



**Univerzitet Crne Gore  
Prirodno-matematički fakultet**

Džordža Vašingtona b.b.  
1000 Podgorica, Crna Gora

tel: +382 (0)20 245 204  
fax: +382 (0)20 245 204  
[www.pmf.ac.me](http://www.pmf.ac.me)

Broj: 733

Datum: 01.04.2022.

UNIVERZITET CRNE GORE  
SENATU  
CENTAR ZA DOKTORSKE STUDIJE

U prilogu akta dostavljam Odluku sa LXXIX sjednice Vijeća Prirodno-matematičkog fakulteta održane 29.03.2022. godine.



Dekan,  
Prof. dr. Predrag Miranović



**Univerzitet Crne Gore  
Prirodno-matematički fakultet**

Džordža Vašingtona b.b.  
1000 Podgorica, Crna Gora

tel: +382 (0)20 245 204  
fax: +382 (0)20 245 204  
[www.pmf.ac.me](http://www.pmf.ac.me)

Broj: 723

Datum: 31.03.2022.god

Na osnovu člana 64 Statuta Univerziteta Crne Gore a u vezi sa članom 35 stav 3 Pravila doktorskih studija, Izveštaja komisije za ocjenu polaznih istraživanja, na LXXIX sjednici Vijeća održanoj 29.03.2022.godine, Vijeće je donijelo

**ODLUKU**

I

Usvaja se Izveštaj komisije za ocjenu polaznih istraživanja kandidata MSc Itane Bujanja.

II

Odluka se dostavlja Centru za doktorske studije Univerziteta Crne Gore.



## OCJENA PODOBNOSTI DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	Mr Itana Bubanja
Fakultet	Prirodno - matematički fakultet
Studijski program	Fizika
Broj indeksa	1/2020
Podaci o magistarskom radu	„Analiza dileptonskih parova iz raspada Z bozona nastalih u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu“, Eksperimentalna fizika čestica, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 23.9. 2019, A (9.92).
NASLOV PREDLOŽENE TEME	
Na službenom jeziku	Produkcija naelektrisanih leptonskih parova kroz Drell-Yan proces u proton-proton sudarima na LHC-u
Na engleskom jeziku	Production of charged lepton pairs through the Drell-Yan process in proton-proton collisions at the LHC
Datum prihvatanja teme i kandidata na sjednici Vijeća organizacione jedinice	24.12.2021.
Naučna oblast doktorske disertacije	Eksperimentalna fizika elementarnih čestica
Za navedenu oblast matični su sljedeći fakulteti	
Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
A. IZVJEŠTAJ SA JAVNE ODBRANE POLAZNIH ISTRAŽIVANJA DOKTORSKE DISERTACIJE	
<p>Dana 16. marta 2022. godine s početkom u 11:00 sati održana je odbrana polaznih istraživanja doktoranda Mr Itane Bubanje. Komisija za obranu bila je u sastavu:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dr Slobodan Backović</li> <li>2. Dr Ivana Pićurić</li> <li>3. Dr Hannes Jung</li> <li>4. Dr Laurent Favart</li> <li>5. Dr Nataša Raičević</li> </ol> <p>Obrana (prezentacija početnog istraživanja doktoranda, pitanja, odgovori i diskusija) je završena u 12:00 sati.</p> <p>Tokom obrane doktorandkinja je predstavila motivaciju istraživanja i kratak pregled aktualne publikacije CMS kolaboracije koja se odnosi na emisiju leptonskih Drell Yan parova u proton-proton sudarima. Kandidatkinja je detaljno objasnila svoj dosadašnji rad na doktorskom istraživanju koji je ukratko sadržan u sljedećem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prvi rezultati sa raspodjelama transverzalnog impulsa leptonskog para za različite invarijantne</li> </ol>	

masene binove u Drell-Yan analizi podataka iz 2017. godine. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa potpunom simulacijom detektora uz korištenje Madgraph generatora događaja. Takođe, fonski doprinosi su u potpunosti simulirani. Analiza je napravljena korištenjem tzv. SHEARS okvira koji se koristi na CMS-u (The Simple and Handy Event Analysis ROOT-based Suite).

2. Prva analiza produkcije Z bozona za podatke iz proton-proton interakcija na energiji od 13 TeV iz 2016. godine uz korišćenje novog formata podataka koji je nazvan NanoAOD. Ovo je format poput Ntuple-a, sa informacijama koje po događaju zauzimaju oko 1Kb memorijskog prostora što predstavlja značajno smanjenje u odnosu na prethodno korišćene formate. Pored osnovnih raspodjela leptona i parova, po prvi put je analizirana raspodjela po azimutalnom otvoru između lepton iz para ( $\Delta\Phi$ ) i pri tome diskutovana njegova korelacija s transverzalnim impulsom para.

3. Softverski paket Rivet (Robust Independent Validation of Experiment and Theory) korišćen je za validaciju generatora Monte Karlo događaja. To je jedan od važnih koraka u odobravanju radova u procesu interne recenzije CMS kolaboracije prije slanja konačnih rezultata u časopis. Kako bismo bili sigurni da je Rivet rutina u skladu sa kodom analize koji je korišćen za dobijanje rezultata mjerenja diferencijalnih efikasnih presjeka Drell Yan leptonskih parova koje će CMS kolaboracija uskoro publikovati, sprovedeno je nekoliko koraka validacije što je od izuzetnog značaja.

4. Upoređivanje različitih modela za simulaciju poddogađaja (engl. underlying event) i višepartonskih interakcija (Multi-parton interactions) koji se koriste u CMS kolaboraciji. Teorijski rezultati su takođe upoređeni s eksperimentalnim mjerenjima efikasnih presjeka po transverzalnom impulsu para.

Nakon obrane, članovi Komisije postavljali su pitanja, komentarisali dosadašnje rezultate i sugerisali dalji rad na disertaciji. Komisija je konstatovala da se radi o izazovnoj i zahtjevnoj temi koja će sadržati mjerenje diferencijalnih presjeka za proizvodnju Drell-Yan parova s najvećom preciznošću do sada na LHC-u. Komisija je takođe konstatovala da su dosadašnji rezultati kandidata na prilično visokom nivou.

## B. OCJENA PODOBNOSTI TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

### B1. Obrazloženje teme

Rezultati koji će biti dobijeni u okviru ove teze pripadaju oblasti fizike elementarnih čestica to jest fizike visokih energija. Analizira se produkcija naelektrisanih parova leptona iz Drell-Yan procesa nastalih u proton-proton (pp) interakcijama pri energiji od 13 TeV. Fokus rada je na raspodjelama transverzalnog impulsa para leptona. Transverzalni impuls je projekcija impulsa na ravan normalnu na snop protona koji se sudaraju. Protoni se ubrzavaju unutar najvećeg do sad napravljenog akceleratora - Velikog hadronskog sudarača (eng. Large Hadron Collider – LHC). LHC je posljednji u nizu u CERN-ovom akceleratorском sistemu, smješten ispod Francusko-Švajcarske granice, u blizini Ženeve. Za prikupljanje podataka koji će biti analizirani u ovom radu koristi se jedan od detektorskih sistema u CERN-u - višenamjenski detektorski sistem pod nazivom Kompaktni mionski solenoid (eng. Compact Muon Solenoid – CMS). Protoni nemaju tačkastu strukturu već se sastoje od mnogo konstituenata: naelektrisanih kvarkova i antikvarkova i neutralnih gluona (kvarkovi i antikvarkovi su čestice koje nemaju cjelobrojno naelektrisanje, već ono iznosi  $\pm 2/3e$  ili  $\pm 1/3e$ , gdje je  $e$  naelektrisanje elektrona). Svi konstituenti protona se jednim imenom nazivaju partoni. Gluoni unutar protona posredstvom

jake interakcije drže na okupu partone. (Anti)kvarkovi međusobno interaguju razmjenom gluona koji su prenosioci jake interakcije. Ovo je detaljno opisano teorijom kvantne hromodinamike (eng. quantum chromodynamics – QCD). Sudari protona visokih energija su zapravo sudari partona koji ih čine.

U sudarima, kvark i antikvark iz interagujućih protona se mogu anihilirati te se kreira bozon. Ako je njihovo ukupno naelektrisanje i ukupni „aromat” nula, nastaju virtuelni foton ( $\gamma^*$ ) ili Z bozon. Ako to nije slučaj, kreira se W bozon koji je naelektrisan. Proces u kome raspadom ovako nastalog  $\gamma^*$  ili Z bozona dobijamo par naelektrisanih leptona, lepton i njegova antičestica ( $l^+$ ), se naziva Drel-Jan proces. Nedugo nakon kreacije bozon se sa određenom vjerovatnoćom raspada na leptonski par. Ukupni impuls u samom procesu se održava tako da impuls para leptona odgovara impulsu  $\gamma^*/Z$  bozona. Ako je leptonski par nastao iz virtuelnog fotona onda je u pitanju elektromagnetni proces dok se proces kreacije leptonskog para iz Z bozona dešava posredstvom slabe interakcije. Invarijantna masa kreiranih leptonskih parova odgovara invarijantnoj masi bozona čijim su raspadom nastali. Za mase koje su značajno ispod energije mirovanja Z bozona, dominantan je elektromagnetni proces. Za mase čija je vrijednost bliska energiji mirovanja Z bozona, postaje dominantan proces koji se odvija pod dejstvom slabe interakcije. U ovom radu analizira se proces kreacije elektronskih ( $e^-e^+$ ) i mionskih ( $\mu^-\mu^+$ ) parova. Međutim, u stvarnosti, Drel-Jan proces nije tako lako izolovati i opisati. Prilikom interakcije ne dešavaju se samo čestice sudari već postoje i tzv. "poddogađaji" (eng. Underlying events – UE) koji se sastoje od čestica nastalih od „ostataka" interakcija (eng. beam-beam remnants – BBR) te onih partonskih interakcija koje ne predstavljaju početno rasijanje partona iz hadrona kao ni zračenja finalnog i inicijalnog stanja koje je povezano sa ovim procesima (eng. multiple-parton interactions – MPI).

Prije anihilacije, kvark-antikvark parovi koji učestvuju u Drel-Jan procesu mogu da izrače gluon. Takođe, kvark i antikvark koji učestvuju u procesu ne moraju da dolaze direktno iz interagujućih protona već gluoni unutar tih protona mogu da izrače te kvarkove. Ovo znači da pored kreacije leptona iz neutralnih bozona može doći i do emisije dodatnih kvarkova i gluona. Prema QCD teoriji, ovako nastali kvarkovi i gluoni – partoni, u procesu hadronizacije formiraju čestice koje se detektuju – hadrone, koji se emituju unutar uskog konusa čija osa leži duž ose inicijalnog partona. U fizici visokih energija ovakve strukture se nazivaju hadronski džetovi. Iako sa manjom vjerovatnoćom, dakle može se desiti da se džetovi emituju zajedno sa neutralnim bozonom. Vjereovatnoća da se neki proces desi je predstavljena efikasnim presjekom tog događaja. Produkcija bozona sa više džetova visoke enrgije je process koji se dešava sa malom vjerovatnoćom. Međutim, kad govorimo o kreaciji džetova manjih energija, situacija je drugačija. Drel-Jan parovi lako mogu biti kreirani sa nekoliko „mekih" džetova.

U cilju što kvalitetnijih mjerenja, kao i mjerenja presjeka procesa koji se odvijaju sa manjom vjerovatnoćom, potrebno je obezbijediti što veću količinu ekperimentalnih podataka tj. statistiku. Kako bi se obezbijedila veća statistika, akceleratori rade u uslovima velike luminoznosti - veliki broj interakcija u sekundi. Proton-proton interakcije se dešavaju kada se takva dva paketića protona sudare. Razmak između paketića protona koji se ubrzavaju u LHC-u je oko 25 ns, a odvije se oko 20 interakcija po jednom sudaru paketića. Iz ovog razloga, veliki izazov za mjerenja je prisustvo značajnog broja proton-proton interakcija koje se "preklapaju" sa interakcijom od interesa, nih u prosjeku 35 (predstavljaju tzv. *pileup*) i dešavaju se praktično istovremeno kao i interakcija tokom koje se kreira leptonski par. Dakle, pri ovakvim uslovima, doprinos koji dolazi od pileup događaja nije zanemarljiv. Kako su čestice i džetovi nastali u ovakvim sudarima nižih energija, njihov doprinos se redukuje uvođenjem kriterijuma za selekciju po energiji detektovanih objekata. Ovo znači i da se u analizu ne uključuju produkti interakcija od interesa koji imaju niske energije. Takođe, ne zabilježava se sve što dolazi iz pp interakcija, već samo onaj dio značajan za analize, dio koji prođe selekzione kriterijume.

„Meki“ gluoni, iako ne mogu biti detekovani kao pojedinačne čestice, utiču na proces. Razlog za ovo je činjenica da gluoni odnose dio energije, a zbog zakona održanja ovo utiče na kompletan sistem. Zbog toga, mjereći impuls nastalih bozona tj. dileptonskih parova, možemo dobiti informaciju o „mekim“ procesima iako nisu detektovani te ih možemo identifikovati.

Teorija perturbacija se koristi za računanje vjerovatnoće da se neki proces desi tokom pp interakcija. Uzima se da emitovani objekti, čestice i džetovi, imaju mnogo veću energiju od protona u stanju mirovanja te se ne može primijeniti za situaciju gdje imamo emisiju „mekih“ gluona. Za ovaj dio niskih energija modelovanje „mekih“ procesa se mora odraditi i tako dobijen model se upoređuje sa eksperimentalnim podacima.

## B2. Cilj i hipoteze

### Cilj rada

Cilj ove teze je da se dobije diferencijalni efikasni presjek za Drel-Jan proces u funkciji od transverzalnog impulsa para leptona i azimutalnog otvora među leptonima iz para u širokom masenom opsegu invarijantne mase para. Analiza se radi na kompletnoj statistici podataka prikupljenih tokom Run II perioda rada LHC-a. Zbog toga se očekuje da ovo bude najpreciznije mjerene diferencijalnog efikasnog presjeka za Drel-Jan proces ikad dobijeno u okviru CMS kolaboracije.

Mjerenja koja će biti dobijena tokom izrade ove teze su:

1. Detektorske raspodjele za sve relevantne varijable za Drel-Jan parove, kako za dielektronski tako i za dimionski kanal: transverzalni impuls leptona, pseudorapiditet leptona, invarijantna masa para leptona, rapiditet para leptona, transverzalni impuls para leptona, azimutalni otvor među leptonima iz para  $\Delta\Phi$ .
2. Poređenje eksperimentalnih rezultata i pune Monte Carlo (MC) simulacije za gore nabrojane raspodjele. MC simulacije se sastoje od simulacije odgovora svake detektorske sredine CMS detektora kao i od simulacija fizičkog doprinosa leptonskih parova i svih značajnih fonskih procesa iz pp sudara.
3. Mjerenje inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka u zavisnosti od transverzalnog impulsa para leptona za različite invarijantne mase.
4. Odnos inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka u zavisnosti od transverzalnog impulsa para leptona u različitim masenim opsezima i inkluzivnog efikasnog presjeka za region Z pika, za oba kanala kao i kombinovani elektronski i mionski kanal.
5. Mjerenje inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka u zavisnosti od varijable  $\Delta\Phi$  za različite invarijantne mase.
6. Odnos inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka u zavisnosti od varijable  $\Delta\Phi$  u različitim masenim opsezima i inkluzivnog efikasnog presjeka za region Z pika.
7. Mjerenje inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka za produkciju Z bozona sa jednim džetom visoke enrgije u zavisnosti od transverzalnog impulsa bozona. Mjerenje će biti takođe rađeno u različitim opsezima invarijantne mase leptonskog para nastalog raspadom Z bozona.
8. Odnos inkluzivnog diferencijalnog efikasnog presjeka za produkciju Z bozona i jednog džeta u zavisnosti od transverzalnog impuls para leptona u različitim masenim opsezima para i inkluzivnog efikasnog presjeka za region Z pika.
9. Poređenje gore nabrojanih mjerenja sa najskorijim teorijskim predviđanjima koja uključuju različite scenarije u okviru QCD teorije kao i resumaciju „mekih“ gluona.

10. Poređenja gore nabrojanjih mjerenja sa različitim teorijskim predikcijama koje uključuju različite parametre za modeliranje podogađaja.

Hipoteza 1: Detektorske raspodjele za naelektrisane leptone,  $e^+e^-$  i  $\mu^+\mu^-$  parove su dobro opisane Monte Carlo simulacijom.

Hipoteza 2: Izmjereni diferencijalni efikasni presjeci za Drel-Jan proces i odgovarajući odnosi opisuju se teorijskim modelima koji uključuju QCD i različite scenarije za resumaciju mekih gluona.

Hipoteza 3: Efikasni presjeci za Drel-Jan proces i odgovarajući odnosi zavise od simulacije podogađaja.

### B3. Metode i plan istraživanja

Eksperimentalni material i teorijski modeli

Ekperimentalni podaci koji se koriste za izradu ove teze, su dobijeni pomoću CMS detektora koji se nalazi u CERN-u, u Ženevi. Podaci su prikupljeni u periodu od 2016. do 2018. godine, tzv. Run II period rada LHC-a. Simulacije Drel-Jan signala kao i fonskog procesa  $\tau^+\tau^-$  su proizvedene koristeći MADGRAPH5 generator sa NLO (engl. next-to-leading-order), AMC@NLO. Kaskade partona, hadronizacija i QED radijacija su uključene koristeći PYTHIA8 generator. Efikasni presjek dobijen direktno iz generatora se koristi za normalizaciju teorijskih predikcija na kontrolnim graficima kao i za upoređivanje sa mjerenjima. Parovi leptona koji se rekonstruišu, ne dolaze samo iz Drel-Jan procesa već i od ostalih procesa koji se nazivaju fonski procesi. Dominantni fonski proces u oblasti visokih invarijantih masa leptonskih parova (iznad mase Z bozona) dolaze od produkcije di-bozona koji se raspadaju na leptone. U oblastima invarijantih masa ispod mase Z bozona, najveći dobrinos fonskim procesima dolazi od Drel-Jan produkcije  $\tau^+\tau^-$  para. Pri veoma niskim invarijantim masama (do 40 GeV), fonski procesi su uglavnom QCD događaji sa više džetova. Situacija je nešto drugačija za elektronski kanal. Pri nizim invarijantim masama, fonski procesi su uglavnom događaji sa  $\tau^+\tau^-$ , dok je doprinos procesa QCD sa više džetova znatno manji zbog strožije selekcije elektrona tj. pozitrona u poređenju sa mionima. Događaje koji dolaze iz fonskih procesa je potrebno procijeniti i oduzeti od događaja koji su ekperimentalno izmjereni. Za sve setove dobijene Monte Carlo simulacijom, odziv detektora na prolazak čestice kroz detektorski materijal je takođe simuliran. Simulacija odziva je izvedena koristeći GEANT4 paket sa detaljnim opisom CMS detektorskog materijala i njegovih akseptansi. Rekonstrukcija simuliranih događaja se vrši pomocu istog softvera koji se koristi za rekonstrukciju ekperimentalno prikupljenih podataka.

Napomena: Svi pomenuti generatori i modeli su u PD formularu dati sa odgovarajućim referencama.

Metode

CMS detektor je detektor kompaktne strukture sa više subdetektorskih sistema. Centralni dio CMS detektora je veliki superprovodni solenoid duzine 12.5 m i radijusa 6 m. Magnetno polje, koje ovaj solenoid proizvodi, dostiže vrijednost od 4 T. Sistem za rekonstrukciju trajektorija naelektrisanih čestica, elektomagnetni kalorimetar (ECAL) i hadronski kalorimetar (HCAL) se nalaze unutar solenoida. Gvozdena povratna sprega se nalazi izvan solenoida, i ispreplijetana je

mionskim komorama. Rekonstrukcija i identifikacija čestica u CMS eksperimentu se vrši pomoću PF (engl. Particle Flow) algoritma. Ovaj algoritam kombinuje informacije iz svih subdetektorskih sistema CMS-a. Pomoću PF algoritma, na najbolji mogući način se vrši identifikacija čestica kao i određivanje njihove energije. Informacije o trajektorijama čestica se dobijaju u sistemu za rekonstrukciju trajektorija i mionskom sistemu, dok se energija čestica mjeri pomoću ECAL i HCAL. PF algoritam se koristi za identifikaciju i rekonstrukciju elektrona, miona, fotona, neutralnih i naelektrisanih hadrona. Ovaj algoritam takodje ima ulogu u rekonstrukciji džetova kao i određivanju tzv "nedostajućeg" transverzalnog impulsa. Proces rekonstrukcije za relevantne čestice je sledeći:

- Elektroni i fotoni - ove čestice svoju energiju deponuju u ECAL-u. Krećući se kroz ovaj detektorski materijal oni interaguju pri čemu se kreiraju tzv "tušev" elektrona i fotona. Depoziti energije ovih čestica u ECAL-u se nazivaju super-klasteri. Elektroni takođe ostavljaju trag i u sistemu za rekonstrukciju trajektorija kroz process jonizacije ili kreacije para electron-šupljina u poluprovodničkim komponentama.
- Naelektrisani i neutralni hadroni - ove čestice se identifikuju unutar HCAL-a i ECAL-a. Iako ove čestice započinju kreaciju "tuševa" unutar ECAL-a, potpuno su absorbovani u HCAL-u. Naelektrisani hadroni ostavljaju trag unutar sistema za rekonstrukciju trajektorija i odgovarajući klaster u HCAL-u. Kombinujući ove informacije, pozicija i energija ovih čestica se određuje. Neutralni hadroni se identifikuju pomoću depozita energije u ECAL-u i HCAL-u, pri čemu se taj depozit energije ne može povezati sa tragom iz sistema za rekonstrukciju trajektorija. Za svaku interakciju, nastali džetovi hadrona su rekonstruisani koristeći anti-kt algoritam. Impuls džeta je određen kao vektorska suma impulsa čestica u džetu.
- Mioni - ove čestice jonizuju gas unutar mionskih komora, čime proizvode električni signal na žicama i trakama detektora. Ovaj signal, zajedno sa signalom iz sistema za rekonstrukciju trajektorija se koristi za određivanje kinematičkih svojstava miona.

Pozicija duž ose snopa na kojoj se desi proton-proton interakcija se naziva verteks. Pri uslovima velikog broja pileup interakcija, postoji veliki broj verteksa u glavnom događaju međutim samo jedan od njih se naziva primarni verteks. Primarni verteks je onaj za koji je kvadrirana suma transverzalnog impulsa fizičkih objekata najveća. Događaji od interesa su selektovani koristeći trigger sistem koji se sastoji iz dva nivoa. Trigger prvog nivoa (L1) se sastoji iz hardverskog procesora, koristi signal iz kalorimetara i mionskih detektora kako bi selektovao određeni događaj. Učestalost L1 je oko 100 kHz. Trigger višeg nivoa nivoa – HLT trigger (eng High Level Trigger), koristi informacije dobijene primjenom softvera koji izvodi punu rekonstrukciju interakcije optimizovanu za brzu obradu. HLT smanjuje učestalost događaja na oko 1 kHz prije skladištenja. U ovoj analizi, događaji su selektovani u nekoliko koraka:

- Dva najenergičnija leptona istog aromata ali suprotnog naelektrisanja se selektuju. Selekcija na onovu transverzalnog impulsa leptona zavisi od dostupnog triggera. Potrebno je da leptoni zadovolje određene kriterijume za rekonstrukciju i identifikaciju tj. da budu visokog kvaliteta identifikacije i izolacije;
- Leptoni su emitovani u geometrijskoj oblasti koju pokriva detektor, tj. pseudorapiditet leptona je  $|\eta| < 2.4$ ;
- Trajektorije čestica koji ne pripadaju primarnom verteksu su identifikovane kao pileup i ne ulaze u sastav energije i impulsa džetova.
- Smanjenje uticaja pileup događaja je dodatno umanjeno zahjevom za određeni minimilani transverzalni impuls džeta i određenim zahtjevima za kvalitet rekonstrukcije džeta. Selektovani džet mora biti u opsegu rapiditeta  $|y| \leq 2.4$ ;



Monte Karlo simulacije odziva detektora, rezolucije i efikasnosti potrebno je da budu sto bliže moguće eksperimentalnoj situaciji, što znači da efikasnost primjenjenih selekcija mora biti uzeta u obzir. Kako bi se to postiglo, dodatni korekcionni faktori su primjenjeni na simulirane događaje. Uticaj ograničene rezolucije i efikasnosti detektora su korigovane u tzv. procesu dekonvolucije koji se vrši upoređivanjem generisanih i (detektorom) rekonstruisanih događaja jer je rekonstrukcija simuliranih (generisanih) događaja ista kao i za ekperimentalne podatke. Kako bi se analizurali dobijeni podaci, programski jezici C++ i Python u CMS softverskom okruženju su korišćeni. Analizirane raspodjele se crtaju uz pomoć ROOT paketa, koji je široko korišćen softverski paket u fizici elementarnih čestica.

### Plan istraživanja

Kako bi se dobili rezultati za efikasni presjek, uobičajni koraci u analizi su:

- Selekcija događaja;
- Implementacija korekcija efikasnosti;
- Procjena fona;
- Oduzimanje fona;
- Dekovolucija;
- Korekcija migracija događaja zbog ograničene rezolucije detektora;
- Aplikacija korekcija za ograničenu geometriju i efikasnost detektora;
- Korekcija migracija zbog radijacije u finalnom stanju;
- Procjena sistematskih grešaka za svaki korak analize.

### B4. Naučni doprinos

Kako se produkcija Drel-Jan parova dešava u sudarima protona kao posledica sudaranja njihovih konstituenata – partona, očekivana mjerenja velike preciznosti će omogućiti veoma značajan uvid u unutrašnju strukturu protona kao i u evoluciju partona.

Najniži red tj. vodeći red (eng. leading order (LO)) za Drel-Jan produkciju se opisuje kao takozvani s-kanal razmjene Z ili  $\gamma^*$  bozona. U ovakvom procesu, kvark iz jednog protona i antikvark iz drugog protona se anihiliraju i nastaje neutralni vektorski bozon posredstvom elektroslabe interakcije. Razmjena Z ili  $\gamma^*$  bozona se faktorizuje na procjenu tzv. kolinearne kvark i antikvark funkcije raspodjele partona u protonu (eng. parton distribution functions - PDF). U ovom, tzv. kolinearnom slučaju, transverzalni impuls Drel-Jan para je jednak nuli. Ako postoji zračenje u početnom stanju (eng. initial state radiation – ISR) onda se radi o procesu višeg reda. ISR je QCD radijacija jer je povezana sa izračivanjem gluona od strane upadnih partona što daje vrijednost transverzalnom impulsu para leptona. Doprinos od dodatne emisije sadrži množenje sa konstantom jake interakcije što je značajno za niže energije tj. „meke” procese gdje ova konstanta ima značajnu vrijednost. Dakle, oblast valikih vrijednosti transverzalnog impulsa je rezultat QCD radijacije koja se opisuje proračunima fiksiranog reda u sklopu perturbativne QCD, dok se oblasti malih vrijednosti transverzalnog impulsa opisuju resumacijom „mekih” gluona. Takođe, oblast malih vrijednosti transverzalnog impulsa uključuje i efekte unutrašnjeg kretanja partona u protonima koje se modeluje uz korištenje određene parametrizacije. Mjerenje transverzalnog impulsa para leptona testira validnost generalnog pristupa te testira preciznost različitih modela teorijskih predikcija. Teorijski proračuni mogu se dobiti u funkciji od transverzalnog impulsa para ili invarijantne mase para i raspoloživi su do prvog sljedećeg višeg reda (eng. next-to-leading-order -NLO) za elektroslabe procese tj. do drugog višeg reda (eng. next-to-next-to-leading-order -NNLO) za perturbativnu QCD teoriju. Zbog toga, ovakva

mjerenja su test za perturbativnu teoriju unutar Standardnog modela kao i input za dalji razvoj teorije. Komplementarno, ova eksperimentalna mjerenja se takođe mogu koristiti za postavljanje ograničenja na funkcije raspodjele partona.

Par leptona iz finalnog stanja može izračiti fotone – kvantna elektrodinamika (eng. Quantum Electrodynamics – QED). Ovo značajno utiče na raspodjelu transversalnog impulsa konačnog para leptona i naziva se QED zračenje finalnog stanja. QED zračenje finalnog stanja ima uticaj i na raspodjelu po invarijantnoj masi para, naročito za mase manje od mase Z bozona gdje mirgacije iz regiona pika mogu biti značajne. Zato se u MC simulacijama simulira kaskada partona sa generatorima kao što je Pythia8 koji uključuju QED zračenje iz raspada Z bozona u vodećem redu. Ova studija je takođe bitna kako bi se procijenile NLO elektroslabe korekcije koje su dostupne u MadGraph5\_aMC@NLO.

Velika statistika dileptona kreiranih u Drel-Jan procesu predstavlja dominantni fon u mjerenjima rijetkih procesa u okviru Standardnog modela kao i za istraživanja van Standardnog modela. Zbog svega navedenog izuzetno je značajno dobiti precizna mjerenja efikasnog presjeka za produkciju Drel-Jan parova do najviših dostupnih energija.

### **B5. Finansijska i organizaciona izvodljivost istraživanja**

Mr Itana Bujanja radi na zajedničkom doktoratu na osnovu Sporazuma potpisanog između Univerziteta Crne Gore i Free University of Brussels - ULB (Université libre de Bruxelles), Belgija. Plan je da doktorand provede oko pola svog istraživačkog vremena na doktorskom radu na svakom od univerziteta uz povremene boravke u CERN-u. Zbog kovid pandemije, doktorandkinja trenutno radi na Univerzitetu Crne Gore, Prirodno-matematičkom fakultetu kao saradnik u istraživanju i financirana je iz projekta podržanog od strane EU programa HORIZON 2020 (*“The strong interaction at the frontier of knowledge: fundamental research and applications”*) u kojoj učestvuje grupa za fiziku čestica s Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore. Rezultati doktorskog rada dobiće se analizom eksperimentalnih podataka iz CMS eksperimenta koji vodi kolaboracija čiji je punopravni član od 2017. godine i Univerzitet Crne Gore. Putem punopravnog članstva, članovi kolaboracije imaju pravo na korištenje svih resursa ove saradnje - svi eksperimentalni podaci dobijeni pomoću CMS-a i cjelokupna detektorska i računarska infrastruktura dostupni su svakom doktorandu koji je član ove kolaboracije. Takođe, posjedovanjem kompjuterskog naloga u CERN-u student može koristiti sve baze podataka sa naučnim publikacijama iz područja prirodnih nauka, matematike i inženjerstva.

### **Mišljenje i prijedlog komisije**


Nakon usmene obrane polaznih istraživanja, diskusije i odgovora kandidata na postavljena pitanja, Komisija se jednoglasno složila da se radi o originalnoj i izazovnoj naučno-istraživačkoj temi. Tokom obrane polaznih istraživanja, kandidatkinja je pokazala vrlo visok nivo znanja o temi kojom se bavi, a rezultati koje je do sada postigla predstavljaju solidnu osnovu za nastavak doktorskih istraživanja.

Stoga Komisija preporučuje Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta i Senatu Univerziteta Crne Gore da prihvate ovo izvještaje i daju saglasnost na predloženu temu doktorske disertacije kandidata mr Itane Bujanje.

### **Prijedlog izmjene naslova**

### **Prijedlog promjene mentora i/ili imenovanje drugog mentora**

(titula, ime i prezime, ustanova)

<b>Planirana odbrana doktorske disertacije</b>	
2024.	
<b>Izdvojeno mišljenje</b>	
(popuniti ukoliko neki član komisije ima izdvojeno mišljenje)	
	Ime i prezime
<b>Napomena</b>	
(popuniti po potrebi)	
<b>ZAKLJUČAK</b>	
Predložena tema po svom sadržaju <b>odgovara</b> nivou doktorskih studija.	<b>DA</b> NE
Tema je originalan naučno-istraživački rad koji odgovara međunarodnim kriterijumima kvaliteta disertacije.	<b>DA</b> NE
Kandidat <b>može</b> na osnovu sopstvenog akademskog kvaliteta i stečenog znanja da uz adekvatno mentorsko vođenje realizuje postavljeni cilj i dokaže hipotezu.	<b>DA</b> NE
<b>Komisija za ocjenu podobnosti teme i kandidata</b>	
Dr Slobodan Backović, CANU, Crna Gora	<i>S. Backović</i>
Dr Ivana Pićurić, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora	<i>Ivana Pićurić</i>
Dr Hannes Jung, DESY, Hamburg, Njemačka	<i>H. Jung</i>
Dr Laurent Favart, F.R.S.-FNRS, IIHE, ULB, Brisel, Belgija	<i>Laurent Favart</i>
Dr Nataša Raičević, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora	<i>N. Raičević</i>
U Podgorici, 28.3.2022.	DEKAN 



**PRILOG**

<b>PITANJA KOMISIJE ZA OCJENU PODOBNOSTI DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA</b>	
Dr Slobodan Backović	1. Danas ste pokazali nove raspodjele samo za mionske parove. Kakav je status analize elektronskih parova? 2. Kakva se logika trigera planira koristiti za ova mjerenja?
Dr Ivana Pićurić	1. Gdje očekujete najviše poboljšanja koristeći kompletnu RUN 2 statistiku ? 2. U svom magistarskom radu radili ste analizu Drell-Yan leptonskih parova iz sudara protona i protona pri energiji od 5 TeV. Planirate li proširiti ovu analizu u svom doktorskom radu ?
Dr Hannes Jung	1. Razumijete li zašto pik u $\Delta\Phi$ raspodjeli nije izraženiji s povećanjem invarijantne mase dileptona ? 2. Razumijete li odakle potiče tako velika razlika u efikasnim presjecima pri malom transverzalnom impulsu para kada koristite istu matricu za simulaciju poddogađaja i interakcije sa više partona ?
Dr Laurent Favart	Komentari i diskusija o prikazanim rezultatima i postavljenim pitanjima od strane članova Komisije.
Dr Nataša Raičević	1. Kakav je status nano-AOD-a ? Komentari i diskusija o prikazanim rezultatima i postavljenim pitanjima od strane članova Komisije.
<b>PITANJA PUBLIKE DATA U PISANOJ FORMI</b>	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
<b>ZNAČAJNI KOMENTARI</b>	

## OCJENA PODOBNOSTI DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	Mr Itana Bubanja
Fakultet	Prirodno - matematički fakultet
Studijski program	Fizika
Broj indeksa	1/2020
Podaci o magistarskom radu	„Analiza dileptonskih parova iz raspada Z bozona nastalih u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu“, Eksperimentalna fizika čestica, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 23.9. 2019, A (9.92).
NASLOV PREDLOŽENE TEME	
Na službenom jeziku	Produkcija naelektrisanih leptonskih parova kroz Drell-Yan proces u proton-proton sudarima na LHC-u
Na engleskom jeziku	Production of charged lepton pairs through the Drell-Yan process in proton-proton collisions at the LHC
Datum prihvatanja teme i kandidata na sjednici Vijeća organizacione jedinice	24.12.2021.
Naučna oblast doktorske disertacije	Eksperimentalna fizika elementarnih čestica
Za navedenu oblast matični su sljedeći fakulteti	
Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
A. IZVJEŠTAJ SA JAVNE ODBRANE POLAZNIH ISTRAŽIVANJA DOKTORSKE DISERTACIJE	
<p>The defense of the initial research of the doctoral student Itana Bubanja, M.Sc., was realized on March 16th, 2022 starting at 11:00 am. The Defense Commission was composed of:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dr Slobodan Backović</li> <li>2. Dr Ivana Pićurić</li> <li>3. Dr Hannes Jung</li> <li>4. Dr Laurent Favart</li> <li>5. Dr Nataša Raičević</li> </ol> <p>The defense (presentation of the doctoral student's initial research, questions and discussion) ended at 12:00.</p> <p>During the defense, the doctoral student presented the motivation of the research and a short overview of ongoing publication from the CMS collaboration focused on the emission of Drell Yan lepton pairs in proton-proton collisions.</p> <p>The candidate explained in detail the work she has performed so far which can be briefly summarized in the following:</p>	

1. The first results on detector level distributions of lepton pair transverse momentum for different pair invariant mass bins of Drell-Yan analysis of 2017 data. Data are compared with the full detector simulation of events obtained using Madgraph event generator. Also, background contribution was completely simulated. The analysis was done using SHEARS framework (The Simple and Handy Event Analysis ROOT-based Suite).
2. First analysis of the Z boson production for 13 TeV data from 2016 using new data format called NanoAOD. This is Ntuple like format - readable with bare root, per-event information needed for analysis, the size per event - order of 1Kb which presents the significant reduction to the previously used formats. The distributions on azimuthal opening angle between the lepton tracks ( $\Delta\Phi$ ) was also shown and its correlation to the pair transverse momentum was discussed.
3. The Rivet routine (Robust Independent Validation of Experiment and Theory) is used for validation of Monte Carlo event generators. It is one of the important steps in the approval of the papers in CMS. In order to be sure that Rivet routine is in agreement with the analysis code performed for obtaining results of Drell Yan lepton pairs which will be published soon by CMS, several validation steps were performed. Also, the results from Rivet 2 and Analysis code were compared. Rivet 3 validation was done by comparing it with Rivet 2 results.
4. The comparison of different tunes used in CMS collaboration for simulation of underlying event and multi-parton interactions. The tunes were also compared with experimental measurements of pair transverse momenta.

After the defense, all members of the Commission asked questions, commented on the results so far and suggested further work on the dissertation. The Commission noted that this is a challenging and demanding topic that would include the measurement of differential cross-sections for the production of Drell-Yan with the highest precision to date at the LHC. The commission also noted that the results of the candidates' work so far are at the rather high level.

## B. OCJENA PODOBNOSTI TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

### B1. Obrazloženje teme

The work of the thesis is in the field of particle physics i.e. high energy physics. The production of charged lepton pairs through the Drell-Yan (DY) process from proton-proton (pp) collisions at a center of mass energy of 13 TeV is analysed. The focus is on transverse momentum distributions of the pairs. Transverse momentum is momentum projection on the plane perpendicular to the beamline. Protons with equal energies which collide head-on are accelerated at the Large Hadron Collider (LHC) – the world's largest collider situated at CERN in Geneva. The experimental data to be analysed are obtained by the experimental apparatus of Compact Muon Solenoid (CMS) – a complex multi-purpose detector system.

Protons are not pointlike particles but have many constituents: electrically charged quarks and antiquarks and neutral gluons (quarks and antiquarks are particles with fractional electric charge,  $\pm 2/3e$  or  $\pm 1/3e$ , with  $e$  being electron charge). The gluons inside the proton hold the charged partons together via the strong force and the (anti)quarks interact themselves by exchanging gluons which are mediators of the strong force, described in detail within quantum chromodynamics (QCD) theory. Together, all constituents of the proton are called partons. The high-energy collision of protons is actually the collision of partons they are made of.

In the collision, a quark and an antiquark from the interacting protons can annihilate and create

a boson. If their net charge and total flavor are zero, a virtual photon ( $\gamma^*$ ) or Z boson is created and if this is not a case a W boson is created. The  $\gamma^*$  or Z boson decaying in a charge lepton and its antiparticle ( $l^+l^-$ ) is called the Drell-Yan (DY) process. Such a lepton pair is produced after brief propagation of created neutral boson,  $\gamma^*/Z$ , after which it splits to an  $l^+l^-$  pair. Since in this process momentum has to be conserved, the momenta of  $l^+$  and  $l^-$  add up to the momentum of  $\gamma^*/Z$  boson. If the lepton pair is created via virtual photon then it corresponds to an electromagnetic process while if it is created from the Z boson the process which occurs via the weak interaction has taken place. The invariant mass of the lepton pair corresponds to the mass of the  $\gamma^*/Z$ . For masses well below the rest energy of Z, the electromagnetic process is the dominant one while at masses around this value, the dominant mechanism is the creation of DY via the weak interaction. In this work, the creation of electron pairs ( $e^-e^+$ ) and muon pairs ( $\mu^- \mu^+$ ) will be analysed.

However, the DY mechanism, in reality, is not as simple as explained above. Real collisions also include the underlying events (UE) which consist of the beam-beam remnants (BBR) and particles that arise from multiple-parton interactions (MPI). The BBR is what is left after a parton is knocked out of each of the two initial proton beams. The MPI are additional soft or semi-hard parton-parton interactions that occur within the same pp collision.

Before their annihilation, quark-antiquark pairs that participate in the DY process can radiate gluons. Also, the interacting quark and antiquark from the protons can come not directly from the protons but produced by gluons of the protons. So, together with the dilepton pair (coming from a neutral boson which is created from one quark and one antiquark) there can be emission of additional partons. According to the QCD, through the process called hadronisation such partons materialize into several hadrons that are emitted within a narrow cone whose axis is along the direction of the initial parton. Such structures in high-energy physics are called hadronic jets. Although less common, from time to time energetic jets (created from quarks and gluons) will be emitted alongside a neutral boson. Since the cross section, which is a measure of the process production rate, decreases with additional emissions (because of a small value of the strong coupling constant at high energy), producing a boson with more energetic jets is less likely than having fewer jets. Concerning the low energy jets (soft jets), the situation is different. DY pairs are easily accompanied by soft jets.

To gain in statistics, nowadays accelerators operate in the condition of high luminosity which provides a huge number of interactions per second and the experiments deal with the problem that the interaction i.e. the hard process of interest cannot be completely separated. At the LHC the protons are accelerated in so-called bunches and each bunch consists of more than a billion of protons. The proton-proton collisions occur in the two bunch crossing. There are about 20 interactions per bunch crossing i.e. within 25 ns. 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 dilepton pairs because of the high luminosity of the colliding beams. Since particles and jets emitted from pile-up are rather soft, their contribution is reduced by defining cuts on the energy of the detected objects to be considered. Hence, experiments are insensitive to very low energy products, and not everything from a pp collision will be recorded.

Soft gluons, even if they cannot be individually reconstructed, still affect the process. Because the gluons carry away energy, due to momentum conservation the system will be slightly pushed and somewhat kicked in different directions. Therefore by measuring the momentum of the emitted  $\gamma^*/Z$  boson we can get information about soft processes even if undetected and identified them experimentally.

The perturbation theory is the tool used to calculate the probability of some process happening during a pp collision. It assumes that the emitted objects (particles and jets) have much higher

energy than the proton at rest and is therefore not applicable to the situation where we have an emission of soft gluons. Therefore, for this low-energy part, the modeling of the soft processes has to be done and compared with experimental results.

## B2. Cilj i hipoteze

### Cilj rada

The main goal of the thesis is to obtain DY differential cross section measurements as a function of the transverse momentum and azimuthal angle opening between pair leptons in a wide range of pair invariant mass using complete statistics of data collected by CMS during the whole Run II period of LHC running. Therefore, this is expected to be the highest precision measurement of the DY differential cross sections obtained so far in CMS collaboration.

The measurements to be obtained in this thesis are the following:

1. Detector distributions for all relevant variables of the DY pairs for both dielectron and dimuon channels: lepton momentum, lepton rapidity, pair invariant mass, pair rapidity, transverse momentum of the pairs ( $p_T$ ), azimuthal angle opening between pair leptons ( $\Delta\Phi$ ).
2. Comparison of the above detector distributions obtained from data and the full Monte Carlo (MC) simulation. The MC simulation includes a detailed simulation of all CMS detector component responses including simulation from physics contribution of lepton pairs and all significant sources of background from pp collisions.
3. Measurement of inclusive differential cross sections in dilepton transverse momentum in different invariant mass intervals.
4. Ratios of inclusive differential cross section in dilepton momentum in different invariant mass intervals and the inclusive differential cross section in the Z peak region for each year and the combined ones.
5. Measurement of inclusive differential DY cross section in  $\Delta\Phi$  in different invariant mass intervals.
6. Ratios of inclusive DY differential cross section in variable  $\Delta\Phi$  in different invariant mass intervals and the inclusive differential cross section in the Z peak region.
7. Measurement of inclusive one energetic jet differential cross sections in dilepton transverse momentum in different invariant mass intervals.
8. Ratios of inclusive one energetic jet differential cross section in lepton pair momentum in different invariant mass intervals and the inclusive differential cross section in the Z peak region for each year and the combined ones.
9. Comparison of the above measurements with most recent theoretical predictions including different scenarios in QCD and the soft gluon resummation.
10. Comparison of the above measurements with theoretical predictions including different tunings for underlying events available at CMS.

Hypothesis 1: The detector distributions for the dilepton pairs are well reproduced by the full Monte Carlo simulation.

Hypothesis 2: The DY differential cross section measurements and the corresponding ratios are reproduced by theoretical models which include QCD and different scenarios of soft gluon resummation.



Hypothesis 3: The DY differential cross sections and the corresponding ratios depend on the set of CMS tunes of underlying events.

### B3. Metode i plan istraživanja

#### Material

The experimental material used in this thesis is obtained by using CMS detector at CERN in Geneva from 2016 to 2018 (Run II period of data collection from LHC).

For the simulation of DY signal created through the  $Z/\gamma^*$  process, including also the  $\tau^+\tau^-$  background, MADGRAPH5 at NLO, AMC@NLO. The parton shower, hadronisation, and QED final state radiation will be performed with PYTHIA8.

Experimentally reconstructed lepton pairs are not coming only from DY process but will contain pairs from other processes - background processes.

Several physical and instrumental backgrounds contribute. The main backgrounds in the region of high invariant masses (above the Z peak) are due to  $t\bar{t}$  and diboson production followed by leptonic decays, while the DY production of  $\tau^+\tau^-$  pairs is the dominant source of background in the region just below the Z peak. At low values of the dimuon invariant mass (up to 40 GeV), most of the background events are due to QCD events with multiple jets. The situation is slightly different for electrons in the final state. At low values of dielectron invariant mass, most of the background events are from  $\tau^+\tau^-$  and  $t\bar{t}$  processes, whereas the contribution from the QCD multijet process is small due to the tighter selection for electrons compared to muons. The pairs from such background processes have to be estimated and subtracted from the measured sample.

For each set of the MC samples, the detector response on particle passage through it is simulated using a detailed description of the CMS detector material and acceptance based on the GEANT4 package. The simulated events are reconstructed using the same software as the real data.

#### Methods

CMS detector has a compact structure with many subdetectors systems. The central part of CMS detector is a large superconducting solenoid with a length of 12.5 m and a radius of 6 m. The value of the magnetic field that can be produced using this solenoid is 4T. The tracking detector, the electromagnetic calorimeter (ECAL), and the hadron calorimeter (HCAL) are all installed inside the solenoid. Outside the solenoid, the iron return yoke of the magnet is placed, interleaved with layers of muon detector.

Particle Flow algorithm (PF) is used by CMS collaboration for reconstruction and identification of particles. PF combines the information of all the CMS subdetectors. It ensures the best possible identification and energy measurements for all types of objects. From tracker and muon system information about tracks of particles are taken and from the ECAL and HCAL, the position, energy and time of arrival of particles can be determined. PF algorithm is used for the identification and reconstruction of electrons, muons, photons, neutral and charged hadrons. It also plays role in jet reconstruction and missing transverse momentum determination. The reconstruction process of some of the particles used in this analysis can be described shortly as follows:

- Electrons and photons – They deposit all their energy only in the ECAL. As they propagate through the material of the detector they interact with the material. As a result of these interactions, they may no longer be detected as a single particle but they can form a shower of multiple electrons and photons. The energy deposits these particles leave in the ECAL are called super-clusters. In addition, electrons leave hits in the tracker layers.
- Charged and neutral hadrons – These particles are identified inside the HCAL and ECAL. Although they initiate a shower in ECAL, it is fully absorbed in the HCAL. Charged hadrons leave hits inside the tracker and corresponding clusters in the HCAL are used to determine their position and energy. Neutral hadrons are identified as energy deposits in the ECAL and HCAL that cannot be matched with hits in the tracker. For each event, hadronic jets are clustered from these reconstructed particles using the anti- $k_T$  algorithm with a distance parameter of 0.4. Jet momentum is determined as the vector sum of all particle momenta in the jet.
- Muons – They ionize the gas in the muon chambers, thus the electric signal is produced on wires and strips. This signal together with the signal obtained from the tracker is used for the determination of muon properties.

The position along the beam axis where the pp interaction happens is called a vertex. For high pile-up, many vertices belong to the main event, but one is called a primary vertex. The candidate vertex with the largest value of summed physics-object transverse momenta squared is taken to be the primary vertex of pp interaction. The physics objects are the jets, reconstructed using the jet-finding algorithm with the tracks (also including electrons and muons) assigned to candidate vertices as inputs, and the associated missing transverse momentum, taken as the negative vector sum of the transverse momenta of those jets.

Events of interest are selected using a two-tiered trigger system. The first level trigger, consisting of hardware processors, uses signals from the calorimeters and muon detectors to select events. The rate of the L1 is at around 100 kHz within a fixed latency of about 4  $\mu$ s. The second level trigger, known as the high-level trigger (HLT), contains information from a farm of processors running a version of the full event reconstruction software optimized for fast processing. HLT reduces the event rate to around 1 kHz before data storage.

In this analysis, the event selection proceeds via several steps:

- The two most energetic lepton candidates of the same flavor, but different electric charge signs are selected. The cuts on the lepton transverse momenta depend on available triggers. The leptons are required to be well reconstructed i.e. identified and isolated and to achieve this, additional cuts are applied;
- The lepton candidate must be emitted within the detector acceptance so the lepton pseudorapidity is limited to  $|\eta| < 2.4$ ;
- Tracks not belonging to the primary vertex are identified as pile-up contribution and are not considered for jet energy and momentum;
- The two selected leptons are not taken into account in the jet collection if they are enough separated from it. A separation  $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$  is measured with  $\Delta\eta$  and  $\Delta\phi$  being differences in pseudorapidity and azimuthal angle between lepton candidate and jet directions.  $\Delta R$  between the reconstructed jets and the lepton candidates is required to be larger than 0.4;
- The pile-up contamination is further reduced by requiring the jet to have a minimum transverse momentum and good quality of the track reconstruction. Selected jet has to be

in a rapidity range of  $|y| \leq 2.4$ .

Monte Carlo simulation of the detector responses, resolution, and efficiencies has to be as close as possible to the experimental situation which also means that the efficiencies of the applied cuts have to be reproduced. To achieve this, the additional scale factors will be applied to Monte Carlo simulated events.

The overall detector resolution and efficiency will be corrected by the unfolding procedure.

Reconstruction of simulated events will be done in the same way as for the experimental data. In order to analyse both experimental and simulated data, the programming languages C++ and Python in CMS software environment will be used. The analysed distributions will be plotted in ROOT which is a widely used software package in particle physics.

#### Research plan

To obtain each of the above-listed cross section measurements, a common set of steps will be performed. The steps are the following:

- Event selection;
- Efficiency corrections implementation;
- Backgrounds estimation;
- Background subtraction;
- Yield unfolding;
- Correction for the effects of the migration of events among different bins of measured variables due to the detector resolution;
- Application of the acceptance and efficiency corrections;
- Correction of the migration of events due to final state radiation;
- Evaluation of systematic uncertainties associated with each of the analysis steps.

#### B4. Naučni doprinos

Since the DY production of lepton pairs in hadronic collisions proceeds as a result of the collision of hadron constituents (partons), the expected high precision measurement will provide very important insights into the internal structure of hadron as well as the parton evolution.

The lowest order or the leading order (LO) DY production is described as a so-called s-channel exchange of Z and  $\gamma^*$  bosons. In such a process, a quark from one proton and an antiquark from another proton annihilate to a neutral vector boson by the electroweak process. The Z/ $\gamma^*$  exchange factorises to collinear quark and antiquark proton parton distribution functions (PDF). In this case, the DY pair transverse momentum is equal to zero. If there is initial state radiation (ISR) then we are dealing with higher-order processes. This ISR is QCD radiation since it is connected with radiation of gluons from incoming partons which gives rise to sizable DY pair  $p_T$ . The contribution of an additional emission contains multiplication with the coupling constant which is sizable for low energy or soft processes. Hence, the region of large pair  $p_T$  which is the result of hard QCD radiation is expected to be described with fixed-order calculation in perturbative QCD (pQCD) due to the small value of running strong coupling constant while the region of small pair  $p_T$  requires the soft gluon resummation to all orders. Also, the small  $p_T$  region includes the effect of internal transverse motion of the partons inside of the colliding protons which should be extracted from data and modeled using parameterizations. Hence, the pair  $p_T$  measurements provide a test of the validity of the general approach and the precision of the different model predictions. Inclusive DY production calculations can be performed as a function of pair invariant mass and pair  $p_T$  and are available up to next-to-leading-order (NLO)

in the electroweak coupling and up to next-to-next-to-leading-order (NNLO) in pQCD. Therefore, a precision measurement of the DY mass and  $p_T$  differential cross sections at the LHC provides an important test and input for the perturbative framework of the Standard model. In a complementary way, the experimental measurements can also be used to constrain the PDFs.

The leptons from the final state pair can radiate photons (radiation of Quantum Electrodynamics – QED) which will certainly affect the DY  $p_T$  spectrum. This radiation is called QED final state radiation. Such radiation will also have an impact on pair mass distribution, especially for masses below Z boson mass where migrations from the Z peak can be significant. MC simulations that perform parton showering, such as Pythia8, include QED radiation from Z boson decay at leading order which could be confirmed with high statistics sample of Z bosons recorded at LHC. This study is also important to evaluate the NLO electroweak corrections available in MadGraph5\_aMC@NLO.

High statistics of DY production of dileptons is also a major source of background for rare processes from the Standard Model as well as searches for physics beyond the Standard Model. Therefore, it is important to measure the DY production rate accurately up to the largest accessible energy.

#### **B5. Finansijska i organizaciona izvodljivost istraživanja**

Itana Bubanja, MSc, works on a joint doctorate from the University of Montenegro and the Free University of Brussels - ULB (Université libre de Bruxelles) in Brussels, Belgium. The plan is that the doctoral student spends about half of her research time on the doctoral thesis at each of the universities with occasional stays at CERN. Due to the covid pandemic, the doctoral student is currently working at the University of Montenegro, and at the Faculty of Science she is employed as a research associate and is funded by a project supported by the EU program HORIZON 2020 (*The strong interaction at the frontier of knowledge: fundamental research and applications*) in which the group for particle physics from the Faculty of Natural Sciences and Mathematics of the University of Montenegro participates. The results of the thesis will be obtained by analyzing experimental data from the CMS experiment led by a collaboration of which University of Montenegro has been a full member since 2017. Through the full membership, members of the collaboration have the right to use all the resources of this collaboration - all experimental data obtained with the CMS and the entire computer infrastructure is available to every doctoral student who is a member of this collaboration. Also, by acquiring a computer account at CERN, a student can use all databases with scientific publications in the fields of natural sciences, mathematics and engineering.

#### **Mišljenje i prijedlog komisije**

After the oral defense of the initial research, discussion and answers of the candidate to the questions, the Commission unanimously agreed that this is an original and challenging scientific research topic. During the Defense of Initial Research, the candidate showed a very high level of knowledge on the topic she is working on and the results she has achieved so far present a solid basis for continuing further research.

Therefore, the Commission recommends to the Council of Faculty of Natural Sciences and Mathematics and the Senate of University of Montenegro to accept this report and approve the proposed topic of the doctoral dissertation of the candidate Itana Bubanja, MSc.

#### **Prijedlog izmjene naslova**

#### **Prijedlog promjene mentora i/ili imenovanje drugog mentora**

(titula, ime i prezime, ustanova)		
<b>Planirana odbrana doktorske disertacije</b>		
2024.		
<b>Izdvojeno mišljenje</b>		
(popuniti ukoliko neki član komisije ima izdvojeno mišljenje)		
		Ime i prezime
_____		
<b>Napomena</b>		
(popuniti po potrebi)		
<b>ZAKLJUČAK</b>		
Predložena tema po svom sadržaju <b>odgovara</b> nivou doktorskih studija.	<b>DA</b>	NE
Tema je originalan naučno-istraživački rad koji odgovara međunarodnim kriterijumima kvaliteta disertacije.	<b>DA</b>	NE
Kandidat <b>može</b> na osnovu sopstvenog akademskog kvaliteta i stečenog znanja da uz adekvatno mentorsko vođenje realizuje postavljeni cilj i dokaže hipoteze.	<b>DA</b>	NE
<b>Komisija za ocjenu podobnosti teme i kandidata</b>		
Dr Slobodan Backović, CANU, Crna Gora	<i>St. Backović</i>	
Dr Ivana Pićurić, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora	<i>Ivana Pićurić</i>	
Dr Hannes Jung, DESY, Hamburg, Njemačka	<i>H. Jung</i>	
Dr Laurent Favart, F.R.S.-FNRS, IIHE, ULB, Brisel, Belgija	<i>Laurent Favart</i>	
Dr Nataša Raičević, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora	<i>N. Raičević</i>	
U Podgorici, 28.03.2022.	za DEKANA <i>[Signature]</i>	



## PRILOG

PITANJA KOMISIJE ZA OCJENU PODOBNOSTI DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA	
Dr Slobodan Backović	1. Today you showed new distributions only for muon pairs. What is the status of electron pair analysis ? 2. What kind of trigger logic is planned to be used for the measurements ?
Dr Ivana Pićurić	1. Where do you expect the most of improvement with the complete RUN 2 statistics ? 2. In your master thesis, you have done analysis of Drell-Yan lepton pairs from proton-proton collisions at 5 TeV. Do you plan to extend this analysis in your PhD thesis ?
Dr Hannes Jung	1. Do you understand why the peak of $\Delta\Phi$ is not more pronounced with increase of the dilepton invariant mass ? 2. Do you understand such a large difference in the cross sections at small pair $p_T$ when using the same tune for underlying event and multi-parton interactions ?
Dr Laurent Favart	Comments and discussion about the results shown and the questions asked by the committee members.
Dr Nataša Raičević	1. What is the present status of the nano-AOD ? Comments and discussion about the results shown and the questions asked by the committee members.
PITANJA PUBLIKE DATA U PISANOJ FORMI	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
ZNAČAJNI KOMENTARI	

Na osnovu člana 32 stav 1 tačka 14 Statuta Univerziteta Crne Gore, u vezi sa članom 34 Pravila doktorskih studija (Bilten br.513/20), Senat Univerziteta Crne Gore, u postupku razmatranja predloga Vijeća Prirodno-matematičkog fakulteta i na predlog Odbora za doktorske studije, na sjednici održanoj 09.03.2022. godine, donio je sljedeću

## ODLUKU

### I

Imenuje se Komisija za ocjenu prijave doktorske disertacije kandidatkinje mr Itane Bujanje, u sastavu:

1. Dr Nataša Raičević, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore
2. Dr Ivana Pićurić, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore
3. Dr Slobodan Backović, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore, akademik CANU, u penziji
4. Dr Laurent Favart, senior istraživač u F.R.S. – FNRS i predavač na Univerzitetu ULB (Universite libre de Bruxelles) u Briselu
5. Dr Hannes Jung, senior istraživač u Institutu DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) u Hamburgu

### II

Student je obavezan da pred komisijom za ocjenu prijave doktorske disertacije javno obrazloži ciljeve i očekivane rezultate, odnosno izloži istraživački program sa uslovima za uspješan završetak disertacije, u roku od 30 dana od dana imenovanja komisije.

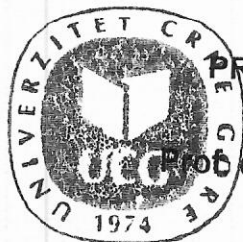
Komisija je dužna da izvještaj koji sadrži ocjenu prijave doktorske disertacije Vijeću organizacione jedinice Univerziteta, u roku od 10 dana od dana javnog izlaganja studenta.

### III

Odluka stupa na snagu danom donošenja.

Broj: 03-33/2

Podgorica, 09.03.2022. godine



PREDSJEDNIK SENATA

*B. Božović*  
dr Vladimir Božović, rektor