

Mjerenje zajedničke tvorbe Z bozona i drugog Z ili W bozona koji se raspadaju na dva b kvarka i dva leptona u sudarima protona

Lovorka Gajović*

Mentor : prof. dr. sc. Vuko Brigljević

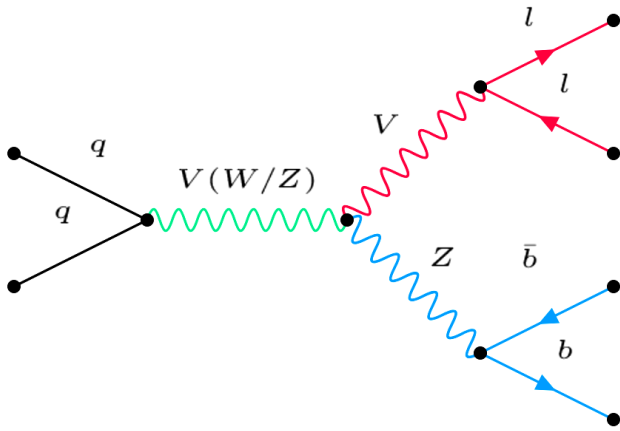
Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 24. siječnja 2021.)

Mjeren je zajednički nastanak Z bozona i vektorskog (V: W ili Z) bozona, nakon kojeg se vektorski bozon raspada leptonski, a Z bozon na dva b kvarka. Mjerenja su izvedena detektorom CMS na LHC-u tijekom 2017. i 2018. godine, za sudare protona s energijom u centru mase $\sqrt{s} = 13$ TeV. Većina analize je rađena na simuliranim podacima koji uzimaju u obzir standardni model i odgovor detektora. Signal reakcije koju proučavamo je odvojen od pozadine primjenom prilagodbe po predlošku na izlazne varijable algoritma strojnog učenja. Korištenjem simulacija pokazano je da u većini događaja, u kojima su nastala barem dva b kvarka, oni dolaze od raspada Z bozona. Događaji su klasificirani u tri kanala ovisno o broju nabijenih leptona koji nastaju u reakciji. Pokazali smo da postoje nezanemarive kontaminacije između kanala. Probna prilagodba simulirane VZ reakcije je dala dobar rezultat. Paralelna prilagodba WZ i ZZ reakcije u simuliranim podacima je dala jakost signala WZ reakcije 1.0 ± 1.4 u odnosu na standardni model i jakost signala ZZ reakcije 0.99 ± 0.37 u odnosu na standardni model. Dobivena signifikantnost u simulacijama za ZZ reakcije je 2.7σ .

I. UVOD

Cilj ovog seminara je bilo mjerenje zajedničkog nastanka Z bozona i vektorskog (W ili Z) bozona, nakon kojeg se vektorski bozon raspada leptonski, a Z bozon na dva dubinska (eng. bottom, b) kvarka. Nadalje ćemo W^+ , W^- i Z^0 bozone zvati zajedničkim imenom V bozoni. Također, u nazivima kvarkova, leptona i neutrina se nadalje podrazumijevaju i njihove antičestice, osim ako je navedeno suprotno. Reakcija koju mjerimo se obično u literaturi zove VZ reakcija. Jedan od mogućih Feynmanovih dijagrama proučavane reakcije se nalazi na slici 1.



Slika 1. Jedan od mogućih Feynmanovih dijagrama VZ reakcije gdje se V bozon raspada u leptone, a Z bozon u b kvarkove.

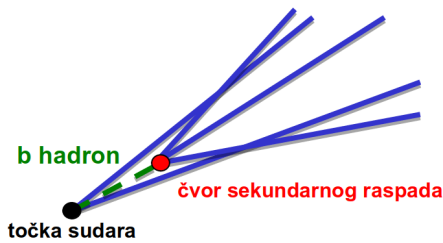
Mjerenja su izvedena detektorom CMS (eng. Compact Muon Solenoid) na Velikom hadronskom sudarivaču (eng. Large Hadron Collider, LHC) na CERN-u.

Početni V bozon (zeleno na slici 1) u proučavanoj reakciji nastaje u proton-proton sudarima na energiji $\sqrt{s} = 13$ TeV [1]. Na ovako velikim energijama u protonu se mogu naći svih šest kvarkova i šest antikvarkova te gluoni, ali vjerojatnost pojave t kvarka je zanemariva. Spomenuti početni V bozon može nastati slabim procesima od para kvark-antikvark (crno na slici 1) te ovisno o njihovom naboju nastaju W^+ , W^- ili Z^0 bozon. [2] Ovaj početni dio reakcije nije predmet proučavanja u ovom seminaru, ali informacije o njemu su sastavni dio simulacija koje koristimo pri analizi podataka.

Promatramo reakcije u kojima se Z bozon (prikazan plavo na slici 1) raspada na dva b kvarka. b kvarkove možemo prepoznati u detektoru zato što mlazovi hadrona nastali njihovom hadronizacijom izgledaju drugačije od mlazova nastalih od lakših kvarkova ili gluona. Mlazove hadrona nastale od b kvarkova nazivamo b-mlazovi (eng. b-jets). Hadroni koji sadrže b kvarkove (B hadroni) imaju vrijeme života reda veličine 1 ps tako da u laboratorijskom sustavu prijeđu udaljenosti reda veličina nekoliko milimetara, ovisno o količini gibanja koju imaju. Ta udaljenost obično nije dovoljna da bi se mogao detektirati B hadron, ali raspad B hadrona generira nekoliko sekundarnih čestica čiji je izlazni čvor pomaknut u odnosu na početnu točku interakcije (slika 2). Prisutnost sekundarnog čvora interakcije omogućava nam da razlikujemo b-mlazove od ostalih. [2, 3]

Kada Z bozon ima veliku količinu gibanja mlazovi dvaju b kvarkova se preklapaju i pojavljuju se kao jedan široki mlaz (eng. fatjet). Za prepoznavanje širokih mlazova se koriste drugačiji algoritmi nego za razlučene b-mlazove. Ovisno o tome jesu li mlazovi široki imenujemo dva kanala: *resolved* kanal u kojem su dva b-mlaza razlučena i *boosted* kanal u kojem su dva mlaza spojena

* lgajovic@dominis.phy.hr; Seminar izrađen u Laboratoriju za fiziku visokih energija na Institutu Ruđer Bošković, Bijenička 54, Zagreb



Slika 2. Ilustracija izgleda b-mlaza.

u široki mlaz. Kanale pri analizi možemo promatrati zasebno ili skupa.

Drugi bozon stvoren u interakciji je V bozon, te razmatramo samo njegove leptonske raspade (označeno crveno na Feynmanovom dijagramu na slici 1). Ako se reakcije odvijaju kanalom prikazanim na slici i početni bozon je W^+ ili W^- , tada je u crvenoj grani dijagrama W^+ ili W^- bozon respektivno (takozvana WZ reakcija). Analogno, ako je početna čestica, nastala iz dva kvarkova, Z bozon onda je čestica koja se raspada leptonski također Z bozon (takozvana ZZ reakcija).

Ovisno o broju nabijenih leptona (elektrona, pozitrona, pozitivnih ili negativnih miona) koji nastaju u raspadu V bozona razlikujemo 0-lepton (0L), 1-lepton (1L) i 2-lepton (2L) kanal. Leptoni se mogu relativno dobro prepoznati detektorima te je zato ovo dobar način razdvajanja kanala. Ciljamo da u 0-lepton kanalu završe reakcije u kojima se Z bozon raspada na neutrino i antineutrino istog okusa ($Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$). Neutrini slabo interagiraju te ih zato nije moguće detektirati, međutim oni nose količinu gibanja i moguće je saznati jesu li nastali u reakciji. Općenito, u LHC-u je ukupna količina gibanja u ravnini okomitoj na mlaz protona jednaka nula. Vektorskim zbrajanjem količine gibanja svih detektiranih čestica možemo odrediti koliko nedostaje do nule i znamo da ta količina gibanja odgovara količini gibanja neutrina jer oni nisu detektirani. 0-lepton kanal je karakteriziran velikom nedostajućom količinom gibanja u ravnini okomitoj na mlaz protona. 1-lepton kanal obično detektira raspade W bozona u lepton i antineutrino ili antilepton i neutrino ($W \rightarrow l\nu$). 1-lepton kanal je karakteriziran detekcijom miona ili elektrona te određene količine nedostajuće energije. 2-lepton kanal u većini slučajeva prepoznaje raspade Z bozona u elektron i pozitron ili mion i antimion ($Z \rightarrow l\bar{l}$). Moguće je da procesi budu svrstani u krivi kanal ako jedan od leptona nije detektiran, ne prođe selekciju signala ili ako su detektirani lažni leptoni. Kontaminacija između kanala će biti jedna od tema istraživanja u ovom seminaru.

Ne razmatramo raspade na tau leptone jer ih se ne može jednostavno detektirati CMS-om. [4]

Motivacija za ovaj rad je da se reakcija ista kao VZ može dogoditi ako na mjestu Z bozona nastaje Higgsov bozon (VH reakcija). VH reakcija ima potpuno iste kanale raspada te se razlikuje od VZ reakcije samo po tome što Higgsov bozon ima veću masu (125 GeV) od Z bozona

(91 GeV) koji stvara b kvarkove. VZ reakcija je bitna zato što se koristi za validaciju analize pri istraživanju raspada Higgsovog bozona u dva b kvarka. Također, VZ reakcija predstavlja pozadinu za mjerenja VH reakcije. Raspad Higgsovog bozona u dva b kvarka ima najveći omjer grananja, ali nije ga lako raspoznati te ga zato pokušavamo detektirati u ovoj reakciji jer možemo vidjeti leptone koji nastaju od V bozona. [4]

U sljedećem poglavlju II. je opis CMS eksperimenta, rekonstrukcije i odabira događaja te korištenih simulacija. U poglavlju III. su objašnjene metode obrade podataka korištene za određivanje iznosa signala i odvajanje od pozadine. Nakon toga slijede rezultati i rasprava. U poglavlju IV.1. smo željeli saznati u kolikom postotku WZ i ZZ reakcija u kojima nastaje više od jednog b kvarka, dva od njih nastaju raspadom Z bozona. Kontaminacija između leptonskih kanala je istražena u poglavlju IV.2. Prilagodbu na simulirane podatke smo prvo radili samo za VZ reakcije (poglavlje IV.3.), a zatim paralelno za WZ i ZZ reakcije u kojima se Z bozon raspada na lakše i b kvarkove (poglavlje IV.4.). Na kraju je poglavlje V. zaključak.

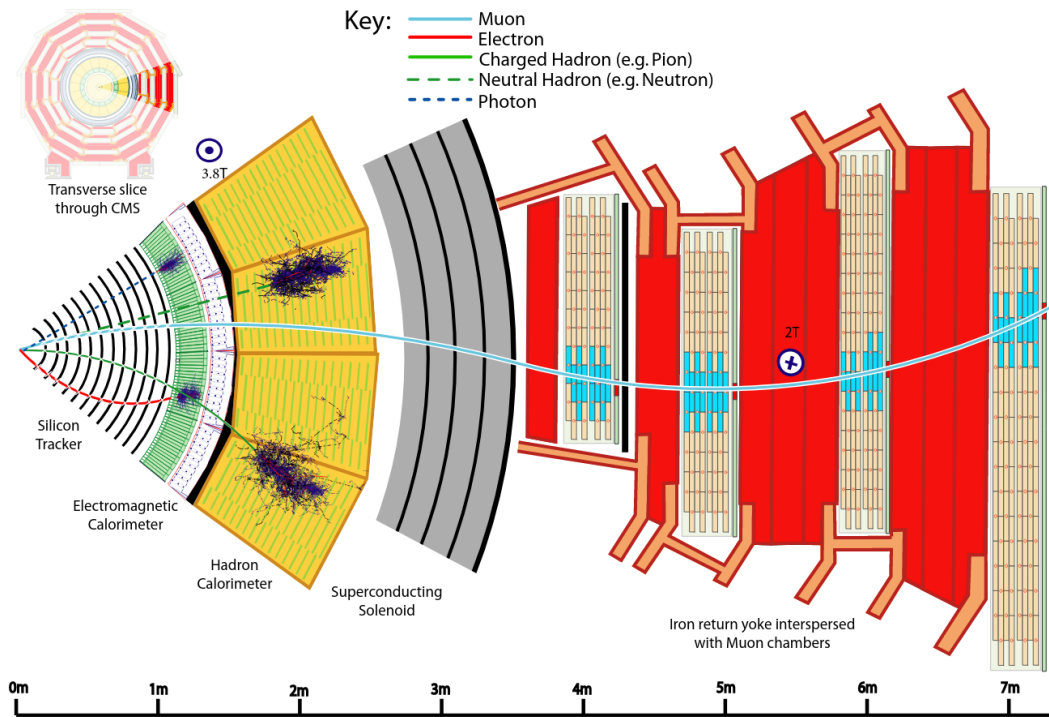
II. EKSPERIMENT I PODATCI

II.1. Eksperiment CMS

Detektor CMS je namijenjen za proučavanje proton-proton sudara i nalazi se na LHC-u na CERN-u. Podatci koje smo koristili su za mjerenja izvršena 2017. i 2018. godine te je energija u centru mase bila $\sqrt{s} = 13$ TeV. [1] Integrirani luminozitet 2017. godine je bio 41.3 fb^{-1} [1], a 2018. godine je bio 58.3 fb^{-1} [5].

Koordinatni sustav koji se koristi na detektoru CMS ima ishodište u točki sudara i z-os u smjeru snopa protona. Uobičajene tri koordinate pri mjerenju količine gibanja čestica su: transverzalni moment u x-y ravnini p_T , azimutalni kut ϕ i pseudorapiditet η . Pseudorapiditet je definiran u odnosu na polarni kut θ jednadžbom $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$. Transverzalnu energiju u x-y ravnini označavamo s E_T , a nedostajuću energiju s E_T^{miss} . [6]

Shema presjeka detektora CMS se nalazi na slici 3. Ključni dio detektora je velika supravodljiva zavojnica koja stvara jako magnetsko polje unutar detektora koje zakreće nabijene čestice te tako omogućava njihovo razlikovanje te mjerenje količine gibanja i naboja. Najbliže snopu se nalazi više slojeva silicijskih piksel detektora i detektora od silicijskih traka koji prate putanje nabijenih čestica. Nakon toga čestice dolaze do kristalnog elektromagnetskog kalorimetra (ECAL) koji mjeri energiju elektrona i fotona. Slijedi hadronski kalorimetar (HCAL) načinjen od bakra i scintilatora koji mjeri energiju hadrona. Pokrivenost kalorimetrima u blizini snopa je povećana Čerenkovljevim detektorima od čelika i kvarcnih niti. Izvan zavojnice magnetsko polje je suprotnog smjera i tamo se nalazi nekoliko slojeva plinskih detektora miona između kojih je željezo. [4, 6]



Slika 3. Ilustracija isječka CMS detektora s označenim detektorskim sustavima i zavojnicom, gdje se snop nalazi s lijeve strane, a detektori miona s desne. Skicirane su putanje čestica koje mogu nastati u sudarima. [7]

II.2. Okidači i rekonstrukcija događaja

Snopovi protona u LHC-u se sudaraju svakih 25 ns [6] te je u svakom sudaru više događaja, na primjer 2017. godine u svakom sudaru je bilo prosječno 32 događaja [5]. Detektor CMS zato proizvodi iznimno veliku količinu podataka te ih treba brzo analizirati te spremati samo one koji su relevantni. U tu svrhu postavljaju se dvije razine okidača (eng. triggers). Prva razina koristi informacije s kalorimetara i mionskih detektora da bi odabrala događaje u vremenu manjem od $3.2 \mu\text{s}$. Druga razina preciznije analizira podatke sa svih detektora. Pohranjuju se sudari koji su prošli barem jedan od niza uvjeta, na primjer uvjet može biti da je prepoznat barem jedan elektron. [4]

U okidanju za prepoznavanje kandidata za čestice se koristi algoritam čestičnog toka (eng. particle-flow, PF algorithm) [7]. Ovisno o vrsti leptona definirane su granice za moment kandidata za leptone i nedostajući moment (više detalja u literaturi [4]). Za događaje koji prođu i kasniju selekciju definirani okidači imaju efikasnost između 90 i 100% ovisno o kanalu. [4]

Nakon što su okidačima odabrani događaji koji će se spremati u memoriju, analiza se nastavlja prepoznavanjem čestica i rekonstrukcijom događaja. Prvo se određuje početna točka proton-proton interakcije. [4] Za prepoznavanje miona se koriste dva algoritma [8] od kojih jedan povezuje tragove u silicijskom detektoru sa signalima u mionskim detektorima, a drugi radi zajedničku

prilagodbu putanje na temelju signala i u silicijskim i u mionskim detektorima. Algoritam za prepoznavanje elektrona [9] povezuje signal u silicijskim detektorima i u ECAL-u te traži da odgovaraju jedan drugome u prostoru i po energiji. Dodatno se traži da elektroni i mioni budu izolirani od ostale aktivnosti u događaju. [4] Hadronski mlazovi se grade grupiranjem PF kandidata za čestice korištenjem anti- k_T algoritma [10]. Za identifikaciju b-mlazova se koristi metoda strojnog učenja trenirana za razlikovanje mlazova nastalih hadronizacijom b kvarkova od onih nastalih hadronizacijom lakših kvarkova. U ovom mjerenju je korišten deepCSV algoritam za prepoznavanje b-mlazova [11].

II.3. Odabir događaja

Odabir događaja za VZ proces je utemeljen na prepoznavanju vektorskog bozona, koji se raspada u leptone, skupa s Z bozonom koji raspadom proizvodi dva mlaza koji su označeni kao b-mlazovi. Glavne pozadine pri detekciji VZ procesa su procesi koji proizvode: V bozon i b-mlazove (eng. V+heavy flavour, V+HF), V bozon i mlazove nastale od lakih kvarkova ili gluona (eng. V+light flavour, V+LF), t kvark i \bar{t} antikvark ($t\bar{t}$), samo jedan t kvark. Također su u pozadinu spadaju općeniti procesi s više hadronskih mlazova i VH procesi. [12]

Pozadine su puno veće od signala i zato postavljamo uvjete koji nam pomažu odvojiti signal te tako definiramo signalno područje u prostoru varijabli. Također

definiramo i kontrolna područja koja su obogaćena određenim pozadinama te nam pomažu točno odrediti njihovu količinu. Bitno je da se signalno i sva kontrolna područja međusobno potpuno isključuju, to jest da pojedini događaj može završiti u samo jednom od njih. Nažalost, procese koje proučavamo nije moguće savršeno odvojiti na ovaj način te se zato u svakom području mogu detektirati i procesi za koje ono nije prilagođeno.

U našoj analizi uz signalno područje definirana su tri kontrolna područja koja su obogaćena $t\bar{t}$, V+LF i V+HF procesima. Signalna i kontrolna područja su različito definirana za leptonske kanale (0L, 1L i 2L) te za *boosted* i *resolved*. Detaljne definicije područja za VH proces su dostupne u literaturi [4] te odgovaraju onim za VZ procese samo s promijenjenim prozorom invarijantne mase b-mlazova na $M_{jj} \in [60, 120]$ GeV.

II.4. Simulirani podatci

Osim eksperimentalnih podataka koristimo i Monte Carlo simulacije [4]. Na temelju udarnih presjeka predviđenih standardnim modelom i izmjerenih partonskih distribucijskih funkcija (PDF) [13] generiran je velik broj reakcija koje smatramo da se događaju unutar CMS detektora. Generirane su VZ reakcije i sve relevantne pozadine. Također je simuliran odgovor CMS detektora na čestice koje nastaju kao rezultat generiranih reakcija. [14] Simulacije se razlikuju ovisno o godini čija mjerenja simuliraju jer uzimaju u obzir stanje detektora te godine i luminozitet. Time je dobiven signal koji odgovara onome kojeg proizvodi CMS i na simulirani signal su primijenjeni isti okidači te su na isti način rekonstruirani događaji kao i za prave eksperimentalni podatke. Simulirani podatci su također raspoređeni u signalno i kontrolna područja primjenom istih uvjeta kao i za eksperimentalne podatke. Korištenje simulacija omogućava nam da razumijemo od kuda dolazi konačni signal koji vidimo.

Uobičajena praksa u CMS kolaboraciji je analizu prvo raditi naslijepo bez promatranja eksperimentalnih podataka u signalnom području i tek kada je postupak utvrđen korištenjem isključivo simulacija, onda se smije gledati pravi signal. Ovakav način rada sprječava pristranost u analizi i onemogućuje manipuliranje statistikom na način da bi se dobio rezultat koji želimo ili očekujemo. Nakon što se pogleda eksperimentalni signal analizu se ne smije više mijenjati te je postavljena pretpostavka (obično da standardni model vrijedi) odbijena ili prihvaćena s dobivenom signifikantnošću.

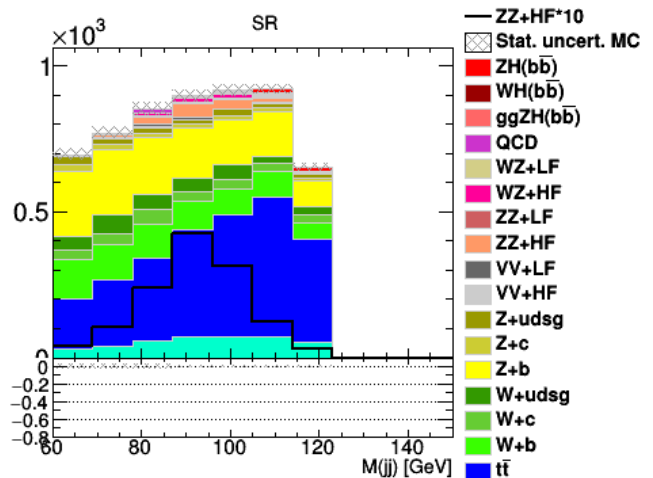
Većina analize u ovom seminaru provedena je na simuliranim podacima jer je prvo bitno odrediti očekivanu osjetljivost mjerenja i utvrditi da možemo odvojiti signal od pozadine s dovoljnom signifikantnošću.

III. ANALIZA PODATAKA

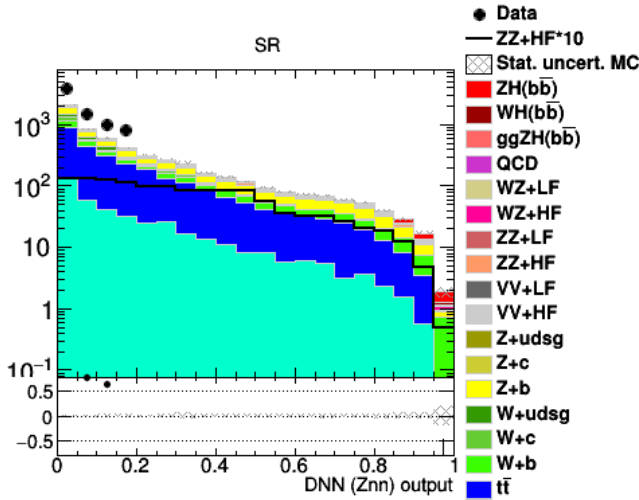
Analiza u ovom seminaru provođena je na podacima koji su već prošli okidač i selekciju. Korišteno je Python sučelje PyROOT okvira za analizu podataka ROOT [15]. Većina korištenih programa u već gotovi programi za analizu CMS podataka dok je manji dio samostalno napisan.

III.1. Razdvajanje signala od pozadine

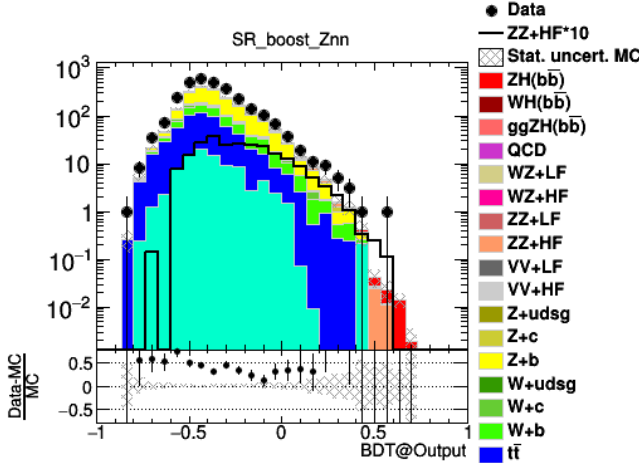
Na slici 4 vidimo primjer simulirane raspodjele invarijantne mase dvaju b-mlazova u signalnom području za 0L kanal. Doprinosi različitih procesa su prikazani različitim bojama. Signal koji nas zanima je ZZ+HF označen narančastom bojom i također je povećan 10 puta nacrtan crnom linijom da bismo bolje vidjeli oblik. Signal dolazi od ZZ reakcije gdje se jedan Z bozon raspada u dva neutrina, a drugi u dva b kvarka. Vidi se da je maksimum oko mase Z bozona, koja iznosi 91 GeV. Međutim, u usporedbi s pozadinama signal je vrlo slab te želimo naći varijable koje bolje odvajaju signal i pozadine. Takve varijable su generirane metodama strojnog učenja. Za *resolved* kanal koristi se izlazna varijable duboke neuralne mreže (eng. deep neural network, DNN), a za *boosted* kanal izlazna varijabla stabla odluke (eng. boosted decision tree, BDT). Radi primjera na slici 5 je prikazan histogram broja događaja u ovisnosti o vrijednosti izlazne varijable DNN-a za signalno područje 0L *resolved* kanala. Na slici 6 je histogram izlazne varijable BDT-a za 0L *boosted* kanal i ovdje se dobro vidi signal na većim vrijednostima BDT varijable.



Slika 4. Primjer simuliranog histograma broja događaja u ovisnosti o masi čestice koja se raspada na b kvarkove u signalnom području za 0L kanal. Doprinosi različitih procesa su prikazani različitim bojama. Signal koji nas zanima je ZZ+HF označen narančastom bojom i također je povećan 10 puta nacrtan crnom linijom.



Slika 5. Primjer simuliranog histograma broja događaja u ovisnosti o izlaznoj varijabli DNN-a u signalnom području za 0L *resolved* kanal. Doprinosi različitih procesa su prikazani različitim bojama. Signal koji nas zanima je ZZ+HF označen narančastom bojom i također povećan 10 puta nacrtan crnom linijom.



Slika 6. Primjer simuliranog histograma broja događaja u ovisnosti o izlaznoj varijabli BDT-a u signalnom području za 0L *boosted* kanal. Doprinosi različitih procesa su prikazani različitim bojama, a mjereni podatci prikazani crnim točkama u ovom primjeru nisu od interesa. Signal koji nas zanima je ZZ+HF označen narančastom bojom i također povećan 10 puta nacrtan crnom linijom.

Nakon što imamo varijablu koja dobro odvajaju signal od pozadine koristimo se takozvanom prilagodbom po predlošku (eng. *template fit*) da bismo odredili veličinu tog signala. Kažemo da predlošku raspodjele $T(x)$ neke varijable x doprinose sve pozadine $B_i(x)$ koje su poznate i signal koji pretpostavljamo da je poznatog oblika $S(x)$ te da mu je jačina r . Eksplicitno:

$$T(x) = \sum_i B_i(x) + r S(x) \quad (1)$$

Nepoznata vrijednost u ovom izrazu je parametar r kojeg nazivamo faktor skale (eng. *scale factor*). Faktor skale se određuje prilagodbom na podatke, bilo eksperimentalne, bilo simulirane.

Oblik signala je pretpostavljen na temelju standardnog modela. Ako je $r = 1$ to znači da signal postoji točno u obliku koji predviđa standardni model. S druge strane, ako je $r = 0$ to znači da signal ne postoji. Ostale vrijednosti faktora skale predstavljaju situaciju kada signal pridonosi različitim udjelom od onoga koji je predvidio standardni model, ali i dalje pridonosi. Vrijednosti značajno veće od $r = 1$ mogu biti znak nove fizike izvan standardnog modela.

Svako mjerenje ima neku neodređenost i ako izmjerimo jednu vrijednost faktora skale i dalje je moguće da je druga prava te da je naše mjerenje samo slučajna fluktuacija. Zato je jako bitno osim vrijednosti faktora skale r odrediti i njegovu standardnu devijaciju σ . Da bi se smjelo objaviti da je neki signal opažen (eng. *observation*) potrebno je da njegov faktor skale bude za pet standardnih devijacija (5σ) udaljen od nule. Razumno je pretpostaviti da su greške raspoređene su po Gaussovoj raspodjeli. Ako je signifikantnost 5σ to onda znači da u slučaju da je naša hipoteza zapravo kriva tada vjerojatnost da izmjerimo ono što smo izmjerili ili više iznosi približno $3 \cdot 10^{-7}$. Ovo i dalje ne isključuje u potpunosti mogućnost da smo u krivu, ali u znanstvenoj zajednici je 5σ signifikantnost uvriježena kao dovoljna da možemo tvrditi da smo opazili signal. U slučaju da je signifikantnost manja, postoje i manje stroge tvrdnje, konkretno, za 3σ signifikantnost kažemo da imamo dokaze (eng. *evidence*) za postojanje signala.

Ono što želimo dobiti za naš signal je da je r približno jedan i da je za 5σ udaljen od nule i to znači da smo opazili signal koji odgovara standardnom modelu. Ako izračunamo za $r = 1$ tada σ treba biti manji od 0.2.

III.2. Prilagodba na podatke

Za prilagodbu podacima se koristi metoda najveće vjerodostojnosti (eng. *maximum likelihood*). Vjerodostojnost Λ se definira kao vjerojatnost da opazimo neki skup podataka $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots)$ ako su teorijske vrijednosti parametara koje uzimamo $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots)$:

$$\Lambda = P(\vec{x}|\vec{\alpha}) = \prod_i P(x_i|\vec{\alpha}) \quad (2)$$

gdje je $P(x_i|\vec{\alpha})$ vjerojatnost da izmjerimo x_i ako je vrijednost parametara $\vec{\alpha}$. Za vjerodostojnost vrijedi da je ukupna vjerodostojnost umnožak zasebnih vjerodostojnosti za svako mjerenje, isto kao i za vjerojatnosti.

Najbolja vrijednost parametara $\vec{\alpha}$ je ona za koju je vjerodostojnost najveća. Postavlja se sustav jednadžbi: [16]

$$\frac{\partial \Lambda(\vec{x}|\vec{\alpha})}{\partial \alpha_j} = 0 \quad \text{za } \alpha_j \in \{\alpha_1, \alpha_2, \dots\} \quad (3)$$

koji se ponekad može riješiti analitički, ali mi moramo ovaj sustav jednadžbi rješavati numerički.

Konkretno u našem slučaju skup mjerenih podataka N_i su bojevi događaja u intervalima histograma varijable koju koristimo za prilagodbu. Skup teorijskih parametara ν_i su predviđene vrijednosti broja događaja u intervalima histograma dobivene na temelju predloška (formula 1) koje ovise o faktoru skale r i o drugim sistematskim parametrima. Vjerodostojnost je umnožak vjerojatnosti da izmjerimo N_i u slučaju da je točna vrijednost ν_i za svaki interval histograma (označeni indeksima i).

$$\Lambda = \prod_i P(N_i, \nu_i) \quad (4)$$

Vjerojatnost $P(N_i, \nu_i)$ je Poissonova:

$$P(N_i, \nu_i) = e^{-\nu_i} \frac{\nu_i^{N_i}}{N_i!} \quad (5)$$

Postupak prilagodbe je takav da se varira faktor skale r iz kojeg se računaju ν_i te se traži vrijednost r za koju je vjerodostojnost maksimalna.

Osim faktora skale trebaju se varirati i ostali sistematski parametri jer oni ne mogu biti savršeno točno određeni. Tu spadaju efikasnosti detekcije i prepoznavanja čestica, luminozitet, neodređenosti u određivanju pozadina i ostali parametri. Standardna devijacija tih parametara je poznata te se zbog toga u vjerodostojnost stavlja dodatan član koji sprječava da oni variraju puno izvan te poznate neodređenosti. Također ovdje dolaze u obzir i kontrolna područja jer one omogućavaju preciznije određivanje pozadine u uzorku koji promatramo.

III.3. Računanje udarnog presjeka iz broja događaja

Ako je broj opaženih događaja $N_{\text{opaženi}}$ udarni presjek računamo prema sljedećoj formuli:

$$\sigma = \frac{N_{\text{opaženi}} - N_{\text{pozadina}}}{A \epsilon \int \mathcal{L} dt} \quad (6)$$

gdje je N_{pozadina} broj pozadinskih događaja, A stopa prihvaćanja, ϵ učinkovitost detektora i selekcije te je \mathcal{L} trenutni luminozitet kojeg integriramo po vremenu da bi dobili ukupni luminozitet. [2]

IV. REZULTATI I RASPRAVA

IV.1. Iz kojih reakcija dolaze b kvarkovi?

Jedan od kriterija za definiranje signalnog područja za VZ reakciju je da su detektirana dva ili više b-mlaza. Međutim, u događaju koji uključuje VZ reakciju mogu nastati i dodatni b kvarkovi, osim dvaju nastalih iz raspada Z bozona. To znači da se može dogoditi da u reakciji u kojoj se Z ne raspada na b kvarkove svejedno nastanu dva ili više b kvarka, što znači da će postavljene uvjete krivo klasificirati događaj. Analizirali smo približno 7 milijuna simuliranih WZ reakcija i 10 milijuna simuliranih ZZ reakcija u kojima se Z bozoni ne raspadaju nužno na b kvarkove, nego se mogu raspasti na kvark i antikvark bilo kojeg okusa. Željeli smo saznati u kolikom postotku VZ događaja nastaju po dva b kvarka bez da su oni nastali raspadom Z bozona jer će ti događaji biti krivo klasificirani. Korištene su Monte Carlo simulacije reakcija koje se događaju u CMS-u. Te simulacije su u obliku popisa svih nastalih čestica skupa s količinom gibanja i informacijom o tome koja čestica je nastala od koje. Korištene simulacije su prvi korak u analizi te govore o početnoj fizici čestica prije simuliranja odgovora detektora i primjene selekcije, što znači da određeni dio simuliranih reakcija neće biti detektiran ili neće proći postavljenu selekciju.

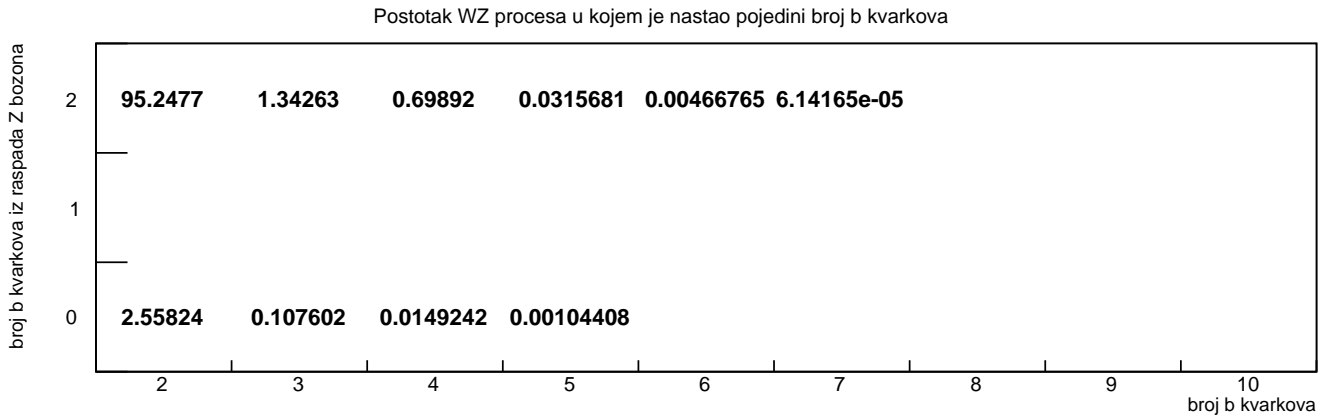
Nacrtni su dvodimenzionalni histogrami ukupnog broja b kvarkova u odnosu na broj b kvarkova nastao raspadom Z bozona, gdje je vrijednost u svakom intervalu postotak reakcija koje su imale taj broj b kvarkova. Histogram za WZ procese je na slici 7, a histogram za ZZ procese na slici 8. Histogram je ograničen samo na reakcije s ukupnim brojem b kvarkova većim od jedan jer nas zanima samo koliki postotak reakcija bi netočno prošao selekciju.

Od WZ procesa u kojima je ukupno nastalo više od jednog b kvarka, u 97.3% procesa dva kvarka su nastali raspadom Z bozona. Taj postotak za ZZ procese iznosi 89.9%. Ovo su dovoljno veliki postotci, pogotovo za WZ reakcije, da možemo postavljanjem uvjeta da je broj detektiranih b-mlazova veći od jedan tražiti VZ reakcije. Ovi postotci su za reakcije prije pune selekcije, te osim uvjeta za više od jednog b kvarka postoje drugi uvjeti (za impulse, mase i ostalo) koji bi trebali pomoći u smanjivanju broja krivo klasificiranih reakcija.

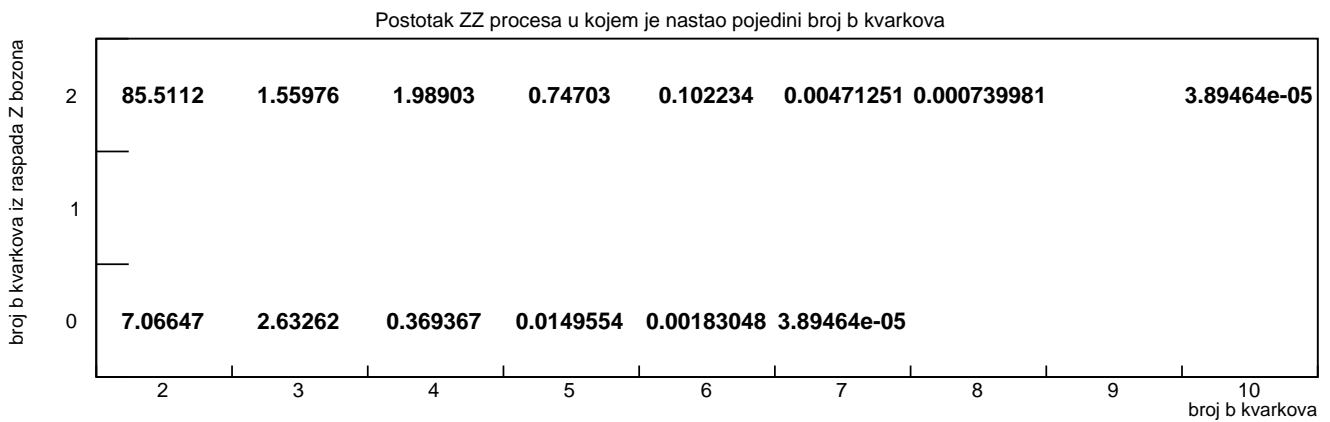
Nije utvrđen razlog ovalike razlike između WZ i ZZ reakcija, ali pretpostavljamo da su transversalni impulsi V bozona u simuliranim ZZ reakcijama bili nešto manji što je uzrokovalo veću prisutnost pozadine.

Također se iz ovih grafova vidi da ako u VZ reakciji nastaju b kvarkovi iz Z bozona, onda će oni uvijek nastati u paru. S druge strane, ostali b kvarkovi mogu nastati i samostalno. Za određeni ukupni broj b kvarkova veći je postotak reakcija u kojima dva kvarka nastaju raspadom Z bozona od reakcija u kojima to nije slučaj, osim za ukupno 3 kvarka u ZZ procesima.

Dodatna stvar koja je zanimljiva za vidjeti je od kuda nastaju dodatni b kvarkovi, koji nisu iz raspada Z bo-



Slika 7. Dviodimenzionalni histogram postotka simuliranih WZ reakcija koje imaju više od jednog b kvarka u ovisnosti o ukupnom broju b kvarkova u odnosu na broj b kvarkova nastao raspadom Z bozona.



Slika 8. Dviodimenzionalni histogram postotka simuliranih ZZ reakcija koje imaju više od jednog b kvarka u ovisnosti o ukupnom broju b kvarkova u odnosu na broj b kvarkova nastao raspadom Z bozona.

zona. U tu svrhu poručeno je nekoliko potpunih ispisa čestica koje sudjeluju u reakciji. Vidjeli smo da su dodatni b kvarkovi partoni početna dva protona što prepoznamo po tome da nemaju navedenu česticu majku ili da su nastali iz kvarkova i gluona koji sudjeluju u reakciji prije nego što je nastao početni V bozon.

IV.2. Kontaminacija u leptonskim kanalima

Željeli smo istražiti koliki udio reakcija završi u krivom leptonskom kanalu. Zato smo koristili simulacije koje uzimaju u obzir odgovor CMS-a, prepoznavanje čestica i odabir događaja. Korištene simulacije su za mjerenja 2018. godine. Za svaku mogućnost raspada V bozona ($Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$, $W \rightarrow l\nu$ i $Z \rightarrow l\bar{l}$) napravljen je dviodimenzionalni histogram koji pokazuje broj događaja u svakom leptonskom kanalu (0L, 1L, 2L) i događaja koji nisu odabrani. Dvije osi histograma su namijenjene za *resolved* i *boosted* odabir događaja što omogućuje da vidimo koliko događaja je prošlo zasebno *resolved* ili *boosted* selekcijom, a koliko obje. Histogrami su na slikama 9, 10 i 11.

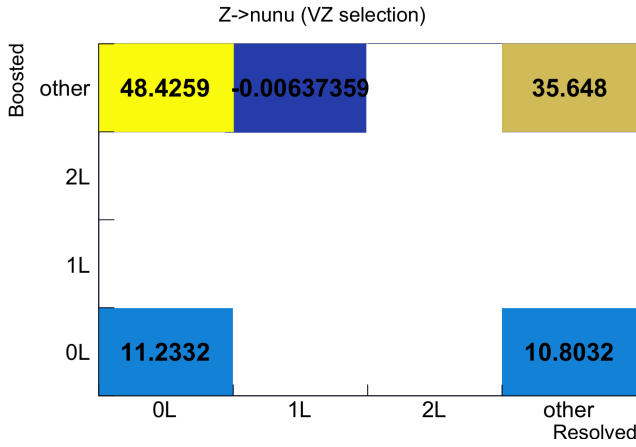
Brojevi događaja u histogramima su dobiveni zbrajanjem statističkih težina svakog simuliranog događaja i prikazuju koliko događaja bismo očekivali da zabilježi CMS u tom intervalu. Raspoređivanje događaja u kanale je napravljeno prema uvjetima specifičnim za VZ procese. Na sve događaje u histogramima postavljen je uvjet da su prisutna dva ili više b kvarka, što nije utjecalo na raspodjelu odabranih događaja, nego je samo smanjilo broj događaja koji nisu prošli niti jednu selekciju.

Na početku treba spomenuti da relativno velik broj događaja nije prošao niti jednu selekciju, ali taj interval nam nije od interesa jer ne ulazi uopće u daljnju analizu.

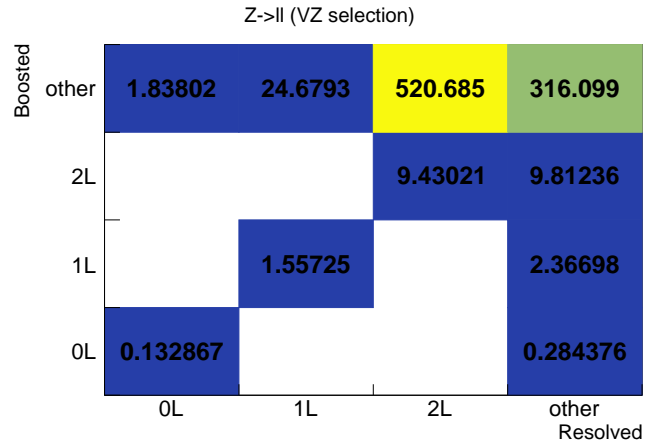
Promotrimo sad histograme reakcija jedan po jedan.

Prvo promotrimo histogram $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ reakcije na slici 9. Reakcija u kojoj se Z bozon raspada na neutrine bi trebala završiti u 0L kanalu i to je upravo ono što vidimo. Jedina reakcija u krivom kanalu je u 1L *resolved* kanalu i njena statistička težina je negativna. Negativna statistička težina nije fizikalna, nego je posljedica statističkih fluktuacija u programu za simulacije i zato možemo zanemariti taj događaj.

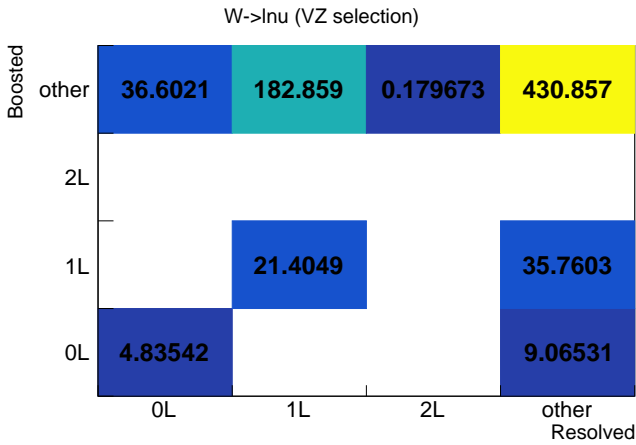
Drugo promatramo histogram $W \rightarrow l\nu$ reakcija (na



Slika 9. Dvodimenzionalni histogram simuliranog broja događaja gdje se Z bozon raspada na dva neutrina ($Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$) koji su završili u 0L, 1L, 2L kanalu ili niti u jednom od njih (označeno s "other"). Na ordinati je *resolved* odabir kanala, a na apscisi *boosted*. Korišten je odabir namijenjen za VZ procese i postavljen je uvjet da je u reakciji prisutno dva ili više b kvarkova. Većinu signala očekujemo u 0L kanalu.



Slika 11. Isto kao slika 9, ali za događaje gdje se Z bozon raspada na dva leptona ($Z \rightarrow l\bar{l}$). Većinu signala očekujemo u 2L kanalu.



Slika 10. Isto kao slika 9, ali za događaje gdje se W bozon raspada na lepton i neutrino ($W \rightarrow l\nu$). Većinu signala očekujemo u 1L kanalu.

slici 10) za koje očekujemo da će završiti u 1L kanalu. Većina događaja je u 1L kanalu, međutim značajan dio je u 0L kanalu. Od reakcija koje su prošle *resolved* selekciju, 17% ih je u krivom kanalu, a 20% reakcija koje su prošle *boosted* selekciju su u krivom kanalu. Posebno trebamo usporediti broj $W \rightarrow l\nu$ reakcija u 0L kanalima, koje ne bi trebale biti tamo, s brojem $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ reakcija u istim kanalima, koje bi trebale biti tamo. Vidimo da su brojevi usporedivi i tu pojavu definitivno ne smijemo zanemariti. Postoji i mala kontaminacija u 2L *resolved* kanalu (prosječno 0.2 događaja), ali je ona zanemariva u odnosu na 530 događaja $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakcije koji trebaju biti u tom kanalu (slika 11).

Treći histogram koji promatramo se nalazi na slici 11. Taj histogram je za $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakciju koja treba završiti

u 2L kanalu. Većina reakcija je u 2L kanalu gdje i trebaju biti, ali 5% reakcija koje su prošle *resolved* selekciju i 18% reakcija koje su prošle *boosted* selekciju su u krivom kanalu. Udio $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakcija krivo klasificiranih u *resolved* kanale je manji nego $W \rightarrow l\nu$ reakcija, ali ga svejedno ne smijemo zanemariti. Postotak krivo odabranih događaja u *boosted* kanalu je ovdje dosta veći nego u *resolved* kanalu. Također, u usporedbi s druge dvije reakcije, ukupni broj događaja koji su prošli *boosted* selekciju je puno manji od broja koji je prošao *resolved* selekciju.

Konačno, želimo usporediti koliko u svakom kanalu ima dobro klasificiranih događaja u odnosu na one koji ne bi trebali biti tamo. U 0L kanalu je kontaminacija najveća: 42% u *resolved* selekciji i 38% u *boosted* selekciji. Ovako velike brojke u 0L kanalu daju nam do znanja da ako analiziramo 0L kanal ne smijemo zanemariti utjecaj $W \rightarrow l\nu$ reakcije za koju prvotno ne bismo očekivali da se tamo detektira. Manje krivih događaja ih ima u 1L kanalu: 11% u *resolved* selekciji i 6% u *boosted* selekciji. Međutim, niti u 1L kanalu ne smijemo zanemariti doprinos $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakcija. Jedino je 2L kanal gotovo potpuno čist i sadrži samo $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakcije.

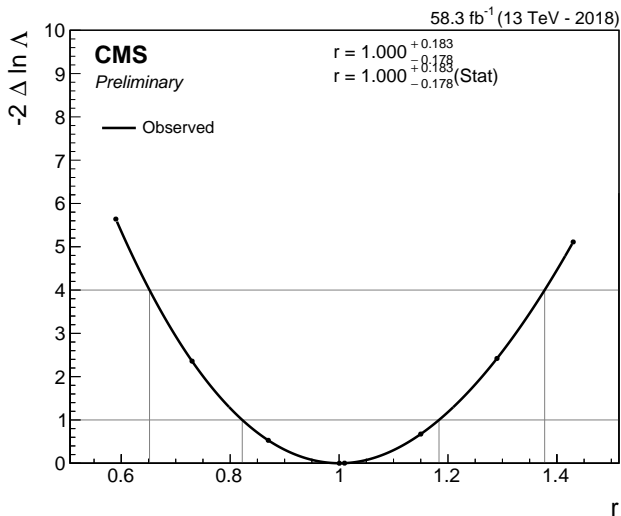
Posljedica koju opažena kontaminacija ima na daljnju analizu je da, kada radimo prilagodbu po predlošku za ZZ reakcije, ne smijemo pretpostaviti da te reakcije pridonose samo 0L i 2L kanalu. Analogno, za prilagodbu WZ reakcije ne smijemo pretpostavljati da pridonose samo 1L kanalu nego svima.

IV.3. Prilagodba signala za VZ reakciju samo u signalnom području i bez sistematskih neodređenosti

Za početak je napravljena prilagodba na simulacije VZ reakcije, dakle, WZ i ZZ reakcije su promatrane zajedno kao jedna. Korištene simulacije su za mjerenja 2018. godine. Prilagodba je rađena na pseudoslučajnom setu po-

dataka koji je generiran uz pretpostavku da je udarni presjek VZ reakcije isti kao u standardnom modelu, što se očituje u postavljanju parametra $r = 1$. Prilagodбом po predlošku određujemo r te ćemo naravno dobiti vrijednost blizu jedinice jer smo generirali takve podatke. Međutim, relevantna informacija koju dobivamo na ovaj način je iznos standardne devijacije. Prilagodba VZ procesa služi samo da bismo ustanovili da sve dobro radi pa je zato rađena samo za signalno područje i variran je samo faktor r bez sistematskih parametara.

Rezultat prilagodbe je graf vjerodostojnosti u ovisnosti o faktoru skale r iz kojeg se određuje najbolja vrijednost parametra r i njegova neodređenost. Specifično, promatraju se grafovi veličine $-2\Delta\ln\Lambda$ gdje je $\Delta\ln\Lambda$ razlika logaritama maksimalne vjerodostojnosti i vjerodostojnosti u točki grafa. Ova veličina se koristi jer su točke u kojima je ona jednaka jedan udaljene od točke maksimalne vjerodostojnosti točno za 1σ .



Slika 12. Graf vjerodostojnosti za prilagodbu faktora skale VZ reakcije samo u signalnom području, bez sistematskih neodređenosti i za sve kanale. Vrijednost i neodređenost faktora skale r dobivena prilagodбом je zapisana gore desno na grafu.

Graf vjerodostojnosti za prilagodbu VZ reakcije koja uključuje sve kanale je na slici 12 i dobiveni iznos faktora skale je

$$r = 1.00^{+0.18}_{-0.18},$$

što je dobar rezultat jer je neodređenost manja od 0.2 što znači da bismo imali signifikantnost 5σ kada ne bi bilo sistematskih neodređenosti.

Dodatno samo htjeli provjeriti kako izgledaju prilagodbe ograničene na samo neke kanale. U tablici I su navedeni rezultati prilagodbe parametra r za svaki leptonski kanal te *resolved*, *boosted* i oboje skupa.

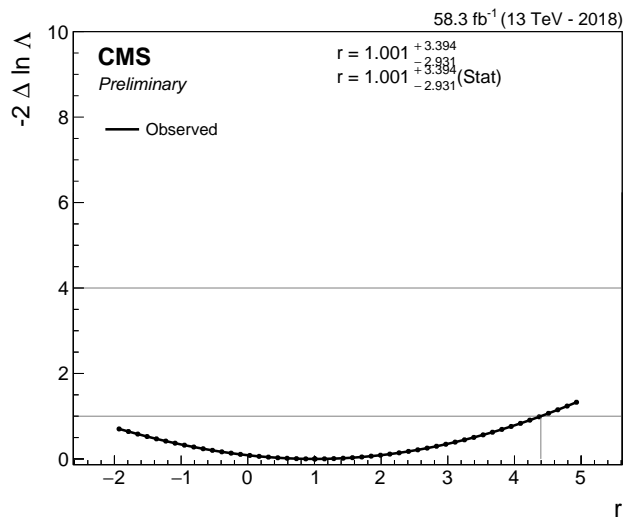
Očekivano, u tablici I sve prilagodbe su dale rezultate blizu jedan jer smo s tom pretpostavkom generirali podatke, ali trebamo promotriti pogreške. Vidimo da su

Tablica I. Iznos i nesigurnosti faktora skale r dobiveni prilagodбом VZ reakcije ograničenom na po jedan leptonski kanal u svakom stupcu. Redovi tablice su: sve reakcije u odgovarajućem kanalu, samo *resolved* i samo *boosted*. Nesigurnosti prema većim i manjim vrijednostima su različite te su zapisane odvojeno kao gornji i donji indeksi.

	0L	1L	2L
sve	$1.00^{+0.25}_{-0.24}$	$1.00^{+0.33}_{-0.33}$	$1.00^{+0.36}_{-0.33}$
<i>resolved</i>	$1.00^{+0.25}_{-0.24}$	$1.01^{+0.31}_{-0.32}$	$1.00^{+0.35}_{-0.36}$
<i>boosted</i>	$1.0^{+3.4}_{-2.9}$	$1.2^{+3.8}_{-3.1}$	$1.0^{+3.9}_{-3.0}$

greške veće ako uzimamo pojedinačne kanale i niti jedna od njih nije manja od 0.2, ali to nas ne treba zabrinjavati jer smo ograničavanjem samo na jedan kanal smanjili broj događaja i time preciznost. *Boosted* kanali imaju znatno veću neodređenost zato što u njima završi manji broj događaja. Usporedbom različitih leptonskih kanala vidimo da je najveća preciznost u 0L kanalu te da je 2L malo manje precizan od 1L.

U ovoj tablici uočena je jedna neobičnost u 1L kanalu. Naime, neodređenosti su veće za *boosted* i *resolved* skupa, nego samo za *resolved*. Ovo je neobično zato što bi neodređenost trebala biti manja ako uključimo veći broj događaja, što je upravo ono što postizemo ako radimo prilagodbu na *resolved* i *boosted* skupa. Primijetimo da je rezultat u 1L *boosted* kanalu $r = 1.2^{+3.8}_{-3.1}$ nešto dalje od jedan nego ostali te bi zato dodavanje tog kanala moglo pokvariti prilagodbu. Zasadu nije pronađeno točno objašnjenje za ovu anomaliju, međutim treba je imati na umu jer ako ovo nije samo slučajna fluktuacija onda treba uskladiti analizu.



Slika 13. Graf vjerodostojnosti za prilagodbu faktora skale VZ reakcije u 0L *boosted* kanalu, samo u signalnom području i bez sistematskih neodređenosti. Vrijednost i neodređenost faktora skale r dobivena prilagodбом je zapisana gore desno na grafu.

Grafovi vjerodostojnosti za zasebne prilagodbe kanala izgledaju slično kao za sve kanale skupa, samo su širi za veću neodređenost, što se posebno dobro vidi za *boosted* kanale. Radi primjera na slici 13 smo odabrali prikazati graf vjerodostojnosti za 0L kanal *boosted*. Primjećujemo da je krivulja vjerodostojnosti znatno šira nego za sve kanale zajedno što prati i veći iznos neodređenosti.

Prilagodbe VZ reakcije su dale uglavnom očekivane rezultate, čime potvrđujemo da je sve u redu u analizi i možemo nastaviti dalje.

IV.4. Prilagodba signala za WZ i ZZ reakcije paralelno uključujući raspade Z bozona na lake i teške kvarkove

Udarni presjek nastanka W i Z bozona ili dvaju Z bozona ne ovisi o tome kako se oni raspadaju. Zbog toga smo željeli vidjeti što se dogodi ako u analizu uključimo reakcije u kojima se Z bozon raspada na lakše kvarkove, a ne samo na b kvarkove. U sklopu izrade ovog seminara iz simuliranih podataka za 2017. godinu generirani su novi predloži za prilagodbu gdje su WZ i ZZ reakcije, s raspadima u bilo koje kvarkove, postavljene kao signal.

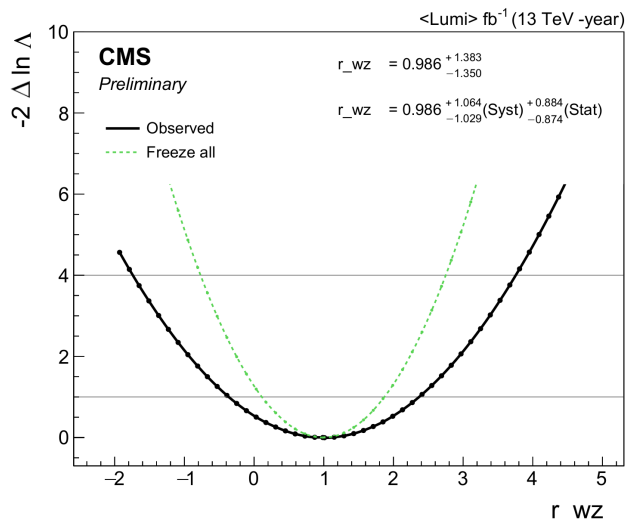
Za te novo generirane simulacije rađena je prilagodba po predlošku, ali ovaj put za dva signala jer se WZ i ZZ reakcije nisu promatrale kao jedna. Podatci za prilagodbu su generirani s pretpostavkom da vrijedi standardni model, to jest da su faktori skale jednaki jedan. To nije problem jer smo željeli saznati neodređenosti. Maksimum vjerodostojnost u ovoj prilagodbi je nađen za kombinaciju dva faktora skale: r_{WZ} i r_{ZZ} . Faktor skale za WZ reakciju je r_{WZ} , a faktor skale za ZZ reakciju je r_{ZZ} .

U ovoj prilagodbi uključene su sve sistematske neodređenosti osim neodređenosti u označavanju b-mlazova. Prilagodba je napravljena i sa zamrznutim vrijednostima sistematskih parametara, što nam omogućuje vidjeti koliki je doprinos samo statistike u ukupnoj neodređenosti, a koliki nepreciznosti u određivanju sistematskih parametara. Budući da smo pokazali da postoje kontaminacije između kanala, pri izvršavanju ove prilagodbe uzeto je u obzir da svaka reakcija daje signal u sva tri kanala i prilagodba je rađena za sve kanale. Prilagodba je rađena za signalno i kontrolna područja. Grafovi vjerodostojnosti u ovisnosti o r_{WZ} i r_{ZZ} su na slikama 14 i 15. Iako su ovdje prikazani odvojeno, oba faktora skale su paralelno varirana kako bi se maksimizirala vjerodostojnost.

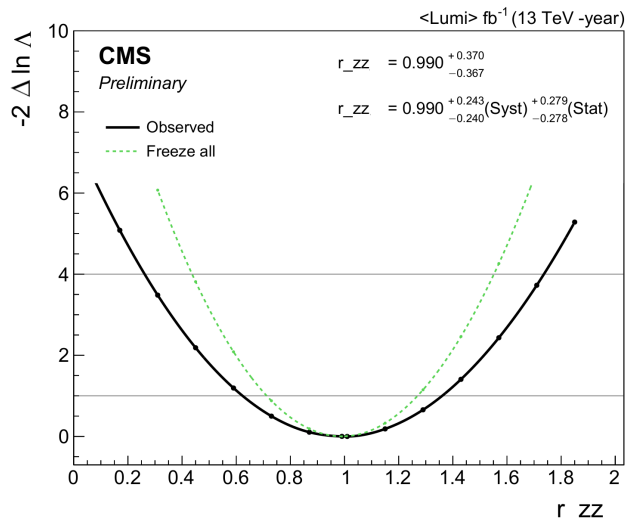
Vrijednosti faktora skale dobivene prilagodbom su zapisane u nastavku skupa sa ukupnim, sistematski i statističkim neodređenostima:

$$r_{WZ} = 1.0^{+1.4}_{-1.4} = 1.0^{+1.1}_{-1.0}(\text{sist.})^{+0.9}_{-0.9}(\text{stat.})$$

$$r_{ZZ} = 0.99^{+0.37}_{-0.37} = 0.99^{+0.24}_{-0.24}(\text{sist.})^{+0.28}_{-0.28}(\text{stat.})$$



Slika 14. Graf vjerodostojnosti u ovisnosti o faktoru skale r_{WZ} dobiven paralelnom prilagodbom signala WZ i ZZ reakcije. Puna crna krivulja uzima u obzir statističke i sistematske neodređenosti, a zelena isprekidana krivulja je dobivena zamrzavanjem sistematskih parametara. Vrijednost i neodređenost (ukupna, sistematska i statistička) faktora skale r_{WZ} dobivena prilagodbom je zapisana gore desno na grafu.



Slika 15. Graf vjerodostojnosti u ovisnosti o faktoru skale r_{ZZ} dobiven paralelnom prilagodbom signala WZ i ZZ reakcije. Oznake su iste kao na slici 14.

Očekivano, prilagodba na pseudoslučajne podatke generirane s pretpostavkom da su faktori skale jedan je dala upravo takav rezultat, zato promotrimo neodređenosti. Sistematske i statističke neodređenosti podjednako pridonose ukupnoj pogrešci.

Neodređenosti za WZ reakciju su znatno veće nego za ZZ reakciju. Pretpostavljamo da je uzrok ovoga to što promatramo sve leptonske kanale, a WZ reakcija pridonosi većinom samo jednom (1L) u kanalu, dok ZZ re-

akcija pridonosi dvama kanalima (0L i 2L). Međutim, ne smijemo prilagodbu ograničiti samo na neke kanale jer znamo da postoji kontaminacija. Izgleda da smo uključivanjem svih kanala žrtvovali preciznost mjerenja WZ reakcije, ali bez toga ne bismo mogli dobiti smislene rezultate.

Za ZZ reakcije smo zapravo dobili dosta dobar rezultat jer je dobivena vrijednost faktora skale 2.7σ udaljena od jedan. Ovo nam govori da smo na dobrom putu da u mjerenim podacima dobijemo dovoljnu signifikantnost (3σ) da bismo mogli tvrditi da imamo dokaze za mjerenje ZZ reakcije, koja je zasada mjerena izvan kombinacije s WZ reakcijom samo na manjoj energiji u centru mase [12]. Međutim, ipak trebamo još poboljšati našu analizu radeći je na simuliranim podacima prije nego što pogledamo prave eksperimentalne rezultate.

V. ZAKLJUČCI

Iz simulacija smo vidjeli da u većini WZ (97.3%) i ZZ (89.9%) reakcija u kojima nastaje više od jednog b kvarka, dva od njih nastaju raspadom Z bozona. Zbog toga možemo koristiti uvjet da se vidi više od jednog b mlaza za odabir VZ reakcija.

Sve simulirane $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ reakcije završe u 0L kanalu gdje ih očekujemo. Od $W \rightarrow l\nu$ reakcija koje prođu leptonsku selekciju 17% završi u krivom (0L) *resolved* kanalu i 20% u krivom *boosted* kanalu, od $Z \rightarrow l\bar{l}$ reakcija 5% ih završi u krivom *resolved* kanalu i 18% u krivom *boosted* kanalu. To uzrokuje kontaminaciju od približno 40% u 0L kanalu i 10% u 1L kanalu, dok 2L kanal ostaje čist. Kontamina-

cije nisu zanemarive te zbog toga kada radimo prilagodbu WZ ili ZZ signala moramo uzeti u obzir da oni pridonose svim kanalima.

Prilagodba simuliranog signala za VZ reakcije samo u signalnom području i bez sistematskih neodređenosti je dala signifikantnost veću od 5σ . Ograničavanjem prilagodbe samo na neke kanale dobivena je manja signifikantnost zbog manjeg broja događaja. Najmanje neodređenosti su dobivene u 0L leptonskom kanalu. U *resolved* kanalima su neodređenosti bile znatno veće nego u *boosted*. Ovo je očekivan rezultat i mogli smo nastaviti analizu.

Prilagodba simuliranog signala za WZ i ZZ reakcije paralelno, uključujući raspade Z bozona u lake i teške kvarkove, je rađena za sve leptonske kanale s uključenim sistematskim neodređenostima. Dobiveni iznosi faktora skale su $r_{WZ} = 1.0 \pm 1.4$ i $r_{ZZ} = 0.99 \pm 0.37$. Rezultat za ZZ reakcije je dosta dobar jer mu je signifikantnost 2.7σ .

Sljedeći korak u analizi bi bila paralelna prilagodba simuliranog signala za WZ i ZZ reakcije, ali s uvjetom da se Z bozon raspada na b kvarkove. Kada bi ta prilagodba dala dobre rezultate mogli bismo pogledati prave eksperimentalne podatke i na njih primijeniti istu analizu.

ZAHVALA

Željela bih se zahvaliti Saswatu Mishra na pomoći u izradi grafova i prilagodbi signala.

Posebno bih zahvalila svom mentoru prof. dr. sc. Vuki Brigljeviću na vođenju kroz izradu ovog seminara te na svemu što me naučio o eksperimentalnoj fizici čestica, statistici i obradi podataka.

-
- [1] A. M. Sirunyan *et al.* (CMS), “Observation of Higgs boson decay to bottom quarks,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 121801 (2018), arXiv:1808.08242 [hep-ex].
- [2] M. Thomson, *Modern particle physics* (Cambridge University Press, New York, 2013).
- [3] S. B. Cooperstein, “Observation of Higgs boson decay to bottom quarks,” (2019).
- [4] A. M. Sirunyan *et al.* (CMS), “Evidence for the Higgs boson decay to a bottom quark–antiquark pair,” *Phys. Lett. B* **780**, 501–532 (2018), arXiv:1709.07497 [hep-ex].
- [5] “Cms luminosity - public results,” <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>, pregledano: 18.1.2021.
- [6] S. Chatrchyan *et al.* (CMS), “The CMS Experiment at the CERN LHC,” *JINST* **3**, S08004 (2008).
- [7] A. M. Sirunyan *et al.* (CMS), “Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector,” *JINST* **12**, P10003 (2017), arXiv:1706.04965 [physics.ins-det].
- [8] S. Chatrchyan *et al.* (CMS), “Performance of CMS Muon Reconstruction in *pp* Collision Events at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” *JINST* **7**, P10002 (2012), arXiv:1206.4071 [physics.ins-det].
- [9] V. Khachatryan *et al.* (CMS), “Performance of Electron Reconstruction and Selection with the CMS Detector in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JINST* **10**, P06005 (2015), arXiv:1502.02701 [physics.ins-det].
- [10] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, “The anti- k_t jet clustering algorithm,” *JHEP* **04**, 063 (2008), arXiv:0802.1189 [hep-ph].
- [11] A. M. Sirunyan *et al.* (CMS), “Identification of heavy-flavour jets with the CMS detector in *pp* collisions at 13 TeV,” *JINST* **13**, P05011 (2018), arXiv:1712.07158 [physics.ins-det].
- [12] S. Chatrchyan *et al.* (CMS), “Measurement of WZ and ZZ production in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with b-tagged jets,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2973 (2014), arXiv:1403.3047 [hep-ex].
- [13] R. D. Ball *et al.* (NNPDF), “Parton distributions for the LHC Run II,” *JHEP* **04**, 040 (2015), arXiv:1410.8849 [hep-ph].
- [14] S. Agostinelli *et al.* (GEANT4), “GEANT4—a simulation toolkit,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **506**, 250–303 (2003).
- [15] R. Brun and F. Rademakers, “ROOT: An object oriented data analysis framework,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **389**, 81–86 (1997).
- [16] G. Cowan, *Statistical Data Analysis*, Oxford science publications (Clarendon Press, 1998).