Identifikacija elektrona za okidač kalorimetra visoke granularnosti detektora CMS

Giljanović, Duje

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, University of Split, Faculty of science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:166:221647

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Science

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

giljanovic_duje_diplomski_rad.pdf

temeljna_dokumentacijska_kartica_giljanovic.pdf

basic_documentation_card_giljanovic.pdf

SVEUČILIŠTE U SPLITU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

ODJEL ZA FIZIKU

DIPLOMSKI RAD

Tema: Identifikacija elektrona za okidač kalorimetra visoke granularnosti detektora CMS

Autor: Duje Giljanović

Mentori: doc. dr.sc. Damir Lelas
prof. dr.sc. Ivica Puljak

Split, srpanj 2017.

Sadržaj

1 Uvod ... 1
1.1 Veliki sudarač hadrona ... 3
2 Compact Muon Solenoid detector ... 7
2.1 Elektromagnetski kalorimetar ... 9
2.2 High Granularity Calorimeter ... 14
3 Simulacija oblika elektromagnetskog pljuska FastShower programom ... 18
3.1 Postavke simulacija ... 20
3.2 Rezultati simulacija ... 25
4 Simulacije oblika elektromagnetskog pljuska CMS softwareom ... 29
4.1 Postavke simulacija ... 29
4.2 Rezultati simulacija ... 31
5 Klastering ... 32
5.1 Postavke simulacija ... 33
5.2 Rezultati simulacija ... 34
6 Diskusija rezultata ... 37
7 Zaključak ... 43
8 Popis literature ... 44
9 Sažetak ... 46
10 Popis oznaka i kratica ... 47
11 Privitak ... 49

1 Uvod

Europski centar za nuklearna istraživanja (CERN) je institut na kojem surađuju brojne države svijeta i s oko 10000 fizičara vezanih za projekt, te 22 zemlje članice (slika *1.1*), jedan je od najvećih znanstvenih instituta na svijetu. Žarište proučavanja je fizika elementarnih čestica, odnosno proučavanje sastavnih dijelova materije. Međutim, spektar interesa proteže se od nuklearne fizike i fizike visokih energija do proučavanja antimaterije i utjecaja kozmičkog zračenja na atmosferu.[1]

Krajem 70-ih godina prošlog stoljeća dovršen je teorijski model koji opisuje strukturu materije i osnovna međudjelovanja - Standardni model. Standardni model opisuje od čega je materija izgrađena i kako njeni sastavni djelovi međusobno interagiraju. Prije formulacije Standardnog modela proračuni vjerojatnosti fizikalnih procesa među elementarnim česticama bili su mogući samo u slučaju kvantne elektrodinamike. Standardni model je omogućio proračun procesa u kojima su uključene sve elementarne čestice, kvarkove i leptone kao konstituente materije i bozone kao medijatore interakcija (osim gravitacije). Neka od najvažnijih postignuća Standardnog modela su razumijevanje jakih interakcija što omogućuje proračun svojstava nukleona, ali i ostalih hadrona, razumijevanje svojstava slabih interakcija, predviđanje postojanja i svojstava $W^{\pm}$ i Z bozona kao i t-kvarka, koncept spontanog narušenja simetrije i Higgsov mehanizam generiranja masa čestica te ujedinjenje teorije slabih i elektromagnetskih interakcija u jedinstvenu, elektroslabu, teoriju.

Prije nego što je Higgsov mehanizam uveden u Standardni model, teorija je nalagala da bi sve čestice, poput fotona, trebale biti bez mase. Porijeklo mase u Standardnom modelu objašnjava se interakcijom čestica s Higgsovim poljem. Foton, primjerice, ne interagira s Higgsovim poljem i zato nema masu. Zbog ovoga je jedan od glavnih ciljeva CERN-a bio pronaći Higgsov bozon, česticu koja je manifestacija tog polja, baš kao što se zna za čestice koje su manifestacije elekromagnetksog polja (fotoni), polja jake (gluoni) i slabe (W, Z bozoni) sile. 4. srpnja 2012. godine kolaboracije A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS) i Compact Muon Solenoid (CMS) potvrdile su postojanje nove čestice u okolini 126 GeV– Higgsovog bozona. Sljedeće godine je dodijeljena Nobelova nagrada François Englertu i Peter Higgsu za teorijsko otkriće mehanizma koji produbljuje razumijevanje podrijetla mase elementarnih čestica.

Međutim, fizičari su svjesni kako nemaju gotovu sliku jer sam Standardni model objašnjava 5% poznatog svemira. Gravitacijska interakcija, primjerice, nije uključena u Standardni model.

Na energijama koje su značajno manje od Planckove energije (~10^{19} GeV), energije na kojoj kvantni efekti imaju značajan utjecaj na prostor-vrijeme, to nije problem jer su gravitacijske interakcije među česticama zanemarive. Gravitacijska interakcija između dva elektrona je oko 10^{39} puta slabija od elektromagnetske. Do sada nisu pronađeni odgovori na pitanja odakle toliko veliki raspon u jakosti fundamentalnih interakcija i kako uvesti gravitacijsku interakciju u Standardni model.

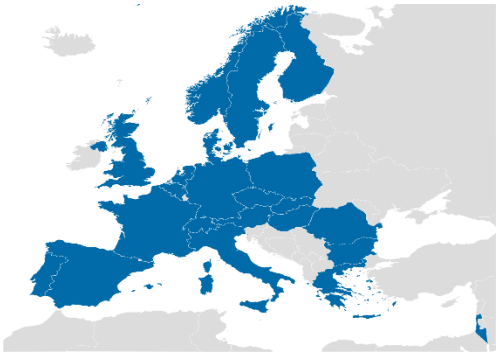
Elementarne čestice su kvantni objekti bez unutarnje strukture. Ukoliko i imaju dimenzije, one su manje od 10^{-20} m kolika je približno rezolucija akceleratora na CERN-u.

Nužna posljedica specijalne teorije relativnosti i kvantne mehanike je veza između prostorne rezolucije i energije. Da bismo mogli razlučiti dva događaja na udaljenosti Δx potrebno je neko minimalno vrijeme t_{min} neophodno za razmjenu informacija između dviju točaka.

Koristeći uvjet $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c}$ i relacije neodređenosti $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ lako se dobije

$$\Delta E \geq \frac{10^{-16}\text{GeVm}}{\Delta x}$$

Uz prostornu rezoluciju $\Delta x = 10^{-10}$m imamo $\Delta E \sim 10^{3}$eV što je skala atomske fizike, uz $\Delta x = 10^{-15}$m imamo $\Delta E \sim 100$ MeV što je skala nuklearne fizike, rezolucija $\Delta x = 10^{-20}$m zahtijeva energiju $\Delta E \sim 10$ TeV što je upravo skala LHC-a – najvećeg kružnog akceleratora na CERN-u. Da bismo imali razlučivost koja odgovara Planckovoj duljini $\Delta x = 10^{-35}$m morali bi ići na energije reda veličine $\Delta E \sim 10^{19}$ TeV što je upravo Planckova energija. U nekim formulacijama teorije kvantne gravitacije Planckova duljina predstavlja prostorne dimenzije na kojima strukturu prostor-vremena određuju kvantni efekti. To je najmanja jedinica duljine koja ima fizikalnog smisla. Vidimo da za postizanje bolje razlučivosti i dobivanja boljeg uvida u najsitnije djelove prirode moramo graditi što veće akceleratore čestica.[2]



Slika 1.1: Zemlje članice CERN-a

1.1 Veliki sudarač hadrona

Da bismo što bolje razumjeli fizikalne zakone koji opisuju interakcije najmanjih djelića materije znanstvenici na CERN-u su osmislili i izgradili najveći sustav akceleratora čestica na svijetu – Veliki sudarač hadrona (eng. Large hadron collider – LHC) (slika 1.1.1).

LHC ubrzava protone i jezgre olova. Proces ubrzavanja protona počinje ubacivanjem komprimiranog vodika u komoru u kojoj se atomima vodika izbijaju elektroni iz elektronskog omotača ostavljajući pritom samo jezgru, odnosno protone. Protoni su nabijene čestice, zbog čega se mogu ubrzavati u električnom polju. Prvotno se veliki broj protona ubrzava unutar linearnog akceleratora. Da bi se pojačao intenzitet snopa, dijeli ga se na četiri dijela koja ulaze u sljedeći akcelerator - "Proton Synchrotron Booster". To je kružni akcelerator opsega 157 metara koji ubrzava protone do 91.6% brzine svjetlosti i tjera ih da se gibaju po kružnoj putanji. Nakon toga, snopovi se spajaju i šalju u sljedeći akcelerator – "Proton Synchrotron" (PS). Ovaj akcelerator ima opseg 628 metara i u njemu se protoni ubrzavaju do 99.9% brzine svjetlosti. Sljedeća faza ubrzavanja protona je "Super Proton Synchrotron" (SPS). Ovaj akcelerator opsega 7 kilometara ima zadatak povećati energiju protona na 450 GeV.[3]

Posljednja faza procesa ubrzavanja je LHC, najveći akcelerator čestica na svijetu. Ovaj akcelerator je postavljen 170 metara ispod površine i ima opseg 27 kilometara. Sastoji se od dvije vakumirane cijevi u kojima protoni putuju u suprotnim smjerovima. Tijekom pola sata SPS u LHC ubacuje protone i na kraju tog intervala LHC-om kruži 2808 paketića protona. U zadnjoj fazi je brzina protona toliko blizu brzine svjetlosti da u jednoj sekundi proton napravi 11000 okretaja. Pri kraju ubrzavanja u sadašnjem režimu rada LHC-a svaki proton ima energiju 6.5 TeV i masu 7000 puta veću od mase mirovanja.[4]

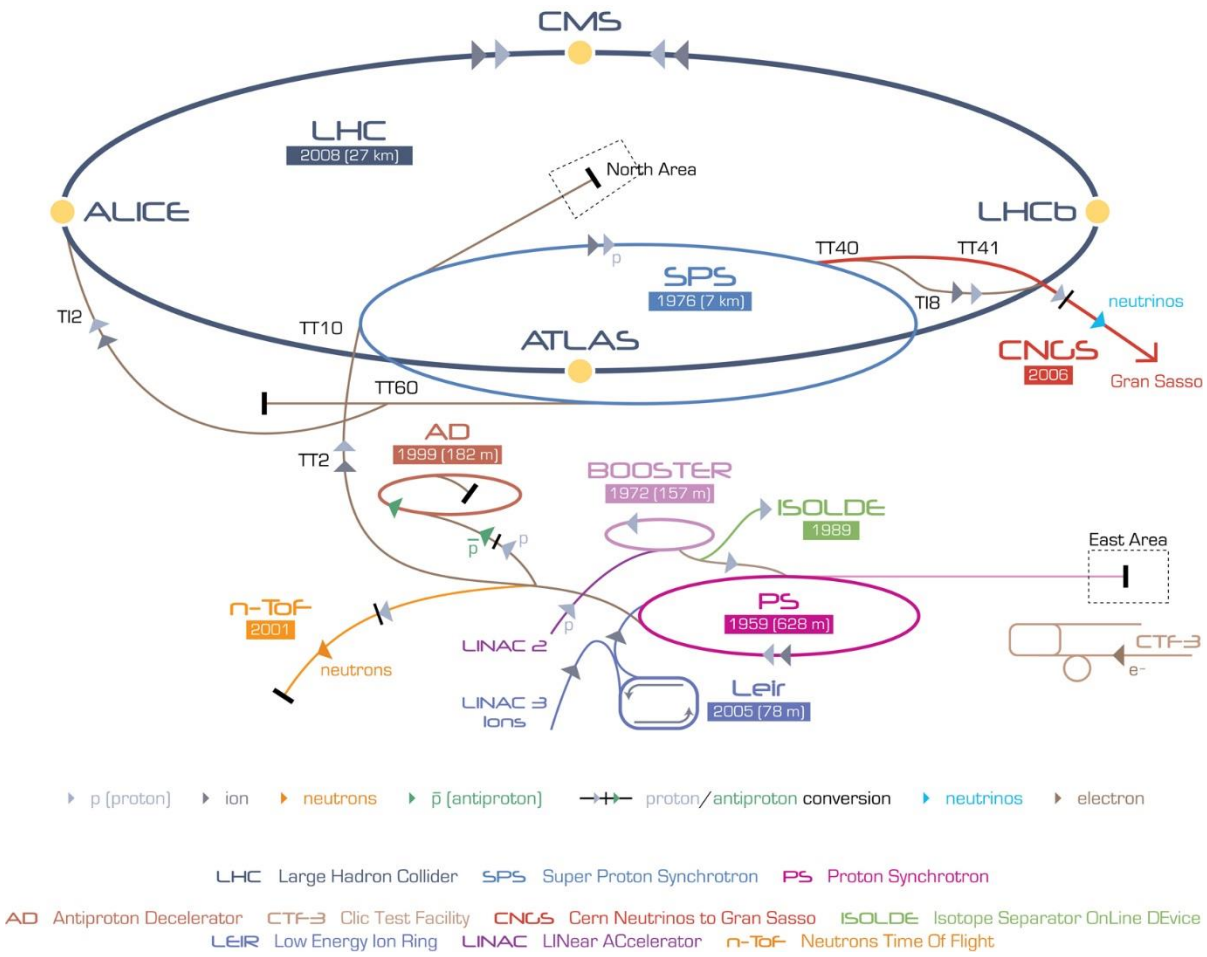
Da bi se protoni ovolike brzine držali na kružnoj putanji potrebni su izuzetno jaki elektromagneti. Kroz zavojnicu elektromagneta pušta se struja jakosti preko 11000 A. Normalni vodiči ne bi bili u stanju nositi ovako jaku struju zbog ohmskog otpora zbog kojeg bi se previše zagrijavali. Da se riješi ovaj problem, elektromagneti su ohlađeni na temperaturu od 1.9 K kako bi se vodiče kroz koje teče struja dovedelo u stanje supravodljivosti. Na ovaj način se riješio problem zagrijavanja budući da otpor supravodiča iščezava.[5]

Kada se dva protona sudare, energija u centru mase iznosi 13 TeV i reproduciraju se uvjeti slični onima neposredno nakon Velikog praska. Ovi sudari stvaraju pljusak čestica koje detektori trebaju uhvatiti.

Sedam eksperimenata na LHC-u, prikazani na slici *1.1.1*, koristi detektore za analizu čestica koje nastaju u proton-proton sudarima. Ove eksperimente vode kolaboracije znanstvenika iz

različitih zemalja svijeta. Eksperimenti su ATLAS, CMS, A large ion collider experiment (ALICE), The Large Hadron Collider beauty (LHCb), Total cross section, elastic scattering and diffraction dissociation measurement (TOTEM) , Large hadron collider forward experiment (LHCf) i Monopole and Exotics Detector (MoEDAL). Svaki od ovih eksperimenata promatra različite stvari.

Dva najveća detektora su CMS i ATLAS i proučavaju najširi spektar događaja u LHC-u.



Slika 1.1.1: Sustav akceleratora na CERN-u

Jedno od najznačajnijih svojstava LHC-a je visoki luminozitet koji označava broj sudara u jedinici vremena po jedinici površine:

$$L = \frac{1}{\sigma}\frac{dN}{dt}$$

pri čemu je σ udarni presjek koji je povezan s vjerojatnošću raspršenja.

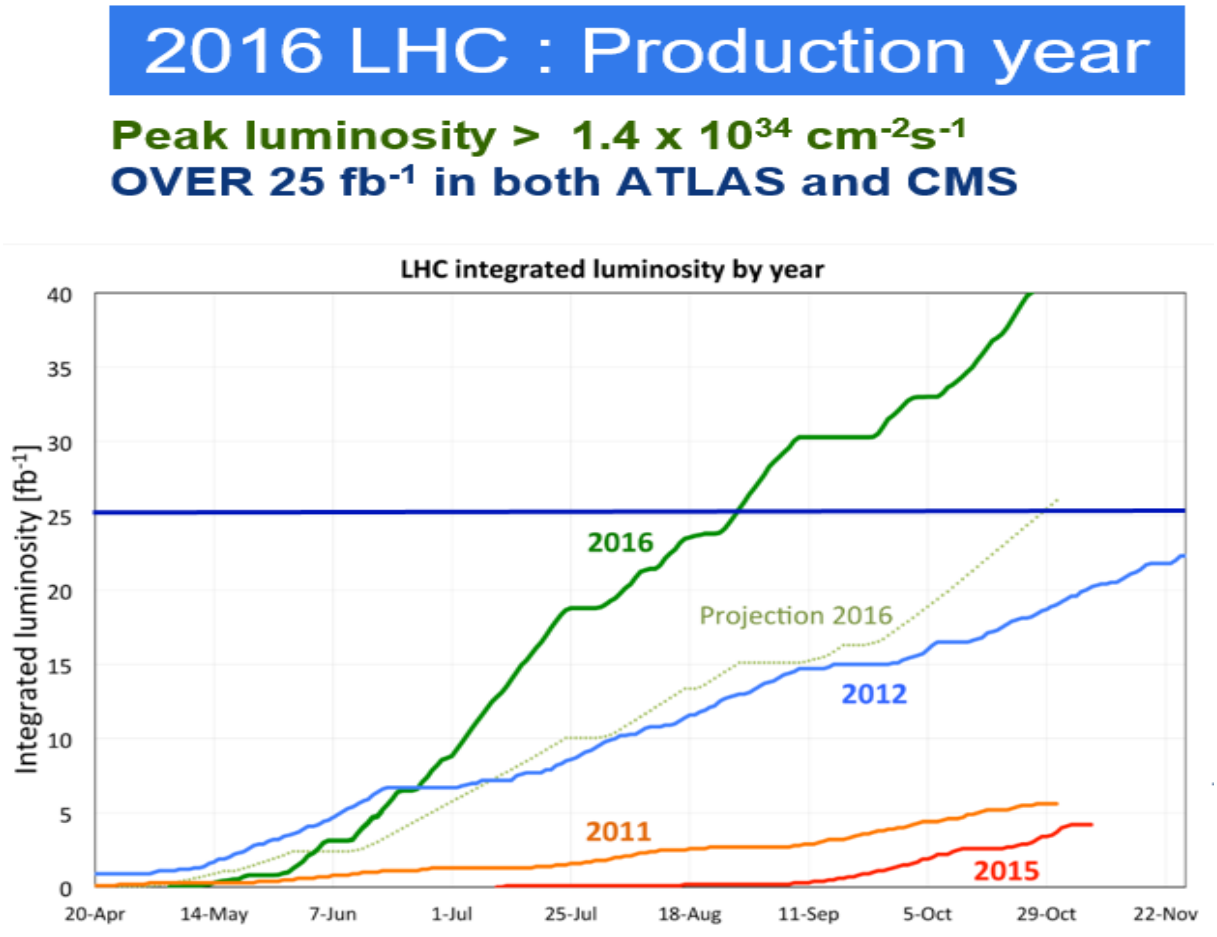
Što je veći luminozitet to je broj sudara veći, a time je i povećan broj događaja koji znanstvenike mogu navesti na novu fiziku. Važna veličina je i integrirani luminozitet, L_{int}, koji se definira kao vremenski integral luminoziteta:

$$L_{int} = \int L \, dt$$

a mjeri se u inverznim femtobarnima (fb^{-1}). Pri tome jedan inverzni femtobarn odgovara otprilike 80 bilijuna sudara.

Ove dvije veličine daju informaciju o performansama akceleratora, a cilj je imati što veći integrirani luminozitet.[6]

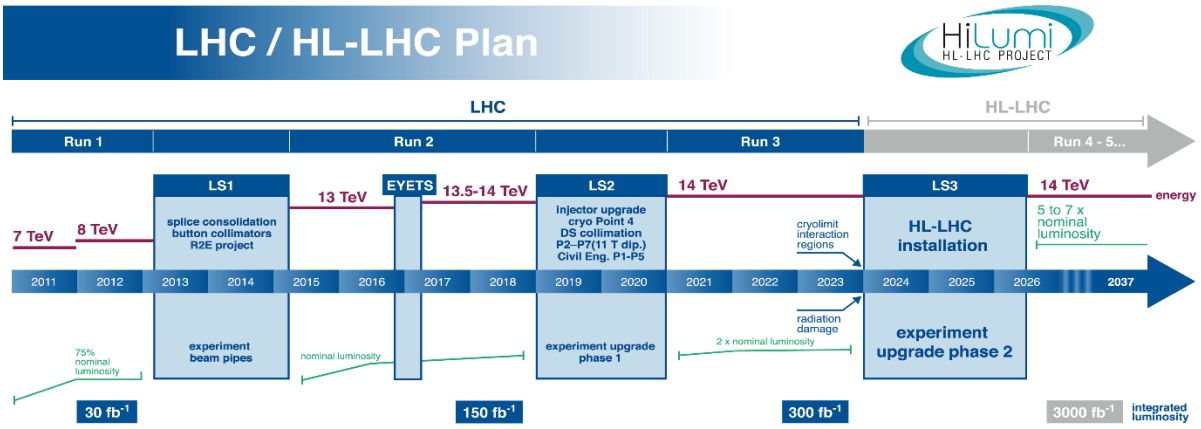
U 2016. godini za dva najveća eksperimenta na LHC-u, CMS i ATLAS, planirani integrirani luminozitet bio je oko 25 fb^{-1}. Na slici *1.1.2* može se vidjeti da je do studenog 2016. godine integrirani luminozitet LHC-a dosegnuo 40 fb^{-1} što govori o izvrsnoj izvedbi akceleratora.



Slika 1.1.2: Integrirani luminozitet LHC-a za 2016. godinu

Cilj CERN-a za nadolazeće godine je dodatno povećati integrirani luminozitet LHC-a i povećati energiju u središtu sudara na dizajniranih 14 TeV.

Trenutno je LHC u drugoj fazi rada (eng. Run 2) koja će trajati do kraja 2018. godine. Cilj je u trećoj fazi rada (eng. Run 3), koja bi trajala do konca 2023. godine, postići i zadržati energiju u središtu sudara na 14 TeV, te postići integrirani luminozitet od 300 fb^{-1} (slika 1.1.3).[7]



Slika 1.1.3: Rapored rada i nadogradnje LHC-a

Tijekom LS3 (eng. Long Shutdown) faze planira se unaprijediti LHC u HL-LHC (eng. High Luminosity LHC) pri čemu će se ostati na istoj energiji, ali je planirano udeseterostručenje integriranog luminoziteta (3000 fb^{-1}). To znači da će se godišnje u sudarima proizvoditi 15 milijuna Higgsovih bozona, dok je taj broj u 2011. i 2012. godini bio 1.2 milijuna.[8]

Prikupljanje podataka na HL-LHC-u trajat će desetak godina.[9]

Tijekom LS3 faze u CMS detektor će biti ugrađen kalorimetar visoke granularnosti, HGCAL (eng. high granularity calorimeter), koji je u žarištu interesa ovog rada.

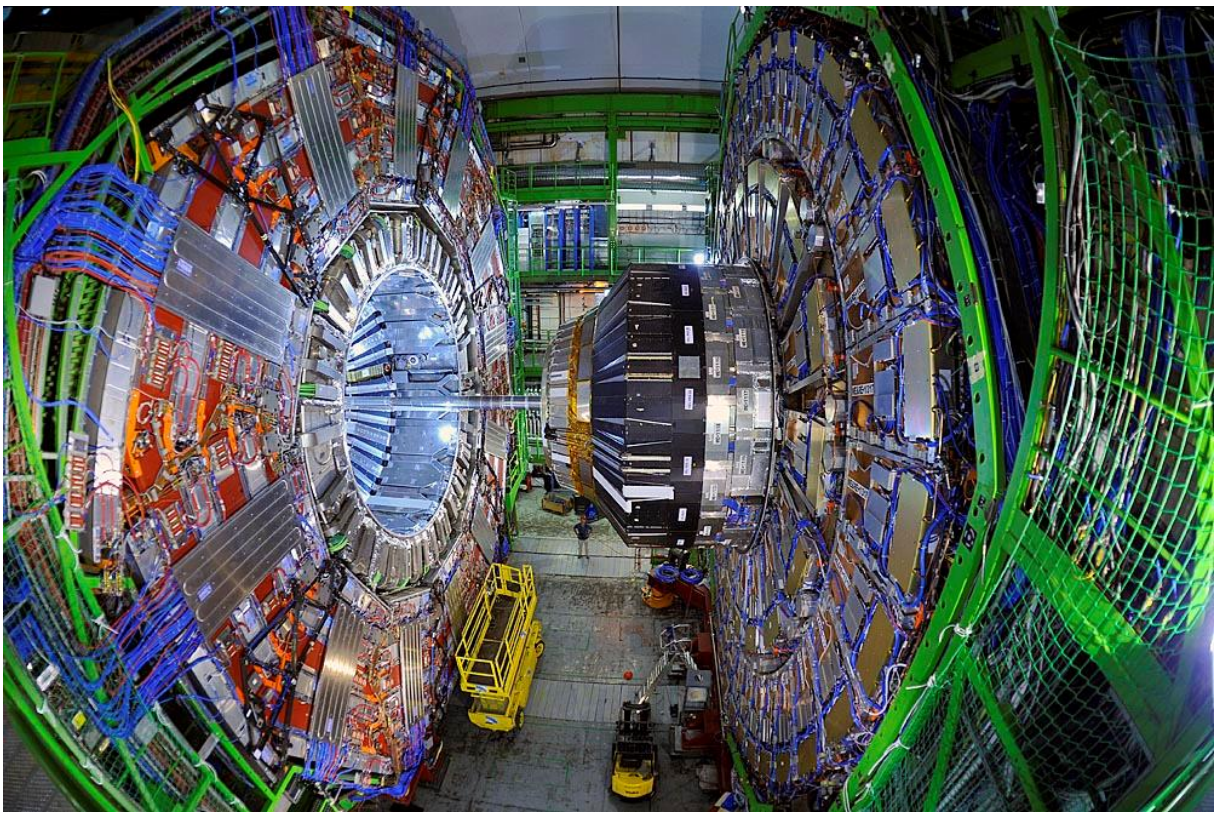
,

2 Compact Muon Solenoid detector

CMS (slika *2.1*) je detektor čestica na LHC-u dizajniran da detektira razne čestice i fenomene koji se događaju u proton-proton sudarima.

Detektor je dizajniran kao slojevita cjelina s ciljem da svaki sloj ima određeni zadatak. Kombinacijom informacija dobivenih iz svih slojeva znanstvenici pomoću zakona očuvanja mogu rekonstruirati što se dogodilo u centru sudara.

CMS detektor sastoji se od nekoliko slojeva: detektora tragova, elektromagnetskog kalorimetra (ECAL), hadronskog kalorimetra (HCAL), supravodljivog elektromagneta i detektora miona (slika *2.2*).

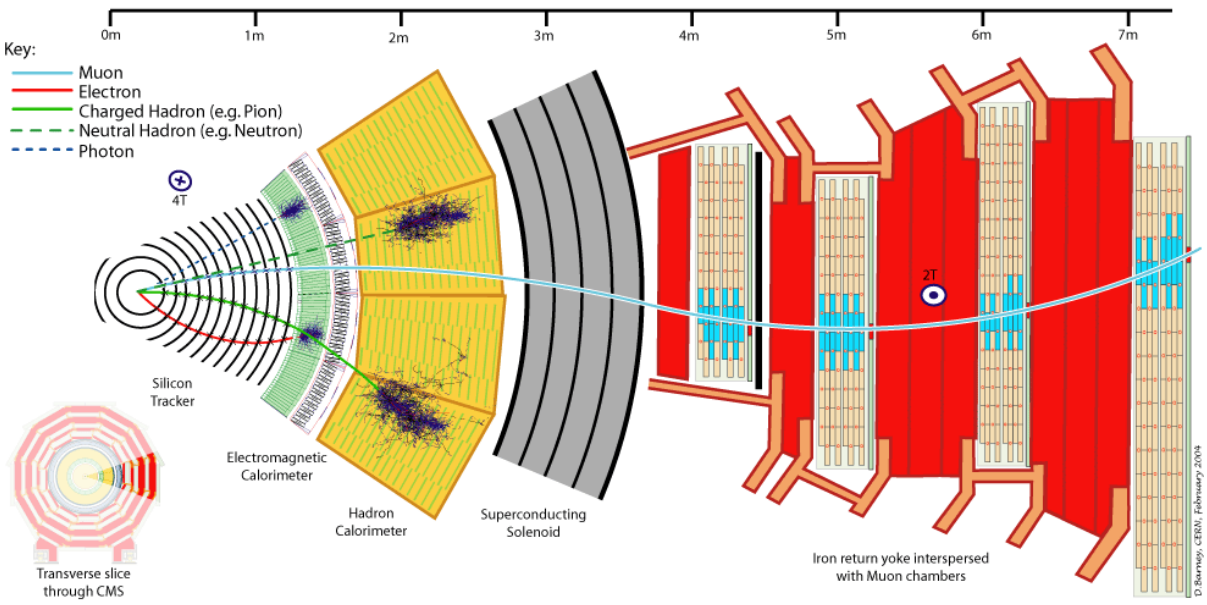


Slika 2.1: CMS detektor

CMS detektor izgrađen je oko velikog solenoidalnog supravodljivog magneta koji proizvodi magnetsko polje jakosti 4 T što je oko 100000 puta jače od Zemljinog magnetskog polja.[10]

Prva tri sloja detektora nalaze se unutar solenoida u homogenom magnetskom polju. Količina gibanja čestice je važna jer predstavlja dio četverovektora energija-količina gibanja. Mjerimo je tako što pratimo putanju nabijene četice kroz magnetsko polje (slika *2.2*). Nabijena čestica s većom količinom gibanja manje će se otkloniti u magnetskom polju od one s manjom. Detektor tragova zabilježi nekoliko ključnih točaka u putanji nabijenih čestica pomoću kojih se rekonstruira njihova putanja. Pomoću detektora tragova mogu se odrediti putanje visokoenergetskih miona, elektrona i hadrona te nekih nestabilnih čestica poput b-kvarkova.[11] Nakon detektora tragova slijedi elektromagnetski kalorimetar koji je detaljnije obrađen u poglavlju 2.1.

Hadronski kalorimetar (HCAL) mjeri energiju hadrona, čestica sastavljenih od kvarkova i gluona.



Slika 2.2: Prikaz slojeva CMS detektora

HCAL je samplirajući kalorimetar što znači da energiju čestica mjeri pomoću naizmjeničnih slojeva apsorbera i scintilatora. Kada hadron udari u apsorber nastaje mnoštvo sekundarnih čestica. Ove sekundarne čestice daljnjim udaranjem u apsorber stvaraju nove čestice i tako nastaje pljusak čestica. Kako se pljusak razvija, čestice prolaze kroz slojeve scintilirajućeg materijala. Kada hadron prođe kroz scintilator, stvori se kratkotrajni bljesak plavo-ljubičaste

svjetlosti kojeg fotodiode registriraju. Na taj način se čestica detektira.

Detektor se sastoji od „barel“ (HB) , prednjeg (HF) i „endcap“ (HE) kalorimetra. HB kalorimetar se sastoji od 36 „klinova“ od kojih svaki teži 26 tona i zadnji je dio kalorimetra koji se nalazi unutar solenoidalnog magneta. Vanjski dio HB se nalazi izvan magneta i sprječava curenje energije van kalorimetra. HE kalorimetar se sastoji od 36 „klinova“ i mjeri energiju onih čestica čija je putanja takva da ih ne može izmjeriti HB. Dva HF kalorimetra se nalaze na svakom kraju CMS detektora i mjere energije čestica koje se gibaju pod malim kutem u odnosu na upadnu zraku.[10]

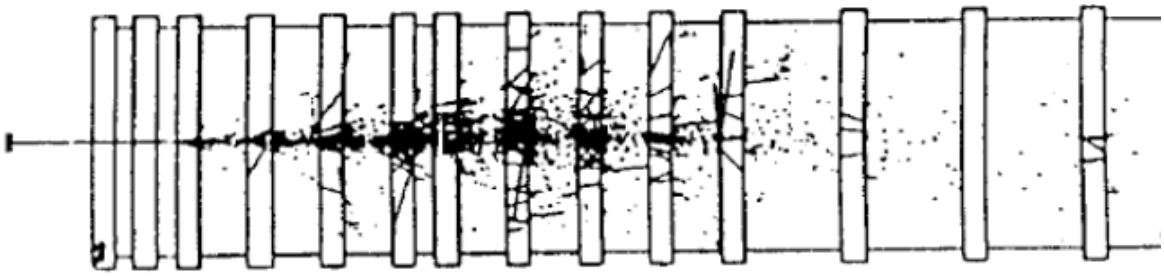
Jedan od najvažnijih zadataka CMS-a je detektiranje miona. Mioni su elementarne čestice istog naboja i spina kao elektron, ali oko 200 puta masivnije od njega. Bitni su za detekciju jer je, primjerice, jedan od kanala raspada Higgsovog bozona upravo onaj na četiri miona. Mionski detektor nalazi se na samom kraju cjelokupnog detektora jer je mione jako teško zaustaviti pošto jako slabo interagiraju sa materijom tako da lako prođu kroz detektor tragova, ECAL i HCAL.[12]

Pomoću prvog sloja CMS-a, detektora tragova, moguće je odrediti količinu gibanja čestice. Ipak, da bi se moglo u potpunosti odrediti o kojoj se čestici radi potrebno je poznavati njen četverovektor, dakle količinu gibanja i energiju.

2.1 Elektromagnetski kalorimetar

Da bi doznali što se događa u trenutku sudara protona, znanstvenici moraju izračunati energije čestica koje su nastale kao produkt tih sudara. Zbog velike uloge u pronalasku Higgsovog bozona, ali i drugih interesantnih fizikalnih procesa, značajnu ulogu imaju elektroni i fotoni. Za mjerenje njihove energije koristimo elektromagnetski kalorimetar (ECAL).

Općenito, kalorimetar je uređaj koji koristi dovoljno debeo sloj materijala za zaustavljanje primarne čestice i svih onih sekundarnih nastalih pri interakciji čestice s uređajem (slika *2.1.1*). Pritom je, idealno, sva energija deponirana unutar kalorimetra. U ovom procesu je velik dio energije disipiran u obliku topline, dok se manji dio može detektirati kao, primjerice, Čerenkovljevo zračenje ili scintilacija.



Slika 2.1.1: Stvaranje pljuska (kaskade) čestica

Razvoj kalorimetrije je otvorio niz mogućnosti i prednosti u odnosu na prethodne metode mjerenja energije čestica.

Kalorimetri detektiraju električki nabijene i neutralne čestice.

Neka upadna čestica ima energiju *E*. Nastanak kaskada čestica od prvotne je statistički proces i prosječan broj sekundarnih čestica $< N >$ je proporcionalan energiji upadne čestice. Nesigurnost u mjerenju enegije upadne čestice iz energije nastalog pljuska je statistička fluktuacija od N, pa energijska rezolucija kalorimetra raste s energijom i to kao $\frac{1}{\sqrt{E}}$. Linearne dimenzije kalorimetra proporcionalne su logaritmu energije upadne čestice.

Informacija dobivena iz oblika pljuska čestica omogućuje precizno mjerenje položaja i kuta upada primarne čestice. Nadalje, kalorimetar ima drukčiji odziv ovisno o tome radi li se o elektronima, mionima ili hadronima što se može iskoristiti za identifikaciju čestica. Također, kalorimetri omogućavaju veliku brzinu mjerenja željenih veličina, pa ih je moguće koristiti u uvjetima brze produkcije četica.

Kako je navedeno, elektromagnetski kalorimetri koriste se za mjerenje energije elektrona i fotona. Prilikom prolaska kroz kalorimetar elektroni i fotoni gube energiju. Glavni mehanizam kojim elektroni gube energiju je bremmstrahlung, odnosno zakočno zračenje, dok je za fotone to produkcija parova. Na energijama iznad približno 1 GeV ovi procesi ne ovise o energiji.

Nizom navedenih procesa elektromagnetska kaskada ili pljusak (EMC) se propagira kroz kalorimetar. Kada energija sekundarnih nabijenih čestica postane dovoljno mala, glavni proces gubitka energije postaje ionizacija medija.

Stvaranje EMC opisano je kvantnom elektrodinamikom i u principu ovisi o elektronskoj gustoći u apsorberu kalorimetra. Zato se longitudinalne dimezije visokoenergijskog EMC-a (E > 1 GeV) mogu opisati na način koji ne uključuje detalje vezane uz sam materijal. To se radi

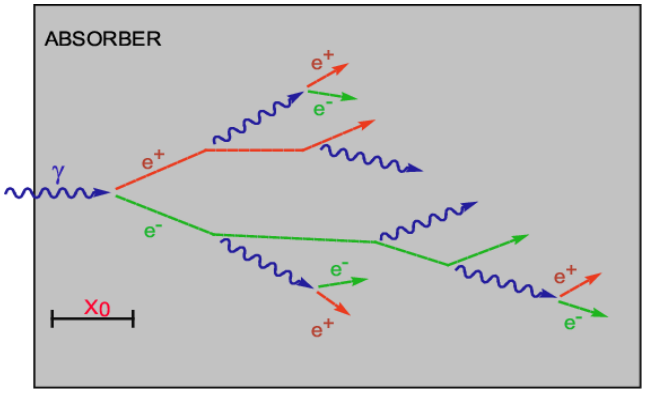
uvodeći radijacijsku duljinu, X_0 (slika *2.1.2*), koja je definirana preko jednadžbe za gubitak energije radijacijom $\frac{\Delta E}{\Delta x}$:

$$\left(\frac{\Delta E}{\Delta x}\right)_{radiation} [X_0^{-1}] = -E$$

Dok je visokoenergetski dio EMC-a određen vrijednošću X_0, niskoenergijski rep pljuska je karakteriziran kritičnom energijom medija, ϵ, definiranom kao gubitak energije elektrona i pozitrona energije ϵ po jedinici radijacijske duljine X_0 pri sudarima s atomima medija:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{collision} [X_0^{-1}] = -\epsilon$$

Vrijednost od ϵ se približno podudara s vrijednošću energije elektrona ispod koje dominantni proces gubitka energije postaje ionizacija medija.



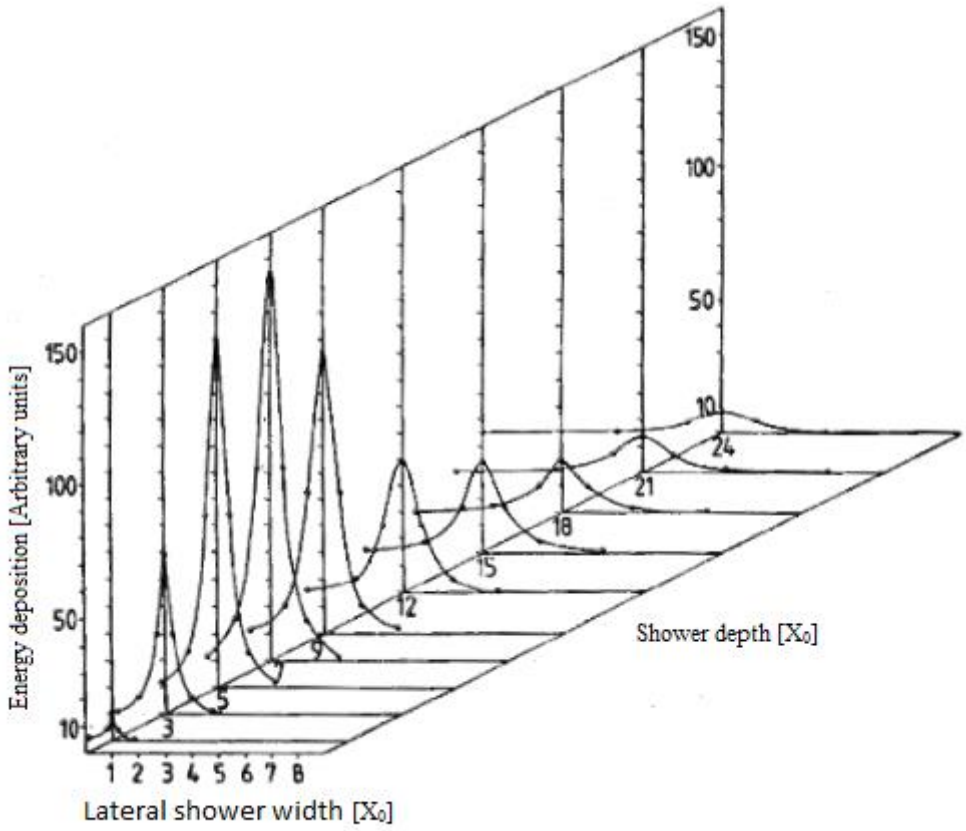
Slika 2.1.2: Shematski prikaz radijacijske duljine

Tranverzalna svojstva pljuska čestica također se mogu shvatiti kvalitativno. U početnom dijelu kaskade lateralno širenje je uvjetovano kutem bremsstrahlung emisije i višestrukim raspršenjima na atomima apsorbera. Što se energija sekundarnih čestica smanjuje, to raspršenje dobiva veću ulogu u širenju kaskade. Kvantitativno, EMC zauzima cilindar radijusa R:

$$R \approx 2\rho_M$$

pri čemu je ρ_M Molièreov radijus koji opisuje prosječni bočni ogib elektrona energije ϵ u jednoj radijacijskoj duljini. Drugim riječima, to je radijus cilindra koji sadrži približno 90%

deponirane energije pljuska.[13] Na slici *2.1.3* dan je shematski prikaz trasnverzalnog i longitudinalnog razvoja elektromagnetskog pljuska.



Slika 2.1.3: Lateralni i longitudinalni profil EMC nastalog sudaranjem elektrona energije 6 GeV s olovnim apsorberom

Precizni rezultati u uvjetima koji su prisutni na LHC-u zahtjevaju nužan izbor pravog materijala za izradu ECAL-a. Zbog velike gustoće i visoke razine transparentnosti, za materijal je odabran olovni volframat $PbWO_4$. Kristali olovnog volframata većinski se sastoje od metala i imaju masu veću od nehrđajućeg čelika. Da bi se dobila željena transparentnost, u kristalnu strukturu su ubačeni atomi kisika.

Još jedan razlog zbog kojeg je odabran upravo olovni volframat je taj što je ove kristale relativno jednostavno napraviti, a institucije koje su spremne za taj izazov već su postojale u Rusiji i Kini. Tijekom 10 godina u ruskim i kineskim tvornicama napravljeno je gotovo 80000 kristala koji se koristite u CMS detektoru. Za proizvodnju svakog kristala potrebno je otprilike dva dana tijekom kojih se kristali uzgoje, a zatim i ispoliraju dijamantnom prašinom.[14]

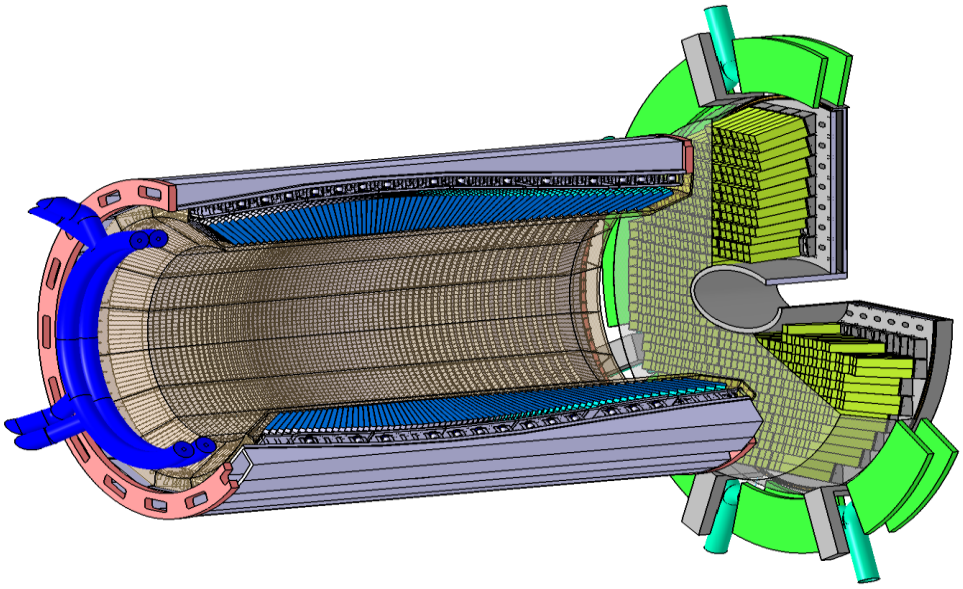
Visokoenergijski elektron ili pozitron udara u jezgru kristala pritom stvarajući pljusak sekundarnih čestica. Atomi materijala zatim preuzmu dio energije ovih sekundarnih čestica i nakratko njihovi elektroni završe u pobuđenom stanju. Elektroni se vrlo brzo vraćaju u početno stanje pri čemu emitiraju foton plave svjetlosti. Ovo nazivamo scintilacijom. Fotodetektor zaljepljen za kraj kristala prikupi ove fotone. Važno je da je količina svjetlosti proporcionalna energiji koja je deponirana u kristalu. Na ovaj način izmjeri se energija prvotnog elektrona ili fotona. [15]

Kako kristali nisu savršeni, pljuskovi fotona pri scintilaciji ovise o temperaturi materijala, pa se 100 tona kristala mora održavati na što stabilnijoj temperaturi čija vrijednost varira unutar 0.1 °C. [16]

ECAL (slika *2.1.4*) se sastoji od dva dijela: "barrel" kalorimetra na čija su dva kraja postavljeni "endcap" kalorimetri. Etimologija ovih naziva je njihov izgled. Središnji dio izgleda poput bačve, dok krajevi izgledaju kao poklopci.

Kristali u središnjem djelu ECAL-a imaju poprečni presjek 5 cm^2 i duljinu 23 cm, a kristali na oba kraja presjek 9 cm^2 i duljinu 22 cm. Središnji dio ECAL-a sadrži 61200 takvih kristala, dok oni na oba kraja sadrže ukupno 15000 kristala.[13]

Na kraju svakog kristala nalaze se fotodetektori koji su posebno dizajnirani za visoke razine zračenja i jako magnetsko polje. Oni detektiraju scintilaciju kristala i svjetlosni signal pretvaraju u električni koji se nakon toga šalje na analizu.



Slika 2.1.4: Elektromagnetski kalorimetar

Zbog visokih razina zračenja unutar CMS-a kristali olovnog volframata se s vremenom oštećuju i gube svoja svojstva. Zbog oštećenja endcap ECAL bi se trebao zamijeniti novim detektorom. Trenutno se rade simulacije nove generacije elektromagnetskog kalorimetra koji bi uskoro trebao zamijeniti dosadašnjeg. Jasno, javljaju se mnogi izazovi i problemi u procesu. Zbog napretka u tehnologiji silicijskih detektora, odlučeno je kako će upravo takvi biti postavljeni u novom detektoru. To će ujedno biti i prvi kalorimetri ovog tipa korišteni u svrhe proučavanja fizike elementarnih čestica. Osnovne prednosti u odnosu na prethodni detektor će biti veća otpornost na zračenje, ali i veća granularnost. Osim na performanse, treba paziti i da sve bude unutar predodređenog budžeta. Zbog toga treba napraviti detaljne simulacije da se dobije uvid u različite parametre među kojima su oblik i dimenzije detektorskih ćelija.

Za dodatnu preciznost mjerenja, ECAL sadrži i "preshower" detektore pomoću kojih mogu razlikovati pojedinačne visokoenergijske fotone od manje zanimljivih parova niskoenergijskih fotona.
Problem stvaraju neutralni pioni koji nastaju u sudarima. Može ih se pogreškom interpretirati kao visokoenergijske fotone prilikom raspada na dva niskoenergijska fotona. Kada se neutralni pioni raspadnu na dva fotona, putanje tih fotona budu bliske. Zbog toga je ispred ECAL-a postavljen "preshower" detektor koji ima puno veću granularnost od ECAL-a tako da može razlikovati ta dva fotona. Na ovaj način se smanjila vjerojatnost da se interpretira fotone nastale raspadom neutralnog piona kao zanimljiv visokoenergijski foton.[17]

2.2 High Granularity Calorimeter

Već je naglašeno kako se tijekom LS3 faze planira unaprijediti LHC tako da se integrirani luminozitet dodatno poveća što će rezultirati većem broju podataka koji će biti analizirani. Važnu ulogu u nadograđenom HL-LHC imaju kalorimetri koji su ključni za detekciju i rekonstrukciju elektrona i fotona.
Elektroni su važni za proučavanje raspada Higgsovog bozona, ali i za proučavanje fizike van okvira Standardnog modela. Za uspješno razlikovanje elektrona i hadrona važni su prednji dio hadronskog kalorimetra, ECAL i detektor tragova. U situaciji velikog broja sudara protona u jednom sudaru gomila protona koji se očekuje u radu HL-LHC-a bitna je visoka granularnost detektora kako bi se staze čestica mogle uspješno povezati sa ćelijama u kojima su iste deponirale energiju.

Postojeći kalorimetri na LHC-u su dizajnirani da ovaj posao obavljaju dobro za integrirani luminozitet do 500 fb^{-1}. Prije nego što je hadronski kalorimetar nadograđen tijekom Phase 1 stadija, CMS je radio sa luminozitetom do $1 \cdot 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$, što je nakon nadogradnje udvostručeno.
Nakon HL-LHC nadogradnje očekuje se integrirani luminozitet od 3000 fb^{-1} što zahtjeva novu tehnologiju endcap kalorimetara.
Da bi se zadovoljili zahtjevi nametnuti Phase 1 nadogradnjom, elektronika u EB će biti u potpunosti zamijenjena. Pločice scintilatora za HB će također biti zamijenjene, kako bi bile otpornije na zračenje i kako bi se performanse održale na željenoj razini, što je nužno za identifikaciju elektrona i fotona.

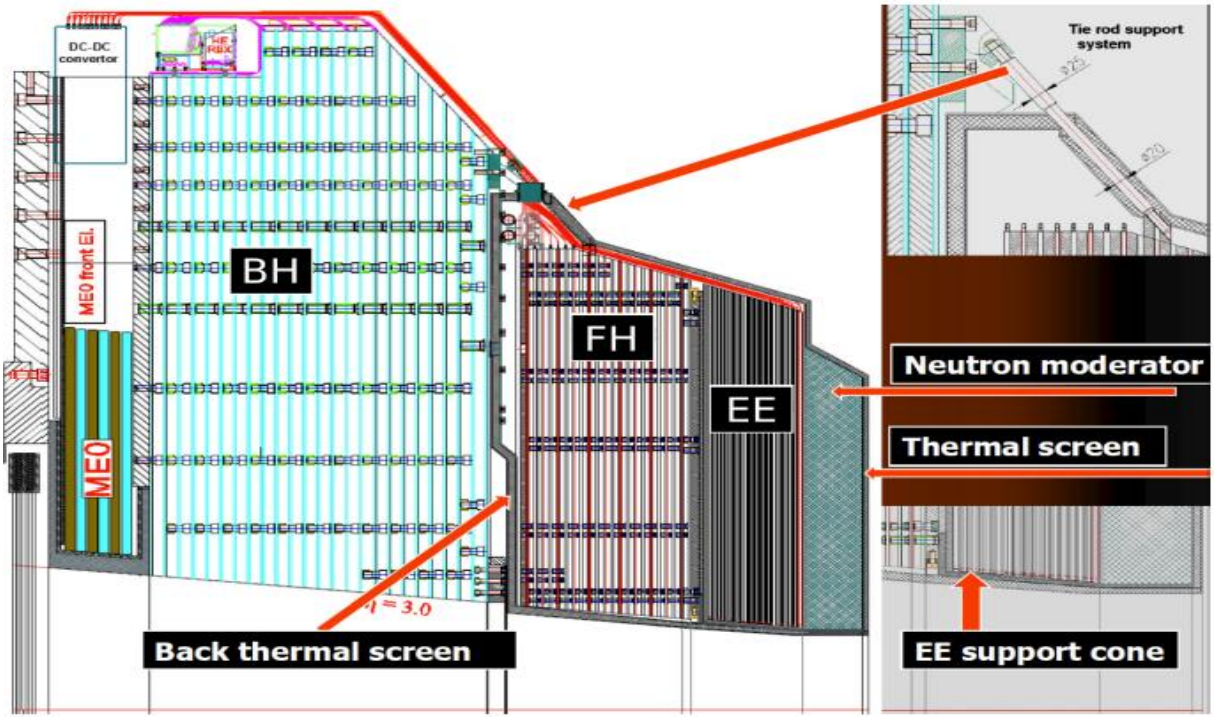
Za integrirani luminozitet od 3000 fb^{-1} razine zračenja u endcap djelovima kalorimetra bit će povećane. Također, veći PU znači težu identifikaciju elektrona i fotona.
Da bi se mogli nositi s ovim zahtjevima, odlučeno je da endcap kalorimetri budu zamijenjeni novim samplirajućim kalorimetrima visoke granularnosti.
Napredak u tehnologiji silicijskih detektora, posebice u financijskom aspektu, kao i napredak u brzini detekcije i obrade dobivenih podataka sugeriraju upravo korištenje novih tehnologija u kalorimetriji na HL-LHC-u.

EE (EM dio) i FH (eng. Forward Hadronic) kalorimetri će koristiti ploče silicija kao aktivni medij, dok će u BH (eng. Back Hadronic) kalorimetru, kao što je do sada bio slučaj u HE, to biti plastični scintilator. Na slici *2.2.1* shematski je prikazana struktura planiranog HGCAL-a. Detaljnije, EE kalorimetar će imati sljedeći raspored slojeva apsorbera i aktivnog materijala:

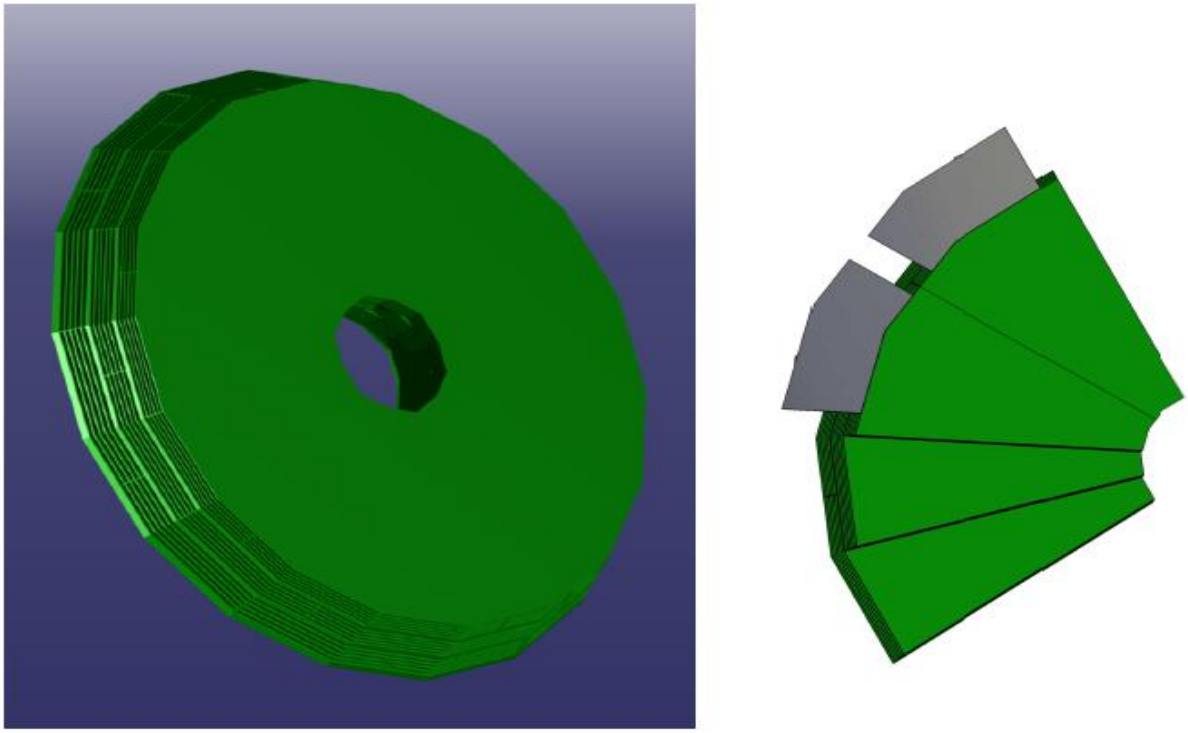
- 10 slojeva apsorbera debiljine 0.65 X_0 između kojih je ploča silicija
- 10 slojeva apsorbera debiljine 0.88 X_0 između kojih je ploča silicija
- 8 slojeva apsorbera debljine 1.26 X_0 između kojih je ploča silicija

Dakle, ukupna debljina EE kalorimetra bit će 25 X_0 , a kao apsorber koristit će se izmjenjujući slojevi volframa i olova/bakra. Cijeli kalorimetar sadržavat će 380 m^2 silicija od čega će biti napravljeno 28 silicijskih ploča. Bakrene ploče su postavljene tako da kroz njih kroz male kanaliće mogu prolaziti pare CO_2 koje hlade aparaturu na temperaturu od -30 °C. Svaki endcap kalorimetar se sastoji od 12 sektora koji pokrivaju po 30° (slika *2.2.2*). U svaki od 12 sektora umetnuta je „kazeta“ koja se sastoji od dvije ploče aktivnog medija između kojih je apsorber. Na pločama aktivnog medija nalazi se potrebna elektronika. Apsorber pritom strukturi

daje stabilnost i predstavlja sredstvo preko kojeg se struktura hladi.

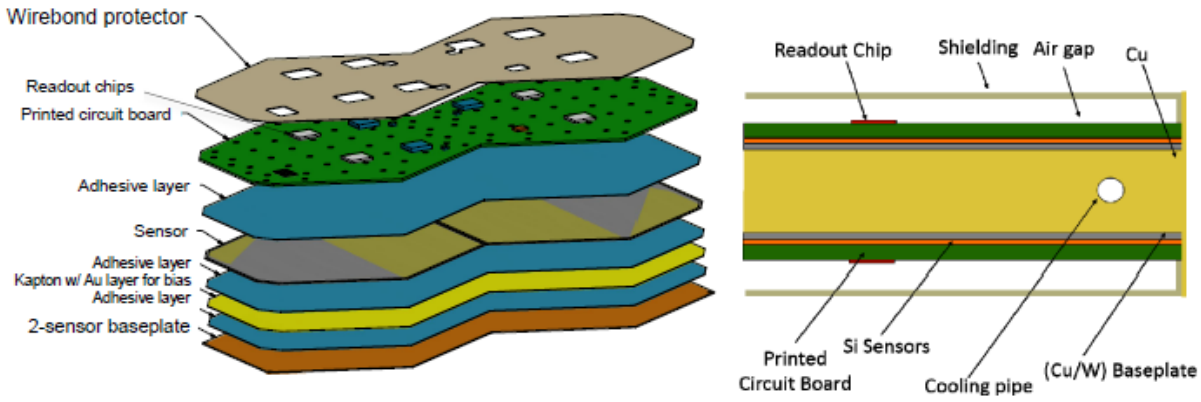


Slika 2.2.1: Predložena struktura HGCAL-a



Slika 2.2.2: Dizajn EE kalorimetra

Apsorber svake kazete debljine je 6 mm i sadrži kanale za hlađenje. Par heksagonalnih senzora montiran je PCB (eng. Printed Circuit Board) pločicu. Ostali slojevi senzora zaljepljeni su na ploču napravljenu od mješavine volframa i bakra. Ove ploče su montirane na obje strane apsorbera.[18] Na slici *2.2.3* prikazana je struktura jednog modula kalorimetra.



Slika 2.2.3: Lijeva slika prikazuje jedan modul koji se sastoji od PCB pločice, silicijskih senzora i Cu/W ploče. Na desnoj slici je prikazano kako se moduli montiraju na obje strane apsorbera.

3 Simulacija oblika elektromagnetskog pljuska FastShower programom

Za potrebe HL-LHC-a potrebni su kalorimetri visoke granularnosti. Isti se planiraju instalirati na CMS detektor tijekom LS3 faze koja kreće 2024. godine.

Plan je zamijeniti postojeći kalorimetar novim samplirajućim kalorimetrom, HGCAL-om, koji će kao aktivni medij koristiti silicij. Jedan od razloga za ovaj izbor je njegova prihvatljiva cijena. Kako je ovo prvi put da će se silicij koristiti za potrebe operativnog elektromagnetskog kalorimetra na sudaračima čestica, bitno je proučiti razne tehničke aspekte kao i predvidjeti ponašanje elektromagnetskog pljuska koji će se formirati udaranjem elektromagnetskih čestica u apsorber.

Da bi se ovo napravilo neophodno je raditi detaljnu Geant4 simulaciju. Geant4 (eng GEometry And Tracking) je platforma za simulaciju prolaza čestica kroz materiju koristeći Monte Carlo metode razvijena na CERN-u.[19]

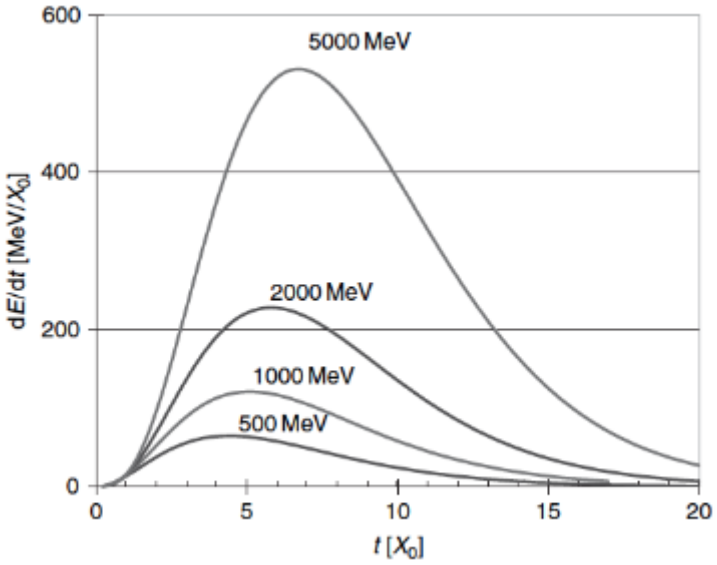
Međutim, premda su ove simulacije robusne, nisu nužno najbolji izbor za dobivanje prvog uvida u ponašanje novog detektora. Korisnije je u prvom koraku raditi sa manje kompleksnim alatom koji će dati manje detaljne, ali korisne, uvide u ono što možemo očekivati jednom kada se pravi detektor postavi. Ove simulacije su i nužne da bi se mogli unaprijed odlučiti razni parametri detektora, kao što su oblik i dimenzije detektorskih ćelija.

U ovu svrhu je razvijen FastShower alat koji koristi poznavanje parametrizacije elektromagnetskog pljuska kao i poznavanje porijekla fluktuacija u mjerenjima energije da bi procijenio koliki će udio energije pljuska biti deponiran u pojedinim ćelijama detektora. Longitudinalni razvoj elektromagnetskog pljuska može se dobiti iz detaljnih Monte Carlo simulacija uzimajući u obzir interakcije koje se odvijaju i njihove ovisnosti o energiji.

Koristeći EGS (eng. Electron Gamma Shower) program koji Monte Carlo simulacijama proračunava transport elektrona i fotona kroz materiju dobiven je opis elektromagnetskog pljuska

$$\frac{dE}{dt} = E_0 \cdot \beta \cdot \frac{(\beta t)^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)}$$

pri čemu su α i β slobodni parametri, t dubina pljuska izražena u radijacijskim duljinama, a Γ gama funkcija (slika *3.1*).



Slika 3.1: Longituinalni profil elektromagnetskog pljuska

Za male vrijednosti *t*, što odgovara početnoj fazi razvoja pljuska, broj sekundarnih čestica, pa tako i deponirana energija raste. U kasnijim fazama razvoja pljuska procesi apsorpcije dominiraju, pa broj čestica, a time i deponirana energija, opada.
Maksimum pljuska raste logaritamski sa energijom upadne čestice, E_0

$$t_{max} = \frac{\alpha - 1}{\beta} = \ln\left(\frac{E_0}{E_C}\right) + C_{e\gamma}$$

Broj čestica u pljuska raste sve dok se ne dosegne kritična energija, E_C. Za $E < E_C$ procesi ionizacije i pobuđenja medija dominiraju, pa se broj čestica smanjuje.
U gornjoj jednadžbi $C_{e\gamma}$ poprima vrijednosti +0.5, odnosno -0.5 ovisno o upadnoj čestici iz koje se razvija pljusak – fotonu ili elektronu.[20]

Prednost FastShower alata nad cjelovitom Geant4 simulacijom je u mogućnosti jednostavne i brze promijene geometrije ćelija kao i njihovih dimenzija. Također, lako je definirati gdje će udariti ulazna čestica. Konačno, vrijeme trajanja samih simulacija je puno kraće.

3.1 Postavke simulacija

Prije nego se navedu postavke simulacija potrebno je definirati koordinate koje će se koristiti. Zbog Lorentz invarijantnosti koristimo pseudorapiditet, η, definiran kao

$$\eta = -\ln\left[tg\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$$

pri čemu je θ kut između smjera vektora impulsa čestice i osi ulaznog snopa čestica.
Osim pseudorapiditeta koristimo i standardni azimutalni kut φ.
Definiramo prvi i drugi transverzalni moment distribucije energije po ćelijama:

$$R_{mean} = \langle R \rangle = \frac{\sum_i E_i \cdot R_i}{\sum_i E_i}$$

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i E_i \cdot (\langle R \rangle - R_i)^2}{\sum_i E_i}}$$

pri čemu je E_i energija deponirana u ćeliji, $R_i = \sqrt{\Delta\phi_i^2 + \Delta\eta_i^2}$, a $\Delta\phi$ ($\Delta\eta$) razlika između azimutalnog kuta (psudorapiditeta) i baricentra pljuska. Baricentar pljuska, R_B, je definiran kao

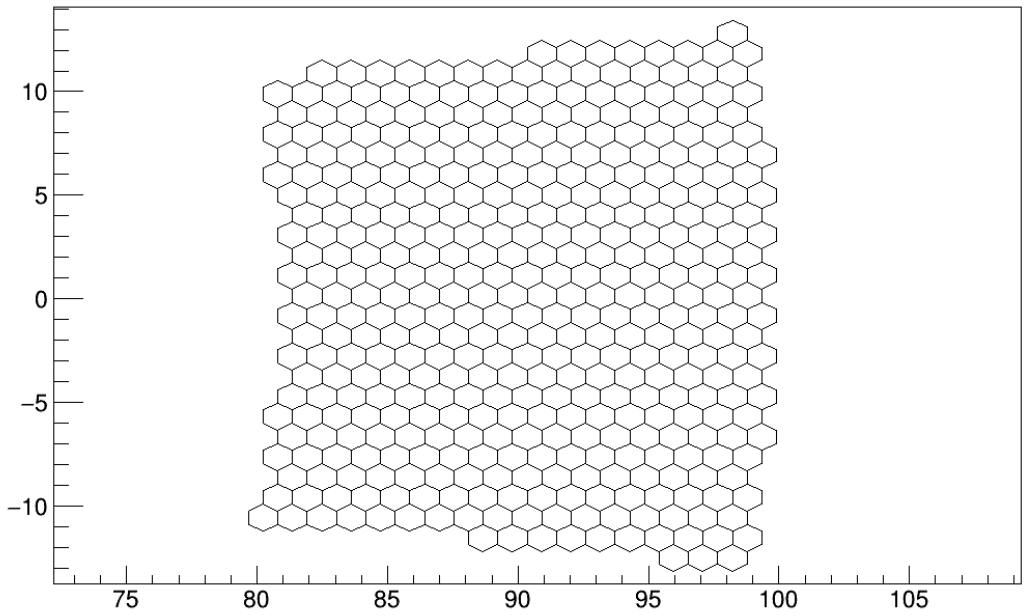
$$R_B = \sqrt{\phi_B^2 + \eta_B^2}$$

pri čemu su

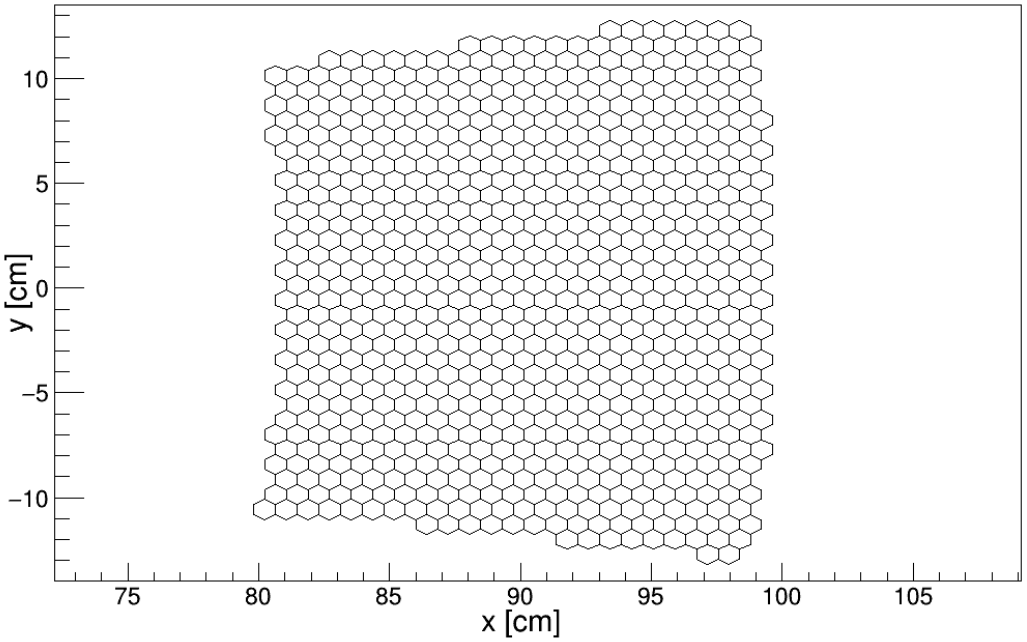
$$k_B = \frac{\sum_i E_i \cdot k_i}{\sum_i E_i}\ , \quad k = \phi, \eta$$

U navedenim jednadžbama smo veličine skalirali energijom. Na isti način možemo dobiti veličine skalirane logaritmom energije. Oba skaliranja i pripadne veličine koriste se u radu. Postavljena je donja granica na energiju ćelija. U slučaju da je energija u ćeliji niža od 100 MeV, ta ćelija neće ulaziti u statističke proračune. Zaključci simulacija se ne mijenjaju ukoliko je ta granica postavljena na nižu vrijednost.
Treba naglasiti kako FastShower alat koristi parametrizaciju za dobivanje transverzalnog profila elektromagnetskog pljuska. U radu će biti prikazani samo rezultati za R_{RMS} u slučaju skaliranja veličina energijom i logaritmom energije. Energija upadne čestice postavljena je na

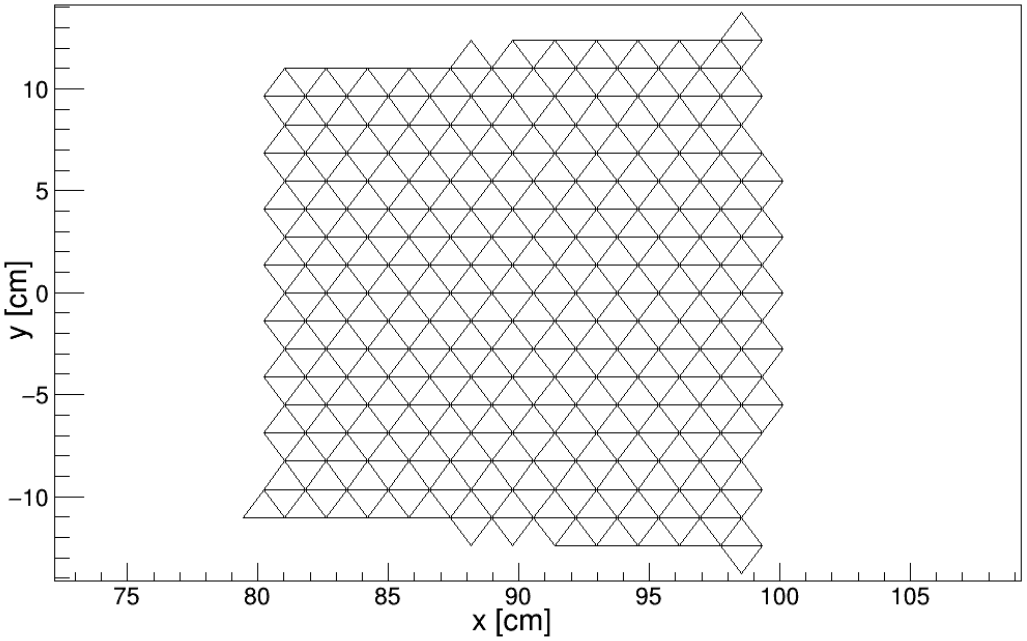
100 GeV s parametrima $\eta = 2.0$ i $\phi = 0$. Svaka simulacija sadrži 10000 događaja, a napravljene su simulacije za 5, 15. i 20. sloj. Razmatrani su razni slučajevi koji uključuju detektorske ćelije različitih oblika i dimenzija te različita mjesta udara upadne čestice.
Od geometrija razmatramo heksagnoske i trokutaste ćelije i to većih i manjih dimenzija (slike *3.1.1 – 3.1.4*).



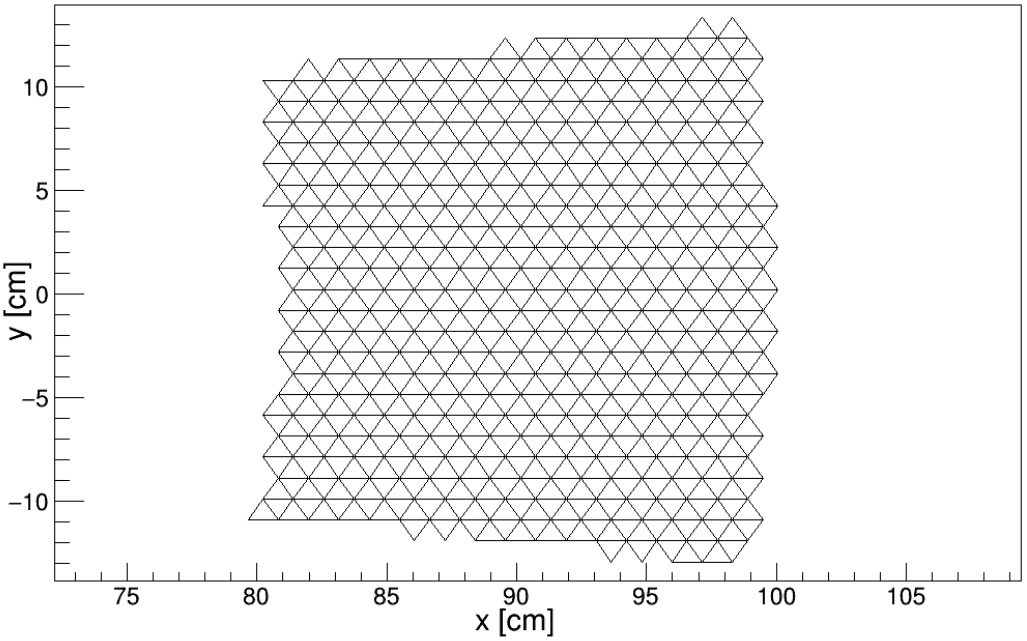
Slika 3.1.1: Velika heksagonska rešetka



Slika 3.1.2: Mala heksagnoska rešetka

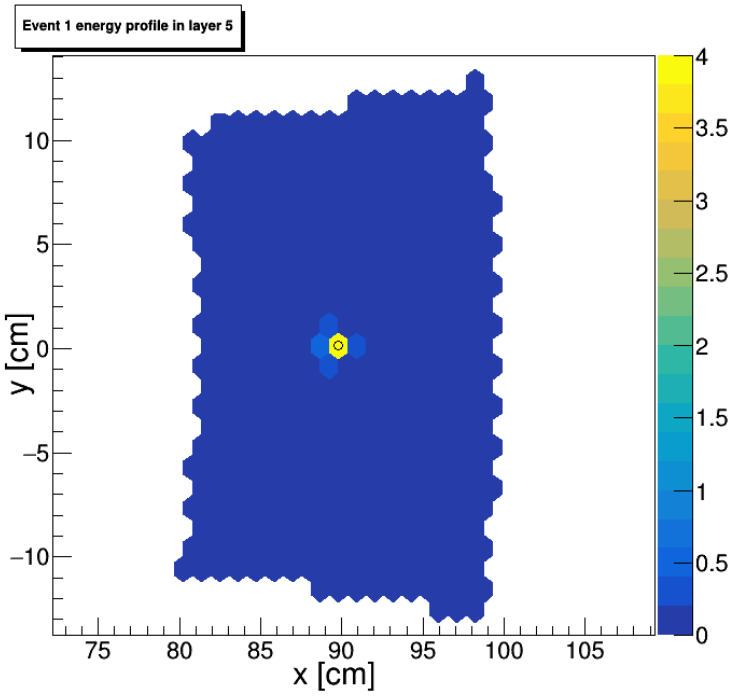


Slika 3.1.3: Velika trokutasta rešetka

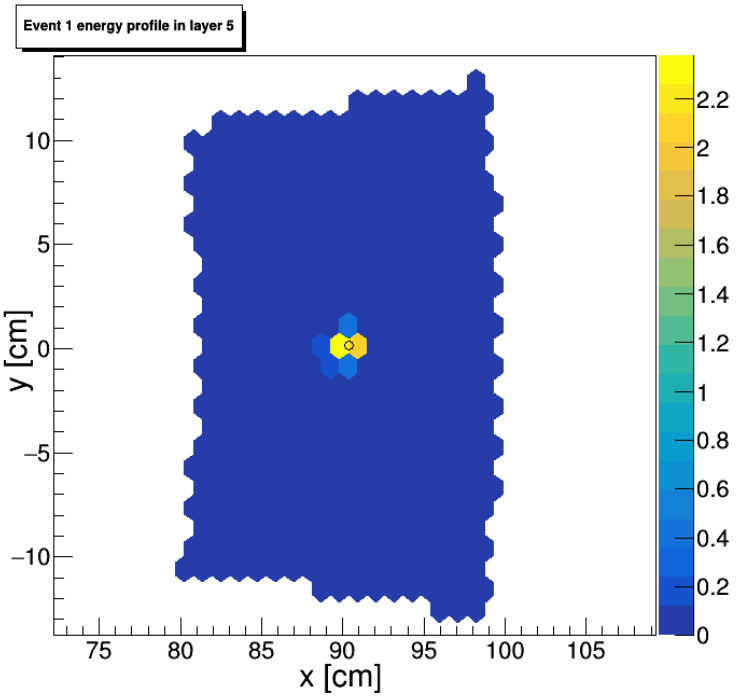


Slika 3.1.4: Mala trokutasta rešetka

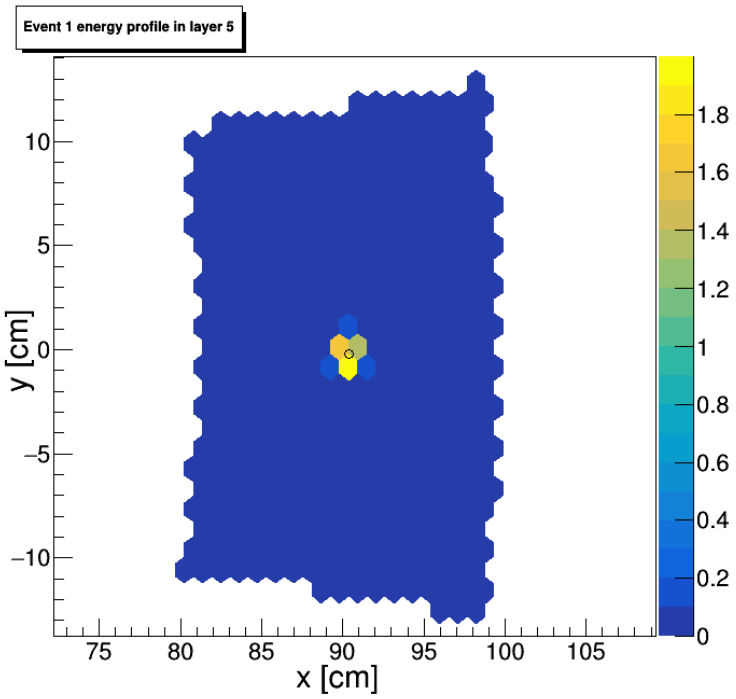
Razmatramo i tri moguća mjesta udara upadne čestice u ćeliju: centar ćelije (eng. center), rub između dvije ćelije (eng. edge) i zajednički vrh tri ćelije (eng. vertex). Navedene situacije prikazane su na slikama *3.1.5 -3.1.7*. Mjesto upada čestice na slikama označeno je kružićem.



Slika 3.1.5: Slučaj u kojem čestica udara u centar ćelije



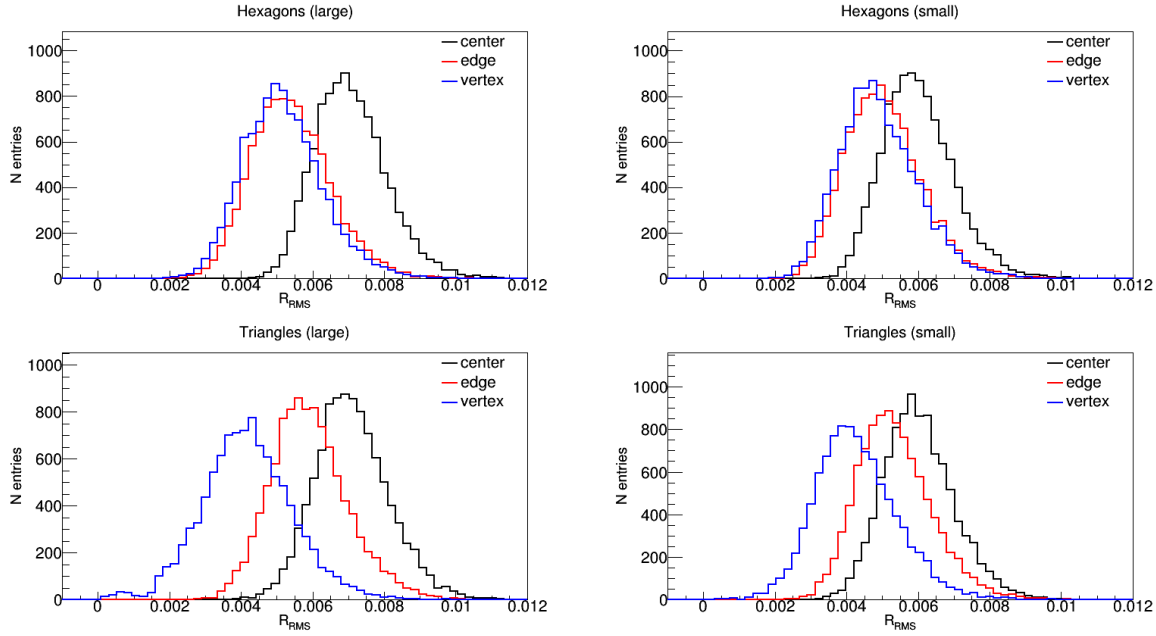
Slika 3.1.6: Slučaj u kojem čestica udara u rub između dvije ćelije



Slika 3.1.7: Slučaj u kojem čestica udara u vrh ćelije

3.2 Rezultati simulacija

Na slici *3.2.1* prikazan je oblik krivulje R_{RMS} dobiven za 15. sloj detektora pri čemu smo sve veličine skalirali energijom ćelije.



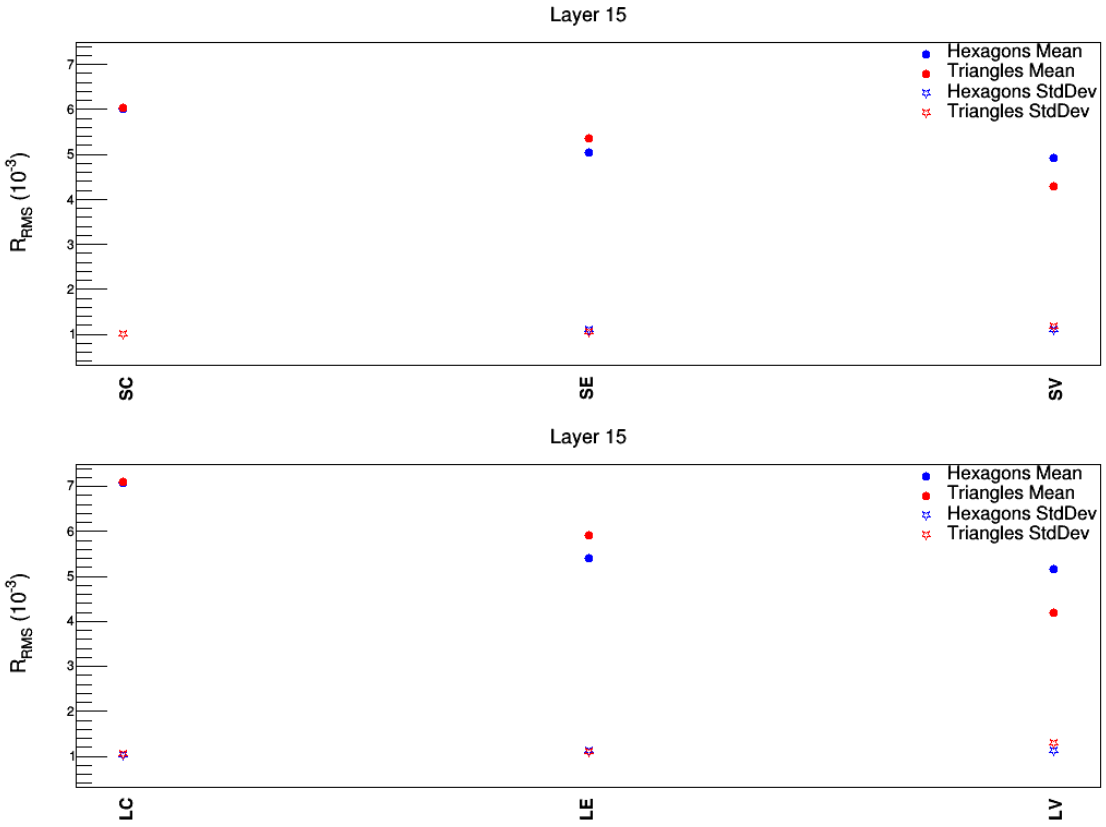
Slika 3.2.1: Oblik krivulje R_{RMS} za 15. sloj detektora pri čemu su sve veličine skalirane energijom ćelije

Sličan rad napravljen od LLR (Laboratoire Leprince-Ringuet) grupe iznjedrio je sljedeće zaključke:

1) Ne postoji značajna razlika u obliku elektromagnetskog pljuska ukoliko se umjesto heksagonalnih ćelija koriste trokutaste ćelije.

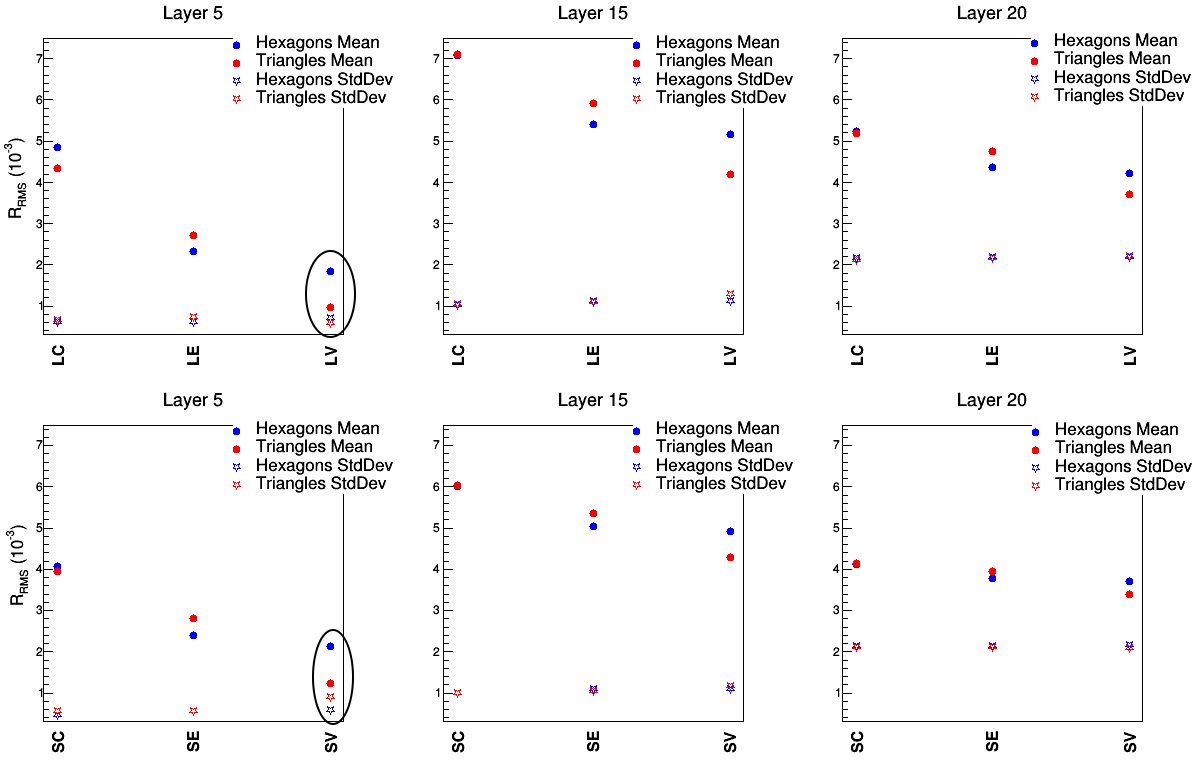
2) Dominantniji utjecaj na varijacije u izgledu elektromagnetskog pljuska ima položaj udara upadne čestice u ćeliju nego sam oblik ćelije.

Ove zaključke teško je donijeti gledajući samo sliku *3.2.1*.
Situacija je jasnija ukoliko se vrijednosti R_{RMS} i standardnih devijacija histograma s grafova *3.2.1* prikažu na posebnom grafu (slika *3.2.2*).



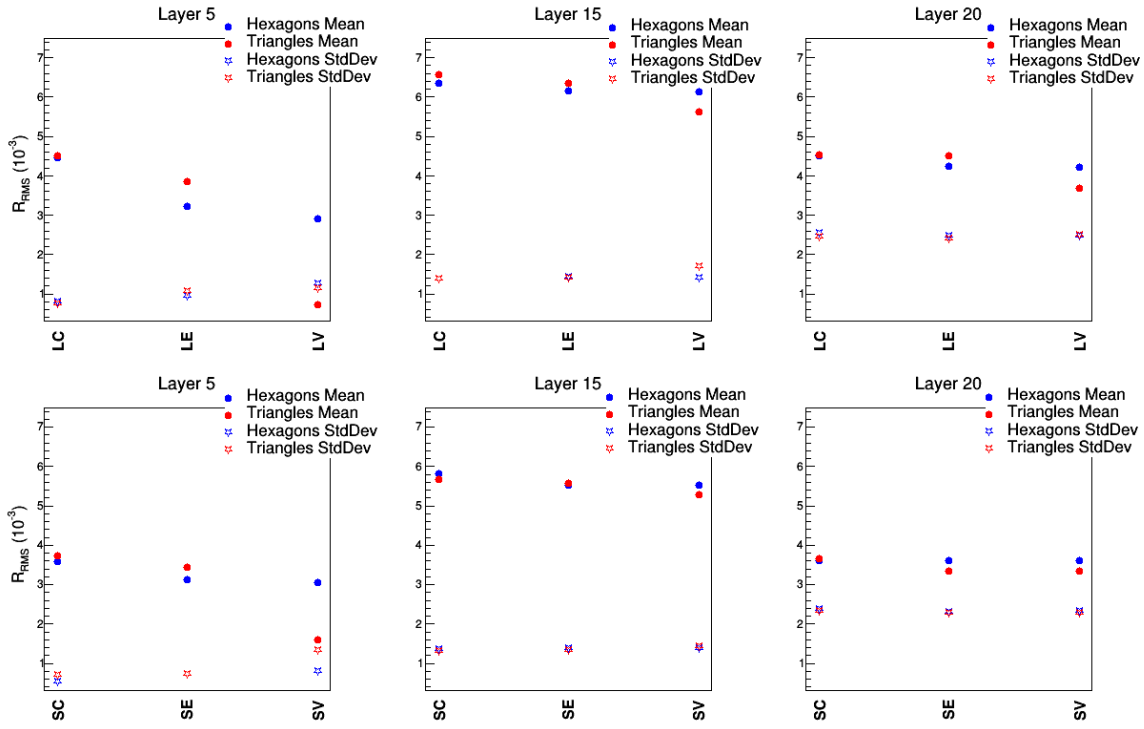
Slika 3.2.2: Vrijednost R_{RMS} i standardnih devijacija histograma prikazanih na slici 3.2.1. Male ćelije su označene sa S, dok su velike označene sa L. Položaj udara upadne čestice u ćeliju označen je sa C u slučaju centra ćelije, E u slučaju ruba između dvije ćelije i V u slučaju udara u vrh ćelije.

Da se dobije uvid u longitudinalni razvoj elektromagnetskog pljuska napravljene su simulacije za 5, 15. i 20. sloj detektora. Dobiveni su histogrami slični onima prikazanima na slici *3.2.1*. Da bi bilo lakše izvući zaključke, rezultati (slika *3.2.3*) su prikazani na isti način kao na slici *3.2.2*.



Slika 3.2.3: Vrijednost R_{RMS} i standardne devijacije za sve konfiguracije i 3 različita sloja detektora. Oznake su iste kao na slici 3.2.2. Prikazani su rezultati za veličine skalirane energijom ćelije. Vidi Dodatak A.

Isto je napravljeno i za slučaj u kojem su se veličine skalirale logaritmom energije (slika *3.2.4*).



Slika 3.2.4: Vrijednost R_{RMS} i standardne devijacije za sve konfiguracije i 3 različita sloja detektora. Prikazani su rezultati za veličine skalirane logaritmom energijom ćelije. Vidi dodatak A.

Na slici *2.1.3* vidimo da bi se elektromagnetski pljusak trebao širiti kako čestica prodire sve dublje u kalorimetar. Na slikama *3.2.3* i *3.2.4* vidimo da takvo ponašanje dobivamo i u simulaciji. Usporedbom dviju slika vidimo i kako su fluktuacije u srednjoj vrijednosti R_{RMS} manje izražene ukoliko veličinu skaliramo logaritmom energije ćelije. Ovo je rezultat značajnijeg utjecaja repova distribucije. Na grafovima su zaokruženi rezultati za 5. sloj detektora i to za slučajeve kada elektron upada u vrh ćelije. Može se primijetiti kako za ovu upadnu poziciju elektrona srednja vrijednost R_{RMS} skokovitije mijenja vrijednost pri prijelazu iz 5. u 15. sloj detektora, nego što je to slučaj za ostale upadne pozicije.

4 Simulacije oblika elektromagnetskog pljuska CMS softwareom

Kako je navedeno na početku prethodnog poglavlja, da bi se pobliže proučavalo svojstva elektromagnetskog pljuska moguće je raditi detaljne Geant4 simulacije koristeći CMS software (CMSSW). CMSSW je skup softverskih alata korišten na CMS-u za analizu podataka dobivenih detekcijom čestica u detektoru. Za razliku od FastShower alata koji koristi parametrizaciju elektromagnetskog pljuska kako bi dao jednostavan uvid u razvoj pljuska, CMSSW koristi puno kompleksnije i detaljnije simluacije, koje uključuju i simulacije samog detektora, da bi se dobila detaljnija i preciznija slika pljuska koji nastaje u CMS detektoru. Da bi pokazali kako su rezultati dobiveni FastShower alatom valjani, trebalo je napraviti detaljniju simulaciju koristeći CMSSW i usporediti dobivene rezultate. Također, za ozbiljnija istraživanja na CMS-u, korištenje kompleksnijih i potpunijih alata od FastShower alata je nužno.

Trenutno se planira detektor visoke granularnosti koji će imati 28 slojeva u EE dijelu i 12 slojeva u FH dijelu. Svaki sloj bit će popločan heksagonalnim ćelijama kao što je prikazano na slici 3.1.2. Zato u prikazanim rezultatima neće biti triangularne geometrije ćelija. Valja napomenuti kako je u FastShower alatu simuliran pojedini elektron koji udara svaki put na isto mjesto ćelije – centar, rub ili vrh. Simulacije dobivene korištenjem CMSSW su realističnije. Nemamo više jedan elektron koji uvijek upada na točno predviđeno mjesto, već imamo cijeli niz čestica koje udaraju na proizvoljna mjesta bilo koje ćelije.

4.1 Postavke simulacija

Osim što čestice ne udaraju svaki put u predviđeno mjesto, valja naglasiti ni kako sam uzorak više nije čist. Drugim riječima, u detektoru nemamo više samo elektrone, nego niz čestica koje nastaju u stvarnim fizikalnim procesima u međusobnoj interakciji čestica, kao i interakciji čestica s detektorom. Osim elektrona, u ćelijama je deponirana i energija čestica koje nastaju u raznim procesima, a koje nisu od interesa iz različitih razloga. Svi ti događaji koji nisu u središtu proučavanja nazivaju se pozadinom (eng. background). S druge strane, oni događaji koji su od interesa nazivaju se signalom. Jedan od najvažnijih i najzahtjevnijih zadataka je upravo mogućnost odvajanja signala od pozadine. U ovom radu čestice od interesa su elektroni koji su nastali raspadom Z bozona. Simulacije se vrše na dva različita uzorka koji simuliraju događaje

nastale raspadom Z bozona i događaje nastale u QCD (eng. quantum cromodynamics) procesima. QCD je kvantna teorija polja koja opisuje jaku interakciju koja postoji između kvarkova i gluona.

U tehničkoj izvedbi simulacije elektroni nastali rapadima Z bozona simulirani su i spremljeni u Zee uzorak, a događaji nastali u QCD procesima spremljeni su u QCD uzorak.

Kada čestica uđe u kalorimetar, ona deponira svoju energiju. U HGCAL-u energija će biti deponirana u jednoj ili više heksagonalnih ćelija. Unutar svakog sloja ćelije se grupiraju u dvodimenzionalne klastere koji se mogu sastojati od samo jedne ćelije (trivijalni dvodimenzionalni klasteri) ili od više ćelija (netrivijalni dvodimenzionalni klasteri). Nakon toga se neki dvodimenzionalni klasteri iz različitih slojeva detektora grupiraju i zajedno čine trodimenzionalne klastere. Svaki se trodimenzionalni klaster tako sastoji od jednog ili više dvodimenzionalnih klastera koji se sastoji od jedne ili više ćelija. Svaki trodimenzionalni klaster u sebi ima deponiranu određenu energiju i transverzalnu količinu gibanja. O klasteringu će više biti napisano u sljedećem poglavlju.

Signalom smatramo trodimenzionalne klastere koji dolaze iz Zee uzorka, a čija je transverzalna količina gibanja, koju definiramo kao komponentu količine gibanja čestice okomitu na smijer brzine čestice, veća od neke vrijednosti, koji se nalaze u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$ i za koje je $dR = \sqrt{d\eta^2 + d\phi^2} < 0.05$, pri čemu su $d\eta$ i $d\phi$ udaljenosti trodimenzionalnih klastera od osi elektromagnetskog pljuska.

Pozadinom smatramo trodimenzionalne klastere koji dolaze iz Zee ili QCD uzoraka, a čija je transverzalna količina gibanja veća od neke vrijednosti, koji se nalaze u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$ i za koje je $dR = \sqrt{d\eta^2 + d\phi^2} > 0.05$. Razlikovat ćemo pozadinu (eng. background) i QCD pozadinu (eng. QCD background) ovisno o tome radi li se o Zee ili QCD uzorku.

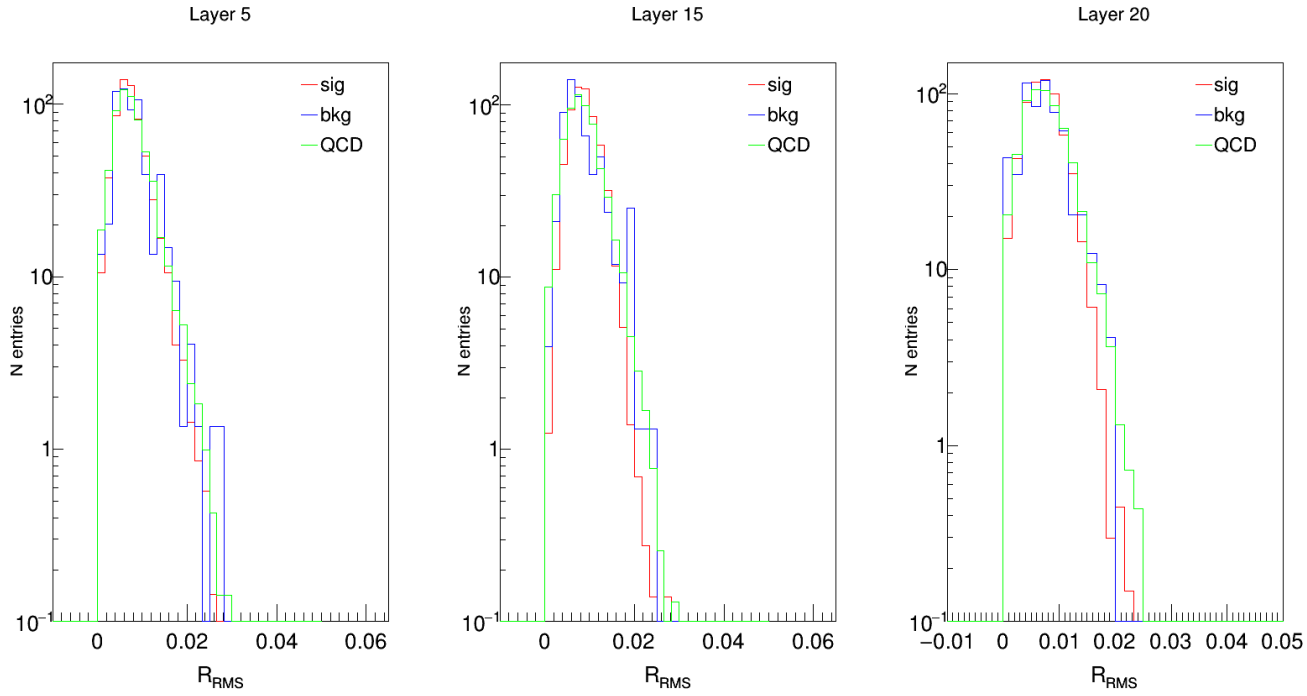
U stvarnosti situacija nije ni toliko jednostavna da imamo jedan proton-proton sudar koji producira cijeli niz čestica. Na LHC-u protoni ne kruže pojedinačno, već u gomilama koje sadrže po 100 milijardi protona.[21] Takve dvije gomile (eng. bunch) koje kruže u suprotnim smjerovima sudare se u točkama (eng. bunch crossing) gdje su postavljeni detektori. U svakom takvom sudaru sudjeluje veći broj protona. Broj sudara protona u jednom sudaru gomila naziva se naslaga (eng. pile up, PU). Očekuje se da će prosječan PU na HGCAL-u biti 200. To znači da će se prilikom savakog sudara gomila u prosjeku dogoditi 200 proton-proton sudara od kojih nastaje mnoštvo čestica koje ostavljaju trag u detektoru.

Zato su rađene simulacije u kojima je PU = 0 i PU = 200. Pošto je drugi slučaj realniji, bit će

prikazani rezutltati simulacija za PU = 200. Rezultati za PU = 0 prikazani su u dodatku A. Ukupan broj događaja u svakom od uzoraka iznosi 10000.

4.2 Rezultati simulacija

U ovom dijelu rada bit će prikazani rezultati simulacija u kojima je postavljen uvjet da je transverzalna količina gibanja svakog trodimenzionalnog klastera minimalno 12 GeV te da se svaki trodimenzionalni klaster nalazi u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$. Kao i kod FastShower alata prikazani su rezultati za 5, 15. i 20. sloj detektora (slika *4.2.1*).



Slika 4.2.1: Vrijednost R_{RMS} za 5, 15. i 20. sloj detektora. Crvena krivulja odgovara signalu, plava pozadini,a crvena QCD pozadini.

Usporedimo li sliku *4.2.1* sa slikom *3.2.1* vidimo kako smo dobili jako slične rezultate. Simulacija u CMSSW također daje reultate u suglasnosti sa slikom *2.1.3*. Manje razlike postoje zbog činjenice što smo FastShower alatom simulirali jedan elektron koju upada uvijek na isto mjesto ćelije.

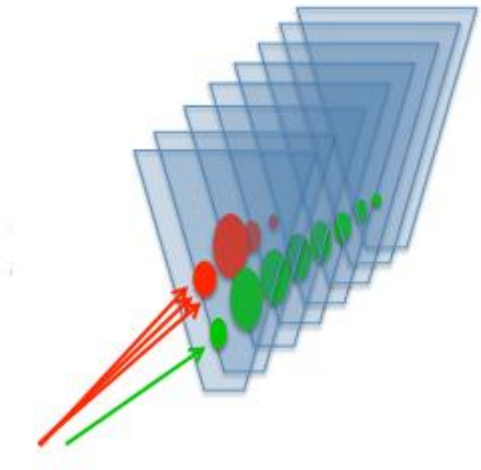
5 Klastering

Kako je navedeno u prethodnom poglavlju, nakon HGCAL nadogradnje planirano je prosječno 200 proton-proton sudara po svakom sudaru gomila protona. Svakih 25 ns dogodit će se 200 novih proton-proton sudara. Svaki od proton-proton sudara producira niz čestica koje se detektiraju u elektromagnetskom kalorimetru. Neke od njih su indikacija fizikalnih procesa s kojima smo već upoznati ili ih u datom trenutku ne mjerimo. Svi ti događaji skupljeni su pod zajedničkim nazivom pozadina. Čak i za PU = 0 odvajanje signala od pozadine nije jednostavan zadatak, dok će za stvarne situacije s očekivanim PU = 200 to biti znatno teže. Kada bi se sve što se događa u detektoru moglo snimiti i poslati na obradu, tada bi dobivena statistika bila bolja. Međutim, frekvencija događaja na LHC-u iznosi 40 MHz. Stoga je količina podataka toliko velika da nije moguće sve podatke snimati i slati na analizu, pogotovo ako se uzme u obzir to da je većina tih podataka upravo pozadina koju svakako želimo odvojiti od signala. Zato je potrebno razviti sustav koji će biti u stanju sakupiti sve potrebne informacije iz detektora i od njih odabrati one koje nas zanimaju, a druge odbaciti. Taj sustav na LHC-u postoji i naziva se okidač (eng. trigger). Okidač se sastoji od 2 dijela: okidača prve razine (eng. Level 1 trigger) i okidača više razine (eng. higher level trigger). L1 okidač je potpuno automatiziran i u svakoj sekundi od milijardu događaja „propusti“ njih približno 100000 na osnovu jednostavnih indikacija zanimljive fizike kao što su energija čestice i sl. Nakon ovog procesa okidači viših razina (eng. high level trigger) od preostalih događaja na temelju kompleksnijih algoritama biraju one koji bi mogli predstavljati indikacije zanimljive fizike.[22]

Dio okidača više razine podrazumijeva rekonstrukciju i identifikaciju čestica. Da bi ovo bilo što efikasnije ćelije pojedinog sloja bit će grupirane u dvodimenzionalne klastere (2DC). Trenutno postoje dva algoritma koja ovo rade. Prvi, algoritam najbližih susjeda (eng. Nearest Neighbors algorithm) koristi ćeliju u kojoj je deponirana energija $E > 5\ MIP$ kao centar. Zajedno sa svim susjednim ćelijama u kojima je deponirana energija $E > 2\ MIP$ ona čini jedan 2D klaster. Drugi, geometrijski algoritam (eng. geometrical algorithm) koristi ćeliju u kojoj je deponirana energija $E > 5\ MIP$ kao centar. Nakon što je ta ćelija odabrana, traže se sve ćelije koje su od odabrane ćelije udaljene manje od $3\ cm$ i u kojima je deponirana energija $E = 2\ MIP$. Sve odabrane ćelije također čine jedan 2D klaster.

Treba napomenuti kako u svakom sloju detektora može postojati više 2D klastera. MIP (eng. minimum ionizing particle) je nabijena čestica koju karakterizira minimalan gubitak energije ionizacijom pri prolasku kroz materiju. Nabijena čestica se smatra Mip kada joj je kinetička energija barem dvaput veća od energije mirovanja. Elektron se, primjerice, smatra

Mip kada mu je kinetička energija veća od približno 1 MeV.
Nakon što su u svakom sloju definirani 2D klasteri formiraju se 3D klasteri na način da se kroz sve slojeve detektora grupiraju svi 2D klasteri koji se nalaze u konusu $dR < 0.01$. Shematski prikaz slaganja ćelija u dvodimenzionalne i trodimenzionalne klastere dan je na slici *5.1*.



Slika 5.1: Formiranje 2D i 3D klastera na HGCAL-u

U ovom radu smo proučavali efikasnost klasteringa na HGCAL-u i utjecaju istoga na različite varijable.

5.1 Postavke simulacija

Kao i ranije, rade se simulacije koristeći dva uzorka: Zee i QCD. Također, razmatrane su situacije u kojima je PU = 0 i PU = 200. Pošto je slučaj PU = 200 očekivan u HGCAL-u, bit će prikazani samo rezultati kada je PU = 200. Rezultati za PU = 0 prikazani su u dodatku A.

U simulacijama signalom smatramo trodimenzionalne klastere koji dolaze iz Zee uzorka, a čija je transverzalna količina gibanja veća od neke vrijednosti, koji se nalaze u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$ i za koje je $dR = \sqrt{d\eta^2 + d\phi^2} < 0.05$.
Pozadinom smatramo trodimenzionalne klastere koji dolaze iz Zee ili QCD uzoraka, a čija je transverzalna količina gibanja veća od neke vrijednosti, koji se nalaze u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$ i za koje je $dR = \sqrt{d\eta^2 + d\phi^2} > 0.05$. Kao i ranije, razlikovat ćemo pozadinu (eng. background) i QCD pozadinu (eng. QCD background) ovisno o tome radi li se o Zee ili QCD uzorku.

Proučavamo utjecaj minimalne dozvoljene vrijednosti transverzalne količine gibanja 3D klastera na izvedbu klasteringa i utjecaj na različite varijable. Zato razmatramo slučajeve u kojima nema donje granice na transverzalnu količinu gibanja 3D klastera te u kojima je postavljena donja granica na 12 GeV i 20 GeV. Kao i ranije, postavljen je uvjet i da se svaki trodimenzionalni klaster nalazi u području pseudorapiditeta $1.7 < |\eta| < 2.7$.

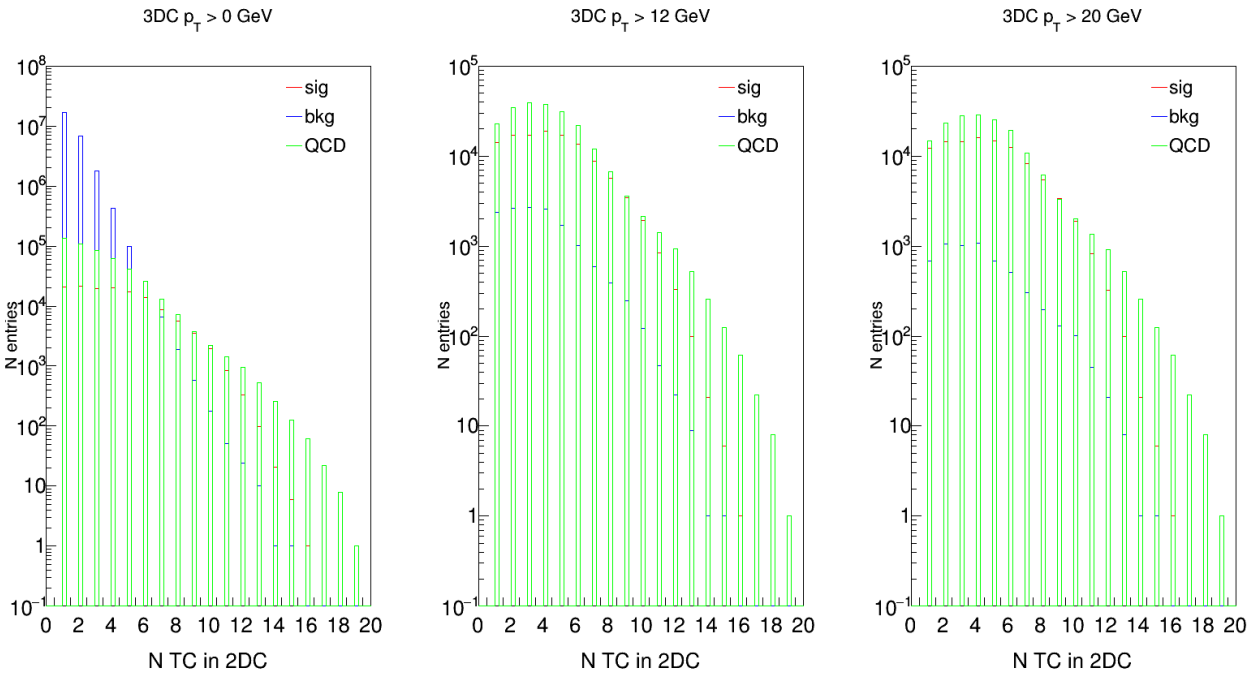
5.2 Rezultati simulacija

Prvo je prikazana distribucija broja ćelija unutar 2D klastera (slika *5.2.1*). Nakon toga su prikazani broj 3D klastera po događaju (slika *5.2.2*) i distribucija broja 2D klastera unutar pojedinog 3D klastera (slika *5.2.3*). Na kraju je prikazana varijabla σ_{zz} (slika *5.2.4*) koja opisuje longitudinalni razvoj pljuska, a definirana je kao

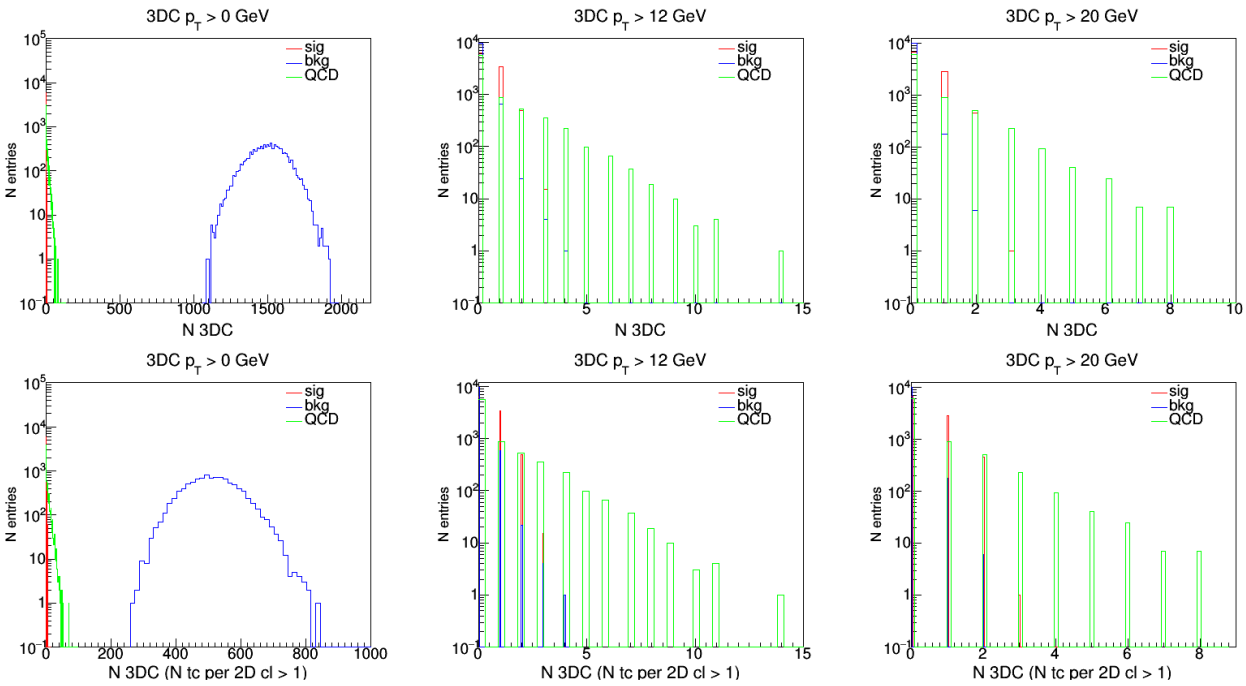
$$\sigma_{zz} = \sqrt{\frac{\sum_i^{3DC} E_i (z_i - <z>)^2}{\sum_i^{3DC} E_i}},$$

pri čemu je

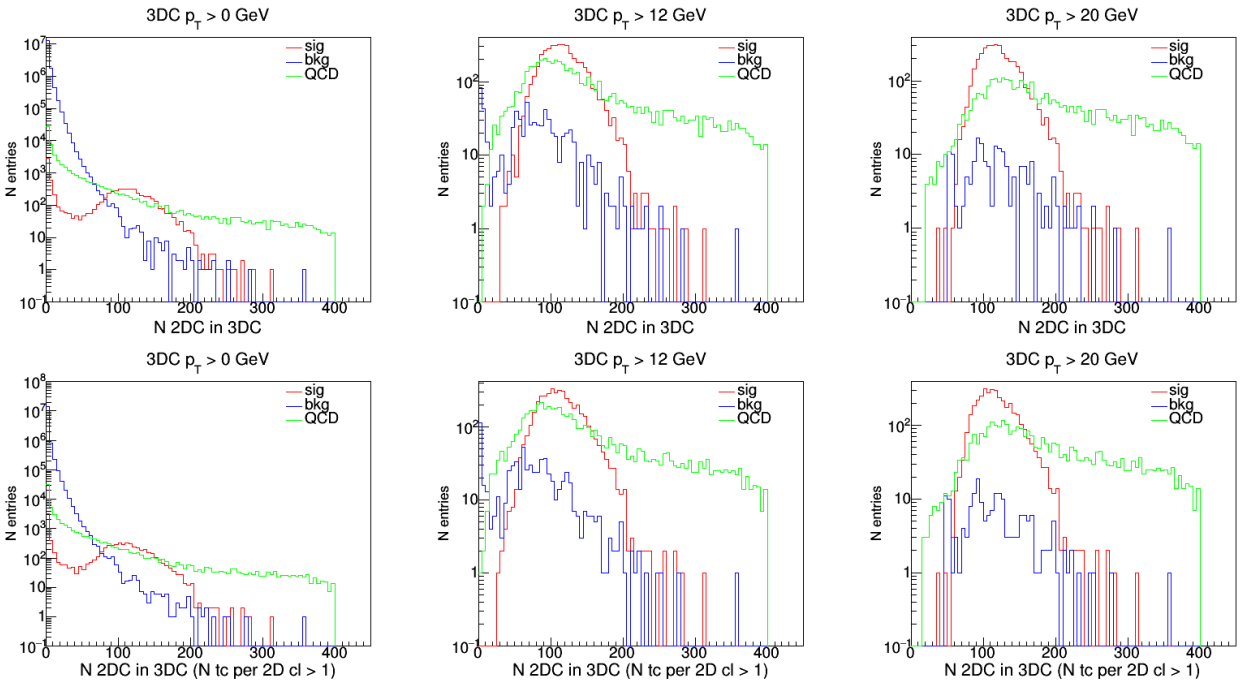
$$<z> = \frac{\sum_i^{3DC} E_i z_i}{\sum_i^{3DC} E_i}.$$



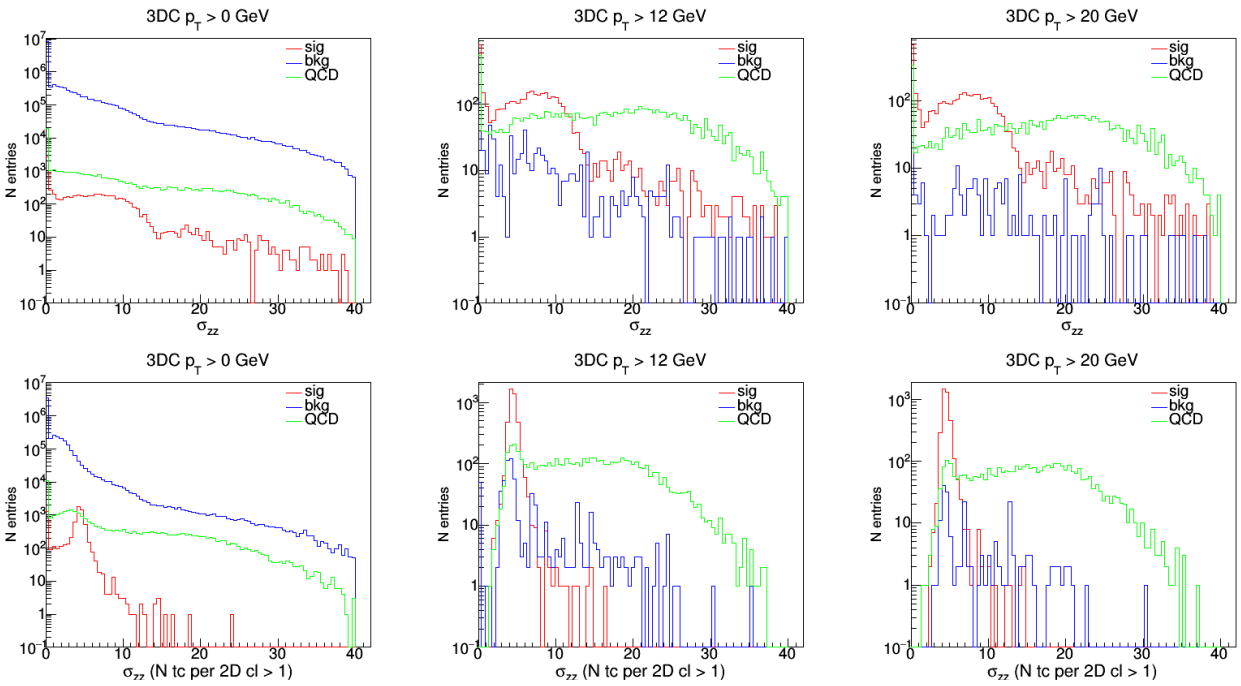
Slika 5.2.1: Raspodjela broja ćelija u 2DC za različita ograničanja na transverzalnu količinu gibanja 3D klastera.



Slika 5.2.2: Broj 3D klastera u pojedinim događajima. Crvena krivulja označava signal, plava pozadinu, a zelena QCD pozadinu. Gornji grafovi dobiveni su u slučajevima kada su u analizu uzeti svi 3D klasteri, dok su kod donjih grafova u analizu uzeti samo oni 3D klasteri koji sadrže barem 1 2D klaster koji se sastoji barem od 2 ćelije (barem 1 netrivijalni 2D klaster).



Slika 5.2.3: Broj 2D klastera u pojedinim 3D kalsterima. U gornjim grafovima su u obzir svi 2D klasteri, dok su u donjim grafovima u obzir uzeti samo netrivijalni 2D klasteri.



Slika 5.2.4 Varijabla σ_{zz} koja opisuje longitudinalni razvoj pljuska. U gornjim grafovima su u obzir svi 2D klasteri, dok su u donjim grafovima u obzir uzeti samo netrivijalni 2D klasteri.

Vidljivo je iz slike *5.2.1* kako postoji velik broj dvodimenzionalnih klastera koji se sastoje od samo jedne ćelije. Pošto je vjerojatnost da elektromagnetski pljusak okupira samo jednu ćeliju mala, u sljedećim grafovima je prikazan i slučaj u kojem su takvi dvodimenzionalni kalsteri zanemareni. Slika *5.2.2*. pokazuje da je taj utjecaj na broj dvodimenzionalnih klastera značajan. Na slici *5.2.3* vidimo kako je utjecaj ovog ograničenja posebno vidljiv za pozadinu (plavi graf) i to za slučaj bez reza na transverzalnu količinu gibanja. Zanimljiv rezutlat ovog ograničenja vidi se na slici *5.2.4*. U ovoj situaciji dolazi do rekalkulacije σ_{zz} zbog čega se signal značajno odvoji od pozadine.

6 Diskusija rezultata

Proučimo li slike *3.2.3* i *3.2.4* vidimo kako standardna devijacija od R_{RMS} raste od sloja 5 prema sloju 20, odnosno kako idemo dublje u kalorimetar. Vidimo na slici *2.1.3* da se takvo ponašanje i očekuje zato što se elektromagnetski pljusak širi od trenutka kada je nastao deponirajući sve manje fragmente energije u sve većem broju detektorskih ćelija.

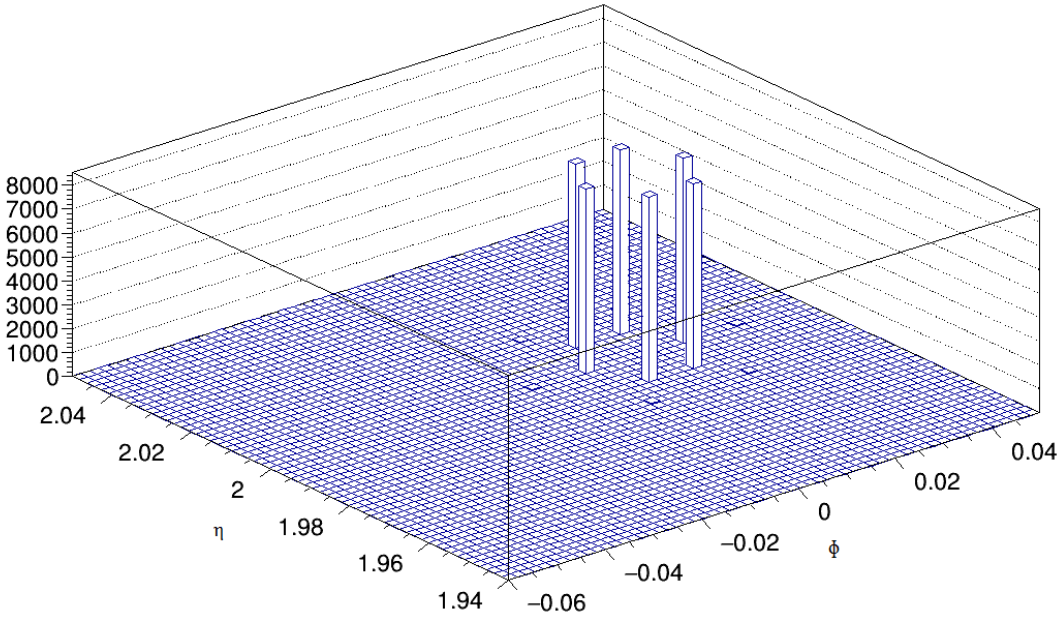
Usporedimo li zasebne slojeve na slikama *3.2.3* i *3.2.4* vidimo kako su fluktuacije u srednjoj vrijednosti R_{RMS} dosta manje u slučaju skaliranja veličina logaritmom energije ćelije. Ovo je očekivano iz matematičke perspektive. Logaritamska skala dosta podigne repove distribucije koji inače imaju mali doprinos. Zbog toga cijela krivulja izgleda manje strmo.

U petom sloju detektora elektromagnetski pljusak nije u potpunosti razvijen. Osim toga granularnost kalorimetra je konačna. Ovo se dosta očituje u rezultatima za 5. sloj detektora, posebice za trokutastu geometriju i to za slučaj kada upadna čestica pogađa u vrh ćelije. Ovo je označeno na slici *3.2.3.* Usporedimo li kako se srednja vrijednost R_{RMS} mijenja od sloja 5 prema sloju 15 u slučaju kada upadna čestica pogađa središte ili rub ćelije i onda kada upadna čestica pogađa vrh ćelije vidimo kako je promjena skokovitija u slučaju kada upadna čestica pogađa u vrh ćelije. Ovo nije toliko naglašeno između slojeva 15 i 20 a razlog je taj što se do 15. sloja detektora elektromagnetski pljusak već dovoljno razvio. Ovo se bolje vidi na slikama *6.1 – 6.3.*.

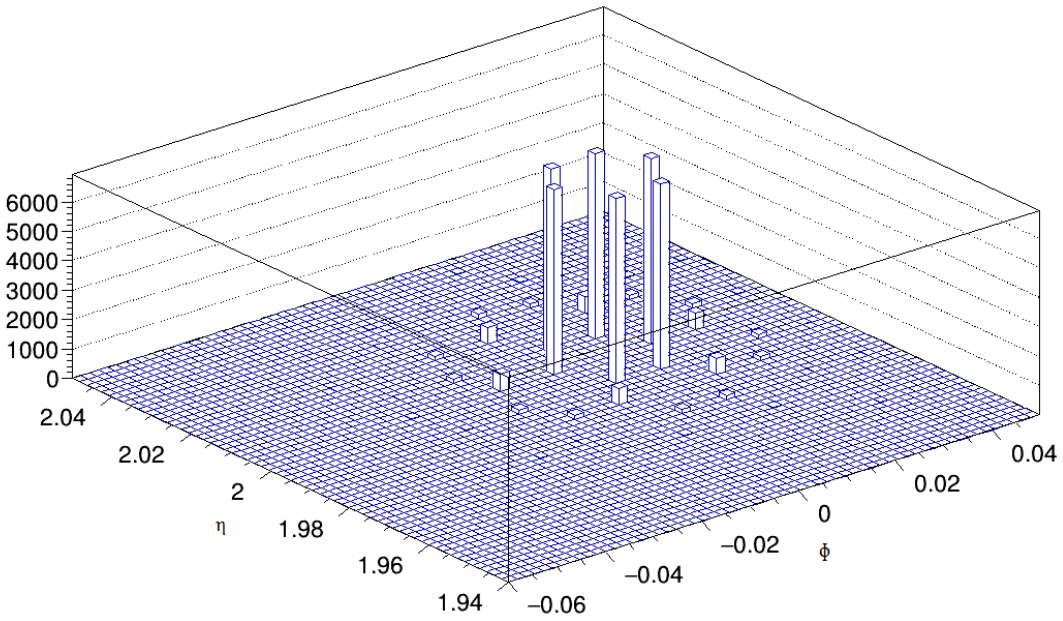
Vidimo na slici *6.1* kako samo ćelije u prvoj koroni imaju značajniju depoziciju energije. Zato je vrijednost R_{RMS} mala. Već u 15, sloju detektora značajniju ulogu imaju i ćelije u drugoj koroni, dok nešto deponirane energije pokazuju već i ćelije u trećoj i četvrtoj koroni što pokazuje slika *6.2.* Kako se elektromagnetski pljusak dalje razvija prema 20. sloju detektora povećava se uloga ćelija u trećoj koroni što je prikazano na slici 6.*3,* ali situacija nije toliko izražena kao što je to slučaj pri prijelazu iz 5. u 15. sloj detektora. Zato na slici *3.2.3* vidimo manji skok u srednjoj vrijednosti R_{RMS} pri prijelazu iz 15. u 20. sloj detektora nego što je slučaj pri prijelazu iz 5. u 15. sloj.

Zaključujemo kako je trokutasta geometrija detektorskih ćelija osjetljivija na lokaciju sudara ulazne čestice i detektorske ćelije, posebice za površinske slojeve detektorima kada elektromagnetski pljusak nije dovoljno razvijen.

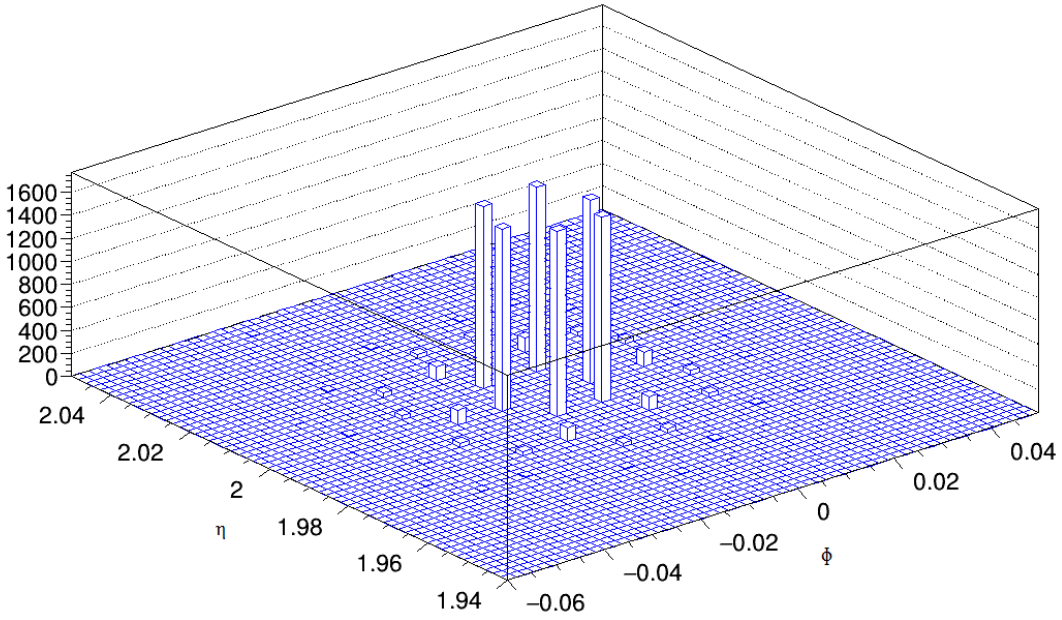
Naknadno je odlučeno kako će upravo heksagonska geometrija detektorskih ćelija biti ugrađena u HGCAL.



Slika 6.1: Depozicija energije u pojedinim ćelijama 5. sloja detektora za velike trokutaste ćelije. Upadna čestica udara u vrh ćelije.



Slika 6.2: Depozicija energije u pojedinim ćelijama 15. sloja detektora za velike trokutaste ćelije. Upadna čestica udara u vrh ćelije.



Slika 6.3: Depozicija energije u pojedinim ćelijama 20. sloja detektora za velike trokutaste ćelije. Upadna čestica udara u vrh ćelije.

Cilj drugog dijela rada je procjena uspješnosti predviđanja razvoja elektromagnetskog pljuska FastShower alatom i proučavanje klasteringa na HGCAL-u koristeći CMSSW. Razlog za formiranje 2D, odnosno 3D klastera je omogućavanje boljeg rada okidača u svrhu što efikasnije identifikacije i rekonstrukcije zanimljivih uz što veće odbacivanje nezanimljivih događaja. Usporedimo li sliku *4.2.1* sa slikom *3.2.1* možemo vidjeti kako su rezultati za 15. sloj detektora dobiveni FastShower alatom dosta slični rezultatima dobivenim korištenjem CMSSW. Manje razlike postoje iz razloga što je u FastShower alatu promatran izolirani elektron koji upada uvijek na isto mjesto, dok u kasnijim simulacijama dobivenim sa CMSSW čestice udaraju u proizvoljne djelove ćelije. Zato su grafovi *4.2.1* kombinacija grafova dobivenih za tri različita upadna položaja elektrona na grafu *3.2.2*. Usporedimo li trend vrijednosti R_{RMS} prikazan na slici *4.2.1* i *3.2.3* vidimo kako u oba slučaja ta vrijednost raste kako idemo od 5. sloja prema 15. sloju nakon čega opada.

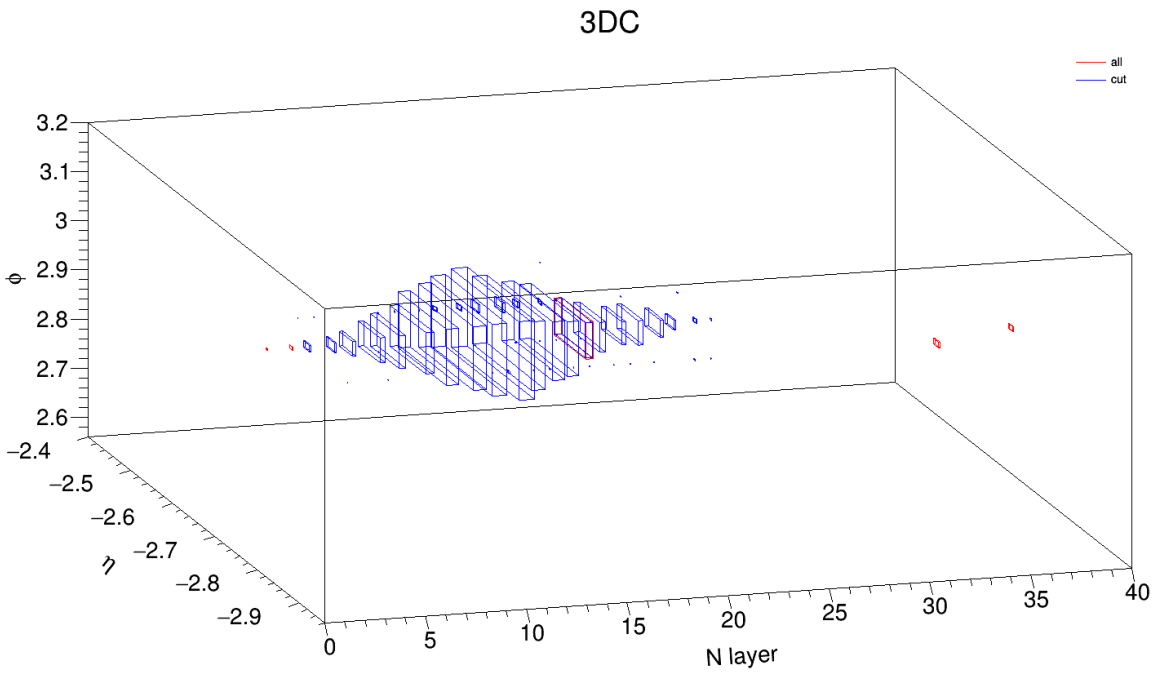
Iz lijevog grafa na slici *5.2.1* vidimo kako postoji velik broj trivijalnih 2D klastera, odnosno 2D klastera koji sadrže samo jednu ćeliju. Vjerojatnost da elektromagnetski pljusak okupira samo jednu ćeliju po sloju je jako mala. To znači da veliki broj 2D klastera dolazi od događaja koji nisu od interesa i koje želimo eliminirati. Vremenski je najskuplje upravo formiranje 2D klastera, a pošto je vrijeme između sudara dvije gomile protona tijekom rada LHC-a jako malo,

bilo bi od velikog značaja kada bi se dio 2D klastera odmah na nivou okidača mogao odbaciti. Zato su rađene i simulacije u kojima je postavljen zahtjev da se u obzir uzimaju samo oni 2D klasteri koji se sastoje od minimalno 2 ćelije. Također, uzeti su u obzir samo oni 3D klasteri koji se sastoje od barem jednog 2D klastera koji ispunjava navedeni zahtjev.

Iz slike *5.2.2* vidimo kako se za slučaj u kojem nismo stavili donju granicu na transverzalnu količinu gibanja broj 3D klastere smanjio za faktor tri. Kada je postavljena donja granica na transverzalnu količinu gibanja iznad 12 GeV, ovaj uvjet više nije činio razlike u broju 3D klastera iz razloga što većina klastera ima jako mali p_T pa ih se navedenim uvjetom a priori velik broj eliminira. Ako pogledamo sliku *5.2.3* vidimo također kako je utjecaj zahtjeva za broj ćelija u 2D klasteru posebno izražen za pozadinu i to posebno značajno prije nego što je nametnut uvjet na transverzalnu količinu gibanja.

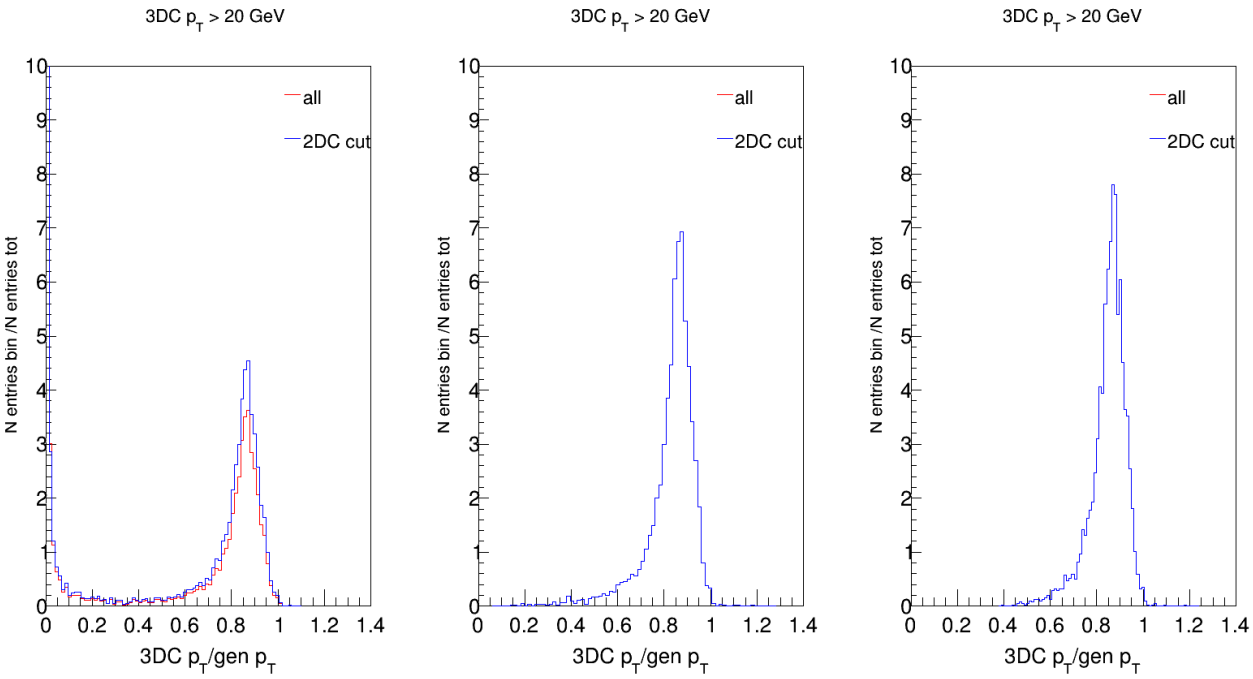
Na slici *5.2.4* prikazali smo varijablu σ_{zz} koja opisuje longitudinalni razvoj elektromagnetskog pljuska. Ona je bitna i zato što daje informacije koje mogu pomoći u identifikaciji elektrona. Na ovoj varijabli se posebno vidi koliko je značajno ograničenje broja ćelija u 2D klasteru. Može se vidjeti kako je uz ovo ograničenje došlo do rekalkulacije varijable σ_{zz}tako da se signal jasno izolirao od pozadine i QCD pozadine i to čak u slučaju kada nije nametnut uvjet na transverzalnu količinu gibanja i u uvjetima visokog PU-a. Iz ove varijable se da naslutiti kako možemo eliminirati velik broj 2D, a time i 3D klastera čime nećemo gubiti informaciju o događajima koji nas zanimaju, dok ćemo značajno odbaciti neželjenu pozadinu. Također, usporedimo li grafove dobivene prije i poslije nametnutog uvjeta, vidimo da se broj podataka koji ulaze u prvi stupac (eng. bin) histograma smanjio sa 2678 na 1288. Razlog je taj što je odstranjivanjem trivijalnih dvodimenzionalnih klastera odstranjen i određen broj trodimenzionalnih klastera koji imaju vrijednost $\sigma_{zz} = 0$. Kako bi rezultat ovakvog ograničenja bio jasniji, na slici *6.4* dan je trodimenzionalni prikaz jednog trodimenzionalnog klastera čija je vrijednost $\sigma_{zz} > 25$.

Crvenom bojom prikazane su ćelije trodimenzionalnog klastera prije postavljanja uvjeta na broj ćelija u dvodimenzionalnom klasteru, dok su plavom bojom prikazane ćelije trodimenzionalnog klastera uz uvjet da broj ćelija po dvodimenzionalnom klasteru bude veći od jedan. Volumen kutije proporcionalan je energiji deponiranoj u ćeliji što omogućava i bolji uvid u razvoj elektromagnetskog pljuska. Broj ćelija nakon nametnutog uvjeta smanjio se sa 132 na 127. Unatoč tomu što se broj ćelija u trodimenzionalnom klasteru smanjio samo za pet, utjecaj na σ_{zz} varijablu je značajan: sa vrijednosti $\sigma_{zz} = 32.7$, vrijednost σ_{zz} nakon ograničenja pala je na $\sigma_{zz} = 4.8$.



Slika 6.4: Prikaz jednog trodimenzionalnog klastera za slučaj PU = 200. Crvenom bojom su označene ćelije prije nametnutog uvjeta na broj ćelija unutar pojedinog dvodimenzionalnog klastera, dok su plavom označene ćelije nakon navedenog uvjeta. Plave ćelije su nacrtane preko crvenih, pa valja napomenuti i da plave ćelije također označavaju ćelije klastera prije nametnutog uvjeta. Broj ćelija nakon spomenutog uvjeta pao je sa 132 na 127.

Postavlja se pitanje utječe li ovakvo ograničenje na kvalitetu rekonstrukcije elektrona? Drugim riječima, gubi li se ovom restrikcijom velik broj 2D klastera koji pripadaju elektronima, a time i dobar dio energije elektrona? Da bi se dobio odgovor na to pitanje napravljen je graf koji prikazuje odnos transverzalne količine gibanja generiranih elektrona i transverzalne količine gibanja pripadajućih 3D klastera bez i uz uvjet da se ne razmatraju 3D klasteri koji ne sadrže barem jedan netrivijalni 2D klaster. Rezultati su prikazani na slici *6.5*. Vidimo kako u slučaju bez ograničenja postoji jako mala razlika u grafovima, dok nakon ograničenja na transverzalnu količinu gibanja te rezlike uopće nema. To znači da smo zanemarivanjem trivijalnih 2D klastera značajno odvojili signal od pozadine bez gubitka energije elektrona.



Slika 6.5: Odnos transverzalne količine gibanja generiranih elektrona i transverzalne količine gibanja 3D klastera uz uvjet da se ne razmatraju 3D klasteri koji ne sadrže barem jedan netrivijalni 2D klaster. Histogrami su normalizirani površinom.

Sljedeći korak u istraživanju bit će detaljnija analiza svih dobivenih rezultata koja bi trebala baciti jasnije svjetlo na utjecaje klasteringa na razne varijable selekcije kao i utjecaj zanemarivanja trivijalnih 2D klastera na signal i pozadinu. Također, veći naglasak u istraživanju bit će stavljen i na varijble koje će pomoći u budućoj, preciznijoj, identifikaciji elektrona i ostalih čestica na HGCAL-u.

7 Zaključak

Do 2025. godine u planu je nadograditi LHC sudarač i detektore na njemu tako da se integrirani luminozitet poveća s očekivanih 300 fb^{-1} do kraja 2023. godine na 3000 fb^{-1}. Ovim će se povećati broj podataka koje će trebati analizirati. Važnu ulogu u nadograđenom HL-LHC (eng. high luminosity LHC) imat će kalorimetri koji su ključni za detekciju i rekonstrukciju energije elektrona i fotona. Veći integrirani luminozitet znači i da će broj sudara protona po sudaru gomila protona (eng. pilue up, PU) biti veći. Zbog većeg PU-a rekonstrukcija elektrona i fotona bit će još zahtjevnija. Također, HGCAL (eng. high granularity calorimeter), kao dio CMS detektora, će biti prvi operativni kalorimetar u kojem će se kao aktivni medij koristiti silicij. Slijedom navedenog, nužno je imati podroban uvid u različite aspekte očekivanog ponašanja kalorimetra. Da bi identifikacija i rekonstrukcija čestica na HGCAL-u bila moguća potrebno je najprije napraviti detaljne simulacije koje će dati uvid u ponašanje fizikalnog sustava u zadanim uvjetima.

U prvom dijelu rada korišten je FastShower alat za dobivanje jednostavnog uvida u očekivano ponašanje elektromagnetskog pljuska u budućem detektoru. Dobiveni rezultati su kasnije potvrđeni korištenjem kompleksnih simulacija prolaska čestica kroz detektor i samog detektora. Time je osigurana pouzdanost budućeg korištenja FastShower alata za dobivanje brzih uvida u razne parametre pljuska i identifikacije elektrona i fotona.

Za dublji uvid u razvoj elektromagnetskog pljuska nužne su detaljne simulacije međusobne interakcije čestica kao i interakcije čestica s materijom.

U drugom dijelu rada analizirani su učinci algoritma za grupiranje ćelija kalorimetra (klastering), koji bi trebao omogućiti efikasniju identifikaciju čestica te odvajanje signala od pozadine, kako na razini okidača tako i u naknadnoj analizi. Da bi se postigla što bolja izvedba identifikacije elektrona i odvajanje signala od pozadine, korišten je uvjet na broj ćelija u pojedinom 2D klasteru. Iako su rezultati obećavajući, potrebna je još detaljnija provjera rezultata, kao i detaljnije proučavanje utjecaja selekcije na efikasnost rekonstrukcije energije i identifikaciju elektrona u HGCAL-u.

8 Popis literature

[1] Wikipedia, s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/CERN, 27.3.2017

[2] Antunović, Ž.: „Standardni model; Fizika elemntarnih čestica“, s Interneta, http://mapmf.pmfst.unist.hr/~zeljko, 27.3.2017

[3] CERN, s Interneta, http://home.cern/about/accelerators, 27.3.2017

[4] L. Evans, P. Bryant, „LHC Machine“, JINST 3 (2008) S08001

[5] CERN, s Interneta, https://home.cern/about/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets, 27.3.2017

[6] Wikipedia, s Interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity_(scattering_theory), 27.3.2017

[7] Bordry, F.: „Status of LHC machine and plans“, LHCC, 22.2.2017

[8] CERN, s Interneta, http://home.cern/topics/high-luminosity-lhc, 27.3.2017

[9] CERN, s Interneta, http://hilumilhc.web.cern.ch, 27.3.2017

[10] The CMS Collaboration, „Observation of a new boson at a mass of a 125 GeV with the CMS experiment at LHC, Phys. Lett. B 716 (2012) 30

[11] CMS Collaboration, „The Hadron Calorimeter Tehnical Design Report“, CERN/LHCC 97-010 (1997)

[12] CMS Collaboration, „The Muon Project Tehnical Design Report“, CERN/LHCC 97-32 (1997)

[13] Christian, W. F.: „Calorimetry in high-energy physics“

[14] CERN, s Interneta, http://cms.web.cern.ch/news/electromagnetic-calorimeter, 27.3.2017

[15] CERN, s Interneta, http://cms.web.cern.ch/news/crystal-calorimeter, 27.3.2017

[16] CERN, s Interneta, http://cms.web.cern.ch/news/crystal-story, 27.3.2017

[17] CMS Collaboration, „The Electromagnetic Calorimeter Tehnical Design Report“, CERN/LHCC 97-033 (1997)

[18] Butler, J; Contardo, D. i dr.: „Technical proposal for Phase-II upgrade of the Compact Muon Solenoid“, CERN-LHCC-2015-010 / LHCC-P-008, 18.9.2015

[19] GEANT4 Collaboration, S Agostinelli et al., „GEANT4: A simulation toolkit“, Nucl. Instrum. and Methods A506 (2003) 250-303

[20] Jakobs, K., s Interneta, https://portal.uni-freiburg.de/jakobs/dateien/vorlesungsdateien/particledetectors/kap8, 27.3.2017

[21] CERN, s Interneta, https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/collisions.htm, 22.5.2017

[22] M. Husejko et al., „Redout System for CMS RPC Muon Trigger“, Proceedings of SPIE 5775 (2005) 121-130

9 Sažetak

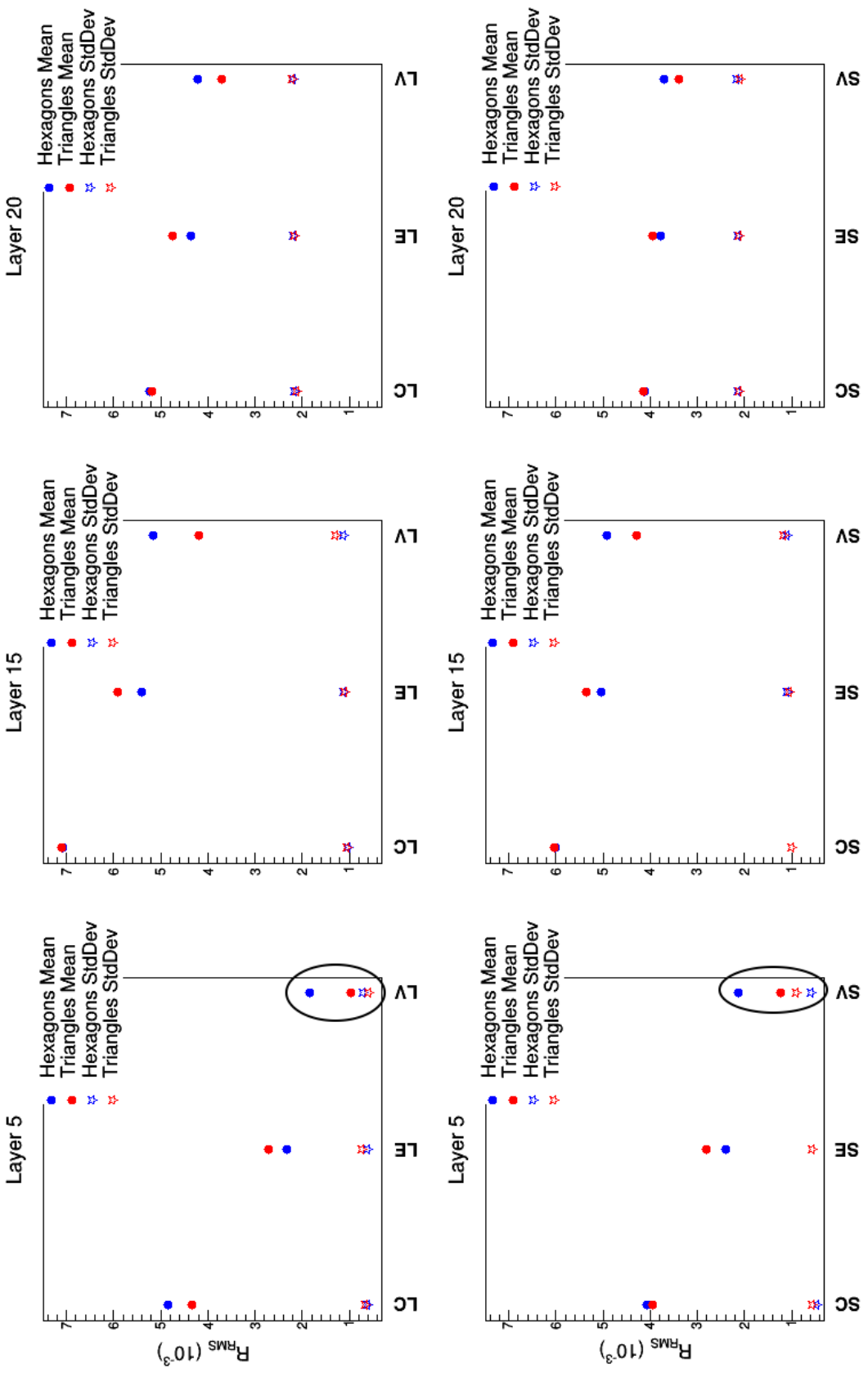
Do 2025. godine u planu je nadograditi LHC sudarač i detektore na njemu tako da se integrirani luminozitet poveća s očekivanih 300 fb^{-1} do kraja 2023. godine na 3000 fb^{-1}. Kako bi se uspješno suočili s povećanim brojem podataka, na Compact Muon Solenoid (eng. CMS) detektoru bit će ugrađen kalorimetar visoke granularnosti, HGCAL. Prije same instalacije novog kalorimetra potrebno je napraviti simulacije koje će pomoći u identifikaciji elektrona na detektoru. U prvom dijelu rada korišten je FastShower alat za dobivanje jednostavnog uvida u očekivano ponašanje elektromagnetskog pljuska u budućem detektoru. U drugom dijelu rada analizirani su učinci algoritma za grupiranje ćelija kalorimetra (klastering), koji bi trebao omogućiti efikasniju identifikaciju čestica te odvajanje signala od pozadine, kako na razini okidača tako i u naknadnoj analizi. Da bi se postigla što bolja izvedba identifikacije elektrona i odvajanje signala od pozadine, uključen je uvjet da svaki dvodimenzionalni klaster sadrži barem dvije ćelije.

10 Popis oznaka i kratica

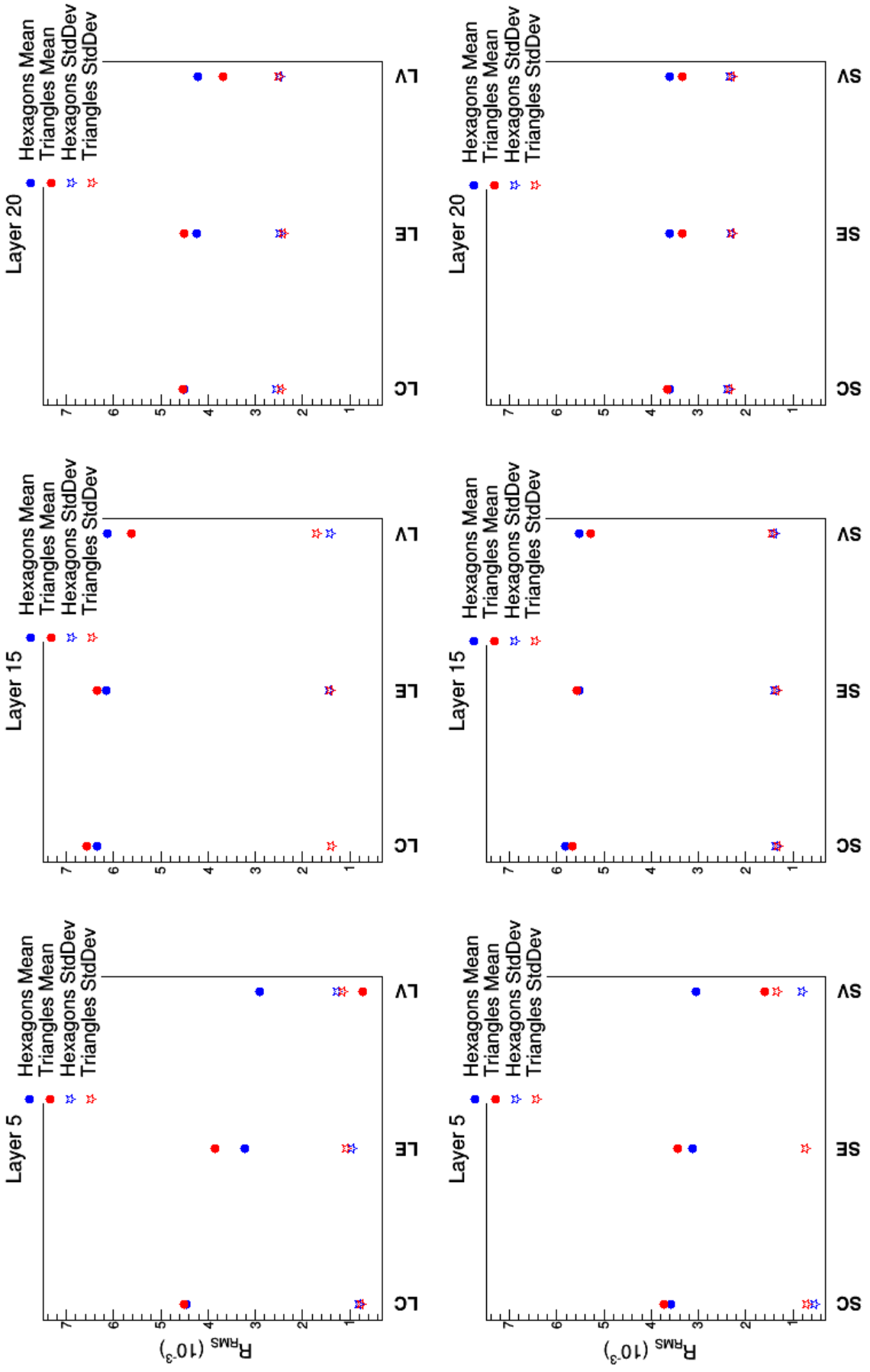
ALICE	eng. A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	eng. A Toroidal LHC AparatuS
CERN	franc. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	eng. Compact Muon Solenoid
CMSSW	eng. CMS software
EB	eng. Electromagnetic (calorimeter) Barrel
ECAL	eng. Electromagnetic Calorimeter
EE	eng. Electromagnetic (calorimeter) Endcap
EGS	eng. Electron Gamma Shower
EMC	eng. Electromagnetic Cascade
eng	engleski
franc	francuski
HB	eng. Hadron (calorimeter) Barrel
HCAL	eng. Hadron Calorimeter
HE	eng. Hadron (calorimeter) Endcap
HF	eng. Hadron (calorimeter) Forward
HGCAL	eng. High Granularity Calorimeter
HL-LHC	eng. High Luminosity Large Hadron Collider
L	luminozitet
L1 trigger	eng. Level 1 trigger
L_{int}	integrirani luminozitet
LHC	eng. Large Hadron Collider
LHCb	eng. Large Hadron Collider beauty experiment
LHCf	eng. Large Hadron Collider forward experiment
LLR	franc. Le Laboratoire Leprince-Ringuet
LS	eng. Long Shutdown
MoEDAL	eng. Monopole and Exotics Detector
Mip	eng. Minimum ionizing particle
PCB	eng. Printed Circuit Board

PU	eng. Pile up
QCD	eng. Quantum cromodynamics
SPS	eng. Super Proton Synchrotron
TOTEM	TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement
X_0	Radijacijska duljina
ρ_M	Molièreov radijus

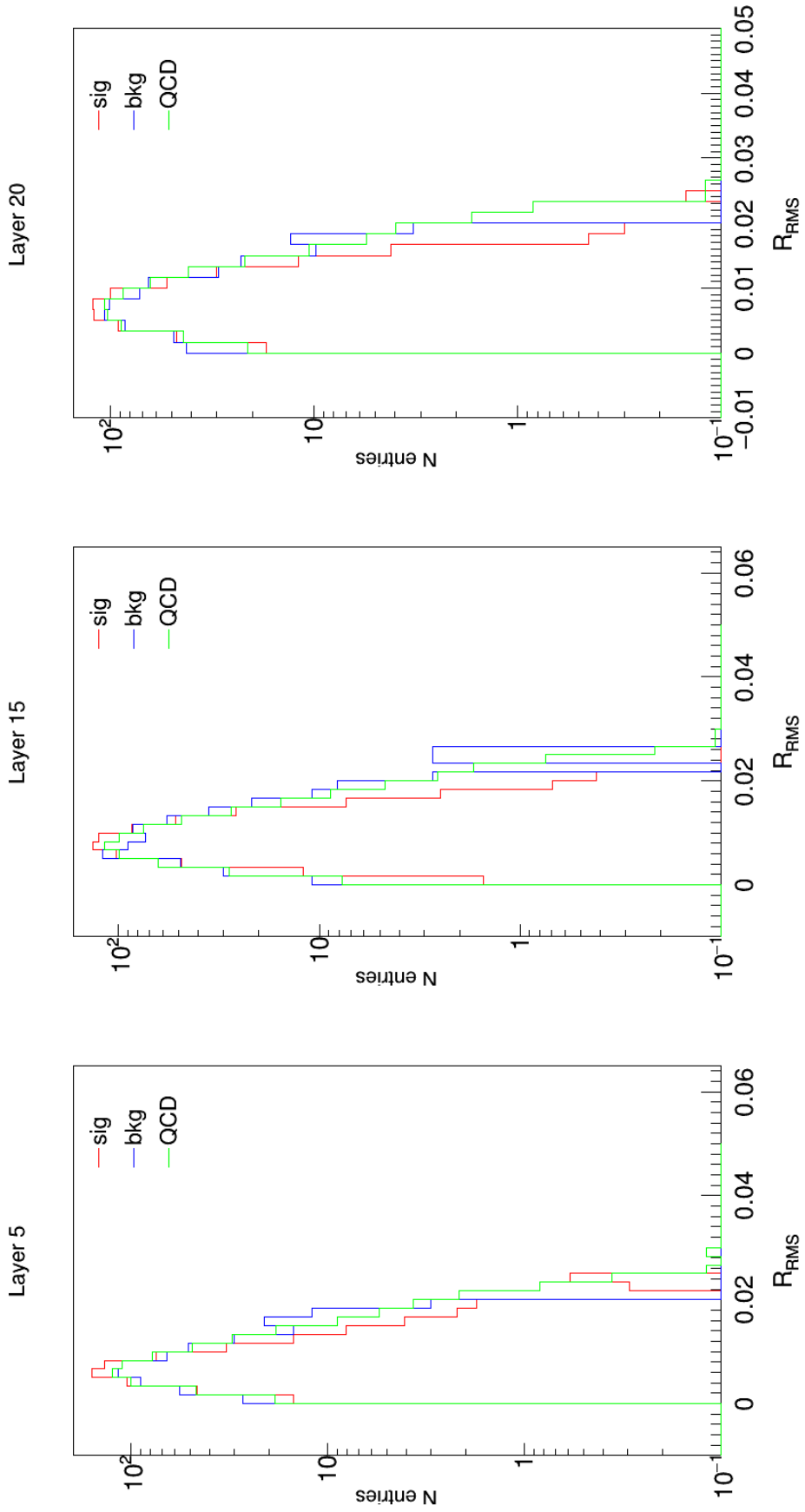
11 Privitak



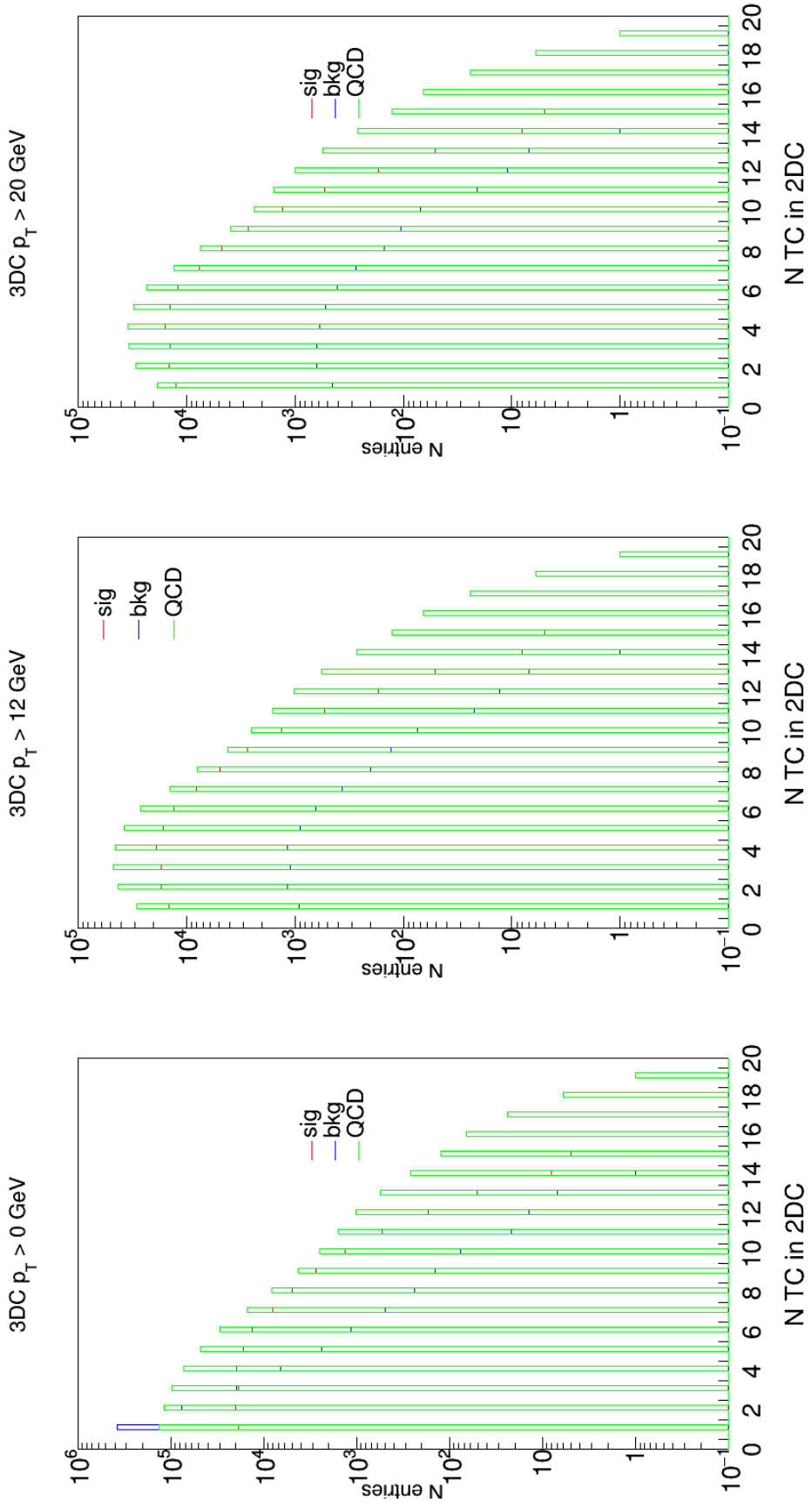
Slika 10.1: Uvećana slika 3.2.3



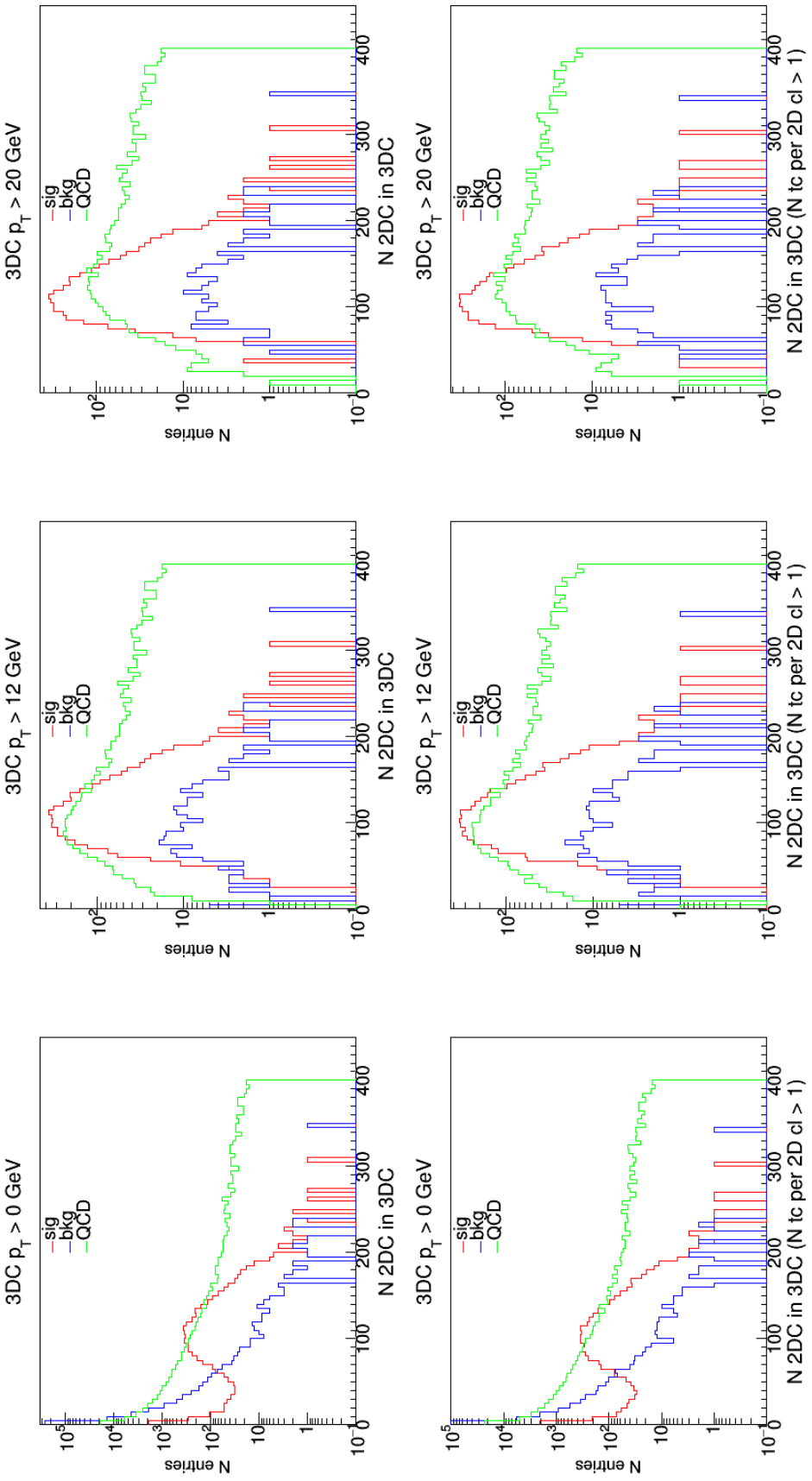
Slika 10.2: Uvećana slika 3.2.4



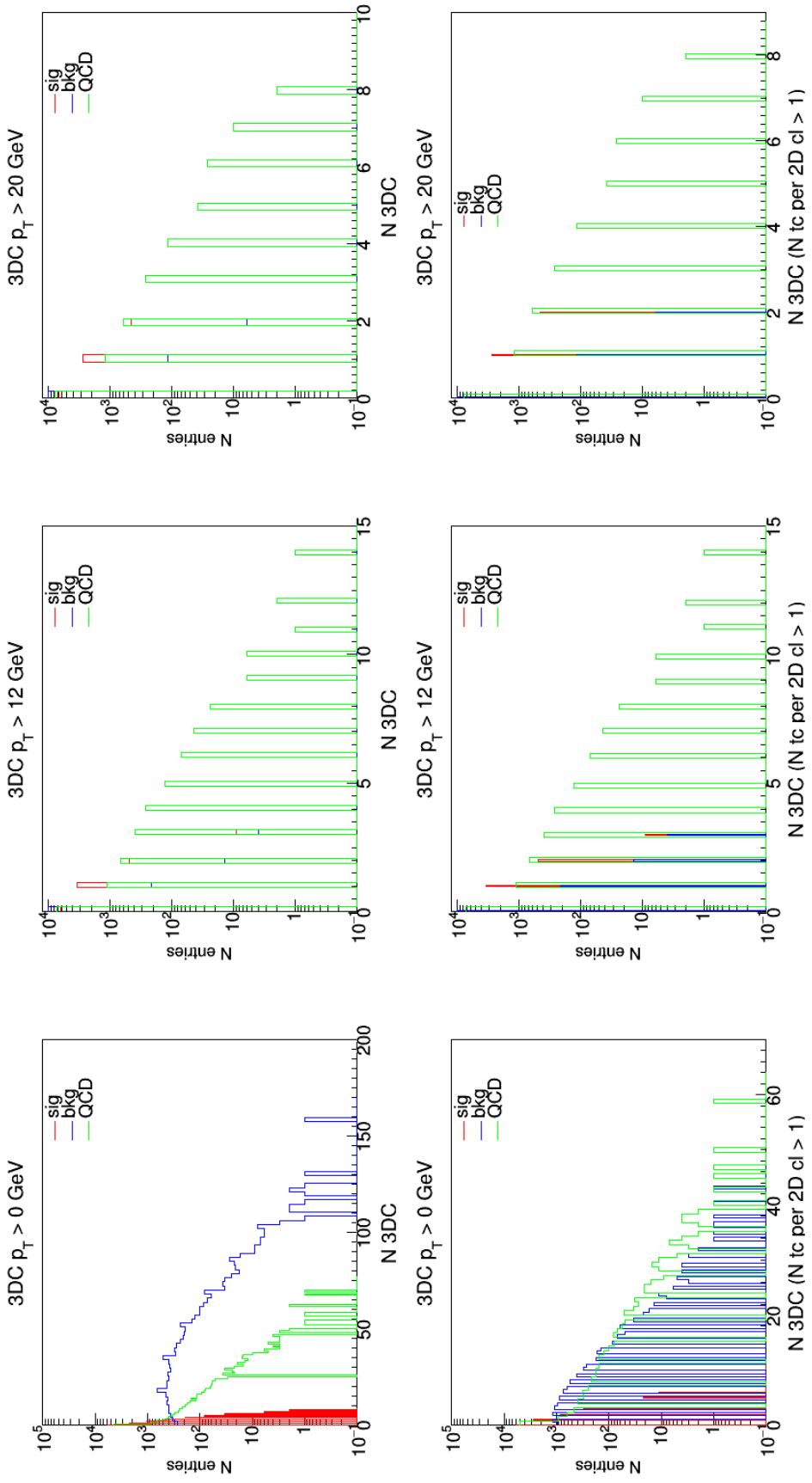
Slika 10.3: R_{RMS} PU = 0



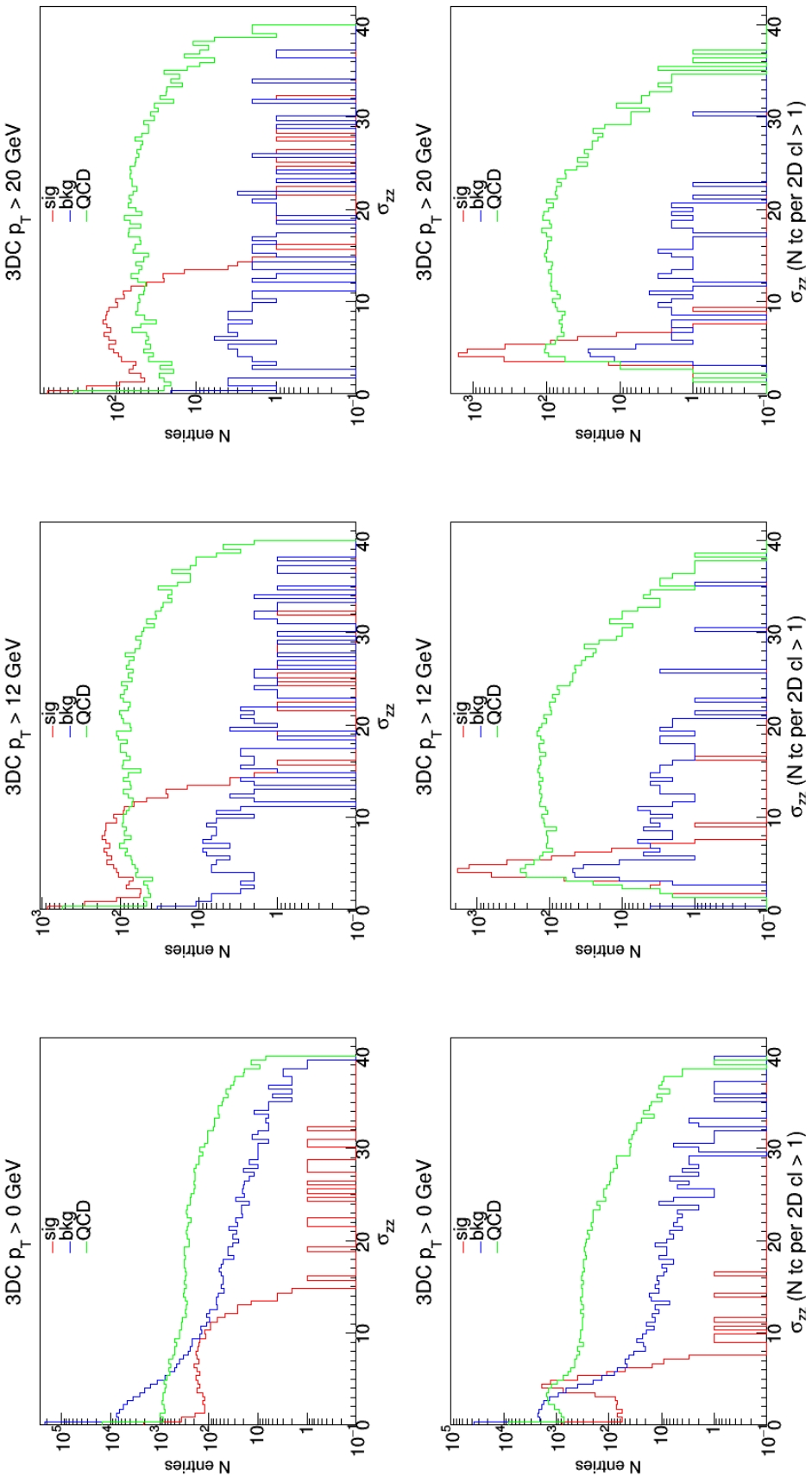
Slika 10.4: Broj ćelija po 2D klasteru za PU = 0



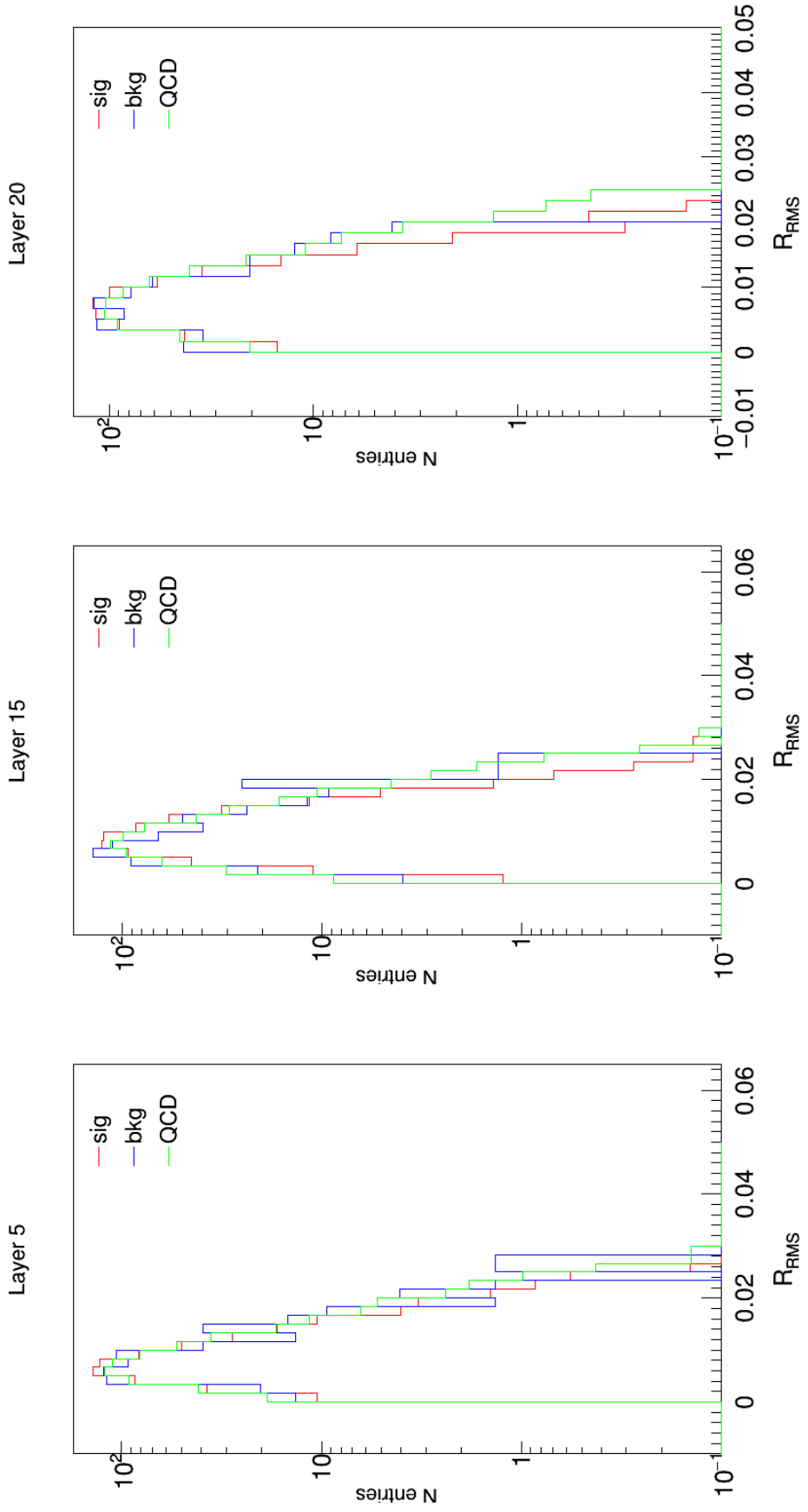
Slika 10.5: Broj 2D klastera unutar 3D klastera za PU = 0



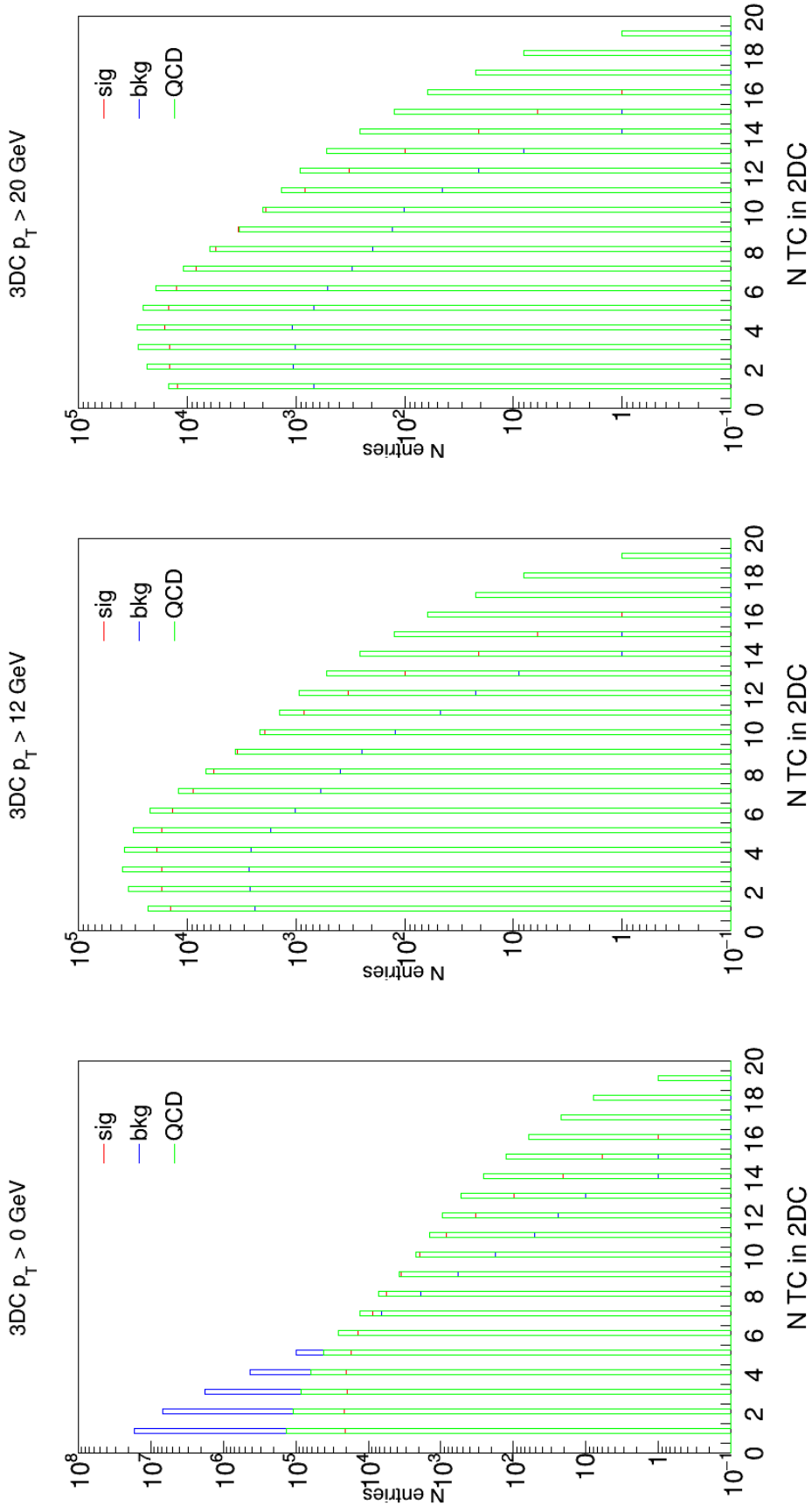
Slika 10.6: Broj 3D klastera za PU = 0



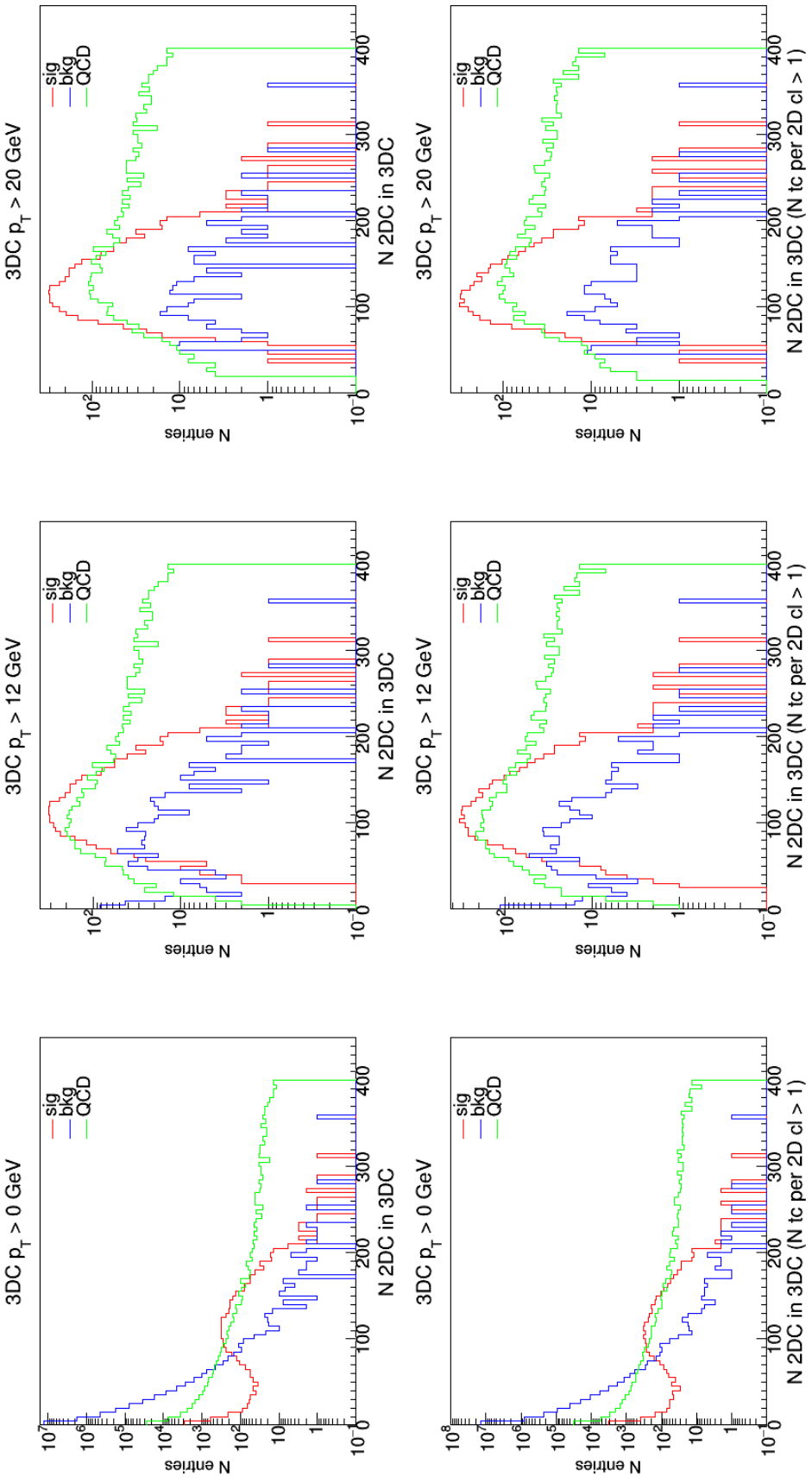
Slika 10.7: σ_{zz} za PU = 0



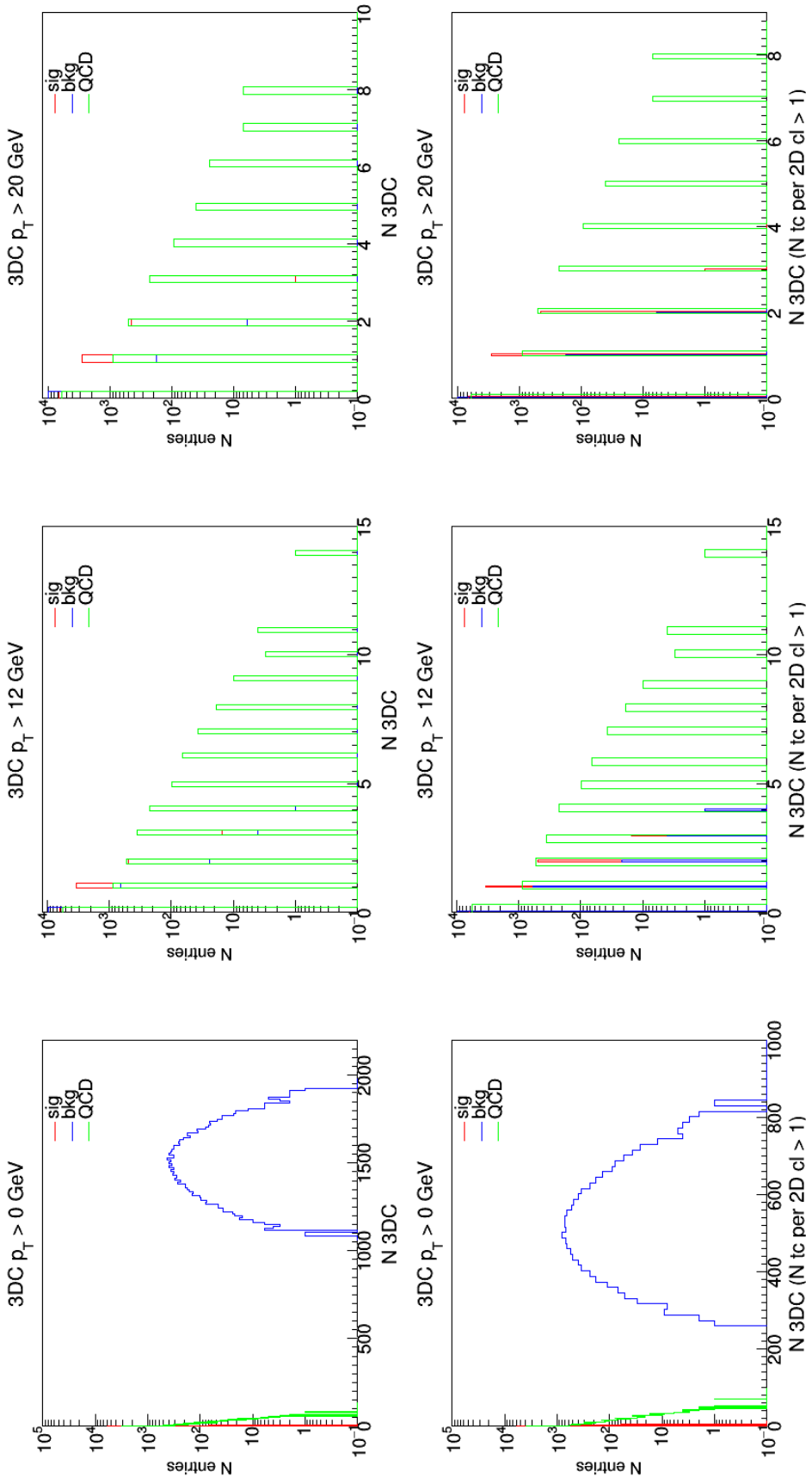
Slika 10.8: R_{RMS} PU = 200



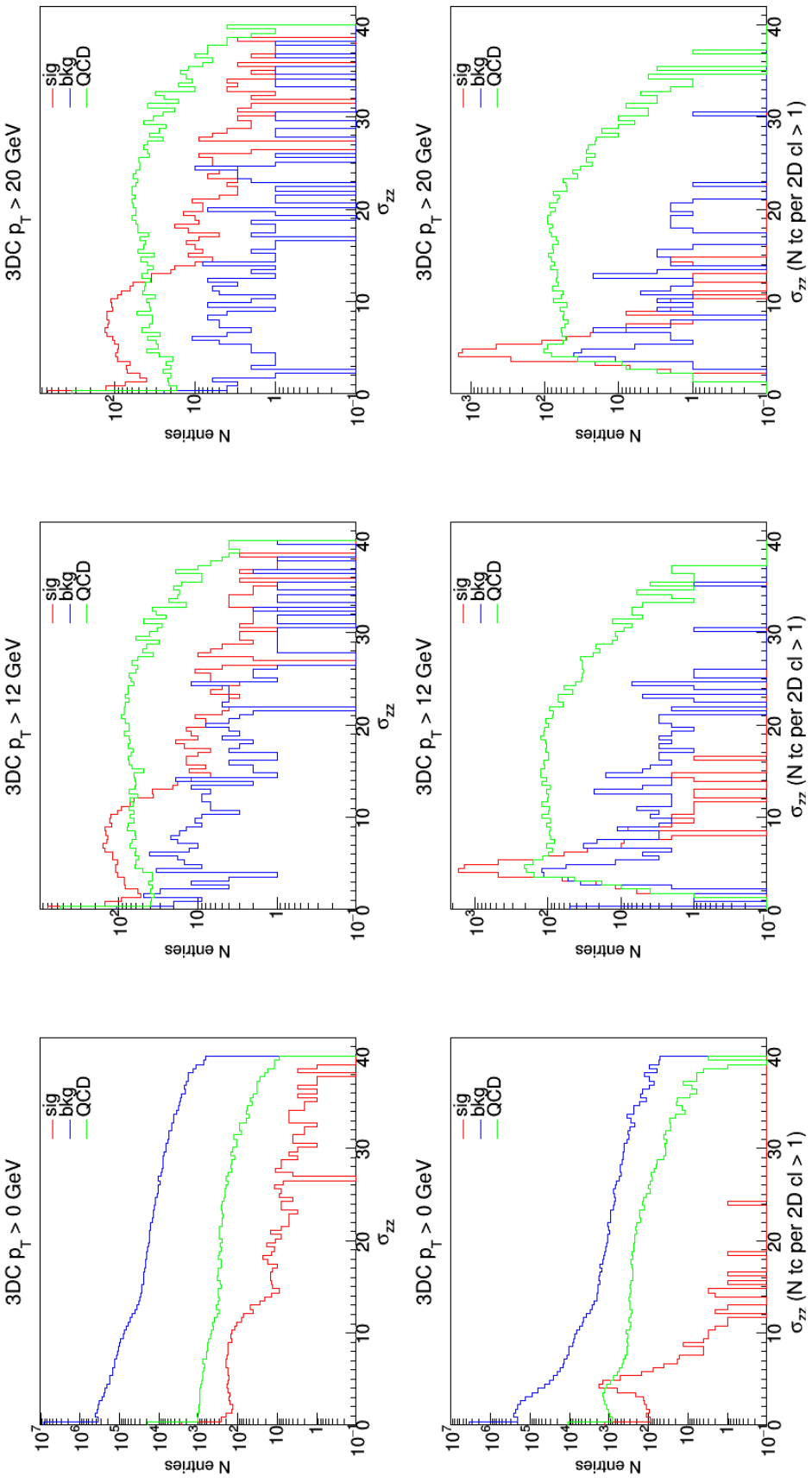
Slika 10.9: Broj ćelija po 2D klasteru za PU = 200



Slika 10.10: Broj 2D klastera unutar 3D klastera za PU = 200



Slika 10.11: Broj 3D klastera za PU = 200



Slika 10.12: σ_{zz} za PU = 200

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Odjel za fiziku

Diplomski rad

IDENTIFIKACIJA ELEKTRONA ZA OKIDAČ KALORIMETRA VISOKE GRANULARNOSTI DETEKTORA CMS

Duje Giljanović

Sažetak

Do 2025. godine u planu je nadograditi LHC sudarač i detektore na njemu tako da se integrirani luminozitet poveća s očekivanih 300 fb^{-1} do kraja 2023. godine na 3000 fb^{-1}. Kako bi se uspješno suočili s povećanim brojem podataka, na Compact Muon Solenoid (eng. CMS) detektoru bit će ugrađen kalorimetar visoke granularnosti, HGCAL. Prije same instalacije novog kalorimetra potrebno je napraviti simulacije koje će pomoći u identifikaciji elektrona na detektoru. U prvom dijelu rada korišten je FastShower alat za dobivanje jednostavnog uvida u očekivano ponašanje elektromagnetskog pljuska u budućem detektoru. U drugom dijelu rada analizirani su učinci algoritma za grupiranje ćelija (klastering), koji bi trebao omogućiti efikasniju identifikaciju čestica te odvajanje signala od pozadine, kako na razini okidača, tako i u naknadnoj fazi. Da bi se izvela što bolje izvedba identifikacije elektrona i odvajanja signala od pozadine, uključen je uvjet da svaki dvodimenzionalni klaster sadrži barem dvije ćelije.

(60 stranica, 48 slika, 22 literaturna navoda, jezik izvora: hrvatski)

Ključne riječi: LHC, CMS, Kalorimetar visoke granularnosti, HGLHC
Voditelji: doc. dr. sc. Damir Lelas, prof. dr. sc. Ivica Puljak
Ocjenitelji: prof. dr. sc. Ivica Puljak, doc. dr. sc. Damir Lelas, dr. sc. Marko Kovač

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics

Graduation thesis

ELECTRON IDENTIFICATION FOR THE HIGH GRANULARITY CALORIMETER OF THE CMS DETECTOR

Duje Giljanović

Summary

The plan by 2025. is to upgrade LHC collider and corresponding detectors in order to increase integrated luminosity from 300 fb^{-1} expected by the end of 2023. to 3000 fb^{-1}. In order to successfully cope with the increased amount of data, High Granularity Calorimeter, HGCAL, will be installed on Compact Muon Solenoid (CMS) detector. Before new calorimeter is installed, simulations which will help in electron identification on the future detector are needed. In the first part of the thesis, FastShower tool is used for getting the first insight into the expected behaviour of the electromagnetic shower in the future detector. In the second part of the thesis effects of clustering are studied which should give rise to a more efficient identification of particles as well as signal and background separation on trigger level as well as offline analysis. In order to achieve more efficient electron identification and separation of signal and background, a condition that every two-dimensional cluster must contain at least two trigger cells is studied.

(60 pages, 48 figures, 22 references, original in: croatian)

Key Words: LHC, CMS, High Granularity Calorimeter, HGCAL
Supervisors: doc. dr. sc. Damir Lelas, prof. dr. sc. Ivica Puljak
Reviewers: prof. dr. sc. Ivica Puljak, doc. dr. sc. Damir Lelas, dr. sc. Marko Kovač