Razvoj komore vremenske projekcije za sPHENIX eksperiment

Dumančić, Mirta

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:349150

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Mirta Dumančić

RAZVOJ KOMORE VREMENSKE PROJEKCIJE ZA sPHENIX EKSPERIMENT

Diplomski rad

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: ISTRAŽIVAČKI

Mirta Dumančić

Diplomski rad

Razvoj komore vremenske projekcije za sPHENIX eksperiment

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Mihael Makek

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2014.

Zahvalna sam Bogu što mi je dao snagu da izvršim sve potrebno kako bi ovaj rad ugledao svjetlo dana. I ne samo to, zahvalna sam mu za sve ove godine obrazovanja i to što mi je dopustio i opremio me potrebnim da bih se divila Njegovom stvorenju na znanstveni i svaki drugi način.

Zahvaljujem svojoj obitelji na neprocjenjivoj potpori, posebno roditeljima Josipu i Anici koji mi nisu nikad uskratili svoju pomoć, a Ivi za svako sestrinsko rame za plakanje i naše nebrojene šale.

Hvala mentoru doc. dr. sc. Mihaelu Makeku na strpljivosti i savjetima koji gotovo nadmašuju njegovo znanje, stručnost i pouzdanost.

Hvala prof. dr. sc. Iliji Ravinovichu za savjete i udijeljeno znanje tijekom rada u laboratoriju i podršku za vrijeme boravka u Izraelu. Zahvaljujem i prof. dr. sc. Alexandru Milovu koji me prihvatio kao člana svoje istraživačke grupe i time omogućio jedno nezaboravno iskustvo u mom školovanju.

Zahvaljujem u konačnici profesorima i djelatnicima Fizičkog odsjeka za lijepih i plodonosnih pet godina studija.

Sažetak

Tema ovog rada je istraživanje i razvoj komore vremenske projekcije u novu nadogradnju sPHENIX detektora na sudarivaču RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) na BNL-u (*Brookhaven National Laboratory*). Komora vremenske projekcije plinski je detektor koji omogućuje trodimenzionalnu rekonstrukciju položaja čestice koja dolazi iz sudara. U sudarima teških iona (kao što su Au-Au) sa velikim multiplicitetom čestica ovaj detektor predstavlja dobro rješenje za rekonstrukciju putanje i identifikaciju čestica. Rad nakon uvoda u osnovne koncepte teorije kvantne kromodinamike te pregleda sadašnje konstrukcije PHENIX detektora iznosi aktualni prijedlog za nadogradnju detektora. Fizikalna motivacija za nadogradnju usko je vezana za detaljno proučavanje karakteristika novog stanja materije pod nazivom kvark-gluon plazma. Observable koje karakteriziraju navedeno stanje postavljaju zahtjeve na konstrukciju detektora i njegovu rezoluciju. Tako su nakon pregleda nadogradnje u radu predstavljena dva dijela istraživanja rada buduće komore vremenske projekcije: brze simulacije rada komore programom GEANT4 te laboratorijska ispitivanja GEM (*Gas Electron Multiplier*) detektora koji su element za pojačavanje signala u toj komori. Mjerenja su obavljena u Laboratoriju za teške ione na Weizmann institutu u Izraelu. Rezultati ovog rada jedan su od koraka u karakterizaciji mogućih detektorskih podsustava sPHENIX detektora prije završnog prijedloga te konstrukcije i instalacije na RHIC sudarivaču koja se očekuje 2020. godine.

Development of a Time Projection Chamber for sPHENIX experiment

Abstract

Aim of this thesis was to explore the possibility of integrating a Time Projection Chamber (TPC) into a new upgrade of PHENIX detector at Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory called sPHENIX. TPC is a gas detector that can provide a three-dimensional position reconstruction of a particle coming from a collision. This detector displays good properties in high-multilicity events such as the ones in heavy ion collisions at RHIC and it can give information about particle's identity and trajectory. In this thesis some basic concepts of the theory of quantum chromodynamics and quark-gluon plasma are shortly introduced. Afterwords an overview of the current PHENIX detector as well as of the future sPHENIX upgrade are represented. Future upgrade sPHENIX will focus on measuring physical properties of the new state of matter which is called quark-gluon plasma. Observables which will be measured impose certain physical requirements and resolution constrainds on future detector subsystems. The core of this thesis are two aspects of research of the future sPHENIX TPC: one aspect are GEANT4 detector simulations which provided us with information about momentum resolution of future chamber. The other aspect was examining the operation of GEM (Gas Electron Multiplier) detector which is a multiplication element for TPC electron signal. This experimental work was performed in the Heavy Ion Laboratory at Weizmann Institute of Science in Israel. Results of the work represented in this thesis are one of the steps in characterization of possible sPHENIX detector subsystems before the final proposal, construction and installation at RHIC collider which is expected in the year 2020.

Sadržaj

1. Uvod **1**

1.1. Osnovni koncepti kvantne kromodinamike 1

1.2. Eksperimenti sa sudarima teških iona 4

1.3. Kvark-gluon plazma 5

1.4. PHENIX eksperiment 7

1.4.1. Fizikalna motivacija 7

1.4.2. Podsustavi PHENIX detektora 8

2. Plan nadogradnje PHENIX eksperimenta - sPHENIX **11**

2.1. Fizikalna motivacija 11

2.2. Koncept sPHENIX detektora 13

2.3. Komora vremenske projekcije 15

2.4. GEM detektori 20

3. Brze simulacije za sPHENIX GEM-TPC **24**

3.1. Programski paket GEANT4 24

3.2. Analiza podataka programom ROOT 25

3.3. Brza simulacija rada komore vremenske projekcije 26

3.4. Analiza podataka i rezultati 29

4. Laboratorijska mjerenja sa trostrukim GEM detektorom **33**

4.1. Eksperimentalni postav 33

4.2. Plinski sustav 36

4.3. Mjerenje faktora pojačanja signala 38

4.4. Mjerenje struje elektrona 42
4.5. Daljnji plan za mjerenje struje iona 45

5. Zaključak **48**

A. GEANT4 i ROOT **50**

Literatura **56**

1. Uvod

Pregled

Ovo poglavlje pokriva osnovne pojmove i koncepte teorije kvantne kromodinamike u kontekstu relativističkih sudara teških iona na današnjim sudarivačima. Također naveden je opis PHENIX detektora na RHIC sudarivaču, fizikalna motivacija za njegovu konstrukciju te konačno sami detalji njegovih detektorskih podsustava.

1.1. Osnovni koncepti kvantne kromodinamike

Šezdesetih godina prošlog stoljeća fizičari su predložili ideju da su hadroni ili čestice koje međudjeluju jakom silom sastavljeni od manjih jedinica koje su nazvani kvarkovima. Gell-Mann i Ne'eman predložili su 1961. godine koncept nazvan "Osmeročlani put" koji je klasificirao sve barione i mezone u multiplete prema grupi simetrija SU(3), a 1964. Gell-Mann i Zweig nezavisno su predložili osnovne konstituente hadrona (kvarkove) u tri okusa. Eksperimentalna potvrda kvarkova došla je sa SLAC eksperimenta putem neelastičnih elektron-nukleon raspršenja od 1967.-1973., te otkrićem J/ψ čestice na Brookhavenu i SLAC-u 1974. godine [1, 2].

Također 70-tih godina formulirana je teorija jake sile ili kvantna kromodinamika (QCD). Paulijev princip isključenja i postojanje bariona sa tri identična okusa kvarkova (primjerice Λ^{++}, Λ^{-} i Ω^{-}) navelo je O.W. Greenberga na ideju novog stupnja slobode kod kvarkova koji je nazvan bojom, dolazi u tri moguća stanja nazvana plava, crvena i zelena. Danas smatramo kako kvarkovi dolaze u 6 okusa (up, down, strange, charm, top i bottom) i u tri boje. U standardnom modelu

interakcija koji obuhvaća elektroslabu i jaku silu, formalni teorijski pristup je opis interakcija pomoću baždarne teorije određene grupe simetrija. QCD je baždarno invarijantna teorija na lokalne transformacije grupe SU(3). Pripadni lagrangijan QCD-a (za svaki okus kvarka, dakle njih šest)[3]

$$L_{QCD} = \left[i\hbar c\overline{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - mc^{2}\overline{\psi}\psi\right] - \frac{1}{16\pi}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \left(q\overline{\psi}\gamma^{\mu}\lambda\psi\right)A_{\mu} \tag{1.1}$$

sadrži opis interakcije tri Diracova polja iste mase (boje imaju istu masu) sa osam bezmasenih vektorskih polja koji su prijenosnici interakcije, a nazivamo ih gluonima. Ako su mase kvarkova fiksne, ovaj lagrangijan sadrži samo jedan slobodan parametar, a to je konstanta vezanja α_s.

U perturbativnom računu poznato je da konstante vezanja elektromagnetske, slabe i jake sile zapravo nisu konstante nego ovise o skali renormalizacije, što dolazi nakon što pri računanju procesa u kvantnoj teoriji polja uključimo korekcije s petljom. Kada za skalu renormalizacije uzmemo vrijednost prenesenog impulsa Q u danom procesu, tada je $\alpha_s(Q)$ mjera efektivne snage jake interakcije u tom procesu. Rješavanjem jednadžbi renormalizacijske grupe [4]:

$$\frac{d}{d\log Q}g_i(Q) = -\frac{b_i}{(4\pi)^2}g_i^3,\ i = 1, 2, 3; \tag{1.2}$$

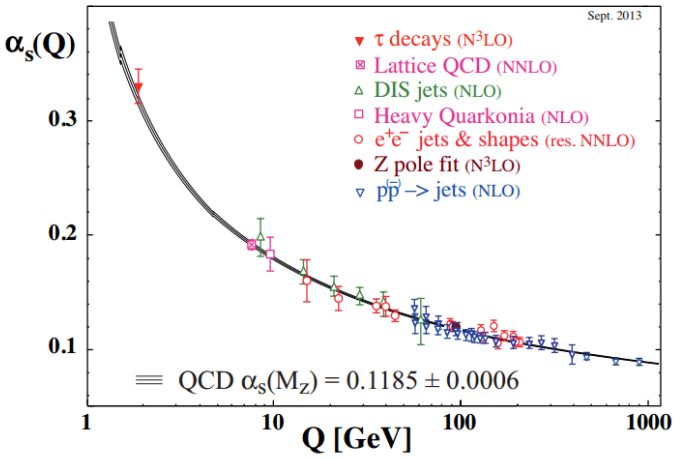
gdje su g_i konstante vezanja, a Q energijska skala u GeV, dobiju se rješenja za konstante vezanja u ovisnosti o energiji:

$$\alpha_i^{-1}(Q) = \alpha_i^{-1}(M_Z) + \frac{b_i}{2\pi}\log\left(\frac{Q}{M_Z}\right), \tag{1.3}$$

gdje je $\alpha_i = \frac{g_i^2}{4\pi}$, M_Z je masa elektroslabog Z bozona koja iznosi $M_Z = (91.1876 \pm 0.0021)$GeV, a b_i su konstante koje ovise o baždarnoj teoriji. Konstanta vezanja jake interakcije (Slika 1.1) posjeduje zanimljivo svojstvo – opada u području velikog prijenosa impulsa, na kratkim udaljenostima. To je osnova onoga što nazivamo svojstvo asimptotske slobode za kvarkove i gluone. U tom režimu možemo

čestice smatrati slobodnima te rabiti perturbativni račun teorije polja, tj. Feynmanove dijagrame kao u slučaju kvantne elektrodinamike (QED).

No druga granica jake interakcije je vezanje (*confinement*), koje je naziv za činjenicu da kvarkove i gluone gotovo nikada (osim u slučajevima visoke barionske gustoće i/ili visoke temperature) ne nalazimo slobodne. Teorijski opis koji se koristi u ovom slučaju je baždarna teorija na rešetci (*lattice gauge theory*) u kojoj se prostorno-vremenski kontinuum diskretizira i jednadžbe QCD-a (Euler-Lagrange jednadžbe) se rješavaju numerički [5]. Na diskretnoj mreži euklidskog prostor-vremena teorije (QCD kao i QED) daju vezano svojstvo materije. U granici kontinuuma poznato je da kvantna elektrodinamika ima fazni prijelaz u nevezano stanje materije dok QCD i dalje pokazuje svojstvo vezanja. Ovako dobivena numerička rješenja možda jesu plauzibilna, ali s druge strane strogi teorijski dokaz vezanja kvarkova i gluona još nije izveden.



Slika 1.1.: Mjerenja konstante jakog vezanja na različitim enegijskim skalama procesa Q. Vrijednost konstante vezanja ovisi o perturbacijskom stupnju QCD teorije korištene u ekstrakciji same vrijednosti iz mjerenja (NLO: *next-to-leading order*; NNLO: *next-to-next-to leading order*; res. NNLO: NNLO sa *next-to-leading logs*; N3LO: *next-to-NNLO*). Također se može odrediti prosječna vrijednost $\alpha_s(M_Z) = 0.1185 \pm 0.0006$. Preuzeto iz [6].

1.2. Eksperimenti sa sudarima teških iona

Od spomenutih svojstava obojene materije, vezanja i asimptotske slobode, upravo je ovo drugo posebno zanimljivo i u eksperimentima se puno pažnje posvećuje granici visokih temperatura i barionske gustoće u kojoj nastaje novo stanje tvari nazvano kvark-gluon plazma (QGP). QGP je moguće stvoriti u akceleratorima i sudarivačima koji koriste snopove sastavljene od teških iona zlata, olova, bakra i slično, ubrzanih do relativističkih brzina.

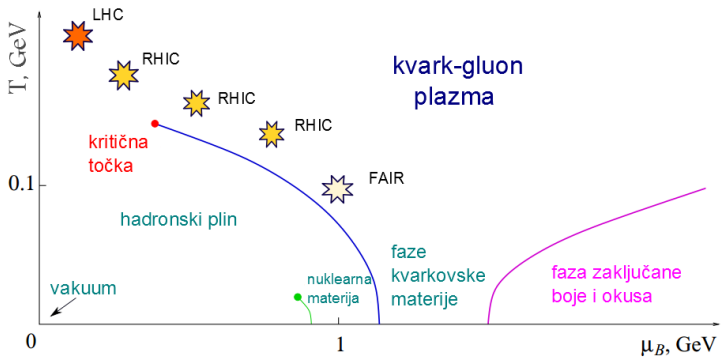
Eksperimentalni početci sudara iona bili su na akceleratorima AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*) energije 10 GeV po nukleonu na Brookhaven-u i SPS (*Super Proton Synchrotron*) energije 160 GeV po nukleonu u CERN-u osamdesetih godina i to na fiksnim metama. U veljači 2000. glavni direktor CERN-a Luciano Maiani izjavio je kako *"kombinirani podatci sa sedam eksperimenata unutar CERN-ovog programa istraživanja teških iona daju jasnu sliku novog stanja materije"* te da *"ovaj rezultat potvrđuje predviđanje postojeće teorije fundamentalnih sila između kvarkova"*[7] .

Eksperimenti s teškim ionima nastavljeni su nadalje od 2000. godine na posebno izgrađenom relativističkom sudarivaču za teške ione RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) na Brookhaven National Laboratory koji doseže energije od $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV po paru nukleona, a od 2010. godine također i na LHC-u u CERN-u sa sudarima iona najvećih energija, 2.76 TeV-a po paru nukleona. Posljednja navedena dva sudarivača danas provode eksperimente s teškim ionima u okviru pet kolaboracija: dvije na RHIC akceleratoru (PHENIX i STAR) i tri na CERN-u (ALICE, ATLAS i CMS) te donose značajne rezultate i nove uvide o prirodi QCD materije i posebno svojstvima kvark-gluon plazme. Dodajmo kako su i dalje aktivni eksperimenti na nižim energijama poput onih na SPS-u i GSI-u (Darmstadt, Njemačka).

1.3. Kvark-gluon plazma

Kao što je već spomenuto, jake naznake za postojanje novog stanja materije pod nazivom kvark-gluon plazma dobivene su krajem prošlog stoljeća na CERN-u. Od 2000. godine na sudarivaču RHIC daljnji eksperimenti s teškim ionima donijeli su konačnu povrdu tog novog stanja. Nakon toga su na RHIC-u do danas vršeni eksperimenti sa raznim jezgrama i u velikom rasponu energija kako bi se istražila fizikalna svojstva QCD plazme. Sudari Au-Au, Cu-Cu, d-Au i p-p provedeni su ili su planirani na različitim energijama od $\sqrt{s_{NN}}$=7.7 do 200 GeV [8].

Otkriće snažno vezane kvark-gluon plazme (sQGP) na RHIC-u u sudarima zlato-zlato objavljeno od strane sva četiri eksperimenta (STAR [9], PHENIX [10], PHOBOS [11] i BRAHMS [12]) te je proglašeno najvećim otkrićem 2005. godine [13]. Proučavanje proizvedenog novog stanja materije dovelo je do slike plazme koja se ponaša kao hidrodinamički objekt (idealna tekućina) te je gotovo neprozirna na partone iz sudara sa velikim impulsom [14, 15].



Slika 1.2.: Sadašnji pogled na fazni dijagram QCD materije [16].

Na Slici 1.2 prikazan je shematski fazni dijagram QCD materije oblikovan rezultatima istraživanja na sudarivačima do danas sa granicama faza i eventualnom kritičnom točkom (vertikalna os je temperatura medija nastalog u sudaru, a horizontalna os je barionska gustoća) [16]. Mjereći u područjima visoke temperature medija i niske barionske gustoće LHC i RHIC nisu otkrili postojanje faznog prijelaza

1. reda nego naprotiv gladak prijelaz iz kvark-gluon plazme u hadrone. [17] Također se pretpostavlja postojanje kritične točke prema nekim QCD teorijama na rešetci (*lattice* QCD) u rasponu od 250 GeV<T_C<450 GeV [18, 19, 20].

Najvažnije veličine koje karakteriziraju nastanak i transportna svojstva kvark-gluon plazme dana su u Tablici 1.1 zajedno sa kvantitativnim procjenama od dosadašnjih mjerenja [15]:

fizikalna veličina	raspon vrijednosti
početna temperatura plazme T_i	300 MeV$\leq T_i \leq$600 MeV
vrijeme formiranja plazme τ_i	0.2 fm/c$\leq\tau_i\leq$1.2 fm/c
omjer viskoznosti i gustoće entropije η/s	$1/(4\pi)\leq\eta/s\leq 2/(4\pi)$
transportni koeficijent gubitka energije $\hat{q}$	$\hat{q}$=2-10 GeV^2/fm

Tablica 1.1.: Osnovne veličine koje karakteriziraju kvark-gluon plazmu i procjene njihovih vrijednosti prema dosadašnjim mjerenjima [15].

Budućnost mjerenja na RHIC-u motivirano je mnoštvom preostalih pitanja u vezi kvark-gluon plazme od kojih su neka [21]:

- koliko je plazma zapravo "savršena" tekućina?
- postoji li kritična točka u faznom dijagramu QCD-a i gdje je?
- na koji način jako vezanje proizlazi iz asimptotske slobode?
- kako gluoni i kvarkovi mora doprinose spinu protona?

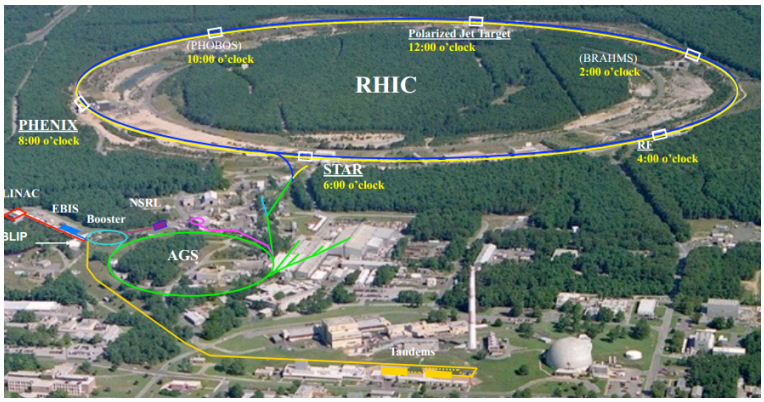
Na ta i slična pitanja znanstvenici će pokušati dati odgovor u budućim godinama mjerenja na sudarivačima RHIC, LHC te budućim EIC (*Electron-Ion Collider*), FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*) u Darmstadtu i NICA (*Nuclotron-based Ion Collider fAcility*) u Dubni.

1.4. PHENIX eksperiment

1.4.1. Fizikalna motivacija

PHENIX (*Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment*) je jedan od dva trenutno aktivna eksperimenta na RHIC sudarivaču na BNL-u, uz eksperiment STAR.

Osnovni cilj PHENIX eksperimenta bio je opažanje kvark-gluon plazme i karakterizacija njezinih fizikalnih svojstava [22]. RHIC sudarivač konstruiran je kao prsten opsega 3.9 km koji na šest mjesta sudara relativističke snopove teških iona kako bi istražio temeljna svojstva kvarkova i gluona. Osim toga RHIC daje mogućnost sudara protona polariziranog spina čiji je cilj mjeriti spinsku strukturu nukleona. U pokušajima rekonstrukcije faznog dijagrama QCD materije RHIC pokriva najveći raspon barionskog kemijskog signala za dostupne energije snopova. [21]



Slika 1.3.: Osnovni dijelovi RHIC sudarivača [21].

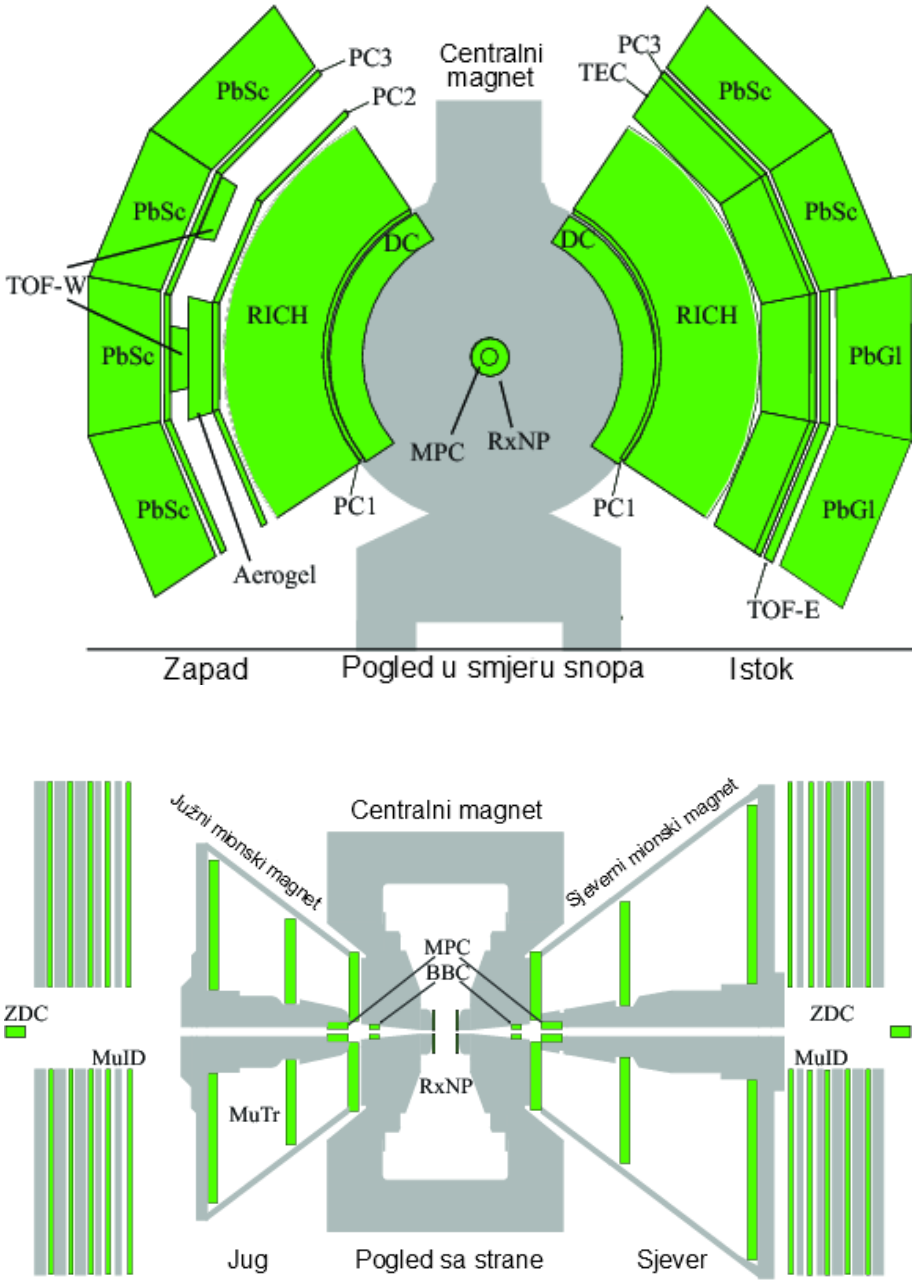
Fizikalni ciljevi PHENIX eksperimenta su generalno proučavanje vruće i guste nuklearne materije (plazme). Pod raznim fazama podrazumijevamo etape od nastanka plazme u sudaru (tzv. odvezivanje partona ili deconfinement) i moguće obnove kiralne simetrije kvarkova, preko termalizacije, hlađenja i ekspanzije i u konačnici do hadronizacije. Elektromagnetske probe, direktni fotoni i parovi leptona, su

osjetljive probe za sve faze sudara sa minimalnom interakcijom u konačnom stanju. PHENIX detektor posebno je konstruiran za opažanje tih tzv. rijetkih proba (fotona, elektrona i miona). To je originalno omogućeno vrlo malom radijativnom duljinom od 0.3%, brzim sustavom za prikupljanje podataka te kasnijim nadogradnjama detektora. PHENIX posjeduje izvrsnu sposobnost mjerenja direktnih fotona čija se raspodjela impulsa može povezati sa početnom temperaturom plazme [23]. Također observable koje omogućuju uvid u interakcije unutar plazme su mlazovi (eng. *jets*) i kvarkoniumi – vezana stanja teških kvark-antikvark parova (primjerice *bottom* kvarka) koja mogu detaljno okarakterizirati interakciju obojenih čestica unutar plazme (slično zasjenjenju električnog naboja u elektromagnetskoj plazmi) [24].

Ne ulazeći dalje detaljno u observable mjerene PHENIX detektorom možemo istaknuti da osim sudara teških iona PHENIX eksperiment skuplja podatke i iz p-p te d-A sudara. Naime, mnogi od navedenih mjerenih signala mogu doći i od interakcija između čestica u hadroniziranoj materiji visoke temperature, a kako bi se mogli sa sigurnošću otkriti potpisi plazme u A-A sudarima potrebno je razumjeti ovu pozadinu. Tako se za detaljno pučavanje QCD efekata bez nastanka plazme prikupljaju podatci iz p-p sudara, a efekti tzv. "hladne" nuklearne materije proučavaju se u d-A sudarima (primjerize proton-zlato ili deuteron-zlato).

1.4.2. Podsustavi PHENIX detektora

PHENIX eksperiment kombinira različite tehnologije detekcije čestica unutar brojnih podsustava detektora. Sadrži četiri spektrometra i četiri globalna detektora za mjerenje hadrona, elektrona, fotona i miona. Shematski prikaz detektora dan je na Slikama 1.3 i 1.4, a osobine pojedinih podsustava detektora u [25]. Zapadni i istočni centralni dijelovi detektora specijalizirani su za detekciju elektrona, fotona i nabijenih hadrona. Sjeverni i južni prednji dijelovi pokrivaju puni azimutalni kut i detektiraju mione. Svaki od četiri dijela pokriva približno 1 steradijan prostornog kuta. Centralni dio pokriva dio rapiditeta $|\eta| <0.35$, a mionski dijelovi prostore od $-1.1< \eta <-2.2$ (južni dio) i $1.1 < \eta < 2.4$ (za sjeverni dio).



Slika 1.4.: Shematski presjek PHENIX detektora u smjeru snopa (gore) i sa bočne strane (dolje) [26].

Tri magneta - centralni magnet (CM) i dva mionska magneta (sjeverni, NMM i južni, SMM) građeni su od bakrenih zavojnica na željeznoj konstrukciji. Magnetsko polje paralelno snopu u području interakcije osigurava centralni magnet i time

omogućava mjerenje impulsa nabijenih čestica za polarni kut u rasponu od 70° do 110°. Sjeverni i južni mionski magnet tvore radijalno magnetsko polje. Svaki pokriva područje pseudorapiditeta od 1.1 do 2.3 i puni azimut [27].

Središnji spektrometri sadrže elektromagnetski kalorimetar kojeg čine: olovni scintilatorski (PbSc) kalorimetar i olovni stakleni (PbGl) kalorimetar koji daje dobru energijsku rezoluciju. Sustav za određivanje putanje čestica i određivanje impulsa čine magnet i diftne komore (DC) i komore s blokovima/pločicama (PC eng. pad chambers). Identifikaciju čestica istovremeno provode Čerenkovljev detektor (Ring-Imaging Cherenkov detector, RICH) i detektor za mjerenje vremena proleta (Time-of-Flight) [28].

Rad dva prednja mionska spektrometra temelji se na mjerenju putanje miona (trackers) unutar radijalnog magnetskog polja [29] pomoću driftnih komora nakon čega slijedi identificiranje miona pomoću slojeva čeličnih apsorbera i slojeva driftnih komora za određivanje putanje (Iarocci tipa).

2. Plan nadogradnje PHENIX eksperimenta - sPHENIX

Pregled

Ovo poglavlje donosi pregled buduće nadogradnje PHENIX detektora (sPHENIX), fizikalnu motivaciju i tehničke detalje. Posebna pozornost pridaje se mogućem detektorskom podsustavu za opažanje tragova pod nazivom komora vremenske projekcije te se detaljno objašnjava njezina uloga i princip rada. Također je objašnjen posebni dio te komore koji će u nadogradnji služiti kao multiplikacijski element signala - GEM detektor.

2.1. Fizikalna motivacija

Sukladno napretku u razumijevanju kvark-gluon plazme i fizikalnih procesa u sudarima teških iona te fizikalnim zahtjevima koja proizlaze iz daljnjih pitanja znanstvene zajednice nakon dosadašnjih eksperimenata na RHIC-u i LHC-u, PHENIX kolaboracija predlaže nadogradnju sadašnjeg PHENIX detektora. Prijedlog planirane nadogradnje sa fizikalnom motivacijom može se naći u [30], a ovdje su predstavljeni osnovni razlozi za nadogradnju i implikacije na samu konstrukciju budućeg detektora.

Neka od pitanja koja određuju smjer novih istraživanja na RHIC-u, posebice ona kojima se bavi PHENIX kolaboracija su [14]:

- Jesu li kvarkovi snažno vezani u plazmi na svim skalama udaljenosti?

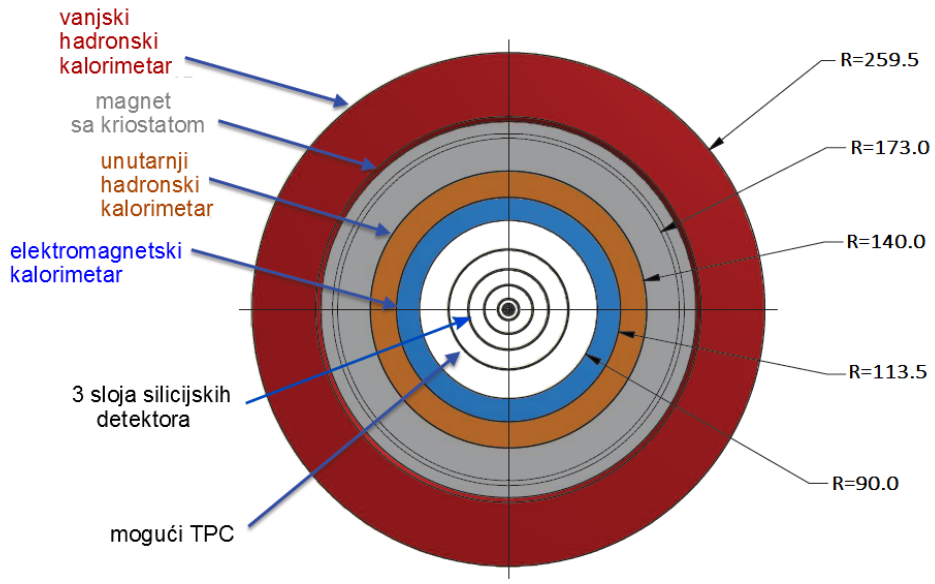
- Koja je detaljna slika parton-QGP interakcije?
- Može li se otkriti prisutnost kvazičestica na bilo kojoj skali?
- Postoji li relevantna duljina zasjenjenja u plazmi?
- Koliko brzo nakon nastanka plazme dolazi do ravnoteže?

Očekuje se da će sPHENIX biti pušten u rad 2019., a sve komponente nadogradnje potpuno integrirane tijekom 2020. godine kada će sudari na RHIC-u biti zaustavljeni i akcelerator privremeno ugašen. Na početku 2021. sPHENIX će biti potpuno funkcionalan i spreman za fizikalnu analizu prikupljenih podataka, čiji se opseg procjenjuje na mjerenih 50 milijardi Au-Au sudara na energiji $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV sa dostupnim luminozitetom. Treba napomenuti da je cijeli dizajn napravljen kao osnova za budući detektor koji će biti instaliran na predloženom elektron-ion sudarivaču (EIC) za koji se planira da će zamijeniti RHIC do godine 2025 [31].

Observable koje će biti u fokusu mjerenja sPHENIX detektorom (upsilon rezonancija, mlazovi, dvostruki mlazovi, fragmentacijske funkcije, mlazovi teških kvarkova, direktni fotoni) daju zahtjeve na karakteristike detektora koji će na taj način omogućiti zadovoljavajuću preciznost u mjerenjima. Neki od tih zahtjeva su visoka akceptancija detektora ($\triangle\phi$=2π, -1<η<1), visoka frekvencija prikupljanja podataka za visoku statistiku (10 kHz), efikasnost rekonstrukcije putanje > 90%, razlučivost impulsa < 0.2%p_T za p_T>3 GeV/c, rezolucija u određivanju putanja do impulsa 40 GeV/c, efikasnost identifikacije elektrona >70% te različita ograničenja na energijsku rezoluciju koja dolaze od mjerenja mlazova u rasponu impulsa 20-70 GeV za sve centralnosti sudara, za različite oblike mlazova.

2.2. Koncept sPHENIX detektora

Kako bi odgovorili na navedene fizikalne zahtjeve, predložena je sljedeća konstrukcija budućeg detektora sPHENIX čiji su osnovni dijelovi prikazani na Slici 2.1.



Slika 2.1.: Presjek sPHENIX detektora sa predloženim podsustavima, pripadni radijusi su u cm.

Kriostat sadrži supravodljivu zavojnicu koja osigurava polje od 1.5 T sa 2% uniformnosti u području interakcije (za r<800 mm i -1483 mm<z<1287 mm). Duljine je 385 cm, a razlika vanjskog i unutarnjeg radijusa je 33 cm. Magnet koji će biti ugrađen u sPHENIX dolazi sa BaBar eksperimenta na SLAC-u (*Stanford Linear Accelerator*), a njegove karakteristike mogu se naći u [32].

Silicijski detektor za određivanje putanje nabijenih čestica koji se naziva i piksel detektor (najbrži signal za određivanje položaja verteksa nastalih čestica). U transverzalnoj ravnini govori se o rezoluciji putanja čestica boljoj od 100 μm za $p_T > 1\text{GeV/c}$. Detektor pokriva područje pseudorapiditeta $-1 < \eta < 1$. Konačni dizajn još nije završen te se govori o mogućoj kombinaciji silicijevih slojeva (3) i komore vremenske projekcije ili o konfiguraciji sa šest silicijevih slojeva. Prva dva sloja su debljine 1.3%X_0, dok je treći debljine 5%X_0, gdje je X_0 karakteristična

duljina zračenja za silicij. Moguća dodatna tri sloja bila bi debljine $2\%X_0$. Ovako mala debljina slojeva važna je za stvaranje što manje elektromagnetske pozadine u cijelom detektoru.

Elektromagnetski kalorimetar služi za mjerenje deponirane energije čestice koja u detektoru stvara elektromagnetski pljusak čestica (*shower*) što su većinom elektroni i fotoni. Detektor ima maleni Moliereov radijus i kratku duljinu zračenja, građen je od volfram apsorbera i scintilacijskih vlakana sa silicijevim fotomultiplikatorima [33]. Radijalna debljina mu je 13 cm i daje pokrivenost od 2π u azimutu. Za razlikovanje susjednih pljuskova, energije događaja od kojih pljuskovi dolaze te zbog razlikovanja oblika pljuskova (čime se odvajaju elektroni od hadrona) potrebno je segmentirati kalorimetar. Tako će on biti podijeljen na dijelove dimenzije 0.024 x 0.024 u η i ϕ što će rezultirati sa oko 25 000 kanala za očitavanje signala.

Hadronski kalorimetar podijeljen je na dva dijela od kojih je jedan unutar, a jedan izvan zavojnice. Takav dizajn minimizira veličinu detektora i širenje hadronskih pljuskova u radijalni prostor koji zauzima kriostat. Slično kao EM kalorimetar za elektrone i fotone ovaj detektor mjeri energiju koju hadroni deponiraju u detektoru. Oba dijela detektora (vanjski i unutarnji) građena su od nemagnetičnog metala i organskih scintilatora (polistiren) te su segmentirani u 384 pločica (svaki). Oba hadronska kalorimetra imaju punu azimutalnu pokrivenost.

To što će mlazovi (jednostruki i dvostruki) biti jedan od ciljeva mjerenja govori kako je kalorimetar je ključni element sPHENIX detektora. To isto tako postavlja granicu na potrebnu energijsku rezoluciju koja treba biti bolja od $\sigma_E/\mathrm{E}=100\%/\sqrt{E}$. Elektromagnetski i hadronski kalorimetar zajedno trebaju imati radijalnu duljinu od približno 6 λ_{int} (nuklearna duljina interakcije) [34] kako bi apsorbirali približno 97% energije hadrona impulsa ispod 50 GeV/c.

Do sada su konstruirani modeli ovih kalorimetara različitog dizajna te su isto tako napravljeni različiti prototipovi za testove na akceleratorima (*beam tests*). Prvi su prototipovi testirani na Fermilabu u veljači 2014.

Kao što je prije navedeno, postoji mogućnost ugrađivanja komore vremenske

projekcije (*Time Projection Chamber* ili skraćeno TPC) umjesto posljednja tri sloja silicijskih detektora. Trenutno je TPC prototip za sPHENIX eksperiment predmet istraživanja i razvoja na Weizmann Institutu u Izraelu, u kojem sudjeluje i grupa sa Fizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu.

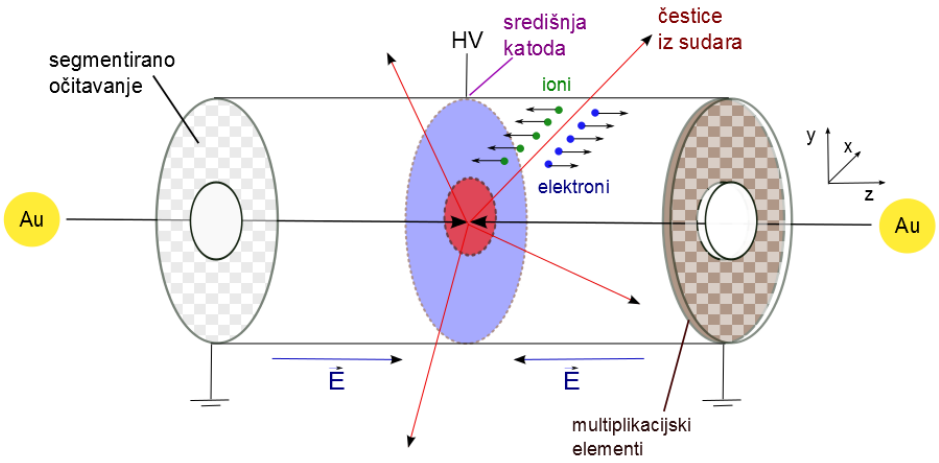
Ovaj rad temelji se na istraživanju te mogućnosti u dva aspekta: računalnim simulacijama rada TPC detektora u programskom paketu GEANT4 i laboratorijskim proučavanjem multiplikacijskih elemenata unutar same komore - GEM (*Gas Electron Multiplier*) detektora. Prije rezultata samog istraživanja predstavljen je princip rada komore vremenske projekcije i GEM detektora.

2.3. Komora vremenske projekcije

Komora vremenske projekcije ili engleskom skraćenicom TPC (*Time Projection Chamber*) je plinski detektor koji omogućuje trodimenzionalnu lokalizaciju ionizacije uzrokovane prolaskom čestica. Ovaj detektor može dati informaciju o gubitku energije čestice (identifikaciju čestice), njezinoj putanji, a posredno iz poznavanja magnetskog polja i informaciju o impulsu.

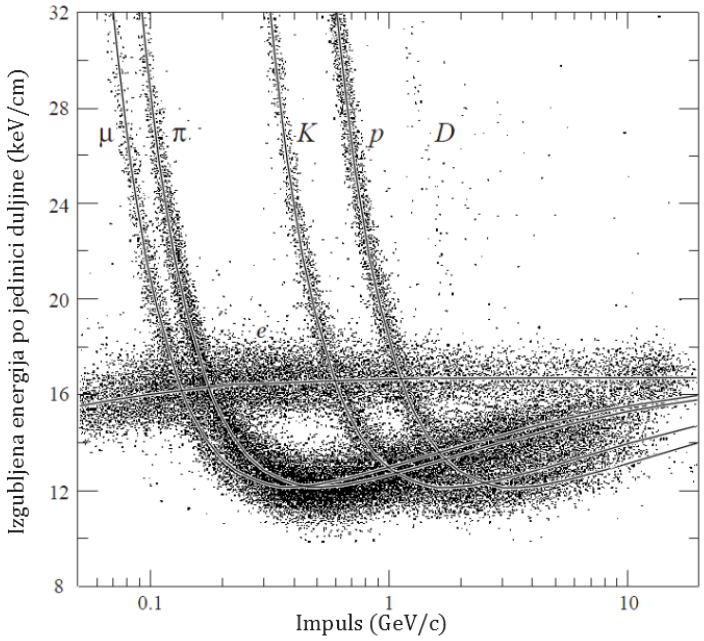
Sama ideja korištenja vremena signala za određivanje koordinate čestice došla je još šezdesetih godina predstavljanjem "Charpakove" ili mnogožičane proporcionalne komore [35]. Nakon raznih razvojnih etapa koja su provedena među ostalim na CERNU i Oxfordu, konstrukciju vremenske komore predložio je 1978. David Nygren [36]. Prvi put TPC je konstruiran za PEP-4 detektor na SLAC-u i instaliran je 1982 [37].

Od tada se komore vremenske projekcije koriste u raznim eksperimentima (PEP, TRISTAN, LEP, KEK), a danas su isto tako u uporabi u mnogim eksperimentima kao što su primjerice detektor STAR na RHIC-u, ALICE na LHC-u (CERN, Švicarska) i T2K na KEK-u (Japan). Dobra trodimenzionalna lokalizacija čestica poželjna je u sudarima u kojima nastaje velik broj čestica pa se ovi detektori često koriste u sudarima teških iona.



Slika 2.2.: Shematski prikaz i ilustracija principa rada komore vremenske projekcije.

Princip rada komore vremenske projekcije (Slika 2.2) je sljedeći: čestica prolazeći plinom (ili tekućinom) ispunjenom komorom uzrokuje ionizaciju atoma i molekula plina (ovisno o mješavini) te se tako nastali elektroni pod djelovanjem električnog polja kreću (eng. *drift*) prema krajevima komore gdje stvaraju signal koji daje informaciju o samoj ionizaciji. Mjeri se amplituda dolaznog signala i vrijeme dolaska signala. Plohe za očitavanje signala su segmentirane što omogućuje 2D lokalizaciju (x,y), a poznavanje brzine elektrona (*drift velocity*) u određenoj plinskoj mješavini i za određeno električno polje zajedno sa mjerenim vremenom omogućuje određivanje z koordinate čestice (duž osi snopa). TPC detektori najčešće rade u homogenom magnetskom polju paralelnom sa z-osi što omogućuje mjerenje impulsa čestice mjerenjem radijusa zakrivljenosti putanje. Identifikacija čestica obavlja se mjerenjem karakterističnog gubitka energije čestice (prema Bethe-Bloch formuli), a primjer ovakvog mjerenja dan na Slici 2.3.



Slika 2.3.: Identifikacija čestica pomoću karakterističnog gubitka energije dobivena PEP4/9-TPC komorom [38].

Konstrukcija same komore predstavlja tehnički izazov zbog brojnih parametara i efekata koji se moraju uzeti u obzir. Neki od njih su moguća distorzija električnog polja od sporih iona, (ne)uniformnost električnog i magnetskoj polja koja već na razini od 1% stvara značajne transverzalne pomake [35] te vezanje elektrona na molekule sa velikim afinitetom (primjerice O_2) što uzrokuje gubitak signala. Isto tako zbog velike duljine driftanja, signal elektrona će biti detektiran 10-100 μs nakon nastanka što za eksperimente sa kraćim intervalom među događajima može stvoriti problem (višeznačnost) u određivanju početnog trenutka ionizacije [38]. To se može riješiti kombiniranjem podataka iz drugih detektora koji daju prostorne i vremenske informacije o događajima.

Izbor plina unutar komore mora biti takav da odgovara zahtjevima visokog luminoziteta sudara na akceleratorima kao što su RHIC i LHC [39]: mora biti brz kako bi bilo moguće nedvosmisleno povezati signal sa sudarom (velika driftna brzina); driftna brzina bi trebala za dano električno i magnetsko polje detektora biti

idealno u točki zasićenja tako da se ne mijenja značajno sa malim neuniformnostima u poljima; mješavina plina mora imati svojstvo "gušenja" (*quenching*) tako da nema sekundarnih efekata kao što je ionizacija fotonima koji nastaju relaksacijom pobuđenih iona unutar plina; što veća pokretljivost iona za što manju distorziju polja prostornim nabojima. Takvim zahtjevima odgovaraju mješavine plemenitih plinova (najčešće neon i argon) sa ugljikovim dioksidom, dušikom ili ugljikovodicima. Svojstva plinova kao što su energija ionizacije i energija po paru iona dana su u Tablici 2.1 [38].

Plin	Gustoća	E_x	E_I	W_I	$[dE/dx]_{min}$	N_P	N_T
	mg cm^{-3}	eV	eV	eV	keV cm^{-1}	cm^{-1}	cm^{-1}
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH_4	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C_2H_6	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC_4H_{10}	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO_2	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF_4	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

Tablica 2.1.: Svojstva plemenitih i molekularnih plinova pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 20°C. E_X, E_I : energije prve ekscitacije i energija ionizacije; W_I : prosječna energija po paru iona; $[dE/dx]_{min}$, N_P, N_T : diferencijalni gubitak energije, primarni i ukupni broj elektron-ion parova po cm, za minimalno ionizirajuće čestice jediničnog naboja [38].

Kako bi ionizacijom nastali elektroni mogli biti opaženi potrebno je primarni signal pojačati. Danas se u TPC komorama koristi princip pojačavanja signala lavinastim procesom umnožavanja elektrona i to primjenom visokom napona, tj. jakog električnog polja. Potrebno je pojačanje reda veličine 10^3-10^4 u odnosu na broj primarnih elektrona.

Multiplikacijski elementi su do nedavno bile anodne žice pod visokim naponom, a inducirani signal bi se očitavao na segmentiranoj katodi (eng. *readout pads*). Takav dizajn ima problem sa velikom povratnom strujom iona (eng. *ion back-flow*) te je zbog toga morao sadržavati dodatni red žica za njihovo skupljanje (što isto tako prekida očitavanje signala, tzv. *dead time*). Takav je dizajn primjerice u trenutno najvećoj komori u detektoru ALICE na LHC-u [40] i ograničava maksimalnu učestalost događaja na 3.5 kHz što je neprihvatljivo za daljnje eksperimente gdje se očekuje povećanje energije i luminoziteta [41]. Anodne žice zbog efekata difuzije i struje iona daju ograničenje na prostornu razlučivost cijelog detektora od oko 50-100 μm [38].

Bolja svojstva ovog multiplikacijskog dijela detektora pokazuju plinski detektori sa mikro-uzorkom (*micro-pattern gas detectors*) napravljeni fotolitografskom metodom i razvijeni na CERN-u pod vodstvom Fabia Saulia od devedesetih godina nadalje. Pružaju visoku sposobnost sakupljanja signala ($> 10^6$ Hz/mm^2), izvrsnu prostornu rezoluciju (~ 30 μm) i višečestičnu rezoluciju (~ 500 μm) [38].

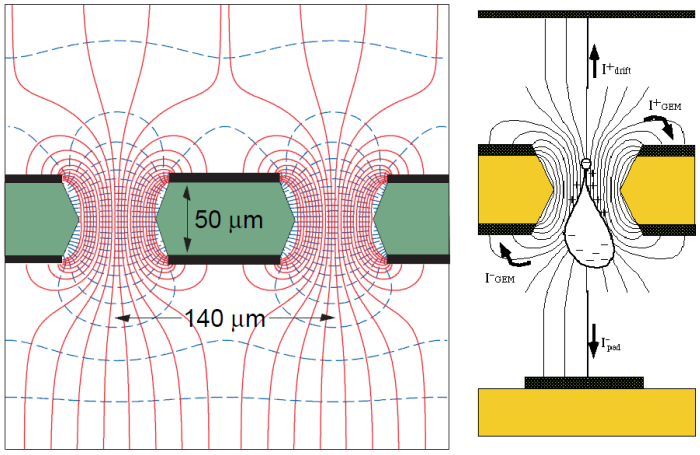
Ovih detektora ima nekoliko vrsta od kojih su najpoznatiji GEM (*Gas Electron Multiplier*) [42, 43] i Micromegas (*Micro-Mesh Gaseous Structure*) detektori [44]. GEM detektori dosad su korišteni u eksperimentima kao što su PHENIX [45], HERA-B, COMPASS, TOTEM, DESY, LHCb te su kao što je već spomenuto i predmet istraživanja ovog rada.

U konkretnom slučaju sPHENIX detektora komora predstavlja bolje rješenje od silicijevih detektora jer smanjuje nastanak elektromagnetske pozadine procesima raspršenja u materijalu (važno za mjerenje EM proba). Razmatra se dizajn u kojem TPC ima visoko-naponsku elektrodu na z=0 cm i očitavanje signala s obje strane

što će rezultirati sa maksimalnom driftnom udaljenosti od ∼95 cm. Sa električnim poljem od 650 V/m i u mješavini plinova takvom da je driftna brzina ∼10 cm/μs maksimalno vrijeme do očitavanja signala bilo bi 10 μs [30].

2.4. GEM detektori

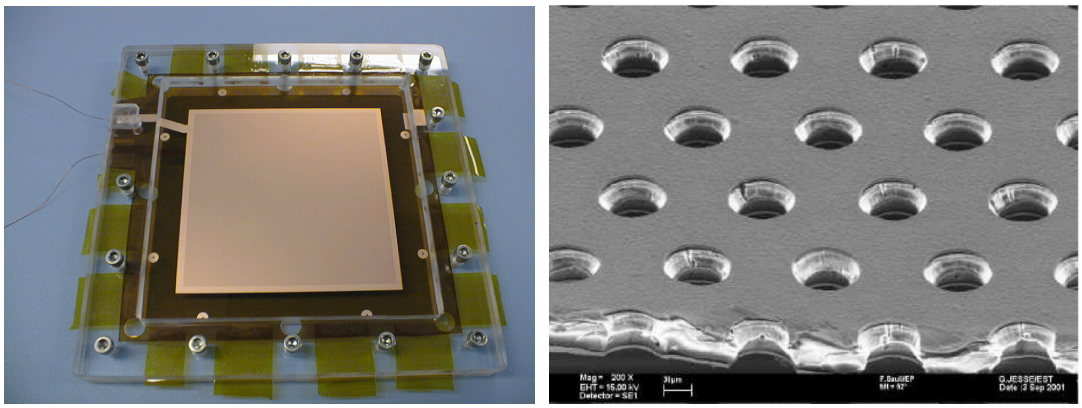
GEM (*Gas Electron Multiplier*) detektor je načinjen od izolatorske kapton folije presvučene s obje strane metalom u kojoj je kemijskim procesom napravljen rupičasti uzorak (rupice su oblika dvostrukog konusa promjera približno 70 μm). Tipične dimenzije prikazane su na Slici 2.4 [38] i odgovaraju onome što se danas naziva standardni GEM. Dimenzije promjera rupica variraju između 25 μm i 150 μm, a razmak između rupica od 50 μm do 200 μm.



Slika 2.4.: Karakteristične dimenzije GEM folije (lijevo) i prikaz lavine u jednoj od rupica (desno). Oblik kapljice dolazi od različite pokretljivosti iona i elektrona (ioni su znatno sporiji).

Elektroni nastali ionizacijom plina visokoenergijskim česticama driftaju unutar većeg plinskog detektora (primjerice komore vremenske projekcije) prema GEM folijama i ulaze u rupice. Primjenom velike razlike potencijala na dvije metalne strane folije u rupicama nastaje jako električno polje, 50-70 kV/cm [38] te se u svakoj od njih događa lavinski proces ionizacije u kojem se eksponencijalno umnožava broj

pristiglih elektrona. Većina elektrona izlazi iz rupica, kao što je prikazano na Slici 2.4 desno. U praksi se u detektorima koristi više GEM folija u nizu tako da se dobije velika konačna multiplikacija elektrona, a to je ujedno i jedna od najvećih prednosti GEM detektora.



Slika 2.5.: Lijevo: Fotografija GEM folije [46]. Desno: Slika GEM folije elektronskim mikroskopom [47].

Parametri koji su važni za ugradnju ovih detektora u komoru vremenske projekcije su:

- faktor pojačanja signala (omjer konačnog i početnog broja elektrona) ili eng. gain; u jednoj GEM foliji ide do reda veličine 10^3 što daje mogućnost za pojačanje od 10^4 uz relativno niske napone na folijama u konfiguracijama sa višestrukim folijama.

- transparentnost GEM folije što je efikasnost prikupljanja primarnih elektrona; ovisi o driftnom polju, naponu na GEM foliji i samoj geometriji rupica [48], a razina od 95% smatra se zadovoljavajućom [40].

- energijska razlučivost; rezultat mjerenja dE/dx razlučivosti s TPC-GEM prototipom za 1 GeV/c elektrone i pione na CERN-u [41] dan je na Slici 2.5 i daje razlučivost od 10.5%.

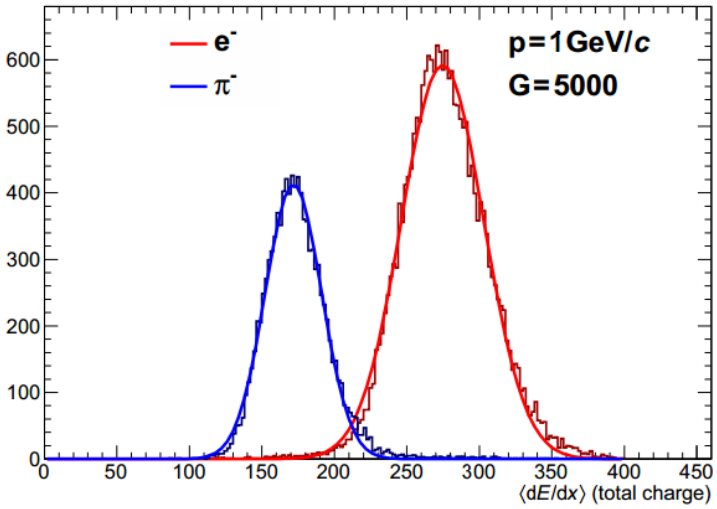
- starenje; mjerenja su pokazala da GEM detektori pokazuju stabilnost pojačanja i nakon prikupljenog naboja reda veličine mC/mm^2 što odgovara otprilike 100 godina rada u detektoru sa sudarima teških iona [40].

- vjerojatnost izboja (iskre); GEM folija u procesu multiplikacije izložena je velikoj gustoći naboja što može dovesti do izboja koji može trajno oštetiti foliju. Neka od posljednjih mjerenja za trostruki GEM detektor pokazuju vjerojatnost reda veličine 10^{-7} za pojačanje od $5{\cdot}10^4$ što je zanemarivo [49].

- povratna struja iona (*eng. ion backflow*);

Ograničenje standardnog očitavanja signala pomoću anodnih žica dolazi od već spomenute nužne uporabe dodatnog niza žica za skupljanja povratnih iona (vrata ili *gating*) što ograničava maksimalnu učestalost prikupljanja podataka na $\sim 10^4$ očitanja u sekundi po mm^2. Same žice uvjetuju to da je razmak između elektroda za očitavanje barem 1 mm [50]. S druge strane povratna struja iona u driftni volumen detektora potisnuta je GEM detektorima na faktor 10^{-1} do 10^{-2} u omjeru sa strujom elektrona [40]. Također GEM detektor zadržava stabilnost relativnog pojačanja za učestalost signala veću za red veličine u odnosu na očitavanje sa anodnim žicama [51].

Posljednji podatci iz ALICE kolaboracije [41] daju broj od 0.7% za povratnu struju iona pri zadovoljavajućoj energijskoj rezoluciji od 12 % (za čestice energije 5.9 keV) u konfiguraciji četiri GEM folije u kojoj su dvije srednje većeg razmaka između rupica (large pitch). Također rezultati grupe koja radi na razvoju GEM detektora za budući EIC sudarivač na BNL-u daju broj od 0.2% za istu energijsku rezoluciju u postavu 2GEM+1Micromegas [52], a isti se rezultat pojavljuje i u najnovijem članku ALICE kolaboracije [41].



Slika 2.6.: dE/dx spektar elektrona i piona impulsa 1 GeV/c mjeren na prototipu unutarnjih komora za očitavanje ALICE detektora sa trostrukim GEM folijama za mulitplikaciju signala [41].

3. Brze simulacije za sPHENIX GEM-TPC

Pregled

U ovom poglavlju ukratko je opisan programski paket za računalnu simulaciju detektora GEANT4 te program za analizu podataka ROOT. Nakon toga opisana je simulacija rada komore vremenske projekcije i dobiveni rezultati.

3.1. Programski paket GEANT4

Geant4 je računalni alat koji omogućuje realističnu simulaciju prolaska čestica kroz materiju. Sada već 20 godina u uporabi i razvitku, Geant4 koristi se u mnogim poljima znanosti kao što su fizika visokih energija i akceleratora, nuklearna fizika, astrofizika i medicina. Posebno su to konstrukcija detektora, zaštita od zračenja, kalorimetrija, kozmičke zrake, fizika neutrina, dozimetrija, radioterapija te različita istraživanja učinaka zračenja primjerice na satelite ili planete.

Geant4 razvijen je od strane dvije grupe znanstvenika u dva velika istraživačka centra – CERN (Švicarska) i KEK (Istraživački centar sa akceleratorima u Japanu) koje su projekt započele 1993. godine [53]. Zamijenivši verziju Geant3 napisanu u jeziku FORTRAN sa novom verzijom objektno-orjentiranog programa napisanog u programskom jeziku C++, istraživači su simulacijski alat učinili fleksibilnijim i funkcionalnijim za primjenu u modernim eksperimentima. Simulacije koriste Monte Carlo računalne metode i algoritme koje se temelje na generatorima slučajnih događaja.

Pohranjena definicija klasa omogućuje objektno orijentirano programiranje

od definiranja geometrije detektora, generiranja samih čestica, fizikalnih procesa u detektoru te konačno do rekonstrukcije fizikalnih observabli i vizualizacije. Nakon unošenja geometrije i materijala željenog detektora odabiremo vrstu čestice (ili više njih) kojima zadajemo željeni verteks, impuls i energiju. Dalje uključujemo različite fizikalne procese (elektromagnetske, hadronske) koji brinu za simulaciju interakcije čestice s detektorom. Tako u simulaciju unosimo pravu fizikalnu situaciju koja onda uključuje procese raspršenja, Bremsstrahlung, pljuskove, tvorbu parova i slično. U područjima detektora koje označimo kao osjetljivi volumen Geant4 računa deponiranu energiju čestice, poziciju pogotka, pripadne fizikalne procese interakcije s materijom i na taj način ostvaruje mogućnost rekonstrukcije putanje i impulsa (ako simulacija uključuje magnetsko polje). Možemo te točke kao i u mjerenjima nazvati "*raw hit*" ili jednostavno pogodak. Uz to što računa ove podatke u simulaciji Geant4 čuva i sve podatke generirane Monte Carlo metodama (kao što su vrsta čestice, čestica roditelj, impuls i slično).

3.2. Analiza podataka programom ROOT

Kako bismo započeli simulaciju rada određenog detektora osim samog programa Geant4 potrebno je poznavanje i korištenje programa ROOT za spremanje i analizu podataka. Ovaj je program također jedan u nizu programa razvijenih na CERN-u u svrhu efikasnije obrade velike količine podataka sa LHC-a (inačice kao primjerice Geant3 napisan u Fortranu bio je razvijen i prije). Kao i Geant4, ROOT je napisan u C++ jeziku i koristi tehniku objektno-orjentiranog programiranja. Većina ovdje navedenih podataka može se naći u [54, 55]. ROOT se razvija od 1995. godine, prošao je brojna izdanja i modifikacije i jedna od prednosti njegovog korištenja je ta što osigurava pristup već razvijenim funkcijama (tvori tzv. *framework* ili radno okruženje) kao što su histogrami, grafovi ili matematičke funkcije prilagodbe koje su neophodne u analizi eksperimentalnih podataka. ROOT također posjeduje vlastitu hijerarhiju kategorija klasa kao i GEANT4.

Nakon instalacije samog paketa Geant4 i programa Root za obradu izlaznih

datoteka simulacija, na računalu smo instalirali i PHENIX bazu podataka koja sadrži specifikacije plana nadogradnje PHENIX detektora te se koristi u programima za simulaciju. Simulacije su napravljene u Laboratoriju za nuklearnu fiziku na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu.

3.3. Brza simulacija rada komore vremenske projekcije

Osnovni korak u simulacijama je definicija geometrije i materijala za detektor čiji rad želimo simulirati. Ovim simulacijama dajemo naziv "brze" jer su materijali uneseni samo okvirno, a detaljno su prema predloženim dimenzijama budućeg detektora unesene geometrijske postavke. U ovom slučaju i prema prijedlozima sPHENIX grupa za nadogradnju detektora, prva tri sloja činit će silicijski detektori za precizno određivanje vrhova i putanja čestica (*Silicon Vertex Tracker*, SVTX), drugi veći sloj je mogući TPC ili komora vremenske projekcije, a dalje slijede elektromagnetski kalorimetar i hadronski kalorimetar. U našem slučaju bilo je važno unijeti geometriju prva dva detektora: SVTX i TPC sloja i to je učinjeno u okviru prostornih parametara zadanih sPHENIX prijedlogom.

Koordinatni sustav je orijentiran tako da je z os u smjeru osi snopova, a x i y os su u ravnini okomitoj na snop (često se koriste i kutevi θ i ϕ sfernog sustava). Magnetsko polje zavojnice koja okružuje detektor definirano je kao homogeno iznosa 1.5 T u z smjeru. Za SVTX detektor definirana su 3 sloja silicija u obliku cilindara: duljine su im 20 cm, 20 cm i 36 cm, debljina 0.035 cm, 0.035 cm i 0.0625 cm, imaju radijuse 2.5 cm, 5 cm i 10 cm. Također za ove slojeve SVTX detektora definirani su i bakreni potpornji oko svakog sloja debljina 0.0161 cm (prva dva) i 0.062 cm (treći sloj).

Komoru vremenske projekcije u realnom slučaju ispunjava mješavina plina i rezultati fizikalnih procesa će biti određeni svojstvima pojedinog plina (primjerice karakterističnom depozicijom energije čestice dE/dx). U simulaciji ćemo ipak modelirati komoru slojevima silicija koji će zamijeniti plin. Napomenimo kako je ova simulacija "gruba" ili "brza" verzija simulacije komore vremenske projekcije. U njoj

nećemo simulirati niti iščitavati signal elektrona koji nastaju ionizacijom u plinu i driftaju prema krajevima komore niti ćemo simulirati mjereno vrijeme od sudara do očitavanja signala koje daje u konačnici z koordinatu početne čestice. Bez zapravo trodimenzionalnog položaja određenog pravim TPC mehanizmom, u prvom koraku (ovoj simulaciji) ograničit ćemo se samo na određivanje impulsa pomoću radijusa zakrivljenosti u magnetskom polju uključujući gubitak energije i fizikalne procese prolaskom kroz samu komoru. Ovakav postupak omogućit će nam određivanje razlučivosti impulsa detektora koja u realnom slučaju dolazi od odabira veličine pločica za očitavanje signala (*read-out pads*) na vanjskim stranama TPC cilindra.

Komora je modelirana cilindrima silicija debljine koja bi odgovarala plinu jednake radijacijske duljine, a broj cilindara ovisi o tome koliko točaka želimo za rekonstrukciju putanje jer će svaki cilindar imati osjetljivo područje u kojem čestica "pogađa" detektor. Na radijusima od početnih 16 cm do konačnih 90 cm zadano je 75 cilindara (što znači 75 točaka za rekonstrukciju putanje) međusobno razmaknutih za 1 cm, a pretpostavljajući da je TPC ispunjen plinom CF_4, odgovarajuća debljina sloja silicija je 0.001 cm (odgovara debljini od 1 cm sloja CF_4). Cilindri su duljine 2 m što sa vanjskim radijusom od 90 cm odgovara pokrivenosti u pseudorapiditetu čestica od -1 do 1. Prema poznatim podatcima navedenim u Tablici 3.1 možemo vidjeti odnose između karakterističnih duljina zračenja[1] za različite materijale.

[1]Karakteristična duljina zračenja je udaljenost u određenom materijalu nakon koje se prosječna energija snopa elektrona smanji na 1/e početne vrijednosti. Također odgovara 7/9 srednjeg slobodnog puta za proizvodnju parova od visokoenergijskog fotona.

Materijal	Karakteristična duljina zračenja [m]
Si	0.0936
Cu	0.0143
Ar	110
CO_2	183
CF_4	92.4
Ne	345

Tablica 3.1.: Karakteristične duljine zračenja za razne plinove te silicij i bakar [56].

Nakon definiranja geometrijske konstrukcije detektora i materijala u njemu slijedi odabir generiranja čestica u simulaciji. Odabrani su elektroni generirani na z osi sa rasponom vrijednosti z koordinate verteksa od -10 cm do 10 cm, a energija elektrona definirana je u rasponu od 0 do 10 GeV. Polarni kut ϕ je od 0 do 2π, a pokrivenost u pseudorapiditetu $-1<\eta<1$.

Uzimajući u obzir to da Geant4 rekonstruira točkastu putanju čestice koja bi imala savršenu rezoluciju, traženu rezoluciju komore uvodimo u obliku "ćelija" (kvadara unutar kojih je jedna točka rekonstruirane putanje "razmazana" u x, y i z smjeru) kojima prekrivamo svaki od cilindara. Potrebno je znati da se prostorna razlučivost detektora u ovom slučaju računa kao $R\Delta\phi/\sqrt{12}$ [2] gdje je R radijalna udaljenost sloja od cijevi snopa, a ϕ polarni kut. Tako rezolucija komore od 90 μm odgovara stranici presjeka jedne takve ćelije od 0.03 cm u x i y smjeru. Rezoluciju u z smjeru koja dolazi od mjerenja vremena u TPC komori, a koju ne simuliramo možemo procijeniti, a u ovom slučaju to definira duljinu svake ćelije. Također već prema poznatoj rezoluciji SVTX detektora konstruiramo ćelije za prva tri cilindra.

[2] Tipična prostorna razlučivost dana je sa $\sigma_x = d/\sqrt{12}$.

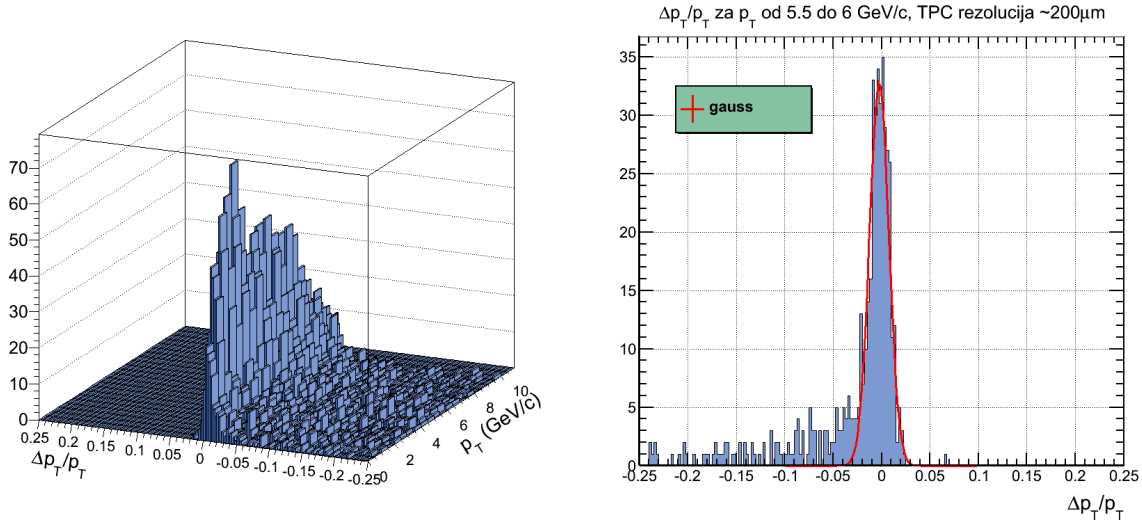
Sloj silicija	x=y [cm]	z [cm]	rezolucija [μm]
SVTX 1	0.005	0.0425	15
SVTX 2	0.005	0.0425	15
SVTX 3	0.008	0.1	20
TPC 1-75	0.03	0.3	90
TPC 1-75	0.0485	0.3	140
TPC 1-75	0.07	0.3	200

Tablica 3.2.: Dimenzije segmentacijskih ćelija za razne slojeve silicija u simulaciji detektora. Prva tri sloja SVTX detektora konstantnih su dimenzija ćelija, dok smo veličine u TPC slojevima mijenjali ovisno o željenoj prostornoj razlučivosti detektora (90 μm, 140 μm i 200 μm).

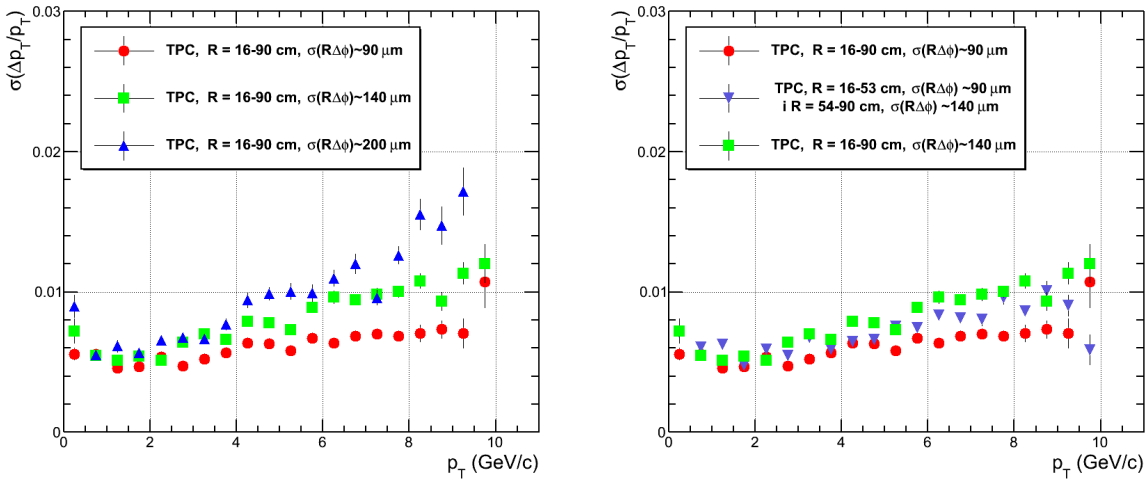
3.4. Analiza podataka i rezultati

Simulacije su rađene za navedene geometrijske parametre TPC komore i za različitu traženu prostornu rezoluciju očitanja u transverzalnoj ravnini (90 μm, 140 μm i 200 μm) kao u Tablici 3.2. Također je napravljena usporedba i sa slučajem u kojem se zahtijevaju dvije različite rezolucije ovisno o radijusu. Naime, realni je slučaj u TPC komorama to da su na većem radijusu veće površine segmenata za očitanje zbog veće depozicije energije (omogućuje bolju rezoluciju u dE/dx), a na manjim radijusima veličina segmenata je manja zbog gustoće putanja.

Slika 3.1 prikazuje 2D raspodjelu razlike između rekonstruiranog i generiranog impulsa s obzirom na generirani transverzalni impuls čestica. Prikaz sadrži 8049 događaja za TPC tražene rezolucije od 140 μm. Vidljivo je kako zbog fizikalnih procesa uključenih u simulaciju čestica interakcijom sa materijom gubi dio energije te rekonstruirani impuls može biti manji od generiranog. Isto tako je vidljivo kako zbog slučajnih procesa ta razlika slijedi gausovu distribuciju.



Slika 3.1.: Dvodimenzionalna raspodjela rezolucije i generiranog impulsa elektrona (lijevo). Projekcija na y-os te raspodjele za p_T od 5.5 do 6 GeV/c (desno).



Slika 3.2.: Impulsna rezolucija ovisno o generiranom i impulsu za različite prostorne rezolucije detektora (lijevo). Usporedba sa slučajem kombiniranja različitih veličina segmentiranih dijelova za očitavanje (desno).

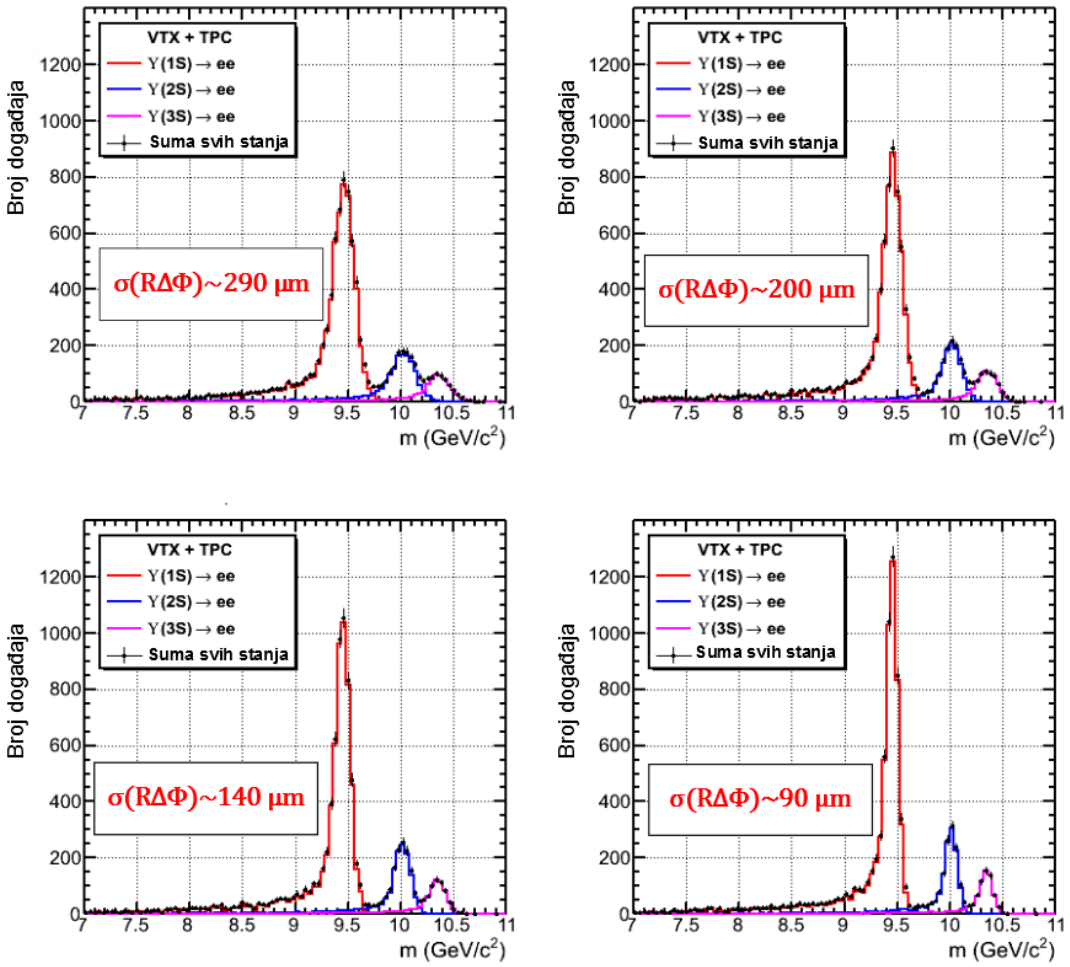
Histogram na Slici 3.1 desno prikazuje projekciju na Y-os duž samo jednog bina u transverzalnom impulsu već prikazane distribucije (p_T od 5.5-6 GeV/c). Na

ovu raspodjelu u 1D histogramu izvršena je prilagodba na gausovu funkciju. Ova je analiza učinjena za svaki razred transverzalnog impulsa širok 0.5 GeV/c (ukupno njih 20), a dobivena standardna devijacija iz prilagodbe uvrštena je u novi histogram.

Slika 3.2 prikazuje relativnu razlučivost impulsa ovisno o generiranom impulsu za različite tražene prostorne rezolucije TPC komore, 90 μm, 140 μm i 200 μm. Može se zaključiti kako rezolucija u impulsu opada za veće dimenzije ćelija definiranih u TPC slojevima što odgovara budućim segmentima očitanja na krajevima komore.

Nadalje je dana usporedba slučajeva sa dvije rezolucije i onog u kojem je napravljena kombinacija sa dvije veličine ćelija (Slika 3.2 desno). Ovakva kombinacija u slučaju da doprinosi poboljšanju energetske rezolucije u dE/dx neće puno naštetiti rezoluciji u impulsu koja ostaje ispod 1% transverzalnog impulsa.

Za sPHENIX u konfiguraciji tri sloja VTX detektora sa TPC komorom ovi rezultati za razlučivost u impulsu su prihvatljivi što se može vidjeti iz rekonstrukcije tri stanja upsilon rezonancije (Slika 3.3). Ta je rezonancija od interesa jer nestanak pobuđenih stanja može karakterizirati temperaturu kvark-gluon plazme (slabije vezana stanja prije će se raspasti s visokom temperaturom medija).



Slika 3.3.: Rekonstrukcija upsilon rezonancije i njena dva pobuđena stanja u simulacijama sa četiri različite prostorne razlučivosti TPC detektora. Rezultate simulacija ustupio je prof. I. Ravinovich sa Weizmann Instituta.

4. Laboratorijska mjerenja sa trostrukim GEM detektorom

Pregled

Opisana su mjerenja i iznešeni rezultati eksperimenta sa trostrukim GEM detektorom u plinskoj mješavini argona i ugljikovog dioksida. Mjerenja su rađena u Laboratoriju za teške ione na Weizmann Institutu u Izraelu.

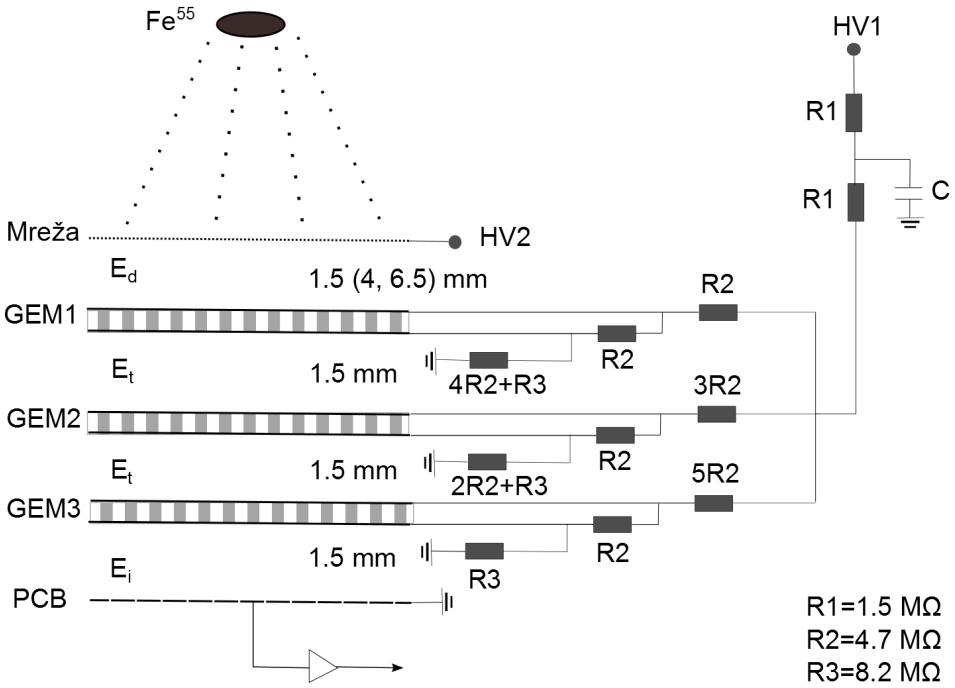
4.1. Eksperimentalni postav

U svrhu moguće ugradnje TPC komore u sPHENIX detektor potrebno je obaviti mjerenja sa već spomenutim multiplikacijskim elementom signala, a to je GEM detektor. U ovom eksperimentu korišten je detektor sastavljen od tri standardne GEM folije dimenzija 26.8cm x22.1 cm. Folije su bile sa prošlog detektorskog podsustava PHENIX eksperimenta pod nazivom *Hadron Blind Detector* [45, 57].

Svaka GEM folija napravljena je od 50 μm debelog sloja kaptona koji je sa obje strane presvučen sa 5 μm debelim slojem bakra. Uzorak rupica je takav da su one razmaknute za 140 μm, dok je promjer rupica 60-80 μm. Svaka je folija testirana u uvjetima čiste sobe te je smatrana ispravnom ako je struja koja teče kroz foliju manja od 15 nA pri naponu od 500 V.

Eksperimentalni postav sastavljen je kao na Slici 4.1. Cijeli je postav unutar cilindrične posude od nehrđajućeg čelika koja je dizajnirana sa otvorima za plinski sustav i rotirajuću turbo vakuumsku pumpu. Izvor visoko energetskih ionizirajućih čestica je radioaktivni uzorak izotopa željeza ^{55}Fe koji se raspada elektronskim uh-

vatom. Raspadom nastaju X-zrake prosječne energije 5.9 keV-a. Izvor je 12.5 mm u promjeru i 3 mm dug, cilindričnog oblika, a radioaktivni je sloj nanesen na bakrenu podlogu i obložen niklom. Izvor je pričvršćen na nosač koji je 6 cm udaljen od dna posude u kojoj se nalazi detektor.

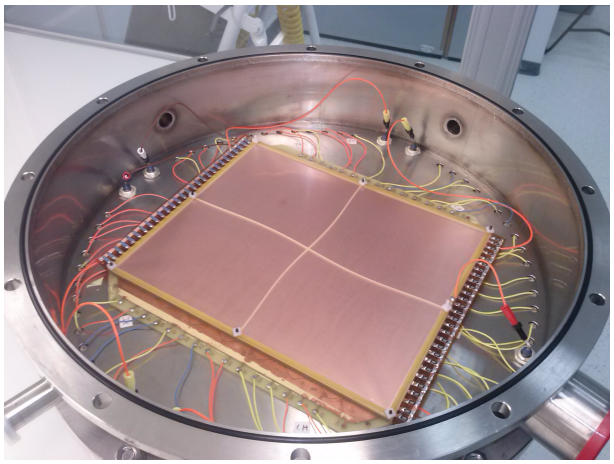


Slika 4.1.: Shema eksperimentalnog postava mjerenja sa 3GEM detektorom.

Odozgo prema dolje GEM folije su redom označene sa GEM1, GEM2 i GEM3 i međusobno su razmaknute za 1.5 mm što je debljina okvira svake folije (napravljenog od materijala G10). Za električno polje između folija GEM1 i GEM2 koristit ćemo naziv transferno polje (E_t).

Iznad GEM folija je prva elektroda pod nazivom mreža (ili eng. *mesh*) koja je od prve GEM folije odmaknuta za 1.5, 4 ili 6.5 mm ovisno o mjerenju. Ta je elektroda potrebna za stvaranje električnog polja između nje i GEM1 folije koje nazivamo driftno polje, a na slici je označeno sa E_d. Driftno polje skuplja elektrone proizvedene

ionizacijom u plinu. Smanjujući udaljenost između mreže i izvora, tj. povećavajući udaljenost između mreže i folije GEM1 povećavamo prostorni kut između elektrode i izvora i time povećavamo vjerojatnost prikupljanja elektrona proizvedenih ionizacijom. Ova je elektroda nezavisno spojena na izvor visokog napona.



Slika 4.2.: PCB, GEM folije i mreža složeni u 3GEM detektor unutar posebno dizajnirane čelične komore.

GEM folije se spajaju na izvor visokog napona preko djelitelja napona čija je shema kao na Slici 4.1. Korišteni su otpornici R1 od 1.5 MΩ, R2 od 4.7 MΩ i R3 od 8.2 MΩ. Na samom početku djelitelja napona nalazi se niskopropusni filter sa kondenzatorom čija je uloga potisnuti moguće visokofrekventne šumove naponskog izvora. Ukupna struja koja teče ovim djeliteljem napona je reda veličine 100 μA, dok svakom granom (prema svakoj GEM foliji) teče trećina ukupne struje.

Ispod folije GEM3 na dnu nalazi se tiskana ploča ili eng. Printed Circuit Board (PCB) koja služi za očitavanje signala prikupljanjem elektrona. Ploča je uzemljena, a električno polje između nje i GEM3 zvat ćemo indukcijsko polje, E_i. Tiskana ploča je podijeljena na 56 heksagonalnih dijelova sa stranicom duljine 15.5 mm (površine 6.24 cm^2) s kojih se nezavisno može očitavati signal, tj. svaka je pločica spojena žicom na izlazni LEMO konektor na dnu čeličnog spremnika. Signal s pločice može biti spojen na predpojačalo ili na pikoampermetar, ovisno o mjerenju.

Izvor visokog napona je uređaj CAEN GECO 2020 sa 12 kanala, negativnog polariteta i do 5 kV. Uređaj se računalno kontrolira posebnim softverom, a moguće je u njemu postaviti granice na struju koju sam uređaj mjeri na određenom kanalu (određenom krugu kojeg je dio) što je korisno za kontroliranje i prevenciju štete u slučaju izboja unutar GEM detektora (kada zbog prekoračenja granice postavljene na mjerenu struju visoki napon pada na nulu). U mjerenjima smo granicu postavili 2 nA iznad struje koju smo izmjerili kroz sam djelitelj napona (kada GEM-ovi nisu bili priključeni). U slučaju izboja, softverske parametre smo postavili tako da se na oba kanala, kanal na koji je priključen djelitelj napona i kanal na koji je priključena mreža, istovremeno napon počeo smanjivati prema nuli brzinom od 25 V/s.

4.2. Plinski sustav

Tijekom upravljanja detektorom i obavljanja mjerenja, potrebno je osigurati konstantan tok plina kroz čelični cilindar. Shema plinskog sustava dana je na Slici 4.3.

Plinski sustav obuhvaća cjevovod, plinske boce, kontrolne uređaje, računalo i softver preko kojeg se kontrolira tok plina u dvjema od tri linije. Četiri plinske boce spojene su na ulazu u sustav cijevi – argon, ugljkov dioksid, dušik i CF_4. U ovom eksperimentu korišteni su samo argon i ugljikov dioksid u željenim omjerima, svaki plin čistoće veće od 99.99%.

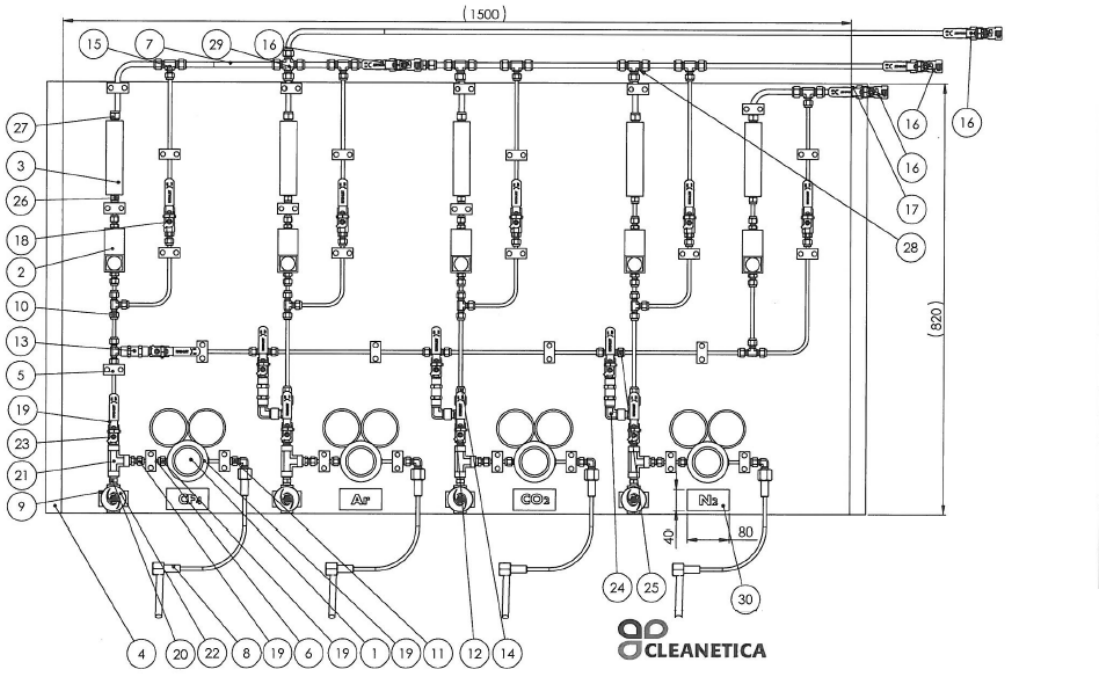
Kao što je već spomenuto plin se pomoću ventila može usmjeriti u tri različite linije i isto tako se može miješati na različite načine (različiti plinovi ovisno o položaju ventila u cijevima). Dvije od tih linija mogu se kontrolirati pomoću računalnog softvera i uređaja koji mjeri maseni tok plina tok plina u jedinicama mL/s, a sa preciznošću od 0.01 mL. Na taj način mogu se plinovi miješati u željenim omjerima. Primjerice, ako želimo omjer argona i ugljikovog dioksida 80%-20% unutar detektora i ukupni tok od 60 mL/min tada ćemo postaviti tok argona na 48 mL/min, a tok CO_2 na 12 mL/min. Budući da je čelični spremnik s detektorom volumena približno 15 L to znači da je potrebno otprilike 4 sata da se plin unutar cilindra jednom potpuno

promijeni, a za preciznost u omjeru nakon promijene mješavine plina potrebno je cijeli volumen promijeniti nekoliko puta.

Treća linija je takozvana "brza linija" kojom se tok plina ne kontrolira nego se samo pomoću ručnog mjerača toka može odrediti teče li plin ovom linijom. Ova je linija korisna želimo li relativno brzo napuniti detektor plinom (u odnosu na kontroliranu liniju).

Sam čelični spremnik unutar kojeg se nalazi trostruki GEM detektor ima tri otvora na koje su spojene cijevi za tok plina i ekstrakciju zraka ili plina vakuumskom pumpom (Slika 4.2). Jedan otvor spojen je na ulazne linije cjevovoda, tj. omogućuje dotok plina odabranom linijom u detektor. Drugi otvor je povezan sa vakuumskom pumpom i zatvoren je osim u slučaju ekstrakcije zraka unutar detektora. Treći otvor nasuprot prvog je spojen na odvodne cijevi kojima se plin iz detektora odvodi van iz laboratorija. Isto tako ulazna linija ima ventil i dodatnu cijev koja služi kao premosnica oko detektora i direktno je spojena na izlaznu liniju. Ovu premosnicu možemo koristiti primjerice tijekom rada vakuum pumpe. Izlazna linija sadrži mogućnost korištenja uređaja za mjerenje ppm udjela kisika u plinu. Time smo kontrolirali kvalitetu plinske mješavine, a moguće povećanje razine kisika ukazivalo bi na mjesta koja nisu dobro zatvorena na samom cilindru te uzrokuju curenje.

Varian Turbo-V 301 rotirajuća turbo pumpa korištena je nakon montiranja i zatvaranja čeličnog cilindra i prije puštanja samog plina kroz otvore. Vakuum koji se ovim uređajem može postići je reda veličine 10^{-9} mbar ili 10^{-6} Torr.



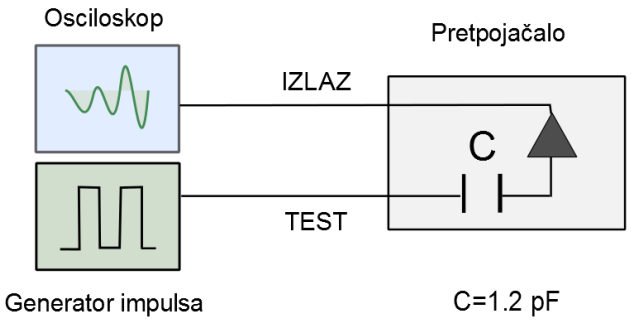
Slika 4.3.: Schema plinskog sustava koji osigurava dovod i protok plina kroz detektor.

4.3. Mjerenje faktora pojačanja signala

Osnovna svrha GEM detektora je pojačanje primarnog elektronskog signala koji dolazi od ionizacije plina X-zrakama. Parametar kojim možemo mjeriti intenzitet pojačanja nazvat ćemo faktor pojačanja signala (ili samo pojačanje), a u daljnjem tekstu će katkad ta veličina na slikam biti označena i engleskim nazivom Gain. Mjerenje ovog parametra obavljeno je tako što se jedna od pločica na kojoj se može očitati signal (Slika 4.1) spoji na predpojačalo koje pojačava i oblikuje signal i nakon toga se signal spoji na osciloskop.

Prije mjerenja faktora pojačanja nužno je obaviti kalibraciju pretpojačala prema shemi na Slici 4.4. Budući da se visina signala očitava s osciloskopa potrebno je znati vezu između ukupnog naboja mjerenog pulsa i njegove visine na ekranu. Kalibraciju smo obavili na način da smo na TEST ulaz pretpojačala spojili poznati signal iz generatora impulsa i mjerili smo signal na izlazu. Kako znamo kapacitet

kondenzatora unutar pretpojačala, možemo ulazni naponski signal pretvoriti u naboj (ako je integracijska konstanta predpojačala veća od perioda pulsa što je regulirano namještanjem parametara pulsa). Tada očitavanjem signala na osciloskopu možemo znati koliko elektrona odgovara milivoltu signala na ekranu.



Slika 4.4.: Shema za kalibraciju predpojačala.

Korišteni impuls imao je sljedeće karakteristike: visina 100 mV, negativan polaritet, kvadratični val, frekvencija 100 kHz, vrijeme porasta signala 5 ns, širina signala 50 μs, vrijeme pada signala 10 ns.

Mjeren je signal za 10 različitih visina ulaznih impulsa i za svaki je izračunata veličina koju nazivamo faktor pretvorbe K, a računali smo na način:

$$K = \frac{CV_{gen}}{eV_{osc}N_{par}}$$

gdje je C kapacitet kondenzatora unutar predpojačala, e elementarni naboj, V_{gen} je visina generiranog pulsa, V_{osc} je visina signala na osciloskopu, a N_{par} je broj parova koji nastaje u određenoj plinskoj mješavini za energiju X-zrake od 5.9 keV iz izvora.

Broj ion-elektron parova stvorenih ionizacijom ovisi o mješavini plina i o energiji čestice koja uzrokuje ionizaciju. Dakle, faktor pretvorbe K će poprimiti različite vrijednosti ovisno o omjerima argona i ugljikovog dioksida. Prosječna en-

ergija potrebna za stvaranje elektron-ion para u plinu dana je u tablicama, primjerice Tablici 2.1. Na taj način možemo izračunati kako jedan foton prosječno ima dovoljno energije za stvaranje 210 primarnih elektrona u mješavini Ar-CO_2 70-30, 215 elektrona u plinu sa omjerima 80-20 i 221 u mješavini 90-10.

Dobivene su različite vrijednosti faktora pretvorbe dani u Tablici 4.1.

Omjer Ar-CO_2	K
%	mV^{-1}
70-30	10.89±0.08
80-20	10.64±0.08
90-10	10.35±0.08

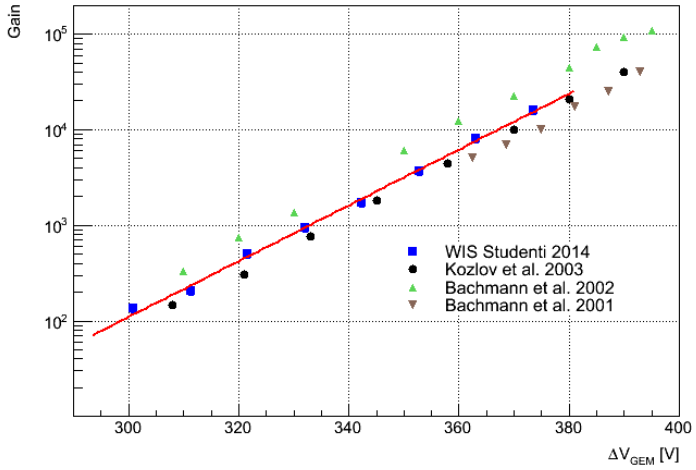
Tablica 4.1.: Faktori pretvorbe za različite mješavine (omjere) plinova.

Definirajmo sada faktor pojačanja. Ova veličina je omjer broja elektrona u konačnom signalu i broja primarnih elektrona svorenih jednim fotonom. Možemo pisati:

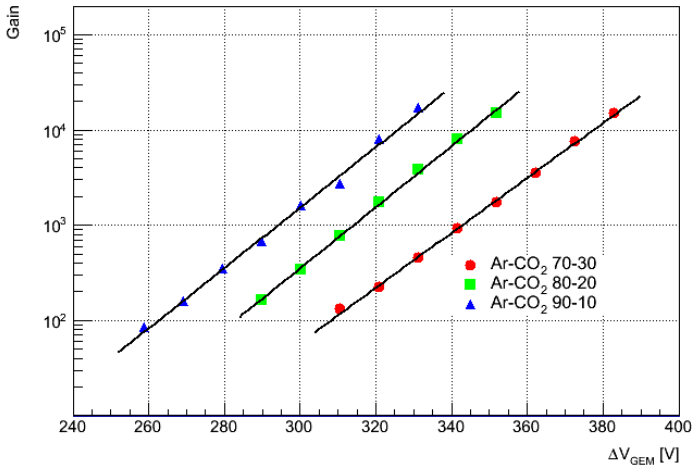
$$Gain = \frac{N_{prim}}{N_{signal}} = KV_{osc}.$$

Vidimo sada praktičnu uporabu faktora pretvorbe K. Pojačanje ćemo posebno računati za različite mješavine plinova. Očekujemo kako će faktor pojačanja biti veći u mješavinama sa manjim udjelom ugljikovog dioksida.

Prva mjerenja ovisnosti pojačanja o naponu na GEM folijama (ΔV_{GEM}) obavljena su sa mješavinom plinova Ar-CO_2 70-30 te je napravljena usporedba sa već objavljenim mjerenjima iz prethodnih godina kao na Slici 4.5 [45, 58, 59]. Eksperimentalne točke dobro su opisane eksponencijalnom funkcijom prilagodbe, kao što predviđa teorija Townsedovog izboja (lavine) [60, 61]. Također su slaganja sa prethodnim rezultatima očito dobra, uz napomenu da faktor pojačanja jako ovisi o omjeru tlaka i temperature pri kojima su vršena mjerenja [45].



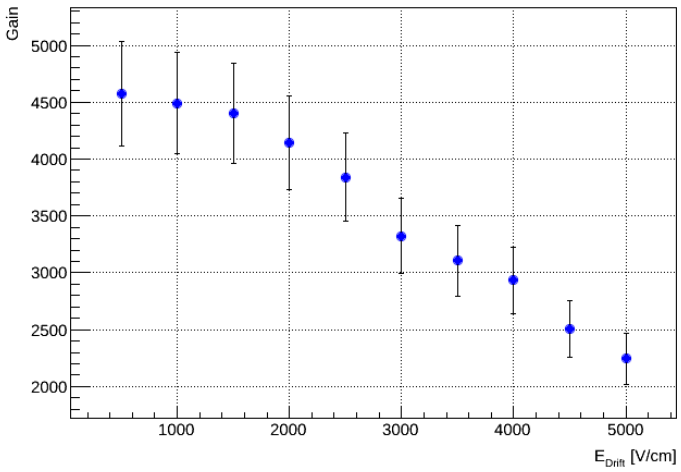
Slika 4.5.: Mjerenja faktora pojačanja (Gain) sa trostrukim GEM detektorom u mješavini Ar-CO_2 70-30 i usporedba sa već objavljenim rezultatima.



Slika 4.6.: Usporedba mjerenja faktora pojačanja u tri različite mješavine plinova Ar i CO_2.

Napravljeno je i mjerenje faktora pojačanja u ovisnosti o driftnom električnom polju tako što je mijenjana vrijednost visokog napona na mreži (Slika 4.7). Nažalost primjenom velikog električnog polja i visokog napona opažen je pad signala zbog izboja na GEM folijama. Budući da mjerenja ne pokazuju porast broja

elektrona, napon očito nije bio dovoljan da u driftnoj regiji počne pojačavanje (lavina), ali je u konačnici uzrokovao kratak spoj na folijama te tako smanjio signal na očitanju. Iznad vrijednosti električnog polja E_d od 1.5 kV/cm detektor nije bio u normalnom operacijskom stanju.



Slika 4.7.: Mjerenje pojačanja ovisno o driftnom polju uzrokovalo je izboj i oštećenje GEM folija što se vidi u naglom padu signala za velika polja.

4.4. Mjerenje struje elektrona

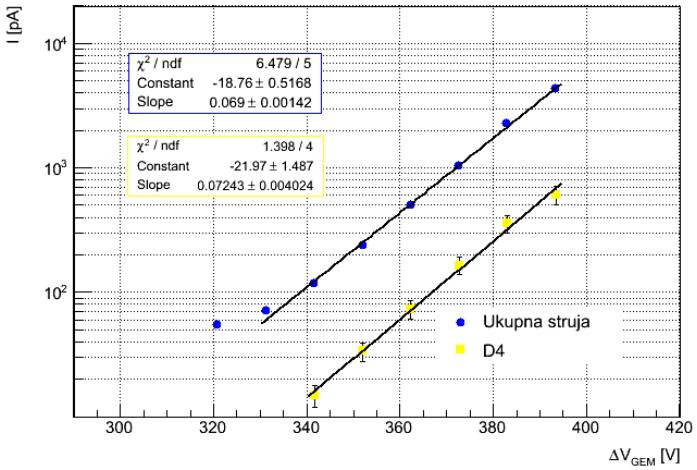
Pri testiranju, razvoju i proučavanju GEM detektora za pojačavanje signala unutar većeg detektora kao što je komora vremenske projekcije parametar od interesa je povratna struja iona. Naime, kao što je već spomenuto, ioni nastali procesom pojačanja u GEM folijama kreću se u smjeru električnog polja, što znači natrag u područje komore gdje se događa primarna ionizacija. Iako puno sporiji od elektrona, ioni mogu poremetiti driftno električno polje koje bi trebalo biti uniformno u cijeloj komori. Povratna struja iona jedan je od najvećih problema nekih komora unutar detektora u sudarivačima kao što je TPC u detektoru ALICE na LHC-u koji koristi mnogožičane proporcionalne komore umjesto GEM folija.

Iako je povratna struja iona značajno manja u slučaju GEM folija samom konstrukcijom (ioni ne mogu slobodno driftati u smjeru polja jer nailaze na nesimetričan raspored rupica u folijama, tj. rupice nisu točno jedna iznad druge između različitih folija) nego u slučaju mnogožičane komore, od interesa je da struja koja dolazi od iona, a može se mjeriti na elektrodama detektora (primjerice na samim GEM folijama ili na mreži) bude što manja. Ovu veličinu označit ćemo i sa kraticom IBF (eng. *ion backflow*). Ona je definirana kao omjer struje elektrona koja tvori konačni signal i pozitivne struje iona koja se mjeri na nekoj od gornjih elektroda, najčešće na mreži. Posljednji je rezultat Yale grupe [52] sa IBF<0.2 % u postavu 2GEM+1Micromegas.

U našem postavu zbog vremenskog ograničenja nismo uspjeli mjeriti povratnu struju iona, ali prijedlog mjerenja će biti iznesen kao i prvi korak prema mjerenju te veličine, a to je struja elektrona na tiskanoj pločici.

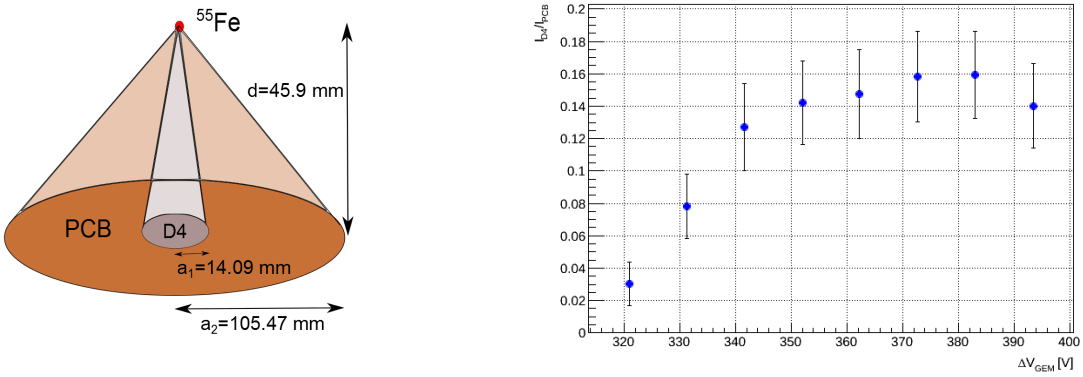
Prema shemi danoj na Slici 4.1 signal sa heksagonalnih pločica bio je spojen na pikoampermetar, Keithley 6487. Imali smo mogućnost promatrati struju sa jedne središnje pločice kao i struju sa svih pločica odjednom jer smo sve ostale međusobno spojili. Na taj način mogli smo provjeriti konzistentnost rezultata (lakim računom s aproksimacijom točkastog izvora kao na Slici 4.9 može se pokazati kako je očekivana struja na jednoj pločici približno 12% ukupne struje) i istovremeno mjeriti i faktor pojačanja signala sa jedne pločice.

Može se vidjeti kako i struja pokazuje karakteristično eksponencijalno ponašanje u ovisnosti o naponu na GEM folijama za obje mjerene struje, sa istim nagibom (Slika 4.8).



Slika 4.8.: Struja očitanja u ovisnosti o naponu na GEM folijama.

Isto tako vidi se i omjer struja cjelovitog signala i signala sa samo jedne pločice, koji je približno 14% što se slaže s očekivanjem promatrajući prostorni kut koji osjetljiva površina zatvara s radioaktivnim izvorom. (Slika 4.9)



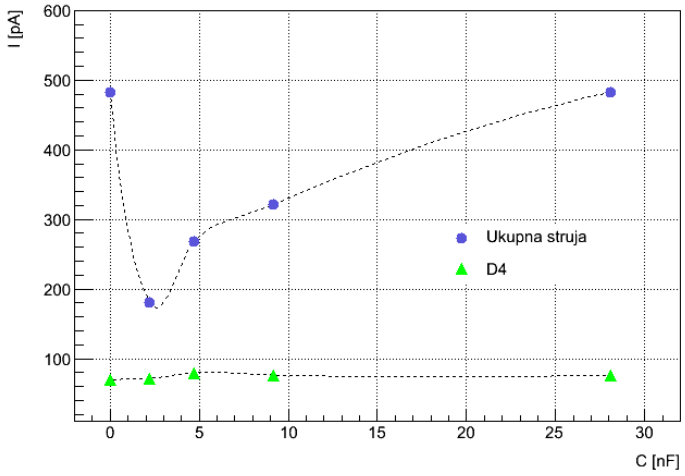
Slika 4.9.: Shematski prikaz zračenja iz izvora na tiskanu ploču u aproksimaciji točkastog izvora i kružne plože (lijevo). Omjer struja sa cijele tiskane ploče i struje sa jednog od središnjih heksagonalnih dijelova (desno).

4.5. Daljnji plan za mjerenje struje iona

Kako je ograničenje pikoampermetra Keithley 6487 takvo da ga nismo bili u mogućnosti spojiti na visoki napon (viši od 500 V) i na taj način direktno mjeriti pozitivnu struju iona na mreži, planirali smo u svrhu ovog mjerenja promijeniti polaritet napona primijenjenog na elektrode GEM detektora (folije i mrežu). Mjerenje se može obaviti kao na Slici 4.8. Istovremeno, isti problem riješili bismo sada na način da na tiskanu pločicu za očitavanje signala spojimo kondenzator i otpornik.

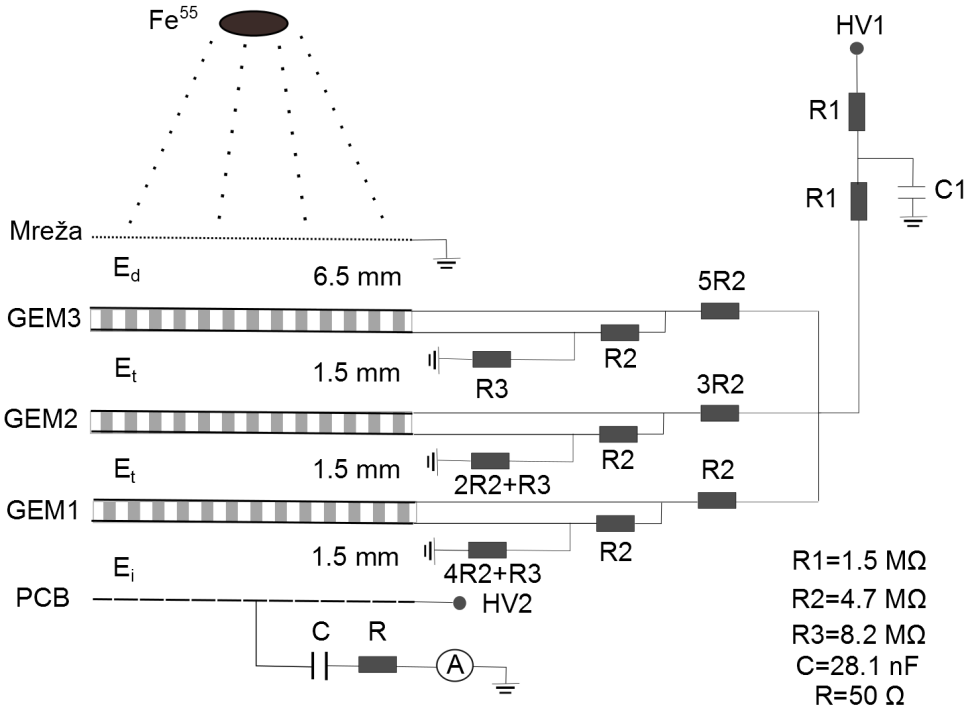
Napomenimo kako su ioni puno sporiji od elektrona, te je struja na mreži u slučaju negativnog polariteta napona male frekvencije. Iz toga razloga nismo mogli primijeniti istu tehniku sa kondenzatorom i otpornikom jer se ovaj spoj ponaša kao filter granične propusne frekvencije koja je puno viša od očekivane frekvencije struje iona. No u slučaju elektrona koji su brži, ovaj bi se filter mogao uporabiti.

U tu svrhu obavili smo mjerenja struje elektrona na tiskanoj ploči sa različitim kondenzatorima u seriji, tj. filterima spojenih na tiskanu ploču prije samog pikoampermetra.



Slika 4.10.: Struja elektrona u ovisnosti o spojenom kondenzatoru u seriji. Struja mjerena samo sa jedne heksagonske pločice ne mijenja se jer je njezin kapacitet puno manji od onoga u filteru te dominira u serijskom spoju. S druge strane, kapacitet cijele ploče je veći te je stoga potreban kondenzator dovoljno velikog kapaciteta da doprinos cijele ploče bude dominantan te struja jednaka kao i bez filtera.

Uzimajući u obzir činjenicu da sama ploča ima kapacitet i da će u serijskom spoju dominirati manji kapacitet došli smo do granice kada je struja koju smo mjerili poprimila istu vrijednost kao i struja mjerena bez filtera, zaključujući da je kapacitet same ploče reda veličine 10 nF i granična frekvencija približno 1 MHz za struju elektrona (Slika 4.10).



Slika 4.11.: Predložena shema za mjerenje povratne struje iona.

Ovi rezultati značajni su za rad buduće komore vremenske projekcije utoliko jer su obavljena mjerenja nekih važnih karakteristika GEM detektora. Važno je znati pojačanje signala koje GEM detektor daje u raznim plinskim mješavinama i za specifične izvore zračenja. Važan faktor je omjer struje elektronskog signala i povratne struje iona, a koraci za mjerenje te veličine opisani su u prethodnom poglavlju te je obavljeno mjerenje struje elektrona. Sa budućim GEM-TPC prototipom osim spomenutih struja na elektrodama i faktora pojačanja signala, bit će

moguće mjeriti i driftnu brzinu elektrona u plinovima kao što su različite mješavine Ar-CO_2, CF_4 i N_2.

5. Zaključak

Nakon otkrića novog stanja materije pod nazivom kvark-gluon plazma krajem prošlog i u prvom desetljeću ovog stoljeća znanstvena zajednica nastavila je smjerom istraživanja fizikalnih svojstava novootkrivene tvari. Ova istraživanja provode se danas na sudarivačima LHC (Large Hadron Collider) na CERN-u i RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) na BNL-u. Posebna pozornost usmjerena je u ovom radu na detektor PHENIX na sudarivaču RHIC.

Specifična tema ovog rada bila je istražiti mogućnost ugradnje detektora pod nazivom komora vremenske projekcije u buduću nadogradnju PHENIX detektora. Istraživački rad fokusirao se na dva aspekta te mogućnosti: na geometriju komore vremenske projekcije u budućem sPHENIX detektoru što smo proučavali računalnim simulacijama dok je drugi aspekt obuhvaćao laboratorijska ispitivanja GEM detektora koji služe za pojačanje elektronskog signala u komori vremenske projekcije.

Računalnim simulacijama u programu GEANT4 povezana je prostorna i impulsna razlučivost budućeg detektora. Prihvatljivost definirane geometrije detektora argumentirana je pomoću primjera uspješne rekonstrukcije tri stanja upsilon rezonancije. Pokazano je kako slabija prostorna razlučivost također daje slabiju razlučivost u rekonstruiranom impulsu, a konačna odluka o prihvatljivoj granici ovisi o zahtjevima observabli koje osim putanje i impulsa uključuju i deponiranu energiju, tj. informaciju o vrsti čestice.

Laboratorijskim mjerenjima proučavan je rad trostrukog GEM detektora u različitim mješavinama argona i ugljikovog dioksida. Mjereno je pojačanje signala te su dobiveni rezultati koji se poklapaju sa prijašnjim mjerenjima dostupnim u različitim publikacijama. Nadalje je izmjerena struja elektronskog signala te tako

obavljen prvi korak u mjerenju povratne struje iona; posljednja je važan faktor koji uvelike određuje prihvatljivost ugradnje ovakvog detektora u veliki detektorski sustav budućeg sPHENIX detektora jer ioni uzrokuju distorziju driftnog polja komore vremenske projekcije. Uz opisane korake koji su obavljeni u pripremi za mjerenje struje iona predložena je i shema za takvo mjerenje. Daljnji plan za ova istraživanja su mjerenja sa prototipom komore vremenske projekcije koji sadrži GEM detektor.

Dodatak A.

GEANT4 i ROOT

C++ objektno orijentirano programiranje koristi kao osnovnu jedinicu koncept pod imenom klasa, čije se instancije nazivaju objektima. Klasa sadrži parametre i funkcije koje definiraju budući objekt i njegova svojstva. Geant4 je softver koji je zbog svog opsega podijeljen na manje logičke jedinice koje su maksimalno međusobno nezavisne. Ovaj način omogućuje lakši razvitak cjelokupnog softvera paralelnim radom na logičkim jedinicama. Te su jedinice zapravo klasteri srodnih klasa, a među samim klasterima postoji hijerarhijski odnos po kriteriju korištenja, tj. klasteri klasa mogu koristiti drugi klaster, tj. sve klase definirane u drugom klasteru. Dijagram koji opisuje dizajn opisanih logičkih jedinica u programu Geant4 dan je na slici ispod. Od dna prema vrhu, linijama su povezane jedinice koje koriste klase od prethodne, a kružić znači da ta jedinica koristi klase jedinice na drugom kraju linije. Kategorije pri dnu su osnova softvera i korištene su od strane svih viših kategorija.

Opišimo ukratko osnovne logičke jedinice ili kategorije klasa u programskom paketu Geant4 prikazane na dijagramu [62]:

globalno – ova osnovna kategorija pokriva sustav mjernih jedinica, konstanti, numeričke metode i operacije s nasumičnim brojevima;

interfon – kategorija omogućuje tumač naredbi (interpreter) koje se brinu o interakciji kategorija koje dolaze od samog korisnika;

materijali i čestice – klase određuju definiciju i fizikalna svojstva čestica i materijala što je potrebno za simulaciju interakcije među njima;

geometrija – ova klasa omogućuju dizajn samog detektora unutar Geant4

simulacije.

Iznad ovih kategorija dolaze one koje su potrebne za opisivanje trajektorije čestice i fizikalnih procesa koji sudjeluju u prolasku kroz detektor:

trajektorija – sadrži klase potrebne za trajektorije i korake koje čestica prolazi, a koristi ju kategorija

fizikalni procesi, koja sadrži ugrađene modele fizikalnih međudjelovanja u kojima čestica sudjeluje prolazeći kroz materijale: elektromagnetskih interakcija između leptona, fotona, hadrona i iona i hadronske interakcije;

određivanje trajektorije čestice – ova kategorija koristi klase fizikalnih procesa kako bi odredila evoluciju same putanje čestice i priskrbila informacije za klase koje obuhvaćaju sudare u osjetljivim volumenima detektora;

pogotci (hits) i **digitalizacija** – ove klase brinu o sudarima unutar detektora, upravljaju skupljanjem svih sudara koji tvore logičke izlazne podatke iz detektora;

događaj (event) – upravlja događajima u smislu putanja čestica "run" - sakuplja događaje koji imaju zajedničku ugrađenu infrastrukturu zrake (beam) i detektora;

očitanje (readout) – omogućuje rad sa nagomilavanjem (pile-up) podataka u detektoru;

U konačnici, one kategorije koje su u vrhu dijagrama, koriste gotove sve ostale i povezuju se sa instalacijama izvan samog alata Geant4 kroz apstraktna sučelja omogućuju vizualizaciju, dugotrajnost (persistency) i korisničko sučelje. Posebno, te su kategorije:

vizualizacija – ove klase upravljaju vizualizacijom materijala, putanja i pogodaka. Nekoliko nezavisnih drajvera je dostupno pri vizualizaciji kao što su OpenGL, Qt, OpenInventor, DAWN i VRML;

sučelja (interfaces) - kategorija obuhvaća proizvodnju grafičkog korisničkog sučelja i interakciju sa vanjskim softverima;

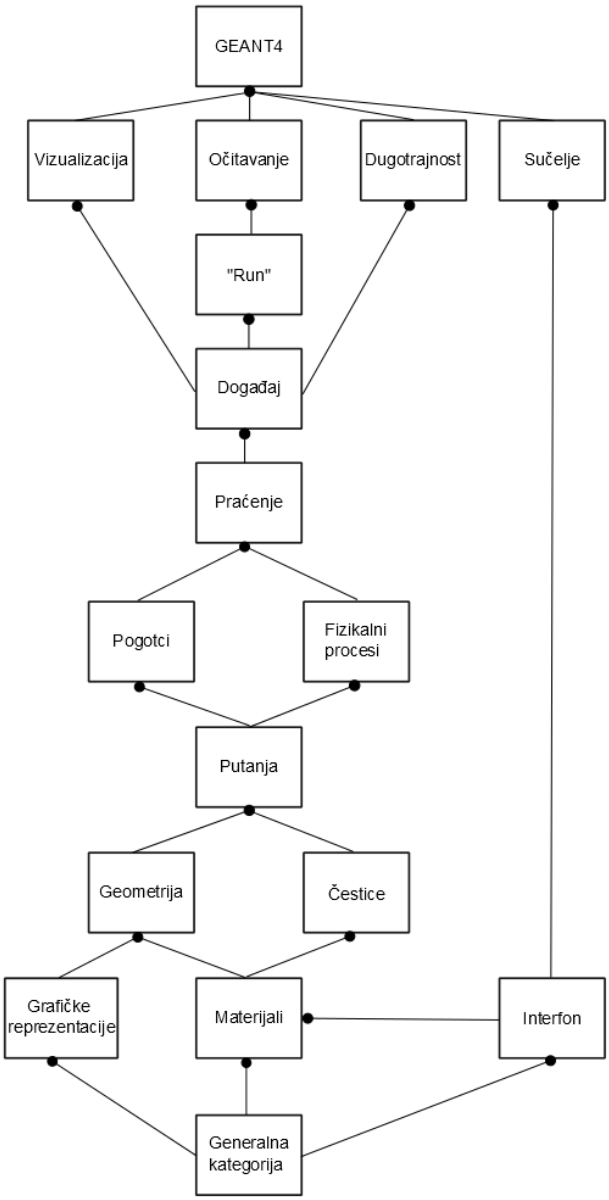
dugotrajnost (persistency) – ovo je proizvoljna kategorija, što znači da

nije nužna za pokretanje simulacije. Omogućuje pristup informacijama iz simulacije (događajima, pogotcima, geometriji itd.) nakon same simulacije u posebnom obliku sučelja (izlazni podatci simulacije mogu se sačuvati u jednostavnom obliku kao što su npr. Ntuple datoteke).

Iako se konstrukcija i sam dizajn ovog programskog alata može činiti komplicirana, ipak 20 godina njegove uporabe i intenzivnog razvoja svjedoče o njegovoj korisnosti i primjenjivosti u različitim situacijama. Navedimo neke od prednosti korištenja Geant4 programa u simulacijama:

- sadrži najmodernije fizikalne modele koji se konstantno provjeravaju i uspoređuju sa eksperimentalnim podatcima
- podrška za kompleksne trodimenzionalne geometrijske konstrukcije kao što su LHC ili ljudsko tijelo
- visoka efikasnost u rekonstrukciji putanje čestica unutar najmanjih (veličine molekule) do najvećih skala kompleksnih geometrija (primjerice planeti)
- omogućuje unos i definiciju širokog spektra materijala koji grade specifično fizikalno okruženje
- tehnike i algoritmi koji omogućuju skraćivanje vremena računanja, ali i detaljne simulacije (kao što su "obrnute Monte Carlo" metode)
- lako prilagodljiv vanjskim softverima
- dobra vizualizacija i grafičko sučelje

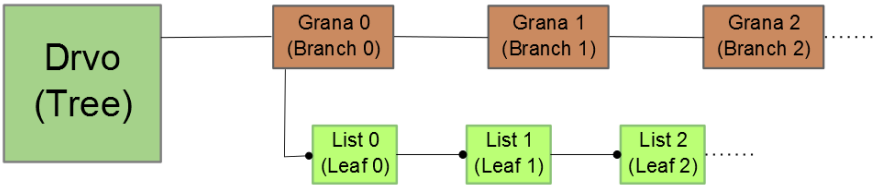
Geant4 može se koristiti u različitim operacijskim sustavima: Linux, Mac OS, Windows i UNIX, a da bi se program mogao pokrenuti potrebna su dva softverska paketa CLHEP (Class Library of High Energy Physics) i STL (Standard Template Library za definiciju osnovnih klasa u C++ programu).



Slika A.1.: Hijerarhijski prikaz osnovnih kategorija klasa u programu GEANT4. Preuzeto sa [62].

Važno je u ovom slučaju objasniti što je dokument tipa root te objekt klase TTree i TNtuple koji ćemo koristiti. ROOT omogućuje čuvanje različitih tipova objekata u dokumente sa ekstenzijom root koji i sami postaju objekti klase Tfile. No ako želimo sačuvati veliku količinu objekata iste klase tada ih možemo organizirati

u konstrukciju pod nazivom drvo ili eng. Tree sa strukturom kao na Slici. N-tuple se od objekta Tree razlikuje samo po tome što pohranjuje jedino podatke koji su realni brojevi (floating-point numbers) dok Tree može pohraniti i složenije tipove podataka, primjerice nizove ili druge objekte.

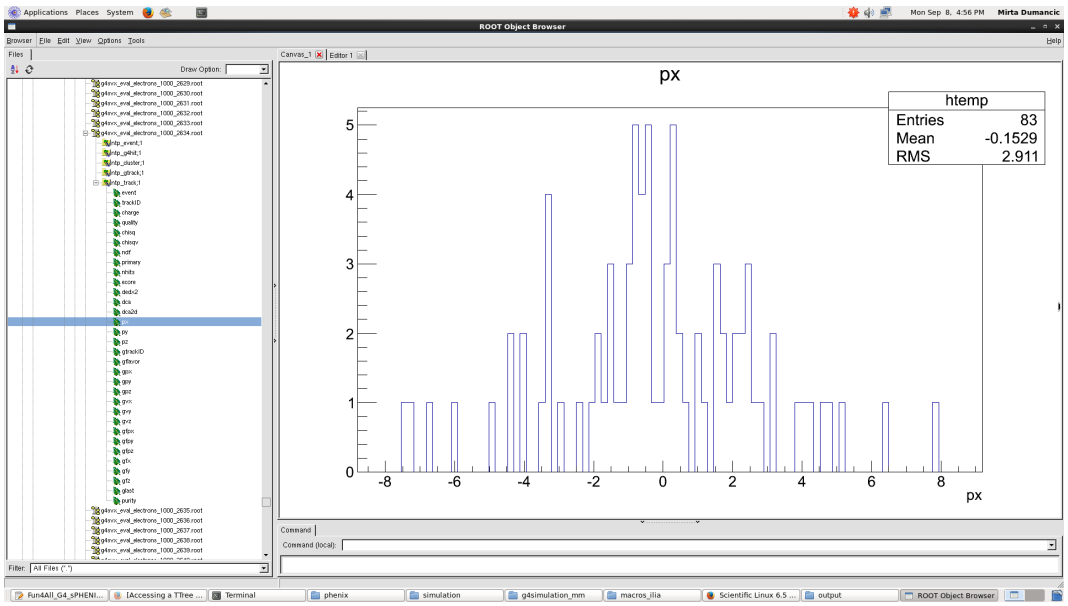


Slika A.2.: Drvenasta struktura podataka u dokumentu tipa root.

Primjerice grane mogu biti nezavisne varijable kao što su impuls i položaj čestice ili generirani i rekonstruirani impuls, a listovi će u grani impulsa biti komponente p_x, p_y i p_z. Objekt Tree tako omogućuje lakši pristup potrebnim varijablama i nudi mogućnost ulančavanja (chain) dokumenata sa istom strukturom podataka (istim drvetom). Primjerice, ako generiramo 1000 dokumenata tipa root iste drvenaste strukture od kojih svaki sadrži podatke za generiranih 100 čestica koje prolaze kroz određeni detektor i daju izlazne podatke spremljene u tim dokumentima, ulančavanjem ćemo dobiti drvo sa svih 100 000 događaja te će primjerice crtanje histograma određenih varijabli biti puno lakše i izravnije.

Struktura takvog dokumenta može se vidjeti na Slici 6.3 u konkretnim simulacijama rada komore za sPHENIX detektor.

54



Slika A.3.: Drvenasta struktura dokumenata koji je rezultat konkretne simulacije rada TPC detektora za sPHENIX. Prikazana je raspodjela događaja za raspon impulsa u x smjeru od -8.5 GeV/c do 8.5 GeV/c.

55

Literatura

[1] J. J. Aubert at al. Experimental Observation of a Heavy Particle J. *Phys. Rev. Lett. 33, 1404*, 1974.

[2] J.-E. Augustin et al. Discovery of a Narrow Resonance in e+e- Annihilation. *Phys. Rev. Lett. 33, 1406*, 1974.

[3] David Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

[4] Michael E. Peskin. Beyond the Standard Model. *Lectures presented at the 1996 European School of High-Energy Physics*, 1997.

[5] K. G. Wilson. Confinement of quarks. *Phys. Rev. D 10*, 1974.

[6] K. A. Olive et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. *Chin. Phys. C, 38*, 090001, 2014.

[7] CERN Press Office. New State of Matter Created at CERN. *http://press.web.cern.ch/press-releases/2000/02/new-state-matter-created-cern*, 2000.

[8] Rachid Nouicer for the PHENIX Collaboration. Recent Results from PHENIX Experiment at RHIC: Exploring the QCD Medium. *The 6th International Conference on Physics and Astrophysics of Quark Gluon Plasma*, 2010.

[9] J. Adams et al. Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma: The STAR Collaboration's Critical Assessment of the Evidence from RHIC Collisions. *Nucl. Phys. A 757*, 2005.

[10] K. Adcox et al. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration. *Nucl. Phys. A 757*, 2004.

[11] B. B. Back et al. The PHOBOS Perspective on Discoveries at RHIC. *Nucl. Phys. A 757*, 2004.

[12] I Arsene et al. Quark Gluon Plasma an Color Glass Condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment. *Nucl. Phys. A 757*, 2004.

[13] Rachid Nouicer. Formation of Dense Partonic Matter in High Energy Heavy-Ion Collisions: Highlights of RHIC Results. *arXiv:0901.0910*, 2009.

[14] Anne Sickles for the PHENIX Collaboration. The Next Decade of Physics with PHENIX. *J.Phys. G 38*, 2011.

[15] Berndt Muller i James L. Nagle. Results from the Relativistic Heavy Ion Collider. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 56*, 2006.

[16] M. Stephanov. QCD phase diagram: an overview. *Proceedings of Science*, 2006.

[17] M. M. Aggarwal et al. An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement. *arXiv:1007.2613*, 2010.

[18] F. Karsch, C. R. Allton, S. Ejiri, S. J. Hands, O. Kaczmarek, E. Laermann, i C. Schmidt. The Chiral critical point in three-flavor QCD. *Phys. Lett. B 520*, 2001.

[19] Z. Fodor i S. D. Katz. Critical point of QCD at finite T and \mu, lattice results for physical quark masses. *Critical Point and Onset of Deconfinement 4th International Workshop, July 9-13 2007, GSI Darmstadt,Germany*, 2004.

[20] R. V. Gavai i Sourendu Gupta. The critical end point of QCD. *Phys. Rev. D 71*, 2005.

[21] Berndt Mueller. The Relativistic Heavy Ion Collider Status and Future. *http://www.bnl.gov/npp/docs/NSAC0213*, 2013.

[22] David Morrison for the PHENIX Collaboration. The PHENIX Experiment at RHIC. *Nucl. Phys. A 638*, 1998.

[23] A. Adare for the PHENIX Collaboration. Enhanced production of direct photons in Au+Au collisions at sqrt(s_NN)=200 GeV and implications for the initial temperature. *Phys. Rev. Lett. 104*, 2010.

[24] Agnes Mocsy, Peter Petreczky, i Michael Strickland. Quarkonia in the Quark Gluon Plasma. *Int. J. Mod. Phys. A 28*, 2013.

[25] K. Adcox et al. for the PHENIX Collaboration. PHENIX detector overview. *Nucl. Instrum. Meth. A499*, 2003.

[26] Takao Sakaguchi for the PHENIX Collaboration. Cold nuclear matter effect measured with high pT hadrons and jets in 200GeV d+Au collisions in PHENIX. *J. Phys.: Conf. Ser. 458*, 2013.

[27] S.H. Aronson et al. for the PHENIX Collaboration. PHENIX magnet system. *Nucl. Instrum. Meth. A499*, 2003.

[28] K. Adcox et al. for the PHENIX Collaboration. PHENIX Central Arm Tracking Detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A499*, 2003.

[29] H. Akikawa et al. for the PHENIX Collaboration. PHENIX Muon Arms. *Nucl. Instrum. Meth. A499*, 2003.

[30] The PHENIX Collaboration. The sPHENIX MIE Proposal. *http://www.phenix.bnl.gov/plans.html*, 2014.

[31] A. Accardi et al. Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier - Understanding the glue that binds us all. *arXiv:1212.1701*, 2012.

[32] P. Fabbricatore, S. Farinon, i R. Parodi. The Superconducting Magnet for the BABAR Detector of the PEP-I1 B Factory at SLAC. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996.

[33] O. D. Tsai, L. E. Dunkelberger, C. A. Gagliardi, S. Heppelmann, H. Z. Huang, G. Igo, K. Landry, Y. X. Pan, S. Trentalange, W. Xu, i Q. Zhang. Results of R&D on a new construction technique for W/ScFi Calorimeters. *J. Phys. Conf. Ser. 404*, 2012.

[34] R. Wigmans. *Calorimetry: Energy measurement in particle physics*. Oxford University Press, 2000.

[35] Walter Blum, Werner Riegler, i Luigi Rolandi. *Particle Detection with Drift Chambers*. Springer, 2008.

[36] J. N. Marx i D. R. Nygren. The Time Projection Chamber. *Phys. Today 31N10*, 1978.

[37] A. Barbaro-Galtieri. Tracking with the PEP-4 TPC. *Stanford 1982, Proceedings, Instrumentation For Colliding Beam Physics*, 1982.

[38] J. Beringer et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D86*, 2012.

[39] Archana Sharma. Properties of some gas mixtures used in tracking detectors. *SLAC-J-ICFA-16-3, SLAC-JOURNAL-ICFA-16-3*, 1998.

[40] ALICE Collaboration. Technical Design Report of the Time Projection Chamber. *CERN Document Server, CERN / LHCC 2000-001*, 2000.

[41] Taku Gunji for the ALICE Collaboration. Future Upgrade and Physics Perspectives of the ALICE TPC. *Nucl. Phys. A*, 2014.

[42] F. Sauli. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A386*, 1997.

[43] A. Bressan et al. Two-dimensional readout of GEM detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A425*, 1999.

[44] Y. Giomataris et al. MICROMEGAS: A High granularity position sensitive gaseous detector for high particle flux environments. *Nucl. Instrum. Meth. A376*, 1996.

[45] A. Kozlov, I. Ravinovich, L. Shekhtman, Z. Fraenkel, M. Inuzuka, i I. Tserruya. Development of a triple GEM UV-photon detector operated in pure CF4 for the PHENIX experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A523*, 2004.

[46] Ian Shipsey i Gino Bolla. Micro Patterned Gas Detector Development Group at Purdue University. *https://www.physics.purdue.edu/msgc/*, 2014.

[47] LCTPC Collaboration. A Time Projection Chamber for a future Linear Collider. *http://www.lctpc.org/*, 2014.

[48] Fabio Sauli, Steffen Kappler, i Leszek Ropelewski. Electron collection and ion feedback in GEM-based detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003.

[49] G. Croci, M. Alfonsi, L. Ropelewski, G. Tsipolitis, G. Fanourakis, E. Ntomari, i K. Karakostas. Discharge probability measurement of a Triple GEM detector irradiated with neutrons. *Nucl. Instrum. Meth. A712*, 2013.

[50] Tsutomu Nagayoshi. Development of MPC and Systematic Study on the Electrode Structure. *http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/nagayosi/Work/D_thesis/d_Nagayoshi4_web.pdf*, 2004.

[51] I. Kreslo i R. Gornea. Detectors for Particles and Radiation. *http://www.lhep.unibe.ch/pages/lecture.php?lang=en&lec_id=73*, 2010.

[52] M. Heffner et al. RD6 TRACKING/PID CONSORTIUM PROGRESS REPORT & FUNDING REQUEST. *https://wiki.bnl.gov/conferences/index.php/Proposals-July2014*, 2014.

[53] S. Giani for GEANT4 Collaboration. Introduction to GEANT4. *http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation*, 2006.

[54] The ROOT Team at CERN. ROOT Users Guide 5.16. *http://root.cern.ch/download/doc*, 2009.

[55] W. G. Seligman. Basic Data Analysis Using ROOT. *http://www.nevis.columbia.edu/˜seligman/*, 2011.

[56] Mukund Gupta. Calculation of radiation length in materials. *https://cds.cern.ch/record/1279627*, 2010.

[57] W. Anderson et al. Design, construction, operation and performance of a Hadron Blind Detector for the PHENIX experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A646*, 2011.

[58] S. Bachmann et al. Performance of GEM detectors in high intensity particle beams. *Nucl. Instrum. Meth. A470*, 2001.

[59] S. Bachmann et al. Discharge studies and prevention in the gas electron multiplier (GEM). *Nucl. Instrum. Meth. A479*, 2002.

[60] R. Bellman, R. Kalaba, i R. Vasudevan. Invariant Imbedding and the Townsend Avalanche. *Journal of Mathematical Analysis and Applications 7*, 1963.

[61] P. L. Auer. Phenomenological Theory of Townsend Breakdown in Dielectrics. *Phys. Rev. 98, 320*, 1955.

[62] K. Amako for Geant4 Collaboration. Geant4 User's Guide for Application Developers. *http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation*, 2013.