

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ირაკლი ლომიძე

რადიაციის გავლენის შესწავლა CMS-ის წინაღობურ შრიან დეტექტორებზე
ეკოლოგიური გაზის ნაზავზე ოპერირებისას LHC-ის მაღალი ლუმინოსიტის
განახლებისთვის

სადოქტორო პროგრამა საინჟინრო ფიზიკა

შიფრი 0719

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი

დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი
საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ზვიად წამალაიძე

რეცენზენტები: პროფესორი ირაკლი ნოსელიძე

პროფესორი გიორგი ნაბახტიანი

დაცვა შედგება 2022 წლის 21 ივლისს 12:00 საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის
სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის
სხდომაზე,
კორპუსი VI აუდიტორია 06-323დ

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი -----

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა

ცერნის დიდი ადრონული ამაჩქარებელი (LHC) და მასზე არსებული 4 დიდი ექსპერიმენტი (CMS, ATLAS, ALICE და LHCb) წარმატებით ფუნქციონირებს ბოლო ათწლეულის განმავლობაში. ამ ხნის მანძილზე მოხდა უაღრესად მნიშვნელოვანი ფუნდამენტური მოვლენების დამზერა მაღალი ენერგიების ფიზიკაში, რომელთაგანაც ხაზგასასმელია ჰიგსის ბოზონის დაკვირვება 2012 წელს, რომელსაც მოჰყვა ნობელის პრემია ფიზიკაში. იმისათვის, რომ გაიზარდოს აღმოჩენების პოტენციალი და მოხდეს ჰიგსის ბოზონის თვისებების შესწავლა, აუცილებელია LHC ის განახლება პროტონ-პროტონული შეჯახებების ალბათობის გაზრდის მიზნით. ამისათვის შემუშავებულია High Luminosity LHC (HL-LHC) განახლების პროგრამა, რომელიც მიზნად ისახავს პროტონული შეჯახებების ალბათობის გაზრდას 1 რიგით 10×10^{34} სმ⁻²/წ მდე. წარმოდგენილ ნაშრომში კვლევის თემას წარმოადგენდა LHC ზე CMS ექსპერიმენტის წინააღმდეგობრივი შრიანი დეტექტორულ (Resistive Plate Chambers (RPC)) სისტემაზე ახალი ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოძიება და მაღალი რადიაციის გავლენის შესწავლა, ახალი ეკოლოგიურად უსაფრთხო გაზის ნაზავის პირობებში, რომლისთვისაც მოსალოდნელი ფონური პროცესების მიერ გამოწვეული ხმაური უდრის 600 Hz/cm² მდე და ინტეგრებული მუხტის დონე კი 840 mC/cm². გარდა იმისა, რომ CMS RPC დეტექტორული სისტემის წინაშე იდგა მაღალი რადიაციისადმი მედეგობის გამოწვევა, ასევე პრობლემატურ საკითხს წამოადგენდა აკრძალვები, ე.წ. კიოტოს პროტოკოლის მიხედვით გარკვეული გაზების მიმართ, რომელთაც გააჩნიათ მაღალი GWP ((Global Warming Power), მაგალითად ფტორი, რომელიც აზიანებს დედამიწის აზოტის ფენას). დღეს-დღეობით CMS ის RPC ტიპის დეტექტორები ეფექტურად მუშაობენ არააალებად 3 გაზიან ნარევზე, რომლებიც შედგება: 95.2% ფრეონი იგივე ტეტრაფლორეთანი (C₂H₂F₄), 4.5% იზობუტანი (C₄H₁₀) და 0.3% სულფიდის ჰეგსაფლორიდი (SF₆). ნაშრომის კვლევის მთავარი

მიზანია შეისწავლოს RPC დეტექტორის მუშაობის სტაბილურობაზე მაღალი რადიაციული დოზის გავლენა ეკოლოგიურად სუფთა გაზის ნაზავზე მუშაობისას. დაადგინოს რამდენად იცვლება დეტექტორის ისეთი ძირითადი პარამეტრები როგორცაა: დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება გაზური გაძლიერების პირობებში, ხმაური, ეფექტურობა და დროითი გარჩევისუნარიანობა, როგორც მაღალი ძაბვის ფუნქციები, ასევე როგორ იცვლებიან ისინი ზოგადად ალტერნატიული გაზის ნაზავის გამოყენებისას და რა დამატებითი ეფექტებია მოსალოდნელი კამერების მაღალი რადიაციული დოზით დასხივების შემთხვევაში. ამ სამუშაოების შესასრულებლად გამოყენებული იქნა CERN ის (ჟენევა, შვეიცარია) CMS ექსპერიმენტის დეტექტორების სპეციალური მაღალტექნოლოგიური ლაბორატორიული კომპლექსი (904) და ცერნის გამა რადიაციის ლაბორატორია GIF++ (Gama Irradiation Facility ++), რომელიც აღჭურვილია მაღალი ინტენსიურობის მქონე (14 ტერა ბეკერელი ენერჯის მქონე) CS^{137} რადიაციული წყაროთი, რომლიდანაც გამოსხივებული გამა კვანტების ნახევარდაშლის ენერჯია უდრის 662 კევს, ასევე SPS (Super Proton Synchrotron) ამაჩქარებლის მუშაობის დროს გამოყენებულ იქნა 150 გევიანი მიუონების სტაბილური ნაკადი.

სამუშაოს მიზანი და ამოცანები

წარმოდგენილი დისერტაციის მიზანი და სამეცნიერო ღირეულება მდგომარეობდა იმაში, რომ დაგვედგინა ახალი ეკოლოგიური გაზი, ასევე რამდენად ვარგისია არსებული CMS RPC დეტექტორული სისტემა HL-LHC ის განახლებისათვის, მოსალოდნელია თუ არა დეტექტორის ეფექტურობის შემცირება მაღალი რადიაციული ფონის პირობებში და ახალი ალტერნატიული გაზის გამოყენებისას. დაგვედგინა ფუნდამენტური პარამეტრების გამოკვლევა შეცვლილი გარემოს პირობებში და მოგვეხდინა ახალი ტიპის RPC დეტექტორების დეტალური ექსპერიმენტალური ანალიზი. აღნიშნული კვლევა არის CMS ექსპერიმენტის RPC კოლაბორაციისთვის დღეს დღეობით ერთ-ერთი უაღრესად აქტუალური

თემა და გააჩნია უდიდესი სამეცნიერო ინტერესი. ამ გაზომვებზე დაყრდნობით შეგვეძლება ვიმსჯელოთ რამდენად მზადაა ექსპერიმენტი LHC ის განახლებისათვის, მოითხოვება თუ არა მიონური სისტემის დეტექტორების, წამკითხავი ელექტრონიკის ან სხვა ინფრასტრუქტურის ცვლილებები. დეტექტორის დროითი გარჩევისუნარიანობა არის ერთ-ერთი მთავარი პარამეტრი არსებული 2 დიზაინის (1.4 და 2მმ-იანი ბაკელიტის სისქის მქონე) RPC დეტექტორის კვლევისათვის. იგი პირდაპირ პროპორციულია დეტექტორის ეფექტურობის, რამდენადაც დიდია დროითი გარჩევისუნარიანობა, მით უფრო მცირეა ეფექტურობა ამაჩქარებელზე ნაწილაკების მაღალი ინტენსივობით დაბადების პირობებში. პროექტს გააჩნია შემდეგი ძირითადი ამოცანები: ორი ახალი ტიპის 1.4მმ და 2მმ-იანი ბაკელიტის გეგმის სისქის მქონე RPC დეტექტორის შექმნა, ახალი ეკოლოგიური გაზის მოძიება, პროტოტიპული დეტექტორების ძირითადი პარამეტრების შესწავლა ნორმალურ ლაბორატორიულ პირობებში კოსმოსური მიუონების გამოყენებით და ახალი სამუშაო გაზის ნარევეზე ოპერირებისას, ღვარული და სტრიმერული მოდების დადგენა მაღალი ძაბვის ცვლილებით, დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება გაზური გაძლიერების პირობებში დეტექტორის მუშაობის ღვარულ რეჟიმში, დეტექტორის ეფექტურობის გაზომვა და დროითი გარჩევისუნარიანობის დადგენა, ბაკელიტის წინაღობის გაზომვა და დეტექტორების ინსტალაცია CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში (-100მ).

კვლევის ობიექტი

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ორი CMS RPC დეტექტორი იდენტური გეომეტრიული პარამეტრებით, ერთი კლასიკური 2 მმ-იანი ბაკელიტის სისქის, ხოლო მეორე შედარებით მცირე 1.4 მმ-იანი ბაკელიტით და დაბალი გაზური მოცულობის სიმაღლით, პროტოტიპების შექმნის შედეგად მოვახდინეთ მათი პირველადი ტესტირება ცერნის 904 ლაბორატორიაში კოსმოსური მიუონების გამოყენებით, დავადგინეთ მათი ძირითადი სამუშაო პარამეტრები, რადგან დავრწმუნებულიყავით მათ

გამართულ მუშაობაში, ხოლო ამის შემდეგ დავიწყეთ ახალი ეკოლოგიური გაზის მოძიება და პროტოტიპების კვლევა მაღალი რადიაციის პირობებში ახალი ეკოლოგიური გაზის ნაზავის გამოყენებისას, კვლევისას გამოყენებულ იქნა SPS ამაჩქარებლიდან წამოსული 150 გევი ენერჯის მქონე მიუონების ნაკადი.

კვლევის მეთოდოლოგია

იმისათვის, რომ გადაჭრილიყო დასმული ამოცანები, ამისათვის გამოყენებულ იქნა ცერნში CMS RPC სუბსისტემის მაღალტექნოლოგიური ლაბორატორია, რომელიც აღჭურვილია მაღალტექნოლოგიური გამზომი აპარატურით: სამუშაო გაზის შემრევი, მაკონტროლირებელი და მონიტორინგის ინფრასტრუქტურით, კოსმოსური სხივების ჰოდოსკოპური სისტემით ეფექტურობის შესწავლისათვის, კლასიკური და ალტერნატიული სამუშაო გაზების წყაროებით, მაღალმგრძობიარე გამზომი ელექტრონიკით და მონაცემთა შეგროვებისა და შენახვის DAQ სისტემებით. გარდა ამისა, კვლევის განხორციელებისათვის კვლევების მნიშვნელოვანი ნაწილის ჩატარება მოხდეს ცერნის Gamma Irradiation Facility ++ ში, რომელიც აღჭურვილია მაღალი ინტენსივობის (14 ტერაბეკერელი) ცეზიუმის იზოტოპით ^{137}Cs . ორივე ლაბორატორია აღჭურვილია გარემო პირობების კონტროლისა და მონიტორინგის სისტემებით და უზრუნველყოფს სამუშაო ტემპერატურას $+21^{\circ}\text{C}$ და ფარდობით ტენიანობას 45% ს რაც არსებითად მნიშვნელოვანია ზუსტი და ურთიერთმედარებითი გაზომვებისათვის. გაზომვებისათვის მზადება დაიწყო პირველი ანუ მოსამზადებელი ეტაპით, რაც გულისხმობდა ორი პროტოტიპული დეტექტორის დამზადებას: 1 ერთეული კლასიკური 2მმ-იანი CMS RPC დეტექტორის მიხედვით, 1 ერთეული თხელშრიანი 1.4მმ-იანი ბაკელიტით და დაბალი გაზური მოცულობის სიმაღლით. კვლევების მეორე ეტაპზე მოხდა 904 ლაბორატორიის გამოყენებით, ნორმალურ სამუშაო პირობებში ორივე პროტოტიპული დეტექტორის სრული ექსპერიმენტალური გაზომვა, მათი ძირითადი პარამეტრების დადგენა და ეკოლოგიური გაზის მოძიება.

კვლევის მესამე ეტაპზე პროტოტიპული დეტექტორები განთავსდა GIF++ ლაბორატორიაში და მოხდა მათი პერიოდული გაზომვები შემდეგი მეთოდოლოგიით: კამერის სამუშაო რეჟიმის დადგენა, დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება, ეფექტურობის დადგენა, სტრიპზე მოსული მიონების სიგნალის რაოდენობა, დროითი გარჩევისუნარიანობა, მიუონების ტრეკირება, ბაკელიტის წინაღობის განსაზღვრა და დეტექტორის ეფექტურობის დამოკიდებულება გამა რადიაციის სხვადასხვა ინტენსიურობის დროს. აღნიშნულმა მეთოდმა საშუალება მოგვცა დაგვეზადებინა 2 სხვადასხვა ბაკელიტის სისქის მქონე (1.4მმ და 2მმ-იანი) RPC დეტექტორები იდენტური გეომეტრიული პარამეტრებით. RPC დეტექტორის სპეციფიკიდან გამომდინარე უაღრესად მნიშვნელოვანია გეომეტრიული პარამეტრების დაცვა, ნებისმიერი გეომეტრიული გადახრა მნიშვნელოვნად შეცვლის დეტექტორის მუშაობის პარამეტრებს. გამომდინარე იქიდან, რომ პროტოტიპული დეტექტორების დამზადება განხორციელდა ამ კვლევის ფარგლებში, გეომეტრიულ პარამეტრებზე გვექონდა სრული კონტროლი, რამაც საშუალება მოგვცა მინიმუმამდე შეგვემცირებინა დეტექტორებში სამუშაო პარამეტრების გადახრა. პროტოტიპული დეტექტორების შექმნისათვის არსებითად მნიშვნელოვანი იყო ცერნის 904 ლაბორატორიასთან არსებული სპეციალური სახელოსნოებისა და ე.წ. სუფთა ოთახების გამოყენება, რომლებიც აღჭურვილია მაღალტექნოლოგიური საწარმოო დანადგარებით და დაცულია კლიმატური პარამეტრები რაც გეომეტრიული ფლუქტუაციების მინიმუმამდე შემცირების საშუალებას იძლევა, შესაბამისად, დეტექტორებს შორის სამუშაო პარამეტრებში სხვაობა იყო მინიმალური.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სახე

კვლევის შედეგად მოხდა ორი ახალი 1.4მმ და 2მმ-იანი ბაკელიტის სისქის მქონე RPC დეტექტორის შექმნა ცერნის 904 ლაბორატორიაში, მათი სრული აღჭურვა და მომზადება პირველადი ტესტირებისათვის, როგორცაა: მაღალი და დაბალი ძაბვის სადენების, გაზის გასართების და

„ფრონტ-ენდ“ ელექტრონიკის მონტაჟი, სამუშაო პარამეტრების დადგენისათვის გამოვიყენეთ აწ უკვე ჩვენთვის კარგად ცნობილი თვისებების მქონე CMS ის სტანდარტული გაზი 95.2% (C₂H₂F₄), 4.5% (C₄H₁₀) და 0.3% (SF₆), როგორც კალიბრაციის ფუნქცია, რადგან დავრწმუნებულიყავით პროტოტიპების გამართულ მუშაობაში. კოსმოსური მიუონებით ტესტირების შედეგად მოხდა დეტექტორების კალიბრაცია და სამუშაო პარამეტრების დადგენა, ამის შემდგომ უკვე მოვახდინეთ ახალი თაობის ეკოლოგიური გაზის ნაზავის ძიება, რაც ჩვენს შემთხვევაში მიზნად ისახავდა CMS ის სტანდარტული გაზიდან, რომლის შემადგენლობაში შემავალი გაზის ნაზავიდან 95.5% ფტორია მის ჩანაცვლებას ახალი ეკოლოგიური გაზით, 3 წლიანი კვლევის შედეგად საგრძნობლად გაუმჯობესებული იქნა შედეგი, კონკრეტულად მოძებნილ იქნა ახალი ტიპის გაზის ნაზავი (**HFO 50%, CO₂ 45, C₄H₁₀ 4%, SF₆ 1%**) გაზის ტენიანობა 40%, რომელმაც ფტორის შემცველობა 95.5% დან შეამცირა 51% მდე, ისე რომ დეტექტორების სამუშაო პარამეტრები უცვლელი დარჩა. ახალ ეკოლოგიურ გაზს რომ ბოლომდე გაეგვლო შემოწმება და ჩაშვებულიყო გამოყენებაში, ამისათვის აუცილებელი გახდა ტესტები გაგვეკეთებინა მაღალი ინტენსიურობის მქონე რადიაციის პირობებში, ისე რომ დეტექტორის სამუშაო პარამეტრებს გაეძლო დიდი ინტენსიური დატვირთვისთვის, ამისათვის გამოვიყენეთ ცერნის GIF++ ლაბორატორია, რომელიც აღჭურვილია მაღალი ინტენდიურობის მქონე (14 ტერა ბეკერელი ენერჯის მქონე) CS¹³⁷ რადიაციული წყაროთი, რომლიდანაც გამოსხივებული გამა კვანტების ნახევარდაშლის ენერჯია შეადგენს 662 კევს, ასევე SPS ამაჩქარებლის მუშობის დროს გამოყენებულ იქნა 150 გევიანი მიუონების ნაკადი, (რომელთა ერთი ხაზი შემოდის GIF++ ლაბორატორიაში, გამა კვანტების პარალელურად) რათა გამოგვეკვლია დეტექტორის ეფექტურობა მაღალი რადიაციის პირობებს დამატებული მიუონების ნაკადი. აღნიშნულ კვლევასაც წარმატებით გაართვა თავი ახალი ტიპის ეკოლოგიურმა გაზმა,

მან გაუძლო როგორც გამა კვანტების მაღალ ინტენსიურობას, ასევე დეტექტორების ეფექტურობა მიონური ნაკადის მიმართ შეადგენდა 97% ს.

შედეგების გამოყენების სფერო

დისერტაციის შედეგებს უკვე აქვს პრაქტიკული გამოყენება, კერძოდ ახალი ტიპის ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოძიებამ დიდი ინტერესი გამოიწვია მთლიანად CMS ექსპერიმენტში და მის მიუონურ სისტემაში, რაც აერთიანებს RPC, DT (drift tube) და CSC (Cathode strip chamber) დეტექტორებს, (რადგან სამივე მათგანი იყენებს გაზს, რომლის შემადგენლობაშიც დიდი რაოდენობით შედის ფტორი), 2022 წლის თებერვალში უშუალოდ CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში (-100 მეტრი) მოვახდინეთ 2 RPC ტიპის დეტექტორის ინსტალაცია და სამუშაო გაზად გაშვებულ იქნა ახალი ტიპის ეკოლოგიური გაზი.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა

დისერტაცია მოიცავს 137 ნაბეჭდ გვერდს. იგი შედგება რეზიუმეს (ორ ენაზე), შესავლის, 4 თავის და დასკვნისაგან. ახლავს გამოყენებული ლიტერატურა. ახლავს 131 ნახაზი, გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა და 44 დასახელებისგან შემდგარი ლიტერატურის სია.

დისერტაციის შინაარსი

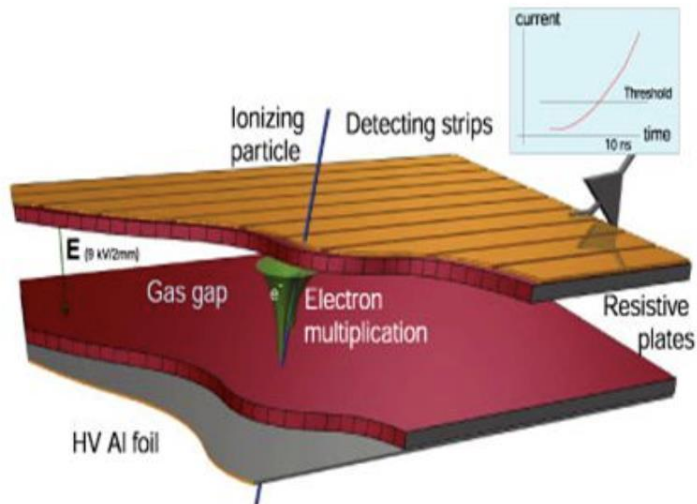
შესავალში წარმოდგენილია კვლევის მიზანი, სამეცნიერო ღირებულება, კვლევის მეთოდოლოგია, ადგილობრივი და საერთაშორისო სამეცნიერო თანამშრომლობის შესაბამისობა საკვლევ თემასთან. პირველი თავი მიძღვნილია ლიტერატურის განხილვისადმი.

1.1 ქვეთავში აღწერილია სტანდარტული მოდელის მოკლე მიმოხილვა, იგი ყველაზე უკეთ გვაძლევს წარმოდგენას იმ თავდაპირველ მატერიაზე, რისგანაც შედგებოდა სამყარო. ელექტროსუსტი და ძლიერი ბირთვული ურთიერთქმედების გაერთიანება ხდება ძალიან მაღალ ტემპერატურაზე. ზუსტად ეს მოვლენა ექსპერიმენტალურად დადასტურდა ცერნში. ჰიგსის ბოზონის აღმოჩენით.

1.2 ქვეთავში განხილულია დიდი ადრონული კოლაიდერი (LHC), სტანდარტული მოდელის ექსპერიმენტალურად დასადასტურებლად საჭირო იყო დიდი მასის მქონე ჰიქსის ნაწილაკის მიღება, რასაც დაჭირდებოდა მაღალი ენერჯის მქონე ნაწილაკების შეჯახების უზრუნველყოფა. ამისათვის შეიქმნა დიდი ადრონული კოლაიდერი ცერნში.

1.3 ქვეთავში განხილულია CMS ექსპერიმენტი (Compact Muon Solenoid) ერთ-ერთია დიდ ადრონულ კოლაიდერზე LHC-ზე მიმდინარე ოთხი უდიდესი ექსპერიმენს შორის, იგი მდებარეობს საფრანგეთ-შვეიცარიის საზღვარზე, მიწის ქვეშ 100 მეტრზე, მისი სიგრძე 28.7 მ, ხოლო დიამეტრი 15 მ-ია, იგი იწონის 14000.

1.4 ქვეთავში განხილულია RPC დეტექტორი (იხ.ნახ.1) იგი შედგება 2 სამუშაო გაზური შრისაგან, რომლებიც მუშაობენ ე.წ. ღვარულ რეჟიმში, რათა უზრუნველყოს ნაწილაკების საიმედო რეგისტრაცია მაღალი სიხშირის დროს დაბადების პირობებში. თითოეული სამუშაო გაზური შრე შედგენილია 2 პარალელური, მაღალი წინაღობის (10^{10} ომი) მქონე 2მმ-ის სისქის მქონე სიბრტყისაგან ე.წ. ბაკელიტისაგან, რომლებიც ერთმანეთისაგან გამოყოფილია 2მმ გაზური სივრცით. ორივე ბაკელიტის გარე ზედაპირი დაფარულია ერთგვაროვანი თხელი ($\sim 100\text{nm}$) გრაფიტის შრით, რომელიც გარანტირებულად უზრუნველყოფს მუხტის თანაბრად გადანაწილებას და შესაბამისად ერთგვაროვან ელექტრულ ველს მთელ სამუშაო გაზის სივრცეში. ღვარულ რეჟიმში დეტექტორის მუშაობისთვის შემუშავებულია ოპტიმალური სამუშაო გაზის ნაზავი 95.2% ფრეონი, იგივე ტეტრაფლორეთანი ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ასევე ცნობილია), 4.5% იზობუტანი (iC_4H_{10}) და 0.3% სულფიდის ჰეგსაფლორიდი (SF_6). დეტექტორის ოპტიმალურ სამუშაო ძაბვას წარმოადგენს დაახლოებით 10 kV, რაც ქმნის რამოდენიმე ასეულ კილოვოლტ ელექტრულ ველს კვადრატულ სანტიმეტრზე დეტექტორის სამუშაო გაზის გარემოში.



ნახ.1 RPC დეტექტორის პრინციპიალური დიზაინი

RPC დეტექტორში ელექტრონული ღვარის განვითარება ხდება პოზიტიურად დამუხტული წინაღობური შრის მიმართულებით, რაც იწვევს ამ შრის გარე ზედაპირზე შესაბამისი რაოდენობის მუხტების მყისიერ კონცენტრაციას, რაც თავისთავად აისახება გამყოფი დიელექტრიკის მიღმა მყოფ სასიგნალო არხების გადამუხტვაზე, ანუ სასიგნალო არხზე ჩნდება მყისიერი ელექტრონული იმპულსი.

1.5 ქვეთავში, განხილულია ცერნის GIF++ დანადგარი, რომელიც წარმოადგენს ძლიერი ინტენსივობის გამა კვანტების რადიაციულ ლაბორატორიას, სადაც მოთავსებულია CS^{137} , 14 ტერა ბეკერელი ნახევარდაშლის პერიოდის რადიაციული წყარო და მიუონების ნაკადის ერთობლიობას.

1.6 ქვეთავში განხილულია SPS ამაჩქარებლის ნაკადის მუშაობის დროის ოპტიმიზაცია, რადგან დეტექტორის ეფექტურობის დასადგენად ამაჩქარებლის 150 გევიანი მუონები გამოვიყენეთ, იმისათვის რომ სწრაფად გაგვეკეთებინა ტესტები საჭირო გახდა მიუონების ნაკადის დროითი ოპტიმიზაცია. ამაჩქარებლის მთლიანი ციკლის დრო შეადგენს 33 წამს, მიონების ნაკადის ხანგრძლივობა - 2×5 წმ, ან 1×5 წმ. ძირითადი დანაკარგი მოდიოდა მიონის 5 წამიან ნაკადებს შორის არსებულ ჯამურ 23 წამზე, როცა ნაკადი არაა და ინფორმაცია არ იწერება. ჩვენ

შევიმუშავეთ სქემა, (იხ.ნახ.2) რომელიც ამ თავისუფალ 23 წამს იყენებს ე.წ. ფონის (ხმაურის) ჩასაწერად.

1.7 ქვეთავში განხილულია მიონების ტრეკირების სისტემა GIF ++ დანადგარში, ნაკადის ეფექტურობის პრეციზიული გაზომვისათვის აუცილებელია მათი ტრეკირება (მიონების ტრაექტორიის ზუსტად აღდგენა სივრცეში). ამისთვის საჭიროა ნაკადის გასწვრივ 2-3 აგილას, რაიმე სახის ორკოორდინატიანი დეტექტორის ჩაყენება. კოორდინატულ დეტექტორებად გამოვიყენეთ თვითონ RPC კამერები.

1.8 ქვეთავში განხილულია ტრიგერების სისტემა GIF++ ში, რადგან ტრიგერის საშუალებით ხდება კამერაში მიონების სიგნალების გამოყოფა სხვა ფონური სიგნალებისგან ასევე კამერის ეფექტურობის განსაზღვრა. კონკრეტული გაზომვისთვის საჭირო ტრიგერის ჩართვა ხდება ე.წ „Trigger Selector“-ზე შესაბამისი დილაკის დაჭერით. ტრიგერის თვლის სიხშირის კონტროლი კი ხდება გადამრთველი ბლოკებით, ხოლო დროითი თანაფარდობის - 4 არხიანი ციფრული ოსცილოგრაფით.

1.8.1 ქვეთავში განხილულია “NEAR Trigger 1 ”, რომელიც წარმოადგენს კამერასთან ახლოს (20 სმ) მოთავსებულ $12 \times 12 \times 1$ სმ², სცინტილაციურ მთვლელს.

1.8.2 ქვეთავში განხილულია “NEAR Trigger 2“, იგი წარმოადგენს $15 \times 15 \times 1$ სმ² ზომის სცინტილაციურ მთვლელს. ის იმყოფება მიონების ნაკადის ხაზზე და შედარებით ახლოსაა გამოსაკვლევ კამერასთან.

1.8.3 ქვეთავში განხილულია “NEAR Trigger 3“, იგი წარმოადგენს $10 \times 1 \times 0.5$ სმ², ზომის სცინტილაციურ მთვლელს, რომელიც განკუთვნილია კონკრეტულ სტრიპთან სამუშაოდ.

მე-2 თავში განხილულია ფოტო დეტექტორები და CMSSW ანალიზი, რომლებიც გამოვიყენეთ RPC დეტექტორის კვლევისათვის, კონკრეტულად ცერნის 904 ლაბორატორიაში მოგვიწია კოსმოსური მიონების სტენდის აწყობა, რადგან შეგვესწავლა დეტექტორების ეფექტურობა, ასევე GIF++ ლაბორატორიაში საჭირო გახდა რამოდენიმე სახის ტრიგერული სისტემის

გაკეთება, როგორც დეტექტორის ეფექტურობის შესასწავლად ისე ნაწილაკის ტრეკირებისათვის, რისთვისაც გამოვიყენეთ ახალი თაობის ფოტო-დეტექტორები.

2.1 ქვეთავში განხილულია სილიკონური ფოტოგამამრავლებელი, იგივე SiPM არის ნახევარგამტარული ფოტო-დეტექტორი, რომლის მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია ნახევარ-გამტარული დიოდის, ტრანზისტორის და ინტეგრირებული სქემების გამოყენებაზე. SiPM საშუალებას იძლევა სიგნალის გენერირება მოხდეს დინამიურ დიაპაზონში, 1 ფოტონიდან 1000 ფოტონამდე ერთი კვადრატული მილიმეტრის არეალში.

2.2 ქვეთავში განხილულია სილიკონური ფოტოგამამრავლებლის გარღვევის ძაბვის სიდიდე (V_{bd}) არის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრი SiPM-ის ნორმალური მუშაობისათვის. V_{bd} თითოეული გაზომვისათვის დეტერმინირებულია შებრუნებული ლოგარითმული წარმოებულის (ILD) მინიმიზაციის მეთოდით.

2.3 ქვეთავში განხილულია ფოტო-დეტექტირება, SiPM ის შემთხვევაში მოვახდინეთ მისი დასხივება რადიაციული წყაროთი, ფარდობა არის 1 თან ახლოს, 10%-ანი სიზუსტით რადიაციამდე 10^{12} cm^2 , დენების ფარდობაში გვაქვს მნიშვნელოვანი გადახრა რადიაციისთვის 10^{13} cm^2 .

2.4 ქვეთავში განხილულია პიქსელის ბლოკირების ალბათობა და დავადგინეთ, რომ ის პირდაპირ კავშირშია ელექტრონულ-ხვრელური წყვილების გენერირების სიხშირესთან და შესაძლებელია აღიწეროს შოკლი-რედ-ჰოლის სტატისტიკით, (იხ.ნახ.6). თუ მოვახდენთ SiPM-ის გაცივებას 0C° გრადუსამდე პიქსელების ბლოკირების კოეფიციენტს შევამცირებთ 35%-მდე და თუ მივალწევთ -30C° გაგრილებას, მაშინ შესაძლებელია კოეფიციენტი შევამციროთ 20%-მდე.

2.5 ქვეთავში განხილულია ფოტოგამამლიერებელი, მას შეუძლია მასში მოხვედრილი სინათლე გაამლიეროს დაახლოებით 10^6 -ჯერ, მილში მოთავსებული დინოდების საშუალებით.

2.6 ქვეთავში განხორციელდა CMS ექსპერიმენტის RPC დეტექტორის, ძირითადი პროგრამული უზრუნველყოფის CMSSW პლატფორმის ოპტიმიზაცია და ანალიზი, CMSSW პლატფორმის პროგრამულ კოდში გამოვიყენეთ როგორც C++ და Python დაპროგრამების ენები.

მე-3 თავში განხილულია CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში (-100) მეტრი და ცერნის 904 ლაბორატორიაში ჩატარებული კვლევები.

3.1 ქვეთავში განხილულია სუპერ-მოდულების ტესტირება და ინსტალაცია მათი განახლების მიზნით, მოვახდინეთ 36 სუპერ მოდულის (72 ცალი RPC დეტექტორი) ტესტირება და შემდგომ ინსტალაცია CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში

3.2 ქვეთავში განხილულია ექსპერიმენტალურ დარბაზში არსებული RPC კამერების მაღალი ძაბვის სისტემის ტესტირება და განახლება

3.3 ქვეთავში განხილულია ექსპერიმენტალურ დარბაზში არსებული RPC კამერების გაზის სისტემის გამოკვლევა და განახლება

3.4 ქვეთავში განხილულია ახალი iRPC ელექტრონიკის გაცივების სისტემის პროტოტიპის შექმნა, მოვახდინეთ iRPC კამერის გაცივების სისტემის პროტოტიპისთვის შექმნილი სისტემის კომპიუტერული მოდელირება და ანალიზი, რის შედეგადაც მოხდა გაცივების სისტემის პროტოტიპის შექმნა, რომელიც გაკეთდა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

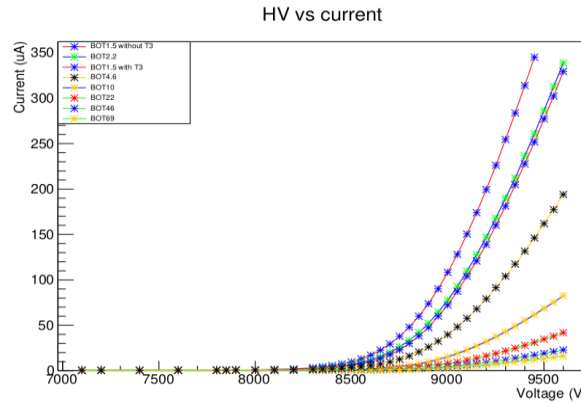
3.5 ქვეთავში განხილულია ახალი ელექტრონიკის გაცივების სისტემის თერმული ბალიშის შესწავლა

3.6 ქვეთავში განხილულია სათადარიგო RPC კამერების შემოწმება და ადღენითი სამუშაოები.

3.7 ქვეთავში განხორციელდა კოსმოსური სხივების ტესტირების სტენდის აწყობა ცერნის 904 ლაბორატორიაში, სადაც მოხდა კამერების ეფექტურობის შემოწმება კოსმოსური მიუონების გამოყენებით.

3.8 ქვეთავში განხილულია ბაკელიტის წინაღობის გაზომვა და რადიაციული დაზიანებების შესწავლა.

3.9 ქვეთავში განხორციელდა გამა კვანტების ინტენსიურობის დამოკიდებულება დეტექტორის დენზე, ამისათვის გამოვიყენეთ 14 ტერა ბეკერელი ენერგიის მქონე CS^{137} რადიაციული წყარო, წყაროს შემცირების კოეფიციენტი იყო: 1; 1,5; 2.2; 4,6; 10; 22; 46 და 69 (იხ.ნახ.2)



ნახ.2 BOT გეპის გამოკიდებულება წყაროს სხვადასხვა ინტენსიობაზე

მე-4 თავში განხილულია ეკოლოგიური გაზის ნაზავის აღმოჩენა და მიღებული შედეგები

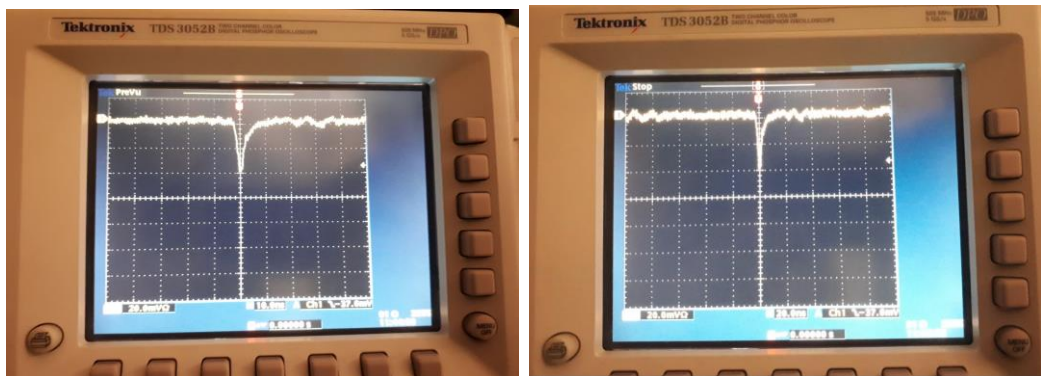
4.1 ქვეთავში განხილულია ეკოლოგიური გაზის შესწავლა, იგი წარმოადგენდა ძალზედ მნიშვნელოვან გამოწვევას RPC კოლაბორაციასა და მთლიანად CMS ექსპერიმენტის მიმართ, რადგან პრობლემატურ საკითხს წარმოადგენს აკრძალვები, ე.წ. კიოტოს პროტოკოლის მიხედვით გარკვეული გაზების მიმართ, რომელთაც გააჩნიათ მაღალი GWP (Global Warming Power). დღეს-დღეობით CMS ის RPC ტიპის დეტექტორები ეფექტურად მუშაობენ არააალებად 3 გაზიან ნარევეზე, რომლებიც შედგება 95.2% ტეტრაფლურეთანი $C_2H_2F_4$, 4.5% iC_4H_{10} იზოპროპანისგან და 0.3% of SF_6 ჩამხშობი გაზისგან, კვლევა მიზნად ისახავდა CMS ის სტანდარტული გაზიდან, რომლის შემადგენლობაში შემავალი გაზის ნაზავიდან 95.5% ფტორია მის ჩანაცვლებას ახალი ეკოლოგიური გაზით

4.2 ქვეთავში აღწერილია ორი ახალი 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორის შექმნა და მათი სრული აღჭურვა, ამისათვის მოძიებულ იქნა დეტექტორის შესაქმნელად აუცილებელი ყველა საჭირო მასალა დეტალი და მოვახდინეთ პროტოტიპების აწყობა.

4.3 ქვეთავში განხილულია აწყობილ პროტოტიპებზე ფრონტ-ენდ ელექტრონიკის მონტაჟი, რომელიც საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ დეტექტორიდან წამოსული იმპულსის ფორმირება, ისე რომ არ მოხდეს გაზაში სიგნალების არეკვლა.

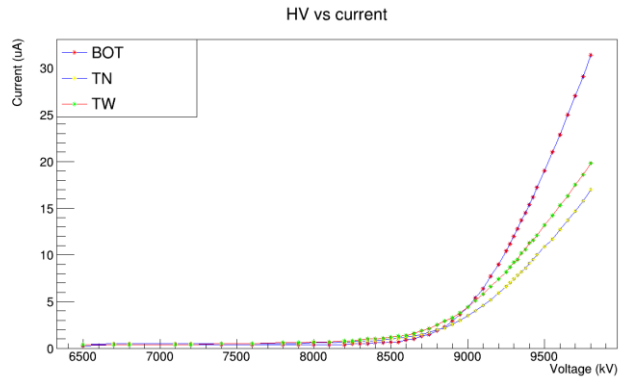
4.4 ქვეთავში განხილულია აწყობილ პროტოტიპებზე კვების სადენების და გაზის ინსტალაცია.

4.5 ქვეთავში განხილულია აწყობილი პროტოტიპების პირველადი შედეგები, დადგინდა დეტექტორების მუშაობის რეჟიმი გაზური გაძლიერებისას, დეტექტორი უნდა მუშაობდეს ავალანჩურ მოდაში, ანუ სიგნალის ამპლიტუდა არ უნდა აღემატებოდეს 25 mV, ხოლო სტრიმერულ მოდაში (ამ დროს დეტექტორში მიმდინარეობს გაზური განმუხტვები, ნაპერწკლები) მუშაობის შემთხვევაში, სიგნალის ამპლიტუდა აღწევს 50 mV და ზოგჯერ უფრო მეტსაც (იხ.ნახ.3).

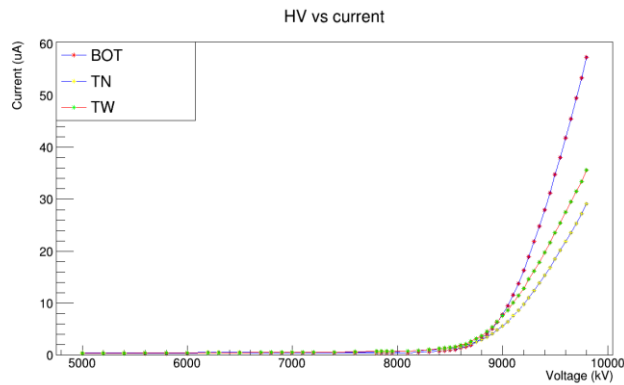


ნახ.3 მარცხნივ 1.4მმ-იანი, ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპისგან მიღებული სიგნალი

4.6 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება CMS-ის სტანდარტული გაზის გამოყენებისას, (იხ.ნახ.4 და ნახ.5), როგორც ნახაზებიდან ჩანს გაზური გაძლიერება CMS-ის სტანდარტული გაზის გამოყენებისას იწყება 9100 ვოლტიდან - 9800 ვოლტამდე.



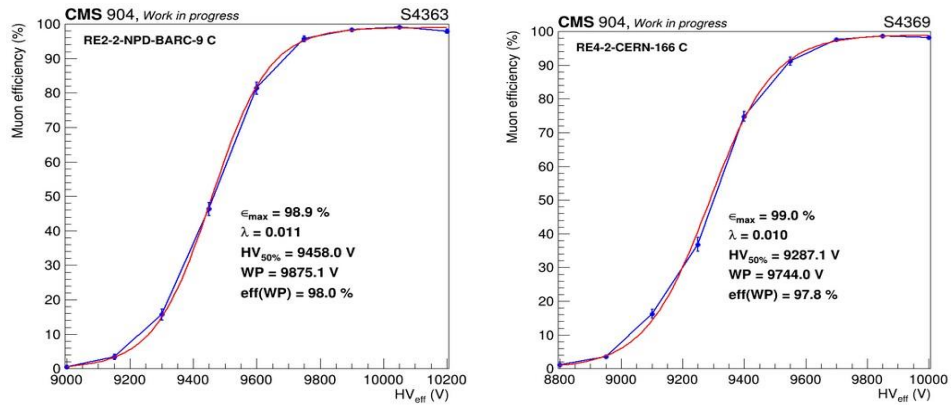
ნახ.4 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 1.4მმ-იანი RPC დეტექტორის
BOT, TW, TN გეპებისთვის



ნახ.5 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 2მმ-იანი RPC დეტექტორის
BOT, TW, TN გეპებისთვის

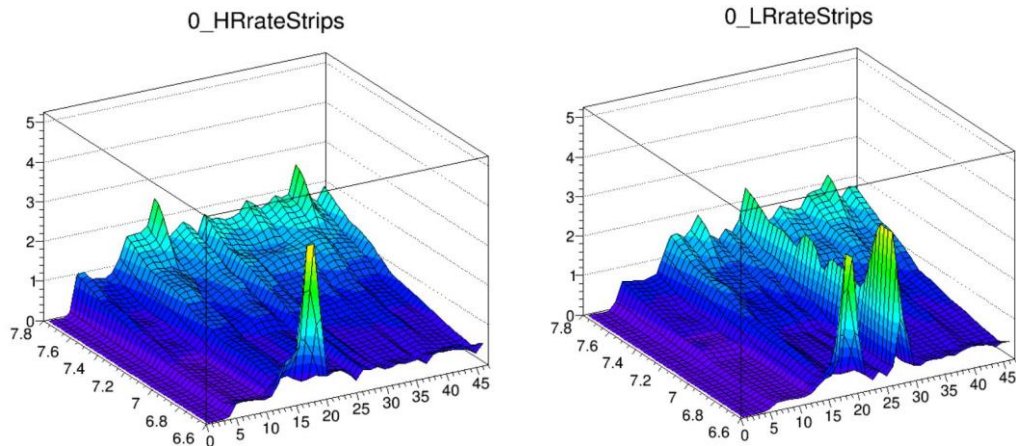
4.7 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ეფექტურობის დადგენა CMS-ის სტანდარტული გაზის გამოყენებისას, RPC დეტექტორის ეფექტურობა ყველაზე მნიშვნელოვანი პარამეტრია, ზოგადად CMS კოლაბორაციას მიღებული აქვს, რომ დეტექტორის ეფექტურობა უნდა იყოს 95% ან მეტი, წინააღმდეგ შემთხვევაში არ მოხდება დეტექტორის ჩართვა ფიზიკური მონაცემების ასაღებად, ჩვენს შემთხვევაში რადგან დეტექტორები ახალი შექმნილი იყო ეფექტურობის დასადგენი ტესტები ჩატარდა 904 ლაბორატორიაში, კოსმიკური ტრიგერის გამოყენებით, როგორც ქვემოთ მოცემული ნახაზიდან (იხ.ნახ.6) ჩანს 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ეფექტურობა CMS-ის სტანდარტული გაზის გამოყენების დროს თითქმის ერთნაირია და შეადგენს 97%, რაც ძალზედ კარგი შედეგია

და იგი მიუთითებს, რომ ახლად აწყობილი პროტიტიპები მუშაობენ კარგად და უკვე მაგათზე შეგვეძლო დაგვეყო ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოძებნა.



ნახ.6 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის ეფექტურობა CMS-ის სტანდარტული გაზის გამოყენების დროს

4.8 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სტრიპზე მოსული მიონების სიგნალის რაოდენობა კოსმოსური ტრიგერის და CMS ის სტანდარტული გაზის გამოყენებისას, (იხ.ნახ.7), როგორც ქვემოთ ჩანს ორივე დეტექტორის თითქმის ერთიდაიგივე სტრიპები ერთდროულად რეაგირებენ მოსულ კოსმოსულ მიონებზე.



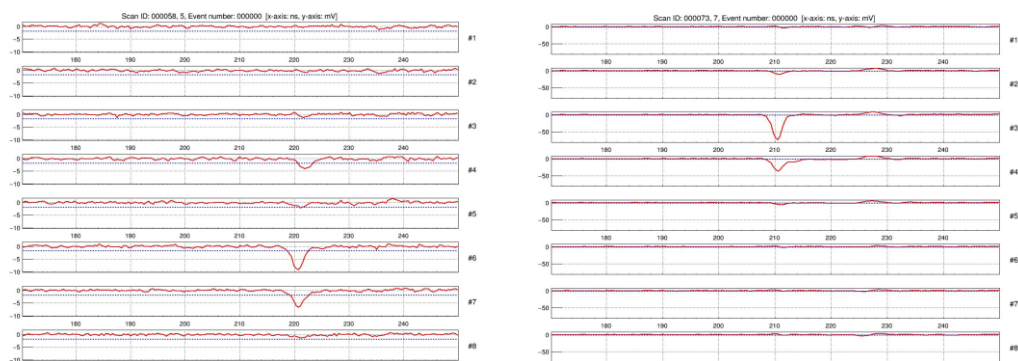
ნახ.7 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპებზე მოსული სიგნალების რაოდენობა

4.9 ქვეთავში განხილულია ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოძიება RPC დეტექტორებისათვის, თავდაპირველად იყო რათქმაუნდა რიგი პრობლემები, როგორცაა: გაზის ნაზავის შერჩევა, მინარევების სწორი

პროცენტული შერევა, გაზის ტენიანობის შენარჩუნება და ა.შ, ყოველი შერჩეული მინარევისათვის ვაკუუმბდით სტანდარტულ ტესტებს, მთავარი მიზანი იყო, რომ რაც შეიძლება შეგვემცირებინა გაზის მინარევიდან ფტორის არსებობა, ისე რომ სამუშაო პარამეტრები უცვლელი დარჩენილიყო, არ შეცვლილიყო დეტექტორის სამუშაო რეჟიმი, ასევე მაღალი ყოფილიყო მისი ეფექტურობა და დროითი გარჩევისუნარიანობა, სამ წლიანმა შრომამ ბოლოს მაინც გამოიღო შედეგი და 2021 წლის მიწურულს შევძელით მოგვენახა გაზის შენარევი, რომელშიც ფტორი გარკვეული რაოდენობით კი დარჩა, მაგრამ მნიშვნელოვნად შემცირდა მისი პროცენტული შემადგენლობა, კონკრეტულად კი მისი შემადგენლობა გაზში 95.5% დან შემცირდა 51% მდე. ახლად აღმოჩენილი ეკო გაზის ფორმულა და პროცენტული შემადგენლობაა:

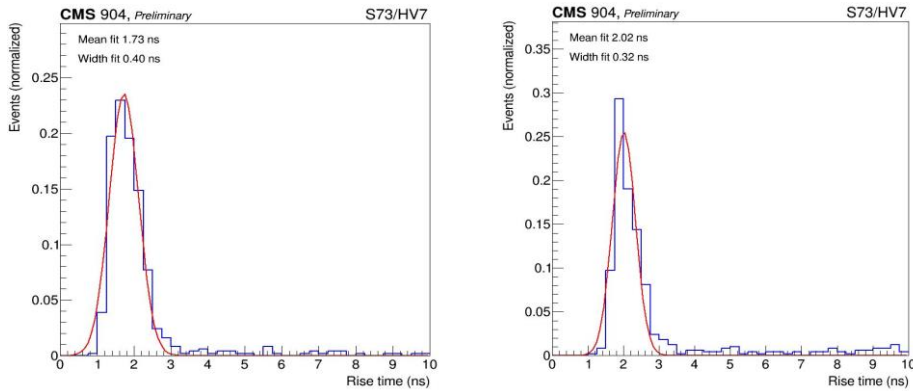
(HFO 50%+CO2 45%+C4H10 4%+SF6 1%) გაზის ტენიანობა შეადგენს 40%

4.10 ქვეთავში მოვახდინეთ 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სამუშაო რეჟიმის დადგენა ეკო გაზის გამოყენებისას, CAEN-ის Digitizer-ის მეშვეობით მოვახდინეთ სტრიპებიდან წამოსული სიგნალის წაკითხვა გაძლიერების გარეშე. როგორც ნახ.14 დან ჩანს, ახალი ეკო გაზის მუშაობის პირობებში, ორივე 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორიდან წამოსული სიგნალის ამპლიტუდა არ აჭარბებს 10mV-ს რაც უტყუარი მტკიცებულებაა იმისა, რომ დეტექტორები მუშაობენ ავალანჩურ რეჟიმში. (იხ.ნახ.8)



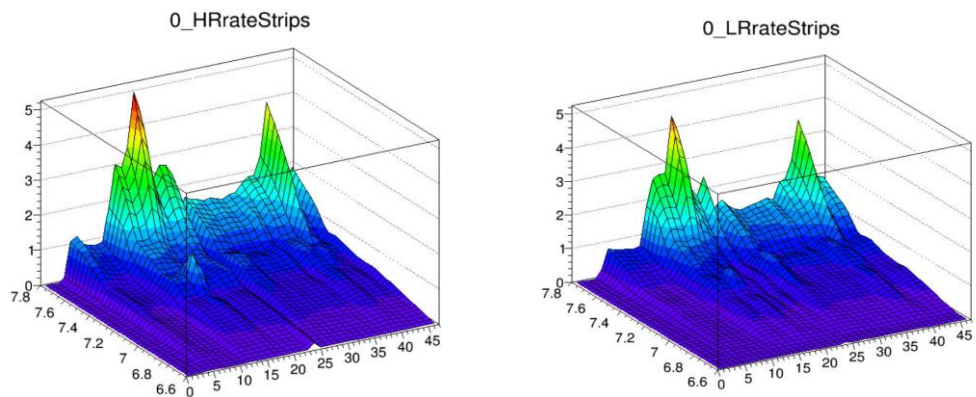
ნახ.8 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპისგან მიღებული სიგნალი

4.11 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების დროითი გარჩევისუნარიანობა ეკო გაზის გამოყენებისას, როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზებიდან ჩანს ახალი ეკოლოგიური გაზის გამოყენებისას პტოტოტიპებში არ გაზრდილა დროითი გარჩევისუნარიანობა და იგი სტაბილურად შეადგენს 2.0 ნანო/წამს, (იხ.ნახ.9)



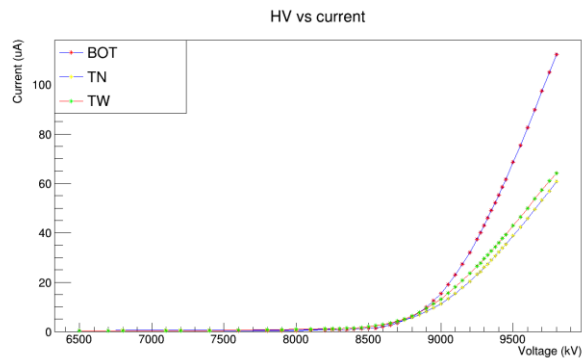
ნახ.9 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის დროითი გარჩევისუნარიანობა

4.12 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სტრიპზე მოსული მიონების სიგნალის რაოდენობა კოსმოსური ტრიგერის და ეკო გაზის გამოყენებისას, როგორც ქვემოთ ჩანს ორივე დეტექტორის თითქმის ერთიდაიგივე სტრიპები ერთდროულად რეაგირებენ მოსულ კოსმოსულ მიუონებზე, რაც მიუთითებს ეკო გაზის სტაბილურ მუშაობას, (იხ.ნახ.10)

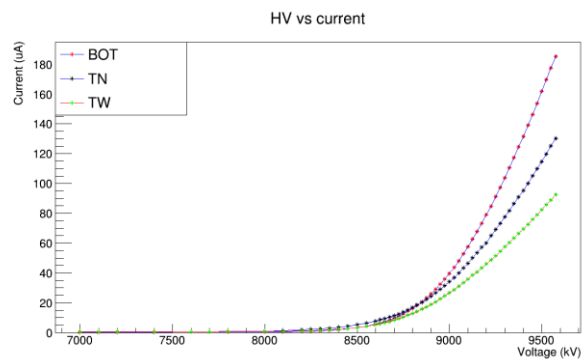


ნახ.10 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპებზე მოსული სიგნალების რაოდენობა

4.13 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება ეკო გაზის გამოყენებისას, როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზებიდან ჩანს (იხ.ნახ.11 და ნახ.12) დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება როგორც 1.4მმ ისე 2მმ-იანი RPC დეტექტორებისათვის აბსოლუტურად შეესაბამება დაშვებულ ნორმებს

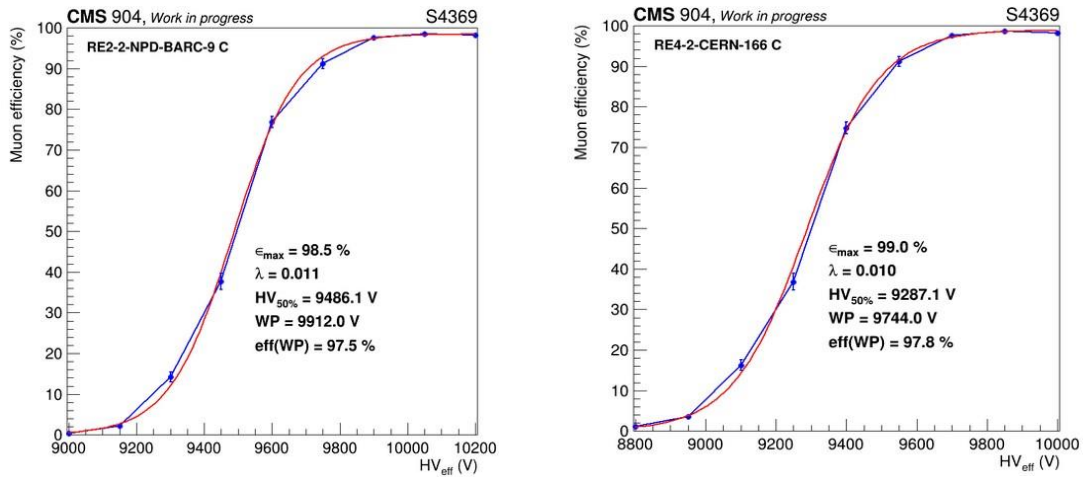


ნახ.11 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 1.4მმ-იანი RPC დეტექტორის BOT, TW, TN გეპებისთვის ერთად



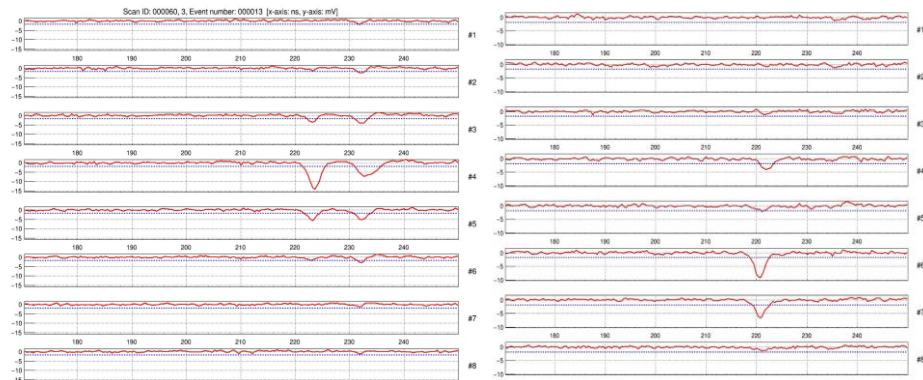
ნახ.12 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 2მმ-იანი RPC დეტექტორის BOT, TW, TN გეპებისთვის ერთად

4.14 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ეფექტურობა და დროითი გარჩევისუნარიანობის ეკო გაზის გამოყენებისას, ეფექტურობა ახლად აღმოჩენილ ეკო გაზის გამოყენების დროს თითქმის იგივეა, როგორც იყო სტანდარტული გაზის დროს და შეადგენს 97% (იხ.ნახ.13)



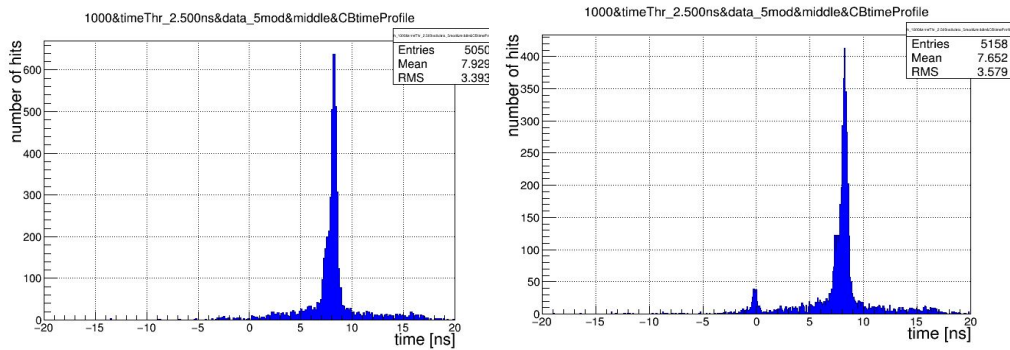
ნახ.13 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის ეფექტურობა ეკო გაზის გამოყენებისას

4.15 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სამუშაო რეჟიმის დადგენა ეკო გაზის გამოყენებისას მაღალი რადიაციული ინტენსიურობის GIF++ დანადგარში, როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზებიდან ჩანს, ახალი ეკო გაზის მუშაობისას რადიაციის პირობებში ორივე 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორიდან წამოსული სიგნალის ამპლიტუდა არ აჭარბებს 10mV-ს რაც უტყუარი მტკიცებულებაა იმისა, რომ დეტექტორები მუშაობენ ავალანჩურ რეჟიმში და მაღალი ინტენსიურობის რადიაციას გავლენა არ მოუხდენია ახლად აღმოჩენილ ეკო გაზის თვისებებზე. (იხ.ნახ.14)



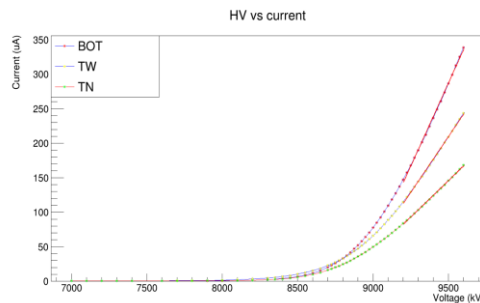
ნახ.14 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპისგან მიღებული სიგნალი GIF++ დანადგარში

4.16 ქვეთავში მოვახდინეთ 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების დროითი გარჩევისუნარიანობის დადგენა ეკო გაზის გამოყენებისას GIF++ დანადგარზე, რომელმაც შეადგინა 1.8 ნანო წამმა (იხ.ნახ.15)

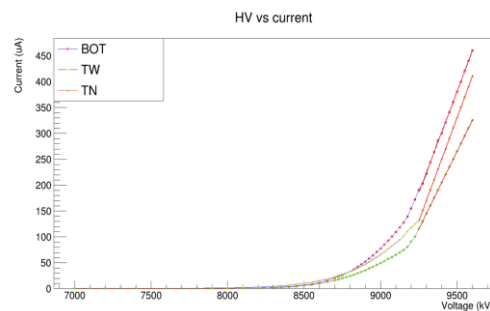


ნახ.15 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის დროითი გარჩევისუნარიანობა

4.17 ქვეთავში განხილულია 1.4 და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება GIF++ დანადგარზე ეკო გაზის გამოყენებისას (იხ.ნახ.16 და ნახ.17) როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზებიდან ჩანს დენის ძაბვაზე დამოკიდებულებას მაღალი რადიაციის პირობებში ორივე RPC დეტექტორებისათვის აბსოლუტურად შეესაბამება დაშვებულ ნორმებს

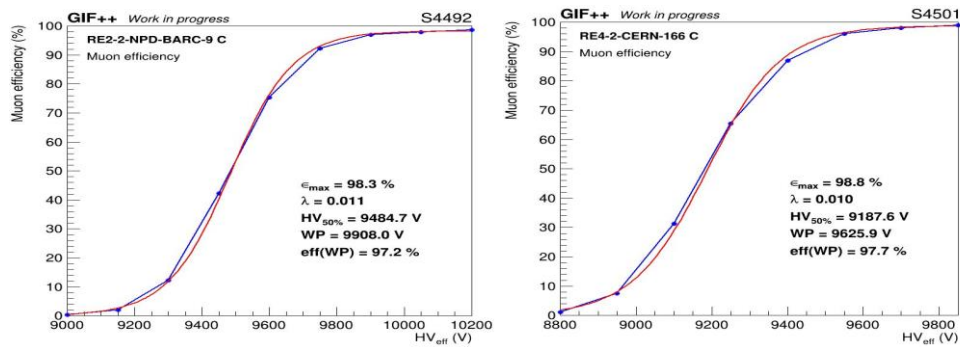


ნახ.16 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 1.4მმ-იანი RPC დეტექტორის BOT, TW და TN გეპებისთვის GIF++ დანადგარზე



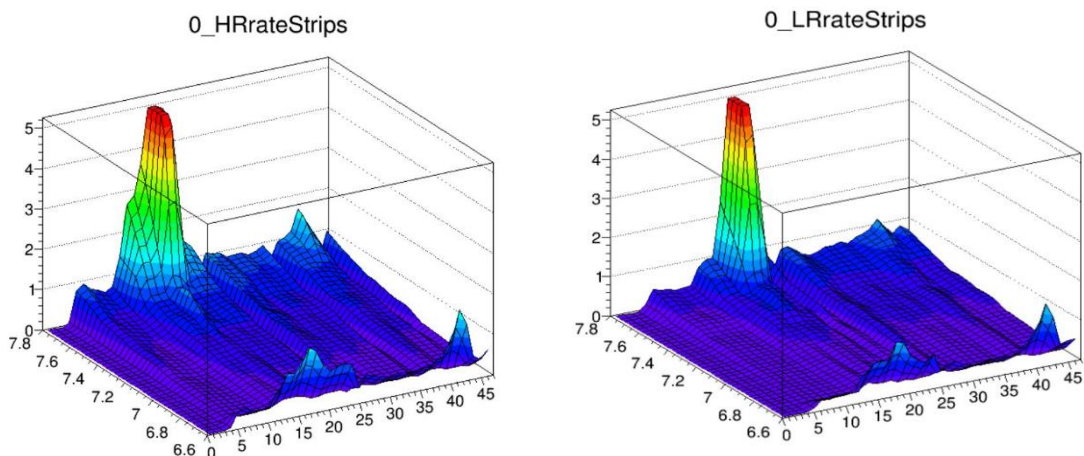
ნახ.17 დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება 1.4მმ-იანი RPC დეტექტორის BOT, TW და TN გეპებისთვის GIF++ დანადგარზე

4.18 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ეფექტურობის დადგენა ეკო გაზის გამოყენებისას GIF++ დანადგარში. კვლევისას მაღალი ინტენსიურობის რადიაციული წყარო იყო გათიშული, მხოლოდ SPS ამაჩქარებლიდან წამოსული მიონების 150 გევიანი ნაკადი ხვდება დეტექტორებში. როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზიდან ჩანს ორივე დეტექტორის ეფექტურობა შეადგენს 97%. (იხ.ნახ.18)



ნახ.18 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის ეფექტურობა GIF++ დანადგარში

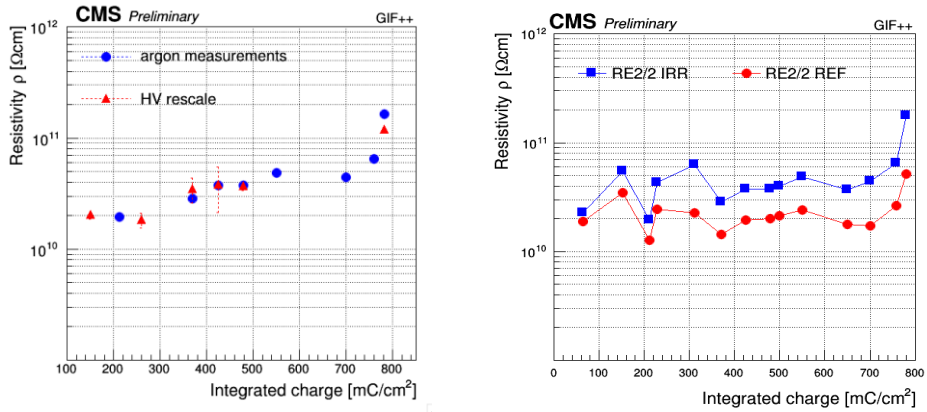
4.19 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სტრიპზე მოსული სიგნალის რაოდენობა ეკო გაზის გამოყენებისას მაღალი რადიაციის პირობებში, როგორც ქვემოთ მოყვანილ ნახაზზე ჩანს (იხ.ნახ.19) ორივე დეტექტორის თითქმის ერთიდაიგივე სტრიპები ერთდროულად რეაგირებენ მოსულ კოსმოსულ მიუონებზე, რაც მიუთითებს ეკო გაზის სტაბილურ მუშაობას მაღალი რადიაციის პირობებში.



ნახ.19 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის სტრიპებზე მოსული სიგნალების რაოდენობა GIF++ დანარგარში

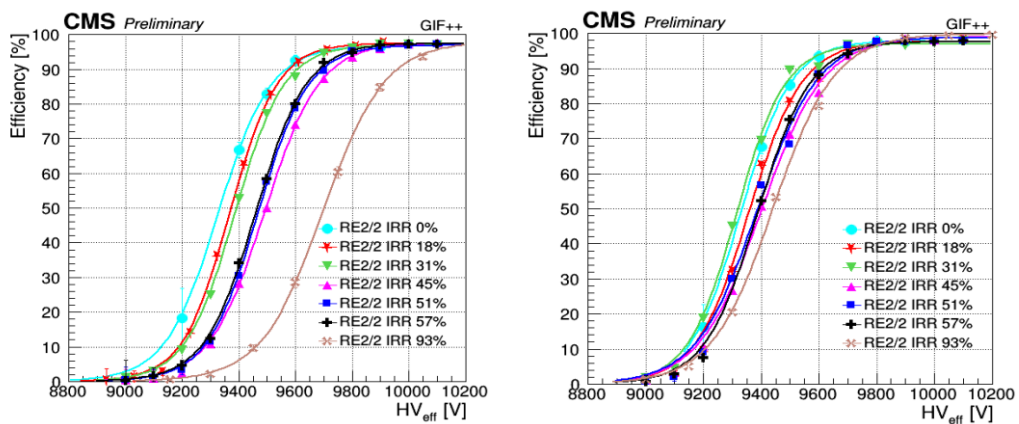
4.20 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ბაკელიტის წინაღობის გაზომვა ეკო გაზის გამოყენებისას მაღალი რადიაციის პირობებში, კვლევისას კამერებისთვის გაგზომეთ დენის მაღალ

მაზვაზე დამოკიდებულება რადიაციის სხვადასხვა ინტენსივობებისთვის. $I=f(V)$ დამოკიდებულების წრფივი უბნის აპროქსიმაციით ვიპოვეთ $R_{bakelite} + R_{gap}$, დავადგინეთ ბაკელიტის წინაღობა, რომელიც ორივე დეტექტორისთვის შეადგენდა დაახლოებით 10^{10} ომს, (იხ.ნახ.20)



ნახ.20 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის ბაკელიტის წინაღობა გამა რადიაციის პირობებში

4.21 ქვეთავში განხილულია 1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების ეფექტურობის დამოკიდებულება რადიაციული წყაროს სხვადასხვა ინტენსიურობის დროს ეკო გაზის გამოყენებისას, როგორც ქვემოთ მოყვანილი ნახაზიდან ჩანს (იხ.ნახ.21) წყაროს მაღალი ინტენსიურობა გავლენას ვერ ახერხებს დეტექტორების ეფექტურობაზე, რაც უთუოდ დიდი მიღწევაა ახალი ეკოლოგიური გაზის გამოყენების პირობებში ყველა



ნახ.21 მარცხნივ 1.4მმ ხოლო მარჯვნივ 2 მმ-იანი RPC დეტექტორის ეფექტურობის დამოკიდებულება გამა რადიაციის სხვადასხვა ინტენსიურობის დროს პირობებში

სტანდარტული კვლევა წარმატებით ჩააბარა ახალი ტიპის ეკოლოგიურმა გაზმა, მან გაუძლო როგორც გამა კვანტების მაღალ ინტენსიურობას, ასევე მისი ეფექტურობა შეადგენდა 97%, რის შედეგადაც იგი უკვე მიიღეს წარმოებაში და 2022 წლის თებერვალში უკვე უშუალოდ CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში (-100 მეტრი) მოვახდინეთ 2 RPC ტიპის დეტექტორის ინსტალაცია (იხ.ნახ.22) და სამუშაო გაზად არჩეულ იქნა ახალი ტიპის ეკოლოგიური გაზი, ამა წლის მათში მთავრდება LHC ის ფაზა II ის განახლება და უკვე იქ იგეგმება მისი ტესტირება მაღალი ლუმინოსიტის პიზობებში, რისი წარმატებით გავლის შემდეგ CMS ის მთლიანი მიუონური სისტემა ეტაპობრივად გადავა ახალ ტიპის ეკოლოგიურ გაზზე.



ნახ.22 RPC დეტექტორების ინსტალაცია CMS ექსპერიმენტზე

დასკვნა

1. შეიქმნა ორი ახალი სატესტო RPC დეტექტორი, 1.4მმ და 2მმ იანი წინაღობური შრეებით. რასაც წინ უძღოდა დეტექტორის შესაქმნელად საჭირო მასალების R&D. სატესტო დეტექტორები აღიჭურვა მაღალი და დაბალი ძაბვის სადენებით და გაზის სისტემით. სატესტო პროტოტიპებმა გადამწყვეტი როლი შეასრულეს ახალი ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოსაძებნად. კვლევები ჩატარდა ორივე პროტოტიპზე პარალელურად, რამაც საშუალება მომცა მაქსიმალურად შემემცირებინა გაზომვების სისტემატური შეცდომები და გამეზარდა საბოლოო შედეგების

დამაჯერებლობა.

2. განხორციელდა ორივე პროტოტიპის აღჭურვა პირველადი იონიზაციური სიგნალის წამკითხავი PETIROC ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული ეისიკებით (ASIC). აღნიშნული „front-end“ ელექტრონიკა სპეციალურად იქნა ოპტიმიზირებული მრავალშრიანი RPC დეტექტორებისათვის ათეულობით პიკოწამის რიგის დროითი გარჩევისუნარიანობით “OMEGA” კომპანიის მიერ. წინამორბედი დეტექტორებისაგან განსხვავებით ახალ პროტოტიპებში იონიზაციური სიგნალის წაკითხვა განხორციელდა სტრიპების ორივე ბოლოდან. ამ ტექტიკით გაიზარდა ერთეული დეტექტორის მიონის დეტექტირების ეფექტურობა და მცდარი ცდომილებების სიხშირის ნულამდე მინიმიზაცია, რისი მიღწევაც მოხდა სტრიპების ორივე ბოლოდან არსებული სიგნალების თანხვერდაზე ჩართვით.
3. განხორციელდა აწყობილი RPC პროტოტიპების პირველადი საკვალიფიკაციო შესწავლა კოსმოსური მიუონების (სინტილაციური ჰოდოსკოპის) გამოყენებით ცერნის 904 ლაბორატორიაში. თავდაპირველად გამოვიყენე CMS ის სტანდარტული გაზის ნარევი, შემადგენლობით: 95.2% ტეტრაფლურეთანი ($C_2H_2F_4$) თავდაპირველი იონიზაციისთვის, 4.5% იზობუტანი (C_4H_{10}) მოქმედებს როგორც ჩამქრობი გაზი რათა თავიდან ავიცილოთ სტრიმერული მოდის ფორმირება და 0.3% სულფიდის ჰეგსაფლორიდი (SF_6), რომელიც უზრუნველყოფს მეორადი ელექტრონების წარმოშობას თავდაპირველი იონიზაციური სიგნალის სისუფთავის შესანარჩუნებლად. რადგან აღნიშნულ გაზს წლების მანძილზე იყენებს RPC კოლაბორაცია და მისი სამუშაო თვისებები კარგადაა შესწავლილი, ამ მიდგომამ საშუალება მომცა, რომ დავრწმუნებულიყავი ახლად აწყობილი პროტოტიპების გამართულ მუშაობაში, დავადგინე: მაღალი ძაბვის პირობებში გაზური გაძლიერებისას მათი მუშაობის რეჟიმი, დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება, მათი ეფექტურობები და სტრიპებზე მოსული

მიონების სიგნალის სიხშირე.

4. მოხდა ახალი თაობის ეკოლოგიური გაზის ნაზავის ძიება. რა დროსაც გადაილახა მთელი რიგი პროპლემები, როგორცაა: გაზის ნაზავის შერჩევა, მინარევების სწორი პროცენტული შერევა, გაზის ტენიანობის შენარჩუნება და ა.შ. ყოველი შერჩეული მინარევისათვის განცორციელდა წინა პარაგრაფში აღწერილი ტესტირების პროტოკოლის დაცვა და რეზულტატების ურთიერთშედარება, რაც ამ შემთხვევაში მიზნად ისახავდა CMS ის სტანდარტული გაზიდან, რომლის შემადგენლობაში შემავალი გაზის ნაზავიდან 95.5% ფტორია მის „ჩანაცვლება-შემცირებას“ ახალი ეკოლოგიური გაზით, ისე რომ დეტექტორების სამუშაო პარამეტრები უცვლელი დარჩენილიყო. 3 წლიანი კვლევის თავზე საგრძნობლად გაუმჯობესებულ იქნა შედეგი, კონკრეტულად მოძებნილ იქნა ახალი ტიპის გაზის ნაზავი (HFO 50%, CO₂ 45, C₄H₁₀ 4%, SF₆ 1%) გაზის ტენიანობა 40%, რომელმაც ფტორის შემცველობა 95.5% დან შეამცირა 51% ზე, ისე რომ დეტექტორების სამუშაო პარამეტრების ცვლილება არ მომხდარა.
5. მოხდა დეტექტორების შესწავლა და ძირითადი სამუშაო პარამეტრების დადგენა მაღალი რადიაციის პირობებში, კერძოდ დეტექტორის ძირითად სამუშაო პარამეტრებს უნდა გაეძლო დიდი რადიაციული ინტენსივობის დატვირთვისათვის. ამ ამოცანის გადასაჭრელად გამოყენებულ იქნა ცერნის GIF++ ლაბორატორია. იგი აღჭურვილია მაღალი ინტენსიურობის მქონე CS¹³⁷ რადიაციული წყაროთი, რისი საშუალებითაც შექმნილია 662 კილო-ელექტრონ ვოლტიანი გამა კვანტების 14 ტერაბეკერელიანი ფონი. გარდა ამ ექსტრემალური რადიაციული პირობებისა, რომელიც განახლებული ლუმინოსიტის LHC ის ინტეგრირებული რადიაციული ფონის ექვივალენტია, საჭირო იყო პროტოტიპული დეტექტორების მიონური თვლის ეფექტურობის გაზომვა. ამისათვის გამოყენებული იქნა SPS ამაჩქარებლიდან მიღებული 150 გევიანი მიონების ნაკადი (8000 ნაწილაკით ყოველ 16 წამში). ექსპერიმენტული გაზომვებით დადგინდა:

1.4მმ და 2მმ-იანი RPC დეტექტორების სამუშაო რეჟიმი, დეტექტორის სტრიპიდან მოხსნილი სიგნალის ამპლიტუდა არ აჭარბებს 10 მილი/მოლტს და შესაბამისად შეადგენს ავალანჩურ მოდას; დროითი გარჩევისუნარიანობა შეადგენს 2.0 ნანო წამს; დენის ძაბვაზე დამოკიდებულება პირდაპირ პროპორციულია დეტექტორების გეგმის ფართისა (რადგან BOT გეპი ყველაზე დიდია, შესაბამისად მეტი დენით მასზე აღენიშნება, შემდეგ მოდის TW და TN); დეტექტორების ეფექტურობები შეადგენს 97% ს, როდესაც რადიაციული წყარო გათიშულია და მხოლოდ მიუონების ნაკადი ხვდება დეტექტორებში; სტრიპებზე მოსული ნაწილაკთა რაოდენობა თითქმის იდენტურია ტრიგერში გავლილი ნაწილაკების რაოდენობის; დეტექტორის ბაკელიტის წინაღობა დარჩა უცვლელი და იგი შეადგენს 10^{10} ომს; დეტექტორების ეფექტურობაზე გავლენა არ მოუხდენია რადიაციული წყაროს სხვადასხვა ინტენსიურობას და იგი უცვლელად დარჩა 97%.

6. სადისერტაციო თემის მთავარი მიღწევაა ის, რომ ახალი ტიპის ეკოლოგიური გაზის ნაზავის მოძიებამ დიდი ინტერესი გამოიწვია მთლიანად CMS ექსპერიმენტში და კონკრეტულად მიუონურ სისტემაში, რაც აერთიანებს RPC, DT და CSC დეტექტორებს, რის შედეგადაც იგი უკვე მიიღეს წარმოებაში და 2022 წლის თებერვალში უკვე უშუალოდ CMS ექსპერიმენტის ექსპერიმენტალურ დარბაზში (-100 მეტრი) მოვახდინეთ 2 ცალი RPC ტიპის დეტექტორის ინსტალაცია და სამუშაო გაზად არჩეულ იქნა ახალი ტიპის ეკოლოგიური გაზი, ამა წლის მათში მთავრდება LHC ის ფაზა II ის განახლება და უკვე LHC ის ოპერირებისას იგეგმება მისი ტესტირება მაღალი ლუმინოსიტის პირობებში, სადაც პროტონ-პროტონული შეჯახებების ალბათობა იქნება 10×10^{34} სმ⁻²/წ, 13 ტევი ენერჯის მასათა ცენტრის პირობებში, რისი წარმატებით გავლის შემდეგ CMS ის მთლიანი მიუონური სისტემა ეტაპობრივად გადავა ახალ ტიპის ეკოლოგიურ გაზზე.

ნაშრომის აპრობაცია

მოხსენებები კონფერენციებზე

1. I. Lomidze, D. Lomidze, I. Bagaturia „Results of CRV stage 1 R&D studies“ CM27 and CMS Muon Collaboration Conference, CERN (Switzerland), 2021 წ., გვ.2
2. I. Lomidze, I. Bagaturia „FEB Cooling“ RPC Upgrade Conference, CERN (Switzerland), 2021 წ., გვ.1

გამოქვეყნებული ნაშრომები

1. I. Lomidze, „CMS RPC Background–Studies and Measurements“ JINST, 2(29), გვ.45-50, 2020
2. I. Lomidze and ect., „Search for long-lived particles decaying into muon pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with a dedicated high-rate data stream” JINST 1(12), pp. 125-137, 2022
3. I. Lomidze and ect., „Measurement and QCD analysis of double-differential inclusive jet cross sections in proton-proton collisions at $s = 13$ TeV” 1(12), pp. 138-146, 2022

Abstract

Studies of radiation influence on Resistive Plate Chambers for the CMS experiment operated on an ecological friendly gas mixture for the LHC High Luminosity Update

The Large Hadron Accelerator at CERN and its four big experiments (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb) have been successfully in operation for the last decades. During this time, many fundamental observations and discoveries have been made; among these highlights is the experimental discovery of the Higgs Boson in 2012, which was followed by the Nobel prize in physics.

In order to move further, it is essential to increase the luminosity of the LHC up to 10^{34} cm⁻²/s. This allows an increasing probability of proton collision by one order of magnitude and, as a consequence, increases Higgs Boson production yield. On the one hand, the high luminosity update is crucial to increase the scientific potential of the accelerator and opening doors for studying the properties of Higgs Boson and increasing the potential for further discoveries. By another hand, it is a huge challenge for the LHC experiments to cope with increasing radiation background while maintaining or increasing particle determination effectiveness by various types of detectors.

The research topic of the thesis studies the influence of high radiation on Resistive Plate Chamber (RPC) performance and the determination of a new environmentally friendly gas mixture for the high luminosity LHC. The estimated noise induced by high radiation background in the RPC detector is about $600\text{Hz}/\text{cm}^2$, and the integrated charge value reaches $840\text{ mC}/\text{cm}^2$. The research interest in eco-friendly gas is motivated due to the recent restrictions deriving from the application of the Kyoto protocol; the main components of the gas mixtures presently used in the Resistive Plate Chambers systems of the LHC experiments have high Global Warming Power (GWP) and for this reason, will be most probably phased out of production in the coming years.

The currently RPC system of the CMS experiment is effectively operational with a three-component gas mixture which has the following compounds: Tetrafluoropropene - ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$) 95.2% that enhances primary ionisation caused by charging particles. 4.5% Isobutane (iC_4H_{10}) acts as a quencher gas to reduce streamer formation, and 0.3% Freon SF6 in order to control the background electrons produced from secondary ionisation to clean the signal.

The main goal of this work is to research the influence of high radiation on RPC detector performance when the detector is operated on an alternative eco-friendly gas mixture by determining key parameters like gain, noise, efficiency and time resolution as a function of gas mixture and background radiation dose.

The main work of this research has been performed at Gama Irradiation Facility ++ (GIF++) and CMS RPC high technological laboratory in building 904 at CERN in 2018-2022 years. The research steps and main achievements are summarised as follows:

- Research and develop two prototype RPC detectors with 1.4mm and 2.0 mm resistive plates. That included studies and selection of detector building materials. The prototypes were equipped with low and high voltages as well as a gas system. These prototype detectors played a key role in the determination of the optimal compound of the new eco-friendly gas mixture. R&D studies were carried out with both prototype detectors. That way, I could minimise systematic experimental errors and enhance the significance of the final results.
- At the second stage of the research, prototypes were equipped with PETIROC based ASICs. The readout system has been optimised by the OMEGA group for multigap RPC detectors, providing a time resolution of the order of picoseconds. A significant improvement has been made in signal readout design. This time analogue signals from both ends of the strips have been connected to the ASICs. By this approach, I could increase muon counting efficiency while minimising fake triggering effects by requiring coincidence logic to these signals from the same strip.
- The third stage of the work was dedicated to qualifying prototype detectors and determining their optimal performance parameters using the standard gas mixture of the CMS experiment, that is 95.2% tetrafluoromethane ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$) responsible for primary ionisations caused by charged particles, 4.5% Isobutane (C_4H_{10}) that acts as quenching gas to prevent streaming mode, and 0.3% sulfide hexafluoride (SF6) which is preventing the formation of secondary electors and maintaining the primary ionisation signal cleaner. Measured performance parameters later have been used as reference values for comparison to the same parameters obtained from various mixtures of new gases. For qualification following parameters were determined: gain coefficient as a function of HV, efficiency as a function of HV and current, i.e. excess noise count as a function of

HV. And last but not least, count rate of cosmic ray muons per square centimetre.

- In the fourth stage of the research, I was focused on the determination of an optimal mixture of eco-friendly gases. The main attention has been paid to identifying which new gases should be a good alternative and what would be the right proportion in order to not compromise detector performance. In this way, several different compounds have been considered and experimentally tested aiming to reduce 95.5% fraction of the $C_2H_2F_4$ to a minimum level or substitute at all. As an outcome of three years of work, a new alternative gas compound has been determined to be (HFO 50%, CO_2 45, iC_4H_{10} 4%, SF_6 1%) with 40% relative humidity; That we Frederike fraction of most unwanted element Fluorine reduced from 95% to 50%. It was demonstrated that the performance of the experimental detector was not compromised, and all key parameters remained unchanged.
- One of the vitally important research was done in a high radiation environment to check and approve the performance of the prototype detectors with the new gas mixture for mass production. For this purpose, experiments have been done in GIF++ laboratory. The laboratory is equipped with 14 TBq Cs_{137} radiation source that emits 663 keV energy gammas and produces an enormous amount of background radiation, which well suits the aim of simulating a high luminosity LHC equivalent radiation environment. In addition, the muon beam produced by the SPS protons has been used 800 muons per spill. Muons were tagged by a specially developed organic scintillator based triggering system and used to evaluate detector efficiency and time resolution in high radiation background. Experimental results showed that the signal amplitude of both 1.4 mm and 2.0 mm prototype detectors does not exceed 10mV, which is good proof that they operated only in avalanche mode. Measured time resolution found to be below 2ns. The measured current was directly proportional to the gap area, and muon counting efficiency equals 97%. After the extensive explosion of the chambers into the high radiation, no change in the bakelite resistance was found nor degradation of counting efficiency, which remained at the level of 97%, which matches the initial value of the detector.
- The main and greatest achievement of the research is that the new gas mixture was officially approved by the CMS experiment RPC collaboration as new eco-friendly gas that started mass usage in Feb 2022. The newly developed RPC prototypes successfully gassed high radion stress tests, and it was successfully demonstrated that muon counting efficiency as well as time resolution despite high radiation background is at a desirable level and greatly fulfils all requirements of HL LHC. As a consequence, two full-size RPC detectors have been installed in the experimental caver of CMS. These will be operated with the new gas mixture and will be used to quantitatively evaluate its performance in a real experimental environment.