

კვანტური ფიზიკის და საინჟინრო ტექნოლოგიების ინსტიტუტი

**2017 წლის
სამეცნიერო ანგარიში**

სამეცნიერო ერთეულის ხელმძღვანელი - ხვედელიძე არსენ

**საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
კვანტური ფიზიკისა და საინჟინრო ტექნოლოგიების ინსტიტუტის
2017 წლის სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების ანგარიში**

№	შესრულებული პროექტის დასახელება მეცნიერების დარგისა და სამეცნიერო მიმართულების მიხედვით	პროექტის ხელმძღვანელი	პროექტის შემსრულებლები
1	2	3	4
1	<p align="center">მონაწილეობა ცერნის CMS LHC ექსპერიმენტზე (შვეიცარია)</p> <p align="center">ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკა</p>	<p align="center">ზვიად წამალაიძე</p> <p align="center">არსენ ხვედელიძე</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. ადამოვი გიორგი 2. ბალათურია იური 3. გოგილიძე სოსო 4. ლომიძე დავით 5. ლომიძე ირაკლი 6. კემულარია ოთარ 7. მალრაძე ერეკლე 8. მელქაძე ალექსანდრე 9. თავხელიძე დავით 10. ოიკაშვილი ბექარ 11. ტორიაშვილი თენგიზ 12. ფრანგიშვილი არჩილ 13. წამალაიძე ზვიად 14. წვერავა ნიკა 15. ხვედელიძე არსენ
<p align="center">დასრულებული კვლევითი პროექტის ძირითადი თეორიული და პრაქტიკული შედეგების ვრცელი ანოტაცია</p> <p>ინსტიტუტი ეფექტურად მუშაობს CMS (CERN, LHC, Switzerland) და COMET (KEK, J-PARC, Japan) ექსპერიმენტებში. CMS -ზე აქტიურობა მიმდინარეობს 4 სხვადასხვა მიმართულებით.</p>			

1. CMS ექსპერიმენტის მიონური სპექტრომეტრის RPC სისტემა

RPC ჯგუფის აქტივობა ამ წელს განპირობებული იყო LHC მეორე ფაზასთან დაკავშირებულ სამუშაოებთან. LHC მეორე ფაზა ითვალისწინებს პროტონების ნაკადის ინტენსივობის იმდენად გაზრდას, რომ კოლაიდერის ნათება $5 \times 10^{34} \text{ სმ}^{-2} \text{ წმ}^{-1}$ მიაღწიოს. ეს ამჩქარებელზე მომუშავე ოთხივე დიდ ექსპერიმენტს საშუალებას მისცემს უფრო დეტალურად შეისწავლონ 14 ტევენერგიაზე მიმდინარე პროცესები და შეეცადონ აღმოაჩინონ ახალი, იშვიათი მოვლენები, რომლებზეც დაკვირვება უფრო დაბალ ინტენსივობებზე შეუძლებელია.

მეორე ფაზისთვის RPC სუბდეტექტორის მოდერნიზაცია ძირითადად ითვალისწინებს შემდეგ ცვლილებებს:

- ფსევდოსიჩქარის არის გადაფარვას 2.4-მდე
- დიდი ფონური დატვირთვის პირობებში მომუშავე ახალი ტიპის კამერების შექმნა
- არსებული სამუშაო გაზის შეცვლა ეკოლოგიურად უფრო მისაღები გაზით
- არსებულია ახალი კამერების რადიაციული მედეგობის შემოწმება

ჩვენი ჯგუფი საკმაოდ ინტენსიურად მუშაობდა ამ პრობლემებთან დაკავშირებულ სამუშაოებში და შესაძლებლობის მაქსიმუმს აკეთებდა საჭირო შედეგის მისაღებად.

ქვემოთ ძირითადად შევხებით იმ სამუშაოებს, რომლებიც საანგარიშო წელს შესრულდა GIF++ დანადგარზე და ე.წ. 904 ლაბორატორიაში, ასევე სამუშაოები, რომლებიც დაკავშირებულია CMS ექსპერიმენტის ე.წ. ცენტრალურ, RPC და GIF++ შიფტებთან.

გაუმჯობესებული კამერების ტესტირება

საანგარიშო პერიოდში შემოწმდა ახალი, სამი სხვადასხვა ტიპის კამერა: ბაკელიტის მოდულებიანი 1.4 და 1.6 მმ ღრეჩოთი (GT კომპანიის და Kodol – Korea Detector Laboratory-ის მიერ დამზადებული); ასევე მინის მოდულებიანი 1.2 მმ ღრეჩოთი (ლიონის უნივერსიტეტის ჯგუფის მიერ დამზადებული). ეს, ე.წ. iRPC კამერები განკუთვნილია დიდი ფსევდოსიჩქარის რეგიონის გადასაფარად და მათ შესაბამისად უნდა შეძლონ მაღალი ფონური დატვირთვის ქვეშ მუშაობა ($\sim 2000 \text{ ჰც/წმ}$). ამის მისაღწევად ამცირებენ მოდულის ფირფიტების სისქეს და მათ შორის მანძილს 2 მმ-დან 1.4 – 1.2 მმ-დე. შესაბამისად მცირდება მიონის გავლისას წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური ღვარის მუხტი და კამერა უფრო „სწრაფად“ მუშაობს. თუმცა ეს იწვევს მთელ რიგ პრობლემებს (იზრდება სპონტანური განმუხტვის ალბათობა, მცირდება წარმოქმნილი მუხტი და ა.შ.). ეფექტურობა რომ არ შემცირდეს, საჭირო ხდება უფრო მგრძობიარე ელექტრონიკის გამოყენება, რაც თავის მხრივ ახალ პრობლემებს წარმოქმნის. საჭირო ხდება ყველა ამ ეფექტის ექსპერიმენტული შესწავლა და ოპტიმალური გადაწყვეტის პოვნა. ამ ახალი კამერების შესწავლა ხდებოდა როგორც GIF++ დანადგარზე γ -კვანტებით და მიონების ნაკადით, ასევე ე.წ. 904 ლაბორატორიაში კოსმოსური სხივებით და მცირე ზომის Cs-137 წყაროთი.

ლიონის ჯგუფის მიერ შემოთავაზებული ახალი ტიპის ელექტრონიკა (PETIROC სისტემის), რომელიც არსებულზე უფრო მგრძობიარეა და ამასთან შეუძლია სიგნალის წაკითხვა სტრიპის ორივე ბოლოდან (ეს საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ ნაწილაკის გავლის კოორდინატი სტრიპის გასწვრივ), გამოიცადა 904 ლაბორატორიაში კოსმოსური სხივების საშუალებით.

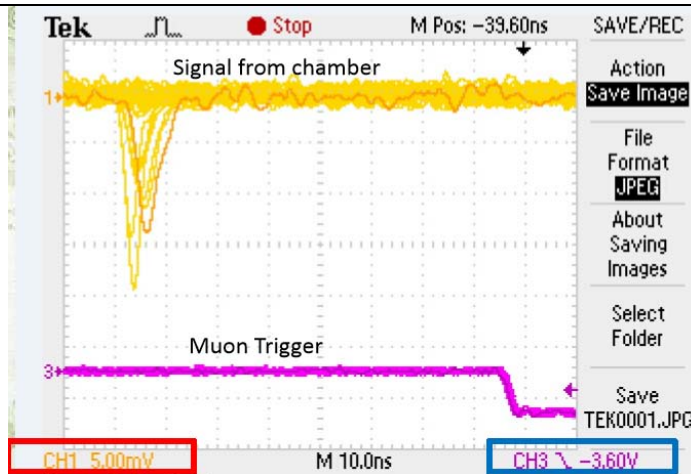
ამ მიზნით 904 ლაბორატორიისთვის შევქმენით კოსმოსური მიონების 2 ტელესკოპი სცინტილაციური მთვლელებით - მობილური (შესაძლებელს ხდის RPC კამერის ნებისმიერი ნაწილის დეტალურად გამოკვლევას) და სტაციონარული (ნახ.1)



ნახ.1. 2 მთვლელიანი სცინტილაციური ტელესკოპები კოსმოსური მიონებისთვის.

სურათის ქვედა ნაწილში ნაჩვენებია მცირე ზომის (30x30 სმ2) Kodex-ის კამერა, რომელზეც მოთავსებულია 2-მთვლელიანი მობილური ტელესკოპი. სურათის ზედა ნაწილში ნაჩვენებია 2-მთვლელიანი სტაციონარული ტელესკოპი.

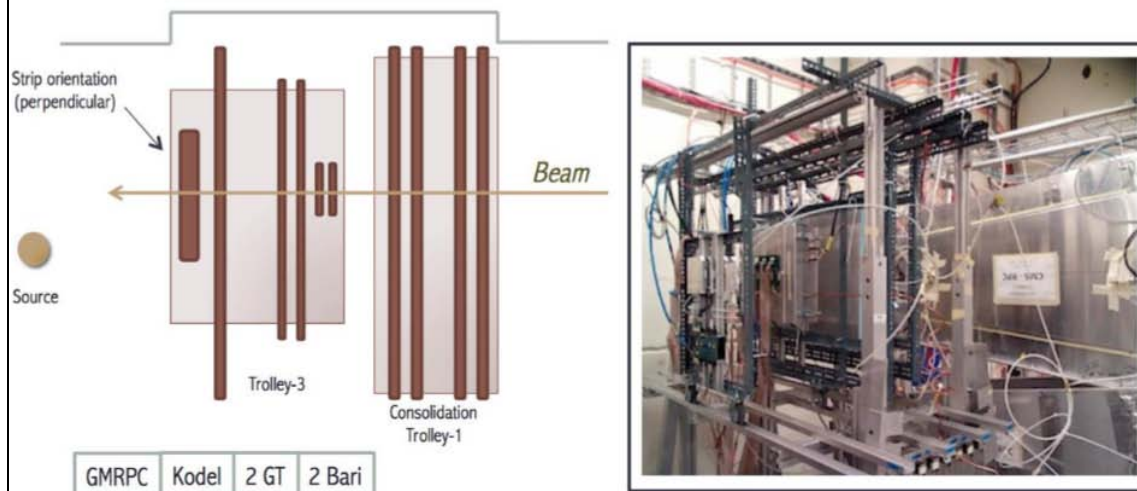
დაწყებულია მცირე ზომის ორმოდულიანი კამერის (Kodex, 1.4 მმ ღრეჩო) დეტალური შესწავლა კოსმოსური მიონებით და Cs-137 წყაროთი. პირველ ეტაპზე გამოყენებულია გაზების სტანდარტული ნარევი. მეორე ეტაპზე ამ კამერით უნდა მოხდეს ეკოლოგიურად უფრო სუფთა სამუშაო ნარევის შესწავლა. ამ კამერის თავისებურებას წარმოადგენს სტრიპებიდან სიგნალის მოხსნის სისტემა - სიგნალები იხსნება 50 ომიანი კოაქსიალური კაბელებით, რაც საშუალებას გვაძლევს სიგნალი მარტივად შევაერთოთ ოსცილოსკოპთან, ან სწრაფ გამაძლიერებელთან. ეს საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ სიგნალის ფორმა და დავადგინოთ სტრიმერების შემცველობა (ნახ.1 და 2).



ნახ. 2. მცირე ზომის კამერიდან ოსცილოსკოპით მოხსნილი სიგნალების ფორმა.

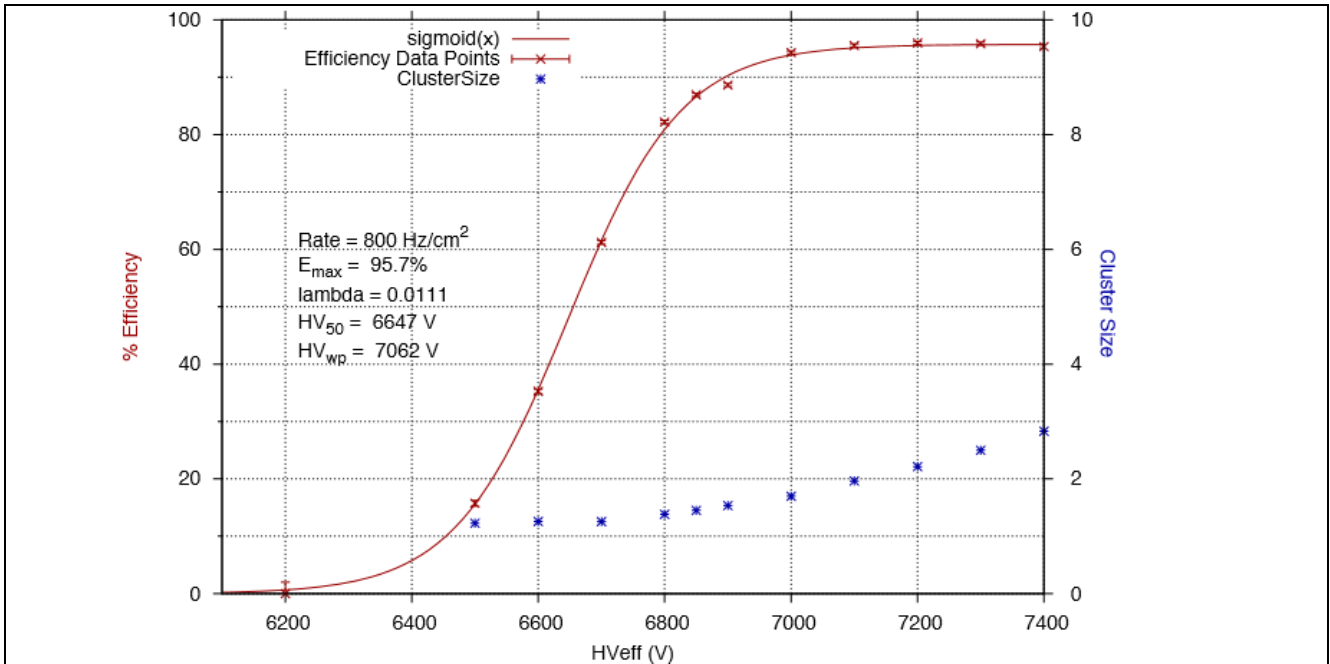
ტრიგერირება ხდება სტაციონარული ტელესკოპით. გამაძლიერებლის გაძლიერების კოეფიციენტი 10-ის ტოლია. გაუმჯობესებული კამერების საბოლოო ტესტირებისთვის გამოიყენება დანადგარი, სადაც შეიძლება მიონების ნაკადით ყველა სამუშაო მახასიათებლის გაზომვა კონტროლირებადი ფონური რადიაციის პირობებში. GT და Kodel კამერები ასევე გამოიყენება ამ დანადგარზე (ნახ.3). ტესტირების შემდეგ კორეული კამერა გადაყვანილ იქნა რადიაციული მდგრადობის შესწავლის რეჟიმში.

Full-size chambers at GIF++



ნახ. 3. GIF++ დანადგარზე ტესტირებული კამერების სისტემა.

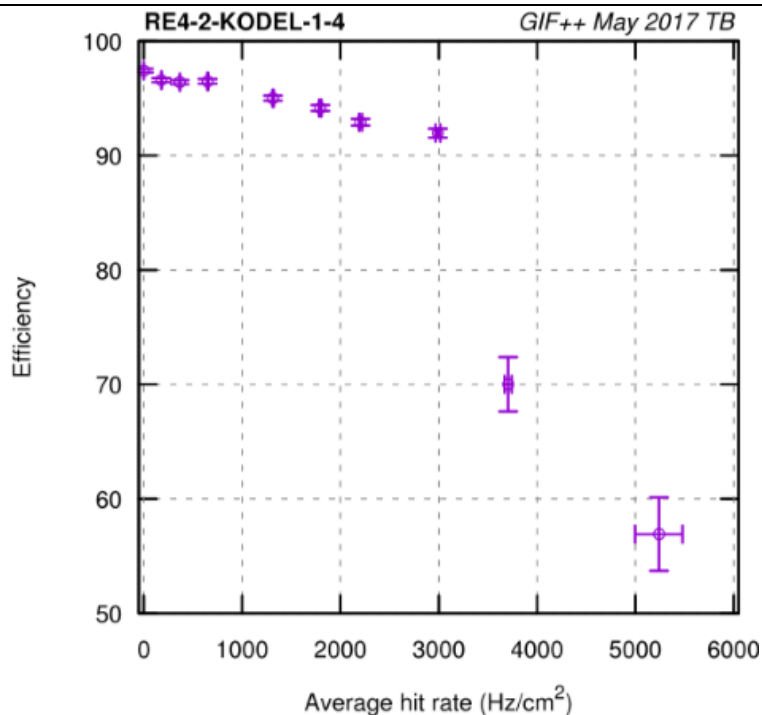
Trolley-1 განკუთვნილია „დაძველების“ (Aging) შესასწავლად. Trolley-3 -ზე ხდება ახალი კამერების გამოცდა. Kodel (დამზადებულია კორეაში) და GT (დამზადებულია GT კომპანიის მიერ) ახალი ტიპის კამერებია.



ნახ.4. RE-4-2-Kodel კამერის GIF++ დანადგარზე ტესტირების შედეგები.

წერტილებით აღნიშნულია გაზომვის შედეგები, ხოლო უწრვეტი მრუდით, ე.წ. სიგმოიდით ფიტირების შედეგები. E_{max} აღნიშნავს მაქსიმალურ ეფექტურობას, ხოლო HV_{wp} კი მაღალ სამუშაო ძაბვას.

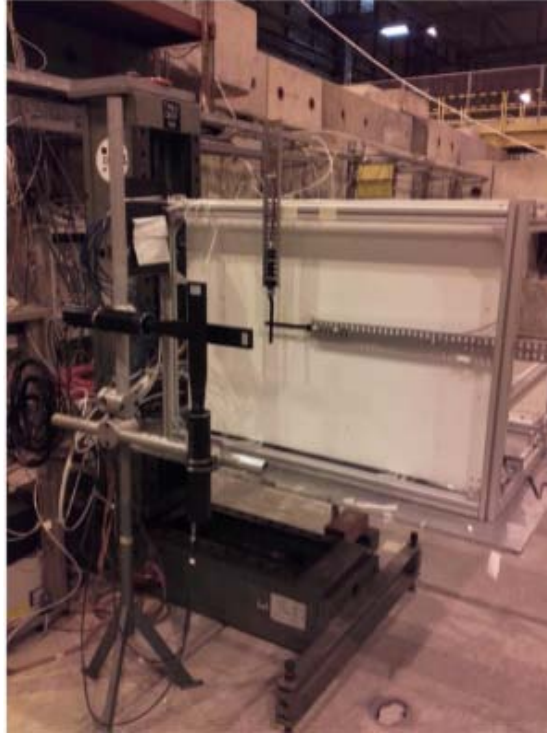
ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია კამერის ეფექტურობის, კლასტერების ზომის და სტრიმერების ალბათობის ძაბვაზე დამოკიდებულების ტიპური სურათი 120 გეგ ენერჯის მიონებისთვის. მარჯვენა დიაგრამაზე გამა-კვანტების წყარო გახსნილია (შთანთქმის კოეფიციენტია 22). გაიზომა ეფექტურობის დამოკიდებულება ფონის ინტენსივობაზე (სხვადასხვა შთანთქმის კოეფიციენტებისათვის). როგორც ნახ.5-დან ჩანს, ამ ტიპის კამერას შეუძლია იმუშაოს ინტენსივობაზეც, რაც მოდერნიზაციისთვის მოთხოვნილ დონეზე მეტია.



ნახ.5. კამერის ეფექტურობის დამოკიდებულება ფონის ინტენსივობაზე.

GIF++ ტესტირებასთან ერთად SPS ამაჩქარებლის მეორადი ნაწილაკების H4 არხზე შემოწმდა GT კომპანიის ორი ახალი კამერა (თითოეული 1.4 და 1.6 მმ დაშორების ორ-ორი მოდულით) და ახალი ელექტრონიკით (PETIROC სისტემის). ეს ელექტრონიკა სტრიპის ორივე ბოლოდან კითხულობს სიგნალს და საშუალებას იძლევა გაიზომოს კამერაში მიონის გავლის მეორე კოორდინატი სტრიპის გასწვრივ (პირველს თვითონ დამუშავებული სტრიპის ნომერი იძლევა). გაზომვების პირველ ეტაპზე ფონზე დამოკიდებულება არ შეისწავლებოდა, ამიტომაც იქნა არჩეული „სუფთა“ H4 არხი რაიმე მნიშვნელოვანი ფონური რადიაციის გარეშე.

ამ ტესტისთვის საჭირო იყო კამერაში მიონების გავლის ორივე კოორდინატის საკმაოდ ზუსტად დადგენა. ამ მიზნით ჩვენი ჯგუფის მიერ გაკეთდა ოთხი მთვლელისგან შემდგარი „ტელესკოპი“ (ორი 1 სმ და ორი 4 სმ სიგანის გრძელი სცინტილატორებით, ნახ.6). გაზომვების შედეგად მიღებულია კოორდინატული გარჩევისუნარიანობის პირველის შეფასება - 1.3 სმ.

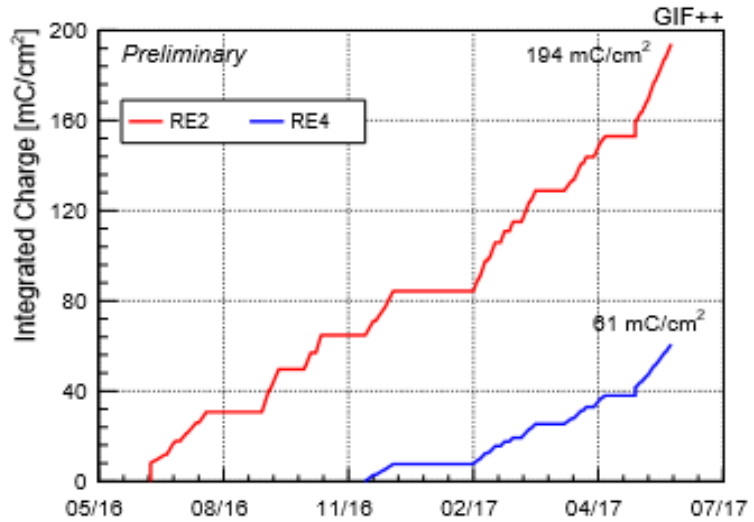


ნახ. 6. კამერების შესამოწმებელი დანადგარი მეორადი ნაწილაკების H4 არხზე.

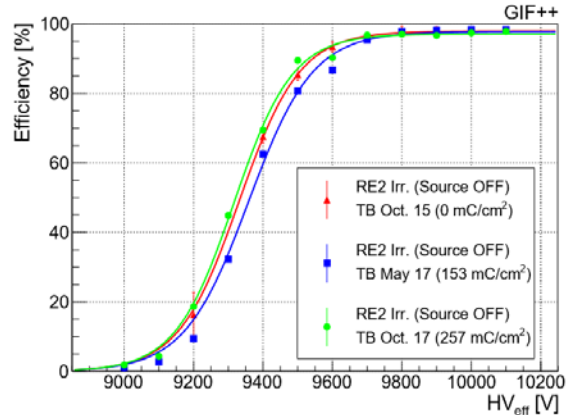
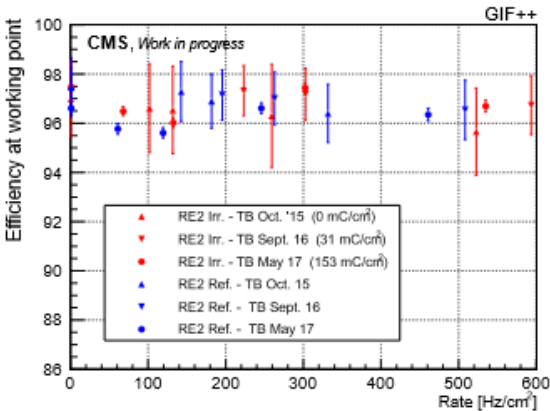
კამერების რადიაციული მედეგობა

RPC კამერების რადიაციული მედეგობა მოწმდება ორგან - როგორც CMS, ისე GIF++ დანადგარზე. CMS-ზე კამერების ეფექტურობები და დროითი გარჩევისუნარიანობები პერიოდულად მოწმდება კოლაიდერის მუშაობისას დაგროვილი ინფორმაციის გამოყენებით. რადიაციული მედეგობის უფრო დეტალური შესწავლა კი ხდება GIF++ დანადგარზე 14 ტერაბეკერელი ინტენსივობის Cs-137 წყაროს საშუალებით ($E\gamma = 662$ კეV) ამისათვის გამოყოფილი რამდენიმე კამერა გაერთიანებულია ერთ სისტემაში (ე.წ. Trolley-1 Consolidation Chamber, იხ ნახ. 3 და 7). ეს კამერები (ერთის გამოკლებით, რომელიც შესადარებლად გამოიყენება) სხივდება მაქსიმალური დოზით და მაქსიმალურად შესაძლებელი ხანგრძლივობით. უწყვეტად იწერება ამ კამერებში გამავალი დენი; სხვადასხვა პერიოდულობით ხდება მათი მახასიათებლების მონიტორინგი (ეფექტურობა, კლასტერების საშუალო ზომა, სამუშაო ძაბვა, ბაკელიტის წინაღობა და ა.შ.) და შედარება დაუსხივებელ კამერის შესაბამის მონაცემებთან.

ნახ.7-ის მარჯვენა დიაგრამაზე ნაჩვენებია RE2 და RE4 ტიპის კამერების მიერ გამოსხივების შედეგად დღემდე „დაგროვილი მუხტი“. RE4 ტიპის კამერაზე დაგროვილი მუხტი გაცილებით მცირეა, რადგან ის უფრო გვიან იქნა ჩართული ამ გაზომვებში. როგორც ნახ.8-ზე მოყვანილი დიაგრამებიდან ჩანს, RE2 კამერის ეფექტურობა ამ დროის განმავლობაში პრაქტიკულად არ შეცვლილა. ასევე სხვა პარამეტრებში დღემდე არაა შემჩნეული რაიმე მნიშვნელოვანი ცვლილებები. ამ შედეგებზე დაყრდნობით კოლაბორაციამ გადაწყვიტა, რომ არსებული კამერები და მათი ელექტრონიკა პრაქტიკულად არ შეიცვლება მოდერნიზაციის პროცესში. რადიაციულ დაზიანებებზე დაკვირვება გაგრძელდება როგორც უშუალოდ CMS-ზე, ასევე GIF++ დანადგარზე.



ნახ. 7. მარცხნივ ნაჩვენებია რადიაციული მედეგობის შესასწავლი დანადგარი. მარჯვენა გრაფიკზე ორი სხვადასხვა ტიპის კამერების მიერ „დაგროვილი რადიაცია“ კამერების მიერ დღემდე „დაგროვილი“ მუხტის ერთეულებში.



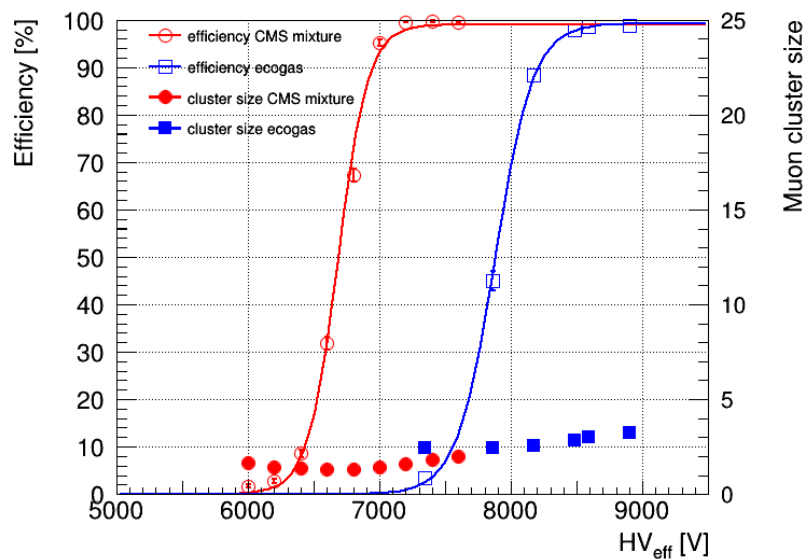
ნახ.8. მარცხენა გრაფიკზე ნაჩვენებია შესასწავლი კამერების ეფექტურობის დამოკიდებულება სიხშირეზე სხვადასხვა დოზით დასხივების შემდეგ. მარჯვენაზე - კამერის ეფექტურობის დამოკიდებულება ძაბვაზე დასხივების 2 წლის განმავლობაში.

ეკოლოგიური გაზების ნარევის შერჩევა

დღემდე კამერებში გამოიყენება საკმაოდ რთული ნარევი - $95,2\% C_2H_2F_4 - 4,5\% Iso - C_4H_{10} - 0,3\% SF_6$, რომელსაც დამატებული აქვს 40% წყლის ორთქლი. ეს ნარევი გამოყენებულ ბაკელიტთან ერთად უზრუნველყოფს კამერების სტაბილურ მუშაობას ე.წ. ღვარულ რეჟიმში. მაგრამ ამ ნარევის ზოგიერთი კომპონენტი, განსაკუთრებით $C_2H_2F_4$ და SF_6 გამოირჩევა „სათბურის ეფექტის“ მაღალი კოეფიციენტით და ევროგაერთიანების კანონმდებლობით მისი გამოყენება აკრძალულია. საჭიროა ახალი, უფრო ეკოლოგიური ნარევის შერჩევა. ახალი ნარევი, ეკოლოგიურობის გარდა, კიდევ რამდენიმე მოთხოვნას უნდა აკმაყოფილებდეს:

- არსებულ და ახალ კამერებს უნდა შეეძლოს ღვარულ რეჟიმში მუშაობა (სტრიმერების ალბათობა უნდა იყოს დაბალი).
- ახალი სამუშაო ძაბვა დიდად არ უნდა განსხვავდებოდეს არსებულისგან (ახალი და ძველი გაძლიერების კოეფიციენტებს შორის განსხვავება უნდა იყოს მცირე).
- კლასტერების საშუალო ზომა მნიშვნელოვნად არ უნდა გაიზარდოს.
- რადიაციულად გამძლე უნდა იყოს.
- არ უნდა იყოს ცეცხლსაშიში და შხამიანი

როგორც ვხედავთ, ისეთი ნარევის მოძებნა, რომელიც ყველა ამ მოთხოვნას დააკმაყოფილებს, არც ისე ადვილია. სამუშაოები ამ მიმართულებით დაწყებულია და ჩვენი ჯგუფიც ბოლო რამდენიმე თვეა აქტიურად ჩაერთო ამ საქმიანობაში. კერძოდ, ჩვენს მიერ შეთავაზებულ იქნა სიგნალის ფორმის შესწავლის მარტივი და ეფექტური სქემა - სტრიპებიდან მოხსნილი სიგნალი უშუალოდ, ან სწრაფი გამაძლიერებლის საშუალებით მიეწოდება ციფრული ოსცილოსკოპს, რომელიც მიერთებულია კომპიუტერთან (მანამდე გამოიყენებოდა სპეციალური გამაძლიერებელი მოდული, რომლიდანაც სიგნალი მუშავდებოდა ე.წ. Digitizer-ით. სიგნალის ფორმის დაუმახინჯებელი მიღება არ იყო გარანტირებული). აწყობილია შესაბამისი აპარატურა და Labview-ზე შექმნილია შესაბამისი პროგრამის პირველი ვერსია. სიგნალის ფორმის ანალიზი საშუალებას იძლევა განვასხვავოთ ღვარები სტრიმერებისაგან, ასევე შევაფასოთ გაძლიერების კოეფიციენტი.



ნახ.9. iRPC 1.4 მმ ღეჩოიანი კამერის მახასიათებლების შედარება სტანდარტული (წითელი) და ეკოლოგიური გაზის (ლურჯი) ნარევისთვის
(50% HFO – 1234ze – 45%CO₂ – 0.3% SF₆ – C₄H₁₀)

როგორც ვხედავთ (ნახ.9.) მახასიათებლების ყოფაქცევა იდენტურია, მაგრამ წანაცვლებულია თითქმის 1.5 კვ-ით, რაც მნიშვნელოვნად გაართულებს სისტემის მუშაობას. ამ მიმართულებით რამოდენიმე ნარევი გამოიცადა, მაგრამ ჯერ-ჯერობით საბოლოო დამაკმაყოფილებელი შედეგი

არაა მიღებული და მუშაობა გრძელდება.

2. CMS ექსპერიმენტის ადრონული კალორიმეტრი

2017 წლის განმავლობაში ჩვენი ჯგუფის აქტივობის ერთ-ერთი მიმართულება იყო, CMS ექსპერიმენტის სუბდეტექტორის HCAL-ის განახლება (update) და არსებული სისტემის მხარდაჭერა. YETS- (Year End Technical Stop) ტექნიკური შეჩერების დროს (2017-2018 წლები) CMS დეტექტორის HCAL სისტემის ჰადრონის ენდკაპის (HE) ნაწილში დაგეგმილია დამატებითი ახალი სამონტაჟო ელექტრონიკის დამონტაჟება. იგი ეფუძნება ახალ დიზაინს Silicon Photo Multiplier (SiPM), როგორც გაზომვების ძირითადი წყარო. ჩვენი ჯგუფი მონაწილეობას იღებს როგორც ტესტირების ინფრასტრუქტურის განვითარებაში, ასევე ახალი ელექტრონიკის მოსამზადებელ სამუშაოებში და შესაბამისად ტესტებში. ტესტების შედეგად მოწმდება ყველა ახალი წამკითხავი მოდულები (RM's), სანამ მოხდება მათი ინსტალირება დეტექტორში. ტესტზე მოწმდება როგორც მოდელირებული პარამეტრები, ასევე მოდულების ქცევა მუშაობის დროს. ახალი მოდულების ტესტები განსაზღვრავს, თუ როგორ იქცევა ელექტრონიკა დეტექტორის მუშაობის რეალურ პირობებში და როგორ იმოქმედებს შესაძლო ჩავარდნებზე. HCAL-ს განახლების აქტივობების მხარდასაჭერად მიმდინარეობს ახალი პროგრამული სისტემის შემუშავება, რომლებიც აუცილებელია როგორც ახალი მოდულების დამონტაჟებისათვის ასევე მათი შემდგომი მუშაობის დროს. ასევე მონაწილეობა მივიღეთ HCAL-ის DOC-ის შიფტებში (shift), რომლის დროსაც მოხდა შიფტების კოორდინაცია CMS-ს ცენტრალური კონტროლისა და HCAL-ის ექსპერტებს შორის, რათა ქვესისტემამ შეძლოს ჯანსაღი მდგომარეობის შენარჩუნება და სხვა ქვესისტემების კოორდინაცია, რათა გააგრძელონ უწყვეტი CMS ოპერაციები.

3. CMS ექსპერიმენტის ცენტრალური კომპიუტერული სისტემა და ინსტიტუტის ინფორმაციული ტექნოლოგიების ჯგუფის აქტივობა

2017 წლის განმავლობაში ინსტიტუტის ჯგუფმა განაგრძო CMS მთავარი პროგრამული უზრუნველყოფის CMSSW-ზე მუშაობა. კერძოდ ჯგუფის ორი წევრი, ერეკლე მალრამე და გიორგი ადამოვი აქტიურად იყვნენ ჩართული ორი ამოცანის შესრულებაში. ჯგუფის წინაშე დასახული იყო CMSSW-ის პროგრამული უზრუნველყოფის ვალიდაციისა ეფექტურობის გაზრდის და ვალიდაციის პროცესში გამოყენებული პროგრამული უზრუნველყოფის ბიბლიოთეკებისა და პაკეტების სიის დინამიური გენერირების ამოცანები. როგორც ცნობილია CMSSW პაკეტი შედგება მილიონობით სტრიქონი პროგრამული კოდისგან, რომელიც დაწერილია როგორც Python ასევე C++ დაპროგრამების ენაზე. ამ პაკეტის დახვეწა, ფუნქციონალური გაფართოება და განვითარება მუდმივი პროცესია. ბუნებრივია ამ პროცესის თანმდევია სხვადასხვა შეცდომებისა და უზუსტობების წარმოქმნა რაც დაუშვებელია პროგრამული უზრუნველყოფის ძალიან აქტიური გამოყენებისა და მასზე მთელი ექსპერიმენტის

კრიტიკული დამოკიდებულების გამო. შესაბამისად, CMSSW ყოველი ცვლილების შეტანისას და ახალი ვერსიის მომზადებისას აუცილებელია ჩატარდეს რიგი შემოწმებებისა, რაც ხორციელდება ავტომატიზირებული სისტემის საშუალებით. შემოწმებები თავის მხრივ რამოდენიმე ეტაპიანია და ყოველი ეტაპის შესრულება დამოკიდებულია წინა ეტაპის წარმატებით დასრულებაზე. რა თქმა უნდა შემოწმებები მოითხოვს არცთუ მცირე გამოთვლით რესურსს და ასევე მიზანშეწონილია რომ ყველა შემოწმება დასრულდეს დროულად. ანუ, ამოცანა მდგომარეობდა მოცემული გამოთვლითი (პროცესორების ბირთვებისა, ანუ განსაზღვრული ნაკადების რაოდენობის მიხედვით), მოხდეს მაქსიმალური რაოდენობის შემოწმებების გაშვება, რაც საბოლოო ჯამში მოახდენს CMSSW პროგრამული უზრუნველყოფის ვალიდაციაზე დახარჯული დროის ოპტიმიზაციას. ეს ოპტიმიზაციის ამოცანა წარმატებით იქნა გადაჭრილი დინამიური პროგრამირების, კერძოდ კი „ზურგჩანთის“ ალგორითმის გამოყენებით. ამოცანის გადაჭრამ პროცესორებისთვის გააჩინა შემოწმების ოპტიმიზაციის აუცილებლობა მეხსიერების მიხედვითაც, რაც ამ ეტაპზე მიმდინარე ამოცანაა. ამ ამოცანის შესრულება და წარმართვა ერეკლე მალრადის პასუხისმგებლობის ქვეშ მიმდინარეობს.

CMSSW აქვს მოდულური სტრუქტურა და მისი შემოწმება მოითხოვს სხვადასხვა პროგრამული ბიბლიოთეკისა და პაკეტის გამოყენებას, თუმცა აუცილებელია რომ ამ პაკეტებისა და ბიბლიოთეკების რაოდენობა იყოს ოპტიმიზირებული და შესაბამისად განისაზღვროს თითოეული შემოწმებისთვის, კრიტიკულად აუცილებელი პაკეტებისა და ბიბლიოთეკების რაოდენობა და სია. ანუ დინამიურად უნდა მოხდეს გაშვებული შემოწმების პროცესების ანალიზი. ამ ამოცანას წარმატებით გაართვა თავი გიორგი ადამოვმა და ამ ეტაპზე მიმდინარეობს მონაცემთა ბაზისა და დაწერილი პროგრამული უზრუნველყოფის CMSSW-ში ინტეგრაციის პროცესი.

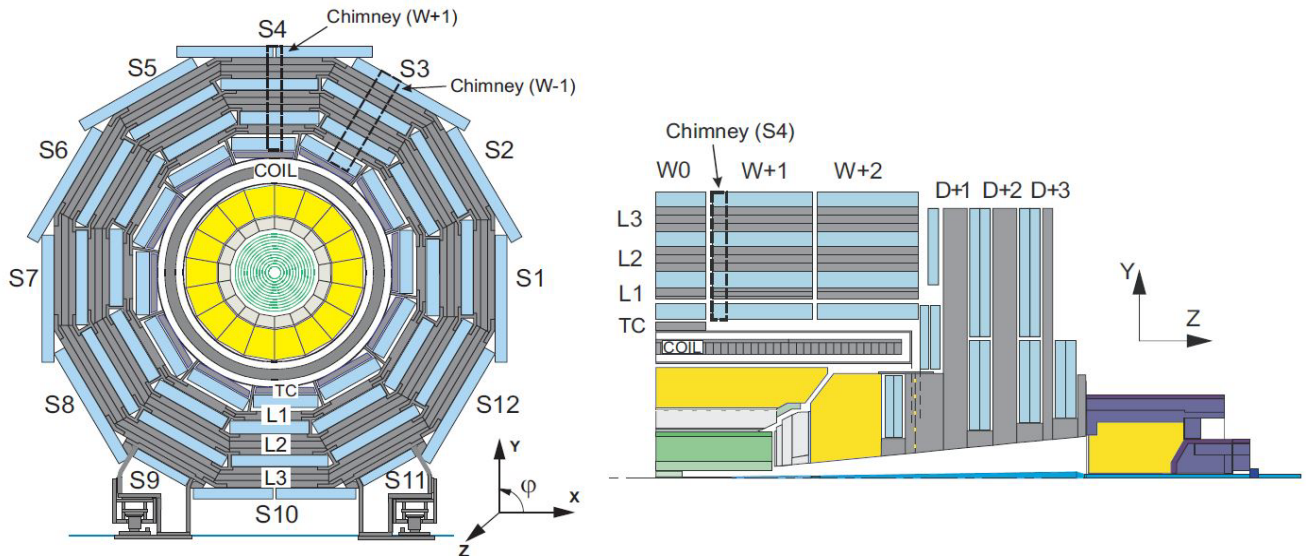
წარმატებით შესრულებული ამოცანებიდან გამომდინარე დაისახა შემდგომი ამოცანის თემატიკა კერძოდ კი, ამოცანა დაკავშირებული იქნება DQM (Data Quality Monitoring) მოდულების განვითარებასთან.

გარდა ამ სამუშაოებისა, ინსტიტუტის ინფორმაციული ტექნოლოგიების ჯგუფის მიზნებში შედის CMS მართვის ოთახის ორგანიზება თბილისში, რაც გულისხმობს შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფის დაყენებასა და გამართვას. ასევე ჯგუფის წევრები, ერეკლე მალრადე და გიორგი ადამოვი აქტიურად არიან ჩართული COMET ექსპერიმენტის პროგრამული უზრუნველყოფის დანერგვისა დაგეგმვისა და შემდგომი აქტიური თანამშრომლობის ამოცანების განსაზღვრის პროცესში.

4. CMS ექსპერიმენტის GEANT4 -ს გეომეტრიული ანალიზი.

ამოცანა მიზნად ისახავდა BeamPipe კვანძის CAD და GDML ვერსიების მონაცემების ერთმანეთთან შედარებას. ამ კვანძში შემაჯავალი დეტალების საინჟინრო პროექტირების პროგრამებისთვის განკუთვნილი .STP ფორმატისა და ნაწილაკების მოძრაობის კომპიუტერული სიმულაციის პროგრამა GEANT4-სთვის განკუთვნილი .GDML ფორმატის გეომეტრიებს შორის გაბარიტული და სიმკვრივის მონაცემებს შორის სხვაობების აღმოჩენას. პრობლემის აქტუალურობა გამოიხატება,

არსებული .GDML ფაილებში, გეომეტრიებისა და ამ გეომეტრიებზე მითითებული მატერიალების გამარტივებული სახით არსებობის გამო, ნაწილაკების მოძრაობის სიმულირების დროს წარმოქმნილი ცდომილებების შემცირებაში. რისთვისაც საჭიროა .GDML ფორმატის ფაილების, ორიგინალი ნახაზების მიხედვით აწყობილ CAD დეტალებთან შედარება და ანალიზი.

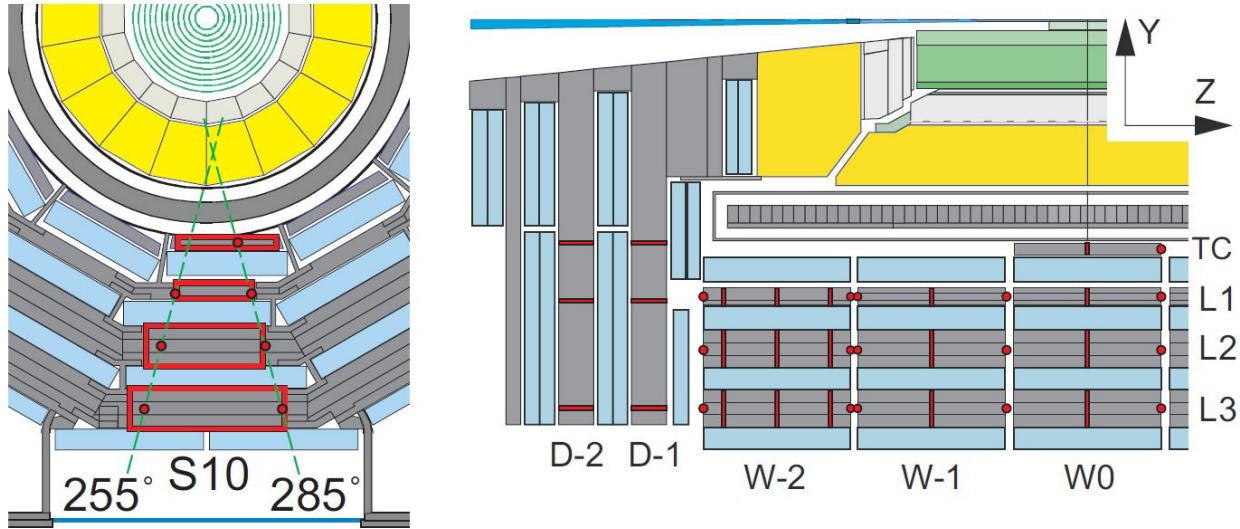


ნახ.10. სპექტრომეტრის ცენტრალური ნაწილის ჭრილები XY და ZY სიბრტყეებზე

სპექტრომეტრის შემადგენლობაში 5 იდენტური ობიექტია. ცენტრალური წრე და მიყოლებით 2 წრე წინა და უკანა მხარეებიდან.

- შესრულებული სამუშაოები

დასმული ამოცანის შესასრულებლად, დამუშავდა არსებული .STP და .GDML ფაილები: მოხდა .STP გეომეტრიულ მოდელებზე შესაბამის მასალათა ფიზიკური თვისებების მონაცემების მითითება, .GDML ფაილებში არსებული მონაცემების მიხედვით აიგო გეომეტრიული მოდელები და მოხდა ამ მოდელებზე შესაბამის მასალათა სიმკვრივის მონაცემების მითითება. ნაპოვნი იქნა აგებულ დეტალებსა და მათზე მითითებულ მასალებს შორის სხვაობები, რაც საბოლოოდ ამ დეტალების მასათა სხვაობებით გამოიხატა.



ნახ. 11. ფრაგმენტი სპექტრომეტრის ცენტრალური ნაწილის ჭრილიდან

- მთავარი ამოცანა სპექტრომეტრის მასის გაზომვა და სიმულაციის ფორმატთან შედარებაა
- კონკრეტულად ეს წრე (W0) ცენტრშია განთავსებული.
- მეტი სიზუსტისათვის, მოცემული ობიექტი დავყავით სექტორებად და
ინდივიდუალურად გავზომეთ ყველა სექტორის მონაცემები. სექტორი მთლიანად შედგება
Fe310 low-carbon steel შენადნობისაგან.

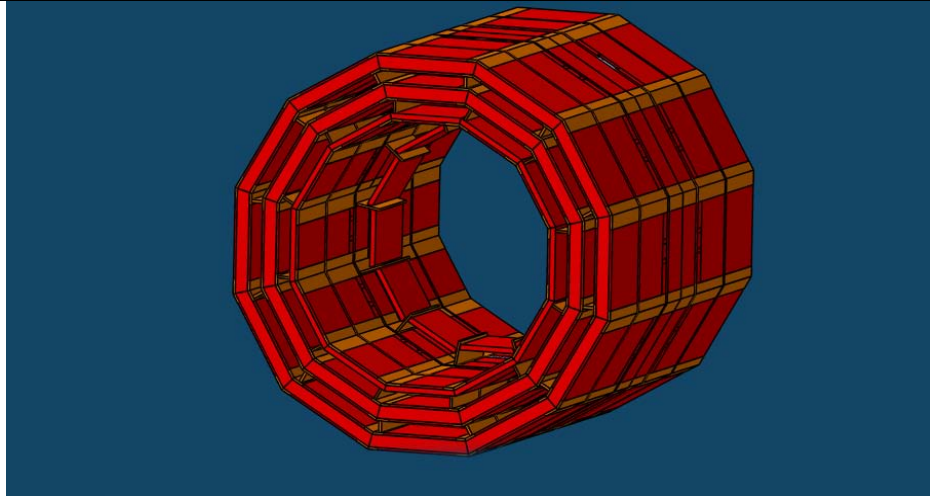
შემდეგ ეტაპზე გავზომეთ 6 სექტორის, (მთელი ობიექტის ნახევარი) მონაცემები. აღსანიშნავია რომ მოცულობის მნიშვნელოვანი ნაწილი უჭირავს სავენტრალაციო და გაგრილების სისტემების გაყვანილობას.

ამის შემდგომ ეტაპზე მოხდა მთელი წრის მონაცემების გამოთვლა, რამაც მოგვცა შემდეგი შედეგი: მასა - 1243.708 ტ (1 243 708კგ) მოცულობა - 158.434 მ³ სიმკვრივე - 7850 კგ/მ³.

- შედარება სიმულაციის გეომეტრიასთან

შემდეგი ეტაპი მოიცავს CAD ფაილების STP ფაილებთან უშუალო შედარებას მათ შორის სხვაობის დასადგენად. ამისათვის საჭირო გახდა სიმულაციის ფაილების კონვერტაცია. ჩვენი კოლეგების მიერ მოხდა ამ კონვერტერის დამუშავება, რამაც მოგვცა კონვერტაციის განხორციელების საშუალება.

GDML ვერსია, სპექტრომეტრის 5 წრე

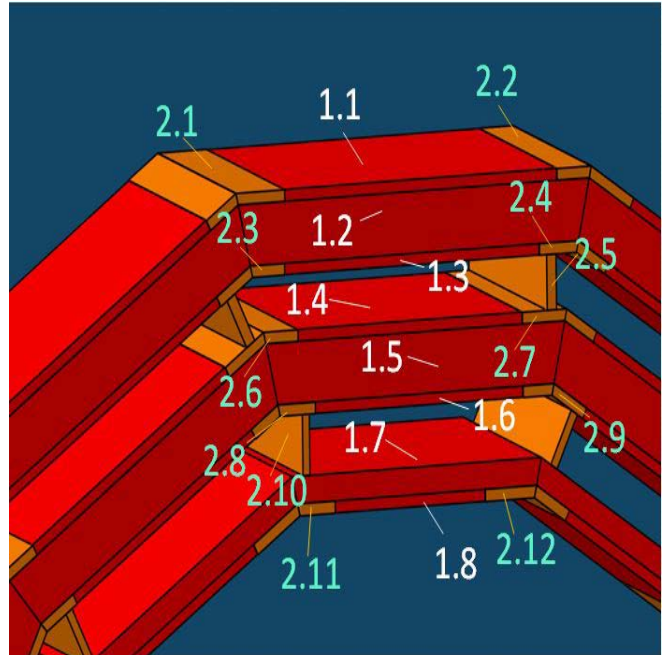


ნახ.12. სპექტრომეტრის 5 წრე, GDML ვერსია

- წრის კონსტრუქციის დეტალური ანალიზი
- მასათა შედარება გაკეთებულია GDML ცხრილში
- საერთო სხვაობაში არ შედის სადგამების წონა
- STPდეტალებს აქვთ იგივე სახელები რაც GDML დეტალებს, ნიშნით_stp

წითელი დეტალები აღნიშნულია 1.X და ყვითელი დეტალები - 2.X ცხრილებში

	სახელი	მასა	მოცულობა	სიმკვრივე
1.1	YB3_w2P_t20	4763.652kg	0.611m3	7799.996kg_m3
1.2	YB3_w2P_m10	31886.591kg	4.088m3	7799.996kg_m3
1.3	YB3_w2P_b20	4457.612kg	0.571m3	7799.996kg_m3
1.4	YB2_w2P_t20	3923.963kg	0.503m3	7799.996kg_m3
1.5	YB2_w2P_m10	26997.462kg	3.461m3	7799.996kg_m3
1.6	YB2_w2P_b20	3635.724kg	0.466m3	7799.996kg_m3
1.7	YB1_w2P_m10	10186.303kg	1.306m3	7799.996kg_m3
1.8	YB1_w2P_b20	2781.463kg	0.357m3	7799.996kg_m3
2.1	YB5_w2F_t10	844.677kg	0.1083m3	7799.996kg_m3
2.2	YB3_w2P_t30	587.454kg	0.0753m3	7799.996kg_m3
2.3	YB3_w2P_b10	588.2001kg	0.0754m3	7799.996kg_m3
2.4	YB3_w2P_b30	672.3358kg	0.0862m3	7799.996kg_m3
2.5	YBSepar3_w2P_t30	791.4461kg	0.1015m3	7799.996kg_m3
2.6	YB2_w2P_t10	592.7562kg	0.076m3	7799.996kg_m3
2.7	YB2_w2P_t30	767.5945kg	0.0984m3	7799.996kg_m3
2.8	YB2_w2P_t10	644.1011kg	0.0826m3	7799.996kg_m3
2.9	YB2_w2P_t30	526.5963kg	0.0675m3	7799.996kg_m3
2.10	YBSepar2_w2P_t30	649.5697kg	0.0833m3	7799.996kg_m3
2.11	YB1_w2P_b10	684.8946kg	0.0878m3	7799.996kg_m3
2.12	YB1_w2P_b30	939.0937kg	0.1204m3	7799.996kg_m3



ნახ.13. ფრაგმენტი სპექტრომეტრის მეორე წრიდან (Wheel +2) GDML ფორმატი

- სპექტრომეტრის თითოეული წრის მონაცემები

დასახელება (GDML)	მასა	სიმკვრივე	მოცულობა	მატერიალი
Wheel_2N0	1163057.874kg	7799.996kg/m3	149.110m3	M_Steel-0080
Wheel_1N0	1159322.696kg	7799.996kg/m3	148.631m3	M_Steel-0080
Wheel_00	1178520.312kg	7799.996kg/m3	151.092m3	M_Steel-0080
Wheel_1P0	1160654.787kg	7799.996kg/m3	148.802m3	M_Steel-0080
Wheel_2P0	1163057.874kg	7799.996kg/m3	149.110m3	M_Steel-0080
Total	5824613.543kg	7799.996kg/m3	746.746m3	M_Steel-0080

დასახელება (STP)	მასა	სიმკვრივე	მოცულობა	მატერიალი
YB-2	1243422.492kg	7850kg/m3	158.398m3	Fe 310 low-carbon steel
YB-1	1239962.304kg	7850kg/m3	157.957m3	Fe 310 low-carbon steel
YB 0	1243708.87kg	7850kg/m3	158.434m3	Fe 310 low-carbon steel
YB+1	1219463.029kg	7850kg/m3	155.346m3	Fe 310 low-carbon steel
YB+2	1221583.788kg	7850kg/m3	155.616m3	Fe 310 low-carbon steel
Total	6168140.483kg	7850kg/m3	785.751m3	Fe 310 low-carbon steel

5. CMS-ს სავალდებულო სეანსებში და სერვის სამუშაოებში (service work) მონაწილეობა

შიფტის დასახელება	შიფტის რაოდენობა	დგროვილი კრედიტი
HCAL Doc + სერვის სამუშაოები	14	18
Online DQM P5	46	74
RPC O&M + სერვის სამუშაოები	35	35
Muon Doc 3 sertification	21	18.9
GIF ++ test beam	18	2 თვის პლეჯი

I. 2.

№	შესრულებული პროექტის დასახელება მეცნიერების დარგისა და სამეცნიერო მიმართულების მითითებით	პროექტის ხელმძღვანელი	პროექტის შემსრულებლები
1	2	3	4
1	მონაწილეობა J-PARC -ს	დავით ლომიძე	

	<p>COMET ექსპერიმენტზე (იაპონია) ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკა</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. აბრამიშვილი რომან 2. ადამოვი გიორგი 3. ბაღათურია იური 4. ლომიძე დავით 5. ლომიძე ირაკლი 6. მელქაძე ალექსანდრე 7. წამალაიძე ზვიად 8. წვერავა ნიკა 9. ხვედელიძე არსენ
<p>გარდამავალი (მრავალწლიანი) კვლევითი პროექტის ეტაპის ძირითადი თეორიული და პრაქტიკული შედეგების შესახებ ვრცელი ანოტაცია (ქართულ ენაზე)</p>			
<p style="text-align: center;">COMET (Coherent Muon to Electron Transition) ექსპერიმენტი J-PARC ამაჩქარებელზე</p> <p>COMET ექსპერიმენტის მიზანი არის 4 რიგით გააუმჯობესოს (დღეს არის 7×10^{-13}) $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$ ($\mu^- \rightarrow e^-$) პროცესის (რომელშიც ირღვევა ლეპტონური მუხტი, Charged Lepton Flavor Violation, CLFV) ზედა ზღვარი და მივიღოთ 2.6×10^{-17}. პროცესის მგრძობიარობის ამ დონეზე მიღწევა საშუალებას მოგვცემს ვნახოთ არის თუ არა სუპერნაწილაკები 10-30 ტევის ინტერვალში, რომელსაც ვერ შეამოწმებს LHC. და საერთოდ ვნახოთ რა ხდება ასეთი დონის მგრძობიარობაზე, ხომ არ არის აქ საერთოდ სრულიად ახალი რაიმე ფიზიკური ეფექტები. იმის გამო, რომ ექსპერიმენტი არის ძალიან რთული, და გამოყენებული იქნება უახლოესი ტიპის ტექნოლოგიები, იქნა მიღებული გადაწყვეტილება, რომ ექსპერიმენტის რეალიზება მოხდეს 2 ფაზად, Phase-I და Phase-II.</p> <p>Phase -I</p> <p>ექსპერიმენტის პირველი ეტაპი დაიწყება 2019 წელს, სენსები 4-5 თვე. მიზანი: 1. დღეს საუკეთესო შედეგის 200-ჯერ გაუმჯობესება, ანუ მიღება 10^{-15} მგრძობიარობის. 2. რეალური შეფასება ფონური პროცესების, როდესაც მიონების ნაკადი იქნება უპრეცედენტო 10^9 წამში.</p> <p>პირველ ეტაპზე არ იქნება გამოყენებული სრული მაგნიტური სისტემა, სრული ელექტრული კალორიმეტრი, და სრული სტროუ (straw) ტრეკული დეტექტორები. გამოყენებული იქნება ცილინდრული დრეიფული დეტექტორი და კოსმოსური ვეტო მთვლელები (CRV, Cosmic Ray Veto).</p>			

Phase –II

მთავარი ეტაპი, ექსპერიმენტი კომეტ-ი დაიწყება 2021-2022 წელს, სეანსები 1-2 წელი.

ექსპერიმენტის მთავარ ეტაპზე გამოყენებული იქნება COMET-ს სრული სისტემა, სრული მაგნიტური სისტემა, ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი, სტროუ დეტექტორების 5 სადგური (თითოეული სადგური შედგება 4 შრისგან 2x და 2y) და კოსმიკური ვეტო მთვლელები.

კომეტ ექსპერიმენტის დეტექტორული სისტემა შედგება

- სტროუ დეტექტორების სისტემა
- ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი
- კოსმოსური ვეტო მთვლელების სისტემა

2015 წლიდან ტექნიკური უნივერსიტეტი არის COMET კოლაბორაციის სრულფუნქციონირებელი წევრი. უნდა აღინიშნოს, რომ ტექნიკური უნივერსიტეტის ჯგუფი აქტიურად მონაწილეობს სამივე დეტექტორების შექმნაში.

სტროუ დეტექტორების სისტემა

შესავალი

ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის მიმართულებით თანამედროვე ექსპერიმენტების განუყოფელ ნაწილს წარმოადგენს ტრეკული დეტექტორები. მათი მიზანია ნაწილაკების ტრეკტორიების და სივრცული კოორდინატების მაქსიმალურად სიზუსტით დაფიქსირება. სტროუ ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული ტრეკული დეტექტორი თანამედროვე სისტემაა, რომელიც დაფუძნებულია გაზის იონიზაციასა და პოტენციალურ ველში იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი ღვარის გაძლიერების პრინციპზე. თვითონ სტროუ მილი შედგება რამდენიმე ნაწილისაგან: ცილინდრული ფორმის კათოდისაგან და მის ცენტრში გამავალი ანოდისაგან. მათ შორის სივრცე შევსებულია გაზით, რომლის იონიზაციასაც მასში გამავალი ნაწილაკი იწვევს. პოტენციალთა სხვაობა კათოდსა და ანოდს შორის უზრუნველყოფს პირველადი იონების აჩქარებას და გაზად გაზის მოლეკულებთან დაჯახების შედეგად ხელმეორე იონიზაციას, ეს პროცესი ძლიერდება და ფორმირდება როგორც ღვარი. ღვარი მოძრაობისას სასიგნალო მავთულზე ქმნის ანალოგურ სიგნალს, რომელიც იკითხება მასზე მიერთებული ელექტრონიკის მეშვეობით.

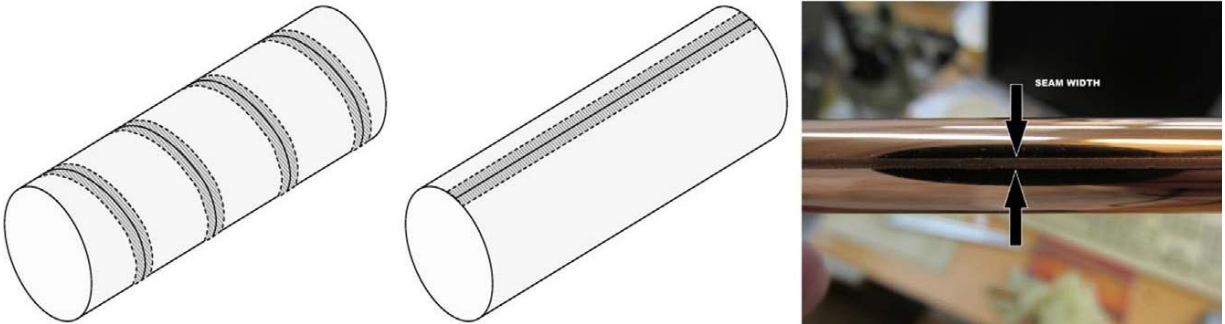
COMET ექსპერიმენტის მოთხოვნის მიხედვით მთლიანი ტრეკული დეტექტორი მოთავსებულია ვაკუუმში. იგი წარმოადგენს საძიებო 105 მეგ. ელექტრონის მთავარ დამაფიქსირებელ დეტექტორს, რაც აყენებს შემდეგ ექსტრემალურ მოთხოვნებს განსაკუთრებით ამ დეტექტორის ყველაზე მგრძობიარე სტროუ მილების წინაშე:

- დამზადდეს რაც შეიძლება თხელი კედლის მქონე სტროუ მილი
- შეინარჩუნოს ვაკუუმში სტაბილური ცილინდრული ფორმა
- მაღალი ვაკუუმის პირობებში მინიმალური გაზის გაჟონვა

ზოგადად ტრეკული სისტემის მიმართ კი მოთხოვნები შემდეგია:

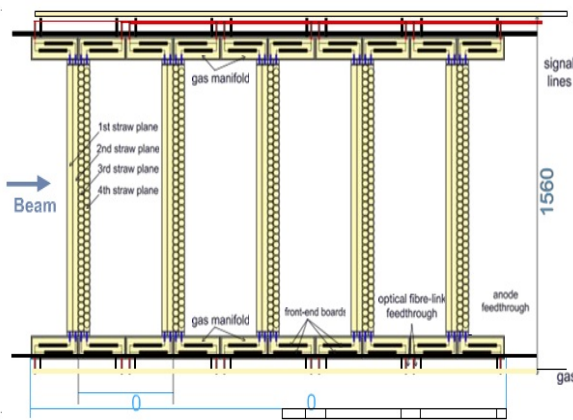
- მაღალი სივრცითი გარჩევისუნარიანობა
- დაბალი სითბური და ფონური ხმაური

მოცემულ პირობებს აკმაყოფილებს ახალი თაობის სტროუ მილი, რომელიც დამზადებულია ულტრაბერით შედუღების ტექნოლოგიის გამოყენებით. გავრცელებული ორმაგხვეული სტროუ მილისგან განსხვავებით, ახალი თაობის სტროუ მილის დამზადებაში არ გამოიყენება წებო, აგრეთვე მას სპირალური ფორმის ნაცვლად გააჩნია ცილინდრის გასწვრივ ერთი შედუღების ზოლი რაც მინიმუმამდე ამცირებს გაზის ჟონვის ფართს (იხ. ნახ.14.)



ნახ.14. ორმაგხვეული და ერთი ნაკერის მქონე სტროუ მილების დიაგრამა

მოსამზადებელი და კვლევითი სამუშაოების შედეგებზე დაყრდნობით, მას შემდგომ რაც ხარისხის და სტაბილურობის ყველა ტესტი წარმატებით იქნა ჩატარებული COMET კოლაბორაციამ გადაწყვიტა ტრეკული დეტექტორისთვის გამოგვეყენებინა ახალი თაობის ერთნაკერიანი მილები. სტროუ მილების კვლევა და წარმოება დაიწყო ორ ნაწილად Phase-1 და Phase-2. პირველ ეტაპზე დამზადდა 20 მიკრონიანი და 9.8 მმ დიამეტრის სტროუ მილები რომლის გამოყენებით იაპონიაში კერძოდ KEK-ში აეწყო პირველი სრული ზომის პროტოტიპი (იხ. ნახ.16.), მას შემდგომ რაც ტესტებმა აჩვენეს ახალი ტექნოლოგიის საიმედოობა.

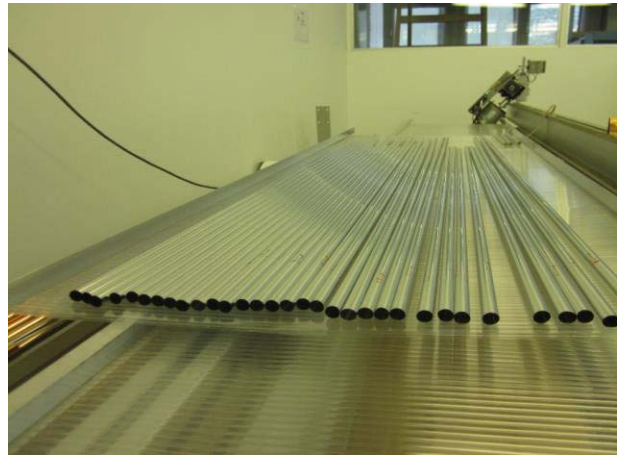


ნახ.15. 5 მოდულიანი სტროუ დეტექტორის დიაგრამა.



ნახ.16. 32 არხიანი ტრეკული დეტექტორის პროტოტიპი

გადაწყდა ამ სტროუ მილების მასობრივი წარმოება 5 სრული ზომის მოდულისათვის (იხ. ნახ.15) რომელიც გამოყენებული იქნება ძირითადად ფონური პროცესების შესასწავლად. მეორე და მთავარი ნაწილისათვის სამომავლოდ დაგეგმილია ახალი 12 მიკრონიანი და 5 მმ დიამეტრის მილების დამზადება.



ნახ.17. მომზადებული სტროუ მილები ტესტირებისთვის

შესრულებული სამუშაო:

Phase-1-თვის სპეციალურ მანქანა-დანადგარებზე შესრულდა სტროუ მილის კვლევიტი და საიმედოობის ტესტირების მოსამზადებელი სამუშაოები. თავდაპირველად დამზადდა 120 სატესტო სტროუ მილი, რომელიც გამოვიყენეთ პროტოტიპის ასაწყობად. მილები დამზადდა 20 მკმ სისქის მაილარის (Mylar) ლენტისგან რომლის ერთ მხარეს დაფენილია 70 ნმ ალუმინის ფენა, მილის დიამეტრია 9.8 მმ (იხ. ნახ.17). ალუმინის ფენა რომელიც წარმოადგენს კათოდს ჩამიწებულია, ხოლო მის ცენტრში გადის მოოქროვილი ვოლფრამის 35 მკმ დიამეტრის მქონე ძაფი.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, პირველ ეტაპზე დაგეგმილია 5 მოდულის აწყობა ფონური ეფექტების შესასწავლად. მოცემული მოდულები მოითხოვენ დაახლოებით 500 სტროუ მილს თითოეული, სულ ჯამში საჭიროა 2500 სტროუ მილი + 200 ცალი რეზერვისათვის. ამრიგად სულ მომზადდა 2700 ერთეული და გადაიგზავნა იაპონიაში შესანახად და ტესტირებისთვის (იხ.ნახ.18). მილის დამზადებისას საწყისი პარამეტრები იხილეთ ქვემოთ ცხრილში:

მილების რაოდენობა	დიამეტრი	ნაკერის სიმტკიცე	MAX წნევა	დამზადების დრო
2500+200	9.8 მმ	3.2 კგ	7 ბარ.	14 თვე

2017 წლის განმავლობაში Phase-1-ის ფარგლებში დაგეგმული და შესრულებული იქნა სტრუქტურული ტრეკერისათვის დამზადებული მილების საიმედოობის მონიტორინგი. სამუშაოები შესრულდა J-PARC-ის ტერიტორიაზე სადაც ამჟერად განთავსებულია მოდულების ასაწყობი ლაბორატორია COMET ექსპერიმენტის კომპლექსში.



ნახ. 18. J-PARC-ში განთავსებული ლაბორატორია, შესანახად მომზადებული სათავსოები

ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს სტრუქტურული მილებიდან გაზის გაჟონვაზე დაკვირვება. გარდა ჩატარებული ტესტებისა მილების დამზადებისთანავე (სანამ გადაიგზავნებოდა იაპონიაში) მნიშვნელოვანია გრძელვადიანი ტესტები საბოლოო საიმედოობის განსასაზღვრავად. ამისათვის მილები ხელმეორედ იქნა შემოწმებული:

1. დიამეტრის ცვლილებაზე
2. გაზის წნევაზე (რამდენი დაკარგა მილმა დროთა განმავლობაში)
3. მექანიკურ დეფექტებზე


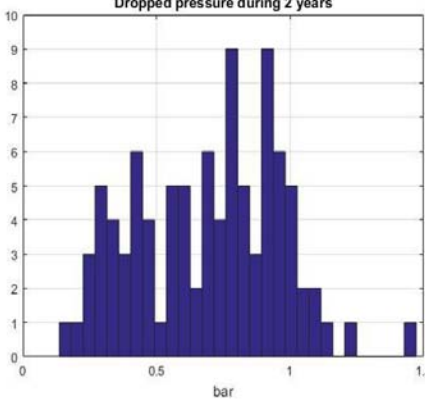
ამისათვის სპეციალურად დამზადდა მექანიკური ზემოქმედებით გაზთან უკონტაქტო მობილური წნევის გამზომი ხელსაწყო, იხ. ნახ.19-20.



ნახ.19. პორტატული წნევის გამზომი



ნახ.20. პორტატული წნევის გამზომი

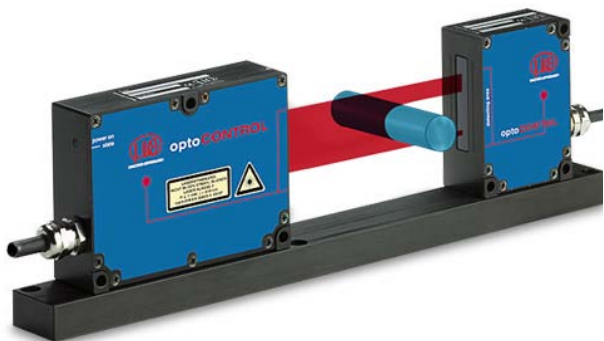
მოქროვილი მილით	ალუმინიზირებული მილით
<p>გაზომვების შედეგებმა აჩვენეს, რომ მექანიკური დეფორმაცია აღნიშნებოდა მხოლოდ 13 მილს 2700-დან, ხოლო წნევის ვარდნა შეინიშნებოდა მხოლოდ 25 %, იხ. ნახ.21-22. ასეთი შედეგი მეტწილად წარმოადგენს მილის ბოლოების ჩაწებების პრობლემას, რაც გამოვლინდა მათი გადატანის და შენახვის დროს.</p>	
	
<p>ნახ.21. წნევის გამზომი სტენდი</p>	<p>ნახ.22. წნევის ვარდნის ჰისტოგრამა</p>
<p>აგრეთვე გასული წლის განმავლობაში ჩატარდა პირველი კვლევითი სამუშაოები ახალი 5 მმ დიამეტრის მქონე მილების დასამზადებლად ნახ.23.</p> <p>1. ცილინდრული მილის მთელ სიგრძეზე დიამეტრის ერთგვაროვნების კონტროლი წინა 9.8 მმ დიამეტრის მქონე მილის კონტროლისათვის დამზადებული იყო სპეცილური მოწყობილობა რომელიც შედგება სხვადასხვა საკალიბრო დიამეტრის $D=9.72, 9.75, 9.77, 9.80, 9.85$ მმ. სექციებისგან. გასატესტად მილის ბოლოებიდან ჩამოიჭრება სანიმუშე რგოლები რომელიც გაიზომება ზემოთ აღნიშნული ხელსაწყოს მეშვეობით</p>	



ნახ.23. 9.8 mm და 5 mm დიამეტრის სტროუ მილები

ეს მეთოდი შეიცვალა ახალი უკონტაქტო ოპტიკური სენსორით რომელიც უკონტაქტოდ ლაზერის მეშვეობით ზომავს მილის დიამეტრს იხ.ნახ.24.

ნახ.25-ზე ნაჩვენებია 5 მმ დიამეტრის გამზადებული მილები.



ნახ.24. ლაზერული გამზომი

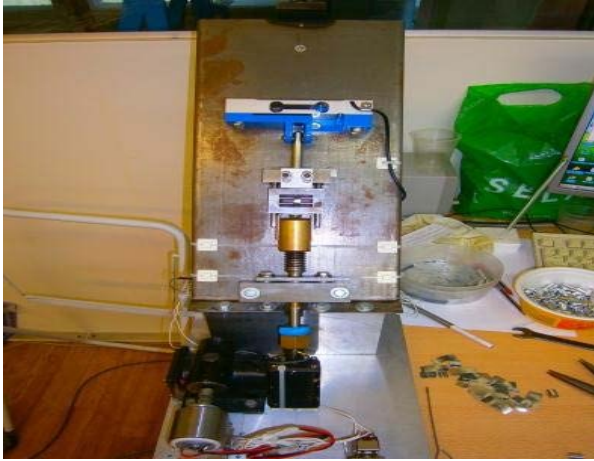


ნახ.25. 5 მმ დიამეტრის მილები

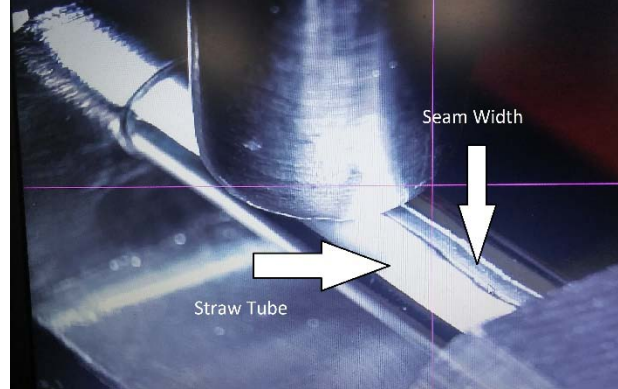
2. ნაკერის სიმტკიცის ტესტირება და გაზომვა

ახალი ტიპის სტროუ მილის დამზადების ტექნიკური პროცესიდან გამომდინარე, ვინაიდან შედეგების პროცესში მიმდინარეობს ფიზიკურ ტემპერატურული ზემოქმედება ნივთიერებაზე, ნაკერის ფორმირებისას გვექნება გარკვეული შიდა სტრუქტურული ცვლილებები, ამრიგად მილის შედარებით სუსტ ნაწილს წარმოადგენს უშუალოდ შედეგების ადგილი, რადგან სტროუ

მილის სამუშაო ადგილი ვაკუუმია, ხოლო მასში მიედინება 1 ბარი წნევის გაზი. გადაბმის ადგილმა უნდა გაუძლოს მინიმუმ 1 კგ/სმ² დატვირთვას. ამისათვის შეიქმნა სპეციალური სტენდი რომელზეც მიმდინარეობს თითოეული მილიდან ჩამოჭრილი ნიმუშების შემოწმება ნახ.26.



ნახ.26. სიმტკიცის შესამოწმებელი სტენდი



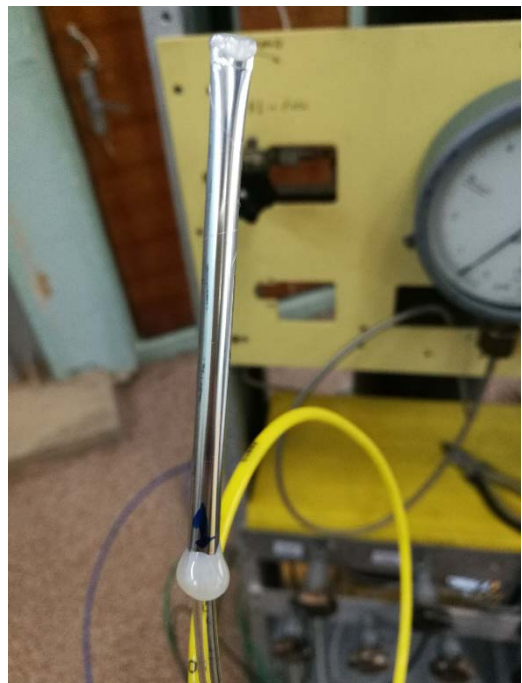
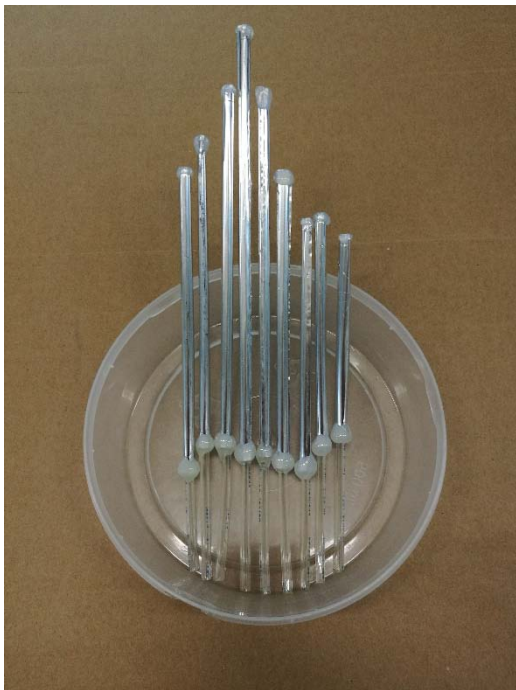
ნახ.27. შედუღების ზოლი სტროუ მილის გასწვრივ

20 მკმ კედლის სისქის მილებისგან განსხვავებით 12 მკმ სისქის მილები თითქმის ორჯერ უფრო სუსტია ნაკერის სიმტკიცით, ეს ბუნებრივიცაა ვინაიდან კედლის სისქე ორჯერ ნაკლებია. ამ მიმართულებით კვლავ მიმდინარეობს აქტიური კვლევები და ზებგერთი შედუღების მეთოდის გამოკვლევა მოცემული ამოცანისთვის, ნახ.27. ნახ.28-ზე შეგიძლიათ იხილოთ პირველი 5 მმ დიამეტრის მილის შემდუღებელი აპარატის პროტიტიპი.



ნახ.28. ულტრაბგერითი შედუღების აპარატის პროტოტიპი

პირველი 5 მმ დიამეტრის მქონე სტროუ მილების დამზადების შემდგომ ჩატარდა მათი ტესტი, ცილინდრული ფორმის სტაბილურობაზე, მექანიკური ზემოქმედებისა და გაზის წნევის ქვეშ მყოფ მილებზე, ნახ.29-30.



ნახ.29. მომზადებული სტროუ მილები

ნახ.30. წნევის ტესტი

საბოლოოდ გაზომვებზე აჩვენებს შემდეგი შედეგები

მილების რაოდენობა	დიამეტრი	ნაკერის სიმტკიცე	MAX წნევა	დამზადების დრო
50	5 მმ	1.6-2.0 კგ	3 ბარ.	5 თვე

სამომავლო სამუშაოები Phase-2 ფარგლებში

COMET ექსპერიმენტის მიხედვით Phase-2 დაგეგმილია ახალი 5 მმ დიამეტრის და 12 მკმ სტროუ მილების დამზადება. ამისათვის პირველ რიგში მოსამზადებელია ახალი ბაზა რაც დაფუძნებული იქნება იმ გამოცდილებაზე რომელიც დაგროვდა 20 მკმ მილების კვლევებისას. როგორც ზემოთ იქნა აღწერილი ამ მიმართულებით უკვე გადაიდგა კონკრეტული ნაბიჯები. გამოცდილება რომელიც პირველი 5 მმ სატესტო მილებთან მუშაობამ მოიტანა, გვიჩვენებს საჭიროებას სრულიად ახალი ტესტირებისა და ხარისხის მეთოდების შემუშავების აუცილებლობაზე, მაღალი საიმედოობის შესანარჩუნებლად. მოცემული სამუშაოების მთავარ მიზნად რჩება შევქმნათ ვაკუუმში მომუშავე ყველაზე თხელკედლიანი სტროუ მილებისგან შემდგარი ტრეკული დეტექტორი, რაც დიდ გამოწვევას წარმოადგენს ჩვენი ჯგუფისთვის.

შედეგები

Phase-1-ის ფარგლებში ჩატარებული სამუშაოები წარმატებით იქნა დასრულებული. მოღებულ შედეგებზე დაიწერა სტატია “Nuclear Instruments and Methods in Physics research”
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306465>

აგრეთვე პუბლიკაციის პროცესშია სტატია „Production of thin-wall straw tubes“ მიმდინარე.

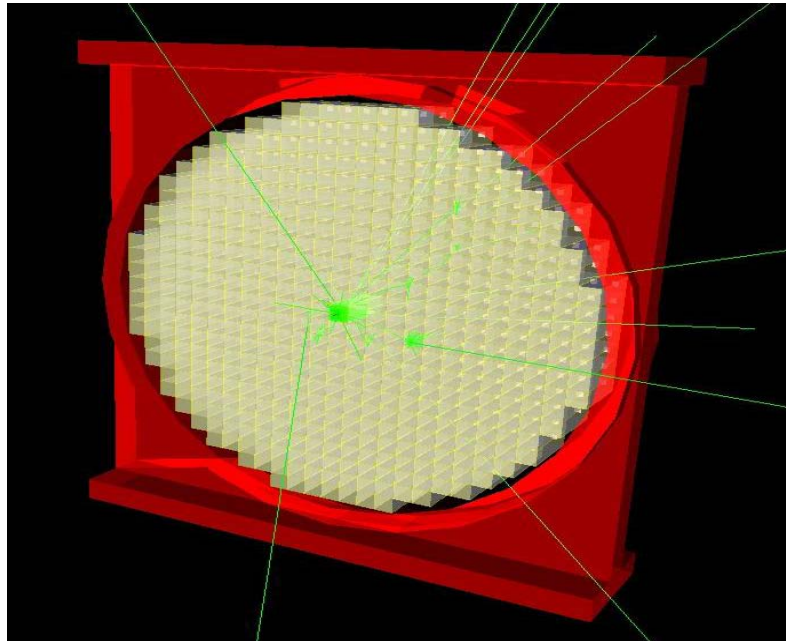
უნდა აღინიშნოს, რომ Phase-I-სთვის სტროუ დეტექტორების შექმნაში ჩვენი ინსტიტუტის თანამშრომლების აქტივობისთვის (დიზაინი, სტროუ მილების წარმოება, მათი შემოწმება და ტესტირება) გამოყენებული იქნა დუბნის ბირთვული კვლევების გაერთიანებული ინსტიტუტის ბაზა, რადგან თვითონ დუბნა არის კომეტ ექსპერიმენტის წევრი, ხოლო საქართველო კი დუბნის წევრი. ასევე იგეგმება შემდგომში ჩვენი ინსტიტუტის თანამშრომლების მონაწილეობა სტროუ დეტექტორების აწყობაში და ინსტალირებაში იაპონიაში.

ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი

COMET ექსპერიმენტში უნდა მოხდეს 105 მევიანი ელექტრონის დიდი სიზუსტით რეგისტრაცია.

ამისთვის გამოიყენება ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი, ნახ.31.

ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი შედგება სეგმენტირებული კრისტალებისგან, და განლაგებულია სტროუ დეტექტორების შემდეგ. კალორიმეტრს აქვს 3 მთავარი მიზანი: ელექტრონის ენერჯის გაზომვა კარგი სიზუსტით, დროითი სიგნალის მიღება, რომელიც ჩართულია ტრიგერში და ინფორმაცია ტრეკის მდებარეობის შესახებ.



ნახ. 31. COMET ექსპერიმენტის ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი.

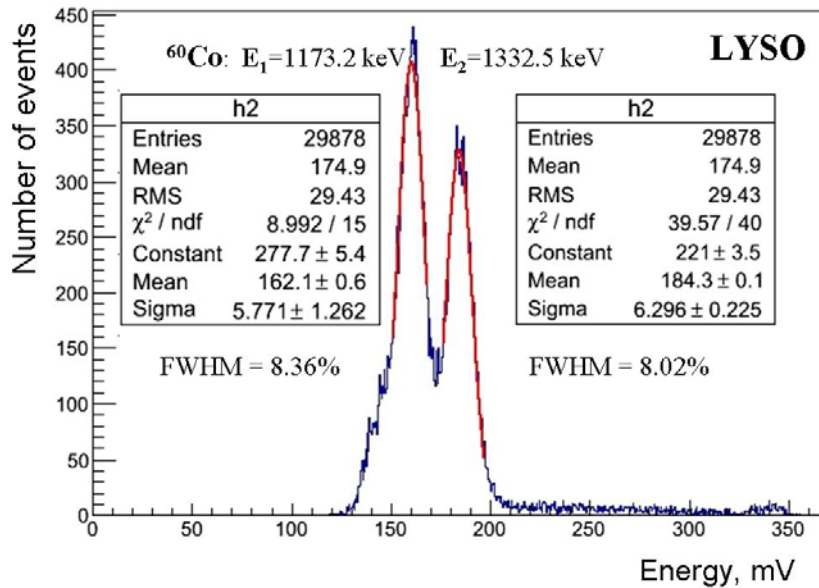
იმის გამო, რომ გვაქვს ფონური პროცესები კალორიმეტრის ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა 105 მევიანი ელექტრონისთვის უნდა იყოს <5%, სწრაფი, decay time <100ნწ (ns), რადიაციულად მყარი და სინათლის კარგვა LY \leq 10%, 1მრად.

კალორიმეტრისთვის განიხილებოდა კრისტალების 2 კანდიდატი, GSO და LYSO. დეტალური კვლევების შედეგებმა აჩვენა, რომ უდაო ფავორიტი არის LYSO კრისტალი, რომელიც იქნა შერჩეული კომეტ-ს ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრის შესაქმნელად. კრისტალების ყველა კვლევაში აქტიურ მონაწილეობას იღებდნენ (და აგრძელებენ) ინსტიტუტის თანამშრომლები. ძირითადი პრინციპი ნაწილაკის ენერჯის გაზომვისა კალორიმეტრში არის პროპორციულობა კალორიმეტრში შემავალ ნაწილაკსა და კალორიმეტრში გამოყოფილ ენერჯიას შორის. ენერჯის ზუსტ გაზომვაზე კალორიმეტრში გავლენას ახდენს ელექტრომაგნიტური ღვარის ფლუქტუაციები და პასიური ელემენტების სისქე და პარამეტრები, რომლებიც განლაგებულია სცინტილატორის გარშემო. როგორც ავღნიშნეთ COMET კალორიმეტრის მთავარი მოთხოვნა არის მაღალი ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა. კალორიმეტრის ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c,$$

სადაც a - არის სტოხასტიკური წევრი, რომელსაც ძირითადად განსაზღვრავს ღვარის სტატისტიკური ფლუქტუაციები; b - ფოტოდეტექტორის და ელექტრონიკის ფონური კომპონენტი; c - მუდმივი წევრი, გამოწვეული დეტექტორის არაერთგვაროვნებისგან.

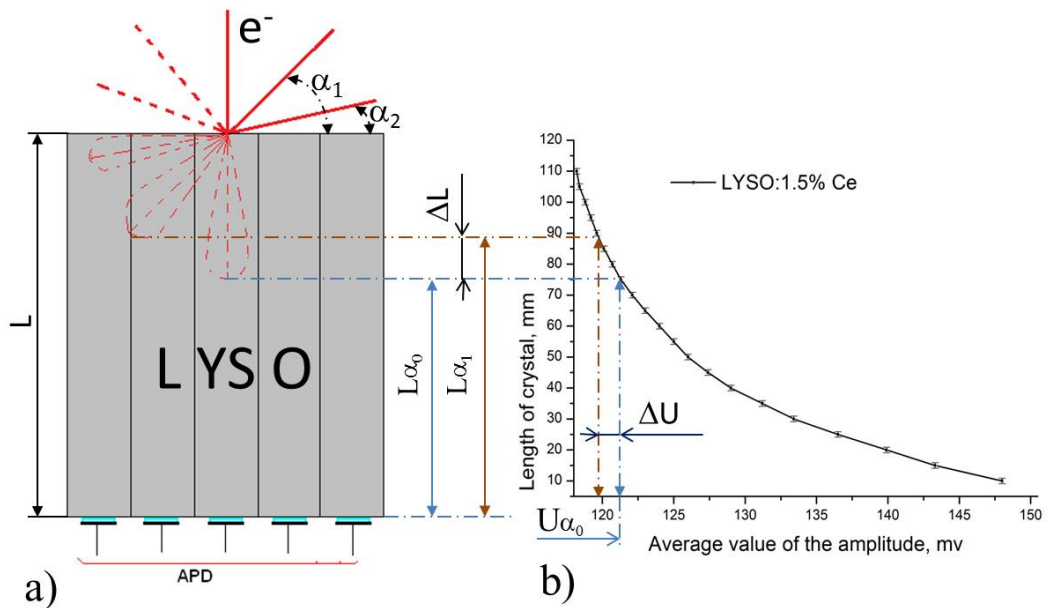
ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრის ენერგეტიკულ გარჩევისუნარიანობაში მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს კრისტალებში გამოყოფილი შუქის არაერთგვაროვნობას. შესაბამისად ეს პარამეტრი ჩვენს მიერ დეტალურად იქნა შესწავლილი. კრისტალში გამოყოფილი შუქის არაერთგვაროვნობის შესწავლის დროს, კარგად უნდა იქნას შერჩეული, თუ რა ამრეკლი მატერიალი უნდა იქნეს გამოყენებული კრისტალის შესახვევად. ჩვენს მიერ ექსპერიმენტალურად შესწავლილი იქნა სხვადასხვა ამრეკლი მასალები. საუკეთესო შედეგი (მაქსიმალური ფოტოელექტრონები) მივიღეთ როდესაც ვიყენებთ, ტეფლონი (2 შეხვევა) + ESR (2 შეხვევა) + ESR (ბოლოში). ინსტიტუტის თანამშრომლების მონაწილეობით გაზომვები ჩატარდა ბირთვული კვლევების გაერთიანებულ ინსტიტუტში ქ. დუბნაში. ნახ. 32-ზე ნაჩვენებია LYSO კრისტალის (ზომა არის $2 \times 2 \times 12$ სმ³) ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა. გაზომვების დროს გამოყენებული იქნა ⁶⁰Co-ს (1173.2 მევ, 1332.5 მევ) წყარო, რომელიც მდებარეობდა 6 სმ-ში ფოტოდეტექტორიდან და 0.1სმ-ში კრისტალიდან.



ნახ.32. LYSO კრისტალების სპექტრი და ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა, ⁶⁰Co-ს წყაროზე, ამრეკლი მატერიალის ვარიანტია ტეფლონი (2 შეხვევა) + ESR (2 შეხვევა) + ESR (ბოლოში).

მიღებული იქნა ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა 8.4% ენერჯისთვის 1173.2 keV, ხოლო 8.0% ენერჯისთვის 1332.5 keV. ამ ენერჯებისთვის ეს შედეგი არის მისაღები ექსპერიმენტისთვის.

კრისტალის გამოსავალი შუქის (Light Yield, LY) ერთგვაროვნების განსაზღვრაში უნდა ველოდოდეთ გარკვეულ შეცდომებს, განსაკუთრებით მაშინ როცა ნაწილაკის ტრეკი არის არაწრფივი (მრუდე), როგორც ეს არის COMET-ში. ეს პრობლემა დაკავშირებულია იმაზე, თუ რა კუთხით შედის კრისტალში ნაწილაკი, ანუ, როდესაც გვაქვს ღვარის ერთი და იგივე გეომეტრიული ზომა, ერთნაირი ენერგიის გამოყოფა, მაგრამ კრისტალში სცინტილაციის დროს წარმოქმნილი ფოტონები გაივლიან სხვადასხვა მანძილს ფოტოდეტექტორამდე (APD), და ეს მანძილი დამოკიდებულია კუთხეზე ღვარის ღმსა და კრისტალს შორის. ეს პრობლემა შესწავლილი იქნა ჩვენს მიერ, შედეგები ნაჩვენებია ნახ.33 -ზე.

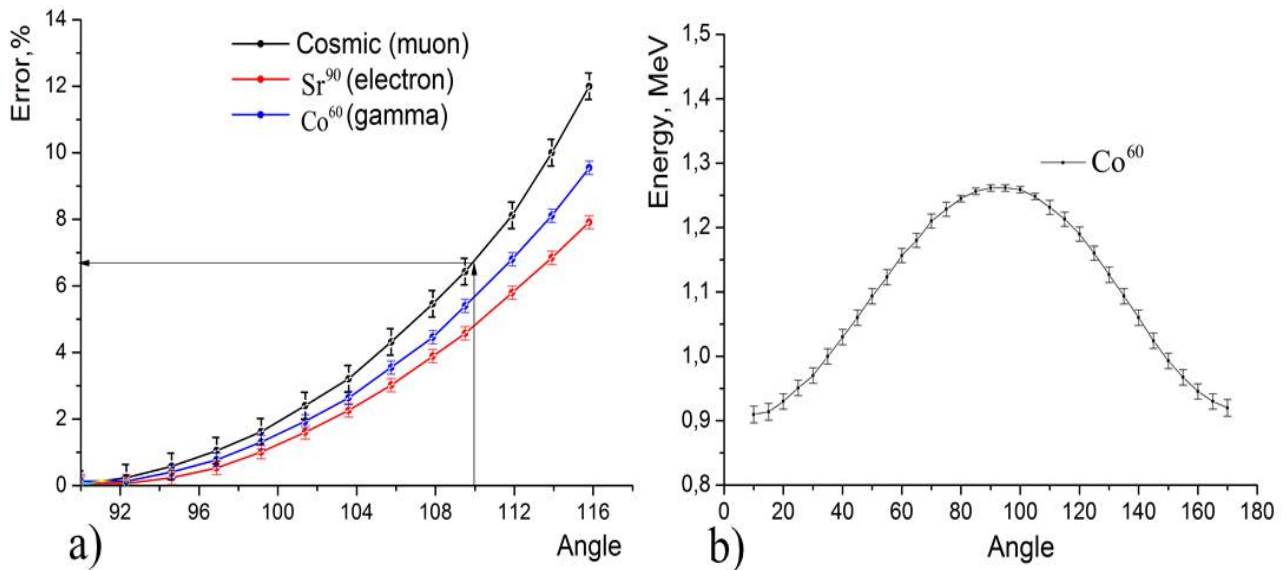


ნახ.33. ენერგიის კუთხური განაწილება სეგმენტირებულ კალორიმეტრში.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, კრისტალების სიგრძის სხვადასხვა ადგილას (L_{α}) გამოყოფილი ენერგია და შესაბამისად APD-დან მიღებული სიგნალებს აქვთ სხვადასხვა ამპლიტუდა.

შესაბამისად სეგმენტირებულ ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში გამოყოფილი ენერგიის გაზომვა ხდება შეცდომით, რომელიც განისაზღვრება კუთხით (α) კრისტალსა და ელექტრომაგნიტური ღვარის მიმართულებას შორის. ტოჰოკუს უნივერსიტეტის (იაპონია) ელექტრონულ ამაჩქარებელზე ჩავატარეთ COMET ექსპერიმენტის კალორიმეტრის პროტოტიპის (LYSO კრისტალების მატრიცა 9×9) ტესტური გაზომვები. გაზომვების დროს გამოვიყენეთ 105 მევიანი ელექტრონის ნაკადი, და კუთხეები იყო $\alpha = 90^\circ$ და $\alpha = 20^\circ$. გაზომვებმა აჩვენა, რომ გამოყოფილ ენერგიებს შორის სხვაობა არის დაახლოებით 6%. აქედან გამომდინარე, როდესაც მოვახდენთ გაზომილი ენერგიის დამუშავებას, რომელიც გამოიყოფა კალორიმეტრში, უნდა გავითვალისწინოთ ენერგიის გაზომვის შეცდომები, რომელიც დაკავშირებული კუთხეებთან, ანუ უნდა ავიღოთ ელექტრონების რეალური ტრეკები კრისტალებში.

ამის შესასწავლად შეიქმნა პრეციზიული სტენდი, რომელზეც მოვახდინეთ ექსპერიმენტალური შესწავლა კუთხური ცდომილების წვლილისა გაზომილ ენერგიაში. ამ გაზომვების დროს გამოყენებული იქნა კალორიმეტრის პროტოტიპი, LYSO კრისტალების (ზომები $2 \times 2 \times 15$ სმ³) 3×3 მატრიცა. სიგნალების მიღება ხდებოდა ღვარული ფოტოდiodებით (APD S8664-1010, Hamamatsu).



ნახ.34. a) გაზომილი ენერგიების ცდომილების სპექტრი. b) ენერგიის კუთხური განაწილება.

როგორც მიღებული შედეგებიდან (ნახ.34) ჩანს, ენერგიის გაზომვის ცდომილება კოსმოსურ მიონებზე, როდესაც გვაქვს კუთხე 20° , არის დაახლოებით 6.7%, რომელიც მთლიანად ემთხვევა შედეგებს, რომელიც მივიღეთ COMET-ს კალორიმეტრის პროტოტიპის ტესტური გაზომვების დროს ტოპოკუს ელექტრონულ ამაჩქარებელზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ ენერგიის გაზომვის ცდომილება არ არის დამოკიდებული დასამზერი ნაწილაკის ტიპზე, ეს დამოკიდებულია მხოლოდ კრისტალში შუქის გამოყოფის ერთგვაროვნებაზე, და ენერგიის კუთხურ განაწილებაზე.

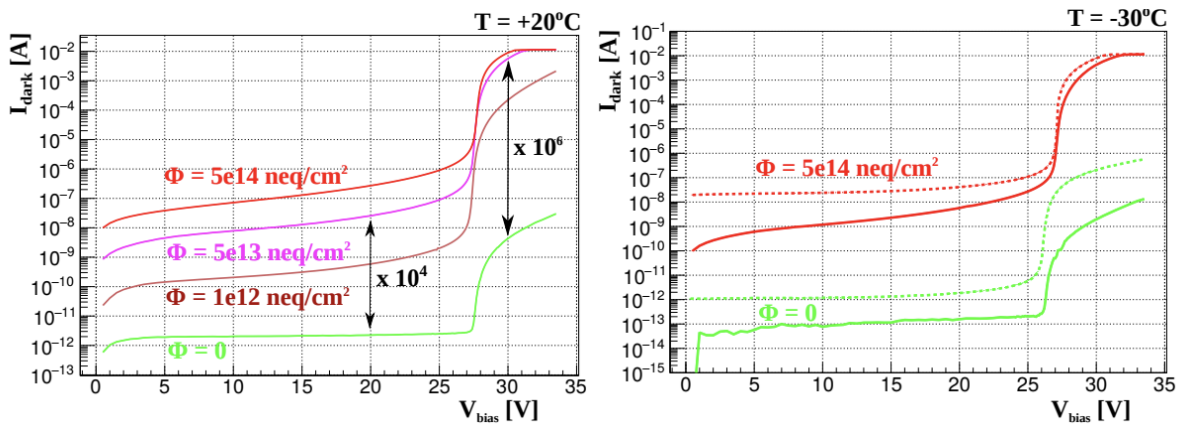
ჩვენს მიერ მიღებული შედეგები გამოყენებული იქნება COMET ექსპერიმენტის სრული კალორიმეტრის (2400 LYSO კრისტალი) შექმნის დროს.

კოსმოსური ვეტო მთვლელების სისტემა, (Cosmic Ray Veto, CRV)

COMET ექსპერიმენტის CRV დეტექტორის დიზაინს შეადგენს ორგანული პლასტიკური სინტილატორი სადაც ხდება დამუხტული ნაწილაკის მიერ ენერგიის გამოყოფა, რომელიც გარდაიქმნება ფოტონებად. გენერირებული ფოტონების ჩაჭერა და ფოტოდეტექტორამდე ტრანსპორტირება ხორციელდება სინათლის ტალღის სიგრძის გარდამქმნელი შუქგამტარით,

რომელიც ამავედროულად არის ფოტონების ტრანსპორტერი ფოტო დეტექტორამდე. ფოტო დეტექტორებზე გამოიყენება სილიკონის ფოტოგამამრავლებელი. ეს არის კომპაქტური ნახევარგამტარული ხელსაწყო, რომელიც ფართოდ ინერგება თანამედროვე მაღალი ენერგიების ექსპერიმენტებში. სილიკონური ფოტოგამამრავლებელის პოპულარობის ძირითადი მიზეზი ტრადიციულ ფოტო გამამრავლებელ მილაკთან შედარებით არის მისი კომპაქტური ზომა, დაბალი ფასი, მაღალი ეფექტურობა და გაძლიერების მაღალი კოეფიციენტი (10^6). მაღალი ენერგიების ფიზიკაში სინტილაციური დეტექტორების გამოყენებისას ერთ ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორი რაც აუცილებლადაა გასათვალისწინებელი, ესაა რადიაციული გავლენა ფოტო-დეტექტორის პერფორმანსზე. ცნობილია რომ რადიაცია ახდენს ფოტო-დეტექტორში ზედაპირული მუხტის აკუმულირებას რომელიც ხდება წყარო დეტექტორში ხმაურის წარმოშობაზე. რადიაციული გავლენა ფოტო დეტექტორებზე არის ძალზედ მნიშვნელოვანი პრობლემა და აუცილებლად საჭიროებს წინასწარ კვლევებს რათა მოხდეს ექსპერიმენტალური სიგნალის ხმაურთან ფარდობის მინიმიზაცია. მაღალი რადიაციული ფონის პრობლემა კომეტ ექსპერიმენტისათვის, კერძოდ ნეიტრონების ინტეგრირებული ფონი ექსპერიმენტის პირველ ფაზაში აღწევს 10^{10} სმ⁻²-ს და ექსპერიმენტის მეორე ფაზაში მოსალოდნელია ფონის გაზრდა 10^{13} სმ⁻²- მდე, აქედან გამომდინარე ძალზედ მნიშვნელოვანია აღნიშნული ტიპის ფოტო დეტექტორების დეტალური შესწავლა რათა აღნიშნული რადიაციის პირობებში მოსალოდნელია შავი ხმაურის დრამატული ზრდა. პრობლემის შესასწავლად მოხდა რამოდენიმე სილიკონური ფოტოგამამრავლებელის ხელოვნური დასხივება 1 MeV ნეიტრონებით 10^{10} და 10^{14} სმ⁻² დოზებით და მოხდა მათი შესწავლა -30C და $+30\text{C}$ ტემპერატურულ რეჟიმში. გაზომვებზე დაყრდნობით მოხდა ახალი მეთოდის შემუშავება რომელიც საშუალებას გვაძლევს დეტალურად დავახასიათოთ დასხივებული ფოტო-დეტექტორის პერფორმანსი. მეთოდი. სილიკონური ფოტო-დეტექტორის რადიაციული დაზიანება გამოიხატება ეფექტური ლეგიონების შეცვლაში, მცირდება მუხტის მატარებლების მობილობა და სიცოცხლის ხანგრძლივობა, ამავედროულად იზრდება თერმული ელექტრონულ-ხვრელური წყვილების გენერირების სიხშირე. წყვილების გენერაციის სიხშირის გაზრდა თავისთავად ზრდის შავ ხმაურს (Dark Count Rate (DCR)), სწორედ DCR-ი წარმოადგენს უდიდეს ლიმიტს როდესაც SiPM-ი გამოიყენება რადიაციულ გარემოში. SiPM-ის პერფორმანსზე DCR ის გავლენის აღწერისათვის შემოვიტანეთ პარამეტრი “პიქსელის ბლოკირების ალბათობა”, რომელიც დეტერმინირებულია შავი დენების გაზომვების მონაცემებზე დაყრდნობით და პიქსელის ჩამქრობი წინააღობის სიდიდის გამოყენებით. პიქსელის ბლოკირების ალბათობა განვსაზღვრეთ როგორც ალბათობა იმისა რომ გეიგერის განმუხტვა მოხდება პიქსელში ელექტრული ველის პოტენციალის აღდგენის დროის ინტერვალში (τ). პიქსელის ბლოკირების ალბათობა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ SiPM ის დინამიკური დიაპაზონი. კვლევისათვის გამოყენებული იქნა 4384 პიქსელიანი SiPM, პიქსელის ზომით 15×15 მკმ². ნეიტრონებით დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ მოხდა ნიმუშების გაზომვა ვოლტ-ამპერულ (IV) მახასიათებლებზე და ძაბვა-ტევადობის (CV) მახასიათებლებზე. ნეიტრონებით დასხივება განხორციელდა ოთახის ტემპერატურაზე, ძაბვის გარეშე. გაზომვებს შორის SiPM ის ნიმუშები ინახებოდა -30C ზე იმისათვის რომ თავიდან აგვერიდებინა ანილინგის ეფექტები. თვითოეული გაზომვა გრძელდებოდა დაახლოებით 2 საათი კონკრეტული ტემპერატურისთვის, რაც

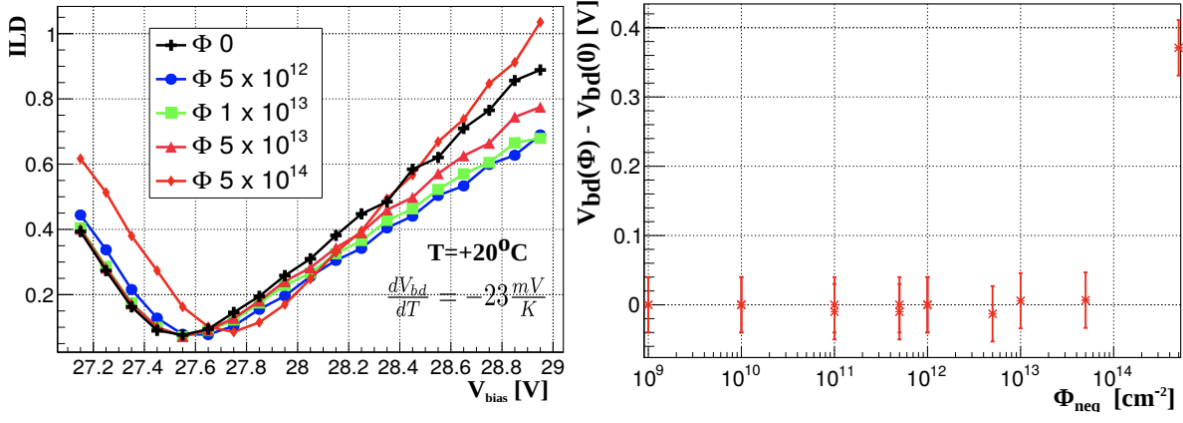
განსაკუთრებით გასათვალისწინებელია ტემპერატურებისათვის $>20^{\circ}\text{C}$, რა დროსაც ხდება ანილინგის ეფექტი. გაზომვები განხორციელდა მიკროკლიმატურ კამერაში სადაც შესაძლებელია ტემპერატურის ცვლილება -30 დან $+30^{\circ}\text{C}$ ინტერვალში და რაც მეტად მნიშვნელოვანია შესაძლებელია ტენიანობის რეგულირება, ჩვენს შემთხვევაში საჭირო იყო მშრალი გარემო ($H < 1\%$). ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების ჩაწერა ხდებოდა სრულიად ბნელ გარემოში და ასევე ხელოვნური განათებით რა დროსაც ვიყენებდით 470 ნმ ტალღის სიგრძის სინათლის წყაროს.



ნახ.35. ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების გაზომვის შედეგები სხვადასხვა რადიაციული დოზისათვის ოთახის ტემპერატურაზე (მარცხნივ), და -30°C ტემპერატურაზე ხელოვნური განათებით (წყვეტილი ხაზი) და ხელოვნური განათების გარეშე (უწყვეტი ხაზი). შესაბამისი რადიაციული დოზები მითითებულია თვითოეული განაწილების გრაფიკზე.

გარღვევის ძაბვის სიდიდე

გარღვევის ძაბვის სიდიდე (V_{bd}) არის ერთ ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრი SiPM ის ოპერირებისას. V_{bd} თვითოეული გაზომვისათვის დეტერმინირებულია შებრუნებული ლოგარითმული წარმოებულის (ILD) მინიმიზაციის მეთოდით. ნახ.36-ზე, მარცხნივ ნაჩვენებია ILD იმ განაწილებებისათვის რომელც ნაჩვენებია ნახ.35-ზე. V_{bd} სიდიდე დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ რჩება ერთი და იგივე 40mV ცდომილების ფარგლებში 5×10^{13} cm⁻² რადიაციის დოზამდე, ხოლო 5×10^{14} სმ⁻² რადიაციისთვის დამზერილი იქნა გარღვევის ძაბვის სიდიდის მნიშვნელოვანი ცვლილება. სხვაობა დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ აღწევს 350 მვ ს რაც მნიშვნელოვანი რიცხვია SiPM ს ეფექტური ოპერირებისათვის.



ფიგურ

ა ნახ.36. შებრუნებული ლოგირითმული წარმოებული (მარცხნივ), რომელიც მიიღება IV განაწილებიდან (იხ. ნახ.35). სხვაობა გარღვევის ძაბვების სიდიდეებს შორის (მარცხნივ), დასხივებამე და დასხივების შემდეგ.

ფოტოდეტექტირება

SiPM-ის აპლიკაციების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კითხვა, ეს არის, თუ როგორ იცვლება ფოტონის დეტექტირების ეფექტურობა (PDE) რადიაციულ დოზასთან და ტემპერატურასთან ერთად, რადგანაც შესაძლებელია შეიცვალოს SiPM რომელიმე ელექტრონული პარამეტრი (სიგნალის ხანგრძლივობა, ელექტრონული ველი, V_{bd} , კორელირებადი ხმაური (CN) ანდაც DCR ის ზრდის გამო რომელიც აშკარად გამოხატული პროცესია).

$$I_{LED}^{norm} = \frac{I_{LED}^{meas}(V_{bias}) - I_{dark}(V_{bias})}{I_{LED}^{meas}(V_{bias} = 10\text{ V}) - I_{dark}(V_{bias} = 10\text{ V})} \quad (1)$$

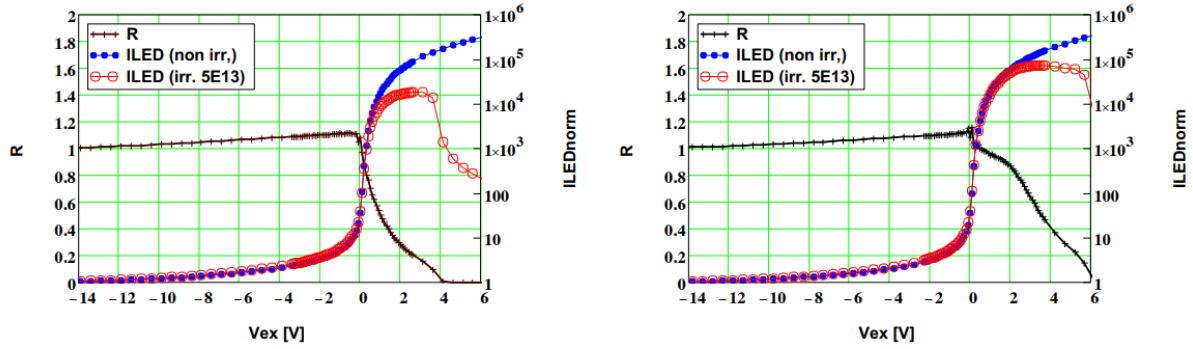
ნახ.37-ზე მოცემულია SiPM ის ნორმალიზებული ფოტო-დენი რადიაციამდე და რადიაციის შემდეგ დოზამდე $5 \times 10^{13} \text{ სმ}^{-2}$, რომელიც გამოთვლილია “გამოსახულება 1” ით. ნორმალიზაციის კოეფიციენტი დათვლილია +10 ვ ძაბვაზე, სადაც ვუშვებთ რომ SiPM-ის გაძლიერების კოეფიციენტი 1-ის ტოლია. თუ დავუშვებთ რომ LED ით გამოწვეული პიქსელის დამატებითი ბლოკირება ნულის ტოლია, მაშინ LED ით ინდუცირებული დენი შეგვიძლია დავუკავშიროთ SiPM- ის პარამეტრებს როგორც

$$I_{LED}^{norm} \approx A_{prob}^* \cdot G \cdot (1 + CN) \quad (1s)$$

სადაც A^*_{prob} არის გეიგერის განმუხტვის ალბათობა გამრავლებული ალბათობაზე იმისა რომ პიქსელი არაა ბლოკირებული გეიგერის ხდომილებით. ფარდობა:

$$R = \frac{I_{LED}^{norm}(\Phi_{neq})}{I_{LED}^{norm}(\Phi_{neq} = 0)} \quad (2)$$

“გამოსახულება 2” უნდა იყოს 1-ის ტოლი თუ “ფორმულა 1s” ზე რადიაციას არ აქვს გავლენა. წინა გაზომვებიდან გამოკვლეულ იქნა რომ ფარდობა არის 1-თან ახლოს, 10% ენტიანი სიზუსტით რადიაციამდე 10^{12} სმ^{-2} , მაგრამ როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ.37-ზე, დენების ფარდობაში გვაქვს მნიშვნელოვანი გადახრა რადიაციისთვის 10^{13} სმ^{-2} . ეს მიგვითითებს იმაზე რომ SiPM-ის ერთი ან რამოდენიმე პარამეტრი შეიცვალა დასხივების შემდეგ.



ნახ.37. ნორმალიზებული SiPM-ის ფოტო-დენი დაუსხივებელი (ლურჯი) და დასხივებული (წითელი) SiPM-ისათვის, და მათი ფარდობა R, ოთახის ტემპურატურაზე (მარცხენა ფიგურა) და -30C ზე (მარჯვენა ფიგურა).

იმისთვის რომ გამოგვეკვლია სიგნალის დანაკარგი რადიაციის გავლენის გამო, შემოგვაქვს პიქსელის ბლოკირების ალბათობა:

პიქსელის ბლოკირების ალბათობა

პიქსელის ბლოკირების ალბათობას η_{DC} -ს, განვსაზღვრავთ როგორც ალბათობა იმისა, რომ გეიგერის განმუხტვა მოხდება რომელიმე პიქსელში, დროის ინტერვალში dt . η_{DC} -სი შეგვიძლია დავაკავშიროთ DCR ს შემდეგი გზით:

$$DCR \cdot (1 + CN) \approx \frac{N_{pix}}{\tau} \cdot \eta_{DC}, \quad (3)$$

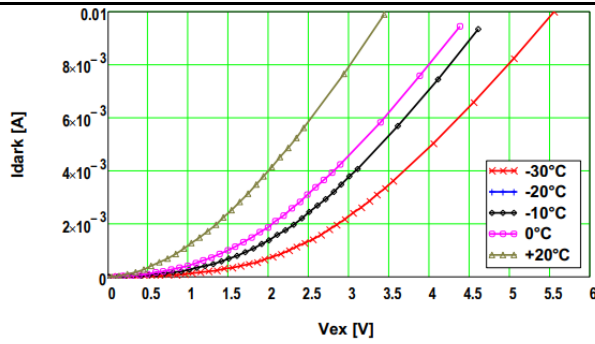
სადაც $dt = \tau = R_q \cdot C_{pix}$ არის პიქსელის ელექტრული პოტენციალის აღდგენის დრო. SiPM ის ფოტო დენი შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც η_{DC} ის ფუნქცია

$$I_{dark} = q_0 \cdot G \cdot DCR \cdot (1 + CN) \approx q_0 \cdot \frac{C_{pix} V_{ex}}{q_0} \cdot \frac{N_{pix}}{\tau} \cdot \eta_{DC}. \quad (4)$$

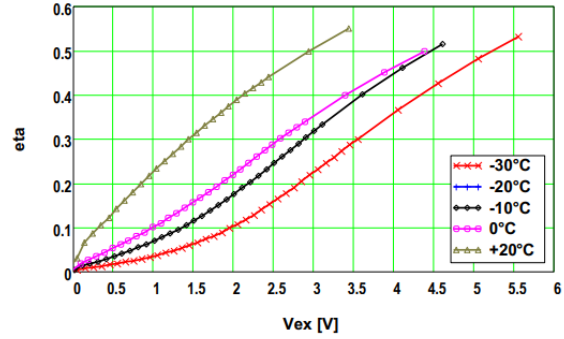
გამოსახულება 4 შეგვიძლია გადავწეროთ როგორც:

$$\eta_{DC} = \frac{I_{dark}}{V_{ex}} \cdot \frac{R_q}{N_{pix}}. \quad (5)$$

უნდა აღინიშნოს რომ მე-5 გამოსახულების ყველა პარამეტრი გამოთვლილია SiPM ის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი გრაფიკიდან. კონკრეტულად R_q რომელიც არის პიქსელის ჩამქრობი წინაღობა გამოთვლილია ფორვარდული დენიდან 1.7ვ-ზე ფოტოდენის ძაბვით წარმოებულთ. ასევე აღსანიშნავია, რომ η_{DC} მიისწრაფვის 1-სკენ, რადგანაც ძაბვის ვარდნა ფოტო დენისთვის R_q/N_{pix} ზე = V_{ex} , რაც იმას ნიშნავს რომ პიქსელი არის მუდმივად ბლოკირებული და ვერ ახერხებს ელექტრული პოტენციალის აღდგენას.



(ა)



(ბ)

ნახ.38. $5 \times 10^{13} \text{ სმ}^{-2}$ რადიაციული დოზით დასხივებული SiPM-ს ფოტოდენი (ა), და ფოტოდენიდან გამოთვლილი პიქსელის ბლოკირების ალბათობის განაწილება სხვადასხვა ტემპერატურისთვის (ბ).

პუასონის სტატისტიკაზე დაყრდნობით შეგვიძლია გამოვთვალოთ μ_{dc} როგორც $\mu_{dc} = -\ln(1-\eta_{DC})$, რომელიც არის ელექტრონულ-ხვრელური წყვილების საშუალო რიცხვი tau დროის ინტერვალში. სიდიდე η_{DC}/τ პირდაპირ კავშირშია ელექტრონულ-ხვრელური წყვილების გენერირების სიხშირესთან და შესაძლებელია აღიწეროს შოკლი-რედ-ჰოლის სტატისტიკით. ნახ.38ა-ზე ნაჩვენებია ფოტოდენი როგორც ძაბვის ფუნქცია SiPM-ის რადიაციული დოზით $5 \times 10^{13} \text{ სმ}^{-2}$, სხვადასხვა ტემპერატურებისათვის. ნახ.38ბ-ზე ნაჩვენებია პიქსელის ბლოკირების ალბათობა რომელიც გამოთვლილია 38ა მონაცემებზე დაყრდნობით. 38ბ განაწილება არის ძალზედ მნიშვნელოვანი SiPM ის აპლიკაციისათვის, როგორც ნახაზზეა ნაჩვენები $5 \times 10^{13} \text{ სმ}^{-2}$ დოზის პირობებში თუ SiPM ს ჩავრთავთ ოთახის ტემპერატურაზე მისი პიქსელების 50%-ი მუდმივად ბლოკირებული იქნება შავი ხმაურის გამო +3ვ ოპერირების ძაბვაზე. თუ მოვახდენთ SiPM-ის გაცივებას 0 გრადუსამდე პიქსელების ბლოკირების კოეფიციენტი შევამცირებთ 35% მდე და თუ მივალწევთ -30C გავრილებას, მაშინ შესაძლებელია კოეფიციენტი შევამციროთ 20% მდე, რაც თავისთავად მაინც დიდი რიცხვია და ფოტო დეტექტორი ვერ იქნება ეფექტური, გასანკუთრებით მცირე სინათლის თვლის აპლიკაციებისთვის ის სრულიად გამოუყენებელი ხდება.

2017 წელს ჩატარებული დეტექტორების (სტროუ-ეკალ) ტესტი ელექტრონულ ნაკადზე.

ისევე როგორც 2014-2016 წლებში, 2017 წლის მარტშიც ჩატარდა ჩატარდა ტოპოკუს უნივესიტეტის 105 მევიან ელექტრონულ ნაკადზე სტროუ-ეკალის (8x8 მატრიცა, 64 კრისტალი) პტოტოტიპის კომბაინ ტესტი, რომელშიც მონაწილეობას იღებდნენ ინსტიტუტის თანამშრომლები.

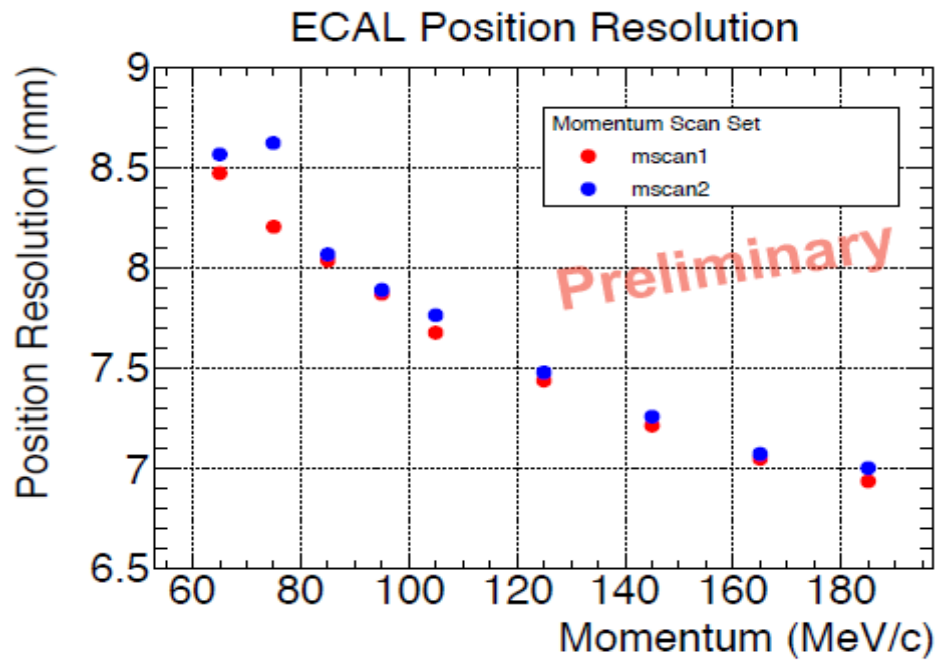
ტესტის მთავარი მიზანი იყო გაგვეზომა კალორიმეტრის პროტოტიპის სივრცული, დროის და ენერჯის გარჩევისუნარიანობა, ასევე სტროუ ტრეკერის იმპულსური და სივრცითი გარჩევის უნარიანობა. ტესტების დროს გამოყენებული იქნა ელექტრონების ნაკადი იმპულსებით: 62, 75, 85,

95, 105, 125, 145, 165, 185 MeV/c.

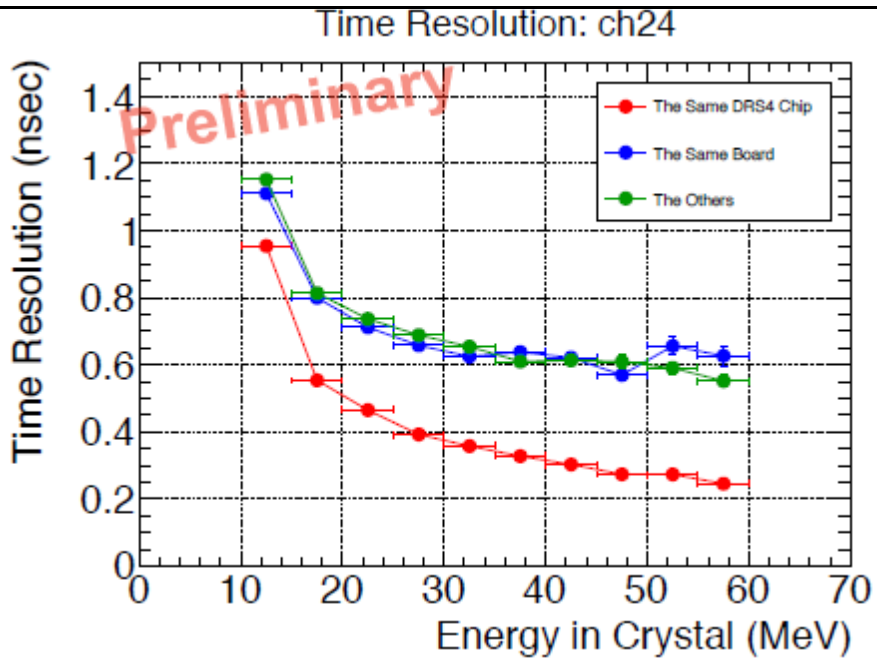
ტესტიდან მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 39, 40, 41, სივრცითი, დროითი და ენერგიის გარჩევისუნარიანობა შესაბამისად.

1. ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრის პროტოტიპის სივრცული, დროის და ენერგიის გარჩევისუნარიანობა 105 მევიან ელექტრონზე მიღებული იქნა **7.6მმ, <15წ, და 4.4%** (ოდნავ ცუდი 2016 წლის შედეგთანა შედარებით, $\sigma/E = 4.2\%$) შესაბამისად.

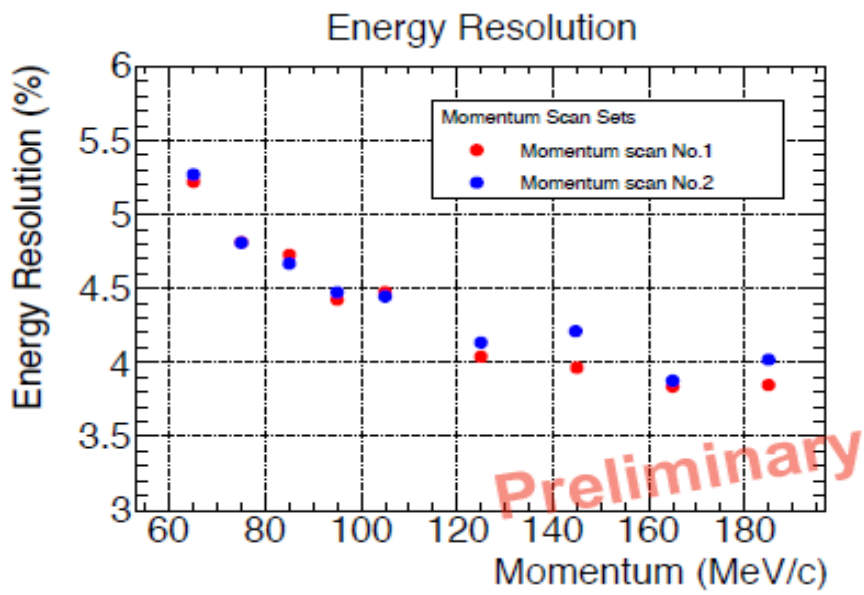
2. სტროუ ტრეკერის პროტოტიპის ეფექტურობა არის **96%**, იმპულსური გარჩევისუნარიანობა **120 მიკრონი**, სივრცითი გარჩევისუნარიანობა **120 მიკრონი**, რაც სრულად აკმაყოფილებს ექსპერიმენტის მოთხოვნებს.



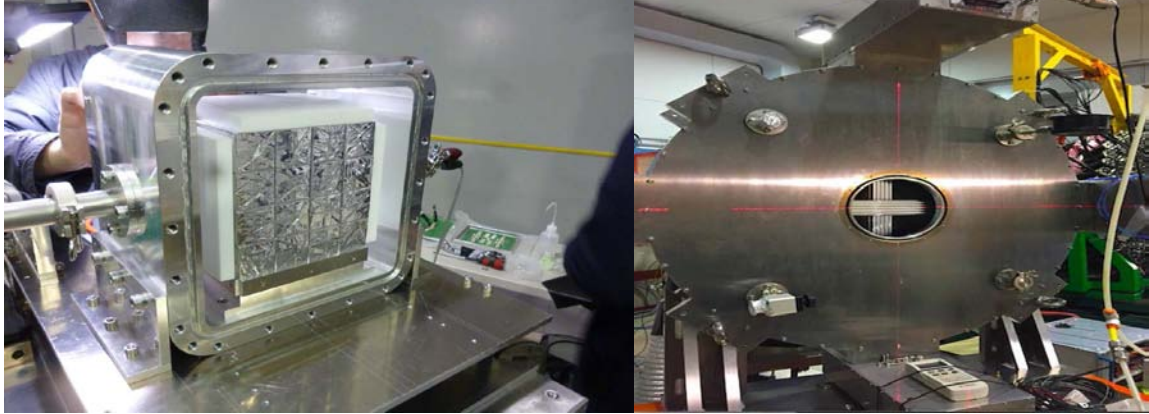
ნახ. 39. კალორიმეტრის პროტოტიპის სივრცითი გარჩევისუნარიანობა.



ნახ. 40. კალორიმეტრის პროტოტიპის დროითი გარჩევისუნარიანობა.



ნახ.41. კალორიმეტრის პროტოტიპის ენერგიის გარჩევისუნარიანობა.



ნახ. 42. ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრის (LYSO კრისტალების 8x8 მატრიცა, 64 კრისტალი). და სტროუ დეტექტორის პროტოტიპი.

II. 1. პუბლიკაციები (საქართველოს სახელმწიფო ბიუჯეტით და/ან შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის გრანტით დაფინანსებული კვლევითი პროექტის თემატიკის ფარგლებში)

II. 2. პუბლიკაციები:

ბ) უცხოეთში

სტატიები

№	ავტორი/ავტორები	სტატიის სათაური, ჟურნალის/კრებულის დასახელება	ჟურნალის/კრებულის ნომერი	გამოცემის ადგილის, გამომცემლობა	გვერდების რაოდენობა
1	CMS Collaboration	Measurement of vector boson scattering and constraints on anomalous quartic couplings from events with four leptons and two jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV	Phys. Lett. B 774 (2017) 682 (arXiv:1708.02812v2 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	34

		(Published in Physics Letters B)			
2	CMS Collaboration	Search for a light pseudoscalar Higgs boson produced in association with bottom quarks in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV (Published in the Journal of High Energy Physics)	J. Reine Angew. Math. 673 (2012), 1-31 (arXiv:1707.07283v2 [hep-ex])	Germany, Berlin, Springer	34
3	CMS Collaboration	Search for direct production of supersymmetric partners of the top quark in the all-jets final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the Journal of High Energy Physics)	JHEP 10 (2017) 005 (arXiv:1707.03316v2 [hep-ex])	Germany, Berlin, Springer	58
4	CMS Collaboration	Search for heavy resonances that decay into a vector boson and a Higgs boson in hadronic final states at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the European Physical Journal C)	EPJC 77 (2017) 636 (arXiv:1707.01303v2 [hep-ex])	Germany, Berlin, Springer	36
5	CMS Collaboration	Constraints on anomalous Higgs boson couplings using production and decay information in the four-lepton final state (Published in Physics Letters B)	Phys. Lett. B 775 (2017) 1 (arXiv:1707.00541v2 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	34
6	CMS Collaboration	Search for Higgs boson pair production in the bb	Phys. Rev. D 96, 072004 (2017)	APS – America	40

	on	$\tau\tau$ final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV (Published in Physical Review D)	(arXiv:1707.00350v2 [hep-ex])		
7	CMS Collaborati on	Measurements of properties of the Higgs boson decaying into the four-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)0 47.)	JHEP 11 (2017) 047 (arXiv:1706.09936v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	52
8	CMS Collaborati on	Search for electroweak production of charginos and neutralinos in WH events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)0 29.)	ISSN: 1029-8479 (arXiv:1706.09933v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	38
9	CMS Collaborati on	Search for a heavy composite Majorana neutrino in the final state with two leptons and two quarks at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017. 11.001.)	(arXiv:1706.08578v3 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	32
10	CMS	Measurements of jet charge	JHEP 10 (2017) 131	Springer –	40

	Collaboration	with dijet events in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)131.)	(arXiv:1706.05868v2 [hep-ex])	Germany, Berlin	
11	CMS Collaboration	Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector (Published in the Journal of Instrumentation as doi:10.1088/1748-0221/12/10/P10003.)	JINST 12 (2017) P10003 (arXiv:1706.04965v2 [physics.ins-det])	(IOP)	84
12	CMS Collaboration	Search for top squark pair production in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV using single lepton events (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)019.)	JHEP 10 (2017) 019 (arXiv:1706.04402v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	40
13	CMS Collaboration	Searches for W' bosons decaying to a top quark and a bottom quark in proton-proton collisions at 13 TeV (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP08(2017)029.)	JHEP 08 (2017) 029 (arXiv:1706.04260v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	38
14	CMS Collaboration	Search for new physics in the monophoton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV	(arXiv:1706.03794v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	36

		(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)073.)			
15	CMS Collaboration	Measurement of the B^\pm meson nuclear modification factor in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV (Published in Physical Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.152301.)	Phys. Rev. Lett. 119, 152301 (2017) (arXiv:1705.04727v2 [hep-ex])	APS – America	30
16	CMS Collaboration	Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV in the single-lepton final state using the sum of masses of large-radius jets (Published in Physical Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.151802.)	Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 151802 (arXiv:1705.04673v2 [hep-ex])	APS – America	32
17	CMS Collaboration	Search for new phenomena with the MT_2 variable in the all-hadronic final state produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5267-x.)	(arXiv:1705.04650v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	46
18	CMS Collaboration	Search for charged Higgs bosons produced via vector boson fusion and decaying into a pair of W and Z bosons using proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV	Phys. Rev. Lett. 119, 141802 (2017) (arXiv:1705.02942v2 [hep-ex])	APS – America	30

		(Published in Physical Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.141802.)			
19	CMS Collaboration	Measurement of the triple-differential dijet cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV and constraints on parton distribution functions (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5286-7.)	(arXiv:1705.02628v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	42
20	CMS Collaboration	Search for physics beyond the standard model in events with two leptons of same sign, missing transverse momentum, and jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5079-z.)	Eur. Phys. J. C 77 (2017) 578 (arXiv:1704.07323v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	42
21	CMS Collaboration	Measurement of the top quark mass in the dileptonic tt decay channel using the mass observables $M_{b\bar{b}}$, M_{T2} , and $M_{b\bar{b}^*}$ in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV (Published in Physical Review D as doi:10.1103/PhysRevD.96.032002.)	Phys. Rev. D 96, 032002 (2017) (arXiv:1704.06142v2 [hep-ex])	APS – America	48
22	CMS	Measurements of the	JHEP 10 (2017) 072	Springer –	34

	Collaboration	<p>$pp \rightarrow W\gamma\gamma$ and $pp \rightarrow Z\gamma\gamma$ cross sections and limits on anomalous quartic gauge couplings at $\sqrt{s}=8$ TeV</p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)072.)</p>	(arXiv:1704.00366v2 [hep-ex])	Germany, Berlin	
23	CMS Collaboration	<p>Search for new physics with dijet angular distributions in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV</p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP07(2017)013.)</p>	JHEP 1707 (2017) 013 (arXiv:1703.09986v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	34
24	CMS Collaboration	<p>Search for a heavy resonance decaying to a top quark and a vector-like top quark at $\sqrt{s}=13$ TeV</p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP09(2017)053.)</p>	JHEP 1709 (2017) 053 (arXiv:1703.06352v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	40
25	CMS Collaboration	<p><u>Measurement of the jet mass in highly boosted $t\bar{t}$ events from pp collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u></p> <p>(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5030-3.)</p>	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.7, 467 (arXiv:1703.06330v2 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	42
26	CMS Collaboration	<p><u>Search for anomalous couplings in boosted $WW/WZ \rightarrow \ell\nu qq$ production in proton-proton collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u></p>	Phys.Lett. B772 (2017) 21-42 (arXiv:1703.06095v2 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	30

		(Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.009.)			
27	CMS Collaboration	<u>Search for associated production of dark matter with a Higgs boson decaying to b b-bar or gamma-gamma at sqrt(s) = 13 TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)180.)	JHEP 1710 (2017) 180 (arXiv:1703.05236 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	44
28	CMS Collaboration	<u>Search for third-generation scalar leptoquarks and heavy right-handed neutrinos in final states with two tau leptons and two jets in proton-proton collisions at s√=13 TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP07(2017)121.)	JHEP 1707 (2017) 121 (arXiv:1703.03995 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	32
29	CMS Collaboration	<u>Measurement of the top quark mass using single top quark events in proton-proton collisions at s√=8 TeV</u> (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-4912-8.)	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.5, 354 (arXiv:1703.02530 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	34
30	CMS Collaboration	<u>Search for dark matter produced with an energetic jet or a hadronically decaying W or Z boson at s√=13 TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as	JHEP 1707 (2017) 014 (arXiv:1703.01651 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	48

		doi:10.1007/JHEP07(2017)014.)			
31	CMS Collaboration	<u>Search for standard model production of four top quarks in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.064.)	Phys.Lett. B772 (2017) 336-358 (arXiv:1702.06164 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	34
32	CMS Collaboration	<u>Measurement of prompt and nonprompt J/ψ production in pp and pPb collisions at $s\sqrt{NN}=\sqrt{=5.02}$ TeV</u> (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-4828-3.)	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 269 (arXiv:1702.01462 [nucl-ex])	Springer – Germany, Berlin	40
33	CMS Collaboration	<u>Search for associated production of a Z boson with a single top quark and for tZ flavour-changing interactions in pp collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP07(2017)003.)	JHEP 1707 (2017) 003 (arXiv:1702.01404 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	43
34	CMS Collaboration	<u>Measurement of the inclusive energy spectrum in the very forward direction in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP08(2017)046.)	JHEP 1708 (2017) 046 (arXiv:1701.08695 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	28
35	CMS Collaboration	<u>Search for single production of vector-like quarks decaying into a b quark and a</u>	Phys.Lett. B772 (2017) 634-656	Netherland, Elsevier	23

		<p><u>W boson in proton-proton collisions at $s\sqrt{=}$ 13 TeV</u></p> <p>(Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.07.022.)</p>	(arXiv:1701.08328 [hep-ex])		
36	CMS Collaboration	<p><u>Search for single production of vector-like quarks decaying to a Z boson and a top or a bottom quark in proton-proton collisions at $s\sqrt{=}$13 TeV</u></p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP05(2017)029.)</p>	<p>JHEP 1705 (2017) 029</p> <p>(arXiv:1701.07409 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	34
37	CMS Collaboration	<p><u>Search for new phenomena with multiple charged leptons in proton-proton collisions at $s\sqrt{=}$13 TeV</u></p> <p>(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5182-1.)</p>	<p>Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 635</p> <p>(arXiv:1701.06940 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	38
38	CMS Collaboration	<p><u>Search for dark matter and unparticles in events with a Z boson and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $s\sqrt{=}$13 TeV</u></p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP09(2017)106.)</p>	<p>JHEP 1703 (2017) 061</p> <p>(arXiv:1701.02042 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	42
39	CMS Collaboration	<p><u>Search for light bosons in decays of the 125 GeV Higgs boson in proton-proton collisions at $s\sqrt{=}$8 TeV</u></p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as</p>	<p>JHEP 1710 (2017) 076</p> <p>(arXiv:1701.02032 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	48

		doi:10.1007/JHEP10(2017)076.)			
40	CMS Collaboration	<u>Search for supersymmetry in the all-hadronic final state using top quark tagging in pp collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in Physical Review D as doi:10.1103/PhysRevD.96.012004.)	Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 0120 (Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 012004)	APS – America	32
41	CMS Collaboration	<u>Search for leptophobic Z' bosons decaying into four-lepton final states in proton-proton collisions at $s\sqrt{=8}$TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.08.069.)	Phys.Lett. B773 (2017) 563-584 (arXiv:1701.01345 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	22
42	CMS Collaboration	<u>Search for high-mass $Z\gamma$ resonances in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 8}$ and 13 TeV using jet substructure techniques</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.062.)	Phys.Lett. B772 (2017) 363-387 (arXiv:1612.09516 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	25
43	CMS Collaboration	<u>Search for a light pseudoscalar Higgs boson produced in association with bottom quarks in pp collision at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)010.)	JHEP11(2017)010 (arXiv:1707.07283 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	34
44	CMS Collaboration	<u>Search for heavy resonances that decay into a vector boson and a Higgs boson in hadronic final states at $s\sqrt{=13}$ TeV</u>	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 636 (arXiv:1707.01303 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	34

		(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5192-z)			
45	CMS Collaboration	<u>Search for electroweak production of charginos and neutralinos in WH events in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)029.)	JHEP 1711 (2017) 029 (arXiv:1706.09933 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	38
46	CMS Collaboration	<u>Search for a heavy composite Majorana neutrino in the final state with two leptons and two quarks at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.11.001.)	Phys.Lett. B775 (2017) 315-337 (: arXiv:1706.08578 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	23
47	CMS Collaboration	<u>Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector</u> (Published in the Journal of Instrumentation as doi:10.1088/1748-0221/12/10/P10003.)	JINST 12 (2017) no.10, P10003 (arXiv:1706.04965 [physics.ins-det])	(IOP)	82
48	CMS Collaboration	<u>Search for top squark pair production in pp collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV using single lepton events</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)019.)	JHEP 1710 (2017) 019 (arXiv:1706.04402 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	40
49	CMS Collaboration	<u>Searches for W' bosons decaying to a top quark and a bottom quark in proton-</u>	JHEP 1708 (2017) 029 (arXiv:1706.04260 [hep-	Springer – Germany, Berlin	38

		<u>proton collisions at 13 TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP08(2017)029.)	ex])		
50	CMS Collaboration	<u>Search for Low Mass Vector Resonances Decaying to Quark-Antiquark Pairs in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV</u> (Published in Physical Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.111802.)	Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.11, 111802 (arXiv:1705.10532 [hep-ex])	APS – America	18
51	CMS Collaboration	<u>Measurement of the triple-differential dijet cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$TeV and constraints on parton distribution functions</u> (Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5286-7.)	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.11, 746 (arXiv:1705.02628 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	42
52	CMS Collaboration	<u>Search for black holes in high-multiplicity final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV</u> (DOI: 10.1016/j.physletb.2017.09.053)	Phys.Lett. B774 (2017) 279-307 (arXiv:1705.01403 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	29
53	CMS Collaboration	<u>Search for new physics with dijet angular distributions in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP07(2017)013.)	JHEP 1707 (2017) 013 (arXiv:1703.09986 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	34
54	CMS	<u>Search for anomalous</u>	Phys.Lett. B772 (2017)	Netherland,	22

	Collaborati on	<u>couplings in boosted WW/WZ$\rightarrow\ell\nu q\bar{q}$ production in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 8 \text{ TeV}}$</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.009)	21-42 (arXiv:1703.06095 [hep-ex])	Elsevier	
55	CMS Collaborati on	<u>Search for associated production of dark matter with a Higgs boson decaying to b b-bar or gamma-gamma at sqrt(s) = 13 TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)180.)	JHEP 1710 (2017) 180 (arXiv:1703.05236 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	44
56	CMS Collaborati on	<u>Search for standard model production of four top quarks in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 13 \text{ TeV}}$</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.064.)	Phys.Lett. B772 (2017) 336-358 (arXiv:1702.06164 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	23
57	CMS Collaborati on	<u>Search for associated production of a Z boson with a single top quark and for tZ flavour-changing interactions in pp collisions at $s\sqrt{=8 \text{ TeV}}$</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP07(2017)003.)	JHEP 1707 (2017) 003 (arXiv:1702.01404 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	43
58	CMS Collaborati on	<u>Study of Jet Quenching with Z+jet Correlations in Pb-Pb and pp Collisions at $s\sqrt{NN}=5.02 \text{ TeV}$</u> (Published in Physical	Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.8, 082301 (arXiv:1702.01060 [nucl-ex])	APS – America	18

		Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.082301.)			
59	CMS Collaboration	<u>Measurement of the inclusive energy spectrum in the very forward direction in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP08(2017)046.)	JHEP 1708 (2017) 046 (arXiv:1701.08695 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	28
60	CMS Collaboration	<u>Search for single production of vector-like quarks decaying into a b quark and a W boson in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.07.022.)	Phys.Lett. B772 (2017) 634-656 (arXiv:1701.08328 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	23
61	CMS Collaboration	<u>Search for dark matter and unparticles in events with a Z boson and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP09(2017)106.)	JHEP 1703 (2017) 061 (arXiv:1701.02042 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	42
62	CMS Collaboration	<u>Search for light bosons in decays of the 125 GeV Higgs boson in proton-proton collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)076.)	JHEP 1710 (2017) 076 (arXiv:1701.02032 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	48
63	CMS Collaboration	<u>Mechanical stability of the CMS strip tracker measured</u>	JINST 12 (2017) no.04, P04023	(IOP	38

	on	<u>with a laser alignment system</u> (Published in the Journal of Instrumentation as doi:10.1088/1748-0221/12/04/P04023.)	(arXiv:1701.02022 [physics.ins-det])		
64	CMS Collaboration	<u>Search for leptophobic Z' bosons decaying into four-lepton final states in proton-proton collisions at $s\sqrt{=8\text{TeV}}$</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.08.069.)	Phys.Lett. B773 (2017) 563-584 (arXiv:1701.01345 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	22
65	CMS Collaboration	<u>Search for heavy gauge W' boson in events with an energetic lepton and large missing transverse momentum at $s\sqrt{= 13 \text{ TeV}}$</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.04.043.)	Phys.Lett. B770 (2017) 278-301 (arXiv:1612.09274 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	24
66	CMS Collaboration	<u>Search for massive resonances decaying into WW, WZ or ZZ bosons in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 13 \text{ TeV}}$</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP03(2017)162.)	JHEP 1703 (2017) 162 (arXiv:1612.09159 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	52
67	CMS Collaboration	<u>Measurement of vector boson scattering and constraints on anomalous quartic couplings from events with four leptons and two jets in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 13 \text{ TeV}}$</u> (Published in Physics Letters B as	Phys.Lett. B774 (2017) 682-705 (arXiv:1708.02812 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	24

		doi:10.1016/j.physletb.2017.10.020.)			
68	CMS Collaboration	<u>Measurement of the differential cross sections for the associated production of a W boson and jets in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in Physical Review D as doi:10.1103/PhysRevD.96.072005.)	Phys.Rev. D96 (2017) no.7, 072005 (arXiv:1707.05979 [hep-ex])	APS – America	25
69	CMS Collaboration	<u>Search for direct production of supersymmetric partners of the top quark in the all-jets final state in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)005.)	JHEP 1710 (2017) 005 (arXiv:1707.03316 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	58
70	CMS Collaboration	<u>Constraints on anomalous Higgs boson couplings using production and decay information in the four-lepton final state</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.10.021.)	Phys.Lett. B775 (2017) 1 (arXiv:1707.00541 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	34
71	CMS Collaboration	<u>Search for Higgs boson pair production in the $bb\tau\tau$ final state in proton-proton collisions at $(\sqrt{s})=8$ TeV</u> (Published in Physical Review D as doi:10.1103/PhysRevD.96.072004.)	Phys.Rev. D96 (2017) no.7, 072004 (arXiv:1707.00350 [hep-ex])	APS – America	25
72	CMS Collaboration	<u>Measurements of properties of the Higgs boson decaying</u>	JHEP 1711 (2017) 047	Springer – Germany, Berlin	55

	on	<u>into the four-lepton final state in pp collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)047.)	(arXiv:1706.09936 [hep-ex])		
73	CMS Collaborati on	<u>Measurement of the semileptonic $tt^- + \gamma$ production cross section in pp collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)006.)	JHEP 1710 (2017) 006 (arXiv:1706.08128 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	38
74	CMS Collaborati on	<u>Measurements of jet charge with dijet events in pp collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)131.)	JHEP 1710 (2017) 131 (arXiv:1706.05868 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	38
75	CMS Collaborati on	<u>Search for new physics in the monophoton final state in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP10(2017)073.)	JHEP 1710 (2017) 073 (arXiv:1706.03794 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	37
76	CMS Collaborati on	<u>Search for pair production of vector-like T and B quarks in single-lepton final states using boosted jet substructure in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u> (Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP11(2017)085.)	JHEP 1711 (2017) 085 (arXiv:1706.03408 [hep-ex])	Springer – Germany, Berlin	46

77	CMS Collaboration	<u>Combination of searches for heavy resonances decaying to WW, WZ, ZZ, WH, and ZH boson pairs in proton–proton collisions at $s\sqrt{=8}$ and 13 TeV</u> (DOI: 10.1016/j.physletb.2017.09.083)	Phys.Lett. B774 (2017) 533-558 (arXiv:1705.09171 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	26
78	CMS Collaboration	<u>Measurement of the cross section for electroweak production of $Z\gamma$ in association with two jets and constraints on anomalous quartic gauge couplings in proton–proton collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.04.071.)	Phys.Lett. B770 (2017) 380-402 (arXiv:1702.03025 [hep-ex])	Netherland, Elsevier	23
79	CMS Collaboration	<u>Study of Jet Quenching with Z+jet Correlations in Pb-Pb and pp Collisions at $s\sqrt{NN=5.02}$ TeV</u> (Published in Physical Review Letters as doi:10.1103/PhysRevLett.119.082301.)	Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.8, 082301 (arXiv:1702.01060 [nucl-ex])	APS – America	18
80	CMS Collaboration	<u>Measurements of the charm jet cross section and nuclear modification factor in pPb collisions at $s\sqrt{NN=5.02}$ TeV</u> (Published in Physics Letters B as doi:10.1016/j.physletb.2017.06.053.)	Phys.Lett. B772 (2017) 306-329 (arXiv:1612.08972 [nucl-ex])	Netherland, Elsevier	24
81	CMS Collaboration	<u>Search for heavy neutrinos or third-generation leptoquarks</u>	JHEP 1703 (2017) 077	Springer – Germany, Berlin	34

	on	<p><u>in final states with two hadronically decaying τ leptons and two jets in proton-proton collisions at $s\sqrt{=13}$ TeV</u></p> <p>(Published in the Journal of High Energy Physics as doi:10.1007/JHEP03(2017)077.)</p>	(arXiv:1612.01190 [hep-ex])		
82	CMS Collaboration	<p><u>Measurements of the associated production of a Z boson and b jets in pp collisions at $s\sqrt{=8}$TeV</u></p> <p>(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5140-y.)</p>	<p>Eur.Phys.J. C77 (2017) no.11, 751</p> <p>(arXiv:1611.06507 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	48
83	CMS Collaboration	<p><u>Search for physics beyond the standard model in events with two leptons of same sign, missing transverse momentum, and jets in proton–proton collisions at $s\sqrt{=13}$TeV</u></p> <p>(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-5079-z.)</p>	<p>Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 578</p> <p>(arXiv:1704.07323 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	42
84	CMS Collaboration	<p><u>Measurement of the top quark mass using single top quark events in proton-proton collisions at $s\sqrt{=8}$ TeV</u></p> <p>(Published in the European Physical Journal C as doi:10.1140/epjc/s10052-017-4912-8.)</p>	<p>Eur.Phys.J. C77 (2017) no.5, 354</p> <p>(arXiv:1703.02530 [hep-ex])</p>	Springer – Germany, Berlin	36