

ივ. ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი



**LYSO მოდულები JEDI პოლარიმეტრისათვის: დამზადება,
ლაბორატორიული ტესტები და გაზომვების პირველადი
შედეგები**

დ. შერგელაშვილი, დ. მჭედლიშვილი, ფ. მიულერი, ი. ქეშელაშვილი,
ო. ჯავახიშვილი, მ. ტაბიძე, ნ. ლომიძე, ა. კაჭარავა

დოქტორანტის სამეცნიერო-კვლევითი პროექტი I

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერია

ხელმძღვანელი: დავით მჭედლიშვილი, ირაკლი ქეშელაშვილი

თბილისი, 0179

2019

შინაარსი

1.1 JEDI კოლაბორაცია.....	01
1.2 COSY ამაჩქარებელი.....	01
1.3 ელექტრული დიპოლური მომენტი.....	02
2.1 JEDI პოლარიმეტრის ზოგადი მიმოხილვა.....	05
2.2 LYSO მოდული.....	06
2.3 LYSO მოდულის ლაბორატორიული შემოწმება.....	12
2.4 კვების წყარო JEDI კალორიმეტრისათვის.....	15
2.5 ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი.....	16
3.1 მოდულების დროითი გარჩევისუნარიანობის შესწავლა.....	18

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1: Sant-Gobain-ის წარმოების LYSO კრისტალის პარამეტრები.....	07
--	----

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1: COSY ამაჩქარებელის სქემა, ციკლოტრონი, დამაგროვებელი რგოლი და ექსპერიმენტები.....	02
ნახ. 2: JEDI კალორიმეტრის გრაფიკული ნახაზი.....	05
ნახ. 3: LYSO მოდულის 3 განზომილებიანი ნახაზი.....	06

გრაფიკების ნუსხა

გრაფ. 1: მოდულის ლაბორატორიული შემოწმების შედეგები: ^{60}Co (a) და ^{22}Na (b).....	13
გრაფ. 2: LYSO მოდულის წრფიობა დაბალ ენერგიებზე.....	14
გრაფ. 3: SiPM-ის გაძლიერების კოეფიციენტის ძაბვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.....	15
გრაფ. 4: ბინარული მონაცემების CFD-ით დამუშავების შედეგები.....	19
გრაფ. 5: 270 MeV კინეტიკური ენერგიის დეიტრონის ფრენის დრო 1 მეტრზე.....	21
გრაფ. 6: სიგნალის დაყოვნება 1 მეტრის სადენში, CFD ანალიზით.....	22

სურათების ნუსხა

სურ. 1: LYSO მოდულის კომპონენტები აწყობამდე.....	08
სურ. 2: SiPM-ის დაფა (a) და შუალედური დაფა (b).....	09
სურ. 3: სილიკონის შუასადები და LYSO კრისტალი.....	10
სურ. 4: LYSO მოდულის დასრულებული სახე.....	11
სურ. 5: Red Pitaya (a) და Raspberry Pi (b).....	12
სურ. 6: STRUCK INOVATION SYSTEM-ის ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი	16

თავი I

1.1 JEDI კოლაბორაცია

JEDI (Jülich Electric Dipole Moment Investigations) კოლაბორაცია შეიქმნა 2011 წლის დასასრულს [1]. ეს კოლაბორაცია ახორციელებს გრძელვადიან პროექტს, რომლის ფარგლებშიც იგეგმება დამუხტული ნაწილაკების ელექტრული დიპოლური მომენტის (ედმ) გაზომვა დამაგროვებელი რგოლის (storage ring) გამოყენებით.

ედმ აღიძვრება იმ შემთხვევაში, თუ დადებითი და უარყოფითი მუხტების სიმძიმის ცენტრები სივრცეში ერთიმეორისაგან წაძრულია. მაგალითად, პროტონისათვის სტანდარტული მოდელის ფარგლებში ედმ-ის შეფასების ზედა ზღვარი შეადგენს 10^{-31} e-cm. მეორეს მხრივ, ედმ-ის არსებობა აუცილებლად იწვევს სამყაროში CP-სიმეტრიის დარღვევას. ეს კი შეიძლება იყოს ძირითადი "გასაღები" იმ აქტუალური პრობლემის გადაწყვეტაში, რომელსაც ქმნის დღევანდელ სამყაროში მატერია-ანტიმატერიის უზარმაზარი ასიმეტრიის (10000000000:1) არსებობა. პროტონის ედმ-ის დღეისათვის არსებული ექსპერიმენტული გაზომვების ქვედა ზღვარი შეადგენს 10^{-21} e-cm, რაც მრავალი რიგით ნაკლებია სტანდარტული მოდელის შეფასებაზე. ამიტომ, საჭიროა ექსპერიმენტების მგრძნობიარობის გაზრდა და ედმ-ის ზედა ზღვარის შემცირება, რამაც შესაძლოა საბოლოოდ გაგვიყვანოს სტანდარტულ მოდელს მიღმა არსებულ ფიზიკაში.

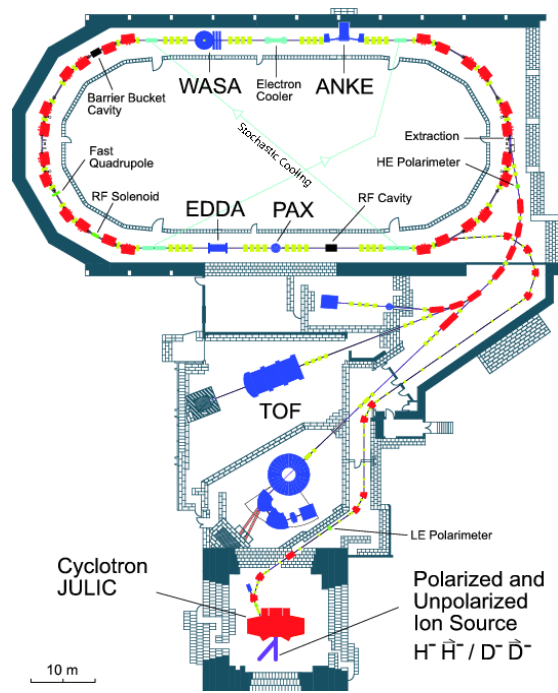
JEDI კოლაბორაციის მკვლევართა საერთაშორისო ჯგუფის ძირითად მიზანს წარმოადგენს პროტონისა და დეიტრონისათვის ისეთი ტექნოლოგიებისა და ექსპერიმენტული მეთოდების შემუშავება, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ რამოდენიმე რიგით გავაუმჯობესოთ ედმ-ის გაზომვის მგრძნობიარობა დღემდე ჩატარებულ ექსპერიმენტებთან შედარებით. უშუალო სიახლეს კი ამ მიმართულებით წამოადგენს დამაგროვებელი რგოლის გამოყენება, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მგრძნობიარობა გავზარდოთ ედმ-ის ეფექტის დროში "დაგროვებით". თუმცა, დამაგროვებელი რგოლი თავისთავად ქმნის უამრავ პრობლემას სისტემატიური ცდომილების წყაროების სახით, რამაც ასევე შეიძლება მცდარი სიგნალის ინიცირება გამოიწვიოს. ამიტომ, ამ წყაროების მინიმიზაცია და აღმოფხვრაა საჭირო, ხოლო ძირითადი გაზომვის პრინციპის ეფექტურობის - მაქსიმალურად გაზრდა.

1.2 COSY ამაჩქარებელი

COSY არის აბრევიაცია “COoler SYnchrotron” (ცივი ამაჩქარებელი). იგი არის საშუალო ენერგიების ამაჩქარებელი, აღჭურვილი როგორც ელექტონული, ასევე სტოქასტური გამაცივებით (ამცირებს ნაწილაკების გადახრას მათთვის განსაზღვრული ორბიტიდან). COSY წარმოადგენს ციკლოტრონისა და 184 მ დამაგროვებელი რგოლის (synchrotron) ერთობლიობას (ნახ. 1). იონების წყაროს შეუძლია აწარმოოს პოლარიზებული და არაპოლარიზებული ან პროტონები ან დეიტრონები. ციკლოტრონს მათი აჩქარება შეუძლია შესაბამისად 300 MeV/c და 540 MeV/c იმპულსამდე. ციკლოტრონიდან ნაწილაკების გადასროლა და შეყვანა ხდება სწორედ დამაგროვებელ რგოლში, სადაც შესაძლებელია მათი სასურველ ენერგიებამდე აჩქარება (იმპულსით დიაპაზონში 0.3 GeV/c – 3.7 GeV/c), დაგროვება და მათზე მანიპულირება. თითოეული გადასროლისას შეყვანილი შეიძლება იქნას 10^{10} პოლარიზებული და 10^{11} არაპოლარიზებული ნაწილაკი [2].

აღნიშნულ რგოლში დაგროვებული პროტონებით და დეიტრონებით შესაძლებელია მომარაგდეს როგორც შიდა ექსპერიმენტები, ასევე მოხდეს მათი გამოყვანა გარე ექსპერიმენტების შესასრულებლად. COSY-ზე წარმოდგენილია ექსპერიმენტების დამაგროვებელ რგოლზე (ANKE, PAX, WASA, EDDA) და მის გარეთ (TOF), რომლებიც ტარდებოდა საერთაშორისო კოლაბორაციის ფარგლებში [3].

COSY-ის მართვა წარმოებს ბირთვული ფიზიკის ინსტიტუტის (IKP) მიერ, რომელიც მდებარეობს ქალაქ იულიხში. აღნიშნული ინსტიტუტი ასრულებს ფუნდამენტურ კვლევებს ადრონულ, ნაწილაკებისა და ბირთვული ფიზიკის მიმართულებით. ამჟამად, ინსტიტუტი მუშაობს საერთაშორისო JEDI კოლაბორაციის ფარგლებში და მიზანად ისახავს COSY-ის მოდიფიცირებას, რათა შემდგომში ის გამოიყენოს პროტონის ან დეიტრონის ედმ-ის გასაზომად.



ნახ. 1: COSY ამაჩქარებელის სქემა, ციკლოტრონი, დამაგროვებელი რგოლი და ექსპერიმენტები [2]

1.3 ელექტრული დიპოლური მომენტი

დღესდღეობით, ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკისა და კოსმოლოგიის გადაუჭრელ პრობლემას წარმოადგენს უპასუხოდ დარჩენილი ფაქტი, თუ რამ გამოიწვია ჩვენს სამყაროში აღმოჩენილი მატერია-ანტიმატერიის ასიმეტრია. დიდი აფეთქების თეორიის მიხედვით, CP დარღვევა იკვეთება გაცილებით დიდი ხარისხით ვიდრე მას ფიზიკის სტანდარტული მოდელი გვთავაზობს. შესაბამისად ჩნდება მოთხოვნა „ახალი ფიზიკისა“, სადაც CP დარღვევას ენიჭება გასაღების როლი ადრეული სამყაროს შეცნობაში.

ლაბორატორიულ პირობებში CP დარღვევის წარმოჩენაში გადამწყვეტ როლს თამაშობს ელექტრული დიპოლური მომენტი (ედმ). ელემენტარული ნაწილაკების პერმანენტული ედმ არღვევს როგორც P სიმეტრიას, ასევე დროის შექცევის მიმართ სიმეტრიას (T) და აქედან გამომდინარე CP სიმეტრიას. სტანდარტული მოდელის მიერ პროგნოზირებული ედმ არის მნიშვნელოვნად მცირე ვიდრე თანამედროვე ექსპერიმენტების მგძნობელობაა (არსებული სხვადასხვა მამტაბური ექსპერიმენტებისათვის დამახასიათებელია მაღალი ენერგიებზე მანიპულირება და არა პრეცეზიული ექსპერიმენტები).

ნაწილაკის ედმ-ის ვექტორის მიმართულება ემთხვევა სპინის მიმართულებას, რადგან სხვა გამოყოფილი მიმართულება არ არსებობს. ცნობილია, რომ ედმ იწვევს სპინის დამატებით პრეცესიას ელექტრულ ველთან ურთიერთქმედებისას [4]. სწორედ სპინის პრეცესიის დროში ზუსტ დაკვირვებაზეა დაფუძნებული ედმ-ის გაზომვის ტექნიკა დამაგროვებელი რგოლების ბაზაზე.

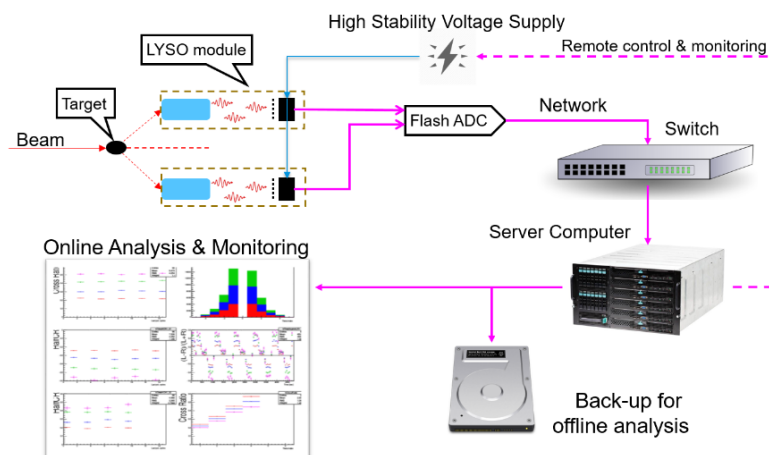
სწორედ, დამაგროვებელი რგოლის ედმ ექსპერიმენტზე ადაპტირების მიზნით შეიქმნა JEDI კოლაბორაცია. მათ აქვთ შესაძლებლობა გამოიყენონ COSY-ზე არსებული ტექნიკური ბაზა და შესაძლებლობები, ჩაატარონ საცდელი ექსპერიმენტები, აღჭურვონ უახლესი და გაუმჯობესებული ტექნიკით რათა მომაზადონ იგი დაგეგმილი ექსპერიმენტისათვის. ამდროისათვის, კოლაბორაციის წევრებმა უკვე გადადგეს მნიშვნელოვანი ნაბიჯები ექსპერიმენტული დიზაინის დამუშავებაში, რათა შეისწავლონ პროტონის ედმ. თუმცა, ამის მიუხედავად კიდევ აქტუალურ საკითხად რჩება სხვადასხვა სამუშაოების ჩატარება, როგორებიცაა: ამაჩქარებლის გაუმჯობესება (ნაკადის ელექტროსტატიკური გადამხრელის დამუშავება, ნაკადის მართვაზე ორიენტირებული მოწყობილობების გამართვა, უკუკავშირის სისტემები გაუმჯობესება), ნაკადის სიმულაცია (ორბიტის განსაზღვრა, სპინის მოძრაობის აღწერა) და სხვ. ერთ-ერთ რთული გამოწვევა ამაჩქარებლის რეკონსტრუქციის პროცესში არის მისი აღჭურვა უახლესი ტექნოლოგიების გამოყენებით შექმნილი პოლარიმეტრით. სიზუსტეზე ორიენტირებული ექსპერიმენტი თავისი კომპლექსურობიდან გამომდინარე მკვარ მოთხოვნებს უყენებს ახალ პოლარიმეტრს, რომლის კონსტრუქციასა და რეალიზებაზე კოლაბორაციის ქართული ჯგუფი მუშაობს.

თავი II

2.1 JEDI პოლარიმეტრის ზოგადი მიმოხილვა

JEDI კოლაბორაციის მიერ მიზნად დასახული ექსპერიმენტის სპეციფიკის გათვალისწინებით საჭიროა ახალი პოლარიმეტრის დაპროექტება და აწყობა. ამოცანის კომპლექსურობიდან გამომდინარე საჭიროა პოლარიმეტრის, როგორც კალორიმეტრის ნაწილის დაპროექტება, ასევე სამიზნის (target) კონსტრუირება და მისი რეალიზება ამაჩქარებელზე. ნაშრომში ძრითადად განხილულია კალორიმეტრის ნაწილი: დეტექტორის აწყობა, ლაბორატორიული ტესტები და შედეგები. პოლარიმეტრის სამიზნე კი ამჟამად პროექტირების ეტაპზეა, მასზე ქართველი და უცხოელი კოლაბორაციის წევრები ერთობლივად მუშაობენ [5].

ახალ კალორიმეტრში გადამწყვეტ როლს თამაშობს LYSO (Lutetium-yttrium oxy orthosilicate) კრისტალი, სცინტილატორი [6]. მას სხვა სცინტილატორებისაგან გამოარჩევს მაღალი სიმკვრივე, მაღალი სინათლის გამოსავალი, სინათლის მიღების მოკლე დრო. 6 სმ სიგრძის LYSO კრისტალს თავისფულად შეუძლია 300 MeV კინეტიკური ენერჯის მქონე დეიტრონის დამუხრუჭება. კალორიმეტრის ფოტომგრძნობიარე ელემენტს SiPM-ს (Silicon photomultipliers) წარმოადგენს [7]. კალორიმეტრის განუყოფელ ნაწილს წარმოადგენს პერიფერიული მოწყობილობებიც, სპეციალიზირებული კვების ბლოკები, ანალოგურ-ციფრული გარდამქნელები და მონაცემთა შეგროვების სიტემები, გრაფიკულად იგი ასე გამოიყურება:

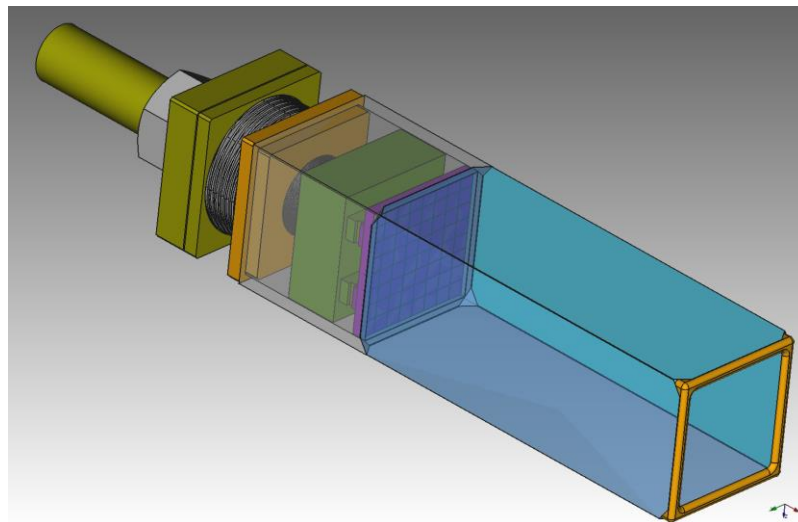


ნახ. 2: JEDI კალორიმეტრის გრაფიკული ნახაზი

როგორც ნახ. 2-ზე არის წარმოდგენილი, კალორიმეტრი შემადგენლობაში შედის LYSO მოდულები, მოდულის კვების ბლოკი, ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (Flash ADC), ქსელის მოწყობილობები და სერვერული კომპიუტერები მასთან დავაშირებული მომხმარებლის ინტერფეისით. შემდეგ თავებში დეტალურად არის განხილული კალორიმეტრის შემადგენელი დეტალები. მათი ფუნქციები და შესაძლებლობები.

2.2 LYSO მოდული

LYSO მოდული არის კალორიმეტრის მთავარი მგრძობიარე ელემენტი. იგი შედგება ლუტეციუმ-იტრიუმ ოქსიორთოსილიკატისაგან, რომელიც არის სცინტილირებადი კრისტალი და ფოტო-მგრძობიარე SiPM-საგან. მოდულის კონსტრუქციაში გამოყენებულია: ალუმინის დეტალები, ზამბარები შესაფუთი მასალები და 3D პრინტერზე დამზადებული დეტალები, რომლებიც უზრუნველყოფენ შემადგენელი კომპონენტების სწორ ურთიერთგანლაგებას და ქმნიან მოდულის მთლიანობას. რეალური მოდულის დამზადებამდე, შეიქმნა 3 განზომილებიანი ტექნიკური ნახაზი:



ნახ. 3: LYSO მოდულის 3 განზომილებიანი ნახაზი

ნახ. 3-ზე ჩანს მოდულის ინდივიდუალური შემადგენელი დეტალები: წინა მხარეს მოთავსებულია კრისტალი, მასზე კი მიბრჭენილია SiPM, რომელიც თავისთავად მოთავსებულია ალუმინის კორპუსში. ალუმინის კორპუსშივეა

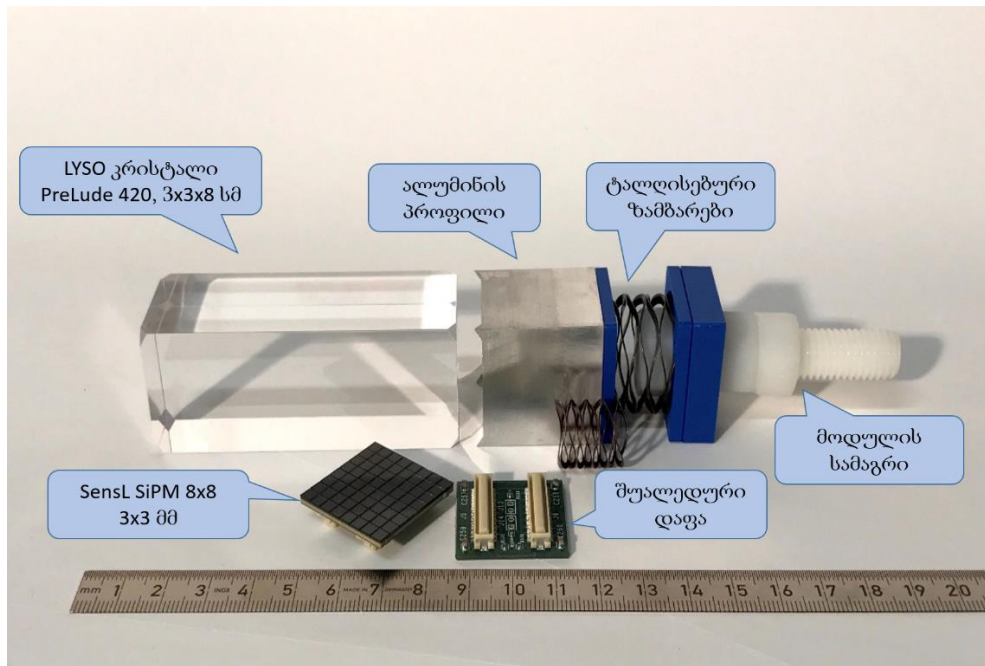
მოთავსებული ელექტრო დაფა, რომელიც წარმოადგენს LEMO სადენებისა და SiPM-ს დამაკავშირებელ დაფას. უკანა ხუფი, გამბრჯენები დამზადებულია 3D პრინტერის გამოყენებით. მოდულის ბოლო ნაწილში ჩამონტაჟებულია 2 ზამბარა, რომელიც შესაფუთ მასალებთან ერთად უზრუნველყოფს მოდულის დეტალების მჭიდრო ურთიერთგანლაგებას.

JEDI კალორიმეტრის კრისტალი არის კომპანია Sant-Gobain Crystals-ის მიერ წარმოებული [8]. LYSO კრისტალის მახასიათებლები მოცემულია ცხრილში:

<i>სიმკვრივე [გ/სმ³]</i>	7.1
<i>შემაკვეებელი სიგრძე @511 KeV [სმ]</i>	1.2
<i>ენერგიის გარჩევისუნარიანობა @662 KeV [%]</i>	8
<i>გამოსხივებული სინათლის ტალღის სიგრძე [ნმ]</i>	420
<i>მილევის დრო [ნ წმ]</i>	36
<i>სინათლის გამოსავალი [ფოტონი/MeV]</i>	33200
<i>ტემპერატურული კოეფიციენტი @ (25-50) [%/°C]</i>	-0.28

ცხრილი 1: Sant-Gobain-ის წარმოების LYSO კრისტალის პარამეტრები

პოლარიმეტრის ჯგუფის მიერ შემუშავებული მოდულის კრისტალის სიგრძე არის 80 მმ, ხოლო განივკვეთი - 30x30 მმ. კრისტალის წიბოები წაკვეთილია 45°-იანი კუთხით, რაც შემდგომში გამოყენებულია მოდულის კომპონენტების ერთმანეთთან უკეთესი ფიქსაციის მიზნით (სურ. 1). ცხრილ 1-ში წარმოდგენილი მახასიათებლების გათვალისწინებით 270 MeV კინეტიკური ენერგიის მქონე ნაწილაკის ბრეგის პიკი მდებარეობს დაახლოებით 6 სმ სიღრმეზე. თუ მხედველობაში მივიღებთ იმ ფაქტს, რომ კრისტალს ხანგძლივი, მაღალენერგეტიკული ნაწილაკებით დაბომბვის შემდეგ სინათლის გამოსავლიანობა უქვეითდება, საჭიროა მისი ცვლილება. მაგრამ, რადგან ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულია 8 სმ-იანი კრისტალი, მისი ამობრუნებით შესაძლებელია ბრეგის პიკის კრისტალის მეორე ბოლოში გადანაცვლება, რაც გააორმაგებს მის სიციცხლის ხანგრძლივობას. სწორედ ამ მიზნით არის დამზადებული შედარებით გრძელი კრისტალი. გარდა სიციცხლიუნარიანობის გაზრდისა, 8 სმ-იანი კრისტალი თავის მხრივ იცავს მასზე მიბრჯენილ SiPM-ს გამჭოლი ნაკადის პირადპირი ზემოქმედებისაგან.

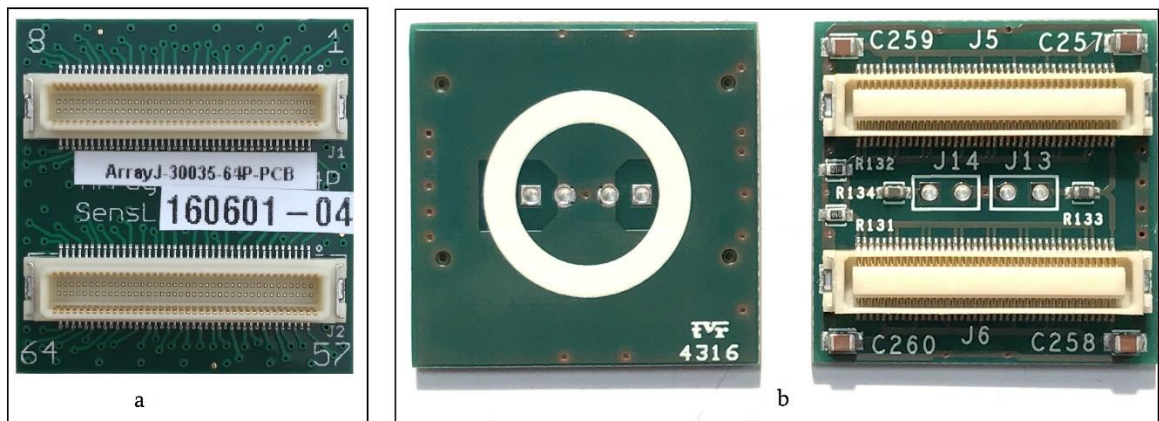


სურ. 1: LYSO მოდულის კომპონენტები აწყობამდე

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, კრისტალის მიერ სცინტილირებული სინათლის აღრიცხვა SiPM-ის მეშვეობით ხორციელდება. SiPM არის ნახევარგამტარული, ფოტო მგრძობიარე ელემენტი, რომელსაც შეუძლია მოახდინოს ინდივიდუალური ფოტონის დაფიქსირებაც კი. იგი დაფუძნებულია SPAD (Single-Photon Avalanche Diode) ტექნოლოგიაზე [9]. ასეთი მგრძობიარე ელემენტის თითოეული პიქსელის ზომა ვარირებს ათეული მიკრომეტრის ფარგლებში. JEDI კალორიმეტრის მოდულში გამოყენებულია SensL-ის წარმოების, J-სერიის ჩიპები [10]. თითოეული ჩიპი შედგება 20 მკმ-იანი 14000 ცალი პიქსელისაგან. ასეთი 64 ჩიპი (8x8) კი ქმნის ერთი LYSO მოდულისათვის საჭირო SiPM-დაფას, რომლის ზომებია 3x3 სმ. დაფაზე ჯამში თითქმის 900 000 პიქსელია მოთავსებული (სურ. 1). პიქსელები თითქმის სრულად ფარავენ LYSO კრისტალის ფუძე წახნაგს (3x3 სმ). სტანდარტული ფოტოგამამრვალებისაგან განსხვავებით SiPM-ი არ საჭიროებს მაღალს ძაბვას (კილოვოლტების რიგის), ჩვენს შემთხვევაში SensL-ის ჩიპები იკვებება 25.2-30.7 ვოლტის დიაპაზონში. დაბალი კვების ძაბვა მოხერხებულია მისი დიზაინის დამუშავებასა და საბოლოო ექსპლუატაციისათვის. SiPM-ს აქვს ფართო სპექტრული

დიაპაზონი 200-900 ნმ, ხოლო პიკი მდებარეობს 420 ნმ-ზე, რაც იდეალურ თანხვედრაშია LYSO კრისტალის ტექნიკურ მონაცემებთან.

J სერიის დაფებზე დამონტაჟებულია Hirose-ის წარმოების 80 გამომყვანიაანი, 2 ცალი ბუდე PN: DF17(2.0)-80DP-0.5v(57). ამ ბუდის საშუალებით უერთდება SiPM-ის მოდული შუალედურ დაფას, რომელზეც მოთავსებულია ელექტრო კომპონენტები და შეერთებულია სიგნალის გამომყვანი სადენი. მეორე ბუდე, რომელიც გამოიყენება დაფების ერთმანეთთან დასაკავშირებლად, არის DF17(2.0)-80DS-0.5v(57). SiPM-ის მუშა რეჟიმში მოსაყვანად საჭიროა მისთვის კვების მიწოდება და შემდგომ ანალოგური სიგნალის მოხსნა. შესაბამისად საკმარისია მხოლოდ 2 ცალი ეკრანირებული სადენის გამოყენება. ჩვენს შემთხვევაში, SiPM-ის კვების ბლოკთან და ანალოგურ ციფრულ გარდამქნელთან დასაკავშირებლად გამოყენებულია 50 ომიანი RG174 სადენები, რომელიც ბოლოვდება LEMO ბუდეებით. შუალედურ დაფაზე მოთავსებულია 4 ცალი SMD, კერამიკული ბუფერული კონდესატორი, თითო 10 მკვ. ამავე დაფაზეა რეზისტორები, რომლებზეც მოდის SiPM-ის გარღვევის შედეგად წარმოქნილი ძაბვის ვარდნა (სურ. 2).



სურ. 2: SiPM-ის დაფა (a) და შუალედური დაფა (b)

მოდულის კონსტრუქციის ნაწილია ალუმინის პროფილი, რომლის შიგნით თავსდება SiPM და შუალედური დაფა (სურ.1). პროფილის წიბოები ისე დამუშავებული, რომ მჭიდროდ დაუკავშირდეს კრისტალს. თავდაპირველი ალუმინის პროფილი ვერცხლისფერი იყო და აწყობის დროს შავად იფერებოდა. შემდეგ იტერაციაში კი გამოყენებულია შავი ფერის ალუმინის პროფილი. კრისტალი და SiPM ერთმანეთზე მიბრჯენილია, თუმცა მათ შორის მოთავსებულია სილიკონის

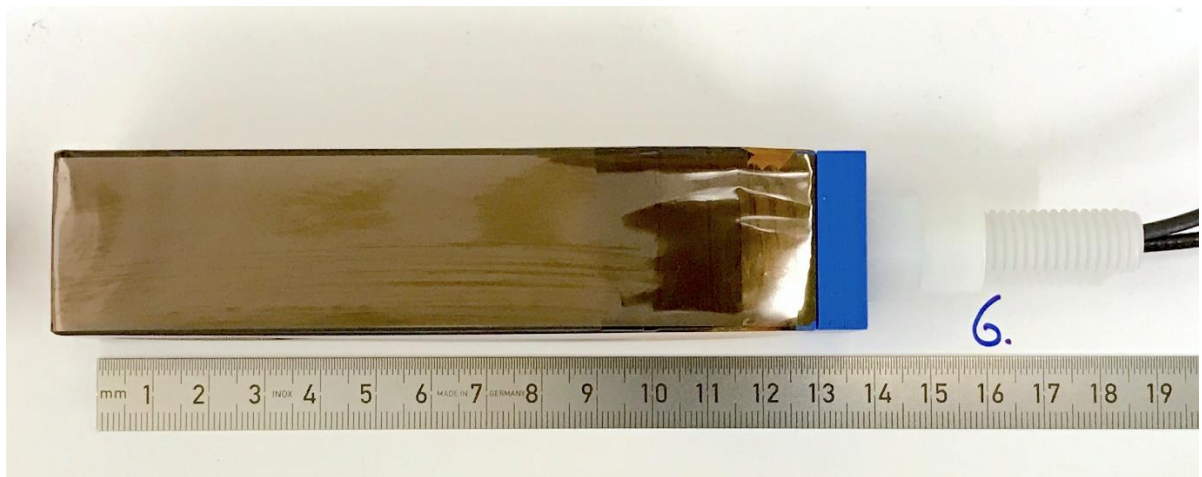
1 მმ ფენა (სურ. 3). სილიკონს აქვს რამდენიმე დანიშნულება. პირველ რიგში, იგი იცავს ნახევარგამტარის შუშის თხელ ფენას, კრისტალის მექანიკური ზემოქმედებისაგან. ამავდროულად, სილიკონის შრე, როგორც ოპტიკური ნაწილი, ამცირებს სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელს კრისტალიდან SiPM-მდე (მის გარეშე მეტად მკვირივი გარემოდან, კრისტალიდან, სინათლე დეტექტოზე მოხვდებოდა ჰაერის გავლით). რადგან LYSO კრისტალს აქვს საკუთარი შიდა გამოსხივება, სილიკონის შუასადების გარეშე SiPM-ადმოჩნდებოდა შედარებით დიდი დასხივების ფონის ქვეშ.



სურ. 3: სილიკონის შუასადები და LYSO კრისტალი

LYSO მოდულის გამართულად ფუნქციონირებისათვის საჭიროა მისი ფოტომგრძობიარე დეტალების გარე სინათლისაგან იზოლირება. ამავდროულად, საიზოლაციო მასალები უნდა იყოს მინიმალური სისქის რათა შევამციროთ ენერჯის დანაკარგი და არ გავზარდოთ მოდულის ზომები. ამ და სხვა ფაქტორების გათვალისწინებით მოდულის შესაფუთად გამოყენებულია 3 სხვადასხვა ტიპის ფოლგა. მოდულის აწყობის პროცესში პირველი ფენა არის ტეფლონი, 50 მკმ სისქის. თეთრი ტეფლონი ეხვევა კრისტალს გარშემო, რათა შეამციროს სცინტილირებული სინათლის დანაკარგი. მისი საშუალებით ხდება იმ ფოტონების გაბნევა, რომელიც არ არის მიმართული SiPM-ისაკენ. ამრეკლის როლში სატესტოდ გამოყენებული იყო სხვადასხვა მასალა: ტეფლონი, მაილარი (როგორც დანაოჭებული ასევე გლუვი) და ტიუვეკი. ექსპერიმენტულ შედეგებზე დაყრდნობით, საბოლოოდ შეირჩა ტეფლონის ფოლგა. ტეფლონის ფენას გარედან ეკვრის 50 მკმ-იანი ტედლარის (შავი) ფოლგა.

სწორედ ტედლარი ასრულებს ბარიერის როლს გარე სინათლისათვის. ტედლარის კიდეების და გადაბმის წერტილების დასაფარად გამოყენებულია 3M-ის წარმოების წებოვანი საიზოლაციო ლენტი. მოდულის შემადგენელი ელემენტების ერთმანეთთან ფიქსაციას უზრუნველყოფს კაპტონის 25 მკმ სისქის, ლენტისებურად დაჭრილი 2 ცალი ფოლგა. ზამბარის დახმარებით იგი ერთმანეთთან მყარად აფიქსირებს მოდულის პლასტიკურ სამაგრს, უკანა ხუფს, ალუმინის პროფილსა და კრისტალს. SiPM-ისა და კრისტალის ურთიერთკავშირი კი მეორე, შედარებით სუსტი ზამბარით ხორციელდება. მოდულის ასეთი შეფუთვა იმდენად მინიმალურად ზრდის კრისტალის გარე ზომებს რომ მისი უგულველყოფაც კი შეგვიძლია. კრისტალის წინა მხარე საიდანაც მოსალოდნელია ნაწილაკების შეჯახება საბოლოო ჯამში ქმნის დამაბრკოლებლის 250 მკმ-იან შრეს (2x50 მკმ ტეფლონი, 2x50 მკმ ტედლარი და 2x25 მკმ კაპტონი), რაც არავითარ პრობლემას არ წარმოადგენს MeV დიაპაზონში მოდულის ფუნქციონირებისას.



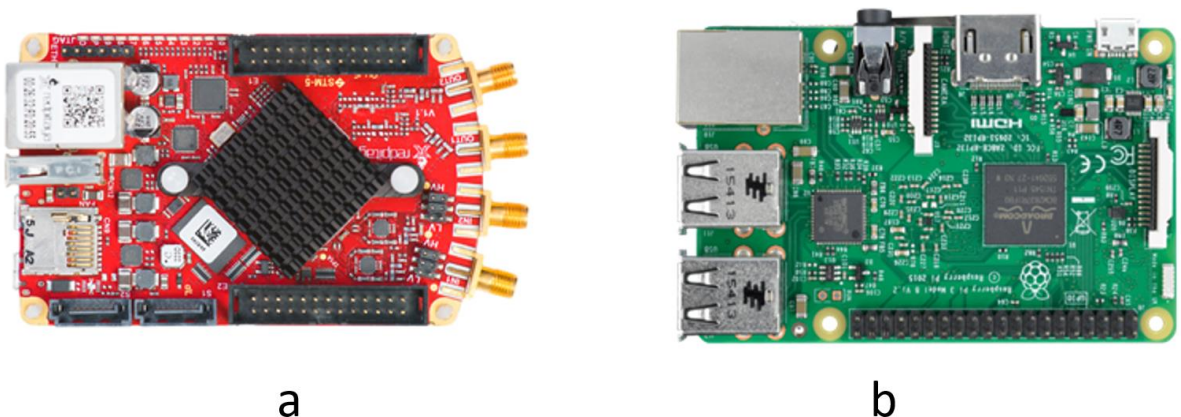
სურ. 4: LYSO მოდულის დასრულებული სახე

დასრულებული მოდულის სახე მოცემულია სურათ 4-ზე. მოდულის სიგრძე სამაგრის გარეშე 14 სმ-ია. განივკვეთი 3x3 სმ. დიაზაინი ისეა შექმნილი რომ შესაძლებელია დეტექტორის მოდულების მიბრჯენით აწყობა. თითოული მოდულიდან გამოყვანილია 2 ცალი კოაქსიალური სადენი: ერთი კვებისათვის (25-31 ვ) და მეორე სიგნალისათვის. სადენის დაბოლოებებზე დამაგრებულია განსხვავებული LEMO ბუდეები, რათა თავიდან იქნეს არიდებული შეცდომით მისი შეერთება. მოდულებს აწყობის შემდეგ უტარდებოდა ლაბორატორიული

ინჰექტირება, სადაც მოწმდებოდა ელექტრული კომპონენტები (შუალედური დაფა, SiPM), გარე სინათლისაგან იზოლაცია და სხვ. ინსპექტირების დეტალები წამოდგენილია 2.3 თავში.

2.3 LYSO მოდულის ლაბორატორიული შემოწმება

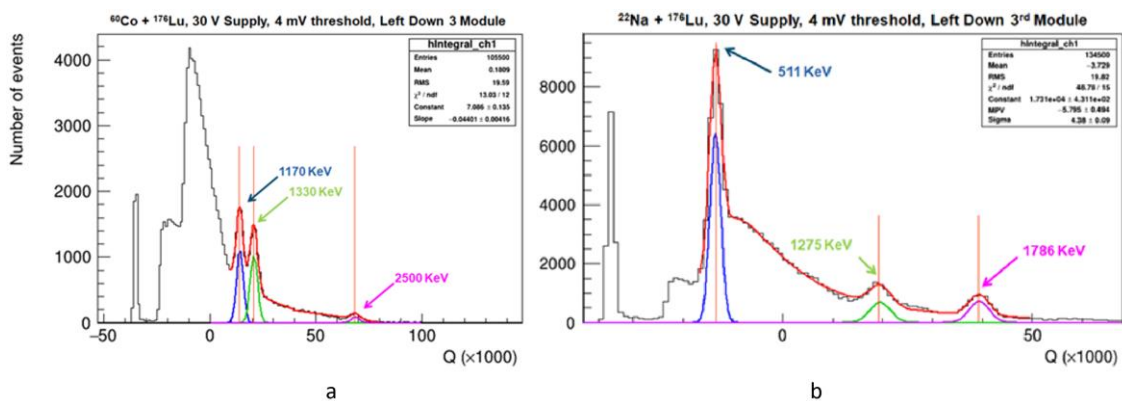
მას შემდეგ, რაც მოხდება ახალი მოდულის აწყობა და შეფუთვა, აუცილებელია მასი ლაბორატორიულ პირობებში შემოწმება, მანამდე, სანამ ექსპერიმენტზე დამონტაჟდება. მოდულის შემოწმებისათვის სპეციალურად შეიქმნა მცირე ზომის DAQ (Data Acquisition) სისტემა. სისტემის მთავრი შემადგენელი ნაწილები არის ლინუქსის ოპერაციულ სისტემაზე დაფუძნებული მიკრო კომპიუტერი - “Raspberry Pi” და StemLab-ის მიერ ღია პლატფორმაზე შექმნილი უნივერსალური ლაბორატორიული ინსტრუმენტი - “Red Pitaya” [11, 12]. ეს ორი მოწყობილობა ერთმანეთს ქსელის საშუალებით უკავშირდება და სოკეტების გამოყენებით ახდენს ინფორმაციის გაცვლას. კერძოდ, Red Pitaya პასუხისმგებელია მონაცემების აღებასა და გაგზავნაზე, რასაც უზრუნველყოფს 14 ბიტანი ანალოგურ-ციფრული გარდამქნელით. მას შეუძლია წამში 125 მილიონი მონაცემის აღება რაც სრულიად დამაკმაყოფილებელია ლაბორატორიული შემოწმების ეტაპზე. Red Pitaya მონაცემებს უგზავნის კომპიუტერს, რომელიც ახარისხებს, იწერს და გრაფიკულად ჰისტოგრამების სახით წარმოაჩენს ეკრანზე.



სურ. 5: Red Pitaya (a) და Raspberry Pi (b)

მოდულის ინსპექტირებისათვის საჭიროა სპეციალიზირებული ერთარხიანი კვების ბლოკი, რომლის დეტალებიც განხილულია 2.4 თავში. შემოწმების დროს ასევე გამოიყენება პორტატული სანათი და რადიაქტიური ელემენტები.

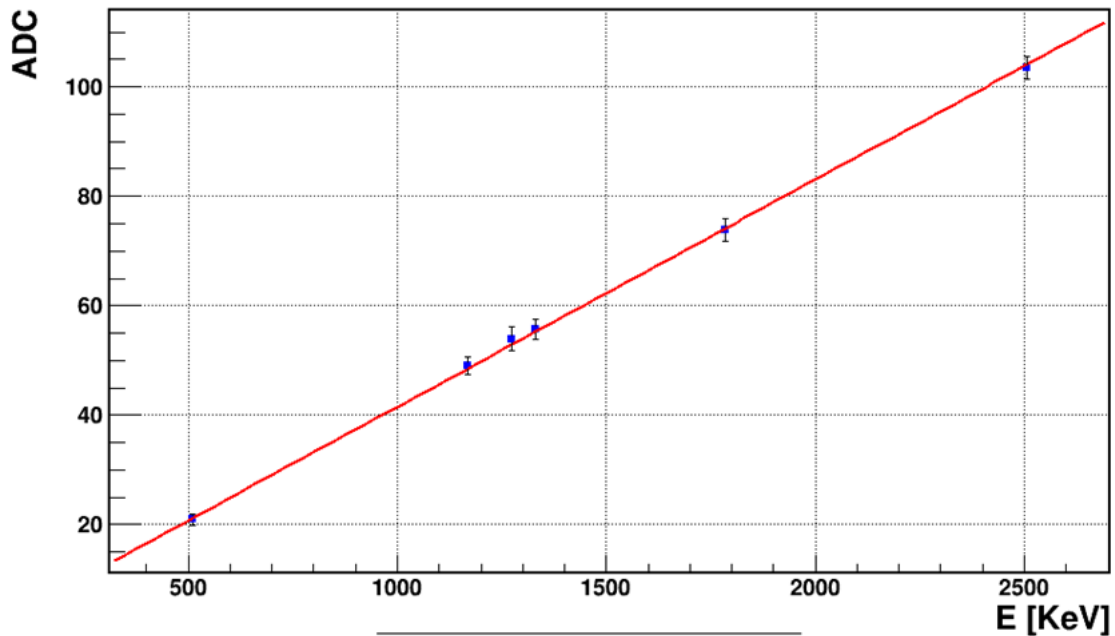
ტესტირების პირველ ეტაპზე მოწმდებოდა მოდულის ნულოვანი მნიშვნელობების წაძვრა (offset), რის შემდეგაც შესაძლებელია სიგნალის ზღვრული მნიშვნელობის (threshold) დაყენება და მონაცემებზე დაკვირვება. შემდგომი ტესტის მიხედვით მოწმდებოდა თუ რამდენად კარგად იყო მოდული იზოლირებული გარემო სინათლის შეღწევისაგან. სანათით ხდებოდა მოდულის გარშემო ძლიერი ნათების შექმნა. იმ შემთხვევაში თუ იზოლირება დარღვეული იქნება მისი დამზარა ადვილად შეიძლება სიგნალის სპექტრზე დაკვირვების შემთხვევაში. მას შემდეგ რაც დადასტურდებოდა მოდულის მუშა მდგომარეობა ხდებოდა მისი მგძნობიარობის შემოწმება სხვადასხვა ენერგიებზე. ტესტირების დროს გამოყენებული იყო ^{22}Na -სა და ^{60}Co -ის იზოტოპები. ასევე ტესტირების დროს მხედველობაში მიიღება კრისტალის შიდა გამოსხივება, რომელიც მოდის ^{176}Lu -სგან და გამოკვეთილად ჩანს სპექტრში. შემთხვევა, როდესაც ტესტირების დროს გამოყენებულია ^{60}Co -ის რადიაციული წყარო წარმოდგენილია გრაფიკ 9-ზე, მარცხენა სურათზე (ა), ხოლო ^{22}Na -ის იზოტოპიდან მიღებული მონაცემი წარმოდგენილია მარჯვენა სურათზე (ბ).



გრაფ. 1: მოდულის ლაბორატორიული შემოწმების შედეგები: ^{60}Co (a) და ^{22}Na (b)

მონაცემების დამუშავების და ფიტირების შედეგად ნათლად ჩანს, კობალტის იზოტოპისათვის დამახასიათებელი დაშლის სპექტრი. ასევე ნატრიუმისა და

ლუტეციუმის იზოტოპების გამოსხივების ენერგიები. ფიტირებიდან მიღებული ანალოგურ-ციფრული გარდამქნელის მნიშვნელობებისა და ენერგიების დაკავშირების შედეგად ვიღებთ შემდეგ სურათს:



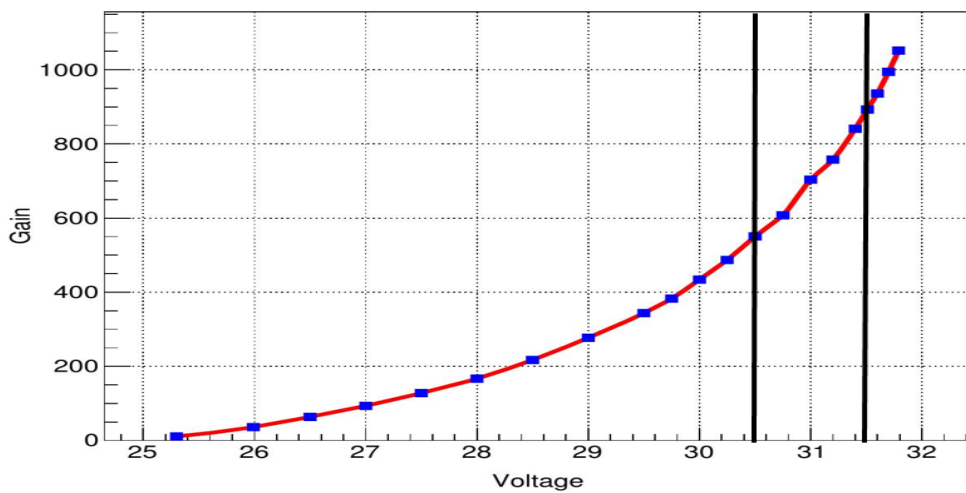
გრაფ. 2: LYSO მოდულის წრფიობა დაბალ ენერგიებზე

გრაფიკის მიხედვით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დაბალ ენერგიებზე მოდულის წრფიობა საკმაოდ მაღალია. ეს კი ძალიან მნიშვნელოვანია ენერგიების კალიბრაციის დროს, რადგან მთლიანი მოდულის კალიბრებისათვის საკმარისი იქნება მისი მხოლოდ რამოდენიმე ენერგიაზე დაკალიბრება.

ლაბორატორიული ტესტების შედეგების ანალიზის დასკვნით ნაწილს წარმოადგენდა ენერგიის გარჩევადობის დამოკიდებულების განსზღვრა თავად ენერგიებზე. ჩატარებულმა ანალიზებმა აჩვენა, რომ ენერგო გარჩევადობა 2.5 MeV-ის ფარგლებში 5%-ზე დაბალია, მაშინ როცა 500 KeV-ს შემთხვევაში 12.5%-ია. მიღებული ტრენდის მიხედვით ცხადია ასეულობით MeV-ის შემთხვევაში გარჩევადობა გაცილებით მაღალი იქნება.

2.4 კვების წყარო JEDI კალორიმეტრისათვის

როგორც უკვე ავლინებთ, LYSO მოდულის კვების ძაბვა იცვლება 25-31 ვოლტის ფარგლებში. SiPM-ის გაძლიერება პირდაპირ პროპორციულია მასზე მოდებული კვების ძაბვის. რადგან LYSO-ს გარჩევიუნარიანობა დაახლოებით 1 %-ია, შესაბამისად, შესაბამისად, ყოველგვარი ფლუქტუაციები SiPM-ის გაძლიერების კოეფიციენტშიც არ უნდა აღემატებოდეს 1%-ს, რათა არ მოხდეს კრისტალის ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობის მნიშვნელოვან დეგრადირება. უკეთესი ანალიზისათვის განვიხილოთ გრაფიკი 3:



გრაფ. 3: SiPM-ის გაძლიერების კოეფიციენტის ძაბვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი

წითელი ფერის წირით ნაჩვენებია გაძლიერების ზრდა ძაბვის ზრდასთან მიმართებაში. შავი ფერის ხაზებით კი მონიშნულია ძაბვის ის ინტერვალი, რომელზეც ნახევარგამტარული დეტექტორის გაძლიერების კოეფიციენტის ცდომილება 0.02-0.05%-ის ფარგლებში მერყეობს. ამ ინტერვალზე SiPM-ის მახასიათებლების გათვალისწინებით, კვების ძაბვის პულსაცია არ უნდა აღემატებოდეს 10 მილი ვოლტს. მოდულის კვების ძაბვის არასტანდარტულ მოთხოვნების გათვალისწინებით მოხდა ახალი კვების ბლოკის დაპროექტება და მისი გარკვეულ ეტაპამდე რეალიზება, [13]. რადგან კალორიმეტრზე საჭიროა არა ერთი და 2 მოდულის განთავსება, კვების ბლოკი დაპროექტებულია ისე რომ ადვილად მოხდეს გამოსასვლელი არხების რაოდენობის გაზრდა. ამ დროსათვის კვების სისტემა აერთიანებს 64 არხიან კვების ბლოკს, რომლის სიზუსტე რამოდენიმე

მიკროვოლტს შეადგენს ხოლო ტემპერატურული სტაბილურობა კი 0.25 მვ/°C-ზეა. ასეთი შედეგის მიღწევა მოხდა წრფივი რეგულატორის UA723CD-სა და ეტალონური ძაბვის რეგულატორის, MAX6350 შერწყმის შედეგად. კვების ბლოკზე დამონტაჟებულია ძაბვის მონიტორინგის სისტემა, რომლის კონტროლიც ქსელის გავლით ხორციელდება. ქსელთან კავშირს უზრუნველყოფს მინი კომპიუტერი „Raspberry Pi 3“. ამ ეტაპზე ინდივიდუალური არხების გამოსავალი ძაბვის ცვლილება შესაძლებელია მხოლოს ხელით, რეოსტატის გამოყენებით. ახლო მომავალში დაგეგმილია ძაბვების ქსელიდან მართვის დამატება. დეტალური ინფორმაცია LYSO მოდულების კვების ბლოკის შესახებ წარმოდგენილია ო. ჯავახიშვილის სამაგისტრო ნაშრომში: „კვების წყაროს შექმნა JEDI პოლარიმეტრისთვის“

2.5 ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი

LYSO მოდულის ენერგეტიკული გარჩევუნარიანობიდან გამომდინარე აშკარაა რომ საჭიროა მაღალი სიზუსტის ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (ADC), რომელიც სრულად მოერგება JEDI პოლარიმეტრის მოთხოვნებს. გარდა გარჩევუნარიანობისა, ADC-ის მოთხოვნება მონაცემთა შეგროვების მაღალი სიჩქარე და მრავალ არხიანობა. ამ და სხვა მოთხოვნების გათვალისწინებით, საბოლოო არჩევანი შეჩერდა STRUCK INOVATION SYSTEM-ის წარმოების მყის ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელზე (Flash ADC), კერძოდ კი: SIS3316-250-14 (სურ. 6) [14]. აღნიშნული გარდამქმნელი არის 14 ბიტისანი (ვერტიკალური გარჩევუნარიანობის), 16 არხიანი მოდული. მას წამში შეუძლია 250 მილიონი ანათვლის აღება, თითოეული არხისათვის დამოუკიდებლად. ADC შექმნილია VME სტანდარტის კრეიტისათვის.



სურ. 6: STRUCK INOVATION SYSTEM-ის ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი SIS3316-250-14

ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი მუშაობს 5 ცალ FPGA-ზე. მათგან 4 აკონტროლებს 16 არხს (თითოეული 4 არხს), ხოლო ერთი მათგანი (მასტერი), პასუხიმგებელია სისტემის ყველა ელემენტის ურთიერთკავშირზე. Flash ADC მოდულზე ინტეგრირებულია 8 ცალი მეხსიერების ჩიპი, ჯამში 2 GB ტევადობის. მეხსიერება ვირტუალურად გაყოფილია 2 ნაწილად: ბანკი-1 და ბანკი-2. გარდამქმნელი ერთ ჯერზე მონაცემებს ინახავს მხოლოდ ერთ ბანკში, როგორც კი ბანკი გადაივსება სისტემა გადაერთვება მეორე ბანკზე და პარალელურად 10Gb-იანი ქსელის გავლით დაიწყებს პირველ ბანკში არსებული ინფორმაციის „პორციად“ გაგზავნას. ბანკი-2-ის გავსების შემდეგ იგი კვლავ შეანაცვლებს ადგილებს და ახლა გააგზავნის მეორე ბანკის მონაცემებს და ასე მორიგეობით. მონაცემთა გაგზავნის ასეთი მეთოდით, შესაძლებელია 4 ნაწილად დაყალიბებული ინტერვალებით, 14 ბიტიანი ინფორმაციის ჩაწერა პარალელურად 16 არხისათვის. გარდა ამისა SIS3316-ს აქვს შესაძლებლობა დაუკავშირდეს სხვა ანალოგურ მოდულებს და იმუშაონ სინქრონიზებულად ერთიდაიგივე საათის მიხედვით. მისი ეს თვისება გადამწყვეტია, რადგან პოლარიმეტრზე საჭიროა ათეულობით LYSO მოდული და მათი პარალელურ რეჟიმში წაკითხვა. რადგან მყისი ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი ოპტიმიზებულია დეტექტორებზე, მას კიდევ მრავალი ფუნქცია აქვს რომელის წარმატებით გამოყენება ხელს შეუწყობს პოლარიმეტრის შესაძლებლობების გაზრდას. ზოგიერთი ასეთი ფუნქცია განხილულია შემდეგ თავებში.

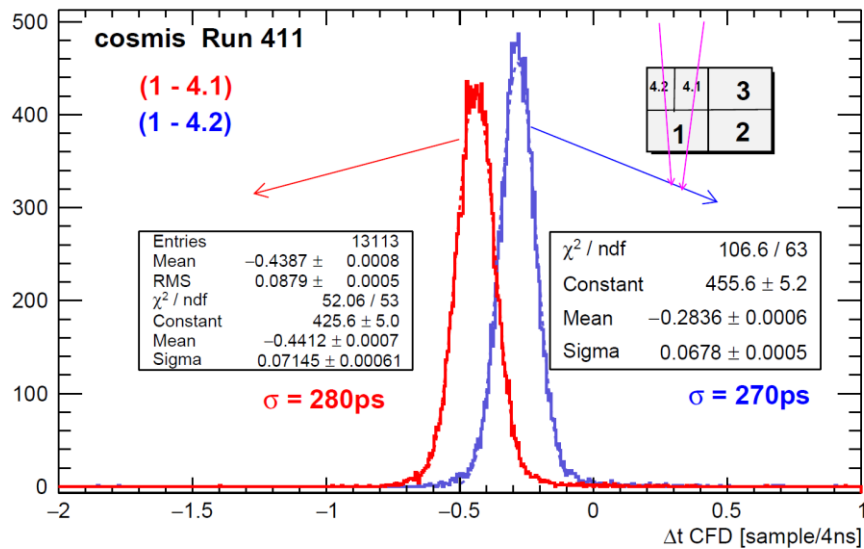
თავი III

3.1 მოდულების დროითი გარჩევისუნარიანობის შესწავლა

JEDI პოლალარიმეტრის დეტექტორის ძირითადი ნაწილი წარმოადგენს კალორიმეტრს, რომელშიც უნდა მოხდეს დეტექტირებული ნაწილაკების ენერგიის დიდი სიზუსტით გაზომვა. მაღალი ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობის გარდა, მონაცემთა სტატისტიკური ანალიზის დროს ასევე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება დროით ინფორმაციასაც, რომლის საშუალებითაც ხდება არასასურველი შემთხვევების გაფილტვრა. გარდა ამისა, მაღალი დროითი გარჩევისუნარიანობის შემთხვევაში დროითი ინფორმაცია შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ისეთი დანიშნულებითაც, რაც დამატებით უფრო გაზრდის ნაწილაკის იდენტიფიკაციის ეფექტურობას და შეამცირებს არასასურველ ფონს. ცნობილი ნაწილაკის ფრენის დროის დიდი სიზუსტით გაზომვის შემთხვევაში კი შესაძლებელია მისი ენერგიისა და გაბნევის კუთხის შეფასებაც. საკმარისი სიზუსტეების შემთხვევაში შესაძლებელია დეტექტორების სწრაფი კალიბრებაც პირდაპირ ექსპერიმენტის მსვლელობისას.

ამაჩქარებელზე ჩატარებულ მოსამზადებელი ექსპერიმენტების პერიოდში გამოყენებული გვაქს მყისი ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (SIS3316-250-14). აღნიშნულ გარდამქმნელზე სპეციალური პარამეტრის გააქტიურების შემთხვევაში შესაძლებელია დეტექტორებიდან მიღებული ინდივიდუალური ანათვლების ჩაწერა შემდგომი ანალიზის მიზნით (სტანდარტულად იგი აგზავნის ამ ანათვლების ინტეგრალს, რაც ბევრად უფრო „მსუბუქი“ ინფორმაციაა). სწორედ ამ ფუნქციის გამოყენებით დეტექტორებზე ჩავატარეთ ექსპერიმენტი დროითი გარჩევისუნარიანობის განსასაზღვრად. ექსპერიმენტი ჩატარდა ვერტიკალურად განლაგებულ (მიჯრით) დეტექტორებზე, სადაც ჩავიწერეთ კოსმოსური ნაწილაკების დეტექტორებში გავლისას აღძრული სიგნალები. მიღებულ სიგნალებს შორის დროითი დაყოვნების გაზომვა შესაძლებელია თითოეული არხის ანათვლების ანალიზით, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში ხდებოდა CFD-ის (Constant Fraction Discriminator) პრინციპის პროგრამულ დონეზე რეალიზებით [15]. SIS3316 მოდულზე შეგროვებული მონაცემების ამოღების, ლოკალურ ქსელში გაგზავნა-მიღებისა და

შემდგომი დამუშავების პროგრამული უზრუნველყოფა შექმნილია C++-ის ბაზაზე, CERN ROOT ბიბლიოთეკების გამოყენებით. მყისი გარდამქნელიან მიღებული ბინარული ფაილების დამუშავების შედეგები წარმოდგენილია გრაფიკ 4-ზე.



გრაფ. 4: ბინარული მონაცემების CFD-ით დამუშავების შედეგები

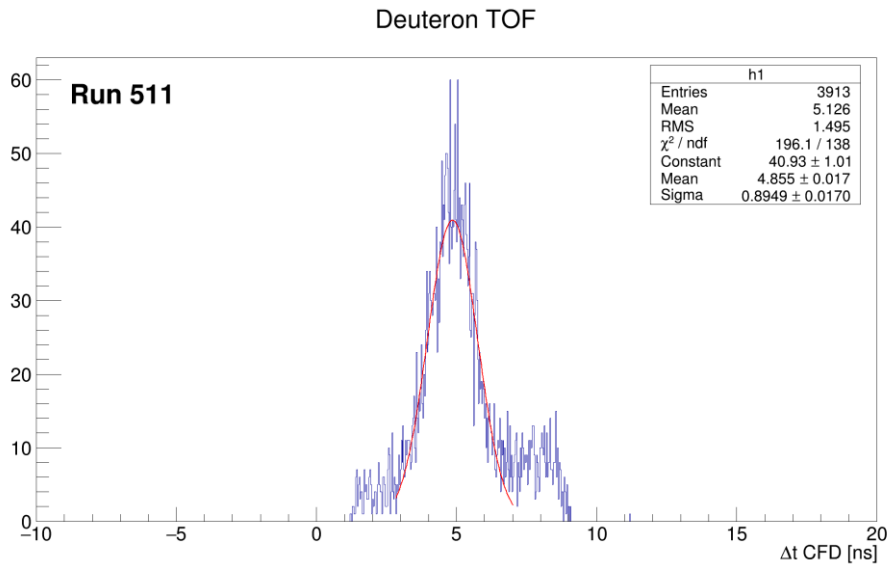
მოცემული გრაფიკის ანალიზით ნათლად ჩანს, რომ ასეთი მეთოდით შესაძლებელია დეტექტორების სხვადასხვა არხებს შორის ფარდობითი დროის გაზომვა ერთი რიგით უფრო დიდი სიზუსტით, ვიდრე ანათვლების ადების ინტერვალაია (4 ნწმ).

იმ შემთხვევაში, როდესაც დეტექტორში გამავალი ნაწილაკი წინასწარაა ცნობილი, მისი მოძრაობის სიჩქარის იმ სიზუსტით შეფასებით, როგორც ეს შესაძლებელია CFD ანალიზით, ცალსახად გვადლევს შესაძლებლობას დიდი სიზუსტით განვსაზღვროთ ნაწილაკის ენერგია. ამაჩქარებელზე ასეთი ტიპის ანალიზის ჩატარება თეორიულად შესაძლებელია, მაგრამ გასათვალისწინებელია მონაცემების უზარმაზარი მოცულობა, რომელშიც მოექცევა თითოეული არხის ყველა ანათვალი. მონაცემების ასეთი გზით შეგროვება რთულად რეალიზებადი და მოუხერხებელია. მაგრამ არსებობს გამოსავალი, რომელსაც მყისი ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი გვთავაზობს. მასში ინტეგრირებული CDF ფუნქცია საშუალებას იძლევა მონაცემების ლოკალური დამუშავების (ისე რომ მისი გაგზავნა

ქსელში საჭირო არაა) საფუძველზე ძალიან მაღალი სიზუსტით გაიზომოს ნაწილაკის გავლის დრო, ანუ „რეალური ტრიგერის“ დრო. ანალოგური სიგნალის მიღების დროს მოდული სპეციალურად გამოყოფილ რეგისტრებში ინახავს MAW (Moving Average Window) ინფორმაციას. იმ შემთხვევაში თუ CFD ფუნქცია გამორთულია, ტრიგერის გენერირება ხდება მაშინ როდესაც MAW-ის მნიშვნელობა გადააჭარბებს წინასწარ განსაზღვრულ დონეს (Trigger Threshold). ამ კონფიგურაციით შესაძლებელია სიგნალის ტრიგერის დროის დაფიქსირება 4 ნწმ-ის სიზუსტით (250 მკვ). ხოლო იმ შემთხვევაში, როდესაც CFD ფუნქცია გააქტიურებულია ტრიგერის გენერირება ხდება არა MAW სიგნალის წინა ფრონტზე, არამედ უკანა ფრონტზე, მაშინ როცა MAW-მნიშვნელობა მისი მაქსიმალური მნიშვნელობის 50% გახდება. ამ დროს დაგენერირებული ტრიგერი, რეალურ ტრიგერთან მიმართებაში დაგვიანებულია (4 ნწმ-ზე მცირე დროით). ახლა საჭიროა ამ დაყოვნების გამოთვლა რათა განვსაზღვროთ რეალური ტრიგერის მნიშვნელობა. ამისათვის ADC ინახავს 3 პარამეტრს: MAW-ის მაქსიმალურ, ტრიგერემდე და ტრიგერის შემდეგ მნიშვნელობებს. თუ ჩავთვლით რომ MAW-ის ცვლილებას დროში წრფივი სახე აქვს მაშინ ამ სამი პარამეტრით გამოყენებით ძალიან მარტივად შეგვიძლია პროპორციით განვსაზღვროთ ტრიგერი დაგვიანების დრო, ან იგივე ტრიგერის დროის უარყოფითი შესწორება.

ზემოთ აღწერილი მეთოდის შესამოწმებლად გამოყენებულია 2017 წლის მარტში ამაჩქარებელზე ჩატარებული ექსპერიმენტის მსვლელობისას ჩაწერილი მონაცემები. ექსპერიმენტის კონფიგურაციის გათვალისწინებით დროითი ინტერვალის გაზომვას ვახდენდით საწყის სცინტილაციურ მთვლელსა (START COUNTER) და ერთ-ერთ დეტექტორს შორის. დეტექტორი წარმოადგენდა LYSO მოდულს (SiPM-ის გამოყენებით). სისტემა ისე იყო აწყობილი, რომ საწყისი მთვლელი გამოიმუშავებდა ტრიგერს და ახდენდა ყველა არხის დატრიგერებას, შესაბამისად ხდებოდა ყველა არხის ერთდროული ჩაწერა. ანალიზისათვის, მეტი საიმედოობის მიზნით, ამოირჩა ის შემთხვევები, როდესაც სიგნალი დაფიქსირდა საწყისსა და მხოლოდ ერთ დეტექტორს შორის. მონაცემებიდან ასევე გაიფილტრა ყველა ის შემთხვევა, სადაც არ მონაწილეობდა დეიტრონი. საწყის მთვლელსა და ჩვენს მიერ შერჩეულ დეტექტორს

შორის მანძილი დაახლოებით 1 მ იყო, ნაწილაკების ენერგია დაახლოებით 270 MeV, შესაბამისად დეიტრონისათვის TOF (Time of Flight) გამოთვლებით უდრის 6.87 ნანო წამს. მიღებული დროითი მნიშვნელობის რეგიონში ჩატარებული ანლიზის შედეგად მივიღეთ შემდეგი დროითი განაწილება:

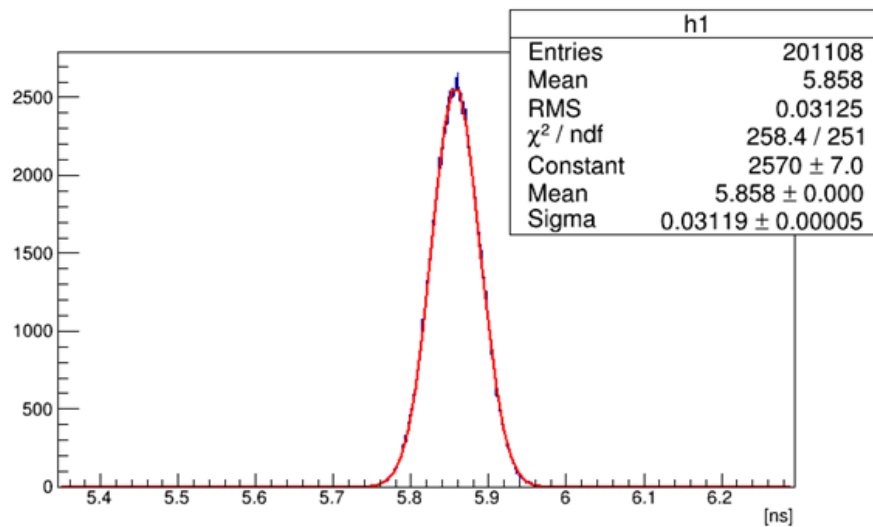


გრაფ. 5: 270 MeV კინეტიკური ენერგიის დეიტრონის ფრენის დრო 1 მეტრზე

მოცემული გრაფიკის მიხედვით დროითი გარჩევისუნარიანობა გაცილებით ნაკლებია ($\sigma = 0.89$ ნანო წამს), ვიდრე ეს იყო კოსმოსური სხივების მონაცემების შემთხვევაში. ამის მიზეზი შეიძლება რამოდენიმე რამ იყოს. რადგან აღნიშნული კონფიგურაციით წარმოდგენილი გაზომვა პირველად მოხდა, შესაძლებელია პრობლემა იყოს ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელის კონფიგურაციაში, ან მონაცემების წაკითხვაში. ასევე შესაძლებელია დაბალი დროითი გარჩევისუნარიანობის მიზეზი იყოს SiPM-ების ბევრად უფრო ხანგრძლივი სიგნალი, ვიდრე ჩვეულებრივ ფოტოგამამრავლებლებს აქვთ. ნაკლებად სავარაუდოა პროგრამული ხარვეზი.

მიღებულ შედეგებში უკეთესად გასარკვევად, შემდეგ ექსპერიმენტი ჩავატარეთ LYSO მოდულის გარეშე. კერძოდ, ექსპერიმენტში გამოვიყენეთ Tektronix-ის წარმოების სიგნალის გენერატორი. არხებს შორის სიგნალის დაყოვნებისათვის გამოვიყენეთ 1 მეტრის სიგრძის LEMO სადენი შემდეგი კონფიგურაციით: სიგნალის

გენერატორიდან სიგნალი შედიოდა გარდამქნელის 1 არხში და შეერთების ადგილიდან გამანაწილებლით გადადიოდა ამავე მოდულის მე-5 არხში. რადგან გარდამქმნელი LYSO მოდულზე არაა დაკავშირებული მისი კონფიგურაციები გარკვეულ წილად განსხვავებული იყო წინა ექსპერიმენტში გამოყენებული კონფიგურაციებისაგან (ტრიგერის წყარო, ტრიგერის ტიპი, ძაბვის დიაპაზონი და სხვ.) ექსპერიმენტის რამოდენიმე იტერაციის, გაუმჯობესების შემდეგ მიღებული შედეგი წარმოდგენილია გრაფიკ 6-ზე:



გრაფ. 6: სიგნალის დაყოვნება 1 მეტრის სადენში, CFD ანალიზით

გრაფიკის მიხედვით სიგნალის დაყოვნების დროითი გარჩევადობა CFD ფუნქციის გამოყენებით არის 30 პიკო წამი (დაყოვნება 5.8 ნანო წამი). ასეთი შედეგის ნამდვილად დამაკმაყოფილებელი და საიმედოა. როგორც ირკვევა, გარდამქმნელი წარმატებით ასრულებს მის მოვალეობას, ამიტომ წინა ექსპერიმენტში მიღებული არადამაკმაყოფილები შედეგები საჭიროებს დამატებით გადახედვას.

ბიბლიოგრაფია

- [1] JEDI collaboration: URL <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi>
- [2] R. Maier, Cooler synchrotron COSY - Performance and perspectives, Nuclear Instruments and methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 390, (1997) URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00324-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00324-0)
- [3] Experiments at COSY:URL http://fz-juelich.de/ikp/EN/Forschung/Experimente/Experimente_node.html
- [4] Eric M. Metodiev, Thomas-BMT equation generalized to electric dipole moments and field gradients, (2015), URL: <https://arxiv.org/pdf/1507.04440.pdf>
- [5] Towards JEDI Polarimetry: URL http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public_files/proceedings/i.keshelashvili_PSTP.pdf
- [6] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lutetium-yttrium_oxorthosilicate
- [7] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_photomultiplier
- [8] URL: <https://www.crystals.saint-gobain.com/>
- [9] Characterisation of Single Photon Avalanche Detectors: URL: http://www.qolah.org/thesis/thesis_janet.pdf
- [10] URL: <https://sensl.com/>
- [11] URL: <https://www.raspberrypi.org/>
- [12] URL: <https://www.redpitaya.com/>
- [13] ო. ჯავახიშვილი, კვების წყაროს შექმნა JEDI პოლარიმეტრისთვის, 2018
- [14] URL: <https://struck.de/>
- [15] URL: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/what-everybody-ought-to-know-about-cfd/>