

ივ. ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი



**JEDI პოლარიმეტრის ელექტრონიკა და
მონაცემთა შეგროვება**

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

დოქტორანტის სამეცნიერო-კვლევითი პროექტი II

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერია

ხელმძღვანელი: დავით მჭედლიშვილი, ირაკლი ქეშელაშვილი

თბილისი, 0179

2020

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
3.2 SiPM-ის მოდულის გაჟონვის დენების ავტომატური გაზომვა.....	23

ცხრილების ნუსხა

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

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1: COSY ამარქარებელის სქემა, ციკლოტრონი, დამაგროვებელი რგოლი და ექსპერიმენტები.....	02
ნახ. 2: JEDI კალორიმეტრის გრაფიკული ნახაზი.....	05
ნახ. 3: LYSO მოდულის სამგანზომილებიანი ნახაზი.....	06
ნახ. 4: გაჟონვის დენების გამზომი ავტომატური სისტემის ბლოკ სქემა.....	25

გრაფიკების ნუსხა

გრაფ. 1: მოდულის ლაბორატორიული შემოწმების შედეგები: ^{60}Co (a) და ^{22}Na (b).....	13
გრაფ. 2: LYSO მოდულის წრფივობა დაბალ ენერგიებზე.....	14
გრაფ. 3: SiPM-ის გაძლიერების კოეფიციენტის ძაბვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.....	15
გრაფ. 4: გრაფ. 4: მონაცემების CFD-ით დამუშავების შედეგები.....	19
გრაფ. 5: გრაფ. 5: 270 MeV-იანი დეიტრონის ფრენის დრო 1 მეტრზე.....	21
გრაფ. 6: გრაფ. 6: სიგნალის დაყოვნება 1 მეტრის სადენში, CFD-ის გამოყენებით.....	22
გრაფ. 7: SiPM-ის მოდულების გაჟონვის დენის დამოკიდებულება ძაბვაზე.....	24
გრაფ. 8: გაჟონვის დენი: Sensel 8x8 SiPM მატრიცა, სნ:161123-07 @ 26 ვ.....	28

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
სურ. 7: სურ. 7: Sensel J-სერიების, 8x8 მოდულის სატესტო ელ. დაფა.....	24
სურ. 8: სიგნალების გამანაწილებელი (a) და სიგნალების გადამრთველი ელ.დაფა (b).....	27

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 სიმბიომის 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 ზედა ზღვარი შეადგენს 10^{-21} e-cm, რაც მრავალი რიგით აღემატება სტანდარტული მოდელის შეფასებას. ამიტომ, საჭიროა ექსპერიმენტების მგრძნობიარობის გაზრდა და ედმ-ის ზედა ზღვარის შემცირება, რამაც შესაძლოა საბოლოოდ გაგვიყვანოს სტანდარტულ მოდელს მიღმა არსებულ ფიზიკაში.

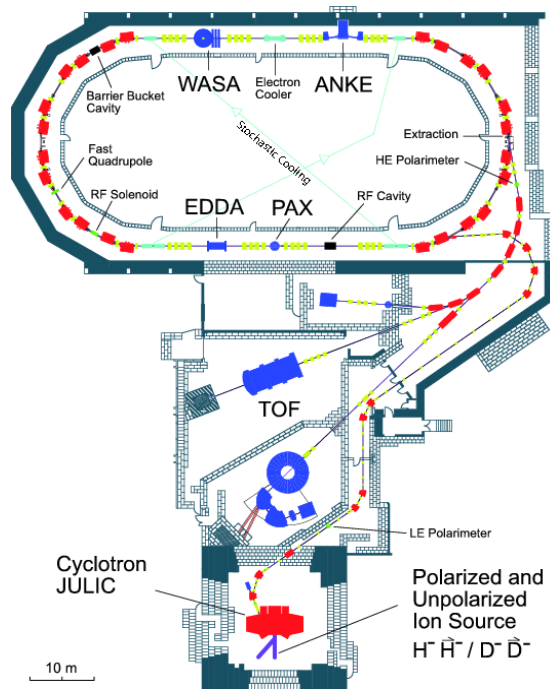
JEDI კოლაბორაციის მკვლევართა საერთაშორისო ჯგუფის ძირითად მიზანს წარმოადგენს პროტონისა და დეიტრონისათვის ისეთი ტექნოლოგიებისა და ექსპერიმენტული მეთოდების შემუშავება, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ რამოდენიმე რიგით გავაუმჯობესოთ ედმ-ის გაზომვის მგრძნობიარობა დღემდე ჩატარებულ ექსპერიმენტებთან შედარებით. 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 გამაციებლით (ამცირებს ნაწილაკების იმპულსების დისპერსიას). COSY წარმოადგენს ციკლოტრონისა და 184 მ გარშემოწერილობის დამაგროვებელი რგოლის (synchrotron) ერთობლიობას (ნახ. 1). იონების წყაროს შეუძლია აწარმოოს პოლარიზებული და არაპოლარიზებული 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 მართვას ახორციელებს ბირთვული ფიზიკის ინსტიტუტი (IKP), რომელიც მდებარეობს ქალაქ იულიხში. აღნიშნული ინსტიტუტი ასრულებს ფუნდამენტურ კვლევებს ნაწილაკების ფიზიკის მიმართულებით. ამჟამად, ინსტიტუტი წარმოადგენს JEDI-ის საერთაშორისო კოლაბორაციის ბირთვს და მიზანად ისახავს COSY-ის მოდიფიცირებას, რათა შემდგომში ის გამოიყენოს პროტონის ან დეიტრონის ედმ-ის გასაზომად.



ნახ. 1: COSY ამაჩქარებლის 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 დამზერილი მატერია-ანტიმატერიის ასიმეტრია. არსებობს ამ პრობლემის ახსნის ერთადერთი ჰიპოთეზა, რომელიც სახაროვის პირობების სახელით არის ცნობილი. ამ ჰიპოთეზაში ერთ-ერთ აუცილებელ პირობას წარმოადგენს CP სიმეტრიის მნიშვნელოვანი დარღვევა, სამყაროს განვითარების ადრეულ ეტაპზე, რაც შესაძლოა გამოწვეული იყოს ნაწილაკების პერმანენტული ელექტრული დიპოლის მომენტის (ედმ) არსებობით. ცნობილია, რომ პერმანენტული ედმ არღვევს როგორც P სიმეტრიას, ასევე დროის შექცევის მიმართ სიმეტრიას (T) და აქედან გამომდინარე CP სიმეტრიასაც. თუმცა, სტანდარტული მოდელის ფარგლებში აღნიშნული ედმ-ის შეფასება არ არის საკმარისი მოცემული CP სიმეტრიის საჭირო ხარისხით დარღვევისთვის. შესაბამისად ჩნდება მოთხოვნა „ახალი ფიზიკისა“, სადაც CP დარღვევას ენიჭება გასაღების როლი სამყაროს ფორმირებაში. სტანდარტული მოდელის შეფასებით, შესაძლო ედმ-ის მნიშვნელობები არის ბევრად მცირე, ვიდრე

თანამედროვე ექსპერიმენტების მგძნობელობა. ამიტომ საჭიროა უფრო პრეცეზიული ექსპერიმენტული მეთოდებისა და საშუალებების შემუშავება.

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 ამ პრეცესიის დროში ზუსტ დაკვირვებაზეა დაფუძნებული ედმ-ის გაზომვის ტექნიკა დამაგროვებელი რგოლების ბაზაზე.

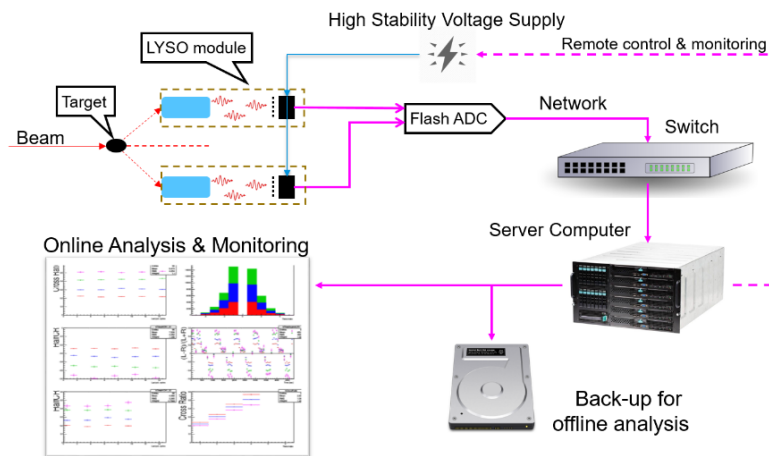
სწორედ, დამაგროვებელი რგოლის ედმ ექსპერიმენტზე ადაპტირების მიზნით შეიქმნა JEDI კოლაბორაცია. მათ აქვთ შესაძლებლობა გამოიყენონ COSY-ზე არსებული მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა და შესაძლებლობები, ჩაატარონ საცდელი ექსპერიმენტები, აღჭურვონ უახლესი და გაუმჯობესებული ტექნიკით რათა მომაზადონ იგი დაგეგმილი ექსპერიმენტისათვის. 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 მკაცრ 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 გარდამქმნელები და მონაცემთა შეგროვების სიტემები, გრაფიკულად იგი ასე გამოიყურება:

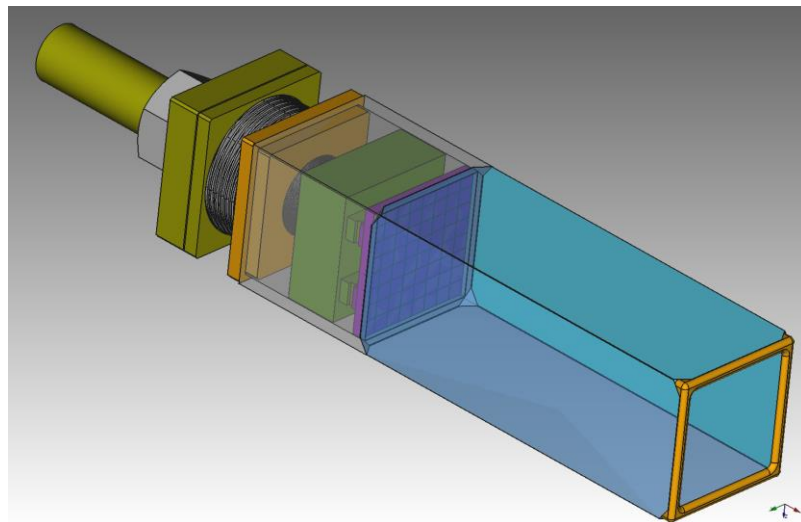


ნახ. 2: JEDI კალორიმეტრის გრაფიკული ნახაზი

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 დავაგშირებული 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-ითრიუმის ოქსიდოროსილიკატისაგან, 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 სამგანზომილებიანი ნახაზი

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

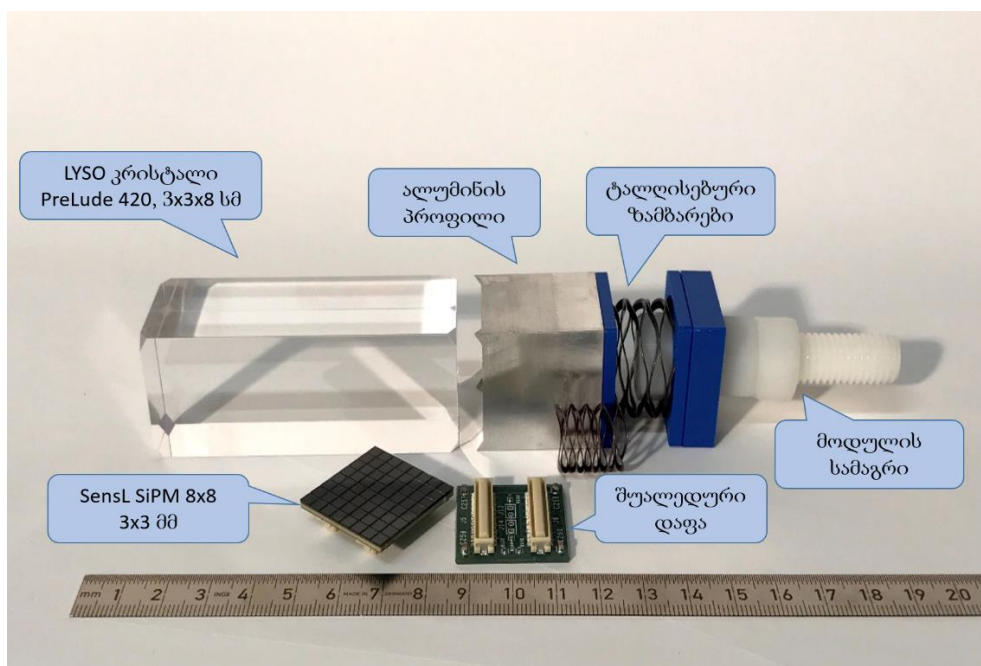
მოთავსებული ელექტრო დაფა, რომელიც წარმოადგენს სადენებისა და SiPM-ს დამაკავშირებელ დაფას. უკანა ხუფი, გამბრჯენები დამზადებულია 3D პრინტერის გამოყენებით. მოდულის ბოლო ნაწილში ჩამონტაჟებულია ორი ცალი ზამბარა, რომელიც შესაფუთ მასალებთან ერთად უზრუნველყოფს მოდულის დეტალების მჭიდრო ურთიერთგანლაგებას.

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>შემაკვეთელი სიგრძე @511 KeV [სმ]</i>	1.2
<i>ენერჯის 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 მმ². 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 ენერჯის 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 სიცოცხლის ხანგრძლივობას. სწორედ ამ მიზნით არის დამზადებული შედარებით გრძელი კრისტალი. გარდა სიცოცხლიუნარიანობის გაზრდისა, 8 სმ-იანი კრისტალი თავის მხრივ იცავს მასზე მიბჯენილ SiPM-ს გამჭოლი ნაკადის პირადპირი ზემოქმედებისაგან.

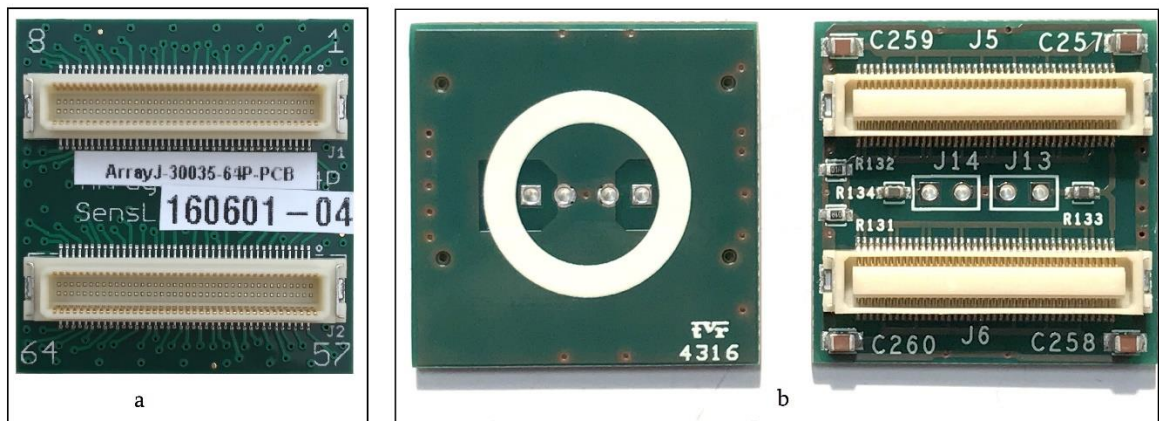


სურ. 1: LYSO მოდულის კომპონენტები აწყობამდე

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, კრისტალის მიერ სცინტილირებული სინათლის აღრიცხვა SiPM-ის მეშვეობით ხორციელდება. SiPM არის ნახევარგამტარული ფოტო მგრძნობიარე ელემენტი, რომელსაც შეუძლია მოახდინოს ინდივიდუალური ფოტონის დაფიქსირება კი. იგი დაფუძნებულია SPAD (Single-Photon Avalanche Diode) ტექნოლოგიაზე [9]. ასეთი მგრძნობიარე 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 სმ². დაფაზე ჯამში თითქმის 900 000 პიქსელია მოთავსებული (სურ. 1). პიქსელები თითქმის სრულად ფარავენ LYSO კრისტალის ფუძე წახნაგს (3x3 სმ²). სტანდარტული ფოტოგამამრვალებისაგან განსხვავებით SiPM-ი არ საჭიროებს მაღალს ძაბვას (კილოვოლტების რიგის), ჩვენს შემთხვევაში SensL-ის ჩიპები იკვებება 25.0-31.0 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 ორი 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 ხდება SiPM-ის გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ძაბვის ვარდნის მოხსნა (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 მიბრჭენილია, თუმცა მათ შორის მოთავსებულია სილიკონის 1

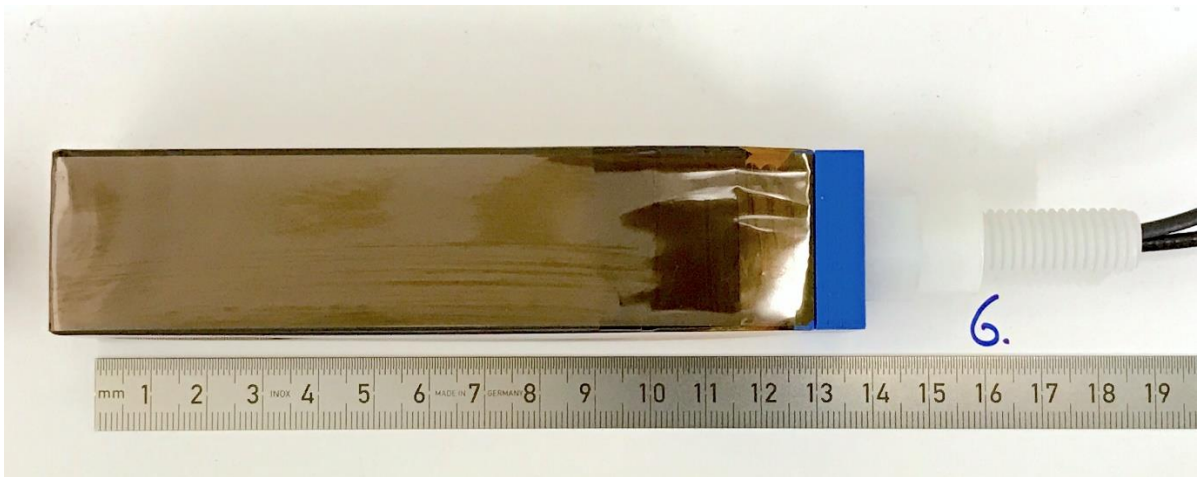
მმ ფენა (სურ. 3). სილიკონს აქვს რამდენიმე დანიშნულება. პირველ რიგში, იგი იცავს ნახევარგამტარის შუშის თხელ ფენას, კრისტალის მექანიკური ზემოქმედებისაგან. ამავდროულად, სილიკონის შრე, როგორც ოპტიკური ნაწილი, ამცირებს სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელს კრისტალიდან SiPM-მდე (მის გარეშე მეტად მკვრივი გარემოდან,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

კიდების 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.



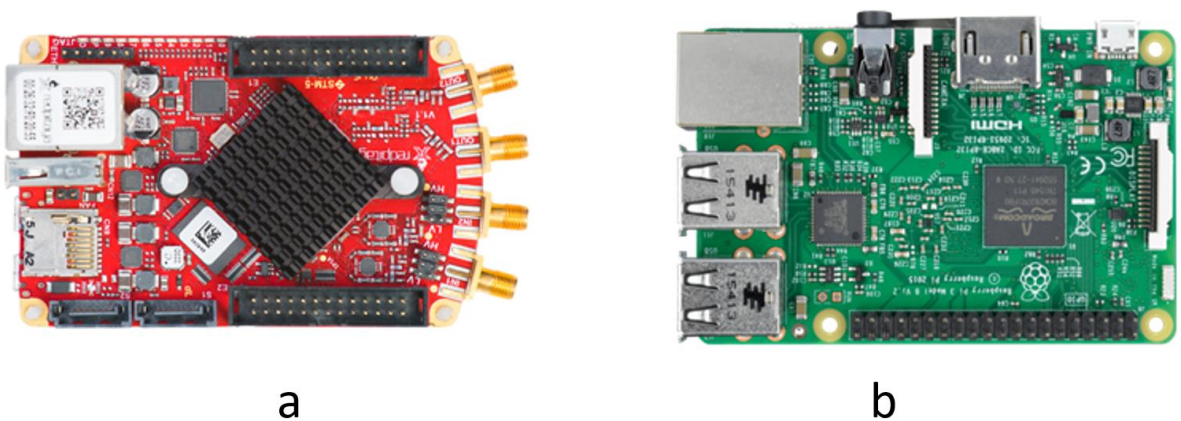
სურ. 4: LYSO მოდულის დასრულებული სახე

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 ინპექტირება, სადაც მოწმდებოდა ელექტრული კომპონენტები (შუალედური დაფა,

SiPM), გარე სინათლისაგან იზოლაცია და სხვ. ინსპექტირების დეტალები წამოდგენილია 2.3 თავში.

2.3 LYSO მოდულის ლაბორატორიული შემოწმება

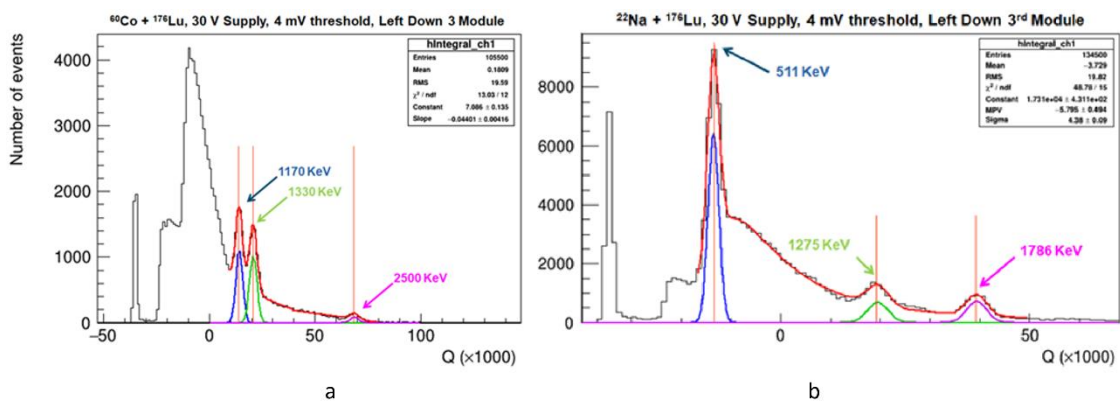
მას შემდეგ, რაც მოხდება ახალი მოდულის აწყობა და შეფუთვა, აუცილებელია მასი ლაბორატორიულ პირობებში შემოწმება, მანამდე, სანამ ექსპერიმენტზე დამონტაჟდება. მოდულის შემოწმებისათვის სპეციალურად შეიქმნა მცირე ზომის მონაცემთა შეგროვების სისტემა (DAQ). სისტემის მთავრი შემადგენელი ნაწილები არის ლინუქსის ოპერაციულ 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)

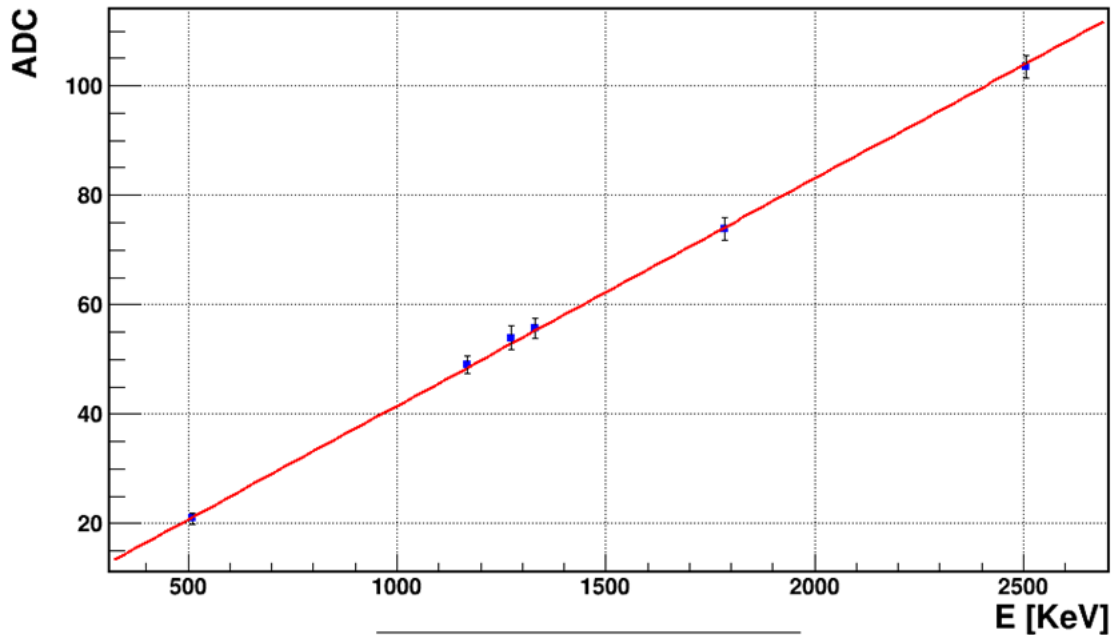
მოდულის ინსპექტირებისათვის საჭიროა სპეციალიზირებული ერთარხიანი კვების ბლოკი, რომლის დეტალებიც განხილულია 2.4 თავში. შემოწმების დროს ასევე გამოიყენება პორტატული სანათი და რადიაქტიური ელემენტები.

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 რადიოაქტიურ წყაროებად გამოყენებულ იქნა ^{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 (ა) და ^{22}Na (ბ)

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:



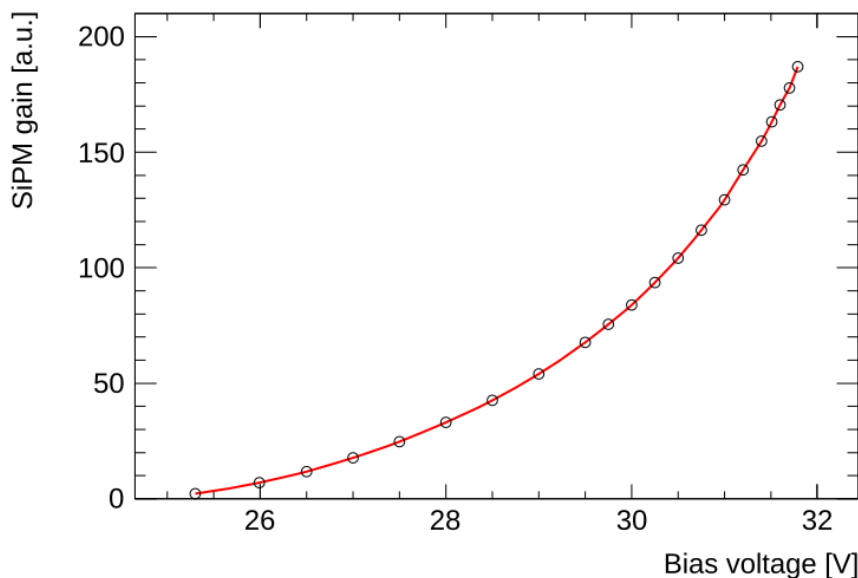
გრაფ. 2: LYSO მოდულის წრფივობა დაბალ ენერგიებზე

გრაფიკის მიხედვით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დაბალ ენერგიებზე მოდულის წრფივობა 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 ენერგეტიკული გარჩევისუნარიანობა 2.5 MeV-ის ფარგლებში 5%-ზე დაბალია, მაშინ როცა 500 KeV-ის 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. SiPM-ისათვის შერჩეული კვების ძაბვის დიაპაზონში, 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 ორი მოდულის განთავსება, კვების

ბლოკი დაპროექტებულია ისე რომ ადვილად მოხდეს გამოსასვლელი არხების რაოდენობის გაზრდა. ამ დროსათვის კვების სისტემა აერთიანებს 64 არხს, რომლის სტაბილურობა მილივოლტის რიგისაა, ხოლო ტემპერატურული სტაბილურობა კი შეადგენს 0.25 მვ/°C-ს. 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 პოტენციომეტრის გამოტენებით. 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 მოეთხოვება 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 ბიტიანი (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 ხუთ ცალ FPGA-ზე. მათგან ოთხი 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 ორ ნაწილად: ბანკი-1 და ბანკი-2. გარდამქმნელი ერთ ჯერზე მონაცემებს ინახავს მხოლოდ ერთ ბანკში, როგორც კი ბანკი გადაივსება სისტემა გადაერთვება მეორე ბანკზე და პარალელურად 1 Gb-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 დაჯერებული ინტერვალებით, 14 ბიტის ინფორმაციის ჩაწერა პარალელურად 16 არხისათვის. გარდა ამისა SIS3316-ს აქვს შესაძლებლობა დაუკავშირდეს სხვა ანალოგურ მოდულებს და იმუშაონ სინქრონიზებულად ერთიდაიგივე საათის მიხედვით. მისი ეს თვისება გადაწყვეტია, 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.

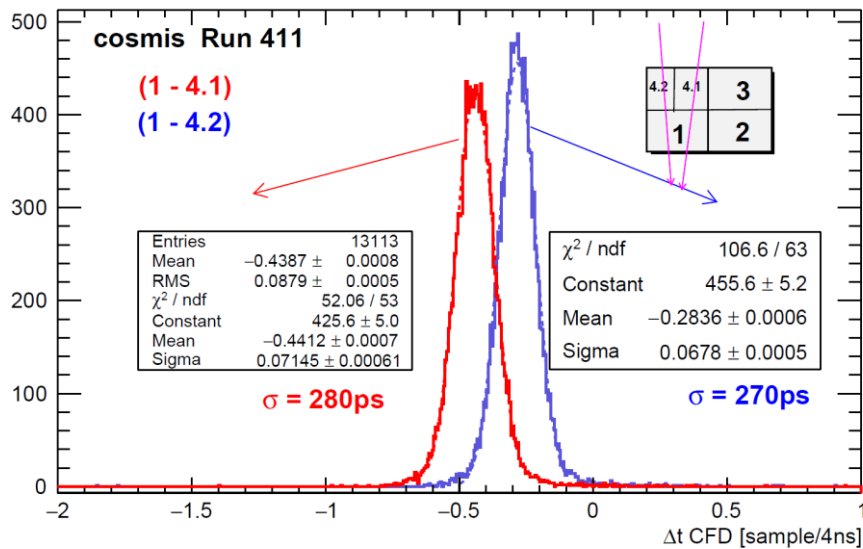
თავი III

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 გვაქვს 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 გარდამქმნელიდან მიღებული ბინარული ფაილების დამუშავების შედეგები წარმოდგენილია გრაფიკ 4-ზე.



გრაფ. 4: მონაცემების CFD-ით დამუშავების შედეგები

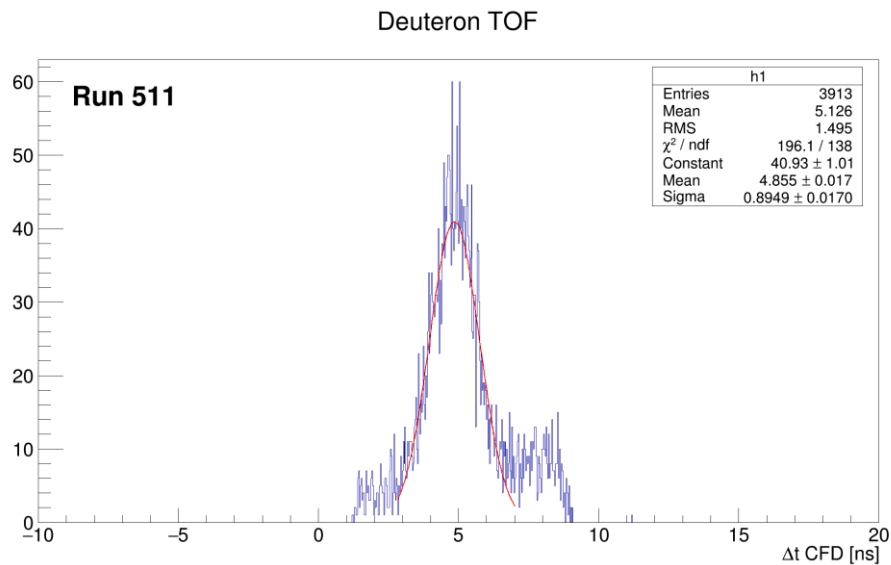
მოცემული გრაფიკის ანალიზით ნათლად ჩანს, რომ ასეთი მეთოდით შესაძლებელია დეტექტორების სხვადასხვა არხებს შორის ფარდობითი დროის გაზომვა ერთი რიგით უფრო დიდი სიზუსტით, ვიდრე ანათვლების აღების ინტერვალია (4 ნწმ).

იმ შემთხვევაში, როდესაც დეტექტორში გამავალი ნაწილაკი წინასწარაა ცნობილი, მისი მოძრაობის სიჩქარის იმ სიზუსტით შეფასებით, როგორც ეს შესაძლებელია CFD ანალიზით, ცალსახად გვაძლევს შესაძლებლობას დიდი სიზუსტით განვსაზღვროთ ნაწილაკის ენერგია. ამჩქარებელზე 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 ჩაშენებული 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 სამ 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 LYSO მოდულს შორის. 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.

მიღებული დროითი მნიშვნელობის რეგიონში ჩატარებული ანლიზის შედეგად მივიღეთ შემდეგი დროითი განაწილება:

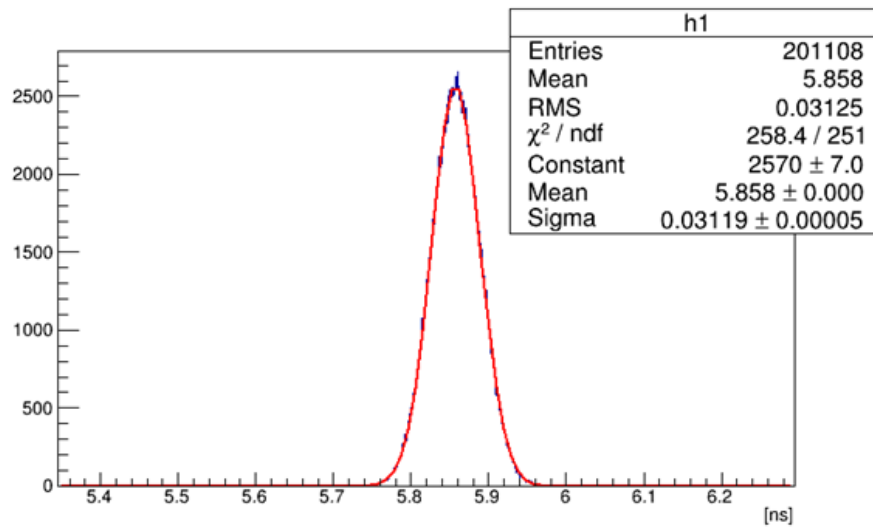


გრაფ. 5: 270 MeV-იანი დეიტრონის ფრენის დრო 1 მეტრზე

მოცემული გრაფიკის მიხედვით დროითი გარჩევისუნარიანობა გაცილებით ნაკლებია ($\sigma = 0.89$ ნანო წამს), ვიდრე ეს იყო კოსმოსური სხივების მონაცემების შემთხვევაში, სადაც გამოყენებული იყო ტრადიციული ფოტოგამამრავლებლები. შესაძლებელია დაბალი დროითი გარჩევისუნარიანობის მიზეზი იყოს SiPM-ების ბევრად უფრო ხანგრძლივი სიგნალი. 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:



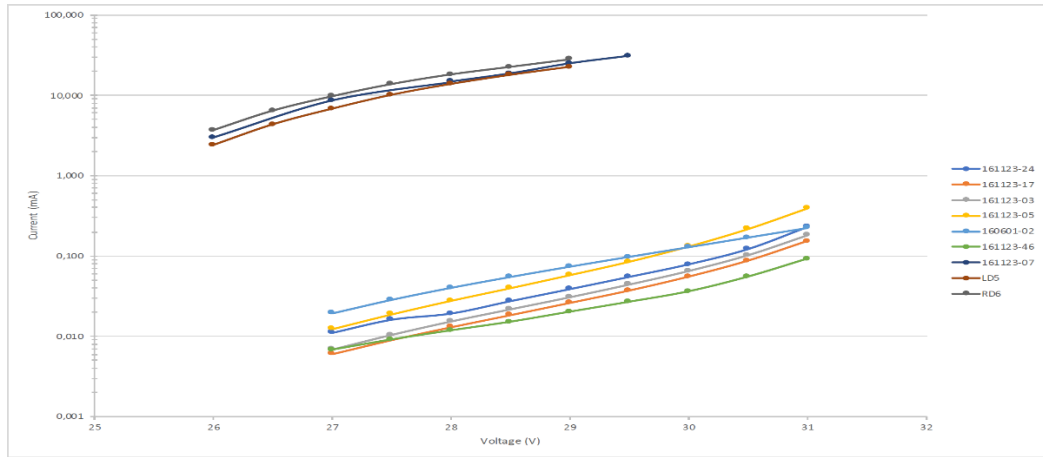
გრაფ. 6: სიგნალის დაყოვნება 1 მეტრის სადენში, CFD-ის გამოყენებით

გრაფიკის მიხედვით სიგნალის დაყოვნების დროითი გარჩევისუნარიანობა 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 არადამაკმაყოფილებელი შედეგები საჭიროებს დამატებით გადახედვას.

3.2 SiPM-ის მოდულის გაჭონვის დენების ავტომატური გაზომვა

JEDI პოლარიმეტრისათვის დაპროექტებული კალორიმეტრის მოდულები შედგება SiPM-ების მატრიცისაგან. მოდულების მახასიათებლების ზუსტი დადგენა მნიშვნელოვანია მისი შემდგომი ოპტიმალური ექსპლუატაციისათვის, რაც თავის მხრივ სხვადასხვა მოსამზადებელ ექსპერიმენტებს და გაზომვებს გულისხმობს. ერთ-ერთი ასეთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია ე.წ. „dark current“, ბნელი დენი [16]. აღნიშნული ტერმინი ახასიათებს სენსორში უკუმიმართულებით გავლილ დენს, მაშინ როდესაც სენსორი სიბნელეშია განთავსებული, და მისი გააქტიურება არ ხდება ფოტონების საშუალებით. პარამეტრის შინაარსობრივი გაიგივება შესაძლებელია გაჭონვის დენთან. შესაბამისად, შემდეგში გამოყენებული ტერმინი გაჭონვის დენი, გამოყენებულია „dark current“-ის შემცვლელად.

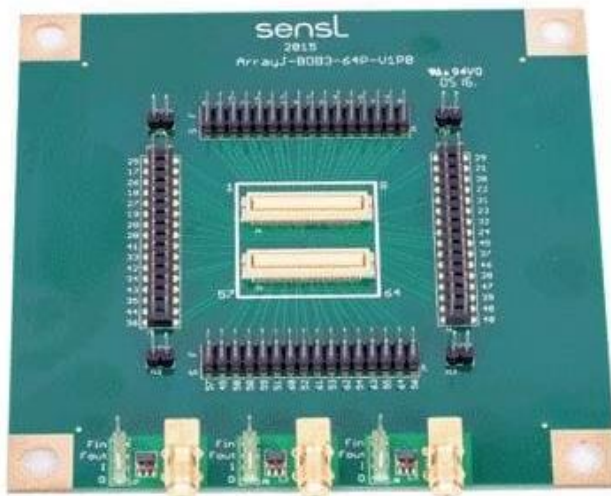
SiPM-ების გაჭონვის დენის ძაბვაზე დამოკიდებულების დადგენა დიდ როლს თამაშობს სენსორის გარჩევისუნარიანობის ოპტიმიზაციისათვის, რადგან კვების ძაბვის გაზრდით იზრდება გაძლიერების კოეფიციენტი და ამავდროულად გაჭონვის დენი. პირველი თავის მხრივ ზრდის გარჩევისუნარიანობას მეორე კი ამცირებს მას. შესაბამისად საჭიროა ოქროს შუალედის პოვნა. სწორედ ამიტომ ჩატარდა სპეციალური გაზომვები, რომელიც გვიჩვენებს მთლიანი SiPM-ის მოდულის (64 ცალი ფოტომგრძობიარე უჯრედს) გაჭონვის დენის დამოკიდებულებას კვების ძაბვაზე. გრაფიკი 7 გვიჩვენებს ცხრა სხვადასხვა სენსორის გაჭონვის დენის ძაბვაზე დამოკიდებულებას. გრაფიკზე აშკარად გამოკვეთილია ორი ჯგუფი. პირველი, რომლის შემადგენელი სამი მრუდის დენის მახასიათებელი სამი რიგით მეტია მეორე ჯგუფის მრუდებით გამოსახულ დენებთან შედარებით. მნიშვნელოვანია, რომ მეორე ჯგუფის გაზომვები ჩატარებულია სრულიად ახალ, გამოუყენებელ SiPM-ზე, ხოლო პირველი ჯგუფი კი აჩვენებს უკვე ექსპლუატაციაში შესული მოდულების მდგომარეობას რომელთაც შეხება ჰქონდათ ამაჩქარებლის ნაკადთან.



გრაფ. 7: SiPM-ის მოდულების გაონვის დენის დამოკიდებულება ძაბვაზე

რადგან, მაიონიზირებელი გამოსხივებით შესაძლებელია SiPM-ის ატომური მესრის სტრუქტურის დანგრევა, მნიშვნელოვანი გახდა დადგენილიყო SiPM-ის უკუდენის გაზრდის გამომწვევი ზუსტი მიზეზი. ამისათვის მნიშვნელოვანი იქნებოდა სენსორის მოდულზე ყველა ჩიპის ინდივიდუალური შემოწმება და მოდულის მდგომარეობის ამსახველი საერთო სურათის შექმნა.

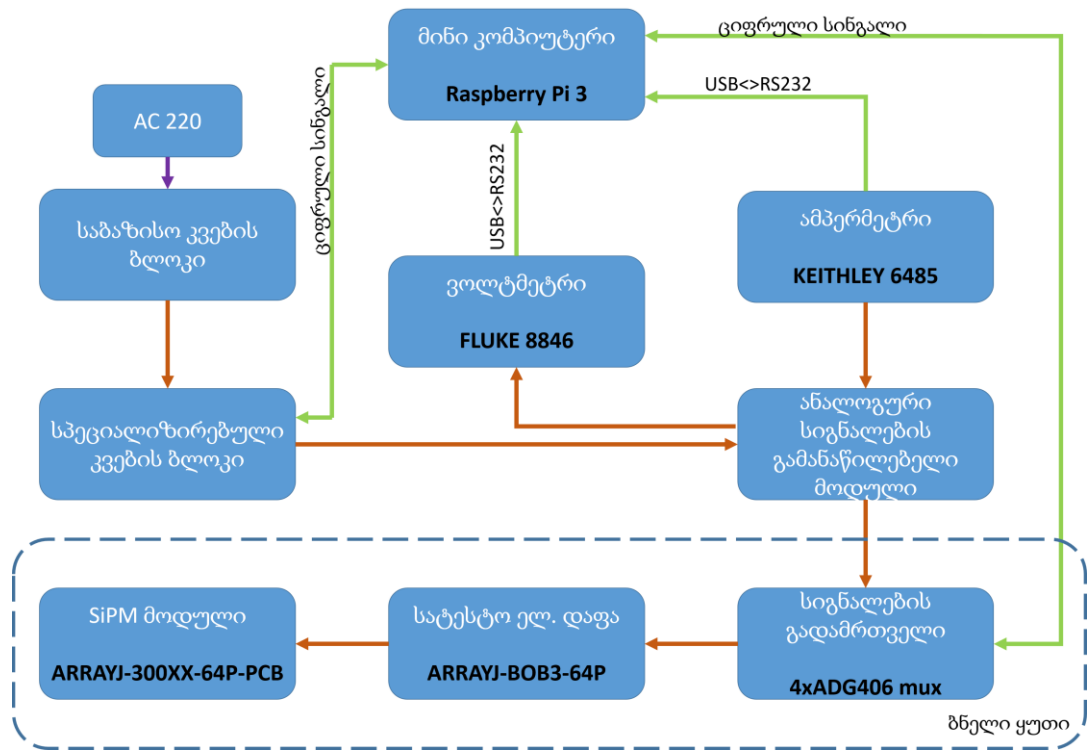
სენსორი მოდული აერთიანებს 64 ცალ, 3×3 მმ²-ზე SiPM-ს (დეტალურად იხ. თავი 2.2), რომელთან ინდივიდუალური წვდომა შესაძლებელია სპეციალური სატესტო ელ. დაფის გამოყენებით (იხ. სურ. 7). ელექტრო დაფა დაპროექტებული და დამზადებულია სწორედ სენსორის მწარმოებელი კომპანიის მიერ რათა მომხმარებელმა თავისუფლად შეძლოს მგრძნობიარე ელემენტის პარამეტრების შესწავლა სხვადასხვა პირობებში და მისი ადაპტირება კონკრეტულ მიზნებზე [10].



სურ. 7: Sensel J-სერიების, 8x8 მოდულის სატესტო ელ. დაფა

დაფა თავის მხრივ ასრულებს კონექტორების გადამყვანის ფუნქციას, თუმცა მასზე რაიმე აქტიური ელემენტი მოთავსებული არ არის. იმისათვის რომ მოდულის ყველა SiPM-ის გაჟონვის დენები გაიზომოს საჭიროა მოდულის სიბნელეში მოთავსება და ყველა სენსორზე უკუძაბვების მორიგეობითი მოდება. ასეთი სამუშაოს შესრულება ავტომატიზაციის გარეშე რატემაუნდა რთულია. მითუმეტეს, რომ სენსორი განთავსებული უნდა იყოს სიბნელეში და არცერთ ჯერზე არ უნდა მოხდეს მისი ფოტონებით დაბომბვა, როდესაც მასზე მოდებულია ძაბვა.

ამოცანის სპეციფიკიდან გამომდინარე დაიგეგმა და აეწყო გაჟონვის დენების ავტომატური გაზომვის სისტემა. სისტემა აერთიანებს: ვოლტმეტრს, ამპერმეტრს, სატესტო ელ. დაფას, საბაზისო და სპეციალიზირებულ კვების ბლოკებს, მინი კომპიუტერს, „ბნელ ყუთსა“ და სიგნალების გამანაწილებელ მოდულს. გრაფიკულად სისტემა მთლიანობაში შემდგენიარად გამოიყურება:



ნახ. 4: გაჟონვის დენების გამზომი ავტომატური სისტემის ბლოკსქემა

განვიხილოთ გრაფიკზე გამოსახული ელემენტები ინდივიდუალურად. დასაწყისში კი უნდა აღინიშნოს, რომ ნახ. 4-ზე გამოსახული წითელი ფერის ხაზები აღნიშნავენ სისტემის ანალოგურ ნაწილს, ხოლო მწვანე ხაზები - ციფრულს. საბაზისო კვების ბლოკი ეს არის ლაბორატორიული მუდმივი დენის კვების ბლოკი,

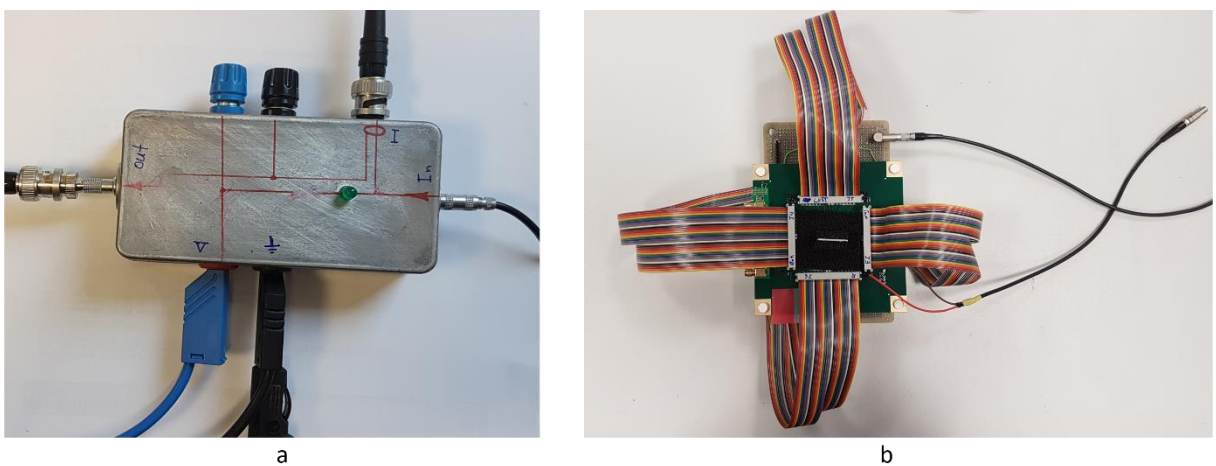
რეგულირებადი გამოსავალი ძაბვით. ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულია წრფივი რეგულირების კვების ბლოკი ზედმეტი ხმაურის თავიდან ასაცილებლათ. გაზომვების დროს კვების ბლოკზე სტაბილურად აყენია 34 ვოლტი გამოსავალი ძაბვა, რომელიც უწყვეტად მიეწოდება სპეციალიზირებულ კვების ბლოკს. სპეციალიზირებული კვების ბლოკი არის JEDI პოლარიმეტრის ფარგლებში დამზადებული მაღალი სტაბილურობისა და სიზუსტის მუდმივი ძაბვის წყარო. იგი დამზადებულია სპეციალურად ზემოთ განხილული SiPM-ების მოდულებისთვის [13]. როგორც ნახ. 4-ზეა გამოსახული იგი კვებას იღებს საბაზისო კვების ბლოკიდან და შემდგომ კვებას აწვდის ანალოგური სიგნალების გამანაწილებელ მოდულს. ექსპერიმენტის დაწყებისა და დასრულების მონაცვლებისას კვების მიწოდების ჩართვასა და გათიშვას უზრუნველყოფს მინი კომპიუტერი 3.3 ვოლტიანი TTL სიგნალის მიწოდებით. მნიშვნელოვანია რომ აღნიშნული სიგნალი არის ოპტიკურად განმხოლოებული, რათა თავიდან იქნება არიდებული კვების ბლოკის ანალოგურ ხაზში ხმაურის შეტანა. სპეციალიზირებული კვების ბლოკის გამოსავალი ძაბვის მომართვა შესაძლებელია მხოლოდ მექანიკურად, მასზე მოთავსებული მრავალბრუნიანი რეოსტატის საშუალებით. სამომავლოთ იგეგმება მისი დისტანციური რეგულირების ფუნქციით გაუმჯობესება.

სპეციალიზირებული კვების ბლოკის სიგნალი პირდაპირ მიეწოდება გამანაწილებელ მოდულს. მოდული წარმოადგენს ალუმინის ყუთს, რომელზეც მოთავსებულია LEMO, BANANA, და BNC სტანდარტის მაერთებლები (ე.წ. „კონექტორები“). მაერთებლები ყუთის შიგნით ისეა დაკავშირებული, რომ დატვირთვის წრედში მიმდევრობით ერთდება ამპერმეტრი და შემავალი ძაბვის პარალელურად ვოლტმეტრი. ალუმინის მოდულის როლი, წრედში მხოლოდ ამპერმეტრის და ვოლტმეტრის ჩართვაა. მართალია, ასეთი შეერთების გაკეთება ბევრნაირად არის შესაძლებელი მაგრამ ალუმინის ყუთი გვიცავს ელექტრომაგნიტური ხმაურისაგან და მასზე დამონტაჟებული მაერთებლები უზრუნველყოფენ მოწყობილობების მჭიდრო და საიმედო ელექტრო კავშირს.

გრაფ. 7-ის მიხედვით, 64 ცალი სენსორი ჯამური გაჟონვის დენები დაუზიანებელი სენსორი შემთხვევაში ათეული მიკროამპერის დიაპაზონშია.

შესაბამისად 1 ცალი სენსორის გაჟონვის დენი მოსალოდნელია, რომ 64-ჯერ ნაკლები იქნება ვიდრე ეს მთლიანი მოდულის შემთხვევაში იყო. ასეთი მცირე დენების გაზომვა კი მოითხოვს სპეციალურ ამპერმეტრს, ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულია KEITHLEY-ის წარმოების პიკოამპერმეტრი, მოდელი - 6485 [17]. აღნიშნული ამპერმეტრს აქვს სერიული ინტერფეისი რითაც შესაძლებელია მისი დისტანციური კონტროლი და მონაცემთა შეგროვება. ჩვენს შემთხვევაში პიკოამპერმეტრი მინი კომპიუტერთან სერიული ინტერფეისით ახდენს ინფორმაციის მიმოცვლას. იგივე პრინციპით მუშაობს FLUKE-ს წარმოების მულტიმეტრი, ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებული, როგორც ვოლტმეტრი [18]. იგი მუდმივ რეჟიმში აკონტროლებს კვების ბლოკის მიერ მიწოდებულ ძაბვას და მონაცემებს აგზავნის ასევე მინი კომპიუტერში.

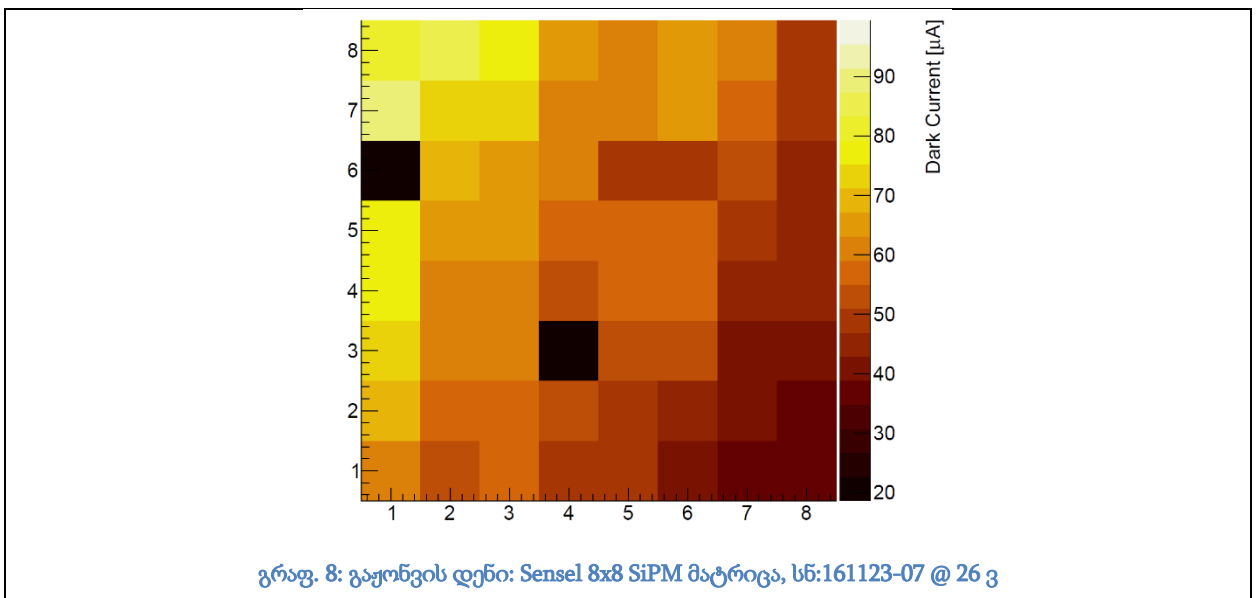
სპეციალიზირებული კვების ბლოკი, ანალოგური სიგნალების გამანაწილებელი მოდულის გავლით კვებას სიგნალების გადამრთველ ელ. დაფას. აღნიშნული ელ. დაფა აღჭირვილია ოთხი ცალი, იდენტური მულტიპლექსერით, მოდელი: ADG406 [19]. თითოეულ მულტიპლექსერს აქვს 16 არხი, ოთხი ცალი ასეთი მულტიპლექსერი კი საკმარისია SiPM-ის მოდულის ყველა სენსორთან წვდომისათვის. არხების გადართვას აკონტროლებს მინი კომპიუტერი. კონტროლისათვის საჭიროა 3 ბიტი (16 არხის გადასართავად) და 4 ბიტი ოთხი ცალი მულტიპლექსერების გადასართავად. ჯამში 7 ბიტი. მულტიპლექსერების ელ. დაფა სადენების საშუალებით უკავშირდება სატესტირო დაფას რომელზეც შეერთებულია გასაზომი SiPM-ის მოდული.



სურ. 8: სიგნალების გამანაწილებელი (a) და სიგნალების გადამრთველი ელ.დაფა (b)

სისტემის სრულ ავტომატიზაციას და მართვას ერთი მინი კომპიუტერი ასრულებს, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში არის Raspberry Pi 3 [11]. კომპიუტერი

მუშაობს Linux-ის ოპერაციული სისტემის ბაზაზე და მასში გაშვებული Python-ის სკრიპტი წარმართავს ექსპერიმენტს. Raspberry არის საუკეთესო შესაბამისობაში ექსპერიმენტის სპეციფიკაციასთან, ჩაშენული USB პორტები გამოყენებულია ამპერმეტრთან და ვოლტმეტრთან საკომუნიკაციოდ, ხოლო GPIO მაერთებლები იდეალურია ციფრული სიგნალების გენერირებისათვის, რომლებიც თავის მხრივ მართავს კვების ბლოკს და მულტიპლექსერებს. კომპიუტერი მიერ შესრულებული ერთი სრული გაზომვა ხდება შემდეგნაირად: პირველ რიგში იგი გააქტიურებს სპეციალიზირებულ კვების ბლოკს, მას შემდეგ, რაც კვების ბლოკის ძაბვა ნორმაში ჩადგება (3-4წმ), იგი მულტიპლექსერს გაუგზავნის სიგნალს რომ დენმა გაიაროს პირველ სენსორში. შემგომ პიკოამპერმეტრი გამოყენებით აიღებს ანათვლებს და მოახდენს მის ფაილში ჩაწერას. შემდგომ ისევ მულტიპლექსერის დახმარებით დენს გაატარებს მხოლოდ მეორე სენსორში და ასე გააგრძელებს მანამ, სამან არ გაივლის 64-ვე სენსორს. როდესაც უკვე ყველა სენსორის უკუდენები გაზომილია და ჩაწერილია ფაილში უსაფრთხოების მიზნით წყვეტს კვებას.



გრაფიკ 8-ზე ნაჩვენებია ერთ-ერთი ასეთი გაზომვის შედეგები. ტესტირება ჩატარებულია SiPM-ზე სერიული ნომრით: 161123-07. აღნიშნული მოდულის ჯამური გაჟონვის დენი, 26 ვოლტი უკუძაბვის შემთხვევაში, რამდენიმე მილივოლტის დიაპაზონშია, რაც 1000 ჯერ მეტია დაუსხივებელი სენსორების გაჟონვის დენთან შედარებით. გრაფ. 8-ის მარტივი ანალიზით ჩანს, რომ გაჟონვის დენები სენსორების

ერთი წიბოდან თანდათანობით მცირდება საპირისპირო წიბოს მიმართულებით. ცალსახად ეს ინფორმაცია არაფერს ამტკიცებს მაგრამ იმ ფაქტორის გათვალისწინებით, რომ აღნიშნული წიბო ზუსტად ემთხვევა ნაკადის ტრაექტორიის სიახლოვეს უკვე აშკარაა რადიაციის დამაზიანებელი ეფექტი SiPM-ებში.

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_oxyorthosilicate
- [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/>
- [16] Pagano, Roberto & Libertino, Sebania & Valvo, Giusy & RUSSO, Alfio & Sanfilippo, Delfo & CONDORELLI, Giovanni & MARTINO, Clarice & CARBONE, Beatrice & Fallica, G. & Lombardo, Salvatore. (2012). Silicon Photomultipliers: Dark Current and its Statistical Spread. Sensors & Transducers Journal. 14. 151.
- [17] <https://www.tek.com/keithley-low-level-sensitive-and-specialty-instruments/keithley-series-6400-picoammeters>
- [18] <https://www.fluke.com/en-us/product/precision-measurement/bench-instruments/fluke-8845a-8846a>
- [19] <https://www.analog.com/en/products/adg406.html>