

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ზუსტ  
და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი



ზღვის ოპტიკური ფონის შესწავლა ხმელთაშუა ზღვის KM3NeT ნეიტრინო ტელესკოპში

დაიანა ბანდური

ნაშრომი შესრულებულია ფიზიკის ბაკალავრის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

ხელმძღვანელი: რევაზ შანიძე - ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის  
სახელმწიფო უნივერსიტეტის ასოცირებული პროფესორი, მაღალი ენერგიების ფიზიკის  
ინტიტუტის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელი

ნაშრომი შესრულებულია შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული  
სამეცნიერო ფონდის საგრანტო პროექტის FR-22-13708 ფარგლებში.

თბილისი

2024 წელი

# სარჩევი

ანოტაცია.....	3
Abstract .....	4
შესავალი .....	5
KM3NeT პროექტი.....	7
KM3NeT ოპტიკური მოდული .....	11
ჩერენკოვის გამოსხივება.....	13
KM3NeT ექსპერიმენტში არსებული ფონი .....	16
კალიუმ-40 .....	16
KM3NeT ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზი.....	20
ORCA-6 მონაცემების ანალიზი KM3NeT პროექტის სერვერზე.....	22
კალიბრაცია 40K საშუალებით.....	31
დასკვნა .....	34

## ანოტაცია

KM3NeT არის დიდი კვლევითი ინფრასტრუქტურა, რომელიც შეიცავს ნეიტრინული დეტექტორებს (ტელესკოპებს) ხმელთაშუა ზღვაში ეს დეტექტორებია ARCA(Astroparticle Research with Cosmics in Abyss) და ORCA (Oscillation Research with Cosmics in Abyss). KM3NeT დეტექტორები აფიქსირებენ მკრთალ ჩერენკოვის გამოსხივებას, რომელიც წარმოიქმნება ნეიტრინოს ურთიერთქმედებაში დაბადებული დამუხტული ნაწილაკებისგან დეტექტორის მოცულობაში.

ნაშრომის მთავარ მიზანს წარმოადგენს ზღვის ოპტიკური ფონის შესწავლა, რომელიც უმეტეს წილად მოდის 40K იზოტოპის  $\beta$  დაშლებზე. დეტექტორების ფონური წყაროების შესწავლა აუცილებელია ნეიტრინოების შემთხვევების აღდგენისთვის. ამ შემთხვევების შესწავლა დროითი კალიბრაციის საშუალებას იძლევა.

ნაშრომი დაფუძნებულია ORCA6 დეტექტორზე მიღებულ მონაცემებზე, რადგან KM3NeT ექსპერიმენტის მონაცემთა ძირითადი ნაწილი ზუსტად ამ კონფიგურაციაზე მოდის. მონაცემები ინახება თსუ-ს მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტის KM3NeT სერვერზე და მუშავდება კომპიუტერული ალგორითმების საშუალებით, რაც საშუალებას გვაძლევს აღვადგინოთ ნეიტრინოების ტრაექტორია და შევისწავლოთ ნეიტრინული ოსცილაციები.

## **Abstract**

KM3NeT is a large research infrastructure which contains a network of a deep-sea neutrino detectors in the Mediterranean Sea. KM3NeT detects faint radiation - Cherenkov radiation, which is produced when a neutrino interacts with a network of optical sensors.

This paper discusses the KM3NeT experiment and its detectors ARCA and ORCA, their working principles.

The paper is based on the data obtained on the ORCA6 detector, since the main part of the data of the KM3NeT experiment comes from this configuration. The data is stored on the KM3NeT server of the Institute of High Energy Physics of TSU and processed by computer algorithms, which allows us to determine the source of the radiation - the trajectory of the particle, the origin of the neutrino, and others.

The neutrino propagates in a straight line, it has a weak interaction. Due to the small probability of interaction with other substances, it is difficult to detect. The neutrino does not lose its properties, so it is an ideal tool for studying the universe.

The main goal of the work is the study of the optical background of the sea and the neglect of background sources by the detectors for the accuracy of the experiment. The largest part of the optical background of the sea comes from the radiation of the radioactive isotope K-40.

## შესავალი

KM3NeT პროექტის ძირითადი მიზანია ნეიტრინოების თვისებების და მათი ასტროფიზიკური წყაროების შესწავლა.

ნეიტრინოები მიეკუთვნებიან ლეპტონებს, რომლებიც მონაწილეობენ სუსტ, ელექტრომაგნიტურ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედებაში. ნეიტრინო ელექტრულად ნეიტრალური ელემენტარული ნაწილაკია, მისი სპინი არის  $\frac{1}{2}$ , ლეპტონური რიცხვია 1 და ის რამდენიმე რიგით უფრო მსუბუქია ვიდრე სხვა ფერმიონები.

სუსტი ურთიერთქმედების მანძილი დაახლოებით  $10^{-17}$ მ რიგისაა, გრავიტაციული ურთიერთქმედება კი იმდენად მცირე რომ უგულებელყოფაა შესაძლებელი ნაწილაკების ურთიერთქმედების განხილვისას. ასეთი ურთიერთქმედება იძლევა ნებისმიერი გარემოს განჭოლვის საშუალებას.

ნეიტრინოები მნიშვნელოვანია მაღალი ენერჯის კოსმოსური სხივების წყაროს წარმოშობის ძიებაში, ისინი გადამწყვეტ როლს თამაშობენ დაკვირვებადი სტრუქტურების, გალაქტიკების, გალაქტიკების კლასტერების და სხვა უფრო დიდი მასშტაბის კოჰერენტული სტრუქტურების ფორმირებაში.

არსებობს სამი არომატის ნეიტრინო: ელექტრული ( $\nu_e$ ), მიუონური ( $\nu_\mu$ ) და ტაუონური ( $\nu_\tau$ ) და მათი შესაბამისი ანტინაწილაკები ( $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ ).

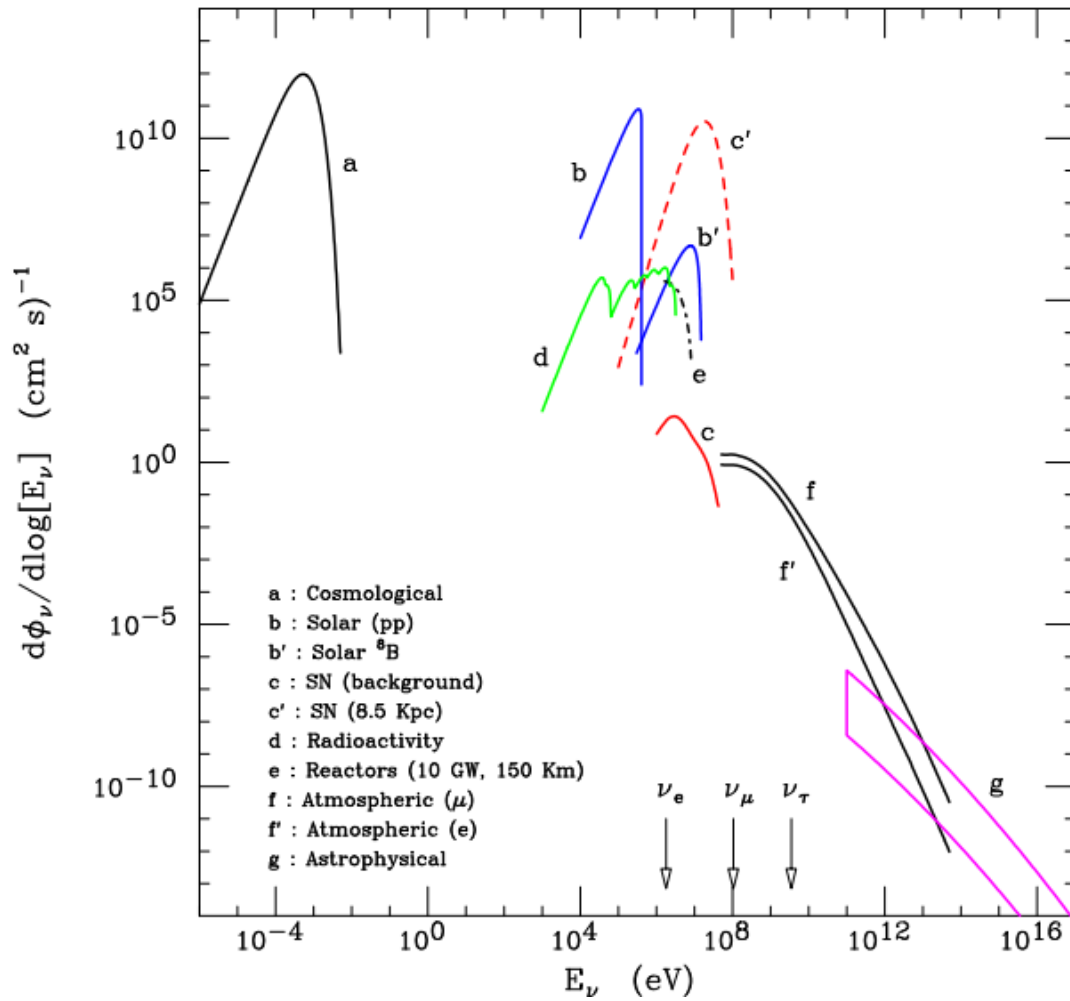
ნეიტრინოს შესახებ ჰიპოთეზა თავდაპირველად 1930 წელს გამოთქვა პაულიმ. ელექტრონული ნეიტრინო აღმოჩენილ იქნა 1956 წელს კოვანისა და რეინეს მიერ. მიუონური ნეიტრინო აღმოჩენილი იყო ლედერმანის, შვარცის და სტეინბერგის მიერ. ტაუ ნეიტრინო აღმოაჩინეს კოდამამ და სხვებმა.

ნეიტრინოების ძირითადი წყაროები მოყვანილია(სურ. 1):

- a. დიდი აფეთქების კოსმოსური ნეიტრონული ფონი - რელიქტური ნეიტრინოები, ანუ სამყაროს ევოლუციის ადრეული ეპოქებიდან შემორჩენილ ნეიტრინოები.
- b. ბირთვული რეაქციები ვარსკვლავებში - მზის ნეიტრინოები წარმოიქმნებიან ჯაჭვური ბირთვული რეაქციების შედეგად მზის ბირთვში. მზის ნეიტრინოების

ყველაზე დიდ ნაწილს წარმოებს ე/წ pp-ჯაჭვი (პროტონ-პროტონული). ხოლო მაღალი ენერგიების 8B-მზის ნეიტრინოებს (მაქსიმალური 15 მეგ ენერგიის მქონე) ძალიან მცირე წვლილი შეაქვთ (0.008%) მთლიან ნაკადში.

- c. ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქება - II ტიპის სუპერნოვა შედეგია მასიური ვარსკვლავის სწყაფი კოლაფსისა და ძლიერი აფეთქების. ნეიტრინოს ემისიის თეორია სუპერნოვაში დამტკიცდა 1987 წლის 23 თებერვალს, როცა ნეიტრინოებმა და სუპერნოვას რადიაციამ(SN1987A), რომელიც აფეთქდა 170 000 წლის წინ მაგელანის ღრუბელში მოაღწია დედამიწამდე. ორმა დეტექტორმა: კამიოკანდე იაპონიაში და IMB ამერიკაში დააფიქსირა ეს მოვლენა.
- d. რადიოაქტიური იზოტოპების დაშლით - რადიოაქტიური იზოტოპების დაშლა დედამიწაზე წარმოქმნის ნეიტრინოების ნაკადს ენერგიით MeV რეგიონში. ძირითადი წვლილი კი მოდის 40K იზოტოპის დაშლაზე ( $40K \rightarrow 40Ca + e + \bar{\nu}_e$ ), ასევე ურანიუმ-238 დაშლაზე ( $238U \rightarrow 206Pb + 8\alpha + 6e^- + 6\bar{\nu}_e$ ) და თორიუმ-232 ის დაშლაზე ( $232Th \rightarrow 208Pb + 6\alpha + 4e^- + 4\bar{\nu}_e$ ). წარმოიქმნება მხოლოდ ელექტრული ანტინეიტრინოები.
- e. ბირთვული რეაქციები რეაქტორებში - დედამიწა გამოყოფს დაახლოებით 40 ტერავატ ენერგიას, ამ ენერგიის გადინების დაახლოებით 40% განპირობებულია რადიოაქტიური ბირთვების დაშლით, ამის 90% გამოწვეულია დაშლის ჯაჭვებით ურანის და თორიუმის დაშლის ჯაჭვების გამო.
- f. ატმოსფერული ნეიტრინოები - დედამიწა იღებს კოსმოსური სხივების დაახლოებით იზოტროპულ და მუდმივ ნაკადს. პირველადი კოსმოსური სხივები, რომლებიც ურთიერთქმედებენ ზედა ატმოსფეროში, წარმოქმნიან უამრავ მეორად ნაწილაკებს, მათ შორის დამუხტულ პიონებსა და კაონებს, რომლებიც თავის მხრივ წარმოქმნიან ნეიტრინოებს ამ ტიპის დაშლისას.
- g. კოსმოგენური ნეიტრინოები - ნეიტრინოების დაბადებას ადგილი აქვს ატმოსფეროს ბირთვებთან ურთიერთქმედების დროს (სურათი.3). ატმოსფერული ნეიტრინოები კოსმოსური ნეიტრინოების დაკვირვებისთვის ფონს წარმოადგენს, თუმცა მათი საშუალებით შეიძლება ნეიტრინოების თვისებების შესწავლა.

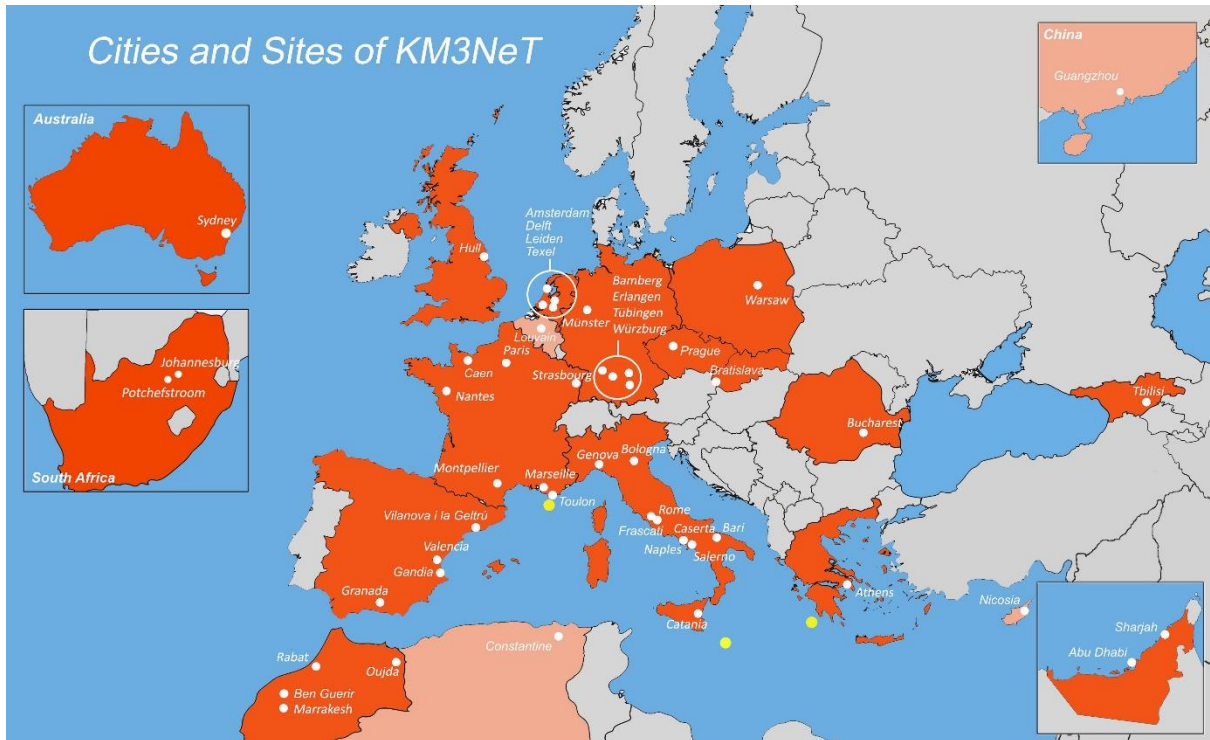


სურ.1 ნეიტრინოს წყაროები

### KM3NeT პროექტი

KM3NeT არის ევროპული კვლევითი ინფრასტრუქტურა, რომელიც შეიცავს ნეიტრინო დეტექტორების (ტელესკოპები ARCA, ORCA) ქსელს ხმელთაშუა ზღვაში. კოლაბორაციაში (სურ. 2) ჩართულია 16-მდე ქვეყანა და შესაბამისი სამეცნიერო ორგანიზაციები. პროექტის მიზანია კოსმოსური სხივების წყაროების აღმოჩენა და შესწავლა ნეიტრინოების საშუალებით და ნეიტრინული ოსცილაციების შესწავლა ატმოსფერული ნეიტრინოების საშუალებით.

KM3NeT დეტექტორები აფიქსირებენ მკრთალ ჩერენკოვის გამოსხივებას, რომელიც წარმოიქმნება ნეიტრინოს გარემოსთან ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქნილი დამუხტული ნაწილაკების გავრცელებისას გარემოში ოპტიკური სენსორების ქსელთან.



სურ. 2 KM3NeT კოლაბორაცია. აღნიშნულია კოლაბორაციის წევრი ქვეყნები, წერტილებად მონიშნულია დეტექტორების ლოკაციები, ხოლო ვარდისფრად ქვეყნები, რომლებსაც აქვთ დამკვირვებლის სტატუსი.

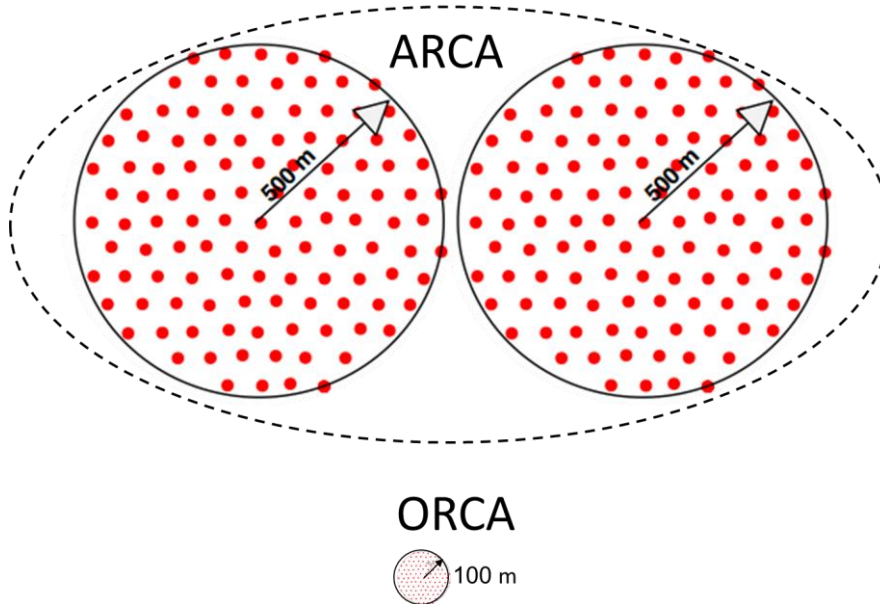
KM3NeT/ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in Abyss) დეტექტორი მდებარეობს 3500 მეტრის სიღრმეზე, დაახლოებით 80 კილომეტრის დაშორებით სიცილიის (იტალია) სანაპიროდან (ქ. პორტო-პალო დი კაპო პასერო). ARCA განკუთვნილია მაღალი ენერგიების (100გევ -1ტევ -ზე მეტი) მქონე ნეიტრინოების დაკვირვებისთვის.

KM3NeT/ORCA (Oscillation Research with Cosmics in Abyss) კი წარმოადგენს დეტექტორს, რომელიც 2500მ სიღრმეზეა განლაგებული, დაახლოებით 40 კილომეტრის დაშორებით საფრანგეთის ქალაქ ტულონიდან. ORCA დეტექტორის საშუალებით 1გევ-100გევ ენერგიამდე ატმოსფერული ნეიტრონების დაკვირვებაა შესაძლებელი. KM3NeT/ORCA ოპტიმიზირებულია ნეიტრინოს მასის იერარქიის გაზომვისთვის.



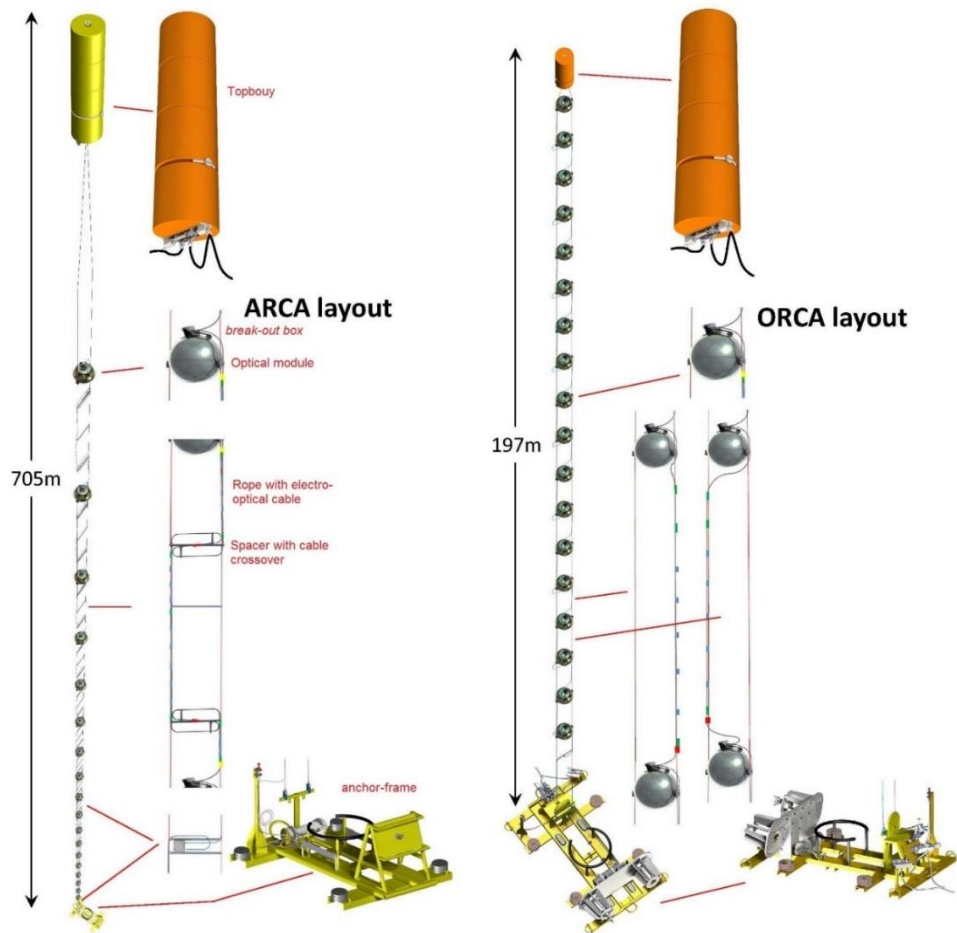
ARCA და ORCA დეტექტორები შედგებიან ოპტიკური მოდულებისგან (Digital Optical Module - DOM), რომელთა სივრცული განლაგების სიმკვრივე განსხვავდება ერთმანეთისგან. დეტექტორები წარმოადგენენ რეგისტრაციის ბლოკების ერთობლიობას.

18 DOM-ი იწყობა ვერტიკალურ ხაზზე, რომელსაც DU ეწოდება. 115 ასეთი DU-ს ერთობლიობა წარმოადგენს ერთ ბლოკს (BB). საბოლოო კონფიგურაციის მიღწევისას ARCA-ში იქნება ორი, ხოლო ORCA-ში ერთი ასეთი ბლოკი. ARCA და ORCA დეტექტორების DOM-ებს შორის ვერტიკალური მანძილი შესაბამისად 36 და 9 მეტრს წარმოადგენს. ჰორიზონტალური მანძილი თითოეულ ხაზს შორის ARCA-ს შემთხვევაში საშუალოდ 90, ხოლო ORCA-სთვის 20 მეტრია (სურ. 3).



**სურ. 3 ARCA და ORCA დეტექტორების ზომების შედარება**

ARCA დეტექტორის DOM-ებს შორის მანძილი დაახლოებით 40მ, ხოლო ერთეულებს შორის მანძილი 100მ. ბლოკის სიმაღლე დაახლოებით 700მ. ორი ბლოკის მოცულობა დაახლოებით 1 კუბური კილომეტრია. KM3NeT ARCA და ORCA დეტექტორების განლაგება მოყვანილია (სურ.4).



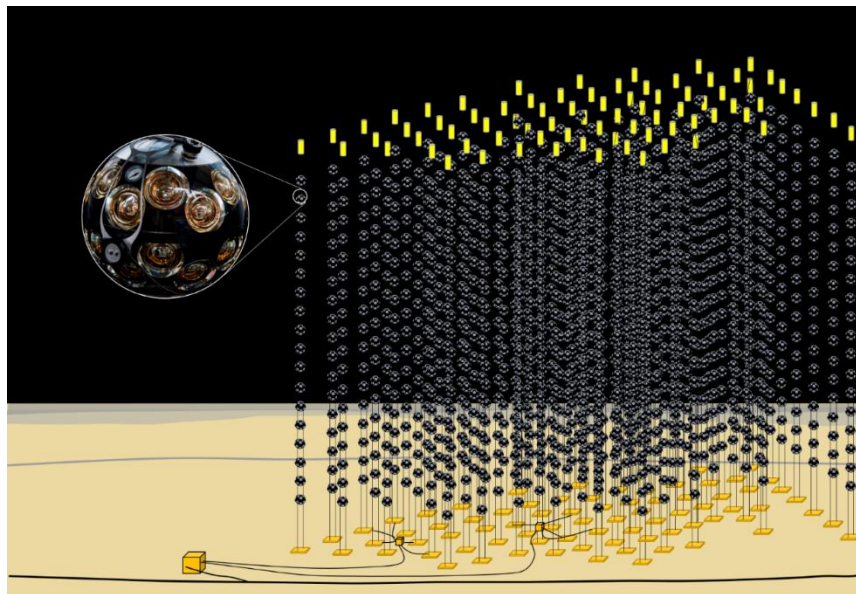
სურ. 4 ARCA და ORCA დეტექტორების წყობისა და დიზაინის სქემა

დომების სრული რაოდენობა ბლოკში 2070-ს შეადგენს. თითოეულ დომში 31 ფოტოგამამრავლებელია, ფოტოგამამრავლებლების საერთო რიცხვი ბლოკში შეადგენს  $2070 \times 31 = 64170$ .

დომში მოთავსებულ ფოტო-გამამრავლებლებს და სხვა სენსორებს, ელექტრული კვება მიეწოდება საერთო კაბელის საშუალებით. ამავე კაბელში, ოპტიკური არხების საშუალებით, ფოტო-გამამრავლებლის ელექტრული სიგნალები გადაეცემა ნაპირზე, სადაც განლაგებულია დეტექტორის მართვისა და მონაცემების მიღების სადგური.

მოდულის მიერ დაფიქსირებული სინათლის ინტენსიობისა და ამ მოდულის მდებარეობის საშუალებით შესაძლებელი ხდება ნაწილაკის ტრაექტორიის გარკვეული მიახლოებით აღდგენა. დეტექტორის ფუნქციონირება დამოკიდებულია ზღვის ფსკერზე მოთავსებული კაბელებისა და მათი დამაკავშირებელი კვანძების გამართულ მუშაობაზე.

რაც შეეხება ოპტიკური მოდულის დამაგრების სქემას, (სურ. 5). ის მაგრდება ტროსზე. მას ზემოდან ემაგრება ელექტრო-ოპტიკური კაბელი, რომელიც დომის კვებისა და ფოტო-დეტექტორიდან მიღებული სიგნალების გადასაცემად გამოიყენება.

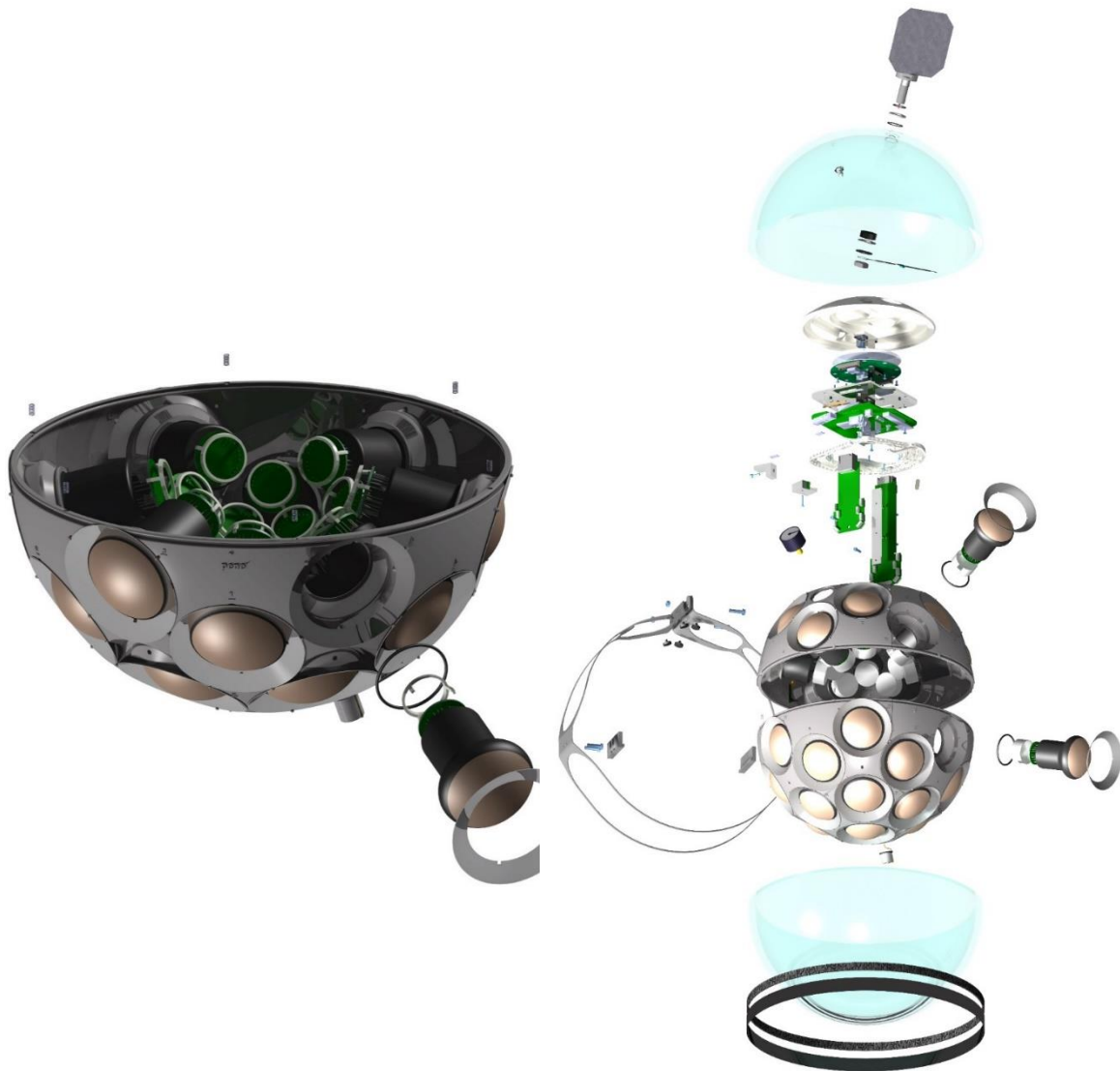


სურ.5 ოპტიკური მოდულების განლაგება და დამაგრების სქემა.. ყვითელი ცილინდრი ტივტივაა, რომელიც მოდულების ვერტიკალურ მდგომარეობას განაპირობებს.

### KM3NeT ოპტიკური მოდული

მე-6-7 სურათებზე ნაჩვენებია ოპტიკური მოდული დაშლილ მდგომარეობაში. მრგვალი ფოტო-სენსორები არეგისტრირებენ ჩერენკოვის გამოსხივებას, რომელიც გამოწვეულია ნეიტრონების ზღვის ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას წარმოქმნილი დამუხტული ნაწილაკების საშუალებით, მათი გარემოში გავრცელების სიჩქარე აღემატება სინათლის გავრცელების სიჩქარეს ამავე გარემოში. დაფიქსირებული

სიგნალის მუშევრებით კი გარკვეული ცდომილებებით შეგვიძლია დავადგინოთ ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორია.



სურ.6 - 7 ოპტიკური მოდული დაშლილ მდგომარეობაში

ოპტიკური მოდული მუშაობს ნანოწამიანი დროის სიზუსტით. იგი წარმოადგენს ეფექტურ ინსტრუმენტს ფონის შემცირებისთვის, რომელიც გამოწვეულია ზღვის წყალში 40K რადიოაქტიური დაშლებითა და ბიოლუმინესცენციით.

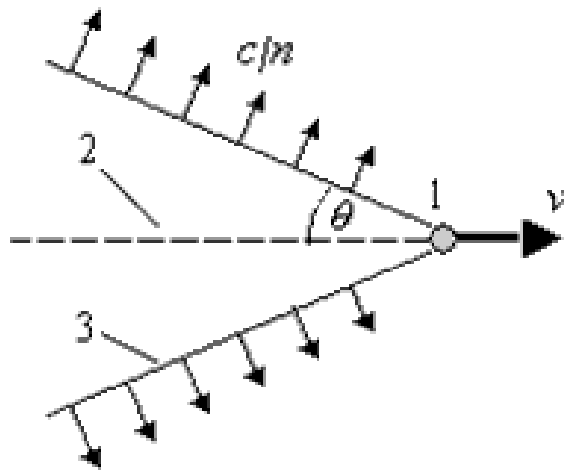
## ჩერენკოვის გამოსხივება

ჩერენკოვის გამოსხივება (ან ვავილონ-ჩერენკოვის გამოსხივება) წარმოიქმნება, როდესაც დამუხტული ნაწილაკი მოძრაობს გამჭვირვალე გარემოში, რომლის სიჩქარე  $v$  აღემატება ამ გარემოში სინათლის სიჩქარეს,  $v > c/n$ -ისთვის, სადაც  $c$  არის სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში და  $n$  არის გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი.

ეს გამოსხივება აღმოაჩინა 1934 წელს ჩერენკოვმა და ახსნა 1937 წელს. თუმცა სწარად ახსნეს ტამმა და ფრანკმა (Tamm & Frank, 1967). ამ აღმოჩენისთვის სამივეს მიენიჭა ნობელის პრემია 1958 წელს.

ჩერენკოვის გამოსხივება წარმოადგენს მრავალი ატომის გაერთიანებულ გამოსხივებას, რომელიც მდებარეობს ნაწილაკების ტრაექტორიის გასწვრივ და პოლარიზებულია მისი ელექტრული ველით. ამრიგად, ეს არ არის ნაწილაკი, რომელიც პირდაპირ ასხივებს, არამედ ის გარემო, რომელშიც ნაწილაკი მოძრაობს.

განვიხილოთ მუხტი, რომელიც გამჭვირვალე გარემოში მოძრაობს მუდმივი  $v$  სიჩქარით, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელი  $z$  ღერძის გასწვრივ არის  $n$ . სინათლის კლასიკური ტალღური თეორიის თანახმად მუხტის ტრაექტორიის ყოველი წერტილი შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების წყარო, რომლიდანაც ყოველი მიმართულებით ვრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღა  $c/n$  სიჩქარით (სურ.8).

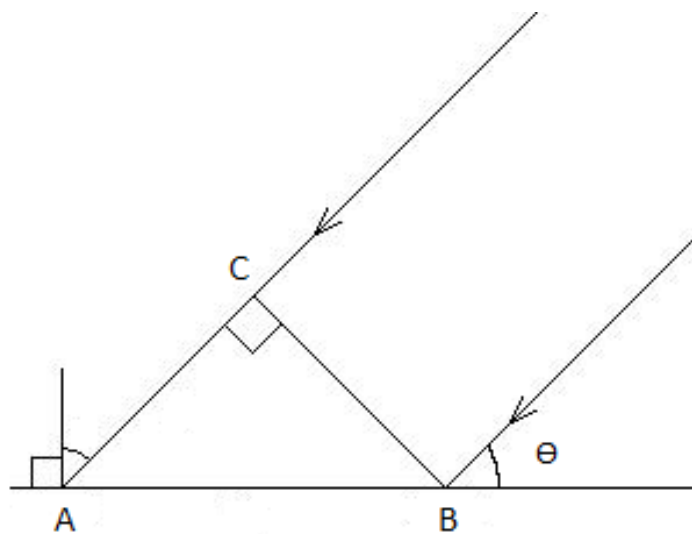


სურ. 8 ჩერენკოვის გამოსხივების გეომეტრიული ინტერპრეტაცია

A და B წერტილებიდან ტრანსპარენტისადმი  $\theta$  კუთხით წამოსული  $\Delta l$  - ტალღის სიგრძეთა სვლათა სხვაობა განისაზღვრება დროით -

$$t_1 = AC \cdot \frac{c}{n} \text{ და } t_2 = \frac{AC}{v} \quad (1)$$

B წერტილში გამოსხივების დაწყებამდე  $t_1$ -დან  $t_2$  მომენტამდე გასული დრო ტოლია A წერტილიდან B წერტილში მუხტის გადაადგილების დროის (სურ. 9)



სურ. 9 ჩერენკოვის გამოსხივებაში სხივების სვლათა სხვაობა

$$\Delta l = AC \cdot \frac{c}{n} (t_1 - t_2) = AB \cdot \left( \frac{1}{\beta n} - \cos\theta \right), \beta = \frac{v}{c} \quad (2)$$

ინტერფერენციის თეორიიდან ცნობილია, რომ როდესაც:

$$\Delta l = \frac{m\lambda}{2}, (m = 0, 1, 2 \dots) \quad (3)$$

თუ  $m$  კენტი რიცხვია მაშინ ტალღები ერთმანეთს ახშობენ მთლიანად ხოლო, როდესაც ლუწი რიცხვია ან ნულის ტოლია, ხდება ამპლიტუდის გაძლიერება.  $\lambda$ - ტალღის სიგრძეა. დავუშვათ:

$$\cos\theta \neq \frac{1}{\beta n} \quad (4)$$

მაშინ  $AB$  მონაკვეთი ყოველთვის შეიძლება ავირჩიოთ ისე, რომ შესრულდეს  $\Delta l = \lambda/2$ , მოცემული მიმართულებით სინათლე აღარ გავრცელდება. ითვლება, რომ ნაწილაკის ტრაექტორია არის საკმარისად გრძელი, რაც იმას ნიშნავს, რომ ტრაექტორიის შემოსაზღვრულობასთან დაკავშირებული ეფექტები უგულებელყოფილია. აქედან გამომდინარე  $\theta$  კუთხით გამოსხივებული ტალღებს, რომლებიც განისაზღვრება პირობით:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n} \quad (5)$$

გამოსხივების წერტილის მიუხედავად ყოველთვის ექნებათ ნულოვანი სვლათა სხვაობა. რადგანაც  $\cos\theta \leq 1$  ამიტომ  $\beta n \geq 1$ , ან რაც იგივეა  $v \geq c/n$ . ეს ნიშნავს, რომ გამოსხივება დასაშვებია მხოლოდ იმ მუხტისთვის, რომელსაც აქვს სინათლის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარე და მხოლოდ იმ მიმართულებით, რომელიც აკმაყოფილებს (5) პირობას.

ჩერენკოვის გამოსხივება წარმოიქმნება მხოლოდ:

$$\beta \geq \frac{1}{n} \quad (6)$$

შემთხვევაში, რაც ზღვრულ ენერგიას გვაძლევს. ზღვის წყალში მიუონისათვის მინიმალური ენერგია ჩერენკოვის გამოსხივებისთვის არის დაახლოებით 158 მეგ. ელექტრონებისთვის ჩერენკოვის გამოსხივების ზღვარი დაბალია 0.76 მეგ.

დამუხტული ნაწილაკები, რომლებიც წარმოიქმნებიან ნეიტრონის ურთიერთქმედებისას გარკვეული ენერგიით, ჩერენკოვის გამოსხივებას იწვევენ.

### **KM3NeT ექსპერიმენტში არსებული ფონი**

ამ ნაშრომის მთავარი არსი მდგომარეობს იმაში, რომ შევისწავლოთ ზღვის ფონური გამოსხივება და მისი თვისებები.

ნეიტრონის ურთიერთქმედებები არ არის ღრმა ზღვაში დამზერადი სინათლის ერთადერთი წყარო. ზღვის ოპტიკურ ფონს წარმოადგენენ ისეთი ფოტონები, რომლებიც არ შეესაბამებიან ამ ნაწილაკებიდან(მიუონი) წამოსულ ფოტონებს. ჩვენ ოპტიკური ფონის სამ შემთხვევას განვიხილავთ.

- ზღვის წყლის შემადგენლობაში არსებული რადიაქტიური ნივთიერების ბეტა დაშლებში წარმოქმნილი ელექტრონები. განსაკუთრებით კალიუმ-40-ის დაშლებით
- ბიოლუმინესცენციით მიღებული ფოტონები, რომელიც გამოწვეულია ცოცხალი ორგანიზმების გამოსხივებით.
- ინსტრუმენტული ეფექტები გამოწვეულია დომებში გაჩენილი ნაპერწკლებით, რომელიც თავის მხრივ გამოწვეულია მოწყობილობაში არსებული დეფექტებით.

განხილული ფონებიდან ყველაზე მნიშვნელოვანია K-40-ით გამოწვეული ფონი. ის გამოსხივების ყველაზე დიდ ნაწილს შეადგენს, რაც ამ საბაკალავრო ნაშრომის მთავარი განხილვის თემაა.

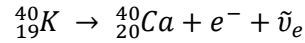
### **კალიუმ-40**

კალიუმ-40 (Potassium-40) წარმოადგენს ბუნებრივი წარმოშობის, კალიუმის  $\beta$ -რადიოაქტიური იზოტოპს.  ${}^{40}_{19}\text{K}$  ატომების რაოდენობა კალიუმის იზოტოპების ბუნებრივ ნარევაში ატომების საერთო რაოდენობის 0,012%-ს შეადგენს (დაახლოებით:

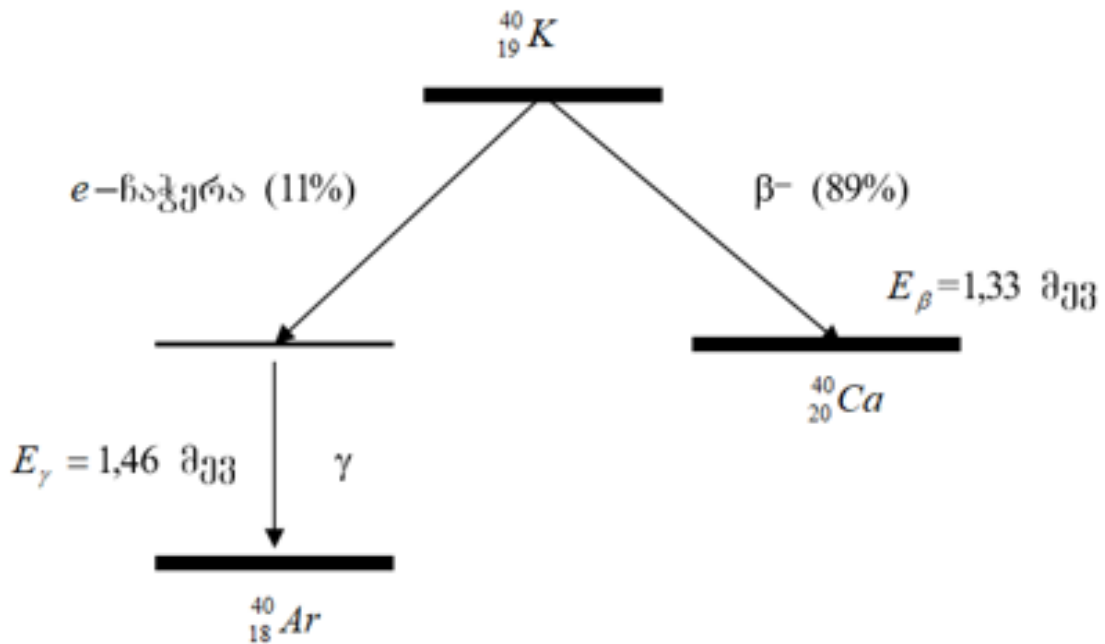
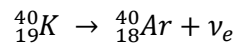


$^{39}_{19}K$  – 93,1%, ხოლო  $^{41}_{19}K$  – 6,88%)  $^{40}_{19}K$  ატომის ბირთვის დაშლის ორი არხი ვიციო (სურ.10):

- $\beta$  ნაწილაკის მაქსიმალური ენერგია შეადგენს  $E_\beta = 1,3$  მევ



- ელექტრონების ჩაჭერით (e-ჩაჭერა), წარმოიქმნება  $^{40}_{18}Ar$  ბირთვი აგზნებულ მდგომარეობაში, რომელიც ძირითად მდგომარეობაში გადადის ენერგიის  $E_\gamma = 1,46$  მევ მქონე  $\gamma$  კვანტის გამოსხივებით



სურ. 10 ნაჩვენებია  $^{40}_{19}K$  იზოტოპის დაშლის ორი არხი და ამ დაშლის პროდუქტები

ფოტონი, რომელიც წარმოიქმნება ელექტრონის ჩაჭერის არხში ათავისუფლებს ელექტრონს წყლის მოლეკულიდან კომპტონის ეფექტის საშუალებით, რაც ჩერენკოვის სინათლეს წარმოქმნის.

კალიუმ-40-ის ატომური მასა არის 39,964008 მაე (ცხრილი 1). კალიუმი-40 იშლება უპირატესად  $\beta$ -ემისიით კალციუმ-40-მდე, აქვს გაზომილი მასა 39,962589 მაე. მასის ატომური ერთეული ან სხვანაირად დალტონი(Da) უდრის 931 478 მევ-ს. ამრიგად, კალიუმ-40-ის დაშლისას კალციუმ-40-მდე გამოიყოფა  $Q_{\beta}$  მაქსიმალური ენერგია

$$Q_{\beta} = (39,964008 - 39,962589) \times 931,478 = 1,31 \text{ მევ} .$$

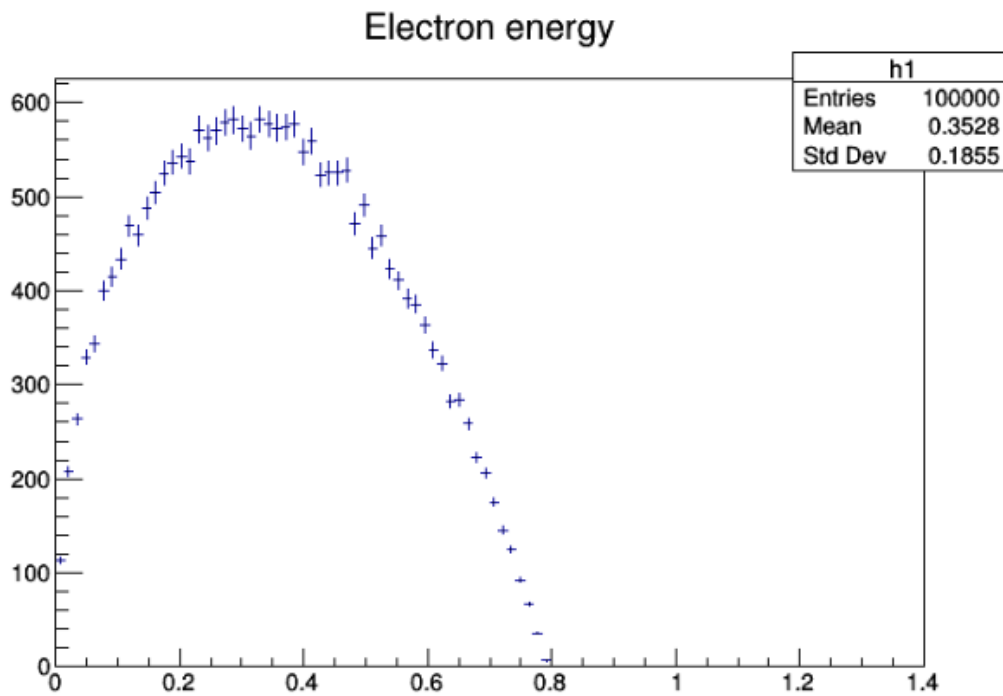
იზოტოპი	Z	N	ატომური მასა (მაე)	% ბუნებაში
$^{39}\text{K}$	19	20	38.96370068	93.258%
$^{40}\text{K}$	19	21	39.96399848	0.012%
$^{41}\text{K}$	19	22	40,96182576	6.73%

### ცხრილი.1 კალიუმის იზოტოპების ატომური მასა და პროცენტული

#### რაოდენობა ბუნებაში

არგონ-40 -ის მასაა 39,962384. ენერგიის ერთეულებად გარდაქმნილი მასის სხვაობა იძლევა ენერგიას დაახლოებით 1,5 მევ-ს. ეს არის გამოყოფილი ენერგია ელექტრონის ჩაჭერის დროს არგონ-40-მდე.

$\beta$ -დაშლის დაახლოებით 70%-ში ელექტრონს გააჩნია საკმარისი ენერგია ჩერენკოვის გამოსხივებისთვის.  $E_{ch} \geq 0.78$  მევ ელექტრონი წარმოქმნილი  $\beta$  – დაშლის გზით ასხივებს საშუალოდ 10-100 ჩერენკოვის ფოტონს (სურ. 11). ენერგიის ეს რაოდენობა არის მაქსიმალური ამ შემთხვევაში, ხოლო მინიმალური კინეტიკური ენერგიაა დაახლოებით 0.26 მევ. გამოყვანები შესრულებულია jupyter გარემოში.



სურ. 11 ელექტრონის ენერგია ბეტა დაშლის შემთხვევაში, ღერძებზე გადაზომილია ტალღის სიგრძე (ნმ) და ენერგია (მეგ)

ჩერენკოვის გამოსხივება წარმოიქმნება ტალღის სიგრძის რეგიონში 300-დან 600 ნმ-მდე.

ფოტოგამამრავლებლები იძლევიან საშუალებას, რომ გაიზომოს ფოტონთა რაოდენობა, მათი დაფიქსირების დრო. ამის წყალობით შესაძლებელია მიუონების სიგნალის გამოყოფა ბიolumინესცენციისა და 40K რადიოაქტიური დაშლის ფონებისგან.

40K დაშლისას განათდება ოპტიკური მოდულის მხოლოდ მცირე ნაწილი, ხოლო მიუონებს შეუძლიათ გამოიწვიონ მოდულში ყველა ფოტოგამამრავლებლის განათება. 40K ჰიტები შემთხვევითად ნაწილდება ოპტიკურ მოდულებში. ამ განსხვავებული თავისებურებით ხასიათდება 40K.

თუ PMT-ზე ორი ჰიტი დაფიქსირდა ერთმანეთისგან  $\Delta r$  მანძილზე დროის ცვლილება აკმაყოფილებს პირობას:

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{v_{light}} + const \quad (7)$$

$v_{light}$ - სინათლის გავრცელების სიჩქარე ზღვის წყალში, const- დეტექტორის გარჩევადობის კოეფიციენტი სასრული დროის მონაკვეთში. დროითი ეს ფანჯარა უდრის  $\Delta t = 10 \text{ ნწმ}$ .

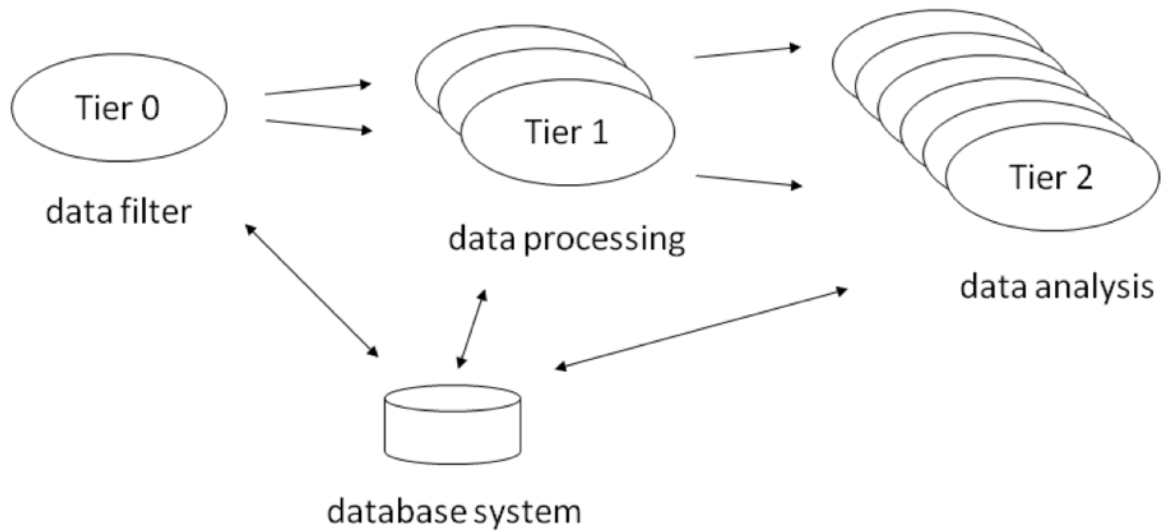
### **KM3NeT ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზი**

KM3NeT ექსპერიმენტის კომპიუტინგის სისტემა იერარქიულად იყოფა რამდენიმე დონედ (Tier).

საწყისი დონეა ნულოვანი Tier-0, ამ დონეზე აიღება მონაცემები დეტექტორებიდან და მოხდება მათი ფილტრაცია - L0 ფილტრის საშუალებით. L0 ამოწმებს ფოტოგამამრავლების სიგნალის ხანგრძლივობას, გარკვეული პრინციპების მიხედვით. ის მონაცემები, რომლებიც L0 ფილტრის ყველა მოთხოვნას გაივლიან all data to shore პრინციპის თანახმად გადაიგზავნებიან სანაპიროზე არსებულ ექსპერიმენტულ სადგურებში - Tier1 (სურ. 12).

თანხვედრა განსაზღვრულია, როგორც ერთ ოპტიკურ მოდულში  $\Delta t$  დროით ფანჯარაში ჰიტების არსებობა. ამ თანხვედრაში მონაწილე PMT-ების რიცხვს კი ეწოდება მრავლობითობა (multiplicity). ყოველი ივენტი შეიცავს ჰიტების სრულ და მიუკერძოებელ სურათს, შემთხვევის ირგვლივ დროით  $\Delta t$  ფანჯარაში. შედეგად მიღებულ L0 სურათებს უწოდებენ ტრიგერირებულ ივენთებს.

PMT-ზე ჰიტების ჩაწერა ხდება დროის სიგანეზე მოსული სიგნალების დამუშავებით ToT (time-over-threshold). ოპტიკურ მოდულზე გათვალისწინებულია, PMT-ზე მოსული სიგნალების სიხშირეა დაახლოებით 8 kHz, ეს ყოველივე გამოწვეულია ზღვის ფონით. ToT ჩასაწერად გამოყოფილია 1 ბაიტი შესაბამისად მაქსიმალური მნიშვნელობა წარმოადგენს 255 ნწმ.



სურ. 12 KM3NeT ექსპერიმენტის კომპიუტინგის მოდელი

L1 ეტაპი შეესაბამება ფოტოგამამრავლებლიდან ერთ დროით ფანჯარაში 2 ან მეტი L0 ჰიტის დამთხვევას ( $\Delta t=10$  ნწმ). L1 სიხშირე ერთ ოპტიკურ მოდულზე დაახლოებით 1000ჰც-ია. საიდანაც დაახლოებით 600ჰც ზღვის წყალში არსებული 40K-ბეტა დაშლით არის გამოწვეული. დანარჩენი წარმოიქმნება შემთხვევათა დუბლირებით, ამიტომ მათი ორის რიგით შემცირებაა საჭირო PMT-ების მდებარეობის გამოყენებით. ეს კი ცნობილია მეორე დონის ფილტრის სახელით L2.

ფონის გამოყოფის საშუალებას იძლევა ერთ მოდულში მდებარე სხვადასხვა PMT-ებში სიგნალების თანხვედრა და თანხვედრათა რაოდენობა. ამ თანხვედრების გამოსაყოფად მონაწილეობს L1 ფილტრი ანუ აქ ხდება ძირითადი მონაცემების ფონური პროცესებისგან განცალკევება.

პირველადი დონეზე (Tier-1) მონაცემები ინახება KM3NeT ექსპერიმენტის 3 მთავარ ცენტრში CCIN2P3-ლიონი (CNRS)(საფრანგეთი) და CNAF (INFN) და ReCaS(იტალია).

მეორე დონეზე(Tier-2) მიღებული მონაცემების დამუშავება კოლაბორაციაში მონაწილე ქვეყნების მიერ უმეტესწილად გულისხმობს მიონური და ნეიტრონული შემთხვევების აღდგენას.

### ORCA-6 მონაცემების ანალიზი KM3NeT პროექტის სერვერზე

თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტი ჩართულია KM3NeT-ის კოლაბორაციაში. მიღებული შემთხვევების მონიტორინგისა და დამუშავებისთვის KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის მსგავსი სადგური განთავსდა საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპიუტერული ქსელების ასოციაციის (გრენა) კომპუტერულ ცენტრში.

ლოკალურ სერვერზე ინახება რეალური და მოდელირებული მონაცემები (/home/papalashvili/v7data) დირექტორიაზე. ამ მონაცემთა ანალიზზე მუშაობის გამარტივების მიზნით ლოკალურ სერვერზე შექმნილია გარემო jupyter (<http://t2.km3net.tsu.ge:9999/hub/login>) საიდანაც ხდება მონაცემების ძირითადი დამუშავება პროგრამირების სხვადასხვა ენებზე(სურ.13).



სურ. 13 Jupyter გარემოსა და Python-ის ლოგოები

საბაკალავრო ნაშრომი შესრულებულია ამ კომპიუტერულ ცენტრის გამოყენებით. ნაშრომში მოყვანილი შედეგები მიღებულია ORCA-6 (ექსპანდირებული კონფიგურაცია) ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე აღებული რამდენიმე ფაილის დამუშავების შედეგად, Python პროგრამირების ენის გამოყენებით.

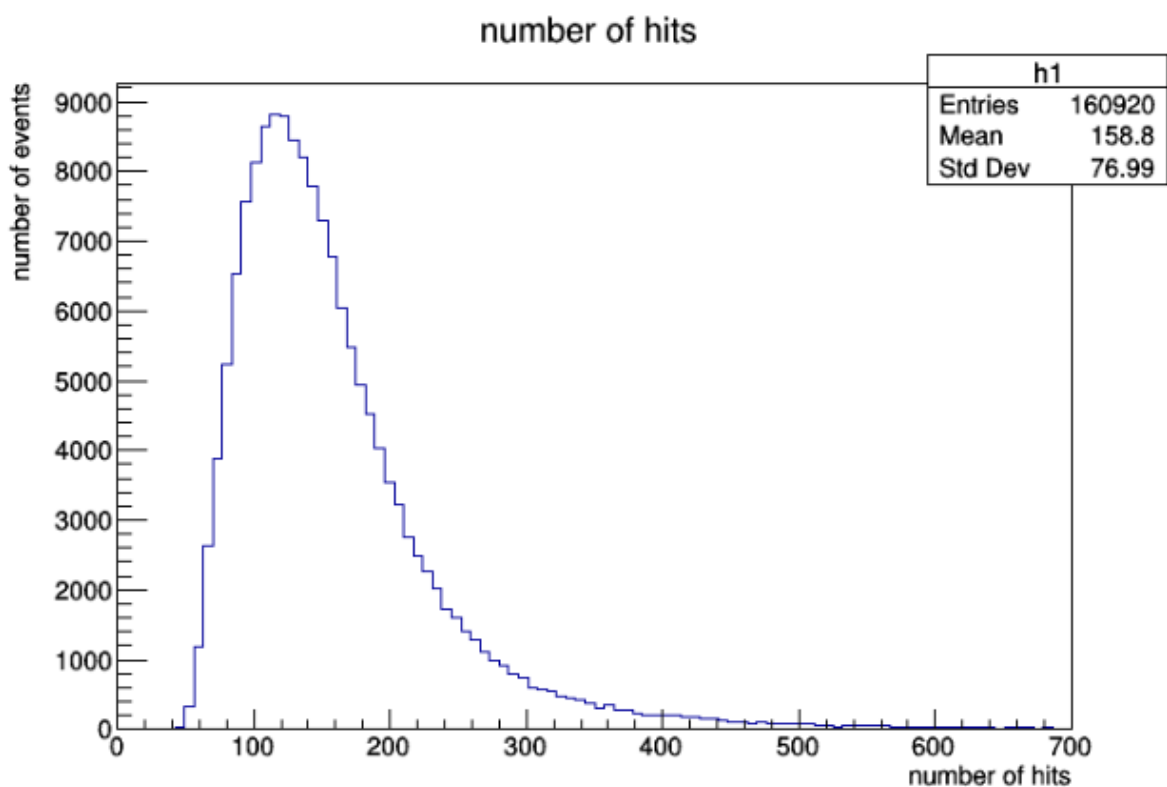
მშენებარე KM3NeT პროექტის ფარგლებში ORCA-ს რამდენიმე კონფიგურაციაა და მათ მერ შეგროვებული მონაცემები შესაბამისად. ORCA-6 დეტექტორის მონაცემების გამოყენება ყველაზე ხელსაყრელია ამ სადიპლომო ნაშრომისთვის, რადგან დროითი უპირატესობა და შედეგად უფრო მეტი სამუშაო მონაცემი ზუსტად ამ კონფიგურაციის მიერ არის მოწოდებული(ცხრილი 2).

ფოტოგამამრავლებლის მიერ დაფიქსირებულ 40K ფონური გამოსხივების დადგენამდე, ძალზე მნიშვნელოვანია შემთხვევათა როდენობის გაგება. მონაცემთა დამუშავების შედეგად მივიღეთ შემთხვევათა 160920 შესაბამისი ალგორითმების გამოყენებით და მოცემულია მიღებულ გრაფიკზეც (სურ.14).

Detector (DB naming)	Detector ID (DB number)	Run range	Dates
D_ORCA006	49	7221 - 11296	February 2020 - November 2021
D0ORCA010	100	11323 - 13212	December 2021 - May 2022
D0ORCA007	110	13213 - 13703	May - June 2022
D1ORCA013	117	13704 - 13961	July 2022
D0ORCA011	123	13964 - 14318	August - September 2022
D1ORCA011	132	14356 - 15146	October - December 2022
D0ORCA015	138	15158 - 16339	December 2022 - April 2023
D1ORCA015	146	16341 - 16516	5 April 2022 - 29 April 2023
D0ORCA018	148	16517 - 18298	May 2023 - 31st August 2023

ცხრილი. 2 ORCA დეტექტორების კონფიგურაციები და მონაცემები

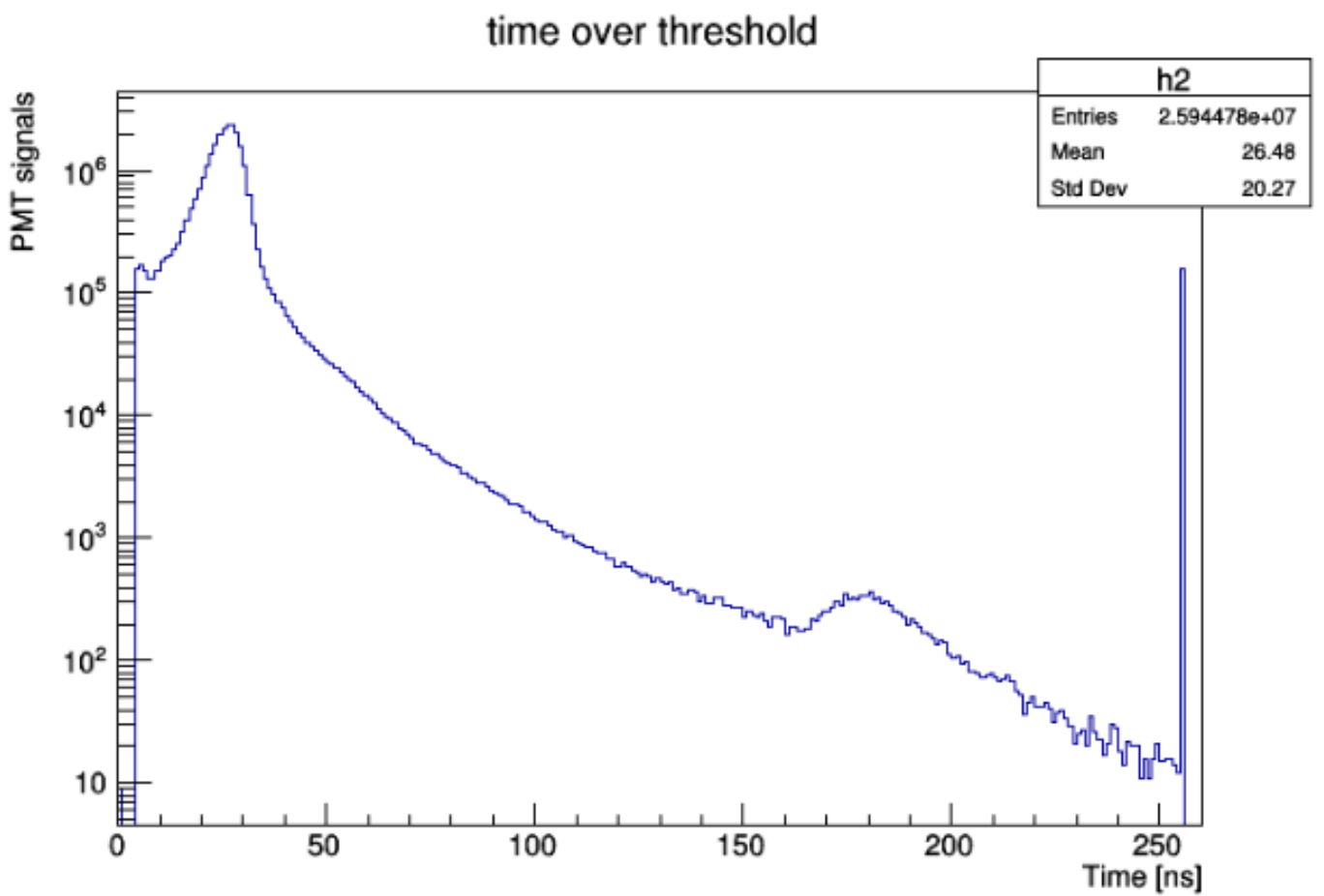
საშუალოდ შემთხვევაში მივღეთ 152 ჰიტი, ამ ჰიტებიდან გარკვეული რაოდენობა მოდის მიუონების გამოსხივებიდან, ნაწილი კი 40K იზოტოპის დაშლის შედეგად. ტრიგერირებულია ჰიტი რომელიც გამოიწვია მიუონმა - ანუ სიგნალის ჰიტები გვაქვს, შესაბამისად არა-ტრიგერირებულია ჰიტი რომელიც ფონური გამოსხივებითაა გამოწვეული.



სურ. 14 მოცემულია იმ ჰიტების რიცხვი რომელიც დაფიქსირდა ფოტოგამამრავლების მიერ

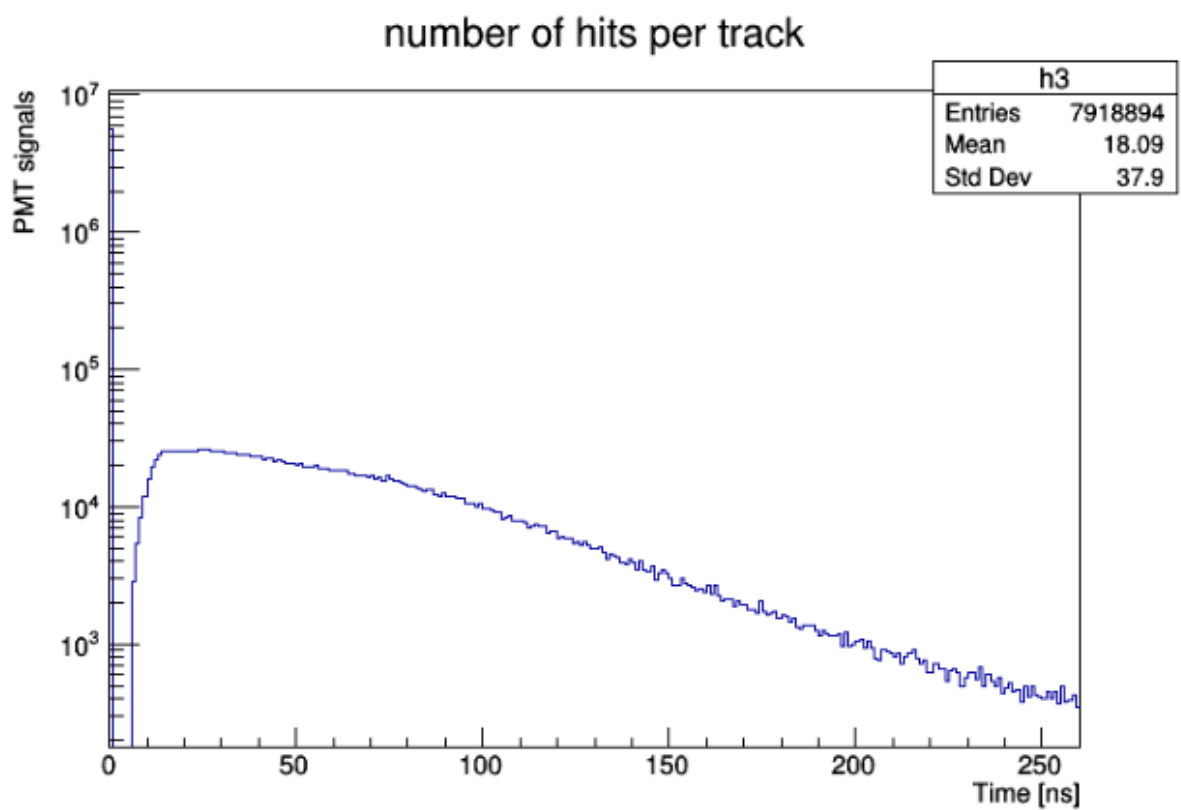
დეტექტორებზე შემოსული სიგნალების რაოდენობა, დროის საწყისი მნიშვნელობიდან ძალიან ბევრია თუმცა შემოსული იმპულსის მთელ სიგანეზე იგივეს ვერ ვიტყვით(სურ.15). ეს განაწილება ძალიან მნიშვნელოვანია შედეგების რაოდენობრივი შედარებისთვის.





სურ.15 სიგნალის სიდიდის განაწილება

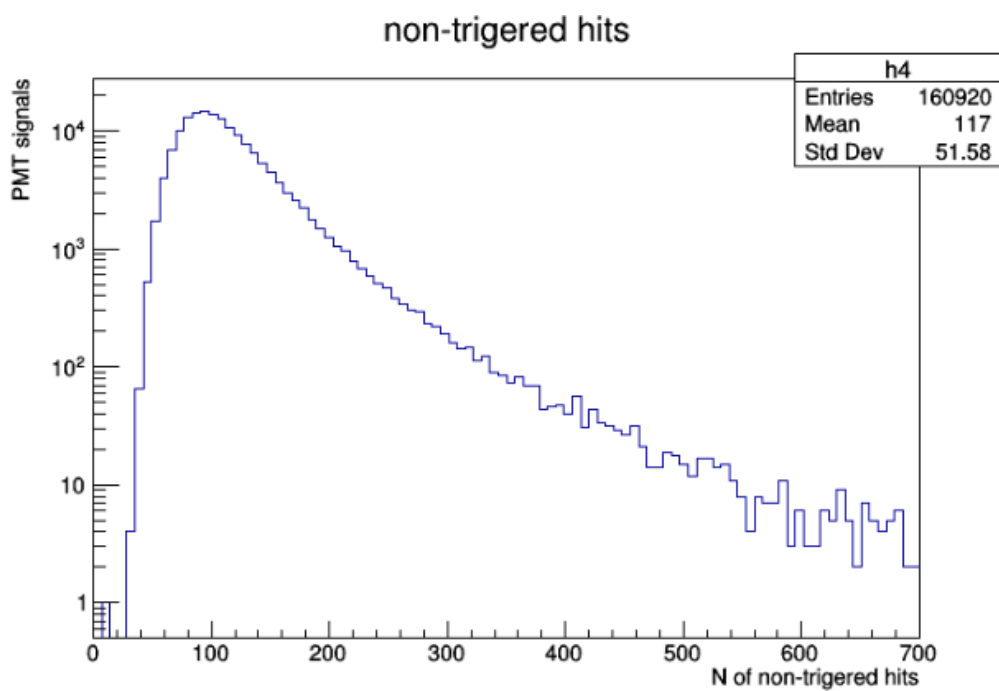
(სურ. 16) მოცემულია იმ ჰიტების საშუალო რაოდენობა რომელიც ფიქსირდება ერთ ტრეკზე ToT იმპულსის სიგანეზე.

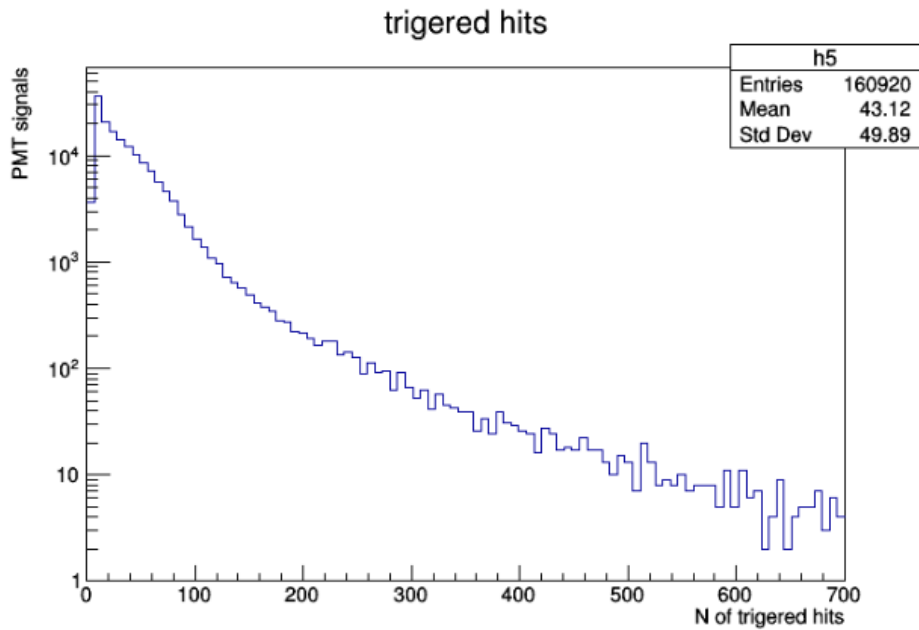


სურ.16 ჰიტების რაოდენობა ერთ ტრეკზე

შემთხვევათა სრული რიცხვისა და ჰიტების საშუალო რაოდენობის დადგენის შემდეგ აუცილებელია ზემოთ ნახსენები ტრიგერირებული და არა-ტრიგერირებული ჰიტების რაოდენობების დადგენა და მათი განაწილებების გრაფიკულად აგება.

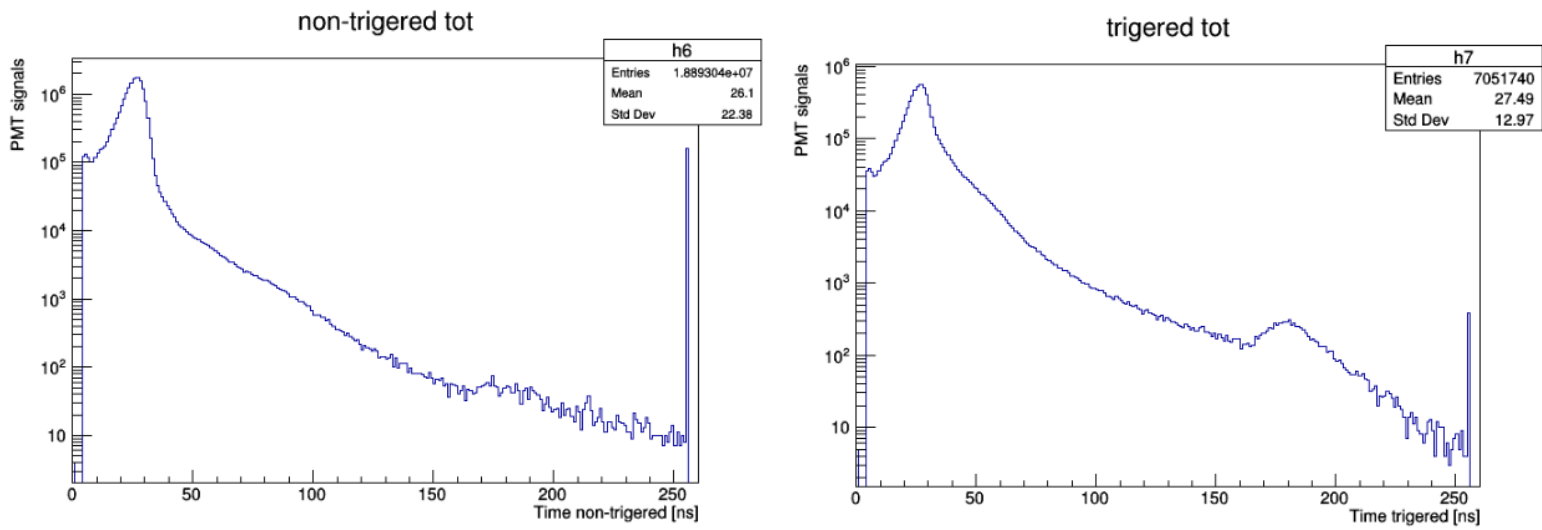
მოცემული შედეგებიდან მტკიცდება აქამდე ბევრჯერ ჩამოყალიბებული წინადადება იმის შესახებ, რომ ფონური გამოსხივება დეტექტორების მიერ დაგროვებული მონაცემების ძალიან დიდ ნაწილს შეადგენს. ამ შემთხვევაში 117 ფონური და 43 მიუონური ჰიტებია (ცდომილება ამ შემთხვევაში უმნიშვნელოა - 3 ჰიტი). პროცენტულად დაახლოებით 74% მოდის 40K და 26% მიუონურ ჰიტებზე (სურ. 17-18).





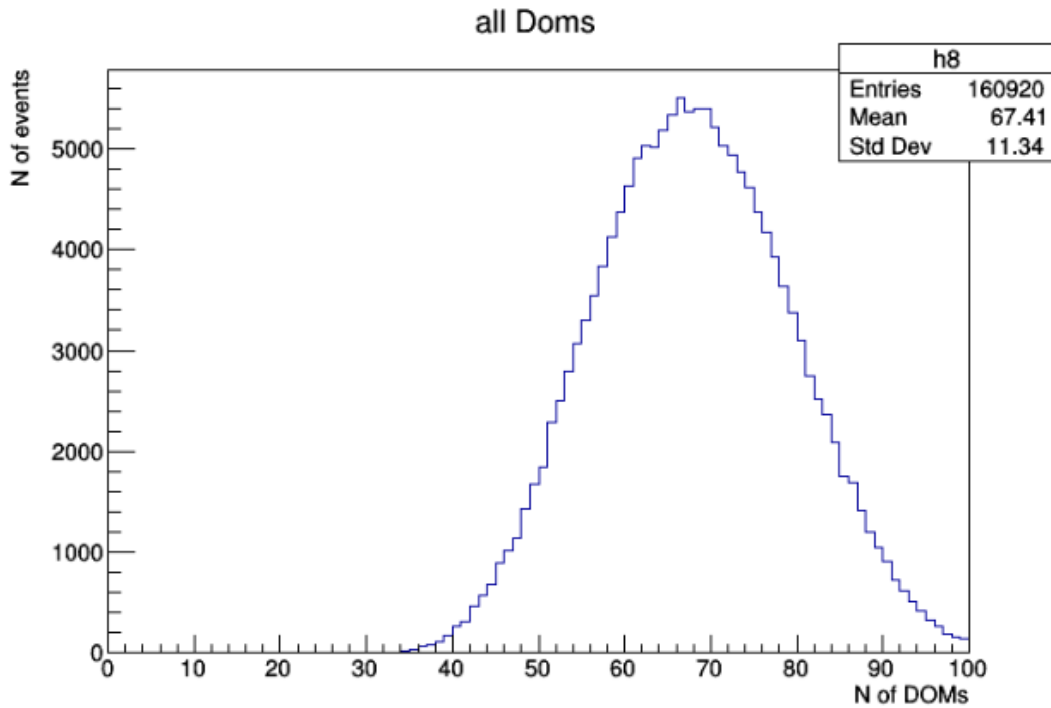
სურ.17-18 არა-ტრიგერირებული ანუ ფონური და ტრიგერირებული ანუ მიუონური ჰიტების განაწილებები, რაოდენობა.

შემდეგი ეტაპია იმპულსის მთლიან სიგანეზე ტრიგერირებული და არატრიგერირებული ჰიტების დათვლა და მიღებული შედეგის შედარება იმპულსის სიდიდესთან - ToT . დროის ამ ფანჯარაში დაფიქსირებული ჰიტების რაოდენობა ძალიან დიდია თუმცა ისევე მცირე ცდომილებებს თუ არ გავითვალისწინებთ (სურ. 15) მოცემული რიცხობრივი მონაცემები უნდა უდრიდეს სურ.19-20 მიღებული მონაცემების ჯამს.



სურ.19-20 სიგნალის სიდიდის განაწილება ფონური და მიუონური ჰიტებისთვის

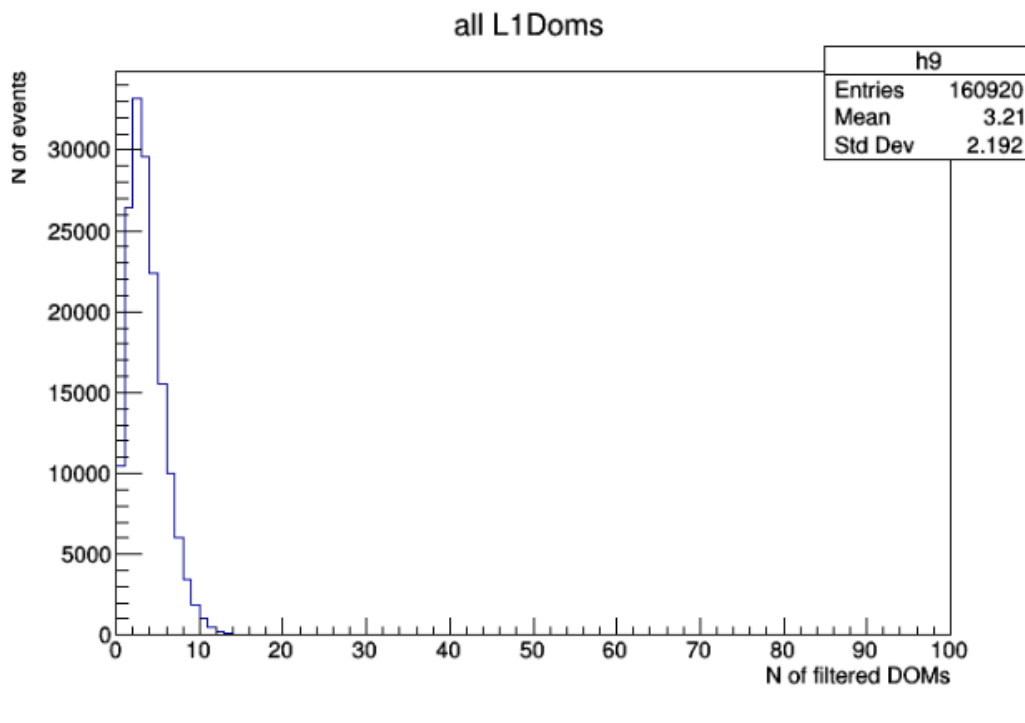
ფონური და მიუონური ჰიტების დაახლოებითი მნიშვნელობების დადგენის შემდეგ დაიბადა კითხვა თუ რამდენი DOM აინთო. ORCA6 დეტექტორის 118 დაყენებული ხაზიდან მწყობრში იყო 103 DOM, ხოლო განაწილების პირველივე გრაფიკიდან ჩანს რომ დაფიქსირდა დაახლოებით 159 ჰიტი რაც იმის დამტკიცების საფუძველს გვაძლევს რომ დაახლოებით 56 DOM-ში სიგნალი განმეორდა. მწყობრში მყოფი 103 დომიდან როგორც (სურ.21)-ზე ჩანს აინთო მხოლოდ 67 რაც იმას ნიშნავს, რომ 67 დომზე მოვიდა 56 განმეორებადი სიგნალი, ხოლო 36 საერთოდ არ ანთებულა.



სურ.21 ანთებული DOM-ის რაოდენობა

ანთებული დომების სრული რაოდენობიდან L1 ფილტრის საშუალებით შეგვიძლია დავაკვირდეთ მიუონთა ჰიტების მიერ ანთებული DOM რაოდენობას (სურ.22). ამ განაწილებიდან ჩანს, რომ ანთებული 67 DOM-დან მიუონმა აანთო დაახლოებით 3 DOM.

(სურ. 22) ჩანს რომ ანთებული დეტექტორებიდან ძალიან მცირე ნაწილი ინთება უშუალოდ მიუონების გამოსხივების გამო. ფონური ნათების გამოყოფა და მოცილება შესაძლებელია ფოტოგამამრავლებლების სიგნალებს შორის სივრცე-დროითი კორელაციების მოთხოვნით.



სურ.22 ანთებული DOM-ების ის რიცხვი, რომლებიც L1 ფილტრის გათვალისწინებით აინთო

### კალიბრაცია 40K საშუალებით

KM3NeT დეტექტორების კალიბრაცია საჭიროა ნეიტრინოს თვისებების განსაზღვრის მაქსიმალური სიზუსტისთვის.

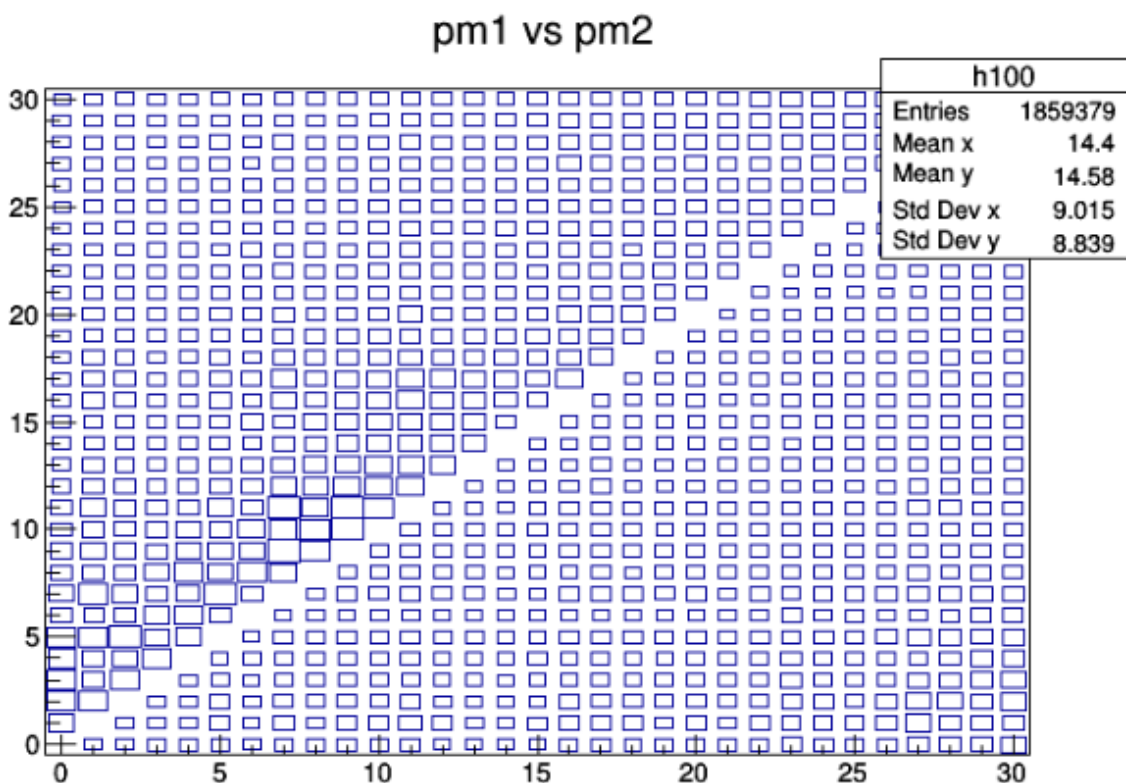
დრო PMT-ს მიერ დაფიქსირებულ გამოსხივებასა და L0 ფილტრით ამ შემთხვევის დასურათებას შორის დაახლოებით არის 30ნწმ. ამ დროითი დაყოვნების განსაზღვრა და მინიმიზირებაა კალიბრაციის მიზანი. კალიბრაციის დროს გამოიყენება, როგორც ფონური

ისე მიუონური ჰიტების მონაცემები, რათა დეტექტორების მონიტორინგი განხორციელდეს დროის დიდ განაკვეთზე.

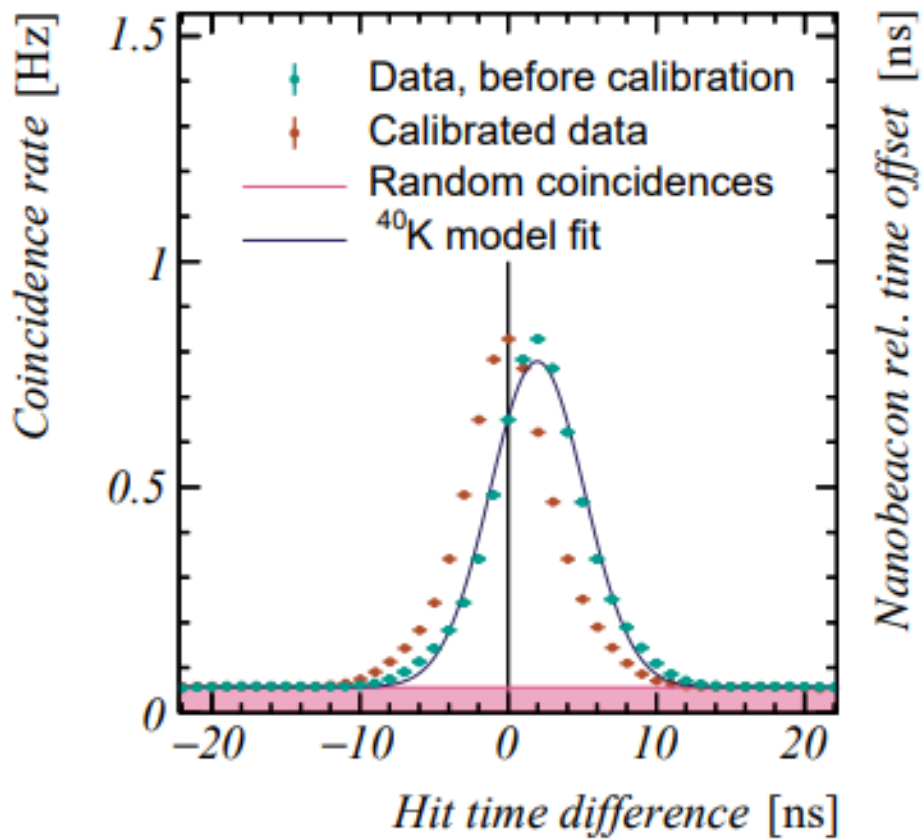
კალიბრაცია შეიძლება: პოზიციისა და ორიენტაციით და დროით. ვინაიდან ამ ნაშრომის მიზანს არ წარმოადგენს კალიბრაციის შესწავლა მოკლედ განვიხილავთ დროით კალიბრაციას, კერძოდ კი PMT-ების დროით კალიბრაციას (Inter-PMT Time Calibration) ფონური მონაცემების გამოყების გზების საჩვენებლად.

დროითი კალიბრაცია მნიშვნელოვანი ასპექტია ნეიტრინო ტელესკოპების მუშაობაში, იგი ფუნდამენტალურ როლს ასრულებს ივენთის რეკონსტრუქციაში, რომელიც ეყრდნობა, როგორც დეტექტორის სხვადასხვა სენსორებზე ჩერენკოვის გამოსხივების დაფიქსირებას, ასევე მათი პოზიციების შეფასებას გამოსხივების დეტექტირებისას(სურ 23 ა-ბ).

Inter-PMT კალიბრაცია წარმოადგენს - ყოველი PMT-ის მიერ დაფიქსირებული სიგნალის დროითი წანაცვლებაoffset). განისაზღვრება PMT დროით წანაცვლებისა  $t_i$  (PMT time offset) და ყოველი დომის DOM დროით წანაცვლებას  $t_j$  (DOM time offset) შორის სხვაობით.







სურ. 23 (ბ)

(ა) ცნობილია რომ DOM-ში 31 PMT გვაქვს შესაბამისად  $31 \times \frac{30}{2} = 465$  წყვილი ყოველ DOM-ზე. X-ღერძი წარმოადგენს საორენტაციო სართულს, რომელიც განსაზღვრავს გამომსხივებელი DOM-ის პოზიციას DU-ში. პირველი სართული (storey) ზღვის ფსკერთან ყველაზე ახლო მდებარეობს. Y-ღერძი წარმოადგენს სამიზნე სართულს, რომელიც მიუთითებს სიგნალის მიმღები DOM-ის პოზიციას. ნანოშუქურები(Nanobeacons) აინთებიან თანმიმდევრულად სართულებს შორის 3520 ნწმ-ის დაგვიანებით. ყველა ნანოშუქურა დაყენებულია 8 ვოლტ ძაბვაზე. ნანოშუქურებს(Nanobeacons) შეუძლიათ PMT-ების დროითი ცვლილების მონიტორინგი შესაბამის DOM-ში.

(ბ) DOM-ში ორ ფოტონს შორის დროის სხვაობის მოსალოდნელი განაწილებაა, რომელიც გამოწვეულია ერთ სიმულირებული 40K დაშლით ორ PMT-ზე. არა-კალიბრირებულ მონაცემებს ეფუძნება დაუმუშავებელი მონაცემები L0 ფილტრებით კორექტირების გარეშე. კალიბრირებული მონაცემები გვიჩვენებენ დროის სხვაობას მიღებულ L0-ებს შორის, Inter-PMT Time Calibration პროცედურის გამოყენებით. განაწილებები ითვალისწინებენ დამთხვევებს 40K მრავალჯერადი დაშლისას. გრაფიკიდან ჩანს რომ დეტექტორს პრაქტიკულად არ გააჩნია ხილვის „ბრმა წერტილები“, დამზერის ეფექტურობას ზრდის.

## დასკვნა

KM3NeT არის დიდი კვლევითი ინფრასტრუქტურა, რომელიც შეიცავს ნეიტრინული დეტექტორებს (ტელესკოპებს ARCA და ORCA) ხმელთაშუა ზღვაში. ARCA და ORCA დეტექტორები შედგებიან ოპტიკური მოდულებისგან (Digital Optical Module - DOM), რომელთა სივრცული განლაგების სიმკვრივე განსხვავდება ერთმანეთისგან. დეტექტორები წარმოადგენენ რეგისტრაციის ბლოკების ერთობლიობას. 18 DOM-ი იწყობა ვერტიკალურ ხაზზე, რომელსაც DU ეწოდება. DU-ს ერთობლიობა წარმოადგენს ერთ ბლოკს (BB). ერთ DOM-ში არის 31 PMT, შესაბამისად გამოდის სულ 3348 PMT-ა ამ ეტაპზე, ეს მნიშვნელობა მუდმივად იცვლება.

ამ ნაშრომის მთავარი დანიშნულება არის ზღვის ოპტიკური ფონის შესწავლა 40K იზოტოპის საშუალებით. ფონი შევისწავლეთ KM3NeT ORCA6 დეტექტორის მიერ შეგროვებული მონაცემების საშუალებით.

40K წარმოადგენს ბუნებრივი წარმოშობის, კალიუმის  $\beta$ -რადიოაქტიური იზოტოპს. 40K დაშლისას განათდება ოპტიკური მოდულის მხოლოდ მცირე ნაწილი, ხოლო მიუონებს შეუძლიათ გამოიწვიონ მოდულში ყველა ფოტოგამამრავლებლის განათება. 40K ჰიტები შემთხვევითად ნაწილდება ოპტიკურ მოდულებში. ამ განსხვავებული თავისებურებით ხასიათდება 40K.

დაახლოებით 60% 40K ფონურ გამოსხივებას უჭირავს, ეს ერთის მხრივ ატმოსფერული მიუონების დამზერის დაბრკოლება, მეორეს მხრივ კი დამხმარე ბერკეტია, რადგან ფონური სიგნალების საშუალებით შეიძლება დომში არსებული PMT-ების კალიბრაცია.

ნაშრომში აღწერილია რომ ORCA-6 დეტექტორის 108 დაყენებული ხაზიდან მწყობრში იყო 103 DOM, ხოლო განაწილების პირველივე გრაფიკიდან ჩანს რომ დაფიქსირდა დაახლოებით 159 ჰიტი, რაც იმის დამტკიცების საფუძველს გვაძლევს რომ დაახლოებით 56 DOM-ში სიგნალი განმეორდა. მწყობრში მყოფი 103 დომიდან როგორც აინთო მხოლოდ 67, რომელზეც მოვიდა 56 განმეორებადი სიგნალი, ხოლო DOM 36 საერთოდ არ ანთებულა.

PMT-ების კალიბრაცია 40K-ის საშუალებით საკმაოდ რთული პროცესია. ამ ნაშრომის ფარგლებში ნაჩვენებია დეტექტორის სხვადასხვა სენსორებზე დაფიქსირებული ჩერენკოვის გამოსხივების გაუსის განაწილების გრაფიკები და შესაბამისი PMT-ების პოზიციები.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. ფაფალაშვილი გოგიატა <http://training.hepi.tsu.ge/Shanidze/Thesis/PapalashviliPhD.pdf>
2. ქისტაური გიორგი - KM3NeT/ORCA4 დეტექტორის გამოძახილის შესწავლა მიუნხენური ნაკადების საშუალებით  
  
[http://training.hepi.tsu.ge/Shanidze/Thesis/Giorgi\\_Kistauri\\_MS\\_thesis\\_0.pdf](http://training.hepi.tsu.ge/Shanidze/Thesis/Giorgi_Kistauri_MS_thesis_0.pdf)
3. KM3NeT ოფიციალური ვებ-გვერდი (ილუსტრაციების და თეორიული მასალა)  
  
<https://www.km3net.org/>
4. KM3NeT ვიკიპედიის-გვერდი ARCA/ORCA დეტექტორების მონაცემთა შეგროვების ვადები  
  
[https://wiki.km3net.de/index.php/Data\\_Processing\\_and\\_Data\\_Quality\\_\(DPDQ\)/Processings/Mass\\_ProcessingSeptember2023](https://wiki.km3net.de/index.php/Data_Processing_and_Data_Quality_(DPDQ)/Processings/Mass_ProcessingSeptember2023)
5. Agustín Sánchez Losa, Juan Palacios González, Francisco Salesa Greus, Juan Zúñiga Román, Diego Real Máñez and David Calvo Díaz-Aldagalán - for the KM3NeT collaboration - KM3NeT Time calibration with Nanobeacons  
  
<https://pos.sissa.it/444/1062/pdf>
6. Canadian Nuclear Society Nu-Salt or NoSalt as a radioactive source fact sheet  
  
[https://www.nost.edu.au/icms\\_docs/133854\\_Radiation\\_-\\_Banana\\_potassium\\_40.pdf](https://www.nost.edu.au/icms_docs/133854_Radiation_-_Banana_potassium_40.pdf)
7. S. P. Denisov Radiation of FASTER THAN LIGHT PARTICLES (CHERENKOV EFFECT)  
  
[http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/1996\\_02b.pdf](http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/1996_02b.pdf)
8. Jurgen Brunner, ANTARES-Site/1999-002 - Simulation of 40K signals

9. Long-term monitoring of the ANTARES optical module efficiencies using 40K decays in sea water – The ANTARES Collaboration  
<https://d.docs.live.net/00eec1057803afbe/Desktop/thesis/thesisTest.docx>
10. Louis Bailly-Salins, on behalf of the KM3NeT collaboration - Time, position and orientation calibration using atmospheric muons in KM3NeT  
<https://pos.sissa.it/444/218/pdf>
11. Nanobeacon: A time calibration device for the KM3NeT neutrino telescope  
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)
12. Melis Karel - Studying the Universe from -3000m N.A.P.
13. S. Toscano, M. Ardid, M. Bou-Cabo, M. Circella, J.J. Hernández-Rey, J-P. Schuller, L.F. Thompson - Time calibration and positioning for KM3NeT  
<https://indico.in2p3.fr/event/681/contributions/39480/attachments/31906/39327/toscano.pdf>