



ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

ფიზიკის დეპარტამენტი

გოგითა პაპალაშვილი

**ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის
ექსპერიმენტ KM3NeT-ის სანყის ეტაპზე**

ფიზიკის დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაცია

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: რევაზ შანიძე

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი,

თსუ ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის

ფიზიკის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი,

თსუ მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტის

მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი

თბილისი

2023



Ivane Javakhishvili Tbilisi State University

Faculty of Exact and Natural Sciences

Department of Physics

Gogita Papalashvili

**Reconstruction of Atmospheric Muon Flux at the Initial
Stage of the KM3NeT Experiment**

**The thesis work is performed to obtain a PhD academic
degree in Physics**

Scientific supervisor: Revaz Shanidze

Doctor of Phys-Math Sciences,

Associate professor at department of physics,

The faculty of exact and natural sciences of TSU,

Leading researcher at

High Energy Physics Institute of TSU

Tbilisi

2023

ანოტაცია

წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი “ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის ექსპერიმენტ KM3NeT-ის საწყის ეტაპზე” შესრულებულია საერთაშორისო KM3NeT ექსპერიმენტის ფარგლებში. დისერტაციის მიზანს შეადგენდა ექსპერიმენტის საწყის ეტაპზე დეტექტორის რამდენიმე ხაზისგან მიღებული მონაცემების ანალიზი, რომლის საფუძველზე აღდგენილი იყო ატმოსფერული მიუონების ნაკადი ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში.

ნაშრომის პირველ თავში აღწერილია KM3NeT ექსპერიმენტის სამეცნიერო მიზნები. კერძოდ, მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომია და ნეიტრინოს თვისებების შესწავლა. მათ შორის ნეიტრინოების მასური იერარქიის დადგენა.

KM3NeT ექსპერიმენტი და მისი დეტექტორები - ARCA და ORCA აღწერილია დისერტაციის მეორე თავში. მათი დანიშნულებაა შეისწავლონ ასტროფიზიკური ნეიტრინოები, მათი წყაროები და ნეიტრინოების თვისებები. KM3NeT/ARCA გამიზნულია შორეული ასტროფიზიკური ობიექტებიდან წამოსული ნეიტრინოების დაკვირვებისთვის, ხოლო KM3NeT/ORCA ოპტიმიზირებულია ატმოსფერული ნეიტრინოების დასაკვირვებლად მათი თვისებების შესწავლის მიზნით. განხილულია KM3NeT დეტექტორის მუშაობის პრინციპი და პროექტის არსებული სტატუსი. KM3NeT ექსპერიმენტის ძირითადი ელემენტია ციფრული მულტისენსორული ოპტიკური მოდული, რომელიც ამ ექსპერიმენტისთვის შეიქმნა და წარმოადგენს ინოვაციურ დეტექტორს. ამ დეტექტორიდან მიღებული მონაცემების ანალიზი დისერტაციის ერთ-ერთ მიზანს წარმოადგენდა.

KM3NeT-ში მიღებული პირველადი მონაცემების ანალიზის მიზნით, დისერტაციის ფარგლებში, თსუ მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტში შეიქმნა KM3NeT კომპუტერული ცენტრი. ამ ცენტრის სერვერებზე განთავსდა როგორც KM3NeT თანამშრომლობაში შექმნილი, ასევე ნაწილაკების ფიზიკაში მონაცემთა ანალიზისთვის ფართოდ გამოყენებული კომპუტერული პროგრამები. თსუ KM3NeT სერვერი ასევე გამოყენებული იყო ნეიტრინული და მიუონური შემთხვევების სიმულაციებისთვის. KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის სადგური ასევე განთავსდა საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპიუტერული ქსელების ასოციაციის (გრენა) კომპუტერულ ცენტრში. ნაშრომში მოყვანილი კვლევები ძირითადად შესრულებულია დისერტაციის ფარგლებში შექმნილ ცენტრებში.

KM3NeT დეტექტორის საწყისი მონაცემებიდან ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში მოყვანილია სადისერტაციო ნაშრომის მეოთხე თავში. ატმოსფერული მიუონების ნაკადი გაზომილია ხმელთაშუა ზღვაში -

2232–3386 მეტრ სიღრმეზე ORCA დეტექტორის ერთი ხაზის და ARCA დეტექტორის ორი ხაზის საშუალებით. მიღებულია ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ზღვის სიღრმეზე დამოკიდებულება. ჩატარებული კვლევის შედეგები თანხვედრაშია ANTARES ექსპერიმენტის შედეგებთან. ექსპერიმენტიდან აღდგენილი ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ზღვის სიღრმეზე დამოკიდებულება კარგად აღინერება არსებული თეორიული მოდელით.

დისერტაციის ფარგლებში KM3NeT ექსპერიმენტის სანყის ეტაპზე მიღებული შედეგების ანალიზი, რომელიც ჩატარებული იყო თსუ მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტში, ადასტურებს KM3NeT პროექტში გამოყენებული ინოვაციური მეთოდების მართებულობას.

Abstract

The doctoral thesis "Reconstruction of atmospheric muon flux at the initial stage of the KM3NeT experiment" was performed within the framework of the international KM3NeT experiment. The aim of the thesis was to analyze the data obtained from several detector lines at the initial stage of the experiment, on the basis of which the flux of atmospheric muons in the depths of the Mediterranean Sea was measured.

The first chapter of the thesis describes the scientific goals of the KM3NeT experiment. In particular, high-energy neutrino astronomy and the study of neutrino properties, among them, determining the mass hierarchy of neutrinos.

The KM3NeT experiment and its detectors - ARCA and ORCA are described in the second chapter of the thesis. Their purpose is to study astrophysical neutrinos, their sources and neutrino properties. KM3NeT/ARCA is designed to observe neutrinos from distant astrophysical objects, while KM3NeT/ORCA is optimized to observe atmospheric neutrinos to study their properties. The operation principle of the KM3NeT detector and the current status of the project are discussed. The key element of the KM3NeT experiment is the innovative digital optical module, which was developed for this experiment and consists of multi photomultiplier tubes. It should be stated that each optical module could be used as an individual detector. Analysis of the data obtained from this detector was one of the goals of the thesis.

In order to analyze the primary data obtained in KM3NeT, within the framework of the thesis, the KM3NeT computer centre was created at the High Energy Physics Institute of TSU. The server of this centre hosts software created in KM3NeT collaboration, as well as widely used data analysis software in particle physics. TSU KM3NeT server was also used for neutrino and muon event simulations. The computing station of the KM3NeT experiment located in the computer centre of the Georgian Research and Educational Networking Association (GRENA) was also created within the thesis. The studies presented in this PhD dissertation are mainly performed in the centres created within the framework of the thesis.

The reconstruction of the atmospheric muon flux in the depth of the Mediterranean Sea from the initial data of the KM3NeT detector is presented in the fourth chapter of the thesis. Atmospheric muon flux was measured in the Mediterranean Sea at a depth of 2232–3386 meters by using one line of the ORCA

detector and two lines of the ARCA detector. The dependence of the atmospheric muon flux on the sea depth is obtained. The results of the conducted research are in agreement with the previous measurement (ANTARES results). The dependence of the atmospheric muon flux on the Mediterranean Sea depth is in accordance with the existing theoretical model as well.

The analysis of the results obtained at the initial stage of the KM3NeT experiment within the framework of the thesis, which was carried out at the Institute of High Energy Physics of TSU, confirms the validity of the innovative methods used in the KM3NeT project.

შინაარსი

ანოტაცია.....	3
Abstract.....	5
1. შესავალი.....	8
1.1 ნეიტრინული ფიზიკა და ასტროფიზიკა.....	12
2. KM3NeT ექსპერიმენტი და მისი მულტისენსორული ოპტიკური მოდული...19	
2.1 ჩერენკოვის გამოსხივება.....	19
2.2 KM3NeT ექსპერიმენტი.....	21
2.4 KM3NeT ოპტიკური მოდული.....	29
3. მონაცემების მიღება და ანალიზი KM3NeT ექსპერიმენტში.....	43
3.1 კომპუტინგის მოდელი KM3NeT ექსპერიმენტში.....	43
3.2. მონაცემთა მიღება და მონიტორინგი KM3NeT ექსპერიმენტში.....	47
3.3 KM3NeT პროექტის მეორე დონის (Tier-2) სერვერი თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში და მასზე ჩატარებული კვლევები.....	49
4. ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში KM3NeT ოპტიკური მოდულების საშუალებით.....	64
4.1. ატმოსფერული მიუონები.....	65
4.2 ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ზღვის სიღრმეზე დამოკიდებულების შესწავლა.....	70
5. შეჯამება და დასკვნა.....	81
გამოყენებული ლიტერატურა.....	83
დანართები.....	90
დანართი 1: KM3NeT ექსპერიმენტის მონაცემთა სტრუქტურა.....	90
დანართი 2: KM3NeT დეტექტორის კომპუტერული მოდელი.....	93

1. შესავალი

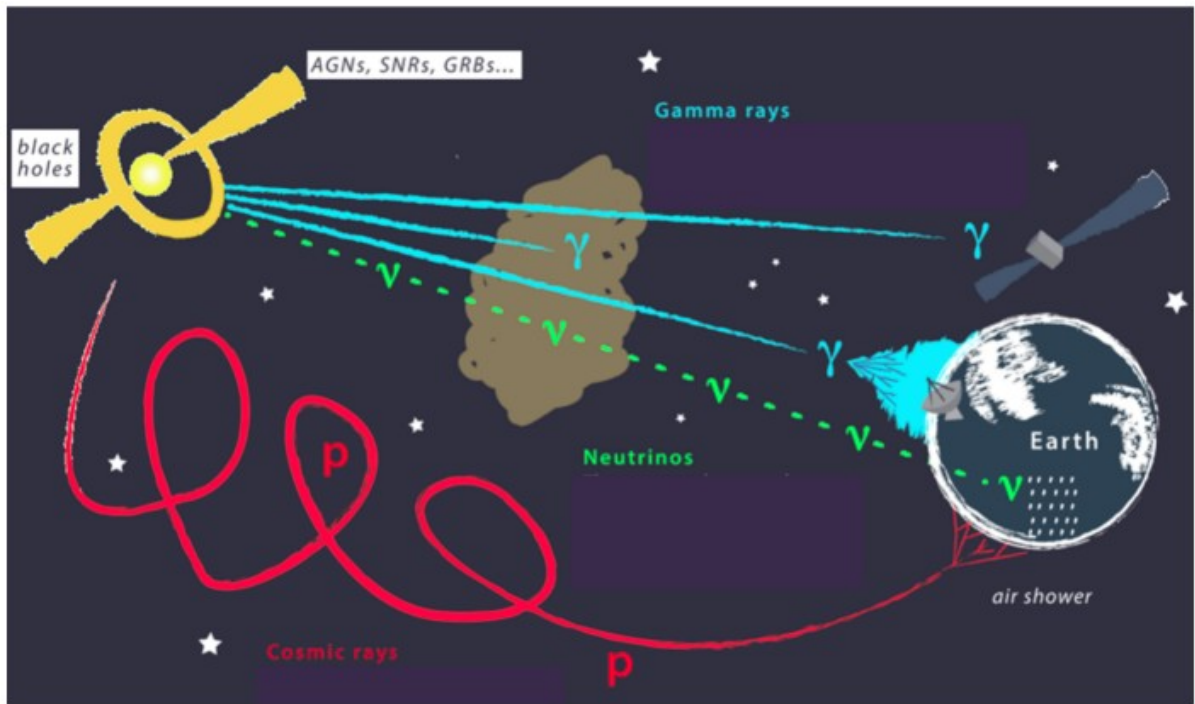
ასტრონაწილაკების ფიზიკა მეცნიერების შედარებით ახალი დარგია, რომელიც სწავლობს მაღალი ენერგიების კოსმოსურ ნაწილაკებს და მათ კავშირს ასტროფიზიკასა და კოსმოლოგიასთან. ამ მიმართულებას ეკუთვნის მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომია. ნეიტრინოებს ჩვენამდე მოღწევა და ინფორმაციის მოტანა შეუძლიათ ისეთი ასტროფიზიკური ობიექტებიდან, საიდანაც ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და სხვა ნაწილაკები ვერ აღწევენ. ამის საუკეთესო მაგალითია შშის ცენტრში, თერმობირთვული რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი ნეიტრინოების დაკვირვება. ასევე აღსანიშნავია გეახალი ვარსკვლავის (სუპერნოვა) აფეთქების შედეგად წარმოქმნილი ნეიტრინოების ნაკადის დეტექტირება 1987 წელს (Hirata et al., 1987), რის შედეგად ვარსკვლავების ევოლუციის თვისობრივი სურათის დადგენა გახდა შესაძლებელი. მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომიის ძირითადი

ამოცანაა პასუხი გასცეს თანამედროვე ბუნებისმეტყველების ისეთ ფუნდამენტურ კითხვებს, როგორც არის მაღალი ენერგიების კოსმოსური სხივების ასტროფიზიკური წყაროებისა და მათი აჩქარების მექანიზმის პრობლემა. კოსმოსური ნეიტრინოების საშუალებით შესაძლებელია ასევე ბნელი (უხილავი) მატერიის არაპირდაპირი დაკვირვება. მაღალი ენერგიის ნეიტრინულ ტელესკოპებში შესაძლებელია ასევე ნეიტრინოების თვისებების შესწავლა. ამ მიზნით გამოიყენება ატმოსფერული ნეიტრინოები, რომლებიც ატმოსფეროში კოსმოსური სხივების ატმოსფეროს ნაწილაკებთან ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნებიან (Stanev, 2010).

დღემდე (2023 წლამდე), მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომია (ასტროფიზიკა) ძირითადად ეყრდნობოდა ორ საერთაშორისო პროექტს – ANTARES (ANTARES Collaboration, 1999) და IceCube (IceCube Collaboration, 2013). პირველი განლაგებულია ხმელთაშუა ზღვის ფსკერზე, დაახლოებით 2500 მეტრის სიღრმეზე, საფრანგეთის ქალაქ ტულონიდან 40 კმ მანძილზე, ხოლო მეორე, რომელიც სადღეისოდ მსოფლიოში ყველაზე დიდი ნეიტრინული ტელესკოპია, განლაგებულია ანტარქტიდაში, სამხრეთ პოლუსზე, ამუნდსენ-სკოტის პოლარულ სადგურთან. მაღალი ენერგიების კოსმოსური ნეიტრინოების პირველი დაკვირვება შესაძლებელი გახდა IceCube ნეიტრინული ტელესკოპის საშუალებით . ამ დაკვირვებამ დაადასტურა, რომ მაღალი ენერგიების

ნეიტრინოები სამყაროს შესწავლის ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას წარმოადგენს და გახსნა სამყაროს შესწავლის ახალი ნეიტრინული ფანჯარა.

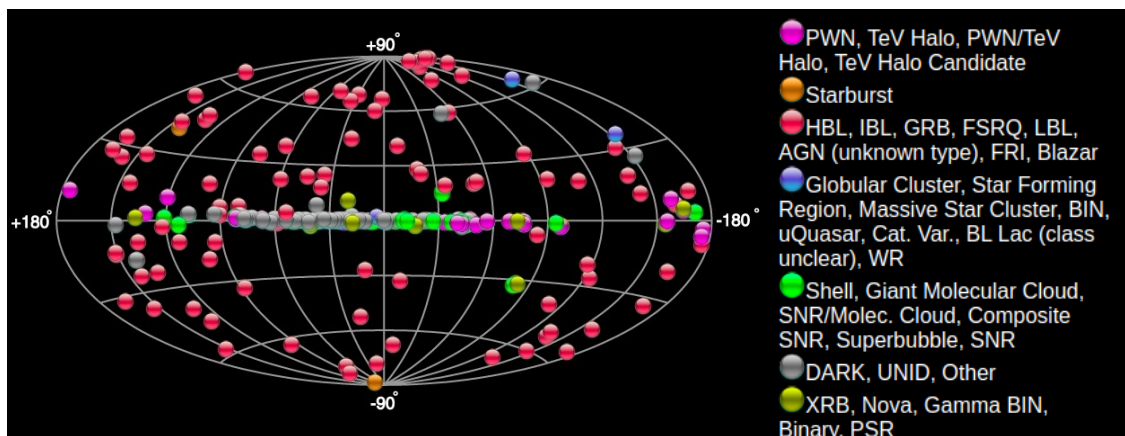
კოსმოსური სხივების ძირითადი ნაწილი სხვადასხვა ელემენტის ბირთვისგან შედგება. მათგან 90% ყველაზე მსუბუქი ელემენტის - წყალბადის ბირთვი, ანუ პროტონია. გალაქტიკურ და გალაქტიკებს შორის არსებული მაგნიტური ველები, მიუხედავად სიმცირისა (10^{-9} ტესლა რიგის), კოსმოსური სხივების სანყისი მიმართულების გადახრას იწვევს. ცხადია, ეს შეუძლებელს ხდის კოსმოსური სხივების წყაროების ძებნას დამუხტული ნაწილაკებით. კოსმოსური სხივების წყაროდან (კოსმოსური ამაჩქარებლებიდან) დედამიწამდე ორი ნაწილაკი მოძრაობს წრფივად - მაღალი ენერგიების გამა სხივები (γ -ნაწილაკები) და ნეიტრინოები (ν). სურათ 1.1-ზე მოცემულია აღნიშნული პროცესების ილუსტრაცია.



სურათი. 1.1 გამა ნაწილაკების, ნეიტრინოებისა და პროტონების გავრცელების ილუსტრაცია წყაროდან დედამიწამდე

ბოლო ათწლეულებში ჩვენს სამყაროში მიმდინარე მაღალი ენერგიების პროცესების შესასწავლად ორივე ნაწილაკი გამოიყენება. კვლევები ამ ნაწილაკებით ფუნდამენტური კვლევების ახალ მიმართულებას - ასტრონაწილაკების ფიზიკას მიეკუთვნება. მაღალი ენერგიების გამა-ასტრონომია და მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომია

ასტრონომიის ფიზიკის ქვემიმართულებებს წარმოადგენენ. გამა ასტრონომიის ხელსაწყოები განლაგებულია როგორც კოსმოსურ თანამგზავრებზე (ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი, მაგალითად Fermi – LAT) (Atwood et al., 2009) ასევე დედამიწაზე. დედამიწაზე განლაგებული მაღალი ენერგიების γ - სხივების დეტექტორები ჩერენკოვის ტელესკოპებს წარმოადგენენ. თანამგზავრული და ატმოსფერული ინსტრუმენტების საშუალებით კოსმოსში აღმოჩენილია მაღალი ენერგიების γ - წყაროების დიდი რაოდენობა (Wakely & Horan, 2008), რომლებიც ნაჩვენებია სურ. 1.2-ზე. გამა ნაწილაკების დაფიქსირება არ იძლევა ცალსახა პასუხს კითხვაზე წარმოადგენენ თუ არა ეს ობიექტები იმ წყაროებს, სადაც კოსმოსური სხივების აჩქარება ხდება. ეს იმით არის გამოწვეული, რომ γ - სხივების წარმოქმნა შესაძლებელია როგორც კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედებების შედეგად მიღებული მეორადი ნაწილაკების დაშლებში (ძირითადად $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$), ასევე მაღალი ენერგიის ელექტრონების გაბნევით კოსმოსური მიკროტალღური ფონის ფოტონებზე (კომპტონის შებრუნებული ეფექტი), რაც შეიძლება არ იყოს დაკავშირებული კოსმოსური სხივების წყაროებთან. გამა ასტრონომიის მეორე შეზღუდვა დაკავშირებულია მაღალი ენერგიების γ - სხივების ჩახშობასთან კოსმოსური ფონის ფოტონების მიერ, რაც ზღუდავს შორეული ასტროფიზიკური ობიექტების დაკვირვების შესაძლებლობებს.

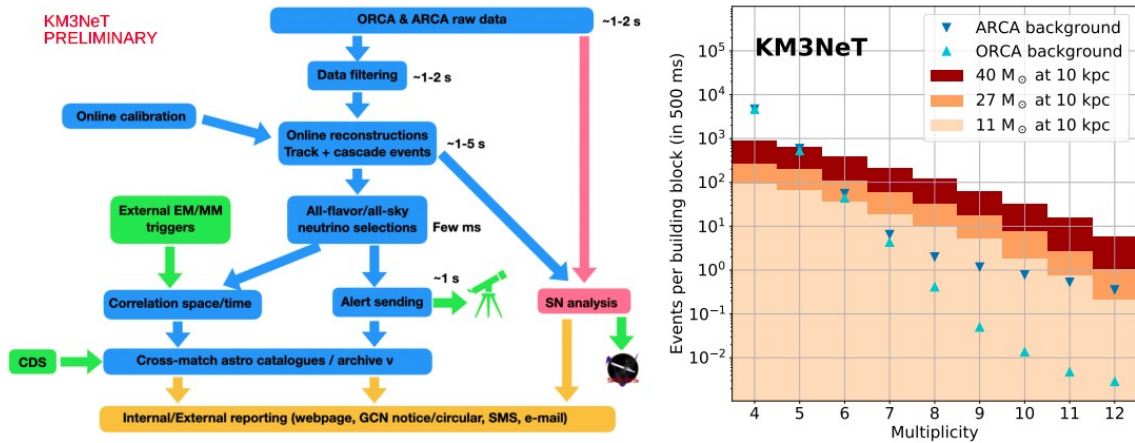


სურათი 1.2. მაღალი ენერგიების გამა ნაწილაკების წყაროები

მაღალი ენერგიების კოსმოსური ნეიტრინოების აღმოჩენა ცალსახად მიუთითებს კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედებაზე ასტროფიზიკურ ობიექტებში. ვინაიდან ნეიტრინოები მხოლოდ სუსტ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედებაში მონაწილეობენ, ასევე არ განიცდიან ფონური ფოტონების მოქმედებას და შესაბამისად ჩახშობის გარეშე აღწევენ დედამიწას. მათი

დეტექტირება დედამიწაზე, იმავე მიზნის გამო, ძალიან რთულ ექსპერიმენტულ ამოცანას წარმოადგენს და ძალიან დიდი მოცულობის დეტექტორების საშუალებით არის შესაძლებელი. პირველი თაობის ნეიტრინულმა ტელესკოპებმა (Baikal (Belolaptikov et al., 1997), AMANDA (for the AMANDA Collaboration. & Silvestri, 2005), ANTARES) აჩვენეს, რომ ნეიტრინოების დეტექტირება შესაძლებელია ბუნებრივ გარემოში მოთავსებული ჩერენკოვის დეტექტორების საშუალებით. მეორე თაობის ნეიტრინული დეტექტორი IceCube რამდენიმე წელია წარმატებით მუშაობს ანტარქტიკაში სამხრეთ პოლუსზე, ხოლო ტელესკოპი KM3NeT, რომელსაც ეს ნაშრომი ეფუძნება ამჟამად მშენებლობის პროცესშია ხმელთაშუა ზღვაში.

ასტროფიზიკური კვლევების ერთ-ერთ თანამედროვე მიდგომას წარმოადგენს მულტიმესენჯერული ასტრონომია. ის გულისხმობს ერთი და იმავე ობიექტის დაკვირვებასა და შესწავლას სხვადასხვა სიგნალებით, კერძოდ ელექტრო-მაგნიტური გამოსხივებით, გრავიტაციული ტალღებით და ნეიტრინოებით. მსგავსი კვლევა ისეთი პროცესების დაკვირვების საშუალებას იძლევა, რომლებიც ცალკე აღებული სიგნალების ფარგლებს ცდება. მულტიმესენჯერული დაკვირვებების მიზნით შექმნილია სხვადასხვა ტიპის ტელესკოპების და დეტექტორების გლობალური ქსელი. როდესაც ერთი ტელესკოპი ან დეტექტორი დააკვირდება განსაკუთრებულ შემთხვევას, ის გზავნის შეტყობინებას მულტიმესენჯერულ ქსელში, რომ ამ შემთხვევის დაკვირვება სხვა სიგნალებით მოხდეს. ასეთი მულტიმესენჯერული ასტრონომიის ქსელის წევრია KM3NeT კოლაბორაცია (Adrián-Martínez et al., 2016). სურ. 1.3 ა)-ბ) წარმოდგენილია KM3NeT ექსპერიმენტის სტრატეგია სუპერნოვასათვის დამახასიათებელი სიგნალების აღმოჩენის შემთხვევაში. ხოლო სურათი 1.3 ბ) გვიჩვენებს 10 კილოპარსეკის დაშორებით სხვადასხვა ზომის სუპერნოვასათვის დამახასიათებელი მოსალოდნელი სიგნალების სიმულაციას (KM3NeT Collaboration et al., 2021, 2022).



სურათი 1.3 ა) KM3NeT ექსპერიმენტის სტრატეგია სუპერნოვას მულტიმესენჯერული დაკვირვებისათვის; ბ) სხვადასხვა ზომის სუპერნოვასათვის დამახასიათებელი სიგნალების მრავლობითობა KM3NeT ექსპერიმენტში

1.1 ნეიტრინული ფიზიკა და ასტროფიზიკა

სტანდარტული მოდელის თანახმად, ლეპტონები წარმოადგენენ სუბატომური ნაწილაკებს რომლებიც მონაწილეობენ, სუსტ, ელექტრომაგნიტურ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედებებში. ლეპტონები ითვლებიან ელემენტარულ ნაწილაკებად (მიიჩნევა, რომ ლეპტონებს არ გააჩნიათ ქვესტრუქტურა). ისინი ან ხასიათდებიან ერთეული ელექტრული მუხტით ან ელექტრონეიტრალურები არიან. დამუხტული ლეპტონებია ელექტრონი - e , მიუონი - μ და ტაუონი - τ . სამივე ლეპტონი უარყოფითი მუხტით ხასიათდება. დამუხტულ ლეპტონებს შორის ყველაზე მსუბუქი ელექტრონია, მას მასური იერარქიით მიუონი მოსდევს რომლის მასაც დაახლოებით 200-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას, ხოლო ტაუ ლეპტონის მასა 3700-ჯერ მეტია ელექტრონის მასაზე. როგორც სხვა ნაწილაკებს, აღნიშნულ ლეპტონებსაც აქვთ მათი ანტინაწილაკები, რომლებიც საპირისპიროდ - დადებითად არიან დამუხტულნი. ყოველ დამუხტულ ლეპტონთან ასოცირდება ელექტრონეიტრალური ლეპტონი - ნეიტრინო.

ნეიტრინო (ν) მსუბუქი, უმუხტო ლეპტონია. მისი სპინია - $\frac{1}{2}$, ლეპტონური რიცხვი - 1. ნეიტრინოს მხოლოდ სუსტი და გრავიტაციული ურთიერთქმედება ახასიათებს. სუსტი ურთიერთქმედების შესაბამისი მანძილები ძალიან მცირე - 10^{-17} მ რიგისაა, მათთვის გრავიტაციული ურთიერთქმედება კი იმდენად მცირეა,

შეასაძლებელია უგულებელყოფა. ამრიგად უმეტესწილად, ნეიტრინოები დაბრკოლების გარეშე განჭოლავენ ნებისმიერ გარემოს.

არსებობს სამი არომატის ნეიტრინო: ელექტრონული ნეიტრინო - ν_e , მიუონური ნეიტრინო - ν_μ და ტაუონური ნეიტრინო - ν_τ . არსებობს მათი ანტინაწილაკებიც - ანტინეიტრინოები.

Q/e	$L_e = -1$	$L_\mu = -1$	$L_\tau = -1$
0	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$
Q/e	$L_e = 1$	$L_\mu = 1$	$L_\tau = 1$
0	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$

ცხრილი 1.1. ლეპტონების თაობები

პირველადი მოსაზრებით, ნეიტრინოს მასა 0-ის ტოლი იყო. თუმცა, ნეიტრინოების არომატების ოსცილაციებიდან გამომდინარე (Bilenky, 2016), უნდა არსებობდეს ნეიტრინოების 3 მასური მდგომარეობა (პირობითი სახელებით '1', '2', '3') , რომელთა წრფივ კომბინაციასაც წარმოადგენს თითოეული არომატის ნეიტრინო.

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

ფორმულა 1.1. მასური მდგომარეობების შერევის მატრიცა

U - მასური მდგომარეობების შერევის მატრიცაა (პონტეკორვო - მაკი - ნაკაგავა - საკატას მატრიცა - PMNS), რომლის პარამეტრებია შერევის θ_{12} , θ_{13} და θ_{23} კუთხეები და CP-ს დამრღვევი δ -ფაზა. ნეიტრინოს სივრცეში გადაადგილებისას მასური კომპონენტები სხვადასხვა სიჩქარით მოძრაობენ, რაც იწვევს შესაბამის კვანტურ-მექანიკურ ტალღურ პაკეტებში ფაზურ წანაცვლებებს და სუპერპოზიციის ცვლილებას. შედეგად ნეიტრინოს არომატი იცვლება ანუ ნეიტრინოები ოსცილირებენ. ოსცილაციის ექსპერიმენტებზე იზომება არა თითოეული მდგომარეობის (ν_1, ν_2, ν_3) შესაბამისი მასები, არამედ ამ მასათა სხვაობის

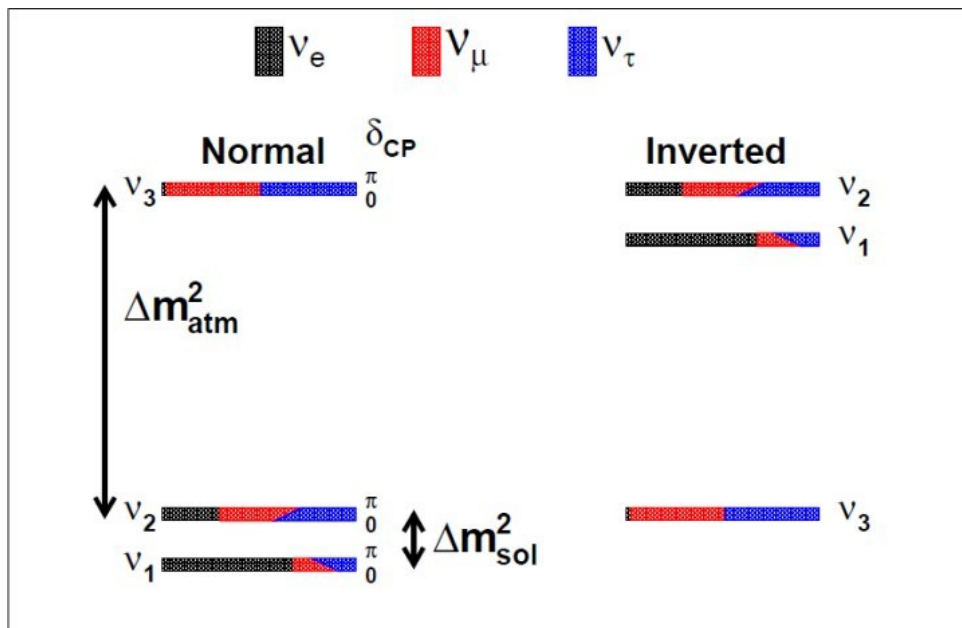
კვადრატი - $\Delta m_{ij}^2 = \Delta m_i^2 - \Delta m_j^2$ ($i, j=1,2,3$) (Hofestädt, 2020). ცნობილია მასათა კვადრატის ორი მნიშვნელობა - მზისა და ატმოსფერული ნეიტრინოების შესაბამისი:

$$\Delta m_{sol}^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} eV^2 \text{ და } \Delta m_{atm}^2 \simeq 2.5 \times 10^{-3} eV^2 \quad (1.2)$$

სიდიდის მიხედვით მასათა თანმიმდევრობა ანუ მასური იერარქია ჯერ დადგენილი არ არის. თუ დავაფიქსირებთ, რომ: $\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{sol}^2 > 0$

ხერხდება იერარქიის ორი შესაძლებლობის გამოყოფა :

1. ნორმალური იერარქია - NH - $m_1 < m_2 < m_3$
2. შებრუნებული იერარქია - IH - $m_3 < m_1 < m_2$



სურ. 1.4. ნეიტრინოების მასური იერარქია.

თეორიული ფიზიკისათვის ოსცილაციებისა და ნეიტრინოების მასური იერარქიის განსაზღვრა მნიშვნელოვანია, რათა უფრო ზუსტად განისაზღვროს PMNS მატრიცის პარამეტრები. ამას გარდა, შეიქმნას შესაბამისი თეორიული მოდელი, რომელიც ახსნის ლეპტონების მასის წარმომავლობასა და მასათა განსხვავებულ სპექტრს კვარკებსა და ლეპტონებს შორის. ექსპერიმენტული თვალსაზრისით კი მასური იერარქიის განსაზღვრა სამომავლოდ დაეხმარება ექსპერიმენტულ

ფიზიკას CP-დარღვევის პროცესების შესწავლასა და შესაბამისი ფაზის (წ) დადგენაში, ნეიტრინოების აბსოლუტური მასებისა და ნეიტრინოს ბუნების (დირაკის თუ მაიორანას ნაწილაკი) განსაზღვრაში. ასტროფიზიკური თვალსაზრისით იერარქიას გავლენა აქვს ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებაში ნეიტრინოს არომატის ცვლილებაზე.

მაღალი ენერგიების ნეიტრინოების ძირითადი წყაროა, ნაწილაკების, პირველ რიგში დამუხტული პიონებისა (π^\pm) და კაონების (K^\pm) სუსტი დაშლები. პიონები და კაონები ძლიერად ურთიერთქმედ ნაწილაკებს წარმოადგენენ, რომლებიც მაღალი ენერგიების პროტონებისა და ბირთვების ურთიერთქმედებისას იბადებიან, და შემდეგ სუსტი ურთიერთქმედების შედეგად იშლებიან. შესაბამისად მაღალი ენერგიების ნეიტრინოების დაკვირვება პიონებისა და კაონების დაბადებაზე, ე.ი. მაღალი ენერგიების ადრონულ ურთიერთქმედებებზე მიაწინებს.

დაშლის არხი
$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$
$K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$
$K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu_e$
$K^\pm \rightarrow \pi^0 \mu^\pm \nu_\mu$
$\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_\mu \nu_e$

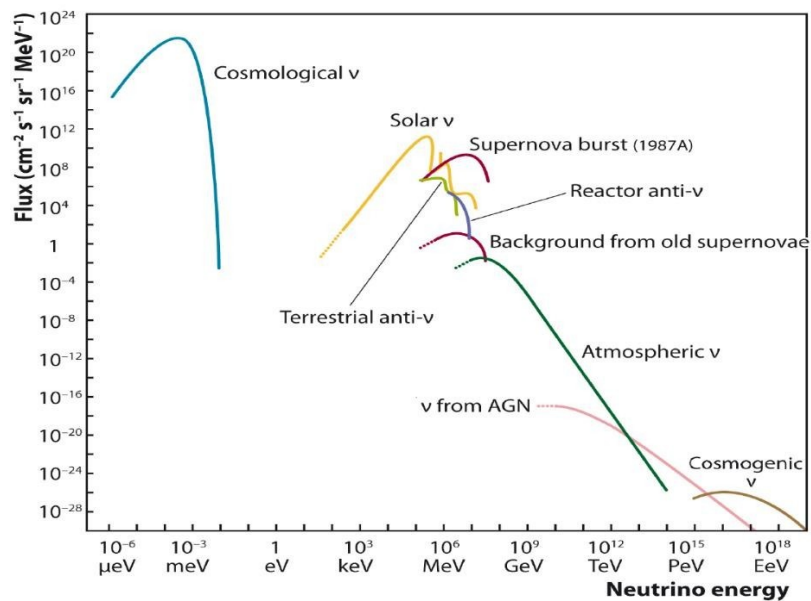
ცხრილი 1.2. ძირითადი დაშლები, რომლებშიც ნეიტრინოების დაბადება ხდება.

კოსმოსური ნეიტრინოები კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედებებში წარმოქმნილი ნაწილაკების დაშლების შედეგად მიიღებიან. შესაბამისად მათი დაკვირვება ცალსახად განსაზღვრავს ასტროფიზიკურ ობიექტს, სადაც კოსმოსური სხივები ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებენ, რაც დიდი ალბათობით ის ასტროფიზიკური ობიექტია, სადაც მაღალი ენერგიების კოსმოსური სხივების აჩქარება ხდება. დღემდე ბოლომდე გარკვეული არ არის თუ სად და როგორ ხდება კოსმოსური სხივების ნაწილაკების აჩქარება.

ნეიტრინოების ძირითადი წყაროები:

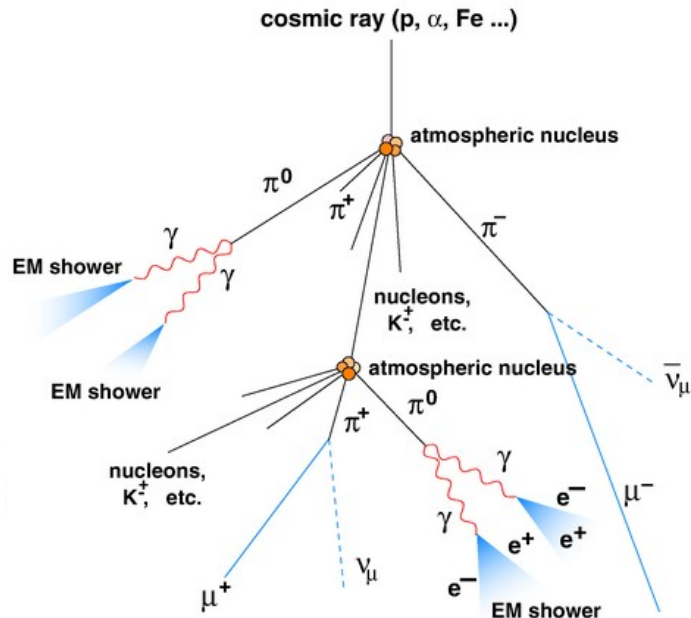
- 1) დიდი აფეთქების კოსმოსური ნეიტრინული ფონი

- 2) ბირთვული რეაქციები ვარსკვლავებში
- 3) ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქება
- 4) ბირთვული რეაქციები რეაქტორებში
- 5) ატმოსფერული ნეიტრინოები
- 6) კოსმოგენური ნეიტრინოები



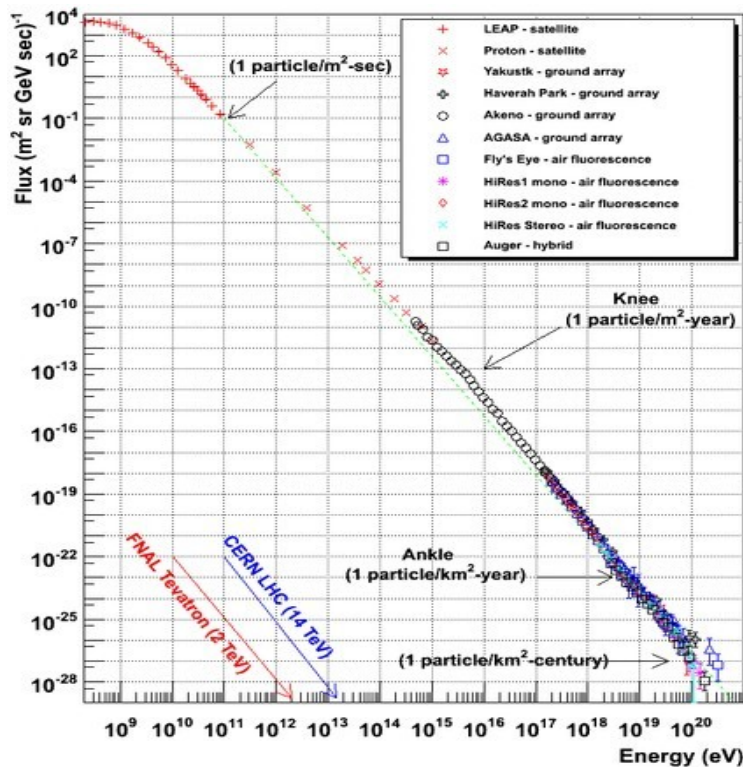
სურ. 1.5. ნეიტრინოების წყაროები

ნეიტრინოების ინტენსიურ დაბადებას ადგილი აქვს კოსმოსური სხივების ნაწილაკების ატმოსფეროს ბირთვებთან ურთიერთქმედებების დროს. სურ 1.6.



სურათი 1.6. ატმოსფერული ღვარების წარმოქმნა

რადგანაც ატმოსფეროს სიმკვრივე გაცილებით მეტია კოსმოსური გარემოს სიმკვრივეზე, შესაბამისად ნეიტრინოების ინტენსიურ წყაროს ატმოსფეროში მიმდინარე რეაქციები წარმოადგენენ. ასეთ ნეიტრინოებს ატმოსფერულ ნეიტრინოებს უწოდებენ. ეს ნეიტრინოები კოსმოსური ნეიტრინოების დაკვირვებებისთვის დაუყვანად ფონს წარმოადგენს, თუმცა მათი საშუალებით შესაძლებელია ნეიტრინოების თვისებების შესწავლა, კერძოდ კი ნეიტრინული ოსცილაციების დაკვირვება და ოსცილაციის პარამეტრების გამოძვა. კოსმოსური სხივების სპექტრი მოცემულია სურათზე 1.7. როგორც სურათიდან ჩანს, კოსმოსური სხივების ნაწილაკების ენერგიები მნიშვნელოვნად აღემატება პროტონულ ამჩქარებლებზე მიღებულ ენერგიებს და ფარავს ინტერვალს $E_{CR} < 10^{21}$ ევ. (10^{12} გევ). კოსმოსური ნაწილაკების ენერგიის ყოფაქცევა ხარისხის ფუნქციით ($E^{-\alpha}$) აღინერება, რომლის მაჩვენებელი მუდმივია დაახლოებით 1012 ევ. ენერგიაზე ($\alpha=2.7$). ის არე სადაც ხარისხის მაჩვენებელი იცვლება, ცნობილია როგორც კოსმოსური სხივების სპექტრის “მუხლი” (knee). კოსმოსური სხივების მუხლი, სავარაუდოდ დაკავშირებულია ჩვენ გალაქტიკაში წარმოქმნილ კოსმოსურ სხივებთან. მუხლის შემდეგ ინდექსი იცვლება ($\alpha=3.7$) იმ არემდე, რომელიც ცნობილია როგორც “კოჭი” (ankle). დაახლოებით 1019 ევ. ენერგიაზე, კოსმოსური სხივები ურთიერთქმედებას იწყებენ კოსმოსის მიკროტალღური გამოსხივების ფოტონებთან, რაც იწვევს კოსმოსური სხივების ენერგიის ჩამოჭრას (ე.წ. გრაიზენ-კუმინ-ბაცეპინის ჩამოჭრა) (Greisen, 1966; Watson, 2014).



სურათი 1.7. კოსმოსური სხივების სპექტრი

ატმოსფერული ნეიტრინოები, დაბალ ენერგიებზე (რამდენიმე ათეული გევ.) ძირითადად დამუხტული პიონების დაშლებში წარმოიქმნება, რომლებიც თავის მხრივ იბადებიან რეაქციაში:



სადაც - A_{atm} ატმოსფეროში არსებული ბირთვებია (ძირითადად აზოტი და ჟანგბადი). ენერგიის ზრდასთან ერთად იზრდება დამუხტულ კაონების დაბადებისა და შეაბამისად კაონების დაშლებიდან გაჩენილი ნეიტრინოების წვლილი. ატმოსფერული ნეიტრინოების სპექტრის გამოთვლისთვის აუცილებელია კოსმოსური სხივების ინტენსივობისა და ატმოსფეროს შემადგენლობის ზუსტი მონაცემები.

ნეიტრინული ფიზიკისა და ასტროფიზიკური კვლევებისათვის (Katz & Spiering, 2012) ამჟამად ხმელთაშუა ზღვაში შენდება ახალი თაობის ნეიტრინული ტელესკოპი, KM3NeT (**Kilometer Cube Neutrino Telescope**). აღნიშნული დეტექტორის მშენებლობა ეყრდნობა ANTARES - პროექტში მიღებულ გამოცდილებას. KM3NeT ექსპერიმენტის მიზანია როგორც კვლევები ასტროფიზიკაში, ასევე ნეიტრინოების თვისებების შესწავლა (ოსცილაციის პარამეტრები, ნეიტრინოს მასების იერარქიის დადგენა). გემოთმოყვანილი

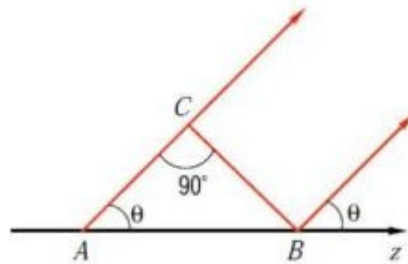
სამივე ტელესკოპი ჩერენკოვის დეტექტორს წარმოადგენს, რომლებიც განლაგებულნი არიან ბუნებრივ, გამჭვირვალე გარემოში - ზღვასა და ყინულში.

2.KM3NeT ექსპერიმენტი და მისი მულტისენსორული ოპტიკური მოდული

2.1 ჩერენკოვის გამოსხივება

ჩერენკოვის ცდების შედეგის პირველი ახსნა მოგვცა ვავილოვმა, იმავე ჟურნალში, რომელშიც იყო გამოქვეყნებული ჩერენკოვის შრომები. ვავილოვი სამართლიანად თვლიდა, რომ აღმოჩენილი გამოსხივება გამოწვეული იყო ელექტრონის და არა ატომის მოძრაობით გარემოში. ამასთან ის თვლიდა, რომ გამოსხივება დაკავშირებულია ელექტრონის გარემოსთან ურთიერთქმედებისას დამუხრუჭებასთან. მართლაც, კლასიკური ელექტროდინამიკიდან ცნობილი იყო, რომ აჩქარებით მოძრავი დამუხრუჭებული ნაწილაკი ასხივებს. თუმცა ვავილოვის ეს ელემენტარული ჰიპოთეზა ამომწურავად ვერ ხსნიდა ექსპერიმენტული ფაქტების სრულ ერთობლიობას. კერძოდ კი, გამოსხივების ინტენსივობის ძალიან სუსტ დამოკიდებულებას გარემოს შემადგენელი ატომების გვარობასთან. ამიტომ ეს პირველადი თეორია უგულებელყოფილ იქნა. სწორი ახსნა აღმოჩნდა უფრო მარტივი და ამავედროულად ლამაზიც, რომელიც ეკუთვნოდა ტამს და ფრანკს. მათ აჩვენეს, რომ დამუხრუჭებული ნაწილაკი, რომელიც მოძრაობს გარემოში თანაბრად და წრფივად ისე რომ მისი სიჩქარე აღემატება გარემოში სინათლის სიჩქარეს, იწვევს ჩერენკოვის გამოსხივებას. 1937 წლამდე, ტამის და ფრანკის პუბლიკაციამდე (Tamm & Frank, 1937) ითვლებოდა, რომ თანაბრად და წრფივად მოძრავი მუხტი არ უნდა ასხივებდეს. ასევე ითვლებოდა, რომ ნაწილაკის სიჩქარე ვერ გადააჭარბებდა სინათლის სიჩქარეს. მაგრამ ეს უკანასკნელი მტკიცება სამართლიანია მხოლოდ ვაკუუმისთვის. მართლაც ვაკუუმში, ფარდობითობის თეორიის თანახმად, სინათლის გავრცელების სიჩქარეა $c = 3 \times 10^8$ მ/წმ არის მაქსიმალური შესაძლო სიჩქარე და შესაბამისად, $v < c$ პირობა ყოველთვის სრულდება. მაგრამ ნივთიერებაში ნაწილაკის გავრცელება სხვა საქმეა. როგორც ვიცით, ნივთიერებაში n - გარდატეხის მაჩვენებლით, სინათლის სიჩქარე ტოლია c/n და შესაძლებელი ხდება $v > c/n$ პირობის შესრულება, ფარდობითობის თეორიასთან უთანხმოების გარეშე. ვაჩვენოთ, რომ ისევე როგორც კლასიკური ტალღური ოპტიკიდან, ისევე

კორპუსკულური წარმოდგენებიდან სინათლის შესახებ გამომდინარეობს, რომ მუხტი, რომელიც მოძრაობს გარემოში ზესინათლის სიჩქარით, უნდა ასხივებდეს უწყვეტად. განვიხილოთ მუხტი, რომელიც მოძრაობს მუდმივი v სიჩქარით გამჭვირვალე გარემოში, 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.



სურათი 2.1. ჩერენკოვის გამოსხივებაში სხივების სვლათა სხვაობა

A და B წერტილებიდან ტრაექტორიისადმი θ კუთხით წამოსული Δl - ტალღის სიგრძეთა სვლათა სხვაობა განისაზღვრება დროით - $t_1 = AC \cdot \frac{c}{n}$ და $t_2 = \frac{AC}{v}$ დაყოვნებით, B წერტილში გამოსხივების დაწყებამდე. t_1 -დან t_2 მომენტამდე გასული დრო ტოლია A წერტილიდან B წერტილში მუხტის გადაადგილების დროის (იხილეთ სურ. 2.1)

$$\Delta l = AC \cdot \frac{c}{n} (t_1 - t_2) = AB \cdot \left(\frac{1}{\beta n} - \cos \theta \right), \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (2.1)$$

ინტერფერენციის ელემენტარული თეორიიდან ცნობილია, რომ როდესაც:

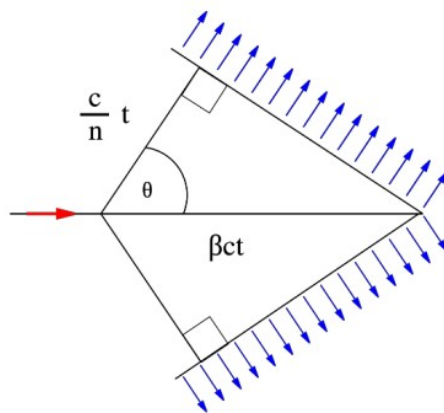
$\Delta l = \frac{m\lambda}{2}$ ($m = 0, 1, 2 \dots$) და m კენტი რიცხვია მაშინ ტალღები ერთმანეთს ახშობენ მთლიანად. ხოლო, როდესაც m ლუწი რიცხვია ან ნულის ტოლია, მაშინ ხდება ამპლიტუდის გაძლიერება. აქ λ არის ტალღის სიგრძე. დავუშვათ:

$$\cos \theta \neq \frac{1}{\beta n} \quad (2.2)$$

მაშინ AB მონაკვეთი ყოველთვის შეიძლება ავირჩიოთ ისე, რომ შესრულდეს $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$ და მოცემული მიმართულებით სინათლე აღარ გავრცელდება. ითვლება, რომ ნაწილაკის ტრაექტორია არის საკმარისად გრძელი, რაც ნიშნავს, რომ ტრაექტორიის შემოსაზღვრულობასთან დაკავშირებული ეფექტები უგულვებელყოფილია. ე.ი. მხოლოდ θ კუთხით გამოსხივებული ტალღებს, რომლებიც განისაზღვრება პირობით:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} \quad (2.3)$$

ყოველთვის ექნებათ ნულოვანი სვლათა სხვაობა, დამოუკიდებლად გამოსხივების წერტილისგან. რადგანაც $\cos \theta \leq 1$, ამიტომ $\beta n \geq 1$, ან რაც იგივეა $v \geq \frac{c}{n}$. ეს ნიშნავს, რომ გამოსხივება დასაშვებია მხოლოდ იმ მუხტისთვის, რომელსაც აქვს სინათლის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარე და თანაც მხოლოდ იმ მიმართულებით, რომელიც აკმაყოფილებს (2.3) პირობას. ჩერენკოვოს გამოსხივების გეომეტრიული ინტერპრეტაცია ნაჩვენებია სურ. 2.2-ზე.

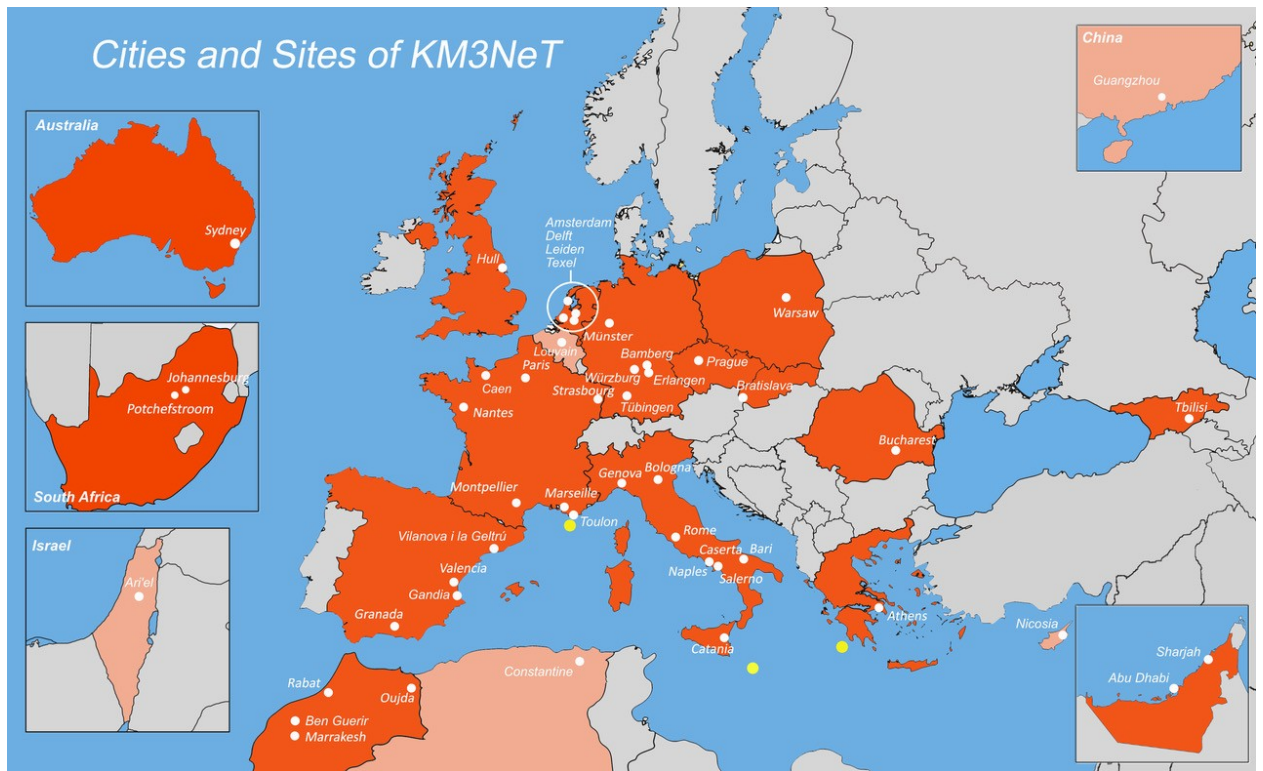


სურათი 2.2. ჩერენკოვის გამოსხივების გეომეტრია, (დისპერსიის გარეშე)

2.2 KM3NeT ექსპერიმენტი

KM3NeT წარმოადგენს ახალი თაობის ნეიტრინული დეტექტორების ერთობლიობას, რომელთა მიზანია კვლევები ნეიტრინულ ფიზიკასა და ასტროფიზიკაში. პროექტის ფარგლებში ასტროფიზიკური კვლევების ჩატარება დაგეგმილია KM3NeT/ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in Abyss) დეტექტორის საშუალებით, რომელიც შენდება ((Aiello et al., 2020) 3500 მეტრის სიღრმეზე, სიცილიის (იტალია) სანაპიროდან (ქ. პორტო-პალო დი კაპო პასერო)

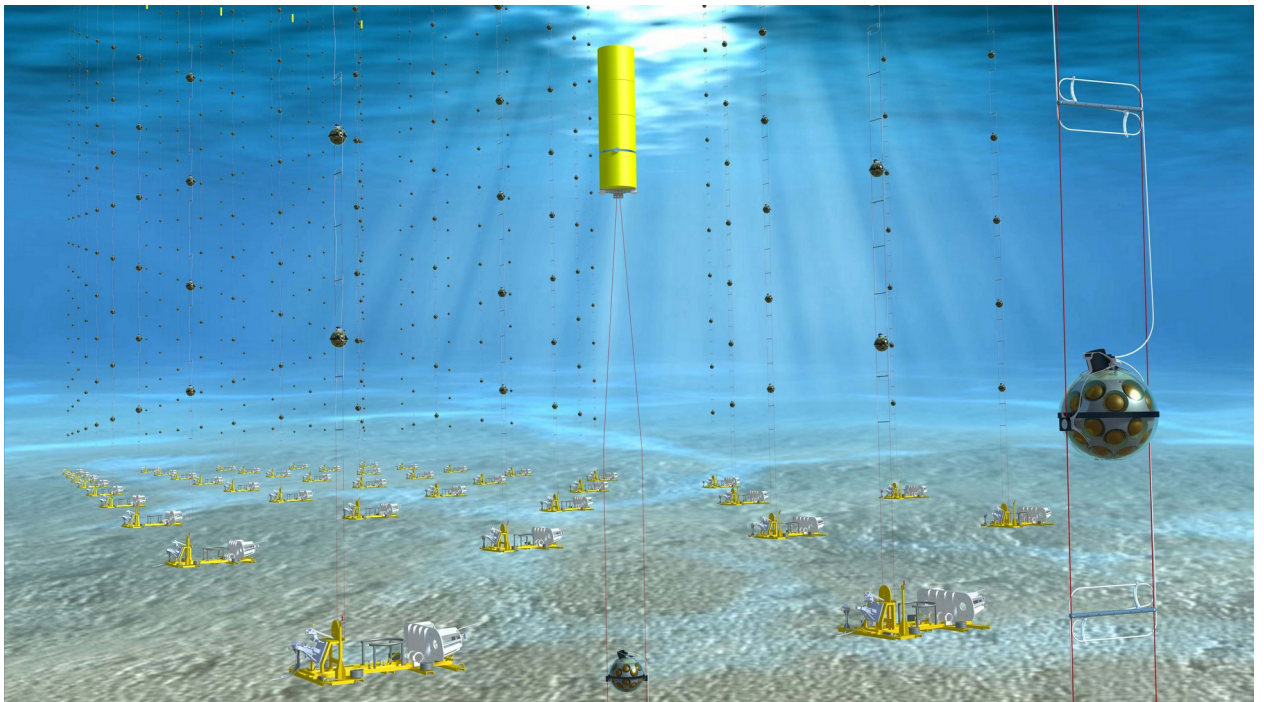
დაახლოებით 100 კმ მანძილზე. KM3NeT/ARCA ოპტიმიზირებულია მაღალი ენერგიების (100 გევ-ზე მეტი) ასტროფიზიკური ნეიტრინოების დაკვირვებისთვის. ზოლო მეორე დეტექტორი - KM3NeT/ORCA (Oscillation Research with Cosmics in Abyss) საფრანგეთის სანაპიროზეა განლაგებული ქ. ტულონთან, 40კმ მანძილზე და 2500 მეტრის სიღრმეზე. მისი მთავარი მიზანია 100 გევ ენერგიებამდე ატმოსფერული ნეიტრინოების დამზერა. დეტექტორების მშენებლობა მიმდინარეობს ხმელთაშუა ზღვის ღრმა წყლებში. მათი დანიშნულებაა გახსნან ახალი ფანჯარა სამყაროს შესასწავლად და წვლილი შეიტანონ ნეიტრინოების თვისებების განსაზღვრაში. KM3NeT თანამშრომლობაში წარმოდგენილია 18 ქვეყნის 57 ინსტიტუტი და ჯგუფი, მათ შორის, საქართველოდან - თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი (სურათი 2.3).



სურ. 2.3. KM3NeT კოლაბორაცია. წითლად აღნიშნულია კოლაბორაციის წევრი ქვეყნები, ყვითლად დეტექტორების ლოკაციები, ხოლო ვარდისფრად ქვეყნები, რომლებსაც აქვთ დამკვირვებლის სტატუსი.

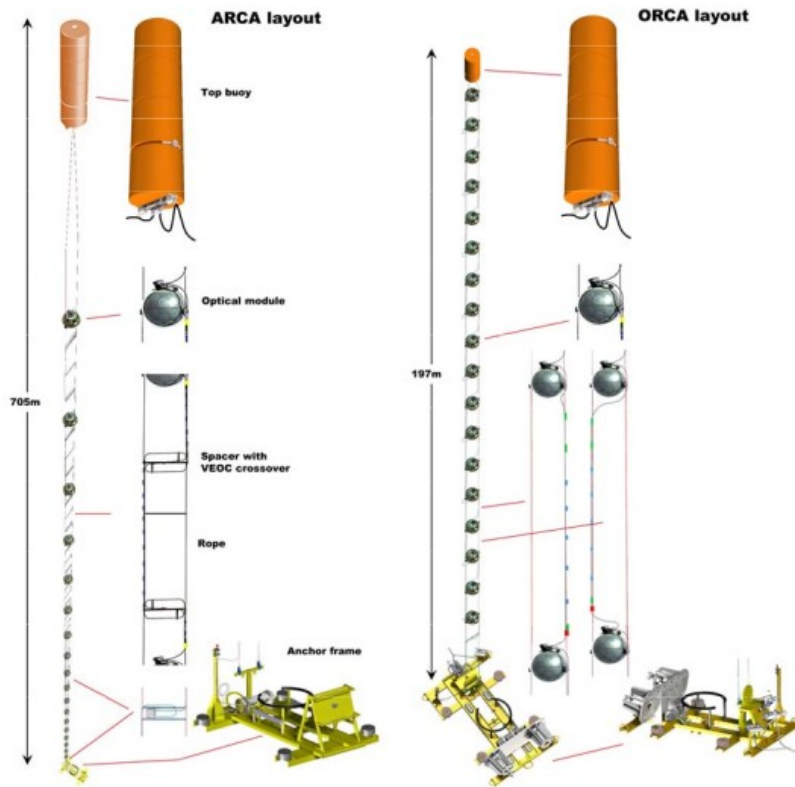
ARCA და ORCA დეტექტორები შედგებიან ოპტიკური მოდულებისაგან (Digital Optical Module) (Aiello, Albert, Alshamsi, et al., 2022), რომლებიც აღწერილია ნაშრომის შემდეგ თავში. ორივე ტელესკოპი იდენტური დიზაინისაა, ერთადერთი განსხვავება მათი შემადგენელი ოპტიკური მოდულების სივრცული

განლაგების სიმკვრივეა. 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. ხოლო ჰორიზონტალური მანძილი თითოეულ ხაზს შორის ARCA-ს შემთხვევაში საშუალოდ 90, ხოლო ORCA-სთვის 20 მეტრია. KM3NeT ნეიტრინული ტელესკოპის ილუსტრაცია ნაჩვენებია სურ. 2.4-ზე.



სურათი 2.4. KM3NeT დეტექტორის ილუსტრაცია. ოპტიკური მოდულები (სფეროები) განლაგებულია დეტექტორის ხაზებზე, რომლებიც ვერტიკალურ მდგომარეობას ხაზის ბოლოს მოთავსებული ტივტივას საშუალებით ინარჩუნებენ (ყვითელი ცილინდრები).

KM3NeT პროექტის ARCA და ORCA ტელესკოპების დეტექციის თითო ერთეული, ზომები და შემადგენელი ნაწილები მოცემულია სურათზე 2.5.



სურათი 2.5 მარცხნივ: KM3NeT ARCA და ORCA ტელესკოპების დეტექციის ერთეულები.

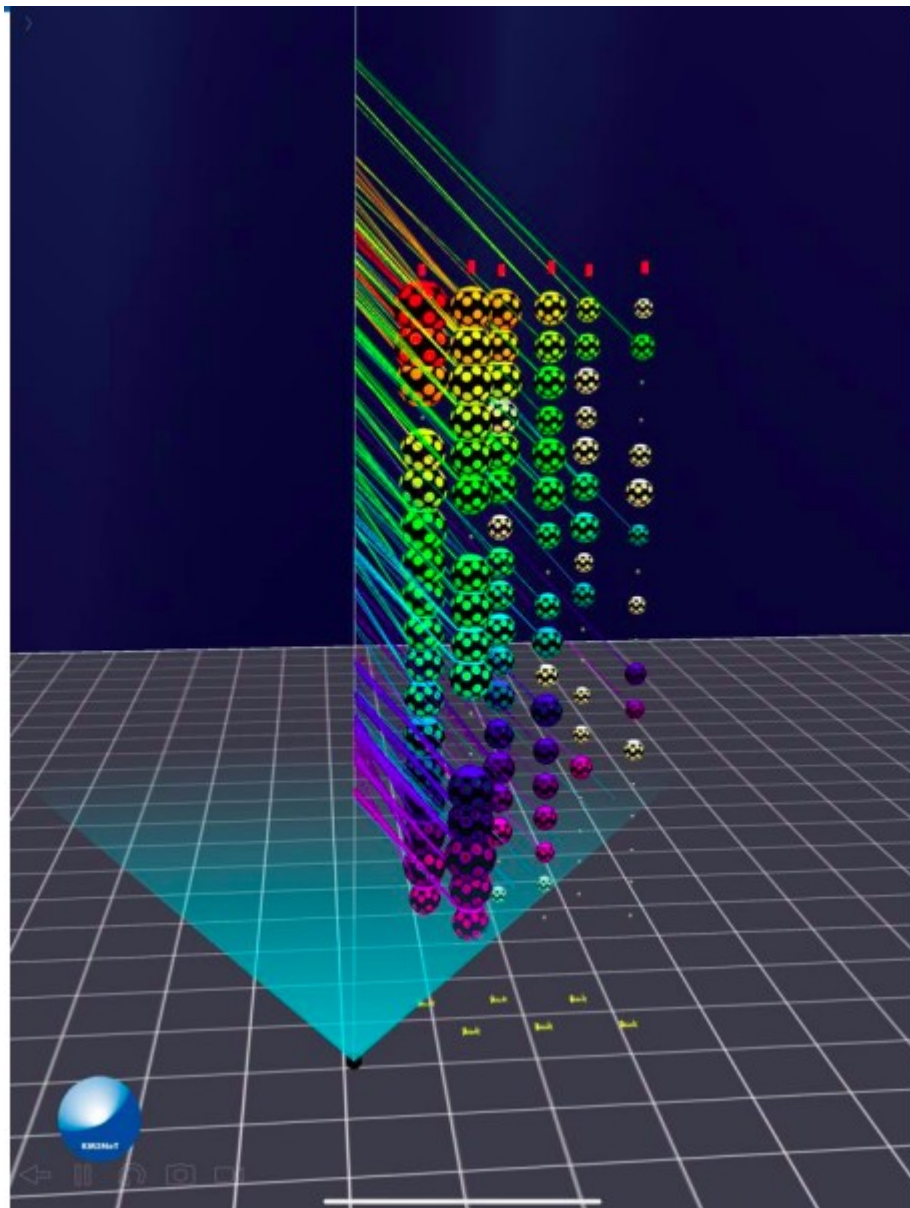
ARCA და ORCA ტელესკოპების პარამეტრები წარმოდგენილია შემდეგ ცხრილი 2.1-ში:

Detector	Depth	Horizontal spacing	Vertical spacing	Detection unit	Volume
ARCA	3500 m	90 m	36 m	2 x 115	1 km ³
ORCA	2500 m	20 m	9 m	115	~0.005 km ³

ცხრილი 2.1. KM3NeT ARCA და ORCA ტელესკოპების პარამეტრები

აღნიშნულ ტელესკოპებში ნეიტრინოების აღდგენა მსგავსი მეთოდებით ხორციელდება. ნეიტრინოების ზღვის ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას წარმოიქმნება დამუხტული ნაწილაკები, რომელთა გავრცელების სიჩქარე გარემოში აღემატება სინათლის გავრცელების სიჩქარეს ამავე გარემოში. ისინი ინვევენ ჩერენკოვის გამოსხივებას, რომლის რეგისტრაცია შესაძლებელია

მაღალი მგრძობიარობის მქონე ფოტოსენსორებით. ფოტოდეტექტორების შერჩეული განლაგება და ჩერენკოვის ფოტონების რეგისტრაციის დროის მაღალი სიზუსტით დაფიქსირება საშუალებას გვაძლევს დამუხტული ნაწილაკების მიმართულება აღვადგინოთ (გარკვეული სიზუსტით). განსაკუთრებით კარგად აღდგება მაღალი ენერგიების მიუონები, რადგან ისინი ახერხებენ დიდი მანძილის დაფარვას ზღვის წყალში. მიუონის განარბენი, ჩერენკოვის გამოსხივება და ოპტიკური მოდულები, რომლებმაც დააფიქსირეს სიგნალი, წარმოდგენილია სურ. 2.6-ზე.



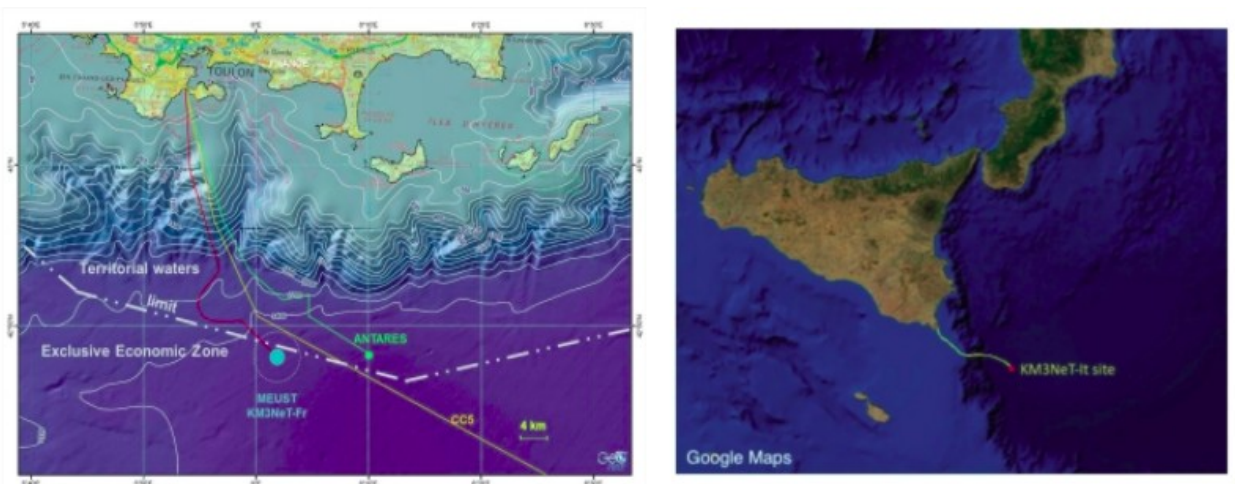
სურათი 2.6. ORCA6-ში (ORCA დეტექტორის ექვსხაზიანი კონფიგურაცია) მიუონური შემთხვევის მაგალითი. ვერტიკალური წრფით ნაჩვენებია მიუონის განარბენი, ცისფერი

არე აჩვენებს ჩერენკოვის გამოსხივებას. ოპტიკური მოდულების ფერები შეესაბამება სიგნალის დაფიქსირების დროს. ფერებით ნაჩვენებია სიგნალების დროში ქრონოლოგიური განაწილება წითლიდან იისფრამდე.

KM3NeT ტელესკოპში ტექნიკურ სიახლეს წარმოადგენს მრავალი ფოტო-დეტექტორის გაერთიანება ერთ ოპტიკურ მოდულში. ოპტიკური მოდულის მახასიათებლები - ფოტოსენსორების განლაგება და ორიენტაცია, ჩერენკოვის ფოტონების მოსვლის დროის გამომვასთან ერთად გვადლევს საკმარის ინფორმაციას ნაწილაკის ტრაექტორიის აღსადგენად. ინდივიდუალური ოპტიკური მოდულით ჩერენკოვის ფოტონების მიმართულების აღდგენის შესაძლებლობა თუნდაც შებლუდული სიზუსტით, KM3NeT დეტექტორს განასხვავებს სხვა ნეიტრინული ტელესკოპებისგან. ამ დამატებითმა ინფორმაციამ უნდა გაზარდოს ნაწილაკთა მიმართულების აღდგენის სიზუსტე.

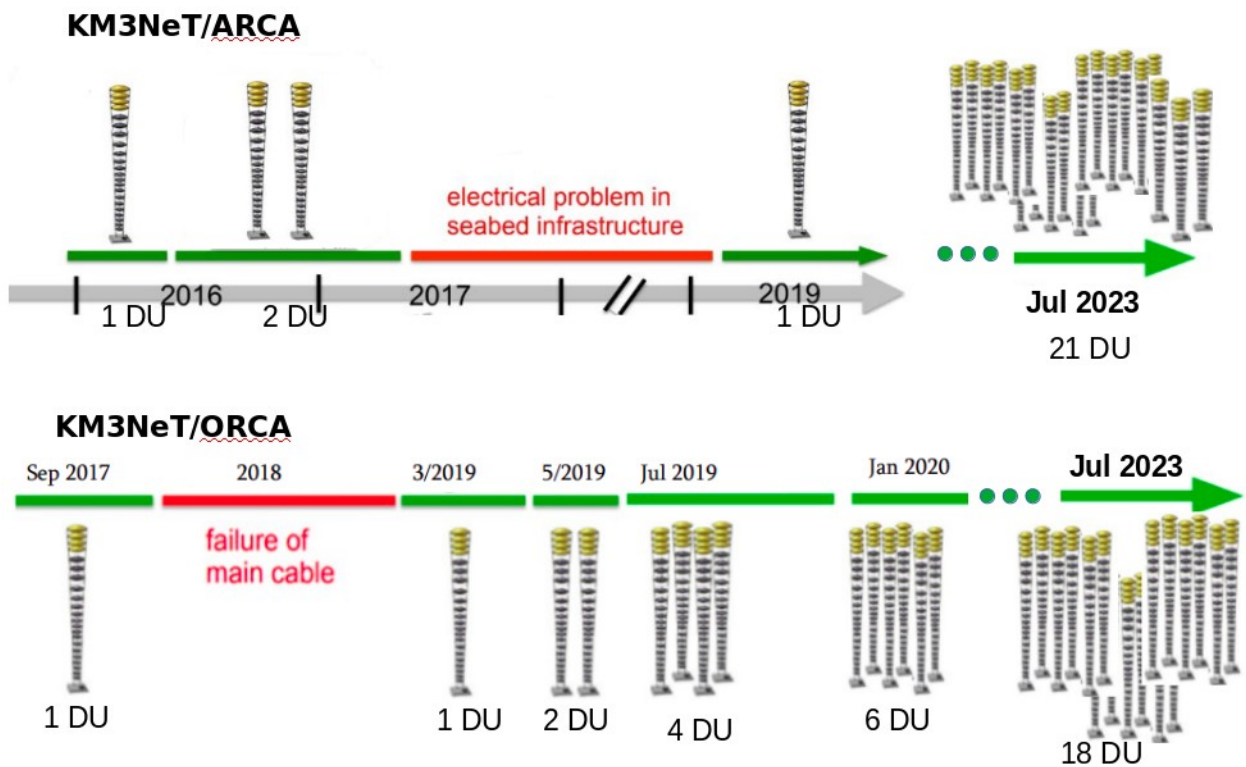
2.3 ARCA და ORCA ტელესკოპების მშენებლობის სტატუსი

ARCA-ს და ORCA-ს ზღვის უბნების ფსკერზე შენდება ელექტრო-ოპტიკური კაბელების ქსელები და შეერთების ყუთები, რომლებიც დაკავშირებულია ხმელეთზე მართვის სადგურთან. ტელესკოპის მდებარეობები ნაჩვენებია სურ. 2.7-ზე.



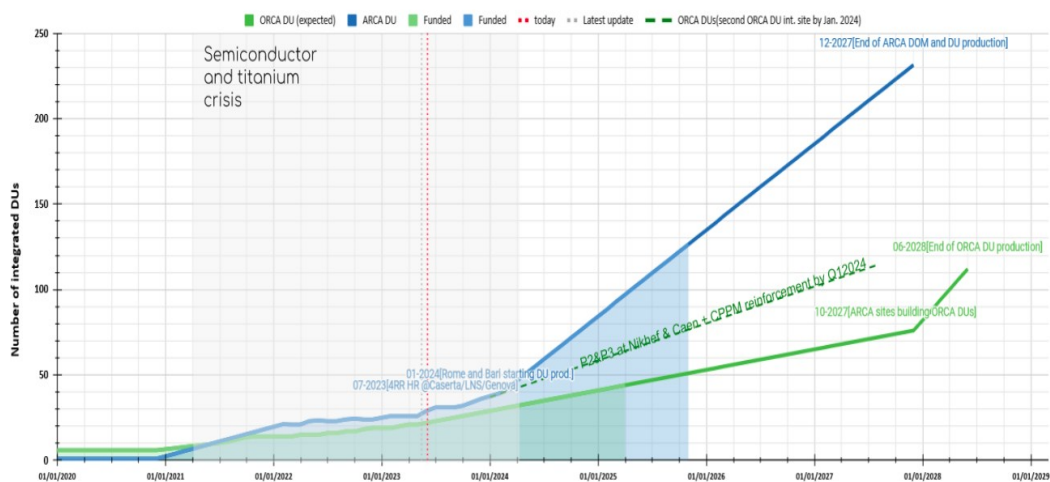
სურათი 2.7. ტელესკოპების მდებარეობები. მარცხნივ - ORCA, მარჯვნივ - ARCA

ორივე, ARCA და ORCA, უბანი წარმოადგენს კვანძებს საზღვაო მეცნიერებებთან დაკავშირებული კვლევებისათვის. ARCA ოპტიკური მოდულების მასივი თანდათან შენდება და უკავშირდება შეერთების ყუთებს ზღვის ფსკერზე, დაახლოებით 3500 მ სიღრმეზე, პორტოპალო დი კაპო პასეროს სანაპიროდან დაახლოებით 90 კილომეტრში, სიცილია (იტალია). მასივის კონფიგურაცია ოპტიმიზირებულია კოსმოსური წყაროებიდან მაღალი ენერჯის ნეიტრინოების აღდგენისათვის. ARCA-ს მიზნობრივი ინსტრუმენტული მოცულობა არის დაახლოებით ერთი კუბური კილომეტრი, შემდგომი ზრდის შესაძლებლობით. ოპტიკური მოდულები განაწილებულია ზღვის წყლის მოცულობაში, დაახლოებით 90 მ საშუალო ჰორიზონტალური და 36 მ ვერტიკალური დაშორებით. ყველაზე დაბალი მოდულები განლაგებულია ზღვის ფსკერიდან დაახლოებით 70 მ სიმაღლეზე. 2023 წლის ივლისში დამონტაჟებულია ARCA დეტექტორის დეტექციის 21 ერთეული 378 მოდულით და მიმდინარეობს შემდეგი ხაზების მშენებლობა. მიზანია 4100-ზე მეტი მოდულის დაყენება 230 ხაზზე. პარალელურად, ORCA დეტექტორის მასივი შენდება ტულონის (საფრანგეთი) სანაპიროდან 40 კილომეტრში, დაახლოებით 2500 მ სიღრმეზე. ORCA-ს კონფიგურაცია ოპტიმიზირებულია ნეიტრინოს ოსცილაციების შესასწავლად კოსმოსური სხივების ატმოსფეროსთან ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი ნეიტრინოების საშუალებით. მისი ოპტიკური მოდულების მასივი მოიცავს ზღვის წყლის მოცულობას დაახლოებით 5 მეგატონას, მოდულებს შორის არის ჰორიზონტალური დაახლოებით 20 მ და ვერტიკალური დაშორება დაახლოებით 9 მ. 2023 წლის ივლისის მონაცემებით ზღვის სიღრმეში განლაგებულია 324 ოპტიკური მოდული, რომლებიც ინტეგრირებულია 18 DU-ზე. ARCA-ს მსგავსად, ოპტიკური მოდულებისა და დეტექციის ერთეულების აწყობა ჯერ კიდევ მიმდინარეობს. ORCA მიზნად ისახავს 2000-ზე მეტი ოპტიკური მოდულის დაყენებას 115 ხაზზე. ზღვის წყალში დამონტაჟებული დეტექციის ერთეულების რაოდენობის დროში ზრდა და მიმდინარე სტატუსი ილუსტრირებულია სურ. 2.8-ზე.



სურათი 2.8. დეტექციის ერთეულების ზღვის სიღრმეზე განლაგების ისტორია და მიმდინარე სტატუსი.

არსებული გეგმის მიხედვით (იხ. სურათი 2.9), ARCA ტელესკოპის მშენებლობა უნდა დასრულდეს 2027 წლის მიწურულს. ამის შემდეგ, KM3NeT თანამშრომლობის ადამიანური და ტექნიკური რესურსები სრულად გადაერთვება ORCA-ს მშენებლობაზე და გაერთიანებული ძალებით შეძლებენ დეტექტორის სრული კონფიგურაციის გამზადებასა და ზღვის სიღრმეში განლაგებას.



სურათი 2.9. KM3NeT ARCA და ORCA ტელესკოპების მშენებლობის გეგმა

2.4 KM3NeT ოპტიკური მოდული

ANTARES წარმოადგენდა ხმელთაშუა ზღვაში პირველ ტელესკოპს, რომელმაც აჩვენა ღრმა ზღვაში ნეიტრინული ტელესკოპის მუშაობის მიზანშეწონილობა (ANTARES Collaboration, 2011). შემდეგი თაობის, ახალი ტექნიკური დიზაინის KM3NeT ტელესკოპი სარგებლობს ANTARES-ის მუშაობის 15 წლიანი გამოცდილებით. დიზაინის დასაწყისში ჩამოყალიბდა რამდენიმე მოთხოვნა ANTARES-ის შეფასების შემდეგ.

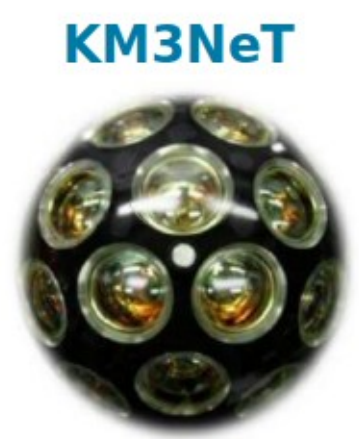
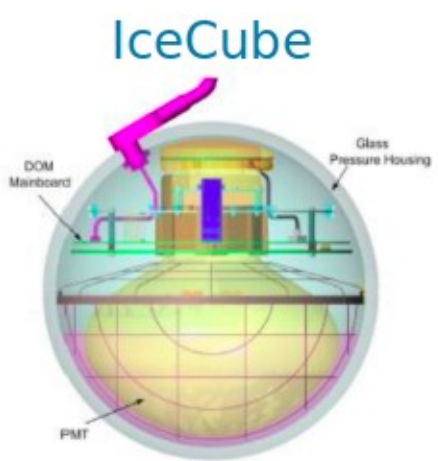
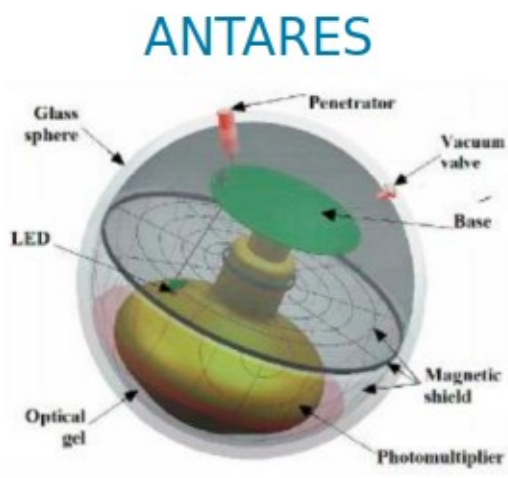
სამეცნიერო თვალსაზრისით, KM3NeT-ის მოთხოვნები იყო გევ-დან პევ-მდე ენერგიების მქონე ნეიტრინოების ეფექტური დაფიქსირება მაღალი კუთხური გარჩევადობით, მინიმუმ 15 წლის ფუნქციონირების პერიოდის განმავლობაში. ტექნიკური თვალსაზრისით კი, შესაბამისი საკვლევი მიზნებისთვის ნეიტრინოების მცირე ურთიერთქმედების კვებითა და ნეიტრინული ნაკადების გათვალისწინებით ORCA-სთვის საჭიროა ზღვის წყლის რამდენიმე მეგატონა მოცულობა, ხოლო დაახლოებით ერთი გიგატონა ARCA-სთვის.

440 ნმ ტალღის სიგრძის ფოტონებისთვის გრძელი შთანთქმის სიგრძე, რომელიც წარმოადგენს 70 მეტრს, ოპტიკური მოდულების მეჩხერად განლაგების საშუალებას იძლევა. ოპტიკური ფოტონების გაბნევის დაბალი ალბათობის გათვალისწინებით (ზღვის წყალში ცისფერი სინათლისთვის გაბნევის საშუალო სიგრძე 100 მ-ზე მეტია) შესაძლებელია განისაზღვროს ფოტონების საწყისი მიმართულება, ამასთან სიგნალის დაფიქსირება ნანონამიანი სიზუსტით ხდება.

ხარჯების ეფექტურობა და მასშტაბურობა მნიშვნელოვანი პარამეტრია KM3NeT ტელესკოპის საბოლოო რეალიზაციისთვის. დანახარჯების ეფექტურობის გასაზრდელად გადაწყდა რაც შეიძლება მეტი აქამდე არსებული კომპონენტების გამოყენება, რომელთა შეთავაზებაც კომპანიებს შეეძლოთ კონკურენტულ ფასებში. საჭიროების შემთხვევაში, როდესაც კომპანიებს არ შეეძლოთ პროდუქციის ხელმისაწვდომ ფასებში მიწოდება ან ვერ იძლეოდნენ წარმოების უწყვეტობის გარანტიას, გამოიყენებოდა პერსონალურად შემუშავებული ტექნიკური გადაწყვეტილებები. ასეთი გადაწყვეტილებები ასევე ხელმისაწვდომი გახდა კომპანიებისთვის მათ პორტფოლიოში გამოსაყენებლად. ოპტიკური მოდულების დიდი რაოდენობის წარმოების მასშტაბურობასა და ხარისხის კონტროლს ხელს უწყობს მოდულების ერთგვაროვნება, რაც

საშუალებას იძლევა მოდულის აწყობა და ხარისხის კონტროლი განხორციელდეს სხვადასხვა ინსტიტუტში.

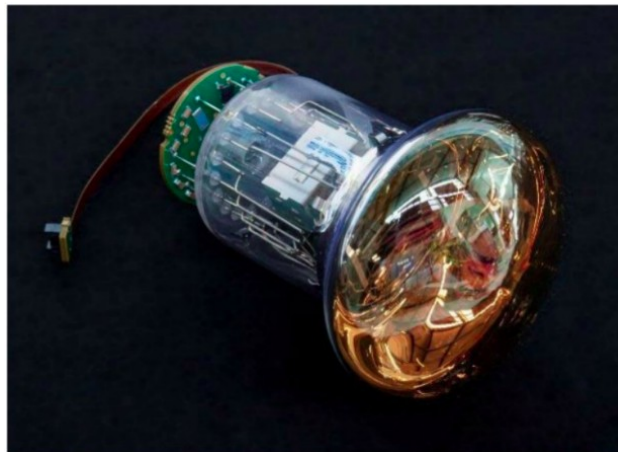
დიზაინის შექმნის ფაზის დაწყებისას მალევე დადასტურდა, რომ ფოტოდეტექტირებისთვის ფოტოგამამრავლებლების (PMT-ების) გამოყენება კვლავ ყველაზე ეფექტური ვარიანტი იყო. ასევე გადაწყდა ზღვის მეცნიერებების კვლევისთვის დამახასიათებელი სტანდარტული მინის წნევაგამძლე სფეროების გამოყენება, რომელიც მიიჩნევა ყველაზე საიმედო გამჭვირვალე კონტეინერებად. სფეროს მინა იცავს მგრძობიარე ალტურვილობას მარილიან წყალში მაღალი წნევის გარემო პირობებისგან, რაც უზრუნველყოფს მაღალ საიმედოობას გრძელვადიანი უწყვეტი მუშაობისთვის.



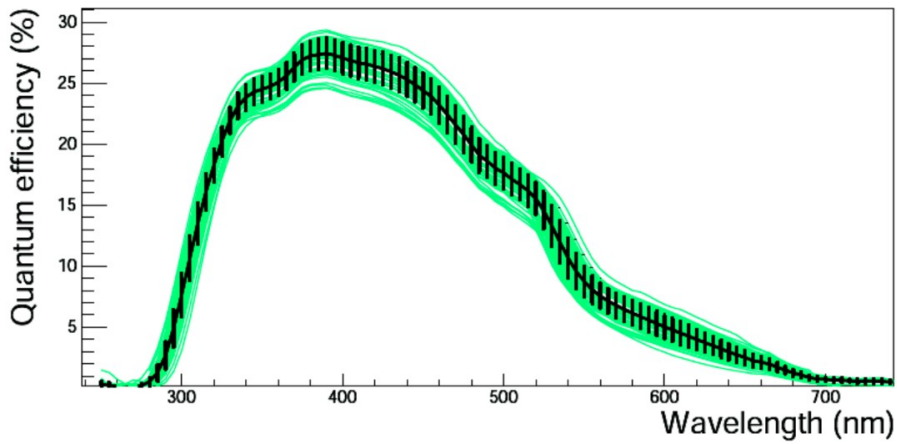
სურათი 2.10. ოპტიკური მოდულები სხვადასხვა ნეიტრინულ ტელესკოპში.

ტრადიციულად, ნეიტრინულ ტელესკოპებში სინათლის დასაფიქსირებლად ხდებოდა გამჭვირვალე მინის სფეროების ალტურვა ერთი დიდი

ფართობის ფოტოგამრავლებლით, დიამეტრით 8-დან 10 დიუმამდე. სხვადასხვა ნეიტრინული ტელესკოპის ოპტიკური მოდულები ნაჩვენებია სურ. 2.10-ზე. KM3NeT ოპტიკური მოდულის დიზაინის პირობებში კი მინის სფერო აღჭურვილია 31 ცალი 3 დიუმიანი ფოტოკათოდური PMT-ების (Aiello et al., 2018) ნაკრებით. მათ გააჩნიათ დაახლოებით იგივე ფოტოკათოდური ფართობით, როგორც სამ 10 დიუმან PMT-ს. აღნიშნული ფოტოსენსორი წარმოდგენილია სურ. 2.11-ზე.



სურათი 2.11. KM3NeT ექსპერიმენტში გამოყენებული ფოტოგამამრავლებელი ამ ფოტოსენსორის კვანტური ეფექტურობის დამოკიდებულება ფოტონის ტალღის სიგრძეზე მოცემულია სურ. 2.12-ზე. თითოეულ ფოტოსენსორზე სიგნალები ინდივიდუალურად მუშავდება. ეს კონცეფცია შემოთავაზებული იქნა ჯერ კიდევ 2003 წელს (Flykt, 2003) და შემდგომ დადასტურდა როგორც ტექნიკურად განხორციელებლად და მიზანშეწონილად. ფოტოკათოდის ფართობის სეგმენტაცია უზრუნველყოფს თითოეულ ოპტიკურ მოდულის მგრძობელობას დაფიქსირებული ფოტონების მიმართულების მიმართ და, ნანონამიანი დროის სიზუსტესთან ერთად, წარმოადგენს ეფექტურ ინსტრუმენტს ფონის შემცირებისთვის, რომელიც გამონვეულია ზღვის წყალში ^{40}K რადიოაქტიური დაშლებითა და ბიოლუმინესცენციით. სეგმენტაცია ასევე საშუალებას იძლევა მოდულზე შემოსული ფოტონების დათვლას, რაც არ არის მარტივი ერთი დიდი PMT-ის შემთხვევაში. გარდა ამისა, ინდივიდუალური PMT-ის წყობიდან გამოსვლის შემთხვევაში ტელესკოპის მუშაობაზე გავლენა მცირდება, რადგან მოდულის ეფექტურად მუშაობა მაინც შესაძლებელია ნაკლები PMT-ებით.



სურათი

2.12. ექსპერიმენტში გამოყენებული ფოტოგამამრავლებლის კვანტური ეფექტურობა

ელექტრონიკისა და მონაცემთა მიღების ჯაჭვის დიზაინი უნდა ითვალისწინებდეს თითოეულ PMT-ზე სიგნალების დიდ სიხშირეს ~ 8 kHz-ს, რაც გამოწვეულია ^{40}K -ის რადიოაქტიური დაშლითა და ზღვის წყალში ბიოლუმინესცენციით. იმისათვის, რომ სიგნალი ფონიდან გამოიყოს, ინფორმაცია ყველა დეტექტირებული ფოტონისთვის იგზავნება ხმელეთზე კონტროლის სადგურზე შემდგომი რთული ალგორითმების ასამუშავებლად. PMT დან წამოსული თითოეული სიგნალი მოიცავს მხოლოდ ფოტონის მოხვედრის დროსა და იმპულსის სიგანეს (time over threshold - ToT). სიგნალების ჩაწერა ხდება ნანონამიანი სიზუსტით, რომელთა ცდომილება მერყეობს 1,5-3 ნანონამიან ინტერვალში, რაც დამოკიდებულია კონკრეტული ფოტოსენსორის მახასიათებლებზე.

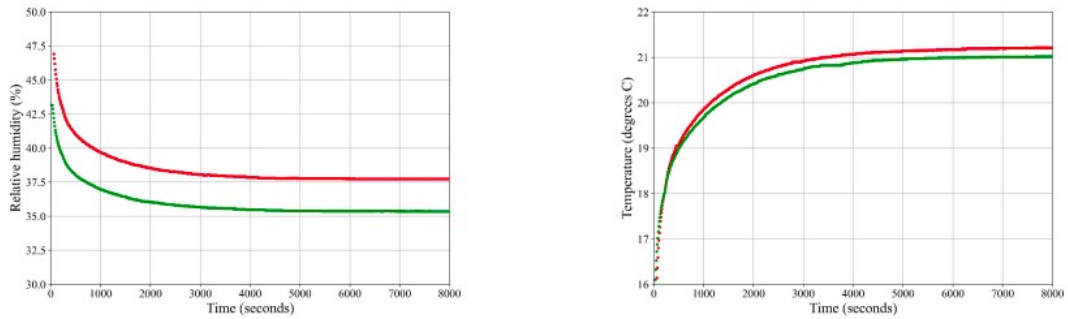
ტელესკოპის დიზაინის შემუშავებისას მნიშვნელოვანი მექანიკური მოთხოვნა იყო ტელესკოპში ელექტრო-ოპტიკური შეერთების წერტილების მინიმუმამდე დაყვანა წყლის გაჟონვის რისკის შესამცირებლად. მინის სფეროში PMT-ების, საკალიბრო მოწყობილობებისა და სხვა ელექტრული კომპონენტების ერთად მოთავსებით, ტელესკოპში აღნიშნული წერტილების რაოდენობა შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს ANTARES-თან შედარებით.

საბოლოოდ, მოწინავე ელექტრონიკით, შორ მანძილზე კომუნიკაციისთვის ოპტიკური გადაწყვეტილებებით და კალიბრაციის მოწყობილობებით აღჭურვილი მრავალფოტოსენსორიანი ოპტიკური მოდულის დიზაინის უპირატესობები KM3NeT ტელესკოპისთვის მრავალფეროვანია:

- ფოტოკათოდების ჯამური ფართობი 1300 სმ²-ია, რაც ერთ 10 დიუმიან ფოტოკათოდის ფართობზე დაახლოებით სამჯერ მეტია. ოპტიკური მოდულის ასეთი დიზაინი საშუალებას იძლევა სამუშაო მოცულობაში მათი შედარებით დაბალი სიმჭირდოვით განლაგებისა;
- ტელესკოპის კორიზონტს ბემოთ თითქმის ერთგვაროვანი და გაფართოებული კუთხოვანი ეფექტურობა;
- დეტექტირებული ფოტონების მიმართულების განსაზღვრა;
- ფოტონთა დათვლის შესაძლებლობა;
- პოზიციისა და დროის მაღალეფექტური კალიბრაცია;
- ფოტოგამამრავლებლების სიგნალების განაწილების მიხედვით ლოკალური ტრიგერების განსაზღვრის შესაძლებლობა;
- დეტექტორის კომპონენტების ერთგვაროვნება, რაც ამარტივებს მათ წარმოებასა და მიღებული მონაცემების ანალიზს.

ARCA და ORCA ტელესკოპების მაღალ სიზუსტესა და მგრძობიარობას განაპირობებს შემდეგი მახასიათებლების კომბინაცია: 1) ფოტოგამამრავლებლების მიერ სიგნალების ნანონამიანი სიზუსტით ჩანერა; 2) ოპტიკური მოდულის პოზიციის 10სმ იანი სიზუსტით გაზომვა; 3) ფოტოსენსორებზე დაფიქსირებული სიგნალთა რაოდენობით ფოტონთა ნაკადის შეფასება; 4) დაფიქსირებული ფოტონების მიმართულების განსაზღვრა. ყველაფერი ერთად, ARCA-ს შემთხვევაში განაპირობებს მედიანური 0,1 (0,055) გრადუსის კუთხურ გარჩევისუნარიანობას 10 ტევ (10 პევ) მიუონის ტრეკებისათვის და 2 გრადუსზე უკეთეს გარჩევისუნარიანობას 100 TeV-ზე მეტი ელექტრომაგნიტური კასკადებისთვის. ამასთან ენერგიის გარჩევადობა შეადგენს დაახლოებით 30%-ს ტრეკებისათვის და 5%-ს კასკადებისთვის 100 ტევ ენერგიაზე (Melis et al., 2017). ხოლო ORCA-ს შემთხვევაში 3 წლის მონაცემებით შესაძლებელი იქნება განისაზღვროს ნეიტრინოების მასური იერარქია 4,4 σ საიმედოობით ნორმალური ან 2,3 σ საიმედოობით შებრუნებული მასური იერარქიისთვის (Aiello, Albert, Garre, et al., 2022).

ზემოთ აღწერილი მოთხოვნების გათვალისწინებით, შეირჩა მინის 0.44 მ დიამეტრის მინის სფერო, რომელშიც მჭიდროდ არის განლაგებული 31 ფოტოგამამრავლებელი, მცირე მონყობილობები პოზიციისა და დროის კალიბრაციისთვის, და ელექტრული კვებისა და მონაცემთა ურთიერთ-გაცვლისთვის საჭირო ელექტრული კომპონენტები. ოპტიკური მოდულის თითოეული ნაწილი ისე შეირჩა, რომ ელექტროენერჯის მოხმარება მინიმუმამდე ყოფილიყო დაყვანილი. შედეგად, თითოეული მოდულის მოხმარება შეადგენს 7 ვატს, რაც ბევრად მცირეა ვიდრე გაგრილების მაქსიმალური თბოგაცემის უნარი – 10 ვატი. სურ. 2.13-ზე ნაჩვენებია ოპტიკურ მოდულებში გაზომილი ტენიანობა და ტემპერატურა.



სურათი 2.13. მარცხნივ – ფარდობითი ტენიანობა ოპტიკურ მოდულში; მარჯვნივ – ტემპერატურა ოპტიკურ მოდულში



სურათი 2.14. მარცხნივ ოპტიკური მოდულის ფოტო. მარჯვნივ დეტექციის ერთეულზე დამონტაჟებული ოპტიკური მოდულის კომპიუტერული გრაფიკული სურათი

ილუსტრაციისთვის სურ. 2.14-ზე წარმოდგენილია აწყობილი ოპტიკური მოდულის ფოტო და ტელესკოპის ხაზზე განთავსებული ერთი ოპტიკური მოდულის კომპიუტერული გრაფიკა. ოპტიკური მოდულისთვის შერჩეული ძირითადი კომპონენტები კი ნაჩვენებია სურ. 2.15-ზე.



სურათი 2.15. KM3NeT ოპტიკურ მოდულის შემადგენელი კომპონენტები

სურათზე 2.15 წარმოდგენილი ოპტიკური მოდულის კომპონენტების სია ნუმერაციის მიხედვით:

- 1) კომპონენტების ზედა ჩარჩო;
- 2) კომპონენტების ქვედა ჩარჩო;
- 3) მინის ნახევარსფერო (ქვედა);

- 4) ქვედა ჩარჩო, რომელშიც ჩამონტაჟებულია ფოტოგამამრავლებლები და სინათლის ამრეკლი რგოლები;
- 5) ოპტიკური კაბელების მიმმართველი;
- 6) რადიატორი და საყრდენი სვეტი;
- 7) ელექტრული კვების დაფა;
- 8) ცენტრალური ლოგიკური დაფა (CLB);
- 9) 3 ფოტოგამამრავლებელი შესაბამისი დაფითა და ამრეკლი რგოლებით;
- 10) მანომეტრი;
- 11) სიგნალის ები ორი დაფა;
- 12) ციმციმა შუქდიოდი (ნანოშუქურა) მართვის დაფით;
- 13) პენეტრატორი (მარცხნივ) და პენეტრატორი კაბელებითა და კაბელების დროებითი მიმართველით (მარჯვნივ);
- 14) პიემო ჰიდროფონი;
- 15) ლაზერული ტრანსივერი.

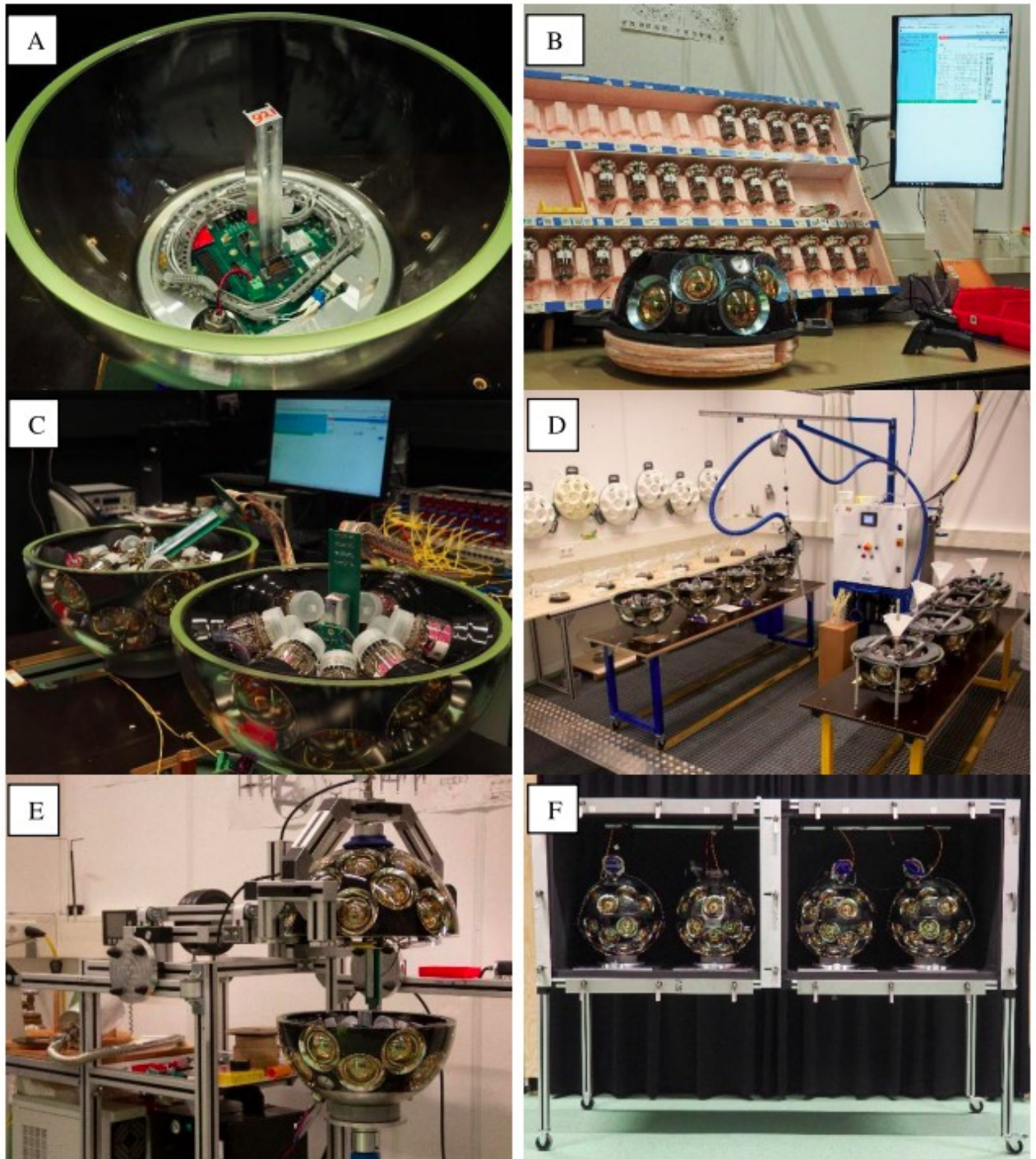
KM3NeT ტელესკოპისთვის 6000-ზე მეტი ოპტიკური მოდულის წარმოებისთვის შეიქმნა წარმოების დანაწილებული მოდელი. KM3NeT კოლაბორაციის მიერ მოთხოვნილი საბაზისო წარმოების სიჩქარის მისაღწევად ინტეგრაციის პროცედურა სტანდარტიზებულია და მოიცავს ზომიერი ზომის ლაბორატორიულ სივრცეს, ბნელ ყუთს (ან ბნელ ოთახს), შედარებით იაფი აღჭურვილობას და მცირე პერსონალს. ამგვარად, მრავალი ინსტიტუტი და ჯგუფი მონაწილეობს ტელესკოპის მშენებლობაში. ეს ჩართულობა ზრდის მათ ხილვადობას კოლაბორაციაში. დადებით მხარეებთან ერთად, ასევე აღსანიშნავია დანაწილებული წარმოების მოდელის გამოწვევები. ოპტიკური კომპონენტების შესყიდვა და გადაზიდვა სხვადასხვა მიმართულებით რთულია, განსაკუთრებით რეგიონული ფონდების გათვალისწინებით, რომლებიც გამოყოფილია KM3NeT კოლაბორაციისთვის. გარდა ამისა, საჭიროა ხარისხის

კონტროლის ძალიან მაღალი დონე, რათა სხვადასხვა ჯგუფის მიერ წარმოებული მოდულებისთვის უზრუნველყოფილი იყოს შესაბამისობა KM3Net ხარისხის სტანდარტებთან. დელიკატური კომპონენტების ერთობლიობისგან ოპტიკური მოდულის აწყობა მოითხოვს მკაცრ პროტოკოლს. მოდულის თითოეული ნახევარსფერო ივსება კომპონენტებით ქვემოდან ზევით, ანუ მინის ნახევარსფეროს ამოზნექილი მხარე ქვემოთაა მიმართული, რაც მის შიგნით წვდომის საშუალებას იძლევა. ასე გრძელდება პროცესი მანამ, სანამ ორივე ნახევარსფერო არ შეივსება, შეერთდება და გამოიცდება. ოპტიკური მოდულის დახურვისა და მინის სფეროს გარშემო ტიტანის გარე სტრუქტურის განთავსების შემდეგ, ოპტიკური მოდული მზად არის ტელესკოპის ვერტიკალურ ხაზზე განთავსებისთვის.

ნახევარსფეროების აღჭურვა იწყება იმ კომპონენტებით, რომლებიც უნდა მიწებდეს მინაზე. ზედა ნახევარსფეროში ეს არის ალუმინის საყრდენი და რადიატორი; ქვედა ნახევარსფეროში კი აკუსტიკური პიეზო სენსორი. ელექტრული კვებისა და ცენტრალური ლოგიკური დაფა, ასევე ელექტრომაგნიტური დამცავი ფირფიტა პენეტრატორთან ერთად მონტაჟდება ალუმინის გარსზე ზედა ნახევარსფეროში პენეტრატორთან ერთად. შემდეგ ჰელიუმის გაჟონვის ტესტი აფასებს პენეტრატორის მონტაჟის ხარისხს.

ოპტიკური მოდულების აწყობის პროცესი ნაჩვენებია სურ. 2.16-ზე. სპილენძის მავთულები პენეტრატორიდან უკავშირდება კვების ელექტრულ დაფას და ოპტიკური ბოჭკო დაკავშირებულია ფილტრთან რომელიც მიერთებულია ლაზერულ ტრანსივერზე. სურ. 2.16A-ზე ნაჩვენებია აღნიშნული პროცესების განხორციელებით მიღებული შედეგი. ტარდება სატესტო ჩართვა იმის შესამოწმებლად, რომ ელექტრული დაფები კარგად არის დამონტაჟებული და ფუნქციონირებს. ნანომუქურის და მანომეტრის დაყენების შემდეგ, ჩარჩოებში თავსდება ფოტოგამამრავლებლები და მონტაჟდება სინათლის შემგროვებელი რგოლები (იხ. სურათი 2.16B). კაბელები ფოტოსენსორებიდან, პიეზო სენსორიდან და ნანომუქურადაც უკავშირდება ელექტრულ დაფებს. ფუნქციური ტესტი სრულდება ორი ნახევრის შეერთებით სპეციალური კაბელის საშუალებით, როგორც ნაჩვენებია სურათზე 2.16C. ფუნქციური ტესტი არის ბოლო შემოწმება და გაუმართავი კომპონენტების შეცვლის ბოლო შანსი. ამის შემდეგ, ინტეგრაცია განახლდება ოპტიკური გელის ჩამოსხმით ფოტოგამამრავლებლის დამჭერ

სტრუქტურებსა და მინის შიდა ზედაპირს შორის სივრცის შესავსებად. გელის “ჩამოსხმის სადგური” რომელზეც მომზადებულია ორი ქვედა და ორი ზედა ნახევარსფეროს კომპლექტი, ნაჩვენებია სურათზე 2.16D. მინის კონტაქტის ზედაპირების განმედიის შემდეგ, ოპტიკური მოდული იხურება და ილუქება. ოპერაცია ხორციელდება ქვედა ნახევარსფეროების ერთმანეთთან სპეციალური ხელსაწყოთა გამოყენებით მიერთებით, რომელიც იძლევა ნახევარსფეროს ბრუნვის საშუალებას. სურათზე 2.16E ნაჩვენებია დახურვის სადგურზე დამონტაჟებული ქვედა და ზედა ნახევარსფერო.



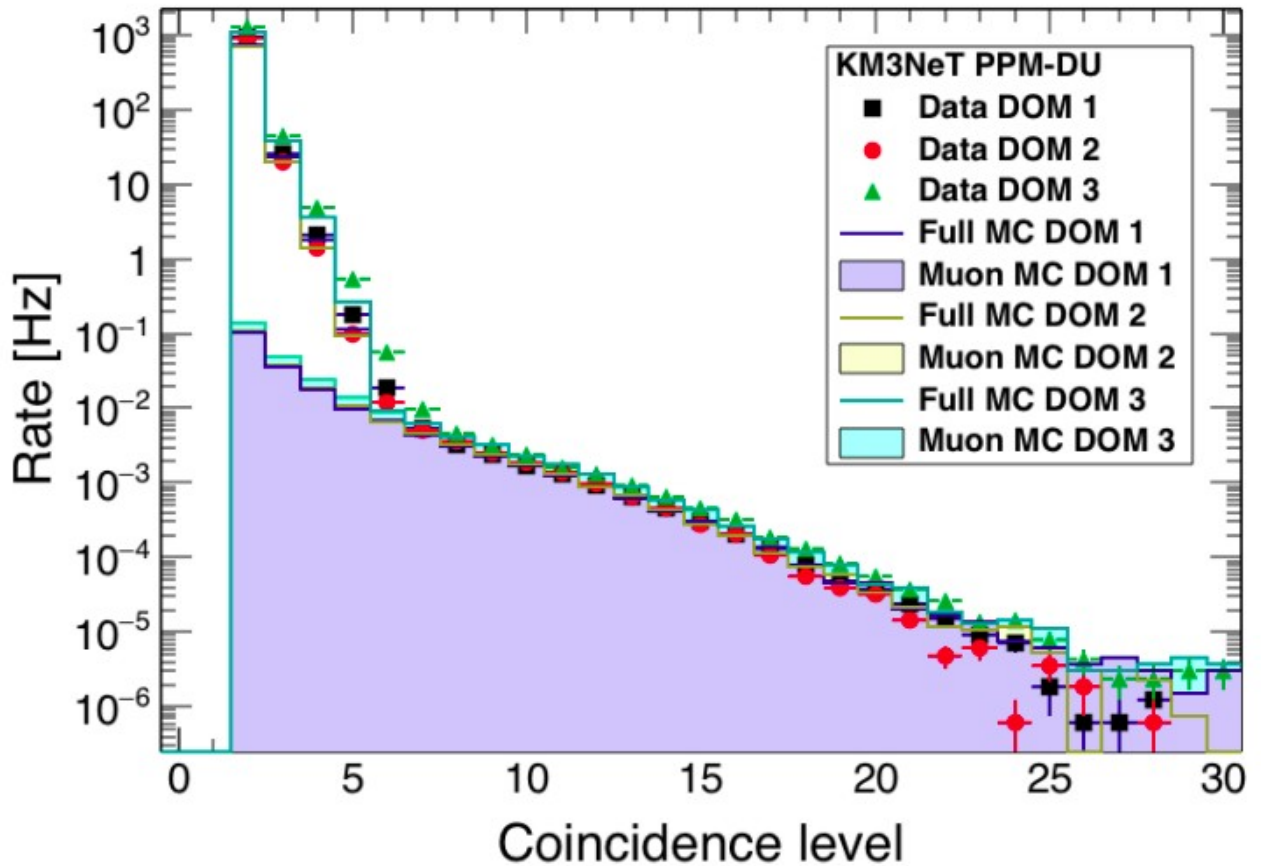
სურათი 2.16. KM3NeT ოპტიკური მოდულის აწყობის ეტაპები

პროცესის დროს, როდესაც ორი ნახევარსფერო შესაბამის სიახლოვესაა, ცენტრალურ ლოგიკურ დაფაზე აერთებენ „ოქტოპუს“ (octopus) დაფას. მცირე გამბარების დაყენების შემდეგ, რომლებიც აკავშირებენ ზედა და ქვედა სტრუქტურებს, ორი ნახევარსფერო მჭიდრო კონტაქტში მოდის. შემდეგ ზედა ნახევარსფეროზე არსებული სარქველის საშუალებით ამოუტუმბება ჰაერი.

საბოლოოდ კი ოპტიკური მოდულის ეკვატორზე ორ ნახევარსფეროს შორის კონტაქტის ადგილი ილუქება. ოპტიკური მოდულის აწყობა სრულდება ტიტანის გარე სარტყელის დამონტაჟებით. საბოლოო ტესტი ტარდება ოპტიკური მოდულის ბნელ ყუთში ან ბნელ ოთახში მოთავსებით, რათა მოხდეს ჩართონ ფოტოსენსორები; ასეთი ტესტის დროს წინასწარ განსაზღვრული კრიტერიუმების მიხედვით მიიღება გადაწყვეტილება ოპტიკური მოდულის გამართულობასთან დაკავშირებით. ასევე ხდება აწყობილი ოპტიკური მოდულის პირველი დაკალიბრება. მოდულის შავი ყუთი ოთხი ოპტიკური მოდულის ტევადობით ნაჩვენებია სურათზე 2.16F.

ნეიტრინული წყალქვეშა ტელესკოპის მიერ ფიზიკური კვლევების ჩატარების წარმადობის გაუმჯობესების პოტენციალი, რომელიც დაფუძნებულია KM3NeT მრავალფოტოგამამრავლებლიანი ოპტიკური მოდულის დიზაინზე, დადასტურდა ადრეული ეტაპის კვლევებისას, ასევე ARCA-სა და ORCA-ს პირველი ხაზების მუშაობის დროს. ოპტიკური მოდულების მიერ მიღებული მონაცემები უკვე გამოყენებულია მულტისენსორული მოდულების წარმადობის საილუსტრაციოდ. ოპტიკურ მოდულებზე სიგნალის მრავალჯერადი თანხვედრების სიხშირე უწყვეტად კონტროლდება და ავლენს გამეორებითობას. ინდივიდუალური ოპტიკური მოდულით, მრავალსენსორიანი თანხვედრების გამოყენებით ატმოსფერული მიონების სიგნალი შეიძლება განვასხვავოთ ფონიდან, რომელიც წარმოიქმნება ^{40}K დაშლისა და ბიოლუმინესცენციის შედეგად (KM3NeT Collaboration et al., 2016). ამ მეთოდის ილუსტრაცია ჩანს სურათზე 2.17. ის გვიჩვენებს ერთ ხაზზე განლაგებული სამი ოპტიკური მოდულისთვის თანხვედრების სიხშირის დამოკიდებულებას თანხვედრათა რაოდენობაზე (მაქსიმუმ 31 ერთ ოპტიკურ მოდულში). თითოეული მოდულისთვის მითითებულია მოდელირებული სრული სიხშირე („FULL MC“), რომელიც მოიცავს ^{40}K დაშლის, ბიოლუმინესცენციისა და ატმოსფერული მიონებისგან წარმოქმნილ სინათლეს. ატმოსფერული მიონების წვლილი მითითებულია ცალკე („Muon MC“). საბოლოო ჯამში, აღნიშნული სურათი 2.17 ასახავს მრავალსენსორიანი ოპტიკური მოდულის შესაძლებლობას, გამოყოს მიუონები ფონიდან. მაღალი მრავლობითობის თანხვედრები საშუალებას იძლევა გაიზომოს ატმოსფერული მიუონების ნაკადის სიღრმეზე დამოკიდებულება (Ageron et al., 2020), ხოლო თანხვედრების ნაკლები რაოდენობა, რომლებიც წარმოიქმნება ცალკეული ^{40}K დაშლისგან, გამოიყენება ცალკეული

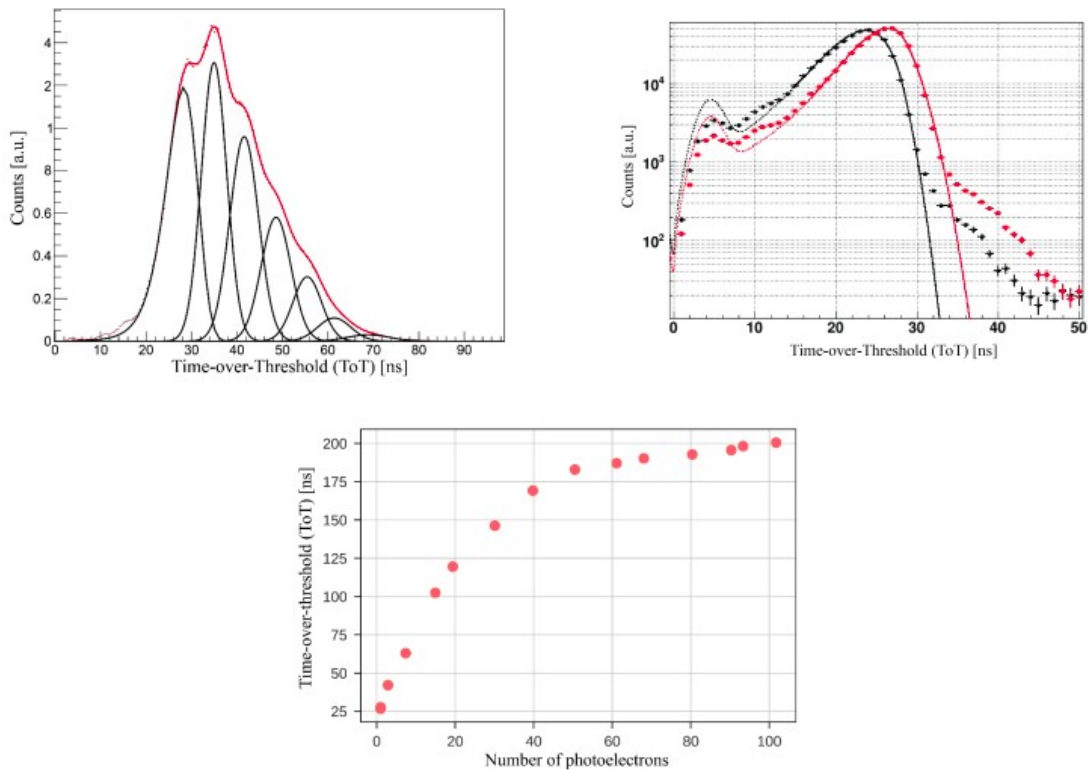
ფოტოგამამრავლებლების დროითი კალიბრაციისას და მათი კვანტური ეფექტურობის დასაზუსტებლად. ORCA-ს პირველი ექვსი ხაზის მონაცემების გამოყენებით, ნაჩვენებია რეალურ დროში სუპერნოვას დაფიქსირების პოტენციალი, რომელიც დაფუძნებულია მაღალი სიმრავლის თანხვედრათა ჭარბ რაოდენობაზე (KM3NeT Collaboration et al., 2021).



სურათი 2.17. თანხვედრი სიგნალების განაწილება ოპტიკურ მოდულებში

მრავალი ფოტონის მიმართ PMT-ების ToT მახასიათებელი შესწავლილია ლაბორატორიულ გაზომვებში. ერთი ფოტოელექტრული სიგნალის მიერ გამოწვეული ToT მნიშვნელობების განაწილების ფორმა აღწერილია ანალიტიკური მოდელით, დაფიქსირებულია მონაცემებზე, რომლის დროსაც ფოტოგამამრავლებლის გამრავლების კოეფიციენტი და ამ კოეფიციენტის გაბნევა გამოყენებულია თავისუფალ პარამეტრებად. აღნიშნული მოდელით შესაძლებელია PMT-ს გაძლიერების კოეფიციენტის მონიტორინგი და საჭიროების შემთხვევაში კორექტირება ძაბვის ცვლილებით.

KM3NeT ექსპერიმენტში გამოყენებული ფოტოგამამრავლებლების ToT გამოდახილის განაწილებები მოყვანილია სურათზე 2.18.



სურათი 2.18. გემოთ მარცხნივ - იმპულსის სიგანე (Time over Theshold). შავი მრუდით ნაჩვენებია ToT განაწილება ფოტოელექტრონთა ზრდადი რაოდენობისათვის, დანყებული 1-დან. წითელი მრუდით ნაჩვენებია ჯამური ფიტირების შედეგი. გემოთ მარჯვნივ - ToT განაწილება სხვადასხვა ძაბვისთვის (შავი განაწილება შეესაბამება -1130 ვოლტს, ხოლო წითელი - -1180 ვოლტს) ერთი ფოტოელექტრონის შემთხვევაში. ქვემოთ ToT-ის სიდიდის დამოკიდებულება ფოტოელექტრონების რაოდენობაზე.

სხვადასხვა ოპტიკურ მოდულს შორის დროის გადახრები შესაძლოა დარეგულირდეს სიგნალების კორელაციების გამოყენებით, რომლებიც გამოწვეულია როგორც მართვადი ნანოშუქურების, ასევე ტელესკოპის დეტექტირების მოცულობაში გამავალი ატმოსფერული მიუონების მიერ. მიუონებიდან მომდინარე სიგნალებისთვის ფოტონების მოსვლის მოსალოდნელ და გაზომილ დროებს შორის განსხვავებები ძალიან მცირეა, რაც ადასტურებს როგორც წყლის ხელსაყრელ გაბნევის მახასიათებელს, ასევე ზუსტ დროით კალიბრაციას (Coniglione et al., 2019).

მიმდინარე თავში აღწერილია KM3NeT ექსპერიმენტის მულტისენსორული ოპტიკური მოდულები და მათი მახასიათებლები. პირველადი კვლევების საფუძველზე, დასტურდება ფიზიკური პროცესების მაღალი სიზუსტით აღდგენისა და თანამშრომლობის მიერ მიზნად დასახული კვლევების ჩატარების შესაძლებლობა, რაც განხილული იქნება ნაშრომის შემდეგ თავებში.

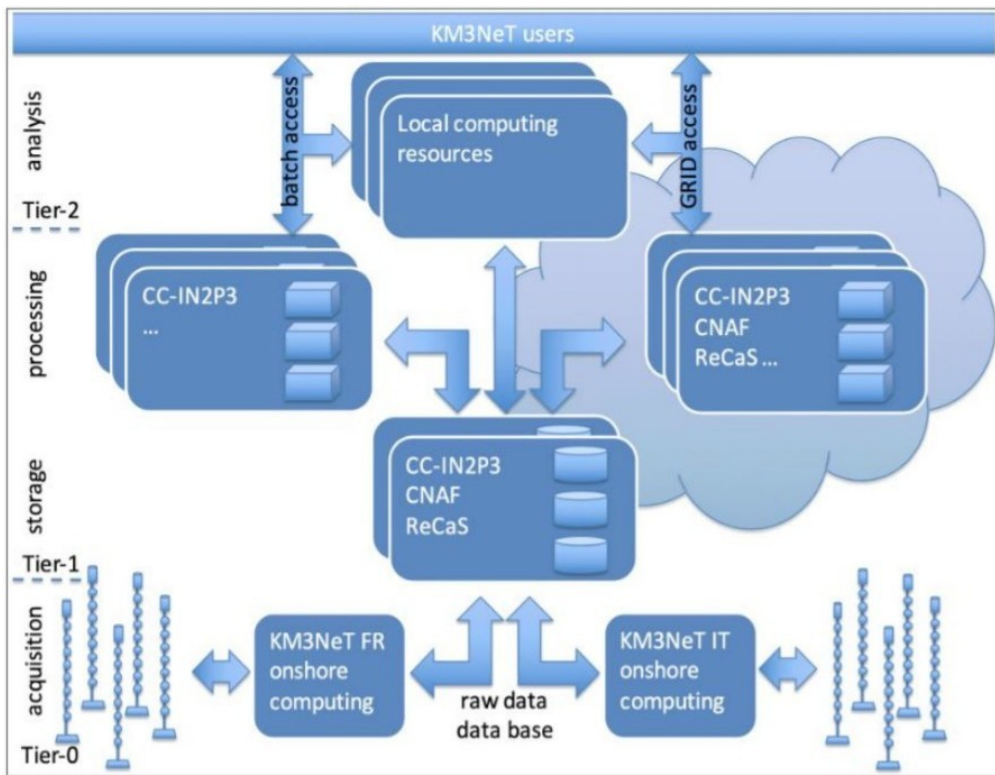
3. მონაცემების მიღება და ანალიზი KM3NeT ექსპერიმენტში

მიმდინარე თავში წარმოდგენილია KM3NeT ექსპერიმენტში მონაცემთა მიღება-ანალიზის ტექნიკური და პროგრამული ასპექტები. წარმოდგენილია KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის მოდელი (Hofestädt, 2019), რომელიც იერარქიული ტიპისაა და შედგება სამი დონისაგან. KM3NeT თანამშრომლობაში მონაცემების ანალიზისთვის ძირითადად გამოიყენება მესამე დონის (Tier-2) კომპუტერული ცენტრები, რომლის მაგალითს წარმოადგენს თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მაღალი ენერჯიების ფიზიკის ინსტიტუტში არსებული კომპუტერული სერვერი. თსუ-ს KM3NeT Tier-2 (Papalashvili et al., 2022) სერვერზე ჩატარებული ანალიზი წარმოდგენილია ნაშრომის ამ თავის ბოლო ნაწილში.

3.1 კომპუტინგის მოდელი KM3NeT ექსპერიმენტში

KM3NeT პროექტში, ისევე როგორც ნაწილაკებისა და ასტრონაწილაკების ფიზიკის თანამედროვე ექსპერიმენტში უმნიშვნელოვანესი ადგილი უჭირავს კომპუტერულ მეთოდებს და პროგრამულ უზრუნველყოფას. მათი საშუალებით ხდება ექსპერიმენტული მონაცემებიდან შემთხვევების შერჩევა, ჩანერა, დეტექტორის დროითი კალიბრება და გეომეტრიული პოზიციის დაზუსტება, შემდეგ კი შემთხვევების რეკონსტრუქცია და ანალიზი. დეტექტორის მუშაობის შესასწავლად აუცილებელია მისი კომპუტერული მოდელის შექმნა, რომელსაც ისეთივე გამოცხადი აქვს მოდელირებულ შემთხვევებზე, როგორც ექსპერიმენტში ჩანერილ შემთხვევებს. იმის გამო, რომ კომპუტერული სიმულაციების დროს შემთხვევის ყველა პარამეტრი ცნობილია, შესაძლებლობა გვეძლევა დეტექტორის სხვადასხვა მახასიათებელი დეტალურად შევისწავლოთ. KM3NeT-ის კომპიუტინგის მოდელი LHC-ის (Evans & Bryant, 2008) მსგავსია. დაგეგმილია, რომ თავდაპირველი ეტაპის შემდეგ, როცა მონაცემები მხოლოდ

კოლაბორაციის წევრებისთვის იქნება ხელმისაწვდომი, მონაცემთა ბაზა ღია იყოს ყველასთვის. ამ ღია მონაცემებში მოიაზრება, როგორც კალიბრებული მონაცემები, ასევე შესაბამისი ცდომილებები და ანალიზისთვის საჭირო პროგრამული პაკეტები.



სურათი 3.1. KM3NeT პროექტის კომპუტინგის იერარქიული მოდელი.

KM3NeT-ის კომპუტინგის სისტემა, LHC-ის მსგავსად, იერარქიულად რამდენიმე დონედ (Tier) იყოფა. ამ მოდელში სულ 3 ასეთი დონეა (სურათი 3.1). ნულოვან დონეზე (Tier-0) პირველადი მონაცემები აიღება დეტექტორებიდან და განიცდის პირველად ფილტრაციას. აღნიშნულ ფილტრს უწოდებენ L0 ფილტრს. ის ამოწმებს ფოტოგამამრავლებლის სიგნალის ხანგრძლივობას, რომელიც აღემატება 0.3 ფოტოელექტრონისთვის დამახასიათებელ სიგნალს. ყველა სიგნალი, რომელიც აკმაყოფილებს L0 მოთხოვნას, “all data to shore” პრინციპის თანახმად, იგზავნება სანაპიროზე, სადაც ხდება მათი პირველადი დამუშავება. თითოეული სიგნალისთვის მონაცემთა მოცულობა შეადგენს 6 ბაიტს. სიგნალში ბაიტების განაწილება შემდეგნაირია: 1 ბაიტში ჩაინერება ფოტოგამამრავლებლის მისამართი; 4 ბაიტში – სიგნალის დრო; 1 ბაიტში – სიგნალის ხანგრძლივობა, იგივე ToT.

თუ გავითვალისწინებთ ფოტოსენსორზე სიგნალის დაფიქსირების საშუალო სიხშირეს - 8kHz (კილოჰერცი, კჰც), ORCA ტელესკოპიდან მონაცემთა ნაკადი იქნება ~25Gb/s (გიგაბიტი/წმ), ხოლო ARCA-სთვის დაახლოებით ორჯერ მეტი. აღნიშნული სიდიდე, ბიოლუმინესცენციის გამო, დროის ხანმოკლე მონაკვეთში შესაძლოა 100Gb/s-მდე გაიზარდოს. იმისათვის რომ შესაძლებელი გახდეს მონაცემების შენახვა, საჭიროა მათი მოცულობის შემცირება. ამისათვის გამოიყენება ტრიგერული ალგორითმები. მოცულობის შემცირების გარდა, მისი მთავარი დანიშნულებაა დეტექტორის მონაცემებში საკვლევი ფიზიკური პროცესების შერჩევა და ფონური სიგნალების გამოყოფა-ჩამოშორება. როგორც წესი, მონაცემთა შერჩევა ხდება ისე, რომ ფონის ტრიგერის სიხშირე ფიზიკური შემთხვევების სიხშირის 10%-ს არ აღემატებოდეს. ტრიგერირებისას უნდა ამოირჩეს, რომელი მონაცემები შეინახოს და რომელი არა. ამისთვის არსებობს ორი მეთოდი - ფოტოსენსორების სიგნალების (ჰიტების) დამთხვევის და კლასტერის. მეთოდები შემუშავებულია იმ პრინციპის მიხედვით, რომ მიუონებიდან წამოსული სიგნალები ერთმანეთთან კორელაციაშია. ჰიტების დამთხვევის მეთოდი გულისხმობს მეზობელ ფოტოგამამრავლებლებში კორელირებული ჰიტების დამზერას. კლასტერის მეთოდი კი იყენებს მიზგ-შედეგობრივ კავშირს, რომლის მიხედვითაც ერთი კლასტერის ჰიტები ერთმანეთთან კორელირებენ. ასე მოწმდება, არის თუ არა რომელიმე ორი ჰიტი კორელირებული. თუ გვაქვს ორი ჰიტი i და j , - x_i და x_j მდებარეობებითა და t_i და t_j დროებით. ჩერენკოვის სინათლის ჯგუფური სიჩქარეა:

$$v=c/n \tag{3.1}$$

სადაც, v ჩერენკოვის სინათლის წყალში გავრცელების სიჩქარეა, c მიუონის სიჩქარე (სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში), n წყლის გარდატეხის მაჩვენებელი. ცხადია, წყალში სინათლის სიჩქარე ნაკლებია მიუონისაზე. 3-განზომილებიანი ოპერატორით მოწმდება, არის თუ არა ჰიტების დროებს შორის განსხვავება იმ დროზე ნაკლები, რომელიც სჭირდება ჩერენკოვის სინათლეს, რათა გაიაროს მანძილი ფოტოგამამრავლებლებს შორის. მათემატიკურად:

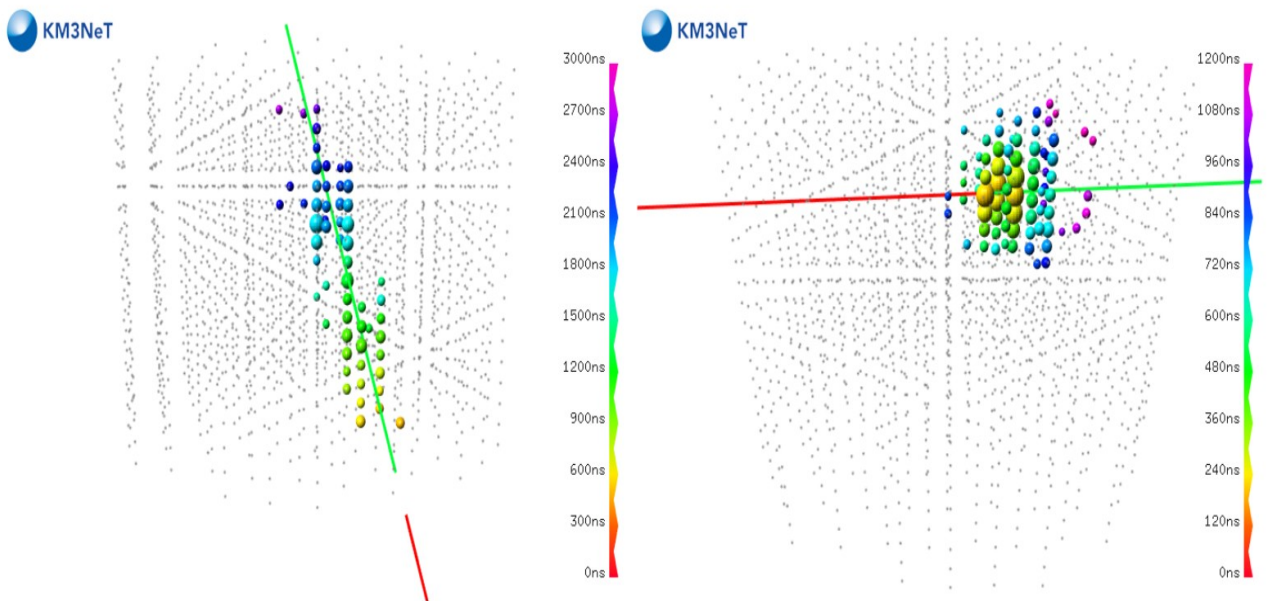
$$|t_i - t_j| \leq |\vec{x}_i - \vec{x}_j| \cdot \frac{n}{c} \tag{3.2}$$

ეს პირობა შეიძლება დაზუსტდეს, თუ z ღერძის მიმართულებას ავიღებთ ისე, რომ დაემთხვეს მიუონის მიმართულებას. ასე შესაძლებელია მიმართულებების

განცალკევება და დროითი სხვაობის კორექტირება. საბოლოოდ ერთგანზომილებიანი ოპერატორისთვის დგება შემდეგი პირობა:

$$|(t_1 - t_2)c - z_1 - z_2| \leq \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \cdot \tan \Theta_c \quad (3.3)$$

მონაცემთა ძირითადი ფილტრაცია მიმდინარეობს სანაპირო სადგურზე. L1 ფილტრაციისას ერთ ოპტიკურ მოდულში 10 ნანონამიან ფანჯარაში მოითხოვება ორი განსხვავებული ფოტოგამამრავლებლის სიგნალი (ჰიტი). ფიზიკური შემთხვევების ტრიგერირებისათვის გამოიყენება L2 ტიპის ჰიტები, რაც გულისხმობს ოპტიკურ მოდულს შორის რამდენიმე L1 ჰიტის არსებობას, რომელთა ფოტოგამამრავლებელთა შორის კუთხე არ აღემატება 90 გრადუსს. პირველ ეტაპზე, L2 ტიპის სინგალების რაოდენობით განისაზღვრება შემთხვევის ხასიათი, რომელიც შეიძლება იყოს ორგვარი: ტრეკის ან ღვარის ტიპის. სურათზე 3.2 მოცემულია ტრეკისა და ღვარის შემთხვევების მაგალითი.

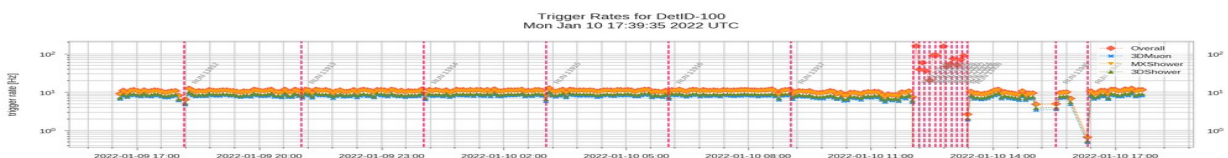


სურათი 3.2. ტრეკიანი (მიუონური) და ღვარული შემთხვევები KM3NeT ექსპერიმენტში გაფილტრული მონაცემები ინერება დისკზე (root ფორმატში) და გადაეგზავნება დიდ კომპიუტერულ ცენტრებს, Tier-1-ებს. პირველ დონეზე (Tier-1) მონაცემები ინახება 3 დიდ კომპიუტერულ ცენტრში - CCIN2P3-ლიონი (CNRS, საფრანგეთი), CNAF (INFN) და ReCaS (იტალია). ძირითადად ამ ეტაპზევე ხდება მონაცემთა დამუშავება, შესაბამისი სიგნალების (ჰიტების) ჩაწერა და მონაცემთა სიმულაცია.

მეორე დონე (Tier-2) შედგება ლოკალური კომპიუტერული რესურსებისგან, რომელზეც პროგრამული უზრუნველყოფისა და მონაცემების არსებობის შემთხვევაში შესაძლებელია ლოკალური დამუშავება და ანალიზი. სწორედ ამ დონეს ეკუთვნის კომპუტინგის ცენტრის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში, მაღალი ენერჯიების ფიზიკის ინსტიტუტში, რაც აღწერილია შემდგომში.

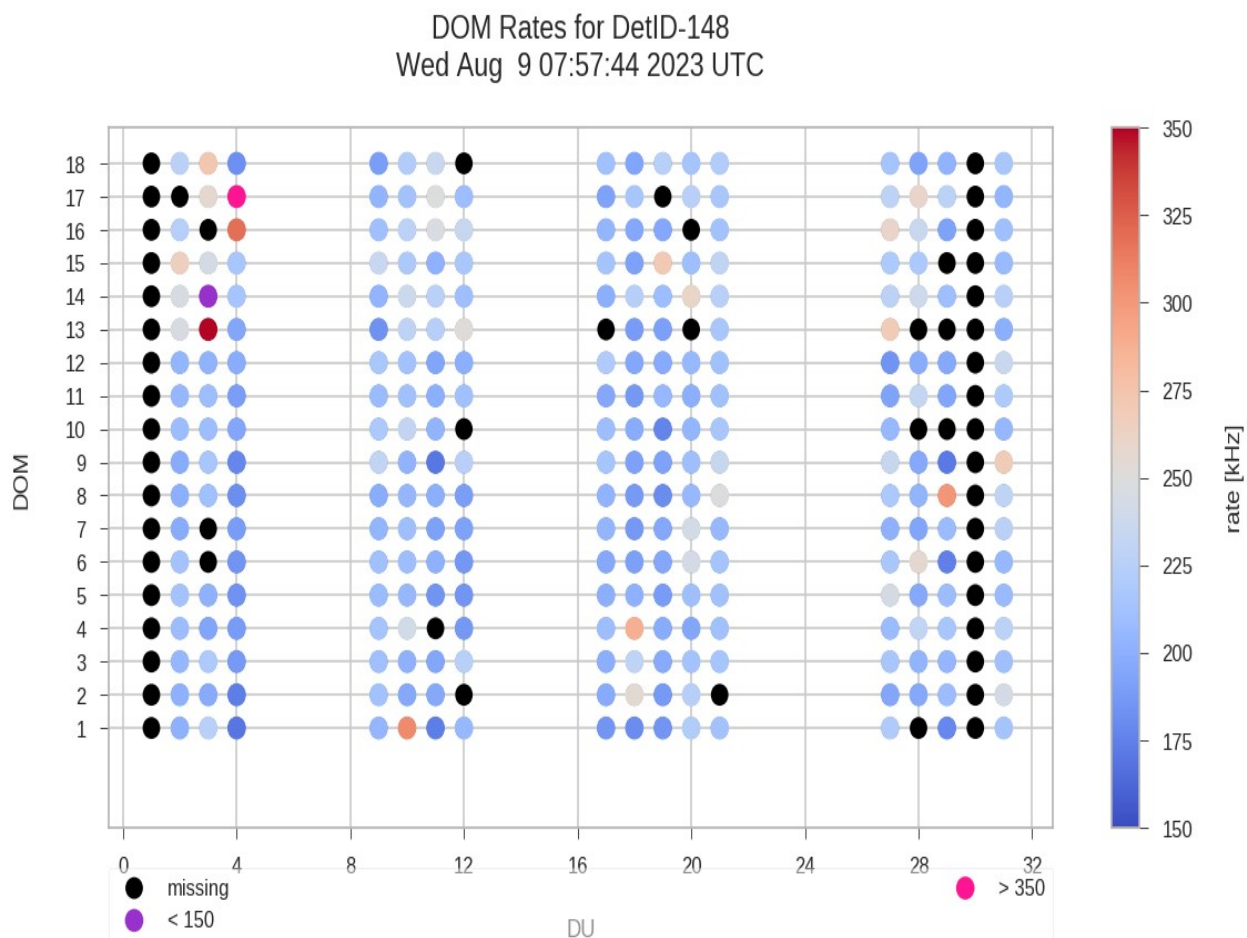
3.2. მონაცემთა მიღება და მონიტორინგი KM3NeT ექსპერიმენტში

ფიზიკის დიდ ექსპერიმენტებში რთული და კომპლექსური კომპუტინგისა და მონაცემთა მიღება-ჩანერის უდიდესი ნაწილის ავტომატიზირების მიუხედავად, საჭიროა პროცესებზე დაკვირვება და საჭიროების შემთხვევაში – ჩარევა. ასეა KM3NeT ექსპერიმენტშიც, სადაც თანამშრომლობის წევრები ატარებენ მორიგეობებს (shift), რომელთა მიზანია მონაცემთა მიღება და ამ მონაცემების პირველადი ანალიზი, დეტექტორის გამართულად მუშაობის მონიტორინგი, დეტექტორის კალიბრებასთან დაკავშირებული პროცედურების ჩატარება და საკალიბრაციო მონაცემების შეგროვება. თითოეული მორიგეობა გრძელდება ერთი კვირის განმავლობაში. სხვა ექსპერიმენტებისგან განსხვავებით, რომლებშიც მონაცემთა მიღება გარკვეულ პერიოდებში, შესაბამისი ხანგრძლივობით ხდება, KM3NeT ექსპერიმენტი მუშაობს უწყვეტად, შესაბამისად მეთვალყურეობაც მიმდინარეობს უწყვეტად. მონაცემები ჩაიწერება 3-საათიანი ხანგრძლივობის შესაბამის ფაილებში. ORCA6 (6 დეტექციის ერთეულისაგან შემდგარი კონფიგურაცია) ტრიგერირებული შემთხვევების სიხშირეები დროის მიხედვით, წარმოდგენილია სურ. 3.3-ზე.



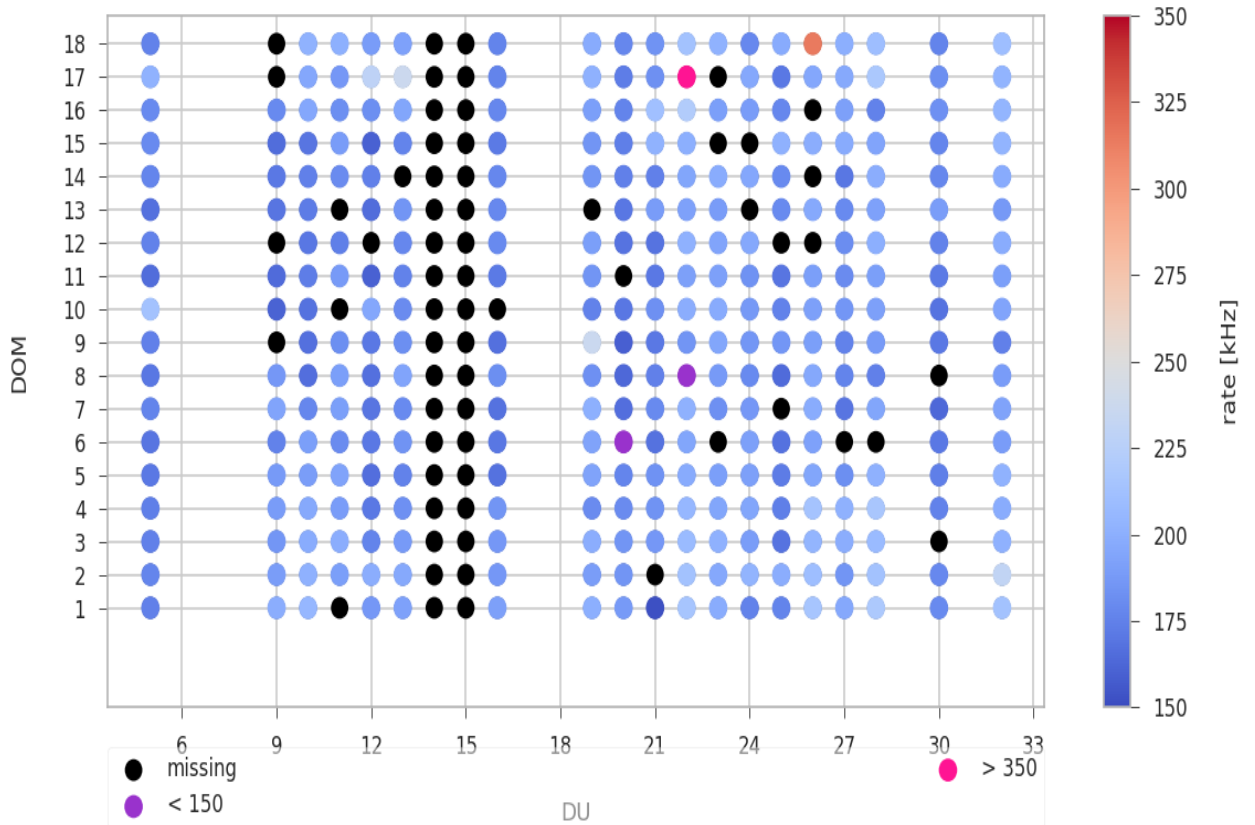
სურათი 3.3. KM3NeT/ORCA6 კონფიგურაციისთვის შემთხვევათა ტრიგერირების სიხშირეების განაწილება დროში. ვერტიკალური წითელი წყვეტილი ხაზით აღნიშნულია ბღვრები ფაილებს შორის. მარჯვენა მხარეში ბღვრების სიმრავლე გამოწვეულია ხანმოკლე საკალიბრო მონაცემების შესაბამისი ფაილებით.

მორიგეობის დროს მიმდინარეობს როგორც ტელესკოპის ერთიანად მუშაობის, ასევე ინდივიდუალური ოპტიკური მოდულების მონიტორინგიც. ასევე შესაძლებელია ინდივიდუალურ ფოტოგამამრავლებლებზე დაკვირვებაც. სურათი 3.4 წარმოადგენს ORCA ტელესკოპის (18 დეტექციის ერთეულით), ხოლო სურათი 3.5 ARCA (21 დეტექციის ერთეულით) ტელესკოპებში თითოეულ ოპტიკურ მოდულში სიგნალების დაფიქსირების სიხშირეს.



სურათი 3.4. ORCA18-ში ოპტიკურ მოდულებში სიგნალების სიხშირეები

DOM Rates for DetID-133
Wed Aug 9 07:56:58 2023 UTC



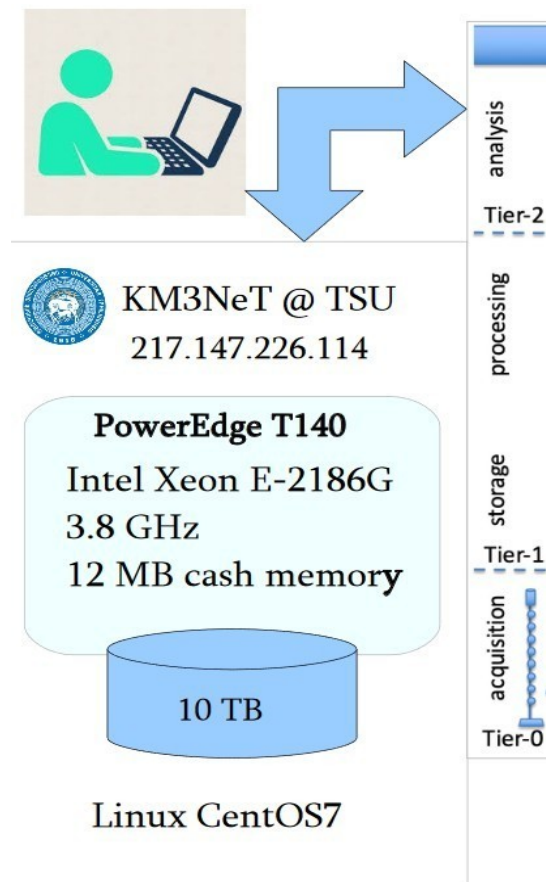
სურათი 3.5. ARCA21-ში ოპტიკურ მოდულებში სიგნალების სიხშირეები

სადოქტორო ნაშრომის შესრულების განმავლობაში მონაწილეობა მივიღე 3 ასეთ მორიგეობაში, რომლებშიც ვმონაწილეობდი ცვლის უფროსის (shift leader) სტატუსით.

3.3 KM3NeT პროექტის მეორე დონის (Tier-2) სერვერი თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში და მასზე ჩატარებული კვლევები

თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მაღალი ენერჯიების ფიზიკის ინსტიტუტი ჩართულია KM3NeT-ის ექსპერიმენტულ მონაცემთა ანალიზში. ანალიზი შესაძლებელია ჩატარდეს ლიონის კომპიუტერულ ცენტრში, თუმცა არსებულ მონაცემებთან წვდომის სიჩქარე დაახლოებით 2.5 მეგაბაიტია წამში, რაც არახელსაყრელია დიდ ფაილებთან სამუშაოდ. გარდა ამისა, მიუხედავად ლიონის ცენტრის რესურსების მასშტაბურობისა, იმის გათვალისწინებით, რომ ის

ემსახურება ათასობით მომხმარებელს, შემუშავებულია სხვადასხვა კვოტა. კვოტა ეხება როგორც გამოთვლით დროსა და გამოთვლით სიმძლავრეებს, ასევე მესხიერებას. აღნიშნული შეზღუდვების გათვალისწინებით თსუ-ს ჯგუფმა შექმნა მეორე დონის (Tier-2) ლოკალური კომპუტერული ცენტრი. ცენტრის ძირითადი სერვერი (სურათი 3.6), რომელიც განთავსებულია თსუ მაღალი ენერჯიების ფიზიკის ინსტიტუტში (მეფი). KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის მსგავსი სადგური ასევე განთავსდა საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპიუტერული ქსელების ასოციაციის (გრენა) კომპუტერულ ცენტრში.



სურათი 3.6. თსუ მეფი კომპუტერული სერვერის ძირითადი მახასიათებლები

ნაწილაკებისა და ასტრონაწილაკების ფიზიკაში ყველაზე ფართოდ გამოყენებული ოპერაციული სისტემა არის ლინუქსი (Linux). ეს ფაქტი აიხსნება იმით, რომ სხვა სისტემებთან შედარებით მას ახასიათებს აღმატებული სისწრაფე, ოპერირებისთვის მცირე გამოთვლითი რესურსების საჭიროება,

სისტემისა და პროგრამების ღია წვდომის (Open Source) მოდელი, მოქნილობა, დაცულობა. ოპერაციული სისტემის არჩევანში არც KM3NeT პროექტია გამონაკლისი. KM3NeT თანამშრომლობა მონაცემთა დასამუშავებლად და ექსპერიმენტის მოდელირებისთვის პირველი დონის (Tier1) კომპუტერული ცენტრები იყენებენ CentOS 7 ოპერაციულ სისტემას, რომელიც ლინუქსის ერთ-ერთი სახეობაა. შესაბამისად, თსუ-ს ლოკალურ სერვერზეც გამოიყენება იგივე ოპერაციული სისტემა, რათა ის მაქსიმალურად დამსგავსებოდა თანამშრომლობაში არსებულ გამოთვლით ცენტრებს. გარდა ამისა, კომპუტერული პროგრამების დიდი ნაწილი, რომლებიც გამოიყენება როგორც KM3NeT-ში, ასევე, ზოგადად, მაღალი ენერჯიების ფიზიკაში, მუშაობს ძირითადად ლინუქს სისტემაზე. აღნიშნულ სერვერზე დაინსტალირებულია KM3NeT პროექტის ფარგლებში შექმნილი პროგრამები (ცხრილი 3.1) რომლებიც დაწერილია პროგრამირების სხვადასხვა ენაზე, აგრეთვე ნეიტრინოებისა და მიუონების სიმულაციისა და მონაცემთა ანალიზისთვის ყველაზე პოპულარული პროგრამები.

კომპ. პროგრამის სახელწოდება	პროგრამირების ენა	პროგრამის ბაზა	ტიპი/გამოყენება
JPP	C++	ROOT	KM3NeT პროგრამების პლატფორმა
MUPAGE	C++	CLHEP	ატმოსფერული მიუონების სიმულაცია
gSeaGen	C++	Genie	ატმ. ნეიტრინოების სიმულაცია
JSirene	C++	JPP	დეტექტორის გამოძახილის სიმულაცია
KM3Sim	C++	Geant 4	დეტექტორის გამოძახილის სიმულაცია
km3py	Python	Numpy, Scipy...	KM3NeT პროგრამების პლატფორმა

Aanet	C++/Python	ROOT	მონაცემთა ანალიზი
-------	------------	------	-------------------

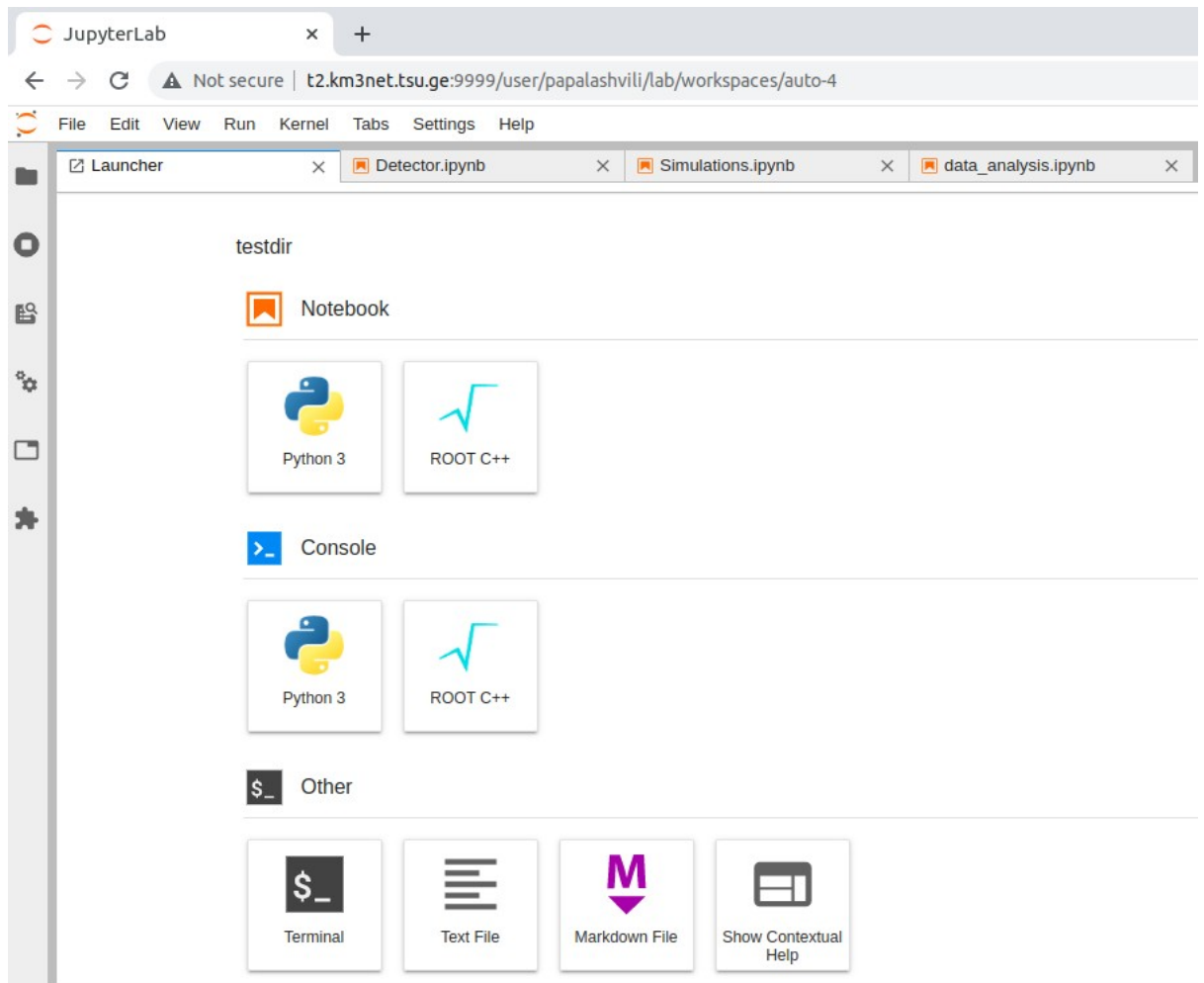
ცხრილი 3.1. თბილისის სერვერზე დაინსტალირებული KM3NeT პროგრამული პაკეტები.

სერვერზე ასევე ინახება რეალური და მოდელირებული მონაცემები, დეტექტორის აღმწერი ფაილები, წყლის მახასიათებლების შემცველი მონაცემები. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მაღალი ენერჯიების ფიზიკის ინსტიტუტის ჯგუფი აქტიურად იყენებს ამ კომპიუტერულ რესურსებს მონაცემთა დამუშავებასა და ანალიზში. გარდა თანამშრომლობის სპეციფიკური პროგრამებისა, თსუ მეორე დონის სერვერზე გამართულია ნაწილაკების ფიზიკაში ფართოდ გამოყენებული პროგრამები: CompHEP (Pukhov et al., 2000), Geant4 (Agostinelli et al., 2003), Pythia (Sjöstrand et al., 2008), ROOT (Brun & Rademakers, 1997).

მუშაობის გამარტივების მიზნით სერვერზე შეიქმნა Jupyter გარემო (<http://t2.km3net.tsu.ge:9999/>), რომელშიც უფრო გამარტივებულია KM3NeT Tier-2 სერვერზე წვდომა და მონაცემთა ანალიზი. გარდა ამისა, ის Python-ის გარდა კიდევ 40-მდე კომპიუტერულ ენაზე მუშაობის საშუალებას იძლევა. Jupyter პროექტი წარმოადგენს ღია ინტერნეტ აპლიკაციას, რომლის საშუალებით შესაძლებელია იმუშაო როგორც პროგრამულ კოდზე, ასევე გამოთვლებსა და ვიზუალიზაციაზე, შექმნა და გააზიარო საკუთარი კოდები (email, Dropbox, GitHub). ის საშუალებას იძლევა გადაამუშავო ინფორმაცია, გააკეთო მონაცემთა ანალიზი, შეასრულო ციფრული სიმულაცია, სტატისტიკური მოდელირება, მონაცემთა ვიზუალიზაცია და ა.შ. შედეგების გამოტანის საშუალებებიც მრავალფეროვანია (HTML, LaTeX, PDF...).

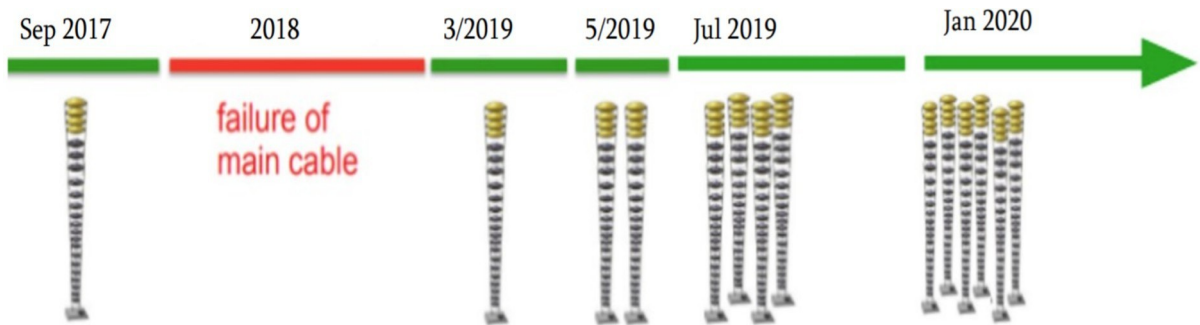
აღნიშნული გარემოს ერთ-ერთი მთავარი ღირსება მასზე წვდომის სიმარტივეა. KM3NeT Tier-2 სერვერზე რეგისტრირებულ მომხმარებელს შეუძლია სერვერთან დაკავშირება სხვადასხვა მოწყობილობით, იქნება ეს სმარტფონი, პლანშეტი, ლეპტოპი, პერსონალური კომპიუტერი თუ სხვა. ამისათვის მომხმარებელს დამატებითი პროგრამული უზრუნველყოფის გამართვა არ სჭირდება. KM3NeT თსუ ჯგუფი თსუ Jupyter სივრცეს აქტიურად

იყენებს KM3NeT მონაცემთა ანალიზში. სურ. 3.7 წარმოადგენს Jupyter სერვისის ინტერფეისის ილუსტრაციას.



სურათი 3.7. თსუ Tier2 სერვერის Jupyter გარემოს ინტერფეისი

როგორც აღინიშნა, KM3NeT/ORCA დეტექტორის მშენებლობა მიმდინარეობს ეტაპობრივად. რაც გულისხმობს დეტექტორის ხაზების ხმელთაშუა ზღვაში პერიოდულად ჩაშვებას. ამ ეტაპზე ზღვაში 18 აქტიური ხაზია, რომლებიდანაც განუწყვეტლივ მიიღება მონაცემები. ნაშრომის შესრულებისას დამუშავებული და ანალიზისთვის ხელმისაწვდომი იყო ORCA4-ის და ORCA6-ის მონაცემები. სწორედ ამ მონაცემებს ეფუძნება ამ თავში განხილული შემდეგი კვლევები. სურ.3.8-ზე ნაჩვენებია როგორ იცვლებოდა ORCA დეტექტორის ხაზების რაოდენობა დროის მიხედვით.

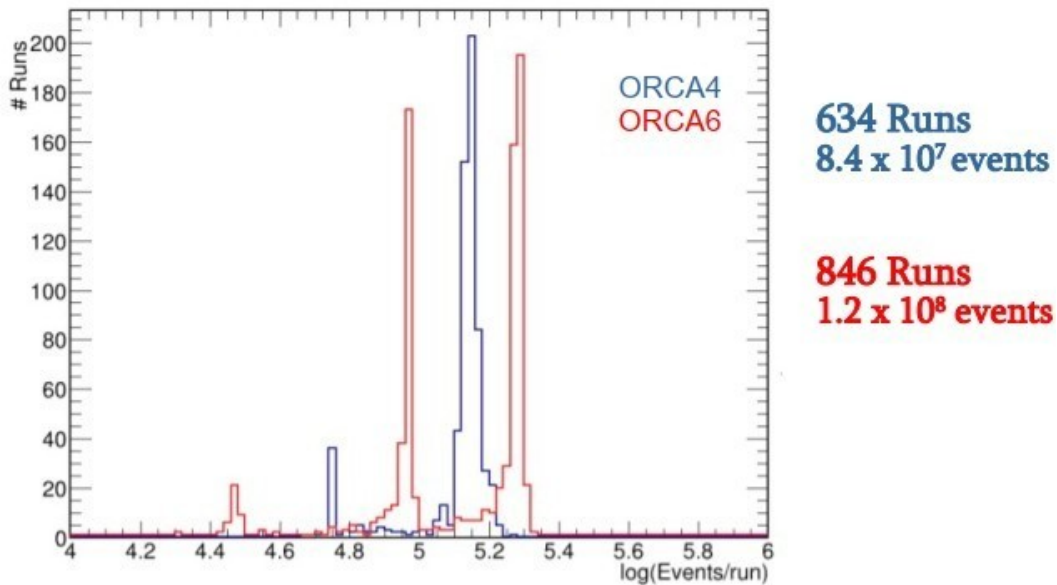


სურათი 3.8. ORCA დეტექტორის მშენებლობის პროცესში დეტექციის ერთულების რაოდენობა და მათი მატება დროში

KM3NeT პროექტში დაგეგმილი შედეგების მისაღებად აუცილებელია დეტექტორის გამოძახილის ზედმინწევით ცოდნა და ნეიტრინული შემთხვევების აღდგენის ალგორითმების დახვეწა. ამ მიზნების მისაღწევად, KM3NeT თსუ ჰკუფი ჩართული იყო ORCA4-ის (ოთხხაზიანი კონფიგურაცია) და ORCA6-ის (ექვსხაზიანი კონფიგურაცია) ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზში და ამ მონაცემების შესაბამის სიმულაციებთან შედარებაში. მთავარ მიზანს კი წარმოადგენდა ზღვის მონაცემების ანალიზი, რათა შემონწმებულიყო დეტექტორის გამართულად მუშაობა. KM3NeT Tier-2 თბილისის სერვერზე ხელმისაწვდომია ORCA4-ის 634 ფაილი, რომელიც შეესაბამება მონაცემთა მიღების პერიოდს: 07/2019 – 01/2020, ასევე ORCA6-ის 2610 ფაილი – პერიოდი: 01/2020 – 11/2021. თსუ სერვერზე განლაგებული ფაილები მოიცავს ორივე კონფიგურაციის სრულ მონაცემებს. ეს ფაილები, ჯამურად აერთიანებს ORCA4-ის $\sim 8.4 \times 10^7$ და ORCA6-ის $\sim 4.3 \times 10^8$ შემთხვევას. ეს მონაცემები გადმონწერილი იყო ლიონის კომპუტერული ცენტრის HPSS სისტემიდან. HPSS – High Performance Storage System წარმოადგენს მაგნიტური ლენტების სისტემას, სადაც შესაძლებელია ხანგრძლივად შეინახოს უზარმაზარი მონაცემები. ამ სისტემაზე წვდომა შესაძლებელია როგორც Tier-1 ცენტრებიდან, ასევე Tier-2 კომპუტერული გარემოდან.

მონაცემების დამუშავება, გულისხმობს KM3NeT დეტექტორიდან მიღებული სიგნალებიდან მიუონებისა და ნეიტრინოების აღდგენას. ამ

პროცესებს ესაჭიროება დიდი კომპიუტერული რესურსები და მიმდინარეობს ცენტრალიზებულად Tier-1 სერვერებზე. შემდეგი ანალიზი, ჩატარებულია ORCA4-ს და ORCA6-ის დამუშავებულ მონაცემებზე. აღნიშნული ანალიზი შესრულდა KM3NeT Tier-2 თსუ სერვერზე. სურათი 3.9 წარმოადგენს შემთხვევათა რაოდენობის განაწილებას ჩანერილ ფაილებში. თითოეულ ასეთ ფაილს მინიჭებული აქვს საიდენტიფიკაციო ნომერი (Run-ის ნომერი).

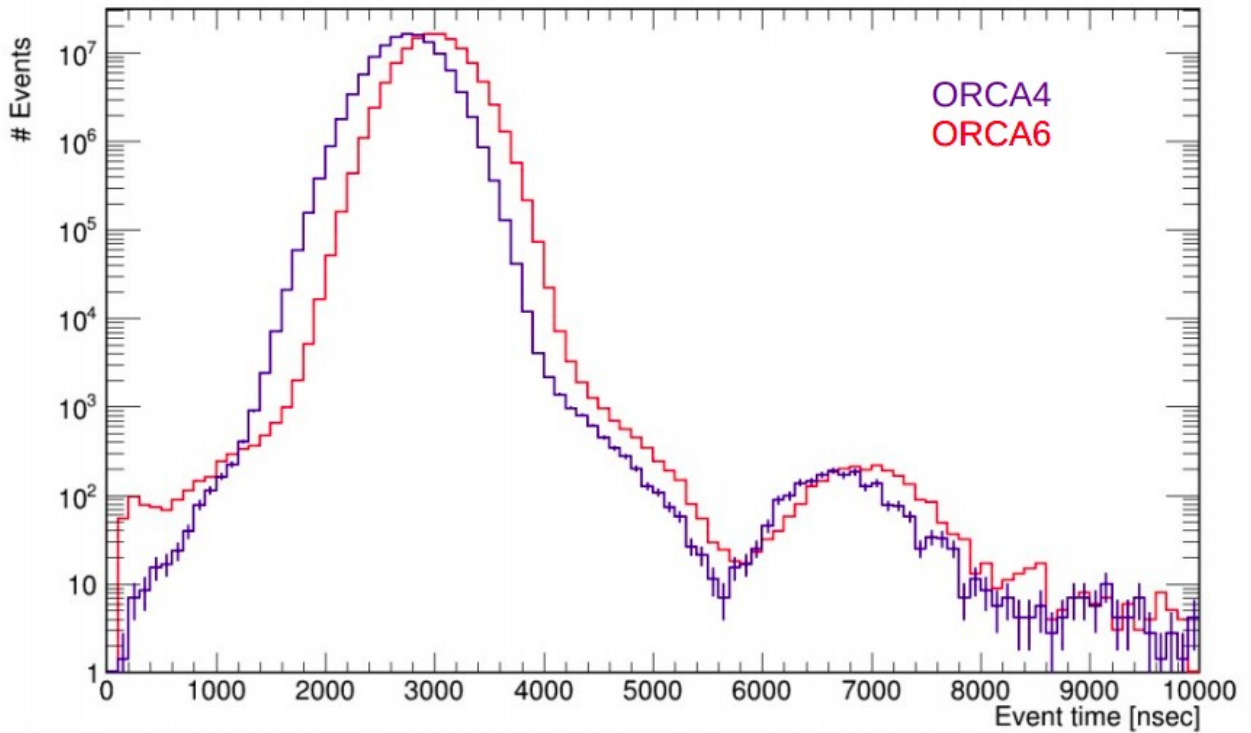


სურათი 3.9. მონაცემთა რაოდენობების განაწილება Run-ების მიხედვით

KM3NeT ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და სიმულირებულ მონაცემებს აქვთ იდენტური სტრუქტურა, რაც ამარტივებს დეტექტორისა და ალგორითმების გამართულობის შესწავლას. თითოეული KM3NeT შემთხვევა ძირითადად შედგება Run-ის პარამეტრებისაგან, ჰიტებისა და აღდგენილი ტრეკებისაგან. ჰიტები და ტრეკები თავის მხრივ ხასიათდება შესაბამისი პარამეტრებით. შემთხვევისა და მასში შემავალი სიდიდეების განსაზღვრებები მოცემულია ნაშრომის დამატებაში - დანართი 1.

შემთხვევაში ჰიტებს შეესაბამება დრო და კოორდინატი, რომელთა გამოყენებითაც დადგინდა სანყისი ნაწილაკის მახასიათებლები, როგორცაა მაგ. მიმართულება, ენერგია. აღნიშნული ჰიტებისგან შედგება შემთხვევები, რომლებიც თავის მხრივ შეიცავს ინფორმაციას სანყისი ნაწილაკის შესახებ. ასეთი შემთხვევები შეიძლება შეიცავდეს სხვადასხვა რაოდენობის ჰიტებს. სურათი 3.10. გვიჩვენებს ექსპერიმენტულ შემთხვევებში ჰიტების შემცველობას

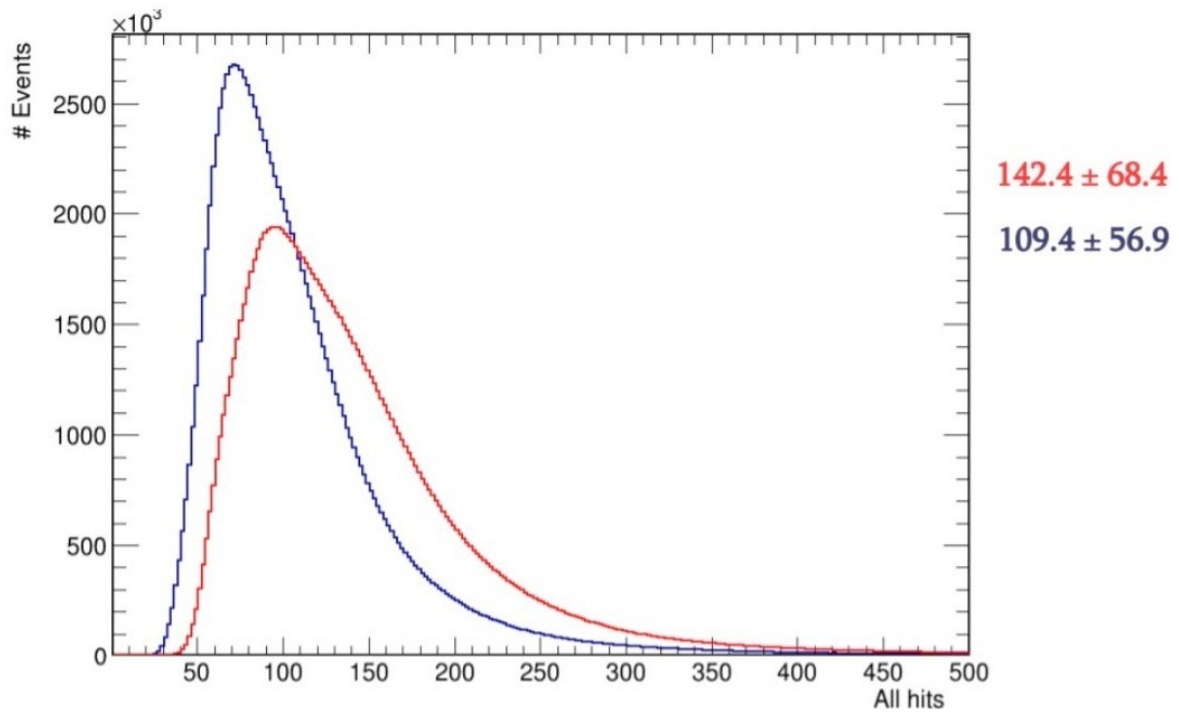
ORCA4-ის და ORCA6-ის მონაცემებისათვის და ჰიტების საშუალო რაოდენობას. თითოეული შემთხვევა შემოსაზღვრულია დროითი ფანჯრით. დროითი ფანჯრის ზომა დამოკიდებულია დეტექტორის მოცულობაზე. ORCA4-ს და ORCA6-ის შემთხვევების ხანგრძლივობები წარმოდგენილია სურ. 3.10-ზე.



სურათი 3.10. ORCA4 და ORCA6-ის შემთხვევების ხანგრძლივობები.

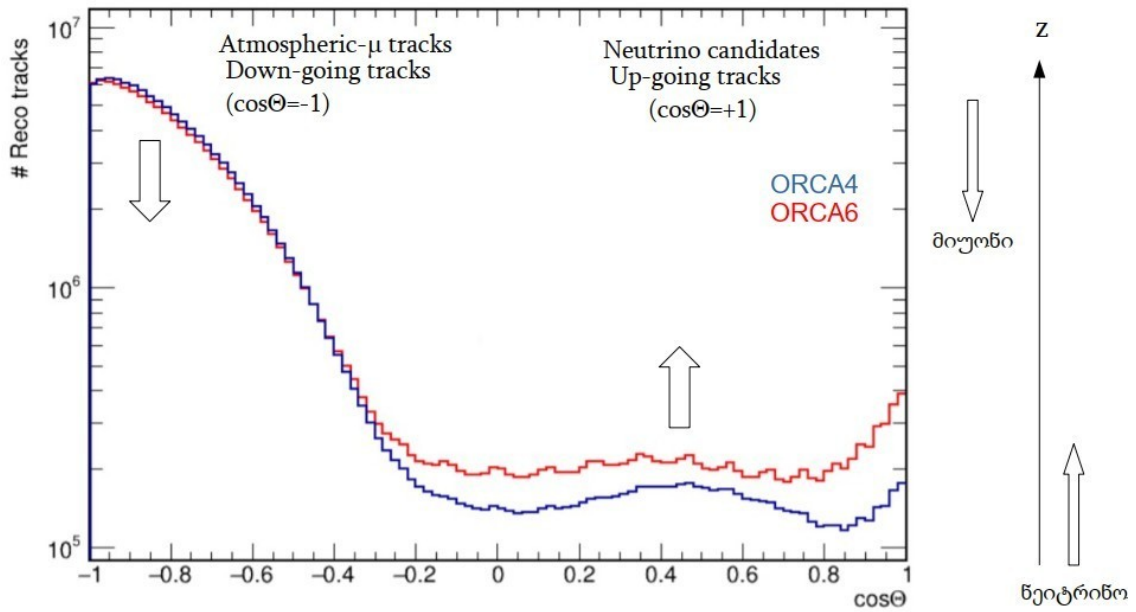
ფოტოგამამრავლებელზე დაფიქსირებული სიგნალების საშუალო სიხშირეების (8კჰც) გათვალისწინებით, ORCA6 კონფიგურაციისთვის შემთხვევებში ჰიტების რაოდენობა შესაძლებელია შეფასდეს შემდეგნაირად:

$$\frac{8 \times 10^3 \times 31 \times 18 \times 6}{10^{-6}} \approx 27 \text{ ჰიტის/მკმ} .$$



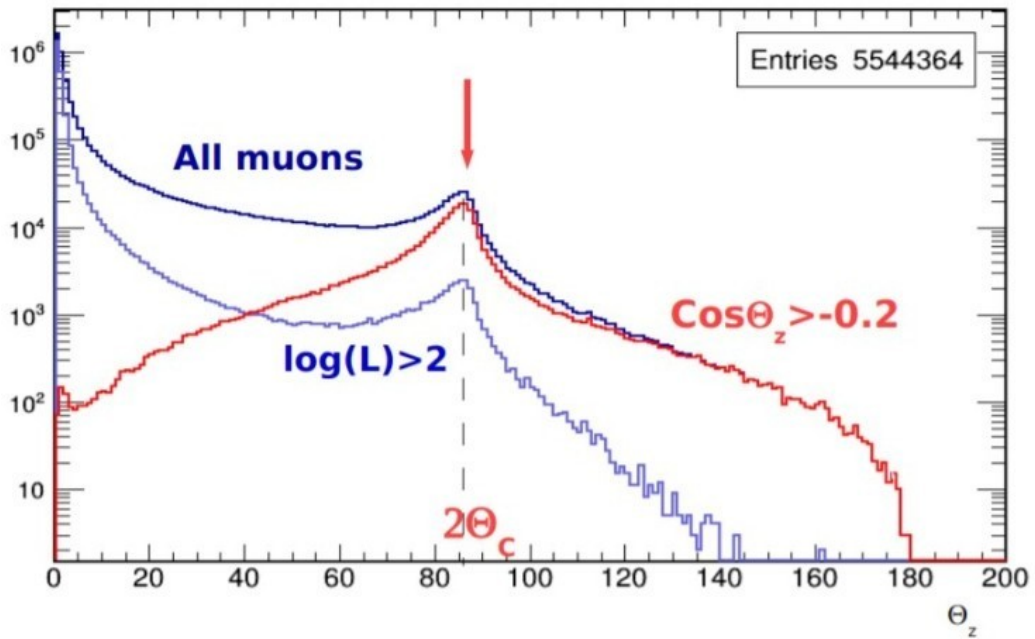
სურათი 3.11. ჰიტების რაოდენობების განაწილება ORCA4 და ORCA6 შემთხვევებში.
მარჯვნივ მოცემულია რაოდენობათა საშუალო არითმეტიკული.

ამ ჰიტების საფუძველზე აღდგენილია საწყისი ნაწილაკები, რომლებმაც გამოიწვია ჩერენკოვის ნათება. იმისთვის რომ გავარჩიოთ აღდგენილი მიუონი იყო ატმოსფერული, თუ დედამიწაში გავლილი ნეიტრინოს ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების შედეგად წამოქმნილი, მთავარი იარაღია ამ მიუონის მიმართულების დადგენა. მონაცემებში აღდგენილი მიუონების მიმართულებათა განაწილება მოცემულია სურათზე 3.12.



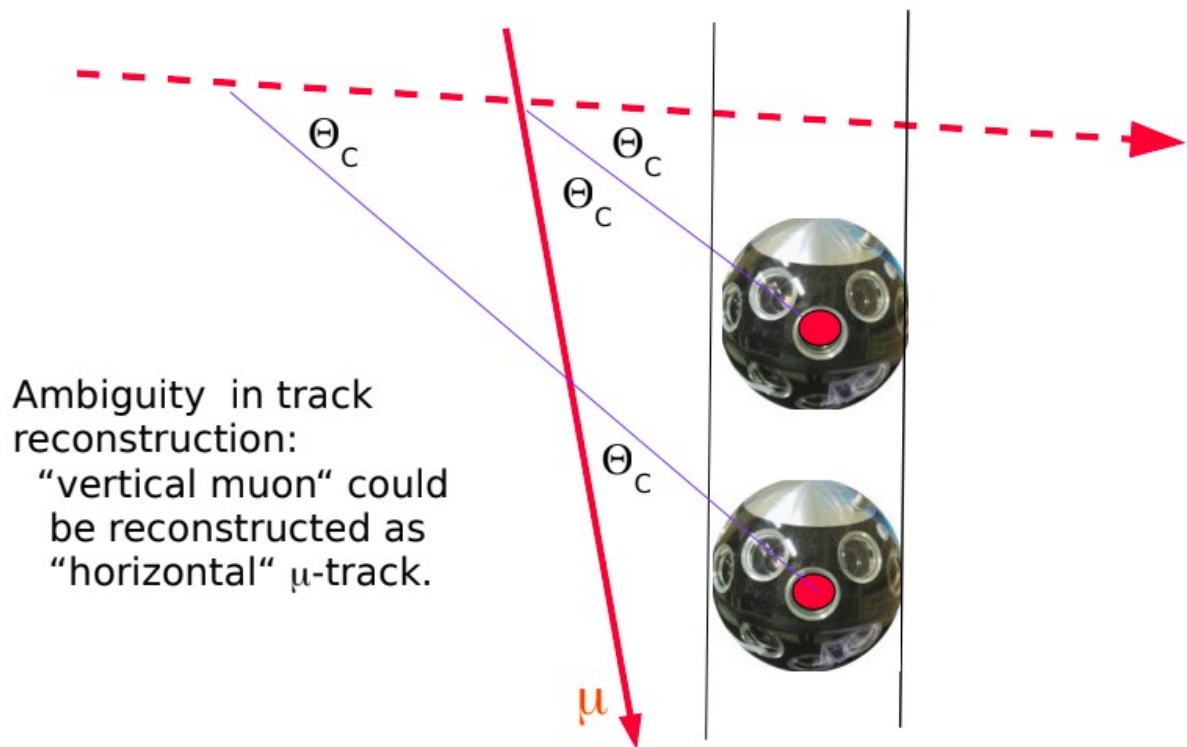
სურათი 3.12. მარცხნივ: აღდგენილი ტრეკების რაოდენობის განაწილება Z ღერძთან შედგენილი კუთხის კოსინუსის მიხედვით. მარჯვნივ: Z ღერძის, ატმოსფერული მიუონებისა და ნეიტრინოების მიმართულებები.

Z ღერძი წარმოადგენს ზღვის ფსკერის მართობულ, ზემოთ მიმართულ წარმოსახვით წრფეს. თუ აღდგენილი მიუონი დედამიწის სიღრმიდან გედაპირისგან მიემართება ანუ მიუონის აღდგენილი წრფივი ტრაექტორიის მიმართულება Z ღერძთან შედგენილი კოსინუსი დადებითია, რადგან ატმოსფერული მიუონი დედამიწას ვერ განჭოლავდა, შეგვიძლია მივიჩნიოთ რომ ნეიტრინომ განჭოლა დედამიწა და წარმოქმნა ეს მიუონი. ცხადია ტრეკის აღდგენისას, მისი მიმართულება შეიძლება არასწორად აღდგეს. ალგორითმის შემოწმება შესაძლებელია მხოლოდ სიმულირებულ შემთხვევებზე. მოდელირებული ატმოსფერული მიუონის აღდგენის კუთხური გარჩევისუნარიანობა მოცემულია სურათზე 3.13.



სურათი 3.13. მოდელირებული ატმოსფერული მიუონის კუთხური გარჩევის-უნარიანობა. ლურჯი ჰისტოგრამით აღნიშნულია ყველა მიუონი; წითლით მიუონები, რომელთა $\cos\theta_z > -0.2$; ცისფერი გვიჩვენებს მიუონებს, რომელთა “ხარისხის” აღმნიშვნელი პარამეტრი აღემატება 2-ს.

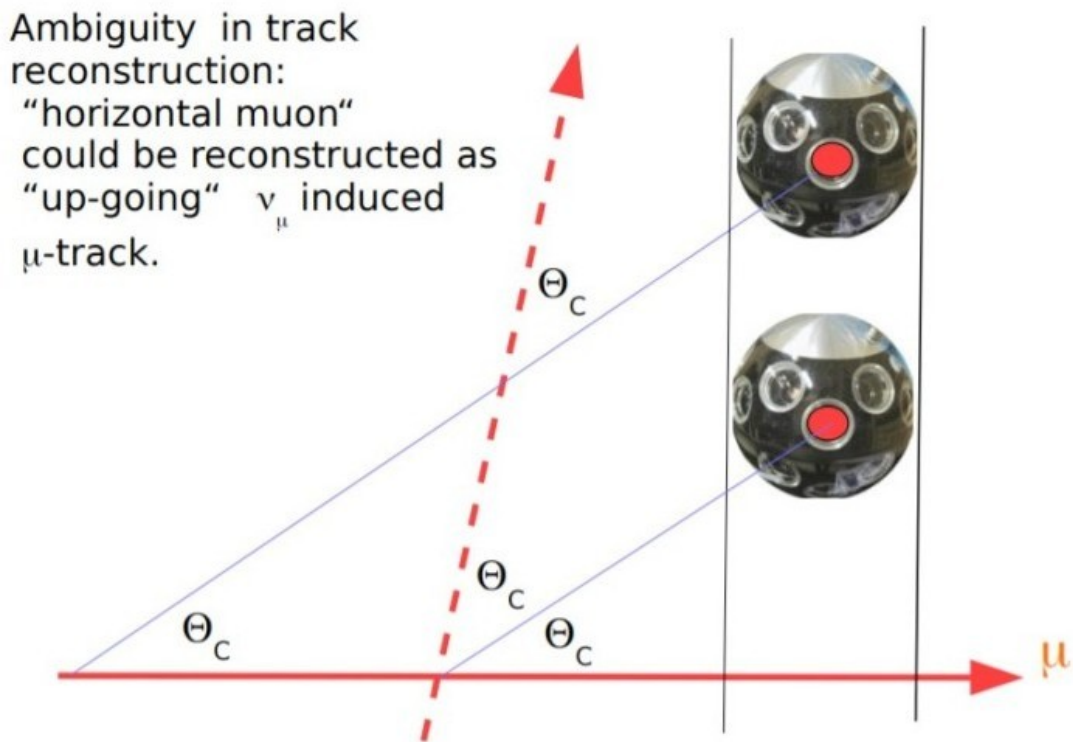
სურათზე 3.13 პიკი 80-85 გრადუსის ინტერვალში დაკავშირებულია ტრეკის მიმართულების აღდგენის არაცალსახობასთან. ეს არაცალსახობა ჩერენკოვის ნათების თვისებისა და მარტივი გეომეტრიული ეფექტით აიხსნება. ზღვის წყალში, კუთხე ნაწილაკსა და ჩერენკოვის ფოტონებს შორის წარმოადგენს 41° -ს. ამიტომ საძიებელი ნაწილაკის ტრეკის აღდგენისას, რეალური მიუონის მიმართულება შეიძლება შეცდომით აღდგეს. მათ შორის კუთხე ორჯერ აღემატება ჩერენკოვის კუთხეს. ასეთი შემთხვევების ერთ-ერთი მაგალითი მოცემულია სურათზე 3.14.



სურათი 3.14. ვერტიკალურად ქვემოთ მიმართული მიუონის არასწორად აღდგენა გეომეტრიული არაცალსახობის გამო.

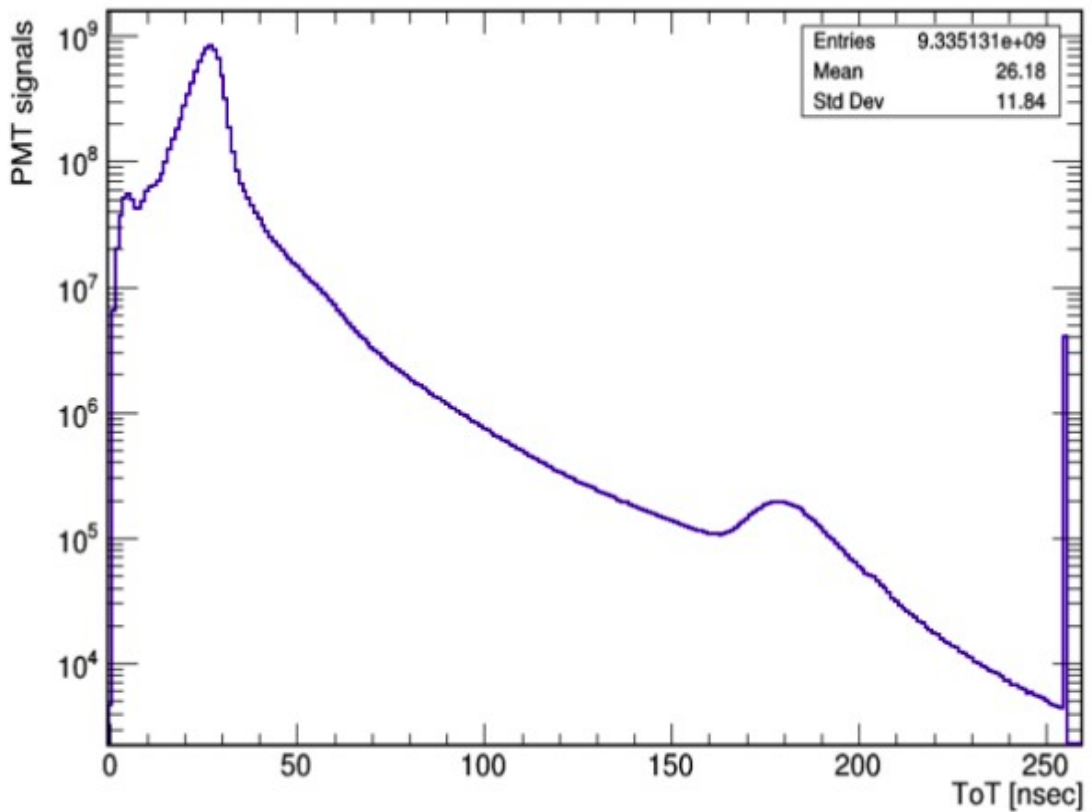
ვერტიკალურის გარდა, კორიზონტალური მიუონის შემთხვევაში, შესაძლოა ატმოსფერული მიუონი არასწორად აღდგეს როგორც ნეიტრინო. ეს მოვლენა აღწერილია სურათზე 3.15.

ასეთი შეცდომების გამოსარიცხად საჭიროა მათი გათვალისწინება აღდგენის ალგორითმებში, ასევე შესაბამისი ჩამოჭრების შემოღება. ამ ყველაფრის შემონმება შესაძლებელია სიმულირებულ შემთხვევებში.



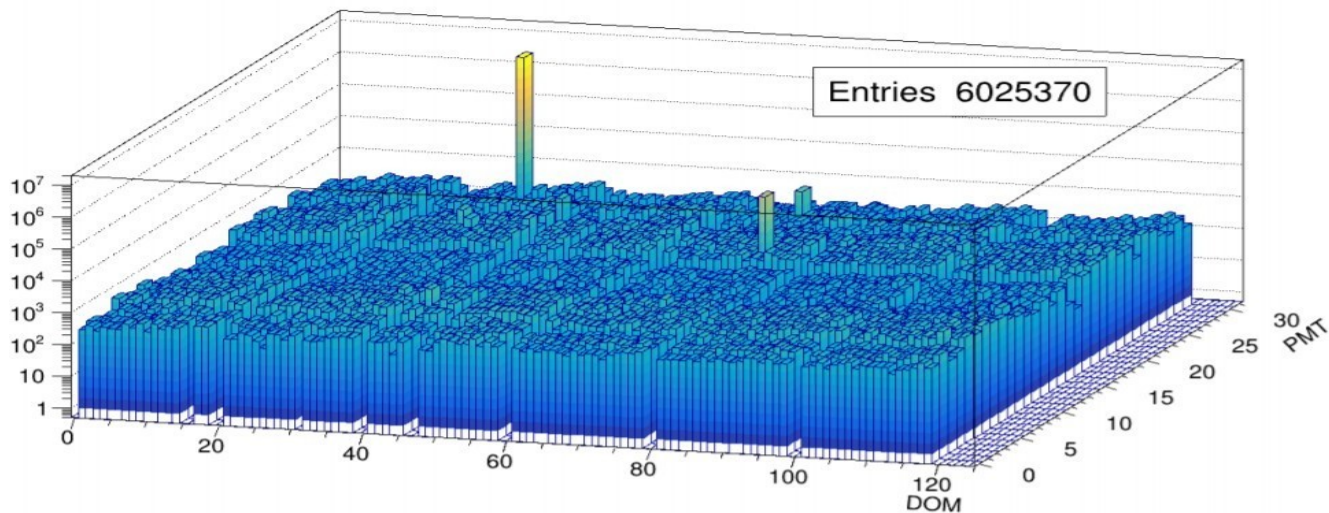
სურათი 3.15. პორიზონტალური მიუონის არასწორად აღდგენა გეომეტრიული არაცალსახობის გამო.

გარდა ფიზიკური შემთხვევებისა, გასათვალისწინებელია დეტექტორის კომპონენტების ანომალური გამოცდები. სწორედ ასეთი შემთხვევების ანალიზი ჩატარდა კოლაბორაციის თხოვნით. კვლევა ეხებოდა მაღალი ამპლიტუდის (ToT=255 ნანონამი) ჰიტების შესწავლას. სურ. 3.16-ზე წარმოდგენილია ORCA6-ის მონაცემებში ToT სიდიდის განაწილება. აღნიშნული განაწილების მარჯვენა მხარეს არის პიკი 255 ნანო ნამზე, რაც გამომწვეულია მონაცემთა ჩანერის მეთოდის თავისებურებით. კერძოდ, ToT სიდიდის ჩასაწერად გამოყოფილია 8 ბიტი მონაცემთა მოცულობა. რადგან $2^8=256$, შესაბამისად ToT ვერ გადააჭარბებს 255-ს. ყველა ის სიგნალი რომლის სიგანეც აღემატება 255-ს, მონაცემებში ჩაინერება როგორც 255.



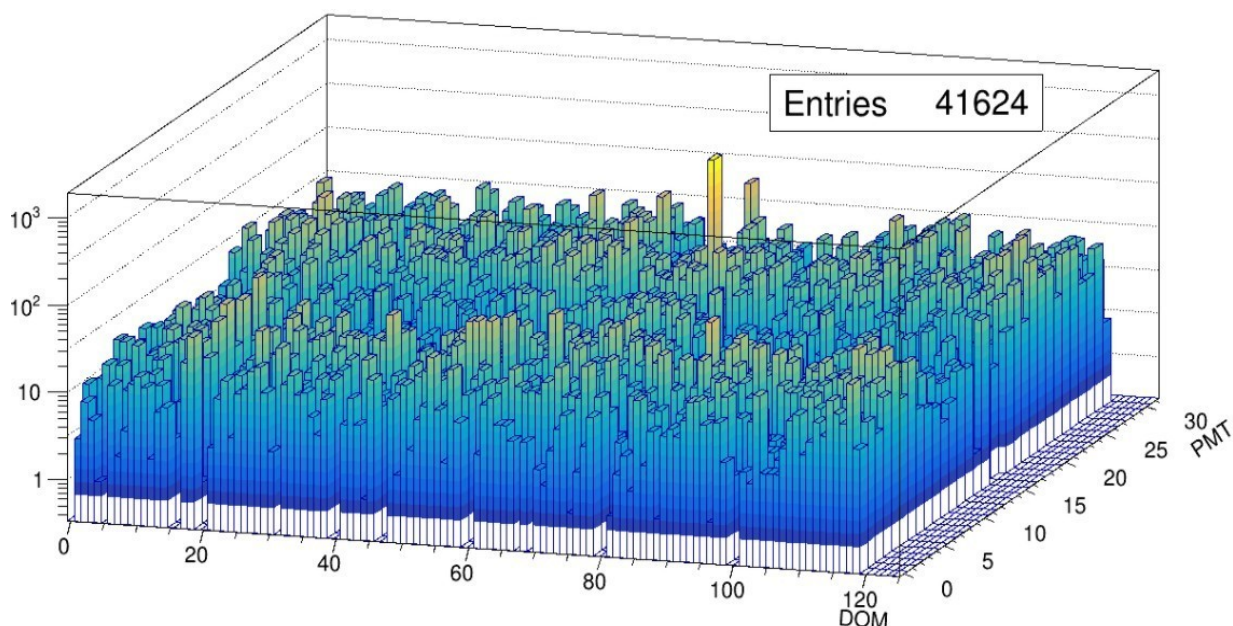
სურათი 3.16. ORCA6-ის მონაცემებში სიგნალის სიდიდის განაწილება.

მონაცემთა ანალიზისას გამოიკვეთა რომ ერთ-ერთი ფოტოგამამრავლებელი როგორც ORCA4-ის ასევე ORCA6-ის მონაცემებში, იძლეოდა ანომალურად დიდი რაოდენობის $ToT=255$ ნანო წამის სიგნალებს რაც ჩანს სურათზე 3.17.



სურათი 3.17. გააქტიურებული ფოტოგამამრავლებლები ORCA6-ის მონაცემებში. X ღერძზე გადაზომილია 108 ცალი DOM ხაზების მიხედვით. Y ღერძზე გადაზომილია თითოეული DOM-ში არსებული PMT. Z ღერძზე სიგნალების ჯამური რაოდენობა

როგორც აღმოჩნდა, აღნიშნული ფოტოგამამრავლებელი ადრეც იყო შემჩნეული და იგეგმებოდა მისი გამორთვა, თუმცა ასე არ მოხდა. ამჟერად, მსჯელობისა და კონსულტაციების შედეგად, კოლაბორაციაში გადაწყდა, გაეთიშათ ეს ფოტოსენსორი და ასეც მოხდა. სურათზე 3.18 ნაჩვენებია მსგავსი განაწილება, ანომალური PMT-ის გამორთვის შემდეგ.



სურათი 3.18. გააქტიურებული ფოტოგამამრავლებლები ORCA6-ის მონაცემებში. X ღერძზე გადაზომილია 108 ცალი DOM ხაზების მიხედვით. Y ღერძზე გადაზომილია თითოეული DOM-ში არსებული PMT. Z ღერძზე სიგნალების ჯამური რაოდენობა

მიმდინარე თავში განხილული იყო KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის იერარქიული მოდელი, მონაცემთა მიღება და დეტექტორის მონიტორინგი. წარმოდგენილია KM3NeT Tier-2 თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის სერვერი, მასზე განთავსებული პროგრამული უზრუნველყოფა და მონაცემები. განხილულია აღნიშნულ სერვერზე ჩატარებული კვლევები რომლებიც ეფუძნება ORCA4-ის და ORCA6-ის მონაცემებს. კვლევები მიმდინარეობდა ორი მიმართულებით: ფიზიკური პროცესების კვლევა და ინსტრუმენტული ეფექტების შესწავლა. ინსტრუმენტული ეფექტის შესწავლისას გამოიკვეთა ანომალური ფოტოგამამრავლებლები. ფოტოგამამრავლებელი, რომელსაც ახასიათებდა $ToT=255$ ტიპის სიგნალების ყველაზე დიდი სიხშირე KM3NeT თანამშრომლობის გადანყვეტილებით, აღარ გამოიყენება ფიზიკურ ანალიზებში.

4. ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში KM3NeT ოპტიკური მოდულების საშუალებით

KM3NeT ექსპერიმენტში ატმოსფერული მიუონების შესწავლას დიდი ყურადღება ეთმობა ორი მიზნის გამო. ისინი გამოიყენება დეტექტორის კალიბრაციისთვის; ასევე, ნეიტრინული კვლევებისას ატმოსფერული მიუონები შესაძლოა რეკონსტრუირდეს როგორც მიუონური ნეიტრინოს მიერ წარმოქმნილი მიუონი, ამიტომ ასეთი შემთხვევების გამოსარიცხად საჭიროა მათი იდენტიფიკაცია. როგორც ნაშრომში აღნიშნულია, დეტექტორი მშენებლობის პროცესშია, თუმცა ზღვის სიღრმეში განთავსებული დეტექციის ერთეულებიდან, უკვე მიმდინარეობს მონაცემთა მიღება. მშენებლობის პროცესში ძირითად ამოცანას წარმოადგენს დეტექტორის შემოწმება თუ რამდენად კარგად მუშაობს და რამდენად შესაძლებელია მისი მეშვეობით ფიზიკური კვლევების ჩატარება. მიმდინარე თავში, აღწერილია ცალკეულ ინოვაციურ, მრავალფოტოგამამრავლებლიან ოპტიკურ მოდულებში მიუონების სიგნალების ფონიდან გამოყოფა და მათი ნაკადის აღდგენა. ამ ამოცანის ჩატარება შესაძლებელი გახდა ოპტიკურ მოდულში განთავსებული

ფოტოსენსორების სიგნალების თანხვედრების გამოყენებით, რაც შეუძლებელია სხვა მსგავსი ნეიტრინული ტელესკოპებისათვის.

4.1. ატმოსფერული მიუონები

ისტორიულად, 1936 წელს კარლ ანდერსონმა და სეთ ნედერმაიერმა კალიფორნიის ტექნიკურ ინსტიტუტში კოსმოსური სხივების შესწავლისას აღმოაჩინეს მიუონები (Neddermeyer & Anderson, 1937). ანდერსონმა შენიშნა ნაწილაკები, რომელთა ტრაექტორია მაგნიტურ ველში იქამდე ცნობილი ნაწილაკების ტრაექტორიებისგან განსხვავდებოდა. მაგნიტურ ველში დაკვირვებებით ივარაუდეს, რომ აღნიშნული ნაწილაკი უარყოფითი (-1 e) ელექტრული მუხტის მატარებელია, თუმცა აქვს ელექტრონზე დიდი და პროტონზე მცირე მასა. ანდერსონმა თავდაპირველად უწოდა ახალ ნაწილაკს მეზოტრონი, (meso - ბერძნული სიტყვიდან "შუა"). მოგვიანებით, 1937 წელს ვილსონის კამერის ექსპერიმენტით დადასტურდა მიუონის არსებობა.

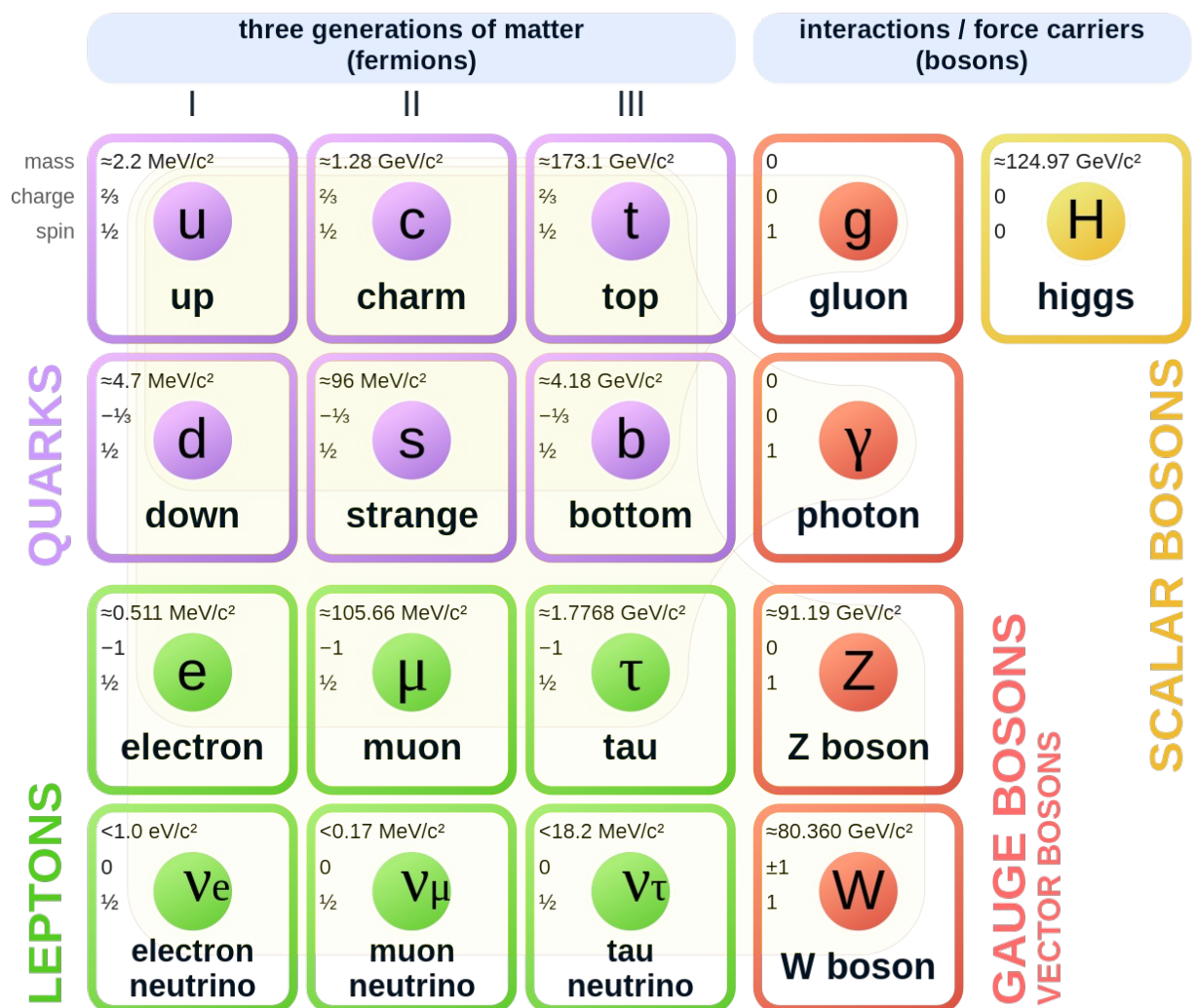
იაპონელმა მეცნიერმა, ჰიდეკი იუკავამ, 1935 წლის სტატიაში (Yukawa, 1935), იწინასწარმეტყველა ნუკლონებს შორის ბირთვული ძალის გადამტანი ნაწილაკი, რომელიც იქნებოდა ელექტრონზე დაახლოებით 200-ჯერ მძიმე. მასის გამო, მიუონი თავდაპირველად ითვლებოდა იუკავას ნაწილაკად. ზოგიერთმა მეცნიერმა, მათ შორის ნილს ბორმა, მას იუკონი უწოდა. იუკავას ნაწინასწარმეტყველები ნაწილაკი – რომელსაც შემდგომში პი (π) მეზონი ეწოდა, კოსმოსური სხივების კვლევებისას აღმოაჩინეს 1947 წელს (Lattes et al., 1947), იუკავას კი 1949 წელს გადასცეს ნობელის პრემია.

ორი შუალედური მასის მქონე ნაწილაკის აღმოჩენის შემდგომ, შემოიღეს უფრო ზოგადი ტერმინი - მეზონი, რომელსაც უწოდებენ ისეთ ნაწილაკებს რომელთა მასა ექცევა ელექტრონებსა და ნუკლონებს შორის მასის დიაპაზონში.

მოგვიანებით, როდესაც ამარქარებლის ექსპერიმენტებში მეტი ტიპის მეზონები აღმოაჩინეს, გაირკვა, რომ მიუ (μ) მეზონი მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა არა მხოლოდ პი მეზონისგან, არამედ სხვა მეზონებისაგანაც.

მიუ მებონები არ ურთიერთქმედებდნენ ბირთვულ ძალებთან, რაც წარმოადგენდა მთავარი განმასხვავებელი ფაქტორს.

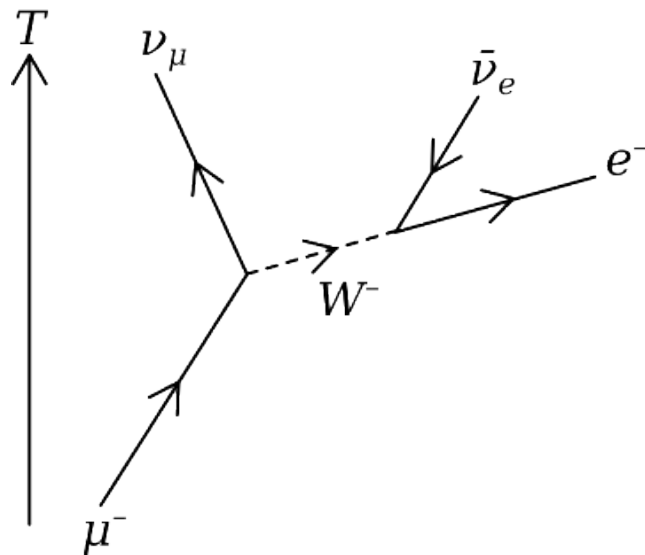
1970-იან წლებში სტანდარტულ მოდელში, ყველა მებონი მიუ მებონის გარდა იდენტიფიცირდა ადრონად, ანუ კვარკებისგან შემდგარი ნაწილაკად. მიუ მებონი, მოდელში შევიდა როგორც ფუნდამენტური ნაწილაკი (ლექტონი), კვარკული სტრუქტურის გარეშე. საბოლოოდ, დადგინდა მებონის განმარტებაც – სუბატომური ნაწილაკი, რომლის მასა მოთავსებულია ელექტრონსა და ნუკლონებს შორის და შედგებიან კვარკ-ანტიკვარკული წყვილებისგან. ამ განმარტების თანახმად მიუ მებონები არ არიან მებონები. ამიტომ, ტერმინი ‘მიუ მებონი’ ჩანაცვლდა ტერმინით – მიუონი. სურათზე 4.1 მოცემულია ნაწილაკების სტანდარტულ მოდელში (Particle Data Group et al., 2022) შემავალი ნაწილაკები და მათი აღმწერი პარამეტრები (მასა, ელექტრული მუხტი, სპინი).



სურათი 4.1. ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელში შემავალი ნაწილაკები და მათი ძირითადი პარამეტრები. იისფრად მოცემულია კვარკები, მწვანედ ლეპტონები, წითლად ურთერთქმედების გადამტანი ნაწილაკები, ყვითლად ჰიგსის ბოზონი.

მიუონი მეორე თაობის ლეპტონია, ელექტრული მუხტით $-1 e$ და სპინით $\frac{1}{2}$. როგორც სხვა ლეპტონებს, მიუონს არ აქვს რაიმე ქვესტრუქტურა - მიჩნევა, რომ იგი არ შედგება სხვა ნაწილაკებისგან. სხვა ელემენტარული ნაწილაკების მსგავსად, მიუონს აქვს საპირისპირო მუხტის შესაბამისი ანტინაწილაკი. მას ეწოდება ანტიმიუონი ან დადებითი მიუონი (μ^+).

μ არის არასტაბილური ნაწილაკი, რომლის სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობაა $2.2 \mu s$ (მიკროწამი), ბევრად უფრო ხანგრძლივი ვიდრე სხვა სუბატომური ნაწილაკების. მიუონის დაშლა თითქმის ყოველთვის წარმოქმნის მინიმუმ სამ ნაწილაკს, რომელიც უნდა შეიცავდეს იმავე მუხტის ელექტრონს, როგორც მიუონი და ორი ტიპის ნეიტრინოს. მიუონის დაშლისას შესაბამისი ნეიტრინოების წარმოქმნა უზრუნველყოფს ლეპტონური მუხტის შენახვას.



სურათი 4.2. მიუონის ყველაზე გავრცელებული დაშლის ფენმანის დიაგრამა

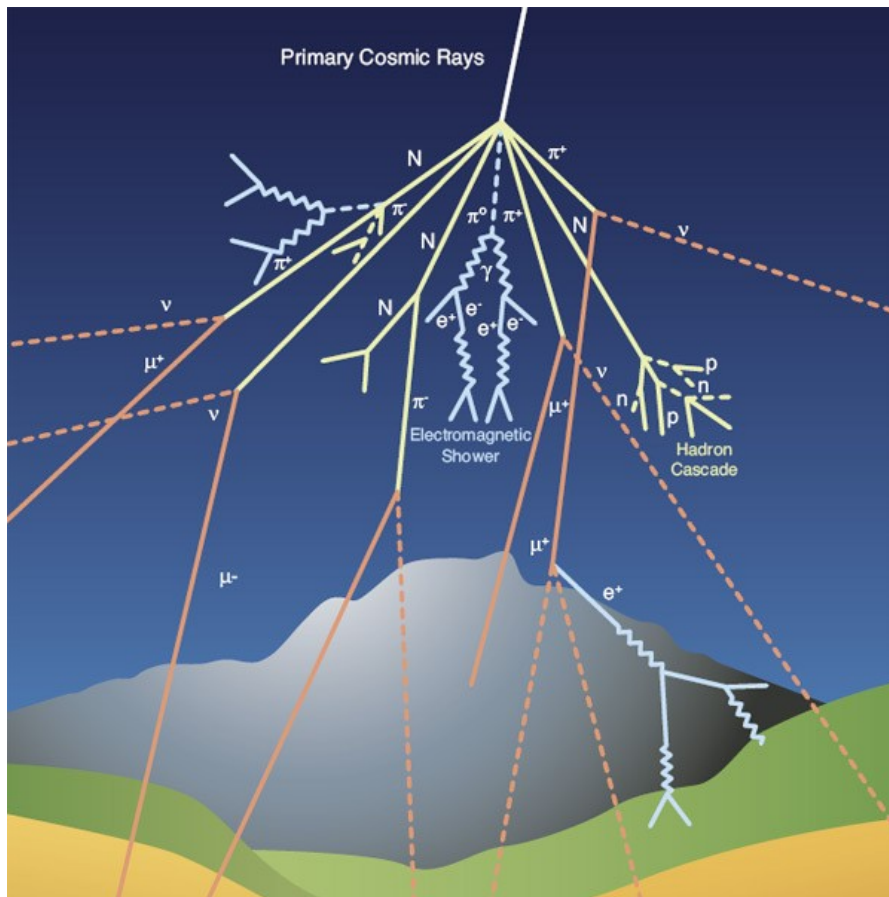
მიუონისა და ანტიმიუონის დაშლები მოცემულია ცხრილში 4.1.

მიუონის დაშლის არხი
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu + \gamma$
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu + e^+ + e^-$

ცხრილი 4.1. მიუონისა და ანტიმიუონის დაშლის არხები

ამ დაშლებიდან ~100% ალბათობით მიმდინარეობს პირველი დაშლა. მეორე დაშლის ალბათობა წარმოადგენს $(6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}$ -ს, ხოლო მესამესი $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$.

მიუონის მასა არის $105,66 \text{ MeV}/c^2$, რაც დაახლოებით 207-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას - m_e . მათი დიდი მასის გამო, მიუონების აჩქარება ელექტრომაგნიტურ ველებში ნაკლებია ელექტრონების აჩქარებასთან შედარებით, ასევე ნაკლებია მათი დამუხრუჭებითი გამოსხივებაც. ეს გარემოება, მოცემული ენერგიის მიუონებს, საშუალებას აძლევს უფრო ღრმად შეაღწიონ მატერიაში, რადგან ელექტრონებისა და მიუონების შენელება, პირველ რიგში, გამოწვეულია დამუხრუჭებითი გამოსხივებით ენერგიის დაკარგვით. ატმოსფერულ მიუონებს, რომლებიც ატმოსფეროში მოხვედრილი კოსმოსური სხივების მატერიასთან ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნილ ატმოსფერულ ღვარებში იბადებიან, შეუძლიათ მიაღწიონ დედამიწის ზედაპირს და ჩააღწიონ ზღვის, წყალსაცავების თუ მაღაროების სიღრმეებშიც კი. ატმოსფერული ღვარები და მათში წარმოქმნილი მიუონები ნაჩვენებია სურათზე 4.3.



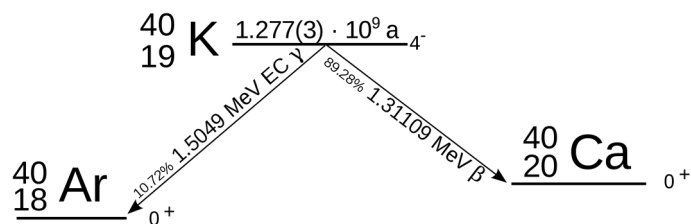
სურათი 4.3. კოსმოსური სხივების მიერ გამოწვეული ატმოსფერული ღვარი

ატმოსფერული ანუ მეორადი მიუონების ნაკადის ინტენსივობა ზღვის დონეზე არის ~ 1 მიუონი, კვადრატულ სანტიმეტრზე, წუთში. ზღვის დონეზე ატმოსფერული მიუონების ენერგია საშუალოდ 4 გევ-ია. მიუონები, მატერიასთან ურთიერთქმედებისას ინვევენ მის იონიზაციას. ატმოსფეროში გამავალი მიუონების მიერ ენერგიის დაკარგვა პროპორციულია იმ მატერიის რაოდენობის, რომელსაც ისინი განჭოლავენ. ენერგიის დანაკარგის საშუალო მნიშვნელობა ხასიათდება გარემოს სიმკვრივის (გ/სმ^3) ნამრავლით გავლილ მანძილზე სანტიმეტრებში. ამ სიდიდეს უწოდებენ "ურთიერთქმედების სიგრძეს" (იზომება გ/სმ^2 -ში). ენერგიის დანაკარგი მიუონებისთვის არის დაახლოებით 2 მევ გ/სმ^2 -ზე. ატმოსფეროს ურთიერთქმედების სიღრმე დაახლოებით 1000 სმ^2 -ია, ამიტომ მიუონები ატმოსფეროში გავლისას კარგავენ დაახლოებით 2 გევ ენერგიას. რადგან ზღვის დონეზე მეორადი მიუონების საშუალო ენერგია 4 გევ-ია, მეორადი მიუონების საშუალო საწყის ენერგიად მიიჩნევა 6 გევ.

მატერიაში ღრმად შეღწევის უნარისა და (სუბატომური ნაწილაკების სტანდარტებით) დიდი სიცოცხლის ხანგრძლივობის გამო, მიუონები აღწევენ KM3NeT წყალქვეშა ტელესკოპების სიღრმეებამდე. მიუხედავად იმისა, რომ ისინი ნეიტრინული კვლევებისას წარმოადგენენ ხელისშემშლელ ნაწილაკებს, პროექტში მაინც მნიშვნელოვანი როლი უკავიათ. მათი საშუალებით შესაძლებელია დეტექტორის კალიბრება, ასევე დეტექტორის გამართულად მუშაობის შემოწმება.

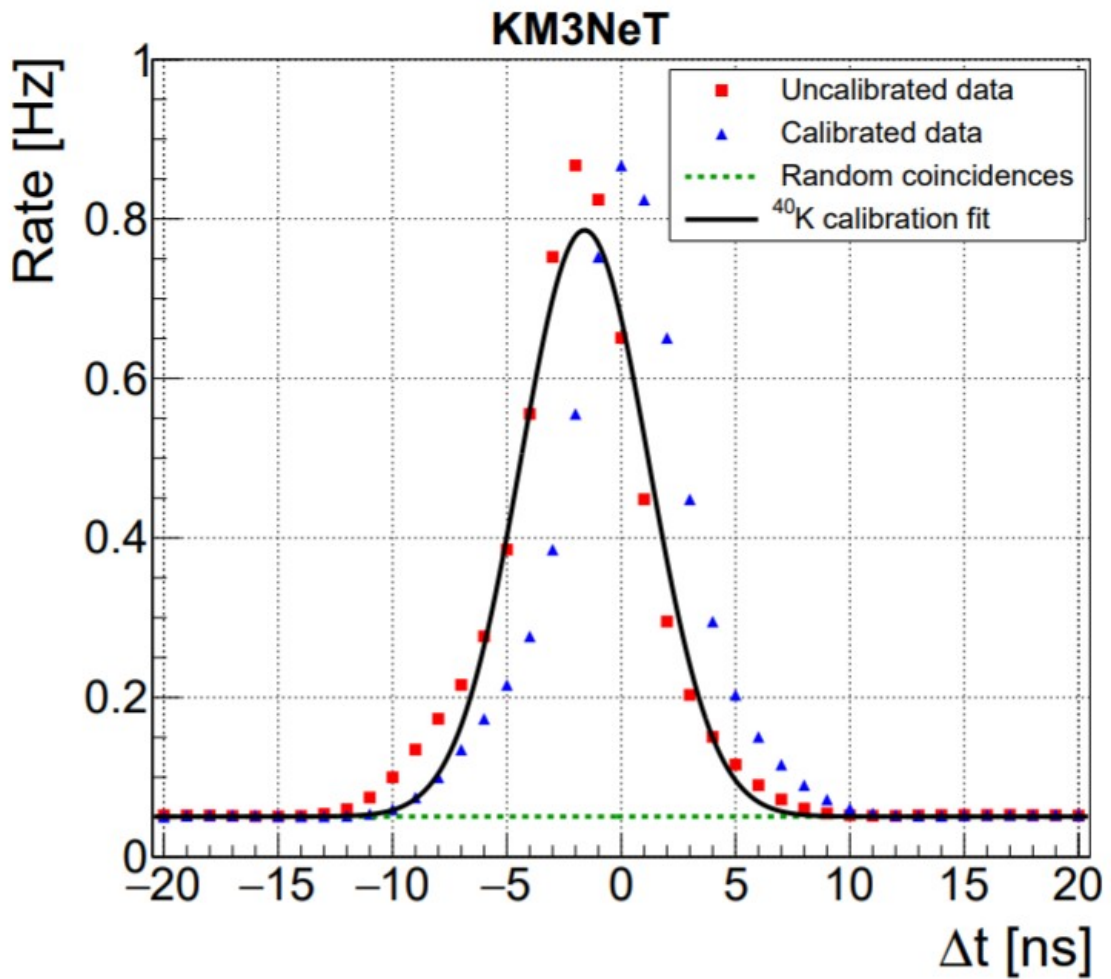
4.2 ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ზღვის სიღრმეზე დამოკიდებულების შესწავლა

როგორც აქამდე აღინიშნა, KM3NeT ექსპერიმენტში ფონის მთავარ წყაროს წარმოადგენს ზღვის მარილებში არსებული კალიუმის არასტაბილური იზოტოპის (^{40}K) რადიოაქტიური დაშლა. დაშლების $\sim 89\%$ -ში გამოსხივდება ბეტა ნაწილაკი, რომელსაც ახასიათებს ჩერენკოვის ნათება. ^{40}K -ის დაშლის არხების სქემა ილუსტრირებულია სურათზე 4.4.



სურათი 4.4. ^{40}K -ის რადიოაქტიური დაშლის არხები და მათი პროცენტული წილი

ასეთი ფონური ნათების გამოყოფა და მოცილება შესაძლებელია ფოტოგამამრავლებლების სიგნალებს შორის სივრცე-დროითი კორელაციების მოთხოვნით. თუმცა, მეორე მხრივ, ეს დაშლები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ოპტიკური მოდულების ფოტოგამამრავლებლების კალიბრაციისთვის და ხანგრძლივ პერსპექტივაში დეტექტორის მუშაობის მონიტორინგისთვის. მიუონების ნაკადის აღდგენის ამოცანაში სიზუსტე მკვეთრად არის დამოკიდებული დეტექტორის ოპტიკური მოდულების ფოტოსენსორების დროით კალიბრაციაზე.

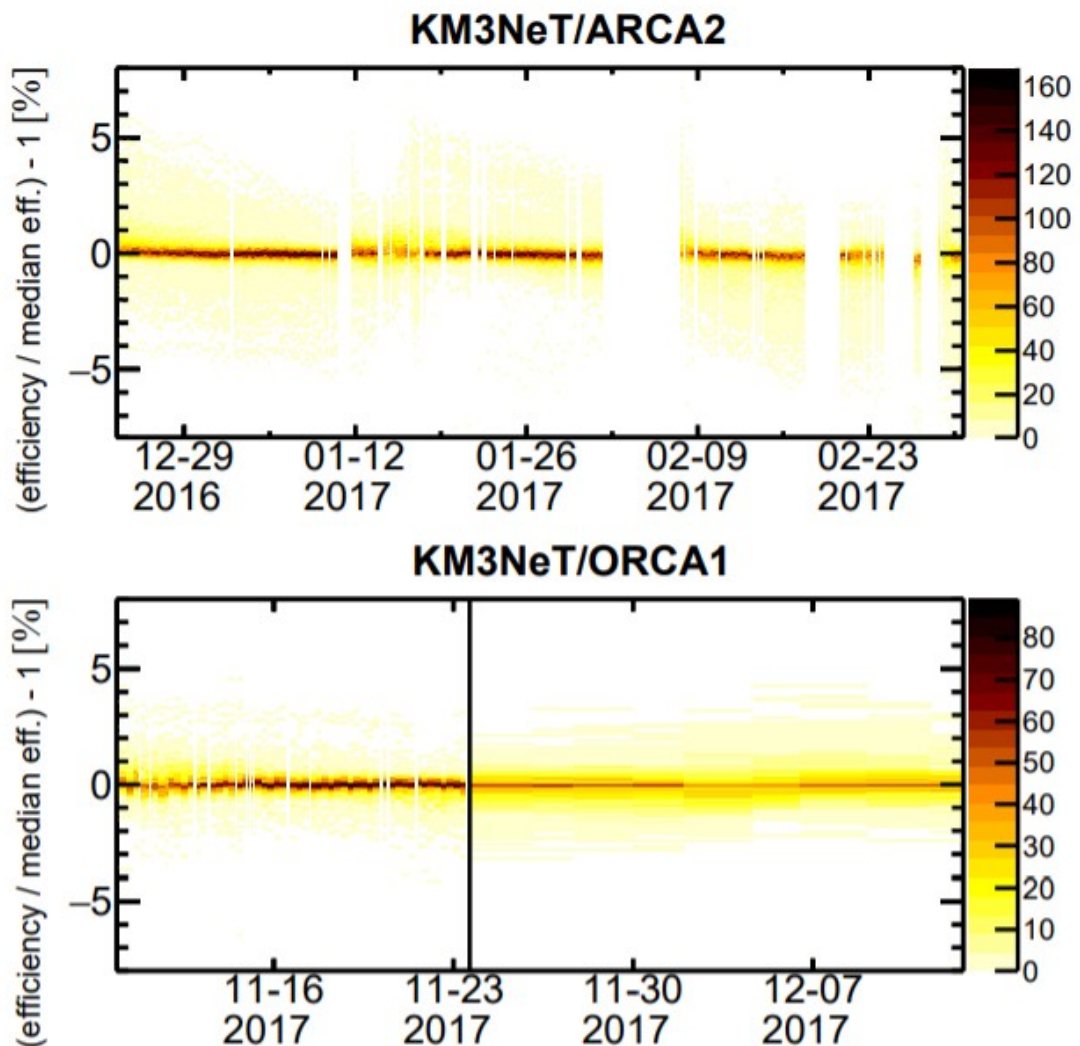


სურათი 4.5. ოპტიკურ მოდულში სიგნალების წყვილის დროითი განსხვავება ორი (i და j) ფოტო-გამამრავლებლისთვის. წითლად მოცემულია შედეგები კალიბრებამდე, ლურჯად – კალიბრაციის შემდეგ. მწვანედ მოცემულია ფონი. შავი მრუდით ნაჩვენებია კალიბრაციისთვის გამოყენებული გაუსის განაწილება.

სურათზე 4.5. ნაჩვენებია ორ ფოტოგამამრავლებელს შორის სიგნალთა დროითი განსხვავება. ორი ფოტოგამამრავლებლის (პირობითად, i და j) LO ჰიტს შორის დროითი განსხვავებების განაწილების შესწავლით, შესაძლებელია შეფასდეს ისეთი პარამეტრები, როგორიცაა: ფარდობითი დროითი გადახრა (t_0), „Transit Time Spread“ სიდიდე (TTS) და ფოტონის დაფიქსირების ეფექტურობა (ϵ) (Melis & KM3NeT Collaboration, 2017). მონაცემთა ფიტირებისას მოთხოვნილია, რომ ყველა PMT-ის t_0 გადახრების ჯამი იყოს 0-ის ტოლი. 31 PMT-სგან შემდგარ მოდულში შესაძლებელია 465 სხვადასხვა წყვილის განხილვა. შემთხვევითი, არაკორელირებული სიგნალები კი საერთოდ არაა დამოკიდებული ამ დროით სხვაობაზე და ხდება შესაბამისი შემთხვევების

გამოყოფა. მოცემული 465 წყვილისთვის მიიღება შესაბამისი დროითი თანხვედრის განაწილება, რომელსაც ერგება გაუსის განაწილება. ერთი წყვილისთვის მიიღება სურათზე მოცემული განაწილება, სადაც წითლად არის სურათი კალიბრაციამდე, ხოლო ლურჯად - კალიბრაციის შემდეგ მიღებული შედეგი. განსხვავება გაუსის ინტეგრალსა და მიღებულ ინტეგრალს შორის 3%-ზე ნაკლებია და შესაძლებელია მიღებულ იქნას, როგორც სისტემური ცდომილება.

შესწავლილია ფოტონის დაფიქსირების ეფექტურობა და საშუალოდან გადახრა ოპტიკური მოდულის ფოტოგამამრავლებლებისთვის, ORCA1-ისა და ARCA2-სთვის. ფოტოგამრავლებელთა ეფექტურობის შედარება საშუალო ეფექტურობასთან წარმოდგენილია სურათზე 4.6.



სურათი 4.6. დროზე დამოკიდებული განსხვავება ARCA2-სა და ORCA1-ში ინდივიდუალური ფოტოგამამრავლებლის ფოტონის დეტექციის ეფექტურობასა და გლობალურ საშუალო ეფექტურობას შორის. ფერადი სკალით გამოსახავს ჰისტოგრამის არხში (bin) ფოტოგამამრავლებელთა რაოდენობა. განაწილებაში თეთრი ნაწილები შეესაბამება წყვეტებს მონაცემთა მიღებაში. ვერტიკალური შავი მონაკვეთით ნაჩვენებია მონაცემთა მოცულობის შემცირების ახალი მეთოდის ამოქმედების მომენტი.

ატმოსფერული მიუონების ნაკადის სიღრმეზე დამოკიდებულების შესასწავლად აღებულია ARCA2 მონაცემები 2016 წლის 23 დეკემბრიდან 2017 წლის 2 მარტამდე, ასევე ORCA1 მონაცემები 2017 წლის 9 ნოემბრიდან იმავე წლის 13 დეკემბრამდე.

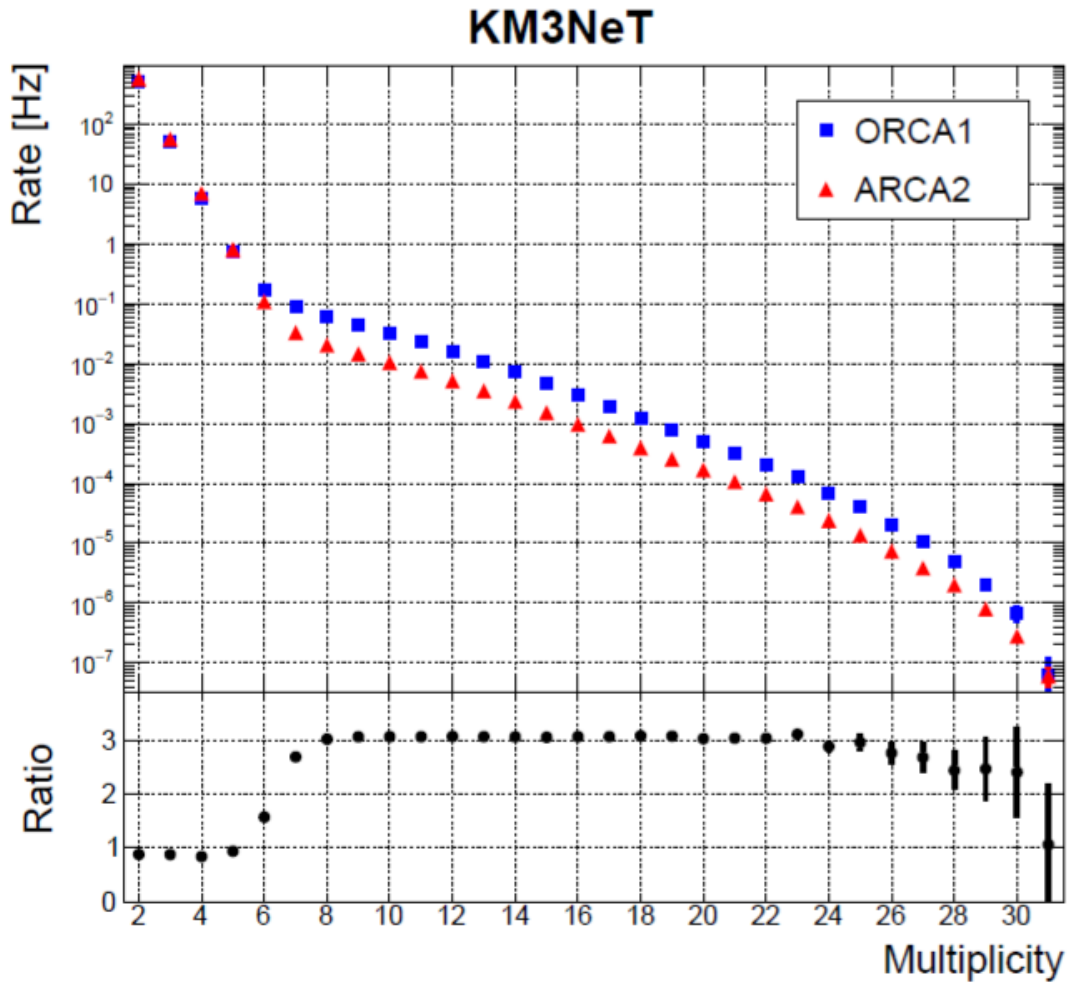
დროითი და ფოტონების დეტექციის ეფექტურობის კალიბრაცია ჩატარებულია მონაცემთა 6 საათიან სეგმენტებზე. მიღებული სტატისტიკა კი სავსებით საკმარისია ექსპერიმენტული და სიმულირებული მონაცემების შესაფასებლად, შესაბამისი პარამეტრების ფლუქტუაციების თავიდან ასაცილებლად.

დეტექტორზე მიუონების ნაკადის გამოძახილის შესასწავლად ასევე გამოყენებული იყო მონტე-კარლოს მეთოდით სიმულირებული შემთხვევები. სიმულაცია მოიცავს შემთხვევების გენერირებას, ჩერენკოვის სინათლის წარმოქმნას, ამ შემთხვევების ფოტოგამამრავლებლების მიერ დეტექციას და მონაცემთა გაფილტვრას. ატმოსფერული მიუონების შემთხვევები სიმულირებული იყო MUPAGE (Carminati et al., 2008) პროგრამული პაკეტით. ამ პაკეტში გათვალისწინებულია კოსმოსური სხივების ატმოსფეროსთან ურთიერთქმედებში წარმოქმნილი მიუონები. KM3 პაკეტით კი სიმულირებულია ჩერენკოვის გამოსხივების წარმოქმნა. ეს პროგრამა ეყრდნობა GEANT3.21-ით (Brun et al., 1987) მიღებული რელატივისტური მიუონებისა და ელექტრომაგნიტური ღვარების სიმულაციების შესაბამის ცხრილებს. ის უზრუნველყოფს ზღვის წყალში ჩერენკოვის ნათების წარმოქმნას, გავრცელებას, გაბნევასა და შთანთქმას. გარდა ამისა, KM3 ითვალისწინებს ოპტიკური მოდულის სტრუქტურასა და მახასიათებლებს, კერძოდ მოდულში განთავსებულ ამრეკლ რგოლებს, მინისა და ოპტიკური გელის მიერ სინათლის შთანთქმას.

საბოლოოდ, გაზომილი PMT-პარამეტრების შესაბამისად, სიმულირებულია დეტექტორის გამოძახილი სიმულირებულ შემთხვევებზე, ასევე დამატებულია შემთხვევითი ოპტიკური ფონიც. მოდელურებული შემთხვევები სრულად იმეორებს რეალური მონაცემების სტრუქტურას, რათა გაადვილდეს ორივე მათგანის ანალიზი, რაც გულისხმობს იდენტური ალგორითმების, კომპუტერული კოდებისა და პროგრამების გამოყენებას.

თითოეულ ოპტიკურ მოდულში არსებული ფოტოგამამრავლებლები იძლევა საშუალებას, რომ გაიზომოს ფოტონთა რაოდენობა, მათი დაფიქსირების დრო და მიმართულება. ამის წყალობით შესაძლებელია ატმოსფერული მიუონების სიგნალის გამოყოფა ბიოლუმინესცენციისა და ^{40}K რადიოაქტიური დაშლის ფონებისგან. ფონის გამოყოფის საშუალებას იძლევა ერთ მოდულში მდებარე სხვადასხვა PMT-ებში სიგნალების თანხვედრა და თანხვედრათა რაოდენობა. თანხვედრა განსაზღვრულია, როგორც ერთ ოპტიკურ მოდულში 15 ნნმ დროით ფანჯარაში ჰიტების არსებობა. ამ თანხვედრაში მონაწილე PMT-ების რიცხვს კი ეწოდება მრავლობითობა (multiplicity).

სურათზე 4.7. წარმოდგენილია ARCA2-ისა და ORCA1-ის ოპტიკურ მოდულებში გასაშუალოებული თანხვედრის სიხშირეები, რომლებიც დამოკიდებულნი არიან მრავლობითობაზე. გრაფიკზე წარმოდგენილია მხოლოდ სტატისტიკური ცდომილებები. შემთხვევითი ფონი მოცილებულია.



სურათი 4.7. ზემოთ: თანხვედრათა მოხდენის სიხშირის დამოკიდებულება მრავლობითობაზე ORCA1 და ARCA2 დეტექტორში. სიხშირეები გასაშუალოებულია თითოეულ დეტექტორზე ყველა ოპტიკური მოდულის გათვალისწინებით.

ქვემოთ: ORCA1 და ARCA2 დეტექტორებში თანხვედრათა სიხშირეების ფარდობა. მრავლობითობა < 6 დიაპაზონში დომინირებს ^{40}K -ის დაშლებით გამოწვეული სიგნალები. მრავლობითობა > 7 დიაპაზონში კი დომინირებს მიუონების მიერ გამოწვეული სიგნალები. ნაჩვენებია მხოლოდ სტატისტიკური ცდომილებები.

როგორც გრაფიკიდან ჩანს, ^{40}K დაშლის ფონი დომინირებს მრავლობითობა < 8 რეგიონში. გაზომვები აჩვენებს, რომ ზღვის მარილიანობა არაა დამოკიდებული არც სიღრმეზე და არც მდებარეობაზე (Albert et al., 2018; Riccobene et al., 2007). ატმოსფერული მიუონებით გამოწვეული დამთხვევები კი დომინირებს მრავლობითობა > 8 დიაპაზონში. ეს ფაქტი იმით აიხსნება, რომ

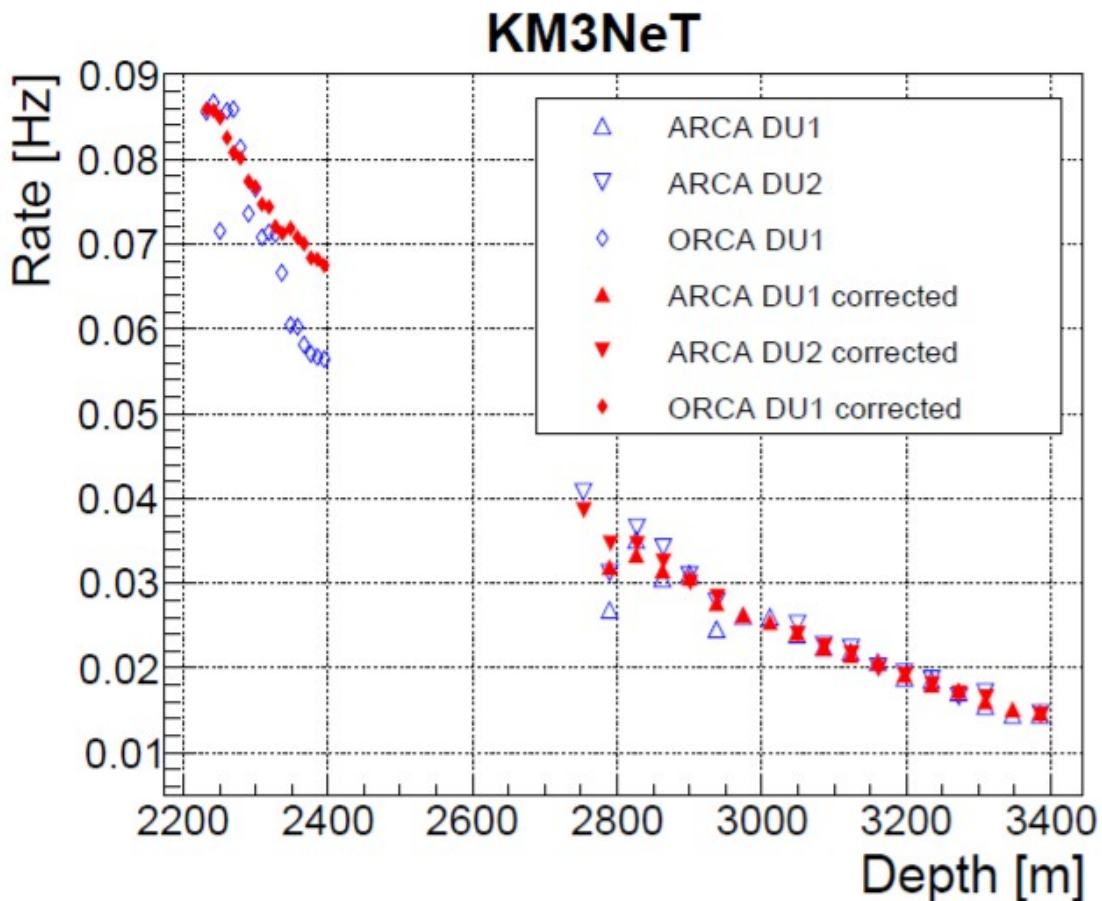
^{40}K დაშლებისას განათდება ოპტიკური მოდულის მხოლოდ მცირე ნაწილი, ხოლო მიუნსა და მიუნთა ჯგუფებს პოტენციურად შეუძლიათ გამოიწვიონ მოდულში ყველა ფოტოგამამრავლებლის განათება. აქვე აღსანიშნავია, რომ ORCA დეტექტორში თანხვედრათა რიცხვი დაახლოებით სამჯერ მეტია ვიდრე ARCA-ში. ამის მთავარი მიზეზი კი დეტექტორების განთავსების სიღრმეა, ისინი ზღვის ზედაპირიდან შესაბამისად 2310 მ და 3070 მ სიღრმეებზეა განთავსებული.

გარემოში, ამ შემთხვევაში კი ზღვის წყალში, ენერჯის დანაკარგის გამო, სიღრმის გაზრდასთან ერთად, ატმოსფერულ მიუნთა რიცხვი მცირდება. აღნიშნული კარგად ჩანს სურათში 4.7., ORCA და ARCA დეტექტორების სიღრმეების გათვალისწინებით.

ფოტოგამამრავლებლების მიერ ფოტონების დაფიქსირების განსხვავებული ეფექტურობა გავლენას ახდენს გაზომვებზე, მათ შორის სიღრმეზე დამოკიდებულების გამოცხადზე. ამის გამოსასწორებლად, ჩატარდა ორნაირი სიმულაცია. პირველი, „ერთგვაროვანი“ სიმულაციის მიხედვით, ყველა PMT-ს მიენიჭა ერთნაირი ეფექტურობა, რომელიც დეტექტორის საშუალო ეფექტურობის ტოლი იყო. მეორე – კალიბრებულ სიმულაციაში კი მინიჭებულ იქნა ექსპერიმენტულად გაზომილი, რეალური ეფექტურობა. სიმულირებული სიხშირეების შეფარდება გამოიყენება თითოეული ოპტიკური მოდულისთვის გაზომილი თანხვედრათა სიხშირეების კორექტირებისთვის, შემდეგი ფორმულის გამოყენებით:

$$R_{corrected}^{data} = R_{measured}^{data} * \frac{R_{uniform}^{MC}}{R_{calibrated}^{MC}} \quad (4.1)$$

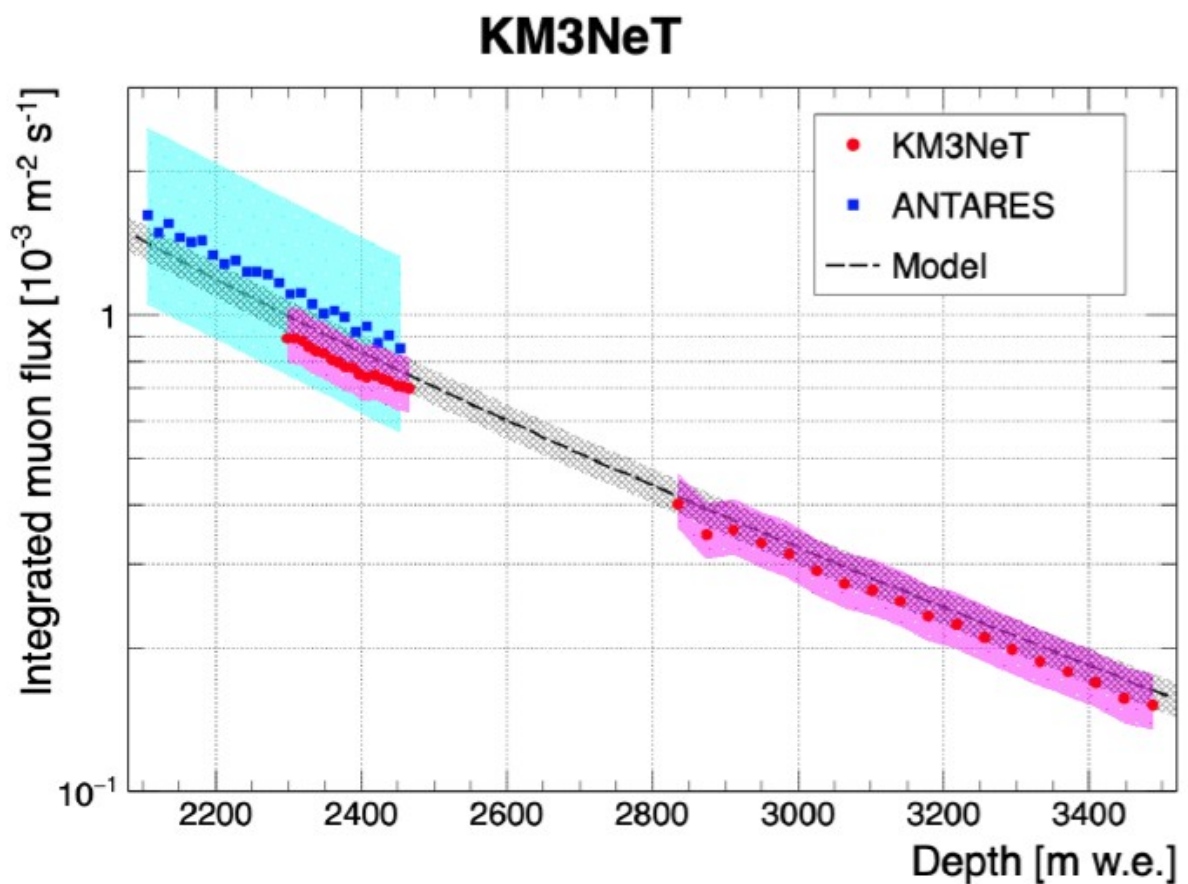
სურათზე 4.8. წარმოდგენილია როგორც გაზომილი (ლურჯად), ასევე შესწორებული (წითლად) თანხვედრათა სიხშირის დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე (წითლად).



სურათი 4.8. ყველა ოპტიკური მოდულისთვის თანხვედრათა მრავლობითობა ≥ 8 შემთხვევების დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე. ARCA და ORCA დეტექტორებით გაზომილი სიხშირეები წარმოდგენილია ლურჯად, ფოტოგამამრავლებელთა ეფექტურობის გათვალისწინებით მიღებული სიხშირეები ნაჩვენებია წითლად. განაწილებაზე წარმოდგენილია სტატისტიკური ცდომილებებიც, თუმცა ისინი იმაზე მცირეა, ვიდრე მონაცემთა აღმნიშვნელი მარკერები.

ატმოსფერული მიუონების ნაკადების გასაზომად გამოიყენება ფოტონთა ეფექტურობების გათვალისწინებით მიღებული სიგნალთა სიხშირეები. მრავლობითობა ≥ 8 თანხვედრებისათვის, ინდივიდუალური ოპტიკური მოდულის გამოძახილი შესაძლებელია შეფასდეს დეტექტორის ეფექტური ფართობის ცნების გამოყენებით. ჩატარდა სიმულაცია პროგრამა MUPAGE-ის გამოყენებით. სიმულაციებში გამოიყენებოდა ფოტოგამამრავლებელთა კუთხური აქსეპტანსი და კვანტური ეფექტურობა, რათა შეფასებულიყო თანხვედრათა სიხშირე. ეფექტური ფართობი წარმოადგენს სიმულირებული ოპტიკური მოდულით გაზომილი თანხვედრების სიხშირისა და მიუონების ნაკადის

(შესაბამის სიღრმეზე) ფარდობას. სიმულაციებიდან დადგინდა რომ, მრავლობითობა ≥ 8 თანხვედრებისთვის, ეფექტური ფართობის საშუალო მნიშვნელობა არის 96^{+5}_{-12}მ^2 . საბოლოოდ, ექსპერიმენტზე მიუონთა ნაკადი იზომება თანხვედრათა შესწორებული სიხშირეებისა და ოპტიკური მოდულის ეფექტური ფართობის შეფარდებით. სურათზე 4.9. წარმოდგენილია მიუონთა ნაკადის დამოკიდებულება ზღვის წყლის სიღრმეზე, რომელიც გადაზომილია მეტრებში. სურათზე ასევე წარმოდგენილია ბუგაევის მოდელით (Bugaev et al., 1998) დათვლილი ნაკადის მნიშვნელობა და ANTARES ექსპერიმენტში მიღებული შედეგები (Aguilar et al., 2010).



სურათი 4.9. ORCA1 და ARCA2 დეტექტორების მიერ გაზომილი ატმოსფერული მიუონების ინტეგრირებული ნაკადის დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე (წითელი წერტილები). სისტემატური ცდომილებები წარმოდგენილია გრაფიკზე წერტილების გარშემო ღია წითელი არის სახით. ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ბუგაევის მოდელი, შესაბამისი ცდომილებებით (ნაცრისფერი არე) წარმოდგენილია შავი წყვეტილი ხაზით. ANTARES ექსპერიმენტის შედეგები ნაჩვენებია ლურჯი წერტილებით

(სისტემატური ცდომილებები - ღია ლურჯი არე). გრაფიკზე ასევე ნაჩვენებია სტატისტიკური ცდომილებები, თუმცა შეუმჩნეველია სიმცირის გამო.

ნაკადის სიღრმეზე დამოკიდებულება შესაძლოა გამოითვალოს ანალიზურად კუთხური ინტეგრებით. გამოთვლებისას განხილულია ვერტიკალური ნაკადი, რომელიც შესწორებულია კუთხური ინტეგრების ფაქტორით. გამოთვლის შედეგად კი მიიღება ნაკადის სიღრმეზე შემდეგი დამოკიდებულება:

$$I_{\mu}(d) = I_{\mu} \frac{(d, \theta=0)}{C(d)} = \frac{A_1 \cdot e^{A_2 \cdot d} + A_3 \cdot e^{A_4 \cdot d}}{B_1 + B_2 \cdot d} \quad (4.2)$$

სადაც:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1.31 \times 10^{-5} \text{ სმ}^{-2} \text{ წმ}^{-1} \text{ სრ}^{-1}, & A_2 &= -2.91 \times 10^{-3} \text{ მ}^{-1} \\ A_3 &= 7.31 \times 10^{-7} \text{ სმ}^{-2} \text{ წმ}^{-1} \text{ სრ}^{-1}, & A_4 &= -1.17 \times 10^{-3} \text{ მ}^{-1} \\ B_1 &= 4.16 \times 10^{-1} \text{ სრ}^{-1}, & B_2 &= 1.07 \times 10^{-4} \text{ მ}^{-1} \text{ სრ}^{-1}. \end{aligned}$$

A_i პარამეტრები განსაზღვრავენ ვერტიკალური ნაკადის სიღრმეზე დამოკიდებულებას, B_j პარამეტრები კი დაკავშირებულია ინტეგრებასთან. აღნიშნული პარამეტრიზაცია სამართლიანია მიუონებისათვის, რომელთა ენერგია აღემატება 1 გეეV-ს (Klimushin et al., 2001). ამ მოდელის ცდომილება წარმოადგენს $\pm 8\%$ -ს.

ANTARES და KM3NeT ექსპერიმენტების მონაცემების საფუძველზე გაზომილი ატმოსფერული მიუონების ნაკადი ზღვის სიღრმეში თანხვედრაშია მოდელით გამოთვლილ მოსალოდნელ შედეგთან. მიღებული შედეგები ადასტურებს KM3NeT ექსპერიმენტის ინოვაციური (მრავალფოტო-გამამრავლებლიანი) ოპტიკური მოდულების შესაძლებლობას გამოყენებული იყოს როგორც ინდივიდუალური დეტექტორი.

ნაშრომის ამ თავში წარმოდგენილია ატმოსფერული მიუონების ნაკადის სიღრმეზე დამოკიდებულების გაზომვა, რომელიც შესრულდა KM3NeT ORCA1 და ARCA2 დეტექტორებით მიღებულ მონაცემებზე. ამ პროცესის ფარგლებში ატმოსფერული მიუონების სიგნალის გამოსაყოფად გამოყენებულია ოპტიკურ მოდულებზე ფოტოგამამრავლებლების თანხვედრათა რაოდენობები (მრავლობითობა), რომელიც შეესაბამება 8 და მეტ მრავლობითობას. სწორედ

ამ პირობის არჩევისას დომინირებს ატმოსფერული მიუონების სიგნალი ფონთან შედარებით. ასევე განხილულია ^{40}K დაშლების სიგნალებზე დაფუძნებული კალიბრაციის პროცედურა. მიუონების გაბომილი ნაკადი შესაბამისობაშია თეორიულ მოდელთან, რაც მიუთითებს ოპტიკური მოდულების გამართულად მუშაობასა და თანამშრომლობაში გამოყენებული კომპუტერული უზრუნველყოფის (სიმულაციების) ექსპერიმენტთან თანხვედრაზე.

5. შეჯამება და დასკვნა

სადოქტორო ნაშრომი “ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის ექსპერიმენტ KM3NeT-ის სანყის ეტაპზე” დაფუძნებულია კვლევაზე, რომელიც ჩატარდა საერთაშორისო KM3NeT ექსპერიმენტის ფარგლებში. ექსპერიმენტი მშენებარე სტადიაშია და აღნიშნული ნაშრომის მიზანს წარმოადგენდა სანყის ეტაპზე დეტექტორის რამდენიმე ხაზისგან მიღებული მონაცემების ანალიზი და ატმოსფერული მიუონების ნაკადის გაზომვა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში.

სადისერტაციო ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია KM3NeT ექსპერიმენტის სამეცნიერო მიზნები, რაც ძირითადად გულისხმობს, მაღალი ენერგიების ნეიტრინული ასტრონომიასა და ნეიტრინოს თვისებების შესწავლას.

დისერტაციის მეორე თავში განხილულია KM3NeT დეტექტორის მუშაობის პრინციპი, პროექტის არსებული მდგომარეობა და მისი ინოვაციური მრავალსენსორიანი ოპტიკური მოდული.

დისერტაციის ფარგლებში KM3NeT ექსპერიმენტის სანყისი მონაცემების ანალიზის მიზნით, თსუ მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტში შეიქმნა KM3NeT კომპუტერული ცენტრი. KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის სადგური ასევე განთავსდა საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპუტერული ქსელების ასოციაციის (გრენა) კომპუტერულ ცენტრში. ნაშრომში მოყვანილი კვლევების ძირითადი ნაწილი შესრულებულია დისერტაციის ფარგლებში შექმნილ აღნიშნულ ცენტრებში. KM3NeT ექსპერიმენტის კომპუტინგის მოდელი, მონაცემთა მიღება და ოპტიკური მოდულების მახასიათებლების კვლევის შედეგები მოცემულია ნაშრომის მესამე თავში.

სადისერტაციო ნაშრომის მეოთხე თავში წამოდგენილია KM3NeT დეტექტორის სანყისი მონაცემებიდან ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში. ORCA და ARCA დეტექტორების შესაბამისად ერთი და ორი ხაზის ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენებით ხმელთაშუა ზღვაში - 2232–3386 მეტრ სიღრმეზე გაზომილია ატმოსფერული მიუონების ნაკადი. მიღებული ატმოსფერული მიუონების ნაკადის ზღვის სიღრმეზე დამოკიდებულება თანხვედრაშია ANTARES ექსპერიმენტის შედეგთან და კარგად აღიწერება არსებული თეორიული მოდელით.

სადოქტორო ნაშრომის ფარგლებში თსუ მაღალი ენერგიების ფიზიკის ინსტიტუტში ჩატარებული KM3NeT ექსპერიმენტის სანყისი ეტაპის მონაცემების ანალიზი ადასტურებს KM3NeT პროექტში გამოყენებული ინოვაციური მეთოდების მართებულობას.

სადისერტაციო ნაშრომი განხორციელდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის (SRNSF FR-18-1268 და SRNSF FR-22-13708) გრანტების, ამავე ფონდისა და ფოლკსვაგენის ფონდის (VolkswagenStiftung) საერთო გრანტის (93 562 & #04/48) ფინანსური მხარდაჭერით.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Adrián-Martínez, S., Ageron, M., Aharonian, F., Aiello, S., Albert, A., Ameli, F., Anassontzis, E., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anton, G., Ardid, M., Avgitas, T., Barbarino, G., Barbarito, E., Baret, B., Barrios-Martí, J., Belhorma, B., Belias, A., ... Zúñiga, J. (2016). *Letter of Intent for KM3NeT 2.0*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1601.07459>
- Ageron, M., Aiello, S., Ameli, F., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anton, G., Ardid, M., Aublin, J., Bagatelas, C., Barbarino, G., Baret, B., Pree, S. B. D., Belias, A., Berbee, E., Van Den Berg, A. M., Bertin, V., Van Beveren, V., Biagi, S., ... Zúñiga, J. (2020). Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth measured with the first KM3NeT detection units. *The European Physical Journal C*, 80(2), 99. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7629-z>
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytráček, R., ... Zschesche, D. (2003). Geant4—A simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Aguilar, J. A., Al Samarai, I., Albert, A., Anghinolfi, M., Anton, G., Anvar, S., Ardid, M., Assis Jesus, A. C., Astraatmadja, T., & Aubert, J.-J. (2010). Measurement of the atmospheric muon flux with a 4GeV threshold in the ANTARES neutrino telescope. *Astroparticle Physics*, 33(2), 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.12.002>
- Aiello, S., Akrame, S. E., Ameli, F., Anassontzis, E. G., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anton, G., Ardid, M., Aublin, J., Avgitas, T., Baars, M., Bagatelas, C., Barbarino, G., Baret, B., Barrios-Martí, J., Belias, A., Berbee, E., Berg, A. V. D., ... Zúñiga, J. (2018).

- Characterisation of the Hamamatsu photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope. *Journal of Instrumentation*, 13(05), P05035–P05035.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05035>
- Aiello, S., Albert, A., Alshamsi, M., Alves Garre, S., Aly, Z., Ambrosone, A., Ameli, F., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anguita, M., Ardid, M., Ardid, S., Aublin, J., Avgitas, T., Bagatelas, C., Bailly-Salins, L., Baret, B., Basegmez Du Pree, S., ... Zywucka, N. (2022). The KM3NeT multi-PMT optical module. *Journal of Instrumentation*, 17(07), P07038. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/07/P07038>
- Aiello, S., Albert, A., Garre, S. A., Aly, Z., Ambrosone, A., Ameli, F., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anguita, M., Anton, G., Ardid, M., Ardid, S., Aublin, J., Bagatelas, C., Baret, B., Pree, S. B. du, Bendahman, M., Benfenati, F., ... Zywucka, N. (2022). Determining the Neutrino Mass Ordering and Oscillation Parameters with KM3NeT/ORCA. *The European Physical Journal C*, 82(1), 26.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09893-0>
- Aiello, S., Albert, A., Garre, S. A., Aly, Z., Ameli, F., Anassontzis, E. G., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anguita, M., Anton, G., Ardid, M., Aublin, J., Bagatelas, C., Bakker, R., Barbarino, G., Baret, B., Pree, S. B. D., Bendahman, M., ... Zywucka, N. (2020). Deep-sea deployment of the KM3NeT neutrino telescope detection units by self-unrolling. *Journal of Instrumentation*, 15(11), P11027–P11027.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/11/P11027>
- Albert, A., André, M., Anghinolfi, M., Anton, G., Ardid, M., Aubert, J.-J., Aublin, J., Avgitas, T., Baret, B., Barrios-Martí, J., Basa, S., Belhorma, B., Bertin, V., Biagi, S., Bormuth, R., Boumaaza, J., Bourret, S., Bouwhuis, M. C., Brânzaș, H., ... Zúñiga, J. (2018). Long-term monitoring of the ANTARES optical module efficiencies using ^{40}K decays in sea water: The ANTARES Collaboration. *The European Physical Journal C*, 78(8), 669. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6132-2>
- ANTARES Collaboration. (1999). *A Deep Sea Telescope for High Energy Neutrinos* (arXiv:astro-ph/9907432). arXiv. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9907432>

- ANTARES Collaboration. (2011). ANTARES: The first undersea neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 656(1), 11–38.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.103>
- Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Band, D. L., Barbiellini, G., Bartelt, J., Bastieri, D., Baughman, B. M., Bechtol, K., Bédérède, D., Bellardi, F., Bellazzini, R., Berenji, B., Bignami, G. F., ... Ziegler, M. (2009). THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE *FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE* MISSION. *The Astrophysical Journal*, 697(2), 1071–1102.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071>
- Belolaptikov, I. A., Bezrukov, L. B., Borisovets, B. A., Budnev, N. M., Bugaev, E. V., Chensky, A. G., Danilchenko, I. A., Djilkibaev, J.-A. M., Dobrynin, V. I., Domogatsky, G. V., Donskych, L. A., Doroshenko, A. A., Dudkin, G. N., Egorov, V. Y., Fialkovsky, S. V., Garus, A. A., Gaponenko, A., Golikov, A. V., Gress, O. A., ... Zurbanov, V. L. (1997). The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results. *Astroparticle Physics*, 7(3), 263–282. [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(97\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(97)00022-4)
- Bilenky, S. (2016). Neutrino oscillations: From an historical perspective to the present status. *Nuclear Physics B*, 908, 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.01.025>
- Brun et al. (1987). GEANT 3: User's guide Geant 3.10, Geant 3.11. *CERN*.
- Brun, R., & Rademakers, F. (1997). ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389(1–2), 81–86.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X)
- Bugaev, E. V., Misaki, A., Naumov, V. A., Sinegovskaya, T. S., Sinegovsky, S. I., & Takahashi, N. (1998). Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater. *Physical Review D*, 58(5), 054001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.054001>
- Carminati, G., Margiotta, A., & Spurio, M. (2008). *Atmospheric MUons from PArametric formulas: A fast GEnerator for neutrino telescopes (MUPAGE)*.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.0802.0562>

- Coniglione, R., Creusot, A., Di Palma, I., Guderian, D., Hofstaedt, J., Riccobene, G., Sánchez Losa, A., & KM3NeT Collaboration. (2019). KM3NeT Time Calibration. *Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2019)*, 868.
<https://doi.org/10.22323/1.358.0868>
- Evans, L., & Bryant, P. (2008). LHC Machine. *Journal of Instrumentation*, 3(08), S08001–S08001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001>
- Flykt, E. (2003). Smart ideas for large PMTs. *VLVnT 2003*.
- for the AMANDA Collaboration., & Silvestri, A. (2005). THE AMANDA NEUTRINO TELESCOPE. *International Journal of Modern Physics A*, 20(14), 3096–3098.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X05025838>
- Greisen, K. (1966). End to the Cosmic-Ray Spectrum? *Physical Review Letters*, 16(17), 748–750. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.748>
- Hirata, K., Kajita, T., Koshiba, M., Nakahata, M., Oyama, Y., Sato, N., Suzuki, A., Takita, M., Totsuka, Y., Kifune, T., Suda, T., Takahashi, K., Tanimori, T., Miyano, K., Yamada, M., Beier, E. W., Feldscher, L. R., Kim, S. B., Mann, A. K., ... Cortez, B. G. (1987). Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A. *Physical Review Letters*, 58(14), 1490–1493. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1490>
- Hofestädt, J. (2019). Computing in the KM3NeT Research Infrastructure. *EPJ Web of Conferences*, 207, 08001. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920708001>
- Hofestädt, J. (2020). Measuring the neutrino mass hierarchy with KM3NeT/ORCA. *Journal of Physics: Conference Series*, 1342(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012028>
- IceCube Collaboration*. (2013). Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. *Science*, 342(6161), 1242856. <https://doi.org/10.1126/science.1242856>
- Klimushin, S. I., Bugaev, E. V., & Sokalski, I. A. (2001). Parametrization of atmospheric muon angular flux underwater. *Physical Review D*, 64(1), 014016.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.014016>
- KM3NeT Collaboration, Adrián-Martínez, S., Ageron, M., Aharonian, F., Aiello, S., Albert, A., Ameli, F., Anassontzis, E. G., Androulakis, G. C., Anghinolfi, M., Anton, G., Anvar, S.,

- Ardid, M., Avgitas, T., Balasi, K., Band, H., Barbarino, G., Barbarito, E., Barbato, F., ... Zwart, A. (2016). The prototype detection unit of the KM3NeT detector. *The European Physical Journal C*, 76(2), 54. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3868-9>
- KM3NeT Collaboration, Aiello, S., Albert, A., Alshamsi, M., Garre, S. A., Aly, Z., Ambrosone, A., Ameli, F., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anguita, M., Ardid, M., Ardid, S., Aublin, J., Bagatelas, C., Baret, B., Pree, S. B. du, Bendahman, M., ... Zywucka, N. (2022). Implementation and first results of the KM3NeT real-time core-collapse supernova neutrino search. *The European Physical Journal C*, 82(4), 317. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10137-y>
- KM3NeT Collaboration, Aiello, S., Albert, A., Garre, S. A., Aly, Z., Ambrosone, A., Ameli, F., Andre, M., Androulakis, G., Anghinolfi, M., Anguita, M., Anton, G., Ardid, M., Ardid, S., Aublin, J., Bagatelas, C., Baret, B., Pree, S. B. du, Bendahman, M., ... Zywucka, N. (2021). The KM3NeT potential for the next core-collapse supernova observation with neutrinos. *The European Physical Journal C*, 81(5), 445. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09187-5>
- Lattes, C. M. G., Muirhead, H., Occhialini, G. P. S., & Powell, C. F. (1947). PROCESSES INVOLVING CHARGED MESONS. *Nature*, 159(4047), 694–697. <https://doi.org/10.1038/159694a0>
- Melis, K., Heijboer, A., De Jong, M., & KM3NeT Collaboration. (2017). KM3NeT/ARCA Event Reconstruction Algorithms. *Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2017)*, 950. <https://doi.org/10.22323/1.301.0950>
- Melis, K. & KM3NeT Collaboration. (2017). In-Situ Calibration of KM3NeT. *Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2017)*, 1059. <https://doi.org/10.22323/1.301.1059>
- Neddermeyer, S. H., & Anderson, C. D. (1937). Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles. *Physical Review*, 51(10), 884–886. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.884>
- Papalashvili, G., Shanidze, R., & KM3NeT Collaboration. (2022). The KM3NeT project and Tier2 computing at Tbilisi State University. *Proceedings of RDP Online PhD School and*

- Workshop “Aspects of Symmetry” — PoS(Regio2021), 006.
<https://doi.org/10.22323/1.412.0006>
- Particle Data Group, Workman, R. L., Burkert, V. D., Crede, V., Klempt, E., Thoma, U., Tiator, L., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., AMSLER, C., Antonelli, M., Aschenauer, E. C., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, S., Barnett, R. M., Baudis, L., Bauer, C. W., ... Zyla, P. A. (2022). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(8), 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>
- Pukhov, A., Boos, E., Dubinin, M., Edneral, V., Ilyin, V., Kovalenko, D., Kryukov, A., Savrin, V., Shichanin, S., & Semenov, A. (2000). *CompHEP - a package for evaluation of Feynman diagrams and integration over multi-particle phase space. User's manual for version 33* (arXiv:hep-ph/9908288). arXiv. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9908288>
- Riccobene, G., Capone, A., & collaboration, the N. (2007). Deep seawater inherent optical properties in the Southern Ionian Sea. *Astroparticle Physics*, 27(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2006.08.006>
- Sjöstrand, T., Mrenna, S., & Skands, P. (2008). A brief introduction to PYTHIA 8.1. *Computer Physics Communications*, 178(11), 852–867. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.01.036>
- Stanev, T. (2010). Cosmic ray showers. In T. Stanev, *High Energy Cosmic Rays* (pp. 175–221). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85148-6_8
- Tamm, I. E., & Frank, I. M. (1967). Coherent visible radiation of fast electrons passing through matter. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 93(10), 388–393.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0093.196710o.0388>
- Wakely, S. P., & Horan, D. (2008). *TeVcat: An online catalog for Very High Energy Gamma-Ray Astronomy*. 3, 1341–1344.
- Watson, A. A. (2014). High-energy cosmic rays and the Greisen–Zatsepin–Kuz'min effect. *Reports on Progress in Physics*, 77(3), 036901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/3/036901>
- Yukawa, H. (1935). On the Interaction of Elementary Particles. I *. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1, 1–10. <https://doi.org/10.1143/PTPS.1.1>

**სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში გამოქვეყნებული
სამეცნიერო ნაშრომების ჩამონათვალი:**

1) The KM3NeT multi-PMT optical module,

S. Aiello, ..., **G. Papalashvili**, ..., R. Shanidze, ... Journal of Instrumentation,
Volume 17, July 2022

DOI: 10.1088/1748-0221/17/07/P07038

**2) Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth
measured with the first KM3NeT detection units,**

M. Ageron, ..., **G. Papalashvili** , ..., R. Shanidze , ... The European Physical
Journal C volume 80, Article number: 99 (2020),

DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7629-z

3) The KM3NeT project and Tier2 computing at Tbilisi State University,

G. Papalashvili, R. Shanidze, KM3NeT Collaboration,

Proceedings of RDP Online PhD School and Workshop “Aspects of Symmetry”
— PoS(Regio2021), 006

DOI: 10.22323/1.412.0006

დანართები

დანართი 1: KM3NeT ექსპერიმენტის მონაცემთა სტრუქტურა

KM3NeT თანამშრომლობაში ექსპერიმენტული და მოდელირებული მონაცემებისთვის გამოიყენება საერთო სტრუქტურა, რომელიც ეფუძნება ნაწილაკების ფიზიკაში გამოყენებული ROOT კომპიუტერული პროგრამის კლასებს. რეკონსტრუირებული შემთხვევები ინახება aanet ფორმატში. aanet წარმოადგენს KM3NeT კოლაბორაციაში შექმნილ მონაცემთა სტრუქტურასა და მისი ანალიზისთვის საჭირო კლასებსა და მეთოდებს. სწორედ aanet ფორმატის ფაილების ანალიზით ტარდება ძირითადი ფიზიკური კვლევები. aanet ფორმატში გამოყენებულია ROOT-იდან აღებული C++ პროგრამირების ენის კლასები, თუმცა მათი ანალიზი შესაძლებელია Python პროგრამირების ენის გამოყენებითაც. ქვემოთ განხილულია aanet ფორმატში შენახული ORCA4 დეტექტორის ექსპერიმენტული მონაცემების ამოკითხვის მაგალითი. აღნიშნული მაგალითი შესრულებულია თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის KM3NeT Tier-2 კომპიუტინგის სერვერზე განთავსებულ JupyterHub გარემოში, რისთვისაც გამოყენებულია Python პროგრამირების ენა.

პირველ რიგში ხდება ROOT-ისა და aanet-ის (aa) ჩატვირთვა და ხშირად გამოყენებული კლასების შემოტანა (სურათი 1)

```
import aa, ROOT
from ROOT import EventFile, dump, Det, TH1D, gPad
```

სურათი 1. მონაცემთა წასაკითხად საჭირო კლასების ჩატვირთვა

აღებულია KM3NeT ORCA4-ის რეკონსტრუირებული ექსპერიმენტული ფაილი და მასში შემავალი პირველი შემთხვევა (event):

```
file = "/home/papalashvili/datav6.0.jorca.rec.aanet.00007000.root"
f = EventFile(file)
evt=f.get_event(0)
```

სურათი 2. მონაცემთა ფაილიდან პირველი შემთხვევის აღება

KM3NeT შემთხვევაში (evt) შემავალი მთავარი ნარმოდგენილია სურათზე 3.

```
print(evt)
```

```
Evt: id=1 run_id=7777 #hits=44 #mc_hits=0 #trks=50 #mc_trks=0
```

სურათი 3. შემთხვევაში შემავალი მთავარი ნევრები

იმავე შემთხვევაში შემავალი ნევრები და მათი მნიშვნელობები (სურათი 4):

```
-----
type          name          value
-----
vector<double>  usr          0 entries
vector<string>  usr_names    0 entries
TObject*       any
int            id            1
int            det_id       44
int            mc_id        0
int            run_id       7000
int            mc_run_id    0
int            frame_index  164
ULong64_t      trigger_mask  22
ULong64_t      trigger_counter  0
unsigned int    overlays     6
TTimeStamp     t            2019-12-28 06:00:16
vector<Hit>     hits         59 entries
vector<Trk>     trks         50 entries
vector<double>  w            0 entries
vector<double>  w2list      0 entries
vector<double>  w3list      0 entries
TTimeStamp     mc_event_time  1970-01-01 00:00:00
double         mc_t         0
vector<Hit>     mc_hits     0 entries
vector<Trk>     mc_trks     0 entries
TString        comment     [cannot print]
int            index       0
int            flags       0
-----
```

სურათი 4. შემთხვევაში შემავალი ნევრები და მათი მნიშვნელობები.

შემთხვევის ძირითადი ნევრები: Id - შემთხვევის ნომერი, det_id - დეტექტორის კოდი (44 შეესაბამება ORCA4 კონფიგურაციას), run_id - ფაილის ნომერი, t - შემთხვევის დასაწყისის დრო.

როგორც სურათზე 4 ჩანს, ამ შემთხვევაში არის 59 სიგნალი (ჰიტი) და მათზე დაფუძნებით რეკონსტრუირებული 50 ნაწილაკი (ტრეკი). სურათი 5-ზე წარმოდგენილია ერთ-ერთი ჰიტის პარამეტრები.

type	name	value
int	id	0
int	dom_id	806451572
unsigned int	channel_id	22
unsigned int	tdc	23951569
unsigned int	tot	22
ULong64_t	trig	0
int	pmt_id	13189
double	t	2.41593e+07
double	a	0.752486
Vec	pos	Vec:464.3 565.1 79.292
Vec	dir	Vec:0 0 -1
int	type	0
int	origin	0
unsigned int	pattern_flags	0

სურათი 5. შემთხვევაში ერთ-ერთი ჰიტის პარამეტრები.

სურ. 5-ზე წარმოდგენილი ძირითადი პარამეტრები: id - რიგითი ნომერი; dom_id - ოპტიკური მოდულის უნიკალური ნომერი; channel_id - ოპტიკურ მოდულში ფოტოგამამრავლებლის რიგითი ნომერი; tot - სიგნალის ხანგრძლივობა, trig - სიდიდე თუ განსხვებულია 0-ისგან, მან მონაწილეობა მიიღო შემთხვევის ტრიგერირებაში; pmt_id - ფოტოგამამრავლებლის უნიკალური კოდი; t - დრო; a - ამპლიტუდა (იზომება ფოტოელექტრონებში); pos - პოზიცია; dir - მიმართულება.

როგორც აღინიშნა, შემთხვევაში რეკონსტრუირებულია 50 ნაწილაკი (ტრეკი). ისინი შემთხვევაში დალაგებულია სწორად აღდგენის ალბათობის, სხვანაირად - აღდგენის ხარისხის მიხედვით. სურათზე 6 წარმოდგენილია პირველი ტრეკის პარამეტრები. ძირითადი პარამეტრებია: id - ნომერი; pos - პოზიცია; dir - მიმართულება; t - დრო; E - ენერგია [გეე], lik - ტრეკის აღდგენის “ხარისხი”;

```
dump(evt.trks[0])
```

type	name	value
vector<double>	usr	0 entries
vector<string>	usr_names	0 entries
TObject*	any	
int	id	1
Vec	pos	Vec:438.302 600.631 198.678
Vec	dir	Vec:0.263154 -0.648703 -0.714097
double	t	2.41592e+07
double	E	7.23729
double	len	0
double	lik	55.3405
int	type	0
int	rec_type	4000
vector<int>	rec_stages	6 entries
int	status	0
int	mother_id	-1
vector<double>	fitinf	17 entries
vector<int>	hit_ids	0 entries
vector<double>	error_matrix	0 entries
string	comment	

სურათი 6. შემთხვევაში “საუკეთესო” ტრეკის პარამეტრები.

დანართი 2: KM3NeT დეტექტორის კომპუტერული მოდელი

KM3NeT დეტექტორის კომპუტერული მოდელი განხილულია ARCA2 კონფიგურაციის მაგალითზე. მოდელში შემავალი პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 1. პირველ სვეტში მოცემულია ოპტიკური მოდულის უნიკალური ნომერი, რომელიც ცხრანიშნაა. იმავე სტრიქონში მოცემულია აღნიშნული ოპტიკური მოდულის დეტექციის ერთეულის ნომერი, დეტექციის ერთეულზე განლაგების სართული, მოდულში არსებული ფოტოგამამრავლებლების რაოდენობა. ოპტიკური მოდულის სტრიქონის შემდეგ, წარმოდგენილია ინდივიდუალური ფოტოგამამრავლებლის აღნიშვნელი უნიკალური კოდი, მისი

კოორდინატები, და X, Y, და Z ღერძებთან შედგენილი კუთხის კოსინუსის მნიშვნელობა.

KM3NeT ARCA2 დეტექტორის კოორდინატები და სიღრმე:

UTM WGS84 33N 587600 4016800 -3450 მ

DOM ID	DU-ს ნომერი	სართული	PMT-ების რაოდენობა			
PTM ID	X	Y	Z	cos(x)	cos(y)	cos(z)
808992603	1	1	31			
1838	122.66	112.48363	65.281	0	-0.83185	0.555
4944	122.4689	112.65	65.229	-0.9555	0	0.295
4945	122.56445	112.4845	65.229	-0.47775	-0.82748	0.295
5048	122.75555	112.4845	65.229	0.47775	-0.82748	0.295
3317	122.80408	112.56681	65.281	0.7204	-0.41593	0.555
4946	122.51592	112.56681	65.281	-0.7204	-0.41593	0.555
4263	122.8511	112.65	65.229	0.9555	0	0.295
1837	122.51592	112.73319	65.281	-0.7204	0.41593	0.555
3307	122.80408	112.73319	65.281	0.7204	0.41593	0.555
1839	122.66	112.81637	65.281	0	0.83185	0.555
1841	122.75555	112.8155	65.229	0.47775	0.82748	0.295
4943	122.56445	112.8155	65.229	-0.47775	0.82748	0.295
7738	122.66	112.8411	65.111	0	0.9555	-0.295
7724	122.74319	112.79408	65.059	0.41593	0.7204	-0.555
4272	122.66	112.75536	65	0	0.52678	-0.85
7718	122.8255	112.74555	65.111	0.82748	0.47775	-0.295
4271	122.4945	112.74555	65.111	-0.82748	0.47775	-0.295
4281	122.57681	112.79408	65.059	-0.41593	0.7204	-0.555
7712	122.56876	112.70268	65	-0.45621	0.26339	-0.85
7729	122.75124	112.70268	65	0.45621	0.26339	-0.85
1752	122.49363	112.65	65.059	-0.83185	0	-0.555
4269	122.82637	112.65	65.059	0.83185	0	-0.555
1754	122.66	112.65	64.97	0	0	-1
4264	122.8255	112.55445	65.111	0.82748	-0.47775	-0.295
7720	122.66	112.54464	65	0	-0.52678	-0.85
7740	122.75124	112.59732	65	0.45621	-0.26339	-0.85
7711	122.56876	112.59732	65	-0.45621	-0.26339	-0.85
7716	122.4945	112.55445	65.111	-0.82748	-0.47775	-0.295
1753	122.57681	112.50592	65.059	-0.41593	-0.7204	-0.555
7737	122.74319	112.50592	65.059	0.41593	-0.7204	-0.555
7730	122.66	112.4589	65.111	0	-0.9555	-0.295
808974928	1	2	31			
1746	122.66	112.48363	103.301	0	-0.83185	0.555
7631	122.4689	112.65	103.249	-0.9555	0	0.295
7623	122.56445	112.4845	103.249	-0.47775	-0.82748	0.295
7622	122.75555	112.4845	103.249	0.47775	-0.82748	0.295
7634	122.80408	112.56681	103.301	0.7204	-0.41593	0.555
7627	122.51592	112.56681	103.301	-0.7204	-0.41593	0.555
7633	122.8511	112.65	103.249	0.9555	0	0.295

7632	122.51592	112.73319	103.301	-0.7204	0.41593	0.555
4279	122.80408	112.73319	103.301	0.7204	0.41593	0.555
7640	122.66	112.81637	103.301	0	0.83185	0.555
7635	122.75555	112.8155	103.249	0.47775	0.82748	0.295
4284	122.56445	112.8155	103.249	-0.47775	0.82748	0.295
4966	122.66	112.8411	103.131	0	0.9555	-0.295
4958	122.74319	112.79408	103.079	0.41593	0.7204	-0.555
4955	122.66	112.75536	103.02	0	0.52678	-0.85
4976	122.8255	112.74555	103.131	0.82748	0.47775	-0.295
1755	122.4945	112.74555	103.131	-0.82748	0.47775	-0.295
4959	122.57681	112.79408	103.079	-0.41593	0.7204	-0.555
4970	122.56876	112.70268	103.02	-0.45621	0.26339	-0.85
4979	122.75124	112.70268	103.02	0.45621	0.26339	-0.85
4971	122.49363	112.65	103.079	-0.83185	0	-0.555
4972	122.82637	112.65	103.079	0.83185	0	-0.555
4957	122.66	112.65	102.99	0	0	-1
4964	122.8255	112.55445	103.131	0.82748	-0.47775	-0.295
6436	122.66	112.54464	103.02	0	-0.52678	-0.85
6204	122.75124	112.59732	103.02	0.45621	-0.26339	-0.85
4975	122.56876	112.59732	103.02	-0.45621	-0.26339	-0.85
6205	122.4945	112.55445	103.131	-0.82748	-0.47775	-0.295
4324	122.57681	112.50592	103.079	-0.41593	-0.7204	-0.555
4325	122.74319	112.50592	103.079	0.41593	-0.7204	-0.555
7626	122.66	112.4589	103.131	0	-0.9555	-0.295
808995481	1	3	31			
1758	122.66	112.48363	141.151	0	-0.83185	0.555
4969	122.4689	112.65	141.099	-0.9555	0	0.295
4978	122.56445	112.4845	141.099	-0.47775	-0.82748	0.295
4953	122.75555	112.4845	141.099	0.47775	-0.82748	0.295
4968	122.80408	112.56681	141.151	0.7204	-0.41593	0.555
4973	122.51592	112.56681	141.151	-0.7204	-0.41593	0.555
2486	122.8511	112.65	141.099	0.9555	0	0.295
2482	122.51592	112.73319	141.151	-0.7204	0.41593	0.555
7714	122.80408	112.73319	141.151	0.7204	0.41593	0.555
4980	122.66	112.81637	141.151	0	0.83185	0.555
4977	122.75555	112.8155	141.099	0.47775	0.82748	0.295
7715	122.56445	112.8155	141.099	-0.47775	0.82748	0.295
4941	122.66	112.8411	140.981	0	0.9555	-0.295
4940	122.74319	112.79408	140.929	0.41593	0.7204	-0.555
4933	122.66	112.75536	140.87	0	0.52678	-0.85
4930	122.8255	112.74555	140.981	0.82748	0.47775	-0.295
4925	122.4945	112.74555	140.981	-0.82748	0.47775	-0.295
4932	122.57681	112.79408	140.929	-0.41593	0.7204	-0.555
4929	122.56876	112.70268	140.87	-0.45621	0.26339	-0.85
4924	122.75124	112.70268	140.87	0.45621	0.26339	-0.85
1831	122.49363	112.65	140.929	-0.83185	0	-0.555
4942	122.82637	112.65	140.929	0.83185	0	-0.555
4936	122.66	112.65	140.84	0	0	-1
4931	122.8255	112.55445	140.981	0.82748	-0.47775	-0.295
4935	122.66	112.54464	140.87	0	-0.52678	-0.85
4928	122.75124	112.59732	140.87	0.45621	-0.26339	-0.85
4938	122.56876	112.59732	140.87	-0.45621	-0.26339	-0.85
1832	122.4945	112.55445	140.981	-0.82748	-0.47775	-0.295
4939	122.57681	112.50592	140.929	-0.41593	-0.7204	-0.555

4937	122.74319	112.50592	140.929	0.41593	-0.7204	-0.555
4948	122.66	112.4589	140.981	0	-0.9555	-0.295
808966287	1	4	31			
1748	122.66	112.48363	178.011	0	-0.83185	0.555
7638	122.4689	112.65	177.959	-0.9555	0	0.295
7639	122.56445	112.4845	177.959	-0.47775	-0.82748	0.295
7637	122.75555	112.4845	177.959	0.47775	-0.82748	0.295
4266	122.80408	112.56681	178.011	0.7204	-0.41593	0.555
4278	122.51592	112.56681	178.011	-0.7204	-0.41593	0.555
7641	122.8511	112.65	177.959	0.9555	0	0.295
7636	122.51592	112.73319	178.011	-0.7204	0.41593	0.555
4282	122.80408	112.73319	178.011	0.7204	0.41593	0.555
1747	122.66	112.81637	178.011	0	0.83185	0.555
7642	122.75555	112.8155	177.959	0.47775	0.82748	0.295
4290	122.56445	112.8155	177.959	-0.47775	0.82748	0.295
6285	122.66	112.8411	177.841	0	0.9555	-0.295
6288	122.74319	112.79408	177.789	0.41593	0.7204	-0.555
6298	122.66	112.75536	177.73	0	0.52678	-0.85
6299	122.8255	112.74555	177.841	0.82748	0.47775	-0.295
6278	122.4945	112.74555	177.841	-0.82748	0.47775	-0.295
6271	122.57681	112.79408	177.789	-0.41593	0.7204	-0.555
6287	122.56876	112.70268	177.73	-0.45621	0.26339	-0.85
6283	122.75124	112.70268	177.73	0.45621	0.26339	-0.85
5052	122.49363	112.65	177.789	-0.83185	0	-0.555
6272	122.82637	112.65	177.789	0.83185	0	-0.555
6291	122.66	112.65	177.7	0	0	-1
6281	122.8255	112.55445	177.841	0.82748	-0.47775	-0.295
7621	122.66	112.54464	177.73	0	-0.52678	-0.85
4285	122.75124	112.59732	177.73	0.45621	-0.26339	-0.85
6274	122.56876	112.59732	177.73	-0.45621	-0.26339	-0.85
4275	122.4945	112.55445	177.841	-0.82748	-0.47775	-0.295
1742	122.57681	112.50592	177.789	-0.41593	-0.7204	-0.555
6277	122.74319	112.50592	177.789	0.41593	-0.7204	-0.555
6473	122.66	112.4589	177.841	0	-0.9555	-0.295
808467569	1	5	31			
7628	122.66	112.48363	215.511	0	-0.83185	0.555
6257	122.4689	112.65	215.459	-0.9555	0	0.295
6253	122.56445	112.4845	215.459	-0.47775	-0.82748	0.295
7157	122.75555	112.4845	215.459	0.47775	-0.82748	0.295
6255	122.80408	112.56681	215.511	0.7204	-0.41593	0.555
6250	122.51592	112.56681	215.511	-0.7204	-0.41593	0.555
6268	122.8511	112.65	215.459	0.9555	0	0.295
6251	122.51592	112.73319	215.511	-0.7204	0.41593	0.555
6262	122.80408	112.73319	215.511	0.7204	0.41593	0.555
6261	122.66	112.81637	215.511	0	0.83185	0.555
6258	122.75555	112.8155	215.459	0.47775	0.82748	0.295
6263	122.56445	112.8155	215.459	-0.47775	0.82748	0.295
2484	122.66	112.8411	215.341	0	0.9555	-0.295
2477	122.74319	112.79408	215.289	0.41593	0.7204	-0.555
7285	122.66	112.75536	215.23	0	0.52678	-0.85
7281	122.8255	112.74555	215.341	0.82748	0.47775	-0.295
7283	122.4945	112.74555	215.341	-0.82748	0.47775	-0.295
7261	122.57681	112.79408	215.289	-0.41593	0.7204	-0.555
7262	122.56876	112.70268	215.23	-0.45621	0.26339	-0.85

7290	122.75124	112.70268	215.23	0.45621	0.26339	-0.85
7288	122.49363	112.65	215.289	-0.83185	0	-0.555
7278	122.82637	112.65	215.289	0.83185	0	-0.555
7265	122.66	112.65	215.2	0	0	-1
7269	122.8255	112.55445	215.341	0.82748	-0.47775	-0.295
7277	122.66	112.54464	215.23	0	-0.52678	-0.85
2461	122.75124	112.59732	215.23	0.45621	-0.26339	-0.85
2489	122.56876	112.59732	215.23	-0.45621	-0.26339	-0.85
2488	122.4945	112.55445	215.341	-0.82748	-0.47775	-0.295
2487	122.57681	112.50592	215.289	-0.41593	-0.7204	-0.555
7280	122.74319	112.50592	215.289	0.41593	-0.7204	-0.555
6680	122.66	112.4589	215.341	0	-0.9555	-0.295
808430036	1	6	31			
1648	122.66	112.48363	252.811	0	-0.83185	0.555
3828	122.4689	112.65	252.759	-0.9555	0	0.295
3821	122.56445	112.4845	252.759	-0.47775	-0.82748	0.295
2476	122.75555	112.4845	252.759	0.47775	-0.82748	0.295
3826	122.80408	112.56681	252.811	0.7204	-0.41593	0.555
7279	122.51592	112.56681	252.811	-0.7204	-0.41593	0.555
7272	122.8511	112.65	252.759	0.9555	0	0.295
1647	122.51592	112.73319	252.811	-0.7204	0.41593	0.555
3819	122.80408	112.73319	252.811	0.7204	0.41593	0.555
3822	122.66	112.81637	252.811	0	0.83185	0.555
2490	122.75555	112.8155	252.759	0.47775	0.82748	0.295
6052	122.56445	112.8155	252.759	-0.47775	0.82748	0.295
6264	122.66	112.8411	252.641	0	0.9555	-0.295
6249	122.74319	112.79408	252.589	0.41593	0.7204	-0.555
7156	122.66	112.75536	252.53	0	0.52678	-0.85
6267	122.8255	112.74555	252.641	0.82748	0.47775	-0.295
6256	122.4945	112.74555	252.641	-0.82748	0.47775	-0.295
7151	122.57681	112.79408	252.589	-0.41593	0.7204	-0.555
7152	122.56876	112.70268	252.53	-0.45621	0.26339	-0.85
7155	122.75124	112.70268	252.53	0.45621	0.26339	-0.85
7154	122.49363	112.65	252.589	-0.83185	0	-0.555
6203	122.82637	112.65	252.589	0.83185	0	-0.555
7158	122.66	112.65	252.5	0	0	-1
7159	122.8255	112.55445	252.641	0.82748	-0.47775	-0.295
7153	122.66	112.54464	252.53	0	-0.52678	-0.85
6207	122.75124	112.59732	252.53	0.45621	-0.26339	-0.85
4328	122.56876	112.59732	252.53	-0.45621	-0.26339	-0.85
4327	122.4945	112.55445	252.641	-0.82748	-0.47775	-0.295
7717	122.57681	112.50592	252.589	-0.41593	-0.7204	-0.555
7719	122.74319	112.50592	252.589	0.41593	-0.7204	-0.555
4954	122.66	112.4589	252.641	0	-0.9555	-0.295
808430571	1	7	31			
7723	122.66	112.48363	289.641	0	-0.83185	0.555
7713	122.4689	112.65	289.589	-0.9555	0	0.295
7727	122.56445	112.4845	289.589	-0.47775	-0.82748	0.295
7725	122.75555	112.4845	289.589	0.47775	-0.82748	0.295
1756	122.80408	112.56681	289.641	0.7204	-0.41593	0.555
4321	122.51592	112.56681	289.641	-0.7204	-0.41593	0.555
7726	122.8511	112.65	289.589	0.9555	0	0.295
7736	122.51592	112.73319	289.641	-0.7204	0.41593	0.555
4965	122.80408	112.73319	289.641	0.7204	0.41593	0.555

4962	122.66	112.81637	289.641	0	0.83185	0.555
4967	122.75555	112.8155	289.589	0.47775	0.82748	0.295
7734	122.56445	112.8155	289.589	-0.47775	0.82748	0.295
6478	122.66	112.8411	289.471	0	0.9555	-0.295
6279	122.74319	112.79408	289.419	0.41593	0.7204	-0.555
6280	122.66	112.75536	289.36	0	0.52678	-0.85
4595	122.8255	112.74555	289.471	0.82748	0.47775	-0.295
5042	122.4945	112.74555	289.471	-0.82748	0.47775	-0.295
3308	122.57681	112.79408	289.419	-0.41593	0.7204	-0.555
6292	122.56876	112.70268	289.36	-0.45621	0.26339	-0.85
6270	122.75124	112.70268	289.36	0.45621	0.26339	-0.85
6269	122.49363	112.65	289.419	-0.83185	0	-0.555
6259	122.82637	112.65	289.419	0.83185	0	-0.555
6290	122.66	112.65	289.33	0	0	-1
5044	122.8255	112.55445	289.471	0.82748	-0.47775	-0.295
6275	122.66	112.54464	289.36	0	-0.52678	-0.85
6295	122.75124	112.59732	289.36	0.45621	-0.26339	-0.85
5046	122.56876	112.59732	289.36	-0.45621	-0.26339	-0.85
6273	122.4945	112.55445	289.471	-0.82748	-0.47775	-0.295
6276	122.57681	112.50592	289.419	-0.41593	-0.7204	-0.555
4599	122.74319	112.50592	289.419	0.41593	-0.7204	-0.555
6266	122.66	112.4589	289.471	0	-0.9555	-0.295
808996420	1	8	31			
6739	122.66	112.48363	327.261	0	-0.83185	0.555
6744	122.4689	112.65	327.209	-0.9555	0	0.295
6735	122.56445	112.4845	327.209	-0.47775	-0.82748	0.295
6725	122.75555	112.4845	327.209	0.47775	-0.82748	0.295
6210	122.80408	112.56681	327.261	0.7204	-0.41593	0.555
6209	122.51592	112.56681	327.261	-0.7204	-0.41593	0.555
7171	122.8511	112.65	327.209	0.9555	0	0.295
5027	122.51592	112.73319	327.261	-0.7204	0.41593	0.555
7179	122.80408	112.73319	327.261	0.7204	0.41593	0.555
6476	122.66	112.81637	327.261	0	0.83185	0.555
4175	122.75555	112.8155	327.209	0.47775	0.82748	0.295
4179	122.56445	112.8155	327.209	-0.47775	0.82748	0.295
7268	122.66	112.8411	327.091	0	0.9555	-0.295
7271	122.74319	112.79408	327.039	0.41593	0.7204	-0.555
6677	122.66	112.75536	326.98	0	0.52678	-0.85
2485	122.8255	112.74555	327.091	0.82748	0.47775	-0.295
2098	122.4945	112.74555	327.091	-0.82748	0.47775	-0.295
6671	122.57681	112.79408	327.039	-0.41593	0.7204	-0.555
3834	122.56876	112.70268	326.98	-0.45621	0.26339	-0.85
939	122.75124	112.70268	326.98	0.45621	0.26339	-0.85
6059	122.49363	112.65	327.039	-0.83185	0	-0.555
6051	122.82637	112.65	327.039	0.83185	0	-0.555
2469	122.66	112.65	326.95	0	0	-1
2100	122.8255	112.55445	327.091	0.82748	-0.47775	-0.295
6732	122.66	112.54464	326.98	0	-0.52678	-0.85
2097	122.75124	112.59732	326.98	0.45621	-0.26339	-0.85
2099	122.56876	112.59732	326.98	-0.45621	-0.26339	-0.85
6666	122.4945	112.55445	327.091	-0.82748	-0.47775	-0.295
2094	122.57681	112.50592	327.039	-0.41593	-0.7204	-0.555
2462	122.74319	112.50592	327.039	0.41593	-0.7204	-0.555
2095	122.66	112.4589	327.091	0	-0.9555	-0.295

808987051	1	9	31			
680	122.66	112.48363	364.641	0	-0.83185	0.555
679	122.4689	112.65	364.589	-0.9555	0	0.295
664	122.56445	112.4845	364.589	-0.47775	-0.82748	0.295
672	122.75555	112.4845	364.589	0.47775	-0.82748	0.295
675	122.80408	112.56681	364.641	0.7204	-0.41593	0.555
1707	122.51592	112.56681	364.641	-0.7204	-0.41593	0.555
1428	122.8511	112.65	364.589	0.9555	0	0.295
1425	122.51592	112.73319	364.641	-0.7204	0.41593	0.555
4296	122.80408	112.73319	364.641	0.7204	0.41593	0.555
1427	122.66	112.81637	364.641	0	0.83185	0.555
1710	122.75555	112.8155	364.589	0.47775	0.82748	0.295
4131	122.56445	112.8155	364.589	-0.47775	0.82748	0.295
6689	122.66	112.8411	364.471	0	0.9555	-0.295
7273	122.74319	112.79408	364.419	0.41593	0.7204	-0.555
6684	122.66	112.75536	364.36	0	0.52678	-0.85
6690	122.8255	112.74555	364.471	0.82748	0.47775	-0.295
2569	122.4945	112.74555	364.471	-0.82748	0.47775	-0.295
1593	122.57681	112.79408	364.419	-0.41593	0.7204	-0.555
4365	122.56876	112.70268	364.36	-0.45621	0.26339	-0.85
2561	122.75124	112.70268	364.36	0.45621	0.26339	-0.85
3163	122.49363	112.65	364.419	-0.83185	0	-0.555
2572	122.82637	112.65	364.419	0.83185	0	-0.555
7267	122.66	112.65	364.33	0	0	-1
7274	122.8255	112.55445	364.471	0.82748	-0.47775	-0.295
6686	122.66	112.54464	364.36	0	-0.52678	-0.85
1594	122.75124	112.59732	364.36	0.45621	-0.26339	-0.85
1599	122.56876	112.59732	364.36	-0.45621	-0.26339	-0.85
6676	122.4945	112.55445	364.471	-0.82748	-0.47775	-0.295
1592	122.57681	112.50592	364.419	-0.41593	-0.7204	-0.555
6664	122.74319	112.50592	364.419	0.41593	-0.7204	-0.555
2577	122.66	112.4589	364.471	0	-0.9555	-0.295
808965918	1	10	31			
4028	122.66	112.48363	401.441	0	-0.83185	0.555
7412	122.4689	112.65	401.389	-0.9555	0	0.295
6875	122.56445	112.4845	401.389	-0.47775	-0.82748	0.295
3358	122.75555	112.4845	401.389	0.47775	-0.82748	0.295
4023	122.80408	112.56681	401.441	0.7204	-0.41593	0.555
4044	122.51592	112.56681	401.441	-0.7204	-0.41593	0.555
6874	122.8511	112.65	401.389	0.9555	0	0.295
6872	122.51592	112.73319	401.441	-0.7204	0.41593	0.555
6871	122.80408	112.73319	401.441	0.7204	0.41593	0.555
666	122.66	112.81637	401.441	0	0.83185	0.555
678	122.75555	112.8155	401.389	0.47775	0.82748	0.295
4055	122.56445	112.8155	401.389	-0.47775	0.82748	0.295
4045	122.66	112.8411	401.271	0	0.9555	-0.295
2775	122.74319	112.79408	401.219	0.41593	0.7204	-0.555
4033	122.66	112.75536	401.16	0	0.52678	-0.85
2772	122.8255	112.74555	401.271	0.82748	0.47775	-0.295
7434	122.4945	112.74555	401.271	-0.82748	0.47775	-0.295
4046	122.57681	112.79408	401.219	-0.41593	0.7204	-0.555
6879	122.56876	112.70268	401.16	-0.45621	0.26339	-0.85
6880	122.75124	112.70268	401.16	0.45621	0.26339	-0.85
6876	122.49363	112.65	401.219	-0.83185	0	-0.555

2776	122.82637	112.65	401.219	0.83185	0	-0.555
4034	122.66	112.65	401.13	0	0	-1
7411	122.8255	112.55445	401.271	0.82748	-0.47775	-0.295
6877	122.66	112.54464	401.16	0	-0.52678	-0.85
4110	122.75124	112.59732	401.16	0.45621	-0.26339	-0.85
2774	122.56876	112.59732	401.16	-0.45621	-0.26339	-0.85
4041	122.4945	112.55445	401.271	-0.82748	-0.47775	-0.295
4096	122.57681	112.50592	401.219	-0.41593	-0.7204	-0.555
6878	122.74319	112.50592	401.219	0.41593	-0.7204	-0.555
2785	122.66	112.4589	401.271	0	-0.9555	-0.295
808447091	1	11	31			
7735	122.66	112.48363	438.761	0	-0.83185	0.555
7731	122.4689	112.65	438.709	-0.9555	0	0.295
7733	122.56445	112.4845	438.709	-0.47775	-0.82748	0.295
7732	122.75555	112.4845	438.709	0.47775	-0.82748	0.295
7722	122.80408	112.56681	438.761	0.7204	-0.41593	0.555
4267	122.51592	112.56681	438.761	-0.7204	-0.41593	0.555
4323	122.8511	112.65	438.709	0.9555	0	0.295
4322	122.51592	112.73319	438.761	-0.7204	0.41593	0.555
4961	122.80408	112.73319	438.761	0.7204	0.41593	0.555
4960	122.66	112.81637	438.761	0	0.83185	0.555
7721	122.75555	112.8155	438.709	0.47775	0.82748	0.295
4330	122.56445	112.8155	438.709	-0.47775	0.82748	0.295
4303	122.66	112.8411	438.591	0	0.9555	-0.295
1440	122.74319	112.79408	438.539	0.41593	0.7204	-0.555
1373	122.66	112.75536	438.48	0	0.52678	-0.85
1372	122.8255	112.74555	438.591	0.82748	0.47775	-0.295
4298	122.4945	112.74555	438.591	-0.82748	0.47775	-0.295
1374	122.57681	112.79408	438.539	-0.41593	0.7204	-0.555
1430	122.56876	112.70268	438.48	-0.45621	0.26339	-0.85
1423	122.75124	112.70268	438.48	0.45621	0.26339	-0.85
1375	122.49363	112.65	438.539	-0.83185	0	-0.555
4291	122.82637	112.65	438.539	0.83185	0	-0.555
4299	122.66	112.65	438.45	0	0	-1
4297	122.8255	112.55445	438.591	0.82748	-0.47775	-0.295
1420	122.66	112.54464	438.48	0	-0.52678	-0.85
7797	122.75124	112.59732	438.48	0.45621	-0.26339	-0.85
1429	122.56876	112.59732	438.48	-0.45621	-0.26339	-0.85
4311	122.4945	112.55445	438.591	-0.82748	-0.47775	-0.295
4292	122.57681	112.50592	438.539	-0.41593	-0.7204	-0.555
4310	122.74319	112.50592	438.539	0.41593	-0.7204	-0.555
4305	122.66	112.4589	438.591	0	-0.9555	-0.295
808430449	1	12	31			
4105	122.66	112.48363	475.921	0	-0.83185	0.555
4026	122.4689	112.65	475.869	-0.9555	0	0.295
4156	122.56445	112.4845	475.869	-0.47775	-0.82748	0.295
4157	122.75555	112.4845	475.869	0.47775	-0.82748	0.295
5022	122.80408	112.56681	475.921	0.7204	-0.41593	0.555
4161	122.51592	112.56681	475.921	-0.7204	-0.41593	0.555
6896	122.8511	112.65	475.869	0.9555	0	0.295
4037	122.51592	112.73319	475.921	-0.7204	0.41593	0.555
5021	122.80408	112.73319	475.921	0.7204	0.41593	0.555
2783	122.66	112.81637	475.921	0	0.83185	0.555
7425	122.75555	112.8155	475.869	0.47775	0.82748	0.295

2777	122.56445	112.8155	475.869	-0.47775	0.82748	0.295
4024	122.66	112.8411	475.751	0	0.9555	-0.295
4029	122.74319	112.79408	475.699	0.41593	0.7204	-0.555
1770	122.66	112.75536	475.64	0	0.52678	-0.85
5023	122.8255	112.74555	475.751	0.82748	0.47775	-0.295
4103	122.4945	112.74555	475.751	-0.82748	0.47775	-0.295
4032	122.57681	112.79408	475.699	-0.41593	0.7204	-0.555
2784	122.56876	112.70268	475.64	-0.45621	0.26339	-0.85
4170	122.75124	112.70268	475.64	0.45621	0.26339	-0.85
4038	122.49363	112.65	475.699	-0.83185	0	-0.555
4035	122.82637	112.65	475.699	0.83185	0	-0.555
7187	122.66	112.65	475.61	0	0	-1
6472	122.8255	112.55445	475.751	0.82748	-0.47775	-0.295
4162	122.66	112.54464	475.64	0	-0.52678	-0.85
4104	122.75124	112.59732	475.64	0.45621	-0.26339	-0.85
6477	122.56876	112.59732	475.64	-0.45621	-0.26339	-0.85
4158	122.4945	112.55445	475.751	-0.82748	-0.47775	-0.295
4039	122.57681	112.50592	475.699	-0.41593	-0.7204	-0.555
4040	122.74319	112.50592	475.699	0.41593	-0.7204	-0.555
4095	122.66	112.4589	475.751	0	-0.9555	-0.295
808468365	1	13	31			
7022	122.66	112.48363	512.651	0	-0.83185	0.555
4138	122.4689	112.65	512.599	-0.9555	0	0.295
4136	122.56445	112.4845	512.599	-0.47775	-0.82748	0.295
4129	122.75555	112.4845	512.599	0.47775	-0.82748	0.295
4135	122.80408	112.56681	512.651	0.7204	-0.41593	0.555
7075	122.51592	112.56681	512.651	-0.7204	-0.41593	0.555
4133	122.8511	112.65	512.599	0.9555	0	0.295
4191	122.51592	112.73319	512.651	-0.7204	0.41593	0.555
4200	122.80408	112.73319	512.651	0.7204	0.41593	0.555
690	122.66	112.81637	512.651	0	0.83185	0.555
683	122.75555	112.8155	512.599	0.47775	0.82748	0.295
676	122.56445	112.8155	512.599	-0.47775	0.82748	0.295
1467	122.66	112.8411	512.481	0	0.9555	-0.295
7784	122.74319	112.79408	512.429	0.41593	0.7204	-0.555
7789	122.66	112.75536	512.37	0	0.52678	-0.85
7792	122.8255	112.74555	512.481	0.82748	0.47775	-0.295
4346	122.4945	112.74555	512.481	-0.82748	0.47775	-0.295
3462	122.57681	112.79408	512.429	-0.41593	0.7204	-0.555
1718	122.56876	112.70268	512.37	-0.45621	0.26339	-0.85
1736	122.75124	112.70268	512.37	0.45621	0.26339	-0.85
1762	122.49363	112.65	512.429	-0.83185	0	-0.555
6524	122.82637	112.65	512.429	0.83185	0	-0.555
1333	122.66	112.65	512.34	0	0	-1
7790	122.8255	112.55445	512.481	0.82748	-0.47775	-0.295
6923	122.66	112.54464	512.37	0	-0.52678	-0.85
6527	122.75124	112.59732	512.37	0.45621	-0.26339	-0.85
1763	122.56876	112.59732	512.37	-0.45621	-0.26339	-0.85
6346	122.4945	112.55445	512.481	-0.82748	-0.47775	-0.295
1830	122.57681	112.50592	512.429	-0.41593	-0.7204	-0.555
1540	122.74319	112.50592	512.429	0.41593	-0.7204	-0.555
1543	122.66	112.4589	512.481	0	-0.9555	-0.295
808987121	1	14	31			
6728	122.66	112.48363	550.091	0	-0.83185	0.555

1611	122.4689	112.65	550.039	-0.9555	0	0.295
3169	122.56445	112.4845	550.039	-0.47775	-0.82748	0.295
4360	122.75555	112.4845	550.039	0.47775	-0.82748	0.295
3160	122.80408	112.56681	550.091	0.7204	-0.41593	0.555
3155	122.51592	112.56681	550.091	-0.7204	-0.41593	0.555
3172	122.8511	112.65	550.039	0.9555	0	0.295
1620	122.51592	112.73319	550.091	-0.7204	0.41593	0.555
3170	122.80408	112.73319	550.091	0.7204	0.41593	0.555
3161	122.66	112.81637	550.091	0	0.83185	0.555
1612	122.75555	112.8155	550.039	0.47775	0.82748	0.295
3154	122.56445	112.8155	550.039	-0.47775	0.82748	0.295
780	122.66	112.8411	549.921	0	0.9555	-0.295
6730	122.74319	112.79408	549.869	0.41593	0.7204	-0.555
1313	122.66	112.75536	549.81	0	0.52678	-0.85
1312	122.8255	112.74555	549.921	0.82748	0.47775	-0.295
5185	122.4945	112.74555	549.921	-0.82748	0.47775	-0.295
6721	122.57681	112.79408	549.869	-0.41593	0.7204	-0.555
5176	122.56876	112.70268	549.81	-0.45621	0.26339	-0.85
4367	122.75124	112.70268	549.81	0.45621	0.26339	-0.85
1220	122.49363	112.65	549.869	-0.83185	0	-0.555
1215	122.82637	112.65	549.869	0.83185	0	-0.555
5186	122.66	112.65	549.78	0	0	-1
5970	122.8255	112.55445	549.921	0.82748	-0.47775	-0.295
1309	122.66	112.54464	549.81	0	-0.52678	-0.85
7176	122.75124	112.59732	549.81	0.45621	-0.26339	-0.85
6471	122.56876	112.59732	549.81	-0.45621	-0.26339	-0.85
7175	122.4945	112.55445	549.921	-0.82748	-0.47775	-0.295
7172	122.57681	112.50592	549.869	-0.41593	-0.7204	-0.555
3174	122.74319	112.50592	549.869	0.41593	-0.7204	-0.555
2563	122.66	112.4589	549.921	0	-0.9555	-0.295
808474231	1	15	31			
1480	122.66	112.48363	587.371	0	-0.83185	0.555
7043	122.4689	112.65	587.319	-0.9555	0	0.295
4686	122.56445	112.4845	587.319	-0.47775	-0.82748	0.295
1482	122.75555	112.4845	587.319	0.47775	-0.82748	0.295
4690	122.80408	112.56681	587.371	0.7204	-0.41593	0.555
6857	122.51592	112.56681	587.371	-0.7204	-0.41593	0.555
1473	122.8511	112.65	587.319	0.9555	0	0.295
7044	122.51592	112.73319	587.371	-0.7204	0.41593	0.555
7045	122.80408	112.73319	587.371	0.7204	0.41593	0.555
1472	122.66	112.81637	587.371	0	0.83185	0.555
7220	122.75555	112.8155	587.319	0.47775	0.82748	0.295
7228	122.56445	112.8155	587.319	-0.47775	0.82748	0.295
7010	122.66	112.8411	587.201	0	0.9555	-0.295
3403	122.74319	112.79408	587.149	0.41593	0.7204	-0.555
3410	122.66	112.75536	587.09	0	0.52678	-0.85
1460	122.8255	112.74555	587.201	0.82748	0.47775	-0.295
3407	122.4945	112.74555	587.201	-0.82748	0.47775	-0.295
3419	122.57681	112.79408	587.149	-0.41593	0.7204	-0.555
3368	122.56876	112.70268	587.09	-0.45621	0.26339	-0.85
3404	122.75124	112.70268	587.09	0.45621	0.26339	-0.85
3401	122.49363	112.65	587.149	-0.83185	0	-0.555
6420	122.82637	112.65	587.149	0.83185	0	-0.555
3391	122.66	112.65	587.06	0	0	-1

6961	122.8255	112.55445	587.201	0.82748	-0.47775	-0.295
6977	122.66	112.54464	587.09	0	-0.52678	-0.85
3408	122.75124	112.59732	587.09	0.45621	-0.26339	-0.85
3402	122.56876	112.59732	587.09	-0.45621	-0.26339	-0.85
1452	122.4945	112.55445	587.201	-0.82748	-0.47775	-0.295
1457	122.57681	112.50592	587.149	-0.41593	-0.7204	-0.555
1468	122.74319	112.50592	587.149	0.41593	-0.7204	-0.555
1458	122.66	112.4589	587.201	0	-0.9555	-0.295
809503299	1	16	31			
6738	122.66	112.48363	623.691	0	-0.83185	0.555
5179	122.4689	112.65	623.639	-0.9555	0	0.295
6724	122.56445	112.4845	623.639	-0.47775	-0.82748	0.295
1206	122.75555	112.4845	623.639	0.47775	-0.82748	0.295
5941	122.80408	112.56681	623.691	0.7204	-0.41593	0.555
5183	122.51592	112.56681	623.691	-0.7204	-0.41593	0.555
1316	122.8511	112.65	623.639	0.9555	0	0.295
5189	122.51592	112.73319	623.691	-0.7204	0.41593	0.555
1319	122.80408	112.73319	623.691	0.7204	0.41593	0.555
5174	122.66	112.81637	623.691	0	0.83185	0.555
6733	122.75555	112.8155	623.639	0.47775	0.82748	0.295
4176	122.56445	112.8155	623.639	-0.47775	0.82748	0.295
3168	122.66	112.8411	623.521	0	0.9555	-0.295
3156	122.74319	112.79408	623.469	0.41593	0.7204	-0.555
1615	122.66	112.75536	623.41	0	0.52678	-0.85
1619	122.8255	112.74555	623.521	0.82748	0.47775	-0.295
6734	122.4945	112.74555	623.521	-0.82748	0.47775	-0.295
1297	122.57681	112.79408	623.469	-0.41593	0.7204	-0.555
5175	122.56876	112.70268	623.41	-0.45621	0.26339	-0.85
1320	122.75124	112.70268	623.41	0.45621	0.26339	-0.85
1311	122.49363	112.65	623.469	-0.83185	0	-0.555
5171	122.82637	112.65	623.469	0.83185	0	-0.555
1614	122.66	112.65	623.38	0	0	-1
3151	122.8255	112.55445	623.521	0.82748	-0.47775	-0.295
3152	122.66	112.54464	623.41	0	-0.52678	-0.85
5178	122.75124	112.59732	623.41	0.45621	-0.26339	-0.85
5180	122.56876	112.59732	623.41	-0.45621	-0.26339	-0.85
1613	122.4945	112.55445	623.521	-0.82748	-0.47775	-0.295
1616	122.57681	112.50592	623.469	-0.41593	-0.7204	-0.555
5182	122.74319	112.50592	623.469	0.41593	-0.7204	-0.555
4022	122.66	112.4589	623.521	0	-0.9555	-0.295
808972586	1	17	31			
7681	122.66	112.48363	660.651	0	-0.83185	0.555
5630	122.4689	112.65	660.599	-0.9555	0	0.295
5622	122.56445	112.4845	660.599	-0.47775	-0.82748	0.295
5617	122.75555	112.4845	660.599	0.47775	-0.82748	0.295
6768	122.80408	112.56681	660.651	0.7204	-0.41593	0.555
1469	122.51592	112.56681	660.651	-0.7204	-0.41593	0.555
6777	122.8511	112.65	660.599	0.9555	0	0.295
7016	122.51592	112.73319	660.651	-0.7204	0.41593	0.555
6771	122.80408	112.73319	660.651	0.7204	0.41593	0.555
1462	122.66	112.81637	660.651	0	0.83185	0.555
1412	122.75555	112.8155	660.599	0.47775	0.82748	0.295
7690	122.56445	112.8155	660.599	-0.47775	0.82748	0.295
6776	122.66	112.8411	660.481	0	0.9555	-0.295

1470	122.74319	112.79408	660.429	0.41593	0.7204	-0.555
6773	122.66	112.75536	660.37	0	0.52678	-0.85
6765	122.8255	112.74555	660.481	0.82748	0.47775	-0.295
7015	122.4945	112.74555	660.481	-0.82748	0.47775	-0.295
7005	122.57681	112.79408	660.429	-0.41593	0.7204	-0.555
6772	122.56876	112.70268	660.37	-0.45621	0.26339	-0.85
6774	122.75124	112.70268	660.37	0.45621	0.26339	-0.85
7218	122.49363	112.65	660.429	-0.83185	0	-0.555
1463	122.82637	112.65	660.429	0.83185	0	-0.555
3363	122.66	112.65	660.34	0	0	-1
3459	122.8255	112.55445	660.481	0.82748	-0.47775	-0.295
6532	122.66	112.54464	660.37	0	-0.52678	-0.85
6859	122.75124	112.59732	660.37	0.45621	-0.26339	-0.85
1422	122.56876	112.59732	660.37	-0.45621	-0.26339	-0.85
6336	122.4945	112.55445	660.481	-0.82748	-0.47775	-0.295
6539	122.57681	112.50592	660.429	-0.41593	-0.7204	-0.555
7013	122.74319	112.50592	660.429	0.41593	-0.7204	-0.555
6775	122.66	112.4589	660.481	0	-0.9555	-0.295
808982574	1	18	31			
6767	122.66	112.48363	697.451	0	-0.83185	0.555
1464	122.4689	112.65	697.399	-0.9555	0	0.295
7214	122.56445	112.4845	697.399	-0.47775	-0.82748	0.295
7215	122.75555	112.4845	697.399	0.47775	-0.82748	0.295
6910	122.80408	112.56681	697.451	0.7204	-0.41593	0.555
6919	122.51592	112.56681	697.451	-0.7204	-0.41593	0.555
6769	122.8511	112.65	697.399	0.9555	0	0.295
7000	122.51592	112.73319	697.451	-0.7204	0.41593	0.555
6928	122.80408	112.73319	697.451	0.7204	0.41593	0.555
6929	122.66	112.81637	697.451	0	0.83185	0.555
6909	122.75555	112.8155	697.399	0.47775	0.82748	0.295
7211	122.56445	112.8155	697.399	-0.47775	0.82748	0.295
4309	122.66	112.8411	697.281	0	0.9555	-0.295
7693	122.74319	112.79408	697.229	0.41593	0.7204	-0.555
5057	122.66	112.75536	697.17	0	0.52678	-0.85
1417	122.8255	112.74555	697.281	0.82748	0.47775	-0.295
5627	122.4945	112.74555	697.281	-0.82748	0.47775	-0.295
5055	122.57681	112.79408	697.229	-0.41593	0.7204	-0.555
5626	122.56876	112.70268	697.17	-0.45621	0.26339	-0.85
1416	122.75124	112.70268	697.17	0.45621	0.26339	-0.85
4313	122.49363	112.65	697.229	-0.83185	0	-0.555
7708	122.82637	112.65	697.229	0.83185	0	-0.555
7707	122.66	112.65	697.14	0	0	-1
4319	122.8255	112.55445	697.281	0.82748	-0.47775	-0.295
7705	122.66	112.54464	697.17	0	-0.52678	-0.85
4312	122.75124	112.59732	697.17	0.45621	-0.26339	-0.85
3311	122.56876	112.59732	697.17	-0.45621	-0.26339	-0.85
7697	122.4945	112.55445	697.281	-0.82748	-0.47775	-0.295
5625	122.57681	112.50592	697.229	-0.41593	-0.7204	-0.555
5629	122.74319	112.50592	697.229	0.41593	-0.7204	-0.555
7696	122.66	112.4589	697.281	0	-0.9555	-0.295
808982559	2	1	31			
704	149.56	197.13363	64.001	0	-0.83185	0.555
6461	149.3689	197.3	63.949	-0.9555	0	0.295
713	149.46445	197.1345	63.949	-0.47775	-0.82748	0.295

709	149.65555	197.1345	63.949	0.47775	-0.82748	0.295
710	149.70408	197.21681	64.001	0.7204	-0.41593	0.555
705	149.41592	197.21681	64.001	-0.7204	-0.41593	0.555
6466	149.7511	197.3	63.949	0.9555	0	0.295
714	149.41592	197.38319	64.001	-0.7204	0.41593	0.555
691	149.70408	197.38319	64.001	0.7204	0.41593	0.555
4366	149.56	197.46637	64.001	0	0.83185	0.555
701	149.65555	197.4655	63.949	0.47775	0.82748	0.295
702	149.46445	197.4655	63.949	-0.47775	0.82748	0.295
7131	149.56	197.4911	63.831	0	0.9555	-0.295
1387	149.64319	197.44408	63.779	0.41593	0.7204	-0.555
1849	149.56	197.40536	63.72	0	0.52678	-0.85
7249	149.7255	197.39555	63.831	0.82748	0.47775	-0.295
5552	149.3945	197.39555	63.831	-0.82748	0.47775	-0.295
1396	149.47681	197.44408	63.779	-0.41593	0.7204	-0.555
1392	149.46876	197.35268	63.72	-0.45621	0.26339	-0.85
1385	149.65124	197.35268	63.72	0.45621	0.26339	-0.85
7257	149.39363	197.3	63.779	-0.83185	0	-0.555
1850	149.72637	197.3	63.779	0.83185	0	-0.555
7258	149.56	197.3	63.69	0	0	-1
1846	149.7255	197.20445	63.831	0.82748	-0.47775	-0.295
1393	149.56	197.19464	63.72	0	-0.52678	-0.85
4334	149.65124	197.24732	63.72	0.45621	-0.26339	-0.85
1843	149.46876	197.24732	63.72	-0.45621	-0.26339	-0.85
7135	149.3945	197.20445	63.831	-0.82748	-0.47775	-0.295
6347	149.47681	197.15592	63.779	-0.41593	-0.7204	-0.555
1408	149.64319	197.15592	63.779	0.41593	-0.7204	-0.555
7778	149.56	197.1089	63.831	0	-0.9555	-0.295
808451481	2	2	31			
8963	149.56	197.13363	102.021	0	-0.83185	0.555
3803	149.3689	197.3	101.969	-0.9555	0	0.295
959	149.46445	197.1345	101.969	-0.47775	-0.82748	0.295
2434	149.65555	197.1345	101.969	0.47775	-0.82748	0.295
3807	149.70408	197.21681	102.021	0.7204	-0.41593	0.555
4449	149.41592	197.21681	102.021	-0.7204	-0.41593	0.555
1895	149.7511	197.3	101.969	0.9555	0	0.295
2445	149.41592	197.38319	102.021	-0.7204	0.41593	0.555
1894	149.70408	197.38319	102.021	0.7204	0.41593	0.555
3805	149.56	197.46637	102.021	0	0.83185	0.555
3806	149.65555	197.4655	101.969	0.47775	0.82748	0.295
3800	149.46445	197.4655	101.969	-0.47775	0.82748	0.295
6540	149.56	197.4911	101.851	0	0.9555	-0.295
3451	149.64319	197.44408	101.799	0.41593	0.7204	-0.555
7038	149.56	197.40536	101.74	0	0.52678	-0.85
6911	149.7255	197.39555	101.851	0.82748	0.47775	-0.295
1738	149.3945	197.39555	101.851	-0.82748	0.47775	-0.295
3452	149.47681	197.44408	101.799	-0.41593	0.7204	-0.555
7035	149.46876	197.35268	101.74	-0.45621	0.26339	-0.85
7217	149.65124	197.35268	101.74	0.45621	0.26339	-0.85
1740	149.39363	197.3	101.799	-0.83185	0	-0.555
3365	149.72637	197.3	101.799	0.83185	0	-0.555
7776	149.56	197.3	101.71	0	0	-1
6852	149.7255	197.20445	101.851	0.82748	-0.47775	-0.295
1488	149.56	197.19464	101.74	0	-0.52678	-0.85

7800	149.65124	197.24732	101.74	0.45621	-0.26339	-0.85
7780	149.46876	197.24732	101.74	-0.45621	-0.26339	-0.85
7788	149.3945	197.20445	101.851	-0.82748	-0.47775	-0.295
6862	149.47681	197.15592	101.799	-0.41593	-0.7204	-0.555
7779	149.64319	197.15592	101.799	0.41593	-0.7204	-0.555
6991	149.56	197.1089	101.851	0	-0.9555	-0.295
808979223	2	3	31			
1726	149.56	197.13363	139.871	0	-0.83185	0.555
3450	149.3689	197.3	139.819	-0.9555	0	0.295
3443	149.46445	197.1345	139.819	-0.47775	-0.82748	0.295
1532	149.65555	197.1345	139.819	0.47775	-0.82748	0.295
6526	149.70408	197.21681	139.871	0.7204	-0.41593	0.555
6858	149.41592	197.21681	139.871	-0.7204	-0.41593	0.555
1728	149.7511	197.3	139.819	0.9555	0	0.295
3442	149.41592	197.38319	139.871	-0.7204	0.41593	0.555
6759	149.70408	197.38319	139.871	0.7204	0.41593	0.555
6751	149.56	197.46637	139.871	0	0.83185	0.555
6348	149.65555	197.4655	139.819	0.47775	0.82748	0.295
1737	149.46445	197.4655	139.819	-0.47775	0.82748	0.295
6528	149.56	197.4911	139.701	0	0.9555	-0.295
6529	149.64319	197.44408	139.649	0.41593	0.7204	-0.555
6537	149.56	197.40536	139.59	0	0.52678	-0.85
6533	149.7255	197.39555	139.701	0.82748	0.47775	-0.295
3406	149.3945	197.39555	139.701	-0.82748	0.47775	-0.295
1715	149.47681	197.44408	139.649	-0.41593	0.7204	-0.555
6967	149.46876	197.35268	139.59	-0.45621	0.26339	-0.85
3392	149.65124	197.35268	139.59	0.45621	0.26339	-0.85
6356	149.39363	197.3	139.649	-0.83185	0	-0.555
6966	149.72637	197.3	139.649	0.83185	0	-0.555
3425	149.56	197.3	139.56	0	0	-1
3432	149.7255	197.20445	139.701	0.82748	-0.47775	-0.295
3446	149.56	197.19464	139.59	0	-0.52678	-0.85
7787	149.65124	197.24732	139.59	0.45621	-0.26339	-0.85
7796	149.46876	197.24732	139.59	-0.45621	-0.26339	-0.85
6763	149.3945	197.20445	139.701	-0.82748	-0.47775	-0.295
6761	149.47681	197.15592	139.649	-0.41593	-0.7204	-0.555
6867	149.64319	197.15592	139.649	0.41593	-0.7204	-0.555
7774	149.56	197.1089	139.701	0	-0.9555	-0.295
808994625	2	4	31			
928	149.56	197.13363	176.731	0	-0.83185	0.555
1952	149.3689	197.3	176.679	-0.9555	0	0.295
903	149.46445	197.1345	176.679	-0.47775	-0.82748	0.295
8932	149.65555	197.1345	176.679	0.47775	-0.82748	0.295
10615	149.70408	197.21681	176.731	0.7204	-0.41593	0.555
3537	149.41592	197.21681	176.731	-0.7204	-0.41593	0.555
3540	149.7511	197.3	176.679	0.9555	0	0.295
911	149.41592	197.38319	176.731	-0.7204	0.41593	0.555
3538	149.70408	197.38319	176.731	0.7204	0.41593	0.555
1965	149.56	197.46637	176.731	0	0.83185	0.555
3534	149.65555	197.4655	176.679	0.47775	0.82748	0.295
3532	149.46445	197.4655	176.679	-0.47775	0.82748	0.295
3136	149.56	197.4911	176.561	0	0.9555	-0.295
3149	149.64319	197.44408	176.509	0.41593	0.7204	-0.555
3193	149.56	197.40536	176.45	0	0.52678	-0.85

4047	149.7255	197.39555	176.561	0.82748	0.47775	-0.295
3355	149.3945	197.39555	176.561	-0.82748	0.47775	-0.295
4092	149.47681	197.44408	176.509	-0.41593	0.7204	-0.555
3347	149.46876	197.35268	176.45	-0.45621	0.26339	-0.85
4048	149.65124	197.35268	176.45	0.45621	0.26339	-0.85
4101	149.39363	197.3	176.509	-0.83185	0	-0.555
3335	149.72637	197.3	176.509	0.83185	0	-0.555
4102	149.56	197.3	176.42	0	0	-1
4094	149.7255	197.20445	176.561	0.82748	-0.47775	-0.295
4651	149.56	197.19464	176.45	0	-0.52678	-0.85
4657	149.65124	197.24732	176.45	0.45621	-0.26339	-0.85
2779	149.46876	197.24732	176.45	-0.45621	-0.26339	-0.85
700	149.3945	197.20445	176.561	-0.82748	-0.47775	-0.295
4166	149.47681	197.15592	176.509	-0.41593	-0.7204	-0.555
3138	149.64319	197.15592	176.509	0.41593	-0.7204	-0.555
3195	149.56	197.1089	176.561	0	-0.9555	-0.295
808987120	2	5	31			
7747	149.56	197.13363	214.231	0	-0.83185	0.555
4254	149.3689	197.3	214.179	-0.9555	0	0.295
4250	149.46445	197.1345	214.179	-0.47775	-0.82748	0.295
1859	149.65555	197.1345	214.179	0.47775	-0.82748	0.295
7745	149.70408	197.21681	214.231	0.7204	-0.41593	0.555
7065	149.41592	197.21681	214.231	-0.7204	-0.41593	0.555
7741	149.7511	197.3	214.179	0.9555	0	0.295
7053	149.41592	197.38319	214.231	-0.7204	0.41593	0.555
6200	149.70408	197.38319	214.231	0.7204	0.41593	0.555
6308	149.56	197.46637	214.231	0	0.83185	0.555
7250	149.65555	197.4655	214.179	0.47775	0.82748	0.295
7072	149.46445	197.4655	214.179	-0.47775	0.82748	0.295
5614	149.56	197.4911	214.061	0	0.9555	-0.295
5615	149.64319	197.44408	214.009	0.41593	0.7204	-0.555
751	149.56	197.40536	213.95	0	0.52678	-0.85
7650	149.7255	197.39555	214.061	0.82748	0.47775	-0.295
5640	149.3945	197.39555	214.061	-0.82748	0.47775	-0.295
5635	149.47681	197.44408	214.009	-0.41593	0.7204	-0.555
5636	149.46876	197.35268	213.95	-0.45621	0.26339	-0.85
5612	149.65124	197.35268	213.95	0.45621	0.26339	-0.85
5634	149.39363	197.3	214.009	-0.83185	0	-0.555
6323	149.72637	197.3	214.009	0.83185	0	-0.555
6321	149.56	197.3	213.92	0	0	-1
4353	149.7255	197.20445	214.061	0.82748	-0.47775	-0.295
6327	149.56	197.19464	213.95	0	-0.52678	-0.85
4354	149.65124	197.24732	213.95	0.45621	-0.26339	-0.85
6328	149.46876	197.24732	213.95	-0.45621	-0.26339	-0.85
1445	149.3945	197.20445	214.061	-0.82748	-0.47775	-0.295
6329	149.47681	197.15592	214.009	-0.41593	-0.7204	-0.555
1442	149.64319	197.15592	214.009	0.41593	-0.7204	-0.555
1449	149.56	197.1089	214.061	0	-0.9555	-0.295
808976325	2	6	31			
5163	149.56	197.13363	251.531	0	-0.83185	0.555
5170	149.3689	197.3	251.479	-0.9555	0	0.295
1816	149.46445	197.1345	251.479	-0.47775	-0.82748	0.295
1819	149.65555	197.1345	251.479	0.47775	-0.82748	0.295
2504	149.70408	197.21681	251.531	0.7204	-0.41593	0.555

2511	149.41592	197.21681	251.531	-0.7204	-0.41593	0.555
7042	149.7511	197.3	251.479	0.9555	0	0.295
2497	149.41592	197.38319	251.531	-0.7204	0.41593	0.555
7041	149.70408	197.38319	251.531	0.7204	0.41593	0.555
736	149.56	197.46637	251.531	0	0.83185	0.555
742	149.65555	197.4655	251.479	0.47775	0.82748	0.295
740	149.46445	197.4655	251.479	-0.47775	0.82748	0.295
1345	149.56	197.4911	251.361	0	0.9555	-0.295
3467	149.64319	197.44408	251.309	0.41593	0.7204	-0.555
7783	149.56	197.40536	251.25	0	0.52678	-0.85
1343	149.7255	197.39555	251.361	0.82748	0.47775	-0.295
7781	149.3945	197.39555	251.361	-0.82748	0.47775	-0.295
7791	149.47681	197.44408	251.309	-0.41593	0.7204	-0.555
1519	149.46876	197.35268	251.25	-0.45621	0.26339	-0.85
7664	149.65124	197.35268	251.25	0.45621	0.26339	-0.85
7666	149.39363	197.3	251.309	-0.83185	0	-0.555
1546	149.72637	197.3	251.309	0.83185	0	-0.555
7658	149.56	197.3	251.22	0	0	-1
1531	149.7255	197.20445	251.361	0.82748	-0.47775	-0.295
1398	149.56	197.19464	251.25	0	-0.52678	-0.85
1514	149.65124	197.24732	251.25	0.45621	-0.26339	-0.85
3449	149.46876	197.24732	251.25	-0.45621	-0.26339	-0.85
1550	149.3945	197.20445	251.361	-0.82748	-0.47775	-0.295
1533	149.47681	197.15592	251.309	-0.41593	-0.7204	-0.555
1383	149.64319	197.15592	251.309	0.41593	-0.7204	-0.555
1403	149.56	197.1089	251.361	0	-0.9555	-0.295
809003766	2	7	31			
6930	149.56	197.13363	288.361	0	-0.83185	0.555
6912	149.3689	197.3	288.309	-0.9555	0	0.295
4685	149.46445	197.1345	288.309	-0.47775	-0.82748	0.295
3364	149.65555	197.1345	288.309	0.47775	-0.82748	0.295
7216	149.70408	197.21681	288.361	0.7204	-0.41593	0.555
6902	149.41592	197.21681	288.361	-0.7204	-0.41593	0.555
7229	149.7511	197.3	288.309	0.9555	0	0.295
6917	149.41592	197.38319	288.361	-0.7204	0.41593	0.555
6916	149.70408	197.38319	288.361	0.7204	0.41593	0.555
6926	149.56	197.46637	288.361	0	0.83185	0.555
6351	149.65555	197.4655	288.309	0.47775	0.82748	0.295
1727	149.46445	197.4655	288.309	-0.47775	0.82748	0.295
4722	149.56	197.4911	288.191	0	0.9555	-0.295
1773	149.64319	197.44408	288.139	0.41593	0.7204	-0.555
4184	149.56	197.40536	288.08	0	0.52678	-0.85
4730	149.7255	197.39555	288.191	0.82748	0.47775	-0.295
1774	149.3945	197.39555	288.191	-0.82748	0.47775	-0.295
1788	149.47681	197.44408	288.139	-0.41593	0.7204	-0.555
686	149.46876	197.35268	288.08	-0.45621	0.26339	-0.85
4197	149.65124	197.35268	288.08	0.45621	0.26339	-0.85
4715	149.39363	197.3	288.139	-0.83185	0	-0.555
4720	149.72637	197.3	288.139	0.83185	0	-0.555
1772	149.56	197.3	288.05	0	0	-1
4198	149.7255	197.20445	288.191	0.82748	-0.47775	-0.295
3137	149.56	197.19464	288.08	0	-0.52678	-0.85
4380	149.65124	197.24732	288.08	0.45621	-0.26339	-0.85
4164	149.46876	197.24732	288.08	-0.45621	-0.26339	-0.85

1790	149.3945	197.20445	288.191	-0.82748	-0.47775	-0.295
1779	149.47681	197.15592	288.139	-0.41593	-0.7204	-0.555
6359	149.64319	197.15592	288.139	0.41593	-0.7204	-0.555
4721	149.56	197.1089	288.191	0	-0.9555	-0.295
808961271	2	8	31			
2509	149.56	197.13363	325.981	0	-0.83185	0.555
2496	149.3689	197.3	325.929	-0.9555	0	0.295
5165	149.46445	197.1345	325.929	-0.47775	-0.82748	0.295
2510	149.65555	197.1345	325.929	0.47775	-0.82748	0.295
2492	149.70408	197.21681	325.981	0.7204	-0.41593	0.555
2494	149.41592	197.21681	325.981	-0.7204	-0.41593	0.555
6708	149.7511	197.3	325.929	0.9555	0	0.295
2508	149.41592	197.38319	325.981	-0.7204	0.41593	0.555
2500	149.70408	197.38319	325.981	0.7204	0.41593	0.555
6169	149.56	197.46637	325.981	0	0.83185	0.555
2503	149.65555	197.4655	325.929	0.47775	0.82748	0.295
2517	149.46445	197.4655	325.929	-0.47775	0.82748	0.295
1851	149.56	197.4911	325.811	0	0.9555	-0.295
1842	149.64319	197.44408	325.759	0.41593	0.7204	-0.555
1845	149.56	197.40536	325.7	0	0.52678	-0.85
7259	149.7255	197.39555	325.811	0.82748	0.47775	-0.295
7021	149.3945	197.39555	325.811	-0.82748	0.47775	-0.295
688	149.47681	197.44408	325.759	-0.41593	0.7204	-0.555
1784	149.46876	197.35268	325.7	-0.45621	0.26339	-0.85
4727	149.65124	197.35268	325.7	0.45621	0.26339	-0.85
1789	149.39363	197.3	325.759	-0.83185	0	-0.555
1771	149.72637	197.3	325.759	0.83185	0	-0.555
6781	149.56	197.3	325.67	0	0	-1
1777	149.7255	197.20445	325.811	0.82748	-0.47775	-0.295
6782	149.56	197.19464	325.7	0	-0.52678	-0.85
1778	149.65124	197.24732	325.7	0.45621	-0.26339	-0.85
4738	149.46876	197.24732	325.7	-0.45621	-0.26339	-0.85
4724	149.3945	197.20445	325.811	-0.82748	-0.47775	-0.295
4737	149.47681	197.15592	325.759	-0.41593	-0.7204	-0.555
4725	149.64319	197.15592	325.759	0.41593	-0.7204	-0.555
1780	149.56	197.1089	325.811	0	-0.9555	-0.295
808951763	2	9	31			
1433	149.56	197.13363	363.361	0	-0.83185	0.555
1431	149.3689	197.3	363.309	-0.9555	0	0.295
7771	149.46445	197.1345	363.309	-0.47775	-0.82748	0.295
6866	149.65555	197.1345	363.309	0.47775	-0.82748	0.295
6844	149.70408	197.21681	363.361	0.7204	-0.41593	0.555
1722	149.41592	197.21681	363.361	-0.7204	-0.41593	0.555
1491	149.7511	197.3	363.309	0.9555	0	0.295
7226	149.41592	197.38319	363.361	-0.7204	0.41593	0.555
1811	149.70408	197.38319	363.361	0.7204	0.41593	0.555
7036	149.56	197.46637	363.361	0	0.83185	0.555
7049	149.65555	197.4655	363.309	0.47775	0.82748	0.295
1432	149.46445	197.4655	363.309	-0.47775	0.82748	0.295
1489	149.56	197.4911	363.191	0	0.9555	-0.295
6854	149.64319	197.44408	363.139	0.41593	0.7204	-0.555
1481	149.56	197.40536	363.08	0	0.52678	-0.85
7032	149.7255	197.39555	363.191	0.82748	0.47775	-0.295
6842	149.3945	197.39555	363.191	-0.82748	0.47775	-0.295

7227	149.47681	197.44408	363.139	-0.41593	0.7204	-0.555
1471	149.46876	197.35268	363.08	-0.45621	0.26339	-0.85
1479	149.65124	197.35268	363.08	0.45621	0.26339	-0.85
1813	149.39363	197.3	363.139	-0.83185	0	-0.555
6901	149.72637	197.3	363.139	0.83185	0	-0.555
7222	149.56	197.3	363.05	0	0	-1
1478	149.7255	197.20445	363.191	0.82748	-0.47775	-0.295
7130	149.56	197.19464	363.08	0	-0.52678	-0.85
4343	149.65124	197.24732	363.08	0.45621	-0.26339	-0.85
6992	149.46876	197.24732	363.08	-0.45621	-0.26339	-0.85
6353	149.3945	197.20445	363.191	-0.82748	-0.47775	-0.295
5553	149.47681	197.15592	363.139	-0.41593	-0.7204	-0.555
5555	149.64319	197.15592	363.139	0.41593	-0.7204	-0.555
5558	149.56	197.1089	363.191	0	-0.9555	-0.295
808469410	2	10	31			
6534	149.56	197.13363	400.161	0	-0.83185	0.555
6536	149.3689	197.3	400.109	-0.9555	0	0.295
6922	149.46445	197.1345	400.109	-0.47775	-0.82748	0.295
1821	149.65555	197.1345	400.109	0.47775	-0.82748	0.295
1717	149.70408	197.21681	400.161	0.7204	-0.41593	0.555
6331	149.41592	197.21681	400.161	-0.7204	-0.41593	0.555
1759	149.7511	197.3	400.109	0.9555	0	0.295
6921	149.41592	197.38319	400.161	-0.7204	0.41593	0.555
6530	149.70408	197.38319	400.161	0.7204	0.41593	0.555
1716	149.56	197.46637	400.161	0	0.83185	0.555
1400	149.65555	197.4655	400.109	0.47775	0.82748	0.295
3454	149.46445	197.4655	400.109	-0.47775	0.82748	0.295
10566	149.56	197.4911	399.991	0	0.9555	-0.295
3087	149.64319	197.44408	399.939	0.41593	0.7204	-0.555
3081	149.56	197.40536	399.88	0	0.52678	-0.85
3082	149.7255	197.39555	399.991	0.82748	0.47775	-0.295
10561	149.3945	197.39555	399.991	-0.82748	0.47775	-0.295
10562	149.47681	197.44408	399.939	-0.41593	0.7204	-0.555
4563	149.46876	197.35268	399.88	-0.45621	0.26339	-0.85
3789	149.65124	197.35268	399.88	0.45621	0.26339	-0.85
6978	149.39363	197.3	399.939	-0.83185	0	-0.555
3078	149.72637	197.3	399.939	0.83185	0	-0.555
4590	149.56	197.3	399.85	0	0	-1
3086	149.7255	197.20445	399.991	0.82748	-0.47775	-0.295
1893	149.56	197.19464	399.88	0	-0.52678	-0.85
4448	149.65124	197.24732	399.88	0.45621	-0.26339	-0.85
1896	149.46876	197.24732	399.88	-0.45621	-0.26339	-0.85
1902	149.3945	197.20445	399.991	-0.82748	-0.47775	-0.295
3810	149.47681	197.15592	399.939	-0.41593	-0.7204	-0.555
2441	149.64319	197.15592	399.939	0.41593	-0.7204	-0.555
3791	149.56	197.1089	399.991	0	-0.9555	-0.295
808985313	2	11	31			
725	149.56	197.13363	437.481	0	-0.83185	0.555
746	149.3689	197.3	437.429	-0.9555	0	0.295
748	149.46445	197.1345	437.429	-0.47775	-0.82748	0.295
3207	149.65555	197.1345	437.429	0.47775	-0.82748	0.295
3143	149.70408	197.21681	437.481	0.7204	-0.41593	0.555
3187	149.41592	197.21681	437.481	-0.7204	-0.41593	0.555
3183	149.7511	197.3	437.429	0.9555	0	0.295

3145	149.41592	197.38319	437.481	-0.7204	0.41593	0.555
3203	149.70408	197.38319	437.481	0.7204	0.41593	0.555
3184	149.56	197.46637	437.481	0	0.83185	0.555
3191	149.65555	197.4655	437.429	0.47775	0.82748	0.295
1049	149.46445	197.4655	437.429	-0.47775	0.82748	0.295
8937	149.56	197.4911	437.311	0	0.9555	-0.295
8930	149.64319	197.44408	437.259	0.41593	0.7204	-0.555
8921	149.56	197.40536	437.2	0	0.52678	-0.85
8914	149.7255	197.39555	437.311	0.82748	0.47775	-0.295
8912	149.3945	197.39555	437.311	-0.82748	0.47775	-0.295
8928	149.47681	197.44408	437.259	-0.41593	0.7204	-0.555
1977	149.46876	197.35268	437.2	-0.45621	0.26339	-0.85
8929	149.65124	197.35268	437.2	0.45621	0.26339	-0.85
8920	149.39363	197.3	437.259	-0.83185	0	-0.555
8911	149.72637	197.3	437.259	0.83185	0	-0.555
1979	149.56	197.3	437.17	0	0	-1
1976	149.7255	197.20445	437.311	0.82748	-0.47775	-0.295
1978	149.56	197.19464	437.2	0	-0.52678	-0.85
1971	149.65124	197.24732	437.2	0.45621	-0.26339	-0.85
1972	149.46876	197.24732	437.2	-0.45621	-0.26339	-0.85
1980	149.3945	197.20445	437.311	-0.82748	-0.47775	-0.295
1973	149.47681	197.15592	437.259	-0.41593	-0.7204	-0.555
1975	149.64319	197.15592	437.259	0.41593	-0.7204	-0.555
1974	149.56	197.1089	437.311	0	-0.9555	-0.295
806472277	2	12	31			
6924	149.56	197.13363	474.641	0	-0.83185	0.555
3473	149.3689	197.3	474.589	-0.9555	0	0.295
3471	149.46445	197.1345	474.589	-0.47775	-0.82748	0.295
7782	149.65555	197.1345	474.589	0.47775	-0.82748	0.295
3466	149.70408	197.21681	474.641	0.7204	-0.41593	0.555
7772	149.41592	197.21681	474.641	-0.7204	-0.41593	0.555
3456	149.7511	197.3	474.589	0.9555	0	0.295
1824	149.41592	197.38319	474.641	-0.7204	0.41593	0.555
3464	149.70408	197.38319	474.641	0.7204	0.41593	0.555
6925	149.56	197.46637	474.641	0	0.83185	0.555
3463	149.65555	197.4655	474.589	0.47775	0.82748	0.295
3472	149.46445	197.4655	474.589	-0.47775	0.82748	0.295
1459	149.56	197.4911	474.471	0	0.9555	-0.295
7007	149.64319	197.44408	474.419	0.41593	0.7204	-0.555
6317	149.56	197.40536	474.36	0	0.52678	-0.85
6311	149.7255	197.39555	474.471	0.82748	0.47775	-0.295
7051	149.3945	197.39555	474.471	-0.82748	0.47775	-0.295
6310	149.47681	197.44408	474.419	-0.41593	0.7204	-0.555
7055	149.46876	197.35268	474.36	-0.45621	0.26339	-0.85
6325	149.65124	197.35268	474.36	0.45621	0.26339	-0.85
6316	149.39363	197.3	474.419	-0.83185	0	-0.555
1840	149.72637	197.3	474.419	0.83185	0	-0.555
4923	149.56	197.3	474.33	0	0	-1
7739	149.7255	197.20445	474.471	0.82748	-0.47775	-0.295
6433	149.56	197.19464	474.36	0	-0.52678	-0.85
1399	149.65124	197.24732	474.36	0.45621	-0.26339	-0.85
4927	149.46876	197.24732	474.36	-0.45621	-0.26339	-0.85
4335	149.3945	197.20445	474.471	-0.82748	-0.47775	-0.295
1853	149.47681	197.15592	474.419	-0.41593	-0.7204	-0.555

1397	149.64319	197.15592	474.419	0.41593	-0.7204	-0.555
1388	149.56	197.1089	474.471	0	-0.9555	-0.295
808963072	2	13	31			
5773	149.56	197.13363	511.371	0	-0.83185	0.555
10586	149.3689	197.3	511.319	-0.9555	0	0.295
5775	149.46445	197.1345	511.319	-0.47775	-0.82748	0.295
10578	149.65555	197.1345	511.319	0.47775	-0.82748	0.295
5766	149.70408	197.21681	511.371	0.7204	-0.41593	0.555
5780	149.41592	197.21681	511.371	-0.7204	-0.41593	0.555
5762	149.7511	197.3	511.319	0.9555	0	0.295
5776	149.41592	197.38319	511.371	-0.7204	0.41593	0.555
10563	149.70408	197.38319	511.371	0.7204	0.41593	0.555
5765	149.56	197.46637	511.371	0	0.83185	0.555
10590	149.65555	197.4655	511.319	0.47775	0.82748	0.295
5774	149.46445	197.4655	511.319	-0.47775	0.82748	0.295
4187	149.56	197.4911	511.201	0	0.9555	-0.295
677	149.64319	197.44408	511.149	0.41593	0.7204	-0.555
682	149.56	197.40536	511.09	0	0.52678	-0.85
6749	149.7255	197.39555	511.201	0.82748	0.47775	-0.295
4186	149.3945	197.39555	511.201	-0.82748	0.47775	-0.295
681	149.47681	197.44408	511.149	-0.41593	0.7204	-0.555
4195	149.46876	197.35268	511.09	-0.45621	0.26339	-0.85
689	149.65124	197.35268	511.09	0.45621	0.26339	-0.85
4199	149.39363	197.3	511.149	-0.83185	0	-0.555
4183	149.72637	197.3	511.149	0.83185	0	-0.555
4194	149.56	197.3	511.06	0	0	-1
4729	149.7255	197.20445	511.201	0.82748	-0.47775	-0.295
6214	149.56	197.19464	511.09	0	-0.52678	-0.85
4714	149.65124	197.24732	511.09	0.45621	-0.26339	-0.85
4712	149.46876	197.24732	511.09	-0.45621	-0.26339	-0.85
684	149.3945	197.20445	511.201	-0.82748	-0.47775	-0.295
4193	149.47681	197.15592	511.149	-0.41593	-0.7204	-0.555
4735	149.64319	197.15592	511.149	0.41593	-0.7204	-0.555
4713	149.56	197.1089	511.201	0	-0.9555	-0.295
806487207	2	14	31			
3396	149.56	197.13363	548.811	0	-0.83185	0.555
6364	149.3689	197.3	548.759	-0.9555	0	0.295
6378	149.46445	197.1345	548.759	-0.47775	-0.82748	0.295
6384	149.65555	197.1345	548.759	0.47775	-0.82748	0.295
6381	149.70408	197.21681	548.811	0.7204	-0.41593	0.555
6236	149.41592	197.21681	548.811	-0.7204	-0.41593	0.555
3399	149.7511	197.3	548.759	0.9555	0	0.295
6373	149.41592	197.38319	548.811	-0.7204	0.41593	0.555
6379	149.70408	197.38319	548.811	0.7204	0.41593	0.555
6387	149.56	197.46637	548.811	0	0.83185	0.555
3398	149.65555	197.4655	548.759	0.47775	0.82748	0.295
4446	149.46445	197.4655	548.759	-0.47775	0.82748	0.295
5763	149.56	197.4911	548.641	0	0.9555	-0.295
902	149.64319	197.44408	548.589	0.41593	0.7204	-0.555
11003	149.56	197.40536	548.53	0	0.52678	-0.85
10998	149.7255	197.39555	548.641	0.82748	0.47775	-0.295
11010	149.3945	197.39555	548.641	-0.82748	0.47775	-0.295
10997	149.47681	197.44408	548.589	-0.41593	0.7204	-0.555
10999	149.46876	197.35268	548.53	-0.45621	0.26339	-0.85

5761	149.65124	197.35268	548.53	0.45621	0.26339	-0.85
10564	149.39363	197.3	548.589	-0.83185	0	-0.555
904	149.72637	197.3	548.589	0.83185	0	-0.555
5771	149.56	197.3	548.5	0	0	-1
1951	149.7255	197.20445	548.641	0.82748	-0.47775	-0.295
3062	149.56	197.19464	548.53	0	-0.52678	-0.85
11008	149.65124	197.24732	548.53	0.45621	-0.26339	-0.85
3066	149.46876	197.24732	548.53	-0.45621	-0.26339	-0.85
10571	149.3945	197.20445	548.641	-0.82748	-0.47775	-0.295
3075	149.47681	197.15592	548.589	-0.41593	-0.7204	-0.555
8943	149.64319	197.15592	548.589	0.41593	-0.7204	-0.555
3068	149.56	197.1089	548.641	0	-0.9555	-0.295
808981888	2	15	31			
2501	149.56	197.13363	586.091	0	-0.83185	0.555
4347	149.3689	197.3	586.039	-0.9555	0	0.295
6161	149.46445	197.1345	586.039	-0.47775	-0.82748	0.295
6167	149.65555	197.1345	586.039	0.47775	-0.82748	0.295
5604	149.70408	197.21681	586.091	0.7204	-0.41593	0.555
6175	149.41592	197.21681	586.091	-0.7204	-0.41593	0.555
7024	149.7511	197.3	586.039	0.9555	0	0.295
6504	149.41592	197.38319	586.091	-0.7204	0.41593	0.555
6439	149.70408	197.38319	586.091	0.7204	0.41593	0.555
5581	149.56	197.46637	586.091	0	0.83185	0.555
7098	149.65555	197.4655	586.039	0.47775	0.82748	0.295
6166	149.46445	197.4655	586.039	-0.47775	0.82748	0.295
6388	149.56	197.4911	585.921	0	0.9555	-0.295
6375	149.64319	197.44408	585.869	0.41593	0.7204	-0.555
6371	149.56	197.40536	585.81	0	0.52678	-0.85
3400	149.7255	197.39555	585.921	0.82748	0.47775	-0.295
3397	149.3945	197.39555	585.921	-0.82748	0.47775	-0.295
6303	149.47681	197.44408	585.869	-0.41593	0.7204	-0.555
6362	149.46876	197.35268	585.81	-0.45621	0.26339	-0.85
6374	149.65124	197.35268	585.81	0.45621	0.26339	-0.85
6377	149.39363	197.3	585.869	-0.83185	0	-0.555
6386	149.72637	197.3	585.869	0.83185	0	-0.555
6305	149.56	197.3	585.78	0	0	-1
4293	149.7255	197.20445	585.921	0.82748	-0.47775	-0.295
3405	149.56	197.19464	585.81	0	-0.52678	-0.85
6380	149.65124	197.24732	585.81	0.45621	-0.26339	-0.85
6369	149.46876	197.24732	585.81	-0.45621	-0.26339	-0.85
6376	149.3945	197.20445	585.921	-0.82748	-0.47775	-0.295
6363	149.47681	197.15592	585.869	-0.41593	-0.7204	-0.555
6382	149.64319	197.15592	585.869	0.41593	-0.7204	-0.555
6365	149.56	197.1089	585.921	0	-0.9555	-0.295
809548782	2	16	31			
7799	149.56	197.13363	622.411	0	-0.83185	0.555
7688	149.3689	197.3	622.359	-0.9555	0	0.295
6762	149.46445	197.1345	622.359	-0.47775	-0.82748	0.295
1437	149.65555	197.1345	622.359	0.47775	-0.82748	0.295
6758	149.70408	197.21681	622.411	0.7204	-0.41593	0.555
6845	149.41592	197.21681	622.411	-0.7204	-0.41593	0.555
7777	149.7511	197.3	622.359	0.9555	0	0.295
3445	149.41592	197.38319	622.411	-0.7204	0.41593	0.555
6849	149.70408	197.38319	622.411	0.7204	0.41593	0.555

6850	149.56	197.46637	622.411	0	0.83185	0.555
7011	149.65555	197.4655	622.359	0.47775	0.82748	0.295
6846	149.46445	197.4655	622.359	-0.47775	0.82748	0.295
3804	149.56	197.4911	622.241	0	0.9555	-0.295
2437	149.64319	197.44408	622.189	0.41593	0.7204	-0.555
4583	149.56	197.40536	622.13	0	0.52678	-0.85
4564	149.7255	197.39555	622.241	0.82748	0.47775	-0.295
8970	149.3945	197.39555	622.241	-0.82748	0.47775	-0.295
6962	149.47681	197.44408	622.189	-0.41593	0.7204	-0.555
3076	149.46876	197.35268	622.13	-0.45621	0.26339	-0.85
7375	149.65124	197.35268	622.13	0.45621	0.26339	-0.85
3069	149.39363	197.3	622.189	-0.83185	0	-0.555
8964	149.72637	197.3	622.189	0.83185	0	-0.555
1335	149.56	197.3	622.1	0	0	-1
3479	149.7255	197.20445	622.241	0.82748	-0.47775	-0.295
3470	149.56	197.19464	622.13	0	-0.52678	-0.85
3461	149.65124	197.24732	622.13	0.45621	-0.26339	-0.85
3476	149.46876	197.24732	622.13	-0.45621	-0.26339	-0.85
3469	149.3945	197.20445	622.241	-0.82748	-0.47775	-0.295
3468	149.47681	197.15592	622.189	-0.41593	-0.7204	-0.555
3457	149.64319	197.15592	622.189	0.41593	-0.7204	-0.555
3458	149.56	197.1089	622.241	0	-0.9555	-0.295
808467131	2	17	31			
7052	149.56	197.13363	659.371	0	-0.83185	0.555
7056	149.3689	197.3	659.319	-0.9555	0	0.295
3478	149.46445	197.1345	659.319	-0.47775	-0.82748	0.295
3465	149.65555	197.1345	659.319	0.47775	-0.82748	0.295
6314	149.70408	197.21681	659.371	0.7204	-0.41593	0.555
6312	149.41592	197.21681	659.371	-0.7204	-0.41593	0.555
6315	149.7511	197.3	659.319	0.9555	0	0.295
6301	149.41592	197.38319	659.371	-0.7204	0.41593	0.555
1451	149.70408	197.38319	659.371	0.7204	0.41593	0.555
1450	149.56	197.46637	659.371	0	0.83185	0.555
6306	149.65555	197.4655	659.319	0.47775	0.82748	0.295
6927	149.46445	197.4655	659.319	-0.47775	0.82748	0.295
4416	149.56	197.4911	659.201	0	0.9555	-0.295
4411	149.64319	197.44408	659.149	0.41593	0.7204	-0.555
5318	149.56	197.40536	659.09	0	0.52678	-0.85
10544	149.7255	197.39555	659.201	0.82748	0.47775	-0.295
5319	149.3945	197.39555	659.201	-0.82748	0.47775	-0.295
1923	149.47681	197.44408	659.149	-0.41593	0.7204	-0.555
4362	149.46876	197.35268	659.09	-0.45621	0.26339	-0.85
5314	149.65124	197.35268	659.09	0.45621	0.26339	-0.85
10546	149.39363	197.3	659.149	-0.83185	0	-0.555
1933	149.72637	197.3	659.149	0.83185	0	-0.555
3543	149.56	197.3	659.06	0	0	-1
3546	149.7255	197.20445	659.201	0.82748	-0.47775	-0.295
10616	149.56	197.19464	659.09	0	-0.52678	-0.85
4441	149.65124	197.24732	659.09	0.45621	-0.26339	-0.85
1900	149.46876	197.24732	659.09	-0.45621	-0.26339	-0.85
1906	149.3945	197.20445	659.201	-0.82748	-0.47775	-0.295
4447	149.47681	197.15592	659.149	-0.41593	-0.7204	-0.555
5312	149.64319	197.15592	659.149	0.41593	-0.7204	-0.555
4426	149.56	197.1089	659.201	0	-0.9555	-0.295

808984760	2	18	31			
729	149.56	197.13363	696.171	0	-0.83185	0.555
730	149.3689	197.3	696.119	-0.9555	0	0.295
3202	149.46445	197.1345	696.119	-0.47775	-0.82748	0.295
3201	149.65555	197.1345	696.119	0.47775	-0.82748	0.295
738	149.70408	197.21681	696.171	0.7204	-0.41593	0.555
741	149.41592	197.21681	696.171	-0.7204	-0.41593	0.555
3181	149.7511	197.3	696.119	0.9555	0	0.295
3198	149.41592	197.38319	696.171	-0.7204	0.41593	0.555
3147	149.70408	197.38319	696.171	0.7204	0.41593	0.555
4373	149.56	197.46637	696.171	0	0.83185	0.555
724	149.65555	197.4655	696.119	0.47775	0.82748	0.295
723	149.46445	197.4655	696.119	-0.47775	0.82748	0.295
914	149.56	197.4911	696.001	0	0.9555	-0.295
8931	149.64319	197.44408	695.949	0.41593	0.7204	-0.555
1957	149.56	197.40536	695.89	0	0.52678	-0.85
1962	149.7255	197.39555	696.001	0.82748	0.47775	-0.295
5278	149.3945	197.39555	696.001	-0.82748	0.47775	-0.295
5650	149.47681	197.44408	695.949	-0.41593	0.7204	-0.555
3539	149.46876	197.35268	695.89	-0.45621	0.26339	-0.85
907	149.65124	197.35268	695.89	0.45621	0.26339	-0.85
3533	149.39363	197.3	695.949	-0.83185	0	-0.555
3535	149.72637	197.3	695.949	0.83185	0	-0.555
2516	149.56	197.3	695.86	0	0	-1
2518	149.7255	197.20445	696.001	0.82748	-0.47775	-0.295
2506	149.56	197.19464	695.89	0	-0.52678	-0.85
7243	149.65124	197.24732	695.89	0.45621	-0.26339	-0.85
2515	149.46876	197.24732	695.89	-0.45621	-0.26339	-0.85
7254	149.3945	197.20445	696.001	-0.82748	-0.47775	-0.295
7255	149.47681	197.15592	695.949	-0.41593	-0.7204	-0.555
1954	149.64319	197.15592	695.949	0.41593	-0.7204	-0.555
8935	149.56	197.1089	696.001	0	-0.9555	-0.295

ცხრილი 1. KM3NeT ARCA2 დეტექტორის განლაგების აღმწერი კომპიუტერული მოდელი