



დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამა
“ფიზიკა”

მოდული: ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკა
ნაწილაკების ექსპერიმენტული ფიზიკა



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

გოგიტა პაპალაშვილი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:
რევაზ შანიძე,
ფიზიკა-მათემატიკის
მეცნიერებათა დოქტორი,
ასოცირებული პროფესორი

Supported by the joint grant
of Volkswagen Foundation
and SRNSF

Ref. 93 562 & #04/48

SRNSF FR-18-1268

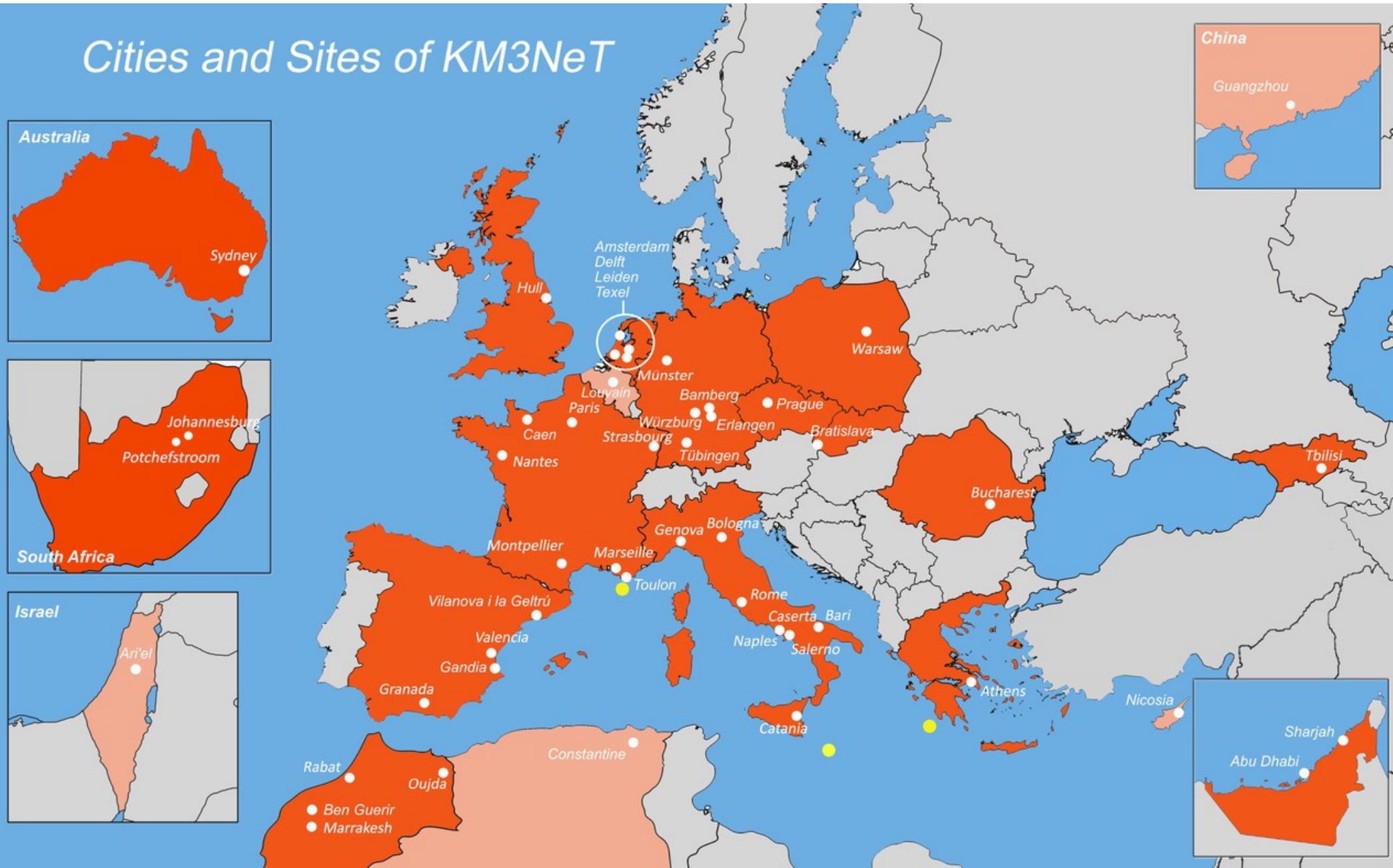
SRNSF FR-22-13708

მოსხენების (დისერტაციის) შინაარსი

- KM3NeT ექსპერიმენტი და მისი ოპტიკური მოდული
- მონაცემების მიღება და ანალიზი KM3NeT ექსპერიმენტში
- ატმოსფერული მიუონების ნაკადის აღდგენა ხმელთაშუა ზღვის სიღრმეში KM3NeT ოპტიკური მოდულების საშუალებით
- საერთაშორისო სამეცნიერო ღონისძიებებში მონაწილეობა
- გამოქვეყნებული პუბლიკაციები
- შეჯამება

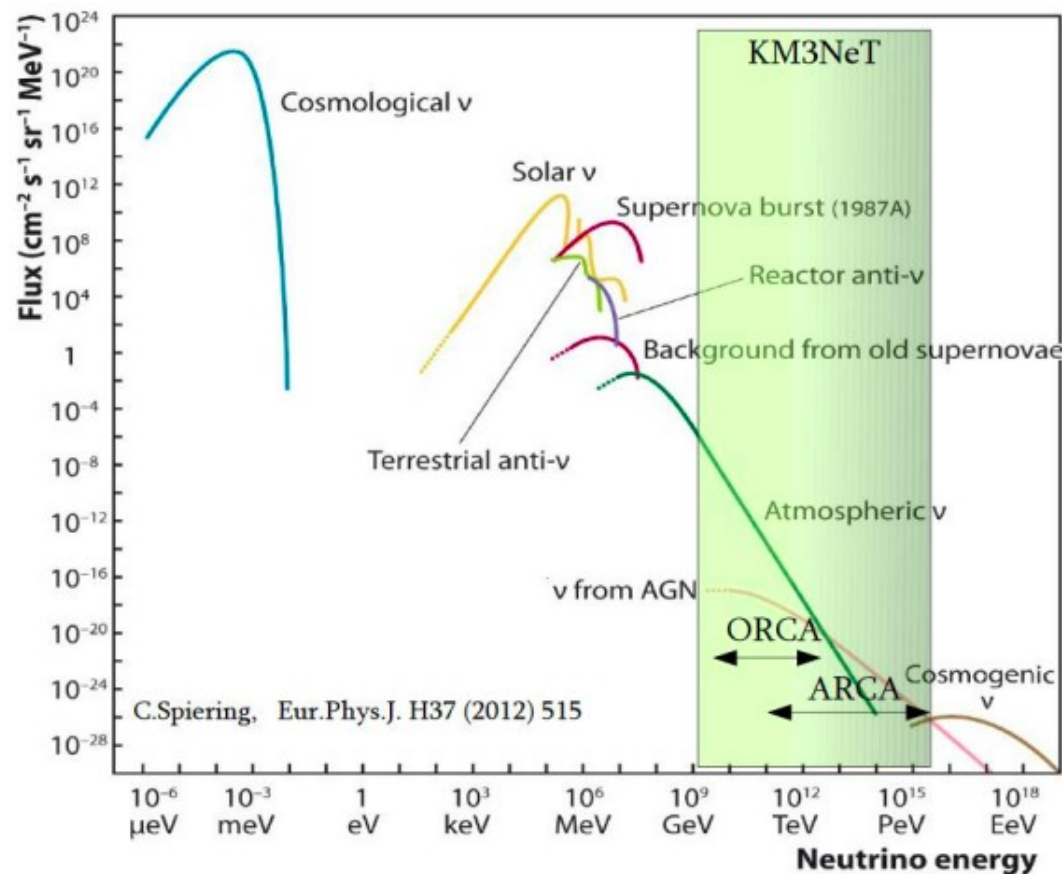
KM3NeT სამეცნიერო თანამშრომლობა

Cities and Sites of KM3NeT



KM3NeT სამეცნიერო მიზნები

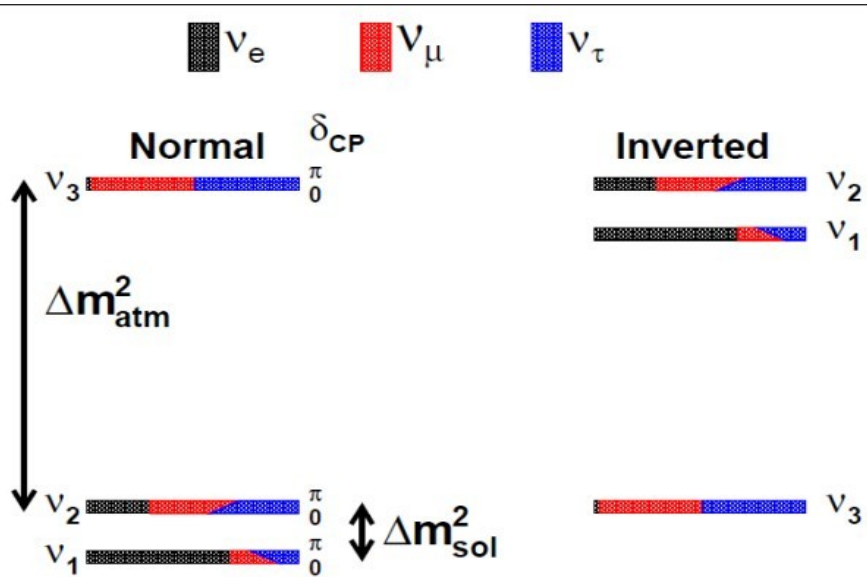
ნეიტრინოების წყაროები და მათი შესაბამისი ენერგიები



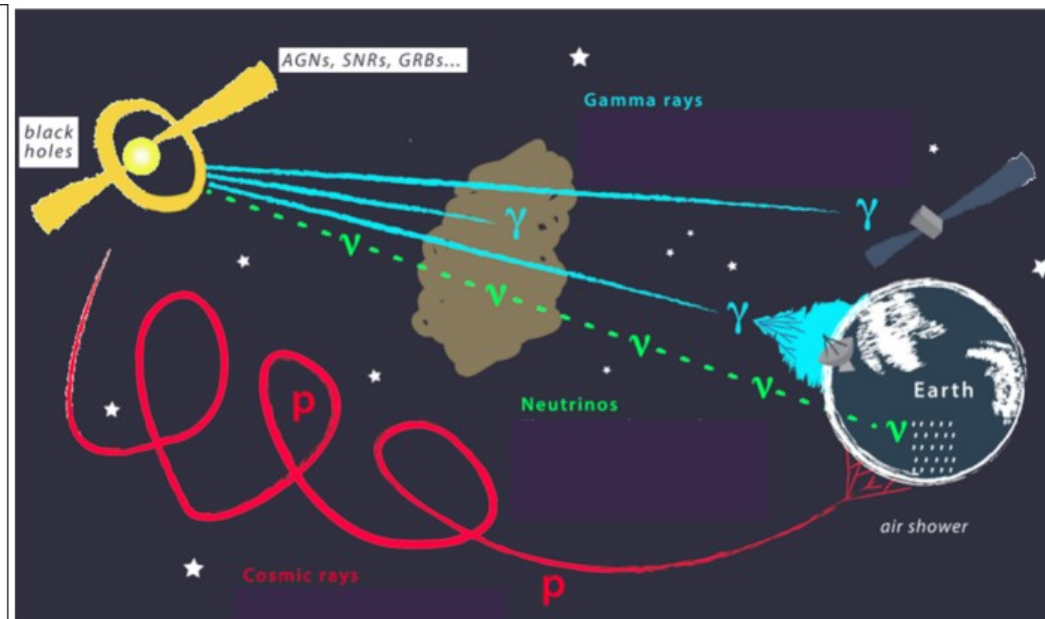
KM3NeT ექსპერიმენტი ოპტიმიზებულია გეგ-პეე ენერგიის დიაპაზონის ნეიტრინოების დაკვირვებისთვის, თუმცა შესაძლებელია სუპერნოვას ნეიტრინული შემთხვევების დამზერა მევ რიგის ნეიტრინოებისათვის

KM3NeT სამეცნიერო მიზნები

ნეიტრინოს ფიზიკა - KM3NeT/ORCA

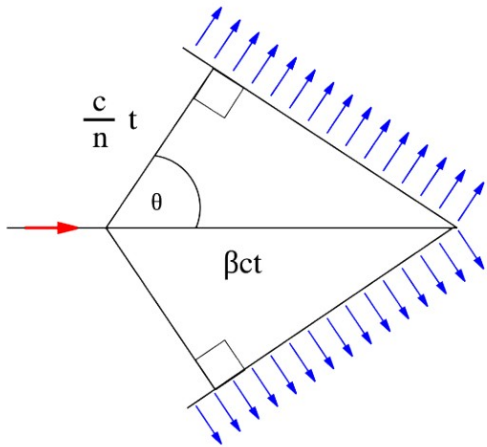


ნეიტრინული ასტროფიზიკა - KM3NeT/ARCA



KM3NeT ჩერენკოვის ტელესკოპი

ჩერენკოვის გამოსხივება



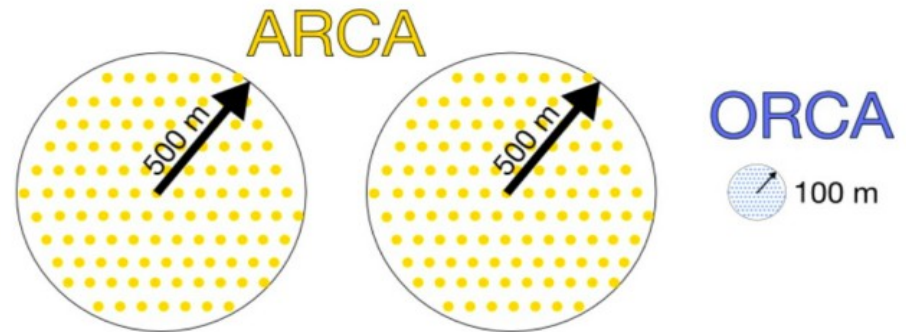
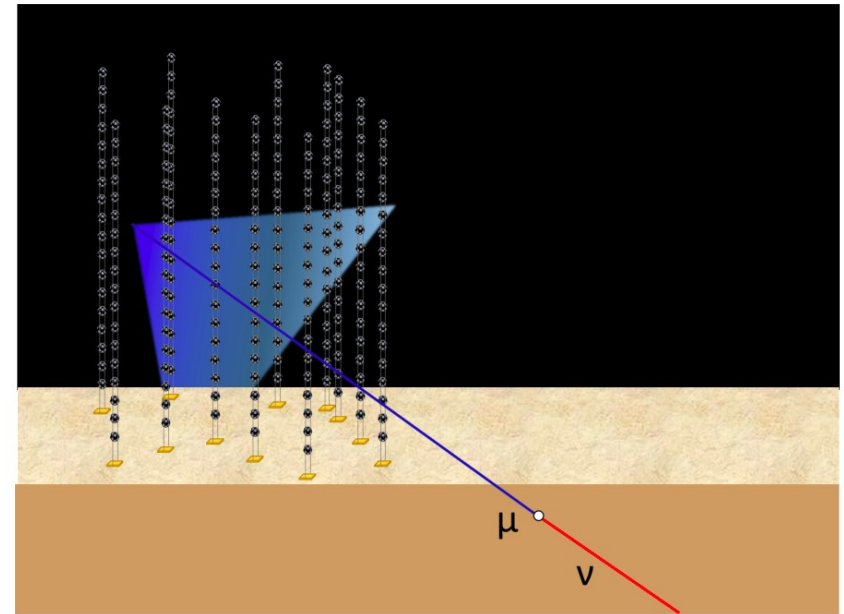
$$\cos\theta = \frac{c}{vn}$$

$$\theta \approx 42^\circ$$

დამუხტული ნაწილაკის ზღურბ-
ლური კინეტიკური ენერჯია:

$$E_c \geq m \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - 1 \right)$$

მიუონისათვის $E_c = 51.6$ მევ
ელექტრონისათვის $E_c = 0.25$ მევ

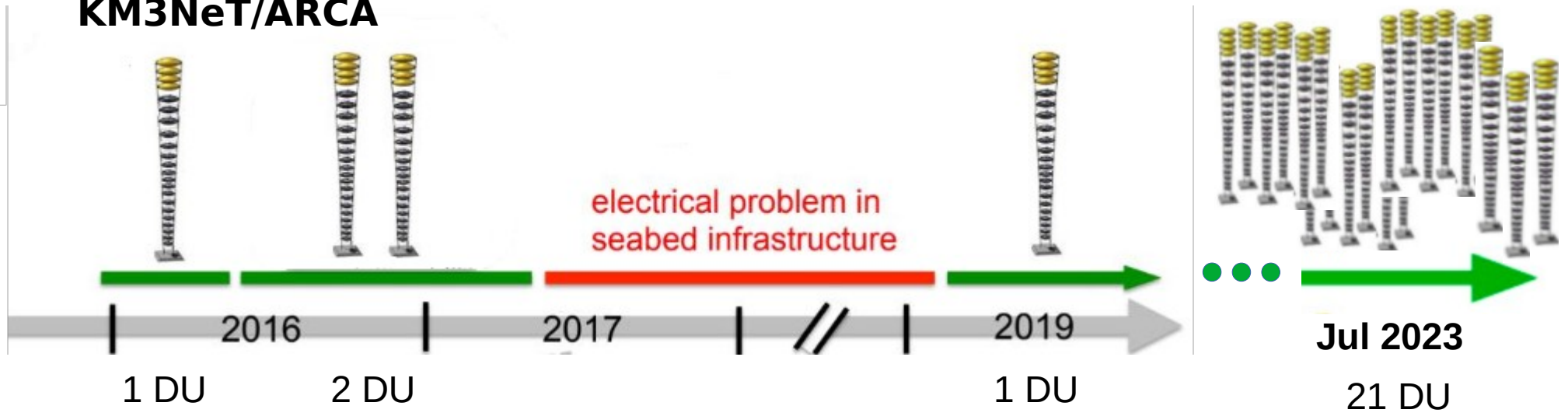


Detector	Depth	Horizontal spacing	Vertical spacing	Detection unit	Volume
ARCA	3500 m	90 m	36 m	2 x 115	1 km ³
ORCA	2500 m	20 m	9 m	115	~0.005 km ³

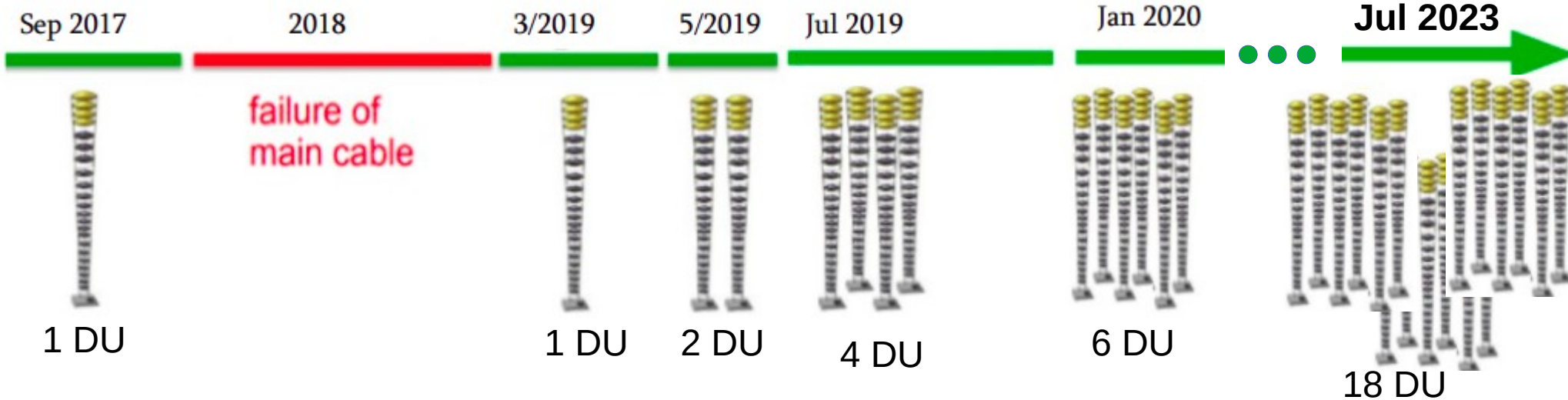
Letter of intent for KM3NeT 2.0

KM3NeT ექსპერიმენტის სტატუსი

KM3NeT/ARCA

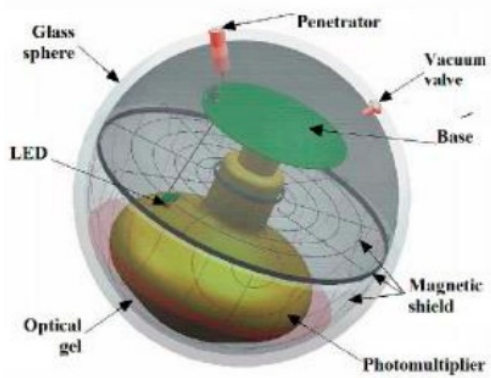


KM3NeT/ORCA

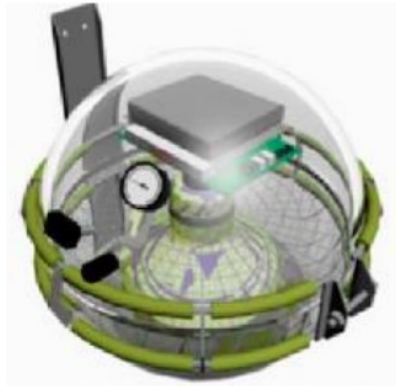


KM3NeT ოპტიკური მოდული (DOM)

ANTARES

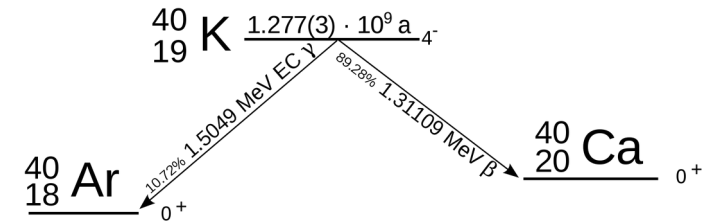


Baikal-GVD

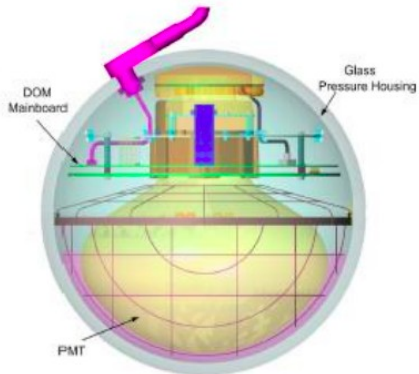


KM3NeT ექსპერიმენტის ძირითადი ფონი:

^{40}K -ის რადიოაქტიური დაშლები



IceCube



KM3NeT



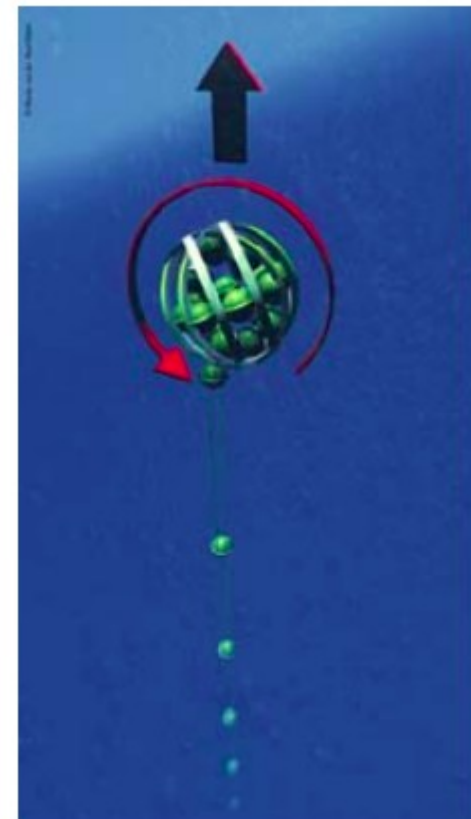
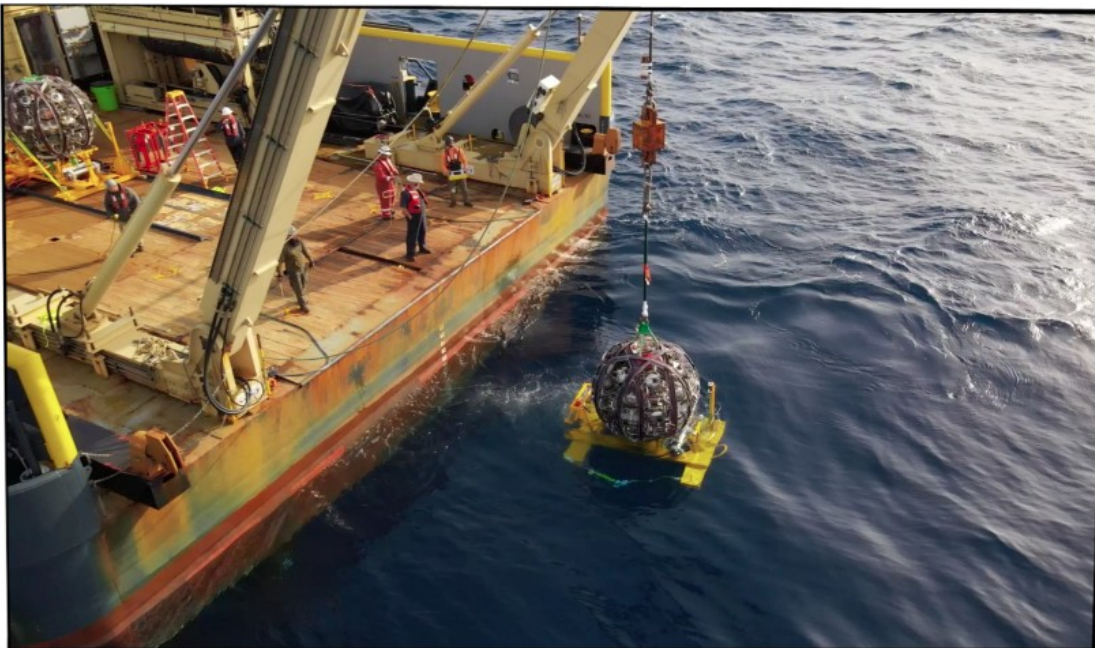
ინოვაციური, მრავალფოტო-
გამამრავლებლიანი (31)
მოდული*
Digital Optical Module

დაშლებში წარმოქმნილ ბეტა ნაწილაკებს ახასიათებთ ჩერენკოვის გამოსხივება, რომლის გამოც თითოეული PMT-სთვის სინგლების სიხშირე წარმოადგენს ~8kHz-ს. DOM-ში რამდენიმე თანხვედრი სიგნალის მოთხოვნის საფუძველზე, შესაძლებელია ამ ფონის გამოყოფა.

*The KM3NeT multiPMT optical module, Journal of Instrumentation, Volume 17, July 2022

KM3NeT დეტექტორის ხაზის ინსტალაცია

დეტექციის ერთეულის ინსტალაციისთვის 18 ოპტიკური მოდულს ათავსებენ LOM-ში (Launcher of Optical Modules)



LOM და “ლუმა”
ზღვის ფსკერზე;

ტივტივების საშუალებით
LOM მიემართება ზღვის
ზედაპირისკენ

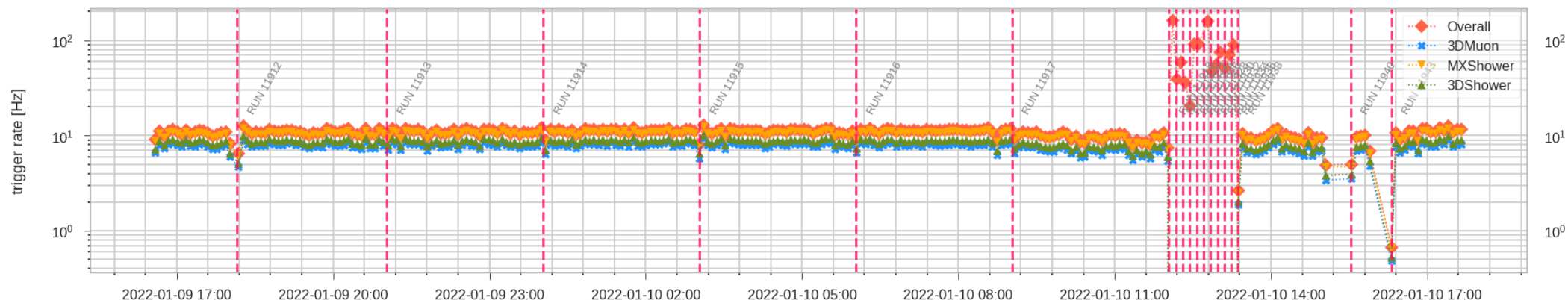
Deep-sea deployment of the KM3NeT neutrino telescope detection units by self-unrolling

KM3NeT მონაცემების მიღება

KM3NeT თანამშრომლობის წევრები ატარებენ 1 კვირიან მორიგეობებს (shift), რომელთა მიზანია მონაცემთა მიღება და პირველადი ანალიზი, დეტექტორის გამართულად მუშაობის მონიტორინგი, საკალიბრაციო მონაცემების შეგროვება.

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

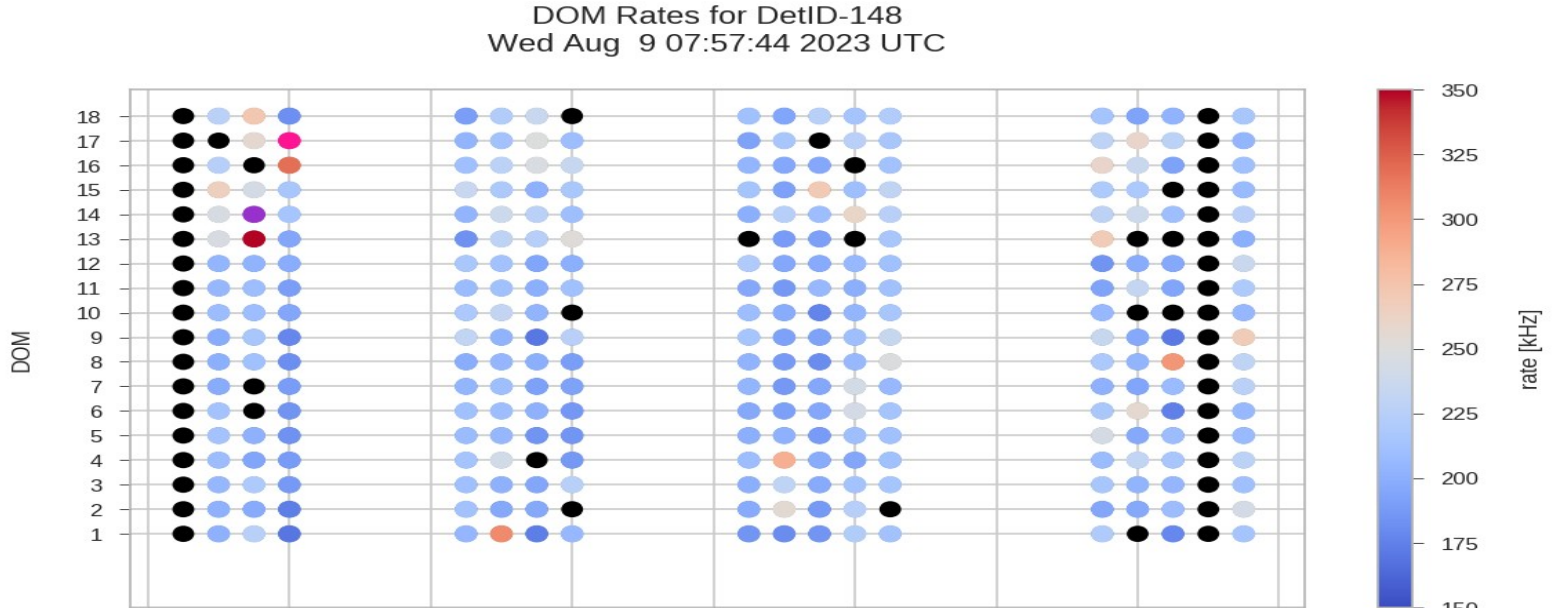
Trigger Rates for DetID-100
Mon Jan 10 17:39:35 2022 UTC



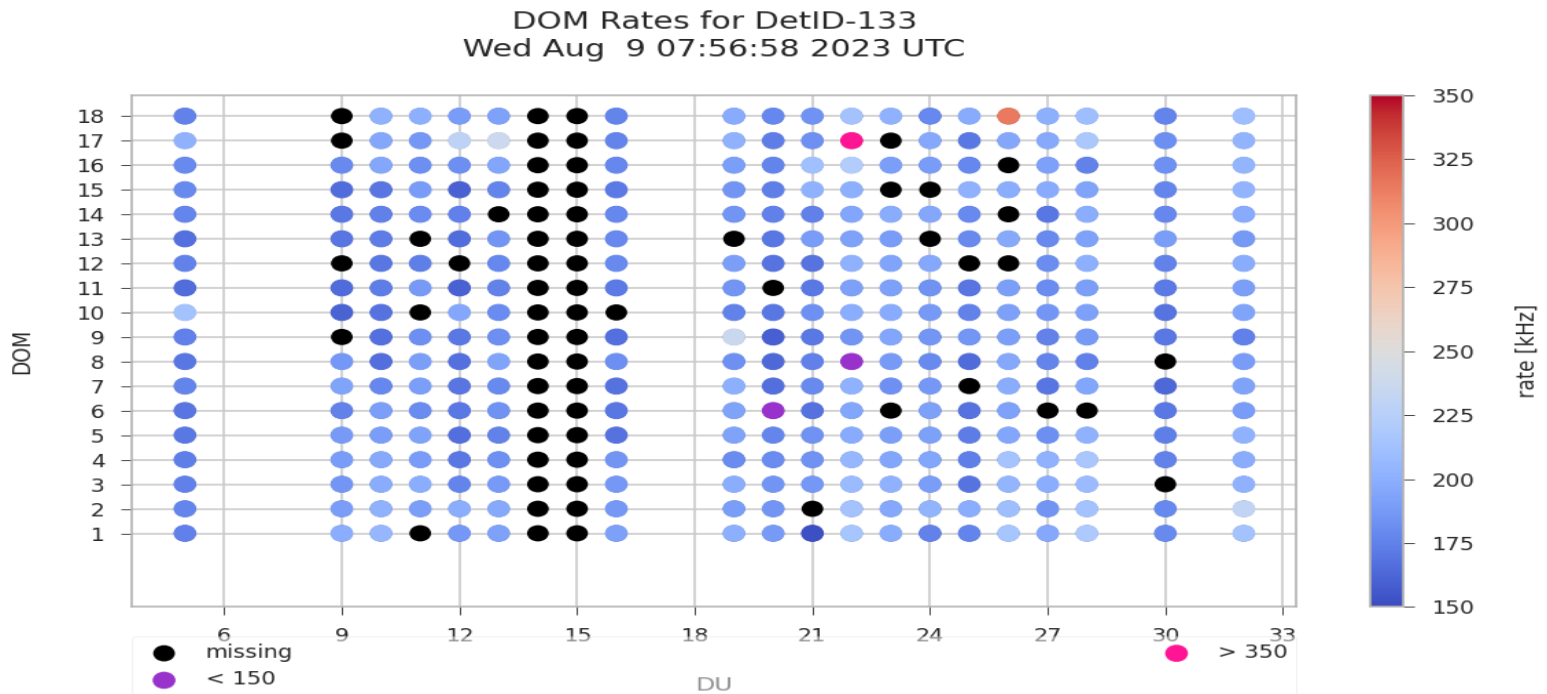
KM3NeT შემთხვევათა სიხშირის განაწილება ORCA6 დეტექტორისთვის, 2022 წლის 9-10 იანვრის პერიოდში, რომელიც საშუალოდ შეადგენდა ~10 ჰერცს.

KM3NeT მონაცემების მიღება

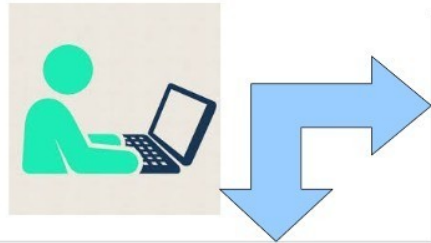
KM3NeT/ORCA18




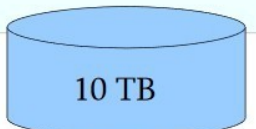
KM3NeT/ARCA21

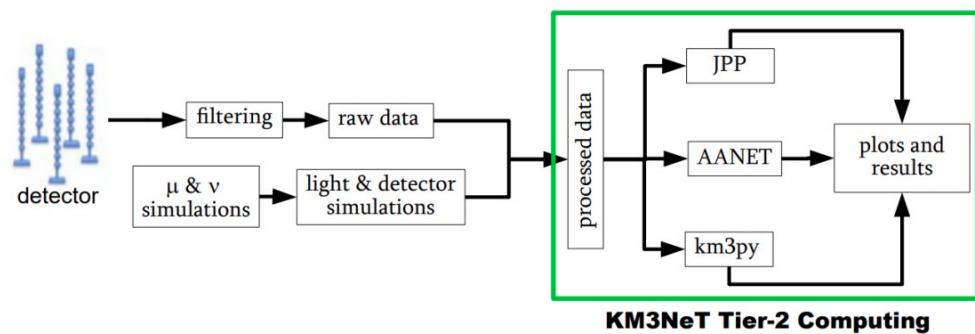
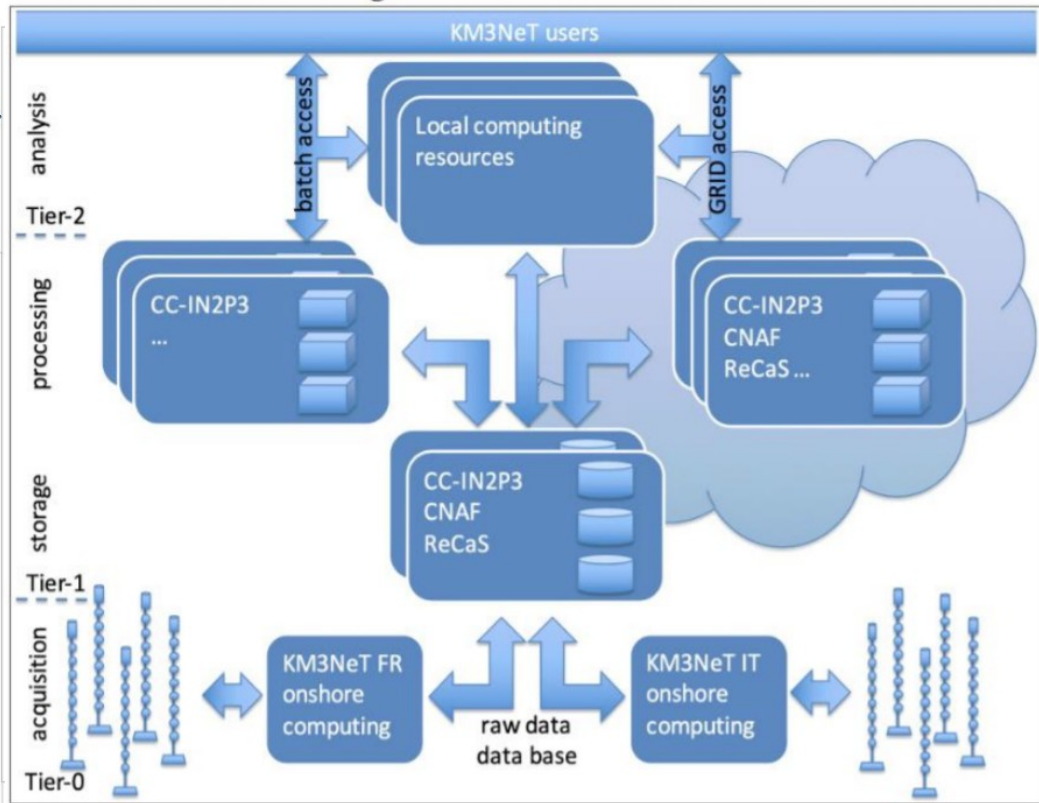


კომპუტინგი KM3NeT კოლაბორაციაში




KM3NeT @ TSU
 217.147.226.114

PowerEdge T140
 Intel Xeon E-2186G
 3.8 GHz
 12 MB cash memory

 Linux CentOS7



Tier-2 კომპუტინგი თსუ-ში*

**The KM3NeT project and Tier2 computing at Tbilisi State University, PoS Regio2021 (2022) 006*

თსუ Tier-2 კომპუტერული ცენტრი



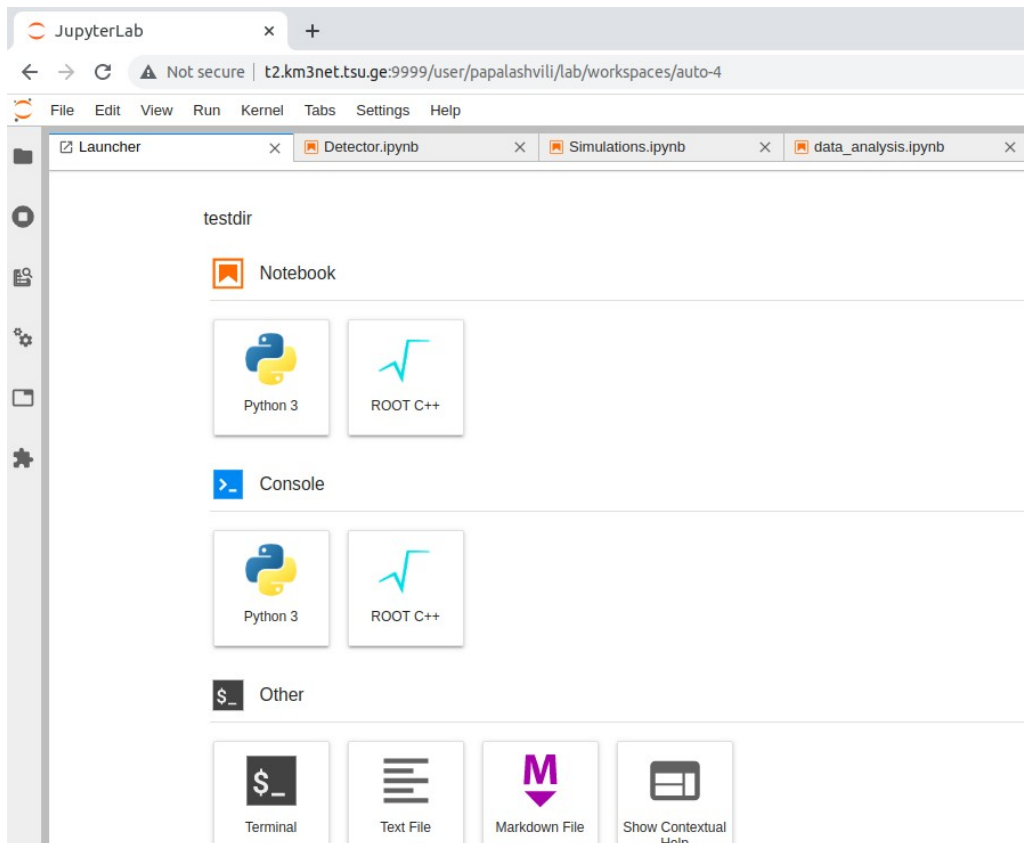
<http://t2.km3net.tsu.ge:9999>
<http://185.212.252.186:9999>



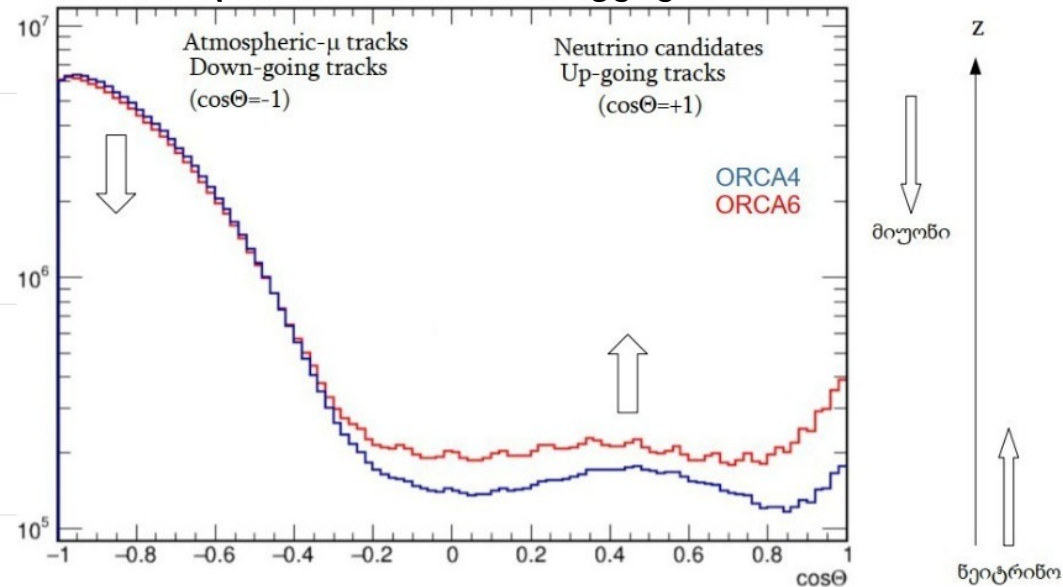
ბრეანა

საქართველოს სამეცნიერო-საბუნებისმეტყველო
კომპიუტერული მსაჯობის ასოციაცია

Jupyter სერვერის ინტერფეისი



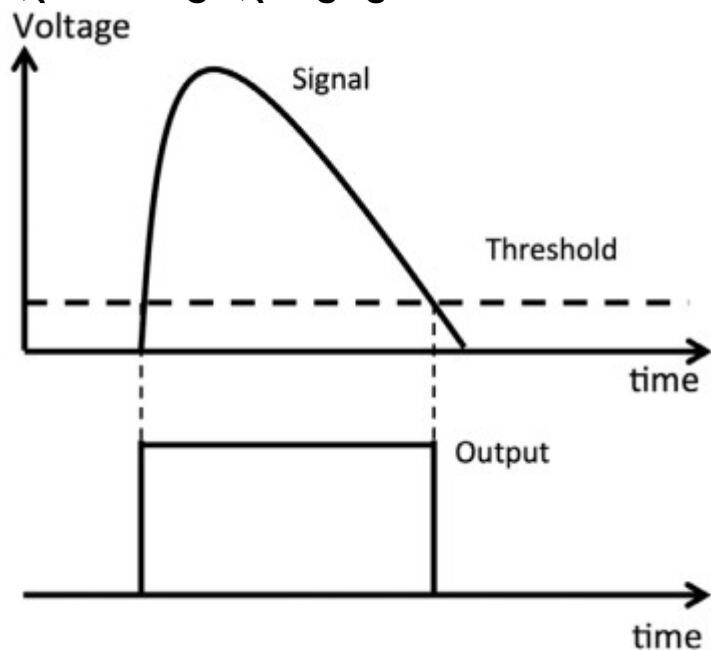
მიუონები და ნეიტრინოები ORCA4 და ORCA6-ის მონაცემებში



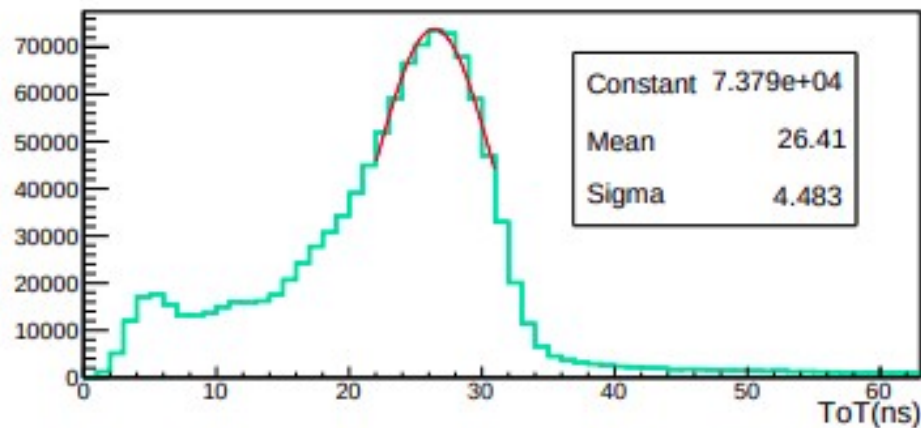
DOM-ის მახასიათებლების შესწავლა

KM3NeT ექსპერიმენტში გამოიყენება Hamamatsu-ს 3 ინჩიანი ფოტოგამამრავლებლები

ფოტოსენსორის სიგნალის დაბვისა და ToT (**T**ime **o**ver **T**hreshold) სიდიდის ზოგადი კავშირი

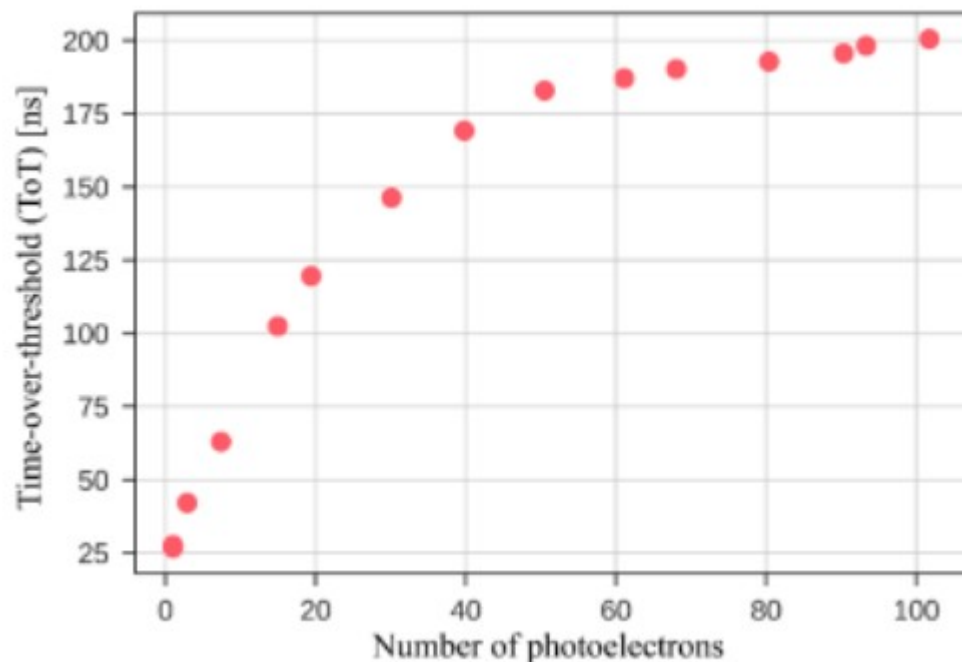


ექსპერიმენტში გამოყენებული ფოტოსენსორების გამოცხადებული ToT სიდიდეების განაწილება

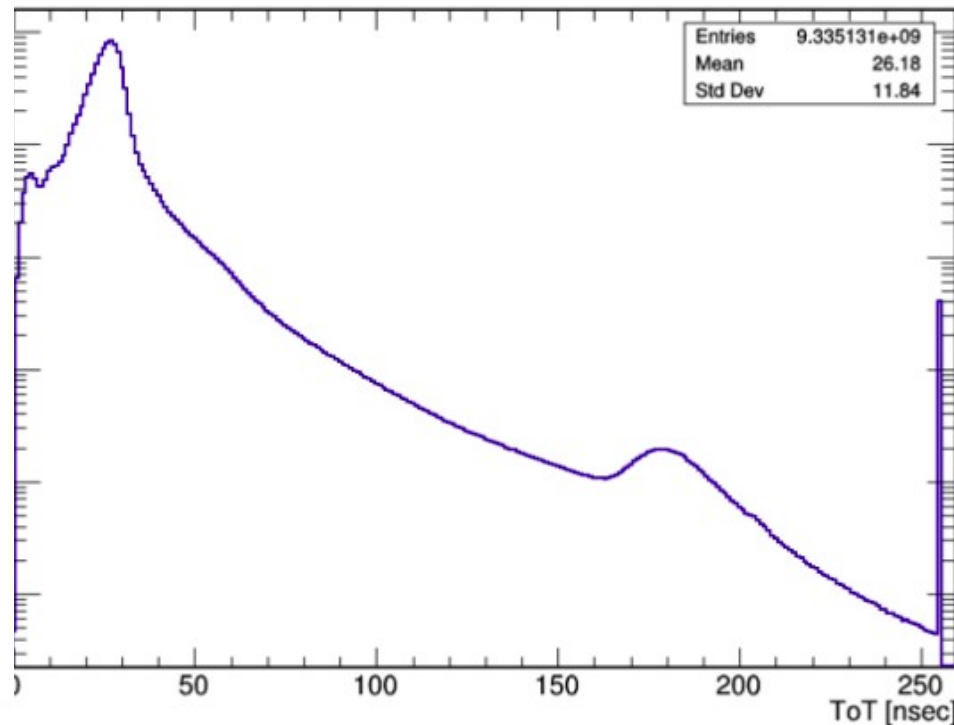


ფოტოგამამრავლების გამოძახილი

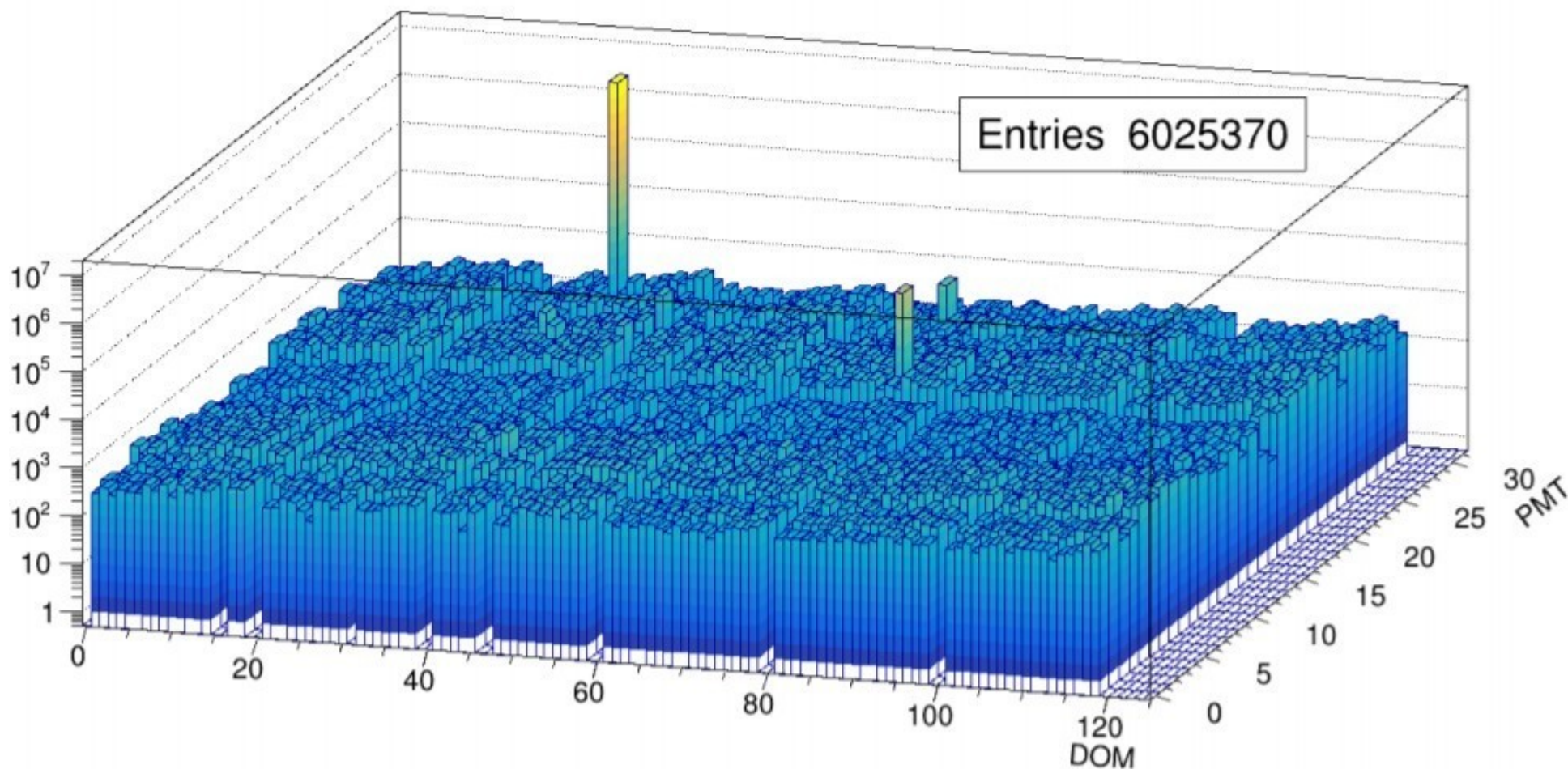
ToT-ის სიდიდის დამოკიდებულება ფოტოელექტრონების რაოდენობაზე



ToT სიდიდე რეალური ექსპერიმენტის მონაცემებში

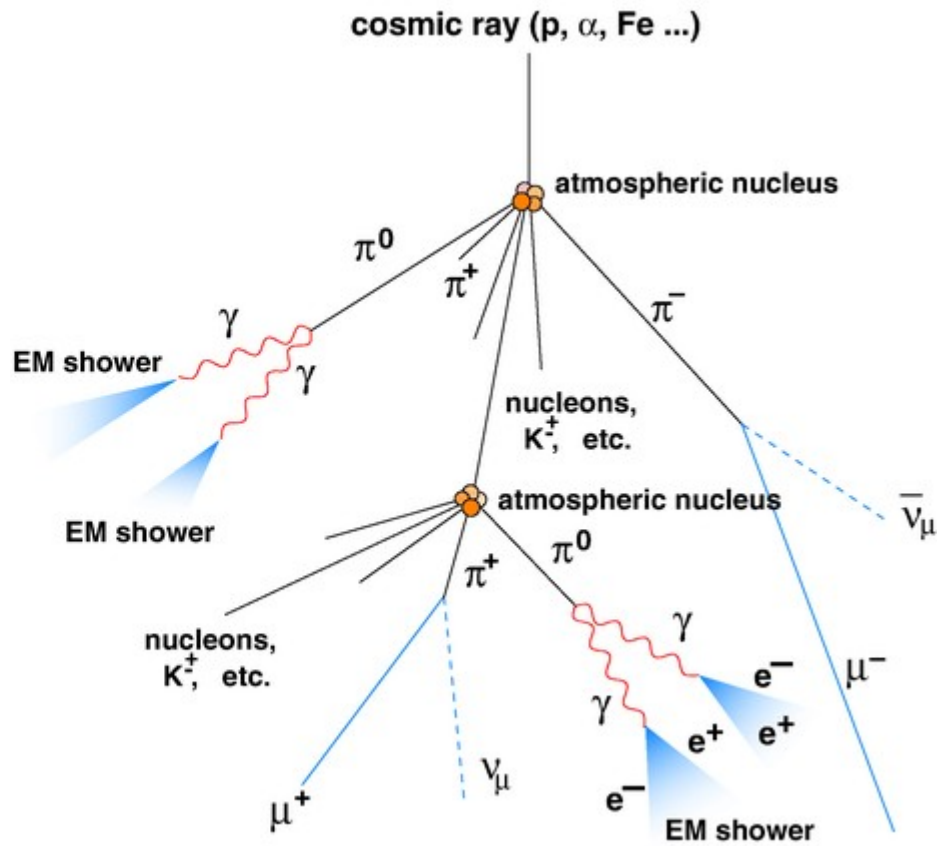


ანომალური PMT-ები ORCA6 მონაცემებში



ჰისტოგრამაზე წარმოადგენილია ინდივიდუალური PMT-ები და მათ მიერ დაფიქსირებული ToT=255 სიგნალთა რაოდენობა

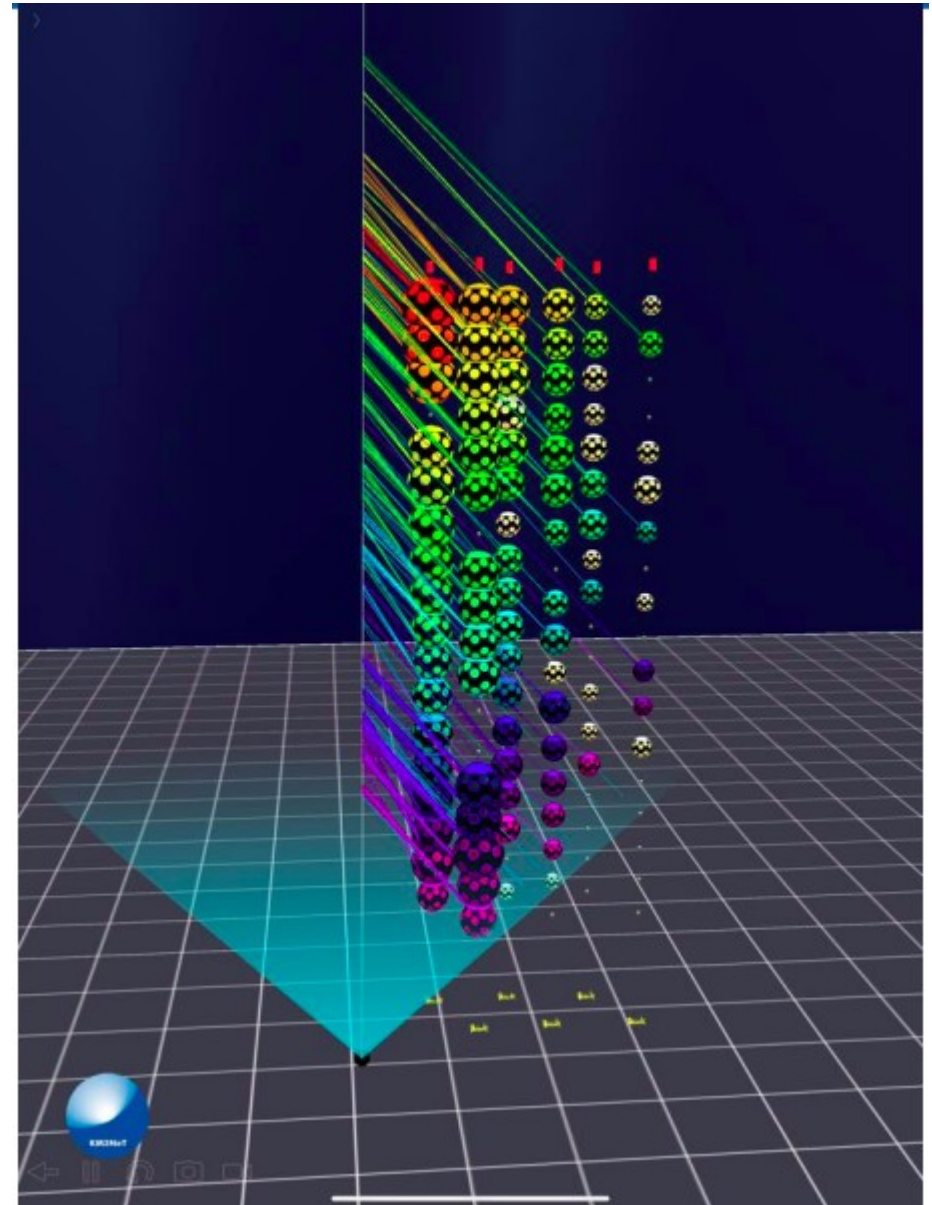
ატმოსფერული მიუონები KM3NeT-ში



ატმოსფერული მიუონებისა და ნეიტრინოების წარმოქმნის ძირითადი მექანიზმი:

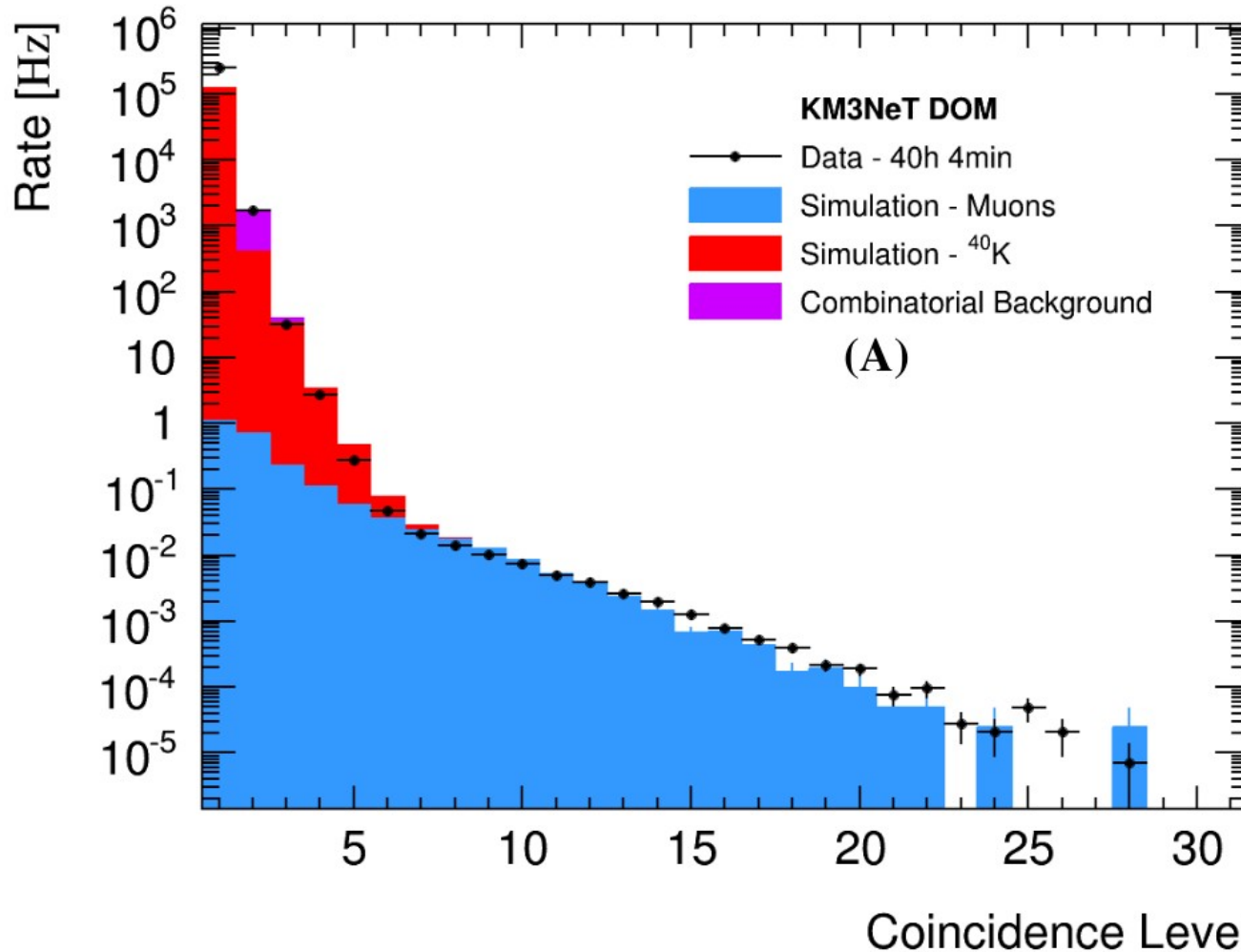
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$



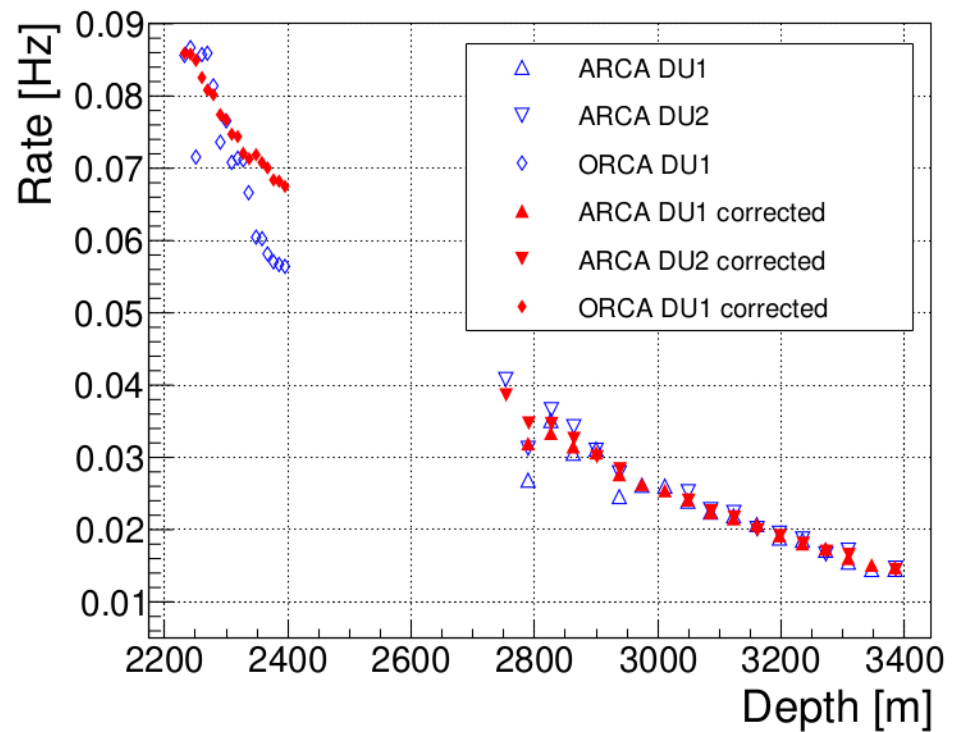
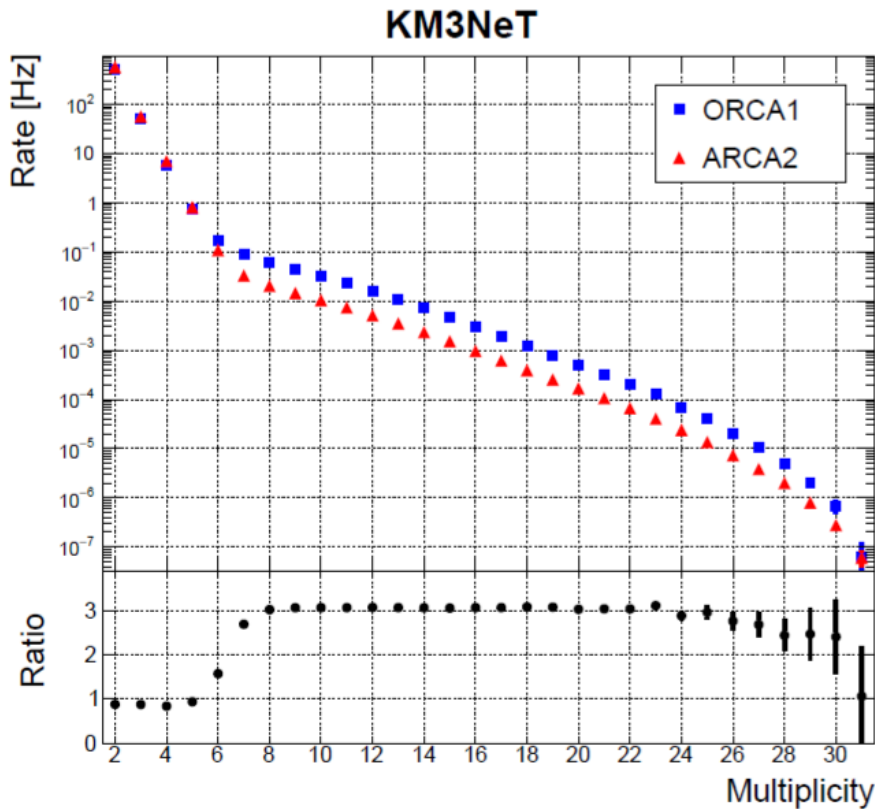
ფონისა და მიუნის სიგნალები DOM-ში

ოპტიკურ მოდულში ფონისა და სიგნალების სიხშირეების განაწილების დამოკიდებულება ფოტოსენსორთა მრავლობითობაზე



დაბალი მრავლობითობის შემთხვევაში, დომინირებს ფონი, ხოლო მაღალში - მიუნის სიგნალი

ატმოსფერული მიუონების სიგნალები



თანხვედრა – ერთ დომ-ში, 15 ნანონამიან ფანჯარაში ორი ან მეტი სიგნალის არსებობა

Rate – თანხვედრათა სიხშირე

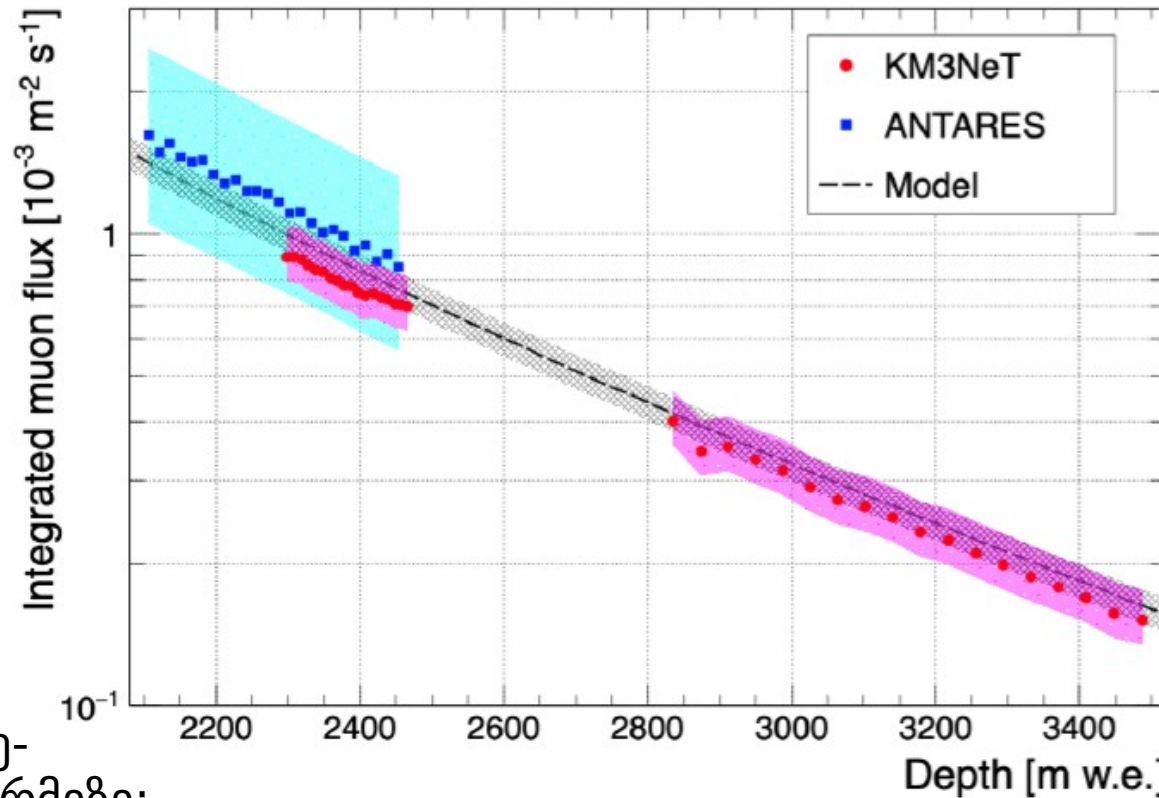
Multiplicity (მრავლობითობა) – DOM-ში თანხვედრი PMT-ების რაოდენობა

მარცხენა განაწილებაზე - Multiplicity < 6 სიგნალის სიხშირეების ფარდობა ORCA და ARCA დეტექტორში წარმოადგენს 1-ს, რადგან ამ დიაპაზონში დომინირებს ^{40}K -ის ბეტა დაშლებით გამოწვეული ფონი

მარჯვენა განაწილებაზე - Multiplicity ≥ 8 შემთხვევების სიხშირის დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე

ატმოსფერული მიუონების ნაკადი

ატმოსფერული მიუონების ნაკადი ზღვის სიღრმეზე*
KM3NeT



ნაკადის დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე:

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

$$A_1 = 1.31 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, A_2 = -2.91 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1},$$

$$A_3 = 7.31 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, A_4 = -1.17 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1},$$

$$B_1 = 4.16 \times 10^{-1} \text{ sr}^{-1}, B_2 = 1.07 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}.$$

*Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth measured with the first KM3NeT detection units
 Journal of Instrumentation, Volume 17, July 2022

გამოქვეყნებული შრომები

- 1) *The KM3NeT multiPMT optical module*, S. Aiello, ..., **G. Papalashvili**, ..., R. Shanidze, ... Journal of Instrumentation, Volume 17, July 2022,
<https://iopscience.iop.org/article/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, ..., **Papalashvili G**, ..., Shanidze R, ... The European Physical Journal C volume 80, Article number: 99 (2020)
<https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-020-7629-z>
- 3) *The KM3NeT project and Tier2 computing at Tbilisi State University*, **G. Papalashvili**, R. Shanidze, KM3NeT Collaboration
PoS Regio2021 (2022) 006
<https://inspirehep.net/literature/2083024>

საერთაშორისო სამეცნიერო ღონისძიებებში მონაწილეობა

N	სამეცნიერო ფორუმის დასახელება, ჩატარების თარიღი და ადგილი	მოხსენების სათაური	ელექტრონული მისამართი
1	JOINT FAR/ANSEF-ICTP and RDP-VW summer school in theoretical physics, 2-7 ივლისი, ერევანი, სომხეთი	Simulation Software in the KM3NeT Project	http://ansef.org/summer-school-2018
2	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting, 22-26 ოქტომბერი, 2018, კაბერტა, იტალია	ORCA High Energy MC Production	https://indico.cern.ch/event/748460/
3	8th Georgian-German School and Workshop in Basic Science(GGSWBS), 20-25 აგვისტო 2019, თბილისი საქართველო	Neutrino research at intermediate energies with KM3NeT/ORCA	http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/cgswhp/cgswhp18/
4	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting, 7-11 ოქტომბერი 2019, ვარშავა, პოლონეთი	HE simulations for ORCA115	https://indico.cern.ch/event/839164/
5	ANTARES and KM3NeT Collaboratron Meeting, 10-14 ივნისი 2019, ნანტი, საფრანგეთი	High Energy elctron neutrino Simulations in ORCA115	https://indico.cern.ch/event/808541/
6	ANTARES and KM3NeT Collaboratron Meeting, 25თებერვალი -1 მარტი 2019 თბილისი, საქართველო	HE ORCA115 simulation	https://indico.cern.ch/event/780512/
7	Workshop on Monte Carlo simulations for KM3NeT, 23-25 იანვარი 2019 ჯენოა, იტალია	Status of the ORCA HE Simulations	https://indico.cern.ch/event/779200/
8	2019 European School of High-Energy Physics, 4-17 სექტემბერი, სანქტ-პეტერბურგი, რუსეთი	<u>poster</u> :The KM3NeT Project	https://indico.cern.ch/event/798971/
9	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting , 10-14 თებერვალი2020, ჯეანოა, იტალია	ORCA4data analysis	https://indico.cern.ch/event/871318/
10	ANTARES and KM3NeT online collaboration meeting, 2-12 ივნისი, 2020	Analysis of the ORCA4 data in TSU	https://indico.cern.ch/event/893586/

საერთაშორისო სამეცნიერო ღონისძიებებში მონაწილეობა

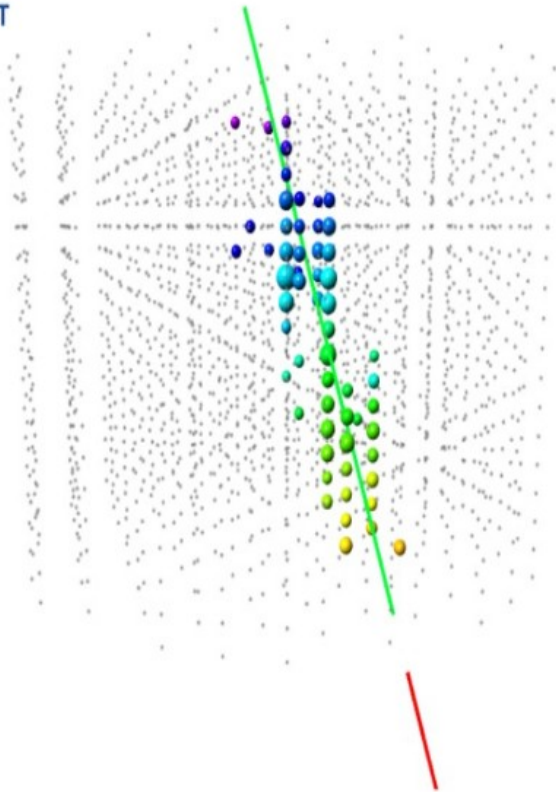
11	ANTARES and KM3NeT online collaboration meeting, 8-19 თებერვალი 2021	ORCA6 Data Analysis Update	https://indico.cern.ch/event/983214/overview
12	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting , 5-16 2021 ოქტომბერი	ORCA6 Data Analysis Update	https://indico.cern.ch/event/949133/
13	IWAPP - Innovative Workflows inAstro- & Particle Physic, Online 2021	KM3NeT Tier-2 Computing in Tbilisi State University	https://indico.in2p3.fr/event/20424/
14	Kutaisi International University Annual Conference, 6 ივლისი 2021	TSU HEPI Server for computing in nuclear, particle and astroparticle physics	
15	PhD School and workshop "ASPECTS OF SYMMETRY", 8-12 ნოემბერი 2021, თბილისი	The KM3NeT project and Tier2 computing at Tbilisi State University	http://conferences.hepi.tsu.ge/RDP_Symmetry_2021
16	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting, 16-20 მაისი 2022, ათენი, საბერძნეთი	Study of Muon Decays in KM3NeT/ORCA6	https://indico.cern.ch/event/1149389/
17	Physcs in Collision Symposium, 5-9 სექტემბერი 2022, თბილისი, საქართველო	<u>poster</u> : "Recent results from the KM3NeT experiment"	https://pic2022.tsu.ge/
18	PhD school and workshop "Recent Advances in Fundamental Physics", 24-26 სექტემბერი 2022, თბილისი, საქართველო	<u>poster</u> : Recent results from the KM3NeT experiment	http://conferences.hepi.tsu.ge/CPinT_2022/
19	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting, 24-28 ოქტომბერი 2022, რომი, იტალია	Study of Muon Decays in KM3NeT/ORCA6	https://indico.cern.ch/event/1168763/
20	ANTARES and KM3NeT Collaboration Meeting, 5-9 ივნისი 2023, სალერნო, იტალია	Status of Muon Decay Analysis in KM3NeT/ORCA6	https://indico.cern.ch/event/1252474/

შეჯამება

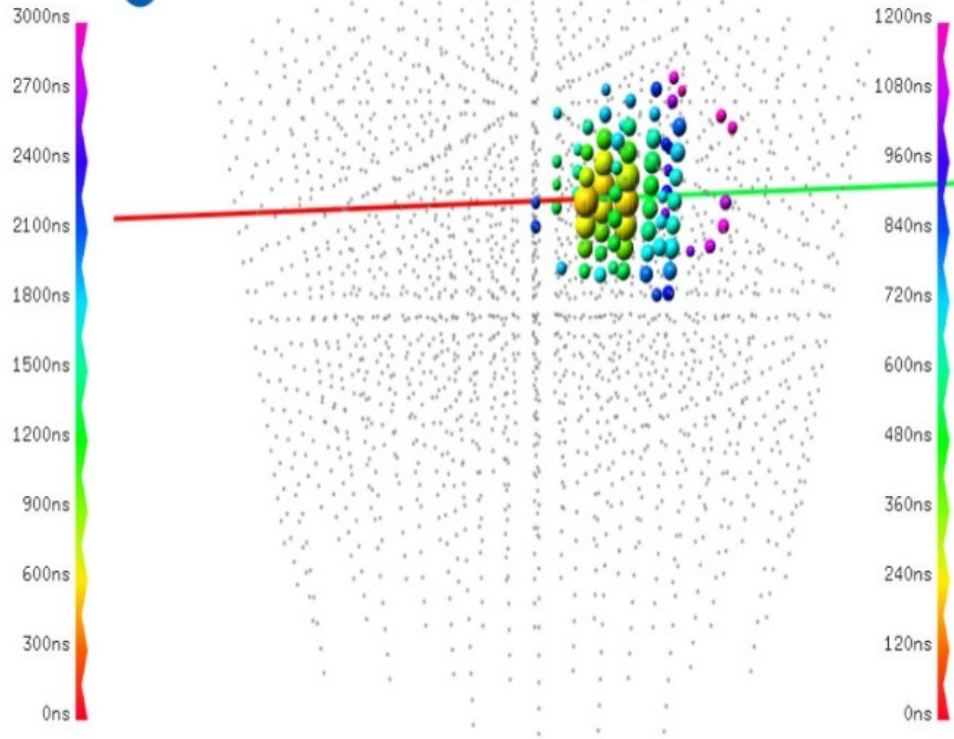
- ნაშრომი შესრულებულია KM3NeT საერთაშორისო სამეცნიერო თანამშრომლობის ფარგლებში
- KM3NeT ექსპერიმენტი მშენებლობის პროცესშია, თუმცა უკვე არსებობს მონაცემები, რომელთა გამოყენებითაც შესაძლებელია დეტექტორის მახასიათებლების და ეფექტურობის შესწავლა, ასევე ფიზიკური კვლევების შესრულება
- სადოქტორო ნაშრომის თემატიკაზე, გამოქვეყნდა 3 პუბლიკაცია
- თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში შეიქმნა KM3NeT Tier-2 კომპუტინგის სერვერი, რომლის საშუალებითაც ჩატარდა სადისერტაციო კვლევები
- შესწავლილია KM3NeT ინოვაციური, მრავალფოტოსენსორიანი ოპტიკური მოდულების მახასიათებლები და სიგნალები; აღმოჩენილია ანომალური ფოტოსენსორი
- ოპტიკური მოდულების გამოყენებით, ექსპერიმენტის სანყის ეტაპზე გაზომილია ატმოსფერულ მიუონთა ნაკადის დამოკიდებულება ზღვის სიღრმეზე
- სადოქტორო ნაშრომში მიღებული შედეგები წარდგენილია საერთაშორისო სამეცნიერო ღონისძიებებზე

Backup Slides

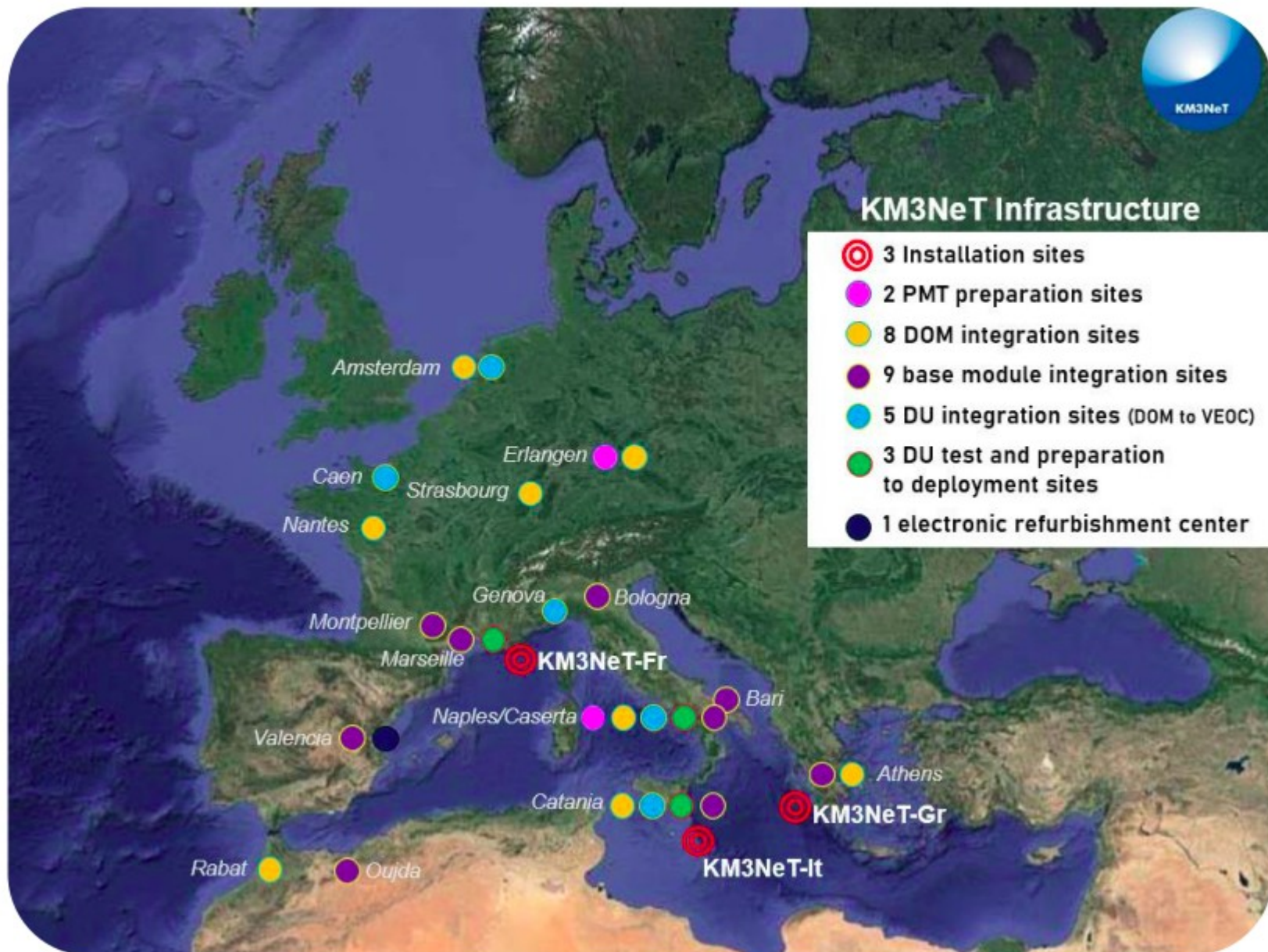
KM3NeT



KM3NeT



Backup Slides



Backup Slides

