

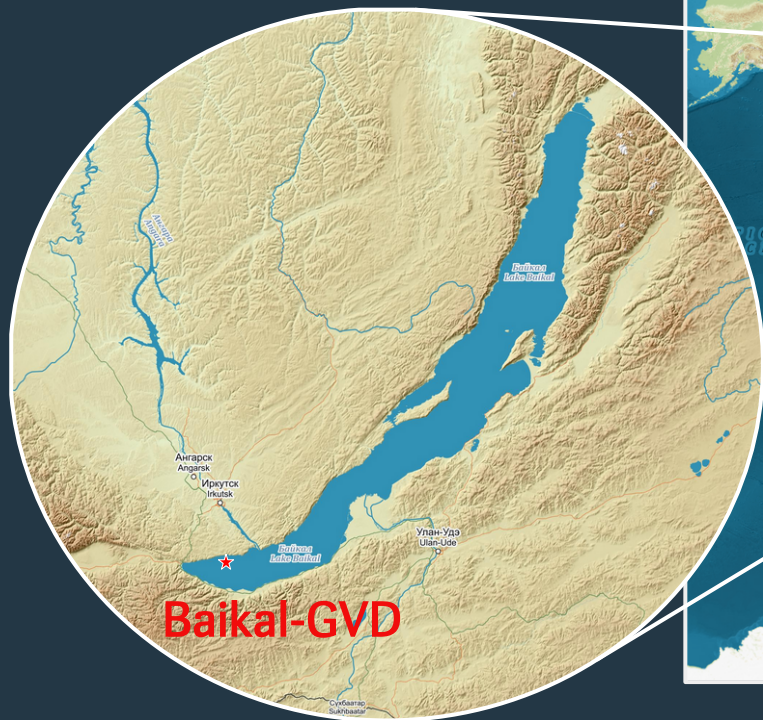
семинар в Доме Ученых ОИЯИ
19 мая 2022



Юрий Малышкин
Лаборатория Ядерных Проблем, ОИЯИ

Baikal-GVD: у истоков нейтринной астрономии

Baikal-GVD



Baikal-GVD



Baikal-GVD

Gigaton

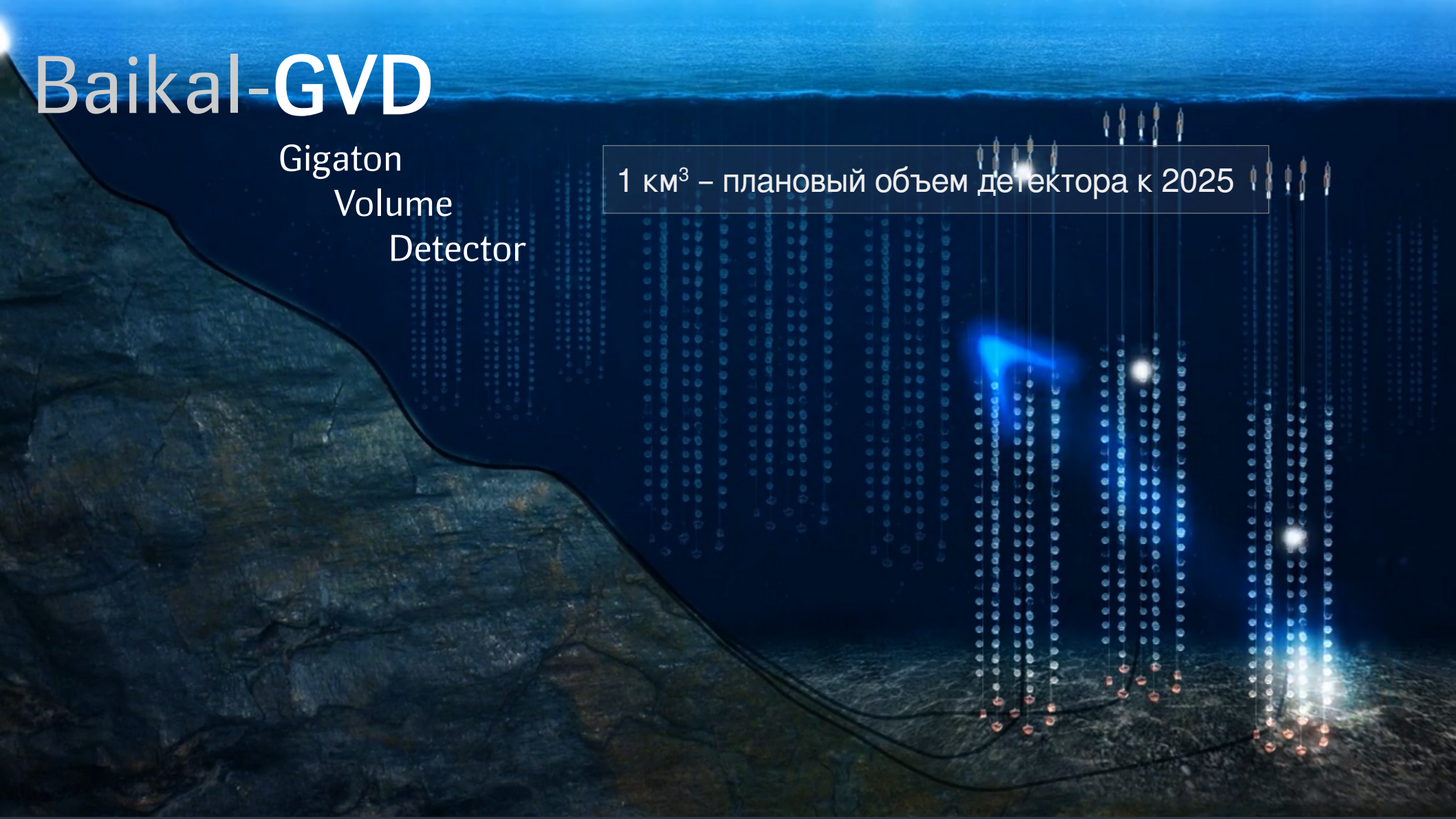
Volume

Detector

Baikal-GVD

Gigaton
Volume
Detector

1 км³ – плановый объем детектора к 2025

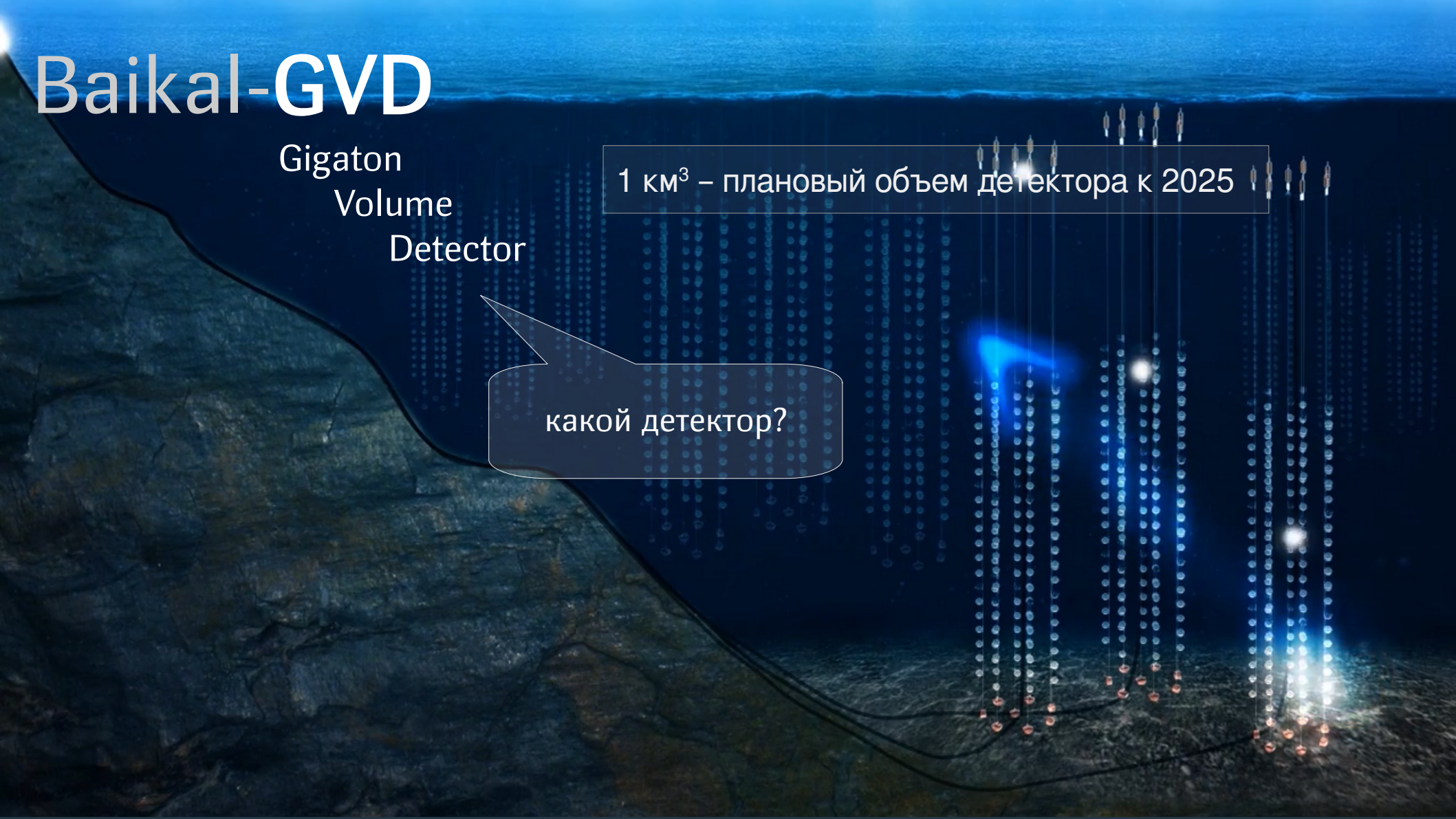


Baikal-GVD

Gigaton
Volume
Detector

1 км³ – плановый объем детектора к 2025

какой детектор?



Baikal-GVD

Gigaton
Volume
Detector

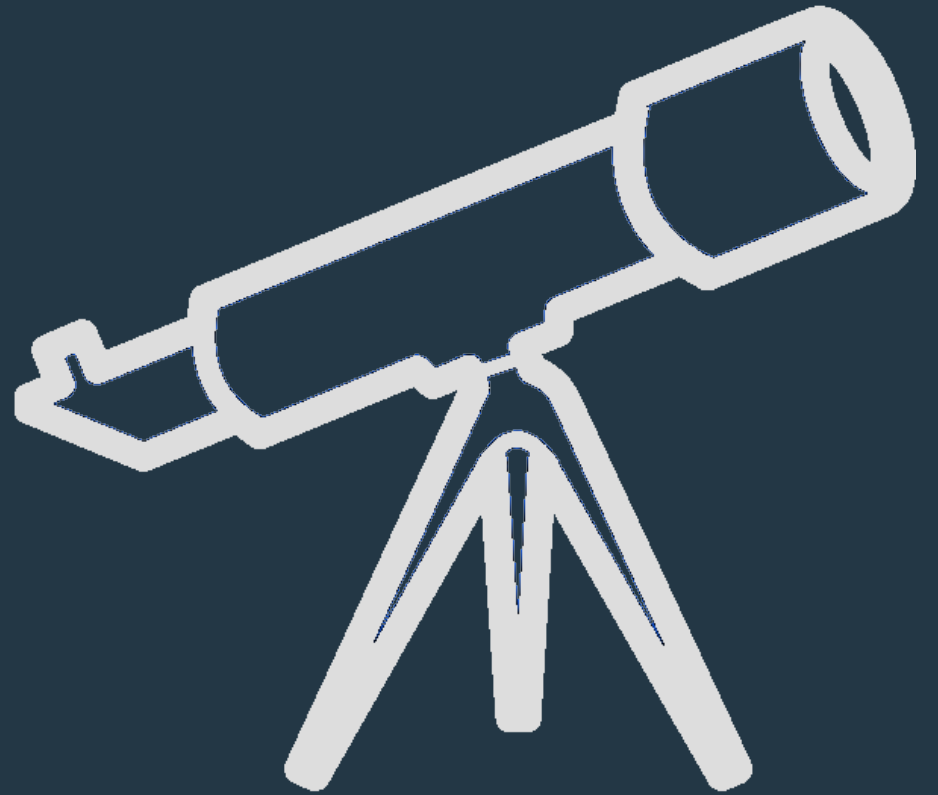
1 км³ – плановый объем детектора к 2025

какой детектор?

НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП



Телескоп – что это?



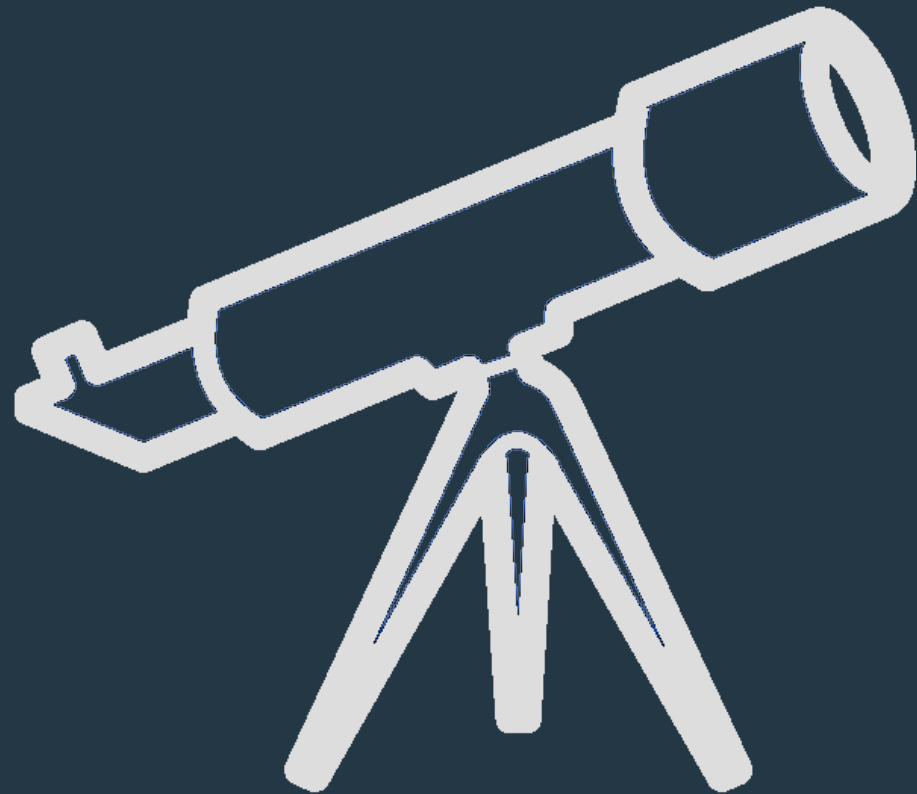
Телескоп – что это?

Wikipedia (статья на русском):

Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») — прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

- оптические телескопы,
- радиотелескопы,
- рентгеновские телескопы,
- гамма-телескопы.



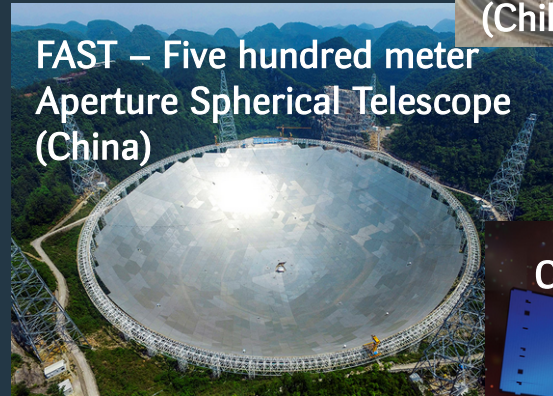
Телескоп – что это?

Wikipedia (статья на русском):

Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

- оптические телескопы,
- радиотелескопы,
- рентгеновские телескопы,
- гамма-телескопы.



Телескоп – что это?

Wikipedia (статья на русском):

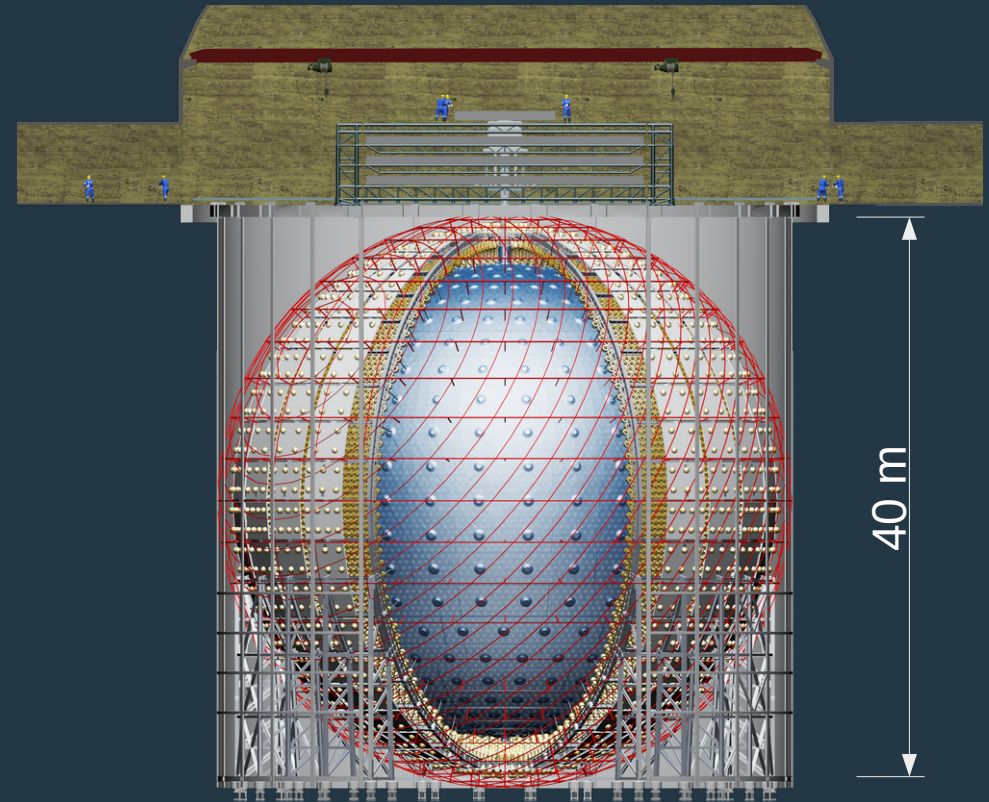
Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

- оптические телескопы,
- радиотелескопы,
- рентгеновские телескопы,
- гамма-телескопы.

Кроме того, **детекторы нейтрино** часто называют нейтринными телескопами. Также телескопами могут называть **детекторы гравитационных волн**.

$$E \sim \alpha(\text{MeV}) - \alpha(\text{GeV})$$



JUNO – Jiangmen Underground Neutrino Observatory (China)

Телескоп – что это?

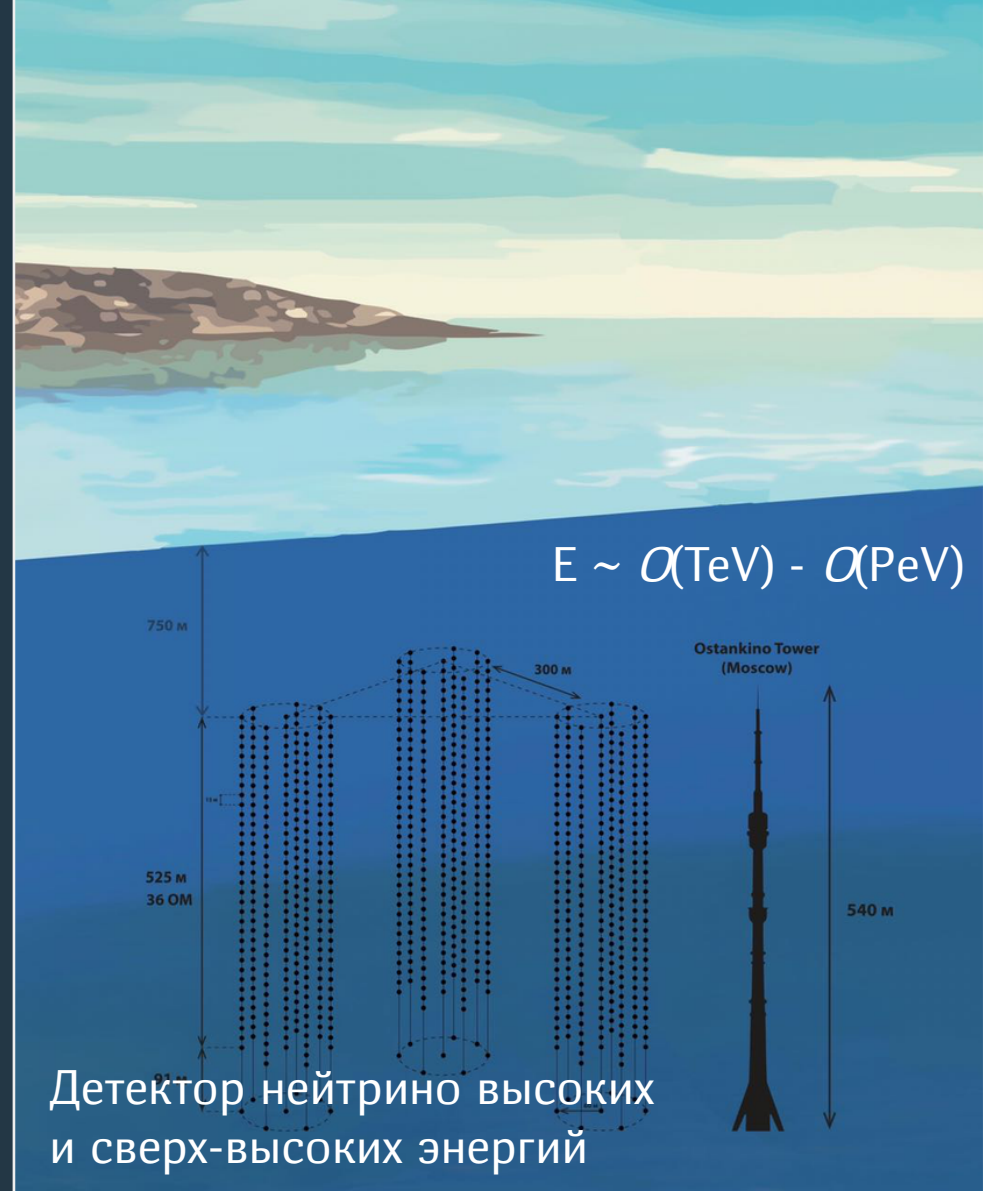
Wikipedia (статья на русском):

Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

- оптические телескопы,
- радиотелескопы,
- рентгеновские телескопы,
- гамма-телескопы.

Кроме того, **детекторы нейтрино** часто называют нейтринными телескопами. Также телескопами могут называть **детекторы гравитационных волн**.



Детектор нейтрино высоких
и сверх-высоких энергий

Телескоп – что это?

Wikipedia (статья на русском):

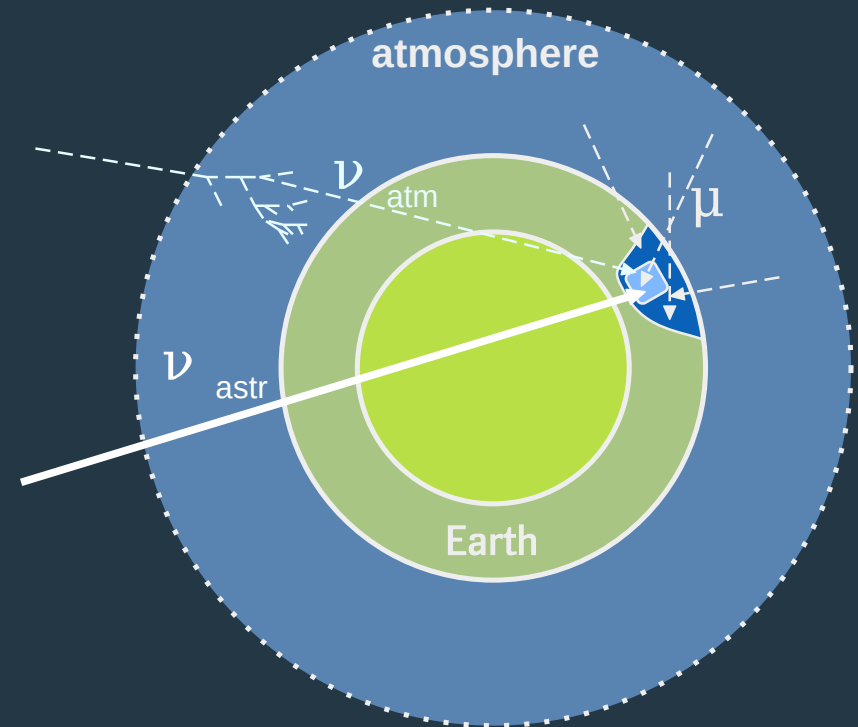
Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

- оптические телескопы,
- радиотелескопы,
- рентгеновские телескопы,
- гамма-телескопы.

Кроме того, **детекторы нейтрино** часто называют нейтринными телескопами. Также телескопами могут называть **детекторы гравитационных волн**.

$$E \sim \alpha(\text{TeV}) - \alpha(\text{PeV})$$



Детектор нейтрино высоких и сверх-высоких энергий

Нейтрино

Стабильно

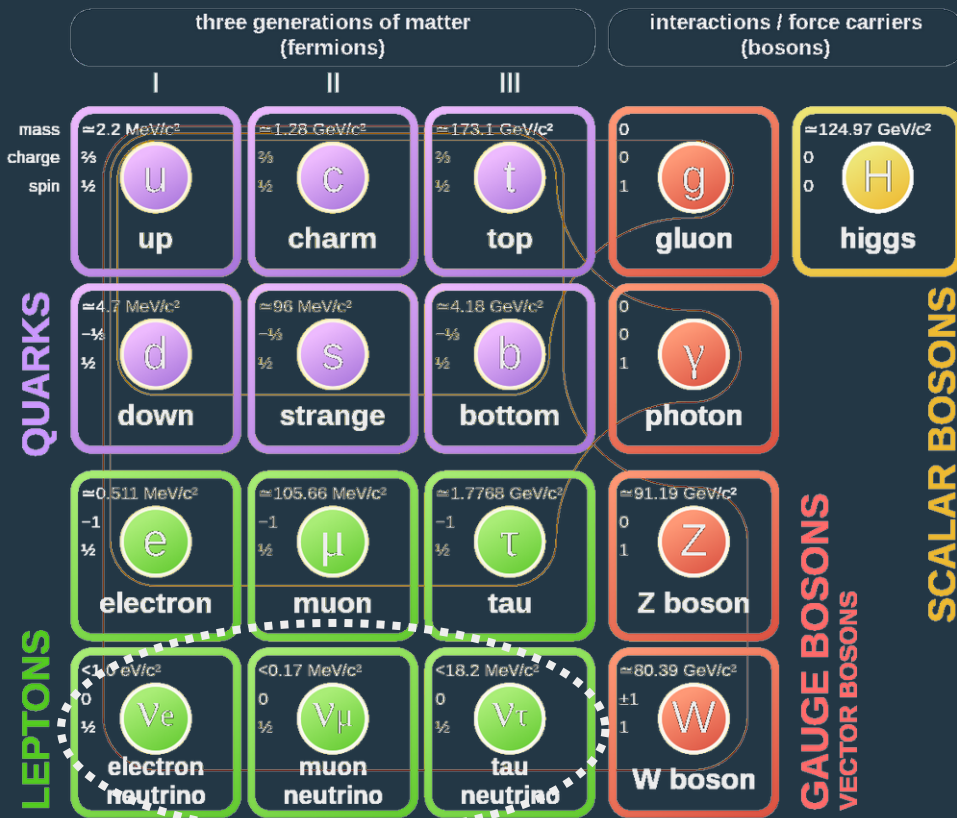
Электрически нейтрально

Имеет массу (но она неизвестна)

Постоянно рождается в Солнце и других звездах, в атмосфере Земли, в ядерных реакторах, в радиоактивных распадах, ...

Участвует в слабом взаимодействии

Standard Model of Elementary Particles



Нейтрино



electron
neutrino



muon
neutrino



tau
neutrino

стабильно

электрически нейтрально

имеет массу (но она неизвестна)

постоянно рождается в Солнце и других звездах, в атмосфере Земли, в ядерных реакторах, в радиоактивных распадах, ...

участвует в слабом взаимодействии

осциллируют между ароматами

$$\begin{aligned} m_e &< 1.1 \text{ eV} \\ m_\mu &< 0.19 \text{ MeV} \\ m_\tau &< 18.2 \text{ MeV} \end{aligned}$$

взрыв сверхновой: 99% энергии уносится нейтрино

пробег солнечных нейтрино в воде:
~100 световых лет (10^{18} км)

поток нейтрино на Земле:
~ 10^{11} нейтрино/с/см²

Нейтрино – открытые вопросы

порядок масс: прямой или обратный?

CP-четность?

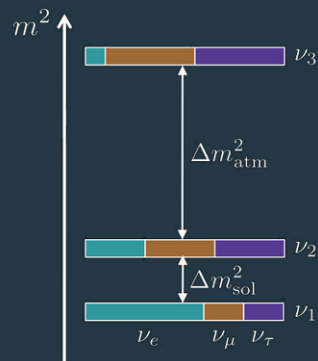
точные значения параметров, описывающих осцилляции? (текущая точность – несколько %)

майорановские или дираковские частицы?

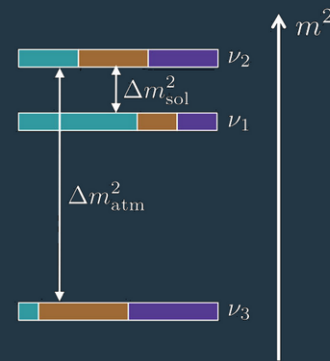
стерильные состояния (не участвующие в слабых взаимодействиях)?

...

normal hierarchy (NH)



inverted hierarchy (IH)



$$\nu \stackrel{?}{=} \bar{\nu}$$



electron
neutrino



muon
neutrino



tau
neutrino



sterile
neutrino

Нейтрино – открытые вопросы

источники астрофизических нейтрино
(с энергиями выше ПэВ) ?

Нейтрино – открытые вопросы

источники астрофизических нейтрино
(с энергиями выше ПэВ) ?

1 ПэВ = 10^{15} эВ

х 100 энергия в LHC

Нейтрино – открытые вопросы

источники астрофизических нейтрино (с энергиями выше ПэВ) ?

остатки сверхновых?

двойные системы?

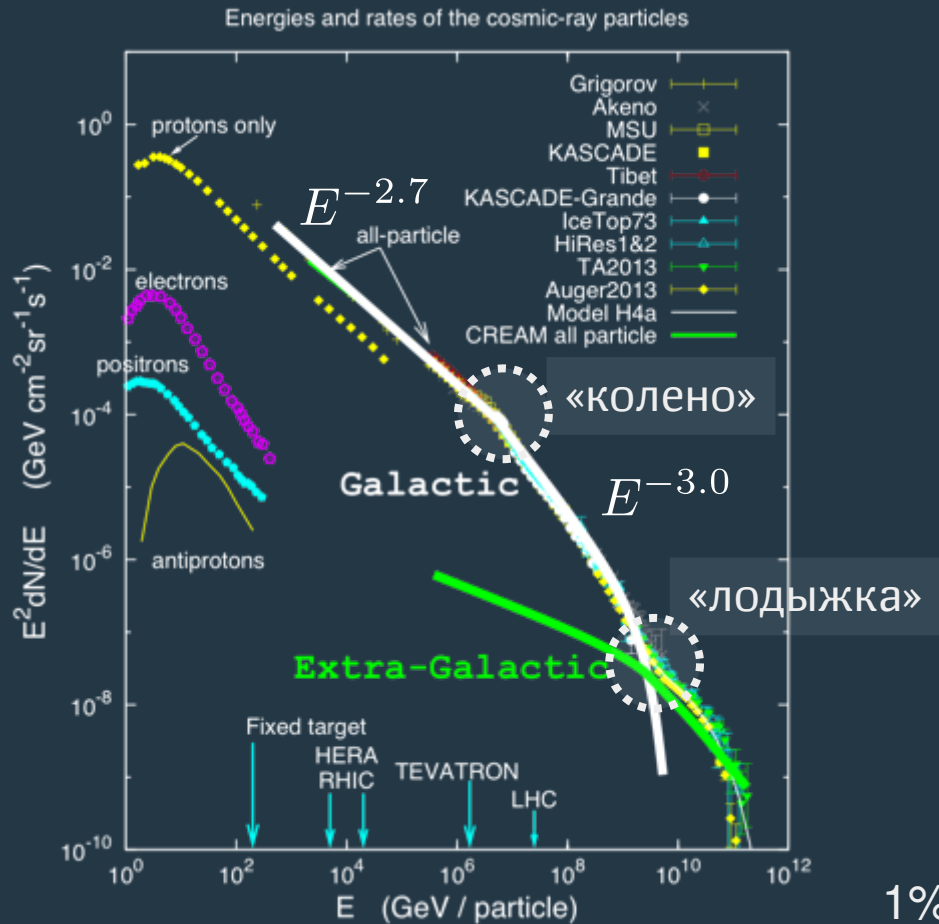
активные галактические ядра?

...?

1 ПэВ = 10^{15} эВ

х 100 энергия в LHC

Космические лучи



По всей видимости астрофизические нейтрино рождаются в результате взаимодействий космических лучей с веществом или фотонами

Космические лучи – элементарные частицы, движущиеся в космическом пространстве

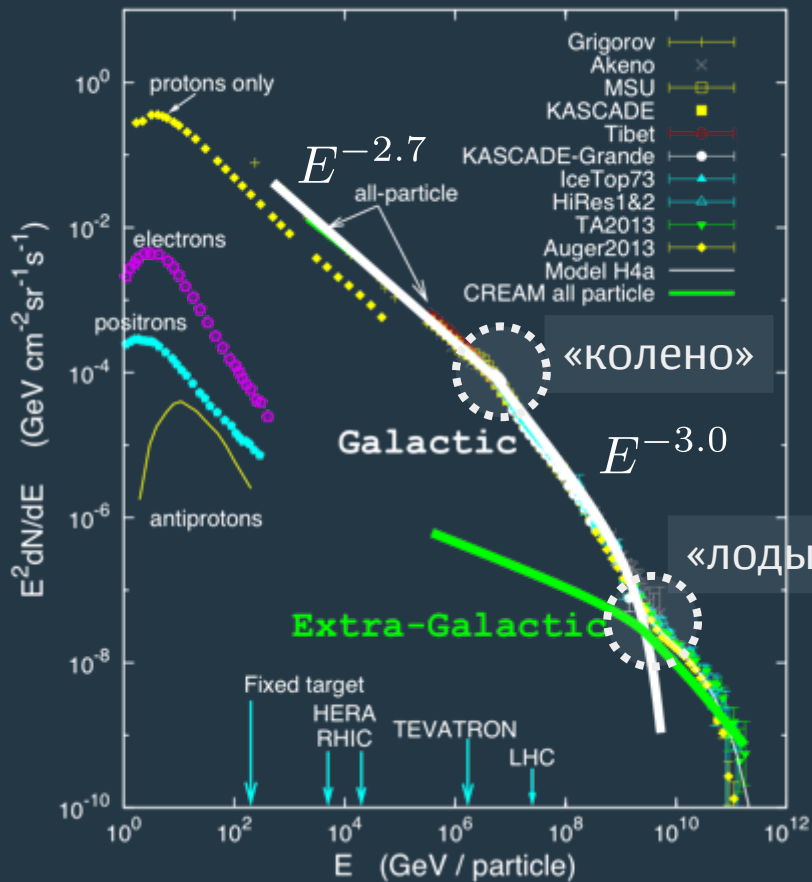
90% протоны

9% гелий и более тяжелые ядра

1% электроны, позитроны, анти-протоны...

Космические лучи → нейтрино

Energies and rates of the cosmic-ray particles



$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (E_p > 50 \text{ EeV})$$

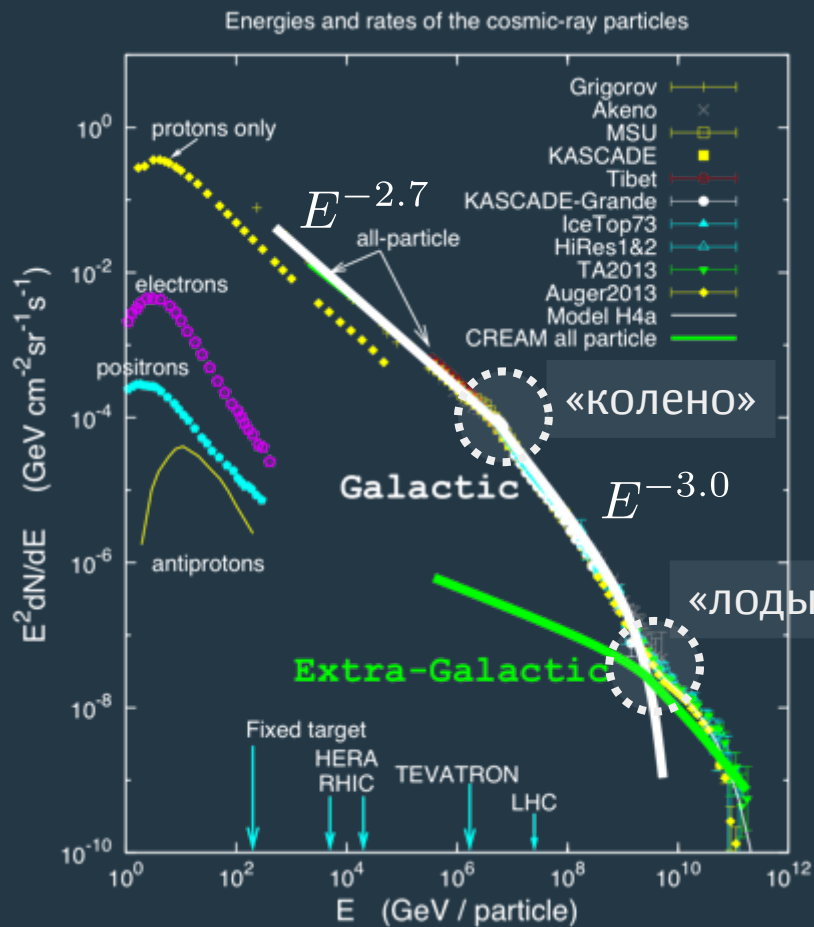
$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$$

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

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

реликтовое излучение

Космические лучи → нейтрино



$$p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (E_p > 50 \text{ EeV})$$

$$p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$$

реликтовое излучение

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

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

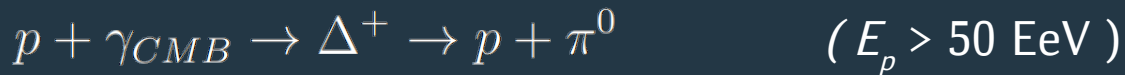
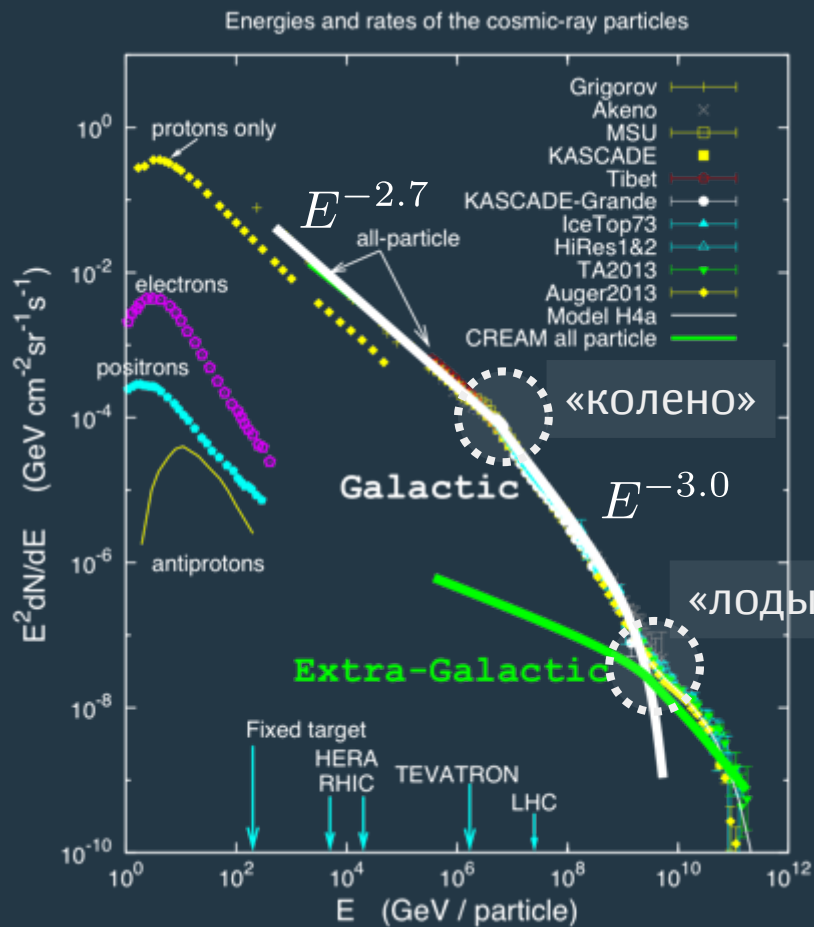
$$p + N \rightarrow \pi^0 + \pi^+ + \pi^- + X$$

вещество

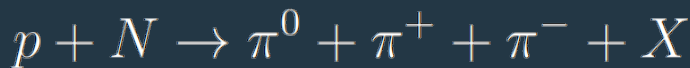
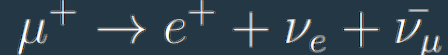
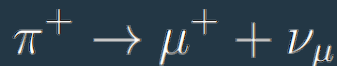
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

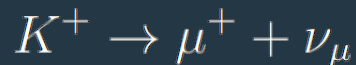
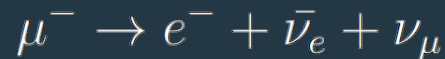
Космические лучи → нейтрино



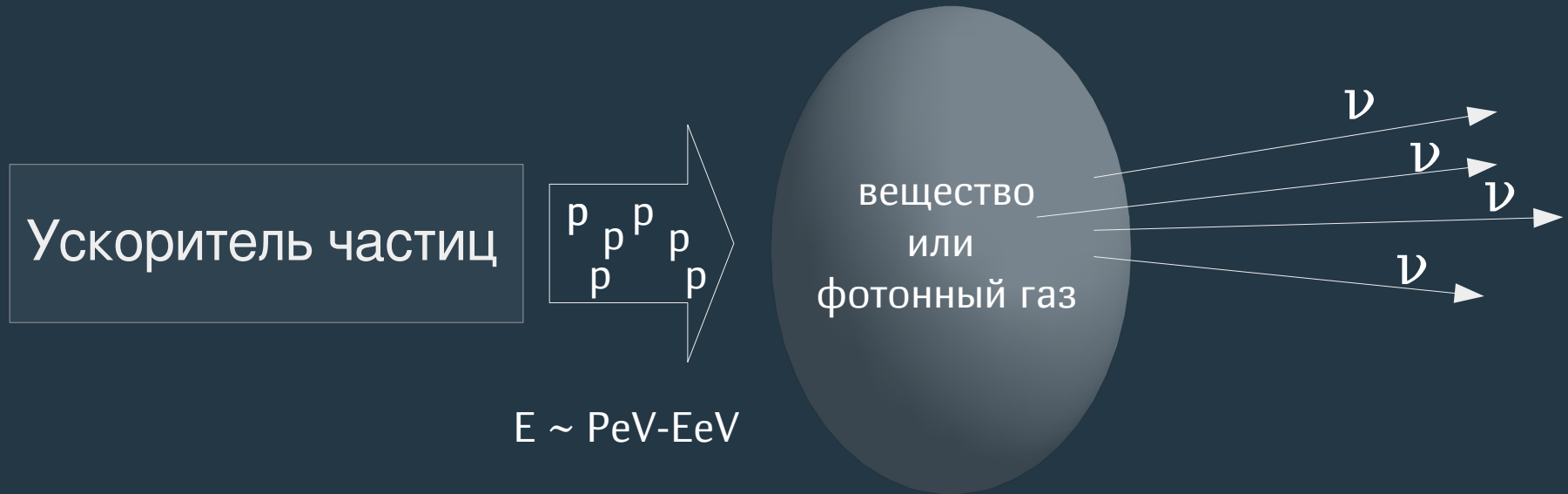
реликтовое излучение



вещество



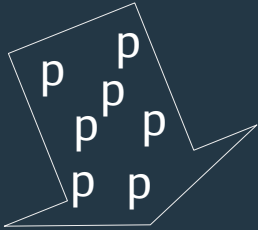
Рождение астрофизических нейтрино



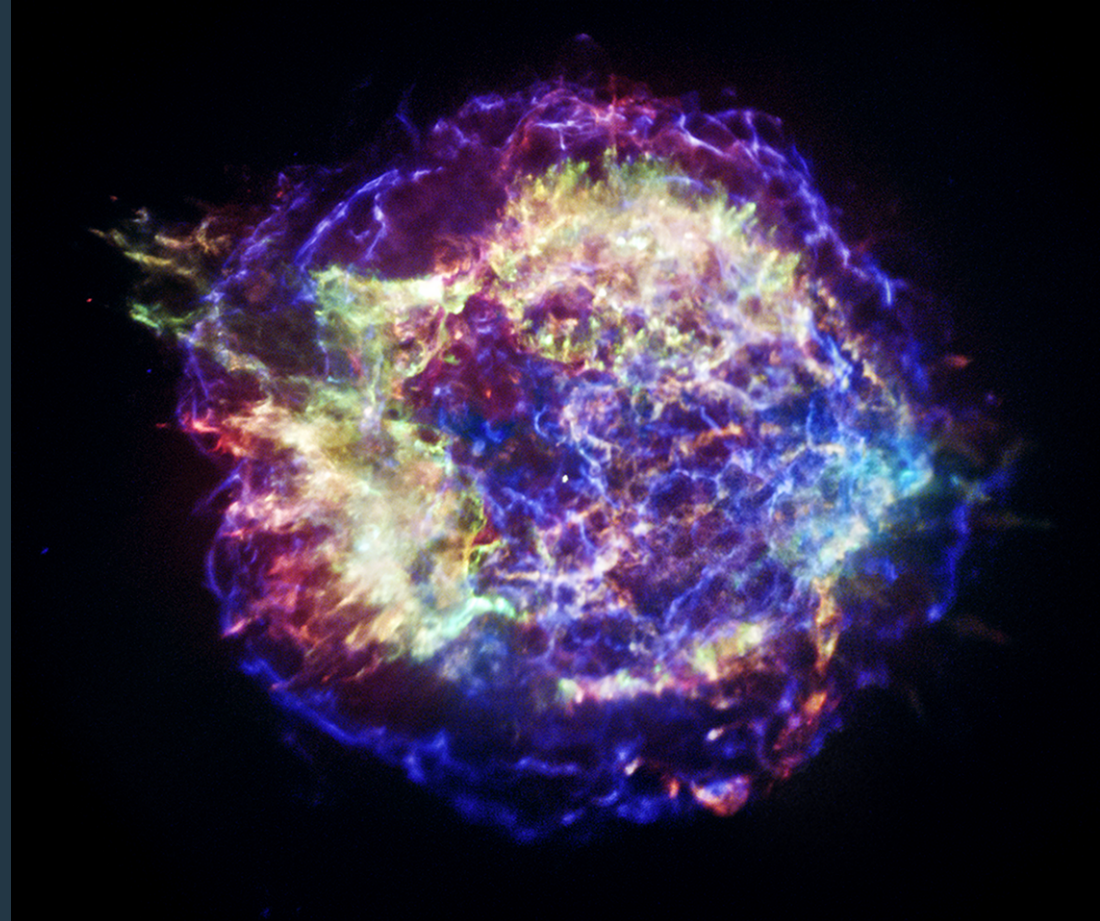
Возможные источники нейтрино

Молодые остатки сверхновых

протоны ускоряются магнитным
полем быстро вращающейся
нейтронной звезды



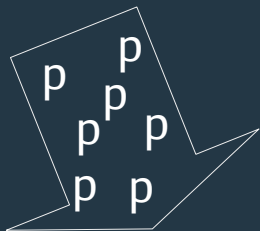
расширяющаяся оболочка
служит мишенью



Возможные источники нейтрино

Активные галактические ядра

протоны ускоряются ударными волнами в джетах или в аккреционном диске



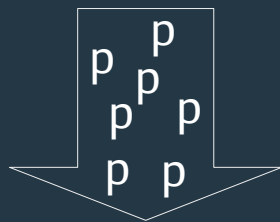
аккреционный диск
служит мишенью



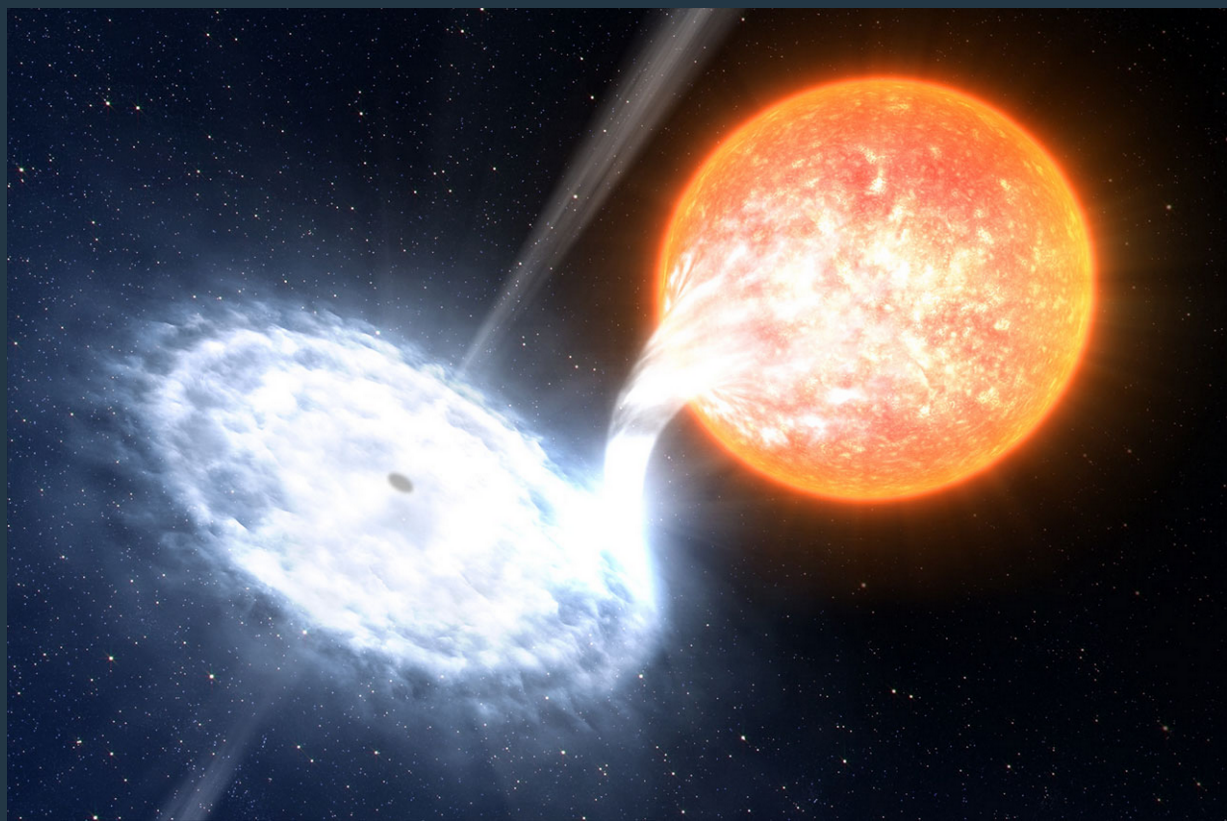
Возможные источники нейтрино

Двойные системы

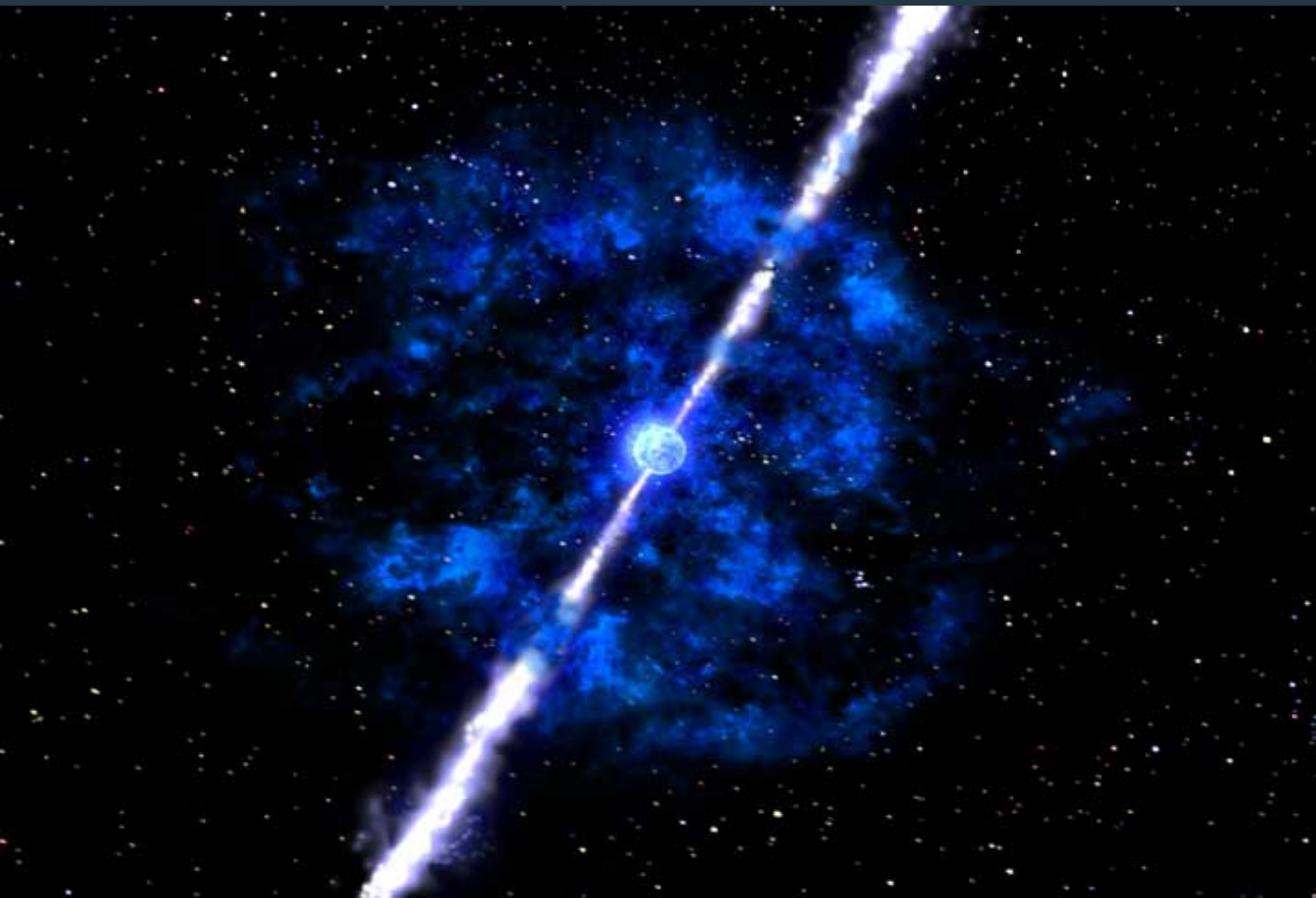
протоны ускоряются в сильном магнитном поле пульсара (черной дыры)



аккреционный диск
служит мишенью



Возможные источники нейтрино



Гамма-всплески

Самые масштабные известные космические выбросы энергии.

Кандидаты:

- гиперновые
- столкновения двух нейтронных звезд
- поглощение нейтронной звезды черной дырой

за доли секунды выделяется столько же энергии, сколько излучит Солнце за все свое существование

Как увидеть нейтрино?

(речь по-прежнему об астрофизических нейтрино)

Как увидеть нейтрино?

(речь по-прежнему об астрофизических нейтрино)

Идея:

Моисей Марков (1960) – в прозрачной природной среде создать сеть светоприемников для регистрации оптических вспышек от взаимодействий нейтрино.



Как увидеть нейтрино?

(речь по-прежнему об астрофизических нейтрино)

Идея:

Моисей Марков (1960) – в прозрачной природной среде создать сеть светоприемников для регистрации оптических вспышек от взаимодействий нейтрино.

по расположению и порядку срабатывания светоприемников можно определить направление



История



Идея:

Моисей Марков (1960) – в прозрачной природной среде создать сеть светоприемников для регистрации оптических вспышек от взаимодействий нейтрино.



1970 – старт первого проекта нейтринного телескопа DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector) у берегов Гавайских островов.

1979 – Александр Чудаков предлагает проводить на Байкале методические испытания. Предполагалось, что глубины Байкала недостаточно для полномасштабного телескопа.

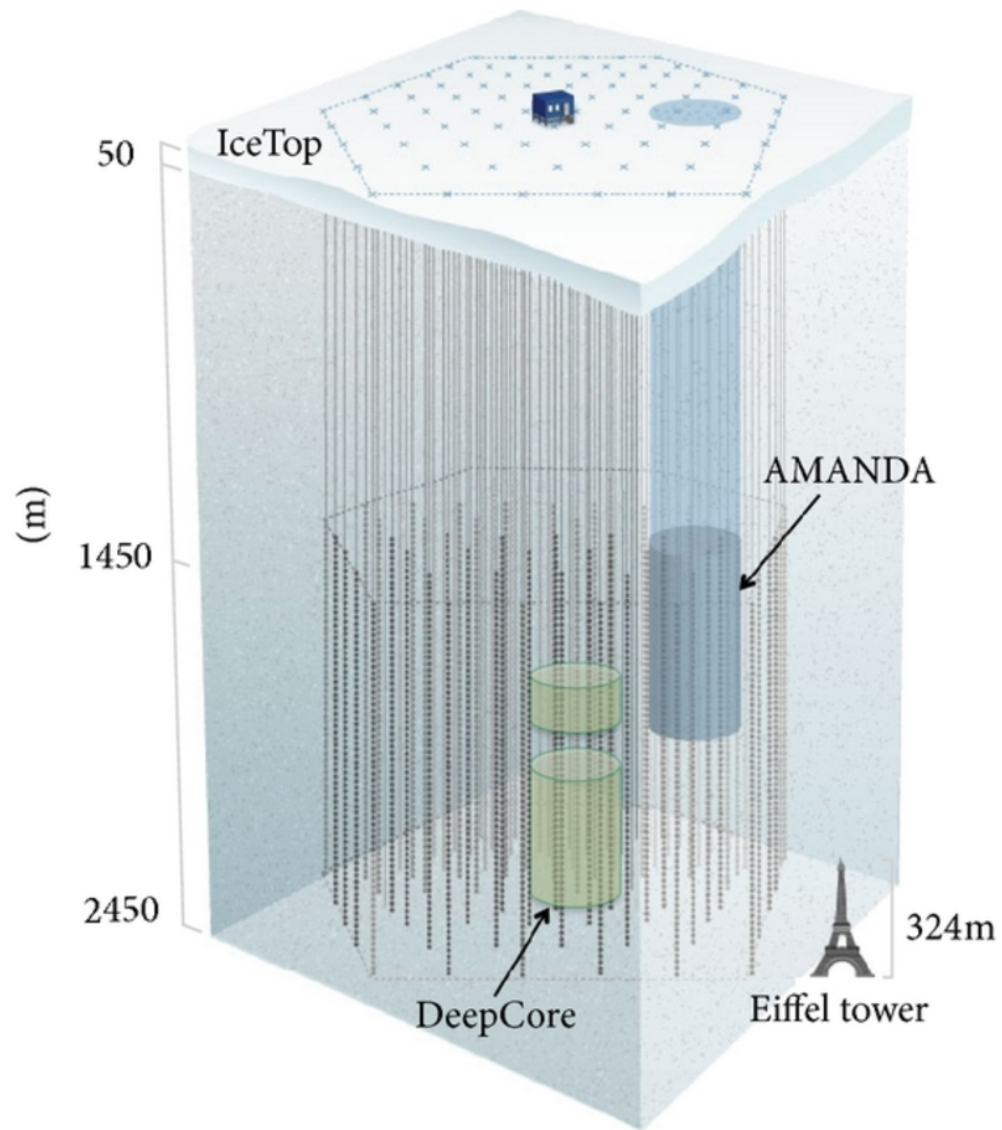
1995 – DUMAND закрывается из-за технических сложностей.

История: Южный полюс

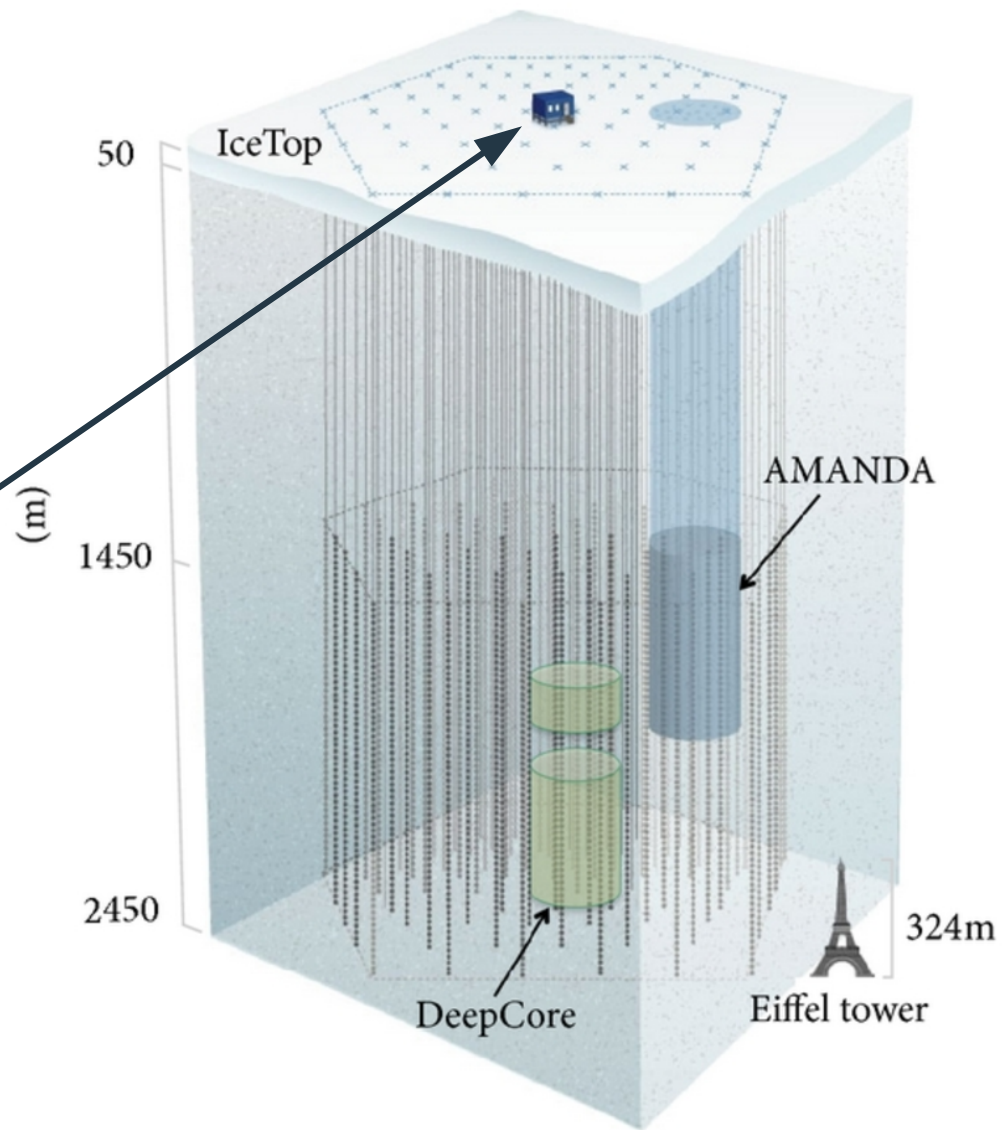
1996: старт проекта AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array).

2005 – 2010: строительство IceCube – крупнейшего нейтринного телескопа на сегодняшний день

2013: регистрация 28 нейтрино, рожденным за пределами Солнечной системы

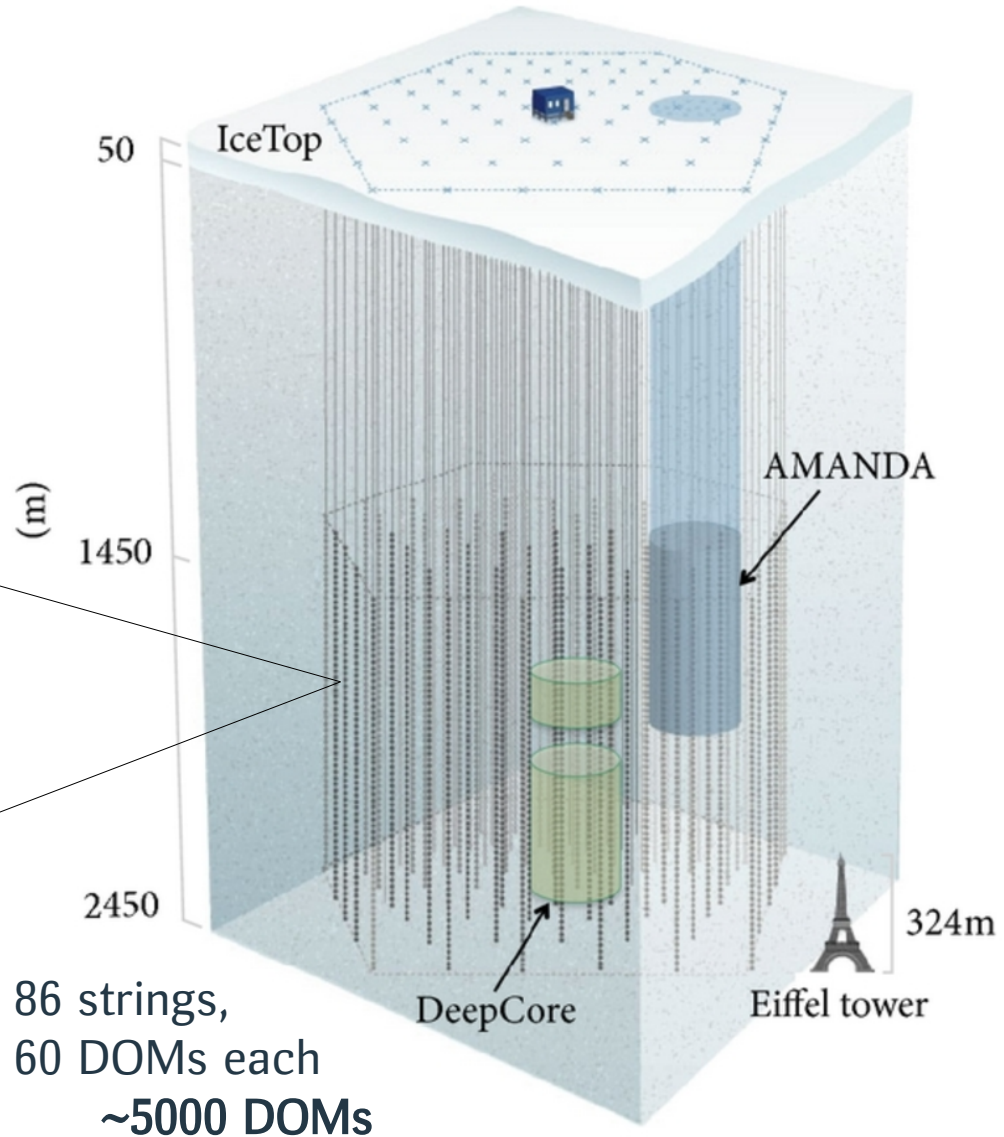
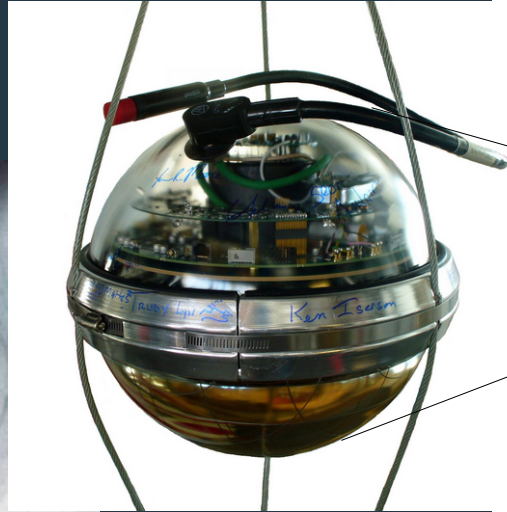


История: Южный полюс



IceCube

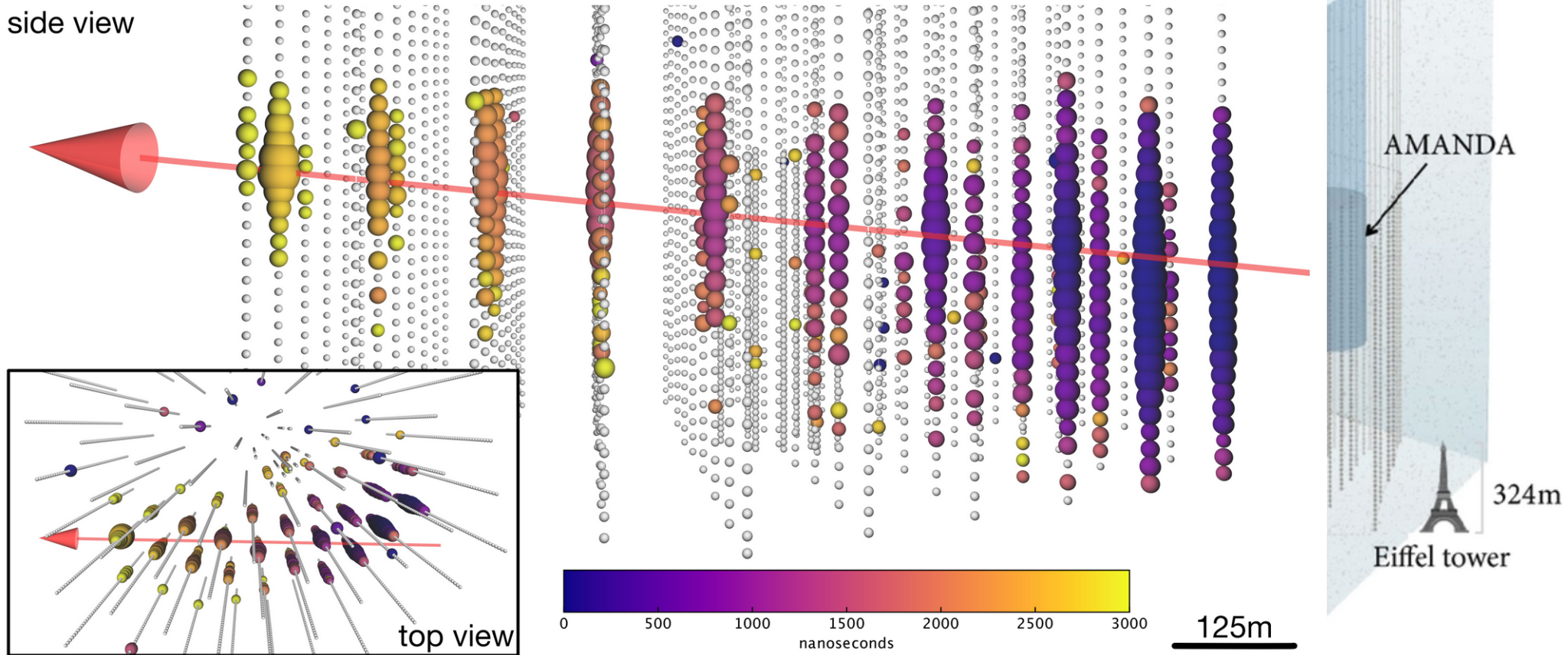
оптические модули (DOM) опускаются в скважины во льду



IceCube

IC170922 event coincident with γ -ray blazar TXS 0506+056

side view



История: озеро Байкал

- 1979: предложение А. Чудакова проводить на Байкале методические испытания
- 1980-1995: NT-36
- 1995-1998: NT-72, NT-96, NT-144, NT-200
- 2004-2005: NT-200+
- 2015-2021: Baikal-GVD phase I (8 clusters, 34M \$USD)
- 2025: Baikal-GVD full (16 clusters)



История: озеро Байкал

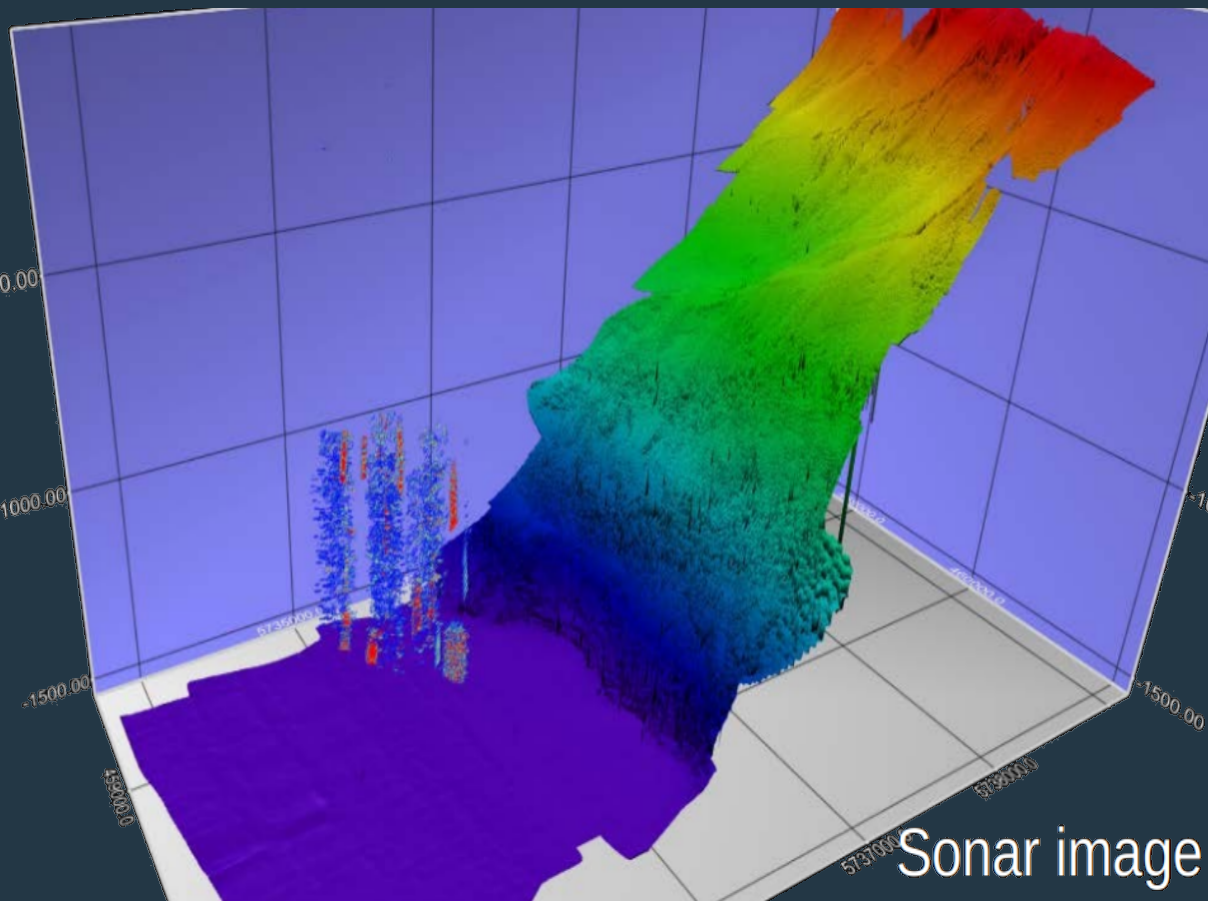


Baikal-GVD сегодня

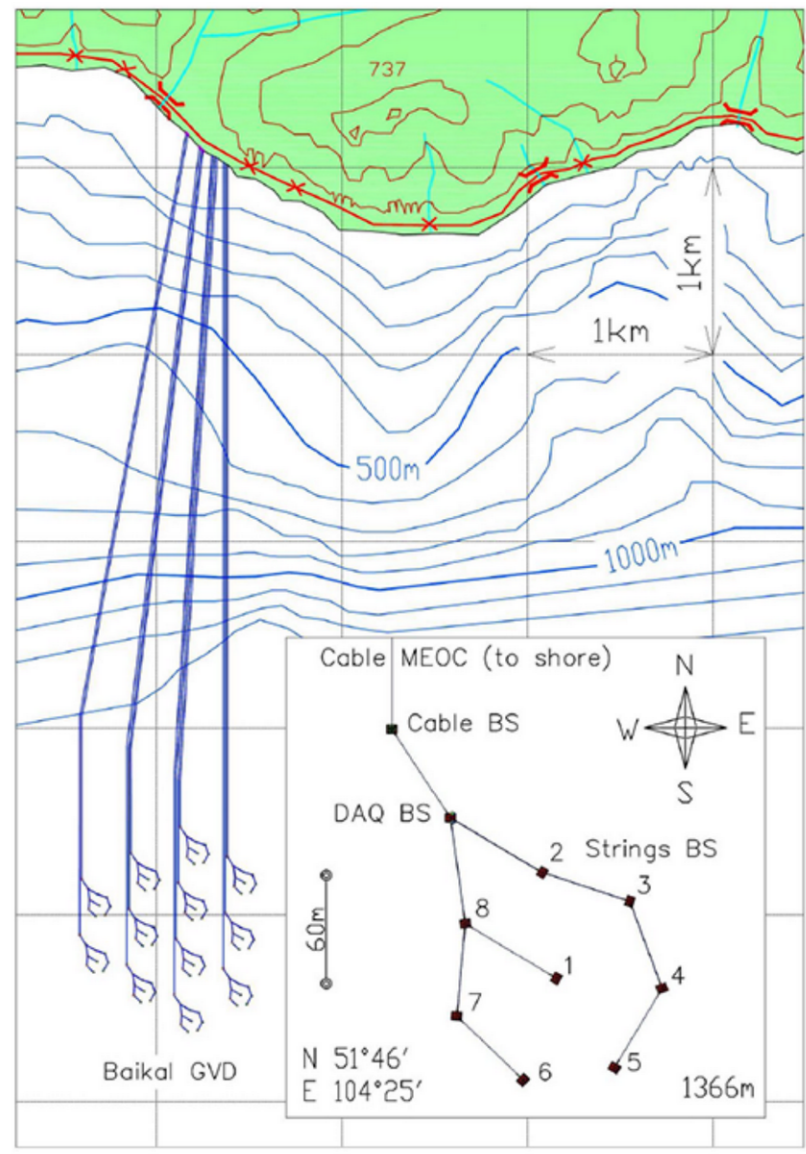
Ваікал-GVD сёння



Baikal-GVD сегодня



Sonar image

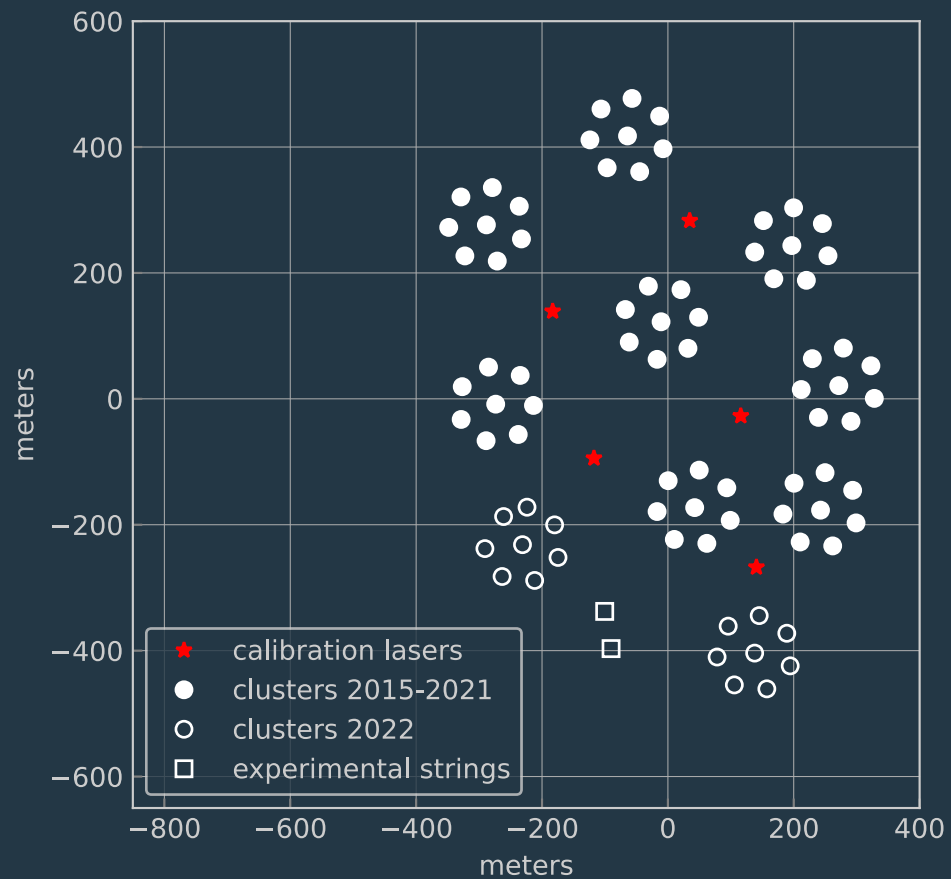


Вайкал-GVD: экспедиция 2022

ледовый лагерь



Baikal-GVD 2022



Зимняя экспедиция



Сначала промер толщины льда и
разметка положений гирлянд на льду



Зимняя экспедиция



Выпиливание «майн»:
16 под новые гирлянды,
+ несколько под кабельные станции
+ под ремонт



Зимняя экспедиция

Вывоз на лед кунгов



Штаб, он же «Оранжевый»



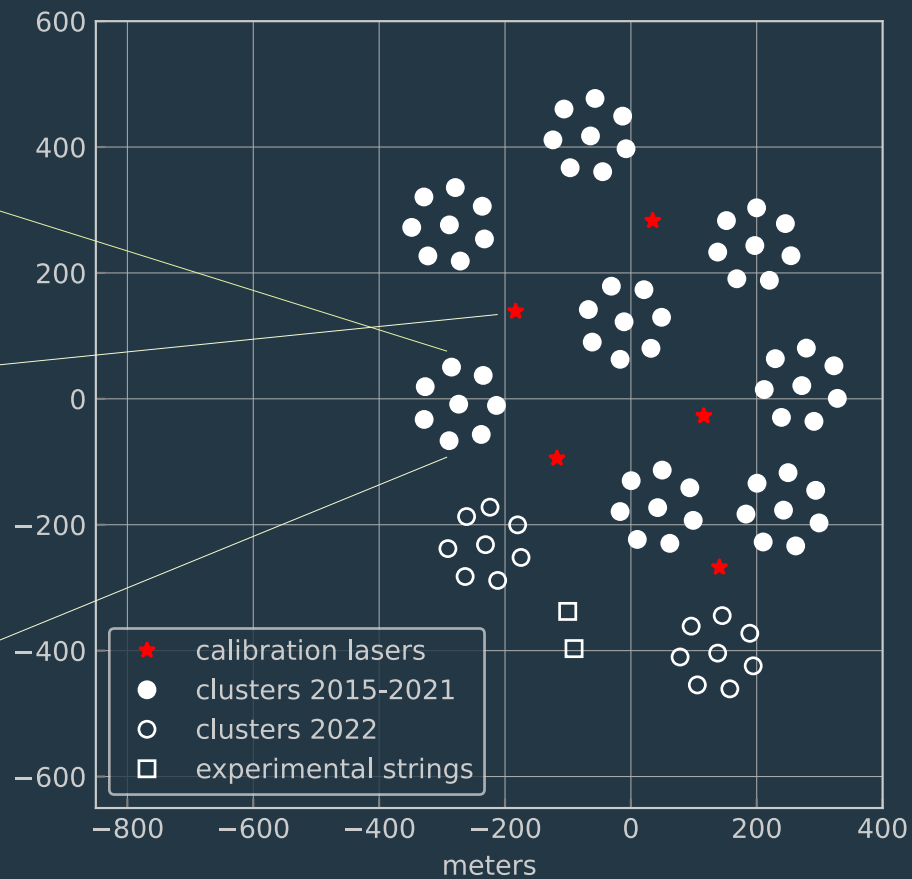
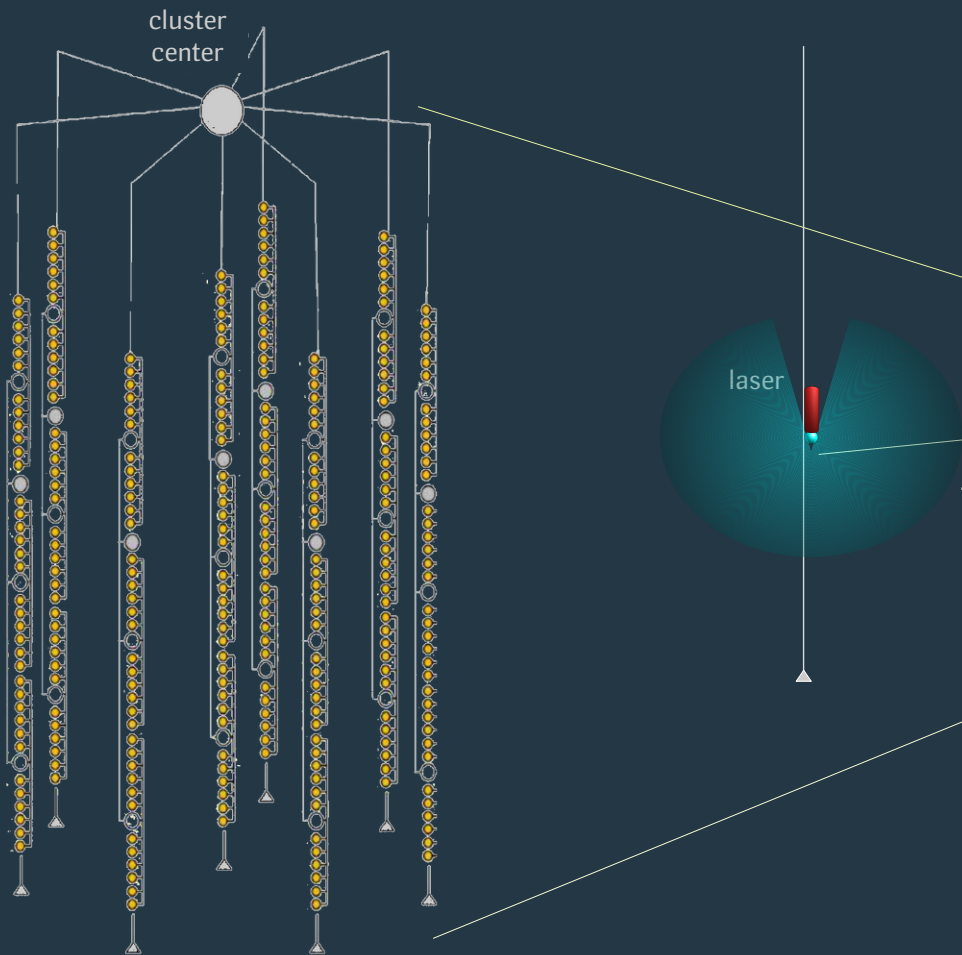
Зимняя экспедиция



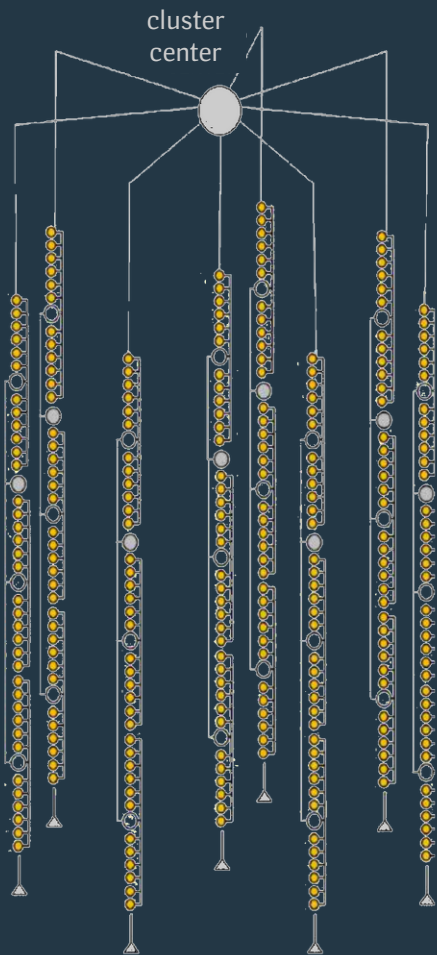
Вывоз лебедок

Baikal-GVD 2022

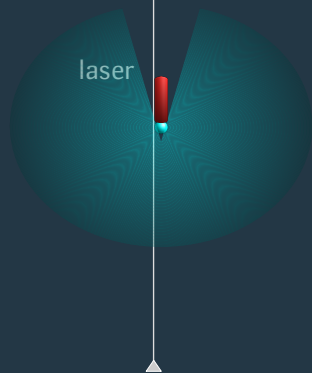
Video: сборка телескопа



Компоненты



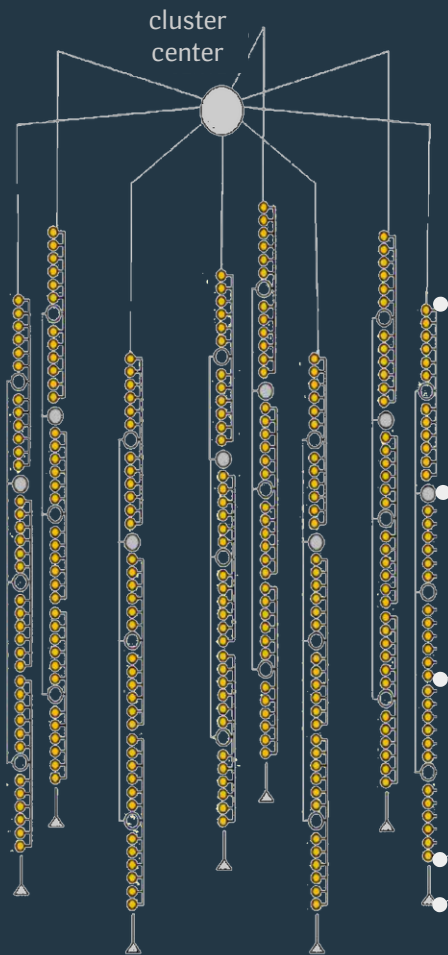
Лазер



Назначение:
измерение оптических
свойств воды,
калибровки



Компоненты



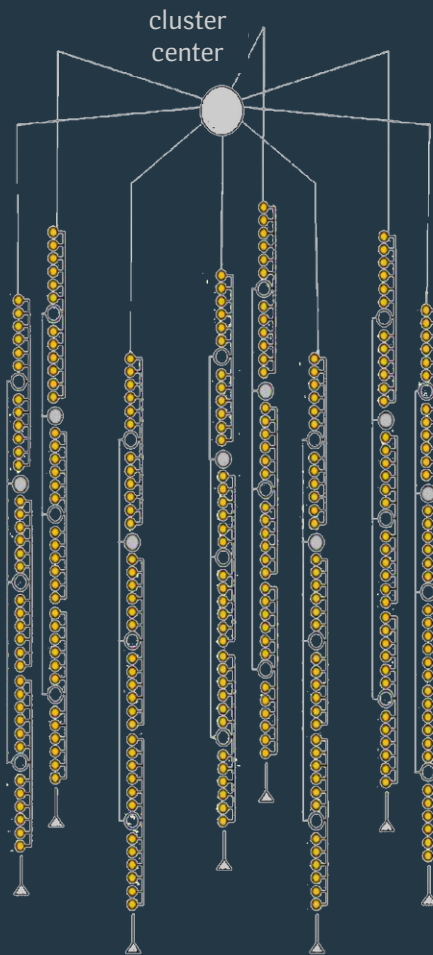
Акустический
модем

4-5 на каждой
гирлянде

Назначение:
точное позиционирование
(20-30 см)



Компоненты



Оптический модуль

36 на каждой гирлянде

Назначение:
регистрация
черенковского
света



Зимняя экспедиция

Вывоз на лед и тестирование оптических модулей



Монтаж гирлянд



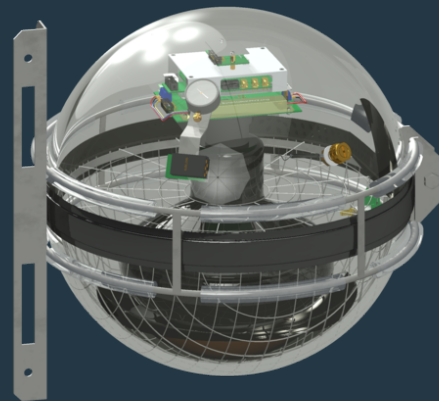
Монтаж гирлянд



Монтажная бригада
состоит из 3-5 человек

В последние годы
одновременно работает
около 4 бригад, каждая
может независимо
монтировать новую
гирлянду или
ремонттировать старую

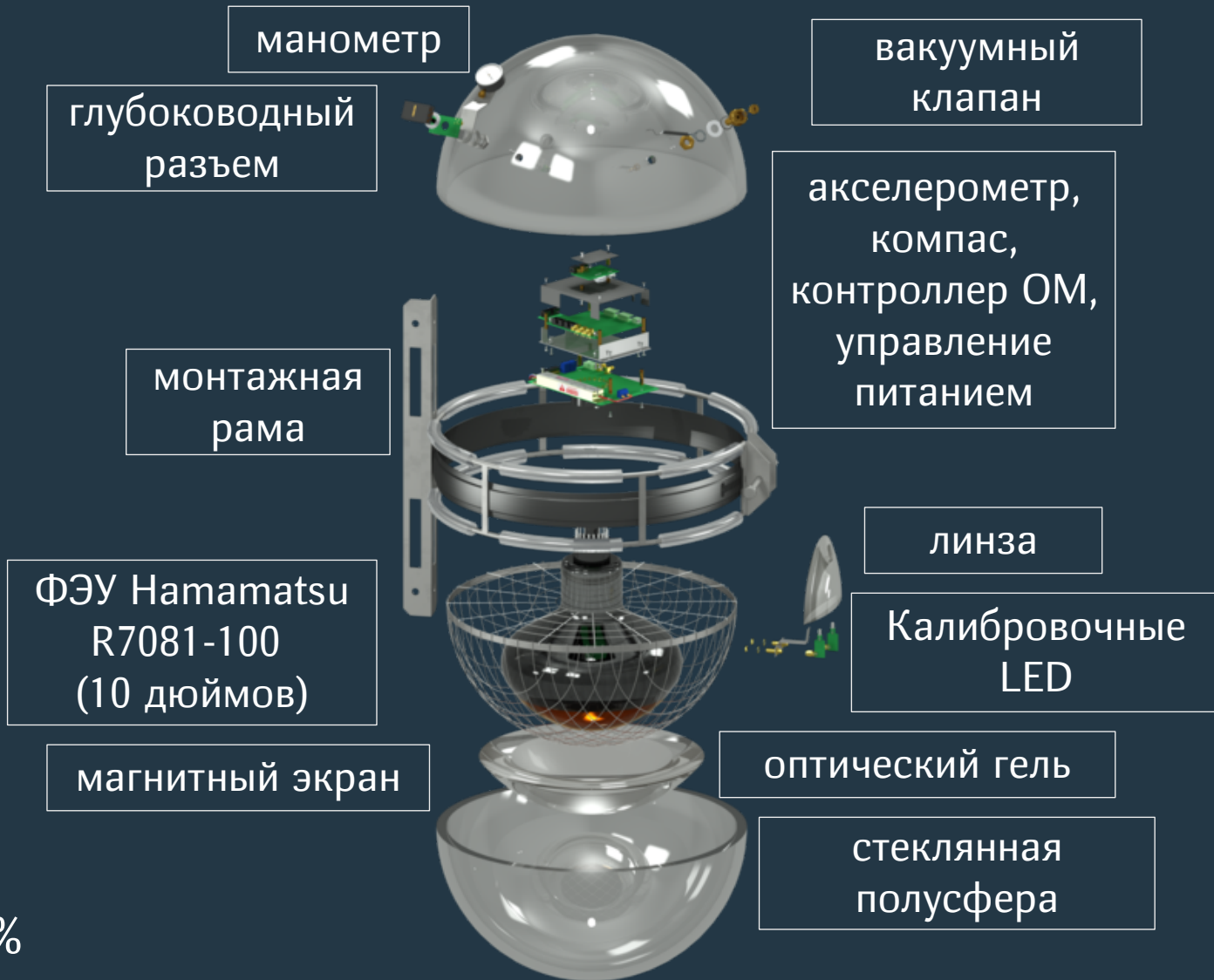
Оптический модуль



Оптический модуль

регистрирует
отдельные
фотоны

эффективность ~25%



Производство оптических модулей

Альфа-зал на площадке ЛЯП

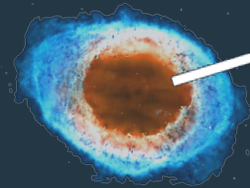
~600 модулей в год



Video: Сборка оптических модулей

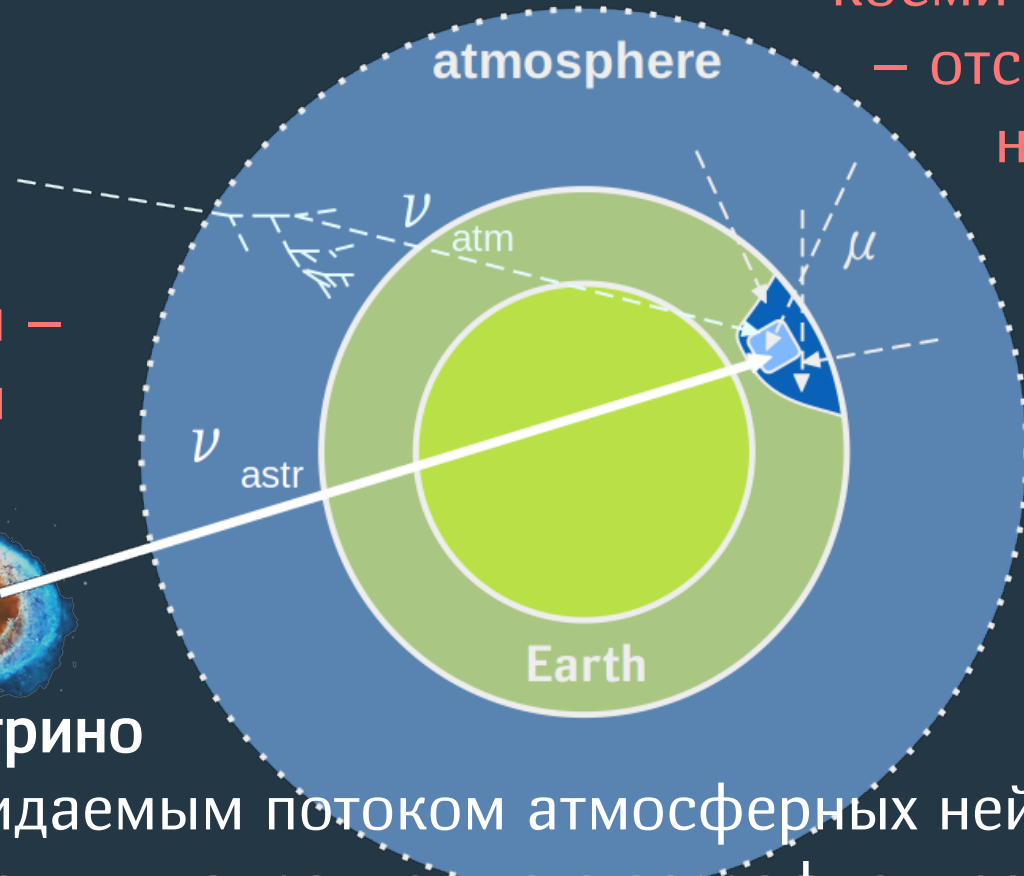
Сигнал и фон

Атмосферные нейтрино от космических лучей – неустранимый фон



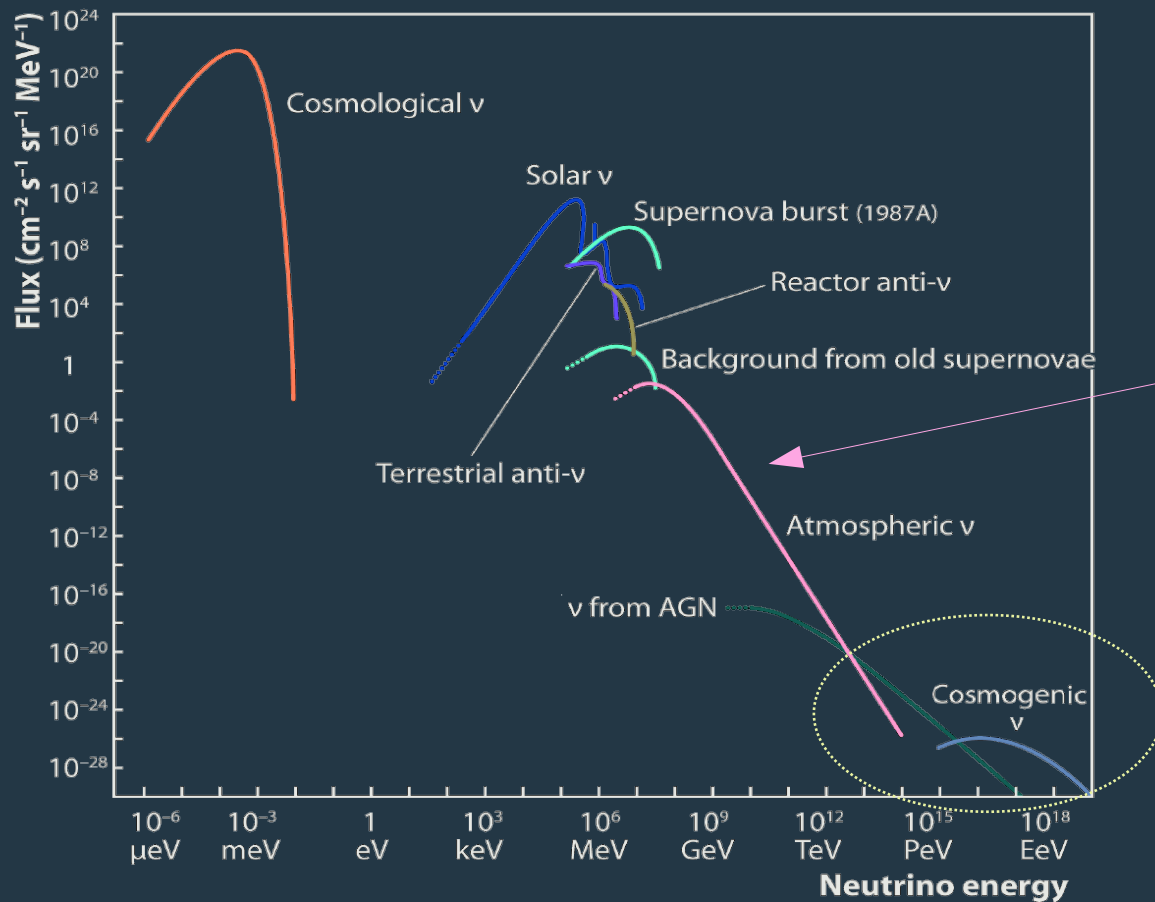
Астрофизические нейтрино

- Превышение над ожидаемым потоком атмосферных нейтрино
- Корреляция по времени и направлению с астрофизическими событиями и объектами



Мюоны от космических лучей – отсеиваются по направлению прихода

Спектр нейтрино



спектр атмосферных
нейтрино хорошо известен



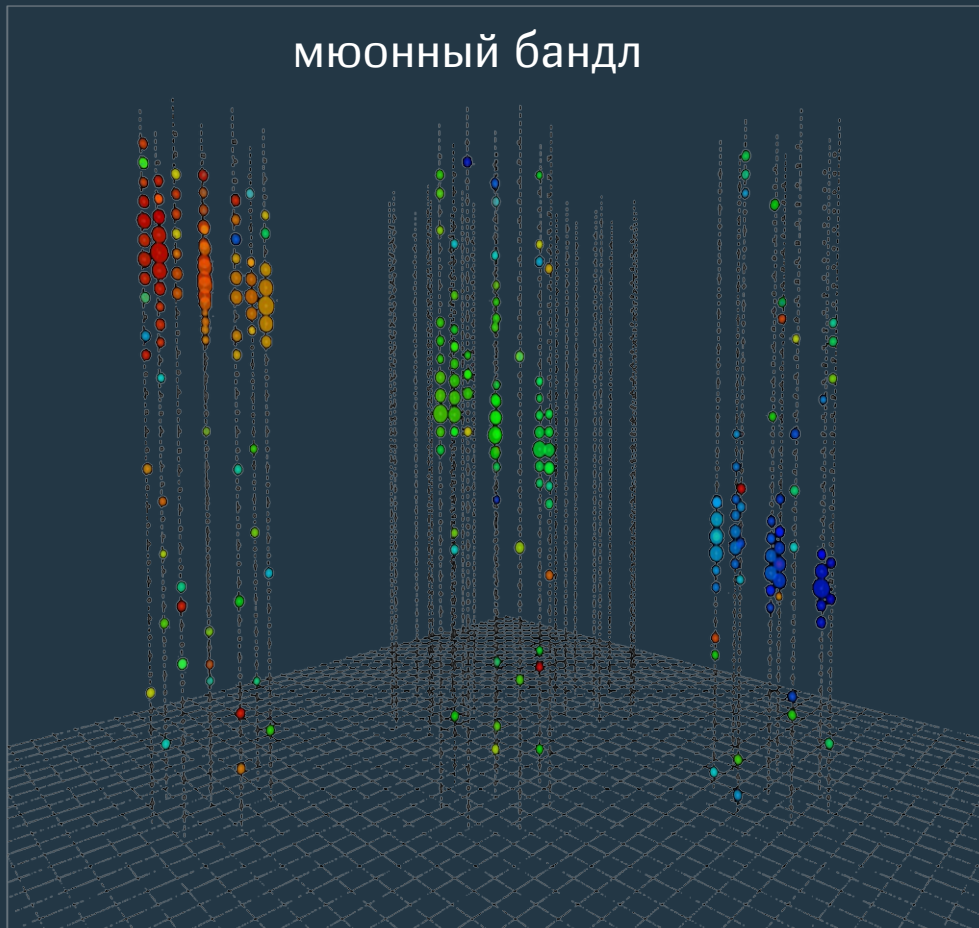
Примеры событий

late

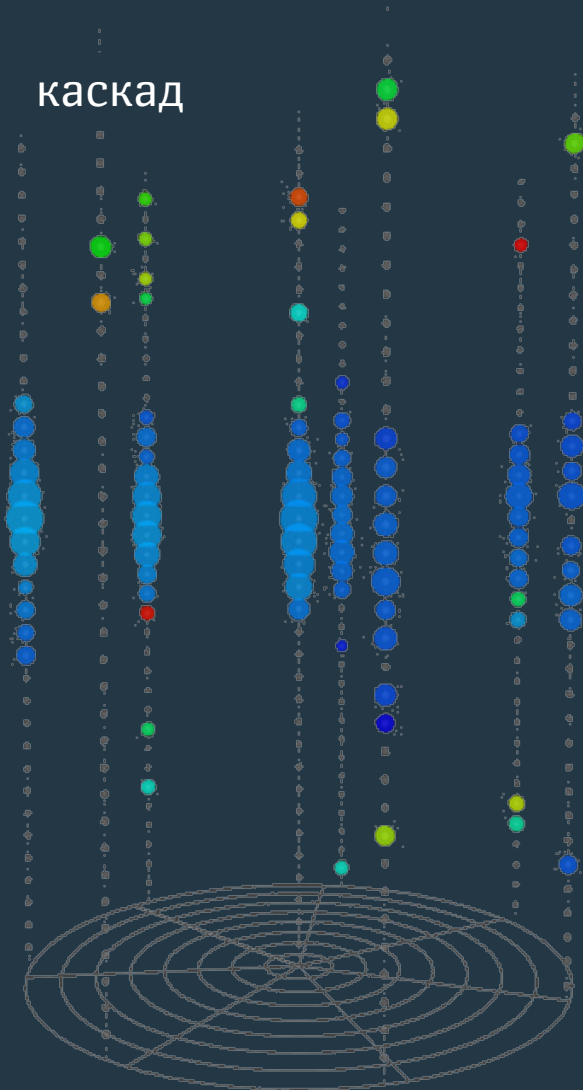


early

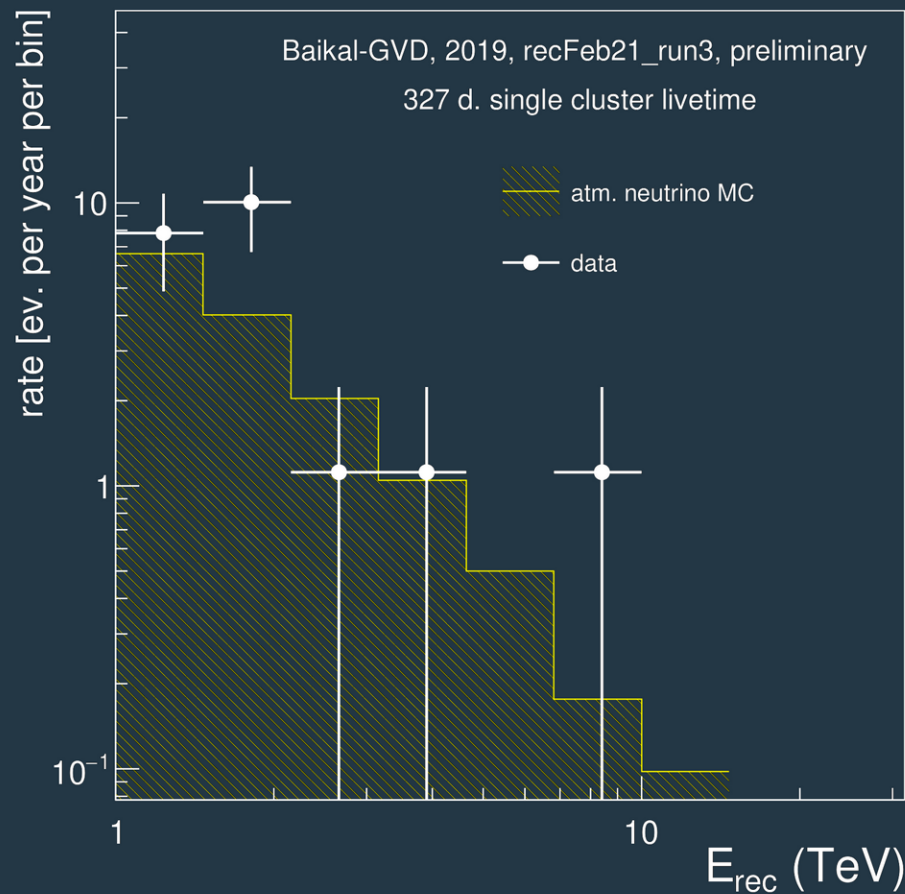
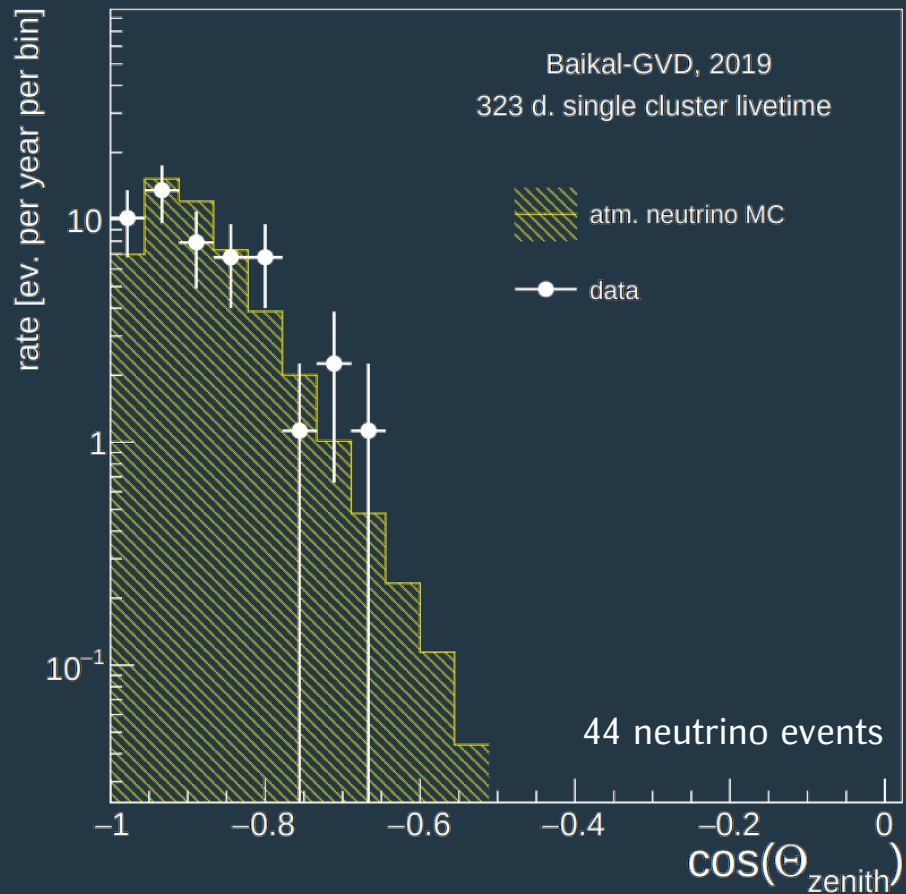
мюонный бандл



каскад



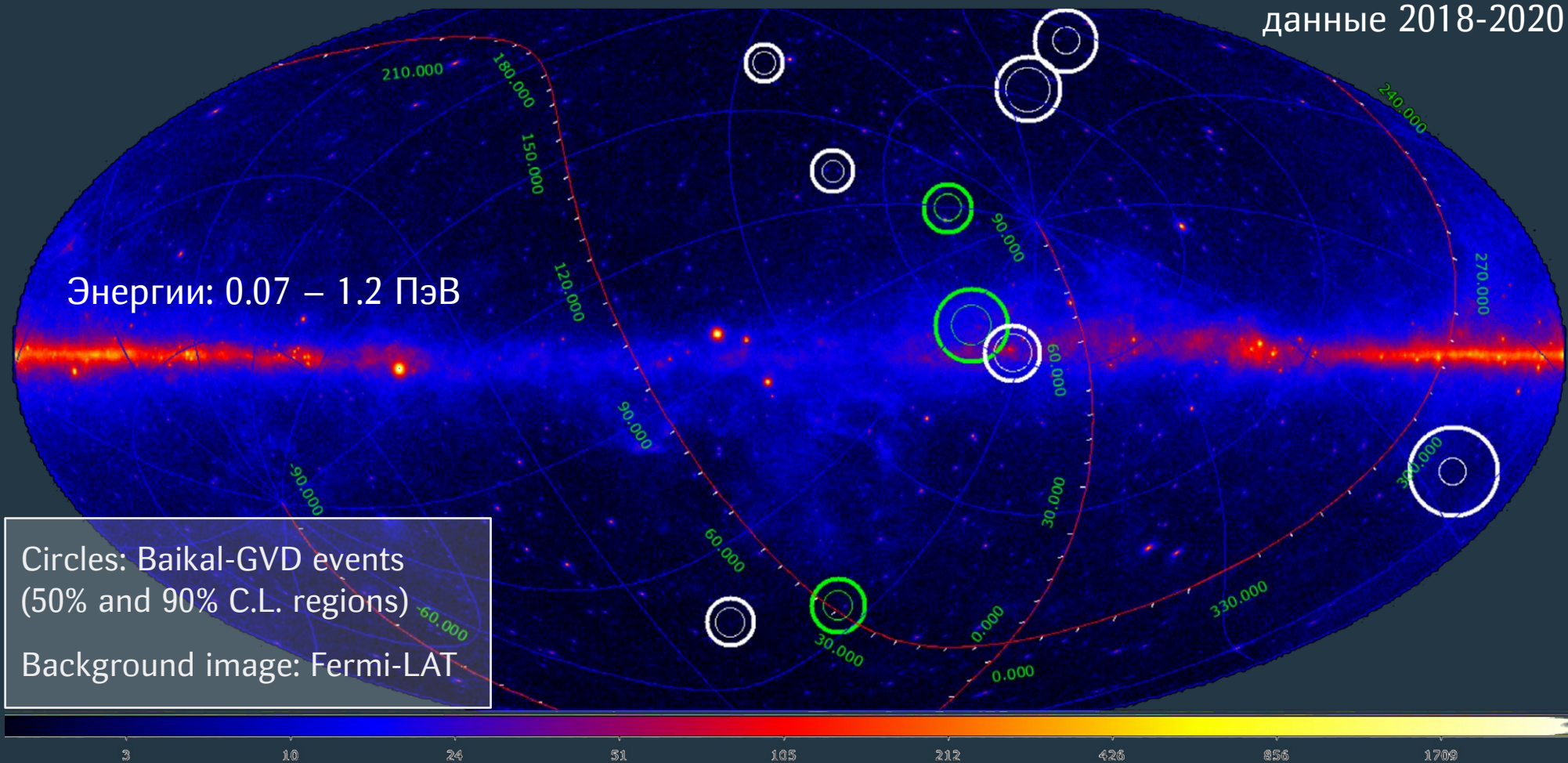
Восходящие трековые события



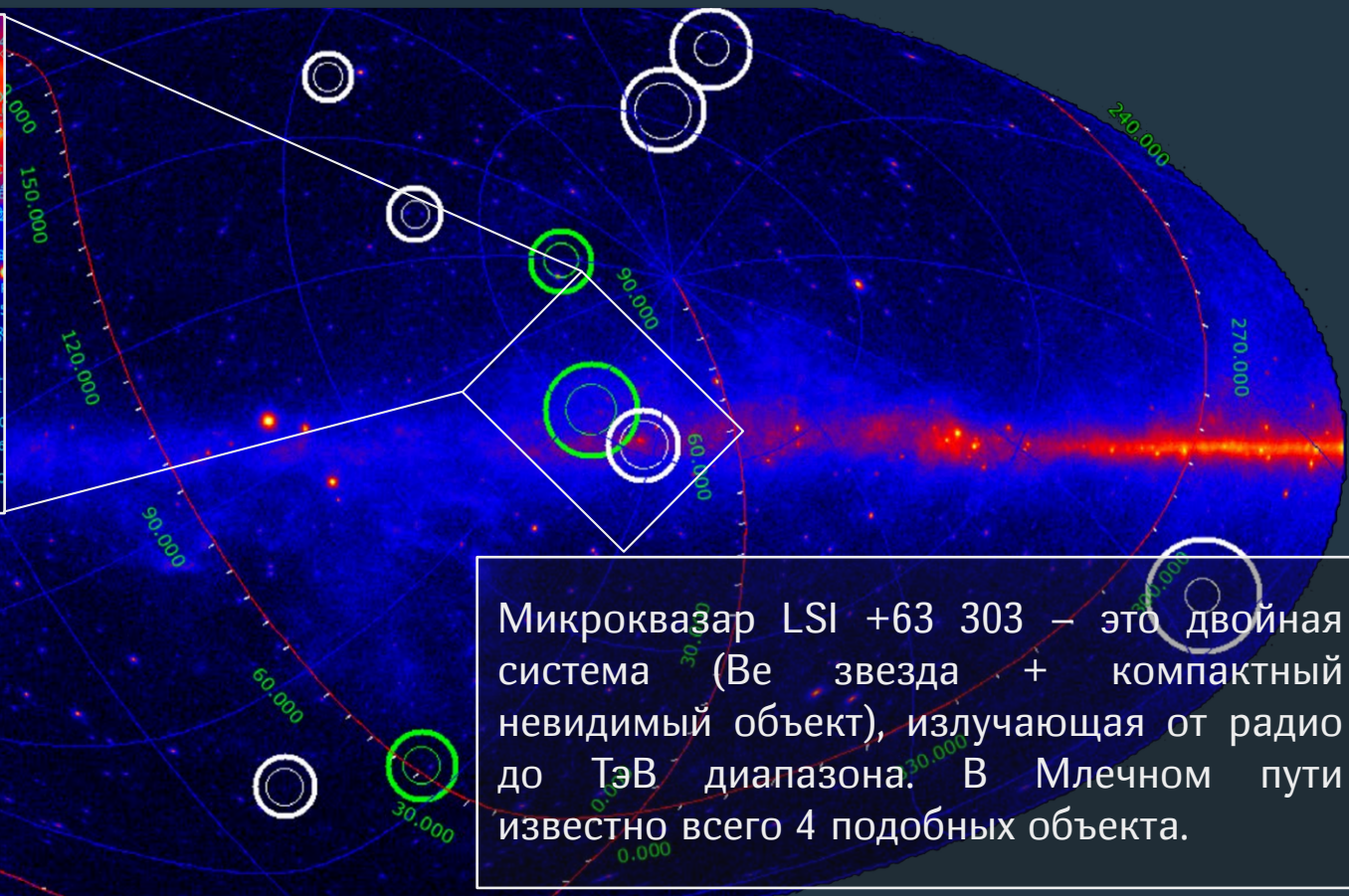
Каскадные события

данные 2018-2020

Энергии: 0.07 – 1.2 ПэВ



Каскадные события

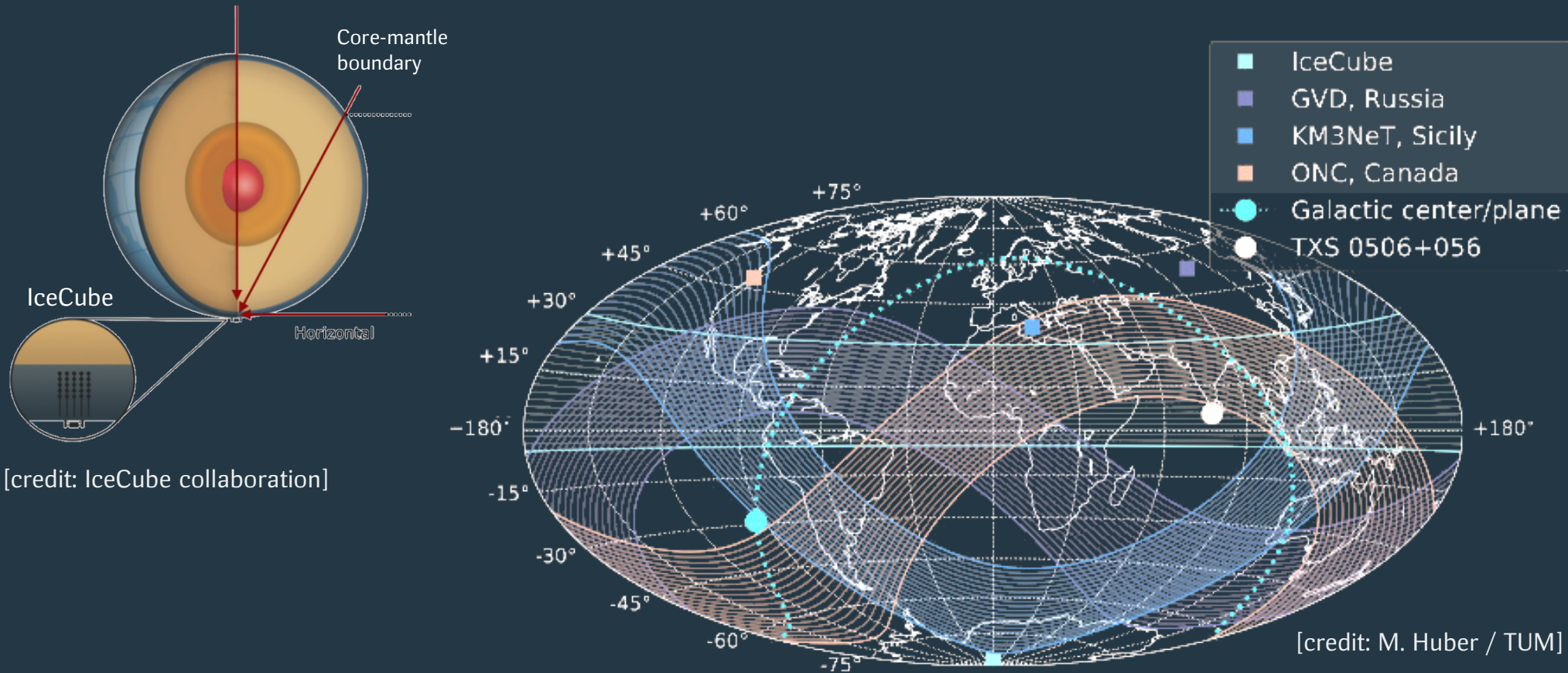


Circles: Baikal-GVD events
(50% and 90% C.L. regions)

Background image: Fermi-LAT

Микроквazar LSI +63 303 – это двойная система (Ве звезда + компактный невидимый объект), излучающая от радио до ТэВ диапазона. В Млечном пути известно всего 4 подобных объекта.

Глобальная сеть нейтринных телескопов



Мультиканальная астрономия

радио-телескопы

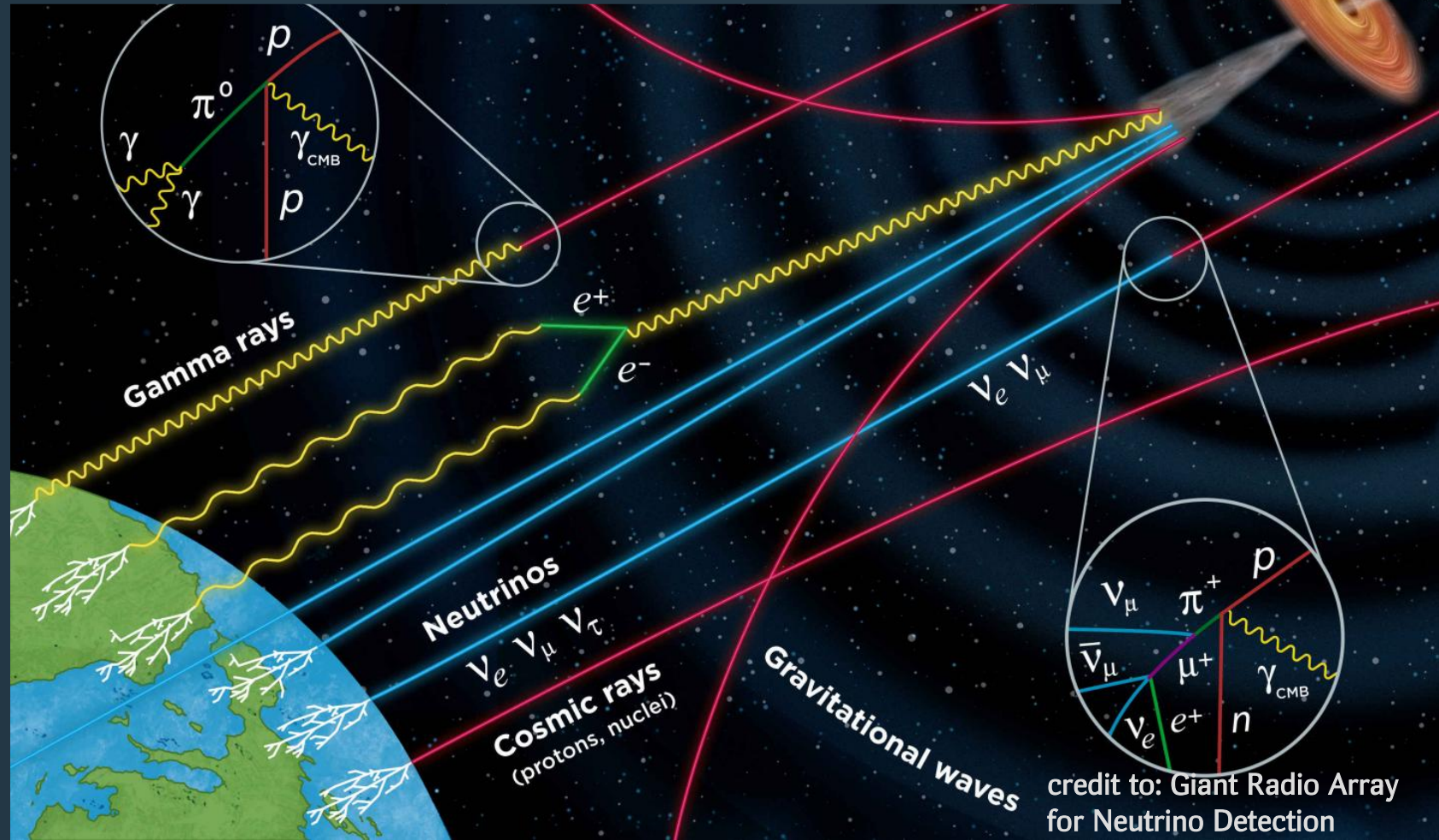
оптические
телескопы

рентгеновские
телескопы

гамма-телескопы

нейтринные
телескопы

детекторы
гравитационных
волн



Первая астрономическая телеграмма

Outside
GCN
IAUCs
ATel on Twitter

Patreon

The Astronomer's Telegram

Post | Search | Policies
Credential | Feeds | Email

18 May 2022; 17:17 UT

This space for free for your conference.

ATel #15112

Thanks to Patrons, The Astronomer's Telegram is free to read, free to publish and always will be. Thank you.

[[Previous](#) | [Next](#) | [ADS](#)]

Baikal-GVD observation of a high-energy neutrino candidate event from the blazar PKS 0735+17 at the day of the IceCube-211208A neutrino alert from the same direction

ATel #15112; *Zh.-A. Dzhiikibaev and O. Suvorova (INR RAS, Moscow) for the Baikal-GVD collaboration*

on 14 Dec 2021; 18:44 UT

Credential Certification: *Sergey Troitsky (st@ms2.inr.ac.ru)*

Subjects: Neutrinos, AGN, Blazar

Referred to by ATel #: [15132](#), [15136](#), [15143](#), [15290](#)

Related


- 15290 Search for neutrino counterpart to the blazar PKS0735+178 potentially associated with IceCube-211208A and Baikal-GVD-211208A with the KM3NeT neutrino detectors.
- 15148 NIR followup of the Blazar PKS 0735+178
- 15143 Baksan Underground Scintillation Telescope observation of a GeV neutrino candidate event at the time of a gamma-ray flare of the blazar PKS 0735+17, a possible source of coinciding IceCube and Baikal high-energy neutrinos
- 15136 Optical and near-infrared observations of PKS 0735+178
- 15132 Optical view of neutrino emitter candidate PKS 0735+178
- 15130 Re-brightening of the BL Lac

Совпадение по времени и направлению с вспышкой блазара PKS 0735+17

IceCube тоже зарегистрировал одно нейтрино: IC211208A

Вспышки зарегистрированы в гамма, рентгеновском, оптических и радиодиапазонах.

<https://www.astronomerstelegram.org>

A night scene on a frozen lake. In the foreground, there is a large, dark crane structure with a spherical top, mounted on a platform. To its right, a tractor is visible. The ground is covered in snow and ice, with a line of orange buoys in the middle ground. In the background, there are dark hills and a few lights. The sky is dark and filled with many stars, with a faint yellowish glow on the horizon.

Спасибо за внимание!