

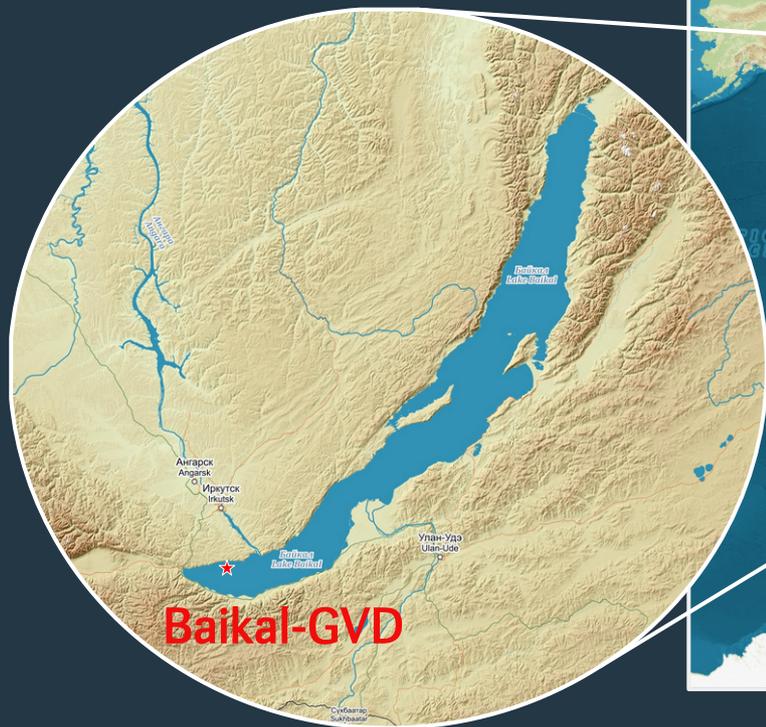
семинар в Доме Ученых ОИЯИ  
19 мая 2022



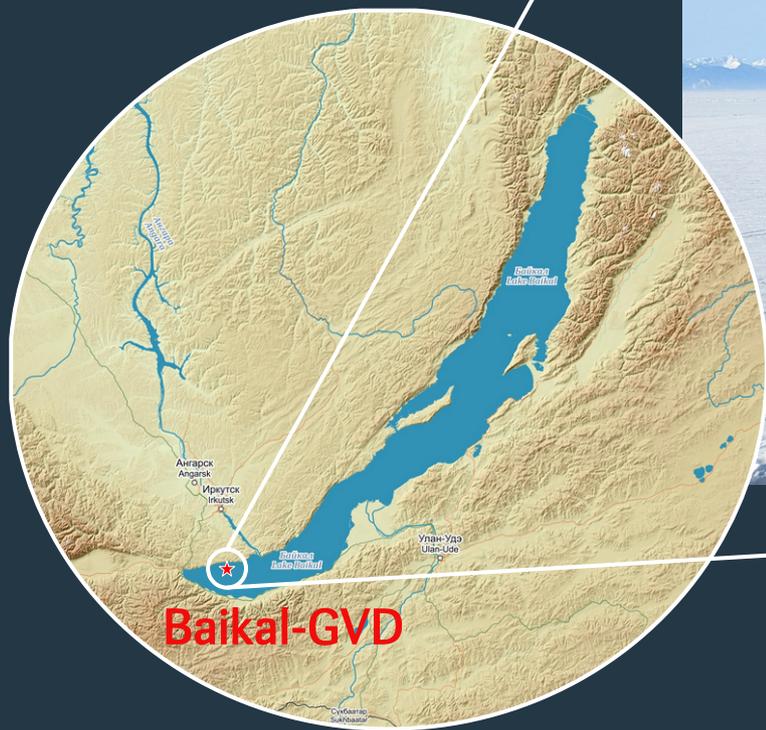
Юрий Малышкин  
Лаборатория Ядерных Проблем, ОИЯИ

Baikal-GVD: у истоков нейтринной астрономии

# Baikal-GVD



# Baikal-GVD



# Baikal-GVD

Gigaton

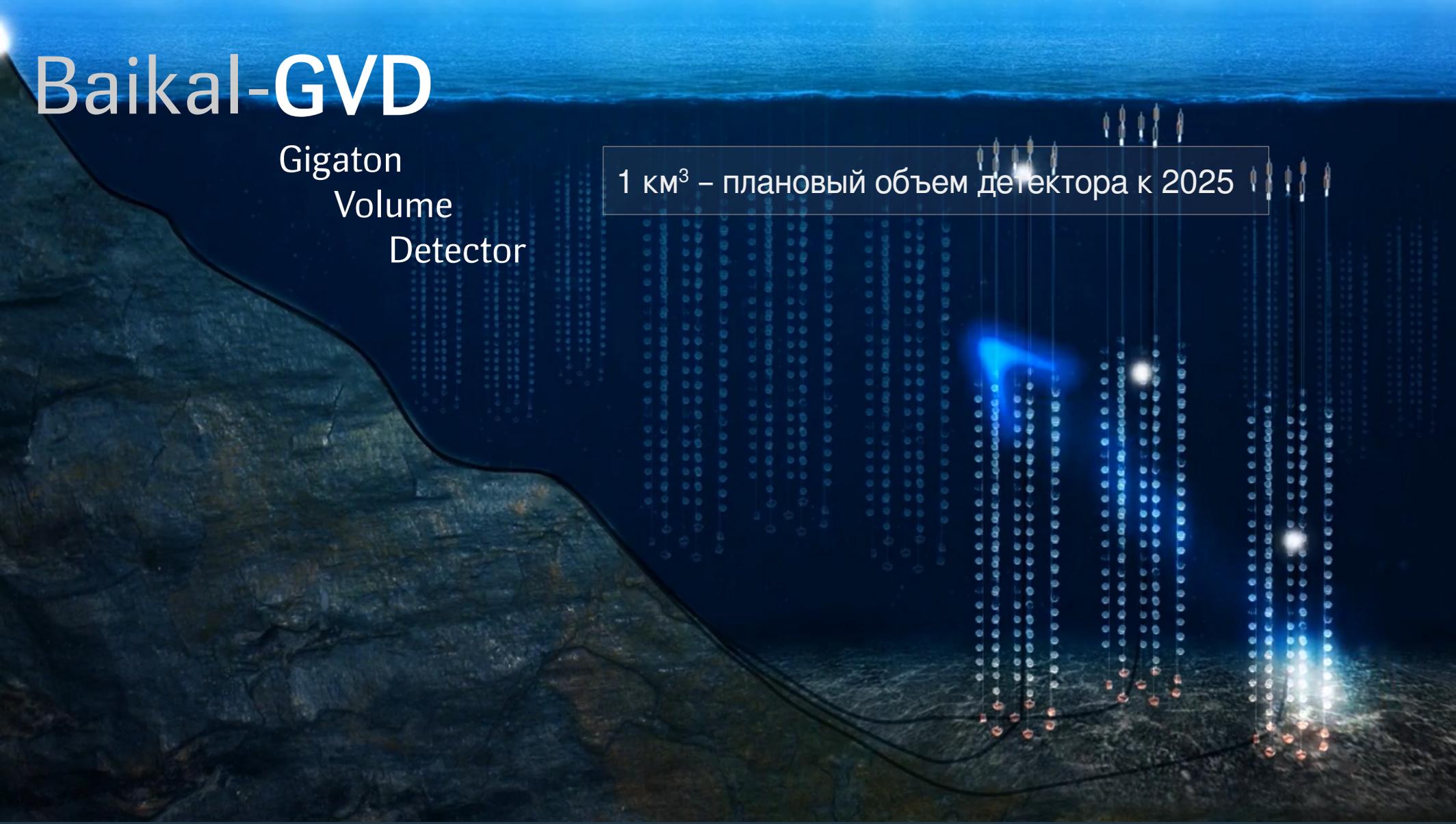
Volume

Detector

# Baikal-GVD

Gigaton  
Volume  
Detector

1 км<sup>3</sup> – плановый объем детектора к 2025

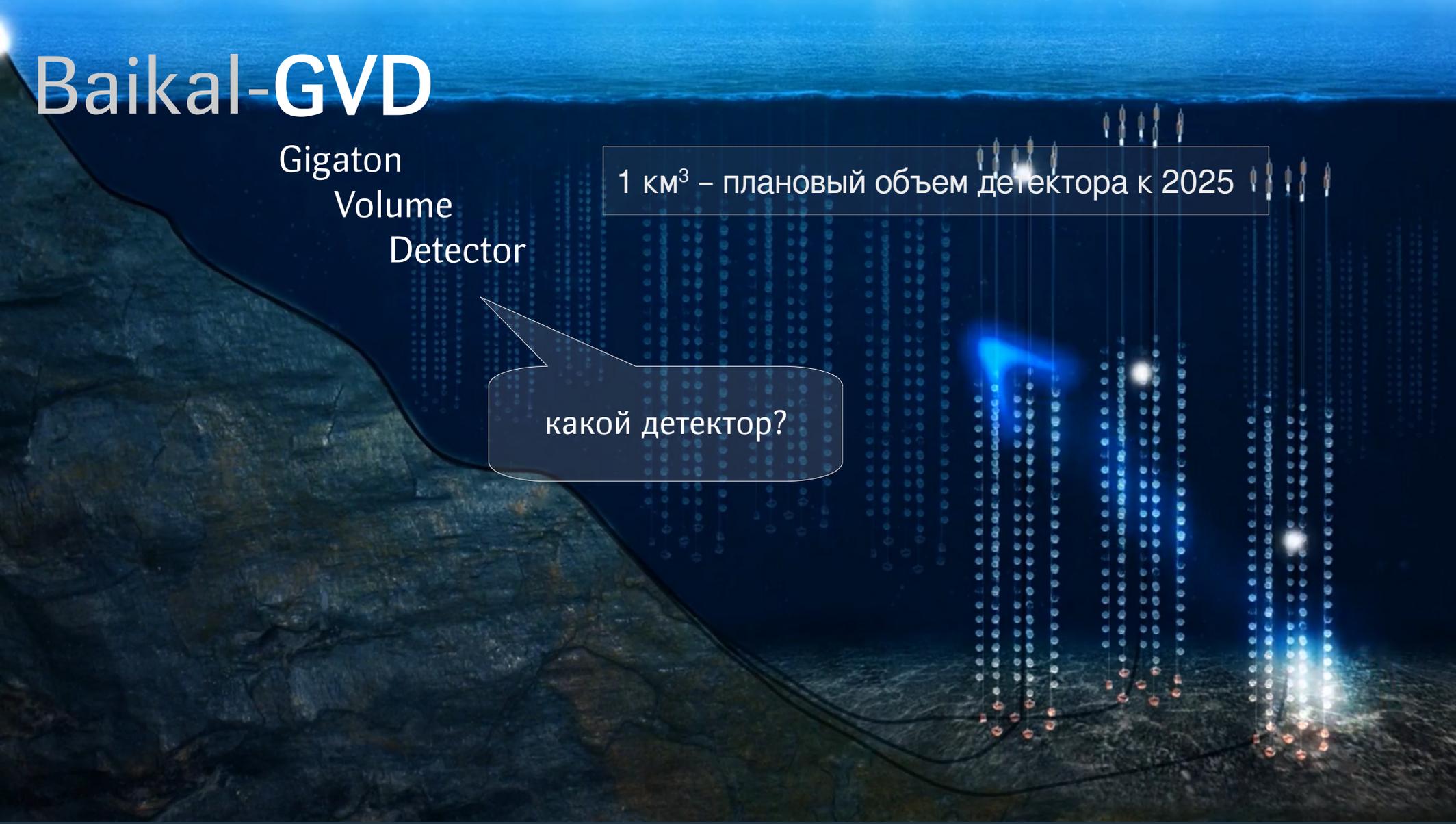


# Baikal-GVD

Gigaton  
Volume  
Detector

1 км<sup>3</sup> – плановый объем детектора к 2025

какой детектор?



# Baikal-GVD

Gigaton  
Volume  
Detector

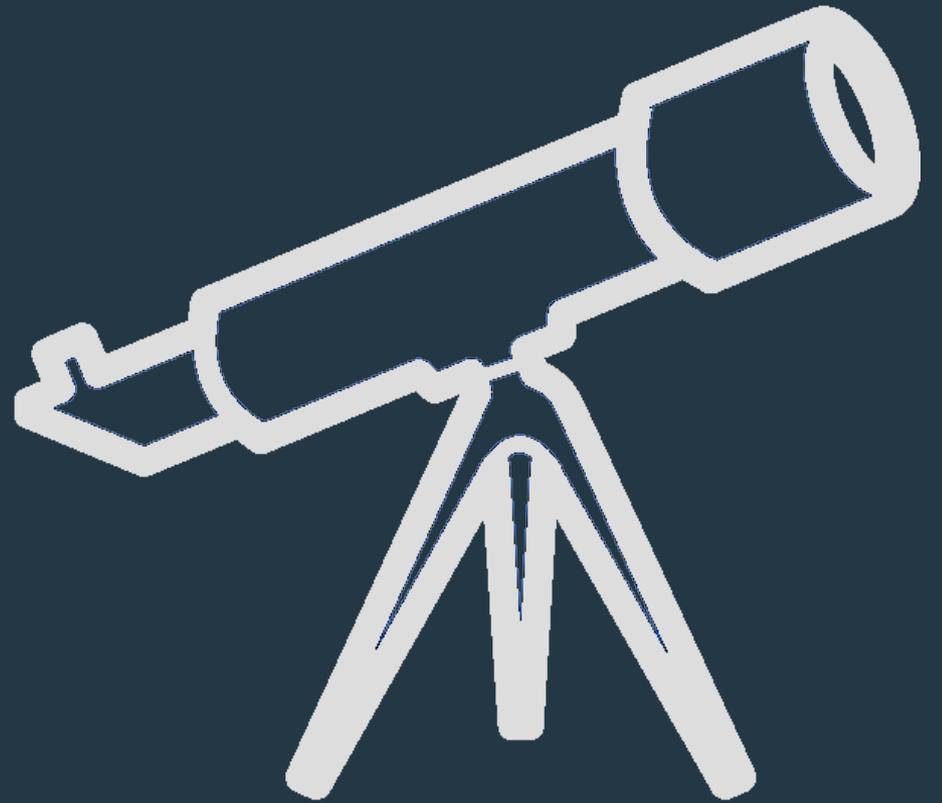
1 км<sup>3</sup> – плановый объем детектора к 2025

какой детектор?

## НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП



Телескоп – что это?



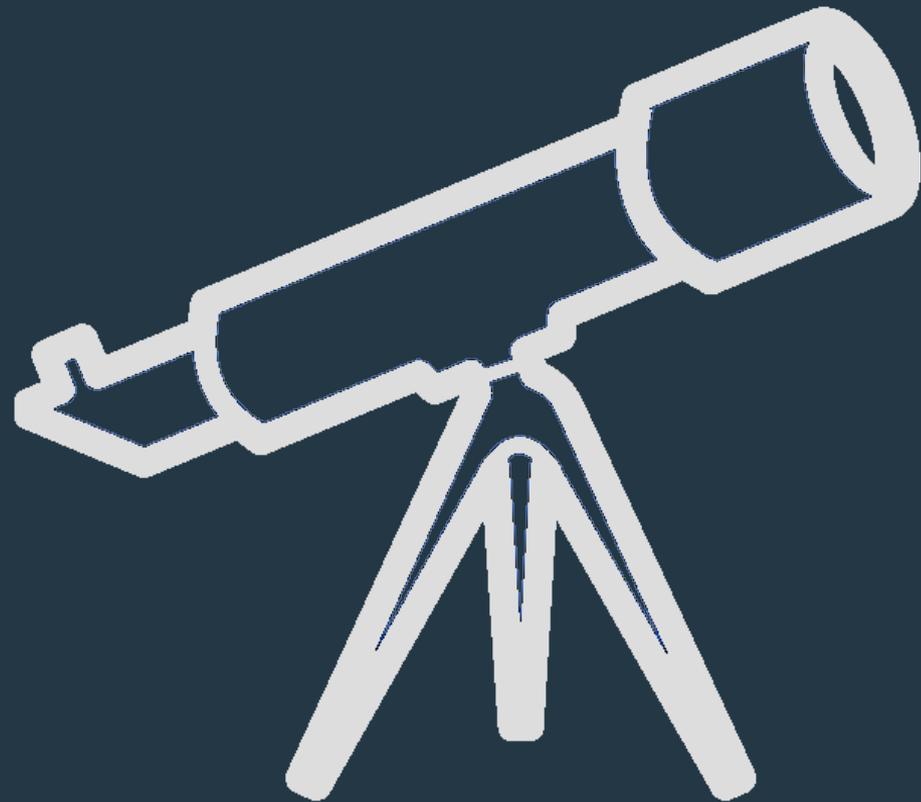
# Телескоп – что это?

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):

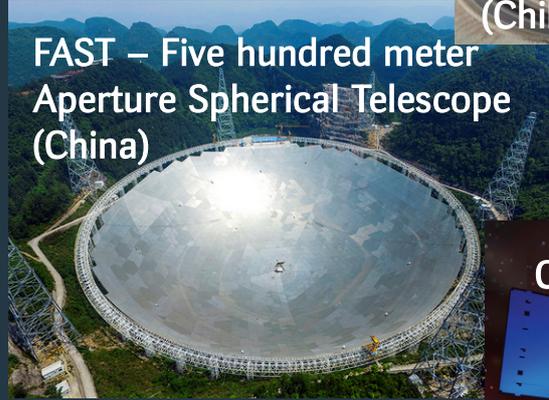
Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

Существуют телескопы для всех диапазонов электромагнитного излучения

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



FAST – Five hundred meter Aperture Spherical Telescope (China)



Chandra X-ray telescope (NASA)



# Телескоп – что это?

Wikipedia (статья на русском):

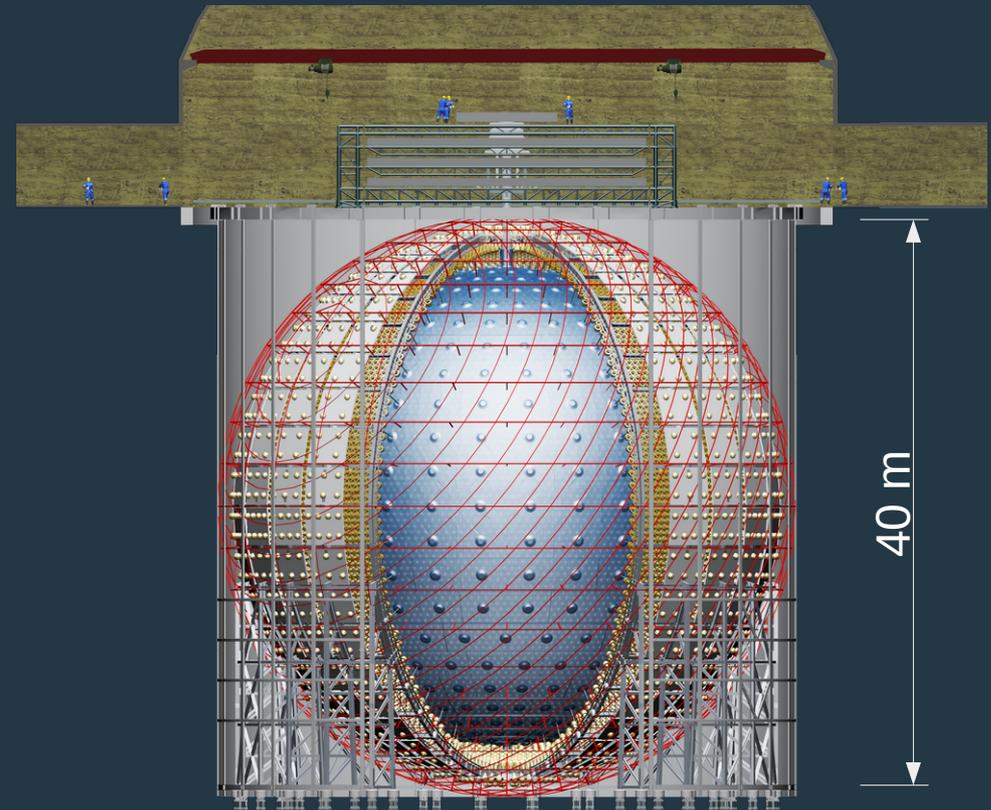
Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

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?

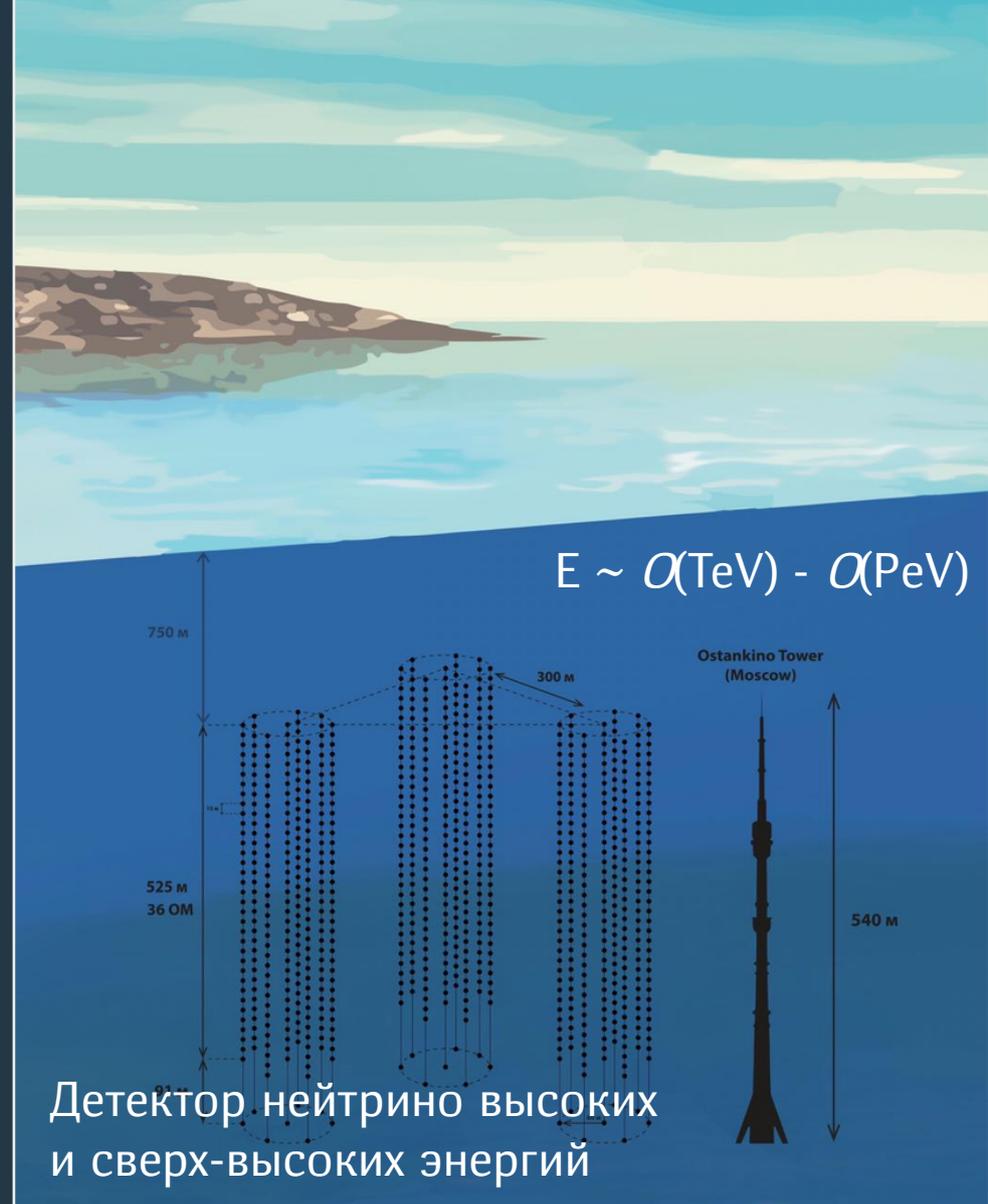
Wikipedia (статья на русском):

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):

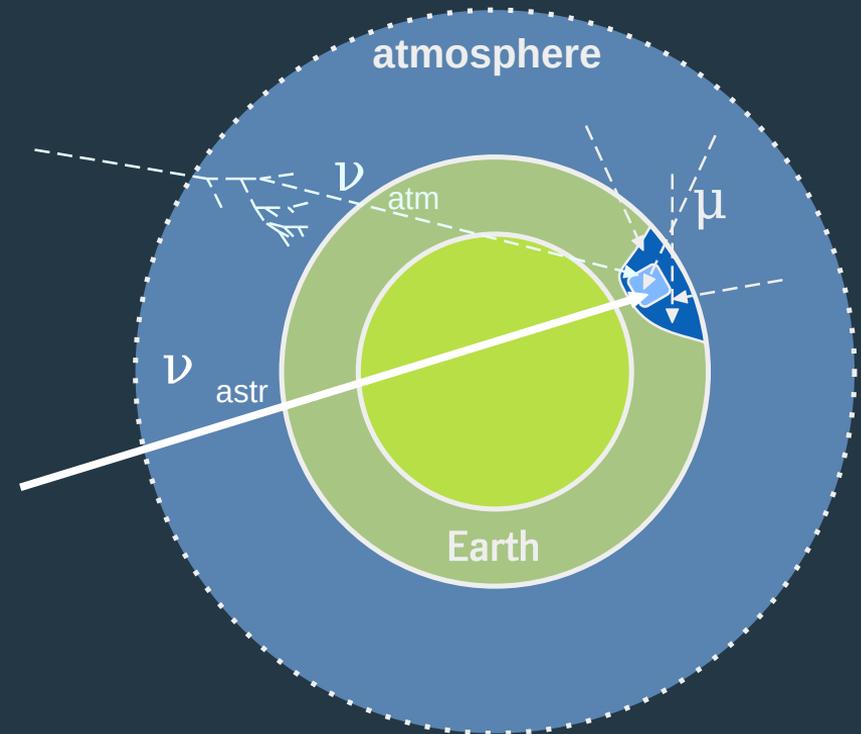
Телеско́п (от др.-греч. τῆλε [tele] «далеко» + σκοπέω [skopeo] «смотрю») – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём выброса электромагнитного излучения (например, видимого света).

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

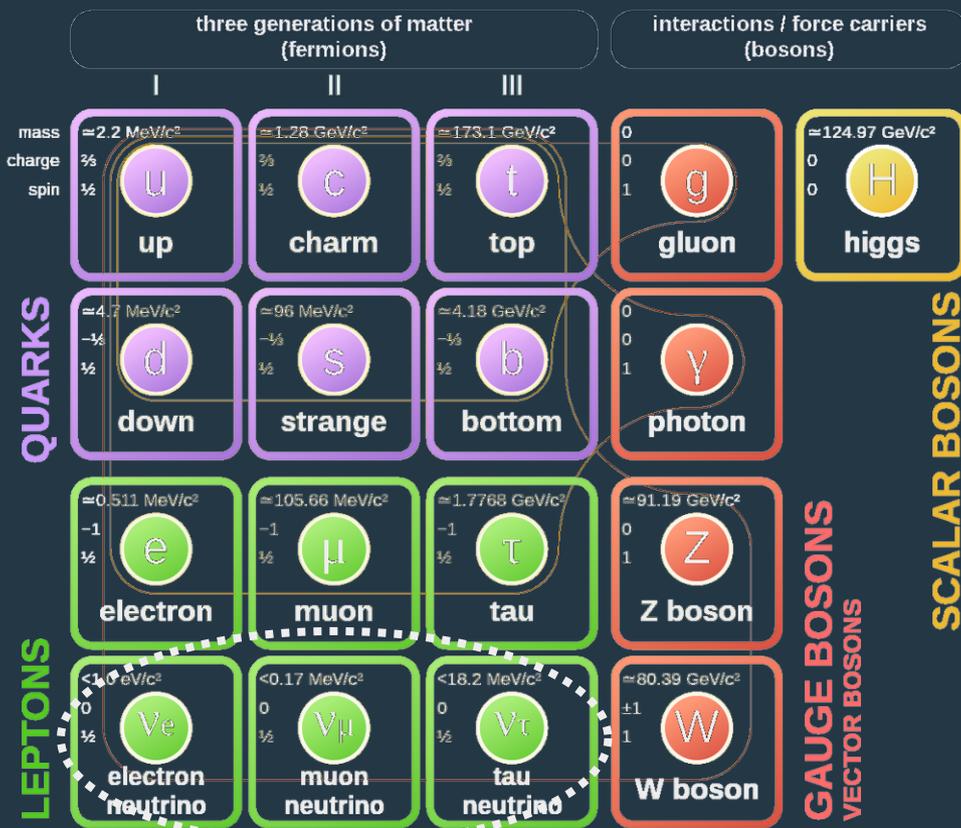
Электрически нейтрально

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/см<sup>2</sup>

# Нейтрино – открытые вопросы

порядок масс: прямой или обратный?

CP-четность?

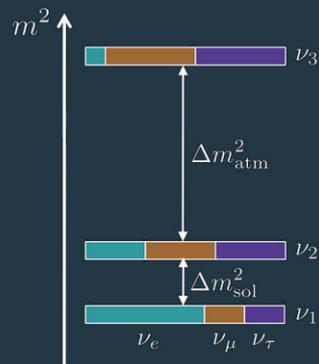
точные значения параметров, описывающих осцилляции? (текущая точность – несколько %)

майорановские или дираковские частицы?

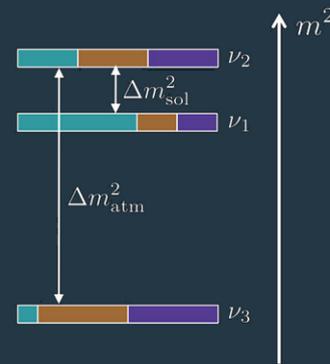
стерильные состояния (не участвующие в слабых взаимодействиях)?

...

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?

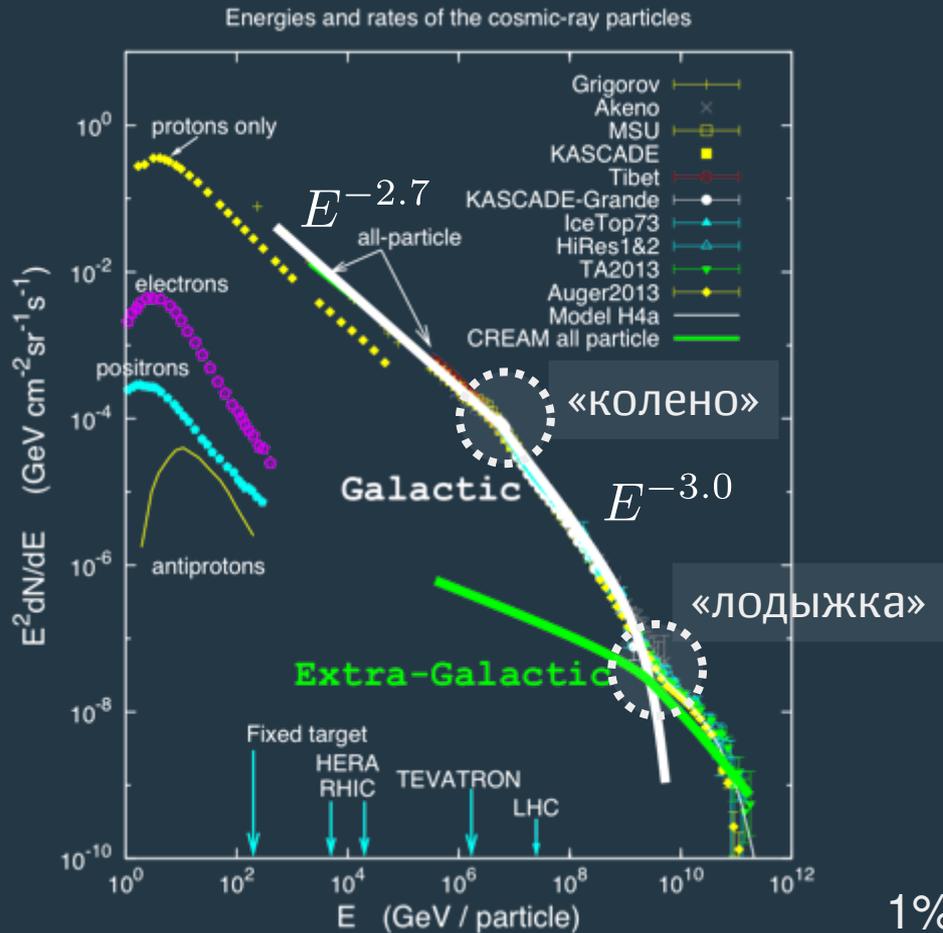
активные галактические ядра?

...?

1 ПэВ =  $10^{15}$  эВ

х 100 энергия в LHC

# Космические лучи

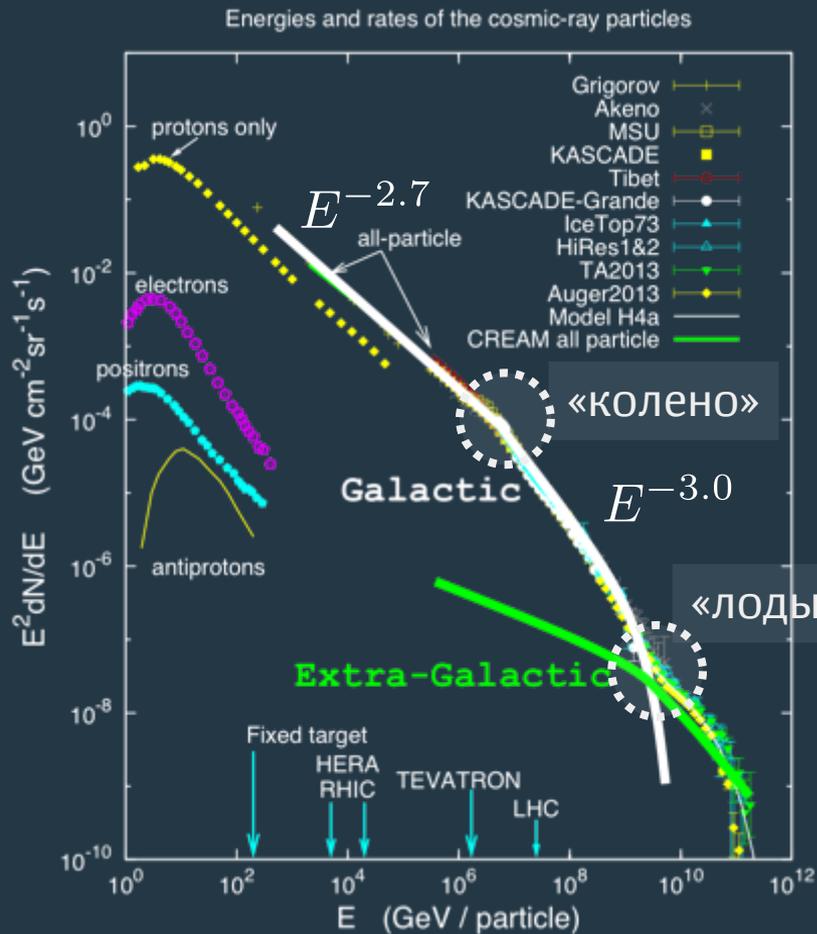


По всей видимости астрофизические нейтрино рождаются в результате взаимодействий космических лучей с веществом или фотонами

**Космические лучи** – элементарные частицы, движущиеся в космическом пространстве

**90% протоны**  
9% гелий и более тяжелые ядра  
1% электроны, позитроны, анти-протоны...

# Космические лучи → нейтрино



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

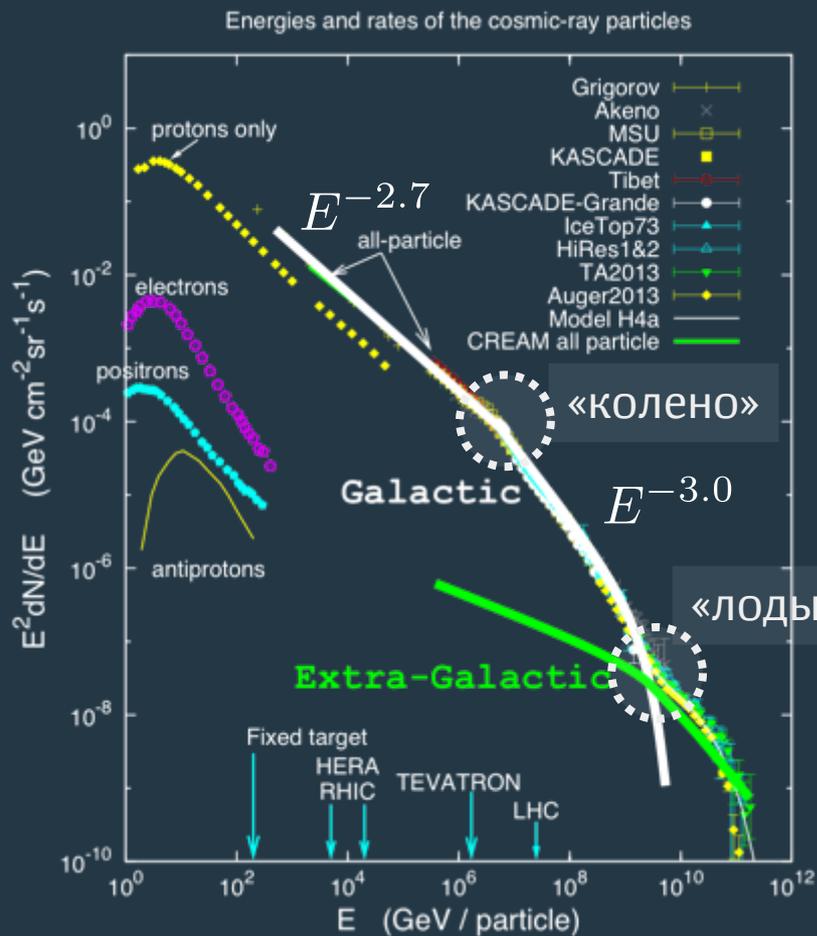
$$p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$$

реликтовое излучение

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

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

# 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

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

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

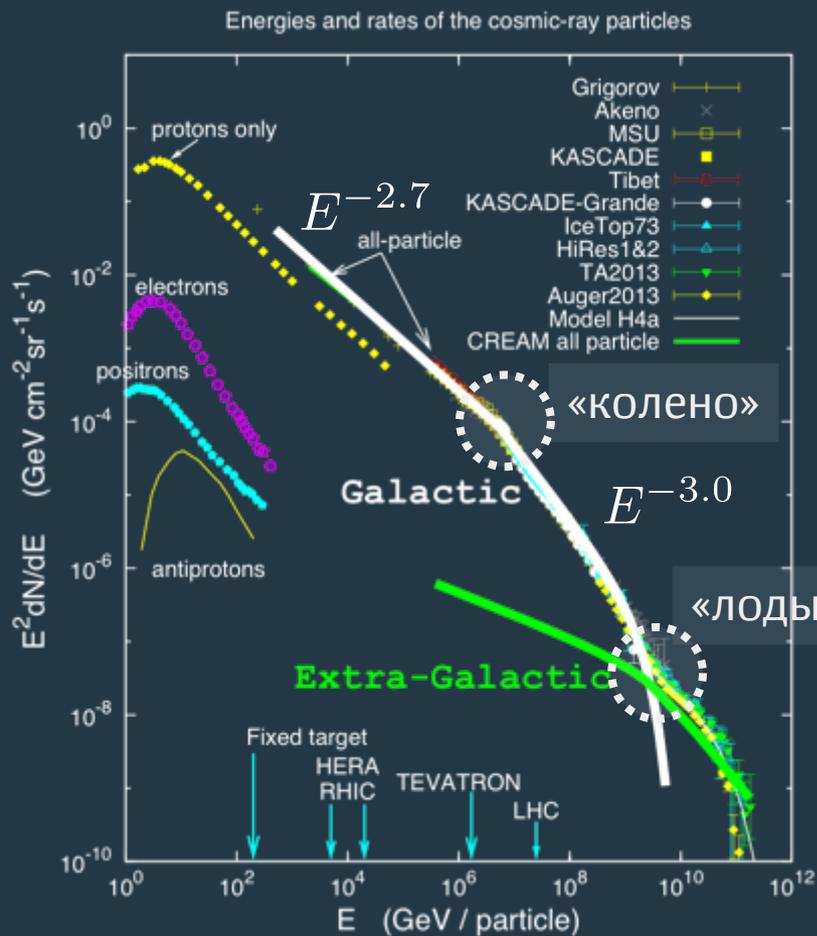
$$p + N \rightarrow \pi^0 + \pi^+ + \pi^- + X$$

вещество

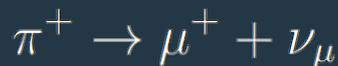
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

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

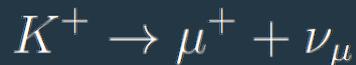
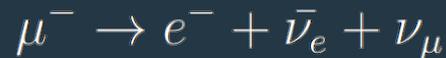
# Космические лучи → нейтрино



реликтовое излучение



вещество



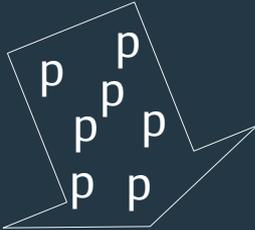
# Рождение астрофизических нейтрино



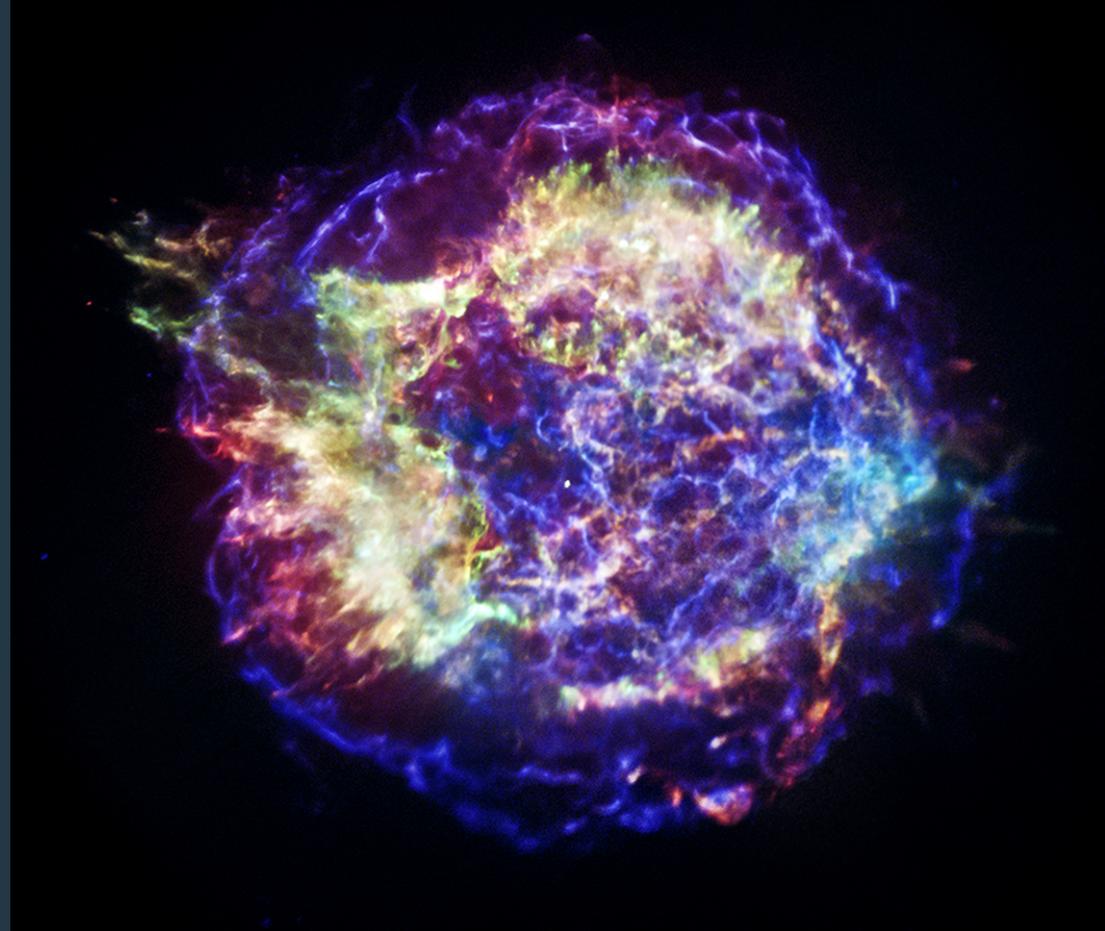
# Возможные источники нейтрино

## Молодые остатки сверхновых

протоны ускоряются магнитным  
полем быстро вращающейся  
нейтронной звезды



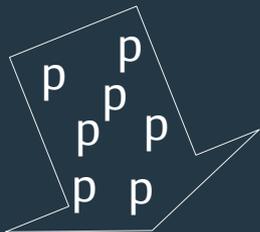
расширяющаяся оболочка  
служит мишенью



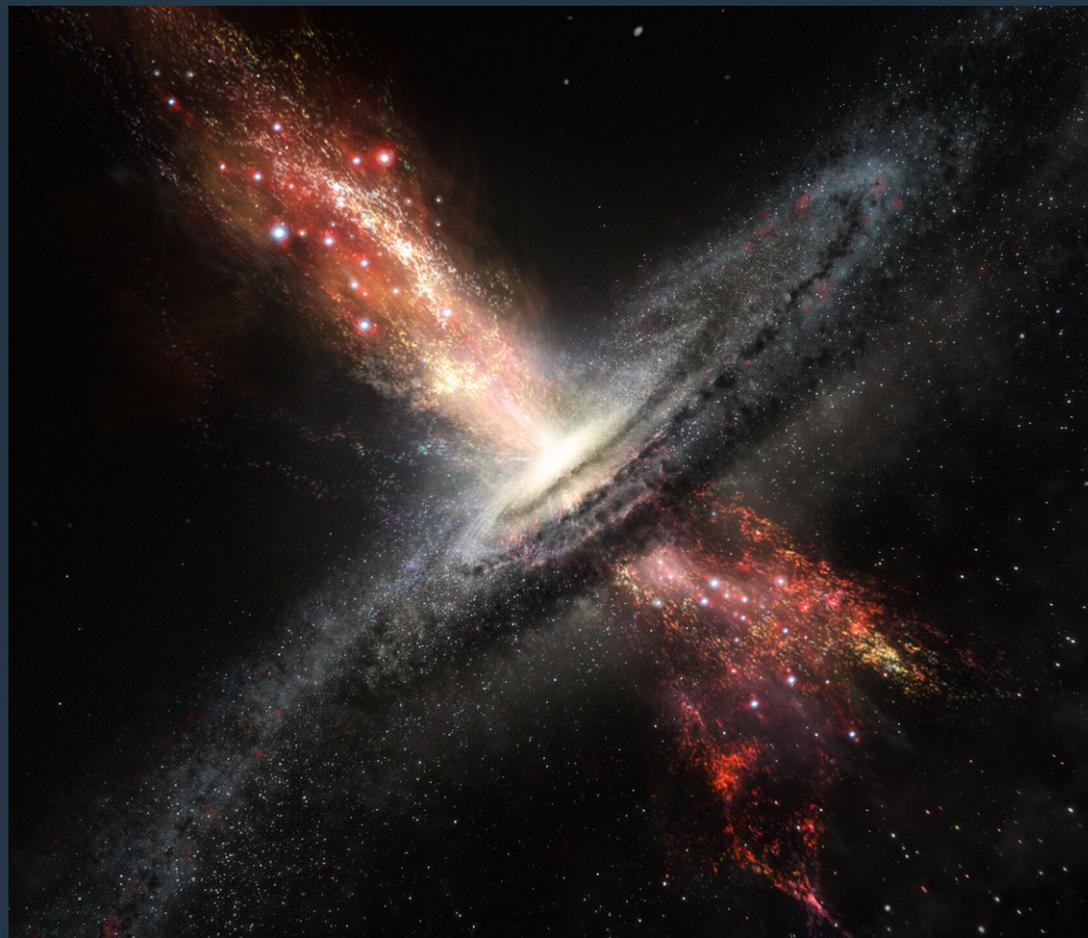
# Возможные источники нейтрино

## Активные галактические ядра

протоны ускоряются ударными волнами в джетах или в аккреционном диске



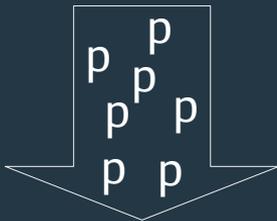
аккреционный диск  
служит мишенью



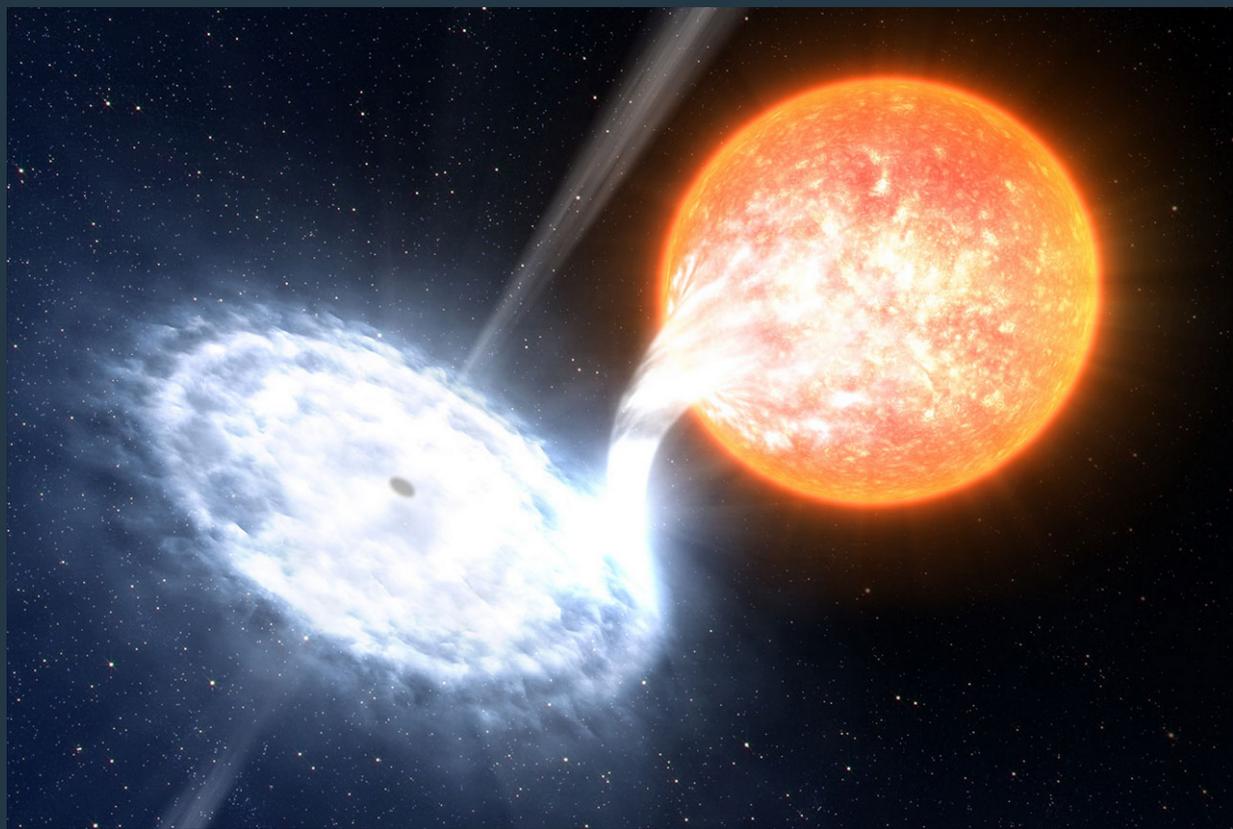
# Возможные источники нейтрино

Двойные системы

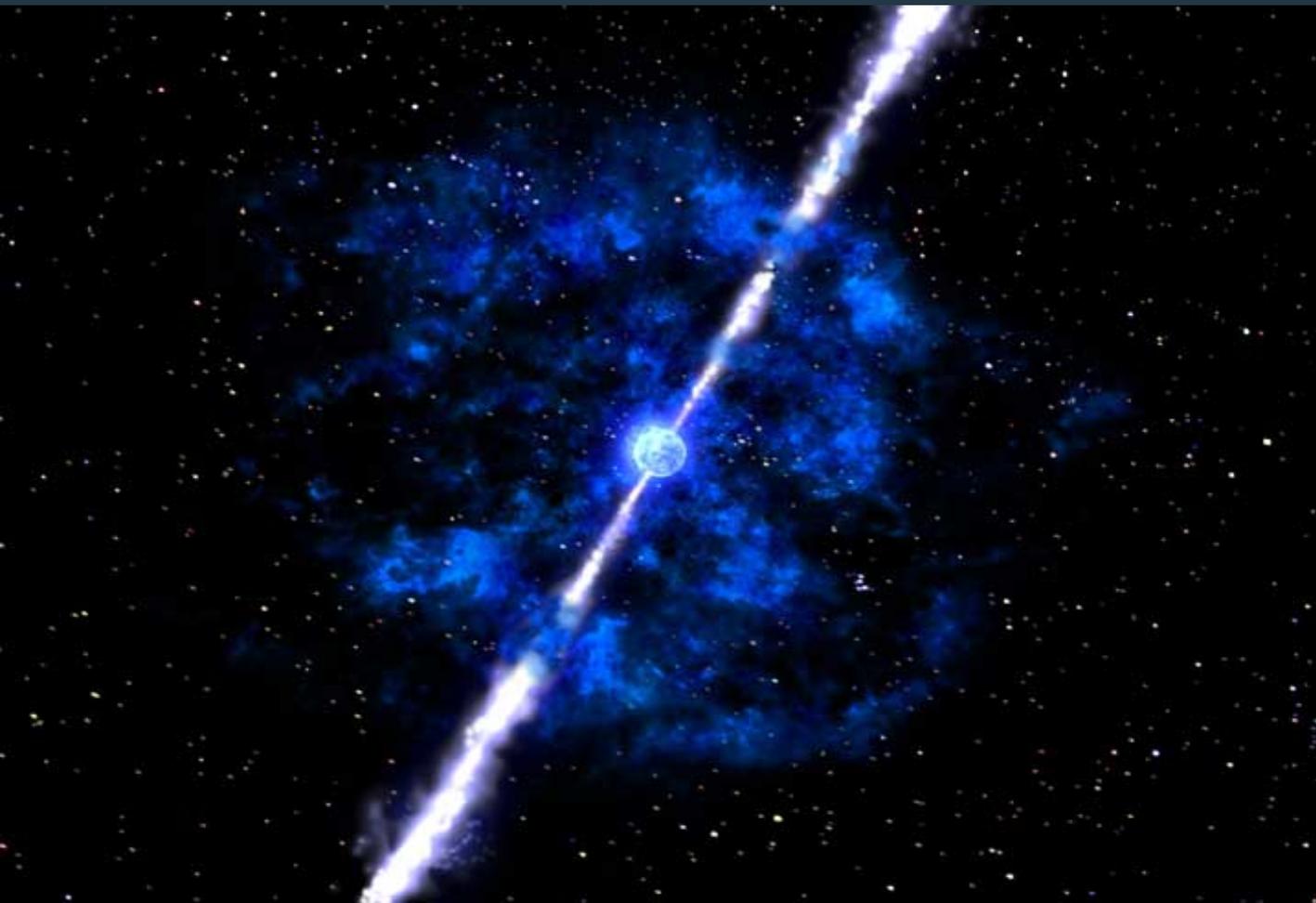
протоны ускоряются в сильном магнитном поле пульсара (черной дыры)



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.

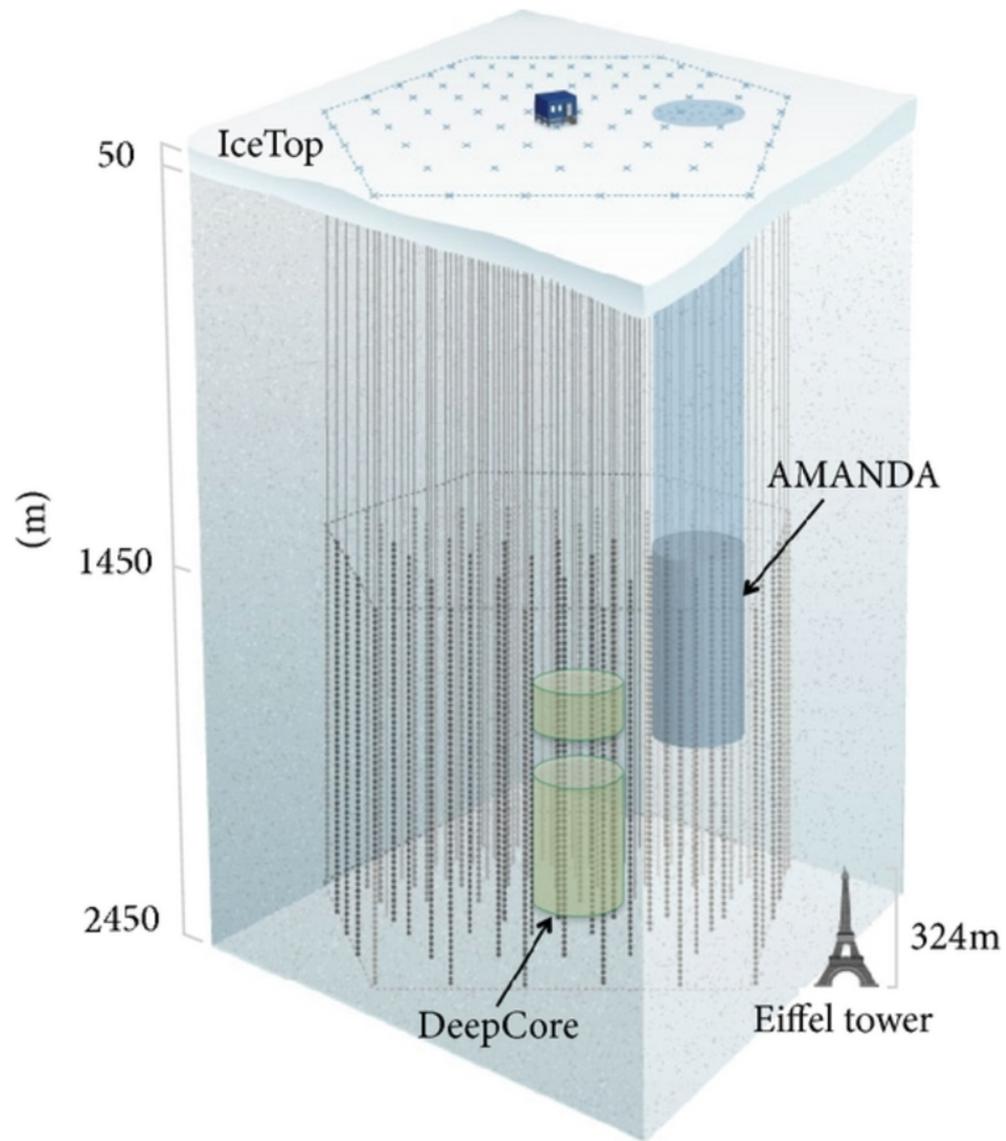
1995 – DUMAND закрывается из-за технических сложностей.

# История: Южный полюс

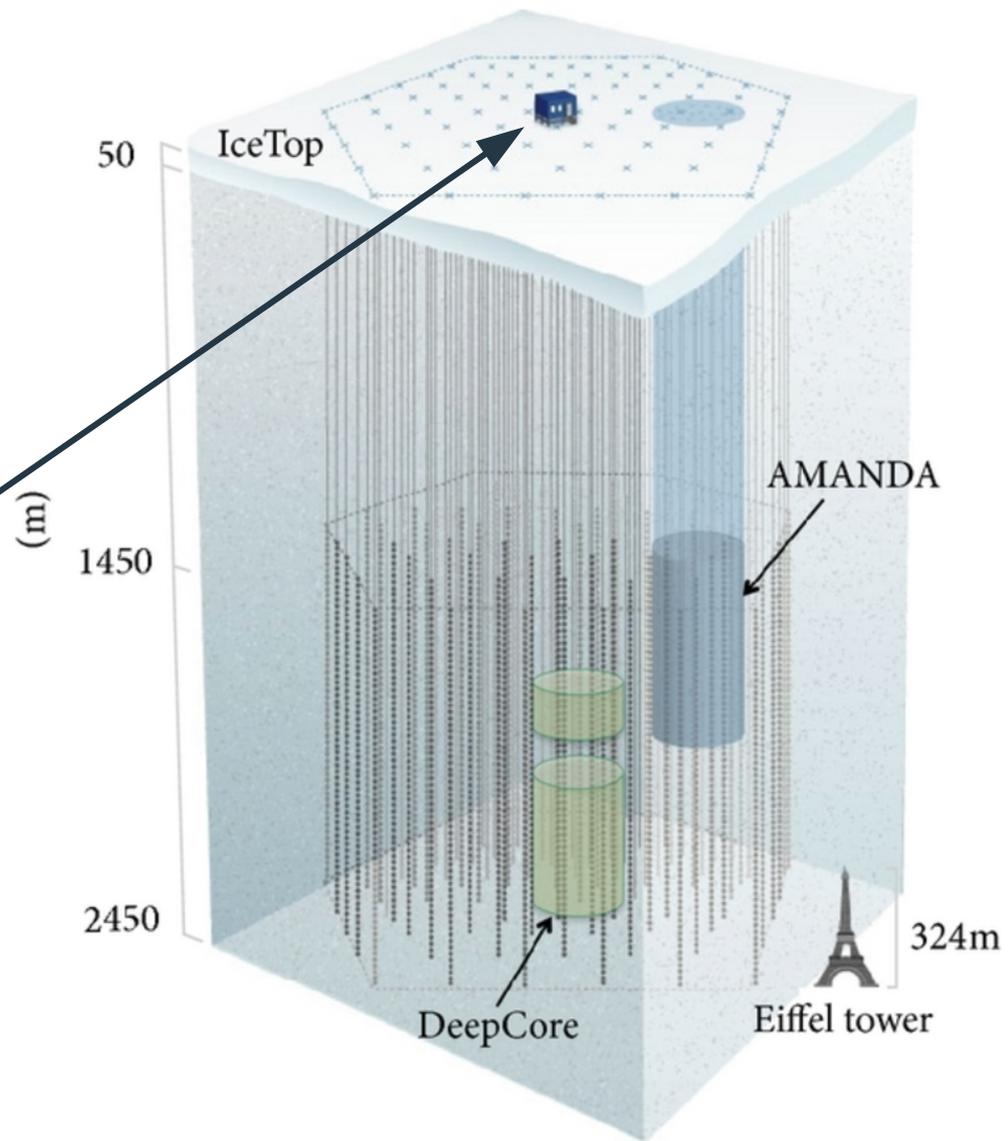
1996: старт проекта AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array).

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

2013: регистрация 28 нейтрино, рожденным за пределами Солнечной системы

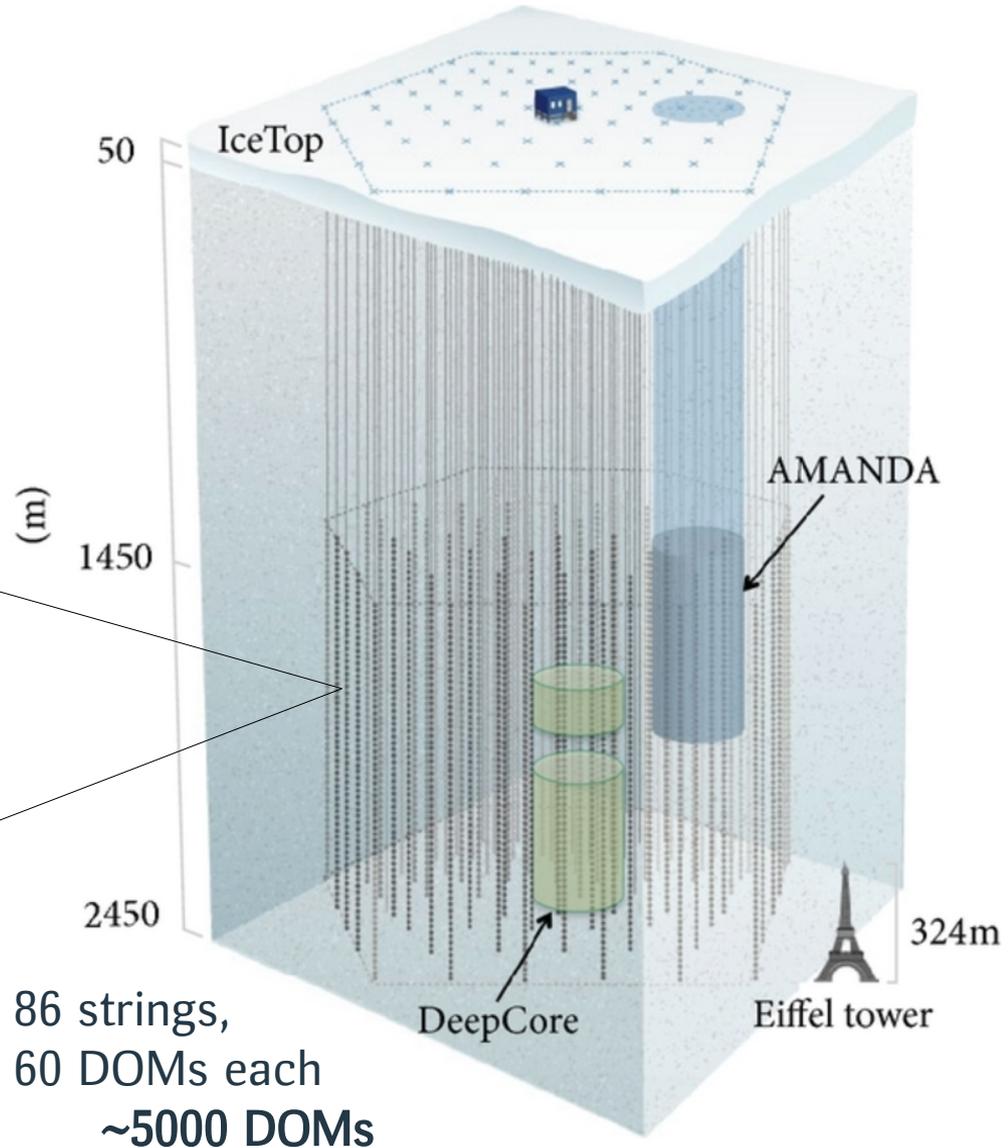
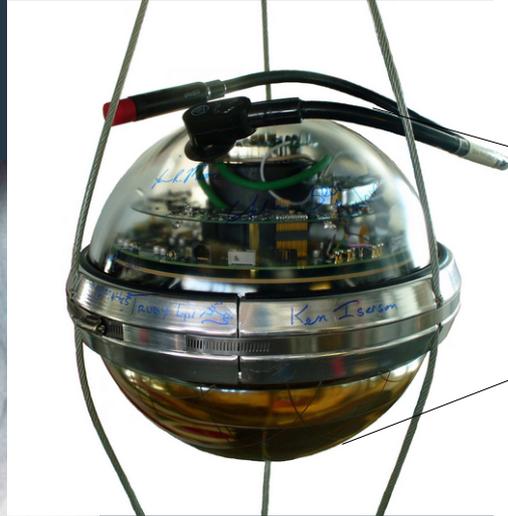


# История: Южный полюс



# IceCube

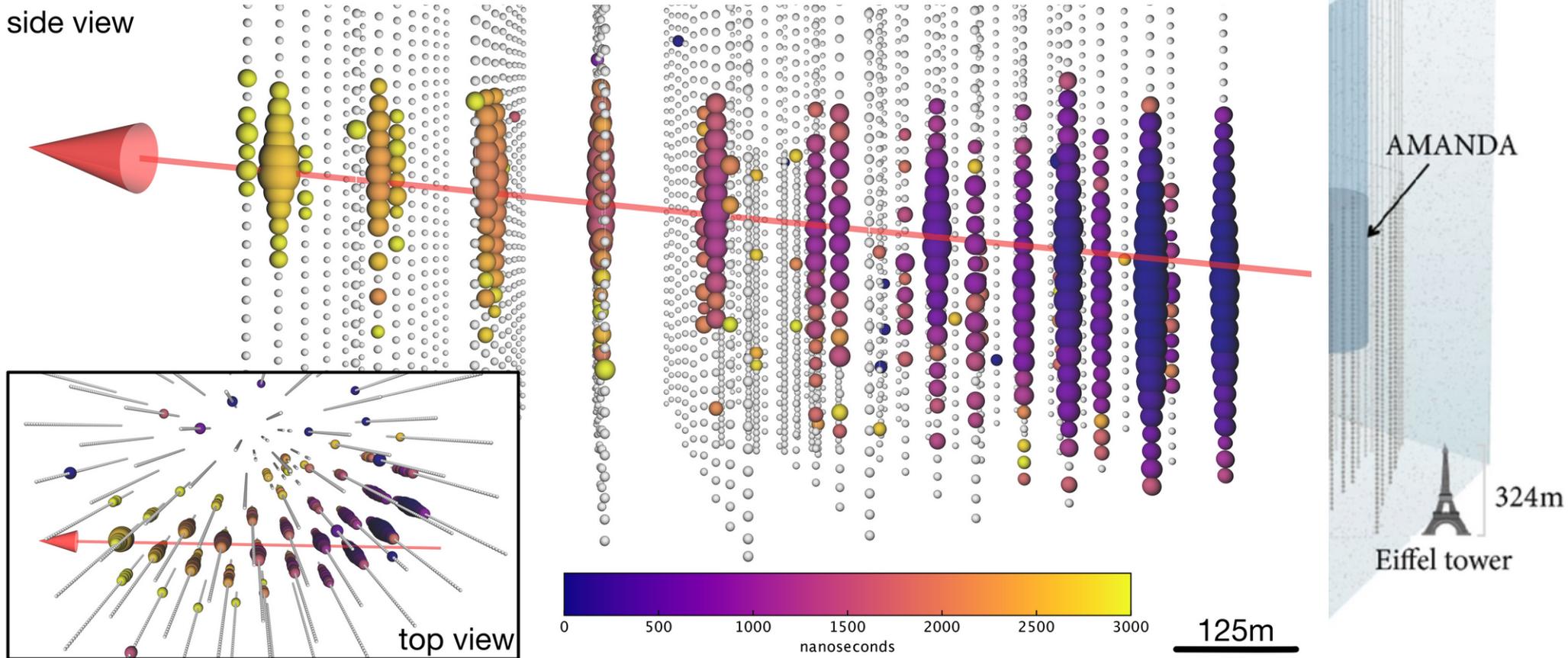
оптические модули (DOM) опускаются в скважины во льду



# IceCube

IC170922 event coincident with  $\gamma$ -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

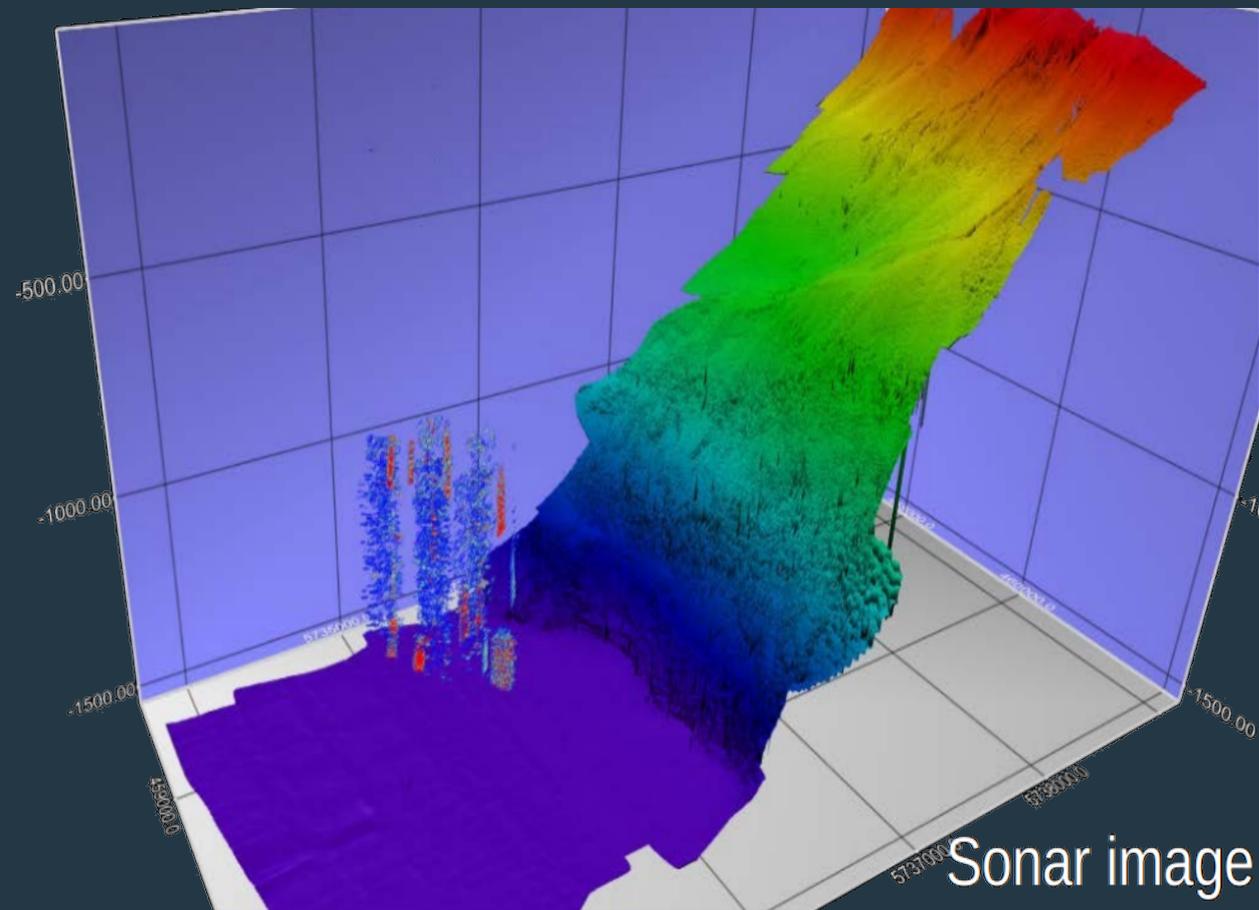


Baikal-GVD сегодня

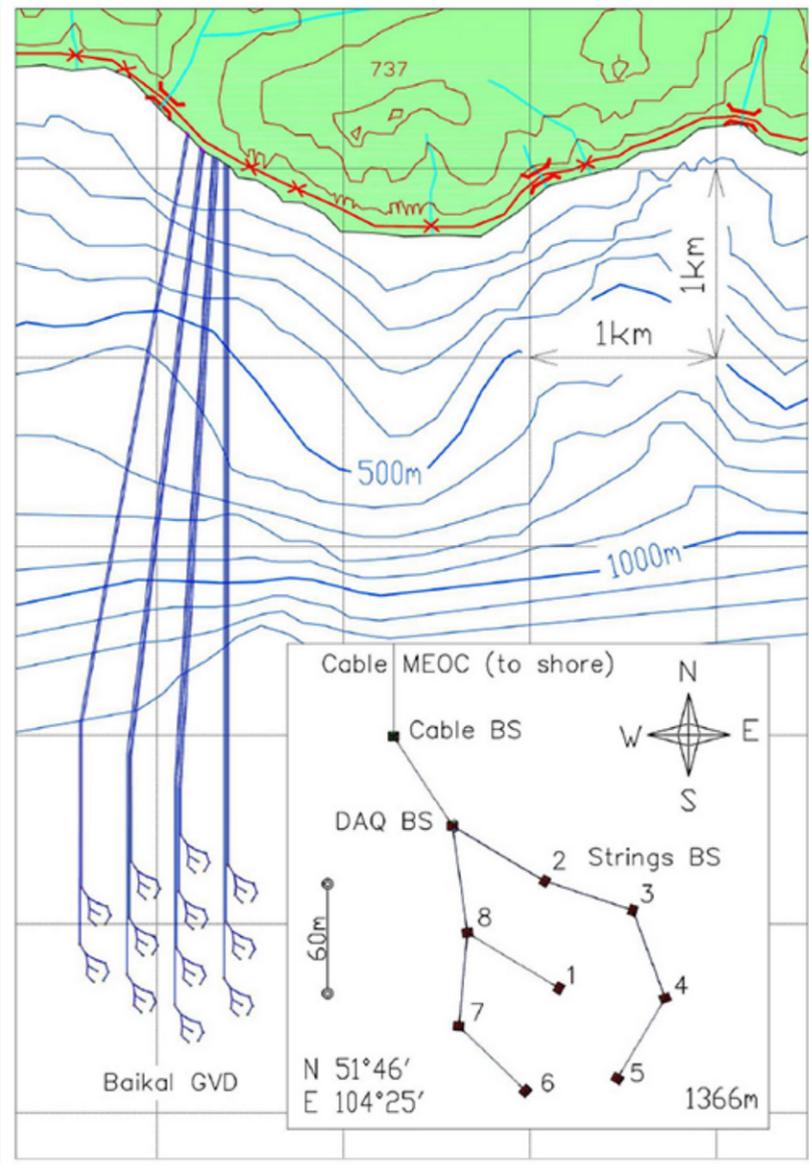
# Ваікал-GVD сёння



# Baikal-GVD сегодня



Sonar image



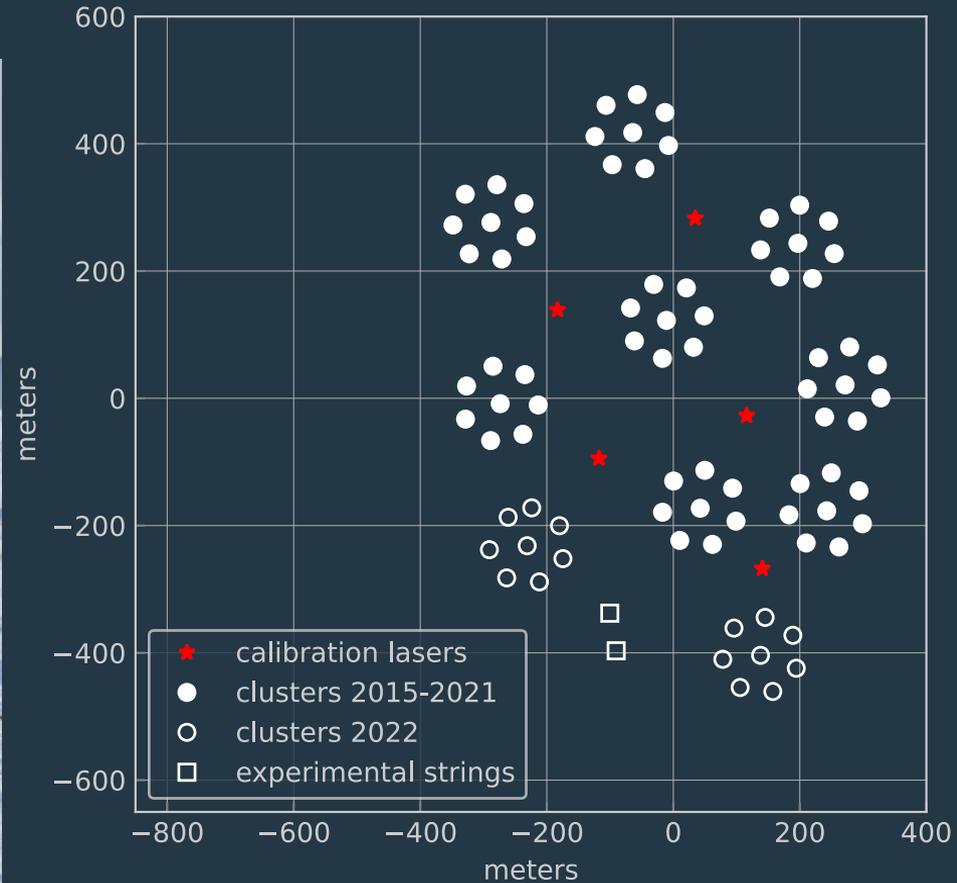
Baikal GVD

# 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»



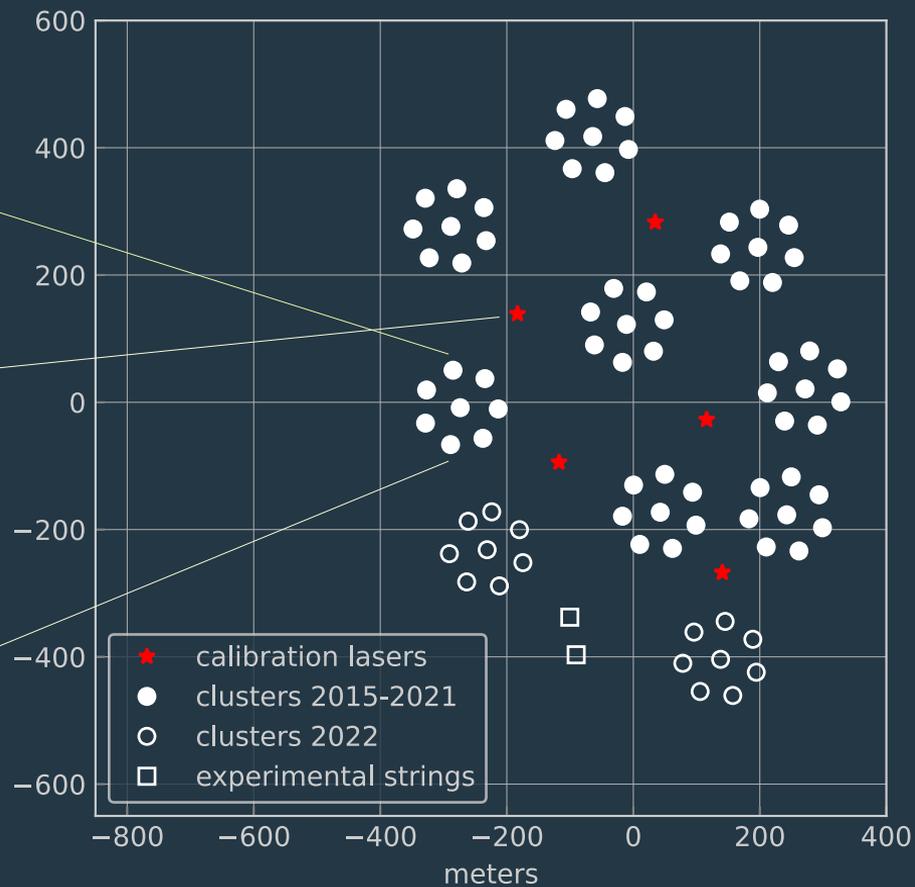
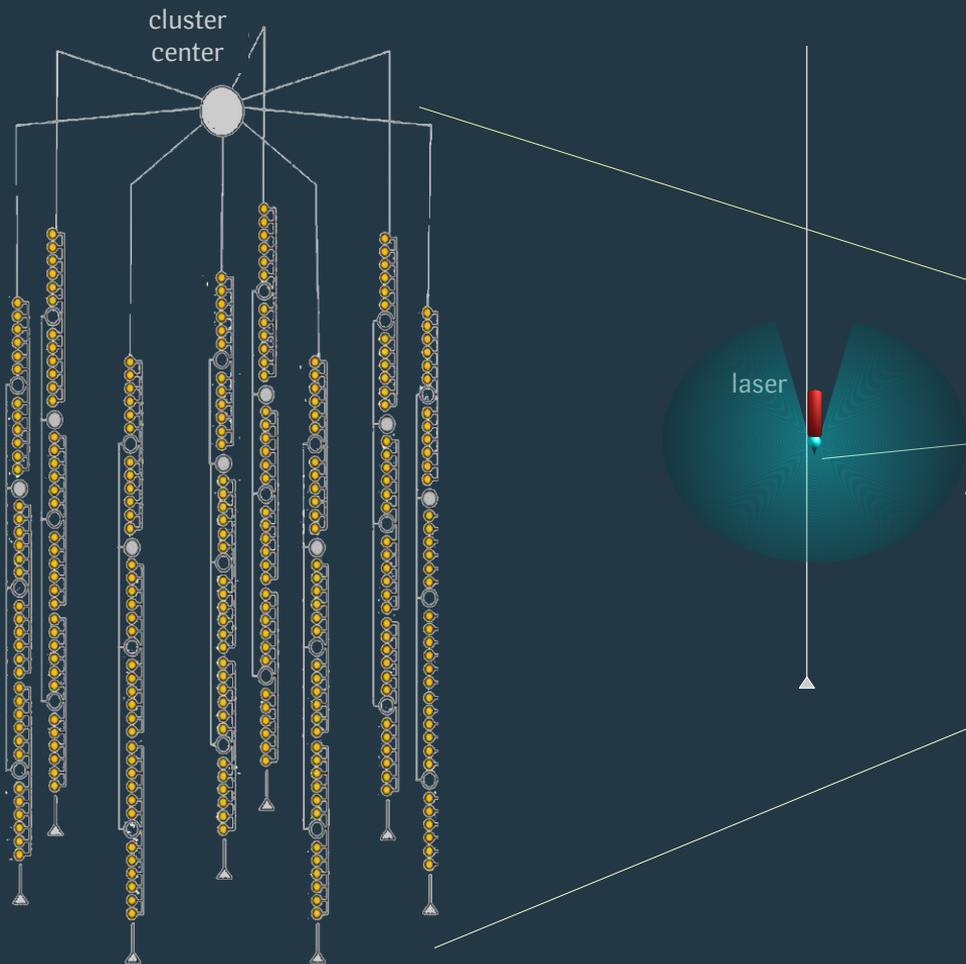
# Зимняя экспедиция



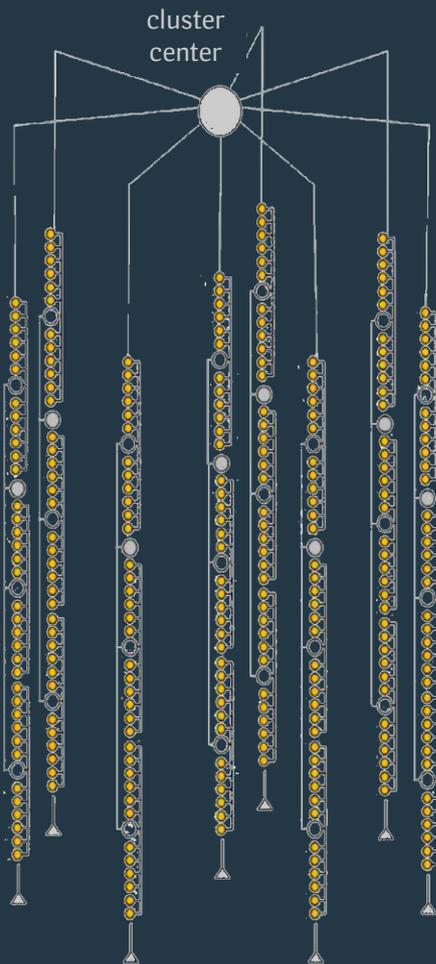
Вывоз лебедок

# Baikal-GVD 2022

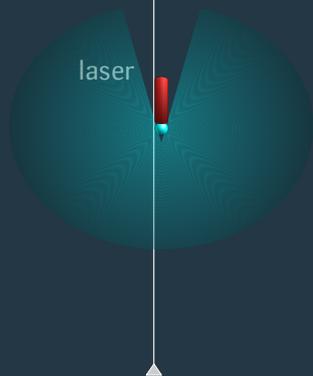
Video: сборка телескопа



# Компоненты



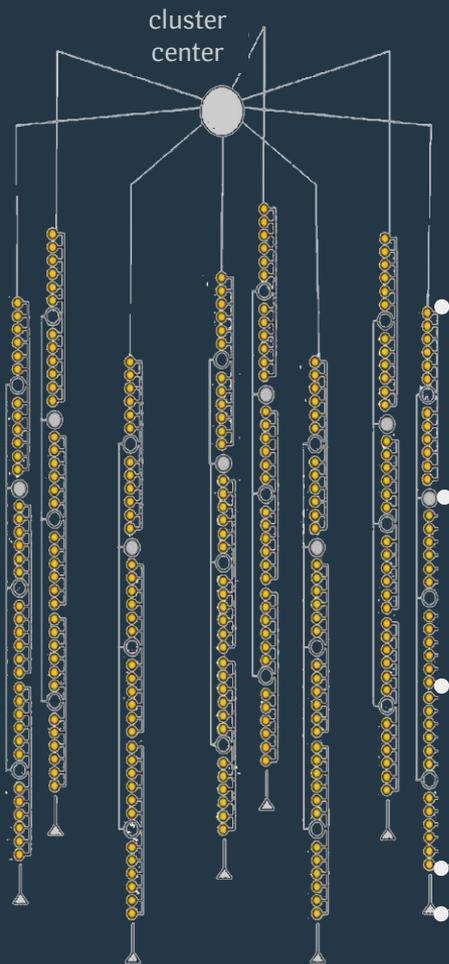
Лазер



**Назначение:**  
измерение оптических  
свойств воды,  
калибровки



# Компоненты



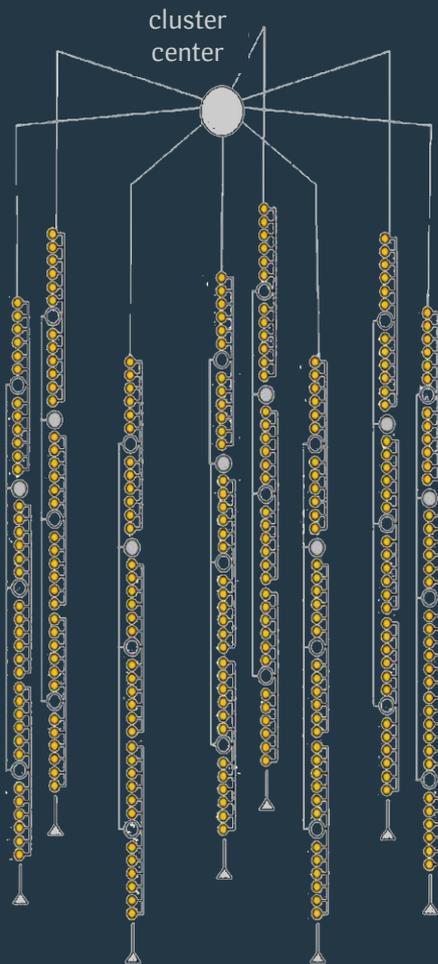
Акустический  
модем

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



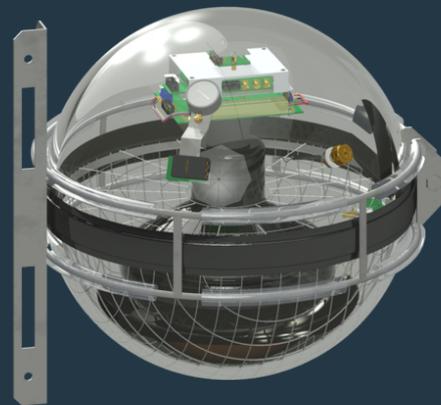
# Монтаж гирлянд



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

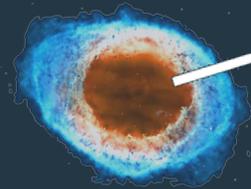
~600 модулей в год



Video: Сборка оптических модулей

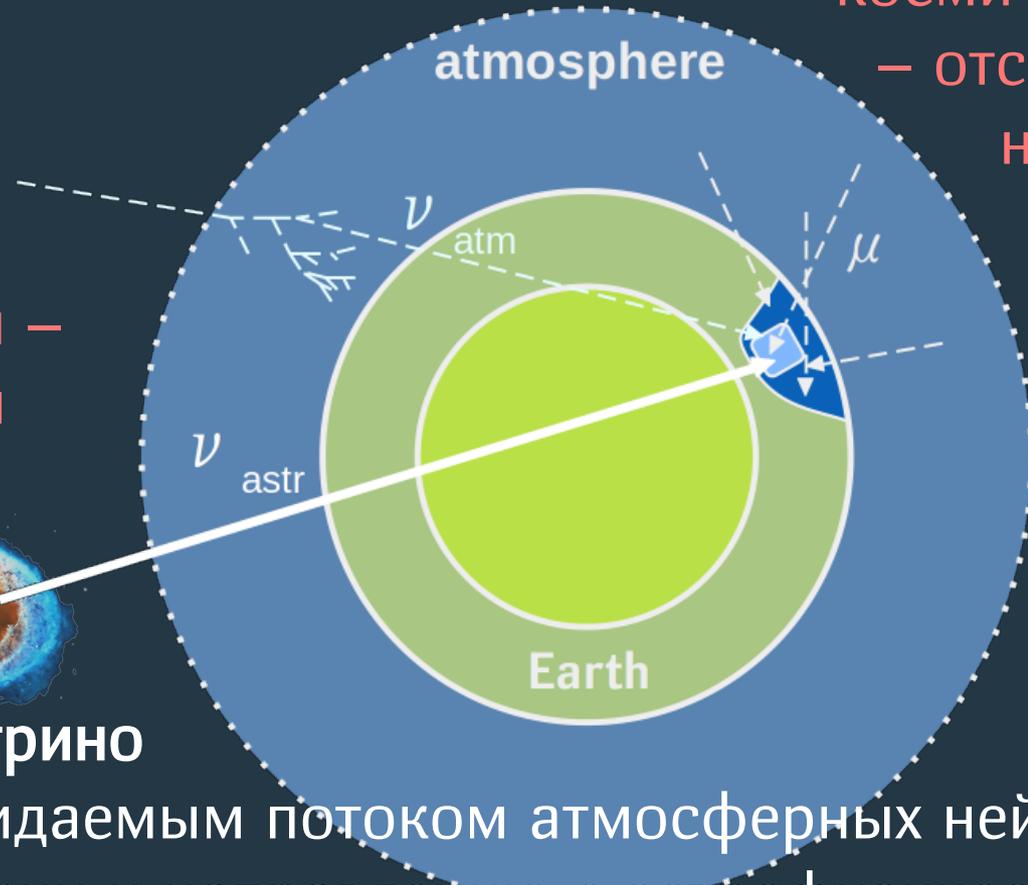
# Сигнал и фон

Атмосферные нейтрино от космических лучей – неустранимый фон



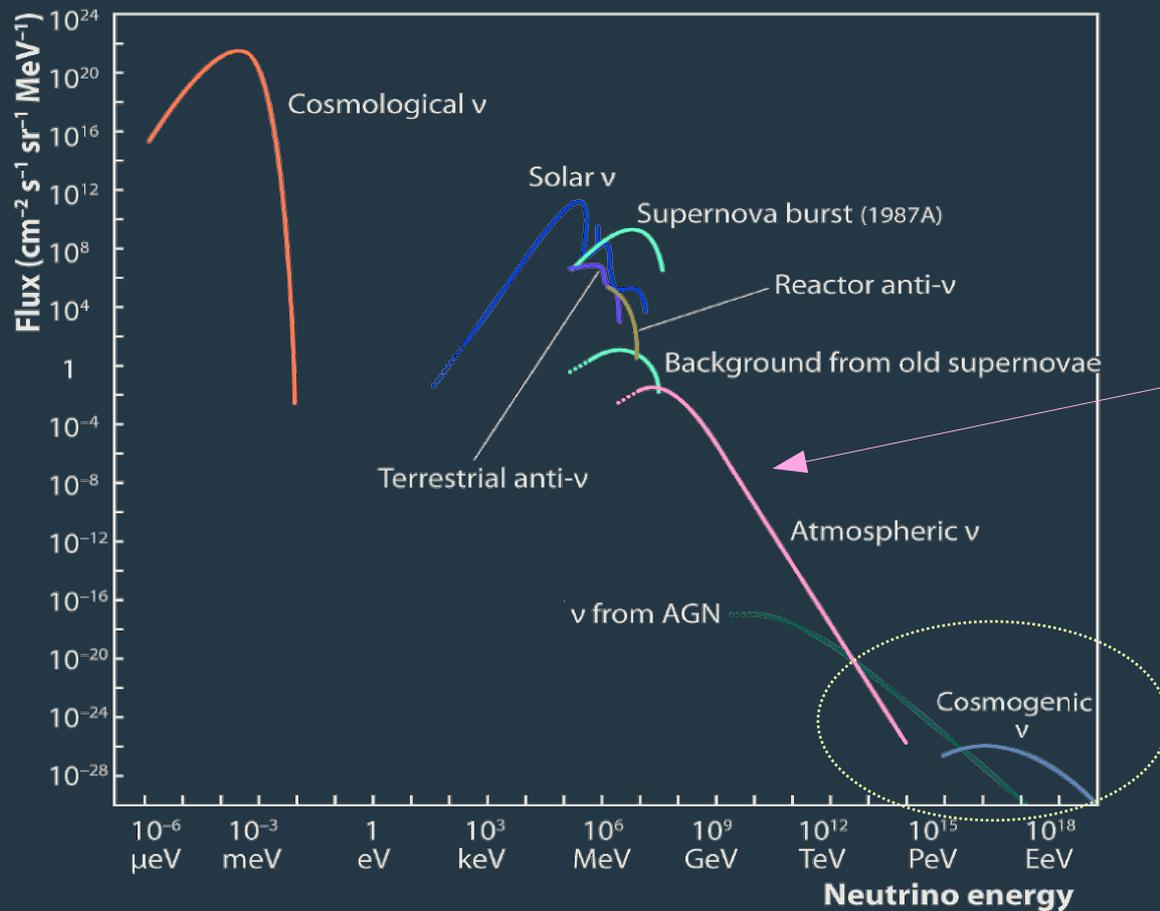
## Астрофизические нейтрино

- 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



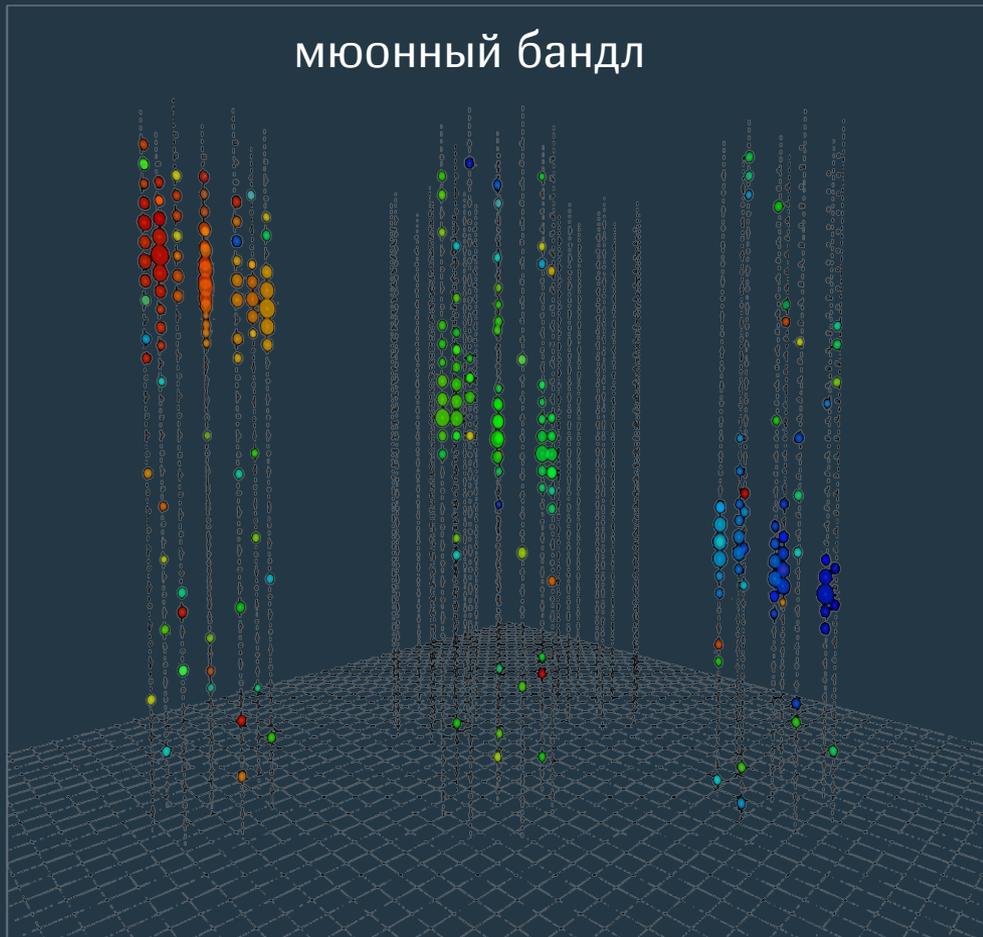
# Примеры событий

late

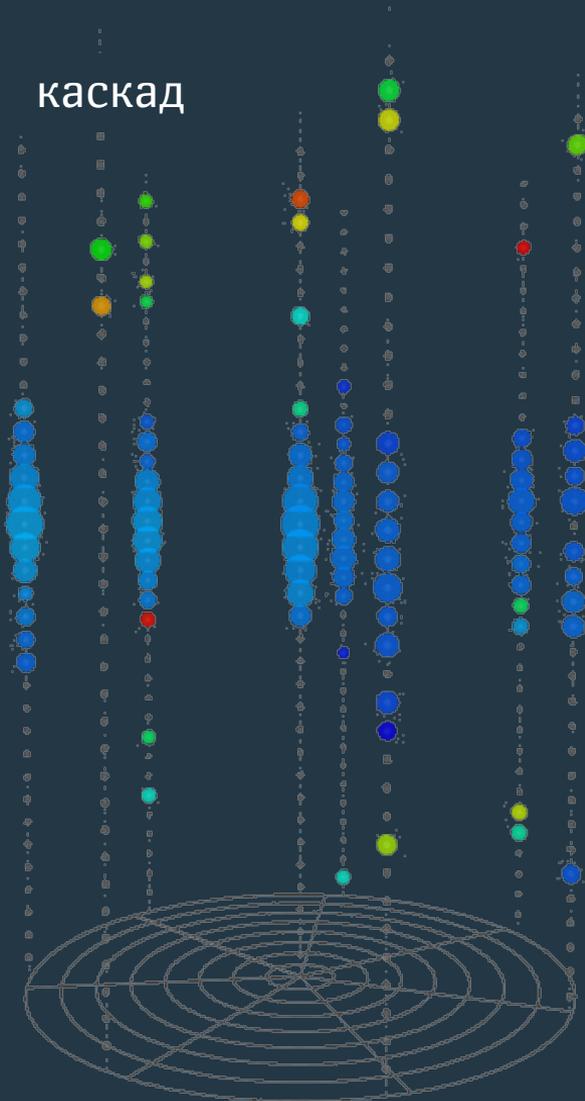


early

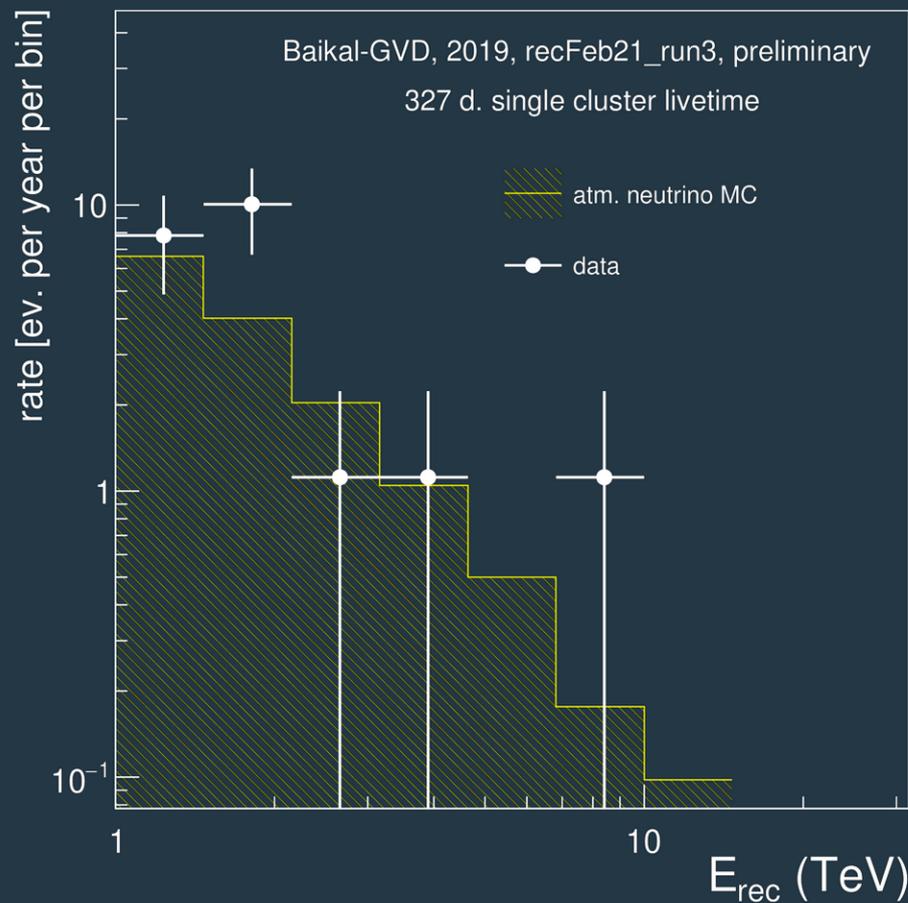
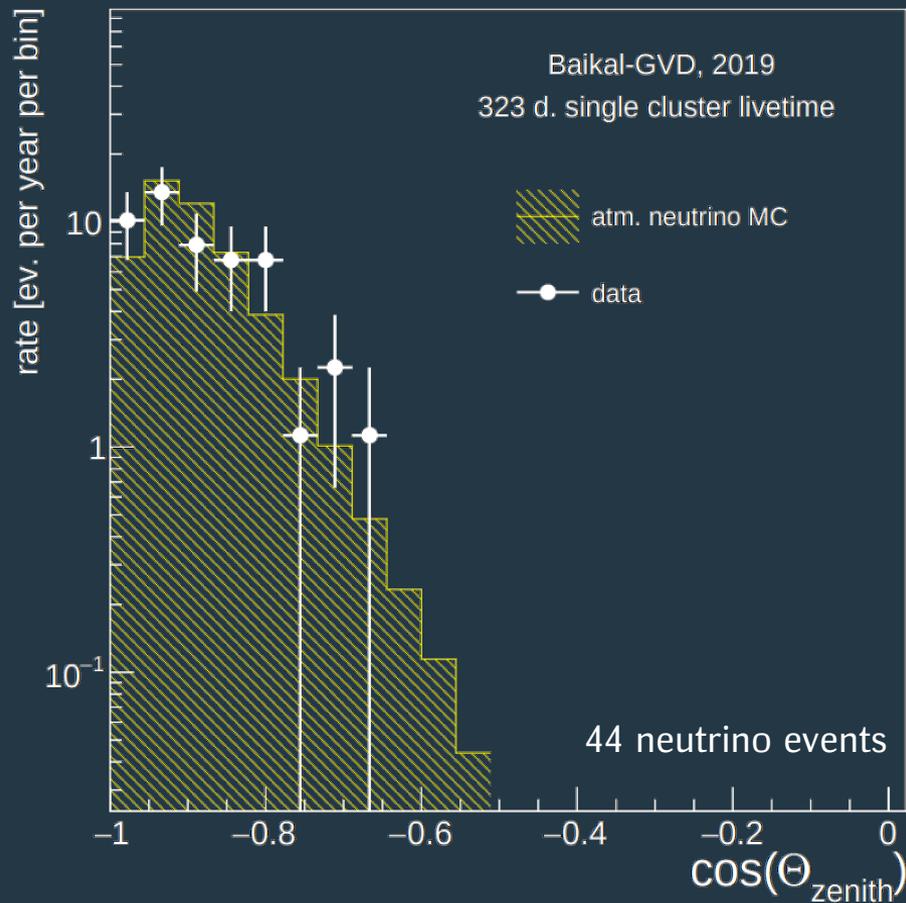
## мюонный бандл



## каскад

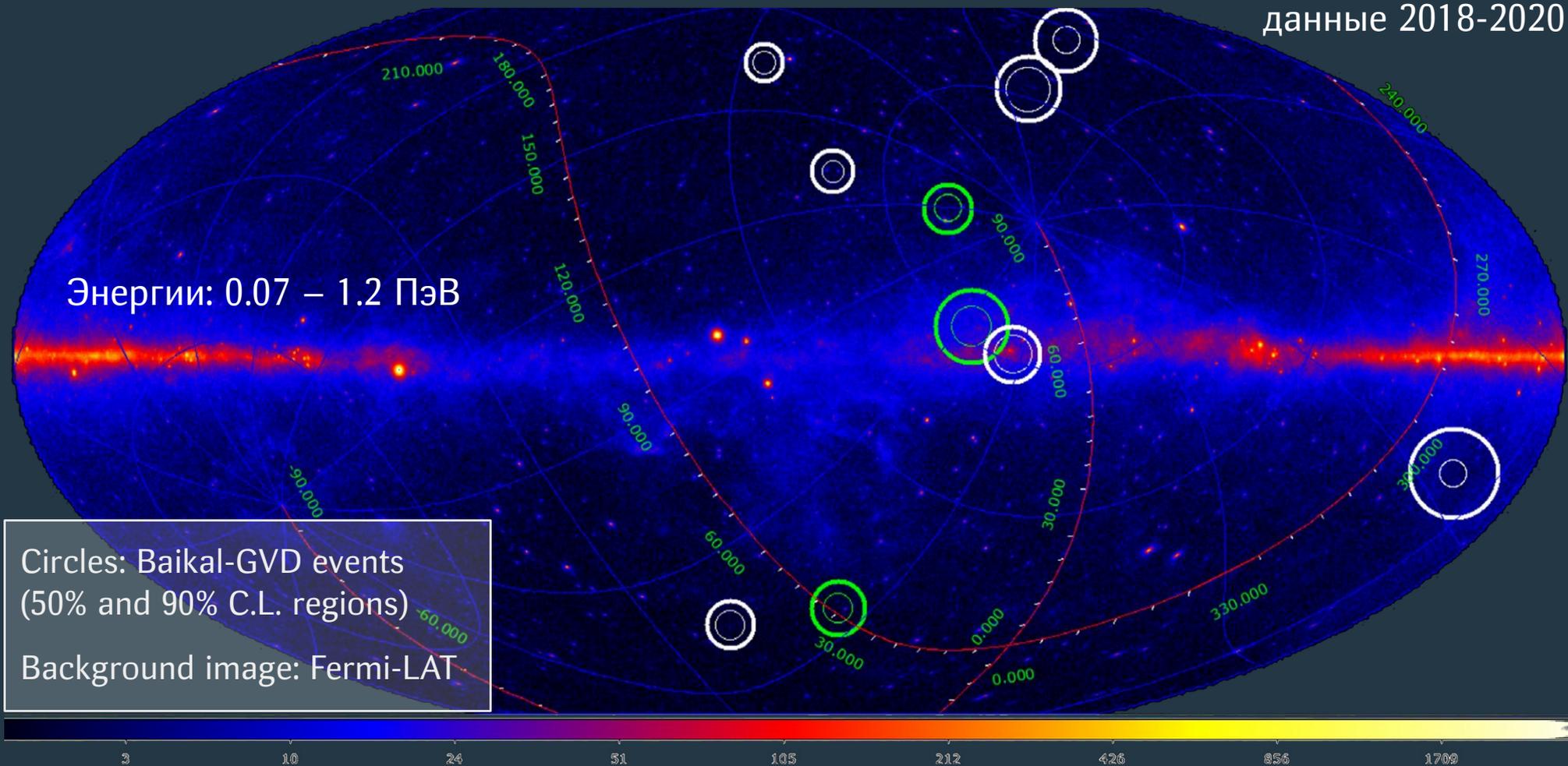


# Восходящие трековые события

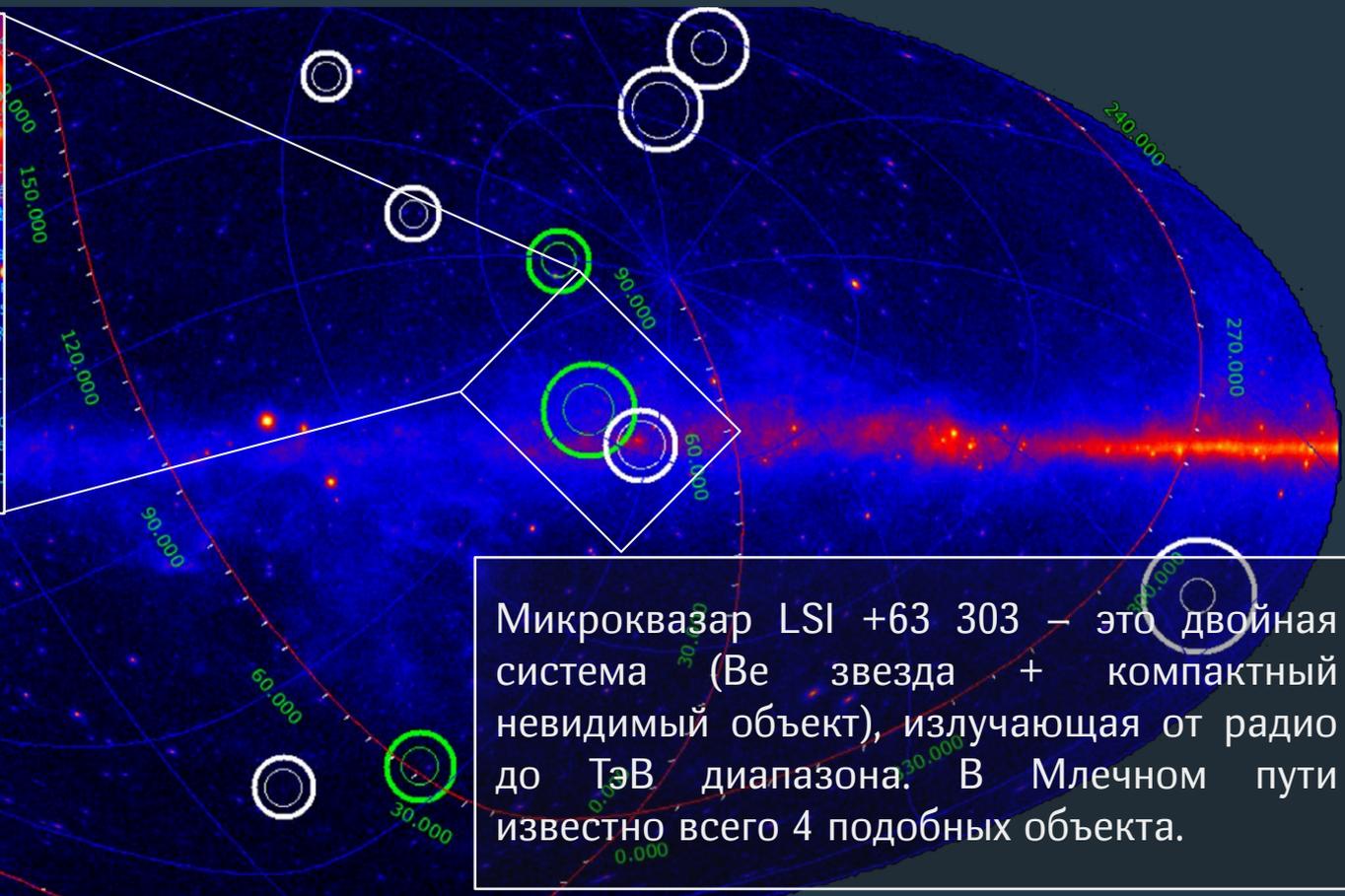


# Каскадные события

данные 2018-2020



# 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

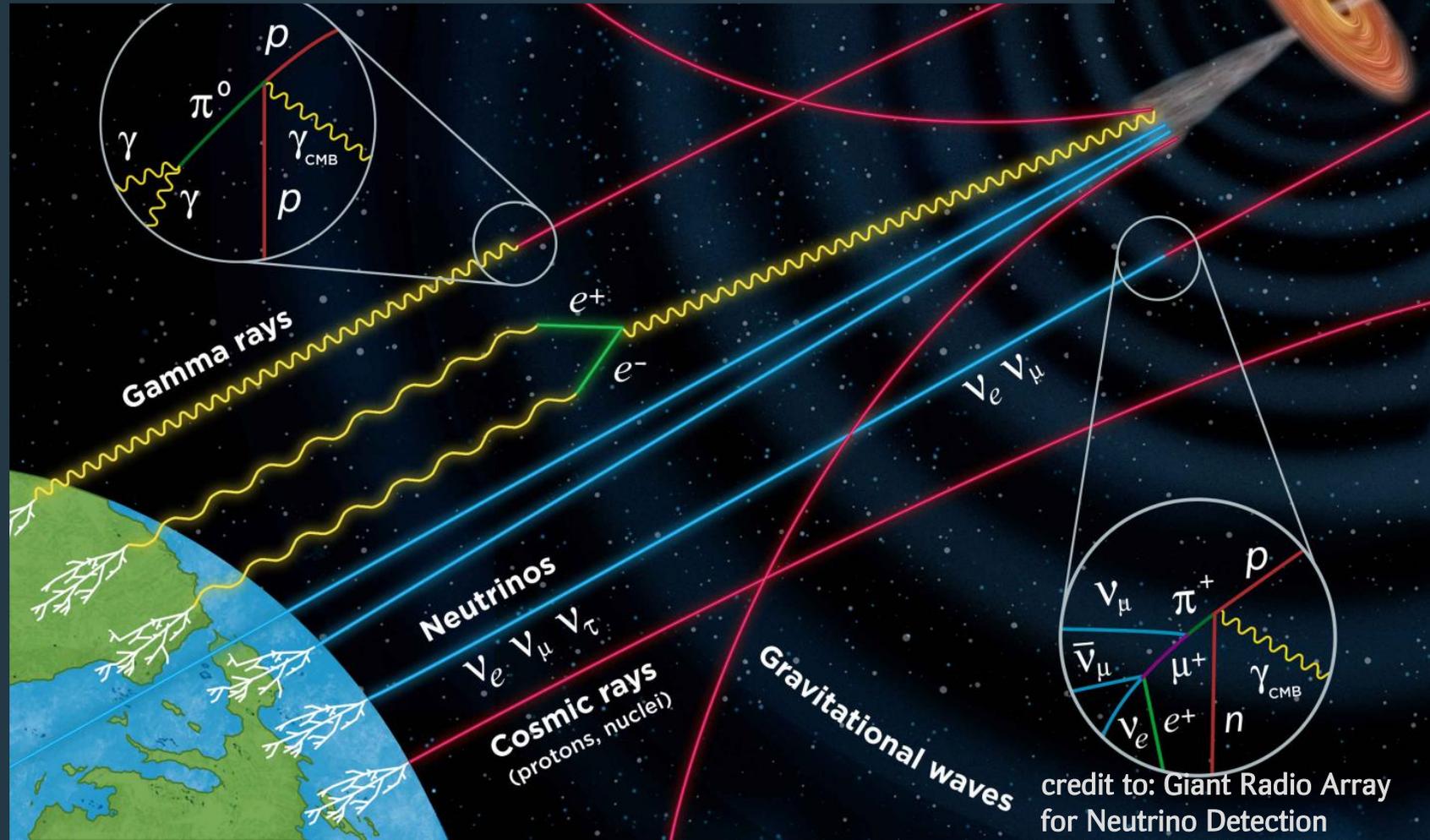
оптические  
телескопы

рентгеновские  
телескопы

гамма-телескопы

нейтринные  
телескопы

детекторы  
гравитационных  
волн



credit to: Giant Radio Array  
for Neutrino Detection

# 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. Dzhilkibaev 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, a large crane-like structure with a spherical top is silhouetted against the dark sky. To its right, a tractor is also visible. The ground is covered in snow and ice, with a line of orange buoys in the middle ground. In the background, a range of mountains is visible under a sky filled with stars. The text "Спасибо за внимание!" is overlaid on the right side of the image.

Спасибо за внимание!