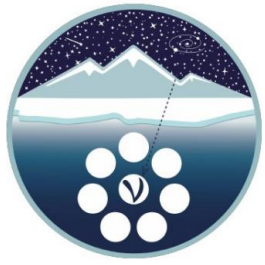


Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD

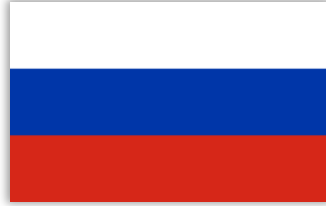
Г.В.Домогацкий (ИЯИ РАН)
от коллаборации “Baikal-GVD”

ВККЛ-2020, Москва, 28.09 -2.10.2020г.



Детектор Baikal-GVD

10 институтов, ~70 участников

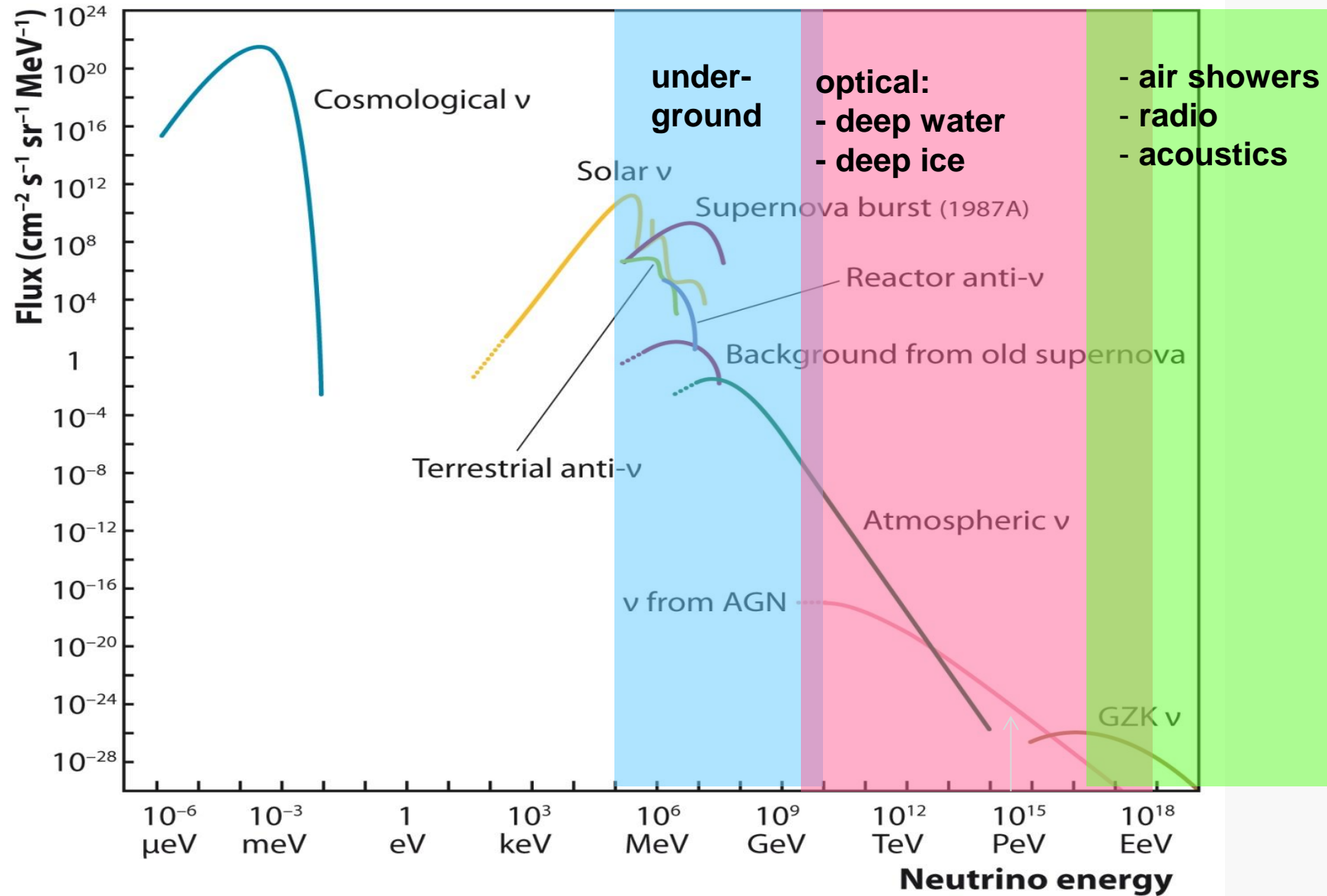


- Институт Ядерных Исследований РАН (Москва)
- [Объединенный Институт Ядерных Исследований \(Дубна\)](#)
- Иркутский Государственный Университет (Иркутск)
- [НИИ Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцина МГУ \(Москва\)](#)
- Нижегородский Государственный Технический Университет (Нижний Новгород)
- [Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет \(Санкт-Петербург\)](#)
- Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University (Prague, Czech Republic)
- [EvoLogics \(Berlin, Germany\)](#)
- Comenius University (Bratislava, Slovakia)
- [Krakow Institute for Nuclear Research \(Krakow, Poland\)](#)



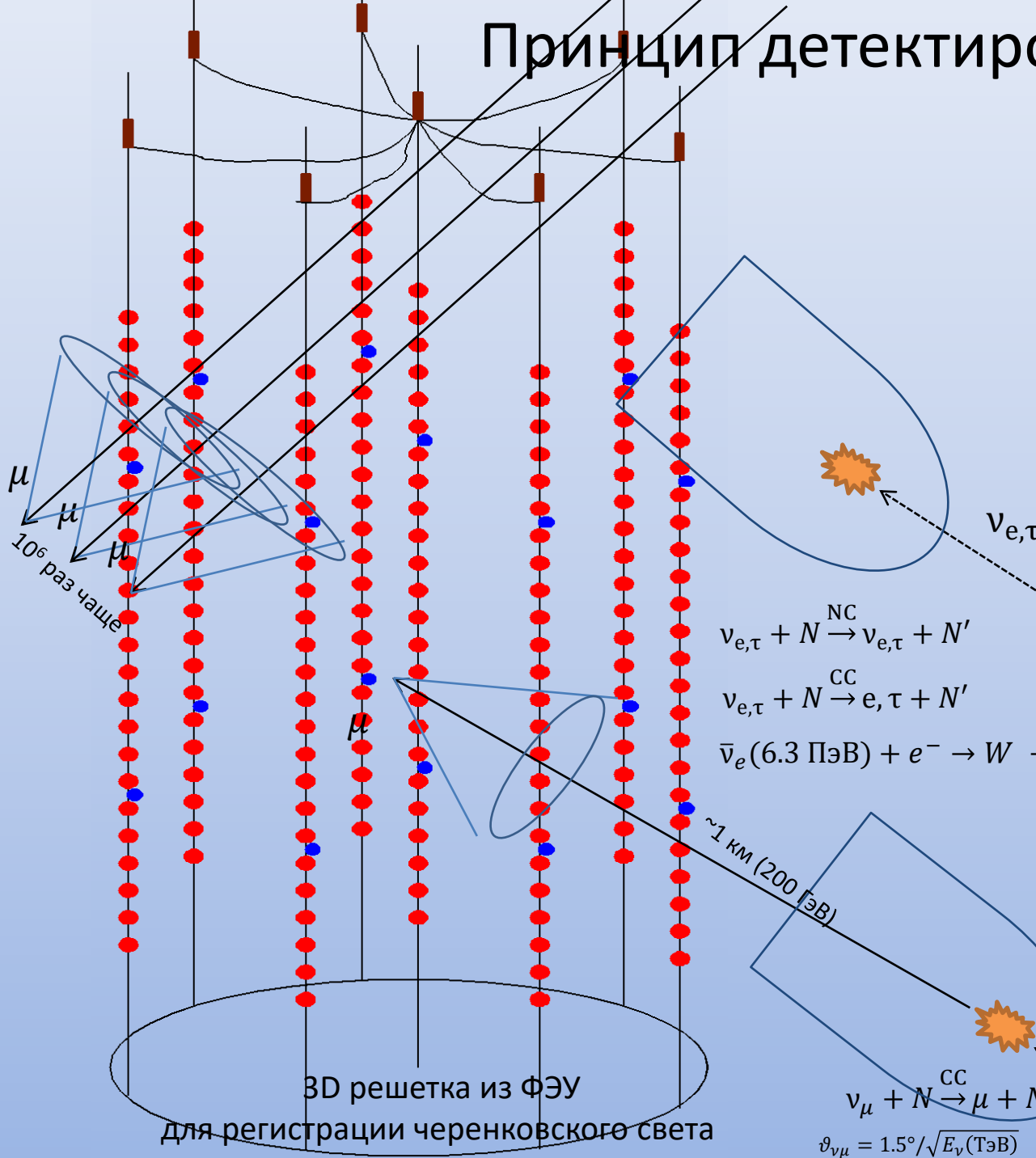
We propose setting up apparatus in an underground lake or deep in the ocean in order to separate charge particle directions by Cerenkov radiation. Markov M.A., 1960, In: Proc. 10th ICHEP, Rochester, p. 578 ³

Природные потоки нейтрино



Принцип детектирования нейтрино

М.А.Марков, ICHEP1960

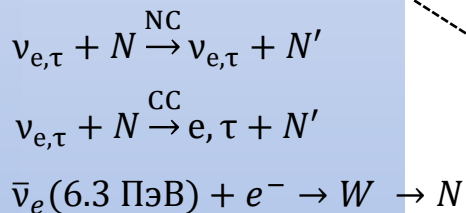


Мюоны от нейтрино:

- Длинный трек в установке
- ФЭУ срабатывает < 20 м от трека (200 фотонов на см)
- Точность восстановления направления $\sim 1^\circ$
- Невысокая точность восстановления энергии
- Вершина взаимодействия нейтрино может находиться в нескольких км от установки

Ливни от нейтрино:

- Во всех остальных 5 реакциях рождаются ливни без мюона
- Квазитоочечный анизотропный источник света в установке
- ФЭУ срабатывает в 100 м от 100 ТэВ ливня ($I \approx 10^8 * E(\text{ТэВ})$ фотонов)
- Относительно невысокая точность восстановления направления ливня ($3^\circ - 6^\circ$)
- Относительно высокая точность восстановления энергии

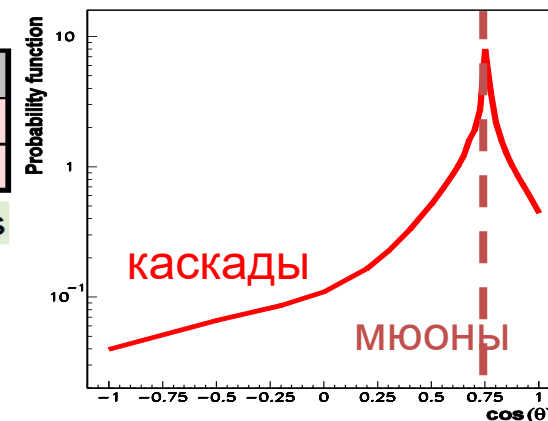


relative cross sections

	ν_e	ν_μ	ν_τ
NC	1	1	1
CC	2	2	2

cascades tracks

1:4.5



Расположение эксперимента

Платформа 106 км Кругобайкальской ЖД

Телескоп расположен в 3.6 км от берега

Глубина озера 1366 -1367 м

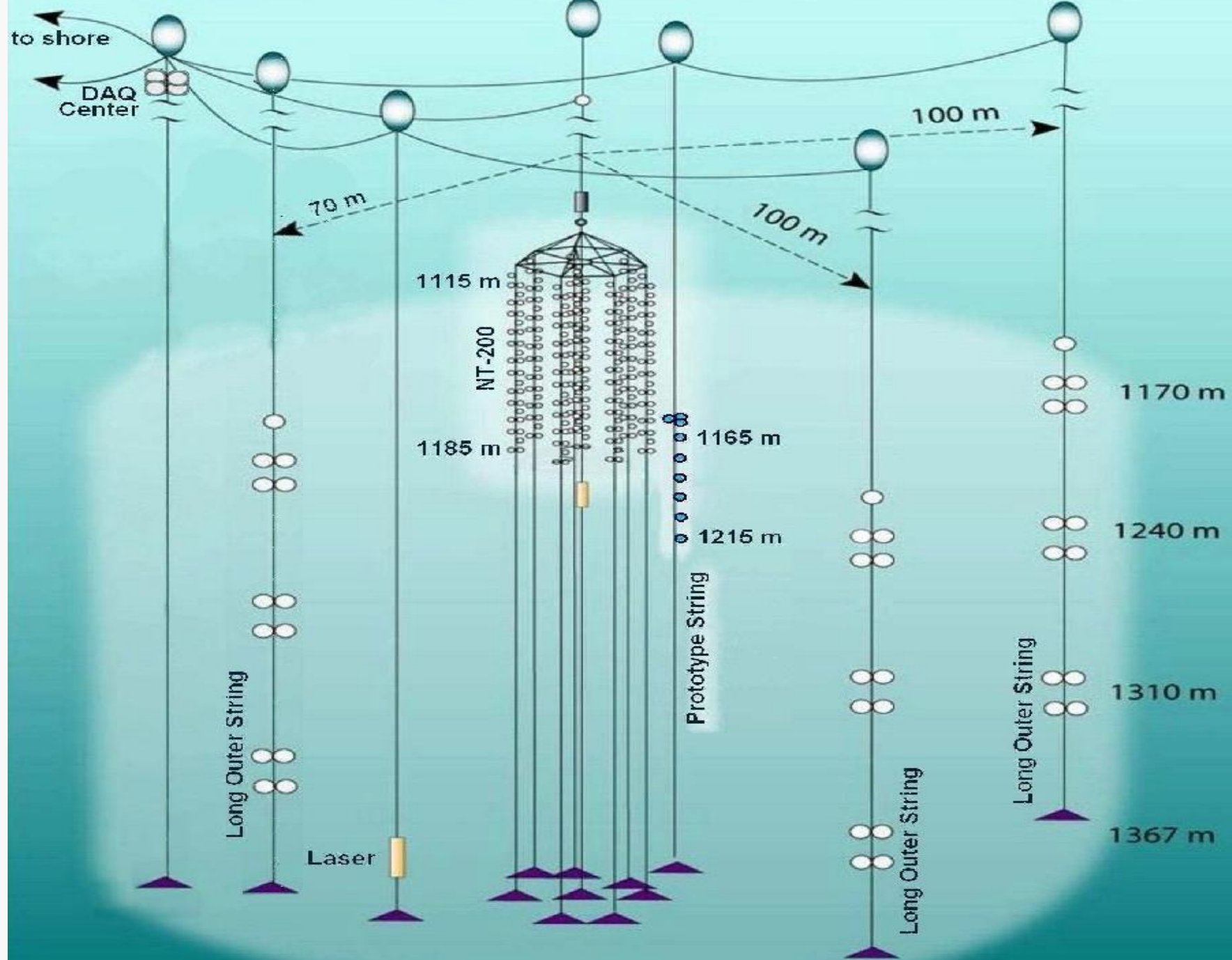
Прозрачность воды:

- Длина поглощения: 22 м
- Длина рассеяния: 30 - 50 м

Стабильный ледовый покров
февраль - апрель, 6-8 недель

- Монтаж новых кластеров
- Ремонт действующей аппаратуры

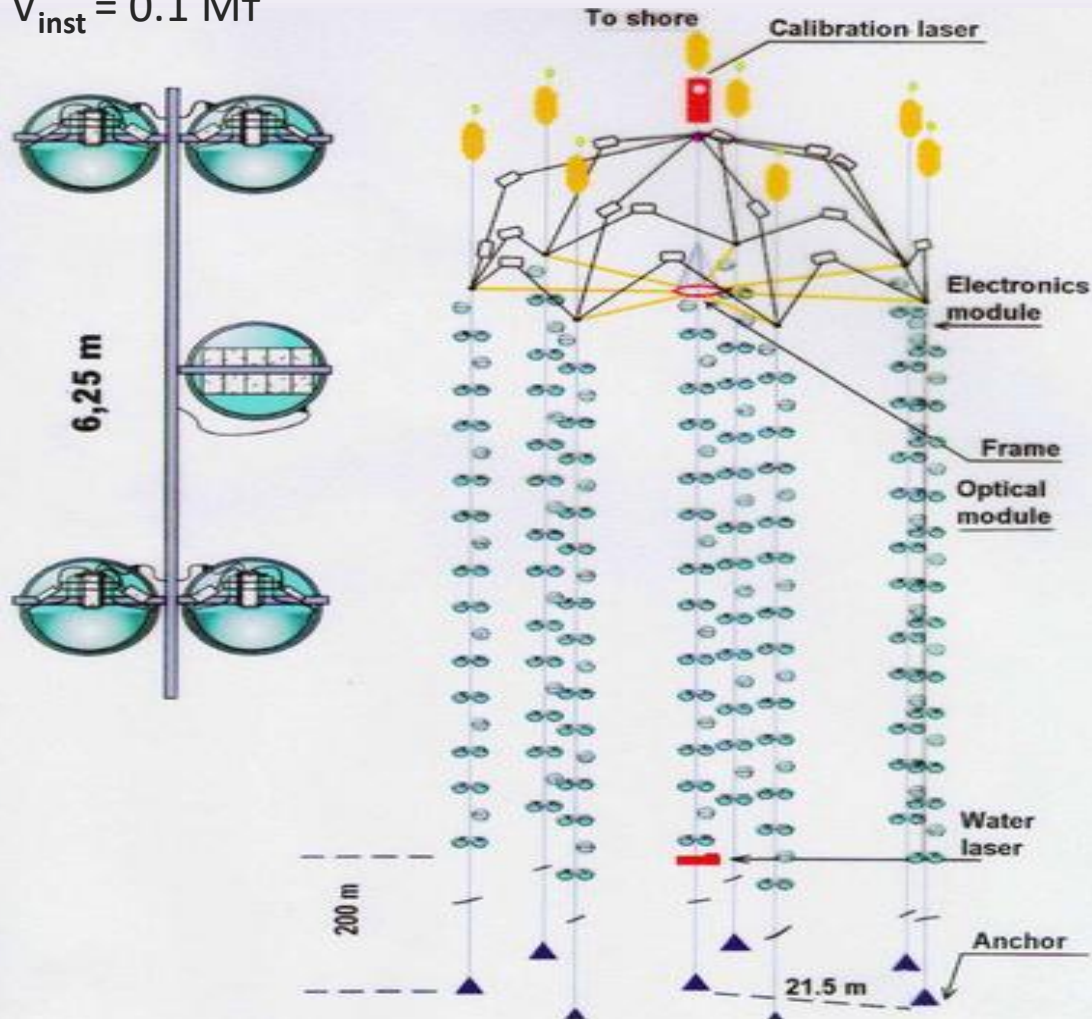




Телескоп НТ200 (1998)

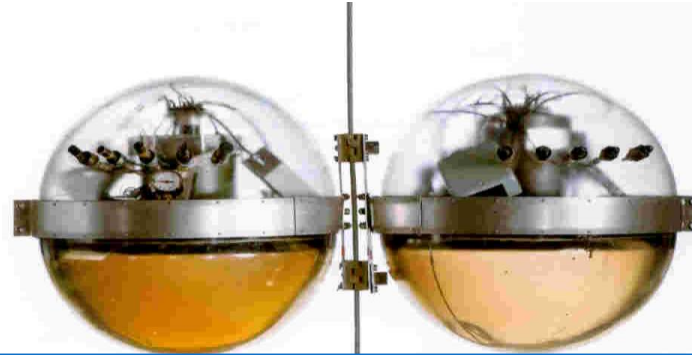
1. НТ200: Высота = 70м, Диаметр = 42м

$V_{inst} = 0.1 \text{ Мт}$

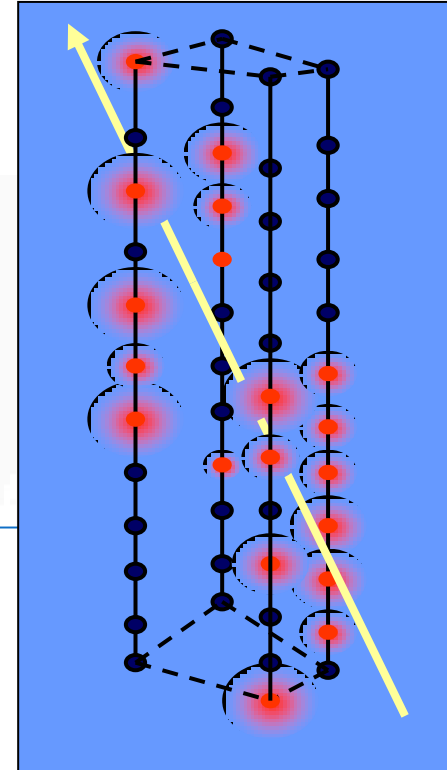


2. НТ200+ : 3 внешних гирлянды по 6 ОМ на расстоянии 100 м

Гибридный ФЭУ «Квазар»: 37см (14.6"),
грибовидная форма, $V = 15 \text{ кВ}$



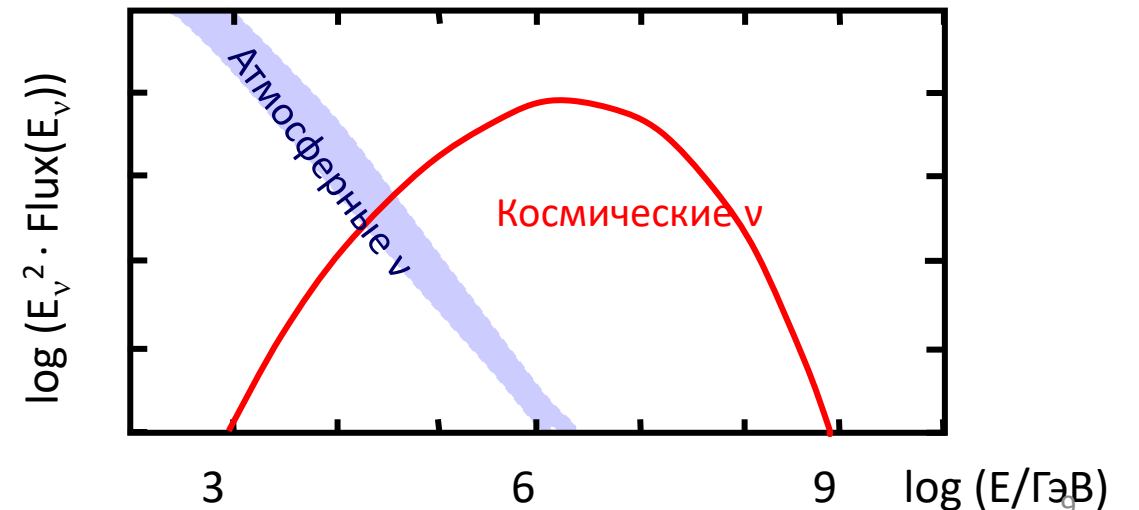
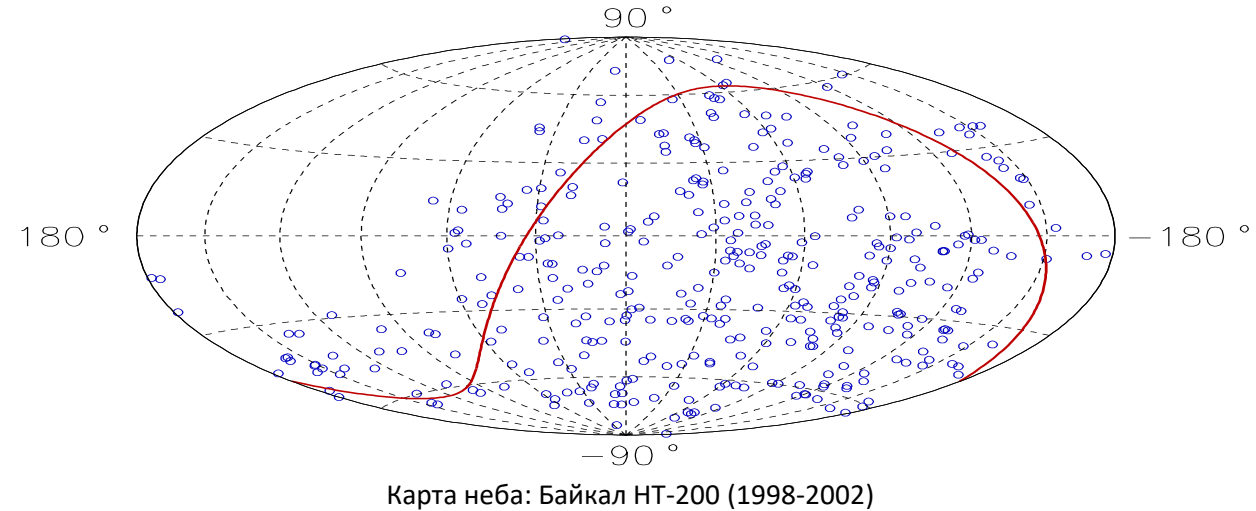
- 8 гирлянд оптических модулей
- 192 оптических модуля
- = 96 измерительных каналов
- регистрация времени прихода черенк. излучения и заряда
- $\sigma_T \sim 1 \text{ нс}$



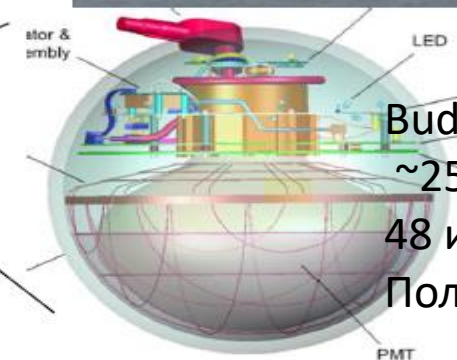
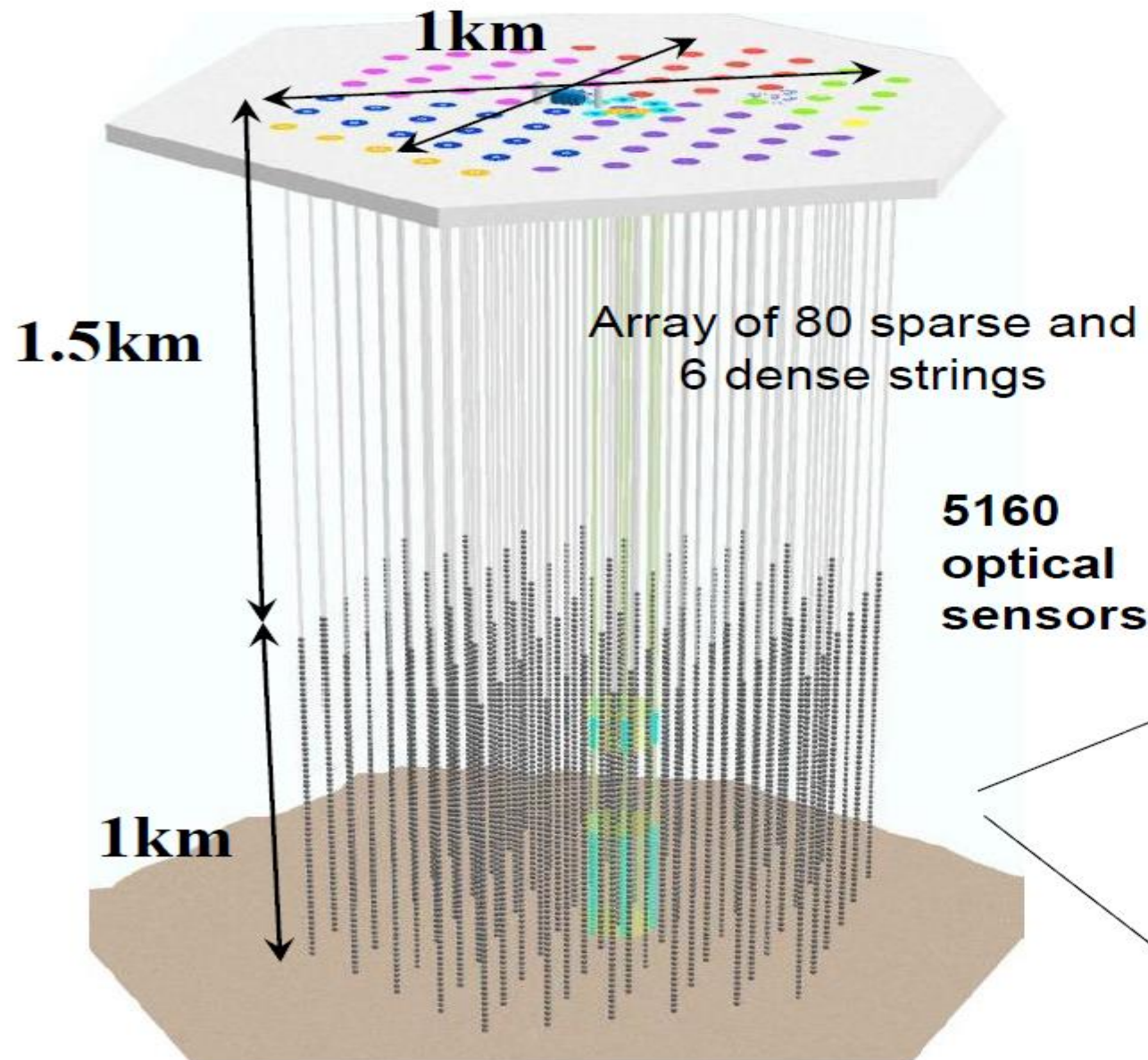
Энерг. порог: $\sim 15 \text{ ГэВ}$
Эфф. площадь: $\sim 2000 \text{ м}^2$ (1 ТэВ)
Эфф. объем: $\sim 0.2 \text{ Мт}$ (10 ТэВ)
 $\sim 1 \text{ Мт}$ (1 ПэВ)

Выделение космических нейтрино на фоне атмосферных мюонов и нейтрино

- По направлению прихода нейтрино с определенного участка небесной сферы из-под горизонта
- По превышению числа событий в высокоэнергичной части спектра зарегистрированных нейтрино над ожидаемым числом событий от атмосферных мюонов и нейтрино (атм. поток ν_e примерно в 20-50 раз меньше атм. потока ν_μ)



The IceCube Detector



Budget: ~300 мил. \$

~250 авторов

48 институтов

Полный запуск: начало 2011 г

Астрофизика нейтрино высоких энергий

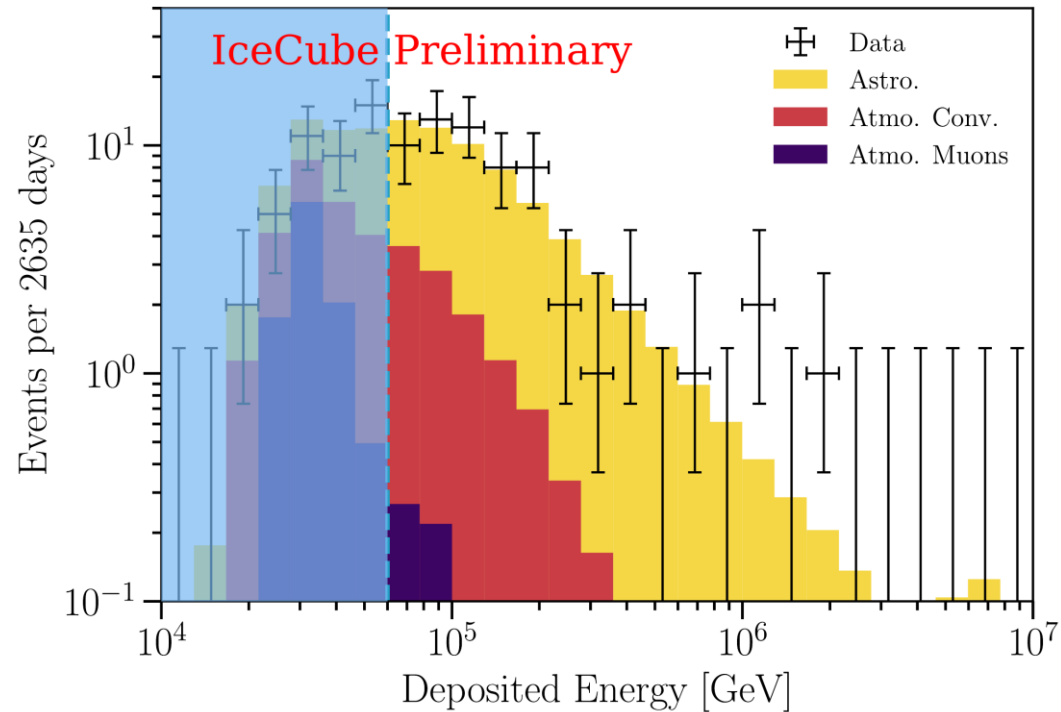
Ключевые результаты IceCube

60 HESE событий от нейтрино с $E > 60$ ТэВ

- 42 ливня, 16 треков, 2 двойных ливня
[EPJ Web Conf. 207 02005 (2019)]

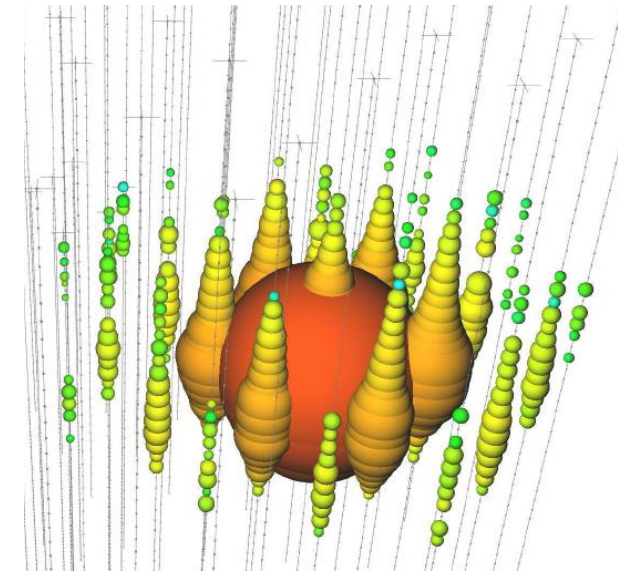
Спектр HESE событий IceCube

[PoS (ICRC2019) 1004]



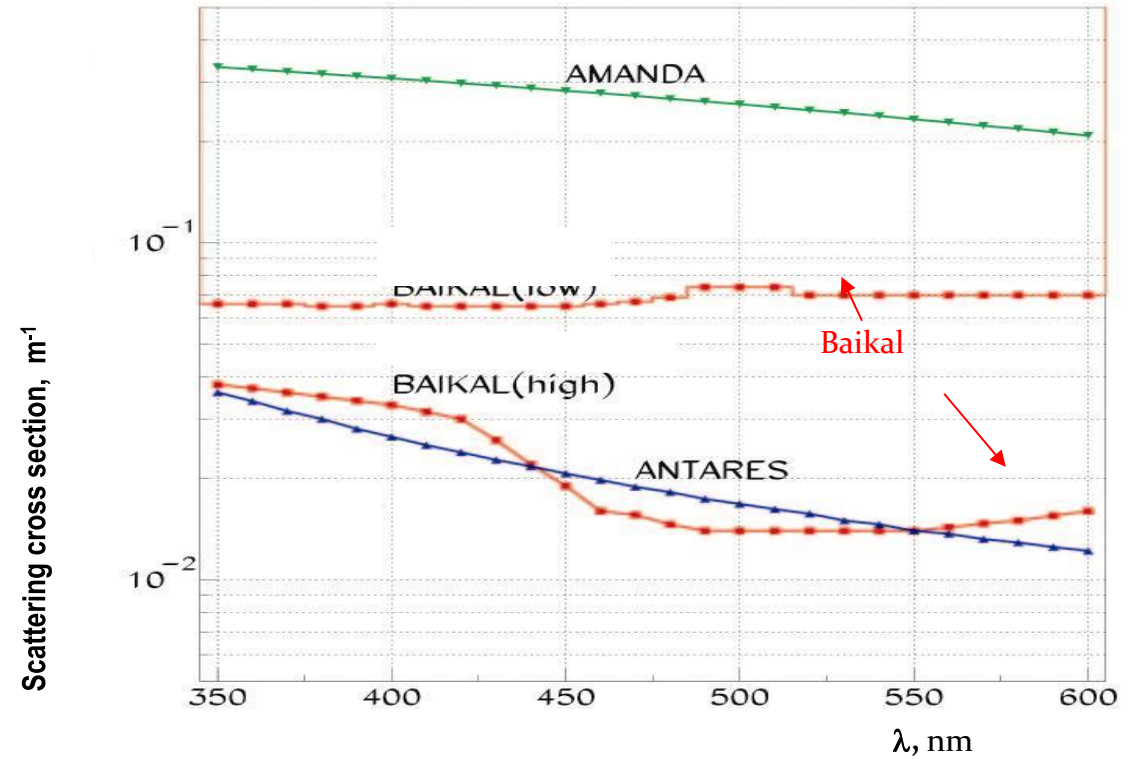
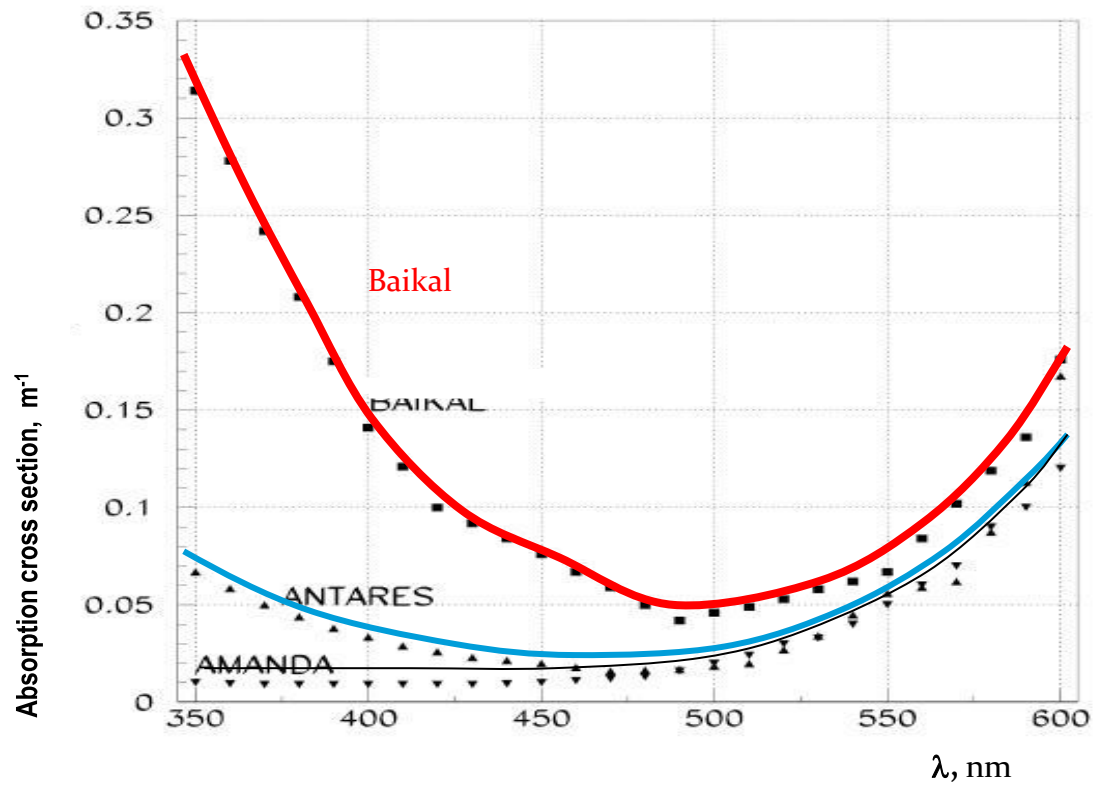
Ливень $E = 1.1$ ПэВ

[10.1126/science.1242856]

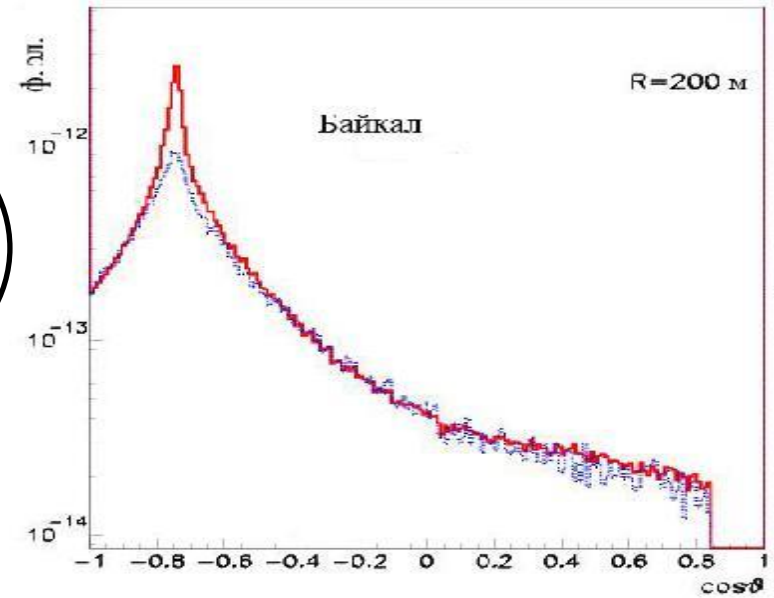
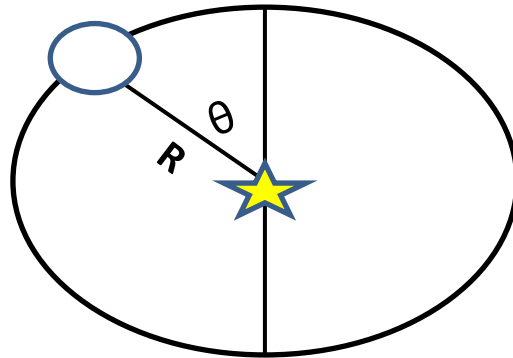
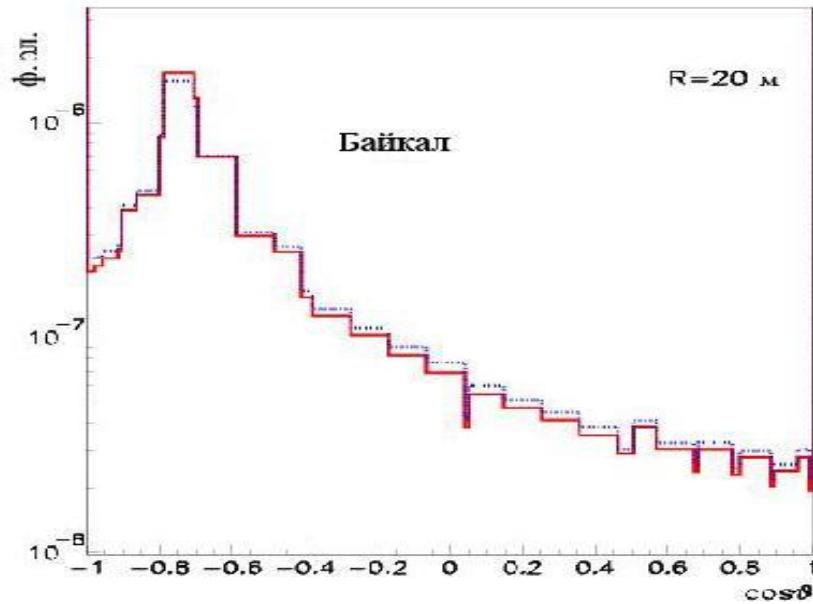


Типичное угловое разрешение IC:
ливни: 15°
треки: 1°

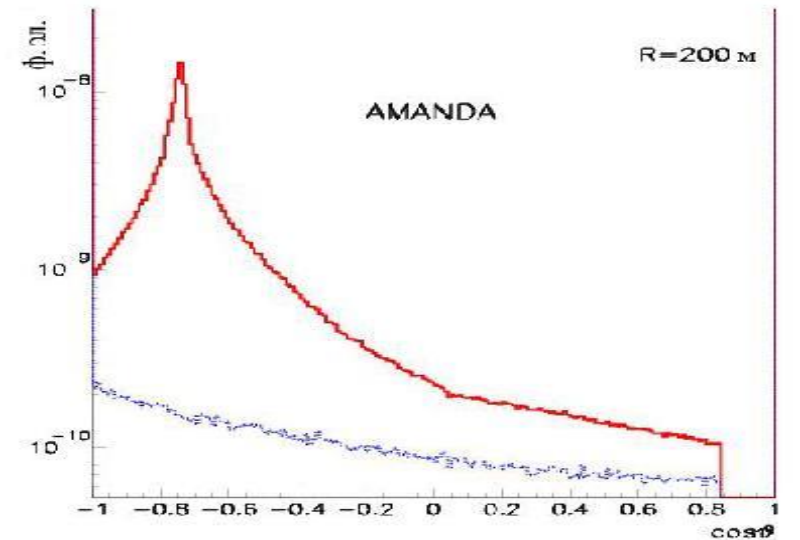
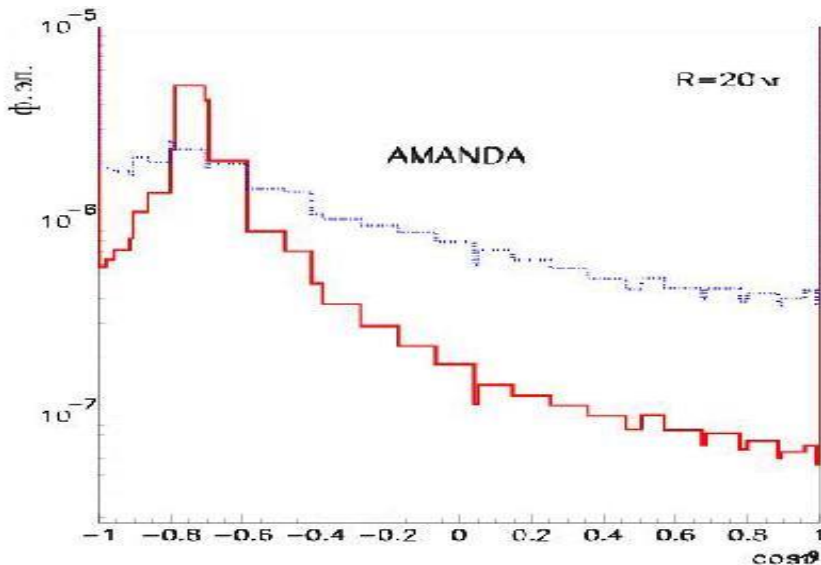
Свойства среды – вода, лед



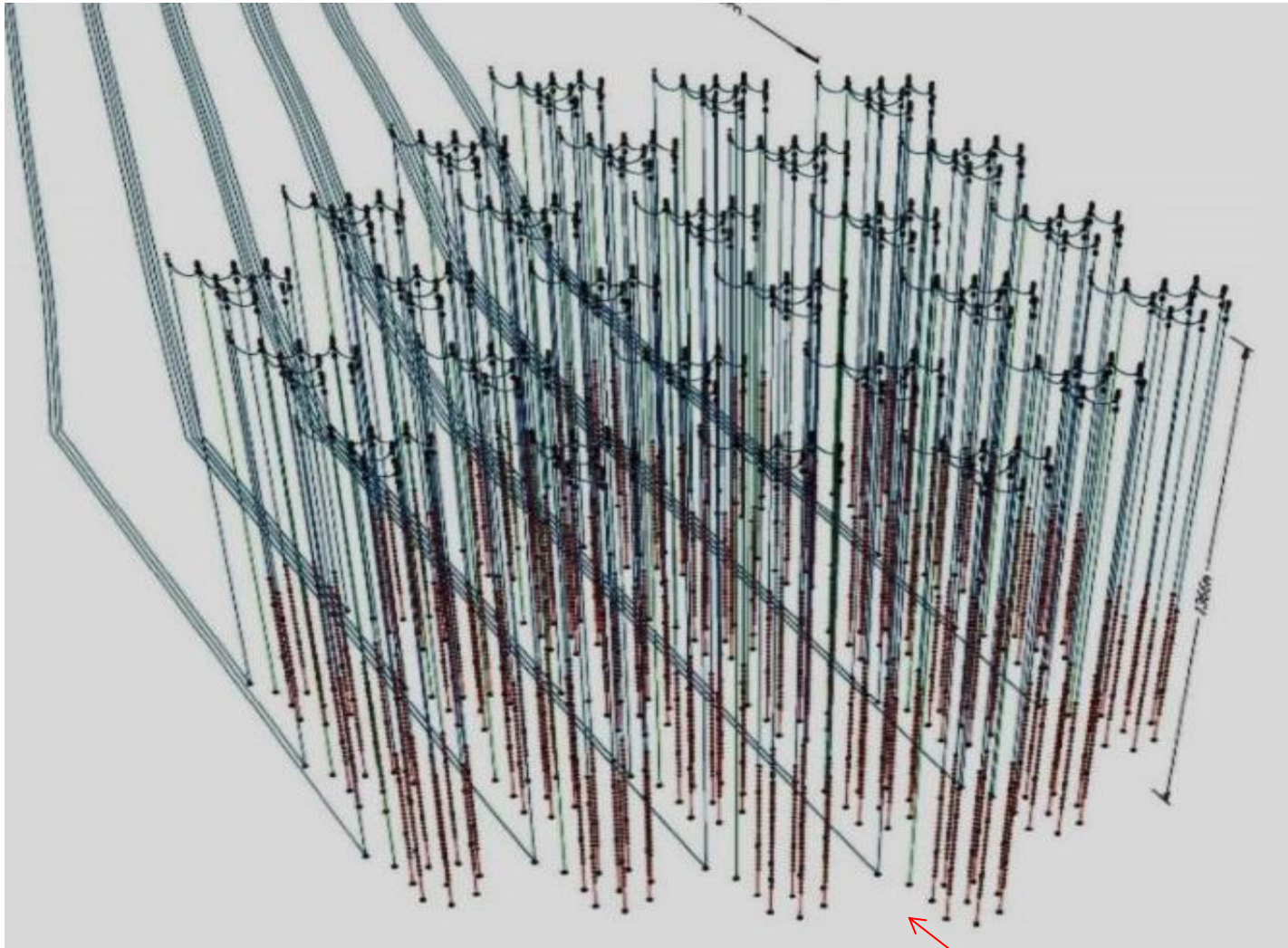
Вода(Байкал): длина рассеяния - 30 – 50 м



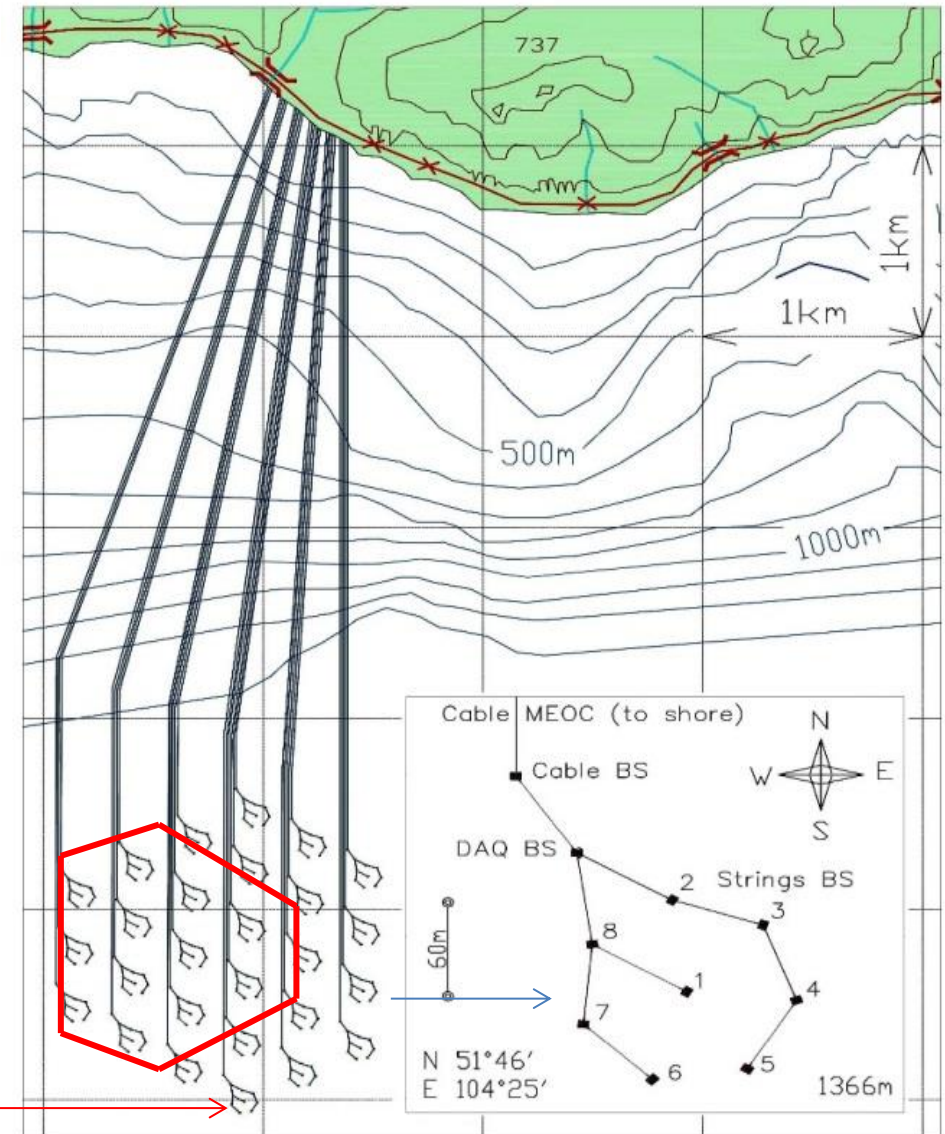
Антарктический лед: длина рассеяния - 1 – 4 м



Gigaton Volume Detector (Lake Baikal)



Cluster



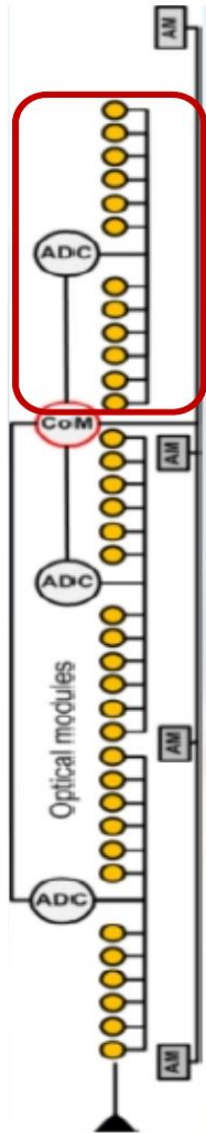
Детектор Baikal-GVD I

Чувствительный элемент телескопа: оптический модуль
По состоянию на 2020 год установлено 2016.



Детектор Baikal-GVD II

гирлянда:
3 секции



Секция
12 OM

Кластер - независимая структурная единица телескопа

Кластер включает 288 OM распределенных по 8-ми гирляндам на глубинах от 750 до 1275 м

OM ориентированы ко дну озера

Каждая гирлянда закреплена якорем на дне озера

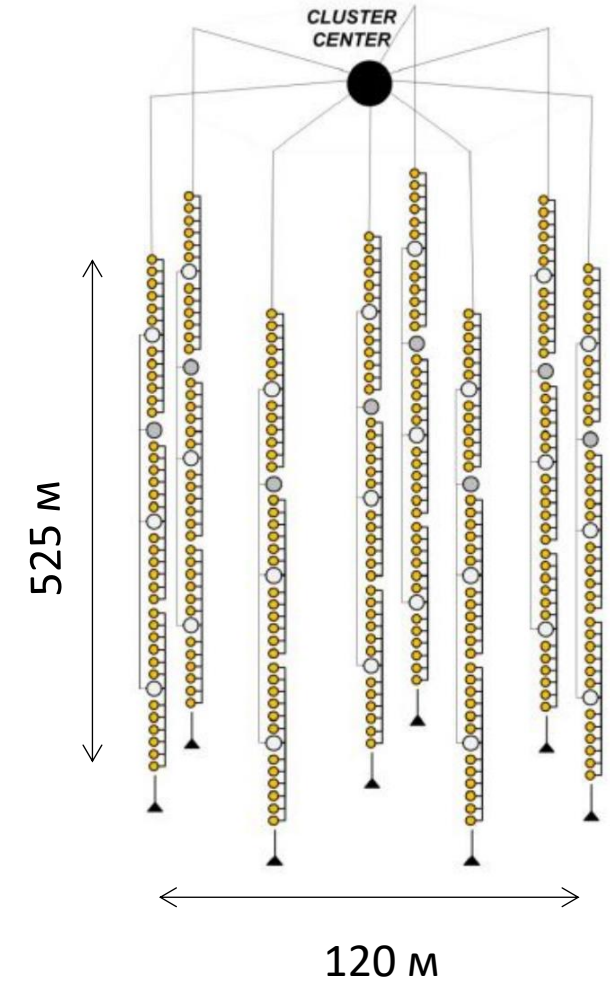
Расстояние между OM по вертикали 15 м

Расстояние между гирляндами 60м

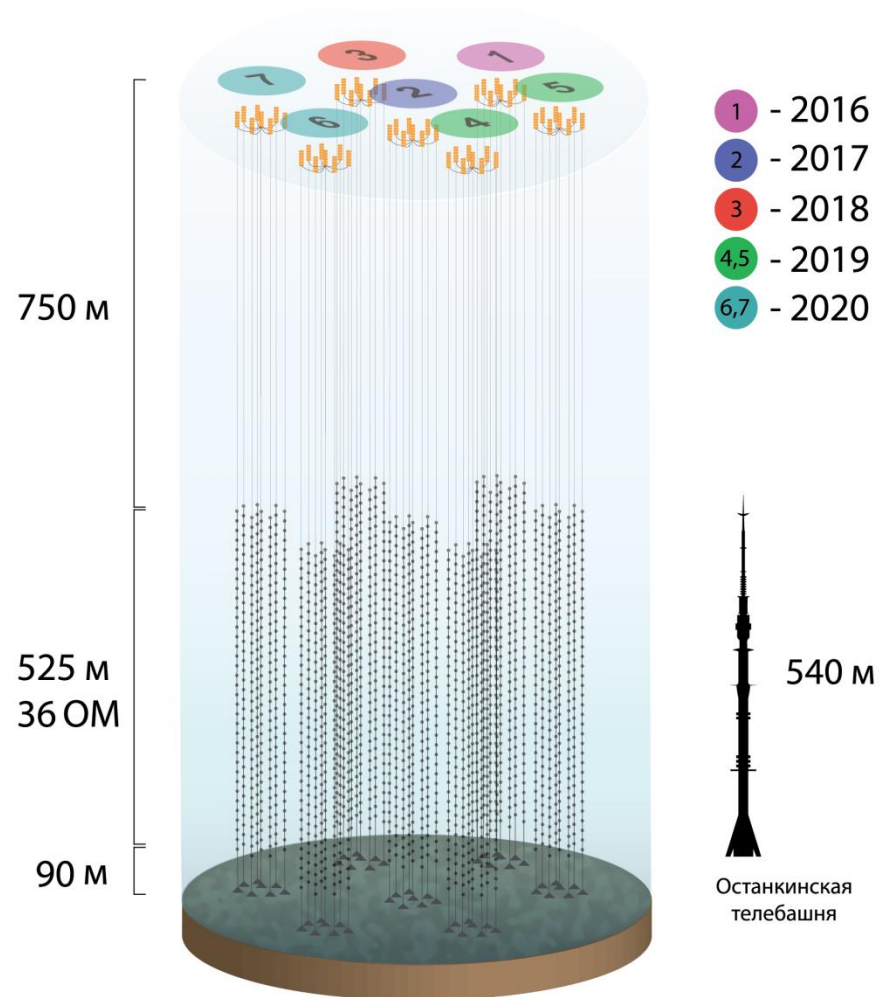
На глубине 30м расположен центр кластера

- Триггерная электроника
- Питание
- Оборудование для передачи данных

Кластер: 8 гирлянд



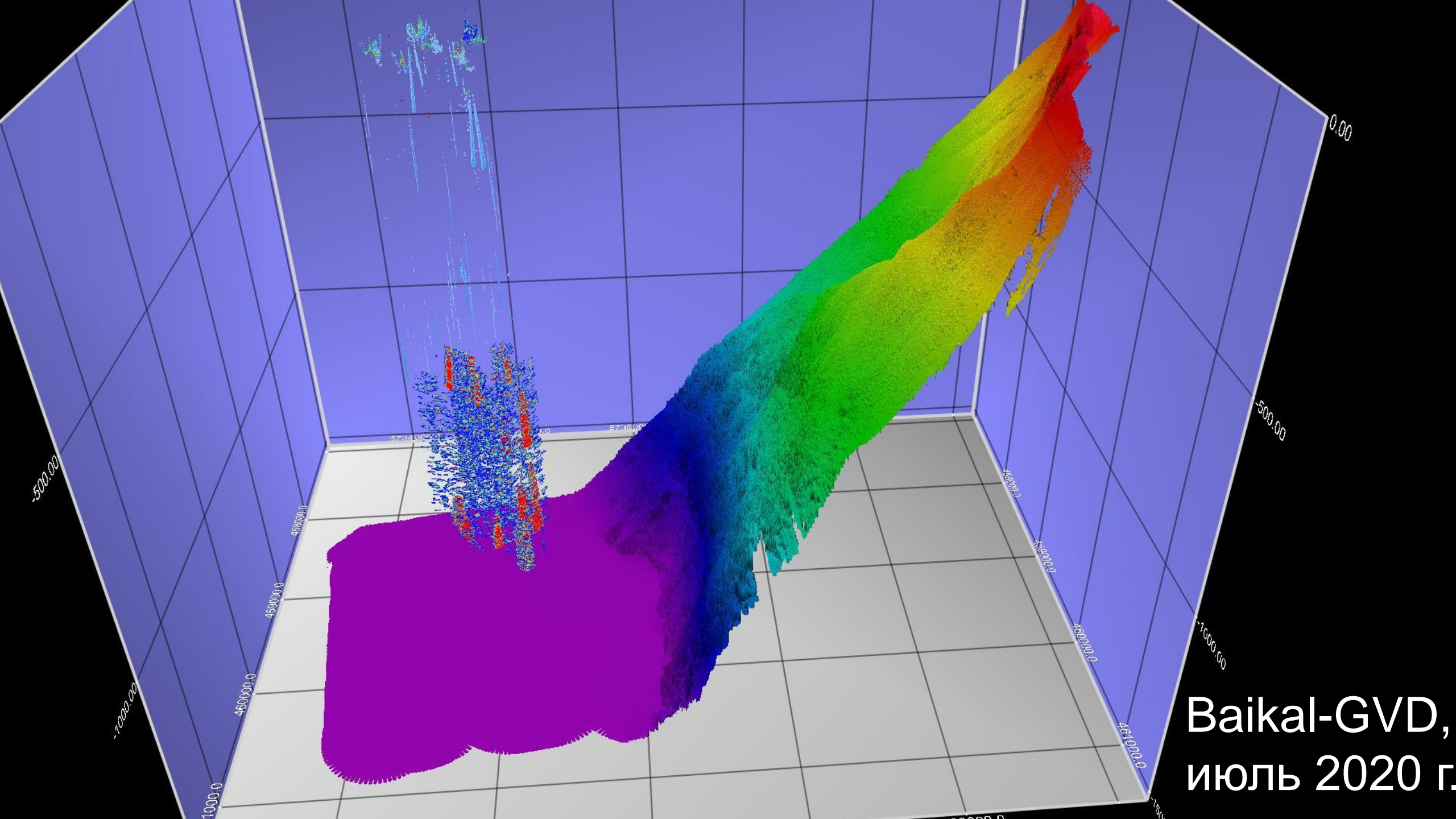
Детектор Baikal-GVD 2020



Эффективный объем для каскадных событий 0.35 куб км

План развертывания детектора

Год	Суммарное число кластеров	Число OM
2016	1	288
2017	2	576
2018	3	864
2019	5	1440
2020	7	2016
2021	9	2592



Вaikal-GVD,
ИЮЛЬ 2020 г.

Зимняя экспедиция



тяжелая ледовая обстановка этой зимой

Экспедиция 2020



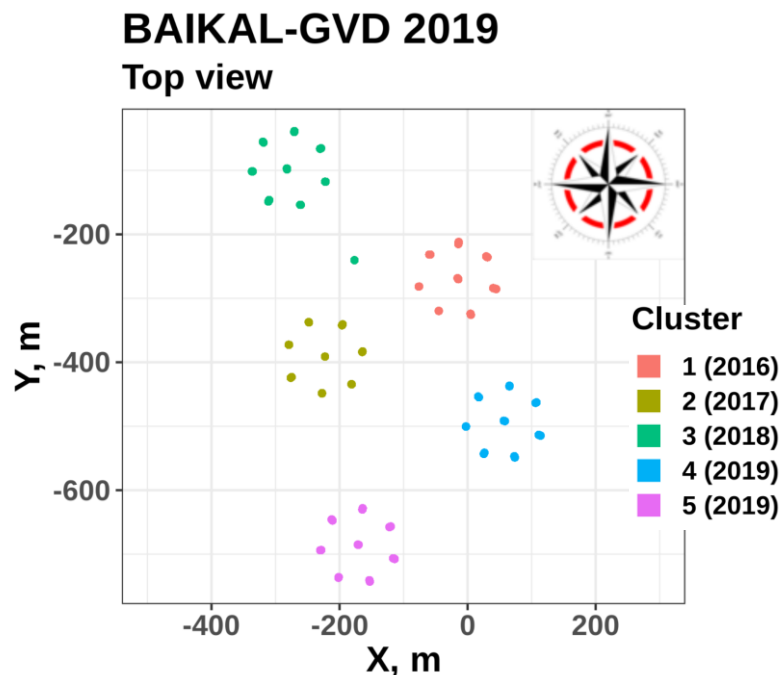
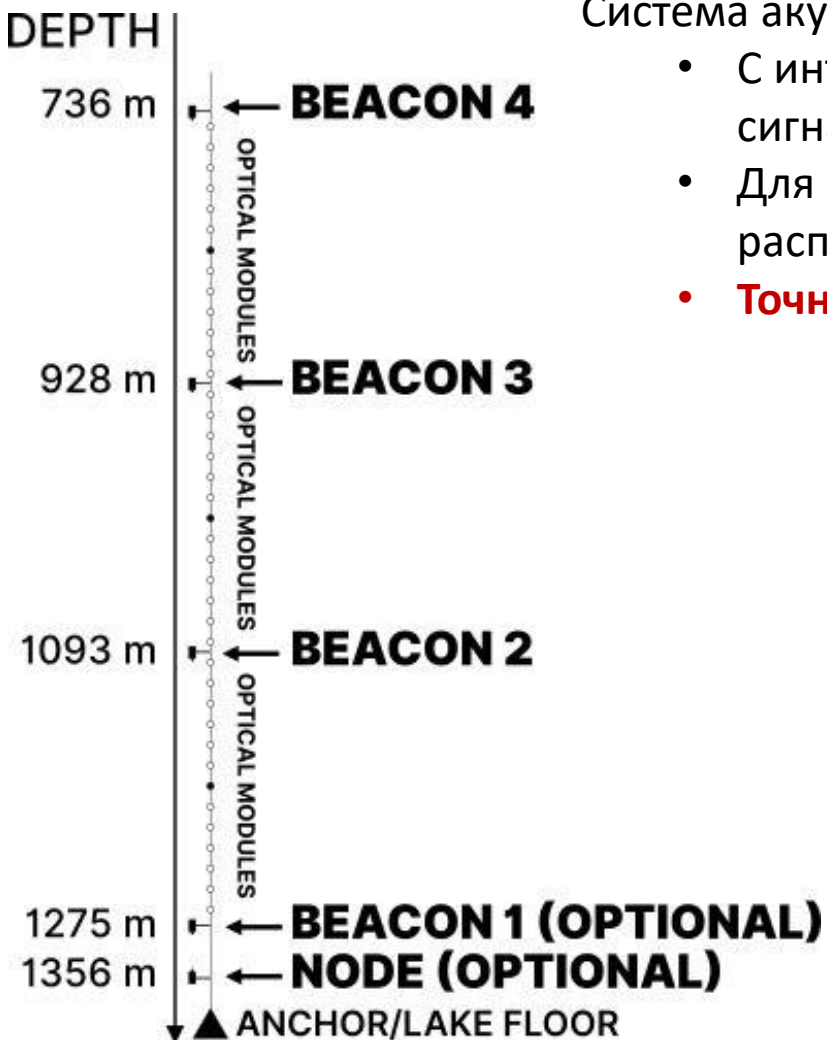
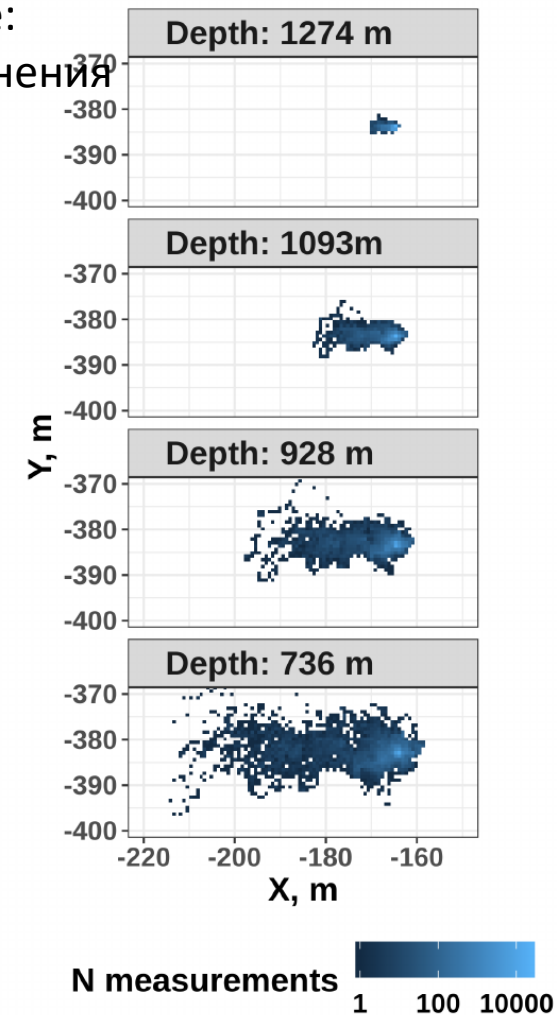
Система акустического позиционирования

Течения приводят к отклонениям ОМ от среднего положения со средней скоростью от 0.5 см/с до максимальной 3 см/с

Система акустических маяков установлена на каждой гирлянде:

- С интервалом ~1 минута измеряется время распространения сигнала между маяками
- Для каждого измерения реконструируется точное расположение ОМ в режиме реального времени
- **Точность определения координат ОМ < 20 см**

Cluster 2, string 2
April 2018 - February 2019



Калибровка времени отклика

Время импульса ФЭУ - важнейшая характеристика сигнала, используемая в реконструкции

Межканальная внутрисекционная калибровка:

Калибровочные светодиоды

Межсекционная калибровка:

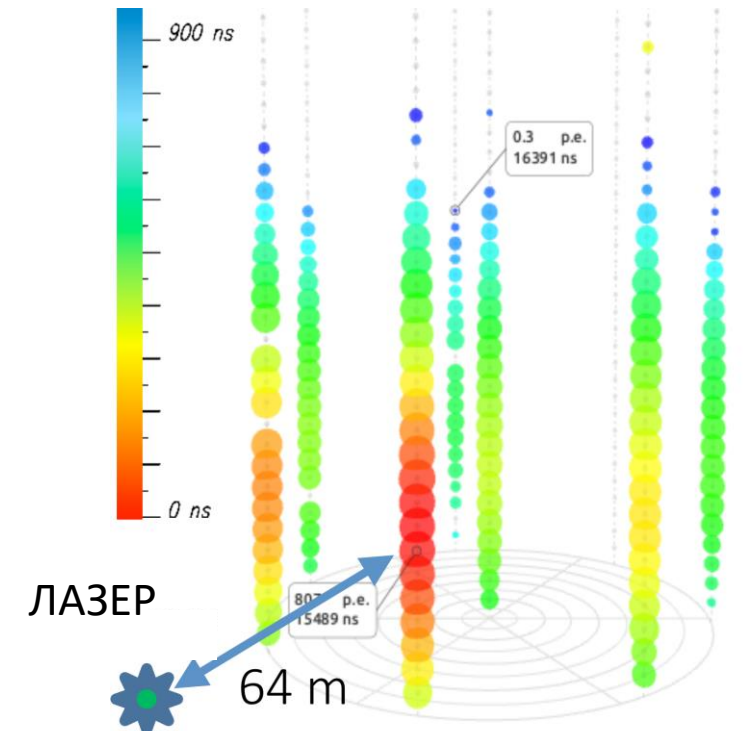
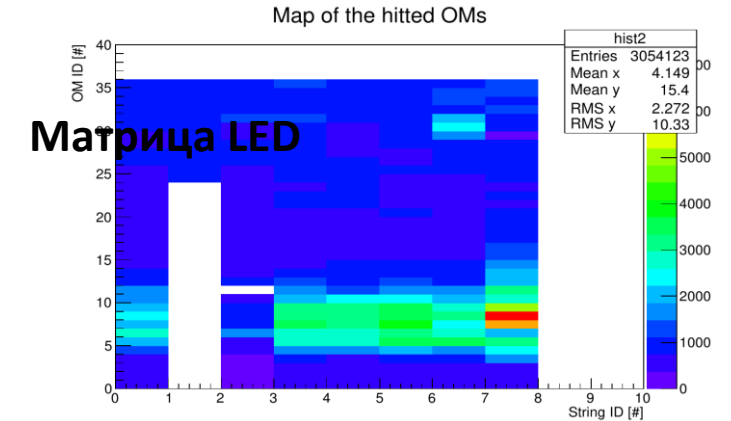
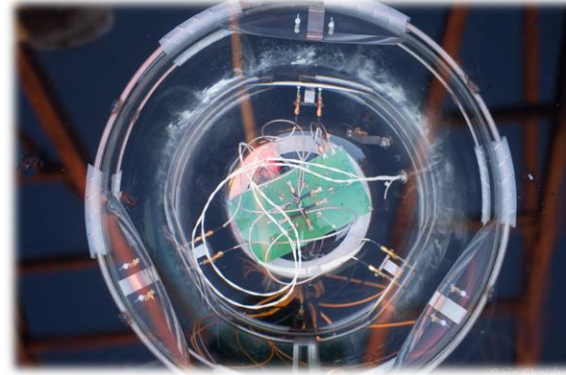
Матрица светодиодов

Межкластерная калибровка:

Пять специально разработанных изотропных лазера

- Вспышки 532нм, 0.37 мДж (10^{15} фотонов) , длительность 1 нс
- В 2020 будет установлено еще 4 лазера

Точность внутрисекционной и межсекционной калибровки ~ 2.5 нс

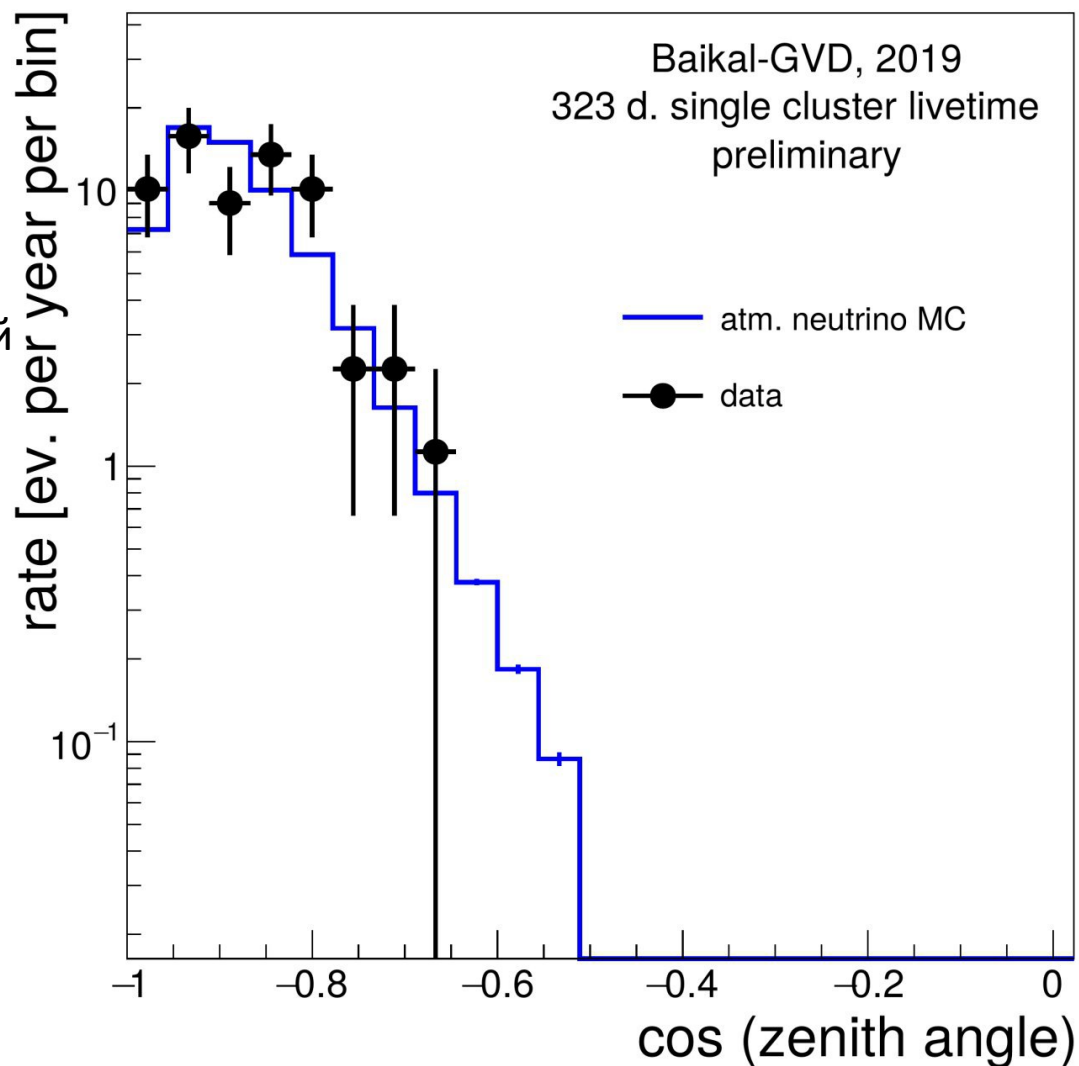




Мюонные нейтрино

Анализ группы событий, являющихся кандидатами на события от мюонных нейтрино.

- Время набора данных
1 апреля – 30 июня 2019 г.
- Полное время экспозиции эквивалентно времени экспозиции одного кластера за 323 дня.
- Полное количество событий от мюонных нейтрино составляет 57.
- Результаты сравниваются с МС-симуляцией от потока атмосферных нейтрино



MC expected: 54.3

- atm. neutrino :54.3
- atm. muon: 0

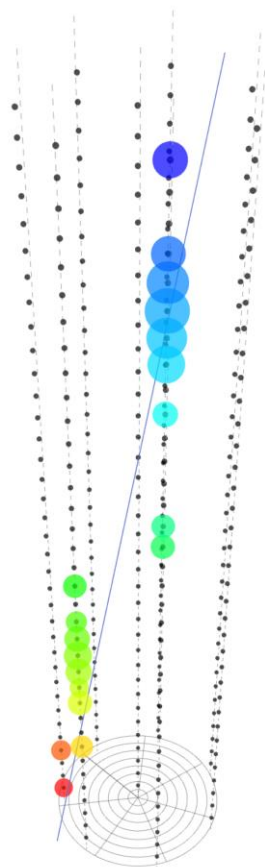
Observed: 57

Вполне удовлетворительное согласие МС ожидания и данных.

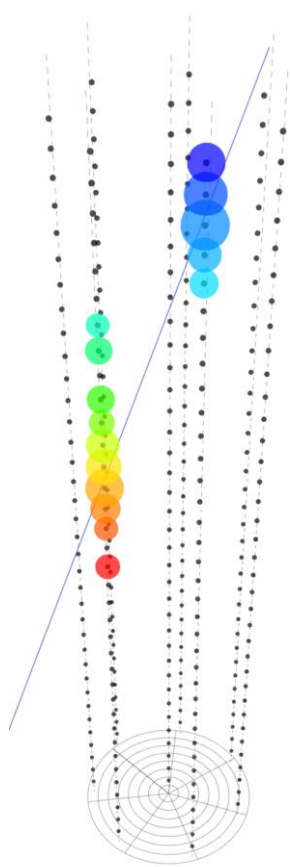
Угловое разрешение для восходящих мюонов в однокластерных событиях $\sim 1^\circ$



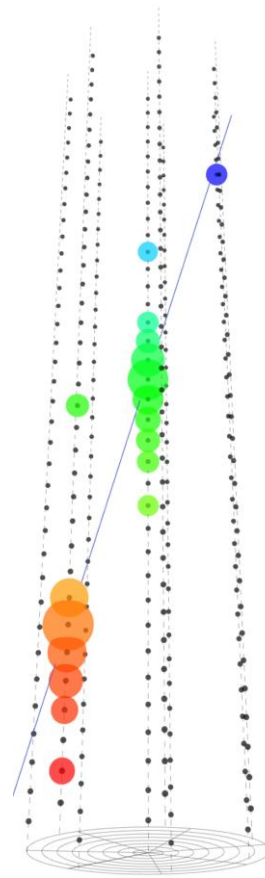
Muon neutrino candidates



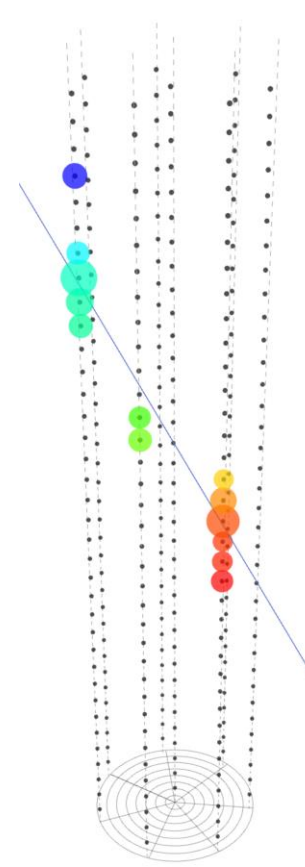
cluster 3, run 122
evt. 1549343
 $\theta_{\text{zenith}} = 169.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{strings}} = 19$



cluster 1, run 157
evt. 1414137
 $\theta_{\text{zenith}} = 161.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 2$
 $N_{\text{strings}} = 15$



cluster 4, run 99
evt. 438088
 $\theta_{\text{zenith}} = 162.22^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 18$



cluster 5, run 162
evt. 1939721
 $\theta_{\text{zenith}} = 148.07^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 13$

late



early

Ливни высоких энергий

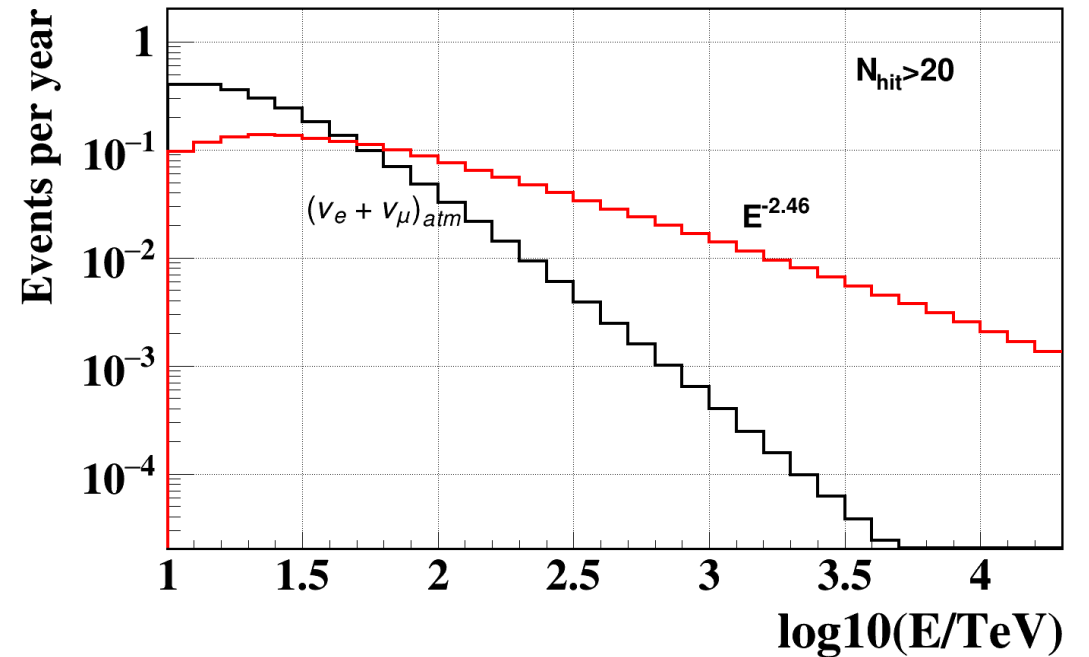
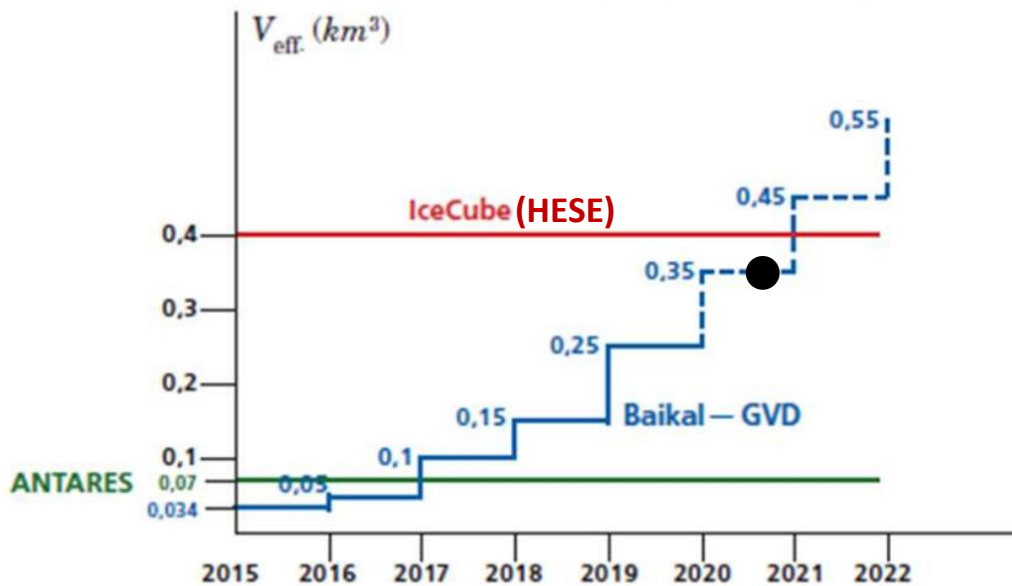
В настоящее время эффективный объем установки для регистрации ливней высоких энергий составляет 0.35 км^3 , или 0.8 от объема IceCube для HESE событий

Спектр энергий астрофизических нейтрино, измеренный IceCube:

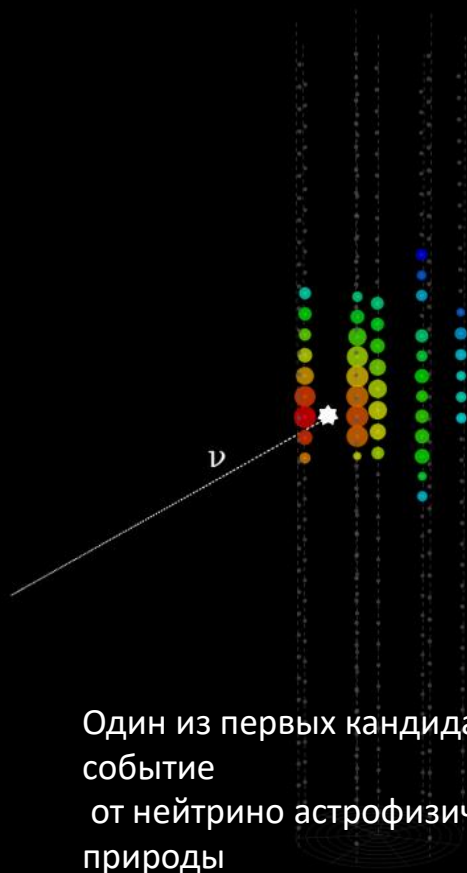
$$4.1 \cdot 10^{-6} E^{-2.46} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Ожидаемое количество ливней на кластер Baikal-GVD за год

Эффективный объем детекторов для регистрации ливневых событий от нейтрино в области энергий 100 TeV — 10 PeV



Ожидается 0.6 ливневых событий с $E > 100 \text{ ТэВ}$ и $N_{\text{hit}} > 20$ на кластер за год



Один из первых кандидатов на событие от нейтрино астрофизической природы
Энергия 91 ТэВ. Дата 23.05.2019 год.
Первый кластер.

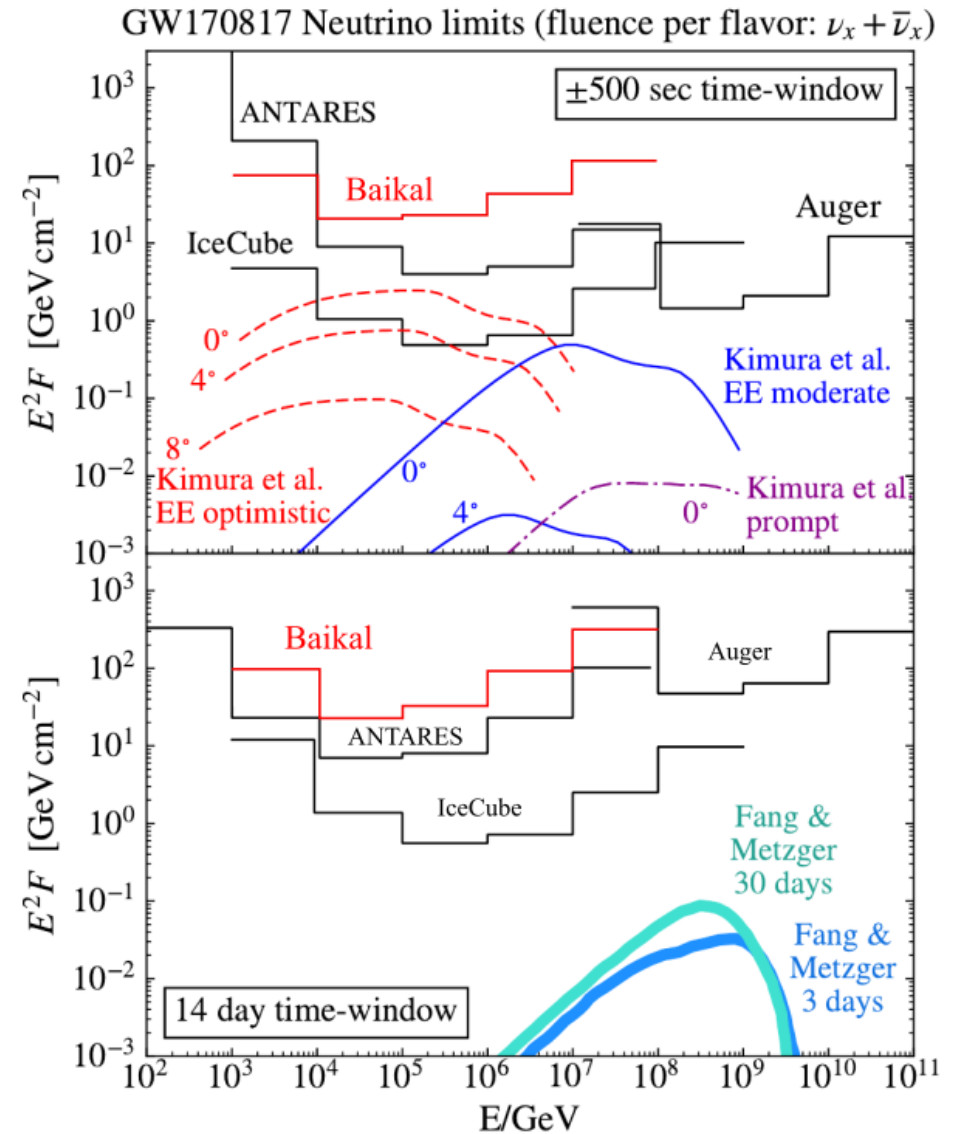
Поиск ливневых событий от GW170817

GW170817 - первое наблюдение гравитационных волн, сопровождавшихся сигналом в гамма/оптическом/радио диапазонах

В ливневом канале не было найдено событий ассоциированных с GW170817 в окне ± 500 секунд и 14 дней после события слияния нейтронных звезд

Было установлено ограничение на поток на уровне 90 % CL в предположении спектра E^{-2} и одинакового потока всех флэйворов

[JETP Letters, v.108, issue 12, arXiv:1810.10966]



Заключение

- Нейтринный телескоп Baikal-GVD - крупнейший детектор нейтрино высоких энергий в Северном полушарии. Эффективный объем детектора составляет 0.35 куб км для каскадных событий с энергией выше 100 ТэВ.
- С апреля 2020 года установка работает в составе 7 кластеров, (2016 оптических модулей), в экспедиции 2021 планируется установить один-два новых кластера.
- Разработаны процедуры позиционирования и калибровки модулей телескопа
- Разработана система автоматической обработки первичных данных
- Получены первые предварительные результаты по восстановлению мюонов.
- При анализе данных 2016, 2018, 2019 г.г. выделены 12 каскадных событий с энергией выше 100 ТэВ и два восходящих каскадных события с энергией 91ТэВ и 23 ТэВ, которые могут рассматриваться как кандидаты на события от нейтрино астрофизической природы
- Завершается подготовка к включению в анализ многокластерных событий.

Благодарю за внимание