

Инструменты и методы регистрации нейтрино сверхвысоких энергий

Дмитрий Костюнин

DESY

4 апреля 2019

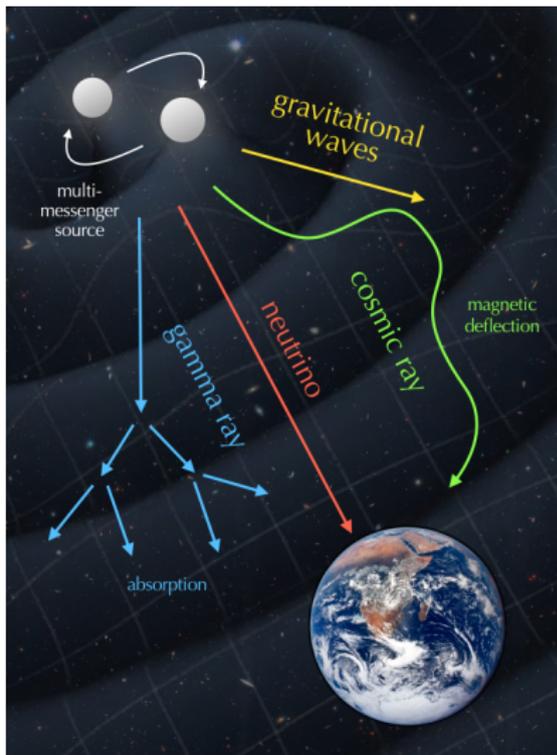
Содержание лекции

- Введение
 - Парадигма многоканальной астрономии
 - Связь нейтрино, КЛ и гамма-квантов
 - Открытие нейтрино и зарождение нейтринной астрономии
 - Взаимодействие нейтрино с веществом
- Современные нейтринные телескопы
 - Принцип работы черенковского нейтринного телескопа
 - Baikal-NT200 → Baikal-GVD
 - IceCube → IceCube-Gen2
 - Первый внегалактический кандидат зарегистрированный в многоканальном режиме
- Методы регистрации нейтрино с энергиями свыше 10 ПэВ
 - Оптический метод
 - Акустический метод
 - Радиометод

Введение

Многоканальная астрономия

Многоканальная = Multimessenger



Ядерно-адронные реакции

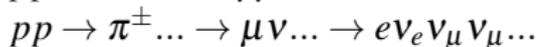
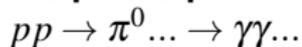
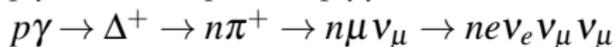
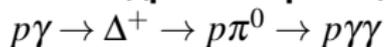


Фото-адронные реакции

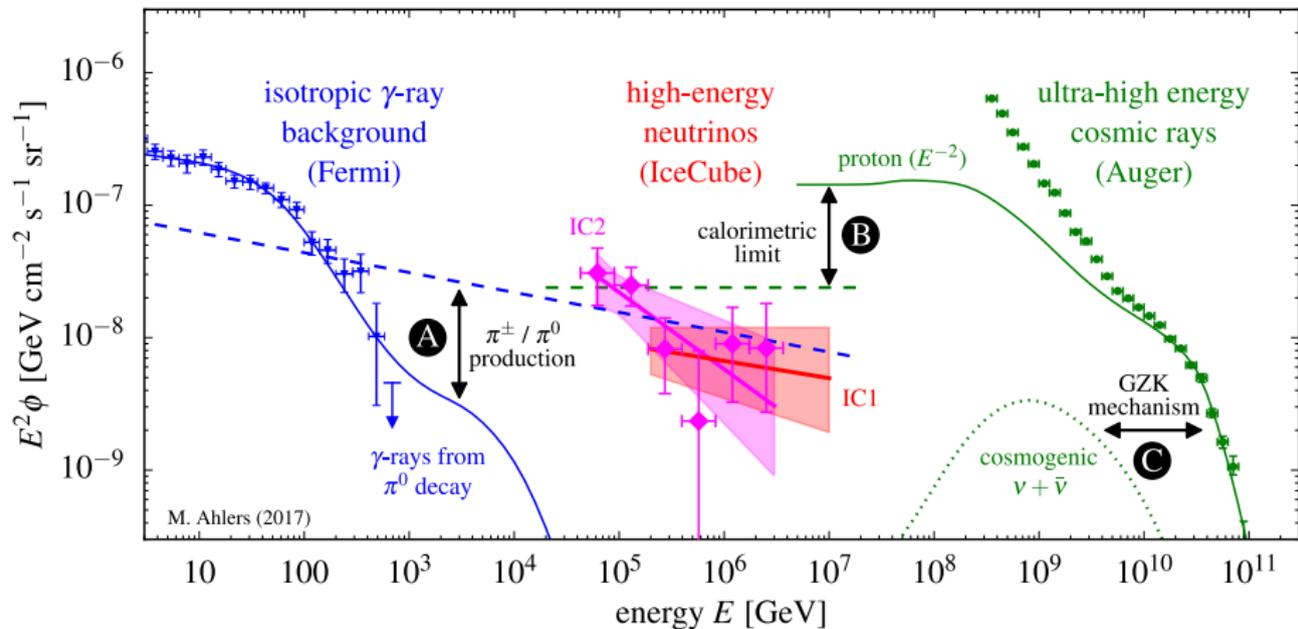


$\nu(1 \text{ ПэВ}) \leftrightarrow \text{КЛ}(20 \text{ ПэВ}) \leftrightarrow \gamma(2 \text{ ПэВ})$

Уникальные особенности нейтрино:

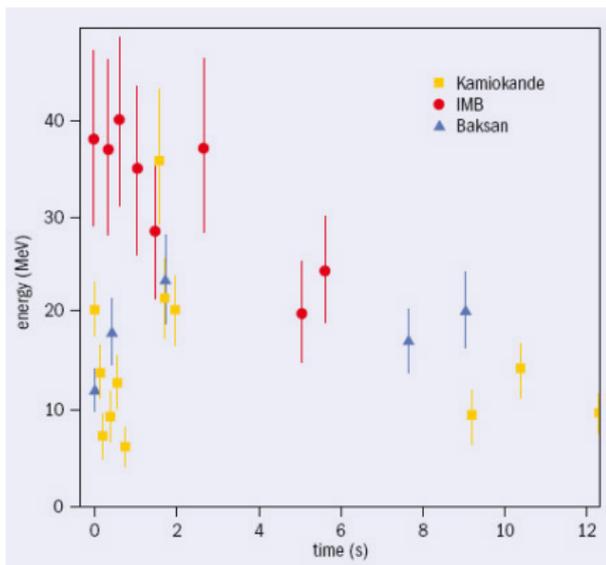
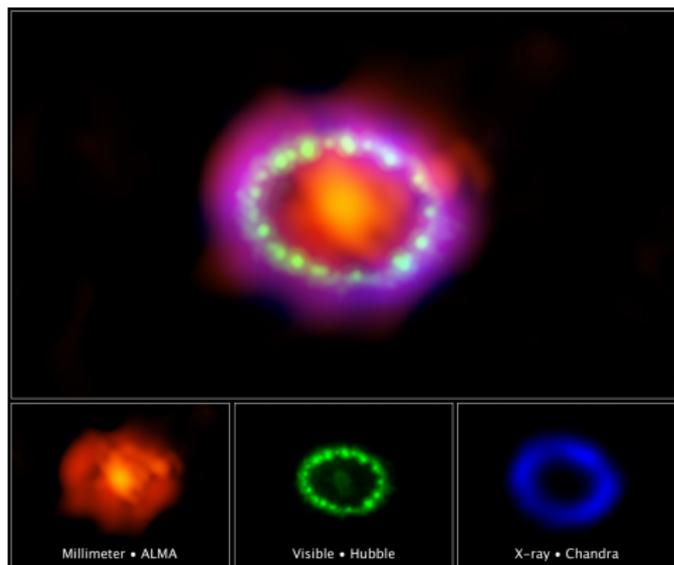
- Обнаружение источников КЛ
- Прохождение через непрозрачные источники
- Исследование удаленных источников в сверхвысоком диапазоне энергий

Связь астрофизических компонентов



(A) совместное рождение π^0/π^\pm при взаимодействии КЛ приводит к испусканию γ (—) и ν (---); **(B)** высокоэнергетические КЛ (—) определяют максимальный поток (калориметрический предел) ν из источников (---) и **(C)** космогенных ν (···).

Первая многоканальная регистрация



В 1987 г. нейтринные обсерватории IMB, Baksan и Kamiokande зарегистрировали порядка 20 нейтрино от сверхновой взорвавшейся в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии порядка 50 кпк.

1956: первая регистрация нейтрино

RADIO-SCHWEIZ AG. **RADIOGRAMM - RADIOGRAMME** RADIO-SUISSE S.A.

SBZ1311 ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGO ILL 56 14 1310

PLC 0025,3

Erhalten - Reçu **„VIA RADIOSUISSE“** Beförderer - Transmis

von - de	Stunde - Heure	NAME - NOM	nach - A	Stunde - Heure	NAME - NOM
NEWYORK	15. VI. 56	Prof. W. Pauli	ZURICH	15. VI. 56	Prof. W. Pauli

Brieftelegramm 74 15. VI. 56 --1 10

LT

NACHLASS
PROF. W. PAULI

PROFESSOR W PAULI
ZURICH UNIVERSITY ZURICH

Per Post ①

NACHLASS
PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED
NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY
OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX
TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

Nr. 20 6500 X 100 3/54

Сечение взаимодействия МэВных нейтрино $\sigma \sim 6 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2 \Rightarrow$
полное поглощение в воде толщиной в 100 световых лет!

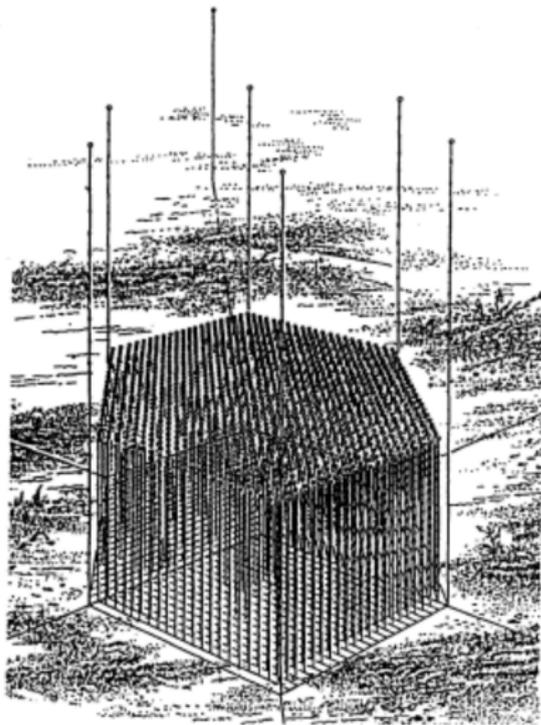
1960: Доклад М.А. Маркова на ICHEP



We propose to install detectors deep in a lake or in the sea and to determine the direction of charged particles with the help of Cherenkov radiation

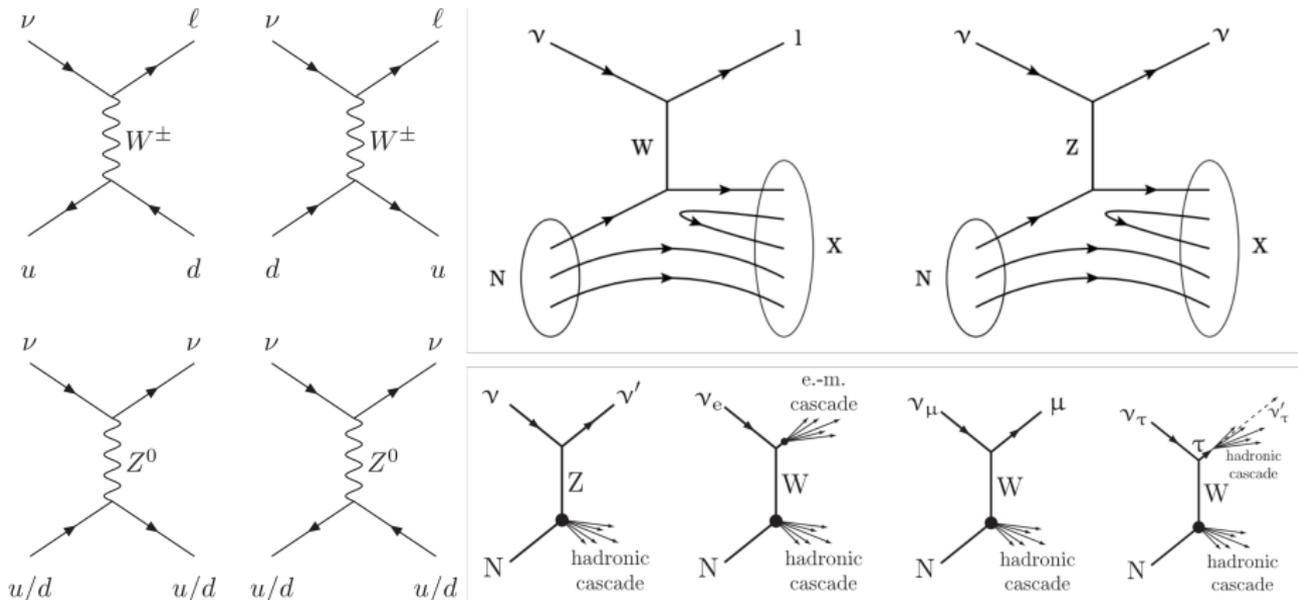
Проект DUMAND

Deep Underwater Muon And Neutrino Detector



- 1975: Первый воркшоп в Вашингтоне
- Предложенный объем 1.26 км^3 с 1261 стрингом и 22698 оптическими модулями
- Акустический детектор в 100 км^3
- Активное взаимодействие между США и СССР до 1980 г
- Работы велись до 1995 г, в котором проект был закрыт
- Несмотря на провал проекта, опыт был использован в AMANDA и NT-200

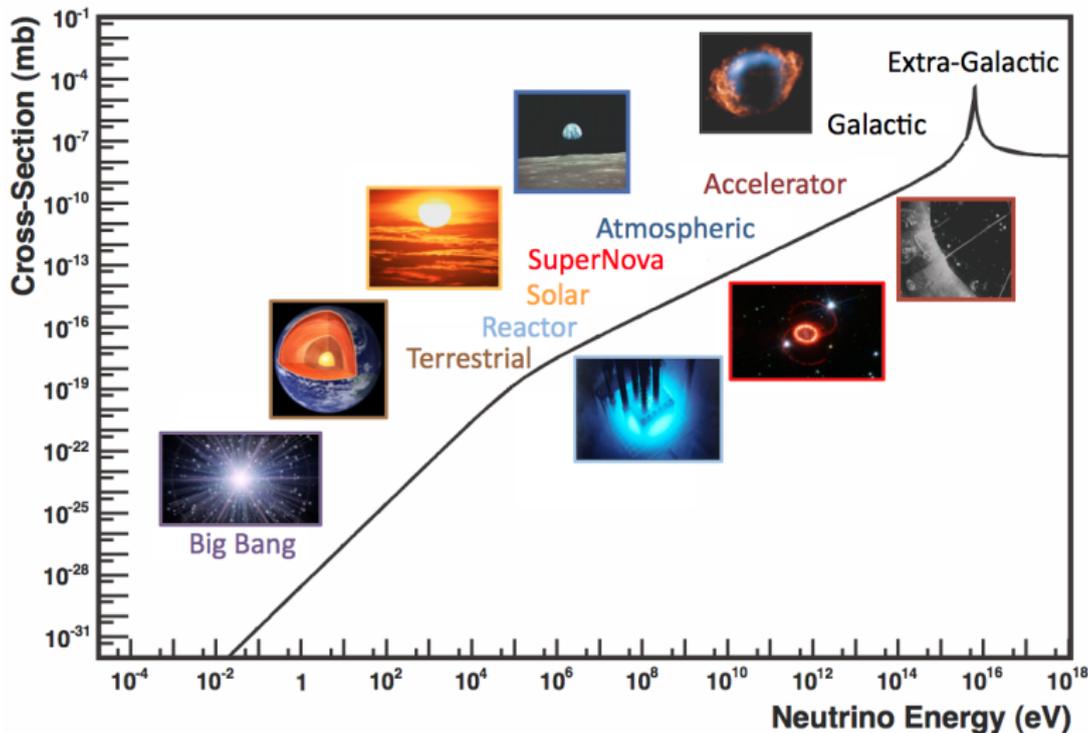
Взаимодействие нейтрино с веществом



При $E_\nu > 10$ ГэВ нейтрино начинает видеть партоны и рассеиваться на единичных кварках, разрушая ядро и рождая ядерный каскад

При $E_\nu > 1$ ТэВ глубоконеупругое рассеяние становится доминирующим процессом при взаимодействии нейтрино с веществом

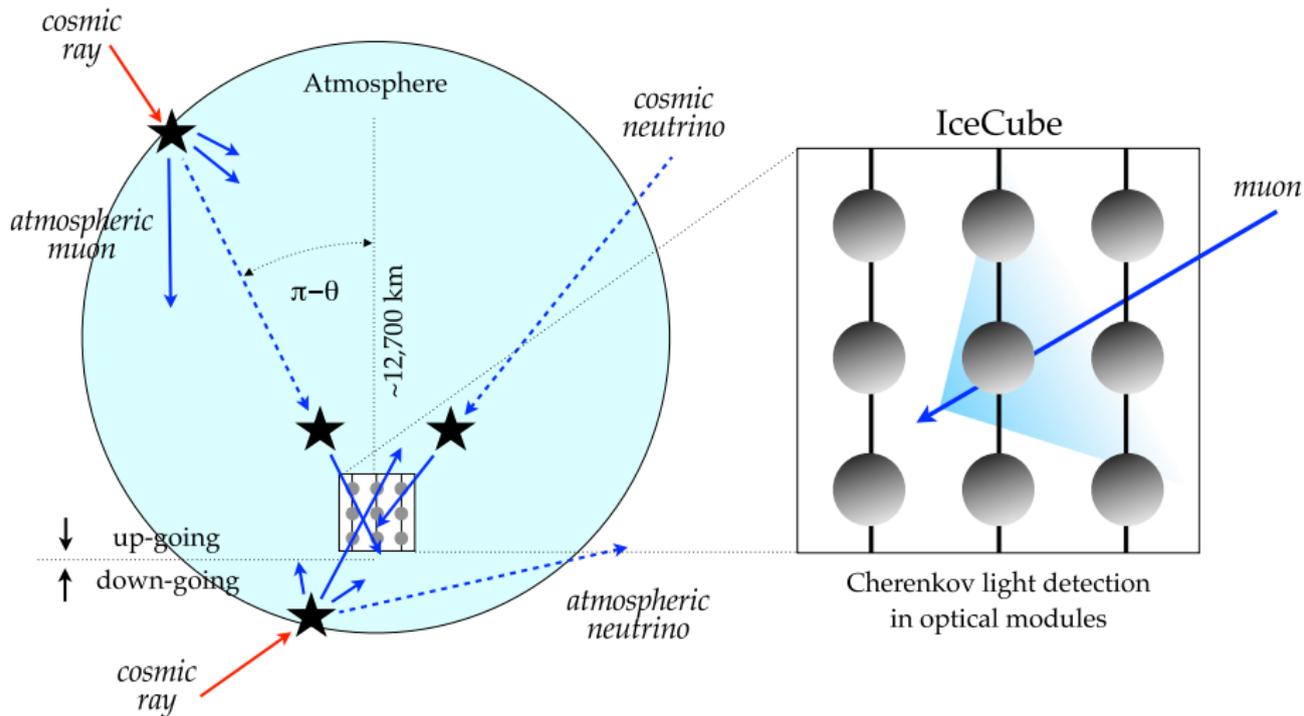
Сечение взаимодействия нейтрино



$$1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2, \sigma_{\nu N} \sim 10^{-8} \sigma_{pp} @ E \sim 1 \text{ ПэВ}$$

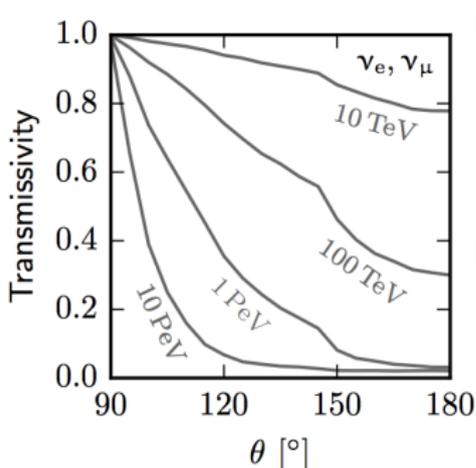
Современные нейтринные телескопы

Принцип работы телескопа



Режимы работы телескопа

На каждое космическое нейтрино приходится 10^4 нейтрино и 10^9 мюонов рожденных в фоновых широких атмосферных ливнях



Низкоэнергетические проникают сквозь землю и могут быть зарегистрированы “снизу” \Rightarrow необходимо учитывать фон от нейтрино ШАЛ с обратной стороны Земли

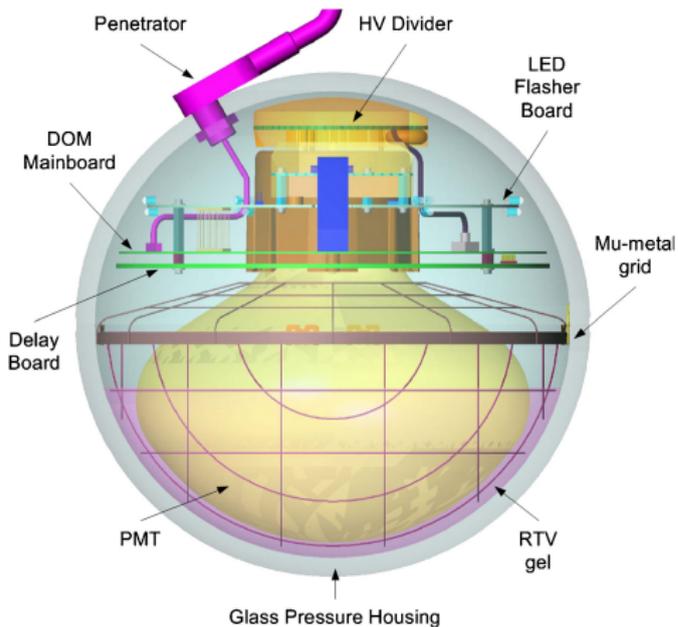
При повышении энергии нейтрино Земля становится непрозрачной \Rightarrow необходимо производить измерения “сверху” \Rightarrow необходимо дополнительно учитывать фон от КЛ

Максимальный уровень достоверности при регистрации мюонных треков или каскадов рожденных внутри детектора (fiducial volume)

Необходимо понимать поток атмосферных нейтрино для оценки фона!

Оптические модули (OM)

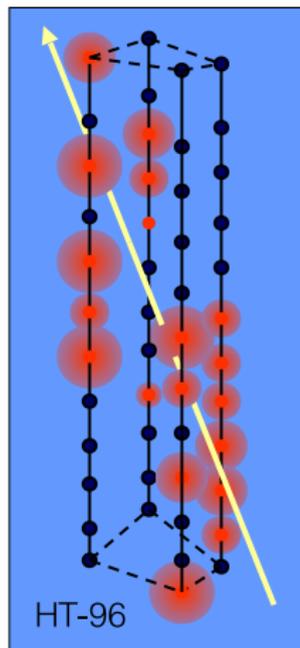
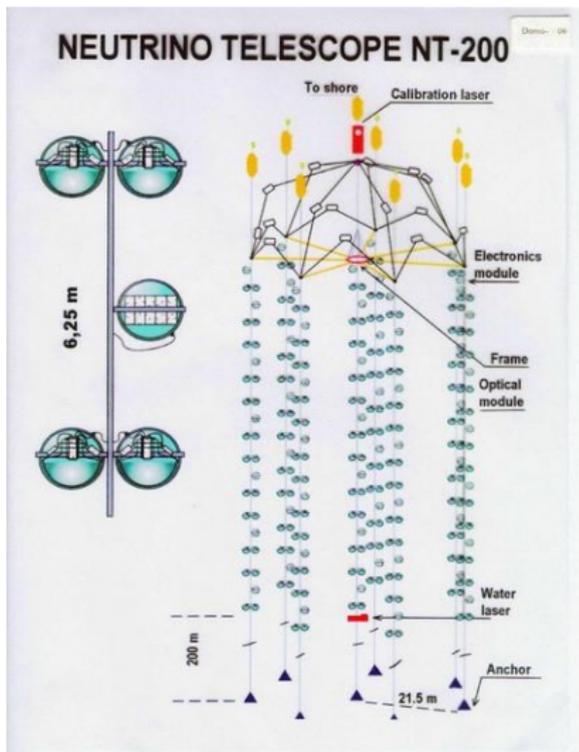
IceCube



GVD

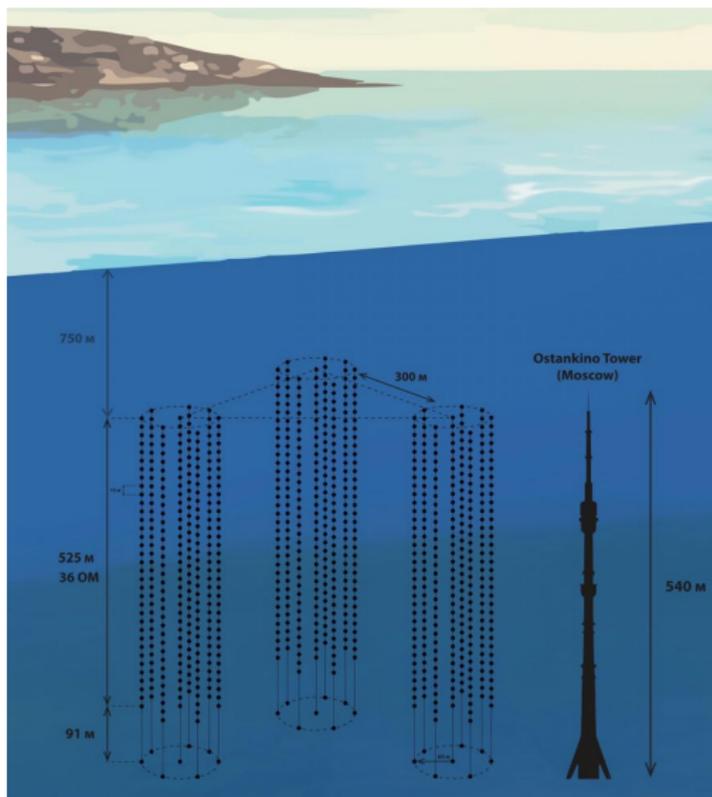


Нейтринный телескоп NT-200



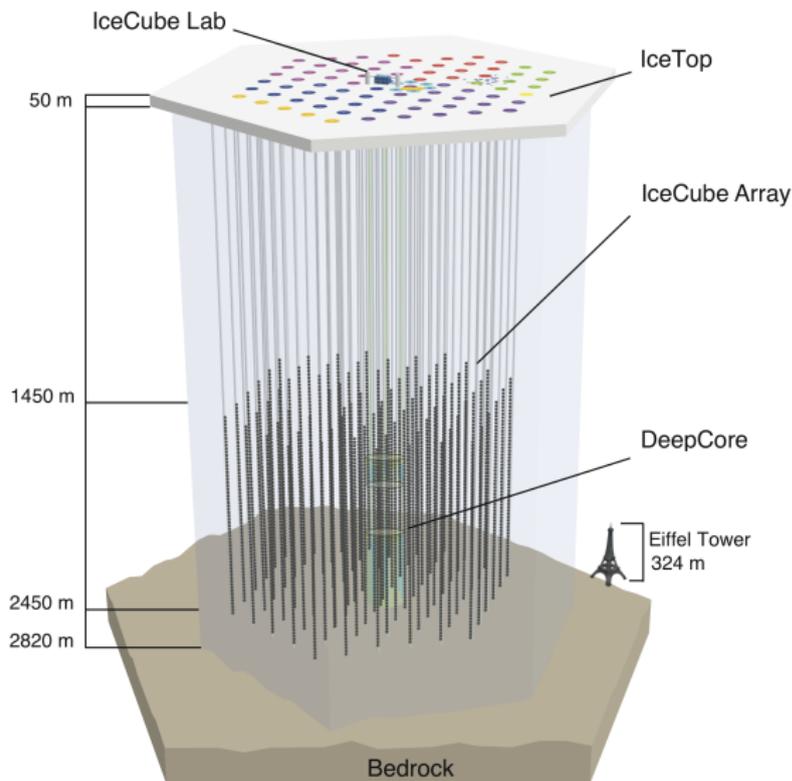
Fully reconstructed
neutrino event (1996)

Нейтринный телескоп Baikal-GVD



- **9 кластеров** общим объемом 0.4 км^2 к 2021 г.
- **8 стрингов** на каждом кластере
- **36 OM** на стринг
- Высокая прозрачность воды и слабое рассеяние
- Низкий уровень шума
- Угловое разрешение 0.25° для мюонных треков
- Планируемый объем 1.5 км^2 с 27 кластерами
- **Возможность менять конфигурацию детектора**

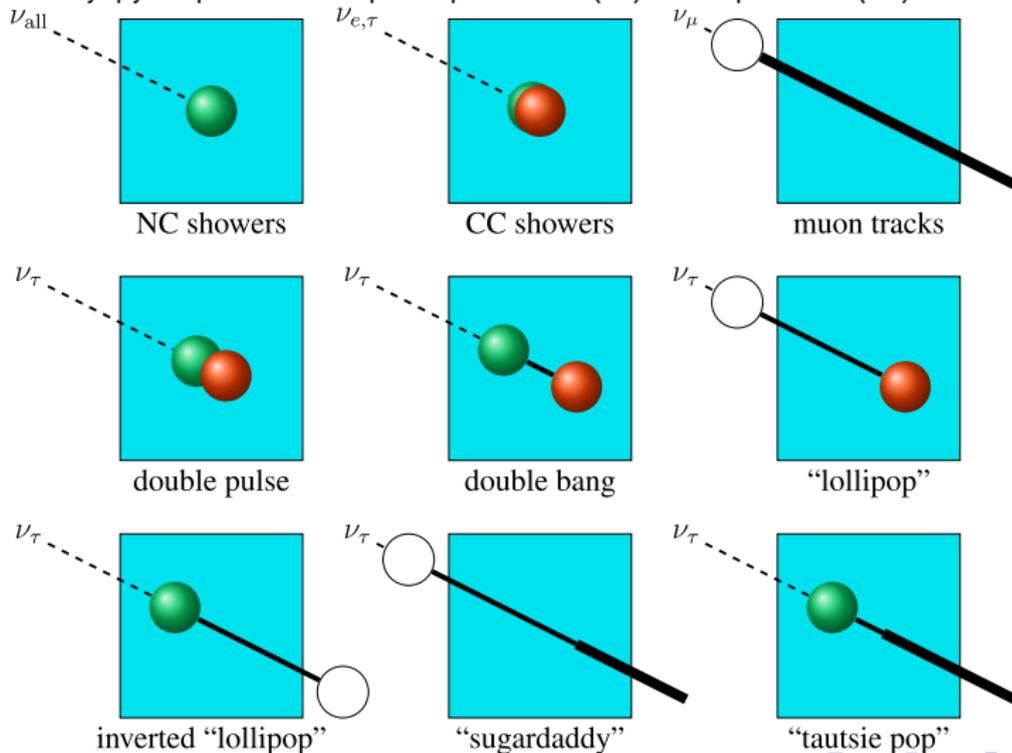
Обсерватория IceCube



- Гигатонный черенковский телескоп на Южном полюсе
- 60 OM на стринг
- **78 стрингов IceCube** в треугольный решетке ($L=125$ м)
- **8 стрингов DeepCore** в особо чистом льду
- **81 станций IceTop**, по два детектора на станцию, 2 OM на детектор
- Развёртывание с 2004 по 2011 гг.

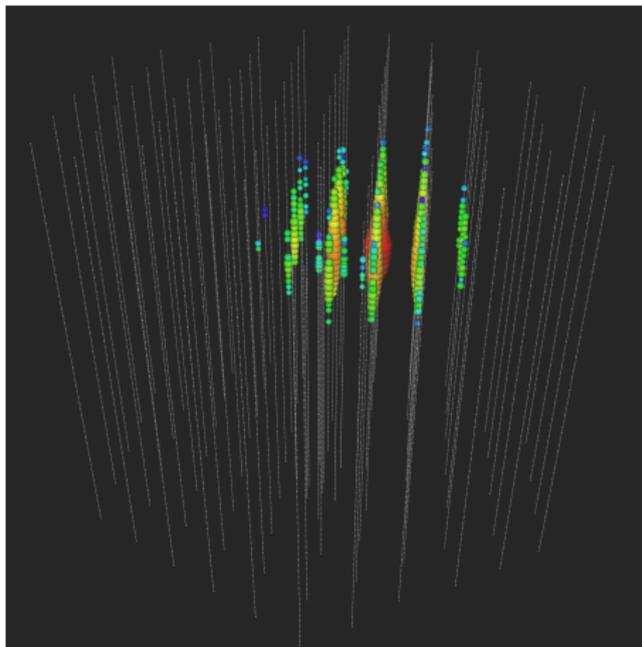
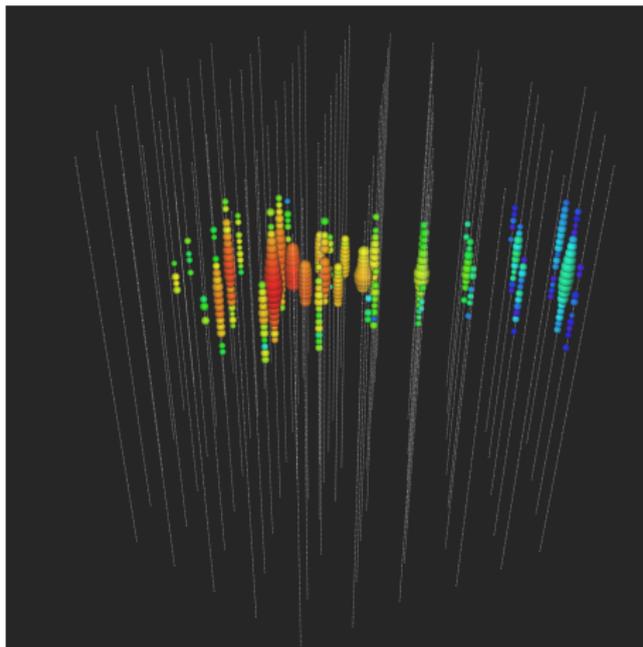
Сигнатуры нейтрино в IceCube

Неупругое рассеяние через заряженный (CC) и нейтральный (NC) токи



Регистрация астрофизических нейтрино

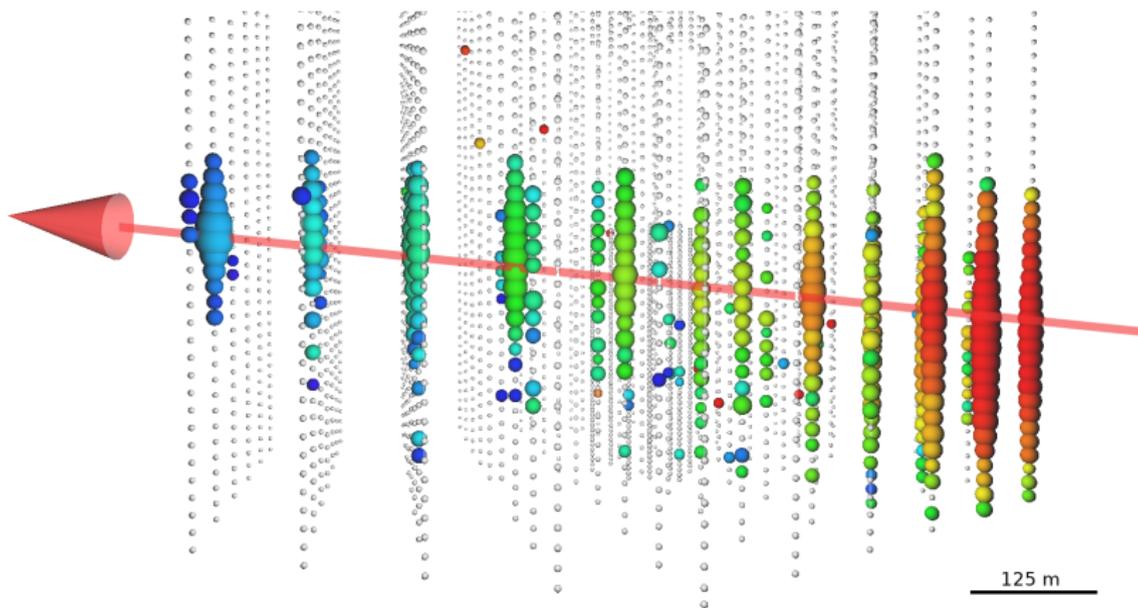
Первая регистрация (IceCube): Science 342 (2013) 1242856



Размер \sim амплитуда сигнала, цвет \sim время срабатывания (раньше \rightarrow позже)



IceCube alert IC-170922A



IceCube EHE (“extremely-high energy”) alert IC-170922A

Восходящий мюонный трек под углом 5.7° к горизонту зарегистрирован 2017.09.22

Восстановленная энергия нейтрино составила 290 ТэВ

IceCube alert IC-170922A follow-up

Fermi-LAT detection of increased gamma-ray activity of TXS 0506+056, located inside the IceCube-170922A error region.

ATel #10791; *Yasuyuki T. Tanaka (Hiroshima University), Sara Buson (NASA/GSFC), Daniel Kocevski (NASA/MSFC) on behalf of the Fermi-LAT collaboration*
on 28 Sep 2017; 10:10 UT

Credential Certification: David J. Thompson (David.J.Thompson@nasa.gov)

Subjects: Gamma Ray, Neutrinos, AGN

Referred to by ATel #: 10792, 10794, 10799, 10801, 10817, 10830, 10831, 10833, 10838, 10840, 10844, 10845, 10861, 10890, 10942

First-time detection of VHE gamma rays by MAGIC from a direction consistent with the recent EHE neutrino event IceCube-170922A

ATel #10817; *Razmik Mirzoyan for the MAGIC Collaboration*
on 4 Oct 2017; 17:17 UT

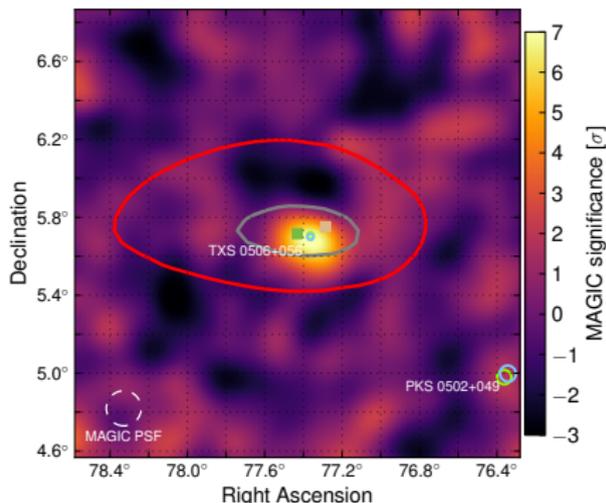
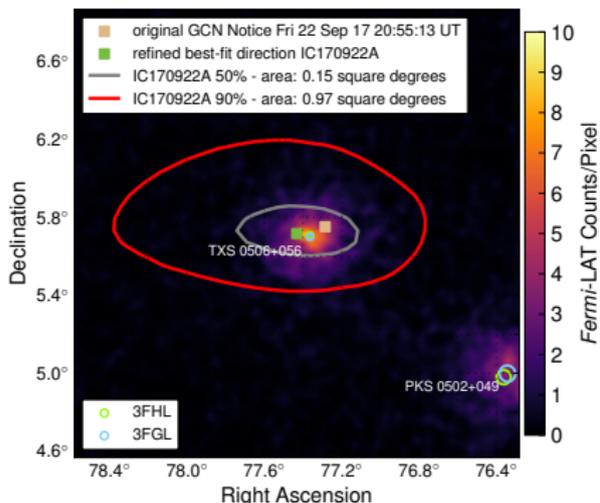
Credential Certification: Razmik Mirzoyan (Razmik.Mirzoyan@mpp.mpg.de)

Subjects: Optical, Gamma Ray, >GeV, TeV, VHE, UHE, Neutrinos, AGN, Blazar

Referred to by ATel #: 10830, 10833, 10838, 10840, 10844, 10845, 10942

Телескопы Fermi-LAT и MAGIC зарегистрировали высокоэнергетическое гамма излучение от **вспышки блазара TXS 0506+056**, в направлении которого пришел alert

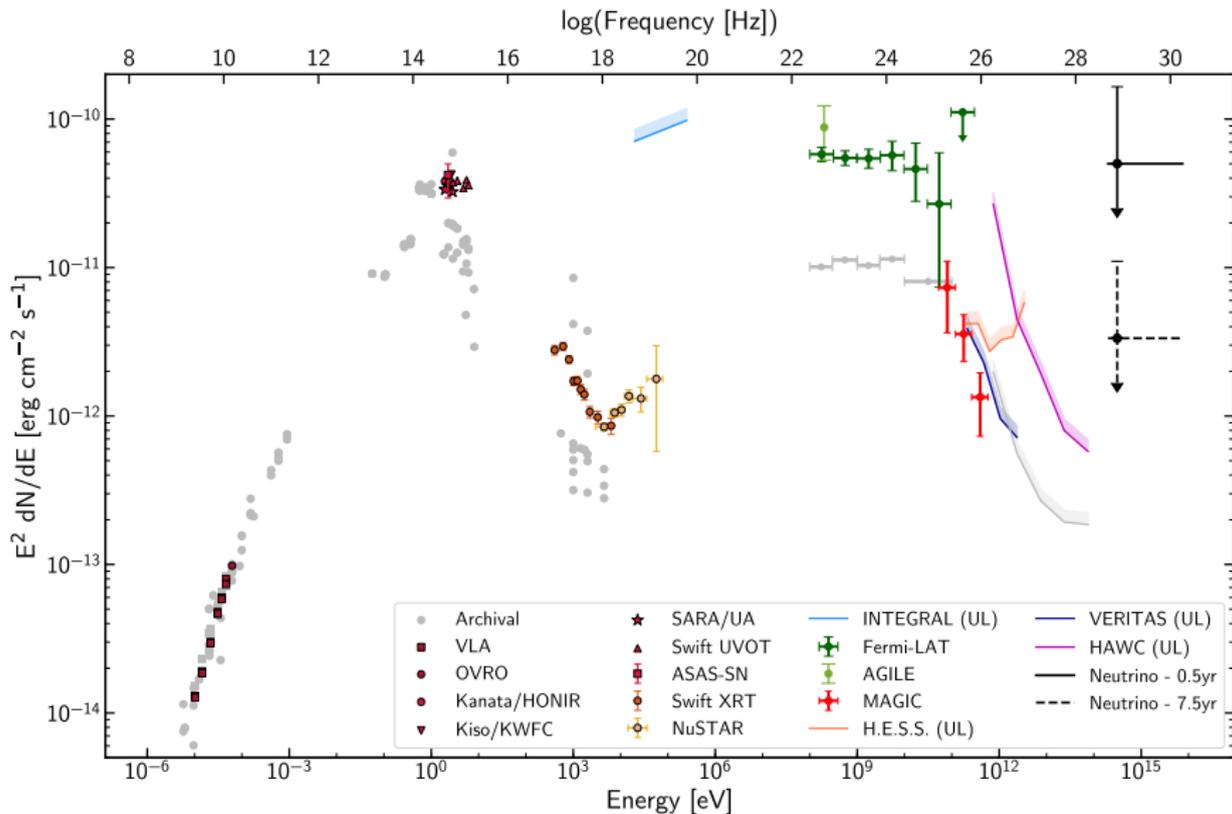
Многоканальное наблюдение TXS



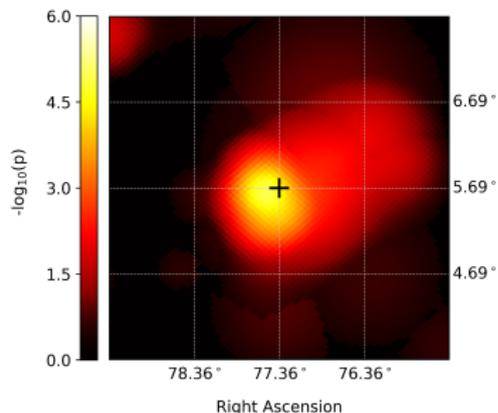
TXS 0506+056 находится в 3% самых ярких блазаров Fermi-LAT

Случайная корреляция была исключена со значимостью в 3σ
Science 361 (2018) no.6398, eaat1378

Многоканальное наблюдение TXS



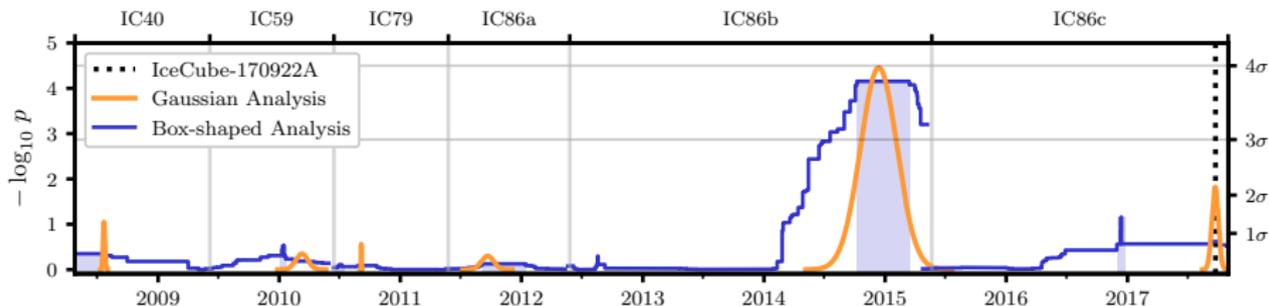
Вспышки TXS как источник нейтрино?



Вспышка нейтрино (13 ± 5 событий)
со стат.значимостью 3.5σ
между сентябрём 2014 и мартом 2015 \Rightarrow

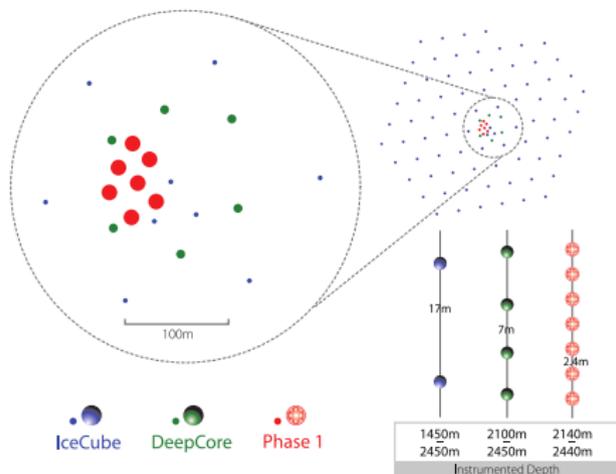
в течение 158 дней
светимость составляла 1.2×10^{47} эрг/с

Science 361 (2018) no.6398, 147-151

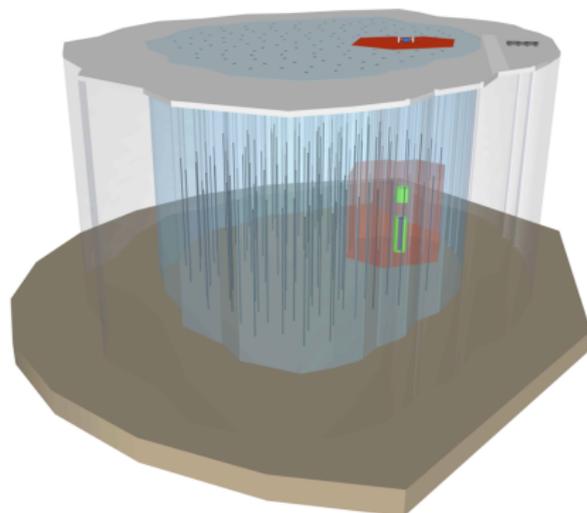


IceCube-Gen2

Phase I



Phase II



Phase I: Установка семи дополнительных стрингов в DeepCore, изучение нейтринных осцилляций, регистрация тау-нейтрино, изучение свойств льда

Phase II: Увеличение эффективного объема установки в 10 раз, $E_\nu < 100$ ПэВ

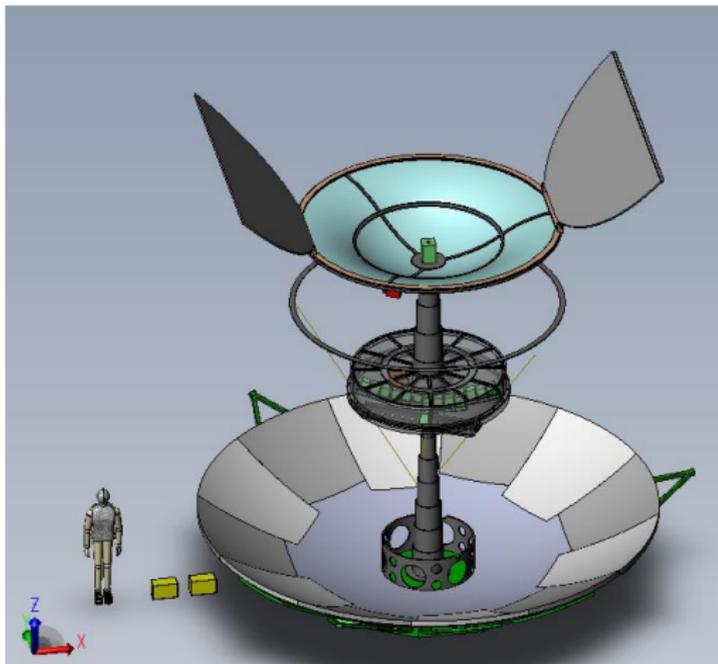
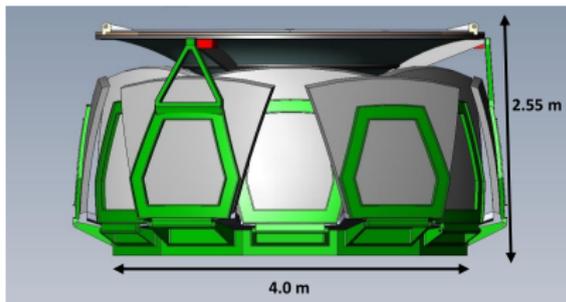
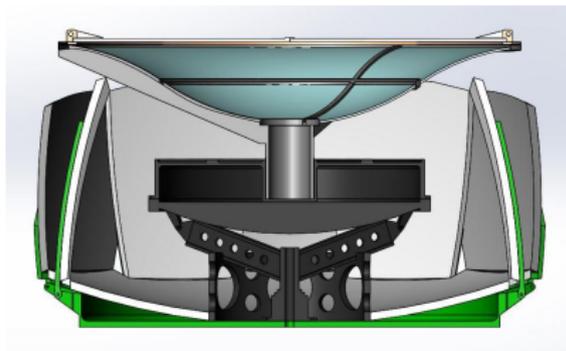
Как зарегистрировать нейтрино с энергиями \sim ЭэВ?

Методы регистрации нейтрино сверхвысоких энергий

Оптический метод регистрации

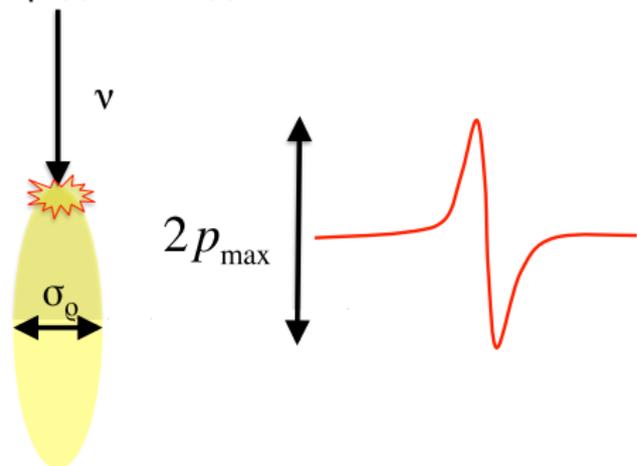


Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics



Акустический метод регистрации

Термоакустический эффект предложенный Г. Аскарьяном:
Биполярный акустический сигнал генерируется при мгновенном нагревании среды каскадом



$$P_{\max} \propto \gamma_G \frac{E_0}{\sigma_\rho^2}$$

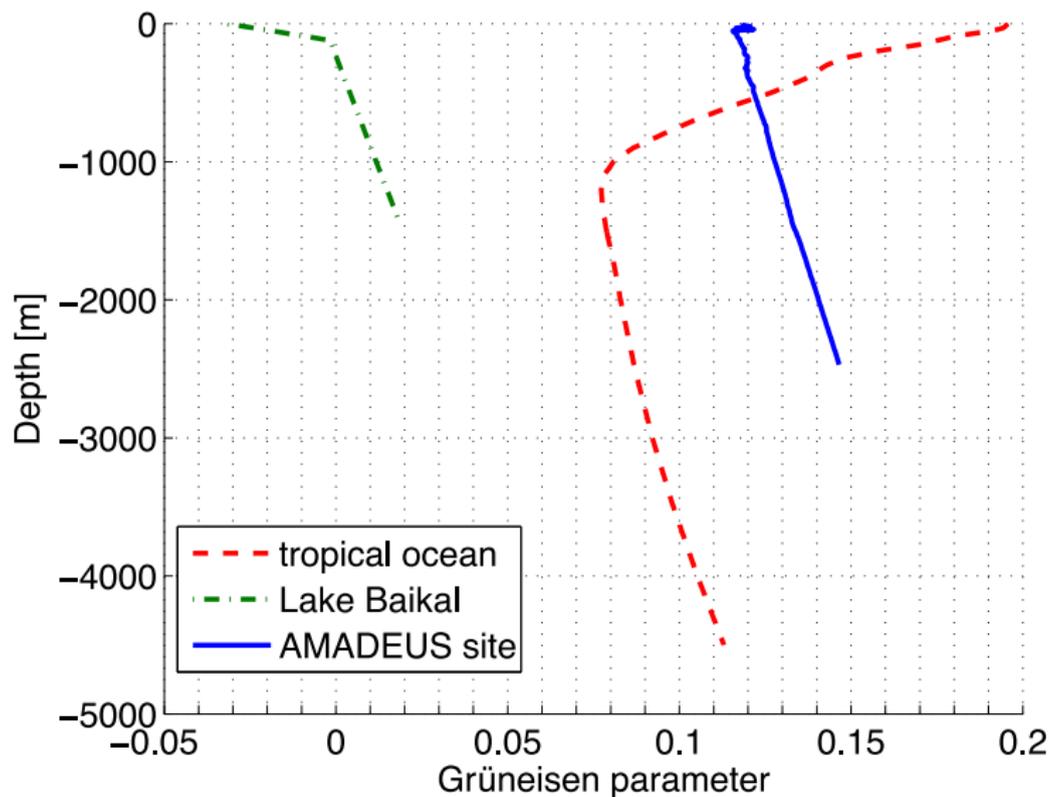
$$\gamma_G = \frac{c^2 \alpha}{C_P}$$

α = Volume expansion coefficient

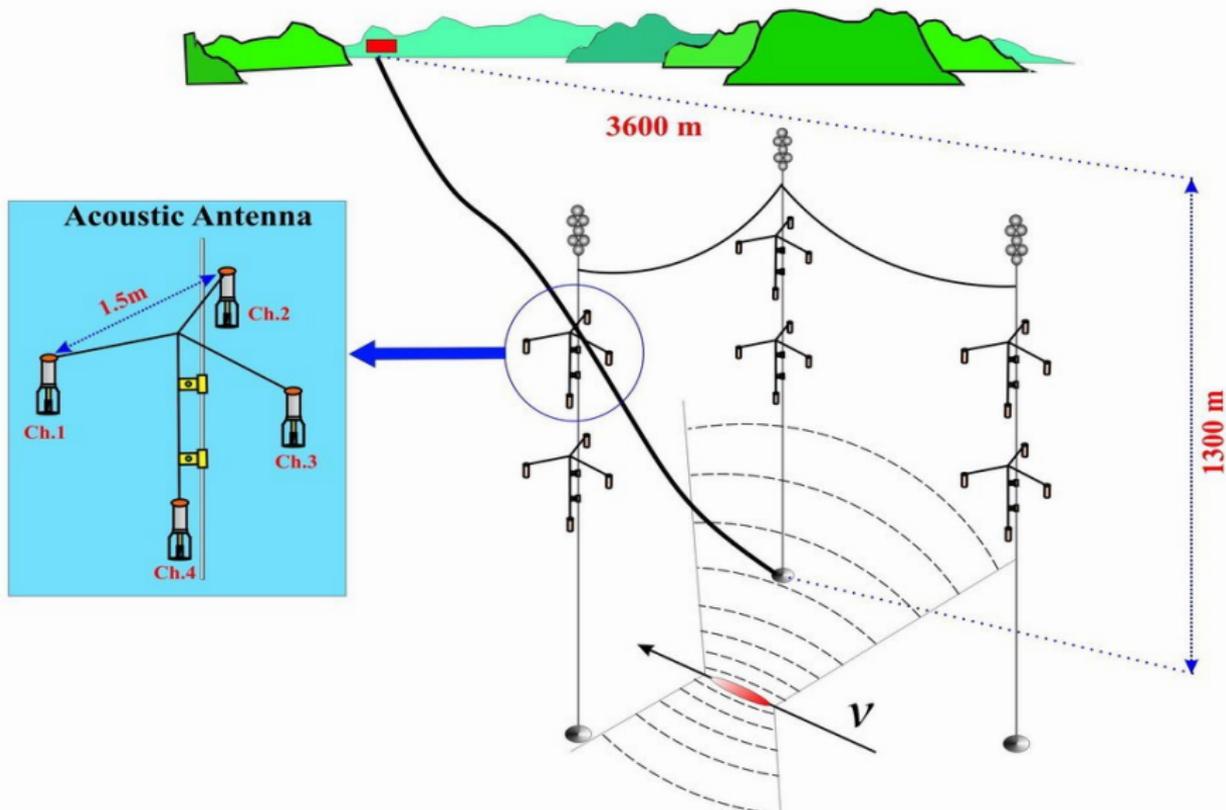
C_P = specific heat capacity (at constant pressure)

c = speed of sound in water (ca. 1500 m/s)

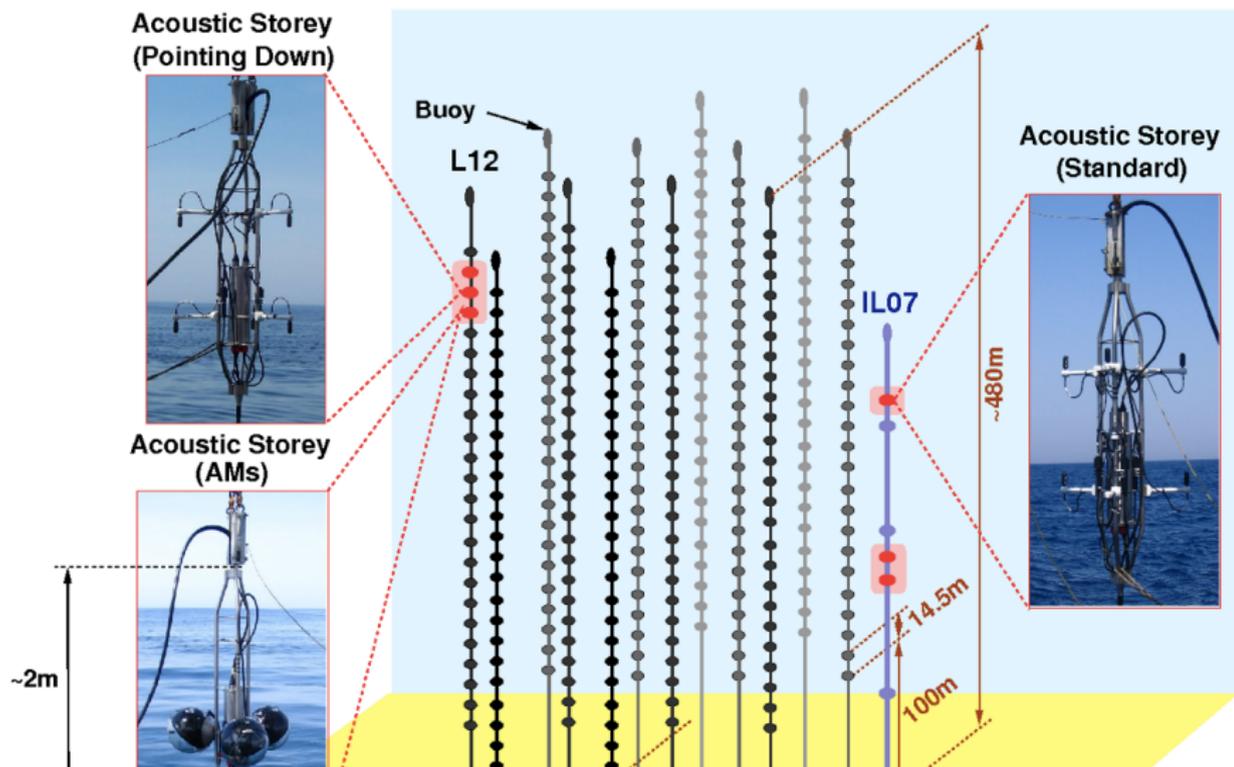
Параметр Грюнайзена



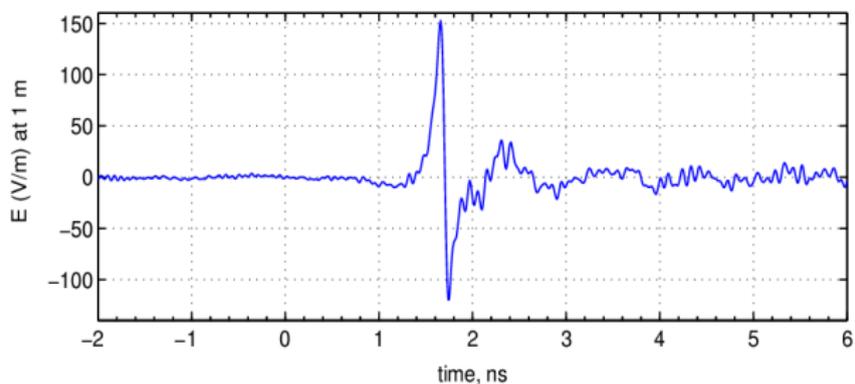
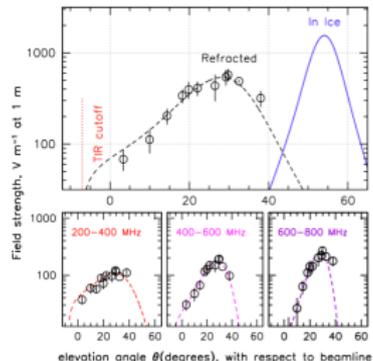
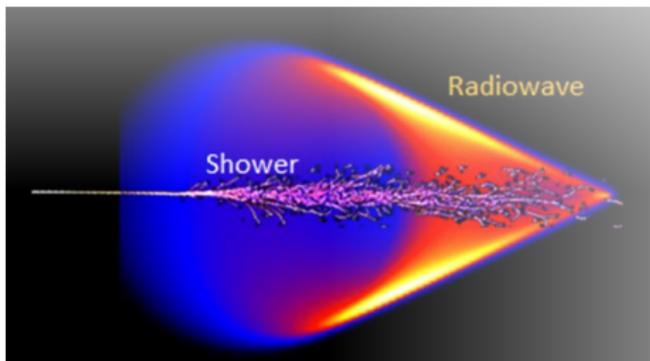
Акустика на Байкале



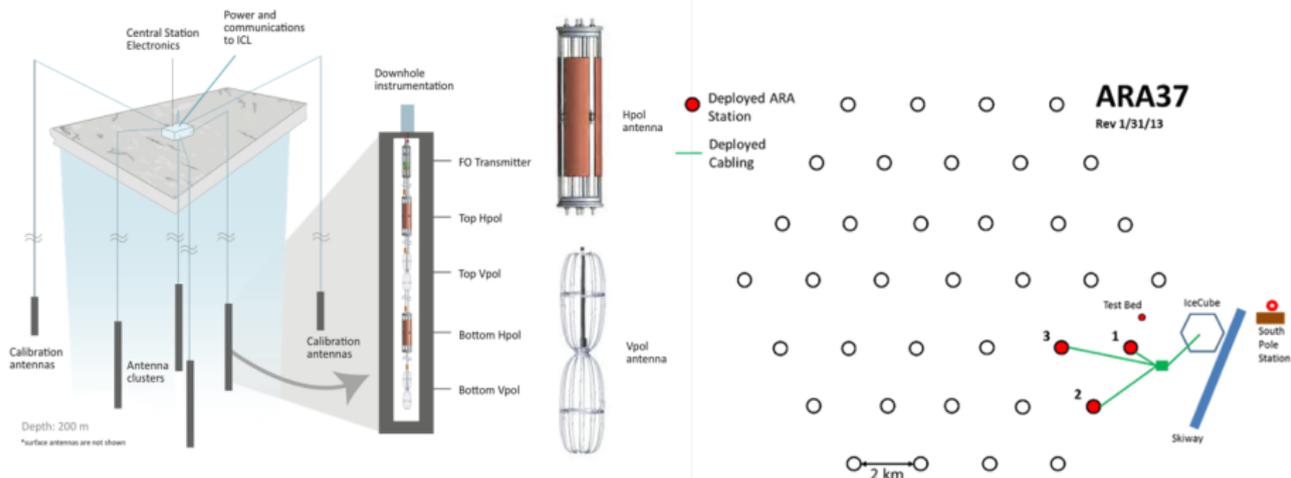
Акустика в Средиземном море



Генерация радио в плотной среде



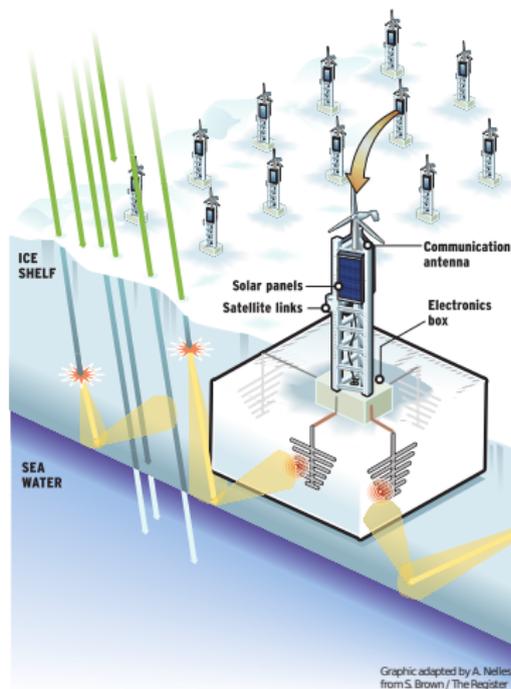
ARA (Askaryan radio array)



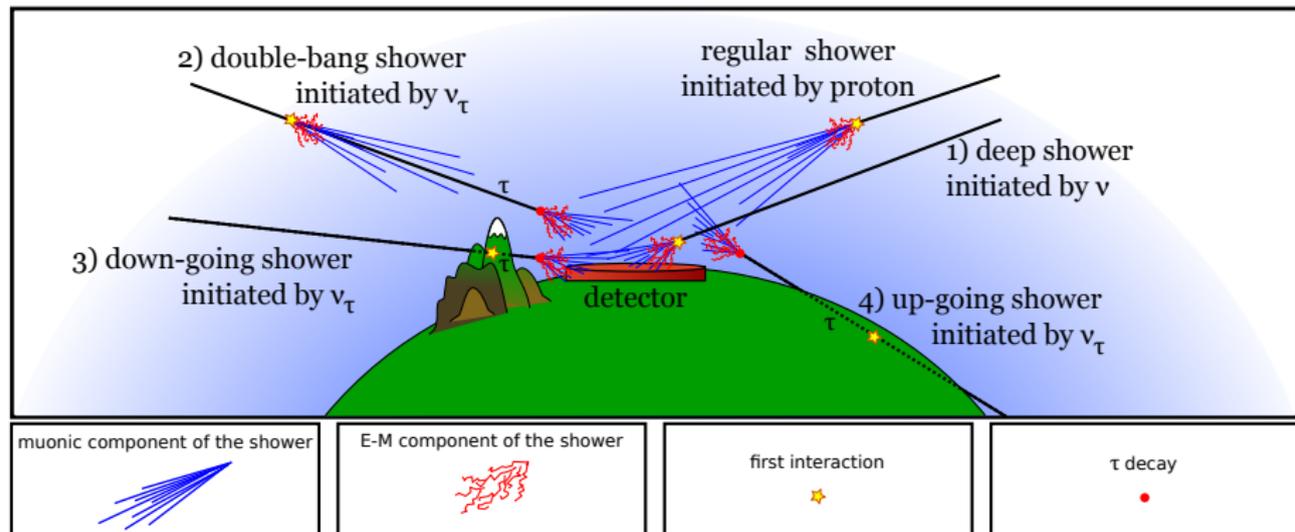
Эффективный объем установки во много раз превышает объем IceCube \Rightarrow
чувствительность к ЭВным нейтрино
Проводится тестирование интерферометрии \Rightarrow снижение порога до ПЭВного
региона

Antarctic Ross Ice Shelf antenna neutrino array

- On ice-shelf: Ice-water boundary **almost perfect reflector** for radio emission
- **Independent antenna stations** can be installed at low costs on the surface
- Real-time data transfer via satellite
- Solar and wind power possible
- **High gain antennas (50 - 1000 MHz)** can be used to instrument a large volume
- Array of about 1200 antennas needed: ~ 30 Million USD

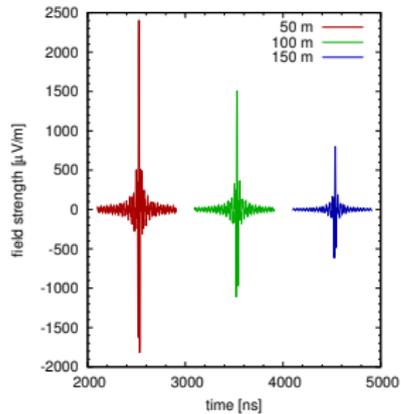
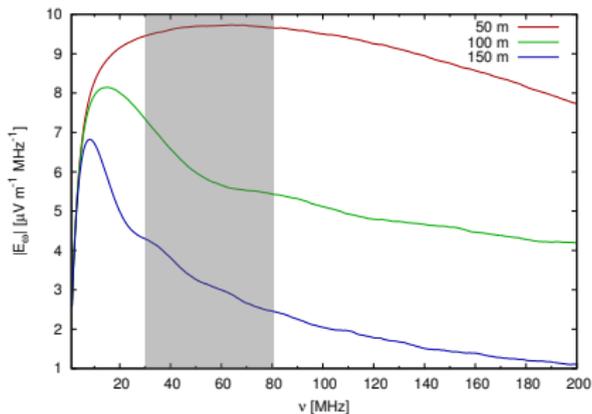


Типы наклонных событий

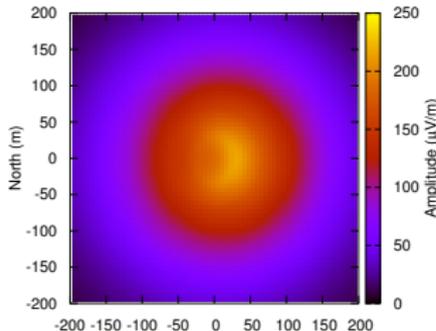


sketch by Javier Tiffenberg

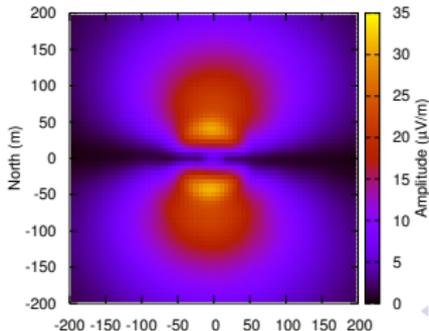
Свойства радиосигнала



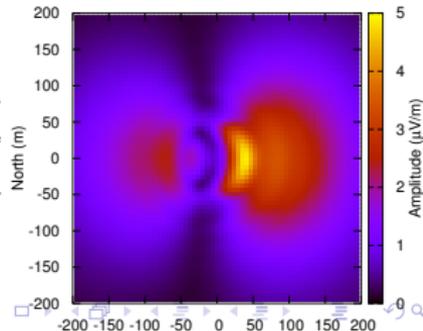
East-West component



North-South component

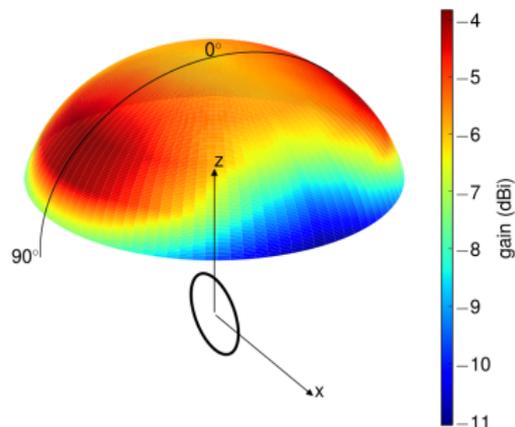


Vertical component

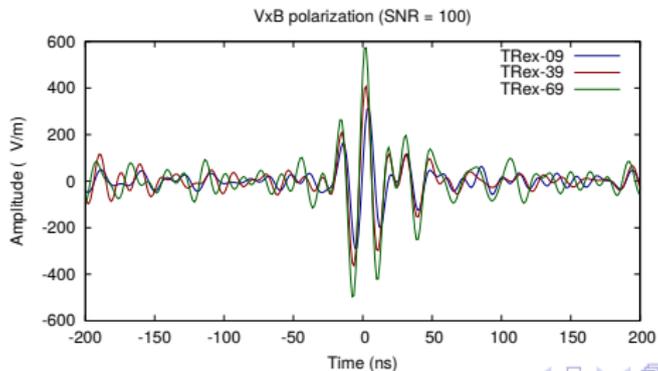
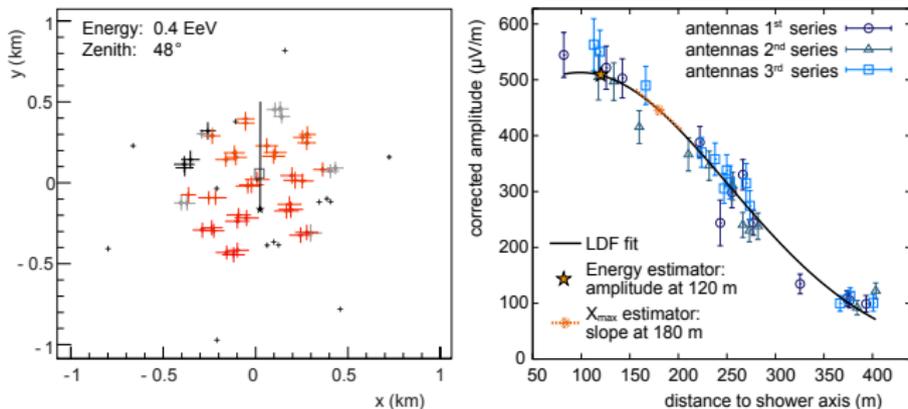


Амплитудная калибровка радио

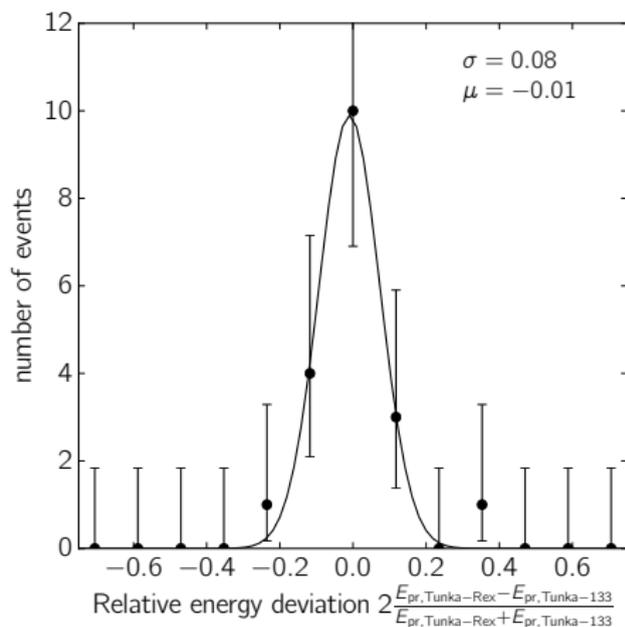
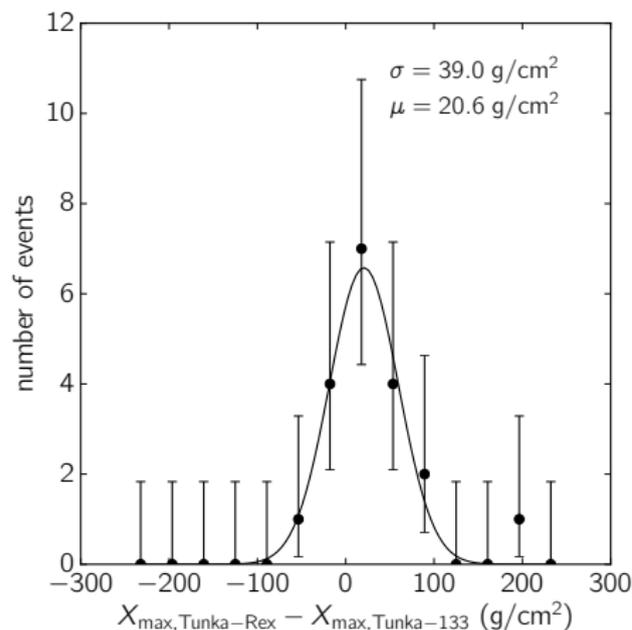
- Tunka-Rex, LOPES, LOFAR откалиброваны с использованием одного источника
- Калибровка используется для нормировки диаграммы направленности
- Восстановленные амплитуды согласуются с модельными



Пример события

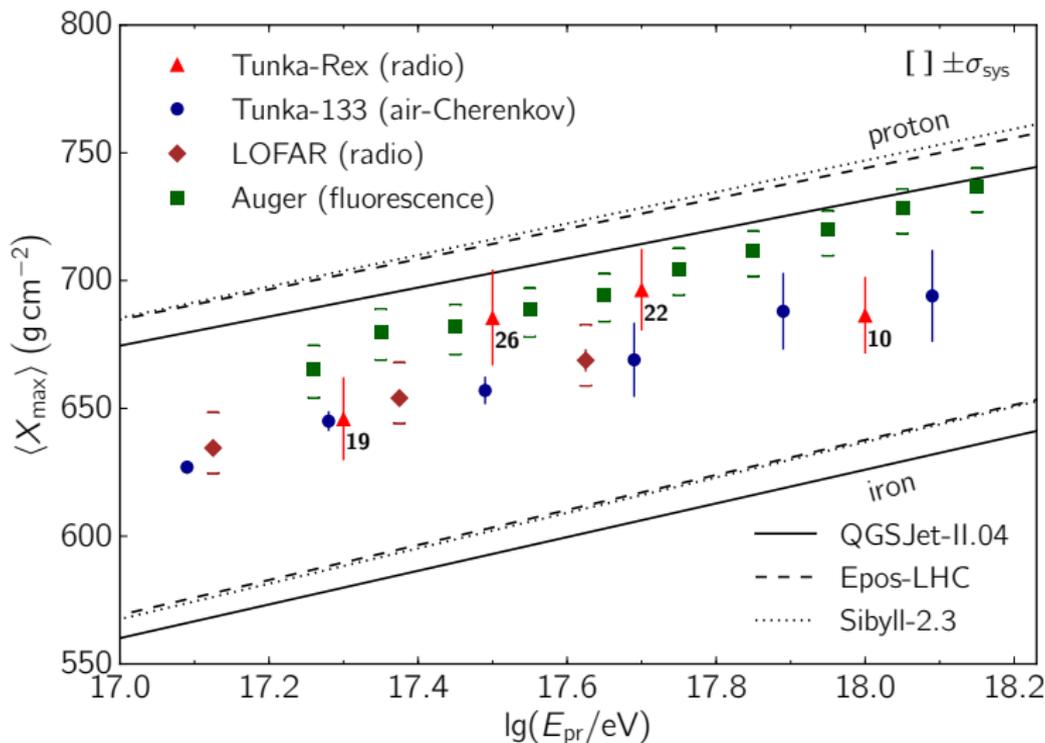


Разрешение метода

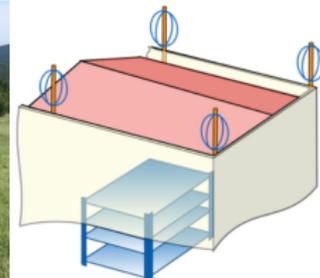


$X_{\max}: 25\text{-}35 \text{ г/см}^2, E_{\text{pr}}: 10\%$

Оценка массового состава

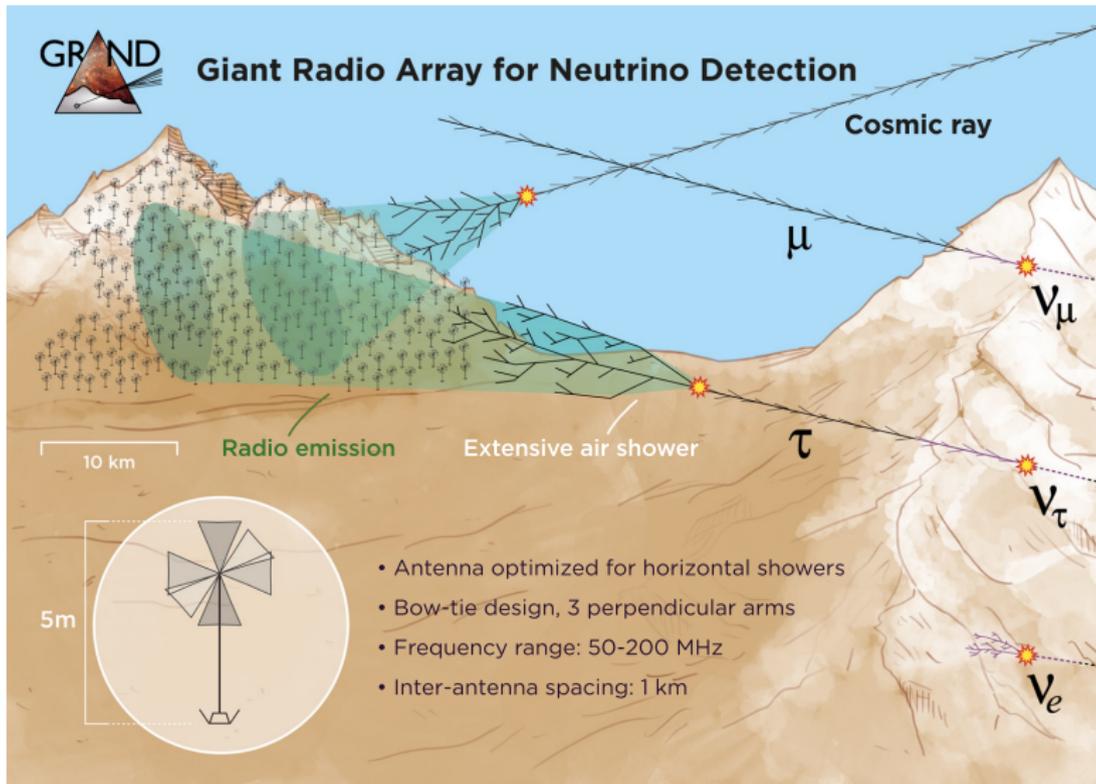


Антенны Tunka-Rex



Сотрудничество с установками в

Казахстане (Тянь-Шань),
Аргентине (Pierre Auger Observatory),
Испании (TRASGO)



Заключение

- Нейтрино является уникальным каналом изучения астрофизических явлений сверхвысоких энергий
- Современные черенковские телескопы приближают нас к эпохе нейтринной астрономии
- Радио является самым перспективным инструментом для регистрации нейтрино сверхвысоких энергий