



Нерешенные проблемы астрофизики частиц

Рубцов Григорий Игоревич

Институт ядерных исследований Российской академии наук

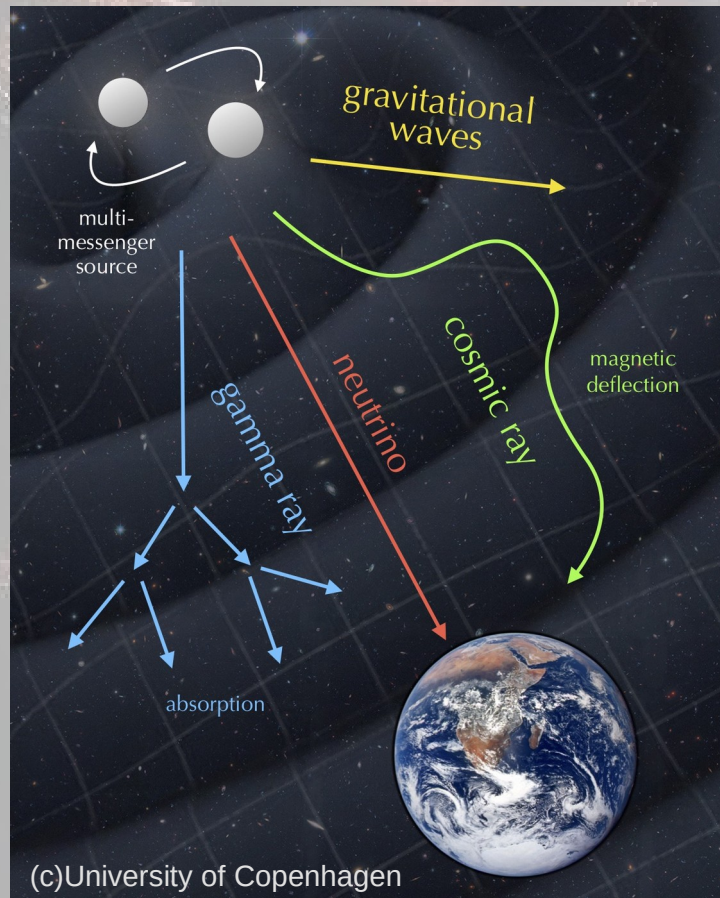
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра
физики частиц и космологии



Москва, 14 апреля 2026 г.

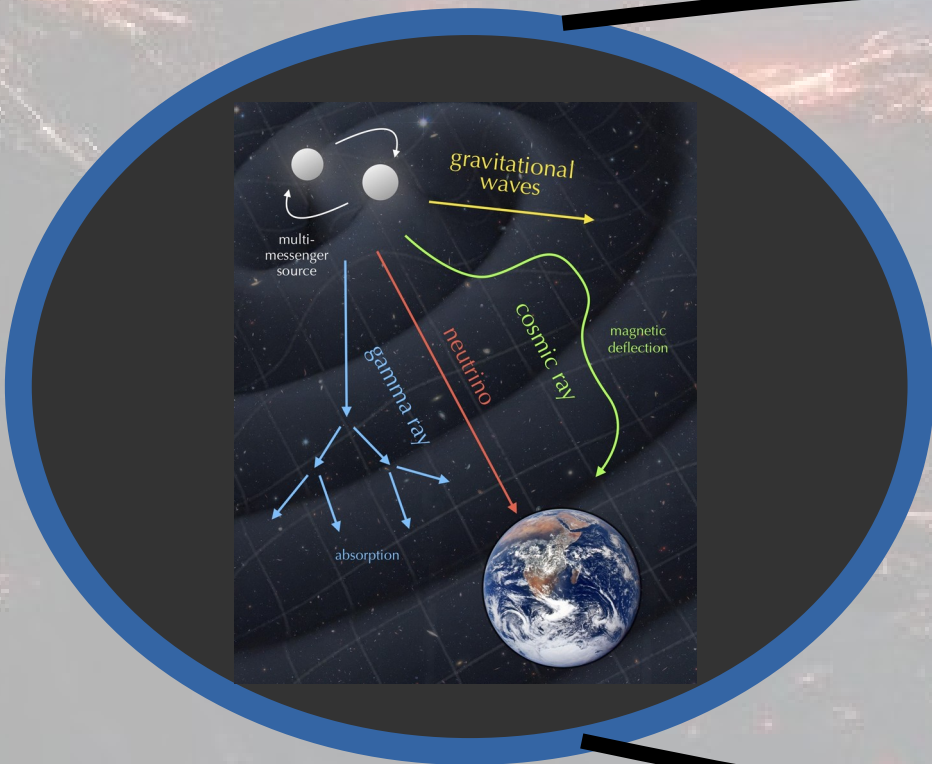


Многоканальная астрономия



Многоканальная астрономия (multi-messenger astronomy) - исследование процессов в космосе с помощью совместного анализа электромагнитного излучения, гравитационных волн, нейтрино и космических лучей высоких энергий.

Исследование Вселенной в богатстве и многообразии ее сигналов



Многоканальная астрономия



- аксионы
- Лоренц-нарушение
- WIMP
- темная энергия
- стерильные нейтрино
- космические струны
- ...

Связующее звено между наблюдениями и физическим знанием

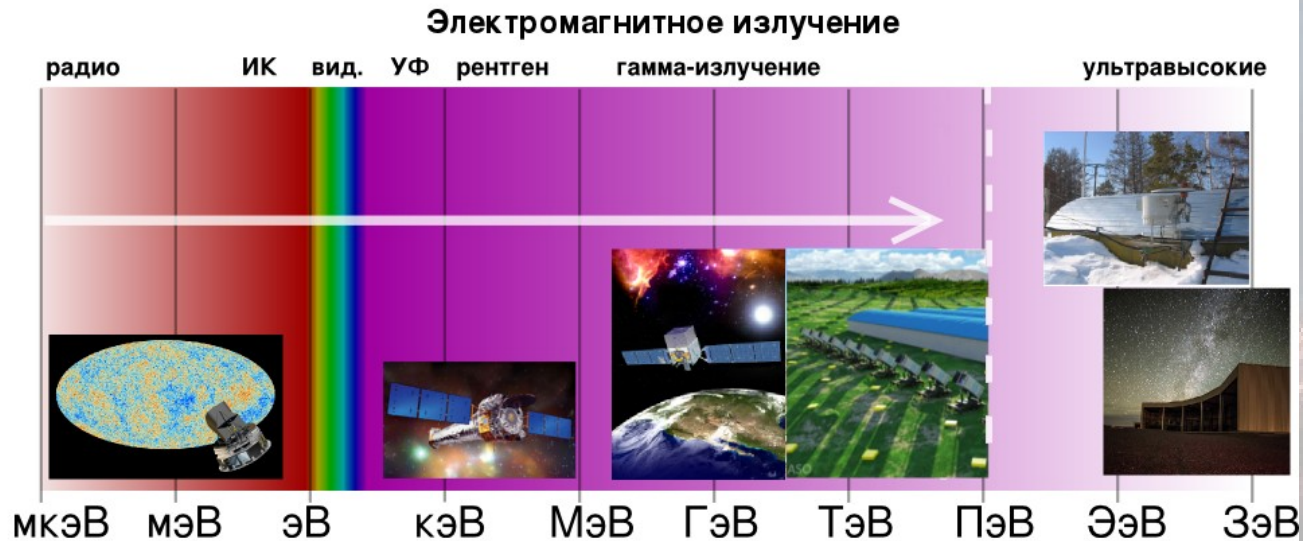
Почему многоканальная астрономия интересна?



(c)Kandinsky 2.1

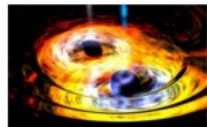
- Исследование процессов с экстремальным энерговыделением во Вселенной
- Поиск границ применимости физических законов / поиск новой физики
- Вопросы
 - Что дает множество каналов?
 - Почему недостаточно одного хорошего канала?
 - Какой может быть новая физика?

Наблюдаемые каналы



**38 порядков
по частоте**

2023, нГц



Нейтрино



2016, LIGO, гравитационные волны 35-250 Hz

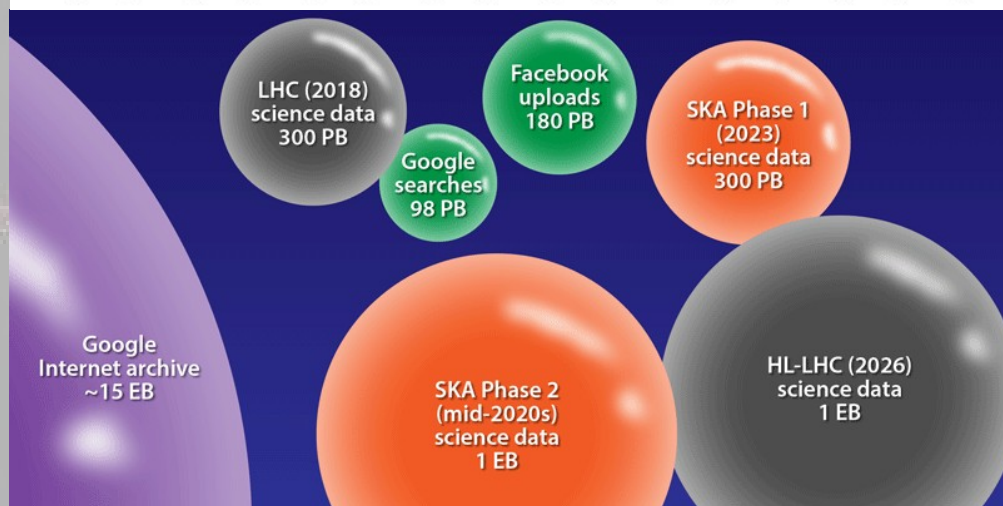
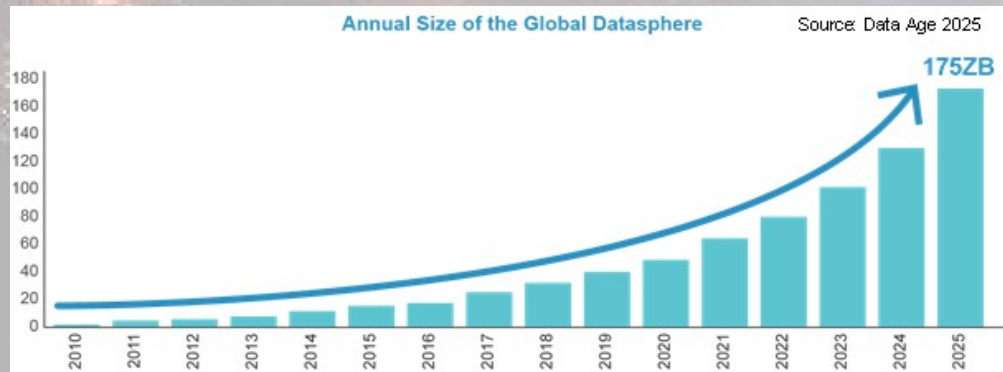
Примеры многоканальных наблюдений



- Нейтрино от Солнца
- Нейтрино от сверхновой SN 1987A
- Нейтрино от блазара TXS 0506+056
IceCube Collaboration, Science 361 (2018)
- Наблюдение гравитационных волн от гамма-всплеска GRB 170817A / GW170817
LIGO Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017)
- Корреляции нейтринных событий IceCube с радиоблазарами

Plavin et al, Astrophys. J. 908 (2021)

Рост объема научных данных



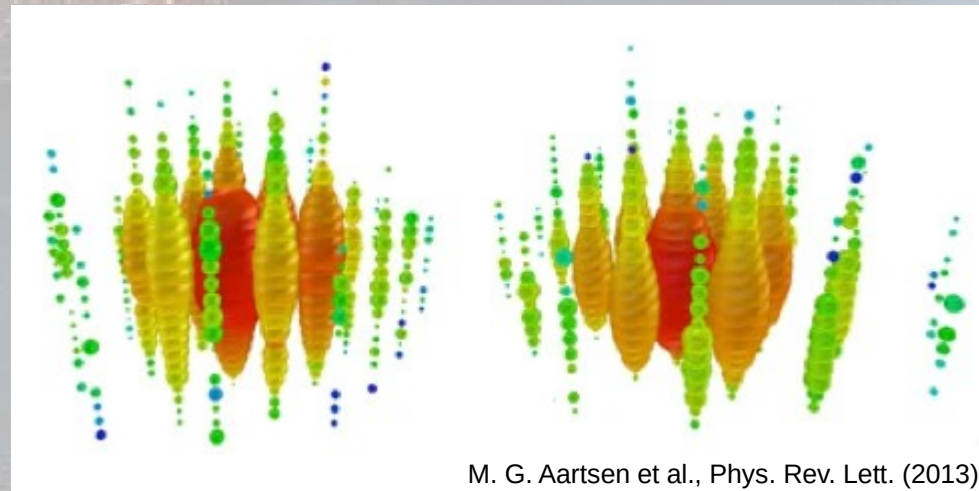
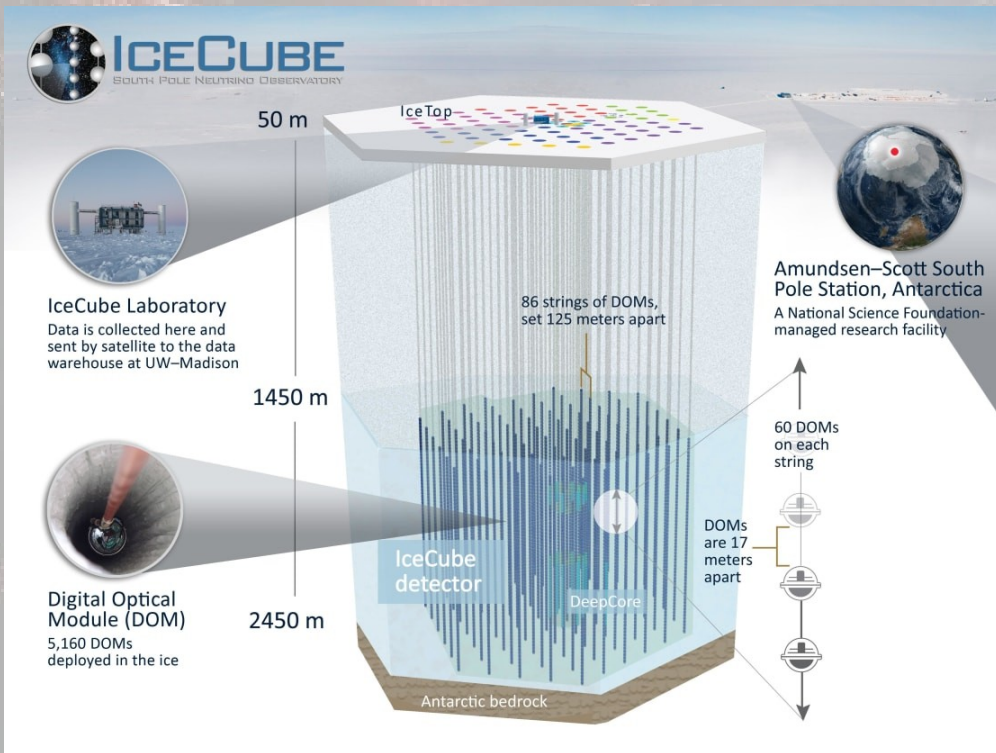
Kremer et al. arXiv:1740.04650



Унести с собой (Введение)

- Многоканальная астрономия
 - это интересно
 - востребованная специальность
 - объединяет физику частиц, астрофизику и обработку данных

Нейтрино высоких энергий

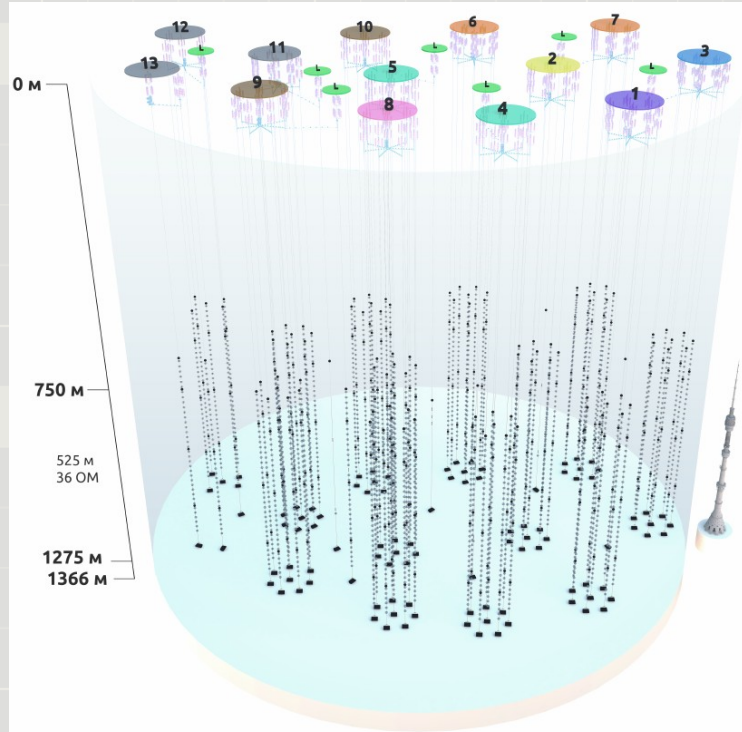


M. G. Aartsen et al., Phys. Rev. Lett. (2013)

- Проникающие частицы с высокой энергией
- Откуда приходят?

п. I Источники нейтрино высоких энергий

Байкал-GVD



Байкальский глубоководный нейтринный телескоп:
эффективный объем: 0.8 км^3

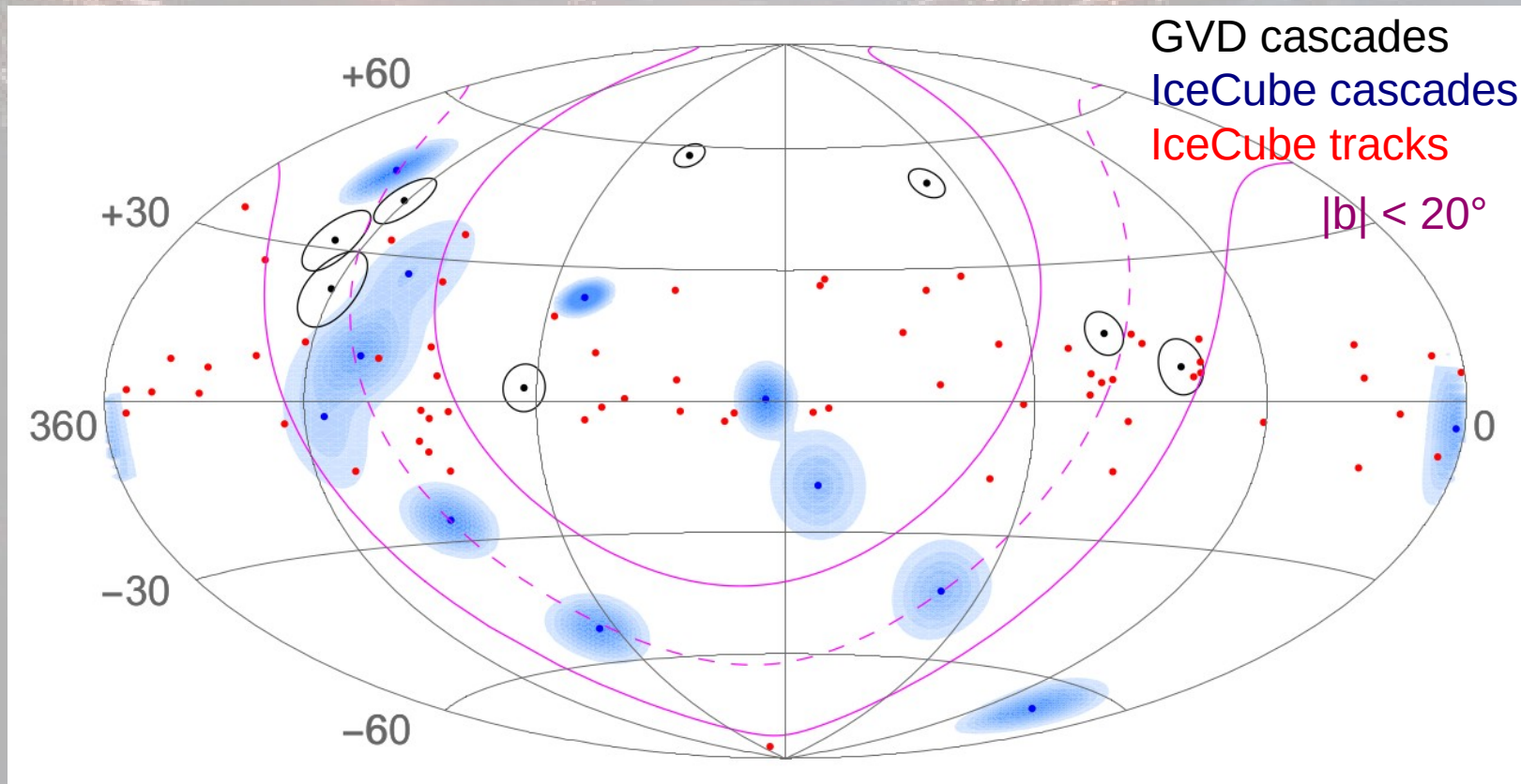
16 кластеров:
почти правильный семиугольник,
радиус: 60 м,
межкласт. расстояние: 300 м

8 гирлянд (на кластер):
рабочая часть: от 750 до 1275 м,
разделены на несколько секций

36 оптических модулей (на гирлянде):
содержат по 1 ФЭУ,
смотрят вниз,
шаг установки ОМ: 15 м,
Точность определения:
положений ОМ: $\sim 20 \text{ см}$,
времен срабатывания ОМ: $\sim 2 \text{ нс}$.

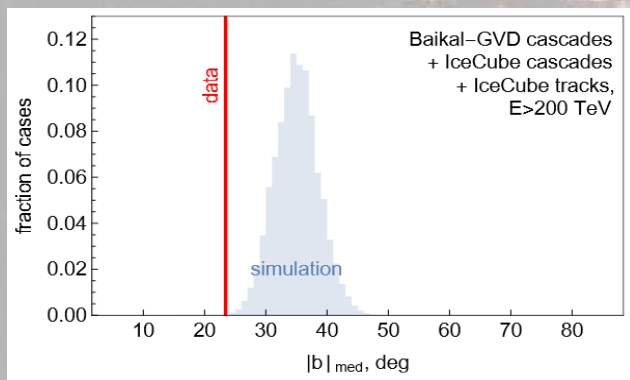
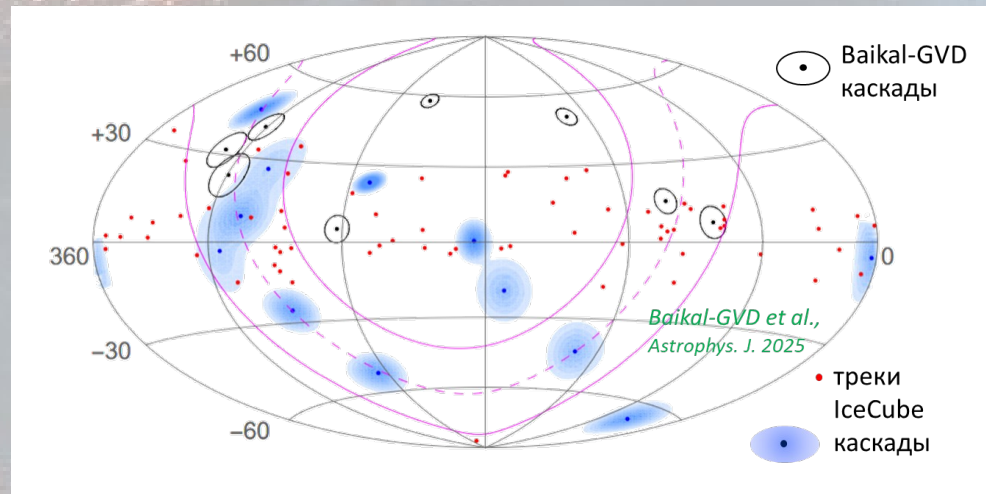


Нейтрино выше 200 ТэВ



Галактические нейтрино

- Baikal-GVD и IceCube: обнаружено нейтринное излучение Галактики при энергиях выше 200 ТэВ
- Распределение по галактической широте не совпадает с предсказаниями моделей

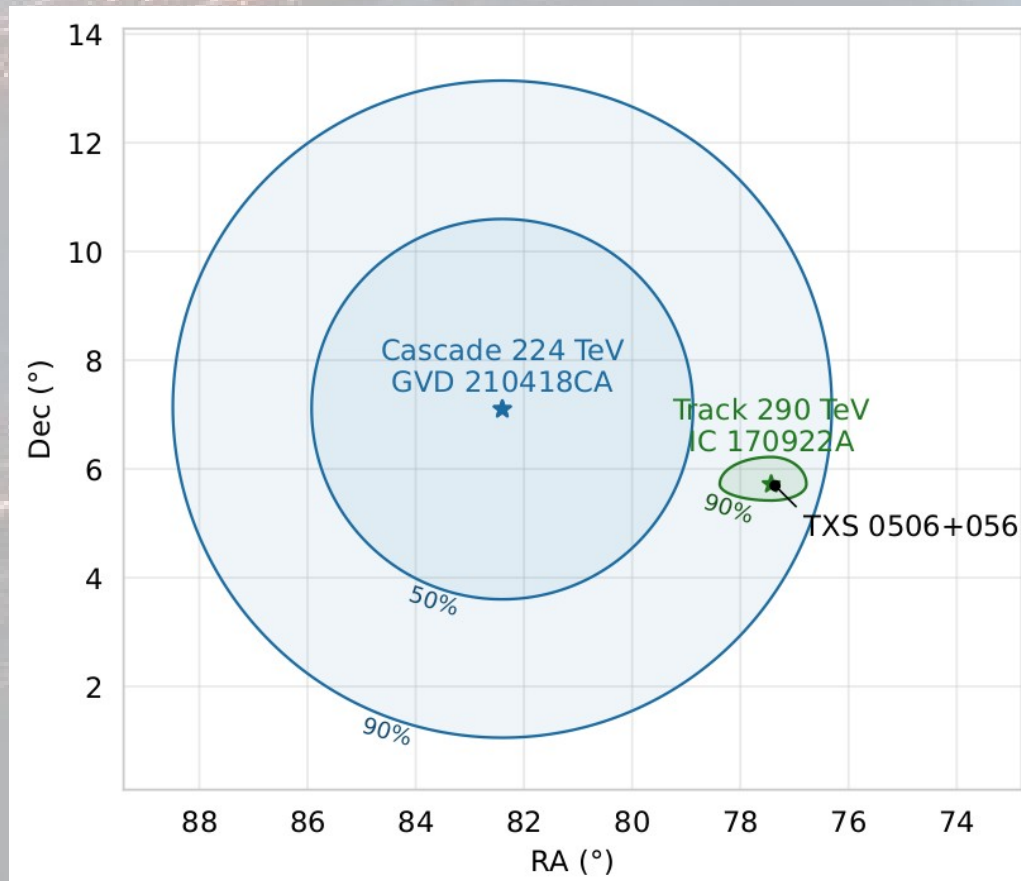


Sample	$ b _{\text{med}}$ observed	$\langle b _{\text{med}} \rangle$ expected	p
Baikal-GVD cascades	10.4°	31.4°	$1.4 \cdot 10^{-2}$ (2.5σ)
IceCube cascades	12.4°	31.9°	$8.7 \cdot 10^{-3}$ (2.6σ)
IceCube tracks	24.7°	36.0°	$1.8 \cdot 10^{-3}$ (3.1σ)
combined	23.4°	35.0°	$3.4 \cdot 10^{-4}$ (3.6σ)

Нейтрино с направления блазара TXS 0506+056



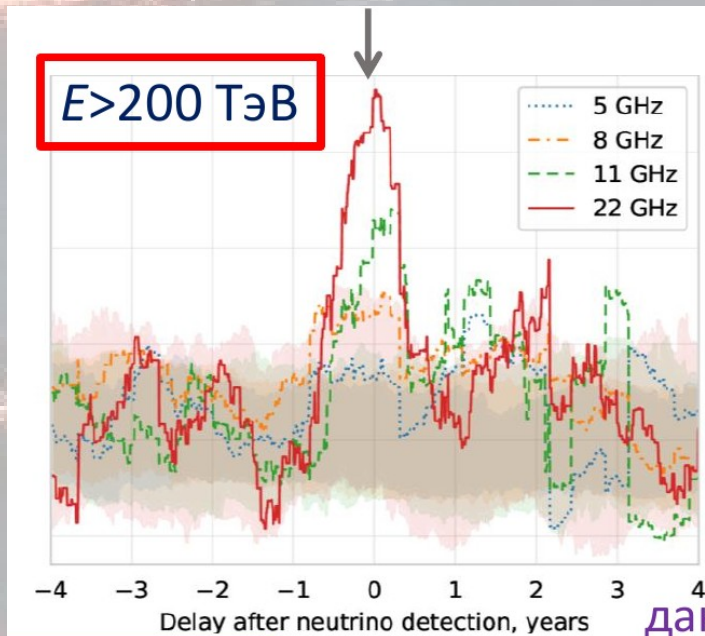
- IceCube и Baikal-GVD зарегистрировали нейтрино с направления, близкого к направлению на блазар TXS 0506+056



Радиоблазары как источники нейтрино



- Направления прихода нейтрино совпадают с радиоблазарами
- Времени прихода нейтрино совпадают с радиовспышками
- Значимость 3.6σ



данные РАТАН-600 САО РАН

KM3NeT рекорд энергии нейтрино



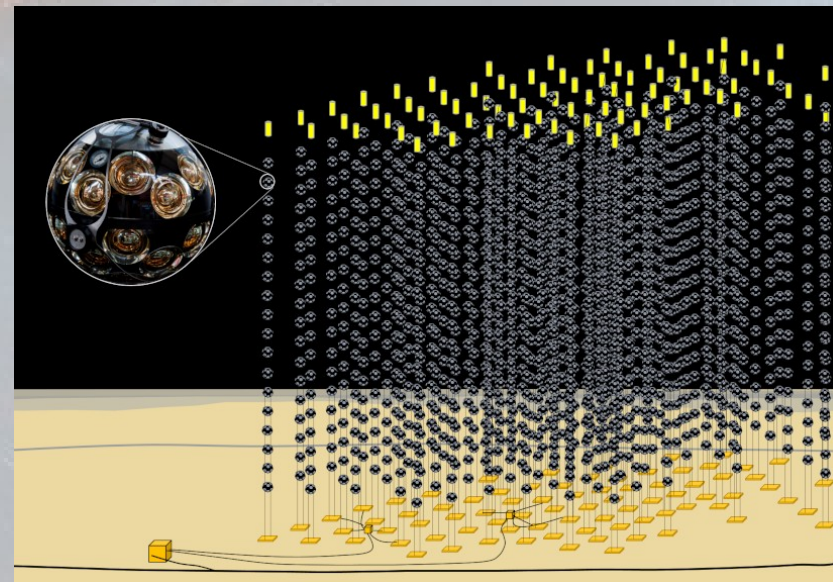
nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾ Subscribe

NEWS | 21 June 2024

‘Fantastic’ particle could be most energetic neutrino ever detected

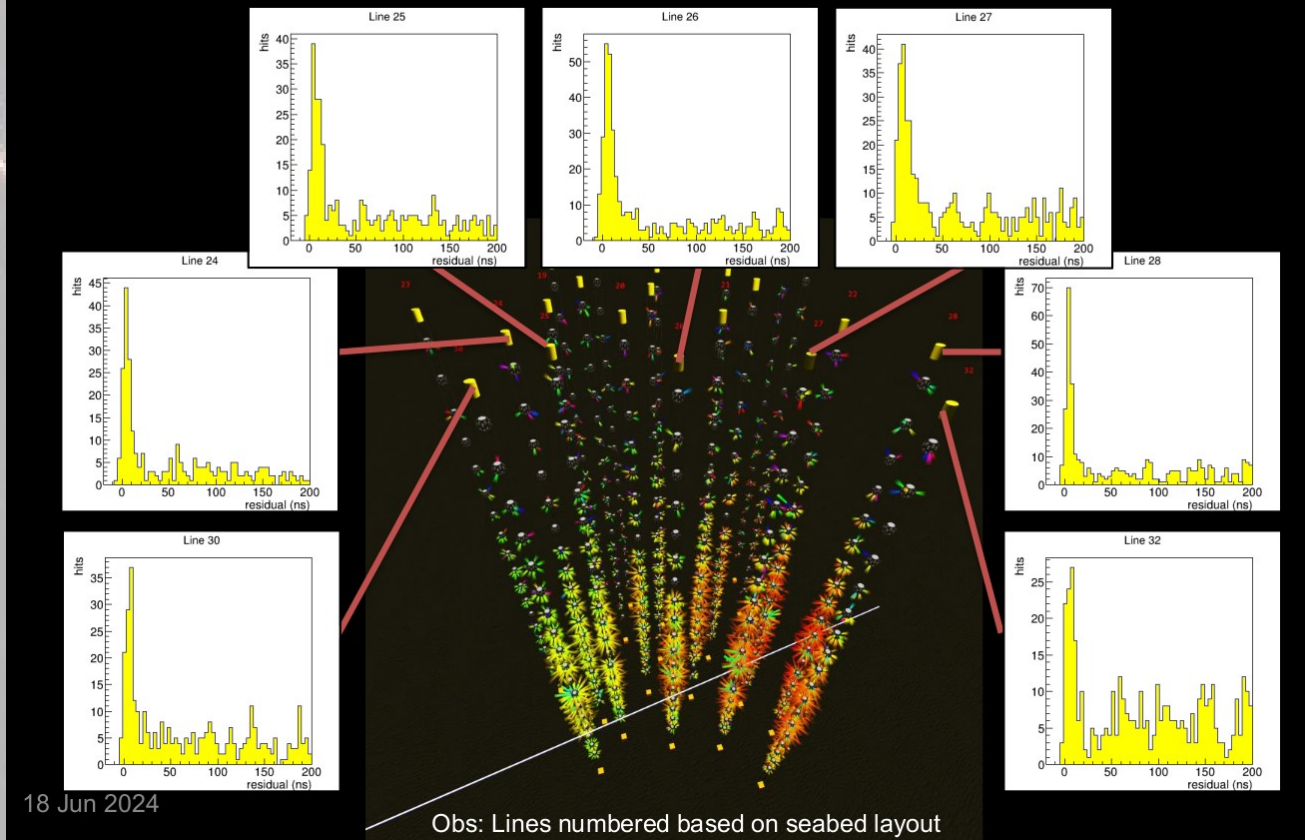
The ultra-high-energy neutrino was spotted by deep-sea detectors and could point to a massive cosmic event.



- In his talk (Neutrino 2024 conference), Coelho said that more than one-third of ARCA's sensors had recorded flashes consistent with a muon crossing the observatory horizontally, produced by a neutrino that arrived from around one degree below the horizon. The particle probably had an energy of many tens of PeV, he added — which would make it the most energetic ever detected.

KM3NET 'fantastic' particle

- Event is well reconstructed as a high energy muon crossing entire ARCA21 detector

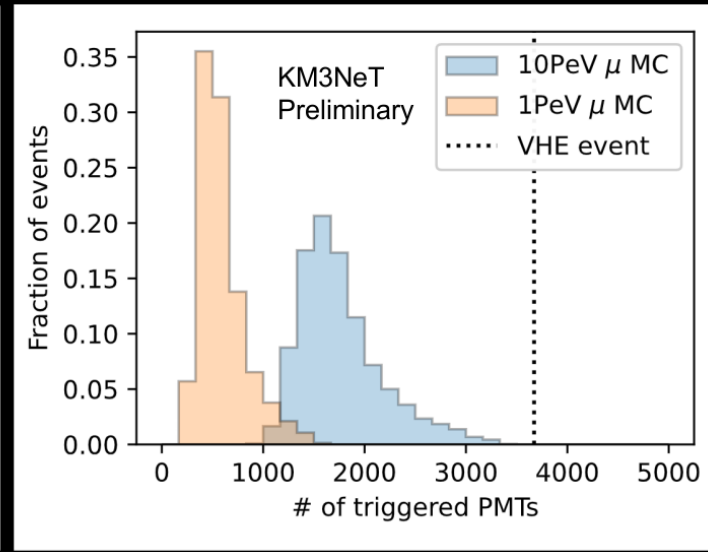
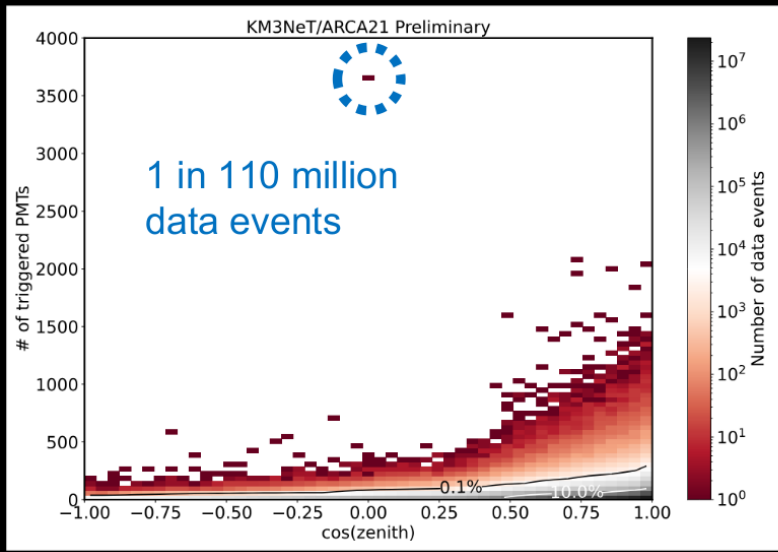


18 Jun 2024

Coelho,
Neutrino 2024

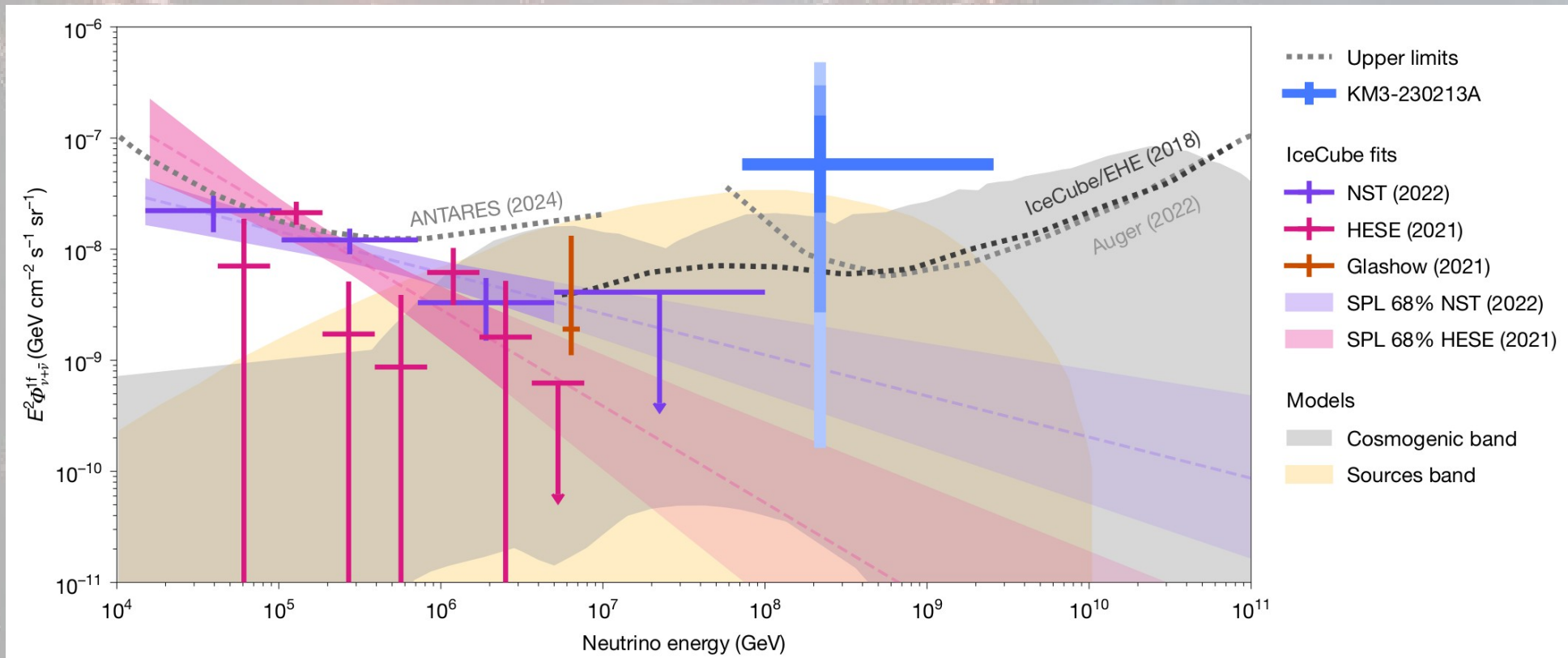
KM3NET 'fantastic' particle

- Significant event observed with huge amount of light
- Horizontal event (1° above horizon) as expected since earth opaque to neutrinos at PeV scale
- 3672 PMTs (35%) were triggered in the detector
- Muons simulated at 10 PeV almost never generate this much light
 - Likely multiple 10's of PeV

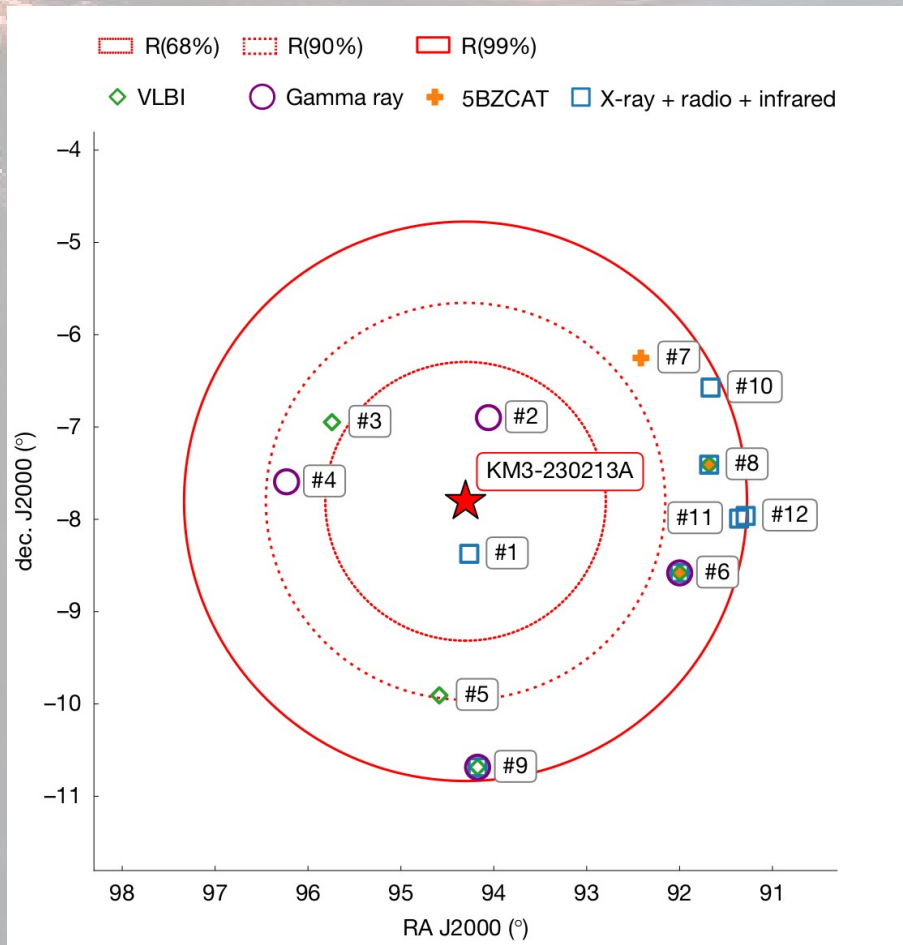


Coelho,
Neutrino 2024

Событие KM3NeT и ограничения на поток нейтрино



Возможные источники на небе

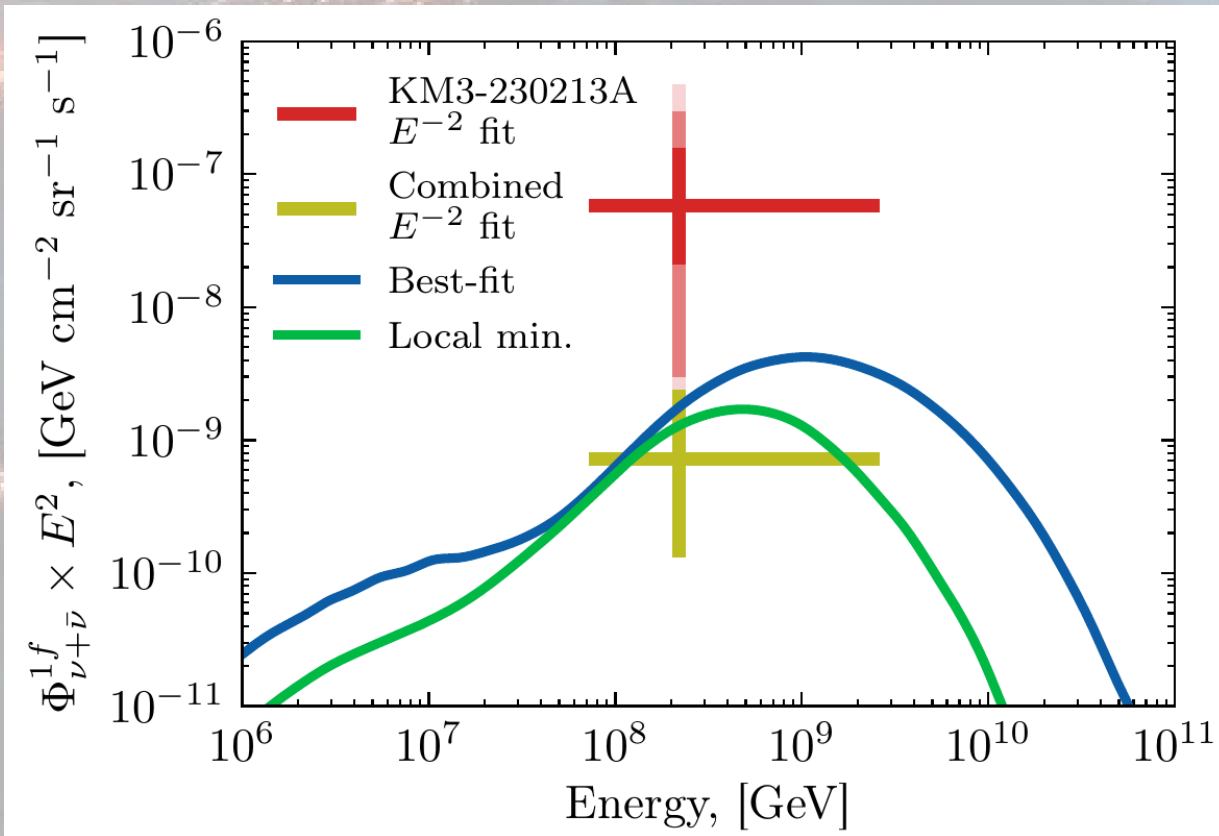


- Источником могут быть несколько объектов, но в любом случае это останется редким, а не регулярным событием

KM3NeT Collaboration, Nature, 638 (2025)

Нейтрино, рожденное космическими лучами?

- Может быть космогенным нейтрино, то есть нейтрино, рожденным во взаимодействии космических лучей





Унести с собой (Нейтрино)

- Источники нейтрино высоких энергий — экстремальные события и явления во Вселенной
- Существуют указания на рождение нейтрино в Галактике, в блазарах и в подклассе радиоблазаров
- Нейтрино рекордно высокой энергии может быть результатом взаимодействия космических лучей во внегалактической среде

Открытие космических лучей

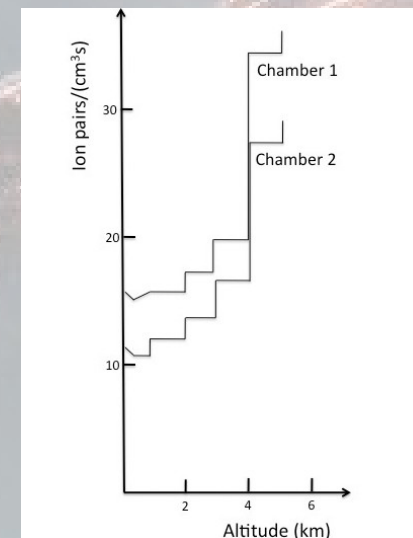


Victor Hess, 1912

- Загадочная радиация приводила к разрядке электроскопа
- При подъеме до 1000 м интенсивность менялась незначительно, на высоте 5300 – выросла в 3 раза.
- Нобелевская премия 1936 “за открытие космического излучения”



Электроскоп Вульфа



Следствия открытия КЛ

C. D. ANDERSON AND S. H. NEDDERMEYER

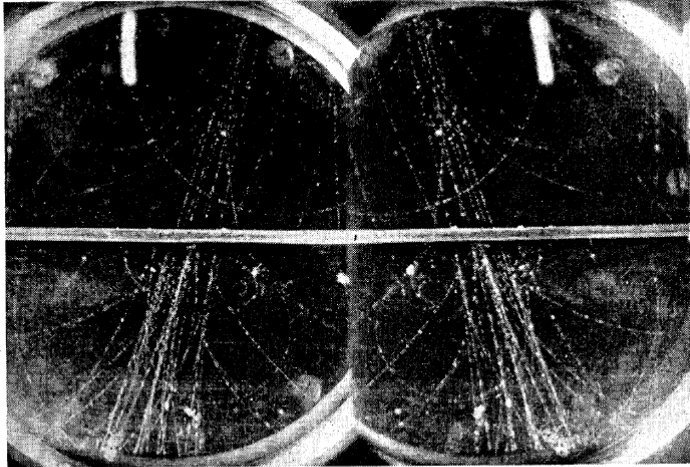
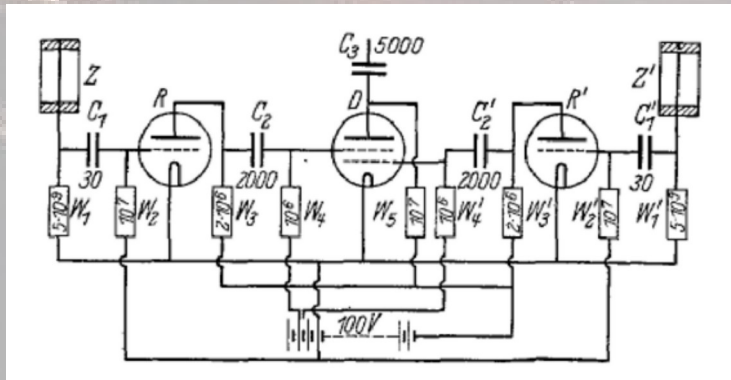


FIG. 3. Pike's Peak, 7900 gauss. A shower in which eight electrons (+ and -) strike the upper surface of the 0.35 cm lead plate.

- 1932 открытие позитрона
Карл Андерсон
 - Нобелевская премия 1936 года
- 1936 открытие мюона
Карл Андерсон, Сет Неддермайер
- 1947 открытие π^+ , π^- мезонов
Сесил Пауэлл и соавторы
 - Нобелевская премия 1950 года
- 1947-1951 открытие К-мезонов
Джордж Рочестер, Клиффорд Батлер, Сесил Пауэлл
- 1954 природу К-мезонов уточнили в экспериментах на ускорителях

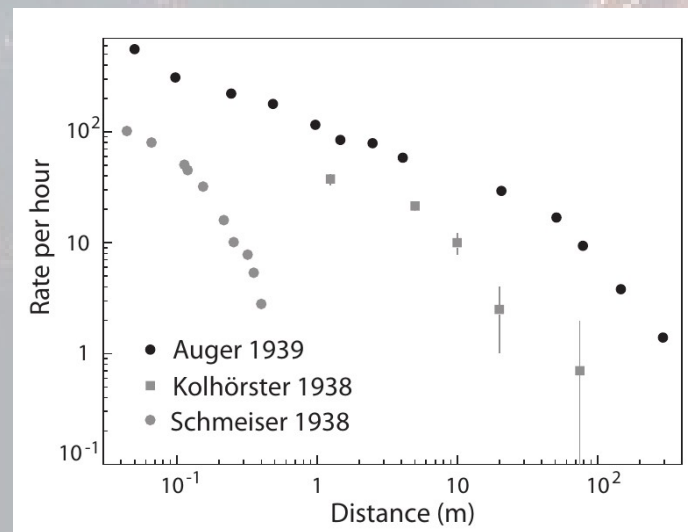
Открытие явления широких атмосферных ливней



- 1934, Бруно Росси, 1938-1939 Вернер Колхерстер, К. Шмейсер, Пьер Оже открытие совпадений на расстоянии. Явление широких атмосферных ливней (ШАЛ)

Схема совпадений Боте (1929),
Z, Z' — два счетчика Гейгера

- 1929, Вальтер Боте, первая схема совпадений
- Нобелевская премия 1954 “за метод совпадения и открытия с его использованием”



Природа ШАЛ

- 1951, академик Г.Т. Зацепин (ФИАН) основа ШАЛ — ядерно-каскадный процесс

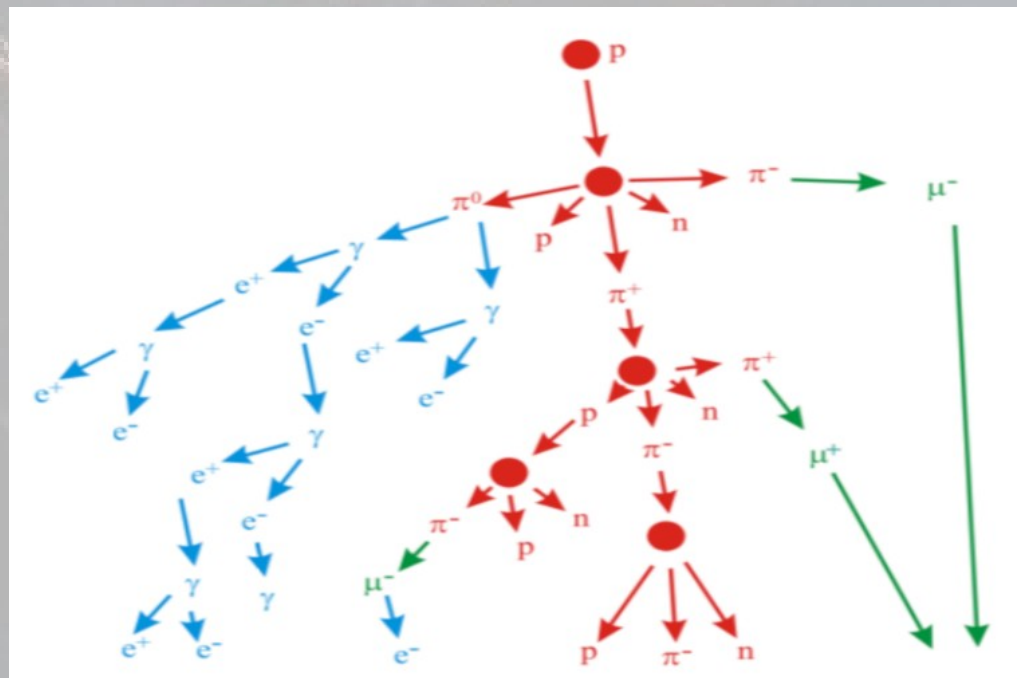
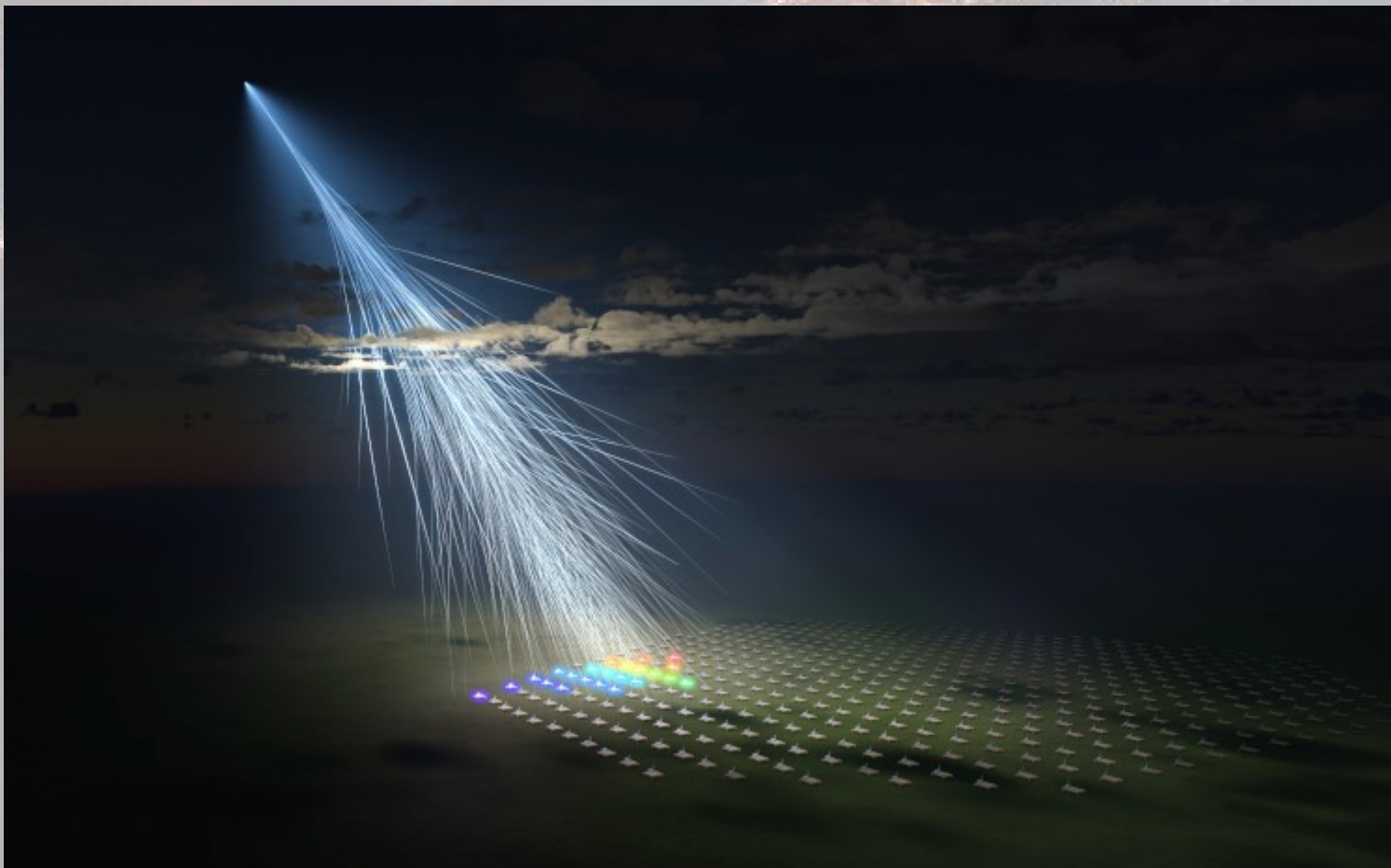


Иллюстрация D. Gora



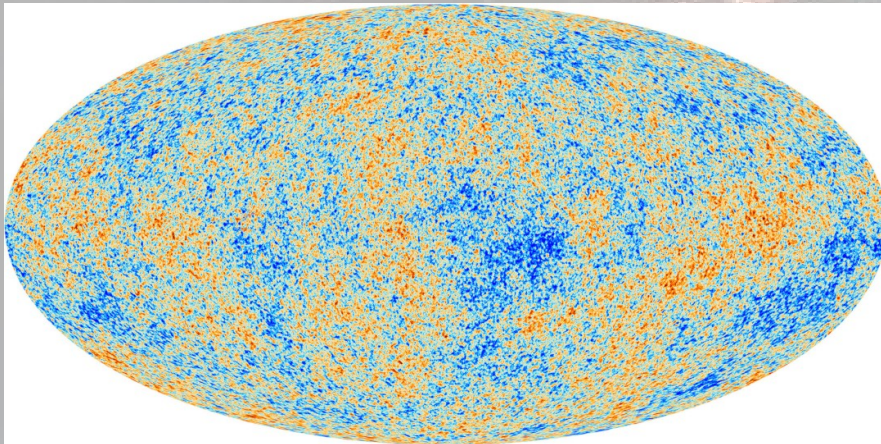
Академик Зацепин на Байкале (архив ИЯИ РАН)

Регистрация ШАЛ



Открытие реликтового излучения

- 1948 Георгий Гамов предсказал реликтовое излучение с температурой 3 К
- 1965 Арно Пензиас, Роберт Вудроу Вильсон (Bell Labs) с помощью радиоантенны открыли избыточный шум с температурой 3 К. Нобелевская премия 1978.



Современное измерение карты реликтового излучения спутником Planck.
Фото молодой Вселенной в возрасте 400 тысяч лет.

Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина



1966

END TO THE COSMIC-RAY SPECTRUM?

Kenneth Greisen

Cornell University, Ithaca, New York

(Received 1 April 1966)

The primary cosmic-ray spectrum has been measured up to an energy of 10^{20} eV,¹ and several groups have described projects under development or in mind² to investigate the spectrum further, into the energy range 10^{21} - 10^{22} eV. This note predicts that above 10^{20} eV the primary spectrum will steepen abruptly, and the experiments in preparation will at last observe it to have a cosmologically meaningful termination.

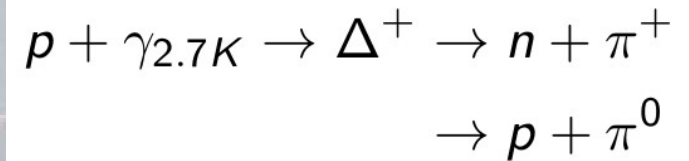
О ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин

В недавних измерениях [1,2] обнаружено мощное изотропное тепловое излучение Вселенной, обладающее, по-видимому, распределением Планка с температурой $T \approx 3^\circ\text{K}$. Интенсивность этого излучения такова ($N \approx 550$ фотонов/см³, $kT \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$ эв), что возникают специфические эффекты при прохождении через него космических лучей сверхвысоких энергий, в частности обрезание спектра космических лучей в области 10^{20} эв.

Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина

- 1966 Кеннет Грейзен; 1966 Георгий Зацепин и Вадим Кузьмин. Спектр космических лучей должен резко падать выше энергии 5×10^{19} за счет взаимодействия с РИ
 - Протоны теряют энергию в ГЗК-процессе
 - Ядра испытывают фотодезинтеграцию при таких же энергиях
- *В то же время: В 1967 начато строительство Баксанской нейтринной обсерватории в составе лаборатории «Нейтрино» ФИАН по руководством Георгия Зацепина (в 1970 передана в ИЯИ АН СССР)*

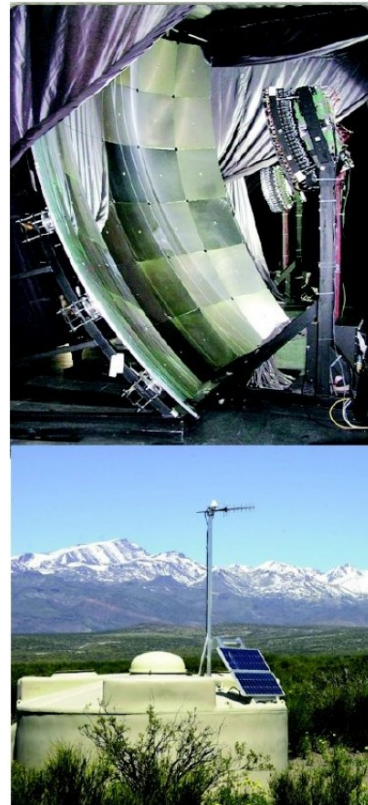


Установки, регистрирующие космические лучи с $E > 1$ ЭэВ

Якутск ШАЛ



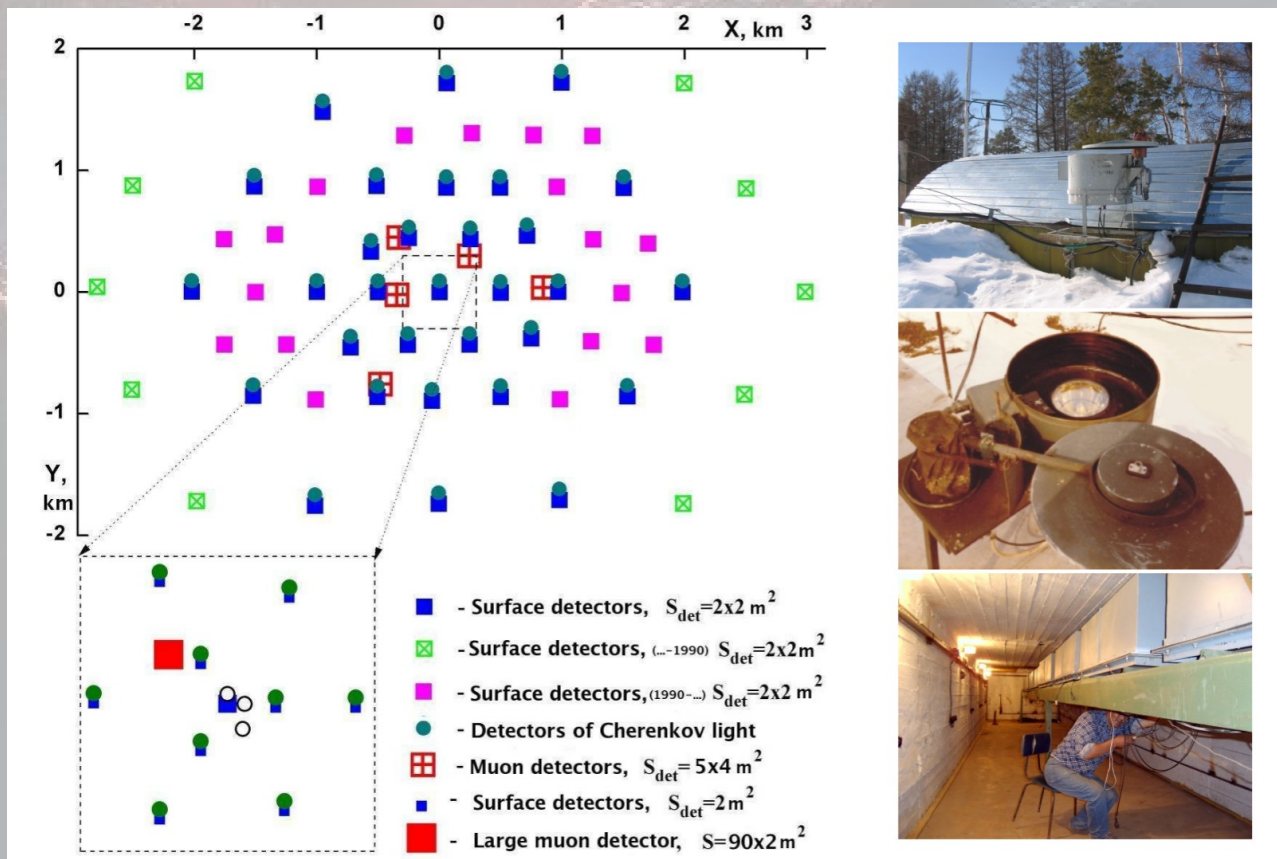
Pierre Auger



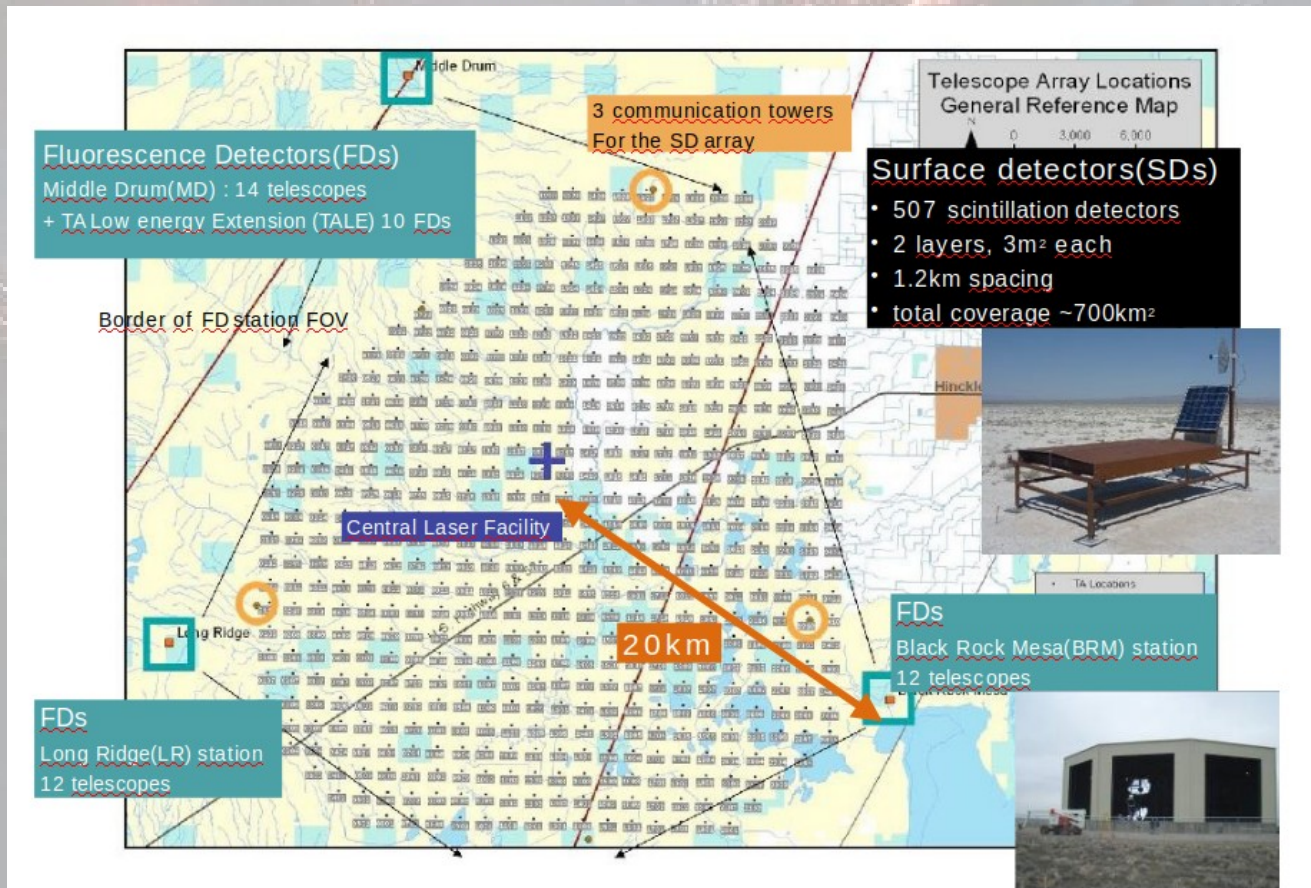
Telescope Array



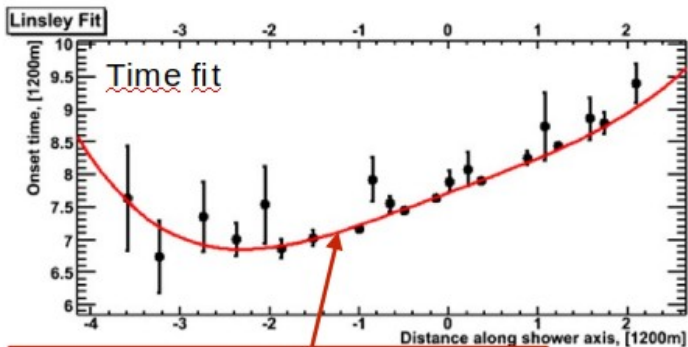
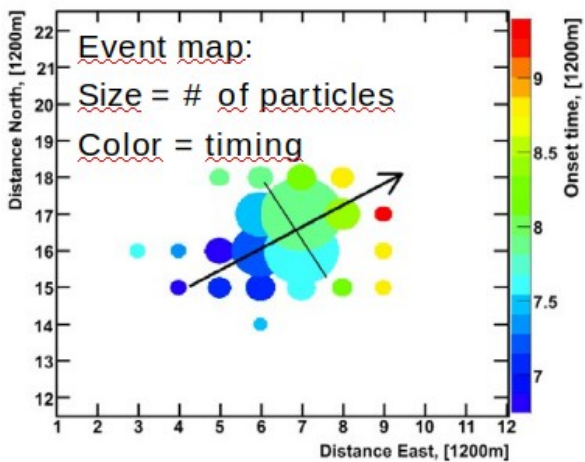
Якутская установка ШАЛ 1973-н.в.



Обсерватория Telescope Array

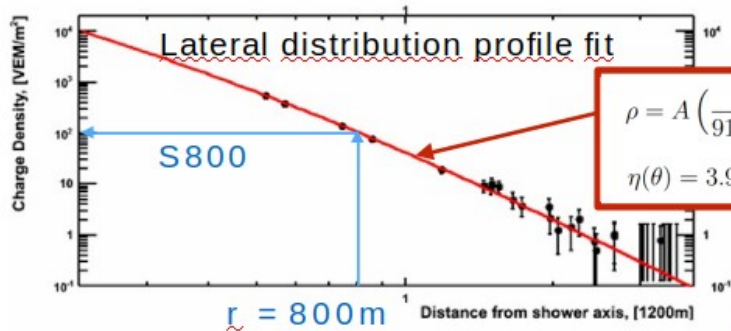


Реконструкция событий наземной решетки



$$\tau = a \left(1 - \frac{l}{12 \times 10^3 \text{m}}\right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.35} \rho^{-0.5}$$

Modified empirical formula in AGASA



$$\rho = A \left(\frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1 + \left[\frac{s}{1000\text{m}}\right]^2\right)^{-0.6}$$

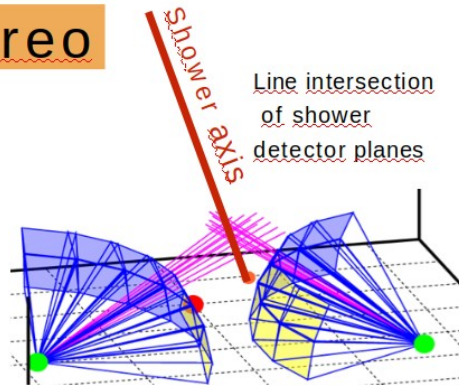
$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79 [\sec(\theta) - 1]$$

Empirical formula used by AGASA

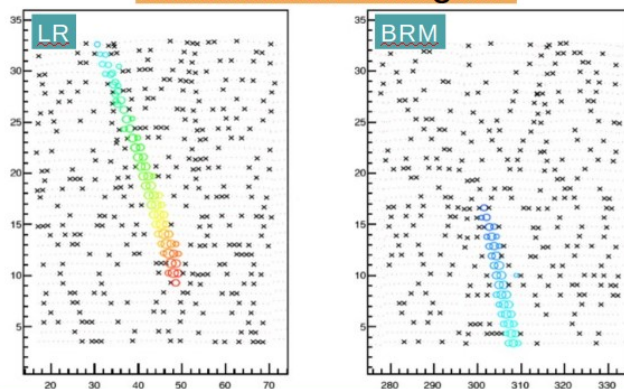
S800 -> primary energy

Восстановление событий в гибридном и стерео-режиме

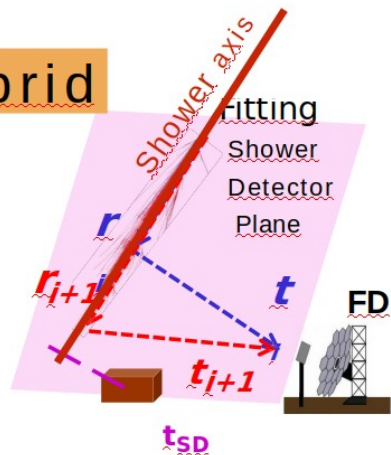
Stereo



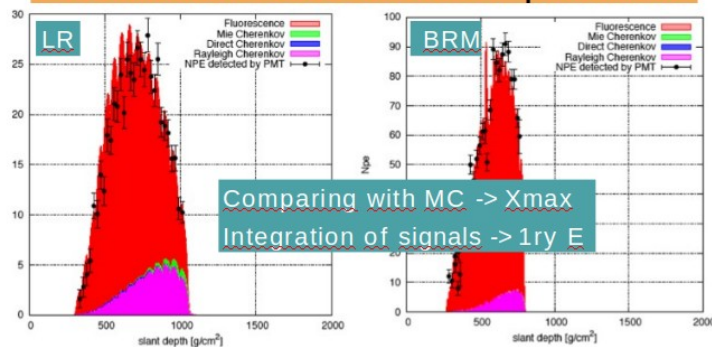
observed images



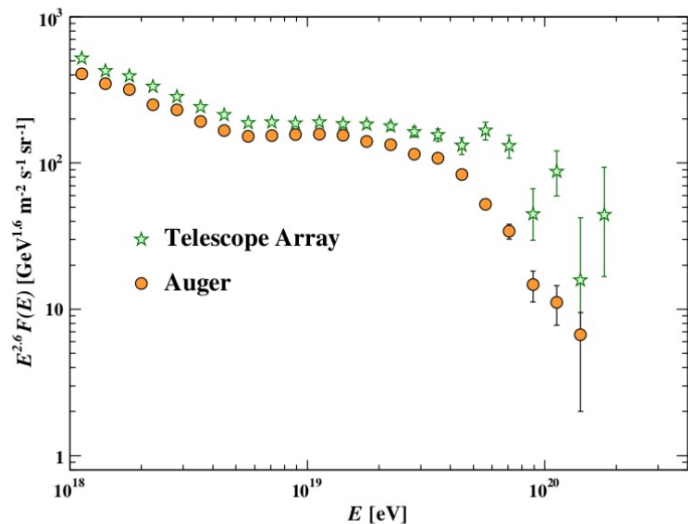
Hybrid



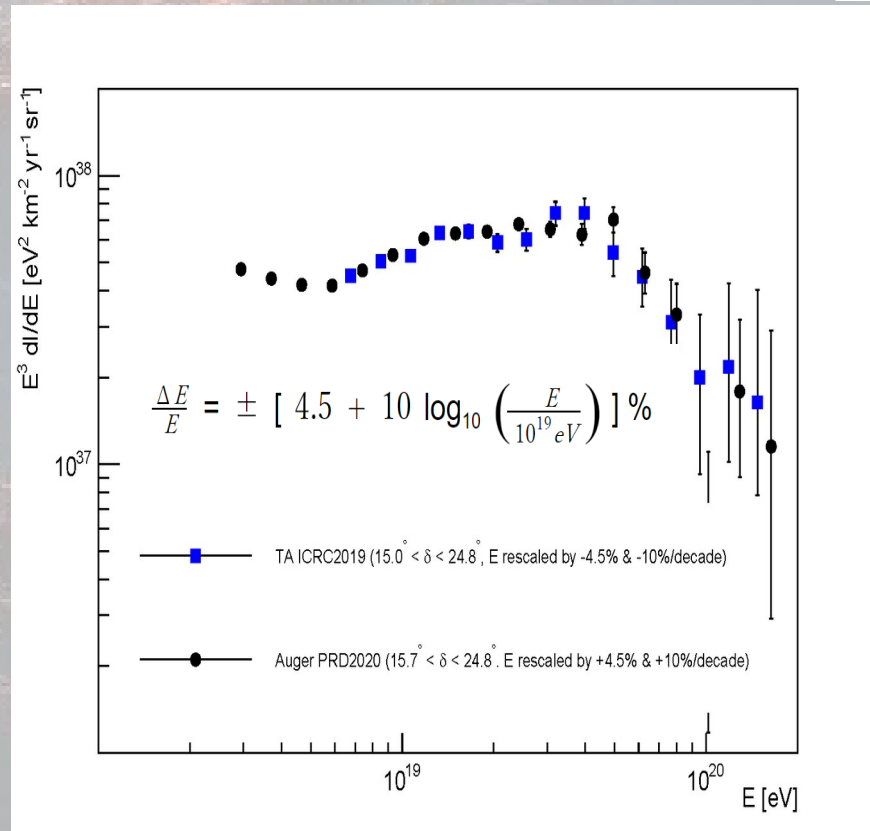
reconstructed shower profiles



Эффект ГЗК: подтверждение в эксперименте



Particle Data Group'2018



Проблема происхождения космических лучей

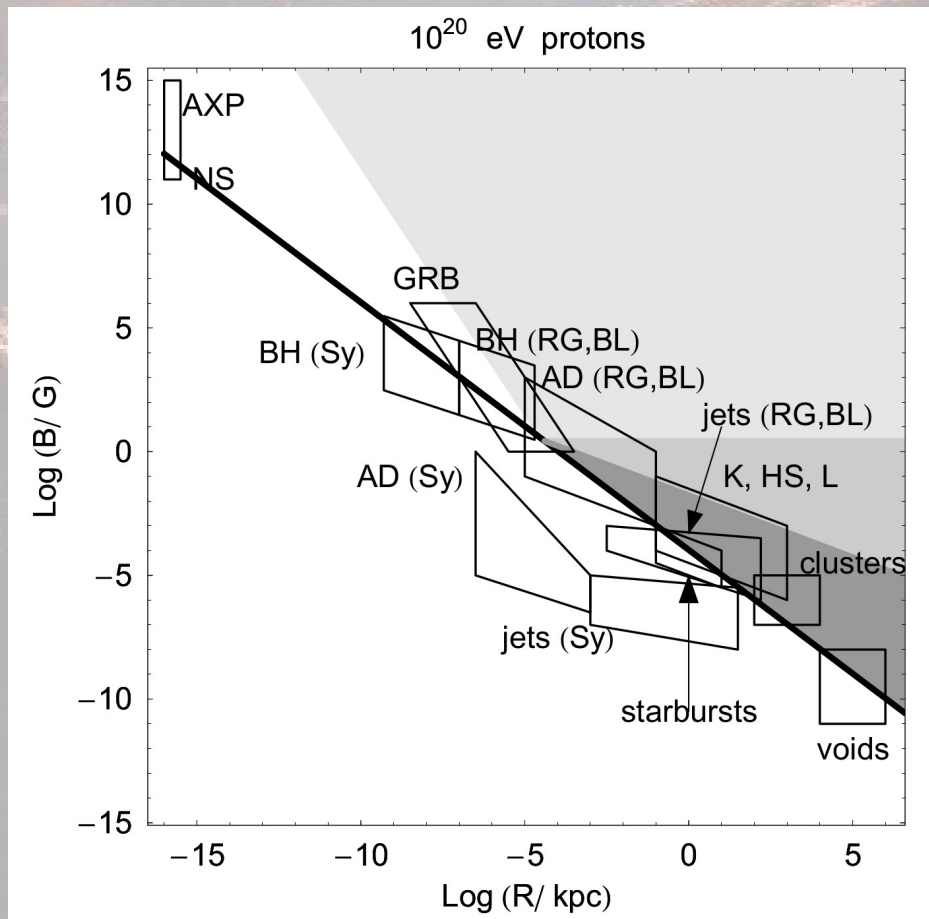


Как нам представляется, к 2001 году или во всяком случае к 2012 году можно ожидать выяснения почти всех вопросов, сформулированных в конце предыдущего параграфа.

В.Л. Гинзбург, *Астрофизика космических лучей*, 1990 г.

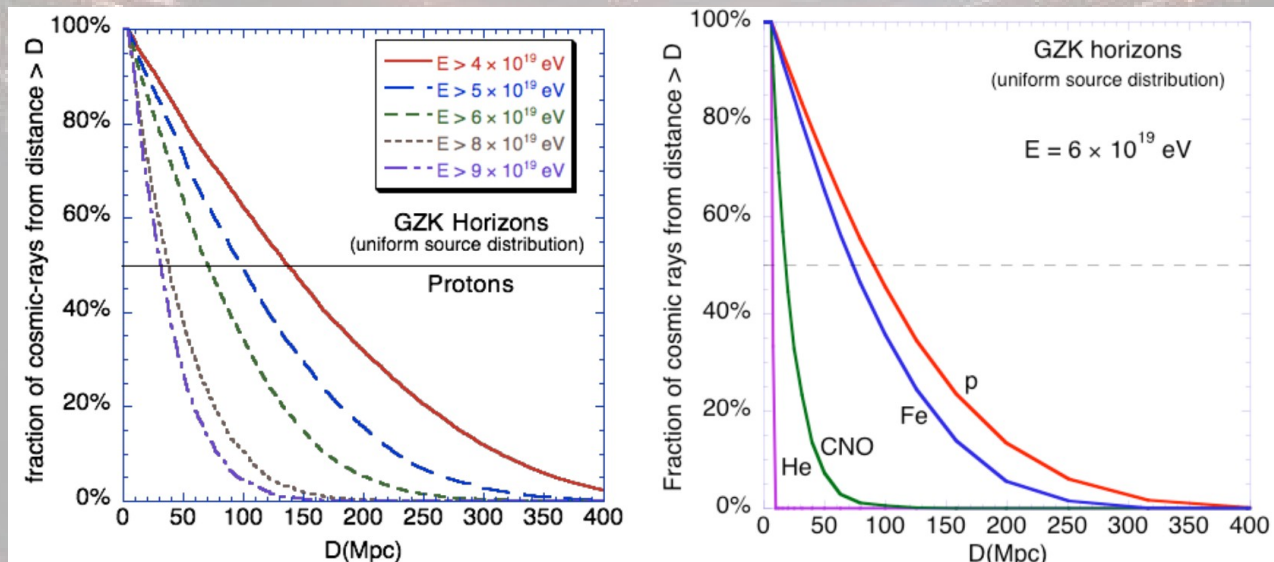
(Примечание: речь об источниках космических лучей)

Рисунок Хилласа: Возможные источники КЛ



Птицына, Троицкий,
УФН 53 (2020) 691

ГЗК-горизонт для протонов и ядер



A. Olinto et. al.,
White paper on UHECR

- Отклонение протонов 60 ЭэВ в галактическом магнитном поле 2-6°
- Возможна ли астрономия космических лучей?
- 2011, Вениамин Березинский disappointing model: нет протонов, не увидим источники, не увидим космогенные фотоны и нейтрино 38

Сколько источников КЛУВЭ?

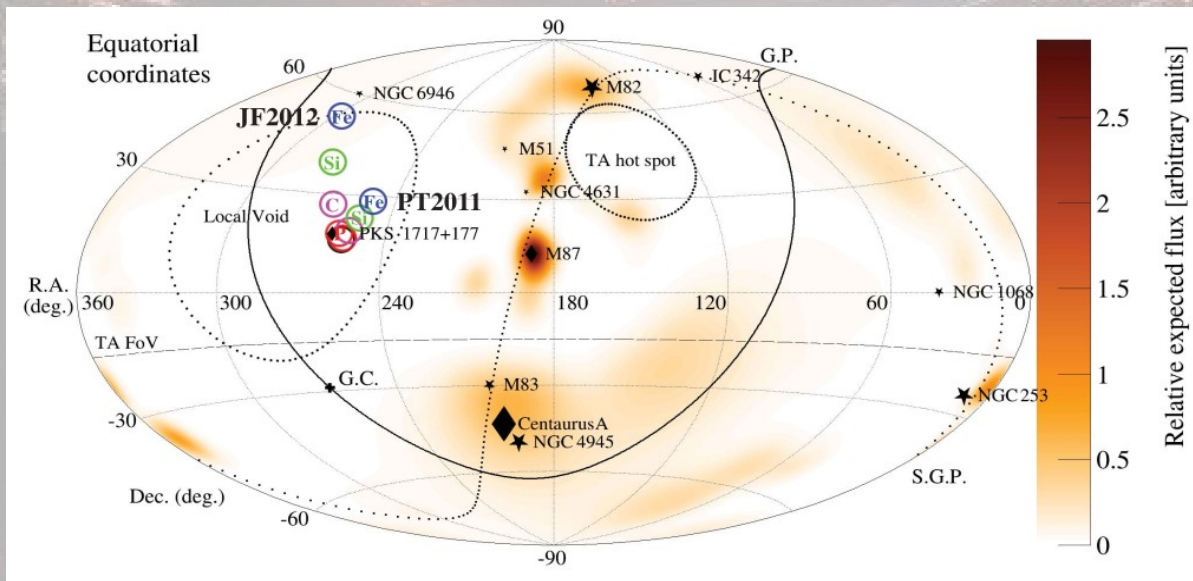
- ▶ Пусть мы видим N_{tot} событий
- ▶ Наблюдается N_{cl} кластеров на величине углового разрешения (отклонения в магнитных полях)
- ▶ Если кластеров мало, значит каждый источник в среднем производит в нашей выборке заметно меньше одного фотона
- ▶ Ограничение на минимальное число источников в видимой области (ГЗК-сфера) $\sim \pi N_{tot}^3 / 3N_{cl}^2$

Дубовский, Тиняков, Ткачев, *Phys.Rev.Lett.* 85 (2000) 1154-1157

- ▶ По данным Auger для $E > 50$ ЭэВ, получаем $n > 10^{-4} \text{ Мрс}^{-3}$ (если источники производят протоны)

Калашев, Птицына, Троицкий, *Phys.Rev.* D86 (2012) 063005

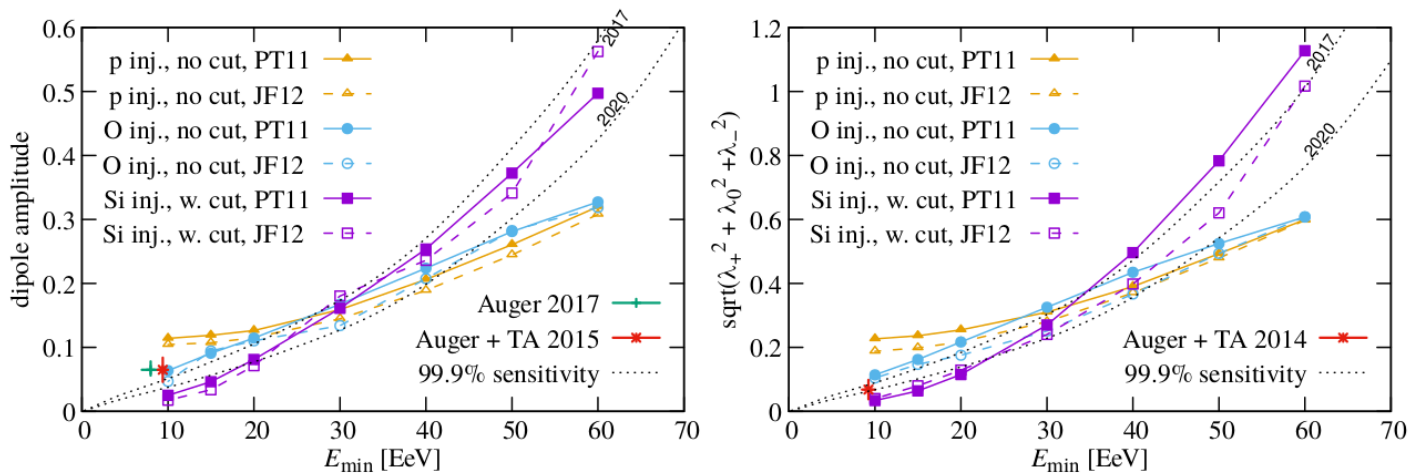
Обнаружение частицы с экстремально высокой энергией



- $E = 2.44 \times 10^{20}$ эВ
- Приходит из пустоты
- Должна быть тяжелым ядром
- Источник близко (не более 5 Мпк)

Telescope Array Collaboration, Science 382, 903–907 (2023).
 M. Kuznetsov, JCAP 04 (2024) 042

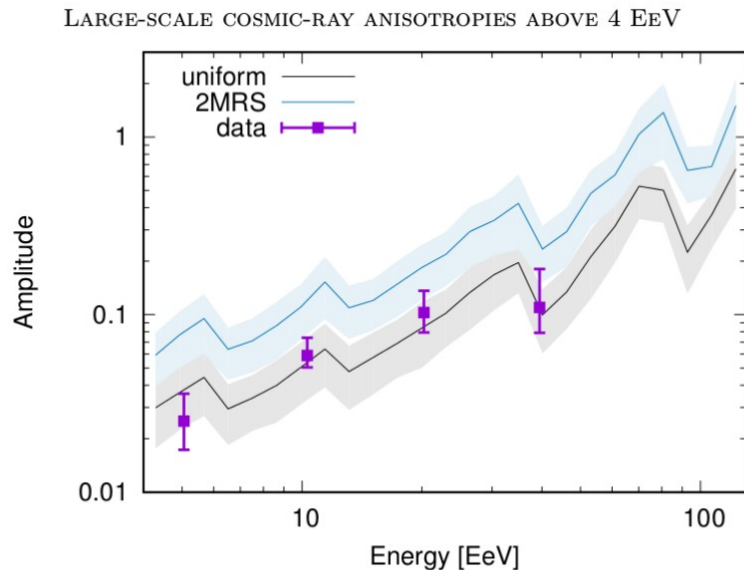
Поиск диполя и квадруполя



di Matteo, Tinyakov, MNRAS 476 (2018) 715

- ▶ В модели источников, повторяющей LSS, предсказан рост диполя и квадруполя с энергией
- ▶ Данные Оже по диполю согласуются с предсказанием
- ▶ Квадруполь не обнаружен: аргумент против чисто протонного состава

Поиск диполя и квадруполья

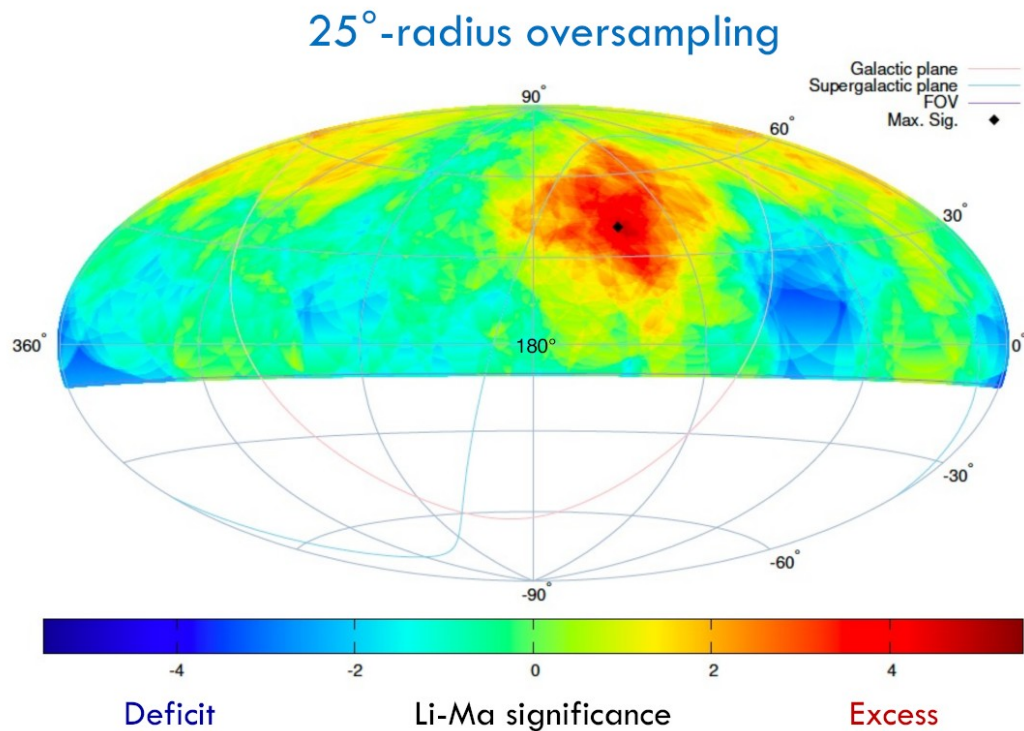


Auger collaboration, ApJ 868 (2018) 4

- ▶ обнаружение диполя 5σ при $E > 8$ ЭэВ
- ▶ согласуется с моделью изотропных источников $\rho = 10^{-4} \text{ Мпк}^{-3}$

Горячее пятно Telescope Array

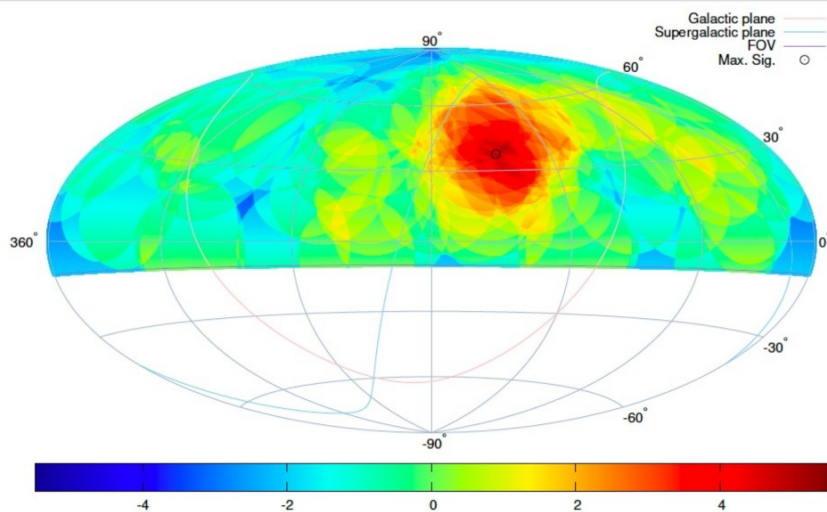
Li-Ma Significance Map with $E \geq 57$ EeV



- 205 events (14-year TA SD data)
- Max local sig.: **5.1 σ** at (144.0°, 40.5°)
 - Obs. : 44 events
 - N_{bg} : 16.9 events
 } ~160% excess
- Post-trial probability:
 - $P(S_{MC} > 5.1\sigma) = 7.4 \times 10^{-4} \rightarrow$ **3.2 σ**

Горячее пятно Telescope Array

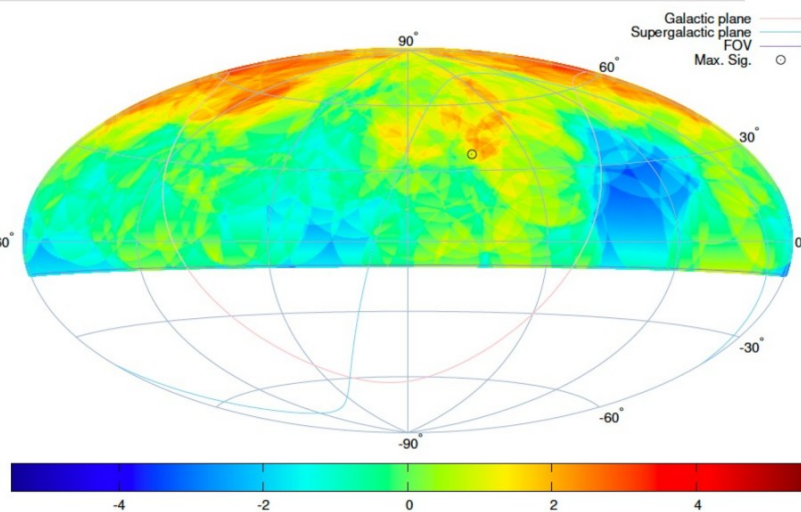
Independent Dataset Analysis



- 72 events (First 5-year)
- **5.0 σ** at (144.0°, 40.5°)

Obs. : 22 events

N_{bg} : 5.2 events



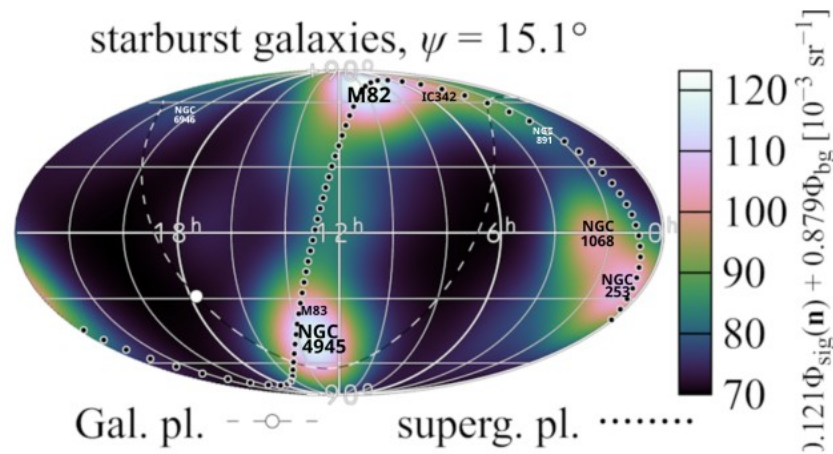
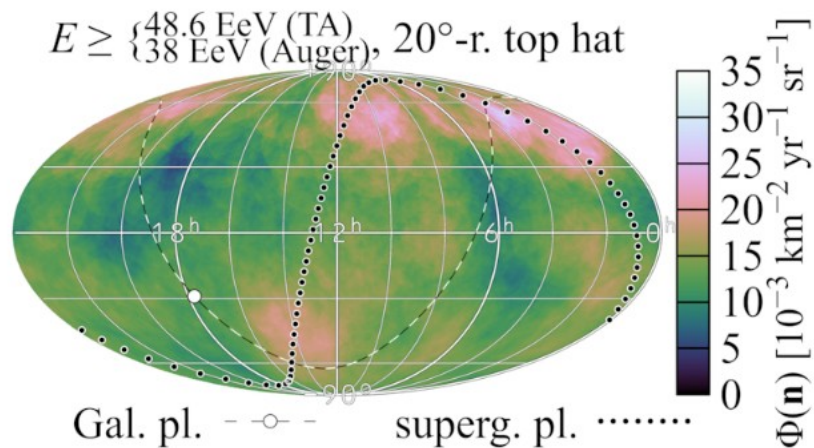
- 133 events (Last 9-year)
- **2.5 σ** at (144.0°, 40.5°)

Obs. : 22 events

N_{bg} : 11.6 events

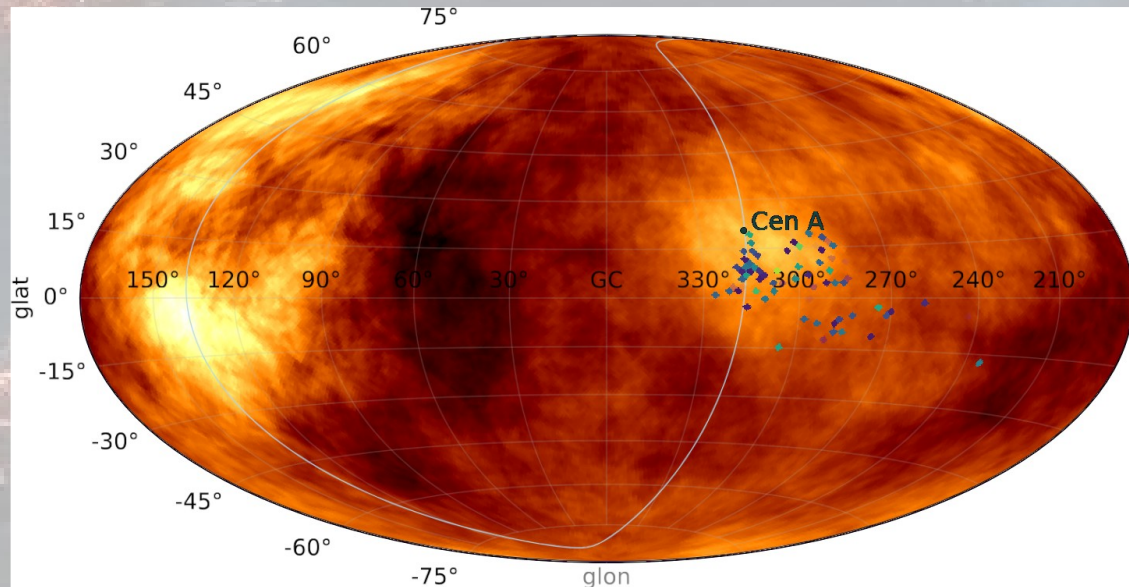
TA-Auger: корреляции с галактиками звздообразования

catalogue	$E_{\min}^{(\text{Auger})}$	$E_{\min}^{(\text{TA})}$	ψ [deg]	f [%]	TS	significance
all galaxies	40 EeV	51 EeV	29^{+11}_{-12}	41^{+29}_{-18}	14.3	$2.7\sigma_{\text{global}}$
starburst	38 EeV	49 EeV	$15.1^{+4.6}_{-3.0}$	$12.1^{+4.5}_{-3.1}$	31.1	$4.6\sigma_{\text{global}}$



Интерпретация горячих пятен

- Горячее пятно может быть изображением источника, размытым во внегалактическом магнитном поле



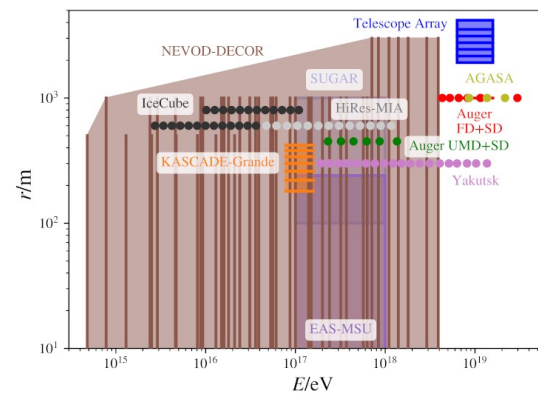
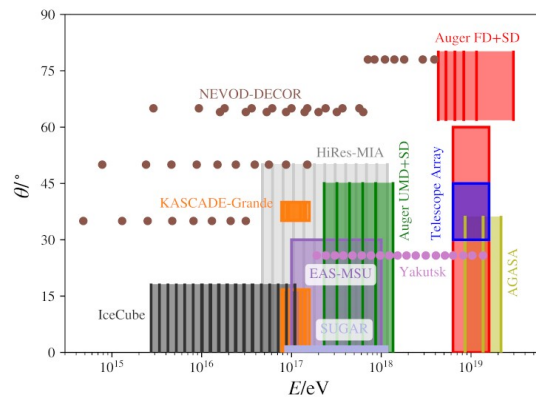
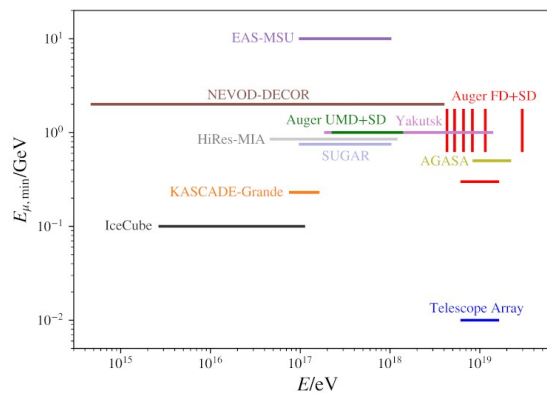
K. Dolgikh, et al. International Journal of Modern Physics A. — 2025.

Анализ мюонной составляющей ШАЛ

- ▶ 9 experiments: Data taken over large parameter space under very different experimental conditions!
- ▶ Muon content is expressed in terms of z -scale:

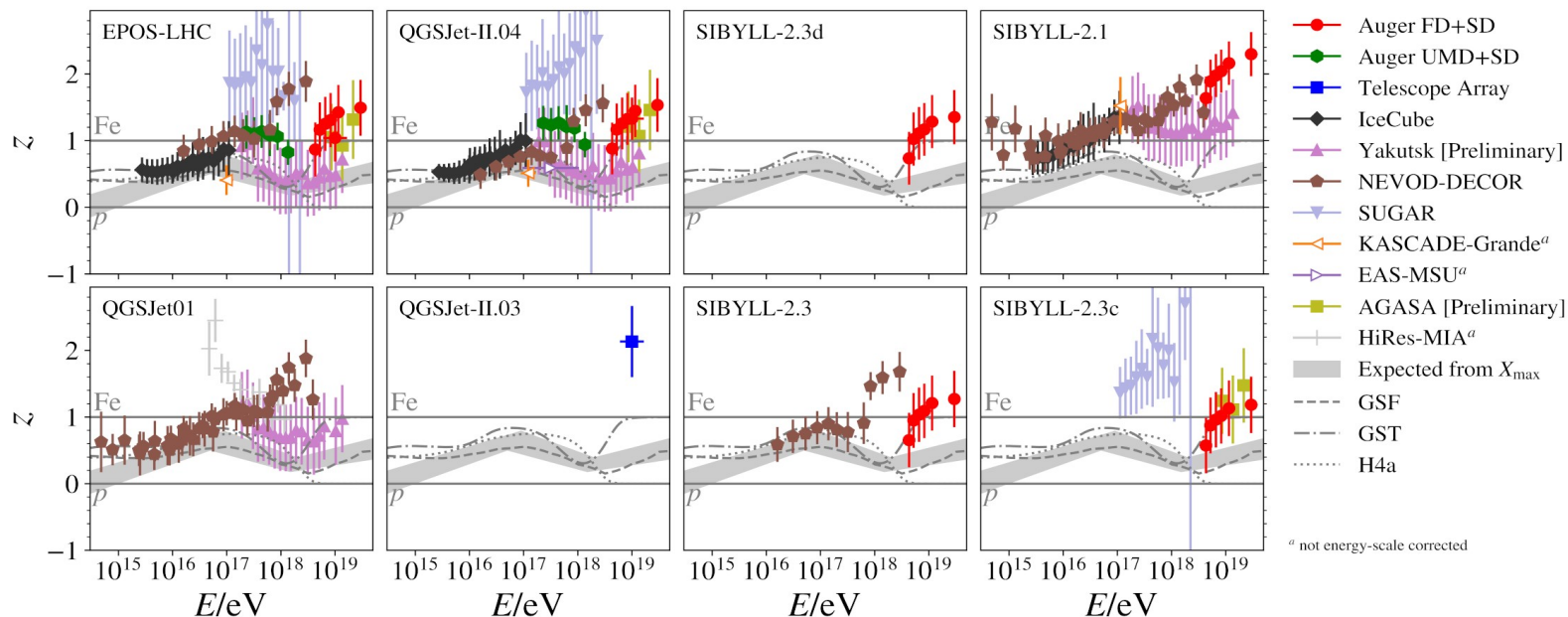
$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu,p}^{\text{det}})}{\ln(N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu,p}^{\text{det}})}, \quad z = 0: \text{proton}, z = 1: \text{iron}$$

- ▶ N_{μ}^{det} : muon content measured in the detector
- ▶ $N_{\mu,p}^{\text{det}}, N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}}$: muon content in simulated EAS (proton/iron) at the detector



Проблема мюонного избытка

► Muon lateral density in EAS after cross-calibration of the energy-scales



Dennis Soldin,
UHECR'2022

Мюонная проблема — снова задача из физики частиц
Ключ к проблеме источников

π.IV Избыток мюонов, наблюдаемых в ШАЛ



Унести с собой

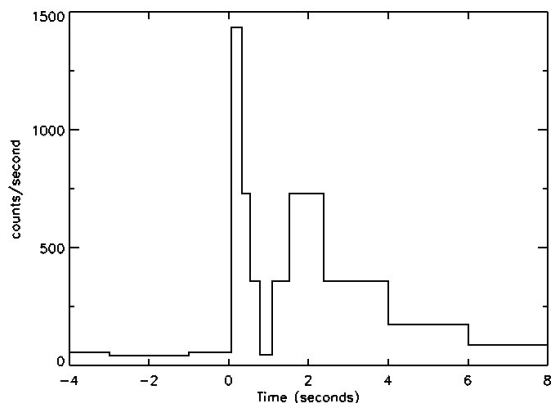
- Источники КЛ до сих пор неизвестны
- Эффект ГЗК экспериментально подтвержден
- Существуют указания на источники, но ни один класс источников не установлен достоверно
- Мюонная проблема: возврат к физике частиц, с которой начиналась физика космических лучей
- Величина внегалактического магнитного поля важна для поиска источников КЛ

Гамма-всплески

- 2 июля 1967 года спутник Vela 4 зарегистрировал длительное гамма-излучение неизвестной природы
- Опубликовано в 1973 году

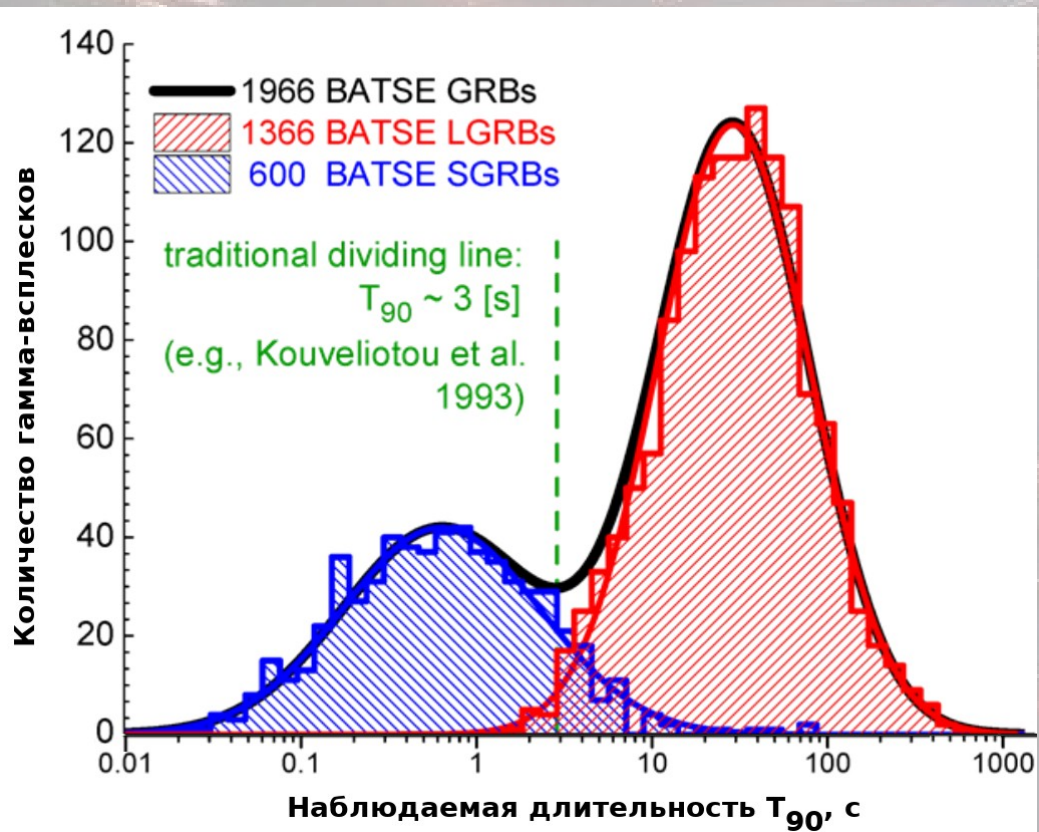


GRB 670702



- Сегодня эксперименты Swift и Fermi GBM регистрируют несколько сотен гамма-всплесков в год
- Гамма-всплески – события за пределами нашей Галактики

Длительность гамма-всплесков



- Гамма-всплески по длительности разделяют на короткие и длинные
- Пороговая длительность – 3 секунды
- Физическая природа коротких и длинных всплесков различна

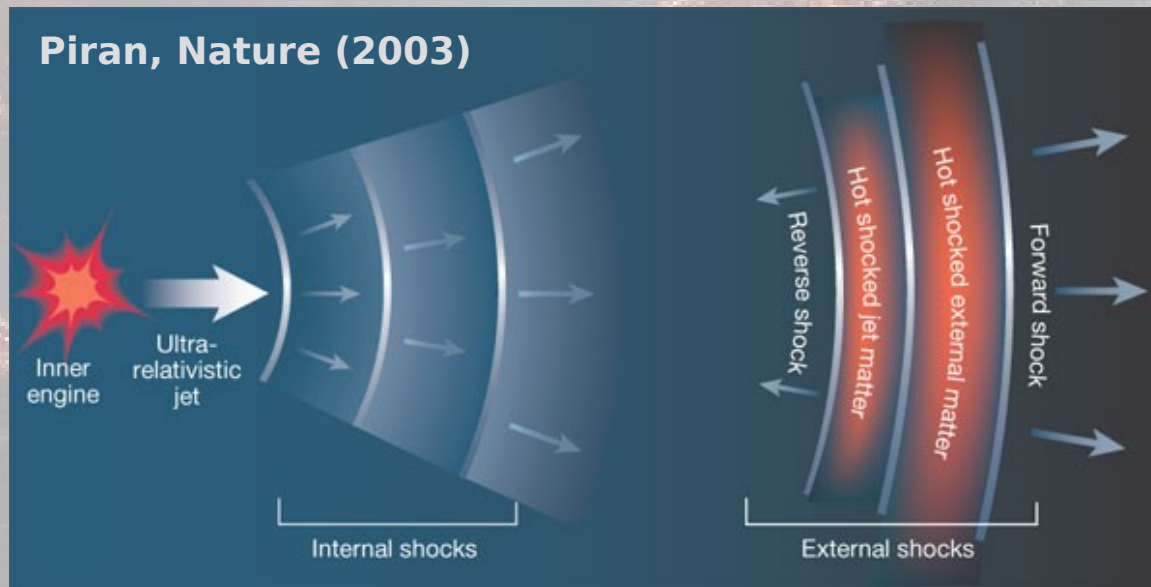
Природа гамма-всплесков



- Короткие гамма-всплески – слияние в двойной системе нейтронных звезд или в системе нейтронная звезда – черная дыра.
 - Подтверждение: наблюдение гравитационных волн от гамма-всплеска GRB 170817A / GW170817
 - LIGO Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017)
- Длинные гамма-всплески – коллапс ядра массивной звезды (остается гипотезой)

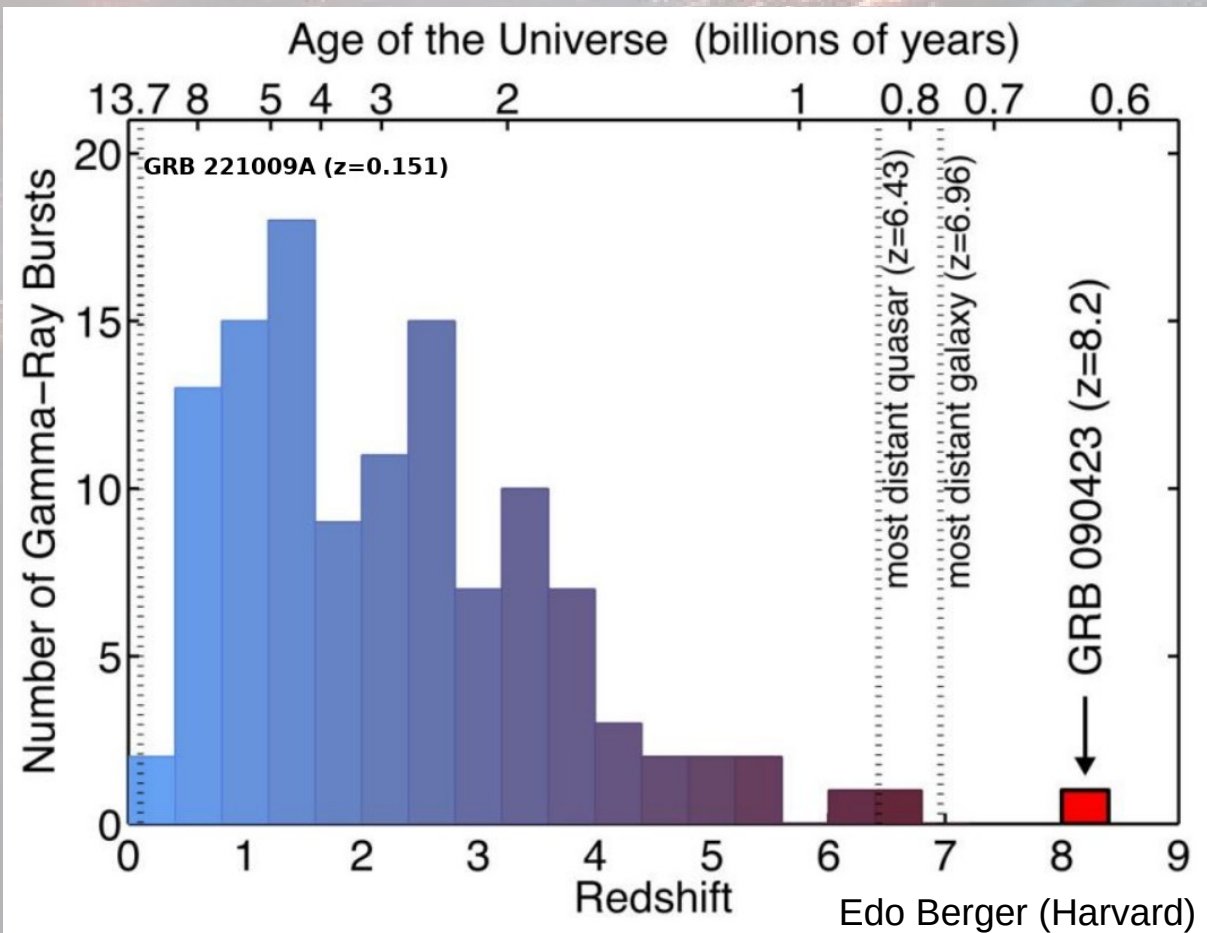
π.V Происхождение гамма-всплесков

Модель “огненного шара”



- первичная вспышка рождается в области внутренних ударных волн
- послесвечение – в области внешних ударных волн после столкновения джета с внешней материей

Расстояние до источников гамма-всплесков



GRB 20221009A: срочные телеграммы 09 октября 2022 г.



GCN Circular 32632

Subject Swift J1913.1+1946 a new bright hard X-ray and optical transient
Date 2022-10-09T14:39:22Z (a year ago)
From David Palmer at LANL <palmer@lanl.gov>

S. Dichiara (PSU), J.D. Gropp (PSU), J. A. Kennea (PSU),
N. P. M. Kuin (UCL-MSSL), A. Y. Lien (U Tampa),
F. E. Marshall (NASA/GSFC), A. Tohuvavohu (U Toronto) and
M. A. Williams (PSU) report on behalf of the Neil Gehrels Swift
Observatory Team:

At 2022-10-09 14:10:17 UT, the Swift Burst Alert Telescope (BAT) triggered and located the new transient Swift J1913.1+1946 (triggers=1126853 and 1126854). Swift slewed immediately to the location.

The BAT on-
RA, Dec 288
RA(J2000
Dec(J2000
with an unc
systematic
visible (le

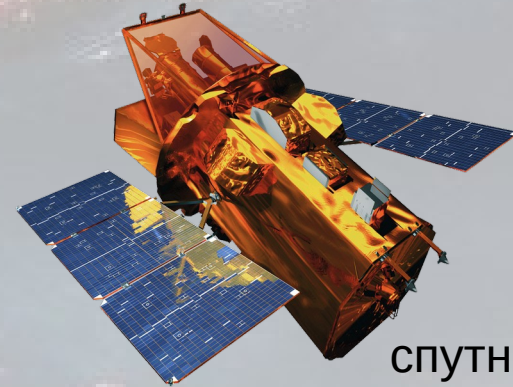
GCN Circular 32636

Subject GRB 221009A: Fermi GBM detection of an extraordinarily bright GRB
Date 2022-10-09T20:54:36Z (a year ago)
From Peter Veres at UAH <veresp@gmail.com>

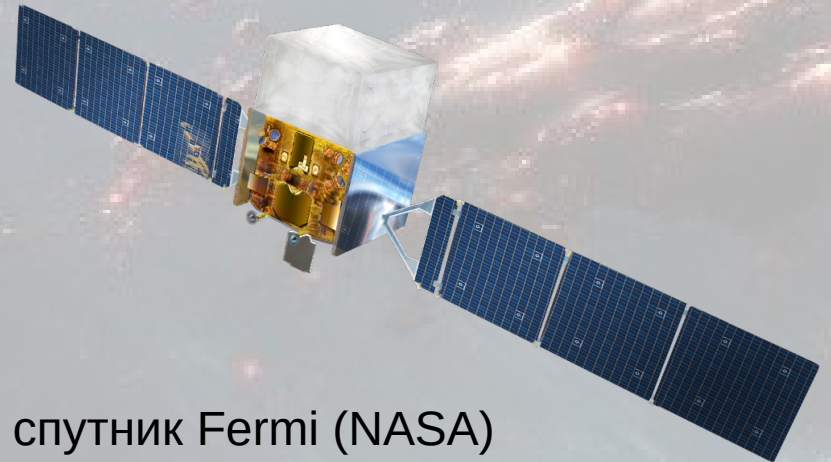
P. Veres (UAH), E. Burns (LSU), E. Bissaldi (Politecnico and INFN Bari), S. Lesage (UAH), O. Roberts (USRA)
report on behalf of the Fermi GBM Team:

"At 2022-10-09 13:16:59.000 UT on 9 October 2022, the Fermi Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) triggered and located GRB 221009A (trigger 687014224 / 221009553).

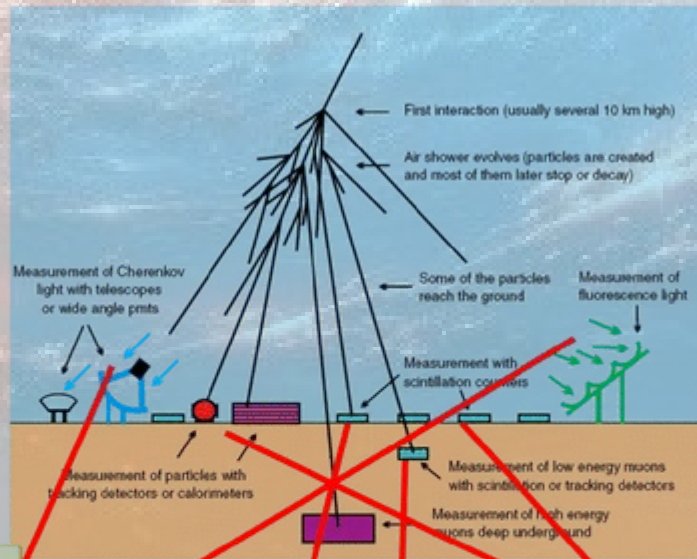
This event, if it is a GRB, it is the brightest among the GBM detected GRBs. If it is not a GRB then it is a rare transient event. Follow-up across all wavelengths is encouraged.



спутник Swift (NASA)



спутник Fermi (NASA)



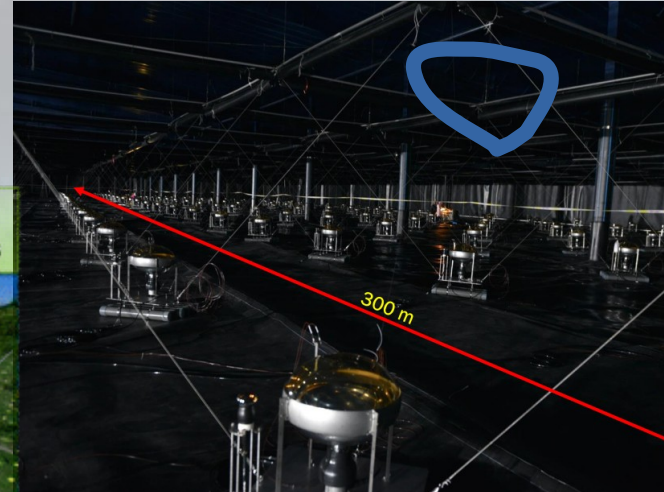
WFCTA:
12 telescopes
1024 pixels each



KM2A:
5195 EDs
1171 MDs



WCDA:
3000 cells

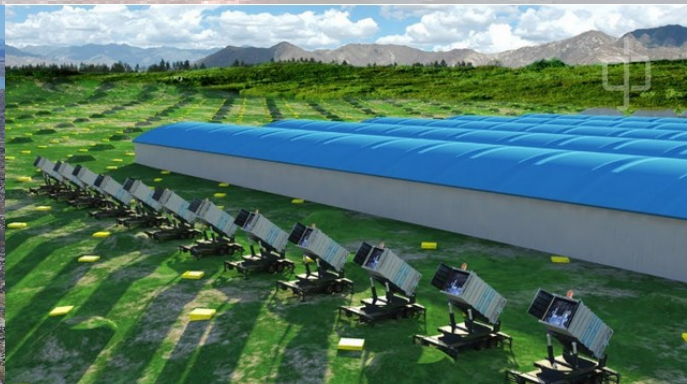


Обсерватория LHAASO

Даоченг, Китай, 4400 метров над уровнем моря
Начала работу в 2019 году



Обсерватория LHAASO, фотоны с энергией выше 10 ТэВ



GCN Circular 32677

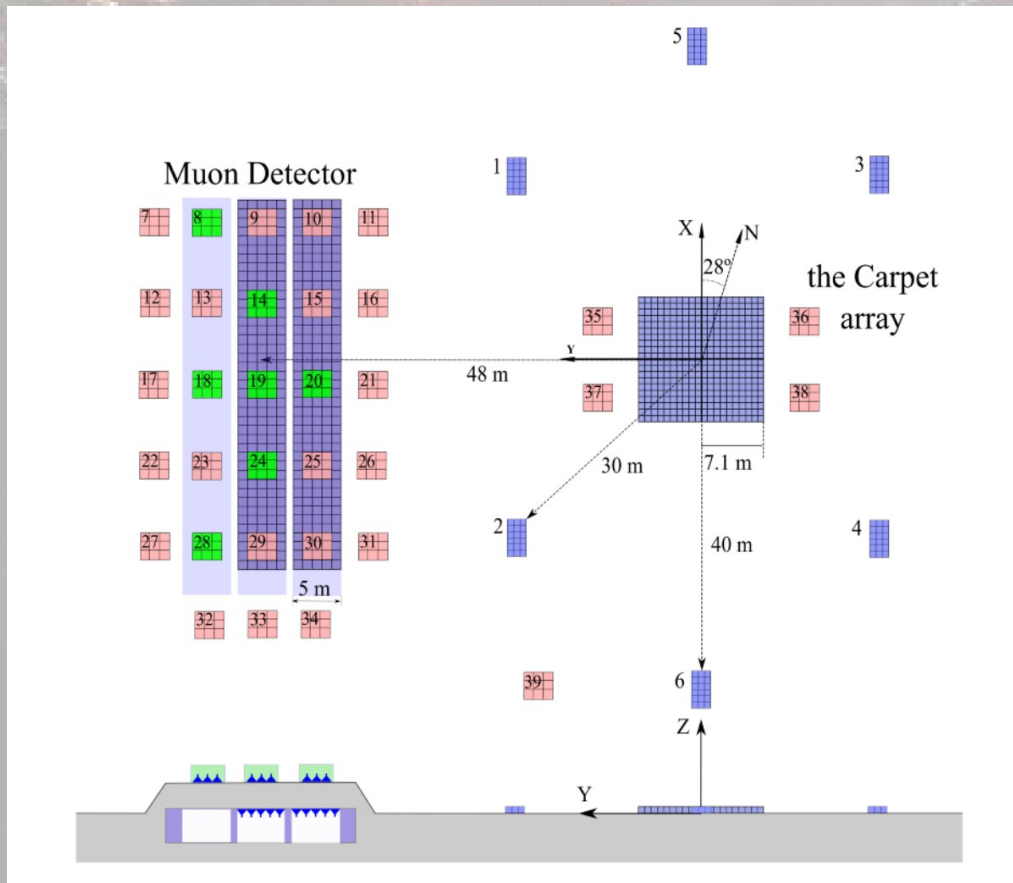
Subject LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV
Date 2022-10-11T09:21:54Z (a year ago)
From Judith Racusin at GSFC <judith.racusin@nasa.gov>

We report the observation of GRB 221009A, which was detected by Swift (Kennea et al. GCN #32635), Fermi-GBM (Veres et al. GCN #32636, Lesage et al. GCN #32642), Fermi-LAT (Bissaldi et al. GCN #32637), IPN (Svinkin et al. GCN #32641) and so on.

GRB 221009A is detected by LHAASO-WCDA at energy above 500 GeV, centered at RA = 288.3, Dec = 19.7 within 2000 seconds after T₀, with the significance above 100 s.d., and is observed as well by LHAASO-KM2A with the significance about 10 s.d., where the energy of the highest photon reaches 18 TeV.

This represents the first detection of photons above 10 TeV from GRBs.

Установка Ковер Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН



Мюонный детектор площадью 410 м²:

- Мюонная проблема
- Состав
- Гамма-астрономия

пос. Нейтрино, Эльбрусский район, Кабардино-Балкарская республика

Установка Ковер-2 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН



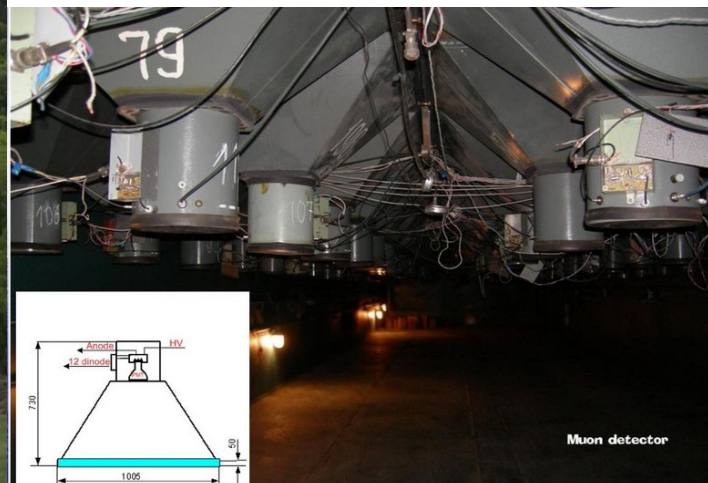
Событие с энергией 251 ТэВ!

Swift J1913.1+1946/GRB 221009A: detection of a 250-TeV photon-like air shower by Carpet-2

ATel #15669 on 12 Oct 2022; 13:56 UT

Credential Certification: [Sergey Troitsky \(st@ms2.inr.ac.ru\)](mailto:st@ms2.inr.ac.ru)

In a follow-up analysis of Carpet-2 data, we found an air shower consistent with being caused by a photon of 251 TeV energy, giving zero hits in the 175 m² muon detector. This event was detected at 14:32:35 UT, that is 1338 sec after the SWIFT trigger and 4536 sec after the GBM trigger. The reconstructed arrival direction is RA=289.51 deg, DEC=18.44 deg, that is 1.78 deg from the transient direction, well within the Carpet-2 angular resolution of 4.7 deg (90% CL).

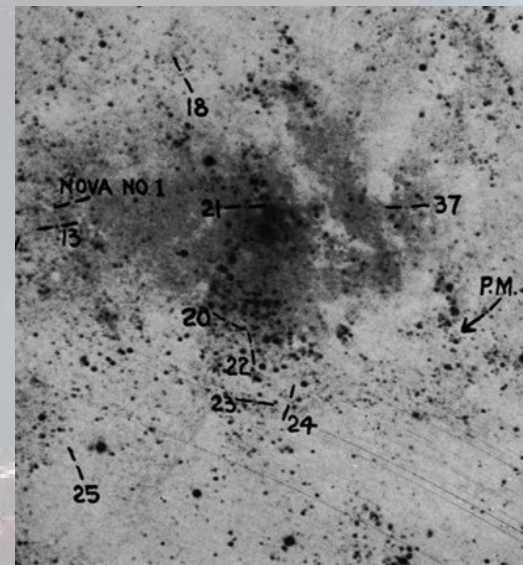


Ковер, Phys.Rev.D
111 (2025)

пос. Нейтрино,
Кабардино-Балкарская
Республика

Закон Хаббла

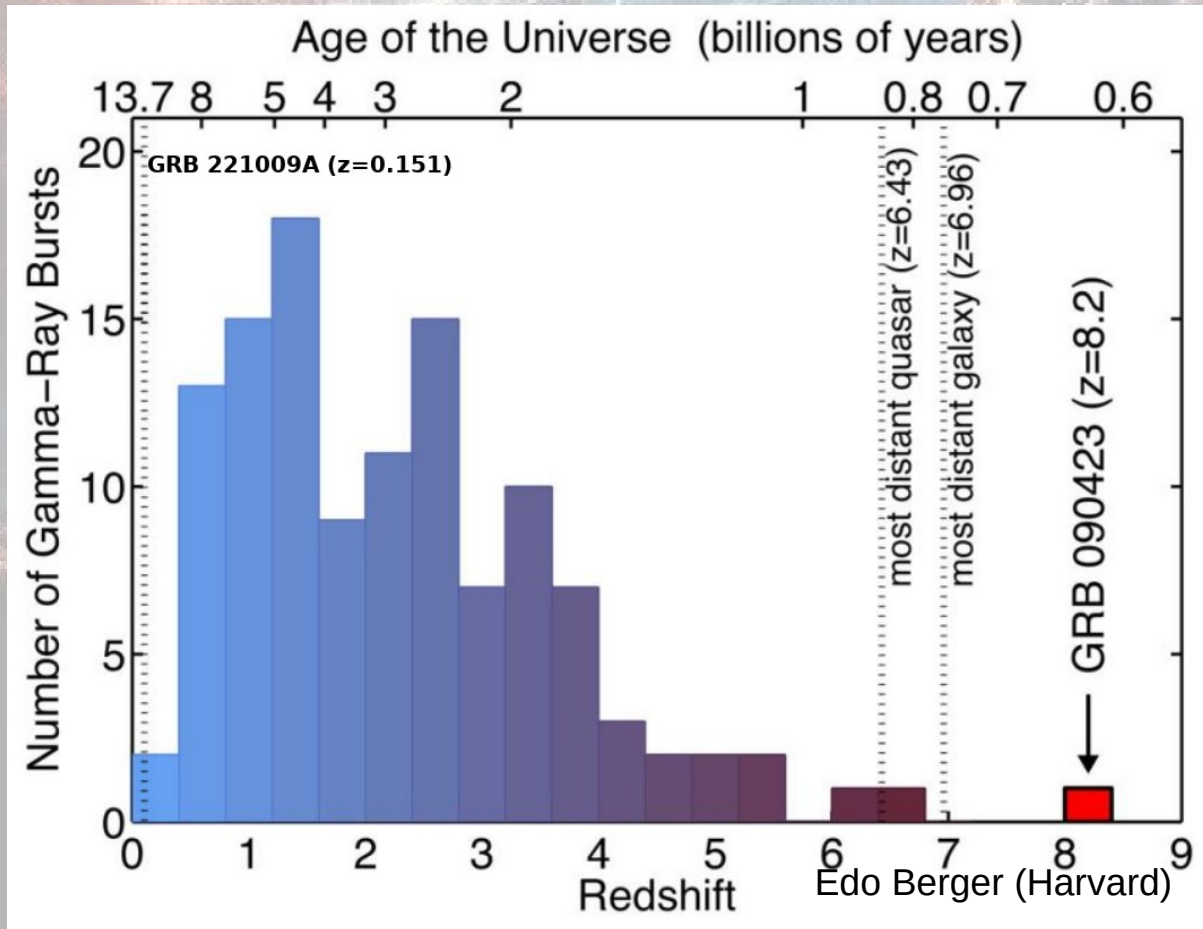
- Расстояние до объекта прямо пропорционально красному смещению
- Хаббл измерил расстояние по светимости переменных звезд.
Показал, что М33 – галактика, а не объект в составе нашей Галактики



Эдвин Хаббл и снимок М33 на 2.5м телескопе, 1923-1929

GRB 221009A:

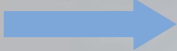
$z = 0.151 \Rightarrow 629$ Мрс или 2.05 млрд световых лет



GRB 221009A – относительно близкий
гамма-всплеск

Понятие: космологическое красное смещение



- расширение Вселенной  увеличение длины волны фотонов в процессе распространения от источника к наблюдателю
- Красное смещение z , $\lambda \rightarrow (1+z) \lambda$
- Эффект общей теории относительности



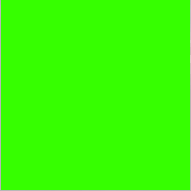

Вопрос про красное смещение

- На Земле растет дерево.
- Какого цвета летняя листва для наблюдателя из материнской галактики GRB 221009A?



Вопрос про красное смещение

- На Земле растет дерево.
- Какого цвета летняя листва для наблюдателя из материнской галактики GRB 221009A?


$$\lambda = 520 \text{ нм} \rightarrow \lambda' = (1+z) \lambda = 598 \text{ нм}$$


Вопрос про красное смещение


$$\lambda = 520 \text{ нм} \rightarrow \lambda' = (1+z) \lambda = 598 \text{ нм}$$




$$\lambda \rightarrow (1+z) \lambda$$



Вопрос про красное смещение


$$\lambda = 520 \text{ нм} \rightarrow \lambda' = (1+z) \lambda = 598 \text{ нм}$$

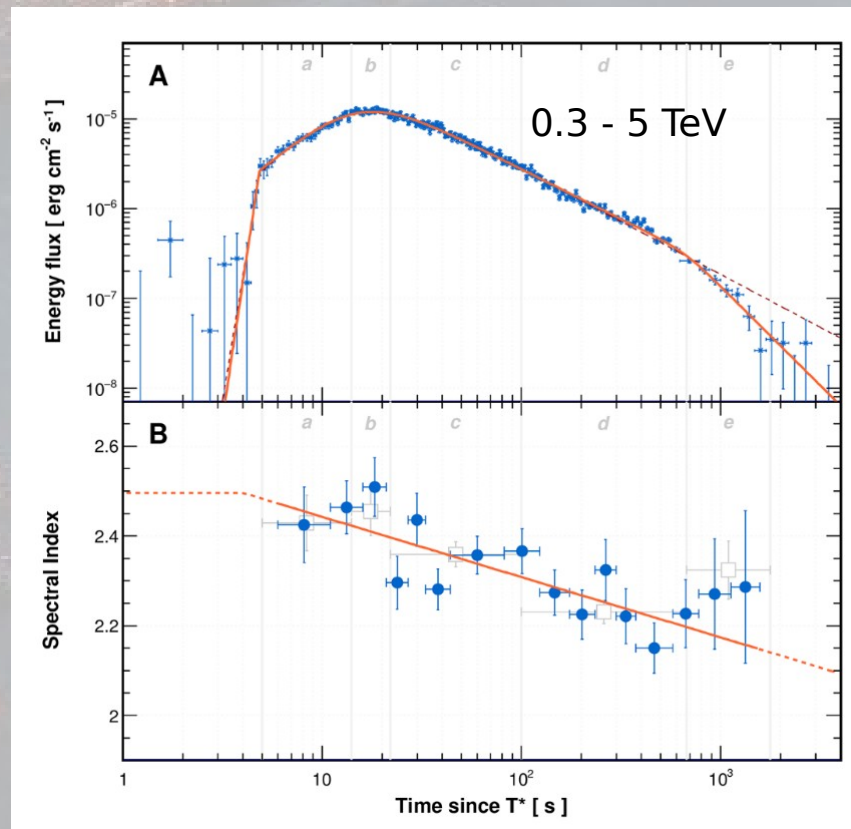
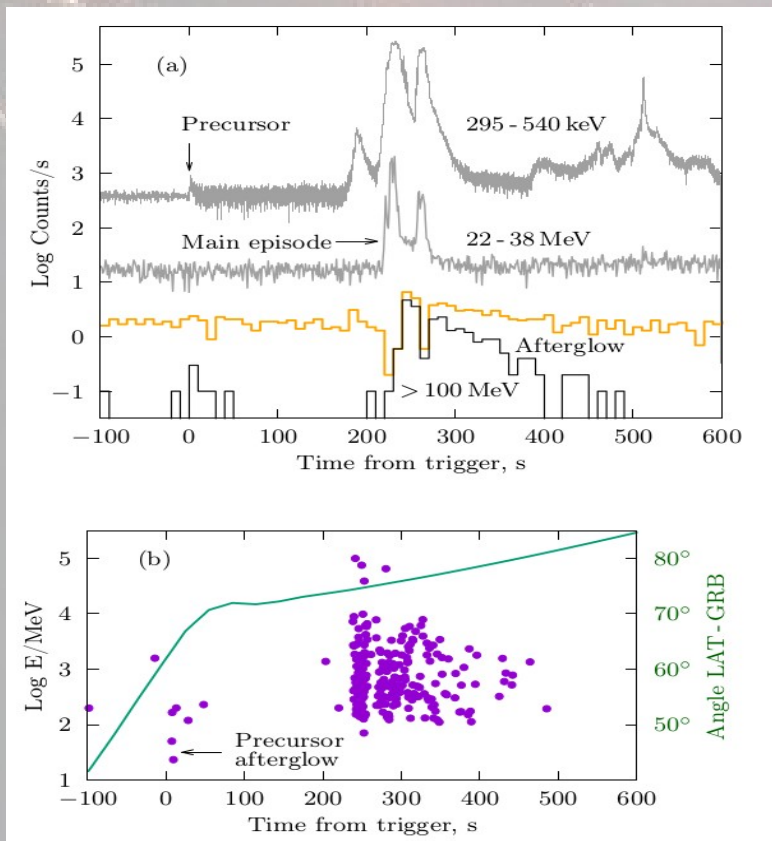



$$\lambda \rightarrow (1+z) \lambda$$

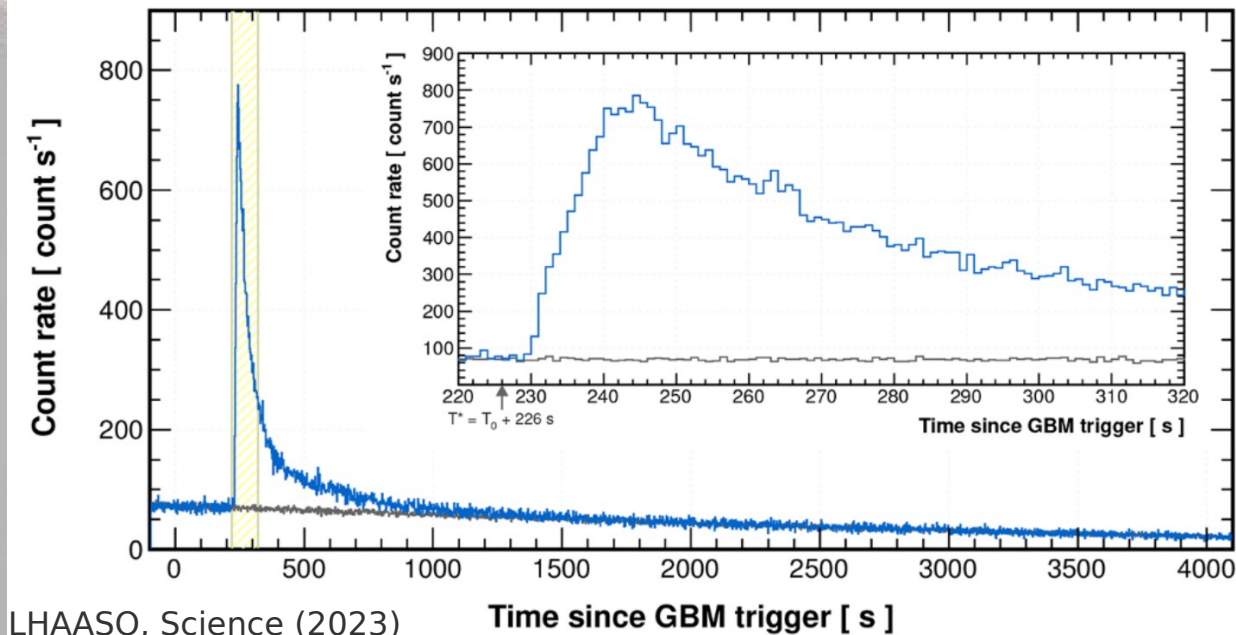


- Но: деревья появились на Земле только 400 млн лет назад

Излучение гамма-всплеска GRB 221009A

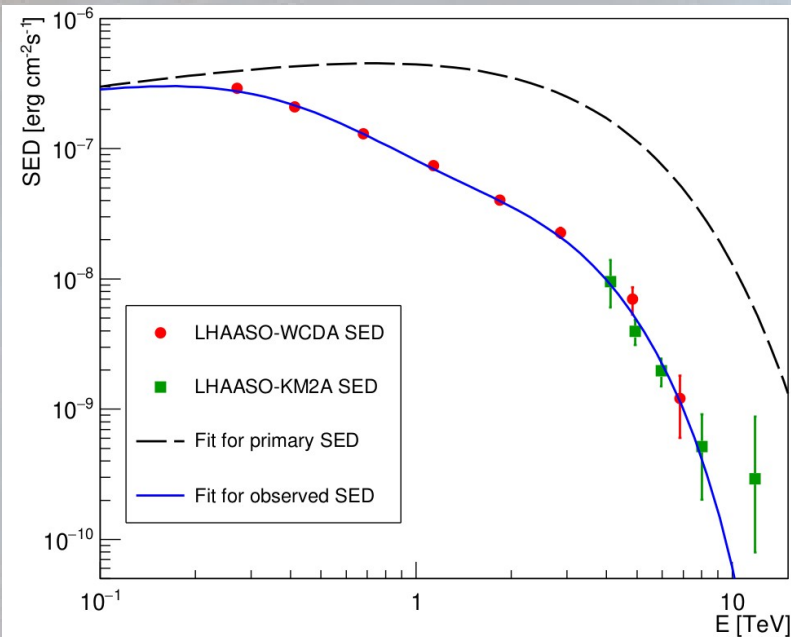


GRB 221009A: результаты LHAASO



LHAASO, Science (2023)

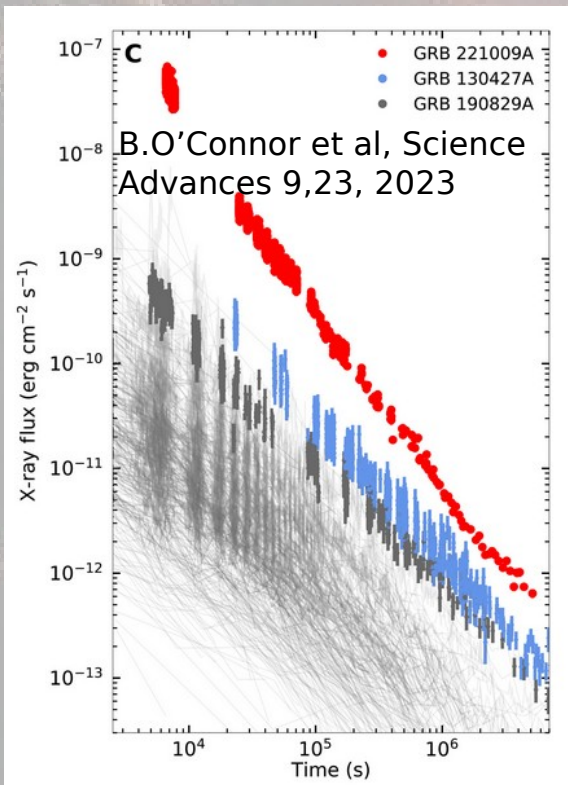
Time since GBM trigger [s]



300 – 900 s

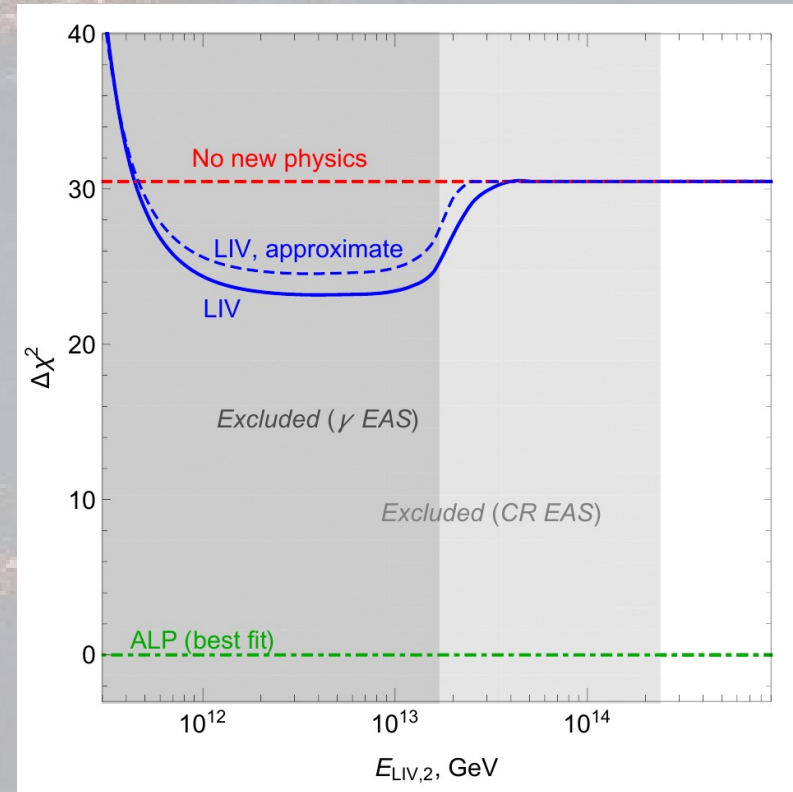
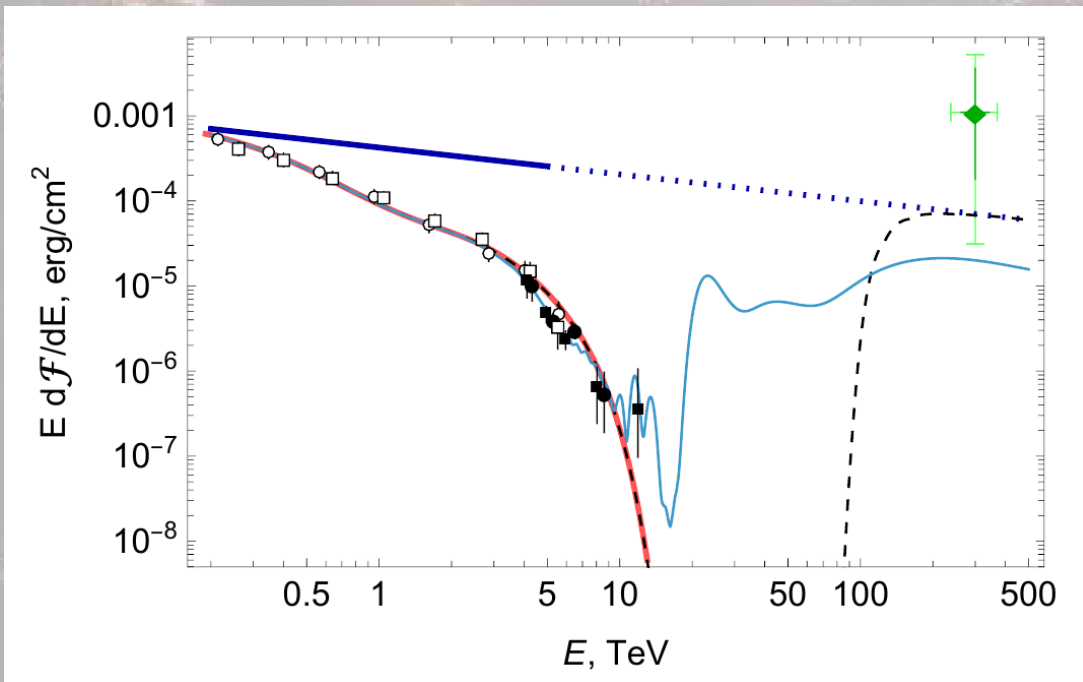
Впервые фотоны с энергией 10 ТэВ от гамма-всплеска

TeV-излучение от гамма-всплеска GRB 221009A



- Наиболее яркий GRB за всю историю наблюдений
- Оптическая толщина для $z=0.151$, $E=18$ ТэВ – 18.3 по отношению к рождению пар на фоновом излучении. Такой фотон – редкое событие.
- 251 ТэВ от $z=0.151$ невозможно объяснить в рамках стандартной физики.
 - осцилляции в аксионоподобные частицы
Troitsky, 2022
 - нарушение Лоренц-инвариантности
Zhu & Ma, 2022
 - другие сценарии новой физики

Интерпретация GRB 221009A в сценариях новой физики



Нерешенные проблемы астрофизики частиц

- п.I Источники нейтрино высоких энергий
- п.II Происхождение космических лучей предельно высоких энергий
- п.III Величина и происхождение внегалактического магнитного поля
- п.IV Избыток мюонов, наблюдаемых в ШАЛ
- п.V Происхождение гамма-всплесков
- п.VI Новая физика в наблюдаемых астрофизических явлениях

**Спасибо за
внимание!**



Запасные слайды

