

Событие сверхвысокой энергии КМЗ-230213А как космогенное нейтрино

По материалам [arXiv:2509.09590](https://arxiv.org/abs/2509.09590)

Михаил Кузнецов
ИЯИ РАН



Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 11.03.2026

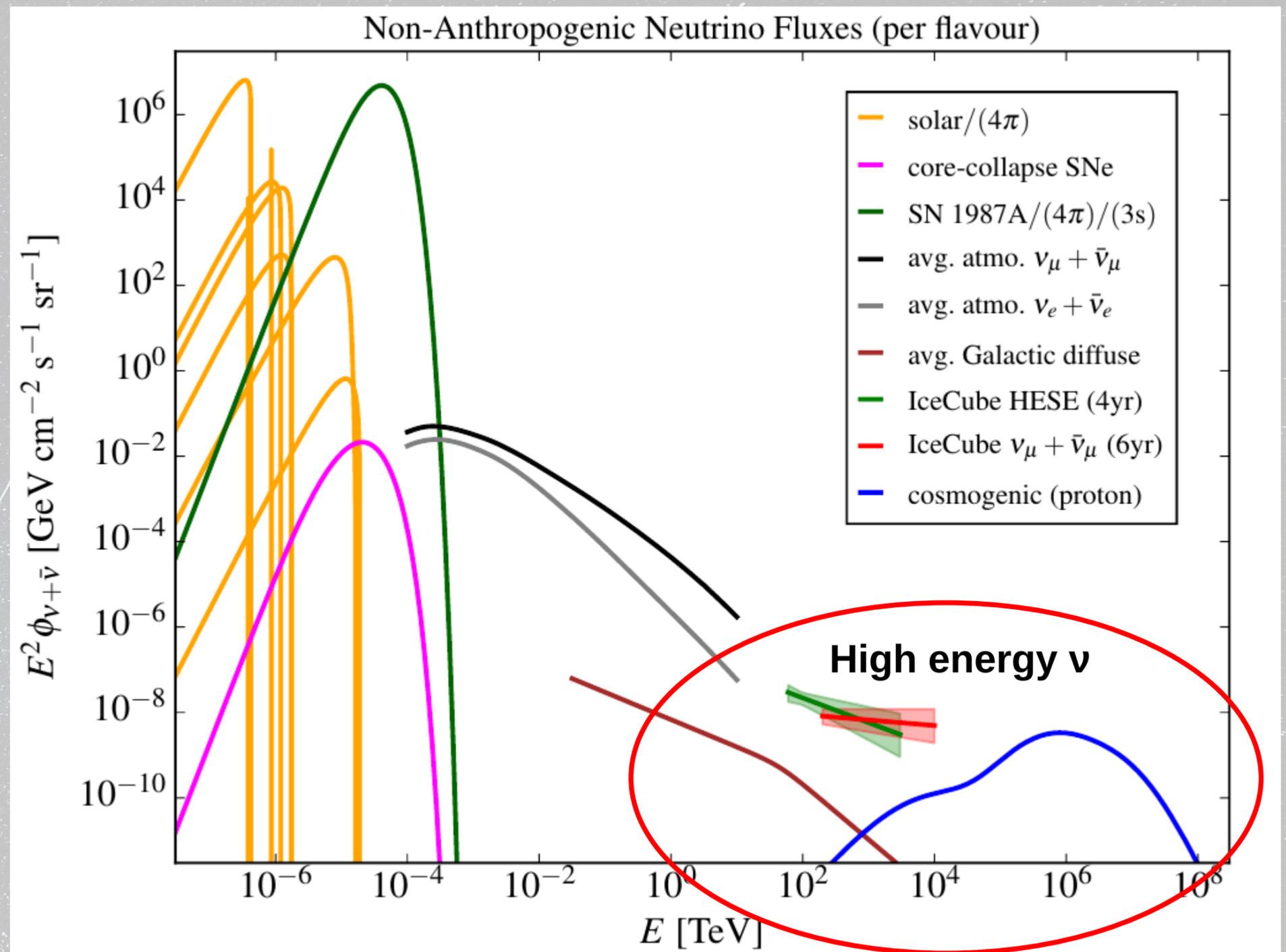
План

По материалам arXiv:2509.09590

- Космические нейтрино высоких энергий:
 - Наблюдение
 - Свойства
- Событие KM3-230213A как нейтрино с рекордной энергией
 - Параметры
 - Возможное происхождение из источника: галактическое, внегалактическое
- Космогенные нейтрино
 - KM3-230213A как космогенное нейтрино
 - Традиционная и минимальная модели
 - Совместимость с данными разных нейтринных телескопов

Космические нейтрино

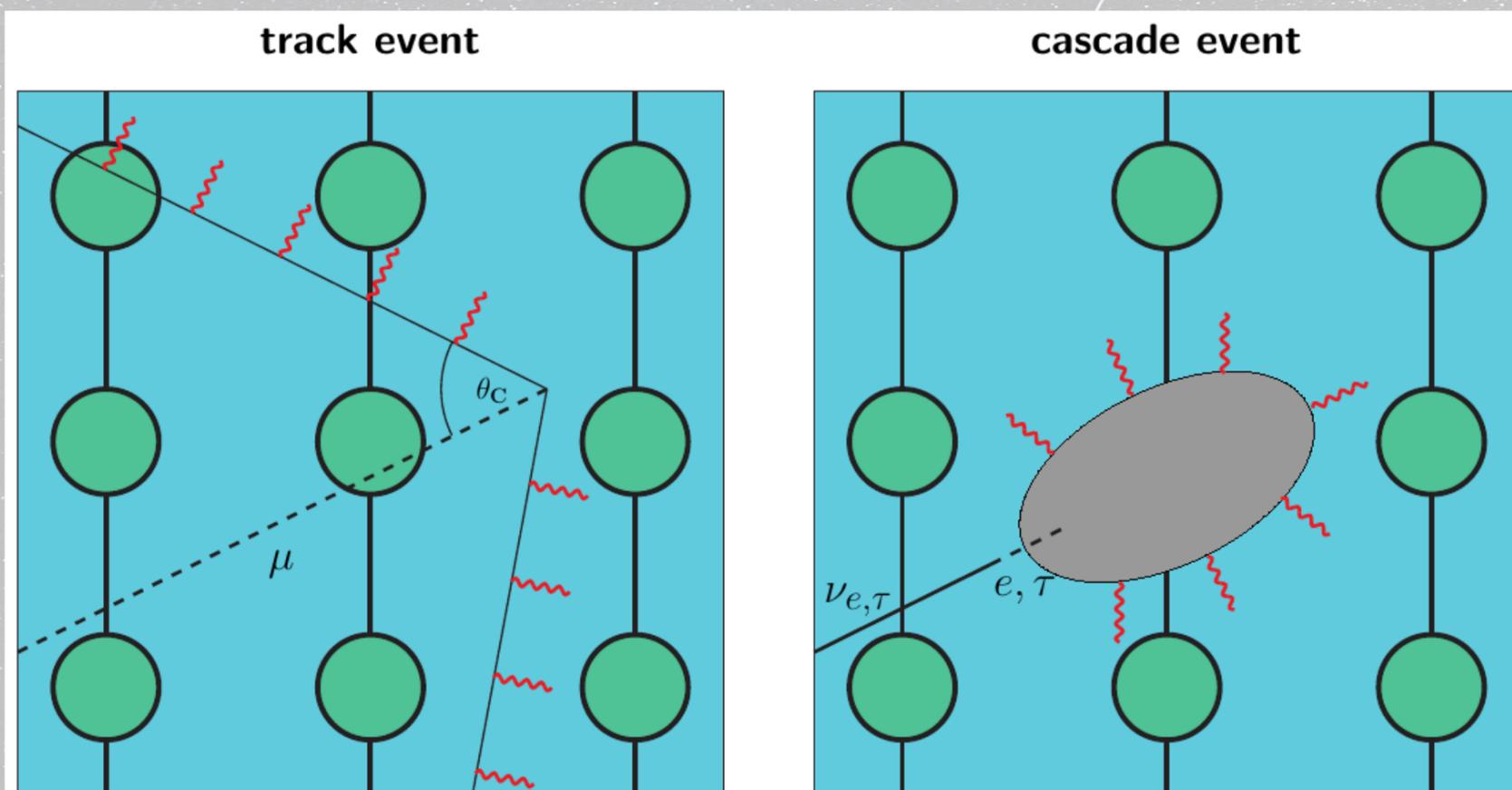
- **Солнечные** ($E \lesssim 10$ МэВ)
- **От близких сверхновых: SN1987A** ($E \lesssim 50$ МэВ)
- **Диффузный поток от далеких сверхновых:** пока не наблюдался
- **Атмосферные:** взаимодействие космических лучей с ядрами атмосферы (1 ГэВ $\lesssim E \lesssim 100$ ТэВ)
- **Астрофизические высоких энергий:** блазары, галактические источники, возможно некоторые другие классы (1 ТэВ $\lesssim E \lesssim 10$ ПэВ)
- **Космогенные:** взаимодействие космических лучей ультравысоких энергий с космическим фоновым излучением (1 ПэВ $\lesssim E \lesssim 10$ ЭэВ)
- **Реликтовые:** Большой взрыв, не наблюдались ($0.01 \lesssim E \lesssim 10$ мэВ)



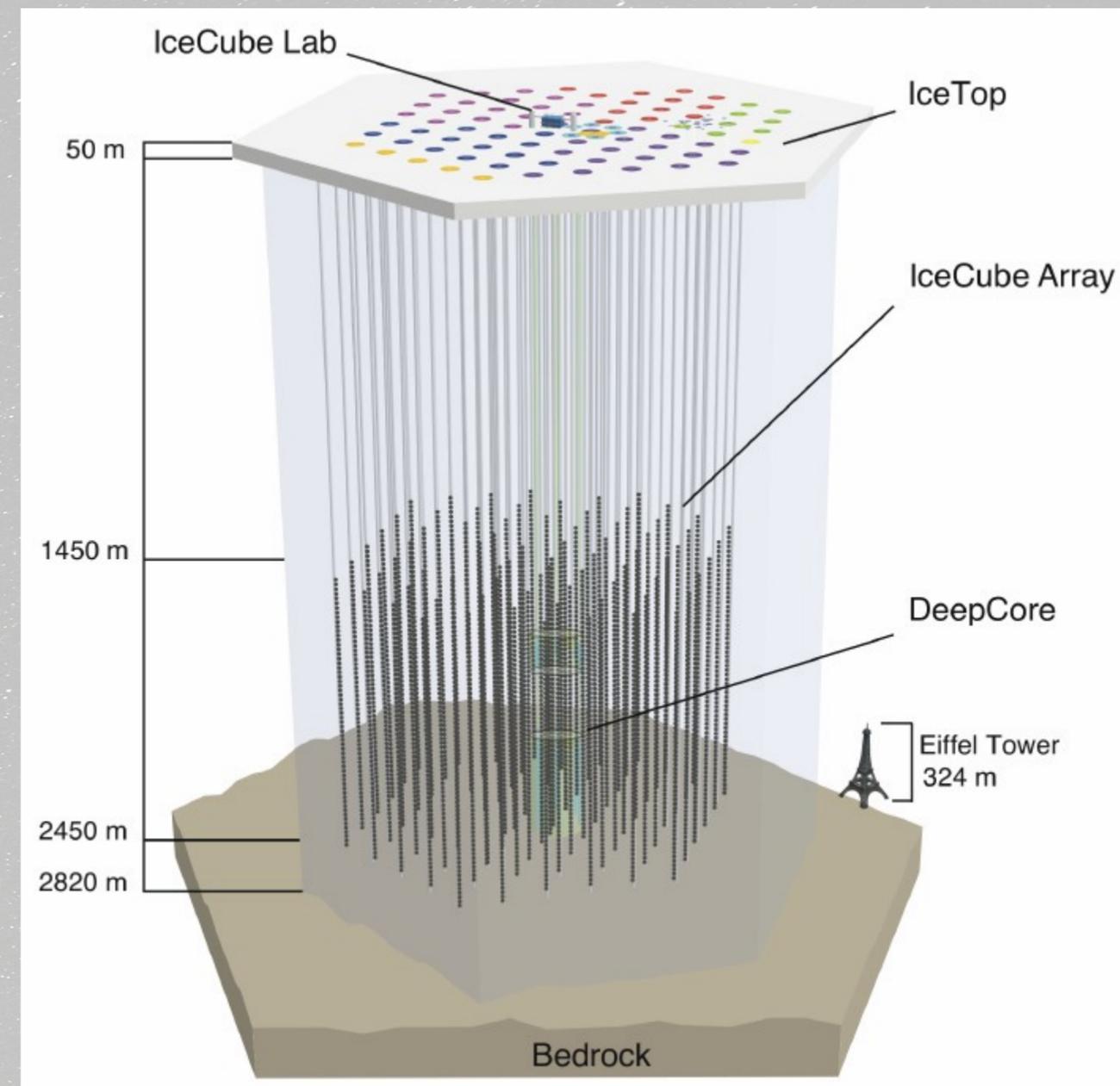
credit:M.Ahlers

Космические нейтрино высоких энергий: наблюдение

- Поток очень мал: $F(E > 1 \text{ ПэВ}) \sim 10^{-5} \text{ год}^{-1} \text{ см}^{-2}$
 - с учетом малости сечения число событий: $dN/dt = 1 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-3}$
- Нейтрино взаимодействует с ядром среды, рождая заряженный лептон (электрон, мюон или тау) и адронный каскад (X):
 - $\nu_l + q \rightarrow l + X$ (заряженный ток: CC)
 - $\bar{\nu}_l + q \rightarrow \bar{\nu}_l + X$ (нейтральный ток: NC)
 - $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \dots$ (резонанс Глэшоу, $E_\nu \gtrsim 1 \text{ ПэВ}$)
- Релятивистский лептон и адронный каскад испускают черенковское излучение в среде

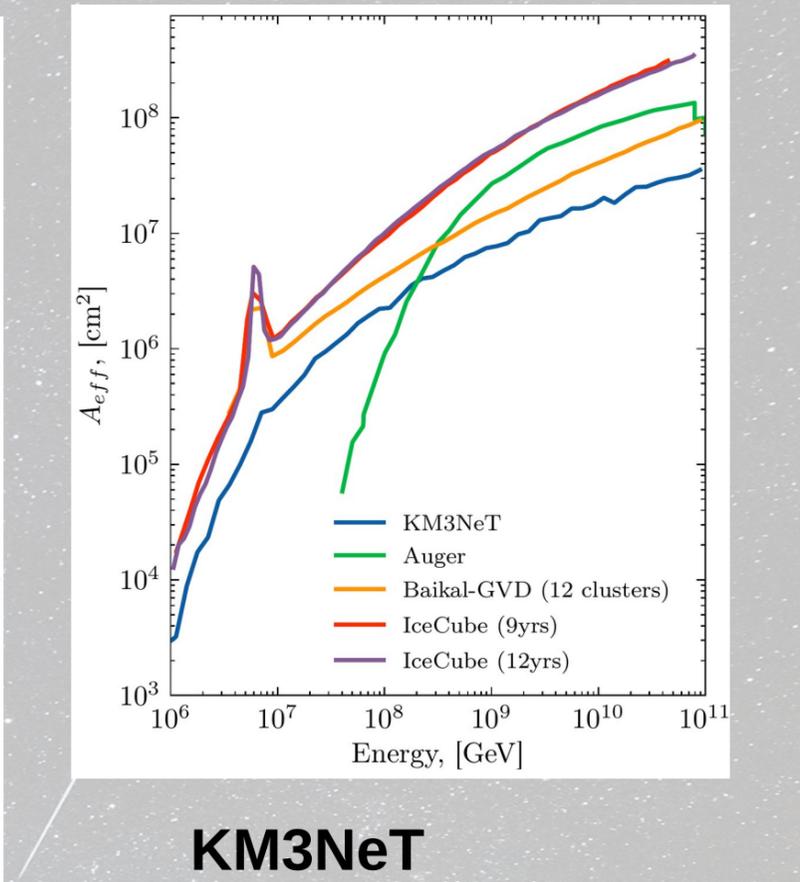
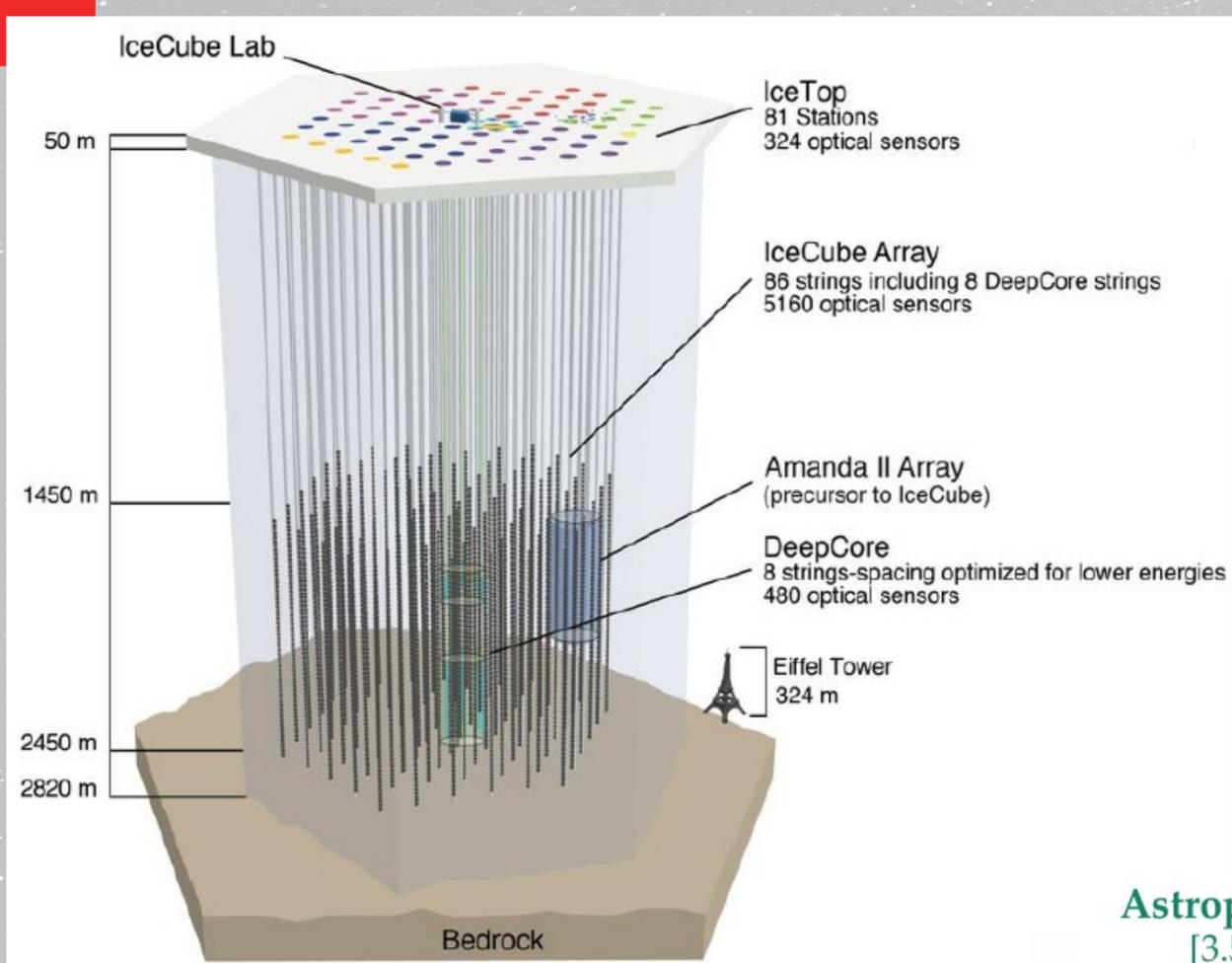


credit: M. Ahlers



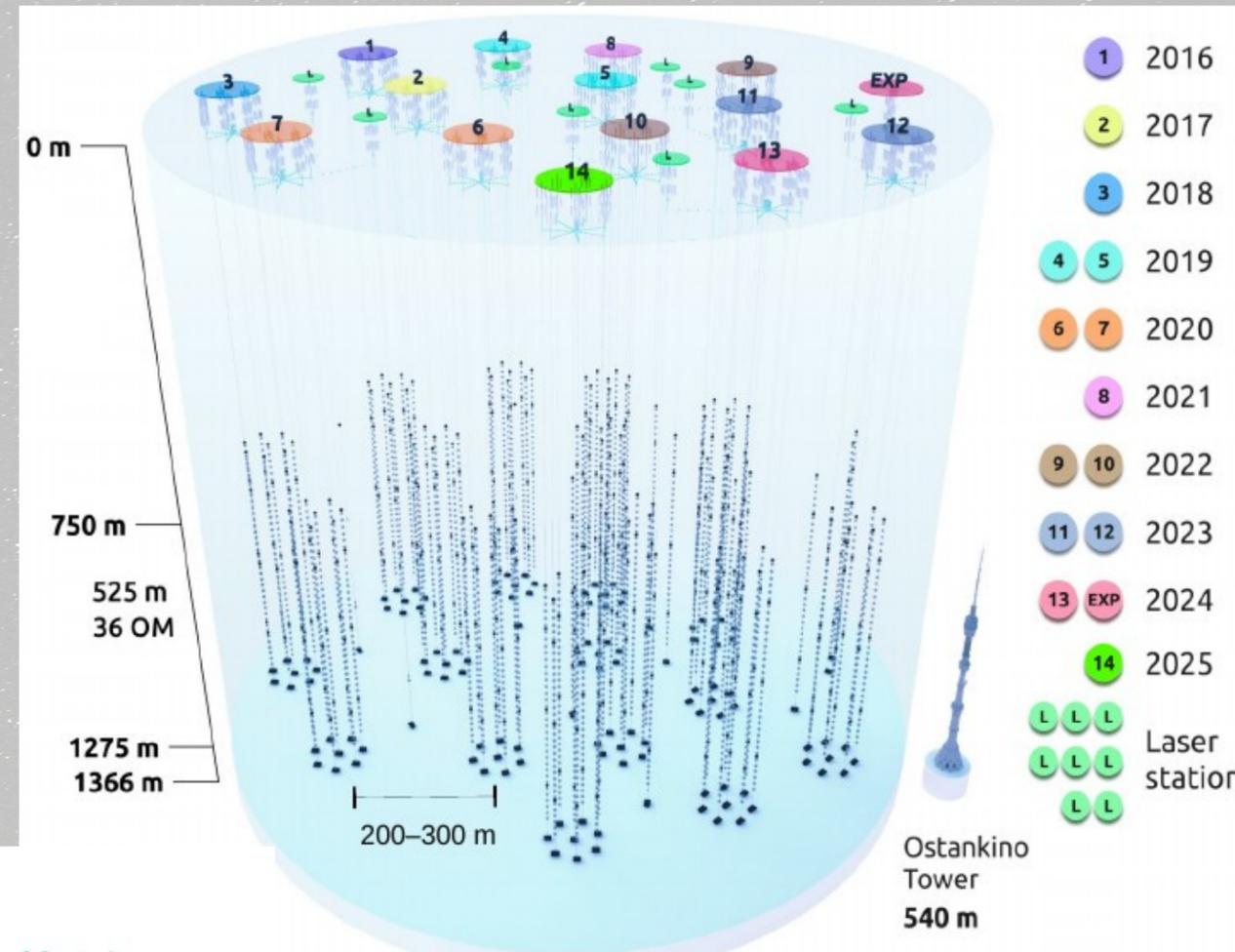
- Это излучение детектируется оптическими модулями распределенными в среде (вода или лед)
- Для получения значимой статистики событий полный объем детектора должен быть очень большим: $\sim 1 \text{ км}^3$

Космические нейтрино высоких энергий: основные эксперименты



Astroparticle Research Mediterranean Sea
[3.5 km deep, Sicily, running since 2015]

Final configuration: > 1 km³, 230 strings, 4100+ optical modules • Today: 33 strings

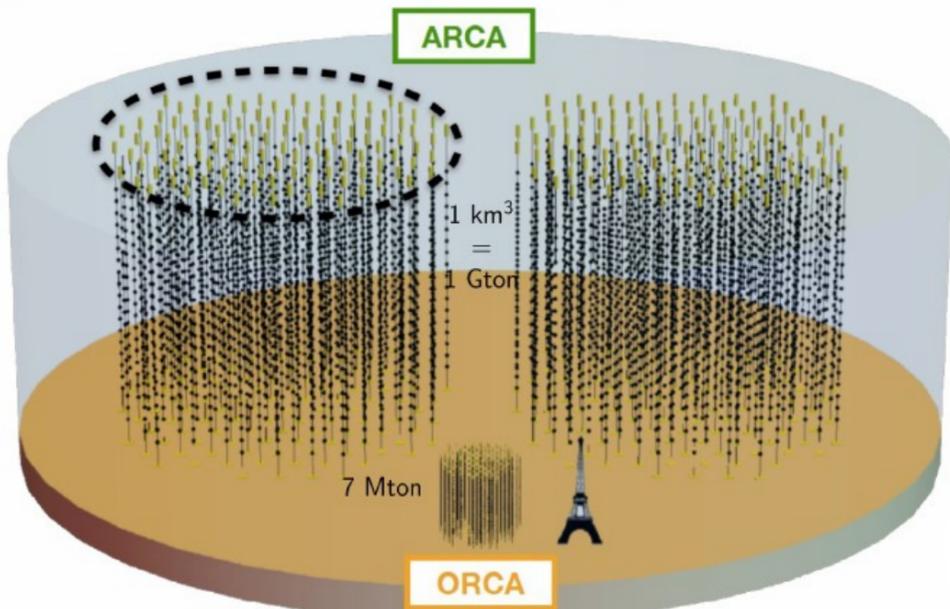


Baikal-GVD

- Байкал
- Объем~ 0.7 км³ (текущий)
- Глубина 1.4 км
- Строительство продолжается с 2016
- Впервые наблюдал астрофизические нейтрино в 2025

IceCube

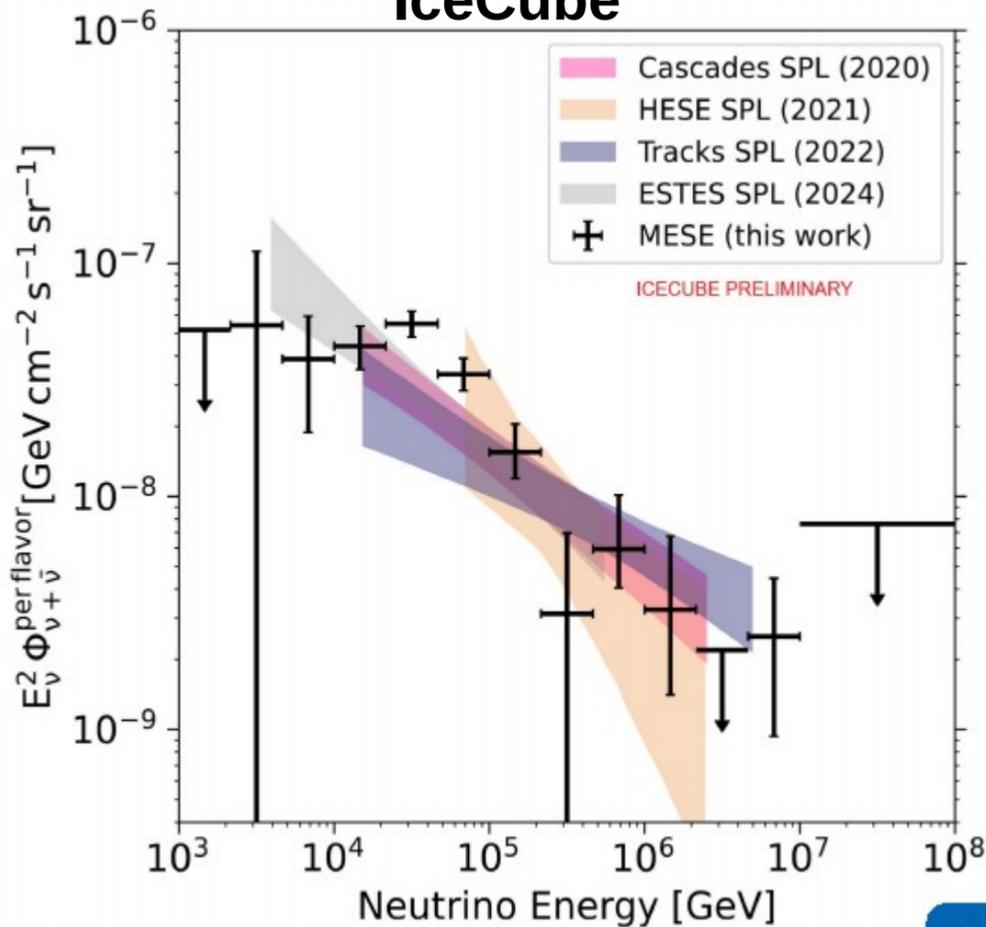
- Южный полюс
- Объем~ 1 км³
- Глубина 1.5-2.5 км
- Строительство завершено в 2011
- Впервые наблюдал астрофизические нейтрино в 2013



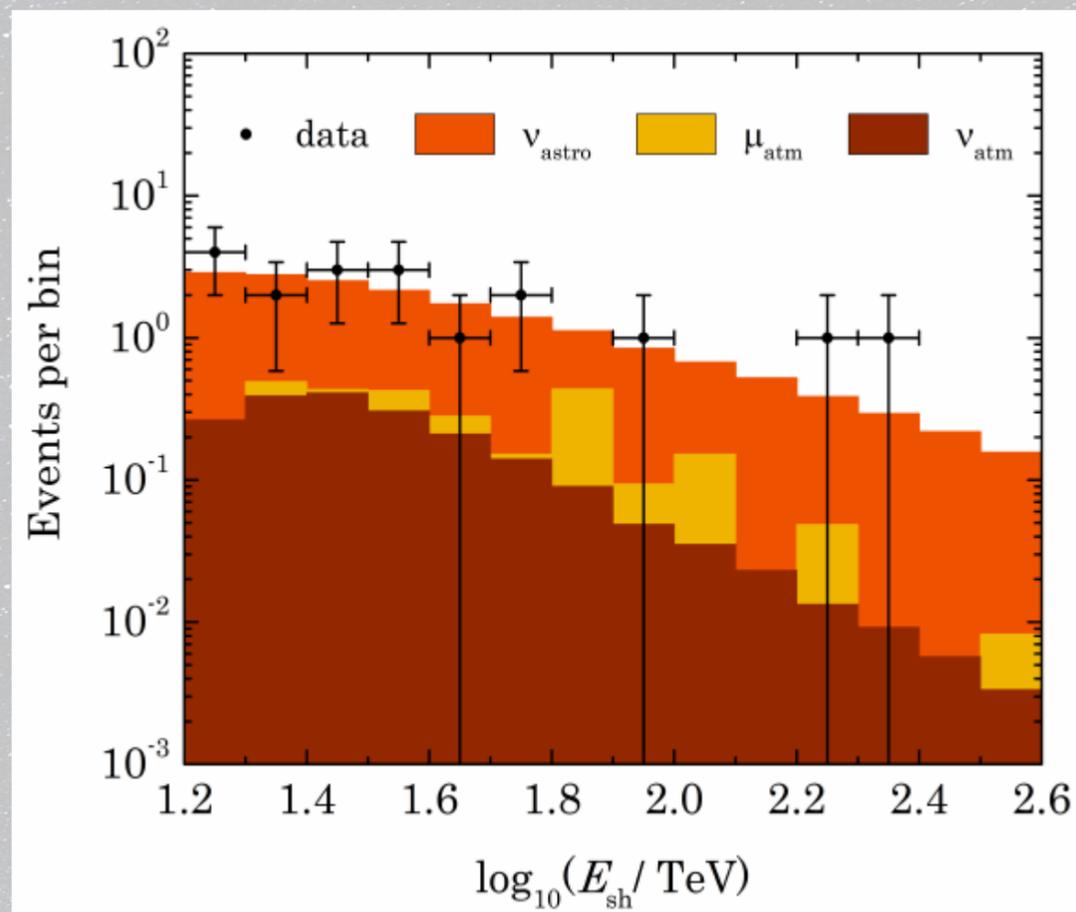
Космические нейтрино высоких энергий: диффузный спектр

- Первое наблюдение астрофизического ν при $E \gtrsim 1$ ПэВ, где фон атмосферных ν пренебрежим
- При меньших энергиях можно выделить сигнал из под фона используя распределение по зенитному углу и ожидаемый спектр фона

IceCube



Baikal-GVD

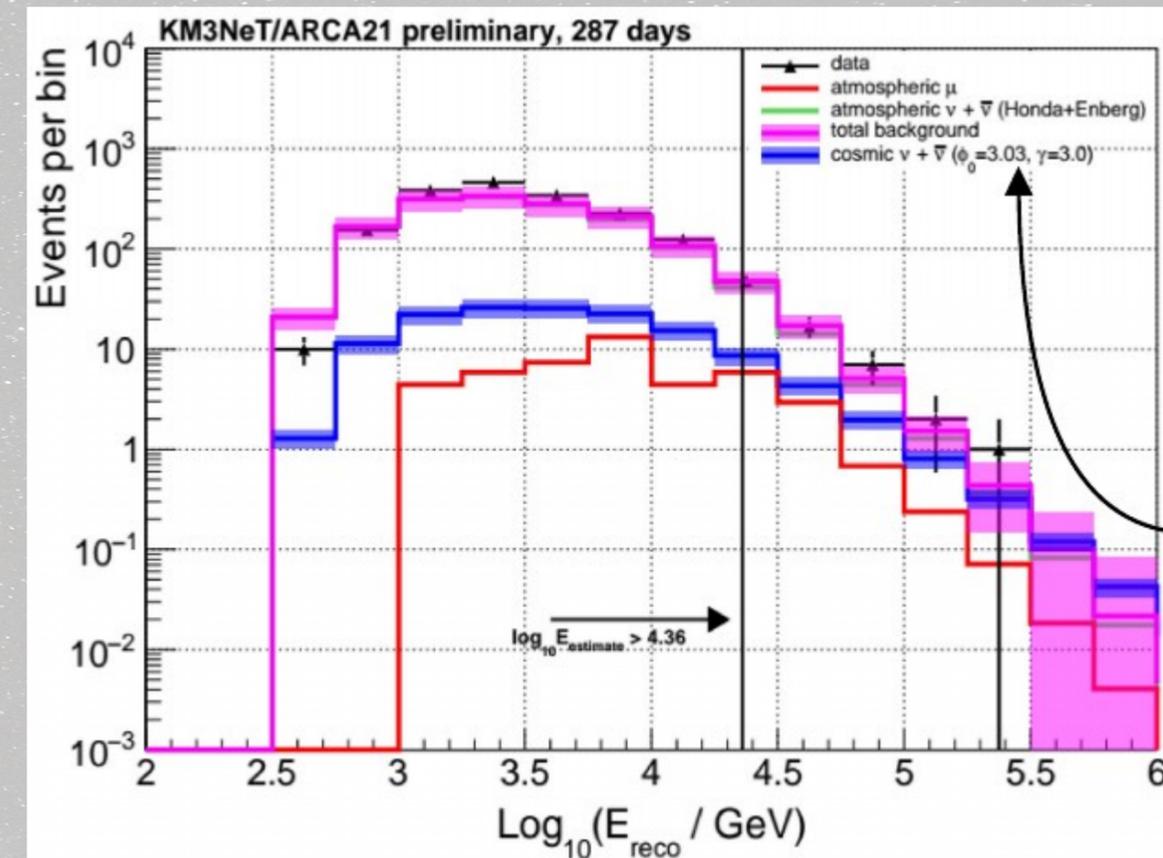


- В таком подходе про отдельное ν с $E < 1$ ПэВ нельзя точно сказать атмосферное оно или астрофизическое
- Но можно построить диффузный астрофизический спектр и искать отдельные источники на небе

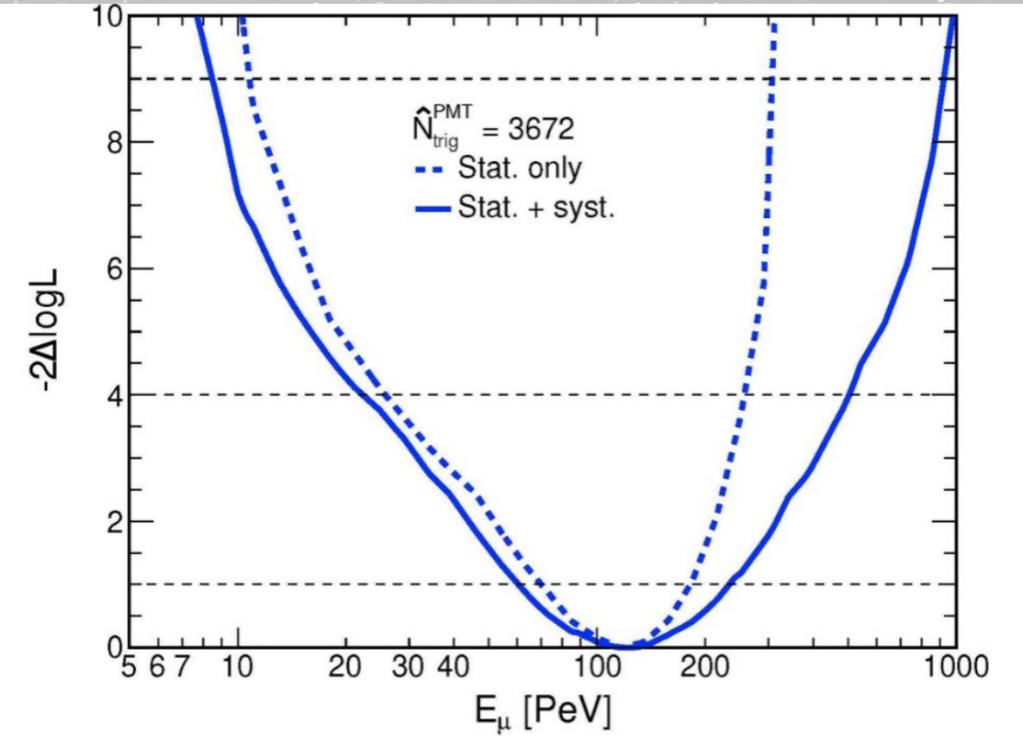
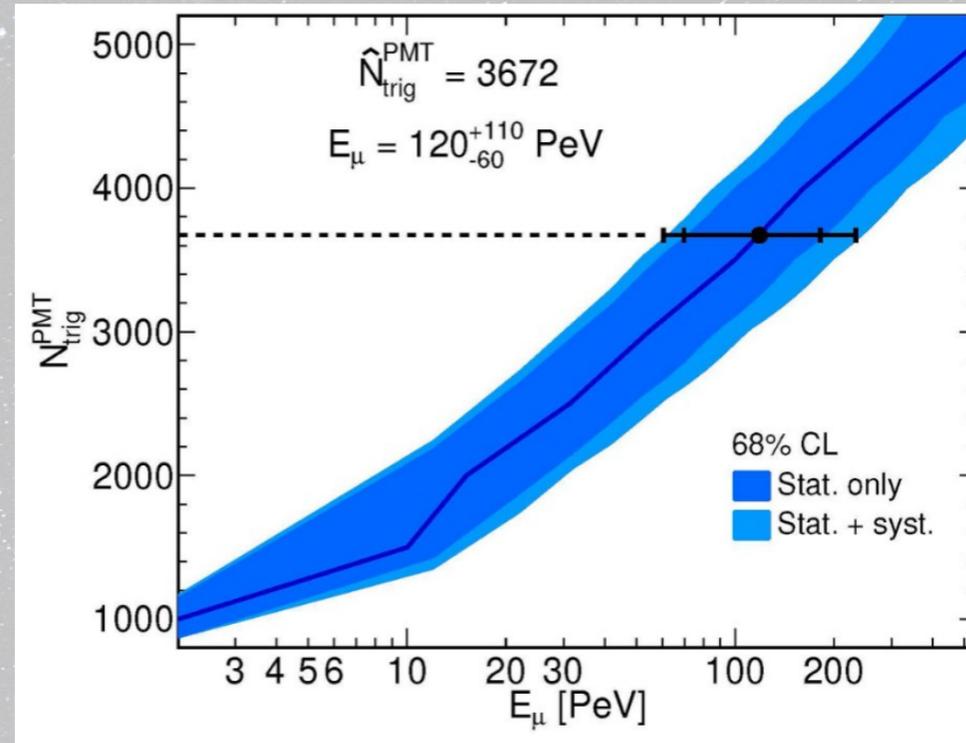
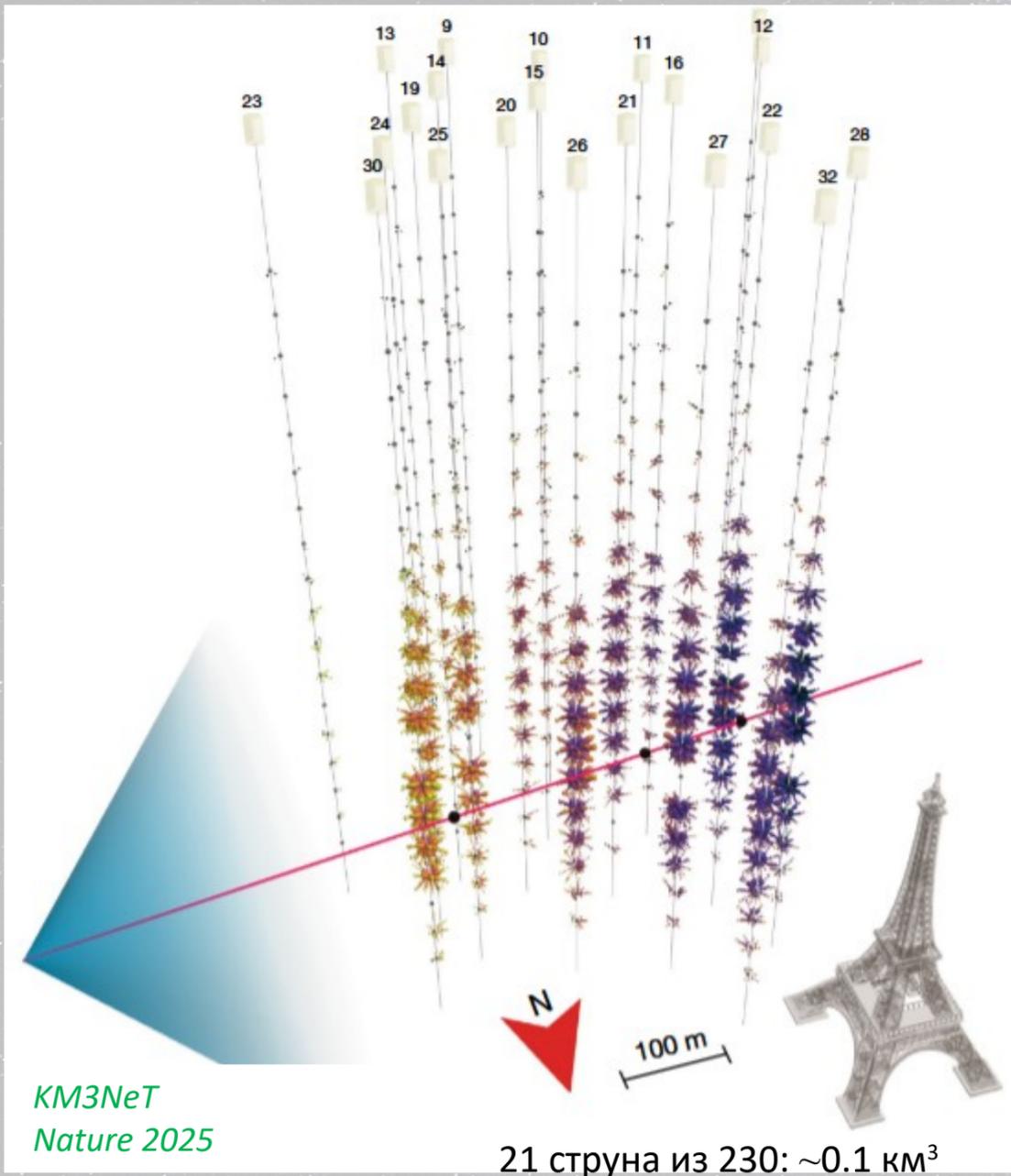
Добавить ссылки!

- KM3NeT пока не наблюдал значимого диффузного потока: недостаточно экспозиции

KM3NeT



Самая высокая энергия мюона/нейтрино: KM3230213A



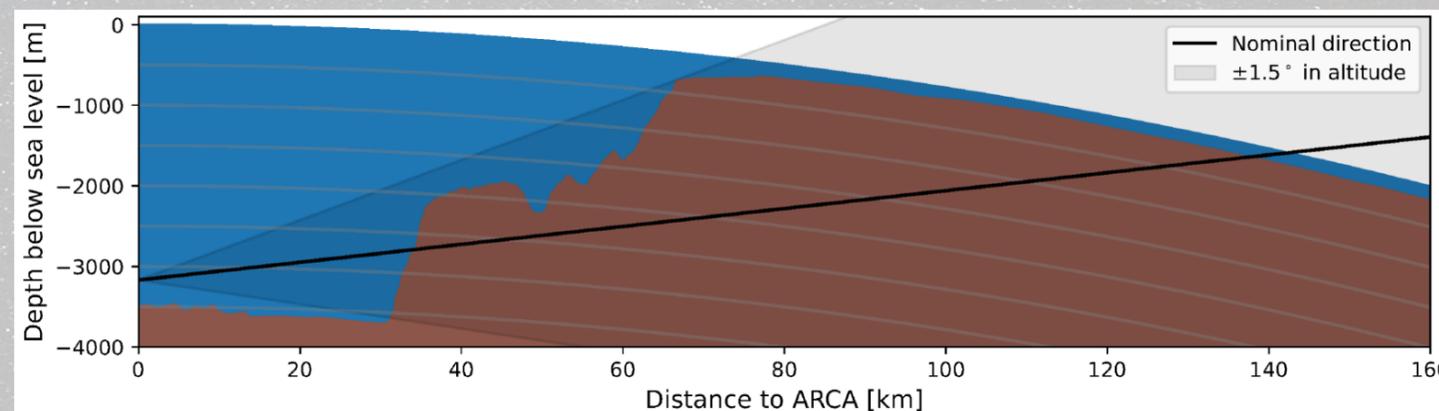
- Экспериментальный артефакт?
- Атмосферный мюон с энергией ~ ЭэВ?
Маловероятно: $N < 10^{-4}$ в год
- Мюонный пучок?
Маловероятно: $N < 10^{-3}$ в год
- Атмосферное нейтрино?
Маловероятно: $N < (1-5) \times 10^{-5}$ в год

энергия мюона:

120 ПэВ best-fit
(60-230) ПэВ 68%CL
(35-380) ПэВ 90%CL

энергия нейтрино:

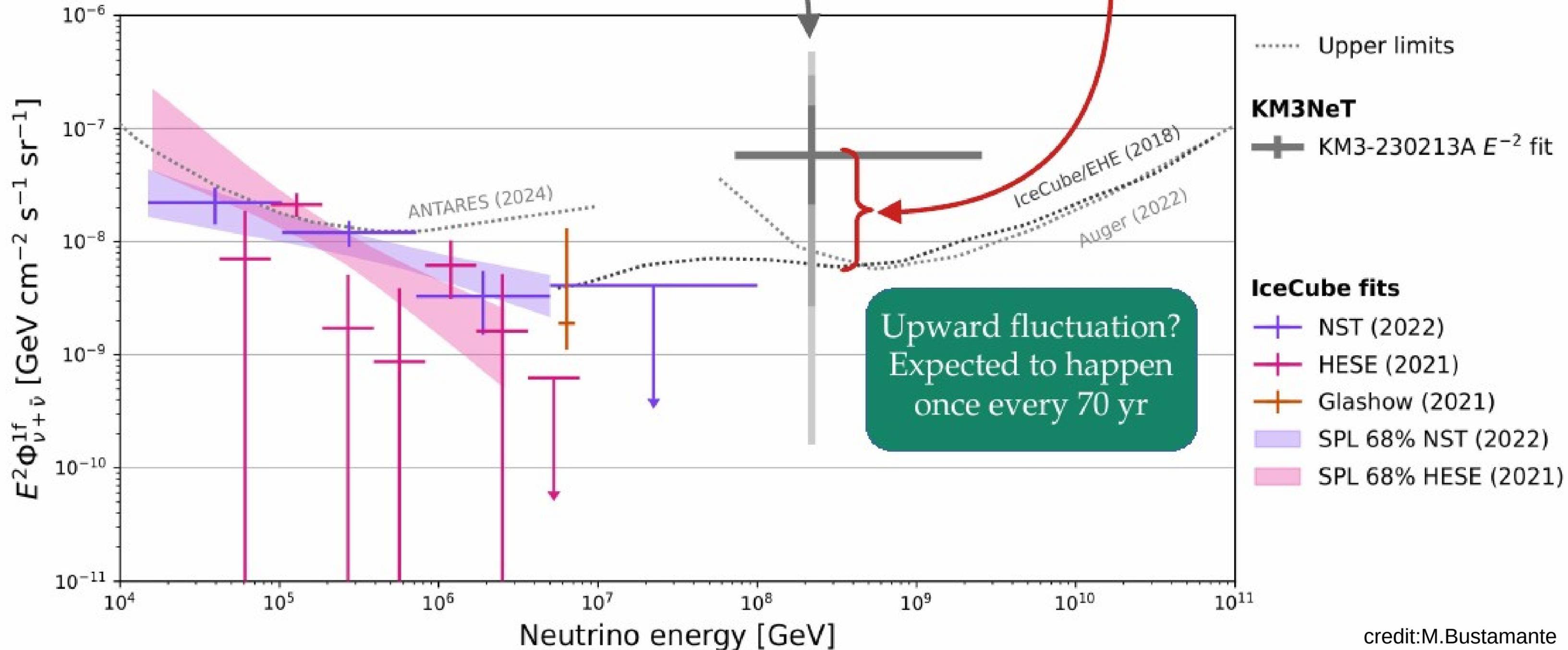
220 ПэВ best-fit
(110-790) ПэВ 68%CL
(72-2600) ПэВ 90%CL



Наблюдение события KM3-230213A

UHE ν flux inferred from KM3NeT event when considered by itself

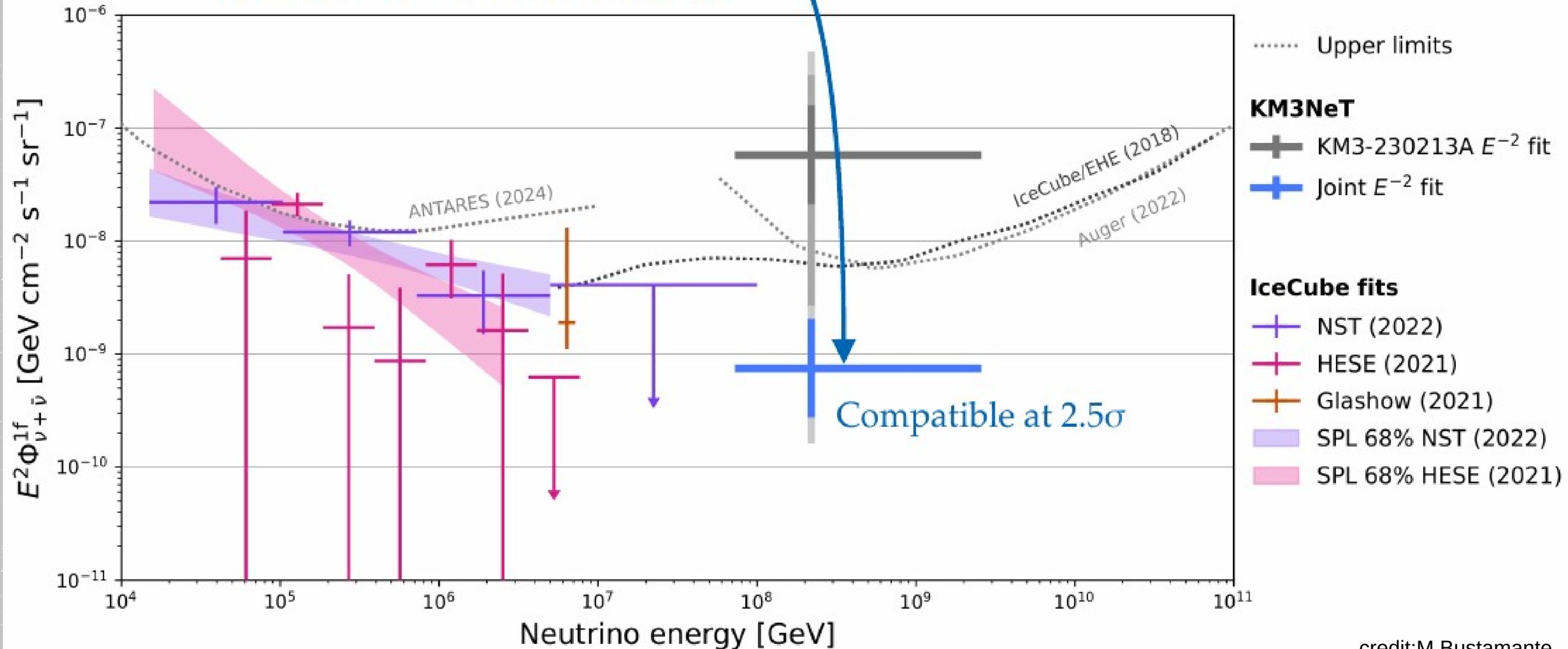
Flux is above upper limits!



credit:M.Bustamante

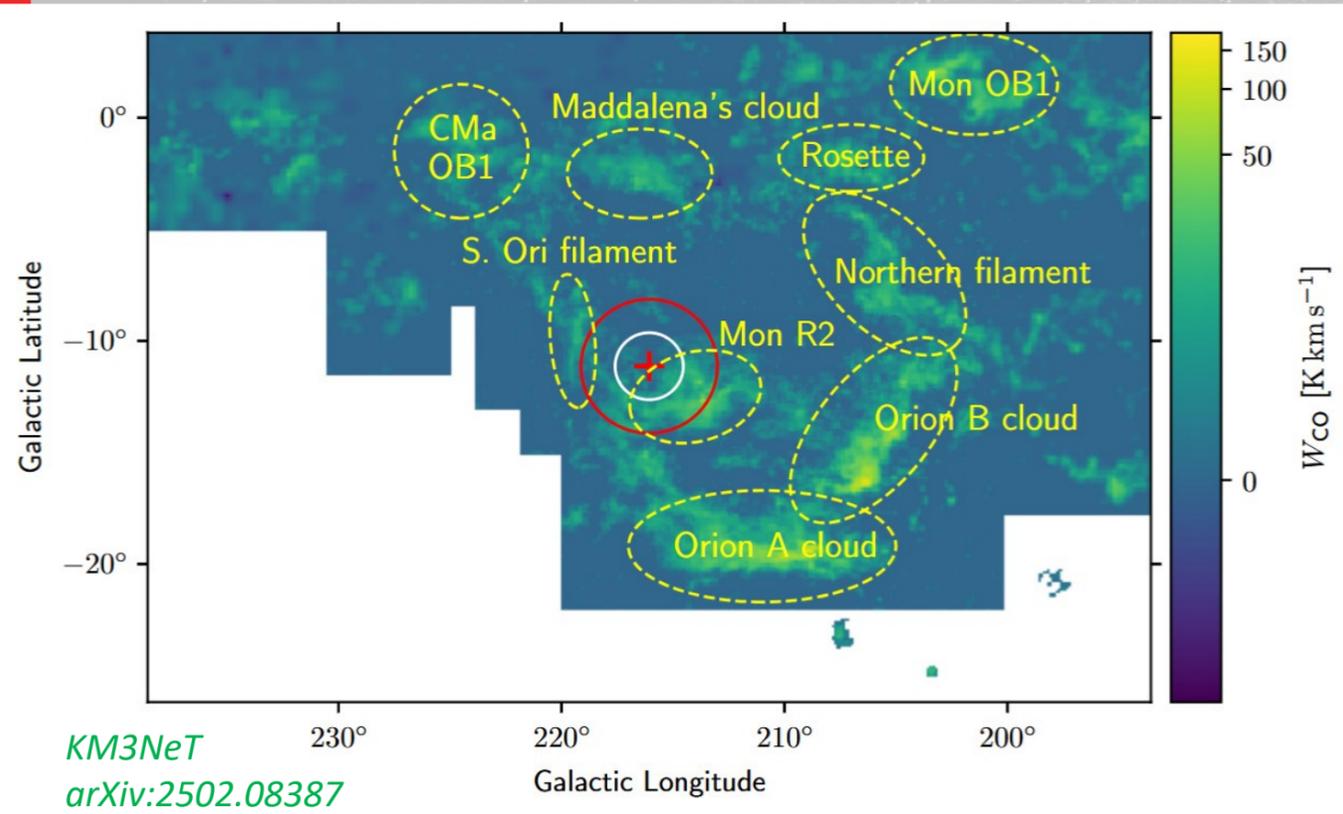
Наблюдение события KM3-230213A: «глобальная нейтринная обсерватория»

UHE ν flux inferred when considering non-observation by IceCube & Auger



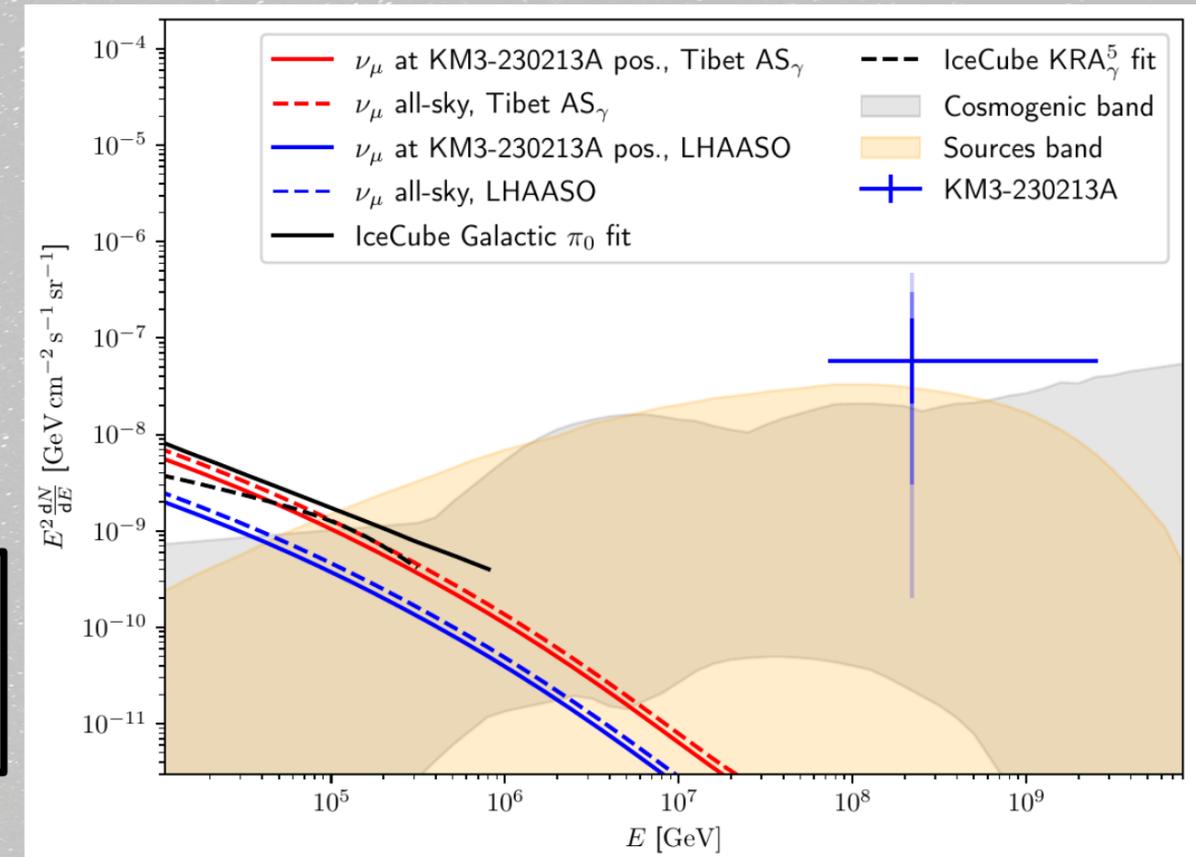
credit:M.Bustamante

Интерпретации KM3-230213A: источник в Млечном Пути



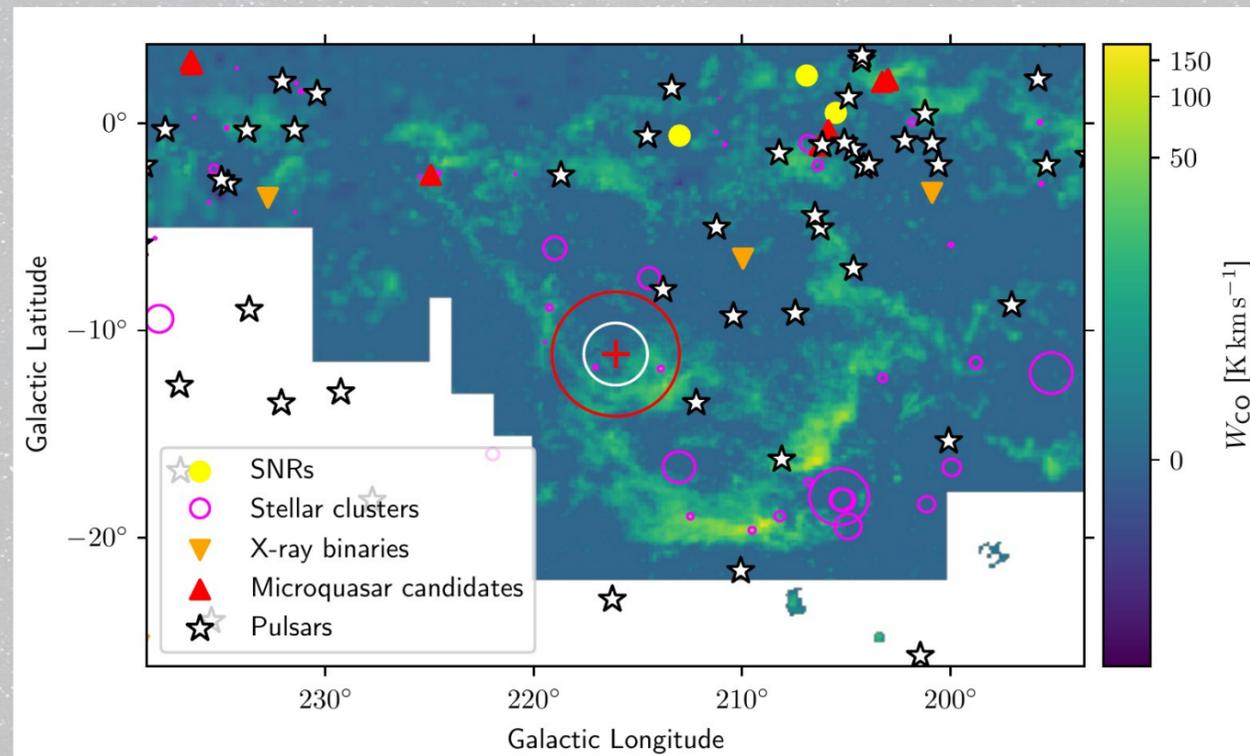
Сопутствующие γ -потoki были бы на много порядков выше наблюдаемых

Событие скорее всего не галактическое



Протяженный источник:

возможная «мишень» - молекулярное облако Monoceros R2 [830 пк, overdensity ~ 1000], область звездообразования, источник КЛ?

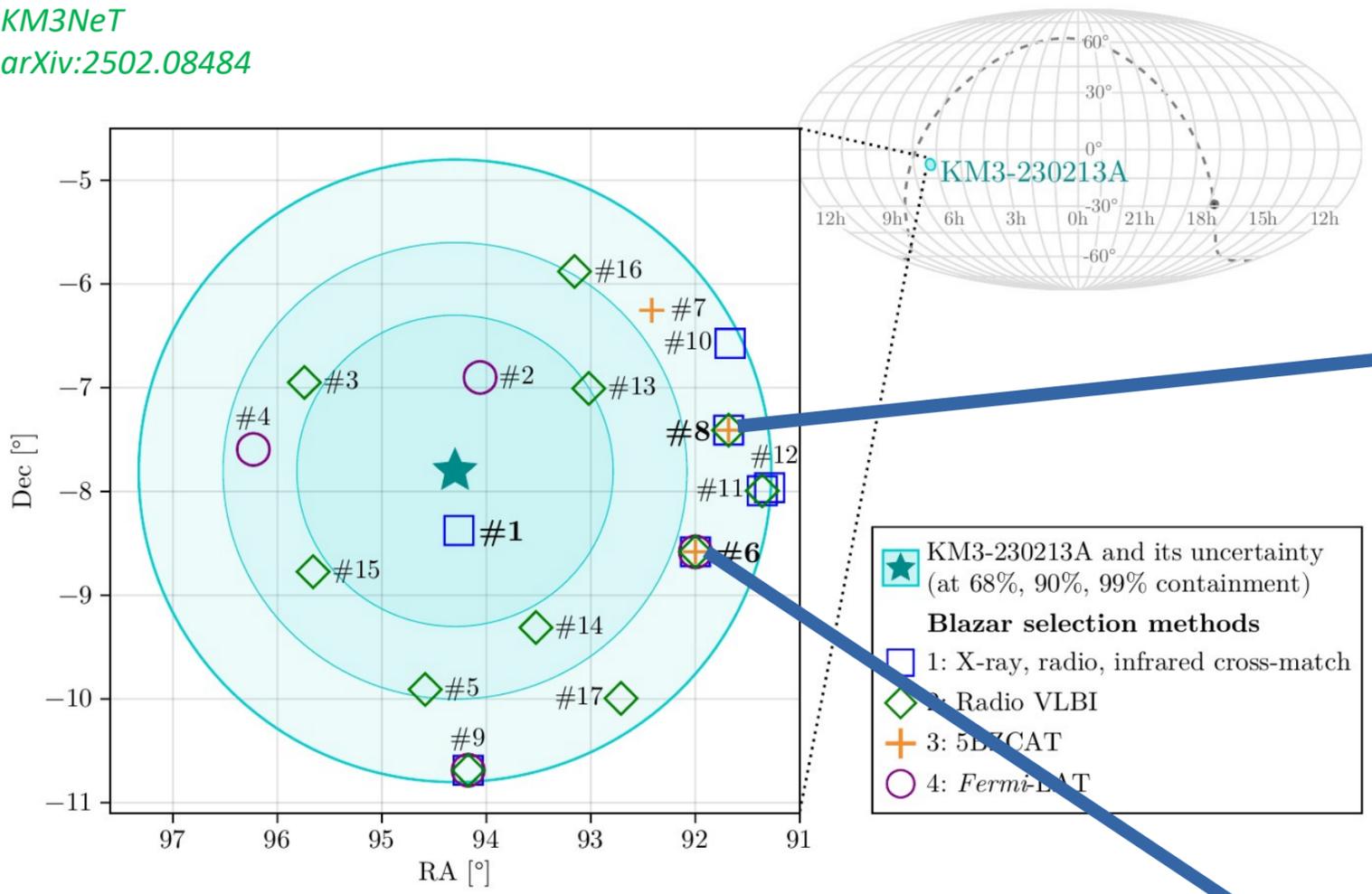


Точный источник:

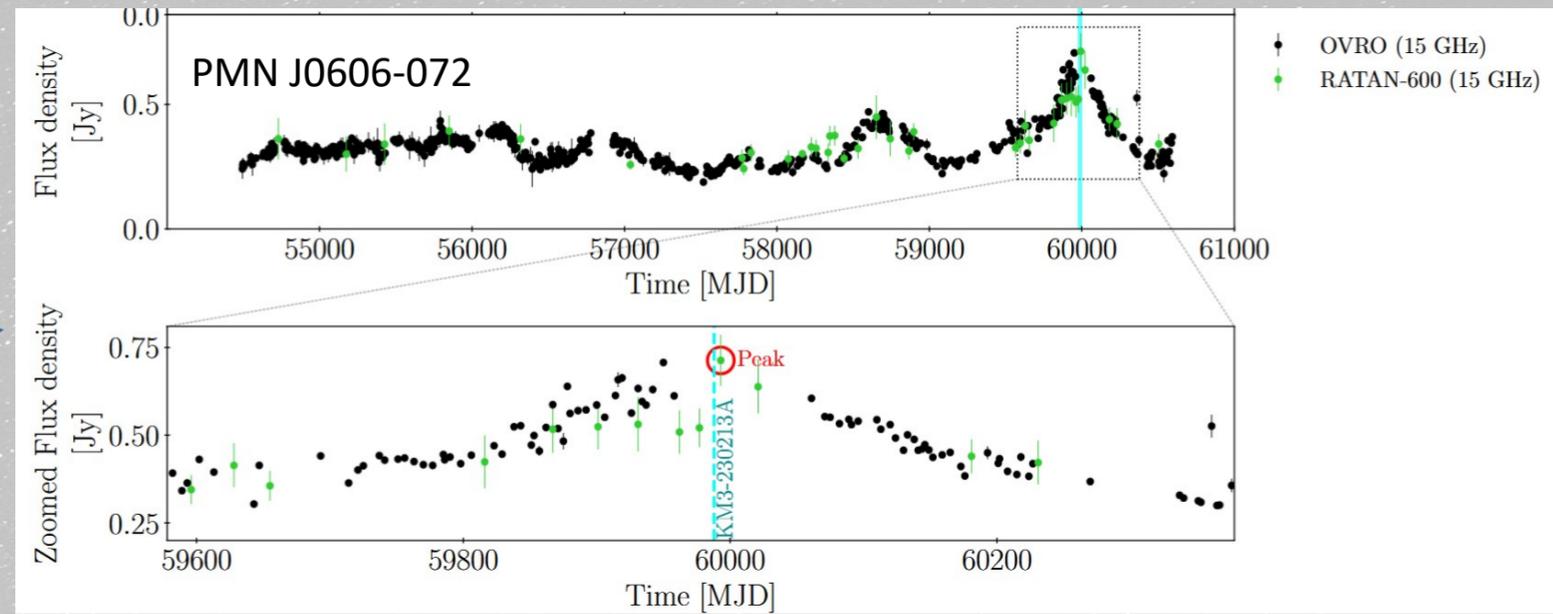
Нет явных кандидатов в направлении прихода события (с учетом неопределенности)

Интерпретации KM3-230213A: внегалактический источник

KM3NeT
arXiv:2502.08484

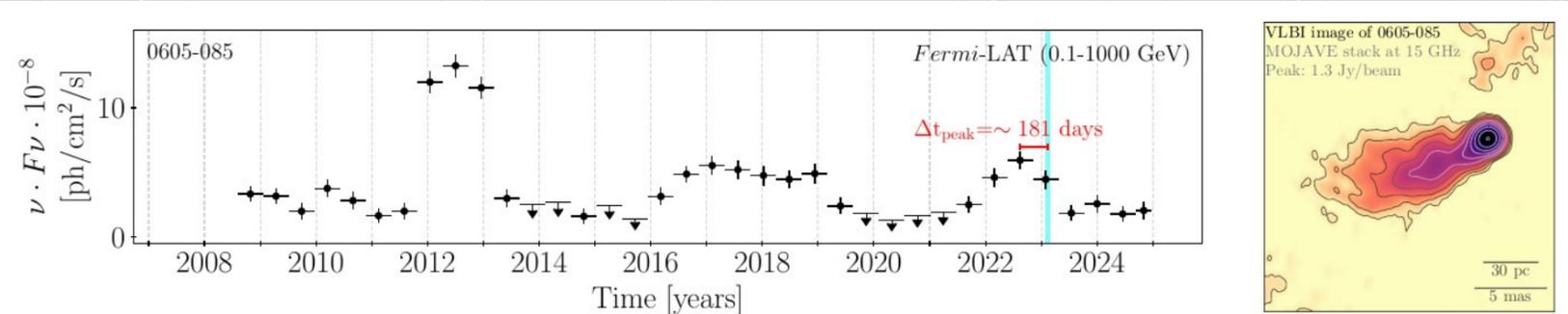
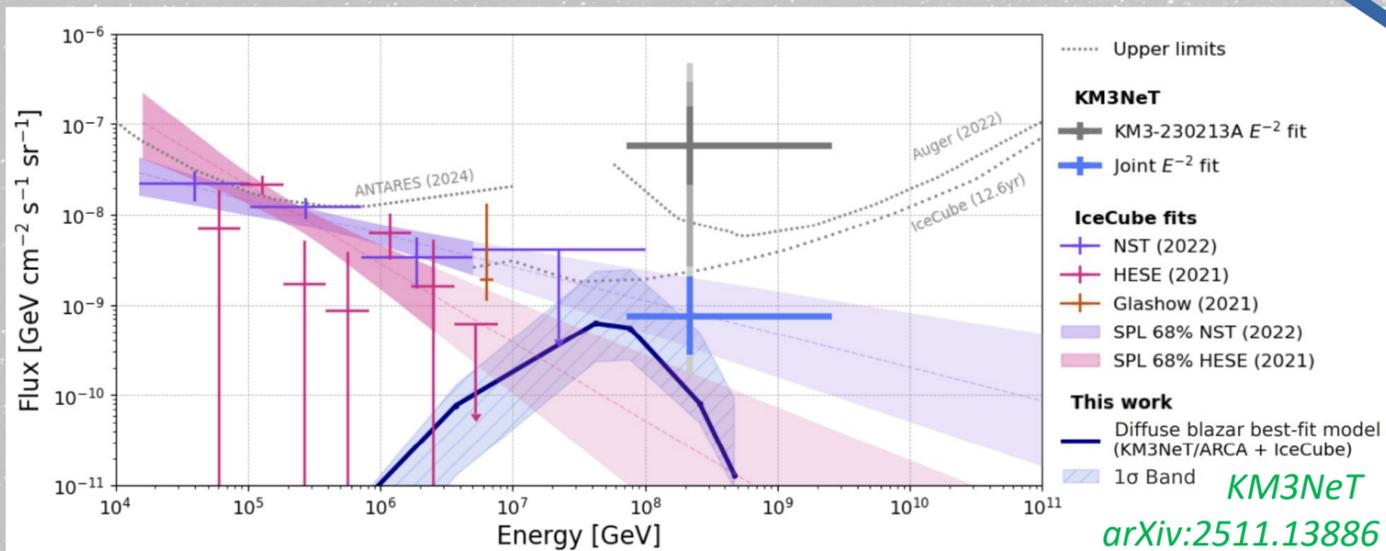


Пример: PMN J0606-072, вспышка в данных RATAN-600 и OVRO



Значимость совпадения со вспышкой:
3.0σ pre-trial

Входит в 50 наиболее ярких блазаров

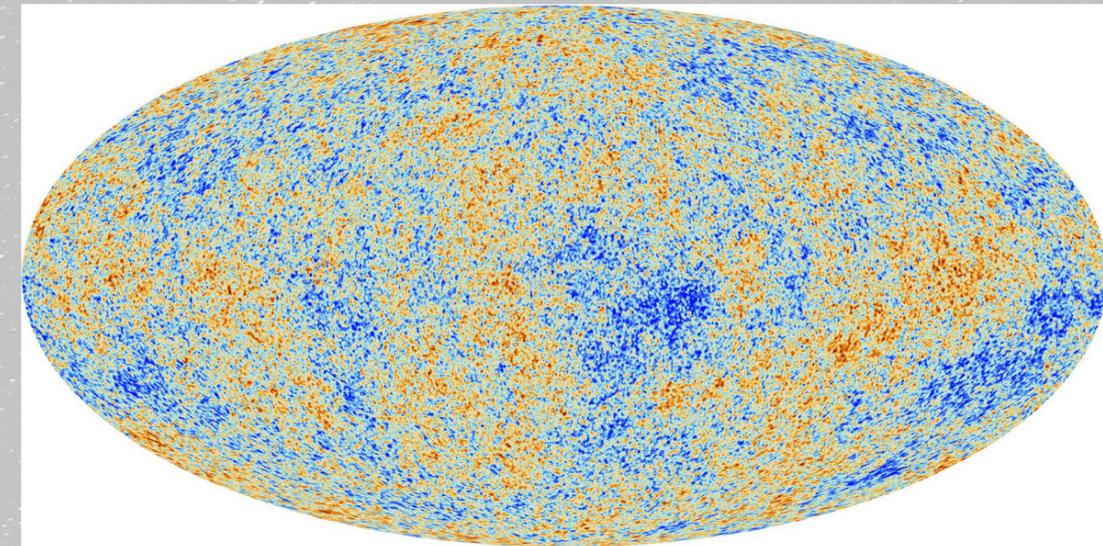


(a) The *Fermi*-LAT light curve and a VLBI image of 0605-085 (#6): the brightest radio source in the neutrino localization region that experiences a gamma-ray flaring activity around the neutrino arrival (Section 5.1.1). Δt_{peak} highlights the time difference of ~ 181 days between the flare peak and the neutrino arrival time.

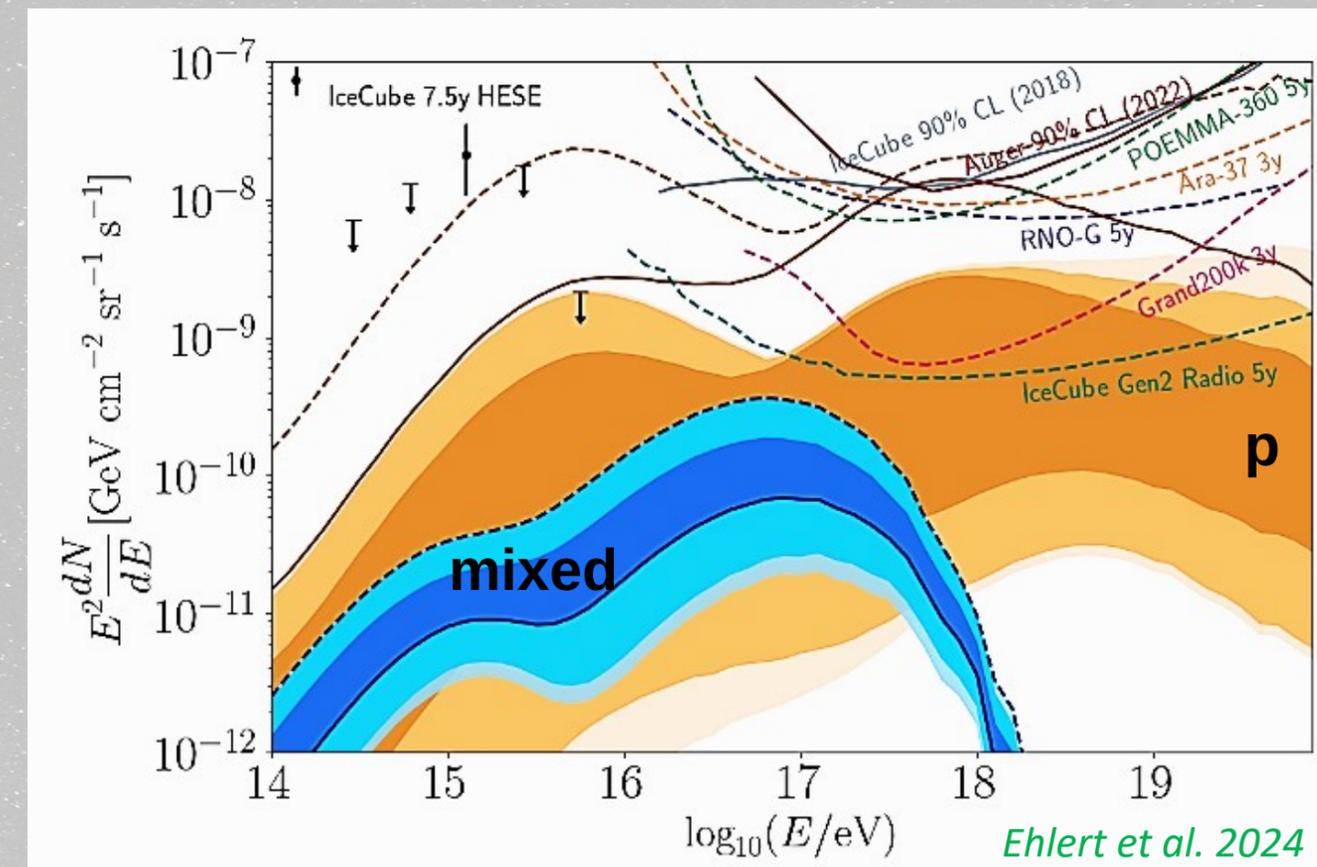
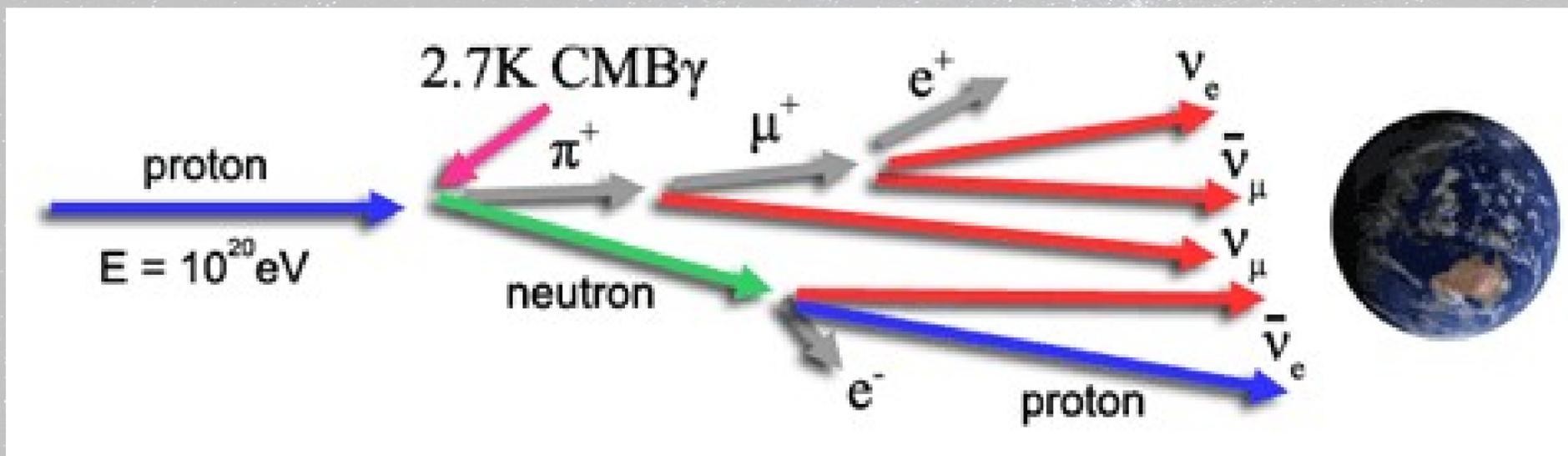
Можно согласовать с ожидаемым диффузным потоком от блазаров

Космогенные нейтрино и гамма-кванты

- Грейзен, Зацепин и Кузьмин (ГЗК – эффект) $p\gamma \rightarrow p\pi$:
Космические лучи энергии $\sim 10^{20}$ эВ не могут достигнуть Земли с расстояния более ~ 100 Мпк из-за потерь энергии во взаимодействии с реликтовым излучением
- Возникает поток нейтрино и гамма-квантов высоких энергий
- Предсказания для тяжелых ядер иные чем для протонов: нет Δ -резонанса, потоки значительно ниже
- Такие ν и γ пока не наблюдались
- В будущем измеряя их потоки можно будет определить массовый состав КЛ самых высоких энергий

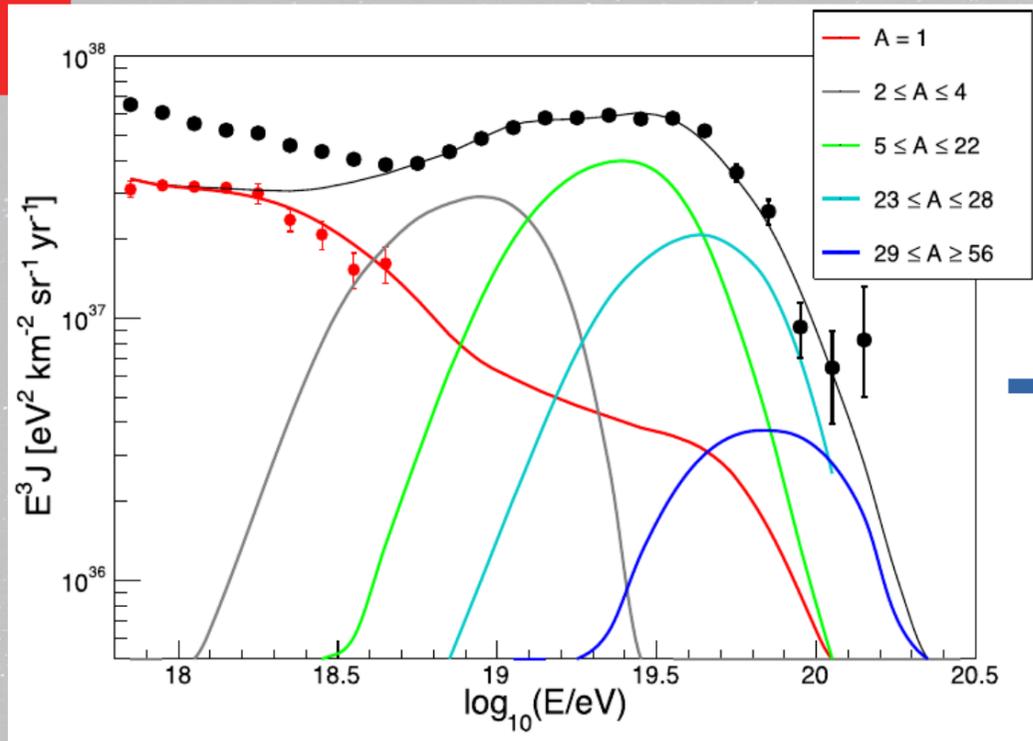


Planck, 2015



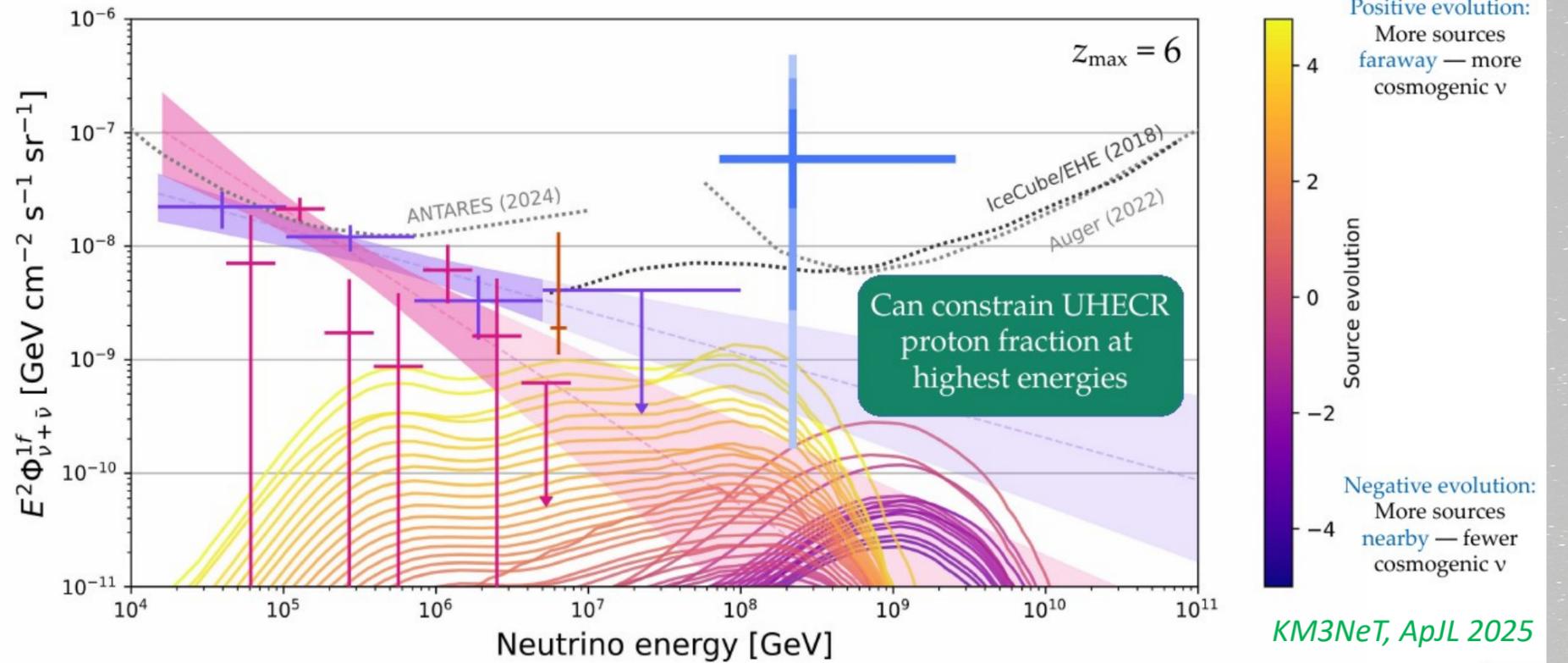
Ehlert et al. 2024

Интерпретации КМЗ-230213А: космогенное нейтрино

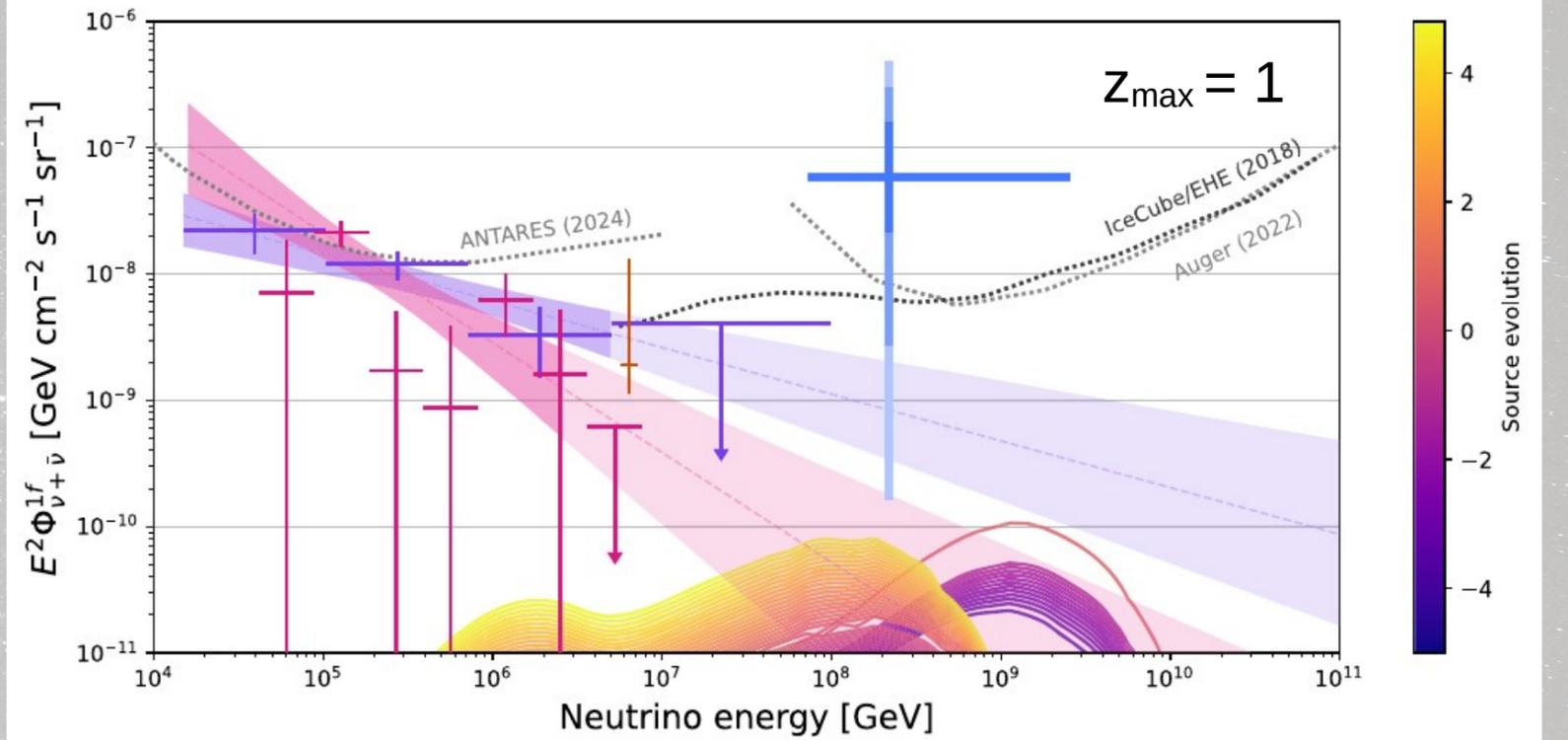


- Модели Auger массового состава UHECR: промежуточные ядра, цикл Питерса
- Значимость отклонения $> 3.0\sigma$
- Обеспечить отклонение $< 2.5\sigma$ от потока нейтрино соотв. КМЗ-230213А-alone можно двумя способами:
 - Добавить существенную примесь UHE протонов (плохо сходится с Auger)
 - Расположить большинство источников на $z > 4$ (неправдоподобный сценарий, т. к. сами КЛУВЭ которые мы измеряем приходят к нам с $z \lesssim 1.5$)

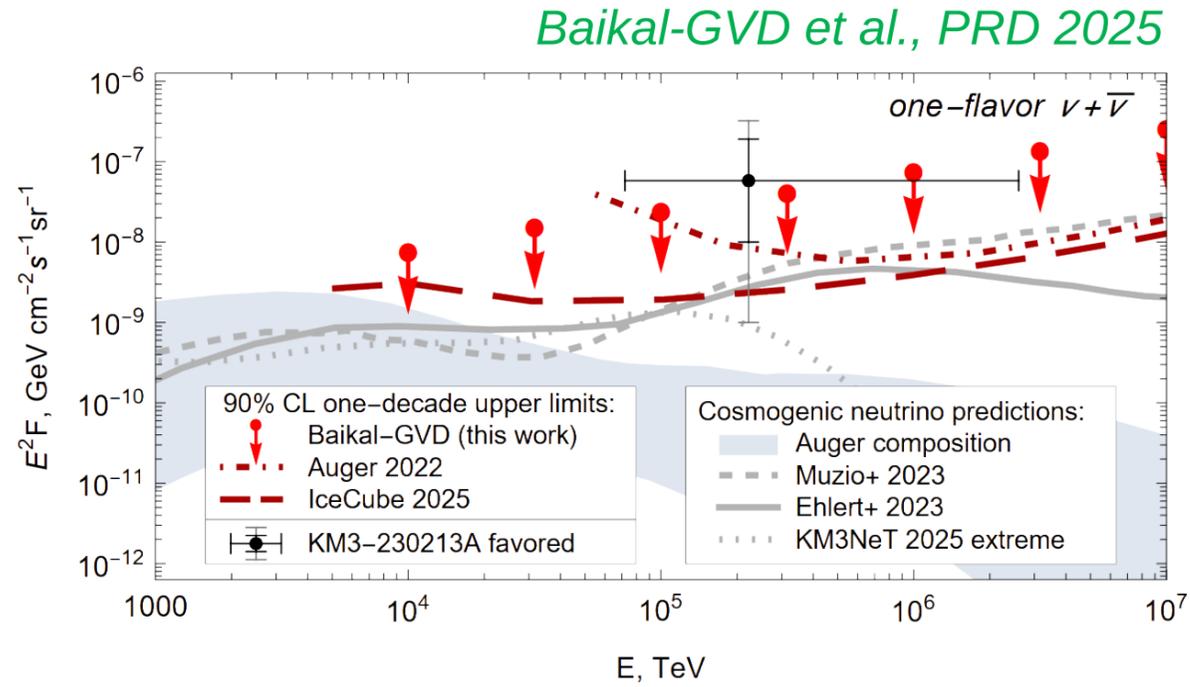
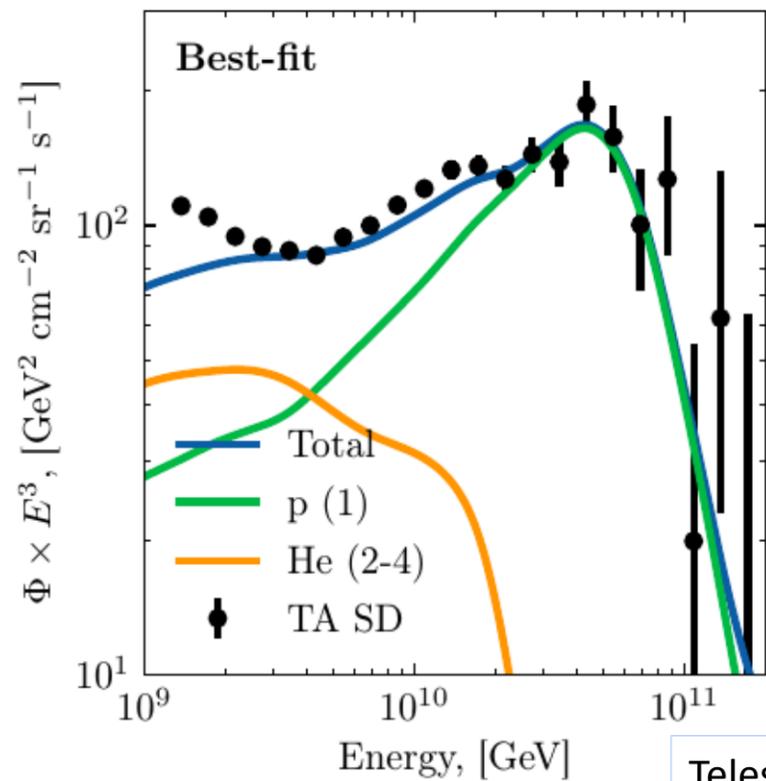
Assume population of nondescript, identical UHECR sources
 UHECR flux fit to Auger spectrum + mass composition, **source abundance $(1+z)^m$**



KM3NeT, ApJL 2025

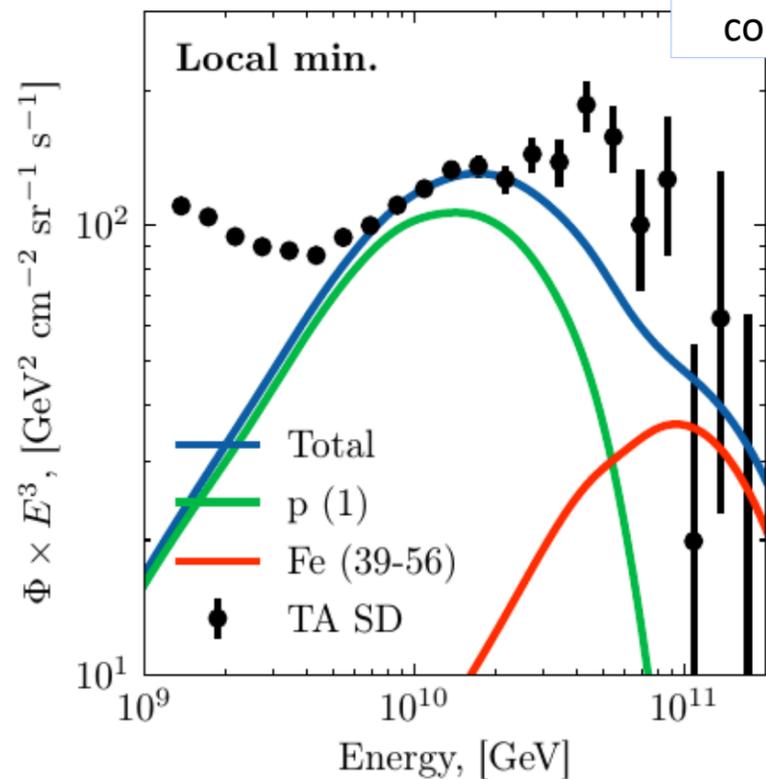


Интерпретации KM3-230213A: космогенное нейтрино

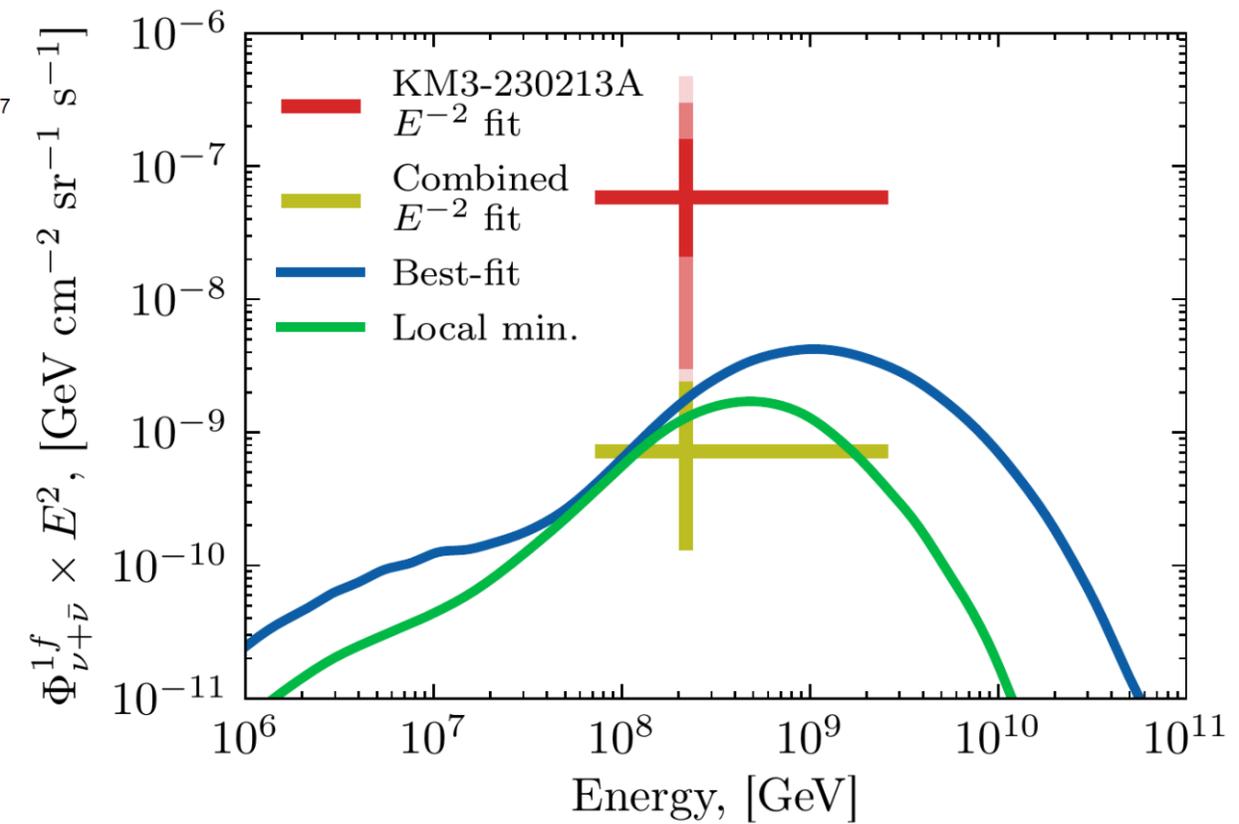


IceCube + Auger + Baikal-GVD: 0
KM3NeT: 1

Telescope Array composition

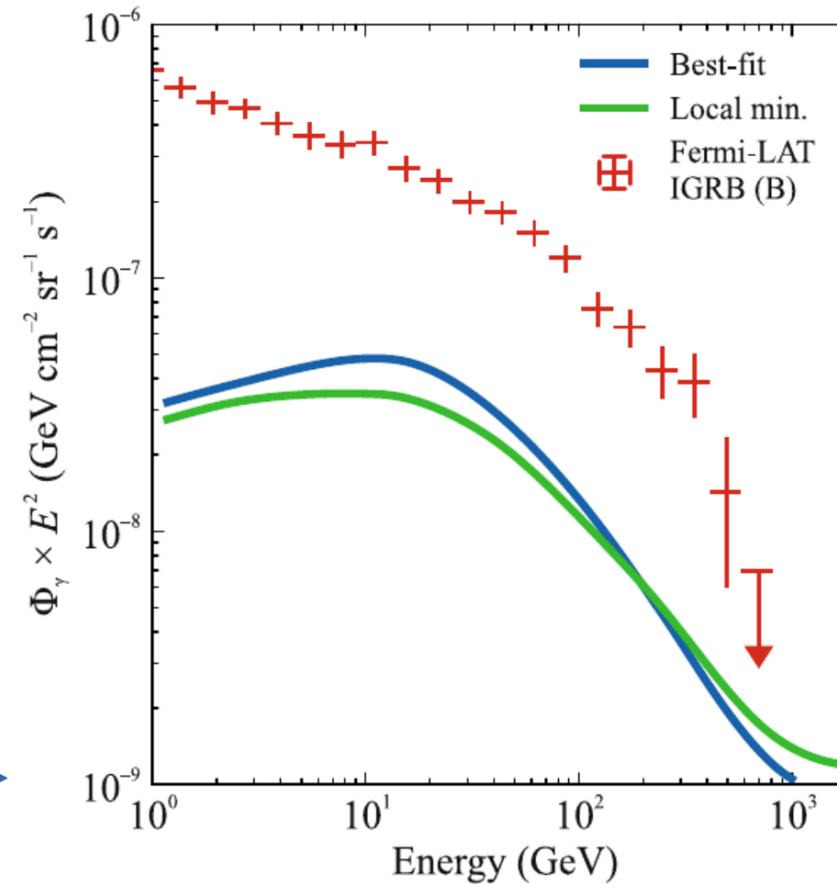
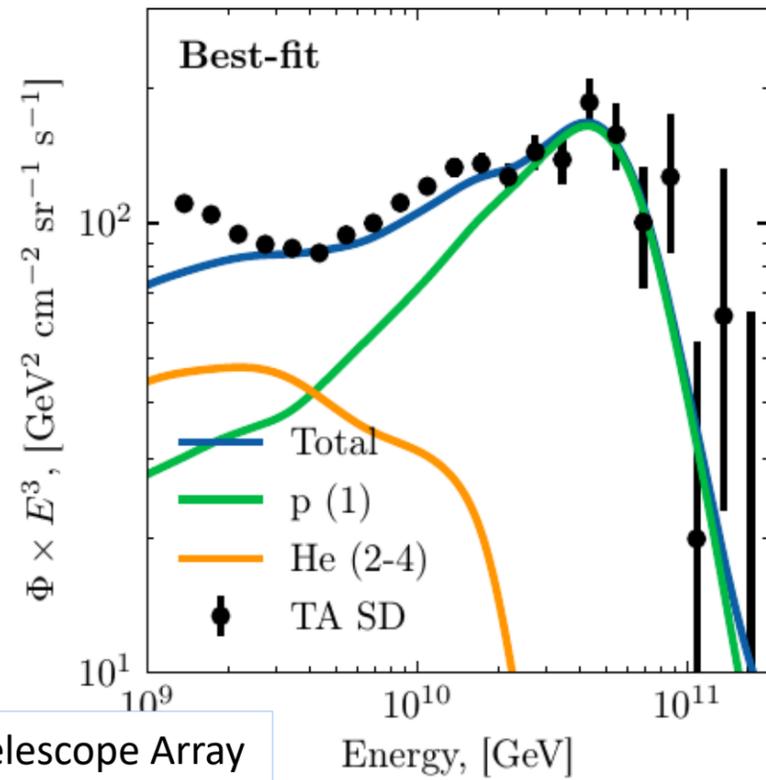


MK, Petrov, Savchenko, arXiv:2509.09590

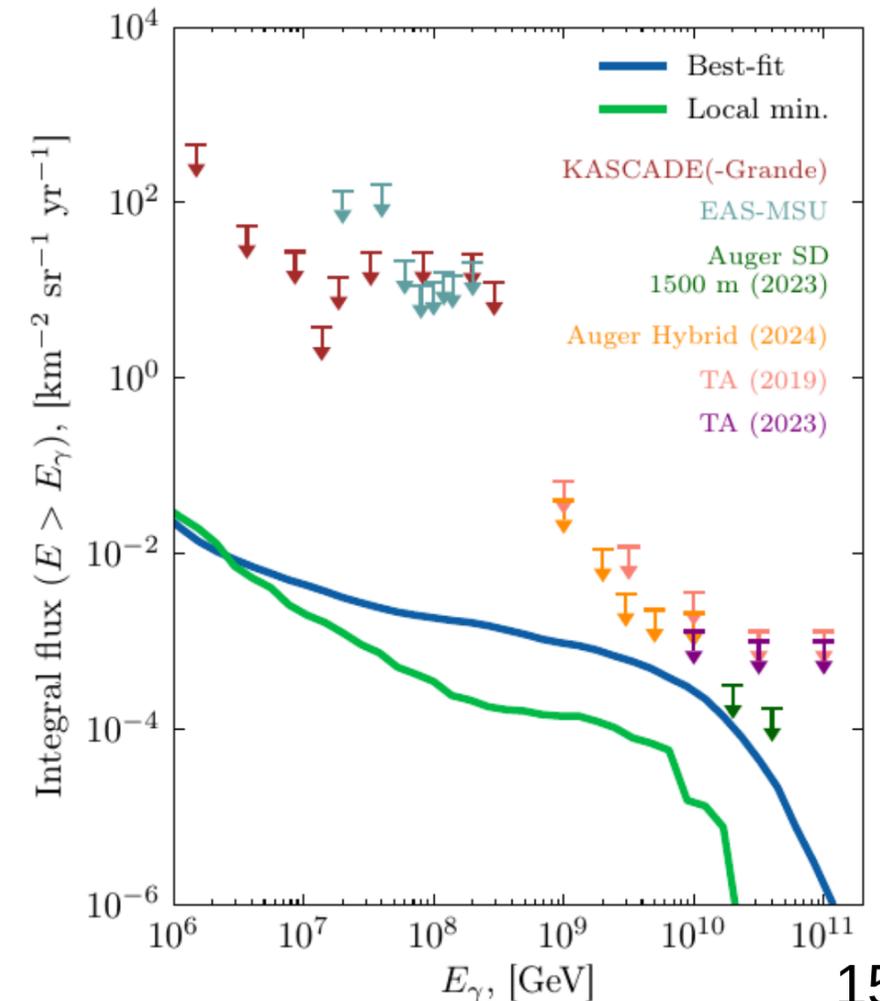


- Модели Telescope Array состава UHECR: преимущественно легкий состав
- **Значимость отклонения обеих моделей: $\sim 2.0\sigma$** от KM3NeT-alone и от фита всех экспериментов, но в разные стороны :)
- **Источники при $z < 1.5$, плотность не зависит от z**

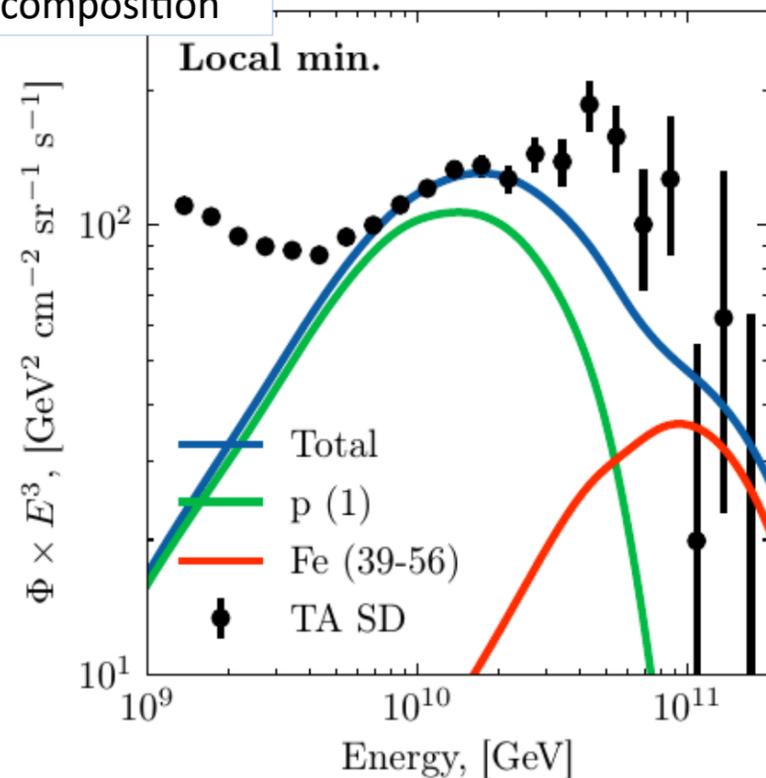
KM3-230213A как космогенное ν : перспективы проверки



MK, Petrov, Savchenko, arXiv:2509.09590



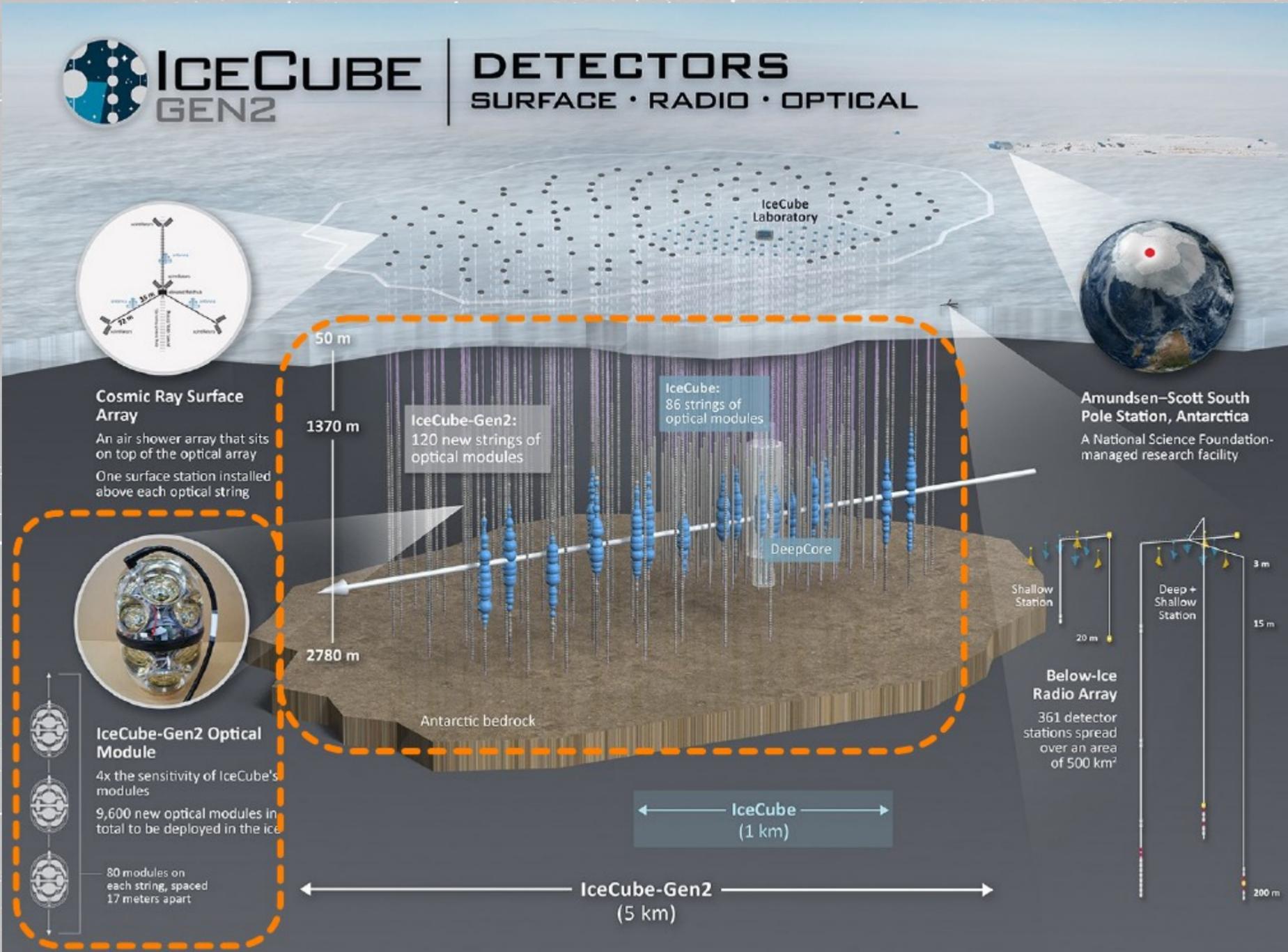
Telescope Array composition



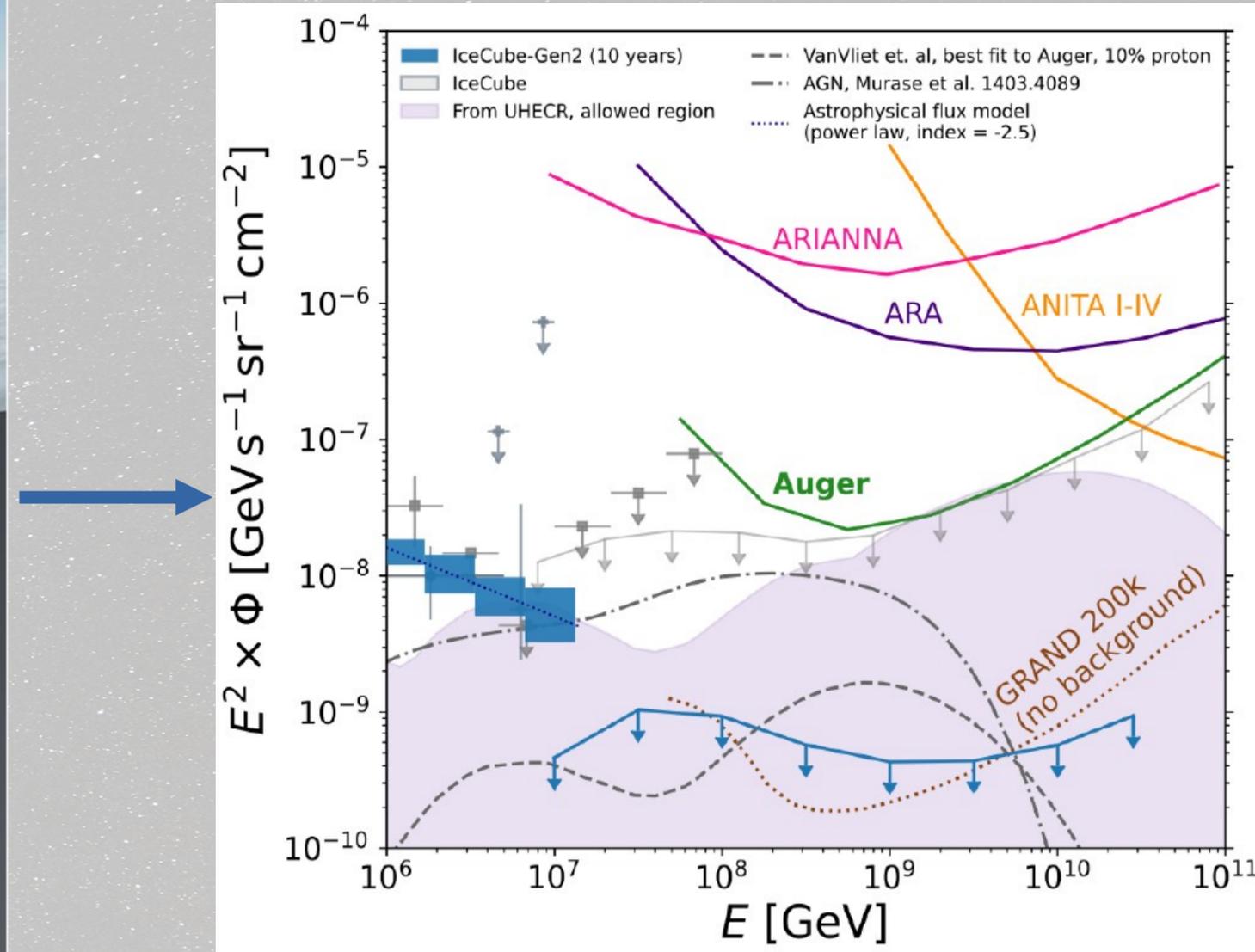
- Не противоречит наблюдениям диффузного γ -фона на ГэВ
- Может быть проверено с помощью наблюдения γ -квантов на ЭэВ
- Для этого нужно увеличение чувствительности поиска UHE γ , по крайней мере **в 5 раз**
- Нужен более чувствительный **анализ** данных UHECR экспериментов
- Либо в эксперименты следующего поколения, с большей экспозицией, например космические (**проект ЭРА**)

Перспективы для нейтринных экспериментов

Расширение IceCube для больших энергий



credit: M. Bustamante



Optical array:
TeV–PeV ν
~8 km³ (8× IceCube)
206 strings
9.6k new DOMs

~10× rate of PeV ν
vs. IceCube

Перспективы для нейтринных экспериментов

credit: M. Bustamante



High-Energy Underwater Neutrino Telescope

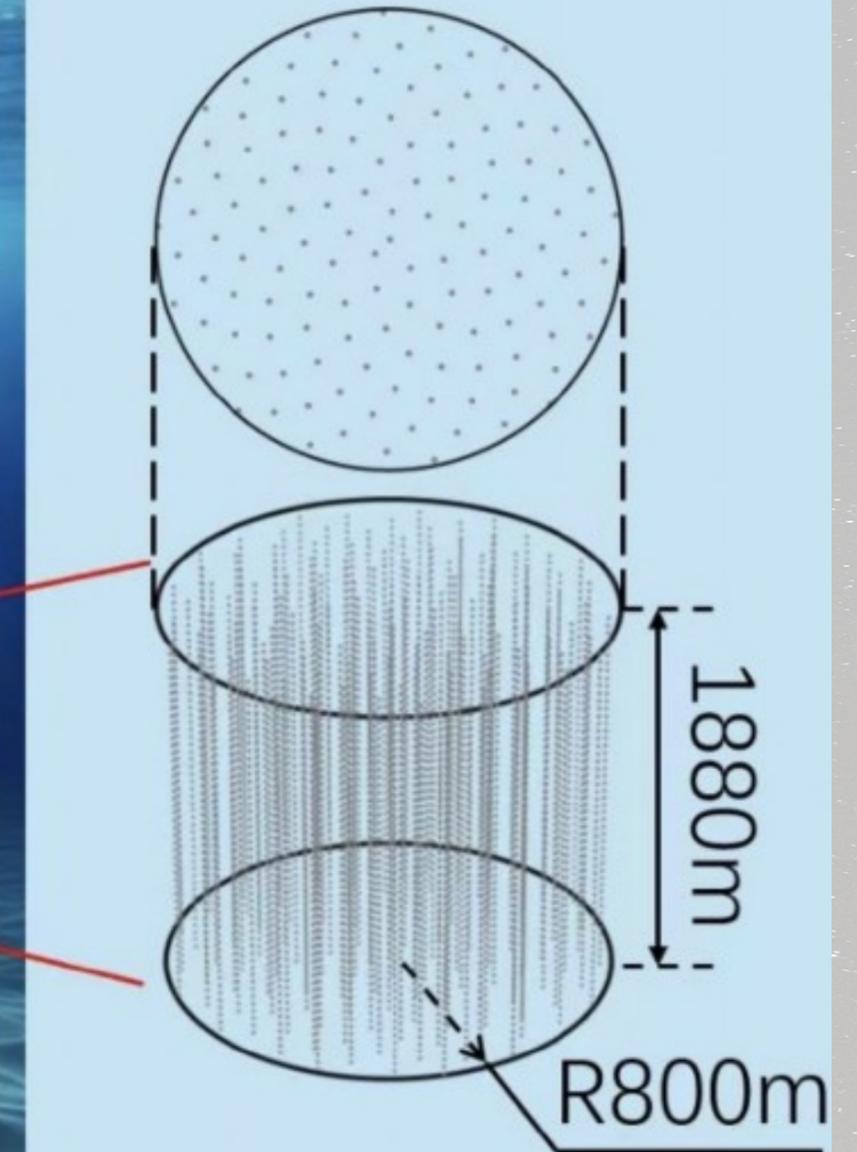
South China Sea

Effective volume: 30 km^3

2304 strings, 55,296 optical modules

Sensitive to ν of 100 TeV–100 PeV

March 2024: Test string in Lake Baikal
January 2025: Test string in South China Sea
2025–2026: 7 strings, South China Sea (*Seastar*)



9 clusters of 128 strings each

Muon track angular resolution as good as 0.05°
(for tracks of 6 km in length)

10km

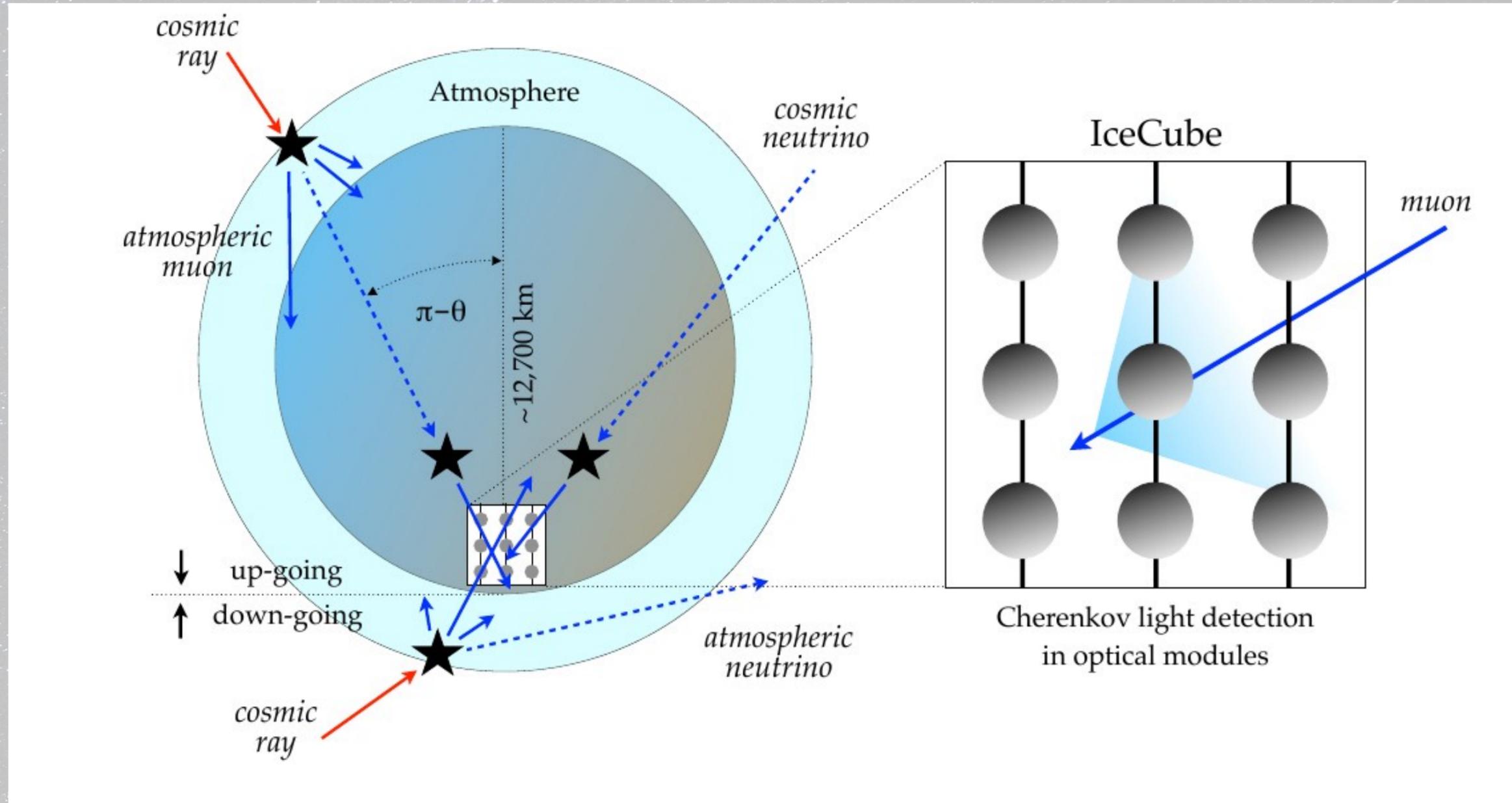
10km

Выводы

- Эксперимент KM3NeT зарегистрировал сверхмощное событие (KM3-230213A), которое интерпретируется как космическое нейтрино с рекордной энергией 72-2600 ПэВ (90% C.L.)
- Интерпретации в качестве экспериментального артефакта маловероятны
- Интерпретации в качестве астрофизического нейтрино более вероятны, но противоречат (на уровне 2.5σ и более) отсутствию соответствующих наблюдений IceCube, Auger и Baikal-GVD
- Происхождение KM3-230213A из Млечного Пути маловероятно
- Происхождение KM3-230213A из внегалактических источников возможно
- Происхождение во внегалактических взаимодействиях космических лучей (космогенное)
 - Позволяет согласовать наблюдение KM3-230213A и ненаблюдение других экспериментов на уровне **1.8-2.1 σ**
 - Для этого нужно предположить что UHECR состоят преимущественно из протонов или легких ядер (соответствует наблюдениям Telescope Array), и
 - UHECR состоящие преимущественно из тяжелых и промежуточных ядер (соответствует наблюдениям Auger) могут дать согласование на уровне **2.1-2.5 σ**
 - Для этого требуется экзотическая эволюция источников: основной вклад от $z = 4-6$

Спасибо за внимание!

Космические нейтрино высоких энергий: наблюдение



→ Selecting **up-going muon tracks** reduces atmospheric muon background:

$\underbrace{10,000,000,000}_{\text{atmospheric muons (from above)}} : \underbrace{100,000}_{\text{atmospheric neutrinos}} : \underbrace{10}_{\text{cosmic neutrinos}}$

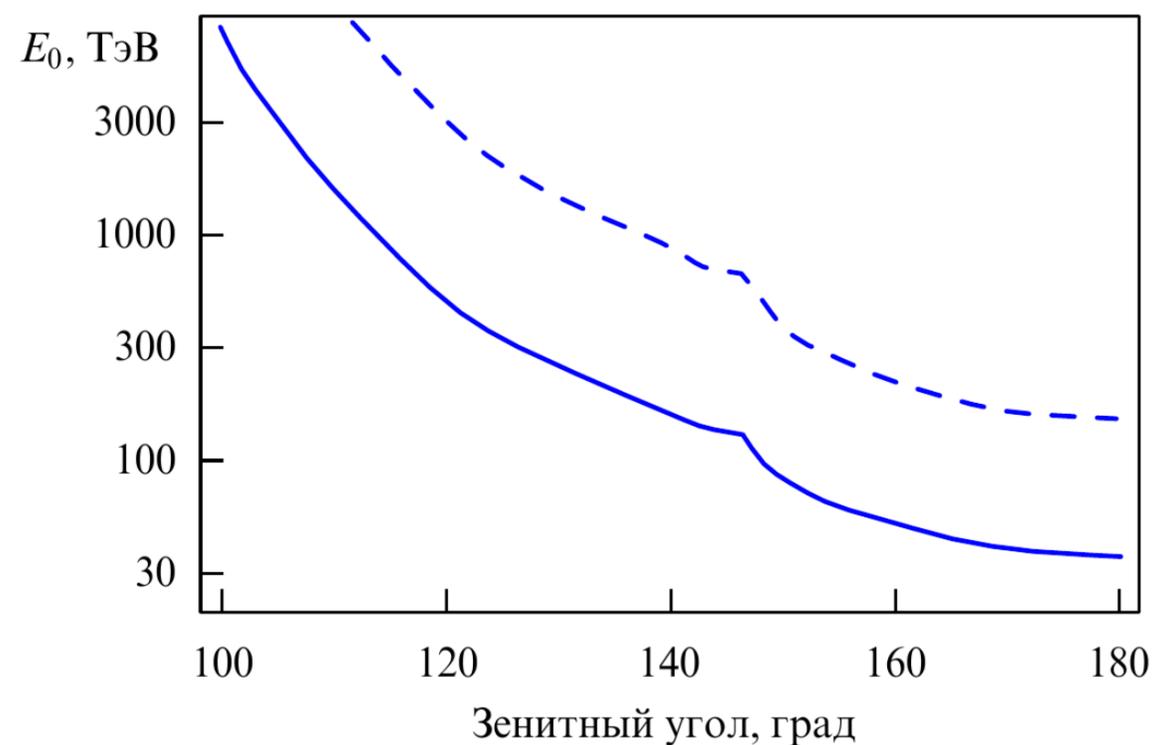


Рис. 4. Критическая энергия E_0 , для которой оптическая толщина электронного нейтрино относительно взаимодействия с веществом Земли равна 1 (сплошная линия) или 2,3 (штриховая линия — взаимодействует 90 % нейтрино) как функция зенитного угла. При энергиях $\gtrsim E_0$ Земля постепенно становится непрозрачной для нейтрино, приходящих с данного направления.

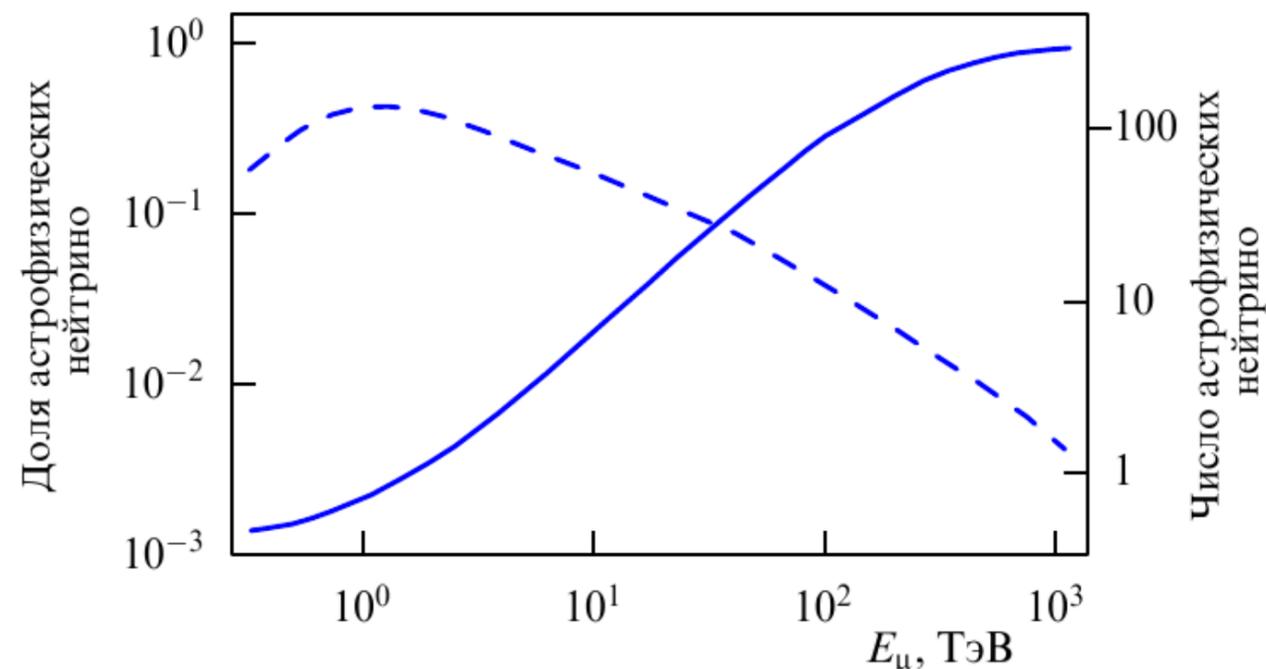


Рис. 5. Ожидаемая доля астрофизических нейтрино в общем числе мюонных треков как функция энергии E_μ (левая шкала, сплошная линия) и ожидаемое полное число астрофизических нейтрино с данной энергией (на бин 0,1dex по E_μ , правая шкала, штриховая линия) в наборе из ~ 650000 событий IceCube. Построено по данным из работы [25] (модель для 10 лет наблюдений). Бин 0,1dex — бин, в котором десятичный логарифм энергии изменяется на 0,1.

С.Троицкий, УФН 2021