

# Взаимодействия адронов в физике космических лучей

Григорий Рубцов<sup>1</sup>, Сергей Троицкий<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>ИЯИ РАН, <sup>2</sup>физфак МГУ)



Новосибирск, 13.03.2026



# Адронные взаимодействия:

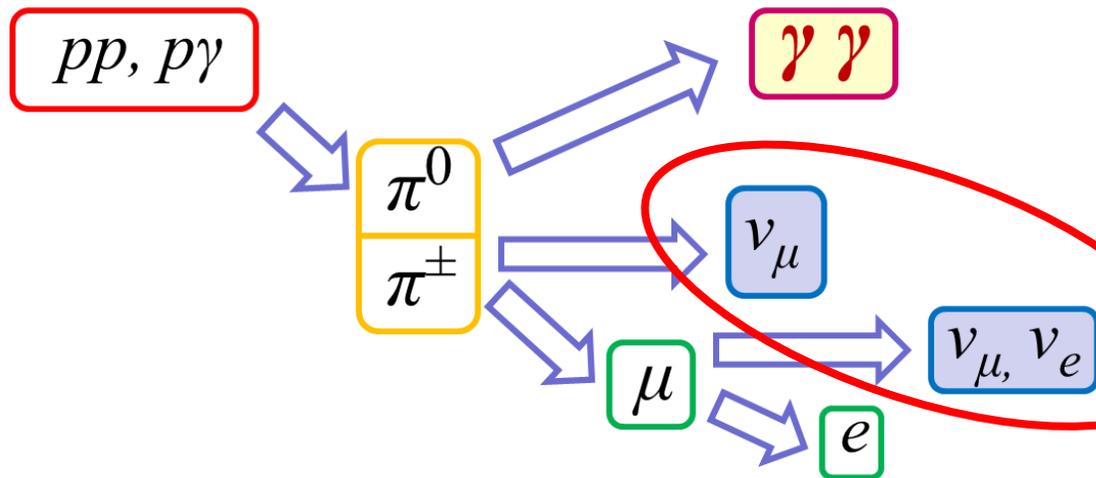
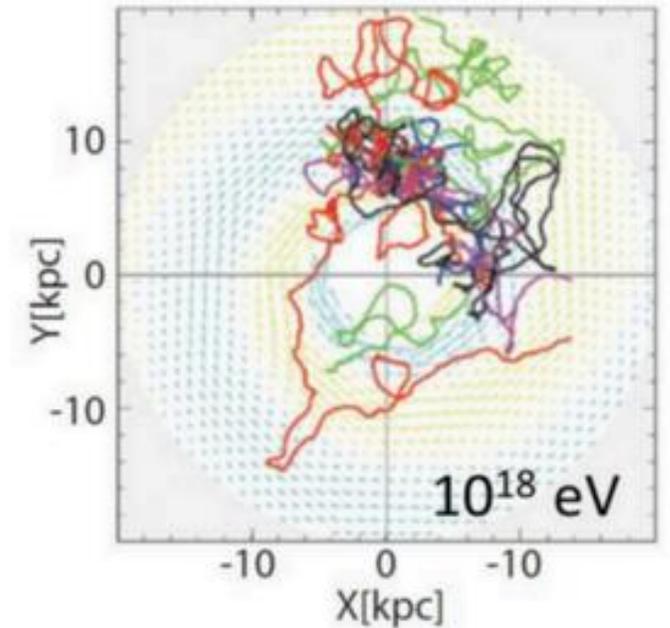
- при **рождении** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы об астрофизических объектах
- при **распространении** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о космических лучах
- при **детектировании** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о физике частиц



# Взаимодействия космических лучей в астрофизических источниках

- **проблема:** обычная астрономия не работает – космические лучи не указывают на свои источники из-за отклонений в магнитных полях

➔ источники космических лучей неизвестны



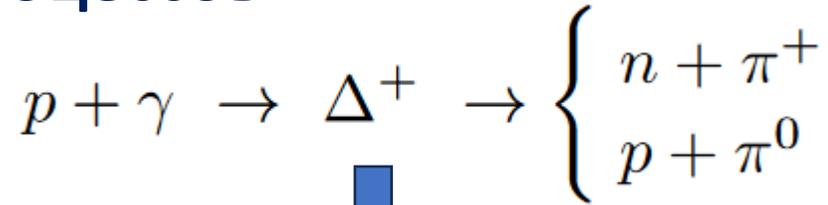
- **нейтрино** высоких энергий – маркер релятивистских адронов. Теперь мы их наблюдаем!



# Знаем особенности адронных процессов



- максимум сечения – резонанс с рождением  $\Delta$ -бариона в промежуточном состоянии



если рождается один пи-мезон через  $\Delta$ -резонанс

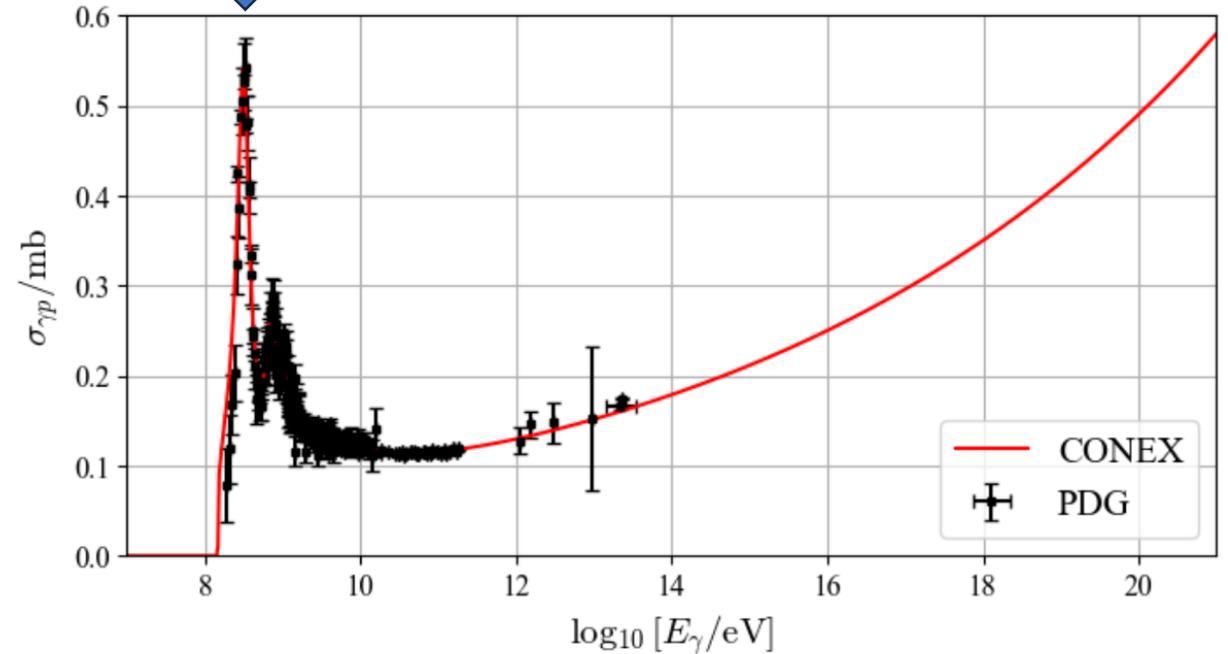
$$E_\pi \approx E_p/5,$$

$$E_\nu \approx E_{\pi^\pm}/4 \approx E_p/20,$$

$$E_\gamma \approx E_{\pi^0}/2 \approx E_p/10$$

$$E_p E_{\gamma_B} = m_\Delta^2$$

$$\rightarrow E_{\gamma_B} = \frac{m_\Delta^2}{20E_\nu} \simeq 750 \text{ eV} \left( \frac{E_\nu}{100 \text{ TeV}} \right)^{-1}$$



резкий пик в сечении определяет зависимость спектра нейтрино от спектра фотонов-мишеней в источнике: знаем, какие фотоны искать



# Пример: активные ядра галактик

энергии фотонов мишени – не совсем такие, как думали



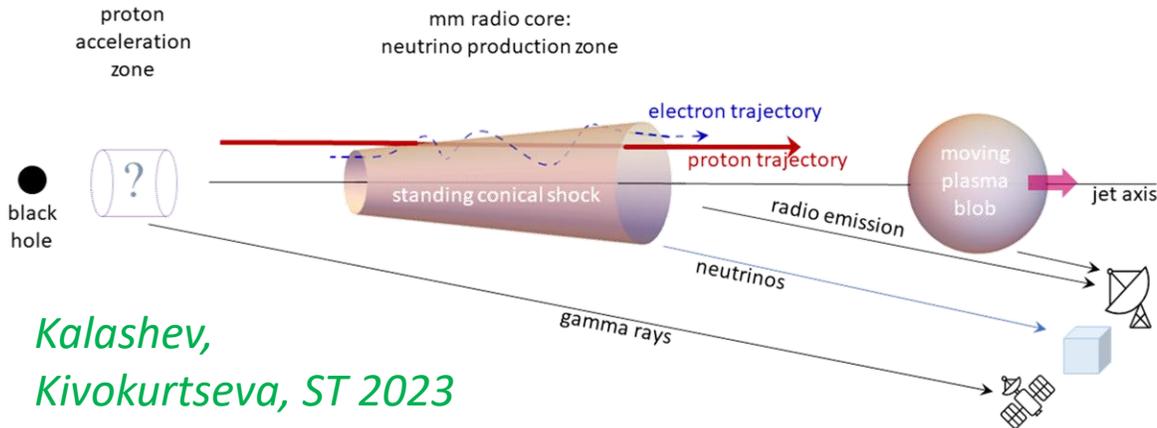
- предполагалось рождение нейтрино вблизи черной дыры
- там основной источник фотонов – аккреционный диск
- энергия фотонов (10 – 100) эВ
- энергия нейтрино на Земле ~ПэВ

*Begelman et al. 1990*  
*Stecker et al. 1991*  
*Mannheim et al. 1992*  
*Neronov & Semikoz 2002*  
*Stecker 2013*  
*Kalashv et al. 2014*  
*Dermer et al. 2014*

$$E'_\gamma = \frac{m_\Delta^2}{20E'_\nu} \simeq 750 \text{ eV} \left( \frac{E'_\nu}{100 \text{ TeV}} \right)^{-1}$$

...

- нейтрино от **10 ТэВ** – от блазаров
- нужны фотоны >10 кэВ
- вдобавок от 100 эВ до 10 кэВ в одном источнике!
- надо рождать нейтрино в джете



*Kalashv,*  
*Kivokurtseva, ST 2023*



# Знаем особенности адронных процессов

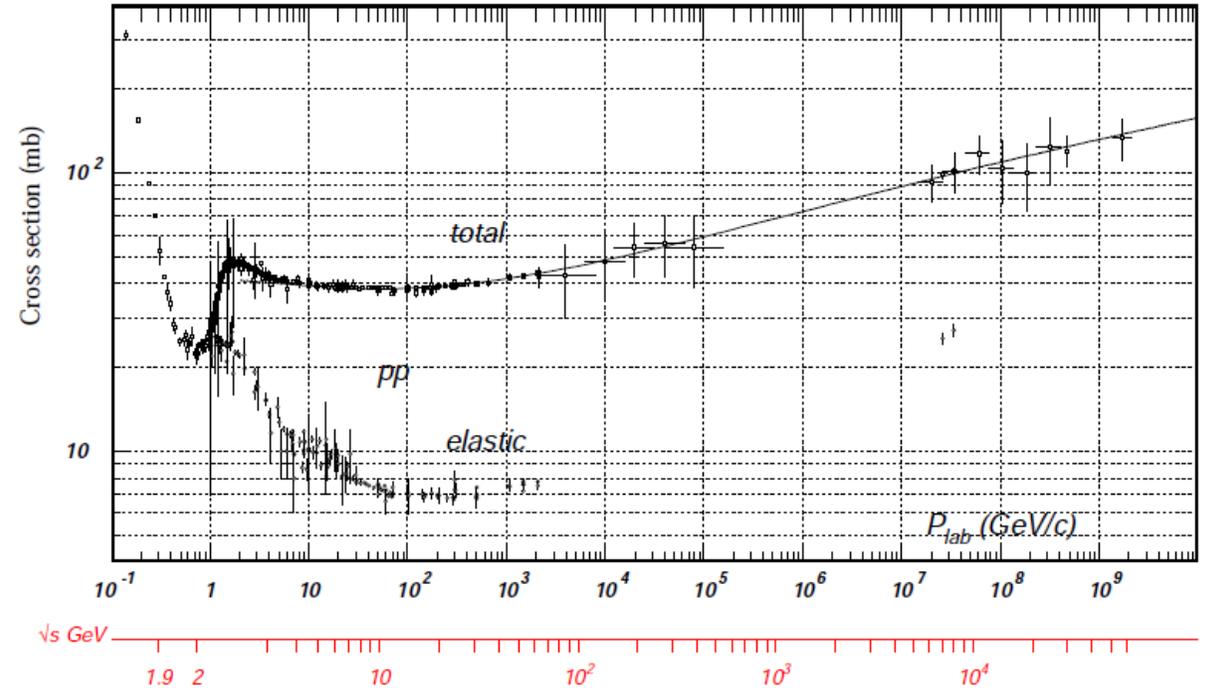


если рождается  
один пи-мезон

$$E_{\pi} \approx E_p/5,$$

$$E_{\nu} \approx E_{\pi^{\pm}}/4 \approx E_p/20,$$

$$E_{\gamma} \approx E_{\pi^0}/2 \approx E_p/10$$



все протоны мишени покоящиеся, спектр нейтрино определяется спектром  
релятивистских протонов (космических лучей)

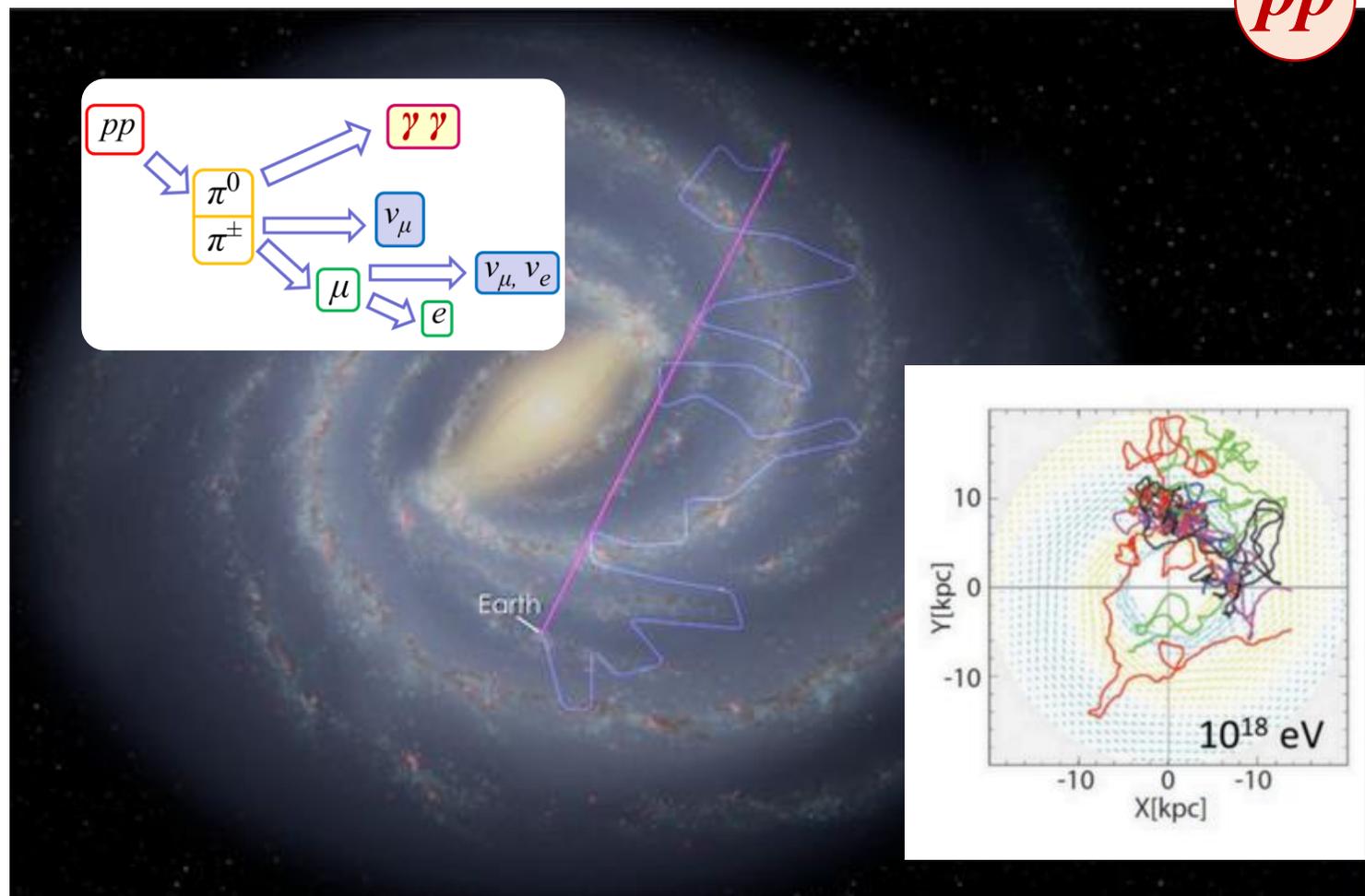


# Пример: космические лучи и нейтрино в Галактике



- it takes two protons to tango:

- галактические космические лучи
- межзвездный газ



# Млечный Путь в нейтрино, 2022-2023

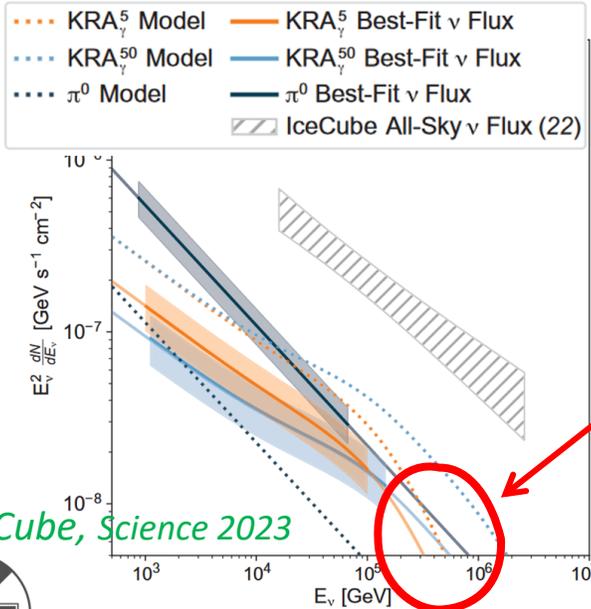
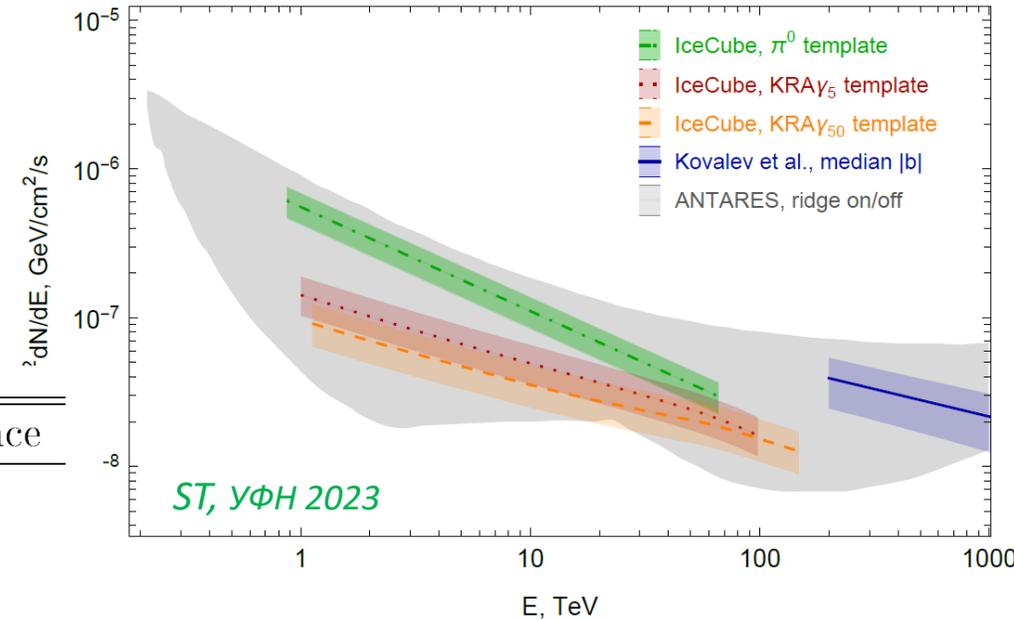
➤ анализы очень разные, и их трудно сравнить...



...но по порядку величины потоки сходятся



Analysis	Energies	Method	Significance
Kovalev et al., 2022 ApJL	$\gtrsim 200$ ТэВ	median of $ b $ distribution	$4.1\sigma$
ANTARES, 2022 PLB	$\sim 1 - 100$ TeV	on/off, ridge	$2.0\sigma$
IceCube, 2023 Science	$\sim 1 - 100$ TeV	templates	$4.5\sigma$

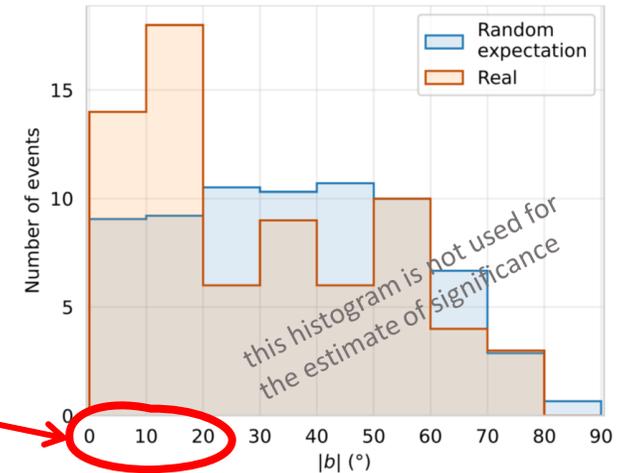


IceCube, Science 2023

➤ две нестыковки:

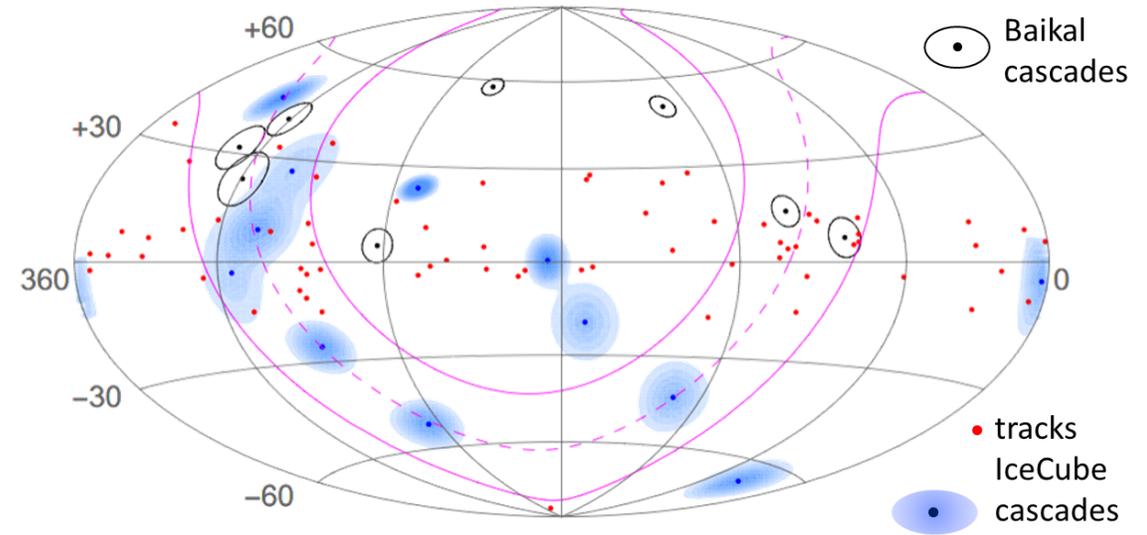
- шаблоны IceCube предсказывают ничтожные потоки выше 200 ТэВ
- выше 200 ТэВ Млечный Путь в нейтрино «слишком широкий»

Kovalev, Plavin, ST, Astrophys. J. Lett. 2022



# Млечный Путь в нейтрино $>200$ TeV, Baikal-GVD & IceCube Baikal-GVD et al., *ApJ* 2025

- данные,  $E > 200$  ТэВ:
  - ✓ каскады Baikal-GVD
  - ✓ каскады IceCube HESE *IceCube 2023*
  - ✓ треки IceCube ICECAT-1 v2 *IceCube ApJS 2023*  
(updated in 2024)
- простой непараметрический тест по  $|b|$
- Млечный Путь во всех 3 наборах данных



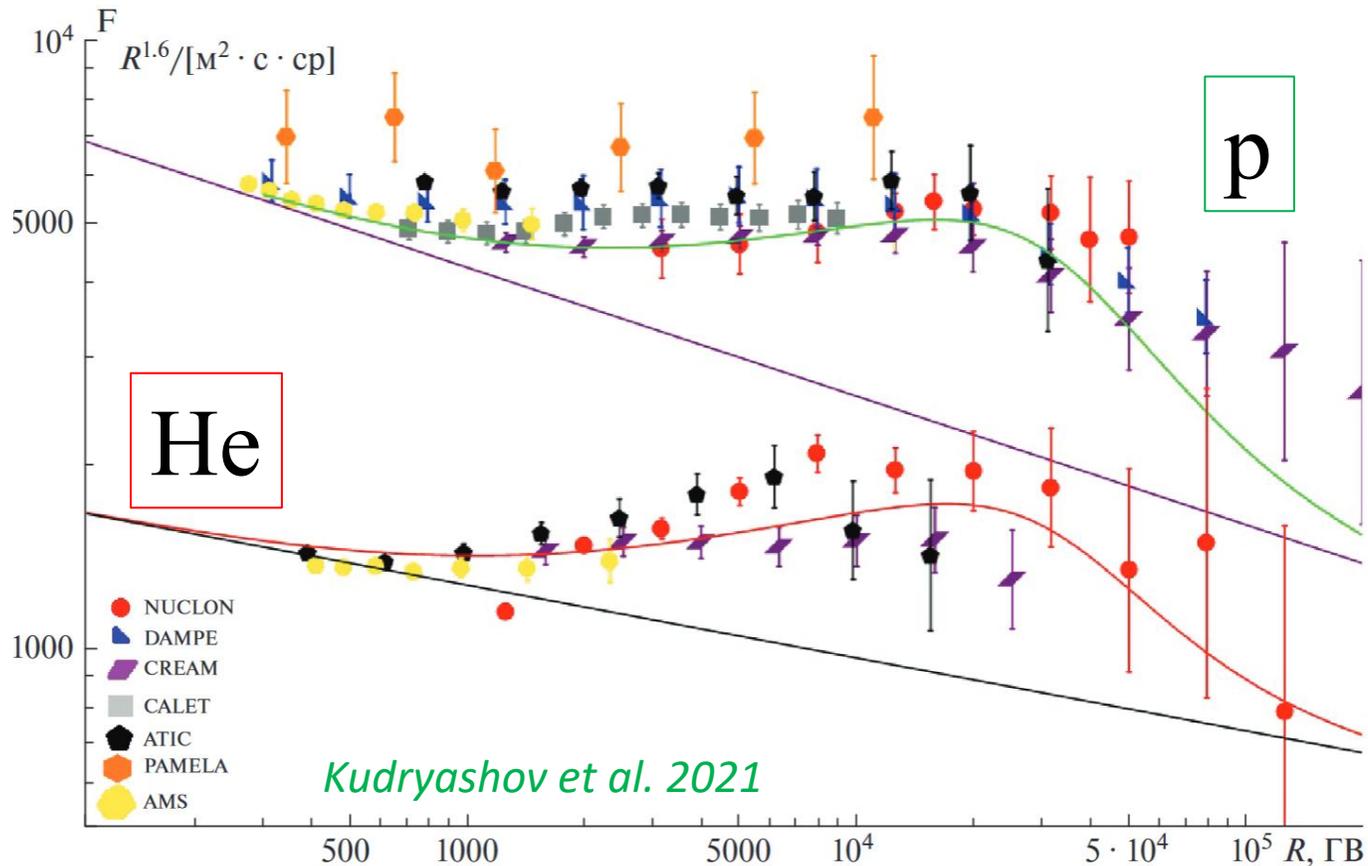
➤ ни одна модель не предсказывает нейтрино от Млечного Пути при  $E > 200$  TeV

➤ **плохие новости** важные выводы для моделей галактических космических лучей

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



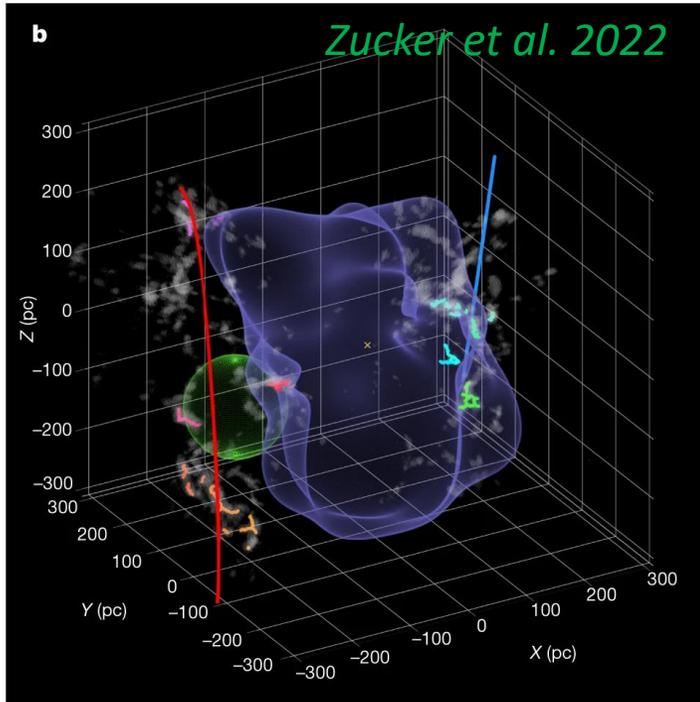
# Локальный источник космических лучей?



- При (10-30) ТВ эксперименты NUCLEON, CALET, DAMPE, CREAM, ATIC, PAMELA,... наблюдают увеличение потока космических лучей
- Может быть объяснено локальным (100-200 пк) усилением рождения космических лучей



# Местный пузырь



- структура размером около 100 пк, Солнце (случайно) почти в центре
- вероятно, связан с несколькими сверхновыми
- наблюдается по распределению газа, поглощению, мерам дисперсии и фарадеевскому вращению
- не включен (как и другие подобные пузыри) в упрощенные модели частиц в Галактике

*Bouyahiaoui, Kachelriess, Semikoz 2018, 2020*

*Neronov, Kachelriess, Semikoz 2018*

*Giacinti et al. 2023*



**Требуется обновление модели галактических космических лучей!**



# Адронные взаимодействия:

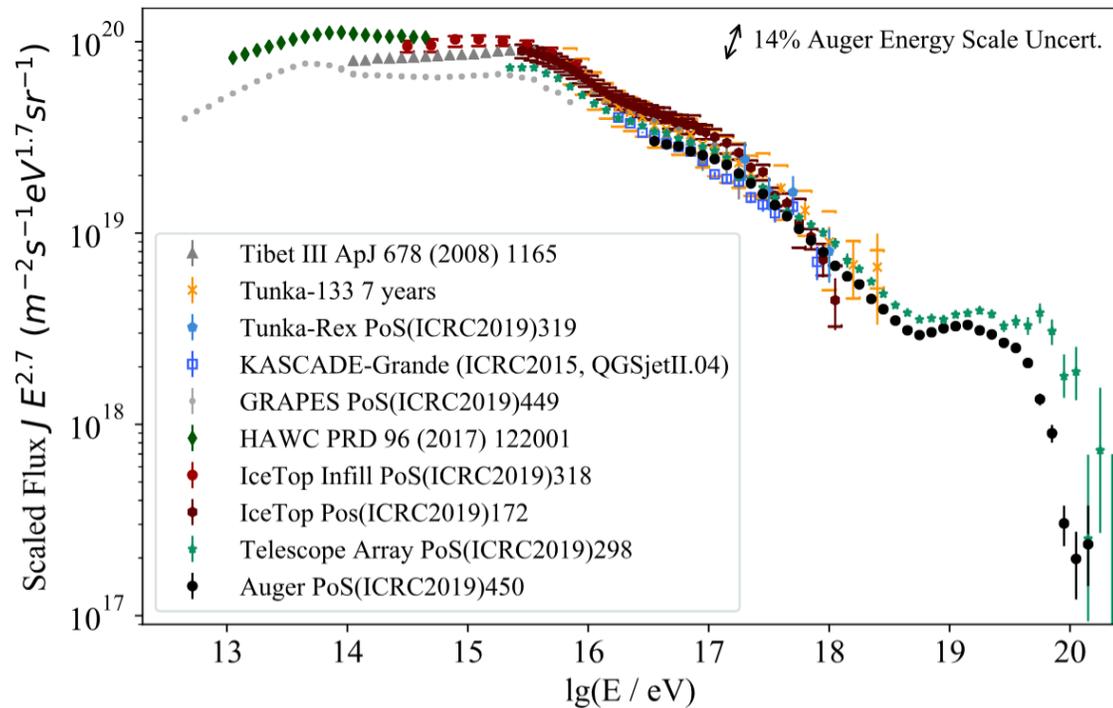
- при рождении космических лучей
  - возможность ответить на вопросы об астрофизических объектах
- при **распространении** космических лучей
  - **возможность ответить на вопросы о космических лучах**
  - при детектировании космических лучей
    - возможность ответить на вопросы о физике частиц



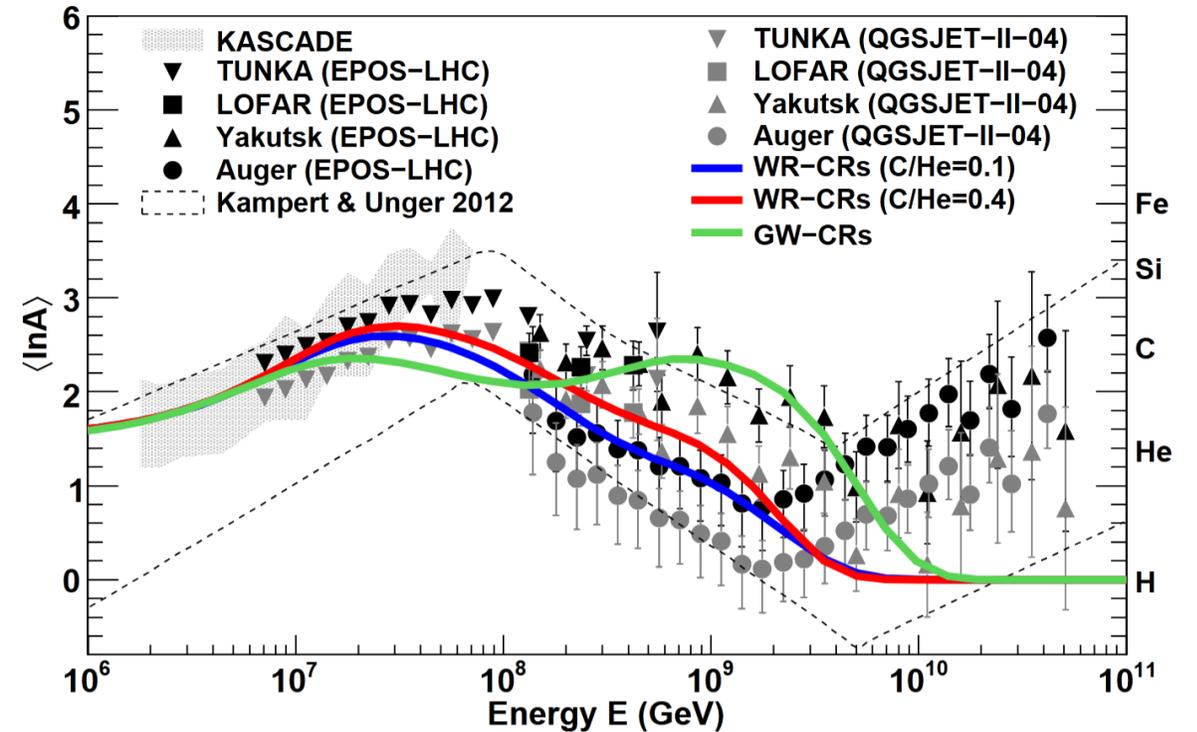
# Взаимодействия космических лучей при распространении

- **проблема:** не прямое детектирование не позволяет надежно определить тип и энергию космических частиц

энергия

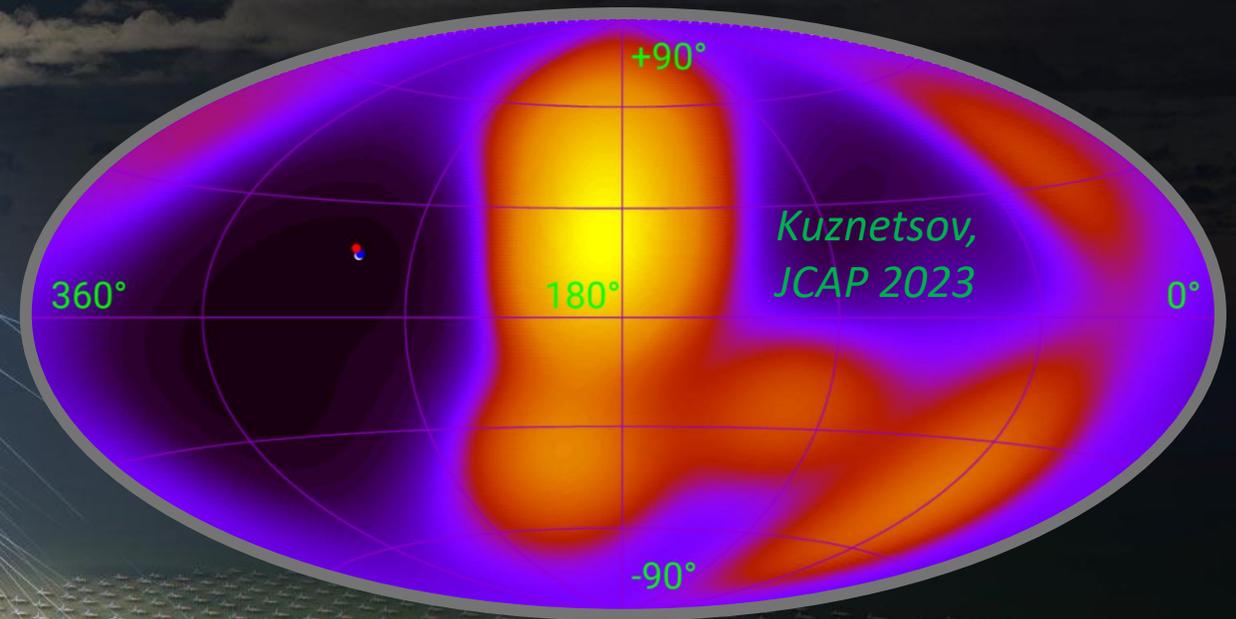


состав

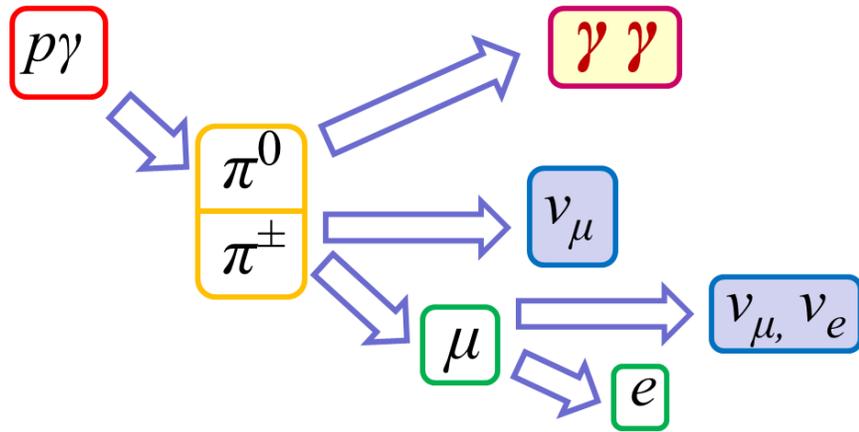


# Пример: «частица Аматерасу»

- зарегистрирована Telescope Array в 2021 году  
*Telescope Array, Science 2023*
- энергия  $2.4 \times 10^{20}$  эВ, номер 2 после события Fly's Eye 1994 года



# Космогенные нейтрино и фотоны



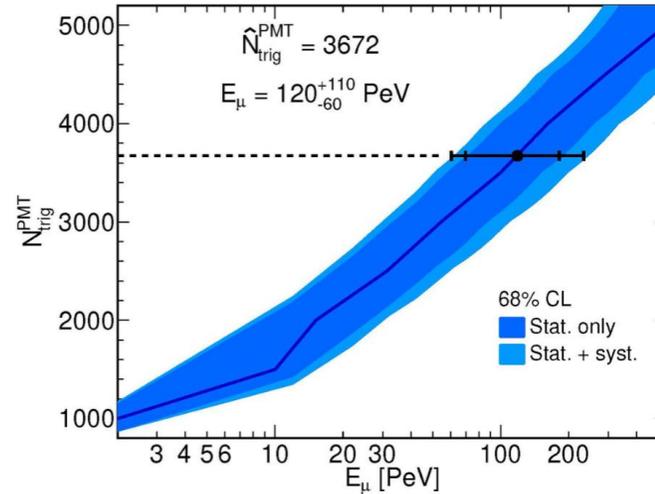
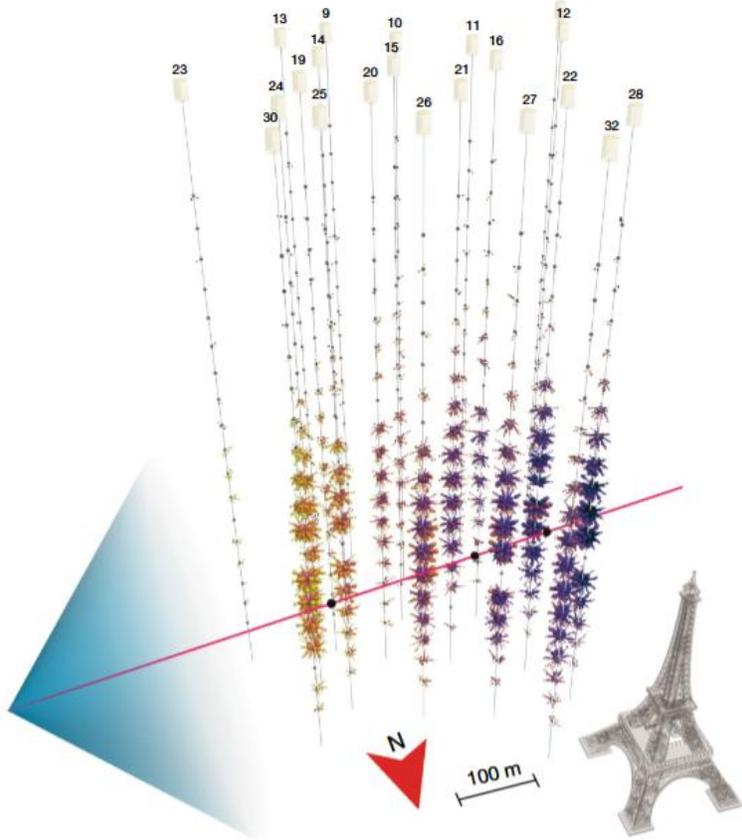
*Berezinsky & Zatsepin 1969*

- энергии в 1/10 (1/20) от энергии протона
- предсказания существенно различаются для протонов и ядер: для ядер нет  $\Delta$ -резонанса, потоки существенно ниже
- обнаружение или строгое ограничение на поток даст возможность сделать выводы о составе космических лучей



# Самый высокоэнергичный мюон, зарегистрированный человечеством: KM3 230213A

*KM3NeT, Nature (2025)*



muon energy:

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

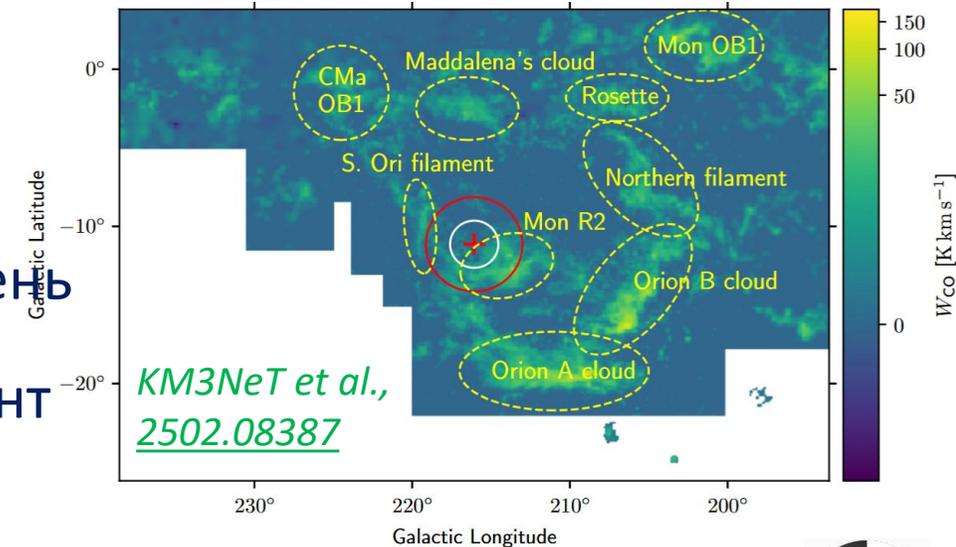
neutrino energy:

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

- возможные астро источники:
- молекулярное облако Monoceros R2 как мишень

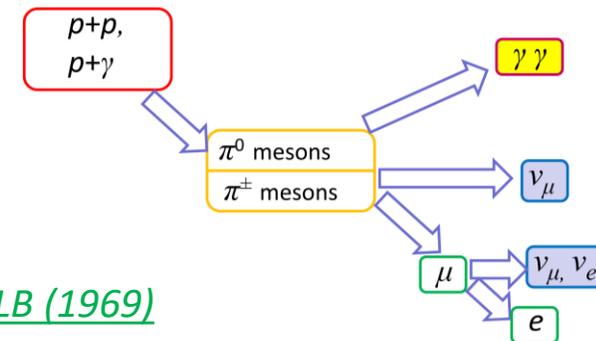
➤ несколько блазаров, один вспыхнул в нужный момент

*KM3NeT et al., 2502.08484* (теория: *Dzhatdov, 2502.11434; Neronov et al., 22.12986; Kivokurtseva & ST, 2509.10352*)



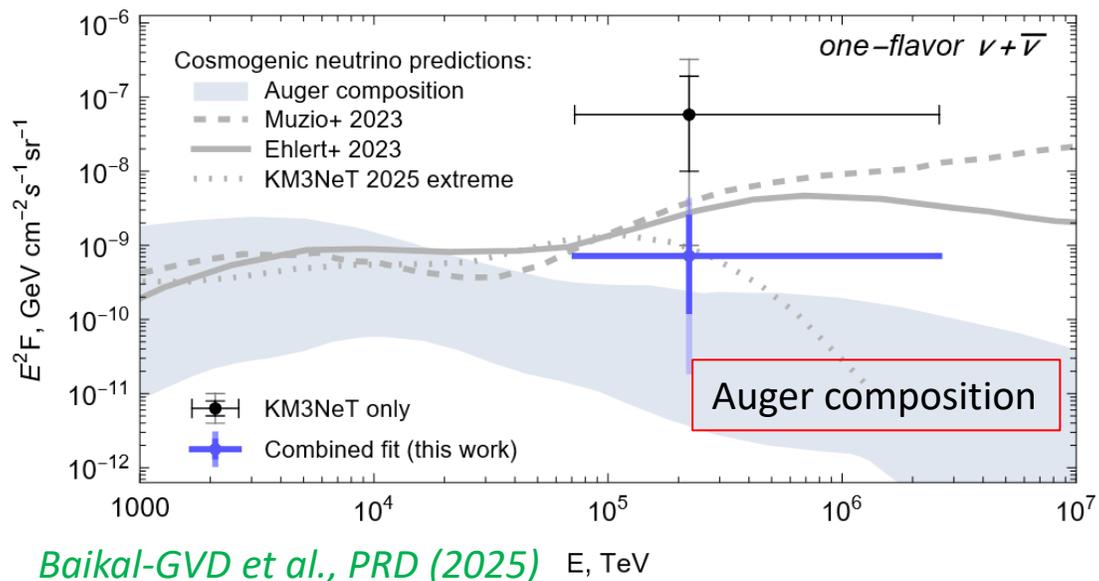
# KM3 230213A как космогенное нейтрино

- если событие из диффузного потока:
  - $N[\text{IceCube+Auger+Baikal-GVD}]=0$  &  $N[\text{KM3NeT}]=1$ :  $p=1.2\%$
- космогенные нейтрино – от протонов

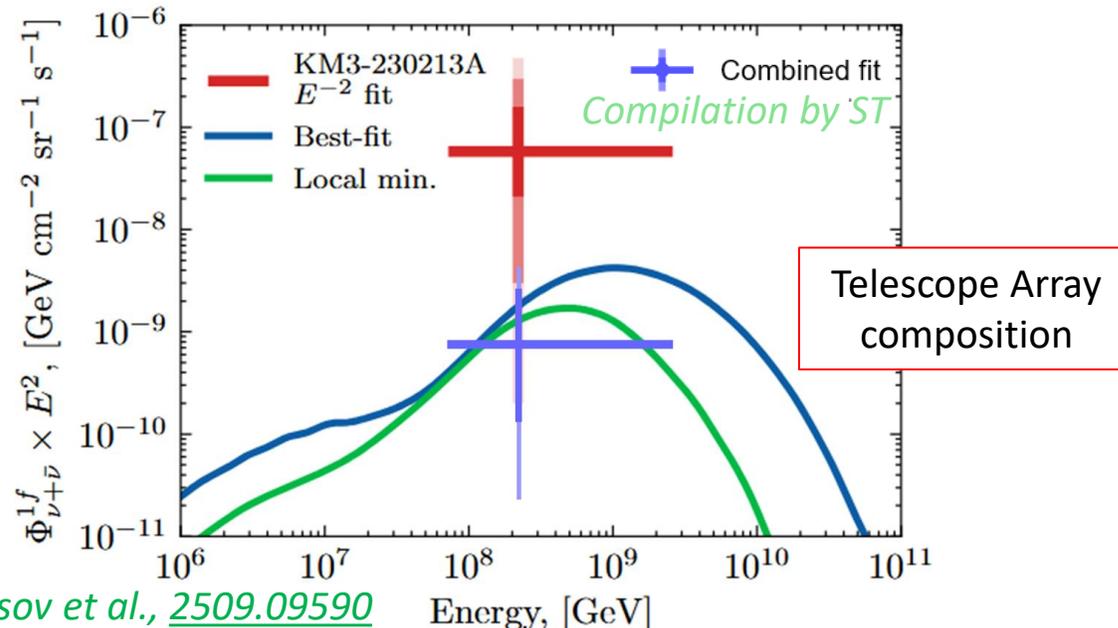


*Berezinsky & Zatsepin, PRL (1969)*

*IceCube, PRL (2025); KM3NeT, ApJL (2025); Baikal-GVD et al., PRD (2025); Kuznetsov et al., 2509.09590*



*Baikal-GVD et al., PRD (2025)*



*Kuznetsov et al., 2509.09590*

- если интерпретировать как космогенное, интересные выводы о составе КЛ



# Адронные взаимодействия:

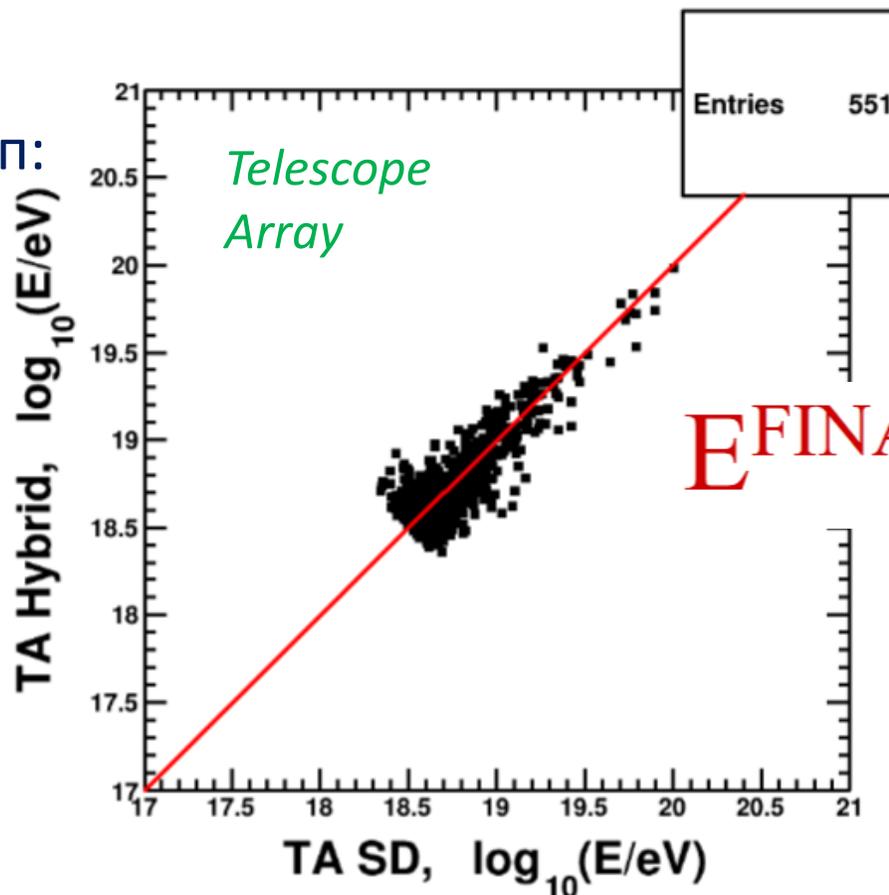
- при рождении космических лучей
  - возможность ответить на вопросы об астрофизических объектах
- при распространении космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о космических лучах
- при **детектировании** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о физике частиц



# Взаимодействия космических лучей при детектировании

- **проблема:** кинематические режимы и энергии в системе центра масс, не исследованные на ускорителях

флуоресцентный телескоп:  
электромагнитный ствол  
ливня в развитии



$$E^{FINAL} = E^{TBL} / 1.27$$

наземная решетка: сумма  
всех компонент на  
периферии ливня в срезе  
мюоны тут!



# Мюонный избыток = мюонный дефицит

История:

SUGAR, ICRC 1965

HiRes-MIA, PRL 2000

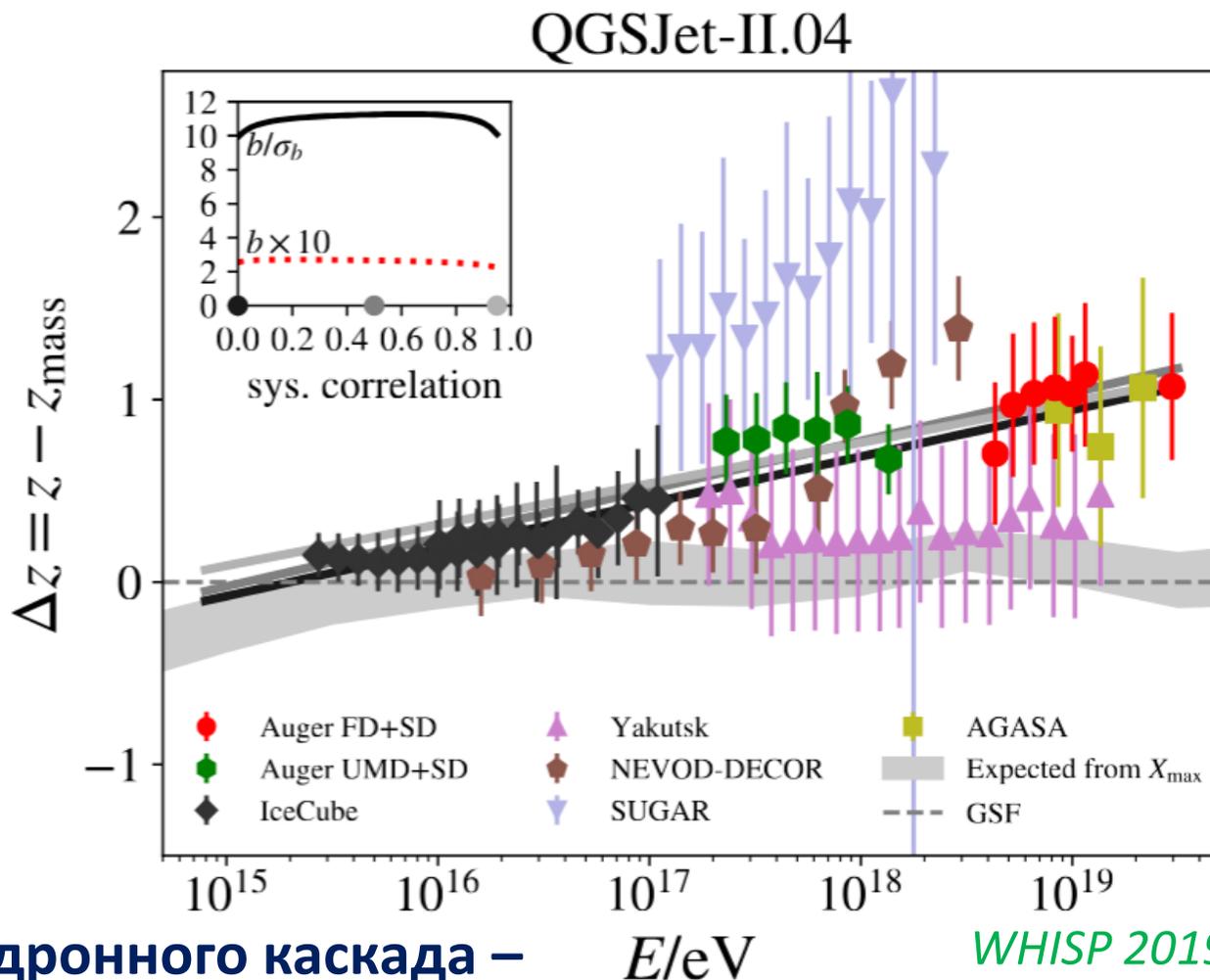
Auger, ICRC 2007

Якутск, Письма в ЖЭТФ 2007

НЕВОД, ЯФ 2010

....

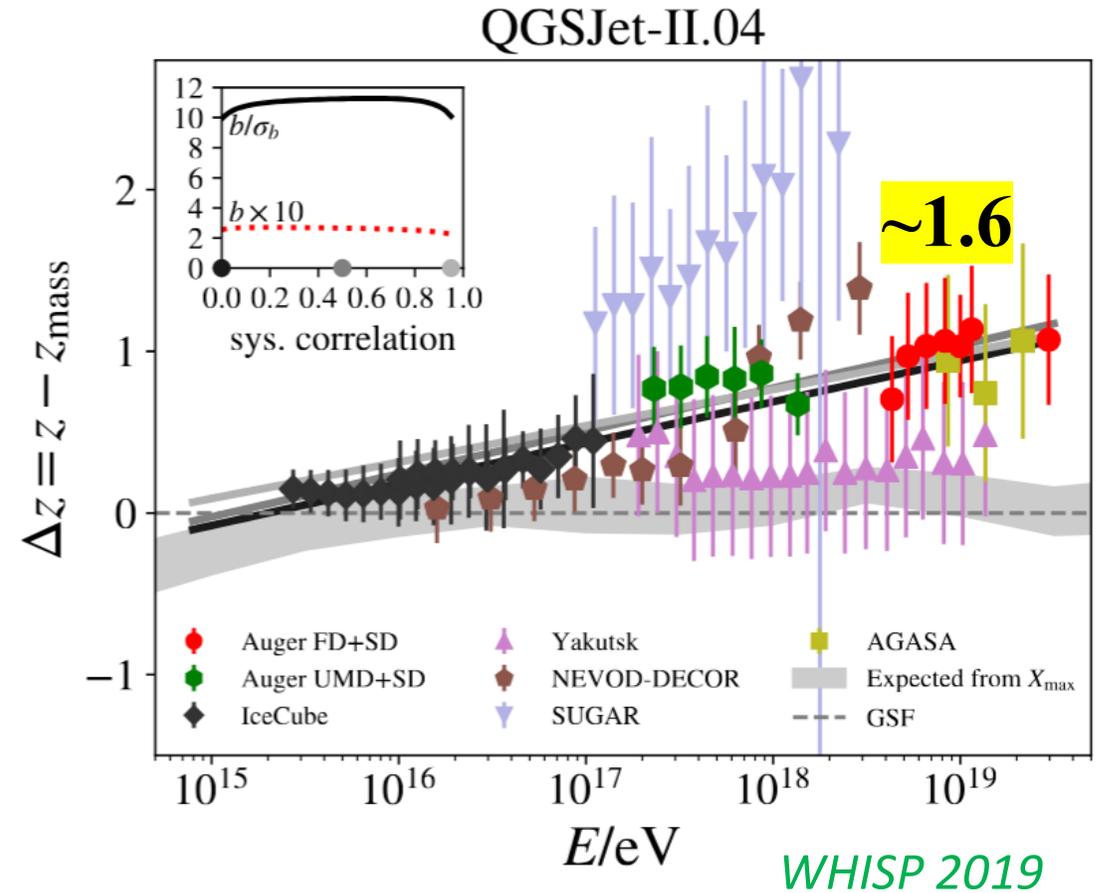
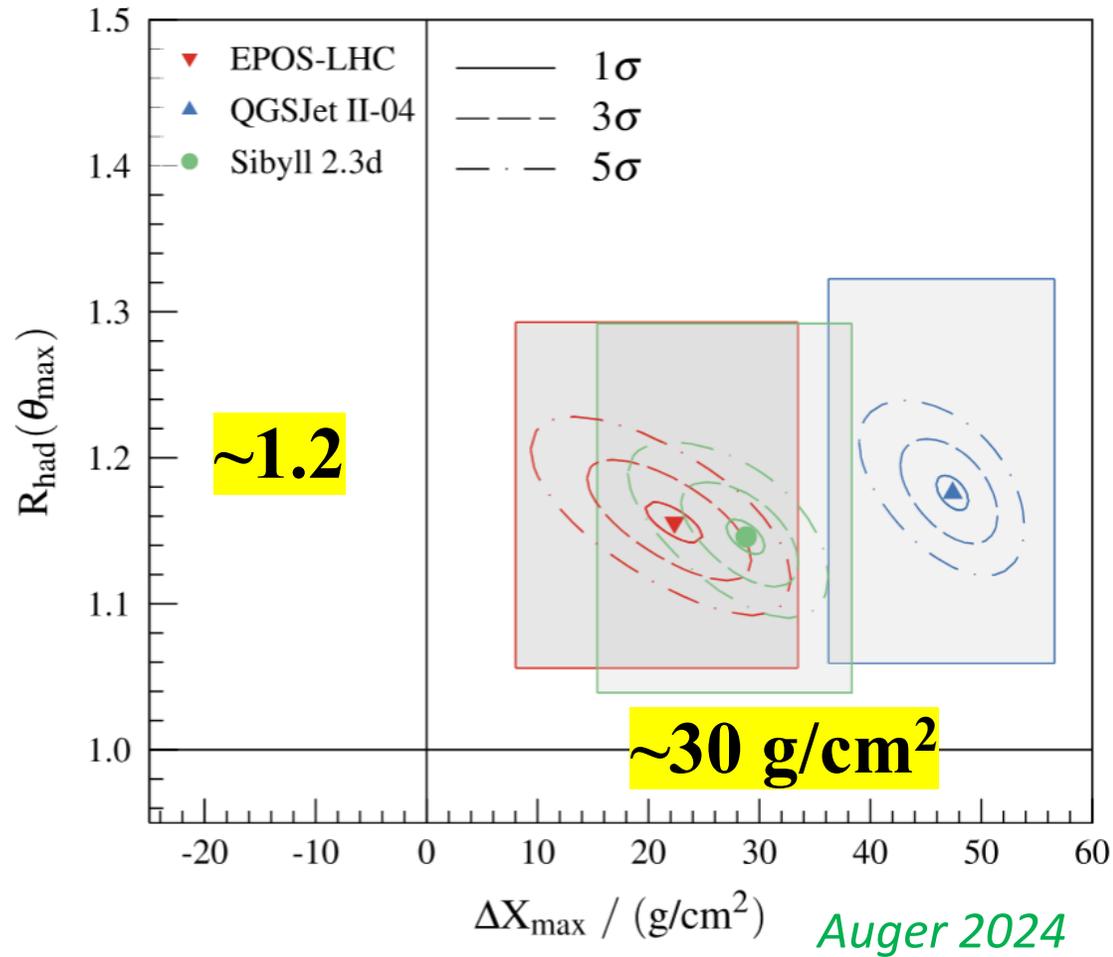
эти мюоны родились в конце адронного каскада –  
накапливающиеся небольшие поправки в физике?



WHISP 2019

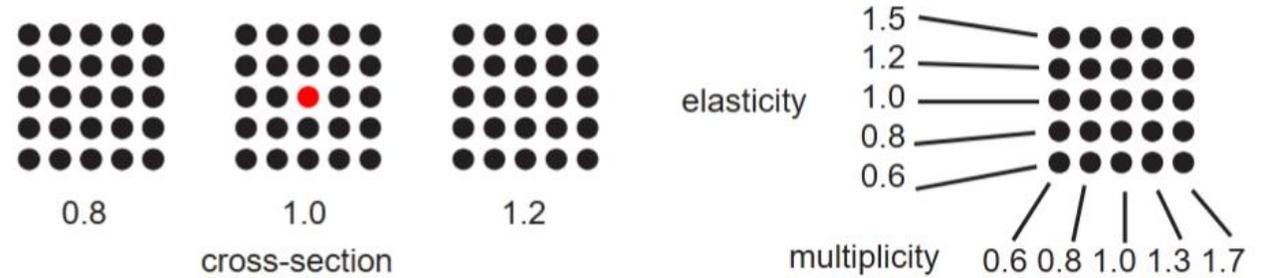


# Мюонный избыток частично «лечится» сдвигом максимума ливня

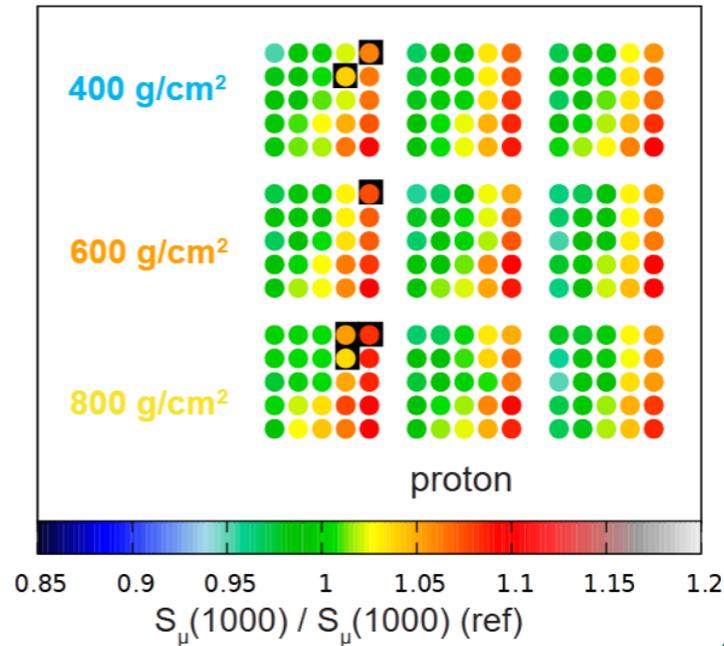


# Физика: перекачать энергию в электромагнитный каскад

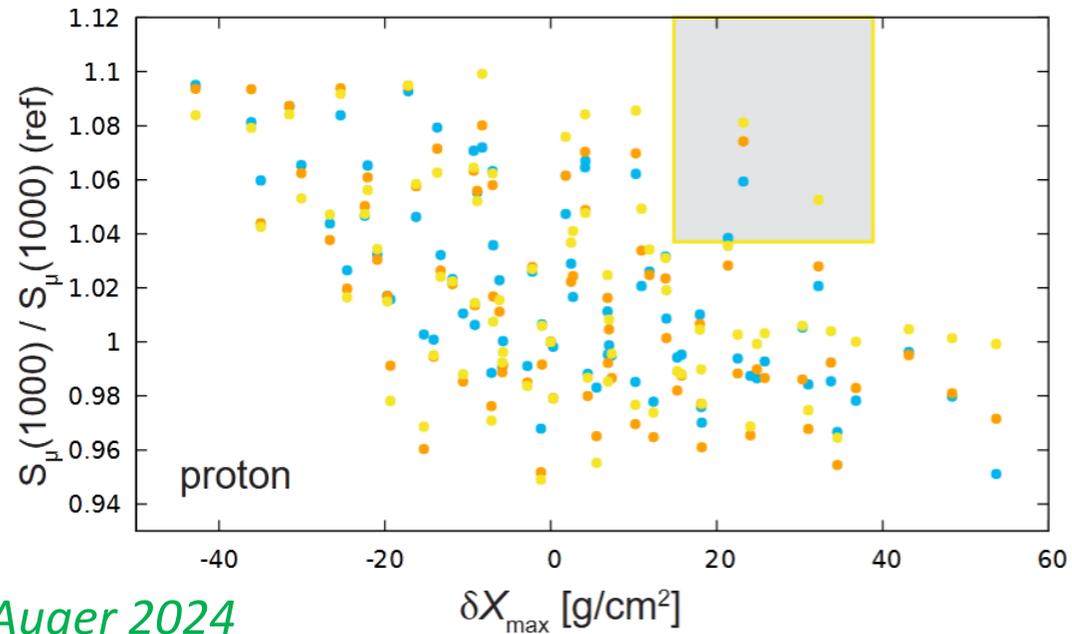
1. сечение
2. множественность
3. неупругость
4. состав рожденных частиц



1, 2, 3 – нужны экзотические изменения



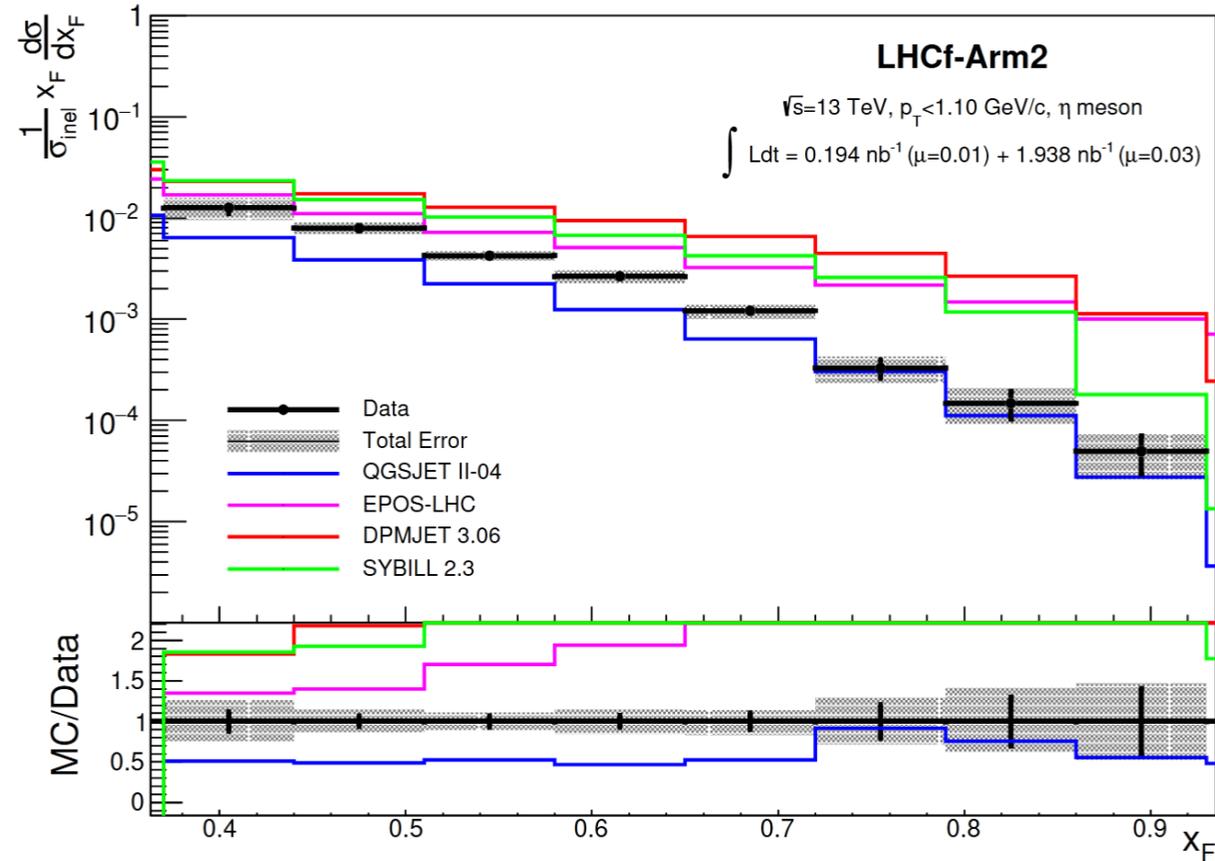
Auger 2024



# Состав рождаемых частиц известен плохо

считается одним из перспективных вариантов...

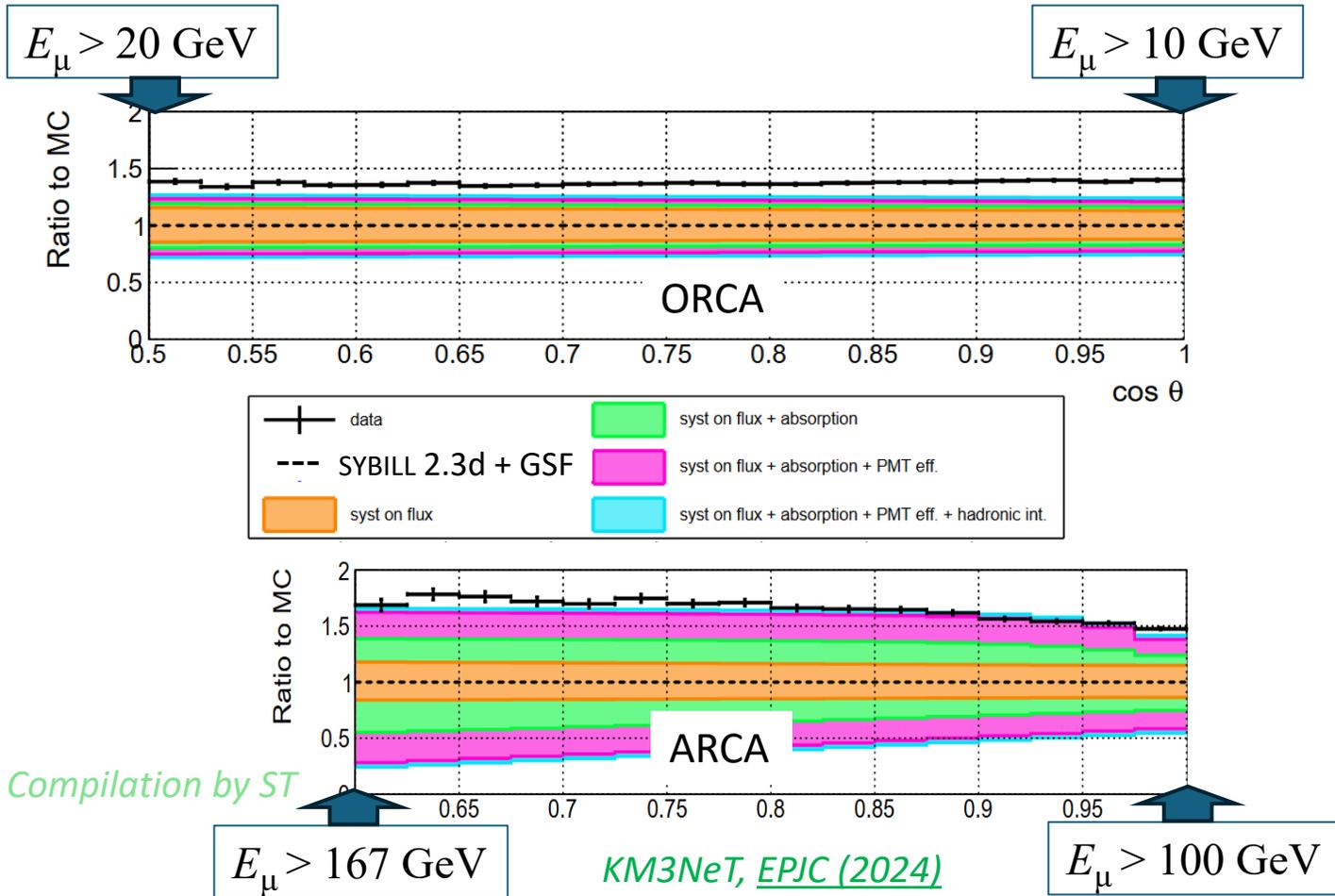
Пример: инклюзивное рождение эта-мезонов не описывается ни одной моделью *LHCf 2023*



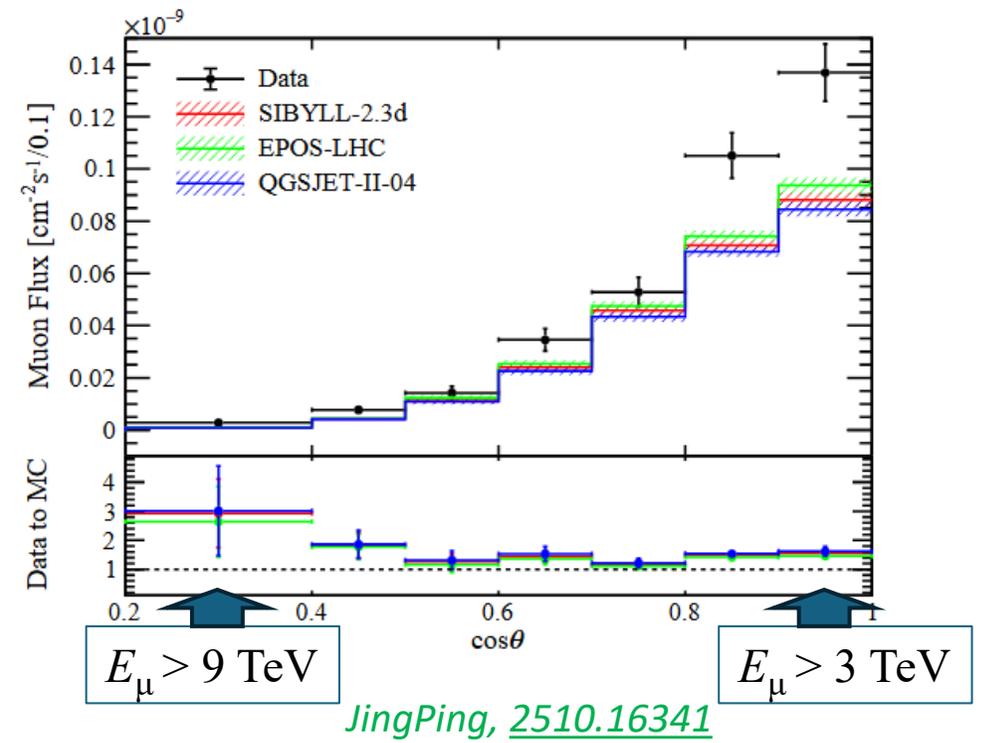
$$x_F = 2p_z / \sqrt{s}.$$



# Атмосферные мюоны (предложено Л.Г. Деденко, Кварки-2004)



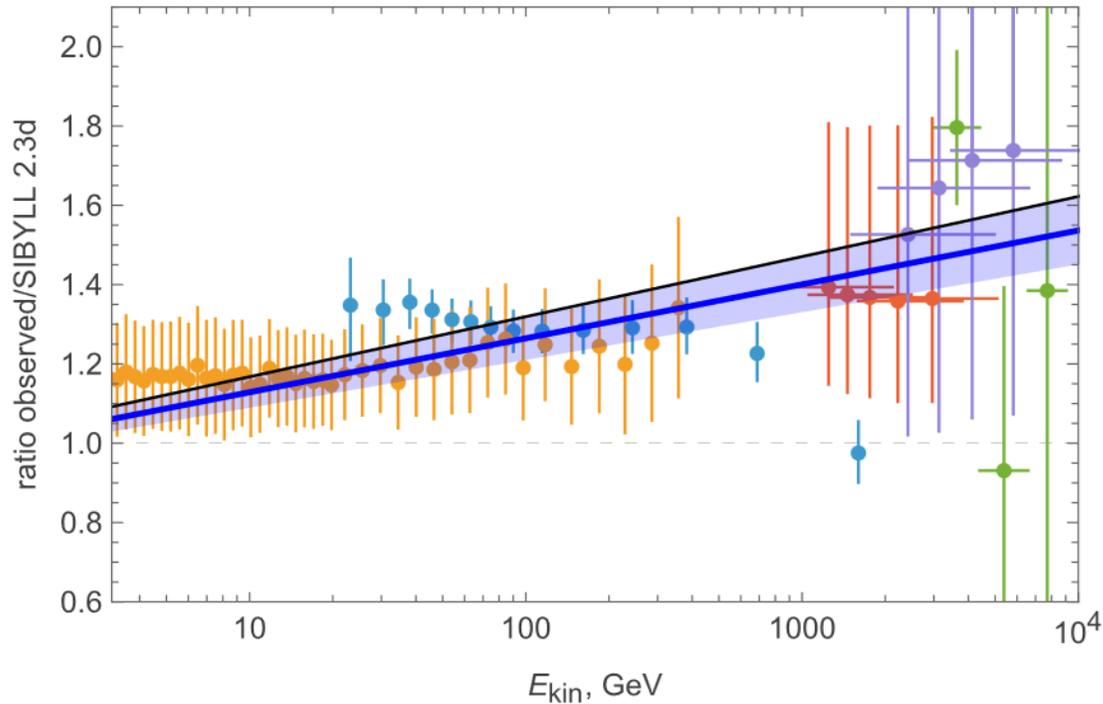
*KM3NeT, EPJC (2024); ALICE, JCAP (2025); IceCube, ICRC-2025; JingPing, 2510.16341*



*Compilation by ST*



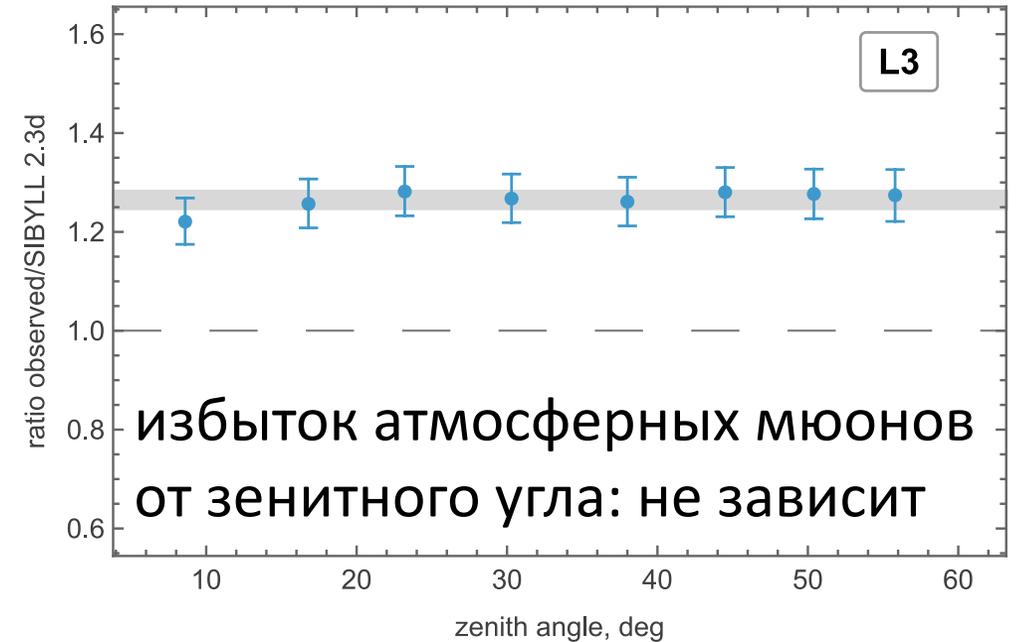
# Атмосферные мюоны, «метаанализ»



- KM3neT ARCA
- KM3neT ORCA
- JingPing
- BESS
- L3

*Rubtsov, ST (in progress)*

данные поделить на  
модель SIBYLL 2.3d



избыток атмосферных мюонов  
от энергии: слабая зависимость

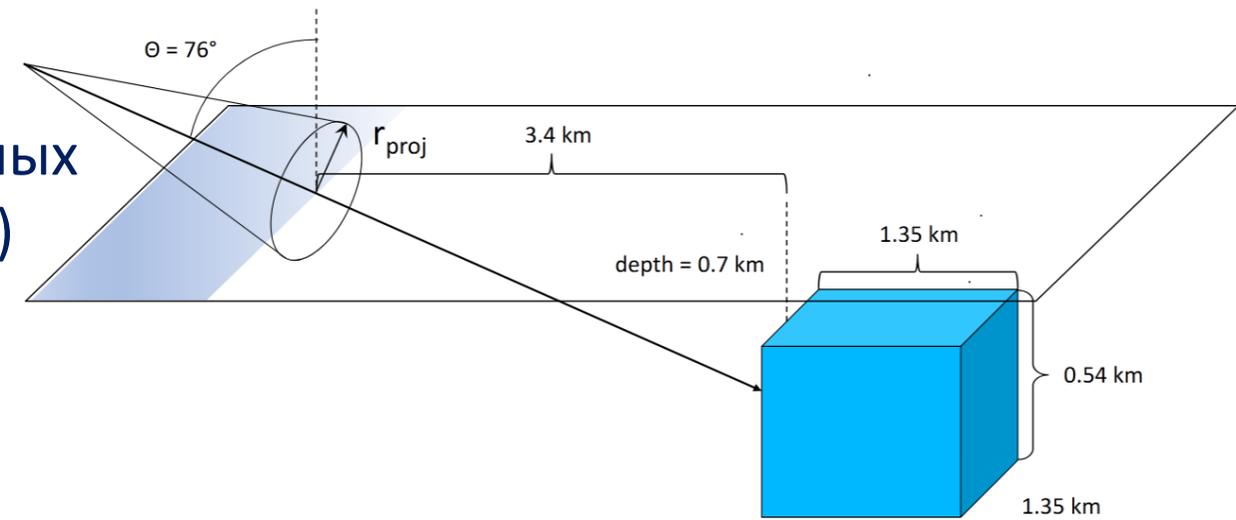
избыток атмосферных мюонов  
от зенитного угла: не зависит

**эти мюоны родились в первых взаимодействиях!**



# Что делать?

- изучать разные компоненты ливня (Auger Prime, ждём результатов)
- столкновения протон-кислород на LHC (2025, ждём результатов)
- продвигаться в нужную кинематику (Forward Physics Facility – предложение для HL-LHC, *Anchordoqui et al. 2025*)
- не пренебрегать изучением атмосферных мюонов! (Baikal-Top, *Kravchenko et al. 2025*)



# Адронные взаимодействия:

- при **рождении** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы об астрофизических объектах
- при **распространении** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о космических лучах
- при **детектировании** космических лучей
  - возможность ответить на вопросы о физике частиц

**эти возможности – в процессе реализации...**

