

# Нейтринная астрофизика высоких энергий

**Сергей Троицкий**  
(ИЯИ РАН и физфак МГУ)



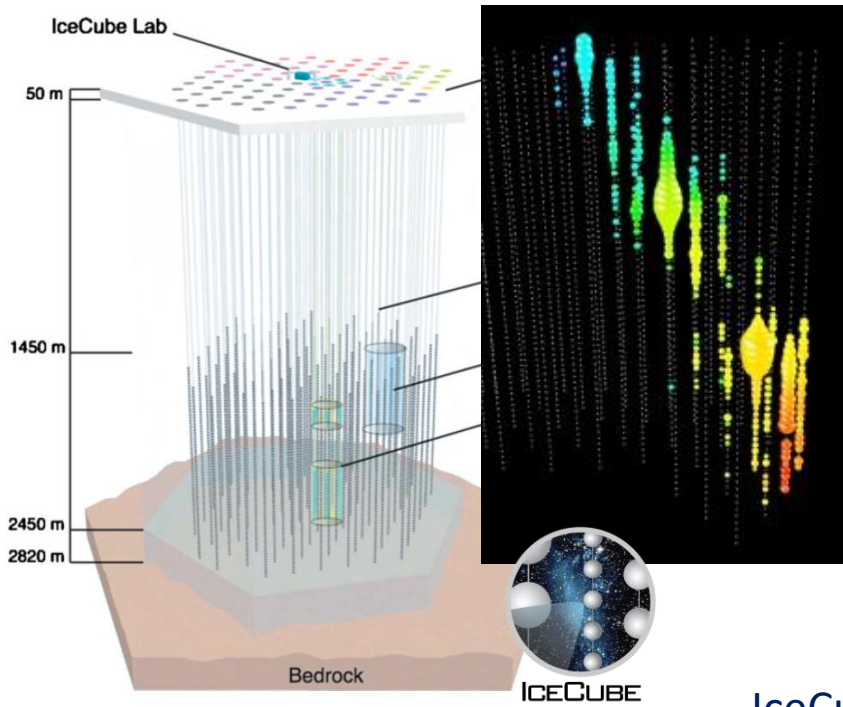
*Сессия Секции ядерной физики РАН, ОИЯИ, 05.04.2024*



# Введение



# Нейтрино высоких энергий



- Южный полюс, работает с 2008
- открытие внеземных нейтрино  $>60$  TeV
- происхождение нейтрино точно не известно!

## IceCube:

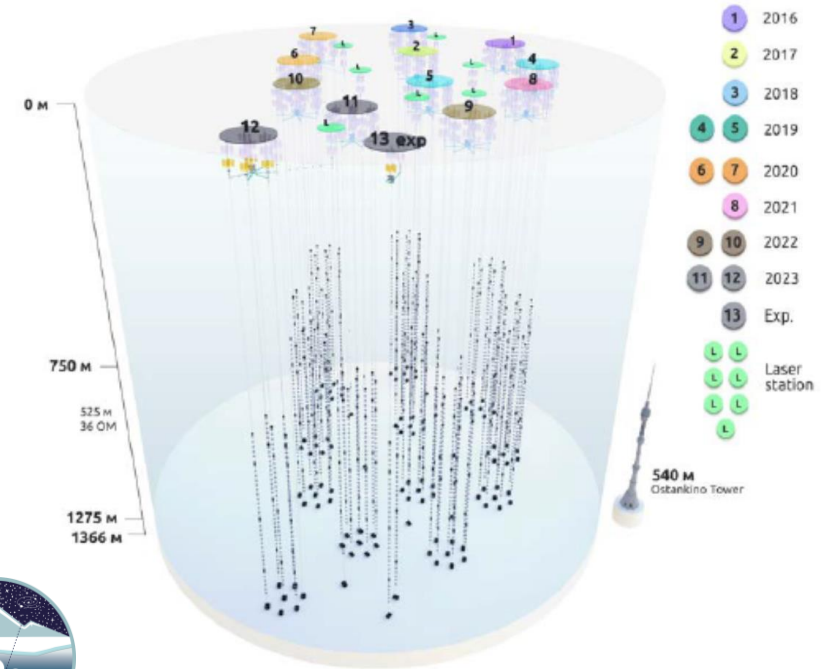
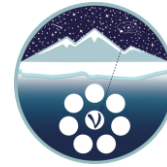
- Средиземное море, создается



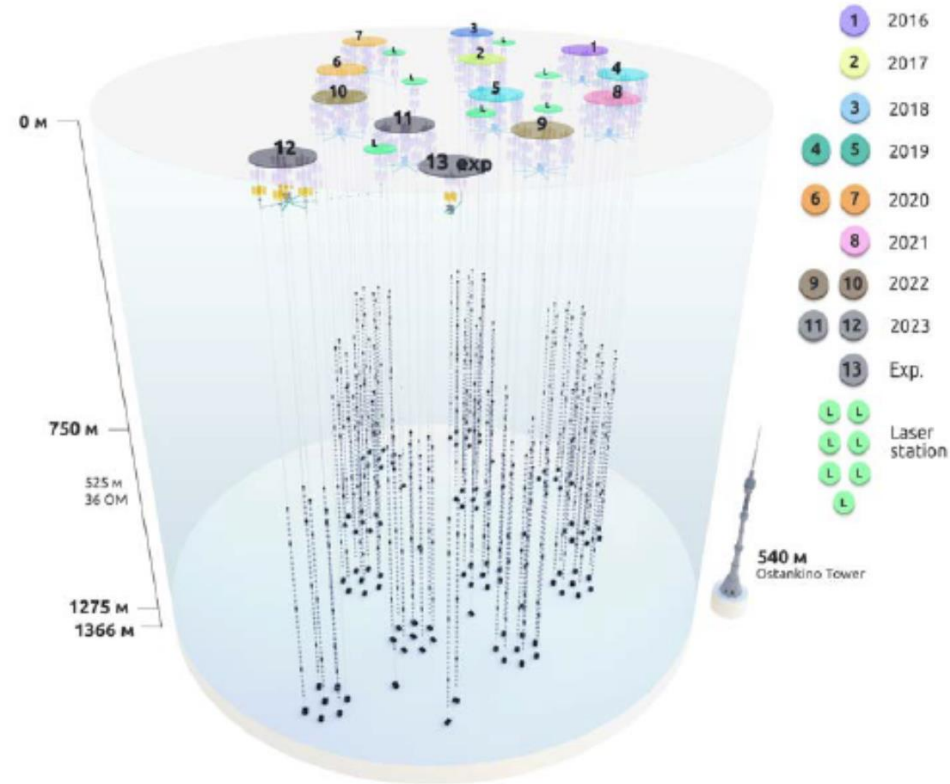
## KM3NeT:

## Baikal-GVD:

- направления прихода нейтрино в воде точнее, чем во льду
- официально запущен в 2021, но набор данных с 2017 в неполной конфигурации
- эффективный объем Baikal-GVD для нейтрино высоких энергий порядка эффективного объема IceCube
- Юг+Север = полное небо в нейтрино

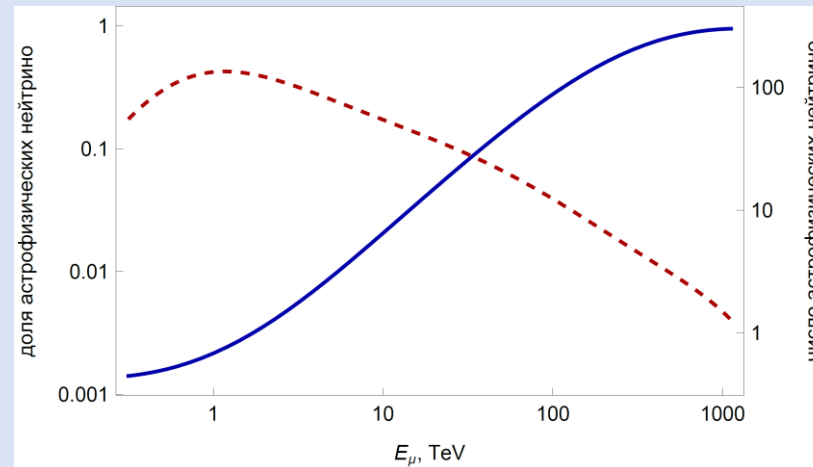


# Baikal-GVD 2024

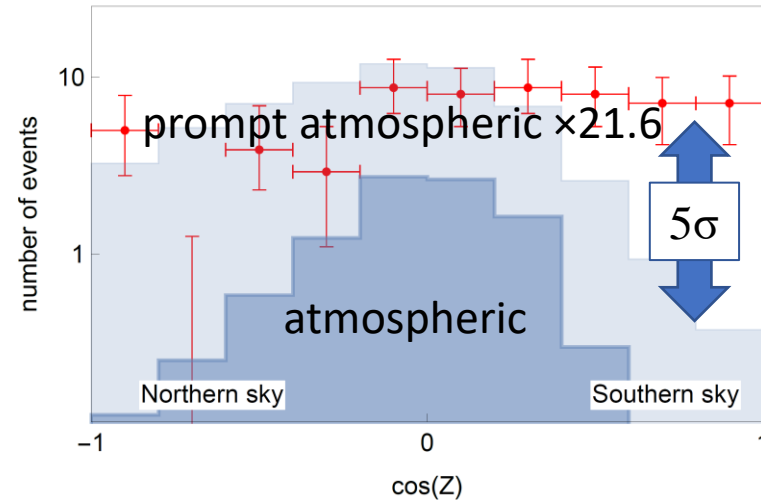
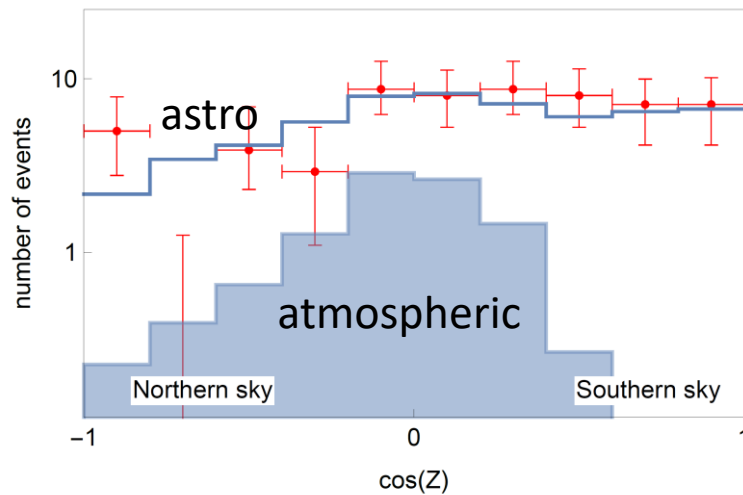
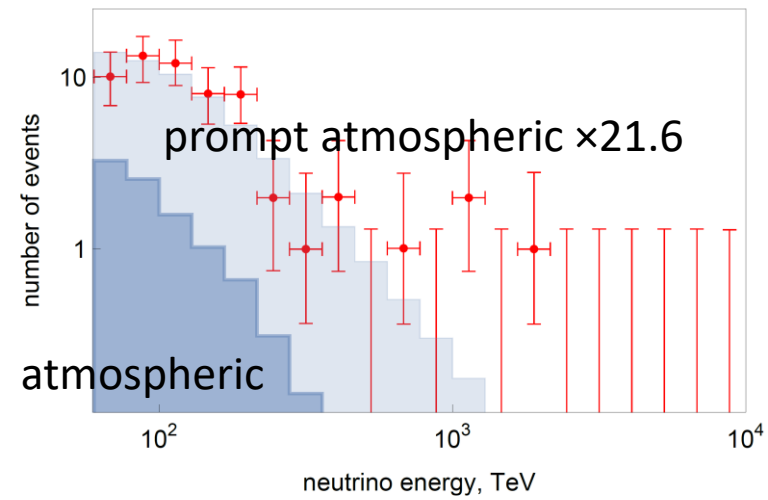
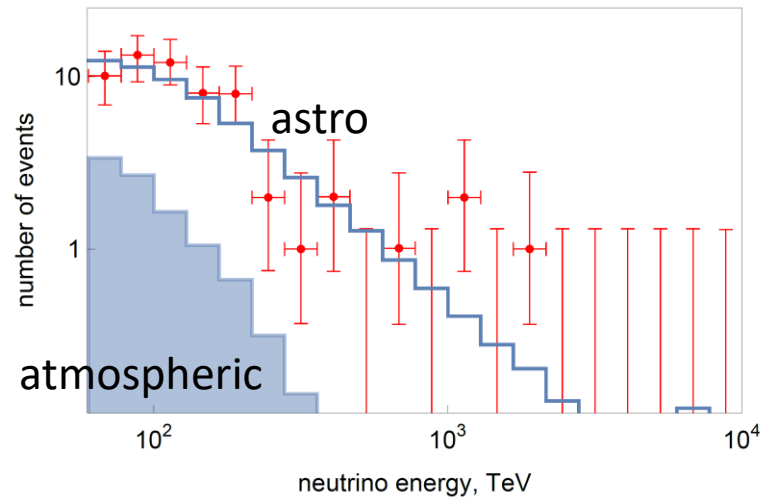


# Некоторые трудности...

- Много нейтрино (и мюонов) рождается в атмосфере, так что даже определить астрофизическое происхождение затруднительно.



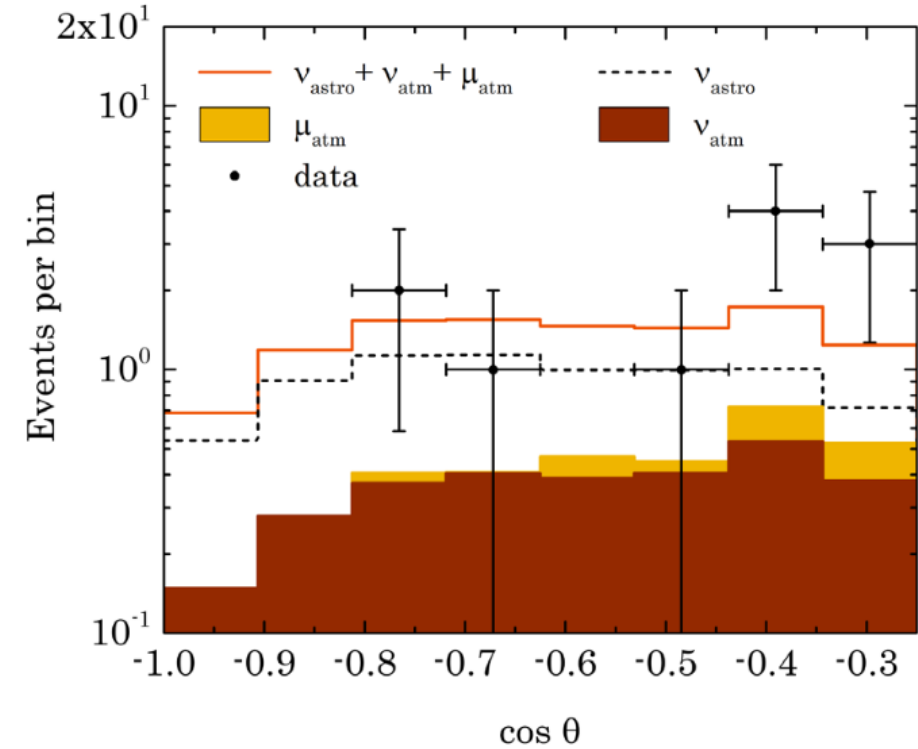
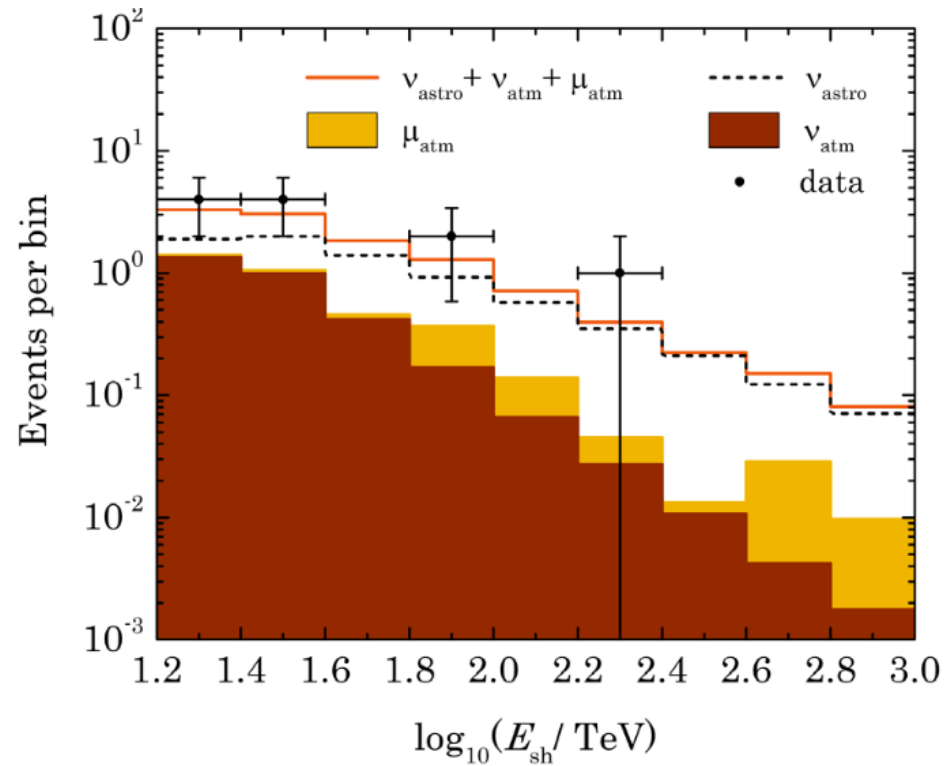
# Астрофизические нейтрино высоких энергий существуют [IceCube 2014, 3 $\sigma$ ]



*IceCube, PRD 2020 - 5 $\sigma$*



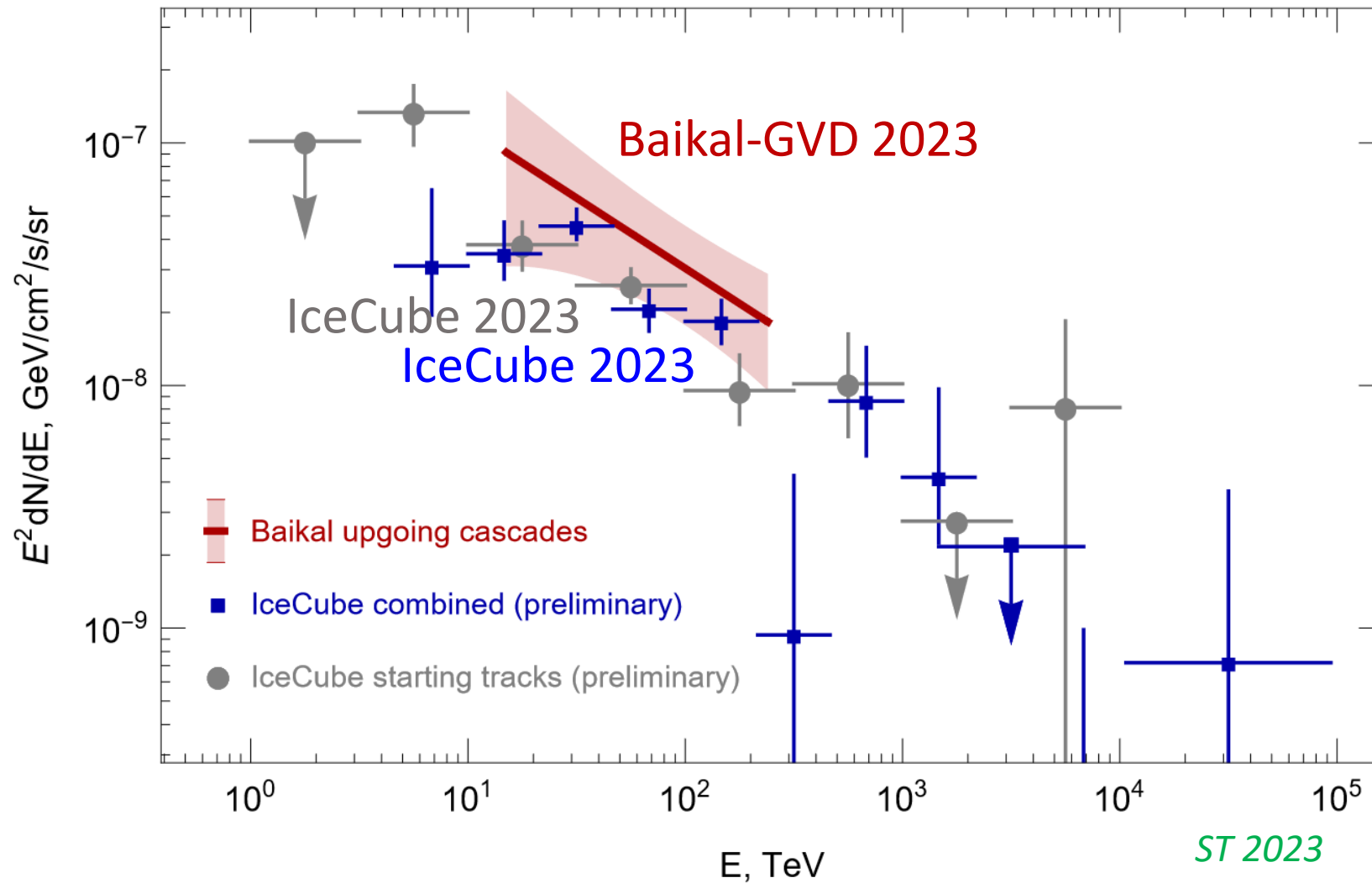
# Подтверждение в независимом эксперименте [Baikal-GVD 2022, $3\sigma$ ]



Baikal-GVD, PRD 2023

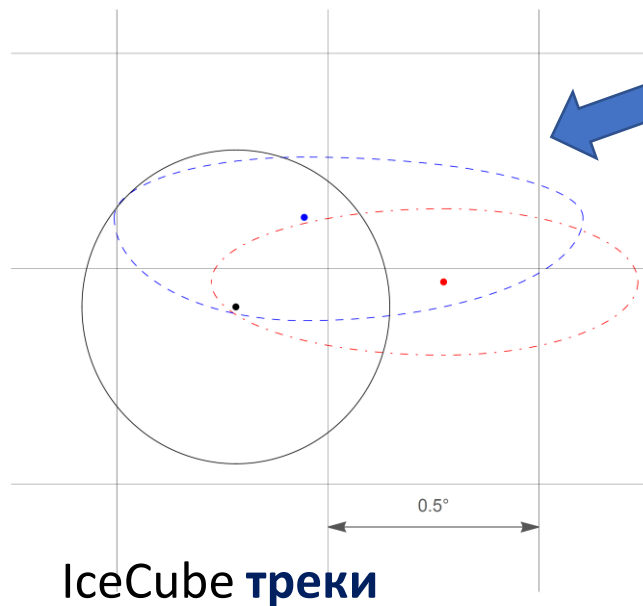


# Спектры астрофизических нейтрино



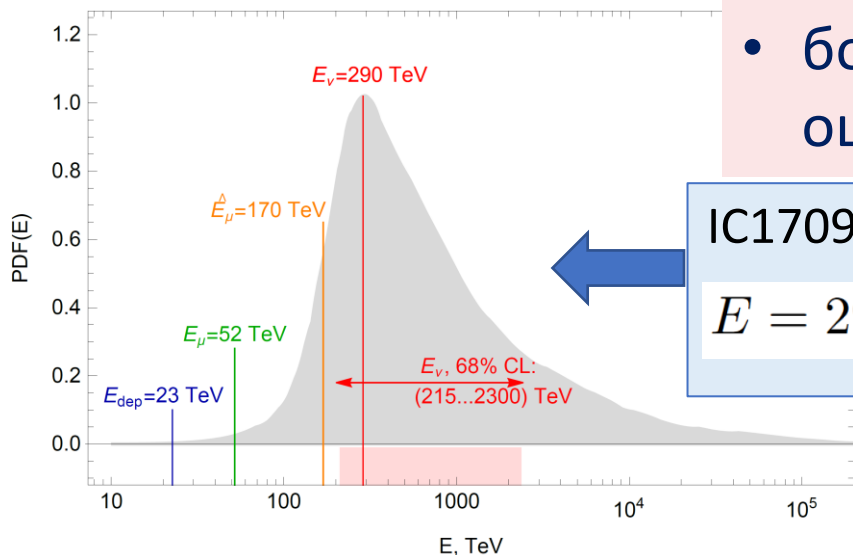


# Большие неопределенности



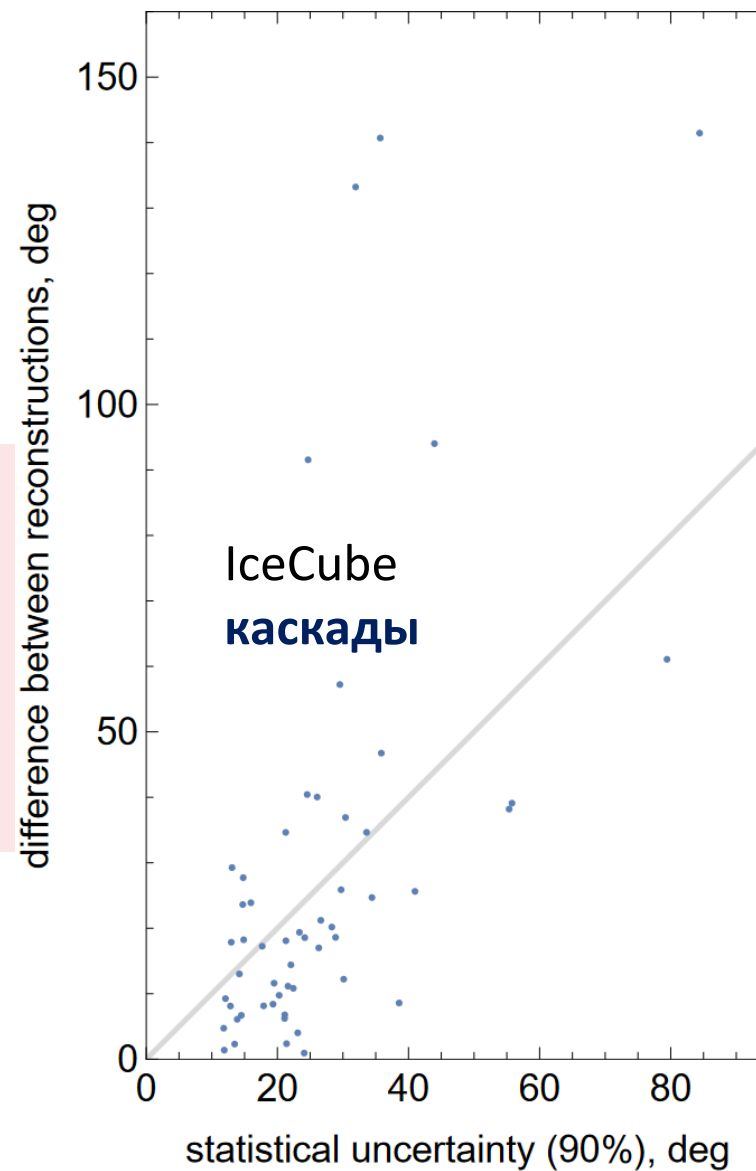
один и тот же трек,  $E > 4$  ПэВ:  
направление прихода в трёх опубликованных реконструкциях

- низкая точность определения направлений и энергий
- большие систематические ошибки (свойства льда)

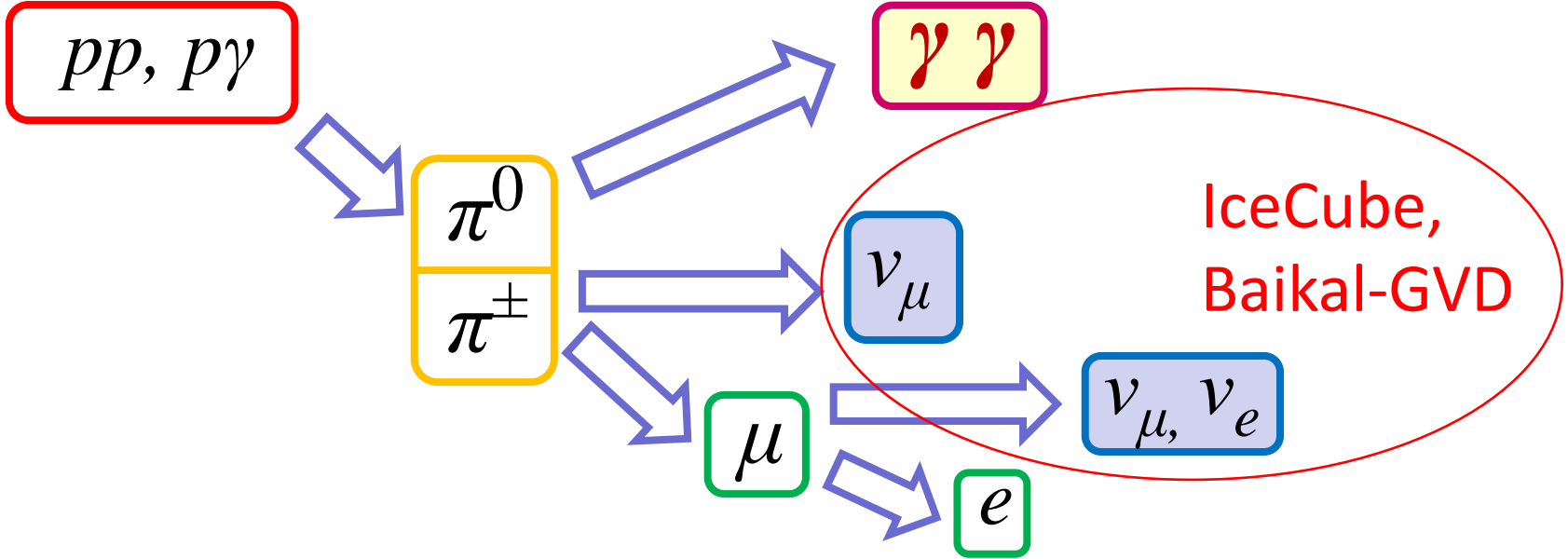


IC170922A трек:  
 $E = 290_{-75}^{+2010}$  TeV

ST - УФН 2021



# Нейтрино высоких энергий требуют релятивистских протонов



- ✓ Энергии выше 1 ТэВ – нетепловое происхождение
- ✓ Стандартная физика – только процессы с участием ускоренных адронов (протоны, ядра)



Нейтрино – маркер релятивистских протонов и нетепловых процессов



# Внегалактические источники



# Нейтрино высоких энергий - от радиоблазаров!

$E > 200$  ТэВ

*Plavin et al. ApJ 2020*

- Направления прихода нейтрино совпадают с радиоблазарами с большим потоком

эффект статистический,

но основной вклад – от 4 мощных источников:

1253-055 = 3C 279, 1730-130, 1741-038, 2145+067

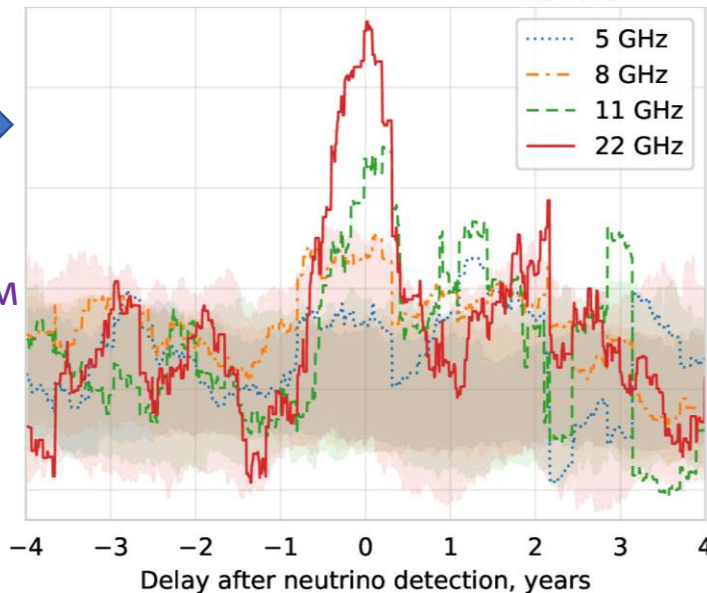
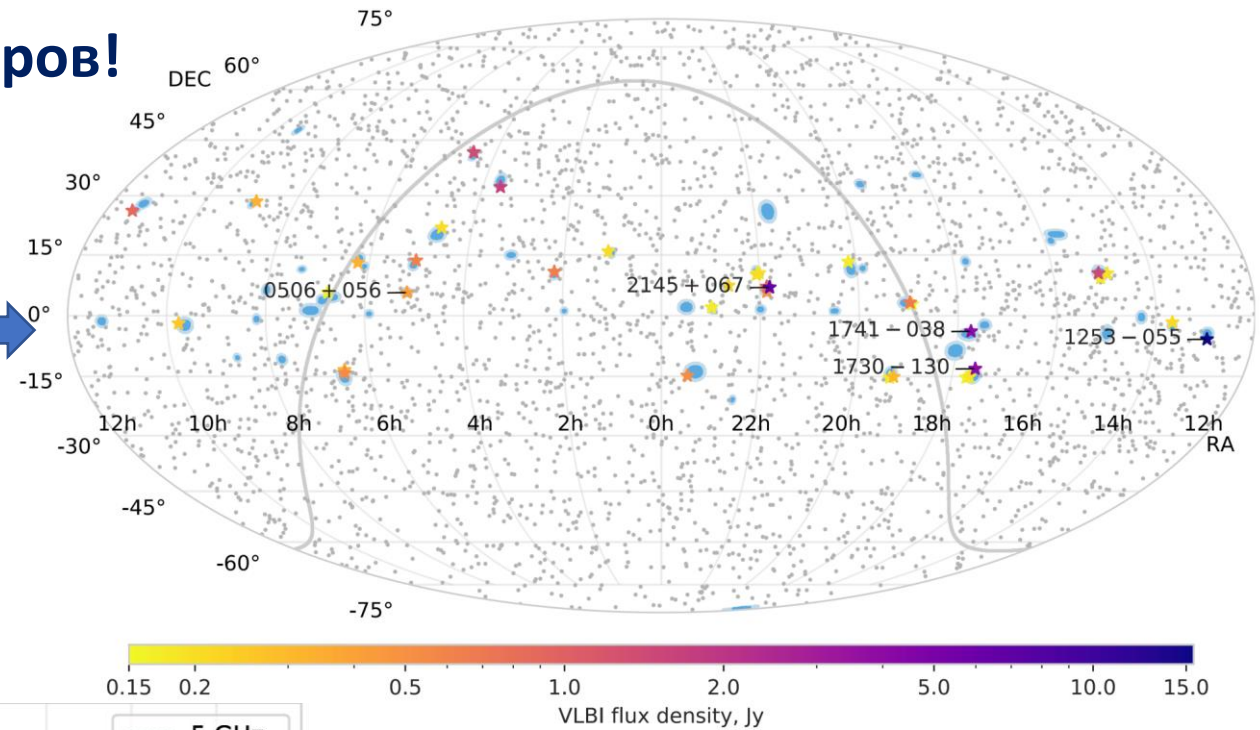
статистическая значимость  $3.1\sigma$  post trial

- Времена прихода нейтрино совпадают с их радиовспышками

эффект статистический,

превышение радиопотока над средним (данные РАТАН-600 САО РАН)

статистическая значимость  $2\sigma$  post trial



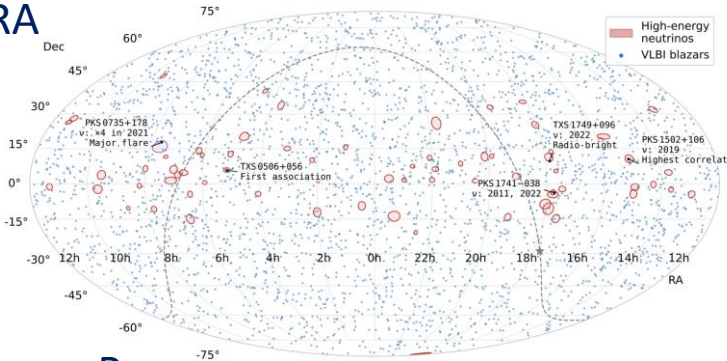
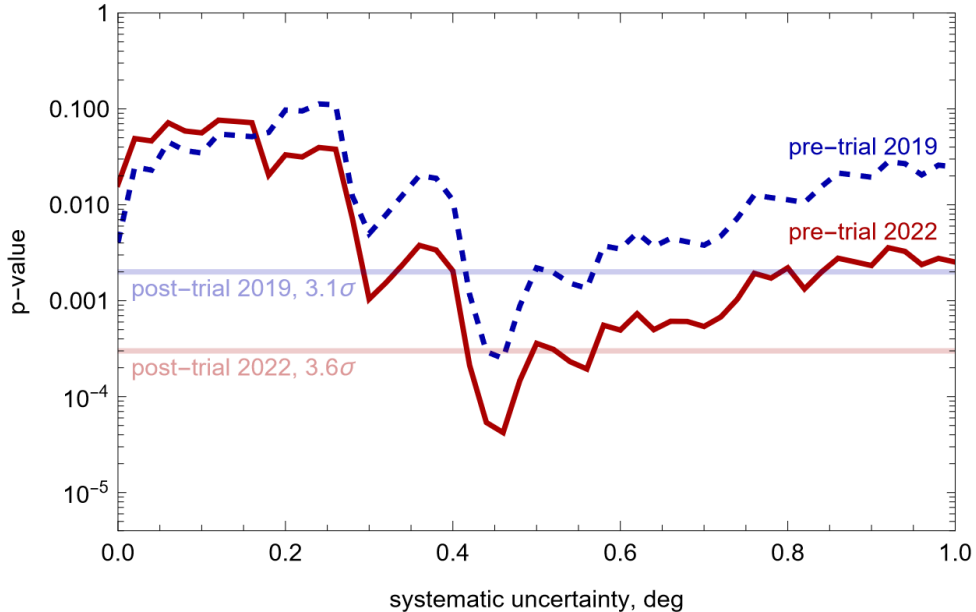
# Нейтрино высоких энергий от блазаров в новых данных

$E > 200$  ТэВ

Plavin et al., MNRAS 2023

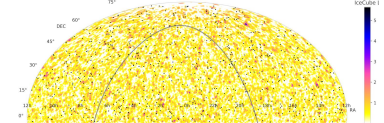
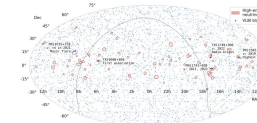
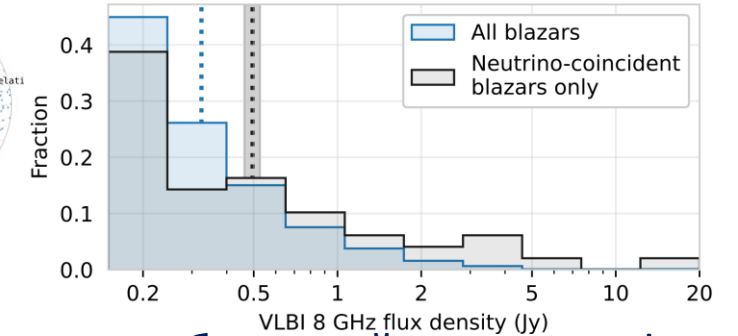
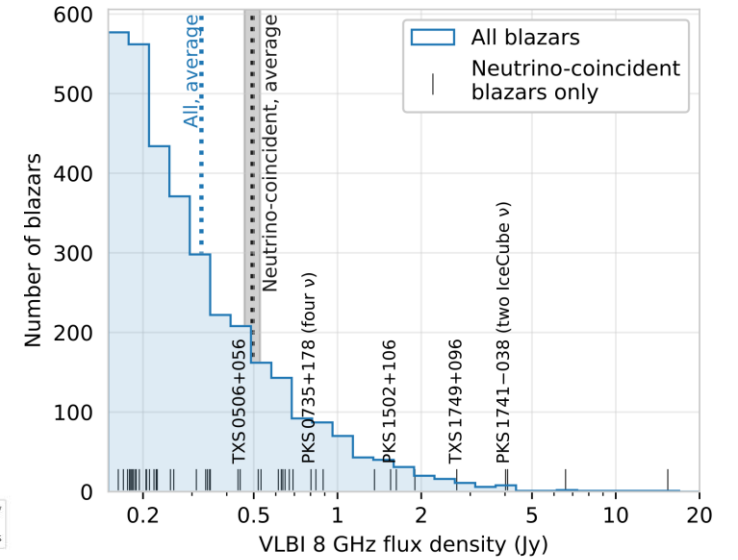
новые события (71 вместо 56), те же критерии, тот же анализ:

- полная изотропная выборка РСДБ блазаров (RFC,  $>0.15$  Ян на 8 ГГц)
- контуры 90% ошибок направлений прихода нейтрино (четверти эллипса)
- добавочная систематическая ошибка (свободный параметр – trials)
- исследуемая величина: геометрическое среднее потоков
- случайные нейтрино – рандомизация по RA
- полное Монте-Карло всей процедуры с учетом trials для оценки значимости

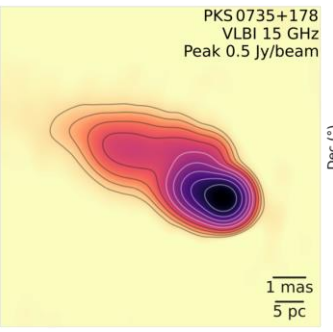
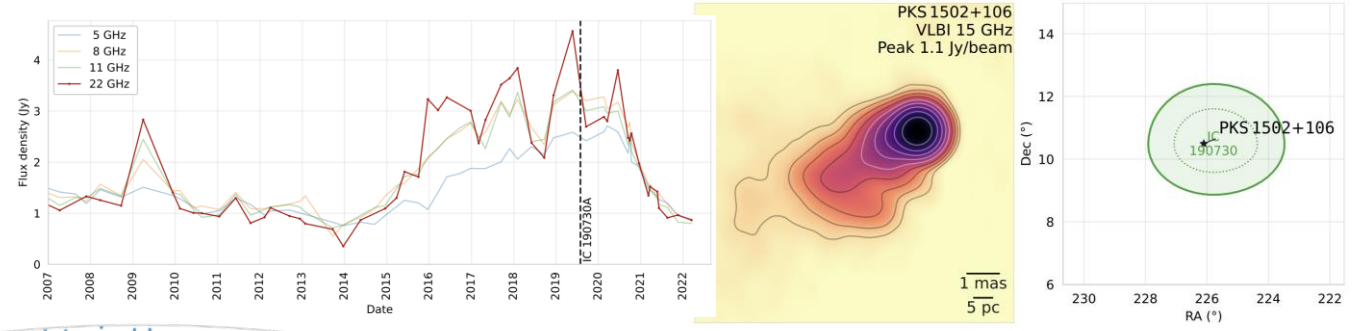


## Результат:

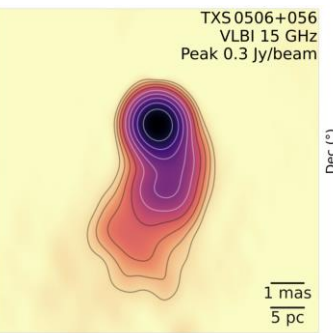
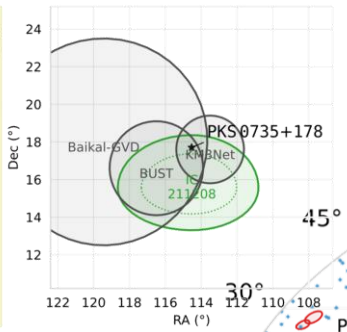
- ✓ да, средний радиопоток блазаров вблизи нейтрино выше!  
 $p = 3 \cdot 10^{-4}$  ( $3.6 \sigma$ )
- ✓ было в 2020 (56 событий):  $p = 2 \cdot 10^{-3}$
- ✓ вместе с независимым анализом по низким энергиям от ТэВ:  
 $p = 2 \cdot 10^{-5}$  ( $4.3 \sigma$ )



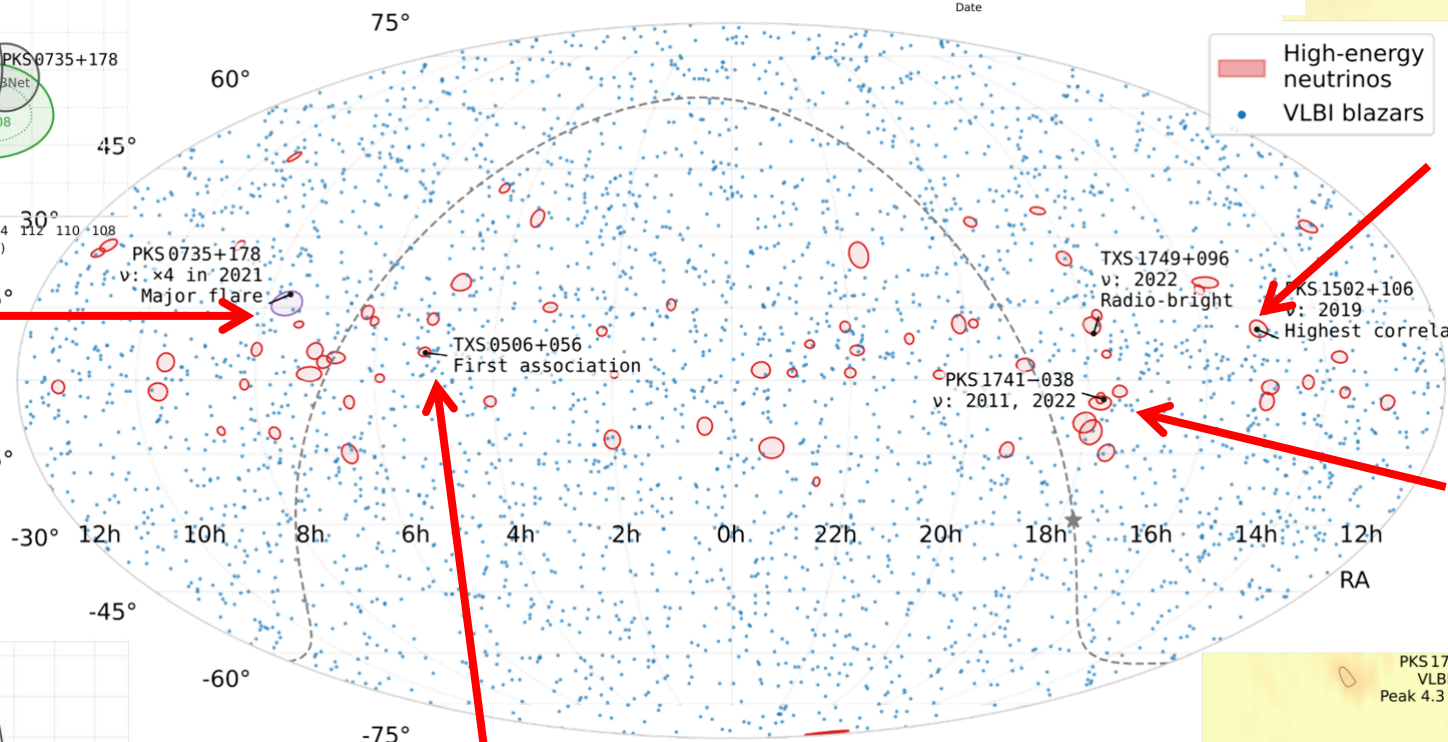
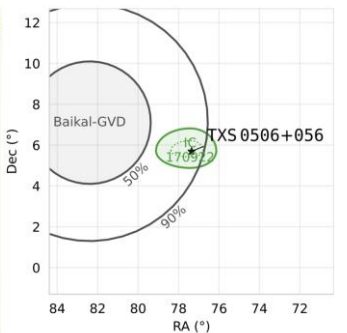
# Case study – отдельные блазары



**PKS 0735+178**  
декабрь 2021 –  
IceCube, Байкал-ГВД,  
KM3Net, Баксан;  
мощная э/м вспышка



**TXS 0506+056**  
первая ассоциация, нейтрино IceCube в 2017,  
вспышка нейтрино низких энергий в 2014,  
нейтрино Baikal-GVD в 2021 *Baikal-GVD, MNRAS 2023*

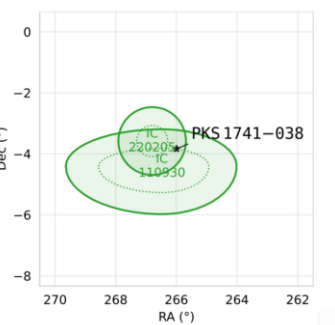
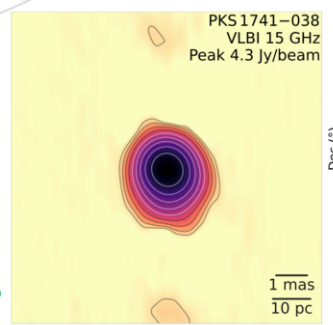


**TXS 0506+056**  
первая ассоциация, нейтрино IceCube в 2017,  
вспышка нейтрино низких энергий в 2014,  
нейтрино Baikal-GVD в 2021 *Baikal-GVD, MNRAS 2023*

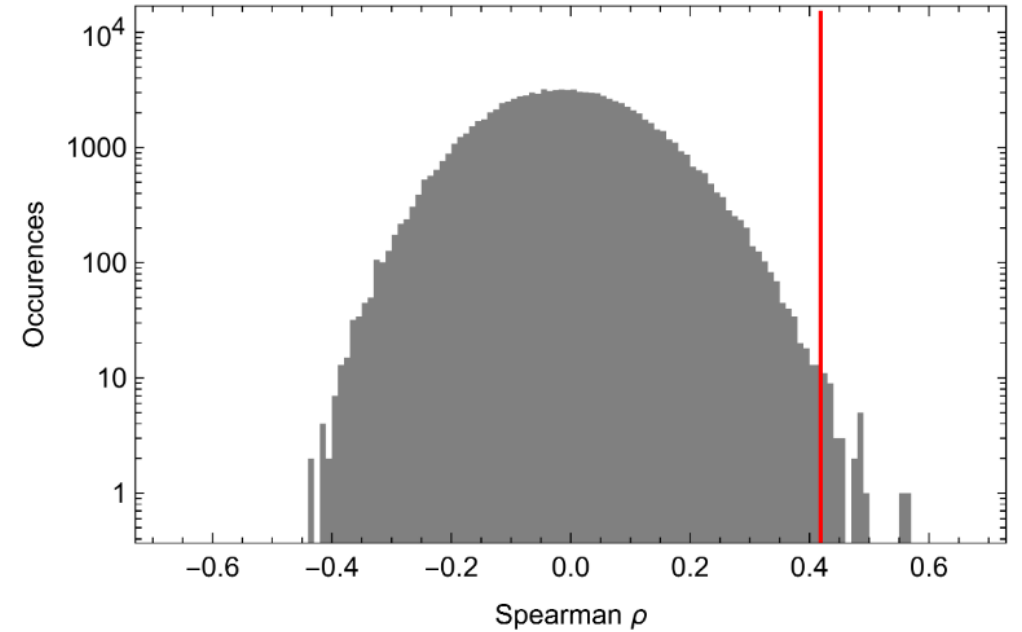
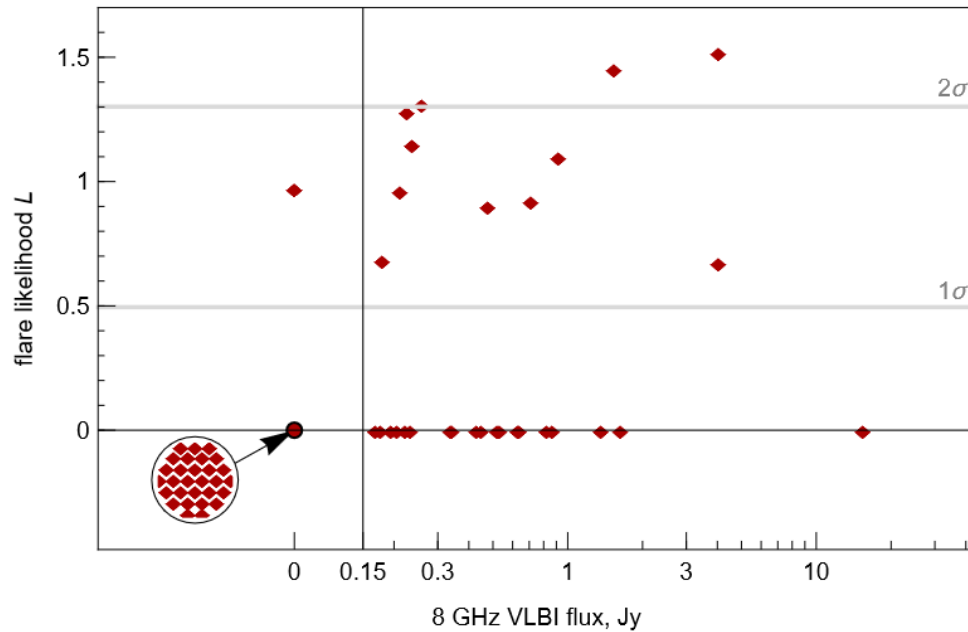
High-energy neutrinos  
VLBI blazars

**PKS 1502+106**  
самая мощная вспышка,  
совпадающая с нейтрино  
(2019)

**PKS 1741-038**  
1 из 4 выделенных в 2020,  
новое нейтрино в 2022 -  
теперь дублет!  
IceCube 2011, 2022



# Нейтрино не приходит одно?



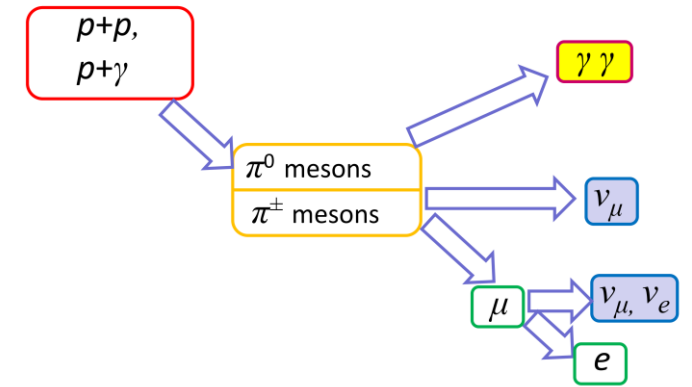
- для каждого алертного нейтрино IceCube публикует вероятность наличия сопутствующих нейтрино с того же направления в интервале  $\pm 1$  день
- ни в одном индивидуальном случае нет статистически значимых совпадений
- нет статистически значимой корреляции для всего ансамбля событий
- **есть значимость  $3.6\sigma$  для тех событий, что совпали с радиоблазарами!**

*Suray, ST MNRAS Lett. 2024*



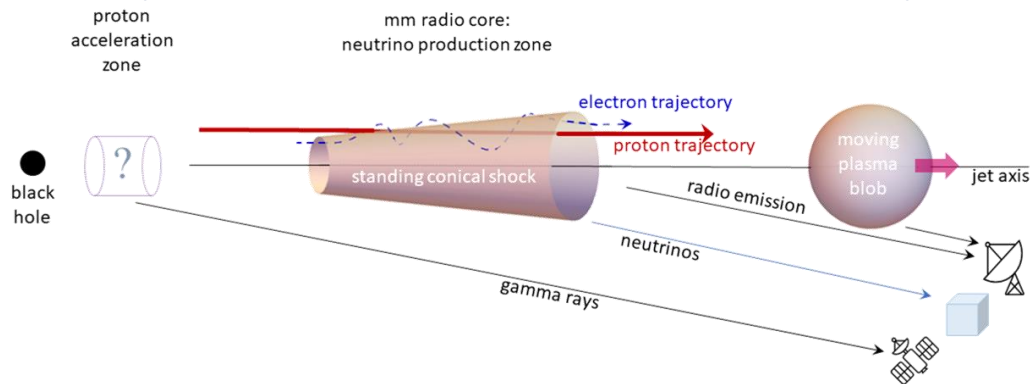
# Нейтрино и радиоблазары, что видим?

- радиоблазары – единственная популяция источников, с которой есть статистические корреляции нейтрино
- нет (очевидной) связи с гамма-излучением
- один класс источников рождает нейтрино от ТэВ до ПэВ
- источников много – нет ярко выраженных доминирующих



# Нейтрино и радиоблазары, что думаем?

- нейтрино рождаются не далее парсеков от центра – вероятно, в протон-фотонных взаимодействиях
- target photons = жесткий рентген
- нейтринная светимость невелика по сравнению с полной фотонной



- возможно, target photons = SSC, тогда прямая связь с (синхротронным) радиопотоком
- предварительные результаты ART-XC

*Plavin et al. ApJ 2021*

*Kalashov, Kivokurtseva, ST JCAP 2023*

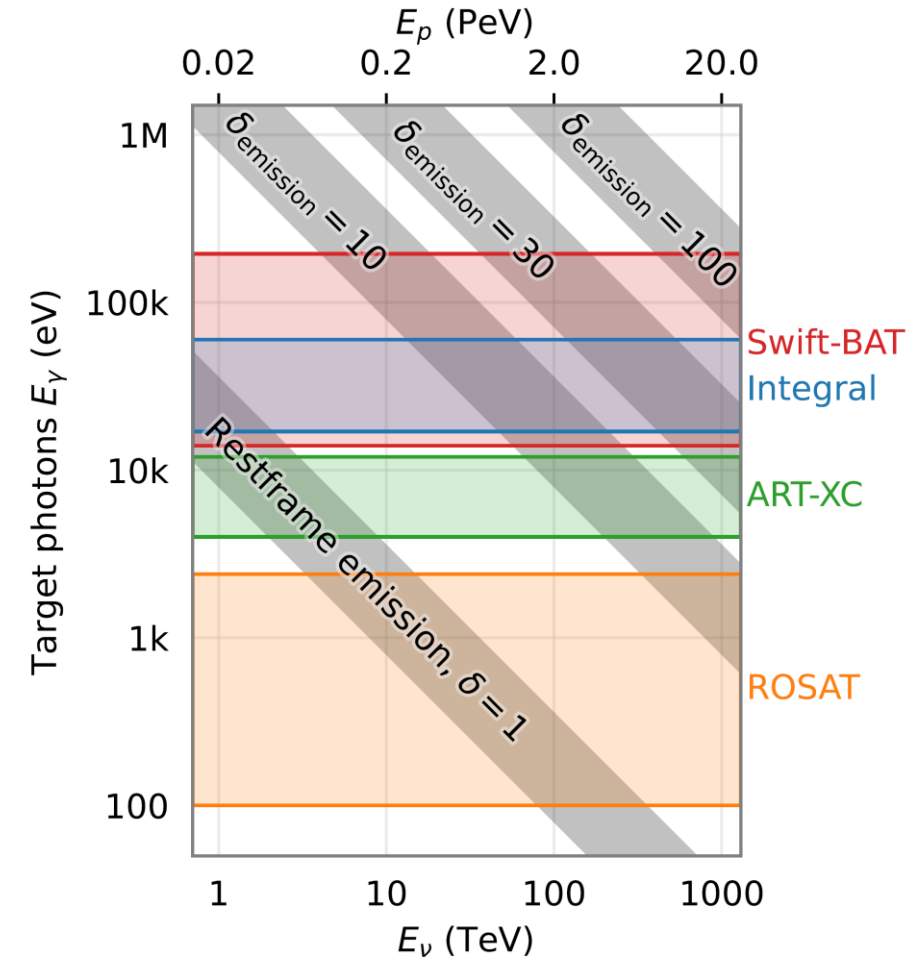
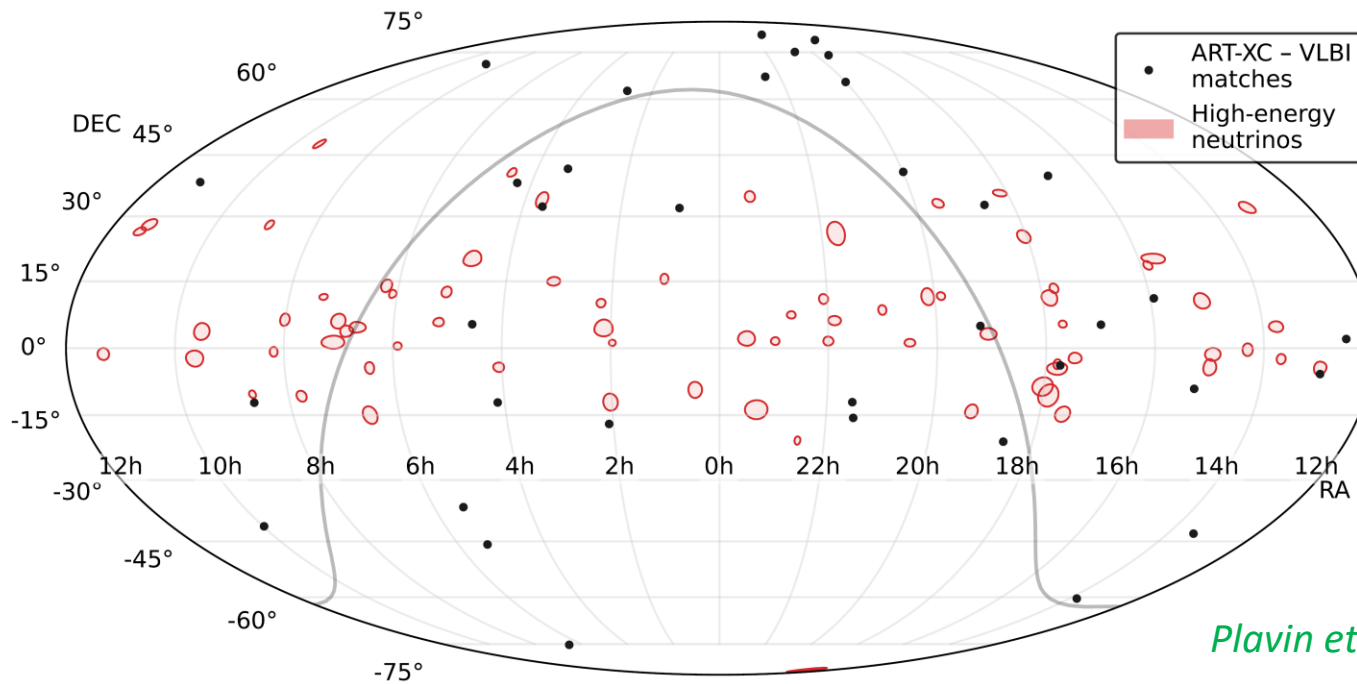
- всегда остается шанс, что РСДБ поток – просто tracer активности в ядре и доплер-усиления





# Нейтринные блазары в рентгеновском излучении

- target photons = жесткий рентген
- радиоблазары из полной выборки, входящие в каталог 1 года ART-XC им. Павлинского (Спектр-РГ)
- совпадения с нейтрино IceCube  $>200$  ТэВ (та же выборка): 4 при ожидании 0.6



## Другие внегалактические источники: богатое нейтринное небо?

- сейфертовские галактики?
- события приливного разрушения звёзд?
- «резервуары» космических лучей?
- ...

Радиоблазары отвечают не более чем за 25-30% астрофизических нейтрино высоких энергий



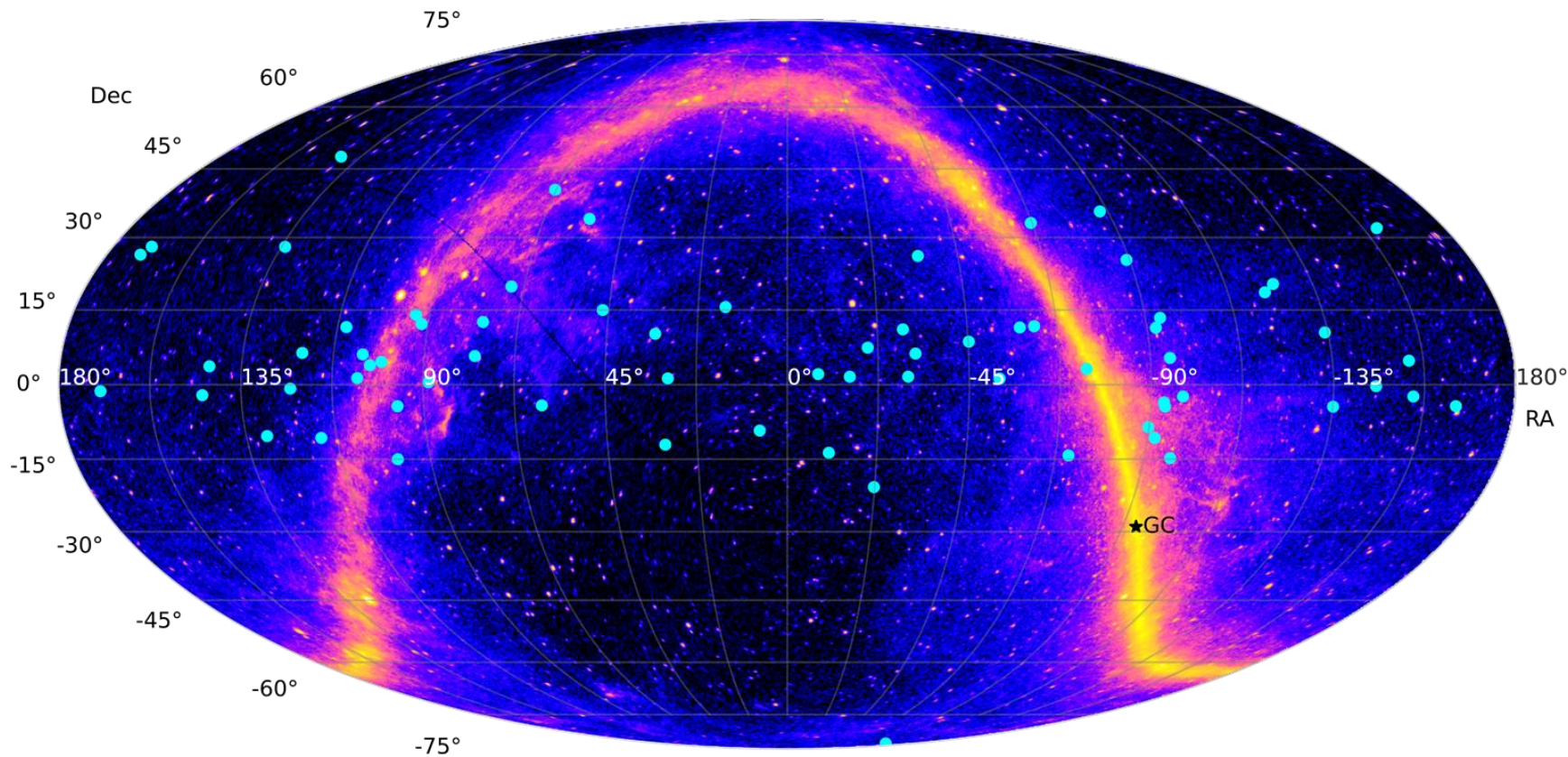
# Млечный Путь в нейтрино



# Галактическая анизотропия треков IceCube выше 200 ТэВ

- выборка 70 событий IceCube высокого качества
  - **pre-defined**: отобрана по критериям, фиксированным для анализа с радиоблазарами – треки,  $E > 200$  TeV, 90% CL локализация  $< 10$  кв.град.

Данные из алертов и статей IceCube 2009-2022



- Примечания:
- 1) около 1/3 из них - атмосферные
  - 2) IceCube exposure depends on RA only

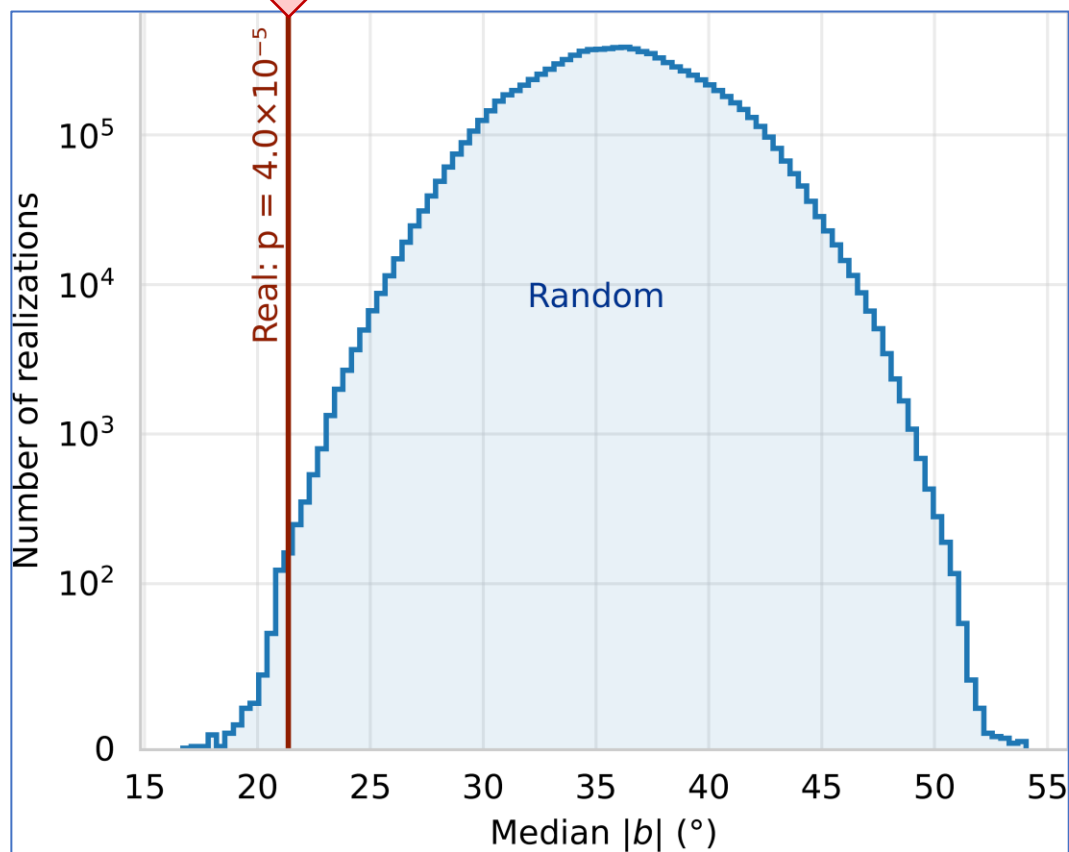
*Kovalev, Plavin, ST [Astrophys. J. Lett. 940 \(2022\) L41](#)*



# Галактическая анизотропия треков IceCube выше 200 ТэВ

простейшая наблюдаемая:

**медиана модуля Галактической широты**



- случайные выборки (RA scrambled)
- p-value  $p=4 \times 10^{-5}$  ( $4.1\sigma$ )
- выборка данных определена заранее – никаких trials
- простейший небинированный тест

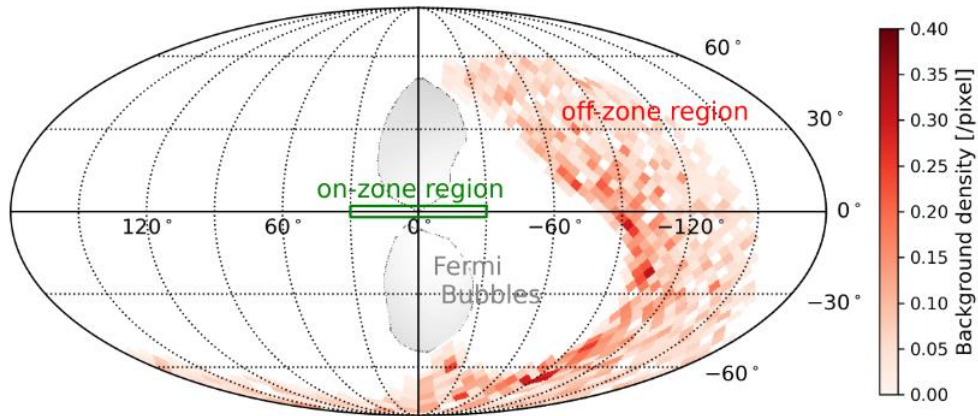
*Kovalev, Plavin, ST [Astrophys. J. Lett. 940 \(2022\) L41](#)*



# ANTARES: область вблизи центра Галактики

on/off метод

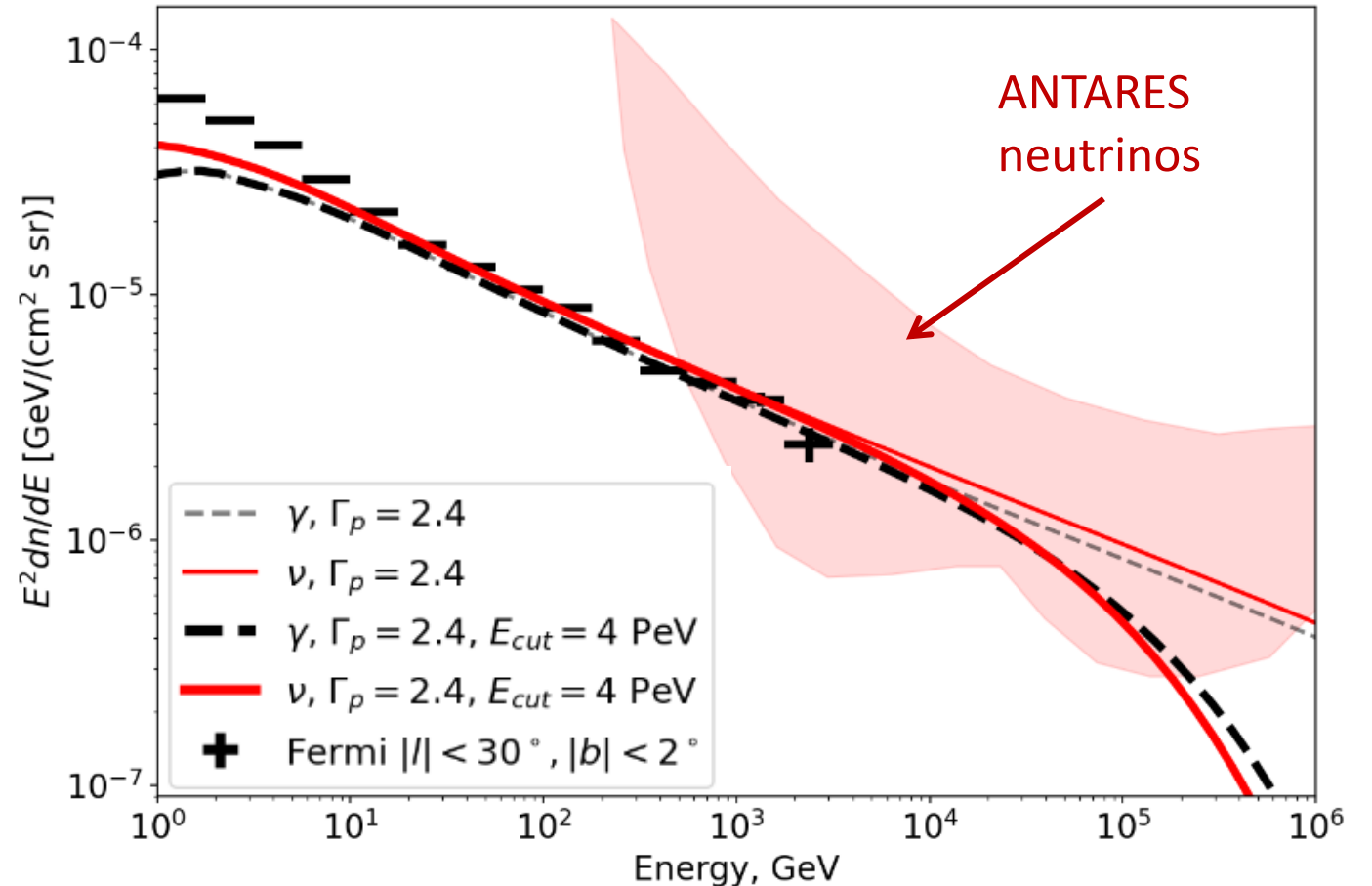
on-зона:  $|l| < 30^\circ$ ,  $|b| < 2^\circ$



- значимость  $2.0\sigma$
- согласие со спектром Fermi-LAT для той же области  
*Neronov&Semikoz 2019*
- $\Gamma=2.4$  для протонов (не 2.7)

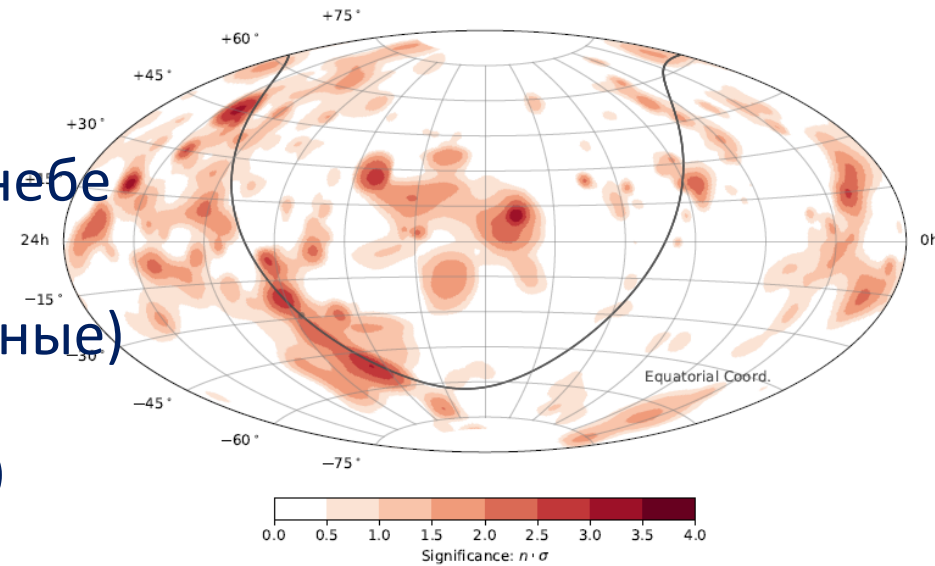
*ANTARES Collab. Phys. Lett. B 841 (2023) 137951*

on-zone ПОТОКИ:



# IceCube: каскады

- заранее зафиксировали спектр и распределение на небе (шаблоны), свободная нормировка
- использовали 3 шаблона, во всех – есть сигналы (разные)
- окончательная значимость  $4.5\sigma$   
(включает поправку на эти 3 варианта)
  - $\pi^0$  шаблон
    - пусть Галактические фотоны ГэВ (Fermi-LAT) – все из распадов  $\pi^0$ . Берём соответствующие нейтрино из распадов  $\pi^\pm$  и экстраполируем от ГэВ до ТэВ со спектром  $E^{-2.7}$
  - $KRA\gamma^5$  шаблон
    - нейтринный поток вычисляется кодом DRAGON на основе модельного распределения космических лучей и газа, обрезание спектра КЛ на 5 ТэВ
  - $KRA\gamma^{50}$  шаблон
    - то же, но обрезание спектра КЛ на 50 ТэВ



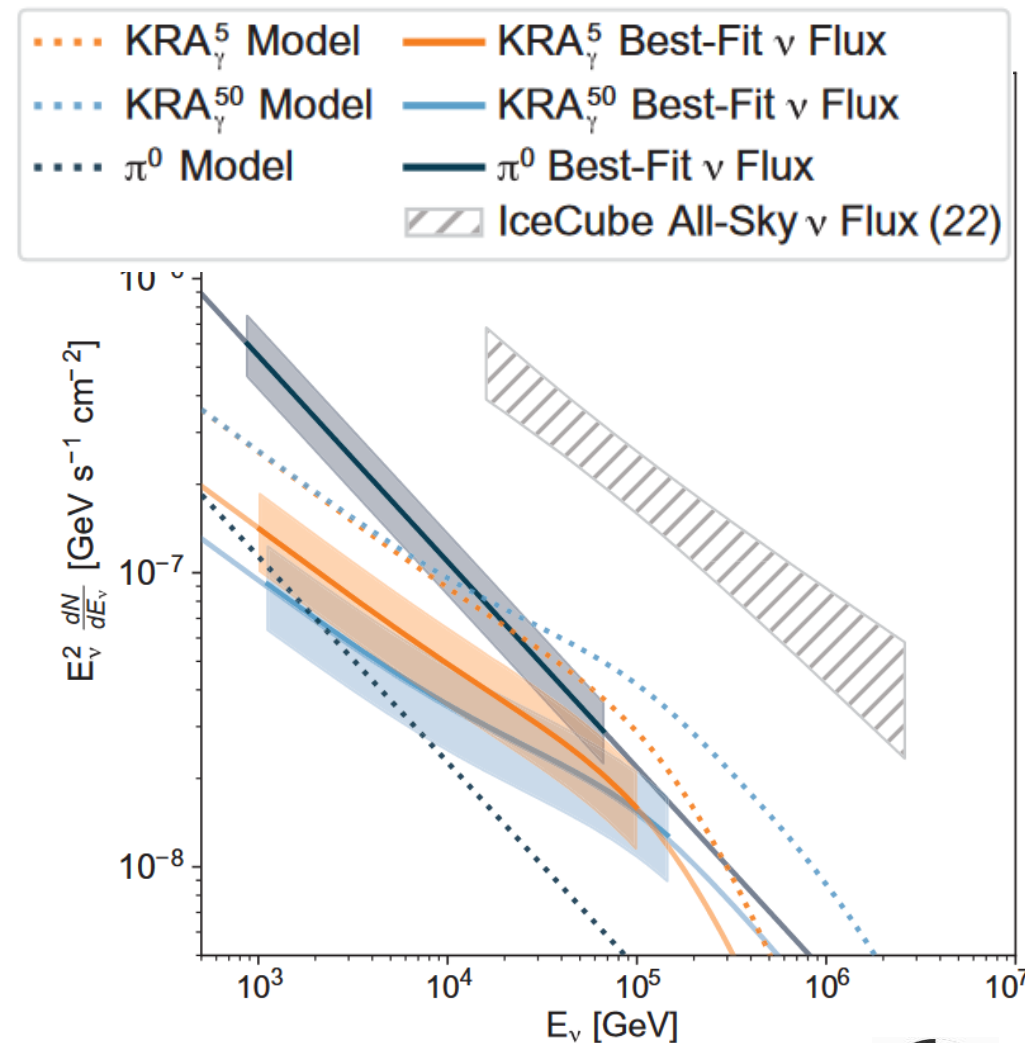
*IceCube Collab.* [Science 380 \(2023\) 6652](#)



# IceCube: каскады

- заранее зафиксировали спектр и распределение на небе (**шаблоны**), свободная нормировка
- использовали 3 шаблона, во всех – есть сигналы (разные)

Flux sensitivity $\Phi$	$P$ value	Best-fitting flux $\Phi$
<i>Diffuse Galactic plane analysis</i>		
$\pi^0$	5.98	$1.26 \times 10^{-6} (4.71\sigma)$
$KRA_{\gamma}^5$	$0.16 \times MF$	$6.13 \times 10^{-6} (4.37\sigma)$
$KRA_{\gamma}^{50}$	$0.11 \times MF$	$3.72 \times 10^{-5} (3.96\sigma)$
		$21.8_{-4.9}^{+5.3}$
		$0.55_{-0.15}^{+0.18} \times MF$
		$0.37_{-0.11}^{+0.13} \times MF$



*IceCube Collab.* [Science 380 \(2023\) 6652](https://doi.org/10.1126/science.1257582)





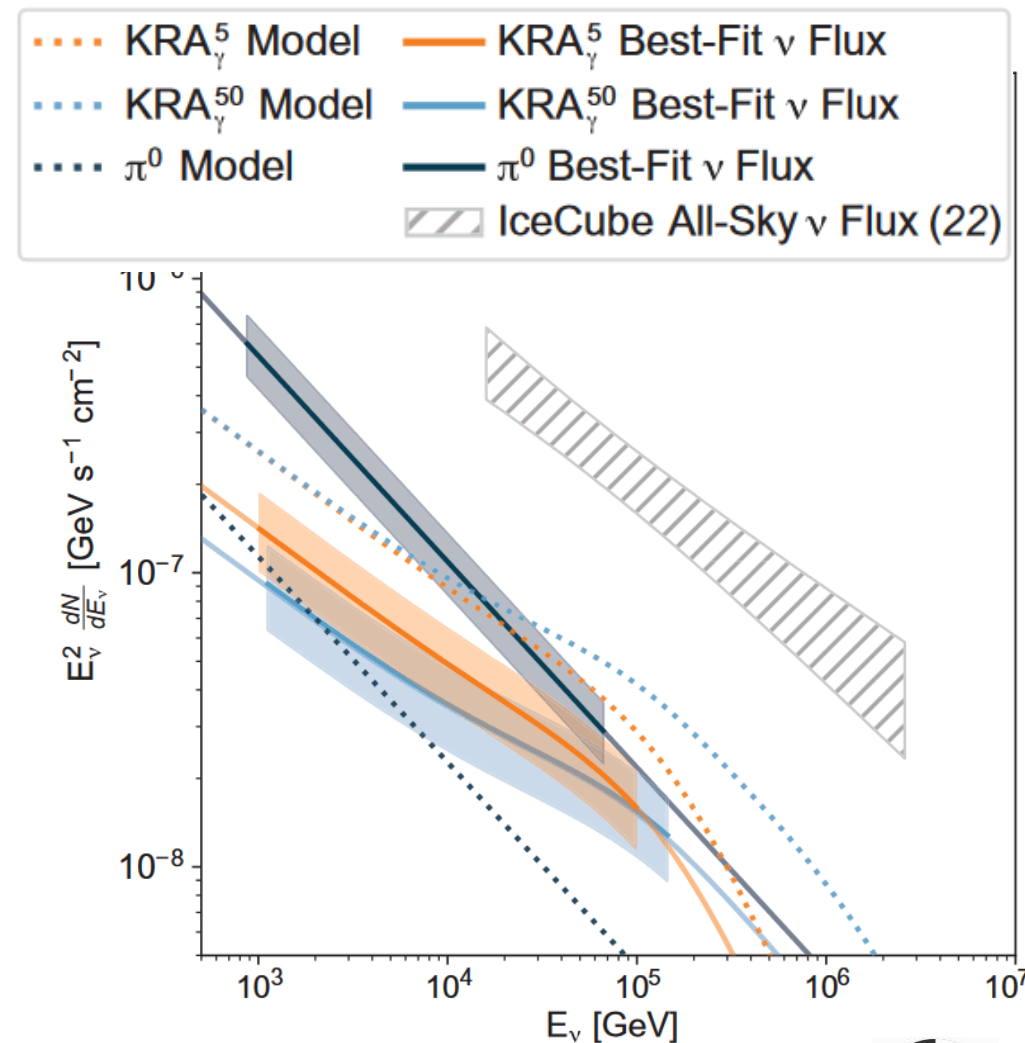
# IceCube: каскады

- заранее зафиксировали спектр и распределение на небе (**шаблоны**), свободная нормировка
- использовали 3 шаблона, во всех – есть сигналы (разные)

	Flux sensitivity $\Phi$	P value	Best-fitting flux $\Phi$
<i>Diffuse Galactic plane analysis</i>			
$\pi^0$	5.98	$1.26 \times 10^{-6}$ (4.71 $\sigma$ )	$4.9^{+1.2}_{-1.1} \times \text{MF}$
$\text{KRA}_{\gamma}^5$	$0.16 \times \text{MF}$	$6.13 \times 10^{-6}$ (4.37 $\sigma$ )	$0.55^{+0.18}_{-0.15} \times \text{MF}$
$\text{KRA}_{\gamma}^{50}$	$0.11 \times \text{MF}$	$3.72 \times 10^{-5}$ (3.96 $\sigma$ )	$0.37^{+0.13}_{-0.11} \times \text{MF}$

- нормировки не согласуются ни с моделями, ни друг с другом

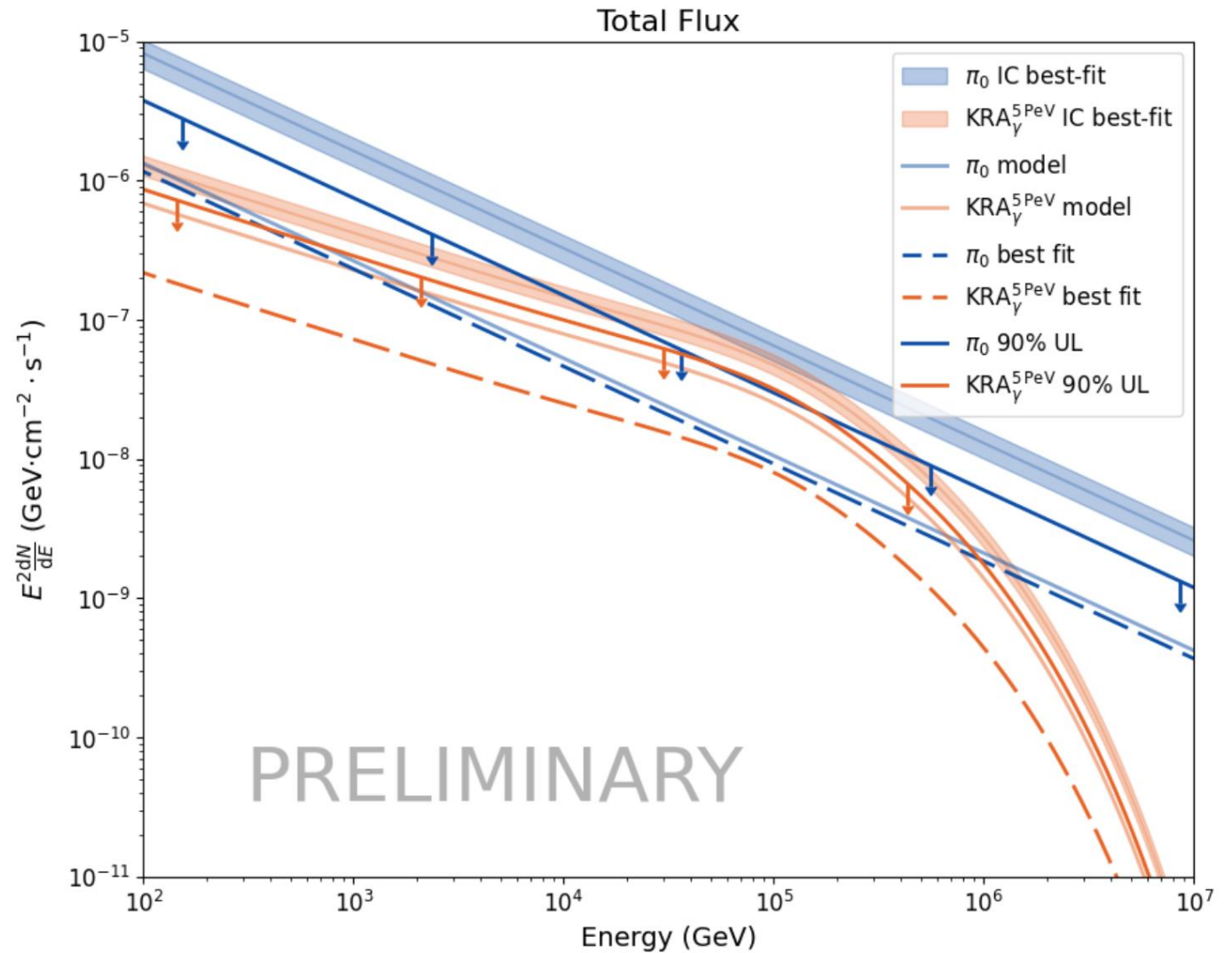
*IceCube Collab.* [Science 380 \(2023\) 6652](https://doi.org/10.1126/science.1254182)



# ANTARES исключает шаблоны IceCube

- анализ по «правилам игры» IceCube – такие же шаблоны, так же свободная нормировка
- нормировки, полученные IceCube, исключены

*ANTARES Collab., Moriond 2024*



# Галактические нейтрино обнаружены!

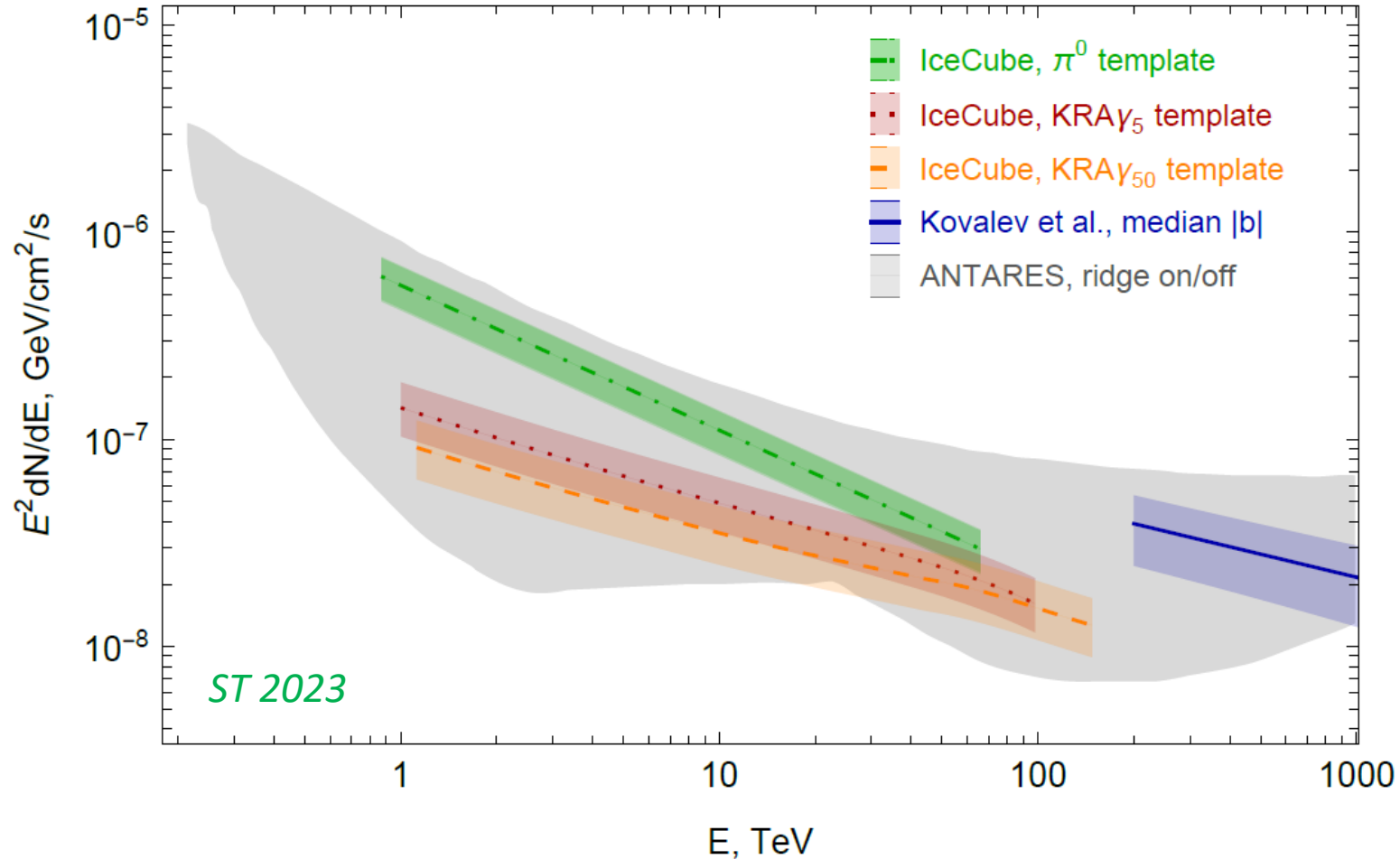
- **нейтрино** обнаружены в 2022-2023
  - сравнение 3 независимых анализов
  - (IceCube треки, ANTARES, IceCube каскады)

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	$4.5\sigma$



# Сравнение нейтринных спектров Млечного Пути

оценки полного потока от Галактики согласуются (в рамках допущений)



# Галактические нейтрино и фотоны обнаружены!

- **нейтрино** обнаружены в 2022-2023
  - сравнение 3 независимых анализов
  - (IceCube треки, ANTARES, IceCube каскады)

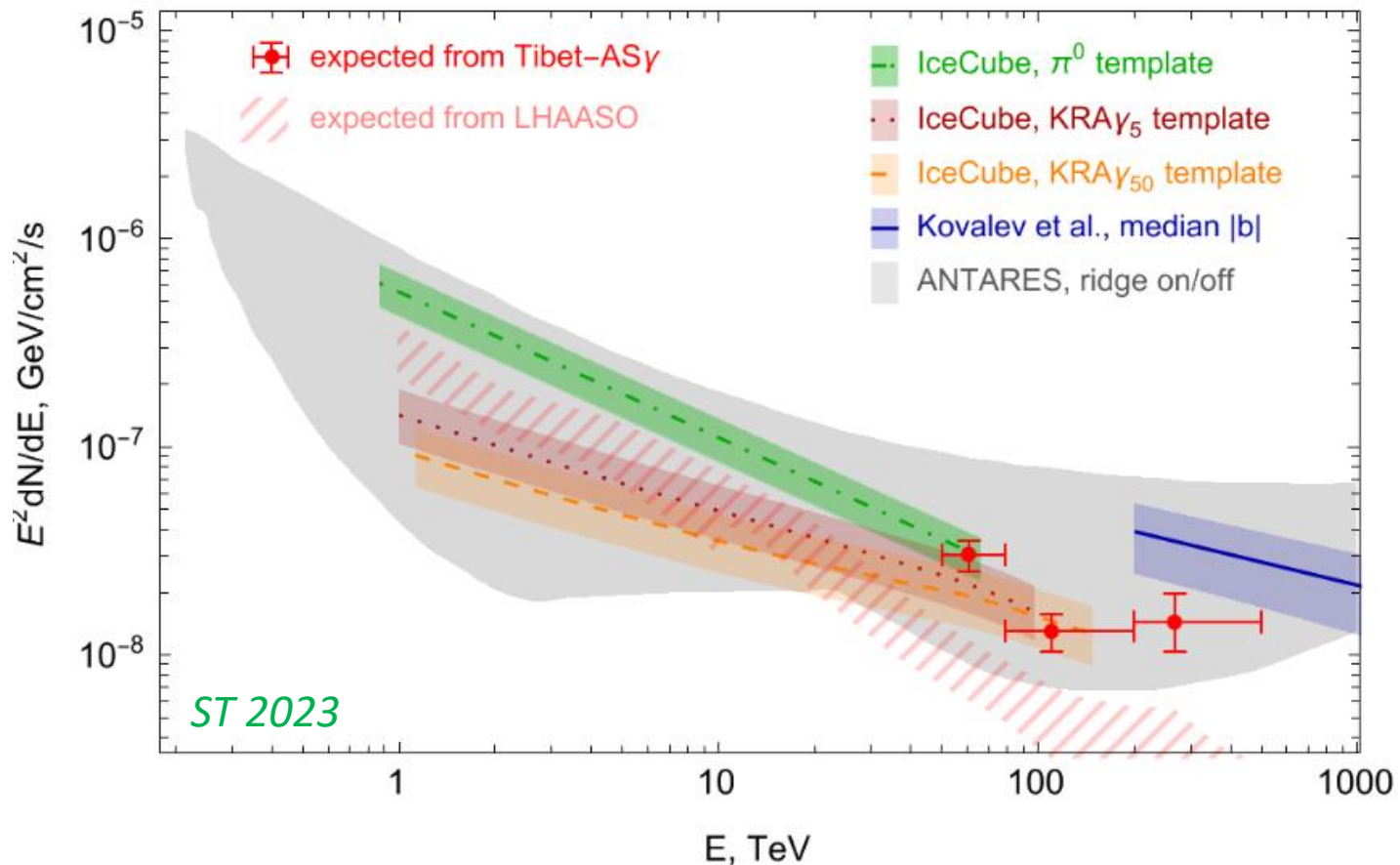
Analysis	Energies	Method	Significance
Kovalev et al., 2022 ApJL	$\gtrsim 200$ ТэВ	median of $ b $ distribution	$4.1\sigma$
ANTARES, 2022 PLB	$\sim 1 - 100$ TeV	on/off, ridge	$2.0\sigma$
IceCube, 2023 Science	$\sim 1 - 100$ TeV	templates	$4.5\sigma$

- диффузное **гамма-излучение** обнаружено в 2021-2022 (Tibet-AS $\gamma$ , LHAASO)
  - сходятся ли результаты между собой?



# Галактические нейтрино и фотоны

Очень неплохо сходятся!

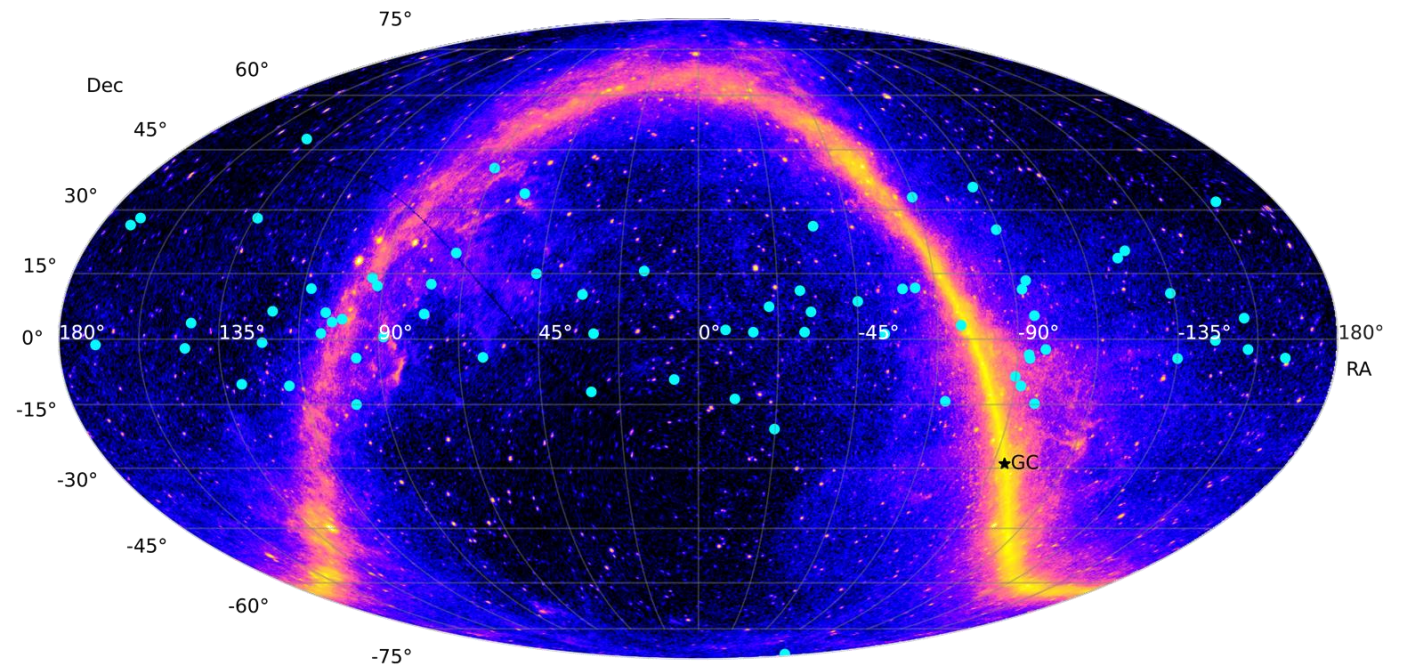
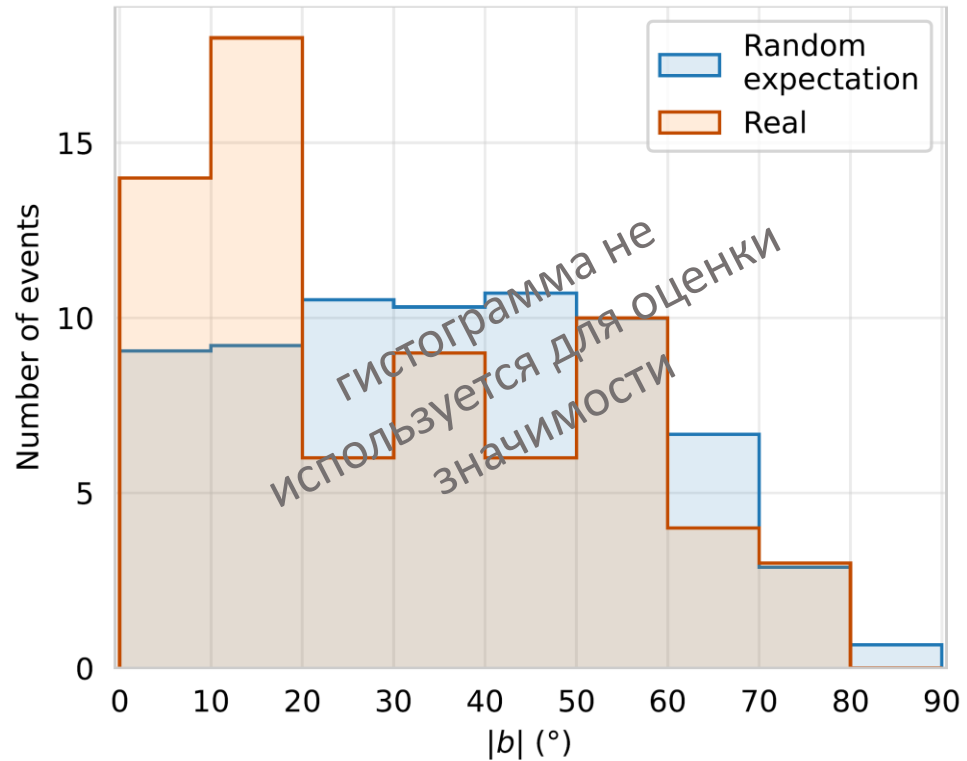


Примечание: тонкости выделения вклада точечных источников



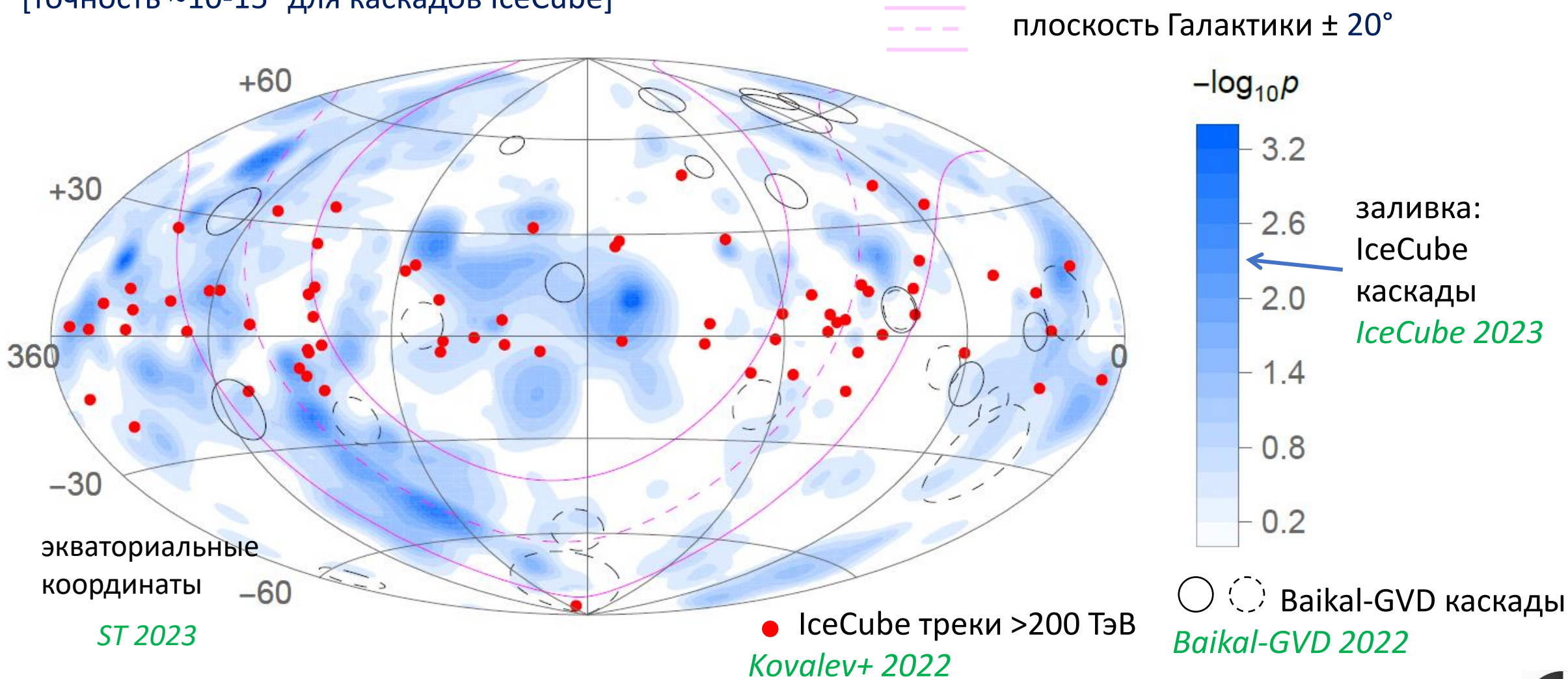
# Сравнение: угловое распределение (ширина Млечного Пути)

*Kovalev et al. 2022* : Млечный Путь в нейтрино шире, чем ожидалось!



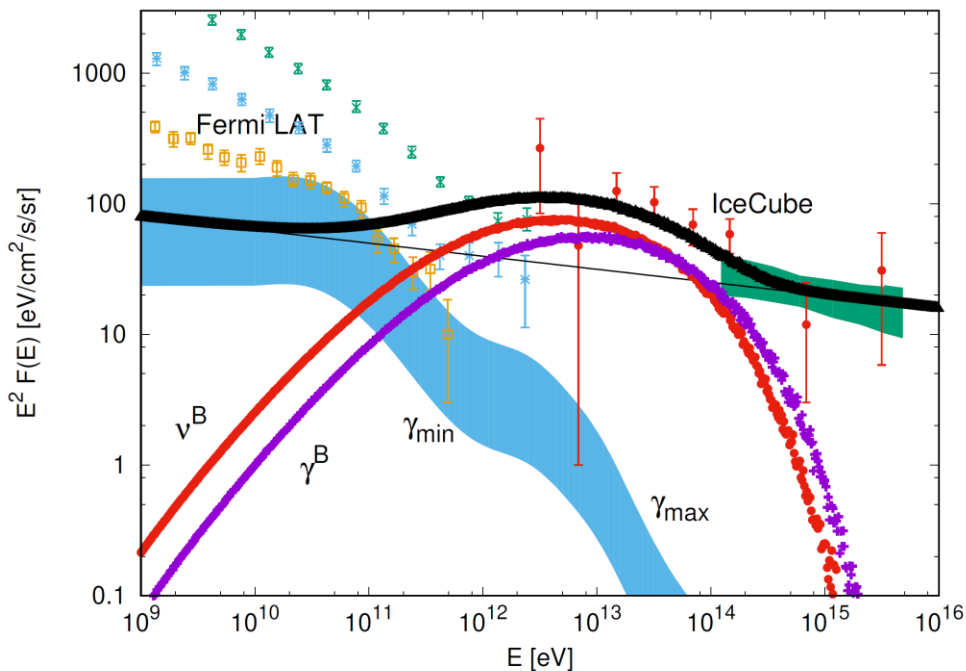
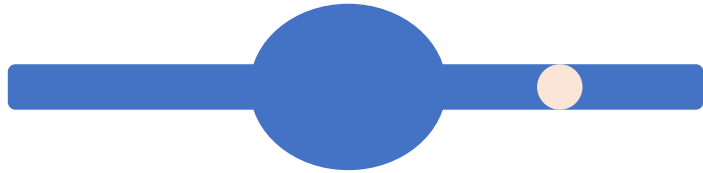
# Сравнение: угловое распределение (ширина Млечного Пути)

[точность  $\sim 10\text{-}15^\circ$  для каскадов IceCube]





# Обсуждение: вклад малых расстояний



- «Местный пузырь» – 100 пк, Солнце почти по центру (несколько сверхновых?)
- фотоны и нейтрино высоких энергий от стенок пузыря? (плюс локальный источник протонов)  
*Bouyahiaoui, Kachelriess, Semikoz 2018, 2020*  
*Neronov, Kachelriess, Semikoz 2018*
- вклад диска (другие пузыри!) + вклад Местного пузыря
- комбинация с изотропным фоном (атмосфера, блазары); вклад других подобных галактик?..

**Требуется обновление модели галактических космических лучей!**

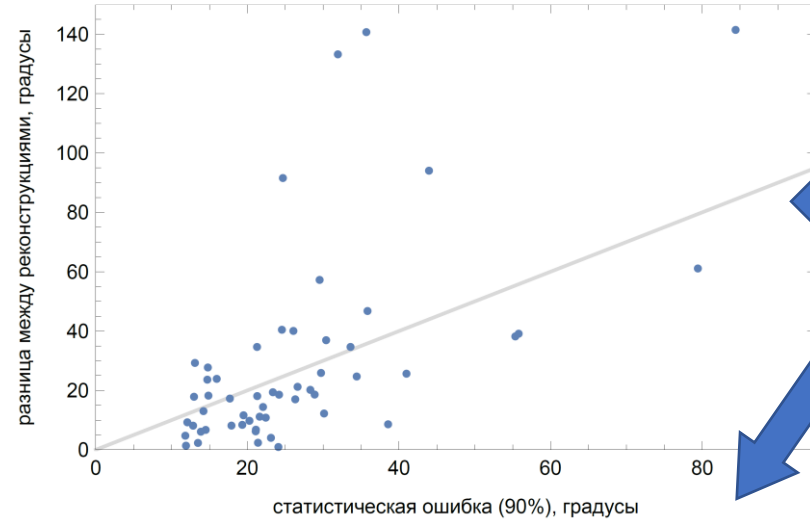
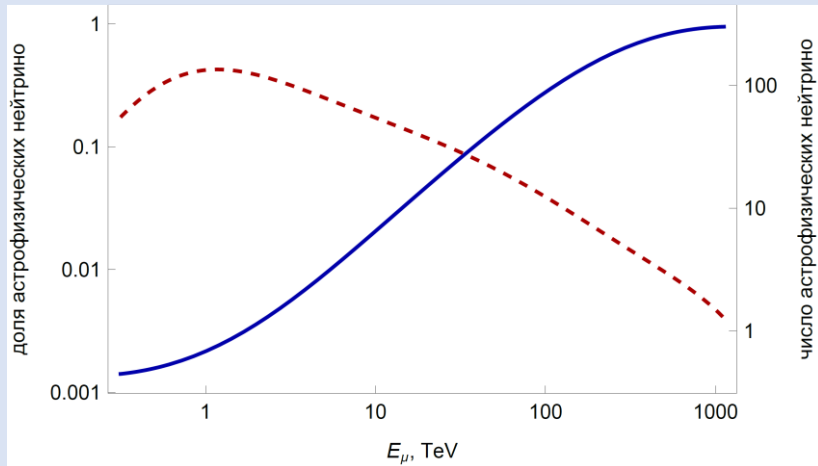


# Будущее

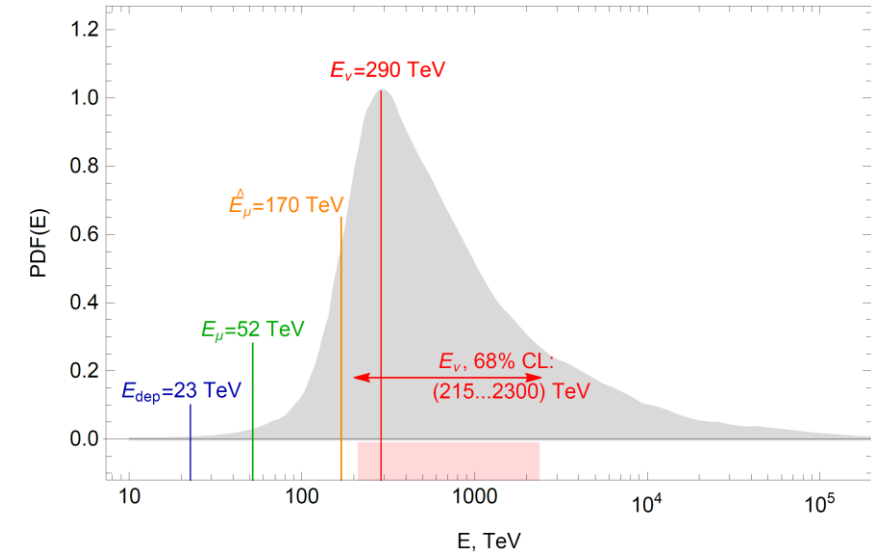
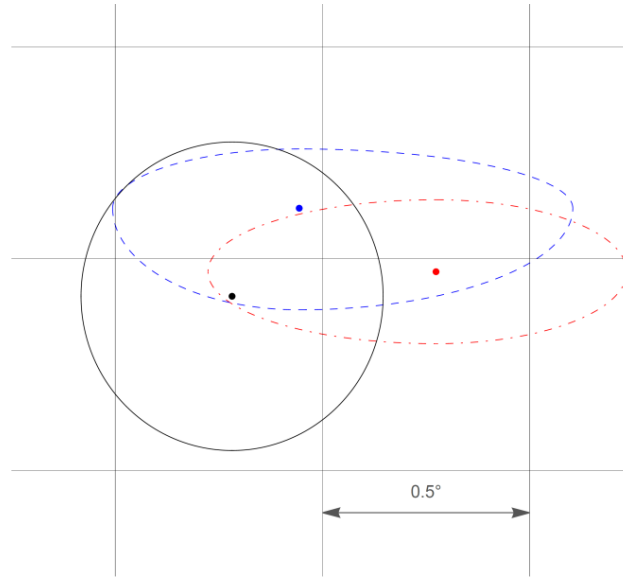
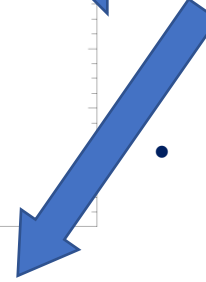


# Будущее?

- Много нейтрино (и мюонов) рождается в атмосфере, так что даже определить астрофизическое происхождение затруднительно.



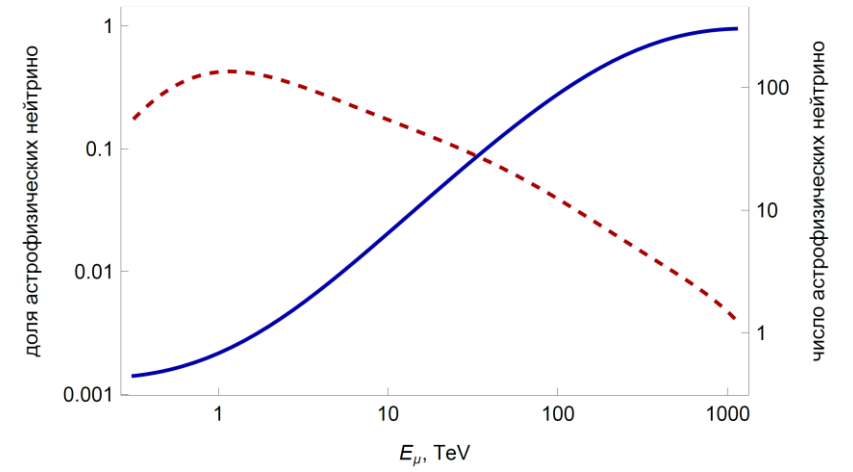
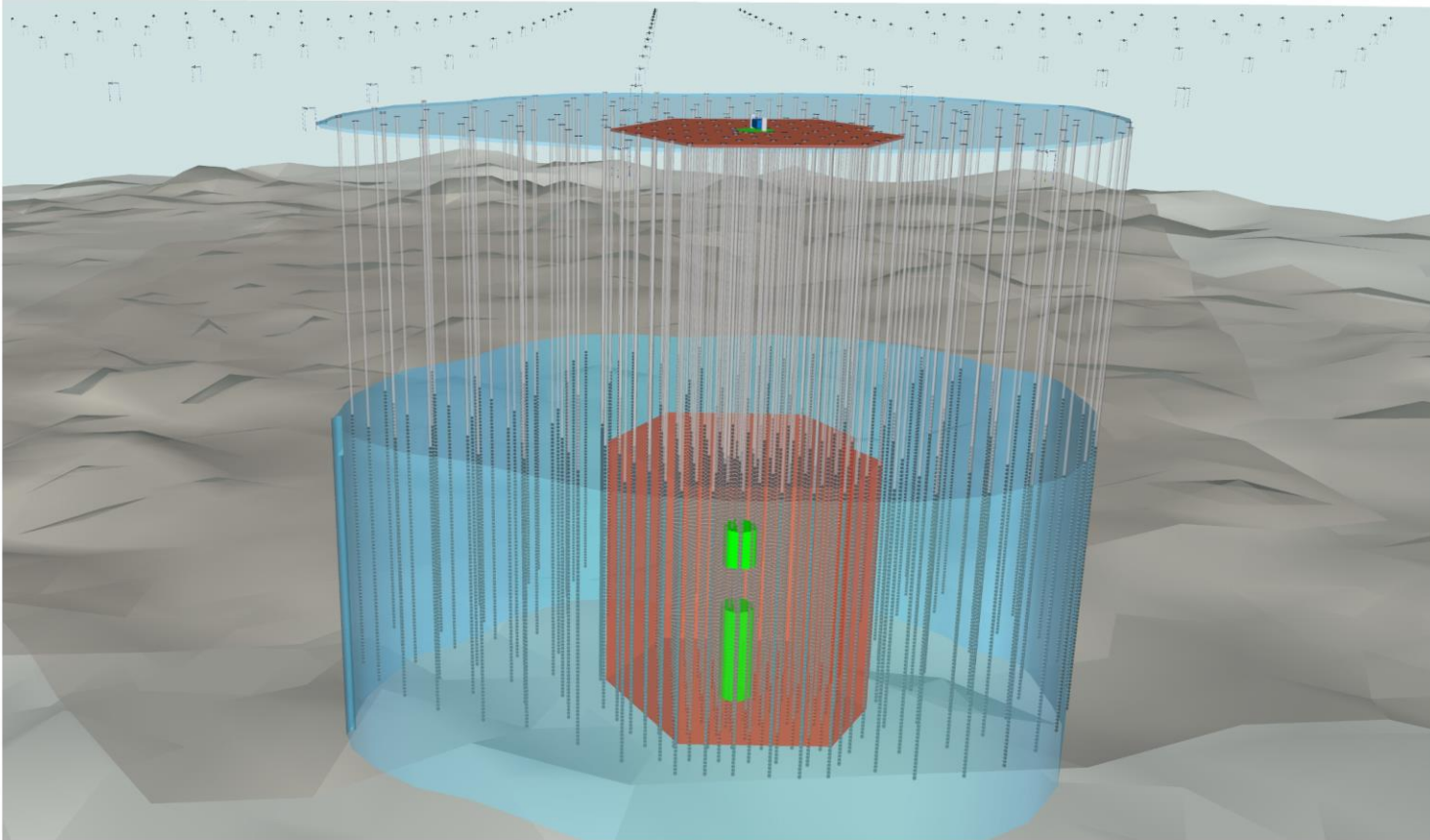
- Низкая точность определения направлений прихода и энергий нейтрино.
- Большие систематические ошибки.



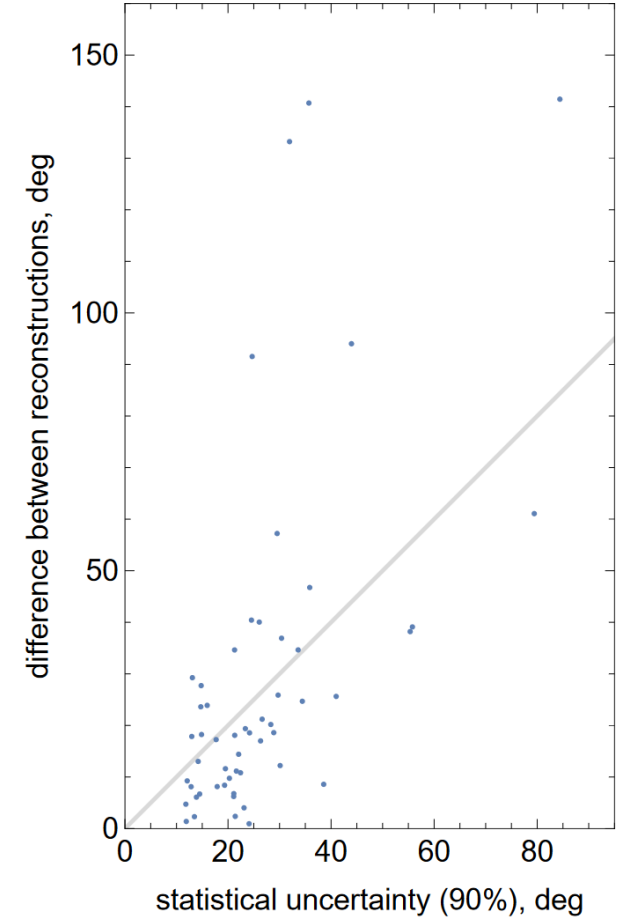
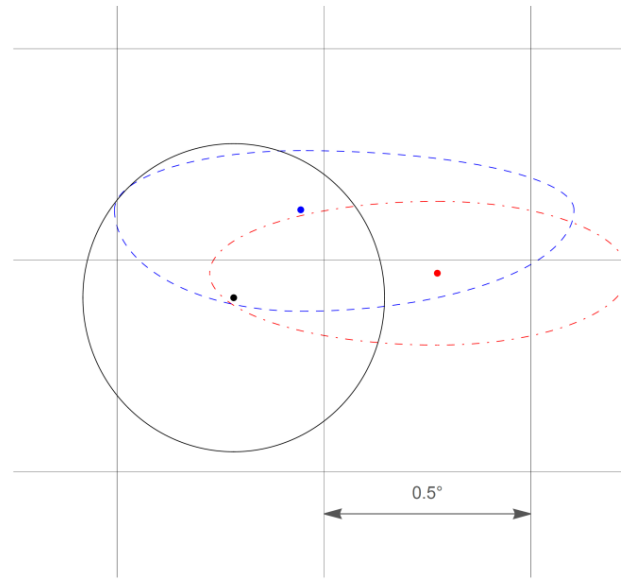
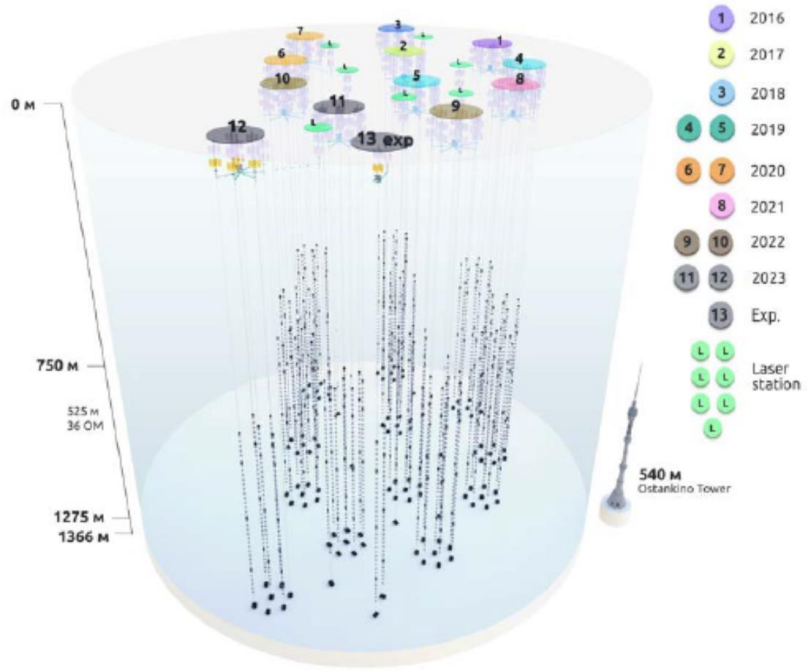
ST - УФН 2021



# Будущее: большая статистика: IceCube-GEN2



# Будущее: высокая точность: эксперименты в жидкой воде



## Baikal-GVD

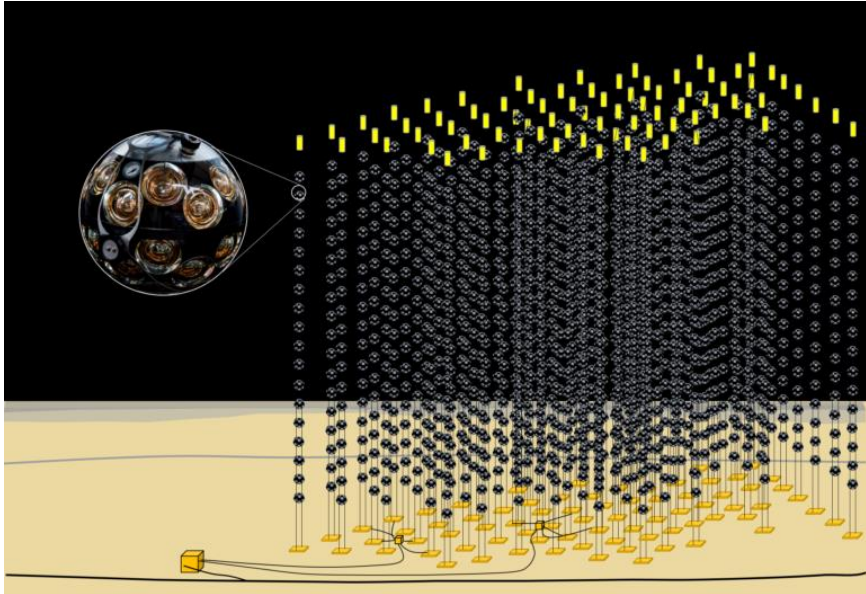
Точность определения направления прихода нейтрино в жидкой воде примерно в 4 раза лучше, чем во льду (площадь на небе в 16 раз меньше)



# Будущее: высокая точность: эксперименты в жидкой воде

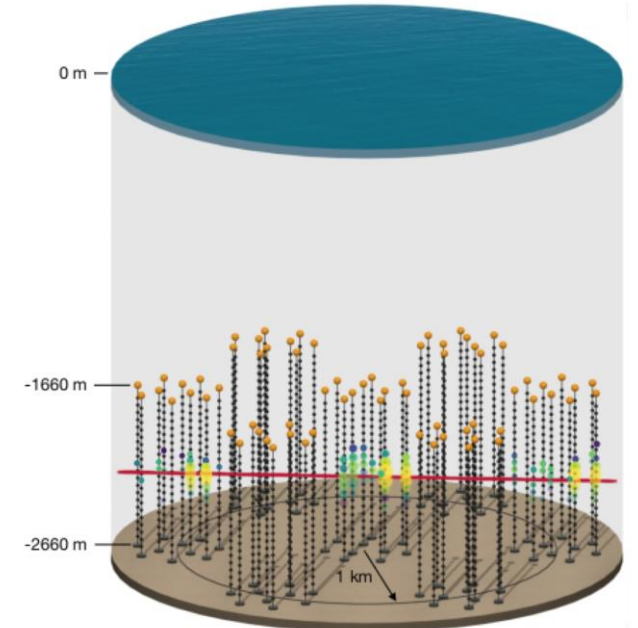
KM3NeT:

Средиземное море



P-ONE:

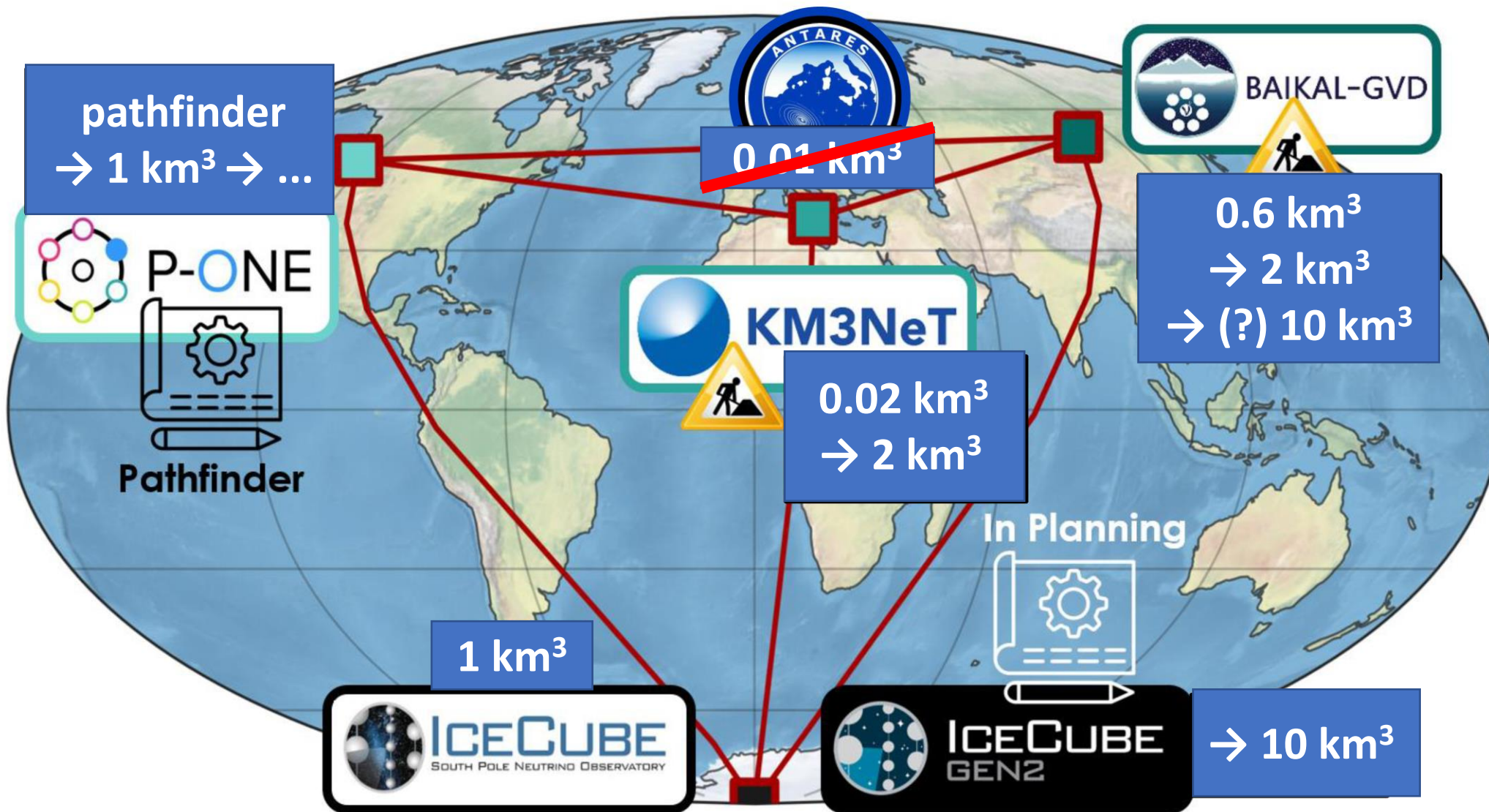
Тихий океан (Канада)



NEON: 1 км<sup>3</sup>  
(плотное заполнение)  
Китай



# Будущее: Global Neutrino Network



# Будущее: БОЛЬШИЕ эксперименты в жидкой воде

TRIDENT: 8 км<sup>3</sup>

Южнокитайское море

HUNT: 10 – 30 км<sup>3</sup>

*или* Южнокитайское море  
(остров 100 км от берега),  
*или* Байкал

Нейтринный телескоп на озере Байкал более 25 лет назад впервые в истории зарегистрировал нейтринные события тем методом, которым получены все обсуждавшиеся в этой статье результаты [65, 66] (см. также исторический обзор [67]). Возможно, еще через 25 лет эта установка превратится в самый амбициозный нейтринный детектор в мире с рабочим объемом, в 30 раз превышающим современный IceCube.

*ST - УФН 04/2024*





# Выводы

- астрофизические нейтрино высоких энергий существуют (результаты IceCube подтверждены Baikal-GVD в 2023)
- богатое нейтринное небо – разные типы источников, внегалактических и галактических
- основные результаты по астрофизике получены по данным IceCube, в которых начинает доминировать трудноустраняемая систематика (свойства льда)
- ждем новых интересных результатов от водных детекторов (Baikal-GVD и KM3NeT)



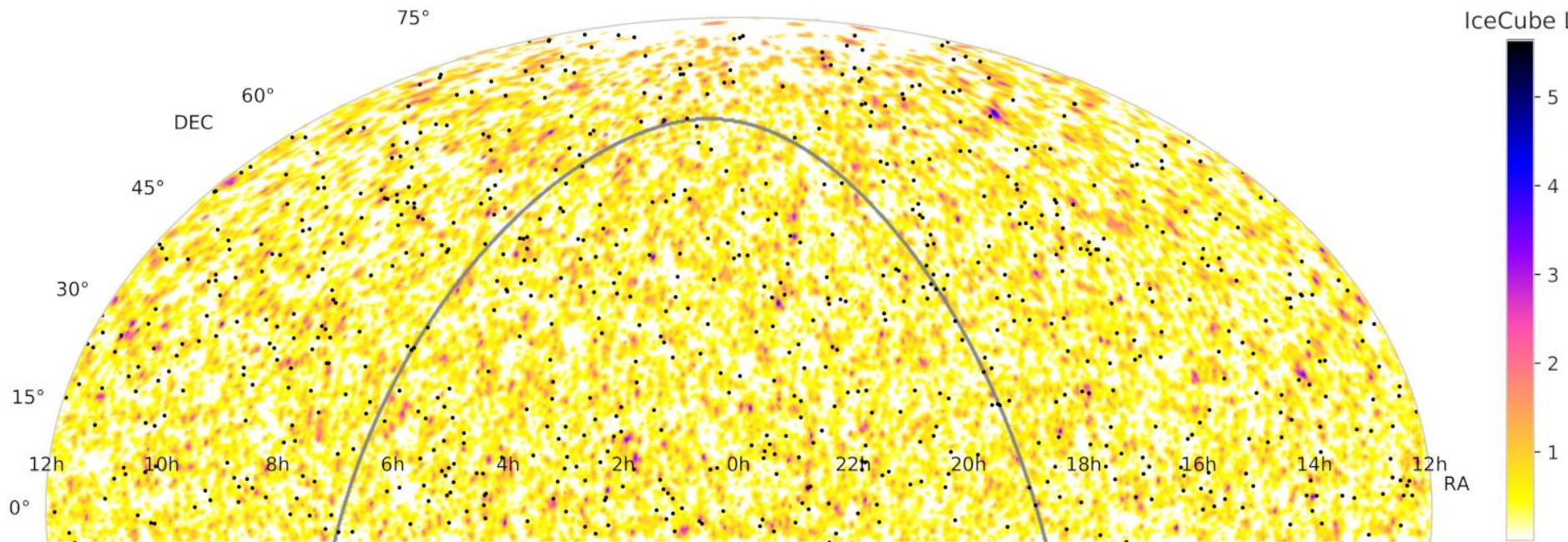
## Запасные слайды



# Нейтрино высоких энергий - от радиоблазаров!

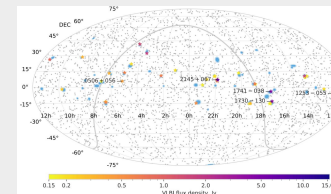
все треки IceCube за  
7 лет: ТэВ – ПэВ

Plavin et al. ApJ 2021



эффект статистический,  
индивидуальные события не выделены,  
статистическая значимость  $3.0\sigma$  post trial

- Направления прихода нейтрино совпадают с радиоблазарами
- Около 25% астрофизических нейтрино (трековых) – от блазаров из каталога
- Поток нейтрино, восстановленный по трековому анализу, можно объяснить радиоблазарами (в том числе от слабых, не вошедших в каталог)



+

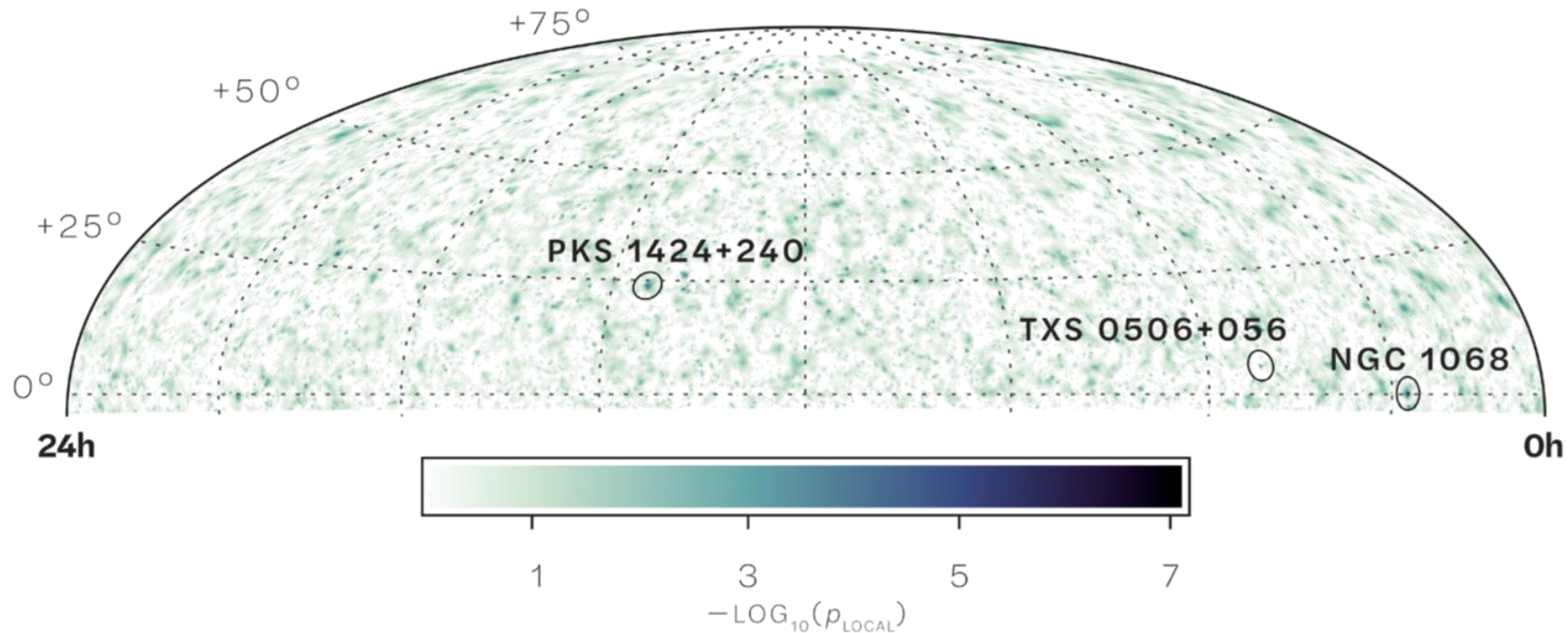


совместная статистическая значимость  
выше и ниже 200 ТэВ (на 2021 год):  
 $4.1\sigma$  post trial



# NGC 1068

- источник нейтрино (4 $\sigma$  по анализу всех энергий) IceCube 2022
- результат может вызвать вопросы:
  - ✓ спектр нейтрино от источника очень мягкий (3.2) и больше похож на атмосферный (3.7), чем на астрофизический (2.2)
  - ✓ не видно вклада от огромного количества аналогичных источников
  - ✓ заявленная значимость определена по списку из 110 источников, составленному неоднородно. При скане по небу – значимость 2 $\sigma$ .

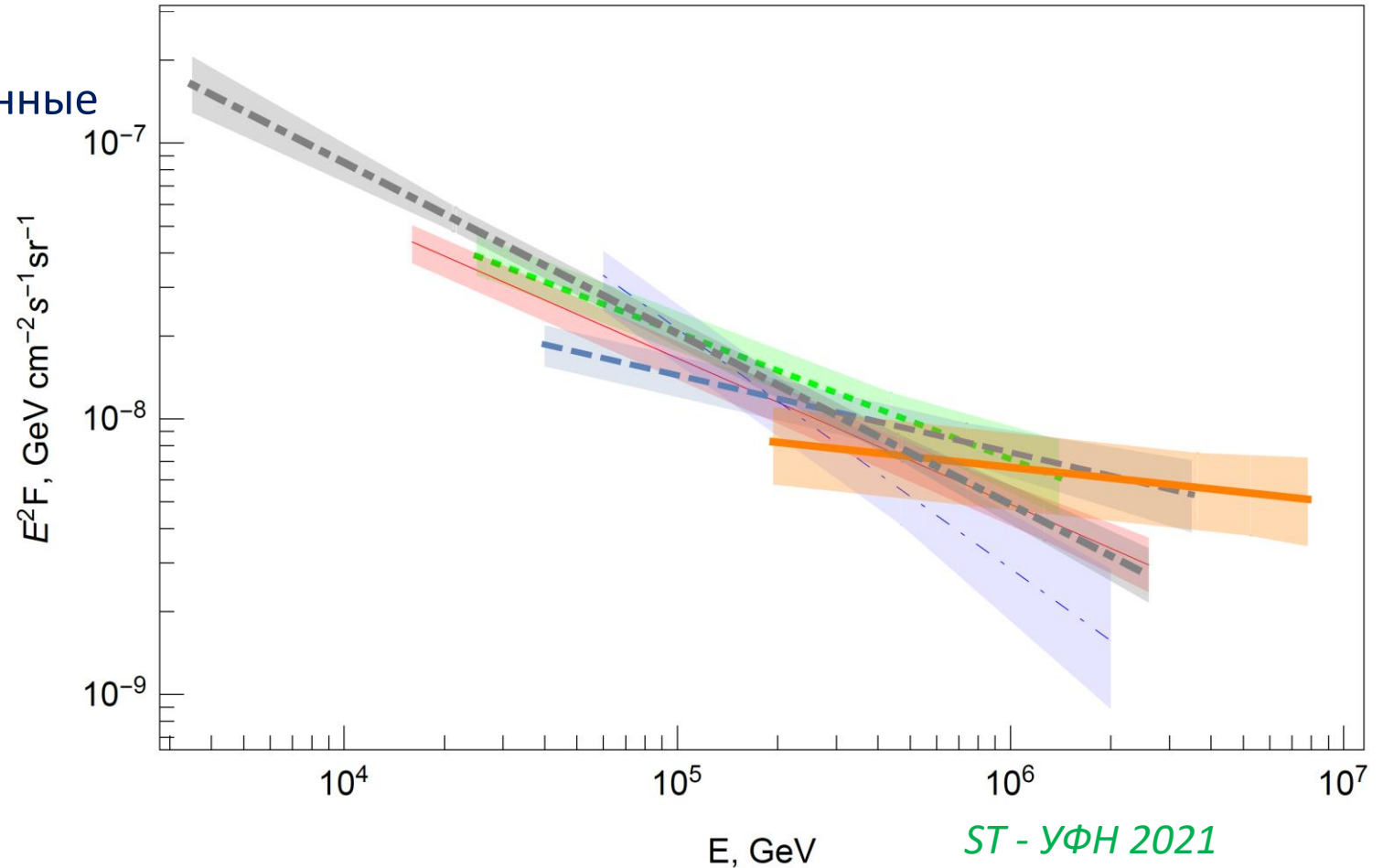


# Измерения спектра намекают на две компоненты

## IceCube: разные анализы

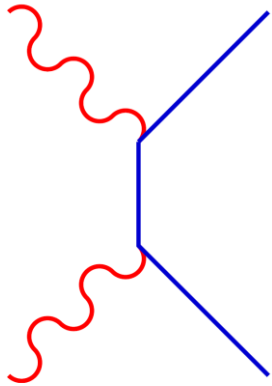
- во всех лучшие фиты спектра - степенные
- но показатели степени разные...

Analysis	Energy	$\Phi_0$	$\gamma$
HESE 2020 [24]	69.4 TeV–1.9 PeV	$2.12^{+0.49}_{-0.54}$	$2.87^{+0.20}_{-0.19}$
Cascades $\nu_e + \nu_\tau$ 2020 [30]	16 TeV–2.6 PeV	$1.66^{+0.25}_{-0.27}$	$2.53 \pm 0.07$
MESE 2014 [31]	25 TeV–1.4 PeV	$2.06^{+0.4}_{-0.3}$	$2.46 \pm 0.12$
Inelasticity 2018 [32]	3.5 TeV–2.6 PeV	$2.04^{+0.23}_{-0.21}$	$2.62 \pm 0.07$
$\nu_\mu$ 2016 [17]	194 TeV–7.8 PeV	$0.90^{+0.30}_{-0.27}$	$2.13 \pm 0.13$
$\nu_\mu$ 2019 [25]	40 TeV–3.5 PeV	$1.44^{+0.25}_{-0.24}$	$2.28^{+0.08}_{-0.09}$
ANTARES 2019 [28]		$1.5 \pm 1.0$	$2.3 \pm 0.4$



# Pair production: the Universe is opaque to gamma rays

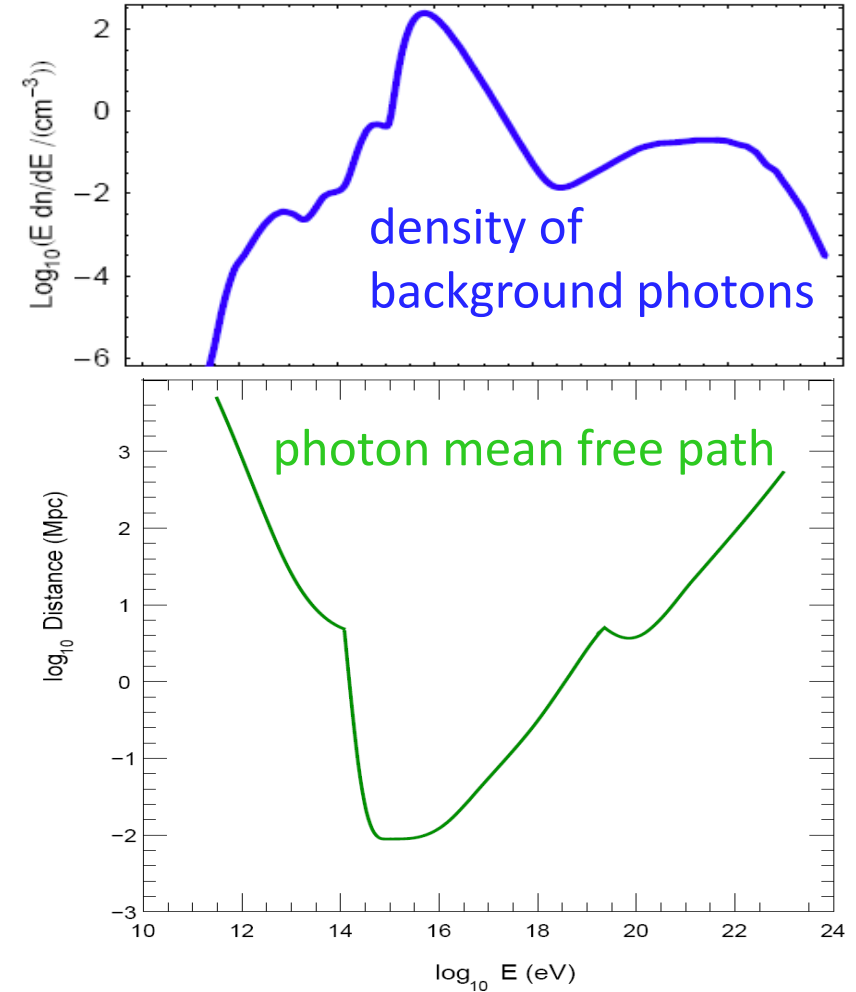
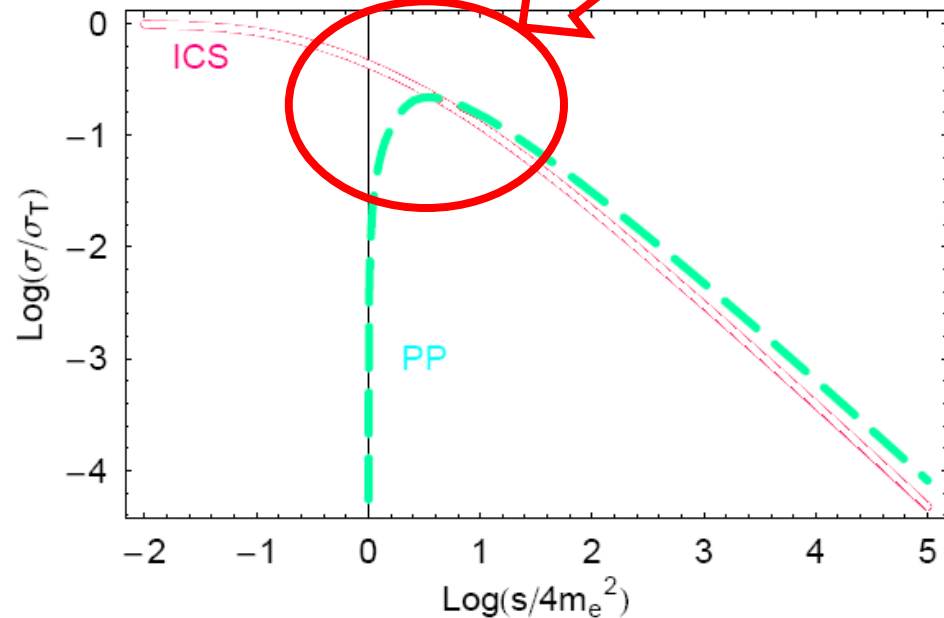
Nikishov 1962



the most intense pair production:

$$s/4m_e^2 \sim 2 \dots 4$$

$$E_\gamma \sim 5 \times 10^{11} (\omega/eV)^{-1} \text{ eV}$$

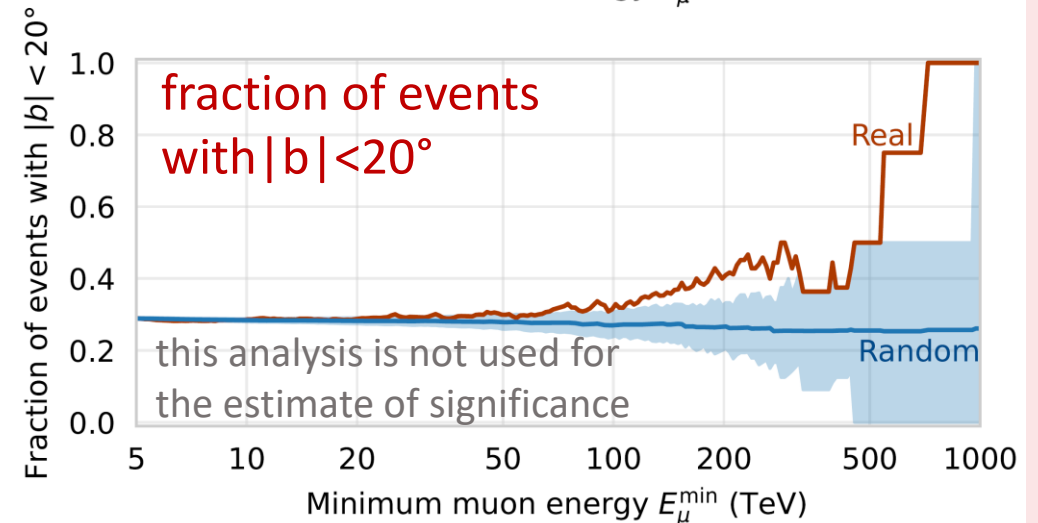
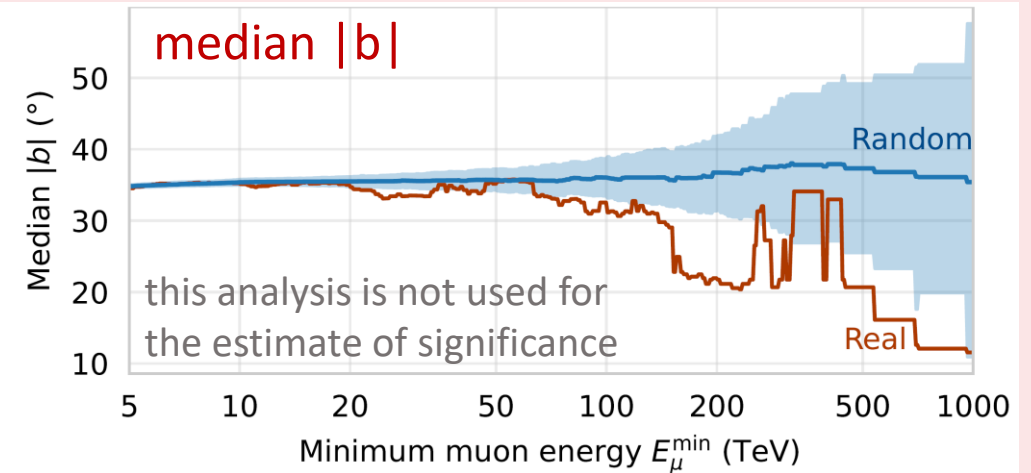
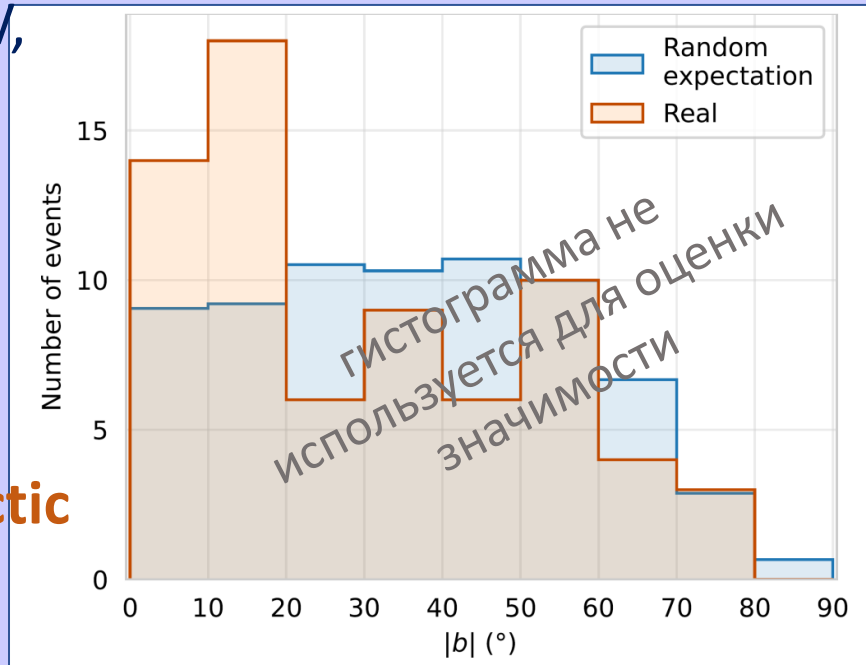


# IceCube tracks: supplementary analyses, lower energies

- IceCube 10yr public data, all energies
- $\text{DEC} > -5^\circ$ , 90% CL error area  $< 10 \text{ sq.deg.}$
- questionable quality, energies of  $\mu$ , not  $\nu$
- large fraction of atmospheric events

energy  $> 200 \text{ TeV}$ ,  
main sample

**(28±9)% Galactic**

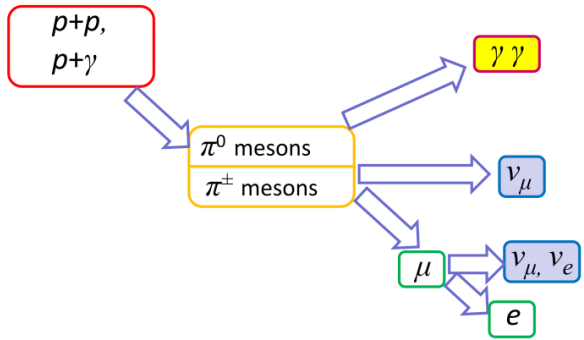


*Kovalev, Plavin, ST* [arxiv:2208.08423](https://arxiv.org/abs/2208.08423) = *Astrophys. J. Lett.* 940 (2022) L41

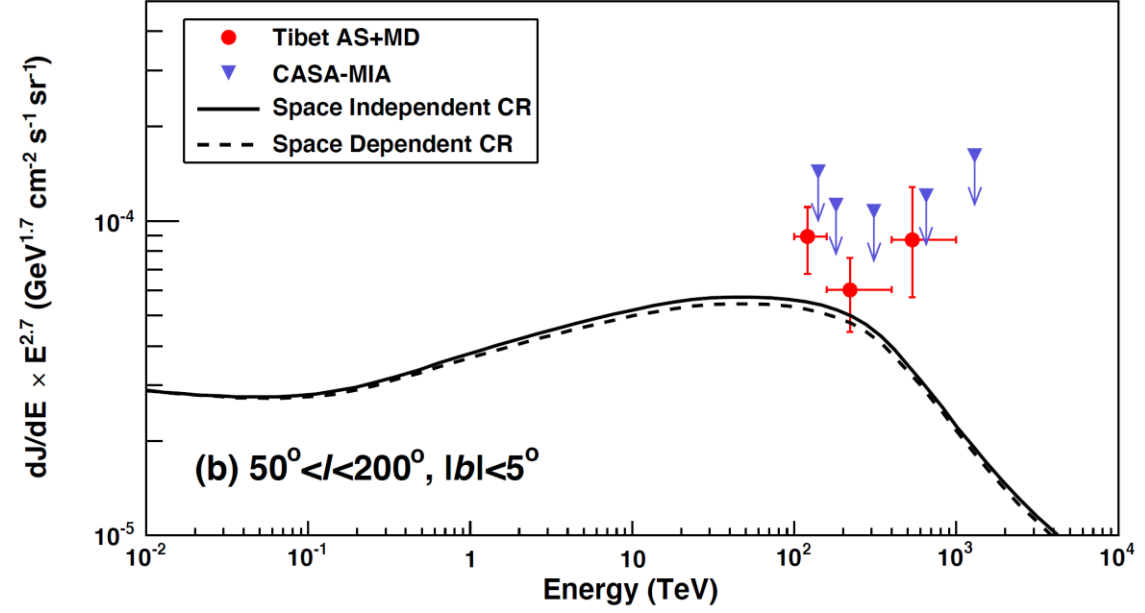
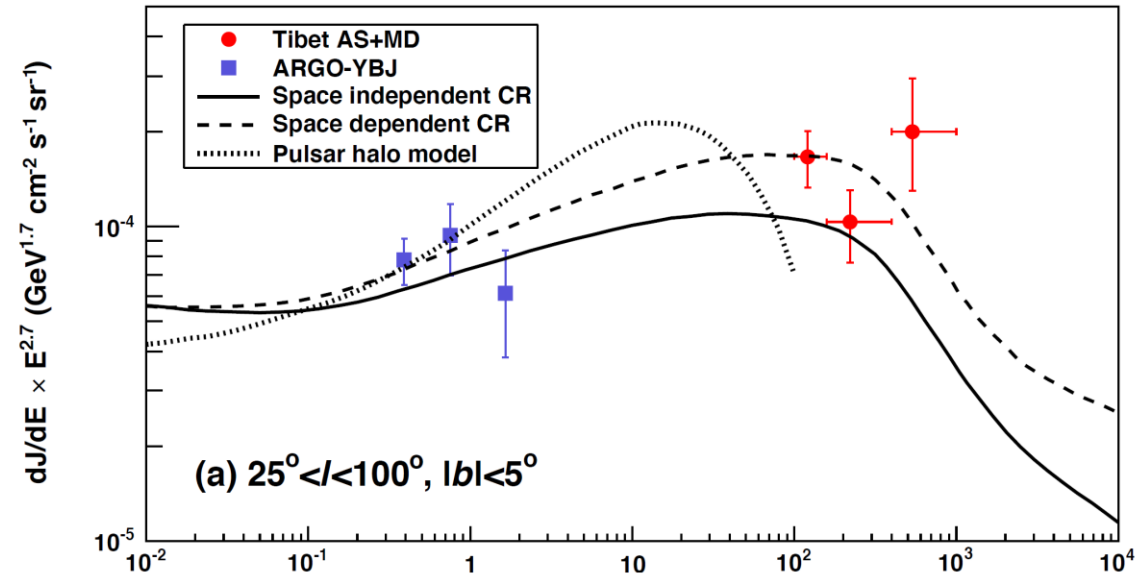
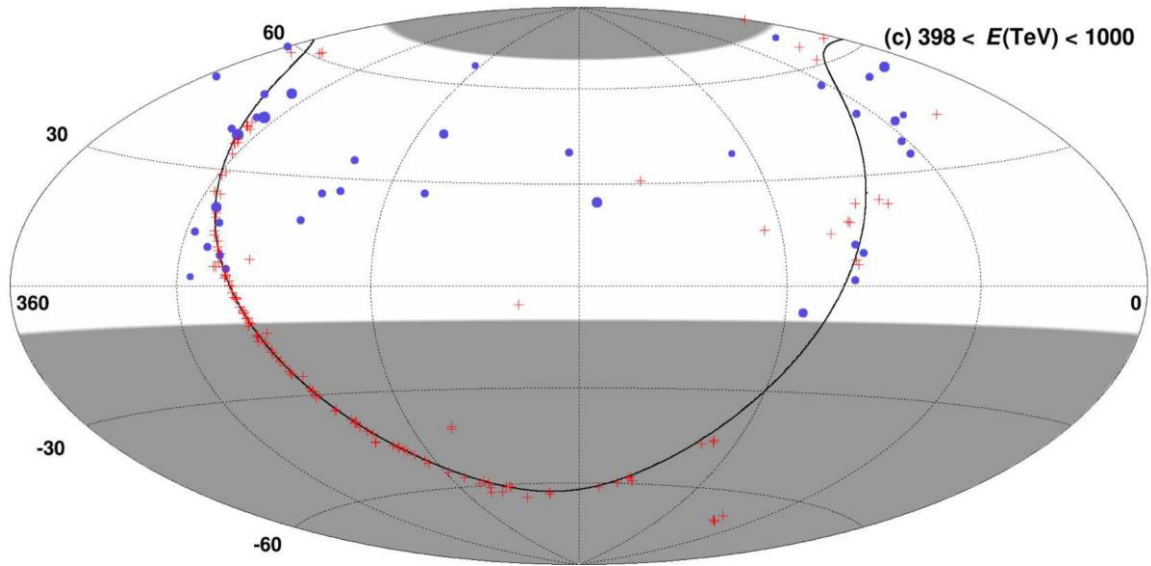


# Обсуждение: нейтрино и фотоны

- Tibet-AS $\gamma$  2021*: наблюдение диффузного потока фотонов (100 – 1000) ТэВ от Галактики



$$E_{\gamma} = 2 E_{\nu}$$

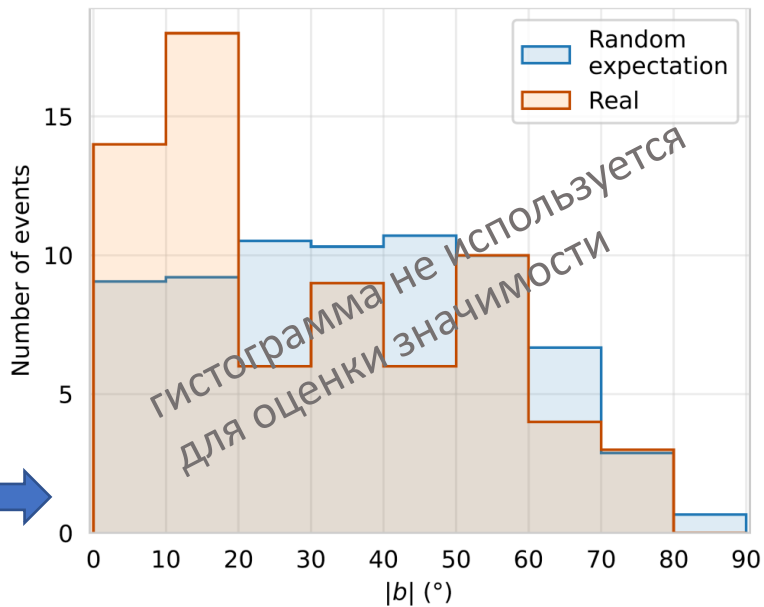


**согласие потоков нейтрино и фотонов!**





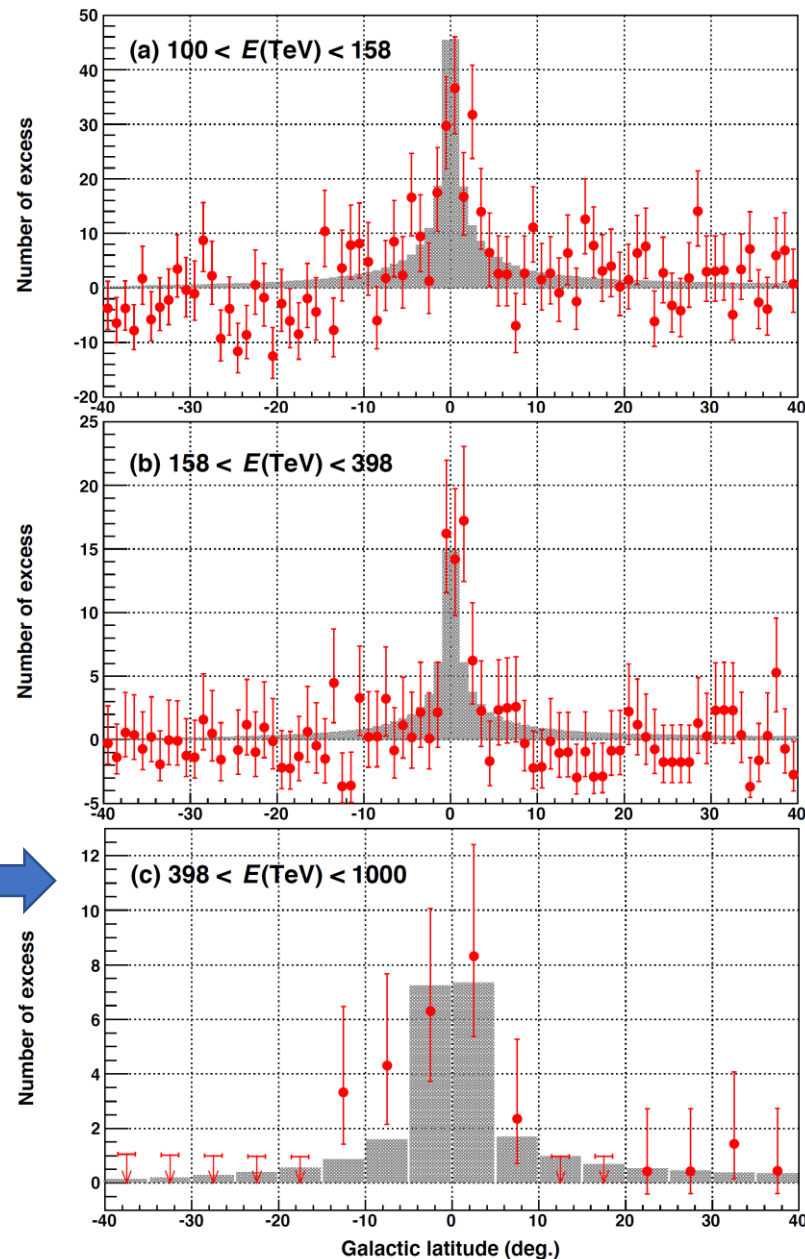
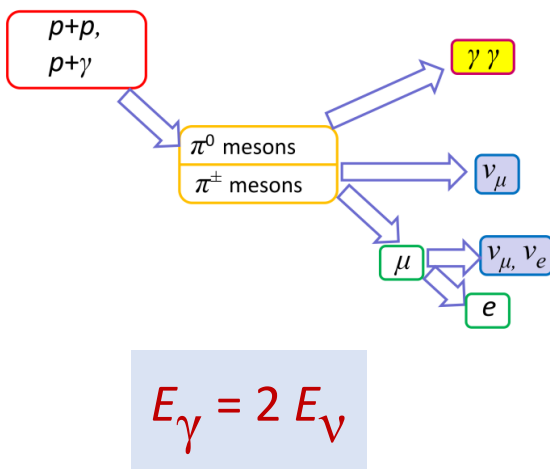
# Обсуждение: ширина Млечного Пути



нейтрино >200 ТэВ *Kovalev+ 2022*

фотоны *Tibet-Asy 2021*

- выше энергия протонов – больше ларморовский радиус
- все равно шире модельного!
- похоже в нейтрино и фотонах

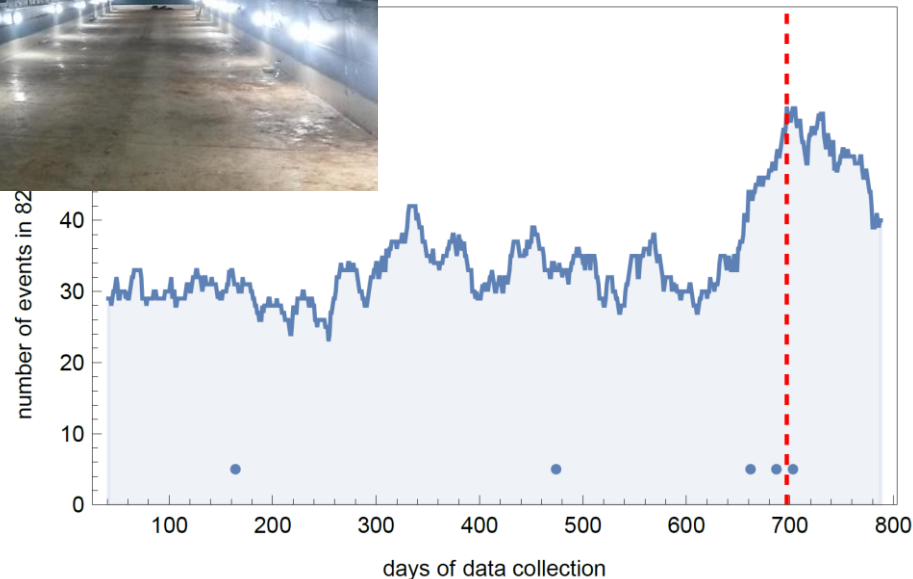


# Нейтрино высоких энергий от источников в Галактике?

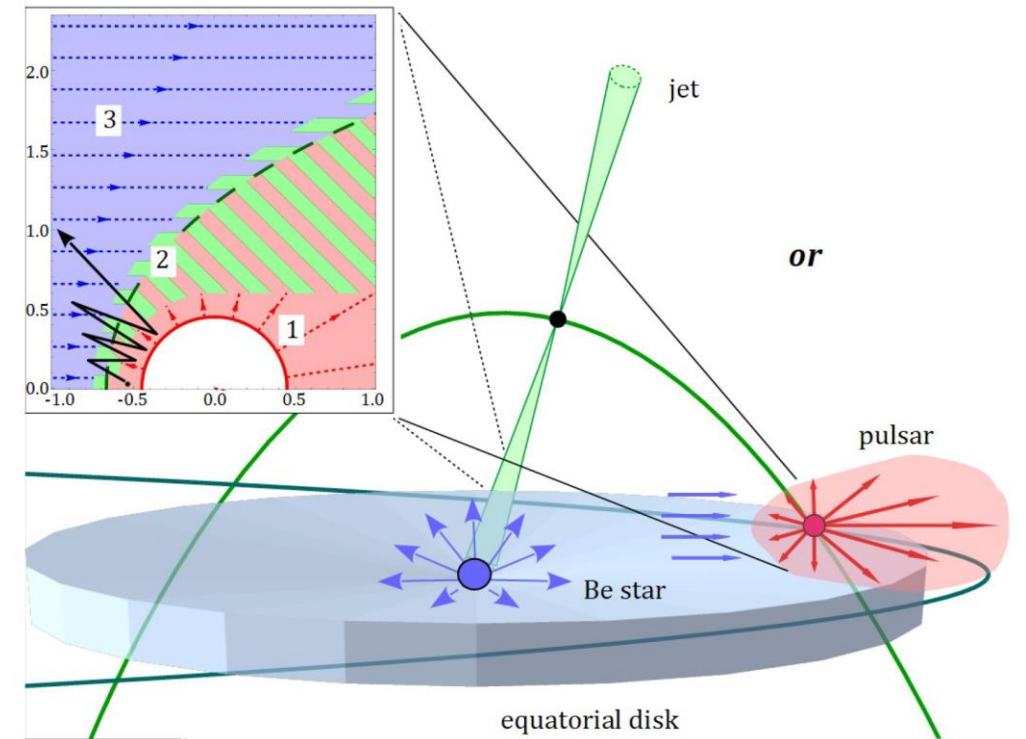
## нейтрино + фотоны очень высокой энергии

- IceCube: нейтрино 150 ТэВ
- Ковер-2: вспышка гамма-излучения >300 ТэВ

- Cygnus region: много источников
- теория: двойная система PSR J2032+4127?



*Dzhappuev et al., Astrophys.J.Lett. 916 (2021) L22*

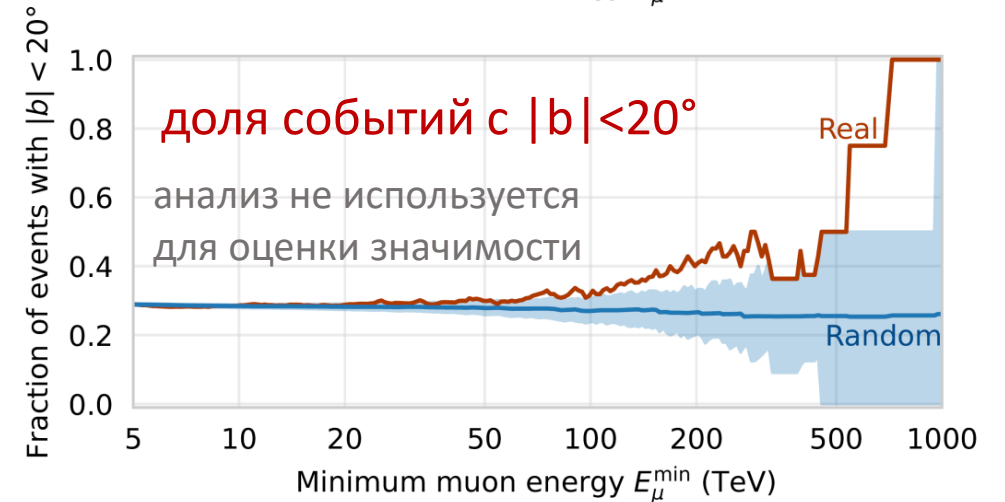
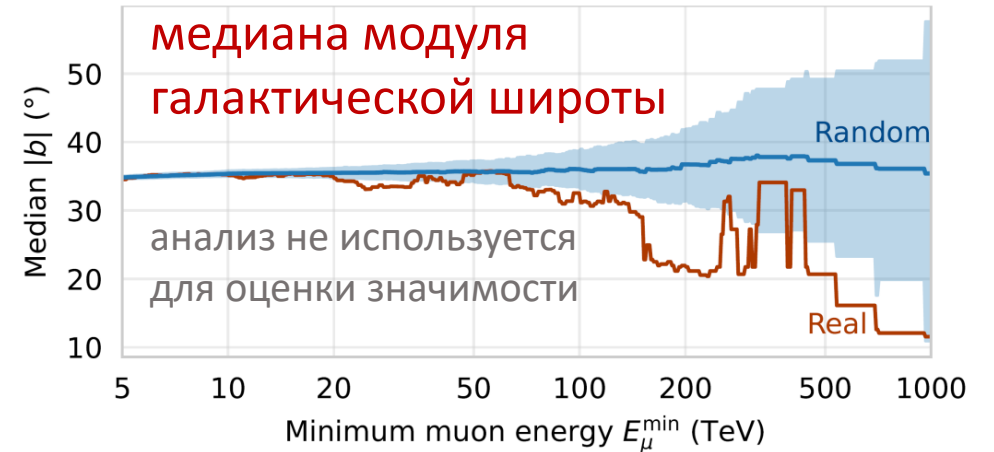
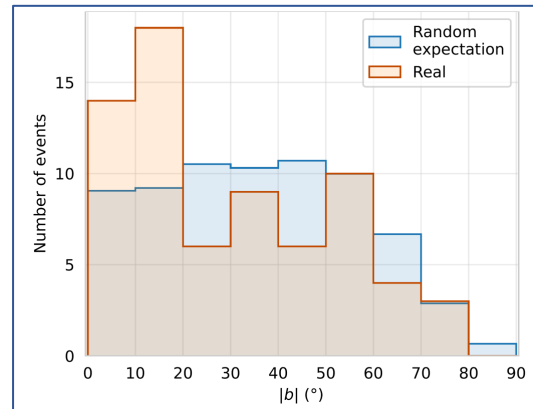


*Bykov et al., Astrophys.J.Lett. 921 (2021) L10*



# Другие энергии? - треки IceCube из публичных данных за 10 лет

- публичные данные за 2009-2018, все энергии
- $DEC > -5^\circ$ , площадь 90% CL ошибок  $< 10$  кв.град.
- сомнительное качество реконструкции
- известны энергии мюонов, не нейтрино
- при низких энергиях доля астрофизических нейтрино 1/10000

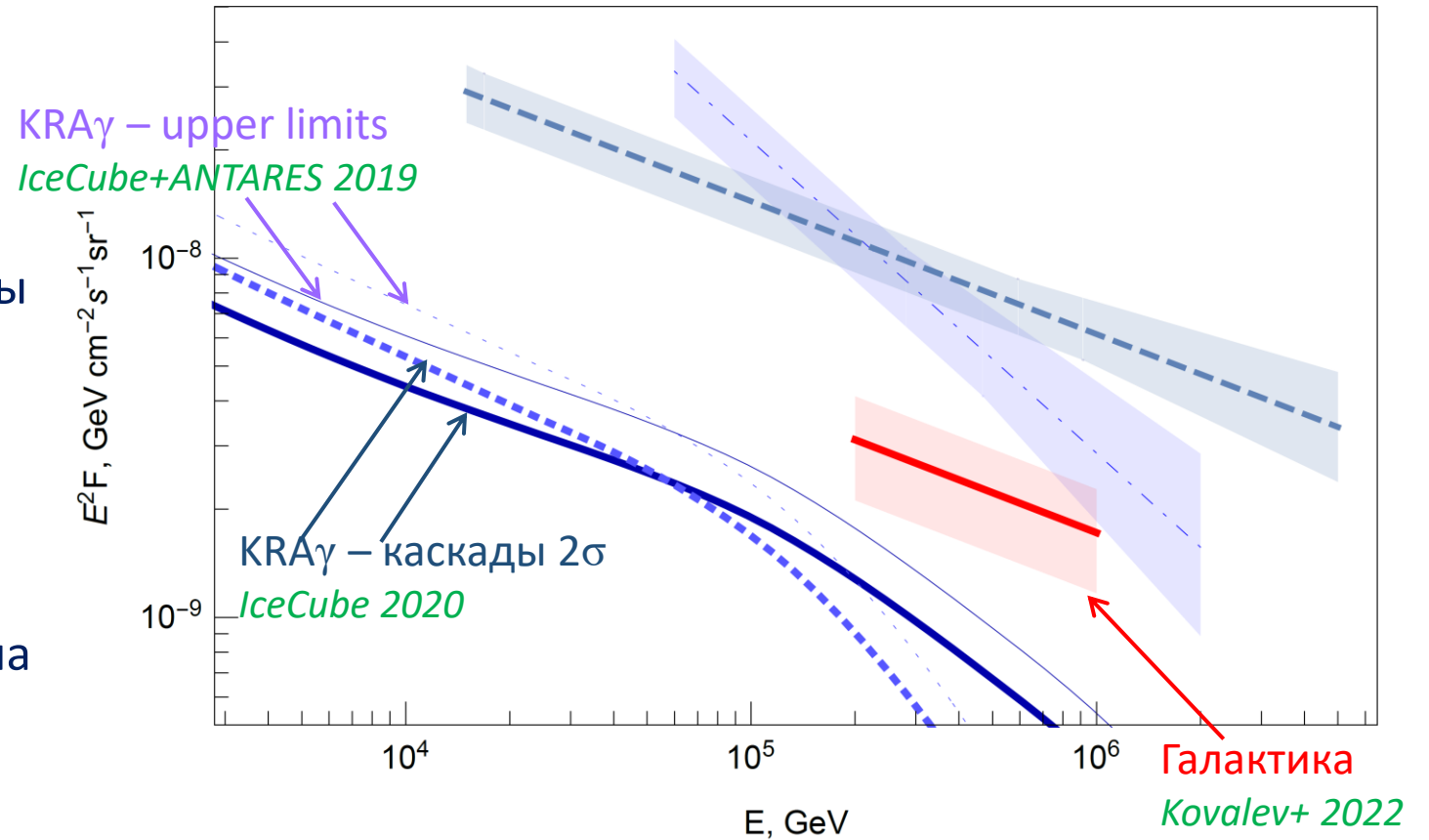


результат вспомогательного анализа согласуется с основным

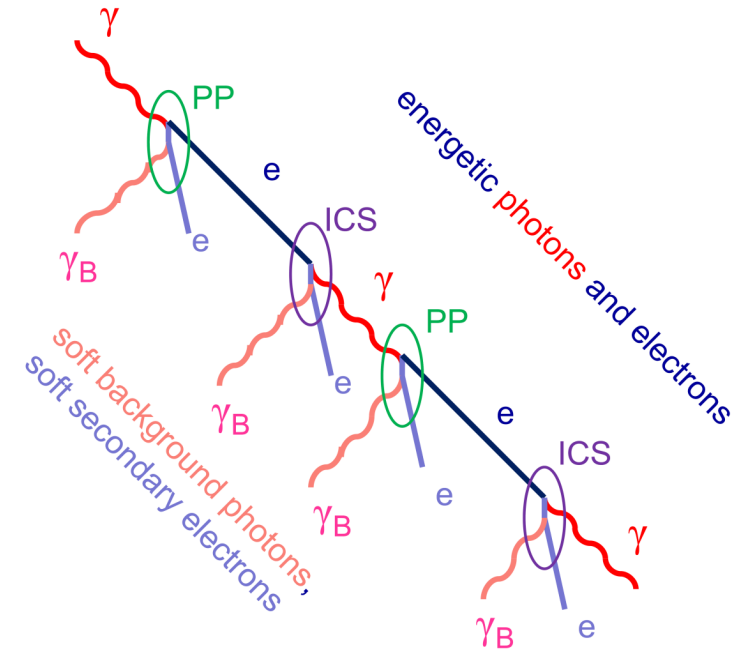
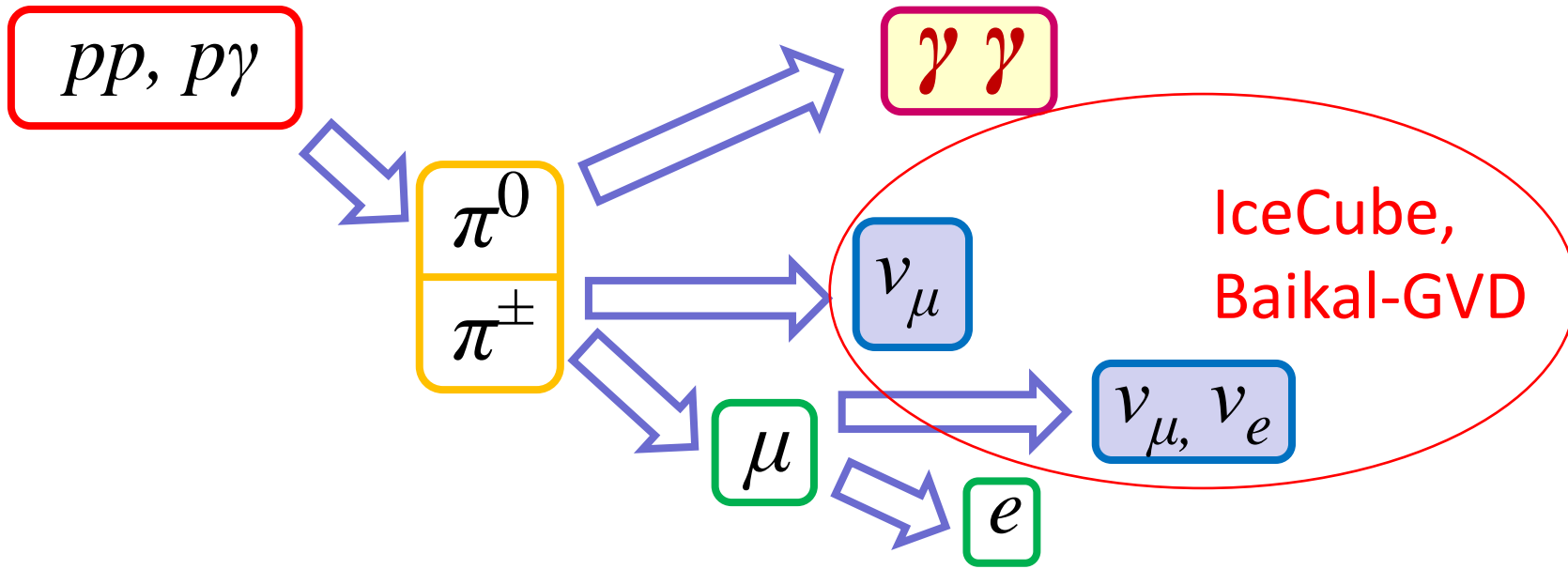


# Обсуждение: KRA $\gamma$ или не KRA $\gamma$

- KRA $\gamma$  – из модели DRAGON (упрощенное распределение протонов)
- DRAGON ~ GALPROP, другие варианты без принципиальных отличий
- KRA $\gamma$  – обрезание спектра протонов (5 ПэВ или 50 ПэВ),  $E_p = 20 E_\gamma$
- галактические протоны до энергий на порядок выше!  
напр. *Telescope Array 2020*



# Neutrino astronomy and gamma rays

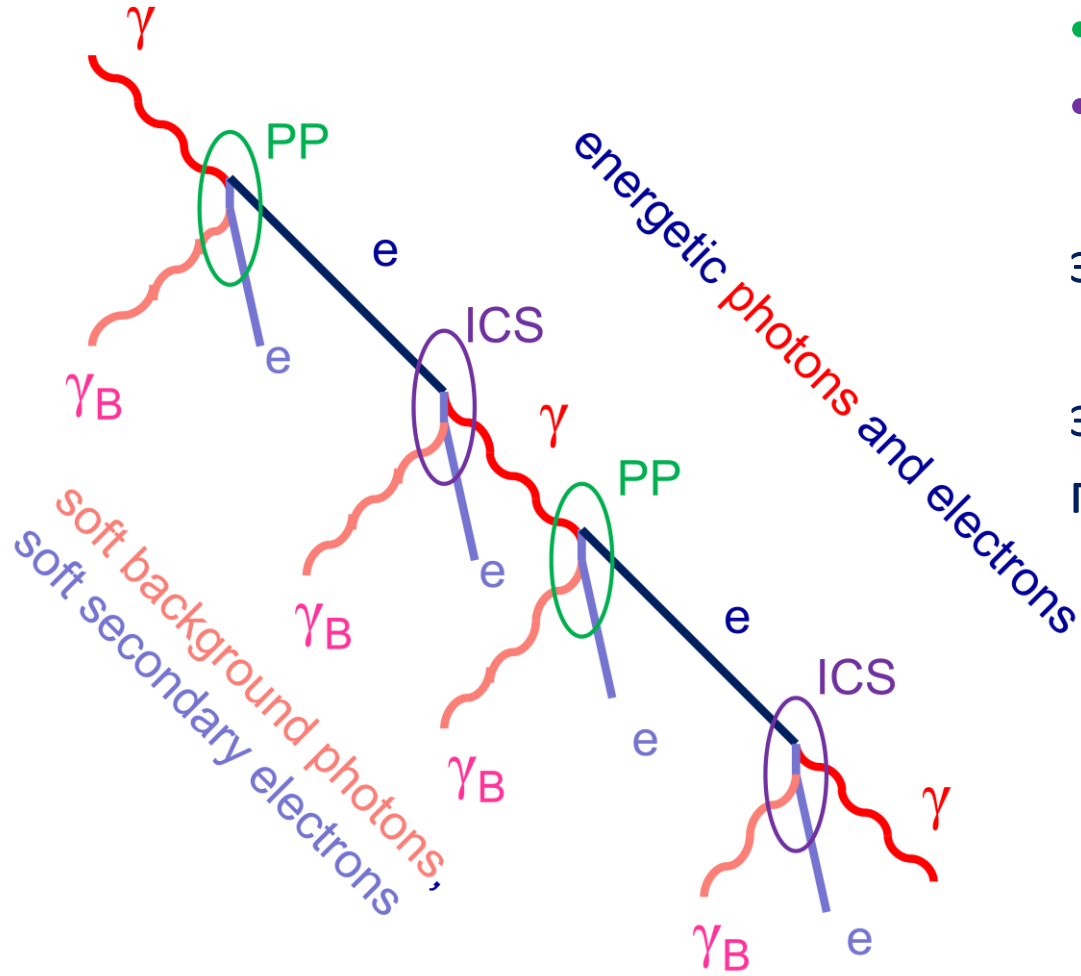


- ✓ High-energy ( $E > 100$  TeV) astrophysical neutrinos are accompanied by high-energy photons, if they are born in  $\pi$ -meson decays
- ✓ Cascades on CMB  $\Rightarrow$  (for extragalactic sources) the energy is transferred to the GeV band
- ✓ Nonthermal radiation (radio and gamma) accompanies the acceleration of particles to the required energies

**Search for high-energy photons = a tool to understand the neutrino origin**



# Судьба фотонов

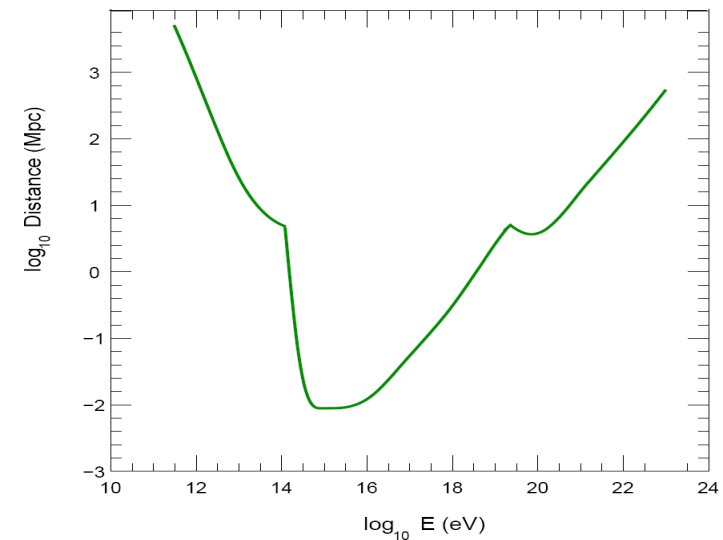


## Электромагнитные каскады:

- рождение пар
- обратное комптоновское рассеяние

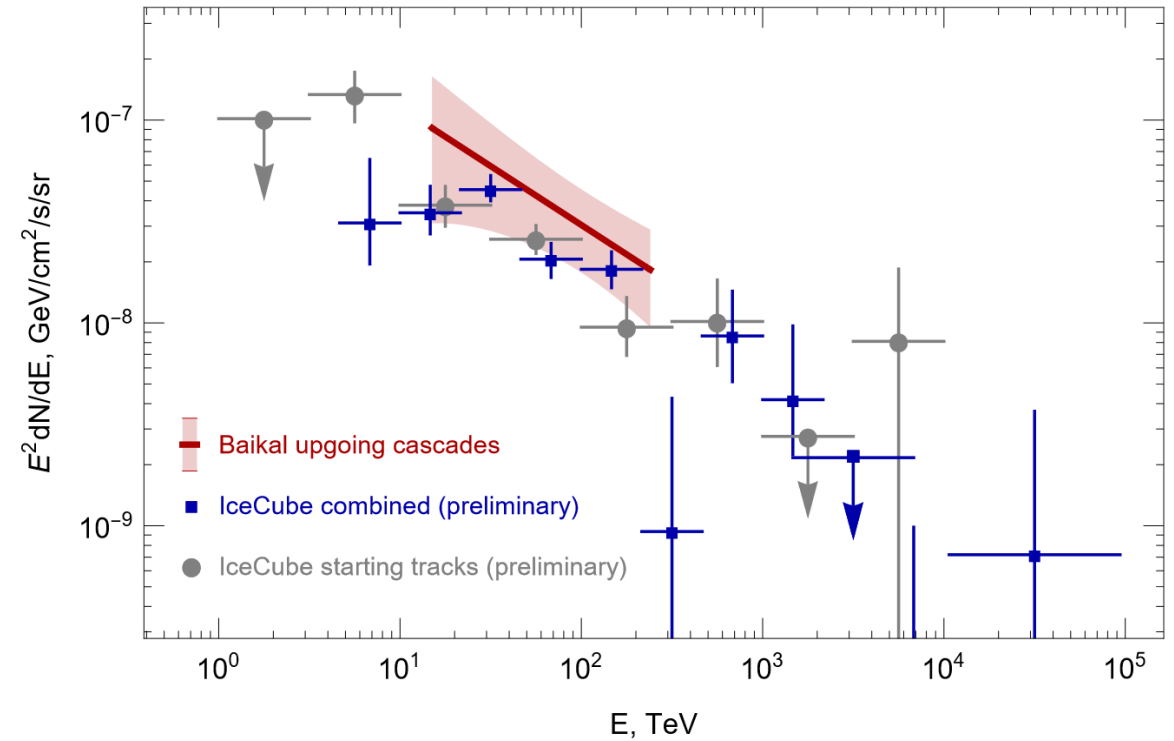
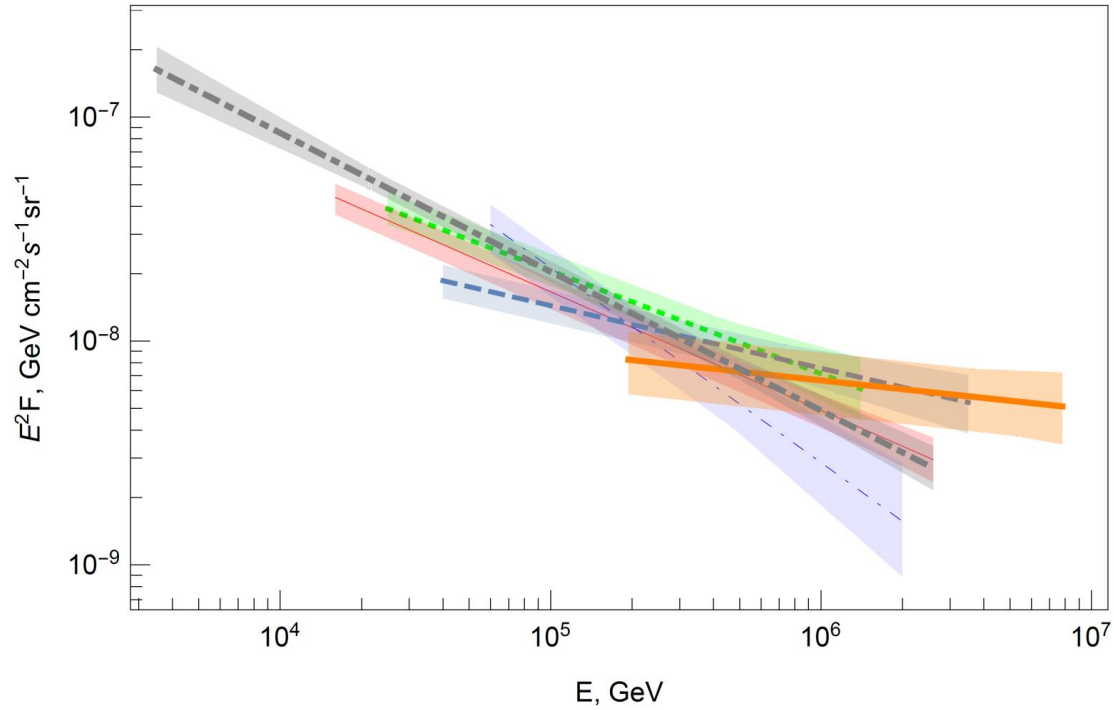
энергия сохраняется, направления меняются

энергия всех источников во Вселенной переизлучается в гамма-диапазоне Fermi LAT

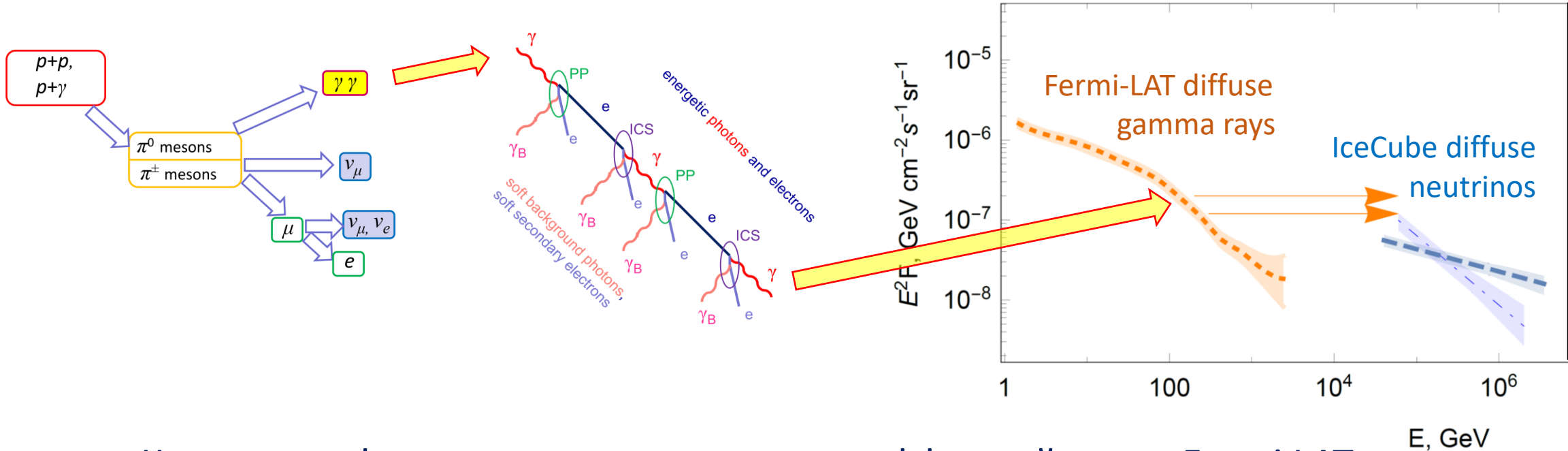


# Спектры астрофизических нейтрино

при высоких энергиях – плоские,  
энергии порядка 1-10 ТэВ – более мягкие, большие потоки!



# Галактическая составляющая?



- Каскадные фотоны «пересвечивают» диффузный поток Fermi LAT
- Галактические нейтрино – каскад не успеваает развиться
- (должны наблюдаться фотоны  $>100$  ТэВ вместе с галактическими нейтрино)



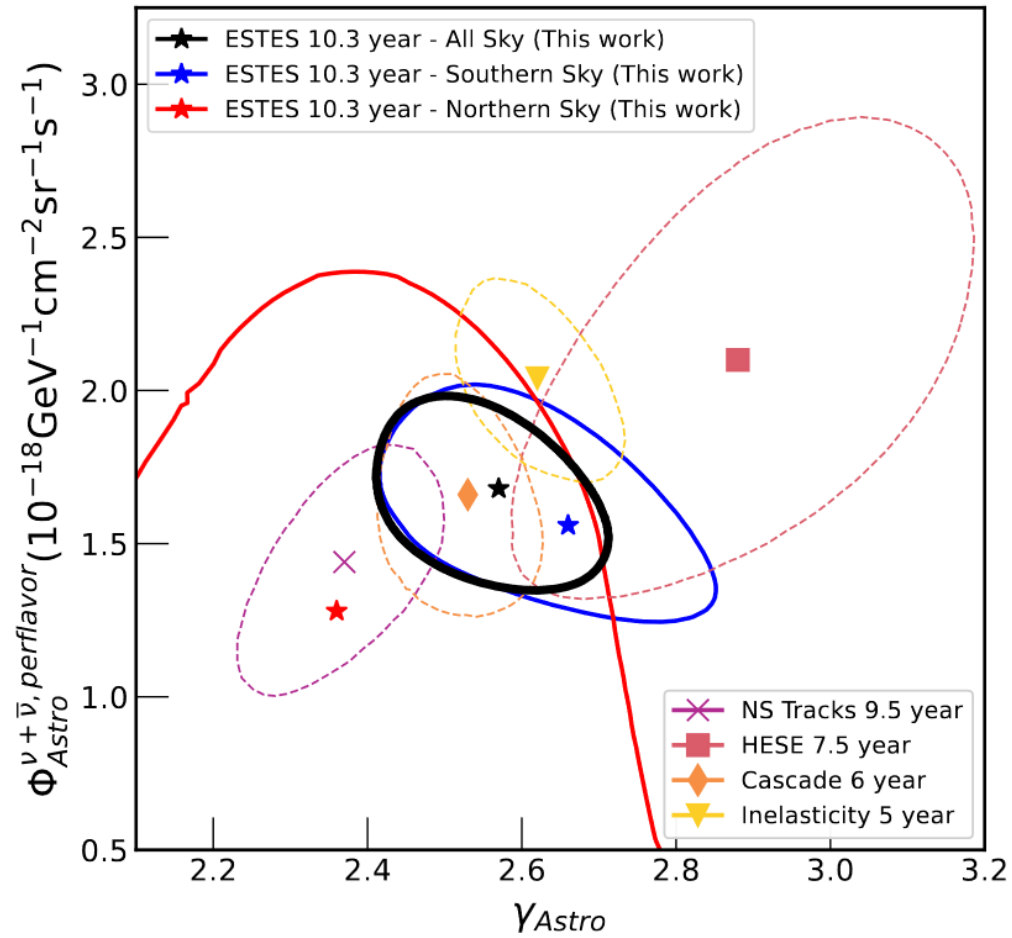


# Галактические нейтрино обнаружены!

- **нейтрино** обнаружены в 2022-2023
  - в 3 независимых анализах (IceCube треки, ANTARES, IceCube каскады)



# IceCube starting tracks, Север-Юг

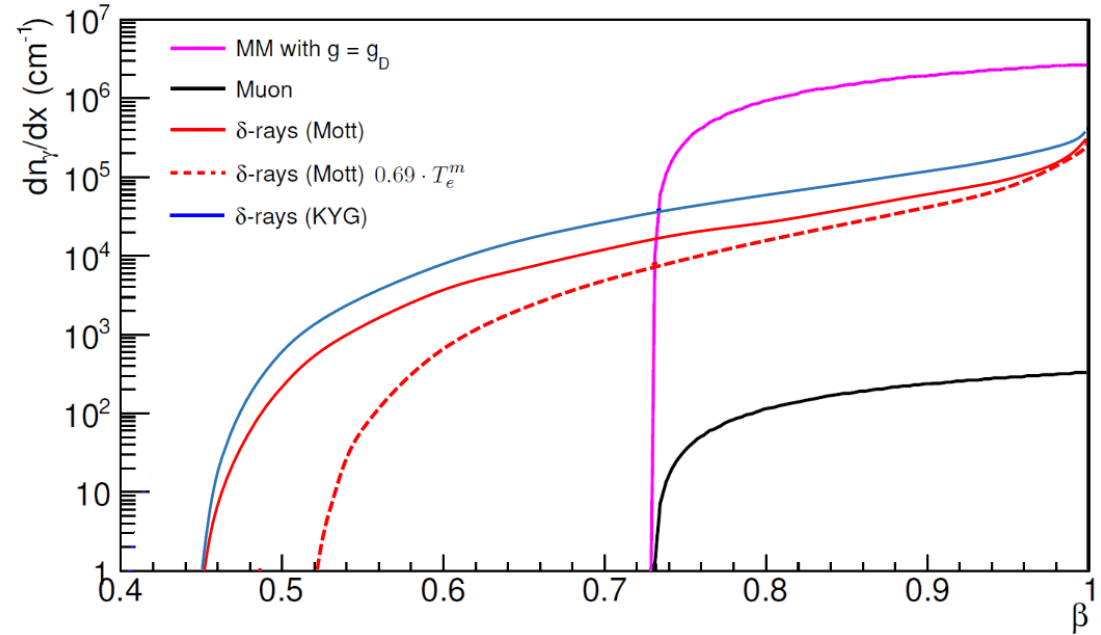
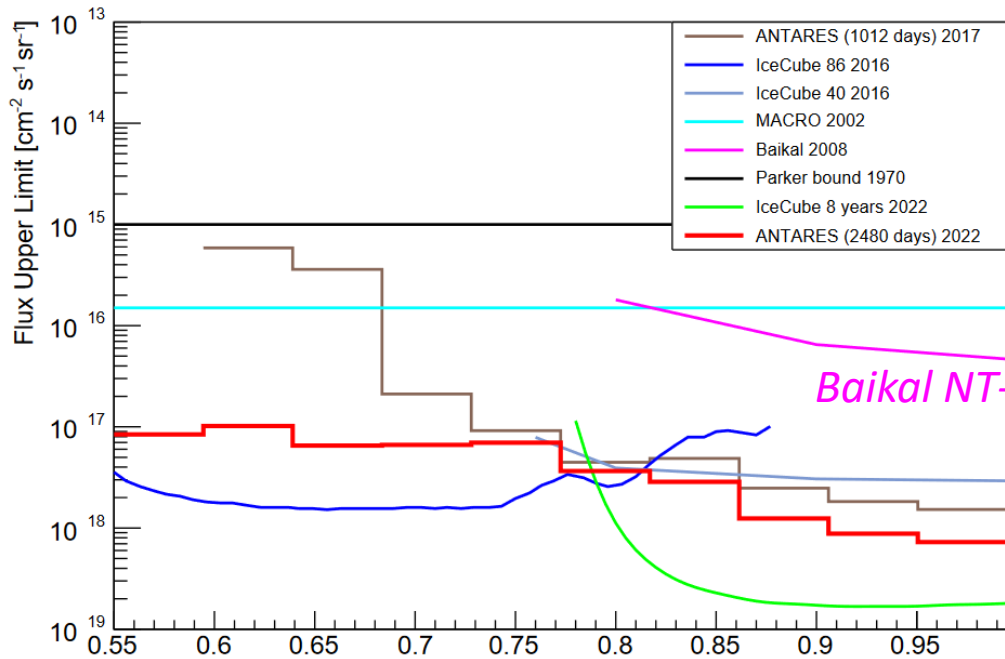


*IceCube arXiv:2402.18026*



# Поиск магнитных монополей и других экзотических объектов

Быстрые монополи:  
мощный черенковский сигнал



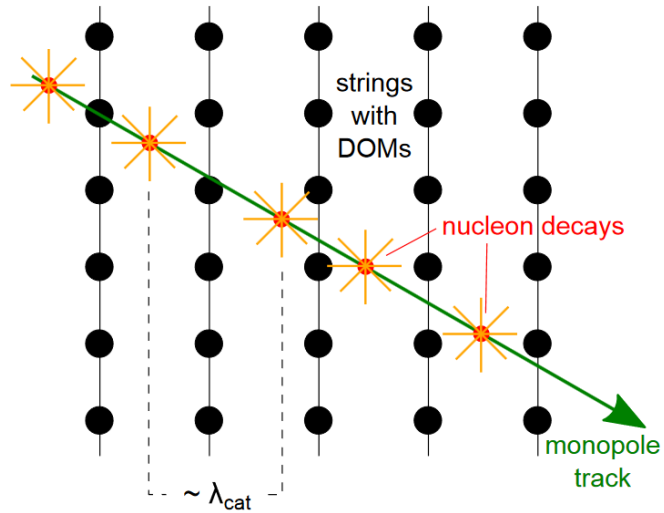
*Spurio 2019*

*ANTARES 2022*

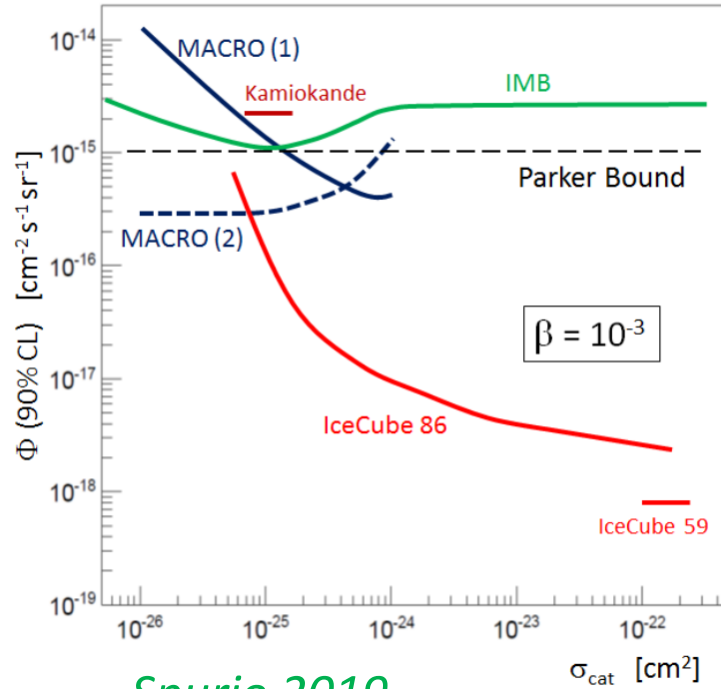


# Поиск магнитных монополей и других экзотических объектов

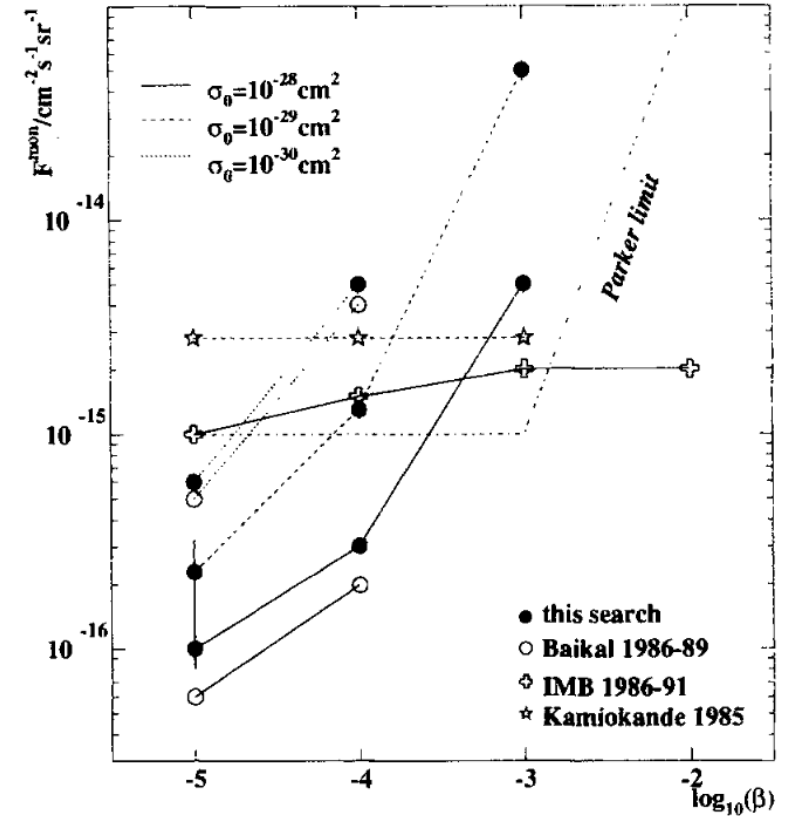
Медленные монополи: эффект Рубакова (последовательные каскады от распадов нуклонов)



*IceCube 2014*



*Spurio 2019*



*Baikal NT-36, 1998*



# Что даст Baikal-GVD для астрофизических задач с каскадами?

## ✓ направления прихода каскадных событий

- точность в 3-5 градусов вместо 10-20 (даже при не слишком высоких энергиях) позволяет говорить об астрономии точечных источников в каскадах [уже: TXS 0506+056, PKS 0735+178, триплет]
- ширина Млечного Пути в каскадах? [уже: события в плоскости Галактики]

## ✓ преимущества каскадов для принципиальных задач

- чем не устраивают треки?
  - определением энергии! по каскадам можно изучать ключевой вопрос о спектрах источников
  - большим атмосферным фоном (спуститься в «низкие» энергии)

## ✓ другое небо

- [уже: LSI +61 303]



# Что даст Baikal-GVD для астрофизических задач с треками?

## ✓ направления прихода трековых событий

- точность в 0.3-0.5 градусов вместо 1-3 (даже при не слишком высоких энергиях) – существенное уменьшение фона при поисках точечных источников и их популяций
- изучение структуры протяженных источников нейтрино (есть такие источники фотонов очень высоких энергий!)
- ширина Млечного Пути при невысоких энергиях в Южном небесном полушарии (там центр Галактики!)

## ✓ другое небо

- вечный вопрос: систематика или астрофизика?
- интригующий анализ IceCube в arXiv от 1 марта 2024?..

**А также: поиски «новой физики», фундаментальные вопросы микромира и ранней Вселенной...**



# Baikal-GVD, KM3NeT, P-ONE

- **Baikal-GVD** уже дает результаты (первое подтверждение существования астрофизических нейтрино в независимом эксперименте, астрофизика с каскадами)
  - но **KM3NeT** активно развивается (несколько десятков абстрактов на Neutrino-2024, огромный задел в обработке данных)
  - и проект **P-ONE** постепенно начинает признаваться в community...
  - китайские проекты – тоже водные и в Северном полушарии
1. **Каждый эксперимент имеет свою систематику (см. “вечный вопрос”)**
  2. **Небо отличается не только по широте, но и по долготе (для быстрых транзиентов)**

