

Млечный Путь в нейтрино высоких энергий: наблюдения и интерпретация

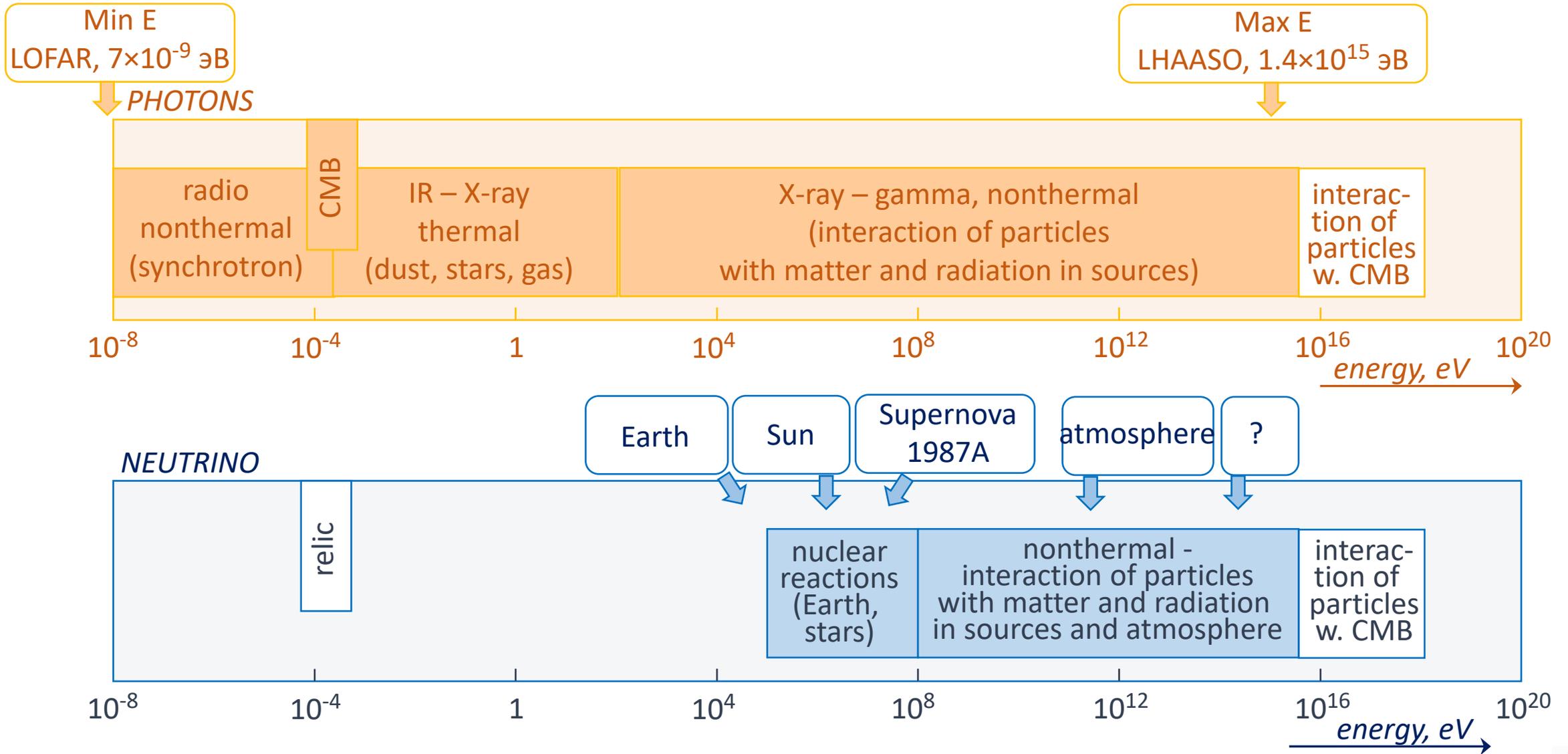
Сергей Троицкий
(ИЯИ РАН, физфак МГУ)



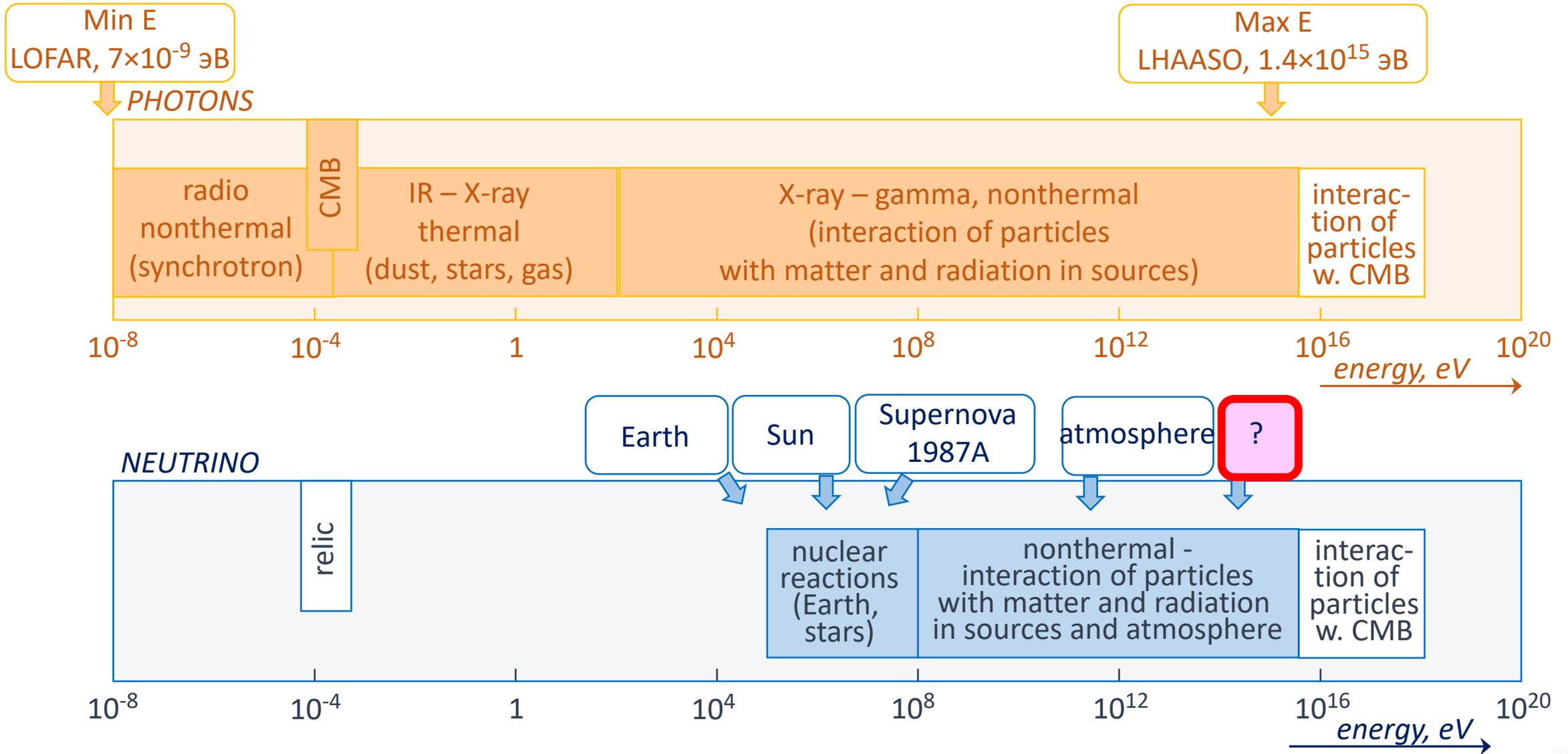
Зацепинские чтения, 02.06.2023



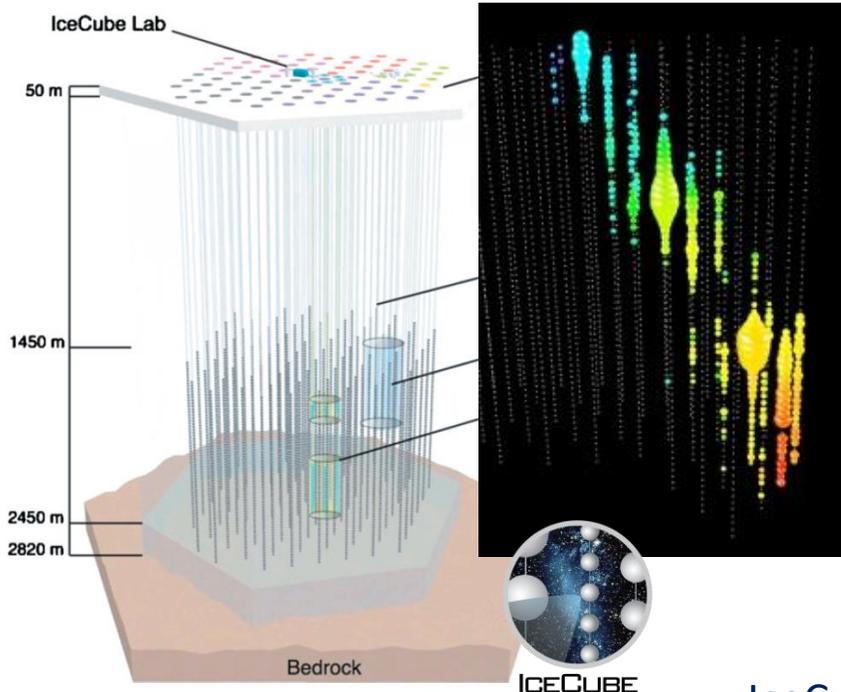
Природные источники фотонов и нейтрино



Природные источники фотонов и нейтрино



Нейтрино высоких энергий



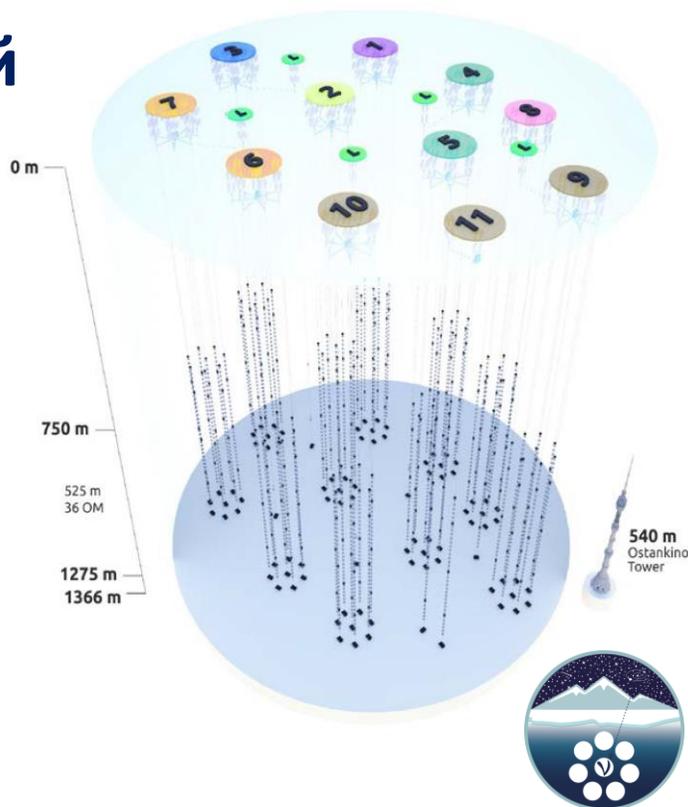
IceCube

IceCube:

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

KM3NeT:

- Средиземное море, создается



- 1 2016
 - 2 2017
 - 3 2018
 - 4 5 2019
 - 6 7 2020
 - 8 2021
 - 9 10 2022
- L L L Laser station
L L

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

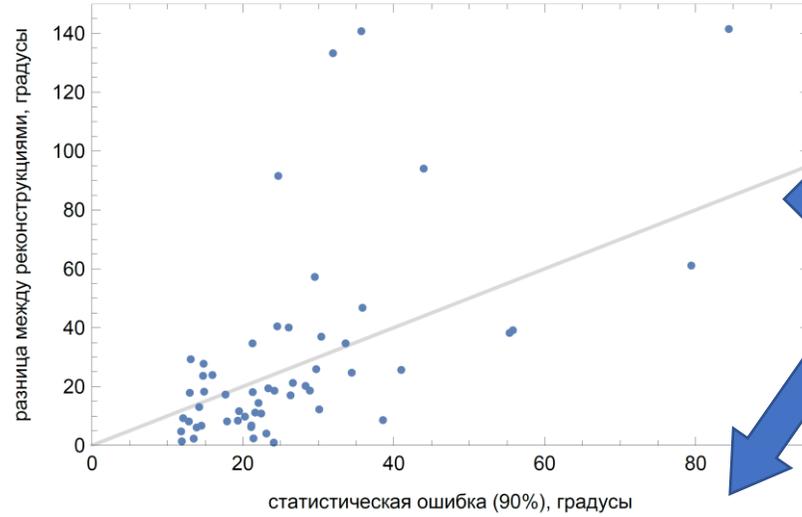
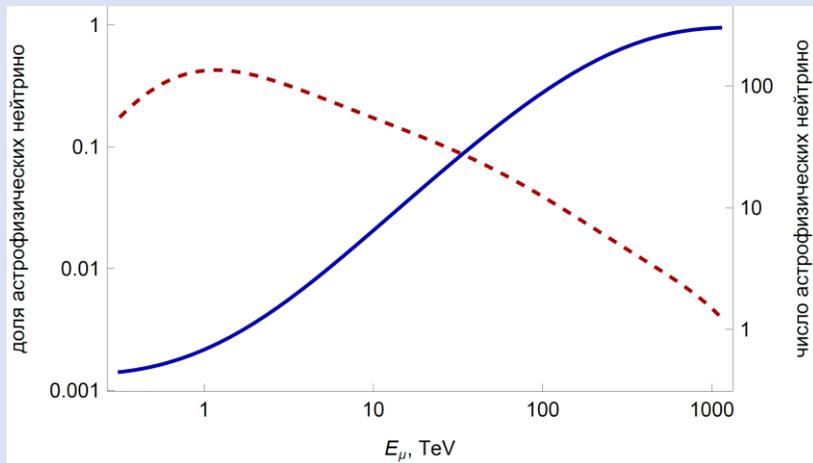


Minister of Science and Higher Education of Russia Valery Falikov is passing a button to launch the Baikal-GVD neutrino telescope. Photo by Ilya Shalobov / JINR

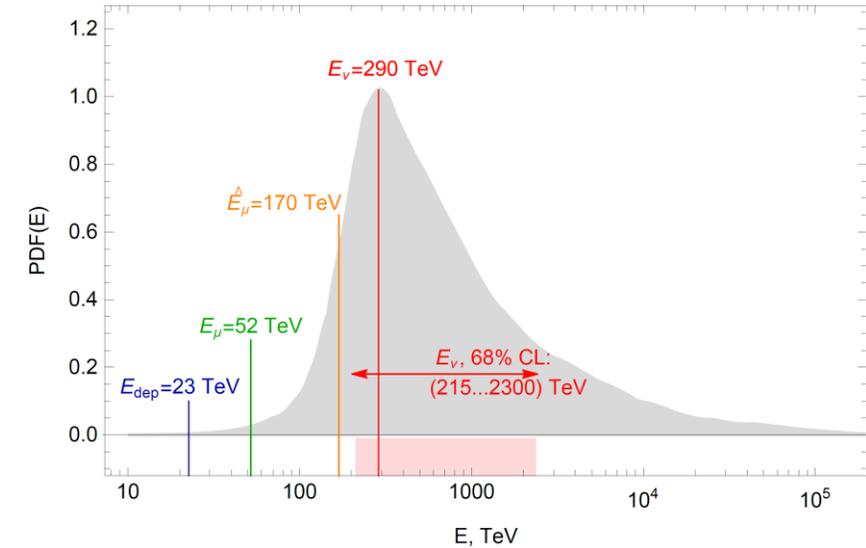
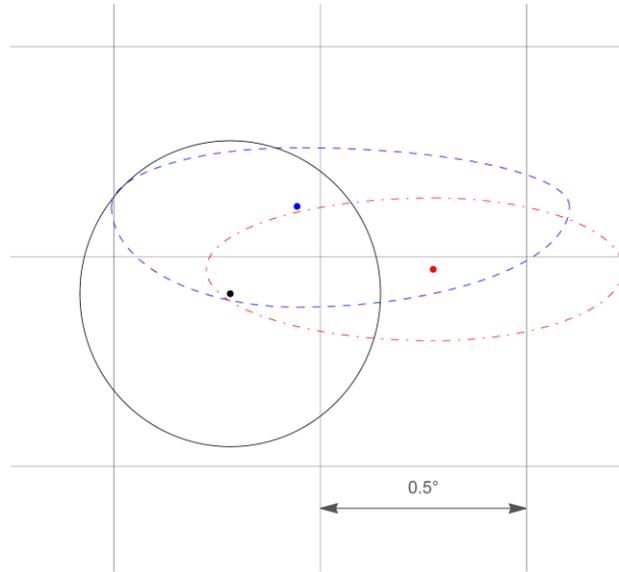


Некоторые трудности...

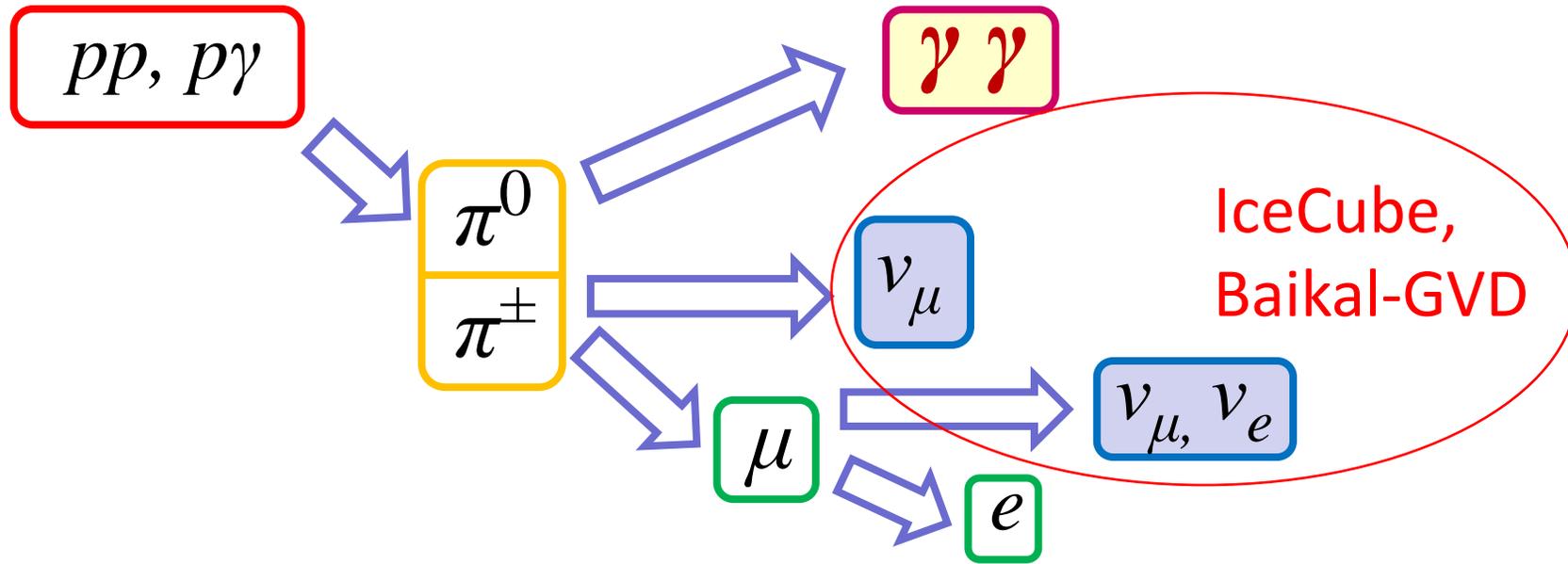
- Много нейтрино (и мюонов) рождается в атмосфере, так что даже определить астрофизическое происхождение затруднительно.



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



Нейтрино высоких энергий требуют релятивистских протонов



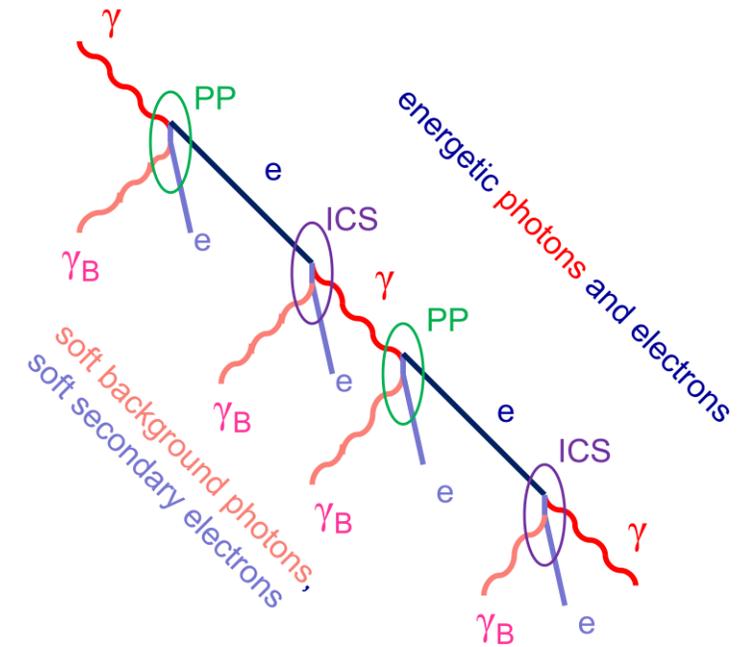
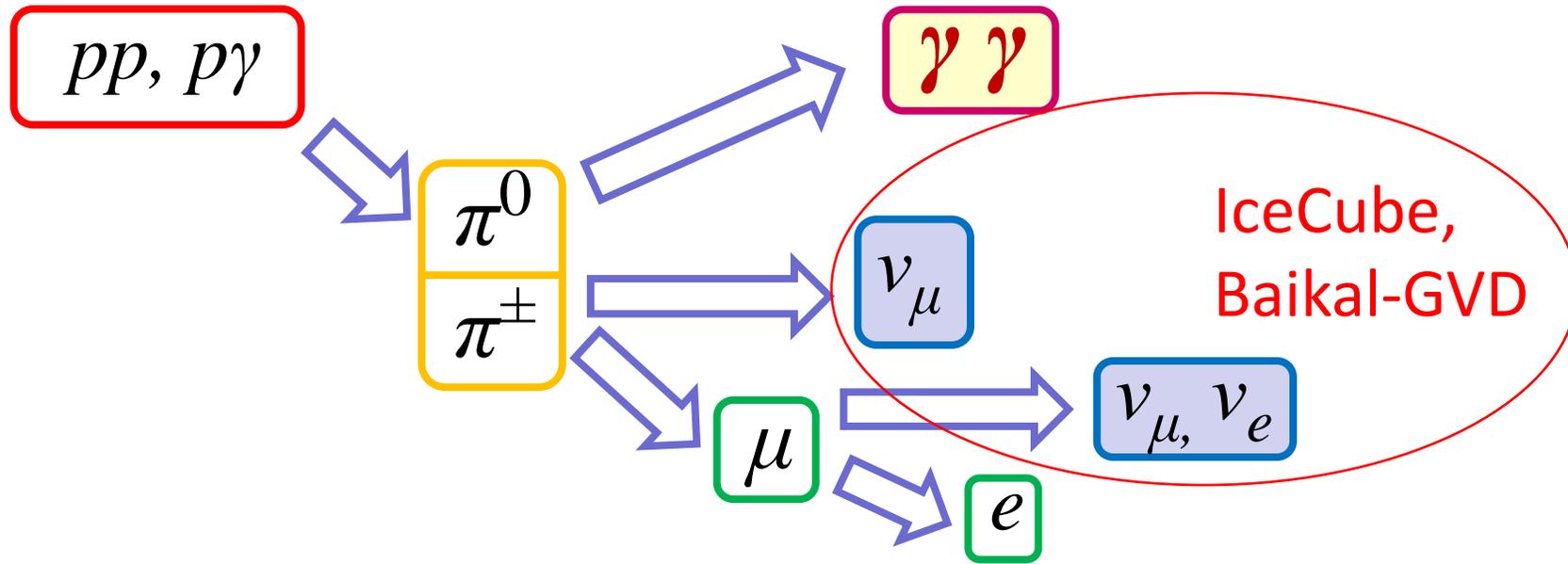
- ✓ Энергии выше 1 ТэВ – нетепловое происхождение
- ✓ Стандартная физика – только процессы с участием ускоренных адронов (протоны, ядра)



Нейтрино – маркер релятивистских протонов и нетепловых процессов



Нейтринная астрономия и гамма-излучение



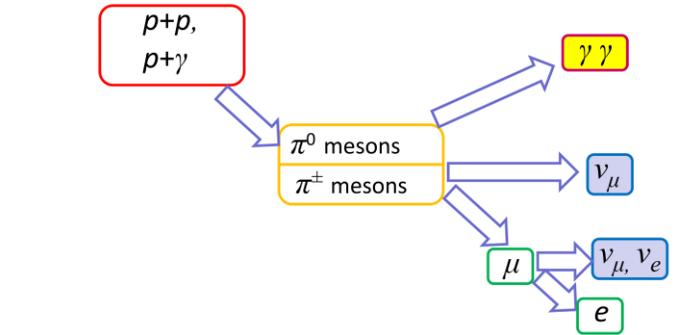
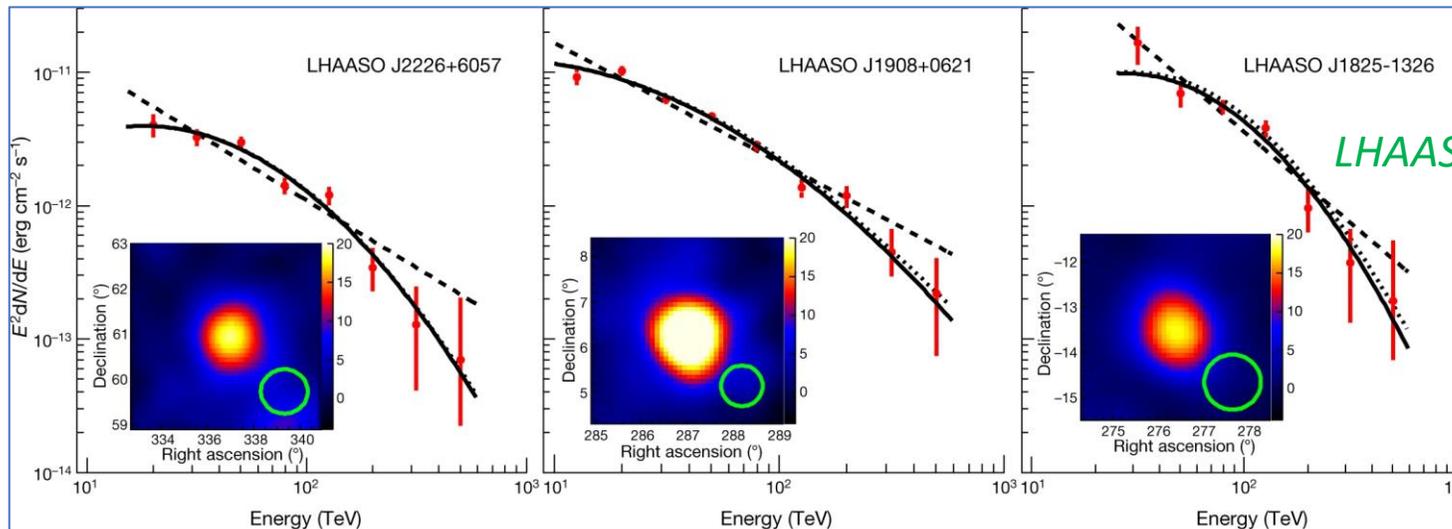
- ✓ Астрофизические нейтрино высокой энергии ($E > 100$ ТэВ) сопровождаются фотонами высокой энергии, если они рождаются в распадах π -мезонов
- ✓ Каскады на СМВ \Rightarrow (для внегалактических источников) энергия переходит в диапазон ГэВ
- ✓ Нетепловое излучение (радио, гамма) сопровождает ускорение частиц до требуемых энергий

Наблюдения фотонов высоких энергий = инструмент понимания происхождения нейтрино

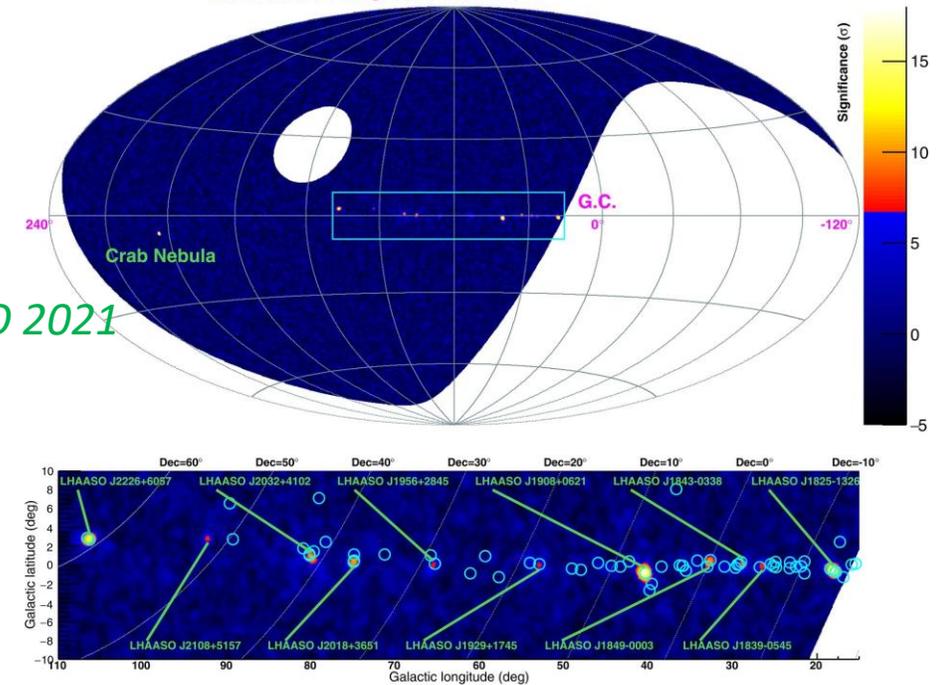


Ожидание галактических нейтрино

- взаимодействия космических лучей с газом в диске (и гало) Галактики
- наблюдение диффузного гамма-излучения выше 100 ТэВ от Галактики (Tibet-AS γ)
- точечные источники (ПэВатроны), Tibet-As γ , HAWC, LHAASO



LHAASO Sky @ >100 TeV



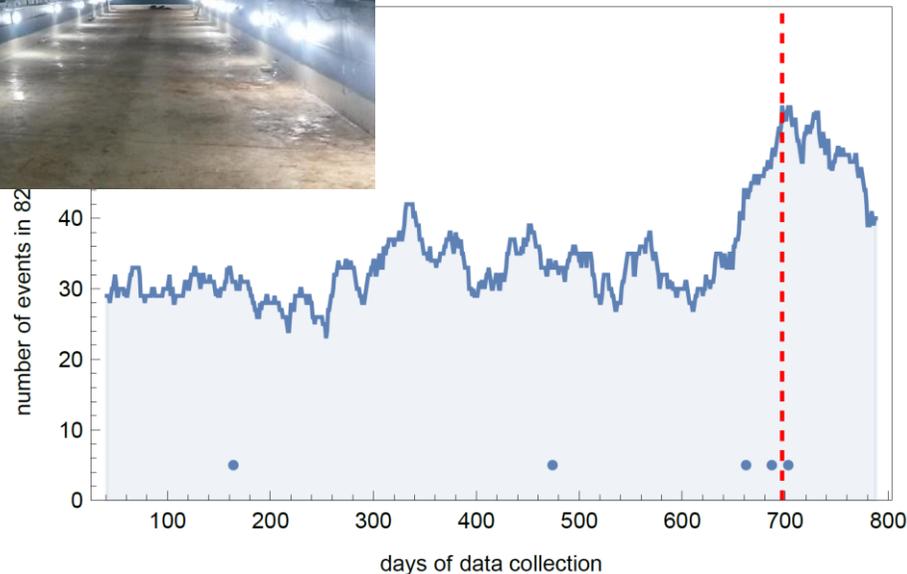
LHAASO 2021



Нейтрино высоких энергий от источников в Галактике?

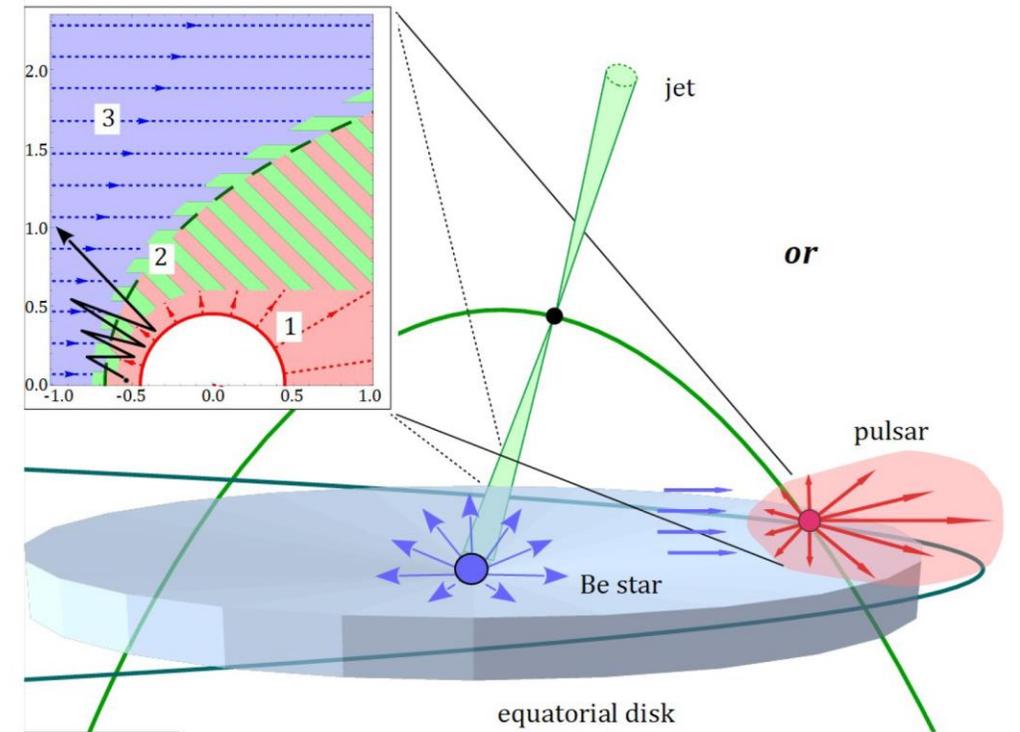
нейтрино + фотоны очень высокой энергии

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



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

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



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

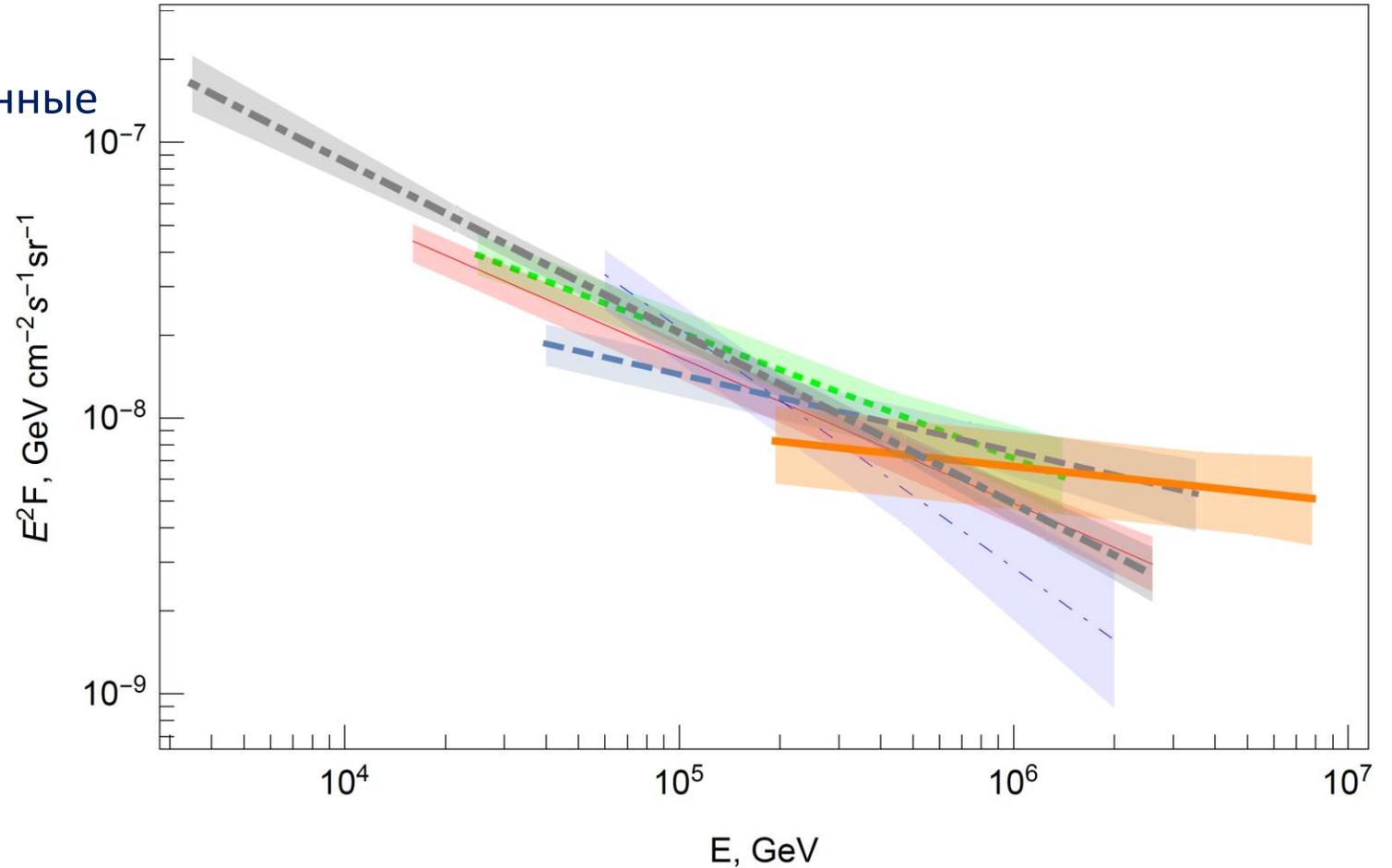


Измерения спектра намекают на две компоненты

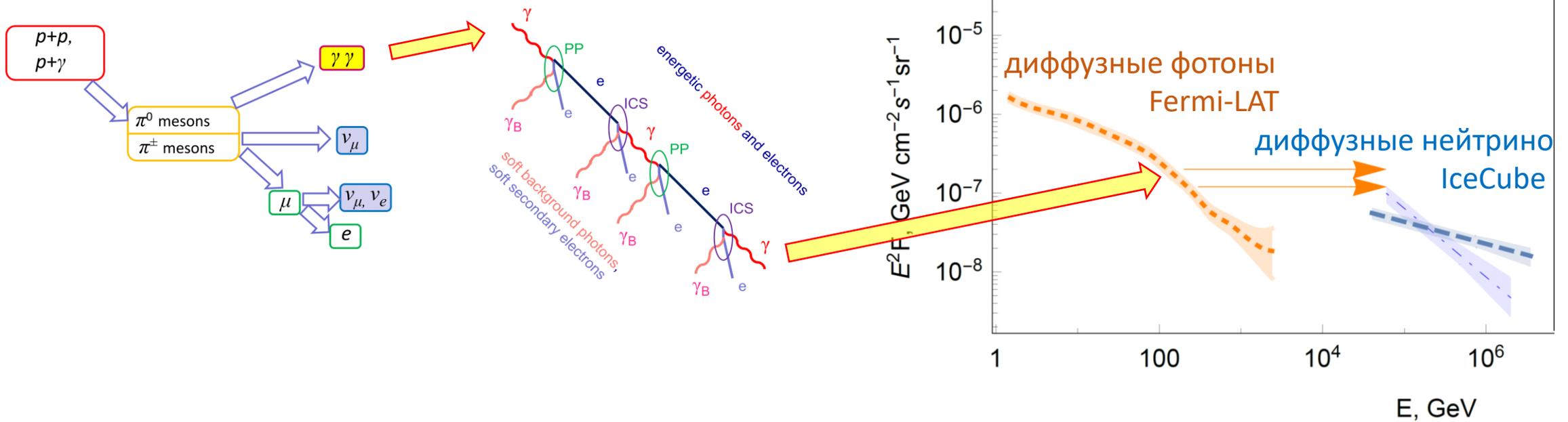
IceCube: разные анализы

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

Analysis	Energy	Φ_0	γ
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 ± 0.07
MESE 2014 [31]	25 TeV–1.4 PeV	$2.06^{+0.4}_{-0.3}$	2.46 ± 0.12
Inelasticity 2018 [32]	3.5 TeV–2.6 PeV	$2.04^{+0.23}_{-0.21}$	2.62 ± 0.07
ν_μ 2016 [17]	194 TeV–7.8 PeV	$0.90^{+0.30}_{-0.27}$	2.13 ± 0.13
ν_μ 2019 [25]	40 TeV–3.5 PeV	$1.44^{+0.25}_{-0.24}$	$2.28^{+0.08}_{-0.09}$
ANTARES 2019 [28]		1.5 ± 1.0	2.3 ± 0.4



Более мягкая компонента - галактическая?



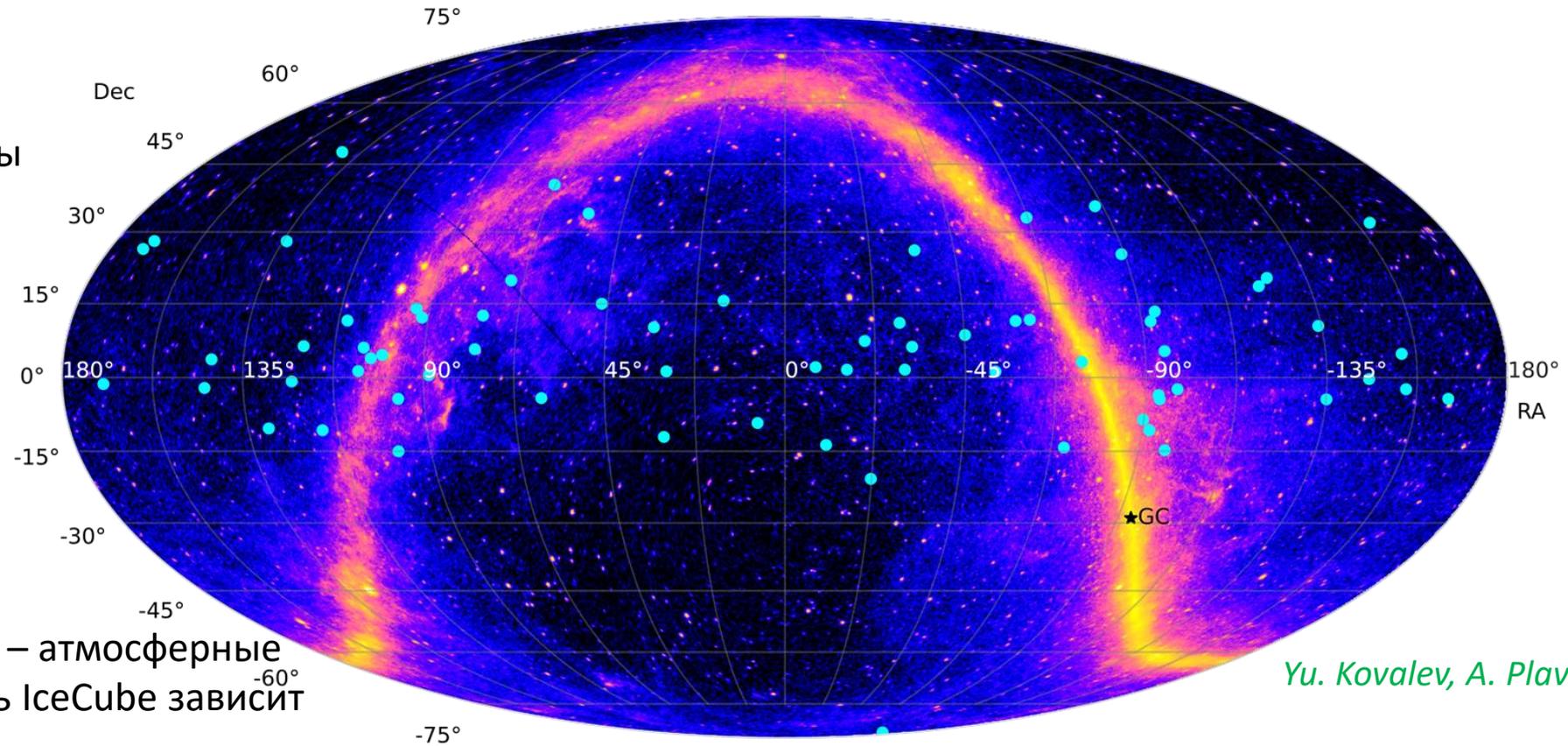
- Из-за каскадов сопутствующие фотоны переизлучают энергию в ГэВ-ТэВ, превышение потоков, измеренных Fermi-LAT
- Галактические источники близко, каскад не успевает развиваться – нет проблемы



Галактическая анизотропия нейтрино - треки IceCube выше 200 ТэВ

- выборка из 70 качественных событий IceCube на карте неба
 - отобраны по критериям, использовавшимся для поиска корреляций с радиоблазарами:
 - треки, энергия >200 ТэВ, площадь 90% CL ошибок <10 кв.град.

Источники:
публикации и алерты
IceCube
2009-2022



Примечания:

- 1) около 1/3 из них – атмосферные
- 2) чувствительность IceCube зависит только от RA

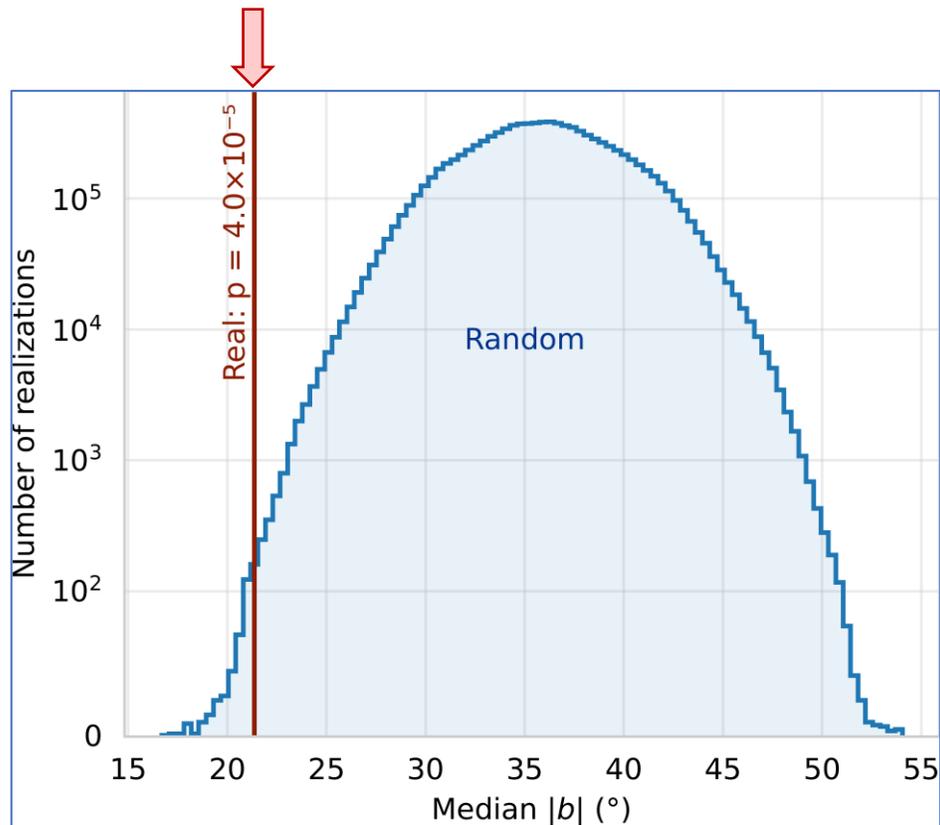
Yu. Kovalev, A. Plavin, ST 2022



Галактическая анизотропия нейтрино - треки IceCube выше 200 ТэВ

наблюдаемая:

**медiana модуля
галактической широты**

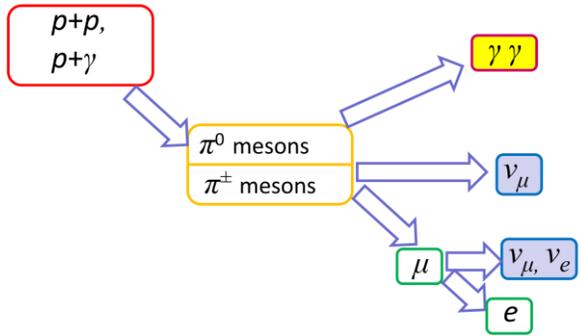


- Монте-Карло выборки с теми же DEC, случайными RA
- p-value $p=4 \times 10^{-5}$ – значимость 4.1 сигма
- критерии выборки – как в работе про радиоблазары
- никаких trial факторов, простейший небинированный тест

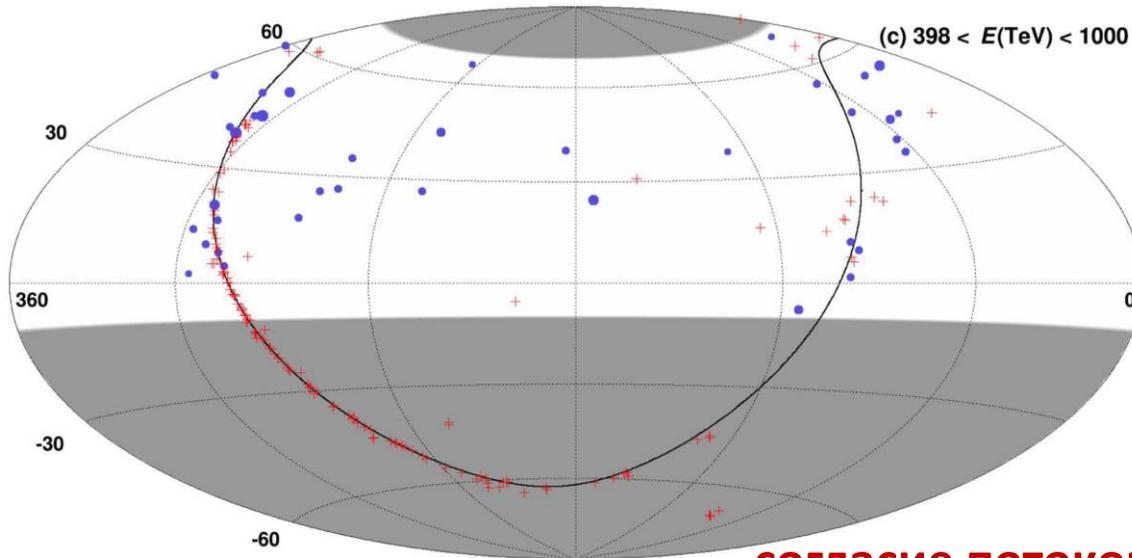


Обсуждение: нейтрино и фотоны

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

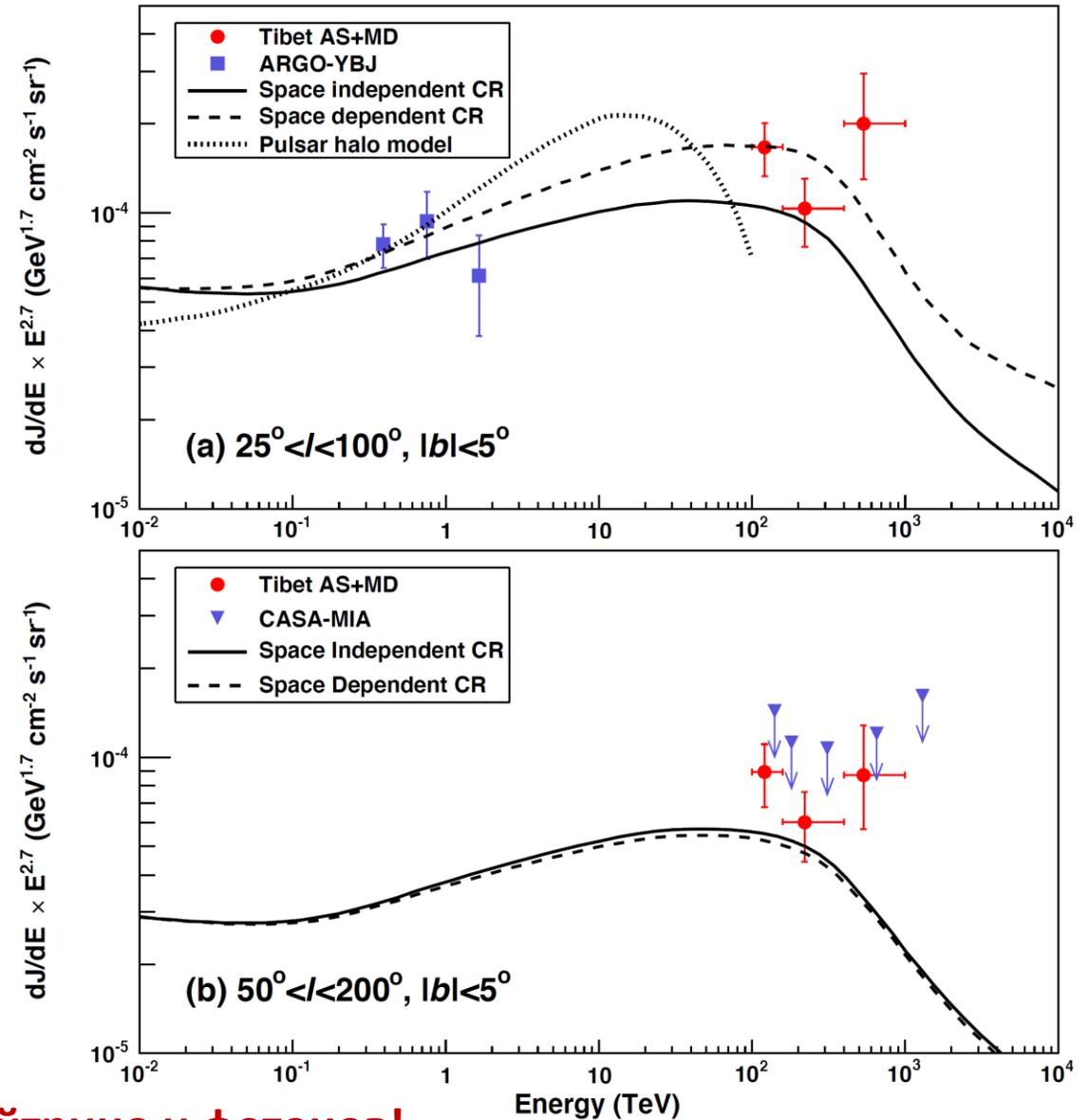


$$E_{\gamma} = 2 E_{\nu}$$



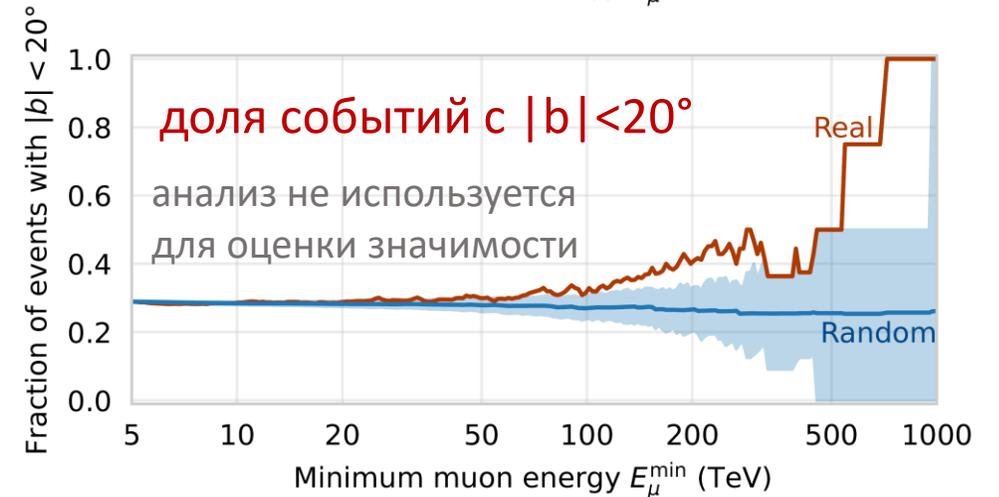
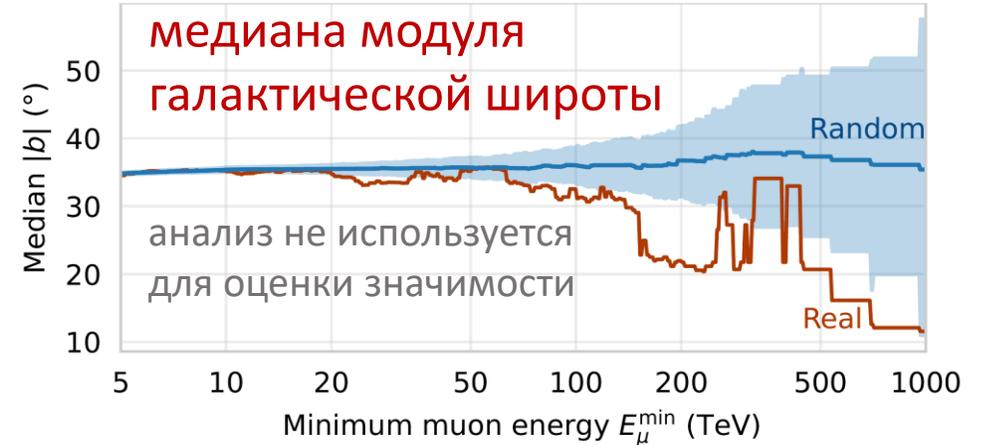
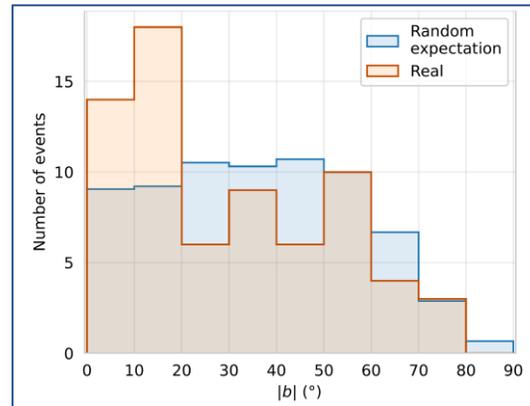
согласие потоков нейтрино и фотонов!

см. также *LHAASO 2023*



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

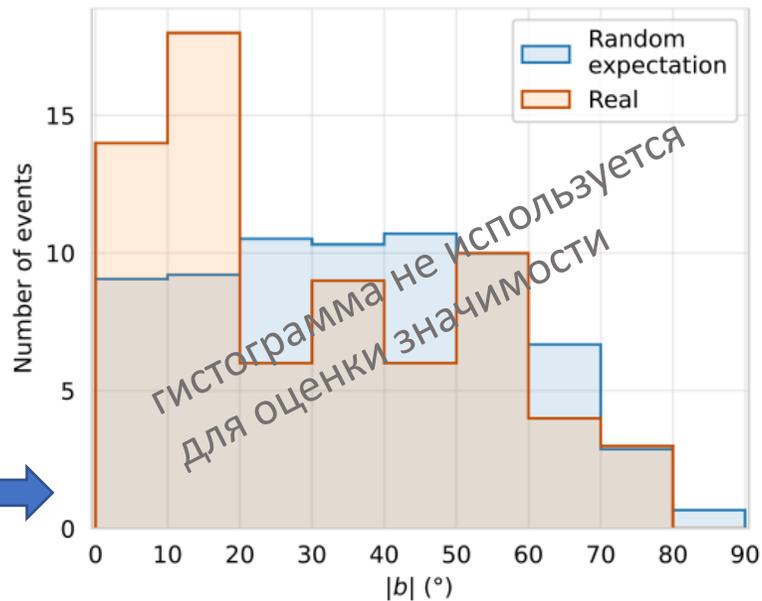
- публичные данные за 2009-2018, все энергии
- $DEC > -5^\circ$, площадь 90% CL ошибок < 10 кв.град.
- сомнительное качество реконструкции
- известны энергии мюонов, не нейтрино
- при низких энергиях доля астрофизических нейтрино 1/10000



результат вспомогательного анализа согласуется с основным

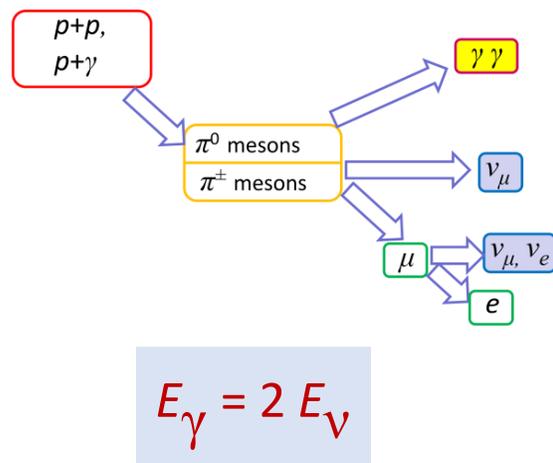


Обсуждение: ширина Млечного Пути

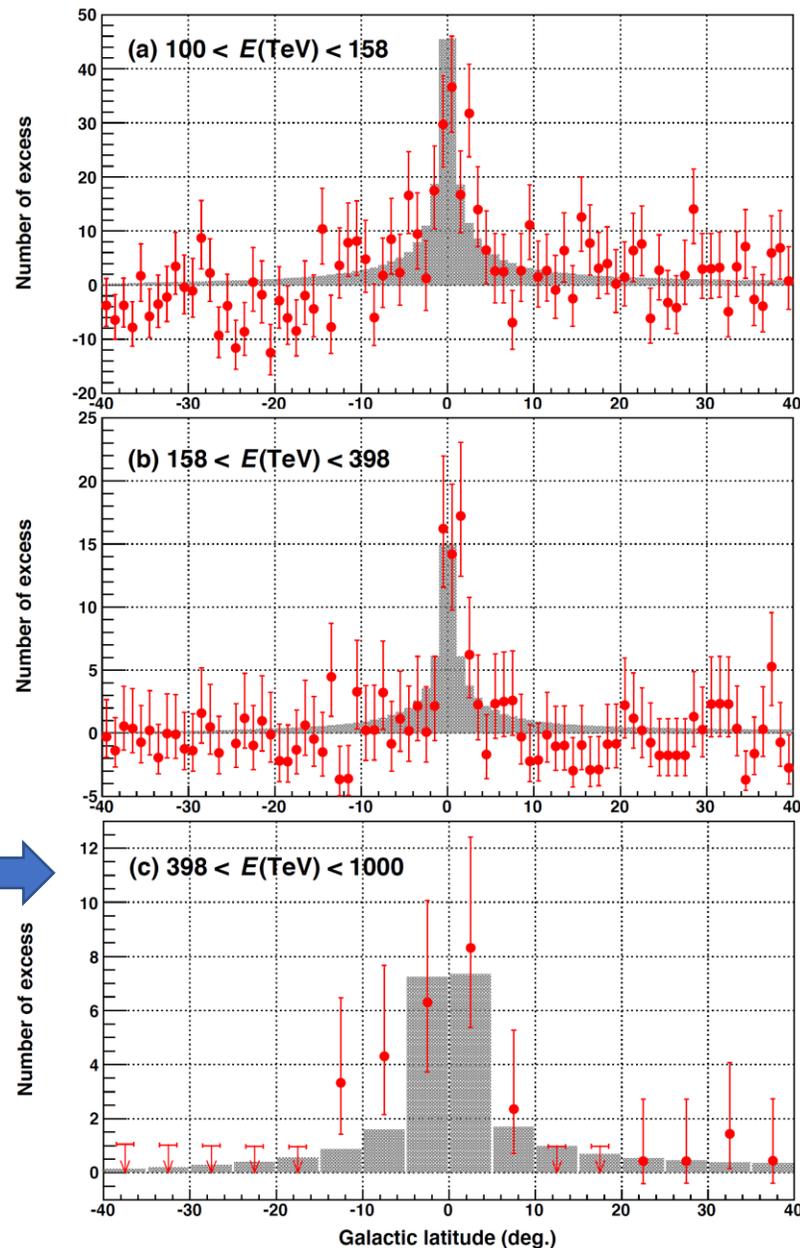


нейтрино >200 ТэВ *Kovalev+ 2022*

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

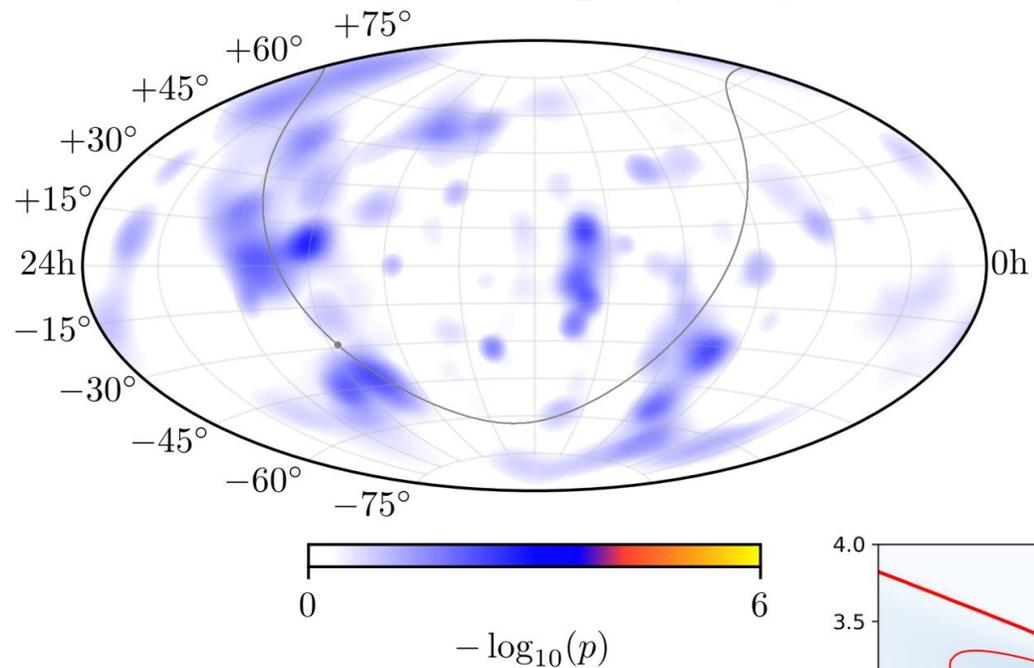


фотоны *Tibet-Asy 2021*

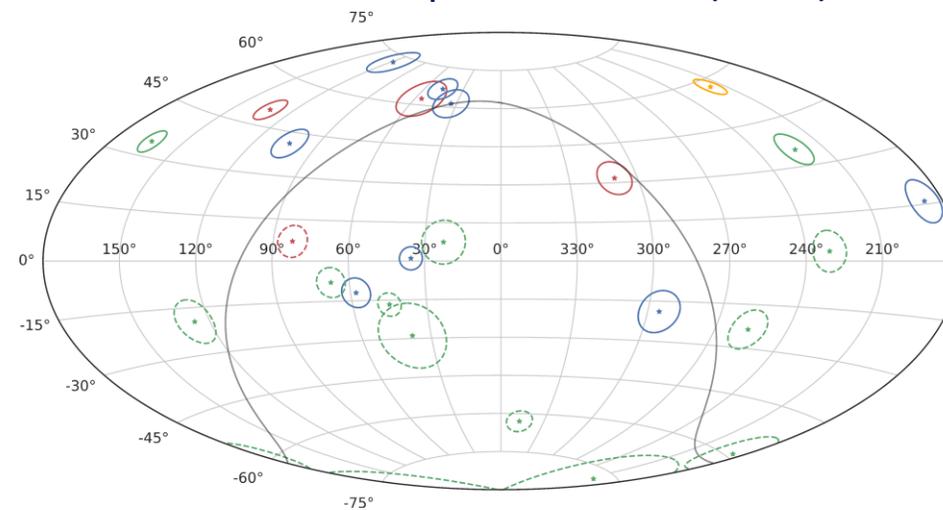


Галактическая компонента в других исследованиях?

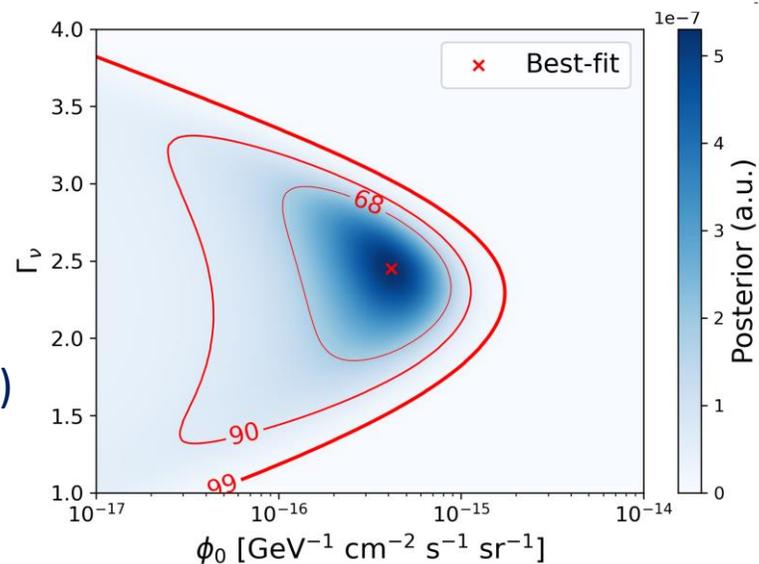
каскады IceCube, 2 sigma (2020)



Baikal-GVD, первые намеки (2022)



ANTARES, 2 sigma (2022)

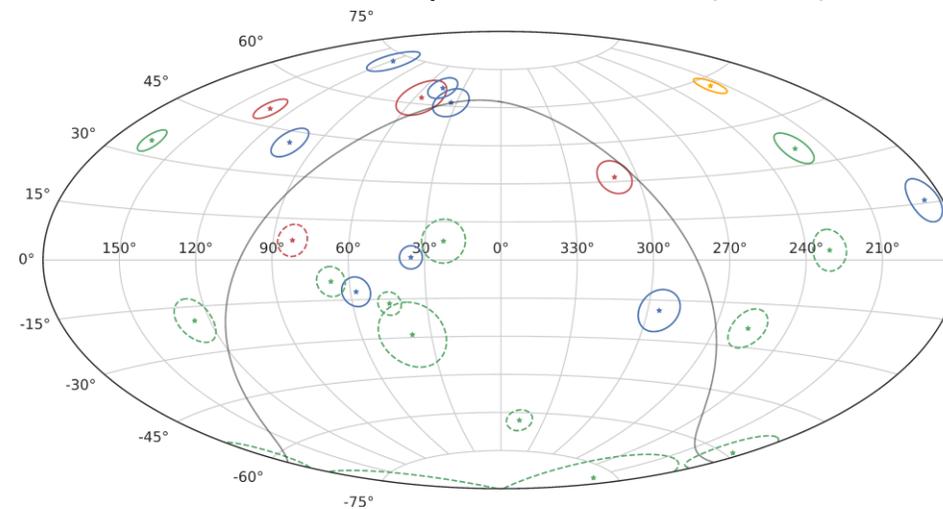


Галактическая компонента в других исследованиях?

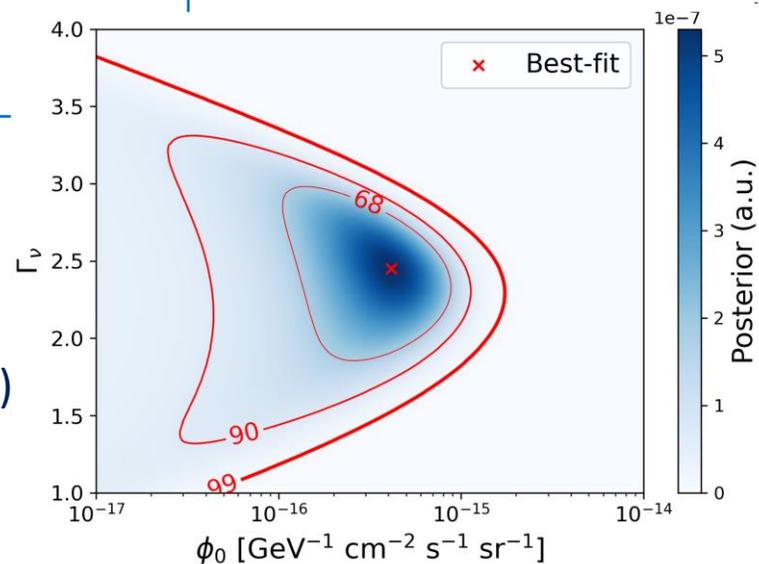
каскады IceCube, >4 sigma (2023)

Вероятно, IceCube видит
плоскость Галактики
в каскадных событиях.
Результаты пока под эмбарго
журнала Science

Baikal-GVD, первые намеки (2022)

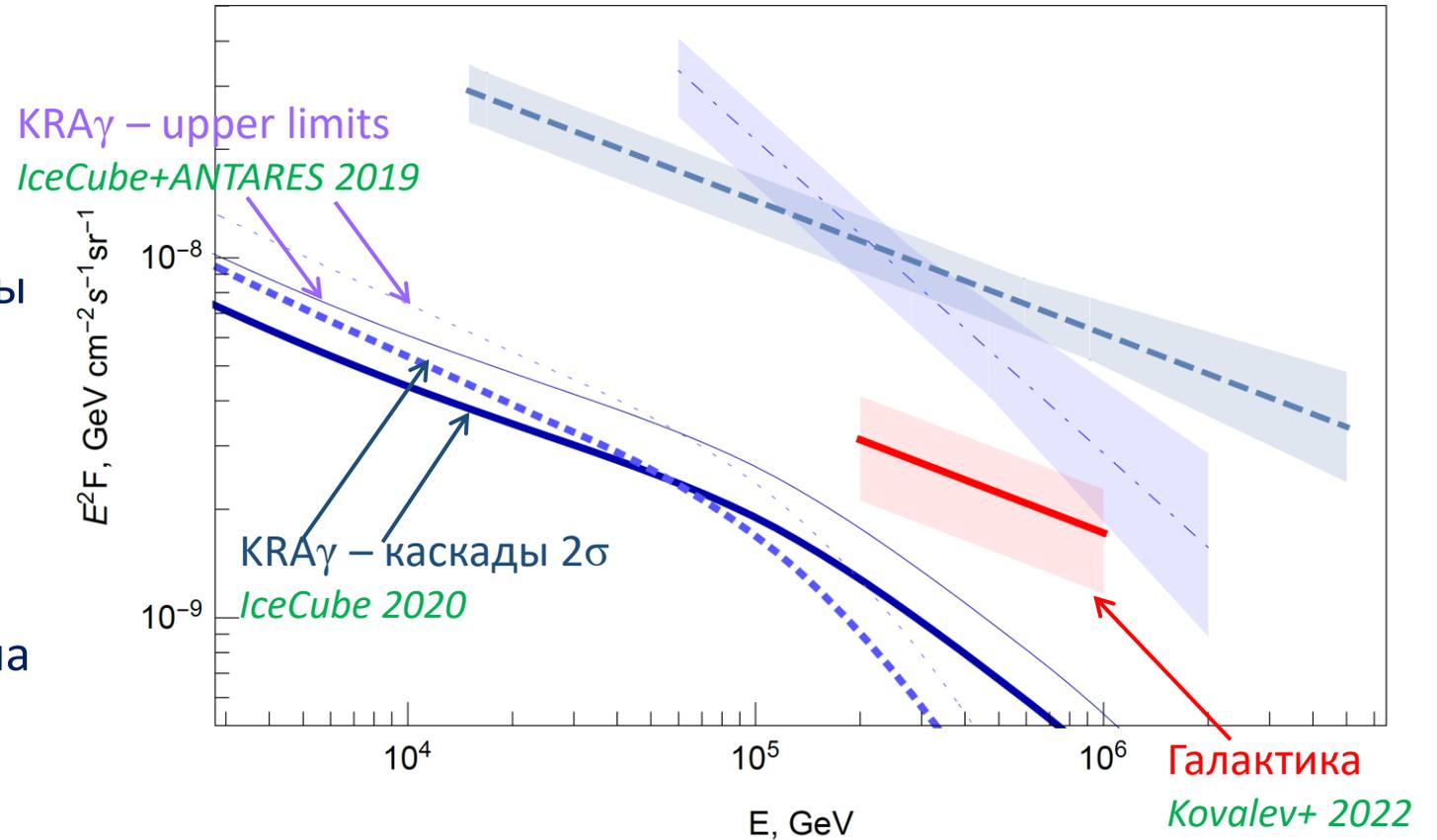


ANTARES, 2 sigma (2022)

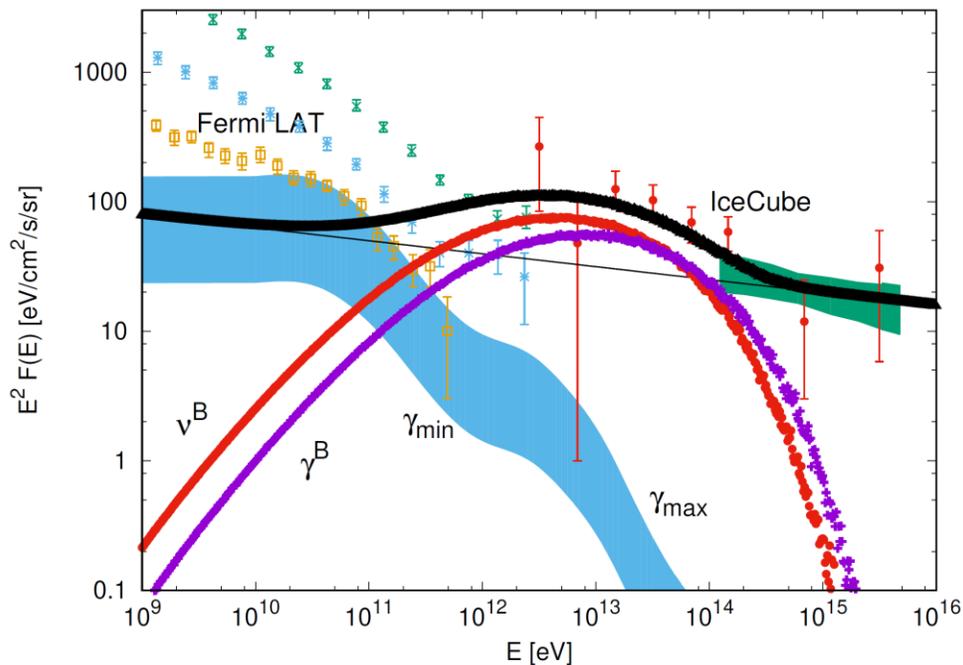
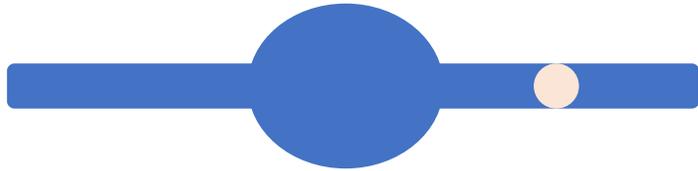


Обсуждение: KRA γ или не KRA γ

- KRA γ – из модели DRAGON (упрощенное распределение протонов)
- DRAGON ~ GALPROP, другие варианты без принципиальных отличий
- KRA γ – обрезание спектра протонов (5 ПэВ или 50 ПэВ), $E_p = 20 E_\gamma$
- галактические протоны до энергий на порядок выше! напр. *Telescope Array 2020*
- сложная структура источников и распределения космических лучей в Галактике *Giacinti&Semikoz 2023*



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 – Vela?)
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?..



Выводы

- ✓ галактическая анизотропия направлений прихода нейтрино выше 200 ТэВ (4.1σ)
- ✓ $(28\pm 9)\%$ астрофизических трековых нейтрино выше 200 ТэВ
- ✓ вероятно, галактический вклад присутствует и при более низких энергиях
- ✓ ширина Млечного Пути в нейтрино почти 40 градусов! Близкие источники?
- ✓ локальные наблюдения космических лучей не отражают среднее по Галактике
- ✓ шаблоны KRA γ или аналогичные – могут ввести в заблуждение



Спасибо за внимание!

наш результат по Галактике Y.Y. Kovalev, A.V. Plavin, ST [arxiv:2208.08423](#) = [Astrophys. J. Lett. 940 \(2022\) L41](#)

обзор по астро нейтрино высоких энергий: ST [УФН 2021](#) = [arxiv:2112.09611](#)

