

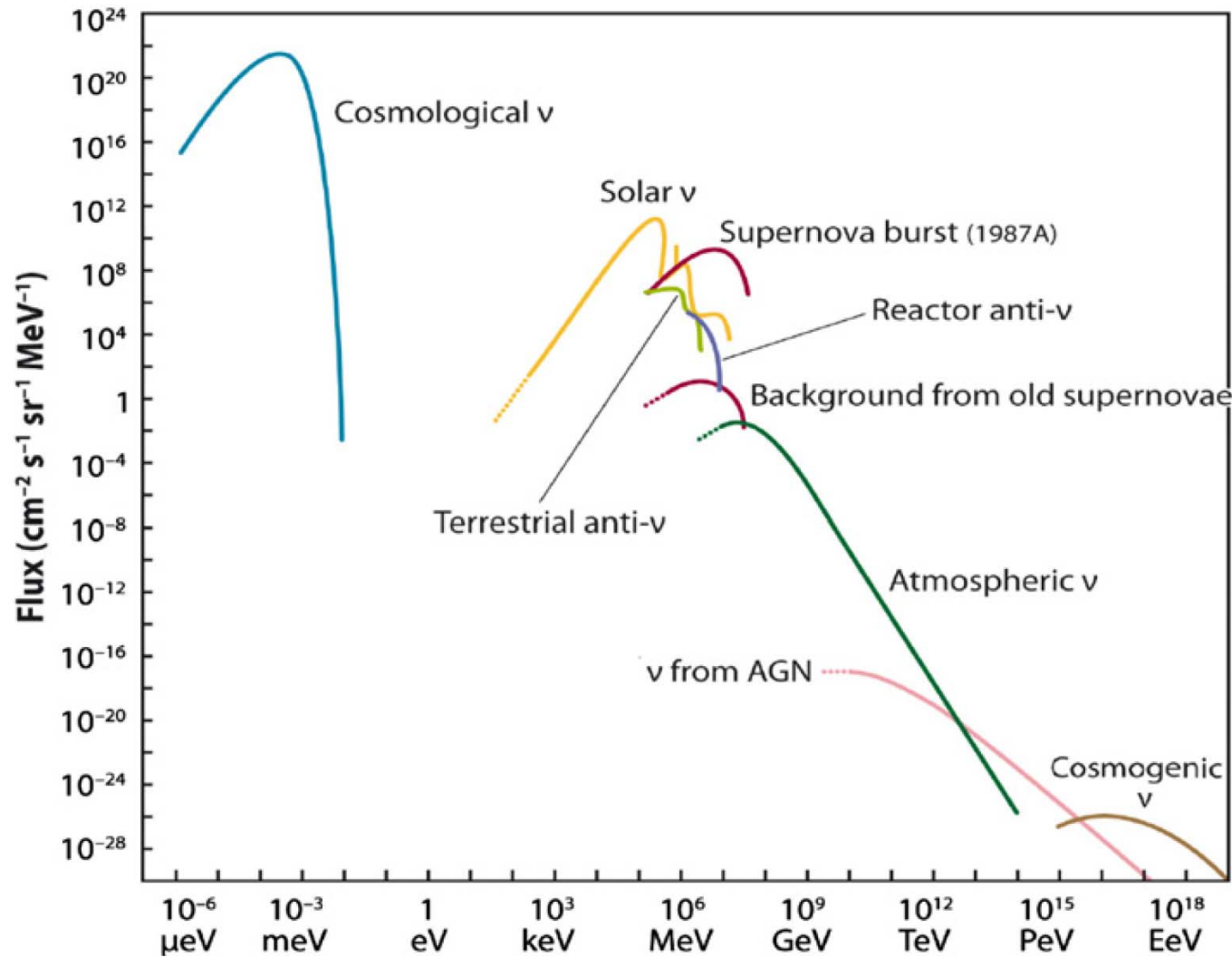
Астрофизические и атмосферные нейтрино высоких энергий

С. Синеговский, ИГУ

JINR-ISU Baikal School 2020

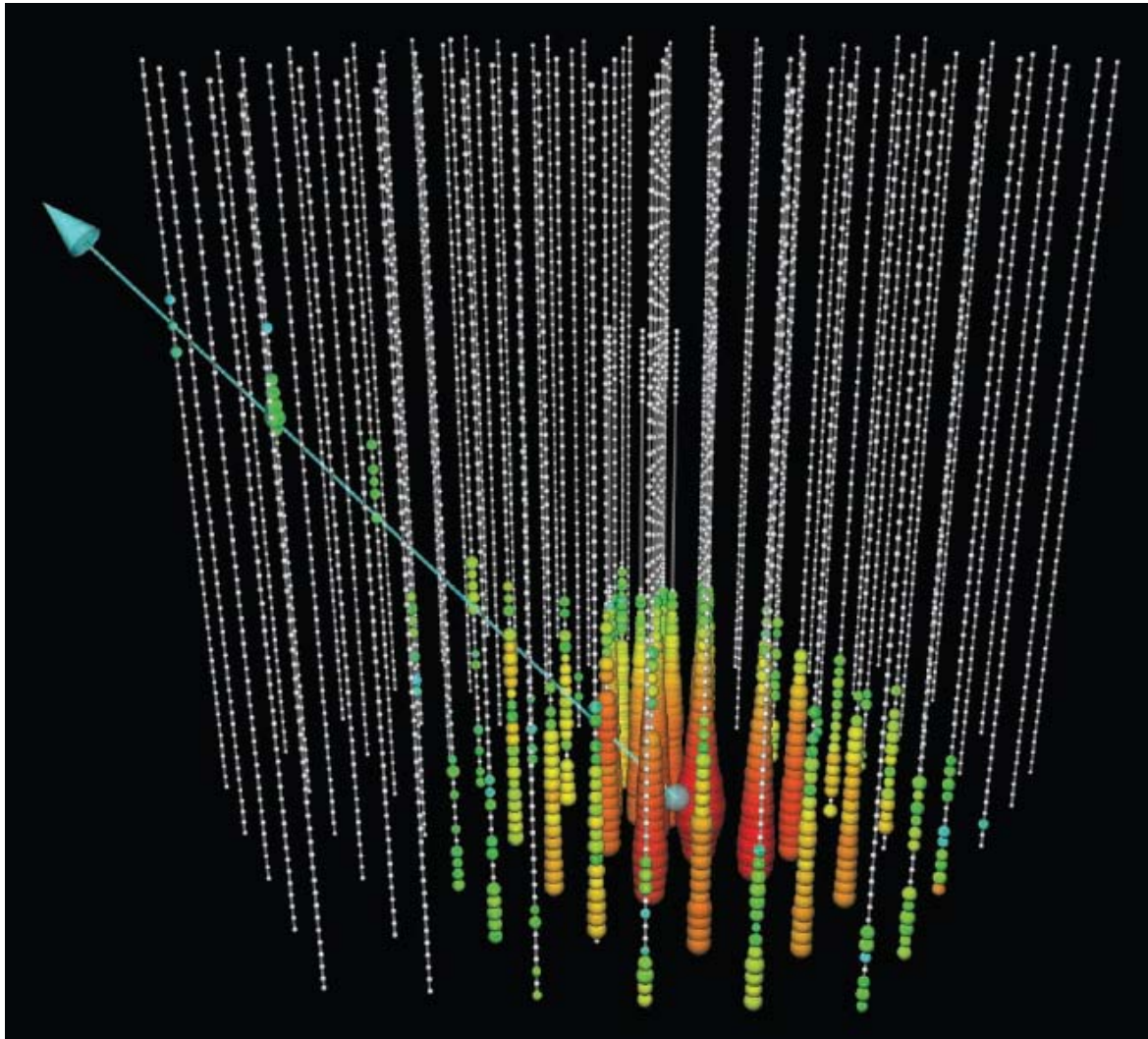
Спектры всех нейтрино – от $\text{C}\nu\text{B}$ до $\text{GZK}\nu$

U.F. Katz, C. Spiering,
PPNP 67 (2012) 651



E_ν

Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos @ IceCube detector



Событие в детекторе IceCube от нейтрино с $E=250$ ТэВ. От точки нейтринного СС-взаимодействия развивается большой ливень с мюоном. Направление движения мюона указывает направление нейтрино
Science 342, 2013
(IceCube Collaboration)

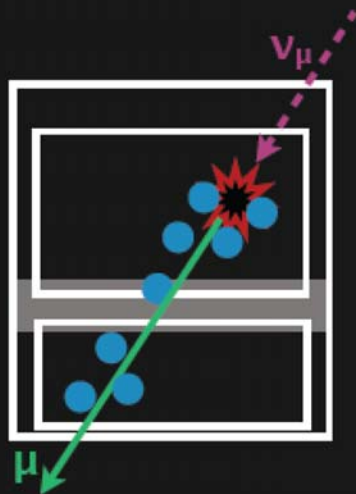
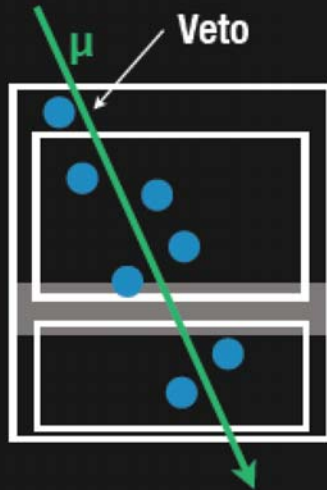
27.10.2020

С.Синеговский
Астрофизические нейтрино

3

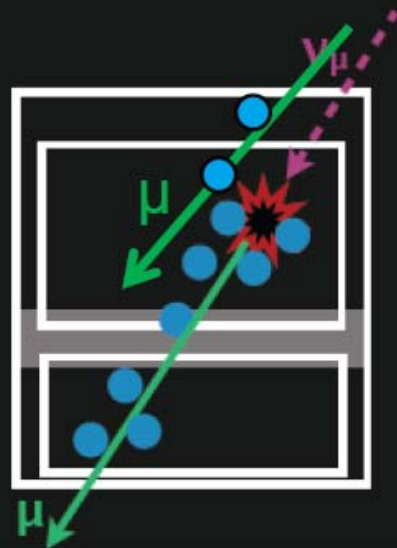
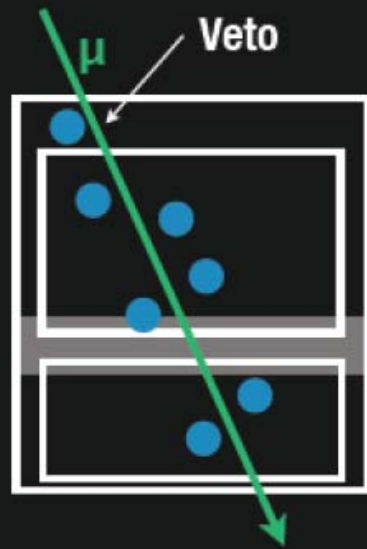
HESE analysis

High Energy Starting Event



- Muon Veto
- $Q_{\text{tot}} > 6000$ photoelectrons

→ 400 Mton eff.
Volume



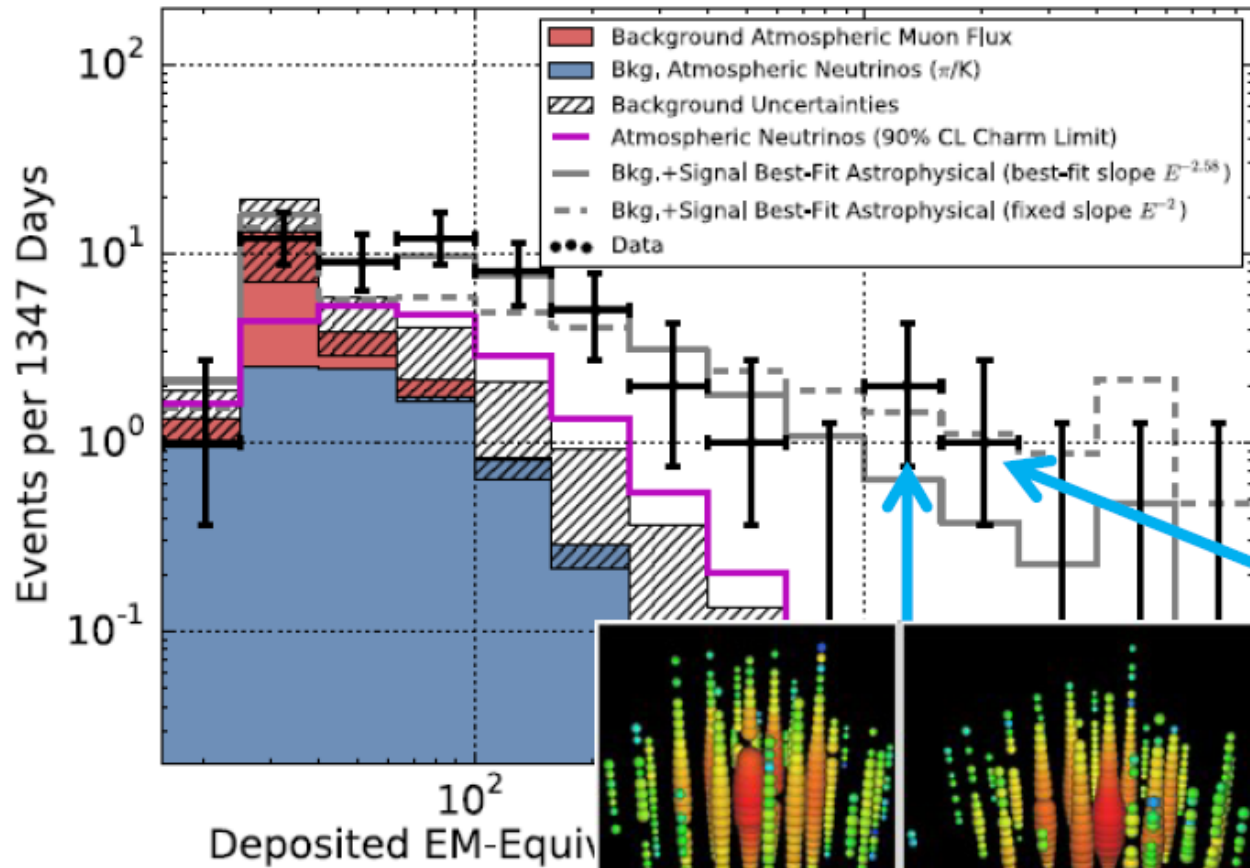
Veto is also good for rejecting large part of atmospheric ν !!

- Muon Veto
- $Q_{\text{tot}} > 6000$ photoelectrons

→ 400 Mton eff.

Volume

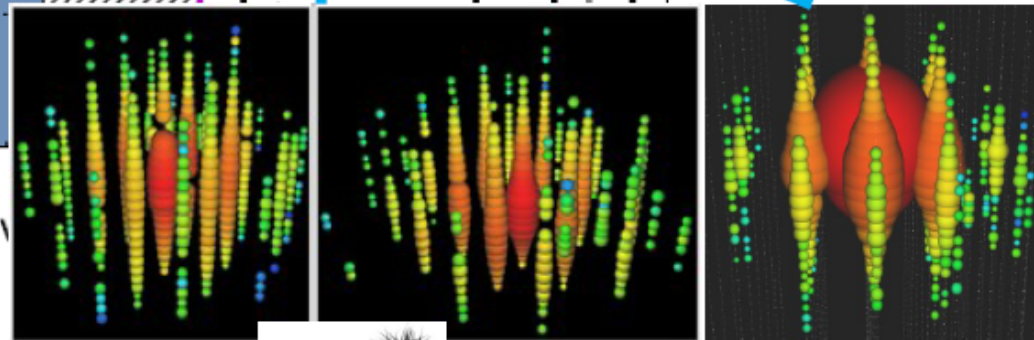
First evidence for an extra-terrestrial h.e. neutrino flux



2 yrs data, 28 evts 4.1σ
Science 342 (2013)

3 yrs data, 37 evts 5.9σ
Phys.Rev.Lett. 113:101101 (2014)

4 yrs data, 54 evts $\sim 7\sigma$



"Bert"
 1.04 PeV
 Aug. 2011



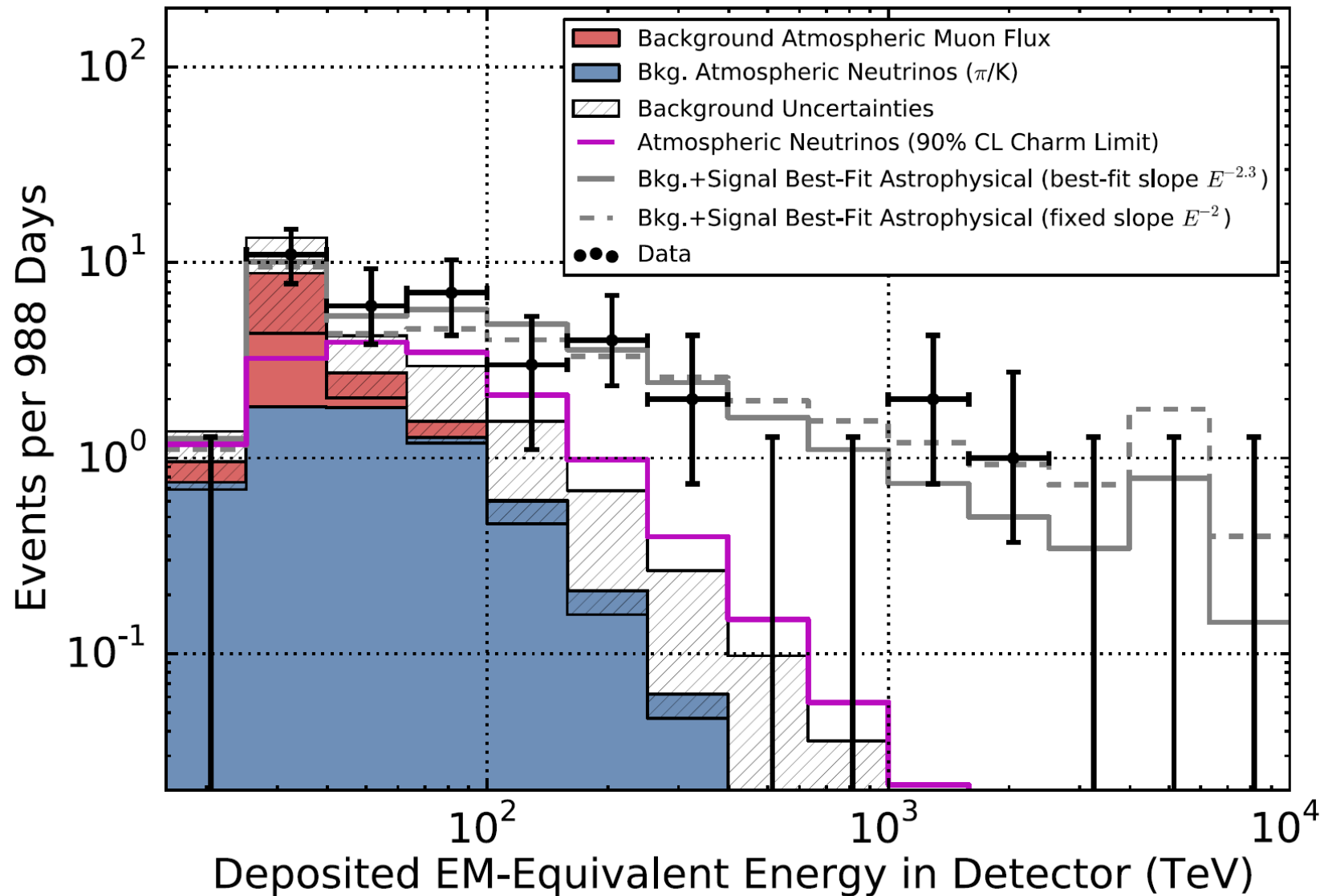
"Ernie"
 1.14 PeV
 Jan. 2012



"Big Bird"
 2 PeV
 Dec. 2012

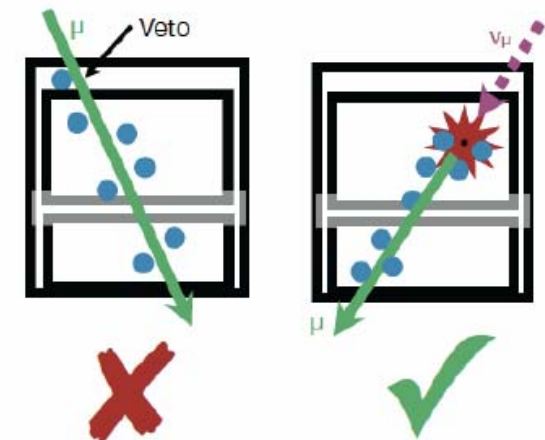
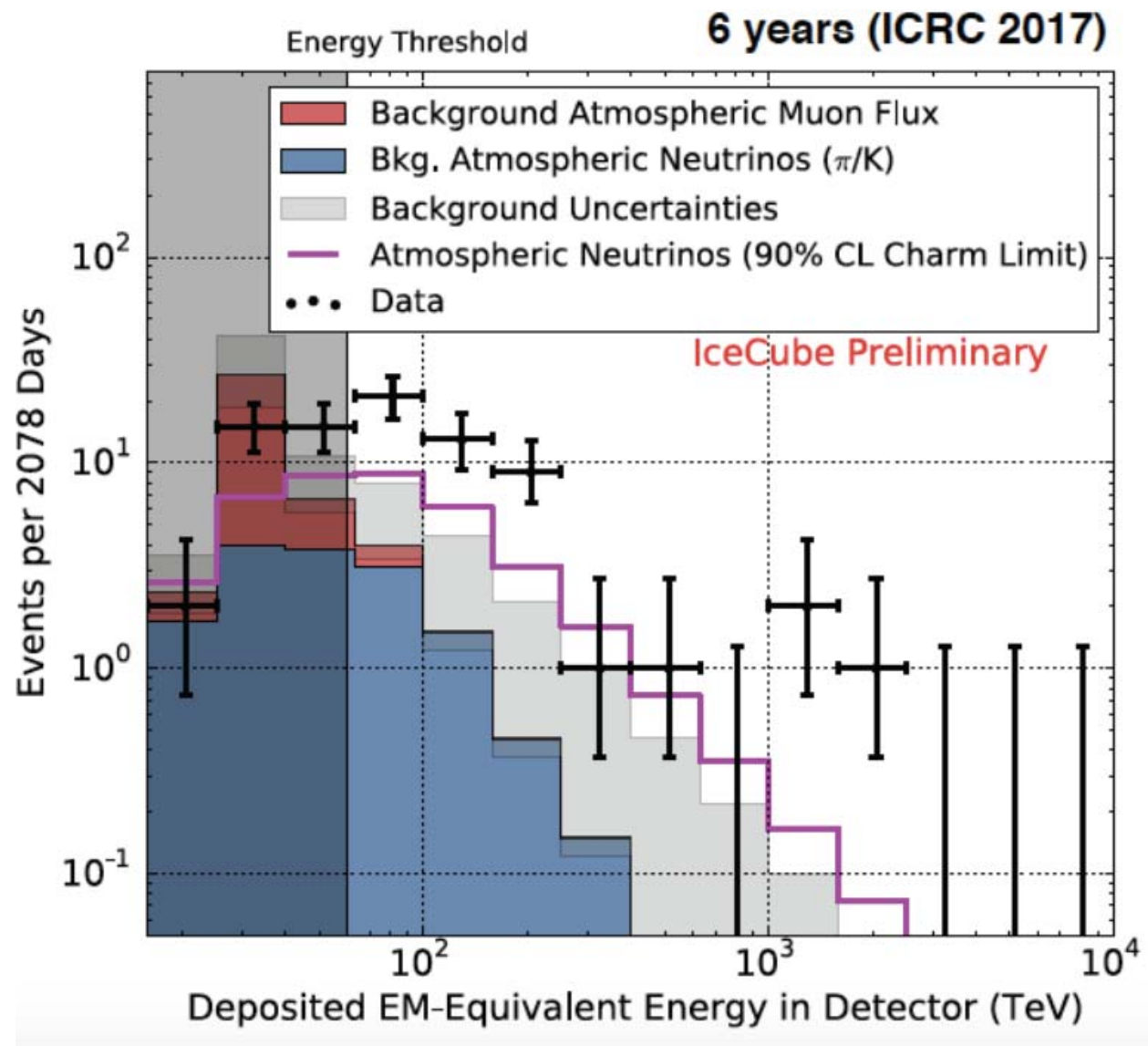
37 events of IceCube

988 days, 37 neutrino events with the energy deposition 30 TeV – 2 PeV



5.7 σ

Регистрация астрофизических нейтрино (6 лет)



82 events in 6 years

Background:

Atm. μ 25.2 ± 7.3

Atm. ν $15.6^{+11.4}_{-3.9}$

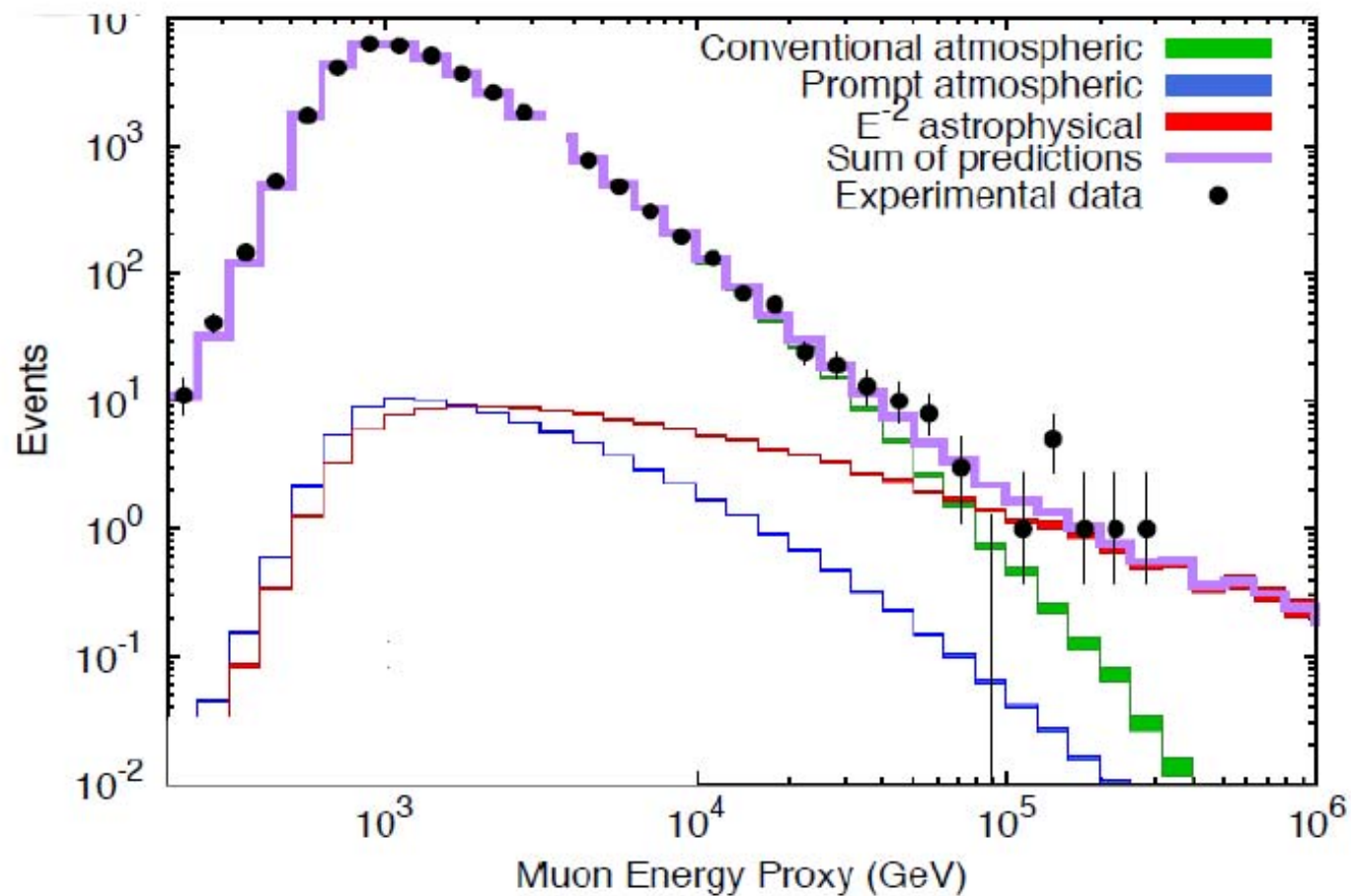
$60\text{TeV} < E_{\text{dep}} < 10\text{PeV}$

Best fit spectral index:

$$-2.92^{+0.33}_{-0.29}$$

Through-going muons, IC-79/86

C.Spiering, 36 ВККЛ 2020



Флейворный состав астрофизических нейтрино

Распады π , K -мезонов:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu), \quad K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e (\nu_e),$$

флэйворный состав
вблизи источника

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:2:0$$

при подавленных
распадах мюонов (?)

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 0:1:0$$

для скрытого источника

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

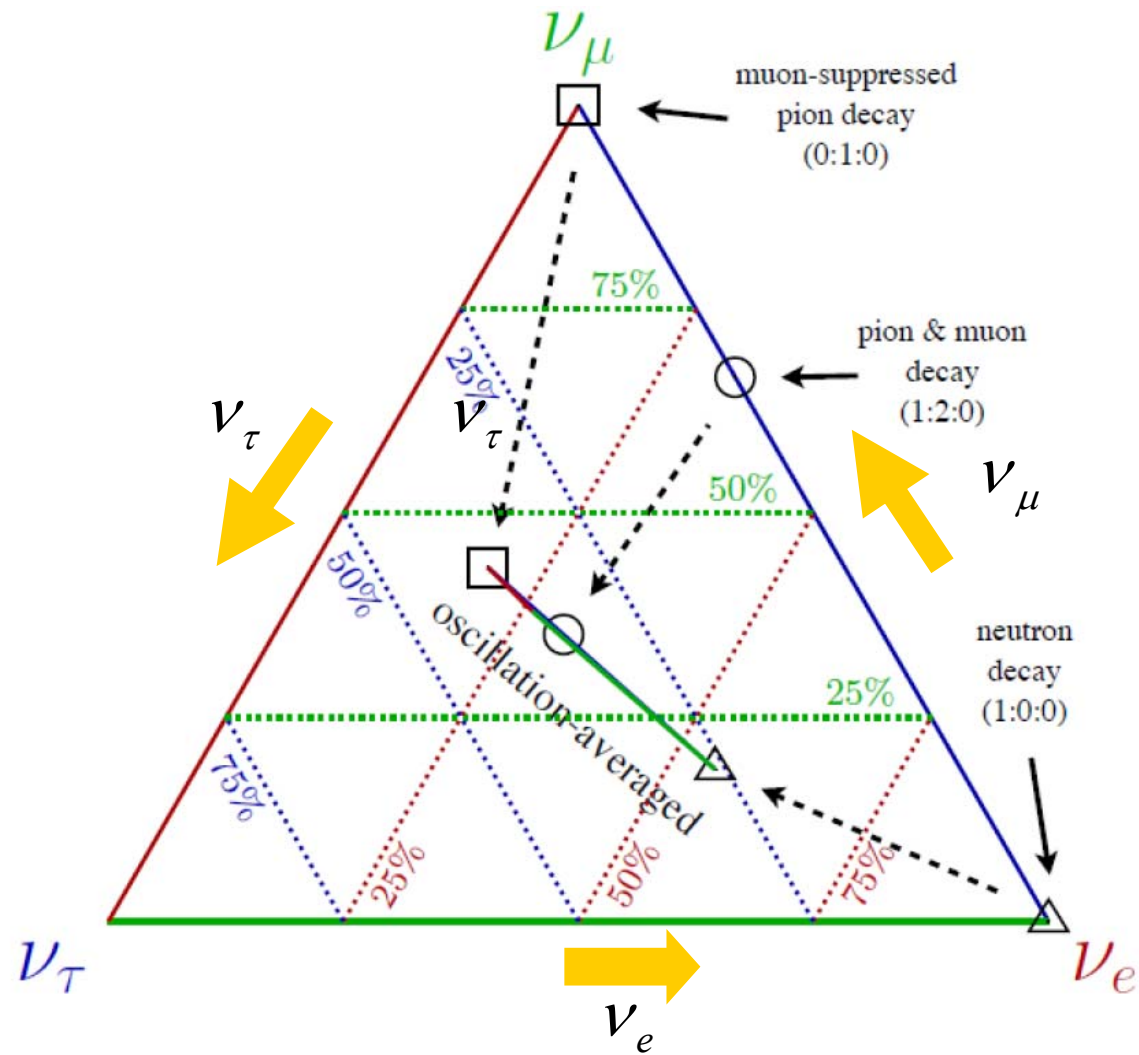
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:0:0$$

флэйворный состав
вблизи Земли

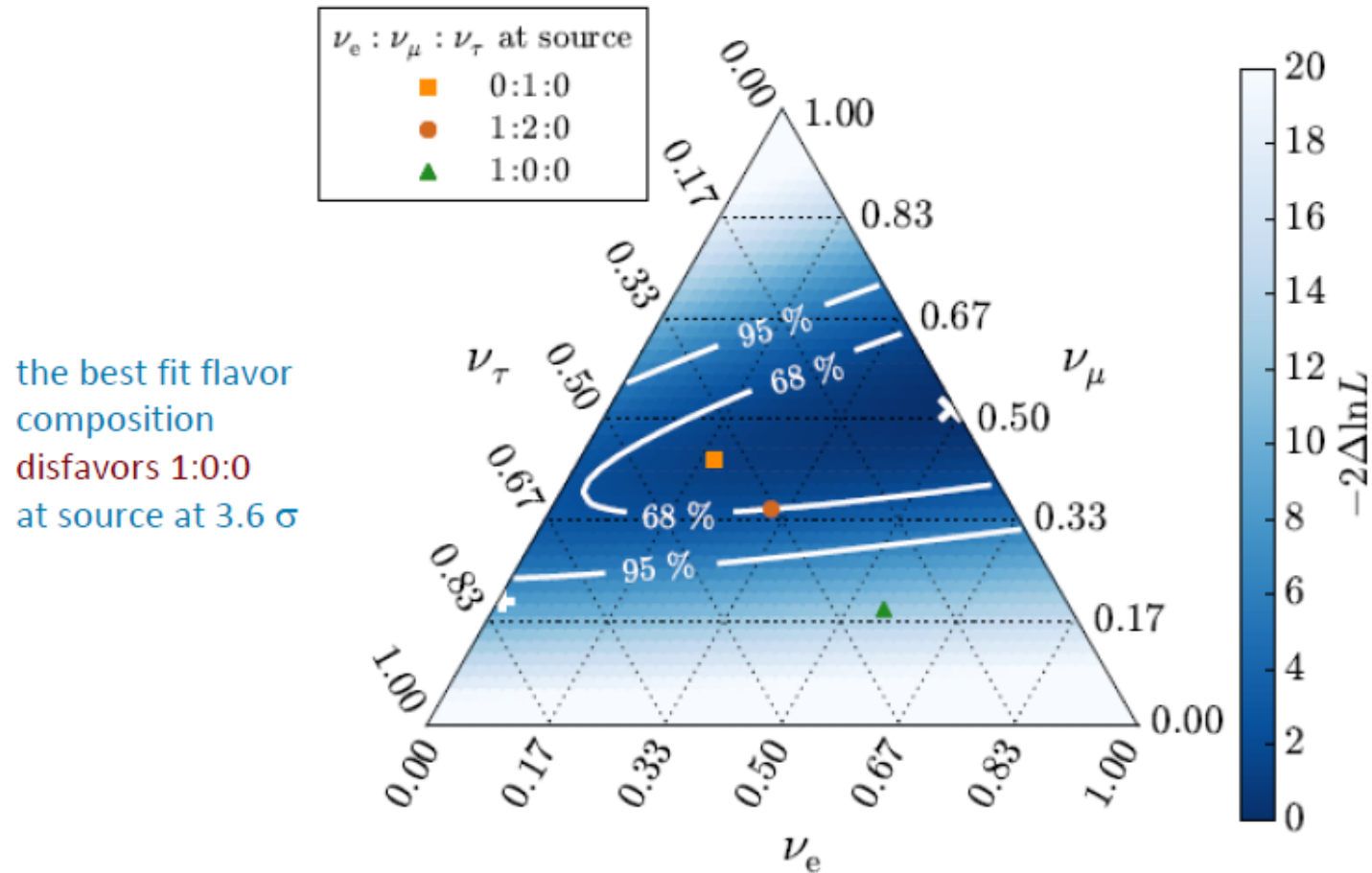
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$$

$$\frac{R_e}{1 + R_e} + \frac{R_\mu}{1 + R_\mu} + \frac{R_\tau}{1 + R_\tau} = 1, \quad R_\alpha \equiv \phi_\alpha^\Gamma / (\phi_\beta^\Gamma + \phi_\gamma^\Gamma)$$

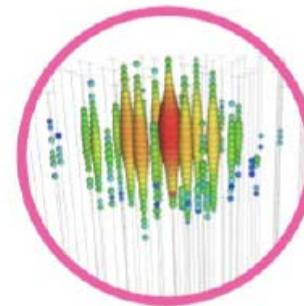
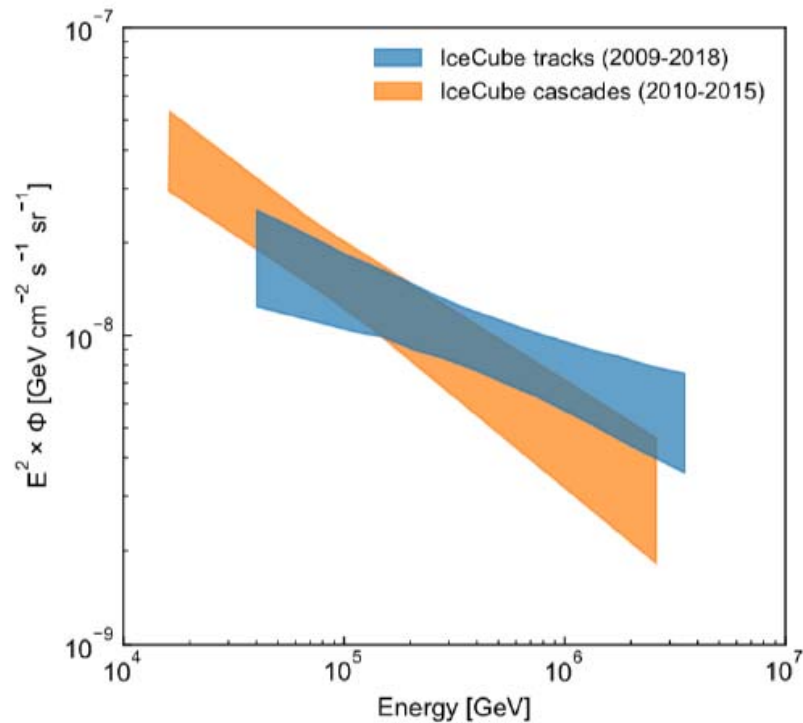
Диаграмма флейворного состава потоков нейтрино



Наблюдаемый флейворный состав

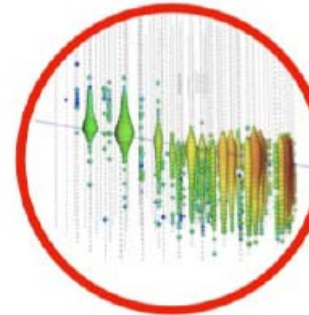


The Astrophysical Neutrino Flux



High-energy starting events (HESE)

Interaction vertex in the detector
All flavor, all sky



Up-going tracks

Muon-dominated
Northern sky

C.Spiering, 36 ВКЛ 2020

Данные ANTARES

ApJ 853 (2018) L7
arXiv:1711.07212

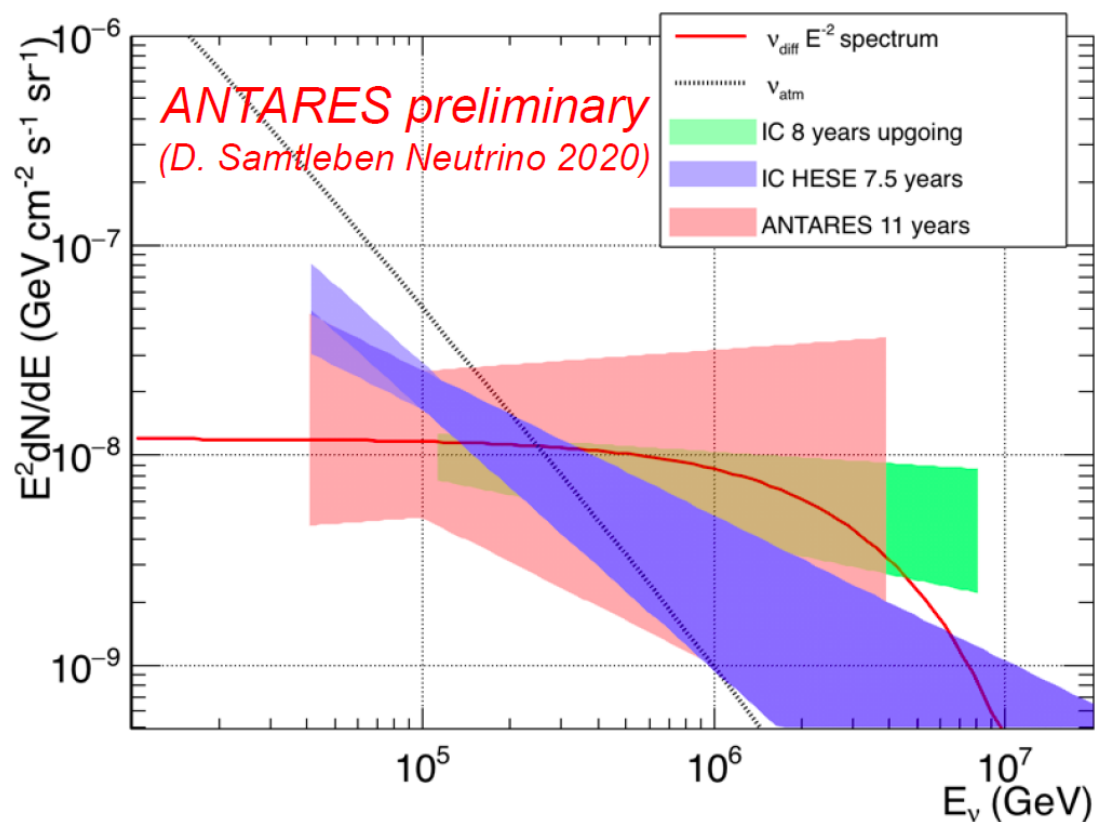
Total: 50 events, Simulation: 36.1 ± 8.7

1.8 σ excess

Best fit $\Phi = 1.5 \pm 1 \cdot 10^{-8} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$

C.Spiering, 36 ВККЛ 2020

$\gamma = 2.3 \pm 0.4$



Диффузный поток нейтрино ВЭ, зарегистрированный IceCube

Источники?

- In 2013, the IceCube Collaboration reported the detection of a diffuse flux of astrophysical high-energy neutrinos. The spectrum of these neutrinos is consistent with a power-law with an index of 2.4 – 2.6, extending from tens of TeV to several PeV, and with flavor ratios that are consistent with those predicted from the decays of charged pions.
- The angular distribution of this flux shows no significant departures from isotropy, and searches for individual point sources in the IceCube data have thus far not resulted in any detections (with the possible exception of the blazar TXS 0506+056).
- These results indicate that IceCube's high-energy neutrinos are produced by a large number of extragalactic sources, of which even the brightest contribute only a small fraction of the total flux.

Источники?

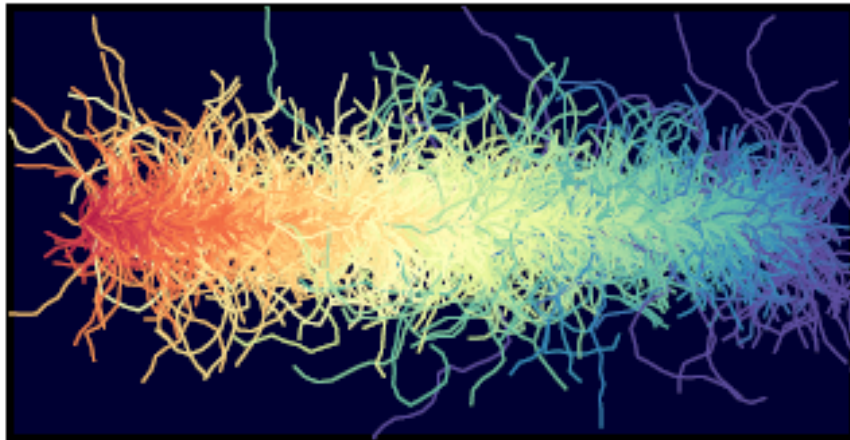
**K. Mannheim, HE neutrinos from extragalactic jets / AP 3(1995) 295;
F. Halzen, E. Zas, Neutrino fluxes from active galaxies: A Model
independent estimate / ApJ. 488 (1997) 669; arXiv:2007.12706;**

**A. Loeb, E. Waxman, The cumulative background of high energy
neutrinos from starburst galaxies / JCAP 05 (2006) 003, [astro-
ph/0601695];**

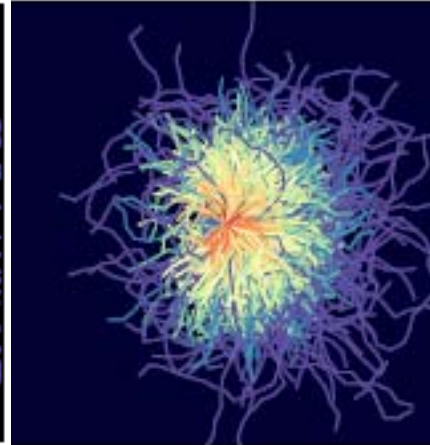
**C. Lunardini et al. Are starburst galaxies a common source of high
energy neutrinos and cosmic rays? /JCAP 10 (2019) 73; [1902.09663];**

Три типа нейтринных событий в эксперименте IceCube

Моделирование распространения черенковского света



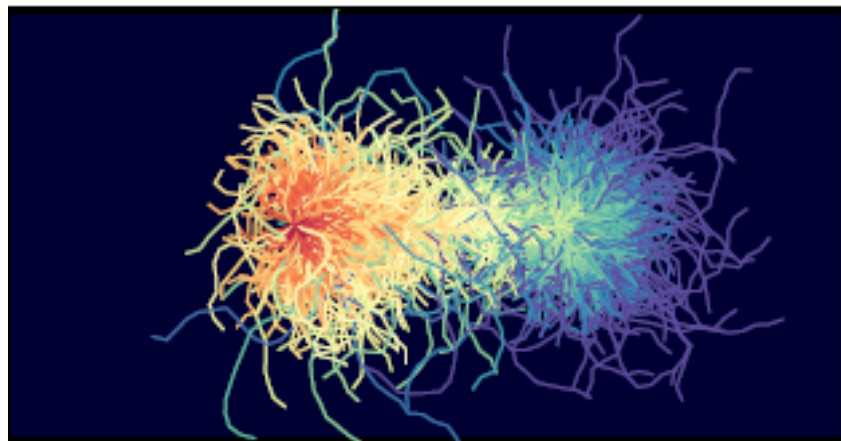
Track-like" events from muons produced in CC interactions of ν_μ



Shower-like" events :

NC-взаимодействия всех типов нейтрино; CC - ν_e (все энергии) и ν_τ (при $E < 100$ TeV)

IceCube, 1701.03731



Специфическая сигнатура: двойной "взрыв" ("double-bang" events) [NIMA 711(2013) 73]. Адронный ливень в вершине и ливень от распада τ – разделяются, если пробег τ больше нескольких десятков метров:

$$\ell_\tau = \Gamma c \tau_\tau \Big|_{E_\tau=1 \text{ ПэВ}} \approx 50 \text{ м}$$

27.10.2020

С.Синеговский
Астрофизические нейтрино

$$\tau_\tau = (290.6 \pm 1) \cdot 10^{-15} \text{ с}^{17}$$

Сигнатура нейтринных событий

- Угловое разрешение для трека $< 1\%$,
для каскада выше 100 ТэВ $\sim 15\%$.
- Разрешение по энергии: для треков – фактор ~ 2 ,
для каскадов $\sim 10\%$.
- 3-й тип событий – двойные каскады (уже
видны!): СС- взаимодействие и последующий
распад тау-лептона в адроны или мюоны и
электроны.

ν_τ

Новые события, зарегистрированные IceCube

- **Рождение W-бозона** $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$ адроны

$$s = 2m_e E_{\bar{\nu}} + m_e^2,$$

$$\sigma_{\bar{\nu}_e e} = \sigma_0 \frac{\Gamma \Gamma_h / 4}{(\sqrt{s} - M_W)^2 + \Gamma^2 / 4}$$

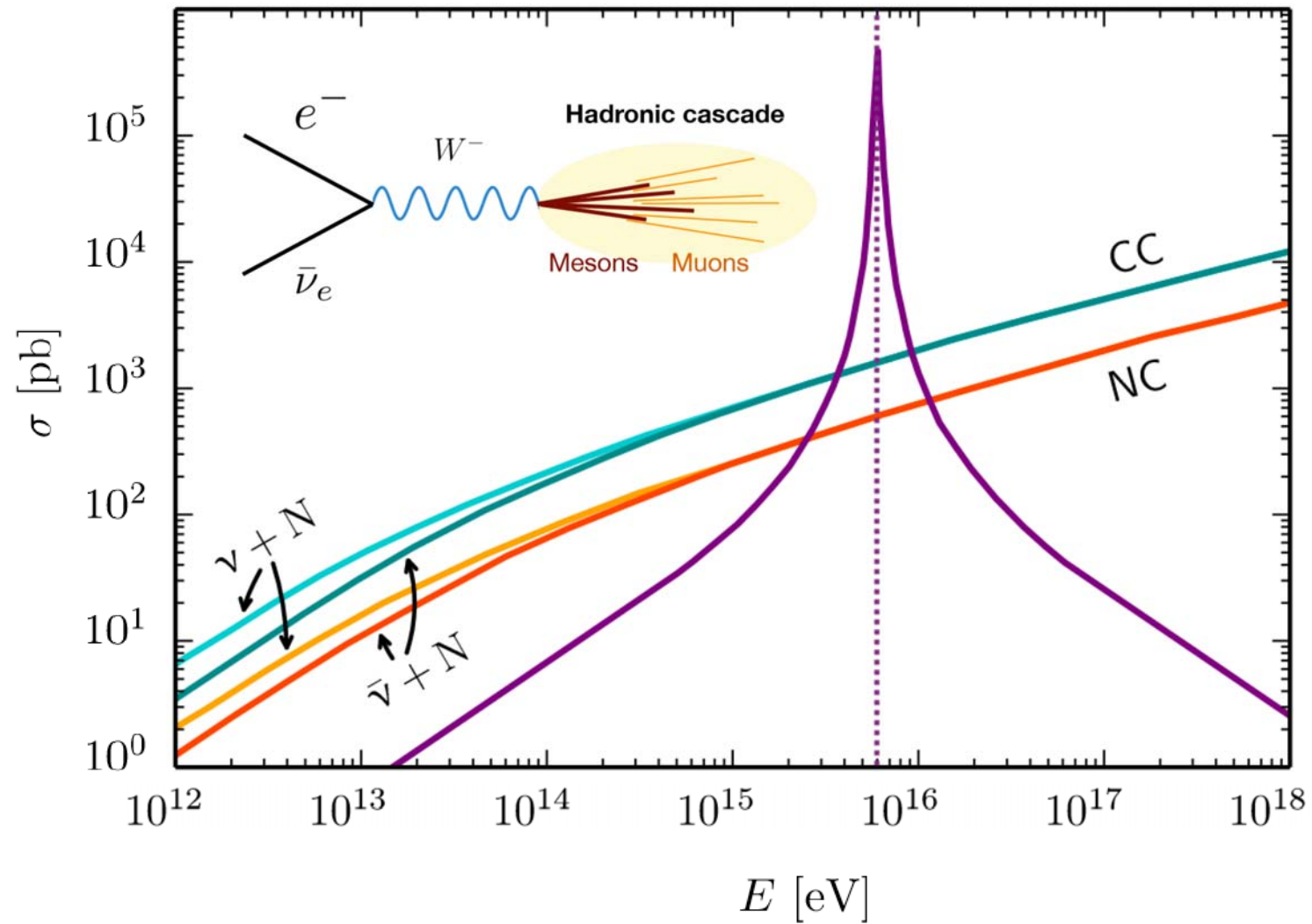
$$E_{\bar{\nu}_e}^{\text{th}} \simeq \frac{M_W^2 - m_e^2}{2m_e} = 6.32 \text{ ПэВ}$$

$$\Gamma_h / \Gamma = 0.676 \pm 0.0027$$

- **Рождение τ -лептона** $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$

Резонанс Глэшоу

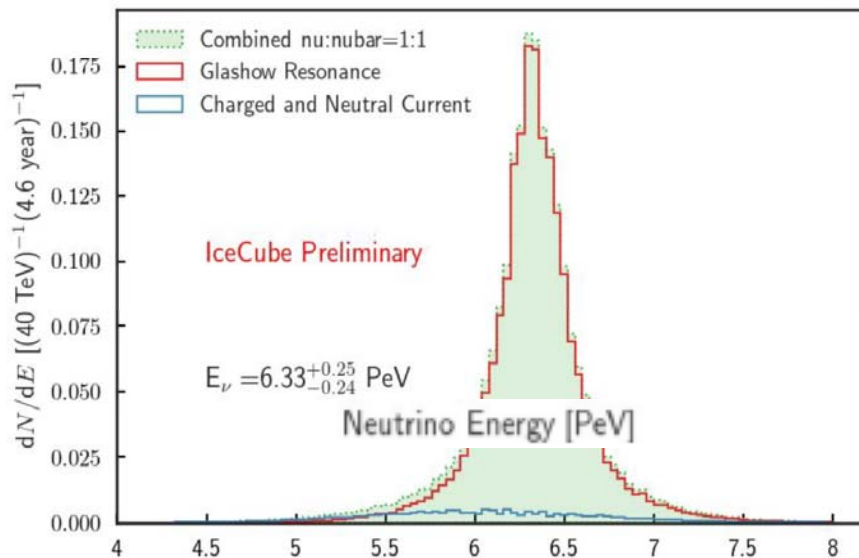
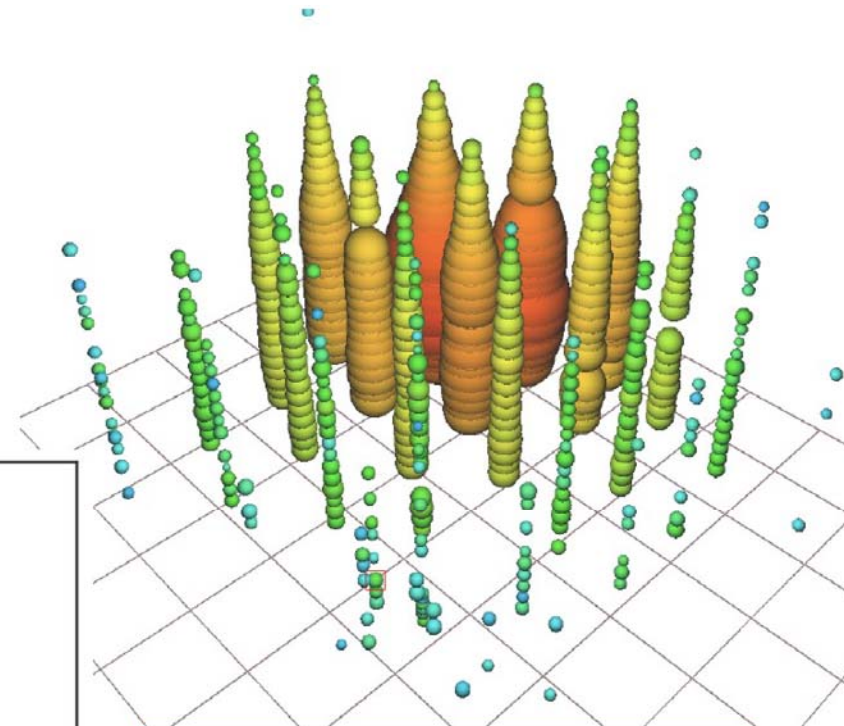
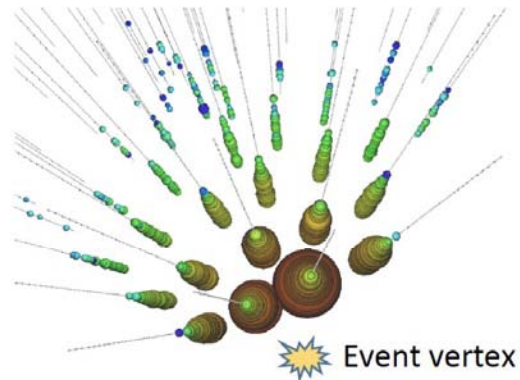
$$\Gamma_h / \Gamma = 0.676 \pm 0.0027$$



Первая регистрация резонанса Глэшоу

C.Spiering, 36 ВККЛ 2020

Partially contained event, $E_\nu = 6.33$ PeV



First identification of a clear candidate for an anti-electron neutrino in an underwater detector !

Детектирование тау-нейтрино

IceCube, arXiv:1908.05506v1

Above 60 TeV reconstructed deposited energy, the HESE sample contains 60 events which we classify into 42 single cascades, 16 tracks, and 2 double cascades

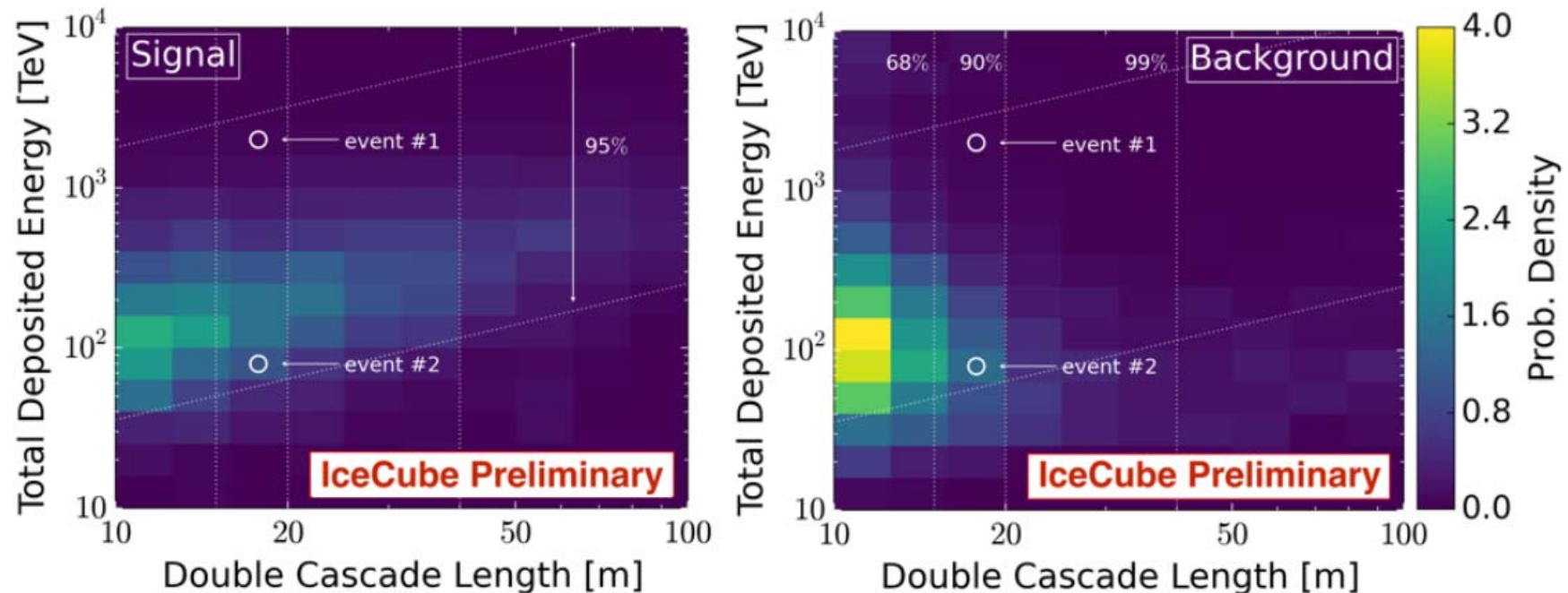
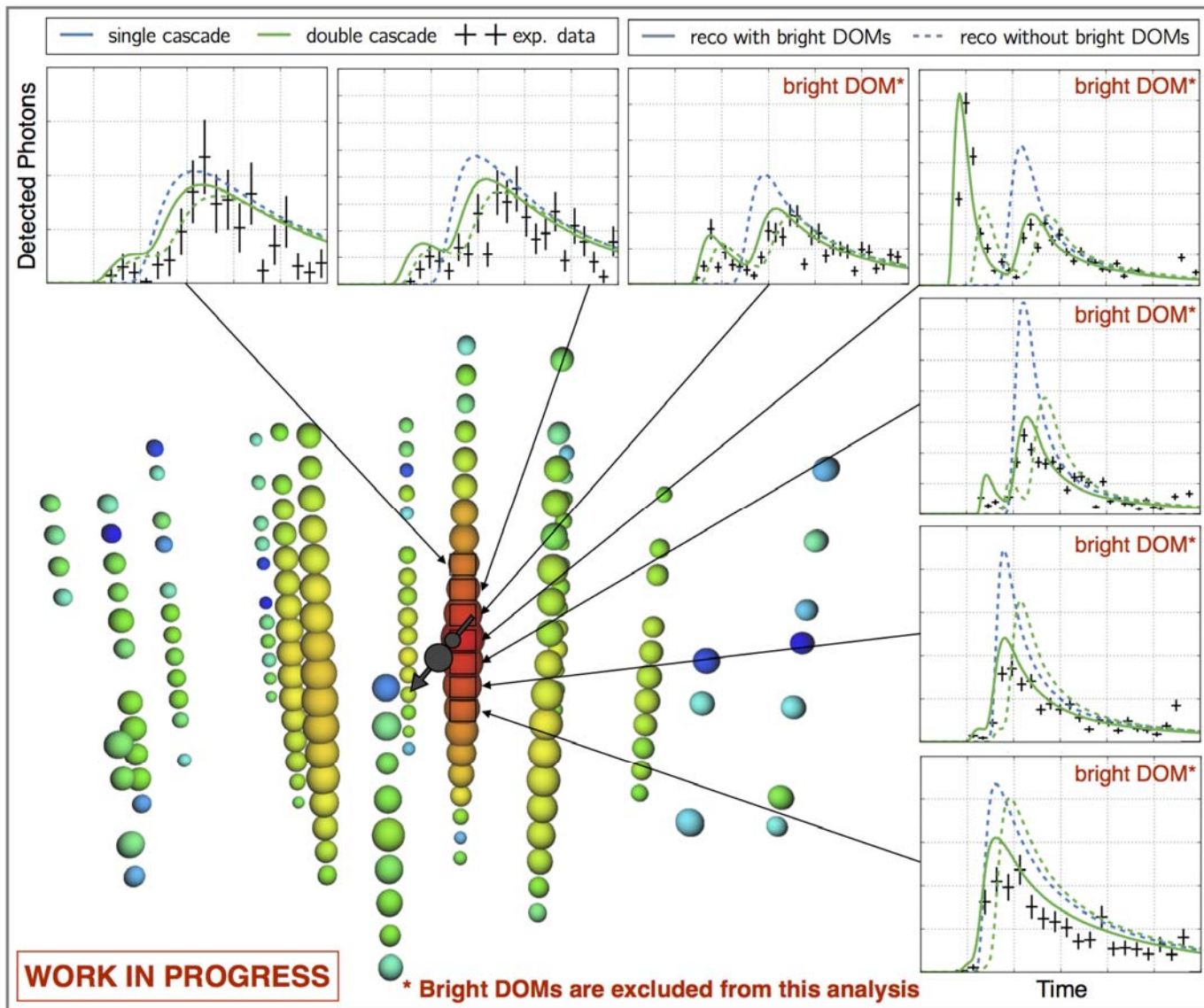


Figure 1: Total deposited energy against reconstructed double cascade length for the double cascade sample. Signal (ν_τ -induced double cascade events) histogram (left). Background (all remaining events) histogram (right). The two tau-neutrino candidate events are overlaid as white circles.

Два предполагаемых события от ν_τ – данные IceCube за 7.5 лет



27.10.

Нейтрино от блазара TXS 0506+056

Блазар (BL Lacertae object) - из класса внегалактических активных галактических ядер (AGN), генерирующих интенсивное переменное нетепловое излучение в релятивистских струях.

- 22 сент. 2017 IceCube зарегистрировал событие высокой энергии от нейтрино в направлении на блазар TXS 0506+056 в момент гамма-вспышки. Позднее событие было подтверждено архивными данными IceCube - избыток ВЭ нейтринных событий над фоном атм. нейтрино в интервале сент. 2014 - март 2015
- свидетельство в пользу потока нейтрино в направлении блазара TXS 0506+056 - на уровне значимости 3.5σ
- подтверждает гипотезу, что блазар TXS 0506+056 – источник космических лучей ВЭ

TXS 0506+056 - пример объекта многоканальной астрономии.

Neutrinos from blazar TXS 0506+056

TXS=Texas Survey of radio sources

IceCube, Fermi-LAT, MAGIC etc. 1807.08816v1

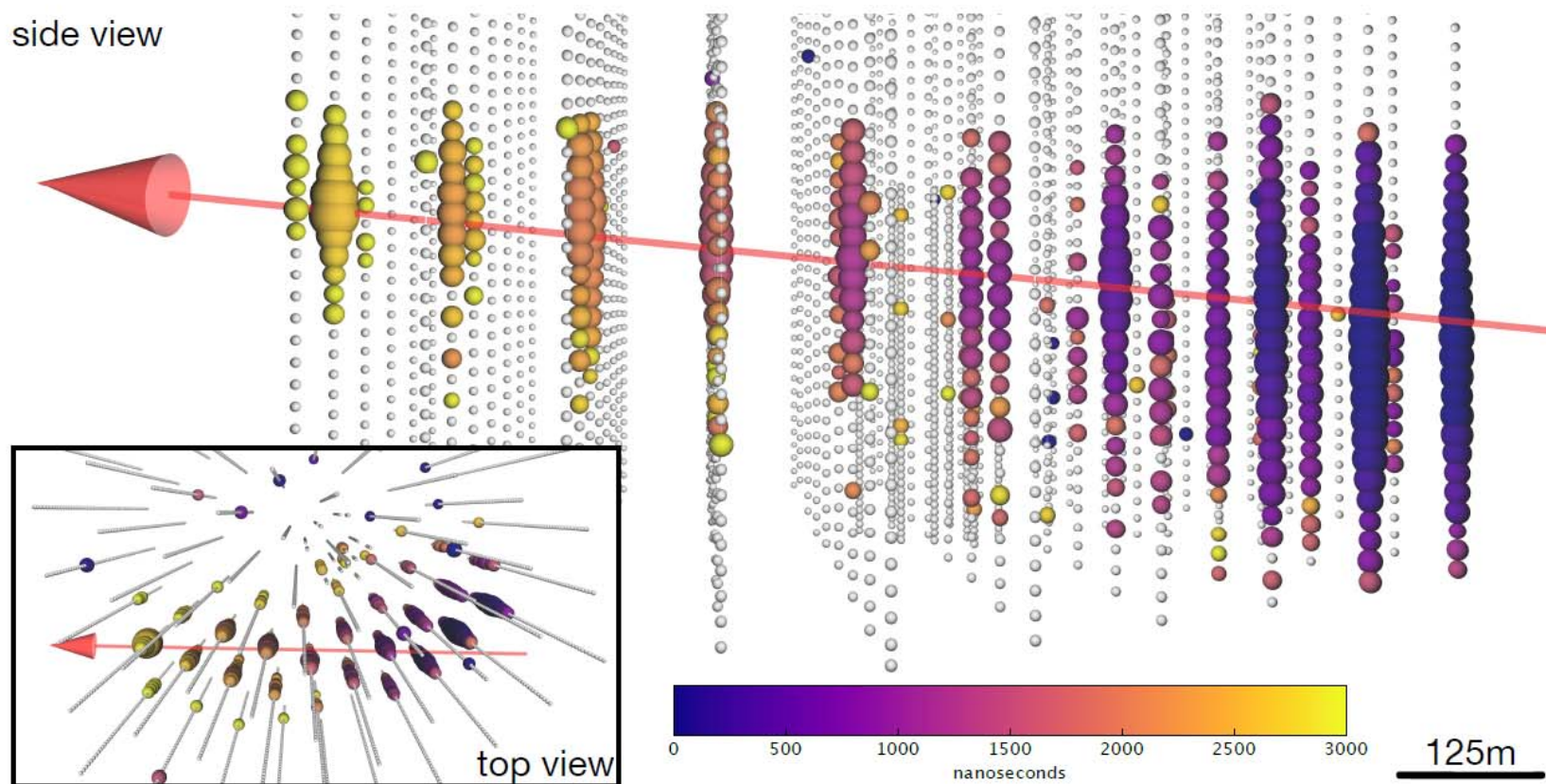
$$dN/dE \propto E^{-2.13}$$

$$E_{\mu} = 23.7 \pm 2.8 \text{ TeV}$$



$$E_{\nu} = 290 \text{ TeV}$$

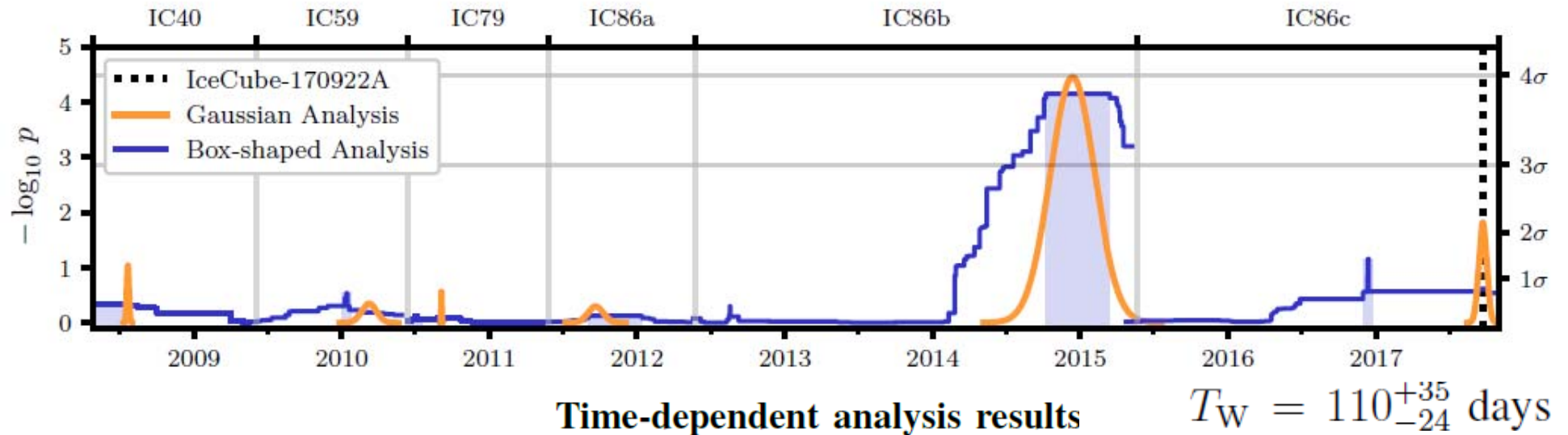
Thus blazar is PeVatron – the source of cosmic rays with energy $E_p > 1 \text{ PeV}$!



Анализ архива IceCube - события TXS 0506+056
до сообщения (alert) 22.09.2017 (IceCube-170922A)

IceCube, Science 361 (2018)
no.6398, 147-151
(arXiv:1807.08794)

TXS 0506+056_prior to IceCube-170922A alert:



$$E^2 J_{100} = (2.1_{-0.7}^{+0.9}) \times 10^{-4} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ at } 100 \text{ TeV and } \gamma = 2.1 \pm 0.2$$

$$E^2 J_{100} = (2.2_{-0.8}^{+1.0}) \times 10^{-4} \text{ TeV cm}^{-2} \quad \gamma = 2.2 \pm 0.2. \quad (\text{box-shaped})$$

$$\Phi_{100} = (1.6_{-0.6}^{+0.7}) \times 10^{-15} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Neutrino flux averaged
over 158 days

27.10.2020

С.Синеговский
Астрофизические нейтрино

26

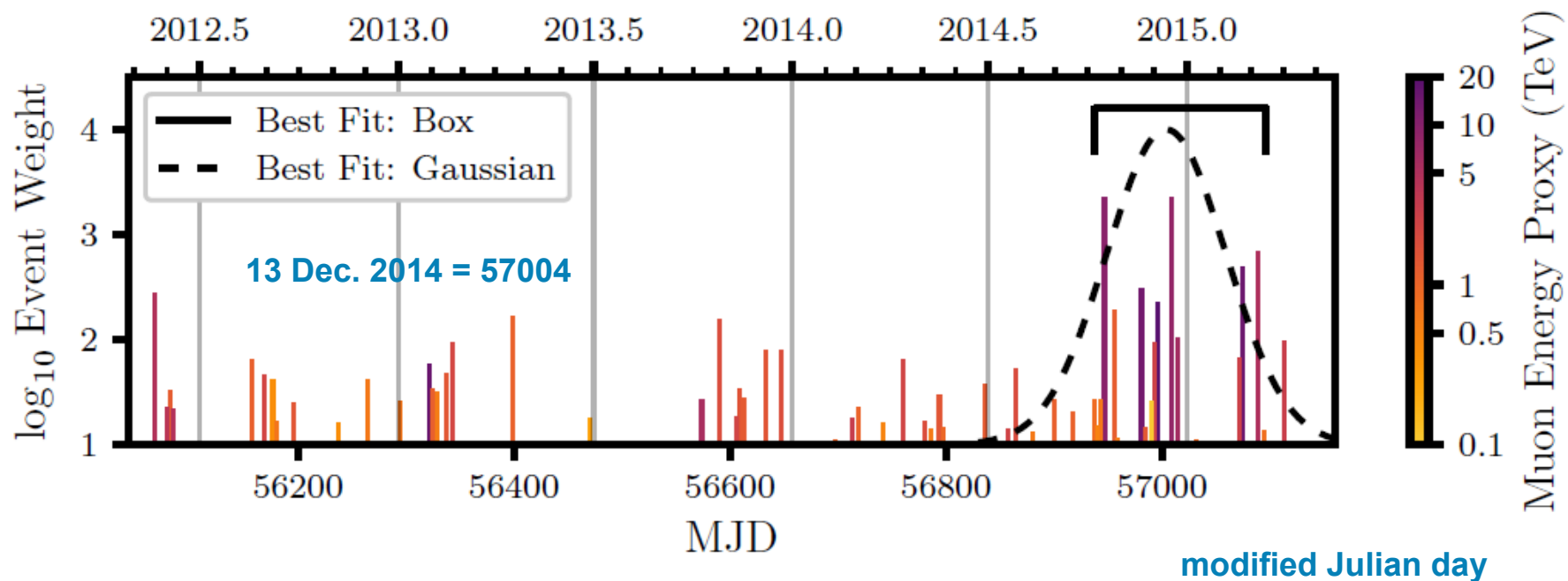


Figure 2: Time-independent weight of individual events during the IC86b period.

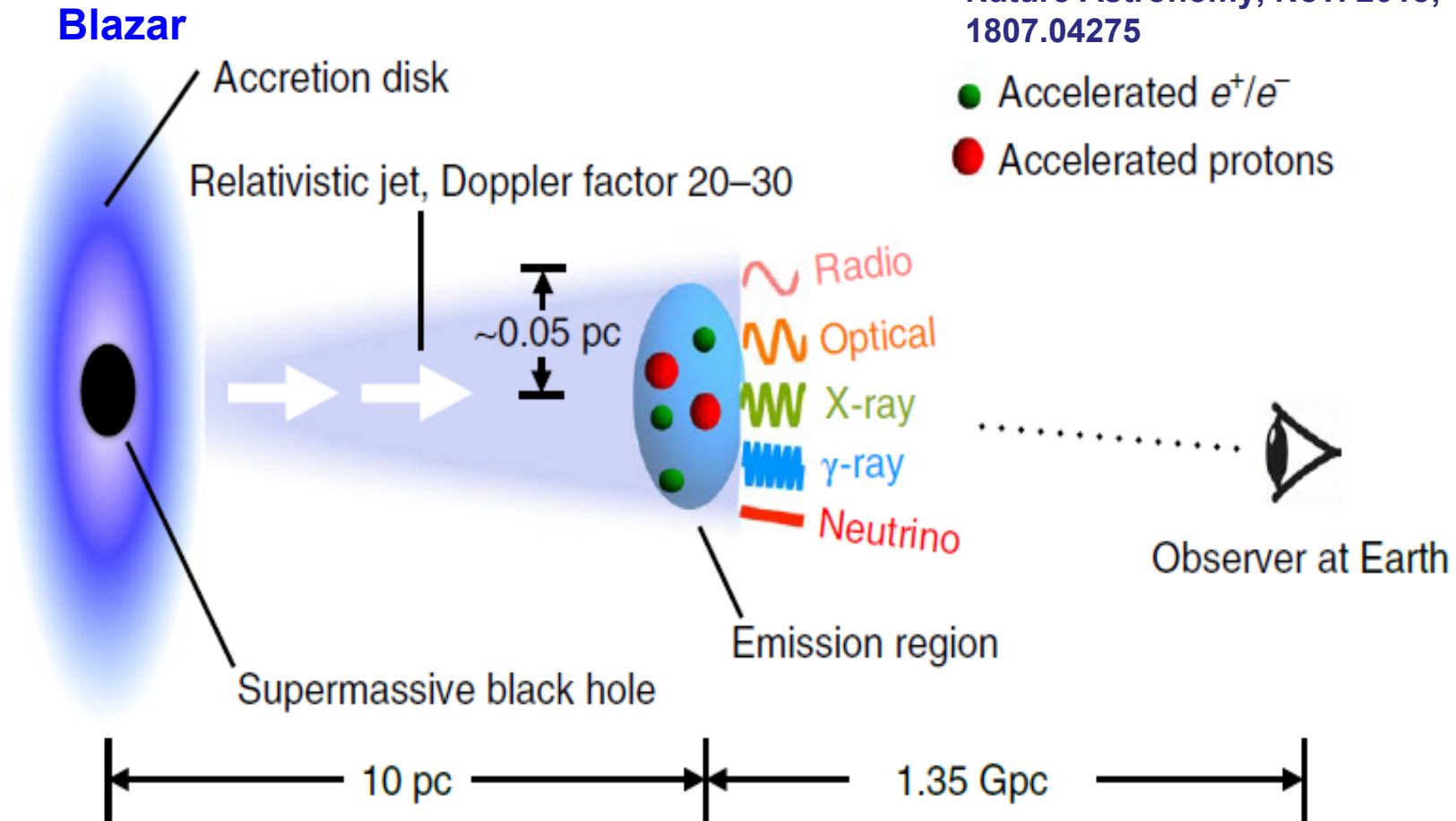
Results: The excess during 5 months in 2014-2015 consists of (13 ± 5) ν_{μ} -events above the expectation from the atmospheric background.

$$\Phi_{100} = (1.6^{+0.7}_{-0.6}) \times 10^{-15} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

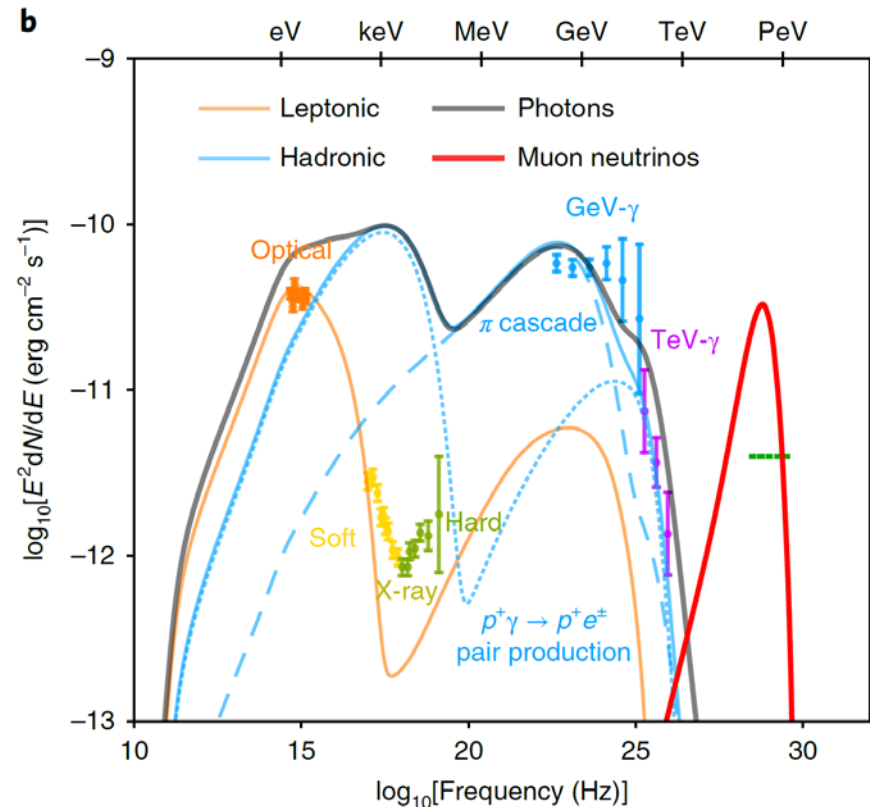
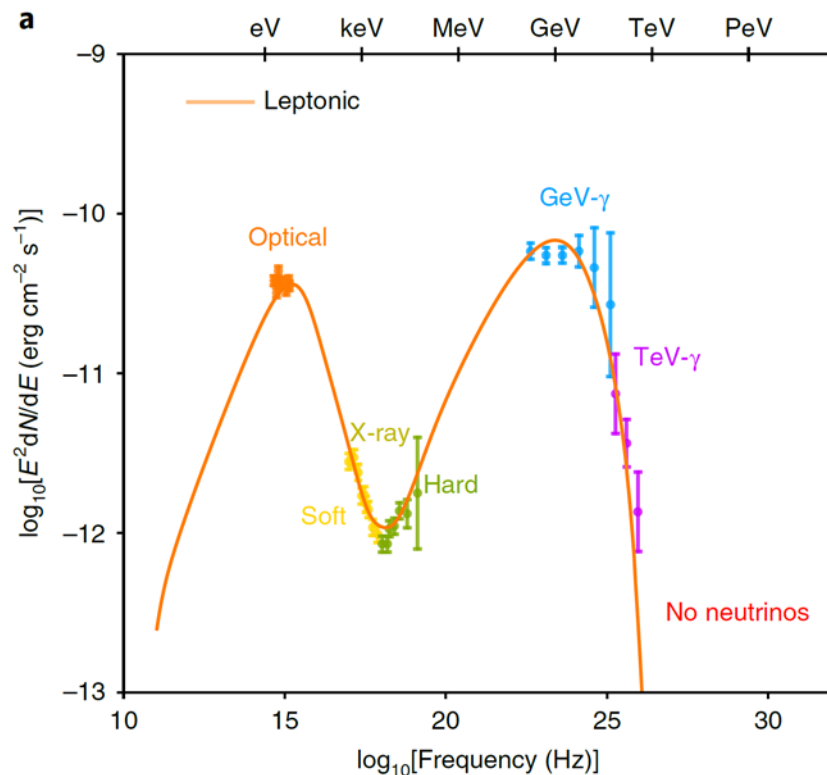
В отличие от диффузных астрофизических нейтрино (HESE-события), спектральный индекс которых был найден в интервале значений $\sim 2.4 - 2.9$, спектр нейтрино от локального источника $\alpha \approx 2.1$ близок к сакральному числу, ожидаемому в рамках стандартного механизма ускорения на УВ (DSA).

Синхронное наблюдение нейтрино ВЭ и яркой ВСПЫШКИ

Shan Gao, A. Fedynitch, W. Winter,
Nature Astronomy, Nov. 2018;
1807.04275



A sketch of the source TXS0506 + 056.



Спектры излучения TXS0506 + 056 для двух гипотез:

(а) лептонный механизм генерации излучения хорошо воспроизводит наблюдаемое э.-м. излучение, нейтрино не генерируется;

(б) в адронной модели во 2-й горб дают вклады π^0 и π^\pm распады, превышая наблюдаемое рентгеновское излучение. Символы – наблюдаемый поток во время вспышки 2. Горизонтальная зеленая линия отвечает ожидаемому диапазону энергии и уровню потока нейтрино, который дает одно ν_μ -событие в детекторе IceCube за 180 дней.

Основные механизмы генерации нейтрино

✓ pp-нейтрино

$$p + p \rightarrow \pi^{\pm} (K^{\pm}, \dots) + X \quad (\sigma_{pp} \sim 50 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2)$$

$$\sigma_{pp} \approx 4.0 \ln \left[(E_p / 1 \text{ ТэВ} + 0.5) / (3 \cdot 10^{-4}) \right] \text{ см}^2$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu}), \quad \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu} (\nu_{\mu})$$

$$\langle E_{\nu} \rangle \cong \frac{1}{4} \langle x_{\pi} \rangle E_p \quad \langle x_{\pi} \rangle \cong 0.2 \quad \longrightarrow \quad \langle E_{\nu} \rangle \cong 0.05 E_p$$

✓ $p\gamma$ -нейтрино

$$p + \gamma \rightarrow \pi^+ + X$$

Пороговые реакции $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$ $\sigma_{p\gamma \rightarrow \pi X}^{\max} \cong 5.4 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Из-за порогового характера реакции в потоках $p\gamma$ -нейтрино меньше доля $\bar{\nu}_e$ по сравнению с pp -нейтрино (здесь больше рождается нейтронов).

В источниках (AGN, GRB) фотонные поля имеют большие плотности ($n_\gamma \gg 400 \text{ cm}^{-3}$), непрозрачны для нуклонов, поэтому **$p\gamma$ -механизм является эффективным механизмом генерации нейтрино очень высоких энергий.**

$$E_p^{\text{th}}(UV) \sim 10^7 \text{ ГэВ}$$

$p\gamma$ -нейтрино рождаются не только при взаимодействии протонов с радиационными полями, окружающими источник (или вдали от него), но и в результате фоторождения пиона на реликтовых фотонах (СМВ).

✓ $p\gamma_{CMB}$ -нейтрино

Фоторождение пиона на реликтовых фотонах (CMB):



В системе протона: $\epsilon_\gamma = \frac{E_p}{m_p} \epsilon_\gamma$, ϵ_γ - энергия CMB-фотона в ЛС

$$\epsilon_\gamma = \frac{(m_\pi + m_n)^2 - m_p^2}{2m_p} \approx 0.16 \text{ ГэВ} \quad - \text{ порог фоторождения}$$

В лаб. системе: $E_p \geq E_p^{th} \cong \frac{m_\pi m_n (1 + m_\pi / 2m_n)}{2\epsilon_\gamma} = \frac{6.7 \cdot 10^7}{(\epsilon_\gamma / 1 \text{ эВ})} \text{ ГэВ}$

$$\epsilon_\gamma \cong 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}$$



$$E_p^{GZK} \cong E_p^{th}(\epsilon_\gamma) \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ ГэВ}$$



$$E_\nu^{GZK} \geq 10^9 \text{ ГэВ}$$

Источники и механизмы генерации нейтрино

Астрофизические нейтрино высоких и сверхвысоких энергий рождаются в распадах мезонов, образующихся во взаимодействиях UHECR с излучением и веществом вблизи астрофизических источников:

- **Активные ядра галактик (AGN)**, блазары - подмножество AGN со струями);
- **Скопления галактик;**
- **Галактики с областями активного звездообразования;**
- **Сверхновые и гиперновые** - ускорители космических лучей;
- **Источники космологических гамма-всплесков (GRB).**

Мишенью для протонов и ядер КЛ является межзвездная среда (ISM) и межгалактическая среда (IGM).

Внегалактические источники нейтрино

- ✓ Нормальные галактики
- ✓ Скопления галактик
- ✓ Активные ядра галактик - сейфертовские галактики, квазары, блазары, радиогалактики
- ✓ Источники гамма-всплесков
- ✓ Космогенные нейтрино – диффузные от pp -, $p\gamma$ - , взаимодействий КЛ в МЗС, МГП
- ✓ Нейтрино от догалактической фазы ($z > 500$) и гипотетической яркой фазы галактик - эпохи формирования и ранней стадии эволюции галактик ($z \sim 30$)

Активные ядра галактик

- Сейфертовские галактики (Seyfert1, Seyfert 1.5, Seyfert 2)
- Радиогалактики
- Квазары
- Блазары, лацертиды
- N-галактики, галактики Маркаряна

Ядра этих галактик - источники огромной энергии, излучение которых нельзя отождествить с обычным излучением звезд. Их мощность превосходит суммарную мощность всех звезд галактики. Активность ядер проявляется в интенсивном э.-м. излучении, выбросе в МГП облаков обычного газа с огромными скоростями ($\sim 10^4$ км/с) и релятивистских электронов, которые обнаруживают по синхротронному радиоизлучению.

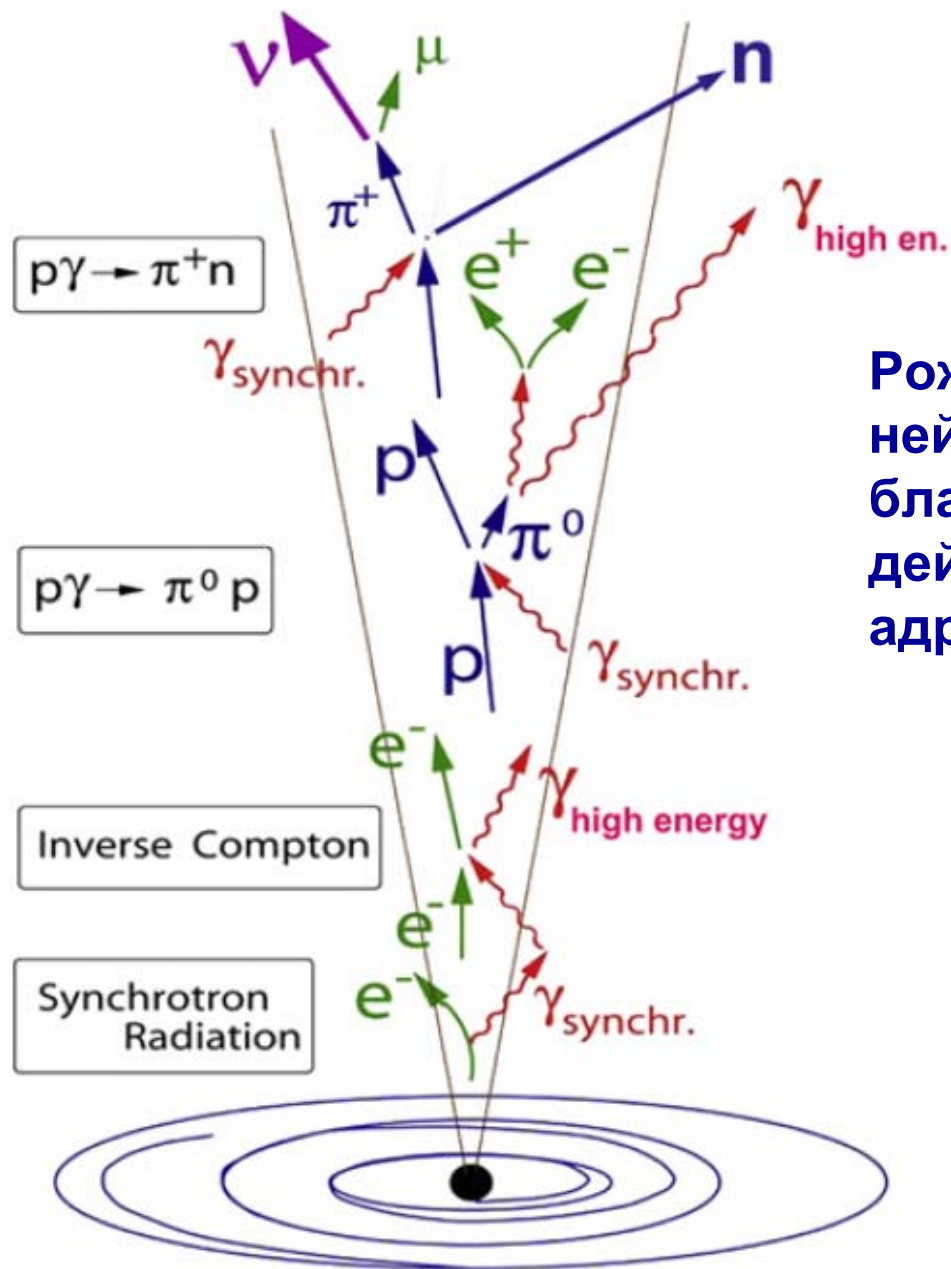
Характеристики AGN

- ✓ Распространенность - несколько % всех галактик (всего ~ 7000)
- ✓ Расстояния - до 1 Гпк (самый яркий квазар 3C 273б, $z=0.158$, $d \approx cz/H_0 \sim 600$ Мпк - ближайший FSRQ)
- ✓ Светимость - до 10^{47} эрг/с ($L_{\text{Galaxy}} = 8 \cdot 10^{43}$ эрг/с)
- ✓ Степенной непрерывный спектр э.-м. излучения $\phi(\omega) \sim \omega^{-\alpha}$
- ✓ Широкие разрешенные линии эмиссии и узкие запрещенные
- ✓ Быстрые изменения блеска (дни, недели)
- ✓ Компактность ($< 10^2$ пк ~ сотен св. лет)
- ✓ Время жизни $\sim 10^8$ лет (если AGN - общая фаза эволюции галактик)
- ✓ Энерговыделение $\sim M_{\text{rg}} c^2$, M_{rg} - масса газа в типичных дисковых галактиках ($10^{58} - 10^{60}$) эрг или $(10^4 - 10^6) M_{\odot} c^2$

Парадигма AGN: источник энергии - аккреция газа на массивную черную дыру; механизм высвобождения энергии - потеря углового момента вращающегося аккреционного диска.

Модель активного ядра галактики





Рождение γ -квантов и нейтрино в струях блазаров (AGN) – действие лептонного и адронного механизмов

Модель активного галактического ядра

Три зоны ядра:

1. Аккреционный диск - источник непрерывного спектра (опт. и жесткое, тах – в гамма-диапазоне) $\phi \sim E^{-\alpha}$
2. Область широких линий ($V > 10^3$ км/с), тепловое излучение
3. Область узких линий (размер \sim св. месяц)

Унифицированная модель AGN:

- ✓ в центре находится вращающаяся черная дыра
- ✓ аккреционный диск вокруг ЧД, разогретый за счет вязкого трения (магнитные поля)
- ✓ коллимированные струи релятивистских частиц

$$M_{SMBH} \sim (10^5 - 10^9) M_{\odot} \quad R_{AD} \leq 10^9 \text{ км} \quad T_{AD} \sim 10^3 \text{ К}$$

Светимость аккреционного диска

Гравитационная энергия частицы массы на кеплеровской орбите радиуса R_i

$$E_g = -\frac{GMm}{R_i}, \quad R_i = 3r_g,$$

По теореме вириала

$$\bar{T} = -\frac{1}{2}E_g = \frac{GM\Delta\bar{m}}{2R_i} \quad r_g = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.9(M / M_\odot) \text{ км}$$

$$\Delta E_g = -E_g = \frac{GM\Delta\bar{m}}{R_i}$$

Выделившаяся при падении частиц с массой Δm из бесконечности на R_i гравитационная энергия распределится между излучением (нагревом - т. е. внутренней энергией) и кинетической энергией :



С другой стороны

$$\Delta E_g = \bar{T} + \Delta\bar{U} \quad \Delta E_g = -\frac{1}{2}E_g + \Delta\bar{U}, \quad \Delta\bar{U} = \Delta E_g + \frac{1}{2}E_g = \frac{GM\Delta\bar{m}}{2R_i}$$

Светимость АД

$$L_{AD} = \frac{\Delta\bar{U}}{\Delta t} = \frac{GM\dot{M}}{2R_i}, \quad \dot{M} = \frac{\Delta\bar{m}}{\Delta t} \quad \text{скорость аккреции}$$

Конверсия гравитационной энергии в излучение

$$L_{AD} = \frac{GM\dot{M}}{2R_i} = \eta\dot{M}c^2 \quad \leftarrow \quad GM = r_g c^2 / 2 \quad \leftarrow \quad r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Здесь коэфф. $\eta = \frac{r_g}{4R_i}$ определяет эффективность конверсии грав. энергии в излучение

Низшая устойчивая орбита ЧД Шварцшильда определяется условием

$$R_i^S = 3r_g,$$

Тогда

$$\eta_s = \frac{1}{12}$$

Для сравнения:

$$\eta_{burn} \sim 10^{-9},$$

$$\eta_{TNS} = \frac{4m_p - m_{He}}{4m_p} \approx 7 \cdot 10^{-3},$$

0,00728 (!)

$$R_i^K = r_g / 2, 9r_g / 2$$

$$\eta_{Kerr} \approx 0.42$$

AGN – источники нейтрино?

А. Плавин, 36-я ВККЛ
(Москва, 28.09-02.10, 2020)

Используемые данные

AGN: полная по потоку РСДБ-выборка, 3411 объектов
Наблюдения за ≈ 30 лет, $S_{8\text{ GHz}} \geq 150 \text{ mJy}$ <http://astrogeo.org/rfc/>

Нейтрино — мюонные треки IceCube, публичные данные

Проверялась гипотеза:

- Яркие AGN чаще встречаются в направлениях, откуда приходят нейтрино?
- Нейтрино чаще приходят с направлений, где находятся яркие AGN?

Результат – нейтрино излучаются AGN !

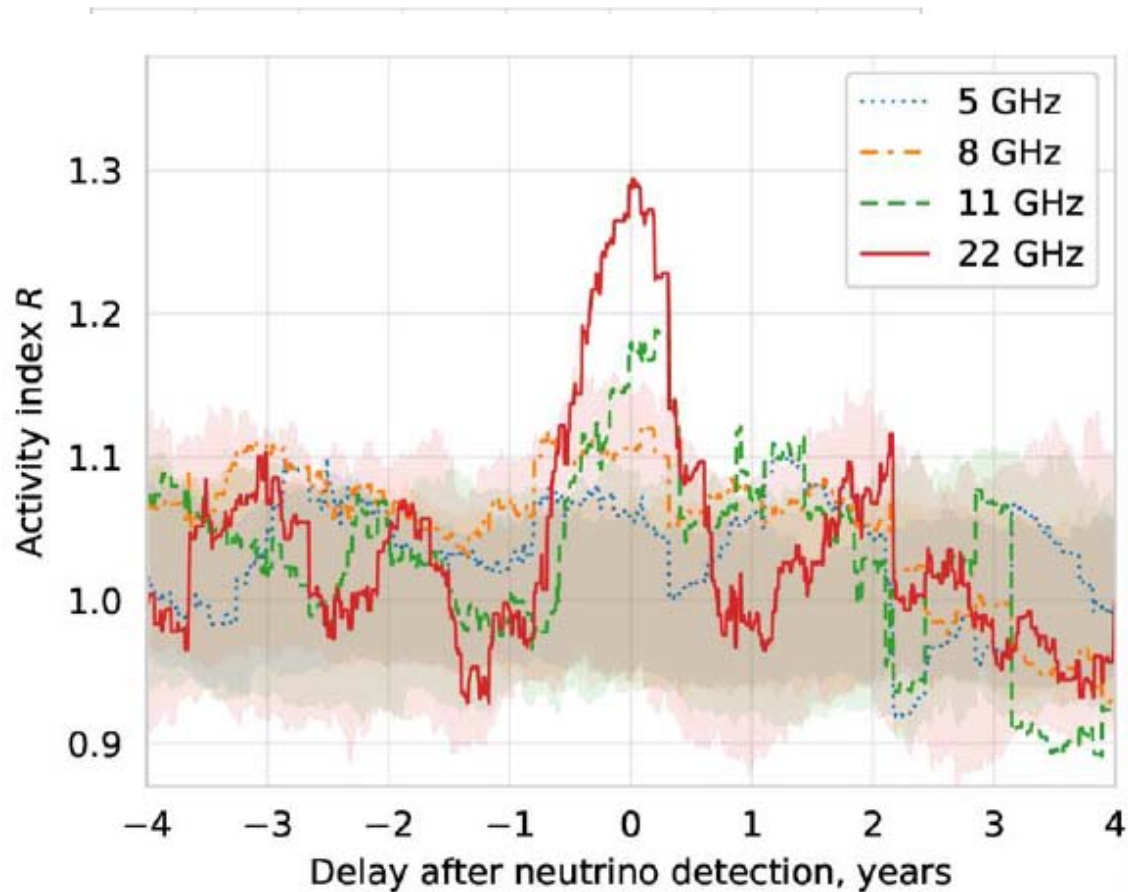
Ассоциированные AGN:

События $\geq 200 \text{ ТэВ}$: 5 блазаров; все энергии – 70-130 блазаров

Нейтрино и вспышки в AGN

Коррелируем радиопоток и время детектирования нейтрино от объектов.

Результат: блазары ярче во время прихода нейтрино!



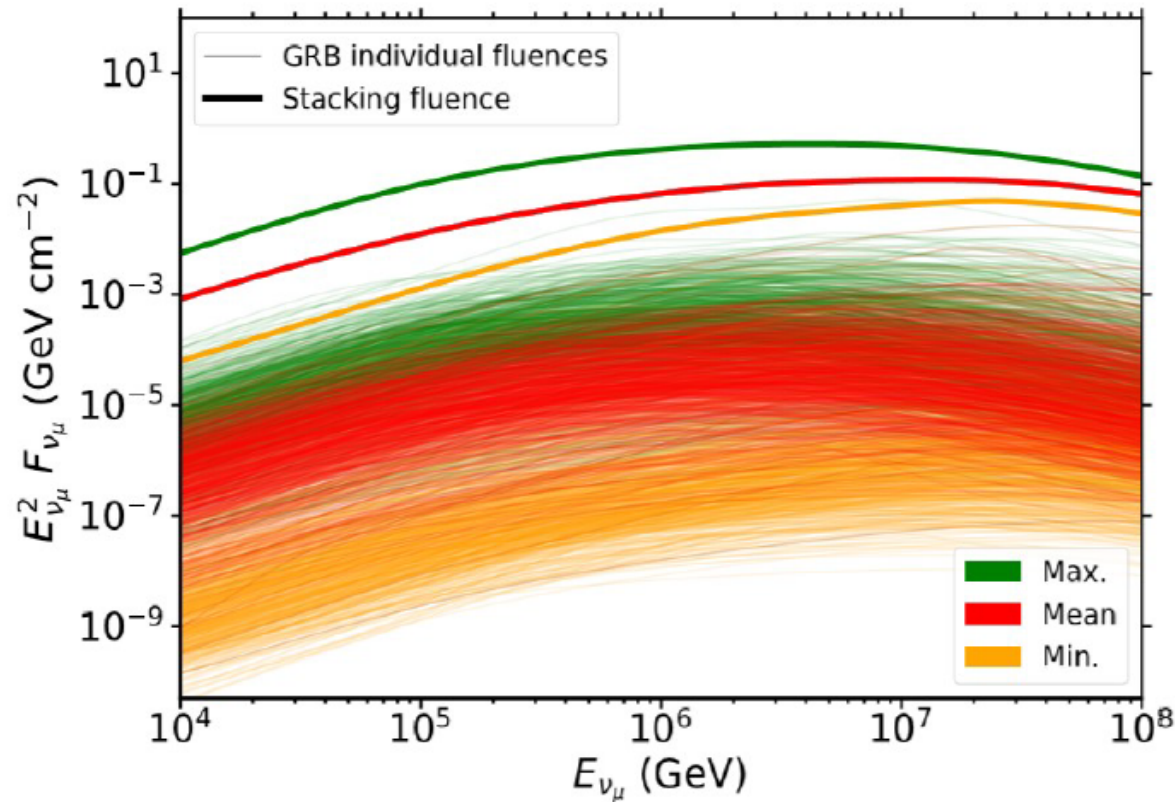
Физическая интерпретация

- Нейтрино образуются в центральных парсеках ярких блазаров - процессы фоторождения π -мезона (р γ -механизм)
- Излучение направленное, преимущественно вдоль джета
- Требуются фотоны 100 эВ -200 кэВ и SCS-фотоны джета?
... и протоны до 10 ПэВ ?
- Механизм ускорения:
Ударные волны? (Vukov et al. 2012; Lemoine & Waxman 2009);
Ускорение в магнитосфере? (Ptitsyna&Neronov2016)

Яркими блазарами можно объяснить весь поток астрофизических нейтрино с $E > 1$ ТэВ, зарегистрированный IceCube !

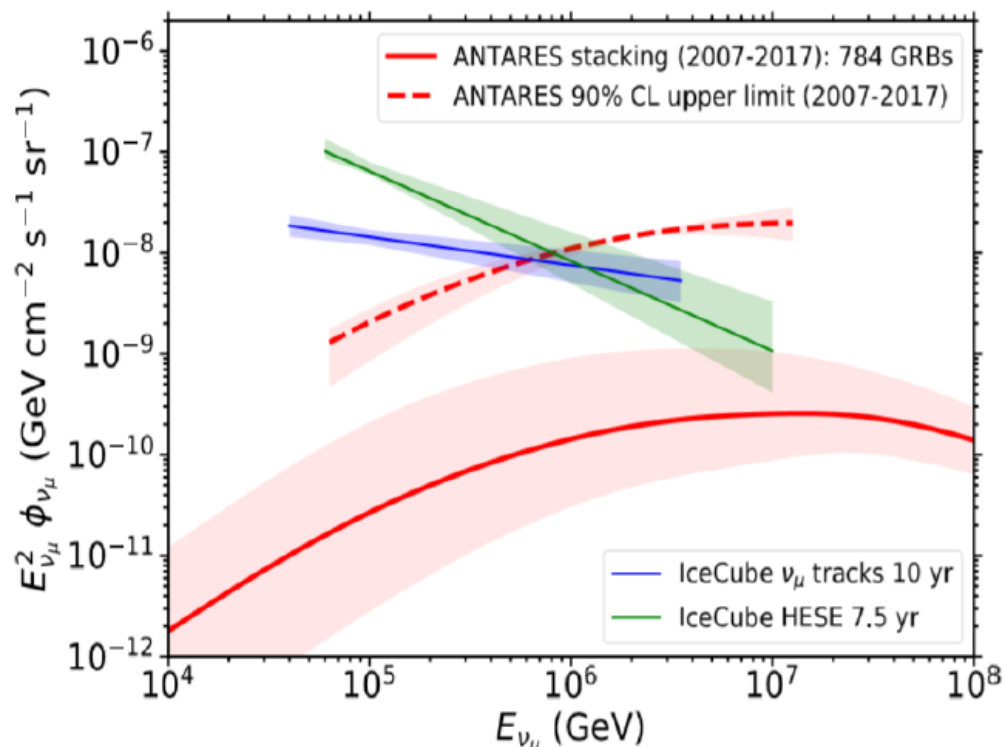
Ограничения на диффузный поток от GRB

arXiv:2008.02127



Вклад 784 GRBs в поток диффузный поток нейтрино ВЭ (по данным ANTARES за 10 лет).

Квазидиффузный поток нейтрино (784 GRBs)



GRB могут дать вклад < 10% (по данным ANTARES) и < 1% (IceCube) в диффузный поток, зарегистрированный IceCube при 100 TeV

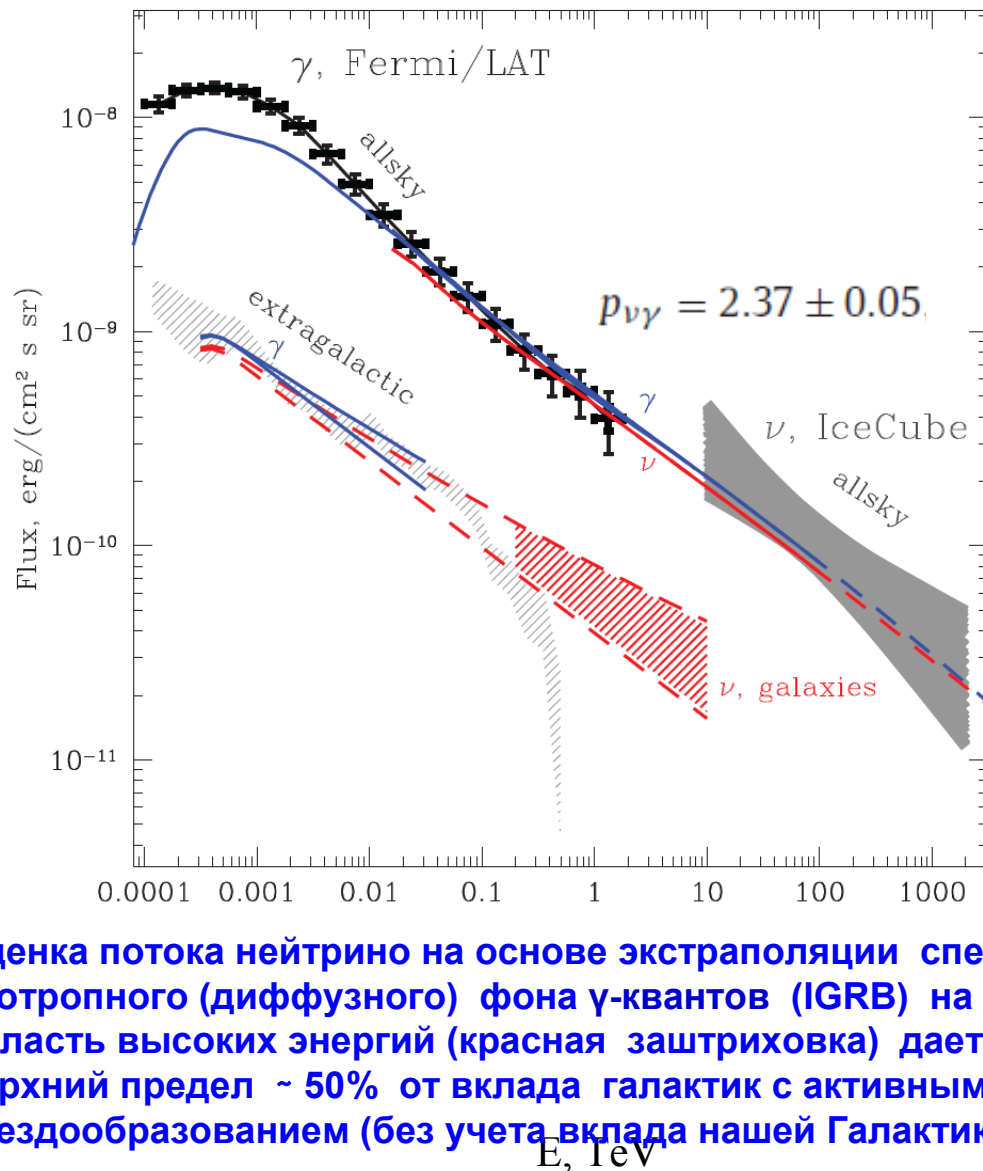
Модель: сплошная красная - ANTARES 90% CL, штиховая линия – верхний предел.

Наилучшие фиты данных IceC – трековые события (ν_μ , blue) и HESE-события (green).

Галактические источники нейтрино

- ✓ Коллапс звезд
- ✓ Остатки сверхновых
- ✓ Нейтронные звезды
- ✓ Двойные рентгеновские (микроквазары)
- ✓ Взаимодействие КЛ с МЗС (pp-, p γ -нейтрино)

Нейтрино от источников в Галактике



Оценка потока нейтрино на основе экстраполяции спектра изотропного (диффузного) фона γ -квантов (IGRB) на область высоких энергий (красная заштриховка) дает верхний предел $\sim 50\%$ от вклада галактик с активным звездообразованием (без учета вклада нашей Галактики).

*A. Neronov, D. Semikoz
Astropart. Phys. 72 (2016) 32*

Спектры γ и ν всех направлений. Показаны статистические и систематические ошибки (тонкие усы) измерений гамма-телескопа им. Ферми. Сплошные линии, синяя

(γ) и красная (ν) – расчет потоков для степенного спектра протонов (наклон спектра $\alpha = 2.45$).

Нижние линии – оценка возможных потоков γ и ν от галактик с интенсивным звездообразованием.

star-forming galaxies

[37] [K. Murase, M. Ahlers, B.C. Lacki, PRD 88 \(2013\) 121301.](#)

[38] [I. Tambora, S. Ando, K. Murase, J. Cosmol. Astropart. Phys. 09 \(2014\) 043.](#)

Некоторые итоги

- Многокомпонентные (multi-messenger) наблюдения дают ключевую информацию для понимания физики источников.
- Многие аномалии КЛ, измерения спектров гамма-излучения и нейтрино приводит к изменению парадигмы КЛ: поток измеренный локально (у Земли) не является универсальным - он различный в разных областях Галактики.
- Мы начинаем понимать лучше галактические КЛ ВЭ:
для начала диффузию связали с реалистическими магнитными полями.
- Вклады локальных источников являются определяющими при $E > 1$ ТэВ.
- SNe – основные кандидаты в источники КЛ
- Новая локальная компонента, проявляющаяся в данных по γ и ν , – либо локальный источник (Vela также дает CR вблизи колена), либо DM-частицы с массой ~ 5 ПэВ.

HIGH-ENERGY NEUTRINOS FROM GALACTIC SUPERBUBBLES

K. J. Andersen, M. Kachelrieß, D. V. Semikoz, 1712.03153

- Рассмотрена возможность вклада ближнего источника КЛ в поток астрофизических нейтрино - модель, в которой источник находится в коконе (superbubble), образовавшемся в результате взрыва сверхновой. Магнитное поле и плотность газа возрастают вблизи границы (стенки) кокона.
- В результате нейтрино генерируется преимущественно вблизи этой границы. Если наблюдатель находится вблизи такого пузыря, нейтринные события распределены по большей части неба. Этот механизм применим для случая локального соседа Галактики. В частности рассмотрен локальный источник, взаимодействующий с пузырем, образуя “стену взаимодействия”. Примером молодого ближнего источника КЛ может служить Сверхновая Vela, вспыхнувшая 11 тыс. лет назад.

Поток нейтрино в такой модели может обеспечить значительную часть событий IceCube при энергиях $\sim 100\text{-}300\text{ TeV}$ и ниже. Другие источники должны обеспечить только половину потока, предсказанного для Vela. Сигнатура такого сценария – корреляция направлений прихода Галактических нейтрино с распределением v - v_a в стенках пузырей. Нейтринный сигнал будет близким к изотропному и походить на сигнал от внегалактической компоненты, поскольку мы вне пузыря (но не в центре).

Fermi Gamma-ray Space Large Area Telescope (FermiLAT)

Космический гамма-телескоп им. Э.Ферми

Телескоп FermiLAT (2008) детектирует γ -кванты с энергией 20 МэВ - 300 ГэВ, используя конверсию γ -квантов в e^+e^- -пару: $\gamma + Z \rightarrow e^+ + e^- + Z$

FoV \sim 20% всего неба. Второй инструмент на борту спутника - монитор гамма-всплесков (Gamma-ray Burst Monitor)

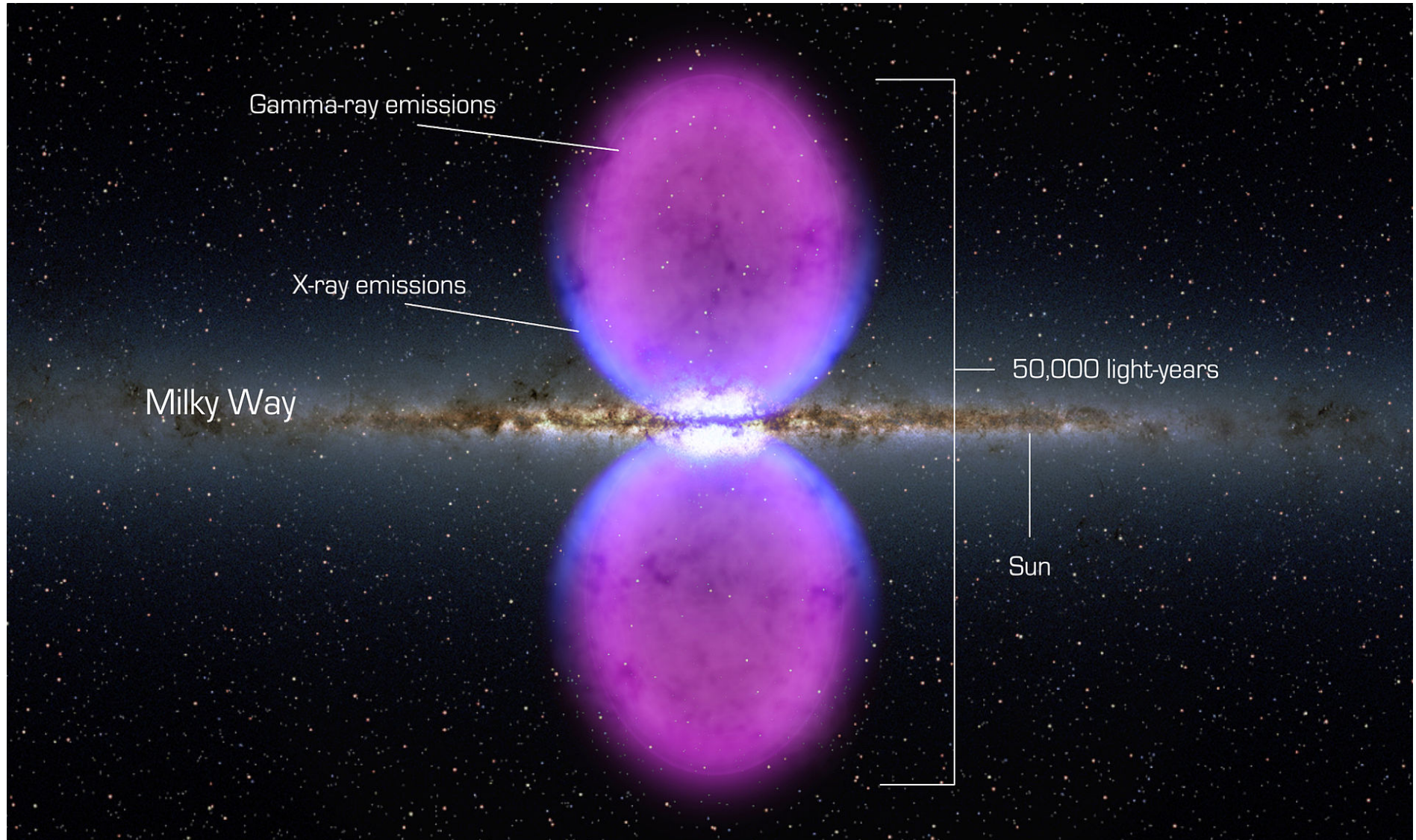
Галактические γ /X-пузыри (bubbles, cocoons)

Ноябрь 2010 - сообщение о зарегистрированных FermiLAT двух пузырей (bubbles) в гамма- и рентгеновском диапазонах.

Пузыри (коконы) имеют протяженность около 8 кпк каждый (\sim 25 тыс. св.лет) в центре Галактики, выше и ниже ее плоскости.

Природа этих образований пока непонятна, гипотеза: пузыри возникли в результате активности сверхмассивной чёрной дыры, находящейся в центре Галактики. Предположительно, возраст пузырей составляет миллионы лет.

Milky Way Gamma/X-ray bubbles



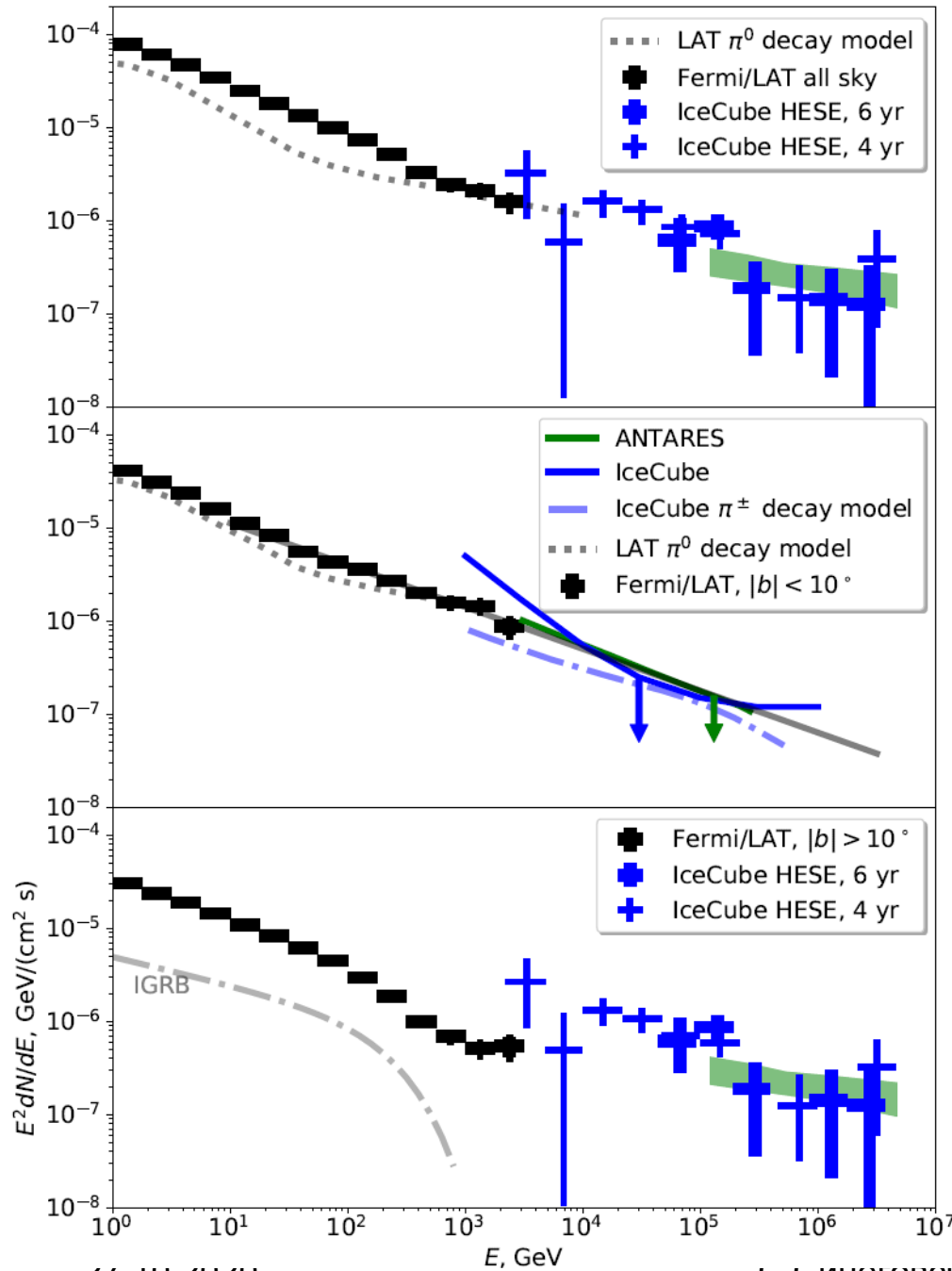
27.10.2020

С.Синеговский
Астрофизические нейтрино

53

Модель галактических КЛ, турбулентность магнитных полей

- Измеренный наклон спектра астрофизических нейтрино не противоречит гипотезе пионного источника (распада π^0) гамма-излучения дисков Галактики и БМО (LMC), если типичный наклон спектра КЛ от области звездообразования удовлетворяет ограничению $p \leq 2.5$, но не $p = 2.7$. Показано, что не только наклон, но и нормировка потока нейтрино не противоречит этой гипотезе.
- Применима простая модель, в которой инжекция КЛ со спектром $p_{inj} = 2.0-2.2$ (диффуз. механизм ускорения на УВ - DSA); взаимодействие КЛ с турбулентными магнитными полями Галактики (механизм Колмогорова) приводит к смягчению спектра $p_{inj} + \delta$ ($\delta = 1/3-1/2$).
- Модель, применяемая к спектру КЛ, усредненному по большим областям галактик, может оказаться неприменимой к отдельно взятой области измерения спектра КЛ - в Солнечной системе нашей Галактики.



Top: the multimessenger spectrum of the full sky: FermiLAT (black), IceCube (blue data and green band ; a model (dash-dotted) for the Galactic diffuse hadronic emission.

Middle: FermiLAT spectrum for $|b| < 10^\circ$ with model-dependent upper limit on neutrino flux.

Bottom: Fermi/LAT spectrum of $|b| > 10^\circ$ region, compared to the IceCube neutrino flux measurements. The dash-dotted curve - the best-fit model of the IGRB.

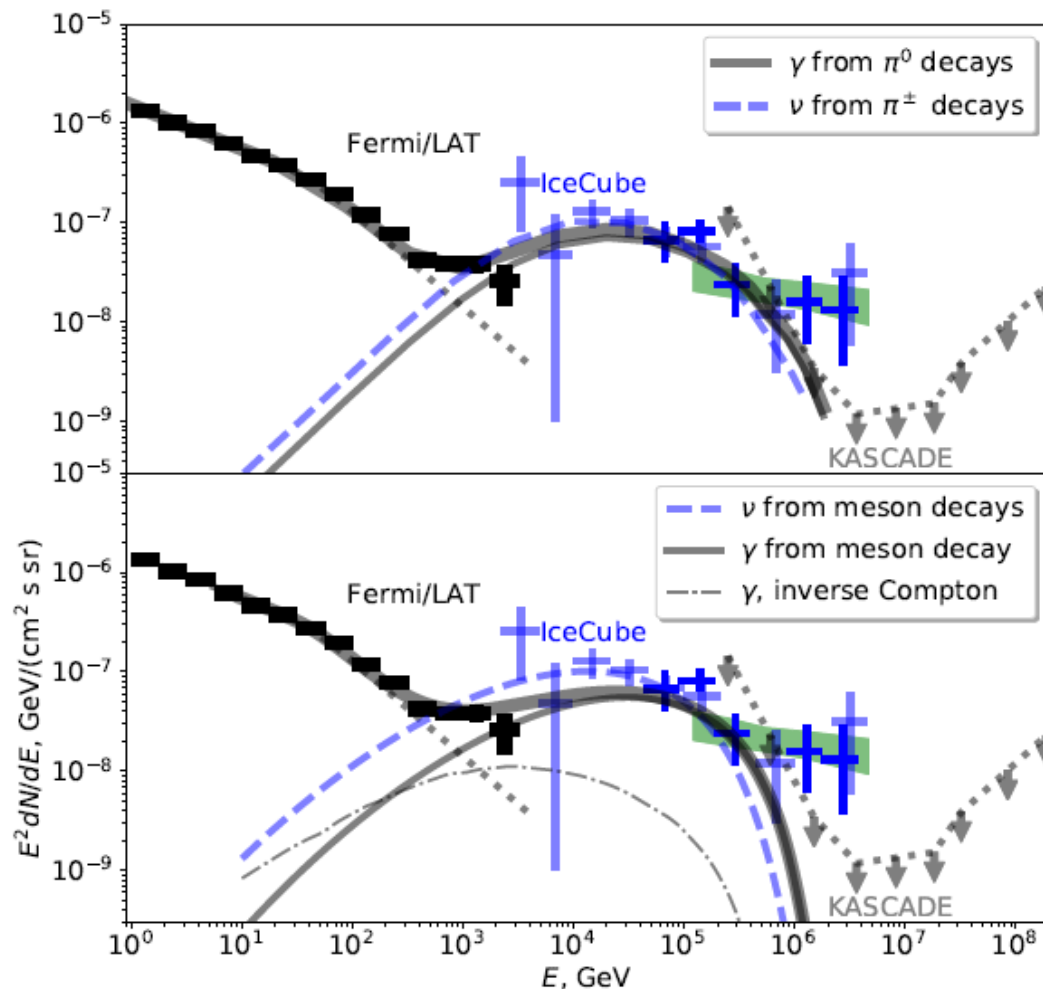


Fig 3. High Galactic latitude emission for the local PeVatron (top) and DM (bottom) models.. Vertical arrows show KASCADE upper limits on the γ -ray flux from Northern sky. Solid thin lines show the γ -ray emission from the additional hard component. Dotted line shows a broken power-law fit to the sub-TeV γ -ray spectrum.

Наблюдаемый более жесткий спектр γ -излучения можно объяснить только присутствием новой Галактической компоненты γ с $E_\gamma > 300$ ГэВ. Эта компонента - дополнение нейтринного сигнала в мульти-ТэВ области.

ПэВатрон? Темная материя?

M. Kachelrieß *et al.*
J. Phys.: Conf. Ser.
1181 (2019) 012052

Только несколько типов источников могли бы генерировать multi-TeV-излучение с жестким спектром на больших угловых масштабах в высоких широтах Галактики.

- Взаимодействие частиц новой, ранее неизвестной компоненты галактических КЛ. Эта жесткая компонента могла бы находиться в локальной окружении, либо быть частью очень большого гало.
- Локальный источник, достигающий энергии ПэВ ("PeVatron") должен быть молодым и ближним, как, например сверхновая Vela – не старше 10^5 лет, на расстоянии не больше нескольких сотен парсек. Выполнение этих двух условий требуется, чтобы обеспечить рождение нейтрино с энергиями 10–100 ТэВ.

Альтернативная возможность показана на нижней панели Fig. 3 - это распады метастабильных частиц X темной материи (DM) с массой $m_X \simeq 5$ ПэВ, в которых рождаются фотоны и нейтрино. Форма спектра моды распада $X \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{hadrons}$ определяется КХД.

Атмосферные нейтрино

Основные источники атмосферных нейтрино

Частица (f)	Время жизни, с	Мода распада	Относительная ширина распада, %	Критическая энергия $\varepsilon_f^{cr}(0^0) = m_f c^2 H_0 / c \tau_f$
μ_{e3}^\pm	2.19×10^{-6}	$e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	100	1.03 ГэВ
π^\pm	2.60×10^{-8}	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	99.987	115 ГэВ
$K_L^0 : K_{Le3}^0$ $K_{L\mu3}^0$	5.12×10^{-8}	$\pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$ $\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	40.55 ± 0.11 27.04 ± 0.07	206 ГэВ
$K_{\mu2}^\pm$ $K^\pm : K_{e3}^\pm$ $K_{\mu3}^\pm$	1.24×10^{-8}	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ $\pi^0 + e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$ $\pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	63.55 ± 0.11 5.07 ± 0.04 3.35 ± 0.03	857 ГэВ
$K_S^0 : K_{Se3}^0$ $K_{S\mu3}^0$	0.90×10^{-10}	$\pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$ $\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	$(7.04 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ $(4.69 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	120 ГэВ

K_S^0	$\pi^+ + \pi^-$ $\pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e (\nu_e)$ $\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$	$(69.20 \pm 0.05)\%$ $(7.04 \pm 0.09) \times 10^{-4}$ $(4.66 \pm 0.07) \times 10^{-4}$	ГэВ 1.12×10^5
D^\pm	$e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \text{адроны}$ $\mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + \text{адроны}$	$(17.2 \pm 1.9)\%$ $(17.41 \pm 1.1)\%$	3.8×10^7
D^0	$e^+ + \nu_e + \text{адроны}$ $\mu^+ + \nu_\mu + \text{адроны}$	$(6.71 \pm 0.29)\%$ $(6.5 \pm 0.7)\%$	9.6×10^7
D_S^\pm	$\tau^\pm + \nu_\tau (\bar{\nu}_\tau)$ $\mu^+ + \nu_\mu$ $e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \text{адроны}$ $l^+ + \nu_l + \text{адроны}$	$(6.4 \pm 1.5)\%$ $(6.1 \pm 1.9) \cdot 10^{-3}$ $(8_{-5}^{+6})\%$ $(10.8 \pm 0.6)\%$	8.0×10^7
Λ_c^+	$e^+ + \nu_e + \text{адроны}$ $\mu^+ + \nu_\mu + \text{адроны}$	$(4.5 \pm 1.7)\%$ $(2.0 \pm 0.7)\%$	2.4×10^8

Критическая энергия для распада частицы в веществе

Изменение потока пионов в результате распада

$$\Gamma = \frac{E}{m_\pi c^2}$$

$$d\pi(E, h, \theta) = -\frac{dl}{\Gamma c \tau_\pi} \pi(E, h, \theta) = -\frac{\rho(h, \theta) dl}{\rho(h, \theta) \Gamma c \tau_\pi} \pi(E, h, \theta), \quad d\pi(E, h, \theta) = -\frac{dl}{l_\pi} \pi(E, h, \theta), \quad l_\pi = \Gamma c \tau_\pi, \quad dh = \rho dl$$

$$d\pi = -\pi(E, h, \theta) \frac{dh}{\Gamma c \tau_\pi \rho(h, \theta)} = -\pi(E, h, \theta) dw, \quad \frac{d\pi}{d h} = -\frac{\pi(E, h, \theta)}{\Gamma c \tau_\pi \rho(h, \theta)} = -\pi(E, h, \theta) \frac{dw}{dh}$$

$$\frac{dw}{dh} = \frac{m_\pi c^2}{E c \tau_\pi \rho(h, \theta)}$$

Для изотермической атмосферы $\rho(h, \theta) = \rho_0 \exp[-H / H_0], H_0 = RT_0 / (\mu g)$

$$h = \int_H^\infty \rho(H) \frac{dH}{\cos \theta} = \frac{\rho H_0}{\cos \theta} \Rightarrow \rho(h, \theta) = h \cos \theta / H_0$$

$$\frac{dw}{dh} = \frac{m_\pi c^2}{E c \tau_\pi \rho(h, \theta)} = \frac{m_\pi c^2 H_0}{E c \tau_\pi h \cos \theta^*} = \frac{\varepsilon_\pi^{cr}(\theta)}{E h}, \quad \frac{dw}{d \ln h} = \frac{m_\pi c^2 H_0}{E c \tau_\pi h \cos \theta^*} = \frac{\varepsilon_\pi^{cr}(\theta)}{E},$$

$$\varepsilon_\pi^{cr}(\theta) = \frac{m_\pi c^2 H_0}{c \tau_\pi \cos \theta^*} \quad \cos \theta^* = [1 - \sin^2 \theta / (1 + H / R_\oplus)^2]^{1/2}$$

Расчет спектров атмосферных нейтрино

Точно также рассматриваются уравнения мезон-нуклонного каскада, решением которого являются потоки пионов $\pi^\pm(E, h, \theta)$, заряженных $K^\pm(E, h, \theta)$ и нейтральных $K^0(E, h, \theta), \bar{K}^0(E, h, \theta)$ каонов на любой глубине атмосферы для всех зенитных углов (см. [29, 30]). Эти спектры входят в уравнения каскада как источники нейтрино, определяя функции генерации атмосферных нейтрино. Уравнения генерации и переноса в атмосфере нейтрино ($\nu = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$) в одномерном приближении записываются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial h} \Phi_\nu(E, h, \theta) = G_\nu^{\pi, K}(E, h, \theta) + G_\nu^{D, \Lambda}(E, h, \theta) + G_\nu^\mu(E, h, \theta),$$

где $G_\nu^{\pi, K}$, $G_\nu^{D, \Lambda}$ – функции генерации нейтрино в распадах π, K - мезонов, D, Λ_c – частиц и мюонов ($G_\nu^{D, \Lambda}$ – источник «прямых» нейтрино); $G_\nu^\mu(E, h, \theta)$ – функция генерации нейтрино от распадов мюонов.

Потоки атмосферных нейтрино

Интегрирование уравнения дает дифференциальный энергетический спектр нейтрино на глубине h вблизи направления под зенитным углом θ :

$$\Phi_\nu(E, h, \theta) = \int_0^h [G_\nu^{\pi, K}(E, t, \theta) + G_\nu^{D, \Lambda}(E, t, \theta) + G_\nu^\mu(E, t, \theta)] dt,$$

$$G_{\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)}^{\pi, K}(E, h, \theta) = \sum_{M=\pi^\pm, K^\pm} B(M_{\mu 2}) \frac{m_M}{\tau_M \rho(h, \theta)} \int_{E_{M\mu 2}^{\min}}^{\infty} \frac{dE_0}{p_0^2} F_\nu^{M\mu 2}(E_0, E) M(E_0, h, \theta) +$$

$$+ \sum_{K=K^\pm, K_L^0, K_S^0} B(K_{\mu 3}) \frac{m_K}{\tau_K \rho(h, \theta)} \int_{E_{K\mu 3}^{\min}}^{\infty} \frac{dE_0}{p_0^2} F_\nu^{K\mu 3}(E_0, E) K(E_0, h, \theta),$$

$$G_{\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)}^{D, \Lambda}(E, h, \theta) = \sum_{D=D^\pm, D^0, \bar{D}^0, D_S^\pm, \Lambda_c^+} B(D_{\mu k}) \frac{m_D}{\tau_D \rho(h, \theta)} \int_{E_{D\mu k}^{\min}}^{\infty} \frac{dE_0}{p_0^2} F_\nu^{D\mu k}(E_0, E) D(E_0, h, \theta).$$

$(f \rightarrow \mu + \nu_\mu + X).$

вероятность k -частичного распада частицы f ($f = \pi^\pm, K^\pm, K_L^0, K_S^0, D^\pm, D^0, \bar{D}^0, \Lambda_c^+$),
Здесь $\rho(h, \theta)$ – профиль плотности атмосферы, $B(f_{\mu k})$ – относительная
распадающейся на лептонную пару $\mu^+ \nu_\mu$ ($\mu^- \bar{\nu}_\mu$) и адроны, $p_0 = (E_0^2 - m_f^2)^{1/2}$

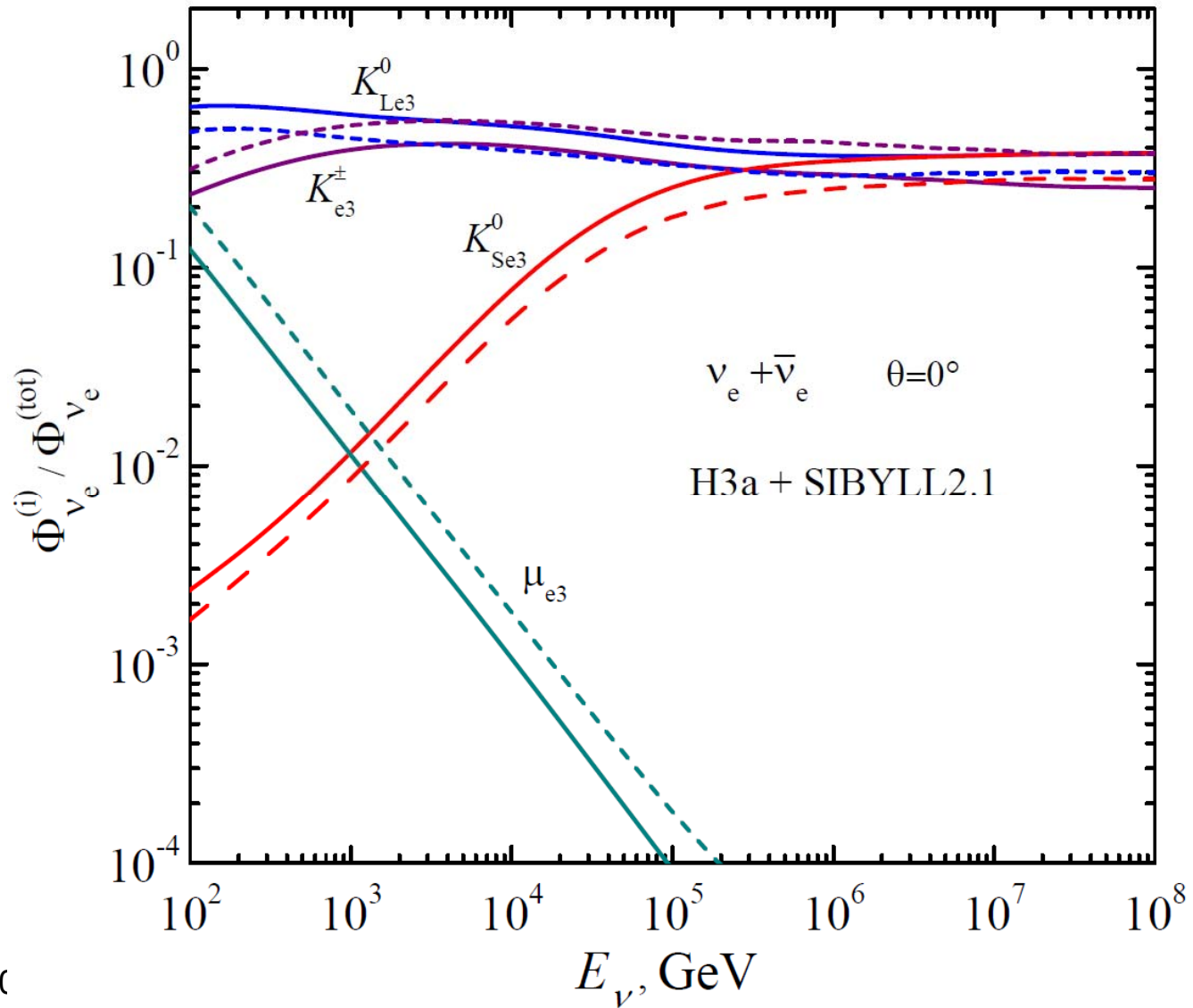
импульс первичной частицы, τ_f – время жизни первичной частицы в системе

покоя, $f(E_0, h, \theta)$ – дифференциальный энергетический спектр f , $F_\nu^{f\mu k}(E_0, E)$ –

дифференциальный энергетический спектр нейтрино в данном распаде

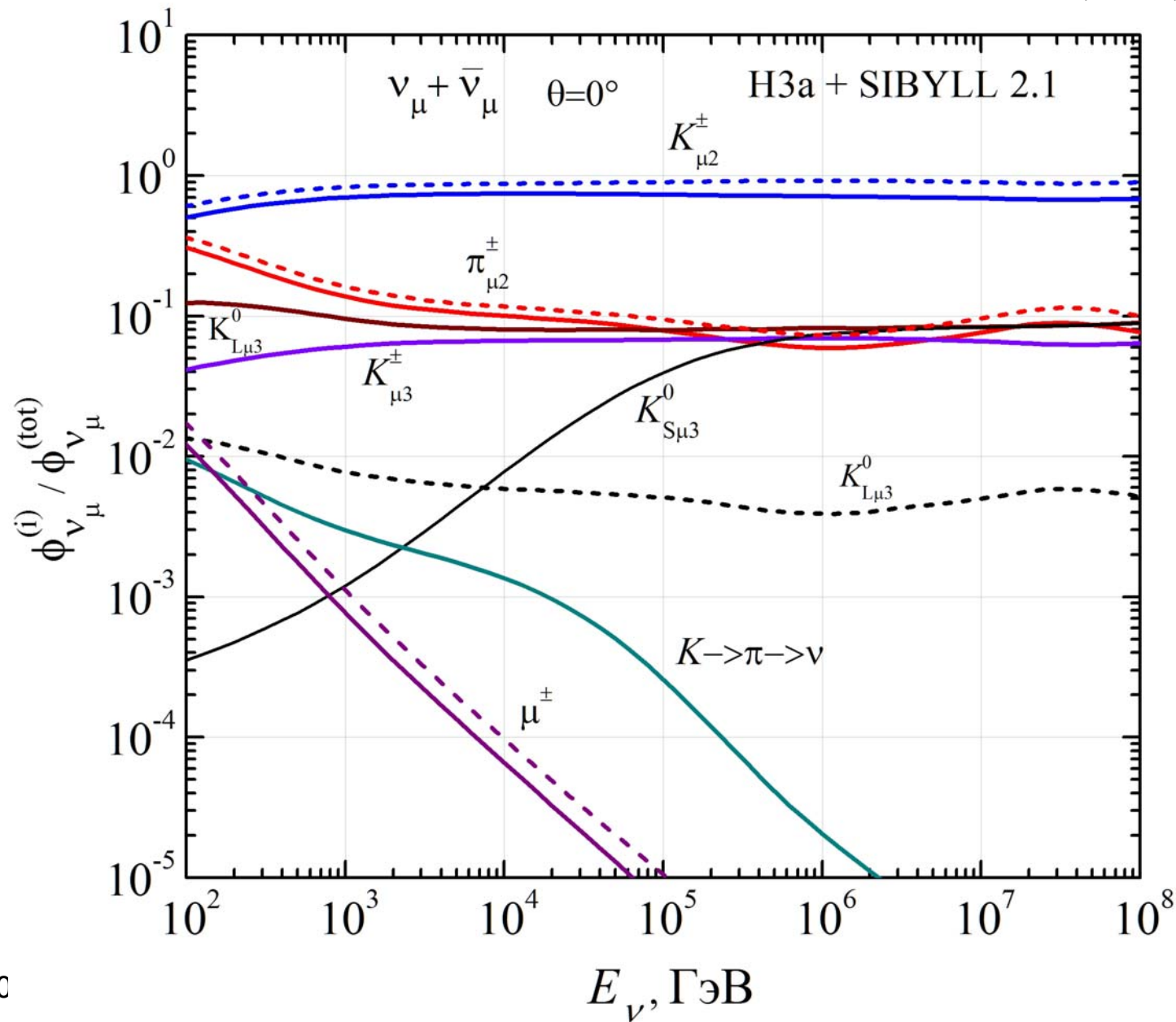
Парциальные вклады в поток

$\nu_e + \bar{\nu}_e$

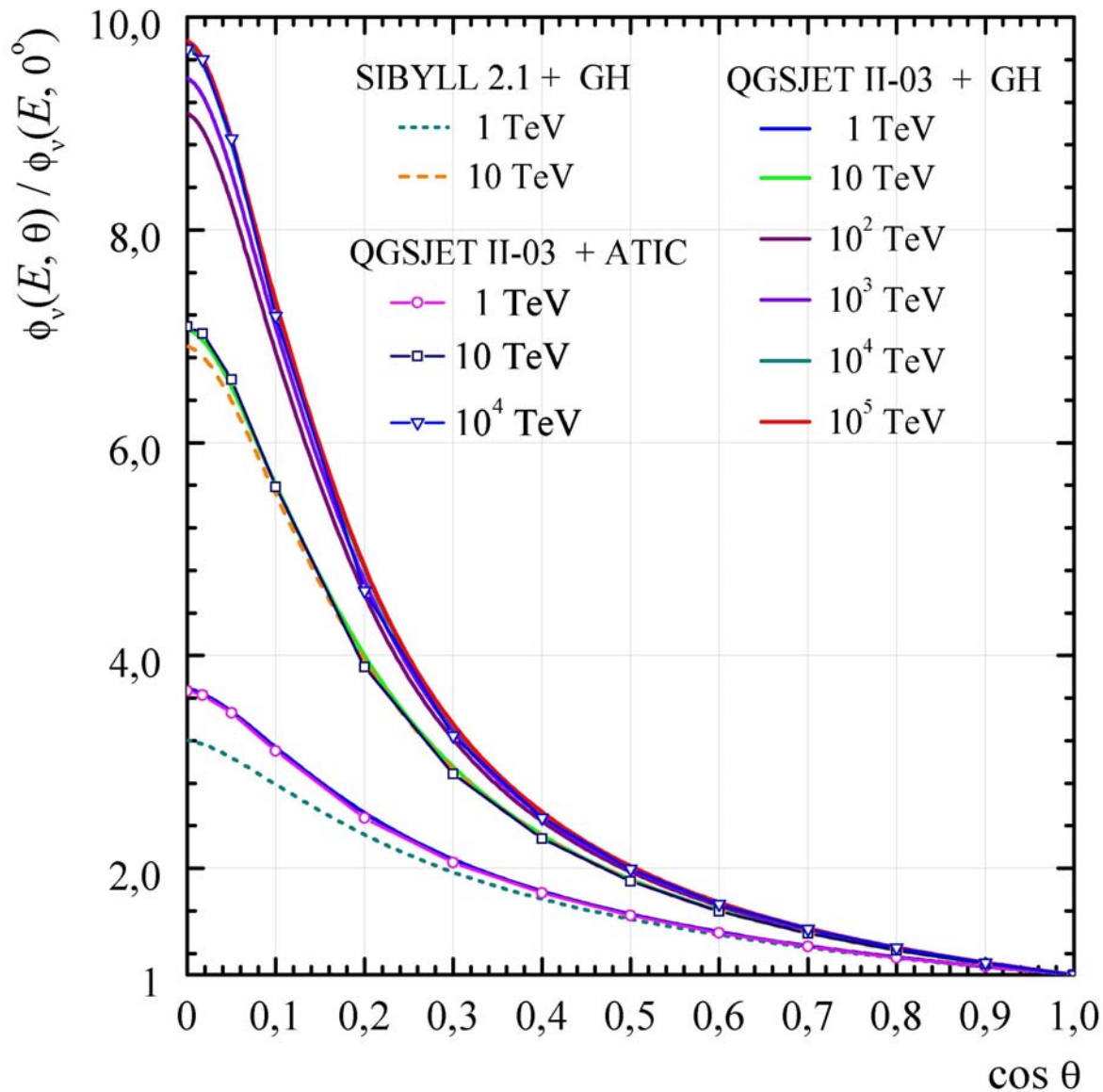


Парциальные вклады в поток

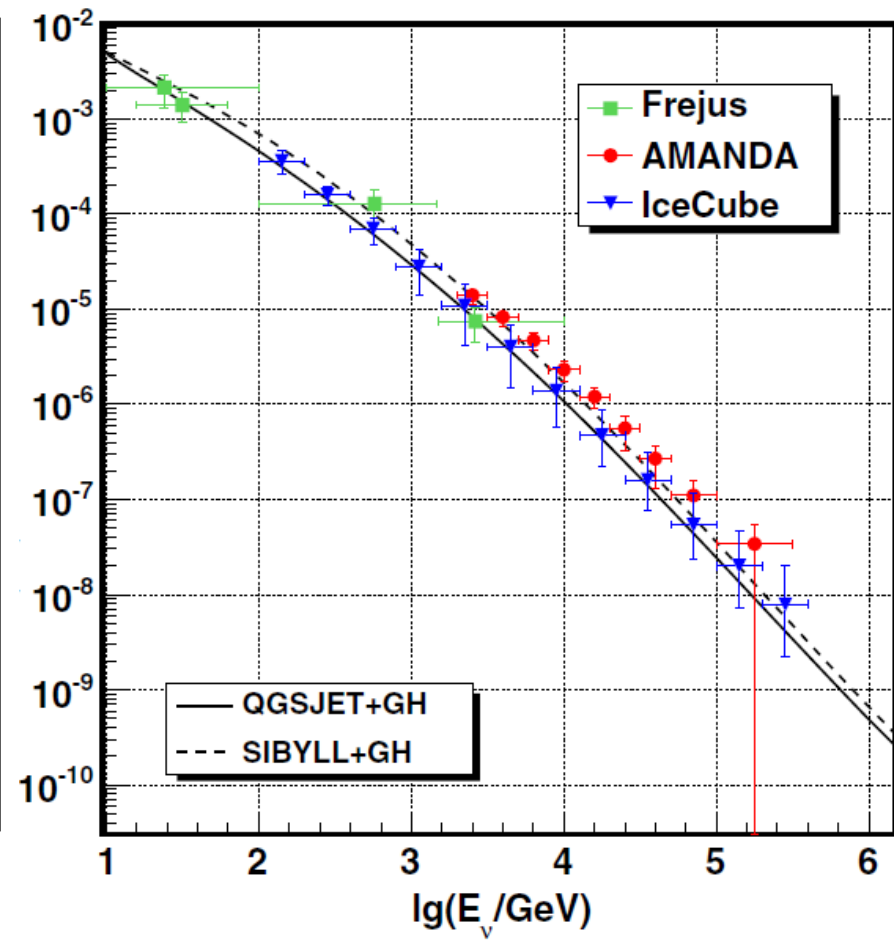
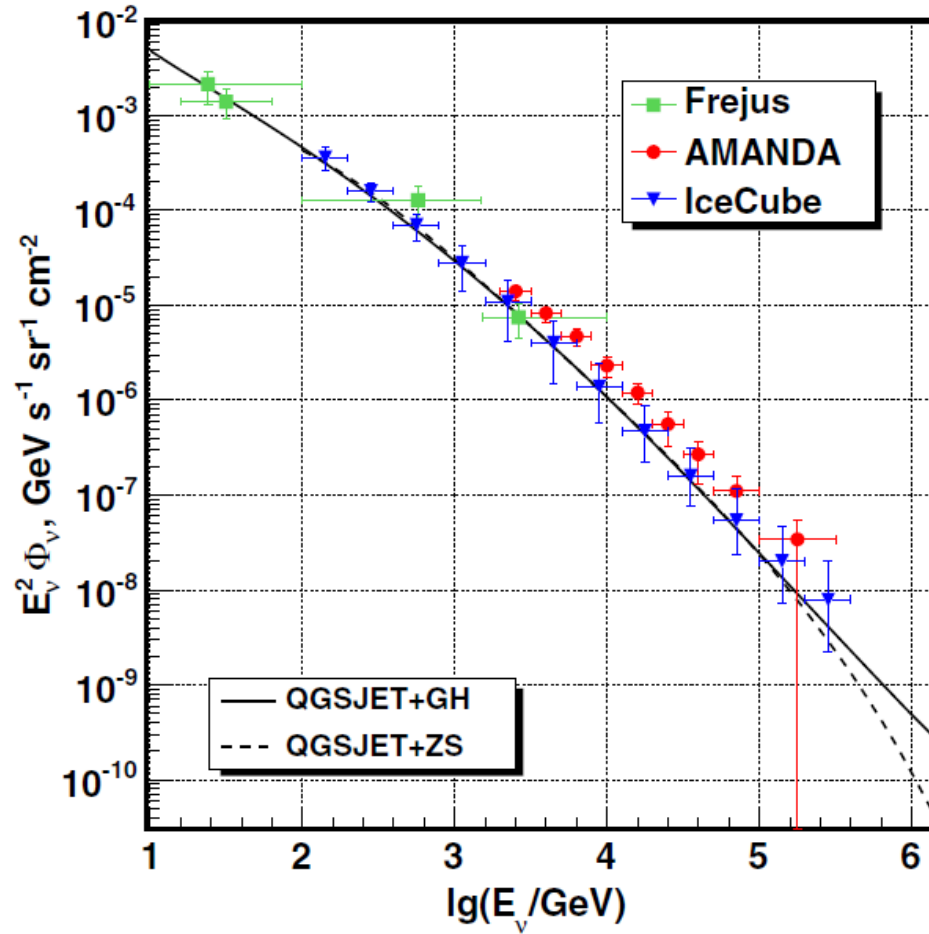
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$



Зенитно-угловое распределение мюонных нейтрино в атмосфере Земли

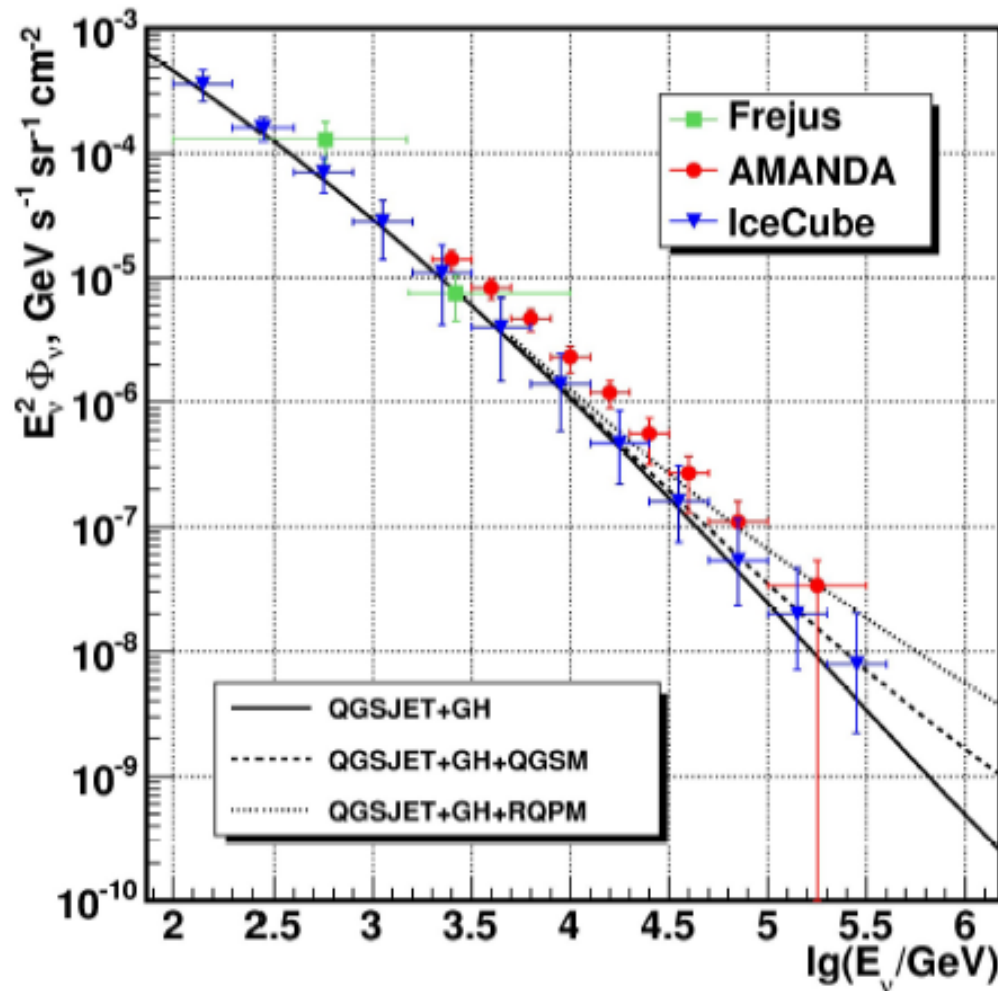


Атмосферные нейтрино: эксперимент



Prompt atmospheric muon neutrinos-I

IceCube experiment and prompt neutrino models



solid line:

the conventional neutrino flux

dotted:

sum of the conventional and prompt
neutrino flux due to RQPM

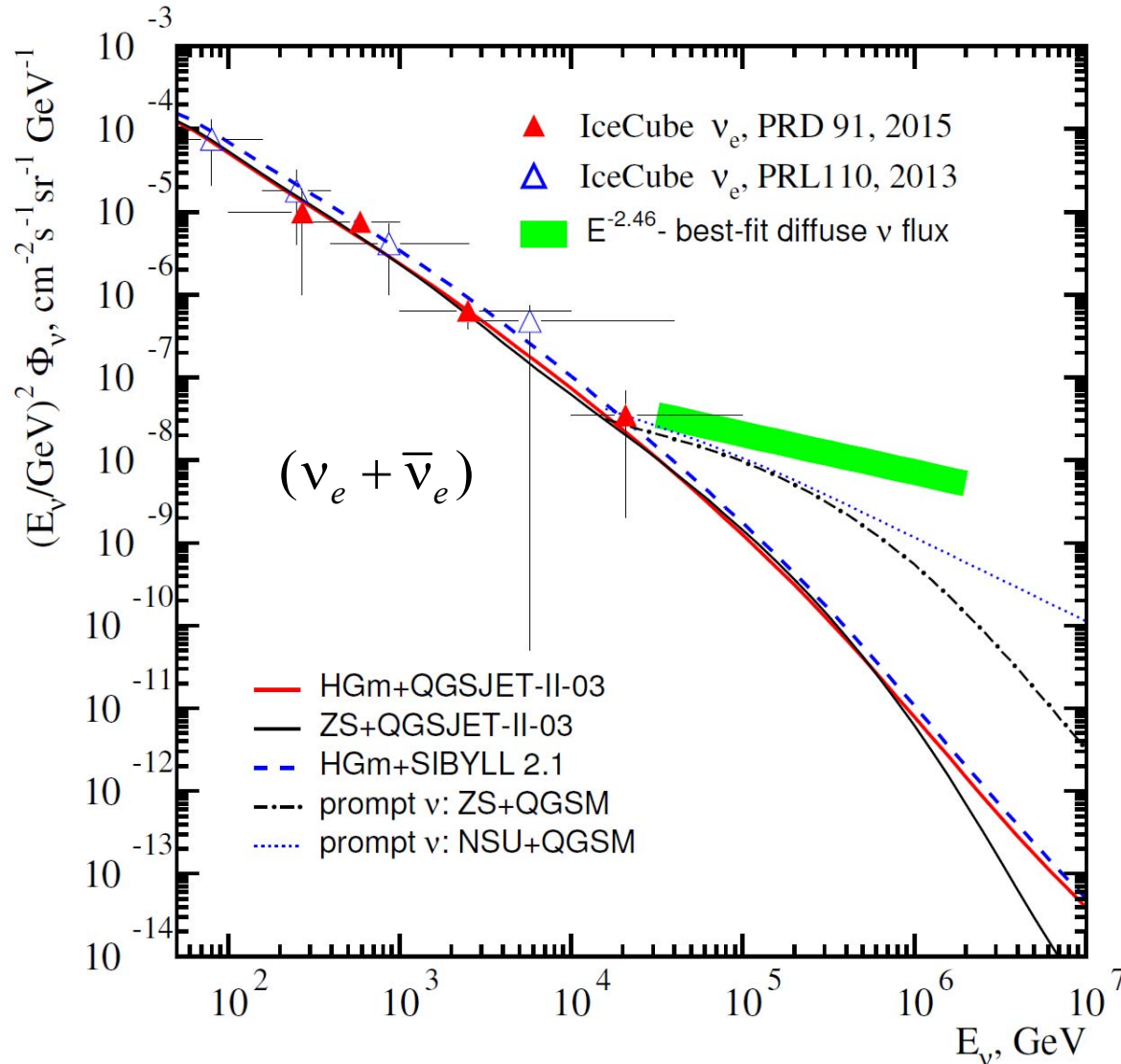
dashed:

sum of the conventional and prompt
neutrino flux due to QGSM

Nuovo Cim. C 12, 41 (1989); *Nuovo Cim. A*
111, 129 (1998); *Phys. Rev. D* 58, 054001
(1998)

Спектр атмосферных электронных нейтрино

(усредненный по зенитному углу)



IceCube ν_e : Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 151105;

M. Aarsten et al. (IceCube), Phys. Rev. D 91, 122004 (2015).

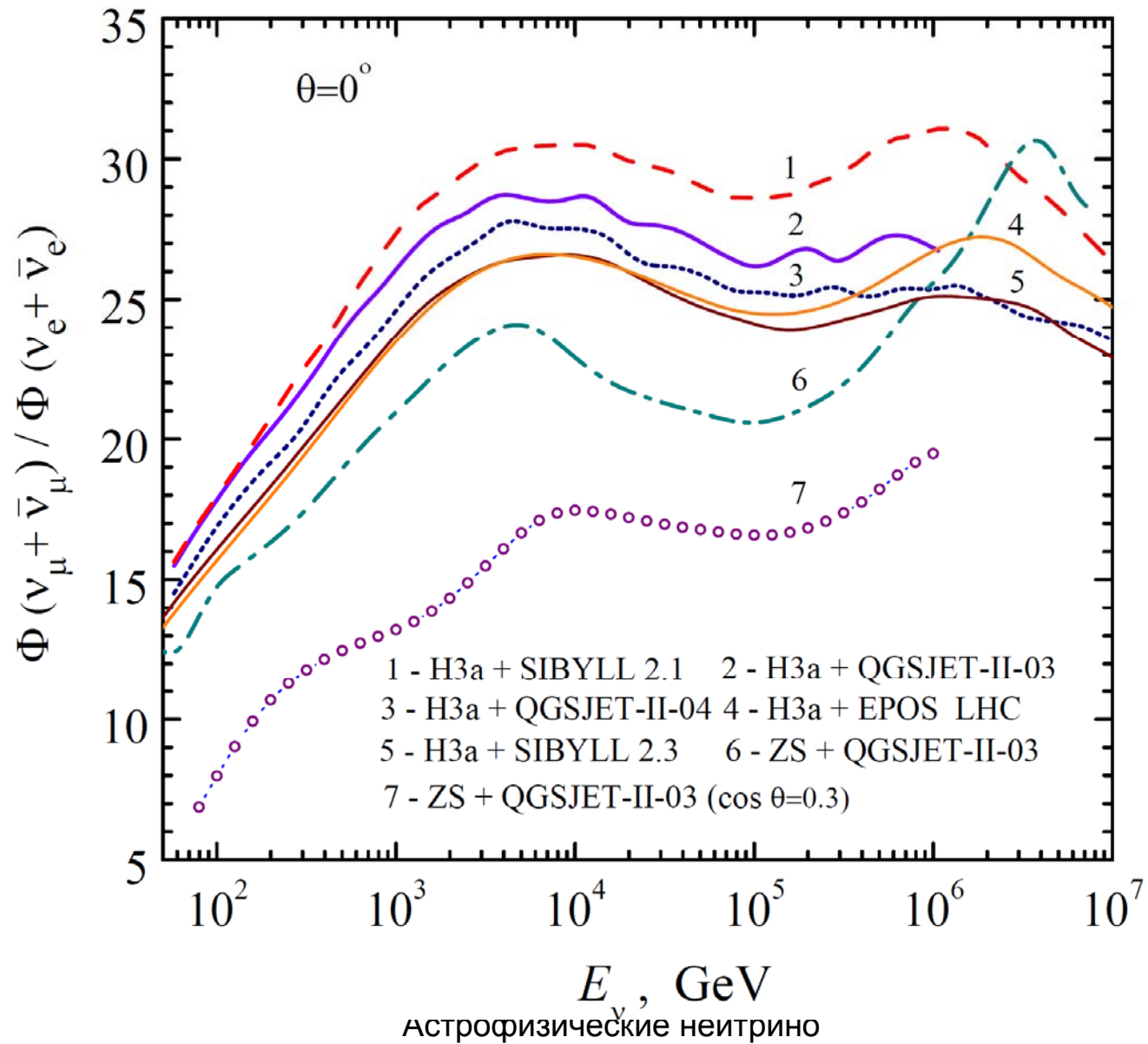
Адронные модели:
QGSJET II-03 и SIBYLL 2.1;
спектры КЛ: Зацепин-Сокольская (ZS) и Хиллас-Гайссер (HGm).

(HGm) T.Gaisser, Astropart. Phys. 24 (2012) 801, arXiv:1303.1431.

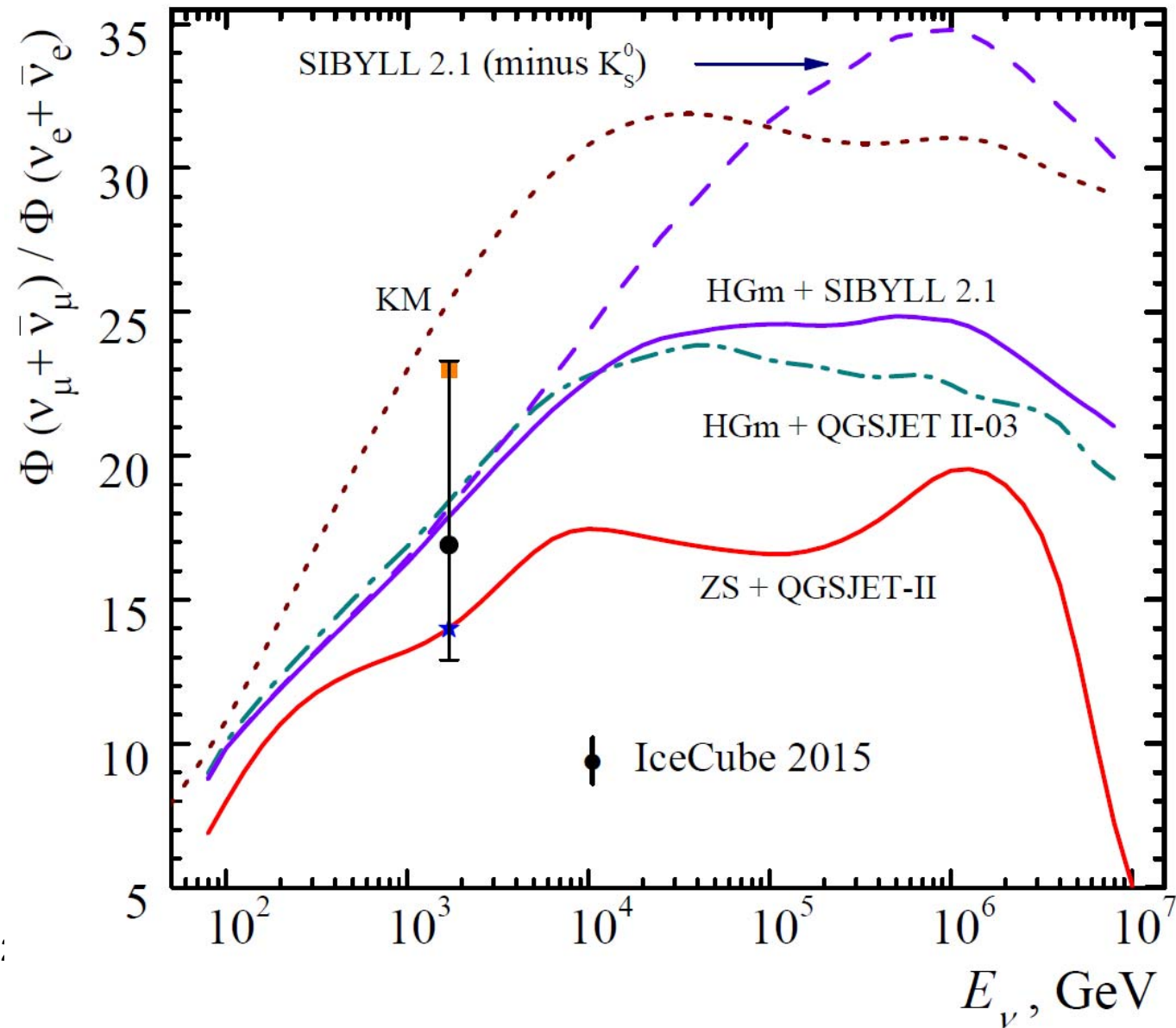
(ZS) V.I.Zatsepin, N.V.Sokolskaya, A & A. 458 (2006) 1.

T.S. Sinegovskaya et al. Phys. Rev. D 91 (2015) 063011

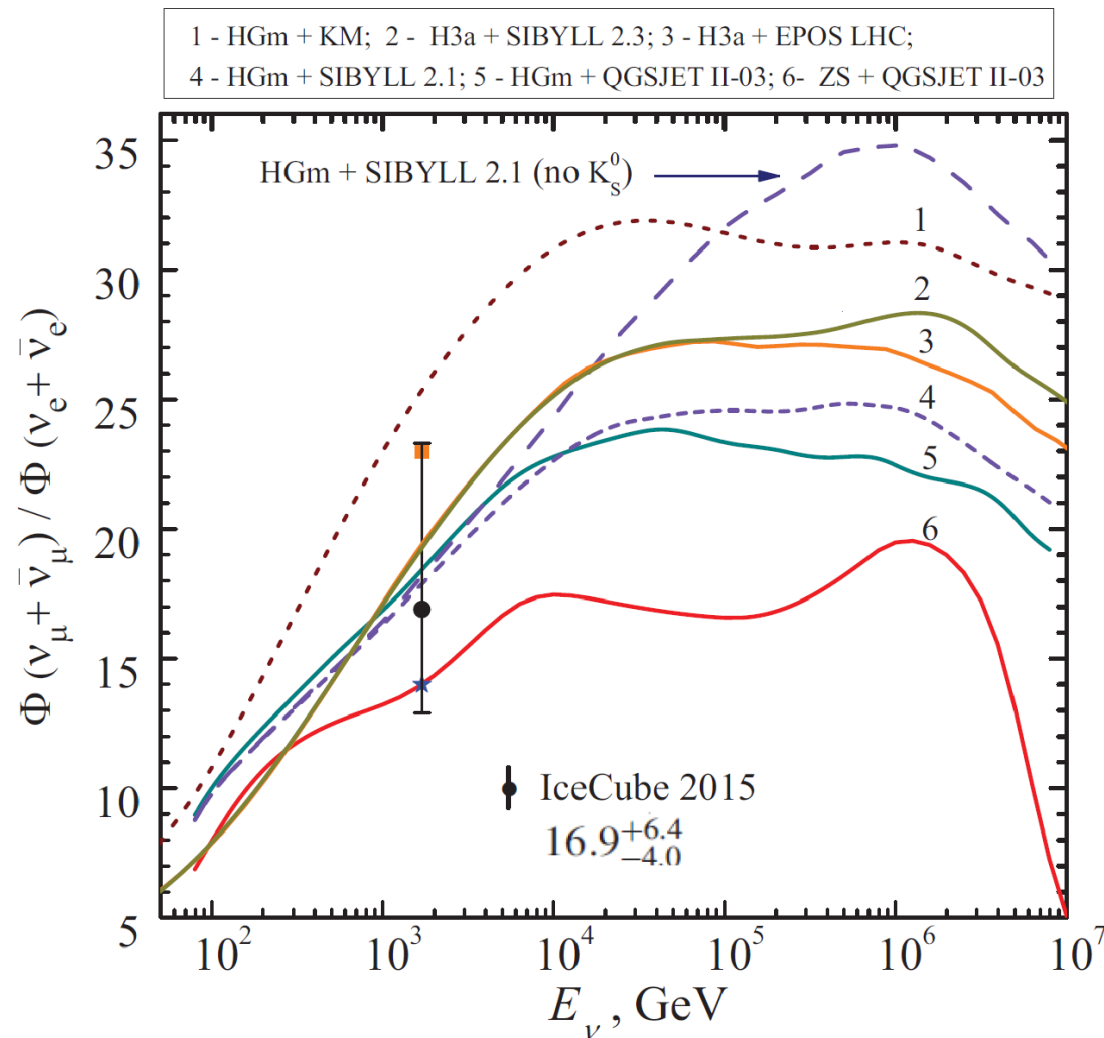
Флейворное отношение атмосферных нейтрино на вертикали



Усредненное по углу флейворное отношение атмосферных нейтрино



ν_μ / ν_e - отношение для атмосферных нейтрино



A D Morozova et al. J. Phys. Conf. Ser. 934 (2017) 012008

Impact of semileptonic decay of K_s^0 on the flavor ratio of neutrinos at 50–100 TeV is strong: this contribution in SIBYLL 2.1 leads to lowering of $R_{\nu\mu/\nu e}$ by factor ~ 1.28 at ~ 100 TeV (curve 4 in fig. 3) as compared to that if no K_s^0 decay (long dash curve).

M.G. Aarsten et al. 2015
Phys. Rev. D 91 122004

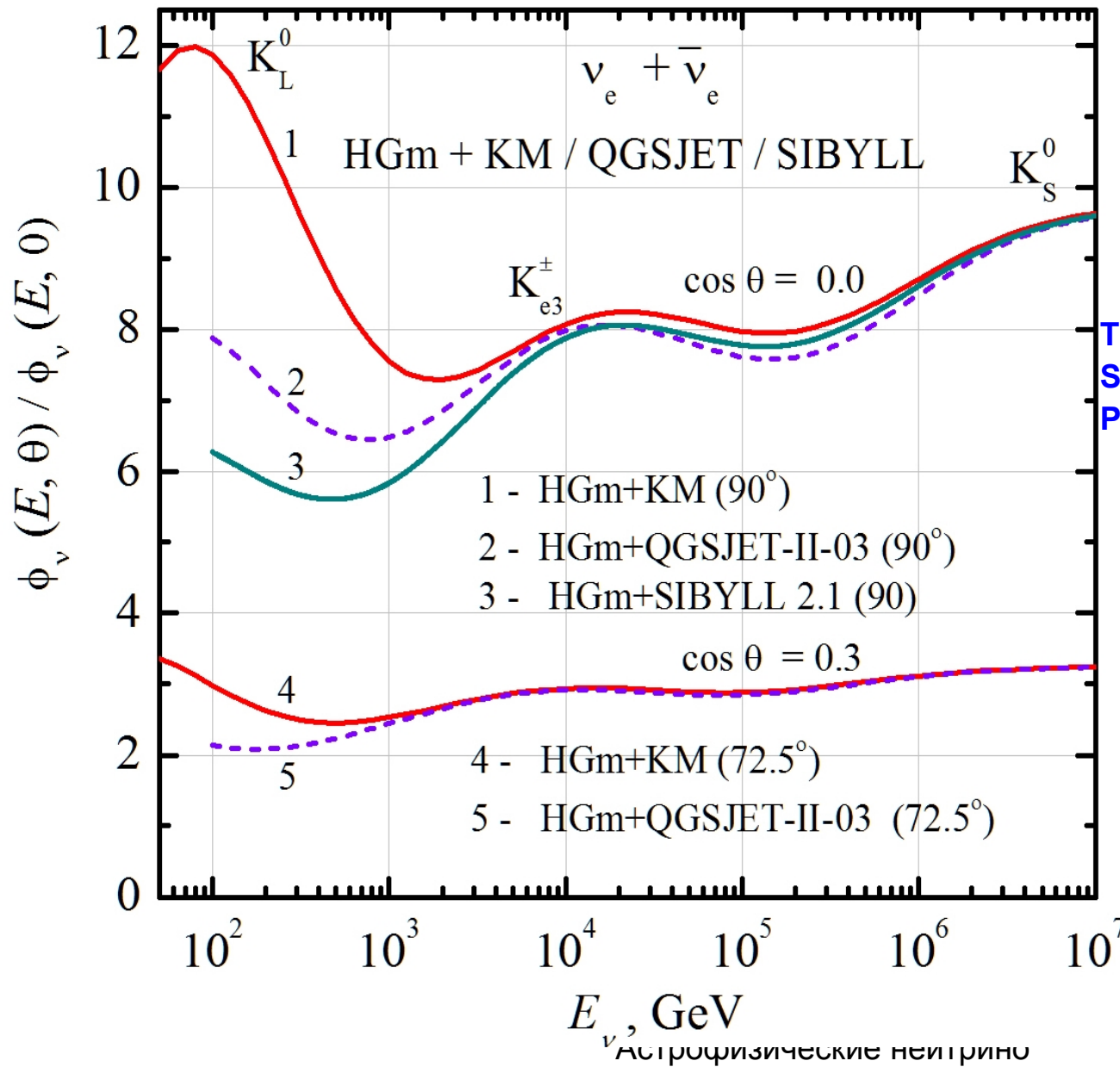
M. Honda et al. PR D 75, 043006 (2007)

G. D. Barr et al., PR D 70, 023006 (2004)

Fig 8. Atmospheric neutrino flavor ratio averaged and over zenith angles. The calculation for the models KM, SIBYLL 2.1 (2.3), QGSJET II-03, EPOS-LHC.

Зенитно-угловое усиление потока

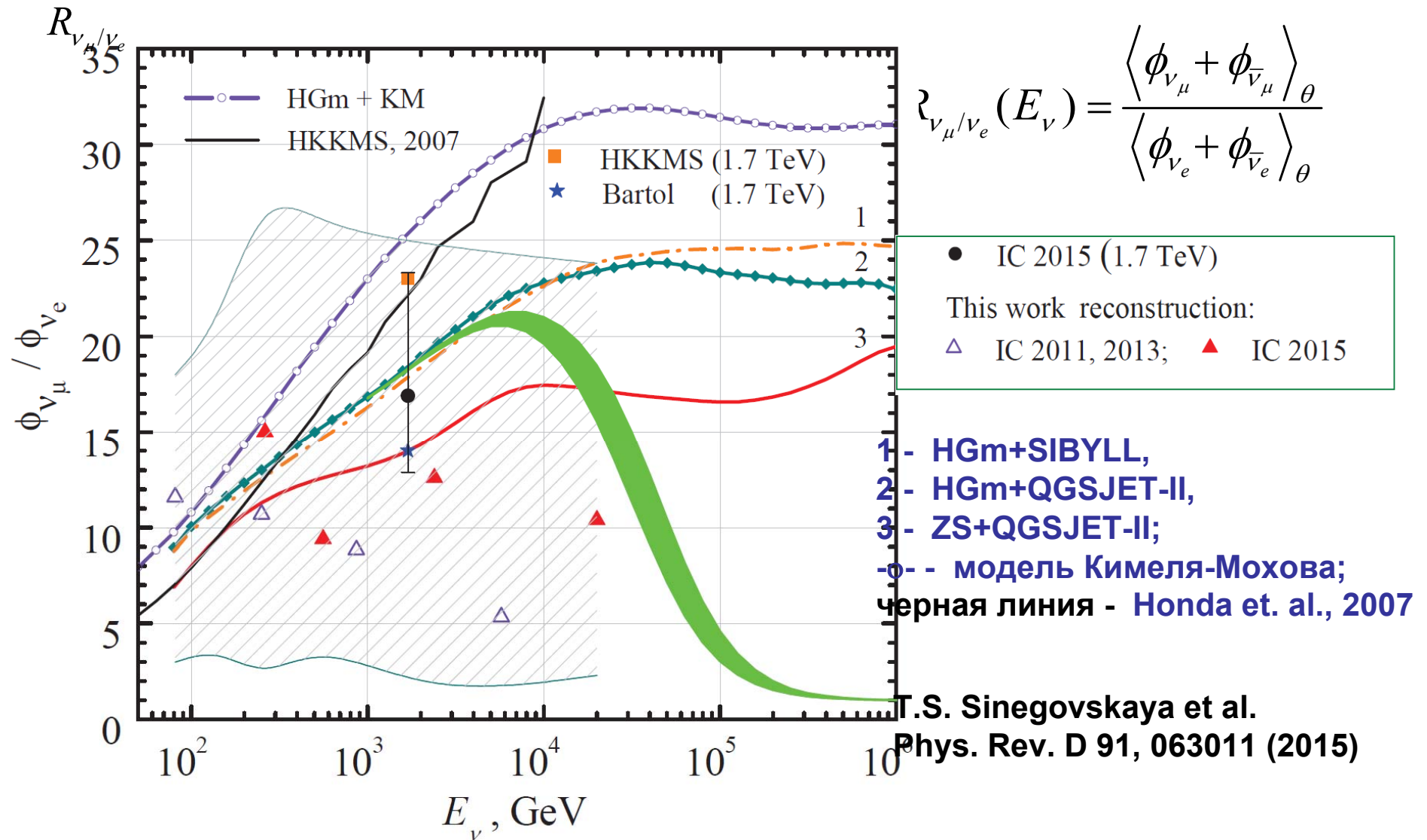
$(\nu_e + \bar{\nu}_e)$



«переключение»
 каонных
 источников

T. Sinegovskaya, A. Morozova,
 S. Sinegovsky,
 Phys. Rev. D 91 (2015) 063011

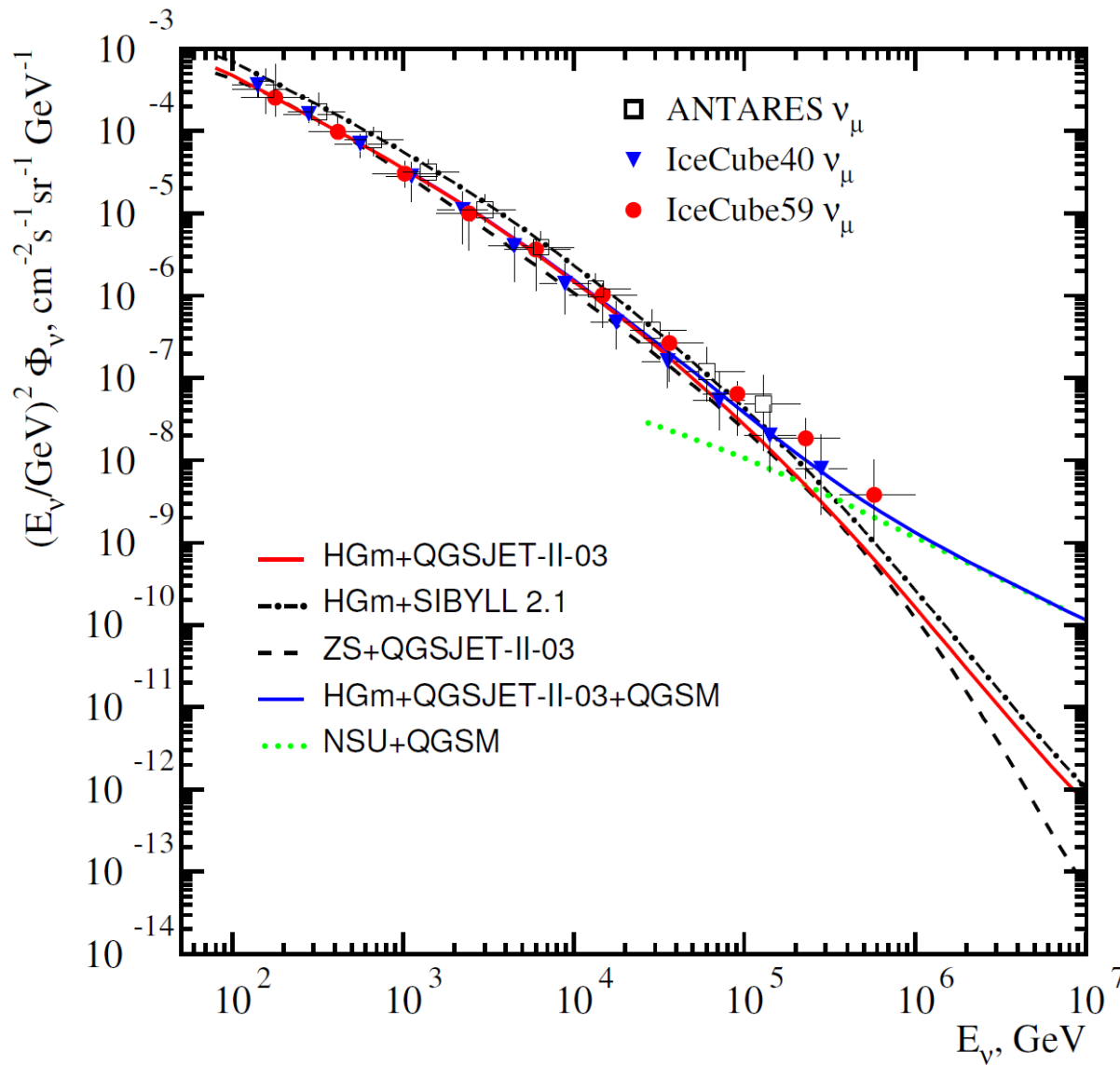
Флейворное отношение потоков атмосферных нейтрино



Спектр

$$\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}$$

(усредненный по зенитному углу)



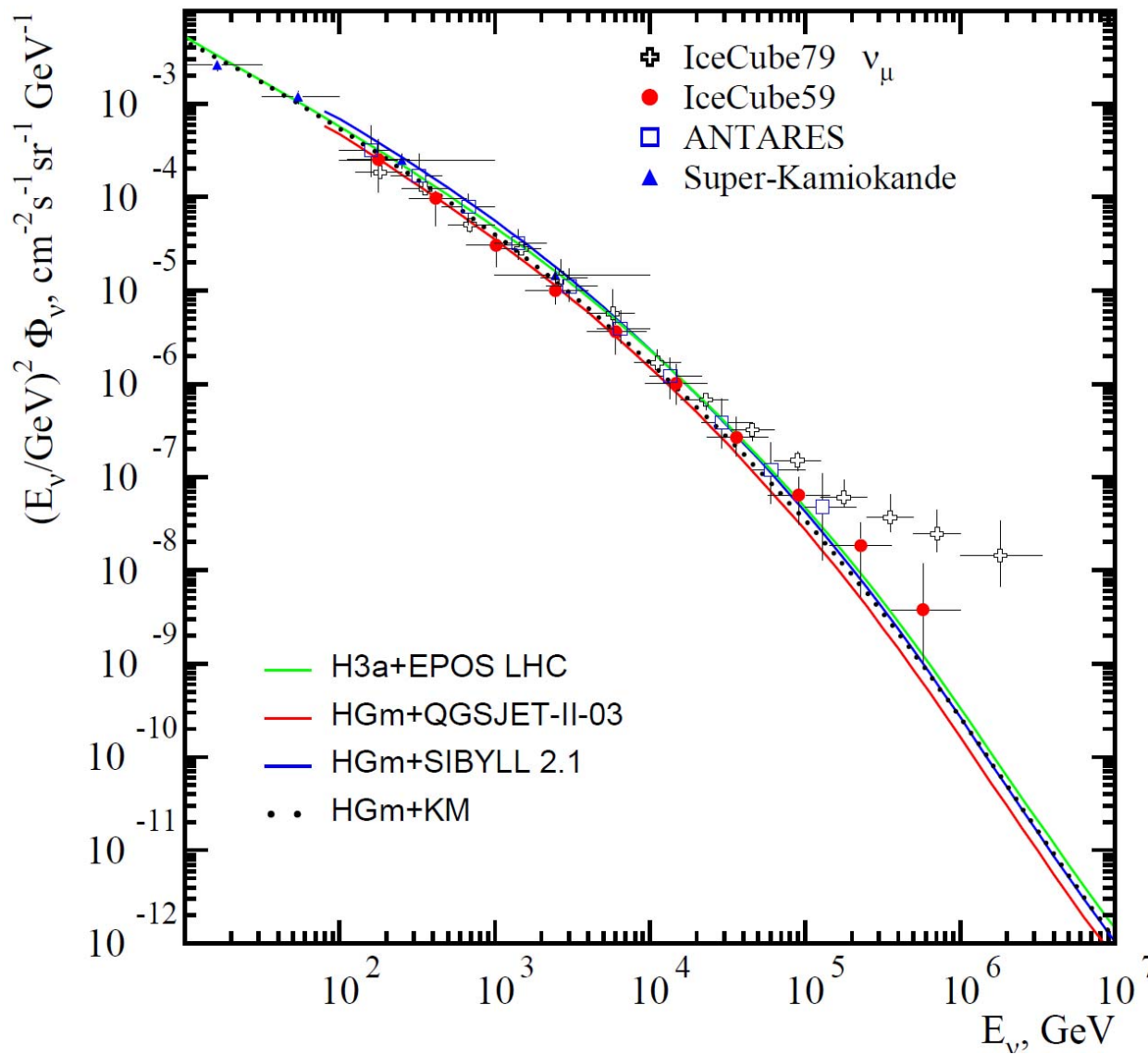
IceCube 40:
Phys. Rev. D 83, 012001 (2011)

IceCube 59:
Eur. Phys. J. C 75, 116 (2015)

ANTARES:
S. Adrian-Martinez et al.
Eur. Phys. J. C 73 (2013)
2606.

Расчет:
T.S. Sinegovskaya et al.
Phys. Rev. D 91, 063011 (2015);

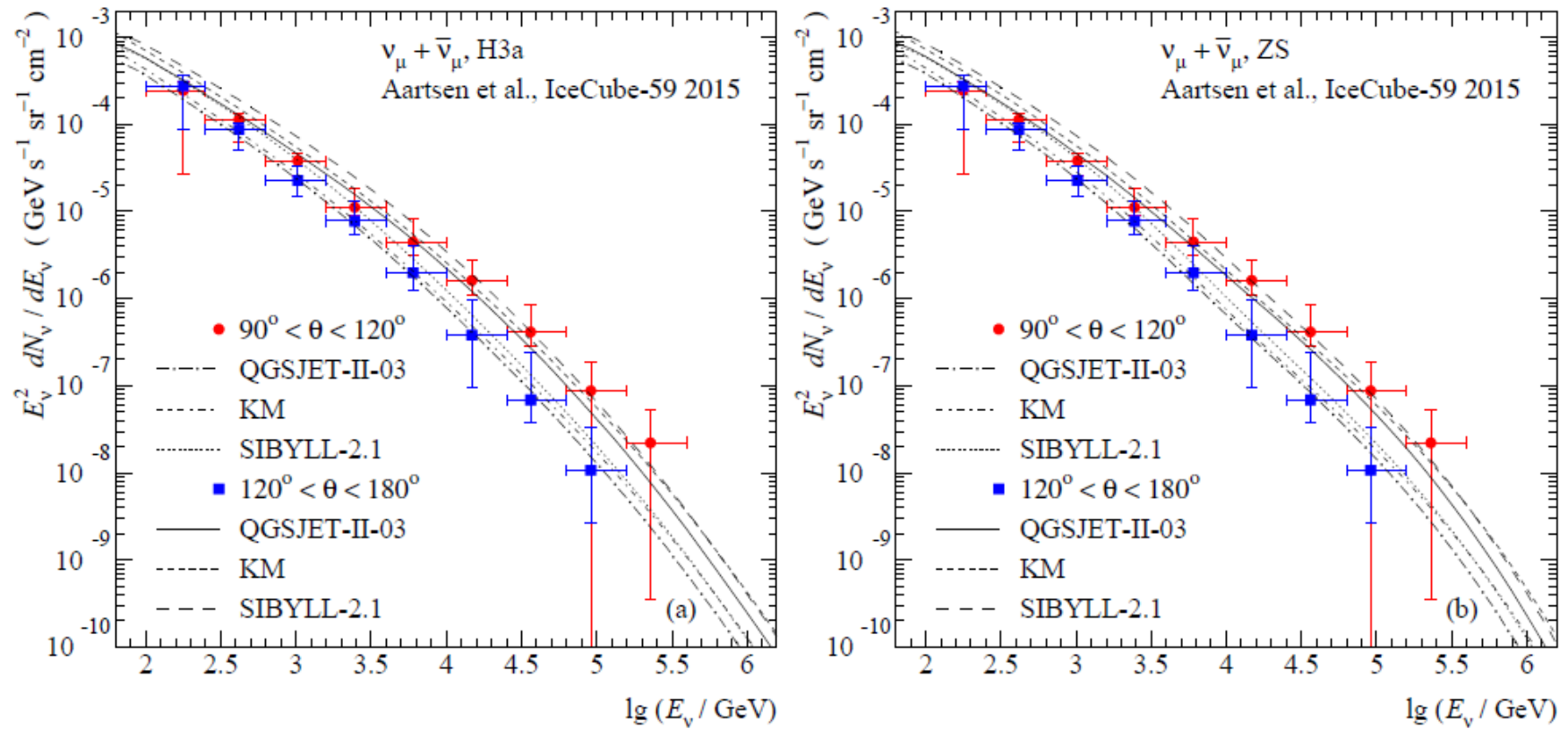
Атмосферные и астрофизические нейтрино



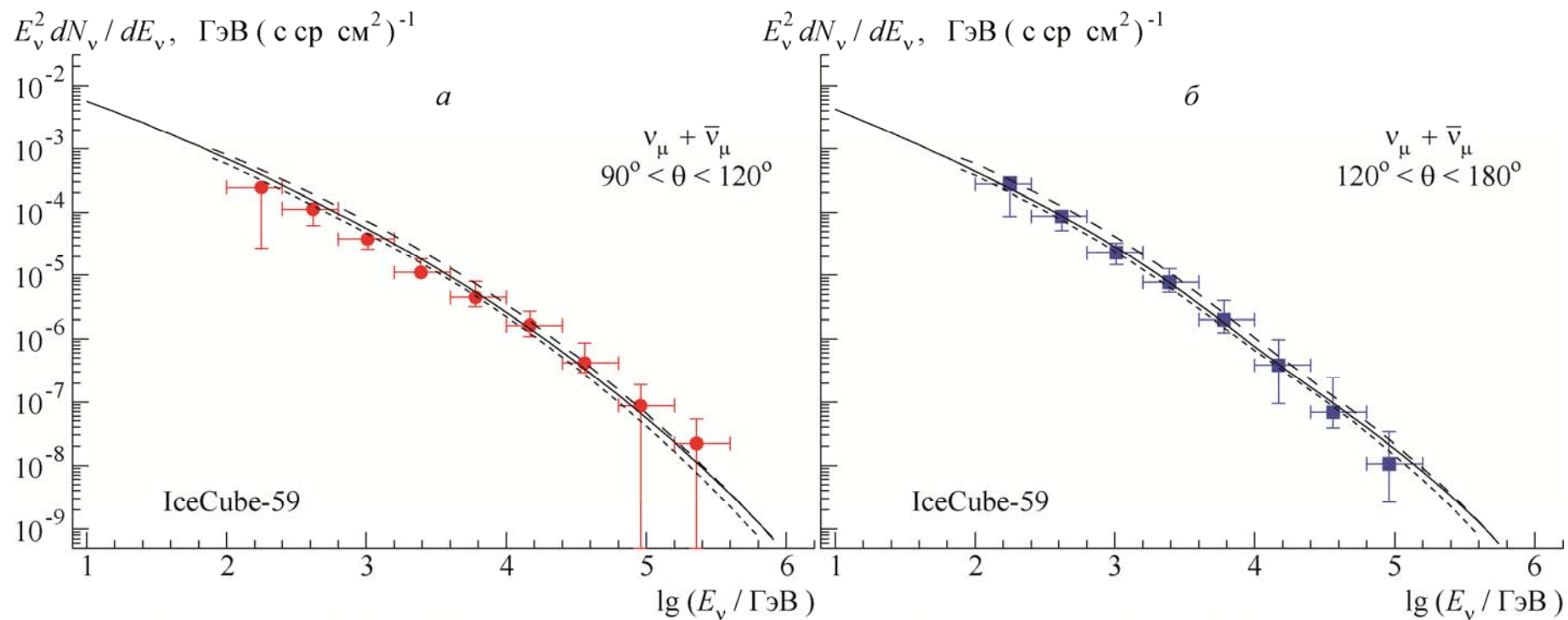
M.G. Aarsten et al.
(IceCube Collab.)

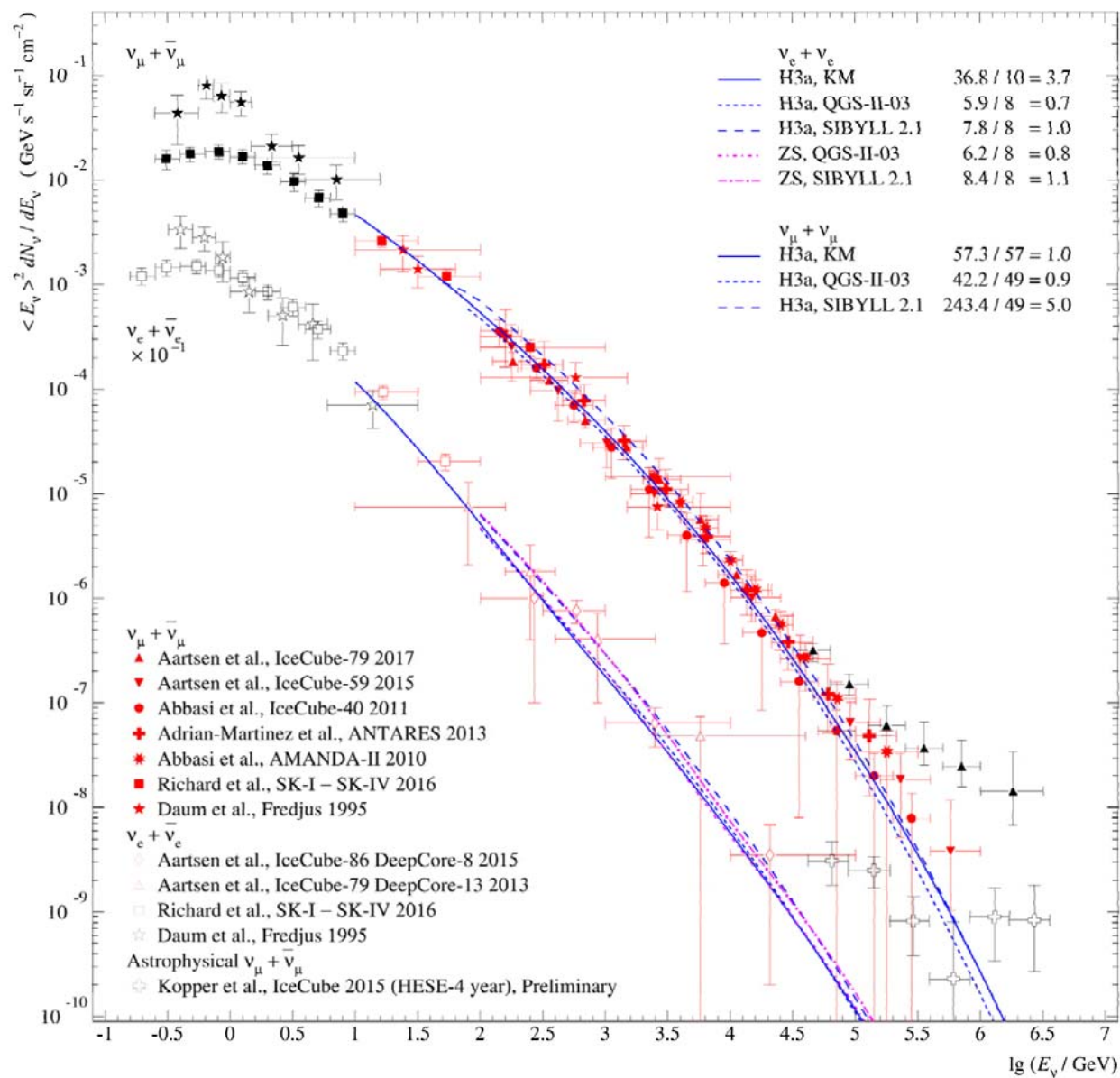
Eur.Phys.J. C77 (2017)
no.10, 692

А. Кочанов и др. 36 ВККЛ-2020



А. Кочанов и др. 36 ВККЛ-2020





**А. Кочанов и др.
36 ВККЛ-2020**

Спасибо за внимание!

Backup

Фундаментальный спектральный индекс КЛ в механизме DSA

$$\sigma = \frac{u_1}{u_2} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2} \quad \sigma = \frac{4}{1 + 3/M_1^2} \quad \varepsilon \approx 4 / M_1^2$$

$\varepsilon =$

$$\frac{dN_p}{dE} \cong C \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-(2+4c_s^2/V_S^2)} \propto E^{-\alpha}, \alpha \cong 2 + \varepsilon$$

$$\alpha(\sigma) = 1 + \frac{3}{\sigma - 1} = \frac{1 + 3/M_1^2}{1 - 1/M_1^2} \approx 2 + 4/M_1^2 + 1/M_1^4$$

ЧЫЧЫ

GRB 170817A – a multi-messenger transient

LIGO Hanford Observatory

- 17 августа 2017 г в 12:41:04 UTC детектор LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) и Virgo зарегистрировал гравитационную волну **GW170817**, которую связывают со слиянием нейтронных звезд двойной системы;
 - 17 августа 2017 г. , Fermi Gamma-Ray Burst Monitor зарегистрировал гамма-всплеск **GRB 170817A** – через 1.734 ± 0.054 с после сигнала LIGO.
 - Космический аппарат International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) также детектировал GRB 170817A. Fermi-GBM и INTEGRAL
 - **Это наблюдение - первое детектирование гравитационного и электромагнитного излучения от одного астрофизического объекта.**
- LIGO: гравитационное излучение от слияния нейтронных звезд,
время регистрации 12:41:04 UTC

FermiLAT: GRB 170817A – с временной задержкой ~ 1.7 s по отношению к GW170817 (гравитационный сигнал)

Сами по себе гравитационно-волновые характеристики события GW170817 не исключают слияния более компактных (чем NS+NS) объектов, таких, как кварковые звезды или черные дыры.

Multi-messenger observations of a binary neutron star merger

Abbott et al. ApJ Lett. 848:L12 (2017)

- On 2017 August 17 a binary neutron star coalescence candidate (**GW170817**) with merger time 12:41:04 UTC was observed through gravitational waves by the Advanced LIGO and Advanced Virgo detectors.
- Fermi Gamma-ray Burst Monitor независимо зарегистрировал гамма-всплеск (**GRB 170817A**) через ~ 1.7 сек после момента слияния звезд. Из гравитационного сигнала локализован участок неба в $(31^\circ)^2$ на расстоянии 40 ± 8 Мпк и восстановлены массы звезд Рентген и радио-излучение были обнаружены двойной системы, совместимые с массами нейтронных звезд.
- Позднее эти массы были определены в интервал $0.86 - 2.26 M_\odot$.
- УФ-наблюдения обнаружили транзиент, затухший за 48 часов. Эволюция опт. и ИК-излучения наблюдалась более 10 дней.
- Рентгеновское и радио-излучение были зарегистрировано через ~ 9 и ~ 16 дней
- Ни UHE гамма-излучение, ни нейтрино не были обнаружены.
- Эти наблюдения подтвердили гипотезу, что гравитац. возмущение **GW170817** возникло в результате слияния двух нейтронных звезд в галактике **NGC4993**

$m_1 \in (1.36 - 2.26) M_\odot$ $m_2 \in (0.86 - 1.36) M_\odot$ $m_2 / m_1 = 0.4 - 1.0$ $M_{tot} = (2.82_{-0.09}^{+0.14}) M_\odot$

The binary's chirp mass is defined as $\mathcal{M} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$. $\Rightarrow \mathcal{M} = 1.188_{-0.002}^{+0.004} M_\odot$

21.10.2020

С.Синелюцкий

84

Search for high-energy neutrinos from binary neutron star merger GW170817 with ANTARES, ICECUBE, and PAO

- The Advanced LIGO and Advanced Virgo observatories recently discovered gravitational waves from a binary neutron star inspiral. A short gamma-ray burst (GRB) that followed the merger of this binary was also recorded by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor (Fermi-GBM), and the Anticoincidence Shield for the Spectrometer for the International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL), indicating particle acceleration by the source.
- The precise location of the event was determined by optical detections of emission following the merger. We searched for high-energy neutrinos from the merger in the GeV–EeV energy range using the ANTARES, IceCube, and Pierre Auger Observatories.
- **No neutrinos directionally coincident with the source were detected within – 500 s around the merger time. Additionally, no MeV neutrino burst signal** was detected coincident with the merger. We further carried out an extended search in the direction of the source for high-energy neutrinos within the 14-day period following the merger, but found no evidence of emission. We used these results to probe dissipation mechanisms in relativistic outflows driven by the binary neutron star merger.

27.10.2020

С.Синеговский

85

Астрофизические нейтрино

- The non-detection is consistent with model predictions of short GRBs observed at a

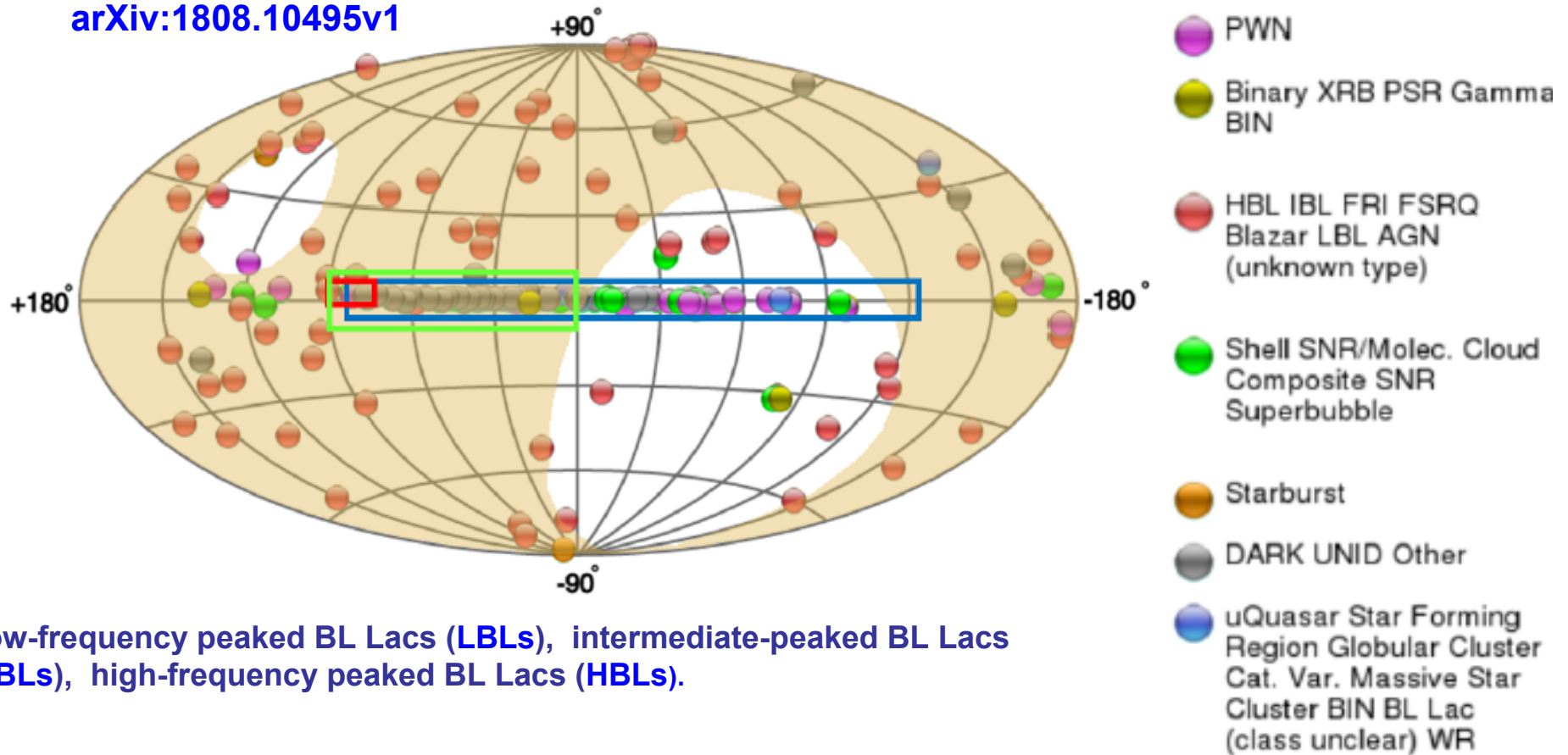
No neutrinos from BNS merger (GRB 170817A)

- The detection of GW170817 was rapidly followed up by the IceCube (Aartsen et al. 2017) and ANTARES (Ageron et al. 2011) neutrino observatories and the Pierre Auger Observatory (Aab et al. 2015a) to search for coincident, high-energy (GeV–EeV) neutrinos emitted in the relativistic outflow produced by the BNS merger.

- In a search for muon–neutrino track candidates, and contained neutrino events of any flavor, IceCube identified no neutrinos that were directionally coincident with the final localization of GW170817 at 90% CL (credible level), within ± 500 s of the merger.

- Additionally, no MeV supernova neutrino burst signal was detected coincident with the merger. Following the identification via electromagnetic observations of the host galaxy of the event, IceCube also carried out an extended search in the direction of NGC 4993 for neutrinos within the 14 day period following the merger, but found no significant neutrino emission

-



low-frequency peaked BL Lacs (LBLs), intermediate-peaked BL Lacs (IBLs), high-frequency peaked BL Lacs (HBLs).

VHE gamma-ray sources in Galactic coordinates as of summer 2017 [8]. The blue rectangular area indicates the region of the H.E.S.S. Galactic plane survey [7]. The red rectangular area indicates the Region of VERITAS's Cygnus sky survey [9]. The green rectangular area indicates the Galactic plane shown by the HAWC collaboration [10]. The yellow shaded area indicates the sky coverage of the HAWC observatory.

Up to now, 2 LBLs, 8 IBLs, and 47 HBLs were detected in the VHE gamma-ray band

Эксперименты на космических аппаратах

Космические аппараты (спутники) :

- **Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2)** – первый большой спутник для γ -астрономии (детекторы – искровые камеры и сцинтилляторы)
Запущен в 1972 пробыл на орбите 6 мес.; детально просмотрено небо в диапазоне 20 МэВ - 1 ГэВ.
- **COsmic ray Satellite B (COS-B), 1975 - 1982 , 70 МэВ – 5 ГэВ;** первая полная карта
 γ -излучения из диска Галактики и первое детектирование γ -излучения внегалактического объекта – квазар 3C273.
- **ВерроSAX, 1996** (см. К. Постнов, УФН 169 (1999)) – дополнительные X-телескопы: 2 широкоугольные камеры (WFC, 2-30 кэВ) и узконаправленные спектрометры 0.1-10 кэВ и 2-10 кэВ, до 10^{-12} эргсм $^{-2}$ с $^{-1}$; положение с точностью до 1'.

Космические аппараты (спутники)

- **Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2)** – первый большой спутник для γ -астрономии (детекторы – искровые камеры и сцинтилляторы). Запущен в 1972 пробыл на орбите 6 мес.; детально просмотрено небо в диапазоне 20 МэВ - 1 ГэВ.
- **COsmic ray Satellite B (COS-B)**, 1975 - 1982 , 70 МэВ – 5 ГэВ; первая полная карта γ -излучения из диска Галактики и первое детектирование γ -излучения внегалактического объекта – квазар 3C273.
- “Реликт”, **COBE (Cosmic Background Explorer)**, 1992- 2006 – измерение спектра РИ и его анизотропии
- **Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)** - спутник NASA 1991- 2000 гг; состоит из 4х инструментов:
 - **Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)**
 - **Burst and Transient Source Experiment (BATSE)**
 - **Compton Telescope (COMPTEL)**
 - **Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)**

CGRO наблюдал γ -излучение до 30 ГэВ, обнаружил изотропное распределение космологических GRBs; EGRET открыл большое число внегалактических источников, в частности – блазары как источники НЕ γ -излучения.

Космические аппараты (спутники)

- Космический телескоп «Хаббл» (*Hubble Space Telescope, HST*) - 1990
- Chandra 1999 – рентгеновская обсерватория (NASA)
- WMAP 2003 (изучение СМВ)
- Swift, 2004 - X-ray и UV-optical telescopes обеспечивают локализацию GRB $\sim 3'$; gamma-ray telescope (Burst and Alert Telescope or BAT) детектируют всплеск, X-ray Telescope (XRT) и UV-Optical Telescope (UVOT) быстро (60-100 с) наводятся на этот участок, что обеспечивает наблюдение перехода от фазы prompt γ -ray к более низким частотам фазы послесвечения (afterglow)
- FERMI LAT 2008 (“наследник” CGRO)
- Planck 2013 (изучение СМВ)

Космический гамма-телескоп им. Э.Ферми

Fermi Gamma-ray Space Large Area Telescope (FermiLAT)

Телескоп FermiLAT (2008) детектирует γ -кванты 20 МэВ - 300 ГэВ,

используя конверсию γ -квантов в e^+e^- -пару: $\gamma + Z \rightarrow e^+ + e^- + Z$

FoV \sim 20% всего неба. Второй инструмент на борту спутника - монитор гамма-всплесков (Gamma-ray Burst Monitor)

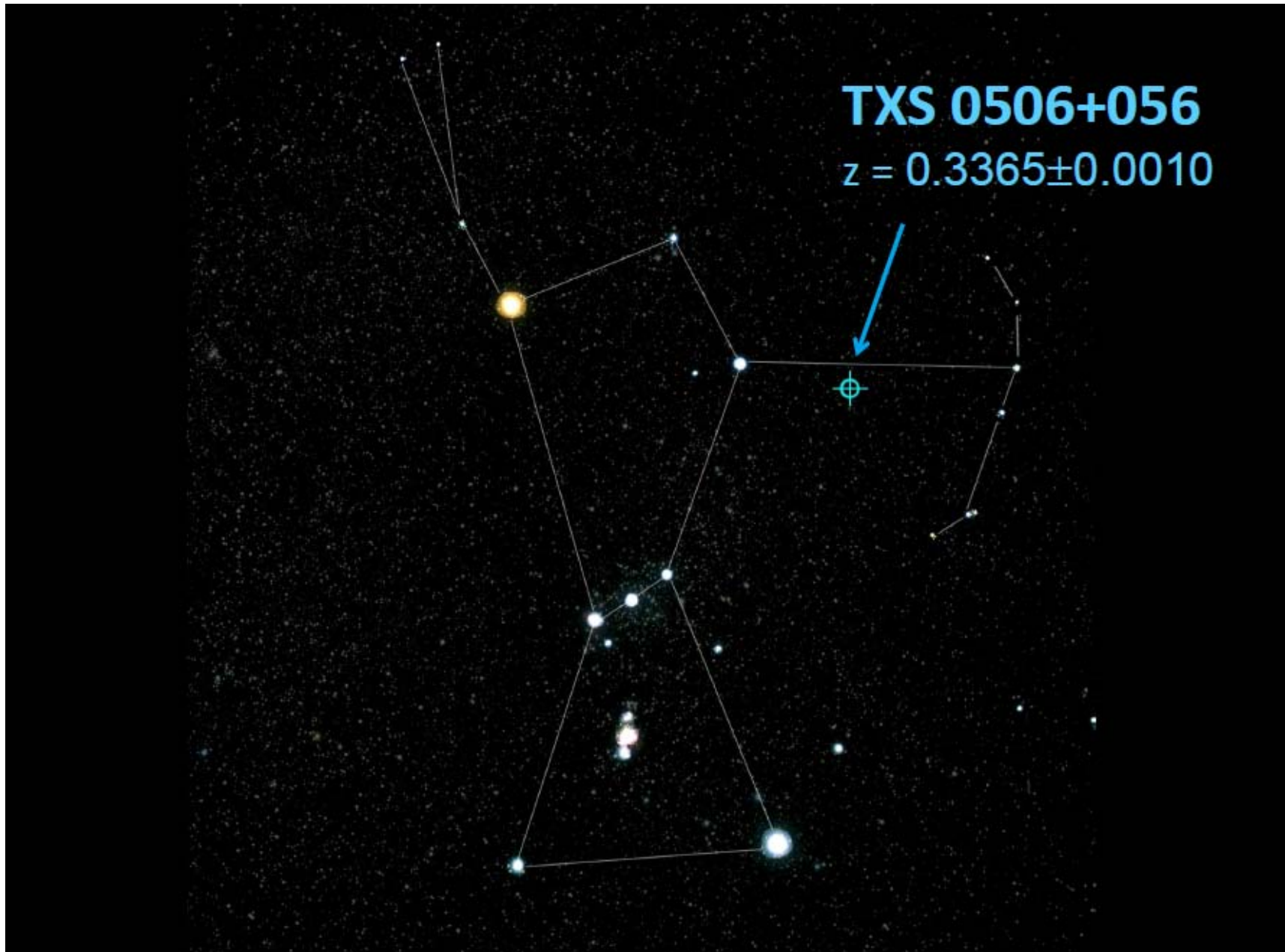
15 сентября 2008 года телескоп Ферми зарегистрировал рекордную вспышку гамма-излучения - GRB 080916C; расстояние до объекта –12 млрд. св. лет (созвездие Carina, Южное полушарие) .

Галактические γ/X -пузыри (bubbles, cocoons)

Ноябрь 2010 - сообщение о двух коконах, зарегистрированных FermiLAT

в гамма- и рентген-диапазонах. Коконны имеют протяженность около 8 кпк каждый (\sim 25 тыс. св.лет) в центре Галактики (выше и ниже ее плоскости).

Природа коконов пока непонятна, гипотеза: пузыри возникли в результате активности сверхмассивной чёрной дыры, находящейся в центре Галактики. Предположительно, возраст пузырей составляет миллионы лет.



TXS 0506+056

$z = 0.3365 \pm 0.0010$

Extragalactic source population

	sources
Blazars	1591
other AGN	32
star-forming galaxies	7
Unassociated	~ 600
Pulsars	72

ApJ (Supplement Series) 218:23, 2015

Источники гамма-всплесков (GRB)

- GRBs - Наиболее яркие объекты Вселенной с $L \sim 10^{51}$ эрг $\text{с}^{-1} = 10^{44}$ Вт за время $\sim 1-100$ с. Устроены они подобно AGN, но образуется черная дыра звездной массы, формирующие струи являются ультрарелятивистскими с лоренц-фактором $\text{or } \Gamma < \sim 10^3$.
- Два типа по длительности и спектру излучения: короткие- жесткие, длительность менее 2 с (интерпретируются как результат слияния двойной системы черных дыр или NS); длительные (до сотен секунд)- мягкие (результат гравит. коллапса массивной звезды).
- Имеются исключение - подкласс GRBs низкой светимости, часто их обнаруживают на близких расстояниях; предполагается, что их источник – быстровращающиеся *and jet-driven population of core-collapse supernovae*.

Модель файербола

- The most popular ‘fireball model’ [55] explains the high-energy emission of GRBs by the interactions of accelerated particles in relativistic shocks. If protons are present, high-energy neutrinos will be produced through the mechanisms described in equations (5) and (4), both during the event causing the GRB (precursor emission) and during the explosion itself (prompt emission) [57]. Again, the transient nature of the phenomenon is an asset for detection by neutrino telescopes .
- A particular class of events similar to long GRBs has also been proposed under the name of failed or ‘choked’ GRBs. In this case, the jet is so rich in baryons that it is unable to go through the envelope of the massive star. Such objects would therefore remain opaque to photons and be detectable only by HE- neutrinos or gravitational wave detectors. According to present estimations, their rate would be nonnegligible in the local Universe [58].

Starburst galaxies

- Starburst galaxies are other potential sources of highenergy neutrinos. These galaxies are very rich in massive stars in formation and have a higher density of supernovae.
- Recent observations have revealed TeV γ –ray emission from these objects [59, 60] with a possible interpretation in terms of hadronic mechanisms. Data suggest a cosmic–ray density three orders of magnitude above the one in the center of our Galaxy, making it a potential source of neutrinos.

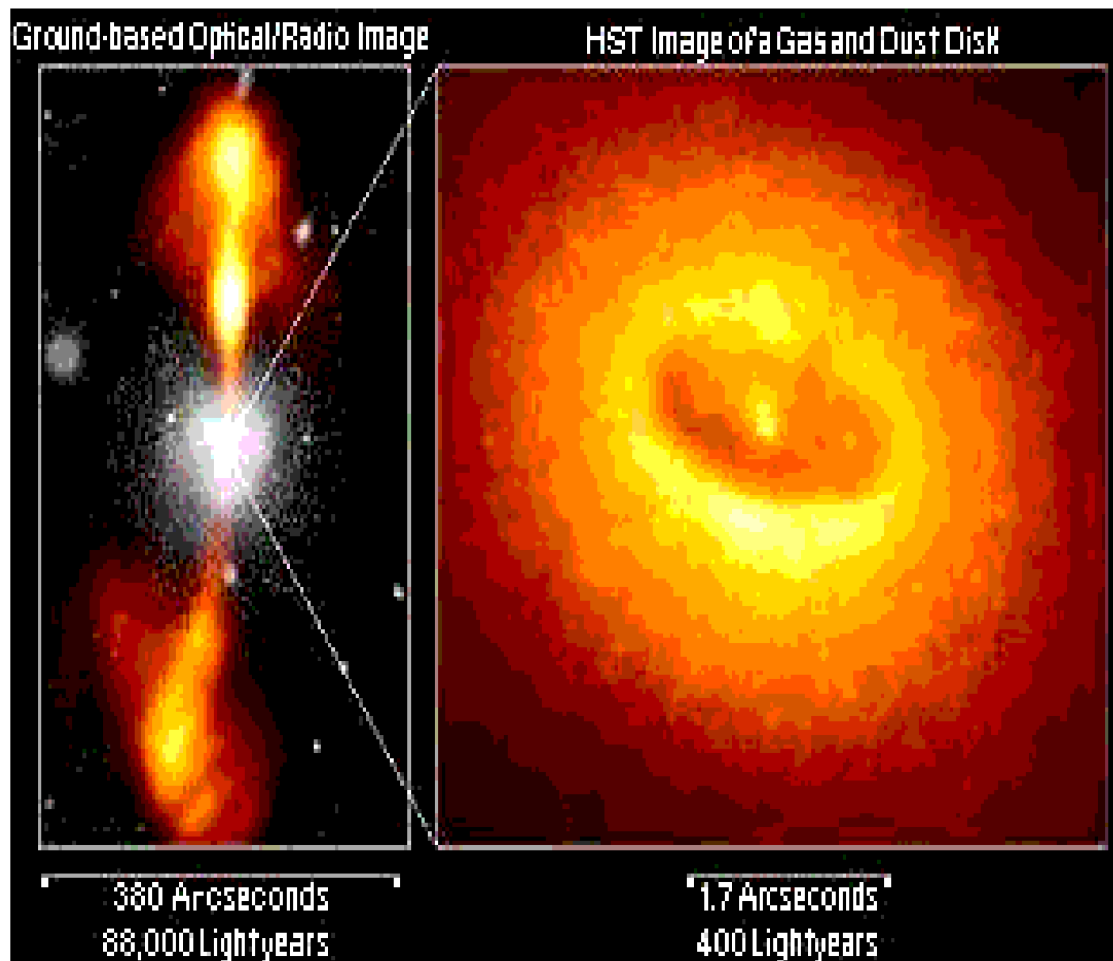
Квазар NGC 4261 (3C 270)

Слева:

радио-оптическое
изображение струй
(наземный телескоп) –
 $8.8 \cdot 10^4$ св. лет. \sim 27 кпк
в поперечнике.

Справа:

снимок HST - оптический
образ диска NGC 4261 -
1250 св. лет. в
поперечнике



R. Antonucci, ARAA 1993, v.31, 473-521

Hubble Space Telescope image

Эддингтоновский предел светимости

Пусть звезда состоит из водорода и доминирует излучение:

$$P \approx P_r, \quad P_r = \frac{1}{3} u(T) = \frac{1}{3} a T^4$$

Предельную светимость найдем из условия

$$P_r \leq P_g$$

Поток энергии в дифф. приближ.

$$\vec{j} = -D \vec{\nabla} u, \quad D = \frac{1}{3} c l_\gamma = \frac{c}{3 n \sigma_T} = \frac{c m_p}{3 \rho \sigma_T} = \frac{c}{3 \rho \kappa_T}$$

$$\kappa_T = \frac{\sigma_T}{m_p}$$

коэф. непрозрачности,

$$\sigma_T = (8\pi/3)(e^2 / m_e c^2)^2 \approx 6.5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$$

(сечение томсоновского рассеяния)

$$|\vec{j}| = \frac{L}{4\pi r^2}, \quad \frac{dP_r}{dr} = \frac{1}{3} \frac{du}{dr} = -\frac{1}{3} |\vec{j}| \frac{3\rho\kappa_T}{c} = -\frac{\rho\kappa_T L}{4\pi r^2 c}$$

градиент давления
излучения

$$\frac{dT_r}{dr} = -\frac{3\kappa_T \rho}{4acT^3} \frac{L}{4\pi r^2}$$

градиент температуры

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP_g}{dr} = -\frac{GM}{r^2}$$

условие устойчивости гравитационно-связанного объекта



$$L = L_{Ed}$$

$$dP_r \Big|_{L=L_{Ed}} = dP_g \implies L_{Ed} = 4\pi GMm_p c / \sigma_T = 4\pi cGM / \kappa_T \approx 1.38 \cdot 10^{31} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ Вт}$$

$(L_\odot = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ Вт} = 3.8 \cdot 10^{33} \text{ эрг / сек})$

Сверхкритический АД

Максимальный темп стационарной аккреции определяется эддингтоновской светимостью (при которой аккреция еще не останавливается давлением излучения):

$$\dot{M}_{\text{cr}} = \frac{L_{\text{Ed}}}{\eta c^2} \approx 10^{-8} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) M_{\odot} / \text{год} \approx 10^{18} \text{ г/с}$$

Сверхкритический режим АД:

$$\dot{M} > \dot{M}_{\text{cr}}$$

При $L > L_{\text{Ed}}$ давление излучения больше гравитационного притяжения.

В этом режиме часть вещества отбрасывается излучением - “звездный ветер” АД.

Узконаправленные релятивистские струи – крайнее проявление сверхкритического режима АД. В частности, в двойной рентгеновской системе SS433 (микроквazar) наблюдаются струи частиц со скоростью 0.26 с .

AGN: какие частицы ускоряются?

Заряженные частицы (**e**, **p**) ускоряются до высоких энергий в счет за счет механизма Ферми 1-го порядка.

Преобладают **e** или **p**, пока неясно (два конкурирующих направления - "лептонное" и "адронное"). Электроны конечно присутствуют - наблюдаются широкие полосы синхротронного излучения.

Если доминируют **e**, то в процессах обратного комптоновского рассеяния низкоэнергетических фотонов могло бы генерироваться жесткое γ -излучение. Мягкие фотоны излучаются диском или облаками газа или пыли вокруг.

Если доминируют **p**, то взаимодействуя с излучением и газом они могли через процессы фоторождения пионов генерировать γ -излучение и нейтрино высоких энергий.

Оценка светимости AGN на основе измерений космических лучей

$$\rho(E > E_{ankle} \sim 10^{19} \text{ eV}) = \frac{4\pi}{c} \int E \frac{dN_p}{dE} dE \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3} \quad (\text{из измерений})$$

$$\rho \approx \rho_{EG} \quad \rho = qt_{esc} = qt_{diff} \sim qt_H = \frac{q}{H_0} \sim q \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

$$q_{EG} = \rho_{EG} H_0 \approx 3 \cdot 10^{36} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-3} \\ \approx 10^{44} \text{ эрг год}^{-1} \text{Мпк}^{-3}$$

скорость генерации плотности энергии или удельная светимость (мощность) внегалактических источников КЛ (светимость ед. объема)

из наблюдений: $n_{AGN} \sim 10^{-7} \text{ Мпк}^{-3}$, $L_{AGN} \sim 10^{44} \text{ эрг} \times \text{с}^{-1} \approx 3 \cdot 10^{51} \text{ эрг} \times \text{год}^{-1}$

$$q_{AGN} = n_{AGN} L_{AGN} \sim 3 \cdot 10^{44} \text{ эрг год}^{-1} \text{Мпк}^{-3} = E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}} \quad (q \approx \int_{E_{CR}} E \frac{d\dot{n}}{dEx})$$

$$\frac{dn_\nu}{dE_\nu} \sim \frac{dn_{CR}}{dE_{CR}} \sim \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}} t_H \sim (\rho_{EG} / t_H) q_{AGN} t_H E_{CR}^{-2} \implies \phi_\nu \equiv \frac{c}{4\pi} \frac{dn_\nu}{dE_\nu} \propto \frac{c}{4\pi} \rho_{EG} E_\nu^{-2}$$

GRB нейтрино с энергиями ~ ПэВ (2)

Кинетическая энергия протонов фajerбола (ускоренных на стадии расширения ф.) \longrightarrow π -мезоны \longrightarrow поток нейтрино

Оценим долю этой энергии: $f_\pi \cong \frac{\delta R'}{\lambda_{p\gamma}} \eta$, $\lambda_{p\gamma} = 1 / (n_\gamma \sigma_{p\gamma})$,

$\delta R' = \Gamma c \Delta t$ – толщина излучающей оболочки, $\Delta t \sim 0.01 \text{c}$; $\eta \equiv \langle x_{p \rightarrow \pi} \rangle \approx 0.2$,

$$f_\pi \cong \eta \Gamma c \Delta t n_\gamma \sigma_{p\gamma}, \quad \sigma_{p\gamma \rightarrow \pi X}^{\max} \cong 5.4 \cdot 10^{-28} \text{cm}^2 \quad E_\gamma = \Gamma E'_\gamma, \quad R' = 2\Gamma^2 c \Delta t$$

$$n_\gamma = \frac{u'_\gamma}{E'_\gamma} = \frac{L_\gamma (\Delta t / \Gamma)}{4\pi R'^2 \delta R' (E_\gamma / \Gamma)} = \frac{L_\gamma}{16\pi c^3 \Delta t^2 \Gamma^5 E_\gamma} \quad (n_\gamma - \text{плотность фотонов в СФ}; \\ u'_\gamma - \text{плотность энергии фотонов})$$

$$u'_\gamma = \frac{L_\gamma \Delta t'}{4\pi R'^2 \delta R'} = \frac{L_\gamma \Delta t / \Gamma}{16\pi \Gamma^5 (c \Delta t)^3} = \frac{L_\gamma}{16\pi \Gamma^6 c^3 \Delta t^2} \quad L_\gamma \sim 10^{52} \text{эрг с}^{-1}$$

$$f_\pi \cong \frac{L_\gamma \sigma_{p\gamma} \eta}{16\pi c^2 \Delta t E_\gamma \Gamma^4} \approx 0.13 \cdot \left(\frac{L_\gamma}{10^{52} \text{эрг} \cdot \text{с}^{-1}} \right) \left(\frac{1 \text{МэВ}}{E_\gamma} \right) \left(\frac{300}{\Gamma} \right)^4 \left(\frac{0.01 \text{с}}{\Delta t} \right)$$

GRB нейтрино с энергиями ~ ПэВ (3)

$f_\pi \cong \frac{\delta R'}{\lambda_{p\gamma}} \eta$ - доля энергии протонов файербола, конвертируемая в пионы в $p\gamma$ -взаимодействиях в области размером $\delta R' = \Gamma c \Delta t$

$\eta \equiv \langle x_{p \rightarrow \pi} \rangle \approx 0.2$ $\lambda_{p\gamma} = 1/(n_\gamma \sigma_{p\gamma})$

$E_\gamma = \Gamma E'_\gamma, R' = \Gamma^2 c \Delta t, \delta R' = \Gamma c \Delta t$

$n_\gamma = \frac{u'_\gamma}{E'_\gamma} = \frac{L_\gamma (\Delta t / \Gamma)}{4\pi R'^2 \delta R' (E_\gamma / \Gamma)} = \frac{L_\gamma}{4\pi c^3 \Delta t^2 \Gamma^5 E_\gamma}$

$L_\gamma \sim 10^{52} \text{ эрг } \text{с}^{-1}$

$\Delta t \sim 0.01 \text{ с}$

$\Gamma \sim 300$

$\sigma_{p\gamma} \sim 10^{-28} \text{ см}^2$

$f_\pi \cong \frac{L_\gamma \sigma_{p\gamma} \eta}{4\pi c^2 \Delta t E_\gamma \Gamma^4} \approx 0.13 \cdot \left(\frac{L_\gamma}{10^{52} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}} \right) \left(\frac{1 \text{ МэВ}}{E_\gamma} \right) \left(\frac{300}{\Gamma} \right)^4 \left(\frac{0.01 \text{ с}}{\Delta t} \right)$

$u_\nu = \frac{1}{2} f_\pi t_H q_{GRB},$ $q_{GRB} \sim 10^{-25} \text{ ГэВ} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{год}^{-1},$

$\phi_\nu \approx \frac{c}{4\pi} \frac{u_\nu}{E_\nu} = \frac{c}{4\pi} \frac{1}{E_\nu} \left(\frac{1}{2} f_\pi t_H q_{GRB} \right),$ $t_H \sim 10^{10} \text{ лет}$

Оценка потока нейтрино (~ ПэВ) от GRB в модели файербола,

Нормировка потока по данным КЛ сверхвысоких энергий; гамма-барстеры рассматриваются как источники КЛСВЕ с плотностью светимости q_{GRB}

поток нейтрино с энергией выше E_ν

$$\phi_\nu \approx \frac{c}{4\pi} \frac{\rho_\nu}{E_\nu} = \frac{c}{4\pi} \frac{1}{E_\nu} \left(\frac{1}{2} f_\pi t_H q_{GRB} \right), \quad q_{GRB} = \frac{d\rho_{UHECR}}{dt} \sim 4 \cdot 10^{44} \text{ эрг} \cdot \text{Мпк}^{-3} \cdot \text{год}^{-1}$$

$$E_\nu = \frac{1}{4} \eta E_p \approx 0.05 E_p > \frac{7 \cdot 10^5}{E_\gamma / 1 \text{ МэВ}} \left(\frac{\Gamma}{300} \right)^2 \text{ ГэВ}, \quad t_H = 1/H \sim 10^{10} \text{ лет}$$

$$f_\pi \cong \frac{\Delta R'}{\lambda_{p\gamma}} \eta \approx \frac{L_\gamma}{E_\gamma} \frac{1}{\Gamma^4 \Delta t} \frac{\sigma_{p\gamma} \eta}{4\pi c^2} \approx 0.13 \cdot \left(\frac{L_\gamma}{10^{52} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}} \right) \left(\frac{1 \text{ МэВ}}{E_\gamma} \right) \left(\frac{300}{\Gamma} \right)^4 \left(\frac{0.01 \text{ с}}{\Delta t} \right),$$

$$\phi_\nu(E_\nu) = 2 \cdot 10^{-14} \left(\frac{7 \cdot 10^5 \text{ ГэВ}}{E_\nu} \right) \left(\frac{f_\pi}{0.125} \right) \left(\frac{t_H}{10 \text{ Глет}} \right) \left(\frac{q_{GRB}}{4 \cdot 10^{44} \text{ Мпк}^{-3} \text{ год}^{-1}} \right) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}.$$

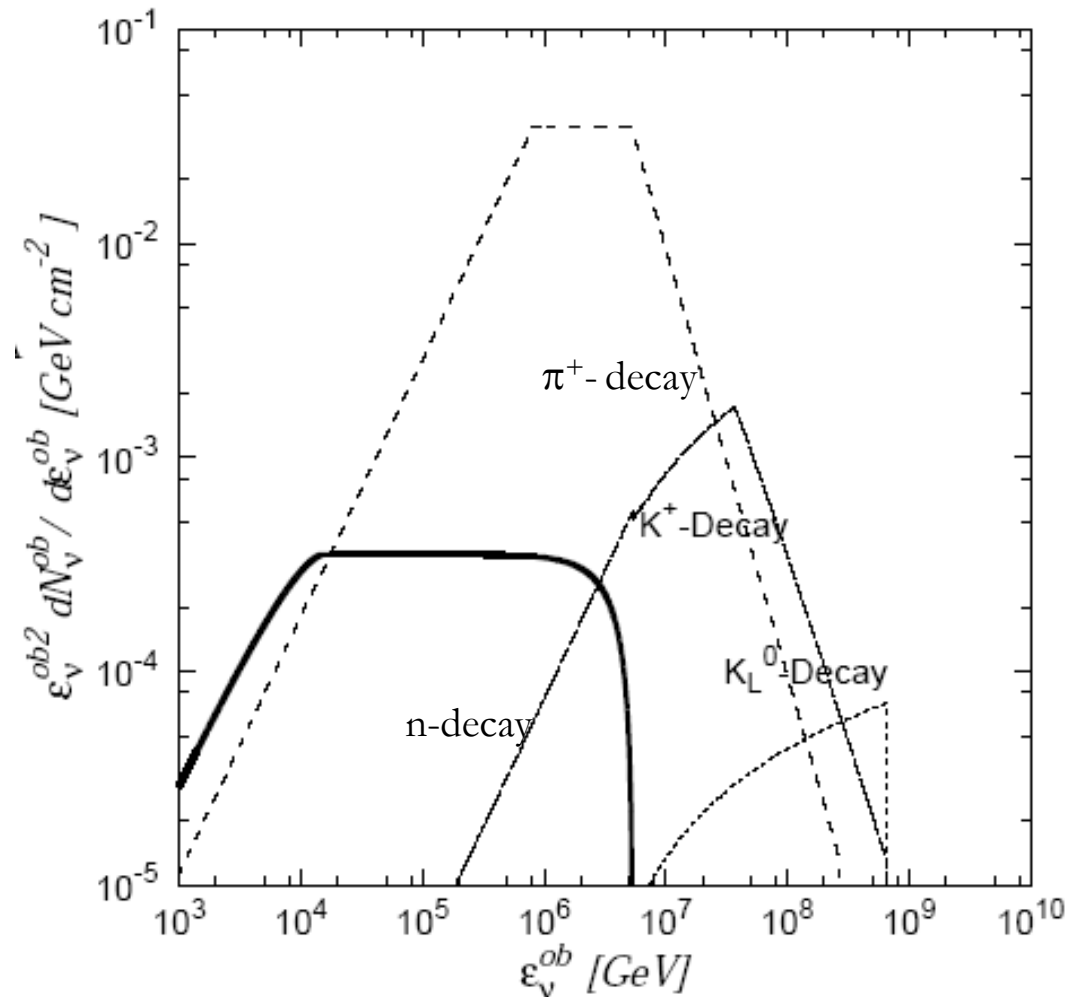
Число событий в детекторе

$$P_{\nu \rightarrow \mu} \approx 1.7 \cdot 10^{-6} E_{\nu, obs}^{0.8}$$

$$N_{events} = \int_{E_{th}}^{E_\nu^{max}} \phi_\nu P_{\nu \rightarrow \mu} \frac{dE_\nu}{E_\nu} \approx 25 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}, \quad E_{\nu, obs} = E_\nu / (1+z)$$

GRB нейтрино (4)

R. Moharana, N. Gupta,
[arXiv:1107.4483v1](https://arxiv.org/abs/1107.4483v1)



$$\Gamma = 100, \quad L_\gamma = 10^{51} \text{ эргс}^{-1} (1 \text{ foe})$$

$$z_{GRB} = 0.8, \quad t_{GRB} = 5 \text{ с,}$$

$$t_\nu = 30 \text{ мс}$$

Потоки нейтрино от распада нейтронов, пионов и каонов

Ограничения на диффузные потоки нейтрино

E.Waxman, J.N.Bahcall, Phys. Rev. 1998. D59, 023002

$$\frac{dn_{CR}}{dE_{CR}} \propto E_{CR}^{-2} \quad E_{\nu}^2 \frac{dn_{\nu}}{dE_{\nu}} \cong 0.25 \eta t_H E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}}$$

$$E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}} = \frac{q(10^{19} < E / 1eV < 10^{21})}{\ln(10^{21} / 10^{19})} \approx \frac{5}{4.6} \cdot 10^{44} \text{ эрг Мпк}^{-3} \text{ год}^{-1}$$

$$E_{\nu} \approx 0.05 E_p \quad E_{\nu}^2 \phi_{\nu} \equiv \frac{1}{4} \eta t_H E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}} \quad (\text{оптически тонкие источники} - \eta=1):-$$

$$E_{\nu}^2 \phi_{\nu} \equiv \frac{c}{4\pi} E_{\nu}^2 \frac{dn_{\nu\mu}}{dE_{\nu}} = \frac{1}{2} \eta I_{\max}, \quad I_{\max} (\eta = 1) \approx 0.25 \xi_z t_h \frac{c}{4\pi} E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}_{CR}}{dE_{CR}} \cong 1.5 \cdot 10^{-8} \xi_z$$

ГэВсм⁻² с⁻¹ ср⁻¹,

$$\xi_z \approx 3 \quad (\text{учет эволюции}) \quad \xi_z \approx 0.6 \quad (\text{нет эволюции источников})$$

$$E_{\nu}^2 \phi_{\nu} < 2 \cdot 10^{-8} \text{ GeVcm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

HIGH-ENERGY NEUTRINOS FROM GALACTIC SUPERBUBBLES

K. J. Andersen, M. Kachelrieß, D. V. Semikoz, 1712.03153

The explanation of the IceCube data requires in addition to an extragalactic component with a hard spectrum $1/E$ and $\alpha = 2.0 - 2.2$ a soft Galactic component with the spectral slope ≈ 2.5 (Neronov & Semikoz 2016b,a; Palladino et al. 2017; Neronov et al. 2018). The bounds on the diffuse extragalactic gamma-rays suggest that such a soft component has a Galactic origin.

A Galactic neutrino component can be decomposed into two contributions, depending on their angular distribution: Neutrinos from sources in the Galactic plane which are not nearby, and neutrinos from local sources. The first component is strongly limited by the recent bounds on the neutrino contribution from the Galactic plane (Aartsen et al. 2017a).

Изменение спектра КЛ турбулентными магнитными полями

- Neutrino telescope IceCube has recently discovered astrophysical neutrinos with energies in the TeV–PeV range. Usage of the data of Fermi cosmic γ -ray telescope one allows to demonstrate that the neutrino signal has to give significant contribution from the Milky Way Galaxy. Matching the γ -ray and neutrino spectra one finds that TeV–PeV Galactic cosmic rays form a power-law spectrum with the slope $p = 2.45$. This spectral slope is consistent with the average cosmic ray spectrum in the disks of the Milky Way and Large Magellanic Cloud galaxies. It is also consistent with the theoretical model of cosmic ray injection by diffusive shock acceleration followed by escape through the Galactic magnetic field with Kolmogorov turbulence (универсальный малый масштаб турбулентности магнитных полей. $\ell_K = (v^3 / \varepsilon)^{1/4}$, $\tau_K = (v / \varepsilon)^{1/2}$).
- The locally observed TeV–PeV cosmic ray proton spectrum is softer than the average Galactic cosmic ray spectrum. This could be explained by variability of injection of cosmic rays in the local interstellar medium over the past 10^7 year and discreteness of the cosmic ray source distribution.

Модель Неронова-Семикоза А. Neronov, D. Semikoz, ЖЭТФ 158 (2020) 295

- Источник астрофизических нейтрино, детектированных IceCube как “High-Energy Starting Events” (HESE), остается неизвестным. Полный поток и наклон спектра HESE-сигнала согласуются с экстраполяцией на область ВЭ (до ТэВ) потока гамма-квантов, зарегистрированных космическим телескопом FermiLAT.
- Однако сигнал не показывает сильного избытка событий из плоскости Галактики. Нейтринный сигнал из Северного полушария при энергиях выше нескольких сотен ТэВ обнаруживает более жесткий спектр мюонных нейтрино по сравнению с HESE-поток. Это “ужесточение” указывает, возможно, на присутствие внегалактической компоненты астрофизических нейтрино. Весь поток жесткой компоненты оказывается на уровне, согласующимся с наблюдаемым потоком КЛ сверхвысокой энергии (UHECR).

- Нейтринное излучение от AGN (в частности, от блазаров) давно и широко обсуждается в рамках адронного механизма активности AGN. Радио-интенсивные активные ядра галактик (AGN) – это объекты, в которых протоны и ядра могут ускоряться до высоких и сверхвысоких энергий (источники UHECR) .
- Ожидается, что излучение нейтрино сопровождается γ -излучением, генерируемым в EM каскадах внутри источника нейтрино. Удивительно, что ярчайшие и/или ближайшие γ -блазары до сих пор не проявились как яркие источники нейтрино. Единственный на сегодняшний день обнаруженный внегалактический источник нейтрино – блазар TXS 0506+056.
- Не все блазары могут быть источниками интенсивного ν -излучения (“neutrino-loud”) [PR D66, 123003 (2002)20]. Различие потоков γ и ν возникает, поскольку нейтрино эффективно генерируются только при наличии достаточно плотной среды - вещества и/или электромагнитных полей.

A. Neronov, D. Semikoz, S. Sibiryakov, Month. Not. Roy. Astron. Soc. 391, 949 (2008); A. Neronov et al. New J. Phys. 11, 065015 (2009); K. Mannheim, P. L. Biermann, Astron. Astrophys. 221, 211 (1989); K. Mannheim, Astron. Astrophys. 269, 67 (1993).20, 21, 23, 24, 29; C. Righi et al. arXiv:1807.10506].