

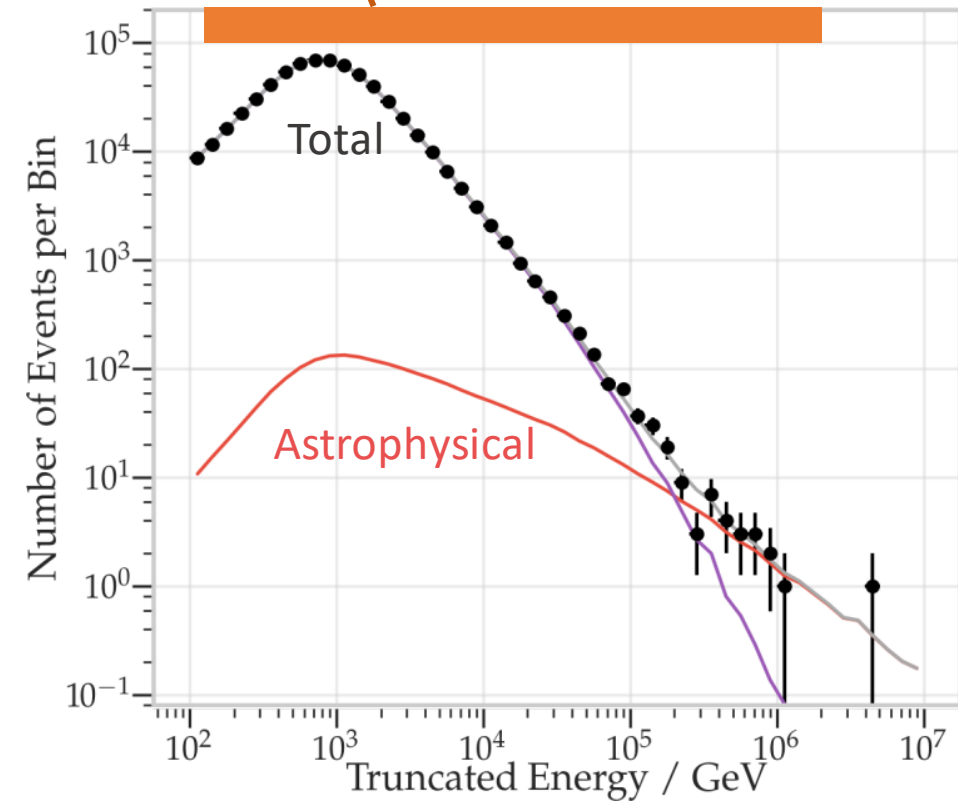
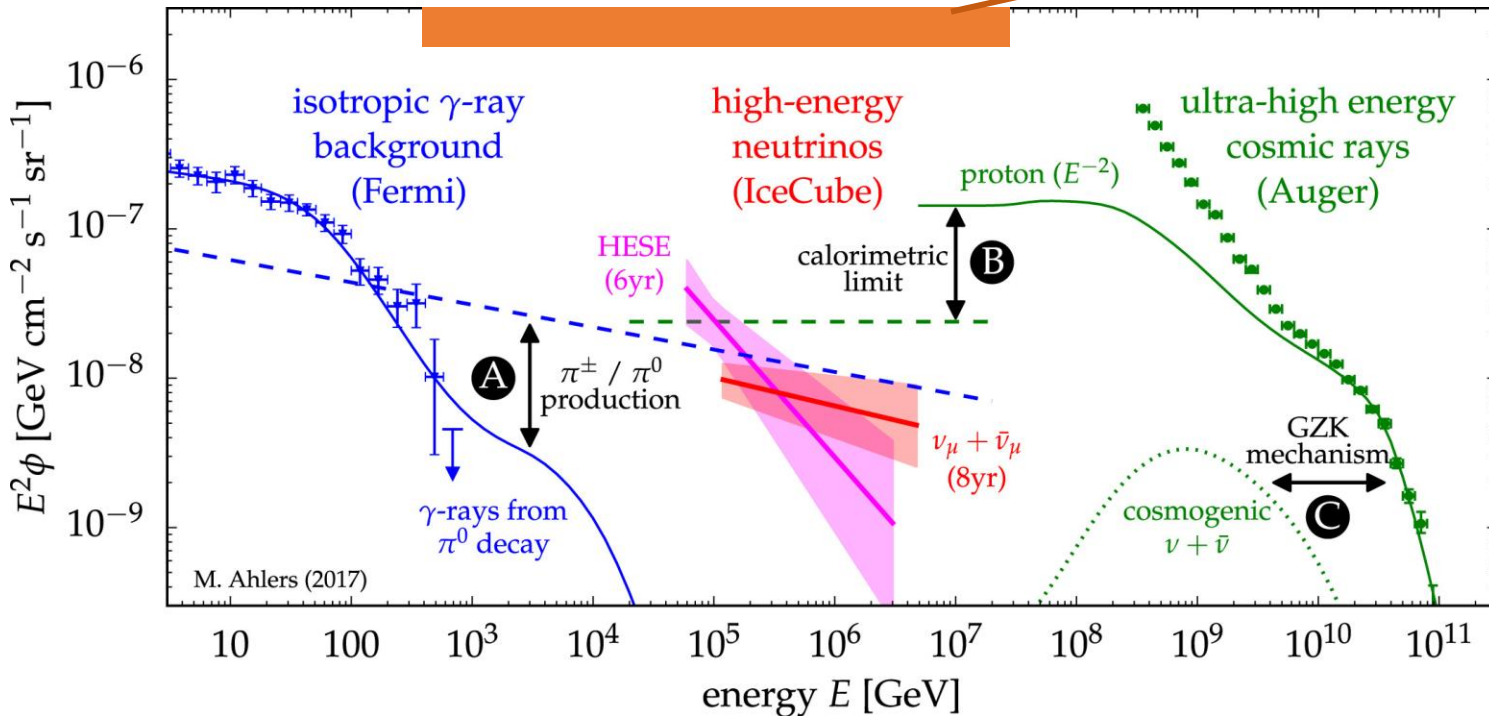
Нейтрино от ТэВ до ПэВ указывают на радио-яркие блазары

Александр Плавин

АКЦ ФИАН, МФТИ

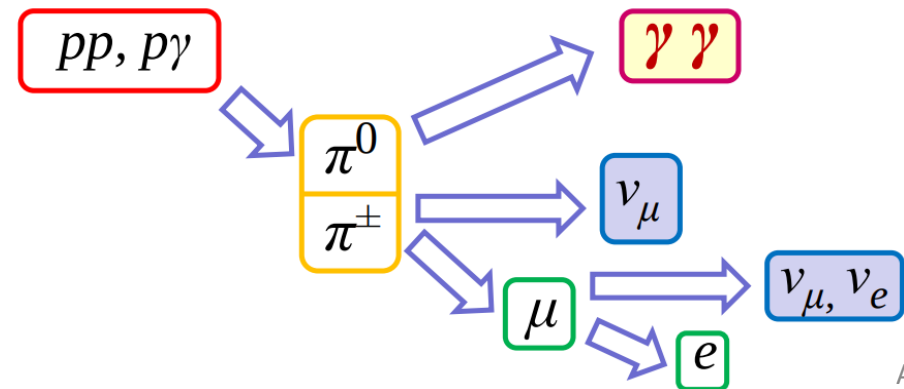
Астрофизические нейтрино высоких энергий

Relevant energies: TeV to PeVs



IceCube muon neutrino spectrum

Stettner 2019



Активные галактики

Релятивистская струя - "джет"
Синхротронное излучение

Сверхмассивная черная дыра:
гигантский ускоритель

Аккреционный диск

Поиски источников нейтрино

ANTARES and IceCube Combined Search for Neutrino Point-like and Extended Sources in the Southern Sky

ANTARES Collaboration*: A. Albert^{1,2}, M. André³, M. Anghinolfi⁴, G. Anton⁵,

Abstract

A search for point-like and extended sources of cosmic neutrinos using data from the ANTARES and IceCube neutrino telescopes is presented. The data set consists of the track-like and shower-like events pointing in the direction of the Southern Sky in the nine-year ANTARES point-source analysis, combined with the through-going muon-like events used in the seven-year IceCube point-source search. The advantageous view of ANTARES and the large size of IceCube are exploited to improve the search in the Southern Sky by a factor ~ 2 compared to both individual analyses. In the search, the Southern Sky is scanned for possible excesses of spatial clustering, and the probability of extended candidate sources are investigated. In addition, special focus is placed

A multiwavelength view of BL Lac neutrino candidates

C. Righi^{1,2,3*}, F. Tavecchio² and L. Pacciani⁴

¹Università degli Studi dell'Insubria, Via Valleggio 11, I-22100 Como, Italy
²INAF – Osservatorio Astronomico di Brera, via E. Bianchi 46, I-23807 Merate, Italy
³INFN – Sezione di Genova, Via Dodecaneso 33, I-16146 Genova, Italy
⁴Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali – Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF-IPA), Via Fosso del Cavaliere, 100 - I-00133 Rome, Italy

Accepted 2018 November 6. Received 2018 October 22; in original form 2018 July 10

ABSTRACT

The discovery of high-energy astrophysical neutrinos by IceCube kicked off a new line of research to identify the electromagnetic counterparts producing these neutrinos. Among extragalactic sources, blazars are promising candidate neutrino emitters. Their structure, a relativistic jet pointing to the Earth, offers a natural accelerator of particles and for this reason, a high number of high-energy neutrinos are expected to be produced in their vicinity.

AGN outflows as neutrino sources: an observational test

P. Padovani^{1,2*}, A. Turcati³ and E. Resconi³

¹European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching bei München, Germany
²Associated to INAF – Osservatorio Astronomico di Roma, via Frascati 33, I-00040 Monteporzio Catone, Italy
³Physik-Department, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, D-85748 Garching bei München, Germany

Fermi/LAT counterparts of IceCube neutrinos above 100 TeV

F. Krauß^{1,2}, K. Deoskar^{3,4,5}, C. Baxter^{1,5}, M. Kadler⁶, M. Kreter^{7,6}, M. Langejahn⁶, K. Mannheim⁶, P. Polko⁸, B. Wang⁹

¹Anton Pannekoek Institute for Astronomy, University of Amsterdam, Science Park 901, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands
²GRAPPA, University of Amsterdam, Science Park 901, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands
³Department of Physics, Indian Institute of Technology Gandhinagar, Ahmedabad 382 015, India
⁴Oskar Klein Centre and Dept. of Physics, Stockholm University, AlbaNova University Center, SE-141 86 Stockholm, Sweden
⁵Dr. Remeis Sternwarte & ECAP, Universität Erlangen, 91054 Erlangen, Germany
⁶Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, 97074 Würzburg, Germany
⁷Centre for Space Research, North-West University, Potchefstroom, South Africa
⁸Theoretical Astrophysics, T-2, MS B227, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA
⁹Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA

Received 3 September 2018 / Accepted 17 October 2018

The IceCube Collaboration has published four years of data from the Southern Sky. In this paper, we study the Fermi-LAT counterparts of IceCube neutrinos above 100 TeV. In our previous approach we have studied neutrino events at PeV energies. In this work we extend our search to lower energies. We use a larger sample of Fermi-LAT sources and a more realistic neutrino spectrum and number of IceCube HESE events. We also show that the neutrino flux and that the expected number of neutrinos is consistent with the expected number of neutrinos in the Fermi-LAT sources.

Key words. neutrinos – galaxies: active – quasars: general

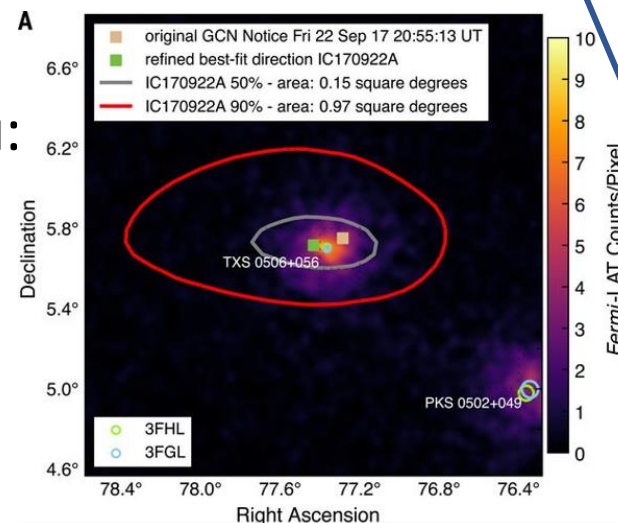
γ -фотоны:

- самые близкие энергии
- излучаются при рождении нейтрино

Должны обнаруживаться одновременно?

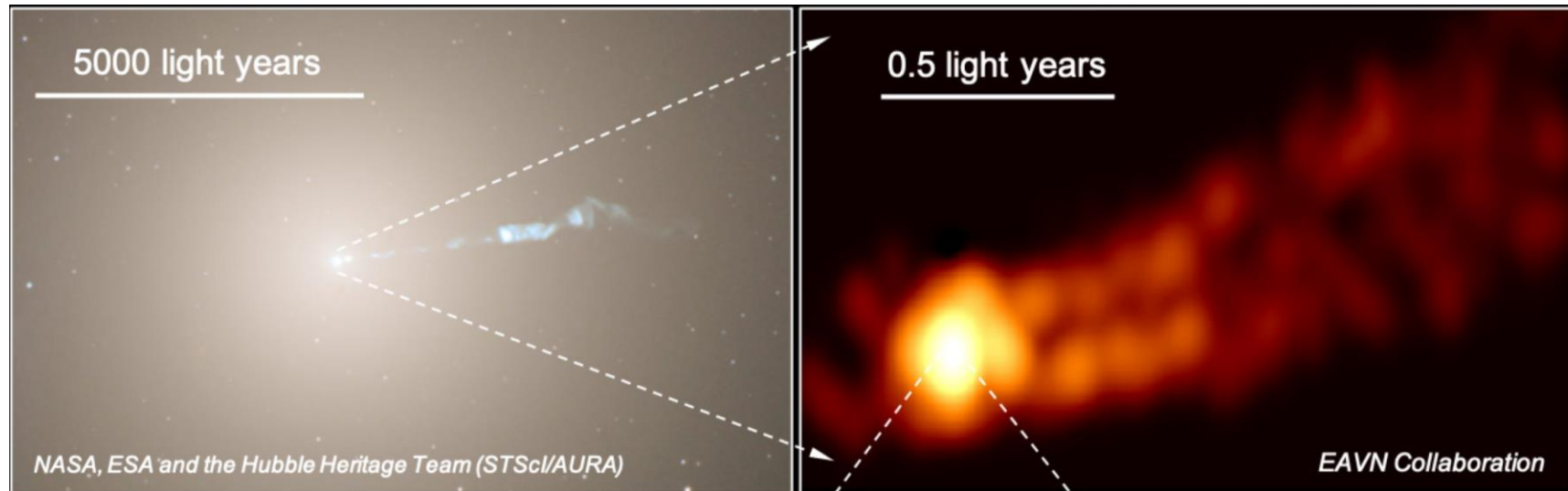
Множество попыток найти систематические соответствия, 2017-2019 и ранее

Единичная ассоциация за около 10 лет наблюдений: блазар TXS 0506+056



Наша идея: сравнение с РСДБ

- Радио интерферометрия — единственный способ разрешить центральные парсеки в AGN



- РСДБ-поток — хороший индикатор яркой компактной структуры
- Отбираются преимущественно блазары: джеты в нашу сторону

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

- Выше 200 ТэВ:
alerts & alert-like events

57 событий, 2009-2019

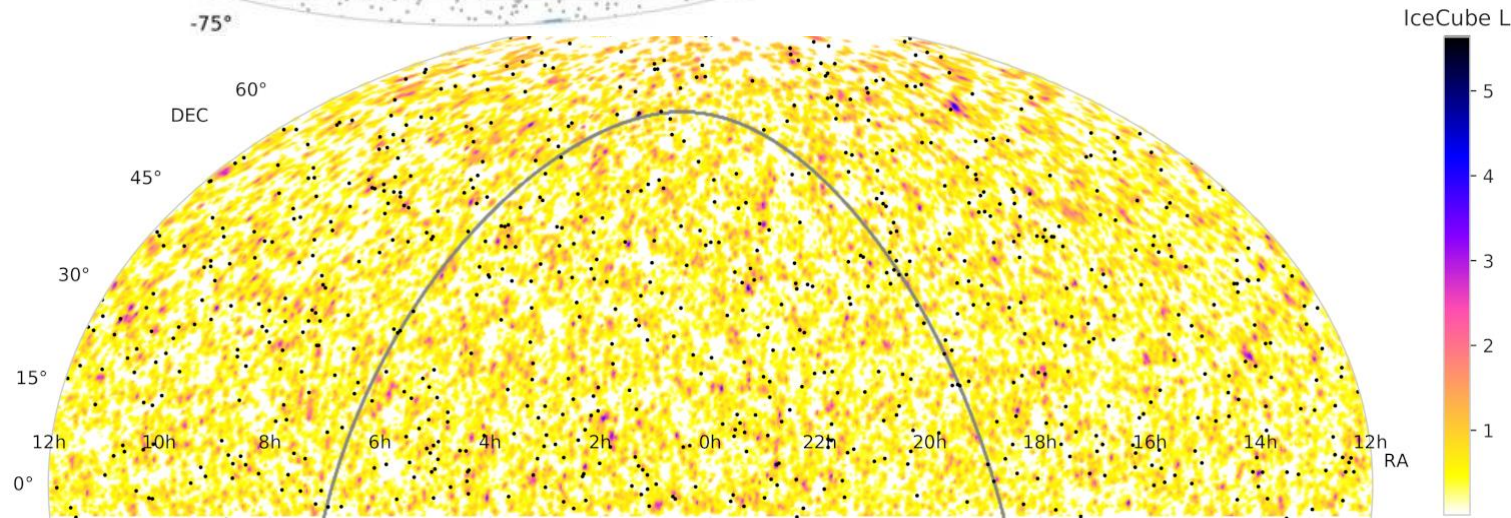
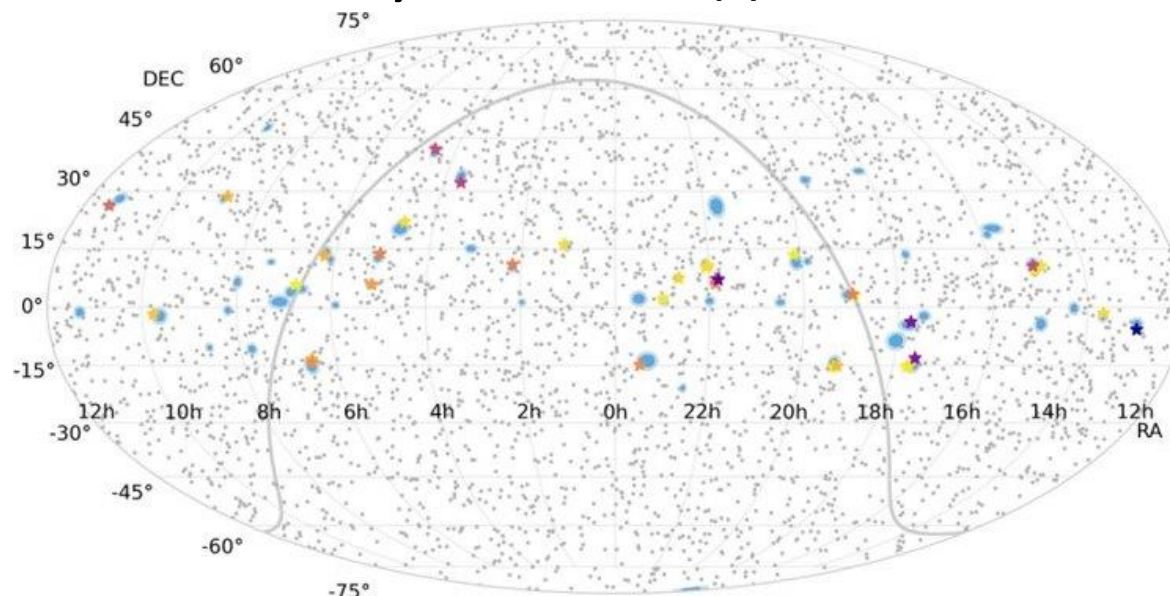
астрофизических ≈ 30

- Все энергии:
вероятность точечного
источника для каждого
направления

712830 событий, 2008-2015

астрофизических ≈ 2000

Основной вклад дают ~ 10 ТэВ



Ассоциация нейтрино \leftrightarrow AGN

Проверяем гипотезу:

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

Ассоциация нейтрино \leftrightarrow AGN

Проверяем гипотезу:

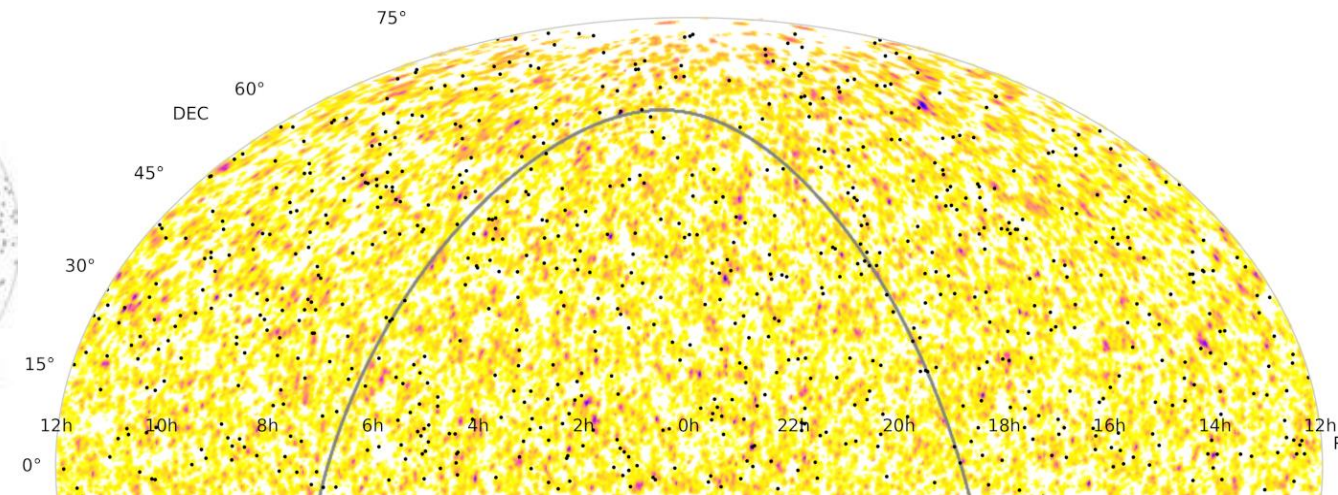
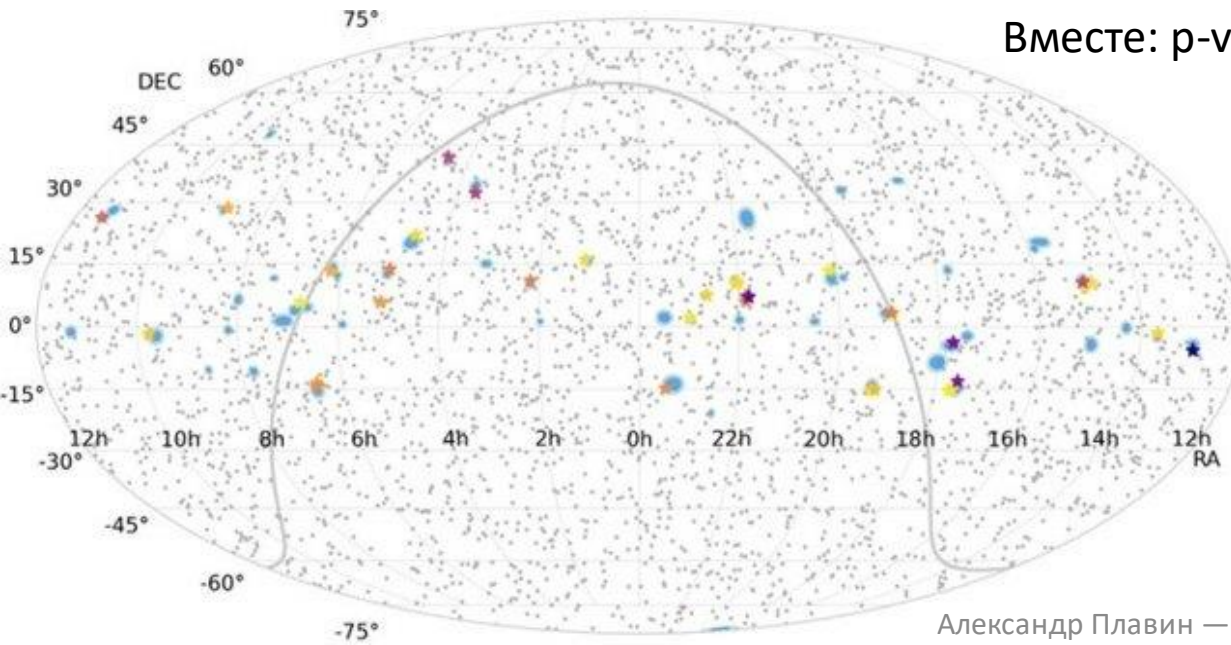
- Яркие AGN чаще встречаются в направлениях, откуда приходят нейтрино?
- Нейтрино чаще приходят с направлений, где находятся яркие AGN?

Результат: да, это так!

События ≥ 200 ТэВ: p-value = 0.2%

Карта по всем энергиям: p-value = 0.3%

Вместе: p-value = 4×10^{-5} , 4.1σ



Ассоциация нейтрино \leftrightarrow AGN

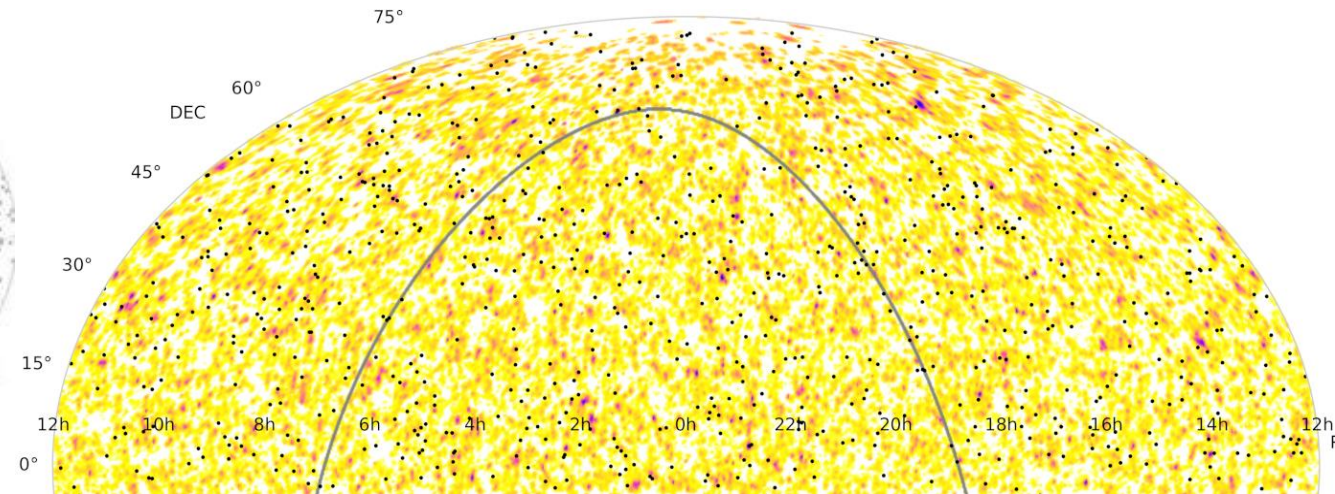
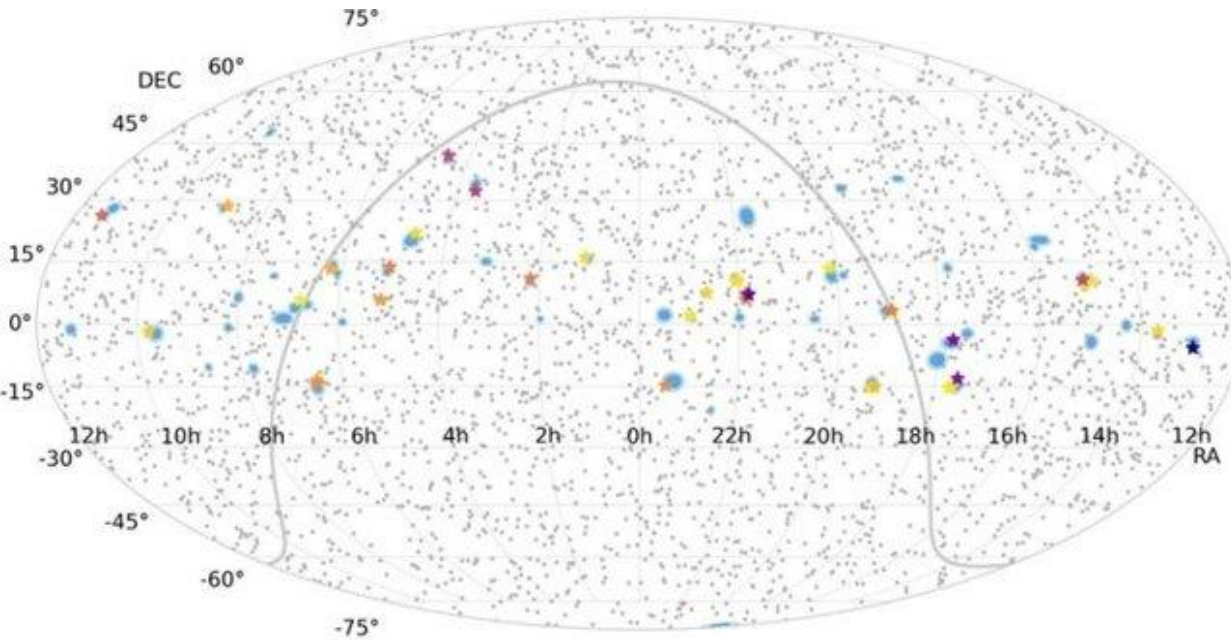
Результат — нейтрино излучаются АГНами!

Ассоциированные АГН:

События ≥ 200 ТэВ — 5 блазаров

3C 279, NRAO 530, PKS 1741-038, PKS 2145+067, 1308+326

По всем энергиям — 70-130 блазаров

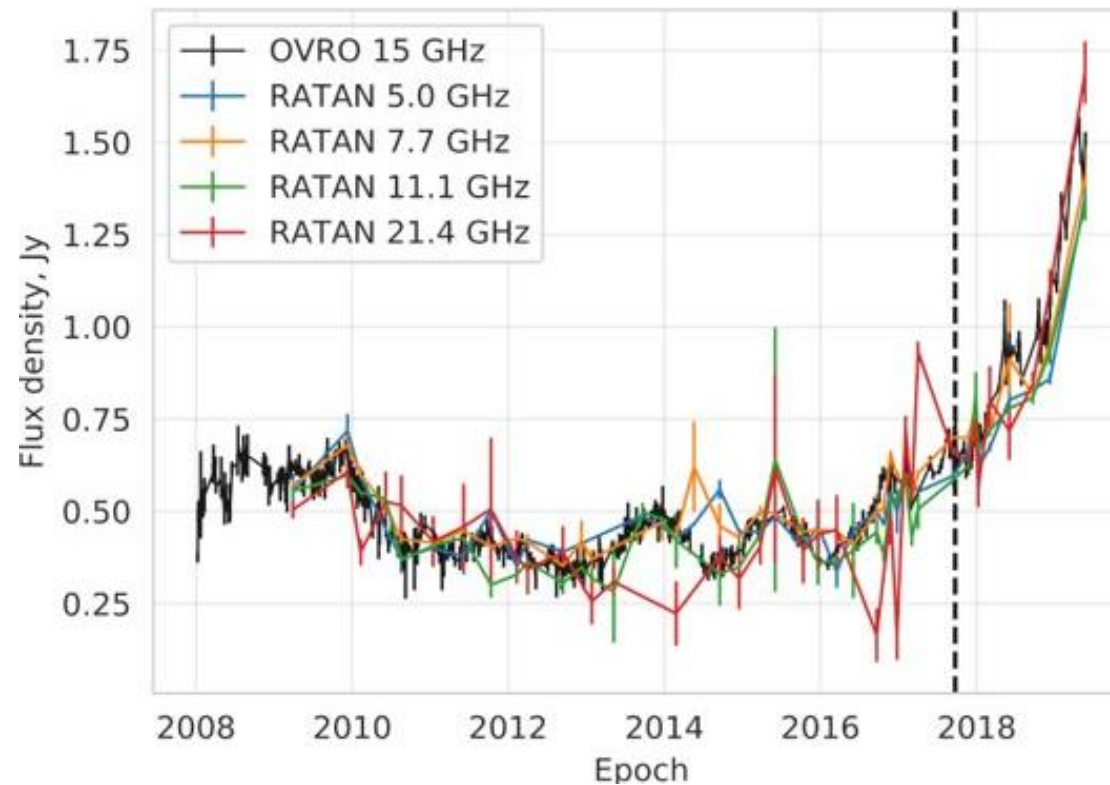


Нейтрино и вспышки в AGN

Предсказана связь излучения нейтрино со вспышками вблизи ЧД

(Murase 17)

Нейтрино от TXS 0506+056 пришло во время развития мощной вспышки:

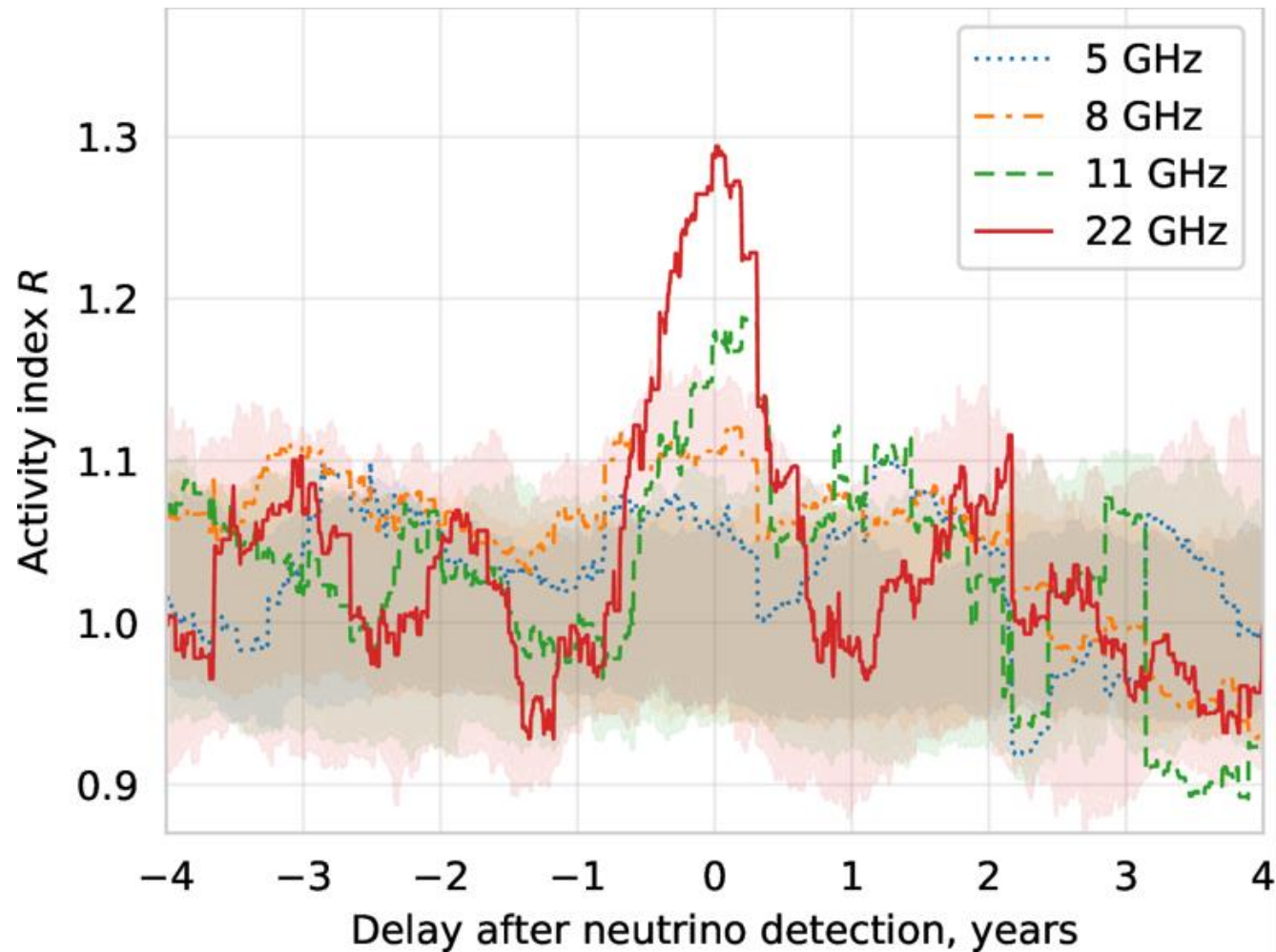


Коррелируем радиопоток и время детектирования нейтрино от объектов.

Нейтрино и вспышки в AGN

Коррелируем радиопоток и время детектирования нейтрино от объектов.

Результат: блазары ярче во время прихода нейтрино!



Независимое подтверждение:
Novatta et al., arXiv:2009.10523
(22 сентября 2020)

Физическая интерпретация

Нейтрино образуются в центральных парсеках ярких блазаров путём $\nu\gamma$

(Stecker+91, Neronov+02, Kalashev+15, Cerruti 19, Bottcher+19)

Излучение направленное, преимущественно вдоль джета

(предсказано Neronov+02)

Требуются фотоны от 100 эВ до 200 кЭв ...

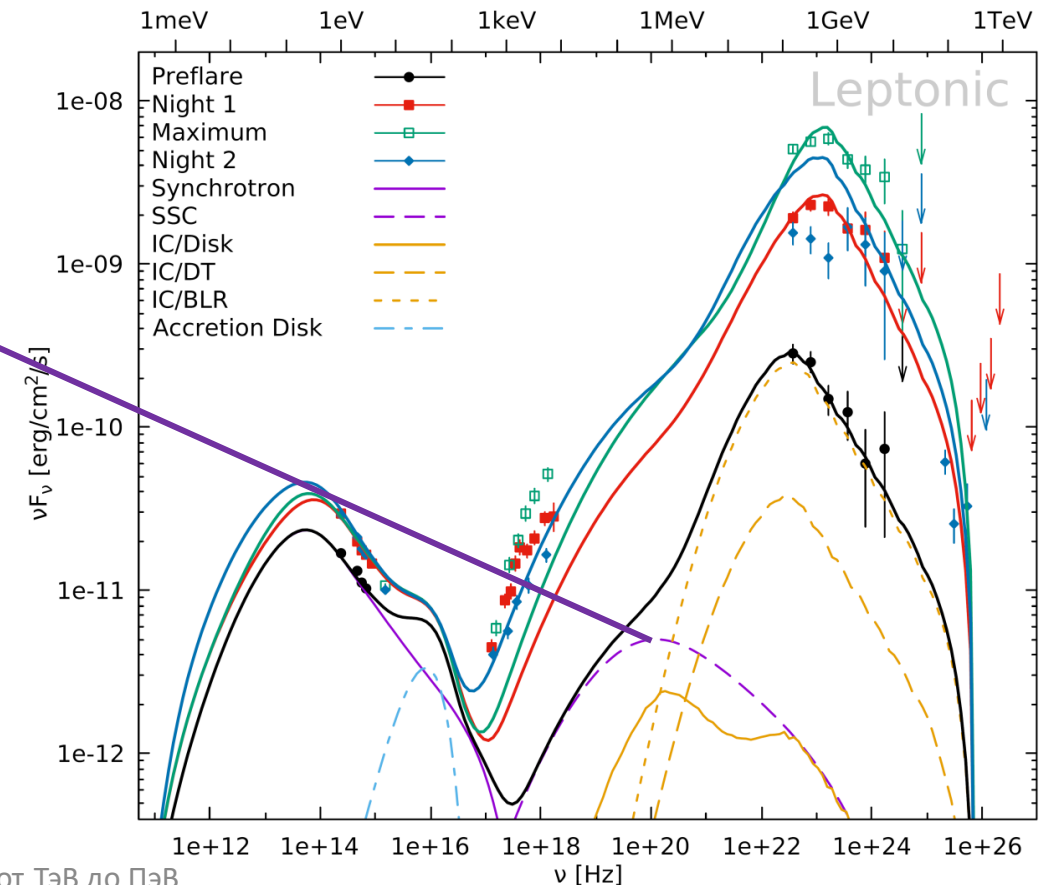
- SSC-фотоны джета?

... и протоны до 10^{16} эВ

- Ударные волны? (Bykov et al. 2012; Lemoine & Waxman 2009)
- Ускорение в магнитосфере? (Ptitsyna & Neronov 2016)

Блазарами можно объяснить весь поток астрофизических нейтрино на IceCube!

Note: несмотря на корреляцию, механизмы излучения радио, гамма, и нейтрино могут быть не связаны напрямую.



Summary

Нейтрино с энергиями от ТэВ до ПэВ рождаются в центральных парсеках ярких блазаров

Значимость 4.1 σ

- Как минимум 70 AGN ассоциированы с IceCube-детектированиями
- РСДБ — ключ к этому сопоставлению
- Важен учёт систематики IceCube: наша оценка величины ошибки $\simeq 0.5^\circ$
- Излучение нейтрино — вдоль джета
- Сильные ограничения на механизм образования: фотоны с энергиями до сотен кЭв, протоны до 10^{16} эВ
- Яркие блазары могут объяснить все астрофизические нейтрино \gtrsim ТэВ

Дальнейшие шаги

- Независимая проверка: переменность подтверждена *Hovatta et al., 2020*
- Больше нейтрино: ждём IceCube, Байкал, другие телескопы
- Больше и детальнее про блазары: ведём новые наблюдательные программы