

# Где рождаются астрофизические нейтрино высоких энергий?

Plavin, Kovalev, Kovalev, Troitsky:  
ApJ, 894, 101 (2020)  
ApJ accepted (arXiv:2009.08914)

Ученый совет ФИАН 25 января 2021 г.

**Ю.Ю. Ковалев**

А.В. Плавин, Ю.А. Ковалев, С.В. Троицкий

# Новая лаборатория: астрофизика высокого разрешения

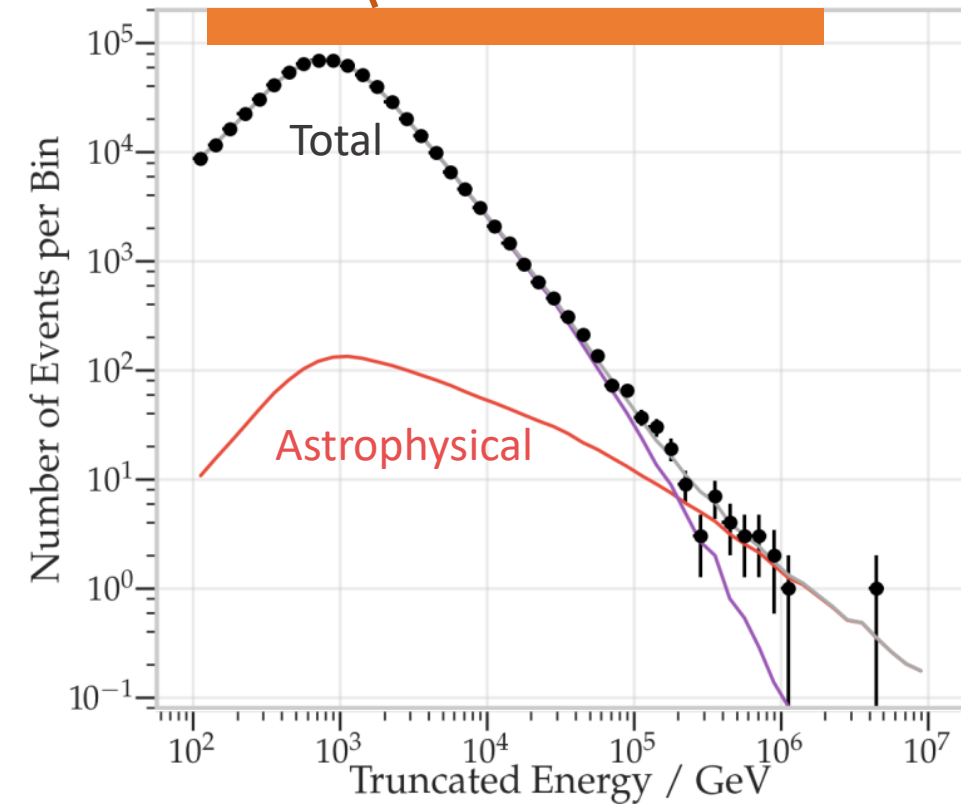
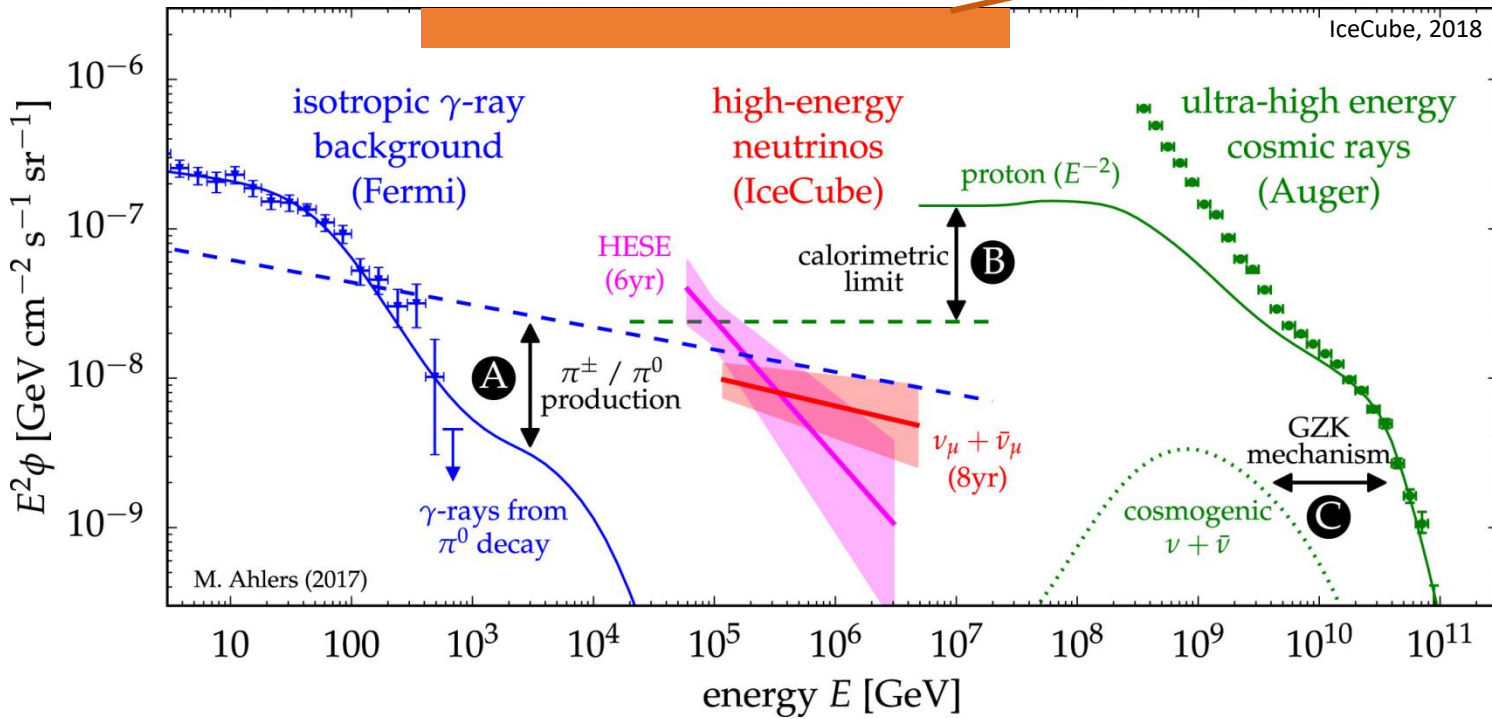
*и соответствующая новая тема ГЗ ФИАН*

- Ио заведующего: Ю.Ю. Ковалев.
- Всего в лаборатории 11 человек, молодежь доминирует.
- Тематика: от Солнца до галактик с использованием методов астрофизики высокого спектрального, временного и углового разрешения.

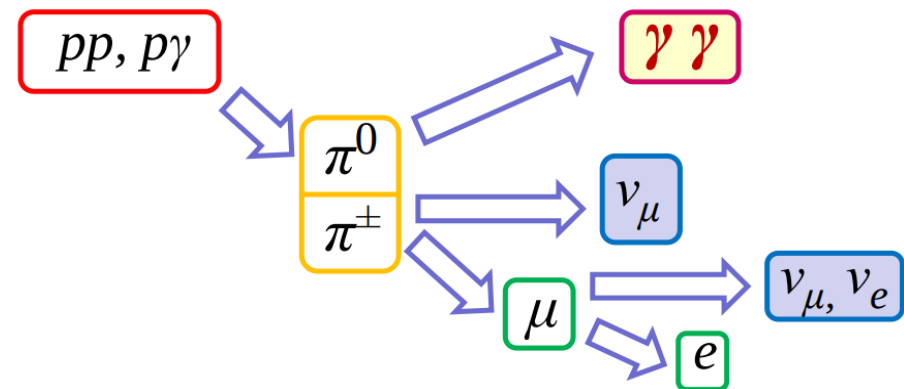
В данном докладе будет рассказано про один из результатов 2020-ого года, полученный в лаборатории.

# Астрофизические нейтрино высоких энергий

Энергии от ТэВ до ПэВ

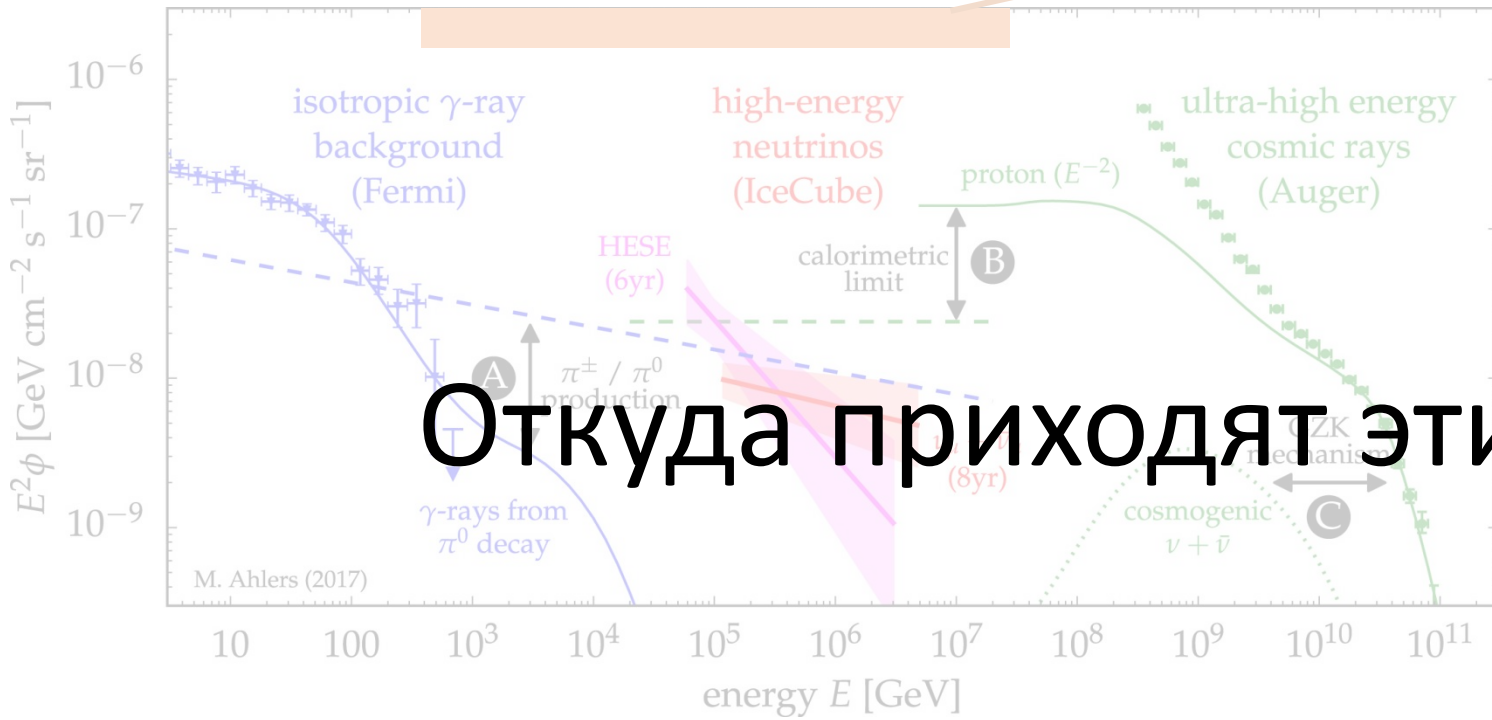


IceCube muon neutrino spectrum  
(Stettner 2019)



# Астрофизические нейтрино высоких энергий

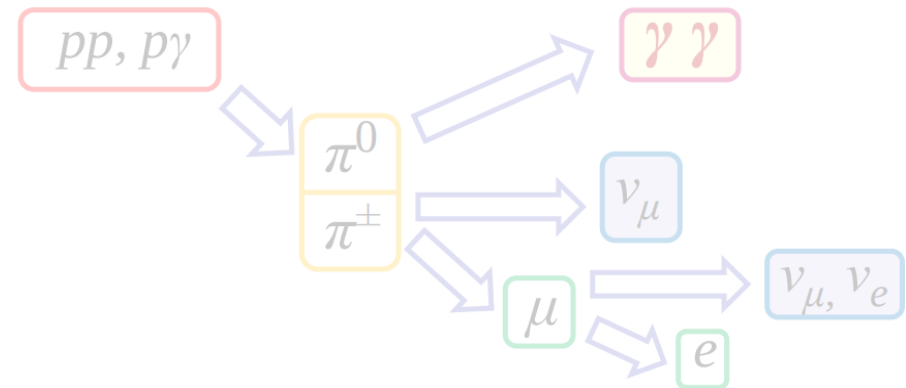
Энергии от ТэВ до ПэВ



Откуда приходят эти нейтрино?



IceCube muon neutrino spectrum  
Stettner 2019



# Хороший кандидат: 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<sup>1,2</sup>, M. André<sup>3</sup>, M. Anghinolfi<sup>4</sup>, G. Anton<sup>5</sup>,

Abstract

A search for point-like and extended sources of cosmic neutrinos using data collected by 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  $\sim 2$  compared to both individual analyses. In this search the Southern Sky is scanned for possible excesses of spatial clustering, and the probability of non-extended candidate sources are investigated. In addition, model fits to the

## A multiwavelength view of BL Lac neutrino candidates

C. Righi<sup>1,2,3\*</sup>, F. Tavecchio<sup>2</sup> and L. Pacciani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi dell'Insubria, Via Valleggio 11, I-22100 Como, Italy  
<sup>2</sup>INAF – Osservatorio Astronomico di Brera, via E. Bianchi 46, I-23807 Merate, Italy  
<sup>3</sup>INFN – Sezione di Genova, Via Dodecaneso 33, I-16146 Genova, Italy  
<sup>4</sup>Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali – Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF-INAP), 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

## AGN outflows as neutrino sources: an observational test

P. Padovani<sup>1,2\*</sup>, A. Turcati<sup>3</sup> and E. Resconi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching bei München, Germany  
<sup>2</sup>Associated to INAF – Osservatorio Astronomico di Roma, via Frascati 33, I-00040 Monteporzio Catone, Italy  
<sup>3</sup>Physik-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<sup>1,2</sup>, K. Deoskar<sup>3,4,5</sup>, C. Baxter<sup>1,5</sup>, M. Kadler<sup>6</sup>, M. Kreter<sup>7,6</sup>, M. Langejahn<sup>6</sup>, K. Mannheim<sup>6</sup>, P. Polko<sup>8</sup>, B. Wang<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Anton Pannekoek Institute for Astronomy, University of Amsterdam, Science Park 90-98, NL-1090 GE Amsterdam, The Netherlands  
<sup>2</sup>GRAPPA, University of Amsterdam, Science Park 90-98, NL-1090 GE Amsterdam, The Netherlands  
<sup>3</sup>Department of Physics, Indian Institute of Technology Gandhinagar, Ahmedabad 382 015, India  
<sup>4</sup>Oskar Klein Centre and Dept. of Physics, Stockholm University, SE-113 23 Stockholm, Sweden  
<sup>5</sup>Dr. Remeis Sternwarte & ECAP, Universität Erlangen, D-91054 Erlangen, Germany  
<sup>6</sup>Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, D-97074 Würzburg, Germany  
<sup>7</sup>Centre for Space Research, North-West University, Potchefstroom, South Africa  
<sup>8</sup>Theoretical Astrophysics, T-2, MS B227, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA  
<sup>9</sup>Department 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 on high-energy neutrinos. In our previous approach we have studied atmospheric neutrino events at PeV energies. In this work we extend our search to at or above a reconstructed energy of 100 TeV, but below a reconstructed energy of 1 PeV. This larger sample allows us to better constrain the scaling law that when we consider a realistic neutrino spectrum and number of IceCube HESE events. We also show that the neutrino flux and that the expected number of neutrinos is

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

## The IceCube Collaboration\*

[http://icecube.wisc.edu/collaboration/authors/icrc\\_icecube](http://icecube.wisc.edu/collaboration/authors/icrc_icecube)  
E-mail: mhuber@icecube.wisc.edu

Located at the South Pole, the IceCube Neutrino Observatory is the world largest neutrino telescope, instrumenting one cubic kilometre of Antarctic ice at a depth between 1450 m to 2450 m. In 2013 IceCube reported the first observations of a diffuse astrophysical high-energy neutrino flux. Although the IceCube Collaboration has identified more than 100 high-energy neutrino events, the origin of this neutrino flux is still not known. Blazars, a subclass of Active Galactic Nuclei and one of the most powerful classes of objects in the Universe, have long been considered promising sources of high energy neutrinos. A blazar origin of this high-energy neutrino flux can be examined using stacking methods testing the correlation between IceCube neutrinos and catalogs of hypothesized sources. Here we present the results of a stacking analysis for 1301 blazars from the third catalog of hard Fermi-LAT sources (3FHL). The analysis is performed on 8 years of through-going muon data from the Northern Hemisphere, recorded by IceCube between 2009 and 2016. No excess of neutrinos from the blazar position was found and first limits on the neutrino production of these sources will be shown

## AGN outflows as neutrino sources: an observational test

P. Padovani<sup>1,2\*</sup>, A. Turcati<sup>3</sup> and E. Resconi<sup>3</sup>

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

Accepted 2018 April 3. Received 2018 March 26; in original form 2018 January 31

ABSTRACT

We test the recently proposed (AGN) could be neutrino emit of 94 'bona fide' AGN outflows currently publicly available AGN with outflows matched and bolometric powers larger. Secondly, we carry out a statistical sample of 23 264 AGN at  $z$  sources. We find no significant events, although we get the relatively high velocities and AGN outflows are neutrino emitters be tested with better statistics explaining the IceCube data

**Key words.** neutrinos – radiative transfer – galaxies: active.

## AGN outflows as neutrino sources: an observational test

P. Padovani<sup>1,2\*</sup>, A. Turcati<sup>3</sup> and E. Resconi<sup>3</sup>

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

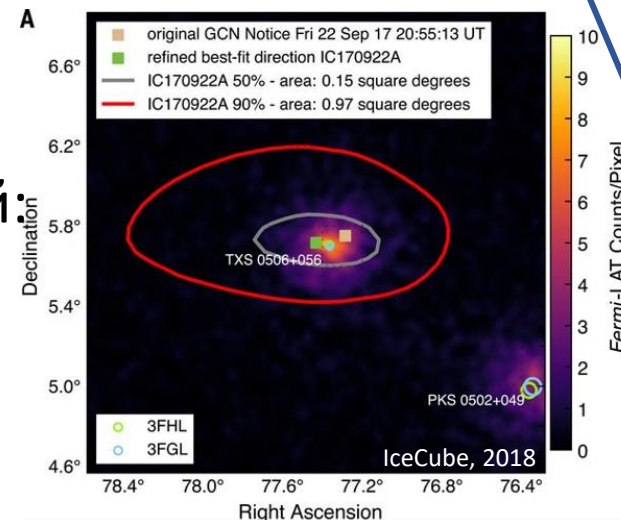
$\gamma$ -фотоны:

- самые близкие энергии
- излучаются при рождении нейтрино

Должны обнаруживаться одновременно.

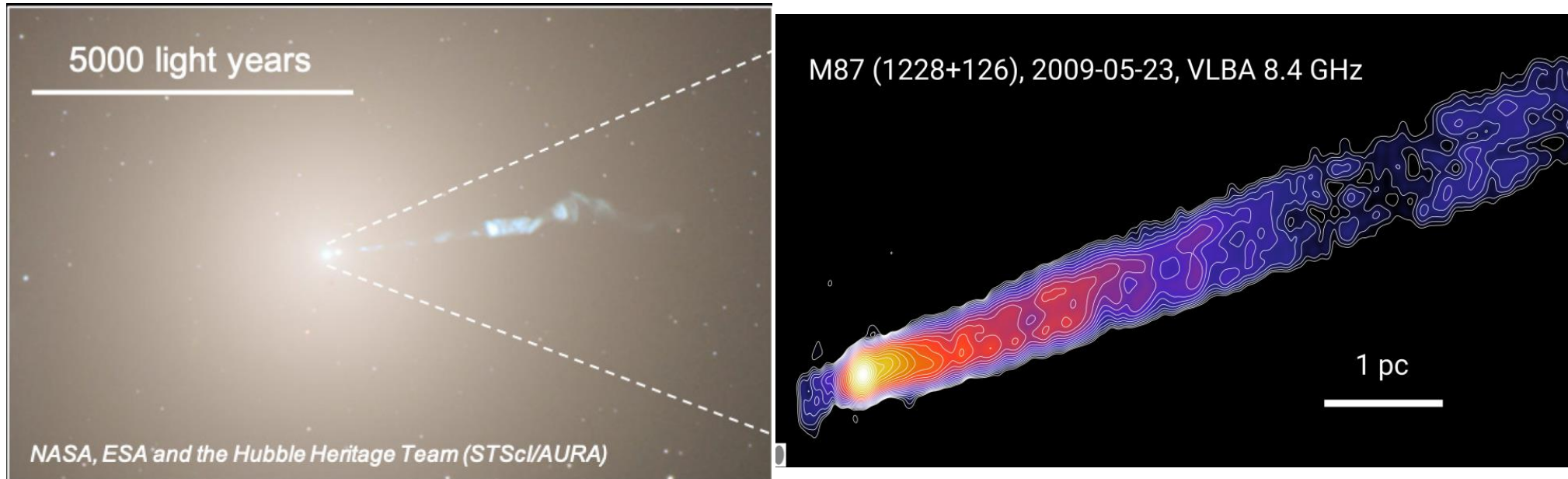
Множество попыток найти значимые систематические соответствия, позитивного результата нет.

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



# Наша идея: сравнение с РСДБ измерениями

- Радио интерферометрия:  
единственный способ разрешить центральные парсеки в AGN



- РСДБ поток излучения — хороший индикатор яркой компактной структуры
- Благодаря релятивистскому усилению илучения, такой подход отбирает преимущественно блазары. Их джеты направлены в нашу сторону.

# Используемые данные

AGN: полная по потоку РСДБ-выборка, 3411 объектов

Наблюдения за  $\approx 30$  лет,  $S_{8\text{ GHz}} \geq 150$  mJy

<http://astrogeo.org/rfc/>

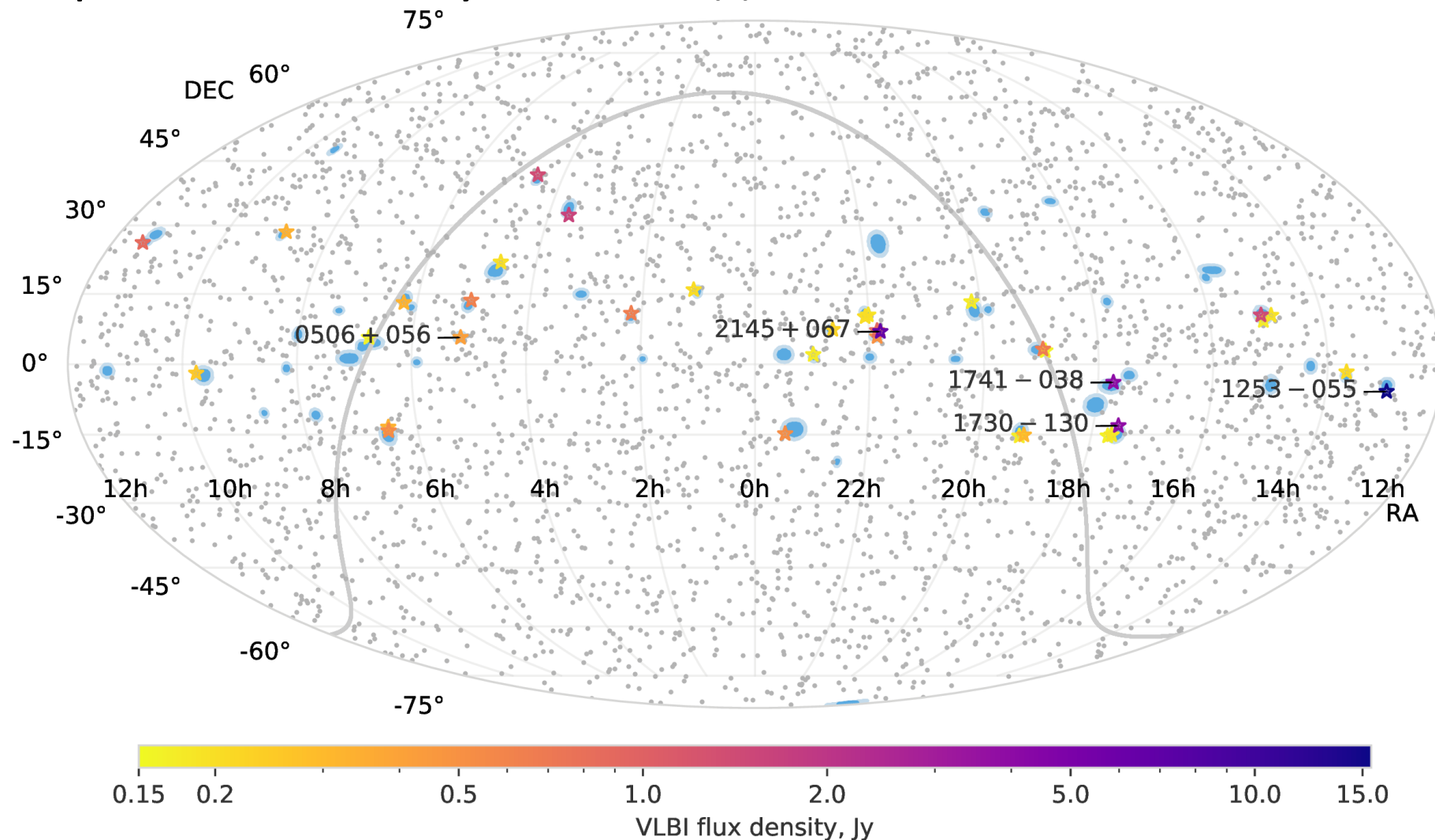
Нейтрино — мюонные треки IceCube, публичные данные

- Выше 200 ТэВ:

alerts & alert-like events

*57 событий, 2009-2019 гг.*

*астрофизических  $\approx 30$  шт.*





# Используемые данные

AGN: полная по потоку РСДБ-выборка, 3411 объектов

Наблюдения за  $\approx 30$  лет,  $S_{8\text{ GHz}} \geq 150$  mJy

<http://astrogeo.org/rfc/>

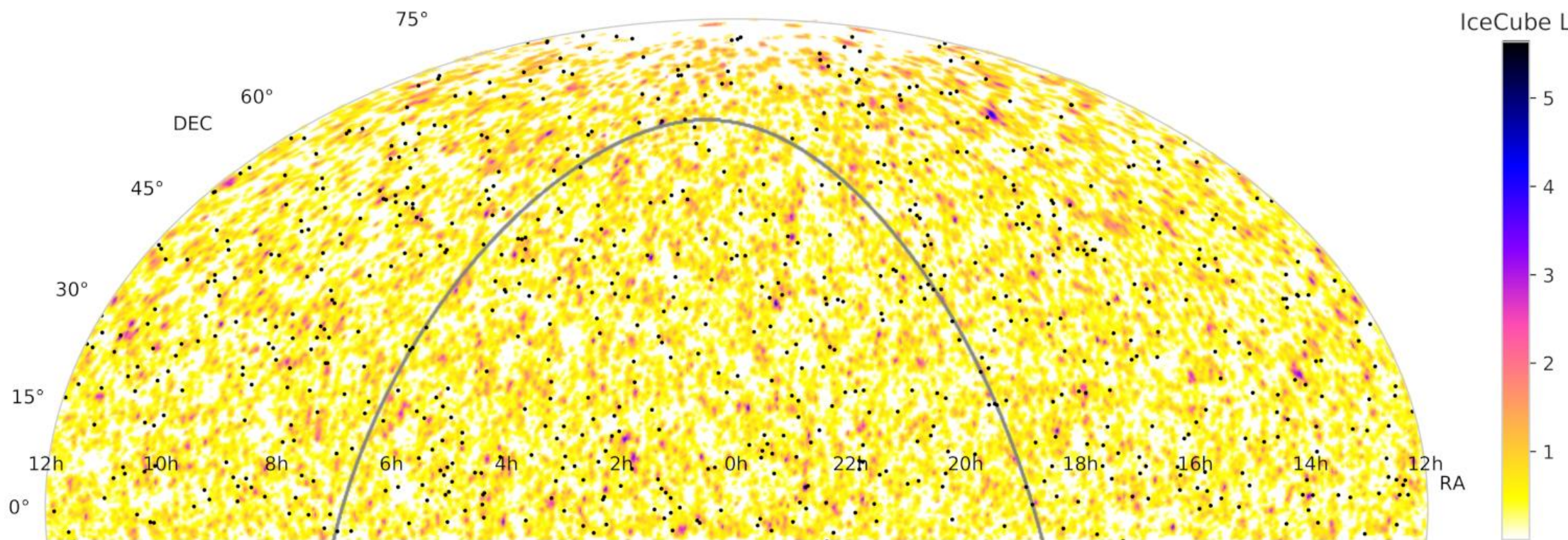
Нейтрино — мюонные треки IceCube, публичные данные

- Все энергии:

вероятность точечного источника для каждого направления

*712830 событий, 2008-2015 гг.; астрофизических  $\approx 2000$  шт.*

*Основной вклад дают  $\sim 10$  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.

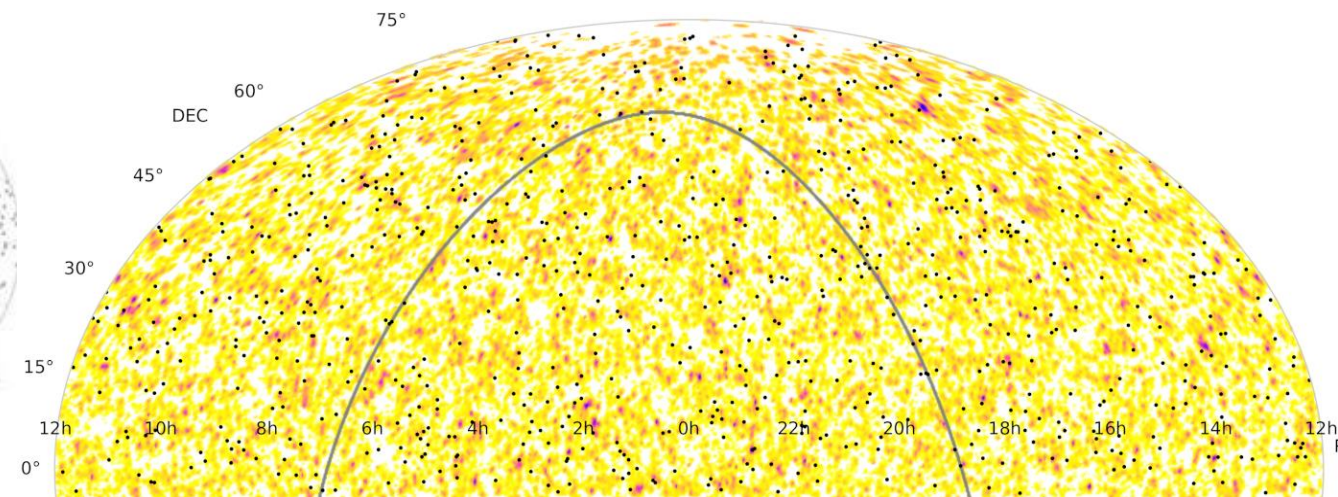
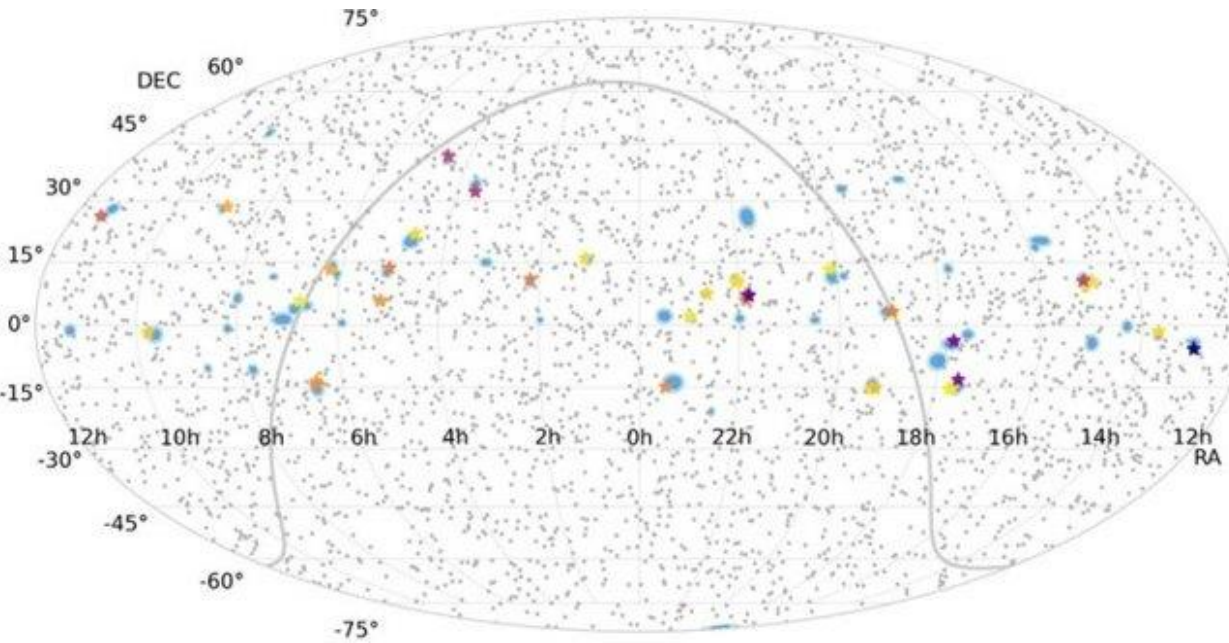
**Результат:** да, это так!  $\Rightarrow$  Нейтрино излучаются AGN-ами, около 100 блазаров

События  $\geq 200$  ТэВ: p-value = 0.2%

Систематическая ошибка IceCube 0.5°

Карта по всем энергиям: p-value = 0.3%

Вместе: p-value =  $4 \times 10^{-5}$ ,  $4.1\sigma$



# Связь нейтрино со вспышками в AGN

- Используем данные наблюдений выборки переменности излучения около 1000 AGN на PATAH-600 за последние 15 лет.

- Результат:**

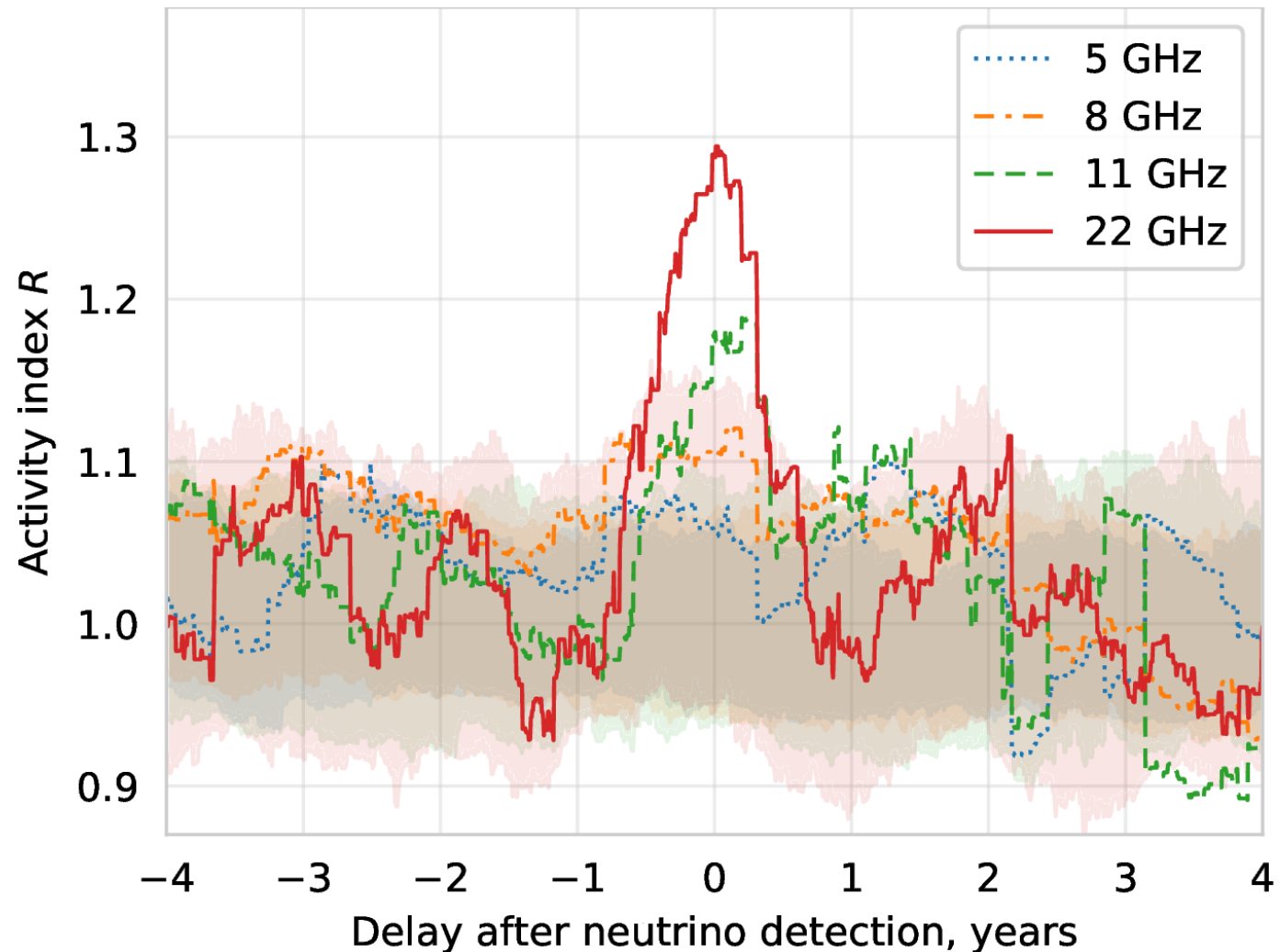
AGN ярче в моменты

детектирования нейтрино!

Для 22 ГГц  $p$ -value = 5% (post-trial),  
1% (pre-trial).

Эффект слабеет к низким частотам.

Независимое подтверждение:  
Novatta et al., arXiv:2009.10523



# Что это значит?

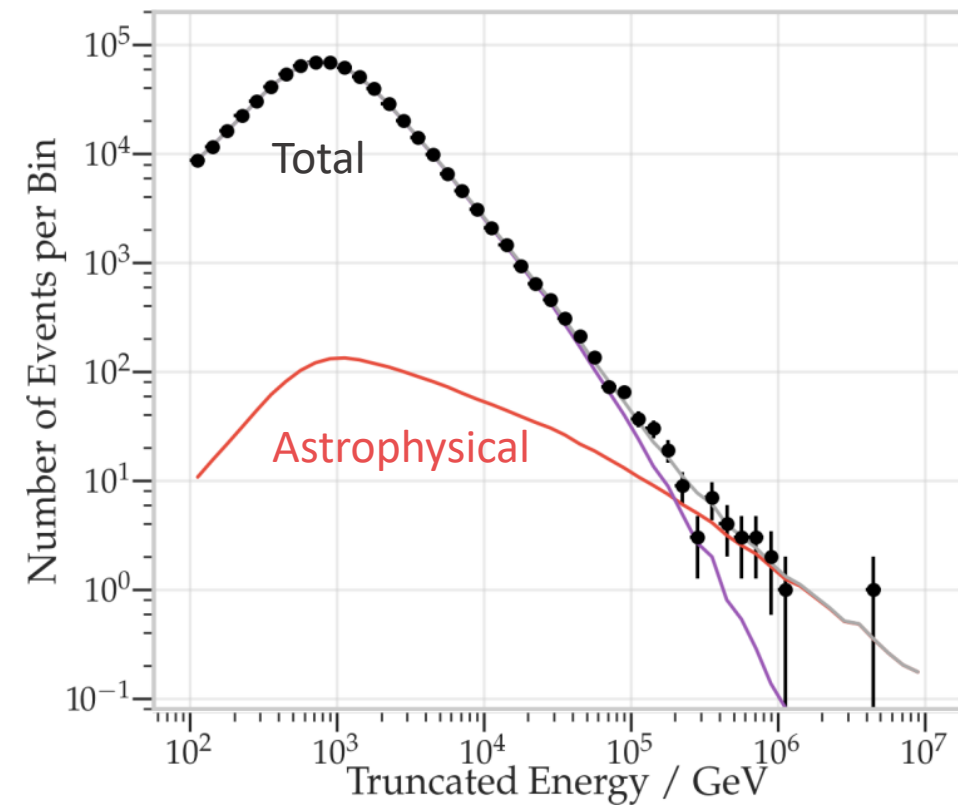
- AGN с яркими струями на масштабах парсек производят нейтрино высоких энергий, и это не единичные случаи. При этом они предпочитают одновременно вспыхнуть в радио (синхротронное излучение).
- РСДБ-выборка далеких активных галактик это преимущественно блазары, то есть галактики с джетами, направленными на наблюдателя.  
=> нейтрино излучаются узким пучком в направлении джета.

# Блазары — единственные источники нейтрино?

Астрофизические нейтрино составляют  
0.3% от всех событий IceCube:  
≈1300 из 422791 за 7 лет

От блазаров с РСДБ-поток > 330 мЯн пришло > 0.1%  
всех событий: это более 1/3 астрофизических

В терминах наблюдаемого потока:  
астрофизические нейтрино  $\approx 835 \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
от блазаров  $> 200 \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

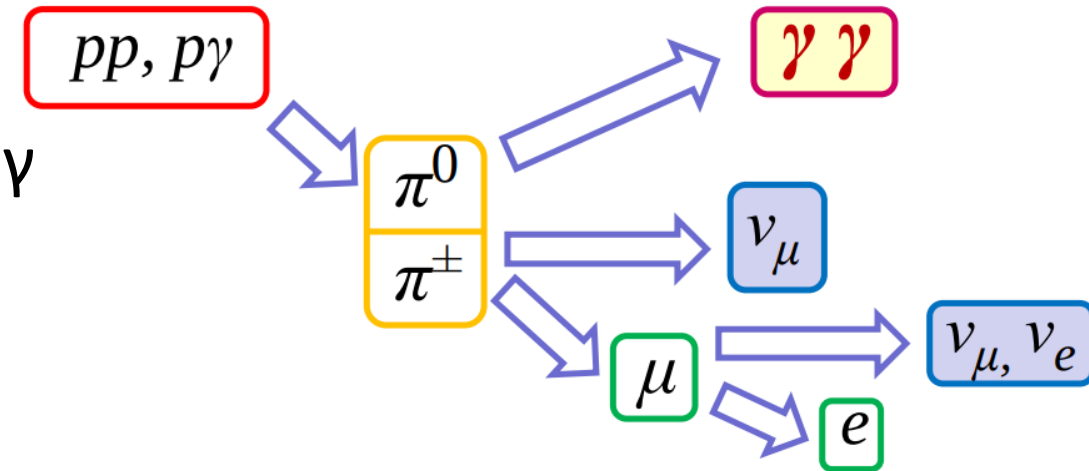


⇒ Блазарами можно полностью объяснить наблюдаемый поток нейтрино  $\gtrsim 1$  ТэВ!

- Есть множество менее ярких объектов, чем попавшие в каталог
- Ассоциация AGN из каталога не полная, ограничивается возможностями IceCube

# Как такое возможно?

- Нейтрино образуются в AGN процессом  $p + \gamma$  (Stecker+91, Neronov+02, Kalashev+15, Cerruti 19)
- Фотоны - от аккреционного диска или обратного Комптона в джете, протоны - разогнанные вдоль оси системы, например, в ударных волнах джета.
- Нейтрино сопровождается гамма-лучами. Почему не видно корреляции нейтрино-гамма (множество работ - попыток найти)? Вторичные фотоны эффективно теряют энергию на образование пар.
- Наблюдаемые от AGN радио-фотоны, гамма-фотоны и нейтрино образуются разными механизмами в далеких несвязанных напрямую областях.



Корреляции радио-гамма (Kovalev+09) и радио-нейтрино (эта работа) вызваны высокой направленностью разогнанных частиц и э/м излучения.

# Что дальше?

## Задачи, вопросы:

- Проверка найденной связи нейтрино-радио/AGN.
- Все-таки  $p+\gamma$  или  $p+p$ ?
- Детально, где и как происходит рождение нейтрино?
- Как разгоняются протоны?

## Следующие шаги:

1. Продолжение наблюдений на PATAN-600 и VLBA: мониторинг большой выборки плюс алерты. Заявки на наблюдения поданы, выиграны с высоким приоритетом, реализуются. Пишем новые.
2. Конкуренты: внимательно следят за развитием ситуации. В Европе и США обсуждается вложение серьезных ресурсов в эту задачу: одиночные телескопы (Caltech) и интерферометры (EVN vision). Гонка началась.
3. Европейский нейтринный телескоп ANTARES обратился к нам с предложением анализа их данных. ФИАН вошел в коллаборацию ANTARES в статусе наблюдателя. Можем использовать их неопубликованные данные и писать совместные статьи.
4. Начали совместную работу с Baikal-GVD в рамках 100M гранта. Надеемся теперь и на «русские нейтрино».

# Заключение

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

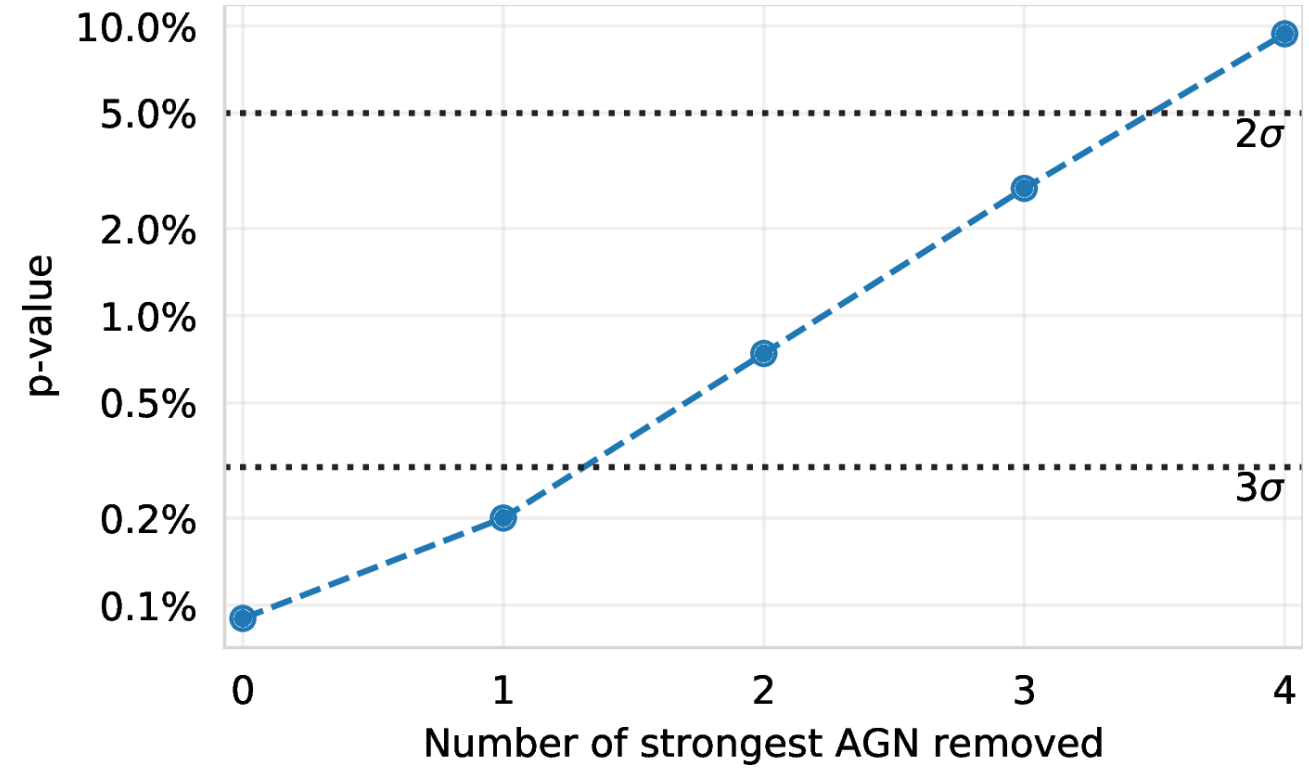
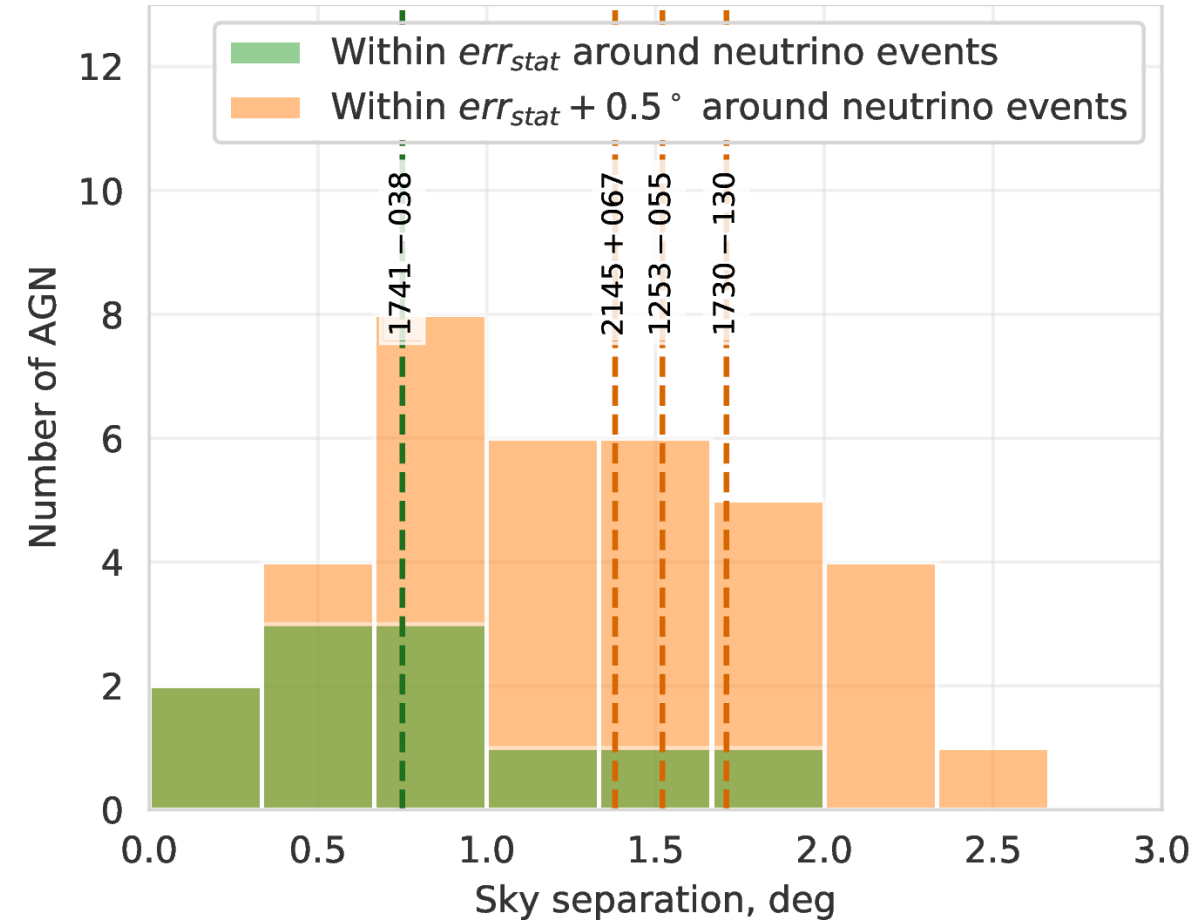
- Как минимум 70 AGN ассоциированы с IceCube-детектированиями, нами отобраны шесть из них как наиболее вероятные.
- РСДБ — ключ к этому сопоставлению.
- Важен учёт систематики IceCube: наша оценка величины ошибки  $\simeq 0.5^\circ$ .
  
- Нейтрино рождается в центральном парсеке и улетает вдоль джета.
- Яркие блазары могут объяснить все астрофизические нейтрино  $\gtrsim$  ТэВ.
- Сильные ограничения на механизм образования: протон+фотон. Фотоны с энергиями до сотен кЭв, протоны до  $10^{16}$  эВ.



Спасибо! Вопросы?

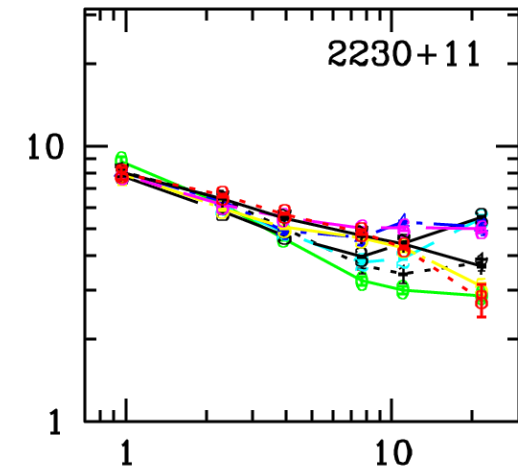
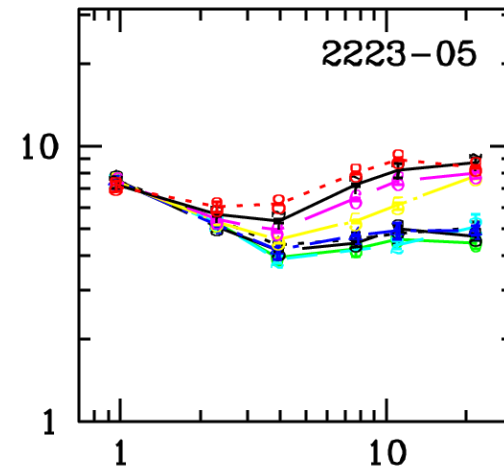
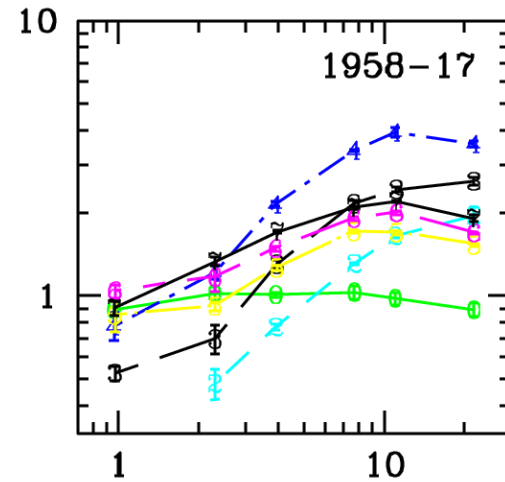
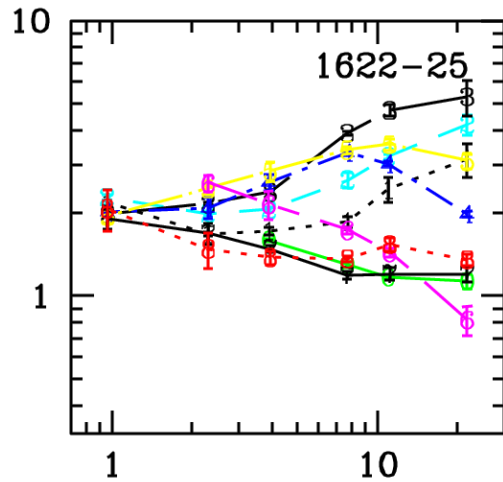
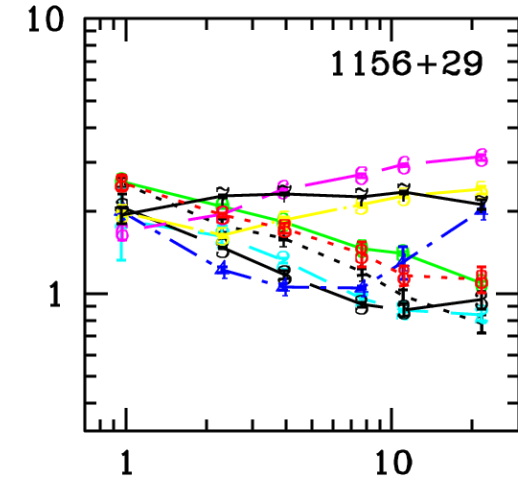
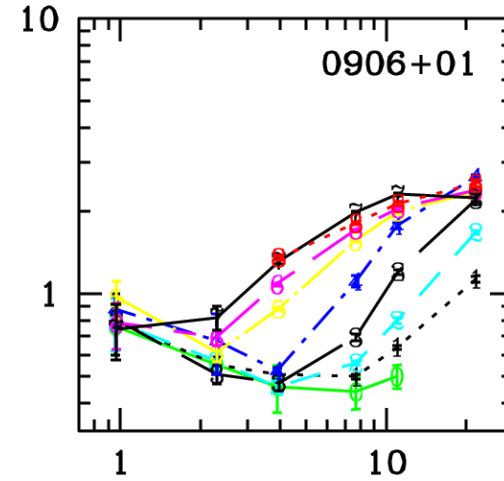
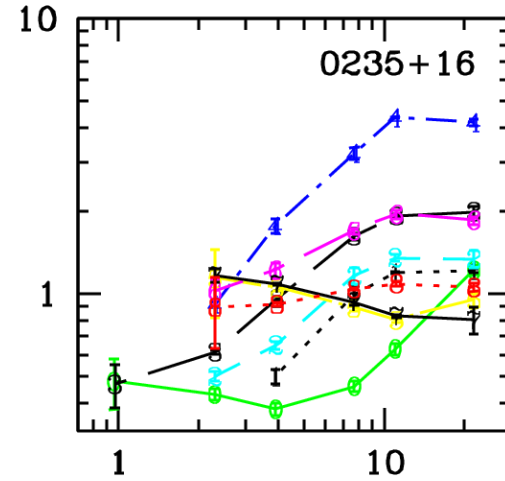
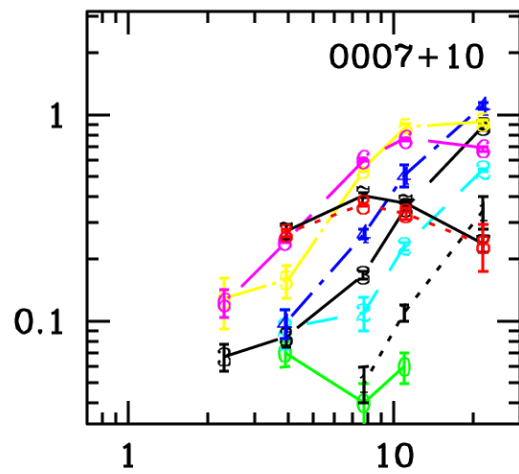


# Нейтрино и яркие AGN



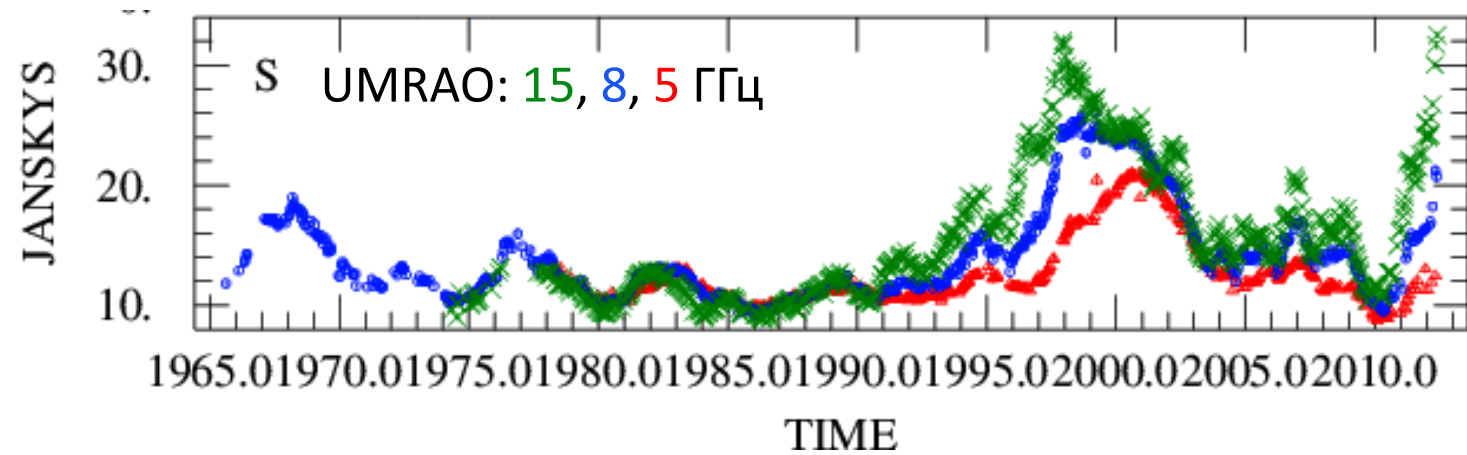
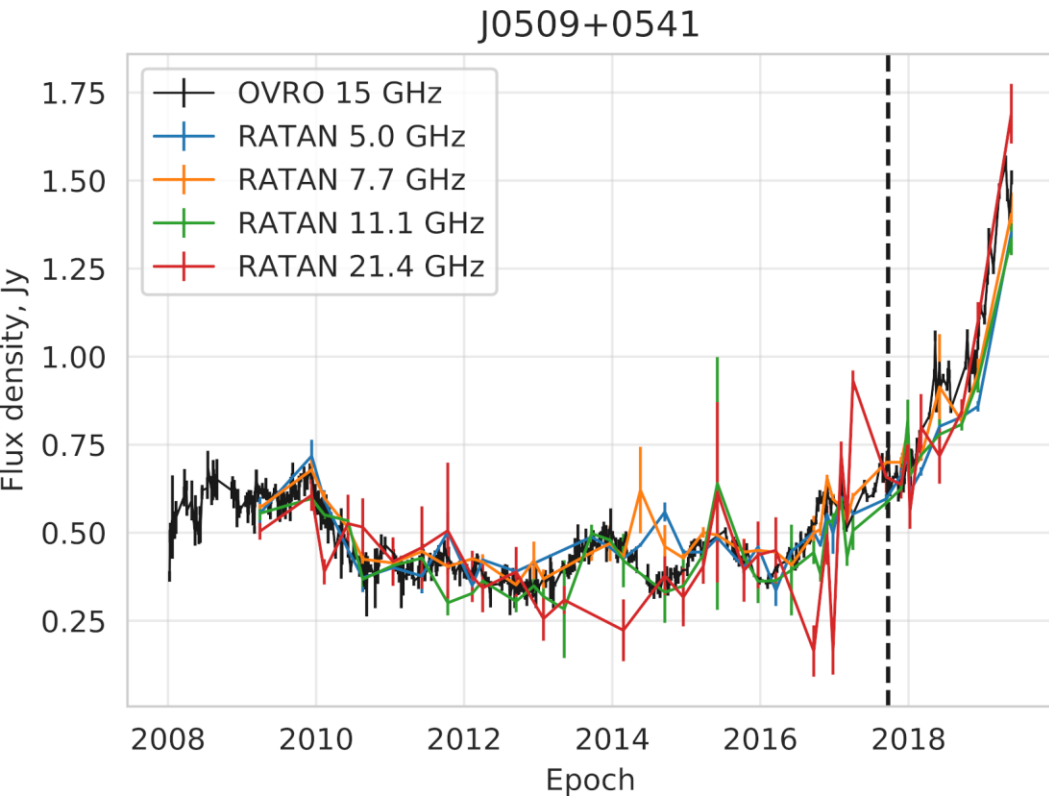
# Типичные радиовспышки в AGN: РАТАН

Flux Density, Jy



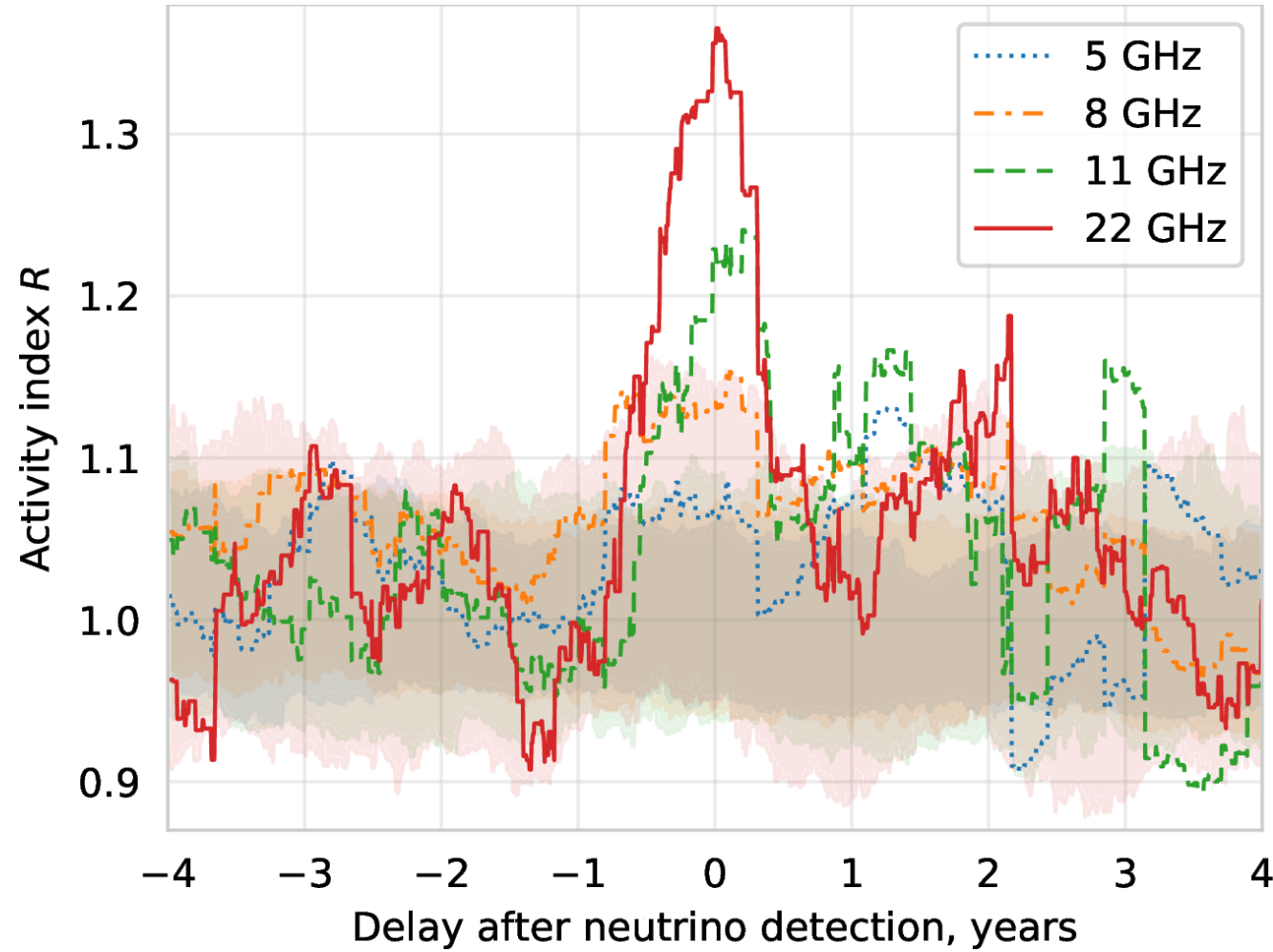
Frequency, GHz

# Пример частых измерений: РАТАН, OVRO, UMRAO



# Связь нейтрино со вспышками в AGN

Эффект остаётся после удаления 4 самых сильных AGN, выделенных нашим РСДБ-анализом:



Корреляция максимальная для PKS 1502+106, но эффект остаётся и после его удаления.

# Физическая интерпретация

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

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

Излучение направленное, преимущественно вдоль джета

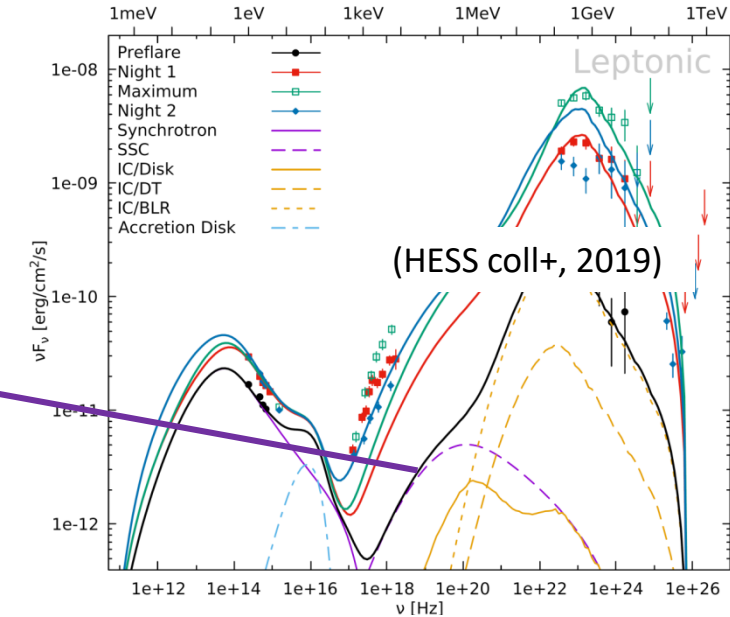
(предсказано Neronov+02)

Требуются фотоны от 100 эВ до 200 кЭв ...

- SSC-фотоны джета?

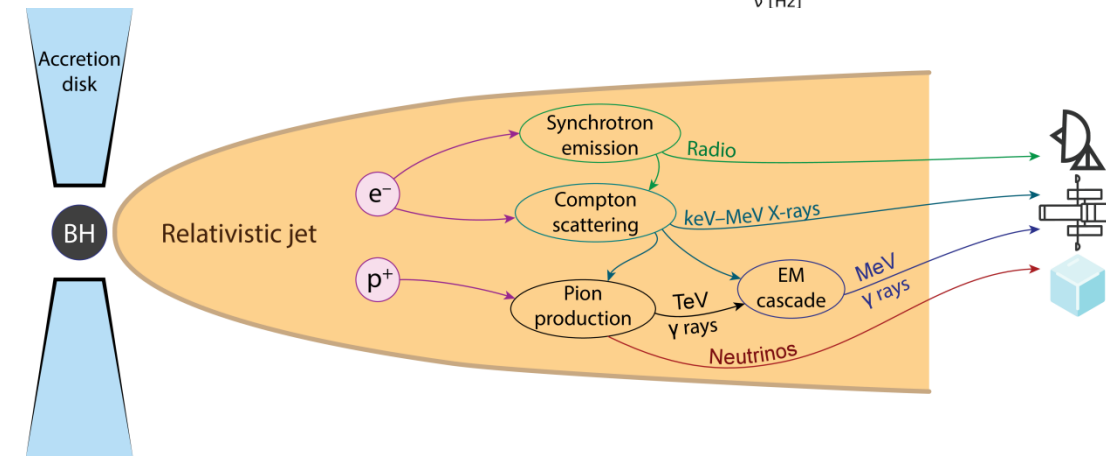
... и протоны до  $10^{16}$  эВ

- Ударные волны? (Bykov et al. 2012; Lemoine & Waxman 2009)
- ...



Блазарами можно объяснить весь поток астрофизических нейтрино на IceCube!

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



# Нейтрино и AGN: теория

- $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$  или  $p + p \rightarrow \pi + X$

Требуются фотоны и высокоэнергетические протоны.

- Возможные области AGN:

(см. например, Bottcher 19)

центр - диск, BLR, область формирования и ускорения джета,  
периферия - крс-scale джеты, "уши".

- Место в спектре:

- До ~15% нейтрино высоких энергий на IceCube могут быть связаны с AGN (Murase+18)

