

Изучение высокоэнергетических процессов в ядрах активных галактик по данным радио, оптических и нейтринных наблюдений

Плавин Александр Викторович

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия**

Научный руководитель: Ковалев Ю.Ю., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Предмет исследования

Центральные области
активных ядер галактик
на масштабах парсек

- Чёрная дыра и аккреционный диск вокруг неё
- Релятивистский джет, видимый наблюдателю под малым углом: блазары



NASA/JPL

В трёх главах диссертации рассматриваются следующие вопросы:

- Исследование оптического излучения активных ядер галактик используя измерения РСДБ и Gaia
- Смещение видимого начала радиоджетов блазаров со временем
- Связь блазаров и нейтрино высоких энергий

Оптическое излучение активных галактик

Различные компоненты:

- Аккреционный диск
- Релятивистский джет
- Звезды хозяйской галактики

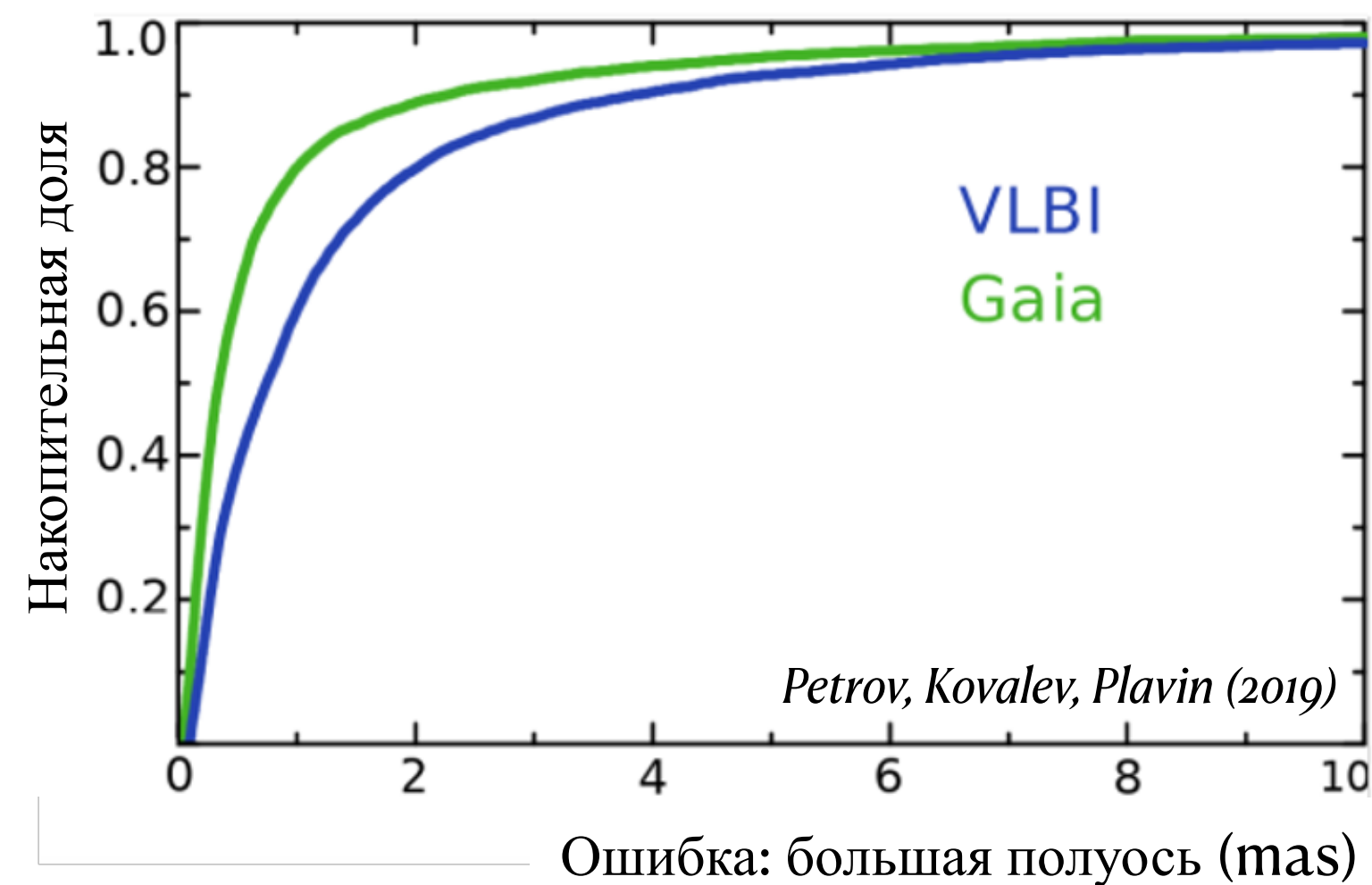


Напрямую различить эти части невозможно:

недостаточно разрешения телескопов, 0.1-1 секунда дуги

Астрометрия: возможность заглянуть глубже?

Характерная точность: 0.5 mas



Радиоастрометрия (РСДБ):

указывает на яркую компактную деталь в начале джета

Оптическая астрометрия (Gaia):

определяет положение центроида излучения

Яркий джет может сместить центроид ...

... но есть ли джеты с настолько сильным оптическим излучением?

Mimica+2009:

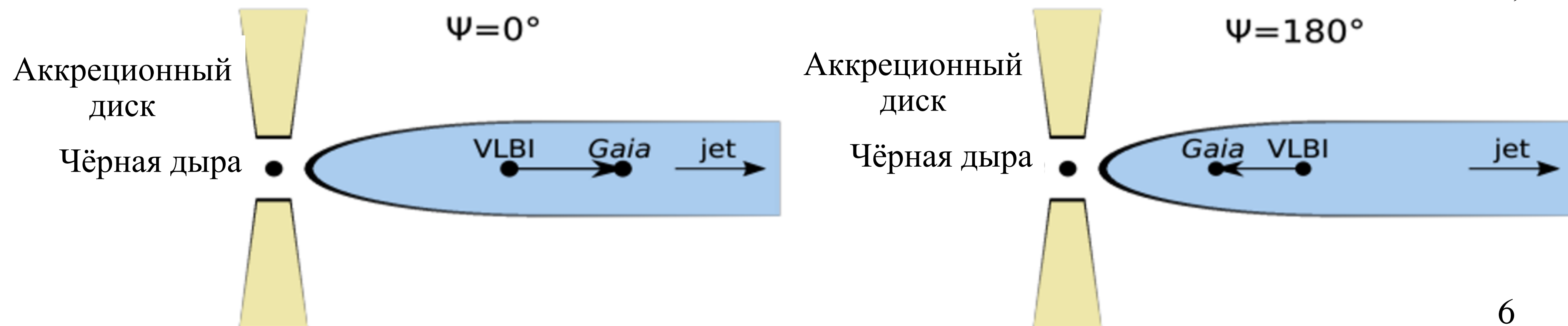
если и есть, то мало

Как часто они встречаются? Какие физические свойства квазара требуются?

Сравнение РСДБ и Gaia положений

Более 1000 из 9000 АЯГ показывают значимые различия
Какие могут быть направления сдвигов?

- Мощное оптическое излучение джета смещает центроид
⇒ сдвиги вдоль джета
- Протяженное излучение слабое
⇒ отличия малы, направления распределены случайно
- Смещение видимого джета в радиодиапазоне, оптическое излучение из центральных областей
⇒ сдвиги VLBI → Gaia против джета

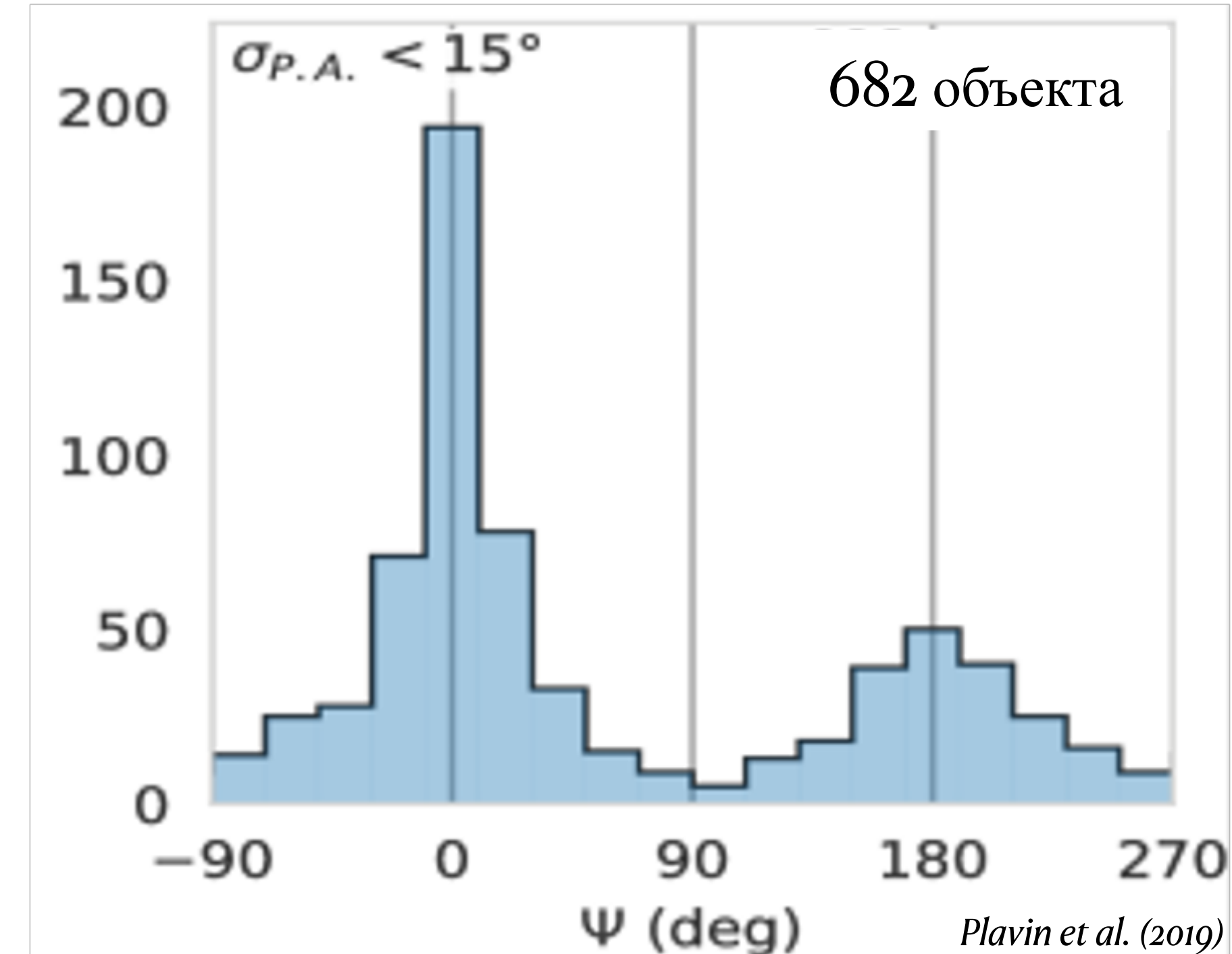
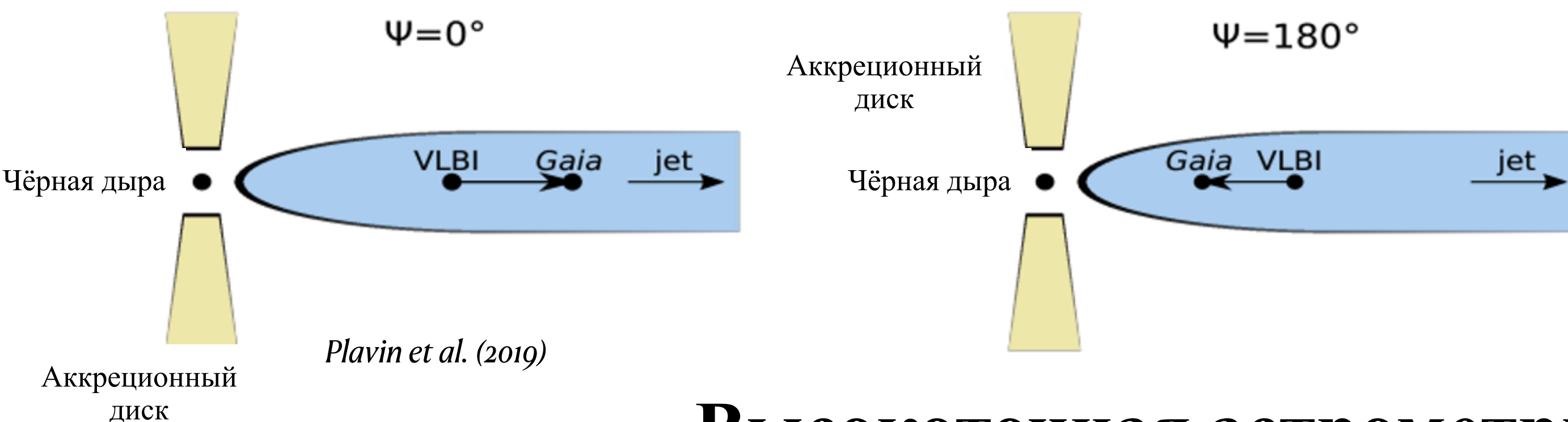


Сравнение РСДБ и Gaia положений

Каковы направления сдвигов на самом деле?

Наблюдаются оба эффекта!

- Смещение видимого джета в радиодиапазоне, оптическое излучение из центральных областей
⇒ сдвиги против джета
- Мощное оптическое излучение джета смещает центроид
⇒ сдвиги вдоль джета



Высокоточная астрометрия «видит» структуру джетов квазаров

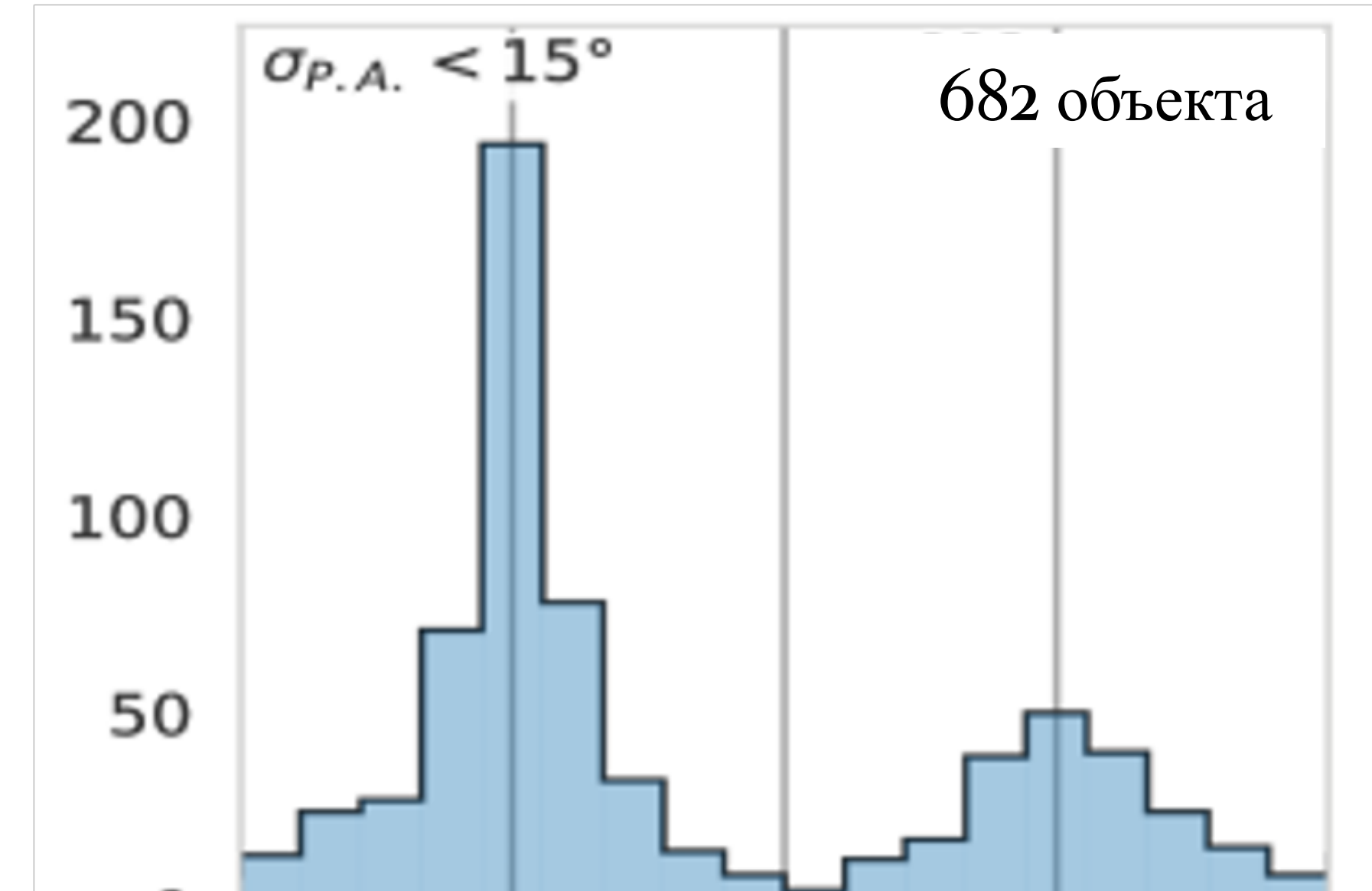
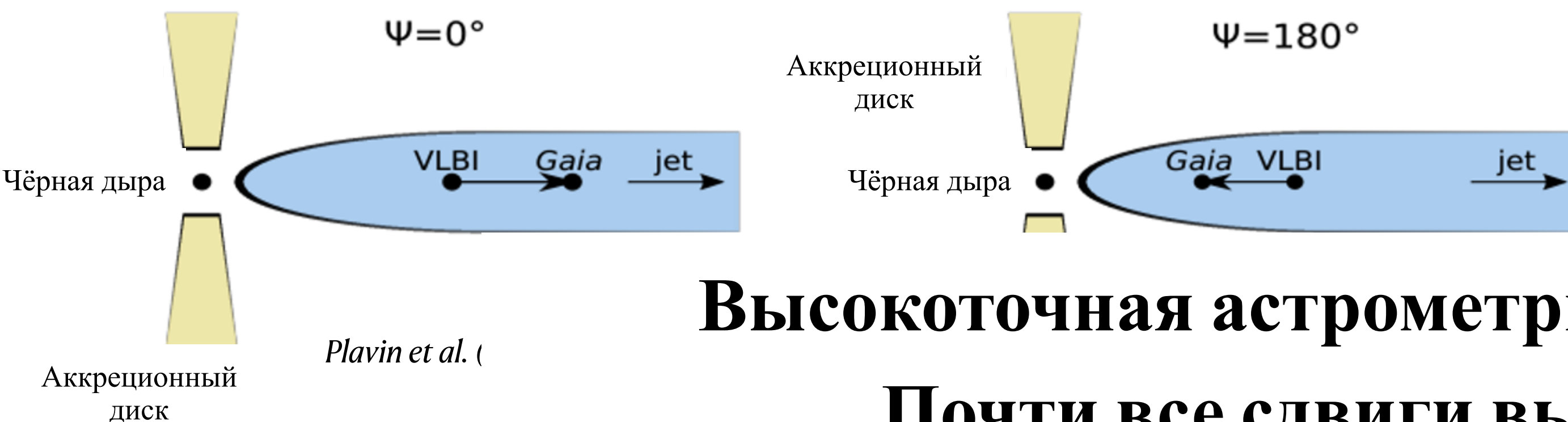
Почти все сдвиги вызваны астрофизическими причинами

Сравнение РСДБ и Gaia положений

Каковы направления сдвигов на самом деле?

Наблюдаются оба эффекта!

- Смещение видимого джета в радиодиапазоне, оптическое излучение из центральных областей
⇒ сдвиги против джета
- Мощное оптическое излучение джета смещает центроид
⇒ сдвиги вдоль джета



Высокоточная астрометрия «видит» структуру джетов квазаров

Почти все сдвиги вызваны астрофизическими причинами

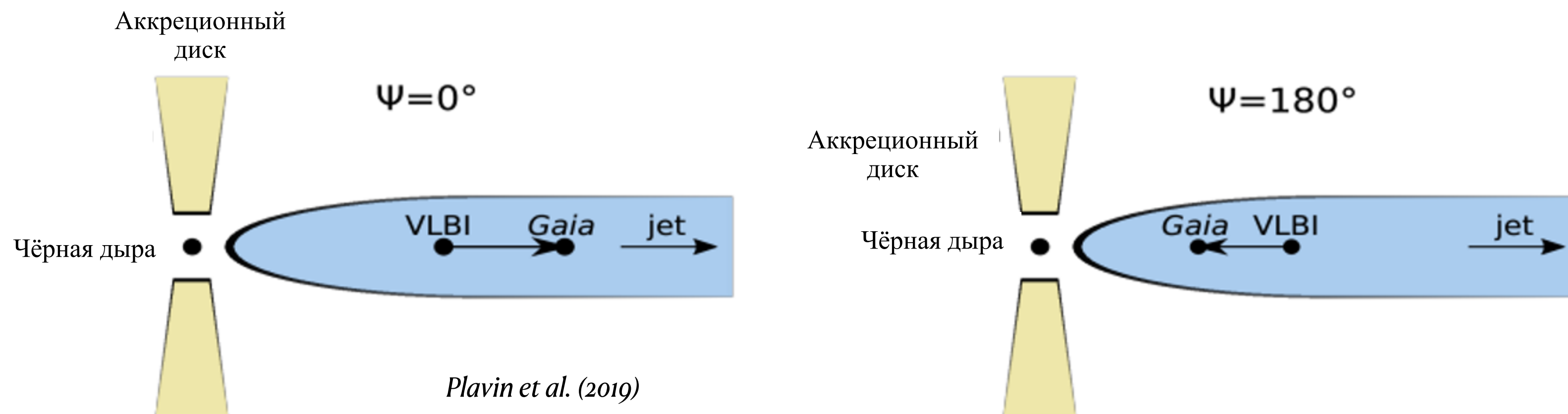
Независимое подтверждение: Xu et al. (2021)

Сравнение РСДБ и Gaia положений

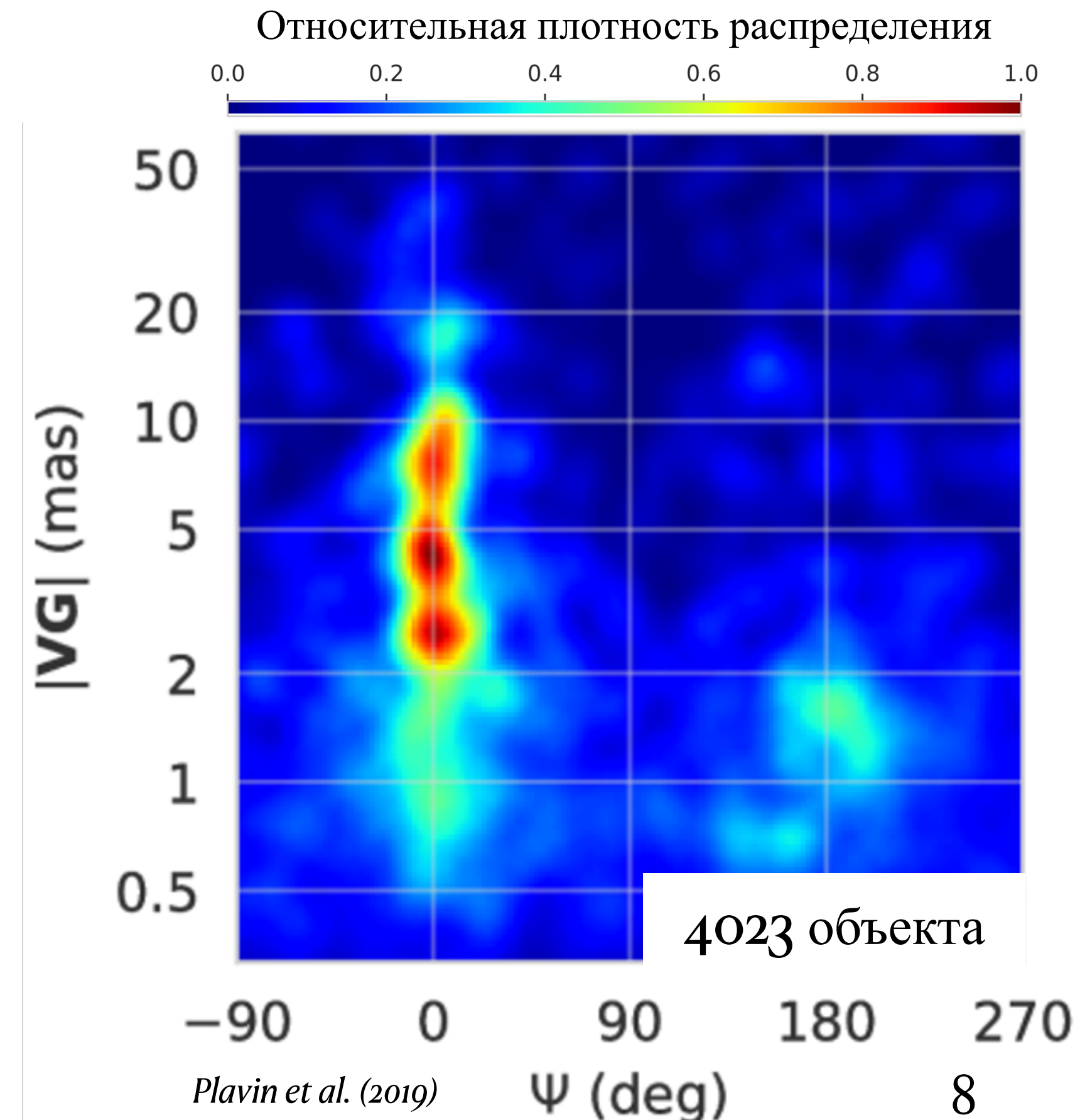
Каковы направления сдвигов на самом деле?

Наблюдаются оба эффекта!

- Смещение видимого джета в радиодиапазоне, оптическое излучение из центральных областей
⇒ сдвиги против джета, **не более 2 mas**
- Мощное оптическое излучение джета смещает центроид
⇒ сдвиги вдоль джета, **до десятков mas**

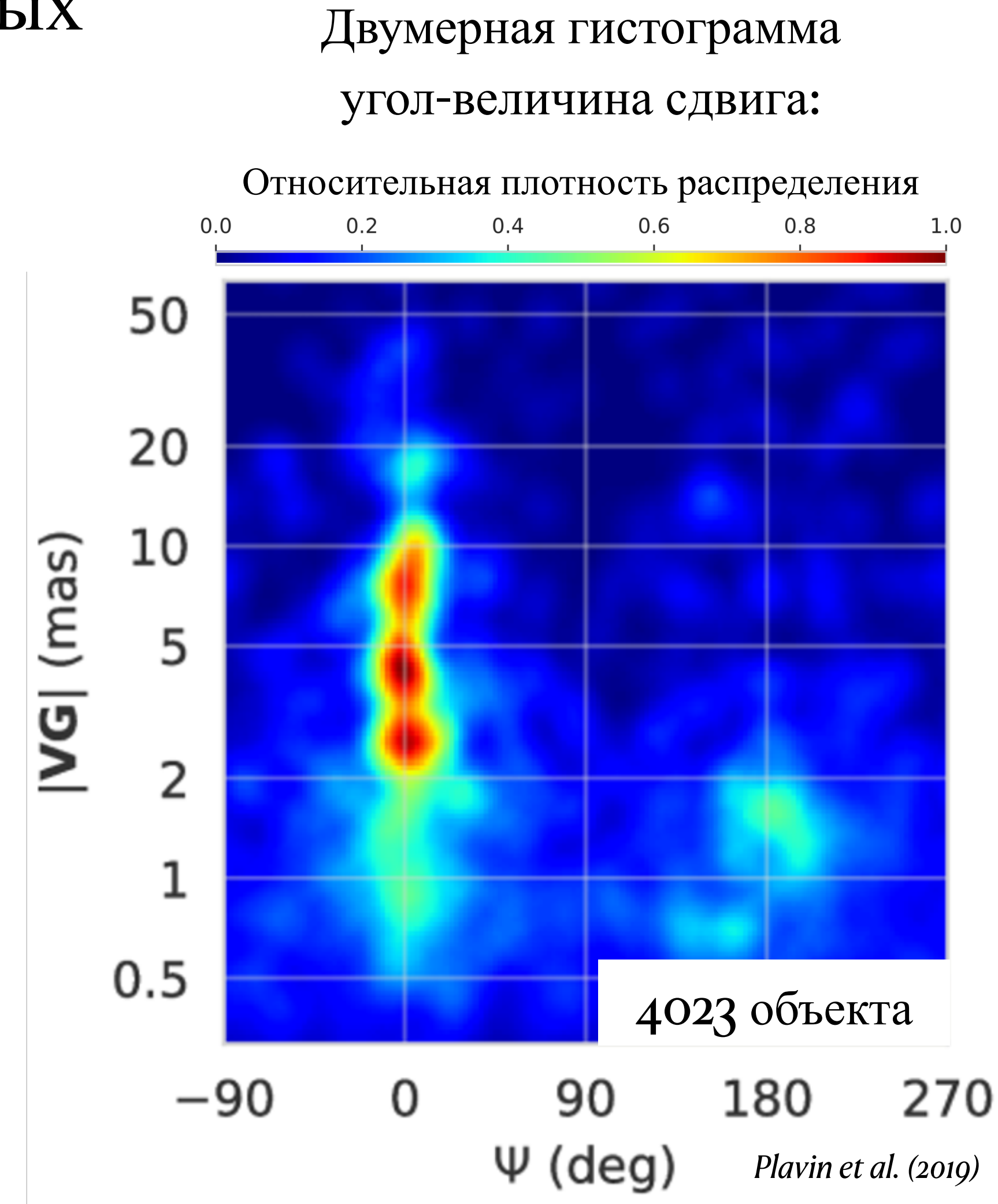
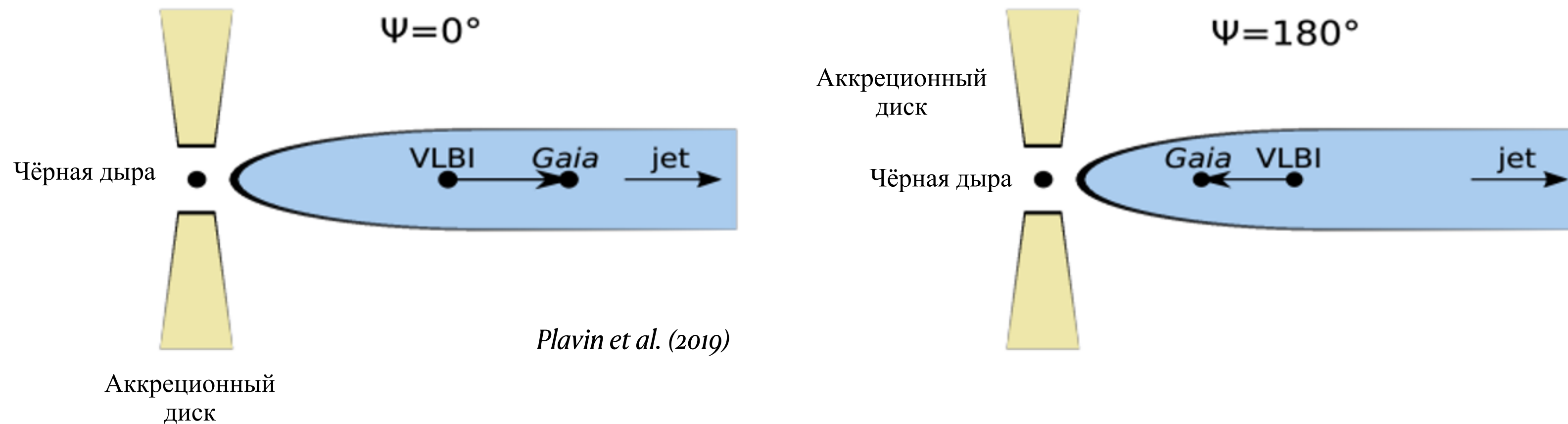


Двумерная гистограмма
угол-величина сдвига:



Источники оптического излучения

- Сдвиги вдоль джета: доминирует излучение протяженных джетов, до десятков парсек (в проекции)
Аккреционный диск закрыт или излучает слабо
- Сдвиги против джета: доминирует излучение аккреционного диска, джет существенно слабее

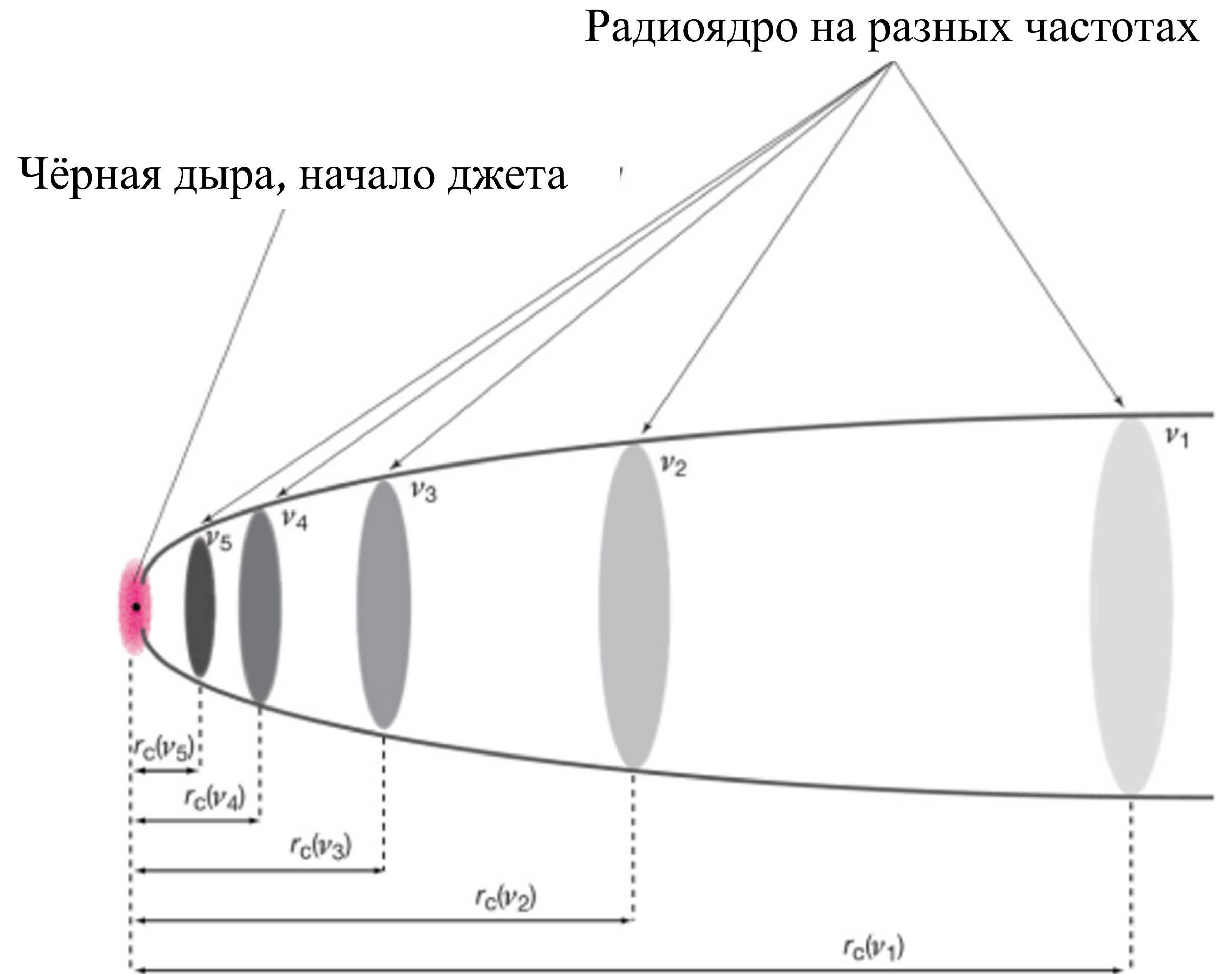


Представлен новый способ массово исследовать оптическую
структуру джетов на парсековых масштабах

Переменность положения радиоядра

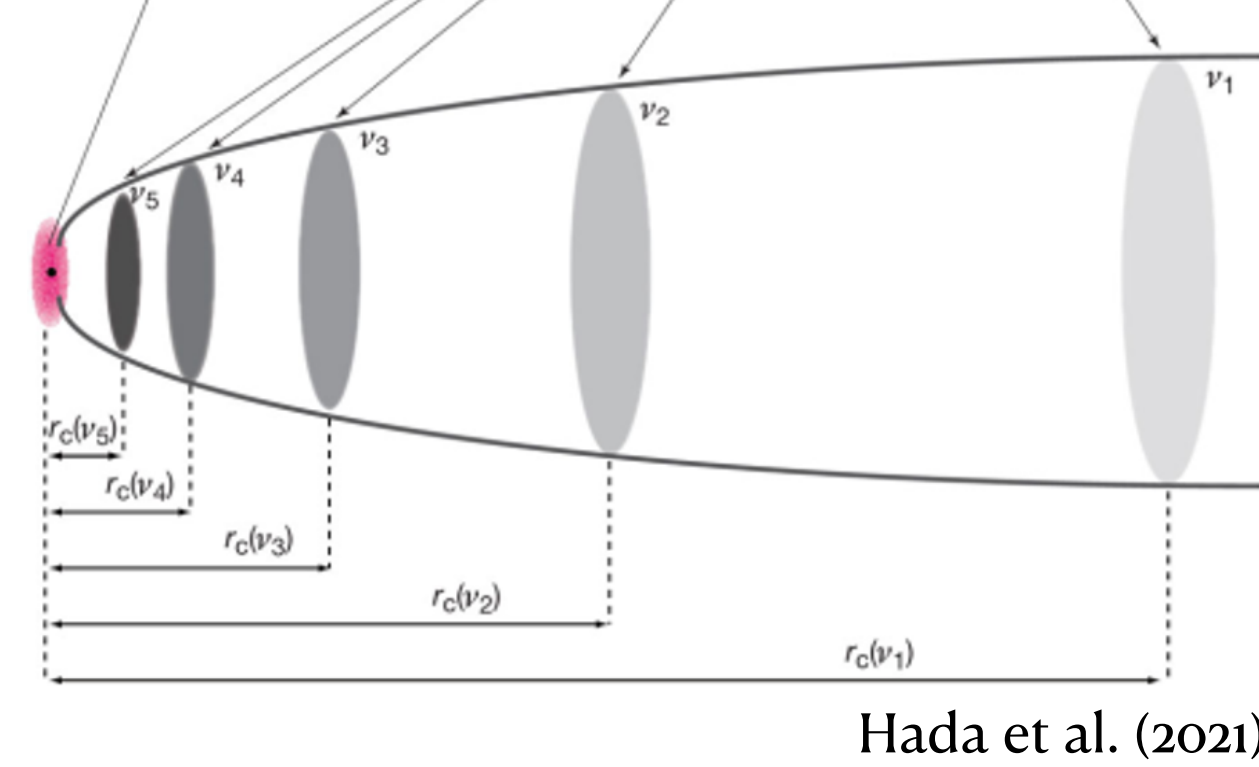
Истинное начало джета не видно в радиодиапазоне: синхротронное самопоглощение

Яркий компонент в видимом начале джета - «радиоядро»



Hada et al. (2021)

Переменность положения радиоядра



Насколько стабильно это положение?

В чём физические причины его переменности? Как это связано со вспышками?

Подход к решению этих вопросов:

Массовые измерения «сдвига ядра», поиск его временных изменений

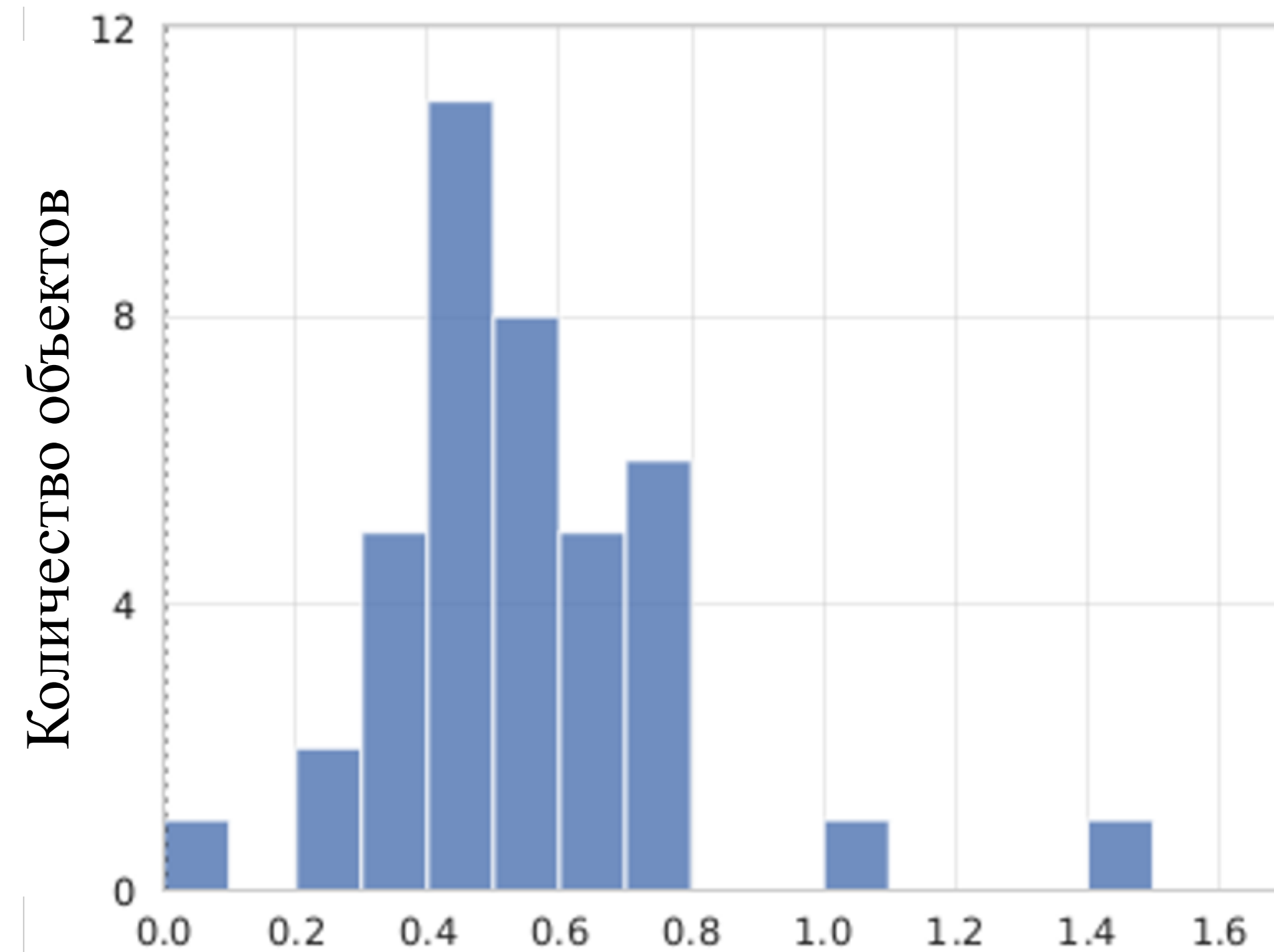
Данные: одновременные двухчастотные многоэпоховые РСДБ наблюдения

Минимум по 10 эпох, 2 и 8 ГГц, 40 активных галактик

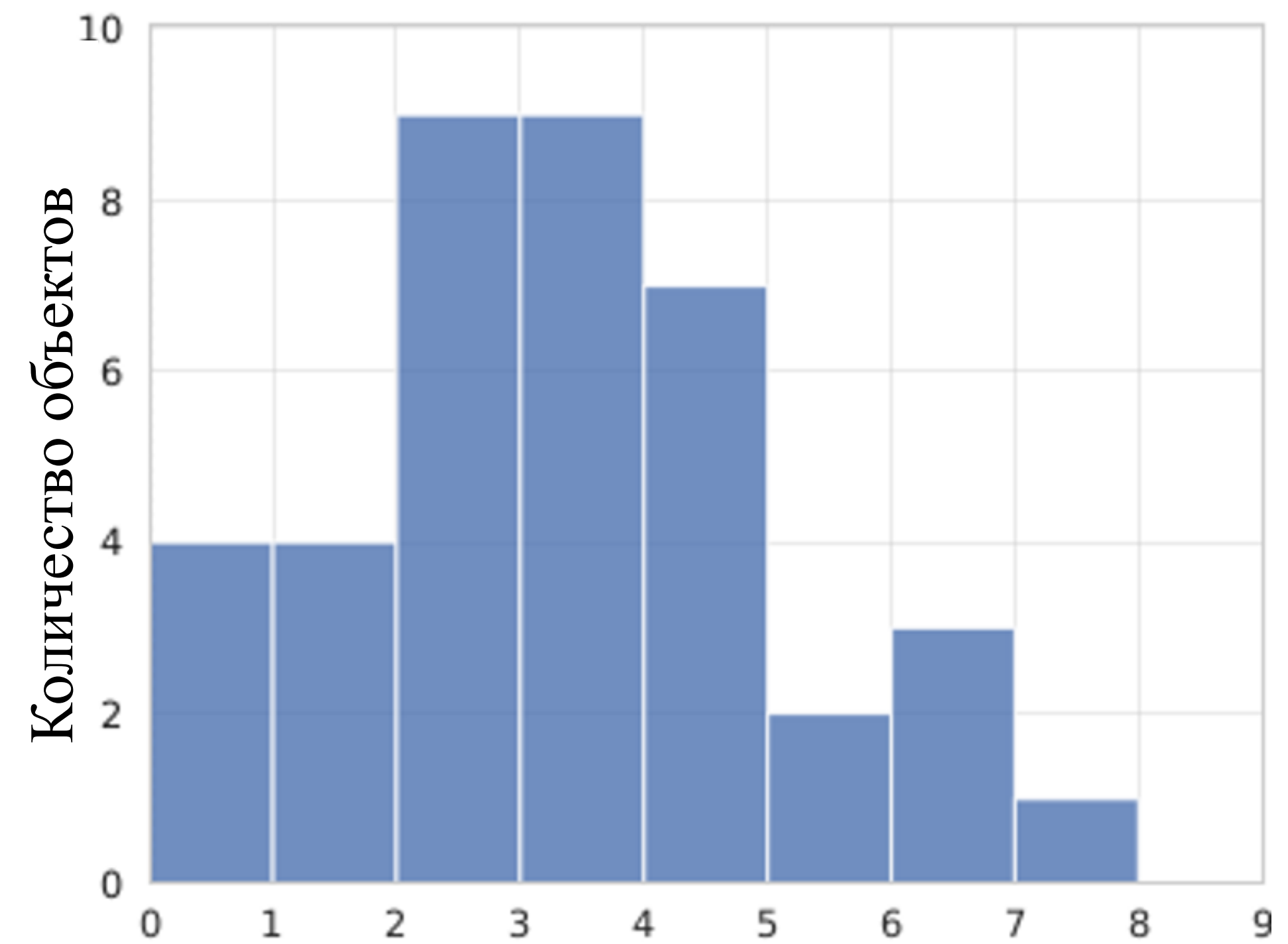
Всего 1691 наблюдение

Сдвиг ядра: величина

Самые массовые измерения, 1691 эпоха



Сдвиг ядра (mas)
Медиана 0.55 mas



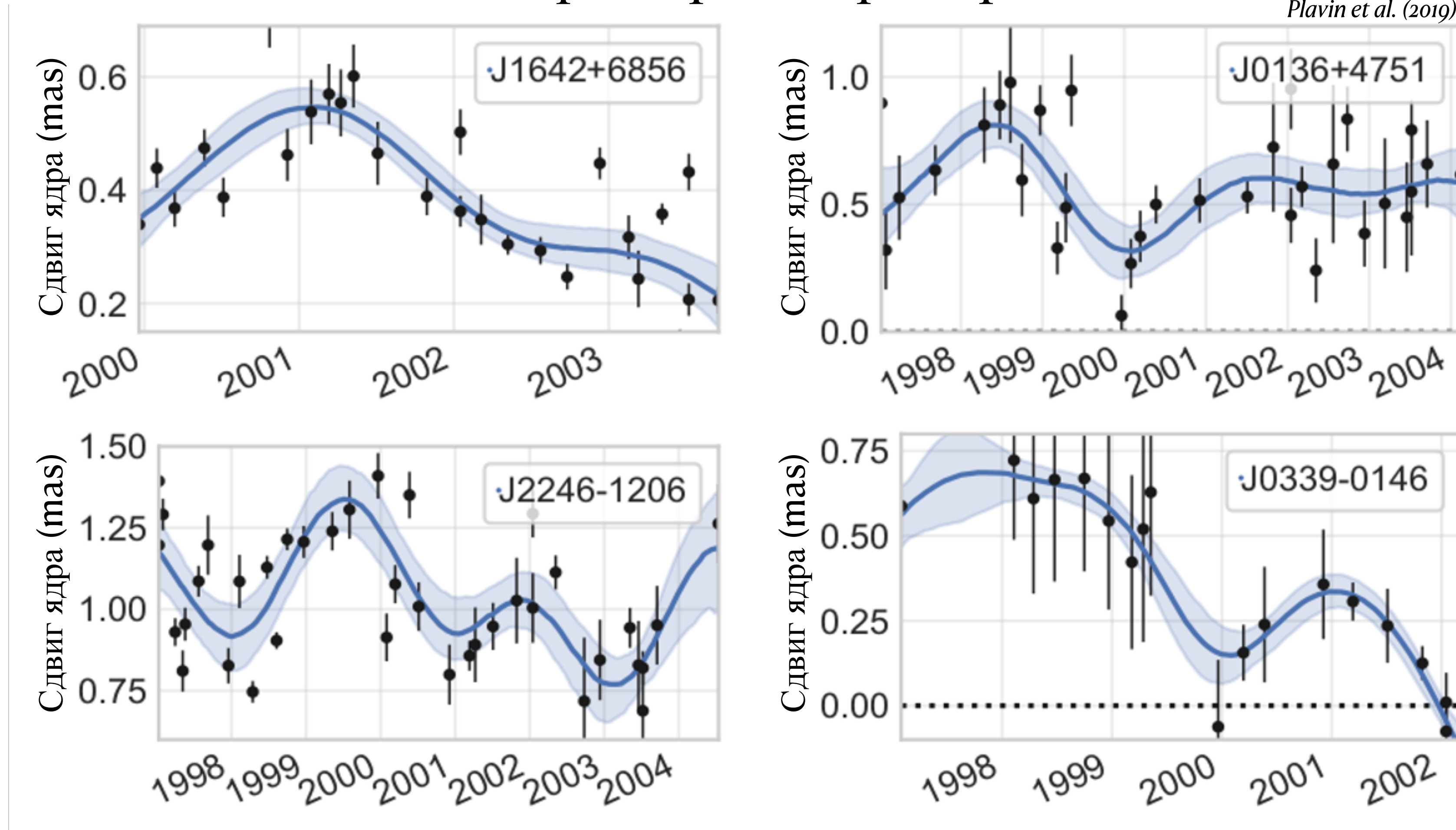
Сдвиг ядра (пк)
Медиана 3.2 пак

Plavin et al. (2019)

Сдвиг ядра: переменность

Характерные примеры

Plavin et al. (2019)



Значимые изменения в 33 из 40 квазаров

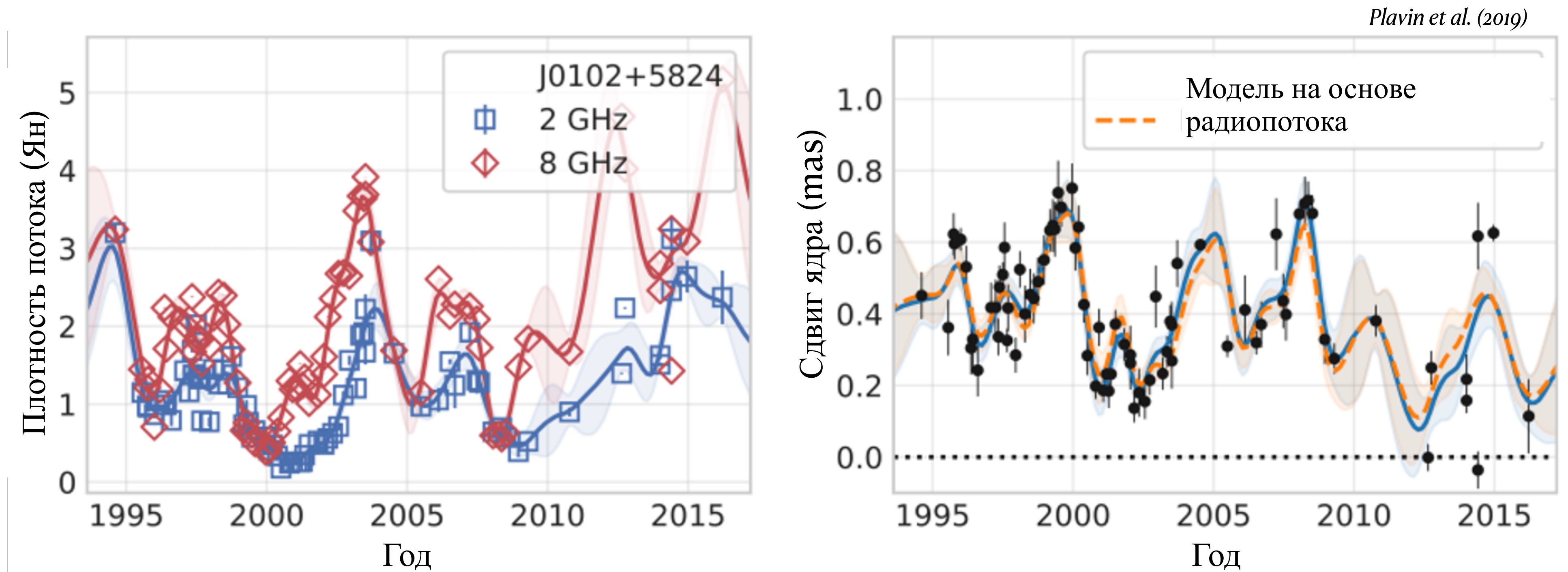
Средний размах переменности на 2-8 ГГц: 0.3 mas

Видимое положение ядра переменно у большинства джетов

Сопоставим с самой величиной сдвига

Начало радиоджета во время вспышек

Основные изменения сдвига ядра соответствуют вспышкам –
изменению радиопотока:



Ядро смещается дальше от начала джета при увеличении потока: $r \sim S^{0.3}$

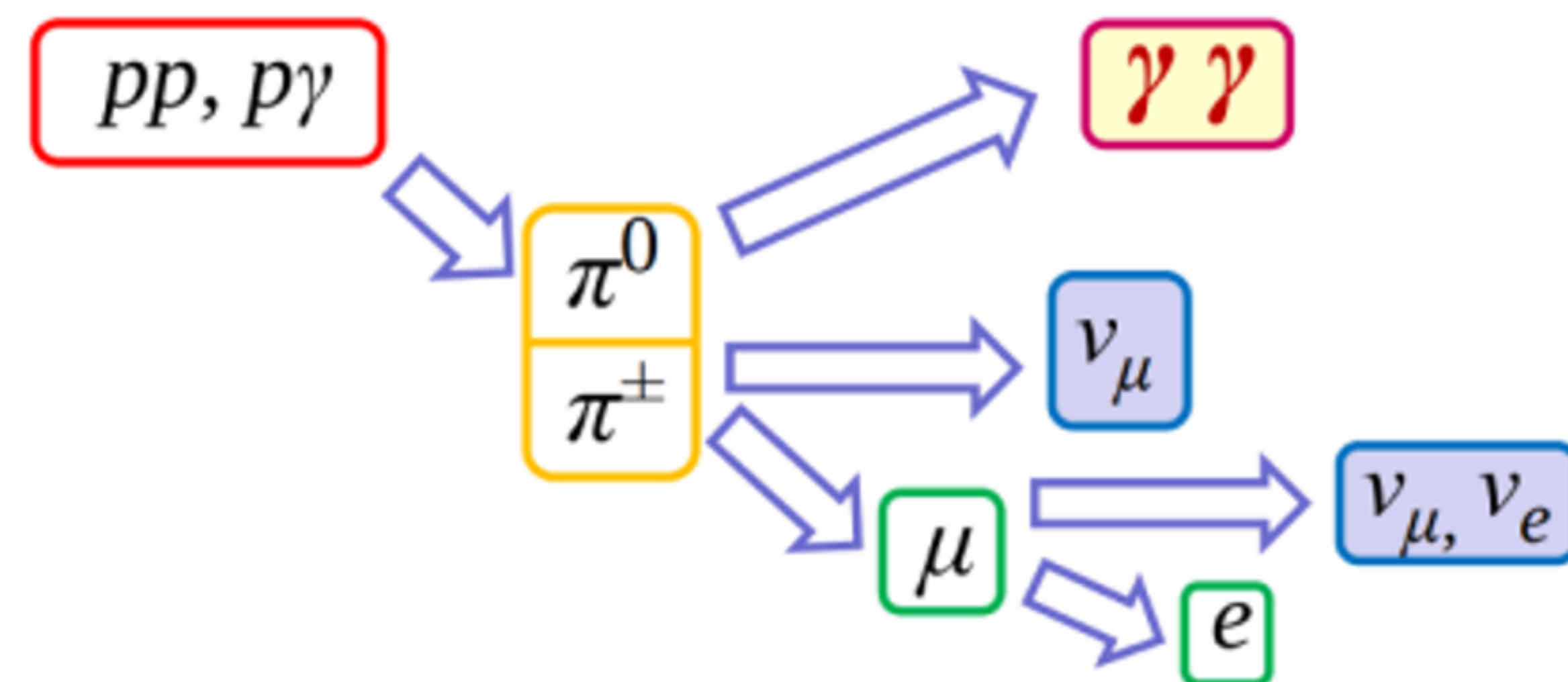
⇒ **Во вспышках выше плотность излучающих частиц и ниже магнитное поле**

(по модели Blandford & Königl, 1979)

Рождаются ли нейтрино в блазарах?

Центральные области активных галактик эффективно ускоряют электроны – релятивистский джет
Достигаются ли высокие энергии протонов? Какие, в каких объектах?

Нейтрино высоких энергий:
ключ к тому, какие объекты ускоряют ультрарелятивистские протоны



Предыдущие результаты:

множество попыток поиска связи, но только один блазар
TXS 0506+056 значимо ассоциирован с нейтрино за 10 лет

Блазары и нейтрино

Поиск ассоциаций

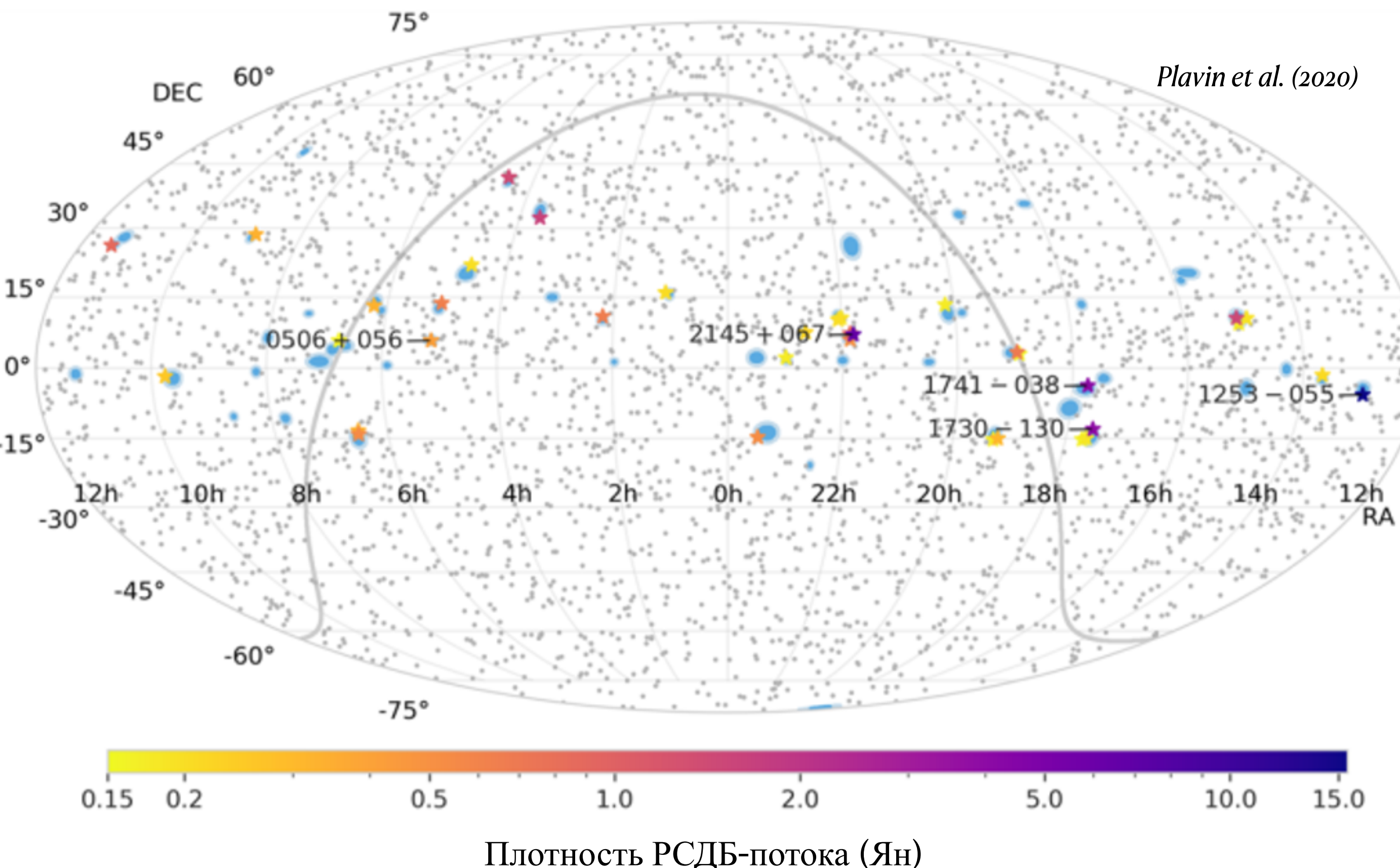
Систематический подход:

сопоставление полной по потоку > 0.15 Ян
выборки 3433 РСДБ-ярких активных ядер
с детектированиями нейтрино на IceCube

Выше 200 ТэВ: каталог из 56 «алертных»
событий

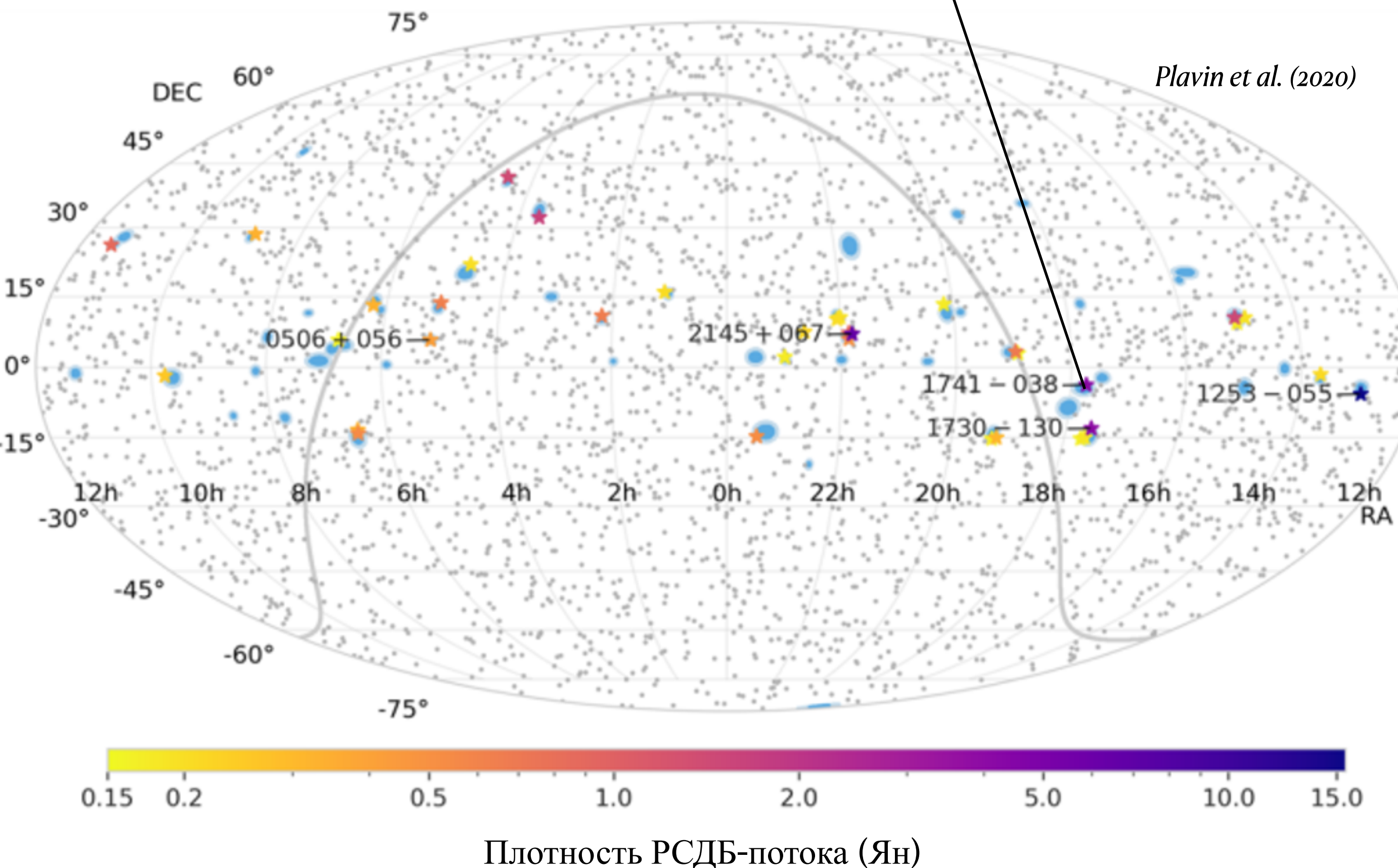
Найдено 4 новых ассоциированных блазара!

p-value: 0.2%



Февраль 2022: ещё одно нейтрино!

ATel #15215



Блазары и нейтрино

Поиск ассоциаций

Систематический подход:

сопоставление полной по потоку > 0.15 Ян
выборки 3433 РСДБ-ярких активных ядер
с детектированиями нейтрино на IceCube

Выше 200 ТэВ: каталог из 56 «алертных»
событий

Найдено 4 новых ассоциированных блазара!

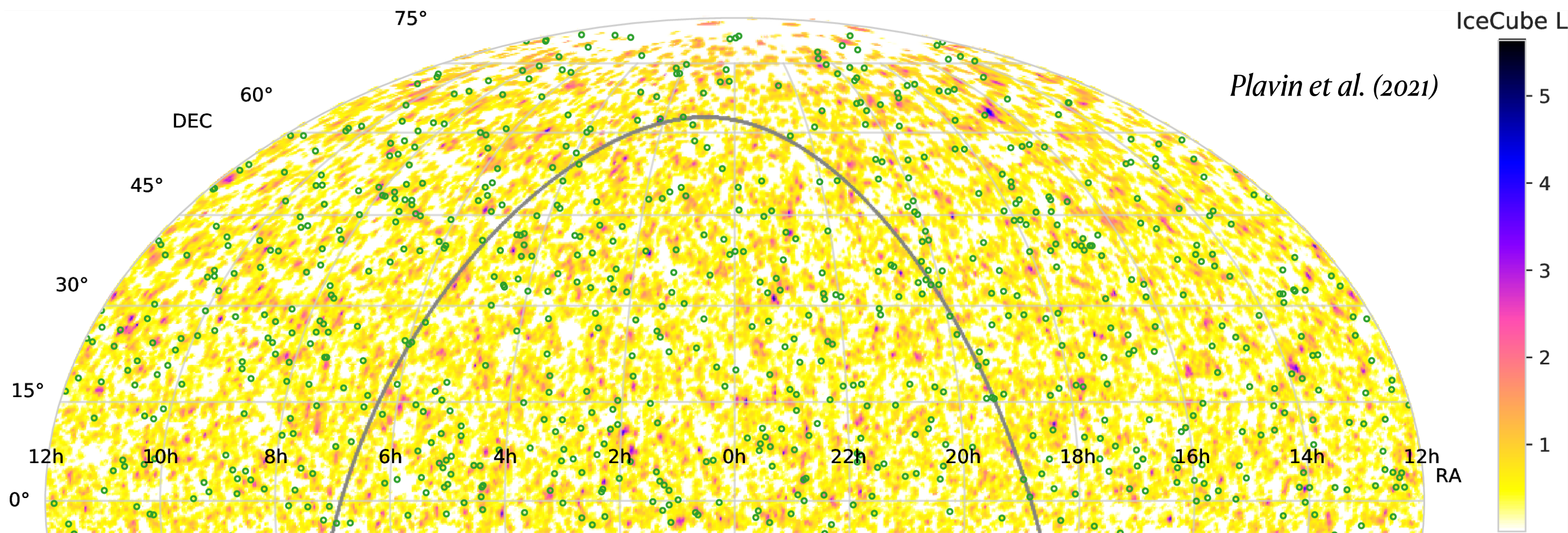
p-value: 0.2%

Блазары и нейтрино

Поиск ассоциаций

Карта неба IceCube

Цвет: вероятность точечных источников нейтрино



Систематический подход: сопоставление полной выборки РСДБ-ярких активных ядер с детектированиями нейтрино на IceCube

Карта неба с вероятностями точечных источников, типичные энергии > 10 ТэВ

Как минимум, 70 блазаров связаны с этими нейтрино!

p-value: 0.3%

Блазары и нейтрино

Поиск ассоциаций

Систематический подход: сопоставление полной выборки РСДБ-ярких активных ядер с детектированиями нейтрино на IceCube

Карта неба с вероятностями точечных источников, типичные энергии > 10 ТэВ

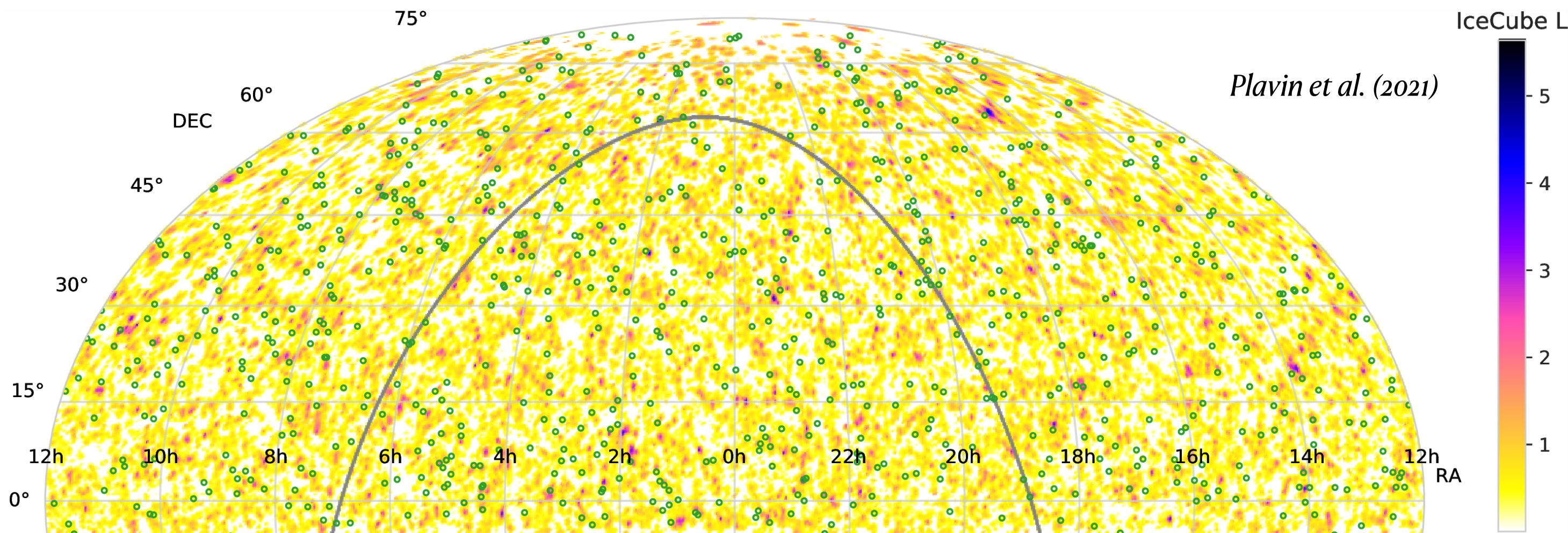
Как минимум, 70 блазаров связаны с этими нейтрино!

p-value: 0.3%

Совместная статистическая значимость результатов по обоим диапазонам энергий:

p-value= $4 \cdot 10^{-5}$, уровень 4.2 сигма

Блазары массово излучают нейтрино с энергиями от ТэВ до ПэВ!



Блазары и нейтрино

Поиск ассоциаций

Систематический подход: сопоставление полной выборки РСДБ-ярких активных ядер с детектированиями нейтрино на IceCube

Карта неба с вероятностями точечных источников, типичные энергии > 10 ТэВ

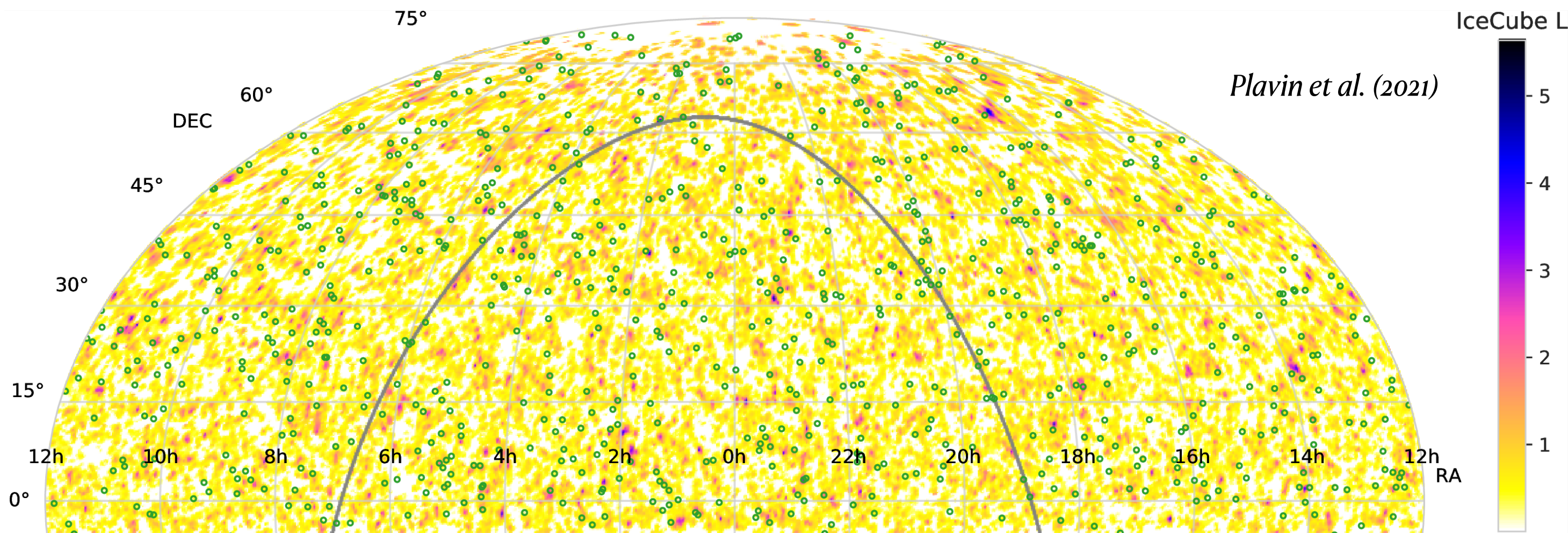
Как минимум, 70 блазаров связаны с этими нейтрино!

p-value: 0.3%

Блазары массово излучают нейтрино с энергиями от ТэВ до ПэВ!

Карта неба IceCube

Цвет: вероятность точечных источников нейтрино



Совместная статистическая значимость результатов по обоим диапазонам энергий:

p-value= $4 \cdot 10^{-5}$, уровень 4.2 сигма

Независимое подтверждение, с меньшей значимостью: Kun et al. (2022)

Когда блазары рождают нейтрино?

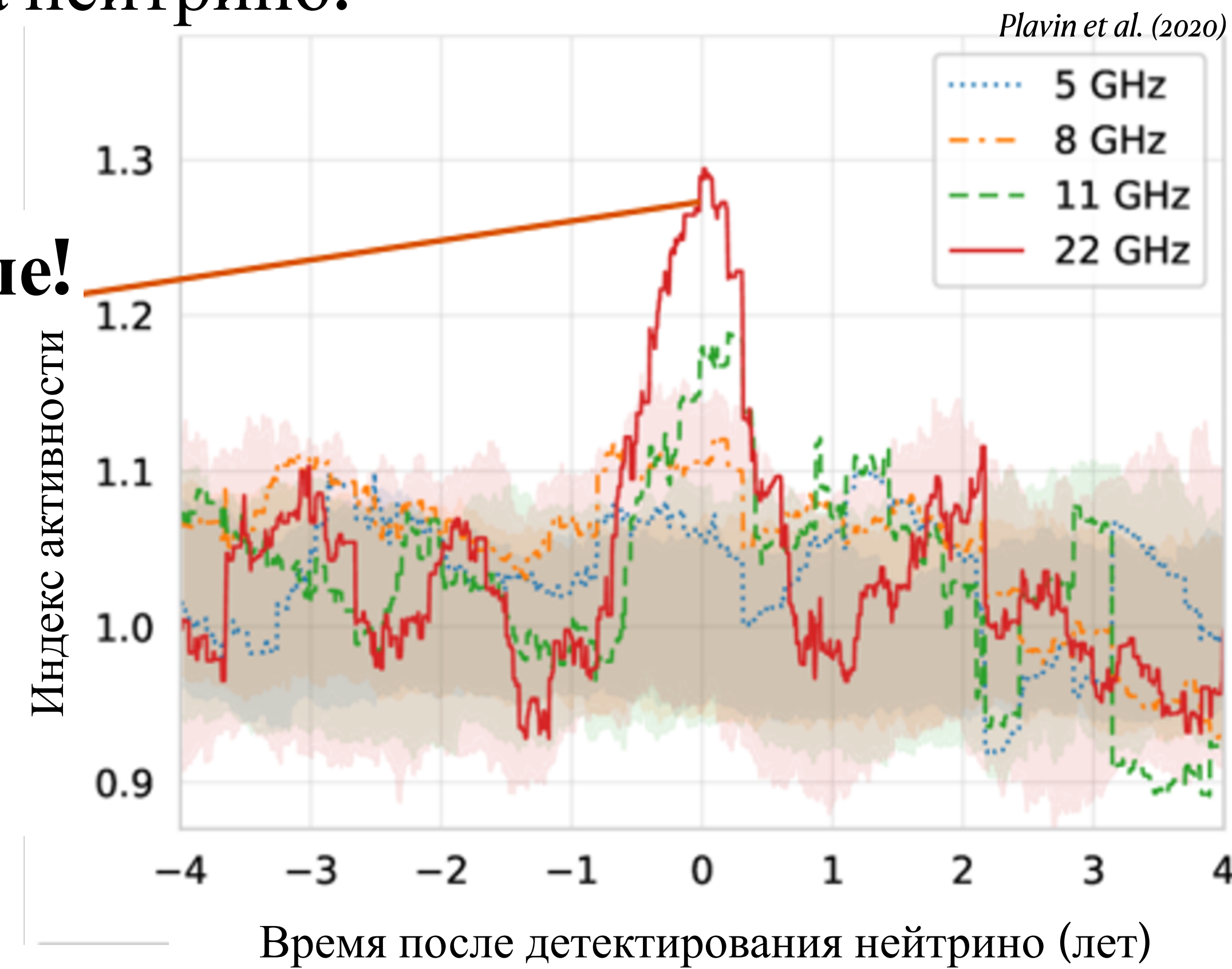
Связано ли это со вспышками в центральных областях?

РАТАН-600: многолетний мониторинг полной выборки ярких блазаров (Ю.А.Ковалев и др.)

Сравним изменения радиопотока и времена прихода нейтрино:

Нейтрино приходят тогда, когда радиопоток выше!

Эффект наиболее силён на 22 ГГц:
усиление с частотой соответствует
синхротронному поглощению



Когда квазары рожают нейтрино?

Связано ли это со вспышками в центральных областях?

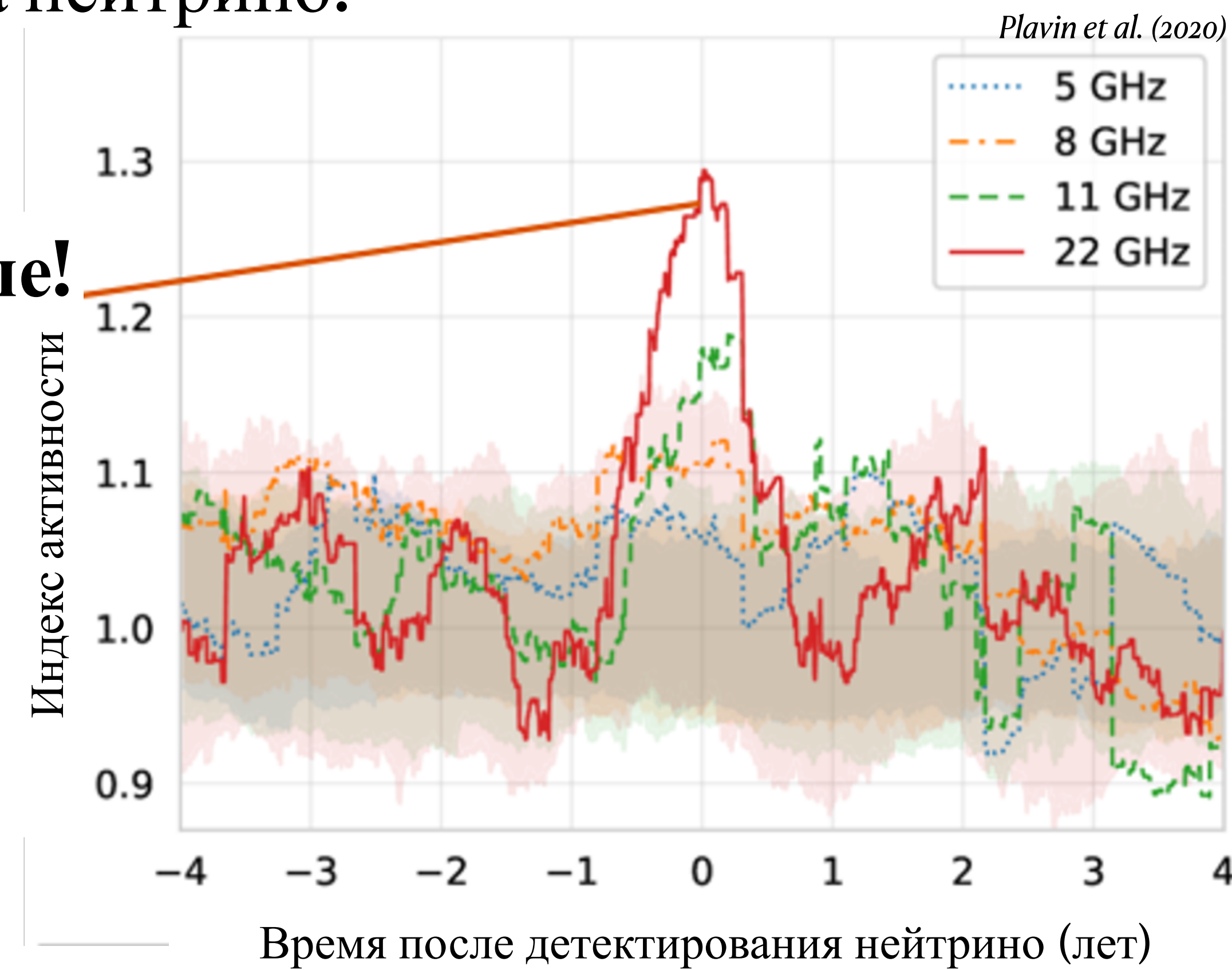
РАТАН-600: многолетний мониторинг полной выборки ярких квазаров (Ю.А.Ковалев и др.)

Сравним изменения радиопотока и времена прихода нейтрино:

Нейтрино приходят тогда, когда радиопоток выше!

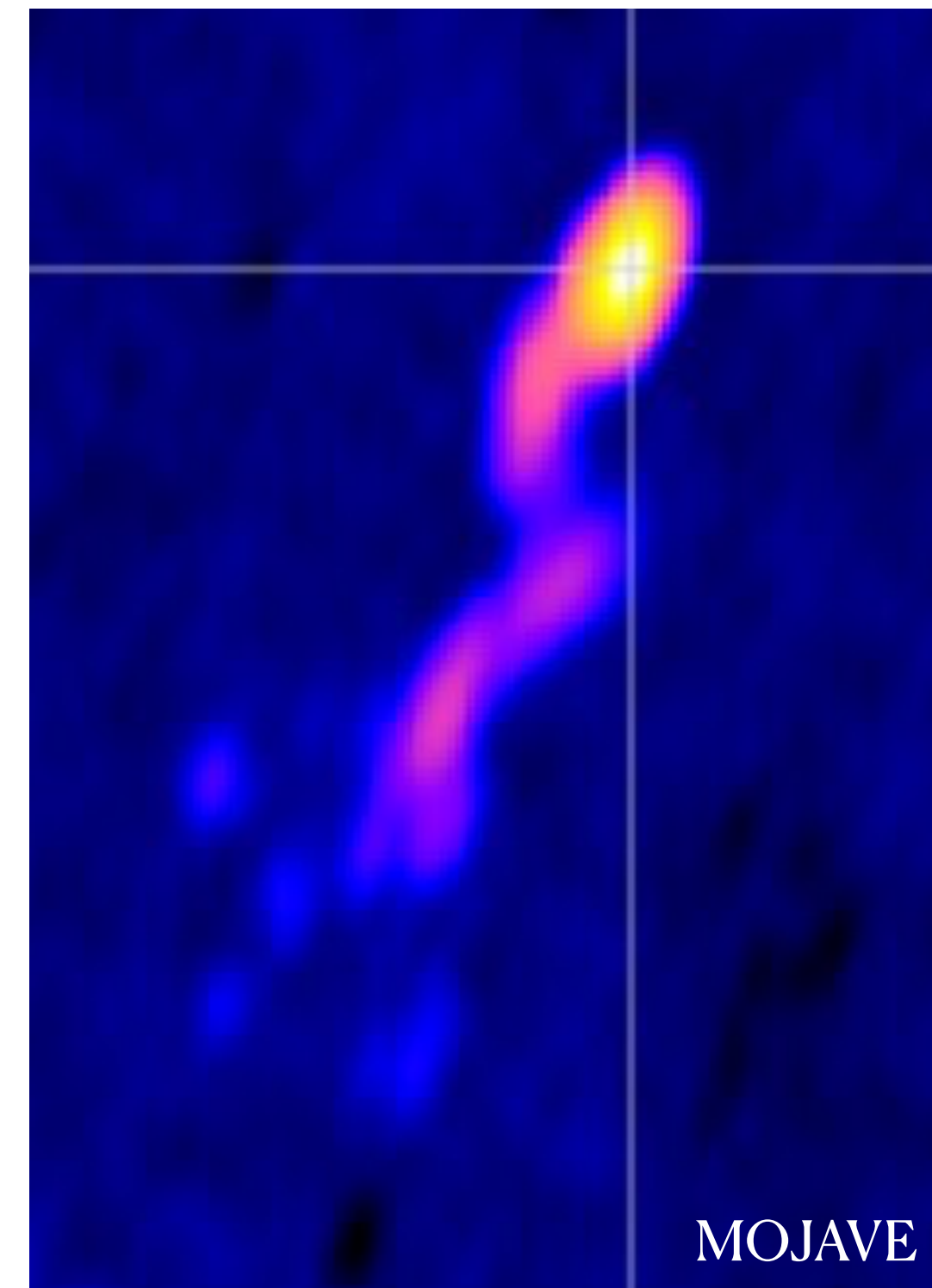
Получено независимое подтверждение: Novatta et al. (2021)

Эффект наиболее силён на 22 ГГц:
усиление с частотой соответствует
синхротронному поглощению



Следствия для физики квазаров

- Нейтрино приходят от РСДБ-ярких активных галактик
⇒ **излучаются анизотропно, вдоль направления джета**
- РСДБ «видит» парсековые области, вспышки происходят на таких же масштабах
⇒ **нейтрино рождаются в центральных парсеках квазаров**
- **Необходимы протоны до 10^{16} эВ:**
требуются существенные обновления
теоретических моделей,
чтобы обеспечить такое ускорение



Результаты, выносимые на защиту

1. Найдено, что значимые сдвиги наблюдаемых положений ядер активных галактик между радио (РСДБ) и оптическим (Gaia) диапазонами преимущественно происходят параллельно направлениям их джетов. Показано, что большинство этих различий величиной до десятков миллисекунд дуги объясняется протяжённым оптическим излучением релятивистских струй. Это является массовым наблюдательным свидетельством наличия мощных оптических джетов в активных галактиках.
2. На основе архивных РСДБ-наблюдений проведены массовые измерения смещений видимого начала джетов в ядрах галактик с частотой. Обнаружена значимая переменность смещения для большинства объектов с характерной величиной 0.3 миллисекунды дуги или 0.5 парсек. Эта переменность вызывается вспышками в джетах, сопровождающимися изменением плотности излучающих релятивистских частиц.
3. Обнаружена связь десятков блазаров, имеющих компактную РСДБ-структуру, с нейтрино высоких энергий, детектируемых обсерваторией IceCube. С использованием многолетних данных наблюдений на телескопе РАТАН-600 сделан вывод о рождении нейтрино преимущественно во время мощных радиовспышек в джетах. Эти результаты говорят, что нейтрино с энергиям от нескольких ТэВ до ПэВ рождаются в центральных областях блазаров на масштабах парсек. Такие частицы могут образовываться при взаимодействиях релятивистских протонов с высокоэнергетичными фотонами в джетах. Из проведённых оценок следует, что радиоблазаров достаточно для объяснения треков от астрофизических нейтрино, обнаруженных на IceCube.

Публикации по теме диссертации

1. VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei
Y. Y. Kovalev, L. Petrov, A. V. Plavin // 2017, Astronomy and Astrophysics, 598, L1
2. Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis
A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, L. Y. Petrov // 2019, The Astrophysical Journal, 871, 143
3. Significant core shift variability in parsec-scale jets of active galactic nuclei
A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, A. P. Lobanov // 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 485, 1822
4. Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies
A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, Yu. A. Kovalev, S. V. Troitsky // 2020, The Astrophysical Journal, 894, 101
5. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars
A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, Yu. A. Kovalev, S. V. Troitsky // 2021, The Astrophysical Journal, 908, 157

Отзыв ведущей организации

> В Главе 1 не обсуждается возможность смещения координат АЯГ, определяемых Gaia, за счёт оптического излучения джета на килопарсековых масштабах

Координаты Gaia чувствительны к излучению до масштабов 100-300 mas, более протяжённое килопарсековое излучение фильтруется данным телескопом.

> В Главах 1 и 2 нет пояснений об используемых критериях или методах для определения направления джета

Действительно, в анализе использовался достаточно грубый способ измерения направлений по РСДБ изображениям, которого оказалось достаточно для решения поставленных задач. Позже, в 2022 году, автором опубликована статья с представлением более чувствительного метода и его детального сравнения с альтернативами.

> В Главе 2 рассматривается влияние изменения численной плотности излучающих частиц, магнитного поля и доплер-фактора на положение РСДБ ядра. Но приведены результаты только для первых двух параметров. <...> Учитывался ли эффект изменения доплер-фактора при вычислениях?

Переменность доплер-фактора считается маловероятной причиной вспышек в джетах активных галактик. В рамках анализа мы пользуемся предположением о его постоянстве.

> В параграфе 3.1.1 сразу после обсуждение выборки нейтринных событий для анализа, говорится, что “значительная часть событий не является астрофизическими”. Возникает вопрос о физическом обосновании выбора этих событий для анализа.

Среди детектируемых событий большинство - не астрофизические. Напрямую выделить их на современных нейтринных телескопах не представляется возможным, кроме как в рамках анализа аналогичного проведённому в диссертации.

Отзыв Байковой А.Т.

> Какова точность приближения струи всего двумя компонентами при автоматизированном подходе измерения смещения ядра? В диссертации дана чисто качественная оценка. Были ли получены численные оценки?

Джет приближался двумя типами компонент: первый – подробное моделирование протяжённой структуры струи набором CLEAN компонент, второй – круглый гауссов компонент в области ядра. Мы следовали подходу, предложенному и апробированному в работе группы MOJAVE (Noman+2021). Наши коллеги провели анализ, и показали, что точности такого метода достаточно для измерения параметров ядра с необходимой точностью.

Отзыв Лутовинова А.А.

> Астрометрия Gaia “привязана” к РСДБ с помощью систематических сдвигов, поворотов. В то же время в диссертации проводится поиск смещений между положениями источников в каталогах Gaia и РСДБ. Нет ли здесь “зацикливания”? Проверялось ли влияние таких эффектов на полученные результаты?

Была проведена проверка в виде анализа распределения направлений сдвигов РСДБ-Gaia по небу. Оно оказалось близко к равномерному, что говорит об отсутствии существенных систематических эффектов.

> Полученные в Главе 1 результаты для смещения вниз и вверх по течению струи и их интерпретация должны быть связаны со светимостью исследуемых объектов. Проверялось ли, есть ли корреляция между ними?

Такой анализ проводился, однако достоверно обнаружить корреляцию со светимостью, а также её интерпретировать, затруднительно в связи с неопределённостями в углах раскрытия джета и его направленности на наблюдателя.

> Глава 2, п.2.2.1, чем определяется эмпирический порог отбора в 3 раза по уровню шума и 4 раза по площади?

Это чисто эмпирические границы фильтрации, визуальный просмотр показал что в противном случае на карте присутствует недостаточно протяжённого излучения для измерения сдвига.

> Как соотносятся два метода выравнивания изображений, описанные в п.2.2.1?

Метод на основе карт спектрального индекса показал себя более надёжным, и требовал меньше ручной работы в рамках проведённого сравнения, как отмечено в диссертации.

> Глава 3, п.3.2.1. Каким образом задавалось смещение событий IceCube? Какая амплитуда была выбрана? Изменялась ли она в моделировании?

Смещение событий в случайных реализациях проводилось по всему диапазону прямого восхождения, от 0 до 360°

> п.3.2.3 и рис. 3.5. Какова значимость полученной корреляции? Судя по рисунку, она не должна быть велика. Поэтому утверждение, что центральные области “являются местом рождения большого числа нейтрино” слишком сильное.

Финальная значимость данной корреляции, как отмечено в диссертации, составляет 5%. Действительно, это уровень “2 сигма”, и сам по себе не считается высокой значимостью. Однако, приведённое утверждение основано также и на корреляции нейтрино с РСДБ потоком из центральных областей, которая значима на уровне более 4 сигма.