

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

СТЕНОГРАММА
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д002.023.01

28 сентября 2022 года

Защита диссертации
Попкова Александра Викторовича
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная
астрономия»

*“Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа
радионаблюдений их полных выборок”*

Присутствовали члены диссертационного совета:

Новиков И.Д., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки,
председатель диссертационного совета

Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки, заместитель
председателя диссертационного совета (*присутствует онлайн*)

Шахворостова Н.Н., к.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки, учёный секретарь
диссертационного совета

Вибе Д.З., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Дорошкевич А.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Каленский С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Ковалев Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Малофеев В.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Троицкий С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Тюльбашев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Чашей И.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Председатель заседания – доктор физико-математических наук, председатель
диссертационного совета И.Д. Новиков.

Секретарь заседания – кандидат физико-математических наук, учёный
секретарь диссертационного совета Н.Н. Шахворостова.

*Заседание проводится с участием членов диссертационного совета и
оппонентов в удалённом интерактивном режиме. Распорядительный акт
директора ФИАН Колачевского Н.Н. о проведении заседания диссертационного
совета с участниками в удалённом интерактивном режиме находится в
приложении №1 к стенограмме.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Мы начинаем процедуру заседания по защите диссертации Попкова Александра Викторовича. Надежда Николаевна, пожалуйста.

СЕКРЕТАРЬ. Спасибо. Итак, сейчас у нас 28 сентября, 15:04 московского времени. Начиная заседание по защите диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия. Соискатель — Попков Александр Викторович. Название диссертации «Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных выборок». Научный руководитель диссертации — Ковалев Юрий Юрьевич, главный научный сотрудник Астрокосмического центра ФИАН. Так, у нас сейчас в зале присутствует 8 членов диссертационного совета, удаленно онлайн присутствует 7 человек, всего 15 человек присутствует из 22-х членов совета, кворум есть. Я оглашу присутствующих. Новиков И.Д., Ковалев Ю.Ю., Шахворостова Н.Н., Вибе Д.З., Дагкесаманский Р.Д., Дорошкевич А.Г., Иванов П.Б., Каленский С.В., Ковалев Ю.А., Лукаш В.Н., Малофеев В.М., Попов М.В., Троицкий С.В., Тюльбашев С.А., Чашей И.В. Напоминаю, что ведется аудиовидеозапись заседания, все члены совета, кто присутствует удаленно, должны быть с включенными камерами. При возникновении технических неполадок просьба об этом сразу сообщать, будем объявлять технический перерыв для восстановления связи.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Надежда Николаевна, пожалуйста, огласите содержание документов соискателя.

СЕКРЕТАРЬ. Да. Я продолжу то, что я уже начала зачитывать. Я уже сказала, что научный руководитель — Юрий Юрьевич Ковалев. Ведущая организация по диссертации — Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук, поселок Научный, Бахчисарайский район, Республика Крым. Оппонентами по диссертации выступили Байкова Аниса Талгатовна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Пулковской астрономической обсерватории РАН, г. Санкт-Петербург. И Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород. Аниса Талгатовна и Игорь Иванович присутствуют удаленно. Теперь я зачитаю основные выдержки из представленных соискателем документов. Во-первых, все документы согласно требованиям ВАК представлены, все соответствуют этим требованиям. Краткая выдержка такова. Соискатель — Попков Александр

Викторович, 1994 года рождения. В 2017 году окончил с отличием Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова с присвоением квалификации «Астроном. Преподаватель» по специальности 03.05.01 «Астрономия», а в период с 01 сентября 2017 г. по 01 сентября 2021 г. обучался в аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия». Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.03.02 «астрофизика и звёздная астрономия» выдана 06 апреля 2022 г. в «Московском физико-техническом институте». В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в МФТИ. Я закончила.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Тогда слово предоставляется соискателю. Александр Викторович, пожалуйста.

ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

СОИСКАТЕЛЬ: *(Выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1-17, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении № 2 к стенограмме, а также приложены к аттестационному делу в бумажной и электронной форме).*

Слайд 1.

Добрый день, уважаемые члены диссовета! Позвольте рассказать о содержании моей диссертации. Сейчас появится презентация. Не буду повторять её название.

Слайд 2.

Перейду к предмету и методам проведённого исследования. Предметом являлись активные ядра галактик, причём те из них, которые являются радиогромкими, то есть, имеют релятивистские струи, или джеты, которые возникают вследствие аккреции вещества на сверхмассивную центральную чёрную дыру. В этих джетах частицы являются ультрарелятивистскими с Лоренц-фактором до 10^8 и со скоростью течения всего потока с гамма-фактором порядка 10. Таким образом, на излучение сильное влияние оказывает эффект Доплера. В радиодиапазоне данные источники излучают синхротронным механизмом. Кроме того, они являются мощными источниками излучения и во всех остальных диапазонах электромагнитных волн, а также являются вероятными источниками нейтрино. Эти источники с большим успехом

изучаются с помощью техники радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, когда радиотелескопы наблюдают совместно один и тот же источник, и по этим данным восстанавливается структура источника с угловым разрешением, на настоящий момент, до десятков микросекунд дуги. И наблюдения с помощью этой техники проводятся уже несколько десятилетий, что позволило на данный момент создать выборку компактных активных ядер галактик, которая является практически статистически полной до некоторых значений плотности потока. Кроме того, в работе использовались широкополосные радиоспектры активных ядер галактик, которые полезны тем, что дают информацию, в том числе, и о структуре источников, о которой можно судить по их форме и переменности. И эти спектры массово наблюдаются такими телескопами, как РАТАН-600. Таким образом, также можно проводить исследования на больших выборках.

Слайд 3.

Целью моей работы являлось исследование свойств популяции компактных джетов активных ядер галактик и физики происходящих в них процессов с помощью анализа РСДБ-наблюдений с высоким угловым разрешением и, как я говорил, широкополосных радиоспектров для статистически полных выборок активных ядер галактик. И для достижения этой цели решались три следующие задачи. Во-первых, на основе анализа наблюдений полной по интегральной плотности потока выборки 482 активных ядер галактик определить количество и исследовать свойства РСДБ-компактных объектов с крутым и плоским радиоспектром. Второе: изучить особенности активности блазара TXS 0506+056 — кандидата в источники нейтрино высоких энергий — и сравнить его характеристики в радиодиапазоне с характеристиками других источников полной выборки блазаров. Третье: получить несмещённые оценки Доплер-факторов джетов активных ядер галактик путём сравнения значений, определённых по РСДБ-наблюдениям яркостной температуры радиоядра для полной по плотности РСДБ-потока выборки, со значениями, даваемыми другими методами.

Слайд 4.

И я перехожу к первой главе, которая посвящена первой из этих задач. Для начала, вот здесь показаны примеры радиоспектров активных ядер галактик, которые можно разделить на три класса. Во-первых, это круто падающий спектр; плоский спектр; и спектр с пиком. Границу между крутым и плоским спектром мы проводим по значению спектрального индекса — то есть, показателя степени частоты — минус 0,5. И оптически тонкие источники имеют крутой спектр, а оптически толстые источники имеют за счёт синхротронного

самопоглощения, если они однородные, пик в спектре, а если неоднородные, то наблюдается плоский спектр. Но, естественно, у источников с крутым спектром также существует пик, а потом завал вследствие синхротронного самопоглощения, но на более низких частотах, чем исследуемые в данной работе. Далее, РСДБ чувствительна не ко всем источникам, а к компактным, то есть, к тем, которые имеют структуры масштабов меньше примерно 0,1 секунды дуги. И, чтобы отбирать такие источники, много лет используется критерий плоского спектра, потому что и теория, и наблюдения показывают, что источники с плоским спектром компактны. Потому что, чтобы быть оптически толстыми, они должны иметь достаточно компактную структуру. Но, таким образом, источники с крутым спектром мало исследовались с помощью РСДБ. Однако, когда они исследовались, то было найдено, что и среди них тоже есть компактные источники. Таким образом, есть задача, во-первых, выяснить, насколько много источников компактных пропускается, если игнорируются источники с крутым спектром, а во-вторых, исследовать физические свойства этих источников — компактных с крутым спектром. Для этого были проведены наблюдения по нашей заявке на американской РСДБ-сети VLBA на 2 и 8 ГГц статистически полной выборки радиоисточников, отобранных по критериям: плотность потока на 1,4 ГГц больше 0,2 янских и склонение больше +75 градусов. Кроме того, нами были для анализа использованы ранее опубликованные широкополосные радиоспектры, полученные в основном на РАТАН-600. И вот здесь на гистограмме внизу слайда показано распределение спектрального индекса в данной выборке, а красной линией показано минус 0,5 — граница между плоским и крутым спектром. И видно, что в данной выборке большинство, примерно 90%, составляют именно источники с крутым спектром.

Слайд 5.

И наш анализ позволил изучить связь спектра и структуры. А именно, во-первых, наши наблюдения полной выборки подтвердили то, что раньше использовали как предположение: что практически все источники со спектром, имеющим пик, и с плоским спектром компактны. А кроме того, у примерно четверти источников с круто падающим спектром также обнаружились компактные структуры, детектируемые РСДБ, имеющие размеры меньше, чем примерно одна десятая угловой секунды. И источники можно разделить на несколько типов. Первый из них — это классические блазары, компактные источники с плоским спектром, у которых спектр плоский, как полный спектр, так и на РСДБ-масштабах. Другой класс источников — это те, у которых полный спектр крутой, однако РСДБ выделяет центральную компактную часть,

которая имеет плоский спектр. Таким образом, и в них, как и в блазарах, на парсековых масштабах доминирует ядро, оптически толстое, парсекового джета. И таких источников примерно поровну, однако больше, чем их вместе взятых, в выборке оказалось таких источников, которые компактны, но при этом имеют крутой спектр как на масштабах всего источника, так и на масштабах парсек. И это как раз те компактные источники с крутым спектром, которые нас интересуют. Их оказалось примерно 17% выборки. Кроме того, есть источники, которые не продетектированы в РСДБ-наблюдениях, таким образом, они являются протяжёнными, и они чаще всего тоже имеют крутой спектр.

Слайд 6.

Теперь, если постараться посмотреть на физические свойства этих источников, то нами были обнаружены корреляции между спектральным индексом источников в нашем исследуемом диапазоне и параметрами их доминирующей детали на парсековых масштабах, а именно, угловым размером (график слева) и яркостной температурой (график показан справа). Причём чем больше спектральный индекс, тем меньше в среднем размер и выше яркостная температура. График с яркостной температурой имеет смысл проанализировать более детально. Здесь красным цветом показаны источники с крутым спектром, а синим показаны источники с плоским спектром. Таким образом, обычно в типичных ранее проводившихся РСДБ-обзорах исследовались только источники, показанные синим цветом, однако видно, как много источников при этом пропускалось — а именно, тех, которые имеют крутой полный спектр. У них довольно большой разброс по яркостной температуре. Среди них много источников, имеющих яркостную температуру того же порядка, что и типичные блазары, однако есть и источники с много меньшей, на порядок примерно меньшей яркостной температурой, что в сочетании с их оптически тонким крутым спектром даёт основания заключить, что в данных источниках доминирующими структурами на парсековых масштабах являются не центральная часть джета, не его оптически толстое ядро, а какие-то более внешние оптически тонкие области: или сам джет, или аналоги радиоушей. То, что наблюдается в классических радиогалактиках, в этих источниках может наблюдаться на парсековых масштабах — эти облака радиоизлучающей плазмы могут иметь такие масштабы, что они детектируются РСДБ.

Слайд 7.

Итак, выводы по главе 1. Мы, во-первых, подтвердили компактность источников с плоским спектром. Во-вторых, определили долю компактных источников среди источников с крутым спектром. Показали, что в таких

источниках на парсековых масштабах доминируют некие оптически тонкие структуры, и сделали вывод, что те РСДБ-каталоги компактных активных ядер галактик, которые были ранее построены только по обзорам источников с плоским спектром, имеют существенную неполноту, а именно, их полнота около 80% на уровне 200 миллионных и ещё ниже для более слабых источников, что говорит о том, что необходимо включать в РСДБ-обзоры также источники с крутым спектром. И это уже делается в настоящий момент.

Слайд 8.

Перехожу ко второй главе, которая показывает, что исследование полных выборок источников полезно не только для определения каких-то статистических свойств популяции, но и для исследований отдельных источников. Конкретно, речь пойдёт о источнике TXS 0506+056. В 2018 году командой детектора IceCube была опубликована статья о том, что данный источник, вероятно, является источником высокоэнергетичных нейтрино. Вот здесь приведена схема, иллюстрирующая детектор IceCube. Он расположен в Антарктиде в толще льда, и по черенковскому излучению он фиксирует треки мюонов, образующихся в результате взаимодействия нейтрино с веществом. И вот в 2017 году было зафиксировано нейтрино с энергией примерно 290 ТэВ, пришедшее с направления, всего лишь на одну десятую градуса отстоящего от направления на этот блазар. А кроме того, анализ предыдущих данных показал, что и в 2014-2015 годах наблюдалось превышение над фоновыми значениями с направления на этот источник, что дало довольно высокую значимость отождествления этого блазара с нейтрино. Были проведены различными авторами исследования по поиску корреляции между источниками нейтрино и гамма-яркими блазарами, потому что предполагается, что гамма-излучение и нейтрино рождаются в одних и тех же процессах в одних и тех же источниках. Но, однако, получился результат, что популяция гамма-ярких блазаров не может объяснить весь наблюдаемый поток нейтрино, что привело некоторых авторов к выводу, что TXS 0506+056 — это некое исключение из правил. В данной работе мы попробовали проверить это утверждение на основе радиоданных.

Слайд 9.

А именно, был привлечён многолетний мониторинг на РАТАН-600 выборки компактных блазаров, отобранных по РСДБ-потoku. Эта выборка полна до значений потока примерно 0,4 янских. И в рамках наблюдений в этой программе данный источник наблюдался более 20 лет — с 1997 года. И здесь на графике показана его многочастотная кривая блеска от 1 до 22 гигагерц, а красными линиями показаны нейтринное событие 2017 года и, левее, полоса,

когда наблюдалось несколько событий меньшей энергии. И видно, что как раз во время регистрации нейтрино в этом источнике зарождалась и развивалась сильная вспышка. Кроме того, если учитывать данные, полученные после публикации работы нашей, из которой этот график, то эта вспышка вообще оказалась наиболее сильной за время наблюдения этого источника. Плотность потока увеличилась в несколько раз и превысила 2 янских. И это совпадение по времени регистрации нейтрино и вспышки усиливает отождествление этого блазара с источником нейтрино, является независимым подтверждением.

Слайд 10.

Если теперь посмотреть и сравнить этот источник с другими источниками выборки, а именно, с формой и переменностью их широкополосных радиоспектров, примеры которых показаны на этом графике, то видно, что он не является уникальным. Его спектр, который показан вот здесь, относится к классу суперплоских, то есть, очень близок спектральный индекс к нулю. И к такому классу относится примерно 20% наблюдавшейся выборки. И переменность его также типична, не показывает никаких экстремальных особенностей. Таким образом, из этих двух фактов: из временного совпадения нейтрино и вспышки и из типичности этого источника — можно сделать вывод, что и другие блазары во время вспышек могут быть источниками нейтрино, что и было впоследствии показано в работах Плавина и других, Ховатта и других и некоторых ещё. Таким образом, вывод, который из этого следует, это то, что в блазарах должны быть условия для рождения нейтрино, для которых нужны релятивистские протоны. Таким образом, блазары должны иметь механизмы ускорения не только электронов, как всегда мы знали, но и протонов до релятивистских энергий.

Слайд 11.

Что и подытожено в этих выводах, которые сейчас не буду повторять, потому что, в принципе, уже сказал.

Слайд 12.

А в третьей главе как раз мы разбирались тем, насколько сильно блазары ускоряют свои джеты, а именно, проводилось определение Доплер-факторов джетов. Доплер-фактор — это та величина, которая показывает, насколько сильно энергия квантов усиливается за счёт движения источника. Формула приведена здесь на слайде. И для большинства источников определяется напрямую в астрофизике по доплеровскому сдвигу линий. Однако для джетов активных ядер галактик, которые излучают в радиодиапазоне синхротронным

механизмом и имеют излучение в континууме, такой прямой метод не работает. Поэтому используются различные косвенные методы. Например, если наблюдается переменность источников, получается их кривая блеска, она может быть разложена на отдельные вспышки, и по характерному времени этих вспышек можно оценить их яркостную температуру. И, предположив какую-то модельную собственную яркостную температуру, определить Доплер-фактор. Кроме того, используются и РСДБ-наблюдения. Например, в работе Бостонской группы Доплер-фактор определяется по времени затухания РСДБ-компонент, выбрасываемых в джет из ядра. А кроме того, как в нашей работе мы делали, можно использовать измерения яркостной температуры самого ядра. Как это было сделано, я расскажу сейчас, на следующем слайде. Мотивацией для этого исследования было, во многом, то, что, хотя эта величина — Доплер-фактор — очень важна для интерпретации любых наблюдательных характеристик, например, для анализа экстремальных яркостных температур, открытых недавно «Радиоастроном», между разными методами наблюдалось существенное расхождение, которое не позволяло использовать какие-то конкретные значения Доплер-фактора. И вот в данной работе мы считаем, что мы устранили это расхождение, показали, какие значения более истинные.

Слайд 13.

Для этого были использованы многолетние данные мониторинга MOJAVE, которые включают в себя полную выборку до РСДБ-потока 1,5 янских, и также ещё много источников и с меньшим потоком. И за годы проведения программы были получены измерения — причём не просто одиночные измерения, а временные ряды — яркостной температуры для более 400 источников, что позволило определить их медианную яркостную температуру, наблюдаемую в спокойном состоянии. А кроме того, были измерены видимые скорости движения компонент в джетах. Для того, чтобы определить Доплер-фактор, нужно знать, кроме наблюдаемой яркостной температуры, яркостную температуру в собственной системе отсчёта. И это было сделано в данной работе на двух предположениях: что это типичное значение одинаково для всей выборки и что наблюдаемые скорости характеризуют настоящее течение плазмы в джете. И на основании этого без дополнительных теоретических предположений было получено значение собственной яркостной температуры примерно $4 \cdot 10^{10}$ кельвинов, что близко к значению, полученному для равнораспределения Ридхэдом. И в результате мы смогли получить значения Доплер-факторов и их распределение, показанное вот здесь на левой гистограмме внизу. Типичное значение Доплер-фактора — порядка 10, и хвост их идёт до 50 с редкими источниками, имеющими большие значения. Кроме

того, опять же привлекая данные по кинематике, были получены Лоренц-факторы джета, у которых тоже пик примерно на десятке, и углы к лучу зрения. Вследствие отбора по плотности потока, усиленной Доплер-эффектом, в основном источники имеют малые углы наклона джета к лучу зрения — порядка нескольких градусов.

Слайд 14.

И далее мы сравнили получившиеся у нас значения Доплер-фактора со значениями, даваемыми другими методами. А именно, методами по моделированию полных кривых блеска (это первые три столбца на этом слайде) и по времени затухания РСДБ-компонент. И наилучшее согласие у нас получилось с работой группы обсерватории Оуэнс Вэлли, где на 15 гигагерцах, на той же частоте, наблюдались вспышки источников. И вот здесь показан график, на одной оси которого, по горизонтальной оси — наше значение, а по вертикальной — значение OVRO. И данные показывают статистически значимую корреляцию с маленьким значением вероятности случайной корреляции. А кроме того, систематический сдвиг этих значений по выборке, медиана отношения по выборке не значимо отличается от единицы. Таким образом, мы можем сказать, что, хотя разброс значений в каждом методе большой, однако мы получили согласование между двумя принципиально разными методами. В нашем случае использовалась РСДБ, измерялись яркостные температуры ядра и с помощью вычисления медианы анализировалось спокойное состояние джета, а в другой работе изучались вспышки и, соответственно, вспышечное состояние и другая собственная яркостная температура бралась как значение в собственной системе отсчёта. И, несмотря на эти разные предположения, разные подходы, значения показывают согласие в пределах погрешностей методов, что говорит о том, что, скорее всего, оба эти метода дают надёжные результаты. Значения же, даваемые этим методом на основании данных других программ, имеют большие сдвиги или меньшую корреляцию. Мы считаем, что это потому, что в данных программах наблюдения одиночными антеннами кривых блеска велись менее часто, что не давало возможность зафиксировать самые быстрые вспышки. А значения, полученные по затуханию РСДБ-компонент, имеют ещё меньшую корреляцию с нашими значениями, что, вероятно, объясняется тем, что предположения, которые используются в этом методе, далеко не всегда выполняются.

Слайд 15.

И выводы по этой главе в том, что, как я уже сказал, два принципиально разных метода дают согласие между собой, что повышает доверие к обоим методам. И

при этом значения порядка 10 и вообще значения оценённых Доплер-факторов для тех источников, которые наблюдались «Радиоастроном», не позволяют решить ту проблему экстремальных яркостных температур, которая существует после наблюдений «Радиоастроны» - нужны какие-то ещё механизмы.

Слайд 16.

И я перехожу к заключительной части. Зачитаю положения основные, выносимые на защиту.

1. В статистически полной выборке 482 активных ядер галактик с интегральной плотностью потока на частоте 1.4 ГГц более 200 миллианских и склонением больше +75 градусов исследована связь между структурой и широкополосным радиоспектром. Компактные структуры масштабов сотен парсек и менее были обнаружены в 100% источников с пиковой формой спектра, 98% источников с плоским спектром и 27% источников с круто падающим спектром. Продemonстрировано, что РСДБ-компактные внегалактические радиоисточники состоят из двух классов объектов примерно равной численности: блазаров, у которых в радиоизлучении доминирует оптически непрозрачное радиоядро джета, и компактных источников с круто падающим РСДБ-спектром, у которых доминируют оптически прозрачные джеты или облака плазмы парсековых масштабов. Это подтверждается обнаруженными статистически значимыми отрицательной корреляцией углового размера компактных компонент со спектральным индексом и положительной корреляцией яркостной температуры со спектральным индексом.
2. На основании многолетних многочастотных наблюдений на РАТАН-600 блазара TXS 0506+056, ассоциированного ранее с источником нейтрино высоких энергий, найдено, что его широкополосный радиоспектр относится к классу плоских и является типичным для переменных активных ядер галактик. Нейтринные события в 2014-2015 и в 2017 годах, отождествлённые с этим блазаром, пришлись на период начала и развития в нём сильной вспышки на сантиметровых длинах волн. Это независимо подтверждает, что данный блазар является вероятным источником высокоэнергичных нейтрино, и указывает на связь процессов генерации нейтрино и вспышек синхротронного радиоизлучения в ядрах блазаров.
3. Определено, что значения Доплер-фактора джетов активных ядер галактик, полученные для большой статистически полной выборки по РСДБ-измерениям яркостной температуры их ядер, согласуются со значениями, независимо определёнными ранее из анализа вспышек

радиоизлучения, в пределах погрешностей методов. Типичное значение Доплер-фактора составляет около 10. Это соответствует независимым оценкам, полученным из анализа РСДБ-кинематики джетов. Делается вывод о достоверности полученных оценок Доплер-фактора.

Слайд 17.

И на последнем слайде я привожу публикации, вошедшие в диссертацию, и здесь кратко описан мой личный вклад в них.

Большое спасибо, у меня всё.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Какие вопросы будут к докладчику? Пожалуйста.

ИВАНОВ П.Б.: У меня вопрос по первой главе. Вот, положим, у Вас есть источник с крутым спектром, но РСДБ-наблюдений нет. Можно ли по спектральному индексу и так далее как-то повысить вероятность того, что у него есть компактный компонент? То есть, не с вероятностью, как Вы сказали, 20%, а вот сказать, например: «У него спектральный индекс такой, и с вероятностью больше 50% у него есть компактный компонент». Или нет такой возможности, с Вашей точки зрения?

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо за вопрос. Ну вот консервативная оценка, как я уже сказал, это именно что 25%, о которых Вы говорили. Кроме того, можно посмотреть на переменность его. Если есть переменность, то это аргумент в пользу его компактности. Но однако, если переменности нет, это ещё не значит, что нет компактной структуры, потому что в нашем исследовании мы нашли довольно много источников с крутым спектром, компактных, но не переменных.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Ещё вопросы? На онлайн? Нет вопросов больше.

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: На онлайн руку никто не поднимал.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста.

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: Нет-нет, я сказал, что я слежу за теми, кто удалённо участвует, никто руку с просьбой о вопросе не поднимал, Игорь Дмитриевич, спасибо, извините меня.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Не поднимал? Извините, я не понял Вас. Спасибо. Значит, вопросов больше нет. Тогда слово предоставляется научному руководителю. Юрий Юрьевич, пожалуйста.

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: Спасибо, коллеги. Я своё короткое выступление разделю на две части: в первой я расскажу о, по моему мнению, значимости и важности тех результатов, или, скорее, тех задач, которые решал Александр; во второй несколько слов скажу про него. Вообще говоря, мы перед Сашей поставили с коллегами задачи, честно говоря, которые нас очень давно уже беспокоили, но, по тем или иным причинам, нормально разрешены не были. И вот первая его глава посвящена вопросу, который, в общем, мы, честно скажу, пытались «замести под ковёр» (мы — наблюдатели в РСДБ) долгие годы. А именно, из-за нашей бедности при проведении обзоров активных галактик для того, чтобы увеличить эффективность этих самых обзоров, мы говорили: «Вроде бы, если мы отберём, например, с помощью наблюдений на РАТАНе или на других телескопах — не таких замечательных, как РАТАН, но тоже ничего — внегалактические радиоисточники с плоскими спектрами, то с большой вероятностью они будут иметь компактную структуру, у нас будет высокая эффективность обзора, мы не зря потратим время на РСДБ-сетях, всё будет хорошо. И, фактически, ответа на вопрос о том, а какое количество объектов с компактными парсековыми джетами мы теряем, — а это принципиально важно для астрофизики как этих объектов в принципе, так и смежных задач, связанных, например, с теми же самыми нейтрино — на этот вопрос ответа не было. И первая глава Саши как раз отвечает на вопрос о том, сколько же активных галактик с джетами, яркими на парсековых масштабах мы теряем в случае, если не наблюдаем внегалактические радиоисточники с падающим спектром. Ну или можно это позитивно сформулировать: какое количество внегалактических радиоисточников с падающими спектрами имеют яркие на масштабах парсек джеты. Вот это принципиально важно как для анализа, который провёл сам Саша, так и для будущих работ. Вторая часть связана с очень популярной сейчас темой нейтрино. И я просто замечу, наверное, подчеркну ещё раз, что хоть у нас с Вами уже была диссертация в совете полгода назад, которая подробно обсуждала нейтринную тематику, но именно статья, о которой рассказывал Саша сегодня, была первой. И именно этот анализ первым сказал, существенно говоря, что вот этот известный кандидат, блазар 0506+056, кандидат в источники нейтрино принципиально из себя ничего такого не представляет уникального по сравнению с классом блазаров. Собственно, это был первый шаг, который дальше уже привёл к выводам о том, что, похоже, есть и другие блазары на небе, которые могут генерировать

нейтрино; может быть, даже их и много. И третья глава — нас мучил этот вопрос долгие годы с Николаем Семеновичем Кардашевым, мы обсуждали много лет: можно ли релятивистским усилением излучения объяснить экстремальную яркость, которую «Радиоастрон» увидел практически с первых своих наблюдений у квазаров. И, честно скажу, Николай Семенович никогда не верил в то, что доплеровского усиления хватит. Я всегда сомневался, потому что никогда не доверял оценкам, которые у нас получаются по тем или иным подходам, о которых сегодня рассказывал Саша, по Доплер-фактору. И, фактически, Саша сегодня показал первый такой уверенный анализ, который говорит о том, что оценкам Доплер-фактора можно верить и их действительно не хватает для объяснения экстремальных яркостных температур «Радиоастрона». Очень интересные все направления исследований, о которых сегодня говорил Саша.

Несколько слов о нём самом. Саша, фактически, сделал первую работу, которая — к сожалению или к счастью, не знаю, как он к этому относится — в диссертацию не вошла. Это работа, опубликованная в *Monthly Notices*, по экзопланетам. И я подумал, что единственный шанс о ней упомянуть сегодня — это если я о ней скажу, потому что она была сделана ещё до того, как Саша пришёл к нам. Просто хотел сказать, что Саша начал свою деятельность даже не как радиоастроном, и он имеет достаточно широкий кругозор и опыт успешный как научной работы, так и публикации в ведущих журналах результатов, полученных по разным темам. Саша, несомненно, за время работы в аспирантуре с нами — фактически, пять лет он работает в нашей группе — вырос в сильного молодого учёного, который однозначно заслуживает за полученные результаты присуждения степени кандидата физико-математических наук, и я надеюсь, что после этого он, не останавливаясь, продолжит дальше работу уже как независимый молодой учёный. У меня всё, спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда, пожалуйста, слово предоставляется нашему учёному секретарю для зачитания отзывов, которые поступили. Сначала отзыв организации, где выполнена диссертация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, В КОТОРОЙ БЫЛА ВЫПОЛНЕНА ДИССЕРТАЦИЯ

СЕКРЕТАРЬ: *Зачитывает заключение организации, Московского физико-технического института, где выполнена диссертация. Отзыв положительный, прилагается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Теперь, пожалуйста, зачитайте нам отзыв ведущей организации.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

СЕКРЕТАРЬ: *Зачитывает отзыв ведущей организации, Крымской астрофизической обсерватории РАН. Отзыв положительный, прилагается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Александр Викторович, Вы будете как отвечать: сразу или потом всем?

СОИСКАТЕЛЬ: Потом, на все замечания сразу.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда слово мы предоставляем первому оппоненту Байковой Анисе Талгатовне. Пожалуйста. Вас не слышно.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

БАЙКОВА А.Т.: Добрый день, дорогие коллеги! Рада всех приветствовать. Позвольте зачитать отзыв. Меня слышно хорошо?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Да, слышно Вас.

БАЙКОВА А.Т.: *(Зачитывает свой отзыв. Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое, спасибо. Слово предоставляется второму оппоненту Зинченко Игорю Ивановичу.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

ЗИНЧЕНКО И.И.: Добрый день! *(Зачитывает свой отзыв. Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое, Игорь Иванович. Теперь слово предоставляется соискателю для ответа на все вопросы.

ОТВЕТЫ СОИСКАТЕЛЯ НА ЗАМЕЧАНИЯ В ОТЗЫВАХ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ОППОНЕНТОВ

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо. Можно снова презентацию показать?

(Включается демонстрация экрана со слайдами 19-20).

Слайд 19.

Насчёт вопроса про центральный пиксель карты. Да, действительно, имелось в виду значение интенсивности в пикселе, соответствующем фазовому центру изображения.

Насчёт вопроса про область, которая использовалась для оценки отношения сигнал-шум. Использовалась область, занимаемая свёрткой компоненты с диаграммой направленности CLEAN-карты. И размер этой области определялся по уровню половины мощности. Данная методика оценки предельного размера компоненты описана в работе Ковалева и других 2005 года, ссылка на которую дана под соответствующей формулой в тексте диссертации.

Слайд 20.

Насчёт рекомендации про использование различных других методов картографирования. Я согласен с этой рекомендацией. Мы, действительно, рассматриваем возможность применения в будущих исследованиях различных вариантов регуляризованного метода максимального правдоподобия, в том числе метода максимальной энтропии. Например, они реализованы в пакетах eht-imaging и SMILI, разработанных для анализа данных Телескопа Горизонта Событий. Одним из достоинств данных пакетов является то, что в них есть возможность проводить картографирование по замкнутым амплитудам и фазам функции видности, что уменьшает влияние погрешностей измерений функции видности на результат.

А с остальными замечаниями я согласен, так что у меня всё.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Теперь объявляем общую дискуссию. Диссертация открыта для общей дискуссии. Пожалуйста, кто хочет выступить? Да, пожалуйста.

ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ

ТРОИЦКИЙ С.В.: Спасибо. Я хотел два момента сказать. Во-первых, — собственно, Юрий Юрьевич про это немножечко меня определил в своём выступлении — но как представитель нейтринного, скажем так, коммьюнити, я должен ещё раз подчеркнуть тот момент, что действительно все думали, что вот

этот 0506+056 — блазар какой-то особенный. И люди пытались строить очень сложные модели хитрые, эти модели разбивались о рентгеновские измерения, которые ни в какую модель не вписывались, и так далее. Просто из-за того, что пытались связать с гамма-наблюдением. А сейчас, действительно, вот та работа (она сейчас очень хорошо цитируется разными группами), которая вошла в диссертацию, которая была про 0506+056 — я говорю только про одну часть [диссертации], которая мне ближе — она действительно показала, что сравнивая с какой-то более-менее полной, неперекошенной выборкой этот блазар, люди видят, что он никакой не особенный. И это открыло, действительно, я думаю, путь к пониманию того, какие именно блазары излучают нейтрино, что их много, что они связаны с компактными структурами и так далее. Это очень важная работа, очень важный результат данной диссертации. Ну а ещё мне хочется сказать, что я ознакомился с диссертацией в составе комиссии диссертационного совета, и мне лично понравилось, как она написана. Я честно скажу, что для себя кое-что интересное и новое из неё узнал. И я призываю, коллеги, поддержать сегодняшнего диссертанта. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Кто ещё хочет выступить? Пожалуйста.

ДАГКЕСАМАНСКИЙ Р.Д.: Я хотел бы обратить внимание на фундаментальность подхода, которая выражается в том, что основные результаты базируются на анализе данных по очень большой выборке, статистически значимой выборке. И поэтому достоверность результатов практически не вызывает сомнений, а это очень важно, потому что часто появляются работы, в которых делаются общие выводы на основе наблюдений двух-трёх объектов, небольшой группы. В данном же случае такая большая выборка — почти полтысячи объектов — это, в общем-то, фундаментальный подход. Спасибо большое, я тоже призываю проголосовать «за».

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Ещё желающие выступить? Нет больше.

СЕКРЕТАРЬ: Есть. У нас в zoom.

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: Прошу прощения, Игорь Дмитриевич, здесь рука поднята у Леонида Юрьевича Петрова в zoom.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо за замечание. Пожалуйста.

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: Леонид Юрьевич, у нас обычно на защитах так настроено, что видно, только когда включил видео. Вот, включил.

ПЕТРОВ Л.Ю.: Леонид Петров, центр космических полётов имени Годдарда, NASA, кандидат физ.-мат. наук. Я с удовольствием прочитал диссертацию Александра Викторовича. Мы с ним знакомы лично, мы с ним работаем в течение четырёх лет. Я бы хотел выделить в диссертационной работе следующее. Довольно часто молодые исследователи используют астрономические программы построения изображений практически как игрушки. То есть, они обучаются, как подвести курсор в данное поле, как нажать мышкой, с тем чтобы получить красивую фотогеничную картинку, которую потом долго обсуждают. К сожалению, редко, когда молодые исследователи имеют желание исследовать досконально код, «замаслить свои руки». И это очень важно, что диссертант с этим разобрался. Наблюдения лежали очень долго мёртвым грузом. Я регулярно напоминал научному руководителю проекта, что у нас анализ данных не завершён. Мне отвечали, что работа очень сложная, что мы ищем — ищем талантливого студента. Искали более 10 лет. А диссертант действительно разобрался в деталях. Хочу обратить внимание на тот небольшой кусочек работы, который и в статье, и в диссертации упомянут как бы мельком, а потратил Александр Викторович огромное количество времени, много месяцев. Это вопрос о достоверности получения изображений, когда у нас мало данных. К сожалению, исторически получилось так, что методы восстановления изображений досконально исследовались для ситуации, когда источник наблюдался долго, от горизонта до горизонта, это много сканов. Если брать по количеству опубликованных работ, то это наиболее частый случай, а если брать по количеству наблюдённых источников, то, наоборот, это редкий случай. А вот случай, когда у нас источник наблюдается всего в одном скане, не был раньше проработан. И оказалось, что использование методов, которые хорошо работают для случая, когда наблюдений много, даёт неправильный результат. Не просто метод перестаёт работать — нет, он работает, получает результат, результат неправильный. И вот Александр Викторович потратил огромное количество времени. Я просто наблюдал это из-за его плеча, время от времени я даже думал: «Когда же он наконец кончит?» А потом, когда он наконец рассказывал, что он делал, говорил: «Как он догадался проверить ещё и это?» И вот это оказалось очень полезным. Почему это полезно? Потому что больше 90% источников, для которых проведены наблюдения со сверхвысоким разрешением, наблюдаются именно в том режиме, который исследовал диссертант. И методы, предложенные диссертантом, легли в основу подхода, который в данный момент

используется в NASA при обработке очень больших обзоров тысяч и десятков тысяч источников. Доскональность, которую отметил Игорь Иванович, я бы даже сказал, вездливость диссертанта оказалась очень полезным качеством для данной темы. Также я хочу отметить, что, к сожалению, достаточно часто приходится видеть работы молодых учёных, когда они проводят исследования по той выборке, которую просто успели наблюдать. Получается три, пять, десять источников, и диссертант пытается сделать какой-то статистический анализ. Вот в данной работе в обеих главах — и про полярную шапку, и про MOJAVE — используется большая выборка, много сотен источников, и поэтому статистический анализ даёт правдоподобный результат. И ещё я хотел бы отметить важное качество диссертанта — критический анализ собственных результатов. Это очень важная черта стиля работы и в публикациях, и в диссертации. Автор избегал штампов типа «идеальное согласие» или селективности к наблюдениям, которые подтверждают его любимую гипотезу. И он честно пишет о фактах, которые хуже согласуются с ожиданиями, и прямо пишет о проблемах как с данными, так и с интерпретацией. В этом отношении работа очень взвешенная. Я высоко оцениваю работу Александра Викторовича и призываю учёный совет проголосовать за присуждение ему степени кандидата физ.-мат. наук. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое. Ещё желающие выступить? Нет, по видимому. Тогда будем считать общую дискуссию закрытой, и слово предоставляется соискателю для заключительного слова. Пожалуйста.

СОИСКАТЕЛЬ: В заключение я хотел бы поблагодарить, в первую очередь, научного руководителя Юрия Юрьевича Ковалева за очень внимательное отношение, за множество ценных советов, за очень комфортные условия для работы. Кроме того, я хотел бы поблагодарить Юрия Андреевича Ковалева, Леонида Юрьевича Петрова и других соавторов опубликованных работ за тот опыт работы с данными, которым они со мной поделились, а также своих коллег по лаборатории в МФТИ и по АКЦ ФИАН за плодотворные дискуссии, обсуждения, комментарии. Наконец, благодарю также оппонентов и представителей ведущей организации за внимательное чтение моей работы и за замечания и диссертационный совет за то, что нашли время рассмотреть мою работу. И также благодарен своей семье за поддержку во всё время этой работы. Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое. Тогда мы приступаем к процедуре голосования. Надежда Николаевна, пожалуйста.

ТАЙНОЕ ГОЛОСОВАНИЕ

СЕКРЕТАРЬ: Уважаемые коллеги, я уже стартовала голосование в системе Криптовече. Насколько я понимаю, должны уже прийти ссылки на индивидуальные электронные бюллетени для голосования на почту всем, кто присутствует сейчас на заседании. Я напоминаю, что нужно перейти по ссылке из письма, зарегистрироваться обязательно. Да?...

КОВАЛЕВ Ю.Ю.: Если можно, я проверил, что у меня в почте нет письма. Я просто хотел бы убедиться...

СЕКРЕТАРЬ: Вот и у меня нет письма. Сейчас проверю, это задержка какая-то с почтой. Я отправила еще одно почтовое уведомление. Надеюсь, что второе дойдет. Сегодня наблюдается какая-то задержка с рассылкой уведомлений в этой системе. Наверное, немножко надо подождать. Ну, я все равно закончу оглашение процедуры голосования, для протокола, так сказать. Вы проходите по ссылке, обязательно регистрируетесь, вам выдается электронный бюллетень. В нем будет указана повестка голосования. Нужно выбрать один из вариантов, за или против, если будут выбраны оба варианта или не будет выбрано ни одного, то такой бюллетень будет учтен как недействительный. Здесь у нас есть ноутбук для голосования в зале заседаний, либо у кого есть свои личные устройства, голосуют с личных устройств. У меня все.

КОВАЛЕВ Ю.А. Подтверждаю, что Ковалеву-старшему пришло уже.

КОВАЛЕВ Ю.Ю. Коллеги, тогда я нажимаю на паузу записи. Да, Игорь Дмитриевич?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Да, спасибо.

Перерыв на голосование 15 минут. В течение перерыва все присутствующие на заседании члены диссертационного совета голосуют в системе для удаленного тайного голосования «Криптовече».

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Коллеги, давайте продолжать наше заседание. Пожалуйста, ученый секретарь.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо. Голосование успешно завершилось. Все 15 членов совета, присутствующих на заседании, проголосовали успешно. Результаты

голосования вы видите на экране. Всего было роздано 15 электронных бюллетеней. ЗА — 15, ПРОТИВ — 0, недействительных бюллетеней — 0. Таким образом, единогласно. По итогам голосования сформирован протокол о результатах электронного тайного голосования, который вы тоже видите на экране.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Нам надо утвердить результаты голосования. Кто за утверждение?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Все ЗА. Теперь нам надо обсудить и принять заключение диссовета.

СЕКРЕТАРЬ: Заключение, как обычно, было разослано всем членам совета. Все имели возможность с ним ознакомиться. Я также получила замечания от Дмитрия Зигфридовича, от Рустама Давудовича. Большое спасибо. Все замечания были внесены в финальный проект, который сегодня утром я разослала, и который вот здесь распечатанный на столе лежит. Если еще есть какие-то замечания, я готова их учесть.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Есть еще замечания? Нет замечаний. Тогда будем голосовать. Кто за то, чтобы принять заключение? Единогласно. Тогда поздравляем Вас с успешной защитой! (*Аплодисменты*). На этом заседание будем считать закрытым.

Председатель заседания,
председатель диссертационного совета,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

И.Д. Новиков

Секретарь заседания, учёный
секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Н.Н. Шахворостова

28 сентября 2022 г.