

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Войцика Петра Андреевича «Исследование центральных областей активных ядер галактик с экстремальным угловым разрешением», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа Войцика П. А. посвящена изучению релятивистских струй в активных ядрах галактик (АЯГ) с высоким угловым разрешением средствами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Несмотря на бурное развитие РСДБ и несомненные успехи в исследовании АЯГ уже в течение нескольких десятков лет, тема изучения релятивистских струй не теряет **актуальности** и в настоящее время. Появление систем со все большим угловым разрешением дает новые возможности в изучении структуры, физических параметров и динамических характеристик релятивистских струй, что может существенно приблизить нас к пониманию работы центральной машины АЯГ. На сегодняшний день системой, обеспечивающей экстремально высокое угловое разрешение (8 мкс на частоте 22 ГГц), является наземно-космический радиоинтерферометр «Радиоастрон» с максимальной базой, достигающей в апогее космического аппарата более 350 тысяч км (29 радиусов Земли). **Актуальность** диссертационной работы в значительной степени определяется использованием данных наблюдений радиоинтерферометра «Радиоастрон», позволяющих измерить размеры и яркости самых компактных областей релятивистских струй с целью уточнения механизмов излучения.

По-существу, диссертация посвящена решению трех основных задач: 1) изучению видимого сдвига РСДБ-ядра в зависимости от частоты в сверхкомпактных внегалактических радиоисточниках; 2) обзору активных ядер галактик на радиоинтерферометре «Радиоастрон» с целью измерения и исследования яркостной температуры центральных областей АЯГ и на этой основе проверки существующих моделей излучения; 3) изучению кинематики релятивистских струй по данным многолетнего РСДБ мониторинга активных ядер галактик с целью оценить типичное значение доплеровского усиления излучения АЯГ.

Диссертация **состоит** из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 123 страницах, включает 25 рисунков и 11 таблиц, список литературы содержит 150 наименований.

Поставленные в работе три основные задачи предопределили структуру и содержание диссертации.

Так, **первая глава** посвящена исследованию видимого сдвига РСДБ-ядра сверхкомпактных радиоисточников с частотой. Решение этой задачи важно не только для изучения астрофизических свойств объектов. Эффект сдвига РСДБ-ядра важно учитывать при построении высокоточных инерциальных систем отсчета. Определение сдвига ядра с частотой является известной проблемой. Традиционно она решается методом совмещения оптически тонких деталей структуры источника на разных частотах. Однако этот метод применим только в случае хорошо выраженных протяженных джетов, содержащих достаточно компактные оптически тонкие области излучения. В диссертации же ставится задача определения сдвига РСДБ-ядра в случае сверхкомпактных источников, практически не содержащих оптически тонких деталей. Таковыми являются объекты, входящие в международную систему астрономических координат (ICRF). Для решения данной проблемы диссертантом разработаны два метода измерения видимого сдвига ядер квазаров с частотой по наблюдениям близких источников, связанных одним фазовым решением методом относительной РСДБ-астрометрии. В диссертации дано подробное описание формирования выборки объектов, проведения наблюдений, обработки наблюдений, построения карт источников, а также предложенных методов измерения сдвига ядра с частотой. С использованием этих методов получены оценки сдвига ядра для 24 объектов, у пяти из которых, а именно, 0133+476, 0202+319, 0235+164, 0440-003 и 0446+112, входящих в список «определяющих» объектов ICRF, обнаружен значимый частотный сдвиг, который необходимо учитывать при решении высокоточных астрометрических задач. Кроме того, диссертант на примере источников с достаточно протяженной структурой показал хорошее согласие результатов измерения методом относительной астрометрии и методом выравнивания изображений по оптически тонким деталям. Обозначена проблема обратного сдвига ядра. По результатам измерений частотного сдвига ядра были также оценены некоторые геометрические и физические параметры релятивистских струй. Отрадно также, что в диссертации дается оценка участия в наблюдениях трех телескопов российской сети «КВАЗАР-КВО» как части европейской РСДБ-сети.

Во второй главе приводятся результаты обзора АЯГ на наземно-космическом интерферометре, представляющего собой одну из основных программ наземно-космического интерферометра «Радиоастрон». Измеряемой физической характеристикой нетеплового излучения струй АЯГ в этом обзоре является яркостная температура. Теоретически для синхротронного излучения существует предел на яркостную температуру, определяемый обратным комптоновским рассеянием. В диссертации показано, что предельная яркостная температура, которая может быть измерена интерферометром, зависит от физической длины проекции базы. Так, наземные интерферометры, ограниченные размером Земли, могут измерять предельную яркостную температуру до $10^{12.5}$ К. А наземно-

космический интерферометр «Радиоастрон» с базой, достигающей 28-29 диаметров Земли, позволяет измерять яркостные температуры, превышающие Комптоновскую катастрофу ($10^{11.5}$ К) на несколько порядков, что, в свою очередь, позволяет проверить существующие теоретические модели излучения плазмы в релятивистских струях АЯГ. В диссертации дается подробное описание технических деталей всех этапов эксперимента: от формирования выборки наблюдаемых источников и проведения наблюдений до посткорреляционной обработки и статистического анализа полученных результатов. Основными выводами данной главы являются то, что 1) по результатам обработки наблюдений получен значимый интерферометрический сигнал от 2/3 объектов полной выборки 163 объектов на проекциях баз до 345 000 км (28 диаметров Земли) на трех частотах наблюдения (1.7, 4.8 и 22.2 ГГц). Для источников 3С 273, В0529+483 и 0235+164 проведен подробный анализ яркостных температур и их нижних пределов во всех частотных диапазонах. Все три источника показывают значения 10^{13} К; 2) яркостная температура многих протектированных в обзоре источников значительно превышает предел на Комптоновскую катастрофу даже с учетом доплеровского усиления излучения; 3) высокие яркостные температуры противоречат предположению о равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля в релятивистских струях АЯГ на расстоянии парсеков от центральной машины; 4) для объяснения высоких яркостных температур требуется пересмотр существующих механизмов излучения в релятивистских струях АЯГ.

Третья глава диссертации посвящена кинематическому анализу релятивистских струй по данным многолетнего РСДБ мониторинга АЯГ на VLBA на частоте 8 ГГц (программа RDV). Целью такого анализа является оценка видимых сверхсветовых скоростей передвижения наиболее ярких деталей струй АЯГ и на этой основе изучение распределения значений доплеровского усиления. В работе дается подробное обоснование сформированной выборки источников: выбор программы наблюдений, частоты наблюдений, эпох наблюдений, количества объектов. Подробно описаны процедура картографирования, а также процесс моделирования и отождествления компактных деталей структуры источников. В итоге получено распределение видимых скоростей для 225 компонентов релятивистских струй 65 источников с известным красным смещением. Определены наиболее важные статистические характеристики полученного распределения скоростей. Обозначены проблемы в интерпретации как величин, так направлений движения компонентов струй. Проанализировано также распределение видимых скоростей самых быстрых деталей всех источников. Получено распределение значений доплеровского усиления. Приводятся наиболее важные статистические характеристики всех полученных в работе распределений, что имеет важное **практическое значение** при оценке физических характеристик релятивистских струй АЯГ. Так, распределение видимых скоростей самых быстрых деталей в источниках

имеет максимальное значение $44c$ и медианное значение $8.3c$, что указывает на типичные значения доплеровского усиления около 10 и максимальные до 30. Кроме того, получен важный статистический результат, что разброс видимых скоростей от компонента к компоненту в отдельно взятом источнике значительно меньше, чем разброс видимых скоростей от источника к источнику в выборке, что по-видимому, указывает, по мнению автора, на то, что существует характерная физическая скорость, связанная с каждым источником, являющаяся скоростью релятивистского истечения.

Научная новизна результатов диссертации определяется тем, что:

1) **предложены** и разработаны методы измерения видимого сдвига ядер квазаров с частотой методом относительной РСДБ-астрометрии для приложения к сверхкомпактным АЯГ, к которым нельзя применить традиционные методы, основанные на совмещении оптически тонких компонентов джета. Предложенные методы **впервые** использованы для измерения эффекта частотного сдвига РСДБ ядра сразу для нескольких компактных внегалактических радиоисточников из каталога опорных объектов международной системы астрономических координат. Так что предложенные методы имеют большое **практическое значение** для уточнения систем координат;

2) **впервые** получены результаты **массового обзора АЯГ** на радиоинтерферометре «Радиоастрон» с проекцией базы достигающей 28-29 диаметров Земли. Для более сотни внегалактических источников получен значимый интерференционный отклик. При этом показано, что яркостная температура многих протектированных источников значительно превышает предел на Комптоновскую катастрофу. Для большинства из них не выполняется предположение о равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля. Полученные результаты требуют пересмотра существующих механизмов излучения в релятивистских струях АЯГ;

3) **впервые** по результатам программы RDV многолетнего мониторинга АЯГ на РСДБ-решетке VLBA на частоте 8 ГГц изучена кинематика компонентов релятивистских струй в 65 АЯГ с известным красным смещением и на этой основе получены важные статистические характеристики распределений видимых скоростей и доплеровского усиления наиболее ярких компонентов. Полученные ограничения на значение Допплер-фактора (пиковое значение распределения при 10 и быстрый спад после 30) важны для оценки яркостной температуры АЯГ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, а также их достоверность. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, обоснованы. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием радиоинтерферометрических комплексов международного уровня, применением известных, широко используемых на мировом уровне пакетов программ для обработки и анализа

интерферометрических данных (AIPS, DifMap, PIMA). Для подтверждения надежности предложенных методов определения задержки с частотой на основе метода относительной астрометрии показано хорошее согласие полученных оценок с оценками, полученными методом совмещения оптически тонких деталей джета в случае АЯГ с протяженной структурой. Для подтверждения значимости результатов обзора АЯГ на интерферометре «Радиоастрон» оценивалась вероятность ложного детектирования для каждого измерения. Для подтверждения правильности результатов коррелирования для части интерферометрических данных был использован программный коррелятор DiFx в дополнение к основному, разработанному в АКЦ ФИАН.

Замечания по диссертации:

1. Имеется некоторое несоответствие между сформулированными целями работы и полученными результатами. Целью диссертационной работы заявлено «исследование физических свойств и механизма излучения релятивистских струй в АЯГ...». Что касается **механизма излучения**, то в случаях, где не работают традиционные модели, альтернативные модели озвучены лишь как предположения, без подробного рассмотрения, не то что исследования. В Положениях, выносимых на защиту, а также в Выводах к диссертации ничего о новых исследованных механизмах излучения не говорится. На мой взгляд, следовало бы ограничить цель работы как «Исследование физических свойств релятивистских струй АЯГ методами РСДБ».
2. Не дается никаких пояснений относительно такого важного физического параметра как k^r (стр. 18), на который диссертант неоднократно ссылается.
3. «Радиоастрон» является наземно-космическим интерферометром с базой, превышающей диаметр Земли до 28-29 раз, обеспечивающей рекордно высокое предельное угловое разрешение, достигающее 7-8 мкс дуги на частоте 22 ГГц. К сожалению, в диссертации не приводится ни одного изображения АЯГ, полученного интерферометром с такими предельными параметрами. Синтез изображений с предельно высоким угловым разрешением мог бы существенно быстрее приблизить нас к пониманию работы центральной машины АЯГ. Интересно знать, были ли попытки получения изображений АЯГ с предельно высоким угловым разрешением и чем увенчались эти попытки. Нелишним было бы в диссертации дать обсуждение этой проблемы.

Редакционные замечания:

1. Текст диссертации изобилует множеством опечаток и даже грамматических ошибок, о чем при всем желании невозможно умолчать.
2. На стр.66 вместо частоты 4.8 ГГц указана частота 4.6 ГГц.
3. На стр.81 в формуле (3.1) вместо β должно быть β_c .

Тем не менее, следует отметить, что диссертация в целом написана хорошим научным языком, обстоятельно, с подробным изложением всех важных технических деталей наблюдательных программ, формирования выборок радиоисточников, методов их картографирования, моделирования отдельных компонент полученных изображений, а также предложенных новых методов обработки и анализа данных. Диссертация снабжена большим количеством иллюстраций, а также таблиц, в которых отражены результаты обработки и статистического анализа. Каждая глава снабжена обстоятельными выводами. Высказанные замечания носят либо рекомендательный, либо редакционный характер и не влияют на высокую общую оценку работы.

Полнота представления результатов. Результаты диссертации полностью отражены в шести публикациях. Все работы опубликованы в изданиях, входящих в международные базы данных (WOS, Scopus) и рекомендованных ВАК для представления результатов диссертаций. Четыре работы опубликованы в лучших международных астрономических журналах из Q1 (ApJ, ApJ Let., MNRAS), одна работа – в издании из Q2. В одной из работ диссертант является первым автором. Во всех работах личный вклад автора четко обозначен как основной или равный вкладу соавторов. Результаты диссертации прошли солидную апробацию на научных семинарах и отчетных сессиях АКЦ ФИАН, а также на 3 Всероссийских и 9 международных конференциях. **Автореферат** правильно отражает содержание диссертации.

Заключение. Диссертация Войцика Петра Андреевича «Исследование центральных областей активных ядер галактик с экстремальным угловым разрешением» является законченным самостоятельным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне. Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения степени кандидата наук, а ее автор Войцик Петр Андреевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент

Байкова А.Т.

Байкова Аниса Талгатовна

доктор физико-математических наук, ученое звание с.н.с.

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия
Главный научный сотрудник Лаборатории
динамики Галактики
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория
Российской академии наук
196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, корп.1.
Тел. (812) 363 72 07, электронная почта bajkova@gaoran.ru,
anisabajkova@mail.ru.

4 марта 2022 г.

Подпись А.Т. Байковой удостоверяю,
ученый секретарь ГАО РАН,
кандидат физ.-мат. наук

О. Ю. Барсунова