

## ОТЗЫВ

официального оппонента Зинченко Игоря Ивановича, заведующего отделом, отдел № 180 «Радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии» Отделения «Физики плазмы и электроники больших мощностей» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», на диссертацию Войцика Петра Андреевича на тему «Исследование центральных областей активных ядер галактик с экстремальным угловым разрешением», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Исследования активных ядер галактик (АЯГ) продолжаются уже не одно десятилетие. Получено много важных результатов. Общеизвестно, что огромное энерговыделение этих объектов обусловлено аккрецией вещества на сверхмассивную чёрную дыру. Тем не менее остается много вопросов, ответы на которые требуют проведения наблюдений АЯГ с предельно возможным угловым разрешением, которое можно реализовать только методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Максимальные базы были достигнуты при помощи наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон», который успешно работал много лет. Диссертация П.А. Войцика посвящена ряду открытых вопросов в изучении АЯГ на основе анализа данных наземных и наземно-космических РСДБ экспериментов. Актуальность этой работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Первая глава посвящена изучению эффекта сдвига положения видимого «ядра» в радиоизлучении АЯГ в зависимости от частоты. Ядром называется наиболее яркая и компактная деталь в основании релятивистской струи, которая возникает в процессе аккреции вещества в данных объектах. Считается, что сдвиг обусловлен зависимостью оптической толщины струи от частоты. Эффект этот известен и изучался ранее теоретически и экспериментально. Его учёт важен для астрофизических исследований АЯГ и для прецизионной астрометрии, в частности для относительной привязки радио и оптической систем координат. В данной диссертационной работе разработан и реализован метод относительной РСДБ астрометрии для исследования этого эффекта. Для каждого выбранного источника наблюдались два близких фазовых калибратора. Одна из проблем заключается в том, что в калибраторах тоже возможен сдвиг ядра. В зависимости от наличия информации о направлении струй в источниках, возможны разные подходы, которые и были реализованы в работе. Проведено сравнение и с «традиционным» подходом, основанным на совмещении изображений на разных частотах на основе кросс-корреляции оптически тонких областей. В целом наблюдается неплохое согласие результатов, полученных разными методами. Астрометрический метод имеет некоторые преимущества, хотя не лишен недостатков. Значимый сдвиг ядра обнаружен у значительного числа объектов. Обращает на себя внимание обратный ожидаемому в принятой модели сдвиг ядра в некоторых объектах, полученный астрометрическим методом. К сожалению, какого-либо объяснения этому явлению не предложено, хотя намечены пути поиска ответа на вопрос о причинах его появления.

Во второй главе приводятся результаты обзора АЯГ на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». Первый важный результат этой главы – это статистика детектирования источников на разных частотах и на разных базах. Обработан и проанализирован большой объём данных РСДБ измерений, что само по себе является непростой задачей. Полученные результаты позволяют делать некоторые общие выводы о свойствах ис-

точников. Самым важным результатом являются оценки яркостной температуры источников. Наблюдения на наземно-космических базах позволяют на порядки повысить оценки нижнего предела яркостной температуры по сравнению с наземными РСДБ наблюдениями. Полученные оценки нижнего предела яркостной температуры для нескольких источников значительно превышают так называемый комптоновский предел и противоречат предположению о равномерном распределении энергии частиц и магнитного поля. Объяснения столь высоким яркостным температурам пока нет.

Третья глава диссертации посвящена изучению кинематики релятивистских струй. По данным периодических РСДБ наблюдений нескольких десятков источников анализируется видимое собственное движение отдельных компонент в этих объектах. Данные аппроксимировались как линейной зависимостью, так и полиномом второго порядка, что даёт оценку ускорения. Найдено, в частности, что более далёкие от ядра компоненты имеют в среднем большую скорость, чем более близкие компоненты. Получены также оценки типичного доплеровского усиления, что важно для анализа данных о яркостной температуре источников.

В целом в рамках диссертационной работы проведен большой комплекс исследований АЯГ, получены важные результаты, отмеченные выше. Эти результаты касаются различных аспектов проблемы изучения активных ядер галактик, отличаются новизной и оригинальностью и вносят значительный вклад в развитие данного направления исследований. Качество представления результатов в целом очень хорошее.

Достоверность результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается использованием данных, полученных на лучших инструментах, применением апробированных методов обработки данных и верификации результатов, сопоставлением с результатами других подобных работ. Также стоит отметить, что все основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых астрономических журналах.

Существенных недостатков в диссертационной работе П.А. Войцика указать не могу. Можно отметить ряд недочётов, которые, однако, не влияют на основные результаты работы. К ним можно отнести следующее.

1. Во второй главе имеются некоторые неточности в описании процедуры оценки яркостной температуры. Так, говорится, что формула (2.3) даёт максимальную яркостную температуру, к которой чувствителен данный интерферометр. На самом деле очевидно, что интерферометр с данной базой чувствителен к сколь угодно более высокой яркостной температуре, но из измеренной плотности потока при данной базе нельзя получить более высокую оценку этой температуры. Далее говорится, что самая высокая яркостная температура, которую можно измерить с помощью радиоинтерферометра, определяется длиной базы и точностью измерения функции видности. Вообще-то, как видно из формулы (2.3), самая высокая оценка яркостной температуры определяется измеренной плотностью потока источника, а не точностью его измерения.

2. В разделе 2.4.2 я не понял, каким образом из верхних пределов на плотность потока удалось получить нижние пределы яркостной температуры.

3. В главе 3 приводятся результаты квадратичной аппроксимации данных о движении компонент источников, что в принципе даёт информацию об их ускорении. Однако эти результаты практически никак не обсуждаются и не используются, кроме выделения медленно движущихся компонент. При этом приведённые в таблице 3.5 оценки показывают, что в некоторых случаях ускорение может быть значимым.

4. Наконец, надо отметить, что в диссертации довольно много грамматических ошибок.

Эти замечания не снижают общей высокой оценки работы. В целом диссертационная работа П.А. Войцика является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, П.А. Войцик, безусловно, заслуживает

присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Зав. отделом ИПФ РАН  
доктор физ.-мат. наук  
тел.: +7-831-4367253  
Email: [zin@ipfran.ru](mailto:zin@ipfran.ru)  
Адрес: 603950 Нижний Новгород,  
ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН

И.И. Зинченко

Подпись И.И. Зинченко заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

И.В. Корюкин