

## 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 Попкова Александра Викторовича на тему «Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных выборок», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Активные ядра галактик (АЯГ) уже долгое время исследуются разными методами. Тем не менее остается немало нерешённых проблем. Некоторым из них и посвящена диссертационная работа А.В. Попкова. В ней рассматривается связь характера радиоспектров и структуры АЯГ, ассоциация источников нейтрино с блазарами (одним из видов АЯГ), проводятся оценки Доплер-фактора для джетов АЯГ. Все эти вопросы активно обсуждаются в научной литературе и работа А.В. Попкова, безусловно, актуальна.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Первая глава самая объёмная (занимает половину диссертации). Она посвящена анализу связи между характером спектров и структурой АЯГ. Для этого используются данные радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами (РСДБ) на двух частотах на антенной решетке VLBA и данные о широкополосных радиоспектрах источников, главным образом по наблюдениям на РАТАН-600. Исследуется статистически полная выборка источников из так называемой Северной полярной шапки (область неба со склонением  $\geq 75^\circ$ ). Диссертантом была выполнена обработка данных VLBA. Особое внимание уделяется тщательной калибровке данных. Она была выполнена независимо в двух программных пакетах диссертантом и его соавтором. Результаты совпали в пределах погрешности. Также очень тщательно была проведена процедура картографирования источников, с анализом устойчивости решения. Всего на VLBA было зарегистрировано 162 из 482 источников полной выборки. По данным VLBA определены различные, как структурные, так и спектральные характеристики источников, получены оценки угловых размеров и яркостной температуры главной компактной компоненты. Далее проводится анализ связи параметров источников, полученных из РСДБ наблюдений и из широкополосных спектров. Результаты, в частности, подтверждают, что источники с плоским спектром и с пиком в спектре являются наиболее компактными. Выделены и другие типы источников, в частности, компактные источники с крутым спектром. В работе анализируются корреляции между параметрами структуры и спектра источников с учетом верхних и нижних пределов. Полученные корреляции соответствуют выводам о наличии тех или иных структур в компактных источниках. Всем этим результатам дана адекватная физическая интерпретация. Выполнен также анализ переменности плотности потока источников. Определены амплитуда и так называемый индекс переменности. Все источники с сильной переменностью были протестированы на VLBA, что свидетельствует об их компактности. Однако не все компактные источники являются переменными. Полученные в главе результаты сравниваются с результатами других работ.

Вторая глава посвящена исследованиям блазара TXS 0506+056, который рассматривается, как вероятный источник нейтрино высоких энергий. Эти исследования проведены в рамках программы многолетнего мониторинга выборки радиоярких АЯГ на 6 частотах в интервале от 1 до 22 ГГц на радиотелескопе РАТАН-600. Диссертантом разработана про-

грамма для оптимизации расписания наблюдений источников на РАТАН-600 с учётом особенностей инструмента и проведен анализ полученных за много лет данных наблюдений. Найдено, что вспышки излучения нейтрино, ассоциированные с данным блазаром, случились во время начала и развития сильной вспышки на сантиметровых волнах. Показано также, что спектр этого источника является типичным для переменных блазаров, что свидетельствует против предположения об уникальности данного источника. Таким образом, подобные объекты могут давать значительный вклад в поток нейтрино высоких энергий. Делается также вывод о том, что в джетах блазаров должен быть механизм ускорения протонов до очень высоких скоростей.

В третьей главе диссертации проводятся оценки релятивистского Доплер-фактора джетов АЯГ на основе РСДБ измерений яркостной температуры их ядер. Для этого используются данные программы мониторинга джетов АЯГ MOJAVE на VLBA. В работе весьма тщательно выполнена оценка яркостных температур радиоядер. С некоторыми упрощающими предположениями были определены Доплер-факторы или их нижние пределы для 447 джетов. Получены также оценки Лоренц-фактора и угла между направлением джета и лучом зрения. Проведено сопоставление с результатами, полученными другими методами. Найдено, что характерная яркостная температура радиоядер джетов в собственной системе отсчета приблизительно соответствует состоянию равномерного распределения между энергией частиц и магнитного поля. Типичные значения Доплер-фактора  $\sim 10$ . Полученные оценки в среднем согласуются с оценками, полученными совершенно другим методом.

В целом в работе получено много новых интересных результатов, перечисленных выше. Эти результаты вносят значительный вклад в развитие данного направления исследований. Научная новизна работы определяется следующими основными факторами. Впервые методами РСДБ исследована статистически полная выборка АЯГ настолько большого объёма, что позволило сделать надёжные выводы о связях между характером спектра АЯГ и их структурой. Были открыты десятки новых компактных объектов с крутым спектром. Впервые показано, что блазар TXS 0506+056, который рассматривается, как вероятный источник нейтрино высоких энергий, является типичным представителем данного класса объектов. Впервые сделаны выводы о том, какие оценки Доплер-фактора джетов являются наиболее надёжными.

Достоверность результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается использованием данных, полученных на лучших инструментах, применением апробированных методов обработки данных и верификации результатов, использованием независимых методов обработки, сопоставлением с результатами других подобных работ. Надо отметить скрупулёзный подход диссертанта на всех этапах работы. Также стоит отметить, что все основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых астрономических журналах. Личный вклад диссертанта в эти работы чётко описан и понятен. Полученные в работе результаты могут быть использованы как в наблюдательных, так и в теоретических исследованиях АЯГ.

В целом диссертационная работа А.В. Попкова производит очень благоприятное впечатление прежде всего обстоятельностью и тщательностью подхода к рассматриваемым вопросам. Диссертация хорошо оформлена и практически не содержит опечаток. Замечаний по существу диссертационной работы А.В. Попкова у меня нет. Можно отметить некоторые мелкие неточности, которые никак не влияют на результаты работы. Например, в разделе 1.2.4 длина самой короткой базы VLBA обозначена, как  $D_{\max}$ . Было бы естественнее использовать  $D_{\min}$ . В разделе 2.1 при описании эффекта Вавилова-Черенкова надо было бы сказать, что частицы должны двигаться быстрее фазовой скорости света, а не просто скорости света в среде.

В заключение можно констатировать, что диссертационная работа А.В. Попкова является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским

диссертациям, а её автор, А.В. Попков, 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