



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора САО РАН

В.В. Власюк

«2» апреля 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация «Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в поляризованном свете», представляемая на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия выполнена в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Шабловинская Елена Сергеевна работала в САО РАН в должности стажера-исследователя.

В 2018 г. окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по специальности «Астрономия» и ей присвоена квалификация АСТРОНОМ.

В период подготовки диссертации и в настоящее время соискатель обучается по программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре САО РАН по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия, сначала под руководством д.ф.-м.н., профессора Афанасьева Виктора Леонидовича, затем д.ф.-м.н. Моисеева Алексея Валерьевича.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Моисеев Алексей Валерьевич работает в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО РАН в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Работа посвящена изучению центральных областей активных ядер галактик (АЯГ) в поляризованном свете. Для этого большое внимание было уделено развитию спектрополяриметрического метода оценки масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД), разработанного ранее В. Л. Афанасьевым на основе данных, получаемых с фокальным редуктором SCORPIO-2 на 6-м телескопе БТА САО РАН. В основе метода лежит эффект экваториального рассеяния – отражения излучения центральных областей АЯГ на внутренней границе пылевого тора, из-за чего профили широких линий приобретают характерные особенности в поляризованном свете. Поскольку поляризация излучения чувствительна к геометрии среды и кинематики излучающего вещества, важной задачей стало определить степень влияния истечений и ветров из центральных областей активных ядер – в первую очередь, из области формирования широких линий (ОФШЛ) – на наблюдаемые свойства объектов. Эти эффекты особенно заметны при наблюдении линий ультрафиолетового (УФ) диапазона, для которых характерны асимметричные профили. Для численного моделирования поляризации вследствие экваториального рассеяния с помощью симуляции трехмерного переноса излучения методом Монте-Карло был рассмотрен профиль поляризации УФ линии Mg II в случае присутствия в области ОФШЛ истечения со скоростью 6000 км/с. Показано, что наличие истечений вносит дополнительную ошибку в оценку массы СМЧД, не превышающую 35%, что делает метод применимым к линиям УФ диапазона.

Данные численного моделирования позволяют продлить спектрополяриметрический метод оценки масс СМЧД на линии коротковолнового диапазона и, следовательно, на наблюдения активных ядер на красных смещениях больше 1. На телескопе БТА с прибором SCORPIO-2 проведены наблюдения двух таких объектов: квазара 1-го типа SBSS 1419+538 ($z = 1.862$) и гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ($z = 1.41$). Полученные для SBSS 1419+538 данные спектрополяриметрии показали наличие особенностей экваториального рассеяния в профиле широкой линии Mg II. Это позволило дать оценку массы СМЧД для этого квазара, оказавшуюся равной $\sim 4 \times 10^9$ солнечных масс. Спектрополяриметрия Q0957+561 была проведена сразу в двух широких линиях, попавших в наблюдаемый спектральный диапазон – это линии Mg II и CIII. Однако ни в одном из двух компонент линзированного квазара признаки экваториального рассеяния обнаружены не были, из чего следует, что в центральных областях квазара присутствует деполаризирующая область или эффект экваториального рассеяния мал из-за сравнимого размера ОФШЛ с областью рассеяния. Полученные спектрополяриметрические данные продемонстрировали эффект, ранее не наблюдавшийся у гравитационно-линзированных квазаров и Q0957+561 в частности: обнаружена зависимость угла поляризации в континууме от длины волны и систематическая разница состояния поляризации излучения двух изображений квазара. Этот результат подтвержден более точными поляриметрическими наблюдениями в широких полосах. В качестве наиболее правдоподобных можно выделить два сценария: прецессию системы диск-джет и комплексное влияние эффектов макро- и микролинзирования. Для однозначной интерпретации требуются дальнейшие наблюдения с большей временной базой.

Спектрополяриметрический метод определения массы СМЧД использует оценку размера области рассеяния – в общем случае, это внутренней границы пылевого тора. Обыкновенно для этого используются оценки размера тора, на сегодняшний день получаемые с помощью двух методов: инфракрасного (ИК) эхокартирования и интерферометрия АЯГ в ближнем ИК-диапазоне. Однако если экваториальное рассеяние происходит при оптической толщине около 1, вблизи радиуса сублимации пыли, стоит полагать, что ИК наблюдения чувствительны к пыли на много большей оптической толщине. Тогда область сублимации пыли, как и область экваториального рассеяния, находится ближе к центральному ионизирующему источнику, чем области максимума яркостной температуры в ИК-диапазоне, но дальше, чем области, доступные для оптического эхокартирования широких линий. Для оценки размер области рассеяния разработан метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях, который применен впервые к архивным данным спектрополяриметрического мониторинга галактики Mrk 6. Задержка сигнала в поляризованной линии относительно неполяризованного континуума составила чуть меньше 100 дней, что в 5 раз больше размера ОФШЛ для Mrk 6. При этом оценка совпала с предсказанным теорией радиусом сублимации пыли и оказалась в 2 раза меньше размера тора, полученного методом ИК-интерферометрии. Таким образом, разработанный метод впервые позволяет напрямую оценивать размер области сублимации пыли, значительно увеличивая точность оценки массы СМЧД.

Особый интерес представляет исследование вклада переменного поляризованного потока джета в излучение АЯГ. Для этого были проведены наблюдения объекта S5 0716+714, относящегося к классу объектов типа BL Lac. Наблюдаемая в этих активных ядрах поляризация имеет синхротронную природу и генерируется в релятивистском джете на расстоянии менее 0.01 пк от ядра. 9-часовой мониторинг S5 0716+714, проведенный на БТА с редуктором SCORPIO-2 выявил переменность блеска с периодом около 1.5 часов, которая также наблюдается и для направления вектора поляризации, что позволяет сделать оценку размера излучающей области порядка 10 а.е. Повторные наблюдения S5 0716+714, сделанные на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН с новым прибором «Стокс-поляриметр» в рамках его методического исследования, показали, что период переменности сохраняется и остается характерным и для блеска, и для направления вектора поляризации, что говорит о стабильности

области формирования оптического поляризованного излучения. Полученные данные рассмотрены в рамках геометрической модели вращения плазмы в геликальном магнитном поле в джете. Наблюдательные данные хорошо описываются моделью, если добавить в нее прецессию магнитного поля с периодом 15 дней как дополнительный кинематический параметр.

Научная новизна работы заключается в построении новой численной модели расчета поляризации вследствие экваториального рассеяния в линиях УФ-диапазона, на основании которой впервые удалось продлить спектрополяриметрический метод оценки масс СМЧД на наблюдения АЯГ на красных смещениях больше 1, проводимые на 6-м телескопе БТА САО РАН. Также благодаря разработке нового метода оценки геометрического размера области экваториального рассеяния в АЯГ 1-го типа впервые дана оценка радиуса сублимации пыли в галактике Mrk 6. Проводимые на 1-м и 6-м телескопах САО РАН наблюдения поляриметрического мониторинга объектов типа BL Lac впервые показали возможность оценки линейных размеров оптического джета.

Научная и практическая значимость работы состоит в проведении численного расчета поляризации вследствие экваториального рассеяния в УФ линии Mg II и доказательстве возможности применения спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД даже в присутствии высокоскоростных истечений из ядра, на основе чего метод был успешно применен к исследованиям двух галактик на красных смещениях больше 1. Представленный в диссертации новый метод эхокартирования в широких поляризованных линиях позволяет получать прямые оценки размера области экваториального рассеяния (или внутреннего радиуса пылевого тора) в АЯГ 1-го типа. Это позволяет повысить точность спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД и дать более точные оценки радиуса сублимации пыли в АЯГ по сравнению с данными наблюдений в ИК-диапазоне. Полученные в диссертации данные длительного поляриметрического мониторинга объекта типа BL Lac демонстрируют возможность получения оценки линейных размеров оптически неразрешаемых областей джета вблизи СМЧД.

Личный вклад автора заключается в получении наблюдательного материала на 1-м и 6-м телескопах САО РАН, обработке и анализе поляриметрических и спектрополяриметрических данных, построении геометрической модели формирования поляризации в джете, разработке методов оценки размеров структур АЯГ и методической работе с аппаратурой.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в 6 статьях соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на международных и всероссийских конференциях, а также на семинарах САО РАН. Результаты работы «Обнаружение внутри суточной переменности направления вектора поляризации радиоисточника S5 0716+714» и «Новый метод измерения радиуса сублимации пыли в активных ядрах галактик по поляриметрии широких линий» приняты на Ученом совете САО РАН как важнейшие научные результаты за 2018 год и 2020 год соответственно.

По докладу автора на Ученом совете САО РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

В выступлениях Валева А. Ф. и Макаров Д. И. предложили переработать формулировки в положениях, выносимых на защиту, и представить диссертацию к защите. Романюк И.И. предложил сделать больший акцент на том, что работа носит наблюдательный характер. Трушкин С.А. порекомендовал дать более четкие формулировки по объекту S5 0716+714. Макаров Д.И., Желенкова О.П., Романюк И.И. отметили хорошее представление результатов. Власюк В. В. отметил высокий уровень соискателя как наблюдателя на телескопах САО РАН, высоко оценил представленную работу. Моисеев А.В. рассказал об истории исследований, на

основе которых базируется данная работа, и о весомом личном вкладе соискателя в представленные исследования.

Ученый совет пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в поляризованном свете» Шабловинской Елены Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета САО РАН 2 апреля 2021 года.

Присутствовало на заседании 15 членов Ученого совета.

Результаты голосования: "за" – единогласно, протокол №394 от 2 апреля 2021 г.

Председатель Ученого совета,
врио директора САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



/Власюк В.В./

Ученый секретарь САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



/Кайсина Е.И./