

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента на диссертацию  
Шабловинской Елены Сергеевны  
Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в  
поляризованном свете  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Специальность: 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия)

**1. Актуальность темы диссертации.**

Изучение природы активных галактик, в центральной части которых находятся сверхмассивные черные дыры (СМЧД), в настоящее время является одним из приоритетных направлений современной астрофизики наряду с изучением темной материи, темной энергии, поиска гравитационных волн. Несмотря на то, что Унифицированная Модель (УМ) объясняет в общих чертах структуру и основные свойства АЯГ, а именно, разделения их на два типа в зависимости от наличия или отсутствия в их спектрах широких разрешенных эмиссионных линий, некоторые вопросы физических свойств этих объектов остаются не выясненными. Различная ориентация ядер относительно наблюдателя при одинаковой в общих чертах внутренней структуре, является причиной их морфологического различия. Ключевым параметром УМ является оптически толстый слой пыли - пылевой тор, который при определенной ориентации АЯГ от наблюдателя экранирует излучение центральных областей ядра. Однако эта геометрически и оптически толстая область имеет более сложную форму и структуру, отличную от тороидальной. Поэтому стоит задача детального изучения таких областей АЯГ. Кроме того, важной особенностью АЯГ является синхротронное излучение и высокая интенсивность излучения в радиодиапазоне, формирующегося в релятивистских джетах, что подтверждено обнаружением линейной поляризации АЯГ. Это дает возможность получать дополнительную информацию о структуре и физических свойствах вещества внутри центральных геометрически неразрешимых областей АЯГ.

Это все и предопределило конкретную цель работы диссертанта - исследование геометрии и кинематики центральных оптически неразрешимых областей АЯГ различных типов с помощью методов оптической поляриметрии. Поэтому, задачи, сформулированные в диссертационной работе, а именно: 1) построение численной модели экваториального рассеяния в широких линиях УФ-диапазона и сравнение результатов с данными спектрополяриметрических наблюдений; 2) разработка нового метода определения размера области экваториального рассеяния для повышения точности спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД в АЯГ; 3) разработка методов анализа данных длительных поляриметрических мониторингов блазаров для оценки геометрических размеров областей оптического излучения джетов; 4) введение в эксплуатацию фотометра-поляриметра 1-м телескопа и его исследование обеспечивающие высокоточные поляриметрических наблюдений внегалактических объектов представляется весьма актуальными.

Диссертационная работа Шабловинской Е. С. состоит из введения, пяти глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 127 страниц, включая 33 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 208 наименований.



**В качестве новых научных результатов автор выделяет следующее:**

1. Впервые проведено численное моделирование поляризации излучения вследствие экваториального рассеяния излучения широкой линии MgII в случае высокоскоростных истечений из центральных областей активного ядра.

2. Впервые признаки экваториального рассеяния были найдены в поляризованном свете в спектральной линии Mg II в квазаре SBSS 51419+538, что позволило также впервые применить спектрополяриметрический метод измерения массы СМЧД к объекту на красном смещении больше 1.

3. Впервые обнаружена систематическая разница между состоянием поляризации двух компонент гравитационно-линзированного квазара Q0957+561, а также зависимость поляризации континуума в компонентах от длины волны.

4. Впервые предложен метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием, позволяющий напрямую оценивать размер области экваториального рассеяния.

5. Впервые на основе высокоточного поляриметрического мониторинга с высоким временным разрешением квазара S5 0716+714 сделана оценка линейного размера геликального магнитного поля на расстоянии менее 0.01 пк от ядра, отождествляемого с излучающей областью, около 10 а.е.

#### **Научная и практическая значимость.**

Численный расчет поляризации вследствие экваториального рассеяния в УФ линии Mg II показал возможность 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 не разрешаемых областей джета вблизи СМЧД.

Автор выносит на защиту следующие положения:

1. На основе численной модели доказана возможность применения спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД в УФ линии Mg II даже в случае высокоскоростных истечений из ядра.

2. По данным спектрополяриметрических наблюдений в широкой линии Mg II гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ( $z = 1.41$ ) обнаружено, что экваториальное рассеяние не является здесь доминирующим механизмом поляризации излучения. Сделано предположение о возможном комплексном влиянии эффектов б микро- и макролинзирования на излучение внутренних областей квазара и прецессии системы диск-джет.



3. Разработан новый метод определения внутреннего радиуса пылевого тора, основанный на идее эхокартирования в широких эмиссионных линиях в поляризованном свете АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием. На примере активной галактики Mrk 6 показано, что измеряемый размер области рассеяния соответствует эмпирическим оценкам радиуса сублимации пыли и позволяет значительно уточнить размер пылевого тора относительно оценок, полученных по данным ИК наблюдений.
4. На основе поляриметрического мониторинга блазара S5 0716+714 обнаружена внутрисуточная переменность блеска и направления поляризации с периодом  $\sim 1.5$  часа. Построена геометрическая модель поляризованного излучения джета и дана оценка линейным размерам геликального магнитного поля, отождествляемого с излучающей областью размером  $\sim 10$  а.е. на расстоянии менее  $0.01$  пк от ядра. Стабильность области формирования оптического поляризованного излучения подтверждена повторными наблюдениями на телескопе Цейсс-1000 с прибором "Стокс-поляриметр".
5. Исследованы параметры разработанного и введенного в строй фотометра-поляриметра для 1-м телескопа САО РАН "Стокс-поляриметр". Продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации  $0.1-0.2\%$  для объектов до 16 зв.в.

## **2. Общая характеристика диссертации, оценка достоверности полученного наблюдательного материала, его обработки, анализа и выводов**

**В первой главе** приводятся основные понятия и характеристики поляризованного излучения. Описываются особенности работы в режимах поляриметрии и спектрополяриметрии на приборе SCORPIO-2 6-м телескопа и с новым поляриметром "Стокс-поляриметр" на 1-м телескопе. Исследования диссертантом инструментальных характеристик поляриметра выявило инструментальную поляризацию  $0.74\% \pm 0.1\%$  и ее постоянство по полю и небольшие систематические различия каталожных и инструментальных параметров. Тем самым продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации  $0.1-0.2\%$  для объектов до 16 зв. в., о чем указано в 5 пункте основных положений, выносимые на защиту. Однако соискатель не указала необходимое время наблюдений для достижения такой точности для объектов 16 зв. в.

**Вторая глава посвящена** численным моделям расчёта поляризации излучения центральных областей АЯГ при экваториальном рассеянии на внутренней границе пылевого тора. Для АЯГ 1-го типа, где экваториальное рассеяние является доминирующим механизмом поляризации в широких линиях, существует метод спектрополяриметрического измерения масс СМЧД. Особый интерес представляет продление использования этого метода на линии УФ-диапазона, что дает возможность исследования объектов на больших красных смещениях. Одной из подходящих линий является линия MgII ( $2798^\circ\text{A}$ ), однако в её профиле, присутствуют признаки радиальных движений перпендикулярно плоскости диска со скоростями несколько тысяч км/с. Поскольку поляризация крайне чувствительна к геометрии и кинематике области излучения и рассеяния, автором было проведено численное моделирование экваториального рассеяния в широких линиях H $\alpha$ , H $\beta$  и Mg II в предположении наличия высокоскоростных истечений вещества и некруговых движений в диске BLR с помощью пакета «stokes». Анализ



полученных результатов показал, что несмотря на то, что поляризационный профиль линии Mg II имеет ряд особенностей, не характерных для линий H $\alpha$  и H $\beta$ , профиль линии в поляризованном свете адекватно описывает кеплеровские движения в BLR. Согласно расчетам, вносимая радиальными истечениями ошибка оценки массы СМЧД по спектрополяриметрии в линии Mg II меньше 35%, что сравнимо со случайными ошибками. В итоге диссертант пришел к важному заключению, что данный метод может быть применен к наблюдениям линий коротковолнового диапазона даже в случае АЯГ с экстремальными истечениями.

**В третьей главе**, результаты численного моделирования, описанного во второй главе, проверены на реальных спектрополяриметрических данных двух АЯГ 1-го типа - квазара SBS 1419+538 ( $z = 1.86$ ) и гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ( $z = 1.41$ ). Для первого объекта были обнаружены особенности профиля угла плоскости поляризации, характерные для случая экваториального рассеяния, что позволило дать оценку массы центральной СМЧД –  $\log(M_{\text{СМЧД}}/M_{\odot}) = 9.72 \pm 0.29$ . Для Q0957+561 следы экваториального рассеяния не обнаружены. Проведен анализ причин этого. Вместе с тем были обнаружены ранее неизвестные свойства объекта: а именно, состояние поляризации двух компонент линзированного квазара отличались, а угол поляризации изменялся с длиной волны. Эти выводы были подтверждены с помощью дополнительных более точных поляриметрических наблюдений компонент А и В линзированного квазара Q0957+561 на спектрографе SCORPIO-2 в широких фильтрах g-SDSS и r-SDSS. Представляется, что этот новый результат очень важен для понимания физических процессов в АЯГ

**В четвертой главе** представлен новый метод оценки размера области экваториального рассеяния на основе метода эхокартирования в поляризованном свете. Из-за неразрешимости центральных областей АЯГ проблема измерения расстояний существует и для BLR и для пылевого тора. В рамках спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД оценки расстояния до области экваториального рассеяния приходится рассчитывать косвенно. В этом случае неопределенность оценки массы СМЧД оказывается порядка фактора 2-4. Поэтому был осуществлен новый подход. Так как эмиссионное излучение области BLR изначально не поляризовано, показано, что в случае АЯГ 1-го типа экваториальное рассеяние является единственным механизмом, вносящим значительную поляризацию в излучение широких линий. Сравнение кривых блеска интегрального потока континуума и поляризованного потока в линии демонстрирует временную задержку, соответствующую расстоянию от аккреционного диска до области рассеяния. При этом оптический джет неразрешим для прямых наблюдений, и оценки размеров, которые можно дать по анализу периода внутри суточной переменности, являются единственными доступными на сегодняшний день.

Применение такого нового подхода к спектрополяриметрическому мониторингу известной сейфертовской галактики Mrk 6, проведенному в 2010-2013 гг. на телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, позволило оценить размер области ~100 св. дней. Эта оценка оказалась в 2 раза меньше, чем полученные ранее с помощью интерферометрии пылевого тора в ближнем ИК-диапазоне, что позволило увеличить точность определения массы СМЧД на основе спектрополяриметрии.

**Глава 5** посвящена изучению блазара S50716+714. Поляризация объектов типа BL Lac имеет нетепловую синхротронную природу и генерируется в релятивистском джете, направленном на наблюдателя, размер и строение которого пока невозможно изучать с



помощью прямых методов. В рамках данной работы, автором проведен длительный поляриметрический мониторинг (около 9 часов) с высоким временным разрешением одного из наиболее ярких и переменных объектов — блазара S50716+714. Это позволило выявить изменение вектора поляризации на малых временных масштабах. Установлено, что переключения направления поляризации и переменность блеска происходили с периодом порядка 1.5 часа. Это соответствует размеру сечения оптического джета порядка 10 а.е., что стало принципиально новым результатом. Наблюдения S5 0716+714 были повторены на 1-м телескопе с помощью прибора "СтоП". Они подтвердили результат, полученный ранее на БТА, и показали, что структура джета, излучающая в оптическом диапазоне, имеет постоянные размеры. Сравнение с литературными поляриметрическими данными S5 0716+714 и других блазаров показало, что быстрая переменность направления вектора поляризации распространена для этой группы объектов. Для объяснения вращения вектора поляризации автор применил простую геометрическую модель движения плазмы в геликальном магнитном поле конического джета. Показано, что характер поведения вектора поляризации на QU-плоскости может быть описан в рамках данной модели с учетом прецессии магнитного поля.

### **3.Рекомендации по использованию полученных результатов**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных учреждениях России и других стран, в которых ведутся исследования АЯГ, в том числе: САО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, КрАО РАН, СПбГУ.

### **4.Замечания по диссертационной работе.**

1. Стр.19-20. Диссертант пишет, что «...где параметры Q и U нормированы на интенсивность I». На самом деле в формулах 1.2 параметры Q и U не являются нормированными. Далее в тексте ненормированные параметры Q и U переобозначены как нормированные Q и U. Это правильно, но в общепринятой практике нормированные параметры Стокса принято обозначать малыми символами  $q=Q/I$  и  $u=U/I$ .
2. Стр. 20 Диссертант отметил, что «...а во-вторых, для определения состояния поляризации необходимо получить изображения при двух положениях пластины —  $0^\circ$  и  $45^\circ$ , что делает метод измерений сильно зависимым от состояния атмосферы.». Это утверждение справедливо для использования пластины Савара в поляриметрах СПбГУ в Петергофе на 0.4-м телескопе и в КрАО на 0.7-м телескопе. Однако встречаются поляриметры с пластиной Савара, где ее поворот не требуется, а вращается фазовая пластинка, например в 5-ти канальном поляриметре 1.25-м телескопа КрАО.  
Стр.22. Диссертант пишет, что «Для наблюдения астрономических объектов призма Волластона используется в комбинации с вращающимися фазовыми пластинами (модуляторами) — полуволновой ( $\lambda/2$ ) пластиной для измерения линейной поляризации и четвертьволновой ( $\lambda/4$ ) пластиной для измерения круговой.



- В общем случае, с четвертьволновой ( $\lambda/4$ ) пластиной измеряют все параметры Стокса.
3. Автор использует в нескольких местах текста, слово «обыкновенно». Стилистически было бы правильнее использовать термин «обычно».
  4. На стр. 28. «Ошибка измерения степени поляризации составила ( $P_{tab} - P_{obs}$ )  $\sim 0.15\%$  и угла поляризации ( $\varphi_{tab} - \varphi_{obs}$ )  $\sim 0.7^\circ$ .» Правильнее будет сказать, что это систематические различия каталожных и инструментальных параметров. То же самое можно сказать о сравнении каталожных и инструментальных значений для прибора ММРР. Для оценки достоверности этих значений необходимо было указать их неопределенности. А вообще, правильнее было бы найти коэффициенты А и В и их неопределенности в соотношении  $P_{cat} = A * P_{obs} + B$
  5. На стр. 27, ссылка на Джонсона–Касинса. В литературе чаще используют Джонсона–Кузинса.
  6. В пункте 5 результатов, выносимых на защиту, автор пишет «Продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации 0.1-0.2% для объектов до 16 зв.в.». Без указания необходимого времени для достижения такой точности эти цифры не дают оценить реальную эффективность прибора.
  7. В главе 5 автору стоило бы упомянуть статью (Дорошенко и Киселев, ПАЖ 2017, 43, 407-430) в которой обработаны и проанализированы многоцветные фотометрические и поляриметрические наблюдения блазара S5 0716+714, выполненные в КраО Н. М. Шаховским и Ю.С. Ефимовым в период 1991 - 2004 гг.

### 5.Общее заключение о диссертации Шабловинской Е. С.

Представленная диссертационная работа Шабловинской Е. С. является законченной работой. Автором получен значительный объем наблюдательных данных, который обработан и проанализирован. Основные положения диссертации, вынесенные на защиту, аргументированы и не вызывают сомнения. Определен личный вклад автора в работу. Отмеченные недостатки в диссертации не являются критическими. Я положительно и высоко оцениваю выполненную работу, которая продемонстрировала, что Шабловинская Е. С. значительно превысила количественно и качественно необходимые требования, предъявляемые для кандидата физико-математических наук и состоялась как ученый, умеющий планировать и осуществлять наблюдения, обрабатывать и анализировать полученный материал, с привлечением данных, опубликованных в научной литературе, создавать, развивать и применять к наблюдательным данным необходимые модели. Результаты исследований опубликованы в 6-ти специализированных журналах и, следовательно, прошли экспертную оценку. Они устно докладывались на 7-ми международных и российских конференциях, на семинарах САО РАН, КраО РАН и ИПА РАН. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в различных научных учреждениях и обсерваториях.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ВАК. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.



Все сказанное выше дает мне основание утверждать, что диссертационная работа Шабловинской Е. С. «Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в поляризованном свете» представляет собой законченное исследование, которое в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шабловинская Е. С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

гнс отдела «Физики Солнца и Солнечной системы»

Крымской астрофизической обсерватории РАН,

доктор физ.-мат. наук

 Н.Н. Киселев

Подпись Н. Н. Киселева заверяю:

Директор

Крымской астрофизической обсерватории,

канд. физ.-мат. наук





А. Н. Ростопчина-Шаховская

18 ноября 2021 г.

Киселев Николай Николаевич

298409 п. Научный, д. 6а, кв. 17, Бахчисарайский район, Республика Крым

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»

Главный научный сотрудник. Тел. +7(978)1162998

Kiselevnn42@gmail.com



**ОТЗЫВ**  
официального оппонента на диссертацию  
Шабловинской Елены Сергеевны  
Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в  
поляризованном свете  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Специальность: 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия)

**1. Актуальность темы диссертации.**

Изучение природы активных галактик, в центральной части которых находятся сверхмассивные черные дыры (СМЧД), в настоящее время является одним из приоритетных направлений современной астрофизики наряду с изучением темной материи, темной энергии, поиска гравитационных волн. Несмотря на то, что Унифицированная Модель (УМ) объясняет в общих чертах структуру и основные свойства АЯГ, а именно, разделения их на два типа в зависимости от наличия или отсутствия в их спектрах широких разрешенных эмиссионных линий, некоторые вопросы физических свойств этих объектов остаются не выясненными. Различная ориентация ядер относительно наблюдателя при одинаковой в общих чертах внутренней структуре, является причиной их морфологического различия. Ключевым параметром УМ является оптически толстый слой пыли - пылевой тор, который при определенной ориентации АЯГ от наблюдателя экранирует излучение центральных областей ядра. Однако эта геометрически и оптически толстая область имеет более сложную форму и структуру, отличную от тороидальной. Поэтому стоит задача детального изучения таких областей АЯГ. Кроме того, важной особенностью АЯГ является синхротронное излучение и высокая интенсивность излучения в радиодиапазоне, формирующегося в релятивистских джетах, что подтверждено обнаружением линейной поляризации АЯГ. Это дает возможность получать дополнительную информацию о структуре и физических свойствах вещества внутри центральных геометрически неразрешимых областей АЯГ.

Это все и предопределило конкретную цель работы диссертанта - исследование геометрии и кинематики центральных оптически неразрешимых областей АЯГ различных типов с помощью методов оптической поляриметрии. Поэтому, задачи, сформулированные в диссертационной работе, а именно: 1) построение численной модели экваториального рассеяния в широких линиях УФ-диапазона и сравнение результатов с данными спектрополяриметрических наблюдений; 2) разработка нового метода определения размера области экваториального рассеяния для повышения точности спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД в АЯГ; 3) разработка методов анализа данных длительных поляриметрических мониторингов блазаров для оценки геометрических размеров областей оптического излучения джетов; 4) введение в эксплуатацию фотометра-поляриметра 1-м телескопа и его исследование обеспечивающие высокоточные поляриметрических наблюдений внегалактических объектов представляется весьма актуальными.

Диссертационная работа Шабловинской Е. С. состоит из введения, пяти глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 127 страниц, включая 33 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 208 наименований.



**В качестве новых научных результатов автор выделяет следующее:**

1. Впервые проведено численное моделирование поляризации излучения вследствие экваториального рассеяния излучения широкой линии MgII в случае высокоскоростных истечений из центральных областей активного ядра.
2. Впервые признаки экваториального рассеяния были найдены в поляризованном свете в спектральной линии Mg II в квазаре SBSS 51419+538, что позволило также впервые применить спектрополяриметрический метод измерения массы СМЧД к объекту на красном смещении больше 1.
3. Впервые обнаружена систематическая разница между состоянием поляризации двух компонент гравитационно-линзированного квазара Q0957+561, а также зависимость поляризации континуума в компонентах от длины волны.
4. Впервые предложен метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием, позволяющий напрямую оценивать размер области экваториального рассеяния.
5. Впервые на основе высокоточного поляриметрического мониторинга с высоким временным разрешением квазара S5 0716+714 сделана оценка линейного размера геликального магнитного поля на расстоянии менее 0.01 пк от ядра, отождествляемого с излучающей областью, около 10 а.е.

**Научная и практическая значимость.**

Численный расчет поляризации вследствие экваториального рассеяния в УФ линии Mg II показал возможность 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 не разрешаемых областей джета вблизи СМЧД.

Автор выносит на защиту следующие положения:

1. На основе численной модели доказана возможность применения спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД в УФ линии Mg II даже в случае высокоскоростных истечений из ядра.
2. По данным спектрополяриметрических наблюдений в широкой линии Mg II гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ( $z = 1.41$ ) обнаружено, что экваториальное рассеяние не является здесь доминирующим механизмом поляризации излучения. Сделано предположение о возможном комплексном влиянии эффектов б микро- и макролинзирования на излучение внутренних областей квазара и прецессии системы диск-джет.



3. Разработан новый метод определения внутреннего радиуса пылевого тора, основанный на идее эхокартирования в широких эмиссионных линиях в поляризованном свете АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием. На примере активной галактики Mrk 6 показано, что измеряемый размер области рассеяния соответствует эмпирическим оценкам радиуса сублимации пыли и позволяет значительно уточнить размер пылевого тора относительно оценок, полученных по данным ИК наблюдений.
4. На основе поляриметрического мониторинга блазара S5 0716+714 обнаружена внутрисуточная переменность блеска и направления поляризации с периодом ~1.5 часа. Построена геометрическая модель поляризованного излучения джета и дана оценка линейным размерам геликального магнитного поля, отождествляемого с излучающей областью размером ~10 а.е. на расстоянии менее 0.01пк от ядра. Стабильность области формирования оптического поляризованного излучения подтверждена повторными наблюдениями на телескопе Цейсс-1000 с прибором "Стокс-поляриметр".
5. Исследованы параметры разработанного и введенного в строй фотометра-поляриметра для 1-м телескопа САО РАН "Стокс-поляриметр". Продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации 0.1-0.2% для объектов до 16 зв.в.

## **2. Общая характеристика диссертации, оценка достоверности полученного наблюдательного материала, его обработки, анализа и выводов**

В первой главе приводятся основные понятия и характеристики поляризованного излучения. Описываются особенности работы в режимах поляриметрии и спектрополяриметрии на приборе SCORPIO-2 6-м телескопа и с новым поляриметром "Стокс-поляриметр" на 1-м телескопе. Исследования диссертантом инструментальных характеристик поляриметра выявило инструментальную поляризацию  $0.74\% \pm 0.1\%$  и ее постоянство по полю и небольшие систематические различия каталожных и инструментальных параметров. Тем самым продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации 0.1-0.2% для объектов до 16 зв. в., о чем указано в 5 пункте основных положений, выносимые на защиту. Однако соискатель не указала необходимое время наблюдений для достижения такой точности для объектов 16 зв. в.

Вторая глава посвящена численным моделям расчёта поляризации излучения центральных областей АЯГ при экваториальном рассеянии на внутренней границе пылевого тора. Для АЯГ 1-го типа, где экваториальное рассеяние является доминирующим механизмом поляризации в широких линиях, существует метод спектрополяриметрического измерения масс СМЧД. Особый интерес представляет продление использования этого метода на линии УФ-диапазона, что дает возможность исследования объектов на больших красных смещениях. Одной из подходящих линий является линия MgII (2798°А), однако в её профиле, присутствуют признаки радиальных движений перпендикулярно плоскости диска со скоростями несколько тысяч км/с. Поскольку поляризация крайне чувствительна к геометрии и кинематике области излучения и рассеяния, автором было проведено численное моделирование экваториального рассеяния в широких линиях H $\alpha$ , H $\beta$  и Mg II в предположении наличия высокоскоростных истечений вещества и некруговых движений в диске BLR с помощью пакета «stokes». Анализ



полученных результатов показал, что несмотря на то, что поляризационный профиль линии Mg II имеет ряд особенностей, не характерных для линий H $\alpha$  и H $\beta$ , профиль линии в поляризованном свете адекватно описывает кеплеровские движения в BLR. Согласно расчетам, вносимая радиальными истечениями ошибка оценки массы СМЧД по спектрополяриметрии в линии Mg II меньше 35%, что сравнимо со случайными ошибками. В итоге диссертант пришел к важному заключению, что данный метод может быть применен к наблюдениям линий коротковолнового диапазона даже в случае АЯГ с экстремальными истечениями.

**В третьей главе**, результаты численного моделирования, описанного во второй главе, проверены на реальных спектрополяриметрических данных двух АЯГ 1-го типа - квазара SBS 1419+538 ( $z = 1.86$ ) и гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ( $z = 1.41$ ). Для первого объекта были обнаружены особенности профиля угла плоскости поляризации, характерные для случая экваториального рассеяния, что позволило дать оценку массы центральной СМЧД –  $\log(M_{\text{СМЧД}}/M_{\odot}) = 9.72 \pm 0.29$ . Для Q0957+561 следы экваториального рассеяния не обнаружены. Проведен анализ причин этого. Вместе с тем были обнаружены ранее неизвестные свойства объекта: а именно, состояние поляризации двух компонент линзированного квазара отличались, а угол поляризации изменялся с длиной волны. Эти выводы были подтверждены с помощью дополнительных более точных поляриметрических наблюдений компонент А и В линзированного квазара Q0957+561 на спектрографе SCORPIO-2 в широких фильтрах g-SDSS и r-SDSS. Представляется, что этот новый результат очень важен для понимания физических процессов в АЯГ

**В четвертой главе** представлен новый метод оценки размера области экваториального рассеяния на основе метода эхокартирования в поляризованном свете. Из-за неразрешимости центральных областей АЯГ проблема измерения расстояний существует и для BLR и для пылевого тора. В рамках спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД оценки расстояния до области экваториального рассеяния приходится рассчитывать косвенно. В этом случае неопределенность оценки массы СМЧД оказывается порядка фактора 2-4. Поэтому был осуществлен новый подход. Так как эмиссионное излучение области BLR изначально не поляризовано, показано, что в случае АЯГ 1-го типа экваториальное рассеяние является единственным механизмом, вносящим значительную поляризацию в излучение широких линий. Сравнение кривых блеска интегрального потока континуума и поляризованного потока в линии демонстрирует временную задержку, соответствующую расстоянию от аккреционного диска до области рассеяния. При этом оптический джет неразрешим для прямых наблюдений, и оценки размеров, которые можно дать по анализу периода внутри суточной переменности, являются единственными доступными на сегодняшний день.

Применение такого нового подхода к спектрополяриметрическому мониторингу известной сейфертовской галактики Mrk 6, проведенному в 2010-2013 гг. на телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, позволило оценить размер области ~100 св. дней. Эта оценка оказалась в 2 раза меньше, чем полученные ранее с помощью интерферометрии пылевого тора в ближнем ИК-диапазоне, что позволило увеличить точность определения массы СМЧД на основе спектрополяриметрии.

**Глава 5** посвящена изучению блазара S50716+714. Поляризация объектов типа BL Lac имеет нетепловую синхротронную природу и генерируется в релятивистском джете, направленном на наблюдателя, размер и строение которого пока невозможно изучать с



помощью прямых методов. В рамках данной работы, автором проведен длительный поляриметрический мониторинг (около 9 часов) с высоким временным разрешением одного из наиболее ярких и переменных объектов — блазара S50716+714. Это позволило выявить изменение вектора поляризации на малых временных масштабах. Установлено, что переключения направления поляризации и переменность блеска происходили с периодом порядка 1.5 часа. Это соответствует размеру сечения оптического джета порядка 10 а.е., что стало принципиально новым результатом. Наблюдения S5 0716+714 были повторены на 1-м телескопе с помощью прибора "СтоП". Они подтвердили результат, полученный ранее на БТА, и показали, что структура джета, излучающая в оптическом диапазоне, имеет постоянные размеры. Сравнение с литературными поляриметрическими данными S5 0716+714 и других блазаров показало, что быстрая переменность направления вектора поляризации распространена для этой группы объектов. Для объяснения вращения вектора поляризации автор применил простую геометрическую модель движения плазмы в геликальном магнитном поле конического джета. Показано, что характер поведения вектора поляризации на QU-плоскости может быть описан в рамках данной модели с учетом прецессии магнитного поля.

### 3. Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных учреждениях России и других стран, в которых ведутся исследования АЯГ, в том числе: САО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, КрАО РАН, СПбГУ.

### 4. Замечания по диссертационной работе.

1. Стр.19-20. Диссертант пишет, что «...где параметры Q и U нормированы на интенсивность I». На самом деле в формулах 1.2 параметры Q и U не являются нормированными. Далее в тексте ненормированные параметры Q и U переобозначены как нормированные Q и U. Это правильно, но в общепринятой практике нормированные параметры Стокса принято обозначать малыми символами  $q = Q/I$  и  $u = U/I$ .
2. Стр. 20 Диссертант отметил, что «...а во-вторых, для определения состояния поляризации необходимо получить изображения при двух положениях пластины —  $0^\circ$  и  $45^\circ$ , что делает метод измерений сильно зависимым от состояния атмосферы.». Это утверждение справедливо для использования пластины Савара в поляриметрах СПбГУ в Петергофе на 0.4-м телескопе и в КрАО на 0.7-м телескопе. Однако встречаются поляриметры с пластиной Савара, где ее поворот не требуется, а вращается фазовая пластинка, например в 5-ти канальном поляриметре 1.25-м телескопа КрАО.  
Стр.22. Диссертант пишет, что «Для наблюдения астрономических объектов призма Волластона используется в комбинации с вращающимися фазовыми пластинами (модуляторами) — полуволновой ( $\lambda/2$ ) пластиной для измерения линейной поляризации и четвертьволновой ( $\lambda/4$ ) пластиной для измерения круговой.



В общем случае, с четвертьволновой ( $\lambda/4$ ) пластиной измеряют все параметры Стокса.

3. Автор использует в нескольких местах текста, слово «обыкновенно». Стилистически было бы правильнее использовать термин «обычно».
4. На стр. 28. «Ошибка измерения степени поляризации составила ( $P_{tab} - P_{obs}$ )  $\sim 0.15\%$  и угла поляризации ( $\phi_{tab} - \phi_{obs}$ )  $\sim 0.7^\circ$ .» Правильнее будет сказать, что это систематические различия каталожных и инструментальных параметров. То же самое можно сказать о сравнение каталожных и инструментальных значений для прибора ММРР. Для оценки достоверности этих значений необходимо было указать их неопределенности. А вообще, правильнее было бы найти коэффициенты А и В и их неопределенности в соотношении  $P_{cat} = A * P_{obs} + B$
5. На стр. 27, ссылка на Джонсона–Касинса. В литературе чаще используют Джонсона–Кузинса.
6. В пункте 5 результатов, выносимых на защиту, автор пишет «Продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации 0.1-0.2% для объектов до 16 зв.в.». Без указания необходимого времени для достижения такой точности эти цифры не дают оценить реальную эффективность прибора.
7. В главе 5 автору стоило бы упомянуть статью (Дорошенко и Киселев, ПАЖ 2017, 43, 407-430) в которой обработаны и проанализированы многоцветные фотометрические и поляриметрические наблюдения блазара S5 0716+714, выполненные в КрАО Н. М. Шаховским и Ю.С. Ефимовым в период 1991 - 2004 гг.

## **5.Общее заключение о диссертации Шабловинской Е. С.**

Представленная диссертационная работа Шабловинской Е. С. является законченной работой. Автором получен значительный объем наблюдательных данных, который обработан и проанализирован. Основные положения диссертации, вынесенные на защиту, аргументированы и не вызывают сомнения. Определен личный вклад автора в работу. Отмеченные недостатки в диссертации не являются критическими. Я положительно и высоко оцениваю выполненную работу, которая продемонстрировала, что Шабловинская Е. С. значительно превысила количественно и качественно необходимые требования, предъявляемые для кандидата физико-математических наук и состоялась как ученый, умеющий планировать и осуществлять наблюдения, обрабатывать и анализировать полученный материал, с привлечением данных, опубликованных в научной литературе, создавать, развивать и применять к наблюдательным данным необходимые модели. Результаты исследований опубликованы в 6-ти специализированных журналах и, следовательно, прошли экспертную оценку. Они устно докладывались на 7-ми международных и российских конференциях, на семинарах САО РАН, КрАО РАН и ИПА РАН. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в различных научных учреждениях и обсерваториях.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ВАК. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.



Все сказанное выше дает мне основание утверждать, что диссертационная работа Шабловинской Е. С. «Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в поляризованном свете» представляет собой законченное исследование, которое в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шабловинская Е. С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

гнс отдела «Физики Солнца и Солнечной системы»

Крымской астрофизической обсерватории РАН,

доктор физ.-мат. наук

Н.Н. Киселев

Подпись Н. Н. Киселева заверяю:

Директор

Крымской астрофизической обсерватории,

канд. физ.-мат. наук



А. Н. Ростопчина-Шаховская

18 ноября 2021 г.

Киселев Николай Николаевич

298409 п. Научный, д. ба, кв. 17, Бахчисарайский район, Республика Крым

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»

Главный научный сотрудник. Тел. +7(978)1162998

Kiselevnn42@gmail.com