

эмиссионных линий (BLR) и аккреционном диске). В частности, неизученным остается влияние истечений на наблюдаемые поляризационные свойства ядра и, в частности, применимость нового спектрополяриметрического метода оценки массы сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в центрах активных ядер. Поэтому проведение спектрополяриметрических наблюдений АЯГ и их анализ и интерпретация представляют большой научный интерес, что и определяет актуальность темы обсуждаемой диссертации.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из Введения, Пяти глав и Заключения. Полный объём диссертации составляет 127 страниц, включая 33 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 208 наименований.

Во **Введении** обсуждена актуальность выбора темы диссертации и представлены все необходимые для защиты параметры диссертации, а именно: цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, апробация работы и публикации по теме диссертации, личный вклад автора в совместные работы, а также краткое содержание диссертации.

В **Главе 1** приводится описание особенностей наблюдений в режиме поляриметрии и обработки поляриметрических данных. Вводятся параметры Стокса и понятия степени и направления поляризации. Даны описания использованных в работе анализаторов поляризации: пластины Савара и анализаторов на основе призмы Волластона. Описываются особенности работы в режимах поляриметрии и спектрополяриметрии с двумя типами анализаторов – одинарной и двойной призмами Волластона. Приводится последовательность обработки наблюдательного материала и формулы для расчётов параметров Стокса.

Глава 2 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, описанный в литературе метод спектрополяриметрического определения масс СМЧД по линиям оптического диапазона распространен на область УФ, что необходимо для исследования объектов на больших красных смещениях. Конкретно рассчитана численная модель экваториального рассеяния в широких линиях $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ и Mg II в предположении наличия высокоскоростных истечений вещества и некруговых движений в BLR диске с помощью пакета *stokes*. Приведены начальные параметры численной модели и характеристики потоков вещества, движущихся под углом 60° к экваториальной плоскости со скоростями 6000 км/с.

Анализ полученных результатов показал, что профиль линии Mg II 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% даже в случае экстремальных истечений.

Глава 3 посвящена проверке результатов расчета численных моделей, описанных во второй главе, на реальных наблюдениях далеких квазаров. Анализируются спектрополяриметрические данные двух объектов: квазара SBS 1419+538 и гравитационно линзированного квазара Q0957+561. Для первого на основе спектрополяриметрических данных в линии Mg II были обнаружены особенности профиля угла плоскости поляризации, характерные для случая экваториального рассеяния, Это позволило дать оценку массы центральной СМЧД: $\log(\text{SMBH}) = 9.72 \pm 0.29$. Данная оценка в пределах точности измерения совпала с рассчитанной по эмпирической зависимости "размер BLR–светимость".

Для гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ($z = 1.41$) была также сделана попытка обнаружения признаков экваториального рассеяния в линии Mg II , но был получен отрицательный результат. Однако было

найденно различие в состоянии поляризации двух компонент, причем угол поляризации изменяется с длиной волны.

В **Главе 4** дается новый метод оценки размера области экваториального рассеяния на основе метода эхокартирования в поляризованном свете. Так как эмиссионное излучение облаков BLR изначально не поляризовано, 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 континуального источника (аккреционного диска) до области рассеяния. Спектрополяриметрический мониторинг сейфертовской галактики Mrk 6 позволил оценить размер области BLR. Он оказался в два раза меньше размера пылевого тора, полученного ранее с помощью интерферометрии в ближнем ИК диапазоне. В результате точность определения массы СМЧД была увеличена.

Глава 5 посвящена поляриметрии блазаров. В отличие от сейфертовских галактик, о которых речь шла в предыдущих главах, у блазаров наблюдаемая поляризация обусловлена синхротронным излучением, которое возникает в направленном на наблюдателя релятивистском джете, строение которого пока невозможно изучать с помощью прямых методов из-за недостаточного пространственного разрешения оптических наблюдений. В рецензируемой работе методом поляриметрического мониторинга с высоким временным разрешением исследован блазар S5 0716+714. Наблюдения были проведены на БТА с прибором SCOPRIO-2 в течение целой ночи (около 9 часов) и затем повторены на 1-м телескопе с прибором “СтоП”, (описание и результаты исследования которого приведены). По наблюдениям на БТА выявлено движение вектора поляризации на малых временных масштабах: переключения направления происходили с периодом порядка 1.5 часов, и такой же период демонстрировали и вариации блеска. Это указывает на размер сечения оптического джета порядка 10 а.е. Результаты наблюдений на

1-м телескопе качественно подтвердили эти результаты. Описана простая геометрическая модель движения плазмы в геликальном магнитном поле конического джета, позволяющая объяснить характер поведения вектора поляризации на плоскости относительных параметров Стокса..

Научная новизна проведенного исследования, полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

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

Для АЯГ предложен метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях, позволяющий напрямую оценивать размер области экваториального рассеяния. Метод использован при изучении сейфертовских галактик и квазаров с большим красным смещением.

На основании впервые выполненных в течение ночи непрерывных поляриметрических и фотометрических наблюдений блазара S5 0716+714 обнаружены короткопериодические (с периодом около 70 минут) изменения блеска и параметров поляризации.

Разработанные диссертантом с соавторами методы являются новыми, их применение позволило получить ценные сведения о строении АЯГ и блазаров.

Значимость для науки полученных результатов

Переходя к оценке научной значимости работы, скажем, что методы, разработанные диссертантом с соавторами, применимы не только к объектам, исследованным в их работах, но могут быть использованы в дальнейшем для уточнения сведений о центральных областях активных галактик и квазаров. Частично эти методы уже применялись другими исследователями.

Можно вполне признать значимость результатов, выносимых автором на защиту.

Обоснованность и достоверность полученных научных положений, выводов и заключений

Достоверность полученных автором наблюдательных результатов гарантирована использованием крупнейшего в России телескопа с тщательно исследованной аппаратурой. При анализе использовались принятые в астрофизике строгие методы.

Материалы диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях (по большей части это устные доклады) и опубликованы в 6 статьях в ведущих российских и зарубежных астрономических изданиях. Среди них *Astrophys.J.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, *A&A*, *Астрофизический бюллетень*. Все статьи написаны в соавторстве, но основной вклад в работы внесен именно диссертанткой.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационного исследования

Диссертация написана довольно хорошим русским языком, однако в тексте изредка встречаются «абсолютные деепричастные обороты» (например, на стр.75,76 «наблюдая, ... было обнаружено» и «учитывая, ... получается»). Есть также неудачные фразы (на стр.50 сравнение «результатов» с «методами», на стр.63 и 76 просто корявые фразы. Любопытна фраза без подлежащего на стр.79: «Не коррелирует с переменностью блеска».

На наш взгляд недостатком является обозначение «нормализованных параметров Стокса Q/I и U/I », величин безразмерных, теми же символами Q и U , которые используются для обозначения стандартных параметров Стокса, имеющих размер интенсивности. Для «нормализованных» параметров Стокса, часто называемых в литературе «относительными»,

имеются удобные обозначения q и u .

К недостаткам работы нужно отнести отсутствие детального описания фотометрической процедуры получения потока от блазара S5 0716+714 в мЯн, указанного на рис.5.4. Кроме того, между рис. 5.4 и 5.6 имеется явное несоответствие в знаке величины Q , по-видимому, здесь имеет место опечатка.

Отмеченные недостатки не умаляют значимости основных результатов, полученных диссертанткой.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертации могут представлять интерес для астрономов ГАО РАН (Пулково), ПРАО АКЦ ФИАН, ИНАСАН и других астрономических организаций.

Заключение

Переходя к общей оценке диссертационной работы, отметим, что диссертанткой совместно с соавторами разработаны новые методы спектрополяриметрического изучения ядерных областей галактик, Диссертация содержит обширный высококачественный наблюдательный материал, позволивший с использованием этих методов получить новые сведения о неразрешимых при оптических наблюдениях ближайших к черной дыре ядерных областях галактик. Вклад соискательницы, Елены Сергеевны Шабловинской, в совместные работы несомненно достаточен для присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры астрофизики В.А.Гаген-Торном.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры астрофизики
11 ноября 2021 года, протокол № 44/8/2-02-4.

Заведующий кафедрой астрофизики,
доктор физико-математических наук,
профессор



В.А.Гаген-Торн

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Адрес: Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Телефон (812) 328-77-32

e-mail: spbu@spbu.ru.

Сайт: spbu.ru