

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ
АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Шабловинская Елена Сергеевна

**Исследование центральных областей активных галактик по
наблюдениям в поляризованном свете**

Научно-квалификационная работа
(диссертация)

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Моисеев А. В.

Нижний Архыз - 2021

Образовательная составляющая

Кандидатские экзамены:

История и философия науки: 21.05.2019, отлично

Иностранный язык: 28.05.2019, отлично

Специальная дисциплина: 8.12.2020, отлично

Образовательная составляющая

Перечень освоенных дисциплин:

Психология и педагогика высшего образования

Ближняя Вселенная

Спектроскопия звезд и звездная эволюция

Компьютерная обработка результатов измерений

Астрономические светоприемники

Физика массивных звезд

Практическая радиоастрономия

Многорезимный фокальный редуктор телескопа БТА

Аккреционные диски в астрофизике

Методы панорамной спектроскопии

Активные ядра галактик

Образовательная составляющая

Педагогическая практика – 4 з.е.

- Руководство практикой студента 6-го курса КФУ Малыгина Е. А. – 13.06-31.08.2019 (139.5 часов)
- Ознакомительная лекция студентам физического факультета СКФУ «Астрофизика за пределами Галактики» - 05.04.2019 (2 часа)
- Практическое занятие по ознакомлению с наблюдениями на телескопе Цейсс-1000 с прибором ММРР в фотометрической моде студента УрФУ Козловой Д. В. – 26.07.2019 (7.5 часов)

Образовательная составляющая

Научно-производственная практика – 4 з.е.

- наблюдения на 6-м БТА (SCORPIO-1,2): 96 ночей

«Технические испытания SCORPIO-2» Афанасьев, «Изучение геометрии и кинематики центральных областей АЯГ» Афанасьев, «Спектрополяриметрия кандидатов в rSMBH» Нацвлишвили, «Спектры катаклизмических переменных звезд», «Исследование структуры аккреции поляра V808 Aur» Габдеев, «Разрешение центральных частей линзированных квазаров и галактик», «Пыль в активных кентаврах» Иванова, «Измерение масс черных дыр АЯГ на основе поляризации высоковозбужденных широких эмиссионных линий» Savic, «Спектроскопия сливающихся карликовых галактик» Сабурова, «Исследование пространственного распределения поляризации и цвета атмосфер комет» Киселев, «Фотометрическое эхокартирование AGN в диапазоне $0.1 < z < 0.8$ » Уклеин, «Долгосрочный спектроскопический мониторинг специфических и чрезвычайно изменчивых активных ядер галактик» Ilic, «Измерение магнитных полей слабых звезд» Глаголевский, «Спектрополяриметрия долгопериодических и полуправильных переменных звезд» Панчук, «Исследование быстрой переменности объектов типа BL Lac в поляризованном свете» Шабловинская, «Обзор протяженных ионизованных облаков вокруг локальных АЯГ» Kee, «Наземная поддержка СРГ: отождествление далеких рентгеновские квазаров и других уникальных объектов» Гильфанов, «Наземная поддержка обсерватории СРГ: оптическое отождествление наиболее массивных далеких скоплений галактик» Буренин, «Alpha обзор карликовых галактик в Местном Объем» Каранченцев

- наблюдения на 1-м Цейсс-1000 (MMPP, StoP, MAGIC): 162 ночи

«Поляриметрический мониторинг объектов типа BL Lac» Шабловинская, «Формирование широких линий в AGN» Уклеин, «Эхокартирование AGN в поляризованном свете» Афанасьев, «Фотометрический мониторинг карликовой сейфертовской галактики NGC 4395» Ilic, «Мониторинг блазара TXS0917+62» Власюк, «Мониторинг SyG» Буренков, «Поляриметрический мониторинг AGN Mrk 817» Ilic

- наблюдения на 2.6-м ЗТШ КрАО (многоканальный поляриметр): 2 ночи

«Эхокартирование сейфертовских галактик в поляризованном свете» Шабловинская

Образовательная составляющая

Участие в грантах

- «Физические и геометрические параметры килопарсековых джетов активных ядер галактик», руководитель – Бутузова М.С., 2018-2019, (РФФИ), исполнитель
- «Измерение внутреннего радиуса газово-пылевого тора активных галактик методами поляриметрии», руководитель – Уклеин Р.И. (Афанасьев В.Л.), 2020-... (РФФИ), исполнитель
- «Исследование геометрии и кинематики ионизированного газа в ядрах активных галактик методами поляриметрии», руководитель – Буренков А.Н. (Афанасьев В.Л.), 2020-... (РНФ), исполнитель
- «Воздействие ультрафиолетового излучения на газ и пыль в областях звездообразования», руководитель – Вибе Д.З., 2021-... (РНФ), исполнитель

Образовательная составляющая

Иные достижения

- Лауреат стипендии им. И.М. Копылова 2020, 2021
- Конкурс-конференция САО РАН 2021: первая премия в конкурсе астрофизических работ за работу «Новый метод измерения радиуса сублимации пыли в активных ядрах галактик по поляриметрии широких линий», вторая премия в конкурсе аппаратурно-методических работ за работу «Высокоточная поляриметрия изображений звездообразных и протяженных объектов на 1-м телескопе»

Актуальность темы

Активные ядра галактик (АЯГ) – это яркие, компактные области, излучающие до 90% светимости всей галактики.

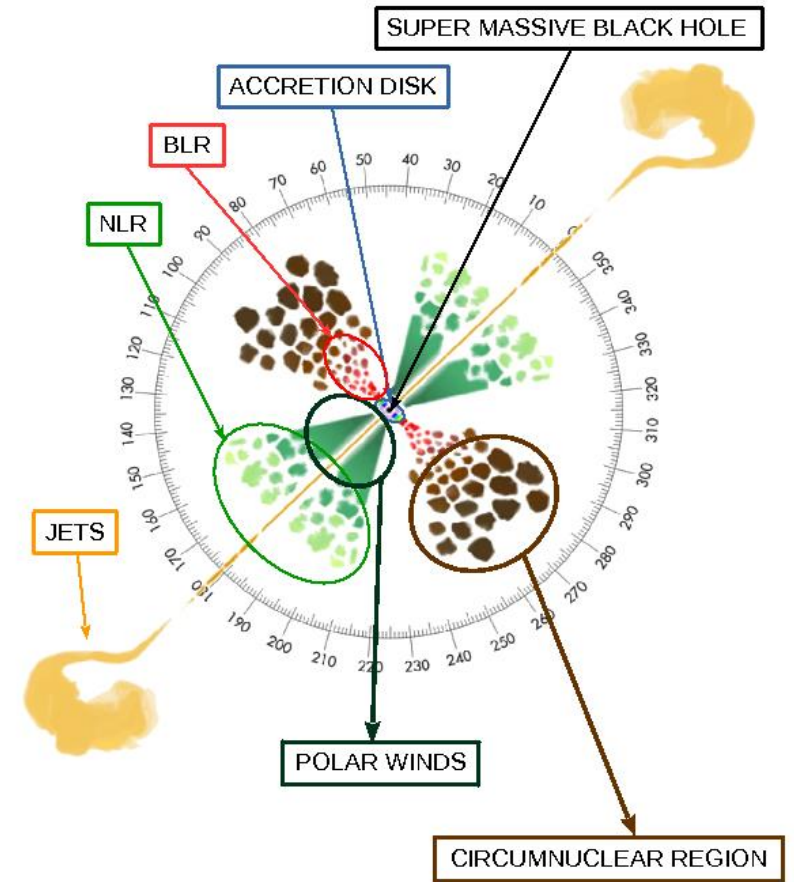
Механизмы генерации поляризации

Внутренние:

- Томсоновское рассеяние в АД
- Рассеяние в горячей короне
- Синхротронное излучение джета
- Фарадеевское вращение

Внешние:

- Полярное рассеяние на конусе ионизации
- Экваториальное рассеяние на пылевом торе



Унифицированная модель АЯГ

Актуальность темы

- Влияние истечений из аккреционного диска и BLR на наблюдаемые свойства АЯГ в поляризованном свете
- Оценка масс СМЧД методом спектрополяриметрии – продление применения метода на более далекие объекты
- Определение положения и размеров структур АЯГ, на которых происходит рассеяние излучения
- Оценка параметров коллимированных струй плазмы – джетов

Цели и задачи работы

Целью данной работы является исследование геометрии и кинематики центральных оптически неразрешимых областей АЯГ различных типов с помощью методов оптической поляриметрии.

1. Построение численной модели экваториального рассеяния в широких линиях УФ-диапазона и сравнение результатов с данными спектрополяриметрических наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO-2 первичного фокуса 6-м телескопа БТА.
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 джета.
4. Введение в эксплуатацию фотометра-поляриметра для 1-м телескопа и его методические исследования для проведения с его помощью высокоточных поляриметрических наблюдений внегалактических объектов.

Структура работы

Введение

Глава 1. Методы поляриметрических наблюдений

Глава 2. Численные модели рассеяния излучения АЯГ на пылевом торе

Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ на $z > 1$

Глава 4. Новый метод определения размера пылевого тора в галактиках с экваториальным рассеянием

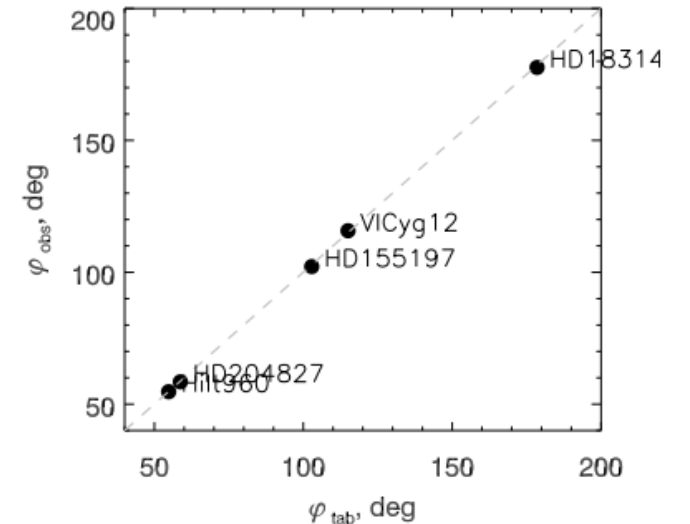
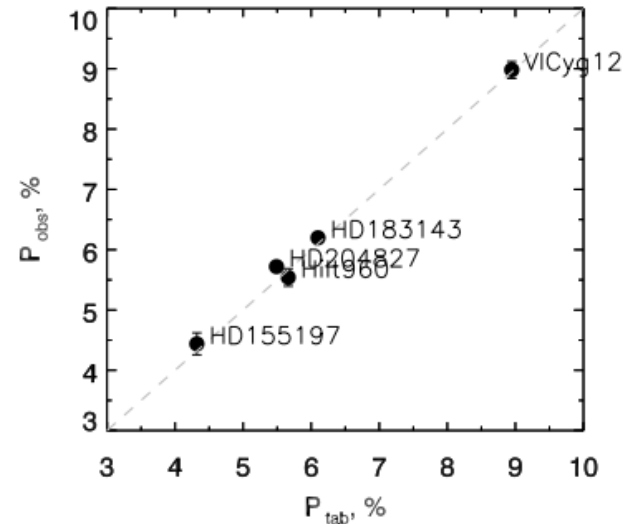
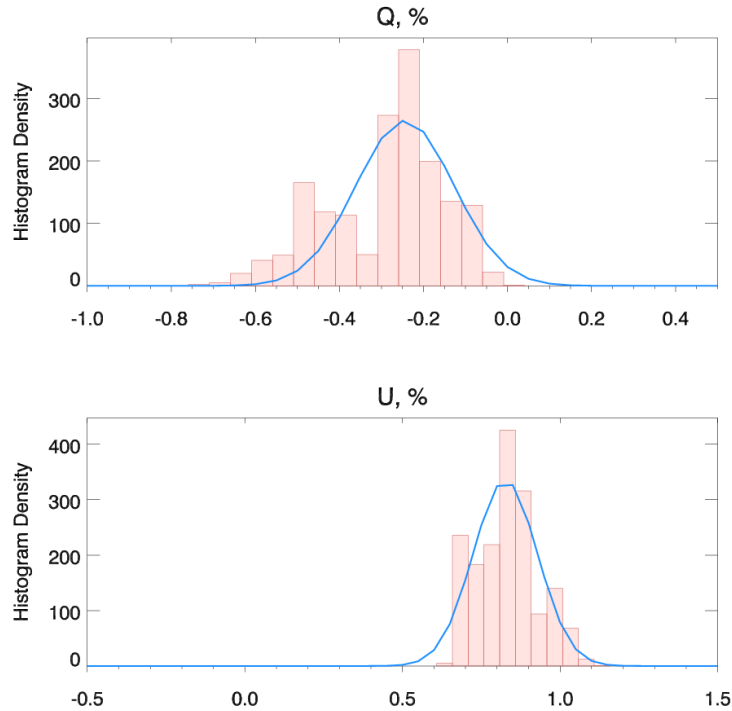
Глава 5. Быстрая поляриметрия блазаров

Заключение

Литература

Глава 1. Методы поляриметрических наблюдений

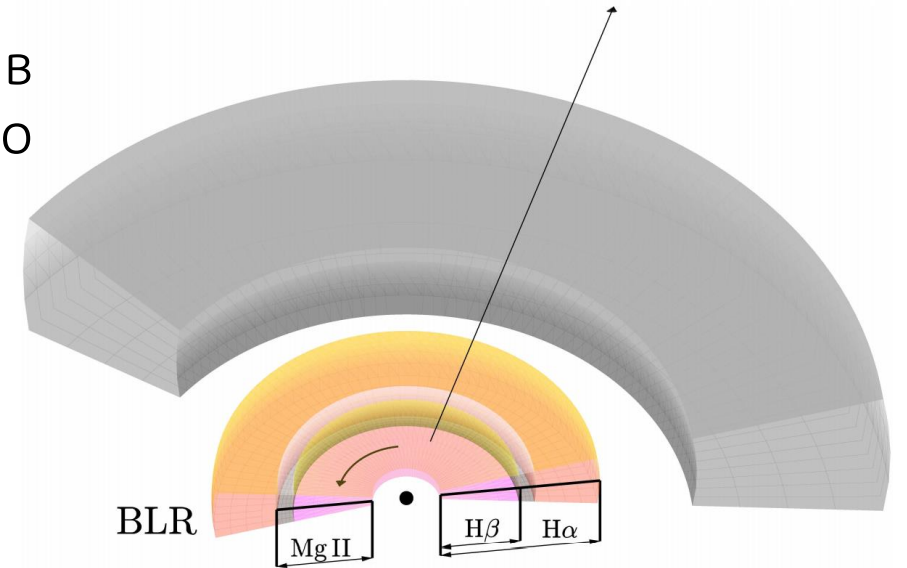
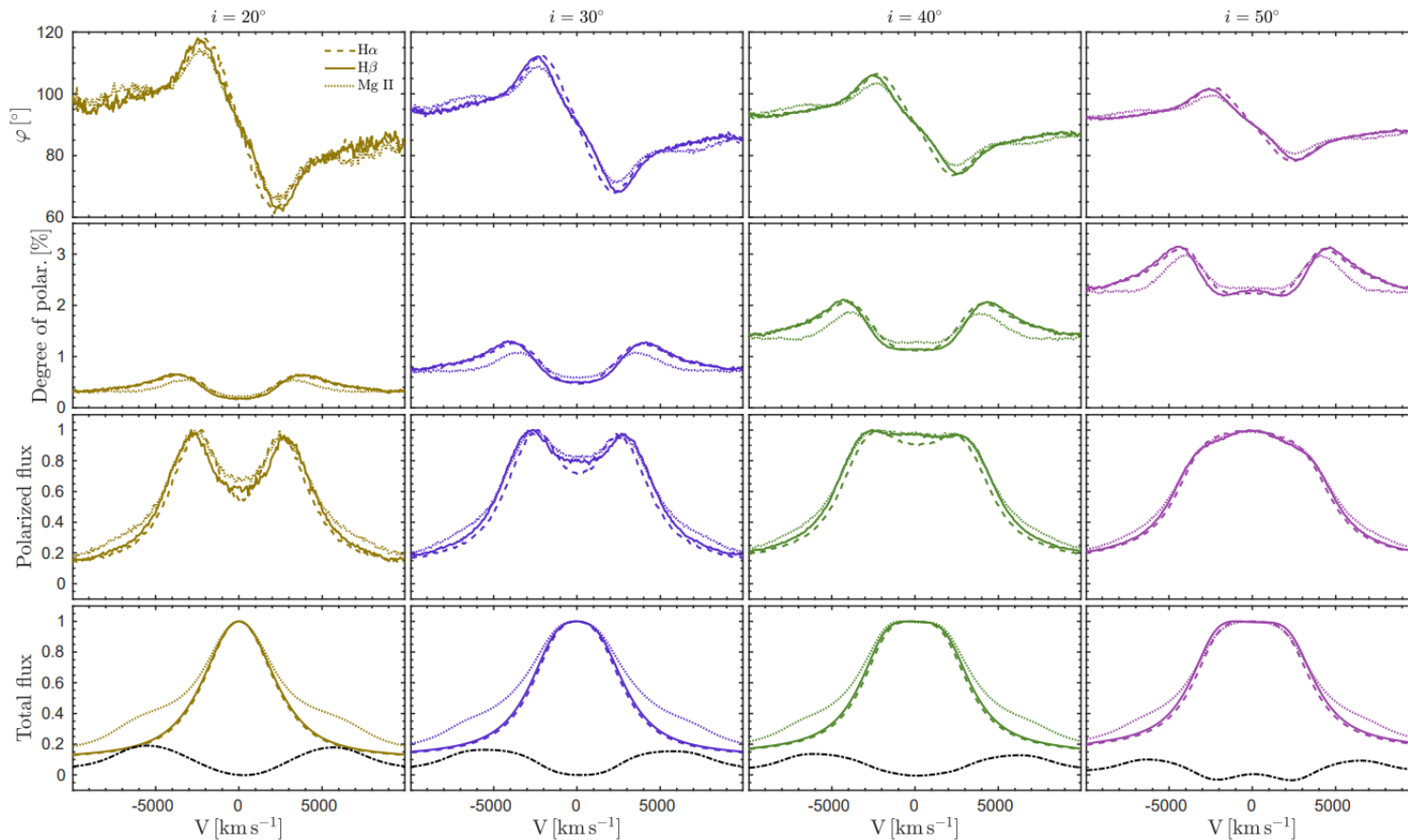
Вводится математический формализм, описываются принципы работы с анализаторами, используемыми в астрономии. Приводятся формулы расчета параметров Стокса и описание редукции поляриметрических и спектрополяриметрических данных, получаемых на БТА с прибором SCORPIO-2 и на Цейсс-1000 со «Стокс-поляриметром».



Результаты методических исследований «Стокс-поляриметра»: гистограмма нуля-пункта инструментальной поляризации (слева) и отклонение наблюдаемых параметров поляризации от табличных для звезд-стандартов (справа).

Глава 2. Численные модели рассеяния излучения АЯГ на пылевом торе

Рассмотрена модель экваториального рассеяния в линии Mg II (2798Å) в присутствии истечения со скоростью 6000 км/с.



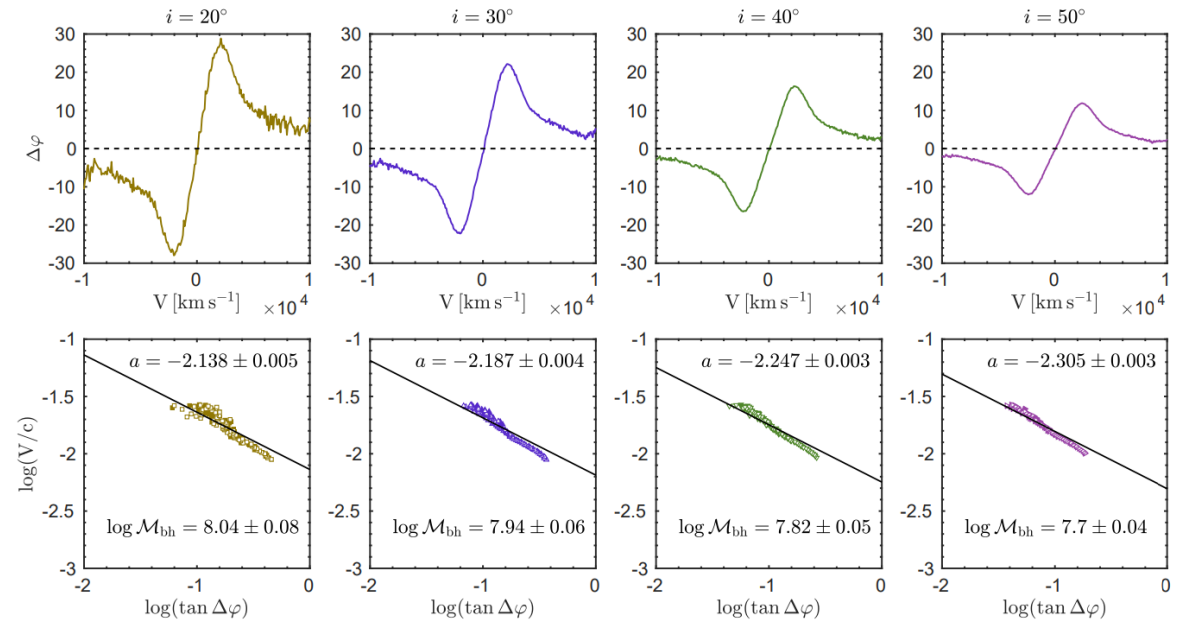
Область	$R_{\text{BLR}}^{\text{in}}$	$R_{\text{BLR}}^{\text{out}}$	λ_{min}	λ_{max}	Спектральное разрешение
	св.дни	св.дни	Å	Å	
H α	36.94	58.93	6300	6826	300
BLR H β	36.94	47.91	4666	5055	300
Mg II	36.94	50.11	2688	2912	300
SR	117.87	201.22			

Сравнение профиля поляризации линии Mg II с профиля линий H α и H β

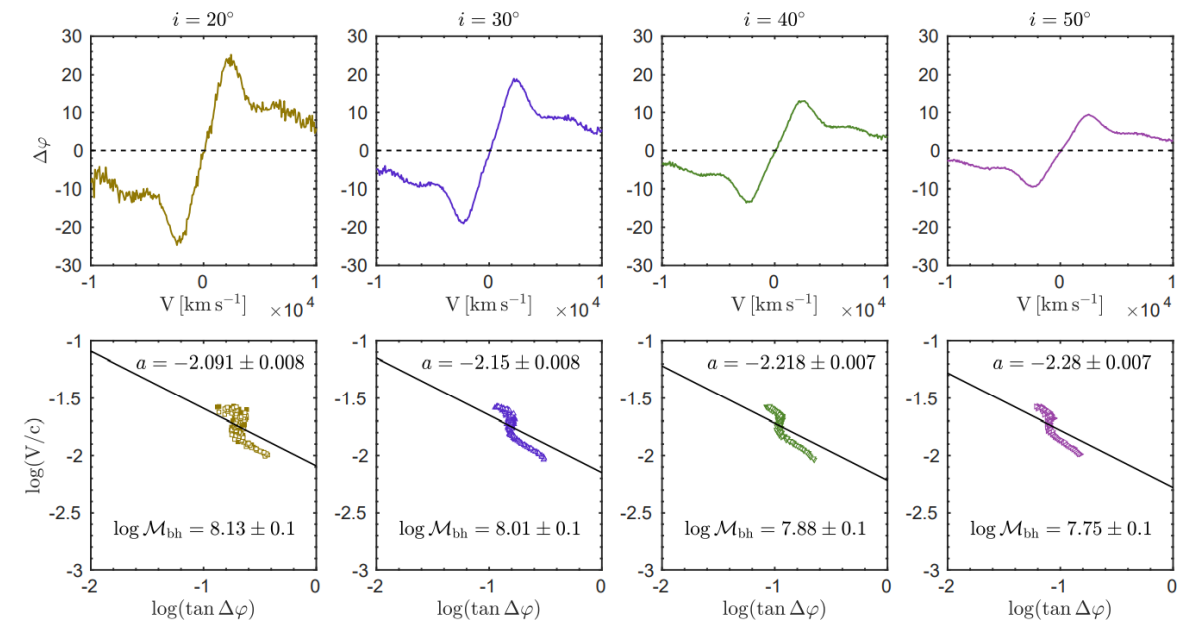
Глава 2. Численные модели рассеяния излучения АЯГ на пылевом торе

- Наличие истечений вещества в области BLR, чьи скорости значительно превышающих кеплеровскую, создает плато в профиле угла плоскости поляризации.
- Ошибка определения массы СМЧД по эмиссионной линии, излучаемой в области, где имеет место высокоскоростное истечение вещества, составляет $\sim 35\%$.

H α



Mg II



Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ на $z > 1$

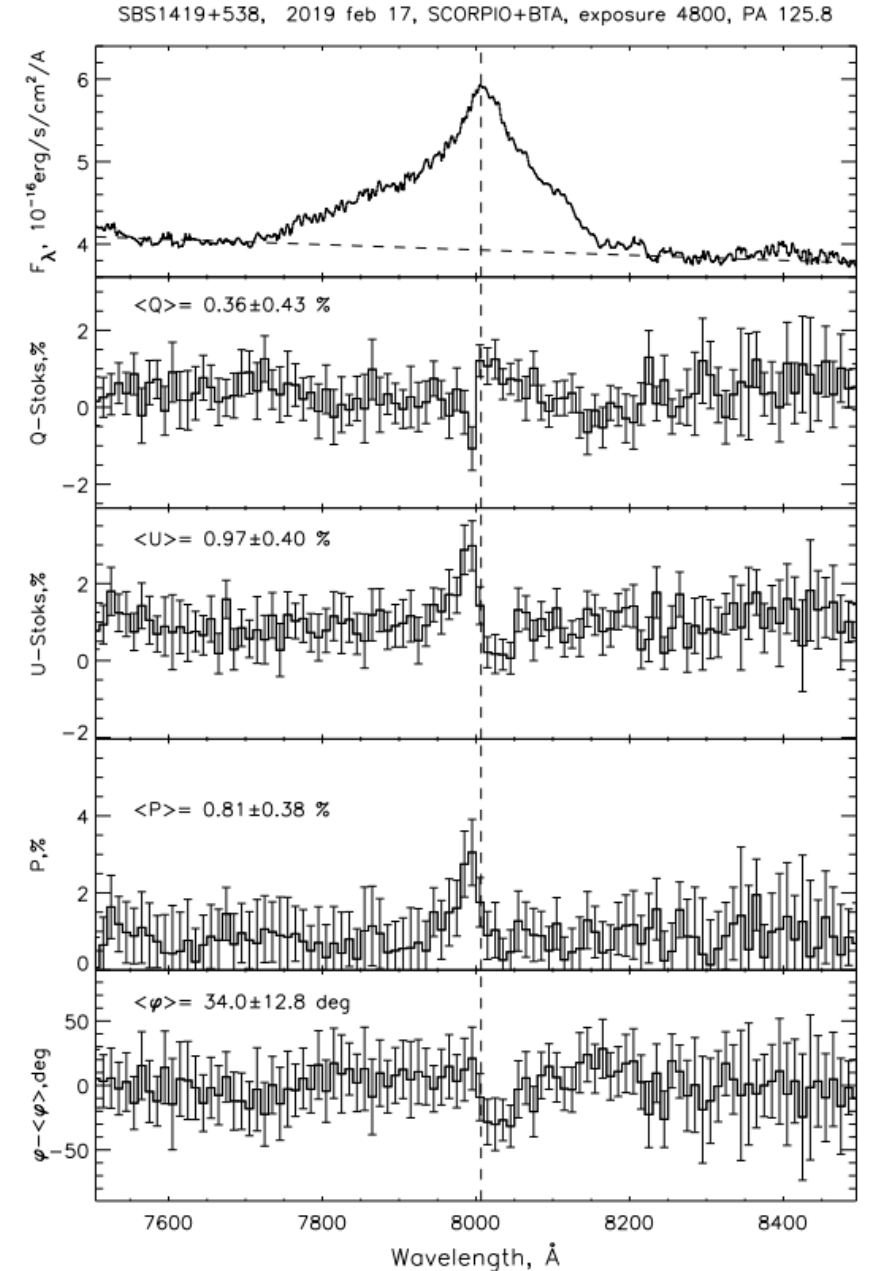
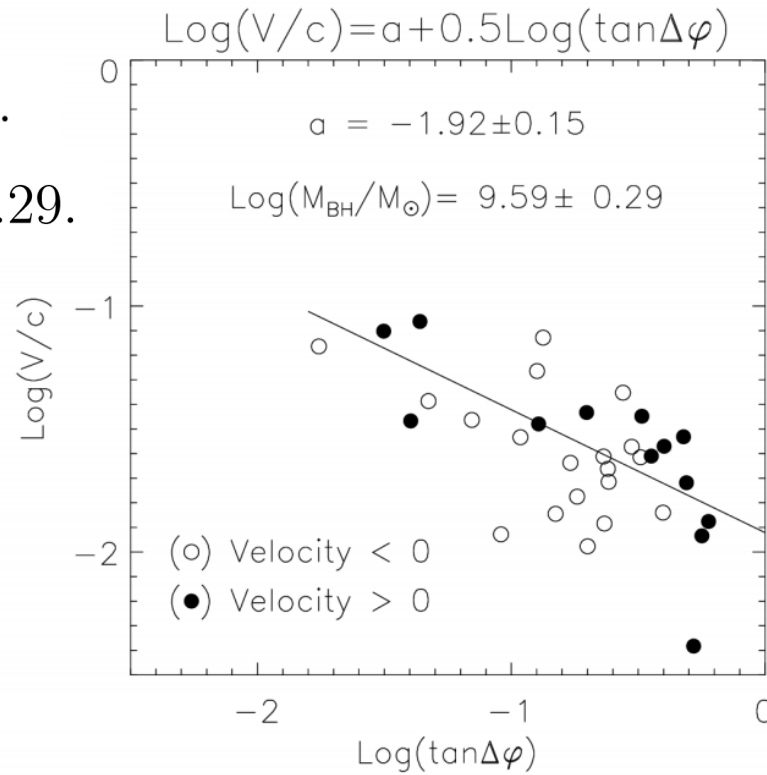
3.1. SBSS 1419+538 ($z = 1.862$)

Спектрополяриметрические наблюдения проведены на БТА с прибором SCORPIO-2. В линии Mg II обнаружены признаки экваториального рассеяния.

$$R_{\text{sc}} = 1575.1 \pm 73.5 \text{ св. дней.}$$

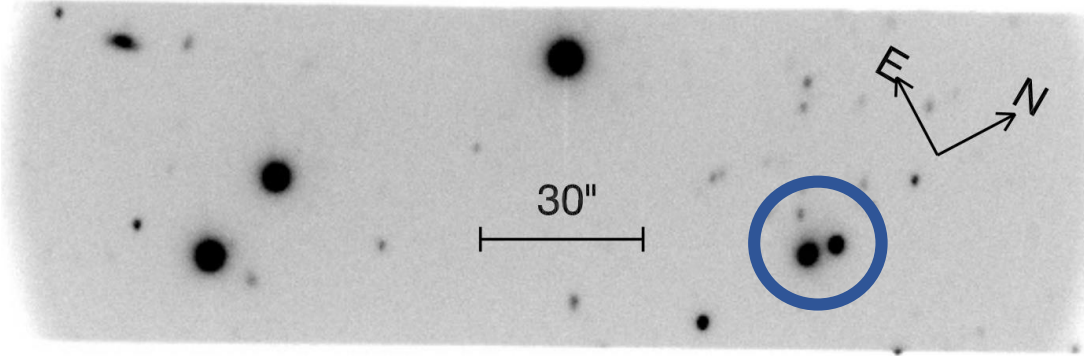
$$\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) = 9.59 \pm 0.29.$$

$$\frac{L_{\text{bol}}}{L_{\text{Edd}}} \approx 0.3.$$



Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ на $z > 1$

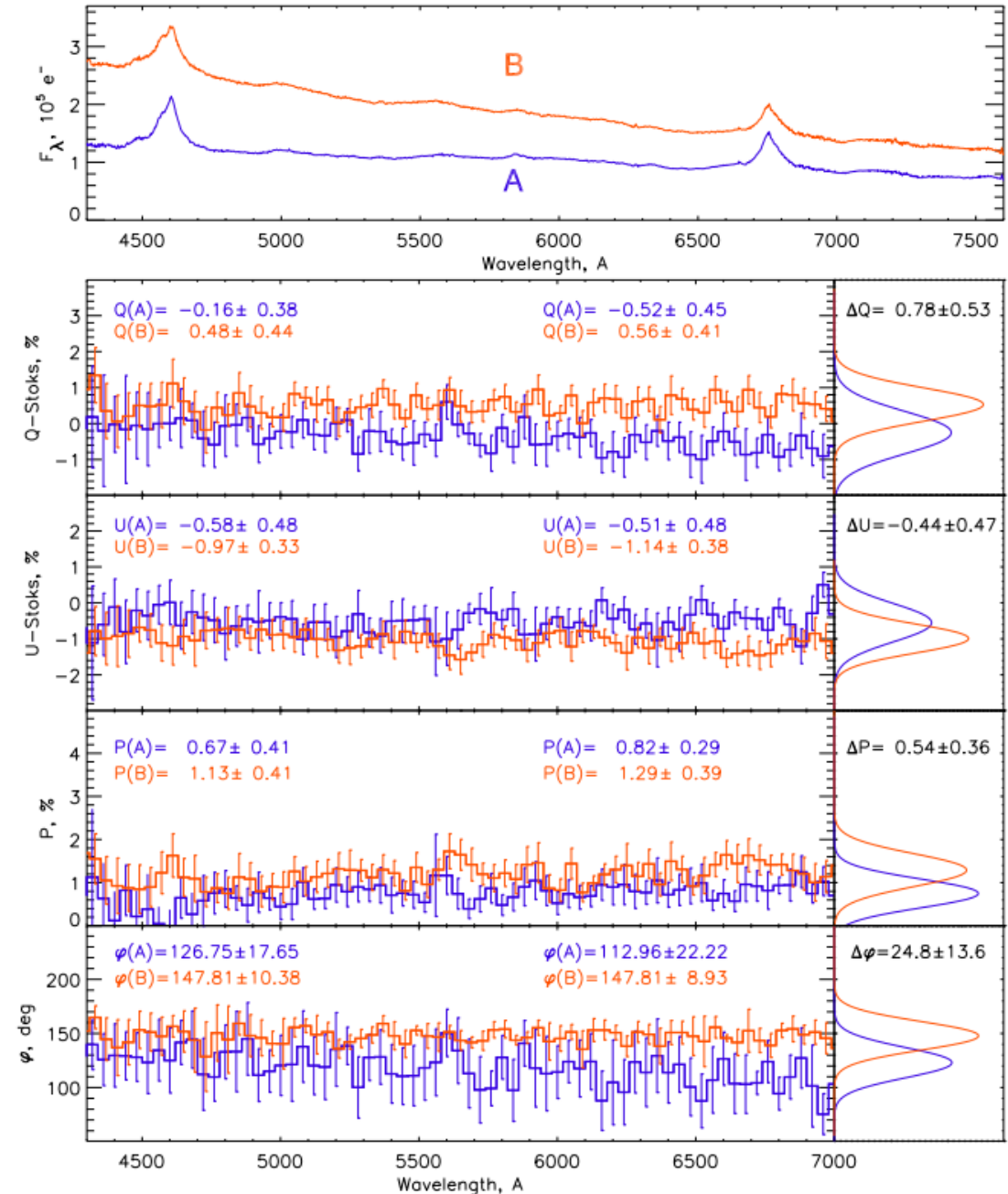
3.2. Q0957+561 ($z = 1.41$)



Признаки экваториального рассеяния не наблюдаются:

- наличие деполаризующей области, например, горячей короны над областью BLR или аккреционным диском;
- размер области BLR сравним с внутренним радиусом тора.

Обнаружена зависимость поляризации в континууме от длины волны и систематическая разница поляризации между компонентами.



Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ на $z > 1$

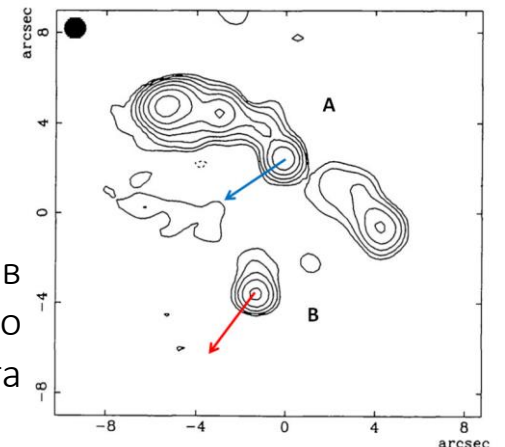
3.2. Q0957+561 ($z = 1.41$)

Дополнительные поляриметрические наблюдения в широких полосах подтвердили результат спектрополяриметрии.

Наиболее правдоподобные сценарии:

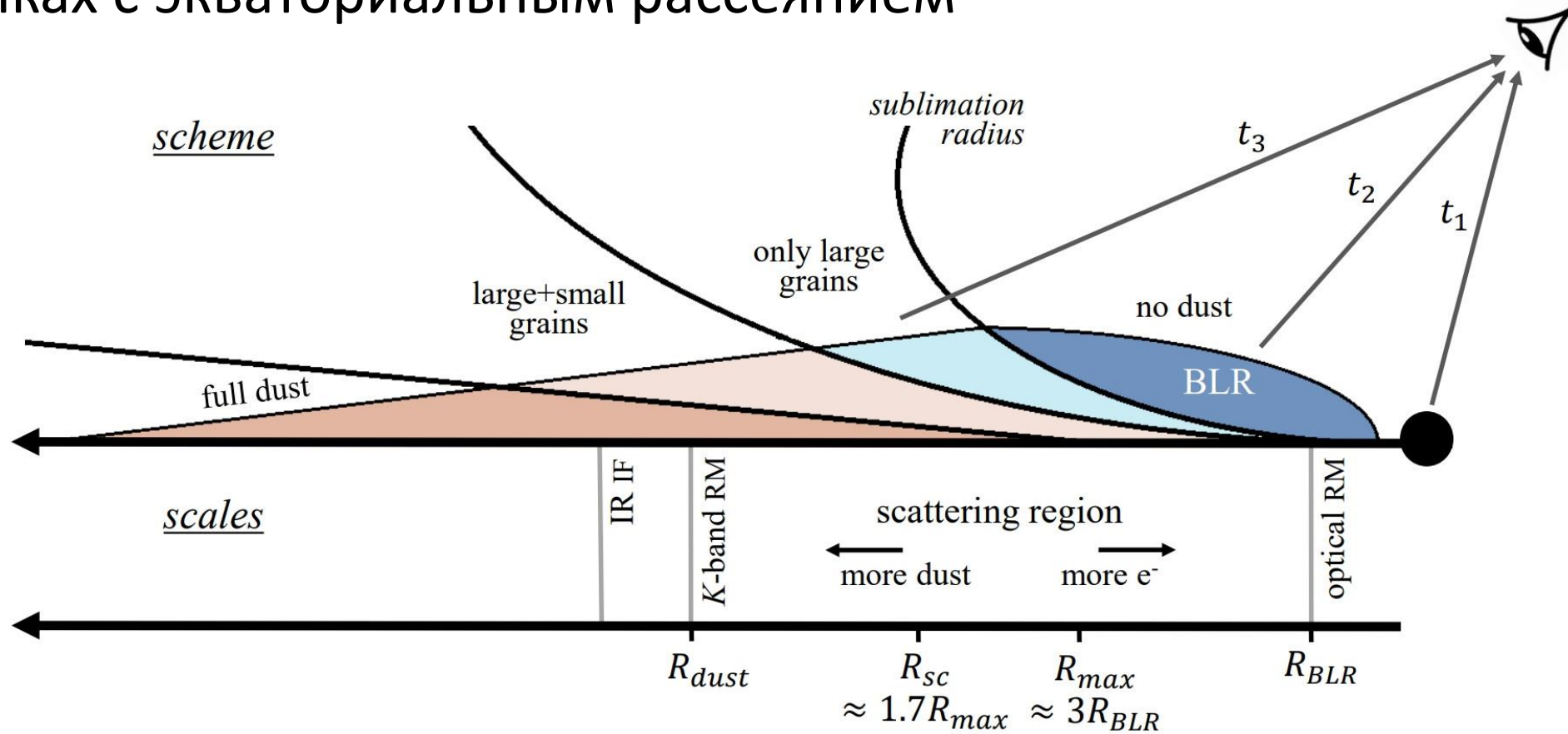
- Прецессия системы диск-джет: поворот плоскости поляризации наблюдается из-за задержки между излучением компонент;
- Различное влияние макро- и микролинзирования на центральные области квазара – аккреционный диск или его корону, где генерируется поляризованное излучение.

Фильтр		$Q, \%$	$U, \%$	$P, \%$	$\varphi, ^\circ$
Спектрополяриметрия, 16/02/2020					
g-SDSS	A	-0.16 ± 0.38	-0.58 ± 0.48	0.67 ± 0.41	127 ± 18
	B	0.48 ± 0.44	-0.97 ± 0.33	1.13 ± 0.41	148 ± 10
r-SDSS	A	-0.52 ± 0.45	-0.51 ± 0.48	0.82 ± 0.29	113 ± 22
	B	0.56 ± 0.41	-1.14 ± 0.38	1.29 ± 0.39	148 ± 9
Поляриметрия, 24/04/2020					
g-SDSS	A	-0.16 ± 0.20	-0.78 ± 0.14	0.75 ± 0.08	130 ± 3
	B	0.65 ± 0.17	-0.81 ± 0.25	1.04 ± 0.07	153 ± 2
r-SDSS	A	-0.39 ± 0.06	-0.52 ± 0.09	0.67 ± 0.09	117 ± 3
	B	0.61 ± 0.06	-0.99 ± 0.09	1.16 ± 0.05	151 ± 2



Ориентация векторов поляризации в компонентах квазара относительно направления радиоджета

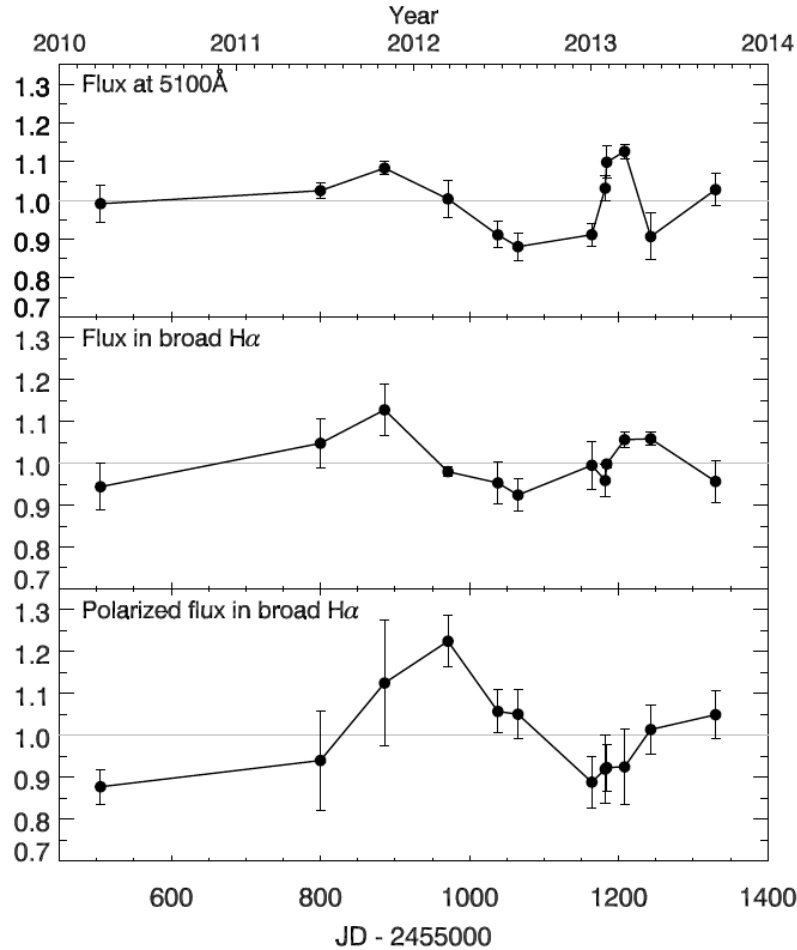
Глава 4. Новый метод определения размера пылевого тора в галактиках с экваториальным рассеянием



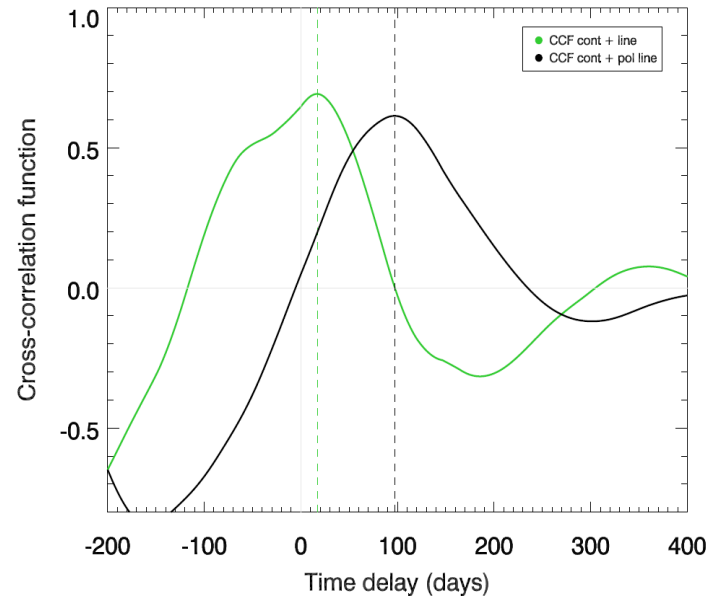
Размеры областей в центральном парсеке АЯГ. Нижняя часть показывает приблизительную шкалу размеров, соединяющую фотометрический радиус BLR, наблюдаемый методом эхокартирования ("optical RM"), максимальный радиус BLR, размер области рассеяния и внутренний радиус пылевого тора, измеренный методом ИК-эхокартирования ("K-band RM") и методом ИК-интерферометрии ("IR IF").

Глава 4. Новый метод определения размера пылевого тора в галактиках с экваториальным рассеянием

Sy1.5 Mrk 6



12 эпох спектрополяриметрических наблюдений со SCORPIO-2 на БТА



Задержка сигнала в поляризованной широкой линии H α составила 94.7 ± 6.9 дней.

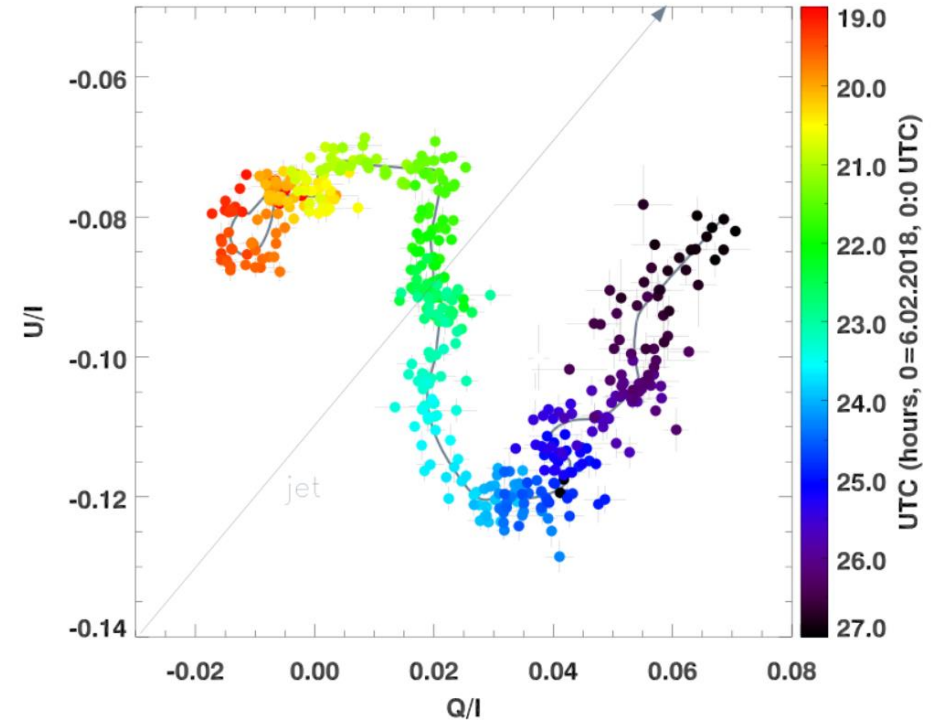
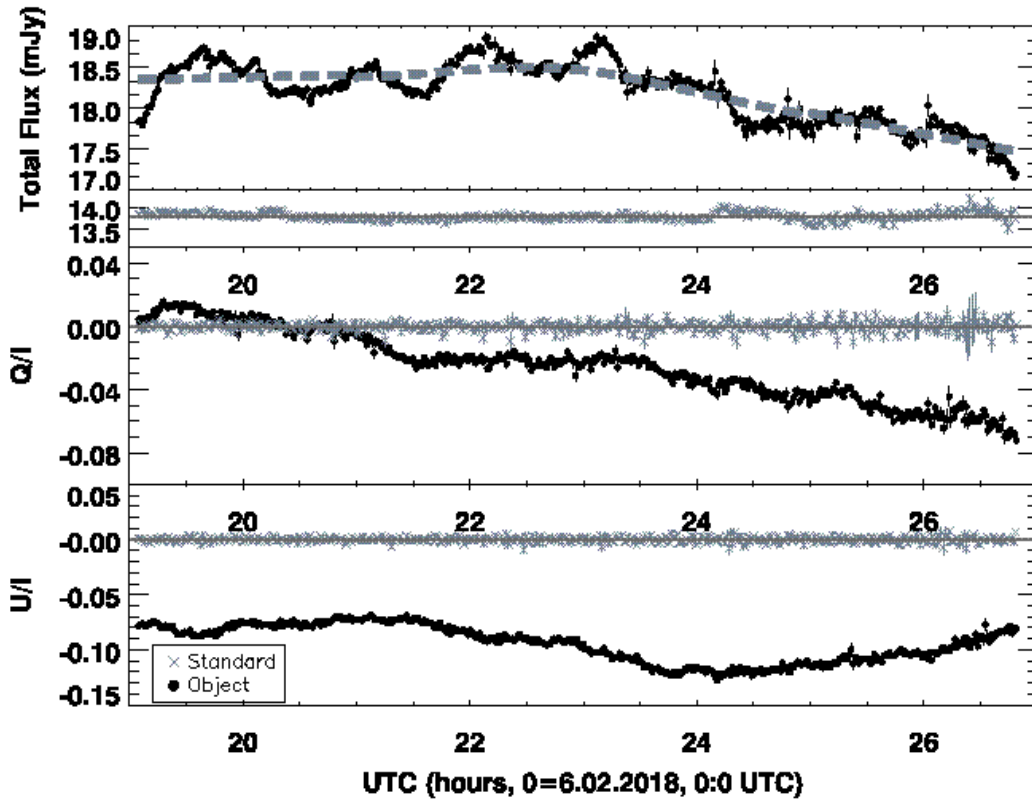
Kishimoto+11, ИК интерферометрия:
 214 ± 59 дн

Suganuma+06, теория: ≈ 115 дн

- влияние других механизмов поляризации пренебрежимо мало;
- не зависит от наклона системы к наблюдателю;
- может быть использован для определения расстояний внутри АЯГ на больших z , что выгодно отличает его от других методов

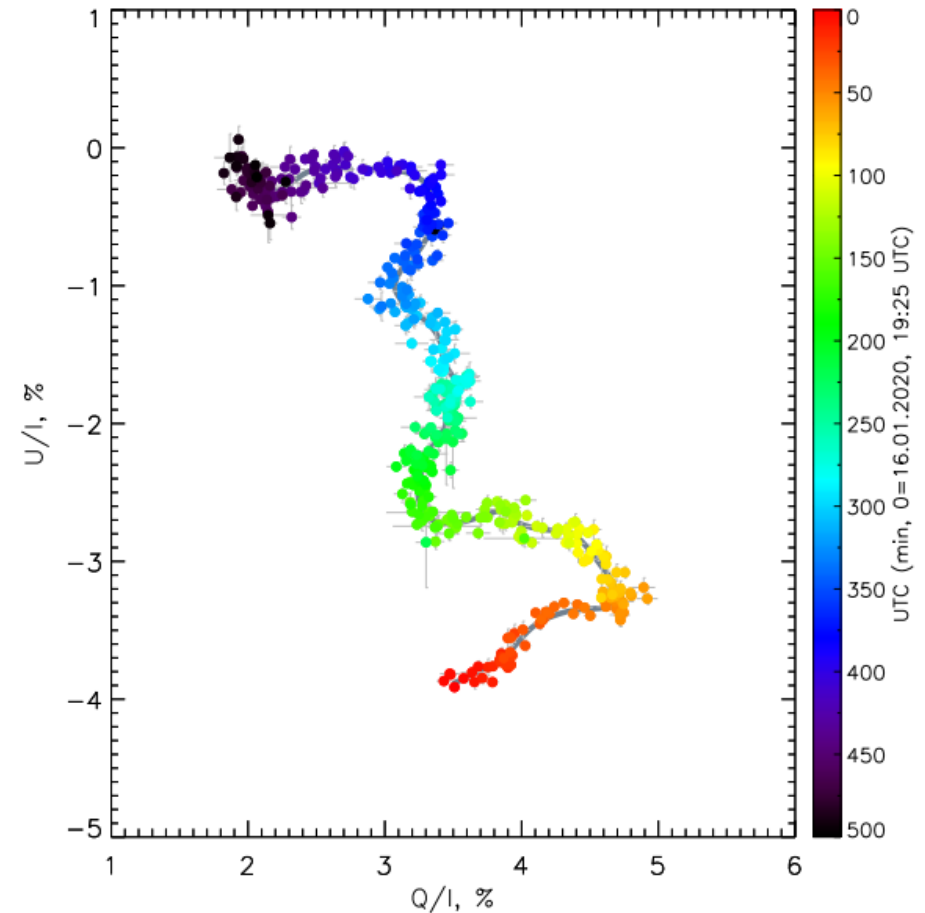
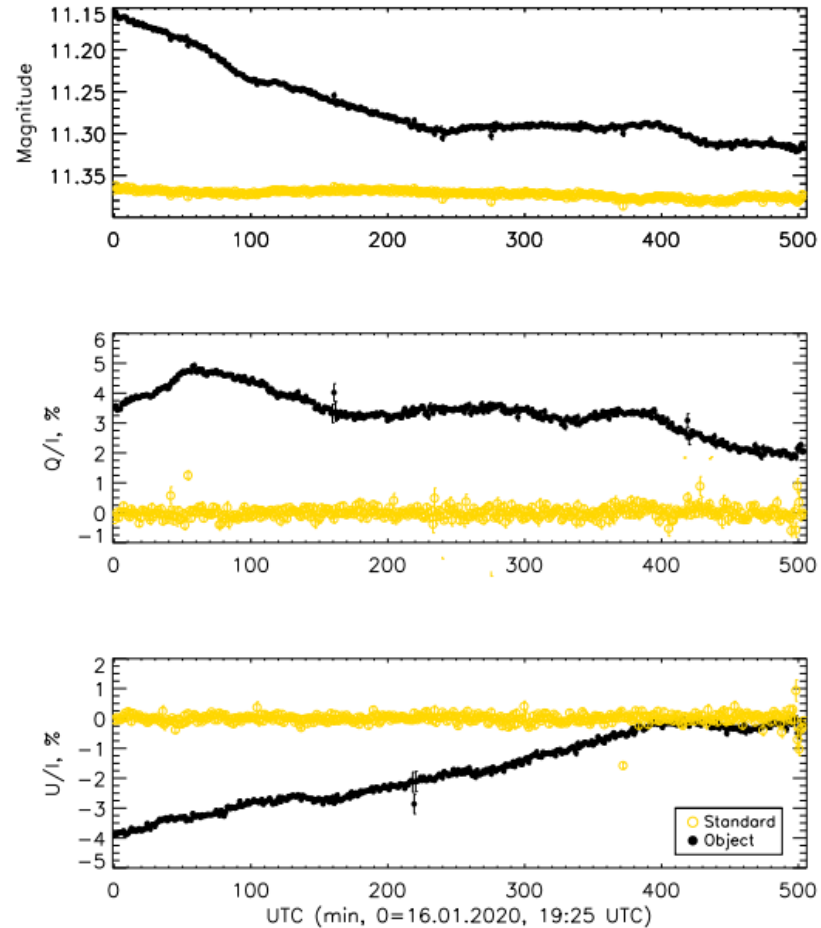
Глава 5. Быстрая поляриметрия блазаров

9-часовой поляриметрический мониторинг с прибором SCORPIO-2 на БТА блазара S5 0716+714 выявил переменность блеска и вектора поляризации с периодом 77 ± 10 мин (~ 10 а.е.).



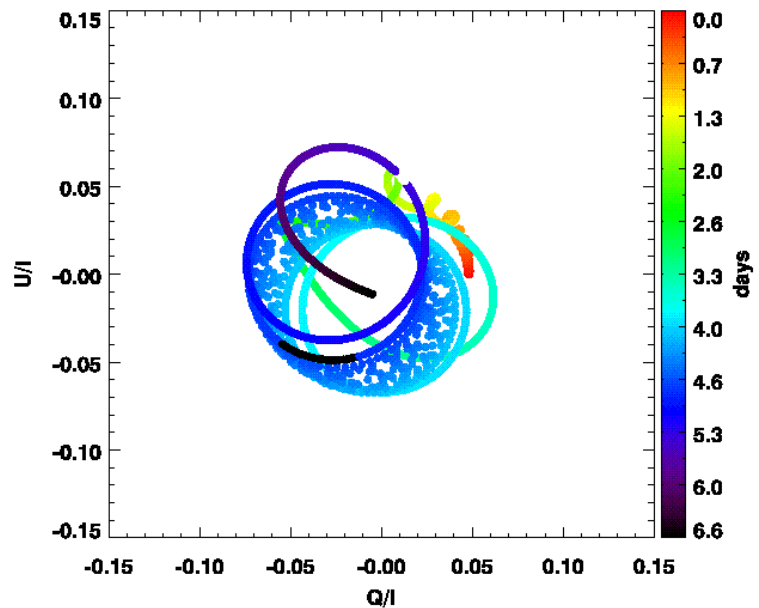
Глава 5. Быстрая поляриметрия блазаров

Спустя 2 года проведены повторные наблюдения на телескопе Цейсс-1000 с прибором «СтоП», показавшие период переменности 76 ± 10 мин, что указывает на стабильность излучающей области.

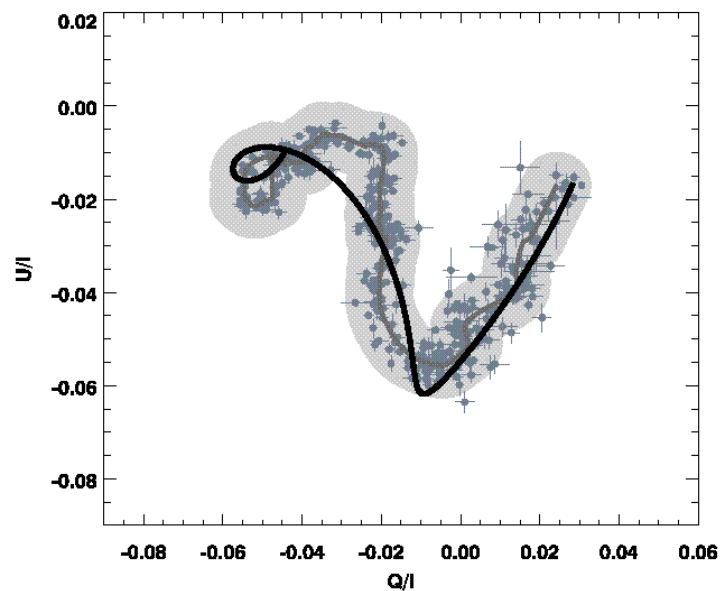


Глава 5. Быстрая поляриметрия блазаров

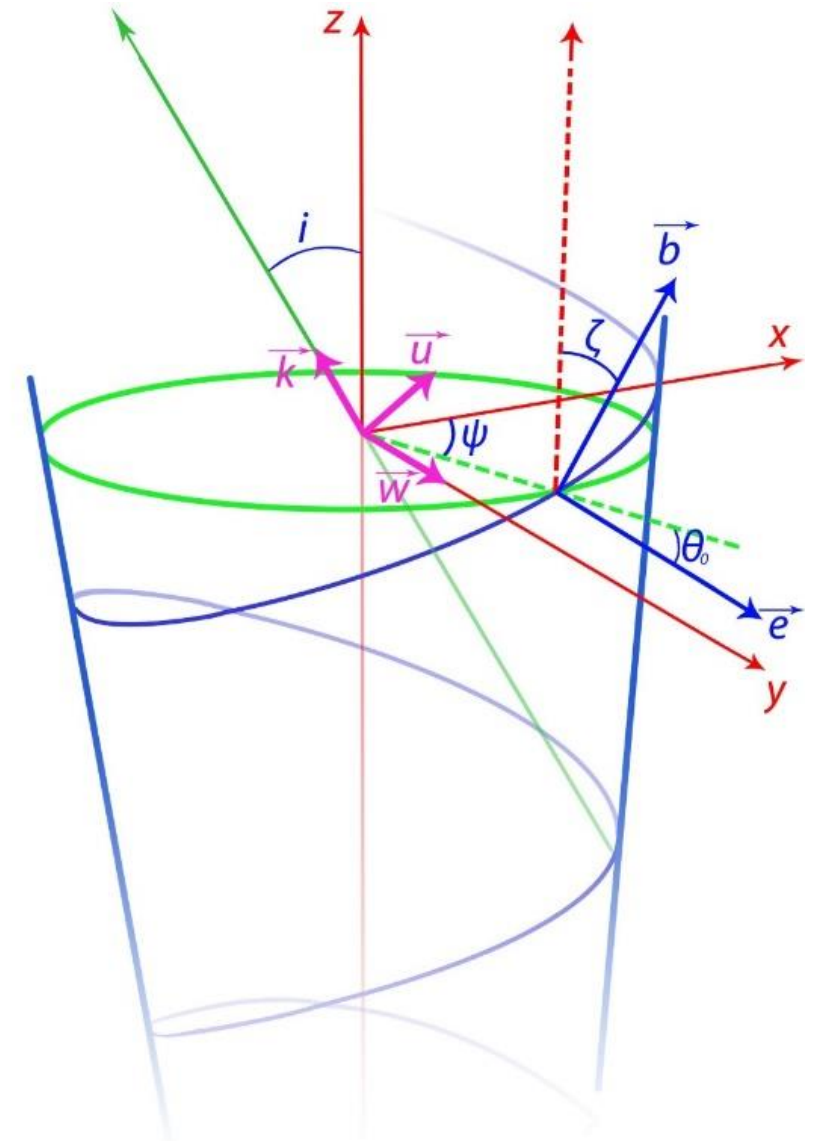
Построена геометрическая модель конического джета с геликальным прецессирующим магнитным полем. Размер сечения конуса предполагается равным 10 а.е. на расстоянии 0.001 пк от ядра. Аппроксимация результатов наблюдений данной моделью показала, что внутрисуточная переменность вектора поляризации в блазаре S5 0716+714 с хорошей точностью описывается при учете прецессии магнитного поля джета с периодом 15 дней.



Моделирование вращения поляризации



Аппроксимация данных моделью



Заключение

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 доминирующим механизмом. Сделано предположение о возможном комплексном влиянии эффектов микро- и макролинзирования на внутренние структуры квазара и прецессии системы диск-джет.
3. Разработан новый метод определения внутреннего радиуса пылевого тора, основанный на идее эхокартирования широких эмиссионных линий в поляризованном свете в 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.

Заключение

4. На основе поляриметрического мониторинга блазара S5 0716+714 обнаружена внутрисуточная переменность блеска и направления поляризации с периодом ~ 1.5 часов. Построена геометрическая модель поляризованного излучения джета и дана оценка линейным размерам геликального магнитного поля, отождествляемого с излучающей областью – ~ 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. Введён в опытную эксплуатацию фотометр-поляриметр для 1-м телескопа "Стокс-поляриметр". Методические исследования прибора показали возможность реализации в хороших атмосферных условиях точности измерения линейной поляризации $0.1-0.2\%$ для объектов до 16 зв.в.

Научная новизна

- Впервые проведено численное моделирование поляризации излучения вследствие экваториального рассеяния излучения широкой линии Mg II в случае высокоскоростных истечений из центральных областей активного ядра.
- Впервые признаки экваториального рассеяния были найдены в спектре в поляризованном свете в линии Mg II в квазаре SBSS 1419+538, что позволило также впервые применить спектрополяриметрический метод измерения массы СМЧД к объекту на красном смещении больше 1.
- Впервые обнаружена систематическая разница между состоянием поляризации двух компонент гравитационно-линзированного квазара Q0957+561, а также зависимость поляризации континуума в компонентах от длины волны.
- Впервые предложен метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях для АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием, позволяющий напрямую оценивать размер области экваториального рассеяния.
- 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.

Апробация работы

Результаты диссертации лично представлялись диссертантом в виде докладов на семинарах САО, КрАО, ИПА и СПбГУ, на конкурсе-конференции САО, а также следующих всероссийских и международных конференциях:

- "The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows", Германия, Потсдам, 02-07.09.2018
- "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2018
- "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН, 24-26.04.2019
- "12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", Сербия, Врдник, 03-07.06.2019
- "Diversity of the Local Universe", Нижний Архыз, САО РАН, 30.09-04.10.2019
- "IV Conference on Active Galactic Nuclei and Gravitational Lensing", Сербия, Баня Ждрело, 12-15.11.2019
- "EAS 2020", online, 1-3.07.2020
- "XII Serbian-Bulgarian Astronomical Conference", online, 25-29.09.2020
- "Towards a panchromatic understanding of the polarization of Active Galactic Nuclei", online, 1-11.12.2020
- IAU symposium "Astronomical Polarimetry 2020 – New Era of Multi-Wavelength Polarimetry", online, 22-26.03.2021
- «Looking at the polarized Universe: past, present, and future» (online), 24-28.05.2021

Список публикаций

1. Shablovinskaya E. S., Afanasiev V. L.; "The intraday variations of the polarization vector direction in radio source S5 0716+714", MNRAS, Vol. 482, Issue 4, pp. 4322-4328 (2019)
2. Shablovinskaya E., Afanasiev, V.; "Intraday variability of the polarization vector in AGN S5 0716+714", CAOSP, Vol. 50, Issue 1, pp. 341-349 (2020)
3. Shablovinskaya E. S., Afanasiev V. L., Popović L. Č.; "Measuring the AGN Sublimation Radius with a New Approach: Reverberation Mapping of Broad Line Polarization", ApJ, Vol. 892, Issue 2, p. 118 (2020)
4. Savić Đ., Popović L. Č., Shablovinskaya E., Afanasiev V. L.; "Estimating supermassive black hole masses in active galactic nuclei using polarization of broad Mg II, H α , and H β lines", Mon. Not. R.Astron. Soc., Vol. 497, Issue 3, pp. 3047-3054 (2020)
5. В. Л. Афанасьев, Е. С. Шабловинская, Р. И. Уклеин, Е. А. Малыгин; "Стокс-поляриметр для 1-метрового телескопа", Астрофиз.Бюл., том 76, 1, с. 120–126 (2021)
6. Popović L. Č., Afanasiev V. L., Shablovinskaya E. S., Ardilanov V. I., Savić Đ.; "Spectroscopy and polarimetry of the gravitationally lensed quasar Q0957+561", A&A, Vol. 647, id.A98, 11 pp. (2021)

Личный вклад автора

- Получение наблюдательного материала на 6-м и 1-м телескопах;
- обработка и анализ поляриметрических и спектрополяриметрических данных;
- построение геометрической модели формирования поляризации в джете;
- разработка метода оценки радиуса сублимации пыли в АЯГ;
- методическая работа по введению в эксплуатацию нового фотометра-поляриметра.

Спасибо за внимание!