

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 520.2/.8
№ 01201273569
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН
член-корр. РАН доктор физ.-мат. наук
_____ Ю.Ю. Балега
05 октября 2012 г

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России» на 2009-2013 годы

по Государственному контракту № 14.740.11.0800 от 30 ноября 2010г.

по теме:

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ПРОТЯЖЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКОМ
ТЕЛЕСКОПЕ БТА
(итоговый, этап № 3)

Наименование этапа «Анализ данных наблюдений, оценка физических параметров,
обобщение и оценка результатов исследований»

Руководитель темы
доктор. физ.-мат. наук, профессор

_____ В. Л. Афанасьев
05 октября 2012 г.

Нижний Архыз 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, главный научный сотрудник, доктор физ.- мат. наук, профессор	_____	В. Л. Афанасьев (введение, разделы 2, 4,5,7, 8,9,10, заключение)
Главный научный сотрудник, доктор. физ.- мат. наук, профессор	_____	В.Е. Панчук (раздел 3,4,5,6)
Ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	А.В. Моисеев (разделы 1,4,5,6,9)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	В.Р. Амирханян (раздел 9)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	Н.В. Борисов (раздел 2,7)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	А.А. Смирнова (разделы 1, 6)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	А.Ф. Валеев (раздел 3)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	О.В. Егоров (раздел 1)

инженер	_____	Теплякова А.Л. (раздел 1)
Стажер-исследователь	_____	О.В. Марьева (раздел 3)
Аспирант	_____	А.И. Колбин (раздел 7)
Аспирант	_____	М. М. Габдеев (раздел 7)
Аспирант	_____	И.Ю. Катков (раздел 1)
Студент	_____	Смирнова К.И. (раздел 1)
Студент	_____	Опарин Д. В. (раздел 1)
Студент	_____	Янчиков П.В. (раздел 1)
Студент	_____	Митрофанова А.А. (раздел 7)
Нормоконтролер	_____	Ш.Т. Узденова

Реферат

Отчет 103 страницы, 60 рисунков 12 таблиц.

Объектом исследования являются протяженные астрономические объекты в оптическом диапазоне длин волн.

Цель работы – модернизация, разработка и внедрение методов наблюдений на крупнейшем российском оптическом телескопе России БТА, привлечение к НИР аспирантов и студентов старших курсов, повышение квалификации аспирантов, студентов и молодых сотрудников в области современных методов астрономических наблюдений. Использование результатов НИР в образовательном процессе. Выполнение НИР должно обеспечивать достижение научных результатов мирового уровня, подготовку и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Разрабатываемые методы:

- Методика панорамных наблюдения галактик на 6-метровом телескопе БТА со сканирующим интерферометром Фабри-Перо для детального изучения внутренних движений газовой и звездной компонент (в т.ч. модернизация модуля со сканирующим интерферометром Фабри-Перо в составе универсального редуктора светосилы БТА,
- Создание программного обеспечения управления работой многорежимного спектрографа SCORPIO-N БТА, совершенствование методики анализа данных панорамной спектроскопии внегалактических
- Метод двумерных поляризационных измерений протяженных астрономических объектов (газово-пылевые туманности и активные галактики);

В процессе выполнения 3-го и последнего этапа госконтракта были проведены дополнительные наблюдения на 6-м телескопе БТА ионизированного газа в кольцевых галактиках, для которых было проведено численное моделирование. Для выборки активных галактик впервые получены оценки магнитных полей в их ядрах. Для газопылевого комплекса «Egg» и некоторых пекулярных звезд с газопылевыми оболочками сделаны оценки физических параметров оболочек. Проведено обобщение

работ за весь период контакта и сформулированы рекомендации для дальнейших исследований.

На 6-м телескопе проведен спектрополяриметрический мониторинг двух активных галактик - радиогалактики 3C390.3 и сейфертовской галактики Маркарян 6, и изучена переменность круговой поляризации четырех слабых полярлов 17.5-19.5 звездной величины.

Разработаны унифицированные программы редукции и анализа спектрополяриметрических данных и завершены работы по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N. Реализован WEB-интерфейс доступа к системе обработки данных.

При выполнении контракта в 2011 г. разработаны программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс и подготовлены необходимые научно-методические материалы.

Степень внедрения – результаты исследований опубликованы по теме НИР в высокорейтинговых журналах.

Совершенствование новых методов наблюдений на БТА позволит повысить эффективность наблюдений на крупнейшем наземном телескопе России.

Полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	7
1	Получение на 6-метровом телескопе дополнительного наблюдательного материала, исходя из требований, возникающих в ходе проведения численных расчетов.	9
2	Оценки магнитных полей в ядрах активных галактик	18
3	Оценка физических параметров газово-пылевых комплексов по результатам спектрополяриметрических наблюдений.	32
4	Обобщение результатов предыдущих этапов работ.	55
5	Выработка рекомендаций для дальнейших исследований.	59
6	Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс.	60
7	Проведение поляризационных наблюдений на 6-метровом телескопе.	61
8	Разработка унифицированных программ редукции и анализа спектрополяриметрических данных.	77
9	Завершение работ по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N	81
10	Разработка WEB-интерфейса доступа к системам обработки данных SCORPIO-N.	94
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	100

ВВЕДЕНИЕ

Специальная астрофизическая обсерватория РАН является крупнейшим центром наземной астрономии в России. В оптическом диапазоне обсерватория оснащена телескопом мирового уровня с диаметром главного зеркала 6 метров (БТА). Обсерватория создавалась в 1966 году как центр коллективного пользования под строящийся крупнейший (того времени) в мире телескоп и остается таковым центром и в настоящее время, на котором проводят наблюдения ученые астрономического сообщества мира. БТА работает в режиме коллективного пользования с 1976 года (безвозмездно) и оснащен современной навесной аппаратурой. Методы наблюдений на телескопе постоянно модернизируются и создаются новые силами сотрудников обсерватории (поскольку телескоп является уникальным сооружением и для него промышленность не изготавливает навесное оборудование).

В результате выполнения работ по 3-му этапу госконтракта внедрялись и модернизировались разработанные и два новых метода в составе многорежимного спектрографа БТА SCORPIO-N: метод панорамных наблюдений галактик со сканирующим интерферометром Фабри-Перо для детального изучения внутренних движений их газовой и звездной компонент и метод двумерных поляризационных измерений протяженных астрономических объектов. В 2012 привлечены к НИР 3-и аспиранта и 3-и студента старших курсов, в работе приняли участие 3-е молодых кандидатов наук. В 2012 г. в порядке повышения их квалификации в области современных методов астрономических исследований к защите в специализированном совете диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук.. Разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс содержащая в себе учебно-методические материалы по проведению лабораторных работ для приезжающих на практики в CAO РАН студентов вузов по специальности «астрономия», обновленную образовательную программу «Методы наблюдений и последние результаты исследований на крупнейшем российском оптическом телескопе БТА» для студентов астрономических специальностей университетов, приезжающих на практики в CAO РАН, и программу подготовки магистров физико-математического факультета Ставропольского государственного университета по специальности «оптика и спектроскопия»;

Содержание работ по контракту на третьем этапе выполнения госконтракта:

1. Получение на 6-метровом телескопе дополнительного наблюдательного материала, исходя из требований, возникающих в ходе проведения численных расчетов.
2. Оценки магнитных полей в ядрах активных галактик.
3. Оценка физических параметров газовой-пылевой комплексов по результатам спектрополяриметрических наблюдений.
4. Обобщение результатов предыдущих этапов работ.
5. Выработка рекомендаций для дальнейших исследований.
6. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс.
7. Проведение поляризационных наблюдений на 6-метровом телескопе.
8. Разработка унифицированных программ редукиции и анализа спектрополяриметрических данных.
9. Завершение работ по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N.
10. Разработка WEB-интерфейса доступа к системам обработки данных SCORPIO-N.

Актуальность работ, проводимых по контракту. В области фундаментальных исследований наблюдательная астрофизика обеспечивает получение новейших знаний о происхождении и эволюции объектов Вселенной. Этот вопрос является одним из самых важных в естествознании. Результаты астрофизических исследований, полученных сегодня, составят основу для развития физических наук человечества в XXI веке.

Новизна работы. Создаваемые новые методы наблюдений на телескопах являются оригинальными (впервые реализованы) и уникальными (созданы специально для БГА).

1. Получение на 6-метровом телескопе дополнительного наблюдательного материала, исходя из требований, возникающих в ходе проведения численных расчетов

1.2 Кинематика галактик с полярными кольцами

В 2011 г нами был опубликован новый каталог кандидатов в галактики с полярными кольцами (SPRC = Sloan-based Polar Rings Catalog, Моисеев и др., 2011). Первые наблюдения на 6-м телескопе с помощью SCORPIO-2 в режимах Long slit и ИФП, показали, что большинство рассмотренных кандидатов действительно содержат внешний звездно-газовый кинематически выделенный компонент, вращающийся в плоскости примерно ортогональной к центральной галактике. Однако для выполнения детальных численных расчетов динамики таких систем и измерения формы темного гало необходимо изучить галактики более подробно и собрать достаточно большой объем наблюдательной информации. Именно для моделирования необходимо знать:

- Закон распределения массы звездного компонента центральной галактики, в нашем случае достаточно фотометрических оценок по данным обзора SDSS
- Распределение лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд вдоль большой оси центральной галактики
- Распределение лучевых скоростей газа ионизованного газа в полярном компоненте. Желательно, чтобы полярное кольцо было заметно развернуто к лучу зрения ($i = 40-60^\circ$), чтобы по полю скоростей можно было измерить как возможный изгиб плоскости вращения, так и использовать двумерное распределение скоростей для непосредственного сравнения с данными моделирования.

Кроме того, и центральный и внешний компоненты должны иметь достаточно большой угловой размер (не менее $10''$), и как можно меньшую область перекрытия, приводящую к искажениям картины движения звезд по лучу зрения.

В результате, в качестве объектов первого приоритета были отобраны галактики SPRC-7 и SPRC-260. Но если для первой необходимый наблюдательный материал уже имелся, то в случае SPRC-260 в декабре 2011 и марте 2012 на 6-м телескопе были проведены дополнительные наблюдения, результаты которых показаны на рисунке.

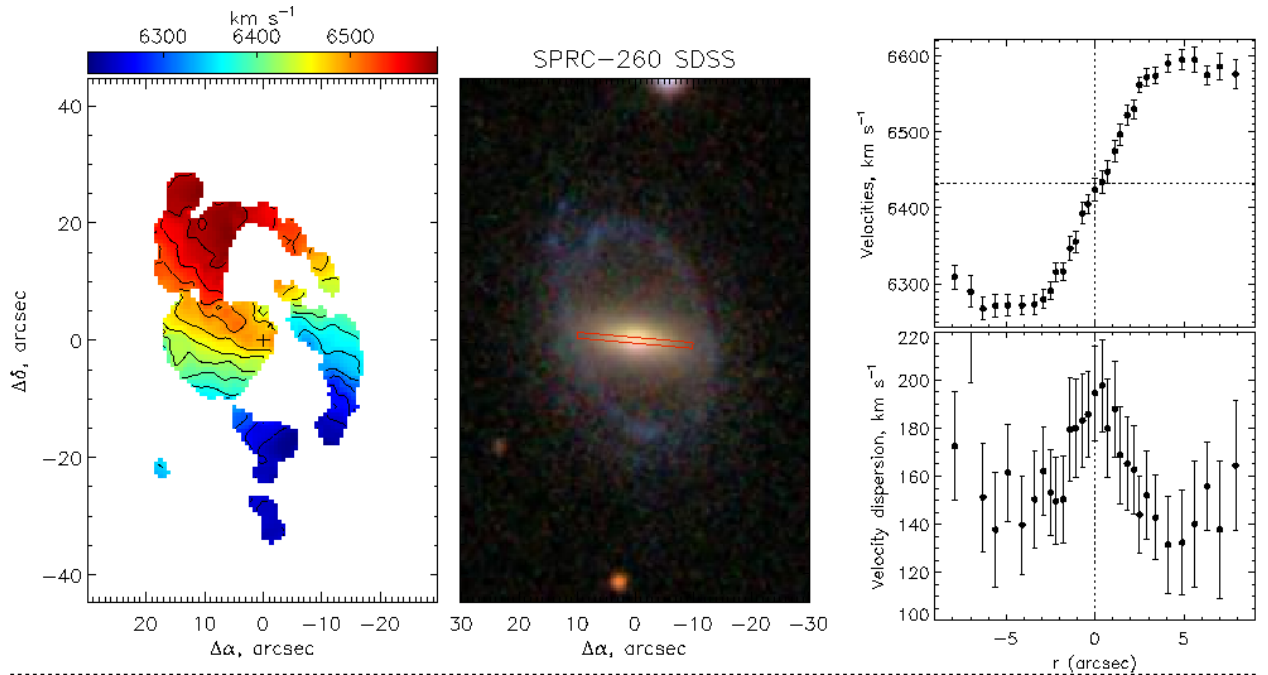


Рисунок 1.1 Галактика SPRC-260. Слева — поле скоростей ионизованного газа, построенное с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо. В центре — изображение галактики в цифровом обзоре неба SDSS, отмечено положение щели спектрографа SCORPIO-N. Справа — распределение лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в центральной галактике, согласно наблюдениям в режиме long-slit.

Ниже в таблице приведены параметры системы, определенные в результате наблюдений

Таблица 1.1 : Принятые параметры SPRC-260 (CGCG 068-056)

Расстояние до галактики	85.5 Мпк
Масштаб	1 arcsec=0.414 кpc
Ориентация центральной галактики	PA=83 i=65
Ориентация кольца к лучу зрения	PA=19 i=46
Внешний диск	² I0=20.80 mag/arcsec r0=7.5 arcsec
Внутренний диск	² I0=18.01 mag/arcsec r0=1.7 arcsec
Балдж (Sersic, n=2)	² Ieff= 19.87 mag/arcsec reff=0.9 arcsec

Для данных комбинаций (PA, i) получаем два решения для реального угла между кинематически выделенными компонентами: $\delta i = 89.6 \pm 5^\circ$ и $54.6 \pm 5^\circ$, где первое соответствует более вероятному случаю точно ортогональных дисков.

Численное моделирование проводилось совместно с коллегами из ИНАСАН (С.А. Хоперсков) и ВолГУ (А.В. Хоперсков) с помощью суперкомпьютеров МГУ им М.В. Ломносова «Чебышев» и «Ломоносов». В ходе расчетов выполнялось решение трехмерных гидродинамических уравнений в цилиндрических координатах, в качестве первого приближения мы пренебрегали самогравитацией газа. Кольцо ориентировалось в плоскости $z=0$. Внешний гравитационный потенциал определялся изотермичным гало, звездным диском и балджем центральной линзовидной галактики. Наблюдаемое распределение скоростей ионизованного газа сравнивалось с модельными предсказаниями для различных параметров сплюснутости гало ($q=a/b$, $s=c/b$). Отдельно строились χ^2 -суммы как для отличий наблюдаемых полей скоростей газа от модельных, так и для отклонений параметров звездной кинематики центральной галактики от модельного предсказания.

В качестве начальных параметров в расчете динамики газового диска принималась наблюдаемая кривая вращения полярного компонента. В целом модельное поле скоростей на протяжении многих периодов вращения ($T=400$ млн. лет) неплохо согласуется с наблюдениями. Небольшие систематические отклонения скорее всего связаны с изгибом плоскости кольца. Величина возмущений скоростей коррелирует с выделенными структурами в распределении плотности. В то же время, полярный компонент оказывается неустойчивым относительно образования крупномасштабных конденсаций. В SPRC-7 Максимумы в распределении плотности располагаются в областях, где полярный диск пересекается с основной плоскостью. Эти области также заметны на картах остаточных скоростей.

В SPRC-260 модель лучше согласуется с наблюдениями, чем в SPRC-7, возможно, из-за почти точно полярных орбит газового компонента, который оказывается устойчивым на временах в несколько млрд. лет. Взаимодействие между неосесимметричными возмущениями, порождаемыми в газовом диске гравитацией гало и центральной галактики приводит к формированию спиральной структуры в полярном кольце. В SPRC-260 изначально двухрукавная структура в дальнейшем эволюционирует к азимутальной моде $m=1$ (lopsided system). Лучшее модельное решение (минимум χ^2 -распределения) указывает, что гравитационный потенциал темного гало в этой галактике

имеет слабую трехосность ($s=0.95$, $q=1.1$), что противоречит предыдущим заключениям о форме гало в галактиках с полярными кольцами, сделанным на основе изучения соотношения Галли-Фишера (Iodice et al., 2003). Однако именно такое, слегка сплюснутое

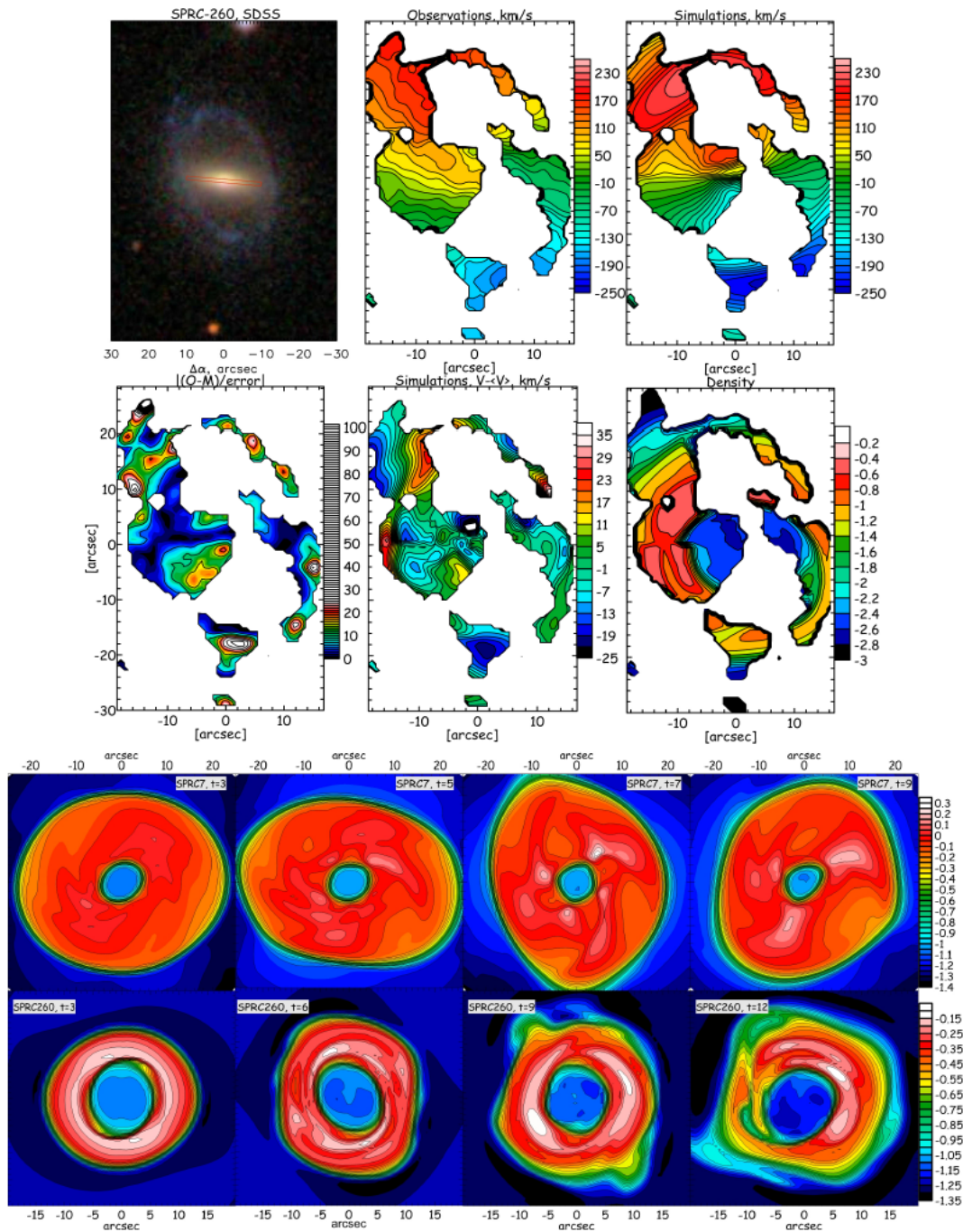


Рисунок 1.2: Численное моделирование динамики газа в полярных кольцах. Вверху — изображение галактики SPRC-260 и сравнение модельных и наблюдаемых полей лучевых скоростей. Внизу — эволюция распределения поверхностной плотности газа в SPRC-7 и SPRC-260.

гало предсказывается в космологических расчетах формирования галактик. Эти первые результаты внушают надежду, что моделирование других подобных галактических систем позволит сделать уверенные выводы, о форме темных гало дисковых галактик.

Кроме получение данных для моделирования отдельных галактик, в ноябре 2011- марте 2012 гг на 6-м телескопе с прибором SCORPIO-N мы продолжали работу по подтверждению новых галактик с полярными кольцами. На рисунке показаны результаты таких наблюдений для двух галактик: SPRC-124 и SPRC-241

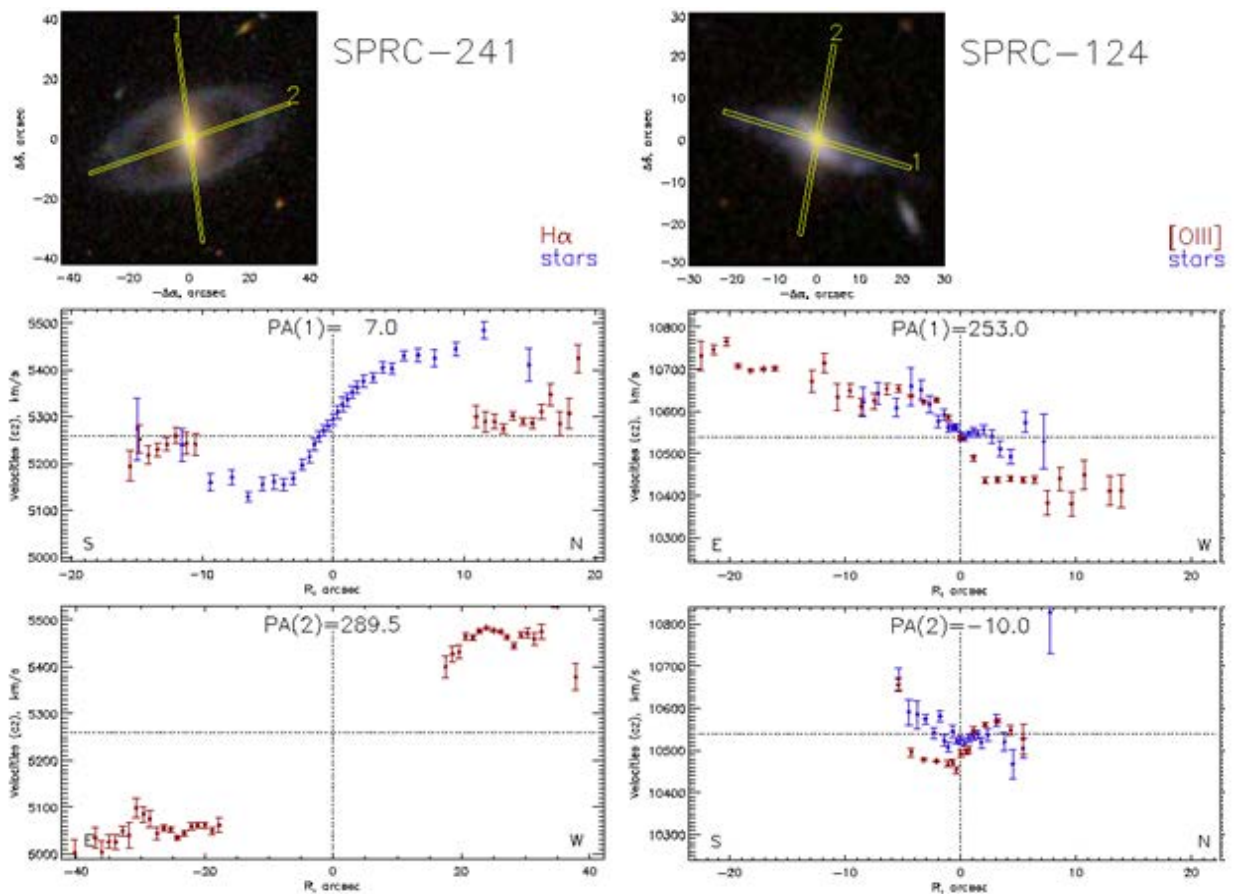


Рисунок 1.3: Новые наблюдения кандидатов в галактики с полярными кольцами из каталога SPRC. Приведены изображения галактик из SDSS, на которых показано положение щелей спектрографа и распределения лучевых скоростей в соответствующих спектральных разрезах для звездного компонента (синие точки) и для ионизованного газа (красные точки)

1.2. Интерферометрические наблюдения турбулентных движений ионизированного газа в карликовых галактиках

Наблюдения. С целью уточнения ранее сделанных нами выводов о поведении дисперсии скоростей ионизированного газа в областях звездообразования карликовых галактик, нами были выполнены дополнительные наблюдения в прямом фокусе 6-м телескопа САО РАН с помощью сканирующего ИФП, установленного внутри фокального редуктора SCORPIO-N. Рабочий спектральный диапазон вокруг линии $\text{H}\alpha$ вырезался узкополосным фильтром с шириной полосы $\text{FWHM}=15\text{-}21\text{\AA}$. Применялся сканирующий интерферометр IFP751 имеющий $\Delta\lambda=8.7\text{\AA}$, и спектральное разрешение 0.4\AA (18 км/с), при масштабе 0.21\AA на канал. В качестве приемников излучения использовалась ПЗС матрица EEU E2V 42-90, дающая масштаб изображения 0.71 arcsec/pixel в режиме аппаратного биннинга 4×4 .

В процессе сканирования мы последовательно получали 40 интерферограмм объекта, при различных расстояниях между пластинами интерферометра. Обработка наблюдательного материала производилась с помощью пакета программ, работающего в среде IDL. После первичной обработки, вычитания линий неба и приведения к шкале длин волн наблюдательный материал представлял собой куб данных, в котором каждый пиксель в поле зрения содержит 40-канальный спектр.

Говоря о дисперсии скоростей ионизированного газа, мы имеем в виду стандартное отклонение гауссианы, описывающий профиль эмиссионной линии $\text{H}\alpha$, после учета аппаратного контура ИФП и вычитания вклада теплового уширения в областях НП. Применяемая нами методика подробно описана в работе Моисеева и Егорова (2008). Ширина инструментального контура прибора измерялась по спектру линии калибровочной лампы. Наблюдаемые профили линии $\text{H}\alpha$ аппроксимировались функцией Фойхта (Voigt), которая в большинстве случаев хорошо описывает наблюдаемый профиль. По результатам аппроксимации профилей строились двумерные поля лучевых скоростей ионизированного газа, карты дисперсии лучевых скоростей, свободные от влияния аппаратного контура, а также изображения галактик в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ и в континууме.

Диаграммы интенсивность — дисперсия скоростей. На рис.1.4 приведены изображения в линии $\text{H}\alpha$, карты дисперсии скоростей (σ), а также диаграммы $I\text{-}\sigma$ для

ряда наблюдавшихся галактик. Наши диаграммы отличаются от более ранних работах тем, что вместо пиковой интенсивности линии I_{peak} , мы используем полный поток в линии I , имеющий более ясный физический смысл (светимость с единицы площади). Поскольку карты σ маскировались по фиксированному уровню S/N , а уровень шума во внешних областях в основном определяется фоном, то левая граница облака точек на диаграммах представляет собой наклонную линию, где $I_{\text{peak}} = \text{const}$. Мы отказались также от линейной шкалы интенсивностей и используем $\lg I$, так как наблюдаемый перепад яркости составляет 2-3 порядка, что значительно больше, чем диапазон яркостей внутри отдельных комплексов НII, которые изучались ранее различными авторами. Цветом на диаграммах выделены характерные особенности, прокомментированные ниже. Синим выделена горизонтальная полоса с относительно низкой дисперсией σ и высокой поверхностной яркостью. Границы по яркости выбраны так, что выделенные области содержат 50% всей светимости галактики в эмиссионной линии. Другими цветами: от зеленого до красного - мы показываем области с повышенной σ , стараясь по возможности выделить оболочечные структуры. Остальные области показаны серым. На диаграммах красной чертой отмечен уровень средней дисперсии скоростей по всей галактике, взвешенный с интенсивностью.

Особенности диаграмм интенсивность-дисперсия скоростей в галактике UGC 8508.

Здесь наблюдается минимум дисперсии скоростей внутри областей НII, окруженных диффузным газом с повышенной σ . Кроме того, на диаграмме I - σ выделяется наклонная полоса, которая, согласно нашим моделям, должна соответствовать расширяющейся оболочке.

Действительно, большинство точек из этой полосы (отмеченные красным и зеленым) сосредоточены внутри гигантской дуги из областей НII на краю западной части диска ионизованного газа. Морфологически и кинематически это напоминает половинку незамкнутой расширяющейся оболочки диаметром около 350 пк. Кинематический возраст этой оболочки, обозначенной как UGC 8508 #1, составляет около 4 млн. лет. В работе Варрена и др. (2011) показано, что в восточной половине галактики имеется полость в распределении НII диаметром около 550 пк, так что яркие области НII располагаются по ее границе. Однако по кинематике ионизованного газа эта область (отмеченная на рисунке как "Cavern") почти не выделяется - дисперсия скоростей мала, за исключением нескольких пятен с повышенной σ в самом центре этой полости, там где почти нет

эмиссии $H\alpha$. Их трудно интерпретировать как отдельную оболочку, скорее всего речь идет о росте турбулентных скоростей на границе областей III.

В правой верхней части диаграммы $I-\sigma$ интересна группа точек, образующая «горизонтальную последовательность», так как здесь поверхностная яркость заметно больше, чем для остальных точек с большой дисперсией скоростей (35-40 км/с). Все точки, отмеченные на нашей схеме кирпичным цветом, группируются внутри одной области III на восточном краю диска. Ее размер совпадает с FWHM звездных изображений, т.е. пространственно она не разрешается. Профиль линии $H\alpha$ имеет здесь четко выраженную двухпиковую структуру с расстоянием между пиками около 80 км/с. Сперва мы предположили, что здесь находится остаток вспышки сверхновой. Но пока отосланная статья проходила рецензирование, в феврале 2012 г. мы провели спектральные наблюдения этого объекта с прибором SCORPIO-N. Полученный спектр разительно отличается от ожидаемого для остатка сверхновой. Здесь видны мощные линии бальмеровской серии, а также достаточно яркие линии HeI и $HeII$, что характерно для эмиссионных звезд. Звезда отличается огромным значением эквивалентной ширины эмиссий $EW(H\alpha)=770\text{\AA}$, причем линия $H\alpha$ имеет широкие крылья, соответствующие гаусс-компоненту с $FWHM=2030$ км/с. В приложении к статье Моисеева и Лозинской (2012) мы приводим дополнительные аргументы в пользу того, что спектр принадлежит уникальной звезде - яркой голубой переменной (luminous blue variable =LBV).

Особенности диаграмм интенсивность-дисперсия скоростей в галактике UGCA 92.

Здесь наблюдается наиболее заметная асимметрия в распределении ионизованного газа относительно центра среди всех галактик выборки. На изображении в линии $H\alpha$ заметно нескольких оболочек и незамкнутых арок, большинство из которых связано с ярчайшим комплексом звездообразования в восточной части галактики. Пять областей III образуют замкнутую вытянутую петлю, в центре которой наблюдается максимум в распределении σ . На диаграмме $I-\sigma$ можно выделить широкую наклонную полосу (показана зеленым и красным цветами), точки которой лежат внутри этой оболочки. В центре, где дисперсия скоростей максимальна, а интенсивность минимальна, профили линии $H\alpha$ имеют заметное правое крыло, так что их удастся разложить на два компонента - более интенсивный синий и в 1.5-2 раза более слабый красный компонент. Разделение между компонентами составляет $\Delta V=45-57$ км/с и уменьшается от центра к краям.

Наблюдаемые особенности свидетельствуют о том, что мы имеем дело с

оболочкой (обозначена как UGCA 92 #2), расширяющейся со скоростью около 30 км/с.

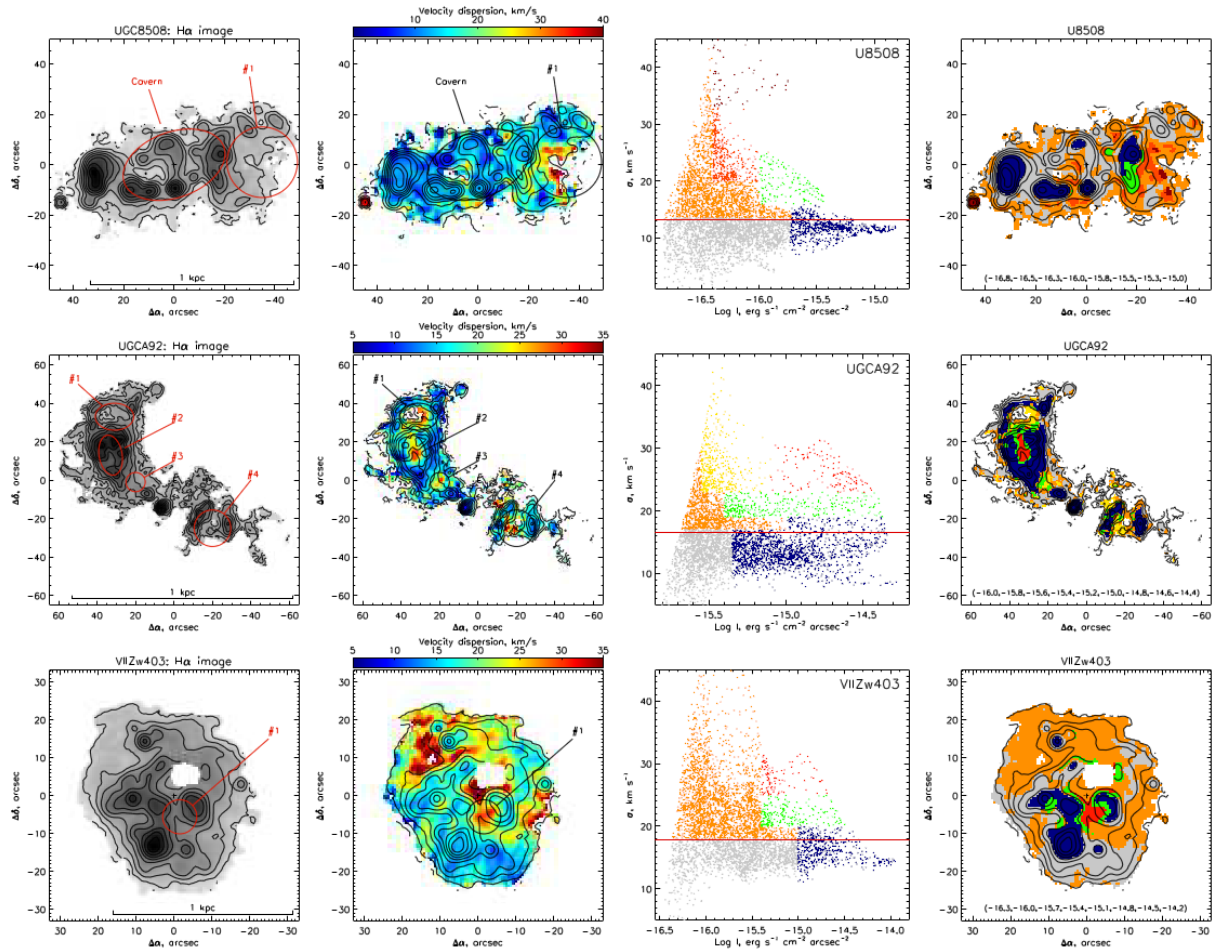


Рисунок 1.4: Результаты наблюдений со сканирующим интерферометром, сверху вниз: галактики UGC8508, UGCA 92 и VII Zw 403. Слева направо: изображение в линии $H\alpha$ в логарифмической шкале интенсивностей и карта дисперсии скоростей с контурами изображения в $H\alpha$. Эллипсами и номерами отмечены обнаруженные нами расширяющиеся оболочки. Крестиком отмечен центр изображения в континууме. Диаграмма интенсивность - дисперсия скоростей. Красная горизонтальная линия отмечает величину средневзвешенной по яркости дисперсии скоростей. Справа показана локализация областей, выделенных разным цветом на диаграмме I- σ . Контуры соответствуют изофотам в линии $H\alpha$.

2. Оценки магнитных полей в ядрах активных галактик

Исследование активных галактических ядер и квазаров является одной из центральных задач современной астрономии. В соответствии с современными представлениями, главными объектами в явлении АГЯ являются центральная сверхмассивная черная дыра и аккрецирующий диск вокруг центральной энергетической машины. Аккреционный диск

обладает сложной структурой и описанию его структуры посвящено довольно много теоретических работ, начиная с классической работы Шакуры и Сюняева (1973).

Естественно, что решающий вклад в решение данной проблемы принадлежит наблюдениям. Такие наблюдения ведутся как во многих астрономических обсерваториях, так и с помощью космических обсерваторий. Последние, как правило, ведут наблюдения рентгеновского излучения активных галактических ядер и квазаров.

Среди основных методов наблюдения данных объектов заметная роль принадлежит спектрополяриметрии. В САО РАН разработан редуктор светосилы первичного фокуса SCORPIO (Afanasiev et al., 2004), который может работать и в режиме спектрополяриметрии (Афанасьев и Моисеев, 2005). На этом приборе возможно измерение линейной и круговой поляризации звездообразных объектов в широком спектральном диапазоне с точностью 0.2-0.3%. Полная квантовая эффективность при таких наблюдениях может достигать 30%.

Физические условия аккреционных дисков вокруг сверхмассивных черных дыр практически не позволяют применять прямой метод измерения магнитных полей - метод зеемановской спектрополяриметрии. Поэтому мы применяем при анализе данных спектрополяриметрических наблюдений косвенный метод определения магнитных полей, развитый в работах Гнедина и Силантьева (1997), Гнедина и др. (2006) (см. также монографию Долгинова и др., 1995). Идея данного метода состоит в том, что, если учесть эффект фарадеевского поворота на длине свободного пробега фотонов в процессе рассеяния на электронах, то величины степени поляризации и позиционного угла, а также их зависимость от длины волны излучения аккреционного диска, которая полностью определяется распределением, т.е. геометрией, магнитного поля внутри аккреционного диска. Величина поляризации оказывается меньше по сравнению с той, которая получена Соболевым и Чандрасекаром (1950) в результате решения задачи многократного рассеяния света в плоскопараллельной атмосфере. Это отличие связано с эффектом

фарадеевской деполяризации излучения при его рассеянии в аккреционном диске. Роль поляриметрических наблюдений сильно возросла в последнее время в связи с тем, что они позволяют сделать решающий выбор между все возрастающим количеством различных моделей аккреционных дисков. Такой рост происходит в связи с увеличением количества численных расчетов ("numerical simulations") структуры таких аккреционных дисков. В результате применения данной методики будут определены величины магнитных полей в той области аккреционного диска, где генерируется наблюдавшееся излучение активных галактических ядер, а также показатель степенного распределения магнитного поля в самом диске. Эти данные, полученные из наблюдений, позволяют также определить величину магнитного поля вблизи радиуса горизонта сверхмассивной черной дыры и сравнить полученную на основе данных наблюдений величину магнитного поля B_H на горизонте событий с теоретическими оценками, полученными в различных моделях. Так сравнение наших результатов с результатами наиболее популярной модели образования магнитного поля вблизи самой сверхмассивной черной дыры - модели магнитной связи ("Magnetic Coupling") позволило определить такую важную физическую величину как отношение плотности энергии аккрецирующего газа к плотности магнитной энергии - хорошо известного в физике плазмы параметра β .

2.1 Получение оценок параметров поляризации непрерывного спектра AGN

Для оценок магнитных полей AGN нами использованы спектрополяриметрические наблюдения выборки активных галактических ядер выполнялись на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в 2008-2009 гг. в течении трех сетов наблюдений. Для наблюдений были отобраны объекты с имеющимися в литературе оценками масс центральных черных дыр M_{BH} . Наблюдения проводились с помощью фокального редуктора светосилы SCORPIO в режиме спектрополяриметрии, установленном в первичном фокусе. В качестве светоприемника использовалась матрица ПЗС EEV42-40 формата 2048x2048 пикселей с размером пикселя 13.5x13.5 мкм, а в качестве диспергирующего элемента - объемная голографическая фазовая решетка VPHG550g из комплекта SCORPIO, работающая в диапазоне 3500-7200 Å. Обратная линейная дисперсия в плоскости светоприемника составила 1.8 Å/px. В спектрографе использовался набор 5 круглых диафрагм диаметром

4.5" расположенных в виде псевдощели с шагом 9.7 сек. дуги. В качестве анализатора поляризации использовалась пластина Савара, установленная за диафрагмами.

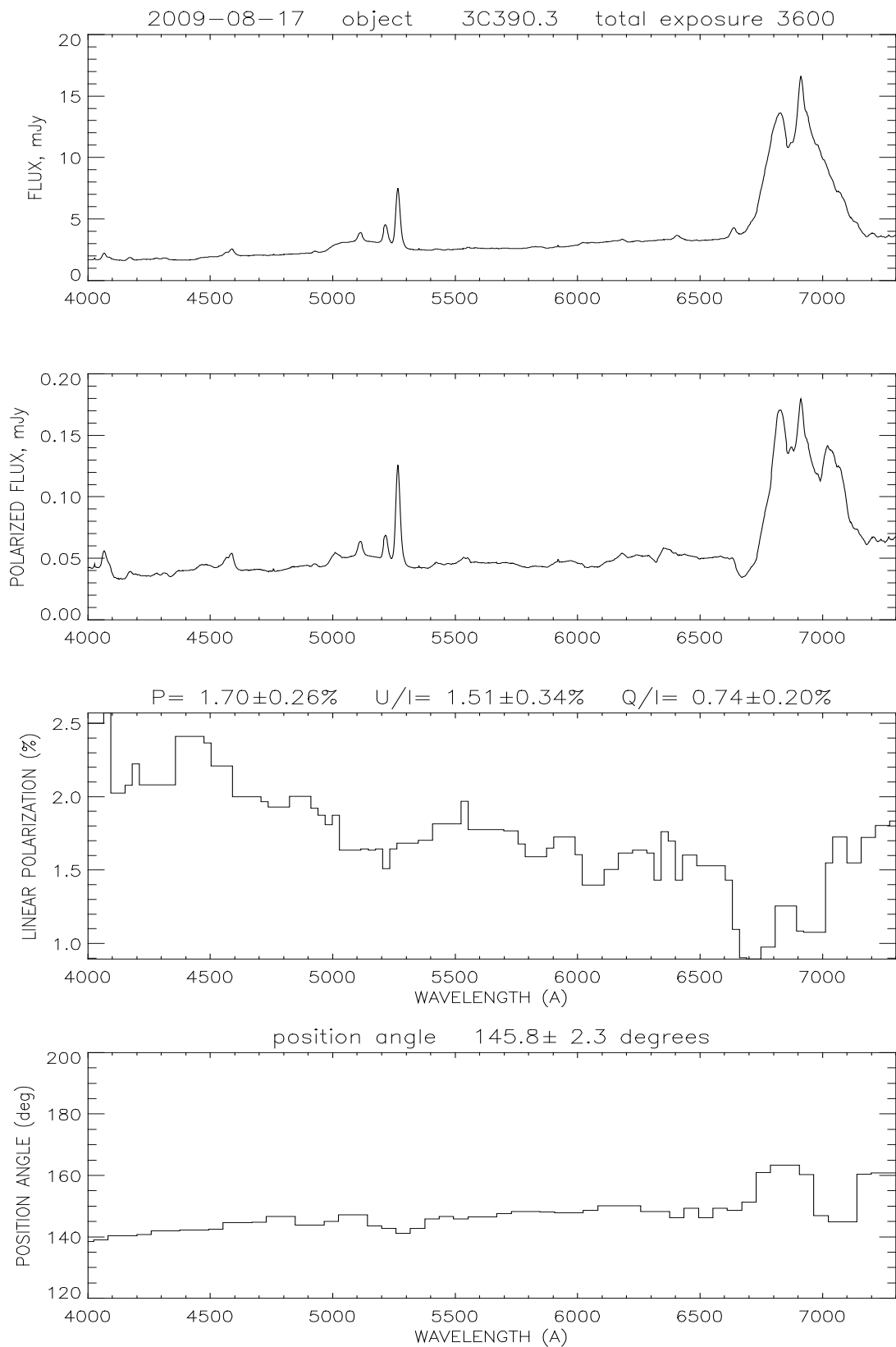


Рис.2.1. Поляризационные измерения 3C390.3

Центральная диафрагма использовалась для получения спектров объекта в перпендикулярных плоскостях поляризации, а остальные для получения спектров ночного неба. Реальное спектральное разрешение наших данных определялось монохроматическим изображением диафрагм и составило 40-42 Å. Качество изображений во всех сетах наблюдений было не хуже 2".

Методика наблюдений и вычисления поляризации описана в работе Афанасьева и др.(2005). Для калибровок длин волн и относительного пропускания диафрагм использовались лампа линейчатого спектра с наполнением Ar-Ne-He и кварцевая лампа. Для калибровки спектрополяриметрического тракта спектрографа наблюдались стандарты из обзора Турншек и др. (1990). Обработка и анализ данных проводился по стандартной методике с использованием специализированных пакетов программ, написанных в среде IDL6.2. Пример типичного представления результатов обработки для одного из наблюдавшихся объектов показан на рис.2.1.

Таблица 2.1 Результаты наблюдений выборки AGN

Объект	m_v	z	Тип	Дата	T_{exp}, s	$P_v(\%)$	$PA(^\circ)$	n
PG 0007+106	15.2	0.089	Sy1	30.11.08	3000	1.02±0.38	83	0.15±0.25
PG 0026+129	15.3	0.142	QSO	30.11.08	3000	1.07±0.28	99	-0.45±0.33
PG 0049+171	16.1	0.064	Sy1.5	24.09.09	2160	1.42±0.31	247	-0.28±0.18
PG 0157+001	15.7	0.163	Sy1.5	01.12.08	3000	0.78±0.28	17	-0.52±0.28
PG 0804+761	14.7	0.100	QSO	02.12.08	3000	1.00±0.38	83	0.24±0.38
PG 0844+349	14.5	0.064	Sy1	29.11.08	3000	0.85±0.10	243	-1.17±0.17
PG 0953+414	15.3	0.234	QSO	03.12.08	3000	0.39±0.12	317	0.11±0.13
PG 1022+519	15.8	0.045	Sy1	30.11.08	3000	0.83±0.30	259	-2.37±0.45
PG 1116+215	14.4	0.177	QSO	29.11.08	3000	0.57±0.12	193	-1.26±0.13
PG 2112+059	15.9	0.466	QSO	29.11.08	3000	1.04±0.21	258	0.45±0.17
				18.08.09	3600	1.08±0.20	243	0.35±0.10
PG 2130+099	14.7	0.063	Sy1	30.11.08	3000	0.62±0.15	53	-0.05±0.32
PG 2209+184	15.9	0.070	Sy1	24.09.08	3600	0.83±0.29	200	-0.75±0.21
PG 2214+139	15.1	0.066	Sy1	28.11.08	3000	1.58±0.18	323	-0.69±0.15
PG 2233+134	16.3	0.326	QSO	29.11.08	3000	0.67±0.23	253	0.28±0.28
3C 390.3	15.2	0.056	Sy1	29.11.08	3000	2.09±0.22	140	-0.57±0.22
				17.08.09	3600	1.58±0.18	146	-0.64±0.07
				24.09.09	3600	1.80±0.24	144	-0.58±0.06

Таблица 2.2 Оценки масс черных дыр и параметров поляризации

Объект	Тип	$\log \lambda L_\lambda$ [erg/s] (opt.)	$\log \frac{M_{BH}}{M_\odot}$	Ссылка	P_V [%]	n	Ссылка
PG 0007+106	Sy1	44.82	$8.73^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.02 ± 0.38	0.15 ± 0.25	1
PG 0026+129	QSO	45.02	$8.59^{+0.07}_{-0.12}$	7	1.07 ± 0.28	-0.45 ± 0.33	1
PG 0049+171	Sy1.5	44.00	$8.35^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.42 ± 0.31	-0.28 ± 0.18	1
PG 0157+001	Sy1.5	44.98	$8.17^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.78 ± 0.28	-0.52 ± 0.28	1
PG 0804+761	QSO	44.94	$8.84^{+0.05}_{-0.06}$	7	1.00 ± 0.38	0.24 ± 0.38	1
PG 0844+349	Sy1	44.35	$7.97^{+0.15}_{-0.23}$	7	0.85 ± 0.10	-1.17 ± 0.17	1
PG 0953+414	QSO	45.40	$8.42^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.39 ± 0.12	0.11 ± 0.13	1
PG 1022+519	Sy1	43.70	$7.15^{+0.09}_{-0.11}$	6	0.83 ± 0.30	-2.37 ± 0.45	1
PG 1116+215	QSO	45.40	$8.53^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.57 ± 0.12	-1.26 ± 0.13	1
PG 2112+059	QSO	46.18	$9.00^{+0.09}_{-0.11}$	6	1.06 ± 0.21	0.40 ± 0.15	1
PG 2130+099	Sy1	44.46	$8.66^{+0.05}_{-0.06}$	7	0.62 ± 0.15	-0.05 ± 0.32	1
PG 2209+184	Sy1	44.47	$8.77^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.83 ± 0.29	-0.75 ± 0.21	1
PG 2214+139	Sy1	44.66	$8.55^{+0.09}_{-0.12}$	6	1.58 ± 0.18	-0.69 ± 0.15	1
PG 2233+134	QSO	45.33	$8.04^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.67 ± 0.23	0.28 ± 0.28	1
3C 390.3	Sy1	43.99	$8.85^{+0.09}_{-0.11}$	6	1.80 ± 0.22	-0.61 ± 0.15	1
I Zw 1	Sy1	44.80	$7.44^{+0.09}_{-0.12}$	6	0.85 ± 0.13	-0.85 ± 0.28	2
Mrk 509	Sy1	44.28	$8.16^{+0.04}_{-0.04}$	7	0.84 ± 0.14	0.66 ± 0.35	2
Mrk 573	Sy1	44.40	$7.28^{+0.08}_{-0.10}$	8	0.98 ± 0.24	-2.35 ± 0.14	3
Mrk 841	Sy1.5	44.29	$8.52^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.07 ± 0.25	0.05 ± 0.35	2
NGC 3227	Sy1.5	42.38	$7.63^{+1.1}_{-1.9}$	7	0.98 ± 0.24	-2.55 ± 0.21	4,9
NGC 3783	Sy1	43.26	$7.47^{+0.07}_{-0.09}$	7	0.51 ± 0.14	-0.34 ± 0.35	2
NGC 4593	Sy1	43.09	$6.73^{+0.03}_{-0.09}$	7	0.34 ± 0.13	-3.44 ± 0.45	2,9
NGC 5548	Sy1	43.51	$7.83^{+0.02}_{-0.02}$	7	0.73 ± 0.10	-0.81 ± 0.26	5,9
NGC 7469	Sy1	43.72	$7.09^{+0.05}_{-0.05}$	7	0.26 ± 0.06	-1.16 ± 0.43	2

(1) Данная статья; (2) Смит и др., 2002; (3) Нагао и др., 2004; (4) Аксон и др., 2008;

(5) Гудрич и Миллер, 1994; (6) Вестергаард и Петерсон, 2006; (7) Петерсон и др., 2004;

(8) Сатяпал и др., 2005; (9) Ву и Хан, 2001.

Список наблюдавшихся объектов и основные результаты наблюдений представлены в Табл. 2.1, где указаны : название объекта, звездная величина ядра в полосе V (m_v), красное смещение z , тип активного ядра, дата наблюдений, экспозиция T_{exp} , средние значения линейной поляризации P_V и позиционного угла плоскости поляризации PA_V в полосе V . В последнем столбце таблицы приводится значение показателя степени

(индекса) n степенной зависимости степени линейной поляризации от длины волны излучения $P_l(\lambda) \sim \lambda^n$. Ошибка определения позиционного угла не превышала 2-3 градусов. При вычислении значения n методом наименьших квадратов отбрасывались значения поляризации в области эмиссионных линий. Полученные значения индекса n будут в дальнейшем использованы для определения степенного закона радиального распределения магнитного поля в аккреционном диске.

2.2. Корреляция между поляризационными параметрами и характеристиками центральной черной дыры

Представляет интерес сравнение полученных нами значений поляризации в континууме и показателя степени в зависимости от поляризации от длины волны $P_l(\lambda) \sim \lambda^n$ с параметрами черных дыр. В таблице 2.2 приводятся данные о светимостях и массах черных дыр, полученных другими авторами по результатам оптических и ультрафиолетовых спектроскопических наблюдений (см. подписи к табл.2.2). Анализ табл.2.2 показывает, что имеется слабая корреляция между степенью поляризации и массой черной дыры и довольно заметная корреляция между показателем степени в зависимости поляризации от длины волны массой черной дыры (рис.2.2)

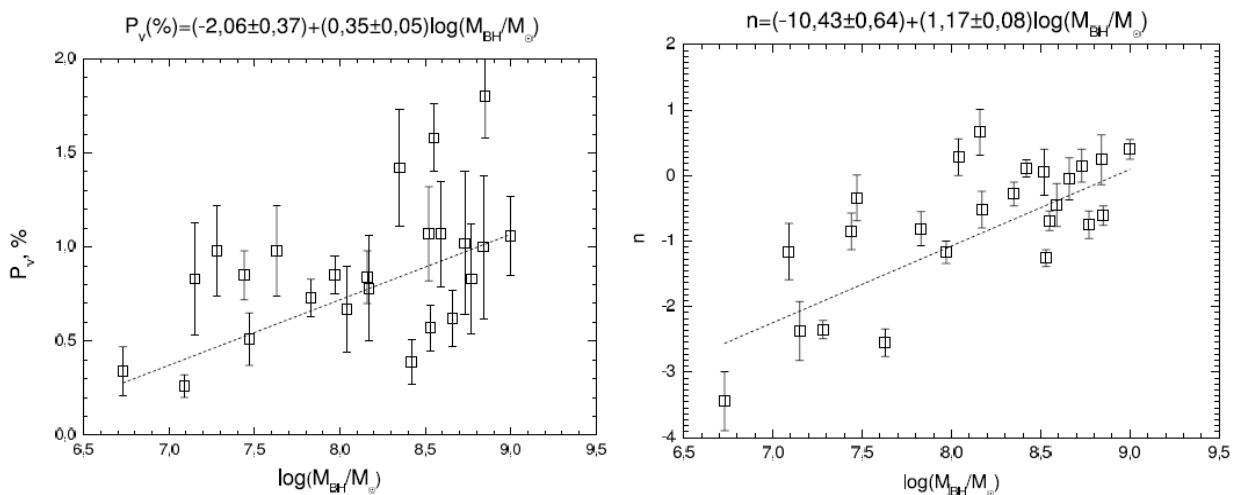


Рис.2.2. Зависимость линейной поляризации и индекса n степенной зависимости от масс черных дыр по данным табл.2.2 (см. также текст)

2.3 Основная методика определения величины и распределения магнитного поля в аккреционном диске

В основе методики определения величины и топологии магнитного поля из данных спектрополяриметрических наблюдений лежат работы Гнедина и Силантьева (1984, 1997), Силантьева и др. (2009) (см. также монографию Долгинова и др., 1995). Как известно, анизотропия распределения плотности горячего газа в области рассеяния электромагнитного излучения уже обеспечивает возникновения поляризованного излучения вследствие томсоновского рассеяния фотонов на электронах горячего газа. В то же время наличие магнитного поля в рассеивающей среде приводит к анизотропии распространения и поглощения электромагнитного излучения. Если же магнитное поле не столь велико ($B < 10^6$ Гс), чтобы обеспечить оптическую анизотропию среды, то реальная оптическая анизотропия может возникнуть в результате процесса фарадеевского вращения плоскости поляризации на длине свободного пробега фотона в среде (Гнедин и Силантьев, 1984). Выражение для угла фарадеевского поворота на длине свободного пробега на длине свободного пробега фотона может быть представлена в виде (Долгинов и др., 1995; Гнедин и Силантьев, 1997):

$$\Psi(\mathbf{n}, \mathbf{B}) = \frac{1}{2} \delta \tau \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{3\lambda}{4\pi r_e} \frac{\omega_B}{\omega} \approx 0.8\lambda^2(mm)B(G)$$

где \mathbf{n} - направление электромагнитного излучения, θ - угол между направлениями \mathbf{n} и магнитного поля \mathbf{B} , $\tau = \sigma_T N_e l$ - томсоновская оптическая толщина (N_e - концентрация свободных электронов, l - геометрическая длина области электронного рассеяния, $\sigma_T = (8\pi/3)(e^2/m_e c^2)^2$ - сечение томсоновского рассеяния), $\omega_B = eB/m_e c$ - циклотронная частота, ω - частота излучения и $\lambda = 2\pi c/\omega$ - длина волны излучения, выраженная в мкм.

Эффект фарадеевского вращения плоскости на длине свободного пробега фотона приводит к сильной зависимости степени поляризации и позиционного угла поляризованного излучения, выходящего из плоскопараллельной оптически толстой плазменной атмосферы, от длины волны излучения (Силантьев, 2002; Силантьев и др., 2009):

$$P_l(\mathbf{B}, \mathbf{n}) = \frac{P_l(0, \mu)}{\sqrt{1 + \delta^2 \cos^2 \theta}} \quad (2.2)$$

$$\tan 2\chi = \frac{U_\lambda}{Q_\lambda} = \delta \cos \theta$$

где $B \cos \theta = \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}$ $\mu = \cos i$, где i – угол наклона аккреционного диска, U, Q – параметры Стокса. Использование формулы 2.2 для анализа и интерпретации данных спектрополяриметрических наблюдений требует знания реальной топологии магнитного поля в аккреционном диске.

Аксиальная симметрия аккреционного диска позволяет разделить эффекты, обусловленные горизонтальной компонентой (внутри аккреционного диска) и вертикальной (полоидальной) компонентой глобального магнитного поля. В результате усреднения выражения (2.2) по азимутальному углу мы получаем (Силантьев и др., 2009) следующие выражения для параметров Стокса:

$$\langle Q \rangle = Q(0, \mu) \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\varphi \frac{1 + a^2 + b^2 \cos^2 \varphi}{(1 + a^2 + b^2 \cos^2 \varphi) - (2ab \cos \varphi)^2} \quad (2.3)$$

$$\langle U \rangle = Q(0, \mu) \frac{2a}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\varphi \frac{1 + a^2 - b^2 \cos^2 \varphi}{(1 + a^2 + b^2 \cos^2 \varphi) - (2ab \cos \varphi)^2}$$

где параметры деполяризации a и b равны

$$a = 0.8 \lambda_{rest}^2 (\mu m) B_z (G) \mu \quad (2.4)$$

$$b = 0.8 \lambda_{rest}^2 (\mu m) B_\perp (G) \sqrt{1 - \mu^2}$$

Здесь B_z – проекция глобального магнитного поля аккреционного диска вдоль нормали к поверхности диска, B_\perp – магнитное поле внутри диска. Напомним, что $\mu = \cos i$, а i – угол между лучом зрения и нормалью.

В дальнейшем мы будем предполагать степенную зависимость величины магнитного поля от радиуса аккреционного диска с показателем степени s :

$$B(R) = B_H (R_H/R)^s, \quad (2.5)$$

где B_H – величина магнитного поля вблизи радиуса горизонта сверхмассивной черной дыры R_H . Показатель степени s может принимать любые значения. Но для модели адвекционного (ADAF) диска, а также для стандартного диска с равенством магнитного и кинетического давлений его значение равно $s = 5/4$ (Парьев и др., 2003).

Существенно, что его значение может быть определено непосредственно из данных спектрополяриметрических наблюдений при условии, что нам известна радиальная зависимость температуры аккреционного диска, т.е. $T_e(R) \sim R^p$. Для стандартной модели (Шакура и Сюняев, 1973) $p = 3/4$. Согласно Силантьеву и др. (2009), в случае сильной фарадеевской деполяризации уравнения (3) приводят к следующей зависимости степени поляризации от длины волны электромагнитного излучения:

$$P_l \sim \frac{P_l(0, \mu)}{B_{z, \perp} \lambda} \sim \lambda^{(s/p-2)} \quad (2.6)$$

Напомним, что спектральное распределение излучения стандартного аккреционного диска имеет вид:

$$F_\nu \sim \nu^{3-2/p} \quad (2.7)$$

В случае стандартного аккреционного диска ($p = 3/4$, $s = 5/4$) получаем $P_l \sim \lambda^{-1/3}$, $F_\nu \sim \nu^{1/3}$ и $P_\nu F_\nu \sim \nu^{2/3}$.

Для случая, когда аккреционный диск облучается рентгеновским излучением горячей короны, радиальное распределение температуры имеет вид: $T_e \sim R^{-1/2}$. В этом случае имеем: $P_l \sim \lambda^{1/2}$, $F_\nu \sim \nu^{-1}$ и $P_\nu F_\nu \sim \nu^{2/3}$.

В общем случае вычисление степени поляризации и позиционного угла по формулам (2.3) требует численных расчетов (Силантьев и др., 2009). Однако в ряде случаев можно получить простые аналитические формулы, полезные для сравнения с данными спектрополяриметрических наблюдений. Рассмотрим два важных случая топологии глобального магнитного поля в аккреционном диске.

Так, если преобладает вертикальная компонента магнитного поля, т.е. $B_z \gg B_\perp$ то степень поляризации и позиционный угол равны:

$$P_l(\mathbf{B}, \mu) = \frac{P_l(0, \mu)}{\sqrt{1+a^2}}, \quad \text{tg} 2\chi = a \quad (2.8)$$

В случае преобладания горизонтальной компоненты магнитного поля, т.е. когда $B_\perp \gg B_z$, имеем:

$$P_l(\mathbf{B}, \mu) = \frac{P_l(0, \mu)}{\sqrt{1+b^2}}, \quad \chi = 0 \quad (2.9)$$

В замагниченном аккреционном диске может возникать сильная турбулентность. В

этом случае асимптотические выражения для степени поляризационного угла имеют вид:

$$P_l(\mathbf{B}, \mathbf{n}) = \frac{P_l(0, \mu)}{\sqrt{(1+c)^2 + \delta^2 \cos^2 \theta}}, \quad \operatorname{tg} 2 \chi = \frac{U}{Q} = \frac{\delta \cos \theta}{1+c} \quad (2.10)$$

Параметр C возникает в турбулентной среде (Силантьев, 2005) и характеризует новый эффект – дополнительное уменьшение параметров Стокса Q и U из-за некогерентного фарадеевского вращения на мелкомасштабных турбулентных вихрях. Выражения для параметра C имеет вид (Силантьев, 2005):

$$C = 0.21 \tau_1 \lambda^4 [\text{mkm}] \langle B'^2 [\text{G}] \rangle. \quad (2.11)$$

Здесь τ_1 - характерная оптическая толщина турбулентного вихря, B' - амплитуда турбулентного магнитного поля. Интересно, что в данном случае параметр деполяризации $\sim \lambda^4$, что приводит к асимптотической зависимости степени поляризации от длины волны $P_l \sim \lambda^{-2}$, если амплитуда турбулентного поля не зависит от расстояния в аккреционном диске.

Значение $\chi = 0$ соответствует ситуации, когда плоскость поляризации совпадает с плоскостью аккреционного диска. Формулы (2.8) и (2.9) удобны для проведения сравнения с данными наблюдений.

Напомним, что величина $P_l(0, \mu)$ хорошо известна из теории переноса поляризованного излучения в плоскопараллельной атмосфере (Соболев, 1949; Чандрасекар, 1950). Для плоскопараллельной атмосферы, видимой с ребра, $i = 90^\circ$, максимальное значение степени поляризации при многократном электронном рассеянии равно 11.7%.

Приведенные выше формулы позволяют теперь определить величину и топологию магнитного поля для объектов, данные наблюдений которых получены в нашей программе.

2.4 Основные результаты наблюдений: определение физических параметров аккреционного диска вокруг сверхмассивных черных дыр AGN

Перейдем к анализу спектрополяриметрических наблюдений конкретных объектов нашей программы и литературных данных некоторых известных AGN.

Результаты данного анализа представлены в табл. 2.3 и 2.4. В этих таблицах в соответствующих колонках представлены: название объекта, значение степенного показателя p радиальной зависимости температуры аккреционного диска, степенной

показатель s радиальной зависимости величины магнитного поля в аккреционном диске, величина магнитного поля $B(R_\lambda)$ в области длины волны наблюдаемого излучения, величины магнитного поля на горизонте событий B_H и отношения плотностей магнитной и кинетической энергии на горизонте событий k

Таблица 2.3. Оценки магнитных полей для наблюдаемых объектов программы

Объект	p	s	$B(R_\lambda)[Гс]$	$B_H[Гс]$	k
PG 0007+106	1/2	1	2.43	1.48×10^3	10^{-2}
PG 0026+129	3/4	5/4	1	270	10^{-5}
PG 0049+171	3/4	5/4	13	720	3.5×10^{-4}
PG 0157+001	3/4	5/4	98	5.9×10^3	0.08
PG 0804+761	3/4	3/2	3.4	400	10^{-3}
PG 0844+349	3/4	1	37	2.8×10^3	2×10^{-3}
PG 0953+414	3/4	1	300	3×10^4	0.5
PG 1116+215	3/4	3/4	100	2.2×10^3	2.5×10^{-3}
PG 2112+059	3/4	2	14.4	7.8×10^3	0.1
PG 2130+099	1/2	1	27	7×10^4	1
PG 2209+184	1/2	3/4	16	1.6×10^3	4×10^{-2}
PG 2214+139	1/2	5/4	2.8	1.8×10^4	1
PG 2233+134	3/4	3/2	0.37	1.3×10^3	1.4×10^{-4}
3C 390.3	3/4	1	6.4	64	4×10^{-4}

Таблица 2.4. Оценки магнитных полей для некоторых объектов по литературным данным

Объект	p	s	$B(R_\lambda)[Гс]$	$B_H[Гс]$	k
I Zw 1	1/2	1	11	4×10^3	4×10^{-4}
Mrk 509	1/2	3/4	4.8	2.8×10^4	1.0
Mrk 841	1/2	1	3.0	1.7×10^3	2×10^{-2}
NGC 3227	3/4	1	15.7	10^3	3×10^{-3}
NGC 3783	3/4	1.5	41	5.2×10^4	1.0
NGC 5548	3/4	1	7.6	650	10^{-3}
NGC 7469	3/4	1	100	10^3	10^{-2}

Определение величины магнитного поля в активных галактических ядрах возможно, в принципе, на основе следующих данных : (1) величины угла наклона

аккреционного диска к лучу зрения; (2) величины степени поляризации и позиционного угла излучения, выходящего из оптически толстой атмосферы вследствие электронного рассеяния (теория Соболева и Чандрасекара); (3,4) наблюдаемых зависимости степени поляризации и позиционного угла от длины волны излучения; (5) теоретических оценок величины ε коэффициента радиационной активности процесса аккреции, определенных в работе Шапиро (2007) и в работах других авторов (см. монографию Новикова, Торна, 1973), который зависит от скорости вращения черной дыры. Детальная методика расчета величины магнитного поля AGN изложена в работе Силантьева и др. (2009).

Что касается величины магнитного поля на последней устойчивой орбите и вблизи горизонта событий, то ее можно оценить в рамках модели магнитной связи (Ма и др., 2007) для которой значение магнитного поля вблизи горизонта событий может быть найдено из соотношения:

$$B_H = \frac{\sqrt{2kMc}}{R_H} = 6.2 \times 10^8 \left(\frac{M_\odot}{M_{BH}}\right)^{1/2} \left(\frac{L_{bol}}{\varepsilon L_{Edd}}\right)^{1/2} \frac{\sqrt{k}}{1+\sqrt{1-a_*^2}} \quad (2.12)$$

Эта величина зависит от отношения параметров, характеризующих отношение плотностей магнитной и кинетической энергии вблизи горизонта событий и радиационную эффективность процесса аккреции, зависящую от скорости вращения черной дыры, т.е. отношения k/ε . Для величины $\varepsilon = 0.32$, соответствующей $a_* = 0.998$ (Новиков, Торн, 1973; Шапиров, 2007) величина k принимает максимальное, наиболее близкое к равенству плотностей магнитной и кинетической энергии, значение. Именно такое значение наилучшим образом соответствует модели магнитной связи.

Для определения величины магнитного поля в области генерации излучения по степени его фарадеевской деполаризации необходимо знать величину наклона аккреционного диска к лучу зрения. К сожалению, в настоящее время отсутствуют сколько нибудь надежные методы определения этой величины. Для большей части AGN, представленных в таблицах 2.1 и 2.2 мы использовали имеющиеся литературные данные (Браун и др., 1997; Крамми и др., 2005; Хо и др.,). Например, согласно этим данным, для наблюдавшихся на БТА квазаров PG0157+001 и PG0844+349 величины углов наклона составляют 73° и 59° с ошибкой меньше 10° . В некоторых случаях мы использовали значение угла наклона равным 60° . В этом случае без учета деполаризации, степень поляризации должна составлять величину около 1-2 %, что составляет среднее значение для нашей выборки. Для изучавшихся объектов предполагалось также, что направление глобального магнитного поля составляет угол 60° к поверхности диска. Многие

численные расчеты (Лютиков, 2009; Садовский, Сикора, 2010; Као, 010) показывают, что именно такое направление глобального магнитного поля реализуется на больших расстояниях от горизонта событий в случае метрики Керра.

Определенные в соответствии с изложенными соображениями параметры аккреционного диска представлены в таблицах 2.3 и 2.4, а сравнение полученных значений магнитных полей с наблюдаемыми параметрами поляризации и величинами масс черных дыр показано на рис.2.3.

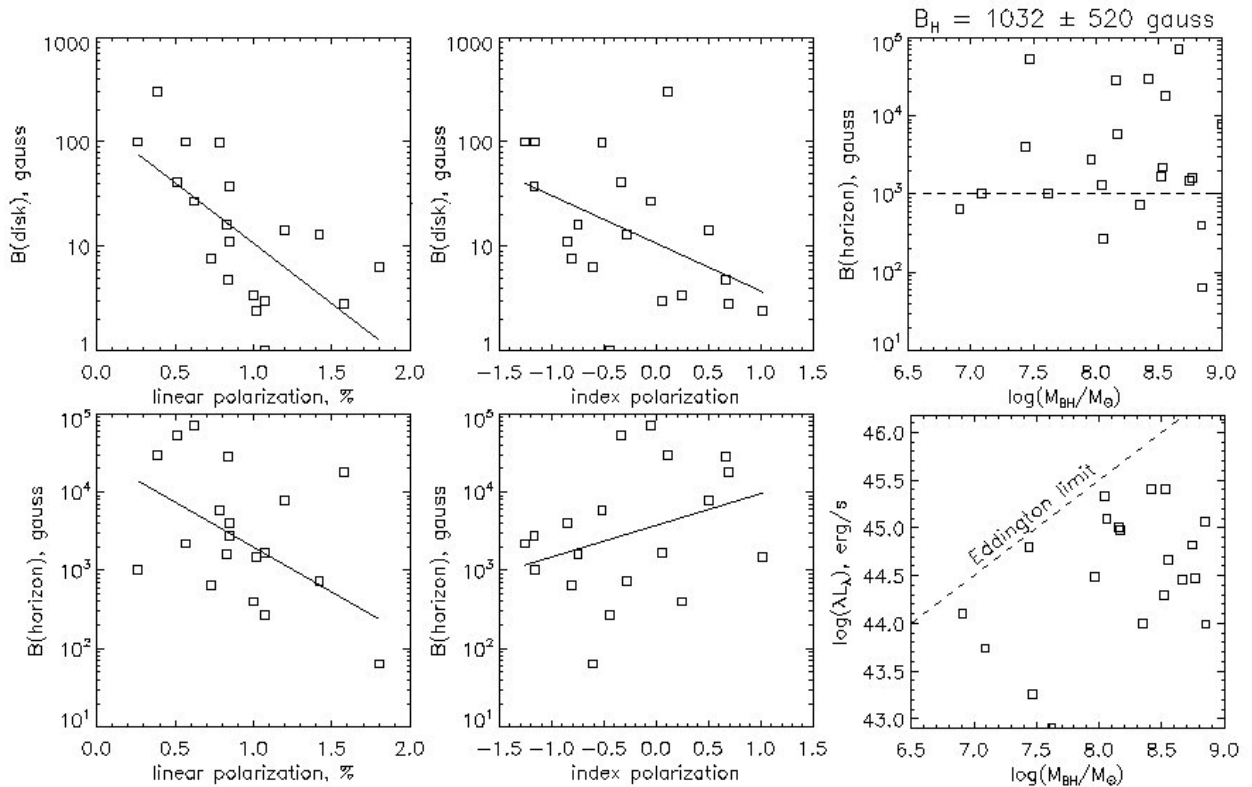


Рис.2.3. Сравнение определенных величин магнитных полей в аккреционных дисках $B(\text{disk})$ и близи горизонта событий $B(\text{horizon})$ наблюдаемыми параметрами поляризации и массами черных дыр.

Как видно из рисунка, величина поляризации в диске коррелирует с величиной поляризации и величиной индекса степенной зависимости ее от длины волны, что вполне ожидаемо в приведенном исследовании, среднее значение магнитного поля вблизи горизонта событий составляет величину порядка тысячи гаусс, что вполне приемливо с точки зрения теории магнитной связи.

Отдельного обсуждения заслуживают зависимости, показанные на рис.2.2. Слабая зависимость степени поляризации от массы центральной сверхмассивной черной дыры

обусловлена такой же слабой зависимостью параметров деполяризации в случае $s = 1, 5/4$.
 Например, в случае $s = 1$

$$a \sim b \sim \left(\frac{M_{\odot}}{M_{\text{BH}}} \right)^{1/3} L_{\text{bol}}^{1/6} \lambda^{1/3}. \quad (2.13)$$

Несколько другая ситуация имеет место для степенного показателя n зависимости степени поляризации от длины волны. Поскольку зависимость степени поляризации от длины волны возникает только в случае заметной фарадеевской деполяризации, то это требует, чтобы параметры деполяризации a и b были, по крайней мере, порядка единицы, т.е. $a \geq 1$ и $b \geq 1$. Длина волны, входящая в соотношение (2.4) и выраженная в мкм, всегда меньше единицы в наблюдаемом диапазоне длин волн. Отсюда возникает ситуация, когда при отрицательных значениях $n < 0$ условие $a > 1$ достигается и при меньших значениях масс черных дыр. Случай же $n > 0$ требует больших значений длин волн, что может реализоваться и при больших массах черных дыр.

При $n > 0$ степень поляризации растет с длиной волны, приближаясь к чандрасекаровскому пределу, который быстрее достигается при больших значениях масс черных дыр. Такой результат получается при условии, что величина магнитного поля B_{H} уменьшается с ростом массы черной дыры. Любопытно, что именно такая зависимость величины магнитного поля от массы черной дыры реализуется в модели магнитной связи.

3. Оценка физических параметров газовой-пылевой комплексов по результатам спектрополяриметрических наблюдений.

В результате спектрополяриметрических наблюдений газовой-пылевой туманности AFGL2688, выполненных на БТА с применением приборов SCORPIO и PFES, мы пришли к следующим выводам:

Степень линейной поляризации лепестков туманности высокая (50%, см. рис.3.1), поэтому модели, призванные объяснить форму лепестков процессами многократного рассеяния на пылинках, - отвергаются.

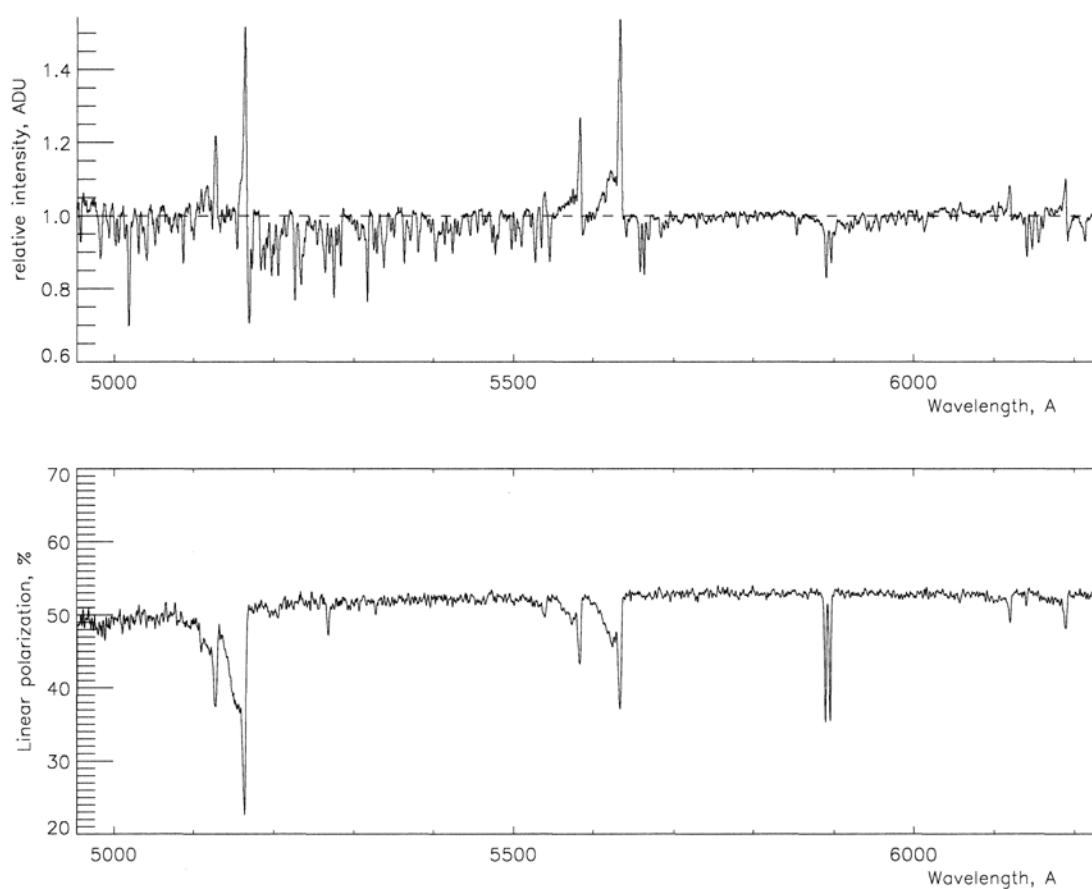


Рис.3.1. Фрагмент спектрограммы участка изображения объекта AFGL2688, полученной на SCORPIO в спектрополяриметрической моде. Вверху – спектр в остаточных интенсивностях, внизу – распределение степени поляризации с длиной волны. Видны три системы молекулярных полос, что позволило определить степень возбуждения уровней фотосферным излучением.

Эмиссию в полосах системы Свана объясняем механизмом резонансной флуоресценции. Учитывая вклад неполяризованной эмиссионной компоненты, получили, что под эмиссионными полосами в поляризованном излучении наблюдаем уровень непрерывного спектра фотосферы. Центральный объект (звезда класса F) подсвечивает лепестки, причем на пути излучения от звезды к лепесткам нет существенного покраснения. Этот факт позволяет отклонить гипотезу пылевого кокона с отверстиями, через которые подсвечивается туманность (гипотеза была призвана объяснить систему лучей, наблюдаемых на КТХ).

Конус подсветки газовой составляющей лепестков, (определяемый из сравнения прямых изображений, центрированных на полосу системы Свана и на соседний участок континуума), - намного шире, чем конус лепестка, рассеивающего фотосферное излучение (рис.3.2). Это означает, что газ и пыль в околозвездной оболочке распределены различным образом и, скорее всего, не имеют единого механизма происхождения. По разности телесных углов подсветки газовой и пылевой составляющей мы получили новые ограничения на геометрию пылевого тора, закрывающего звезду от наблюдателя.

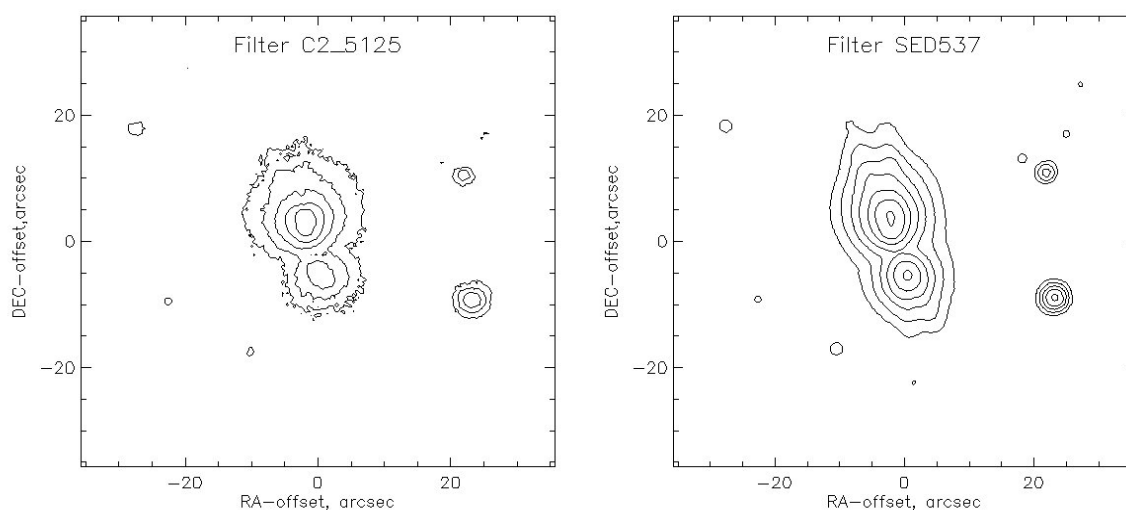


Рис.3.2. Изофоты изображения AFG2688, полученного в полосе, центрированной на полосу системы Свана $\lambda=5125 \text{ \AA}$ (слева) и изофоты изображения, полученного в полосе, $\lambda=5372 \text{ \AA}$ (континуум в спектре центральной звезды).

Разделение поляризованной и неполяризованной компонент в дублете натрия (рис.3.3.) позволило выявить асимметрию фотосферных линий и оценить скорость движения вещества непосредственно вблизи звезды. В результате спектроскопии с

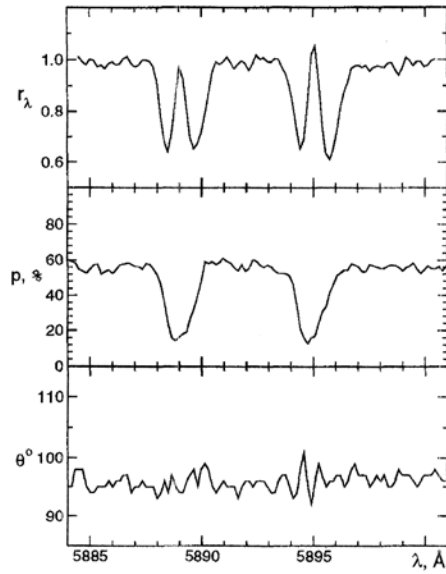


Рис.3.3. Участок спектра в районе резонансного дублета натрия.

Вверху – спектр в остаточных интенсивностях, посредине – степень поляризации, внизу – угол поляризации.

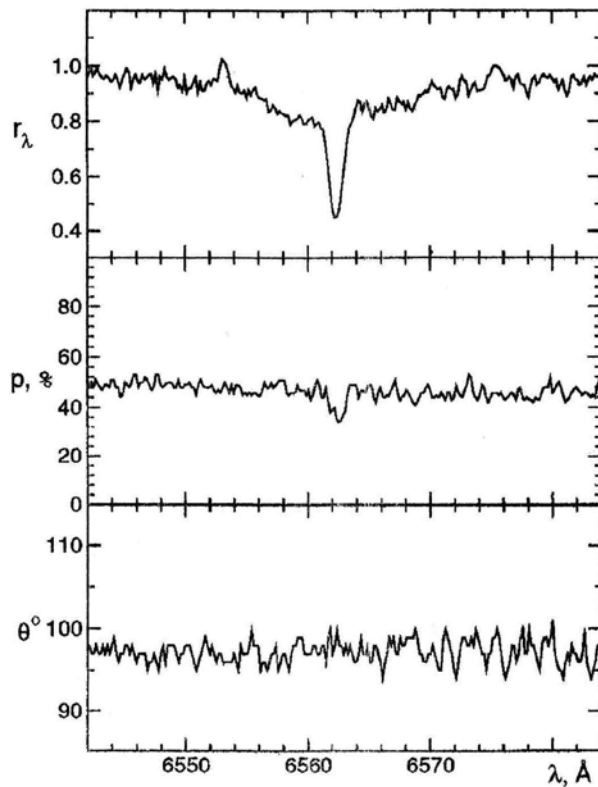


Рис.3.4. Участок спектра в районе линии Na. Вверху – спектр

в остаточных интенсивностях, посредине – степень поляризации, внизу – угол поляризации.

высоким разрешением ($R=60000$) влияние межзвездной компоненты на профиль абсорбции при этом было исключено.

Обнаружено понижение степени поляризации и в абсорбционном ядре линии $\text{H}\alpha$ (от 48% в соседнем континууме, до 31% в ядре линии (рис.3.4). Угол плоскости поляризации в пределах профиля линии не изменяется.

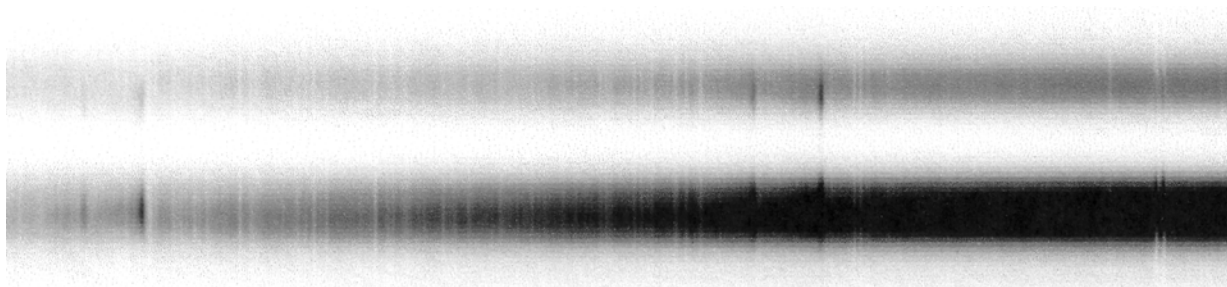


Рис.3.5. Фрагмент изображения спектра, полученного с длинной щелью, пересекающей южный (вверху) и северный (внизу) лепестки AFGL2688.

В целом, отвлекаясь от деталей, спектрополяриметрические наблюдения AFGL2688 позволяют классифицировать объект как объект с эмиссионными деталями и континуумом, имеющими разную степень поляризации. Такой эффект может возникать либо в случаях, когда прямое излучение звезды экранируется (полностью или частично), и мы наблюдаем заметный вклад поляризованного излучения в комбинации с неполяризованной эмиссией оболочки, либо когда экранируются и звезда, и эмиссионная область, но вследствие дилуции излучения степень поляризации соответствующих компонент спектра различается.

Сектрополяриметрические наблюдения позволили однозначно интерпретировать выполненные нами классические наблюдения с высоким спектральным разрешением (рис.3.6). В частности, по ширине эмиссионных линий удалось определить кинематику и геометрию лепестков.

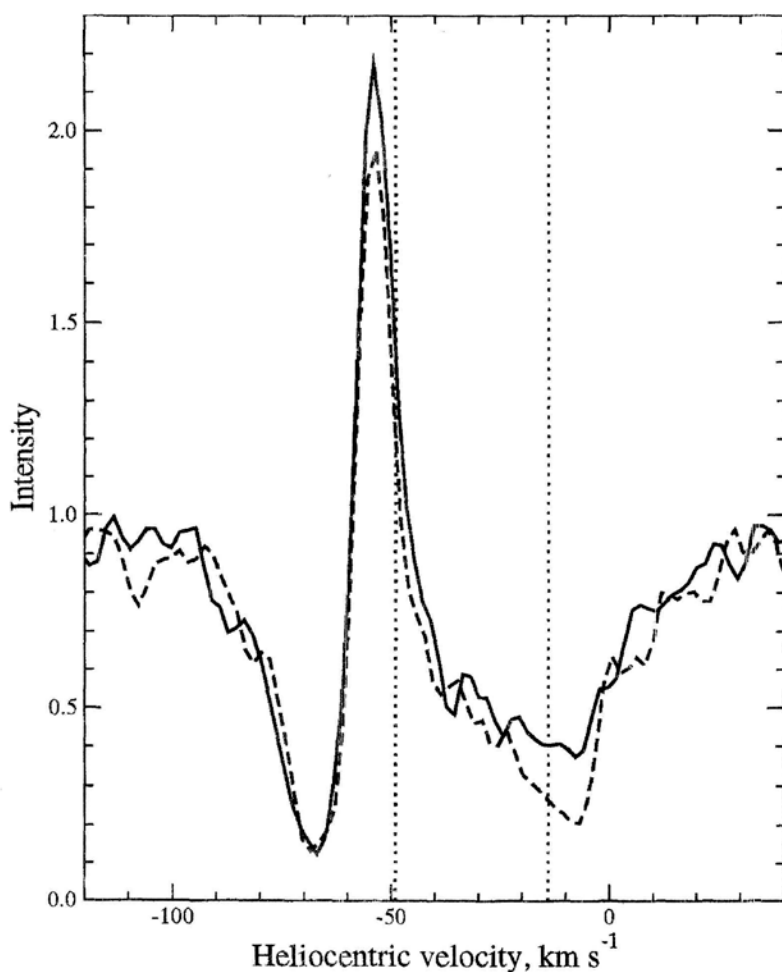


Рис.3.6. Фрагмент спектра центральной части северного лепестка туманности в области резонансного дублета натрия, (спектральное разрешение $R=60000$).

Вертикальными линиями обозначены системная лучевая скорость (-49.2 км/с) и лучевая скорость (-15 км/с), измеренная по линиям фотосферного спектра.

На рис.3.7. представлена феноменологическая модель AFGL2688, построенная по результатам спектрополяриметрических и спектроскопических наблюдений на БТА.

На примере исследования газово-пылевой туманности AFGL2688 мы показали, что сочетание спектрополяриметрических наблюдений, проводимых с умеренным спектральным разрешением, - с методом спектроскопии высокого разрешения - открывает принципиально новые возможности изучения околозвездных оболочек. Остановимся на результатах применения методов высокого спектрального разрешения в исследованиях газово-пылевых оболочек холодных звезд, демонстрирующих изменения линейной поляризации в широких фотометрических полосах. Такие изменения обнаружены, в

частности, у долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита. Известны также спектрополяриметрические измерения мирид, выполненные со средним спектральным

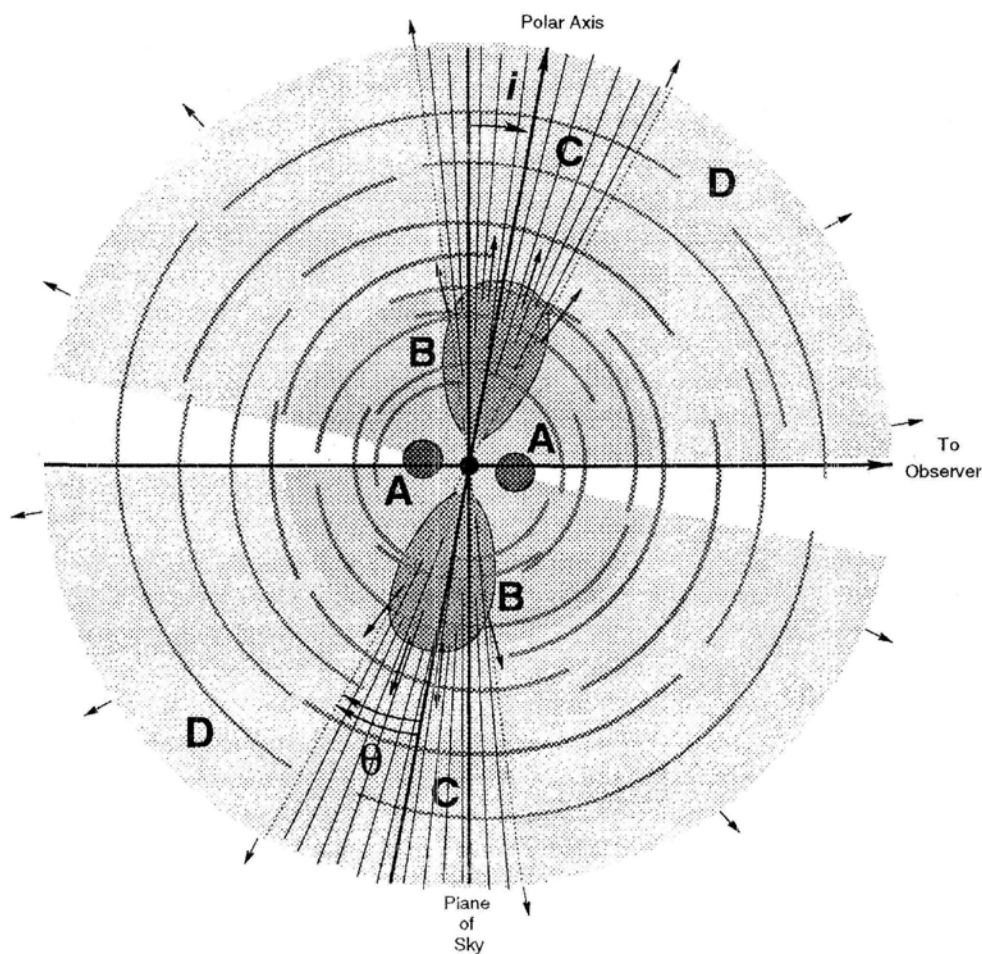


Рис.3.7. Схема предлагаемой модели объекта AFGL2688. Обозначения: A - пылевой тор, закрывающий центральную звезду от наблюдателя, B - расширяющиеся лепестки, наблюдаемые в оптике, C - лучистая структура, D - медленно расширяющаяся оболочка, потерянная на стадии AGB (дуги не концентрические), i - угол наклона главной оси лепестков туманности к картинной плоскости, θ - половинный угол раствора пылевых лепестков.

разрешением (Ландстрит и Энжел, 1977). Ключевым моментом нашей работы по этому этапу является как расширение наблюдательных возможностей кварцевого эшелле спектрографа НЭС, стационарно установленного на 6-метровом телескопе БТА, так и комплексный аналитический подход, позволяющий, с использованием уже известных наблюдательных данных, получить принципиально новые выводы о структуре и динамике газово-пылевых оболочек окружающих звезды типа Миры Кита (мирид). Напомним, что

мириды находятся на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB), предшествующей стадии post-AGB, на которой, как мы показали, находится объект AFGL2688.

На рис.3.8 и 3.9 приведены изображения эшелле спектров мириды R Cam, полученных в апреле и августе 2012г, соответственно. На рис.3.10 моменты получения указанных спектров отмечены на кривой изменения блеска R Cam, построенной за последний год.

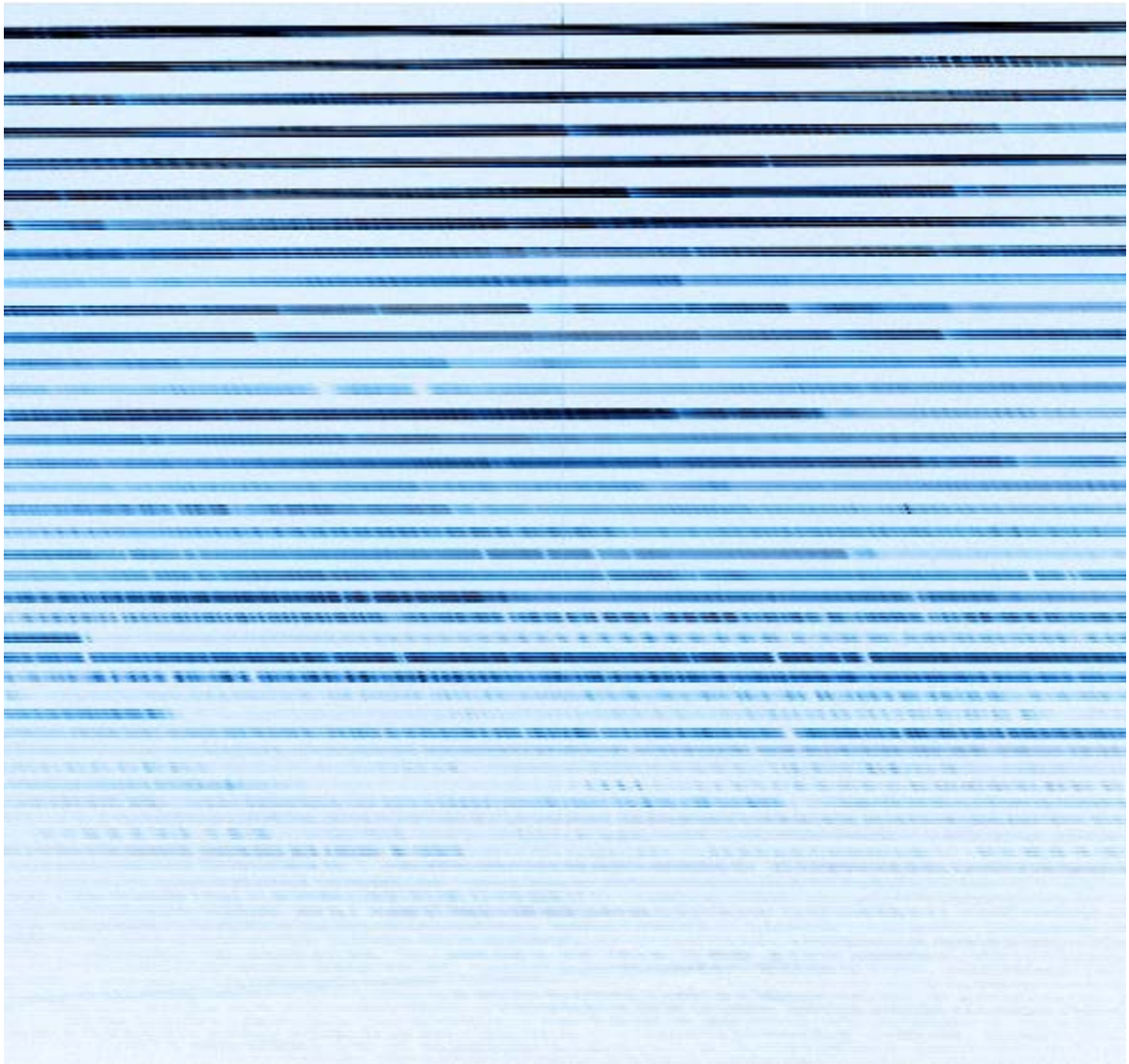


Рис.3.8. Спектр мириды R Cam, полученный на НЭС БТА 13.04.2012, в минимуме блеска. Видны канты полос окиси титана. Резонансный дублет натрия - в 13-м порядке сверху, ионосферная линия 5577\AA - в 18-м порядке сверху.

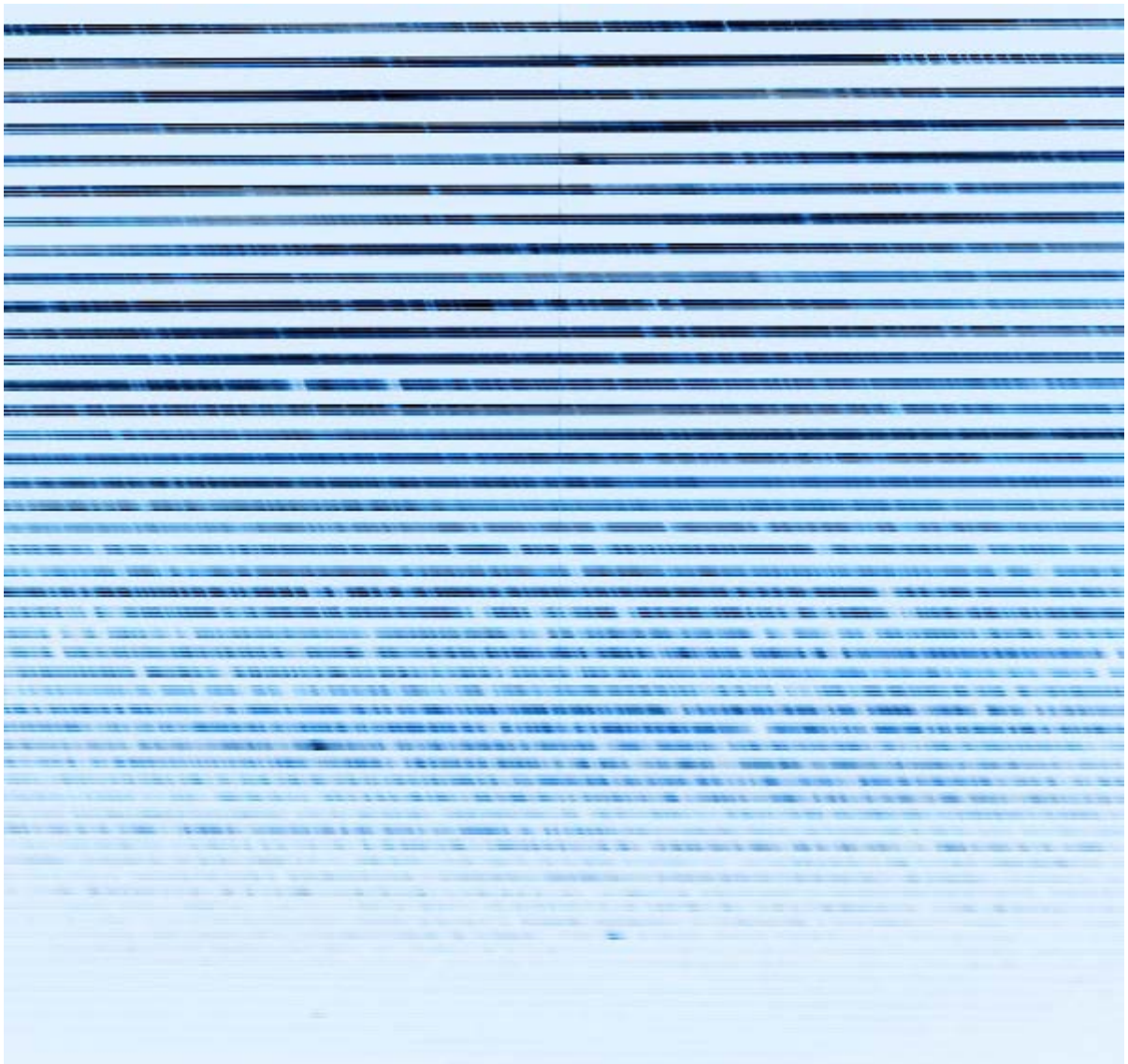


Рис.3.9. Спектр мириды R Sct, полученный на НЭС БГА 02.08.2012, в максимуме блеска. Линия 5577\AA по интенсивности уступает фотосферному спектру, и не видна. В ядрах дублета натрия заметны эмиссионные компоненты. Наблюдаются широкие эмиссионные линии бальмеровской серии водорода.

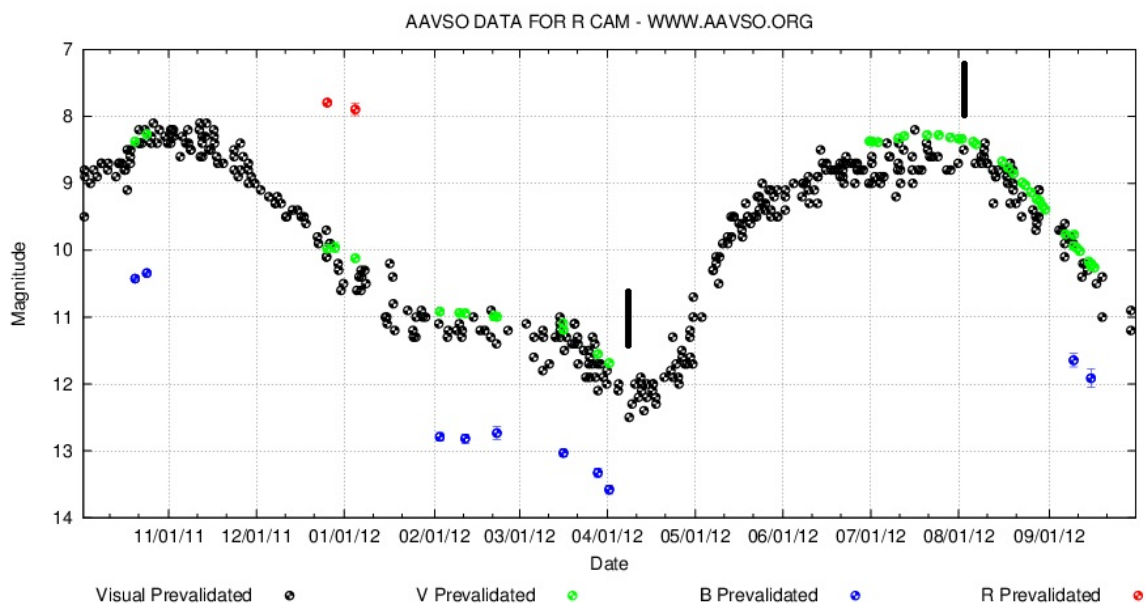


Рис.3.10. Кривая изменения блеска R Cam, построенная по данным сайта AAVSO.

Отмечены моменты получения спектров на БТА.

Мирида R Cam принадлежит к спектральному типу S, промежуточному между классами M (звезды кислородной последовательности) и C (или R и N, звезды углеродной последовательности). Тип спектра (M, S или C) определяется отношением ядер кислорода к азоту, O/C. Дело в том что молекула CO имеет максимальный потенциал диссоциации, и поэтому наиболее эффективно образуется в атмосфере холодной звезды. Оставшиеся атомы (C или O), идут на формирование углеродосодержащих или кислородосодержащих молекул, соответственно. Эти молекулы ("второго приоритета", как имеющие потенциал диссоциации ниже, чем у CO), формируют спектр в видимой области: при $O/C < 1$ - двух- и трех- атомные молекулы углерода, в спектрах C-звезд; и, при $O/C > 1$ - металлических оксидов (TiO, ZrO, VO), в спектрах M-звезд. Если $O/C \sim 1$, то все атомы кислорода и углерода идут на формирование молекул CO, и атмосфера становится "безмолекулярной", в смысле отсутствия молекул, способных изменить вид спектра в оптическом диапазоне.

По данным ОКПЗ, амплитуда изменения блеска R Cam в V-лучах составляет $14.4 - 6.97 = 7.4$ звездной величины, спектральный подкласс изменяется в пределах S2.8e-S8.7e, период изменения блеска составляет в среднем 270.22 суток, период переменный. Из рис.3.10 следует, что за последний год, перекрывающий период изменения блеска, амплитуда изменения блеска в визуальных лучах составила всего $12.5 - 8.1 = 4.4$ звездной величины, причем блеск в минимуме и максимуме не соответствует данным каталога. Известны и другие случаи уменьшения амплитуды блеска до "не миридных" значений.

Ниже изложим нашу, новую интерпретацию спектров мирид. Главным выводом нашей работы является то, что в оптическом диапазоне мы наблюдаем не спектр звездной атмосферы, а, преимущественно, спектр неоднородной газовой-пылевой оболочки. Чтобы показать, насколько этот вывод изменяет наши представления о мирадах, обратимся вначале к предшествующим наблюдениям и моделям.

Кроме физических характеристик, звезды типа Миры Кита выделяются среди других типов переменных звезд еще и тем, что интерпретация их спектров выполнена достаточно давно, причем столь авторитетными астрономами (Меррилл - систематизация спектров, Шайн - интерпретация поведения эмиссионных линий, Горбачкий - теория ударной волны в атмосфере), что достаточно продолжительное время вопрос считался закрытым. На рис.3.11 приведен вид спектра собственно Миры Кита, полученный в максимуме блеска еще фотографическим методом (обратная линейная дисперсия 2.9 Å/мм).

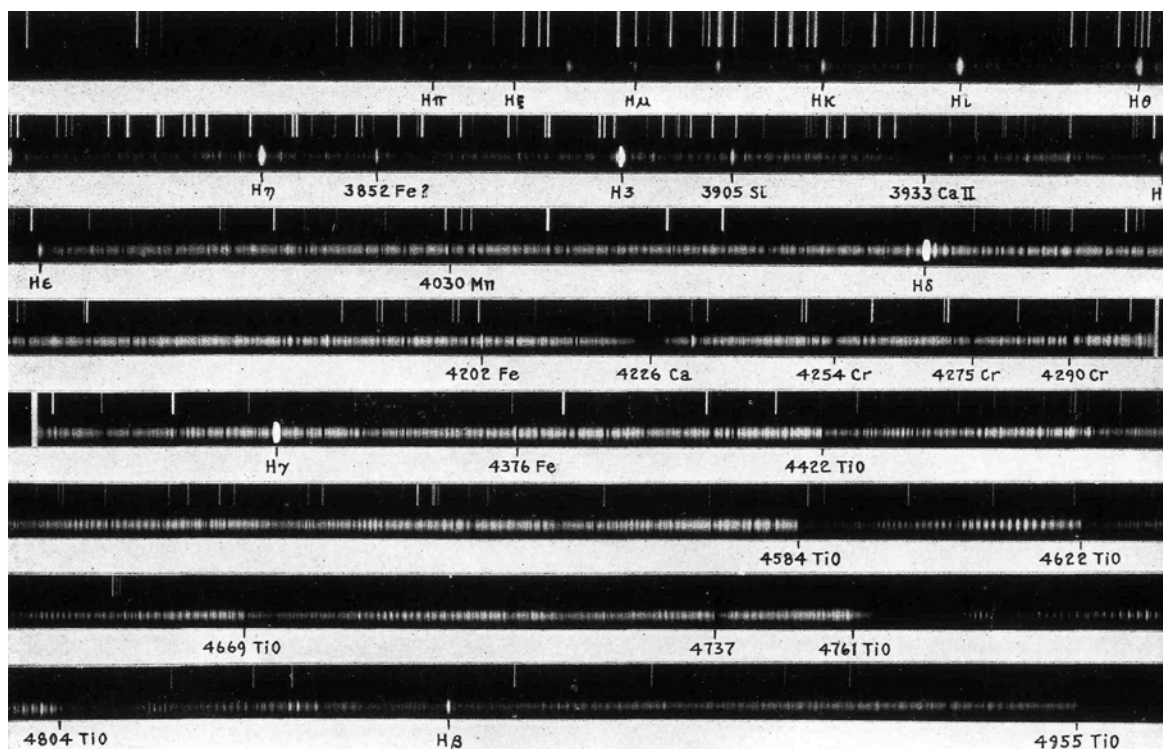


Рис.3.11. Спектр Миры Кита в максимуме блеска. Видны эмиссионные линии бальмеровской серии водорода.

На рис.3.12 и 3.13 приведены изображения спектров мирид различных классов (M, S и C), полученных в максимуме блеска в коротковолновой (рис.3.12) и длинноволновой (рис.3.13) областях спектра.

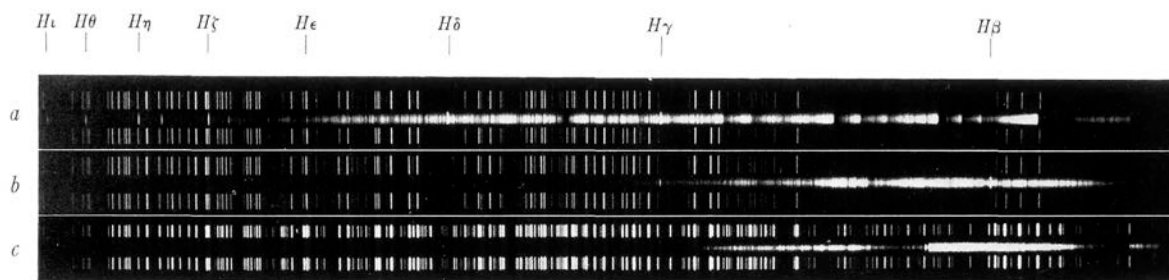


Рис.3.12. Спектры мирид разных типов в сине-зеленой области. Обозначения: *a* – *R Hydrae*, *M7_e*, *b* – *R Geminorum*, *S_e*, *c* – *TT Cygni*, *N3_e*.

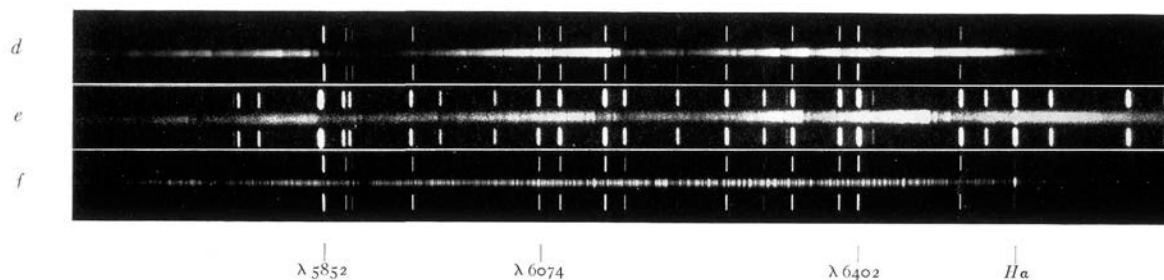


Рис.3.13. Спектры мирид разных типов в красной области. Обозначения: *d* – *R Leonis*, *M8_e*, *e* – *T Geminorum*, *S_e*, *f* – *R Leporis*, *N6_e*.

Видно, что линия $H\alpha$ полностью блендирована в спектрах M_e и слабо – в спектрах S_e и углеродных N_e . Этот эффект объясняется различным расположением кантов полос молекул TiO и C_2 . На рисунке 3.14 приведены спектрограммы мириды *R Leo*, полученные в максимуме и минимуме блеска.

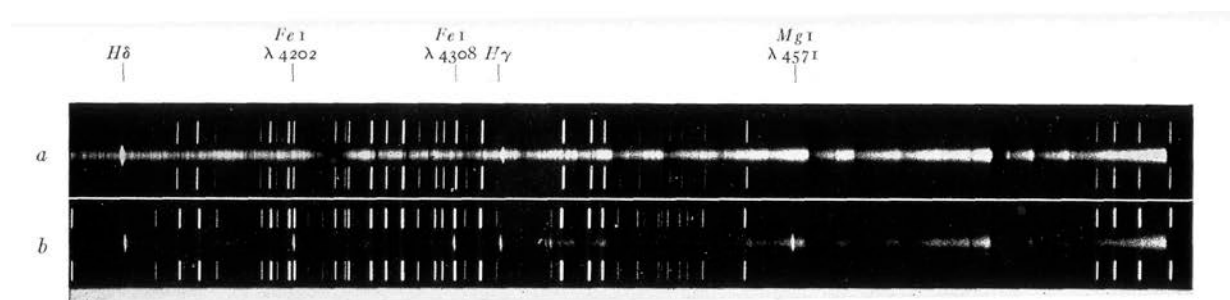


Рис.3.14. Спектрограммы *R Leo*, полученные вблизи максимума и вблизи минимума блеска. Обозначения: *a* – *R Leo*, *max-8d*; *b* – *R Leo*, *max+87d*.

Кроме эмиссионных линий водорода и нейтрального железа, наблюдаются запрещенные линии $[FeII]$, рис.3.15. Их локализация (как и линий водорода и FeI) приписывается области высвечивания за фронтом ударной волны, с чем мы не можем согласиться (см. ниже).

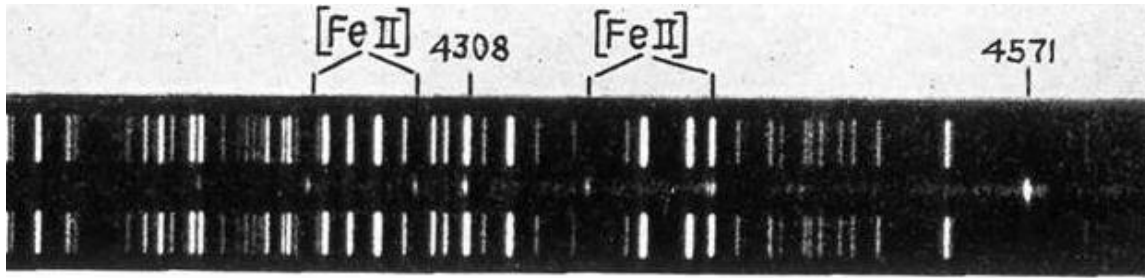


Рис.3.15. Запрещенные линии ионов железа вблизи минимума блеска, R Hydrae; min+9d.

Протяженность атмосфер мирид оценена по данным спекл-интерферометрии в узких полосах (первые наблюдения на 5.08-метровом телескопе выполнены в 1972 году [A.Labeyrie et al, ApJ, 218, L75-L78, 1977]). В фильтре, ориентированном на кант полосы, диаметры о Ceti и R Leo оказались вдвое больше, чем в фильтре, центрированном на относительно прозрачный соседний участок длин волн. По оценке авторов, область формирования полос окиси титана отстоит от фотосферы на несколько астрономических единиц ("точнее", на 400 млн км). Сделаем следующую оценку. Если придерживаться гипотезы ударной волны как причины возникновения эмиссионного спектра (Горбацкий), то для появления эмиссии, неискаженной поглощением вышерасположенных холодных слоев, волне придется пройти указанное расстояние, двигаясь со скоростью не более 20 км/с, (бóльших различий в лучевых скоростях, измеренных по абсорбциям и эмиссиям, мы не наблюдаем). Получили 20 млн.сек., или 231 сутки. По порядку величины имеем совпадение с самыми короткими периодами для мирид.

Представления о сферической симметрии внешних слоев атмосферы начали рассыпаться после спектрополяриметрических наблюдений с умеренным и низким спектральным разрешением (40Å в полосе R и 160Å в полосе B) (Ландстрит и Энжел, 1977). На рис.3.16 показан один из примеров таких наблюдений. Видно, что вблизи кантов молекулярных полос и степень поляризации, и угол поляризации значимо изменяются.

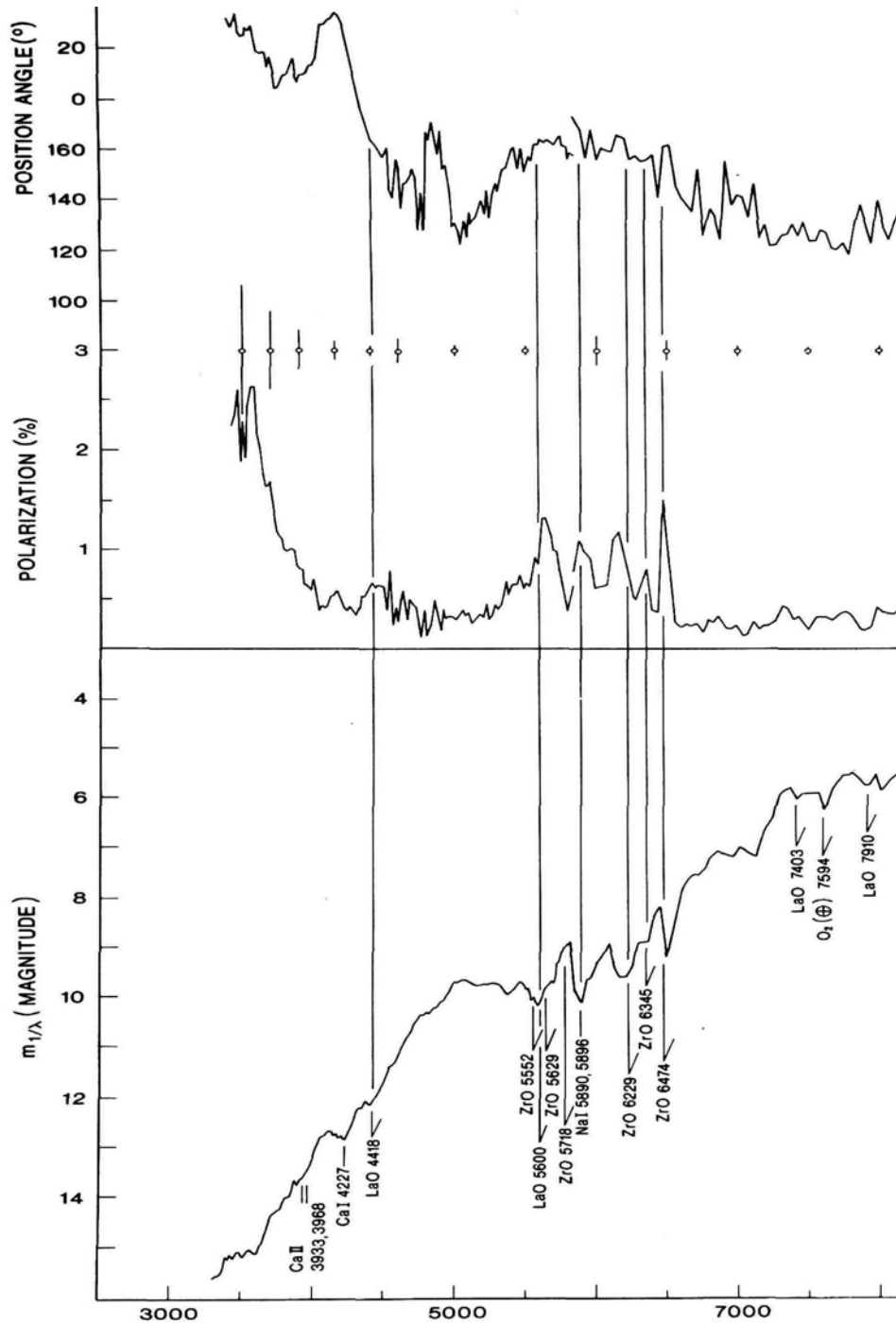


Рис.3.16. Спектрополяриметрия *S*-мириды *R And*.

В коротковолновой области работает релеевское рассеяние на молекулах водорода. Механизм поляризации тот же, что и предложенный Чандрасекаром (1950) [для случая рассеяния на электронах (на лимбе рассеивающей атмосферы поляризация достигает 11%). Харрингтон (1969) показал, что крупномасштабные вариации на 100°K , при температуре 2000°K могут обеспечить асимметрию рассеяния, обнаружимую при поляриметрических наблюдениях. Спектрополяриметрия молекулярных полос является

критическим тестом (т.к. при рассеянии на околозвездных пылинках степень поляризации будет одинакова внутри и вне молекулярной полосы). Эффекты асимметрии могут возникать и вследствие нерадиальных пульсаций (напомним, что до сих пор продолжается полемика, в какой из частот пульсируют мириды, в основной частоте или первом обертоне?). То обстоятельство, что наблюдаемые вариации чаще встречаются в степени поляризации p и реже в угле поляризации θ , может свидетельствовать в пользу наличия у ряда объектов двух, по крайней мере, конкурирующих механизмов различной природы (имеющих две различные главные оси). Понятно, что указанные возможные механизмы формирования асимметрии не могут поддерживать последнюю устойчивой, и следует искать изменения асимметрии во времени. Такие изменения легче обнаружить спектрально, и труднее - спектрополяриметрически. На рис.3.17 приведены изменения эквивалентных ширин эмиссионных линий $H\beta$ и $H\gamma$ в спектре $U Ori$ (наблюдения с обратной линейной дисперсией $86\text{\AA}/\text{мм}$ выполнены в САО).

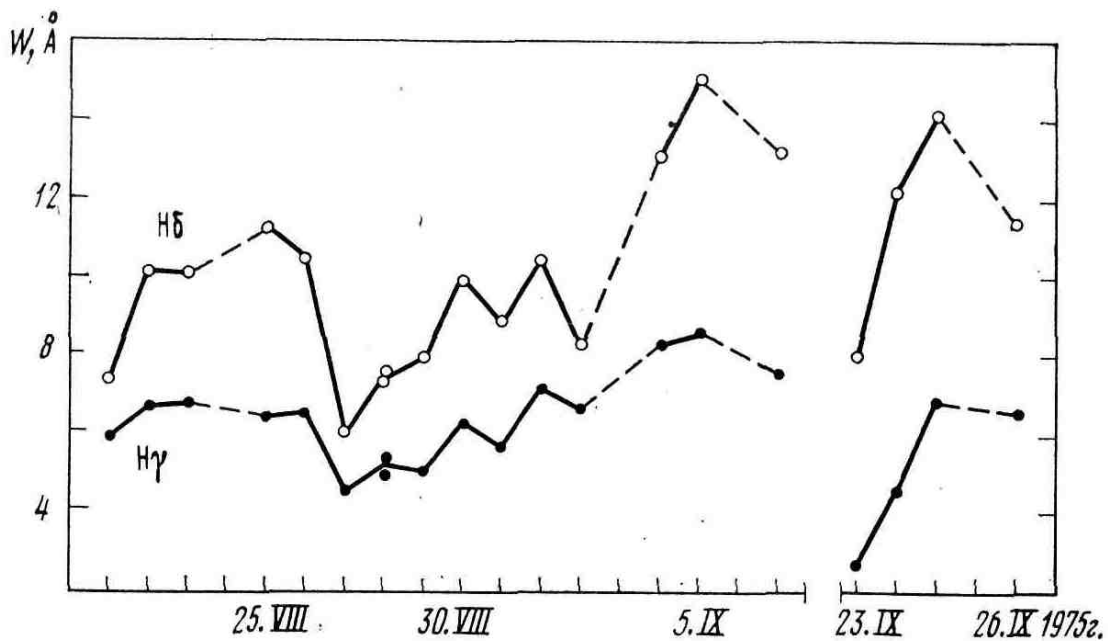


Рис.3.17. Изменения эквивалентных ширин эмиссионных линий $H\beta$ и $H\gamma$ в спектре $U Ori$.

В схеме высвечивания за фронтом сферически симметричной ударной волны такие вариации эмиссий не получить. Сделаем предположение, что интенсивности линий могут изменяться не только за счет изменения меры эмиссии, но и за счет изменения коэффициента молекулярного и атомного поглощения. На рисунках 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 приведены фрагменты порядков эшелле спектров, полученных на НЭС БТА в 2012 году.

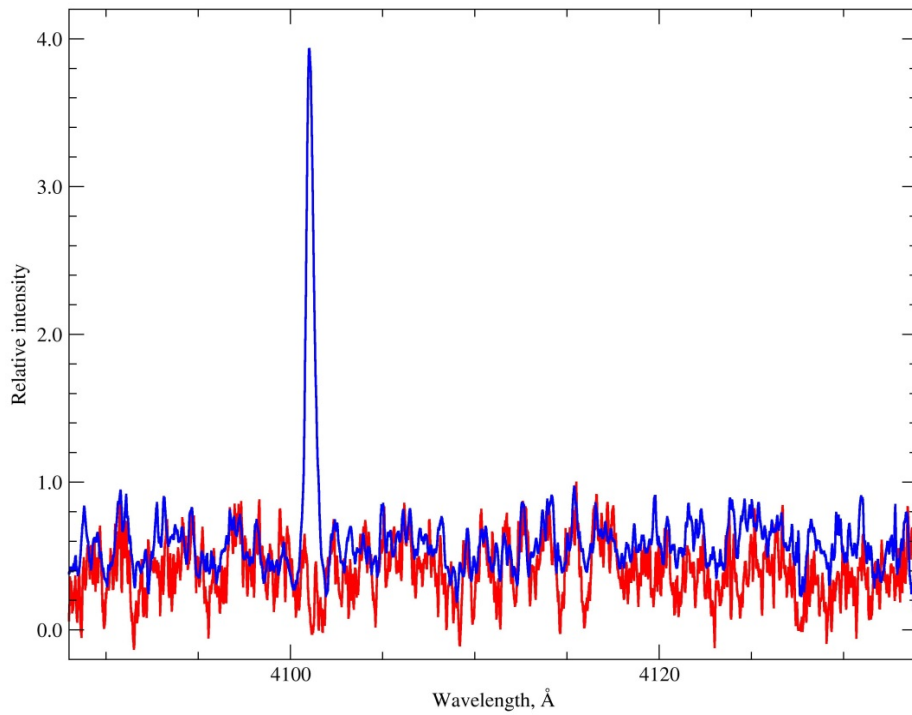


Рис.3.18. Фрагменты спектра R Сат в области линии Нδ. Эмиссионная линия имеет симметричный профиль.

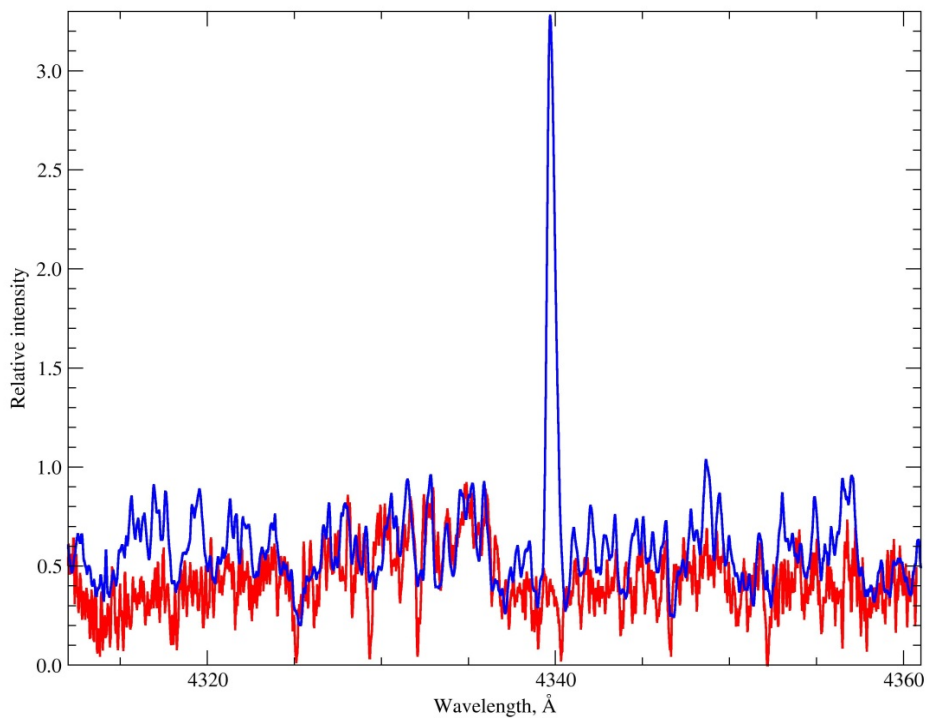


Рис.3.19. Фрагменты спектра R Сат в области линии Нγ. Эмиссионная линия имеет симметричный профиль.

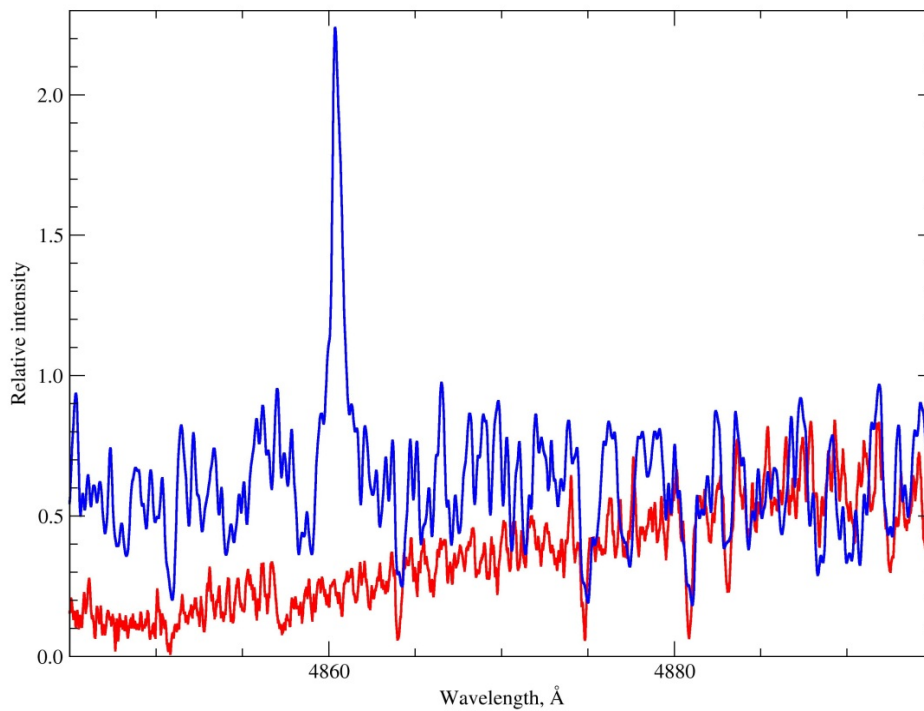


Рис.3.20. Фрагменты спектра R Sct в области линии H β . Профиль эмиссионной линии искажен за счет поглощения на вращательных переходах колебательной полосы окиси титана.

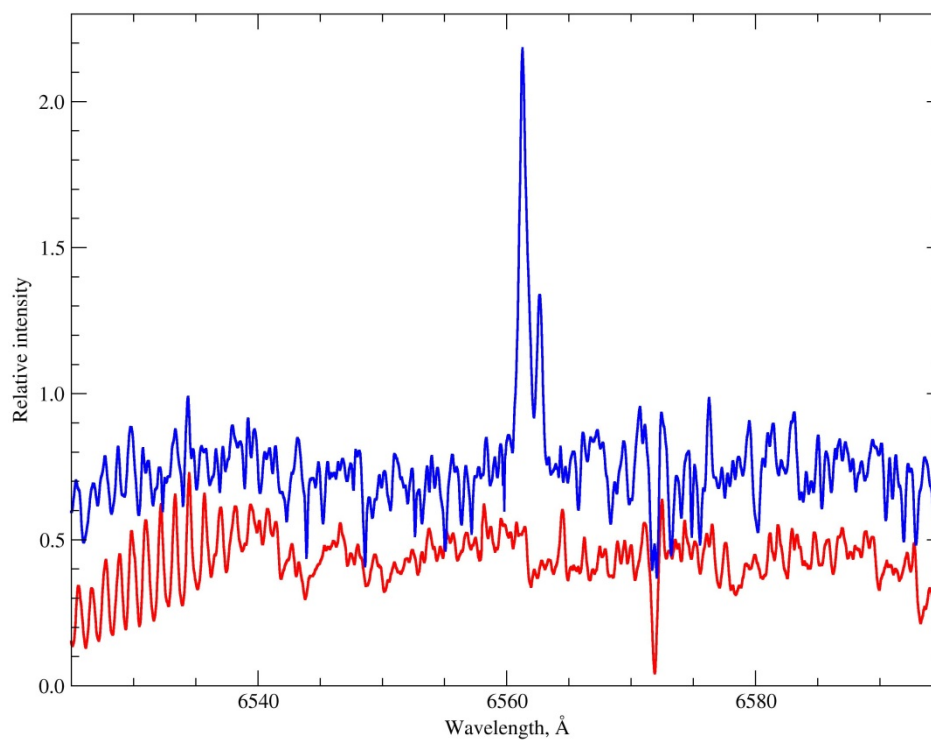


Рис.3.21. Фрагменты спектра R Sct в области линии H α . Правое крыло профиля эмиссионной линии искажено за счет поглощения в канте полосы окиси титана.

На рисунках 3.18-3.21 синим цветом показаны спектры в максимуме блеска R Cam, а красным - в минимуме блеска.

Из рисунков видно, что в максимуме блеска низкие члены бальмеровской серии даже в случае S-мириды искажены молекулярным поглощением, а в минимуме блеска мы вообще не наблюдаем водородной эмиссии. В действительности неискаженные профили линий H α и H β шире, их ширину невозможно объяснить тепловыми движениями. Если предположить доплеровское уширение эмиссий, за счет разнонаправленных движений излучающих областей, тогда необходимо объяснить, почему это уширение не наблюдается у высоких членов бальмеровской серии и у линий FeI.

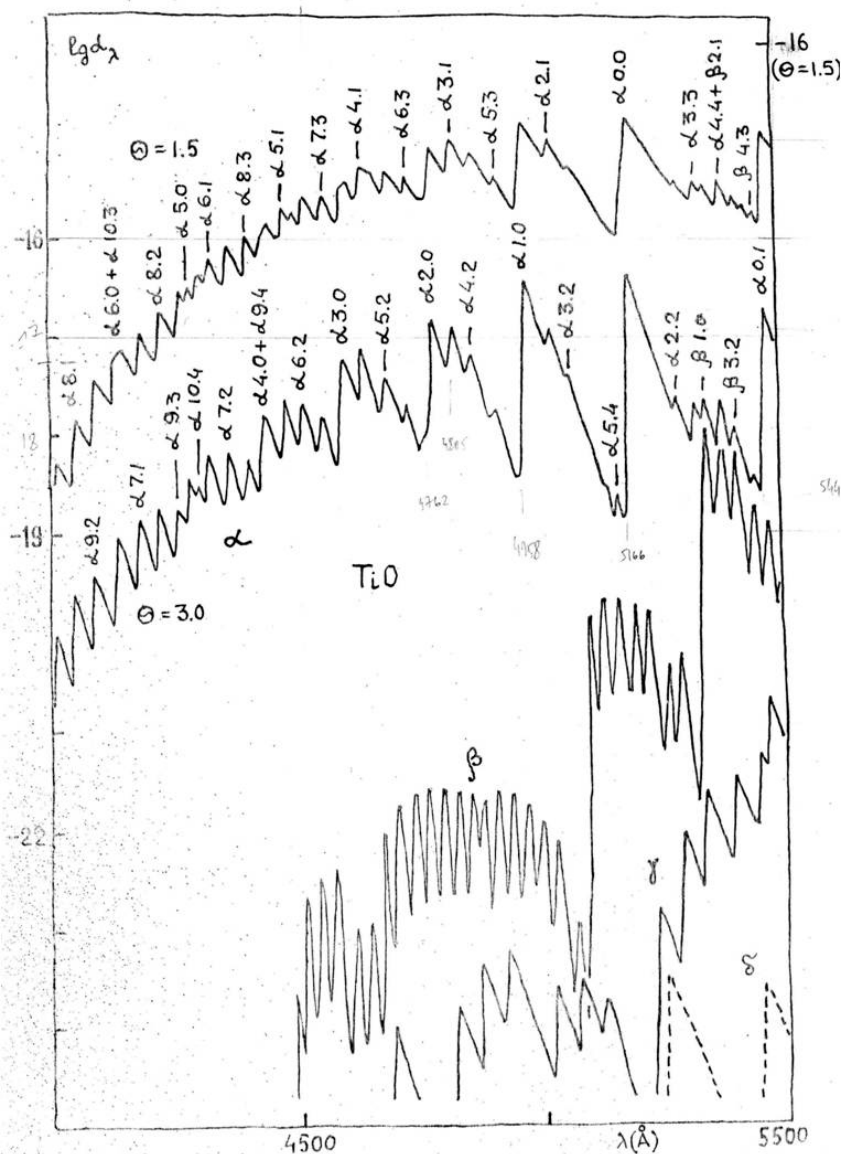


Рис.3.22. Результаты расчетов монохроматического коэффициента поглощения молекулы окиси титана.

Сделаем расчеты коэффициентов молекулярного поглощения. На рис.3.22 приведены монохроматические коэффициенты поглощения, рассчитанные на одну молекулу в приближении гипотезы перекрывающихся линий (это приближение дает верхнюю оценку коэффициента поглощения). Показаны вклады различных электронных систем полос. Приведены значения коэффициентов поглощения на одну молекулу, рассчитанные для двух значений обратной температуры $\theta=5040/T$. Такие расчеты позволяют оценить средние значения коэффициентов поглощения в окрестностях линий бальмеровской серии.

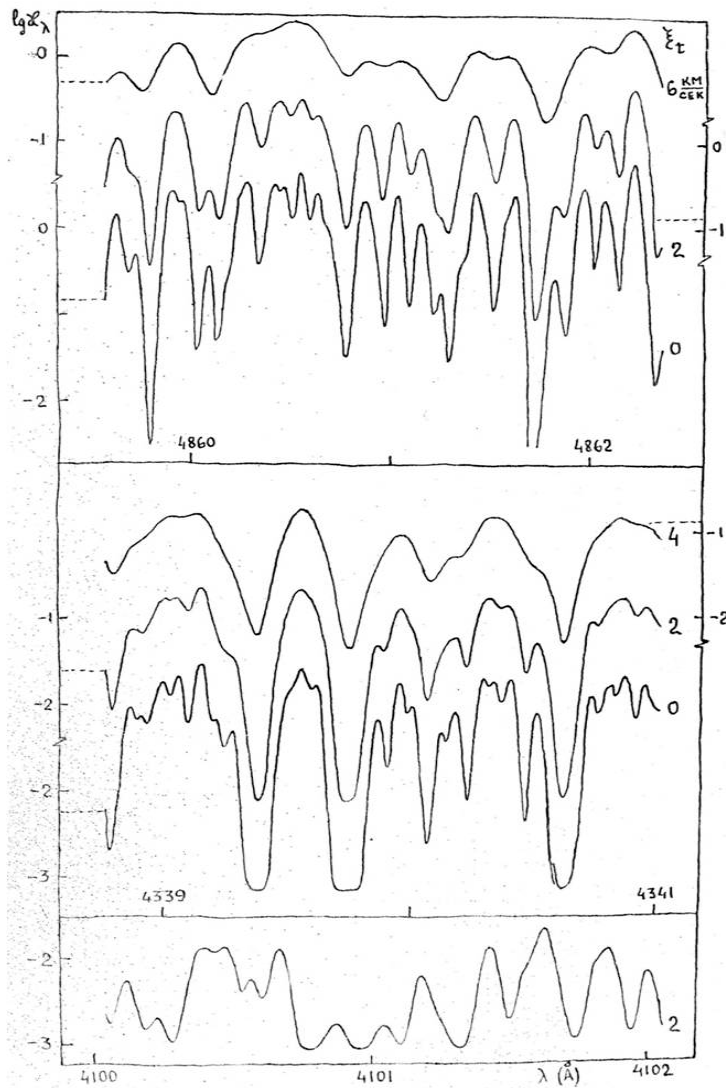


Рис.3.23. Монохроматические коэффициенты поглощения, рассчитанные на 1 грамм вещества, имеющего солнечный химсостав. Справа у кривых указаны значения микротурбулентной скорости ξ_t - 0, 2, 4 и 6 км/сек..

На рис.3.23 приведены значения монохроматических коэффициентов поглощения, рассчитанные в области линий бальмеровской серии водорода. В отличие от гипотезы перекрывающихся линий, расчеты "от линии к линии" (небольшие фрагменты которых представлены на рис.3.23), проведены нами для 1.5млн переходов, в интервале длин волн, покрывающем все 6 известных электронных систем. Видно, что в области линий H δ и H γ коэффициент монохроматического поглощения различается более чем на порядок. Аналогичный вывод можно получить и в рамках упрощенной модели коэффициента поглощения (Рис.3.22.).

Рассмотрим подробнее рис.3.23. Перемещая эмиссионные профили бальмеровских линий вдоль шкалы длин волн, имитируем изменение доплеровского сдвига между излучающей и поглощающей областью. При этом получим изменения интенсивности остаточных профилей эмиссионных линий, причем не синхронизированные между собой, т.к. изменение коэффициентов молекулярного поглощения в окрестностях различных эмиссионных линий различно. На рис.3.24 показаны результаты расчетов влияния поглощения молекулами TiO на соотношение интенсивностей H δ и H γ .

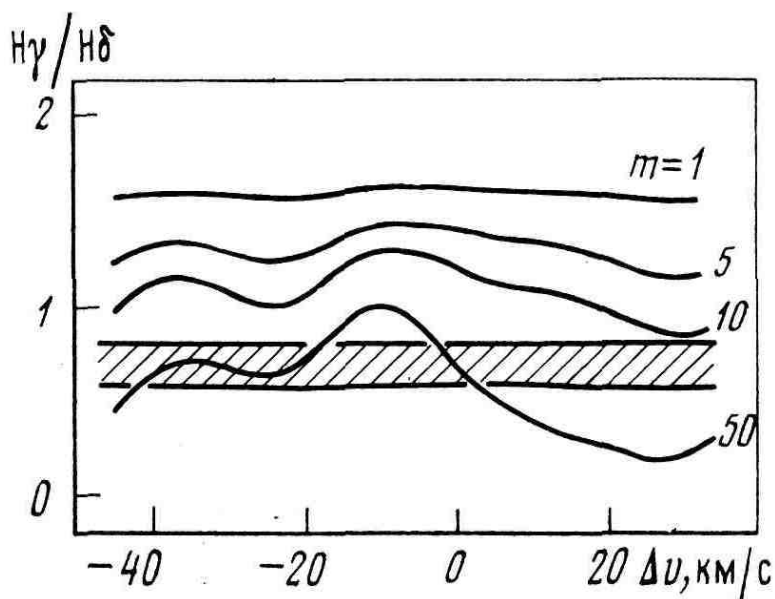


Рис.3.24. Расчеты соотношения интенсивностей водородных эмиссий в функции массы поглощающего слоя, для различных значений доплеровского сдвига поглощающей области относительно эмиссионной. Цифры у кривых - значения массы столба поглощающего вещества с основанием 1см^2 . Затрихованная полоса - наблюдаемое соотношение интенсивностей эмиссий, приведенных на рис.К.

На рис.3.25 приводим сравнение теоретического и наблюдаемого спектров мириды. Теоретическое распределение энергии рассчитано методом "от линии к линии", с учетом всех квантовых эффектов (спин-орбитальное взаимодействие, триплетное расщепление), с последующим вычислением среднего планковского коэффициента поглощения. Расхождения спектров в коротковолновой области связаны с преобладающим влиянием многочисленных атомных линий, которые в данном расчете не учитывались.

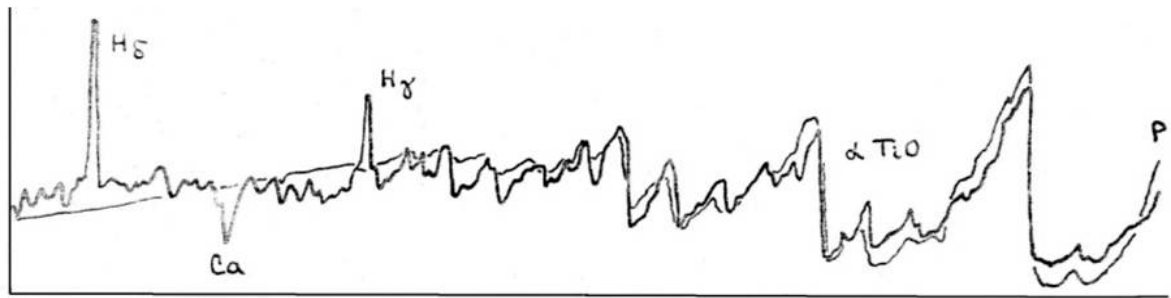


Рис.3.25. Наблюдения - толстая линия с эмиссиями Hδ и Hγ, и теория - тонкая линия, в области электронной α-системы полос TiO.

Средние планковские коэффициенты поглощения в окрестности Hγ и Hδ различаются на порядок. Поэтому, если эмиссия в Hγ видна, то Hδ практически не поглощается. Принимая величину неискаженного декремента $W(H\gamma)/W(H\delta) = 5:3$, получим оценку массы вещества, искажающего интенсивность эмиссии в Hγ. Если для формирования теоретического спектра поглощения в полосах TiO масса составляет около 1 грамма, то для подавления эмиссии требуется намного больше вещества. Следовательно, большинство наблюдаемых полос, изображенных на рис.3.25, являются насыщенными. На рис.3.26 приведен пример спектрограммы мириды, где указаны положения колебательных полос α-системы TiO.

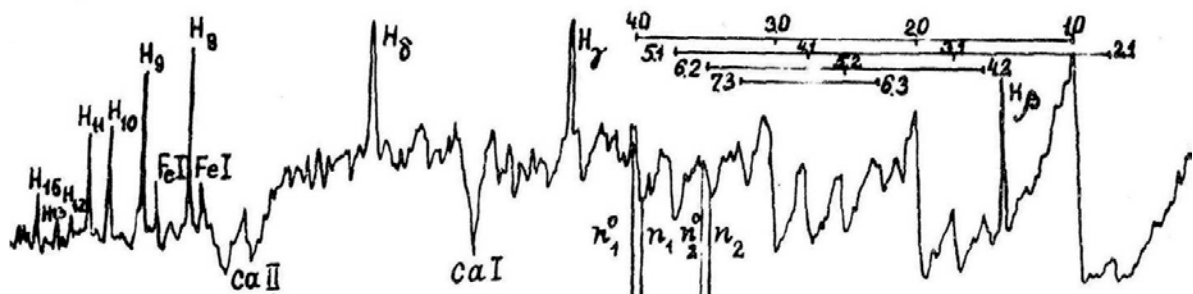


Рис.3.26. Положения кантов колебательных полос в спектре мириды. Справа сверху - колебательные квантовые числа. Вертикальными линиями указаны скачки интенсивности, измеряемые для определения колебательной температуры.

В программе спектрофотометрии мириды и полуправильные M_e - звезды наблюдались вблизи максимума блеска. Температуры у полуправильных M_e - звезд ниже температур мирид, имеющих в максимуме блеска такой же спектральный подкласс. При переходе от M3 к M7 эффективная температура M-звезд уменьшается на 670° , а колебательная температура остается постоянной, $1500 \pm 80^\circ\text{K}$. Итак, по результатам наблюдений получили одинаково низкую колебательную температуру молекул окиси титана.

Суммируя результаты наблюдений и расчетов, проведенных в САО, получили, что:

а) у мирид колебательные температуры низки и не зависят от спектрального подкласса (!),

б) вещества, достаточного для формирования наблюдаемого спектра поглощения, требуется меньше, чем для обеспечения наблюдаемого искажения эмиссионного бальмеровского декремента,

в) встречаются ситуации, когда в минимуме блеска эмиссионные линии не наблюдаются (см. рисунки 3.18, 3.19, 3.20, 3.21), хотя мирида относится к классу S, т.е. атмосфера относительно свободна от сильного молекулярного поглощения. **Это позволяет нам выдвинуть гипотезу, что в оптическом диапазоне мы наблюдаем не спектр атмосферы мириды, а спектр околозвездной оболочки.**

Обратимся к проблеме лучевых скоростей мирид. Известно, что определение лучевых скоростей, проводимое самым экономичным образом, т.е. по эмиссионным линиям в максимуме блеска, дает аномальное движение Солнца относительно подсистемы мирид. Это заставило выдвинуть гипотезу, что скоростями, близкими к скорости центра масс, являются скорости, измеренные в максимуме блеска по абсорбциям. Но по абсорбциям получают скорости, изменяющиеся (для данной фазы блеска) от периода к периоду. При высоком спектральном разрешении и хорошем отношении сигнал/шум наблюдается асимметрия абсорбционных линий, известен случай, когда асимметричные (по другим спектрам) линии на одной спектрограмме показали слабое раздвоение. Ключевым экспериментом явилась фурье-спектроскопия яркой мириды, рис.3.27.

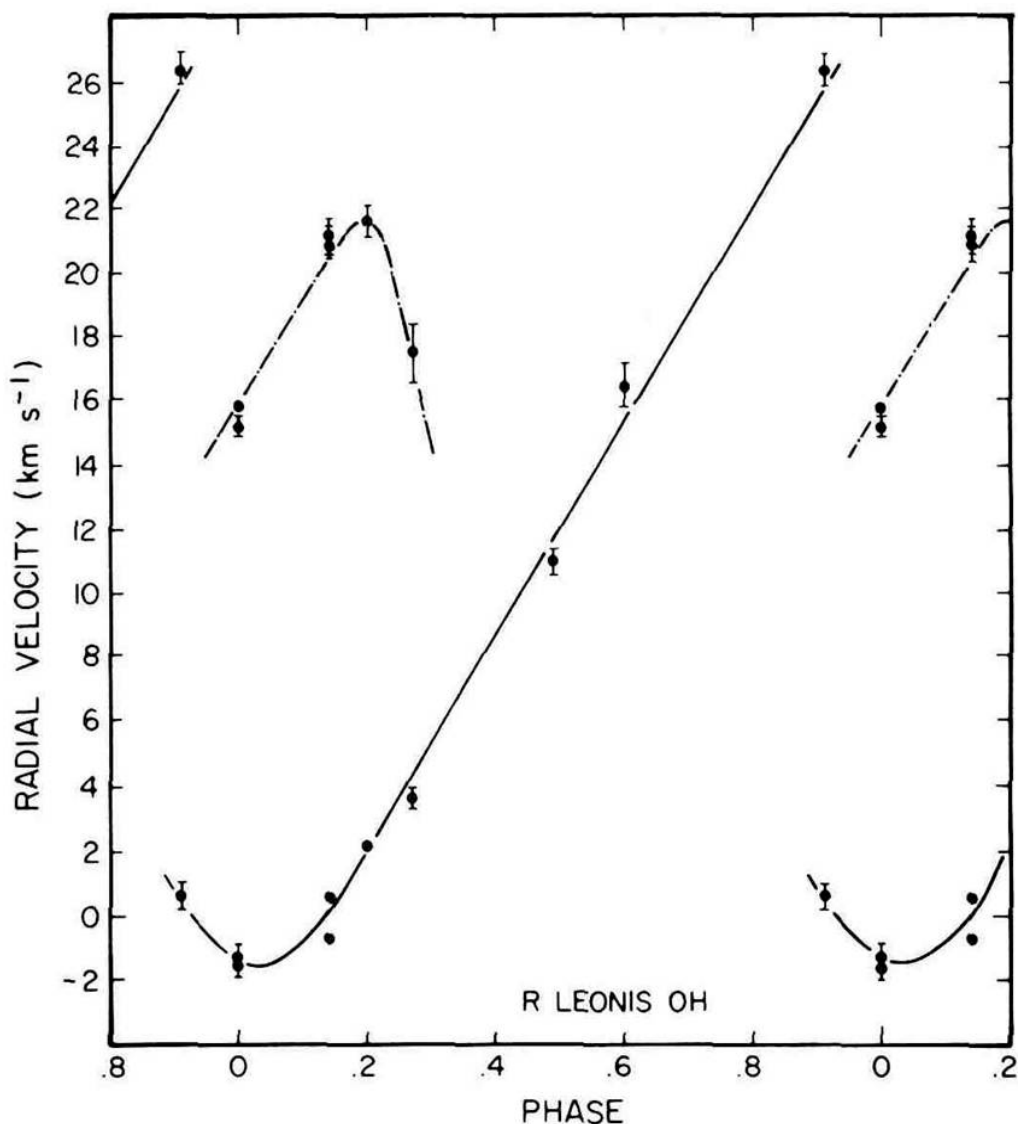


Рис.3.27. Результаты измерения лучевых скоростей по линиям гидроксила в ИК-диапазоне (фурье-спектрометр). На некоторых фазах линии с температурой 1000°K не наблюдаются, т.к. закрыты линиями фотосферного происхождения.

В диапазоне 1.5-2.5мкм у мириды R Leo наблюдаются две системы линий СО и ОН. Большинство линий формируется в области с $T=3500^{\circ}\text{K}$, скорость изменяется с амплитудой 27 км/с. Вторая система линий с $T=1000^{\circ}\text{K}$ показывает вариации скорости ~ 16 км/с. Таким образом, мы получили прямое подтверждение существования холодной околозвездной газовой-пылевой оболочки вокруг одной из мирид. Осталось определить массу этой оболочки по ИК-спектрам. Не вдаваясь в подробности проведенных нами расчетов диссоциативного равновесия и коэффициентов поглощения в молекулярных линиях, ограничимся утверждением, что масса холодной оболочки, непосредственно

наблюдаемой в ИК-спектрах, имеет тот же порядок, что и массы, полученные нами при интерпретации различных эффектов в спектрах оптического диапазона. Теперь становится ясным, почему по спектрам мирид, оцениваемых существенно различными подклассами, мы получаем одинаково низкие колебательные температуры: - в оптическом диапазоне мы наблюдаем преимущественно спектр холодной оболочки. Этот результат имеет принципиальное значение для проблемы лучевых скоростей мирид, измеряемых в оптике. Оболочка нестабильна, на это указывают и кратковременные вариации блеска, и различие амплитуд мирид от цикла к циклу, и невозможность свести измерения лучевых скоростей в среднюю кривую, построенную по наблюдениям в разных циклах.

Подводя итоги этого раздела отметим, что комплексное исследование мирид, выполненное с учетом новых методических возможностей БГА, позволило выявить газово-пылевые оболочки в том случае, который ранее приписывался чисто атмосферным проявлением. Таким образом, относительно небольшое количество наблюдений, в сочетании с хорошим аналитическим аппаратом, привело нас к ситуации, когда большое число наблюдений, выполненных другими авторами, может быть интерпретировано по-новому, в рамках концепции газово-пылевой оболочки. Это позволяет по-новому формировать наблюдательные программы и сформулировать новые темы для подготовки кадров высшей квалификации.

4. Обобщение результатов предыдущих этапов работ.

В ходе выполнения работ по контракту в 2010-2012 гг выполнялись самые разнообразные разработки и исследования, которые можно выделить в четыре крупных блока:

- разработка универсального спектрографа SCORPIO-N нового поколения и методики наблюдений с ним на б-м в различных режимах наблюдений;
- исследование движения ионизированного газа в галактиках методами двухмерной спектроскопии;
- исследование физических условий в активных галактических ядрах (AGN)
- исследование газовой пыли в Галактике методами спектрополяриметрии и спектроскопии высокого разрешения.

Коротко приведем обобщение основных результатов работ по контракту по этим направлениям.

Методика наблюдений

- Разработана методика наблюдения и анализа данных, позволяющая с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо картировать распределение дисперсии скоростей ионизированного газа в галактиках и эмиссионных туманностях. Предложены алгоритмы, позволяющие существенно уменьшить влияние систематических ошибок на измеряемую дисперсию скоростей.
- Разработан алгоритм анализа полей скоростей карликовых галактик, позволяющий корректно учитывать вклад, вносимый в наблюдаемое поле скоростей гигантскими расширяющимися оболочками.
- Разработана методика измерения линейной и круговой поляризации с прибором SCORPIO-N, позволяющая для слабых объектов (прибор SCORPIO). Методика отработана на протяженных и точечных объектах с известными параметрами поляризации.
- Разработано и внедрено в практику наблюдений специализированное программное обеспечение для высокоточной редукции спектрополяриметрических данных. Найдены эффективные алгоритмы учета деполяризации в атмосфере Земли, в результате чего достигнута точность измерения степени линейной поляризации

лучше 0.1% и 0.05% в измерениях круговой поляризации.

- Разработана и реализована система удаленного доступа к управлению спектрографа SCORPIO-N и редукации данных в различных режимах наблюдений.

Исследование кинематики ионизированного газа в галактиках

- Представлено исследование морфологии и кинематики уникальной кольцевой галактики - Объекта Хога. С помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо впервые изучена кинематика ионизованного газа в этой галактике. Предложено объяснение пекулярной структуры этой галактики холодной аккрецией газа из межгалактической среды на прародительницу - эллиптическую галактику.
- Составлен новый каталог, существенно увеличивающий число известных кандидатов в галактики с полярными кольцами. На 6-м телескопе САО РАН выполнены спектральные наблюдения 14 галактик из нашего каталога, в подавляющем большинстве объектов подтверждено существование полярных колец. Для четырех галактик с помощью сканирующего интерферометра построены детальные поля скоростей ионизованного газа.
- Для галактик SPRC-7 и SPRC-260 на основании данных наблюдений на 6-м телескопе проведено численное моделирование динамики газа на полярных орбитах. Сравнивая результаты расчетов с реальными распределениями лучевых скоростей удалось измерить форму темного гало, распределение гравпотенциала в котором оказалось близким к сферическому, со слабой трехосностью.
- По результатам наблюдений выборки близких карликовых галактик, выполненных на 6-м телескопе САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри-Перо, удалось показать, что существует четкая связь между поверхностной яркостью в линии $H\alpha$, и дисперсией лучевых скоростей (σ). Основная часть областей с высокой дисперсией скоростей связана не с конкретными расширяющимися оболочками, а принадлежит диффузному фону низкой яркости, окружающему комплексы звездообразования. Это поведение наблюдаемых распределений σ мы объясняем наличием у гигантских областей III корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями. Такое объяснение согласуется с современными представлениями о турбулентности в межзвездной среде.

Исследование AGN методами спектрополяриметрии

- Измерена степень линейной поляризации и ее изменение с длиной волны по спектрополяриметрическим наблюдениям на 6-м телескопе с прибором SCORPIO у выборки 20-ти галактик с активными ядрами с известными массами центральных черных дыр. Обнаружена сильная корреляция между параметрами поляризации в континууме этих объектов с массами центральных черных дыр. В рамках представлений о том, зависимость степени поляризации в аккреционном диске возникает вследствие деполяризации излучения на фарадеевском вращении в магнитном поле, сделаны оценки напряженности магнитного поля в области аккреционных дисков AGN и на горизонте событий. Последняя оказалась порядка 10^3 Гаусс, что определено для активных галактик впервые.
- По результатам многолетних спектрополяриметрических наблюдений радиогалактики 3C390.3 и сравнения их с результатами фотометрического мониторинга обнаружена двухкомпонентная структура области образования широких линий – кроме быстро вращающегося кеплеровского диска, формирующего широкие водородные линии, в центральной области галактики наблюдается радиальное истечение горячего газа BLR со скоростями порядка 10^4 км/с. На этом потоке происходит полярное рассеяние непрерывного излучения аккреционного диска, что приводит к наблюдаемой деполяризации излучения в континууме в подширокими водородными линиями.
- По результатам спектрополяриметрии в континууме и широких водородных линиях сейфертовской галактики Маркарян 6 в различные эпохи наблюдений обнаружено вековое изменение ориентации аккреционного диска относительно газово-пылевого тора.

Исследование газово-пылевых туманностей в Галактике

- Разработана методика определения областей формирования поляризованных и неполяризованных компонент в спектрах газово-пылевых оболочек, на БТА методами спектрополяриметрии проведены наблюдения звезд-кандидатов в объекты с газово-пылевыми оболочками;

- Разработана самосогласованная кинематическая модель объекта AFGL2688, в рамках которой снимаются противоречия по лучевым скоростям, определяемым по различным компонентам спектра. Определены скорости движения вещества, включая и составляющие, лежащие в картинной плоскости.
- Показано, что эмиссионные компоненты молекулярных и атомных спектров формируются в оболочках посредством механизма резонансной флюоресценции. Соотношение интенсивностей кантов полос молекулы углерода повторяет распределение энергии центральной звезды, что закрывает модели объекта с плотной околозвездной оболочкой.
- На основании спектров высокого разрешения, с привлечением данных спектрополяриметрии, впервые показано, что спектры звезд типа *o* Ceti, наблюдаемые в видимом диапазоне, формируются не в атмосферах, а, преимущественно в околозвездных оболочках. Этот вывод снимает ряд противоречий, накопившихся за период спектроскопических исследований мирид.

Кроме научных и методических результатов, полученных в ходе работ по контракту, подготовлены курсы лекций и лабораторных работ тематике контракта, которые вошли в подготовленную программу (п.6 отчета) внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

5. Выработка рекомендаций для дальнейших исследований.

Наблюдений на БТА с разработанным спектрографом SCORPIO-N показали его высокую эффективность. В тоже время для увеличения возможностей спектрографа требуется расширение комплекта высокоэффективных объемных фазовых голографических решеток и узкополосных интерференционных фильтров. Крайне желательным для увеличения точности поляриметрических наблюдений является изготовление анализатора «двойной Волластон» из кристалла полевого шпата большого размера с высоким пропусканием в УФ-области спектра.

Ближайшее перспективы развития методики наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо мы видим в реализации режима наблюдений одновременно в двух линиях дублета ионизованной серы: [SII]6717,6731. Это позволит, одновременно с изучением кинематики перейти к измерениям электронной плотности ионизованного газа (по отношению интенсивностей линий дублета).

В методике спектрополяриметрических наблюдений крайне важным представляется реализация проекта фотометра-поляриметра для малого телескопа (диаметр 0.6 - 1 м), расположенного вблизи БТА. Одновременные параллельные наблюдения на таком приборе с наблюдениями на БТА позволят хорошо определять реальные параметры деполяризации излучения в атмосфере Земли и, в конечном итоге, увеличить точность измерения поляризации в 2-3 раза.

Продолжение изучения внутренней кинематики объектов из нашего каталога SPRC, с помощью представленных нами методик, включающих как саму технику наблюдений, так и сравнение с численными моделями, позволит лучше понять важные вопросы галактического строения эволюции. Прежде всего, речь идет об измерении формы гало темной материи и о поиске массивных полярных колец, образовавшихся в результате акта аккреции протяженных межгалактических газовых филаментов.

Следует продолжать работы по высокоточному спектрополяриметрическому мониторингу AGN – по итогам контракта ясно, что только на этом пути можно определить пространственную ориентацию аккреционного диска и газовой пылевой тора в центральной области активных галактик.

Перспективы развития метода спектрополяриметрии околозвездных газовой пылевых оболочек видим в следующем:

Во-первых, с уже достигнутым спектральным разрешением необходимо расширить круг исследуемых объектов. Например, у звезд типа Вольфа-Райе, где ширина эмиссионных

линий не требует высокого разрешения, можно искать эффект "провала" в степени поляризации в пределах спектральных линий. Один-два уверенных случая деполяризации в линиях в спектрах звезд WR уже уверенно выделены. Весьма перспективными являются наблюдения объектов с чрезвычайно сильными эмиссиями в H α , здесь, за счет хорошей статистики в эмиссионном ядре, можно изучать тонкие эффекты (см., например, рис.6.12 в промежуточном отчете, этап No.2).

Во-вторых, перспективным является спектрополяриметрия звезд типа R CrB, причем не столько в минимуме (это уже предельная задача, см. рис.6.11 в промежуточном отчете, этап No.2), сколько на восходящей и нисходящей ветвях кривой блеска, когда на небольшое время возникает весьма специфический эмиссионный спектр.

6. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

В соответствии с календарным планом и п.4.2 Технического задания в порядке внедрения результатов НИР в образовательный процесс разработана образовательная программа «Методы наблюдений и последние результаты исследований на крупнейшем российском телескопе БТА» для студентов астрономических специальностей университетов, приезжающих на практики в САО РАН. Программа включает в себя как чтение лекций по тематике контракта, так и практические занятия по освоению методов панорамной спектроскопии и спектрополяриметрии с универсальным спектрографом SCORPIO-N на БТА. Программа одобрена Ученым советом САО и утверждена директором САО РАН член-корреспондентом РАН Балегой Ю.Ю. Программа прилагается к отчету отдельным документом.

7. Проведение поляризационных наблюдений на 6-метровом телескопе

Ранние измерения магнитных полей AGN (Афанасьев и др., 2011) и полярных методами спектрополяриметрии (Афанасьев и др., 2007) не давали необходимой точности. Более того, стало ясно, что для определения ориентации аккреционных дисков в пространстве, что важно для обоих типов объектов, необходимо проводить ряды измерения в течение достаточно длительного времени (у внегалактических объектов это шкала нескольких лет, у галактических – нескольких дней). Также крайне важно проводить измерения таким образом, чтобы каждый раз одновременно с объектом измерялась опорная звезда в поле зрения прибора. Это крайне важно как с точки зрения контроля стабильности схемы измерений, так и для контроля состояния атмосферы Земли. Разработанная нами в ходе выполнения настоящего контракта методика спектрополяриметрических измерений на усовершенствованном приборе SCORPIO-N позволяет это делать (Афанасьев, Амирханян и Борисов, 2012).

7.1 Наблюдения активных галактических ядер (AGN)

В ходе предыдущих исследований стало ясно, что измерения поляризации в различных длинах волн дают информацию о нескольких механизмах возникновения поляризации в околоядерных областях активных галактик. На рис.7.1 показана феноменологическая схема возникновения наблюдаемой поляризации для различных механизмов. Следует отметить, что обычно используемая в литературе так называемая “unified model” описывает наблюдаемый характер поляризации только лишь у небольшого числа объектов (Смит и др., 2002). В нашей схеме мы рассматриваем механизмы возникновения поляризации на различных масштабах (расстояниях) от центрального источника – сверхмассивной черной дыры:

- масштабы порядка гравитационного радиуса $R_g \sim 10^{13}$ см. Здесь следует ожидать поляризации излучения, обусловленного вращающейся черной дырой с метрикой Керра (Новиков, Торн, 1973);
- аккреционный диск - масштабы порядка нескольких десятков (до сотни) гравитационных радиусов $\sim 10^{15}$ см. Здесь наряду с механизмами комтоновского рассеяния на свободных электронах за счет переноса излучения в диске работают

механизмы деполяризации излучения за счет фарадеевского вращения в магнитном поле (это детально обсуждалось в п.2 отчета;

- Область образования широких линий (BLR) – масштабы порядка 10^{17} - 10^{18} см (~0.1-1 пк). Здесь работает несколько механизмов – деполяризация в горячей оптически толстой плазме и экваториальное рассеяние на пыли рассеяние на пыли;
- Конус ионизации – масштабы 10-100 пк. Область полярного рассеяния а оптически тонких газе и пыли.

В такой схеме в зависимости от ориентации объекта мы получаем разных характер поляризации в спектре – поляризация в континууме зависит от механизмов рассеяния излучения и деполяризации в области аккреционного диска, а поляризация в широких водородных линиях – механизмы рассеяния в газовой-пылевом торе, внутри которого находится область образования широких линий. Отметим, что поскольку ориентация электрического вектора в полярном и экваториальном рассеянии различна, мы сравнивая ориентацию плоскости поляризации в континууме и линиях можем восстановить ориентацию в пространстве околоядерной области изучаемого объекта.

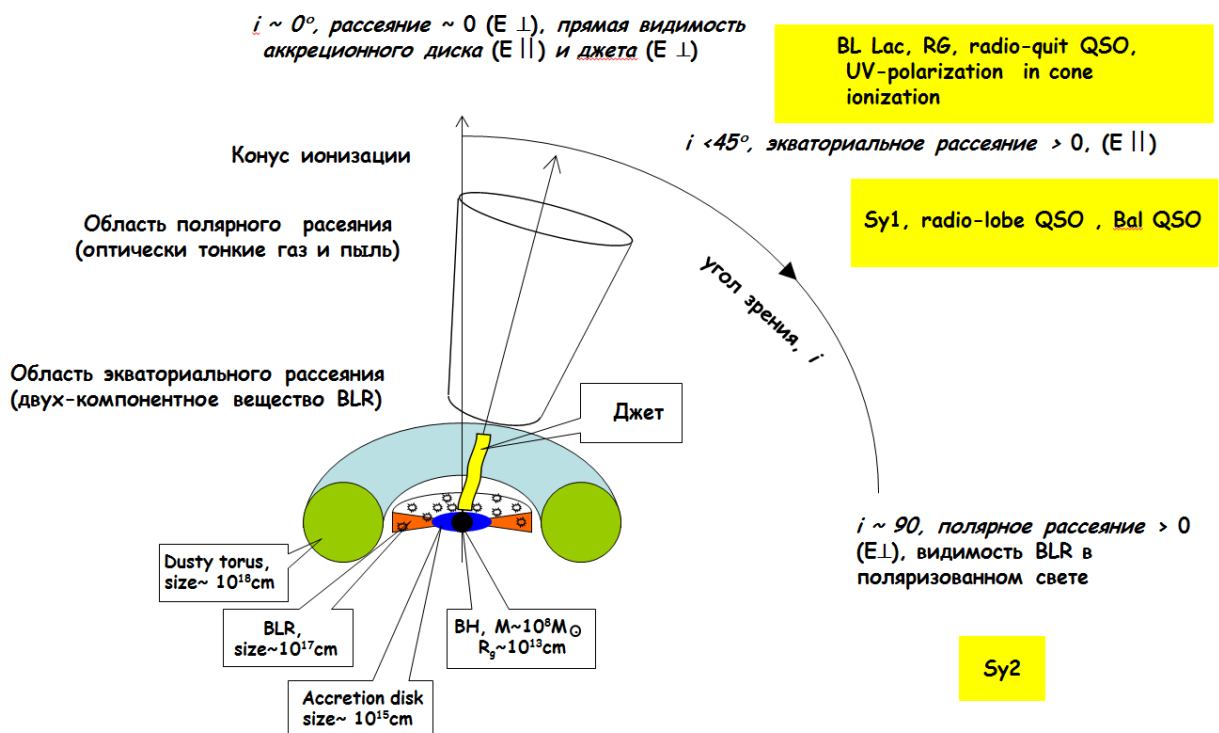


Рис. 7.1. Феноменологическая схема различных механизмов возникновения поляризации в активных галактических ядрах различных типов.

7.1.2 Наблюдения радиогалактики 3C390.3

Радиогалактика 3C390.3 хорошо известный объект - сейфертовская галактика 1-го типа, имеющая широкие водородные линии в области BLR и поляризованный континуум (~1.5 % на длине волны 5500 Å). Область BLR у этого объекта интересна тем что она имеет два широких пика разнесенных на 104 км/с, то дает основания полагать, что в этом объекте мы имеем дело с двойной черной дырой (Эраклеус и Гальперн, 1994). Масса центрального источника определена достаточно надежно методом реверберации по длинным рядам наблюдения спектральной переменности в континууме и линиях (Шаповалова и др., 2010).

При наблюдениях этого объекта, кроме оценок магнитного поля в континууме, нам было интересно оценить изменение параметров поляризации в линиях и континууме со временем. Проведенные нами наблюдения и данные из литературы охватывают период 18 лет (с 1995 по 2012 год). Типичный вид спектров, получаемых со старым прибором SCORPIO, показан на рис.2.1, а спектры получаемые с новым прибором показаны на рис.7.2. На рисунке хорошо видно, что в спектре поляризованном свете у 3C390.3

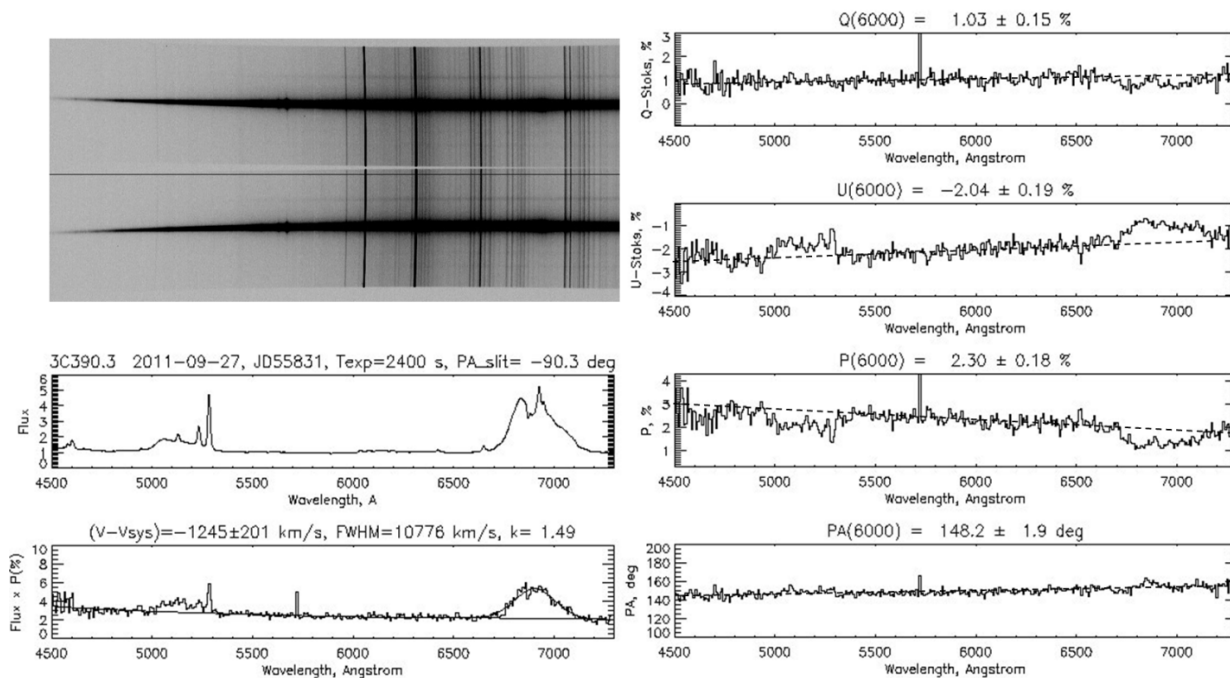


Рис. 7.2 Пример спектров, получаемых в спектрополяриметрической моде на приборе SCORPIO-N

наблюдаются широкие линии смещенные на величину порядка 10^3 км/сек в синюю сторону. В широких водородных линиях наблюдается, в отличие от ожидаемого в рамках “unified model” (Смит и др., 2005), деполяризация на горячем газе BLR поляризованного излучения, формируемого в аккреционном диске. Результаты оценок параметров поляризации приведены в таблице 7.1. В таблице приведена юлианская дата наблюдений (период 1995-2012 гг.), экспозиция, значения параметров Стокса Q и U, степень линейной поляризации и позиционный угол плоскости поляризации, поток в континууме и смещение широкой компоненты в поляризованном свете относительно системной скорости. Оценки поляризационных параметров приведены для длина волны 6000 \AA , что соответствует длине волны 5100 \AA в сопутствующей системе координат для этого объекта.

Таблица 7.1

Julian date	Exp., sec	Q(6000), %	U(6000), %	P(6000), %	PA(6000), degrees	Continuum(6000) $10^{-15} \text{ erg/s/cm}^2/\text{\AA}$	$V_{\text{sys}} - V_{\text{polarized}}$, km/s
49875*	3200	0.59 ± 0.10	-0.94 ± 0.10	1.12 ± 0.07	156.0 ± 1.9	1.56 ± 0.15	(300 ± 300)
50302**	4000	0.74 ± 0.10	-1.17 ± 0.10	1.51 ± 0.15	160.0 ± 2.9	1.72 ± 0.20	437 ± 200
50628*	4000	0.54 ± 0.05	-1.47 ± 0.05	1.57 ± 0.05	150.0 ± 2.0	1.27 ± 0.13	(300 ± 300)
54799	3000	0.38 ± 0.25	-2.06 ± 0.25	2.09 ± 0.22	140.2 ± 1.1	3.26 ± 0.14	1200 ± 400
55060	3600	0.82 ± 0.20	-1.60 ± 0.34	1.81 ± 0.26	148.6 ± 2.8	2.42 ± 0.10	1100 ± 350
55099	3600	0.60 ± 0.24	-1.70 ± 0.28	1.80 ± 0.24	144.7 ± 1.7	2.44 ± 0.09	800 ± 300
55394	2400	1.21 ± 0.34	-1.38 ± 0.24	1.85 ± 0.29	155.6 ± 3.9	1.96 ± 0.11	874 ± 200
55682	2160	0.90 ± 0.11	-1.38 ± 0.08	1.65 ± 0.09	151.6 ± 2.1	2.62 ± 0.12	915 ± 276
55713	4000	1.39 ± 0.15	-0.90 ± 0.10	1.66 ± 0.09	163.3 ± 1.8	2.03 ± 0.14	913 ± 220
55831	2400	1.04 ± 0.09	-2.03 ± 0.16	2.28 ± 0.12	148.5 ± 1.3	1.56 ± 0.10	1250 ± 193
55885	2880	1.52 ± 0.22	-1.83 ± 0.40	2.45 ± 0.29	155.1 ± 3.9	2.21 ± 0.13	1246 ± 418
55959	1440	1.26 ± 0.41	-1.09 ± 0.49	1.89 ± 0.42	160.4 ± 7.1	1.72 ± 0.13	1294 ± 201
55971	4320	0.97 ± 0.34	-1.95 ± 0.47	2.22 ± 0.42	147.8 ± 4.0	1.65 ± 0.14	1012 ± 304
56032	2880	1.03 ± 0.18	-1.80 ± 0.19	2.10 ± 0.10	149.6 ± 2.6	1.33 ± 0.12	1170 ± 201

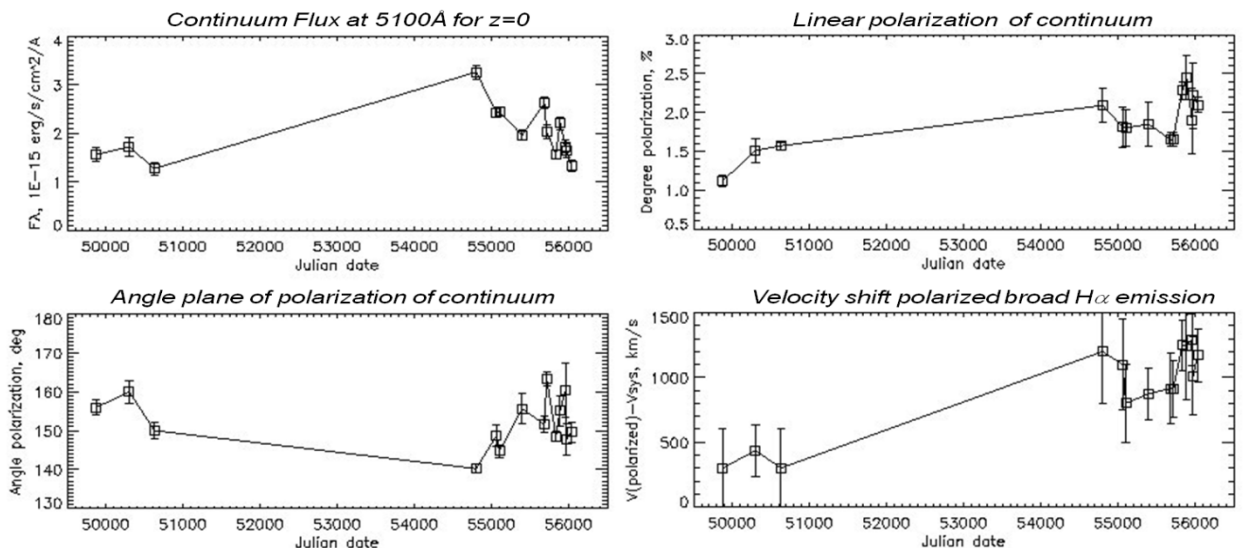


Рис.7.3. Изменение параметров поляризации 3C390.3 со временем

Отметим, что поток в континууме определялся относительно измеряемого на каждом спектре потока в узкой запрещенной линии кислорода [ОIII] 5007/49 Å согласно работе Шаповаловой и др. (2010).

На рисунке 7.3 показано изменение со временем потока в континууме на 5100 Å в сопутствующей системе отсчета, степени линейной поляризации и угла плоскости поляризации, а также величины смещения широкой компоненты водородных линий относительно системной скорости. На рис.7.3 хорошо заметна антикорреляция изменения угла плоскости поляризации по времени относительно уровня континуума. Для понимания того, чтобы это значило, нанесем наблюдаемые точки на проекцию сферы Пуанкаре в плоскость (U,Q) Стокса, что изображено на рис. 7.4.

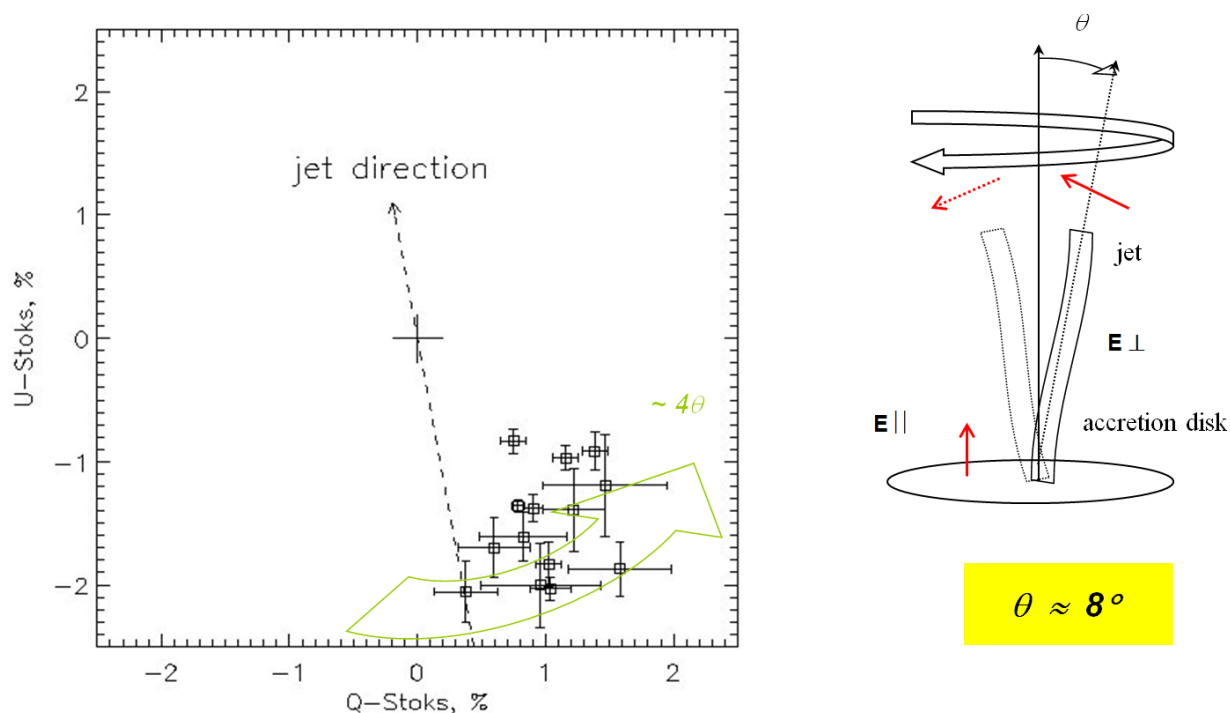


Рис.7.4. Переменность 3C390.3 на UV-плоскости (слева) и рисунок (справа), объясняющий такую переменность в модели прецессирующего джета.

Объяснение, приводимое на рис.7.4 представляется довольно привлекательным, если бы не одно важное обстоятельство – по данным VLBI в объекте не наблюдается прецессия джета (Аршакян и др., 2010). В этой работе, где авторы сравнивали переменность в оптике (континууме и линия) и переменность джета на субпарсековой шкале, показано, что в объекте наблюдаются два переменных процесса – медленный, с характерной шкалой около 10 лет, который объясняется медленными изменениями в аккреционном диске и быстрый – связанный с активностью (движений различных компонент) джета. При этом

двугорбость области BLR объясняется наличием конического истечения горячего газа с субрелятивистскими скоростями. Именно такая картина наблюдается нами в поляризации континуума, если считать, что наблюдаемая поляризация есть результат векторного сложения поляризации диска, меняющейся медленно и направление которой приблизительно совпадает с направлением джета, и быстроменяющейся поляризации обусловленной синхротронным излучением джета, вектор поляризации которого приблизительно перпендикулярен направлению джета. Это собственно и иллюстрируется рисунком 7.5. Таким образом в оптике мы видим прямое поляризованное излучение аккреционного диска замешанное с переменным поляризованным излучением джета.

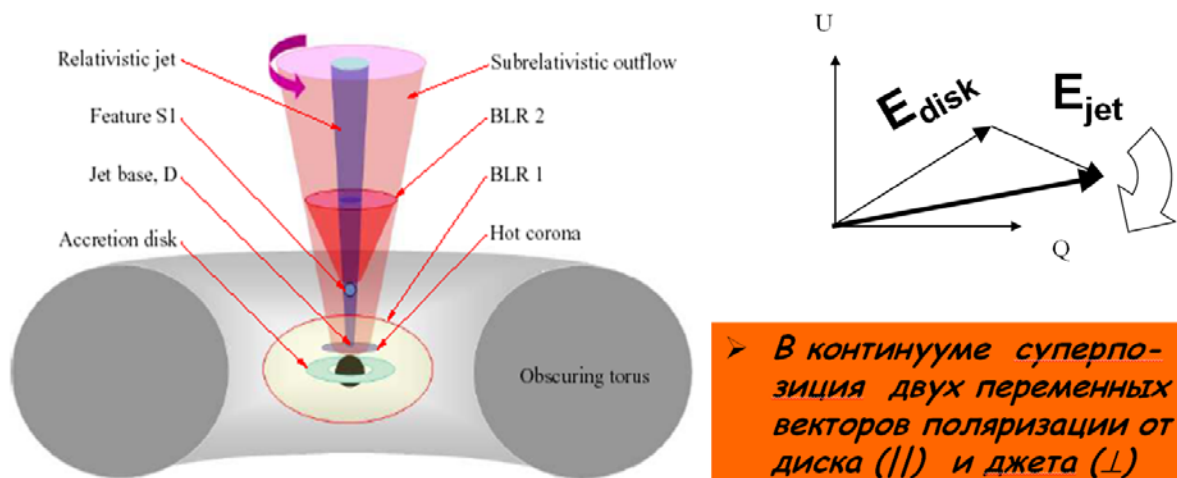


Схема центральной области 3C 390.3.
Коническая структура области BLR2 ассоциирующаяся с истечением дает наибольший вклад в излучение континуума в конусе с углом $\sim 30^\circ$ (Шаповалова и др., 2010).

- В континууме суперпозиция двух переменных векторов поляризации от диска (\parallel) и джета (\perp)
- В линии $H\alpha$ полярное рассеяние (деполяризация) в плоскости \perp направлению джета и субрелятивистское истечение со скоростью $\sim 10^3$ км/сек

Рис.7.5. Схема, объясняющая характер поляризации в континууме и широких водородных линиях радиогалактики 3C390.3

С этой точки зрения понятна ситуация с поляризацией в линиях. Как следует из рис. 7.2 в области широких линии заметно резкое увеличение параметра Стокса U , который по определению перпендикулярен направлению электрического вектора, который, как следует из табл. 7.1, хорошо совпадает с направлением радиоджета ($PA \sim 150^\circ$). Следуя логике, изложенной вначале этого раздела, заключаем, что наблюдается полярное рассеяние на газе, движущемся со скоростью порядка 1000 км/сек. Таким образом, сделанный нами вывод по поляризационным измерениям, не противоречит выводу

работы Аршакяна и др. (2010) о наличии в центральной области 3С390.3 двухкомпонентной среды в области образования широких линий и субрелятивистского истечения в конусе (BLR2).

7.1.2 Наблюдения сейфертовской галактики Маркарян 6.

Сейфертовская галактика Маркарян 6 интересна тем, что у нее, помимо сильной переменности в оптическом и радиодиапазонах, в поляризации BLR наблюдается типичная для “unified model” картина (Смит и др., 2002). Вид спектра и зависимости параметров поляризации от длины волны Маркарян 6, получаемых новым прибором SCORPIO-N, показан на рис.7.6

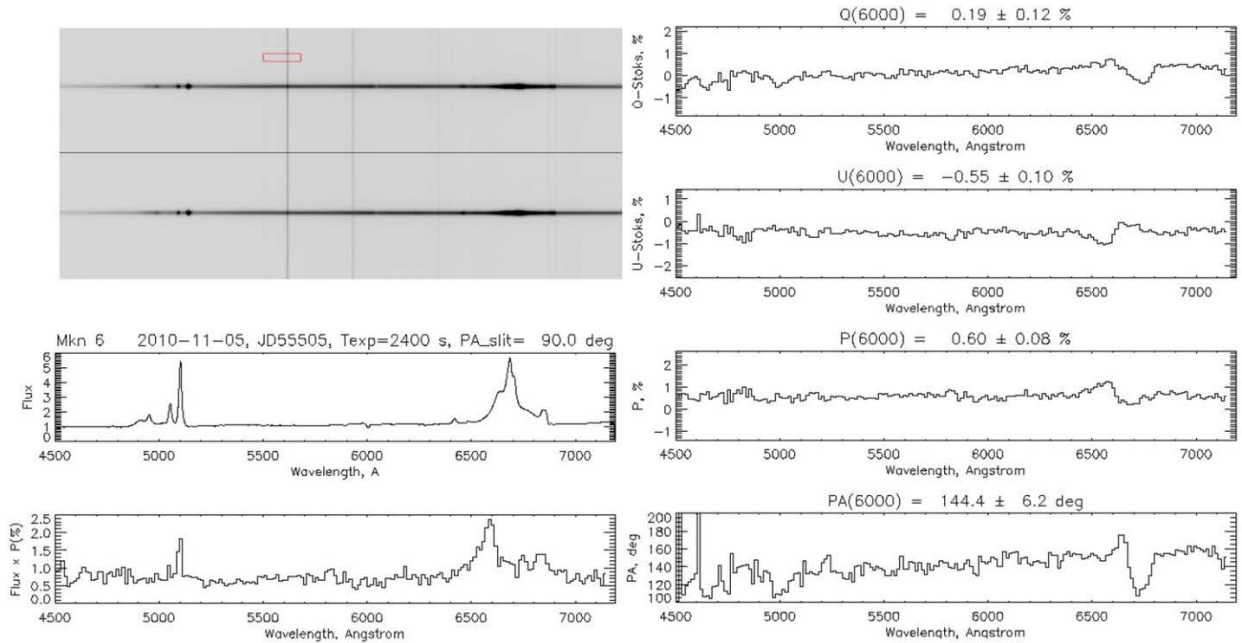


Рис.7.6 Спектры и характер поляризации в спектре поляризация Маркарян 6

Таблица 7.2.

Julian date	Exposure, sec	Q(5500), %	U(5500), %	P(5500), %	PA(5500), degrees
50488	4000	-0.08 ± 0.07	-0.90 ± 0.07	0.90 ± 0.13	132.4 ± 1.1
51089	2400	0.61 ± 0.06	-0.66 ± 0.06	0.90 ± 0.12	156.5 ± 0.8
55505	2400	0.19 ± 0.12	-0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.18	144.4 ± 6.2
55800	3360	0.50 ± 0.18	-0.65 ± 0.16	0.85 ± 0.21	152.8 ± 4.5
55886	2400	0.63 ± 0.16	-0.48 ± 0.21	0.83 ± 0.15	161.6 ± 6.1
55971	3600	1.03 ± 0.14	-0.32 ± 0.16	1.10 ± 0.16	170.2 ± 4.2
56038	2880	0.46 ± 0.10	-0.20 ± 0.08	0.051 ± 0.09	169.4 ± 36

Наши наблюдения и имеющиеся литературные данные охватывают период 6 лет - с февраля 1997 г по апрель 2004 г. Результаты оценок поляризационных параметров в континууме Маркарян 6 приведены в таблице 7.2. Переменность в континууме на плоскости (U,V) сравнивается с данными VLA и MERLIN на рис.7.7. Изображения центральной области галактики на 6 см на разных масштабах, которые приведены на рисунке, взяты из работы Харба и др. (2006). В этой работе обнаружена сильнейшая переменная прецессия джета с характерными временами около года. Угол прецессии оценивается порядка $20-30^\circ$, что не противоречит данным поляризации в оптике (Харб и др., 2006). Следует, конечно, отметить, что к подобным сравнениям нужно относиться достаточно осторожно – поляризованное излучение в переменном джете в оптике формируется значительно ближе к ядру, чем в радиодиапазоне.

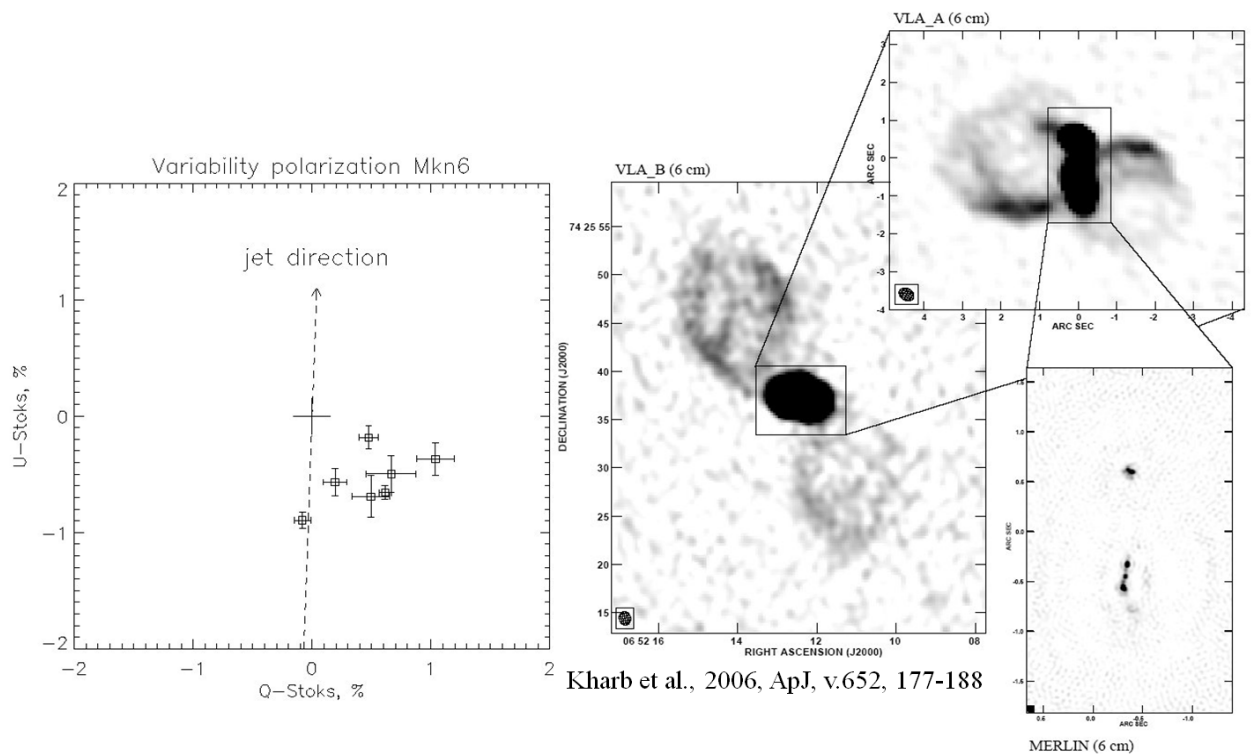


Рис.7.7. Сравнение поляризации в оптике с данными наблюдений на VLA и MERLIN.

Представляет несомненный интерес оценка вековой переменности профилей широких линий Маркарян 6 в поляризованном свете. На рис.7.8 показан характер изменения профилей линии $H\alpha$ в различные эпохи наблюдений. На рисунке (сверху вниз) для каждой приведены зависимости от длины волны позиционного угла плоскости поляризации,

форма профиля линии в поляризованном свете, степень линейной поляризации в линии и профиль линии в неполяризованном свете.

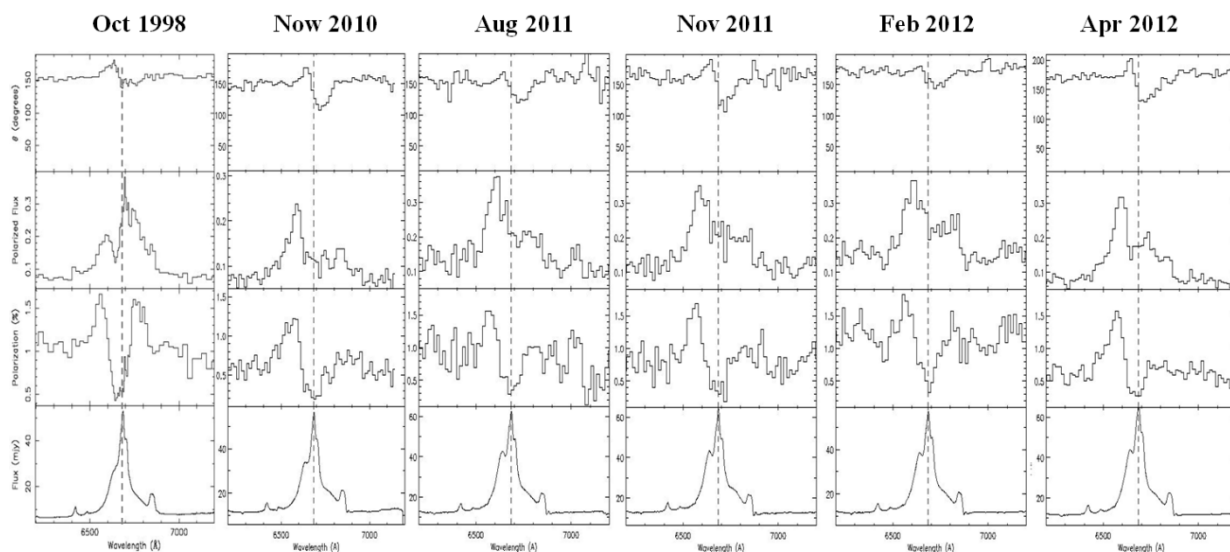


Рис. 7.8. Изменение профилей линий $H\alpha$ в поляризованном и неполяризованном свете в спектре сейфертовской галактике Маркарян 6.

Совершенно очевидно, что изменение профиля линии со временем свидетельствуют о вековом изменении геометрии центральной области Маркарян 6 – переменность излучения диска или джета не может изменить характер рассеяния на газово-пылевом торе. Таким образом в этом объекте мы наблюдаем не только переменное поляризованное излучение в континууме, которое объясняется прецессией джета с характерным временем меньше года, но и медленную (на шкале около 5 лет) прецессию аккреционного диска относительно газово-пылевого тора.

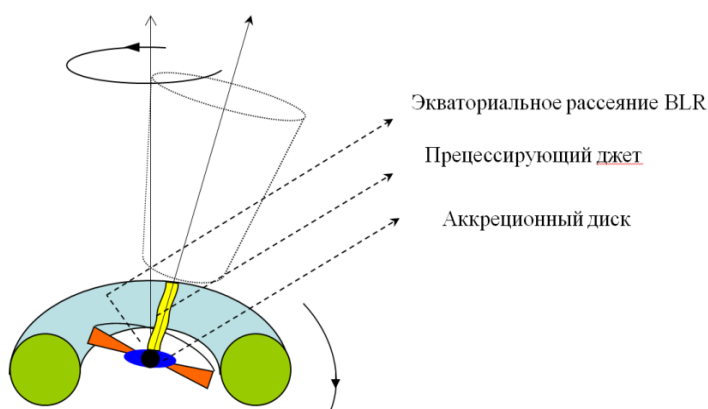


Рис.7.9. Феноменологическая схема, объясняющая характер изменения линейной поляризации в спектре Маркарян 6 со временем.

7.2. Наблюдения поляризованного излучения аккреционных структур полярнов.

Программа наблюдений предусматривала работу в поляриметрической моде. Основная трудность проведения данных наблюдений заключалась в том, что все объекты выборки очень слабы для проведения поляризационных измерений. Использовались наблюдения с фильтром V (**SCORPIO**). Ставилась задача измерения круговой поляризации.

7.2.1 Постановка задачи.

Поляры, или звёзды типа AM Her – относятся к подклассу магнитных катаклизмических переменных. Величина магнитного поля белых карликов в этих системах порядка 10^7 - 10^8 Гс (Швопе, 1995). Такое сильное поле препятствует формированию аккреционного диска вокруг белого карлика. И газ, захваченный магнитными силовыми линиями, аккрецирует на один или оба магнитных полюса белого карлика. Такие системы возникают при определенных соотношениях между размерами большой полуоси орбиты a и альвеновским радиусом r_a белого карлика, а именно при $r_a > a$. Альвеновский радиус- расстояние, на котором давление аккрецирующего вещества сравнивается с давлением магнитного поля. Если альвеновский радиус превышает полуось орбиты, то вещество, проходя внутреннюю точку Лагранжа, движется вдоль магнитных силовых линий. Этот режим аккреции в маломассивных тесных двойных системах при напряженности магнитного поля белого карлика $B=10$ - 30 МГс реализуется для систем с орбитальным периодом меньше 4 часов. На практике диапазон орбитальных периодов полярнов составляет 81-220 минут. В большинстве случаев, в найденных полярах, вращение белого карлика синхронизировано с орбитальным вращением системы своим магнитным полем. Однако существуют небольшое число систем, типа BY Cam, в которых период вращения и орбитальный период различаются на несколько процентов. В таких случаях магнитное поле пытается восстановить синхронизацию, медленно изменяя период вращения белого карлика. Асинхронное вращение в этих системах, возможно, является следствием взрыва Новой. Небольшое количество обнаруженных систем данного типа связано с тем, что синхронизация происходит за очень короткий срок - менее 20 тысяч лет (Кроппер, 1990).

Отличительная особенность полярнов от других типов катаклизмических переменных является наличие у них сильной переменной круговой поляризации излучения. Тапия проводил поляриметрические наблюдения оптического аналога мягкого переменного рентгеновского источника 3U1809+50, обнаруженного специализированным

рентгеновским спутником Uhuru. Высокая степень линейной и круговой поляризации, обнаруженные в видимом и инфракрасном диапазонах, свидетельствовала о присутствии компактного объекта с магнитным полем 2×10^8 Гс. Последующие оценки магнитного поля AM Her дали результат ~ 13 МГс. Максимумы линейной и круговой поляризации достигали значений 5 и 10% соответственно. Изменения поляризаций происходили с одинаковыми периодами и так же были синхронизированы с оптической кривой блеска. Максимум линейной поляризации, совпадал с максимумом интенсивности излучения объекта. Совпадение максимума линейной поляризации с изменением знака круговой поляризации, показало общее происхождение обеих поляризаций. Так же был сделан вывод о сильной зависимости поляризации от длины волны, так как изменения поляризаций не наблюдалось в U фильтре. Следовательно, формирование высокочастотного излучения происходит без влияния магнитного поля белого карлика. Обнаружение этого объекта выявила новый тип катаклизмических переменных, а именно полярнов.

В течение последних 5 лет исследований донного типа объектов большое внимание уделяется изучению небольшой группе полярнов, в спектрах которых обнаружены гармоники циклотронного излучения. Первые представители этой группы были обнаружены в 2007 году (Шмидт и др., 2007) и их принято называть полярны с низким темпом аккреции. Они имеют более длинные орбитальные периоды от 3 до 5 часов, а в их спектрах обнаруживаются спектральные линии вторичного компонента. Как правило, это широкие абсорбционные полосы окиси титана, которые соответствуют спектрам красных карликов спектрального класса M. Считается что низкий темп аккреции этой группы полярнов обусловлен относительно длинным орбитальным периодом. Однако, 2005 году по результатам фотометрических, спектральных и поляриметрических исследований исследований нового полярна FL Cet орбитальным периодом 87.13 минуты в его спектре было обнаружено присутствие циклотронных гармоник (Шмидт и др., 2005).

Мы полагаем что низкий темп аккреции в полярнах связан прежде всего с особенностями параметров вторичного компонента двойной системы, т. е. звезды «донора». Была поставлена задача расширить список полярнов с низким темпом аккреции имеющих короткие орбитальные периоды. Для этого мы провели предварительные фотометрические и спектральные наблюдения небольшой выборки тесных двойных систем с короткими орбитальными периодами. По результатам выполненных наблюдений было отобрано 4 объекта (см. Таблицу 7.7), в спектрах которых обнаруживались широкие

Таблица 7.7.

Объект	Орбитальный период, дней	Звездная величина, V
USNO-A2.0 0825-18396733	0.084	19.1
1RXS J184542+483134	0.055	19.6
USNO-B1.0 1340-00183028	0.081	17.5
MT Dra	0.089	17.2

детали, интерпретированные нами как возможные гармоники циклотронного излучения. Пример такого спектра представлен на рис.7.10. Далее были проведены поляриметрические наблюдения выбранных объектов с целью исследования свойств их поляризованного излучения.

Исследование таких систем необходимо для того, чтобы понять эволюцию тесных двойных систем на поздних стадиях. Аккрецирующее вещество в полярах ведёт себя как материя нагретая до высоких температур в сильном магнитном поле. То есть создаются условия, которые невозможно воссоздать в лабораториях на Земле.

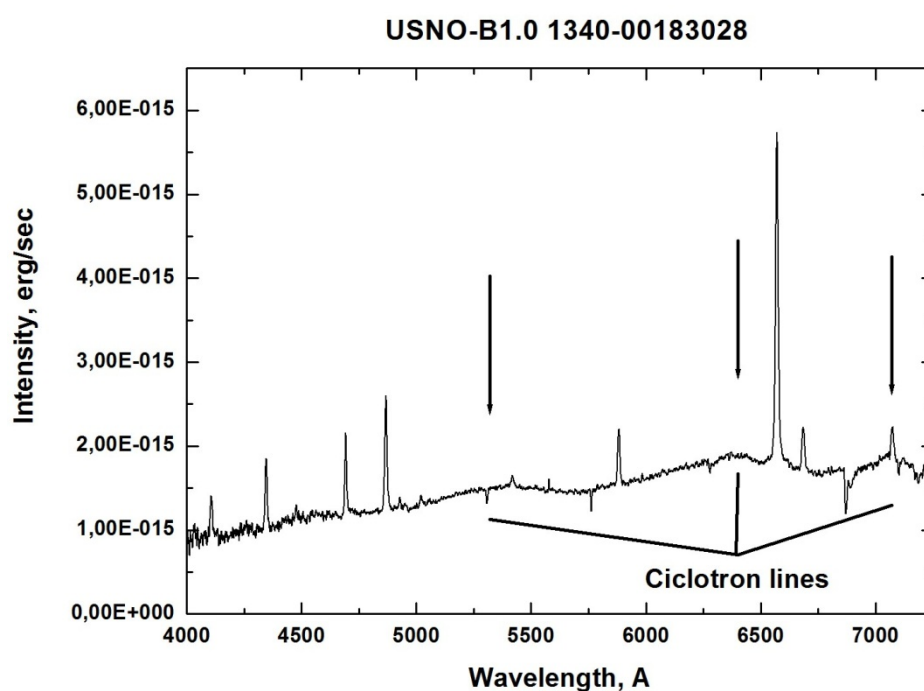


Рис. 7.10. Один из спектров USNO-B1.0 1340-00183028 полученный на БТА с использованием SCORPIO

7.2.2 Результаты поляриметрических наблюдений

По всем объектам выборки поляриметрические наблюдения проводились впервые. На рис.7.11. представлена кривая изменения круговой поляризации излучения **USNO-A2.0 0825-18396733** в зависимости от фазы орбитального периода. Обращает на себя внимание то, что в интервале фаз 0.15 — 0.25 поляризация достигает значения равное -28 %, со средней ошибкой измерения равной 1 %. Отметим, что столь сильная степень круговой поляризации излучения ранее наблюдалась только у поляр AN UMa.

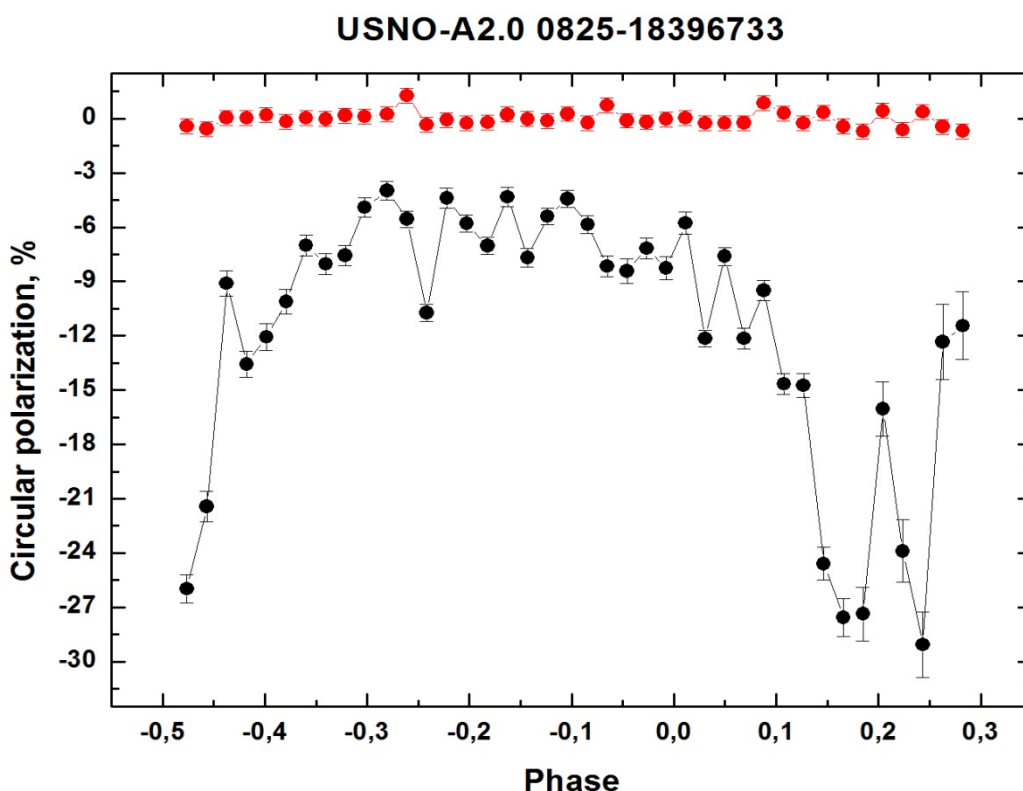


Рис. 7.11. Кривая изменения круговой поляризации излучения

USNO-A2.0 0825-18396733 в зависимости от фазы орбитального периода.

Черные кружки — объект. Красные кружки — звезда сравнения.

На рис.7.12 представлены результаты измерений круговой поляризации излучения объекта **1RXS J184542+483134**. В максимуме кривой поляризация достигает 15 % при

средней точности измерений 1 %. Здесь обращает на себя сильнейшая переменность круговой поляризации излучения на временной шкале 2 — 4 минуты.

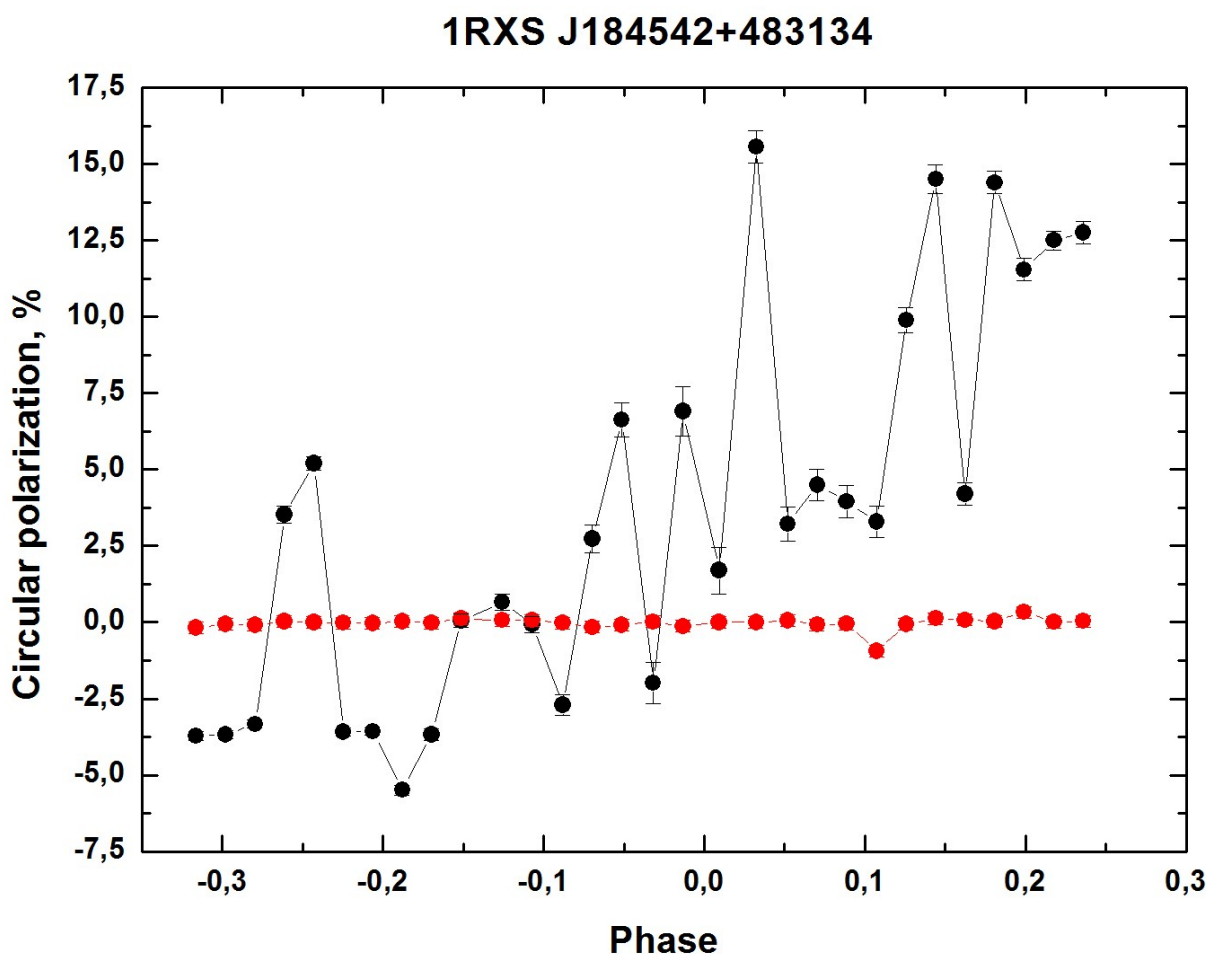


Рис. 7.12. Кривая изменения круговой поляризации излучения **1RXS J184542+483134** в зависимости от фазы орбитального периода. Черные кружки — объект, красные кружки — звезда сравнения.

Следующий объект **USNO-B1.0 1340-00183028** является наиболее интересным с точки зрения исследования тесных двойных систем с глубокими минимумами. Глубина главного минимума кривой блеска данного объекта в фильтре V достигает 5 звездных величин. На рис. 7.13 представлена кривая изменения круговой поляризации излучения **USNO-B1.0 1340-00183028** в зависимости от фазы орбитального периода. Величина круговой поляризации излучения **USNO-B1.0 1340-00183028** в максимуме достигает 8 % при средней величине ошибки 0,5 % .

USNO-B1.0 1340-00183028

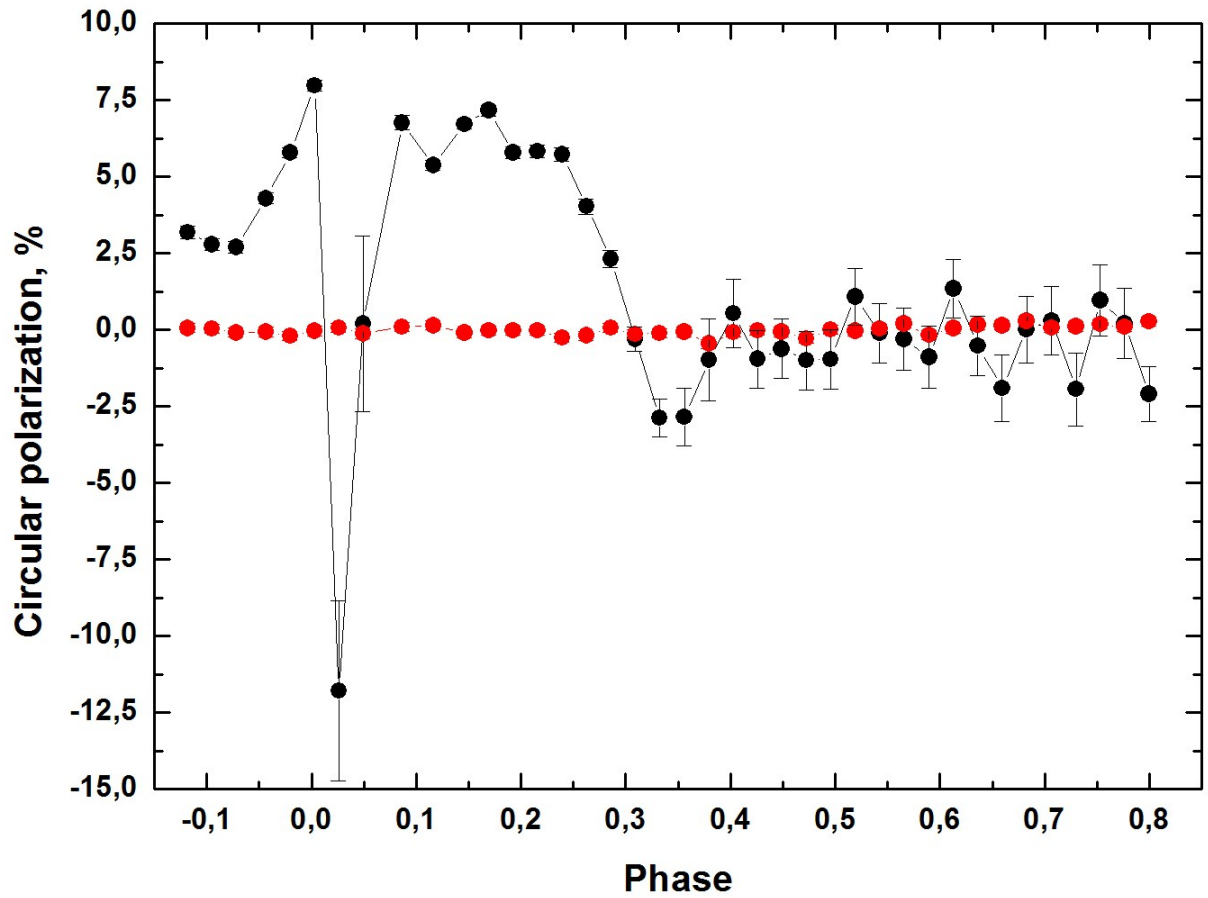


Рис. 7.13. Кривая изменения круговой поляризации излучения *USNO-B1.0 1340-00183028* в зависимости от фазы орбитального периода. Черные кружки — объект, красные кружки — звезда сравнения.

MT Dra достаточно много исследовалась на основе фотометрических и спектральных наблюдений, но поляриметрические измерения выполнены впервые. Величина круговой поляризации излучения MT Dra в максимуме достигает 12 % при средней ошибке измерений 0.5 % (см. рис. 7.14.).

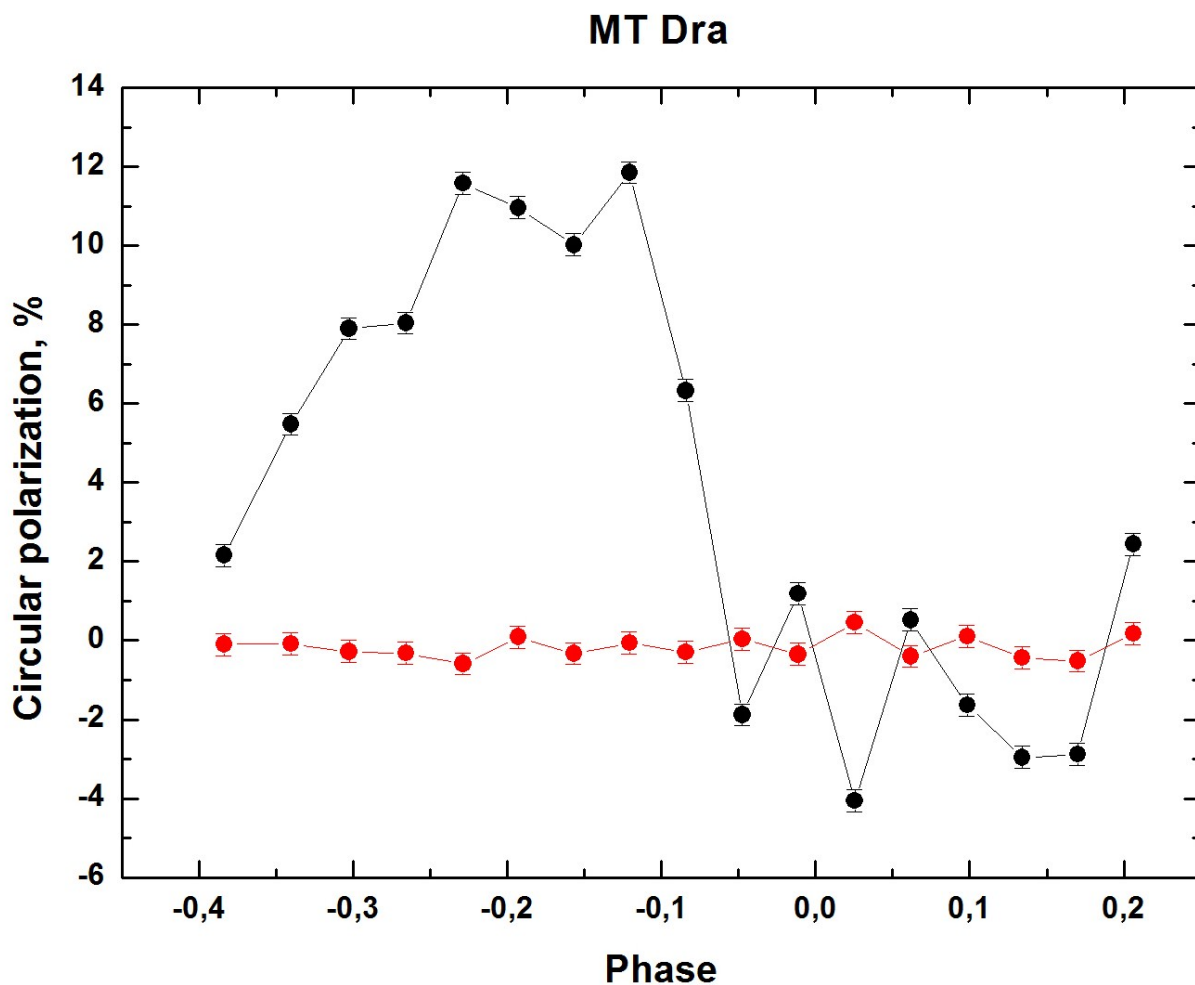


Рис. 7.14. Кривая изменения круговой поляризации излучения MT Dra в зависимости от фазы орбитального периода. Черные кружки — объект, красные кружки — звезда сравнения.

По результатам выполненных нами наблюдений все объекты нашей выборки показали наличие сильной круговой поляризации излучения. На основе этого факта мы делаем вывод, что все они являются полярными, т. е. это тесные двойные системы содержащие в виде первичного компонента сильнозамагниченный белый карлик. По нашим оценкам величины магнитных полей белых карликов исследуемых нами выборки находятся в интервале 30 — 50 МГс. Отметим, мы существенно пополнили новыми представителями группу полярных с короткими орбитальными периодами, в спектрах которых наблюдаются циклотронные гармоники.

8. Разработка унифицированных программ редукции и анализа спектрополяриметрических данных.

Алгоритмы редукции спектрополяриметрических данных, получаемых с прибором SCORPIO-N описаны в отчете 2-го этапа настоящего контракта и опубликованы в работе Афанасьева, Амирханяна и Борисова (2012). Все вычислительные алгоритмы реализованы в виде программ и функций на интерактивном языке программирования IDLv6.4_64bit и скомпонованы в библиотеке программ SCORPIO_pol.lib. В библиотеке содержится более 100 программ и функций. Обработка данных может проводиться как в режиме последовательного применения различных программ в интерпретаторе IDL так и с использованием разработанных для этой цели графических интерфейсов **ScorpioPol** и **ViewPol**.

Унификация обработки данных спектрополяриметрии в первую очередь достигается тем, что во время наблюдений экспозиции получаются в пакетном режиме и все необходимые параметры записываются в FITS-шапке изображения. В начале обработки астроном создает текстовый LOGFILE, в котором указываются исходные данные. Как правило в названии такого содержится название объекта и дата. Пример формата такого файла с именем **3C390_120414.txt** приведен ниже:

```
SIMPLE =                               T / LOG OBSERVATION POLATISATION MODE
EXT     =  '.zip'                       / EXTENTION DATA FILE
R_DIR   =  h:\obs_data.pol\s120414\      / DIRECTORY FOR READING DATA
W_DIR   =  h:\red_data.pol\3C390_120414\ / DIRECTORY FOR WRITING DATA
ANALYZER= wollaston-1                  / ANALYZER (wollaston etc.)
MODE    =  spectra                      / MODE (spectra, image)
OBJ     =  s97006                       / OBJECT CUBE (INCLUDE NEON&FLAT)
STAR_0  =  s97006                       / STANDARDS OF ZERO POLARISATION
STAR    =  s97006                       / STANDARD OF NONZERO POLARIZATION
END
```

Этот файл является входным для программ обработки

Перечислим основные программы и функции, разработанные нами для обработки данных спектрополяриметрии и поляриметрии изображений.

Программы:

- **create_LOG**, LOGFILE, Nmax=Nmax – формирование структуры, описывающей входные данные для программ редукций – имена файлов для различных значений поляризации. В рабочей директории с именем, совпадающим с

LOGFILE без расширения txt, образуется файл **log.fit**;

- **create_eta**,LOGFILE,over,sc_x,sc_y,Neta=Neta,PLOT=plot,X_SHIFT=x_shift – формирует в рабочей директории исходное изображение эталона **eta.i.fts**;
- **create_flat**,LOGFILE,over,sc_x,sc_y,PLOT=plot,X_SHIFT=x_shift - формирует в рабочей директории исходное изображение плоского поля **flat.i.fts** ;
- **create_neon**,LOGFILE,over,sc_x,sc_y,PLOT=plot,X_SHIFT=x_shift - формирует в рабочей директории исходное изображение спектра сравнения **neon.i.fts** ;
- **create_obj**,LOGFILE,over,sc_x,sc_y,X_SHIFT=x_shift,CLEAN=clean,\$
OVERSCAN=overscan,SCALE=scale - формирует в рабочей директории 4-х мерный исходный куб данных для исследуемых объектов **obj.i.fts**;
- **cube_NS_subtraction**,LOGFILE – робастное вычитание фона неба в линейаризованном кубе, формирует в рабочей директории куб **obj-sky.fts**
- **create_LOG_photometry**,LOGFILE,Nmax=Nmax – формирование структуры, описывающей данные фотометрии, формирует файл **log_phot.fit**
- **create_cube**,LOGFILE – формирование исходного куба данных фотометрии **obj_phot.fts**.
- **geometry** ,neon,tra, DY=dy,X0, Y0,X1, Y1,PLOT=plot – определение масштабных искажений по изображениям эталона и неона. Формируется файл **geometry.fit**

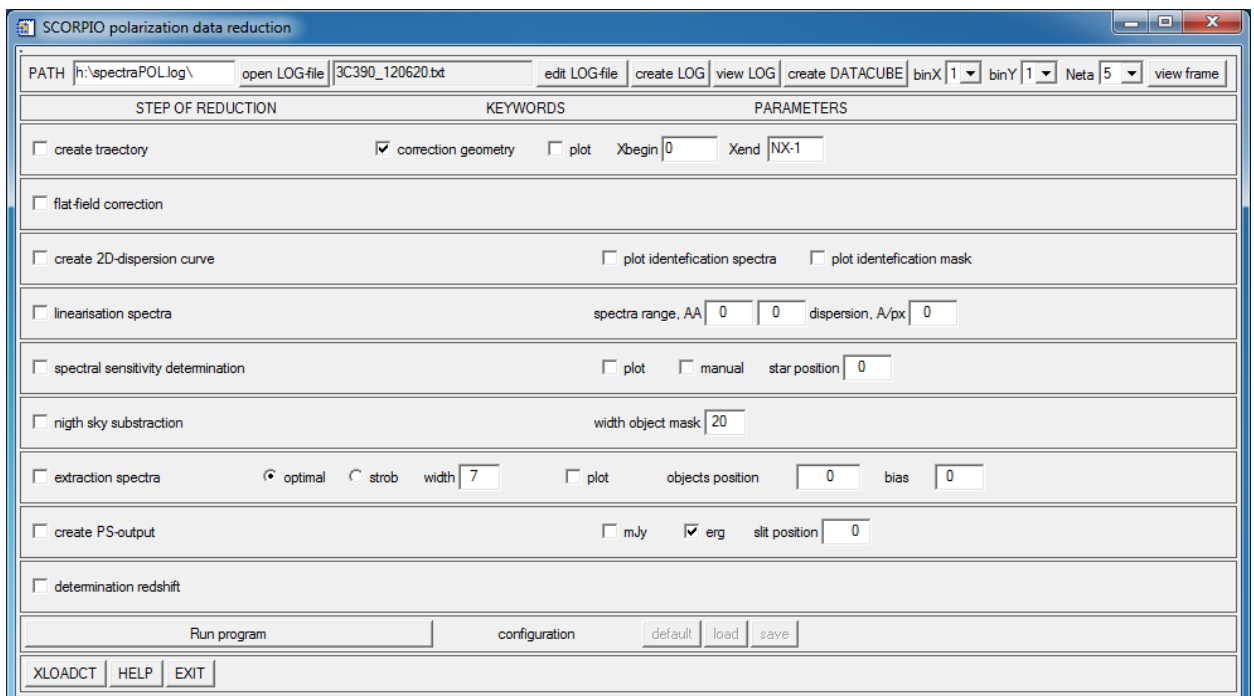
Функции:

- **create_header**,Nx,Ny,Npol,Ncube,Nray,lambda_0,d_lambda – формирование FITS-шапки для исходного куба данных **obj.i.fts**;
- **def_bias**,ima,PLOT=plot – робастное определение электронного нуля;
- **correction_geometry**,ima,tra,c,Hslit=Hslit – исправление геометрических искажений на основе построенной модели искажений, формируются исправленные изображения **eta.fts**, **flat.fts**, **neon.fts** куб данных объекта **obj.fts**;
- **clean_cosmic**,cube – чистка космических астиц в кубе данных с использованием робастных алгоритмов;
- **extraction_spectra**,ima,BROAD=broad,POS=pos,WIDTH=width,PLOT=plot – экстракция спектра из отдельного изображения;
- **create_spectra**,cube,BROAD=broad,YPOS=ypos,W=W,OPTIMAL=optimal – формирование куба спектров **spectra.fit** из линейаризованного куба после вычитания фона неба **obj-sky.fts**;
- **create_trajectory**,ima,NP=Np,X_BEG=x_beg,X_END=X_END,WX=wx,\$

NDEG=Ndeg,PLOT=plot – вычисление траекторий спектров эталона **eta_i.fits**. В рабочую директорию записывается файл **traectory.fit**;

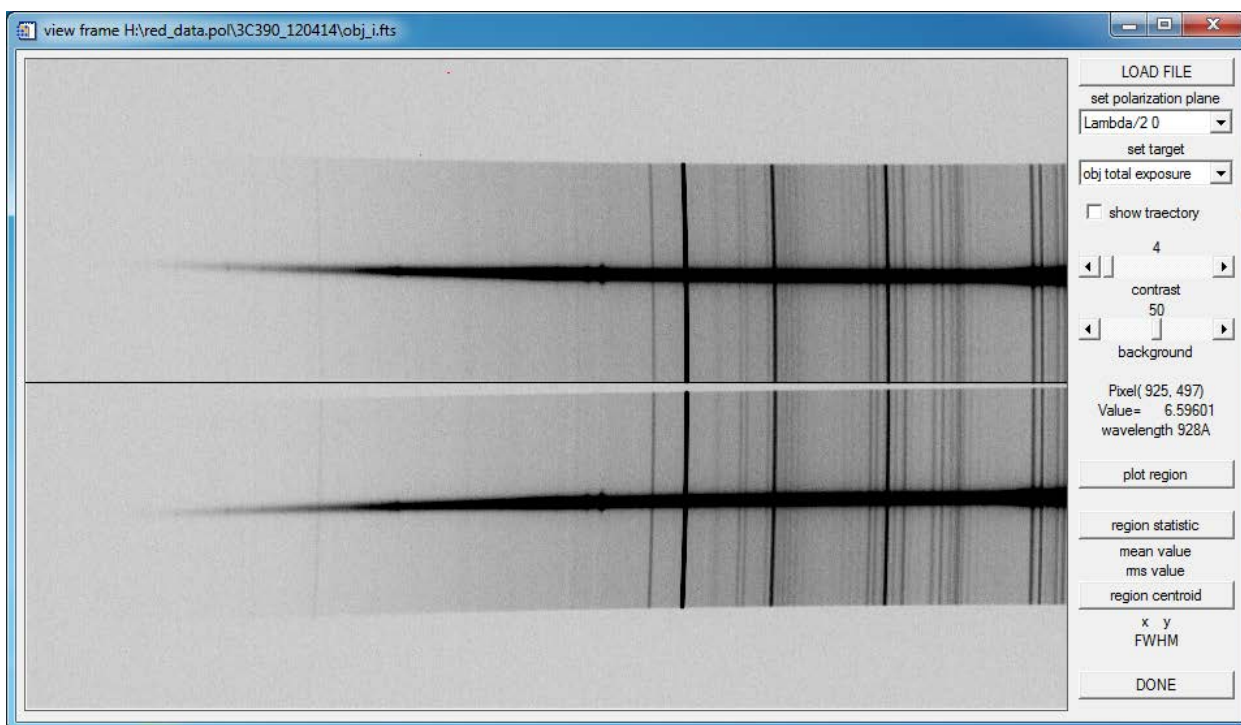
- **dispersion_2D**,neon,ident_table,N_DEG=N_deg,TRESH=tresh,PLOT=plot,DX=dx – определение двухмерной дисперсионной кривой **dispersion.fit** по измерением автоматически отождествленных линий в изображении спектра сравнения **neon.fits**;
- **linerisation_2D**,ima,disp,PARAM=param – преобразование исправленных за геометрические искажения кубов данных **obj.fits** в линейаризованные по длинам волн кубы **obj_lin.fits**.
- **create_stoks**,spectra,PLOT=plot,PA_0=pa_0,CORR=corr,WTITLE=wtitle,\$XRANGE=xrange,WAVE=wave - образование кубов векторов Стокса **stokes.fit** из куба спектров **spectra.fit** с исправлением деполяризации в атмосфере Земли.

Разработанный нами пакет программ представляет астроному самые разнообразные возможности по обработке данных, однако для достижения единообразия следует пользоваться графическим интерфейсом **SCORPIO_POL** пакета обработки:



Этот интерфейс позволяет обрабатывать данные как последовательно, так и на любом этапе пакета. В интерфейсе обработки предусмотрен графический интерфейс **ViewPol**,

который позволяет просматривать любые проекции различных кубов данных:



Наличие такой возможности крайне важно для быстрой оценки качества данных на любом этапе обработки.

Скорость обработки зависит от объема исходных данных и параметров компьютера. Так для типичных данных - наблюдения объекта и звезд сравнения в течение 1-1.5 часов (число циклов переключения фазовых элементов 6-10) и 64-х разрядного 4-х ядерного процессора INTEL с быстродействием 3.2ГГц и оперативной памятью 8 Гбайт. Полный цикл обработки занимает 10-15 минут. Как показывает опыт обработки пакет работает достаточно устойчиво, а основные проблемы при обработке возникают из-за ошибок при заполнения текстового LOGFILE.

9. Завершение работ по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N

9.1 Управление комплексом СПЕКТРОГРАФ+АДАПТЕР на аппаратном уровне

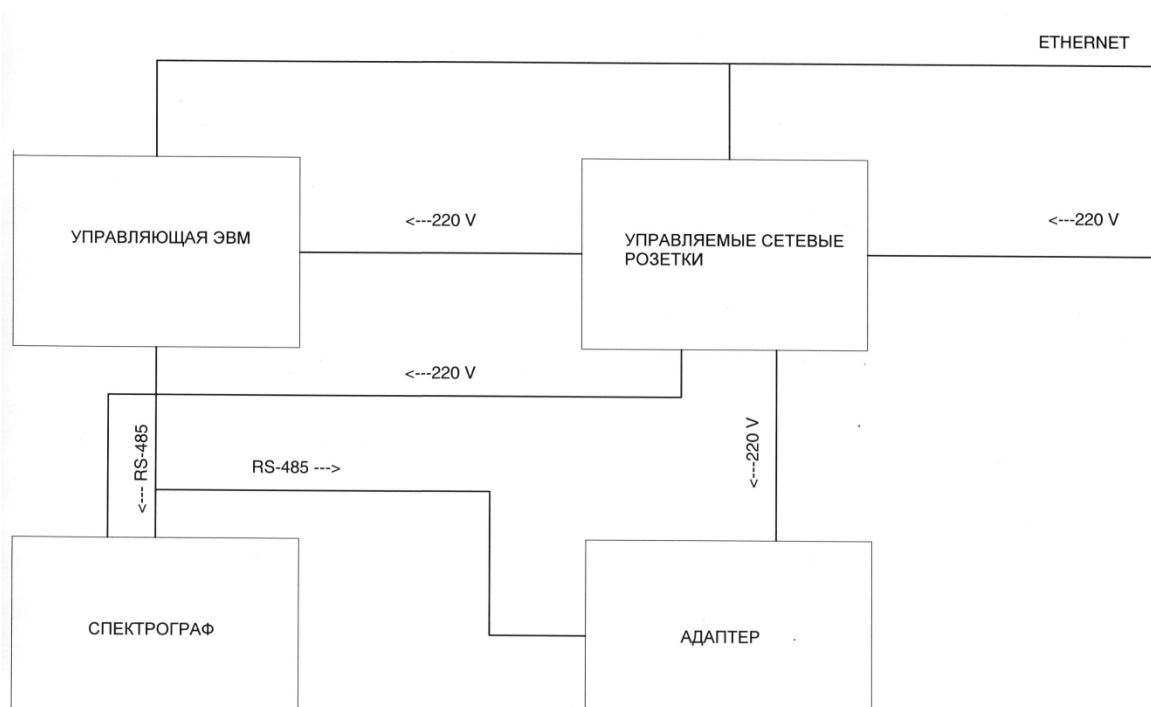
Спектрограф SCORPIO-2 собран на четырех “этажах” , где размещаются оптические элементы, из которых конструируется схема прибора, необходимая для текущих наблюдений. В спектрографе 42 сменных оптических элемента, 19 переставляемых элементов. Спектрограф крепится к фланцу телескопа через адаптер, на котором установлены схемы гидирования и калибровок. В комплексе работает 21 электромотор, текущее состояние комплекса контролируют 81 датчик. Энергоснабжение комплекса обеспечивают встроенные в спектрограф и адаптер блоки питания, управление и состояние которых также контролируется. Чтобы обеспечить удаленное управление и контроль столь обширным набором устройств используется распределенная система , включающая семь микропроцессоров: пять в спектрографе и два в адаптере. Каждый микропроцессор управляет и контролирует набором логически связанных устройств. Это обеспечивают программы, записанные в энергонезависимую память микропроцессоров. Используются микропроцессоры фирмы ATMEЛ типа АТМЕГА8515L и АТМЕГА8535L с обширным набором функций, необходимых для решения управленческих задач нескольких устройств.

Получив команду от Внешней программы, которая не противоречит текущему состоянию исполнительных элементов, программа микропроцессора приступает к ее выполнению, непрерывно контролируя состояние исполнительных устройств, находящихся в ее “подчинении”. Такое разделение “труда” позволило освободить Внешнюю программу от мелочной нагрузки, уменьшить обмен информацией и, тем самым, повысить надежность управления. Существенно, что программы, “зашитые” в микропроцессоры, построены так, что команда Внешней программы будет выполняться независимо от текущей работы исполнительных элементов.

Обмен информацией между Управлением и Внешней программой ведется с помощью стандартного протокола RS-232 , реализованного на четырехпроводной полнодуплексной линии связи RS-485. На эту же линию можно “посадить” внешние приборы , работающие с комплексом.

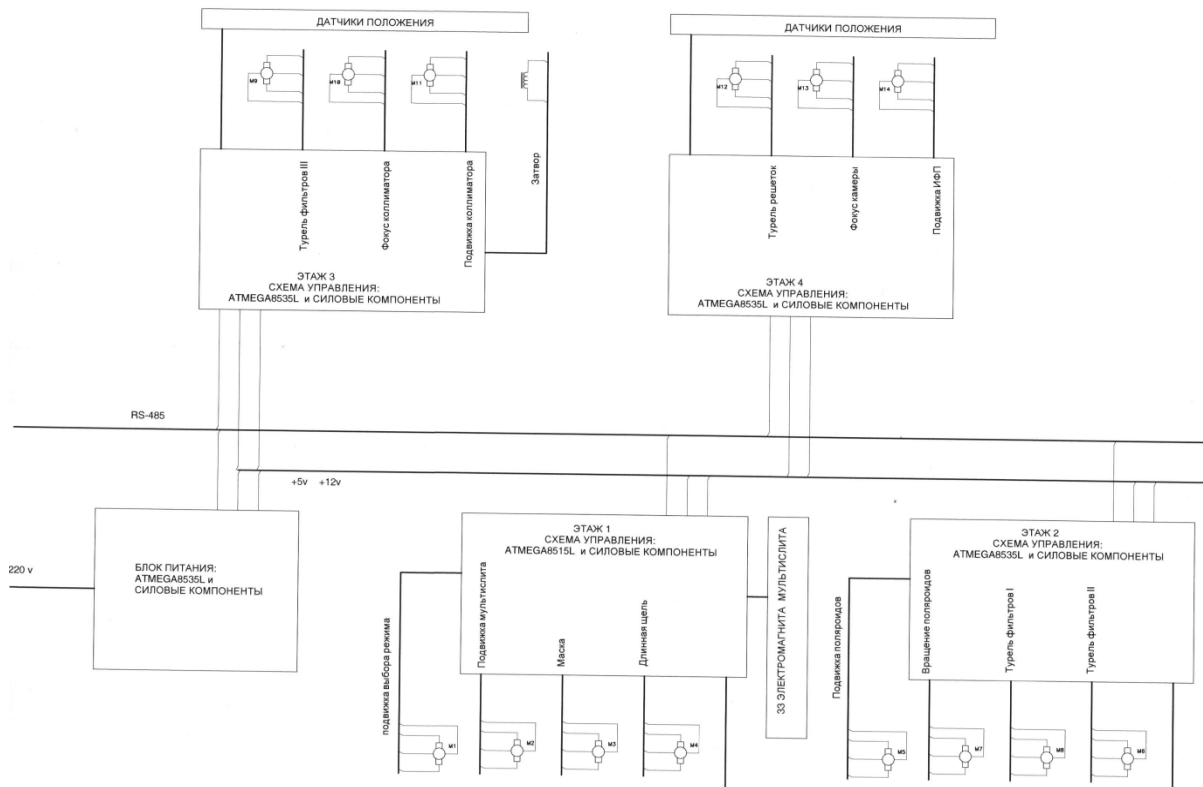
Обмен информацией между комплексом и Внешней программой возможен только по инициативе последней. Далее показаны блок-схемы системы управления комплекса СПЕКТРОГРАФ+АДАПТЕР, и отдельно – управления СПЕКТРОГРАФА и АДАПТЕРА

БЛОК-СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОГРАФ-АДАПТЕР

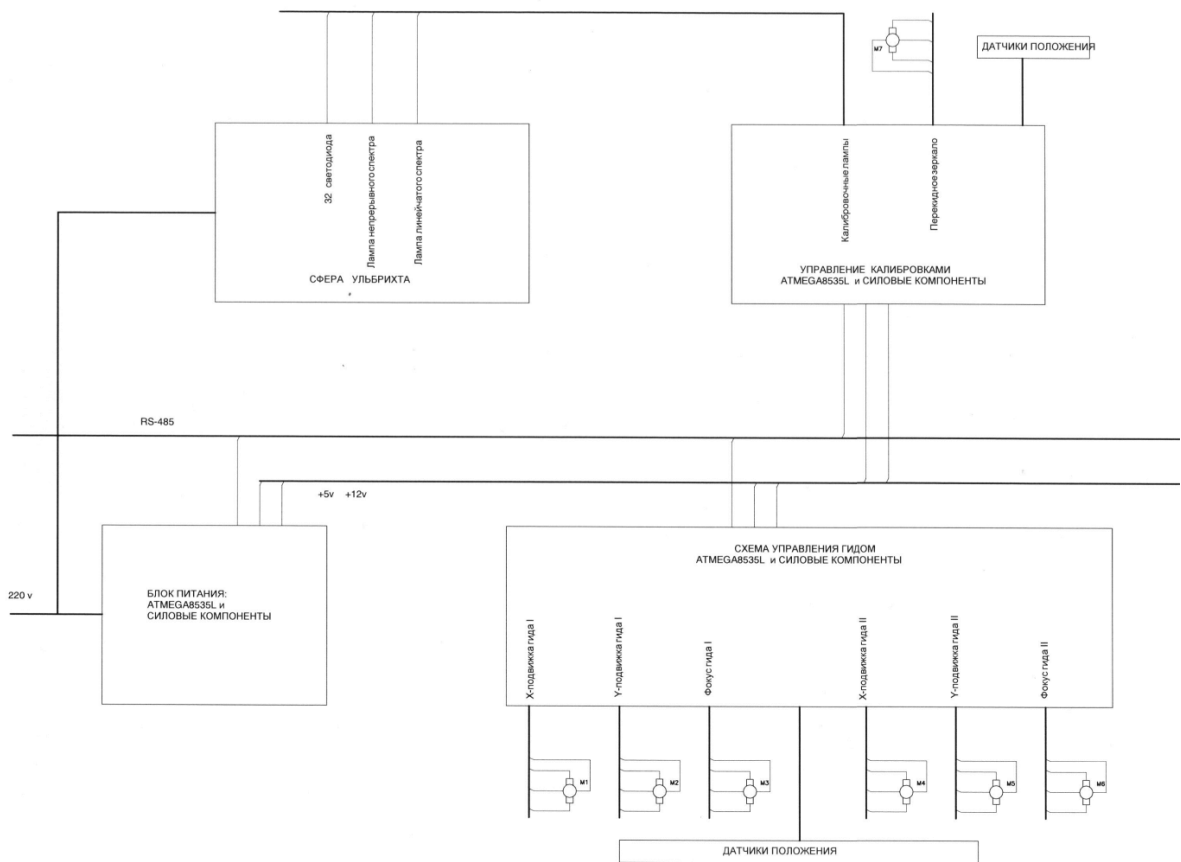


Конструктивно, схема управления этажем (микропроцессор и силовые компоненты) собрана на многослойной плате, которая монтируется рядом с исполняющими устройствами. Такая архитектура позволила существенно сократить длину и количество коммуникаций, а также упростила настройку и ремонт как схем управления , так и всего комплекса в целом.

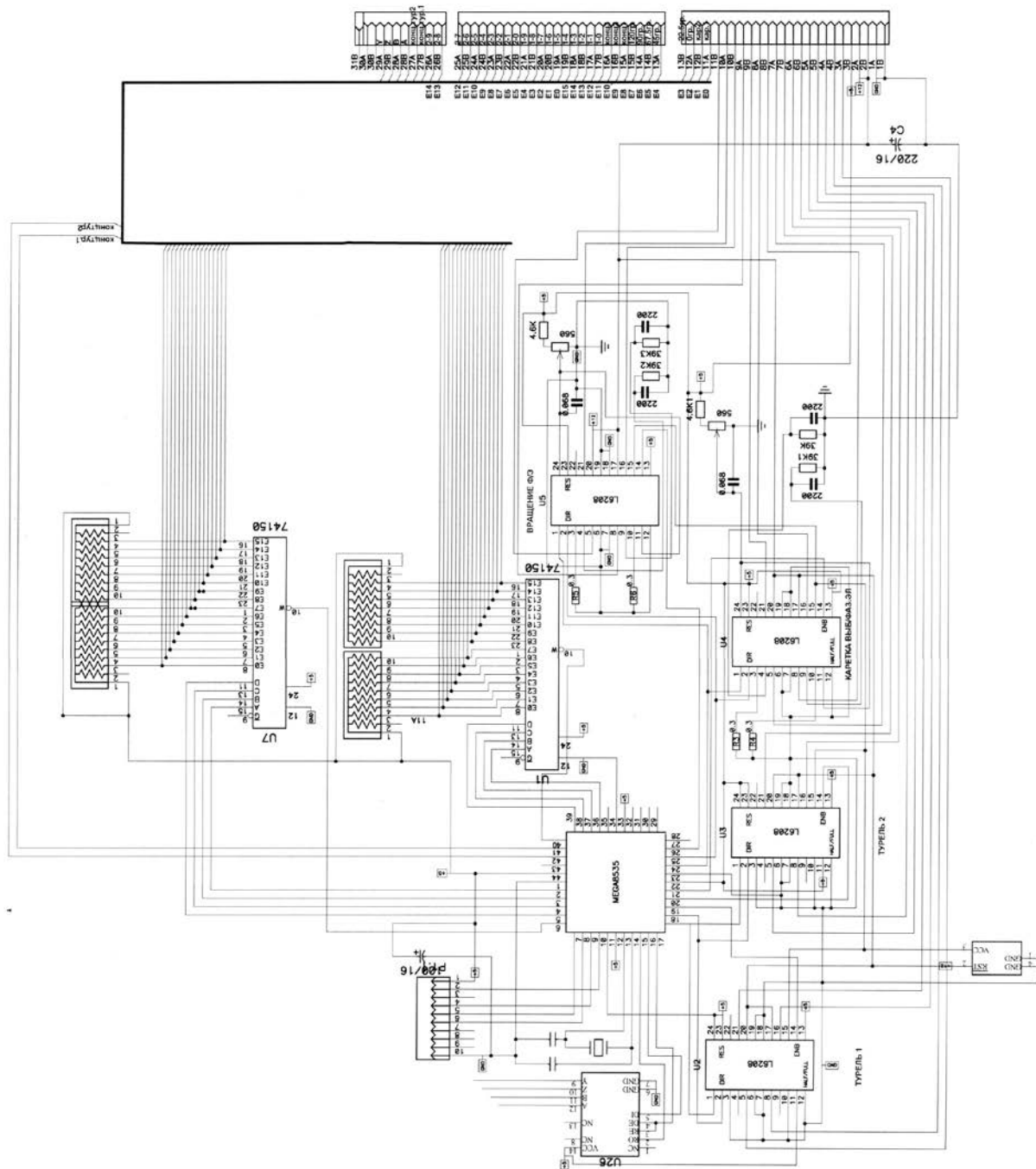
БЛОК-СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОГРАФом



БЛОК-СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ АДАПТЕРОМ



В качестве приводов использованы шаговые электродвигатели с вращающим моментом от 0.15 до 12 кг/см. Этот тип моторов работает в широком диапазоне скоростей от 0 до 5 оборотов в секунду, позволяет грубо контролировать позицию исполнительного механизма по всей траектории движения, прост в управлении, компактен.



Здесь, в качестве примера , приводим схему управления вторым ” этажом ” спектрографа.

Далее приводятся команды управления этой схемой. Формат всех команд от Внешней программы одинаковый и состоит из четырех байт. Ответ любого микропроцессора также содержит четыре байта.

Формат команд, отправляемой в микропроцессор:

Первый байт всегда есть 0x23 (в шестнадцатеричном виде).

Второй байт в четырех старших разрядах несет номер устройства, которому посылается команда. Четыре младшие разряда – номер исполняющего элемента в адресуемом устройстве.

Третий и четвертый байты указывают на конкретные действия , которые должен совершить вышеуказанный исполняющий элемент в вышеуказанном устройстве.

Формат ответа, получаемого от микропроцессора:

Первый байт ответа всегда есть 0x21 (в шестнадцатеричном виде).

Второй байт ответа повторяет второй байт команды, чтобы Внешняя программа, могла понять от кого пришел ответ (на линии может находиться до 16 устройств).

Третий и четвертый байты содержат информацию о состоянии исполняющих элементов устройства.

Пример:

команды второго “этажа” (в шестнадцатеричном виде)

23 51 00 0N – переместить подвижку с поляроидами в позицию N (N=1-4). Если N= 0 , то перемещение поляроидов прекратиться.

23 52 00 0N – повернуть турель I в позицию N(N=0-9). Если N=A, то турель остановится.

23 53 00 0N - повернуть турель II в позицию N(N=0-9). Если N=A, то турель остановится.

23 54 00 0N - повернуть поляроиды в позицию N(N=0-8). Если N=A, то турель остановится.

23 55 01 00 - опрос концевиков 0-15

Ответ микропроцессора 21 55 XX XX

0-7 биты первого байта и 0-1 биты второго байта - позиция турели I

2-3 биты второго байта - крайние позиции подвижки

4-6 биты второго байта - 0-2 позиции поляроида
7 бит второго байта - признак работы мотора каретки

23 55 02 00 - опрос концевиков 16-31

Ответ микропроцессора 21 55 XX XX

0-7 биты первого байта и 0-1 биты второго байта - позиция турели II
2-7 биты второго байта - 3-8 позиции поляроида

23 55 03 00 - опрос концевиков позиций подвижки и фиксаторов турелей, а также флаги работы моторов

Ответ микропроцессора 21 55 XX XX

Первый байт

0 бит - концевик каретки в позиции 2
1 бит - концевик каретки в позиции 3
2 бит - концевик фиксатора турели I
3 бит - концевик фиксатора турели II

Второй байт

0 бит - работает мотор каретки
1 бит - работает мотор турели I
2 бит - работает мотор турели II
3 бит - работает мотор поляроида

задания скорости шаговых электромоторов

23 57 NN NN – скорость подвижки в шагах за секунду

23 58 NN NN - скорость турели I в шагах за секунду

23 59 NN NN - скорость турели II в шагах за секунду

23 5A NN NN - скорость поляроида в шагах за секунду

Например: для скорости 504 шага / сек NN NN есть 01 F8 в шестнадцатеричном виде

Все вышеперечисленные команды выполняет программа, “защитая” в микропроцессоре второго “этажа” спектрографа, которая написана на языке программирования C++.

9.2. Программный пакет управления Платформой-адаптером SCORPIO-N

Программная оболочка запускается иконкой на рабочем столе **SCORPIO-2 + Платформа-2**, в IDL при этом компилируется и запускается программа `..\remote\remoteSCORPIO_22.pro`. Общий вид интерфейса показан на рис 1. Меню управления платформой без оболочки управления экспозициями и спектрографами запускается процедурой `platform_22.pro` (без ключей). После запуска программа каждую секунду опрашивает состояние платформы (обоих микропроцессоров) с помощью процедуры `query_adapter.pro`. Номер COM-порта устанавливается только через конфигурационный файл.

Для работы необходимы следующие библиотеки:

`platform-2` – собственно программы управления платформой

`\lamp` – программы установки яркости светодиодов

`\remote` (здесь, в сравнении со старой версией, изменена процедура `block_panels_2.pro`, добавлены `remoteSCORPIO_22.pro` – основная процедура создания интерфейса и `REMOTE_22_start.pro` – стартовый файл)

`scorpio-2` – программы управления SCORPIO-2

`Test_platform` – тестовые процедуры управления платформой.

Отличия от интерфейса управления старой платформой

Положение зеркала, ламп и концевиков подвижек постоянно мониторятся и отображаются. Во время переезда, состояние зеркала = GO

У лампы FLAT - два параметра: QUARTZ (лампа непрерывного спектра) и LEDs (линейка светодиодов). Можно выделить флажком один или сразу оба.

Вместо того, чтобы нажимать кнопки MOVE fiber 1/2, MOVE FIBERS, SHIFT, px CCD, достаточно нажать ENTER в соответствующем поле.

Можно одновременно запускать перемещения любого элемента, пока другие еще едут.

Если нажать одновременно стрелочки X и Y – будет ехать сразу по обеим координатам. `set initial` устанавливает в ноль только X и Y, не двигая фокус и зеркало.

Добавлена кнопка вызова программы управления светодиодами и лампами LEDs menu

Управление фокусами обоих микроскопов вынесено в отдельное меню (рис. 9.1), запускаемое от кнопки focusing. Из этого меню есть возможность двигать фокус

стрелочками с клавиатуры, зарезервированы поля для автофокусировки.

Временно убрано поле ShiftY (пока не проверены на телескопе смещения) и управление переменным движением (будет вынесено в отдельное меню)

Убрано управление яркостью крестов, поскольку сейчас кресты виртуальные.

При любом изменении положения зеркала обновляется файл **d:\scorpio.cfg\mirros.pos** в который записывается одно слово, соответственно FIBERS, FIELD или GO. Этот файл планируется использовать для обмена с программой гидирования.

Конфигурационные файлы

Информация о текущем состоянии платформы сохраняется в файле: **d:\scorpio.cfg\adapter-2.cfg**. Файл конфигурации перезаписывается каждый раз при любых изменениях положения микроскопов или зеркала. При этом предыдущая версия сохраняется в файл **adapter-2.cfg_bak**.

Пример файла adapter-2.cfg

```
# ADAPTER-2 MAIN CONFIGURATION: Sun Mar 18 23:17:44 2012
COM PORT: 4
# == Fibers positions [mm]
Y1 current: 1.00
X1 current: 25.00
Y2 current: 3.43
X2 current: 26.33
F1 current: 2.00
F2 current: 6.52
# == LIMITS [mm]
Y1 limit: 21.00
X1 limit: 51.00
Y2 limit: 21.00
X2 limit: 51.00
F1 limit: 9.72
F2 limit: 9.72
# == FLAT TYPES (1 = set)
QUARTZ: 0
LEDS: 1
# == Speed (reserved fields)
XY Speed: 0
F1 Speed: 0
F2 Speed: 0
```

Поля для кодов скоростей зарезервированы, но пока не используются.

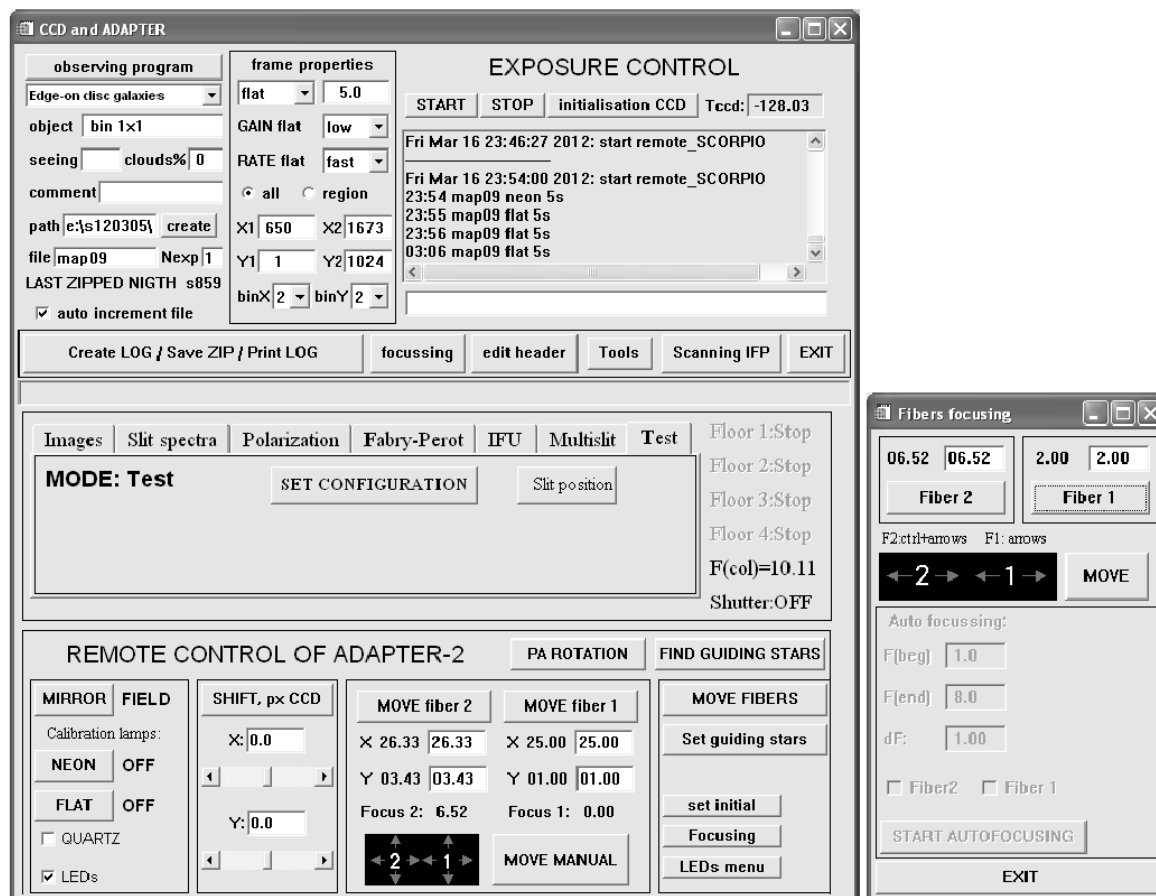


Рисунок 9.5 Меню управления SCORPIO-N с новой платформой

9.3 Программа управления калибровочными лампами осветителя SCORPIO-2

Программа запускается иконкой на рабочем столе LAMPS, при этом открывается IDL в котором компилируется и запускается программа c:\rsi\idl62\lamp\lamps_start.pro.

Конфигурационные файлы

В рабочей директории программы (c:\rsi\idl62\lamp) должен находиться файл **leds_tab.par** с описанием характеристик 32 диодов. Если файл отсутствует - программа сообщит об этом и не запустится. Пример заполнения файла:

```
# LEDs parameters for ADAPTER-2
ID NAME          CWL  FWHM  Norm
0 XSL355-5E      357  15    1.
1 XSL360-3E      361  15    1.
2 RLT365-525     365  15    1.
3 LED375-04      375  10    1.
```

4	LED385-04	385	15	1
5	RLU395-8-30	395	12	1
6	GB333UV1CL1	405	16	1
7	LED420-01	420	15	1
8	LED-435-12-30	435	20	1.
9	LED450-01	450	25	1.
10	B5B-437-IX	468	30	1.
11	B56L5111P	470	50	1.
12	LED490-03U	490	30	1
13	B5-433-B505	507	30	1.
14	B5-433-B525	528	30	1.
15	B5-435-30	625	20	1.
16	B5-435-TL	628	20	1.
17	OPE5T64UR	639	20	1
18	B5-436-30D	660	25	1
19	ELD-68-524	685	45	1.
20	ELD-700-524-1	700	45	1.
21	ELD-720-524	720	30	1.
22	ELD-740-524	740	30	1.
23	LED-760-03AU	760	25	1.
24	LED770-03AU	770	35	1
25	ELD-810-525	810	30	1.
26	ELD-840-515	840	35	1.
27	ELD-870f-515-2	870	70	1.
28	LED910-01	910	60	1.
29	LED970-xx	970	55	1.
30	LED1050-03	1050	50	1.
31	LED1070-03	1070	50	1

Указаны – порядковый номер диода, его фабричная маркировка, центральная длина волны максимума излучения (CWL), полуширина полосы (FWHM) и нормировочный коэффициент (Norm), на который умножается кривая пропускания при отображении графиков.

Этот файл можно править любым текстовым редактором. Нажав кнопку REFRESH в программе управления лампами можно сразу обновить график со спектральными характеристиками включенных светодиодов.

Также пользователь может сохранять и загружать файлы *.cfg с желаемыми установками "эквалайзера". Пример содержимого такого файла:

```
# LEDS fluxes Thu Oct 27 14:38:30 2011
COM3
52
51
52
49
32
```

32
22
17
17
16
16
9
11
11
11
10
11
13
11
16
14
16
17
19
19
16
17
14
14
14
16
16

Здесь после заголовка указано имя управляющего COM-порта и установленные яркости для всех 32 светодиодов.

Задание спектральных характеристик светодиодов

В директории (c:\rsi\idl62\lamp\LEDs_curves) располагаются ASCII-файлы содержащие спектральные кривые излучения светодиодов: 00.txt, 01.txt,...31.txt. Если файл отсутствует, то светодиоду присваивается нулевая интенсивность. Формат файла – заголовок (первая строка) и таблица из двух колонок: длина волны и интенсивность (нормированная на максимум). Шаг по длинам волн может быть любым. Кнопка REFRESH в программе управления лампами заново считывает эти файлы, чтобы обновить график со спектральными характеристиками включенных светодиодов. Пример файла с характеристиками диода номер "0":

```
XSL355-5E  
350.000 0.546726  
351.000 0.641713  
352.000 0.734867
```

353.000	0.821058
354.000	0.895025
355.000	0.951905
356.000	0.987753
357.000	1.00000
358.000	0.987753
359.000	0.951905
360.000	0.895025
361.000	0.821058
362.000	0.734867
363.000	0.641713
364.000	0.546726
365.000	0.454459
366.000	0.368567
367.000	0.291632
368.000	0.225139
369.000	0.169576
370.000	0.124616
371.000	0.0893465
372.000	0.0625000
373.000	0.0426559
374.000	0.0284037
375.000	0.0184530
376.000	0.0116965
377.000	0.00723340
378.000	0.00436440
379.000	0.00256924
380.000	0.00147564

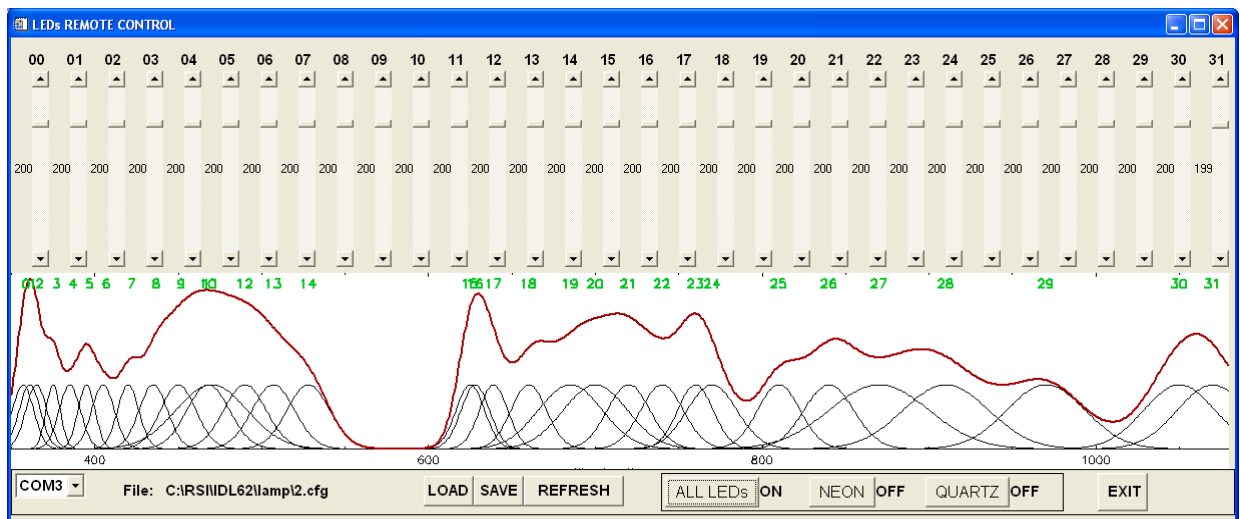


Рисунок 9.6 Меню управления осветителем.

Описание интерфейса

Меню программы показано на рис. 9.2. Верхний ряд – “эквайзер”, позволяющий выставить яркость светодиодов в градациях от 0 до 253. Перемещение любого "ползунка" приводит к изменению высоты гауссианы, показывающей в графическом окне спектральную кривую излучения данного светодиода. Если светодиоды включены (кнопка ALL LEDs в положении ON), то меняется яркость свечения светодиода.

В графическом окне черным показаны спектральные кривые всех светодиодов, с яркость больше нуля. Отображаемая высота гауссиан является произведением установленного в "эквайзере" кода яркости и нормировочного коэффициента из **leds_tab.par**. Красная кривая показывает суммарную спектральную характеристику для всех светодиодов. Зеленые цифрами сверху отмечены соответствующие номера светодиодов.

Нижняя панель:

TEST/COM: выбор номера последовательного порта.

LOAD/SAVE: загрузка/запись текущей конфигурации зажженных светодиодов. Рядом отображается имя файла.

REFRESH: заново считывает содержимое файла leds_tab.par. Это позволяет обновлять нормировочные коэффициенты и параметры спектральной характеристики светодиодов без перезапуска программы.

ALL LEDs: включение/выключение светодиодов.

NEON: включение/выключение лампы СГЗС

FLAT: включение/выключение лампы непрерывного спектра.

10 Разработка WEB-интерфейса доступа к системам обработки данных SCORPIO-N.

Важным элементом системы обработки данных является система архивирования, быстрого поиска и просмотра. Важным также является наличие удаленного доступа из при помощи WEB-интерфейса как к исходным, так и обработанным данным, получаемым со спектрографом SCORPIO.

Для этой цели нами модернизирован в ходе выполнения контракта интерфейс архива наблюдательных данных, **ASPID** (Archive of Spectral, Photometric and Interferometric Data). Этот архив был специально разработан для работы с данными, получаемыми на БТА с методами низкого и умеренного спектрального разрешения. Архив представляет собой многоуровневую системы архивирования и хранения данных и имеет такие характеристики:

- Предназначен для архивизации и оперативного доступа к данным, полученным на БТА с методами IFP, MPFS, MOFS и SCORPIO;
- Проект реализован и поддерживается силами лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов CAO;
- ASPID состоит из двух частей:
 - WINDOWS приложения, реализованного в среде BDE, предназначенного для создания архива ночи наблюдений, редактирования FITS-заголовков, поиска записей, просмотра журнала наблюдений;
 - UNIX приложения, реализованного в среде PostgreSQL и PLEINPOT, предназначенного для оперативного доступа к архиву через ИНТЕРНЕТ.

Схема записи наблюдательных данных в архив показана на рис.10.1.

В течение ночи наблюдений получаемые на SCORPIO изображения записываются в компьютер сбора данных, установленный в кабине первичного фокуса 6-м телескопа. Изображения записываются в файлы в международном FITS-формате с таким наименованием:

sXXXCNN.fts,

где s – прибор (SCORPIO), с которым получены данные, XXX – номер текущей ночи, с момента запуска прибора на БТА, CC - номер куба данных, NN – номер записи внутри куба.

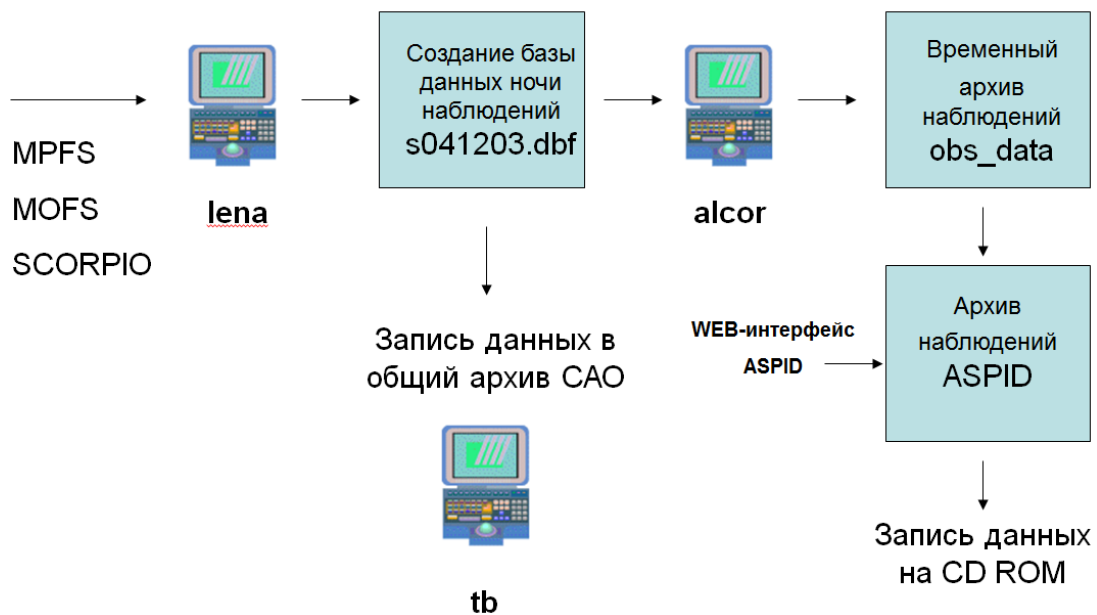


Рис.10.1 Схема записи данных в архив ASPID

Поиск по базе данных ASPID

Search

Имя объекта или координаты Искать в r(arcmin)
 Пример: n23 или ngc23 или "0 9 53.42 +25 55 25.4" или "2.472566 25.923710"

Тип изображения Телескопы Даты наблюдений ОТ: ДО:

Поля для вывода:
 Record Id
 Path
Filename
 Dataset Id
 Dataset Name
Target Name
 J2000 Coordinates
 Local Date&Time

Инструменты: MOFS, MPFS, SCORPIO, **SCORPIO-2**, TIGER

Режимы наблюдений: SCORPIO:IMAGESPOL, SCORPIO:SPECTRA, **SCORPIO:SPECTRA POL**, SCORPIO:SPECTRAMUL, SCORPIO:SPECTRAPOL

Детекторы: -= любой детектор -=, CCD ISD017A, CCD K585, CCD TK1024, **E2V CCD42-90 RED**

Наблюдательные программы: Magnetic cataclysmic variables, **Magnetic field in AGN**, Magnetic fields AGN, Magnetic fields in AGN, Mark Galaxies

Авторы программ: Movsesian, Munoz-Tunon, NIKOGOSIAN, **Navtsvlishvily**, PANCHUK

Возвращать: 50 строк на страницу

Search

Рис.10.2 WEB-интерфейс архива ASPID

При этом данные ночи записываются в директорию с таким наименованием:

sYYMMDD,

где s – прибор, YY – две последние цифры даты наблюдений, MM – месяц, DD – день наблюдений.

После ночи наблюдений в рабочей директории формируется журнал наблюдений, автоматически архивируются и переносятся в рабочий архив **obs_data/SCORPIO** на сервере **ALCOR** и записываются в общий архив CAO РАН OASIS. Далее в течение месяца средствами приложения Windows **ASPID_ADM**, формируется постоянный архив, который записывается на сервере **ALCOR** в директорию ASPID, и далее преобразуются в формат, доступный для поиска и чтения из WEB-интерфейса. Доступ к интерфейсу архива ASPID, вид которого показан на рис.10.2 осуществляется по адресу <http://alcor.sao.ru/db/aspid/>. Результат поиска, по запросу, который отмечен в интерфейсе синим цветом (см. рис.10.1) показан ниже:

cdnum	fname	±Target Name	+RA2000	+Dec2000	-Start time	+type	+Exp	-Inst	+Mode	-Proposal	-Author	Tools
cd272	S8680104.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:00:51.50	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680105.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:03:05.32	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680106.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:05:20.48	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680107.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:07:36.10	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680108.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:09:49.71	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680109.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:12:05.35	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680110.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:14:22.09	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680111.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:16:37.20	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680112.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:18:50.32	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680113.FTS	BD332642	(15h 52m 01.16s, +32d 56m 49.0s)		2011-05-03 00:21:05.95	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680201.FTS	BD332642	(15h 52m 01.27s, +32d 56m 49.2s)		2011-05-03 00:41:30.95	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680202.FTS	BD332642	(15h 52m 01.27s, +32d 56m 49.2s)		2011-05-03 00:43:48.09	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8680203.FTS	BD332642	(15h 52m 01.27s, +32d 56m 49.2s)		2011-05-03 00:46:02.25	obj	120	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690206.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.29s, +32d 56m 47.1s)		2011-05-03 23:28:42.78	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690207.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.31s, +32d 56m 47.9s)		2011-05-03 23:29:57.20	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690208.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.33s, +32d 56m 47.2s)		2011-05-03 23:31:11.53	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690209.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.32s, +32d 56m 46.9s)		2011-05-03 23:32:27.93	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690210.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.32s, +32d 56m 47.1s)		2011-05-03 23:34:09.06	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690211.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.35s, +32d 56m 47.3s)		2011-05-03 23:35:23.60	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690212.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.29s, +32d 56m 46.8s)		2011-05-03 23:36:35.96	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690213.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.30s, +32d 56m 47.9s)		2011-05-03 23:37:51.03	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690214.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.33s, +32d 56m 47.7s)		2011-05-03 23:40:36.48	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690215.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.33s, +32d 56m 47.7s)		2011-05-03 23:41:53.31	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690216.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.33s, +32d 56m 47.7s)		2011-05-03 23:43:07.70	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D
cd272	S8690217.FTS	BD33D2642	(15h 52m 01.33s, +32d 56m 47.7s)		2011-05-03 23:44:22	obj	60	SCORPIO-2	SPECTRA	Magnetic field in AGN	Navtsvlishvili	P F L D

Здесь синим цветом отмечены «активные» области таблиц нажатие их (слева направо) позволяет выбрать:

- Все записи в архиве для звезды [BD33D2642](#) (при этом ASPID допускает различные написания имени объекта);
- Все записи (файлы) полученные по программе «Magnetic field in AGN»;
- Все записи (файлы) полученные по программам заявителя Navtsvlishvili;
- Просмотреть изображение (нажатие буквы P);
- Прочитать шапку FITS-файла - нажатие буквы F;

- Прочитать журнал ночи наблюдений - нажатие буквы L;
- Извлечение записи (файла) из архива по сети – нажатие буквы D (авторизованный доступ).

Надо отметить, что в описанном WEB-интерфейсе реализованы достаточно простые функции работы с данными наблюдений в архиве ASPID. При поиске объектов в интерфейсе предусмотрена возможность подключения к интернациональным базам астрономических данных – SIMBAD, LEDA и MIGALE. В принципе, на языке SQL-запросов могут быть реализованы самые разнообразные операции с наблюдательными, данным содержащимися в архиве - статистика ясного времени и качества изображений, анализ потерь времени, распределение времени по наблюдательным программам и заявителям им т.д. Учитывая, что реально прибор SCORPIO работает практически все безлунное время на БТА (около 60% календарного времени), такие возможности представляют несомненный интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем отчете, иллюстрирующем работы 3-го этапа госконтракта, приводятся результаты анализа наблюдательных данных, полученных на БТА и описаны разработанные методы. Так, нами были проведены дополнительные наблюдения на 6-м телескопе БТА ионизированного газа в кольцевых галактиках, для которых было проведено численное моделирование. Для выборки активных галактик впервые получены оценки магнитных полей в их ядрах. Для газово-пылевого комплекса «Egg» и некоторых пекулярных звезд с газово-пылевыми оболочками сделаны оценки физических параметров оболочек. Проведено обобщение работ за весь период контакта и сформулированы рекомендации для дальнейших исследований. На 6-м телескопе проведен спектрополяриметрический мониторинг двух активных галактик - радиогалактики 3C390.3 и сейфертовской галактики Маркарян 6, и изучена переменность круговой поляризации четырех слабых полярных звездной величины 17.5-19.5. Разработаны унифицированные программы редукции и анализа спектро-поляриметрических данных, завершены работы по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N и реализован WEB-интерфейс доступа к системе обработки данных.

При выполнении контракта в 2011 г. разработаны программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс и подготовлены необходимые научно-методические материалы.

Работы проводились с привлечением молодых специалистов, аспирантов и студентов.

В результате выполнения работ по контакту в части проведения новых наблюдений при помощи сканирующего интерферометра Фабри-Перо впервые изучена кинематика ионизированного газа в этой галактик уникальной кольцевой галактики - Объекта Хога, выполнены наблюдения 14-ти новых кольцевых галактик из составленного нами каталога на основ обзора SDSS. Для двух кольцевых галактик SPRC-7 и SPRC-260 на основании данных наблюдений на 6-м телескопе проведено численное моделирование динамики газа на полярных орбитах.

В рамках представлений о том, зависимость степени поляризации в аккреционном диске возникает вследствие деполяризации излучения на фарадеевском вращении в магнитном поле, сделаны оценки напряженности магнитного поля в области аккреционных дисков AGN и на горизонте событий для выборки активных галактик, для которых ранее на БТА были приведены спектрополяриметрические наблюдения. Проведен мониторинг изменения параметров поляризации в радиогалактике 3C390.3 и

сейфертовской галактике Маркарян 6. В части исследования поляризации газово-пылевых туманностей нашей Галактики проведены дополнительные наблюдения различных типов звезд с оболочками и разработана самосогласованная модель туманности AFGL2688.

Завершены работы по системе управления SCORPIO-N, с целью повешения точности усовершенствованы алгоритмы редукции данных двухмерной спектроскопии с ИФП и спектрополяриметрии на этом приборе, разработано и внедрено в практику наблюдений специализированное программное обеспечение для высокоточной редукции данных поляриметрии. Реализован WEB-интерфейс удаленного доступа к системе обработки.

Выполнение индикаторов проекта:

К проведению исследований привлечены 12 молодых участников (в т.ч. 3 аспиранта и 4 студента). Среди исполнителей - 2 доктора наук и 6 кандидатов наук (из них трое молодых). Всего в 2012 году было привлечено 500 000 руб. из внебюджетных средств (Завершение работ по системе дистанционного доступа к SCORPIO-N и разработка WEB-интерфейса доступа к системам обработки данных SCORPIO-N). Доля молодых участников в общем ФОТ в 2012 году составляет 53%.

Разрабатываемые методы наблюдений рекомендуется использовать не только на телескопе БТА, но и на других телескопах. Данные разработки и полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики. Дальнейшая разработка методики, несомненно, внесет большой вклад в эту область науки. В связи с тем, что все представленные в отчете разработки методов проводятся в лабораториях САО РАН, данные результаты эффективны как в экономическом плане, так и в плане внедрения этих разработок.

Таким образом, настоящий Отчет иллюстрирует, что все задачи, поставленные по государственному контракту на третьем этапе выполнены полностью и в соответствии с Техническим заданием и Календарным планом.

Руководитель работ,

Афанасьев В.Л.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Аксон и др. (D.J. Axon, A. Robinson, S. Young et al.), Mem. Soc. Astron. Ital. **79**, 1213 (2008).

Аршакян и др., (Arshakian, T. G.; León-Tavares, J.; Lobanov, A. P.; Chavushyan, V. H.; Sharovalova, A. I.; Burenkov, A. N.; Zensus, J. A.), MNRAS, **401**, 1231 (2010)

Афанасьев и др., Письма в Астрон.журн. **37**, 333 (2011)

Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), arXiv:astro-ph/0503095 (2005).

Афанасьев и др., Proceedings of International Conference on Physics of Magnetic Stars, NizhijArkhyz, p.238 (2007)

Афанасьев ВЛ., Амирханян В.Р. и Борисов Н.В., Астрофизический бюллетень, **67**, 123 (2012)

Афанасьев и др. (V.L. Afanasiev, E.B. Gazhur, S.R. Zhelenkov and A.V. Moiseev), Bull. SAO **58**, 90 (2004).

Блендфорд, Знаек (R.D. Blandford and R.L. Znajek) MNRAS **179**, 433 (1977).

Блендфорд, Пейн (R.D. Blandford and D. Payne), MNRAS **199**, 833 (1982).

Браатц и др. (J.A. Braatz, A.S. Wilson and C. Henkel), Astrophys. J. Suppl. Ser. **110**, 321, (1997).

Варрен и др. (Warren S. R., Weisz D. R., Skillman E. D. et al.), Astrophysical Journal, **738**, 10 (2011)

Вестергаард, Петерсон (M. Vestergaard and B.M. Peterson), Astrophys. J. **641**, 689 (2006).

Ву, Хан (X.-B. Wu and J.L. Han), Astrophys. J. **561**, L59 (2001).

Гнедин, Силантьев (Yu.N. Gnedin and N.A. Silant'ev), Astrophys. Space Sci. **102**, 375 (1984).

Гнедин, Силантьев (Yu.N. Gnedin and N.A. Silant'ev), *Astrophys. Space Phys.* **10**, 1 (1997).

Гнедин Ю.Н., Силантьев Н.А., Штернин П.С., *Письма в Астрон. журн.* **32**, 42 (2006).

Гудрич, Миллер (R.W. Goodrich and J.S. Miller), *Astrophys. J.* **434**, 82 (1994).

Долгинов и др. (A.Z. Dolginov, Yu.N. Gnedin and N.A.Silant'ev), *Propagation and Polarization of Radiation in Cosmic Media* (New York: Gordon and Breach Publ. 1995).

Иноуэ и др. (H. Inoue, Y. Terashima and L.C. Ho) arXiv:astro-ph/0703350 (2007).

Као (X. Cao), arXiv:1001.3201 (2010).

Крамми и др. (J. Crummy, A.C. Fabian, L. Gallo and R.R. Ross), arXiv:astro-ph/0511457 (2005).

Кроппер (Cropper M.), *SSRv*, **54**, 195, (1990)

Ландстрит и Энжел (J.D.Landstreet, J.R.P.Angel) , *ApJ*, **211**, 825 (1977)

Лютиков (M. Lyutikov), arXiv:0903.1111 (2009).

Ма и др. (R.-Y. Ma, F. Yang and D.-X. Wang), *Astrophys. J.* **671**, 1981 (2007).

Моисеев и др.(Moiseev A.V., Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P.), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **418**, 244 (2011)

Моисеев и Лозинская (Moiseev A.V., Lozinskaya T.A.), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **423**, 1831 (2012)

Нагао и др. (T. Nagaо, T. Murayama and Y. Taniguchi), *Astron. J.* **128**, 109 (2004).

Новиков, Торн (I.E. Novikov and K.S. Thorne), *Black-Holes, Les Houches* (Ed. C. DeWitt, B. DeWitt, New York: Gordon and Breach, 1973).

Петерсон и др. (B.M. Peterson, L. Ferrarese, K.M. Gillbert, et al.), *Astrophys. J.* **613**, 682 (2004).

Пиотрович М.Ю., Гнедин Ю.Н., Нацвлишвили Т.М., Силантьев Н.А., *Письма в Астрон. журн.* **36**, 411 (2010).

Садовский, Сикора (A. Sadovski and M. Sikora), arXiv:1001.2771 (2010).

Сатяпал и др. (S. Satyapal, R.P. Dudik, B. O'Halloran and M. Gliozzi), *Astrophys. J.* **633**,86 (2005).

Силантьев (N.A. Silant'ev), *Astron. Astrophys.* **433**, 1117 (2005).

Силантьев и др. (N.A. Silant'ev, M.Yu. Piotrovich, Yu.N. Gnedin and T.M. Natsvlishvili), *Astron. Astrophys.* **507**, 171 (2009).

Смит и др. (J.E. Smith, S. Young, A. Robinson et al.), *MNRAS* **335**, 773 (2002).

Смит и др. (J.E.Smith et al.), *MNRAS*, **359**,846 (2005)

Соболев В.В., *Астрон. журн.* **36** (1949).

Турншек и др. (D.A. Turnshek, R.C. Bohlin, R.L. Williamson et al.), *Astron. J.* **99**, 1243 (1990a).

Турншек и др. (D.A. Turnshek, R.C. Bohlin, R.L. Williamson et al.), *Astron. J.* **99**, 1344 (1990b).

Эраклиус и Гальперн (Eracleous, M. & Halpern, J.P.), *ApJS*, **90**, 1 (1994)

Харб и др. (Kharb et al.), *ApJ*, **652**, 177 (2006)

Харрингтон (J.P.Harrington) , ApJ, **3**, L165 (1969)

Хо и др. (L.C. Ho, J. Darling and J.E. Greene), Astrophys. J. **177**, 103 (2008).

Чандрасекар (S. Chandrasekhar), *Radiative Transfer* (Oxford: Clarendon Press,1950).

Шакура, Сюняев (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), Astron. Astrophys. **24**, 337 (1973).

Шапиро (S.L. Shapiro), arXiv:0711.1537 (2007).

Шаповалова и др. (Shapovalova, A. I.; Popović, L. Č.; Burenkov, A. N. at al.), Astronomy and Astrophysics, **517**, 42 (2010)

Швопе (Schwope, A. D.), RvMA, **8**, 125, (1995)

Шмидт и др.(Schmidt, et. al.), ApJ, **654**, 521, (2007)

Шмидт и др.(Schmidt, et. al.), ApJ, **620**, 422, (2005)