

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

УДК 524

№ госрегистрации 01201273568

Инв.№ 10/12

УТВЕРЖДАЮ
Директор
д-р физ.-мат.наук, член-корр. РАН

Ю.Ю.Балега
«15» ноября 2012 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

Шифр заявки «2012 1.4 12 000 1011 001»
Соглашение от 23 июля 2012 г. № 8173

по теме:

ПРОВЕДЕНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ
НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН

1. Фотометрическое и спектральное исследование кандидатов в галактики с полярными кольцами.
2. Изучение галактик в войдах по наблюдениям на БТА и данным SDSS.
3. Исследование кинематики и звездных населений дисковых галактик по данным наблюдений 6 метрового телескопа.
4. Исследование переменности излучения сверхкритического аккреционного диска SS433.
5. Анализ спектров SS433 и измерение массы черной дыры с этой системе.
6. Анализ фотометрических и спектроскопических данных выборки пятенно-активных звезд по результатам наблюдений на телескопах САО РАН.
7. Разработка дифракционного устройства для снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения.
8. Спектроскопическое исследование Полярной Звезды.
9. Изучение влияния атмосферной турбулентности при наблюдениях на оптическом телескопе БТА.
10. Разработка широкоугольной светосильной камеры для фотометрического поиска внесолнечных планет.
(заключительный, этап № 1)

Руководитель работ, канд. физ.-мат. наук,

И.П.Костюк

подпись, дата

Нижний Архыз

2012

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, директор, д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН		Ю.Ю.Балега (введение, заключение, раздел 2,3,6,7)
Исполнители темы:		
Ученый секретарь, канд. физ.-мат. наук		И.П.Костюк (введение, заключение, раздел 2,3,6,7)
Зав. лаб., докт. физ.-мат. наук		С.Н.Фабрика (раздел)
Главный научный сотрудник, докт. физ.-мат. наук		В.Е. Панчук (раздел 2,3,6)
Ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		А.В.Моисеев (раздел 2,3,6)
Ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		С.А.Пустильник (раздел 2,3,6)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		А.Н. Буренков (раздел 6)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Н.В.Борисов (раздел 2,3,6)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		М.В. Юшкин (раздел 2,3)
Старший научный сотрудник, канд. техн. наук		М.В. Якопов (раздел 2,6)
Научный сотрудник, канд. техн. наук		Э.В. Емельянов (раздел 2)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		А.Ф.Валеев (раздел 6)
Аспирант		М.М.Габдеев
Аспирант		А.С. Винокуров
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		О.А. Меркулова (раздел 6)
Младший научный сотрудник		Ю.А. Лямина (раздел 2)
Ведущий инженер		И.Ю.Катков (раздел)
Аспирант		К.Е.Атапин (раздел)

Аспирант		П.С.Медведев (раздел)
Аспирант		А.И.Колбин (раздел)
Аспирант		А.С.Булейкин (раздел)
Инженер-исследователь		Е.Н.Канев (раздел)
Младший научный сотрудник		Е.А.Копылов (раздел)
Младший научный сотрудник		Е.Н.Соков (раздел)
Нормоконтролер		Ш.А.Узденова

Реферат

Отчет 94 стр., 76 рис., 6 таблиц

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ, МЕТОДЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ, АСТРОФИЗИКА

Объектом исследования являются астрономические объекты, наблюдения которых были проведены в оптическом диапазоне длин волн на оптических телескопах САО РАН (6-м телескопе БТА и 1-м телескопе Цейсс-1000) и методы их наблюдений..

Цель работы – Выполнение исследований астрономических объектов на основании наблюдений, полученных на оптических телескопах САО РАН. Повышение уровня квалификации и мобильности научных и научно-педагогических кадров.

На базе САО РАН действует почти 15 лет научно-образовательный центр «Наземная астрономия», в котором проходят подготовку студенты и аспиранты в области астрономии.

Темы краткосрочных ПНИР, к выполнению которых привлекались аспиранты и сотрудники вузов и научно-исследовательских организаций:

1. Фотометрическое и спектральное исследование кандидатов в галактики с полярными кольцами.
2. Изучение галактик в войдах по наблюдениям на БТА и данным SDSS.
3. Исследование кинематики и звездных населений линзовидных галактик по данным наблюдений 6-м телескопа.
4. Изучение сверхкритического аккреционного диска SS433.
5. Анализ спектров SS433 и измерение массы черной дыры в этой системе.
6. Анализ фотометрических и спектроскопических данных выборки пятенно-активных звезд по результатам наблюдений на телескопах САО РАН.
7. Разработка дифракционного устройства для снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения.
8. Спектроскопическое исследование Полярной звезды.
9. Изучение влияния атмосферной турбулентности при наблюдениях на оптическом телескопе БТА.
10. Разработка широкоугольной светосильной камеры для фотометрического поиска внесолнечных планет.

Обсерватория обеспечила научное руководство исследованиями, проводимыми молодыми учеными и аспирантами, доступ к оборудованию, необходимому для проведения научных исследований, научной литературе и технической документации.

Были получены следующие результаты (в соответствии с нумерацией, которая

приведена выше при перечислении тем ПНИР):

1. Получены фотометрические и спектральные данные кандидата в галактики с полярными кольцами PGC 60020 с помощью 6-м телескопа САО РАН и многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO. Фотометрические данные в полосах В и V Джонсона и полосе Rc Кузинса. Спектральные данные получены в режиме «длинная щель» с применением гризмы в красном спектральном диапазоне, содержащем эмиссионные линии. Проанализировано изображение галактики и ее ближайшего окружения для уточнения особенностей структуры, распределения яркости и показателей цвета самой галактики и её компаньона. Также проанализированы кривые лучевых скоростей газовой и звездной составляющих PGC 60020 и построены кривые вращения звезд главного тела галактики и ионизованного газа предполагаемого полярного кольца. В результате работы сделаны следующие выводы о галактике PGC 60020: она является классической галактикой с полярным кольцом, относится к группе ГПК с так называемыми внутренними полярными кольцами, главное тело представляет собой галактику типа S0, а вокруг него под углом примерно 60 град., вращается диск, состоящий из газа, звезд и пыли. От южной части полярного диска к галактике-компаньону тянется петлеобразная структура, и было сделано предположение о наличии приливного хвоста.

2. В рамках исследования карликовых галактик в войдах и их эволюционного статуса, была проведена фотометрия 12-ти низкометаллических галактик и спектроскопия HII областей галактик выборки по данным БТА, что позволяет определить содержание кислорода в межзвездной среде. Были обработаны спектры галактик войда, полученные на SCORPIO с гризмой. Уточнены металличности для ряда галактик. В ходе поисковой программы для включения галактик к войду были измерены лучевые скорости для отобранных кандидатов. По фотометрии из SDSS для 80-ти галактик выборки была получена оценка массы звезд, а с учетом массы газа, и суммарной барионной массы галактики, и из них получена оценка эволюционного параметра - массовой доли газа (fgas). Благодаря широкополосной поверхностной фотометрии изображений галактик были получены цвета внешних областей галактик, и из их сравнения с модельными эволюционными треками - получены оценки возрастов самых старых видимых звездных популяций в изучаемых галактиках. Цвета подавляющего большинства галактик в войде соответствуют возрастам $T \sim 10-15 \text{ Gyr}$, которые типичны для галактик в целом. Был разработан метод учета красного смещения для эволюционных треков. Для каждой галактики треки для определения возрастов самого старого звездного населения рассчитывались из учета их лучевых скоростей.

3. Проведены наблюдения на 6-м телескопе САО РАН с использованием фокальных редукторов светосилы SCORPIO и SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии с гризмой и решеткой. Разработана методика вычитания спектра ночного неба, которая дает существенно лучший результат вычитания неба по сравнению с известными методиками. Новый подход дает возможность строить хорошую модель неба, так как не чувствителен к вариациям вдоль щели и к качеству калибровки по длинам волн. На примере галактики NGC 5440 было произведено сравнение методик простой экстраполяции и экстраполяции в частотном диапазоне. При новом методе практически отсутствуют артефакты звездных объектов, что существенно улучшает результаты дальнейшей обработки. Были исследованы две линзовидные галактики поля IC 719 и NGC 6798, проведены наблюдения и анализ редуцированных спектров. Было обнаружено, что обе галактики имеют газовый компонент, который вращается с противоположным угловым моментом по отношению к звездному. Был разработан подход двукомпонентного фитирования спектра звездного населения галактик на основе программного пакета NBURSTS.

4. Были проведены наблюдения микроквара SS433 на приборе SCORPIO 6-м телескопа БТА в фильтре V. В результате наблюдений были получены ряды продолжительностью 4846,5 и 6081,5 секунды. Редукция проводилась по стандартной методике. Далее были построены спектры мощности или спектральной плотности мощности (квадрат модуля Фурье-преобразования кривой блеска). На частотах выше 10-2 Гц спектры мощности становятся плоскими. Связано это, по-видимому, с тем, что на данных частотах над переменностью объекта начинает преобладать пуассоновский шум, связанный с ошибками фотометрии.

5. В рамках НИР на ряде телескопов были получены наблюдательные данные по компактному объекту SS433. Был подробно изучен метод спектрального синтеза для определения массы компактного объекта в двойных системах. Он заключается в том чтобы задать геометрию излучающих областей в виде функции плотности вероятности, методом Монте Карло накидать точек с заданной плотностью вероятности. После того, как в каждой точке были вычислены физические характеристики области, профиль линии рассчитывался как сумма доплеровских профилей. Во время изучения линии HeII $\lambda 4686$ была выделена широкая (FWHM $\sim 60\text{\AA}$) подложка этой линии - «сверхширокая» компонента. Схожие компоненты обнаружились у линий HeI $\lambda 4922\text{\AA}$ и H β $\lambda 4861\text{\AA}$. Было обнаружено, что при накладывании релятивистских эмиссионных линий на интересующие нас линии происходит искажение профиля.

6. Развивалась методика многополосного фотометрического картирования, которая является хорошим дополнением к методу доплеровской томографии, поскольку позволяет провести картирование объектов, недоступных для исследования последним методом. Проводились наблюдения на телескопе Цейсс-1000 по предварительно сделанной выборке короткопериодических объектов, проявляющих переменность блеска, обусловленную запятненностью их поверхности. Используя разработанную методику фотометрического картирования был проведен анализ температурной структуры поверхности первичной компоненты системы HD 12545. Для оценки влияния запятненности звезд на вид их спектров реализованная методика моделирования спектров была применена к восстановленной температурной карте вторичной компоненты системы FF Aqr.

7. Предложен метод фильтрации ярких линий спектра сравнения, который прошел практическую проверку и может быть рекомендован для широкого практического применения в астрономической спектроскопии высокого разрешения. Наиболее трудоемкой частью работы является изготовление маски механическими средствами. Поэтому в дальнейшем необходимо проверить и другие технологии изготовления спектральной маски, в частности, способы изготовления маски фотолитическим методом.

8. На основе наблюдений на БТА было проведено моделирование кривой блеска Полярной звезды методом Бааде-Весселинка (с использованием опубликованной многоцветной фотометрии). Результатом такого моделирования является значение радиуса звезды, оценённое в 37 ± 3 радиуса Солнца. Проведённые наблюдения с 2004 по 2012 год однозначно подтверждают увеличение амплитуды пульсаций, что можно характеризовать, как совершение петли Полярной звездой у границы полосы неустойчивости.

9. Были измерены параметры атмосферной турбулентности в подкупольном пространстве телескопа БТА. Наличие осциллирующих профилей структурной характеристики C_n^2 можно объяснить присутствием неоднородностей подстилающей поверхности вблизи телескопа по радиальной. Выравнивание по однородной структуре подстилающей поверхности у башни телескопа может привести к уменьшению флуктуаций показателя преломления. Также флуктуации показателя преломления можно уменьшить путём изменения некоторых конструктивных особенностей телескопа (более широким раскрытием защитных лепестков главного зеркала во время наблюдения), учитывая масштабность конструкции телескопа улучшение качества наблюдаемых объектов так же можно добиться с применением адаптивной оптики для коррекции по отдельным участкам поля зрения телескопа.

10. Была рассчитана оптическая схема телескопа системы Шмидта, имеющего большое поле зрения, сделан выбор светоприемника, сделаны оценки фотометрической точности.

В выполнении проекта приняли участие 10 молодых исследователей из 9 ведущих вузов и институтов РАН, 6 молодых кандидатов наук (до 35 лет включительно), 6 аспирантов. Опубликованы и подготовлены к печати 7 статей по результатам НИР. 5 молодых исполнителя проекта были участниками научной конференции, на которой были сделаны сообщения с представлением результатов по темам НИР.

Результаты исследований будут использоваться при подготовке дипломных работ и диссертаций студентами и аспирантами ведущих вузов и НИИ России в области астрономии. Привлечение аспирантов и студентов к выполнению проекта обеспечит приход и закрепление молодых кадров в науку. Полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики.

САО РАН является крупнейшим центром наземных наблюдений в России. Проведение исследований с помощью наблюдений на БТА позволит повысить уровень квалификации и мобильности научных и научно-педагогических кадров. Полученные новые данные об астрономических объектах Вселенной предполагают повышение качества научных публикаций, качества возрастной и квалификационной структуры кадрового потенциала сферы науки.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		10
1	ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ И СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТОВ В ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ	12
2	ИЗУЧЕНИЕ ГАЛАКТИК В ВОЙДАХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА БТА И ДАННЫМ SDSS	15
3	ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ЗВЕЗДНЫХ НАСЕЛЕНИЙ ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 6-М ТЕЛЕСКОПА	20
4	ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО АККРЕЦИОННОГО ДИСКА SS433	27
5	АНАЛИЗ СПЕКТРОВ SS433 И ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ В ЭТОЙ СИСТЕМЕ	36
6	АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВЫБОРКИ ПЯТЕННО-АКТИВНЫХ ЗВЕЗД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН.	44
7	РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЯРКИХ ЛИНИЙ СПЕКТРА СРАВНЕНИЯ	56
8	СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ	67
9	ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ НА ОПТИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА	71
10	РАЗРАБОТКА ШИРОКОУГОЛЬНОЙ СВЕТОСИЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОИСКА ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		92

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. Наблюдательное время на телескопе БТА распределяется согласно решению комитета по большим телескопам. Исследования, проводимые с использованием данных полученных на телескопе БТА, публикуются в ведущих мировых научных журналах.

В результате выполнения работ по проекту были проведены исследования по следующим десяти краткосрочным темам:

1. Фотометрическое и спектральное исследование кандидатов в галактики с полярными кольцами.
2. Изучение галактик в войдах по наблюдениям на БТА и данным SDSS.
3. Исследование кинематики и звездных населений линзовидных галактик по данным наблюдений 6-м телескопа.
4. Изучение сверхкритического аккреционного диска SS433.
5. Анализ спектров SS433 и измерение массы черной дыры в этой системе.
6. Анализ фотометрических и спектроскопических данных выборки пятенно-активных звезд по результатам наблюдений на телескопах CAO РАН.
7. Разработка дифракционного устройства для снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения.
8. Спектроскопическое исследование Полярной звезды.
9. Изучение влияния атмосферной турбулентности при наблюдениях на оптическом телескопе БТА.
10. Разработка широкоугольной светосильной камеры для фотометрического поиска внесолнечных планет.

К выполнению краткосрочных НИР привлекались аспиранты и сотрудники вузов и научно-исследовательских организаций. Результаты работ использовались для подготовки научных статей, выступлений на конференциях, разработке методик.

САО РАН обеспечила научное руководство исследованиями, проводимыми молодыми учеными, доступ к оборудованию, необходимому для проведения научных исследований, доступ молодых ученых к научной литературе и технической документации.

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. Исследование Вселенной как целого позволяет проводить тестирование физических моделей микромира. Результаты астрофизических исследований, полученных сегодня, составят основу для развития физических наук человечества в XXI веке.

Новизна работы. Все полученные наблюдательные данные являются оригинальными и впервые полученными. Результаты, полученные на их основе, расширяют наши знания об окружающей нас Вселенной.

1 ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ И СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТОВ В ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Научным сотрудником Санкт-Петербургского университета Меркуловой О.А. проведены исследования кандидатов в галактики с полярными кольцами с целью получения новых данных о морфологии и кинематики их газового и звездного компонентов и выяснения вопроса об их принадлежности к классу галактик с полярными кольцами.

Обоснование проводимого направления исследований.

Изучение процессов образования и эволюции галактик – одно из актуальнейших и быстро развивающихся направлений современной астрофизики. Начиная с 90-х годов, в этой области исследований особое место занимает изучение галактик с полярными кольцами (ГПК), представляющих собой редкий класс динамически пекулярных систем, у которых вокруг главного тела примерно в полярной плоскости вращается кольцо или диск, состоящее из газа, пыли и звезд. Малое число известных на сегодняшний день объектов этого типа пока не позволяет делать более или менее определенные заключения об их природе, эволюции, характеристиках темного гало. Поэтому многие вопросы, связанные с возникновением, стабильностью, возрастом полярных колец (ПК), являются все еще актуальными. Необходимы более полные и точные сведения о кинематике звездных и газовых компонентов, о свойствах звездного населения и межзвездной среды, о процессах звездообразования. Обнаружение новых объектов этого класса, а также их детальное исследование представляет большой интерес.

Основными задачами исследования являются получение новых более полных наблюдательных данных для ряда кандидатов в ГПК методами фотометрии и спектроскопии, изучение морфологических и кинематических особенностей и выявление причин их формирования у этих галактик. Новые наблюдательные данные о свойствах и особенностях исследуемых объектов послужат основой для развития теории формирования и эволюции кинематически выделенных подсистем.

В 2000 году в Астрономическом институте СПбГУ была начата программа по исследованию галактик с полярными кольцами (ГПК) и связанных с ними объектов из каталога Уайтмора и др. (1990) с использованием 6-м телескопа САО РАН. Для ряда галактик была кинематически подтверждена их принадлежность к классу ГПК. Другие исследованные галактики, как оказалось, не относятся к ГПК, а представляют собой многокомпонентные объекты со сложной структурой и кинематикой, которую удалось выявить лишь в результате совместного использования различных методов спектроскопии

(в том числе и 3D-спектроскопии) и фотометрии.

Проведение наблюдений на 6-м телескопе и обработка полученных наблюдательных данных (изображений, спектров).

Работа была посвящена фотометрическому и спектральному исследованию кандидата в галактики с полярными кольцами PGC 60020. Наблюдения этого объекта выполнялись на 6-м телескопе САО РАН с помощью многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO. В наблюдательный сет 09–12.08.2012, в ходе которого планировалось снять дополнительный спектральный материал, вследствие плохих погодных условий получить новые данные нам не удалось, поэтому в работе использовались изображения и спектры, полученные нами на 6-м телескопе ранее в 2008 и 2010 гг.

Фотометрические наблюдения PGC 60020 были проведены в полосах В и V Джонсона и полосе Rc Кузинса. Для калибровки в течение ночи наблюдались стандартные звезды из списка Ландольта [1]. Обработка наблюдений выполнялась с использованием стандартных процедур пакета программ ESO-MIDAS.

Спектральные наблюдения проводились с помощью редуктора светосилы SCORPIO в режиме "длинная щель" в "красном" спектральном диапазоне, содержащем эмиссионные линии H_{α} , [NII]6548,6584AA, с применением гризмы VPHG1200R. Обработка полученных данных выполнялась с использованием пакета ESO-MIDAS. Лучевые скорости газового компонента измерялись по положению центров вписанных в эмиссионные линии гауссиан. Для определения лучевой скорости по линиям поглощения использовался кросс-корреляционный метод [2].

Анализ наблюдательных данных.

В ходе анализа полученных фотометрических наблюдательных данных было проведено детальное рассмотрение изображений самой галактики PGC 60020 и ее ближайшего окружения; для уточнения особенностей структуры PGC 60020 использовались метод "нерезкая маска" и методика, основанная на разложении в ряд Фурье отклонения изофот от эллиптической формы [3]. Помимо этого, были исследованы распределения яркости и показателей цвета PGC 60020 и галактики-"компаньона", а также построена двумерная модель PGC 60020.

На основании спектральных данных были проанализированы кривые лучевых скоростей газовой и звездной составляющих PGC 60020 и построены кривые вращения звезд главного тела галактики и ионизованного газа предполагаемого полярного кольца. На основе анализа полученных нами фотометрических и спектральных данных были сделаны следующие выводы о структуре и природе галактики PGC 60020:

- 1) галактика PGC 60020 является классической *галактикой с полярным кольцом* (о чем свидетельствуют особенности фотометрической структуры и, главным образом, присутствие двух кинематических подсистем, вращающихся в разных плоскостях), причем поскольку диаметр полярного диска не превышает диаметра главного тела галактики, PGC 60020 относится к группе ГПК с так называемыми внутренними полярными кольцами;
- 2) главное тело PGC 60020 представляет собой галактику типа S0 (что подтверждается анализом формы изофот, разложением на компоненты профиля яркости вдоль большой оси, величинами фотометрических характеристик);
- 3) возможно, ядро галактики PGC 60020 имеет характеристики LINER (на что указывают факт свечения газа в результате ударной ионизации, а также значительная ширина линии азота на половине максимальной интенсивности);
- 4) вокруг главного тела галактики в плоскости, наклоненной к плоскости галактики на угол примерно 60 град., вращается диск, состоящий из газа, звезд и пыли;
- 5) от южной части полярного диска к галактике-компаньону SDSS J171745.58+404137.1 (типа E4-E5) тянется петлеобразная структура, возможно, приливный хвост (в настоящее время неизвестно, взаимодействуют эти галактики между собой или имеет место эффект проекции; если эти галактики действительно близки и взаимодействуют, то полярный диск мог образоваться в результате аккреции вещества с галактики-компаньона на PGC 60020).

Результаты обработки данных наблюдений кандидата в галактики с полярными кольцами представлены в отдельном документе в составе отчетной документации. По результатам работы в рамках проекта подготовлена и опубликована статья «PGC60020 — галактика с полярным кольцом», копия которой представлена в составе отчетной документации.

2 ИЗУЧЕНИЕ ГАЛАКТИК В ВОЙДАХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА БТА И ДАННЫМ SDSS

Младшим научным сотрудником Южного федерального университета Ляминой Ю.А. проведено исследование карликовых галактик из выборки в одном из ближайших войдов Lynx-Cancer на основе полученных на БТА спектров и изображений в линии H α и спектральных и фотометрических данных обзора SDSS с целью получения содержания кислорода и других тяжелых элементов, а также оценки массы звезд и массовой доли газа (с привлечением данных по массе нейтрального водорода HI).

Обоснование проводимого направления исследований.

Проект по изучению галактик в ближайшем войде Lynx-Cancer связан с попытками лучше понять, насколько вековая эволюция галактик связана с внутренними процессами и в какой части она является результатом внешних воздействий [4]. Характер эволюции галактик в пустотах может сильно отличаться от таковых для областей с более плотным окружением [5][6]. Из общих соображений, если отличия в эволюции галактик из-за влияния глобального окружения имеют место, то наибольший эффект следует ожидать для галактик самых малых масс, так как такие галактики наиболее подвержены внешним влияниям [7]. Поэтому именно наименее массивные галактики являются наилучшими зондами для проверки роли окружения в их эволюции и образовании [8].

Насколько большую роль в вековой эволюции галактик разных масс играют разного типа взаимодействия, известно не очень хорошо. В любом случае, можно ожидать, что если для маломассивных галактик роль взаимодействий существенна, то в окружении типа войдов, где вероятность столкновений ниже, их эволюционные свойства могут отличаться от таких же галактик в более плотном окружении [9][10][11][12]. С учетом того, что относительная роль разных факторов в эволюции галактик известна слабо, нужна достаточно большая выборка, чтобы обнаружить указанный эффект на фоне рассеяния из-за влияния других факторов. Первые результаты указывают на присутствие в войдах необычных галактик с очень низкой металличностью, очень большой массовой долей газа и без следов "стандартного" старого звездного населения. Эти эволюционно-молодые галактики могут быть ближайшими аналогами "первичных" галактик в ранней Вселенной, в эпохи, соответствующие красным смещениям 5-10 и ранее.

Однако, даже с появлением таких больших обзоров как Слоуновский [13][14][15][16][17][18][19][20], заметного продвижения в этом направлении пока не произошло. Причина состоит в том, что при изучении далеких больших войдов, в силу эффектов наблюдательной селекции, были получены данные только об относительно

ярких галактиках ($M_B < -17$), для которых эффекты окружения относительно малы. Кроме того, более ранние исследования не касались напрямую эволюционного статуса галактик в пустотах.

За последние годы несколько групп астрономов, включая российских [21] и европейских [22], представили выборки изолированных галактик для их более подробного изучения. Изучение галактик в пустотах весьма актуально в рамках этого направления. Кроме того, статистические свойства галактик в войдах: их число, скучивание и другие свойства, рассматриваются как важные параметры для проверки современных космологических моделей формирования галактик и их структур. Для работ в этом направлении в недавней работе [9] была сформирована выборка карликовых галактик, населяющих одну из ближайших пустот в Lynx-Cancer. На данный момент она включает в себя 106 объектов. Зона обзора SDSS почти полностью покрывает Lynx-Cancer войд. Таким образом, подвыборка для фотометрии включает в себя 80 объектов. Большая часть - это карликовые галактики низких светимостей. Более половины галактик выборки были определены как LSB. В силу их голубых цветов и относительно большой массовой доли газа, предполагается, что, либо они относительно недавно начали процесс звездообразования, или переработка газа в них идет с крайне низкой эффективностью.

В рамках исследования карликовых галактик в войдах и их эволюционного статуса, была проведена фотометрия 12-ти объектов для подвыборки низкометаллических галактик из осенней зоны вблизи экватора. Большая часть этих объектов из работы [23].

Целью данного исследования является попытка выявления роли окружения на эволюцию галактик в пустотах; расчет статистических зависимостей и корреляций между полученными параметрами галактик, тщательная фотометрия более полной выборки галактик в Lynx-Cancer войде.

Обработка данных наблюдений на БТА.

Спектроскопия III областей галактик выборки по данным БТА и частично SDSS позволяет определить содержание кислорода в межзвездной среде. В рамках текущего исследования были обработаны спектры галактик войда от 3 декабря 2011 года. Спектры были получены на SCORPIO с гризмой VPHG550G, покрывающей диапазон 3500-7500Å с эффективным разрешением 11-12 ангстрем. Уточнены металличности для галактик: J0737+4724, J0744+2508, J0852+1350, J0940+4459.

Обработаны Na снимки с ночи 30 ноября 2011 г для объектов: J0723+3621, J0723+3622, J0737+4724, J0852+1350, J0852+1351. А была проведена обработка Na снимков для низкометаллических галактик экваториальной зоны: J0107+0001, J0135-0023,

J0216+0115. Для данных наблюдений были использованы среднеполосные фильтры для прямых изображений SED665, SED607.

В ходе поисковой программы для причисления галактик к войду были измерены лучевые скорости для отобранных кандидатов. Лишь три объекта из измеренных (таблица 1) включены в войд со скоростями <1600 km/s.

Таблица 1. Лучевые скорости отобранных кандидатов.

SDSS Name	Vhel (km/s)
SDSSJ0750+3643	11990
SDSSJ0713+2926	954
SDSSJ0805+3452	4607
SDSSJ0909+4307	18459
SDSSJ0944+2915	1569
SDSSJ1001+2828	4581
SDSSJ0755+4541	6517
SDSSJ0802+4348	4807
SDSSJ0853+4250	9640
SDSSJ0908+4509	1928
SDSSJ1002+2832	13702
SDSSJ0755+4205	2658
SDSSJ0636+2554	19742
SDSSJ0717+3044	8204
SDSSJ0744+2506	730
SDSSJ0738+3237	3987
SDSSJ0750+3643	11990
SDSSJ0805+3452	4607
SDSSJ0909+4307	18459
SDSSJ0755+4541	6517

По фотометрии из SDSS для 80-ти галактик выборки была получена оценка массы звезд, а с учетом массы газа, и суммарной барионной массы галактики, и из них оценку эволюционного параметра - массовой доли газа (f_{gas}), т.е. отношения полной массы газа к полной барионной массе. Для оценки звездной массы по интегральной светимости галактик мы использовали наиболее подробный анализ и выведенные соотношения для параметра M/L в зависимости от цветовых индексов из работы [24]. Для этого использовались g_{tot} и цвет $(g-i)_{tot}$, как дающие наиболее устойчивые результаты. Из полной светимости в g -фильтре была получена оценка массы звезд M_* . Результаты данных HI из литературы позволили определить общую массу газа в галактиках. Далее мы вычисляем барионную массу $M_{bary}=M_*+M_{gas}$, а затем и массовую долю газа f_{gas} .

Аппроксимация профилей поверхностной яркости экспоненциальным законом или законом Серсика дала возможность определить центральные поверхностные яркости в фильтрах u, g, r, i ; центральную поверхностную яркость в B -полосе $\mu(0, B)$ (пересчитанная по формулам из Lupton et al. 2005 [25]), и эти же параметры с учетом наклона дисков галактик к лучу зрения и экстинкции в нашей Галактике. Для большинства галактик профили близки к экспоненциальным, так как индекс Серсика оказался близок к 1. Также даны оценки масштабной длины диска для u, g, r, i фильтров.

Моделирование эволюционных треков галактик и сравнение с наблюдениями.

Благодаря широкополосной поверхностной фотометрии изображений базы данных SDSS с помощью пакета `air` [26] пакета программ первичной редукции MIDAS, получили цвета внешних областей галактик. Из их сравнения с модельными эволюционными треками известного пакета PEGASE2 получили оценки возрастов самых старых видимых звездных популяций в изучаемых галактиках.

Возможный вклад излучения молодых HII -областей в цвета внешних частей галактик ограничивает использование радиальных профилей цвета для выявления возможных градиентов. В связи с вытянутыми формами большинства галактик, фотометрия в кольцевой диафрагме дает смешивание цветов из отдельных областей "диска", что приводит к сильному разбросу данных цветов. Мы решили эту проблему, применив подход, использованный ранее для галактик этого войда DDO 68 и SDSS J0926+3343 [27][28]. Исключая явные HII -области, суммировалось излучение внешних частей, взятое по набору небольших диафрагм в этой области.

Для сравнения $u-g$, $g-r$, $r-i$ цветов внешних частей галактик с модельными эволюционными треками из пакета PEGASE используются два типа исходной функции масс (IMF): Salpeter [29] и Kroupa [30] и два крайних случая закона звездообразования

(SF): мгновенное и непрерывное с постоянным темпом. По сопоставлению наблюдаемых цветов с модельными треками мы получаем оценки возрастов звездного населения.

В ходе исследования получены оценки *ugri* цветов внешних частей для 80-ти галактик войда, которые сопоставлены с модельными эволюционными треками. Цвета подавляющего большинства галактик в войде соответствуют возрастам $T \sim 10-15$ Gyr, которые типичны для галактик в целом. Для семи из исследованных галактик (J0723+3622, J0737+4724, HS0822+3542, J0926+3343, SAO0822+3545, UGC3966, UGC4117) возраста старого звездного населения не превышают $T \sim 1-3$ Gyr. Еще 5 имеют промежуточные возраста $T \sim 4-6.5$ Gyr.

Был разработан метод учета красного смещения для эволюционных треков пакета PEGASE2. Выяснилось, что в рамках красных смещений для войда Lynx-Cancer треки незначительно смещаются, таким образом данным эффектом для галактик выборки в войде можно пренебречь. Что же касается низкометаллических галактик осенней зоны вблизи экватора, то для данных объектов эффект имеет более значимый вес. Для каждой галактики треки для определения возрастов самого старого звездного населения рассчитывались из учета их лучевых скоростей.

В приложении 2 представлены результаты обработки данных наблюдений карликовой галактики.

Результаты обработки данных наблюдений карликовых галактик в войде Lynx-Cancer представлены в отдельном документе в составе отчетной документации. По результатам работы в рамках проекта подготовлена к публикации статья «Изучение галактик в войде Lynx-Cancer. Фотометрические свойства», копия которой представлена в составе отчетной документации.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ЗВЕЗДНЫХ НАСЕЛЕНИЙ ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 6-М ТЕЛЕСКОПА

Ведущим инженером Московского государственного университета Катковым И. Ю. проведены новые спектральные наблюдения дисковых галактик, а так же использованы ранее полученные архивные данные, на 6-м телескопе. Из полученных спектральных данных восстановлена информация о кинематике и свойствах звездных населений дисков галактик с помощью оригинальных методик. Эта информация использована для построения сценария образования галактик рассматриваемого типа.

Анализ проблем обработки спектральных наблюдений, а так же проблем, возникающих при восстановлении внутренних физических параметров дисков галактик.

Исследования галактик и их свойств занимают особую нишу в астрономии. Галактики являются наиболее многочисленными объектами, наблюдаемыми во Вселенной. Особая роль галактик заключается в том, что они являются “лабораториями” с одной стороны для изучения космологических свойств Вселенной, а с другой стороны - для исследования широкого спектра явлений, происходящих на масштабах самих галактик (килопарсеки и десятки килопарсек).

Существует два эффективных наблюдательных оптических метода изучения отдельных галактик - это поверхностная фотометрия и спектроскопия. Фотометрический подход позволяет выделить в изображении галактики структурные компоненты, свойства которых далее можно исследовать. Помимо того, многоцветная фотометрия позволяет изучать содержание пыли в галактике, говорить о свойствах звездного населения. Не менее важным представляется спектральный метод исследования галактик. В спектрах галактик содержится информация как о свойствах звездного населения (кинематика, возраст и содержание металлов), так и о газовом компоненте. Поэтому спектральные исследования дисковых галактик дают возможность изучения состава и характеристик звездного населения, а в случае наличия эмиссионных линий - свойства газового компонента.

Однако протяженных кривых вращения и радиальных профилей, описывающих изменение параметров звездного населения, получено пока мало. Для этого необходимо использовать большие телескопы и спектрографы с низкими световыми потерями. Соответствующие требования реализуются при использовании на 6-ти метровом телескопе (БТА) САО РАН системы SCORPIO, которая работает с использованием объемных голографических решеток (VPGH), что делает эту систему весьма подходящей

для решения задач комплексного спектрального исследования дисковых галактик, особенно раннего типа, где эмиссии слабы или отсутствуют.

Проведение наблюдений на 6-м телескопе и редукция новых и полученных ранее наблюдательных данных с помощью оригинальной методики.

В настоящее время на 6-ти метровом телескопе реализуется несколько наблюдательных программ по исследованию кинематики дисковых галактик на основании спектральных наблюдений с длинной щелью, пересекающей изображения галактик в различных направлениях. Цифровые приемники излучения позволяют работать непосредственно с массивом данных, полученных в результате длительных (1-3 часа) экспозиций. Здесь важной и еще до конца не решенной задачей является разработка оптимальных алгоритмов обработки научных “сырых” данных для получения оценок кинематических и других параметров галактических дисков с максимально возможной точностью и до максимально возможного расстояния от центра галактики.

Наблюдения. Данная работа выполнялась на основе материала, полученного на 6-м телескопе САО РАН в рамках наблюдательных программ А.В. Засова и О.К. Сильченко. Наблюдения проводились при помощи фокальных редукторов светосилы SCORPIO [31] и SCORPIO-2 [32], монтируемых в прямом фокусе телескопа. При наблюдениях использовался режим длиннощелевой спектроскопии, размер щели составлял $1'' \times 6''$. В качестве детектора применялись ПЗС матрицы EEV CCD42-40 с размером чипа 2048 на 2048 пикселей и E2V CCD42-90 RED с размером чипа 4632 на 1044 пикселей. Масштаб вдоль щели равен 0.35 секунд на пиксель.

Программы, в рамках которых наблюдались галактики, были ориентированы на изучение кинематики звезд и свойств звездного населения. Поэтому использовалась гризма VPHG2300G с рабочим “зеленым” диапазоном 4800-5550 ангстрем для работы с прибором SCORPIO и решетка VPHG1200 для работы со SCORPIO-2, что обеспечило покрытие спектра в диапазоне 4300-7300 ангстрем. Типичное спектральное разрешение для конфигураций с указанными решетками для SCORPIO примерно 2.3 ангстрема (60 км/с), для SCORPIO-2 – 3.6 ангстрема (90 км/с). В обеих конфигурациях спектральный диапазон включает в себя контрастные абсорбционные линии звездного населения и эмиссионные линии H β и [OIII] (для обоих приборов), [SII], H α , [NII] – для SCORPIO-2.

Первичная редукция данных. В целом, первичная редукция наблюдательных данных заключалась в выполнении стандартных этапов обработки таких как, построение среднего кадра смещения (супербайеса), приведение кадров к плоскому полю, чистка следов космических частиц, построение дисперсионного уравнение, линеаризация,

исправление направления дисперсии, сложение экспозиций, вычитание ночного неба. Особое внимание уделяется вычитанию спектра ночного неба, для которого представлен новый подход. При анализе звездного населения слабых объектов (23 mag/arcsec^2) и/или внешних частей галактик необходимо очень внимательно подходить к вопросу вычитания спектра ночного неба. Присутствие в спектре артефактов от вычитания неба могут приводить к систематическому завышению, в первую очередь, оценок металличности, а так же оценок скорости дисперсии звезд.

Подробное описание методики редукиции первичных данных, полученных на БТА с прибором SCORPIO-2, приводится в отдельном документе в составе отчетной документации.

Моделирование редуцированных данных с целью восстановления физических параметров звездно-газовых дисков галактик. Построение сценария образования рассматриваемых галактик с учетом существующих моделей образования и эволюции галактик.

Восстановление параметров кинематики и истории звездообразования звездного компонента галактик проводилось на основе сравнения наблюдаемых спектров галактик с модельными. Минимизируя невязку между наблюдаемым спектром и модельным получался набор параметров, соответствующий оптимальной модели. После вычитания оптимальной модели из наблюдаемого спектра получался чисто эмиссионный спектр ионизованного газа. Каждая линия подгонялась гауссианой, что дало кинематику ионизованного газа, а из анализа отношений потоков в линиях были исследованы механизмы ионизации газа. Подробное описание методики восстановления физических параметров звездных и газовых дисков галактик приводится в отдельном документе в составе отчетной документации.

Исследованы две линзовидные галактики поля IC 719 и NGC 6798. Линзовидные галактики выделяются на фоне других дисковых галактик малым содержанием газа, слабым звездообразованием и отсутствием контрастных спиральных ветвей. Вопрос происхождения линзовидных галактик в настоящее время остается открытым. Наблюдательные работы [33] и [34] показали, что доля линзовидных галактик в скоплениях на красном смещении $z \sim 0.4$ составляет менее 20% всех галактик и увеличивается до 60% на $z=0$, в то время как доля спиральных галактик уменьшается, а доля эллиптических остается примерно постоянной $\sim 30\%$. Это говорит о том, что линзовидные галактики образовались из спиральных галактик, однако, нет однозначного понимания, почему спирали лишились холодного межгалактического газа и превратились в линзовидные. По всей видимости, ключевую роль в этом переходе занимают эффекты

окружения, такие как взаимодействие с межгалактическим газом, близкие парные взаимодействия галактик и многочисленные поглощения небольших спутников (малый мержинг). Практически все существующие теоретические сценарии образования линзовидных галактик тем или иным образом связаны с эффектами окружения (см. [35, 36, 37, 38]). Однако, известно, что порядка 15-20% всех изолированных галактик в местном объеме составляют линзовидные галактики, для которых эффекты окружения малы или полностью отсутствуют.

Теоретического сценария образования изолированных линзовидных галактик на данный момент не существует.

Наблюдения изолированных галактик IC 719 и NGC 6798 были проведены в ноябре 2011 года в рамках наблюдательной программы О.К. Сильченко. Режим наблюдений и описание используемых алгоритмов обработки спектров приводились выше. Анализ редуцированных спектров проводился с помощью программного пакета NBURSTS [39].

Было обнаружено, что обе галактики имеют газовый компонент, который вращается с противоположенным угловым моментом по отношению к звездному, т.е. наблюдается противовращение звездного и газового компонентов галактики. Кроме того, было обнаружено, что при фитировании звездного спектра IC 719 в предположении гаусс-эрмитовой формы LOSVD радиальный профиль дисперсии скоростей звезд имеет два нецентральных максимума (рисунок 1). Такое поведение профиля дисперсии скоростей говорит о присутствии двух кинематически выделенных подсистемах звезд.

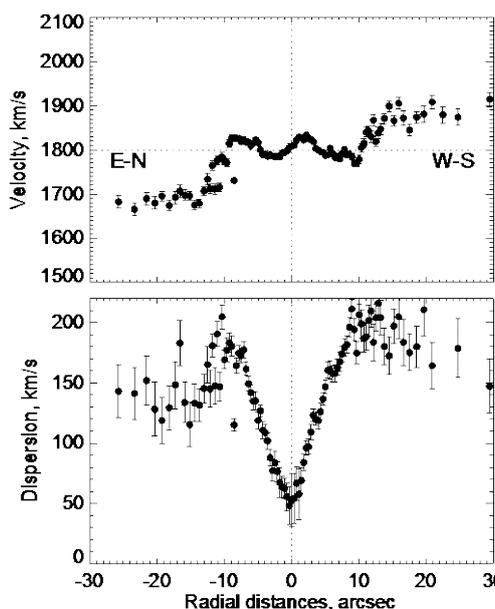


Рисунок 1 - Радиальные профили скорости (сверху) и дисперсии скоростей звезд (снизу) IC 719

Был разработан подход двукомпонентного фитирования спектра звездного населения галактик на основе программного пакета NBURSTS. Суть разработанного метода в том, что наблюдаемый спектр галактики представляется суммой двух компонентов звездного населения с разными свойствами, т.е. разных возрастов и металличностей, обладающие разными кинематическими параметрами – скоростью и дисперсией скоростей. Относительные веса компонентов также являются параметрами минимизации. Такой подход был ранее разработан для анализа многокомпонентной структуры спектра линзовидной галактики NGC 524 [40]. В случае IC 719 удалось выделить два *звездных* проитвоображающихся диска, один из которых совращается с диском ионизованного газа (рисунок 2).

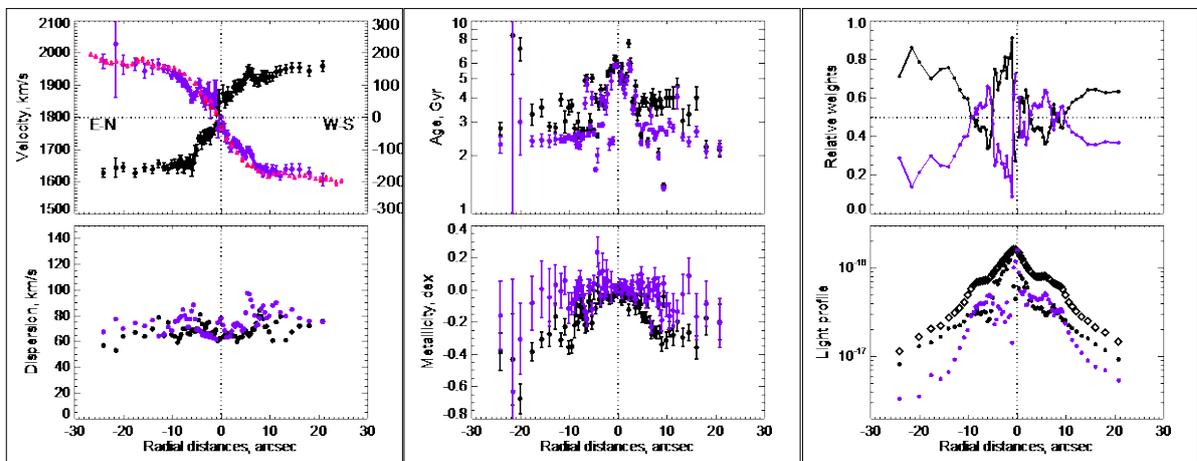


Рисунок 2 - Результат анализа спектра IC 719. Слева – лучевая скорость и дисперсия скоростей, посередине – профили металличности и возраста, справа – относительные веса компонентов и декомпозиция профиля яркости. Черные и синие точки отображают звездные компоненты, розовые символы – ионизованный газ.

На рисунке 3 представлен результат анализа спектра галактики NGC 6798. Видно, что помимо типичного звездного компонента линзовидная галактика NGC 6798 обладает противовращающимся диском ионизованного газа. Анализируя классические диагностические диаграммы (рисунок 4), построенные по эмиссионным спектрам обеих галактик, удалось показать, что ионизованный газ возбужден в основном излучением молодых звезд.

Газ с угловым моментом отличным от момента звездного компонента в общем случае мог быть приобретен галактиками в результате мерджинга (слияния) или взаимодействия между галактиками. Однако, NGC 6798 полностью изолированная галактика, а IC 719 образует изолированную невзаимодействующую пару с галактикой позднего типа сопоставимой светимости IC 718. В тоже время, карты HI показывают наличие огромных дисков нейтрального водорода вокруг обеих линзовидных галактик

[41,42], которые выглядят копланарными по отношению к звездным дискам, но более протяженными (до 100 кпк от центров галактик).

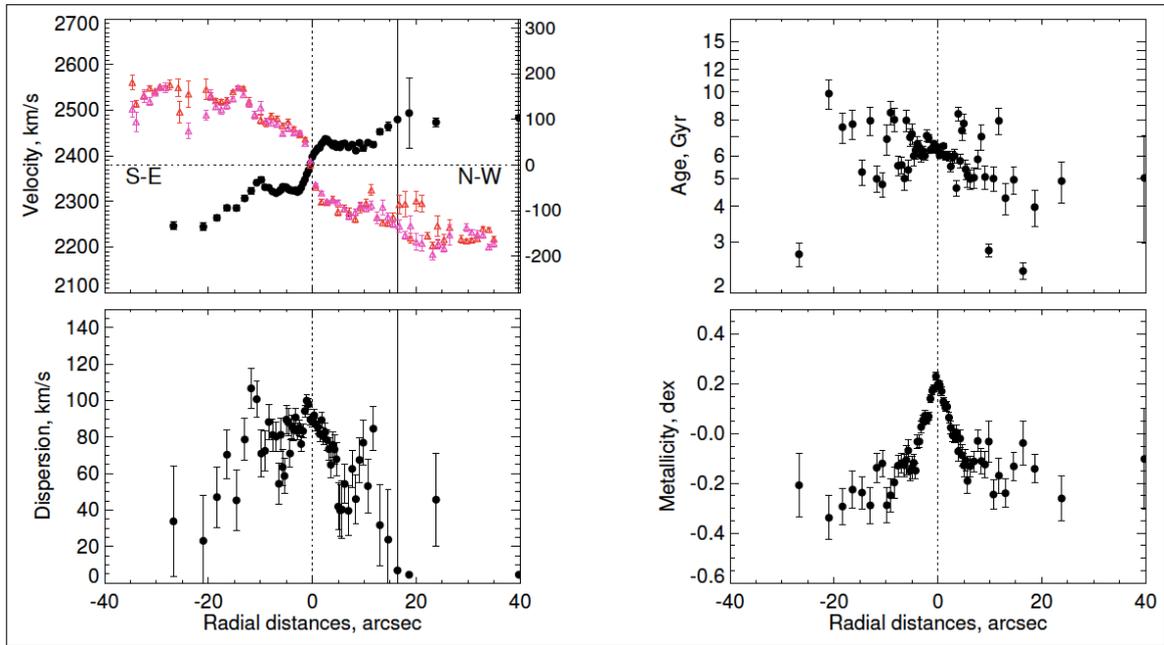


Рисунок 3 - Результат анализа спектра галактики NGC 6798. Слева – радиальные профили лучевой скорости и дисперсии скоростей звезд, справа – возраст и металличность звездного населения. Черные точки обозначают оценки параметров для звезд, розовые – оценки лучевых скоростей ионизованного газа.

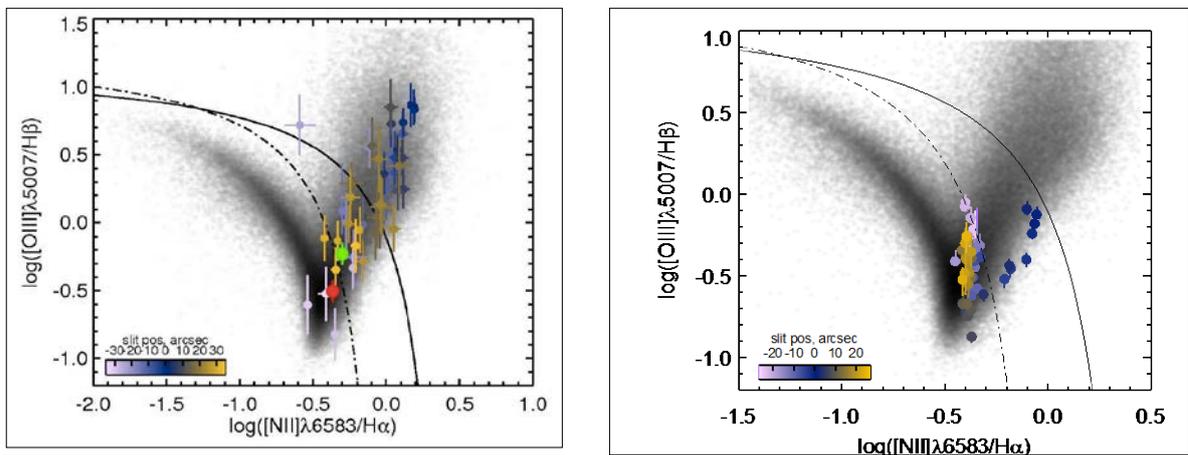


Рисунок 4 - Классические диагностические диаграммы для эмиссионного спектра NGC 6798 (слева) и IC719 (справа). Серым фоном показаны около 100000 галактик из обзора SDSS, а линиями обозначены границы между областями доминирования механизмов возбуждения фотоионизацией или нетепловыми источниками.

Нет оснований полагать, что эти диски образовались в результате холодной аккреции вдоль крупномасштабных космологических филаментов, поскольку химический

состав ионизованного газа, который был определен из анализа эмиссионных линий, не столь беден металлами, чтобы считать его состоящим из реликтовых барионов непрошедших стадию обогащения через звезды. Мерджинг также является маловероятным, потому что большая масса газа ($M_{\text{gas}} = 2.5 \cdot 10^9 M_{\text{sun}}$ для NGC 6798 и $M_{\text{gas}} = 0.7 \cdot 10^9 M_{\text{sun}}$ для IC 719) вместе с современной массой звезд галактик, $3 \cdot 10^6 M_{\text{sun}}$ и $6 \cdot 10^9 M_{\text{sun}}$, требует мерджинга галактик с отношением масс больших 1:10, что в свою очередь означает, что тонкий звездный диск не смог бы выжить при таком слиянии [43,44]. Однако в случае обоих галактик звездный диск является динамически холодным, а как следствие тонким. Поэтому происхождение большого количества противовращающегося газа в галактиках NGC 6798 и IC 719 остается неясным. Однако, основная масса звезд диска обладает промежуточным возрастом 3-5 млрд. лет, что говорит о том, что диск сформировался относительно недавно. Возможно это означает, что приобретение газа галактиками случилось в еще более позднюю эпоху. Но в любом случае рассматриваемые изолированные галактики в ближайшем будущем станут очень похожими на линзовидную галактику NGC 4550, обладающую равными по массе противовращающимися звездными дисками без текущего звездообразования.

По результатам работы в рамках проекта подготовлена к публикации статья «Field lenticulars IC 719 and NGC 6798: current building of large-scale disks by cold accretion.1», копия которой представлена в составе отчетной документации.

4 ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО АККРЕЦИОННОГО ДИСКА SS433

Аспирантом Московского государственного университета Атапиным К. Е. выполнялся анализ всех фотометрических наблюдений SS433 на БТА: проводилась обработка этих данных, построение спектров мощности на основе этой фотометрии. После этого была построена модель канала сверхкритического диска, моделирование переменности сигнала в такой модели, сравнение с результатами наблюдений и определение геометрии и параметров канала.

Обоснование развиваемого направления исследований.

Объект SS 433 представляет собой тесную двойную систему, состоящую из компактного релятивистского компонента, вероятнее всего чёрной дыры, и сверхгиганта спектрального класса А (см. обзор [45]). Этот объект примечателен тем, что в его спектре наблюдаются яркие эмиссионные линии релятивистских струй, движущихся со скоростью $0.26c$. Линии струй показывают переменность на нескольких временных масштабах: прецессионном $P_{pr} = 162.15$ суток, орбитальном $P_{orb} = 13.6$ суток и нутационном $P_{nut} = 6.28$ суток. Так же этот объект имеет колоссальную светимость $L_{bol} \sim 1040$ эрг/с с максимумом излучения в ультрафиолетовом диапазоне, однако этот диапазон недоступен прямым наблюдениям из-за сильного поглощения.

По современным представлениям SS 433 — это сверхаккректор с темпом аккреции $\dot{M} \sim 10-4M_{\odot}/год \sim 300 \dot{M}_{cr}$, где \dot{M}_{cr} — темп аккреции, соответствующий эддингтоновской светимости. В своей работе по аккреционным дискам Шакура и Сюняев [46] предположили, и в дальнейшем это было подтверждено гидродинамическими расчётами [47],[48],[49], что в случае сверхкритической аккреции энерговыделение падающего газа начиная с некоторого радиуса R_{sp} начинает превышать эддингтоновский предел. Этот радиус называется радиусом сферизации и зависит только от массы чёрной дыры и темпа аккреции. Для SS 433 он примерно равен 109 см. Ниже радиуса сферизации диск «раздувается» под действием давления излучения, его высота становится сравнима с расстоянием до чёрной дыры. Формируется так называемый канал сверхкритического аккреционного диска.

Со стенок канала сверхкритического диска давлением излучения срывается газ, который уносится в виде ветра. Считается, что внутрь чёрной дыры попадает только ничтожная доля ($\sim 1\dot{M}_{cr}$) материи, остальное вещество так или иначе выбрасывается в виде ветра и струй. Предполагается, что вещество ветра вылетает в диапазоне углов $[\vartheta_c; \vartheta_c + \beta]$, и образует собой конус (симметрично для «верхней» и «нижней» частей

аккреционного диска). Длина образующей это конуса $\sim 1012 \text{ см} \sim 1000R_{sp}$. Такую геометрию ветра мы в дальнейшем будем называть ветровым каналом.

Угол раствора канала известен плохо. Гидродинамические расчёты [47],[48] показывают, что раствор канала сверхкритического диска может быть как 20° , так и 45° , однако совершенно не обязательно, что это же значение угла сохраняется и в ветровом канале. С большой уверенностью можно утверждать только то, что ни при каких фазах прецессии наблюдатель не видит самого дна канала. Минимальный угол между лучом зрения и направлением джета (осью конуса) наблюдается при фазе прецессии $\psi = 0$ и составляет $\sim 60^\circ$ (знак « \sim » использован, поскольку ещё существуют нутационные колебания с амплитудой 3° — 5°). В эти моменты оптическое излучение хорошо описывается законом Планка с температурой ~ 50000 — 70000 К .

Объект SS 433 существенно переменен на всех масштабах времени и во всех диапазонах длин волн. Кроме периодической переменности (орбитальный, прецессионный периоды) ярко выражен и шумовой компонент. Этот компонент изучался ранее Ревнивцевым и др. [50],[51]. Авторами были построены спектры мощности относительно низкого разрешения, но охватывающие 6 порядков по частотам: с 10^{-8} Гц до 10^{-2} Гц . Все точки на частотах $> 10^{-7} \text{ Гц}$ приблизительно аппроксимируются степенным законом $P \propto f^{1.5}$. Однако предполагается, что на частотах $\sim c/l$ спектр мощности должен стать более крутым. Связано это с тем, что на временах l/c , где l — размер канала, переменность излучения должна замываться, поскольку один и тот же сигнал от более внутренних и более внешних частей канала будет приходить в разное время и интерферировать. Таким образом, изучив высокочастотную часть спектров мощности, можно определить параметры ветрового канала сверхкритического аккреционного диска SS433.

Задача заключается в построении спектров мощности оптической переменности SS433 в области частот выше 10^3 Гц , и их сравнения с моделью. Для построения спектров мощности вплоть до частот в 1 Гц требуется временное разрешение кривой блеска не хуже $0,5 \text{ с}$. Поэтому для получения кривых блеска был использован метод дрефтовой фотометрии, который позволил добиться разрешения $\approx 0,007 \text{ с}$.

Обработка фотометрических данных SS433. Построение спектров мощности.

Дрифтовая фотометрия — это метод звездной фотометрии, который позволяет получать на небольших интервалах времени кривые блеска сверхвысокого временного разрешения. Связано это с особым режимом работы ПЗС-детектора. В классической ПЗС-фотометрии обычно делают двумерный снимок неба, обработав который можно получить одну точку на кривой блеска. Качественно цикл работы камеры в обычном режиме можно

описать следующей схемой: сначала затвор закрыт, и свет не попадает на приемник. Затем затвор открывается, начинается накопление сигнала. Экспозиция обычно длится от нескольких секунд до десятков минут в зависимости от величины потока и от наблюдаемого объекта. Потом затвор закрывается, и происходит считывание матрицы. При этом заряд каждой ячейки движется по матрице вдоль координаты y , переходя от строки к строке пока не доберётся до первой и не попадет в считывающий регистр. Считывание заканчивается, когда заряд последней строки окажется в считывающем регистре.

В дрейфовом режиме считывание матрицы происходит при открытом затворе одновременно с накоплением. Поэтому когда фотоэлектроны покидают ячейку, в которой они появились, на их месте образуются новые. На снимках, снятых в дрейфовом режиме, изображения звезд выглядят в виде длинных треков, вытянутых вдоль оси y . Полное время экспозиции определяет длину трека. Соотношение сигнал-шум определяется временем экспозиции одной строки, т. е. величиной, обратной скорости считывания, которая может быть довольно высокой. Поэтому метод дрейфовой фотометрии пригоден только для ярких звёзд. В результате получаются очень длинные снимки с характерными размерами $1\ 000 \times 500\ 000$ пикселей, в которых вдоль длинного измерения смешана информация о y координате объекта и зависимости его блеска от времени. Эта важная особенность снимков, снятых в дрейфовом режиме, существенно меняет алгоритм редукции наблюдений.

Методика обработки фотометрических данных SS433. Любые наблюдения, прежде чем из них может быть получена интересующая информация, нуждаются в редукции. Первичная редукция в классической ПЗС-фотометрии включает в себя следующие шаги:

- Вычет темнового кадра (bias);
- Деление на плоское поле (flat field);
- Устранение дефектов матрицы и следов космических частиц.

Пройдя эти этапы можно приступать к измерению потоков. Важной их особенностью является то, что это попиксельные операции. То есть из пикселя с координатами (x,y) исходного изображения, вычитается пиксель темнового кадра с теми же координатами. Ввиду специфики дрейфового режима попиксельные операции невозможны. В данном случае целесообразно сначала измерить потоки в каждой строке, и лишь затем приступать к дальнейшей редукции.

Измерение потоков. Для измерения потоков можно использовать методы как апертурной, так и PSF-фотометрии. В обоих случаях работа ведется отдельно с каждой строкой изображения. Профили звезд можно описать функцией Гаусса:

$$I(x) = A \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{2(x-b)}{c} \right)^2 \right],$$

где A — амплитуда, b — координата максимума, c — полная ширина на половине амплитуды (FWHM). Фон аппроксимируется полиномом.

Как показывает практика, беспокойная атмосфера сильно искажает треки звезд. Таким образом координата и ширина трека становятся функциями времени. По этой причине предпочтительнее использовать PSF-фотометрию, поскольку вычисление апертурных поправок для каждой строки крайне затруднено. Как для PSF, так и для апертурной фотометрии необходимо совершить предварительный прогон, оставив свободными все три параметра. Считая, что параметры слабо меняются от строки к строке, для увеличения соотношения сигнал-шум можно усреднить по несколько строк, а окончательный результат сгладить фильтром «скользящее среднее». Изучив поведение параметра c (Рисунок 5), принимают решение о выборе ширины апертуры. Параметр b — траектория центра апертуры при чистовом прогоне показана на Рисунке 6. В случае PSF-фотометрии при чистовом прогоне свободным оставляют только параметр A , беря для b и c их ранее найденные сглаженные значения. Полное количество отсчетов, собранное гауссовым профилем:

$$I = Ac \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}}$$

Полученная таблица чисел будет «сырой» кривой блеска.

Устранение дефектов матрицы и следов космических частиц. Подобного рода дефекты как правило являются единичными событиями, т. е. проявляют себя как отдельные выпавшие точки в кривой блеска. Данный шаг редукции заключается в "возвращении" выпавших точек на место. Если таких точек немного, то процедуру можно провести вручную, или в противном случае воспользоваться медианным фильтром с шагом в несколько пикселей. Но следует иметь в виду, что применение различных фильтров к кривой блеска искажает статистику шумов.

Учет фона неба. Данный шаг необходимо проводить только для апертурной фотометрии (в случае PSF-фотометрии фон учитывается автоматически). Для этого построчно измеряют поток в области свободной от звезд. Затем количество отсчетов делят на ширину апертуры, чтобы получить средний уровень фона на один пиксель (шумовую дорожку). Апертуру желательно выбирать как можно шире, чтобы после статистического

усреднения снизить дисперсию шума. Из шумовой дорожки удаляют выпавшие точки, сглаживают скользящим средним с шагом в несколько секунд, и вычитают её из кривой блеска.

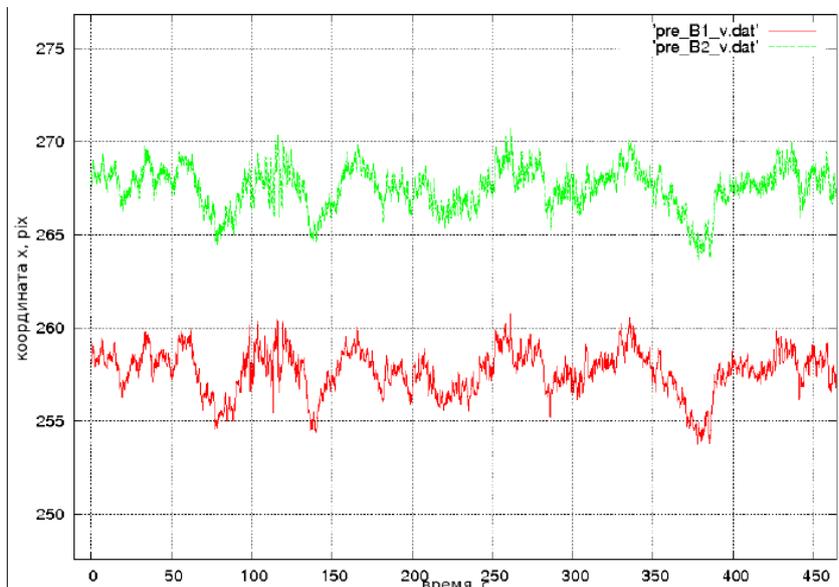


Рисунок 5 - Траектории треков звезд $b(t)$

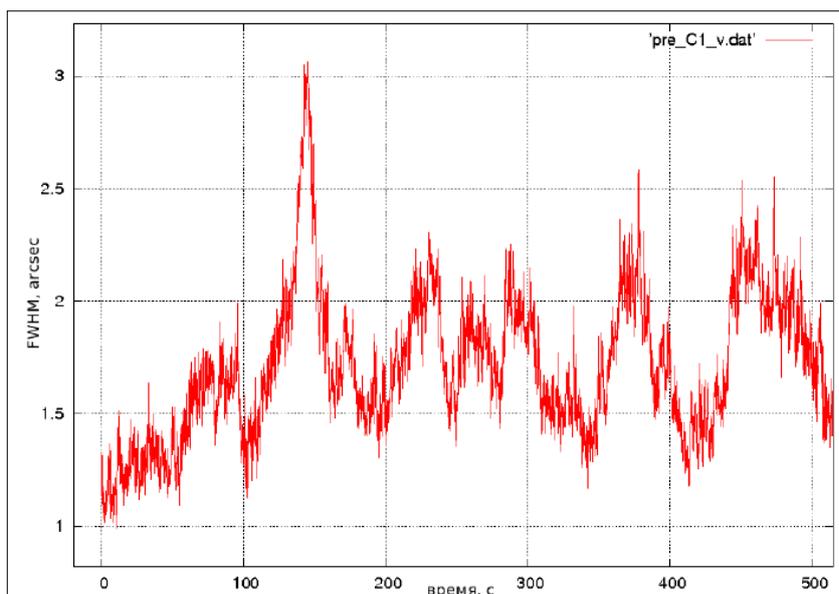


Рисунок 6 - Динамика изменения размеров изображений $c(t)$

4. Учет изменения прозрачности атмосферы. Если предыдущий шаг учитывал аддитивные вклады в поток, то данный шаг учитывает мультипликативные эффекты, такие как изменение воздушной массы и прозрачности атмосферы. Основная идея заключается в накоплении сигнала от звезды сравнения одновременно с объектом на том же снимке. Трек звезды сравнения обрабатывается так, как это было описано выше, и сглаживается с большим шагом, чтобы избавиться от деталей и оставить только общую

тенденцию изменения блеска. Полученная кривая блеска нормируется на среднее значение, чтобы получить кривую относительного изменения блеска. Затем на неё делят кривую блеска объекта. Если данный шаг проделать для второй звезды сравнения, то в результате её кривая блеска должна стать плоской, что является критерием корректности процедуры редукции.

Используемый наблюдательный материал. Все наблюдения проводились Лабораторией физики звезд Специальной астрофизической обсерватории РАН на приборе SCORPIO [52] 6-метрового телескопа в фильтре V. Использовался ПЗС-детектор EЕV CCD42-40 разрешением 2048×2048. Нужно отметить, что дрейфовая мода является нестандартным режимом съёмки для данного инструмента, наблюдения проводились в режиме отладки. Оптимальные параметры подбирались опытным путем, поэтому ряды (см. таблицу 2) отличаются временным разрешением. В данных 2006-го года для ещё большего увеличения временного разрешения использовались сразу два считывающих регистра ПЗС-матрицы.

Таблица 2. Параметры рядов наблюдений.

Дата ггммдд	Длина ряда Т, с	Разрешение "/pix × sec/pix	Фаза прецессии ψ
040822 (MJD 53239)	1800	0.37 × 0.033999	0.99
040908 (MJD 53256)	3600	0.37 × 0.026658	0.09
060525 (MJD 53880)	1800	0.18 × 0.013333	0.93
060530 (MJD 53885)	3600	0.37 × 0.007143	0.97
	1200	0.37 × 0.007143	
060531 (MJD 53886)	3600	0.37 × 0.007143	0.98
	2400	0.37 × 0.007143	

На рисунке 7 показано поле объекта SS433. Здесь хорошо заметен ромб из четырех ярких звезд, которые традиционно используются в качестве звезд сравнения при изучении объекта SS433. Камера была ориентирована таким образом, чтобы треки звезд были разнесены как можно дальше друг от друга. Темные поля сверху и снизу — след от прямоугольной диафрагмы, которая использовалась для уменьшения фонового сигнала, собираемого нерабочими частями матрицы.

В наблюдениях 30 и 31 мая 2006 г. имеются по два продолжительных ряда, разделенных коротким промежутком. Ряды были склеены, а пробел был заполнен средним значением кривой блеска. Таким образом получились ряды продолжительностью 4846,5 и 6081,5 секунды соответственно.

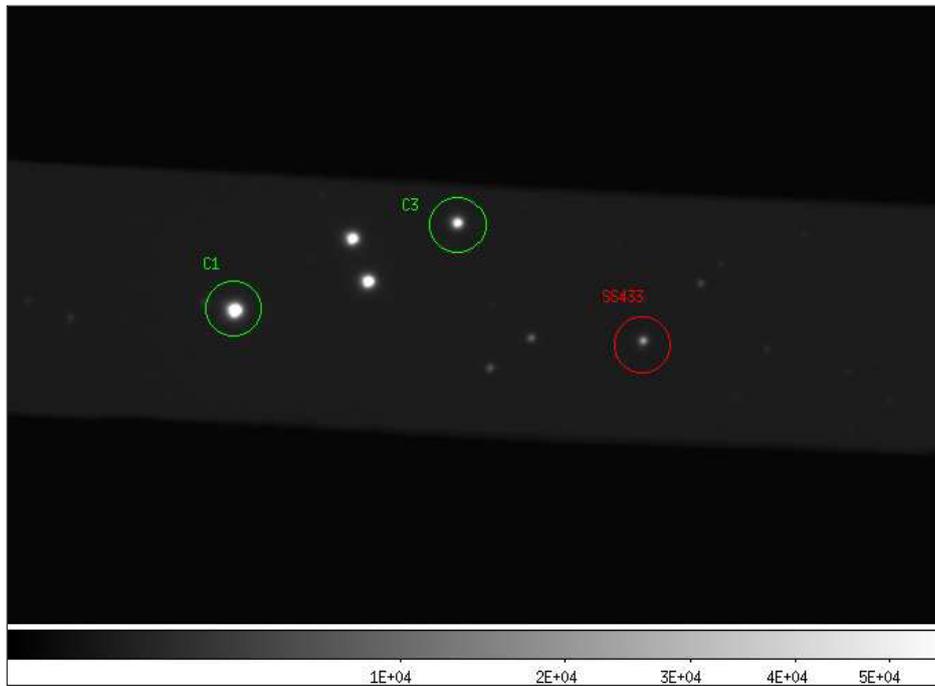


Рисунок 7 - Поле объекта SS433

Редукция проводилась по описанной выше методике. В качестве среды обработки использовалась платформа ESO-MIDAS [53]. Для объекта и звезды C3 были выбраны апертуры $6 \times \text{FWHM}$ (по три в каждую сторону). Звезда C1 имеет слишком большие крылья, поэтому она не фотометрировалась отдельно. Были использованы две различные апертуры, которые захватывают все четыре звезды сравнения. Для фона были выбраны свободные области слева и справа. Так как в поле имеется очень много слабых звезд, вместо статистического усреднения фона было взято медианное среднее. Шумовая дорожка сглаживалась скользящим средним с шагом 30 секунд, тренд изменения блеска - с шагом 60 секунд.

Построение спектров мощности. Спектром мощности, или спектральной плотностью мощности называется квадрат модуля Фурье-преобразования кривой блеска. Для равномерных по времени рядов наблюдений используется дискретное преобразование Фурье (DFT), которое заключается в следующем. Пусть последовательность измерений $\{x_k\} = \{x(t_k)\}$ с шагом $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ состоит из N точек и имеет продолжительность $T = N \cdot \Delta t$. Тогда гармоника на частоте $f_j = j/T$ находится по формуле:

$$a_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-2\pi i f_j t_k} = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-2\pi i j k / N}$$

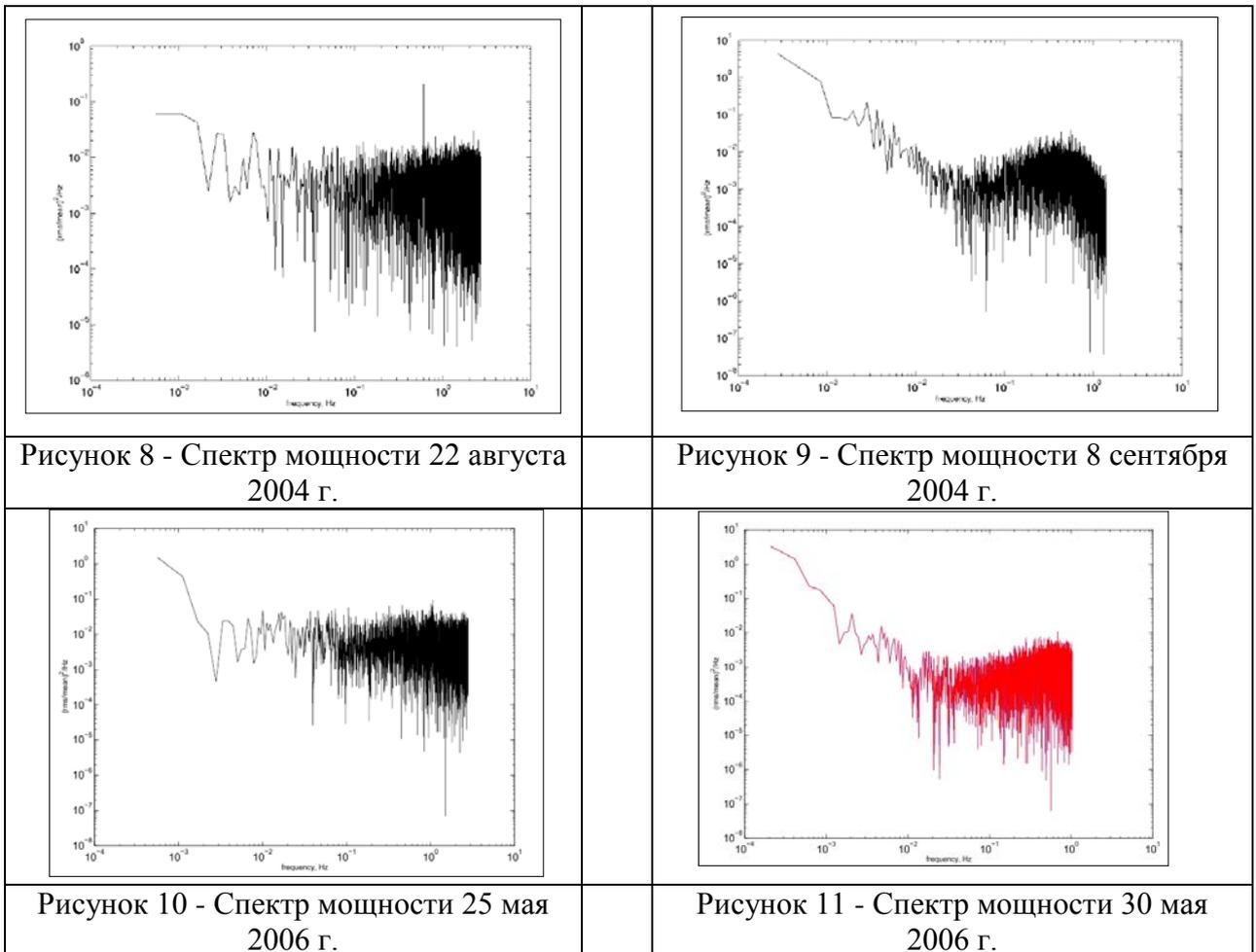
Формально эта формула работает для всех частот, но Фурье-гармоники на частотах с нецелым j не являются независимыми. Кроме того, для действительного дискретного

сигнала на частотах $j > N/2$ (частота Найквиста) возникает так называемый муаров эффект, который приводит к тому, что высокочастотная часть спектра мощности является зеркальным отражением низкочастотной. Поэтому дискретное Фурье-преобразование обычно выполняют в фундаментальной системе частот: $j = 0, 1, \dots, N/2$ (для четных N). Для поиска гармоник в фундаментальной системе частот существует алгоритм быстрого Фурье-преобразования (FFT), которому требуется $M \log N$ операций вместо N^2 .

На практике обычно используют процентную нормировку, которая не зависит единиц измерения исходной кривой блеска. Спектр мощности в процентной нормировке вычисляется по следующей формуле:

$$P_j[(\text{rms}/\text{mean})^2/\text{Hz}] = \frac{2T}{\langle x \rangle^2 N^2} |a_j|^2$$

Спектры мощности SS 433 вычислялись по приведенной формуле. Пропуски заполнялись мат.ожиданием кривой блеска. Графики спектров мощности можно увидеть на рисунках 8-12. На частотах выше 10-2 Гц спектры мощности становятся плоскими. Связано это, по-видимому, с тем, что на данных частотах над переменностью объекта начинает преобладать пуассоновский шум, связанный с ошибками фотометрии.



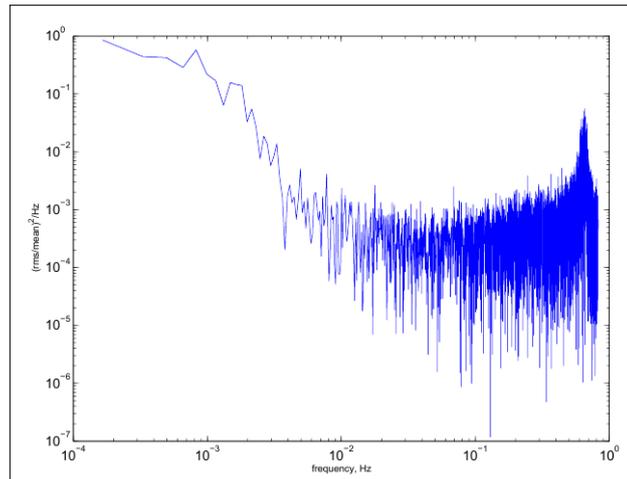


Рисунок 12 - Спектр мощности 31 мая 2006 г.

Методика определения параметров канала в сверхкритических аккреционных дисках приводится в отдельном документе в составе отчетной документации.

Сравнение данных с моделью, определение параметров канала в SS433.

На рисунке 13 ромбиками обозначен наблюдаемый спектр мощности для ряда MJD 53886 и модель непрерывной линией. Выяснилось, что вид спектров мощности очень чувствителен к параметрам модели. Длина канала регулирует положение излома, а угол раствора — наклон ниже слома. Даже такая простая модель позволяет независимо оценить геометрические параметры канала. Наиболее оптимальными оказались значения: раствор канала $\vartheta = 52 \pm 2^\circ$, длина образующей $l = (20 \pm 5) \cdot 10^{12}$ см.

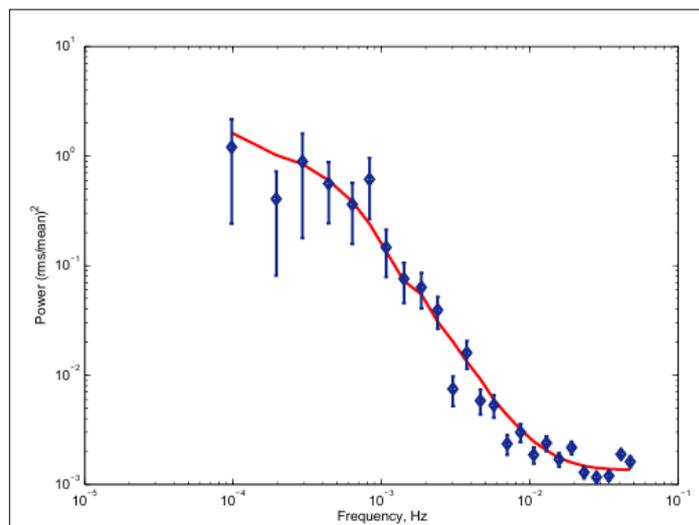


Рисунок 13 - Наблюдаемый и модельный спектр мощности MJD 53886

По результатам работ по проекту представлен доклад на Всероссийской молодежной астрономической конференции «Наблюдаемые проявления эволюции звезд»

5 АНАЛИЗ СПЕКТРОВ SS433 И ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ В ЭТОЙ СИСТЕМЕ

Аспирантом Института космических исследований РАН Медведевым П.С. проведены исследования эмиссионной линии HeII в спектрах SS433 на основе анализа спектральных данных. Сравнивались с компьютерной моделью системы SS433 с целью проверки разных вариантов простых геометрий области, излучающей линию HeII., а также измерялись массы компонентов системы.

Обоснование проводимого направления исследований.

Роль объекта SS 433 в астрофизике высоких энергий. SS 433 - это единственный известный сверхаккректор нашей Галактики. Непосредственная близость объекта в сравнении, например, с активными ядрами галактик предоставляет возможность изучения механизмов сверхкритической аккреции и проверки существующей теории с помощью наблюдательных данных высокого разрешения. Более того, в настоящий момент существуют основания полагать, что Ультра Яркие Рентгеновские источники могут быть схожими с объектами типа SS 433. Принципиальным вопросом в понимании физических явлений происходящих в системе SS 433 является вопрос о массе системы и релятивистского компаньона, в частности.

Первые результаты в определении функции масс системы были получены Crampton & Hutchings[54], которые показали, что линия HeII A4686 Å отражает движение релятивистской звезды и с помощью кривой лучевых скоростей линии нашли полуамплитуду ~ 195 km/ s. Сотрудники CAO [55] уточняют результат Crampton & Hutchings и определяют функцию масс системы по линии HeII A4686 Å для выборки наблюдательных данных вблизи прецессионной фазы $\varphi = 0$ (наибольшее раскрытие диска), $f = 7.7 M_{\odot}$. Несмотря на то, что кривая лучевых скоростей HeII A4686 Å лучше остальных линий в спектре SS 433 соответствует орбитальному движению релятивистской звезды, становится ясно, что линия имеет сложный многокомпонентный профиль, а амплитуда кривой лучевых скоростей сильно зависит от прецессионной фазы объекта (ориентации относительно наблюдателя). Hilwig & Gies [56] находят слабые абсорбционные линии звезды-донора в SS 433 и определяют полуамплитуду движения звезды-донора $K_o = 58.2$ km/ s (отношение масс $q = 0.29$). Kubota et al. [57] уточняют значения массы компонентов системы используя модель прогрева звезды-донора со стороны аккреционного диска.

Альтернативный способ определения массы системы — нахождение и изучение линий формирующихся во внешнем растекающемся диске (circumbinary disk). Внешний газовый диск образуется из газа покидающего систему через точку Лангранжа L3,

скорость вращения такого диска непосредственно зависит от массы системы. Blundell, Bowler & Schmidtbreick, [58] детально изучают circumbinary диск и находят значительно большую массу системы $M \sim 40 M_{\odot}$.

Таким образом, в настоящий момент нет однозначного мнения о массе и даже природе релятивистской звезды объекта SS 433. Сложность газовых потоков в системе и не понимание областей формирования линий приводит к неоднозначности определения массы системы. Заметим, что если масса релятивистской звезды мала $\sim 3M_{\odot}$, то светимость объекта $L = 10^{40} \text{erg/s}$ [59] составляет около $800 L_{edd}$.

Метод спектрального синтеза для определения массы компактного объекта в двойных системах. Метод спектрального синтеза, реализованный в нашей работе, заключается в том чтобы задать геометрию излучающих областей в виде функции плотности вероятности, методом Монте Карло накидать точек с заданной плотностью вероятности. После того, как в каждой точке будет вычислены физические характеристики области профиль линии рассчитывается как сумма доплеровских профилей:

$$\epsilon(\phi, \Psi) = F \sum_{i \in W} \sum_{k \in \Omega} \tilde{\eta}_i(p) ME_i(s_{me}) \exp \left\{ - \left[\frac{v_k^k - v_i^r}{\delta} \right]^2 \right\},$$

где W — множество незатмеваемых (звездой-донором, аккреционным диском, непрозрачным газом) точек ветра, Ω — шаг по лучевым скоростям $v \in (-2000, 2000)$ км/с, от него зависит разрешение получаемого профиля, v_r^i — лучевая скорость i -ой точки ветра, F — нормировка. Мы вводим меру эмиссии в ветре как степенную функцию от расстояния до релятивистской звезды:

$$ME(s_{me}) = F \left(\frac{r}{r_{sph}} \right)^{-s_{me}},$$

где F — нормировка, s_{me} — параметр модели учитывающий падение плотности и температуры в ветре с расстоянием. Излучение рекомбинационное и поэтому $ME \sim n^2$. Для того чтобы учесть прогрев ветра, летящего ближе к оси диска, мы используем степенной закон:

$$\tilde{\eta}(p) = F_1 \left(\frac{\pi/2 - \theta}{\pi/2} \right)^p,$$

Близко летящий к оси ветер «видит» горячие стенки канала сверхкритического аккреционного диска и может вносить значительный вклад в профиль.

Анализ спектральных данных. Обработка спектров.

Во время изучения линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ нами была выделена широкая (FWHM $\sim 60 \text{ \AA}$) подложка этой линии, которую мы назвали «сверхширокая» компонента. Схожие компоненты обнаружались у линий HeI $\lambda 4922 \text{ \AA}$ и H β $\lambda 4861 \text{ \AA}$. Но самая яркая сверхширокая компонента на оптических спектрах у линии HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$. На Рисунке 17 представлен оптический спектр SS 433, полученный на телескопе БТА. Наряду с яркими стационарными линиями H β $\lambda 4861 \text{ \AA}$, HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$, CIII/NIИ $\lambda 4625\text{-}4650 \text{ \AA}$, на спектре присутствуют линии релятивистских струй [59], которые проявляют себя как «движущиеся» эмиссионные линии водорода и гелия. Далее в тексте HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$ — HeII, HeI $\lambda 4922 \text{ \AA}$ — HeI, CIII/NIИ $\lambda 4625\text{-}4650 \text{ \AA}$ — CIII/NIИ. Линии перемещаются по спектру из-за изменения наклона струй к лучу зрения в связи с прецессией. Наблюдаются две группы релятивистских эмиссионных линий, которые формируются в удаляющейся (на рисунке 1 H β^+ , H γ^+ , H δ^+) и приближающейся к наблюдателю струе (на рисунке 1 H β^-).

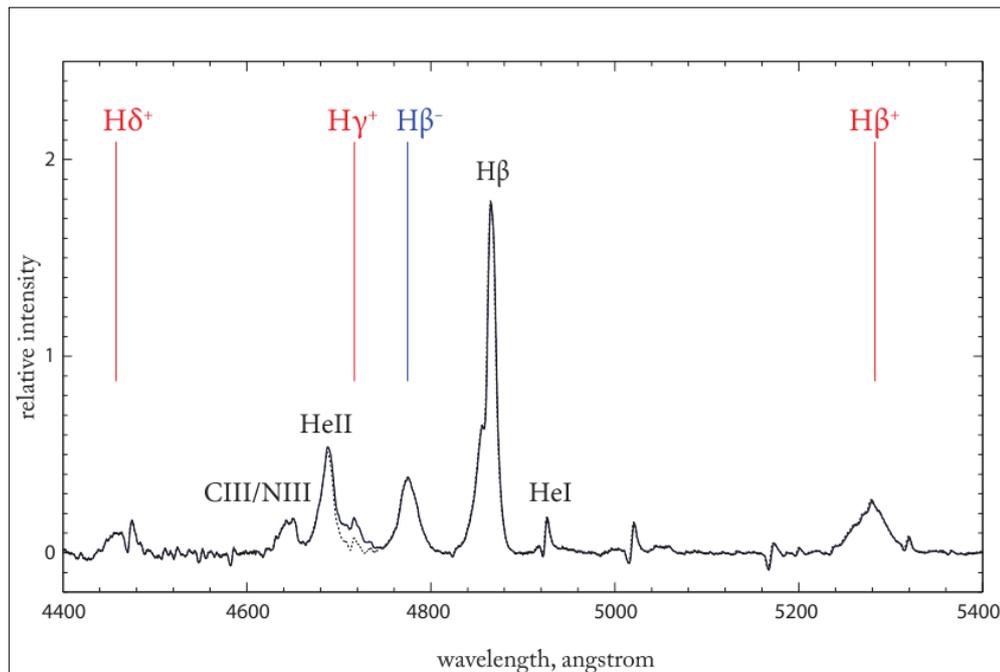


Рисунок 14 - Спектр SS 433 с «движущимися» и стационарными линиями. По данным с телескопа БТА на 07.06.05

Расположение струй в пространстве и положение линий в спектре описывает кинематическая модель Абея и Маргана [60]. При накладывании релятивистских эмиссионных линий на интересующие нас линии происходит искажение профиля. Например, на рисунке 14 релятивистская эмиссия H γ^+ блендирует со стационарной линией HeII. Для ее вычитания из линии HeII, «вырезается» профиль релятивистской линии H β^+ (в данном случае, не перекрывающаяся с другими линиями), который преобразуется геометрически: $d \lambda_{H\gamma^+} = (\lambda_{H\gamma^+}/\lambda_{H\beta^+}) d \lambda_{H\beta^+}$, домноженный на бальмеровский декремент соответствующей линии водорода. Значение бальмеровского декремента

определяется в основном населенностью уровней энергии атомов водорода и условиями выхода фотонов, но в объектах типа SS 433 с эмиссионным спектром бальмеровский декремент определяется большим набором процессов, таких как возбуждение и деактивация уровней ударами частиц, рассеяние в спектральных линиях водорода. Он может сильно отличаться от бальмеровского декремента для зон НП и быть более крутым и переменным во времени. Мы оцениваем значение декремента из относительной интенсивности имеющихся свободных (неблендированных) движущихся линий. Если в спектре только одна свободная релятивистская эмиссия, то бальмеровский декремент для разных фаз прецессии берется из статьи Парфенова и др.[61]. Исправленный спектр с удаленной релятивистской эмиссией представлен на рисунке 1.

Левое крыло линии HeII искажено линией CIII/NIИ, поэтому невозможно выделить отдельную сверхширокую компоненту HeII. Предполагается, что сверхширокая компонента является результатом сложения сверхшироких компонент линий HeII и CIII/NIИ, так как центр тяжести сверхширокой компоненты лежит примерно по середине между линиями HeII и CIII/NIИ (слегка смещен в сторону гелия). Для аппроксимации сверхшироких компонент HeII и CIII/NIИ гауссианами отбирались реперные точки на крыльях сверхширокого профиля и в промежутке между линиями HeII и CIII/NIИ.

Линии HeI, H β одиночные, поэтому для аппроксимации их сверхшироких компонент реперные точки отбирались на крыльях сверхширокого профиля, аппроксимирующая гауссиана проводилась по центру шумов.

На Рисунках 15,16 представлены спектры SS 433 с выделенной сверхширокой компонентой линий HeII и CIII/NIИ, HeI, H β соответственно. Эти спектры получены на телескопах БТА и Subaru.

На Рисунках 17-19 представлено изменение эквивалентной ширины сверхшироких компонент с течением орбитального периода. Основной вклад в ошибку нахождения эквивалентной ширины вносят ошибки связанные с выбором реперных точек и аппроксимации с помощью них сверхширокой компоненты. Чтобы оценить ошибку аппроксимации мы задавали области возможного положения реперных точек. В основном эта область определяется шумом спектра, но в некоторых случаях неоднозначностью выбора реперной точки. Ошибка определялась методом Монте Карло: рассматривалось распределение параметров всех возможных аппроксимаций для реперных точек в заданных областях. Ошибки для спектров БТА, WHT, Subaru, Gemini составляют около 5 %. Зеленые точки соответствуют прецессионной фазе ноль (Субару 2007, БТА 2007, БТА 2004). Компоненты линий HeII и HeI испытывают затмение совпадающее с орбитальной фазой ноль — момент затмения релятивистского компонента в системе. Для линии HeII

глубина затмения составляет $45.4 \pm 5.3\%$, среднее значение эквивалентной ширины 6.4 \AA , для линии HeI $49 \pm 9\%$, среднее значение 0.7 \AA . Это накладывает ограничения на размер области формирования компонент. Сверхширокая компонента линии H β затмения не испытывает.

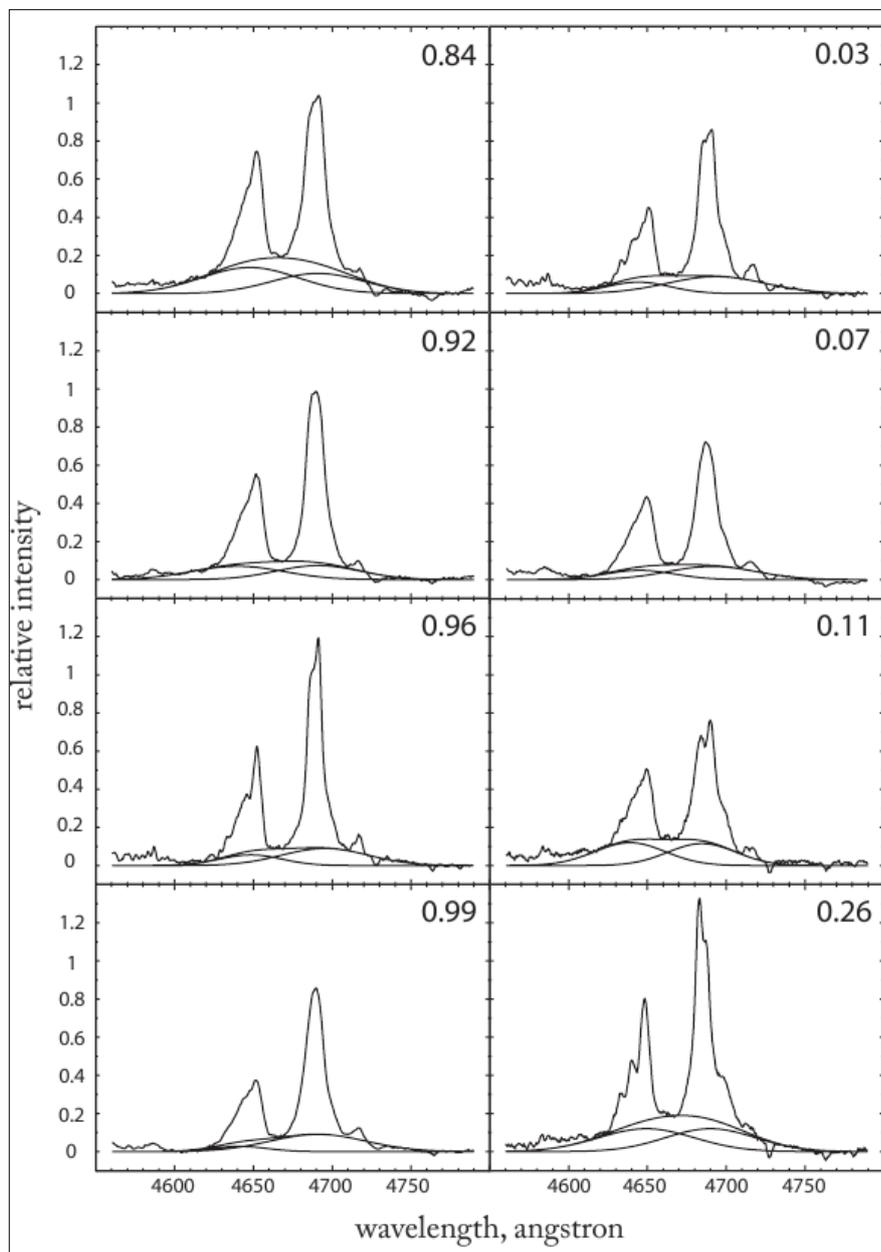


Рисунок 15 - Спектры с линией HeII $\lambda 4686 \text{ \AA}$, CIII/NIИ $\lambda 4625\text{-}4650 \text{ \AA}$ и выделенной сверхширокой компонентой. По данным с телескопов БТА($R \approx 1000$) и Субару($R \approx 2500$)

В момент наблюдений 2006 года SS 433 находился в активном состоянии. В таких состояниях, которые длятся от 30 до 90 дней, средний блеск объекта повышается примерно в 1.5 раза и наблюдаются мощные вспышки с характерным временем часами[59]. На рисунке 15 наблюдения, соответствующие активному периоду, обозначены красными метками. Во время наблюдений БТА 2006 изменение эквивалентной ширины сверхшироких компонент имеет спорадический характер. Это также указывает на то, что

компонента формируется вблизи компактной звезды. Несмотря на активное состояние, данные Gemini 2006 вписываются в общую картину по наблюдениям в спокойном состоянии, глубина затмения для линии HeII λ 4686 Å $38.1 \pm 2.3\%$, среднее значение 5.4 Å, для линии HeI λ 4922 Å $59 \pm 9\%$, среднее значение 0.8 Å.

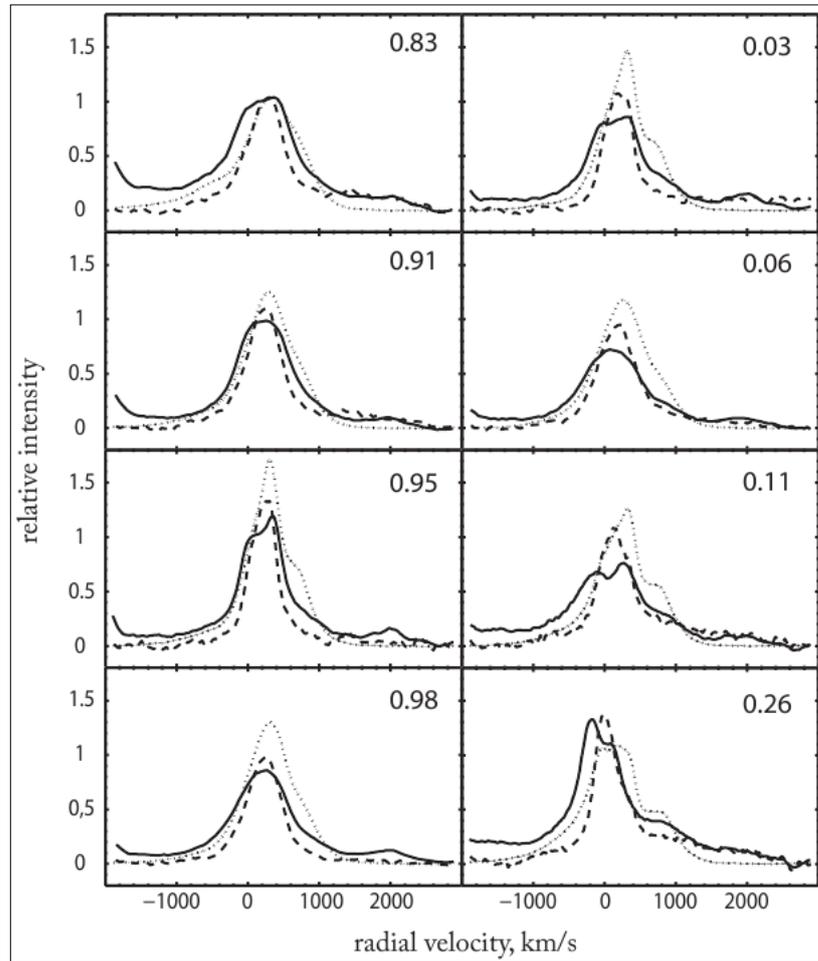


Рисунок 16 - Сравнение профилей HeII λ 4686 Å (сплошная жирная линия), HeI λ 4922 Å (пунктирная линия), H β λ 4861 Å (точечная линия) со сверхширокой компонентой. Орбитальные фазы 0.83, 0.91, 0.98, 0.06 соответствуют данным с телескопа БТА ($R \approx 1000$), 0.98, 0.99, 0.00, 0.01 — Субару ($R \approx 2500$)

Построение модели области, моделирование профиля линии HeII, измерение массы черной дыры в SS433.

Мы считаем, что областью излучения линии является ветер сверхкритического диска, который моделируется методом Монте-Карло. Ветер представляется в виде шарового сектора, задаваемого внутренним углом и углом раствора. Верхний и нижний ветер имеют как положительную, так и отрицательную лучевую скорость. Поэтому профиль излучения ветра будет многокомпонентный. Мы используем формализм Шакуры-Сюняева [62] и считаем, что истечение ветра начинается с внутреннего радиуса черной дыры. Падающее

на черную дыру вещество образует газовый канал, в котором происходит интенсивное истечение вещества, темп истечения определяется локально эддингтоновской светимостью в каждой точке канала.

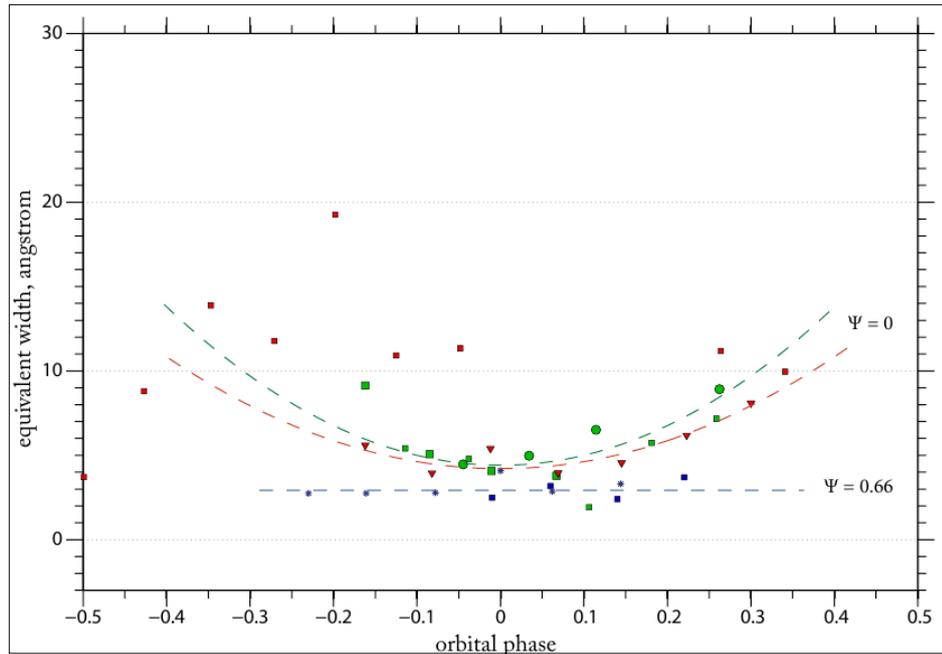


Рисунок 17 - Зависимость эквивалентной ширины сверхширокой компоненты HeII и CIII/III от орбитальной фазы. Метка квадратами соответствует наблюдениям телескопа ВТА, треугольниками — Gemini, звездочки — WHT, кружки — Subaru. Зеленые метки — спокойное состояние объекта, красные - активное, для прецессионной фазы ноль. Синие метки соответствуют моменту кроссовера ($\psi = 0.66$)

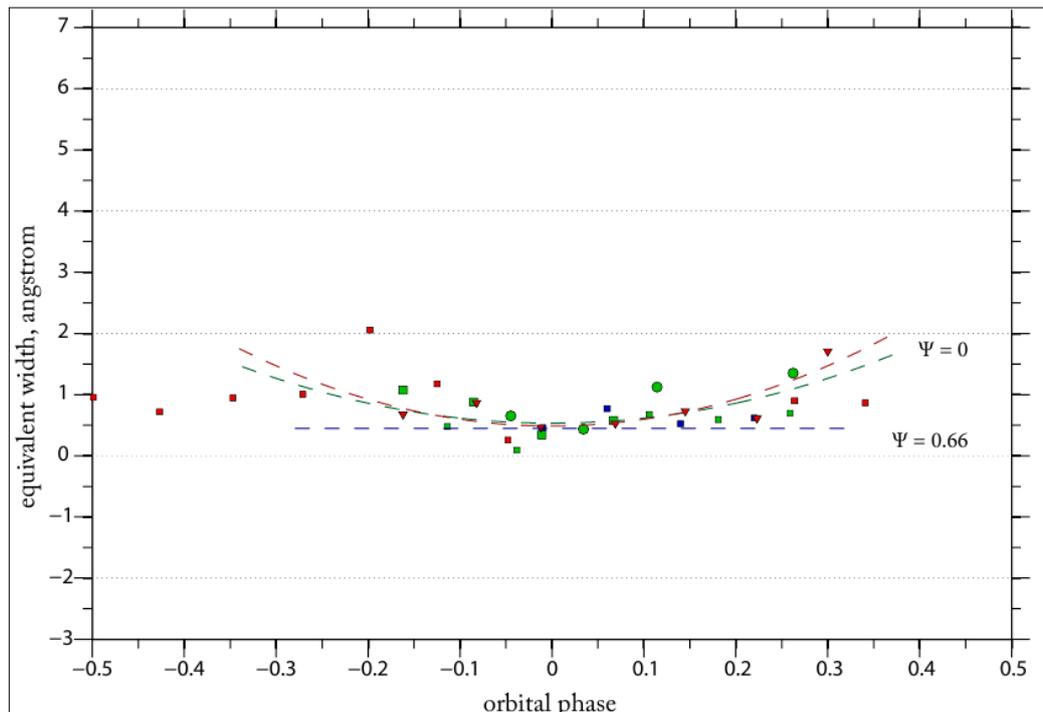


Рисунок 18 - Тоже что и рис.3 для HeI $\lambda 4922 \text{ \AA}$. Спектральных данных WHT для HeI $\lambda 4922 \text{ \AA}$ нет.

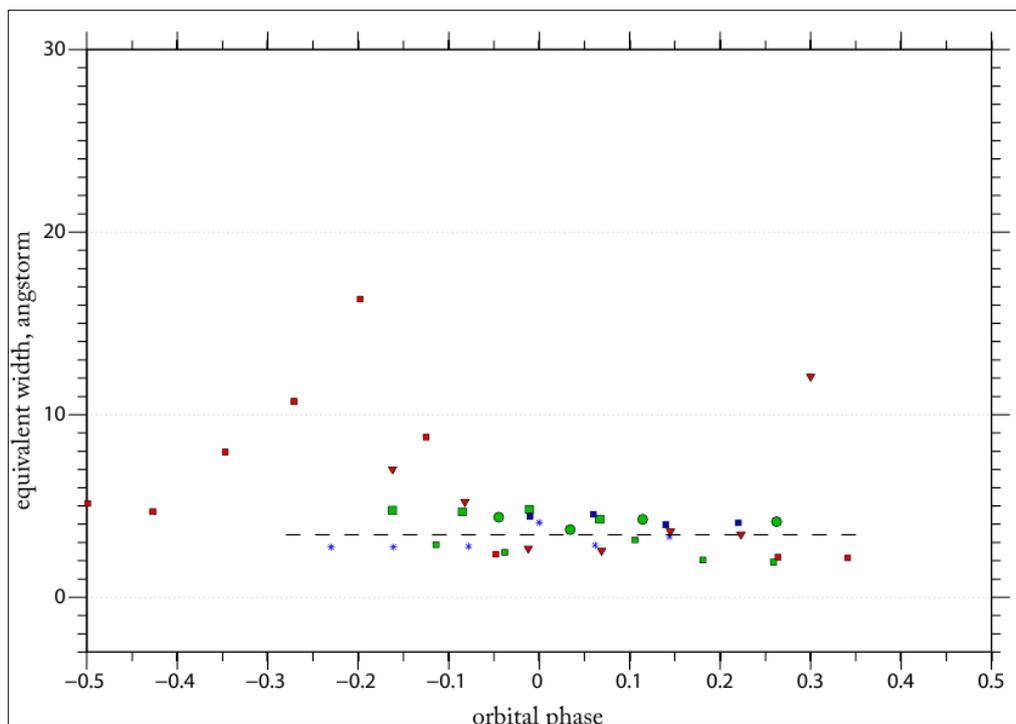


Рисунок 19 - Тоже что и рисунке 17 для H β λ 4861 Å

Мы считаем, что каждый элементарный объем газа ветра имеет доплеровский профиль, а доплеровская ширина всех точек имеют одинаковую ширину. Изменение параметров модели влияет на лучевую скорость центра тяжести модельного профиля. Физика SS433 очень сложна, и получить теоретическую оценку параметров трудно. Также есть проблема, которая заключается в том, что для тестирования модели нужны спектры очень высокого разрешения, но таковым в наших данных обладают только спектры телескопа Subaru и Gemini. К сожалению, SS 433 находился в активном состоянии (по данным фотометрии) на момент наблюдения на телескопе Gemini и эти данные при расчетах не использовались. По спектрам телескопа БТА возможно лишь наблюдение общих закономерностей профиля и исследование их Гаусс-анализом.

Описание методики определения масс черных дыр в тесных двойных системах на основе моделирования спектральных линий приводится в отдельном документе в составе отчетной документации. По результатам проведения работ в рамках проекта подготовлена к печати статья «Исследование сверхширокой компоненты в профилях эмиссионных линий системы SS433» и представлен доклад на Всероссийской молодежной астрономической конференции «Наблюдаемые проявления эволюции звезд».

6 АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВЫБОРКИ ПЯТЕННО-АКТИВНЫХ ЗВЕЗД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН

Аспирантом Казанского (Приволжского) федерального университета Колбиным А.И. исследованы структуры распределения температуры по поверхности выборки пятенно-активных звезд с использованием наблюдений на оптическом телескопе Цейсс-1000 и разработанной методики фотометрического картирования.

Обоснование проводимого направления исследований.

Исследование структуры поверхности пятенно-активных звезд имеет важное значение для тестирования теории генерации звездных магнитных полей (теории звездного динамо) и выявления связи между магнитной активностью и фундаментальными параметрами звезд. Развиваемая нами методика многополосного фотометрического картирования является хорошим дополнением к методу доплеровской томографии, поскольку позволяет провести картирование объектов, недоступных для исследования последним методом. Кроме того, выявленное в ходе тестирования качество воспроизведения широтного распределения пятен дает возможность решить вопрос о существовании высокоширотной запятненности у быстровращающихся объектов. Удовлетворительное воспроизведение распределения температуры возможно лишь для объектов, имеющих узкий набор некоторых важных для картирования параметров. Большинство из таких объектов имеют малую яркость, и требуют наблюдений на относительно больших телескопах, т.к. Цейсс-1000.

Проведение наблюдений на телескопе Цейсс-1000 для получения кривых блеска и спектров выборки пятенно-активных звезд. Картирование поверхности исследуемой выборки звезд.

Для наблюдений на телескопе Цейсс-1000 была отобрана выборка короткопериодических объектов, проявляющих переменность блеска, обусловленную запятненностью их поверхности. Все объекты выборки являются одиночными звездами поздних спектральных классов, некоторые параметры которых представлены в таблице 3. Все объекты были наблюдаемы в благоприятных погодных условиях в сентябре 2012 года.

Обработка наблюдательного материала проводилась при помощи программного пакета IRAF (www.iraf.noao.edu). Начальная обработка изображений, включающая в себя вычитание байеса и деление изображений на плоское поле была выполнена при помощи процедуры IRAF/ccdproc. Апертурная фотометрия объектов исследования проводилась при помощи процедуры IRAF/apphot. Фотометрия исследуемых объектов была выполнена

относительно звезд близкого спектрального класса, не проявляющих переменности блеска при сравнении со звездами поля. Ниже (Таблица 3) мы представляем результаты фотометрии объектов выборки.

Таблица 3.- Некоторые параметры исследуемой выборки звезд.

Звезда	RA (h m s) (2000)	DE (° ' ") (2000)	Период вращения (d)	Блеск в V- фильтре (mag)	Спектр. класс
LO Peg	21 31 01.7	+23 20 07	0.423	9.30	K5-7V
AP 86	03 30 22.9	+48 24 43	0.210	14.31	K7V
HP 1883	03 48 28.0	+23 18 03	0.235	12.60	K2V

LO Peg. Наблюдения этого объекта были проведены в ночи на 26 и 27 сентября 2012 г. Фотометрия звезды проводилась в фильтрах U, B, V, R, I с покрытием всего вращательного периода. Обработка полученного материала показала, что кривая блеска звезды имеет сложную двугорбую структуру малой амплитуды. Кривая блеска звезды в фильтре V представлена на рисунке 20. К сожалению, малая амплитуда кривой блеска, сравнимая с ошибками наблюдений, делает полученный материал малоприменимым для многополосного картирования звезды.

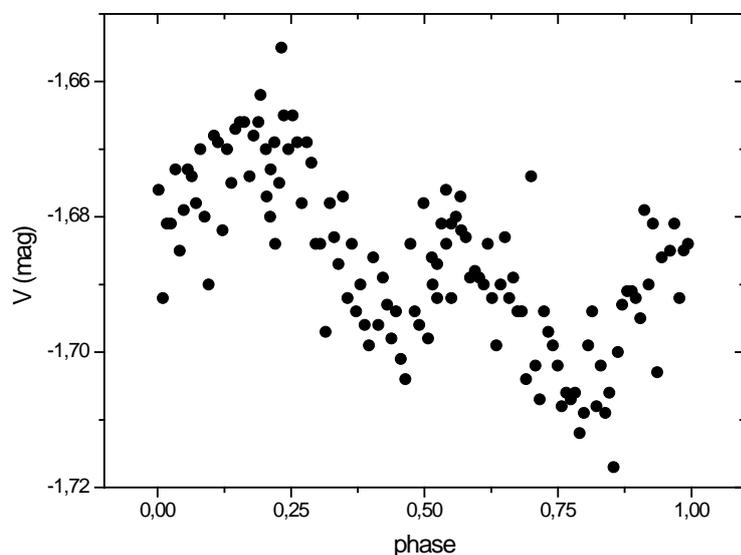


Рисунок 20 - Кривая блеска звезды LO Peg в полосе V.

AP 86. Наблюдения звезды проводились в ночи на 26-27 сентября. Наблюдения звезды проводились в фильтрах B, V, R, I с покрытием всего вращательного периода. Кривые блеска звезды представлены на рисунке 21. Видно, что все кривые блеска имеют явно-асимметричный профиль с амплитудой 0.24m, 0.22m, 0.19m, 0.22m в полосах B, V, R, I соответственно.

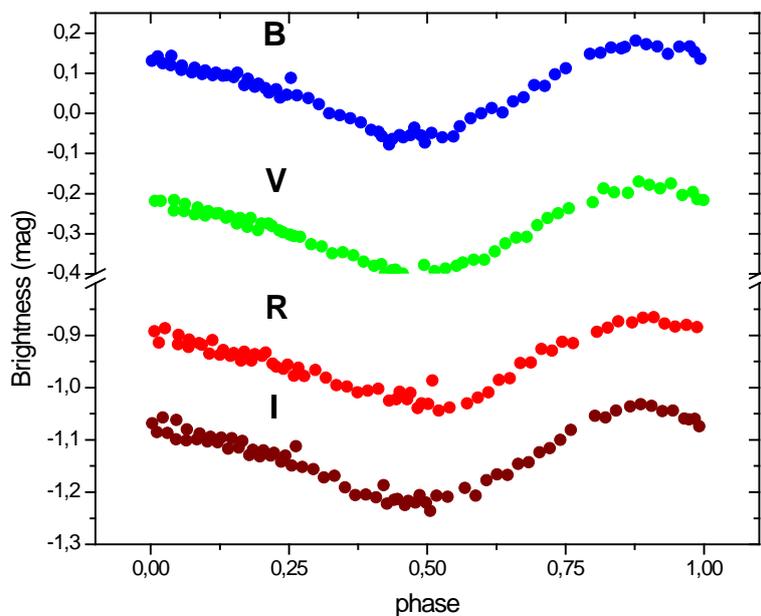


Рисунок 21 - Кривые блеска звезды AP 86 в полосах B, V, R, I.

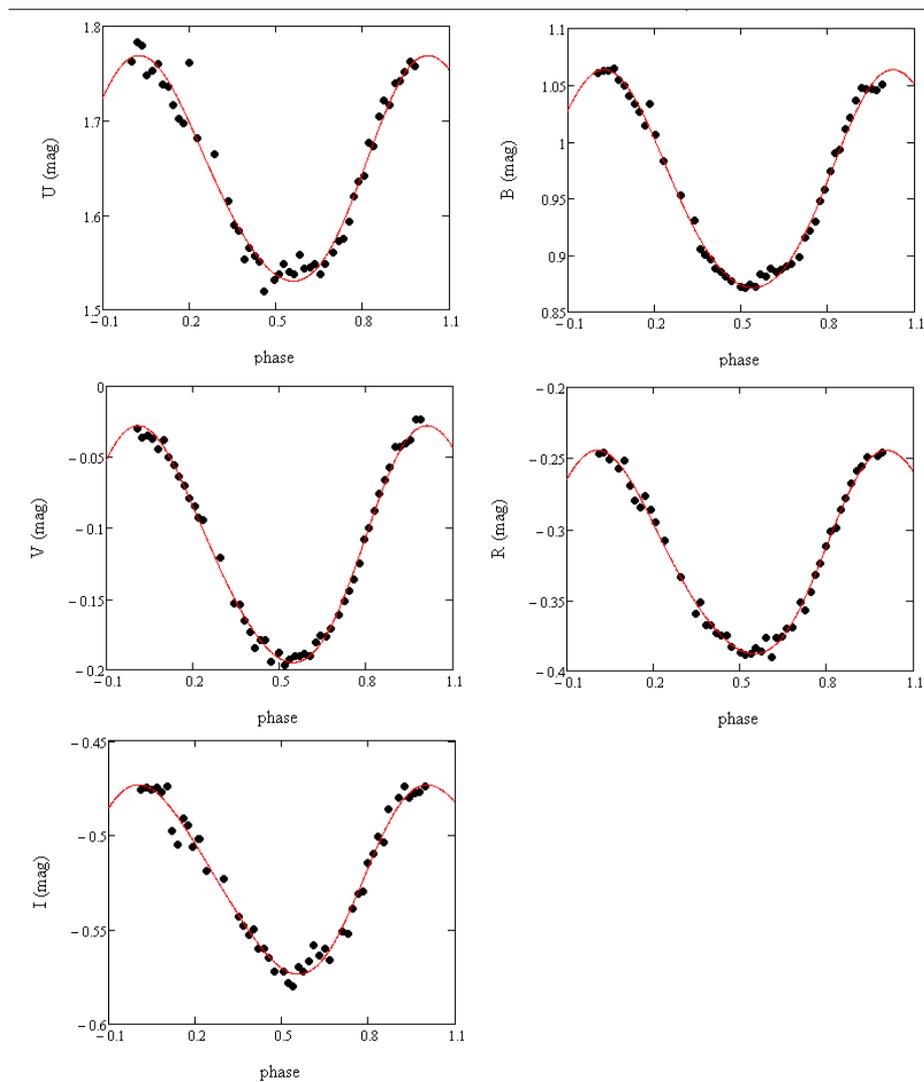


Рисунок 22 - Кривые блеска звезды HIP 1883 в полосах U, B, V, R, I. Непрерывная линия – аппроксимация данных тремя первыми членами фурье-разложения

НП 1883. Наблюдения звезды проводились в ночь на 26 сентября в фильтрах U, B, V, R, I. Полученные кривые блеска звезды представлены на рисунке 22. Видно, что все кривые блеска имеют асимметричный профиль с амплитудой 0.22m, 0.187m, 0.167m, 0.140m, 0.100m в полосах U, B, V, R, I соответственно.

Используя разработанную нами методику фотометрического картирования, мы провели анализ температурной структуры поверхности первичной компоненты системы HD 12545. Объект HD 12545 (XX Tri) представляет собой яркую ($V \sim 8m$) долгопериодическую ($P_{orb}=24d$) двойную систему типа RS CVn. Он отличается очень большими вариациями блеска, вызванными наличием крупных холодных пятен на поверхности запятненной компоненты, которые согласно работе, достигают значений 0.50 в фильтре V [63]. Кроме того, умеренное значение угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения 50° и наличие работ, посвященных ее фотометрическому исследованию, делают ее подходящим объектом для тестирования разрабатываемой нами методики.

Фотометрический материал, используемый нами для картирования поверхности HD 12545, был заимствован из статьи Strassmeier [63]. Наблюдения были проведены между 17 января и 1 марта 1991 года на однометровом телескопе обсерватории Конколи (Венгрия), охватив два вращательных периода звезды. В качестве детектора использовался одноканальный UBVR(I)c фотометр с термоэлектронным охлаждением. Средняя ошибка дифференциальной фотометрии составляла 0.004m в фильтрах B, V, R, I и 0.008m в фильтре U. Разница между наблюдаемым максимальным и минимальным блеском составляла 0.60, 0.57, 0.50, 0.46 и 0.38 зв. величин в фильтрах U, B, V, R и I соответственно. Данные фотометрии звезды HD 12545 относительно звезды HD 12478 были представлены в работе [63] в шкале фаз орбитального периода звезды HD 12545. Значения фаз были вычислены авторами работы согласно орбитальным эфемеридам $HJD = 2447816.01 + 23.9824 E$.

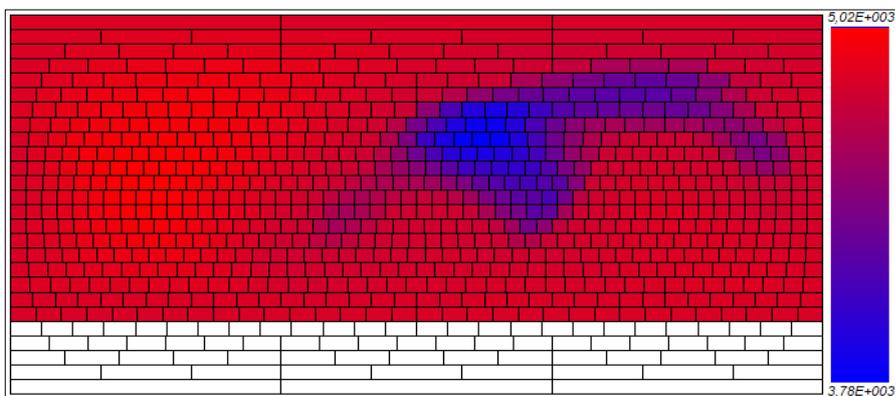


Рисунок 23 - Температурная карта, полученная нами методом многополосного картирования

Мы приняли температуру нормальной фотосферы звезды равной 4820 К, соответствующей звездам класса K0III. В процессе картирования учитывался эффект потемнения звездного диска к краю в линейном приближении с коэффициентом потемнения, соответствующий атмосфере с параметрами $T_{\text{eff}}=5000$ К и $\log g=3.0$. Яркость незапятнанной фотосферы была принята в соответствие с максимальным блеском звезды, который наблюдался в 1991 году. Температура пятен была принята равной 3600 К [63]. Полученная карта распределения температуры по поверхности HD 12545 представлена на рисунке 23, а сравнение кривых блеска восстановленной поверхности с наблюдаемыми кривыми блеска показано на рисунке 24.

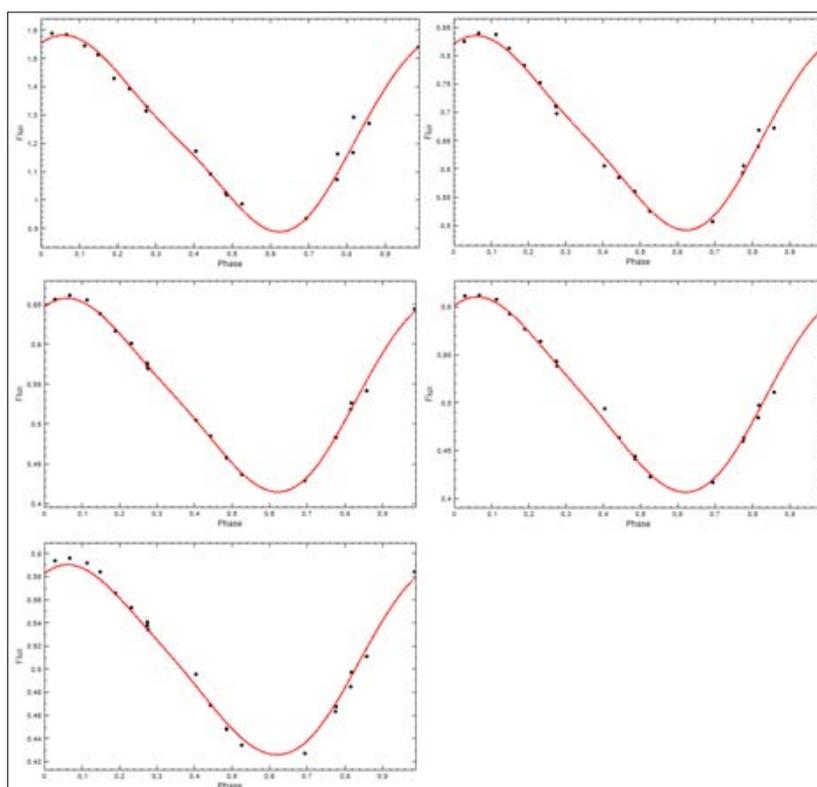


Рисунок 24 - Сравнение наблюдаемых и модельных кривых блеска.

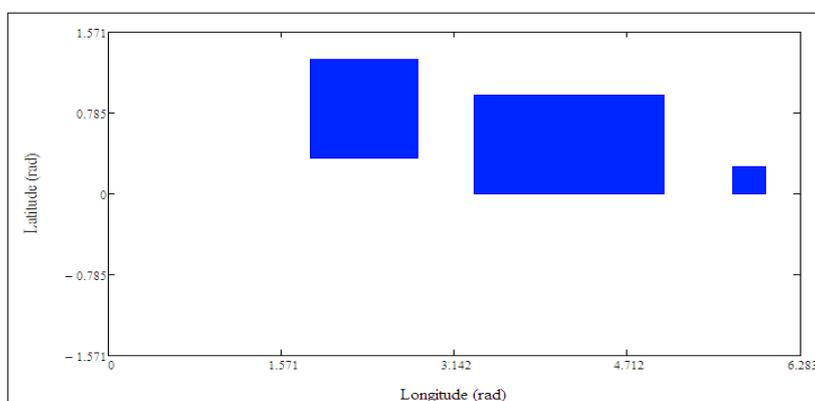


Рисунок 25 - Температурная карта, полученная методом моделирования кривой блеска прямоугольными пятнами [63]

Полученная нами карта температурного распределения (рисунки 25, 26) неплохо согласуется с картами, полученными в работе [63] методами моделирования кривой блеска круглыми и прямоугольными пятнами. Из полученной нами карты видно, что температурный минимум достигается в области соответствующей расположению наиболее крупного пятна моделей Штрассмайера.

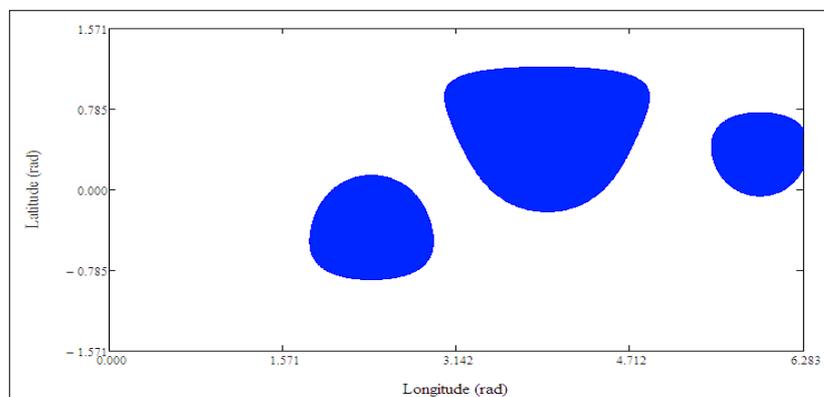


Рисунок 26 - Температурная карта, полученная методом моделирования кривой блеска круглыми пятнами [63]

Анализ температурных карт. Моделирование синтетических спектров и сравнение с наблюдениями.

Для оценки влияния запятненности звезд на вид их спектров, реализованная нами методика моделирования спектров была применена к восстановленной температурной карте вторичной компоненты системы FF Aqr, которая представлена на рисунке 27.

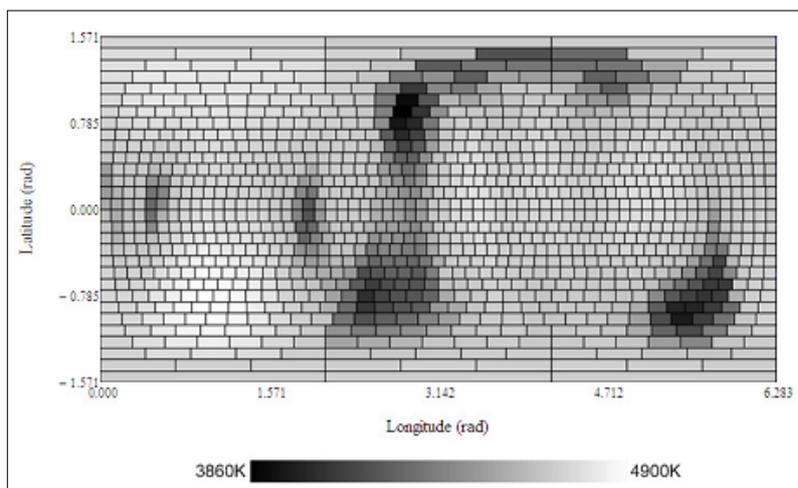


Рисунок 27 - Карта распределения температуры на поверхности FF Aqr

Данная карта была получена нами методом BVRI-картирования на основе данных представленных в работе Vassago [64]. Моделирование спектров звезды проводилось в наиболее неблендированном участке спектра, охватывающем диапазон длин волн 6126 – 6186 Å, с шагом 0.005 Å. Радиус исследуемой звезды был принят равным $R = 6.9 R_{\text{sun}}$,

период ее вращения $P_{\text{rot}} = 9.2\text{d}$, а угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 76^\circ$. Расчет сетки удельных интенсивностей проводился для атмосфер с ускорением силы тяжести $\log g = 3.0$, турбулентной скоростью $v_{\text{turb}} = 1.0 \text{ km/s}$ и солнечным химсоставом. Полученная сетка удельных интенсивностей охватывала температурный диапазон 4900 – 3550 К с шагом 50 К; три значения направлений излучения $\mu_1 = 0.11$, $\mu_2 = 0.50$ и $\mu_3 = 0.89$; и указанный выше диапазон длин волн. Полученные нормированные спектры вторичной компоненты системы FF Aqr, соответствующие фазам ее максимальной и минимальной яркости, представлены на рисунках 28, 29. Заметно влияние запятненности на рассчитанные спектры звезды, которое проявляется в изменении сил линий и их профилей.

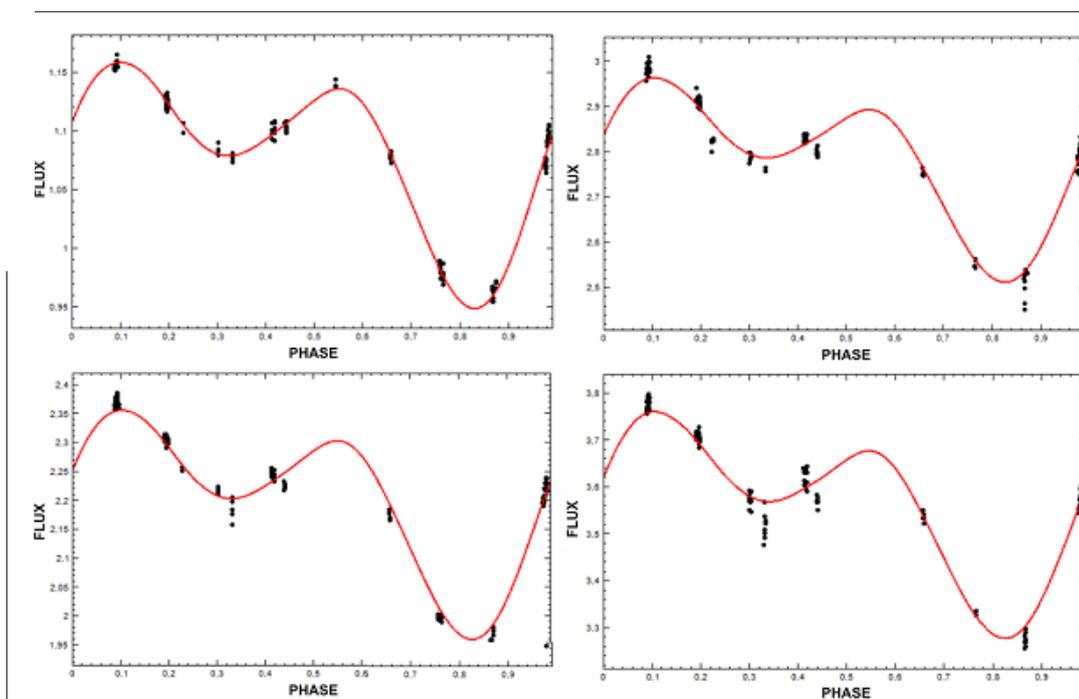


Рисунок 28 - Сравнение наблюдаемых кривых блеска звезды FF Aqr с кривыми блеска модельной поверхности в фильтрах B, V, R, I.

Для исследования изменения эквивалентных ширинок линий по фазе вращения, нами была рассчитана сетка спектров звезды, охватывающая полный период ее вращения с шагом по фазе 0.05. Было выделено 14 диапазонов длин волн, охватывающих интересующие нас линии и бленды, которые перечислены в таблице 4. Для каждого рассчитанного спектра, было проведено интегрирование внутри диапазонов, содержащих спектральные линии и бленды, с целью вычисления эквивалентных ширинок. Полученные таким образом зависимости эквивалентных ширинок выделенных линий от фазы вращения представлены на рисунках 30, 31. В таблице 4 перечислены все использованные диапазоны интегрирования, химические элементы, линии которых входят в

соответствующие диапазоны, и относительные амплитуды изменения эквивалентных ширин.

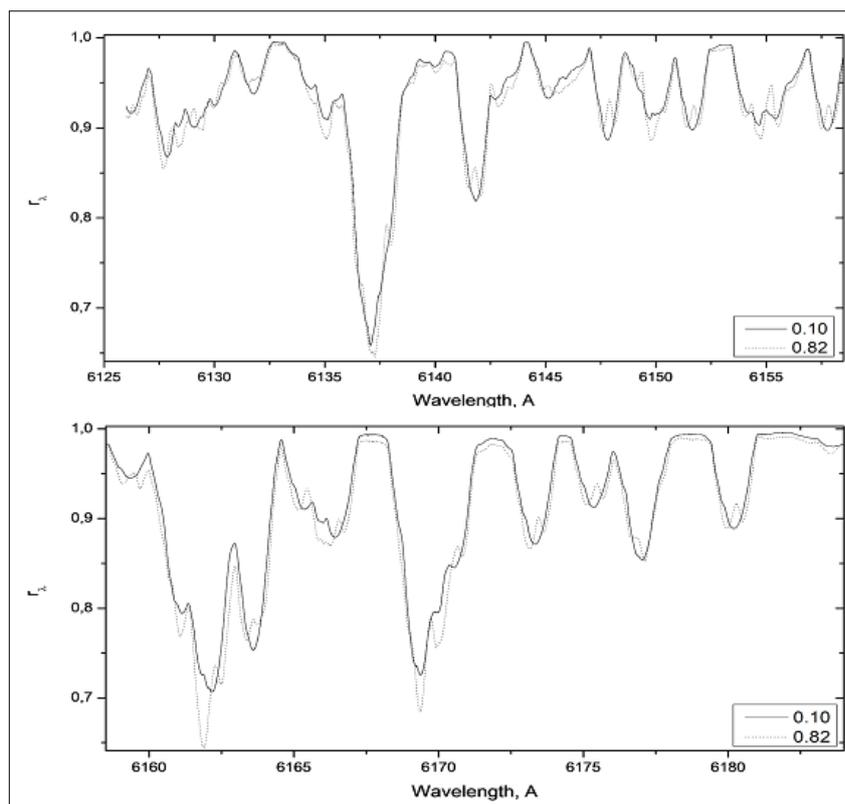


Рисунок 29 - Рассчитанные спектры вторичной компоненты системы FF Aqr. Показаны спектры звезды на фазы ее вращения, соответствующие ее максимальному и минимальному блеску

Сравнение рисунков 30, 31 с рисунком 29 показывает, что эквивалентная ширина большинства линий изменяется в противофазе с изменением блеска звезды, т.е. увеличивается при увеличении запятненности ее видимой поверхности. Подобные изменения характерны для линий нейтральных атомов с относительно невысокими потенциалами возбуждения нижних уровней ($E_{ext} < 4$ eV). Данный эффект обусловлен увеличением количества поглощающих атомов с уменьшением температуры среды, что имеет место в области пятен. Обратные эффекты наблюдаются для ограниченного числа линий, к которому в исследуемом диапазоне принадлежат детали, обозначенные номерами 10 и 14. Они демонстрируют увеличение своей эквивалентной ширины с повышением блеска звезды. Первая из них принадлежит второй стадии ионизации железа (FeII), а вторая формируются нейтральными атомами кремния SiI при переходах с уровня, имеющего высокий потенциал возбуждения ($E_{ext} = 5.61$ eV). Количество атомов и ионов, поглощающих в этих линиях, растет с ростом температуры, и максимальная интенсивность последних достигается в областях незапятненной фотосферы.

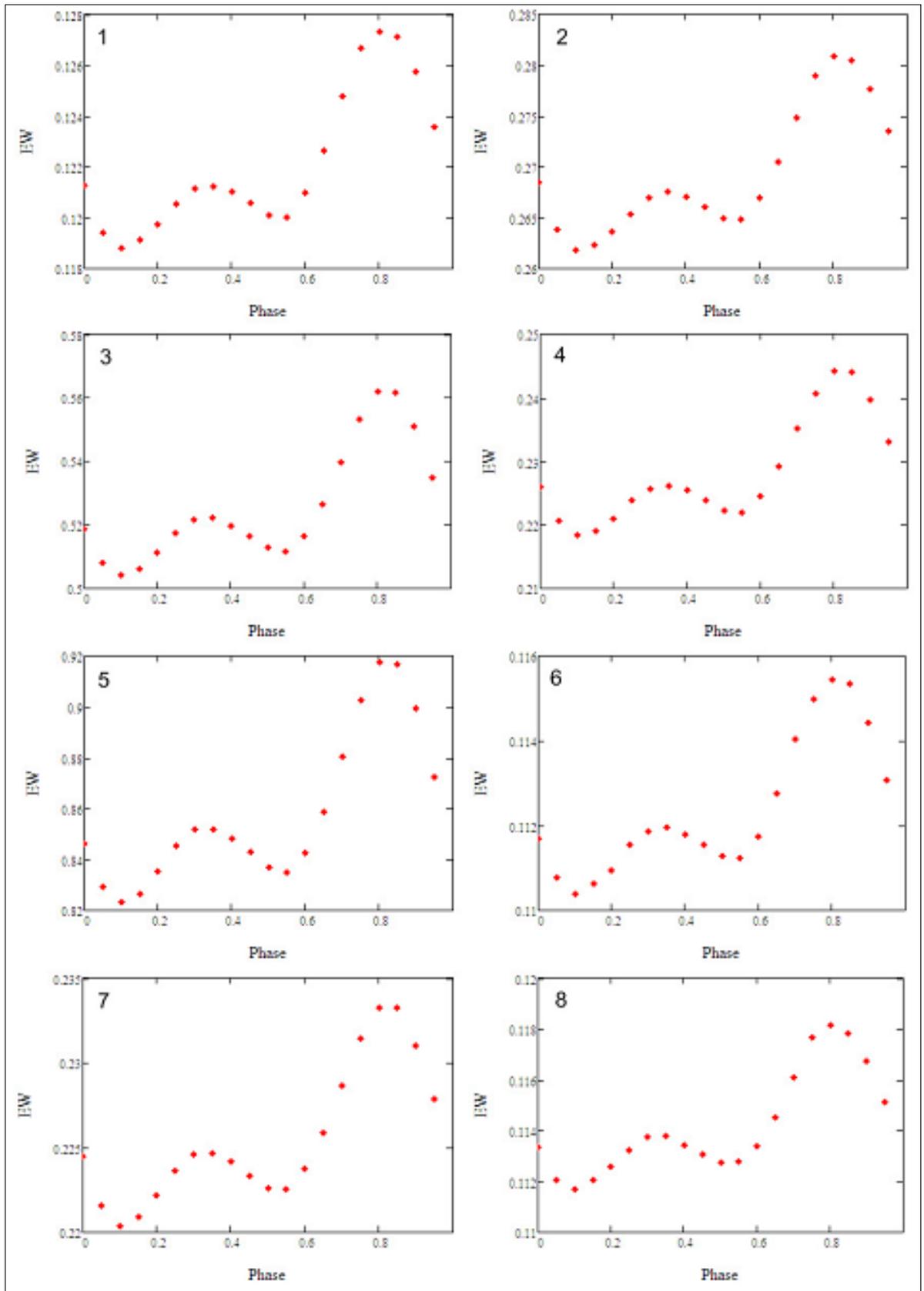


Рисунок 30 - Изменение эквивалентных ширин линий при вращении восстановленной температурной поверхности вторичной компоненты системы FF Aqr. Указаны номера линий, по которым можно найти их некоторые характеристики в таблице 2.

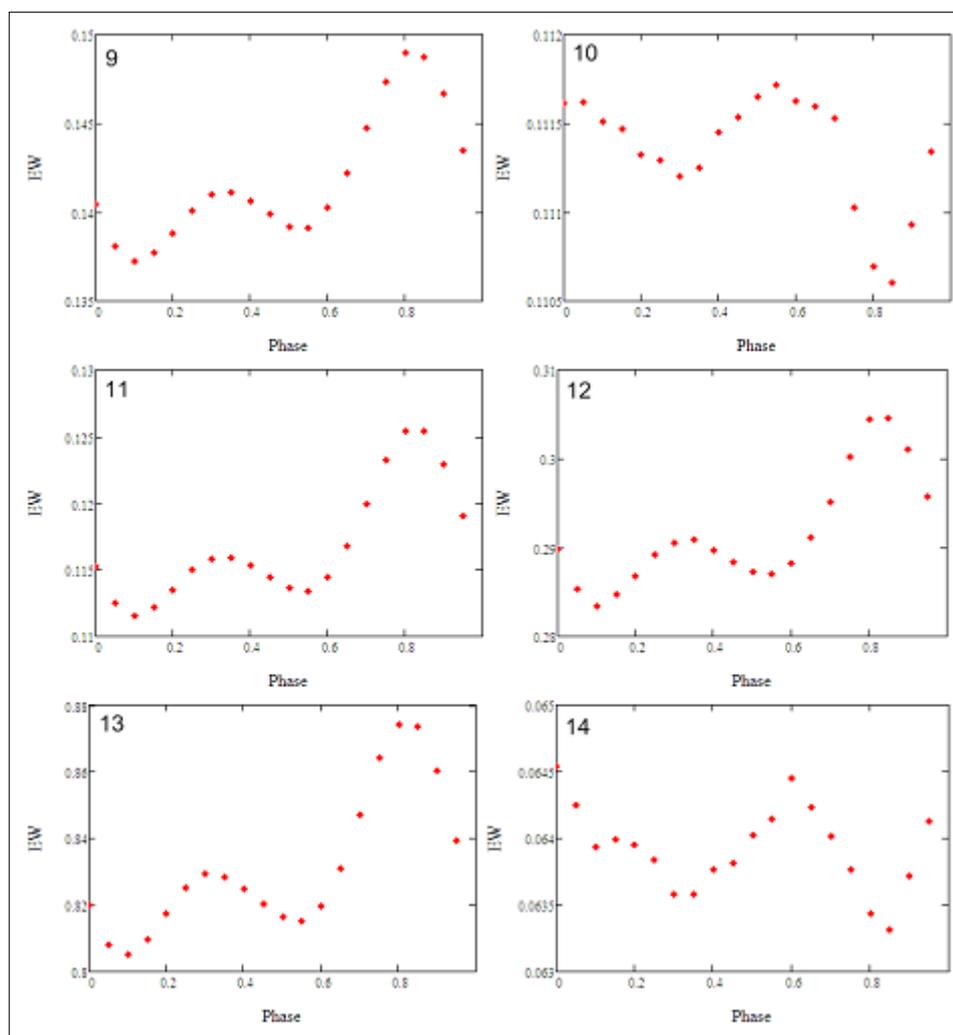


Рисунок 31 - Изменение эквивалентных ширин линий при вращении восстановленной температурной поверхности вторичной компоненты системы FF Aqr. Указаны номера линий, по которым можно найти их некоторые характеристики в таблице 4.

Таблица 4. Параметры линий и бленд, для которых было выполнено измерение эквивалентных ширин.

	Диапазон	Хим. элемент	(EWmax - EWmin)/EWmax
	6179.3--6181.1	FeI	6.7
	6174.4--6178.7	NiI	6.8
	6167.6--6171.8	CaI, FeI	10.3
	6164.6--6167.6	CaI, FeI	10.6
	6159.9--6164.6	NaI, CaI	10.3
	6156.9--6158.6	FeI	4.4
	6153.4--6156.9	NaI, SiI, CaI	5.5
	6150.9--6152.9	FeI	5.4
	6148.6--6150.9	VI	7.9

0	6147.0--6148.6	FeII	1.0
1	6144.2--6147.0	SiI, TiI	11.1
2	6140.4--6144.2	BaII	7.0
3	6132.8--6140.5	FeI	7.9
4	6130.9--6132.7	SiI	1.9

Демонстрация искажения профилей спектральных линий запятненностью поверхности звезды представлена на рисунке 32 на примере линий FeII λ 6180A и BaII 6141A, рассчитанных для нескольких фаз вращения звезды. На рисунке 33 показаны видимые карты восстановленной температурной поверхности звезды, соответствующие некоторым фазам вращения звезды. Профили рассматриваемых линий, демонстрируют искажения в виде "эмиссионных" горбов, положение которых хорошо соответствует значениям мгновенных лучевых скоростей пятен на видимой поверхности звезды. Мгновенных лучевых скоростей пятен на видимой поверхности звезды.

Например, профили обеих линий, рассчитанные для фазы 0.82, имеют довольно большой "эмиссионный" горб около нулевой лучевой скорости, слегка смещенный в сторону положительных лучевых скоростей. В то же время, видимая на данную фазу полусфера звезды имеет сильную запятненность, вытянутую вдоль меридиана. Эта область запятненности покрывает линию нулевых лучевых скоростей, но большая ее часть медленно удаляется от наблюдателя. Та же область запятненности проявляет себя и на профиле линий, полученных для фазы вращения 0.70.

Эти профили демонстрируют наличие "эмиссионного горба" в синем крыле линии, около лучевой скорости -20 km/s. На соответствующей полусфере можно также видеть область запятненности, которая искажала ядро линий при фазе 0.82. Однако, на этот раз она видна в левой части диска звезды и приближается к наблюдателю. Еще один, ярко выраженный "эмиссионный" горб можно видеть на профилях линий, рассчитанных для фазы 0.32. Данный горб порождается пятном, видимым в нижней части соответствующей полусферы. Это пятно приближается к наблюдателю с относительно небольшой скоростью. Соответствующий "эмиссионный" горб также расположен в синем крыле линии, близко к ее центру. Аналогичные детали, но более меньшего масштаба, можно видеть и на остальных профилях линий.

Описание методики многополосного температурного картирования поверхности запятненных звезд приводится в отдельном документе в составе отчетной документации.

По результатам проведения работ в рамках проекта подготовлена к печати статья «О восстановлении структуры поверхности запятанных звезд» и представлен доклад на Всероссийской молодежной астрономической конференции «Наблюдаемые проявления эволюции звезд».

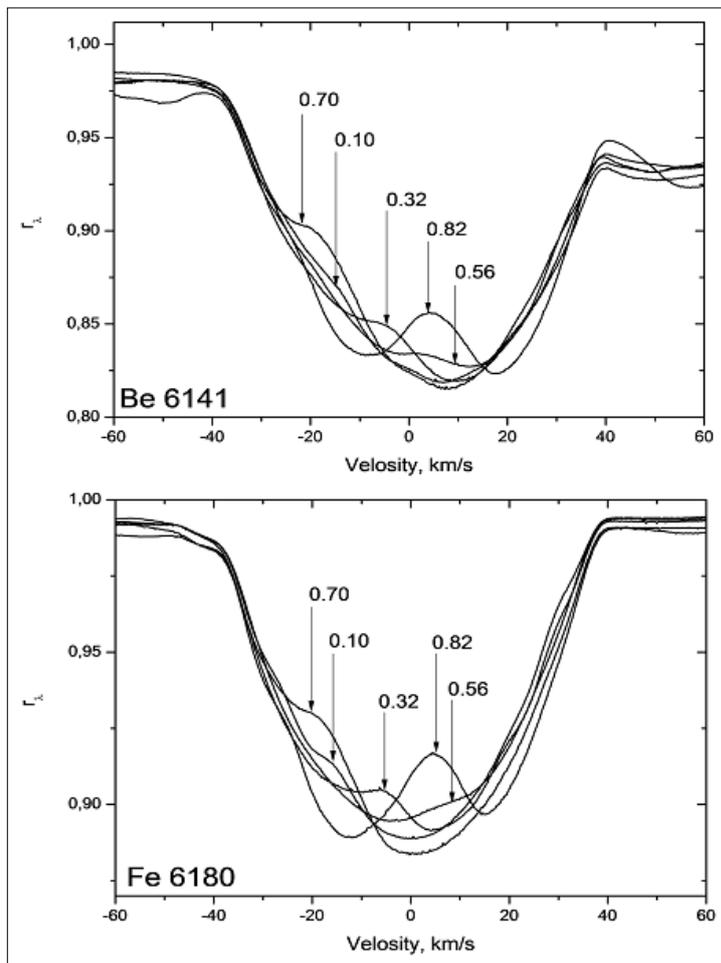


Рисунок 32 - Модельные профили линий бериллия и железа

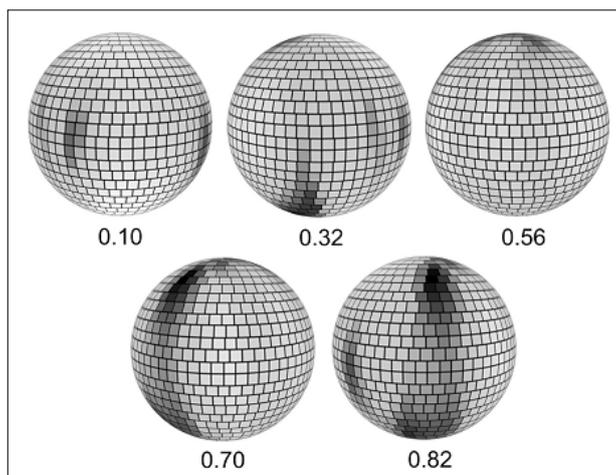


Рисунок 33 - Видимые со стороны наблюдателя полусферы восстановленной температурной поверхности вторичной компоненты системы FF Aqr. На рисунке указаны значения фаз вращения звезды, в которые наблюдается ее соответствующая полусфера.

7 РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЯРКИХ ЛИНИЙ СПЕКТРА СРАВНЕНИЯ

Аспирантом Северо-Кавказского федерального университета Булейкиным А.С. разработано и испытано устройство для снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения.

Обоснование проводимого направления исследований.

Проект является составной частью программы оснащения телескопов САО РАН новой спектральной аппаратурой высокого разрешения. В рамках этой программы предполагается создать два эшелельных спектрографа, которые получают свет от телескопа по оптическому волокну. По такому же оптическому волокну в спектрограф подается свет от источника спектра сравнения (калибровки). Необходимо обеспечить одинаковые условия экспозиции спектра исследуемого астрономического объекта и спектра сравнения (в этом случае на спектрографах можно обеспечить точность измерений лучевой скорости, достаточную для поиска планет вокруг других звезд). Но при одинаковых условиях экспозиции яркие линии спектра сравнения существенным образом увеличивают уровень рассеянного в спектрографе света, кроме того, происходит искажение отдельных деталей спектра исследуемого объекта. Поэтому создание устройства, избирательно понижающего интенсивность ярких линий спектра сравнения, является решающим в обеспечении режима непрерывной калибровки спектрографа высокого разрешения. Такое устройство предлагается впервые в мировой практике.

Постановка задачи. В большинстве случаев спектр исследуемого астрономического объекта необходимо сравнивать со спектром лабораторного источника, с известными значениями длин волн спектральных линий. Спектр лабораторного источника может быть зарегистрирован одновременно со спектром исследуемого объекта, либо «до» и «после» регистрации спектра исследуемого объекта. Спектр лабораторного источника может быть зарегистрирован в непосредственной близости от исследуемого спектра (рисунок 34), либо, при последовательных экспозициях, зарегистрирован теми же элементами светоприемника, которые регистрируют исследуемый спектр (рисунки 35 и 36).

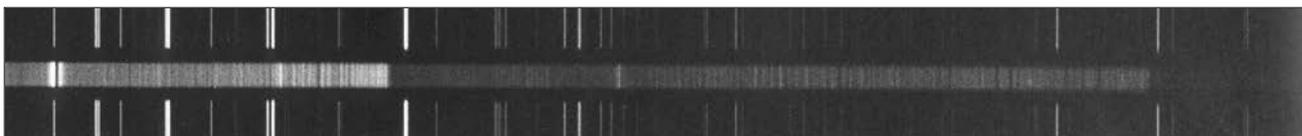


Рисунок 34 - Спектр звезды (средняя полоска) и спектр сравнения (полоски сверху и снизу), зарегистрированные на фотопластинке

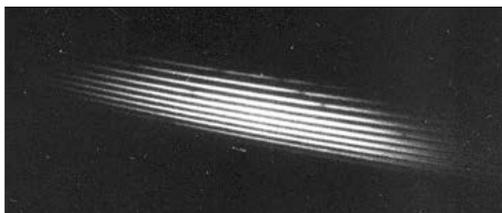


Рисунок 35 - Эшелле спектр звезды, зарегистрированный при помощи двумерного счетчика фотонов.



Рисунок 36 - Эшелле спектр сравнения, зарегистрированный при помощи двумерного счетчика фотонов. Вокруг ярких линий видны ореолы рассеянного света.

Спектр сравнения формируется в лампе с полым катодом (лампа канала калибровки), заполненной инертным газом (например, аргоном). Из-за особенностей строения атома аргона в его спектре наблюдаются яркие линии, интенсивность которых может превышать интенсивность рабочих линий, используемых для построения дисперсионной кривой и для точных определений положений линий в спектре исследуемого объекта. Применение малочувствительных светоприемников (рисунок 34) оставляло проблему рассеянного света второстепенной [65], с переходом на счетчики фотонов (рисунки 35 и 36) и на матрицы ПЗС (рисунок 37) проблема рассеянного света вокруг ярких линий спектра сравнения стала одной из основных.

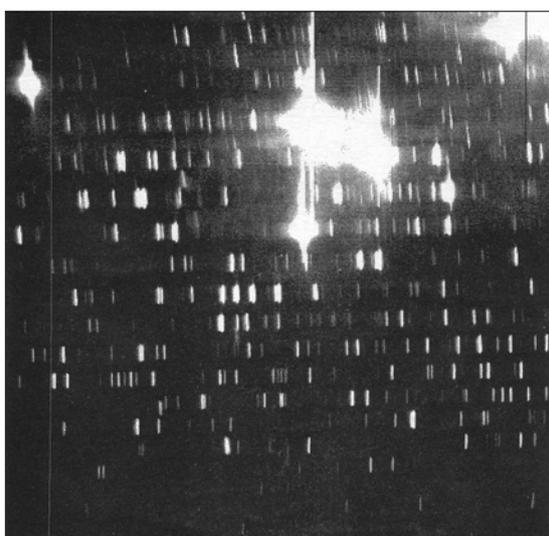


Рисунок 37 - Образец спектра сравнения, полученный в диапазоне 580-745 нм. Спектрограф РЫСЬ [66], эшелле 37.5штр/мм, решетка скрещенной дисперсии 150штр/мм. Вокруг ярких линий видны ореолы рассеянного света.

Итак, для того, чтобы измерить большое число слабых линий спектра сравнения, необходимо увеличить экспозицию, но при этом вокруг сильных линий развиваются ореолы, которые могут испортить как спектр сравнения, так и расположенный рядом с ним спектр звезды. Традиционный способ борьбы с этим эффектом состоит в том, что астроном последовательно регистрирует серию спектров: а) сначала регистрируется спектр сравнения, б) затем спектры звезды (один или более), в) затем – снова спектр сравнения. Этот способ хорош до тех пор, пока смещения положений спектров сравнения, зарегистрированных в процедурах «а» и «в», можно описывать линейной функцией, с интерполяцией положения линий спектра сравнения на момент середины экспозиции спектра исследуемого объекта.

Однако нестабильности могут развиваться нелинейно, а центр тяжести экспозиции может не соответствовать середине экспозиции во времени (из-за изменчивости астроклиматических условий). Поэтому спектрографы, предназначенные для высокоточных измерений положений спектральных линий, разрабатываются таким образом, чтобы спектр исследуемого объекта и спектр сравнения можно было регистрировать одновременно (рисунок 38). Снижение уровня рассеянного света от канала калибровки здесь обеспечивается специальными конструктивными приемами (щели и бленды) в области построения промежуточного спектра в схеме белого зрачка.

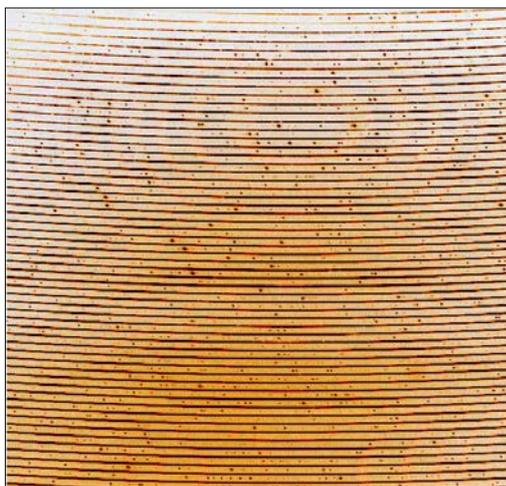


Рисунок 38 - Эшелле спектры звезды (полоски) и лампы канала калибровки (точки между полосками), зарегистрированные одновременно на оптоволоконном спектрографе ELODIE.

Однако способы борьбы с ореолами вокруг ярких линий спектра сравнения, «подаваемого» на вход спектрографа, не всегда оказываются удачными. Идеальным вариантом является корректировка интенсивностей ярких линий до того, как они сформируются в оптической схеме спектрографа. Именно такую задачу мы попытались решить в данной работе.

Расчет схемы автоколлимационного спектрографа с зеркальной оптикой и дифракционной решеткой с большим углом блеска. Изготовление деталей устройства.

Обратимся теперь к выбору и расчету схемы спектроскопического фильтра. Прежде всего, отметим, что схема использования дифракционной решетки в низких порядках представляется неудобной, из-за длины промежуточного спектра (см., например, рисунок 34, где представлен фрагмент одного из низких спектральных порядков). Гораздо удобнее сформировать спектр сравнения в виде эшелле-спектра, т.е., в виде прямоугольной картинки (см. пример на рисунок 37), когда излучение с компактной площадки удобно собирать после фильтрации. Поставим следующий вопрос: необходимо ли пространственное разведение порядков спектра сравнения, обеспечиваемое элементом скрещенной дисперсии? Нет, пространственное разведение порядков в схеме спектроскопического фильтра представляется излишним, т.к. это приведет к усложнению конструкции маски ярких линий. На рисунке 39 приводим изображение спектра сравнения, полученное на эшелле спектрографе РЫСЬ без элемента скрещенной дисперсии (вместо дифракционной решетки устанавливалось плоское зеркало).

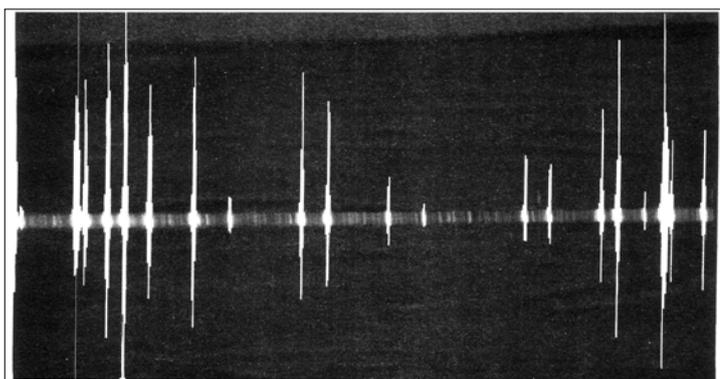


Рисунок 39 - Изображение эшелле спектра, полученное без элемента скрещенной дисперсии

На рисунке 39 изображен спектр, сформированный переналожением большого числа спектральных порядков (практически всех порядков эшелле спектра, попадающих в диапазон чувствительности используемой матрицы ПЗС). Для того, чтобы подчеркнуть эффекты рассеяния, экспозиция спектра выбрана большой, нетипичной для стандартной процедуры калибровки. Высокие «усы», наблюдаемые на продолжении ярких линий, иллюстрируют тот эффект, что рассеяние света на дифракционной решетке неизотропно, а происходит преимущественно вдоль штриха. С точки зрения фильтрации, совершенно безразлично, в какой части полосы спектра, изображенного на рисунке 39, находится фильтруемая линия. При изготовлении маски следует закрыть все яркие линии, формирующие значимый рассеянный свет.

Итак, мы выбрали один оптический элемент схемы спектроскопического фильтра - это должна быть дифракционная решетка с большим углом блеска, работающая в высоких порядках. Чем выше номер спектрального порядка, тем короче его протяженность. Если регистрировать все короткие порядки с переналожением, то все яркие линии спектра сравнения разместятся на небольшой длине маски. Небольшая длина маски облегчит сбор излучения после фильтрации.

В схеме спектрального фильтра (по сути дела - вспомогательного спектрографа) должны присутствовать коллиматор и камера. Так как речь идет о фильтрации в широком спектральном диапазоне, желательно, чтобы оптика вспомогательного спектрографа была ахроматической. Мы предлагаем схему, состоящую из вогнутых зеркал (рисунок 40). Коллиматор 2 представляет собой вогнутое зеркало, перехватывающее пучки, расходящиеся после входной щели 1. Параллельный (коллимированный) пучок попадает на дифракционную решетку 3, штрихи которой расположены параллельно плоскости рисунка 40. Дифрагированные монохроматические пучки перехватываются объективом камеры 4, которая строит изображение спектра на поверхности светоприемника. На плоскости рисунка 40 показаны высота щели и высота спектра. Изображение спектра находится в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка 40.

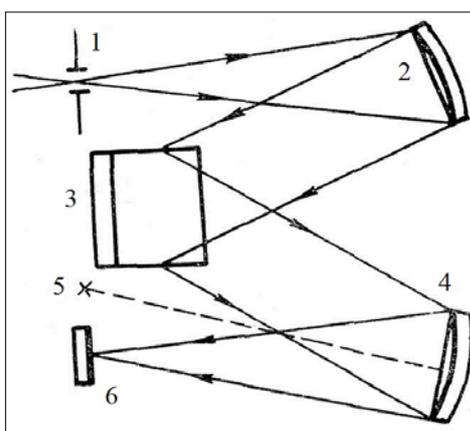


Рисунок 40 - Вертикально-симметричная схема использования дифракционной решетки. Обозначения: 1 - щель, 2 - зеркало коллиматора, 3 - дифракционная решетка, 4 - зеркало камеры, 5 - точка пересечения главной оси объектива камеры с фокальной плоскостью, 6 - светоприемник.

Прежде, чем перейти собственно к расчету схемы спектрографа с зеркальной оптикой и дифракционной решеткой с большим углом блеска, изложим некоторые аргументы в пользу нашей схемы.

Величина aberrаций в большой степени зависит от светосилы прибора. По сравнению с линзовой, зеркальная оптика проще в изготовлении, ахроматична и позволяет получить хорошее качество изображения спектральных линий на плоской фокальной

поверхности. Для приборов малой светосилы (т.е., с малым относительным отверстием сферического зеркала $A=D/F$, где D - диаметр зеркала, а F - его фокусное расстояние), применяется автоколлимационная схема Литрова, в которой aberrации входного объектива (выполняющего функции коллиматора) складываются с aberrациями выходного (камеры).

В случае асимметричного падения пучка лучей на вогнутое зеркало, такой пучок можно рассматривать как часть более широкого симметричного пучка, поэтому на экране, установленном перпендикулярно осевому лучу пучка, мы увидим яркое ядро в месте пересечения каустики сходящихся лучей с плоскостью экрана. От этого ядра отходит широкий короткий хвост, интенсивность которого убывает по направлению к прямой, проходящей через светящуюся точку и центр кривизны зеркала. В таком пятне рассеяния, содержащем в себе поперечную сферическую aberrацию и астигматизм, выделяют кому — фигуру, похожую по форме на комету с коротким хвостом. При падении параллельных лучей на зеркало длина хвоста комы равна 3ρ , а ширина хвоста 2ρ , где $\rho = (1/16)A^2\omega F$, а ω - угла падения лучей на зеркало.

Когда необходимо исправление комы, применяют схему, изображенную на рисунке 40. Если в этой схеме середину решетки установить на расстоянии $0.85F$ от зеркала камеры (здесь F - фокусное расстояние камеры), то можно получить плоское поле изображения спектра. На рисунке 41 показано положение астигматических фокалей на плоскости светоприемника.

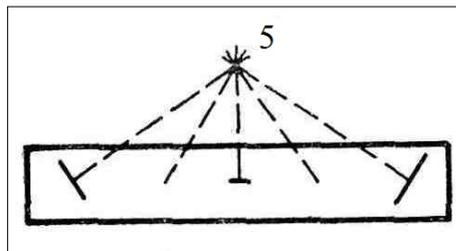


Рисунок 41 - Aberrации в вертикально-симметричной схеме. Обозначения: 5 - точка пересечения оптической оси зеркала с фокальной плоскостью прибора, см. рисунок 40.

В центре полосы спектра фокаль направлена перпендикулярно спектральной линии, но вследствие ее незначительной длины этим обстоятельством можно пренебречь. Длина фокаль l по формуле $l = A\omega^2 F$, пропорциональна квадрату угла падения лучей на зеркало ω , который приближенно равен расстоянию фокаль от точки "5" пересечения оптической оси зеркала с фокальной плоскостью прибора, деленному на $1.7F$, где F - фокусное расстояние зеркального объектива камеры. На краях пластинки длина фокалей приобретает значительную величину, но так как здесь их направление почти совпадает с направлением спектральных линий (фокаль расположены по касательной к окружности с

центром в точке "5"), то практически они не очень сильно ухудшают изображение спектральных линий. Напомним, что в данной оптической схеме нам необходимо не зарегистрировать спектр высокого качества, а лишь обеспечить качество изображения линий, достаточное для изготовления маски, закрывающей сильные линии. Если фокусные расстояния зеркал коллиматора и камеры равны, и равны соответствующие углы ω , то вертикально-симметричная схема в значительной степени компенсирует кому (рисунок 42).

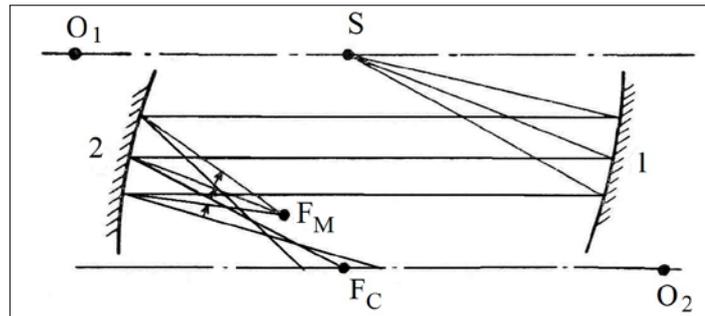


Рисунок 42 - К вопросу о компенсации комы вогнутых зеркал

Рассмотрим случай, когда кома одного вогнутого зеркала может быть исправлена комой другого вогнутого зеркала (в отличие от сферической аберрации). Это возможно при z-образном ходе лучей (рисунок 42). Если бы из двух зеркал 1 и 2 комой обладало бы только зеркало 2, то крайние лучи сходящегося пучка пересеклись бы ниже осевого луча; однако, вследствие того что зеркало 1 также обладает комой, отраженные от него лучи слегка отклоняются по направлению к центру кривизны O_2 , причем отклонение будет наименьшим для верхнего луча и наибольшим для нижнего. В результате этого все три луча, отраженные от зеркала 2, повернутся против часовой стрелки и пересекутся в одной точке, лежащей выше точки F_C осевого луча; при этом кома исправится, а астигматизм удвоится. Если же зеркала 1 и 2 установить по Δ -образной схеме (расположив центры кривизны O_1 и O_2 по одну сторону от зеркал), то при одинаковых зеркалах и углах падения и кома, и астигматизм удвоятся.

Если фокусные расстояния F_1 и F_2 зеркал различны, то кома зеркала 1 $\rho_1 = (1/16)A_1^2\omega_1F_1$ после отражения лучей от зеркала 2 будет иметь размеры $\rho'_1 = \rho_1\Gamma_2$, где $\Gamma_2 = F_2/F_1$ — поперечное увеличение зеркала 2. Поэтому для компенсации комы необходимо выполнить условие — $\rho'_1 = \rho_2$, т. е. $(1/16)A_1^2\omega_1F_1 (F_2/F_1) = (1/16)A_2^2\omega_2F_2$, откуда $A_1^2\omega_1 = A_2^2\omega_2$, а так как $A_2 = A_1F_1/F_2$, то условием компенсации комы будет $\omega_2 = \omega_1F_2^2/F_1^2$.

Мы рассмотрели случаи совпадения меридиональных плоскостей осевых лучей пучков, отраженных от входного и выходного зеркальных объективов. В общем случае эти плоскости образуют угол. Здесь уже нельзя указать простого способа расчета

результатирующей фигуры рассеяния, образующейся в фокальной плоскости выходного объектива, и можно рекомендовать только выполнение полного расчета хода лучей. Существование астигматической разности приводит к тому, что когда мы переходим от бесконечно узких пучков лучей к широким пучкам, то в плоскостях обоих астигматических фокусов образуются астигматические фокалы — взаимно перпендикулярные отрезки прямых, длина которых пропорциональна относительному отверстию пучка в каждой из этих плоскостей: $l_{as} = A\omega^2F$.

Астигматизм широкого пучка лучей проявляется в том, что по мере удаления от зеркала сечение пучка уменьшается и превращается в эллипс, который, сужаясь, превращается в отрезок прямой в месте первого астигматического фокуса. Если экран передвигать далее, фокаль снова превращается в эллипс, потом в круг, потом в эллипс, но уже сплюснутый в другом направлении, и, наконец, в астигматическую фокаль, перпендикулярную первой.

Мы остановились на варианте, когда фокусные расстояния коллиматора и камеры равны, и равны углы падения ω . В этом случае коллиматорным и камерным объективами может служить одно и то же зеркало, рисунок 43.

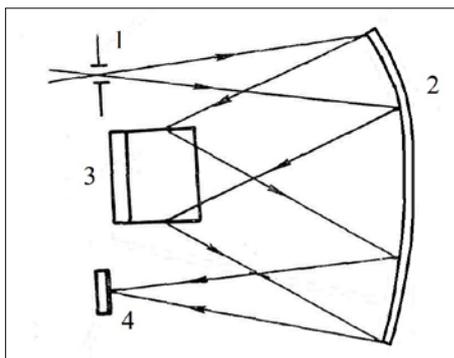


Рисунок 43 - Схема спектрографа с зеркальной оптикой и дифракционной решеткой с большим углом блеска (эшелле). Обозначения: 1 - входная щель, 2 - параболическое зеркало, 3 - эшелле, 4 - светоприемник.

Изготовление деталей устройства. В результате оптических расчетов (использовался комплекс программ ZEMAX), были выбраны следующие параметры оптических элементов:

- а) Зеркало 2 - параболическое, $F = 500$ мм, $D = 130$ мм;
- б) Дифракционная решетка - плотность штрихов 75 штр/мм, угол блеска $\theta_b = 64.3^\circ$, размер заштрихованной области 117×58 мм²;
- в) щель стандартная, УФ-2.

Детали "а" и "б" были изготовлены в оптическом производстве САО РАН и в лаборатории дифракционных решеток НПК ГОИ, соответственно. Все механические детали были изготовлены по нашим чертежам в макетных мастерских САО РАН.

На рисунке 44 приведена фотография параболического зеркала в оправе и дифракционной решетки в оправе.



Рисунок 44 - Фото основных оптических элементов: дифракционной решетки (слева) и параболического вогнутого зеркала.

Сборка, юстировка и испытания устройства.

По результатам наших расчетов оптические элементы спектрографа были собраны и выполнена их относительная юстировка. В качестве репера использовался лазер, определяющий положение осей коллиматора и камеры. В качестве светоприемника использовалась монохромная ПЗС-камера Meade Deep Sky Imager PRO II, снабженная воздушным охлаждением (рисунок 45).



Рисунок 45 - Фото светоприемника с вентилятором охлаждения (закреплен с тыльной стороны камеры). Видна площадка матрицы ПЗС.

На изготовленном нами устройстве были зарегистрированы спектры сравнения (калибровки). Изображения были обработаны в системе MIDAS, полученные векторы были измерены с целью определения координат ярких (сильных) линий. По результатам измерений была изготовлена маска, устанавливаемая вместо светоприемника (поз.4 на рисунок 43). Конструктивно маска состоит из узкой прорези в тонкой металлической пластинке, причем спектр проецируется в прорезь. Поперек прорези наклеены тонкие проволочки (диаметром 0.2мм), положение которых соответствует положению ярких линий спектра сравнения. Таким образом, проволочки препятствуют прохождению излучения от ярких линий через маску. За маской установлена кварцевая линза (рисунок 46), собирающая все излучение, прошедшее через маску.

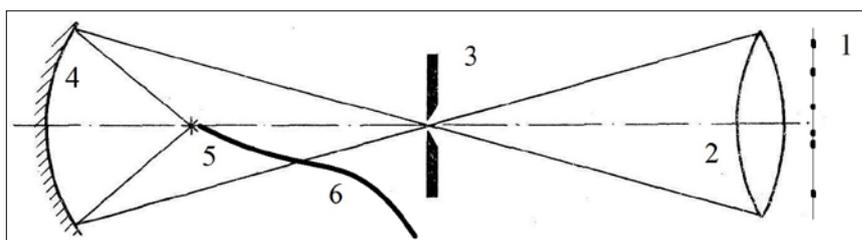


Рисунок 46 - Схема сбора излучения, прошедшего через маску спектрального фильтра. Обозначения: 1 - маска, 2 - кварцевая линза, 3 - промежуточная диафрагма, 4 - вогнутое зеркало - концентратор, 5 входной торец жгута 6 оптических волокон.

Собранное линзой излучение проецируется на входной торец жгута оптических волокон. Этот жгут передает излучение, отфильтрованное в изготовленном нами спектрографе S2, в основной спектрограф S1 (см. рисунок 47).

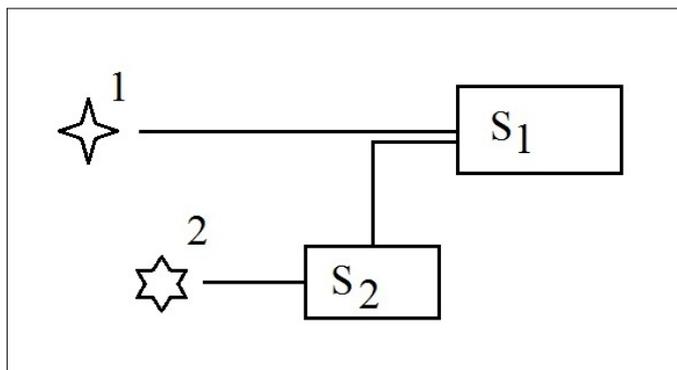


Рисунок 47 - Схема фильтрации спектра сравнения. Обозначения: 1 - поток от исследуемой звезды, 2 - источник спектра сравнения, S₁ - основной спектрограф, S₂ - спектроскопический фильтр, разработанный нами.

На рисунке 48 приведен пример спектра сравнения, отфильтрованного от влияния ярких линий.

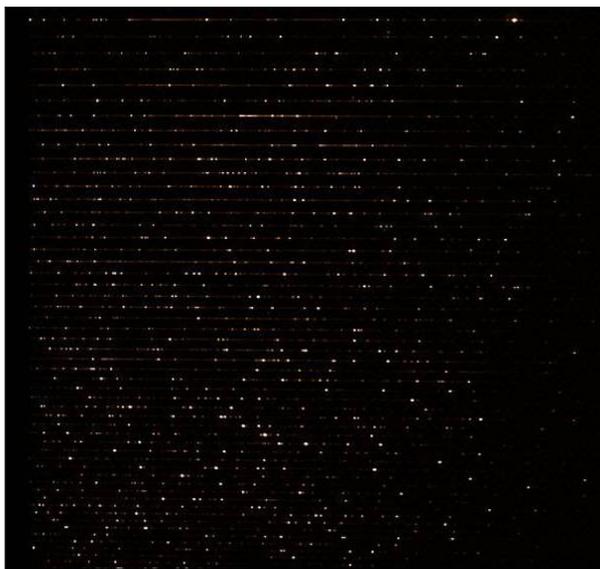


Рисунок 48 - Пример спектра сравнения, отфильтрованного от влияния ярких линий.

Предложенный нами метод фильтрации ярких линий спектра сравнения прошел практическую проверку и может быть рекомендован для широкого практического применения в астрономической спектроскопии высокого разрешения. Наиболее трудоемкой частью работы является изготовление маски механическими средствами. Поэтому в дальнейшем необходимо проверить и другие технологии изготовления спектральной маски, в частности, способы изготовления маски фотолитическим методом.

Описание методики снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения приводится в отдельном документе в составе отчетной документации.

8 СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Инженером-исследователем Института астрономии Российской академии наук Каневым Е.Н. исследована Полярная звезда с целью получения ее физических характеристик и параметров пульсации. Проведено моделирование блеска звезды модифицированным методом Бааде-Весселинка с целью определения радиуса Полярной звезды, и сравнено с другими способами получения физических параметров.

Анализ проблемы изучения пульсаций Полярной Звезды.

Полярная Звезда (α Umi, HIP 11767, HD 8890, HR 724) – наиболее известная цефеида. Она имеет несколько очень интересных особенностей с точки зрения астрофизики. Полярная – член тройной системы, она ярчайшая и ближайшая к нам цефеида с очень малой амплитудой пульсации. Поэтому она очень интенсивно изучалась фотометрическими и спектроскопическими методами с конца 19ого века. На всём протяжении наблюдений (150 лет) амплитуда пульсаций звезды уменьшалась, амплитуда лучевой скорости в ходе пульсаций уменьшилась с 10км/с в 1860гг. до 2км/с в начале 2000ных. к 2006 году пульсации прекратились, в печати появились предположения о выходе звезды с полосы неустойчивости. Однако уже в 2007 пульсации вновь возникли, с тех пор их амплитуда только растёт. Возможно, мы наблюдаем петлю цефеиды на диаграмме Гецшпрунга-Рессела на границе полосы неустойчивости. К тому же, одной из особенностей Полярной является очень быстрое изменение периода пульсаций – 4,5 с/год [67].

Впервые измерения лучевых скоростей звезд начали вести в середине позапрошлого века после предложения об измерении собственных скоростей звёзд с помощью доплеровского смещения линий. Первые измерения лучевых скоростей пульсирующих звёзд начались с Полярной Звезды. Сэйдел и Шмидт показали незначительное периодическое изменение лучевой скорости. С 1996 года начали проводиться регулярные измерения скоростей для ярчайшей Цефеиды - Полярной Звезды. Длиннейшая программа наблюдений собственных скоростей Полярной Звезды, которая длилась 62 года, и включавшая в себя 1180 наблюдений лучевой скорости на 36-дюймовом рефракторе Ликской обсерватории, опубликована Элизабет Рёмер в 1965 году [68] (рисунок 49). Однако измерения тех лет велись на призмных спектрографах с фотографической регистрацией. Ошибка таких измерений составляет около 3 км/с. Несмотря на её значительную величину даже те измерения могут быть использованы для более точного определения орбитального движения кратной системы, которой является Полярная Звезда.

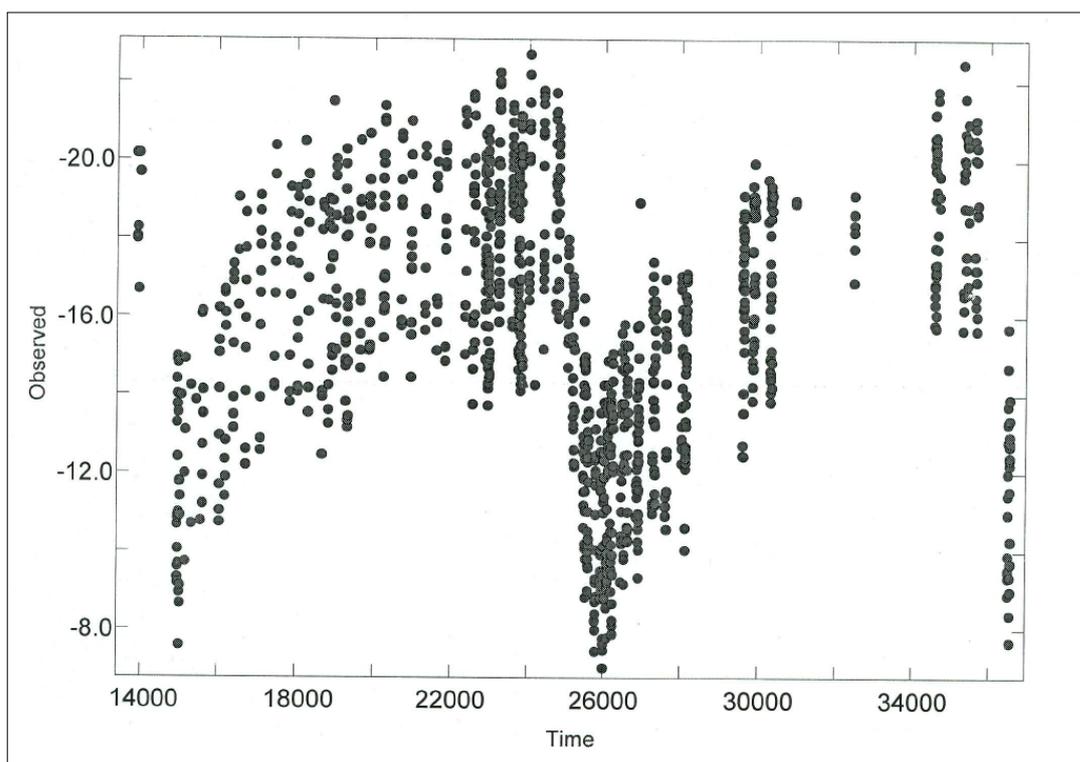


Рисунок 49 – Первый длительный мониторинг лучевой скорости Полярной Звезды (Roemer, 1965, [68]), представленные данные полезны для точного определения орбитальных параметров кратной системы, а так же для наблюдения за вековым изменением амплитуды пульсаций.

Как следствие, уточнение разделения пульсационной и орбитальной компоненты, а значит и непосредственного уточнения интересующей нас пульсационной компоненты.

Во второй половине 20 века Полярная Звезда потеряла интерес астрономов, в связи с обнаруженным предсказуемым уменьшением амплитуд пульсации. Однако после их исчезновения в 2005 году, они неожиданно появились вновь, таким образом, поставив вопрос об эволюционной петле малоамплитудной цефеиды.

Собственные наблюдения и мониторинг Полярной Звезды на БТА велись нами с 2004 и продолжаются до настоящего момента.

Обработка полученных данных наблюдений Полярной звезды. Моделирование пульсаций и сравнение модельных данных с наблюдательными. Проведение измерений физических параметров Полярной Звезды и параметров пульсаций.

С 2004 годы группа лаборатории астроспектроскопии проводила наблюдения и мониторинг Полярной Звезды, с 2007 года мы присоединились к этой программе и ведём собственные наблюдения этого объекта. Совместно наши наблюдательные данные представляют значительную ценность, т.к. охватывают возможную эволюционную петлю Полярной Звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

Наблюдательные данные, полученные на БТА, обладают необходимой точностью (для надёжного применения метода Бааде-Весселинка, точность определения лучевых скоростей должна быть не больше 0.1 амплитуды пульсации) позволяют использовать кросс-корреляционные методы для определения пульсационной компоненты лучевой скорости Полярной Звезды и проведения заявленных исследований.

Спектроскопических наблюдений цефеид и, в частности, Полярной Звезды в России практически не ведётся ввиду отсутствия необходимой аппаратуры. Фактически единственный телескоп, позволяющий производить наблюдения приемлемого качества (определение лучевых скоростей с точностью 100 м/с) – БТА.

Фундаментальной трудностью в наблюдении Полярной звезды является её пульсационный период, практически равный четырём суткам (3,97 дней), что даёт нам одни и те же наблюдаемые фазы в течение длительного сета наблюдений. Поэтому весьма полезными являются публикуемые наблюдательные данные, произведёнными разными авторами на инструментах с различным географическим положением.

Нами было проведено моделирование кривой блеска звезды методом Бааде-Весселинка с использованием опубликованной многоцветной фотометрии и собственных наблюдений лучевых скоростей звезды.

Результатом такого моделирования является значение радиуса звезды, оценённое нами в 37 ± 3 радиуса Солнца. Что немногим больше оценки в работе Тёрнера [67] 33 ± 2 радиуса Солнца.

Анализ полученных данных, определения физических параметров Полярной Звезды и параметров пульсаций.

Проведённые нами наблюдения с 2004 по 2012 год однозначно подтверждают увеличение амплитуды пульсаций, что можно характеризовать, как совершение петли Полярной Звездой у границы полосы нестабильности.

Проведённое моделирование кривой блеска Полярной Звезды методом Бааде-Весселинка дало возможность определить радиус звезды, несколько больший, чем значение, определённое Тёрнером, что говорит о большем значении расстояния до Полярной 105пк (94 у Тёрнера). Результаты моделирования представлены на рисунке 50.

Результаты обработки данных наблюдений Полярной звезды и сравнения с модельными данными приводится в отдельном документе в составе отчетной документации. По результатам проведения работ в рамках проекта подготовлена к печати статья «Лучевые скорости и радиус Полярной Звезды»

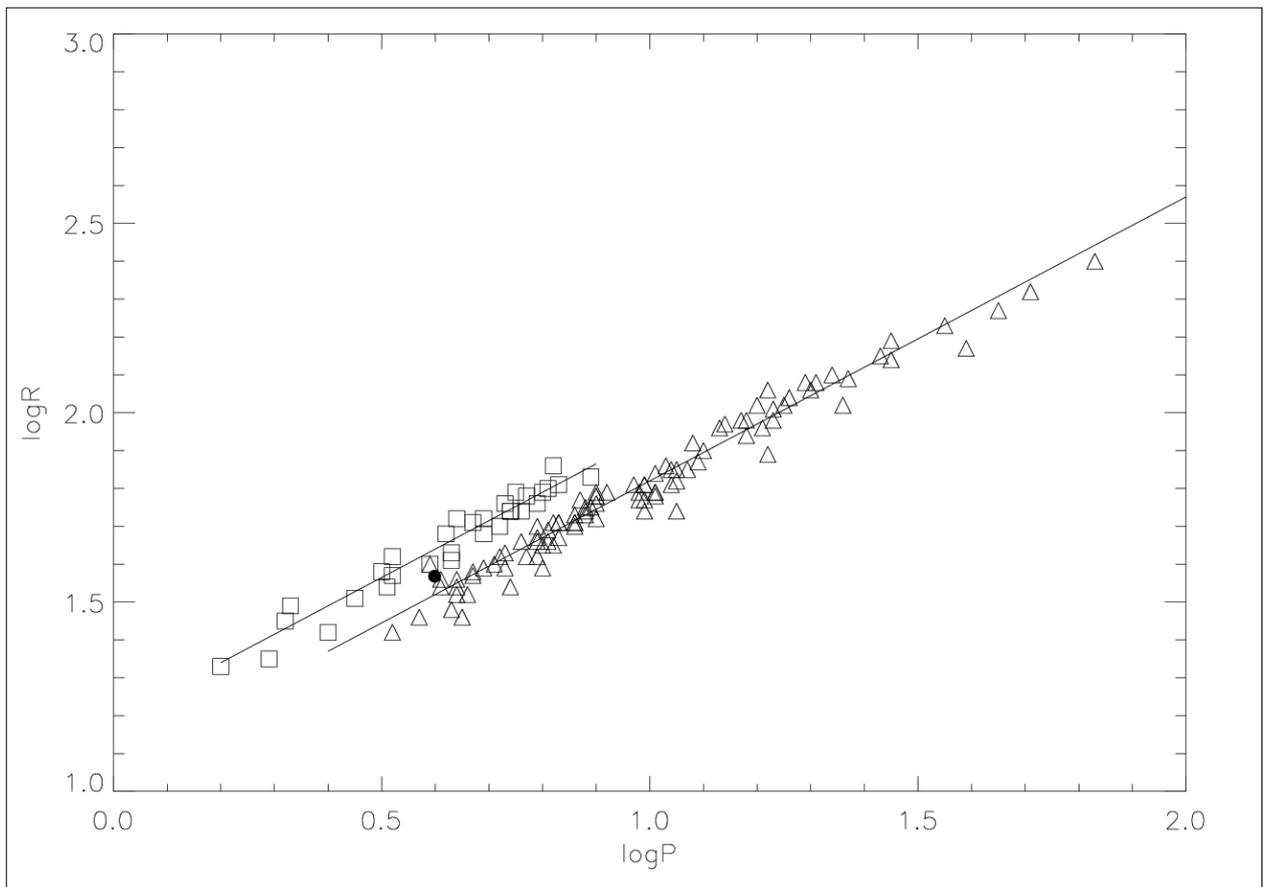


Рисунок 50 – Положение Полярной Звезды, на диаграмме период-радиус для галактических цефеид, треугольникам и изображены цефеиды, отождествлённые, как пульсаторы основной моды, квадратами – цефеиды, пульсирующие в первом оберitone, закрасенный кружок – Полярная Звезда.

9 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ НА ОПТИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА

Младшим научным сотрудником Института оптики атмосферы им.Зуева Сибирского отделения Российской академии наук Копыловым Е.А. проведены теоретические и экспериментальные исследования атмосферной турбулентности в подкупольном пространстве телескопа БТА с целью улучшения качества астрономических изображений.

Как известно [69,70,71], атмосфера внутри астрономических телескопов (характеризуемая астроклиматическими характеристиками специализированных помещений) может оказывать заметное влияние на результаты наблюдений. Специализированное помещение телескопов обычно содержит достаточно протяжённые воздушные участки, по которым распространяется оптическое излучение. Для уменьшения влияния атмосферы эти участки оптической трассы должны быть защищены от внешних воздействий, приводящих к флуктуациям показателя преломления. Это достигается применением специальных изолирующих материалов, применением герметичных перегородок внутри помещения, а так же использованием специализированных термостатированных павильонов. В тоже время полностью исключить влияние атмосферы не удастся. В рабочих помещениях телескопа возникают собственные воздушные потоки, флуктуации температуры и др. Поэтому исследование и анализ астроклиматических характеристик помещения телескопа представляет самостоятельный интерес. Изучение влияния подкупольного пространства телескопа позволяет сделать шаги по минимизации влияния атмосферной турбулентности и повысить уровень научных наблюдений проводимых на 6-м телескопе БТА. В работе приведены результаты измерений характеристик локального астроклимата подкупольного пространства БТА.

Обоснование проводимого направления исследований.

Хорошо известно, что в незамутненной атмосфере, качество астрономических изображений определяется в основном атмосферной турбулентностью, приводящей к деградации качества изображений. Как правило, для борьбы с этим негативным влиянием применяют системы адаптивной оптики. Однако при применении адаптивной оптики остаётся серьёзной проблемой минимизация влияния искажений в под купольном пространстве телескопа. Поскольку в течение суток перестройка турбулентных полей происходит плавно, то ночные условия наблюдений определяются дневными, во всяком случае, первую половину темного времени суток. Отсюда следует, что при исследовании ночного астроклимата необходима информация и о дневных условиях наблюдений. На сегодняшний день отсутствует объективная оценка подкупольной турбулентности

оптического телескопа БТА. Проводя исследования в данном направлении, возможно провести поиск путей получения изображений высокого разрешения при наблюдении на 6-м телескопе БТА

Измерения параметров турбулентности в подкупольном пространстве телескопа БТА в дневное и ночное время суток. Анализ полученных данных.

Аппаратура, используемая для измерений. В работе использовалась мобильная ультразвуковая метеостанция «Метео3М», разработанная в Институте оптики атмосферы СО РАН. Принцип действия прибора заключается в измерении скорости звука, прошедшего между двумя датчиками на измерительной головке. Измерительная головка представляет собой поперечные друг к другу два измерительных кольца радиусом около 12 см с общим центром. Кольца в точке их пересечения прикреплены к верхней стороне цилиндрического основания радиусом около 3 см и длиной 20 см. Ультразвуковые датчики размещены на периметрах колец. К нижней стороне основания крепится блок давления и влажности. Измерительная головка устанавливается на металлическом шесте переменной длины.

В метеостанции задействованы 4 измерительных канала источник-приёмник. Частота измерений определяется скоростью распространения звука в воздухе и надёжностью аппаратуры. Для каждого канала частота выдачи результатов составляет 160 Гц. Для обработки результатов измерений применяется 2х ступенчатая процедура. Предварительная обработка, суть которой сводится в основном к осреднению высокочастотных измерений, происходит в процессоре измерительной головки и повышает надёжность аппаратуры, окончательная – в переносном компьютере. Время осреднения результатов задаётся оператором и в зависимости от режима измерений может меняться от 1 минуты до нескольких суток.

Метеостанция регистрирует 89 параметров, фиксирует результаты измерений одновременно в виде бинарного массива и в виде текстового отчёта. К основным измеряемым характеристикам относятся средняя температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), средние компоненты скорости ветра (м/с), модуль (м/с) и направление осреднённого горизонтального вектора скорости (град.) (направление откуда дует ветер отсчитывается от севера через восток), абсолютная (г/м³) и относительная (%) влажность воздуха, атмосферное давление (мм. рт. ст.), структурные характеристики флуктуации температуры C_T^2 (град² x см^{-2/3}), акустического показателя преломления $C_{n,a}^2$ (м^{-2/3}), оптического показателя преломления C_n^2 (см^{-2/3}). Кроме того система регистрирует среднеквадратическое отклонение температуры, компонент и направления вектора скорости., измеряет полную энергию турбулентных движений (м²/с²). Моменты потоков

импульса и тепла, турбулентные масштабы Мони́на-Обухова L (м) и другие характеристики.

Метеостанция прошла полный комплекс метрологических испытаний, включая термо- баро- и термовлагокамер. Чувствительность прибора $0,002^{\circ}\text{C}$ – для температуры и $0,007$ м/с для компонент вектора скорости ветра. Полоса пропускания чувствительного элемента определяется временем пробега звука через измерительную головку и равна $1,7$ кГц. Усреднения, возникающие из-за постоянной времени прибора, приводят к обрезанию высоких частот в спектре турбулентности. Поэтому аппаратура не чувствует неоднородности, размеры которых, например, при средней скорости ветра 1 м/с . менее 4 мм. Такая постоянная ограничивает возможность экспериментального изучения мелкомасштабных компонент турбулентности. Однако, это практически не влияет на точность измерения случайных характеристик метеополей. Так, результат прямых измерений спектров турбулентности показывает, что при регистрации случайных температуры и скорости ветра величина погрешности, вносимой постоянной времени обычно не превышает одного процента. Это обусловлено незначительным вкладом обрезаемого участка спектра в общую энергию флуктуаций.

При измерениях турбулентных параметров время осреднения, как известно, должно выбираться из условия, чтобы масштаб длины осреднённого турбулентного течения (средняя скорость ветра, умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения ветра (или, что то же самое, время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля). Измерения в приземного слое над ровной поверхностью обычно производят со временем осреднения не менее 100 с [69,70]. Соответствующий этому времени масштаб длины для скорости ветра $1-10$ м/с составляет $0,1-1$ км и превышает внешний масштаб турбулентности. При измерениях в закрытом помещении внешний масштаб турбулентности ограничен размерами помещения. Однако реально он значительно (в $5-10$ раз) меньше этих размеров. Для времени осреднения 100 с . и типичной скорости ветра $0,05 - 0,5$ м/с масштаб длины составляет $5-50$ м и превышает внешний масштаб, наблюдающийся в помещениях. Поэтому в закрытых помещениях измерения так же можно проводить с осреднением 100 с . В данной работе время осреднения при регистрации параметров турбулентности в одной точке составляло 2 мин.

Относительная погрешность измерений структурных характеристик C_T^2 , C_n^2 , C_V^2 определяется, в первую очередь, чувствительностью прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и самых значений структурных характеристик. Так, например, в условиях относительно слабой турбулентности ($C_n^{2.5} =$

$5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$) при времени осреднения 2 мин. и средней скорости ветра 5-10 м/с относительная погрешность измерений величины C_n^2 находится в диапазоне 0,4-14 %. С такими же ошибками измеряются и характеристики C_T^2 , C_V^2 .

Схема измерений. Для уменьшения влияния приземного турбулентного слоя воздуха на качество изображения телескоп установлен в башне высотой 53 м. Диаметр астрономического вращающегося купола равен 45,2 м, а открывающееся, для ведения наблюдений, забрало на куполе оставляет щель шириной 11 м. Стены башни и купола изготовлены из тонких трехслойных алюминиевых панелей с запрессованным пенопластом. Такие панели применяются в строительстве астрономических сооружений впервые. В подкупольном пространстве всегда должна соблюдаться температура, равная предполагаемой ночной температуре воздуха, поэтому подкупольное пространство герметизировано и термостатируется. Подкупольное пространство отделено от нижних этажей башни бетонным полом, имеющим технологические отверстия выведенной из строя системы охлаждения пространства. Отверстия герметизированы.

Точки наблюдения выбраны так, что бы получить достаточно полную картину воздушных потоков внутри БТА. Измерения проводились у забральной щели купола телескопа и пространством между главным зеркалом и первичным фокусом. Положение забральной щели купола во время измерений соответствовало направлению строго на север. Измерения производились на расстоянии около 1 м от кабины наблюдателя первичного фокуса. Локальные точки измерений располагались вдоль забральной щели купола при положении трубы телескопа в зенит на 0, 25, 50 и 75°. Для определения направления движений воздушных масс в подкупольном пространстве телескопа измерения проводились в 4-х направлениях подкупольного пространства (север, юг, запад, восток), а также на высотах $h = 2, 8, 16, 24, 29$ м. от уровня пола монтировки телескопа.

Результаты измерений и анализ полученных данных. Результаты измерений параметров турбулентности в подкупольном пространстве телескопа БТА приводятся в отдельном документе в составе отчетной документации (таблицы 1-4). По данным таблиц можно представить распределение подкупольных воздушных потоков. Измерения проводились с 23.00 до 04.00 местного времени.

Преимущественное направление ветра во время измерений было северо западное. Внутри полусферы купола выполняются положения теории Монина–Обухова. На границе забрала характеристики турбулентности должны сшиваться со значениями, соответствующими окружающему пространству. Значения C_n^2 на границе полусферы немного больше чем вблизи подстилающей поверхности. При таком поведении

структурных характеристик, естественно, появляются минимумы на определённой высоте забральной щели. Чем больше разница между значениями C_n^2 вблизи подстилающей поверхностью купола телескопа и зенитным углом положения телескопа, тем меньше проявляется участок действия теория подобия. Этот участок всё более приближается к подстилающей поверхности, и значение C_n^2 незначительно отличаются от приповерхностных. Вне купола порядки значений C_n^2 совпадают на всём промежутке измерения. Эти значения, в согласии с теорией подобия, будут убывать с высотным профилем (Рисунок 51). Значение числа Монина-Обухова представлены на рисунке 52.

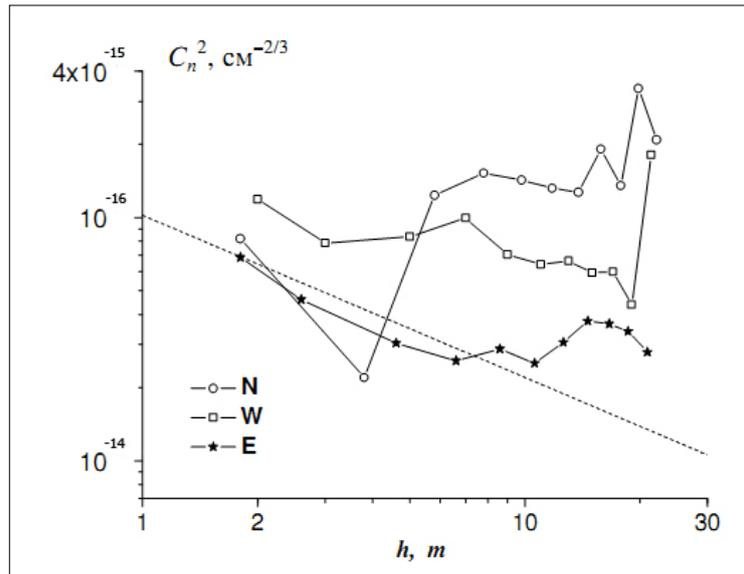


Рисунок 51 - Профиль структурной характеристики C_n^2 подкупольного пространства БТА (расстояние от стенок башни 13м, высота от 1.8м до 22м). Пунктир - теория подобия для плоской подстилающей поверхности

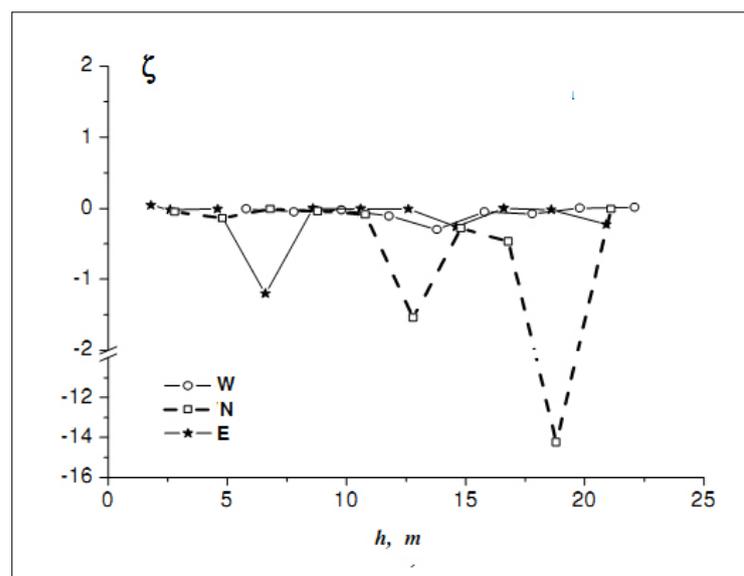


Рисунок 52 - Вертикальный профиль изменения числа Монина-Обухова

Максимальное значение структурной характеристики показателя преломления C_n^2 наблюдаются не только у забрала, но и у главного зеркала ($C_n^2=7,8 * 10^{-16} \text{см}^{-2/3}$). Эта точка лежит у вторичного зеркала на пути луча зрения телескоп на оптической трассе, когда положение трубы телескопа находится под зенитным углом $50-75^\circ$. Отсюда следует, что, в секторе наблюдения БТА на оптическом пути имеются усиления флуктуации показателя преломления по сравнению с уровнем флуктуаций показателя преломления над трубой телескопа. Такое усиление возможно вследствие особенностей формы и масштабности размеров телескопа.

Теоретические исследования влияния атмосферной турбулентности на качество изображения формируемого телескопом. Сопоставление результатов экспериментальных данных с теоретическими расчётами.

Для задач распространения оптического излучения в условиях турбулентности необходимы модели спектров флуктуации температуры. Как известно, временные частотные спектры флуктуации температуры $W_T \sim f^{-5/3}$. В этом интервале происходит перекачка энергии от вихрей с большими масштабами к меньшим. На рисунке 53 представлены сглаженные временные частотные спектры флуктуации температуры W_T в подкупольной части телескопа БТА и открытой атмосфере.

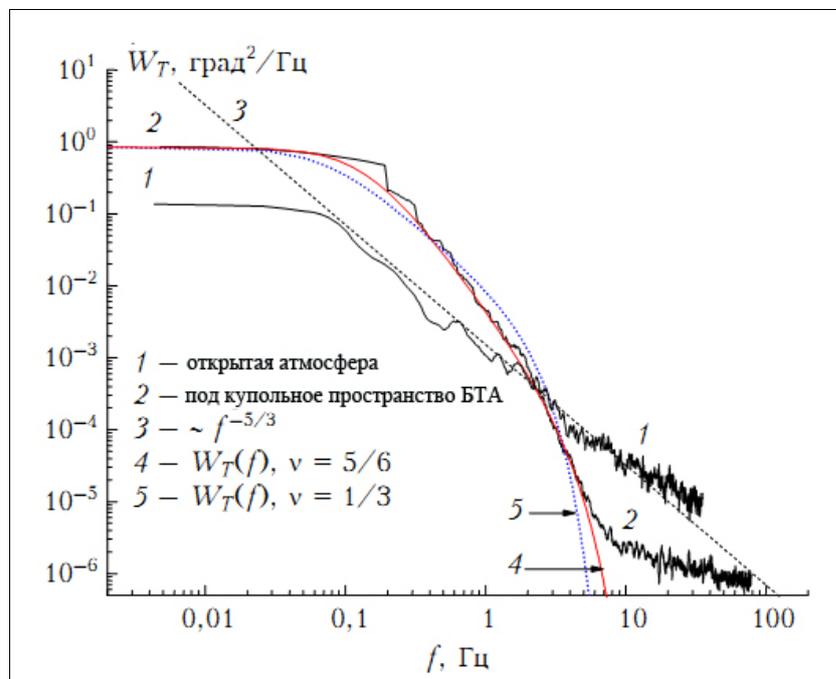


Рисунок 53 - Сглаженные временные частотные спектры флуктуации температуры W_T в подкупольной части телескопа БТА и открытой атмосфере

Как следует из рисунка 53, спектры в закрытом помещении, в отличие от открытой атмосферы, в инерциальном интервале убывают значительно быстрее. Кроме того, в этом интервале имеются лишь отдельные короткие отрезки частот, внутри которых можно их

считать колмогоровскими. Эти отрезки наблюдаются между скачками спектральной функции. Если сгладить ступеньки, то экспериментальные спектры неразвитой турбулентности будут иметь ряд характерных участков быстрого степенного убывания. Так, если в протяжённом энергетическом интервале $W_T \sim \text{const}$, то по мере роста частоты сначала $W_T \sim f^{-8/3}$, а затем $W_T \sim f^{-12/3}$. Следовательно, в зарождающейся турбулентности перекачка энергии от больших вихрей к малым незначительна, т.е. вихри слабо размыты. При дальнейшем увеличении частоты, в вязком интервале, где спектральная плотность близка к шумовому уровню, убывание спектров замедляется, $W_T \sim f^{-2/3}$. Аналогичное поведение спектров наблюдается и в других точках измерений под куполом БТА. Для построения приближённой теоретической модели спектров зарождающейся турбулентности можно использовать кармановскую модель (см. описание методики) с соответствующим на рисунке 53 убыванием в инерционном интервале [72,73].

Максимальная погрешность аппроксимации реальных спектров кармановским одномерным пространственным спектром приходится на область очень больших частот (вязкий интервал). Поэтому в задачах распространения волн, в которых большую роль играет вязкий интервал, следует использовать более подробную модель. В задаче, где основной вклад приходится на флуктуации фазы волны (смещение оптических пучков, дрожание изображения и др.), вязкий интервал не вносит существенного вклада, поэтому данная аппроксимация применима.

В соответствии с рассмотренными теоретическими и экспериментальными положениями наличие осцилляций профилей структурной характеристики C_n^2 можно объяснить присутствием неоднородностей подстилающей поверхности вблизи телескопа по радиальной. Выравнивание по однородной структуре подстилающей поверхности у башни телескопа может привести к уменьшению флуктуаций показателя преломления. Внутри павильонные флуктуации показателя преломления можно уменьшить путём изменения некоторых конструктивных особенностей телескопа (более широким раскрытием защитных лепестков главного зеркала во время наблюдения). Учитывая масштабность конструкции телескопа улучшение качества наблюдаемых объектов так же можно добиться с применением адаптивной оптики для коррекции по отдельным участкам поля зрения телескопа.

Описание методики оценки параметров атмосферной турбулентности в подкупольном пространстве телескопа БТА приводится в отдельном документе в составе отчетной документации. По результатам проведения работ в рамках проекта подготовлена к печати статья «Астроклимат специализированного помещения БТА» в журнал «Оптика атмосферы и океана».

10 РАЗРАБОТКА ШИРОКОУГОЛЬНОЙ СВЕТОСИЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОИСКА ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

Младшим научным сотрудником Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук Соковым Е.Н. проведены оптические и энергетические расчеты широкоугольной светосильной камеры для создания нового телескопа, предназначенного для сканированного поиска экзопланет, разработана оптическая схема данного телескопа.

Обоснование проводимого направления исследований.

В последние годы было обнаружено огромное количество экзопланет, то есть планет, находящихся вне Солнечной системы. Задача обнаружения и изучения экзопланет представляет огромный научный интерес с точки зрения понимания прохождения и эволюции планетных систем. До недавнего времени не было известно, является ли Солнечная система уникальной во Вселенной, а однозначного представления об её происхождении нет до сих пор. С обнаружением первых экзопланет появилась возможность взглянуть на формирование и эволюцию Солнечной планетной системы "со стороны", в сравнительном плане, и заложить основы для ревизии и совершенствования существующих космогонических представлений. Расширение статистики по экзопланетам послужит основой для создания теории происхождения и эволюции планетных систем у звёзд различных классов. Уже первые обнаруженные планетные системы у других звёзд показали сильное отличие по своей структуре от Солнечной системы. В частности, планеты-гиганты типа Юпитера, как правило, обнаруживаются на очень близких расстояниях от звезды, в то время как в Солнечной системе дело обстоит наоборот. Кроме того, обстоятельство, что Солнечная система не уникальна, ассоциируется с идеями о том, что, возможно, и наша цивилизация не является уникальным явлением во Вселенной.

Итак, в настоящее время изучение экзопланет рассматривается как одно из важных направлений в астрономии. На развитие этого направления выделяется немало средств и создаются проекты по поиску и исследованию таких тел. В частности, на обнаружение и изучение экзопланет ориентированы такие действующие космические миссии, как «Kepler», «Corot», «Pegase», «Spitzer». Кроме того, разрабатываемые проекты будущего: «Gaia», «James Webb Space Telescope», «European Extremely Large Telescope (E-ELT)», - также включают поиск и изучение экзопланет в перечне основных направлений. Помимо космических проектов, существует ряд наземных проектов, осуществляющих поиск экзопланет на основе сканирования выбранных площадок неба. Среди наземных проектов наиболее известны проекты «SuperWASP», «HAT-Net», «Qatarnian extrasolar Survey»,

«Trans-atlantic Exoplanet Search». Эти проекты основаны на использовании широкоугольных телескопов, позволяющих за одну экспозицию охватывать площадку на небе размером до 7×7 квадратных градусов. Такая техника позволяет провести одновременное сканирование нескольких десятков звёзд. Фотометрический анализ блеска всех регистрируемых звёзд позволяет обнаружить падения блеска, вызванные прохождением планеты по диску звезды.

Подобных сканирующих телескопов, осуществляющих поиск экзопланет на основе фотометрического метода, позволяющего детектировать падения блеска при прохождении экзопланеты по диску звезды (т.н. транзита), в России не существует. В рамках данного проекта для фотометрического поиска экзопланет планируется разработать телескоп системы Шмидта, имеющий большое поле зрения. Необходимо рассчитать оптическую схему с учетом имеющихся в САО РАН оптических элементов предполагаемого телескопа (50-сантиметрового зеркала и 40-сантиметровой коррекционной пластины), для разработки остальных деталей телескопа (трубы, оправ для зеркала и для коррекционной пластины, монтировки), а также для определения необходимых параметров ПЗС-камеры.

Разработка такого телескопа позволит России впервые осуществить поиск экзопланет прямым методом поиска на основе транзитов экзопланет.

Разработка оптической схемы, измерение уже изготовленной оптики, выбор и испытания светоприемника.

В САО РАН имеются оптические и механические элементы (Рисунки 54,55,56), на базе которых можно изготовить макет широкоугольного телескопа.

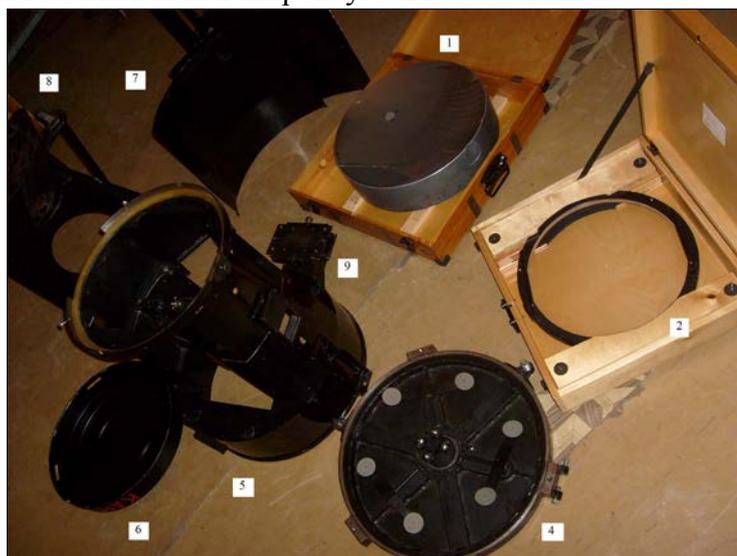


Рисунок 54 - Фотография набора оптических и механических элементов широкоугольной катадиоптрической камеры. Обозначения: 1 - асферическое главное зеркало, 2 - коррекционная пластина Шмидта, 4 - оправа и система разгрузки главного зеркала, 5 - механическая часть конструкции камеры, 6 - крышка коррекционной пластины, 7 - крышки кожуха камеры, 8 - пилон системы крепления корпуса камеры в спектрографе, 9 - узел крепления и юстировки светоприемника в схеме «ломаный Шмидт».



Рисунок 55 - Фотография набора элементов светосильной камеры, сделанная под другим ракурсом. Обозначения: 3 - ломающее плоское зеркало, работающее в сходящемся пучке системы "ломаный Шмидт", 9 - узел крепления и юстировки светоприемника, 10 - дефект на поверхности главного зеркала (матовое пятно).



Рисунок 56 - То же, что и на рисунке 55, под другим ракурсом. Обозначения: 9 - узел крепления и юстировки светоприемника, 10 - дефект на поверхности главного зеркала (матовое пятно).

Эти элементы входили в состав светосильной камеры Основного звездного спектрографа (ОЗСП) БТА [74], которая была разработана в 70-х для фотографических

наблюдений слабых звезд. Некоторые результаты исследования камеры в составе ОЗСП можно найти в [75]. На рисунке 57 приведен пример спектрограммы, полученной на данной камере в ближнем ИК-диапазоне.

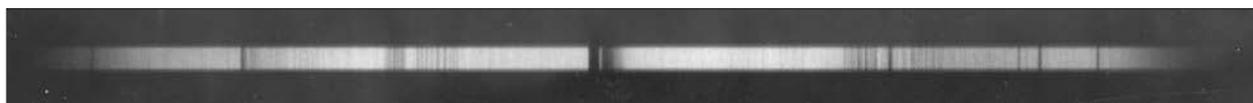


Рисунок 57 - Фотографический спектр, полученный В.Е.Панчуком (1981г.) на светосильной камере ОЗСП. Использовалась дифракционная решетка 600штр/мм, угол блеска 8.5 градуса, в I-м порядке. Обратная линейная дисперсия 56Å/мм. Формат пластинки 13x60мм², эмульсия Kodak IN. В центре кадра - теллурическая полоса 7600Å, длина волны нарастает вправо.

Рисунок 57 приводим в качестве свидетельства того, что на данной камере удавалось получить хорошее качество изображений на поле до 50 мм (по крайней мере, по одной координате). Дефект на поверхности зеркала появился в 1985 году, когда при напылении слоя алюминия при нарушении технологии, с испарителя сорвалась капля алюминиевого расплава и выжгла участок поверхности зеркала. В дальнейшем кассетная часть камеры с внутренним фокусом была демонтирована. Было изготовлено плоское зеркало высокой точности, работающее в сходящемся пучке (поз.3 на рисунке 55), и узел крепления и юстировки приемника (поз.9 на рисунках 54 и 55). В качестве приемника на камере «ломаный Шмидт» использовался координатно-чувствительный детектор (КЧД), для задач высокоскоростной спектроскопии с низким спектральным разрешением.

Параметры оптических элементов камеры следующие (по ходу лучей)(рисунок 58):

А) Коррекционная пластина Шмидта (поз.2 на рисунке 54), световой диаметр 420мм,

Б) Главное зеркало, (поз.1 на рисунке 54, поз.10 на рисунках 55 и 56), световой диаметр 500мм,

В) Плоское ломающее зеркало, диаметр 160мм,

Г) Полеспрямляющая линза, световой диаметр 52мм.

Предполагается использовать элементы «А», «Б» и «Г»" в схеме, приведенной на рисунке 58.

Для исследования качества изображения мы применили временный светоприемник - монохромную ПЗС-камеру Meade Deep Sky Imager PRO II, снабженную воздушным охлаждением (рисунок 59).

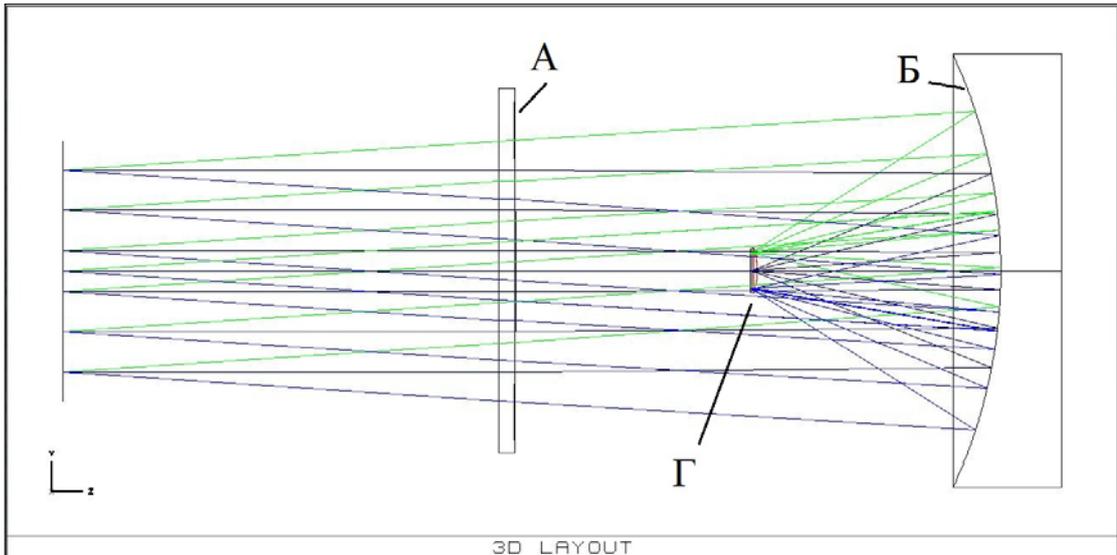


Рисунок 58 - Схема использования светосильной камеры спектрографа в качестве обзорного телескопа. Обозначения: А - коррекционная пластина, Б - вогнутое асферическое зеркало, Г - полеспрямляющая линза.



Рисунок 59 - Фото светоприемника с вентилятором охлаждения (закреплен с тыльной стороны камеры). Видна площадка матрицы ПЗС.

Величина центрального экранирования объектива камеры таким светоприемником составляет около 4%.

Определение параметров разработанной оптической схемы. Оценка фотометрической точности при заданной звездной величине.

Расчёты оптической схемы для определения наилучших показателей данного телескопа в расчёте функции рассеяния точки проводились в специализированной программе «Zemax». Данная программа позволяет проводить расчёты оптических схем различной сложности.

На основе расчётов оптической схемы были определены параметры: радиус кривизны при вершине поверхности и соответствующие данному параметру оптимальные расстояния от данной поверхности до следующей. Результаты расчётов приведены в Таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчётов оптической схемы.

Радиус кривизны при вершине поверхности	Расстояние от данной поверхности до следующей
$r1=\text{inf}$	$d1=20$ (первая поверхность коррекционной пластины) коррекционная пластина из стекла К8
$r2=3996.94^*$	$d2=556.5$ (вторая поверхность коррекционной пластины)
$r3=595.7^{**}$	$d3=-279.5$ (поверхность главного зеркала)
$r4=90.46$	$d4=-6.0$ (первая поверхность полеспрямляющей линзы) полеспрямляющая линза из плавленого кварца
$r5=2014.0$	$d5=1.95$ (вторая поверхность полеспрямляющей линзы)

Примечания к табл.5:

$d5$ - расстояние от второй поверхности полеспрямляющей линзы до плоскости светоприемника.

*) - Первая поверхность коррекционной пластины является плоской. Вторая поверхность коррекционной пластины описывается следующей функцией:

$$x = 1.25096 \text{ E-}04*y^2 - 1.89481 \text{ E-}09*y^4 - 7.4108 \text{ E-}15*y^6 - 1.36 \text{ E-}20*y^8 - 2.863\text{E-}25*y^{10}$$

***) - Поверхность главного зеркала асферическая, ее форма описывается следующим уравнением:

$$x = 8.3934810 \text{ E-}04*y^2 + 5.91326 \text{ E-}10*y^4 + 7.80538 \text{ E-}16*y^6 + 7.5933 \text{ E-}22*y^8 + 3.27 \text{ E-}27*y^{10} - 3.596 \text{ E-}32*y^{12} - 1.287 \text{ E-}37*y^{14}$$

Были проведены оптические и энергетические расчеты с представлением их на основе точечных диаграмм и функции рассеяния точки по всему полю камеры для разных длин волн в диапазоне 380-500нм. Пример результатов таких расчетов приведен на рисунке 60.

Рабочее поле зрения камеры оценим по результатам расчета точечных диаграмм. При стороне квадрата 100мкм (пессимистичная оценка углового разрешения) имеем приличную переоценку изображения звезды - 6 пикселей размером 15x15мкм каждый. Поле диаметром 40мм при фокусном расстоянии камеры 300мм перехватывает около 6

градусов. Указанной оценке линейного изображения звезды (90 мкм) будет соответствовать 54 угл. сек., т.е. такой короткофокусный телескоп оказывается нечувствительным ни к точности сопровождения, ни к диаметру звездных изображений.

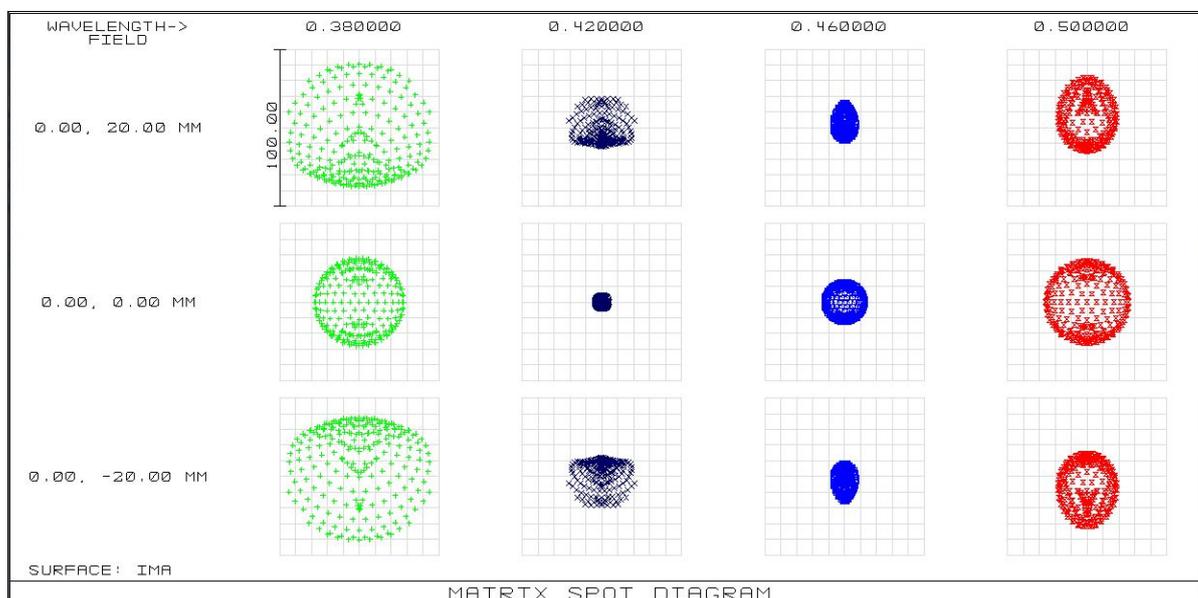


Рисунок 60 - Точечные диаграммы для различных участков поля камеры. Строка вверху - значения длины волны в мкм. Средняя строка изображений - расчет для центра поля камеры, верхняя и нижняя строки - расчет для точек, отстоящих на 20мм от центра поля, в разные стороны. Сторона квадрата - 100мкм (0.1мм).

Проницающую способность схемы можно оценить, имея практические оценки, полученные на длиннофокусных телескопах близкого диаметра. Концентрация потока (в первом приближении) пропорциональна отношению квадратов относительных отверстий сравниваемых инструментов.

Оценку квантовой эффективности можно сделать, опираясь на данные по телескопу диаметром 1 метр (Цейсс-1000 САО РАН [76]).

Скорость счета (электрон в секунду) для $ADU = 1e$, посчитанные по всему изображению для $U = B = V = R = I = 20.0$ для объекта, наблюдаемого при воздушной массе равной 1.0 с вариантом ПЗС, указанным на сайте САО РАН, на телескопе Цейсс-1000, - даны в таблице 6.

Указанная скорость счета может быть умножена на продолжительность экспозиции, для получения оценки «сигнал/шум». При такой оценке следует помнить, что проницающая способность определяется и яркостью фона неба и качеством звездных изображений.

Таблица 6. Квантовая эффективность и скорость счета в широкополосной фотометрической системе ПЗС-фотометра телескопа Цейсс-1000

Полоса	U	B	V	R	I
Скорость счета, (e-/s)	0.18	10.8	12.4	15.7	6.0
Поток на верхней границе атмосферы, (ph/s)	30	120	75	66	38
Коэффициент поглощения, (magnitude/air mass)	0.62	0.32	0.18	0.11	0.07
Квантовая эффективность ПЗС + фотометр + телескоп, (%)	1.1	12.0	19.4	26.4	16.9
Нульпункт, A0 V, зенит e-/ADU = 1, (magnitude)	18.14	22.58	22.73	22.99	21.95

Высокая светосила имеет следующие минусы:

а) Достаточно малый масштаб изображений разрабатываемого телескопа может приводить к снижению проникающей способности. Если секундное изображение звезды "размазывается" абберациями камеры почти на одну угловую минуту, то под поток от звезды будет "подкладываться" поток от фона неба, собранный с этой же угловой минуты. Сделаем соответствующую оценку.

Относительное отверстие телескопа Цейсс-1000 в фокусе Ричи-Кретьена составляет 1:13.09, относительное отверстие разрабатываемого телескопа D/F (при D=405мм, F=300мм), составляет 1:0.74. Квадраты относительных отверстий сравниваемых инструментов относятся как 1:313, это и есть выигрыш "за счет масштаба". Таким образом, применение светосильного телескопа дает выигрыш в концентрации света более чем на два порядка, при проигрыше в собирающей поверхности в 6.25 раза. Общий выигрыш (масштаб и площадь) оценим в $313/6.25=50$ раз. При этом мы пренебрегаем различиями в центральном экранировании. Эту величину следует откорректировать с учетом различного качества изображений, создаваемых телескопами. На телескопе Цейсс-1000 в фокусе Ричи-Кретьена масштаб составляет 15.27 угл.сек. в 1 мм, т.е. приблизительно 0.3 угл.сек. на пиксель. Принимая для Цейсс-1000 оптимистичную оценку (идеальное сопровождение объекта, идеальная юстировка оптики), условимся, что телескоп «видит» одну угловую секунду. Разрабатываемый светосильный телескоп в полосе V будет иметь линейное разрешение около 30мкм, т.е. 18 угл.сек. Итак, при оценке

нижнего предела проникающей способности яркость фона неба для светосильного телескопа следует увеличить в 324 раза. Так как телескоп ориентирован на получение точной фотометрии звезд, находящихся много выше предельно достижимой величины, фактор фона неба в данном проекте будем считать второстепенным.

б) В режиме сканирования (когда через поле неподвижного телескопа «пробегают» изображения звезд, и с такой же скоростью выполняется перенос заряда в чипе), временное разрешение сигнала ограничено величиной масштаба изображения. Величина временного разрешения зависит и от склонения звезды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете представлены результаты исследований, выполненных с использованием наблюдательных данных, полученных на оптических телескопах САО РАН молодыми учеными и аспирантами страны.

В результате выполнения работ по контракту были получены следующие результаты:

Тема 1: «Фотометрическое и спектральное исследование кандидатов в галактики с полярными кольцами».

Получены фотометрические и спектральные данные кандидата в галактики с полярными кольцами PGC 60020 с помощью 6-м телескопа САО РАН и многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO. Фотометрические данные в полосах В и V Джонсона и полосе R_c Кузинса. Спектральные данные получены в режиме "длинная щель" с применением гризмы в "красном" спектральном диапазоне, содержащем эмиссионные линии. Проанализировано изображение галактики и ее ближайшего окружения для уточнения особенностей структуры, распределения яркости и показателей цвета самой галактики и её "компаньона". Также проанализированы кривые лучевых скоростей газовой и звездной составляющих PGC 60020 и построены кривые вращения звезд главного тела галактики и ионизованного газа предполагаемого полярного кольца. В результате работы сделаны следующие выводы о галактике PGC 60020: она является классической галактикой с полярным кольцом, относится к группе ГПК с так называемыми "внутренними полярными кольцами", главное тело представляет собой галактику типа S0, а вокруг него под углом примерно 60 град., вращается диск, состоящий из газа, звезд и пыли. От южной части полярного диска к галактике-"компаньону" тянется петлеобразная структура, и было сделано предположение о наличии приливного хвоста.

Тема 2: «Изучение галактик в войдах по наблюдениям на БГА и данным SDSS».

В рамках исследования карликовых галактик в войдах и их эволюционного статуса, была проведена фотометрия 12-ти низкометаллических галактик и спектроскопия НП областей галактик выборки по данным БГА, что позволяет определить содержание кислорода в межзвездной среде. Были обработаны спектры галактик войда, полученные на SCORPIO с гризмой. Уточнены металличности для ряда галактик. В ходе поисковой программы для включения галактик к войду были померяны лучевые скорости для отобранных кандидатов. По фотометрии из SDSS для 80-ти галактик выборки была получена оценка массы звезд, а с учетом массы газа, и суммарной барионной массы галактики, и из них получена оценка эволюционного параметра - массовой доли газа

(fgas). Благодаря широкополосной поверхностной фотометрии изображений получили цвета внешних областей галактик, и из их сравнения с модельными эволюционными треками получили оценки возрастов самых старых видимых звездных популяций в изучаемых галактиках. Цвета подавляющего большинства галактик в войде соответствуют возрастам $T \sim 10-15 \text{ Gyr}$, которые типичны для галактик в целом. Был разработан метод учета красного смещения для эволюционных треков. Для каждой галактики треки для определения возрастов самого старого звездного населения рассчитывались из учета их лучевых скоростей.

Тема 3: «Исследование кинематики и звездных населений линзовидных галактик по данным наблюдений 6-м телескопа».

Проведены наблюдения на 6-м телескопе Специальной Астрофизической Обсерватории (САО РАН) в рамках наблюдательных программ А.В. Засова и О.К. Сильченко с использованием фокальных редукторов светосилы SCORPIO и SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии с гризмой и решеткой. В рамках настоящего НИР разработана методика вычитания спектра ночного неба, которая дает существенно лучший результат вычитания неба по сравнению с известными методиками. Процедура основана на методе построения спектра неба методом “простой экстраполяции” и его вычитание со сглаживанием из наблюдаемого спектра и вторым шагом экстраполяция с внешних областей спектра на область объекта, но в частотном пространстве. Т.е. экстраполируется фурье образ. Такой подход дает возможность строить хорошую модель неба, так как не чувствителен к вариациям вдоль щели и к качеству калибровки по длинам волн. На примере галактики NGC 5440 было произведено сравнение методик простой экстраполяции и экстраполяции в частотном диапазоне. При новом методе практически отсутствуют артефакты звездных объектов, что существенно улучшает результаты дальнейшей обработки. Также в рамках НИР были исследованы две линзовидные галактики поля IC 719 и NGC 6798, проведены наблюдения и анализ редуцированных спектров. Было обнаружено, что обе галактики имеют газовый компонент, который вращается с противоположенным угловым моментом по отношению к звездному. Был разработан подход двукомпонентного фитирования спектра звездного населения галактик на основе программного пакета NBURSTS.

Тема 4: «Изучение сверхкритического аккреционного диска SS433».

Были проведены наблюдения в Специальной астрофизической обсерватории РАН на приборе SCORPIO 6-метрового телескопа БТА в фильтре V. В результате наблюдений были получены ряды продолжительностью 4846,5 и 6081,5 секунды. Редукция проводилась по стандартной методике. Далее были построены спектры мощности или

спектральной плотности мощности (квадрат модуля Фурье-преобразования кривой блеска). На частотах выше 10-2 Гц спектры мощности становятся плоскими. Связано это, по-видимому с тем, что на данных частотах над переменностью объекта начинает преобладать пуассоновский шум, связанный с ошибками фотометрии.

Тема 5: «Анализ спектров SS433 и измерение массы черной дыры в этой системе».

В рамках НИР на ряде телескопов были получены наблюдательные данные по компактному объекту SS433. Был подробно изучен метод спектрального синтеза для определения массы компактного объекта в двойных системах. Он заключается в том чтобы задать геометрию излучающих областей в виде функции плотности вероятности, методом Монте Карло накидать точек с заданной плотностью вероятности. После того, как в каждой точке были вычислены физические характеристики области профиль линии рассчитывался как сумма доплеровских профилей. Во время изучения линии HeII $\lambda 4686$ °А нами была выделена широкая (FWHM $\sim 60\text{\AA}$) подложка этой линии, которую мы назвали «сверхширокая» компонента. Схожие компоненты обнаружались у линий HeI $\lambda 4922$ Å и H β $\lambda 4861$ Å . Было обнаружено, что при накладывании релятивистских эмиссионных линий на интересующие нас линии происходит искажение профиля

Тема 6: «Анализ фотометрических и спектроскопических данных выборки пятенно-активных звезд по результатам наблюдений на телескопах САО РАН».

В рамках НИР нами активно развивалась методика многополосного фотометрического картирования, которая является хорошим дополнением к методу доплеровской томографии, поскольку позволяет провести картирование объектов, недоступных для исследования последним методом. Проводились наблюдения на телескопе Цейсс-1000, по предварительно сделанной выборки короткопериодических объектов, проявляющих переменность блеска, обусловленную запятненностью их поверхности. Выполнялась первичная обработка и фотометрия полученных объектов. Используя разработанную нами методику фотометрического картирования, мы провели анализ температурной структуры поверхности первичной компоненты системы HD 12545. А также детальный анализ ряда других звезд. Для оценки влияния запятненности звезд на вид их спектров, реализованная нами методика моделирования спектров была применена к восстановленной температурной карте вторичной компоненты системы FF Aqr.

Тема 7: «Разработка дифракционного устройства для снижения интенсивности ярких линий спектра сравнения».

Предложенный нами метод фильтрации ярких линий спектра сравнения прошел практическую проверку и может быть рекомендован для широкого практического применения в астрономической спектроскопии высокого разрешения. Наиболее

трудоемкой частью работы является изготовление маски механическими средствами. Поэтому в дальнейшем необходимо проверить и другие технологии изготовления спектральной маски, в частности, способы изготовления маски фотолитическим методом.

Тема 8: «Спектроскопическое исследование Полярной звезды».

На БГА группа лаборатории астроспектроскопии ведет мониторинг Полярной звезды с 2004 года. Совместные наблюдательные данные представляют значительную ценность, т.к. охватывают возможную эволюционную петлю Полярной Звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Точность полученных данных позволяет использовать кросс-корреляционные методы для определения пульсационной компоненты лучевой скорости Полярной Звезды и проведения заявленных исследований. В рамках НИР было проведено моделирование кривой блеска звезды методом Бааде-Весселинка с использованием опубликованной многоцветной фотометрии и собственных наблюдений лучевых скоростей звезды. Результатом такого моделирования является значение радиуса звезды, оцененное нами в 37 ± 3 радиуса Солнца. Проведенные нами наблюдения с 2004 по 2012 год однозначно подтверждают увеличение амплитуды пульсаций, что можно характеризовать, как совершение петли Полярной Звездой у границы полосы неустойчивости. Проведенное моделирование кривой блеска Полярной Звезды методом Бааде-Весселинка дало возможность определить радиус звезды.

Тема 9: «Изучение влияния атмосферной турбулентности при наблюдениях на оптическом телескопе БГА».

В соответствии с рассмотренными теоретическими и экспериментальными положениями наличие осцилляций профилей структурной характеристики C_n^2 можно объяснить присутствием неоднородностей подстилающей поверхности вблизи телескопа по радиальной. Выравнивание по однородной структуре подстилающей поверхности у башни телескопа может привести к уменьшению флуктуаций показателя преломления. Внутри павильонные флуктуации показателя преломления можно уменьшить путём более изменения некоторых конструктивных особенностей телескопа (более широким раскрытием защитных лепестков главного зеркала во время наблюдения), учитывая масштабность конструкции телескопа улучшение качества наблюдаемых объектов так же можно добиться с применением адаптивной оптики для коррекции по отдельным участкам поля зрения телескопа.

Тема 10: «Разработка широкоугольной светосильной камеры для фотометрического поиска внесолнечных планет».

Проводились расчеты оптической схемы для определения наилучших показателей данного телескопа. На основе которых, были определены параметры: радиус кривизны

при вершине поверхности и соответствующие данному параметру оптимальные расстояния от данной поверхности до следующей. Были проведены оптические и энергетические расчеты с представлением их на основе точечных диаграмм и функции рассеяния точки по всему полю камеры для разных длин волн в диапазоне 380-500нм.

В выполнении НИР приняли участие 10 молодых исследователей из вузов и институтов страны, в т.ч. 1 молодой кандидат наук, 4 аспиранта. Опубликованы и подготовлены к печати 8 статей по результатам НИР. 5 молодых исполнителей проекта были участниками научных конференций, на которых были сделаны сообщения с представлением результатов, полученных с использованием наблюдений на телескопах САО РАН.

Результаты исследований будут использоваться при подготовке дипломных работ и диссертаций студентами и аспирантами ведущих вузов и НИИ России в области астрономии. Привлечение аспирантов и студентов к выполнению ПНИР обеспечит приход и закрепление молодых кадров в науку. Полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики.

САО РАН является крупнейшим центром наземных наблюдений в России. Проведение исследований с помощью наблюдений на БТА позволит повысить уровень квалификации и мобильности научных и научно-педагогических кадров. Полученные новые данные об астрономических объектах Вселенной предполагают повышение качества научных публикаций, качества возрастной и квалификационной структуры кадрового потенциала сферы науки.

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

Руководитель работ

И.П.Костюк

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. U. Landolt, *Astron. J.*, v. 88, p. 439 (1983)
2. J. Tonry and M. Davis, *Astron. Astrophys.*, v. 84, p. 1511 (1979)
3. R. I. Jedrzejewsky, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, v. 226, p. 747 (1987)
4. Joeveer M., Einasto J., & Tago E., 2078, *MNRAS*, 185, 357
5. Kirshher R. P., Oemler A., Jr. Schechter P.L., Shectman S.A., 1981, *ApJ*, 248, L57
6. P.J.E. Peebles, *ApJ* 557, 459 (2001)
7. Patiri S.G., Prada F., Holtzman J., Klypin A., Betancort-Rijo J., 2006, *MNRAS*, 372, 1710
8. Kreckel K., Joung M.R., Cen R., 2011, *ApJ*, 735, 132
9. S.A. Pustilnik, and A.L. Tepliakova, *MNAS*, 414, 1188 (Paper I) (2011)
10. S.A. Pustilnik, and A.L. Tepliakova, A.Y. Kniazev, *Astrophys. Bulletin*, 66, 255 (Paper II) (arXiv:1108.4850)
11. S.A. Pustilnik, J.-M. Martin, A.L. Tepliakova, A.Y. Kniazev, 2011, *MNRAS*, 417, 1335 (Paper III)
12. J.N. Chengalur, S.A. Pustilnik, 2012, *MNRAS*, submitted (Paper IV)
13. K.N. Abazajian, J.K. Adelman-McCarthy, M.A. Agueros, et al. *ApJS* 182, 543 (2009)
14. Garsia-Appadoo D.A., West A.A., Dalcanton J.J., Cortese L., Disney M., 2009, *MNRAS*, 394, 340
15. Kniazev A.Y., Grebel E.K., Pustilnik S.A., Pramskij A.G., Kniazeva T.F., Prada F., Harbeck D., 2004b, *AJ*, 127, 704
16. Lupton R., Gunn J.E., Ivezić Z. et al., 2001, in: Harden F.R., Jr., Primini F.A., & Payne H.E., eds, *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*, ASP Conf. Ser. 238, Astron. Soc. Pas., San Francisco, p. 269.
17. Zibetti S., Charlot S. & Rix H.-W., *MNRAS*, 400, 1181, 2009.
18. S.A. Pustilnik, A.L. Tepliakova, and A.Y. Kniazev, *Pis'ma v AZh* 34, 503 = *Astron.Lett.* 34, 457 (2008).
19. S.A. Pustilnik, Pramskij A.G., A.Y. Kniazev, and A.N. Burenkov, *MNRAS* 401, 333 (2010)
20. Gunn J.E., Carr M.A., Rockosi C.M, et al., *AJ* 116, 3040 (1998).
21. Fukugita, M.; Ichikawa, T.; Gunn, J. E.; Doi, M.; Shimasaku, K.; Schneider, D. P., *Astronomical Journal* v.111, p.1748 (1996).
22. Hogg, D. W.; Blanton, M.; SDSS Collaboration; American Astronomical Society, 199th AAS Meeting, (2001)
23. Smith, Harding E.; *MNRAS*, 2002.
24. Stoughton, Christopher; Adelman, Jennifer; Annis, James T. et al.; *Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*. Edited by Tyson, J. Anthony; Wolff, Sidney. *Proceedings of the SPIE*, Volume 4836, pp. 339-349 (2002).
25. Pier, Jeffrey R.; Munn, Jeffrey A. et al.; *The Astronomical Journal*, Volume 125, Issue 3, pp. 1559-1579 (2003).
26. Tucker, D. L.; Kent, S.; Richmond, M. W.; Annis, J.; Smith, J. A. et al.; *Astronomische Nachrichten*, Vol.327, Issue 9, p.821 (2006).
27. Sulentic, J. W.; Verdes-Montenegro, L.; Bergond, G. et al.; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 449, Issue 3, April III 2006, pp.937-949; 2006.
28. Guseva, N. G.; Papaderos, P.; Meyer, H. T.; Izotov, Y. I.; Fricke, K. J.; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 505, Issue 1, 2009, pp.63-72; 2009.
29. Salpeter, E. E.; *Astrophysical Journal*, vol. 121, p.161; 1955.
30. Kroupa, Pavel; Tout, Christopher A.; Gilmore, Gerard; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (ISSN 0035-8711); 1993.
31. Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2005, *Astronomy Letters*, 31, 193
32. Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011, *Baltic Astronomy*, 20, 363

33. Dressler A., Smail I., Poggianti B.M., Butcher H., et al., 1999, ApJSS, 122, 51
34. Fasano G., Poggianti Bianca M., Couch W., Bettoni D., et al., 2000, ApJ, 542, 673
35. Quilis V., Moore B., Bower R., 2000, Science, 288, 1617-1620
36. Icke V., 1985, A&A, 144, 115
37. Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler A., 1996, Nature, 379, 613-616
38. Larson R.B., 1981, MNRAS, 194, 809
39. Chilingarian I., Prugniel P., Sil'chenko O., Koleva M. 2007, in 'Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies', Proceedings of IAU Symposium 241, edited by A. Vazdekis and R. F. Peletier., C Cambridge University Press, p.175
40. Katkov I., Chilingarian I., Sil'chenko O., Zasov A., Afanasiev V., 2011, Baltic Astronomy, 20, 453
41. Grossi M., di Serego Alighieri S., Giovanardi C., Gavazzi G., Giovanelli R., et al., 2009, A&A, 498, 407
42. Serra P., Oosterloo T., Morganti R., Alatalo K., Blitz L., et al., 2012, MNRAS, 422, 1835
43. Walker I.R., Mihos J.Ch., Hernquist L., 1996, ApJ, 460, 121
44. Thakar A.R., Ryden B.S., 1996, ApJ, 461, 55
45. Fabrika S., 2004, Astrophys. and Space Phys. Rev. 12, 1
46. Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A, 24, 337
47. Ohsuga K., Mineshige S., 2011, ApJ, 736, 20
48. Ohsuga K., Mori M., Nakamoto T., Mineshige S., 2005, ApJ, 626, 368
49. Okuda T., Lipunova G. V., Molteni D., 2009, MNRAS, 398, 1668
50. Revnivtsev M., Burenin R., Fabrika S., Postnov K., Bikmaev I., Pavlinsky M., Sunyaev R., Khamitov I., Asian Z., 2004, A&A, 424, L5
51. Revnivtsev M., Fabrika S., Abolmasov P., Postnov K., Bikmaev I., Burenin R., Pavlinsky M., Sunyaev R., Khamitov I., Sakhbullin N., 2006, A&A, 447, 5451.
52. <http://wO.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>
53. <http://www.eso.org/sci/data-processing/software/esomidas/>
54. Crampton & Hutchings (1981)
55. S. N. Fabrika and L. V. Bychkova. The mass function of ss 433. Astronomy and Astrophysics, 240:L5–L7, 1990.
56. Hilwig & Gies (2004)
57. Kubota et al. (2010)
58. Blundell, Bowler & Schmidtobreick, (2008)
59. N. Fabrika S. The jets and supercritical accretion disk in ss433. Astrophysics and Space Physics Reviews, 12:1–152, 2004.
60. Абель и Марган, 1979
61. Парфенова и др.(1997).
62. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev. Black holes in binary systems. observational appearance. Astronomy and Astrophysics, 24:337–355, 1973.
63. Strassmeier, 1992, A&A, 259, 595
64. Vaccarro, 2003, MNRAS, 342, 564
65. Тарасов К.И., Спектральные приборы. "Машиностроение", 1968, Л., стр.388.
66. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д. и др., Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. IV. Светосильный эшелле-спектрограф РЫСЬ. // Препринт САО РАН, 1999, No.139.
67. Тёрнер и др., 2005
68. Э.Рёмер. 1965, Astrophysical Journal, vol. 141, p.1415
69. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. С.548
70. Монин А.С., Яглом А.М Статистическа гидродинамика. Т. 1. М.: Наука, 1967. с.696; Т. 2. Спб.: Гидромеоиздат, 1996. с.742.

71. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 10. с. 845–862.
72. Миронов В.Л., Носов В.В., Чен Б.Н. Дрожание оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 4. с. 461–469.
73. Аксенов В.П., Алексеев А.В., Банах В.А. и др. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения // Под ред. В.Е. Зуева, В.В. Носова. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1987.с/ 247.
74. Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В., Пейсахсон И.В. // Оптико-механическая промышленность, 1977, вып.2, с.31.
75. Панчук В.Е. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. VII. Основной звездный спектрограф. // Препринт САО РАН, 2001, No.154, с.1-18.
76. <http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/instrum.html>