

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524.3

Per. № НИОКТР АААА-А18-118041990009-8

Per. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН


В. В. Власюк

«29» декабря 2018 год




ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ПРОЕКТ П.15 «РАЗВИТИЕ И ВНЕДРЕНИЕ В НАБЛЮДЕНИЯ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНИТОРИНГА СЛАБЫХ ЗВЕЗД
В ГЛАВНОМ ФОКУСЕ 6-М ТЕЛЕСКОПА»
(промежуточный)

Программа 28: «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей»
Подпрограмма II «Астрофизические объекты как космические лаборатории»

Руководитель НИР,
Главный научн. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


/Ключкова В.Г./

Нижний Архыз 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

Гл.н.с., д.ф-м.н.

Исполнители темы

гл.н.с, д.ф-м.н.

вед.н.с, д.ф-м.н.

ст.н.с, к.ф-м.н.

н.с.

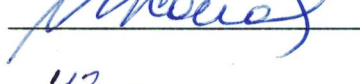
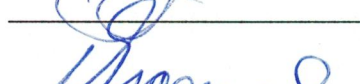

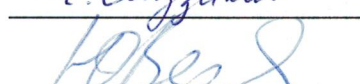
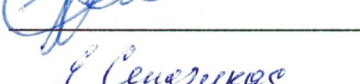
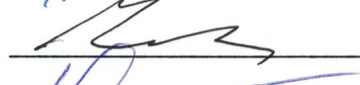
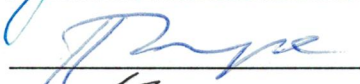
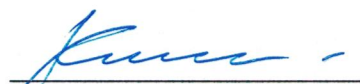
м.н.с.

ст. инженер

н.с., к.тех.н.

с.н.с., к.тех.н.

Нормоконтролер



В.Г. Ключкова (Введение, Заключение, раздел 1)

В.Е. Панчук (раздел 1)

Е.Л. Ченцов (раздел 1)

М.В. Юшкин (раздел 1)

Н.С. Таволжанская (раздел 1)

Е.Г. Сендзикас (раздел 1)

Верич Ю.Б. (раздел 1)

Емельянов Э. В. (раздел 1)

Якопов Г.В. (раздел 1)

Ш.А. Узденева

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	7
1.1. Разработка спектрополяриметра в первичный фокус 6-м телескопа	7
1.2. Спектроскопия звезд высокой светимости с несферическими оболочками	8
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	13
ПРИЛОЖЕНИЕ А	14
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	14
ДОКЛАДЫ	14

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БТА – Большой Телескоп Азимутальный с 6-м главным зеркалом

ИК-источник – источник инфракрасного излучения

НЭС – эшельный спектрограф в фокусе Нэсмита 6-м телескопа

В[e]-звезды – звезды спектрального класса В с эмиссиями запрещенных металлов

LBV – luminous blue variable (голубые переменные высокой светимости)

AGB — асимптотическая ветвь гигантов

post-AGB — стадия после асимптотической ветви гигантов

БМО — Большое Магелланово Облако

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Звезды с феноменом В[е] — горячие массивные звезды с наличием в спектрах запрещенных эмиссий

Luminous blue variables (LBV) — крайне редко встречающиеся массивные звезды экстремально высокой светимости и ранних спектральных классов с высоким темпом потери массы до $10^{-4} M_{\odot}$ в год

Гипергиганты — далеко проэволюционировавшие звезды на пределе светимости с максимальными исходными массами, более $20 M_{\odot}$, с большой потерей вещества за счет звездного ветра

AGB сверхгиганты — звезды с исходными массами в интервале 3 - 9 M_{\odot} , проэволюционировавшие до стадии углеродно-кислородного ядра

Post-AGB звезды — непосредственные потомки AGB звезд и предшественники планетарных туманностей

Спектрополяриметрия — исследование параметров поляризации излучения в зависимости от длины волны

Тяжелые металлы — металлы, синтезированные за счет s-процесса (медленной нейтронизации) ядер железа на стадии AGB

ВВЕДЕНИЕ

Объектами наших исследований являются звезды различных масс с высоким темпом потери вещества на их предыдущих и текущей стадиях эволюции. Фундаментальная причина процесса потери вещества и его эволюционных изменений пока не понята, что предопределяет актуальность определения характеристик проэволюционировавших звезд, изучение особенностей строения их протяженных оболочек и параметров звездного ветра. Программа включает исследование проэволюционировавших звезд в большом диапазоне масс: голубые переменные высокой светимости (LBV) вблизи предела стабильности; звезды с феноменом В[e], с большой вероятностью являющиеся двойными системами промежуточной массы вскоре после стадии быстрого обмена массами; белые и желтые гипергиганты и маломассивные post-AGB сверхгиганты с большими избытками ИК-излучения. Необходимым и самым трудоемким моментом наших исследований является определение светимости и массы звезды, а, следовательно, и фиксация ее стадии эволюции. Парадоксально, но звезды высокой светимости (далее – ЗВС), принципиально различающиеся по массам (самые массивные звезды с исходными массами выше $20\div 40 M_{\odot}$ и звезды средних масс $3\div 9 M_{\odot}$ и стадиям эволюции, имеют близкие наблюдаемые свойства: особенности оптических и радиоспектров, большие избытки ИК-излучения, сложное и переменное поле скоростей, особенности спектрополяриметрии.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1.1. Разработка спектрополяриметра в первичный фокус 6-м телескопа

В рамках проекта программы ПРАН в 2018 г. выполнены следующие работы:

- изготовление лабораторного стенда сборки и юстировки спектрографа ПФ,
- проектирование механических деталей оптических узлов,
- сборка лабораторного макета ядра спектрографа (без предщелевой части и поляризметрической оптики),
- юстировка основной оптики,
- подготовка двух докладов на международной конференции и их публикаций в ASP Conf. Ser,
- подготовка заявки на патент.

На рисунках представлены общий вид макета спектрографа (Рисунок 1), модули основных его узлов (Рисунок 2), вид спектра (Рисунок 3).

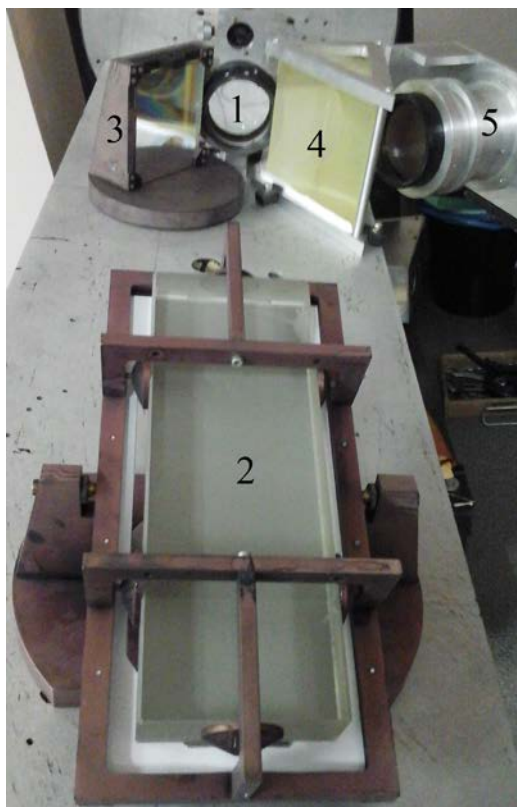


Рисунок 1 – Общий вид макета. Обозначения: 1 - коллиматор, 2 - эшелле, 3 - решетка скрещенной дисперсии, 4 - призма скрещенной дисперсии, 5 - камера



Рисунок 2 – Юстировочная часть передвижного стенда. Обозначения: 1 – лазер, 2 – источник комбинированного спектра (ртуть + люминофор), 3 – оптика осветителя щели (1:4)

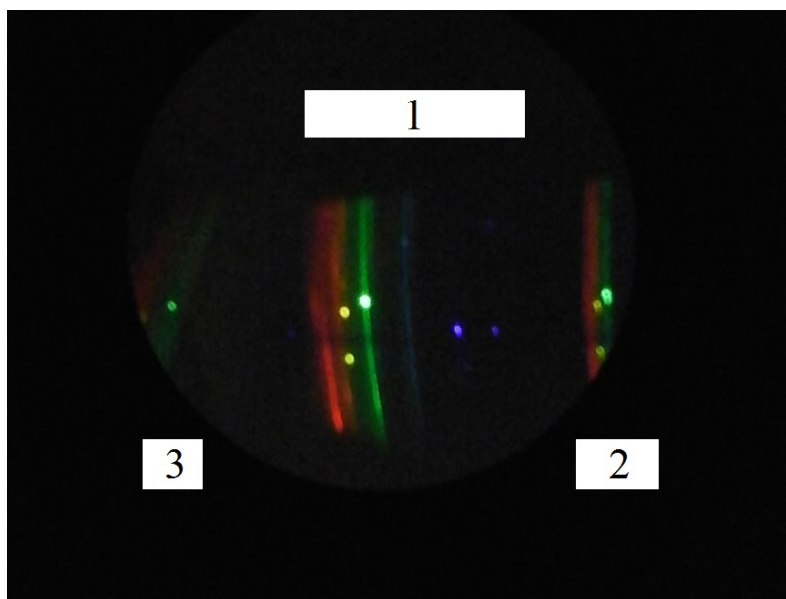


Рисунок 3 – Вид спектра (в качестве приемника использован смартфон). Обозначения: 1 – протяженность рабочего спектра, I-й порядок решетки скрещенной дисперсии, 2 – спектр в нулевом порядке решетки, дисперсия осуществляется только призмой, 3 – элементы спектра во II-м порядке решетки скрещенной дисперсии

Макетирование подтвердило правильность расчетов параметров оптических элементов и схемы спектрографа. Изготовление оригинала предщелевой части сдерживается отсутствием официального документа об изменившемся выносе первичного фокуса при работе с обновленным зеркалом БТА.

1.2. Спектроскопия звезд высокой светимости с несферическими оболочками

Пересечение наблюдаемых свойств самых массивных ЗВС и post-AGB сверхгигантов предопределяет проблему спектральной мимикрии. При известной неопределенности в оценках расстояний для удаленных объектов за гипергигант может

быть принят – по его оптическому спектру – объект с мощным ветром, но с меньшей массой и светимостью. Звезды из указанных выше групп на принципиально различающихся стадиях эволюции демонстрируют сходные оптические спектры и другие свойства (нестабильные протяженные атмосферы, расширяющиеся газопылевые оболочки, большие избытки потока в ИК диапазоне).

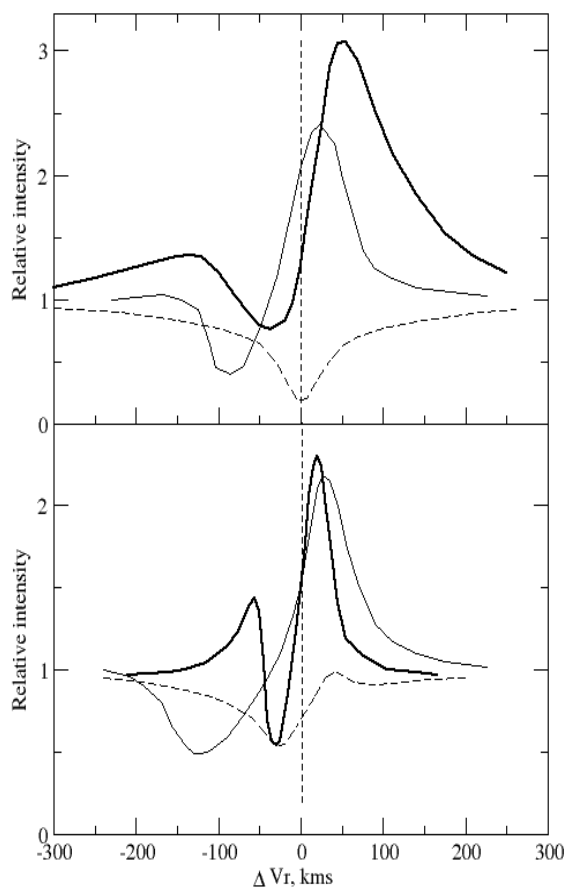


Рисунок 4 – Профили Na в спектрах сверхгигантов. Верхняя панель: классический сверхгигант α Per (F5 Ib) – штриховая линия, гипергигант HD 33579 (A3 Ia0) – тонкая сплошная, post-AGB сверхгигант V510 Pup (F5Ib) – жирная сплошная. Нижняя панель: классический сверхгигант HD 102878 (A2Iab) – штриховая, гипергигант 6 Cas (A2.5Ia0) – тонкая сплошная, post-AGB сверхгигант BD+48° 1220 (A4) – жирная сплошная. По оси абсцисс указано смещение ΔV_r относительно системной скорости каждого объекта

Мы рассмотрели некоторые аспекты проблемы спектральной мимикрии на примере свойств репрезентативных объектов с использованием спектров, полученных с одним и тем же спектрографом НЭС 6-метрового телескопа БТА и в рамках единой методики обработки спектров. Однородность наблюдательного материала позволяет нам проводить корректное сопоставление спектральных деталей, зарегистрированных в спектрах звезд различной природы. С ростом светимости звезды нарастает темп потери вещества, – за счет увеличения плотности ветра, т.к. скорость его снижается. Эти параметры для α Cyg

(A2 Ia), белого гипергиганта БМО HD 33579 (A3 Ia-0) и S Dor в максимуме блеска соотносятся следующим образом: темп потери массы нарастает от объекта к объекту как 1:100:1000, а средние скорости истечения (по резонансным линиям ракетного ультрафиолета) составляют 200, 120 и 70 км/с соответственно. Такая же корреляция получается и по нашим объектам. Сопоставляя предельную скорость истечения, зафиксированную по абсорбции H α , и темп потери массы (по литературным данным), получаем вывод о несферичности и нестационарности ветров сверх- и гипер- гигантов, вывод об упрощении их пространственно-кинематической структуры с ростом светимости. Проблему мимикрии хорошо иллюстрирует Рисунок 4, где сопоставлены профили H α в спектрах ЗВС различной природы.

Рассмотренные нами вопросы спектральной мимикрии являются частью общей проблемы фиксации стадии эволюции далеко проэволюционировавших звезд различных масс [1]. Перспективным направлением в исследовании финальных стадий эволюции звезд различных масс является комплексное изучение и анализ особенностей химического состава и поля скоростей в их атмосферах и оболочках, а также данных спектрополяриметрии. В частности, в оболочках гипергигантов V1302 Aql и HD 179821 обнаружен аммиак [2], атмосферы обеих звезд обогащены азотом [3, 4]. Эти результаты позволяют без сомнений считать оба объекта потомками массивных звезд. В последнее десятилетие аналогичные результаты получены и для ряда post-AGB звезд. Во-первых, выделена подвыборка post-AGB звезд, в атмосферах которых найдены большие избытки углерода и тяжелых металлов, их околзвездные оболочки имеют сложную морфологию и, как правило, обогащены углеродом, что проявляется в присутствии в ИК-, радио- и оптических спектрах полос молекул C₂, C₃, CN, CO и т.п. (см [5] и ссылки в этой статье). Во-вторых, среди этих post-AGB звезд найдены несколько объектов с атмосферами, обогащенными тяжелыми металлами, для которых методом оптической спектроскопии высокого разрешения обнаружено присутствие тяжелых металлов и в их околзвездных оболочках [5, 6]. Подчеркнем, что эти спектральные детали невозможно изучить в спектрах, полученных с низким и даже со средним спектральным разрешением.

Эффективность использования совокупности современных наблюдательных методик для фиксации эволюционного статуса пекулярных ЗВС хорошо иллюстрирует история исследований сверхгиганта V1302 Aql (ИК-источник IRC+10420), который в течение нескольких десятилетий считался представителем стадии post-AGB. Лишь совокупность результатов, полученных за счет многолетних наблюдений с применением различных методик на самых крупных оптических и радиотелескопах привела к истине. Помимо оптической спектроскопии с высоким разрешением решающие результаты были

получены за счет спектроскопии с высоким пространственным разрешением [7], ИК-спектроскопии [8], спектрополяриметрии [9].

Причины возникновения проблемы спектральной мимикрии обусловлены тем, что практически все детали оптических спектров ЗВС формируются в различных слоях протяженной расширяющейся и оптически плотной в континууме атмосферы, сформированной за счет звездного ветра, для обозначения которой используется термин «псевдофотосфера», введенный авторами [10]. Наличие таких специфических слоев характерно и для гипергигантов, и для post-AGB звезд. Во внутренних, энергетически активных слоях звезды формируется полный поток излучения, определяющий эффективную температуру, однако, по наблюдаемым спектрам трудно определить, какой из процессов энерговыделения обеспечивает излучение звезды: горение водорода или гелия в ядре, или же горение в слоевых источниках. Разнообразие типов спектральных деталей в основном определяются физическими условиями в протяженной атмосфере звезды и меньше зависит от массы нижележащих фотосферных слоев. Этот вывод хорошо иллюстрирует уже наличие в спектрах post-AGB звезд мощных эмиссий H α , относительная интенсивность которых, как видно из рис.1, может превышать интенсивность таковых в спектрах гипергигантов. Необходимость учета эффекта спектральной мимикрии отлично иллюстрируют результаты работы [11], авторы которой на основе комплексного исследования ЗВС в галактиках M81 и NGC 2403 опровергли статус LBV для десятка звезд, предложенный другими авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из рассмотрения проблемы мимикрии, ее решение для каждого индивидуального объекта состоит прежде всего в определении эволюционного статуса, а для этого требуется найти и сопоставить разнообразные параметры: положение в Галактике, светимость, параметры ветра, распределение энергии в спектре, особенности химического состава, а также детальную картину скоростей на разных уровнях в атмосфере звезды и в околозвездной среде. Получение вышеперечисленных параметров может обеспечить только спектроскопия высокого разрешения в широком интервале длин волн с привлечением данных спектрополяриметрии, радио- и ИК-спектроскопии. Именно для спектрополяриметрического обзора исследованных объектов и создается эшелле-спектрополяриметр первичного фокуса БТА.

Новизна результатов, их научная и практическая значимость

Сектрополяриметр высокого спектрального разрешения в первичном фокусе 6-м телескопа разработан впервые. Оптическая схема предложена впервые и, по мнению авторов, представляет предмет заявки на патентный поиск. Результаты исследования спектральной мимикрии сверхгигантов получены впервые. Они будут использоваться в будущих исследованиях природы ЗВС с неясным статусом (кандидаты в LBV, В[e], гипергиганты).

Проблема спектральной мимикрии столь детально и на основе однородного материала исследована впервые.

Все поставленные задачи выполнены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R.M. Humphreys, K. Davidson, S. Grammer, et al., *ApJ*, 836, p. 64 (2017).
2. G. Quintana-Lacaci, V. Bujarrabal, A. Castro-Carrizo, *A&A*, 488, 203 (2008).
3. V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, A.S. Miroshnichenko, V.E. Panchuk, M.V. Yushkin, *MNRAS*, 459, 4183 (2016).
4. T. Sahin, D. Lambert, V.G. Klochkova, V.E. Panchuk, *MNRAS*, 461, 4071 (2016).
5. V.G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin*, 69, 279 (2014).
6. V.G. Klochkova, In: «Proceed inter conf Stars: from collapes to collapse», Nizhnij Arkyz, 3-7.10.2016. Eds. Yu.Yu. Balega, D.O. Kudryavtsev, I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin, *Astron Soc Pacific Conf Series*, 510, 121 (2017).
7. R.M. Humphreys, K. Davidson, N. Smith, *AJ*, **124**, 1026 (2002).
8. R.D. Oudmaijer, W.J. de Wit, *A&A*, **551**, A69 (2013).
9. M. Patel, R.D. Oudmaijer, J.S. Vink, J.E., et al., *MNRAS*, **385**, 967 (2008).
10. C. Leitherer, I. Appenzeller, G. Klare, et al., *A&A*, 551, 168 (1985).
11. R.M. Humphreys, S. Stangl, M. Gordon, K. Davidson, S. Grammer, arXiv:1811.06559, 15 Nov (2018).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В РОССИЙСКИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

1. В.Г. Ключкова, Е.Л. Ченцов. К проблеме спектральной мимикрии сверхгигантов. *Астрономический журнал*, 2018, т.95, No.1, с.22-34.

ДОКЛАДЫ

1. Vladimir Panchuk, Valentina Klochkova. Technique of stellar spectroscopy in the first quarter of XXI century. Intern. Conf. "Physics of Magnetic Stars", Special Astrophysical Observatory, Russia, 1–5 October, 2018.
2. Maxim Yushkin, Vladimir Panchuk, Valentina Klochkova. Nebulae AFGL 2688: structure, kinematics, chemical composition. Intern. Conf. "Physics of Magnetic Stars", Special Astrophysical Observatory, Russia, 1–5 October, 2018.