

Отчет по НИР

«Комплексные исследования нестационарных звезд с газо-пылевыми оболочками в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра»

за период 1 января - 31 декабря 2022 г

Номер договора: госзадание ГАИШ 3.6

Номер ЦИТИС: АААА-А20-120012990067-3

Руководитель: Ламзин С.А.

Участники НИР в 2020 г.: Додин А.В., Корнилова Л.Н., Кравцова А.С., Пахомов Ю.В., Столяров А.В., Татарникова А.А., Шенаврин В.И.

Выполнен цикл исследований по программе изучения звезд разных типов с газо-пылевыми оболочками, включая мириды, симбиотические мириды, новые звезды, звезды post-AGB и молодые звезды типа Тельца и Ae/Be Хербига. Основа – многолетние ряды оптической и ИК (JHKLM) фотометрии, а также поляриметрические, спекл-интерферометрические и спектральные наблюдения. Интерпретация основана на численном анализе данных и компьютерном моделировании. Цель исследований — определение параметров звезд и их газо-пылевых оболочек (параметры и свойства пыли).

Получены следующие результаты:

1) Подведен итог многолетнего фотометрического мониторинга FG Sge - быстро эволюционирующего ядра планетарной туманности Неп 1-5. Новые наблюдения в оптической (BVRC) и инфракрасной (JHKLM) областях за 2008–2021 гг. и 2013–2021 гг. соответственно, выполненные на телескопах ГАИШ МГУ, позволили проследить изменение блеска звезды в последние годы. Наиболее значимыми оказались наблюдения 2019 г, когда звезда испытала на короткий срок просветление пылевой оболочки и оказалась доступной для наблюдений в полосах BVRC. По распределению энергии в спектре FG Sge в ярком состоянии блеска в диапазоне 0.4–5 мкм найдены параметры пылевой оболочки: размер пылевых частиц $a = 0.01$ мкм, температура пыли на внутреннем крае около 900 К, оптическая толщина в полосе K -- 0.5 (в полосе V -- 4.5), масса пыли в оболочке $7 \times 10^{-5} M_{\odot}$. После кратковременного просветления пылевой оболочки в 2019 г. произошел выброс новой пылевой оболочки, который привел к ослаблению блеска FG Sge во всем наблюдаемом нами диапазоне длин волн. По кривым блеска и показателям цвета в ИК-диапазоне изучен процесс роста оптической толщи пылевой оболочки в 2019–2020 гг. Результаты исследований опубликованы в журнале ПАЖ.

2) Установлена симбиотическая природа малоизученной циркониевой звезды CSS 1102. Определены характеристики компонентов системы. Анализ распределения энергии показал, что помимо туманности и холодного компонента спектрального класса S4.5/2, в спектре CSS~1102 заметно избыточное излучение в синем и в ближнем УФ диапазонах, которое может быть приписано аккреционному диску. Результаты исследований опубликованы в журнале ПАЖ.

3) Совместно с зарубежными коллегами был изучен процесс формирования пылевой оболочки вокруг богатой углеродом двойной системы Вольфа-Райе WR 125. Для анализа использовались спектры, полученные в октябре 2019 г на инструменте COMICS телескопа Subaru (7,3--13,6 мкм), а также изображения в полосе N (11,7 мкм) и Q-диапазоне (18,8 мкм). Для построения распределения энергии в спектре системы были также использованы фотометрические наблюдения в диапазоне 1-5 мкм (JHKLM) проведённые в Крымской лаборатории МГУ в октябре 2019 года, которые практически совпали по времени с COMICS наблюдениями. WR 125 - двойная система (WC7 + O9) со встречным ветром компонент продемонстрировала в 2018 году процесс пылеобразования, примерно через 28 лет после того, как наблюдался первый подобный эпизод. Проведено сравнение инфракрасной фотометрии с историческими наблюдениями и пересмотрен период пылеобразования в системе со 125 до 28,1 года. Кроме того, в работе заново проанализированы архивные инфракрасные спектры пяти подобных WC-звезд с пылевыми оболочками, полученные с помощью инфракрасной космической обсерватории, и проведено их сравнение со спектром WR 125 для поиска аналогичной детали в районе длины волны 8 мкм. Показано, что у всех исследованных систем такая деталь с FWHM~1-2 мкм имеется, и высказано предположение, что эти особенность присуща всем WC-звездам. Результаты исследования опубликованы в журнале Astrophysical Journal.

4) Проанализировано около 1000 рентгеновских наблюдений двойной системы WR 140, состоящей из звезды Вольфа-Райе и O-звезды. Наблюдения проводились с борта космических обсерваторий RXTE, Swift, NICER и охватывают три 7.94-летних орбитальных цикла. Найдено, что рентгеновская светимость меняется в зависимости от расстояния между компонентами по тривиальному закону, который нарушается вблизи периастра, по-видимому, из-за частичной переработки рентгеновского излучения ударной волны в оптическое, в частности, в линии C III 5696 Å. Обсуждается механизм возникновения в системе бесстолкновительной ударной волны. Из инфракрасных наблюдений в полосе K следует, что пыль появляется в системе всего через несколько дней после прохождения периастра. Вместе с тем найдено, что в сталкивающихся ветрах компонент отсутствуют крупномасштабные неоднородности. Результаты доложены на профильной конференции в США и опубликованы в журнале *Bulletin of the American Astronomical Society*.

5) Проведено лабораторное моделирование джетов молодых звезд на установке плазменный фокус ПФ-3 в НИЦ "Курчатовский институт". Изучался вопрос о причинах, приводящих к различию в пространственной структуре плазменных выбросов при разряде в газах разного химического состава – неон, гелий и гелий с примесью неона. Было найдено, что наиболее структурированным является поток в случае чистого неона: передняя кромка выброса состоит из многочисленных уплотнений, что по внешнему виду делает его весьма похожим на уплотнения в джетах молодых звезд, так называемых объектах Хербига–Аро. Наименее структурированным выглядит выброс в случае чистого гелия, однако при добавке к гелию всего 1% неона существенно меняется форма головной части выброса, в нем становится заметной мелкомасштабная структура. Оценки показывают, что эти особенности могут быть связаны с различием эффективности охлаждения исследуемых газов как в самом плазменном выбросе, так и в ударной волне, возникающей при его движении через фоновый газ. Сделано предположение, что основной причиной появления неоднородностей в плазменном сгустке, как и в случае объектов Хербига–Аро, являются различного рода неустойчивости, которые развиваются при наличии эффективного радиационного охлаждения. Кроме того, было найдено, что в ряде случаев плазменный выброс может состоять из нескольких почти параллельно летящих сгустков, которые возникают уже на стадии пинчевания плазмы. Столкновение ударных волн, порождаемых каждым из сгустков, приводит к возникновению уплотнений, что также способствует формированию кружевной структуры плазменного выброса. Результаты опубликованы в журнале "Физика плазмы".

6) Используя полученные нами и архивные данные мы провели исследование молодой двойной системы ZZ Tau, состоящей из двух классических звезд T Тельца с возрастом менее 2 млн лет, окруженных общим газо-пылевым диском. Определены орбитальные параметры системы (период 46.8 ± 0.8 лет, большая полуось 88.2 ± 2.1 миллисекунд дуги, эксцентриситет 0.58 ± 0.02) и ее полная масса $0.86 \pm 0.09 M_{\odot}$. Сделан вывод о том, что каждая из звезд системы также имеет свой протопланетный диск, аккрецируя из него вещество с темпом 7×10^{-10} (ZZ Tau A) и 2×10^{-10} (ZZ Tau B) $M_{\odot}/\text{год}$ соответственно. Показано, что фотометрическая переменность с периодом $P=4.171 \pm 0.002$ суток обусловлена наличием на поверхности главной звезды (горячего) аккреционного пятна. Оказалось, что околос звездная экстинкция в направлении на компоненты системы существенно отличается, вследствие чего излучение более холодной звезды доминирует в общем излучении системы на длинах волн короче 0.4 мкм. Сделан вывод о том, что ZZ Tau является источником холодного молекулярного CO-потока, однако не имеет отношения к расположенному неподалеку объекту Хербига-Аро HH 393. Результаты исследования опубликованы в *MNRAS*.

7) Подведен промежуточный итог примерно 20-летнего фотометрического мониторинга в ИК диапазоне трех молодых Ae звезд Хербига (CQ Tau, SV Cep, WW Vul), относящихся к подклассу "уксоров" -- звезд типа UX Ori. Показано, что циклические вариации блеска в ИК диапазоне, как и в оптическом, связаны с переменной экстинкцией. Сделан вывод о том, что циклическая переменность отражает азимутальную структуру протопланетных дисков вдали от зоны сублимации. Вместе с тем обнаружены эпизоды повышения яркости ИК излучения длительностью 1-2 года, не коррелирующие с оптической переменностью. Результаты представлены в виде приглашенного доклада на Всероссийской конференции "Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления" (п.Научный, республика Крым, Россия, 11-16 сентября 2022)

8) На той же конференции были сделаны еще два доклада. В докладе "Результаты исследования звезд T Тельца ZZ Tau и ZZ Tau IRS" были изложены основные результаты наблюдений и их интерпретации молодой двойной системы ZZ Tau, окруженной общим диском, а также молодой звезды с протопланетным диском, видимым почти с ребра, ZZ Tau IRS. Во втором докладе "Лабораторное моделирование структуры джетов молодых звезд" представлены результаты изучения т.н. кружевной структуры плазменных сгустков,

генерируемых в серии экспериментов, проведенных сотрудниками НИЦ "Курчатовский институт" на установке ПФ-3. В известной степени доклад пересказывал результаты описанные выше в п.4 (и опубликованные в соответствующей статье), но с более глубоким изложением астрофизического аспекта исследования.

9) Результаты исследования быстрой переменности блеска симбиотических звезд были доложены на двух Всероссийских конференциях. Доклад о системах CSS1102 и DQ Ser был представлен на конференции "Астрономия и исследование космического пространства" (Россия, 31 января - 4 февраля 2022 г), а доклад о системе Т СгВ -- на конференции "Современная звездная астрономия-2022" (КГО ГАИШ МГУ, Россия, 8-11 ноября). В частности, сообщается об обнаружении у Т СгВ фликкер-эффекта и быстрой переменности потоков в эмиссионных линиях водорода и гелия, что указывает на наличие в системе аккреционного диска.

10) Еще один (приглашенный) доклад "Молодые переменные звезды", посвященный природе вековой переменности молодых звезд, был сделан на конференции, посвященной 100-летию со дня рождения П.Н. Холопова (Москва, 7 июня 2022)

В 2022 г вышел из печати сборник материалов конференции ВАК-2021. В этом сборнике опубликован не учтенный в отчете по теме за 2021 г доклад "The Epsilon Aurigae Observation. Infrared Photometry and Speckle-Polarimetry", в котором сообщается о наблюдаемом изменении ИК спектра системы и обнаружении поляризации ее излучения. В том же сборнике опубликован доклад "Young stars", который вошел в отчет 2021 г.

В течение 2022 г проводился фотометрический, поляриметрический и спектральный мониторинг ряда звезд с пылевыми оболочками (6 объектов), с целью последующей интерпретацией полученных результатов.

Кроме того, в 2022 г А.В.Додин вел [Специальный астрономический практикум кафедры Астрофизики и звездной астрономии «Внутреннее строение звезд и звездная эволюция»](#) (обязательный, базовой части, практические занятия, 216 часов), а С.А.Ламзин читал курс лекций [«Строение и эволюция звезд»](#) (обязательный, вариативной части, 72 часа).

Всего в 2022 г было опубликовано 6 статей и сделано 6 докладов на четырех конференциях. Список публикаций и докладов прилагается.

/С.А. Ламзин/

Список публикаций 2022 г

Статьи

- 1) Лабораторное моделирование структуры джетов молодых звезд
 - Крауз В.И., Харрасов А.М., Ламзин С.А., Додин А.В., Мялтон В.В., Ильичев И.В.
 - в журнале *Физика плазмы*, издательство *Наука (М.)*, том 48, № 6, с. 506-518 DOI

- 2) Orbital parameters and activity of ZZ Tau – a low-mass young binary with circumbinary disc
 - Belinski A., Burlak M., Dodin A., Emelyanov N., Ikonnikova N., Lamzin S., Safonov B., Tatarnikov A.
 - в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, издательство *Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England)*, том 515, № 1, с. 796-806 DOI

- 3) FG Sge: новая многоцветная фотометрия и кратковременное просветление пылевой оболочки в 2019 году
 - Архипова В.П., Иконникова Н.П., Шенаврн В.И., Бурлак М.А., Татарников А.М., Цветков Д.Ю., Белинский А.А., Павлюк Н.Н., Шугаров С.Ю.
 - в журнале *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*, издательство *Наука (М.)*, том 48, № 6, с. 430-444 DOI

- 4) Detection of a Broad 8 μ m UIR Feature in the Mid-infrared Spectrum of WR 125 Observed with Subaru/COMICS
 - Endo Izumi, Lau Ryan M., Sakon Itsuki, Onaka Takashi, Williams Peredur M., Shenavrin Victor I.
 - в журнале *Astrophysical Journal*, издательство *University of Chicago Press (United States)*, том 930, № 2, с. 116-133 DOI

- 5) Competitive X-Ray and Optical Cooling in the Collisionless Shocks of WR 140
 - Corcoran Michael, Pollock Andrew, Stevens Ian, Russell Christopher, Hamaguchi Kenji, Williams Peredur, Moffat Anthony, Weigelt Gerd, Shenavrin Victor, Richardson Noel, Espinoza Galeas David, Drake Stephen
 - в журнале *Bulletin of the American Astronomical Society*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 54, № 3, с. 98

- 6) Симбиотическая природа циркониевой звезды CSS1102
 - Масленникова Н.А., Татарникова А.А., Татарников А.М., Иконникова Н.П., Додин А.В.
 - в журнале *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*, издательство *Наука (М.)*, том 48, № 1, с. 43-51

Доклады на конференциях

- 1) Оптический фликкер-эффект у симбиотических звезд CSS 1102 и DQ Ser (Устный)
 - Авторы: Масленникова Н.А., Татарникова А.А., Татарников А.М.
 - Вторая Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых "Астрономия и исследование космического пространства", Россия, 31 января - 4 февраля 2022

- 2) "Фотометрическая активность звезд Ae Хербига CQ Tau, SV Сер и WW Vul в ближней инфракрасной области спектра по данным многолетних наблюдений" (Приглашенный)
- Авторы: Шенаврин В.И., Ростопчина-Шаховская А.Н., Гринин В.П., Шаховской Д.Н.
 - Всероссийская конференция "Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления", Научный, республика Крым, Россия, 11-16 сентября 2022
- 3) Исследование быстрой переменности Т Северной Короны (Приглашенный)
- Авторы: Масленникова Н.А., Татарников А.М., Татарникова А.А.
 - Современная звёздная астрономия-2022, Кавказская Горная Обсерватория ГАИШ МГУ, Россия, 8-11 ноября 2022
- 4) Молодые переменные звезды (Приглашенный)
- Автор: Ламзин С.А.
 - 100-летие П.Н. Холопова, Москва, Россия, 7 июня 2022
- 5) Лабораторное моделирование структуры джетов молодых звезд (Устный)
- Авторы: Ламзин С.А., Крауз В.И., Харрасов А.М., Додин А.В., Мялтон В.В., Ильичев И.В.
 - Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления, Крымская Астрофизическая Обсерватория, Россия, 12-17 сентября 2022
- 6) Результаты исследования звезд Т Тельца ZZ Tau и ZZ Tau IRS (Устный)
- Авторы: Ламзин С., Белинский А., Бурлак М., Додин А., Емельянов Н., Желтоухов С., Иконникова Н., Потанин С., Сафонов Б., Татарников А.
 - Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления, Крымская Астрофизическая Обсерватория, Россия, 12-17 сентября 2022