

Отчет по НИР

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

за период 1 января 2020 - 31 декабря 2024 г

Номер договора: госзадание ГАИШ 3.6

Номер ЦИТИС: АААА-А20-120012990067-3

Руководитель: Ламзин С.А.

Участники НИР в 2024 г.: Додин А.В., Волкова А.С., Кирюхина В.А., Корнилова Л.Н., Пахомов Ю.В., Столяров А.В., Татарникова А.А., Шенаврин В.И.

Результаты, полученные в 2024 г:

Изучена вращательная модуляция лучевых скоростей узких эмиссионных линий у четырех классических звезд типа Т Тельца. Найдено, что декларируемое ранее смещение средней скорости линий нейтрального и ионизованного гелия относительно средней лучевой скорости звезды не связано с втеканием аккрецируемого газа в пятно, поскольку кривые лучевых скоростей для линий с различными смещениями по скорости должны испытывать фазовые сдвиги друг относительно друга, в то время как наблюдаемые фазовые сдвиги отсутствуют в пределах ошибок и не соответствуют наблюдаемым сдвигам линий по скорости. Это означает, что сдвиги линий не вызваны реальным движением газа. В случае линий нейтрального гелия смещения можно объяснить большой оптической толщиной линий и эффектом Штарка при параметрах плазмы, которые соответствуют ожидаемым в основании аккреционной колонки звезд типа Т Тельца. Статья с результатами исследований принята в печать в журнал "Письма в АЖ".

Считается, что наличие сильного магнитного поля и высокого темпа аккреции - необходимые условия формирования струйных выбросов (джетов) у молодых звезд. При этом пока не ясно, являются ли эти условия достаточными. До сих пор примером, нарушающим условие достаточности, считалась молодая звезда ВР Тау, у которой величина дипольной компоненты магнитного поля превышает 1 кГс, а темп аккреции $> 10^{-8}$ Мо/год. Нам удалось обнаружить джет у ВР Тау, проведя спектральные наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ и получив изображение окрестностей звезды в узкополосном фильтре [S II] 672 нм. Точнее говоря, мы нашли, что ВР Тау является источником биполярного истечения, которому присвоен номер НН 1181, включающего в себя, как минимум два объекта Хербига-Аро и микро (контр)джет протяженностью порядка 1". Мы также показали, что джет перпендикулярен протопланетному диску ВР Тау. Результаты опубликованы в журнале Astron. and Astrophys. Letters.

Проведены и проанализированы результаты фотометрических инфракрасных наблюдений в полосах JHKLM и спектральных инфракрасных наблюдений в диапазоне 1-2.5 мкм углеродной мириды Т Дра, выполненных с 2019 по 2023 гг. Анализ фотометрических наблюдений показывает наличие в это время как пульсационных колебаний блеска с амплитудой падающей от 1.2 m в полосе J до 0.84 m в полосах L и M, так и наличие линейного тренда среднего уровня блеска, величиной 0.0007 m/d в полосе J. В ИК спектре Т Дра выделены полосы поглощения молекул C₂H₂, HCN, CN, CO и C₂. Обнаружена зависимость глубины полосы поглощения 1.53 мкм от блеска звезды. Показано, что полосы молекулы CO 2.29 мкм имеют высокий контраст, что указывает на их формирование не в атмосфере звезды, а в околосредной пылевой оболочке. Представлено распределение энергии в спектре Т Дра в широком спектральном диапазоне, по которому получены оценки болометрических потоков в максимуме и минимуме блеска: 4.8×10^{-10} и 2.5×10^{-10} Вт/м² соответственно. Для расстояния Т Дра 944 пк они соответствуют светимости звезды в максимуме блеска $L_{\max} \approx 13300 L_{\odot}$ и в минимуме блеска $L_{\min} \approx 6900 L_{\odot}$. Проведено моделирование переноса излучения в околосредной оболочке Т Дра и получены оценки параметров звезды и оболочки: $T_{\text{eff}}=2400$ K, $R^*=670 R_{\odot}$, $R_{\text{in}}=5-6$ a.e., $R_{\text{out}} \sim 50000$ a.e., оптическая толща в полосе V равна 3.5, $M_{\text{dust}}=(4-8) \times 10^{-5}$ Мо и $dM/dt \sim 1.5 \times 10^{-6}$ Мо/год. Результаты опубликованы в журнале "Письма в астрономический журнал".

Несколько долгопериодических двойных систем с богатой углеродом звездой Вольфа-Райе и ОВ-звездой при столкновении с ветром образуют пыль. В эксцентрических двойных системах это особенно заметно вблизи прохождения периастра. Точные условия, приводящие к образованию пыли, требуют определения орбитальных характеристик, что затруднительно из-за их длительных периодов. Недавно в двойной системе WR 125 (WC7 + O9III) начался эпизод образования пыли, который был замечен благодаря инфракрасной вспышке, которая стала первой вспышкой, обнаруженной с 1991 года. Представлена новая фотометрия в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, которая используется для получения орбитального периода 28.12 года. Был также использован продолжительный временной ряд оптических спектров, чтобы установить ограничения на элементы орбиты, исходя из предположения, что эта система будет производить пыль вблизи периастра. Эксцентриситет орбиты составляет 0.29 ± 0.12 и рассчитан только для компонента Вольфа-Райе, поскольку радиальные скорости О-звезды имеют

шум, который превышает ожидаемую полуамплитуду орбитальной скорости. Представлены результаты спектроскопии SOFIA/FORCAST для изучения распределения энергии пыли в инфракрасном спектре во время этого выброса, проведено сравнение ее свойств с другими двойными объектами WCd и получено значение температуры пыли в 580 K для 2021 года. Эти наблюдения позволяют спланировать будущие наблюдения за этой системой и включить WR 125 в класс двойных систем Вольфа-Райе, создающих пыль. Проведенный анализ WR 125 позволил получить несколько ключевых сведений о системе: 1) Кривая инфракрасного излучения полностью соответствует двум отдельным вспышкам вблизи периастрального прохода системы. Повторяемость напоминает прототип звезд WC - WR 140; 2) Инфракрасный спектр в районе 6.2 мкм демонстрирует слабую особенность, аналогичную спектру WR 137. В отличие от WR 137 в среднем инфракрасном диапазоне у WR 125 не видны линии излучения звезды WR, когда выброс пыли близок к максимальному для этой системы. Анализ показывает, что пыль остыла с 800 K в 2019 г до 580 K в 2021 г, что согласуется с расширением и охлаждением пылевого облака по мере того, как оно удаляется от двойной системы. Будущие исследования, детализирующие расширение пыли, позволят полностью проверить это; 3) Наши данные подтверждают идею о наличии неизотермической пыли в районе WR 125, хотя наиболее подходящей температурой, по-видимому, является величина близкая к 580 K, что приводит к массе пыли 9.5×10^{-7} Мо. Текущая вспышка WR 125 подчеркивает важность долгосрочного спектроскопического мониторинга таких систем. Следующий несколько лет будут особенно важными для WR 125. Знание орбиты будет иметь решающее значение для моделирования инфракрасных изображений пыли в системе получаемых с помощью наземных или орбитальных телескопов. Долгосрочный мониторинг звезд WCd с помощью наземной фотометрии играет важную роль в определении периодов обращения в подобных исследованиях, и, имея большую выборку таких систем, мы могли бы точно оценить количество пыли, образующейся в таких системах, что может иметь космологическое значение. Результаты исследования опубликованы в журнале *Astrophys. Journal*.

Проанализированы многолетние ряды фотометрических наблюдений в полосах J и K классической симбиотической звезды YY Her. На фазовой кривой блеска выявлено наличие вторичного минимума глубиной 0.08 mag при глубине главного минимума 0.13 mag. При этом был учтен вклад избыточного излучения от горячего компонента и туманности. Из анализа фазовой кривой был сделан вывод о том, что холодный компонент системы приливно деформирован. Показано, что при широком диапазоне отношения масс компонентов системы угол наклона плоскости орбиты к лучу зрения не превышает 50 градусов. Проведены также исследования 9 кандидатов в симбиотические звезды. Для всех объектов определены физические параметры (избытки цвета, спектральные классы, классы светимости). В спектрах V520 And обнаружены эмиссионные линии H_I, HeI, [NeIII] и др., а также значительный УФ избыток. Линии водорода демонстрируют декремент, характерный для планетарных туманностей. По полосам TiO V520 And классифицирована как M5III. Такое сочетание признаков позволяет отнести V520 And к симбиотическим звездам. При моделировании распределения энергии в спектре были получены оценки температур горячего компонента (~50 000 K) и туманности (~10 000 K). По результатам исследований принята в печать статья в журнал «Астрофизический бюллетень».

В 2024 г. С.А.Ламзин был оппонентом на защите кандидатских диссертаций Я.А.Лазовика и С.Е.Павловского, а также докторской диссертации И.И.Антохина.

А.В.Додин был ответственным исполнителем гранта РНФ 23-12-00092 "Комплексные исследования звезд на ранних и поздних стадиях эволюции" (рук. Черепашук А.М.), В.И.Шенаврин был исполнителем гранта физического факультета МГУ "Исследование вариаций яркости фона неба в инфракрасном диапазоне длин волн на разных временных масштабах" (рук. Татарников А.М.).

Наконец, в 2024 г А.В.Додин вел Специальный астрономический практикум (обязательный, базовой части, практические занятия, 216 часов), а С.А.Ламзин читал курс лекций «Строение и эволюция звезд» (обязательный, вариативной части, 72 часа) для студентов 5 курса астрономического отделения физического факультета МГУ. Кроме того, А.В.Додин руководил успешно защищенной магистерской диссертацией "Лучевые скорости узких эмиссионных компонент линий HeI-HeII в спектрах классических звезд типа Т Тельца" студентки астрономического отделения физфака МГУ В.А.Кирюхиной.

За весь период выполнения НИР (1 января 2020 г - 31 декабря 2024 г) было изучены 25 звезд с газо-пылевыми оболочками, а именно: повторная новая Т CrB; симбиотические звезды CSS 1102, V1413 Aql, V426 Sge, YY Her плюс 9 кандидатов в симбиотические звезды; углеродные мириды V CrB и Т Dra; звезды Вольфа-Райе WR 125, WR 137, WR 140; молодые звезды RW Aur A, RW Aur B, ZZ Tau, ZZ Tau IRS, BP Tau, CQ Tau. Результатом исследований стало определение параметров как самих этих звезд, так и их оболочек.

Мы выяснили, что нерегулярная переменность молодых звезд RW Aur A и ZZ Tau IRS, по-видимому, обусловлена затмением звезды пылевыми облаками ветра, который "дует" с поверхности протопланетного диска - т.н. "запыленный ветер". Впервые на примере Ae звезды Хербига CQ Tau было показано, что затмение пылевыми облаками вызывает заметные вариации не только блеска, но и профилей абсорбционных линий в спектре звезды (эффект МакЛафлина-Росситера), что позволяет определять параметры пылевых облаков на масштабах меньших радиуса звезды. Кроме того, нами было показано, что у молодой двойной системы ZZ Tau газо-пылевой диск, окружающий систему, лежит в орбитальной плоскости. Также было показано, что звезды RW Aur A и RW Aur B

образуют гравитационно связанную систему с орбитальным периодом свыше 1000 лет, причем возмущения, создаваемые спутником вблизи периастра, приводят к возникновению коллимированных выбросов из протопланетного диска главной компоненты.

Струйные выбросы вещества (джеты) — характерная особенность молодых звезд с пылевыми оболочками (классических звезд Т Тельца и Ae звезд Хербига). В процессе выполнения НИР мы открыли джеты у звезд ZZ Tau IRS, BP Tau и определили их параметры: степень климации, темп потери массы и др. Оказалось, что у этих звезд джеты направлены перпендикулярно изображению их протопланетных дисков, полученных с помощью интерферометра ALMA, откуда следует, что внутренние и внешние области дисков ZZ Tau IRS и BP Tau не наклонены друг относительно друга заметным образом (в отличие от многих других молодых звезд).

В нашей обзорной статье «Лабораторное моделирование струйных выбросов из молодых звезд на установках с плазменным фокусом», опубликованной в журнале "Успехи физических наук" в 2023 г, показано, как лабораторное моделирование позволяет существенно продвинуться в понимании основных физических процессов, ответственных за образование и устойчивость этих объектов. В частности, в обзоре рассмотрена возможность моделирования струйных выбросов в лабораторном эксперименте на установке ПФ-3 в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт". Показано, что многие свойства течений, полученных на этой экспериментальной установке, согласуются с основными характеристиками струйных выбросов, наблюдаемых в окрестности молодых звезд. В частности, оказалось, что кружевная структура плазменных сгустков, генерируемых в эксперименте, и структура объектов Хербига-Аро в джетах молодых звезд обусловлены неустойчивостями, связанными с радиационными потерями горячей плазмы и столкновением ударных волн. Эти выводы опубликованы в 2023 г в журнале "Физика плазмы". Мы также приняли участие в двумерном численном магнито-гидродинамическом моделировании процесса распространения замагниченного сгустка в окружающем газе, опираясь на результаты, полученные в эксперименте на установке ПФ-3. Результаты опубликованы в Астрономическом журнале.

В настоящее время известно менее десятка двойных систем, состоящих из звезды Вольфа-Райе класса C и звезды спектрального класса O. Особенность этих систем состоит в том, что при столкновении их звездных ветров эпизодически (периодически) образуется пыль, что проявляется в виде вспышки ИК излучения. В рамках НИР были исследованы три такие системы - WR 125, WR 137 и WR 140, причем у первой из них такого рода вспышка наблюдалась в 2019 г. Нами были определены/уточнены орбитальные параметры всех трех систем, параметры пыли, оценен темп потери массы компонентами, а также показано, что ИК вспышки происходят через несколько дней после прохождения периастра. Основой для полученных выводов служили как ИК кривые блеска систем, так и их рентгеновские наблюдения на орбитальных обсерваториях. В частности, в случае WR 140 были проанализированы результаты широкополосной спектроскопии обсерваторий RXTE, SWIFT и NICER, полученной за 20 лет, и почти 1000 наблюдений на трех последовательных периодах обращения продолжительностью 7.94 года, включая 3 прохода через периастр. Обоснован вывод об отсутствии крупномасштабных неоднородностей в ветре WR 140, а в случае WR 137 показано, что рост пылевых частиц начинается при смешивании ветра компонента WC с диском O-звезды.

При изучении симбиотических и повторных новых звезд были получены следующие результаты.

Показано, что V426 Sge является классической симбиотической звездой. С использованием фотографических архивов была также реконструирована историческая кривая блеска с 1900 года. До 1967 года объект не показывал активности, типичной для симбиотических звезд, но в 1968 г произошла вспышка, продолжавшаяся примерно до 1990 года. Подобно другим симбиотическим новым, при возвращении в фазу покоя кривая блеска объекта испытывала ярко выраженные колебания с периодом 493 дня, что соответствует орбитальному периоду системы. В августе 2018 года V426 Sge вспыхнула снова, демонстрируя признаки вспышки типа Z And. Вблизи максимума белый карлик увеличил свою температуру до 200 000 K, а темп потери массы звезды через звездный ветер - до 3×10^{-6} Мо/год. К февралю 2019 года V426 Sge вернулась в спокойную фазу с волнообразными изменениями кривой блеска. В этой фазе удалось определить, что донором аккреции является красный гигант спектрального класса M4.7III с $T_{\text{eff}}=3400$ K и радиусом 106 R_o.

Проанализированы результаты спектральных наблюдений классической симбиотической звезды V1413 Aql, полученных нами в 2012-2017 гг. В этот период система находилась как в активном, так и в редком для нее спокойном состоянии. В 2012 году в оптическом спектре доминировало излучение вспыхнувшего горячего компонента спектрального класса F4-7III, а в 2017 году система перешла в спокойное состояние, длившееся не менее 3 месяцев. Температура и светимость горячего компонента в этот период составили примерно 90 000 K и 1800 L_o соответственно. Показано, что по временным и энергетическим характеристикам спокойное состояние 2017 г мало отличалось от предыдущего спокойного состояния 1993 г.

Установлена симбиотическая природа малоизученной звезды CSS 1102, ранее считавшейся одиночным красным гигантом S класса. Фотометрический мониторинг в фильтре В выявил наличие у этой системы фликкер-эффекта — крайне редкого типа переменности блеска, который наблюдался не более чем у 12 симбиотических звезд.

По характеристикам фликкер-эффекта можно предположить, что его источником является аккреционный диск. Моделирование распределения энергии в спектре CSS 1102 также показало, что в ближнем УФ диапазоне существенный вклад дает дополнительный источник излучения – аккреционный диск. Были получены оценки физических параметров горячего и холодного компонентов системы, туманности и аккреционного диска.

Фотометрический фликкер-эффект также удалось обнаружить у симбиотической повторной новой Т СгВ. Из анализа фотометрических и спектральных наблюдений, полученных в период с 2011 по 2023 г, определены эфемериды моментов минимумов блеска, соответствующих ситуации, когда красный гигант расположен между наблюдателем и горячим компонентом. Моделирование кривых блеска в ближнем ИК-диапазоне позволило получить параметры двойной системы: степень заполнения холодным компонентом полости Роша, отношение масс компонент и наклон плоскости орбиты к лучу зрения. Показано, что наблюдаемый спектр Т СгВ можно представить в виде суммы излучения красного гиганта М4 III, туманности с $T_e=10\,000\text{ K}$ и мерой эмиссии $4 \times 10^{58}\text{ cm}^{-3}$, а также аккреционного диска ($R_{in}=0.003\text{ Ro}$, $R_{out} \approx 1\text{ Ro}$) при наклоне $i = 57$ градусов.

Продолжены исследования линии Li I в спектрах повторных симбиотических новых. Приведены аргументы в пользу того, что возможной причиной избытка лития в спектрах холодных компонентов этого класса объектов являются вспышки на поверхностях горячих компонентов.

При изучении мирид были получены следующие результаты.

Подведены итоги многолетнего мониторинга в оптических и ИК фильтрах UBV JHKLM углеродной мириды V СгВ, проводимого на 125-см и 60-см телескопах Крымской станции ГАИШ. ИК-наблюдения осуществлялись на временном интервале 1989–2018 гг, а данные в фильтрах U, B и V были получены в период 2001–2014 гг. Найдено, что период пульсаций V СгВ в ИК-полосах JHKLM равен 355.2 суткам, а в полосах BV - 352 суток. Эффективная температура звезды в максимуме блеска - 3000 K, а в минимуме - 2400 K. В фильтрах JHK, помимо периодических пульсаций звезды, обнаружены синусоидальные изменения среднего уровня блеска с характерным периодом около 8300 суток. Построена модель сферически симметричной околозвездной пылевой оболочки, позволяющая воспроизвести наблюдаемое распределение энергии в спектре как в максимуме, так и в минимуме блеска, и согласующаяся с результатами наблюдения V СгВ методом дифференциальной спекл-поляриметрии. Оценены параметры пылевых частиц оболочки: распределение по размерам и химический состав.

Проведены и проанализированы результаты фотометрических инфракрасных наблюдений в полосах JHKLM и спектральных инфракрасных наблюдений в диапазоне 1-2.5 мкм углеродной мириды Т Дра, выполненных с 2019 по 2023 гг. Анализ фотометрических наблюдений показывает наличие в это время как пульсационных колебаний блеска с амплитудой падающей от 1.2 m в полосе J до 0.84 m в полосах L и M, так и наличие линейного тренда среднего уровня блеска, величиной 0.0007 m /d в полосе J. Показано, что полосы молекулы CO 2.29 мкм формируются не в атмосфере звезды, а в околозвездной пылевой оболочке. На основании моделирования переноса излучения в околозвездной оболочке получены оценки параметров звезды Т Дра и ее оболочки.

По результатам всех вышеперечисленных исследований в 2020-2024 гг было опубликовано 34 статьи в рецензируемых журналах: все журналы входят в перечень ВАК, а 10 из них в список топ-25. Эти результаты также были доложены на 14 всероссийских и международных конференциях.

/С.А. Ламзин/