АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе (серии статей) на соискание степени доктора философии PhD
по образовательной программе «8D05307 – Физика и астрономия»

Габитова Ильфа Азаматовна

Структура и эволюция околозвёздного вещества в Be-звёздах

Общая характеристика работы

В данной диссертационной работе (серии статей) исследуется структура и эволюция околозвёздных дисков классических Be-звёзд с помощью доплеровской томографии на примере двух двойных систем: κ Draconis и HD 698, где наблюдаются неосесимметричные диски, вероятно вызванные взаимодействием со звёздами компаньонами. κ Draconis - известная двойная система с фазовой переменностью отношения пиков V/R в линии Hα, а HD 698 долгое время считалась кандидатом в систему с чёрной дырой, пока не было подтверждено наличие звезды-компаньона с сорванной оболочкой. Обе системы служат уникальными объектами для изучения влияния компаньонов на диски Be-звёзд.

Актуальность темы

Классические Be-звёзды – это быстро вращающиеся звезды B-типа, окружённые кеплеровскими газовыми дисками. Эти диски создают двухпиковые бальмеровские эмиссионные линии, которые демонстрируют переменность отношения пиков (V/R). У изолированных Be-звёзд долговременные циклы V/R часто объясняются прецессирующей однорукавной волной плотности (Okazaki, 1997). Однако многие Be-звёзды находятся в двойных системах, и некоторые из них демонстрируют переменность V/R, синхронизированную по фазе с орбитальным периодом. Примерами служат 4 Hercules (Koubský et al., 1997), π Aquarii (Bjorkman et al., 2002) и κ Draconis (Saad et al., 2005). Эти случаи не могут быть описаны моделью прецессии Okazaki, 1997 и предполагают прямое гравитационное влияние компаньона.

Если переменность V/R синхронизирована с орбитальным периодом, асимметрия, вероятно, обусловлена приливными или радиационными эффектами, а не естественной структурой диска. Традиционная спектроскопия позволяет отслеживать эти изменения и устанавливать ограничения на кинематику диска, но не позволяет изолировать лежащую в основе геометрию излучения. Гидродинамические модели могут моделировать структуру, но требуют больших вычислительных затрат и являются вырожденными. Доплеровская томография предлагает прямую, основанную на данных альтернативу.

Доплеровская томография, разработанная Маршем и Хорном (1988), реконструирует двумерную карту излучения в пространстве скоростей,

используя спектры с фазовым разрешением. Она отображает области излучения линий во вращающейся системе отсчета. Метод реконструирует полный спектральный временной ряд как распределение излучения в пространстве скоростей и не требует вычислительных затрат физического моделирования. Учитывая известные орбитальные параметры, томография эффективна и проста.

Первым применением томографии к классической Be-звезде была π Aquarii (Zharikov et al., 2013), двойная звезда с 84-дневной орбитой. На основе более 40 орбитальных циклов спектров Hα была построена томограмма, показывающая асимметричное эмиссионное кольцо с ярким пятном. Периодичность V/R совпала с орбитальным периодом (~84,2 дня), что доказывает орбитальную синхронизацию асимметрии. Это подтвердило, что усиление плотности вращается вместе с компаньоном, а не прецессирует свободно.

В данной работе метод был распространён на другие двойные Be-системы. В κ Draconis (P = 61,55 дня) наша томография выявила область эмиссии, соответствующую области повышенной плотности вещества в диске, которое обуславливает осцилляции V/R. Десятилетний мониторинг показал, что осцилляции V/R оставались фазово-синхронизированы с орбитальным периодом даже после того, как диск диссипировал и практически исчез. Наш анализ (Gabitova et al., 2024) также реконструировал изображения диска во время диссипации, показывая, как томография может отслеживать изменения структуры диска с течением времени.

HD 698 (V742 Cassiopeia), 56-дневная двойная Be-система, ранее предполагалась как содержащая черную дыру. Интерферометрические измерения (Rivinius et al., 2025) показали, что, вероятно, имеется компаньон с содранной оболочкой, в стадии расширения. Томография была применена в данной диссертационной работе для исследования возможных возмущений диска, вызванных компаньоном. Результаты показывают наличие уникального дополнительного источника эмиссии, движущегося со скоростями, связанными с компаньоном, и, после его удаления, предположительно двухрукавную структуру, так же движущуюся с орбитальным периодом.

Доплеровская томография позволяет осуществлять независимое от модели обнаружение и характеристику асимметрии диска в двойных звездах Be. В отличие от теоретических моделей, она реконструирует эмиссионные структуры исключительно на основе спектральных данных, без предположений о плотности диска или модах возмущений. Результаты томографии по своей природе не могут противоречить наблюдениям и требуют минимальных вычислений.

Томография позволяет эффективно локализовать области излучения и идентифицировать структуры, движущиеся с орбитальным периодом. В системе π Aquarii (Zharikov et al., 2013) томограмма подтвердила роль компаньона в формировании диска. В системах κ Draconis и HD 698 наши

карты демонстрируют чёткие признаки возмущений, вызванных компаньонами.

Эти результаты подтверждают, что воздействие компаньонов может играть важную роль в формировании структуры диска в двойных Be-системах. Продемонстрировано, что диски сохраняют следы как прошлых, так и текущих взаимодействий с компаньоном. Томография объединяет теорию и наблюдения, показывая, как структуры дисков эволюционируют и реагируют на динамику двойных звёзд.

Подводя итог, можно сказать, что доплеровская томография является полезным инструментом для картирования околозвёздных дисков в двойных Be-звёздах. Она дополняет другие методы и позволяет проводить статистические сравнения между системами. По мере изучения большего количества двойных звёзд понимание поведения дисков углубляется, особенно в контексте эволюции двойных Be-звёзд.

Целью работы является определение взаимосвязи компаньона и диска в двойных Be-звёздах путем проверки фазовой синхронизации V/R, уточнения орбитальных/геометрических параметров и визуализации структуры вещества в пространстве скоростей.

Задачи исследования

1. Измерить отношение V/R в соответствующих спектральных линиях и установить его связь с орбитальным движением.
2. Определить фундаментальные параметры исследуемых систем, моделируя кривые лучевых скоростей и профили линий.
3. Построить и интерпретировать доплеровские томограммы для выявления и характеристики дисковых структур, находящихся под влиянием звезды-компаньона.

Объекты исследования: Be-звёзды κ Draconis и HD 698

Методы исследования:

1. Обработка эшелле-спектров с использованием пакета IRAF и скриптов Python (как находящихся в публичном доступе, так и написанных самостоятельно).
2. Измерение спектральных характеристик линий поглощения путем кросс-корреляции выбранных областей с шаблонами, оценка неопределенностей по ширине пика корреляции с помощью R-статистики Тонри–Дэвиса.
3. Измерение спектральных характеристик линий испускания с помощью метода двойных гауссовых крыльев или метода биссектрисы.
4. Поиск периодичностей в рядах RV и V/R с помощью методов Ломба–Скаргла и фазовой дисперсии, а также свёртывание по орбитальным фазам.
5. Моделирование кривых RV для определения орбитальных параметров.
6. Моделирование и вычитание компонентов линий в виде гауссиан с допплеровским смещением для выделения основного профиля линии.
7. Реконструкция допплеровских томограмм методом максимизации энтропии (программа dopmap).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В объекте к Draconis фазовая синхронизация отношения пиков линии Hα (V/R) с орбитальным периодом вызвана влиянием звезды-компаньона на околозвёздный диск, на протяжении всего периода диссипации диска, от максимальной интенсивности до полного исчезновения.

2. По результатам доплеровской томографии, данное фазо-синхронизированное отношение пиков возникает в яркой излучающей области во внешнем диске, всегда обращённой к звезде-компаньону. Эта область существует в результате приливного или радиационного воздействия звезды-компаньона и не исчезает даже на поздних стадиях диссипации диска, когда радиус диска уменьшается с ~64 $R_{\odot}$ до ~30 $R_{\odot}$.

3. В объекте HD 698 центральный пик эмиссии в профиле линии Hα связан не с околозвездный диском, а с дополнительным источником излучения, движущимся на скоростях, близких к скоростям звезды-компаньона, которая имеет динамическую массу 1.1±0.2 $M_{\odot}$.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые через допплеровские томограммы исследовано полное событие диссипации диска Be-звезды к Draconis.

2. Впервые идентифицирован и кинематически описан центральный компонент эмиссии Hα, движущийся вместе с компаньоном в системе HD 698.

3. Первые прямые, самосогласованные ограничения на массу компаньона в системе HD 698 (RV, томография), которые отвергают ранее предложенный для этой системы сценарий черной дыры и вместо этого подтверждают гипотезу о раздутом компаньоне с содранной оболочкой.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты показывают, что компаньоны Be-звезд являются движущей силой неосесимметричной структуры околозвёздных дисков Be-звезд. Установлена связь переменности V/R с фазой орбиты и картирован участок диска, обращенный к компаньону, с помощью доплеровской томографии, тем самым позволяя наложить ограничения на сценарии усечения диска, изменения структуры и воздействия потока в рамках кеплеровской модели. На практике работа предлагает воспроизводимую методику, включающую стандартизированные измерения линий, анализ периодических сигналов, фазо-разрешенную томографию и, опционально, целенаправленное вычитание компонентов линий, связанных с дополнительным излучением, с документированными параметрами, которые делают этот подход применимым к другим двойным звездам Be.

Личный вклад автора

Результаты исследования получены лично кандидатом. Постановка целей и задач, а также проведение исследования курировались научными руководителями. Вклад в публикации указан в разделе «Вклад авторов» в конце каждой публикации.

Достоверность результатов

Надежность результатов обеспечивается спектроскопией с калиброванными центральными длинами волн, выполненной в разные даты на разных инструментах; воспроизводимостью измерений RV и V/R; обнаружением одного и того же орбитального периода в сериях RV и V/R; последовательными результатами, которые согласуются с предыдущими исследованиями; геометрической и кинематической согласованностью отображенных структур с динамикой двойных звезд; тестами на соответствие диапазону параметров и на проверку альтернативных сценариев; и полным документированием эфемерид, окон измерений и настроек допплеровской реконструкции, позволяющим точно воспроизводить полученные графики.

Публикации

Основные результаты были опубликованы в 3 научных статьях, из них:

Статьи с высоким импакт-фактором по базе данных Thomson Reuters или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:

1. **Gabitova I. A.**, Zharikov S. V., Miroshnichenko A. S., Carciofi A., Khokhlov A. A., Agishev A., and Prendergast P. Doppler Tomography of the Be Star HD 698 //Galaxies. – 2025. – Vol. 13. – № 4. DOI: 10.3390/galaxies13040080. (**Journal Impact Factor – 3.8, WoS – Q2, Scopus – 74**)

2. **Gabitova I. A.**, Miroshnichenko A. S., Zharikov S. V., Amantayeva A., and Khokhlov S. A. Doppler Tomography of the Circumstellar Disk of the Be Star κ Draconis //Galaxies. – 2024. – Vol.12. – №3. DOI: 10.3390/galaxies12030023. (**Journal Impact Factor – 3.8, WoS – Q2, Scopus – 74**)

3. Miroshnichenko A. S., Chari R., Danford S., Prendergast P., Aarnio A. N., Andronov I. L., Chinarova L. L., Lytle A., Amantayeva A., **Gabitova I. A.**, Vaidman N. L., Baktybayev S. S., and Khokhlov S. A. Searching for Phase-Locked Variations of the Emission-Line Profiles in Binary Be Stars //Galaxies. – 2023. – Vol.11. – №4. DOI: 10.3390/galaxies11040083. (**Journal Impact Factor – 3.2, WoS – Q2, Scopus – 66**)

Апробация работы

Результаты, полученные в данной работе, докладывались и обсуждались:

– на международной научной конференции «Hot Stars: Life with Circumstellar Matter» (2024 г. Алматы, Казахстан);

– на 23-й Гамовской международной конференции по астрономии «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Astroparticle Physics, Radioastronomy, Astrobiology and Genetics» (2023 г. Одесса, Украина).

Связь темы исследовательской работы с планами научных работ

Исследовательская работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан «Грантовое финансирование научных исследований» по теме: «AP23484898 – Разработка современной методики определения фундаментальных параметров Галактических горячих сверхгигантов».