

На правах рукописи

Шульман Сергей Георгиевич

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТМЕНИЙ
ЗВЁЗД ТИПА UX ORI**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

**Научный
руководитель**

Гринин Владимир Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник, и.о. заведующего
Лабораторией звездообразования ГАО РАН

**Официальные
оппоненты**

Ламзин Сергей Анатольевич,
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник, Государственный
астрономический институт имени П.К. Штернберга
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Павлюченков Ярослав Николаевич,
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Институт
астрономии Российской академии наук»

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Крымская астрофизическая
обсерватория Российской академии наук»

Защита состоится 16 октября 2020 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (www.gaoran.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к. ф.-м. н.,
Булига Станислава Дмитриевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Молодые звёзды являются весьма интересными объектами для исследований. В окружающих их околозвёздных дисках протекают различные физические процессы, изучение которых даёт важную информацию о формировании звёзд и планетных систем, взаимодействии околозвёздного вещества с излучением и магнитными полями.

Среди молодых звёзд выделяют несколько классов объектов: звёзды типа Т Тельца, Ae/Be Хербига, объекты Хербига-Аро, которые демонстрируют различные виды переменности [4]. Звёзды Ae/Be Хербига имеют массы от $2M_{\odot}$ до $8M_{\odot}$ и относятся к спектральным классам А и В. Среди звёзд Ae/Be Хербига в отдельный класс выделяют звёзды типа UX Ori, у которых наблюдаются алголеподобные падения блеска, достигающие 4^m . Многолетний поляриметрический мониторинг звёзд типа UX Ori показал, что глубокие падения блеска обычно сопровождаются поворотом цветового трека в минимумах блеска (т.н. эффект “поголубения”) и повышением степени линейной поляризации до 5–8%, а звёзды типа UX Ori наблюдаются при небольшом наклоне луча зрения к околозвёздным дискам [2].

В. П. Гринин [14] предложил модель этого явления: при экранировании звезды компактным газопылевым облаком интенсивность прямого неполяризованного излучения звезды уменьшается, а рассеянное облаком излучение не вносит существенного вклада в излучение системы. В результате растёт вклад рассеянного диском излучения и возрастает степень поляризации системы. Для классической модели расширяющегося (flared) диска подобные затмения компактным облаком были подробно исследованы в работе [5]. Многолетние наблюдения звёзд типа UX Ori показали, что такая модель хорошо описывает большинство наблюдаемых затмений.

Тем не менее, ряд наблюдаемых особенностей затмений не вполне соответствует описанной выше простой модели. Изменения степени поляризации звезды могут существенно различаться во время разных затмений [16]. Во время затмения может не наблюдаться заметного роста линейной поляризации [17]. В разных спектральных полосах позиционный угол линейной поляризации может быть ориентирован в разных направлениях [7]. Затмение звезды может проходить без её покраснения. После некоторых глубоких минимумов блеска звёзд типа UX Ori наблюдались существенные отклонения позиционного угла линейной поляризации, достигавшие 60° [3, 15]. В. П. Гринин [1] при объяснении наблюдаемого разброса параметров поляризации звёзд типа UX Ori на диаграмме поляризация/блеск на качественном уровне рассматривал возможные причины таких отклонений позиционного угла поляризации. Обсуждалась возможность затмения звезды протяжённым пылевым экраном, который обладает заметным рас-

сеянным излучением и, двигаясь вокруг звезды, затмевает не только саму звезду, но и части околозвёздного диска. В результате чего поляризация диска заметно меняется.

Следует отметить, что Natta et. al [6] показали, что избытки излучения звёзд Ae/Be Хербига в инфракрасной области спектра невозможно объяснить с использованием модели flared диска. В качестве альтернативы была предложена модель диска с утолщённой внутренней областью в зоне сублимации пыли. Расчет поляризации рассеянного излучения и моделирование затмений звёзд типа UX Ori для такой модели диска до сих пор не проводились.

Накопленный объём наблюдательных данных, не укладывающихся в рассмотренную ранее модель затмений, и уточнение теоретических представлений о структуре околозвёздных дисков делают актуальными дальнейшие теоретические исследования затмений звёзд типа UX Ori. Можно выделить две важные задачи: моделирование затмений компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с утолщением в центральных областях, и моделирование затмения крупномасштабной структурой в околозвёздном диске.

В первой задаче диск можно считать симметричным, вторая задача предполагает довольно сложную геометрию, что приводит нас к ещё одной актуальной задаче: эффективной организации вычислительного процесса для решения задач переноса излучения в средах со сложной геометрией. В настоящее время задачи со сложной трёхмерной геометрией моделируются методом Монте-Карло. Для него существует много модификаций и оптимизаций, делающих его весьма универсальным и эффективным. Подробное описание метода можно найти в обзорах [10, 12]. Тем не менее, не смотря на большие успехи, достигнутые в моделировании переноса излучения, вычислительные методы для данной задачи можно совершенствовать и дальше. А полученные более эффективные подходы применять как для переноса излучения в околозвёздных дисках, так и при решении других астрофизических задач.

Цель работы

Основной целью данной работы является исследование затмений звёзд типа UX Ori для объяснения наблюдаемых отклонений от существующей модели затмений. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка нового метода моделирования переноса излучения в околозвёздных дисках и реализация его в виде программы.
2. Тестирование предложенного метода, сравнение его точности и эффективности с методом Монте-Карло.

3. Моделирование затмений компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с утолщением в зоне сублимации пыли. Исследование зависимости степени линейной поляризации от изменений блеска для разных положений наблюдателя, параметров диска и дискового ветра, создающего утолщение в центральных областях диска.
4. Моделирование затмений звезды крупномасштабным возмущением диска, проведение оценки получаемых в данном случае степени линейной поляризации в минимуме блеска и амплитуды отклонений позиционного угла поляризации после прохождения минимума блеска.

Научная новизна

1. Предложен **новый** алгоритм моделирования переноса излучения в околосвёздной среде, позволяющий более эффективно, чем широко используемый метод Монте-Карло, организовать вычисления излучения от точечного источника. Для учёта кратных рассеяний предлагается комбинировать предложенный метод с методом Монте-Карло. В результате в ряде задач выигрыш по скорости вычислений может достигать одного-двух порядков. Метод протестирован для задач с различной геометрией: околосвёздных дисков, оболочек и фрактальных структур.
2. **Впервые** проведено моделирование затмений компактным пылевым экраном звезды типа UX Ori, окруженной диском с утолщением в зоне сублимации пыли. Получен ряд качественных отличий от модели затмения звезды с тонким диском. Эти отличия позволяют объяснить некоторые особенности поляризации звёзд типа UX Ori, которые нельзя было получить в модели с тонким диском.
3. **Впервые** рассчитаны модели затмения звезды крупномасштабным возмущением околосвёздного диска. Показано, что звезда с утолщённым в центральных областях диском в такой модели может иметь затмения, сопровождающиеся существенными изменениями позиционного угла собственной линейной поляризации после прохождения минимума блеска.

Практическая значимость

Впервые решены задачи о затмениях компактным пылевым облаком и крупномасштабным возмущением диска звезды, окруженной диском с утолщением в зоне сублимации пыли. Полученные теоретические результаты могут быть использованы при изучении строения внутренних областей

дисков звёзд типа UX Ori. Часть результатов также может быть применена и к звёздам типа Т Тельца. Предложенный для решения этих задач численный метод может быть использован для моделирования переноса излучения в различных задачах, где необходимы трёхмерные модели излучающих областей.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах кафедры астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета, Объединенном семинаре научных подразделений Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, а также на следующих конференциях:

1. VI Пулковская молодежная астрономическая конференция, 6–8 июня 2016, ГАО РАН, Санкт-Петербург
2. Международная молодежная конференция “Физика.СПб”, 1–3 ноября 2016, ФТИ, Санкт-Петербург
3. VII Пулковская молодежная астрономическая конференция, 28–31 мая 2018, ГАО РАН, Санкт-Петербург
4. Международная конференция “Звезды, планеты и их магнитные поля”, 17–21 сентября 2018, СПбГУ, Санкт-Петербург
5. The 2nd international Workshop “The UX Ori type stars and related topics”, September 30 – October 4, 2019, St. Petersburg

Личный вклад автора диссертации

Автор предложил и реализовал в виде вычислительной программы новый метод моделирования процесса переноса излучения, изложенный во второй главе. В главах 3 и 4 автором произведен подбор параметров и расчёт всех рассмотренных моделей; совместно с научным руководителем В. П. Грининым проведён анализ и интерпретация полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации 120 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 112 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность работы и ставятся её основные цели. Описывается научная новизна работы, перечисляются выносимые на защиту результаты, публикации с основными результатами и конференции и семинары, на которых проводилась апробация работы. Также указывается личный вклад автора и кратко рассматривается структура диссертации.

В **первой главе** даётся краткий обзор физических свойств молодых звёзд и их переменности, обсуждаются результаты наблюдений и моделирования затмений звёзд типа UX Ori. Обсуждаются современные представления о строении околозвёздных дисков и методах моделирования переноса излучения.

В *разделе 1.1* приводятся классификации молодых звёзд и механизмов их переменности. Обсуждаются различные причины переменности молодых звёзд: вращение холодных пятен на поверхности звезды, движение горячих аккреционных пятен по поверхности классических звёзд типа Т Тельца и затмения звёзд непрозрачными газопылевыми облаками. Описываются характерные особенности затмений (ослабление блеска до 4^m , эффект “поголубения” и рост степени поляризации). Указываются некоторые возможные причины для изменения экстинкции на луче зрения и отмечаются некоторые объекты с необычными особенностями затмений.

В *разделе 1.2* описывается модель затмения звезды компактным газопылевым облаком и полученные для неё модельные графики затмений для случая звезды, окружённой flared диском. Обсуждаются различия между наблюдаемыми затмениями и получаемыми в данной модели. Рассматриваются более современные модели околозвёздных дисков. Описываются затмения звёзд UX Ori и WW Vul с последующими отклонениями позиционного угла поляризации до 60° . На качественном уровне рассматриваются размеры поглощающего экрана, способного вызвать такой эффект, и обсуждаются возможные физические причины возникновения крупномасштабного возмущения околозвёздного диска, способного играть роль такого экрана.

Раздел 1.3 посвящён моделям околозвёздных дисков, в частности утолщению диска в зоне сублимации пыли. Обсуждается как возможность явного задания стенки на внутренней границе диска, так и возникновение

утолщения из-за дискового ветра. Упомянуты некоторые работы, посвящённые важным свойствам дискового ветра.

В *разделе 1.4* перечисляются разные методы решения задач переноса излучения. Отмечаются удобства метода Монте-Карло, благодаря которым он стал наиболее популярен для решения задач со сложной трёхмерной геометрией вещества. Упомянуты примеры реализующих метод Монте-Карло программ, и обсуждаются существующие подходы к построению сеток, используемых для аппроксимации пространственного распределения вещества.

Вторая глава посвящена предложенному автором методу численного решения задач переноса излучения, названному методом перебора по сетке направлений (DGEM).

В *разделе 2.1* изложена основная концепция метода, которая заключается в более эффективном методе выбора моделируемых пучков фотонов, по сравнению со случайным. Для этого вводится дискретизация всех параметров пучков фотонов: частоты, направления распространения и оптической толщины, пройдя которую пучки фотонов рассеются. Каждому пучку фотонов присваивается статистический вес, определяемый из известных распределений вероятности его возникновения (полученных на основе теоретических индикатрис рассеяния и закона рассеяния). Такой подход к моделированию должен дать следующие преимущества над методом Монте-Карло: пропадает необходимость в наборе статистики случайных реализаций для уменьшения случайного шума; мы можем моделировать пучки фотонов, используя информацию о близких по параметрам реализациях; можно легко получить число многократных рассеяний, большее чем число однократных, и повысить точность их моделирования.

Рассматриваются возможные сетки для разных параметров пучков фотонов. Для частоты можно использовать равномерную сетку. Для того чтобы статистические веса всех рассеявшихся в данном направлении пучков были равны между собой, для оптической толщины хорошо взять логарифмическую сетку. Для направления распространения вводится сетка направлений, полученная разбиением сферы на основе правильного икосаэдра. Итоговые направления в сетке идут из центра сферы в барицентры треугольников. Указывается, что разбиение треугольников икосаэдра на меньшие треугольники приводит к неоднородности площадей новых треугольников, которую надо компенсировать дополнительными коэффициентами. Упомянуты другие способы разбиения сферы.

В *разделе 2.2* приводится пример первого применения данного подхода для задачи с тонким слоем поглощающего вещества. Рассматривается возникновение дискретных абсорбционных компонент линий D Na I в спектре молодой звезды RZ Psc. Дискретная переменная структура абсорбционных компонент без признаков эмиссии в линиях D Na I говорит о сильной анизотропии истечения и большой скважности. Было проведено модели-

рование рассеяния в образующей спираль струе отбрасываемого от звезды вещества. Моделирование показало, что такая модель даёт периодичные абсорбционные компоненты, в то время как наблюдаемые абсорбционные линии не имеют периода. Эта особенность вполне объяснима нестабильностью аккреции и истечения вещества, свойственной звёздам на данной стадии эволюции и наблюдаемой у RZ Psc. Полученная в модели интенсивность рассеянного спиралью излучения оказалась на три порядка ниже интенсивности континуума, что согласуется с отсутствием эмиссии в изучаемой линии на наблюдаемых спектрах.

В *разделе 2.3* рассматривается реализация метода для протяжённых поглощающих оболочек. Кратко рассматриваются основные физические соотношения, лежащие в основе решения задач переноса излучения путём моделирования отдельных пучков фотонов. Приводятся формулы для получения оптической толщины вдоль пути распространения фотона, вектора Стокса после рассеяния и коэффициентов матрицы Мюллера. Для рассеяния на пыли используется индикатриса Хенли-Гринштейна с аппроксимацией для поляризованного излучения [11].

Обсуждается процесс испускания и рассеяния пучков фотонов в методе Монте-Карло, отмечается существенно повышающая уровень сигнала к шуму техника “peel-off” [13] и описывается регистрация пучков фотонов для получения модельного изображения.

Последняя часть раздела посвящена испусканию и рассеянию пучков фотонов в предложенном методе. Приводятся формулы для вычислительных весов источников излучения, направлений в сетке и пучков фотонов, распространяющихся в данном направлении. Для каждого из распространяющихся в данном направлении пучков фотонов рассчитывается оптическая толщина, пройдя которую он рассеется. Подробно описывается рассеяние пучка фотонов, при котором он разделяется на пучок фотонов в сторону наблюдателя (“peel-off”) и распространяющиеся в разных направлениях сетки пучки рассеявшихся фотонов. Статистические веса последних определяются с учётом индикатрисы рассеяния так, чтобы при каждом рассеянии выполнялся закон сохранения энергии.

Раздел 2.4 посвящён анализу эффективности метода. В нём вводятся абсолютная и относительная нормы разности изображений для сравнения точности получаемых результатов. В разделе рассматривается flared диск и моделируется рассеянное им излучение. Продемонстрировано, что метод Монте-Карло даёт случайный шум, а результат, полученный методом перебора по сетке направлений, — показывает особенности, связанные со структурой сетки. При увеличении числа фотонов и детализации сетки такие особенности пропадают в обоих методах.

Отмечается, что метод перебора по сетке направлений для однократных рассеяний имеет два явных параметра, количество направлений в сетке (N_d) и количество пучков фотонов, распространяющихся в каждом из

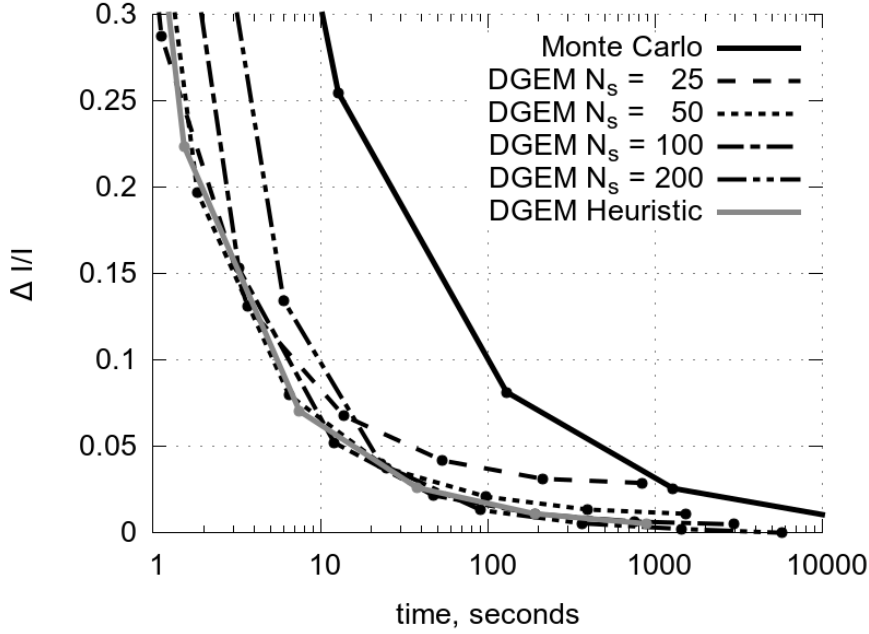


Рис. 1: Отклонения результатов от наиболее качественного результата в зависимости от времени. Результаты получены методом Монте-Карло с разным количеством пучков фотонов (от 10^5 до 10^{10}) и DGEM с разными значениями параметра N_d при фиксированных значениях параметра N_s . Линия *Heuristic* соответствует решению DGEM с оптимальным соотношением параметров.

направлений (N_s), в то время как у метода Монте-Карло есть только один такой параметр — число фотонов. Показывается, что для задачи с известной геометрией существует оптимальное соотношение параметров дискретизации, при котором метод перебора по сетке направлений оказывается заметно эффективней метода Монте-Карло. На рис. 1 показаны зависимости ошибки получаемых результатов от времени моделирования для метода Монте-Карло и DGEM с разными параметрами N_s .

Для многократных рассеяний рассматриваются различные вариации DGEM и его комбинация с методом Монте-Карло. Показано, что с учётом уменьшения вклада многократных рассеяний в результат, наиболее эффективно использовать DGEM для первых рассеяний и метод Монте-Карло для последующих.

В *разделе 2.5* кратко описываются преимущества тетраэдральных сеток на основе триангуляции Делоне: возможность получать сгущения сетки в наиболее важных областях и легко аппроксимировать заданные в узлах значения для любой точки исследуемой области.

В *разделе 2.6* подводятся итоги второй главы.

В **третьей главе** изучаются затмения компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с утолщением в зоне сублимации пыли.

В *разделе 3.1* описывается рассматриваемая задача о затмении звезды компактным газопылевым облаком и кратко упоминаются возможные при-

чины и модели утолщения диска в зоне сублимации пыли. Обсуждаются параметры исследуемой звезды, параметры пыли, модель flared диска и модель дискового ветра [8, 9], используемая для создания утолщения диска.

В работе Safier [9] представлены аналитические аппроксимации для нескольких моделей ветра, которые позволяют нам легко их использовать при описании пространственного распределения вещества. Формулы и таблицы параметров для аппроксимации ветра также приведены в данном разделе. Важно отметить, что плотность ветра пропорциональна темпу истечения вещества.

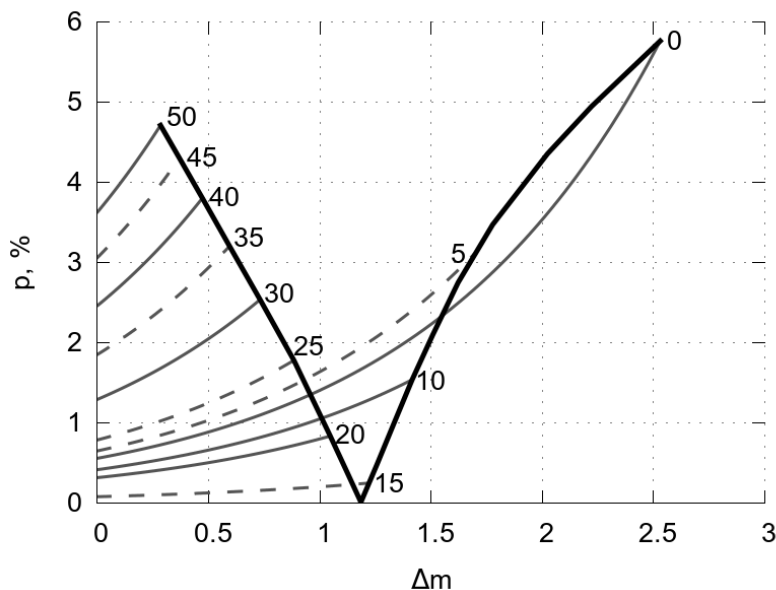


Рис. 2: Зависимость степени линейной поляризации в полосе V от изменения звездной величины, вызванного экраном с увеличивающейся оптической толщиной. Рядом с графиком каждого из затмений подписан темп истечения вещества в единицах $10^{-9} M_{\odot}$ в год. Излом огибающей соответствует изменению позиционного угла линейной поляризации на 90° .

Раздел 3.2 посвящён результатам моделирования затмений компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с дисковым ветром. В первую очередь мы рассмотрели зависимость поляризации от темпа истечения вещества, который мы варьировали от 10^{-9} до $5 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$ в год. Моделирование показало, что при низком темпе истечения вещества (и плотности ветра) степень поляризации во время затмения получается выше, чем у диска без ветра. При дальнейшем увеличении темпа истечения вещества степень поляризации убывает до нуля. В такой ситуации поляризация излучения не меняется во время затмения. После этого рост темпа истечения вещества приводит к росту степени линейной поляризации, но диск оказывается поляризован вдоль своей плоскости, а не перпендикулярно ей. Чем выше темп истечения вещества, тем менее глубокие затмения возможны, поскольку плотный дисковый ветер сам частично закрывает звезду от наблюдателя. Такое поведение показано на рис. 2.

Моделирование показало, что общий характер зависимости сохраняется при использовании различных моделей дискового ветра, разных положениях наблюдателя и параметрах диска.

На рис. 3 показана зависимость степени поляризации в разных фотометрических полосах от ослабления блеска в полосе V для разных темпов истечения вещества. На графиках (d) и (e) присутствуют разрывы, соответствующие повороту плоскости линейной поляризации системы. Коэффициент поглощения пыли уменьшается с увеличением длины волны, как следствие, наиболее оптически плотный ветер получается в спектральной полосе U. Позиционный угол поляризации в полосе U меняется раньше, чем в полосах B, V, R и I, таким образом дисковый ветер может приводить к различным ориентациям плоскости линейной поляризации в разных фотометрических полосах.

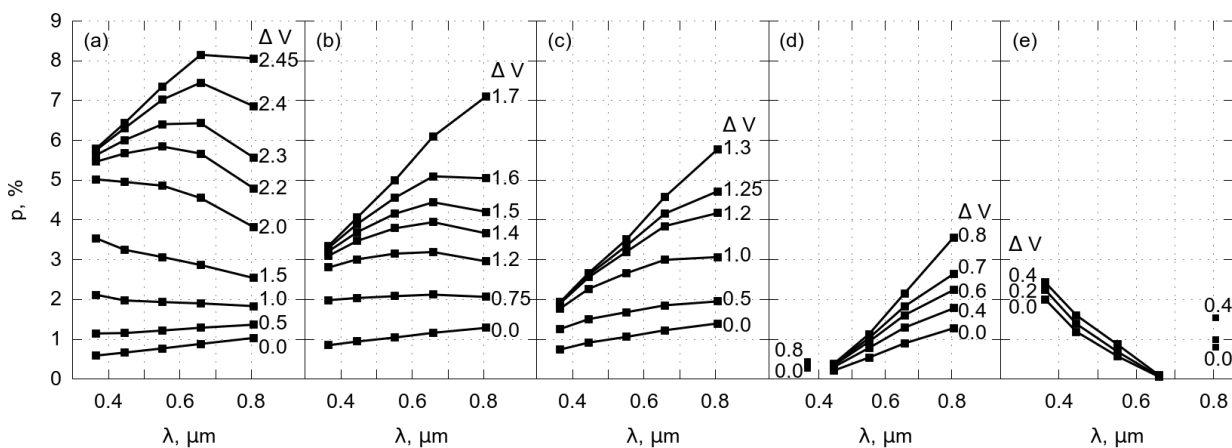


Рис. 3: Степень линейной поляризации излучения диска в разных полосах фотометрической системы UBVRI. На каждом графике приведено несколько линий, соответствующих разным ослаблениям блеска системы в полосе V. На графике (a) показаны результаты для диска без ветра, на остальных графиках даны результаты для моделей с плотностью ветра, соответствующей темпу истечения вещества $5 \cdot 10^{-9}$ (b), 10^{-8} (c), $2 \cdot 10^{-8}$ (d) и $3 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$ в год (e). Разрывы на графиках соответствуют повороту плоскости линейной поляризации.

Утолщение диска также влияет на показатели цвета звезды. Рис. 4 демонстрирует изменения показателей цвета для пяти моделей диска: без дискового ветра и с ветром разной плотности. Затмения в моделях с ветром получаются менее глубокими, потому что дисковый ветер частично поглощает излучения звезды. Все показатели цвета в моделях диска с ветром отклоняются в меньшую сторону быстрее, чем для случая с ветром. Возможна ситуация, когда во время затмения покраснения звезды не будет, а поглубение звезды может быть сильнее, чем в модели без ветра. При изменении плотности ветра, мы можем получать разброс показателей цвета при одной и той же глубине затмения.

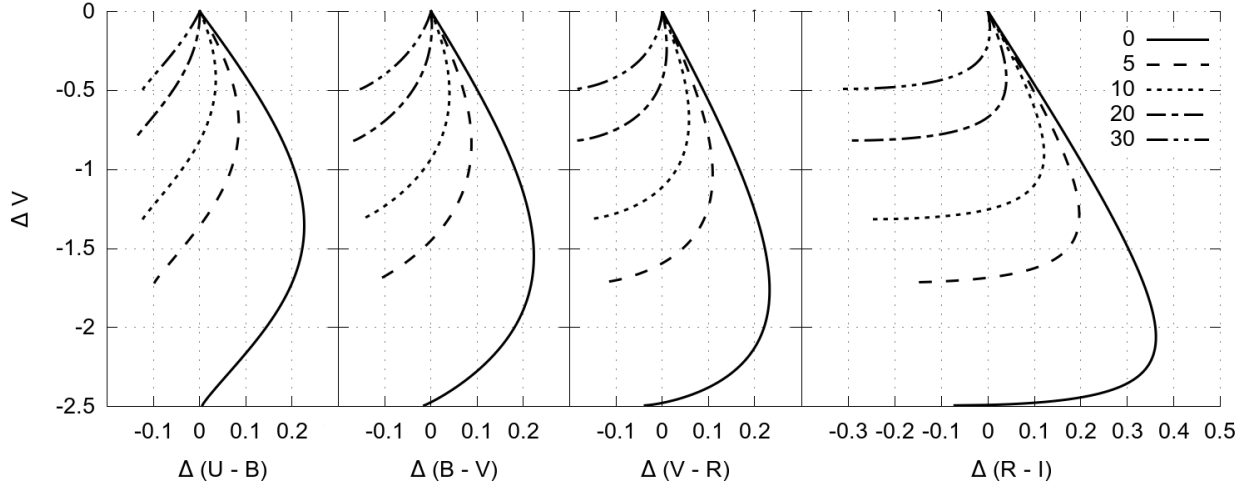


Рис. 4: Изменения показателя цвета во время затмений для моделей дисков с разной плотностью дискового ветра. На графиках подписан темп истечения вещества, задающий плотность ветра, в единицах $10^{-9} M_{\odot}$ в год.

В *разделе 3.3* кратко исследуется затмение звезды дисковым ветром. Плотность дискового ветра связана с темпом истечения вещества, который обычно полагается для молодых звёзд на порядок меньше, чем темп аккреции, который обладает известной нестабильностью. Можно рассчитывать, что плотность дискового ветра меняется со временем, из-за чего меняется оптическая толщина вещества на луче зрения и возникает переменность блеска звезды.

Мы показали, что увеличение плотности дискового ветра может приводить к небольшому росту степени линейной поляризации, её уменьшению до нуля, изменению ориентации позиционной плоскости и дальнейшему росту степени линейной поляризации. До изменения позиционного угла степень линейной поляризации невелика и составляет порядка 1%, после изменения позиционного угла она может расти до 2–8%, в зависимости от параметров диска, модели ветра и положения наблюдателя.

Если дисковый ветер изначально достаточно плотный, плоскость поляризации может быть изначально повернутой вдоль диска, тогда при увеличении плотности ветра степень поляризации будет монотонно расти.

В *разделе 3.4* обсуждаются полученные в главе результаты. Проводится сравнение полученных в модели с утолщённым диском особенностей затмений с наблюдениями: разной ориентацией плоскости линейной поляризации в разных фотометрических полосах, падении блеска без роста степени линейной поляризации, большом разбросе наблюдаемых при одном и том же уровне блеска параметров поляризации и затмении без покраснения звезды (преимущественно в коротковолновой области спектра).

Отмечается, что в главе рассматривалась звезда Ae Хербига, тем не менее у классических звёзд типа Т Тельца также присутствует запылённый дисковый ветер. В результате рассмотренная выше модель может быть

применима и к классическим звёздам типа Т Тельца.

В **четвёртой главе** моделируются глубокие и продолжительные минимумы звёзд UX Ori и WW Vul, сопровождавшиеся сильными изменениями позиционного угла поляризации после прохождения минимума блеска.

В *разделе 4.1* приводятся кривые блеска и параметры поляризации изучаемых затмений UX Ori и WW Vul.

В *разделе 4.2* описывается используемая модель возмущённого диска. Приводятся параметры диска UX Ori и оценки темпа аккреции для рассматриваемых звёзд.

Мы рассматриваем простую модель возмущения диска, основанную на усложнении формулы для высоты диска. В неё добавляется слагаемое, на основе двумерной гауссианы описывающее локальное увеличение высоты диска. В итоге получается гладкое возмущение, описываемое тремя параметрами, характеризующими расстояние от звезды, протяжённость возмущения и его высоту.

Кроме возмущённого диска без ветра, мы рассмотрели диск с возмущённым дисковым ветром. Поскольку ветер описывает распределение плотности во внешних слоях диска, для диска с ветром мы использовали только возмущение ветра. Для плотности ветра использовалась аналогичная основанная на гауссиане формула, задающая локальное увеличение плотности.

Раздел 4.3 посвящён результатам моделирования затмений крупномасштабным возмущением диска. Сначала рассматривается возмущённый диск без ветра, изучаются изменения блеска, степени поляризации и позиционной плоскости поляризации во время движения возмущения вокруг звезды. Отмечается, что поляризация максимальна в минимуме блеска, выходит на низкий уровень после прохождения минимума блеска, а затем немного возрастает за счёт рассеянного возмущением излучения, когда возмущение находится за звездой.

В зависимости от протяжённости возмущения и расстояния от его центра до звезды, за время полуоборота возмущения вокруг звезды возможны отклонения позиционного угла поляризации как в одну сторону, так и в разные.

Мы рассмотрели очень сильные возмущения диска, но во всех случаях отклонения позиционного угла не превосходили 10° , что существенно меньше наблюдаемых отклонений до 60° .

В случае диска с возмущённым дисковым ветром можно добиться существенно больших изменений позиционного угла плоскости линейной поляризации. Получаемые отклонения зависят от модели дискового ветра, модели возмущения, темпа истечения вещества и фотометрической полосы. Для тонкого диска, излучение которого поляризовано перпендикулярно его плоскости, можно добиться изменений позиционного угла до 60° . Когда дисковый ветер настолько плотный, что излучение диска становится поляризовано вдоль его плоскости, возможны изменения позиционного уг-

ла до 30° (см. рис. 5). Отдельно следует отметить, что для диска с плотным ветром максимальная степень поляризации системы достигается не в минимуме блеска, а после его прохождения.

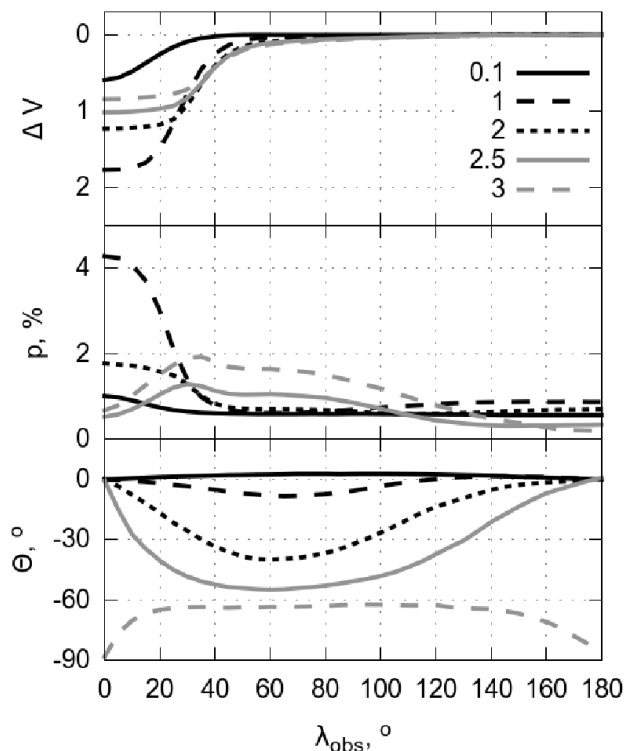


Рис. 5: Зависимости блеска системы (верхний график), степени поляризации излучения (средний график) и угла поляризации (нижний график) в спектральной полосе V от угла между направлениями на наблюдателя и центр возмущения (λ_{obs}) для диска с возмущённым ветром с различными темпами истечения вещества. В подписях к линиям указан темп истечения вещества в единицах $10^{-8} M_{\odot}$ в год.

В *разделе 4.4* отмечается, что среди модельных графиков есть затмения со степенью поляризации в минимуме блеска до 8% и есть затмения с отклонениями позиционного угла линейной поляризации до 60° . При этом одновременно и то, и другое в рамках одной модели получить нельзя. Это является существенным отличием от результатов наблюдений.

Мы рассмотрели большое количество моделей затмений, варьируя параметры возмущения в широком диапазоне, и получили, что, чем больше степень поляризации в минимуме блеска, тем меньше получается изменение позиционного угла. Этот эффект объясняется тем, что для высокой степени поляризации в минимуме блеска нужен тонкий сильно поляризованный диск, а для больших изменений позиционного угла диск должен быть утолщённым и менее поляризованным.

В *разделе 4.5* исследуется модель затмения в системе с переменным темпом истечения вещества. Мы рассматривали модель ветра, дающую наибольшие изменения позиционного угла поляризации. При низком темпе истечения вещества (и низкой плотности ветра) в минимуме блеска нам удалось добиться хорошего соответствия модельного ослабления блеска и степени поляризации с наблюдениями WW Vul. Увеличение темпа истечения вещества после прохождения минимума блеска позволяет получить плавный выход звезды на прежний уровень светимости и заметные изменения позиционного угла. Тем не менее, мы получали либо корректное ослабление блеска после прохождения глубокого минимума и слишком слабое

изменение позиционного угла, либо наблюдаемые изменения позиционного угла и слишком сильное ослабление блеска.

В *разделе 4.6* изучается модель с переменным темпом истечения вещества и изменяемой формой возмущения. При моделировании затмений с варьированием темпа истечения вещества и параметров возмущений мы получаем широкий разброс кривых блеска и параметров поляризации. Анализ этих кривых позволяет подобрать такие изменения темпа истечения вещества и формы возмущения, что модельное затмение будет похоже на наблюдавшееся (см. рис. 6).

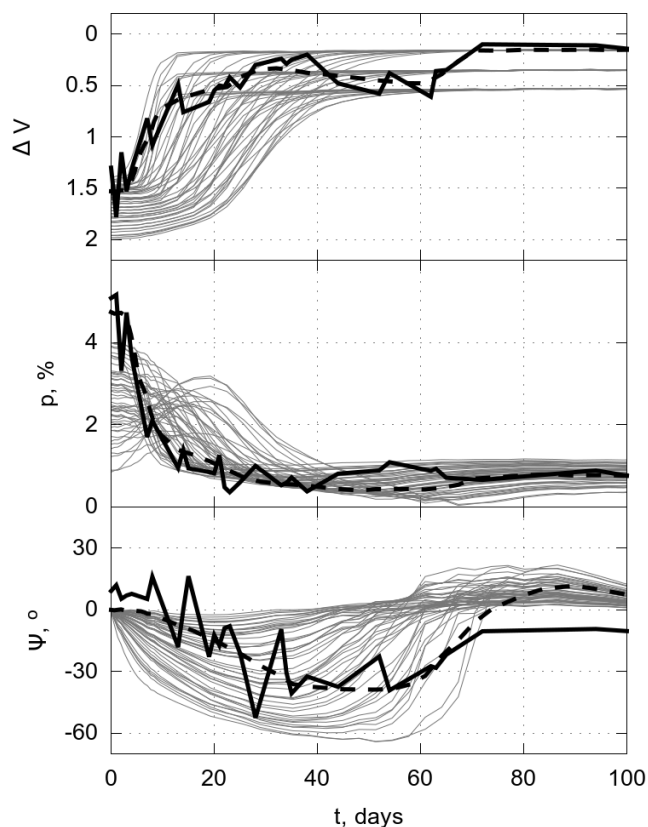


Рис. 6: Моделирование затмения WW Vul с переменными темпом истечения вещества и параметрами возмущения. Чёрной сплошной линией показаны наблюдения, серыми линиями — графики для моделей с постоянными темпом истечения вещества и параметрами возмущения, чёрным пунктиром — полученное модельное приближение.

В итоговой модели возмущение расплывается по диску: становится более протяжённым и низким, темп истечения сначала возрастает, а потом убывает. Такие изменения объясняют, почему до затмения мы не наблюдаем такого же по величине изменения позиционного угла в противоположную сторону, и нет точного повторения затмения после его полного оборота вокруг звезды. В разделе также обсуждаются оставшиеся различия модельного графика затмения и наблюдаемого.

В *разделе 4.7* подводятся итоги главы, отмечается, что в рамках модели с диском без утолщения в центральных областях невозможно получить наблюдаемые изменения позиционного угла поляризации. Модель с утолщённым диском позволяет получить либо наблюдаемые изменения позиционного угла, либо степень линейной поляризации в минимуме блеска. Модель утолщённого диска с изменяемыми параметрами возмущения и темпом истечения вещества позволяет добиться хорошего соответствия модели

и наблюдений. Этот результат демонстрирует актуальность рассмотрения физических моделей затмений такого сорта.

В **заключении** приводятся выводы и основные результаты, полученные в работе.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Шульман С. Г. Образование резонансных линий в движущихся газовых потоках с большой скважностью // *Астрофизика*. — 2017. — Т. 60. — С. 205–218.
2. Shulman S. G. Three-dimensional heuristic radiation transfer method based on enumeration using the directions grid // *Astronomy and Computing*. — 2018. — Vol. 24. — P. 104–116.
3. Шульман С. Г., Гринин В. П. Влияние дискового ветра на собственную поляризацию молодых звёзд // *Письма в Астрон. журн.* — 2019. — Т. 45. — С. 435–446.
4. Шульман С. Г., Гринин В. П. Влияние крупномасштабных возмущений в околозвёздных дисках на параметры линейной поляризации звёзд типа UX Ori // *Письма в Астрон. журн.* — 2019. — Т. 45. — С. 716–730.

Прочие публикации

1. Шульман С. Г., Гринин В. П. Образование резонансных линий в спектре RZ Psc // *Известия ГАО*. — 2016. — Т. 224. — С. 119–122.
2. Shulman S. G., Grinin V. P., Potravnov I. S. and Mkrtichian D. E. D Na I absorption lines formation in the RZ Psc spectrum // *Journal of Physics: Conf. Series*. — 2017 — Vol. 929, — P. 012003
3. Шульман С. Г. Связь глубоких минимумов UX Ori с возмущениями в диске // *Известия ГАО*. — 2018. — Т. 226. — С. 108–114.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод моделирования переноса излучения путём перебора дискретных параметров пучков фотонов (направления распространения и

преодолеваемой оптической толщины), позволяющий более эффективно, по сравнению с методом Монте-Карло, моделировать перенос излучения звёзд, окружённых околозвёздным диском.

2. Зависимость изменений степени линейной поляризации во время затмений компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с утолщением в зоне сублимации пыли, от темпа истечения вещества в виде дискового ветра, задающего степень утолщения. Анализ этой зависимости показал, что такая модель объясняет наблюдаемые затмения без изменения степени линейной поляризации и большой разброс наблюдаемых при одном уровне блеска параметров поляризации во время разных затмений одной звезды.
3. Зависимость параметров поляризации в разных спектральных полосах во время затмения компактным газопылевым облаком звезды, окружённой диском с утолщением в зоне сублимации пыли, от темпа истечения вещества. Эта зависимость объясняет наблюдаемые затмения без изменений показателя цвета и изменения на 90° позиционного угла линейной поляризации при изменении длины волны наблюдений.
4. Результаты анализа моделей крупномасштабных возмущений тонкого околозвёздного диска и диска с утолщением в зоне сублимации пыли, дающих глубокие фотометрические минимумы с последующими изменениями позиционного угла поляризации. Крупномасштабное возмущение околозвёздного диска без утолщения в зоне сублимации пыли не может объяснить наблюдаемые отклонения позиционного угла поляризации после прохождения минимума блеска. Модель с возмущением утолщённого диска позволяет получить отклонения позиционного угла, сопоставимые с наблюдаемыми.

Список литературы

- [1] Grinin V. P. Photopolarimetric Activity of Pre-Main-Sequence Stars (Invited Review) // *Disks, Planetesimals, and Planets* / Ed. by G. Garzón, C. Eiroa, D. de Winter, T. J. Mahoney. — Vol. 219 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2000. — P. 216.
- [2] Grinin V. P., Kiselev N. N., Minikulov N. Kh. et al. The investigations of 'zodiacal light' of isolated AE-Herbig stars with non-periodic Algol-type minima // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* — 1991. — Vol. 186. — P. 283–298.

- [3] Grinin V. P., The P. S., de Winter D. et al. The β Pictoris phenomenon among young stars. I. The case of the Herbig Ae star UX Orionis // *Astron. Astrophys.* — 1994. — Vol. 292. — P. 165–174.
- [4] Herbst W., Herbst D. K., Grossman E. J., Weinstein D. Catalogue of UBVR photometry of T Tauri stars and analysis of the causes of their variability // *Astron. J.* — 1994. — Vol. 108. — P. 1906–1923.
- [5] Natta A., Grinin V., Mannings V. Properties and Evolution of Disks around Pre-Main-Sequence Stars of Intermediate Mass // *Protostars and Planets IV.* — 2000. — P. 559–588.
- [6] Natta A., Prusti T., Neri R. et al. A reconsideration of disk properties in Herbig Ae stars // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 371. — P. 186–197.
- [7] Pereyra A., Girart J. M., Magalhães A. M. et al. Near infrared polarimetry of a sample of YSOs // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 501. — P. 595–607.
- [8] Safier P. N. Centrifugally Driven Winds From Protostellar Disks. I - Wind Model and Thermal Structure // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 408. — P. 115–147.
- [9] Safier P. N. Centrifugally Driven Winds from Protostellar Disks. II. Forbidden-Line Emission in T Tauri Stars // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 408. — P. 148–159.
- [10] Steinacker J., Baes M., Gordon K. D. Three-Dimensional Dust Radiative Transfer* // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51. — P. 63–104.
- [11] White R. L. Polarization in reflection nebulae. I - Scattering properties of interstellar grains // *Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 229. — P. 954–961.
- [12] Whitney B. A. Monte Carlo radiative transfer // *Bulletin of the Astronomical Society of India.* — 2011. — Vol. 39. — P. 101–127.
- [13] Yusef-Zadeh F., Morris M., White R. L. Bipolar reflection nebulae - Monte Carlo simulations // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 278. — P. 186–194.
- [14] Гринин В. П. О происхождении голубой эмиссии, наблюдаемой в глубоких минимумах молодых неправильных переменных звезд // *Письма в Астрон. журн.* — 1988. — Т. 14. — С. 65–69.
- [15] Гринин В. П., Киселев Н. Н., Минукулов Н. Х., Чернова Г. П. Наблюдения линейной поляризации в глубоких минимумах WW Vul // *Письма в Астрон. журн.* — 1988. — Т. 14. — С. 514–525.
- [16] Ростопчина А. Н., Гринин В. П., Шаховской Д. Н. и др. Фотополариметрическая активность Ae-звезды Хербига SV Cep // *Астрон. журн.* — 2000. — Т. 77. — С. 420–431.
- [17] Ростопчина-Шаховская А. Н., Гринин В. П., Шаховской Д. Н. Необычные повторяющиеся затмения звезды типа UX Ori WW Vul // *Астрофизика.* — 2012. — Т. 55. — С. 165.