АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Кенжебековой Ақмарал Игілікқызы
«**Динамика пылевых частиц в окрестности белых карликов: орбитальная эволюция и диффузия в атмосфере**», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D061100 – Физика и астрономия»

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена моделированию динамики испаряющихся пылевых частиц силикатного и графитового состава в области сублимации белых карликов в рамках проблемы обогащения атмосфер белых карликов тяжёлыми элементами из внешних источников.

Актуальность темы

Исследование внесолнечных планетных систем вокруг звезд представляет собой фундаментальную научную задачу в современной астрофизике. Такие системы называются экзопланетными, и в рамках проектов COROT (Convection Rotation and planetary transits), сообщества NASA (National Aeronautics and Space Administration) Kepler, WISE (Wide-field infrared survey Explorer), TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) и GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) проводятся наблюдения за ними и изучение их свойств с помощью современных спектрометрических и фотометрических методов, что вносит существенный вклад в науку. В настоящее время наиболее прямым способом изучения состава экзопланетного материала представляет собой анализ загрязнений металлами белых карликов. Это связано с тем, что более четверти белых карликов аккрецирует в свою атмосферу каменистые материалы, что обусловлено сильной гравитацией звезды. По наблюдениям миссии GAIA более чем у 500 белых карликов обнаружены в спектре линии щелочных металлов и других тяжелых элементов. Однако, только около 4% из них дают наблюдаемый избыток инфракрасного (ИК) излучения пылевых частиц в пределах приливного радиуса белого карлика, что указывает на наличие вращающегося пылевого диска. Поэтому возникает задачи об аккреции внешнего вещества, покинувшего окрестности звезды в последних этапах своей эволюции, по орбитам. Тем не менее, в последнее время доказательство загрязнения металлами белых карликов и их связь с окружающими планетными системами становятся все больше.

Согласно теории эволюции звезд, все звезды с массами порядка солнечной заканчивают свою эволюцию белыми карликами. Естественно, в число этих звезд также входит и наше Солнце, поэтому белые карлики являются ключевыми объектами исследования при изучении эволюции Солнечной системы в реальном времени. С другой стороны, изучение

загрязненных белых карликов позволяет определить свойства и химический состав планетарных систем вне Солнечной системы. При этом некоторые вопросы, как время жизни пылевых частиц, структура и эволюция пылевых дисков в окрестности белых карликов все ещё остаются актуальными. Нашей исследовательской задачей является моделирование динамики внешнего пылевого вещества во время аккреции на поверхность звезды, вследствие чего происходит обогащение атмосферы звезды тяжелыми элементами – металлами.

Таким образом, на основании вышеизложенного, диссертационная работа посвящена исследованию динамики пылевых частиц вокруг загрязненных белых карликов.

Связь диссертации с другими научными проектами.

Работа выполнена в рамках планов научно-исследовательских проектов Министерства образования и науки Республики Казахстан по приоритету: Научные исследования в области естественных наук по теме грантового финансирования: ИРН AP08956243 «FEB сценарий для экзопланетных систем на основе теории катастрофической термодеструкции малых тел», сроки исполнения 2020 - 2021гг., государственная регистрация № 0120РК00267. Работа связана с предыдущими разработками по программе целевого финансирования BR05236322 Министерства Образования и науки РК за 2018-2020гг. и целевой научно-технической программе BR05336383 Аэрокосмического комитета Министерства обороны и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан за 2018-2020гг; ИРН BR18574080 - «Исследование фундаментальных и прикладных проблем физики плазмы, плазмоподобных сред для целей решения задач современной энергетики и получения новых функциональных материалов» за 2018-2020гг.

Целью диссертации является исследование динамики испаряющихся пылевых частиц путём моделирования их орбитального движения в процессе аккреции частиц из внешнего пылевого облака на поверхность звезды.

Для решения поставленной задачи выбраны две звезды с признаками присутствия внешнего вещества:

1) белый карлик G29-38, с температурой поверхности около 11600 К, обладающий ИК избытком излучения из-за присутствия горячей пыли;

2) холодный карлик WDJ1644–0449 с температурой 3800 К, у которого обнаружены спектральные линии лития и других щелочных металлов, но отсутствует ИК избыток излучения.

Для достижения цели диссертации последовательно решаются следующие **исследовательские задачи**:

1. Выполнить расчёты **эффективных факторов** поглощения и радиационного давления по теории Ми в зависимости от длины волны излучения, материала и радиуса гранулы для частиц силикатного и графитового состава в интервале размеров от 0.01 мкм до 100 мкм.

2. По расчетам теплового баланса пылевых частиц **определить температуры нагрева частиц** в зависимости от их радиуса, материала и расстояния до звезды и другие сопутствующие параметры. В расчётах

теплового баланса пылевых частиц используется теоретическая функция излучения Планка в качестве модели излучения звезды и теплового излучения пылевой частицы, учитываются потери энергии на испарение с использованием вещественных параметров каждого материала, полученных по результатам расчётов по теории Ми.

3. Исследовать **влияние давления излучения звезды** на пылевые частицы с использованием данных среднего фактора радиационного давления, полученного по результатам расчётов по теории Ми и отношения силы радиационного давления к силе тяготения в зависимости от радиуса пылинки и материала для каждой звезды.

4. Провести анализ **динамической эволюции частиц**. Для этого выполняется совместное решение системы дифференциальных уравнений движения и уравнения испарения пылевой частицы, расчет траектории движения пылинки в экзопланетной системе с заданными параметрами каждой звезды: массой, радиусом и температурой поверхности.

5. Расчет коэффициентов диффузии в атмосфере загрязненных белых карликов методом Чэпман-Энскога.

Объект исследования. Пылевые частицы, находящиеся вблизи следующих астрофизических объектов: белый карлик G29-38, холодный карлик WD J1644–0449.

Предмет исследования. Орбитальная эволюция пылевых частиц в области сублимации около исследуемых звёзд и диффузия в атмосфере звезд.

Методы исследования. При решении задач, необходимых для достижения поставленной цели, проводятся расчеты температурного баланса и орбитальной эволюции базальтовых и графитовых пылевых частиц в области сублимации белых карликов. Параметры, характеризующие взаимодействие сферических пылевых частиц с излучением, рассчитаны по теории Ми на основе комплексных индексов рефракции, полученных из экспериментов для графита и выбранного нами силикатного материала – базальта. Использовался метод Чепман-Энскога и модель взаимодействия частиц для расчета коэффициента диффузии.

Новизна работы. В рамках данной диссертации впервые были получены следующие результаты для пылевых частиц вблизи белых карликов G29-38 и WDJ1644–0449:

- получено распределение температур частиц базальта и графита в зависимости от радиуса частицы и расстояния до звезды;

- выполнены расчёты динамической эволюции частиц на основе решения системы дифференциальных уравнений движения и уравнения испарения пылевой частицы. Выполнены расчеты траектории движения пылевых частиц в диапазоне радиусов от 0.01мкм до 100 мкм в двух экзопланетных системах в процессе сублимации до достижения полного испарения частиц. Расчёты выполнены для круговых и параболических орбит;

- получены границы зон полного испарения базальтовых и графитовых частиц для каждой звезды.

- пылевые частицы микронных размеров, движущиеся по параболическим орбитам, могут непосредственно попадать на поверхность холодного карлика WD J1644-0449, не достигнув полного испарения.

Научная и практическая ценность диссертации. Полученные результаты вносят существенный вклад в решение проблемы обогащения атмосферы белых карликов тяжелыми элементами из внешних источников и могут быть использованы при исследовании экзопланетных систем, а также для понимания эволюции белых и коричневых карликов и планет-гигантов, нейтронных звезд и других астрофизических объектов. Исследование диффузии в атмосферах белых карликов позволяет определить динамические и транспортные свойства горячего плотного вещества у белых карликов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для пылевых частиц размером $0.1 \div 100$ мкм, движущихся по круговым орбитам вокруг белых карликов G29-38, WDJ1644-0449, параметры которые взяты из GAIA Data Release 2, существуют безпылевые зоны, размеры которых составляют: для графитовых частиц – $0.16R_{\odot}$ вблизи БК G29-38 и $0.0195R_{\odot}$ вблизи БК WDJ1644-0449, для базальтовых частиц – $0.52-0.65R_{\odot}$ вблизи БК G29-38 и $0.039R_{\odot}$ вблизи БК WDJ1644-0449.

2. Пылевые частицы базальтового материала с начальным радиусом больше 300 мкм и графитового материала радиусом больше 0.3 мкм, движущиеся по параболическим орбитам, попадают непосредственно на поверхность холодного карлика WDJ1644-0449, не достигнув полного испарения.

3. В области параметра неидеальности $\Gamma < 1$, диффузия углерода в оболочке белых карликов происходит 10 раз быстрее, чем диффузия кремния.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке исследовательской задачи совместно с научными консультантами, проведении численных расчетов, проведении сравнений и анализа полученных результатов, подготовке выводов, представлении полученных результатов на международных конференциях, подготовке результатов работы к публикации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

В диссертационной работе использовались известные физические модели и апробированные математические методы. Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МНВО РК, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Апробация диссертационной работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе обсуждались:

– на международной конференции «XXXIV International Conference on Phenomena in ionized Gases» (2019, Sapporo, Japan);

– на международной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2019, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);

– на международной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2020, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);

обсуждались с профессорами: С.А. Майоровым (Россия) в рамках международного сотрудничества, Серебрянским А.В. (Казахстан, Институт Астрофизики им. В.Г. Фесенкова) в рамках программы стажировки.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ: 5 - в журналах из Перечня КОКСНВО МНВО РК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени PhD и 1 статья в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором, входящие в международные информационные ресурсы Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды); 5 работ в сборниках международных научных конференций.

Статья с высоким импакт-фактором по базе данных Clarivate Analytics или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:

1. Shestakova L.I., Serebryanskiy A.V., Kenzhebekova A.I. On the survival of dust grains in the sublimation zone of cold white dwarfs // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Vol.514(1). – P.997-1005.

Статьи в изданиях, рекомендуемых КОКСНВО Министерства науки высшего образования МНВО РК:

1. Shestakova L.I., Serebryanskiy A.V., Kenzhebekova A.I. Dynamics of dust grain in the sublimation zone of cold white dwarfs // Reports of the NAS of the republic of Kazakhstan. – 2022. – Vol.1 (341). – P. 130-136.
2. Шестакова Л.И., Кенжебекова А.И. Сублимация пылевых частиц вблизи белого карлика G29-38 // Известия НАН РК, серия физико-математическая. – 2021. – №3 (337). – С.156-166.
3. Kenzhebekova A.I.,Bastykova N.K, Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Maiorov S.A., Moldabekov Z.A. Destruction of a dust particle in the white dwarf atmosphere // The Japan Society of Applied Physics. – 2020. – Vol. 59(4). – SHHA04.
4. Skvortsova N. N., Maiorov S. A., Malakhov D. V., Stepakhin V. D., Obraztsova E. A., Kenzhebekova A.I. Shishilov O. N. On the dust structures and chain reactions induced over the regolith by gyrotron radiation // JETP Letters. – 2019. – Vol.109. (7). – P.441-448.
5. Кенжебекова А.И., Коданова С.К. О левитации пыли над поверхностью Луны // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2019. – №2(69). – С. 47-52.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 163 наименований, содержит 90 страниц основного компьютерного текста, включая 37 рисунков и 5 таблиц.