

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Шематовича В.И.

на диссертацию Руменских Марины Сергеевны

«Оптический метод транзитных поглощений в линии метастабильного гелия для определения параметров экзопланетных атмосфер», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

В диссертационной работе Руменских М.С. выполнен детальный анализ транзитов горячих экзопланет в линии $\lambda=1083$ нм метастабильного состояния гелия в зависимости от физико-химических условий, влияющих на особенности оптических профилей поглощения, и на основании численного моделирования трехмерным многожидкостным газодинамическим кодом получены оценки параметров ряда исследованных планетных систем. В работе проанализирована кинетика метастабильного уровня гелия и сделаны выводы о необходимости учета радиационного давления на атомы гелия в метастабильном состоянии для корректной интерпретации транзитных поглощений в ИК линии 1083 нм HeI(2^3S).

Диссертационная работа состоит из пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертационной работы составляет 127 страниц и содержит 27 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 93 библиографические ссылки.

В главе 1 (**Введении**) изложены цели и задачи работы, обоснована их актуальность, сделан обзор литературы по исследуемой тематике, сформулирована цель и показаны научная новизна исследований и практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

В **главе 2** представлены основные положения численного моделирования оптических транзитных поглощений верхних атмосфер горячих экзопланет. Также обсуждаются физико-химические процессы, ответственные за возбуждение и девозбуждение метастабильного уровня HeI(2^3S) гелия, такие как рекомбинация, электронные и атомные столкновения, фотоионизация. Отмечено, что накачка метастабильного уровня гелия определяется в основном локальной температурой и степенью ионизации планетарного вещества. Соответственно, поглощение в триплете дает информацию о слоях термосферы на высотах нескольких радиусов планеты, т.е. в области интенсивного нагрева и ускорения атмосферного газа. Делается вывод, что только комплексное самосогласованное численное трехмерное моделирование является надежным инструментом для интерпретации оптических транзитных поглощений горячих экзопланет и описания процессов, происходящих при взаимодействии атмосфер экзопланет с излучением и ветром родительских звезд.

В **главе 3** диссертации представлены результаты расчетов профилей характерных величин и скоростей реакций, используемых для интерпретации транзитных измерений планетарных систем HD 189733b, GJ 436b и GJ 3470b. Показано, что поглощение в линии HeI(2^3S) обусловлено совместным действием спектра кинетических процессов рекомбинационной, столкновительной и излучательной природы. Скорость протекания этих процессов зависит от распределения плотности вещества и спектральной плотности излучения звезды, а потому на поглощение в линии метастабильного гелия могут оказать влияние как параметры планеты, так и особенности спектра родительской звезды.

В **главе 4** показывается, как наблюдения поглощения в линии HeI(2^3S) могут быть использованы для зондирования параметров звездного излучения и состава атмосферы, изучаемой экзопланеты. Для это исследовано влияние различных аспектов излучения и ветра родительской звезды, а также состава атмосферы на

наблюдательные проявления в линии метастабильного гелия. На основе численного моделирования нескольких планетарных систем было показано, что основными параметрами, которые возможно оценить из спектральных профилей поглощения в линии метастабильного гелия, являются поток излучения ионизирующей радиации звезды F_{XUV} и относительное содержание гелия в атмосфере планеты He/H . Использование линии метастабильного гелия для оценки интенсивности звездного ветра не всегда оправдано.

В **главе 5** обсуждается важность учета радиационного давления звезды в линии 1083 нм для интерпретации транзитных поглощений горячих экзопланет в линии $\text{HeI}(2^3\text{S})$. Эффект радиационного давления на атомы метастабильного гелия определяется главным образом временем жизни уровня, которое для некоторых планет может быть довольно большим, позволяя достаточно длительное ускорение до высоких скоростей в несколько десятков км/с. Было впервые показано, что иные модели, не учитывающие радиационного давления, дают для некоторых планетных систем существенно различные с наблюдениями результаты, и некорректную интерпретацию транзитных измерений.

В **Заключении** изложены основные выводы диссертационной работы, а именно, утверждается что транзитные поглощения горячих экзопланет в триплетной линии $\text{HeI}(2^3\text{S})$, измеренные с использованием наземных телескопов, предоставили новую возможность зондирования параметров экзопланетных систем. Интерпретация данных в этой линии с помощью моделирования дали новый импульс в развитии существующих моделей и физических сценариев взаимодействия атмосфер экзопланет с излучением и ветром родительских звезд, которые в будущем могут быть использованы как дополнительный инструмент для поиска потенциальных атмосферных биомаркеров.

Диссертантом получены новые и важные результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Моделирование оптических транзитных поглощений горячих экзопланет позволило оценить физико-химические параметры в окрестности активно наблюдаемых планетных систем: HD 189733, HD 209458, Wasp 107, Wasp 69, GJ 3470. Так, например, транзитные поглощения в линии метастабильного гелия дают количественную информацию об интенсивности ионизирующего излучения звезды и относительном содержании гелия в атмосферах планет.
2. Установлено, что в основном поглощение в линии метастабильного гелия сосредоточено в области $1.2R_p < r < 3R_p$, т. е., относительно близко к фотометрическому радиусу планеты. Однако для некоторых планет с протяженными газовыми оболочками поглощение образуется во внешней области вблизи ударной волны, что позволяет использовать такие наблюдения для определения параметров звездного ветра.
3. Радиационное давление излучения звезды на атомы метастабильного гелия является важным фактором и должно учитываться при численном моделировании оптических транзитных поглощений горячих экзопланет.

Имеется несколько замечаний по диссертационной работе.

- 1) Глава 1, раздел 1.7. Обсуждаются первичные и вторичные атмосферы экзопланет. Однако ничего не сказано о переходных типах атмосфер, наблюдаемых, например, у суб-нептунов, атмосферы которых содержат значительные концентрации тяжелых молекул H_2O , CO_2 и др., однако их внешние атмосферные слои по-прежнему являются водород-гелиевыми.
- 2) Глава 2, раздел 2.1, стр. 37. Совсем не очевидна возможность использования газодинамического описания для фракции энергетических нейтральных атомов водорода (ЭНА-Н), образующейся вследствие перезарядки между протонами звездного ветра и тепловыми атомами оболочки горячей экзопланеты. Поток ЭНА-Н играет важную роль в аэрономии атмосфер горячих экзопла-

нет, а их распределение по энергии является существенно неравновесным. Как данная фракция присутствует в газодинамическом описании атмосферы горячей экзопланеты?

3) Глава 2, раздел 2.1, стр. 39. Приведенное здесь описание процесса поглощения звездного XUV излучения справедливо для атмосфер горячих экзопланет, содержащих лишь атомы водорода. В случае присутствия гелия и металлов необходимо детально рассматривать кинетику фотоэлектронов, см., например, недавно опубликованную монографию и обзор Бисикало и др., Наука, 2020;УФН, 2021.

4) Глава 2, стр.45, таблица 2.1.1. Из текста неясно как оценивался относительный вклад каждой из включенных в таблицу реакций? Что не позволило включить в рассмотрение все приведенные реакции, в особенности, при расчете химии вблизи внутренней границы, где числовые плотности компонент высоки?

5) Глава 4, стр. 84, рисунок 4.1.1. Почему нумерации расчетов в подписи к рисунку и в легенде на рисунке отличаются? К чему относятся точки измерений на этом рисунке - надо пояснить в подписи к рисунку.

б) Глава 4, стр. 86. В тексте отмечается, что при выполненном моделировании плотность на уровне $r = R_p$ принималась достаточно высокой, 10^{17} см^{-3} . Изучалась ли зависимость результатов расчетов от более низких значений плотности на внутренней границе модели?

В тексте диссертации также присутствует ряд неудачных выражений, обозначений и опечаток, например:

1) стр. 17 и 18, таблица 1.2.1. В последней колонке используется неудачное обозначение " $\sim 0^{40}$ ", где 40 это номер ссылки, более понятно " $\sim 0 [40]$ ".

2) стр. 26-- " плазмо-фотохимии плазменных компонент".

3) в тексте случайным образом встречаются термины "расселение", "депопуляция" и "девозбуждение" для метастабильного уровня гелия.

Вместе с тем, приведенные выше замечания не умаляют значимости результатов диссертационного исследования.

В целом, диссертационная работа Руменских М.С. представляет собой законченное исследование в области дистанционного зондирования физико-химических свойств атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах. Результаты диссертационного исследования опубликованы в зарубежных журналах, индексируемых в международных системах цитирования, а также представлены на российских и международных конференциях. Следует особо подчеркнуть, что в 4-х публикациях Руменских М.С. является первым автором. Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Диссертационная работа Руменских М.С. отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями от 20.03.2021 г.), а её автор – Руменских Марина Сергеевна – несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.6 – Оптика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, заведующий отделом

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук

Шематович Валерий Иванович

Подпись В.И. Шематовича заверяю

Ученый секретарь ИНАСАН

15 января 2024 г.



А.М. Фатеева