

Отзыв официального оппонента

доктора технических наук Тригуба Максима Викторовича
на диссертационную работу Шепелина Артема Витальевича
«Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и
расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика»

Диссертационная работа Шепелина Артема Витальевича направлена на исследование ключевых физических процессов в атмосферах экзопланет через разработку и применение принципиально новых методов неравновесной (не-ЛТР) кинетики для расчета населенностей атомных и ионных уровней, синтеза оптических спектров поглощения и анализа энергетического баланса.

Актуальность

Актуальность представленной работы обусловлена стремительным развитием наблюдательной экзопланетологии и появлением данных от современных и будущих телескопов (JWST, ARIEL, «Спектр-УФ»). Интерпретация спектров транзита, особенно для экстремальных классов планет, требует перехода от упрощенных моделей локального термодинамического равновесия (ЛТР) к физически адекватным описаниям, учитывающим сильное воздействие звездного излучения. Решение этой задачи лежит в области создания моделей, основанных на детальном учете неравновесной кинетики оптических и столкновительных процессов.

В рамках данной проблематики актуальность исследования Шепелина А.В. определяется его прямой нацеленностью на разработку именно такого инструментария. Работа восполняет существующий пробел, предлагая комплексный подход, который впервые позволяет исследовать влияние отдельных уровней химических элементов и кинетических процессов на синтезированные спектры поглощения и тепловой баланс атмосфер, объединяя при этом расчет не-ЛТР населенностей для сотен уровней атомов и ионов с трехмерным гидродинамическим моделированием. Полученные результаты являются необходимым фундаментом для корректного определения химического состава, температурной структуры и условий в плазме атмосфер экзопланет.

Структура и содержание диссертационной работы

Структура диссертации логична и полностью соответствует поставленной цели и задачам.

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, а также список литературы. Объем работы составляет 119 страниц, содержащих 20 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список состоит из 129 пунктов.

Во введении убедительно обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования.

Первая глава представляет собой аналитический обзор современного состояния исследований экзопланетных атмосфер, в котором критически рассмотрены ограничения моделей локального термодинамического равновесия, а также ограничения основных современных не-ЛТР моделей, и обоснована необходимость перехода к детальному неравновесному описанию.

Вторая глава является методическим ядром работы. В ней детально описана разработанная автором архитектура программного комплекса, представлена система кинетических уравнений для расчета населенностей уровней, а также алгоритмы синтеза спектров поглощения и вычисления функций нагрева и охлаждения. Приведены результаты верификации модели, подтверждающие ее корректность.

Третья глава посвящена разработке и применению новой методики диагностики атмосфер на основе анализа линий атомарного кислорода O I 130,4 нм и 777,4 нм. Автором установлена чувствительность соотношения их интенсивностей к температуре, что позволяет использовать эти линии в качестве нового независимого термометра для верхних слоев атмосфер.

Четвертая глава содержит детальное исследование роли иона железа Fe II в энергетическом балансе атмосферы ультрагорячего юпитера KELT-9 b. На основе не-ЛТР расчетов показано влияние этого иона на нагрев и охлаждение в различных слоях атмосферы и разрешено противоречие, связанное с необъясненным ранее аномально высоким нагревом от Fe II в атмосфере KELT-9 b, выявленным в результате моделирования кодом Cloudy (так называемая «железная аномалия KELT-9 b»).

Пятая глава исследует влияние звездных вспышек на наблюдаемость линий водорода (Лайман-альфа и H-альфа) в атмосферах экзопланет. Разработана методика моделирования отклика атмосферы, количественно оценено усиление сигнала, что открывает новые возможности для наблюдений низкоинтенсивных линий.

В заключении систематизированы и лаконично изложены основные научные результаты и выводы работы. Структура диссертации обеспечивает последовательное раскрытие темы, а содержание каждой главы непосредственно направлено на решение поставленных задач.

Научная и практическая значимость

Научная значимость диссертации заключается в существенном развитии методов моделирования физики верхних атмосфер экзопланет. Работа вносит вклад в фундаментальное понимание роли неравновесной кинетики в формировании наблюдаемых спектров поглощения и теплового баланса. Впервые в рамках единого подхода количественно исследованы и сопоставлены ключевые диагностические линии кислорода O I 130,4 нм и 777,4 нм, детально проанализирован механизм охлаждения за счет множества переходов Fe II и оценено влияние звездной активности на наблюдаемость линий водорода. Полученные результаты меняют подход к интерпретации спектроскопических данных для экстремальных классов планет и закладывают основу для создания нового поколения более реалистичных атмосферных моделей.

Практическая значимость исследования ярко выражена и подтверждается конкретными результатами. Разработанный и зарегистрированный программный комплекс «Астрея: Экзопланеты» представляет собой готовый инструмент для расчетов, непосредственно востребованный при планировании и интерпретации наблюдений современных (JWST, HST) и будущих (ARIEL, LUVOIR, «Спектр-УФ») космических миссий. Предложенные методики позволяют решать прикладные задачи спектральной диагностики, такие как определение температуры по линиям кислорода или поиск следов химических элементов. Комплекс также может быть интегрирован в более масштабные симуляционные коды для моделирования космической плазмы.

Замечания по диссертационной работе

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, а выявленные в ходе ознакомления замечания носят исключительно рекомендательный характер и не умаляют ее общей ценности.

1. В тексте диссертации и автореферата присутствует небольшое количество опечаток и стилистических погрешностей. Данные недочеты носят сугубо технический характер и никоим образом не влияют на научную корректность, логику изложения и достоверность полученных результатов.

2. Можно отметить отдельные моменты в оформлении иллюстраций и их описания, которые следовало бы улучшить для большей наглядности и самодостаточности графического материала. Например, подписи к некоторым рисункам (в частности, к рисункам с профилями линий) содержат не все необходимые сведения для их однозначной интерпретации без обращения к основному тексту (такие как конкретные источники наблюдательных данных, отображенных пунктиром, или объяснение формы синтезированных профилей). Аналогично, условные обозначения в таблицах могли бы быть расшифрованы непосредственно в заголовке или сноске.

Кроме того, на ряде составных рисунков (например, рис. 4, 10) отсутствует внутренняя нумерация панелей. Учет этих аспектов в будущих публикациях повысит удобство работы читателя с представленным иллюстративным материалом.

3. В разделе 2.3 на стр. 35 декларативно заявляется, что кинетические уравнения на населенности уровней являются линейными, и дальнейшие выкладки опираются на данный факт. Линейность этих уравнений, вообще говоря, является следствием ряда существенных приближений, таких как малая плотность среды, пренебрежение вынужденным излучением (позднее на стр. 40 было упомянуто, что им можно пренебречь для атмосферы экзопланет), фиксированность плотности электронов и т.д., либо достигается некоторой процедурой линеаризации, например, итеративным пересчетом. Учитывая, что в работе неоднократно подчеркивается универсальность предлагаемого подхода, стоило бы явно указать, какие ограничения с физической точки зрения накладывает линейность кинетических уравнений либо как эти ограничения удается обойти.

Заключение

Диссертационная работа «Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет» полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шепелин Артем Витальевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:
Главный научный сотрудник
Лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН
д.т.н.

Тригуб М.В.

Подпись д.т.н. Тригуба М.В. заверяю:
Ученый секретарь ИОА СО РАН
к.ф.-м.н.



Кураева Т.Е.

«20» мая 2026

Адрес: 634055, г. Томск, площадь Академика Зуева, д. 1.
Тел.: +7 903 953-79-57
Email: trigub@iao.ru