

11 - Астрофизика, физика космоса, современные и перспективные космические исследования и технологии

Голубовский Максим Петрович, магистрант 1 года обучения
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет
Моделирование поглощения инфракрасного триплета атома кислорода в атмосфере экзопланеты KELT-9b

Шайхисламов Ильдар Фаритович, д.ф.-м.н.
e-mail: maxym9121@gmail.com стр. 194

Назаров Сергей Валентинович, н.с.
Научный, Крымская астрофизическая обсерватория
Восстановление и модернизация телескопа «Синтез»
e-mail: astrotourist@gmail.com стр. 196

Шепелин Артем Витальевич, аспирант 3 года обучения
Новосибирск, Институт лазерной физики, лазерной физики
Моделирование кинетики элементов в частично ионизированной плазме экзопланетных атмосфер
Шайхисламов Илдар Фаритович, д.ф.-м.н.
e-mail: 4.shepelin@gmail.com стр. 197

Моделирование поглощения инфракрасного триплета атома кислорода в атмосфере экзопланеты KELT-9b

Голубовский Максим Петрович

Шепелин Артём Витальевич, Шайхисламов Ильдар Фаритович

Новосибирский государственный технический университет

Шайхисламов Ильдар Фаритович, д.ф.-м.н.

maxym9121@gmail.com

Наблюдения космическими и наземными телескопами спектральных линий элементов при транзитах экзопланет дают уникальную информацию. Для правильной интерпретации данных измерений, понимания протекающих процессов и состава атмосфер экзопланет принципиально важным является моделирование поглощения линий. Особенно интересным представляется моделирование поглощения в линиях тяжёлых элементов, например, кислорода или азота, потому что заметное наблюдаемое поглощение может указывать на то, что атмосфера экзопланет является вторичной, а вторичные атмосферы характерны для планет, которые при выполнении некоторых иных условий могут быть пригодными для жизни. Относительно недавно было обнаружено поглощение в триплетной линии атома кислорода с длиной волны 777,4 нм [1]. Оно было обнаружено в атмосфере сверхгорячего Юпитера KELT-9b.

KELT-9b обладает уникальными параметрами – массивная (с массой 2,88 масс Юпитера) и сверх-горячая (при температуре 4000 К является самой горячей из обнаруженных экзопланет). Планета обращается на близком расстоянии 0.0336 А.Е. от молодой и горячей звезды, которая излучает экстремальные потоки в ВУФ и УФ области спектра. Также данная планета вращается на малом расстоянии от своей родительской звезды — малая полуось равна приблизительно 0.0336 А.Е. При таких параметрах планета очевидно не обладает вторичной атмосферой, однако исследование KELT-9b необходимо для создания и апробации методов диагностики и анализа с использованием линии кислорода, поскольку в будущих наблюдениях данный триплет будет обнаружен в атмосферах и других экзопланет.

Моделирование в данной работе может быть разделено на три этапа. На первом этапе определяется пространственная структура и состав атмосферы. Вторым этапом является вычисление населённости нижнего уровня триплета, переходы с которого образуют поглощение в линии. Для этого была разработана кинетическая модель атома кислорода. На третьем этапе вычисляется поглощение в линии 777,4 нм. Для первого этапа решения проблемы используется трёхмерная магнитогидродинамическая модель атмосфер горячих экзопланет [2]. Для сравнения, в [1] использовалась одномерная модель, которая не может продемонстрировать некоторые явления и процессы. Наша модель учитывает большое число процессов, а также в ней возможно включение различных тяжёлых элементов, например, кислорода, углерода, магния. Эта модель ранее успешно применялась для моделирования горячих экзопланет, но не включала кинетику уровней элементов. Корректное моделирование кислорода в данной работе является первым шагом для модернизации модели и возможности моделирования вторичных атмосфер. Таким образом, используя результаты 3D моделирования в виде пространственных распределений температуры, концентрации атомов кислорода в основном состоянии, концентрации электронов, населённости основного состояния одиножды ионизованного атома кислорода, мы вычисляем на втором этапе населённости нижнего уровня триплета, что представлено на рисунке 1.

Применяемая здесь кинетическая модель – это двухуровневая схема, которая включает в себя основное состояние атома кислорода и нижний уровень триплета. Учитываются такие процессы как фотоионизация, фотовозбуждение, радиационный распад, переходы за счёт столкновения с электронами, а также рекомбинация. Также учитывается поглощение фотовозбуждающих фотонов при распространении сквозь атмосферу экзопланеты. Данный процесс является важнейшим, потому что фотовозбуждение оказывается основным процессом накачки нижнего уровня триплета. Также для сравнения выполнен расчёт населённости нижнего уровня триплета в предположении локального термодинамического равновесия. Это позволяет оценить, насколько важен учёт всех процессов.

На последнем этапе вычисляется непосредственное поглощение в линии и сравнение с наблюдениями. Под поглощением в астрофизике экзопланет подразумевается относительная разность излучения в момент первичного транзита и в момент, когда планета не проходит по диску звезды. В данной работе используется Фойгтовский профиль линии с эмпирической аппроксимацией [3]. Сечение поглощения задавалось с помощью формулы (1). Поглощения, полученные в предположении ЛТР и при кинетическом расчете, изображены на рисунке 2. Полученный результат сопоставим с результатами из работы [1], но учтено большее число пространственных эффектов.

$$\sigma(x) = f_{12} \frac{\sqrt{\pi} e^2}{m_e c \Delta v_D} H(\alpha, x) \quad (1)$$

$$\Delta v_D = \sqrt{\frac{2kT}{m_i c^2}} v_0 \quad (2)$$

где f_{12} – сила осциллятора перехода, Δv_D – доплеровская ширина линии (2), m_i – масса атома кислорода, $H(\alpha, x)$ – функция Фойгта, для которой используется приближение из [3]

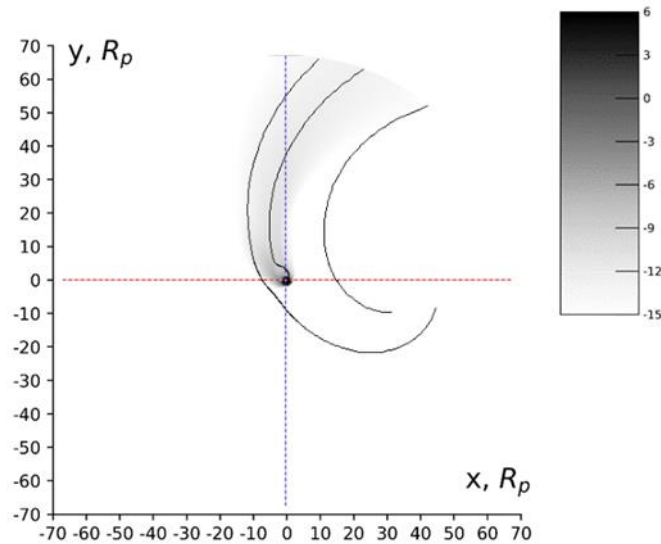


рис. 1. Распределение населённости нижнего уровня триплета атома кислорода, истекающего из планетарной атмосферы, в масштабе звездной системы. Цвет характеризует населённость и значение показывает десятичный логарифм. Чёрные линии демонстрируют типичные линии тока протонов, включая звездный ветер.

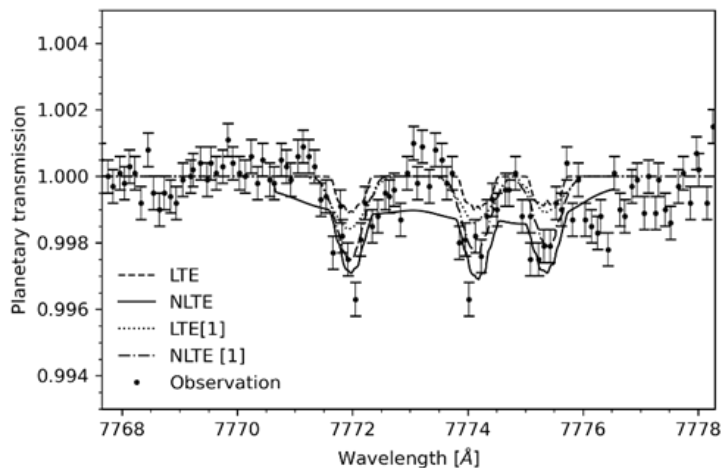


рис.2. Контуры поглощения, полученные в предположении ЛТР, не-ЛТР, а также результаты из [1] и данные наблюдений.

Список публикаций:

- [1] Borsa F. et al. // *Astrophys. J.* 2018. 866, 47
- [2] Shaikhislamov, I.F. et al. // *Astrophys. J.* 2018. 866, 47
- [3] Tasitsiomi A // *Astrophys. J.* 2006. 645, 792.

Модернизация телескопа «Синтез» в КРАО РАН
Назаров Сергей Валентинович
Крымская астрофизическая обсерватория РАН
astrotourist@gmail.com

В 1978-м году в Крымской астрофизической обсерватории введён в строй экспериментальный телескоп «Синтез» или «АСТ-1200». [1] Он установлен в павильоне с откатной крышей, на экваториальной монтировке вилочного типа. Оптика выполнена по кассегреновской схеме с тонким ситалловым сегментированным главным зеркалом, которое состоит из шести одинаковых подвижных шестиугольных сегментов и одного центрального неподвижного диаметрами по 40см. [2]

После развала Советского Союза телескоп около тридцати лет находился на консервации. Электронные системы управления монтировкой и двигателями зеркал устарели морально и физически. Стоимость современных устройств точного позиционирования сегментов превышает наши финансовые возможности, а поставка затруднена в связи с санкциями. Опыт собственного производства подобной техники отсутствует. Кроме того, исследование оптических свойств сегментов показало недостаточное качество.

Модернизация телескопа началась в 2018 году с расчёта новой оптики для главной апертуры и создания современной системы управления монтировкой. К 2021 году реализован ряд технических и программных решений, позволивших приступить к научным исследованиям на базе временного 350 мм телескопа, установленного на главной трубе «Синтеза».

Монтировка приводится в движение двумя идентичными приводами, состоящими из трех электродвигателей и двух сельсина-датчиков положения, грубого и точного. Команды двигателям отдают два модуля управления приводами, которыми, в свою очередь, управляет одноплатный миникомпьютер Raspberry Pi. Специальный регулятор, разработанный из-за большого момента инерции монтировки, во время движения телескопа рассчитывает тормозной путь и начинает контролируемое торможение когда конечная точка оказывается близко к точке назначения.

Общее управление крышей, телескопом и периферией осуществляет промышленный контроллер Овен ПЛК-100. Связь с Raspberry Pi и ПЛК-100 идёт по протоколу Modbus. [3]

Первой научной задачей стали астрометрические наблюдения спутников Урана и Нептуна совместно с ГАО РАН, в 2020-21 годах. Съёмка велась на камеру QHY-9: размер пикселя 5.4 мкм, масштаб 630 mas/pix, рабочее поле 35×26 угловых минут. Типичное время накопления 45 секунд. Проницание составило 19 m, астрометрические ошибки 50 mas.

В 2022 году приёмная часть 350 мм телескопа оснащена корректором, новой камерой QHY600M и колесом с фотометрическими фильтрами g, r, i, z системы Sloan. К 2023 году в круг наблюдательных задач добавлены активные ядра галактик, малые тела Солнечной системы, послесвечения гамма-всплесков, вспышки сверхновых, переменные звёзды и звёзды с экзопланетными транзитами. Благодаря разработке нового программного обеспечения для обработки кадров организован систематический поиск астероидов Главного пояса, а также сближающихся с Землёй.

Начинается изготовление оптической системы для главной апертуры – цельного зеркала диаметром 1000 мм. Приёмник будет расположен в прямом фокусе, после корректора. Расчётное линейное поле зрения 60×60 мм. Фокусное расстояние 3200 мм.

За шесть лет модернизации телескопа создана оригинальная система управления всем комплексом аппаратуры, установлен временный телескоп, начаты систематические научные наблюдения по ряду научных направлений, обнаружены 400 неизвестных астероидов, среди которых один троянец Юпитера и один околоземный. Один принадлежит к семейству Amor, один к Hungaria, остальные относятся к главному поясу. Самый быстрый носит временное обозначение 2022 YU10, и на момент открытия обладал скоростью 85.3 "/час

Список публикаций:

- [1] *Ustinov N. D., Vasilev A. S., Vysotskii Iu. P. et al. AST-1200 astronomical telescope having a sectional main mirror // Optiko Mekhanicheskaja Promyshlennost. — 1985. — Vol. 52. — P. 22–25.*
- [2] *Basov N. G., Dimov N. A., Gvozdev M. I. et al. New Astronomical Telescope AST-1200 with a Segmented Actively Controlled Primary Mirror // The MMT and the Future of GroundBased Astronomy. — 1979. — Vol. 385. — P. 185*
- [3] *Харченко, А. В., Назаров С. В. Система управления телескопа «Синтез» // Астрономия и исследование космического пространства / Издательство Уральского университета, 2022. — С. 185-188. — EDN DZGINP.*

Моделирование кинетики элементов в частично ионизированной плазме экзопланетных атмосфер

Шепелин Артем Витальевич

Институт лазерной физики СО РАН

Шайхисламов Илдар Фаритович, д.ф.-м.н.

4.shepelin@gmail.com

Первые открытия экзопланет в конце 1980-х значительно раздвинули рамки наших знаний о строении Вселенной и подтвердили одну из наиболее смелых гипотез. Это послужило толчком к появлению новых методов наблюдения и развитию компьютерных технологий моделирования. Сегодня наблюдения телескопами и изучение экзопланет неразрывно связано с компьютерным моделированием атмосфер, так как чаще всего мы располагаем данными именно о верхних слоях их газовых оболочек. Одно из основных направлений исследований в данной области связано с определением химического состава. Данная задача довольно сложна, поскольку многие спектральные линии поглощения значительно ослабляются при прохождении межзвёздной среды и подвергаются зашумлению в атмосфере Земли. Эта особенность ограничивает возможность определения наличия и содержания элементов в атмосферах. Однако, с помощью компьютерного моделирования, привлекающего наиболее современные физические теории, существует возможность максимально полного и точного использования спектральной информации. Условно, процесс моделирования делится на два этапа: моделирование движения и распределения вещества (магнитная гидродинамика, МГД), моделирование населенностей энергетических уровней элементов. Первый этап дает информацию об основных параметрах — температуре, скоростях элементов, плотности электронов и химических элементов. Второй этап учитывает радиационные и столкновительные процессы, позволяя синтезировать спектр поглощения, который в свою очередь сравнивается с результатами наблюдений.

Для определения распределения вещества используются гидростатические и гидродинамические модели. В ИЛФ СО РАН разработан трехмерный МГД код, позволяющий учитывать сложные процессы взаимного влияния звезды и планеты [1]. Населенности уровней элементов можно моделировать, используя различные приближения. Наиболее простым является приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР), при котором распределения скоростей и спектры считаются равновесными (распределение Максвелла и закон Планка, соответственно). В таком случае, населенности уровней распределены согласно статистике Больцмана, а элементы находятся в ионизационном равновесии, описываемом формулой Саха. В общем случае, такие условия не выполняются, а в ряде случаев (например, для близкоорбитальных планет) отличаются принципиально. Другим подходом, позволяющим учесть более сложные распределения рассматриваемых величин, является детальное моделирование кинетики радиационных и столкновительных переходов (НЛТР).

В данной работе представлена новая универсальная программная библиотека для моделирования кинетики квантовых переходов в космической плазме. Она доступна в двух версиях: на языках C++ и Python. Библиотека учитывает как равновесное приближение, так и неравновесную кинетику. Неравновесная кинетика описывается с помощью “основного уравнения”, которое позволяет учесть ударные и радиационные процессы, включая возбуждение, девозбуждение, ионизацию и рекомбинацию. Немаловажным аспектом библиотеки является адаптация наиболее полных моделей элементов (C I-III, Mg I-III, O I-II, Fe I-III — энергии, силы осциллятора, сечения связанно-свободных переходов, эффективные силы столкновений для более чем 700 квантовых уровней) [2]. На примере аномально горячей экзопланеты KELT-9 b рассмотрено влияние примесных элементов на термодинамику атмосферы, что позволяет объяснить формирование поглощения в спектральной линии 777.4 нм кислорода, впервые обнаруженного в газовой оболочке планеты, находящейся вне Солнечной системы.

Список публикаций:

[1] Шайхисламов И. Ф., Ходаченко М. Л., Березуцкий А. Г // *Астрономический журнал*. 2021. Т. 98. № 1. С. 10-28.

[2] Mashonkina L. I., Simova T. N., Pakhomov Yu. V // *Astronomy Letters*. 2016. V. 42. P. 606-615.

