

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ В 2018-2020 ГГ. С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА НГУ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИЛФ СО РАН)

1. Аннотация

Задача наблюдения и поиска экзопланет в последние годы становится всё более и более актуальной. Число открытых экзопланет стремительно растёт: к 2019 году насчитывалось ~3900 звездных систем, в которых было подтверждено наличие экзопланет, связи с чем растёт и необходимость анализа полученных данных, предоставляющих информацию об этих системах. Класс экзопланет, именуемых горячими Юпитерами, является наиболее многообещающим для изучения свойств экзопланетных систем методом транзитной спектроскопии. Эти планеты имеют большой радиус, из-за чего транзит оказывается достаточно глубоким для наблюдения телескопами. Кроме того, особенностью этих экзопланет является близость к родительской звезде: типичный горячий Юпитер располагается на расстоянии ~0.005 а.е. от звезды, и относительно короткий период обращения позволяет совершать наблюдение транзита в течение нескольких часов. Данный проект нацелен на изучение верхней атмосферы горячих экзопланет, истечения планетарного вещества и его взаимодействия с натекающим ветром родительских звезд путем интерпретации данных телескопов на основе трехмерных многокомпонентных аэрономных численных моделей.

2. Тема работы

Взаимодействие планетарного ветра близко-орбитальных экзопланет со звездными ветрами

3. Состав коллектива

1. Шайхисламов Илдар Фаритович, д.ф.-м.н., зам. директора по научной работе, ИЛФ СО РАН, руководитель
2. Мирошниченко Илья Борисович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ИЛФ СО РАН, исполнитель
3. Березуцкий Артем Григорьевич, младший научный сотрудник, ИЛФ СО РАН, исполнитель
4. Руменских Марина Сергеевна, аспирант очной формы обучения Института лазерной физики СО РАН, специальность 01.04.05 – Оптика; работа проводится в рамках написания кандидатской диссертации, научный руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович, год окончания обучения 2023; младший научный сотрудник, ИЛФ СО РАН, исполнитель
5. Ефимов Михаил Александрович, аспирант очной формы обучения Института лазерной физики СО РАН, специальность 01.04.05 – Оптика; работа проводится в рамках написания кандидатской диссертации, научный руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович, год окончания обучения 2024; младший научный сотрудник, ИЛФ СО РАН, исполнитель

4. Информация о грантах

- 1) РФФИ № 16-52-14006, совместный российско-австрийский проект «Взаимодействие планетарного ветра близко-орбитальных экзопланет со звездными ветрами» (2016-2019 годы), руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович.
- 2) РНФ № 18-12-00080 «Экзосфера горячих экзопланет и ее наблюдательные проявления» (2018-2020 годы), руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович.

3) Проект Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных систем и характеристик экзопланет», суб-контракт «Численное моделирование аэродинамики, газовых оболочек и магнитосфер горячих экзопланет, интерпретация наблюдательных данных по транзитному поглощению линий, лабораторное моделирование отдельных процессов в плазматмосфере горячих экзопланет» (2020-2022 годы), руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович.

4) РФФИ № 20-02-00520 «Новые сценарии и режимы взаимодействия планетарного течения горячих экзопланет с плазменным ветром звезд» (2020-2022 годы), руководитель – Шайхисламов Илдар Фаритович.

5. Научное содержание работы

5.1. Постановка задачи

Основная задача работы состоит в систематическом описании взаимодействия планетарного и звездного ветра, и выявлении таких сопутствующих процессов и явлений, которые можно использовать для диагностики параметров планетарного и звездного ветра, а также планетарного магнитного поля. Для газовых гигантов типа Юпитера или Нептуна основным параметром задачи является орбитальное расстояние от которого зависят основные движущие силы – звездная радиация, генерирующая планетарный ветер, звездный ветер, чье давление определяет положение ионопаузы и приливные силы, которые эффективно ускоряют вещество за пределами полости Роша. Для супер-Земель важным является также состав атмосферы. Предварительные исследования авторов обнаружили, что комбинация этих сил в зависимости от орбитального расстояния и массы планеты может создавать качественно различные режимы взаимодействия и формирования облака Энергичных Нейтральных Атомов ЭНА. Эти режимы в принципе можно различить по наблюдательным проявлениям. Основная задача проекта - количественное объяснение транзитных спектральных измерений и выявление физических величин, о которых можно получать информацию благодаря таким измерениям. Создание методов оценки интенсивности планетарного ветра, химического состава и температуры экзосферы, скорости звездного ветра станет выдающимся достижением в планетологии. Другая важная задача, на решение которой направлен проект, состоит в выявлении главных закономерностей, определяющих интенсивность планетарного ветра в зависимости от основных астрофизических параметров системы – массы, орбитального расстояния и магнитного поля планеты, класса и возраста звезды. Обнаружение систем, в которых планета теряет значительную долю своей атмосферы или массы в целом изменит картину долговременной эволюции планетарных систем.

5.2. Современное состояние проблемы

Анализ и численное моделирование Горячих Юпитеров, таких как HD209458b, показали, что расширение нагретой и частично ионизированной термосферы приводит к отрыву от гравитационного притяжения планеты и формированию на расстоянии порядка нескольких радиусов планеты сверхзвукового течения (Vidal-Madjar et al 2003, Lammer et al 2003, Yelle 2004, Erkaev et al 2005). Планетарный ветер представляет собой новое физическое явление, не встречающееся в Солнечной системе, хотя в определенной степени аналогичное Солнечному ветру, но образованному другим механизмом. Одним из следствий этого процесса является потеря массы, которое может достигать до 10^{11} g/s (Munoz 2007) и за времена жизни планеты составлять заметную долю от ее полной массы. Численные одномерные газодинамические модели, включающие кинетические процессы ионизации и нагрева газа коротковолновым излучением, столкновительных процессов рекомбинации, ионизации и возбуждения (Yelle 2004, Munoz 2007, Koskinen et al 2010) показывают, что для планеты типа Юпитера, вращающейся на расстоянии 0.05 а.е. вокруг звезды Солнечного типа характерная температура термосферы достигает величины 10^4 К, а скорость истечения порядка 10 км/с.

Использование линии поглощения триплетного гелия He-I $\lambda=10830$ Å для исследования атмосферы экзопланет типа горячих Юпитеров методом транзитных измерений было предсказано в работе (Seager&Sasselov, 2000) для планеты HD-209458b. Основное преимущество использования данной линии состоит в том, что она не подвержена влиянию межзвездной среды и может наблюдаться с помощью наземных телескопов. Недавно, в статье (Oklopčić & Hirata 2018), была описана численная одномерная модель транзита в этой линии для наиболее изученных экзопланет GJ436b и HD209458b. Наблюдения в линии метастабильного гелия было обнаружено для ряда экзопланет, таких, как HD189733b (Salz, 2018; Guilluy, 2020), WASP-69b (Nortmann, 2018), HAT-P-11 (Allart, 2018), WASP-107b (Spake, 2018), GJ3470b (Ninan, 2019) поглощение данной линии гелия было обнаружено на уровне порядка нескольких процентов. В работе Spake, 2018 сообщалось о регистрации транзитной кривой в линии метастабильного гелия для теплого Нептуна WASP-107b на уровне порядка 2%. В работе Allart et al, 2018 наблюдаемый транзит для данной планеты показал величину поглощения на уровне $\sim 1\%$. Ninan et al. 2019 сообщил о поглощении около 1% в трех транзитах GJ 3470b, рассчитанном путем усреднения по ширине линии 1,2 Å (или 33 км/с). Несмотря на относительно низкое отношение S/N, данные показывают, что поглощение происходит в основном на синем крыле $[-36; 9]$ км/с линии. Ninan et al. 2019 выведена плотность атомов вдоль луча зрения для He(23S) на уровне $2,4 \cdot 10^{10}$ см⁻². Моделирование, основанное на 1D профилях атомов и ионов гелия, приведенное в Salz et al. 2016, где предполагается содержание гелия He/H=0,1, показали плотность вдоль луча зрения на порядок больше. Совсем недавно Palle 2020 и др. сообщили о новых трех транзитах на линии метастабильного гелия. Полученные данные имеют значительно лучшее соотношение сигнал-шум, лучшее спектральное разрешение и сравнение транзитных и внетранзитных измерений. Получена спектрофотометрическая кривая освещенности, которая показывает, что поглощение в линии 10830 Å совпадает с ожидаемым временем начала и окончания транзита. Спектрально разрешенное поглощение при транзите показывает глубину 1,5% вокруг центра линии, ограниченную интервалом $[-30; 20]$ км/с, в то время как интервал половинной ширины составляет $[-22; 10]$ км/с. Таким образом, второе измерение поглощения линии метастабильного гелия подтверждает и дополняет первое из Ninan et al. 2019. Palle et al. 2020 также смоделировал поглощение He(23S) 1D изотермической гидродинамической моделью с неравновесным расчетом населенности метастабильного гелия. Аналогично 1D-моделированию Ninan et al. В 2019 году они обнаружили, что распределение HeI(23S) распространяется как минимум на 10 планетарных радиусов. Наилучшее соответствие наблюдательным данным было получено при скорости потери массы $3 \cdot 10^{10}$ г/с при температуре термосферы 6000 К и синем смещении линии 3,2 км/с. Уширение линии происходило в основном за счет радиального расширения газа со скоростями до 20 км/с.

[1] Vidal-Madjar A. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b //Nature. – 2003. – Т. 422. – №. 6928. – С. 143-14

[2] Lammer H. et al. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating //The Astrophysical Journal Letters. – 2003. – Т. 598. – №. 2. – С. L121.

[3] Yelle R. V. Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances //Icarus. – 2004. – Т. 170. – №. 1. – С. 167-179.

[4] Erkaev N. V. et al. Plasma and magnetic field parameters in the vicinity of short-periodic giant exoplanets //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2005. – Т. 157. – №. 2. – С. 396.

[5] Muñoz A. G. Physical and chemical aeronomy of HD 209458b //Planetary and Space Science. – 2007. – Т. 55. – №. 10. – С. 1426-1455.

[6] Koskinen T. T. et al. Characterizing the thermosphere of HD209458b with UV transit observations //The Astrophysical Journal. – 2010. – Т. 723. – №. 1. – С. 116.

[7] Seager S., Sasselov D. D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits //The Astrophysical Journal. – 2000. – Т. 537. – №. 2. – С. 916.

- [8] Oklopčić A., Hirata C. M. A new window into escaping exoplanet atmospheres: 10830 Å line of helium //The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Т. 855. – №. 1. – С. L11.
- [9] Salz M. et al. Detection of He I λ 10830 Å absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy //Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Т. 620. – С. A97.
- [10] Guilluy G. et al. The GAPS programme at TNG XXII. The GIARPS view of the extended helium atmosphere of HD189733 b accounting for stellar activity //arXiv preprint arXiv:2005.05676. – 2020.
- [11] Nortmann L. et al. Ground-based detection of an extended helium atmosphere in the Saturn-mass exoplanet WASP-69b //Science. – 2018. – Т. 362. – №. 6421. – С. 1388-1391.
- [12] Allart R. et al. Spectrally resolved helium absorption from the extended atmosphere of a warm Neptune-mass exoplanet //Science. – 2018. – Т. 362. – №. 6421. – С. 1384-1387.
- [13] Spake J. J. et al. Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet //Nature. – 2018. – Т. 557. – №. 7703. – С. 68-70.
- [14] Ninan J. P. et al. Detection of He I 10830 Å absorption during the transit of a warm Neptune around the M-dwarf GJ 3470 with the Habitable-zone Planet Finder //arXiv preprint arXiv:1910.02070. – 2019.
- [15] Palle, E., Nortmann, L., Casasayas-Barris, N., Lampón, M., López-Puertas, M., Caballero, J. A., ... & Alonso-Floriano, F. J. (2020). A HeI in upper atmosphere around the warm Neptune GJ 3470 b. A&A, 638, A61

5.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Численное моделирование является основным методом настоящего проекта, а также в целом для данной области науки. Авторы проекта развивают численную модель горячих экзопланет с 2013 г., последовательно разработав 1D HD (Shaikhislamov et al 2014) и 2D HD/MHD (Khodachenko et al 2015, Shaikhislamov et al 2016) коды. Они были применены для анализа взаимодействия планетарного ветра с планетарным магнитным полем (Khodachenko et al 2015), со звездным ветром (Shaikhislamov et al 2016), интерпретации транзитных наблюдений (Khodachenko et al 2017, Shaikhislamov et al 2018). В 2018 г. на основе этих кодов был создан 3D газодинамический код, который позволил впервые провести аэромическое моделирование планетарного ветра двух наиболее изученных экзопланет – HD209458b и GJ436b (Shaikhislamov et al 2018). Модель решает газодинамические уравнения непрерывности, импульса и энергии для отдельных атомарных, молекулярных и ионных компонент плазмы. Основными процессами взаимопревращения частиц являются фото-ионизация, электронный удар, рекомбинация и перезарядка. Фотоионизация также приводит к нагреву вещества через порождаемые фотоэлектроны. Эффективность передачи энергии фотоэлектронов более холодным частицам рассматривается в рамках кинетических моделей (Shematovich et al. 2014, Bisikalo & Shematovich, 2015; Ionov et al. 2017). Для каждой конкретной звезды используется наиболее подходящий XUV спектр в диапазоне 1–92 нм. Прохождение и ослабление XUV потока вычисляется в каждом спектральном интервале в соответствии с зависящим от длины волны сечением поглощения. Помимо нагрева также рассчитывается охлаждение за счет возбуждения атомарного водорода и инфракрасного излучения молекулы H₃⁺. Обмен импульсом и энергией между различными компонентами происходит за счет ион-атомных и Кулоновских столкновений. Верхняя атмосфера планет берется состоящей из компонент H, H⁺, H₂, H₂⁺, H₃⁺, He, He⁺ между которыми рассчитывается полный набор химических реакций. Код реализован в обобщенном виде, позволяющим включение любых других независимых компонент. Для самосогласованного моделирования на масштабе всей звездной системы те же алгоритмы используются для вычисления динамики звездного ветра (Khodachenko et al 2019). Помимо планетарной атмосферы другой граничной поверхностью является корона звезды, на которой задаются параметры корональной плазмы. При необходимости также рассчитывается сила радиационного давления на частицы со стороны звездной радиации. Модель выполняет вычисления в неинерциальной сферической системе координат привязанной к центру

планеты и вращающейся в фазе с орбитальным движением, т.е. в приливно захваченном режиме. При этом сама планета может вращаться с любым периодом. В этой системе отсчета вводятся соответствующие неинерциальные силы – обобщенный гравитационный потенциал и сила Кориолиса. Радиальный шаг сетки сильно неоднородный с наименьшим значением вблизи поверхности планеты, где необходимо разрешать сильно стратифицированную верхнюю атмосферу. Код полностью распараллелен для вычислений на кластерах. Численная модель создана на базе уравнений магнитной гидродинамики и атомных процессов столкновений химических превращений с учетом сил гравитации и светового давления. Используемые численные методы и алгоритмы – явная частично консервативная upwind схема на неравномерной сетке; матричное решение химических и столкновительных уравнений.

5.4. Полученные результаты

1) Впервые осуществлено моделирование горячего Юпитера WASP-12b с применением 2D много-жидкостного кода и расчетом поглощения в линиях магния. Ранее данная планета моделировалась 3D MHD кодом (Bisikalo et al. 2013), но без сопоставления с наблюдениями (Fossati et al. 2010). В расчетах учитывается взаимодействие расширяющейся атмосферы со звездным ветром различной силы, в условиях различной интенсивности XUV излучения. Рассмотрено два сценария, соответствующих случаям с приливной силой и без нее, и с различной ориентацией головной ударной волны. Показано, что учет приливной силы, которая для WASP-12b имеет очень большую величину из-за его близкой орбиты, планетарной течение формирует две струи в направлении к звезде и от нее. Интегральная потеря массы доходит до 10^{12} г/с. Для сравнения с наблюдениями, выполнен расчет динамики атомов и ионов магния. Расчетное поглощение в резонансной линии MgII дало хорошее согласие с наблюдениями по времени начала и окончания транзита, а также по глубине транзита. Это показывает, что относительное содержание магния в атмосфере планеты соответствует стандартному солнечному содержанию. Второй сценарий без приливной силы имел цель получить конфигурацию головной ударной волны по ходу орбитального движения планеты и проверить возможность формирования за счет этого резкого и раннего транзита, предложенного в работе (Vidotto et al. 2010). В нашей работе было показано, что такое взаимодействие не создает избыточного и раннего поглощения в линии MgII и, таким образом, не может объяснить наблюдения (Dwivedi et al., MNRAS, 2019).

2) Разработан, впервые в мире, трехмерный аэрономный много-жидкостный код по расчету планетарного истечения горячих экзопланет и его взаимодействия со звездным ветром (Shaikhislamov et al., MNRAS, 2018). Модель полностью согласуется с предыдущими 1D и 2D версиями, а также с более сложными аэрономными одномерными кодами других групп. Адаптированы ранее разработанные графические пакеты для трехмерной визуализации провидимых 3D расчетов и вычисления поглощения в различных линиях для прямого сравнения с наблюдениями. Разработанный 3D код применен для расчета планетарного течения горячего Юпитера HD209458b и теплого Нептуна GJ436b. Обнаружено несколько новых эффектов. Показано существование в верхней атмосфере планет сложных зональных течений со скоростями до 1 км/с, которые эффективно перераспределяют тепло, выделяемое при поглощении XUV излучения на дневной стороне. Из-за закручивания течения силой Кориолиса температурный максимум смещается с точки зенита, а течение в целом поворачивается по часовой стрелке на 25-45 градусов относительно линии планета-звезда. Планетарная плазма сплюснута в меридиональной плоскости гравитацией звезды и ограничена областью около 10 планетарных радиусов сверху и снизу экваториальной области. Обнаружено, что присутствие гелия в атмосфере планеты, даже в небольших количествах, значительно влияет на плазмосферу вблизи планеты благодаря уменьшению шкалы высот и дополнительной фото-ионизации. В зависимости от содержания гелия возможно существование либо компактной, либо обширной молекулярной оболочки вокруг планеты со значительным содержанием H₂.

3) Для теплого Нептуна GJ436b впервые показано в 3D расчетах, что при ожидаемом уровне XUV излучения и интенсивности плазменного ветра для данной звезды, вокруг планеты должна существовать обширная слабоионизованная оболочка размерами в десятки планетарных радиусов. Рассчитано транзитное поглощение в линии Ly α и обнаружено, что оно в основном создается энергичными нейтральными атомами в переходном слое между головной ударной волной и ионопаузой. В то же время, влияние радиационного давления оказывается незначительным, что опровергает более ранние результаты, полученные методом расчета траекторий частиц (Boutier et al. 2016, Lavie et al. 2017). Смоделированное поглощение хорошо согласуется с наблюдениями и подтвердило такие особенности, как сильная асимметрия между синим и красным крыльями профиля поглощенной линии Ly α , глубина поглощения в высокоскоростной синей части линии, достигающая более 70%, и время ингресса, начинающегося значительно раньше фотометрического транзита. С другой стороны, модель создает значительно более глубокий и более длинный выход, чем в наблюдениях, что указывает на то, что могут существовать другие процессы и факторы, которые до сих пор не учтены, которые влияют на взаимодействие покидающего планету материала и звездного ветра (Khodachenko et al., ApJ, 2019; Kislyakova et al., A&A, 2019).

4) Для HD209458b впервые смоделировано поглощение во всех резонансных линиях дальней УФ области, обнаруженных ранее в наблюдениях телескопом Хаббл. Это линии таких элементов, как H I, O I, C II, Mg I, Mg II, Si III. Поглощение звездного излучения, наблюдаемое HD209458b в резонансных линиях O I и C II, еще не было удовлетворительно смоделировано. В наших предыдущих 2D расчетах мы показали, что верхняя атмосфера HD209458b, в которой преобладает водород, нагретая XUV-излучением, расширяется до сверхзвуковой скорости за пределами полости Роша и тащит за собой более тяжелые частицы. Предполагая солнечное содержание, частицы O I и C II, ускоренные приливными силами до скоростей до 50 км/с, должны производить поглощение благодаря механизму доплеровского резонанса на уровне 6-10%, что согласуется с наблюдениями. Поскольку 2D-геометрия не учитывает силу Кориолиса в системе отсчета планеты, оставался вопрос, в какой степени закручивание в спираль покидающего планетарного материала и его фактически достигнутая скорость могут повлиять на выводы, сделанные на основе 2D-моделирования. В дальнейшем мы впервые применили в исследовании HD209458b глобальную трехмерную гидродинамическую много-жидкостную модель, которая самосогласованно описывает формирование и расширение уходящего планетарного ветра, подверженного влиянию приливных сил и сил Кориолиса, а также окружающего звездного ветра. Результаты моделирования подтвердили наши предыдущие выводы о том, что скорость и плотность планетарного потока достаточно высоки, чтобы произвести поглощение в резонансных линиях H I, O I и C II на уровне, близком к наблюдаемым значениям в транзите. Новым открытием является то, для линий Mg II и Si III согласование смоделированного поглощения с измеренным требует, по меньшей мере, в 10 раз меньшего содержания этих элементов, чем значения для Солнечной системы. Качественно этот вывод полностью соответствует ожидаемому малому содержанию этих элементов в верхней атмосфере HD209458b из-за их конденсации (Shaikhislamov et al., MNRAS, 2019).

5) Впервые смоделировано поглощение одновременно в линии Ly α водорода и в линии 1083 нм метастабильного гелия. В качестве объекта взят теплый нептун GJ 3470b, для которого измерено с хорошим спектральным разрешением значительное поглощение в обоих этих линиях. Диагностика атмосфер горячих экзопланет по свечению с метастабильного уровня 2S3 атома гелия является относительно новой и мало изученной, но в то же время перспективной, поскольку линию можно регистрировать наземными телескопами. Применение 3D глобального кода позволило впервые выявить сложный характер процессов возбуждения и девозбуждения метастабильного уровня. В частности, для GJ 3470b свечение в линии 1083 нм возбуждается рекомбинацией ионов гелия в потоке планетарного вещества в большой области вокруг планеты $\sim 10R_p$. С другой стороны, на

крыльях линии большой вклад вносит область ударной волны, формируемой при столкновении планетарного потока со звездным ветром. Там преобладает процесс ударного возбуждения метастабильного уровня горячими электронами. Таким образом, измерения с хорошим спектральным разрешением позволяют, совместно с комплексным численным моделированием, диагностировать различные области и процессы, протекающие вокруг горячих экзопланет. Конкретно для GJ 3470b установлено, что наблюдаемое транзитное поглощение в линии 1083 нм указывает на пониженное содержание гелия в верхней атмосфере планеты ($\text{He}/\text{H} \sim 0.013$) по сравнению со стандартным солнечным значением ($\text{He}/\text{H} \sim 0.1$). (Shaikhislamov et al., MNRAS, 2020).

б) Рассмотрен теплый нептун Pi Men C, для которого измерено транзитное поглощение в линии Ly α и обнаружено, что оно не превышает 6% в интервале скоростей [200; 70] км/с. При этом для похожих систем (GJ436b, GJ3479b) зарегистрированное поглощение существенно больше 10%. Предыдущие попытки объяснения наблюдений использовали 1D модель без учета потока звездного ветра и образования ЭНА. Мы применили 3D глобальную аэрономную модель и показали, что слабое поглощение в линии Ly α возможно только при условии, если плазменный ветер звезды Pi Men примерно в 6 раз меньше по интенсивности среднего Солнечного ветра (Shaikhislamov et al., A&A, 2020).

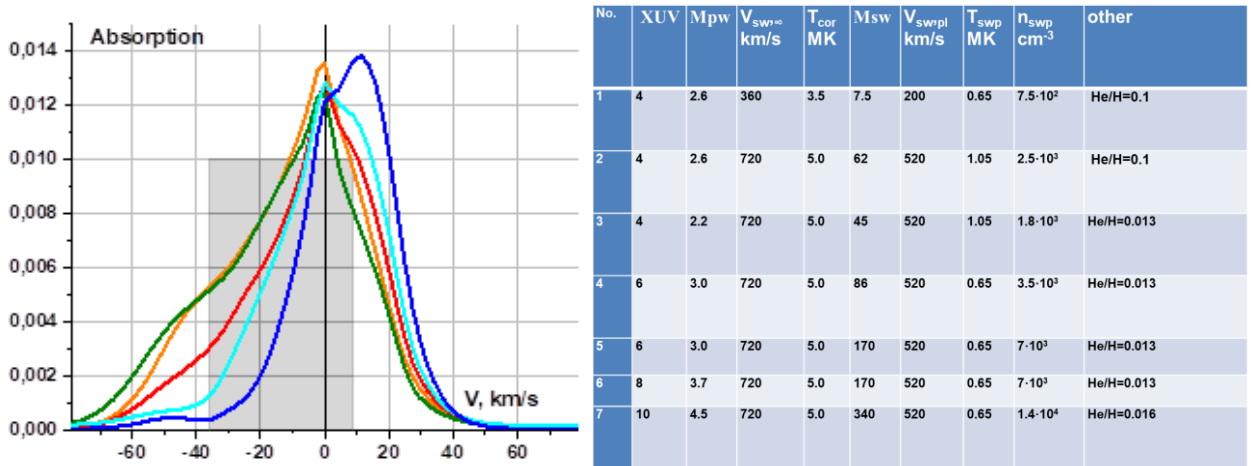


Рисунок 1. Слева: Профили поглощения линии He 1083 нм, рассчитанные для набора N3 (синяя линия), N4 (голубой), N5 (оранжевый), N6 (красный), N7 (зеленый) с низким содержанием гелия; Справа: наборы параметров для моделирования. Столбец XUV содержит звездный поток в диапазоне длин волн $1 < \lambda < 91,2$ нм, выраженный в эрг*см $^{-2}$ *с $^{-1}$ и масштабированный на 1 а.е. Скорость потери массы планеты M_{pw} / и звезды M_{sw} / выражается в 10^{10} г / с. Если не указано иное, другими параметрами моделирования являются: $P_{base} = 0,05$ бар, $T_{base} = 650$ К, $\text{He} / \text{H} = 0,1$. Индекс sw_p обозначает параметры СВ на орбите планеты.

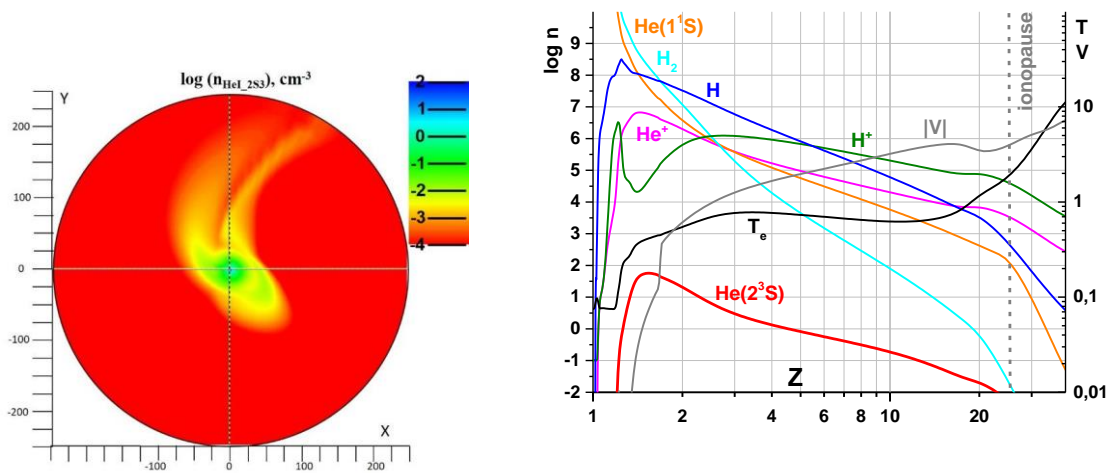


Рисунок 2. Слева: распределение плотности HeI (23S) в плоскости орбиты. Справа: профили температуры и скорости HeI (23S) (правая ось) и плотность основных частиц (левая ось) вдоль оси наблюдения Z. Вертикальная пунктирная линия указывает положение границы между планетарной плазмой и плазмой SW. Оси масштабируются в планетарных радиусах R_p

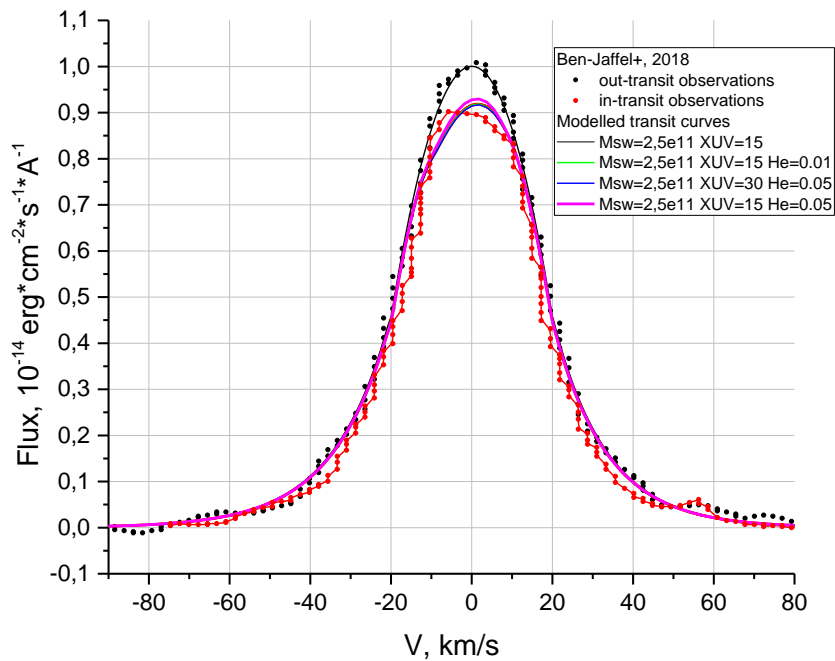


Рисунок 3. Транзитные поглощения в линии нейтрального кислорода, описанные в работе Ben-Jaffel 2018: черные точки вне транзита, красные – в транзите, а также рассчитанные кривые, полученные с использованием 3D МГД модели

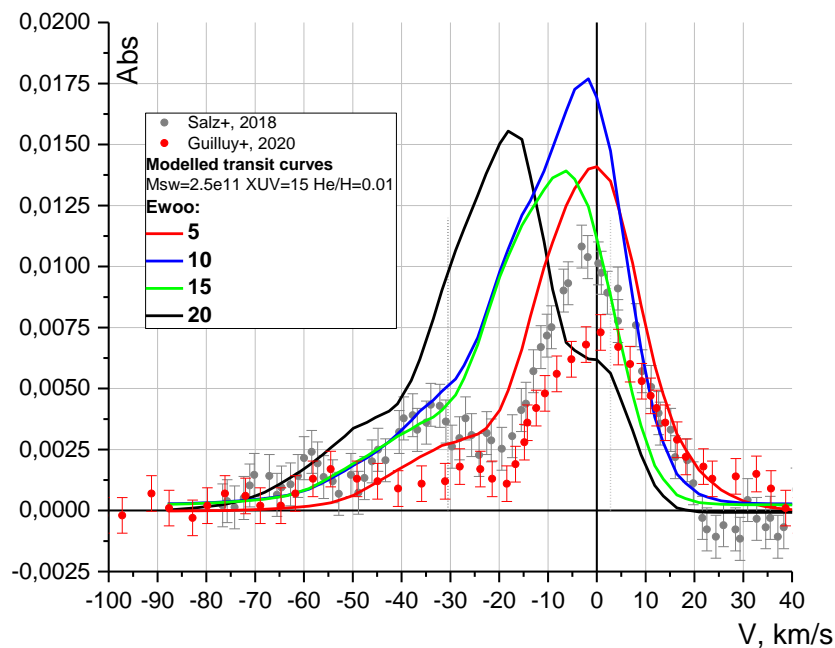


Рисунок 4. Влияние вариации спектральной энергии на орбите планеты на поглощение в линии метастабильного гелия. Расчеты проводились при XUV 15 эрг/с, относительно низком звездном ветре и стандартной относительной концентрации гелия. Скорость фотоионизации увеличивалась в 25, 20, 10 и 5 раз по сравнению со стандартным значением

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Многопроцессорный суперкомпьютер на базе оборудования ИВЦ НГУ является неотъемлемой частью для качественного проведения заявленных работ. Использование суперкомпьютерного комплекса позволяет проводить масштабные серии расчетов, что очень важно для понимания процессов протекающих в атмосфере экзопланет, а так же проводить вычисления с высокой скоростью. Результаты, достигнутые по проекту и опубликованные в статьях, было бы невозможно достигнуть получить без оперативного использования кластера ИВЦ НГУ.

7. Перечень публикаций 2019-2020 гг в журналах первой четверти, содержащих результаты работы группы и ссылку на кластер ИВЦ НГУ

- 1) Dwivedi, N. K., Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Fossati, L., Lammer, H., Sasunov, Y. ... & Güdel, M. (2019). Modelling atmospheric escape and Mg ii near-ultraviolet absorption of the highly irradiated hot Jupiter WASP-12b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 487(3), 4208-4220.
- 2) Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., & Rumenskikh, M. S. (2019). 3D Modeling of absorption by various species for hot jupiter HD209458b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society., <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3211>
- 3) Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Lammer, H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., Rumenskikh, M. S., ... & Dwivedi, N. K. (2019). Global 3D Hydrodynamic Modeling of In-transit Ly α Absorption of GJ 436b.

The Astrophysical Journal, 885(1), 67. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab46a4>

4) Shaikhislamov I. F. et al. Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: Comparison with Ly α transit observations
Astronomy & Astrophysics. – 2020. – Т. 639. – С. A109.

5) Shaikhislamov I. F. et al. Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 A lines at transits of GJ3470b
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Т. 500. – №. 1. – С. 1404-1413.

6) Shaikhislamov I. F. et al. Three-dimensional modelling of absorption by various species for hot Jupiter HD 209458b
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Т. 491. – №. 3. – С. 3435-3447.

**Прошу предоставить доступ к пользованию ресурсов ИВЦ НГУ до 31 декабря 2022 года.
Руководитель группы, д.ф.-м.н. Шайхисламов И.Ф.**

14.12.2020