

Тема работы

Взаимодействие планетарного ветра близко-орбитальных экзопланет со звездными ветрами

Состав коллектива

Шайхисламов Ильдар Фаритович д.ф.-м.н. и.о. директора, Институт Лазерной физики СО РАН, руководитель.

Березуцкий Артем Григорьевич, н.с., Институт Лазерной физики СО РАН, исполнитель.

Руменских Марина Сергеевна, н.с., Институт Лазерной физики СО РАН, исполнитель.

Информация о гранте

Проект РНФ № 23-12-00134 «Физика экзопланетных атмосфер и интерпретация наблюдательных проявлений», руководитель Шайхисламов И.Ф.

Научное содержание работы

Постановка задачи

Горячие газовые экзопланеты, которые обнаруживаются на очень близких орбитах к родительским звездам, являются уникальными и новыми объектами в астрофизике и физике плазмы. Несмотря на то, что их аналогов нет в Солнечной системе, популяция таких планет оценивается до 10% из всех существующих. Основная особенность горячих экзопланет состоит в том, что из-за интенсивной ионизирующей радиации звезды преимущественно водородно-гелиевая атмосфера нагревается до степени, когда начинается сверхзвуковое истечение. При этом истекающее вещество является достаточно холодными чтобы содержать нейтральные и низко-ионизованные компоненты. Это дает уникальные возможности по транзитным спектральным наблюдениям в видимой и инфракрасной области, а также вакуумного ультрафиолета, в ходе которых можно измерять не только составляющие элементы атмосферы планеты, но и параметры звездной плазмы, с которой эти элементы взаимодействуют. Физические параметры горячих экзопланет и их сверхзвукового ветра качественным образом отличаются от других двойных астрофизических систем. Основным методом исследования в проекте является разработанный авторами трехмерный многокомпонентный МГД код, включающий самосогласованным образом необходимые аспекты явления, такие как аэрономия и плазма-фото-химия верхней атмосферы, расчет переноса ионизирующей радиации со спектральным разрешением, нагрев и газодинамическое истечение, формирование потока звездной плазмы в зоне ускорения, магнитное поле планеты и звезды, расчет поглощения в различных линиях с возможностью прямого сравнения с наблюдениями. Код успешно применялся для моделирования ряда горячих экзопланет. В проекте будут изучаться различные режимы взаимодействия планетарного ветра с родительской звездой, ударные волны и аккреция планетарного вещества, эволюционные сценарии потери атмосферы, миграции экзопланет. Будут смоделированы реальные системы для интерпретации имеющихся и поступающих спектральных наблюдений, а также предсказания новых эффектов и новых перспективных объектов для наблюдений.

Современное состояние проблемы

Горячие экзопланеты являются совершенно новым классом объектов, существование которых не было предвосхищено до их обнаружения. Vidal-Madjar et al. (2003) увидели на телескопе HST/STIS уменьшение интенсивности в звездной Ly α на высокоскоростном голубом крыле спектральной линии во время транзита Горячего Юпитера HD 209458b на 15%, которое можно объяснить только присутствием в звездном ветре энергичных нейтральных атомов планетарного происхождения, движущихся от звезды со скоростями до 150 км/с. Аналогичное поглощение на голубом крыле Ly α также обнаружено у Горячего Юпитера HD189733b (Lecavelier des Etangs et al. 2008; Bourrier et al. 2013) и газового гиганта 55 Cnc (Ehrenreich et al., 2012). Транзитные измерения Теплового Нептуна GJ 436b (Ehrenreich et al. 2015) дали поглощение в линии Ly α до 50% в интервале до 150 км/с. Теоретический анализ позволил предположить, что из-за близкого положения к родительской звезде интенсивная ионизирующая радиация может нагревать водородно-гелиевую атмосферу газовых планет до такой степени, что формируется сверхзвуковое истечение (Lammer et al. 2004). Планетарный ветер горячих экзопланет уже стал новой концепцией, которая имеет глубокие аналогии со звездным ветром (решение Паркера) с одной стороны, и принципиальные отличия в механизме формирования и свойствах с другой. Принципиальная возможность получения информации о планете и даже звездном ветре благодаря обширной плазмосфере горячих экзопланет была осознана в последние десять лет и в настоящий момент активно изучается. Для этого необходимо глубокое теоретическое понимание явления и создание специальных численных моделей.

Вскоре после обнаружения Горячих Юпитеров для описания их экзосферы были применены 1D аэрономические газодинамические модели (Yelle 2004, Tian et al. 2005, García Muñoz 2007, Penz et al. 2008, Murray-Clay et al. 2009, Koskinen et al. 2010, Guo 2011, Trammel et al. 2011, Shaikhislamov et al. 2014, Shematovich 2015). Было обнаружено, что из-за экстремального нагрева ионизирующим XUV излучением звезды близко-орбитальные планеты действительно должны формировать поток вещества в форме сверхзвукового газо-плазменного планетарного ветра, который преодолевает притяжения планеты и уходит за границу Роша. Расчетная температура экзосферы в $\sim 10^4$ К, скорость истечения ~ 10 км/с и потеря массы в диапазоне $\sim 10^9$ – 10^{12} г/с качественно соответствуют транзитным спектральным наблюдениям. В этих работах были рассмотрены по отдельности основные факторы и процессы, влияющие на формирование планетарного ветра: Ионизирующий XUV спектр звезды и особенности его поглощения, приливные силы, водородная плазмо-фотохимия и более тяжелые элементы в составе атмосферы, газодинамика ускорения частично ионизированной плазмы, процессы инфракрасного и ультрафиолетового охлаждения, неоднородность нагрева и зональные течения.

Следующим шагом было развитие концепции магнитогидродинамического взаимодействия планетарного ветра со звездным ветром. Murray-Clay et al. (2009) оценил, что для экзопланеты HD 209458b типичное давление Солнечного Ветра сравнивается с тепловым и кинетическим давлением планетарного ветра на расстоянии около 4-5 радиусов планеты. Это расстояние примерно соответствует точке перехода планетарного течения в сверхзвуковой режим. Этот вывод был подтвержден в работах авторов проекта (Shaikhislamov et al. 2014, Khodachenko et al. 2015), которые оценили это расстояние в пять радиусов планеты, что находится за пределами полости Роша. Несмотря на очевидную

необходимость дополнить перечисленные выше гидродинамические модели формирования планетарного ветра и кинетические модели пробных частиц таким элементом, как газодинамическое взаимодействие со звездным ветром, такие попытки носят ограниченный характер. Это связано с необходимостью перехода от 1D по крайней мере к 2D геометрии, раздельного описания значительно различающихся газодинамических компонент, комбинирования крупномасштабных процессов взаимодействия плазменных потоков с микро-процессами формирования планетарного ветра на атмосферной шкале высот. Есть несколько работ, в которых часть проблем была решена посредством адаптации астрофизических кодов. В одной из первых работ (Stone and Proga 2009) моделировалась ударная волна от столкновения ветров. Для очень близких экзопланет типа Wasp-12b в работе (Bisikalo et al 2013) было показана трехмерная картина того, как планетарное вещество достигает границы полости Роша и далее падает на звезду в виде нерегулярных спиральных сгустков. Параметрическое исследование при различной интенсивности ветров показало (Matsakos et al. 2015), что если звездный ветер останавливает планетарное течение в пределах полости Роша, то формируется кометная структура с тянущимся хвостом. В противном случае на дневной стороне образуется струя убегающего планетарного вещества, аккрецирующая на звезду и быстро теряющая момент вращения за счет взаимодействия со звездным ветром. В работе (Tremblin & Chiang 2013) было впервые предложено рассматривать формирование облака ЭНА в рамках газодинамического подхода, для чего моделировать четыре жидкости – атомы и протоны планетарного происхождения, звездные протоны и ЭНА. Однако в этой работе, помимо многочисленных эмпирических упрощений, подход не был доведен до конца, поскольку движение планетарных частиц не разделялось. В результате перезарядка и формирование ЭНА было возможно только в тонком пограничном слое турбулентного перемешивания.

Собственное магнитное поле планеты есть еще один важный фактор, определяющий интенсивность планетарного ветра и скорость потери массы (Khodachenko et al. 2007). В первых попытках учесть планетарное магнитное поле в структуре экзосферы эмпирически задавались «мертвая» зона и зона «ветра» в соответствии с теоретическим анализом (Mestel 1968), выполненным в свое время для плазменного ветра магнитных звезд. Adams (2011) построил изотермическое решение типа Паркера вдоль фиксированных и открытых линий магнитного поля. Trammell et al. (2011) показали, что приливные силы существенно тормозят ветер на полюсах планеты. Более актуальный подход, основанный на 2D MHD моделях, выполненный в последние годы (Trammel et al. 2014, Owen and Adams 2014), подтвердил формирование в потоке планетарного ветра «мертвой» зоны и зоны «ветра». Однако, нагрев термосферы и гидродинамическое течение, формируемое в верхней атмосфере моделировались в этих работах весьма упрощенно, в предположении моно-энергетического XUV излучения, изотермического или эмпирически заданного профиля температуры, варьируемых граничных условий на поверхности планеты. В результате, полученные оценки на величину планетарного магнитного поля при котором должно происходить заметное подавление планетарного ветра различаются в этих работах более чем на порядок величины. Поэтому самосогласованное моделирование планетарного ветра в присутствии собственного магнитного поля планеты остается актуальной задачей, и было впервые реализовано авторами проекта (Shaikhislamov et al 2014, Khodachenko et al. 2015). Нами был предложен общий подход к формированию магнитосферы Горячих Юпитеров с учетом горячей и расширяющейся термосферы. Ключевым элементом этого

сценария является взаимодействие разлетающегося горячего и ионизованного газа с магнитным полем, которое вращается вместе с планетой. В результате формируется экваториальный токовый слой или окружающий планету магнитодиск. В работе авторов проекта такой магнитодиск был сперва смоделирован в лабораторном эксперименте (Antonov et al. 2013), а затем в численном моделировании (Khodachenko et al. 2015). Была впервые получена полностью самосогласованная подробная картина взаимодействия планетарного ветра с планетарным магнитным полем и подтверждено формирование магнитодиска, а также впервые обнаружен его динамический характер в виде периодических циклов медленного накопления потока со взрывными фазами пересоединения и релаксации. Для HD 209458b впервые установлено, что критическая величина магнитного поля, при которой потеря массы значительно уменьшается, составляет примерно 0.3-1 Гс на экваторе, что вполне вероятно для таких планет.

Одним из следствий планетарного ветра является потеря массы, которое может достигать до 10^{12} г/с и за времена жизни планеты составлять заметную долю от ее полной массы. Например, для Wasp 12b оценка составляет 6-12% (Lammer et al. 2009). Некоторые системы с экстремально близко-орбитальными газовыми гигантами показывают признаки пониженной активности звезды (низкого излучения в EUV области), что может свидетельствовать о заполнении системы большим количеством вещества и очень большой потере массы экзопланетой (на уровне $>10^{11}$ г/с для Wasp 13b, Fossati et al. 2015). Для супер-Земель и мини-Нептунунов стоит задача определения той доли первичной газовой оболочки вокруг каменистого ядра, которую планеты успевают сбросить за первые сотни миллионов лет эволюции (Howe & Burrows 2015). Существование таких оболочек подтверждается большим разбросом в наблюдаемых радиусах планет при относительно небольшой массе. вполне вероятно, что потеря первоначальной газовой оболочки является определяющим фактором для потенциальной обитаемости малых планет у красных карликов (Erkaev et al. 2016).

Литература:

1. Vidal-Madjar, A., Des Etangs, A. L., Désert, J. M., Ballester, G. E., Ferlet, R., Hébrard, G., & Mayor, M. (2003). An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b. *Nature*, 422(6928), 143.
2. Des Etangs, A. L., Pont, F., Vidal-Madjar, A., & Sing, D. (2008). Rayleigh scattering in the transit spectrum of HD 189733b. *Astronomy & Astrophysics*, 481(2), L83-L86.
3. Bourrier, V., & des Etangs, A. L. (2013). 3D model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions. *Astronomy & Astrophysics*, 557, A124.
4. Ehrenreich, D., Bourrier, V., Bonfils, X., des Etangs, A. L., Hébrard, G., Sing, D. K., ... & Forveille, T. (2012). Hint of a transiting extended atmosphere on 55 Cancri b. *Ast*
5. Ehrenreich, D., Bourrier, V., Wheatley, P. J., Des Etangs, A. L., Hébrard, G., Udry, S., ... & Vidal-Madjar, A. (2015). A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b. *Nature*, 522(7557), 459.

6. Lammer, H., Ribas, I., Grießmeier, J. M., Penz, T., Hanslmeier, A., & Biernat, H. K. (2004). A brief history of the solar radiation and particle flux evolution. *Hvar Observatory Bulletin*, 28, 139-155.
7. Yelle R. V. Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances // *Icarus*. 2004. V.170.№1.P.167-179.
8. Muñoz, A. G. (2007). Physical and chemical aeronomy of HD 209458b. *Planetary and Space Science*, 55(10), 1426-1455.
9. Penz, T., & Micela, G. (2008). X-ray induced mass loss effects on exoplanets orbiting dM stars. *Astronomy & Astrophysics*, 479(2), 579-584.
10. Murray-Clay, R. A., Chiang, E. I., & Murray, N. (2009). Atmospheric escape from hot Jupiters. *The Astrophysical Journal*, 693(1), 23.
11. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Sasunov, Y. L., Lammer, H., Kislyakova, K. G., & Erkaev, N. V. (2014). Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. I. Modeling of hydrodynamic escape of upper atmospheric material. *The Astrophysical Journal*, 795(2), 132.
12. Shematovich, V. I., Bisikalo, D. V., & Ionov, D. E. (2015). Suprathermal Particles in XUV-Heated and Extended Exoplanetary Upper Atmospheres. In *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments* (pp. 105-136). Springer, Cham.
13. Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Lammer, H., & Prokopov, P. A. (2015). Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. II. Effects of planetary magnetic field; structuring of inner magnetosphere. *The Astrophysical Journal*, 813(1), 50.
14. Stone, J. M., & Proga, D. (2009). Anisotropic winds from close-in extrasolar planets. *The Astrophysical Journal*, 694(1), 205.
15. Bisikalo, D., Kaygorodov, P., Ionov, D., Shematovich, V., Lammer, H., & Fossati, L. (2013). Three-dimensional gas dynamic simulation of the interaction between the exoplanet wasp-12b and its host star. *The Astrophysical Journal*, 764(1), 19.
16. Matsakos, T., Uribe, A., & Königl, A. (2015). Classification of magnetized star–planet interactions: bow shocks, tails, and inspiraling flows. *Astronomy & Astrophysics*, 578, A6.
17. Tremblin P. and Chiang E. 2013 *MNRAS* 428 2565
18. Khodachenko, M. L., Ribas, I., Lammer, H., Grießmeier, J. M., Leitner, M., Selsis, F., ... & Rucker, H. O. (2007). Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. I. CME impact on expected magnetospheres of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones. *Astrobiology*, 7(1), 167-184.
19. Mestel, L. (1968). Magnetic braking by a stellar wind—I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 138(3), 359-391.

20. Owen, J. E., & Adams, F. C. (2014). Magnetically controlled mass-loss from extrasolar planets in close orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(4), 3761-3779.
21. Antonov, V. M., E. L. Boyarinsev, A. A. Boyko, Yu P. Zakharov, A. V. Melekhov, A. G. Ponomarenko, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, and H. Lammer. Inflation of a dipole field in laboratory experiments: Toward an Understanding of magnetodisk formation in the magnetosphere of a hot Jupiter, *ApJ*, 2013, 769:28, (10pp).
22. Lammer, H., Bredehöft, J. H., Coustenis, A., Khodachenko, M. L., Kaltenecker, L., Grasset, O., ... & Wahlund, J. E. (2009). What makes a planet habitable?. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 17(2), 181-249.
23. Fossati, L., France, K., Koskinen, T., Juvan, I. G., Haswell, C. A., & Lendl, M. (2015). Far-UV spectroscopy of the planet-hosting star WASP-13: high-energy irradiance, distance, age, planetary mass-loss rate, and circumstellar environment. *The Astrophysical Journal*, 815(2), 118.
24. Howe, A. R., & Burrows, A. (2015). Evolutionary models of super-Earths and mini-Neptunes incorporating cooling and mass loss. *The Astrophysical Journal*, 808(2), 150.
25. Erkaev, N. V., Lammer, H., Odert, P., Kislyakova, K. G., Johnstone, C. P., Güdel, M., & Khodachenko, M. L. (2016). EUV-driven mass-loss of protoplanetary cores with hydrogen-dominated atmospheres: the influences of ionization and orbital distance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(2), 1300-1309.
26. Bourrier, V., des Etangs, A. L., Ehrenreich, D., Tanaka, Y. A., & Vidotto, A. A. An evaporating planet in the wind: stellar wind interactions with the radiatively braked exosphere of GJ 436 b. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, V. 591, A121.
27. Bourrier, V., Lecavelier des Etangs A. L. 3D model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, V.557, A124.
28. Lavie, B., Ehrenreich, D., Bourrier, V., des Etangs, A. L., Vidal-Madjar, A., Delfosse, X., Garcia Berna, A., Heng, K., Thomas, N., Udry, S., Wheatley, P. J. The long egress of GJ 436b's giant exosphere. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, V.605, L7.
29. Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Lammer, H., Kislyakova, K. G., Fossati, L., Johnstone, C. P., ... & Posukh, V. G. (2017). Ly α absorption at transits of HD 209458b: a comparative study of various mechanisms under different conditions. *The Astrophysical Journal*, 847(2), 126.
30. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., & Rumenskikh, M. S. (2018). 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(4), 5315-5323.
31. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Kislyakova, K. G., Fossati, L., Johnstone, C. P., Prokopov, P.A., Berezutsky, A.G., Zakharov Yu.P., Posukh, V. G. Two regimes of interaction of a Hot Jupiter's escaping atmosphere with the stellar wind and generation of energized atomic hydrogen corona. *The Astrophysical Journal*, 2016, V.832, №2, P.173.

32. Alexeev, I. I., & Belenkaya, E. S. (1991). Alfvén wings in the vicinity of a conducting body in a magnetized plasma. *Journal of atmospheric and terrestrial physics*, 53(11-12), 1099-1101.
33. Березуцкий, А. Г., Шайхисламов, И. Ф., Мирошниченко, И. Б., Руменских, М. С., & Ходаченко, М. Л. (2019). Взаимодействие расширяющейся атмосферы со звездным ветром вокруг экзопланеты Gliese 436 b. *Астрономический вестник*, 53(2), 147-154.
34. Izmodenov, V. V., Geiss, J., Lallement, R., Gloeckler, G., Baranov, V. B., & Malama, Y. G. (1999). Filtration of interstellar hydrogen in the two-shock heliospheric interface: Inferences on the local interstellar cloud electron density. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A3), 4731-4741.
35. Bisikalo, D. V., Shematovich, V. I., Gérard, J. C., & Hubert, B. (2017). Influence of the crustal magnetic field on the Mars aurora electron flux and UV brightness. *Icarus*, 282, 127-135.
36. Cherenkov, A., Bisikalo, D., Fossati, L., & Möstl, C. (2017). The influence of coronal mass ejections on the mass-loss rates of hot-Jupiters. *The Astrophysical Journal*, 846(1), 31.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Основная работа за отчетный период была связана с:

- анализом полученных результатов наблюдательных данных по различным экзопланетам и поиск наиболее перспективных систем, для которых можно обнаружить принципиально новые режимы взаимодействия;
- получение общих физических закономерностей и критериев, позволяющих оценить какой режим взаимодействия, и сценария наиболее вероятен для той или иной планетарной системы методами численного моделирования.

Авторы развивают модель численного моделирования горячих экзопланет с 2013 г., последовательно разработав 1D HD (Shaikhislamov et al 2014) и 2D HD/MHD (Khodachenko et al 2015) коды. Они были применены для анализа взаимодействия планетарного ветра с планетарным магнитным полем (Khodachenko et al 2015), со звездным ветром (Shaikhislamov et al 2015), 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 астрономическое 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 фотоионизация, электронный удар, рекомбинация и перезарядка. Фотоионизация также приводит к нагреву вещества через порождаемые фото-электроны. Для каждой конкретной звезды используется наиболее подходящий XUV спектр в диапазоне 10–912 А. 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 H_3^+ . Обмен импульсом и энергией между различными компонентами происходит за счет ион атомных и Кулоновских

столкновений. Верхняя атмосфера планет берется состоящей из компонент H , H^+ , H_2 , H_2^+ , H_3^+ , 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. 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.

Полученные результаты

1) Впервые реализовано комплексное 3D аэрономное моделирование ультра-горячего Юпитера Kelt9b с расчетом транзитного поглощения и сравнением с наблюдениями сразу в двух линиях H β 121.5 нм и OI 777.4 нм. Получено хорошее соответствие по глубине и ширине профиля поглощения в обеих линиях и на основе этого сделаны следующие выводы: Основным источником нагрева является фотоионизация возбужденного водорода, а основным каналом генерации возбужденного водорода является рекомбинация. В отличие от работы Muñoz & Schneider (2019) мы впервые подтвердили, что наблюдаемое поглощение в линии H α 656.3 нм соответствует именно тому количеству возбужденных атомов водорода, которое обеспечивает необходимый нагрев верхней атмосферы. Полученная нами степень нагрева атмосферы также объясняет большую ширину профиля поглощения в линии OI 777.4 нм. Для объяснения ширины поглощения авторам работы Fossati et al. 2022 пришлось ввести необоснованное уширение за счет турбулентности.

2) В 3D МГД численном моделировании показано, что планетарное магнитное поле и звездный плазменный ветер не могут создать прямой протяженный хвост у близкоорбитальных планет и тем самым объяснить измеренное для HAT-P-11 b транзитное поглощение в голубом крыле линий Ly α и CII 133.5 нм при слабом поглощении в центре линии. Впервые проведено моделирование экзопланеты HAT-P-11 b с фитированием измерений сразу в двух линиях, Ly α и HeI 1083 нм. Найдены величины интенсивности ионизирующей радиации и звездного ветра, а также содержания гелия, при которых достигается качественное согласие с наблюдениями. При этом поглощение в линии Ly α создается Энергичными Нейтральными Атомами в области ударной волны в результате взаимодействия звездного ветра с планетарной атмосферой, а поглощение в гелии в близи планеты в результате фотоионизации и нагрева атомов ионизирующей радиацией.

3) 3D многожидкостное моделирование поглощения в линии HeI 1083 нм в транзитах теплого нептона GJ436b впервые позволило установить следующее. Содержание гелия и тяжелых элементов в атмосфере оценивается величинами ≤ 0.3 и ≤ 2 от стандартных солнечных. Слои атмосферы на высотах $0.3R_p < r < 1R_p$ состоят преимущественно из молекулярного водорода. Звездный ветер несущественно влияет на поглощение в линии метастабильного гелия, поскольку оно происходит вдали от границы взаимодействия планетарного и звездного веществ. Учет радиационного давления звезды в линии 1083 нм существенно влияет на поглощение в линии метастабильного гелия и должен учитываться при интерпретации транзитных поглощений, особенно в линиях, образованных при переходе с метастабильных уровней.

Путем подбора параметров модели к пределу не обнаружения поглощения в измерениях получен верхний предел содержания гелия - в три раза меньшим солнечного значения. Основная причина слабого поглощения состоит в том, что область, населенная метастабильным гелием довольно мала ($< 3R_p$), как и сама планета, по сравнению с родительской звездой. Мы также показали, что сила радиационного давления, действующая на атомы HeI(23S) уширяет профиль линии и также уменьшает пиковое значение поглощения.

4) Аналогично системе TOI421, изученной нами ранее, мы показали, что атмосферное истечение ближней планеты HD 63433b значительно возмущает поток звездного ветра. В результате, на орбите более дальней планеты HD 63433c температура и скорость звездного будут варьироваться в случае прохождения через след хвоста ближней планеты. Это должно отражаться на транзитном поглощении в линии Ly α экзопланеты HD 63433b, если транзит происходит через несколько часов после прохождения HD 63433c. Таким образом, нами предсказывается, что изменения поглощения Ly α , связанного с относительным положением планет в системе, может дать уникальную информацию о звездном ветре.

Эффект от использования кластера в достижений 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. Для дальнейших исследований необходим доступ к ИВЦ НГУ до 31.12.2026 г.

Перечень основных публикаций за 2023-2024 г.

1. Berezutsky, A. G., Shaikhislamov, I. F., Rumenskikh, M. S., Miroshnichenko, I. B., Khodachenko, M. L., Golubovskii, M. P., & Sharipov, S. S. (2024). 3D aeronomy of two mini-neptunes in the HD 63433 system and their in-transit absorption in Ly α and metastable He i lines. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 533(1), 374-385.
2. Rumenskikh, M. S., Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Miroshnichenko, I. B., Berezutsky, A. G., Shepelin, A. V., & Dwivedi, N. K. (2023). Mysterious non-detection of He i (23S) transit absorption of GJ 436b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 526(3), 4120-4129.

3. Fossati, L., Pillitteri, I., Shaikhislamov, I. F., Bonfanti, A., Borsa, F., Carleo, I., ... & Rumenskikh, M. S. (2023). Possible origin of the non-detection of metastable He I in the upper atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. *Astronomy & Astrophysics*, 673, A37.