

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, м.н.с., Институт Лазерной физики СО РАН, исполнитель.

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

Информация о гранте

Проект РФФ № 18-12-00080 «Экзосфера горячих экзопланет и ее наблюдательные проявления», руководитель Шайхисламов И.Ф.

Проект РФФИ № 20-0200520 «Новые сценарии и режимы взаимодействия планетарного течения горячих экзопланет с плазменным ветром звезд», руководитель Шайхисламов И.Ф.

Научное содержание работы

Постановка задачи

Изучение экзопланет в настоящее время является одним из наиболее бурно развивающихся направлений астрофизики и астрономии. Это стимулирует также прогресс в смежных областях физики, химии и астробиологии. Значительная часть астрономических наблюдений сейчас сосредоточена в этой области. Помимо обширной сети наземных инструментов и наблюдательных кампаний (ALMA, WASP, HARPS и т. д.), были успешно завершены несколько специализированных космических миссий (например, CoRoT, Kepler, K2), в ходе которых были обнаружены тысячи экзопланет и уточнены их основные свойства. Ряд других миссий (например, HST, CHEOPS, TESS, JWST и т. д.) в настоящее время находятся в эксплуатации, и другие (например, PLATO, ARIEL, Spectr-UV) будут запущены в ближайшее время. Полученные данные наблюдений за экзопланетами позволяют получить уникальное представление о природе их миров, но они нуждаются в последовательной физической интерпретации, чтобы преобразовать эмпирические факты в научное знание и понимание.

Из большого разнообразия экзопланет выделяются так называемые Горячие Юпитеры, которые по меркам Солнечной системы вращаются крайне близко к родительским звездам. Благодаря относительно короткому периоду обращения и достаточно большим размерам такие планеты создают ярко выраженную модуляцию кривой блеска звезды. Их гораздо легче обнаружить на фоне естественных и инструментальных шумов даже без длительных непрерывных наблюдений. Таким образом, в будущем горячие юпитеры останутся большим классом вновь открываемых экзопланет и важным объектом исследований. В настоящее время около 10% всех обнаруженных экзопланет являются горячими Юпитерами или теплыми Нептунами. При этом почти половина из них обращается вокруг своих звезд на расстояниях менее 0.05 а.е., что в 8 раз меньше орбиты Меркурия и меньше десятка звездных радиусов.

Сам факт открытия Горячих Юпитеров поставил вопрос о пересмотре теорий образования планетных систем, и в настоящее время разрабатываются модели

интенсивной миграции планет, либо их образования непосредственно вблизи звезды. Только детальное понимание эволюции горячих планет решит эту проблему. Транзитная спектроскопия открывает уникальные возможности для независимого определения химического состава планет за пределами Солнечной системы. Он также способен предоставлять информацию о параметрах излучения и плазменного ветра родительской звезды. Поскольку прямое измерение параметров космической погоды вокруг других звезд недоступно, разработка соответствующих методов имеет большое научное значение.

Плазмосфера горячих экзопланет, образованная истечением верхних слоев атмосферы под действием звездного излучения, является новым объектом в астрофизике и космической плазме. Интенсивный выброс планетарного вещества в виде ветра, часто сверхзвукового, влияет на всю звездную систему и порождает ряд новых, ранее не изученных процессов. Понимание того, что газовые планеты, вращающиеся очень близко к звездам, создают вокруг себя уникальную плазмосферу и экзосферу, началось в 2003 г. (Видаль-Маджар и др., 2003, Ламмер и др., 2003) и продолжается в качественном и количественном аспектах. Основными каналами, рассматриваемыми для дистанционного зондирования окрестностей экзопланет и получения данных наблюдений, являются 1) УФ-ВУФ и ИК-спектроскопия, 2) широкополосная оптическая фотометрия и 3) потенциально радио-диапазон. Первые два связаны с измерениями искажений и поглощения спектра звездного излучения во время транзитов, когда планета, как ее видит наблюдатель, проходит перед звездным диском. Около 3400 из общего количества 4500 подтвержденных на сегодняшний день экзопланет (~76%) были обнаружены как транзитные экзопланеты. Около 50% этих планет расположены на очень близких (<0.2 а.е.) орбитальных расстояниях от своих родительских звезд и подвергаются интенсивному звездному излучению и потокам плазмы. Отличительной особенностью горячих близкорбитальных экзопланет является расширение и истечение их верхних атмосфер, ионизируемых и нагреваемых ВУФ- и мягким рентгеновским излучением родительских звезд (Yelle 2004; García Muñoz 2007; Murray-Clay et al. 2009; Koskinen et al. 2010, 2013; Guo 2011, 2013; Bisikalo et al. 2013, Shaikhislamov et al. 2014). Истекающий частично ионизированный атмосферный материал, взаимодействуя с набегающим потоком плазмы Звездного Ветра, образует вокруг планеты динамическую плазмосферу. Такие плазмосферы являются новым объектом для астрофизики, включающей фотохимию, аэрономию и столкновительную магнитогидродинамику частично-ионизированной многокомпонентной планетарной плазмы.

Таким образом, основная научная задача заключается в анализе и описании на основе сравнения комплексного численного моделирования с данными наблюдений атмосфер экзопланет, обусловленных сложными звездно-планетными взаимодействиями и явлениями космической погоды. Это требует понимания лежащей в основе физики, доступной для зондирования с помощью наземных и космических инструментов.

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 Теплого 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 ионизованной 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 (Trammell 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 потери массы экзопланетой (на уровне $>10^{11}$ г/с для Wasp 13b, Fossati et al. 2015). Для супер-Земель и мини-Нептунов 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 аэрономическое 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) Для нескольких экзопланет определены параметры звездного ветра, при котором происходит интенсивное взаимодействие с истекающим планетарным веществом с образованием головной ударной волны, сносом вещества с орбиты планеты и образованием хвоста, а также значительным транзитным поглощением в линии $\text{Ly}\alpha$. Также рассмотрено влияние звездного ветра на поглощение в линии метастабильного гелия $\text{HeI}(2^3\text{S})$ и влияние звездного излучения в области 1083 нм на ускорение атомов метастабильного гелия.

2) Впервые выполнено моделирование с помощью трехмерного газодинамического многожидкостного аэрономического кода теплого Нептуна Wasp107b. Показано, что измеренное поглощение триплета $\text{HeI}(2^3\text{S})$ указывает на содержание гелия в верхних слоях атмосферы сравнимое со стандартным солнечным значением $\text{He}/\text{H}=0.1$. Это первая планета, демонстрирующая такое значительное содержание, поскольку для других экзопланет оно примерно в 10 раз ниже. Мы также подтвердили открытие (Spake et al. 2019, Allart et al. 2019), что радиационное давление, действующее на метастабильные атомы He , важно для формирования спектрального профиля поглощения. Однако мы продемонстрировали, что его эффект сильно нивелируется процессами столкновительного девозбуждения. Мы также показали, что вывод работы Dan & Wei 2021, также основанной на 3D газодинамическом моделировании, о несущественности радиационного давления и необходимости существования в системе очень сильного звездного ветра для объяснения спектрального профиля поглощения $\text{HeI}(2^3\text{S})$ является необоснованным, поскольку этот профиль объясняется естественным уровнем радиационного давления.

3) Взаимодействие экзопланетных атмосфер с родительской звездой имеет много аспектов. Один из мало изученных, по потенциально важным является кинетика возбужденных состояний верхней истекающей атмосферы. Нагрев ионизирующим излучением звезды до температуры порядка 10^4 К приводит к появлению небольшого количества атомов водорода, возбужденных на второй уровень. $\text{Ly}\alpha$ фотон излучаемый в

результате быстрого радиационного распада не может быстро покинуть плотные слои атмосферы и многократно переизлучается, что значительно увеличивает количество возбужденных атомов. В такой ситуации включается дополнительный канал нагрева – фотоионизация возбужденных атомов звездным излучением с длиной волны менее 365 нм. Энергия звездного излучения в ВУФ области спектра может превосходить на порядки энергию в XUV области. Расчеты для отдельных экзопланет показали, что такой механизм может оказаться основным (Munoz et al. 2020). Для задач настоящего проекта, механизм дополнительного нагрева может оказаться важным для вещества, накапливающегося в торе вокруг звезды. Для учета этого канала, нами развита модель Монте-Карло в приближении частично когерентного изотропного рассеяния Ly α фотонов на атомах водорода. В качестве исходных данных брались профили атомарного водорода, а также электронов, протонов и температуры, полученные при моделировании трехмерным газодинамическим кодом. Модернизация кода позволила включить в модель внутренние источники Ly α фотонов. Проведены расчеты, где помимо звездного излучения, Ly α фотоны образуются за счет процессов столкновений атомов водорода с электронами, а также рекомбинации протонов и электронов. В качестве процессов потери Ly α фотонов, помимо геометрического выхода из области расчета, взяты наиболее вероятные процессы: фотоионизация возбужденных атомов, а также двухфотонная релаксация возбужденного состояния, при этом учитывалось замешивание 2p и 2s уровней (l-mixing). Внутри модельной атмосферы генерируются фотоны, обладающие случайными координатами, направлением распространения, а также частотой (в соответствии с локальной температурой). Вне атмосферы равномерно по сферическому фронту генерируются модельные фотоны, соответствующие излучению родительской звезды, при этом фотоны распространяются в сторону планеты, а частота фотонов генерируется из модельного распределения (Burgler et al. 2013). Модельные фотоны распространяются между однородными атмосферными слоями на расстояние, соответствующее интегрально накопленной вероятности рассеяния. Каждый акт рассеяния регистрируется на осесимметричной сетке, при этом запоминается количество возбужденных в результате такого акта атомов водорода, а также количество атомов подвергшихся фотоионизации. Описанная модель позволяет получить профиль возбужденных атомов водорода в атмосферах экзопланет, а также посчитать мощность дополнительного нагрева атмосферы за счет фотоионизации. Количественная связь между плотностью атомов водорода в основном состоянии и выделяемой энергией в результате фотоионизации возбужденного атома водорода, полученная моделью Монте-Карло, позволяет включить данный процесс в трехмерный код простым способом, избегая сложных вычислений, которые трудно реализовать в МГД коде. Был произведен расчет дополнительного нагрева атмосферы за счет фотоионизации возбужденных атомов водорода. Для планеты HD189733b величина такого нагрева составила $\sim 4.2 \cdot 10^{23}$ эрг/с, что составляет примерно 10% относительно такого нагрева за счет XUV излучения. Для планеты HD209458b величина такого нагрева составляет $\sim 3.9 \cdot 10^{22}$ эрг/с, что составляет примерно 13% от нагрева за счет XUV излучения. Таким образом, эффект дополнительного нагрева уточняет, но не меняет принципиально предыдущие расчеты.

4) 3D газодинамическая численная модель была значительно дополнена возможностью расчета на двух пересекающихся сферических сетках. Достижение поставленных целей требует новых подходов численной (математической) реализации модели. В первую очередь это касается геометрической реализации физических условий. Специфика задачи диктует использование двух сферических систем координат, центрированных на планете и на звезде. До настоящего времени использовалась какая-либо одна из них. Выбор сферической сетки центрированной на планете наиболее оптимально для расчета формирования планетарно ветра, но не рационально для звездного ветра и не обеспечивает достаточной точности сохранения орбитального момента. Сферическая сетка с центром на звезде также необходима для расчета магнитного поля, вмороженного

в звездный ветер. С другой стороны, сферическая сетка с центром на звезде не может использоваться для расчета формирования планетарного ветра, поскольку не обладает достаточным разрешением вблизи планеты. Использование адаптивных сеток не только принципиально усложняет вычислительный аспект задачи, но и не решает до конца стоящих проблем. В настоящем проекте впервые будет использоваться совмещение двух сферических сеток. Каждая из них обеспечит необходимые параметры расчетов в своей области. При этом граница планетарной области будет выступать в качестве граничных условий для подобласти внутри глобальной сферической сетки вокруг звезды.

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 31.12.2024 г.

Перечень основных публикаций публикаций за 2020-2022 г.

1. 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.
2. Shaikhislamov I. F. et al. Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 Å lines at transits of GJ3470b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Т. 500. – №. 1. – С. 1404-1413.
3. Rumenskikh M. S. et al. Numerical Modeling of Spectral Measurements of Near-Orbit Exoplanets //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2020. – Т. 84. – №. 7. – С. 788-790.
4. Шайхисламов И. Ф., Ходаченко М. Л., Березуцкий А. Г. Атмосферный ветер горячих экзопланет и его наблюдательные проявления: от энергетических оценок до трехмерных МГД моделей //Астрономический журнал. – 2021. – Т. 98. – №. 1. – С. 10-28.
5. Мирошниченко И. Б. и др. Влияние Ly α излучения родительской звезды на поглощение в линии H α атмосфер горячих юпитеров HD189733B и HD 209458B //Астрономический журнал. – 2021. – Т. 98. – №. 1. – С. 66-74.
6. Khodachenko M. L. et al. Simulation of 10 830 Å absorption with a 3D hydrodynamic model reveals the solar He abundance in upper atmosphere of WASP-107b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2021. – Т. 503. – №. 1. – С. L23-L27.
7. Khodachenko M. L. et al. The impact of intrinsic magnetic field on the absorption signatures of elements probing the upper atmosphere of HD209458b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Т. 507. – №. 3. – С. 3626-3637.
8. Fossati L. et al. The GAPS Programme at TNG-XXXII. The revealing non-detection of metastable He I in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b //Astronomy & Astrophysics. – 2022. – Т. 658. – С. A136.
9. Rumenskikh M. S. et al. Global 3D Simulation of the Upper Atmosphere of HD189733b and Absorption in Metastable He i and Ly α Lines //The Astrophysical Journal. – 2022. – Т. 927. – №. 2. – С. 238.
10. Berezutsky A. G. et al. On the transit spectroscopy features of warm Neptunes in the TOI-421 system, revealed with their 3D aeronomy simulations //Monthly

Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – T. 515. – №. 1. – C. 706-715.