

1. Тема работы

Взаимодействие планетарного ветра близко-орбитальных экзопланет со звездными ветрами

2. Состав коллектива

1. Шайхисламов Ильдар Фаритович д.ф.-м.н. зам. директора, Институт Лазерной физики СО РАН, руководитель
2. Березуцкий Артем Григорьевич, аспирант, Институт Лазерной физики СО РАН, исполнитель
3. Руменских Марина Сергеевна, студент Новосибирского Гос. Университета, исполнитель.

3. Информация о гранте

РФФИ № 16-52-14006 Взаимодействие планетарного ветра близко-орбитальных экзопланет со звездными ветрами (2015-2018), руководитель - Шайхисламов И.Ф.

4. Аннотация

Планетарный ветер газовых гигантов, обращающихся на экстремально близких орбитах, представляет собой уникальное явление, не встречающееся в Солнечной системе. Статистика обнаруженных экзопланет показывает, что такой ветер, тем не менее, может широко встречаться во вселенной. Развитые теоретические и численные модели показали, что в верхней атмосфере, нагреваемой и фото-ионизируемой интенсивным XUV излучением звезды, развивается сверхзвуковое течение и потеря массы, которые кардинально изменяют плазменное окружение и долговременную эволюцию так называемых горячих Юпитеров. Спектральные особенности, наблюдаемые во время транзита близко-орбитальных экзопланет, дают интригующее свидетельство такого окружения и возможностей его экспериментального исследования. Другим критическим фактором плазменного окружения горячих экзопланет является звездный ветер, который сталкивается с планетарным ветром и ограничивает его течение ионопаузой, или магнитопаузой, если планета обладает помимо прочего значительным магнитным полем. Существенной новизной проекта является применение специально разработанной авторами полностью самосогласованной гидродинамической численной модели взаимодействия планетарного и звездного ветров для исследования и систематизации основных классов экзопланет, включая горячие Юпитеры, Нептуны и супер-Земли. Развитый многожидкостный подход описывает комплексную систему, состоящую из планетарных атомов и ионов, звездных протонов и таких компонент, как Энергичные Нейтральные Атомы (ЭНА) или тяжелые примесные ионы звездного происхождения. Численная модель основана на реалистичном солнечном спектре XUV излучения для описания ионизации и нагрева верхней атмосферы экзопланет; включает водородную фотохимию для расчета содержания молекулярного водорода и инфракрасного охлаждения молекулой H_3^+ ; взаимодействие планетарного магнитного поля с плазменными потоками в 2D осесимметричной геометрии. Основная цель работы состояла в построении комплексной картины различных физических режимов взаимодействия планетарного и звездного ветра. Такими режимами являются либо раздувание термосферы за границу Роша и дальнейшая аккреция планетарного вещества на звезду, либо его удержание звездным ветром. Эти принципиально различные сценарии определяются действием в зависимости от орбитального расстояния таких факторов, как приливные силы, давление звездного ветра и интенсивность XUV излучения.

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 ЭНА облака. Эти режимы в принципе можно различить по наблюдательным проявлениям. Принципиальный и до сих пор открытый вопрос о планетарном ветре состоит в том, где окажется вещество после того, как оно преодолет гравитацию планеты и попадет под воздействие притяжения звезды. С одной стороны, гравитация звезды и вращение планеты направляют планетарный ветер к звезде, формируя аккреционный или «захваченный звездой» режим. С другой стороны, достаточно сильный звездный ветер может остановить планетарное вещество и направить его в обратную сторону, формируя «унесенный ветром» режим. Очевидно, что интегральная потеря массы планетой будет зависеть от режима взаимодействия со звездным ветром. Формулировка проблемы двух базовых режимов истечения планетарного ветра и ее исследование специально разработанным 2D MHD многожидкостным численным кодом (Shaikhislamov et al. 2014, Khodachenko et al. 2015) составляет главную новизну и оригинальность работы.

5.2 Современное состояние проблемы

Анализ и численное моделирование Горячих Юпитеров, таких как HD209458b, показали, что расширение нагретой и частично ионизованной 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, 2009, 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, Guo 2011) 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.

Другим важным аспектом газовых гигантов является планетарное магнитное поле и магнитосфера. Помимо обычных факторов, такие как звездный ветер, величина магнитного поля и скорость вращения планеты, магнитосфера горячего Юпитера будет зависеть от планетарного ветра. С другой стороны, магнитосфера будет влиять на планетарный ветер и ограничивать потерю массы (Khodachenko et al 2007). Структура магнитосферы зависит от скорости и направления звездного ветра относительно планеты (Erkaev et al 2005). Достаточно далеко от звезды ветер сверхзвуковой и сверх-

Альфвеновский. В этом случае формируется магнитосфера Юпитерианского типа с головной ударной волной и хвостом. Однако для экстремально близких экзопланет с радиусом орбиты <0.03 а.е. звездный ветер находится на стадии ускорения и остается до-Альфвеновским (Preusse et al 2005), и магнитосфера может иметь безударную структуру Альфвеновских крыльев.

Большинство исследований потери массы экзопланет пренебрегают взаимодействием убегающего потока как с планетарным магнитным полем, так и со звездным ветром (Lammer et al 2003, Yelle 2004, 2006, Erkaev et al 2005, Tian et al. 2005, Penz et al 2008). До настоящего времени было лишь несколько попыток учесть это взаимодействие. Например, в работе (Trammell et al 2011) рассмотрено движение плазмы с учетом существования открытой области и области стагнации. Однако глобальное магнитное поле и распределенный магнитодиск задавались эмпирическим образом, а не определялись самосогласованным образом. Такой же подход использовался в работе (Adams 2011). В последних работах стали применяться 2D МГД модели (Trammell et al 2014, Owen & Adams 2014), в которых были подтверждены основные теоретические предположения – формирование мертвой зоны и зоны ветра. В работе авторов проекта (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.

Ссылки на литературу

Vidal-Madjar, A., Lecavelier des Etangs, A., Desert, J.M., Ballester, G.E., Ferlet, R., Hebrard, G., Mayor, M., An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b, *Nature*, 2003, 422, 143-146.

Lammer, H., Selsis, F., Ribas, I., Guinan, E. F., Bauer, S.J., Weiss, W.W., 2003. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-Ray and extreme-ultraviolet heating. *ApJ* 598, L121-L124.

Lammer, H., Odert, P., Leitzinger, M., Khodachenko, M.L., Panchenko, M., Kulikov, Y.N., Zhang, T.L., Lichtenegger, H.I.M., Erkaev, N.V., Wuchterl, G., Micela, G., Penz, T., Biernat, H.K., Weingrill, J., Steller, M., Ottacher, H., Hasiba, J., Hanslmeier, A., 2009. Determining the mass loss limit for close-in exoplanets: what can we learn from transit observations? *A&A* 506, 399-410.

Yelle, R.V., Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances, *Icarus*, 2004, 170, 167-179.

Erkaev, N.V., Penz, T., Lammer, H., Lichtenegger, H.I.M., Biernat, H.K., Wurz, P., Griebmeier, J., Weiss, W.W., Plasma and magnetic field parameters in the vicinity of short-periodic giant exoplanets, *ApJS*, 2005, 157, 396-401.

Garcia Munoz, A., Physical and chemical aeronomy of HD 209458b, *Planet. Space Sci.* 2007, 55, 1426-1455.

Koskinen, T.T., Yelle, R. V., Lavvas, P., Lewis, N. K., Characterizing the thermosphere of HD209458 b with UV tranist observations, *ApJ*, 2010, 723, 116-128.

Guo, J. H., Escaping particle fluxes in the atmospheres of close-in exoplanets. I. Model of hydrogen, *ApJ*, 2011, 733:98, (10pp).

Khodachenko, M.L., Lammer, H., Lichtenegger, H.I.M., Langmayr, D., Erkaev, N.V., Griebmeier, J.-M., Leitner, M., Penz, T., Biernat, H. K., Motschmann, U., Rucker, H.O., Mass

loss of “Hot Jupiters” – Implications for CoRoT discoveries. Part I: The importance of magnetospheric protection of a planet against ion loss caused by coronal mass ejections, *Planet. Space Sci.*, 2007, 55, 631-642.

5.3 Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Основная часть работы связана с физикой взаимодействия планетарного и звездного ветра (немагнитные планеты). Задача рассматривает только экзопланеты без собственного магнитного поля и посвящена изучению основных характеристик взаимодействия ветров. Конкретная цель состояла в построении общей картины и нахождении условий, когда реализуются предполагаемые сценарии истечения планетарного вещества (1) «захваченный звездой» и (2) «унесенный ветром». Моделировалась относительно близкая окрестность планеты ($<10R_p$) так что процесс собственно аккреции вещества на звезду в режиме 1 останется за пределами рассмотрения. В тоже время, полученные распределения плазмы можно использовать как входные параметры для расчета глобально динамики вещества другими моделями. Будут рассмотрены три основных типа приливно-захваченных планет (горячие Юпитеры, горячие Нептуны и супер-Земли) в широком диапазоне орбитальных расстояний 0.03-0.3 а.е. Для каждого типа определяется критическое расстояние и другие параметры системы, которые разделяют режим падения планетарного вещества на звезду и режим его ограничения звездным ветром. В первом режиме рассматривается структура ударной волны, с тем чтобы использовать эту важную информацию в других эмпирических моделях. Во втором режиме полученные данные позволят провести анализ возможности формирования из планетарного вещества тора (диска) окружающего звезду. Звезда в численном моделировании предполагается Солнечного типа с аналогичным потоком XUV излучения, быстрого и медленного плазменного ветра. Параметры ветра в зоне ускорения (<0.1 а.е.) взяты из модели, развитой ранее Австрийскими участниками проекта (Khodachenko et al. 2007, Johnstone et al. 2015). Результаты численного моделирования, полученные российскими участниками, прошли интерпретацию астрономами австрийской команды и сравнение с имеющимися наблюдательными данными (транзиты для HD209458, WASP-12b).

Используемая в расчетах, численная схема дискретизирует MHD уравнения на равномерной цилиндрической сетке r, z с шагом сетки $1/200$ радиуса планеты или менее. Такой малый пространственный размер необходим для разрешения областей поглощения XUV энергии в плотной сильно стратифицированной атмосфере вблизи условной поверхности планеты. Применяется явная схема с «upwind» расчетом динамики жидкостей и предсказательным шагом для магнитным величин. Высокая устойчивость достигается ограничением шага по времени $1/4$ от предела Куранта. Код распараллелизован и расчеты выполняются на кластерах.

5.4 Полученные результаты

1) Усовершенствован блок расчета водородной фотохимии горячих экзопланет. Для этого использовались реакции, протестированные австрийскими участниками с использованием химического кода KROME. Для повышения точности расчетов в условиях большой разницы в характерных временах отдельных реакций по сравнению с газодинамическим временем задачи находится прямое решение посредством обращения матрицы. Это позволило также повысить устойчивость расчетов и получить более достоверные данные о структуре верхней атмосферы и протяженности слоя, в котором присутствуют молекулы водорода.

2) Разработан блок расчета столкновений между частицами в форме обобщенной матрицы. Для каждой пары частиц найдены экспериментальные данные и аналитические модели, на основе которых табулируется сечение столкновений в зависимости от энергии.

3) Впервые проведены полностью самосогласованные расчеты взаимодействия экзопланеты HD209458b с потоком звездного ветра. Звездный ветер брался из модельных расчетов австрийских участников проекта и примерно соответствовал быстрому и медленному Солнечному ветру. Отличительной особенностью является то, что на рассматриваемых расстояниях от звезды ветер находится на стадии ускорения. Модель учитывает нагрев атмосферы коротковолновым ионизирующим излучением с реальным спектром в диапазоне от 912 до 10 А, измеренным для Солнца, химическую кинетику водородных компонент Н, Н⁺, Н₂, Н₂⁺, Н₃⁺, необходимую для расчета ионизации, рекомбинации, нагрева, инфракрасного охлаждения молекулами Н₃⁺, охлаждение через излучение Лайман-Альфа фотонов, реальные граничные условия на поверхности планеты с начальной барометрической статической атмосферой молекулярного водорода, адиабатическую динамику газа в поле гравитации и приливных сил.

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

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*, 832(2), 173, 2016

Erkaev N.V.; Lammer H.; Odert P.; Kislyakova K.G.; Johnstone C.P.; Gudel M.; Khodachenko M.L. 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*, vol. 460, no 2, pp.1300-1309, 2016.

Shaikhislamov I F, Khodachenko, M. L., Lammer H., Kislyakova K. G., Prokopov P. A., Johnstone C. P. Interaction of escaping atmosphere of HD209458b with stellar wind. *The Astrophysics of Planetary Habitability, Book of Abstracts, Vienna, Austria February 8-12, 2016.*

Khodachenko M. L., Shaikhislamov I. F., Lammer H., Kislyakova K. G., Fossati L., Johnstone C. P., Arkhypov O. V., Berezutsky A. G., Miroshnichenko I. B. & 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.

Weber C., Lammer H., Shaikhislamov I. F., Chadney J. M., Khodachenko M. L., Grießmeier J. M., ... & Kislyakova K. G. (2017). How expanded ionospheres of Hot Jupiters can prevent escape of radio emission generated by the cyclotron maser instability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(3), 3505-3517.

Erkaev N. V., Odert P., Lammer H., Kislyakova K. G., Fossati L., Mezentsev A. V., Shaikhislamov I. F. & Khodachenko M. L. (2017). Effect of stellar wind induced magnetic fields on planetary obstacles of non-magnetized hot Jupiters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470(4), 4330-4336.

I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, A. G. Berezutsky, I. B. Miroshnichenko. 3D Aeronomy Modeling of Close-in Exoplanets . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018

I. F. Shaikhislamov , M. L. Khodachenko, H. Lammer, L. Fossati, N. Dwivedi, M. Güdel, K. G. Kislyakova, C. P. Johnstone, A. G. Berezutsky, I. B. Miroshnichenko, V. G. Posukh, N. V. Erkaev, and V. A. Ivanov. Modeling of Absorption by Heavy Minor Species for the Hot Jupiter HD 209458b. *The Astrophysical Journal*, 866:47 (13pp), 2018 October 10