

УДК 521.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БЛИЗКО-ОРБИТАЛЬНЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2020 г. М. С. Руменских^{1, *}, И. Ф. Шайхисламов¹,
А. Г. Березуцкий¹, И. Б. Мирошниченко^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский государственный технический университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: marina_rumenskikh@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Данная статья посвящена исследованию процессов, происходящих при взаимодействии планетарной атмосферы Глизе 436 b с натекающим плазменным ветром и ионизирующим излучением родительской звезды. По итогам сравнения результатов численного моделирования с использованием самосогласованной магнитогидродинамической 3D-модели с результатами наблюдений посредством HST/STIS телескопа “Хаббл” был сделан вывод о приблизительных значениях скорости и плотности плазменного ветра звезды.

DOI: 10.31857/S0367676520070261

ВВЕДЕНИЕ

Со времен открытия первой экзопланеты экспериментальные и теоретические исследования этих космических объектов стали активно развиваться. Известно, что около 40% обнаруженных экзопланет вращаются вблизи (~ 0.1 а. е.) своих родительских звезд. Из-за малого расстояния воздействие на атмосферы планет оказывается значительным. Планета Глизе 436 b относится к классу теплых нептун. Ее период обращения вокруг родительской звезды составляет 2.64 земных суток. Из-за малого расстояния между планетой и звездой (0.03 а. е.) верхняя атмосфера ионизируется и формирует сверхзвуковое течение. Оптические наблюдения телескопами “Хаббл” и “Спитцер” [1, 2] показали наличие в атмосфере планеты водорода, а также таких соединений, как CO_2 и CH_4 . Кроме того, наличие водорода в атмосфере планеты было подтверждено теоретически.

Транзитные наблюдения [3, 4] показали значительное ($\sim 60\%$) поглощение линии Ly- α при проходе планеты перед диском звезды. Эта линия была выбрана, потому что атмосфера Глизе 436 b состоит преимущественно из водорода, и спектральные измерения проводились на длине волны 121.6 нм, что соответствует переходу серии Ly- α . По данным спектральных наблюдений определено, что поглощение происходит на скоростях от -120 до -40 км \cdot с $^{-1}$. Значительная величина поглощения $\sim 60\%$ показывает, что вокруг планеты су-

ществует обширное частично ионизованное облако водорода, в котором атомы ускорены или нагреты до больших температур.

Среди особенностей транзитной кривой, зарегистрированной телескопом “Хаббл”, стоит отметить раннее (относительно прохождения планеты перед диском звезды) поглощение [3] а также затянутое восстановление интенсивности Ly- α [4]. Это свидетельствует о том, что водородное облако вокруг планеты имеет протяженный (~ 50 млн км) хвост.

Целью нашей работы является исследование плазменного окружения горячих экзопланет, в частности взаимодействия атмосферы Глизе 436 b со звездным ветром, включая сравнение синтетических спектральных транзитных измерений, полученных в расчетах 3D газодинамическим кодом с измерениями телескопом “Хаббл”. Конечной целью является нахождения параметров звездного ветра. В настоящее время определение параметров далеких космических объектов не представляется возможным, а потому оптические методы диагностики оказываются единственным инструментом для определения таких важных параметров звездного ветра, как температура, скорость и плотность.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для численного решения газодинамических уравнений непрерывности, сохранения импульса

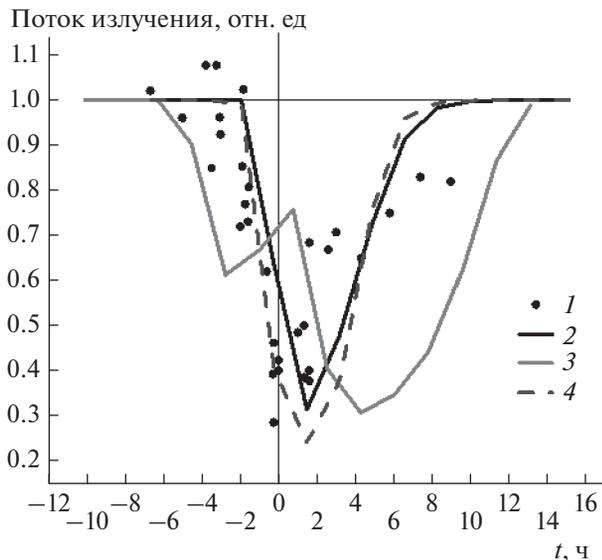


Рис. 1. Поглощение линии Ly- α . Линия была измерена телескопом “Хаббл” при транзите планеты перед диском звезды (точка отсчета временной шкалы – середина транзита). Измерения телескопа обозначены на рисунке точками (1), а рассчитанные транзитные кривые при различных параметрах звездного ветра – сплошными и пунктирными линиями (2 – $F_{XUV} = 0.43, n = 2.5 \cdot 10^7, T = 200$; 3 – $F_{XUV} = 0.86, n = 2.5 \cdot 10^7, T = 200$; 4 – $F_{XUV} = 2, n = 2.5 \cdot 10^7, T = 190$).

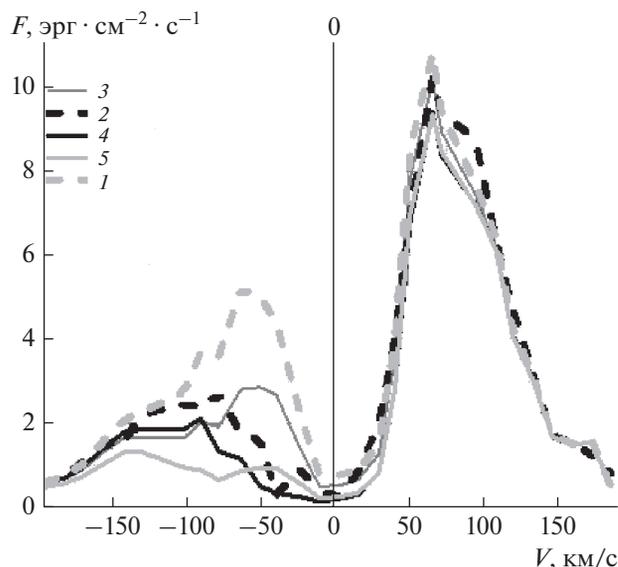


Рис. 2. Профиль линии Ly- α звезды Глизе 436, измеренный телескопом “Хаббл” вне транзита (серый пунктир, 1) и при переходе планеты через диск звезды (черный пунктир, 2). Также построены транзитные кривые при различных параметрах звездного ветра, полученные в численном моделировании (3 – $F_{XUV} = 0.43, n = 2.5 \cdot 10^7, T = 200$; 4 – $F_{XUV} = 0.43, n = 5 \cdot 10^6, T = 220$; 5 – $F_{XUV} = 2, n = 2.5 \cdot 10^7, T = 190$).

и энергии для различных компонент, записанных в следующем виде [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_j + \nabla(V_j n_j) = N_{XUV,j} + N_{exh,j}, \quad (1)$$

$$m_j \frac{\partial}{\partial t} V_j + m(V_j \nabla) V_j = -\frac{1}{n_j} \nabla n_j k T_j - \frac{z_j}{n_e} \nabla n_e k T_e - m_j \nabla U - 2m_j V_j \Omega - m_j \sum_i C_{ji}^v (V_j - V_i), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T_j + (V_j \nabla) T_j + (\gamma - 1) T_j \nabla V_j = W_{XUV,j} - \sum_i C_{ji}^T (T_j - T_i). \quad (3)$$

Модель многожидкостная и рассчитывает динамику различных атомарных и ионных компонент независимо, с учетом процессов ионизации и рекомбинации, плазмо-фото химии водородных молекул. Индекс j соответствует ионным, а i – электронным компонентам. Учет влияния ультрафиолетового излучения на динамику звездного ветра был произведен посредством включения первого слагаемого в правой части уравнений (1) и (3).

Используется система координат, совмещенная с центром планеты, ось Z которой направлена перпендикулярно плоскости эклиптики. Система

координат обращается вместе с планетой и вращается вокруг оси с одинаковой частотой, так что ось X всегда направлена на звезду – так называемая приливно-захваченная система отсчета. Для вычислений используется сферическая сетка с неравномерным шагом по радиусу. Полагается, что скорость течения вещества на поверхности планеты равна нулю, а нормальная составляющая скорости у поверхности звезды определяется решением политропного уравнения эволюции звездного ветра при заданной температуры короны и интегральной скорости потери массы звездой [5, 6].

Планета Глизе 436 b с массой $M_p = 0.07 M_J$ и радиусом $R = 0.38 R_J$, вращается на расстоянии $D = 0.028$ а. е. вокруг красного карлика Глизе 436 спектрального класса M 2.5, имеющего массу $M_{St} = 0.45 M_S$ и радиус $R_{St} = 0.46 R_S$. В качестве характерных значений численной задачи используется радиус планеты $R_p = 2.5 \cdot 10^9$ см, температура 10^4 К и соответствующая скорость протонов $V_0 = 9.07$ км · с⁻¹. Доплеровское уширение линии рассчитывается сверткой Лоренцевского профиля и Максвелловского распределения атомов по скоростям (свертка Фойгта, приближенная формула [7]).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Глизе 436 b, проходя через диск звезды, поглощает часть ее излучения, что наглядно показывает транзитная кривая, зарегистрированная телескопом “Хаббл” (рис. 1, точки). Время прохождения планеты через диск звезды свидетельствует о наличии обширного облака перед планетой и протяженного хвоста позади. В работе исследовалась зависимость поглощения от таких параметров как интенсивность ионизирующего излучения звезды (F_{XUV}), плотность звездного ветра (n) а также его скорости и температуры. Сравнивая построенные транзитные и спектральные кривые с экспериментальными данными, можно сделать вывод о параметрах ветра родительской звезды Глизе 436.

Профиль линии Ly- α , излучаемый звездой Глизе 436 и зарегистрированный телескопом “Хаббл”, представлен на рис. 2 (серый пунктир). В транзите планеты линия показывает выраженное поглощение в голубом крыле в области скоростей -120 до -40 км \cdot с $^{-1}$ спектр звезды (черный пунктир). Это показывает существование обширного облака нейтралов, движущегося от звезды со значительной скоростью. Ускорение планетарных атомов происходит в модели за счет взаимодействия с быстрыми протонами звездного ветра, включая процесс перезарядки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были найдены интенсивность ионизирующей радиации $F_{XUV} = 0.43$ эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$

на сравнительном расстоянии 1 а. е.; концентрация протонов звездного ветра 3000 см $^{-3}$ и скорость 200 км \cdot с $^{-1}$ на орбите планеты (при температуре короны $T = 2$ МК), при которых спектральные и транзитные кривые линии Ly- α хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными телескопом “Хаббл”/STIS.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117021750017-0), а также при поддержке РФФИ (проект № 18-12-00080 “Экзосфера горячих экзопланет и ее наблюдательные проявления”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourrierr V., Ehrenreich D., Lecavelier des Étangs A. // arXiv: 1508.06634. 2015.
2. Madhusudhan N., Seager S. // arXiv: 1004.5121. 2010.
3. Lavie B., Ehrenreich D., Bourrier V. et al. // Astron. Astrophys. 2017. V. 605. Art. № L7.
4. Ehrenreich D., Bourrier V., Wheatley P.J. et al. // Nature. 2015. V. 522. № 7557. P. 459.
5. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Sasunov Yu.L. et al. // Astrophys. J. 2014. V. 795. № 2. Art. № 132.
6. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Prokopov P.A. // Astrophys. J. 2015. V. 813. № 1. Art. № 50.
7. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H. et al. // Astrophys. J. 2016. V. 832. № 2. Art. № 173.