

БЫСТРЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 189733b

Зайцев В.В., Шапошников В.Е., Кузнецов А.А., Симонова Т.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

FAST ELECTRONS IN THE PLASMOSPHERE OF EXOPLANET HD 189733b

Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E., Kuznetsov A.A., Simonova T.V.

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-123-126>

By analogy with the acceleration mechanism that occurs in the Jupiter-Io system, the mechanism of electron acceleration in the plasmasphere of the exoplanet HD 189733 b is discussed under conditions when the oncoming stellar wind flow reaches an atmospheric region in which there is a sufficient amount of neutral particles. In this case, the different frequency of collisions of stellar electrons and ions with neutrals ensures the separation of charges in the oncoming flow and the appearance of an electric field of charge separation. Attention is drawn to the important role of the anisotropy of atmospheric plasma conductivity in this process, which ultimately leads to the appearance of a powerful electric field that has a projection on the direction of the magnetic field and is the cause of electron acceleration. The characteristic energies and fluxes of accelerated electrons for the exoplanet HD 189733 b are estimated. The possibilities of this acceleration mechanism are discussed from the point of view of the occurrence of plasma instability in the atmosphere of an exoplanet and the generation of the radio emission flux necessary for registration on Earth.

1. Введение

Поиски радиоизлучения планет, находящихся за пределами Солнечной системы, направлены на расширение возможных методов обнаружения экзопланет, а также на создание дополнительных методов диагностики параметров их плазменных оболочек. При анализе радиоизлучения экзопланет обычно предполагается, что механизмом радиоизлучения является электронный циклотронный мазер, который сразу дает информацию о величине магнитного поля. Вместе с тем в плазмосферах «горячих Юпитеров», таких, как, например, HD 189733b, условие генерации циклотронного мазера не выполняется вследствие наличия у них плотной плазменной оболочки. В этом случае может реализоваться плазменный механизм радиоизлучения [1].

В связи с этим возникает проблема происхождения энергичных электронов, которые могут быть причиной возникновения плазменной неустойчивости в плазмосфере экзопланеты и обеспечить необходимые для регистрации потоки радиоизлучения. Как известно, собственное магнитное поле экзопланет, классифицируемых как "горячие Юпитеры", относительно невелико. Поэтому распространенным является сценарий, при котором

магнитопауза находится уже внутри ионосферы планеты [2]. Характерным и одним из наиболее хорошо изученных представителей этого класса экзопланет является HD 189733b. Отмеченные особенности указанной экзопланеты позволяют говорить о возможности проникновения магнитного поля звезды глубоко в ионосферу экзопланеты при ее движении по орбите. Это позволяет на примере HD 189733b рассмотреть механизм ускорения электронов, возникающий при вращении спутника Ио в магнитосфере Юпитера [3]. В этом случае поток набегающего звездного ветра может достигать области, в которой существует достаточное количество нейтральных частиц, разная частота столкновений электронов и ионов с которыми обеспечивает разделение зарядов в набегающем потоке и возникновение электрического поля, имеющего проекцию на направление магнитного поля и способного в результате эффективно ускорять электроны. Электрическое поле разделения зарядов связано с анизотропией проводимости плазмосферы, вследствие чего индуцированное набегающим потоком электрическое поле стремится вызвать холловский ток в направлении поверхности планеты, который, однако, не может эффективно замыкаться на поверхности вследствие ее низкой проводимости, поскольку концентрация нейтралов здесь на 6–7 порядков превышает концентрацию электронов. В работе проведен анализ роли указанного электрического поля в ускорении электронов и в наполнении плазмосферы экзопланеты HD 189733b энергичными частицами.

2. Ускорение электронов в плазмосфере HD 189733b

Приведем некоторые параметры экзопланеты HD 189733b. Материнская звезда – активный карлик класса K радиуса $0.76R_{\odot}$ с периодом вращения $T_s = 12$ дней. Мониторинг крупномасштабного магнитного поля HD189733 [4] в рамках программы Multiwavelength Observations eVaporating Exoplanet and its Star (MOVES) в течение 2013–2015 гг. показал, что поле эволюционирует со средним значением полного магнитного поля на поверхности около 40 Гс. Радиус орбиты экзопланеты $R_0 = 6 R_{\odot}$, радиус планеты $R_p = 1.138R_J$, период орбитального вращения планеты $T_p = 2,2$ дня, эффективная температура в основании атмосферы планеты $T_{\text{eff}} = 1200$ К, концентрация нейтралов в основании атмосферы $n_a = 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, концентрация электронов в основании атмосферы $n_e = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ [5].

Магнитное поле на орбите экзопланеты меняется в различные эпохи наблюдений в диапазоне $(1-10)10^{-2}$ Гс вследствие эволюции звездного магнитного поля [4]. Для дальнейшего анализа мы примем значение магнитного поля на орбите, близкое к максимальному ($B \approx 0,08$ Гс), чтобы оценить возможности рассматриваемого механизма ускорения. Кроме того, учитывая значительные изменения концентрации нейтралов и электронов, а также температуры, при удалении от поверхности [5], мы проведем

оценку эффективности ускорения для параметров атмосферы, соответствующих приведенным выше значениям для поверхности экзопланеты. Электрическое поле разделения зарядов ортогонально поверхности и имеет проекцию на направление обтекающего планету магнитного поля [3]:

$$E_{||} = -\frac{1}{c}VB \frac{\omega_e \tau_e \sin \alpha \cos \alpha}{1 + \xi \omega_e \tau_e \omega_i \tau_i + (\xi \omega_e \tau_e \omega_i \tau_i + \xi^2 \omega_e^2 \tau_e^2 \omega_i^2 \tau_i^2 + \omega_e^2 \tau_e^2) \sin^2 \alpha}. \quad (1)$$

Здесь ω_e , ω_i – гирочастоты электронов и ионов, соответственно, $\tau_e = (\nu_{ei} + \nu_{ea})^{-1}$ – эффективное время столкновений электронов с ионами и нейтральными атомами, $\tau_i = \tau_{ia}^{-1}$ – время столкновений ионов с нейтральными атомами. В слабо ионизованной плазме нижней атмосферы выполняются условия $\xi \approx 1$, $\omega_e^2 \tau_e^2 \gg 1$, $\omega_e \tau_e \gg \xi \omega_i \tau_i$. При этом максимальное значение продольной составляющей электрического поля соответствует углу $\sin \alpha^* \cong 1/\omega_e \tau_e$ и составляет

$$E_{||}^{max} \cong -\frac{1}{2c}VB. \quad (2)$$

При дальнейшем отклонении направления магнитного поля от плоскости плазменного слоя, когда $\sin \alpha \gg \sin \alpha^*$, электрическое поле уменьшается. В предположении, что величина поля (2) сохраняется на масштабе $L_{||} \sim R_p \sin \alpha^*$, можно оценить энергию ускоряемых электронов,

$$\varepsilon_e^{max} \approx e E_{||}^{max} L_{||} \approx e \frac{1}{2c}VB \frac{R_p}{\omega_e \tau_e} \approx 120 \text{ keV}, \quad (3)$$

где использованы значения $B = 0,08 \text{ Гс}$, $V = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$, $R_p = 8 \cdot 10^9 \text{ см}$, $\omega_e \tau_e = 3 \cdot 10^2$. Эта оценка относится к значениям параметров в основании атмосферы и слабо зависит от величины магнитного поля на орбите планеты. При этом скорости быстрых электронов оказываются много больше тепловых скоростей электронов основной плазмы, т.е. при соответствующей концентрации они достаточны для генерации ленгмюровской турбулентности.

Заметим, что значительных энергий в электрическом поле $E_{||}$ достигает только относительно небольшая доля электронов, которая находится в режиме «убегания». Оценка минимальной концентрации убегающих электронов приводит к значениям $n_r \approx 2 \cdot 10^{-3} n_e \text{ см}^{-3}$, превышающим порог развития ленгмюровской турбулентности в атмосфере планеты [3]. Для энергии ускоренных электронов $\varepsilon_e \approx 120 \text{ keV}$ и концентрации $n_r \approx 2 \cdot 10^{-3} n_e \approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, мощность источника ускоренных электронов имеет величину порядка $P_e \approx 5 \cdot 10^{21} \text{ Вт}$. При этом мощность электромагнитного излучения экзопланеты в метровом диапазоне длин волн, необходимая для того, чтобы обеспечить на Земле поток радиоизлучения в $1 \text{ Дж} = 10^{-26} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$, достаточный для регистрации современными радионастрономическими средствами, составляет $P_f \approx 10^{18} \text{ Вт}$. Таким образом, рассматриваемый механизм ускорения электронов энергетически достато-

чен, чтобы обеспечить необходимую в метровом диапазоне мощность радиоизлучения. Следует отметить, что материнская звезда HD 189733 является сильно переменной, поэтому магнитное поле на орбите экзопланеты меняется в различные эпохи наблюдений в диапазоне $(1-10)10^{-2}$ Гс вследствие эволюции звездного магнитного поля [4]. Поэтому величина ускоряющего электрического поля и эффективность продуцирования энергичных электронов может существенно меняться в различные эпохи, что приводит к соответствующим сильным вариациям возможного потока радиоизлучения в различные эпохи наблюдения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-22-00014.

Литература

1. Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E. // MNRAS. 2022, 513, 4082-4089
2. Zhilkin A G., Bisikalo D.V. // Astronomy Reports. 2019, 63, 550–564. DOI: 10. 1134 /s1063772919070096
3. Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E., Rucker H.O. // Astronomy Reports, 2003, 47, 701–708. DOI:10.1134/1.1601639
4. Fares R. et al. // MNRAS, 2017, 471, 1246- 1257
5. Rumenskikh M.S., et al. // The Astrophysical Journal. 2022. 927, 238