

ПЕРЕХОД ОТ СВЕРХАЛЬФВЕНОВСКОГО К ДОАЛЬФВЕНОВСКОМУ ОБТЕКАНИЮ ЭКЗОПЛАНЕТЫ ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ НА ПРИМЕРЕ HD 209458b

© 2024 г. Е. С. Беленькая^{1,*}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

*E-mail: elena@dec1.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 28.01.2024 г.

После доработки 18.02.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

В зависимости от расстояния между экзопланетой и центральной звездой и от свойств этой звезды возникают разные режимы обтекания звездным ветром. Если экзопланета находится на расстоянии до альфвеновского радиуса, на котором скорость ветра равна альфвеновской скорости, или альфвеновское число Маха $M_A = 1$, то экзопланета генерирует альфвеновские крылья. Если она расположена за альфвеновским радиусом, возникает кометообразная магнитосфера, как у планет Солнечной системы. В работе рассматривается, как переход от одного режима обтекания к другому может быть описан в рамках параболоидной модели магнитного поля магнитосферы на примере экзопланеты HD 209458b.

Ключевые слова: магнитосфера, экзопланета, альфвеновские крылья, звездный ветер

DOI: 10.31857/S0004629924030053 EDN: KJSTYR

1. ВВЕДЕНИЕ

Обтекание небесного тела сверхальфвеновским или доальфвеновским потоком плазмы приводит к возникновению разных типов магнитосфер: кометообразной с головной ударной волной перед ней или в виде альфвеновских крыльев наподобие двух трубок, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля обтекающего потока. Обтекание магнитных экзопланет звездным ветром в этих двух различных режимах рассмотрено во многих работах. Например, в работе [1] авторы исследовали этот вопрос применительно к экзопланетам в зоне обитаемости вокруг М карликов. В работе [2] была проанализирована реакция магнитосферных токовых систем на изменение альфвеновского числа Маха (M_A), равного отношению скорости потока, обтекающего планету, к альфвеновской скорости и на изменение собственного магнитного поля планеты. Авторы [2] рассматривали изменение M_A за счет вариации скорости потока. Фишер и Саур [3] описали нелинейное взаимодействие альфвеновских крыльев от двух экзопланет. Были выбраны две ближайшие экзопланеты в системе TRAPPIST-1 (TRAPPIST-1b и 1c). Вычисления проводились в МГД модели, облака нейтрального газа имитировали планеты. Авторы пришли к выводу, что детальное знание взаимодействия звезда-планета необходимо для изучения экзопланет.

В настоящей работе мы рассматриваем один из вопросов этого взаимодействия — переход альфве-

новского числа Маха в звездном ветре через единицу и соответствующие изменения в структуре магнитосферы экзопланеты на примере горячего юпитера HD 209458b. Стоит отметить, что в работах [4–6] уже рассматривалась подобная задача по отношению к этому объекту (HD 209458b) с использованием 3D МГД моделирования и с учетом магнитного поля горячего юпитера и обтекающего его звездного ветра. Авторы [4–6] отмечали, что обсуждаемый вопрос актуален почти для всех горячих юпитеров из-за их близкого расположения к родительской звезде. Авторы [6] дополнительно рассмотрели влияние прохождения коронального выброса массы через магнитосферу HD 209458b на смену режимов обтекания экзопланеты. В работах [4–6] представлены результаты МГД моделирования в основном в экваториальной плоскости или в плоскости орбиты экзопланеты для радиального и азимутального компонентов магнитного поля звездного ветра, в то время как в нашей работе проводится моделирование только магнитного поля магнитосферы HD 209458b в параболоидной модели с учетом вертикального компонента магнитного поля звездного ветра, результаты моделирования представлены в меридиональной плоскости магнитосферы полдень-полночь. Газовая оболочка планеты, рассчитанная в МГД моделировании, не определяется в параболоидной модели. Это относится также к расчетам плотности, скорости, температуры и полости Роша.

Кроме того, в работах [4–6] учитывается только магнитное поле экзопланеты в качестве источника магнитосферного поля, в то время как в параболическую модель включены магнитные поля магнитосферных токовых систем помимо внутреннего поля планеты, а именно: поле токовой системы хвоста и поле токов магнитопаузы, для которых определяются модельные параметры, исходя из условий в звездном ветре.

2. СМЕНА РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ

Магнитное число Маха $M_A = V_{sw}/V_A$ равно отношению скорости звездного ветра V_{sw} к альфвеновской скорости $V_A = B_{sw}/(\mu_0 n_{sw} m_{sw})^{1/2}$, где B_{sw} — магнитное поле звездного ветра, или межпланетное магнитное поле (ММП), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума, n_{sw} — плотность плазмы в звездном ветре, m_{sw} — средняя масса частицы звездного ветра. Произведение $n_{sw} m_{sw}$ — массовая плотность плазмы звездного ветра.

В работе [2] исследовано изменение структуры, возникающей при обтекании небесного тела типа Луны при изменении скорости набегающего потока плазмы. Уменьшение скорости вызывало переход от сверхальфвеновского режима обтекания к доальфвеновскому. Расчеты проводились в трехмерной гибридной модели. Авторы отмечали, что при этом изменении режимов происходило также переключение токов от сконцентрированных, в основном в экваториальной плоскости, к вертикальным, распределенным вдоль магнитных силовых линий.

Чан и др. [7] исследовали зарегистрированный экстремальный случай, когда обычная магнитосфера Земли вместе с ударной волной исчезли и образовались альфвеновские крылья длиной в $600R_E$, где R_E — радиус Земли. При этом M_A и магнитозвуковое число Маха были меньше 1. Авторы утверждали, что это был первый случай наблюдения альфвеновских крыльев, генерируемых Землей. Переход от сверхальфвеновского к доальфвеновскому режиму обтекания был вызван чрезвычайно низкой плотностью плазмы солнечного ветра. В это время почти не наблюдалась авроральная активность на Земле. ММП было близко к горизонтальному направлению средней величины 9.8 нТл.

Ридли [8] численно показал, что при увеличении южного ММП магнитосфера Земли может превратиться в альфвеновские крылья. В качестве примера рассматривался корональный выброс массы (КВМ), внутри которого было очень сильное южное магнитное поле и очень низкая плотность плазмы. Это привело к тому, что солнечный ветер стал доальфве-

новским ($M_A < 1$). Ридли [8] проводил расчеты в МГД модели Мичиганского Университета. ММП менялось от -5 нТл до -60 нТл, плотность и скорость солнечного ветра оставались постоянными: 5 см^{-3} и 400 км/с при температуре $250\,000 \text{ К}$. При этом M_A менялось от 8.2 до 0.7. Ридли [8] показал, что переход от сверх- к доальфвеновскому режимам происходит непрерывно без резкого изменения состояния магнитосферы обтекаемого тела.

M_A зависит от трех параметров: скорости обтекающего потока плазмы V_{sw} , плотности заряженных частиц в нем n_{sw} и его магнитного поля B_{sw} . Считаем, что масса заряженных частиц в потоке m_{sw} не меняется. В задаче, рассматриваемой в этой работе, мы фиксируем найденное экспериментально в работе [9] расстояние от центра планеты до подзвездной точки магнитопаузы (R_1). Это расстояние находится из баланса динамического давления звездного ветра P_{dynsw} и магнитного давления магнитосферы. Это означает, что P_{dynsw} должно быть постоянным, соответствующим оцененному масштабу магнитосферы R_1 ($P_{dynsw} = n_{sw} m_{sw} V_{sw}^2 = \text{const}$). При этом либо n_{sw} и V_{sw} не меняются, либо $n_{sw} V_{sw}^2 = \text{const}$. Предположив, что выполняется первое условие (из которого следует и второе), исследуем, как меняется магнитосфера с изменением M_A за счет вариации компонента ММП, параллельного магнитному моменту экзопланеты. Выберем ориентацию диполя планеты на юг, как у Земли.

3. ЭКЗОПЛАНЕТА HD 209458b

Экзопланета HD 209458b выбрана нами потому, что это одна из немногих экзопланет, для которых оценен магнитный момент ($\sim 1.6 \cdot 10^{26} \text{ А м}^2$ [9]). Она обнаружена методом радиальных скоростей. Поскольку радиус планеты $R_{pl} = 1.38 R_{Jup} = 9.54 \cdot 10^7 \text{ м}$ [9], где $R_{Jup} = 69\,911 \text{ км}$ — радиус Юпитера, магнитное поле на экваторе этого газового гиганта, соответствующее оцененному магнитному моменту, $B_{pl} = 18\,400 \text{ нТл}$.

HD 209458b является горячим юпитером, она находится очень близко от центральной звезды HD 209458, на расстоянии $d = 0.047 \text{ а.е.} = 7.1 \cdot 10^9 \text{ м}$. Орбитальный период $T = 3.52$ дня. Центральная звезда — желтая, подобная Солнцу, ее спектральный класс G0V, возраст 4 Гуг, расстояние от Солнца 47 пк.

Параметры звездного ветра были оценены в работе [9]: скорость звездного ветра $V_{sw} \sim 400 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, концентрация частиц звездного ветра $n_{sw} \sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$. Согласно результатам работы [10], магнитное поле на поверхности подобной Солнцу звезды составляет

$\sim 143\,000$ нТл. Если считать, что свойства звездного ветра HD 209458 аналогичны свойствам солнечного, то $m_{sw} = 1.92 \cdot 10^{-27}$ кг [10]. Расчеты показывают, что при перечисленных параметрах на близкой орбите экзопланеты альфвеновская скорость V_A порядка скорости звездного ветра V_{sw} (учет орбитального движения экзопланеты не меняет V_{sw} по порядку величины). Следовательно, альфвеновское число Маха M_A близко к единице. В зависимости от условий в звездном ветре M_A может быть больше или меньше 1.

В этой работе мы будем имитировать прохождение звездного ветра на орбите HD 209458b через альфвеновский радиус (где $M_A = 1$) за счет вариации магнитного поля звездного ветра B_{sw} и исследовать соответствующие изменения структуры магнитосферы экзопланеты на базе параболоидной модели. Стоит отметить, что вблизи границы магнитосферы полученный результат будет некорректен, поскольку в используемой модели предполагалось заранее, что параболоидная магнитопауза ограничивает магнитосферу, что неверно в случае образования альфвеновских крыльев. Учитывая это, мы рассмотрим общий характер изменения структуры магнитного поля магнитосферы экзопланеты при изменении альфвеновского числа Маха.

4. ПАРАБОЛОИДНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 209458B

Параболоидная модель магнитосферы экзопланеты [11] является развитием модели магнитосфер магнитных планет Солнечной системы [12]. Помимо магнитного поля планеты, она содержит крупномасштабные токовые системы: токовую систему хвоста, токи экранировки на магнитопаузе, частично проникающее ММП с коэффициентом $k \leq 1$: $b = k B_{sw}$. Для экзопланет, содержащих магнитодиск (или мощный кольцевой ток) модель магнитосферы включает также систему, связанную с магнитодиском. Поскольку расстояние до подзвездной точки магнитопаузы для HD 209458b мало ($R_1 \sim 2.9 R_{pl}$), и авторы [9] не предполагали наличия магнитодиска у HD 209458b, последняя токовая система не вводилась в модель.

Для токовой системы хвоста в параболоидной модели использовался параметр $R_2 \sim 0.7 R_1$, описывающий расстояние от центра планеты до внутренней границы токового слоя хвоста. Величина магнитного поля токовой системы хвоста на расстоянии $R_2 \sim 0.7 R_1$ (внутреннем крае токового слоя, расположенного в экваториальной плоскости хвоста

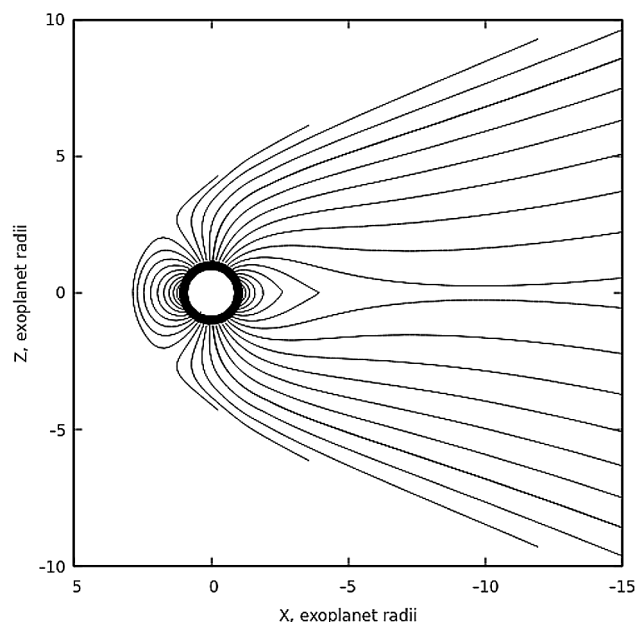


Рис. 1. Меридиональное сечение магнитосферы экзопланеты HD 209458b день-ночь. Параметры модели описаны в тексте. Межпланетное магнитное поле представлено в звездно-магнитосферной системе координат (X, Y, Z) с компонентами $\{0, 0, -90\}$ нТл, соответствующими $M_A > 1$.

магнитосферы), может быть грубо оценена по формуле: $B_t = -1.2 B_{pl} (R_{pl} / R_1)^3$.

Таким образом, для модели магнитосферы экзопланеты HD 209458b получены в первом приближении следующие параметры:

$$R_{pl} = 9.5 \cdot 10^7 \text{ м}, \quad (1)$$

$$R_1 = 2.9 R_{pl}, \quad (2)$$

$$B_{pl} = 18400 \text{ нТл}, \quad (3)$$

$$R_2 = 0.7 R_1 = 2 R_{pl}, \quad (4)$$

$$B_t = 1.2 B_{pl} (R_{pl} / R_1)^3 = 905.3 \text{ нТл}. \quad (5)$$

В этой работе мы полагаем коэффициент проникновения ММП в магнитосферу k равным 1.

На рис. 1 показано сечение магнитосферы экзопланеты HD 209458b полдень-полночь для умеренного (относительно слабого) ММП. При этом альфвеновское число Маха очень большое, и получается кометообразная магнитосфера с головной ударной волной, не показанной на рисунке. Замкнутые силовые линии идут из одного полушария ионосферы в другое, пересекая экватор. Открытые силовые линии пересекают магнитопаузу и вытянуты в далекий хвост. При ММП, равном нулю, они нигде не пересекают магнитопаузу, уходя в торец хвоста. В долях

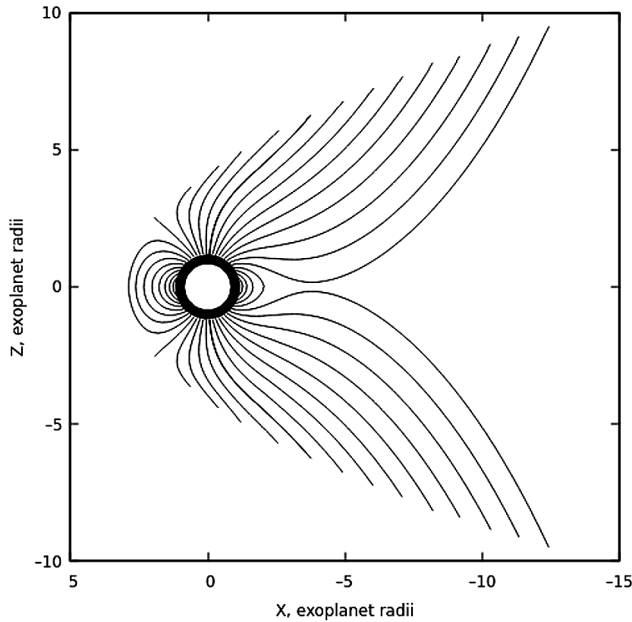


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для ММП: $\{0, 0, -1389$ нТл, соответствующего $M_A = 1$.

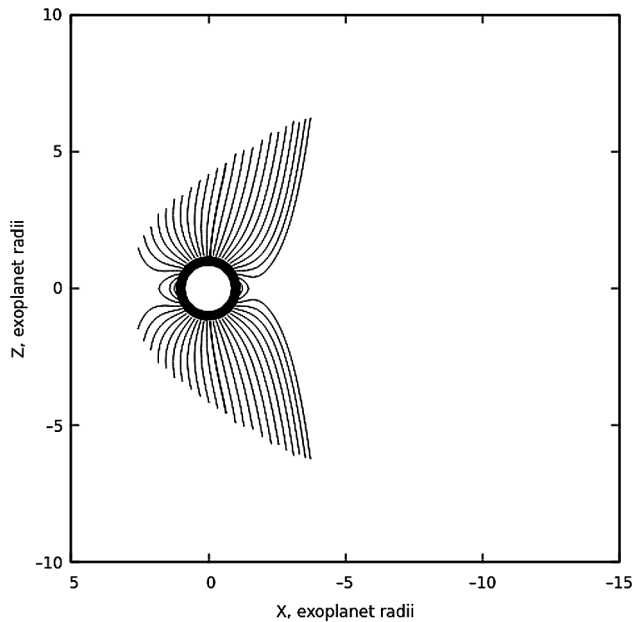


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для ММП: $\{0, 0, -13890\}$ нТл, соответствующего $M_A < 1$.

хвоста направления магнитного поля противоположны в северном и южном полупространствах, этому соответствует ток в экваториальном хвосте (нейтральный токовый слой).

Рассмотрим, при каком южном ММП альфвеновская скорость становится порядка $V_{sw} = 400 \cdot 10^3$ м/с, учитывая, что концентрация частиц звездного ветра $n_{sw} \sim 5 \cdot 10^9$ м⁻³ и $m_{sw} = 1.92 \cdot 10^{-27}$ кг. $V_A = B_{sw}/(\mu_0 n_{sw} m_{sw})^{1/2} \sim V_{sw}$, значит $B_{sw}^2/(\mu_0 n_{sw} m_{sw}) = V_{sw}^2$

или $B_{sw}^2 = \mu_0 n_{sw} m_{sw} V_{sw}^2$. Для приведенных значений $B_{sw}^2 = 1\,929\,211 \cdot 10^{-18}$ Тл², следовательно $B_{sw} = -1389$ нТл. Эта величина порядка величины магнитного поля звездного ветра на орбите HD 209458b (~ 1440 нТл). Если южное поле звездного ветра будет такой величины (ММП: 0, 0, -1389 нТл), то картина поля магнитосферы примет вид, показанный на рис. 2.

Предположим, вслед за Ридли [8], что при столкновении экзопланеты с корональным выбросом массы (КВМ) южное ММП возросло на порядок по сравнению с обычным значением. При этом M_A становится меньше единицы и изменившаяся структура магнитосферного магнитного поля принимает вид, показанный на рис. 3.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пока $M_A > 1$ параболическая модель кометообразной магнитосферы экзопланеты описывает следующие источники магнитосферного магнитного поля: поле планеты, поле токов экранировки на магнитопаузе, поле токовой системы хвоста и частично проникающее в магнитосферу ММП. В долях хвоста, примыкающих друг к другу в экваториальной плоскости (рис. 1), магнитные поля антипараллельны друг другу, и их скачок соответствует величине тока в нейтральном токовом слое хвоста.

При переходе к $M_A < 1$ (рис. 2 и 3) эти доли хвоста раздвигаются вверх и вниз, расходясь между собой, и исчезает соответствующий экваториальный ток поперек хвоста вместе с θ -образной структурой токовой системы хвоста. Вместе с тем исчезают и осцилляции заряженных частиц относительно плоскости прежнего нейтрального слоя. Сам хвост становится очень коротким, состоящим из замкнутых силовых линий, а доли хвоста с открытыми силовыми линиями превращаются в альфвеновские крылья. На низких широтах конвекция из дальнего хвоста от точки ночного пересоединения заменяется конвекцией из ближней точки на ночной границе короткого хвоста. Пересоединения на дневной и ночной стороне магнитосферы сохраняются при параллельных направлениях ММП и магнитного момента диполя экзопланеты. В точках пересоединения происходит ускорение частиц за счет магнитной энергии, ускоренные пучки в продольных токах вызывают авроральные сияния на экзопланете (по аналогии с Ганимедом).

Альфвеновские волны генерируются при торможении обтекающего потока плазмы препятствием (экзопланетой). Альфвеновские крылья вызваны

взаимодействием альфвеновских волн с обтекающим потоком. Альфвеновские волны распространяются вдоль межпланетного магнитного поля в противоположных направлениях со скоростями $\pm V_A$ и одновременно сносятся потоком плазмы со скоростью V_{sw} . В результате магнитное поле искажается движением плазмы и силовые линии наклоняются на угол $\beta = \arctg(1/M_A)$, образуя две трубы — альфвеновские крылья, представляющие собой магнитосферу небесного тела [8]. Если $M_A > 1$, то поток наклоняет силовые линии магнитосферы к экваториальной плоскости, два крыла сближаются, соединяясь в экваториальной ночной магнитосфере, и получается вытянутый хвост с центральным токовым слоем. Если $M_A < 1$, то наклон силовых линий магнитного поля к экваториальной плоскости резко возрастает, доли хвоста расходятся, исчезают антипараллельные поля по обе стороны экватора вместе с центральным токовым слоем.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере изучения взаимодействия звездного ветра от звезды спектрального класса G0V HD 209458 с горячим юпитером HD 209458b, предположительно обладающим магнитным полем, показано изменение структуры магнитосферы экзопланеты при смене режима обтекания от сверхальфвеновского к доальфвеновскому.

В зависимости от того, больше или меньше единицы альфвеновское число Маха, возникают разные структуры магнитного поля в окружающей небесное тело области и разные системы токов. При $M_A > 1$ вокруг экзопланеты образуется кометообразная магнитосфера с головной ударной волной перед ней. При $M_A < 1$ образуются альфвеновские крылья, вытянутые вдоль магнитных силовых линий, идущих к центральной звезде. На границах альфвеновских

крыльев (характеристиках) меняется наклон силовых линий. При этом исчезает токовый слой хвоста в экваториальной ночной магнитосфере и резко расходятся доли хвоста, заполненные открытыми силовыми линиями, образующими альфвеновские крылья.

На базе параболической модели магнитосферы экзопланеты продемонстрирован переход от одного режима к другому за счет изменения величины межпланетного магнитного поля, параллельного магнитному моменту планеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Vidotto, M. Jardine, J. Morin, J. F. Donati, P. Lang, and A. Russell, *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A67 (2013).
2. Y. Vernisse, J.A. Rioussel, U. Motschmann, and K.H. Glassmeier, *Planet. Space Sci.* **137**, 40 (2017).
3. C. Fischer and J. Saur, *Astron. and Astrophys.* **668**, id. A10 (2022).
4. А.Г. Жилкин, Д.В. Бисикало, *Астрон. журн.* **96**(7), 547 (2019).
5. А.Г. Жилкин, Д.В. Бисикало, *Астрон. журн.* **97**(7), 538 (2020).
6. А.Г. Жилкин, Д.В. Бисикало, П.В. Кайгородов, *Астрон. журн.* **97**(2), 145 (2020).
7. E. Chané, J. Saur, F. M. Neubauer, J. Raeder, and S. Poedts, *J. Geophys. Res. Space Physics* **117**(A9), id. A09217 (2012).
8. A. J. Ridley, *Ann. Geophysicae* **25**(2), 533 (2007), <https://www.ann-geophys.net/25/533/2007>.
9. K. G. Kislyakova, M. Holmström, H. Lammer, P. Odert, and M. L. Khodachenko, *Science* **346**, 981 (2014).
10. J. Nichols and S. E. Milan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **461**, 2353 (2016).
11. E.S. Belenkaya, I.I. Alexeev, and M.S. Blokhina, *Universe* **8**, 231 (2022).
12. I.I. Alexeev, *Moscow University Phys. Bull.* **65**, 300 (2010).

TRANSITION FROM SUPER-ALFVENIC TO SUB-ALFVENIC STELLAR WIND FLOW PASSING BY AN EXOPLANET, USING THE EXAMPLE OF HD 209458b

E. S. Belenkaya^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia*

Depending on the distance of the exoplanet from the central star and on the properties of this star, different regimes of stellar wind flow around it arise. If the exoplanet is at a distance up to the Alfvén radius at which the wind speed is equal to the Alfvén speed, or the Alfvén Mach number $M_A = 1$, then the exoplanet generates Alfvén wings. If it is located beyond the Alfvén radius, a comet-like magnetosphere appears, like that of the planets of the Solar System. The paper examines how the transition from one flow regime to another can be described on the base of a paraboloid model of the magnetospheric magnetic field using the example of exoplanet HD 209458b.

Keywords: magnetosphere, exoplanet, alfvén wings, stellar wind