Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2024. С. 8–10.

УДК 523.4 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-8

КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ЭКЗОПЛАНЕТЫ π Men c ПОД ДЕЙСТВИЕМ РОДИТЕЛЬСКОЙ ЗВЕЗДЫ

А.А. Автаева, В.И. Шематович

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, nastyaavt@gmail.com

KINETIC MODELING OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC LOSSES FOR EXOPLANET π Men c FORCED BY THE HOST STAR

A.A. Avtaeva, V.I. Shematovich

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nastyaavt@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты кинетического моделирования нетепловых потерь верхней атмосферы экзопланеты π Men c под действием родительской звезды. Во-первых, детально рассматривалось влияние диссоциации молекулярного водорода в процессах экзотермической фотохимии под действием жесткого УФ излучения родительской звезды и образование дополнительного нетеплового потока убегающего вещества из атмосферы. Во-вторых, изучалось влияние высокоэнергетичных протонов звездного ветра на нагрев верхних слоев атмосферы экзопланеты.

Ключевые слова: экзопланеты, кинетическое моделирование, звездный ветер, УФ излучение.

Abstract. This paper presents a kinetic modeling of the non-thermal losses of the upper atmosphere of the exoplanet π Man c under the action of the host star. Firstly, the effect of dissociation of molecular hydrogen in the processes of exothermic photochemistry under the action of hard UV radiation from the parent star and the formation of an additional non-thermal flux of escaping matter from the atmosphere were considered in detail. Secondly, the influence of high-energy protons of the stellar wind on the heating of the upper atmosphere of the exoplanet was studied.

Keywords: exoplanets, kinetic modeling, stellar wind, UV radiation.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются нетепловые процессы, влияющие на потерю вещества атмосферами экзопланет. Родительская звезда оказывает основное влияние на эволюцию экзопланеты и её атмосферы. В случае горячей экзопланеты, из-за относительно близкого расположения звезды и планеты (расстояние между ними менее 0.1 а.е.), влияние звезды существенно возрастает. В основном все рассматривают тепловые процессы потери атмосферы [Shaikhislamov et al., 2020].

Существуют также нетепловые процессы, влияющие на частицы атмосферы, в частности, жесткое ультрафиолетовое (УФ) излучение (1–100 нм) родительской звезды, проникающее глубоко в верхнюю атмосферу экзопланеты, его поглощение атмосферой сопровождается образованием надтепловых частиц с энергиями больше 5 kT в процессах экзотермической фотохимии [Avtaeva, Shematovich, 2021]. Аналогично, в столкновениях с перезаряженными протонами звездного ветра (ЗВ) атмосферные атомы и молекулы приобретают избыточную энергию, переходя в разряд надтепловых частиц [Avtaeva, Shematovich, 2023].

СИСТЕМА ЗВЕЗДА π MENSAE И ЭКЗОПЛАНЕТА π MEN c

Изучаемая в работе экзопланета π Men c является переходной планетой между суб-нептуном и суперземлями из-за своего относительно малого размера (R_p = 2.06 ± 0.03 R_{Earth} и M_p = 4.52 ± 0.81 M_{Earth} [Gandolfi et al., 2018]). Такие размеры соответствуют границе ущелья Фултона (1.6–2.2 R_{Earth}, [Fulton и др., 2017]) в распределении по радиусам, со стороны суб-нептунов. Экзопланета π Men c имеет среднюю плотность 2.82 г см$^{-3}$, что позволяет отнести ее к типу горячих суб-нептунов имеющих первичную, либо близкую к первичной переходную, атмосферу с преимущественным содержанием водорода.

Родительская звезда π Mensae является звездой солнечного типа (M_{Star} = 1.02 M_{Sun}, R_{Star} = 1.01 R_{Sun}; [Gandolfi et al., 2018]) и принадлежит классу G0 V, что удобно для дальнейших расчетов и построений аерономических моделей. При этом, π Mensae достаточно молодая звезда — 3 млрд. лет, но относительно спокойная, что позволяет в расчетах использовать стационарный поток жесткого УФ излучения и поток протонов звездного ветра от родительской звезды.

Суб-нептун π Men c располагается близко к своей родительской звезде, на расстоянии 0.067 а.е., что делает влияние родительской звезды существенным. В используемых нами моделях нетепловой потери атмосферы экзопланеты требуется модельная нейтральная атмосфера, в которой учитывается тепловое гидродинамическое убегание атмосферы и гидродинамическое поджатие атмосферы, поэтому в качестве начальных данных использовались данные из аэрономической модели [Shaikhislamov et al., 2020]. Концентрации основных компонент атмосферы представлены на рис. 1.

Рассматриваемая область атмосферы экзопланеты находится в пределах от 1 R_p до 19 R_p, как показано на рис. 1. От звезды к планете движутся два потока энергии: жесткое УФ излучение (XUV) и протоны звездного ветра (H^+_{SW}), с высокими энергиями.

1) XUV проходит глубоко в атмосферу без изменений и на высоте ниже примерно 5 R_p начинается образование надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода под действием УФ излучения (формулы представлены в рамке в зеленой области рис. 1). Зеленая область рис. 1 (от 2.5 R_p до 4.7 R_p) – область взаимодействия XUV и H_2, эта же область является переходной областью $H \rightarrow H_2$, где процессы экзотермической фотохимии начинают преобладать, по сравнению с остальными высотами.

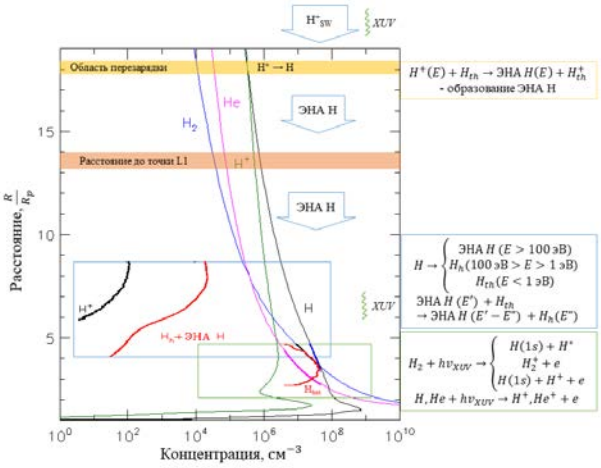

Рис. 1. Схематичное представление воздействия родительской звезды на атмосферу экзопланеты π Men c

2) Протоны звездного ветра H^+_{SW} обмениваются зарядом с нейтральными атомами водородной короны в области перезарядки (желтая область рис. 1), находящейся примерно на высоте 18 R_p, в результате происходит образование нейтральных атомов водорода (ЭНА H) с высокими энергиями, которые проходят вглубь атмосферы (формулы представлены в желтой рамке рис. 1). Далее происходит взаимодействие ЭНА H с атмосферными атомами водорода (формулы представлены в рамке в голубой области рис. 1). Голубая область рис.1 (от 4.0 R_p до 8.6 R_p) — область исследования взаимодействия ЭНА H и атмосферного водорода, с образованием сверхтепловой фракции водорода.

То, что точка Лагранжа L1 находится между планетой и звездой на расстоянии 13.6 R_p от центра планеты (оранжевая область рис. 1), дает возможность не учитывать гравитацию родительской звезды для исследуемых областей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В исследовании использовались разработанные раннее кинетические модели для расчета образования, столкновений и переноса частиц, образующихся в процессах экзотермической фотохимии [Avtaeva, Shematovich, 2021] и в процессах высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в планетные атмосферы [Avtaeva, Shematovich, 2023].

Убегающий поток надтепловых H за счет экзотермической фотохимии через верхнюю границу (4.0 R_p — черная линия, рис. 2) получился равен $1.35 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$, тогда как тепловой поток убегающего вещества, рассчитанный по формуле Джинса равен $4.67 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$. Потоки сравнимы между собой, что позволяет с уверенностью сказать, что нетепловые процессы вносят существенный вклад в убегание вещества из атмосферы, одновременно меняя относительный химический состав атмосферы.

Проведенные расчеты показали, что энергия проникающего в атмосферу потока ЭНА H, образующегося при перезарядке H^+_{SW} с тепловыми атомами водородной короны преимущественно идет на нагрев водородной короны горячей экзопланеты, а прямой поток убегания (для сравнения числовой спектр – красная линия на рис. 2) за счет перезарядки H^+_{SW} существенно меньше теплового потока убегания и не компенсирует проникающий в атмосферу поток ЭНА H.

На рис. 1 красным представлены высотные профили концентраций надтепловой фракции атомов водорода, полученные в наших расчетах.

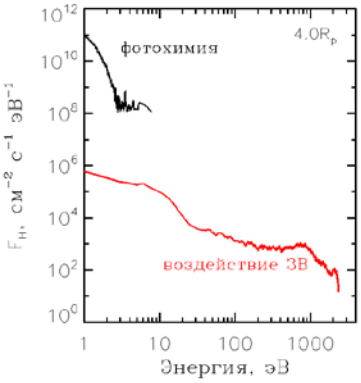

Рис. 2. Расчетные спектры восходящих числовых потоков надтепловых атомов водорода на расстоянии 4.0 R_p от центра экзопланеты π Men c. Красным представлен поток надтепловых атомов H, образующихся за счет перезарядки протонов ЗВ. Черным представлен поток надтепловых атомов H, образующийся за счет процессов экзотермической фотохимии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атмосферный нагрев плазмой звездного ветра важен лишь в самых внешних областях протяженной водородной короны. По расчетам высотного распределения надтепловой фракции атомарного водорода (рис. 1, красная линяя в синей области), образующейся за счет переноса энергии в столкновениях высокоэнергичных атомов H с тепловыми атомами протяженной водородной короны горячего суб-нептуна π Men c, данная фракция является лишь малой примесью к тепловой фракции H в короне экзопланеты. При этом поток нетепловой потери вещества атмосферой за счет экзотермической фотохимии сравним с тепловой потерей атмосферой. Оба этих процесса существенно влияют на атмосферу экзопланеты, меняя относительный химический состав и среднее распределение температуры вещества и должны учитываться в аэрономических моделях.

Полученные относительно низкие скорости потери атомарного водорода из атмосферы, могут являться свидетельством того, что в атмосфере π Men c не преобладает водород, что может быть подтверждено в поисках планетного атмосферного поглощения на длинах волн линий более тяжелых элементов, таких как He, C и O. В то время, как ранее потенциал обитаемости экзопланеты оценивался по ее радиусу, массе и расстоянию от родительской звезды, в настоящее время происходит переход к новой версии оценки обитаемости – основное внимание уделяется химическому составу, особенно наличию атмосферных биомаркеров, а также климату в зависимости от влияния и активности родительской звезды.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-12-00384.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Nonthermal Atmospheric Loss of the Exoplanet GJ 436b due to H2 Dissociation Processes // Solar System Research. 2021. V. 55. ISS. 2. P. 150–158.

Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Kinetic Model of the Effect of the Stellar Wind on the Extended Hydrogen Atmosphere of the Exoplanet π Men c // Astronomy Reports. 2023. V. 67, N. 10. P. 979–990.

Fulton B. J., Petigura E. A., Howard A. W., Isaacson H., Marcy G. W., Cargile P. A., Hebb L., Weiss L. M., Johnson J. Asher, Morton T. D., Sinukoff E., Crossfield I. J. M., Hirsch L. A. The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets // Astronomical J. 2017. V. 154. P. 109 (19 PP.).

Gandolfi D., Barragán O., Livingston J. H., and 29 more. TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae // Astronomy & Astrophysics. 2018. V. 619. P. id. L10 (10 PP.).

García Muñoz A., Youngblood A., Fossati, L., Gandolfi D., Cabrera J., Rauer H. Is π Men c's Atmosphere Hydrogen-dominated? Insights from a Non-detection of H I Lyα Absorption // The Astrophysical Journal Letters. 2020. V. 888. P. id. L21 (12 PP.).

Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., and Rumenskikh M.S. Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of pi Men c: comparison with Ly-alpha transit observations // Astronomy & Astrophysics. 2020. V. 639. P. id. A109 (7 PP.).