

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ОКРЕСТНОСТИ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 189733b

Кузнецов А.А., Зайцев В.В.

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия*

SHOCK WAVE RADIO EMISSION IN THE VICINITY OF THE EX- OPLANET HD 189733b

Kuznetsov A.A., Zaitsev V.V.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

The possibility of efficient radio emission generation in the bow shock region of "hot Jupiter" type exoplanets is being considered. A drift acceleration mechanism at a nearly perpendicular shock wave is proposed as the source of energetic electrons. The electrons reflected from and accelerated by the shock wave propagate through the relatively dense plasma of the stellar wind and generate plasma waves. Therefore, the plasma mechanism is considered as a potential source of radio waves. The parameters of the energetic electron beam, plasma waves, and the frequency of the generated radio emission are evaluated using the example of the bow shock of the hot Jupiter HD 189733b. An energetic assessment of the stellar wind parameter region is conducted, which allows for the possibility of detecting radio emission from the bow shock of the exoplanet HD 189733b with modern astronomical instruments.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-201-204>

1. Введение

Важной задачей современных радиоастрономических исследований является поиск радиоизлучения экзопланет, обнаружение которого могло бы предоставить многочисленные данные об их плазменных оболочках и пролить свет на процессы, ответственные за формирование звездных систем. В данной работе на примере экзопланеты HD 189733b, типичного «горячего юпитера», обсуждается возможность генерации в области головной экзопланетной ударной волны радиоизлучения, достаточного по интенсивности для обнаружения современными радиоастрономическими средствами. Для этого с одной стороны оценена плотность кинетической энергии W потока электронов, ускоряемых при отражении от экзопланетной ударной волны посредством дрейфового механизма [1]. Рассматриваемые параметры звездного ветра таковы, что распространение в нем высокоэнергичных электронов приводит к развитию ленгмюровской неустойчивости, то есть возбуждению плазменных волн [2]. Поэтому, с другой стороны, оценена плотность энергии этих волн E , необходимая для генерации посредством плазменного механизма [3] достаточно интенсивного для регистрации радиоизлучения. Из условия $W \gg E$ в работе выделена область параметров звездного ветра, в которой обнаружение радиоизлучения

из области экзопланетной ударной волны энергетически возможно. Также приведена оценка диапазона частот, в котором генерируется радиоизлучение.

2. Ускорение электронов в окрестности головной ударной волны экзопланеты HD 189733b

Если скорость звездного ветра относительно экзопланеты v_s превышает магнитозвуковую v_{ms} , то формируется экзопланетная головная ударная волна и реализуется механизм дрейфового ускорения электронов в той её области, где она является квазипоперечной, то есть угол θ между нормалью к ударной волне и магнитным полем звездного ветра близок к 90° . Дрейфовый механизм ускорения электронов удобно описывать в системе отсчета де Хоффмана-Теллера (рис.1), в которой потоковая скорость v_s сонаправлена с магнитным полем, так что индуцируемое электрическое поле отсутствует. Поскольку быстрая магнитозвуковая ударная волна сопровождается сжатием магнитного поля, масштаб неоднородности которого много больше электронного гирорадиуса, ударная волна играет роль движущегося вдоль силовых линий со скоростью $v_s \sec \theta$ магнитного зеркала. Тогда электроны, не попавшие в конус потерь, в котором необходимо учесть потенциал φ_{HT} , связанный с различной инерцией электронов и протонов поперек ударной волны, могут быть ею отражены и ускорены. Компоненты скорости электронов вдоль магнитного поля до и после отражения, $v_{i,\parallel}$ и $v_{r,\parallel}$ соответственно, связаны соотношением (1).

$$v_{r,\parallel} = 2v_s \sec \theta - v_{i,\parallel} \quad (1)$$

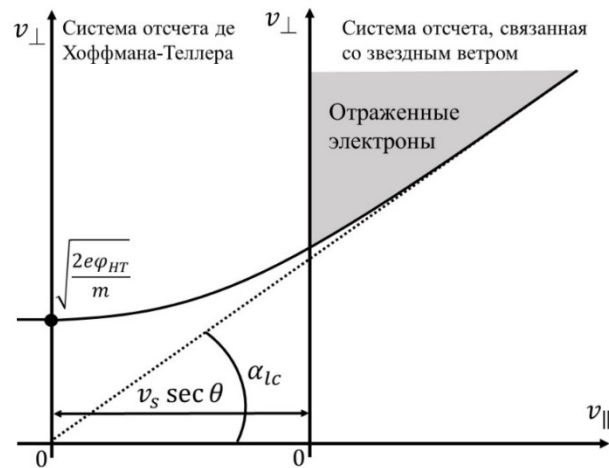


Рис. 1. Связь между системой отсчета, связанной со звездным ветром, и системой отсчета де Хоффмана-Теллера. Закрашенная область соответствует отражаемым электронам.

Распределение отраженных от движущегося магнитного зеркала электронов относится к семейству конусных со сдвигом. Посредством его интегрирования оценивается зависимость плотности кинетической энергии W

потока ускоренных при отражении электронов от параметров звездного ветра и угла θ . Максимум плотности кинетической энергии достигается при θ_{max} , близком к 90° , и пропорционален тепловой энергии звездного ветра, умноженной на функцию питч-угла α_{lc} . Концентрация ускоренных электронов не превышает 10% от концентрации звездного ветра, а характерная скорость пучка достигает $2.5v_t$ при характерных параметрах, где v_t – тепловая скорость плазмы звездного ветра.

3. Энергетическая оценка возможности детектирования радиоизлучения, генерируемого ускоренными электронами

Ускоренные при отражении от ударной волны электроны возвращаются в плазму звездного ветра, в которой их энергия посредством ленгмюровской неустойчивости трансформируется в плазменные волны. Последние конвертируются в радиоволны на основной (рэлеевское рассеяние) или удвоенной (комбинационное рассеяние) плазменной частоте [3]. При концентрации звездного ветра на орбите экзопланеты HD 189733b, равной $n \approx 10^5 \div 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, частота генерируемого радиоизлучения лежит в диапазоне 2 – 40 МГц, в котором чувствительность современных радиотелескопов достигает 0,01 Ян. И в случае рэлеевского, и в случае комбинационного рассеяния в работе используются классические оценки зависимости между потоком радиоизлучения, который наземная радиоаппаратура способна зарегистрировать, и плотностью энергии плазменных волн E , которые этот поток способны обеспечить [4]. Если выполняется $W \gg E$, то обнаружение соответствующего радиоизлучения энергетически возможно.

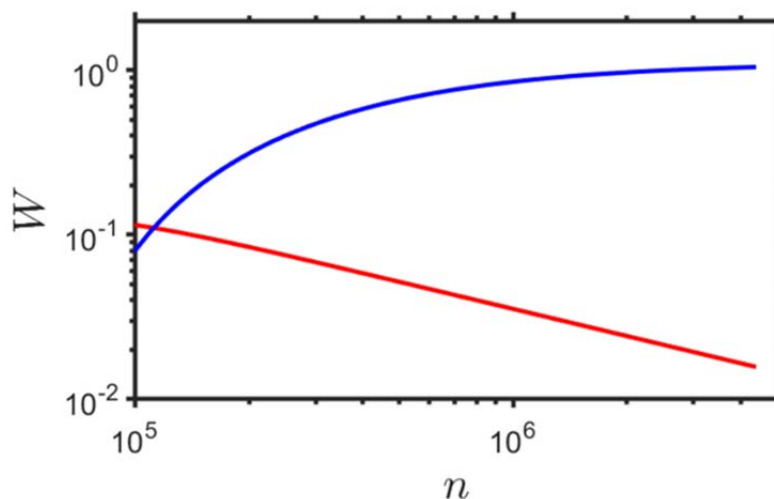


Рис. 2. Зависимость нормированной на тепловую энергию звездного ветра $nk_B T$ энергии ускоренных электронов W (синий цвет) и энергии плазменных волн E , необходимой для генерации радиоизлучения, регистрируемого на Земле, при рэлеевском рассеянии (красный цвет), от концентрации при температуре $T = 1.5 \cdot 10^6$ К, магнитном поле $B = 0.04$ Гс и скорости звездного ветра $v = 500$ км/с (штрихи).

Звездный ветер на орбите экзопланеты существенно неоднороден, так что в работе исследуется эффективность генерации радиоизлучения на основной и удвоенной плазменных частотах в зависимости от его параметров [5]. При концентрации звездного ветра n в промежутке от 10^5 см^{-3} до $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и температуре $T = 1.5 \cdot 10^6 \text{ К}$ энергия плазменных волн E , необходимая для генерации, посредством рэлеевского рассеяния, радиоизлучения, регистрируемого на Земле, уменьшается по мере увеличения концентрации (рис. 2), магнитного поля и скорости звездного ветра. Таким образом, при высокой скорости звездного ветра $v_s = 1000 \text{ км/с}$ условие эффективной генерации радиоволн $W \gg E$ выполняется уже при $n \gtrsim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и магнитном поле до 0.1 Гс . При скорости звездного ветра $v_s = 500 \text{ км/с}$ то же справедливо уже для магнитных полей до 0.04 Гс , а при скорости $v_s = 250 \text{ км/с}$ условие эффективной генерации для тех же магнитных полей выполнено при $n \gtrsim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

В рассматриваемой области параметров звездного ветра плотность энергии плазменных волн E , необходимая для генерации достаточно интенсивных радиоволн посредством комбинационного рассеяния, значительно выше чем посредством рэлеевского. В этом случае условие $W \gg E$ выполнено лишь при высокой скорости $v_s \gtrsim 1000 \text{ км/с}$ и концентрации $n \gtrsim 10^6 \text{ см}^{-3}$ звездного ветра.

В работе не учтены многочисленные факторы, способные усилить или ослабить радиоизлучение от экзопланетной ударной волны. К таким факторам относятся уточненные размеры, расположение, форма и тип головной экзопланетной ударной волны; возможная рефракция радиоволн в системе HD~189733; столкновительное поглощение радиоволн при их распространении от источника к приемнику; отличная от ионов температура электронов звездного ветра в области ударной волны и др.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-22-00014.

Литература

1. Wu C.S. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1984. Vol. 89, P. 8857–8862. doi: 10.1029/JA089iA10p08857.
2. Михайловский А.Б. // Теория плазменных неустойчивостей. Москва: Атомиздат, 1971.
3. Zaitsev V., Stepanov A. // Solar Physics. 1983. Vol. 88, № 1-2. doi: 10.1007/bf00196194.
4. Zheleznyakov V.V. // Radiation in Astrophysical Plasmas. Springer Netherlands, 1996.
5. Odert P. et al. // A&A. 2020. Vol. 638, A49, doi: 10.1051/0004-6361/201834814.