О ПРОИСХОЖДЕНИИ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В КОРОНЕ СОЛНЦА

Цап Ю.Т.¹, Степанов А.В.², Копылова Ю.Г.², Ханейчук О.В.³

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

ON THE ORIGIN OF LONG PERIOD ALFVEN WAVES IN THE SOLAR CORONA

Tsap Yu.T.¹, Stepanov A.V.², Kopylova Y.G.², Khaneychuk O.V.³

¹*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Alfven wave penetration with periods exceeding a few tens of minutes generated by convective plasma motions in the lower solar atmosphere is considered. The sharp boundary approximation between the chromosphere and the corona is used. It has been shown that transmission coefficient for Alfven modes does not exceed one percent. Possible mechanisms of wave generation with long periods are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-293-296

Введение

Альфвеновские возмущения в солнечном ветре с периодами от нескольких минут до нескольких десятков часов известны уже около 50 лет [1]. Между тем происхождение долгопериодических мод в короне Солнца все еще вызывает много вопросов [2]. Между тем как показывают наблюдения, долгопериодические волны альфвеновского типа могут генерироваться в нижней атмосфере [3, 4]. Особенно хотелось бы обратить внимание на работу [4], в которой были обнаружены крутильные колебания в порах с периодом $P \approx 20$ мин. Как показали оценки, наблюдаемый поток энергии волн вполне может обеспечить нагрев короны активных областей. В связи с этим возникает вопрос об эффективности проникновения долгопериодических альфвеновских волн из нижней атмосферы в корону Солнца. Ранее, принимая во внимание определяющую роль в отражении альфвеновских волн переходной области, мы уже рассматривали этот вопрос в приближении резкой границы хромосфера–корона [5]. Однако в ходе анализа для описания альфвеновских мод в короне Солнца мы ограничились ВКБ-приближением, что для длиннопериодических волн, как станет ясно из дальнейшего изложения, становится неприемлемым. Цель настоящей работы – рассмотреть проникновение альфвеновских мод из хромосферы в корону с учетом неоднородности плазмы, обусловленной стратификацией солнечной короны.

Альфвеновские волны, ВКБ-приближение и их отражение

Волновое уравнение, описывающее распространение крутильных (торсионных) альфвеновских мод в тонкой магнитной трубке, полагая для простоты магнитное поле трубки $B = \text{const}$, в цилиндрической системе координат, с осью Z , направленной вверх перпендикулярно поверхности Солнца, можно представить следующим образом [5–7]

$$\frac{\partial^2 \delta V}{\partial t^2} = V_A^2(z) \frac{\partial^2 \delta V}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где альфвеновская скорость

$$V_A(z) = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho(z)}}.$$

Если принять $\rho = \rho_0 \exp(-z/H)$, где H – характерная шкала высот и возмущение скорости $\delta V(t, z) \propto \exp(-i\omega t)$, то решение уравнение (1) выражается через функции Ханкеля [3]

$$\delta V(t, \eta) = (C_1 H_0^{(1)}(\mu) + C_2 H_0^{(2)}(\mu)) e^{-i\omega t}, \quad \mu = \frac{2\omega H}{V_A} = \frac{4\pi H}{P V_A}. \quad (2)$$

Здесь C_1 и C_2 – произвольные константы. Откуда, учитывая, что согласно уравнению индукции [5–7]

$$\delta B = \frac{iB}{\omega V_A} (C_1 H_1^{(1)}(\eta) + C_2 H_1^{(2)}(\eta)) e^{-i\omega t},$$

а поток электромагнитной энергии

$$F_A = -B/8\pi \text{Re}(\delta V^* \delta B),$$

для усредненного по времени потока энергии альфвеновских волн вдоль оси Z с помощью (3) находим [5–7]

$$F_A = \frac{B^2}{8\pi^2 \omega H} (|C_2|^2 - |C_1|^2). \quad (3)$$

Как следует из уравнения (3), функции Ханкеля $H_0^{(1)}(\mu)$ и $H_0^{(2)}(\mu)$ описывают распространение волн в противоположных направлениях.

Принимая во внимание поведение функций Ханкеля при малых значениях аргумента, согласно (2) нетрудно прийти к выводу [5], что ВКБ-приближение можно считать оправданным, если период волн

$$P \ll P_c = \frac{4\pi H}{V_A}. \quad (4)$$

Рисунок. Зависимость коэффициента прохождения альфвеновских волн от температуры короны при различных значениях периода P .

Полагая в (1) альфвеновскую скорость в короне Солнца $V_{Ac} = 10^8$ см/с и $H_c = (1 - 20) \times 10^9$ см, получим $P = 2 - 40$ мин. Таким образом, даже для описания альфвеновских мод с минутными периодами использование рамВКБ-приближения может оказаться неприемлемым для солнечной короны.

Далее, считая граничную поверхность между хромосферой и короной достаточно резкой и поступая стандартным образом, т.е. сшивая возмущенную скорость и магнитное поле падающей (1), отраженной (2) и прошедшей (3) волны на границе, для коэффициента прохождения $T_r = F_3/F_1$ получим

$$T_r = 1 - \frac{H_0^{(1)}(\eta_1)H_1^{(1)}(\eta_2)V_{A1} - H_1^{(1)}(\eta_1)H_0^{(1)}(\eta_2)V_{A2}}{H_1^{(1)}(\eta_1)H_0^{(2)}(\eta_2)V_{A2} - H_1^{(2)}(\eta_2)H_0^{(1)}(\eta_1)V_{A1}} \cdot \frac{H_0^{(2)}(\eta_1)H_1^{(2)}(\eta_2)V_{A1} - H_1^{(2)}(\eta_1)H_0^{(2)}(\eta_2)V_{A2}}{H_1^{(2)}(\eta_1)H_0^{(1)}(\eta_2)V_{A2} - H_1^{(1)}(\eta_2)H_0^{(2)}(\eta_1)V_{A1}}.$$

Необходимо также учесть, что на границе между короной и хромосферой выполняется условие гидростатического равновесия, т.е.

$$\rho T = const ,$$

где T – температура плазмы. Откуда положив в хромосфере Солнца $H = 200$ км, а в короне $H_c = 0.05T$ км, характерную альфвеновскую скорость $V_A = 10^8$ см/с при $T = 2 \times 10^6$ К, нетрудно получить зависимость коэффициента прохождения T_r от температуры T , представленную на рисунке. Как видно коэффициент прохождения волн для альфвеновских волн с пе-

риодами P , превышающими несколько десятков секунд, составляет менее одного процента. Это предполагает, что конвективные движения вещества в фотосфере Солнца едва ли могут служить источником наблюдаемых высоко в короне долгопериодических альфвеновских мод.

Выводы

В представленной работе на основе приближения резкой границы мы оценили коэффициент прохождения линейных альфвеновских из хромосферы в корону Солнца с учетом корональной стратификации. Нами было показано, что коэффициент прохождения долгопериодических волн с периодами большими нескольких десятков минут из-за сильного их отражения в переходной области не превышает одного процента. Этого явно не достаточно для обеспечения нагрева корональной плазмы и ускорения солнечного ветра.

На наш взгляд, генерация долгопериодических альфвеновских волн скорее происходит в нижней короне Солнца. При этом важную роль может играть процесс пересоединения магнитных силовых линий [2]. Однако этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и РФФИ (проект № 20-52-26006).

Литература

1. *Roberts, D.A.* // *ApJ*, 2010, 711, 1044.
2. *Cranmer, S.R.* // *Astrophysical Journal*, 2018, 862, 6.
3. *Mashnich, G.P. and Bashkirtsev, V.S.* // *Solar Phys.*, 1999, 185, 35.
4. *Stangalini, M., Erdélyi, R., Boocock, C. et al.* // *Nature Astron.*, 2021, 5, 691.
5. *Tsap Y.T., Kopylova Y.G.* // *Solar Phys.*, 2021, 296, id5.
6. *Hollweg J.V.* // *ApJ*, 1984, 277, 392.
7. *Tsap Y.T., Stepanov A.V., Kopylova Y.G., Khaneichuk O.V.* // *G&A*, 2020, 60, 446.