

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ В БЕЛОМ СВЕТЕ И НАГРЕВ ФОТОСФЕРЫ АЛЬФВЕНОВСКИМИ ВОЛНАМИ

Цап Ю.Т.¹, Копылова Ю.Г.²

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

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

WHITE-LIGHT FLARES AND SOLAR PHOTOSPHERE HEATING BY ALFVÉN WAVES

Tsap Yu.T.¹, Kopylova Yu.G.²

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

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-337-340>

The possibility of the photospheric heating by Alfvén waves, using numerical calculations based on models of the solar atmosphere proposed by Avrett and Loeser (2008) is analyzed. Calculations show that the propagation time of the Alfvénic disturbances from the corona to the photosphere lies in the range from a few minutes to a few tens of minutes. This suggests that Alfvén waves can hardly be responsible for the heating of the photosphere in solar flares.

Введение

Солнечные вспышки в белом свете – это вспышки, которые можно обнаружить в оптическом континууме. В настоящее время считается, что за нагрев вспышечной хромосферы/фотосферы, т.е. областей, где формируется оптическое континуальное излучение, могут быть ответственны либо электроны, либо протоны, либо альфвеновские волны [1, 2]. При этом наиболее привлекательным выглядит последний механизм, поскольку первый и второй предполагают необходимость ускорения большого числа высокоэнергичных частиц, что противоречит наблюдениям [1, 2]. Хотелось бы также подчеркнуть, что часто привлекаемый механизм нагрева фотосферы, связанный с переизлучением нагретой ускоренными частицами хромосферы (back-warming) также сталкивается с трудностями, как вследствие малости потока излучения в нижние слои атмосферы [3], так и определяющего вклада в континуум, по крайней мере, для некоторых событий фотосферных источников излучения [4].

Несмотря на большое количество работ, вопрос о времени распространения альфвеновских волн из короны в фотосферу до сих пор детально не рассматривался. Насколько известно авторам, лишь в работе [6], исходя из модели вспышечной атмосферы *F1* Machado et al. [7] сравнительно детально была рассмотрена данная проблема. В частности, для характерного времени распространения альфвеновских волн была получено следующее

полуэмпирическое соотношение: $\tau \approx 10^4/B_{0,ph}$ [сек], где магнитное поле на уровне фотосферы выражено $B_{0,ph}$ выражено в гауссах.

Цель настоящей работы – оценить характерное время распространения альфвеновской волны из короны в фотосферу, исходя из современных моделей атмосфер Солнца.

Аналитические и численные оценки времени распространения альфвеновских волн

Характерное время распространения альфвеновских волн из короны в область температурного минимума можно представить следующим образом

$$\tau = \tau_c + \tau_{hp}, \quad (1)$$

где τ_c – время распространения альфвеновской волны вдоль корональной части, а τ_{hp} – от переходной области до фотосферы. Сразу отметим, что поскольку $\tau_c = L/V_{Ac}$, где характерная полудлина петли $L = 10^9$ см, а альфвеновская скорость $V_{Ac} = 10^3$ км/с, значение $\tau_c = 10$ сек, т.е. корональная компонента едва ли окажет существенное влияние на задержку между жестким рентгеновским и континуальным излучением. В свою очередь, полагая характерное время распространения из переходной области в фотосферу

$$\tau_{hp} = \int_0^{z_{tr}} \frac{dz}{V_{Ap}(z)}, \quad (2)$$

и альфвеновскую скорость в нижних слоях в хромосфере/фотосфере

$$V_{Ap}(z) = V_{Ac} \exp\left(\frac{-z}{2H}\right), \quad (3)$$

где z_{tr} – глубина проникновения альфвеновской волны, начиная от переходной области, а H – характерная шкала высот, из (2) и (3) получим

$$\tau_{hp} = \frac{2H}{V_{Ac}} (\exp(z_{tr}/2H) - 1). \quad (4)$$

Вновь полагая в (4) альфвеновскую скорость $V_{Ac} = 10^3$ км/с, шкалу высот $H = 120$ км и расстояние от переходной области до источника фотосферного излучения $z_{tr} = 2200$ км, получим $\tau_{hp} \approx 38$ мин.

Полученную оценку τ_{hp} едва ли можно считать надежной ввиду сильной неоднородности нижней атмосферы Солнца. В связи с этим мы решили воспользоваться численными расчетами, взяв за основу модель спокойной атмосферы Солнца Avrett, Loeser [8], представленную на рис. 1.

На первый взгляд может показаться, что использование модели спокойной атмосферы будет приводить к значительным погрешностям в случае солнечной вспышки. Однако нас интересует, в первую очередь, начальная фаза вспышечного энерговыделения, и, как станет ясно из дальнейшего, изложения, основной вклад в τ_{hp} вносит распространение альфвеновского возмущения в области нижней хромосферы/фотосферы, где температура

и плотность плазмы, как показывают оценки [2], меняются незначительно в ходе вспышки.

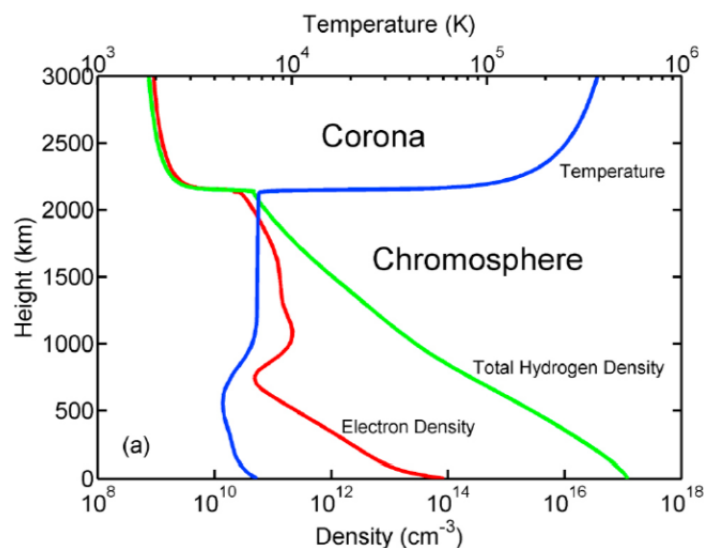


Рис. 1. Модель солнечной атмосферы Avrett, Loeser [8].

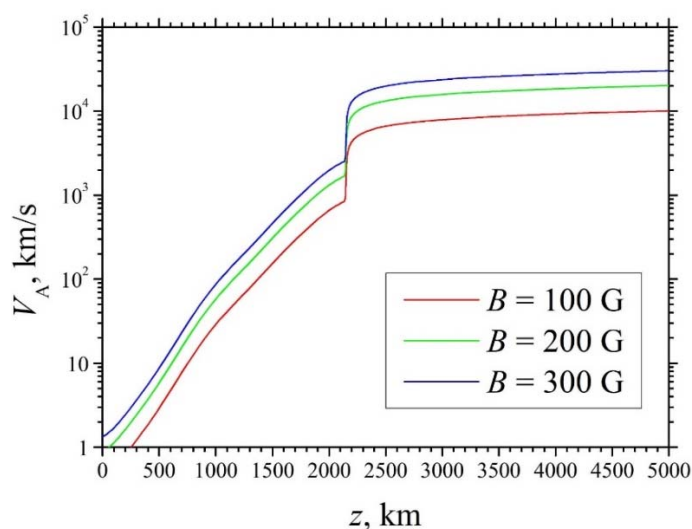


Рис. 2. Изменения альфвеновской скорости V_A с высотой z в солнечной атмосфере при различных значениях B .

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов изменения альфвеновской скорости $V_A(z)$ с высотой z . Как и следовало ожидать, в короне Солнца $V_A(z)$ меняется незначительно, и быстро падает в переходной области, а также хромосфере/фотосфере.

Результаты численных расчетов зависимости времени распространения сигнала от напряженности магнитного поля B и высоты z (рис. 3) свидетельствуют, что, как и следовало ожидать, временная задержка τ_{hp} в основном «набегает», начиная с высоты около 700 км, что соответствует нижней хромосфере. При этом τ_{hp} лежит в пределах порядка 3–10 минут.

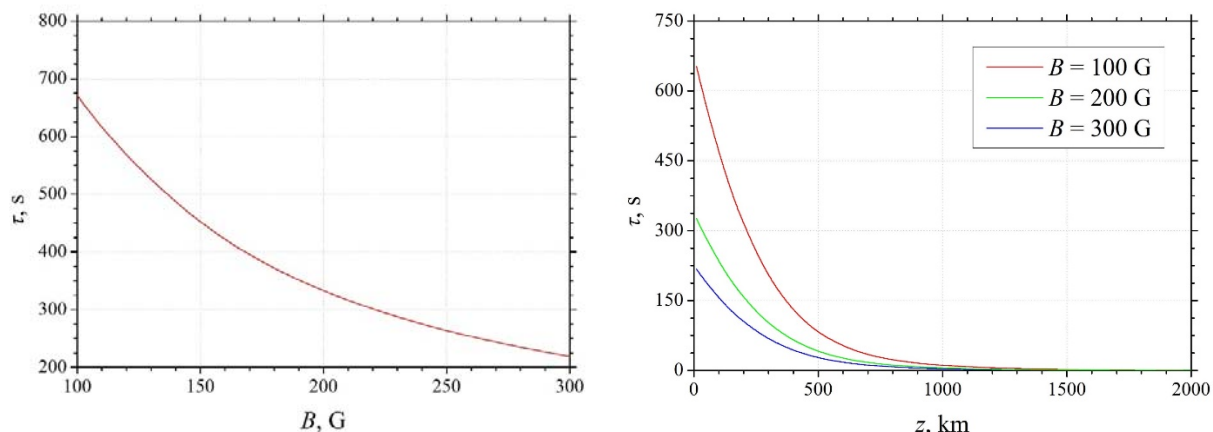


Рис. 2. Зависимость времени распространения сигнала от напряженности магнитного поля (слева) и высоты z при различных значениях B (справа).

Обсуждение и выводы

Нами был проведен анализ времени распространения альфвеновских волн, генерируемых вспышечным энерговыделением, из короны в фотосферу τ . На основе модели спокойно атмосферы Avrett, Loeser [8] показано, что характерное время τ лежит в пределах от нескольких минут до нескольких десятков минут. Это предполагает, что альфвеновские волны едва ли могут служить эффективным источником нагрева фотосферы в солнечных вспышках. На наш взгляд, нагрев фотосферы скорее происходит *in situ* вследствие диссипации электрических токов. Однако этот вопрос требует отдельного обстоятельного анализа.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№ 20-52-26006), РНФ (№ 22-12-0030) и Минобрнауки (НИР № 1021051101548-7-1.3.8).

Литература

1. Prochazka, O., Reid, A., Milligan, R. et al. // *ApJ*, 2018, 862:76 (12pp).
2. Kerr, G.S. // *Frontiers in Astron. and Space Sci.*, 2022, 9, id.425.
3. Allred, J.C., Kowalski, A.F., & Carlsson, M. // *ApJ*, 2015, 809, 104.
4. Kretzschmar, M. // *A&A*, 2011, 530, A84.
5. Kuhar, M., Krucker, S., Oliveros, J.C.M. // *ApJ*, 2016, 816:6 (8 pp).
6. Emslie, A.G., Sturrock, P.A. // *SoPh*, 1982, 80, 99.
7. Machado, M.E., Avrett, E.H., Vernazza, J.E., Noyes, R.W. // *ApJ.*, 1980, 242, 336.
8. Avrett, E.H., Loeser, R. *Astrophys. J. // Supp. Ser.* 2008, 175, 229.