

УДК 523.9, 523.98

Медленные магнетогидродинамические колебания тонких магнитных трубок: фазовые соотношения и диагностика солнечной фотосферы

Ю.Т. Цап^{1,2}, А.В. Степанов², Ю.Г. Копылова²

¹ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
yur_crao@mail.ru

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулковское шоссе 65/1,
Санкт-Петербург, 196140

Поступила в редакцию 24 ноября 2015 г.

Аннотация. В приближении тонкой магнитной трубки рассмотрены фазовые соотношения между возмущенными величинами линейных эванесцентных магнетогидродинамических волн в условиях изотермической стратифицированной атмосферы. Показано, что резонансные (возбуждаемые на частоте отсечки) моды могут быть ответственны за происхождение обнаруженных на спутнике Hinode солнечных фотосферных осцилляций.

SLOW MAGNETOHYDRODYNAMIC OSCILLATIONS OF THE THIN MAGNETIC FLUX TUBES: PHASE RELATIONSHIPS AND SOLAR PHOTOSPHERE DIAGNOSTICS, *by Yu.T. Tsap, A.V. Stepanov, Yu.G. Kopylova.* Based on the thin flux tube approximation the phase relationships between disturbed quantities of the linear evanescent magnetohydrodynamic waves under the isothermal stratified conditions have been considered. It has been shown that the resonance (excited on the cutoff frequency) modes can be responsible for the origin of the solar photospheric oscillations revealed with the Hinode satellite.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, пульсации излучения, магнитные трубки

1 Введение

Исследование магнетогидродинамических (МГД) волн позволяет не только проводить диагностику плазмы и магнитных полей в атмосферах Солнца и звезд (Цап и др., 2011; Степанов и др., 2012; Цап и др., 2013), но и лучше понять природу различных астрофизических явлений. Среди них хотелось бы особо выделить высокую температуру короны (Зиркер, 1993; Кранмер, 2002; Климчук, 2006; Нараин, Ульмшнейдер, 1996), а также ускорение солнечного и звездного ветров (Кранмер, 2002; Кранмер, Ван Баллегойджен, 2005; Судзуки, 2013). Между тем вопрос о происхождении МГД-волн в атмосфере Солнца все еще остается открытым.

Согласно современным представлениям, основным структурным элементом солнечной фотосферы являются тонкие интенсивные магнитные трубки с диаметрами, не превышающими ста километров (Стэнфлю, 2011; Джи и др., 2012; Шарыкин, Косовичев, 2014). На них может приходиться до 90 % магнитного потока (Ховард, Стэнфлю, 1972; Руиди и др., 1992). Данные магнитные образования, выступая в роли волноводов, способны эффективно передавать механическую энергию конвективных движений в верхние слои солнечной атмосферы.

Считается, что в тонких магнитных трубках, когда характерный продольный масштаб возмущений значительно превосходит их радиусы, могут возбуждаться три основные моды (Дефо, 1976; Робертс, Вебб, 1978; Спруит, 1981, 1983): медленные (“сосисочные”), поперечные (изгибные) и крутильные. Ввиду малых размеров трубок вопрос об их относительной роли в атмосфере Солнца все еще остается открытым.

С запуском в 2006 г. японского спутника Hinode (“Рассвет”) появилась возможность проводить наблюдение осцилляций магнитных трубок Солнца с высоким пространственным разрешением, достигающим 0.16” (Фуджимура, Цунета, 2009). Наблюдения на спектрополяриметре телескопа SOT (Solar Optical Telescope, спутник Hinode) в линиях железа Fe I на длинах волн 6301.5 Å и 6302.5 Å, формируемых на уровне нижней фотосферы, позволили одновременно измерять флуктуации интенсивности, скорости и магнитного поля. Высокая чувствительность инструмента позволяла выявлять вариации магнитного поля амплитудой всего в 1–5 Гс.

Детальный анализ измерений, выполненных на SOT/Hinode, позволил, в частности, выявить для 14-ти участков поверхности Солнца одновременные колебания лучевой скорости V и продольного магнитного поля B в порах и межгранульных магнитных элементах соответственно с периодами 3–6 и 4–9 мин (Фуджимура, Цунета, 2009). Наиболее интересным оказалось то, что разность фаз между возмущенными величинами δB и δV составила примерно $-\pi/2$ радиан. Это не только исключает какую-либо связь между магнитными осцилляциями и изменениями оптической толщины (Фуджимура, Цунета, 2009), но и свидетельствует об эффективном возбуждении колебаний в фотосфере Солнца.

Фуджимура и Цунета (2009) предположили, что наблюдаемые пульсации могли быть вызваны стоячими медленными МГД-волнами тонких магнитных трубок. Предполагалось, что они формируются вследствие отражения волн в переходной области между хромосферой и короной Солнца. На наш взгляд, такой подход нельзя считать достаточно обоснованным в силу следующих причин. Во-первых, амплитуды медленных волн над магнитным балдахином в хромосфере Солнца должны сильно возрасти с высотой из-за стратификации атмосферы, вызывая их быструю диссипацию из-за нелинейных эффектов. Во-вторых, как следует из модели Фуджимуры и Цунеты (2009), образование узлов и пучностей стоячих волн с различными периодами должно происходить на одних и тех же высотах, что объяснить достаточно трудно. Влияние силы тяжести на дисперсионные и фазовые соотношения возбуждаемых в трубках солнечной фотосферы собственных мод также не учитывалось. Между тем именно стратификация атмосферы ответственна за происхождение эванесцентных МГД-колебаний (Прист, 1985), которые могут играть важную роль в атмосфере Солнца, если их периоды превышают несколько минут (см. следующий раздел).

В настоящей работе мы рассмотрим медленные осесимметричные колебания тонких магнитных трубок в стратифицированной атмосфере, уделяя особое внимание анализу фазовых соотношений между возмущенными величинами.

2 Фазовые соотношения МГД-мод тонких магнитных трубок

Считая ось Z цилиндрической системы координат направленной вертикально к поверхности Солнца, линеаризованные уравнения движения и сохранения энергии для медленных осесимметричных волн тонкой магнитной трубки можно представить в виде (Робертс, Вебб, 1978; Спруит, 1983; Прист, 1985; Ферриз-Мас и др., 1989; Еллес Шауш и др., 2009)

$$\rho \frac{\partial \delta V}{\partial t} + \frac{\partial \delta p}{\partial z} + \delta \rho g = 0, \quad (1)$$

Медленные магнитогидродинамические колебания тонких магнитных трубок...

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} + \delta V \frac{\partial p}{\partial z} - c_s^2 \left(\frac{\partial \delta \rho}{\partial t} + \delta V \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

где ρ , V , p — плотность, скорость и давление плазмы соответственно, B — магнитное поле, $c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$ — скорость звука, g — ускорение свободного падения, $\gamma = 5/3$ — постоянная адиабаты. В случае изотермической атмосферы (температура $T = \text{const}$) с характерной шкалой высот H , используя уравнение состояния, $p = (\rho/m)\kappa_B T$, где κ_B — постоянная Больцмана, m — средняя масса частиц в плазме, имеем

$$p \propto e^{-z/H}, \quad \rho \propto e^{-z/H}, \quad B \propto e^{-z/2H}. \quad (3)$$

Отметим, что последнее выражение следует из условия баланса давлений внутри и снаружи (e) магнитной трубки

$$\frac{B^2}{8\pi} + p = p_e. \quad (4)$$

Как легко видеть из (3) и (4), в рамках рассматриваемой модели скорость звука c_s и альвеновскую скорость $V_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ можно считать постоянными величинами.

Если возмущения $\delta f \propto \exp(-i\omega t)$, то, задавая их в виде

$$\delta \rho = A_\rho \sin(\omega t) e^{k_p z}, \quad \delta p = A_p \sin(\omega t) e^{k_p z}, \quad \delta V = A_V \cos(\omega t) e^{k_v z}, \quad (5)$$

где волновые числа k_p и k_v , а также амплитуды A_ρ , A_p и A_V являются константами, нетрудно получить из (1)–(4) соотношения

$$A_p = \left[\frac{1}{c_s^2} + \frac{N^2}{g(\omega^2 - N^2)} \left(k_p + \frac{g}{c_s^2} \right) \right] A_\rho, \quad A_V = \frac{\omega}{\rho(\omega^2 - N^2)} \left(k_p + \frac{g}{c_s^2} \right) A_p, \quad (6)$$

где $N^2 = (\gamma - 1)g^2/c_s^2$ — квадрат частоты Брента-Вяйсяля.

Приняв во внимание, что в приближении тонкой трубки

$$\delta p = -\frac{B \delta B}{4\pi},$$

для возмущенного магнитного поля получим

$$\delta B = -\frac{4\pi}{B} A_p \sin(\omega t) e^{k_p z}, \quad (7)$$

где волновое число (Дефо, 1976; Робертс, Вебб, 1978)

$$k_p = -\frac{3}{4H} \pm \frac{i\sqrt{\omega^2 - \omega_T^2}}{c_T}, \quad c_T^2 = \frac{c_s^2 V_A^2}{c_s^2 + V_A^2},$$

и квадрат частоты отсечки

$$\omega_T^2 = \alpha c_T^2 / H^2, \quad \alpha = \frac{9}{16} - \frac{1}{2\gamma} + \frac{c_s^2}{V_A^2} \frac{\gamma - 1}{\gamma^2}.$$

Волны с частотой $\omega > \omega_T$ называют бегущими, а с $\omega \leq \omega_T$ — эванесцентными (нераспространяющимися). Поскольку плазменный параметр $\beta = 8\pi\rho/B^2 = 2c_s^2/(\gamma V_A^2)$, то, исключив в выражении для ω_T шкалу высот H , нетрудно определить критический период волн

$$T_T = \frac{2\pi}{\omega_T} = \frac{2\pi c_s}{\gamma g} \sqrt{\frac{2 + \beta\gamma}{2\alpha}}. \quad (8)$$

Если положить в магнитных трубках фотосферы Солнца $c_s = (7-10) \times 10^5$ см/с и $\beta \leq 3$, из (8) получим: $T_T = (180-270)$ с. Это свидетельствует, как уже было отмечено, о необходимости учета действия силы тяжести в случае возбуждения минутных медленных мод с периодами $T_p \geq 1$ мин (здесь мы также учли влияние стратификации атмосферы на бегущие волны, для которых фазовые соотношения существенно усложняются).

Полагая $\omega = \omega_T$, и, принимая во внимание, что разность

$$\omega_T^2 - N^2 = \frac{c_T^2}{H^2} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\gamma} \right)^2,$$

т. е. $\omega_T - N > 0$, а также $k_p + g/c_s^2 < 0$ ($c_s^2 = \gamma g H$), из (5)–(7) и (8) находим

$$\delta V \propto -\cos(\omega t) = \cos(\omega t + \pi), \quad \delta B \propto -\sin(\omega t) = \cos(\omega t + \pi/2).$$

Откуда следует, что разность фаз между соответствующими возмущенными величинами будет равна: $\psi_B - \psi_V = -\pi/2$, что хорошо согласуется с результатами наблюдений на SOT/Hinode (Фуджимура, Цунета, 2009).

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что за обнаруженные Фуджимурой и Цунетой (2009) квазипериодические пульсации в фотосфере Солнца были ответственны медленные МГД-колебания тонких магнитных трубок, частота которых близка к частоте отсечки ω_T (их иногда называют резонансными). Последнее обстоятельство может быть использовано для диагностики термодинамических параметров фотосферной плазмы.

3 Выводы

В настоящей работе мы показали, что учет силы тяжести, ответственной за стратификацию солнечной фотосферы, может существенным образом сказаться на фазовых соотношениях медленных МГД-волн с периодами $T_p \geq 1$ мин, генерируемых в фотосфере Солнца. В

Медленные магнитогиродинамические колебания тонких магнитных трубок...

частности, это позволило нам объяснить фазовые соотношения минутных осцилляций, обнаруженных Фуджимурой и Цунетой (2009) из анализа наблюдательных данных, полученных на SOT/Hinode. Хотя эванесцентные моды не переносят волновую энергию, они дают возможность получить важную информацию о динамике и основных параметрах фотосферных магнитных трубок. Например, оценить альвеновскую скорость или скорость звука, от которой зависит частота отсечки ω_T . Это также косвенно свидетельствует о возможной важной роли альвеновских возмущений в нагреве верхней атмосферы Солнца, поскольку они не возбуждают резонансные колебания, на которые, как следует из полученных результатов, может приходиться значительная доля энергии конвективных движений.

Полученные нами оценки предполагают, что эванесцентные медленные резонансные ($\omega \approx \omega_T$) МГД-волны ответственны за происхождение наблюдаемых на SOT/Hinode осцилляций. Генерация медленных мод рассматривалась разными авторами (см., например, Мусиелак, Ульмшнейдер, 2003; Эрдели, Харгривс, 2008). Было показано, что под действием некоторого гармонического источника в магнитных трубках могут одновременно возбуждаться как вынужденные бегущие волны, частота которых ω определяется источником возбуждения, так и затухающие свободные колебания с частотой ω_T . Однако, когда ω совпадает с ω_T , генерируются только свободные колебания, которые, в отличие от предыдущего случая, не затухают со временем (Эрдели, Харгривс, 2008). Кроме того, резонансные колебания легко возбуждаются и ангармоническими источниками возмущения. Вопрос генерации резонансных медленных МГД-мод в тонких магнитных трубках требует отдельного рассмотрения.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (N 15-02-08028 А).

Литература

- Дефо (Defouw R.J.) // *Astrophys. J.* 1976. V. 209. P. 266.
 Джи и др. (Ji H., Cao W., Goode P.R.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 750. id. L25.
 Зиркер (Zirker J.B.) // *Solar Phys.* 1993. V. 148. P. 43.
 Еллес Шауш и др. (Yelles Chaouche L., Solanki S.K., Schüssler M.) // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 504. P. 595.
 Климчук (Klimchuk J.A.) // *Solar Phys.* 2006. V. 234. P. 41.
 Кранмер (Cranmer S.R.) // *Space Sci. Rev.* 2002. V. 101. P. 229.
 Кранмер, Ван Баллегойджен (Cranmer S.R., van Ballegoijen A.A.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005. V. 156. P. 265.
 Мусиелак, Ульмшнейдер (Musielak Z.E., Ulmschneider P.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 400. P. 1057.
 Нараин, Ульмшнейдер (Narain U., Ulmschneider P.) // *Space Sci. Rev.* 1996. V. 75. P. 453.
 Прист Э.Р. // *Солнечная магнитогиродинамика*. М.: Мир. 1985.
 Робертс, Вебб (Roberts B., Webb A.R.) // *Solar Phys.* 1978. V. 56. P. 5.
 Руиди и др. (Rüedi I., Solanki S.K., Livingston W., Stenflo J.O.) // *Astron. Astrophys.* 1992. V. 263. P. 323.
 Спруит (Spruit H.C.) // *Astron. Astrophys.* 1981. V. 98. P. 155.
 Спруит (Spruit H.C.) // *Solar and stellar magnetic fields: Origins and coronal effects*. IAU Symp. N. 102. / Ed. Stenflo J.O. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1983. P. 41.
 Степанов и др. (Stepanov A.V., Zaitsev V.V., Nakariakov V.M.) // *Coronal Seismology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. 2012.
 Стэнфло (Stenflo J.O.) // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 529. id. A42.

- Судзуки (Suzuki T.K.) // *Astron. Nachr.* 2013. V. 334. P. 81.
- Ферриз-Мас и др. (Ferriz-Mas A., Schüssler M., Anton V.) // *Astron. Astrophys.* 1989. V. 210. P. 425.
- Фуджимура, Цунета (Fujimura D., Tsuneta S.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 702. P. 1443.
- Ховард, Стенфло (Howard R., Stenflo J.O.) // *Solar Phys.* 1972. V. 22. P. 402.
- Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Жилев Б.Е. // *Письма в Астрон. журн.* 2011. Т. 37. С. 53.
- Цап и др. (Tsap Yu., Kopylova Yu., Goldvarg T., Stepanov A.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013. V. 65. S6.
- Шарькин, Косовичев (Sharykin I.N., Kosovichev A.G.) // *Astrophys. J.* 2014. V. 788. L18.
- Эрдели, Харгривс (Erdelyi R., Hargreaves J.) // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 483. P. 285.