

Изучение динамики магнитоакустических волн в акустически активных корональных петлях

Д.В. Агапова^{1, 2}, Д.И. Завершинский^{1, 2}, С.А. Белов^{1, 2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Обоснование. Областью проводимых исследований является корональная сейсмология. Это быстро развивающийся раздел астрофизики, предметом исследования которого являются волновые и колебательные явления в солнечной атмосфере. Анализ волн и осцилляции, полученных с помощью инструментов космического и наземного базирования в последние десятилетия, позволяет сделать выводы о внутренней структуре и процессах, протекающих в солнечной атмосфере. Особое место в данных наблюдениях занимают именно волновые явления в пространственно-временных структурах в солнечной короне, таких как корональные петли, протуберанцы и т. д. Наблюдение во всех корональных структурах магнитоакустических (МА) волн и колебаний имеет очень важное значение для объяснения неизвестного нагрева солнечной короны, так как именно эти волны могут обеспечить значительную часть необходимой энергии. К тому же в различных корональных областях были обнаружены незатухающие и даже растущие волны. Такие явления могут быть объяснены только эффектами, которые не были учтены при анализе или были учтены некорректно ранее, в частности влиянием неадиабатических процессов, таких как нагрев и радиационное охлаждение, рассмотренных в данной работе.

Цель — исследовать дисперсионные свойства собственных мод в плазме солнечной атмосферы с учетом неоднородности плазмы по магнитному полю, а также неадиабатических процессов.

Методы. Исследование динамики волн проводилось с помощью идеальной системы уравнений магнитогидродинамики с учетом неадиабатических процессов, таких как объемный нагрев и радиационное охлаждение, зависящих от параметров плазмы, например плотности, температуры и магнитного поля. Из-за наличия упомянутой зависимости возмущение параметров активной среды может привести к дисбалансу между нагревом и охлаждением, который, в свою очередь, может оказать влияние на развитие самого возмущения. В данной работе проводился линейный анализ волн, так, с помощью теории возмущения нами было получено дисперсионное соотношение (1) для осесимметричных и изгибных магнитоакустических волн, распространяющихся в солнечной короне:

$$\left(c_{A_i}^2 k_z^2 - \omega^2\right) k_{x_e} = - \left(\frac{\rho_{0_e}}{\rho_{0_i}} \right) \left(c_{A_e}^2 k_z^2 - \omega^2 \right) k_{x_i} \begin{pmatrix} \coth(k_{x_i} x_0) \\ \tanh(k_{x_i} x_0) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Результаты. Из анализа численного решения дисперсионного соотношения (1) для характерных параметров «теплых» корональных петель, было показано, что фазовая скорость медленных МА волн подвержена существенному влиянию не только дисперсии из-за конечной ширины плазменного слоя, но и дисперсии, определяемой тепловым дисбалансом. При этом основное влияние теплового дисбаланса приходится на длинноволновую часть спектра, где классическое выражение для адиабатической трубочной скорости теперь принимает модифицированное выражение. Было установлено, что модифицированная трубочная скорость может принимать разные значения в зависимости от вида функциональной зависимости нагрева, от величины магнитного поля. Для «сильных» магнитных полей, для $\beta = 0,03$, разница в значениях модифицированной трубочной скорости пропадает.

В результате возникшего теплового дисбаланса также может появиться положительная/отрицательная обратная связь между возмущением и активной средой, следствием которой будет усиление/затухание волн. В данной работе рассматривался режим, при котором тепловой дисбаланс может привести к затуханию МА волн в корональной плазме. Так, было показано, что медленные волны затухают быстрее, чем

быстрые. В зависимости от степенной зависимости нагрева от магнитного поля было показано, что время затухания медленных МА волн уменьшается с увеличением показателя степени. При этом быстрых волн же ведут себя наоборот.

Выводы. Таким образом, в данной работе было исследовано дисперсионное соотношение для магнитоакустических волн, распространяющихся в неадиабатической плазме, при наличии механизма нагрева, зависящего не только от температуры и плотности, но и от магнитного поля. Анализ дисперсионных соотношений показал, что медленные МА волны в области длинных волн подвержены действию теплового дисбаланса, а в области коротких волн — конечных размеров магнитной структуры. При этом даже в неадиабатической плазме основным источником дисперсии фазовой скорости быстрых волн является геометрия волновода.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

Ключевые слова: тепловая неустойчивость; солнечная корона; осесимметричные возмущения; изгибные возмущения; магнитное поле; радиационное охлаждение; объемный нагрев.

Сведения об авторах:

Дарья Вадимовна Агапова — студентка, группа 4202-030402D, естественнонаучный институт; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия; младший научный сотрудник, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: agapovadaria2019@gmail.com

Сергей Александрович Белов — научный сотрудник НОЦ ФНОС-73, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия; научный сотрудник, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: mr_beloff@mail.ru

Дмитрий Игоревич Завершинский — научный руководитель, кандидат физико-математических наук; доцент кафедры физики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия; научный сотрудник, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: dimanzav@mail.ru