

ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ГОРЯЧИХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

**Дертеев С.Б., Шивидов Н.К., Сапралиев М.Е.,
Бембитов Д.Б., Михалыев Б.Б.**

Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия

LONGITUDINAL OSCILLATIONS IN HOT CORONAL LOOPS

**Derteev S.B., Shividov N.K., Sapraliev M.E.,
Bembitov D.B., Mikhalyaev B.B.**

Kalmyk State University, Elista, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-95-98>

Longitudinal oscillations in hot post-flare coronal loops are studied in a nonlinear hydrodynamic approximation. To explain its fast damping, a thermal conductivity mechanism is used, which is important at high temperatures. In the case of a large amplitude, the numerical simulation shows that the nonlinear approach gives a greater coincidence of the results with the observational data than the linear approximation.

Продольные колебания

Поперечные и продольные волны в корональных петлях наблюдаются повсеместно в различных диапазонах электромагнитного излучения [1]. Продольные волны наблюдаются как движущиеся неоднородности и интерпретируются как области сжатия плазмы. При их теоретическом исследовании используется представление медленных магнитозвуковых или акустических волн. Волны сжатия имеются в различных корональных структурах, корональных дырах и петлях, в настоящей работе берутся после вспышечные горячие корональные петли [2–3], где используется аппарат стоячих продольных волн [2, 4]. Наблюдения горячих петель дают довольно большой перечень событий с указанием многих физических параметров петель и их колебаний, например, Wang et al. [3]. Полученные данные позволяют оценивать параметры горячей корональной плазмы, а также изучать роль физических эффектов в наблюдаемых явлениях.

Нами составлена сводная таблица параметров нескольких событий из этой работы, приводимая ниже. События сильно разнятся по величине скорости плазмы. Например, в петле 5 она составляет 2.4% значения звуковой скорости, а в петле 7 – уже 17%. Понятно, что во втором случае скорость плазмы нельзя считать малой, и при описании колебаний необходим нелинейный подход. Ранее при оценке параметров колебания в работе [5] мы использовали линейное приближение, основной задачей настоящей работы является изучение стоячих продольных волн в горячих корональных петлях с помощью нелинейного подхода. Имеет смысл проверить резуль-

таты нелинейного подхода на примерах малой и большой амплитуды, чтобы оценить величину ошибки расчетов линейного приближения.

Таблица параметров волн сжатия в горячих корональных петлях
(по данным работы Wang et al. 2007 [3].)

Номер петли	Длина петли (тыс. км)	Темпера- тура (МК)	Электронная плотность (10^9 см^{-3})	Скорость плазмы (км с $^{-1}$)	Период (мин)	Время затухания (мин)
1	134	6.6 ± 0.1	5.2 ± 0.1	21	12.9 ± 0.2	18.1 ± 3.1
2	275	6.5 ± 0.3	4.3 ± 0.5	36	18.3 ± 0.7	19.9 ± 4.2
3	92	7.0 ± 0.3	14.1 ± 0.8	14	8.1 ± 0.1	19.8 ± 5.0
4	74	6.4 ± 0.9	10.4 ± 2.0	17	8.5 ± 0.2	7.4 ± 1.7
5	98	6.3 ± 0.9	11.1 ± 2.3	8	9.3 ± 0.3	19.1 ± 9.2
6	82	6.3 ± 0.5	7.8 ± 0.9	30	8.1 ± 0.3	7.2 ± 1.8
7	135	5.9 ± 0.3	5.6 ± 0.5	61	13.3 ± 0.7	8.1 ± 2.3

Постановка задачи

Для описания волн используются уравнения одномерной газовой динамики с учетом эффекта теплопроводности, играющего важную роль в поведении волн при высоких температурах:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} &= 0, \\
 \frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial v_x}{\partial x} &= (\gamma - 1) \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\
 p &= \rho \frac{RT}{M},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\gamma = 5/3$ – показатель адиабаты, $M = 0.62 \text{ г моль}^{-1}$ – молярная масса. Для коэффициента теплопроводности берется классическое спитцеровское выражение

$$\kappa(T) = 2.28 \times 10^{-6} T^{5/2} \text{ эрг см}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-1}. \tag{2}$$

Аналогично работам [2, 4] численно решается задача о продольных колебаниях корональной петли на фундаментальной моде, $0 < x < L$, L есть длина петли. Используются следующие начальные

$$\begin{aligned}
 \rho(x, 0) &= \rho_0(1 - \varepsilon \sin(\pi x/L)), \\
 p(x, 0) &= p_0(1 - \varepsilon \gamma \sin(\pi x/L)), \\
 v_x(x, 0) &= -\varepsilon C_s \sin(\pi x/L)
 \end{aligned} \tag{3}$$

и граничные условия.

$$\begin{aligned}
 \rho(0, t) &= \rho(L, t) = \rho_0, \\
 p(0, t) &= p(L, t) = p_0, \\
 v_x(0, t) &= v_x(L, t) = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Величины ρ_0 и p_0 есть равновесные значения плотности и давления. $C_s = \sqrt{\gamma RT_0/M}$ – звуковая скорость. Безразмерный параметр ε определяет отношение амплитуды скорости плазмы к звуковой скорости. Уравнения решаются при помощи программного пакета PLUTO.

Результаты моделирования

На рисунках 1 и 2 показаны линейные колебания, полученные из дисперсионного уравнения, и нелинейные колебания, полученные посредством численного моделирования. На рисунке 1 представлено событие, обозначенное как петля 5 в приведенной таблице данных наблюдений. Эти колебания имеют относительно малую амплитуду, результаты расчетов позволяют интерпретировать их как линейные.

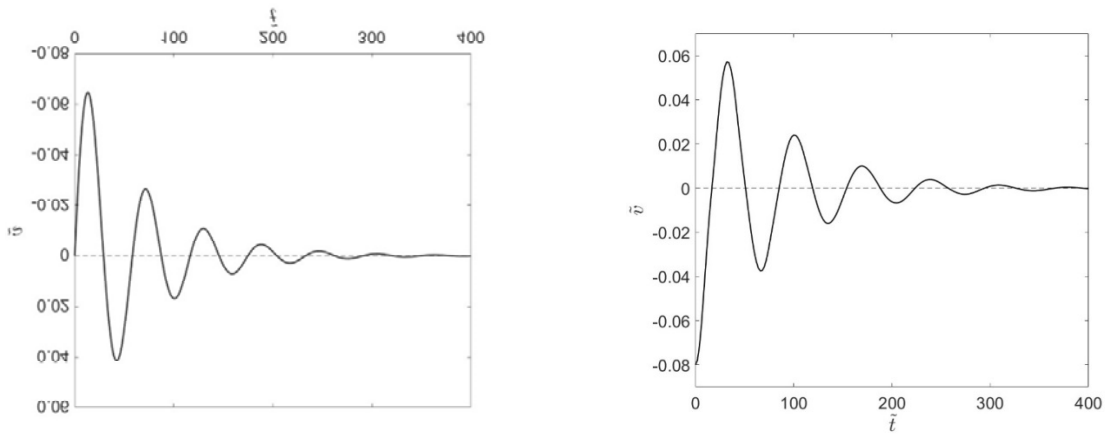


Рис. 1. Моделирование колебаний петли 5 в линейном и нелинейном приближении.

На рисунке 2 показано колебание петли 7, имеющее большую амплитуду. Если в линейном приближении расчетное время затухания равно 15.3 мин, то в нелинейном получается 8.3 мин, что находится в согласии с наблюдением. В данном примере нелинейный подход дает адекватный результат.

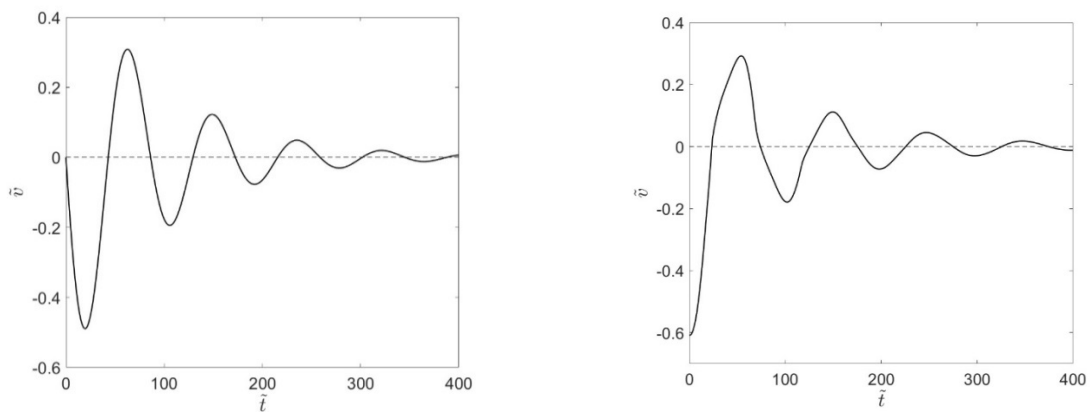


Рис. 2. Колебания петли 7 в линейном и нелинейном приближении.

Исследование выполнено по госзаданию Минобрнауки РФ (№ 075-03-2023-121/3 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

Литература

1. *Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y.* // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2020. V. 58. P. 441.
2. *Ofman L., Wang T.* // *Astrophys. J.* 2002. V. 580. P. L85.
3. *Wang T., Innes D.E., Qiu J.* // *Astrophys. J.* 2007. V. 656. P. 598.
4. *De Moortel I., Hood A.W.* // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 408. P. 755.
5. *Mikhalyaev B., Derteev S., Shividov N., et al.* // *Solar Phys.* 2023. V. 298. 102.