

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

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

Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия

QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN THE SOLAR CORONA

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

Kalmyk State University, Elista, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-373-376>

In the general problem of oscillations observed in the solar corona, a particularly intriguing position is occupied by quasi-periodic oscillations, which are often observed in coronal holes. Most often, periods are observed in pairs of close values. Among the possible explanations of this phenomenon, we consider the dispersion of acoustic waves under the influence of thermal conductivity. The possibility of the appearance of pairs of periods may be due to the existence of a minimum at the group velocity, which is realized under the conditions available in the corona. We show how this works, and also claim that this mechanism can serve for the purposes of coronal seismology to determine the parameters of coronal plasma.

Наблюдения и возможные источники квазипериодических колебаний

В солнечной короне часто наблюдаются колебания на нескольких, чаще всего на двух, частотах. В случае корональных петель обычно говорят, что происходят колебания корональных магнитных трубок на двух или нескольких модах [1]. Аналогичный ответ затруднителен в случае корональных дыр. Колебания регистрируются по вариациям интенсивности излучения и объясняются изменением плотности плазмы, поэтому их называют волнами сжатия. Krishna Prasad et al. [2] приводят примеры наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне на длинах волн 171, 193 и 211 Å. Условия формирования линий дают характерные значения температуры около 0.8, 1.25 и 1.6 МК. В большинстве случаев имеются пары периодов, близких по величине. Пары были следующими.

Для 171 Å: 24.3 и 13.2 мин, 18.7 и 12.1, 31.4 и 13.2, 18.7 и 11.1, 28.8 и 14.40, 26.4 и 12.1, 28.8 и 18.7, 24.3 и 14.4, 26.4 и 17.1, 18.7 и 12.1.

Для 193 Å: 28.8 и 12.1 мин, 20.4 и 17.1, 26.4 и 13.2, 22.2 и 10.2, 26.4 и 10.2, 24.3 и 17.1, 31.4 и 17.1, 24.3 и 14.4, 26.4 и 18.7, 18.7 и 11.1.

Gupta [3] приводит периоды 22.24 и 5.56 и 22.24 и 15.72.

Причины появления пар можно указать самые различные, в том числе упомянутые уже моды магнитных трубок. Мы предлагаем иной механизм, связанный с дисперсией акустической волны из-за теплопроводности плазмы. Квазипериодические колебания могут возникать в результате

наложения волн, имеющих одну групповую скорость. Такая возможность возникает в случае, когда групповая скорость имеет минимум при некоторой длине волны. Здесь происходит наложение именно двух групп волн. Оказывается, под действием эффектов теплопроводности и нагрева радиационных потерь появляется два подобных минимума, из которых для объяснения наблюдаемых периодов подходит теплопроводность. Другой эффект приводит к долгопериодическим колебаниям с периодами порядка нескольких часов.

Основные уравнения

Для описания волн используются уравнения одномерной газовой динамики с учетом эффектов теплопроводности и нагрева/радиационных потерь:

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

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

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

Для функции излучения $\Lambda(T)$ мы используем приближенное аналитическое описание в виде кубических сплайнов, данное в работе [4]. Для анализа колебаний используется дисперсионное уравнение, приведенное в работе [5].

В качестве примера рассмотрим волны в плазме с температурой $T_0 = 1.25$ МК, что соответствует условиям наблюдения в линии 193 Å [2–3]. На рисунке 1 показаны дисперсионные кривые для плотности частиц $n_0 = 1.7 \times 10^9$ см⁻³. Групповая скорость имеет два локальных минимума.

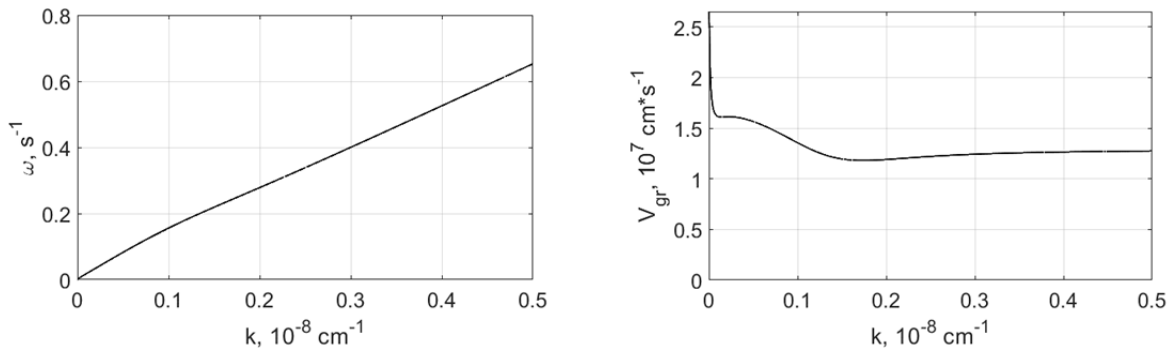


Рис. 1. Кривые частоты и групповой скорости акустической волны при температуре $T_0 = 1.25$ МК и плотности $n_0 = 1.7 \times 10^9$ см⁻³.

Более глубокий обусловлен действием теплопроводности, он находится в точке $k = 1.74 \times 10^{-8} \text{ см}^{-1}$.

Квазипериодические колебания

Реально распространяющиеся колебания всегда имеют форму волновых пакетов, поэтому имеет смысл говорить о группе волн, распространяющихся с некоторой групповой скоростью. Доминирующую роль в пакете играет центральный максимум. С другой стороны, колебания, переносимые пакетом или группой волн, имеют частоту несущей волны, приходящуюся на центр спектра пакета. По обе стороны от минимума мы находим два подобных пакета, имеющих близкие значения периодов несущей.

Ниже на рисунке 2 мы приводим вейвлет-спектр колебаний, генерируемых в результате дисперсии широкого пакета, захватывающего целую окрестность минимума групповой скорости. Он позволяет выделить два основных максимума с периодами 16.9 и 19.6 мин. Пакет построен при температуре $T_0 = 1.25 \text{ МК}$, при которой имеется наблюдение близких по величине периодов 20.4 и 17.1 мин в работе Krishna Prasad et al. [2]. Далее мы отмечаем, что расчетные периоды получены для плотности $n_0 = 1.7 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$. Тем самым мы вводим в действие плотность, которая отсутствует в цитируемой работе. Можно говорить, что проведенное нами на одном примере моделирование квазипериодических осцилляций позволяет восстановить один из ключевых параметров корональной плазмы.

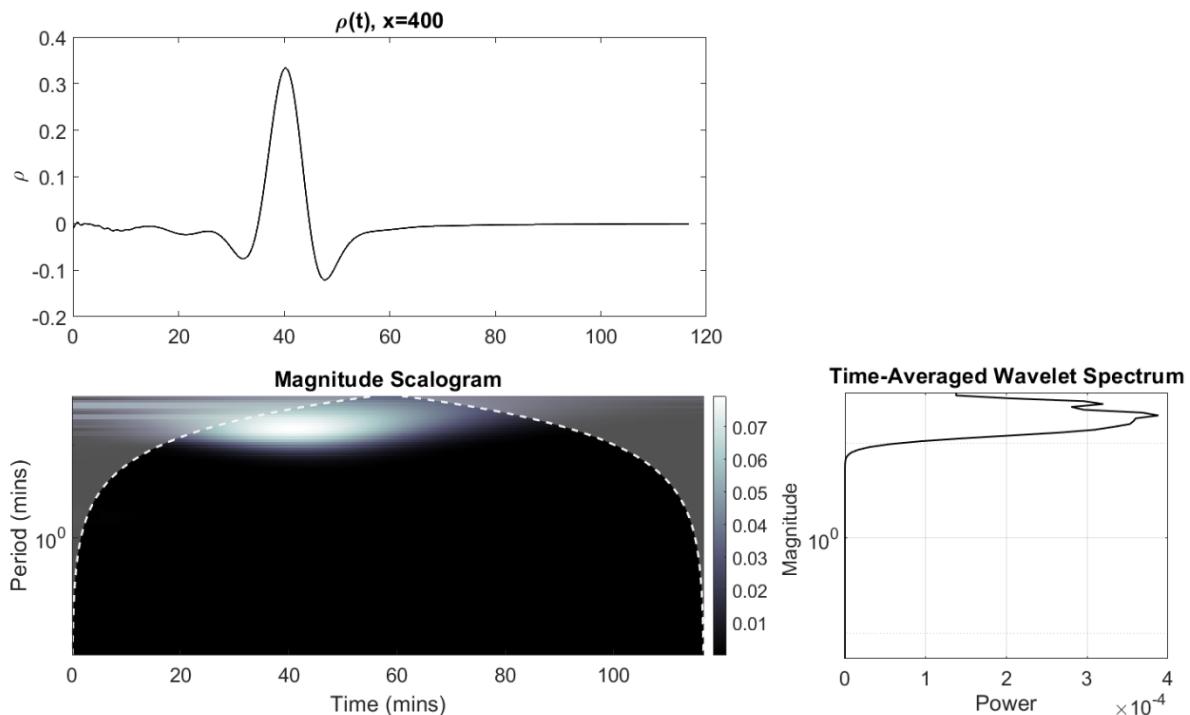


Рис. 2. Вейвлет-спектр квазипериодических осцилляций вследствие дисперсии. Температура и плотность $T_0 = 1.25 \text{ МК}$, $n_0 = 1.7 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№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. *Krishna Prasad S., Banerjee D., Gupta G.R.* // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 528. P. L4.
3. *Gupta G.R.* // *Astron. Astrophys.* 2014. V. 568. A96.
4. *Derteev S., Shvidov N., Bembitov Dz., Mikhalyaev B.* // *Physics.* 2023. V. 5. P. 215.
5. *Mikhalyaev B., Derteev S., Shvidov N., et al.* // *Solar Phys.* 2023. V. 298. 102.