

УДК 533.95; 534.28

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В РАЗРЕЖЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ, ВЫЗВАННЫЕ ДИСПЕРСИЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Д.Б. Бембитов^{1,*}, Н.К. Шивидов¹, Б.Б. Михалев¹

¹Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, г. Элиста, 358000, Россия

*e-mail: dbembitov@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.11.2023

После доработки: 20.11.2023

Принята к публикации: 23.01.2024

На основе учета эффектов теплопроводности и нагрева/радиационных потерь изучается дисперсия акустических волн в разреженной высокотемпературной плазме на примере плазмы солнечной короны. Для функции радиационных потерь используется аналитическая аппроксимация, построенная по значениям, найденным при помощи кода CHIANTI. Показано, что появление квазипериодических осцилляций в акустических волнах может быть объяснено специфическими свойствами дисперсии, связанными с наличием минимума групповой скорости в пространстве волновых чисел. Вейвлет-спектр акустических колебаний в этом случае имеет структуру, названную «бумерангом». Предложена процедура расчета периодов с использованием построенной дуги «бумеранга». Предполагается, что начальное возмущение плазмы имеет форму локализованного импульса, имеющего высокие дисперсионные качества в силу своего широкого спектра. Такой подход имеет основания, известно, например, что различного рода нестационарные процессы в солнечной короне генерируются под действием кратковременных импульсов со стороны конвективных ячеек. Спектр временного сигнала, рассматриваемого в некоторой точке наблюдения, получается непрерывный, и нахождение периодов производится по имеющимся в спектре локальным максимумам. В этом смысле понятие квазипериодических осцилляций отличается от традиционного, где имеется в виду наличие конечного или счетного количества периодов, между которыми имеется определенная связь. Расчеты проводятся на примере высокотемпературной плазмы солнечной короны, где квазипериодические осцилляции наблюдаются повсеместно и могут служить инструментом исследования физических свойств корональной плазмы.

Ключевые слова: плазма, теплопроводность и излучение плазмы, акустические волны, затухание и дисперсия волн, квазипериодические колебания.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.290

EDN FPSJNU

ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих работах [1–2] была предложена модель неадиабатических акустических волн в разреженной высокотемпературной плазме, в которой были учтены эффекты теплопроводности и радиационных потерь. Для примера плазмы солнечной короны принимались классическая спитцеровская теплопроводность и функция излучения, построенная по известному коду CHIANTI [3]. В солнечной короне наблюдаются волны различного вида и различной природы [4–5], которые находят важное практическое применение в определении параметров корональной плазмы [6]. Как правило, они быстро затухают. Хорошо известно, что потери энергии волнами ведут не только к их затуханию, но и к дисперсии [7], этот эф-

фект применяется и в солнечной физике [8]. Квазипериодические колебания привлекают к себе особенное внимание, хотя бы потому, что содержат больше информации. Они наблюдаются, например, во время вспышек по осцилляциям интенсивности микроволнового излучения и объясняются возбуждением нескольких мод магнитных трубок [9–10]. В ситуациях, где наблюдаются волны сжатия, возможно объяснение дисперсии акустических волн [11]. Моделирование показывает, что под воздействием дисперсии из начального локализованного импульса могут возникать квазипериодические осцилляции, при этом вейвлет-спектр по своей форме напоминает бумеранг [12]. Мы показываем, что «бумеранг» возможен и в случае дисперсии акустических волн. Мы связываем его появление с минимумом групповой скорости и

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В РАЗРЕЖЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ, ВЫЗВАННЫЕ ДИСПЕРСИЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

предлагаем процедуру расчета появляющихся при этом пар периодов. Работа направлена на развитие теоретических основ исследований космической плазмы, разработку методов формулирования и решения обратных задач для нахождения параметров плазмы.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Волны изучаются в приближении одномерной гидродинамики, исходные уравнения записываются через плотность и температуру, которые принимаются в качестве базовых термодинамических параметров

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{R}{M} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + (-1)T \frac{\partial v_x}{\partial x} = \\ & = -\frac{(\gamma-1)M}{R\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{(\gamma-1)M}{R} [\rho \Lambda(T) - H]. \quad (3) \end{aligned}$$

Исходная среда есть идеальный газ с показателем адиабаты $\gamma = 5/3$ и молярной массой высокоионизованной водородной плазмы с гелиевой добавкой $M = 0,62 m_p N_A \approx 0,62 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$. Эффект нагрева/радиационных потерь определяется выражением $\rho \Lambda(T) - H$, содержащим постоянную функцию нагрева H . Функция излучения строится кубическими сплайнами по найденным с помощью кода CHIANTI [3] табличным значениям, для просмотра которых мы отсылаем к работе [1]. В рассматриваемом ниже примере приводятся параметры из дисперсионного соотношения, которые вычисляются из функции излучения и коэффициента теплопроводности. Для высокотемпературной плазмы используем классическое выражение коэффициента с кулоновским логарифмом $\Lambda_c = 19.3$

$$\begin{aligned} & \kappa(T) \approx \\ & \approx 2.28 \cdot 10^{-6} T^{\frac{5}{2}} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (4) \end{aligned}$$

Невозмущенная плазма имеет однородные плотность ρ_0 и температуру T_0 , $C_s = \sqrt{\gamma R T_0 / M}$ – звуковая скорость. Частота и волновое число имеют безразмерные значения $\tilde{\omega}$, $\tilde{k}$ и соответствующие масштабы $m(\omega) = 0.1 \text{ с}^{-1}$, $m(k) = 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. Величина $\frac{m(\omega)}{m(k)} = m(C_s) = 10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ есть масштаб звуковой скорости, характерный для температуры поряд-

ка одного МК. Дисперсионное соотношение в безразмерных величинах имеет следующий вид:

$$\tilde{\omega}^3 + iA\tilde{\omega}^2 - \tilde{\omega}\tilde{C}_s^2\tilde{k}^2 + iB = 0, \quad (5)$$

$$A = A_1\tilde{k}^2 + A_2,$$

$$B = [-(A_1\tilde{k}^2 + A_2) + A_3] \tilde{C}_s^2\tilde{k}^2/\gamma, \quad (6)$$

где параметры «неадиабатичности» имеют выражения

$$A_1 = \frac{(\gamma-1)Mm(k)^2}{R\rho_0m(\omega)} \kappa(T_0), \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{(\gamma-1)M}{Rm(\omega)} \rho_0 \Lambda'(T_0), \quad (8)$$

$$A_3 = \frac{(\gamma-1)M}{RT_0m(\omega)} \rho_0 \Lambda(T_0). \quad (9)$$

Асимптотическое в пределе больших волновых чисел значение частоты

$$\tilde{\omega} \approx \tilde{v}_\infty \tilde{k} - i\tilde{\delta}_\infty, \quad \tilde{v}_\infty = \frac{\tilde{C}_s}{\sqrt{\gamma}}, \quad \tilde{\delta}_\infty = \frac{(\gamma-1)\tilde{C}_s^2}{2\gamma A_1}. \quad (10)$$

Нетрудно видеть, что при больших волновых числах фазовая скорость волны близка к изотермической звуковой скорости. Это означает высокую эффективность теплопроводности.

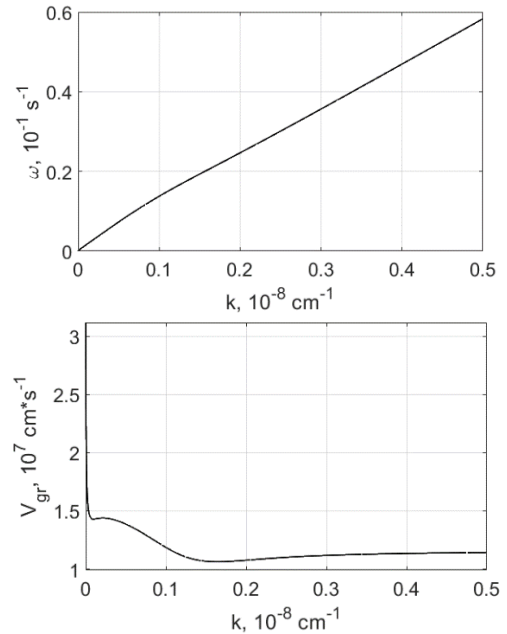


Рис. 1. Кривая частоты и групповая скорость при $T_0 = 1 \text{ МК}$ и $\rho_0 = 1.037 \times 10^{-15} \text{ г см}^{-3}$

На рис. 1 мы приводим пример дисперсионных кривых для случая, когда $A_1 = 11.0$, $A_2 = -0.000509$, $A_3 = 0.0128$. Обращаем внимание на два локальных минимума групповой скорости, один при $\tilde{k} = 0.164$, другой находит-

ся вблизи нуля, он менее выражен. Главный минимум обусловлен теплопроводностью, второй – нагревом/радиационными потерями. В данной работе нас будет интересовать первый.

ДИСПЕРСИЯ ВОЛН

Моделирование дисперсии производим, изучая распространение волнового пакета в виде локализованного начального импульса гауссовой формы.

На рис. 2 показан вейвлет-спектр колебаний на некотором удалении от начального положения импульса. Спектр колебаний довольно широк, его ядро своей формой напоминает бумеранг [12]. Появление бумеранга свидетельствует о наличии квазипериодических колебаний. На чем основан этот вывод? Очевидно, точка излома бумеранга дает колебания, которые последними приходят в точку наблюдения, и это есть

колебания, распространяющиеся с минимальной групповой скоростью. Несколько ранее приходят колебания, имеющие большую групповую скорость, но таких колебаний, судя по кривой групповой скорости, имеется два. Каждое такое колебание формируется узким пакетом, имеющим частоту, равную частоте несущей, которая определяется кривой частоты из рис. 1. Под узким мы понимаем пакет, имеющий узкий интервал волновых чисел. Два узких пакета, спектральные интервалы которых лежат по обе стороны от минимума, имеют равную групповую скорость, но различные несущие частоты. Они дают квазипериодические колебания. Данный анализ, приведенный в работе [12], имеет качественное значение и не дает возможности определить величины периодов, которые появляются в конкретном случае. Мы предлагаем процедуру их вычисления.

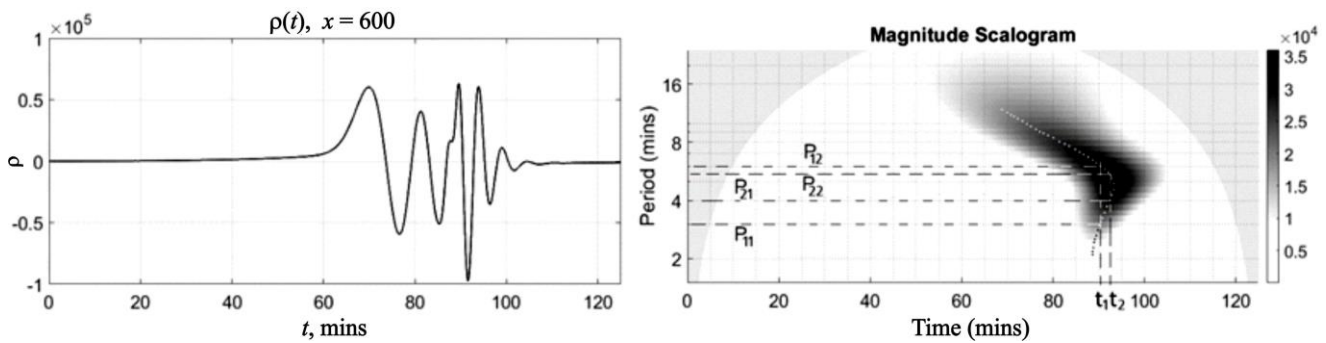


Рис. 2. Вид временного сигнала на расстоянии $x = 3 \times 10^{10}$ см (левая панель) и вейвлет-спектр сигнала (правая панель)

Поскольку пакет «размыт» не только в пространстве, но и во времени, излом бумеранга и другие его части имеют некоторую протяженность. Имеет смысл рассматривать его дугу, изображенную на рис. 2 (правая панель) точечной линией, под которой мы понимаем геометрическое место точек наибольшей плотности сигнала. В точке излома дуга имеет вертикальную касательную, в ней период колебаний равен 5 мин. С другой стороны, в точке минимума групповой скорости $k = 0.164 \times 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ мы имеем частоту $\omega = 0.021 \text{ с}^{-1}$, или период в те же 5 мин. В каждый отдельный момент времени, например $t_1 = 90.5$, с помощью дуги мы находим два периода, $P_{11} = 3$ мин и $P_{12} = 6$ мин.

Возможных пар много, и, по всей видимости, наблюдение определенной пары связано с видом спектральной плотности сигнала. Можно рассмотреть обратный пример, когда по периодам можно получить параметры плазмы. В ра-

боте [13] приведены данные наблюдений волн сжатия в полярных шапках на Солнце в линии $171 \text{ \AA}$ при температуре плазмы в 1 МК. Были обнаружены периоды в 22.4 и 17.1 мин, они могут быть получены из нашей модели при $T_0 = 1 \text{ МК}$ и $\rho_0 = 1.037 \times 10^{-15} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. В данном примере по заданным периодам мы оценили плотность плазмы. Такой подход соответствует основной задаче корональной сейсмологии. В рассмотренных примерах используется основной минимум групповой скорости, обусловленный теплопроводностью. Аналогично, возможно существование квазипериодических осцилляций, вызванных дисперсией в результате нагрева/радиационных потерь. Однако здесь значения периодов будут на порядок больше.

ВЫВОДЫ

Образование наблюдаемых квазипериодических осцилляций возможно в результате распа-

да локализованного импульса на отдельные периодические составляющие. Данный процесс обычно изучается с применением вейвлет-анализа, где хорошо изучены примеры с выделенными периодами. Распад импульса возможен в результате дисперсии начального импульса под действием теплопроводности и нагрева/радиационных потерь. Дисперсия на минимуме групповой скорости дает пары периодов, что часто наблюдается в практике. Она может быть использована при определении параметров плазмы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бембитов Д.Б., Шивидов Н.К., Михальев Б.Б. Акустические волны в разреженной высокотемпературной плазме // Вестник НИЯУ МИФИ, 2022. Т. 11. № 4. С. 288.
2. Derteev S., Shvidov N., Bembitov Dz., Mikhalyaev B. Damping and dispersion of non-adiabatic acoustic waves in a high-temperature plasma: A radiative-loss function // Physics. 2023. V. 5. P. 215.
3. Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – An atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions // The Astrophysical Journal, 2021. V. 909. P. 38.
4. De Moortel I. Longitudinal waves in coronal loops // Space Science Reviews, 2009. V. 149. P. 65.
5. Wang T.J. Waves in solar coronal loops. Low-frequency waves in space plasmas. / Ed. by Andreas Keiling, Dong-Hun Lee, Valery Nakariakov // Geophys. Monograph Series. Wiley, 2016. V. 216. P. 395.
6. De Moortel, I., Nakariakov, V.M.: 2012, Magneto-hydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results // Philosophical Transactions of the Royal Society A // V. 370. P. 3193.
7. Гинзбург В.Л. Об общей связи между поглощением и дисперсией звуковых волн // Акустический журнал, 1955. Т. 1. Вып. 1. С. 31.
8. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.L. Dispersion of slow magnetoacoustic waves in the active region fan loops introduced by thermal misbalance // Solar Physics, 2021. V. 296. P. 122.
9. Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., Mehta T., Pugh C.E., Lee D.-H., Broomhall A.-M. Non-stationary quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2019. V. 61. 014024. P. 9.
10. Куприянова Е.Г., Колотков Д.Ю., Накаряков В.М., Кауфман А.С. Квазипериодические пульсации в солнечных и звездных вспышках. Обзор // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 3.
11. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // Physics of Plasmas, 2019. V. 26. 082113.
12. Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Moss G., Shellard P. Fast magnetoacoustic wave trains: from tadpoles to boomerangs // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021. V. 505. P. 3505-3515.
13. Krishna Prasad S., Banerjee D., Van Doorselaere T. Frequency-dependent in propagating slow magneto-acoustic waves // The Astrophysical Journal, 2014. V. 789. P. 118.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 1, pp. 11–15

QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN A RAREFIED HIGH-TEMPERATURE PLASMA CAUSED BY THE DISPERSION OF ACOUSTIC WAVES

D.B. Bembitov^{1,*}, N.K. Shvidov¹, B.B. Mikhalyaev¹

¹Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikov; Elista, Pushkin str., 11, 358000, Russia

*e-mail: dbembitov@gmail.com

Received November 20, 2023; revised November 20, 2023; accepted January 23, 2024

Based on the effects of thermal conductivity and heating/radiation losses, the dispersion of acoustic waves in a rarefied high-temperature plasma is studied using the example of the plasma of the solar corona. For the radiation loss function, an analytical approximation is used, based on the values found using the CHIANTI code. It is shown that the appearance of quasi-periodic oscillations can be explained by the specific properties of dispersion associated with the presence of a minimum group velocity in the space of wave numbers. The wavelet spectrum of acoustic vi-

brations in this case has a structure called “a boomerang”. A procedure for calculating periods using the constructed boomerang curve is proposed. It is assumed that the initial plasma disturbance has the form of a localized pulse having high dispersion qualities due to its wide spectrum. This approach has grounds, it is known, for example, that various kinds of non-stationary processes in the solar corona are generated under the action of short-term pulses from convective cells. The spectrum of the time signal considered at some point of observation is continuous, and the periods are determined based on the local maxima available in the spectrum. In this sense, the concept of quasi-periodic oscillations differs from the traditional one, which refers to the presence of a finite or countable number of periods between which there is a certain relationship. Calculations are carried out on the example of high-temperature plasma of the solar corona, where quasi-periodic oscillations are observed everywhere and can serve as a tool for studying the physical properties of coronal plasma.

Keywords: plasma, thermal conductivity and radiation of the plasma, acoustic waves, dispersion and damping of waves, quasi-periodic oscillations.

REFERENCES

1. Bembitov D.B., Shvidov N.K., Mihalyaev B.B. Akusticheskie volny v razrezhennoj vysokotemperaturnoj plazme. [Acoustic waves in rarefied high-temperature plasma]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2022. Vol. 11. No. 4. P. 288 (in Russian).
2. Derteev S., Shvidov N., Bembitov D., Mikhalyaev B. Damping and dispersion of non-adiabatic acoustic waves in a high-temperature plasma: A radiative-loss function. *Physics*, 2023. Vol. 5. P. 215.
3. Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – An atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions. *The Astrophysical Journal*, 2021. Vol. 909. P. 38.
4. De Moortel I. Longitudinal waves in coronal loops. *Space Science Reviews*, 2009. Vol. 149. P. 65.
5. Wang T.J. Waves in solar coronal loops / Low-frequency waves in space plasmas. / Ed. by Andreas Keiling, Dong-Hun Lee, Valery Nakariakov. *Geophys. Monograph Series*. Wiley, 2016. Vol. 216. P. 395.
6. De Moortel, I., Nakariakov, V.M. 2012, Magneto-hydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. Vol. 370. P. 3193.
7. Ginzburg V.L. Ob obshchej svyazi mezhdu pogloshcheniem i dispersiej zvukovyh voln [On the general relationship between absorption and dispersion of sound waves]. *Akusticheskij zhurnal*, 1955. Vol. 1. Iss. 1. P. 31 (in Russian).
8. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.L. Dispersion of slow magnetoacoustic waves in the active region fan loops introduced by thermal misbalance. *Solar Physics*, 2021. Vol. 296. P. 122.
9. Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., Mehta T., Pugh C.E., Lee D.-H., Broomhall A.-M. Non-stationary quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2019. Vol. 61. 014024. P. 9.
10. Kupriyanova E.G., Kolotkov D.Yu., Nakaryakov V.M., Kaufman A.S. Kvaziperiodicheskie pul'sacii v solnechnyh i zvezdnyh vspyskakh. Obzor [Quasiperiodic pulsations in solar and stellar flares. Review]. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2020. Vol. 6. No. 1. P. 3 (in Russian).
11. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance. *Physics of Plasmas*. 2019. Vol. 26. P. 082113.
12. Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Moss G., Shellard P. Fast magnetoacoustic wave trains: from tadpoles to boomerangs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021. Vol. 505. Pp. 3505–3515.
13. Krishna Prasad S., Banerjee D., Van Doorselaere T. Frequency-dependent in propagating slow magneto-acoustic waves. *The Astrophysical Journal*, 2014. Vol. 789. P. 118.