

Проявления теплового дисбаланса в корональных петлях, вызванного медленными магнитоакустическими волнами: моделирование УФ-излучения для наблюдений SDO

А.М. Юдина¹, Д.С. Рящиков^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет, (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)
²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, (443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221)
e-mail: udina.alena163@gmail.com

1 Введение

Солнечная корона — это уникальная среда, которая является естественной лабораторией для изучения физических процессов в плазме. Температура короны достигает более 10^6K , однако механизм нагрева до сих пор остаётся неизвестным, что является одной из нерешённых проблем в физике Солнца. Существуют две основные гипотезы, которые объясняют нагрев короны до столь высоких температур: импульсный нагрев или нагрев корональными вспышками, либо нагрев за счёт МГД волн, переносящих энергию из нижележащих слоёв Солнца. Однако ввиду отсутствия теоретической модели нагрева короны, его часто моделируют в виде степенной функции температуры и плотности. Кроме того, солнечная корона теряет энергию на излучение. Мощность теплопотерь также зависит от температуры и плотности плазмы. В стационарной атмосфере приток энергии и теплопотери уравновешивают друг друга. Однако возмущения равновесия, вызванные, например, МГД волнами, приводят к нарушению баланса. Показано, что этот тепловой дисбаланс также влияет на свойства МГД волн, приводя к изменению скорости их распространения, усилению или затуханию волн, а также возникновению фазового сдвига между возмущением плотности и температуры, а данное возмущение связано с изменением яркости волн, распространяющихся в солнечной короне.

Цель данной работы изучить проявления эффекта теплового дисбаланса в наблюдениях космической обсерватории SDO, получить аналитическое выражение, описывающее изменение наблюдаемой интенсивности возмущения и сдвиг фаз между откликом телескопа и возмущением плотности в зависимости от параметров теплового дисбаланса для произвольной температурной функции отклика, исследовать влияние теплового дисбаланса на интенсивность регистрируемых возмущений прибором SDO/AIA, вызванных медленными МГД волнами, а также на сдвиг фаз между возмущениями плотности и интенсивности в волне.

3 Результат

Описание рисунков

I_Q - яркость с учётом теплового дисбаланса

I - яркость без учёта теплового дисбаланса

— жёлтая линия на рисунках обозначает, что возмущения при данных параметрах не наблюдаются:

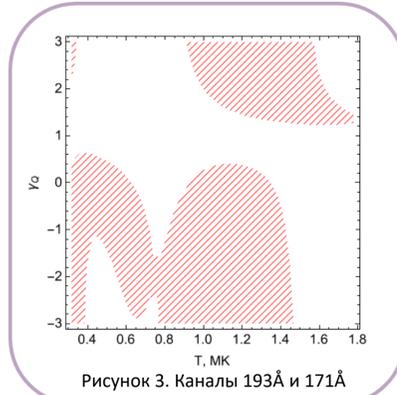
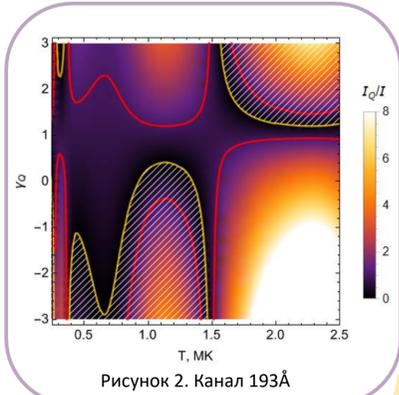
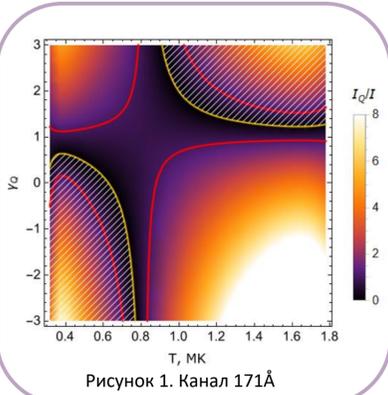
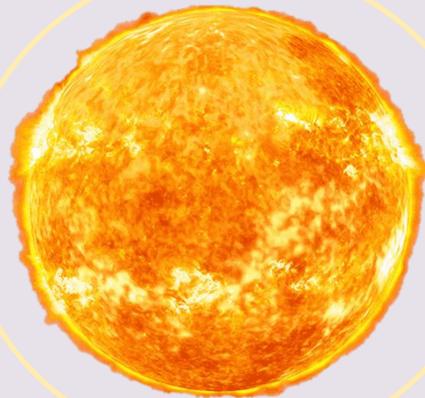
$$\frac{I_Q}{I} = 0$$

— красная линия на рисунке обозначает отсутствие изменения яркости за счет теплового дисбаланса:

$$\frac{I_Q}{I} = 1$$

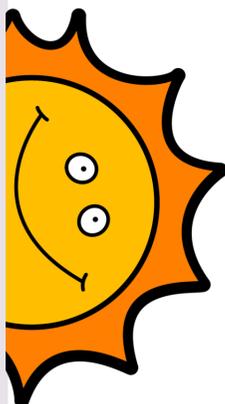
▨ область возможного изменения фазы на π между откликом прибора и возмущением плотности

▨ заштрихованная часть рисунка означает, что одно и то же возмущение в одном канале выглядит как яркая область, а в другом как тёмная.



4 Заключение

Для каждого канала прибора SDO/AIA определены области увеличения и уменьшения яркости изображения и области возможного изменения фазы на π между откликом прибора и возмущением плотности в зависимости от температуры плазмы и характеристик теплового дисбаланса. Полученные результаты позволяют получить дополнительную информацию о нагреве короны Солнца и температуре плазмы при интерпретации наблюдений аппарата SDO. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что в устойчивой атмосфере ($0 < \gamma_Q < 5/3$) тепловой дисбаланс приводит к уменьшению наблюдаемой яркости возмущений, что затрудняет наблюдение распространяющихся в среде МГД волн. Однако в среде с тепловыми неустойчивостями ($\gamma_Q < 0$ или $\gamma_Q > 5/3$) яркость возмущений за счет теплового дисбаланса увеличивается для большинства значений температуры в широко используемых каналах для наблюдения солнечной короны (171Å, 193Å, 211Å). Данные эффекты проявляются сильнее для волн с большим периодом (большого характерного размера возмущений). Возмущение, вызванное МГД волной в устойчивой атмосфере ($0 < \gamma_Q < 5/3$) наиболее вероятно будет вызывать уярчение (потемнение) одновременно во всех каналах SDO/AIA. Уярчение в одном канале и потемнение в другом может свидетельствовать о наличии тепловой неустойчивости того или иного типа ($\gamma_Q < 0$ или $\gamma_Q > 5/3$). Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственные задания № FSSS-2023-0009 и № FFMR-2024-0017).



2 Уравнение

Связь относительного изменения яркости с амплитудой плотности данного возмущения
Одним из наиболее широко используемых инструментов для наблюдения Солнца является космическая обсерватория SDO, которая с помощью инструмента AIA позволяет получать изображения Солнца в нескольких каналах, соответствующих различным длинам волн в дальнем ультрафиолетовом диапазоне. Отклик прибора пропорционален произведению квадрату плотности плазмы на некоторую функцию температуры, которая различна для каждого канала AIA [1]

$$I \sim \rho^2 f(T).$$

Пусть в корональной петле с параметрами ρ_0, T_0 имеется малое возмущением $\Delta\rho, \Delta T$:

$$I(\rho, T) \approx I(\rho_0, T_0) + \frac{\partial I}{\partial \rho} \Big|_0 \Delta\rho + \frac{\partial I}{\partial T} \Big|_0 \Delta T = I(\rho_0, T_0)(1 + K^*),$$

$$\text{где } K^* = 2 \frac{\Delta\rho}{\rho_0} + \alpha \frac{\Delta T}{T_0}, \quad \alpha(T) = \frac{T}{f(T)} * \frac{df(T)}{dT}.$$

Рассмотрим среду с тепловым дисбалансом, введём некоторые параметры:

Возмущение T связано с возмущением ρ в МГД волне как [2]:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = (\gamma_{eff} - 1) \frac{\Delta\rho}{\rho_0},$$

где $\gamma_Q = 1 - \frac{\rho_0 J_{0\rho}}{T_0 J_{0T}}$ — эффективный низкочастотный показатель адиабаты и $J_{0\rho} = \frac{\partial I}{\partial \rho}, J_{0T} = \frac{\partial I}{\partial T}$.

$$Q = L - H,$$

где L — мощность охлаждения, а H — мощность нагрева.

$$\gamma_{eff} = \frac{\gamma_Q - i\omega\tau_V}{1 - i\omega\tau_V},$$

где τ_V — характерное время теплового дисбаланса.

Более подробно о приведённых параметрах говорится в статье [3].

Тогда:

$$K^* = (2 + \alpha(\gamma_{eff} - 1)) \frac{\Delta\rho}{\rho_0}.$$

Изменение яркости возмущения одной и той же амплитуды, вызванной тепловым дисбалансом:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = K \frac{\Delta\rho}{\rho_0},$$

$$\text{где } K = 2 + \alpha(\gamma_{eff} - 1).$$

Амплитуда яркости возмущения определяется величиной $|K|$:

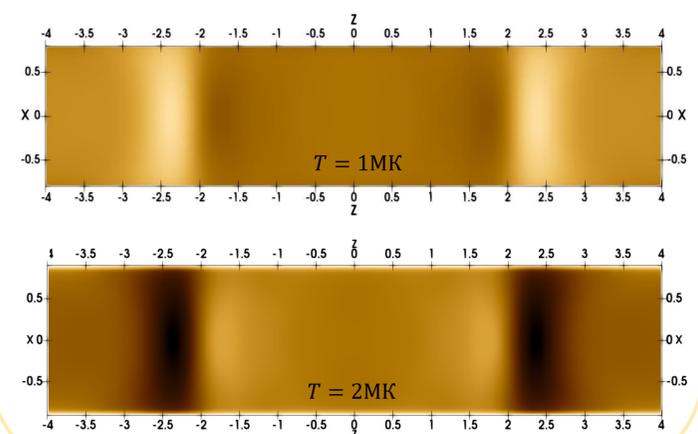
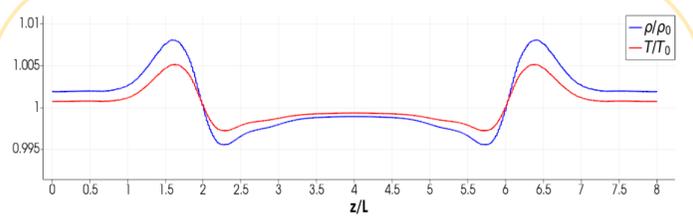
$$|K| = \left(\alpha \frac{(\gamma_Q - \gamma)\omega\tau_V}{1 + \omega^2\tau_V^2} \right)^2 + \left(2 + \alpha \frac{(\gamma_Q - 1) + (\gamma - 1)\omega^2\tau_V^2}{1 + \omega^2\tau_V^2} \right)^2.$$

Без дисбаланса
 $I = I_0 |K|_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$,
С дисбалансом
 $I_Q = I_0 |K|_{\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$.

$$|K|_{\omega \rightarrow 0} = |2 + \alpha(\gamma_Q - 1)|, \quad \omega\tau_V \ll 1,$$

$$|K|_{\omega \rightarrow \infty} = |2 + \alpha(\gamma - 1)|, \quad \omega\tau_V \gg 1.$$

Из анализа данных в канале 193Å видно, что при температурах около 1 МК возмущение плотности, вызванное МГД волнами, находится в фазе с интенсивностью излучения. При повышении температуры до 2 МК наблюдается сдвиг фаз, при котором возмущение плотности становится противоположными по фазе интенсивности излучения. Результаты численного моделирования полностью подтверждают аналитические результаты.



5 Список литературы

- Boerner P. et al. Initial calibration of the atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) //The Solar Dynamics Observatory. – 2012. – С. 41-66.
- Molevich N. E. et al. Phase shift between temperature, pressure, and density perturbations in a heat-releasing medium //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2022. – Т. 49. – №. 9. – С. 282-287.
- Zavershinskiy D. I. et al. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance //Physics of Plasmas. – 2019. – Т. 26.