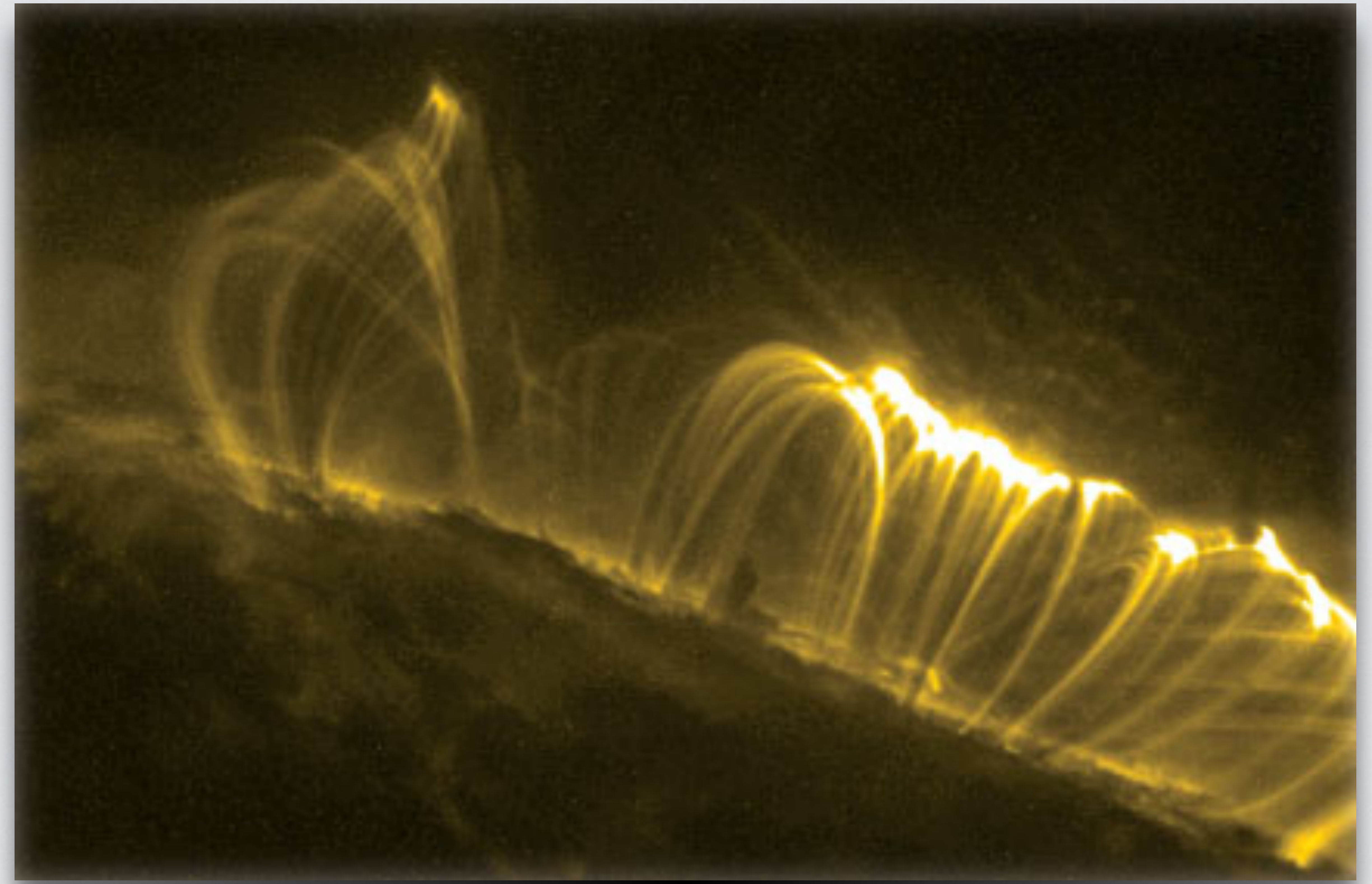
Тепловая неустойчивость пересоединяющего токового слоя в солнечных вспышках

Леденцов Л.С., Сомов Б.В.
ГАИШ МГУ

XV Конференции молодых ученых
«Взаимодействие полей и излучения с веществом»
11-16 сентября 2017 г., Иркутск

Постановка задачи



TRACE 195Å

Постановка задачи

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathrm{div} n\mathbf{v} = \mathbf{0}$$

$$\mu n \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = -\nabla(2nkT) - \frac{1}{4\pi}(\mathbf{B}\times\mathrm{rot}\mathbf{B})$$

$$\frac{2nk}{\gamma-1}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} - 2kT\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{c^2}{(4\pi)^2\sigma}(\mathrm{rot}\mathbf{B})^2 + \mathrm{div}(\kappa\nabla T) - n^2 L(T)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi}\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\mathrm{rot}\mathbf{B}\right)$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

Постановка задачи

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathrm{div} n\mathbf{v} = \mathbf{0}$$

$$\mu n \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = -\nabla(2nkT) - \frac{1}{4\pi}(\mathbf{B}\times\mathrm{rot}\mathbf{B})$$

$$\frac{2nk}{\gamma - 1}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} - 2kT\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{c^2}{(4\pi)^2\sigma}(\mathrm{rot}\mathbf{B})^2 + \mathrm{div}(\kappa\nabla T) - n^2 L(T)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi}\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\mathrm{rot}\mathbf{B}\right)$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r}, t) = f_{const} + f' \exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{kr})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Линеаризация

$$\omega\, n' = n\,(\mathbf{k}\mathbf{v}')$$

$$\mu n \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = -\nabla(2nkT) - \frac{1}{4\pi}(\mathbf{B}\times\mathrm{rot}\mathbf{B})$$

$$\frac{2nk}{\gamma-1}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} - 2kT\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{c^2}{(4\pi)^2\sigma}(\mathrm{rot}\mathbf{B})^2 + \mathrm{div}(\kappa\nabla T) - n^2 L(T)$$

$$\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi}\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\mathrm{rot}\mathbf{B}\right)$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Линеаризация

$$\omega\, n' = n\,(\mathbf{k}\mathbf{v}')$$

$$\omega\, n\, \mathbf{v}' = \mathbf{k}\,\frac{2k_{\mathrm{B}}}{\mu}\,(nT' + Tn')$$

$$\frac{2nk}{\gamma-1}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} - 2kT\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{c^2}{(4\pi)^2\sigma}(\mathrm{rot}\mathbf{B})^2 + \mathrm{div}(\kappa\nabla T) - n^2 L(T)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi}\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\mathrm{rot}\mathbf{B}\right)$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Линеаризация

$$\omega\, n' = n\,(\mathbf{k}\mathbf{v}')$$

$$\omega\, n\, \mathbf{v}' = \mathbf{k}\,\frac{2k_{\mathrm{B}}}{\mu}\,(nT' + Tn')$$

$$i\omega\,\frac{2nk_{\mathrm{B}}}{\gamma-1}\,T' - i\omega\, 2k_{\mathrm{B}}T\, n' = n^2\,\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}\,T' + 2nL\, n' + k^2\,\kappa\, T'$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi}\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\mathrm{rot}\mathbf{B}\right)$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Линеаризация

$$\omega\, n' = n\,(\mathbf{k}\mathbf{v}')$$

$$\omega\, n\, \mathbf{v}' = \mathbf{k}\,\frac{2k_{\mathrm{B}}}{\mu}\,(nT' + Tn')$$

$$i\omega\,\frac{2nk_{\mathrm{B}}}{\gamma-1}\,T' - i\omega\,2k_{\mathrm{B}}T\,n' = n^2\,\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}\,T' + 2nL\,n' + k^2\,\kappa\,T'$$

$$i\omega\,\mathbf{B}' = \frac{c^2}{4\pi\sigma}\,(k^2\,\mathbf{B}' - \mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{B}'))$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Линеаризация

$$\omega\, n' = n\,(\mathbf{k}\mathbf{v}')$$

$$\omega\, n\, \mathbf{v}' = \mathbf{k}\,\frac{2k_{\mathrm{B}}}{\mu}\,(nT' + Tn')$$

$$i\omega\,\frac{2nk_{\mathrm{B}}}{\gamma-1}\,T' - i\omega\, 2k_{\mathrm{B}}T\, n' = n^2\,\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}\,T' + 2nL\, n' + k^2\,\kappa\, T'$$

$$i\omega\,\mathbf{B}' = \frac{c^2}{4\pi\sigma}\,(k^2\,\mathbf{B}' - \mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{B}'))$$

$$(\mathbf{k}\mathbf{B}') = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r}, t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Дисперсионные уравнения

$$k^2 = \frac{\gamma\omega^2}{c_s^2}\,\frac{-i\omega + \tau_r^{-1}\alpha + \tau_\kappa^{-1}}{-i\omega\gamma + \tau_r^{-1}[\,\alpha - 2\,] + \tau_\kappa^{-1}}$$

$$i\omega\,\mathbf{B}' = \frac{c^2}{4\pi\sigma}\,(k^2\,\mathbf{B}' - \mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{B}'))$$

$$(\mathbf{k}\mathbf{B}') = 0$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{k}\mathbf{r})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Дисперсионные уравнения

$$k^2 = \frac{\gamma\omega^2}{c_s^2}\frac{-i\omega + \tau_r^{-1}\alpha + \tau_\kappa^{-1}}{-i\omega\gamma + \tau_r^{-1}[\alpha - 2] + \tau_\kappa^{-1}}$$

$$k^2 = \frac{i\omega}{\nu_m}$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r}, t) = f_{const} + f' \exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{kr})\right)$$

$$\mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Дисперсионные уравнения

$$k^2 = \frac{\gamma\omega^2}{c_s^2} \frac{-i\omega + \tau_r^{-1}\alpha + \tau_\kappa^{-1}}{-i\omega\gamma + \tau_r^{-1}[\,\alpha - 2\,] + \tau_\kappa^{-1}}$$

$$k^2 = \frac{i\omega}{\nu_m}$$

$$c_s^2 = \frac{2\gamma k_\mathrm{B} T}{\mu} \qquad \tau_\kappa = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa\, k^2} \qquad \nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\ln T} \qquad \tau_r = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{2k_\mathrm{B} T}{nL}$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r}, t) = f_{const} + f' \exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{kr})\right) \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Инкремент неустойчивости

$$\varGamma^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1}\right)\frac{c_s^2}{\nu_m}\right]\varGamma - \left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\alpha-2}{\tau_r}\,\frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$

$$c_s^2 = \frac{2\gamma k_\mathrm{B} T}{\mu} \qquad \tau_\kappa = \frac{\gamma}{\gamma-1}\,\frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa\, k^2} \qquad \nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\ln T} \qquad \tau_r = \frac{\gamma}{\gamma-1}\,\frac{2k_\mathrm{B} T}{nL}$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r},t) = f_{const} + f'\exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{kr})\right) \qquad \varGamma = -i\omega \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

Инкремент неустойчивости

$$\Gamma^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1}\right) \frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1}\right) \frac{c_s^2}{\nu_m} \right] \Gamma - \left(\frac{r}{r-1}\right) \frac{\alpha-2}{\tau_r} \frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$

$$c_s^2 = \frac{2\gamma k_\mathrm{B} T}{\mu} \qquad \tau_\kappa = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa\, k^2} \qquad \nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\ln T} \qquad \tau_r = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{2k_\mathrm{B} T}{nL} \qquad r = \frac{1}{\gamma-1} \frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa} \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

ищем решение в виде бегущей волны

$$f(\mathbf{r}, t) = f_{const} + f' \exp\left(-i\omega t + i(\mathbf{kr})\right) \qquad \Gamma = -i\omega \qquad \mathbf{v}_{const} = 0 \quad \mathbf{B}_{const} = 0$$

$$\mathit{\Gamma}^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1}\right)\frac{c_s^2}{\nu_m}\right]\mathit{\Gamma} - \left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\alpha-2}{\tau_r}\,\frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$

$$c_s^2 = \frac{2\gamma k_\mathrm{B} T}{\mu} \qquad \tau_\kappa = \frac{\gamma}{\gamma-1}\,\frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa\, k^2} \qquad \nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\ln T} \qquad \tau_r = \frac{\gamma}{\gamma-1}\,\frac{2k_\mathrm{B} T}{nL} \qquad r = \frac{1}{\gamma-1}\,\frac{2k_\mathrm{B} n}{\kappa}\,\frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\Gamma_1 \simeq \frac{r}{r-1}\,\frac{1}{\tau_r} \qquad \Gamma_2 \simeq \frac{c_s^2}{\nu_m}$$

$$\Gamma^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1} \right) \frac{c_s^2}{\nu_m} \right] \Gamma - \left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\alpha-2}{\tau_r} \frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$

$$c_s^2 = \frac{2\gamma k_{\mathrm{B}} T}{\mu} \qquad \tau_\kappa = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{2k_{\mathrm{B}} n}{\kappa\, k^2} \qquad \nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

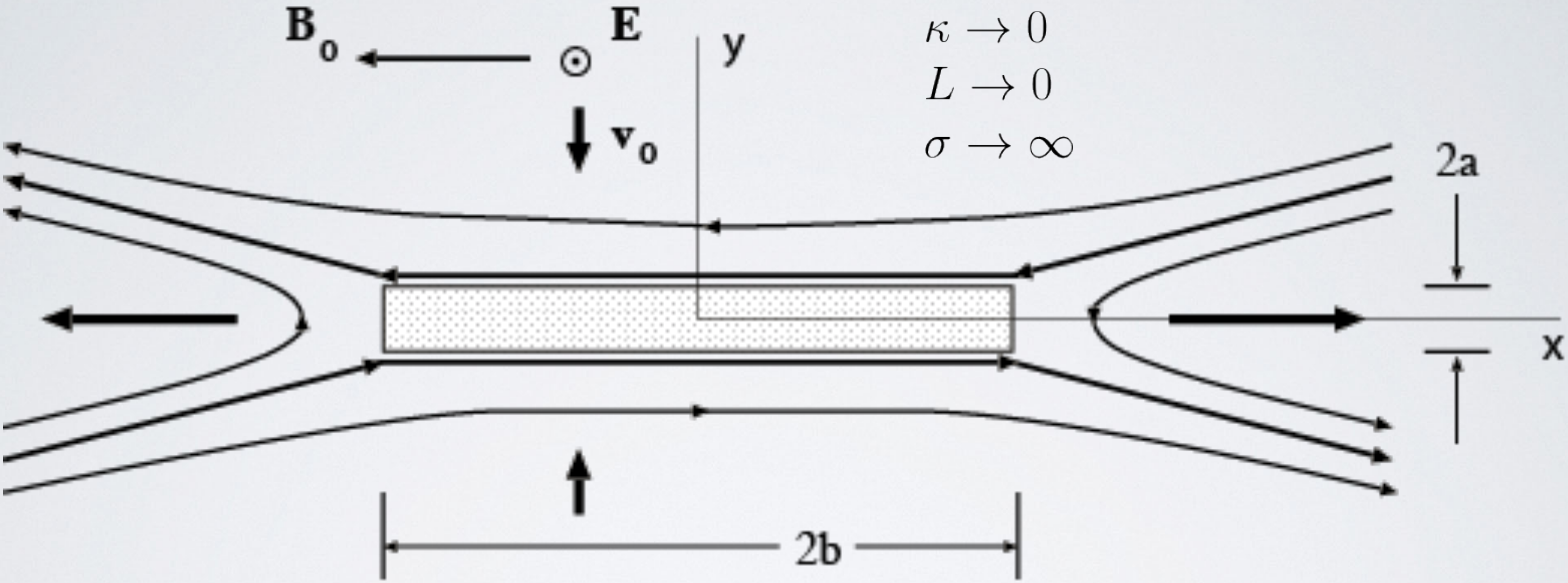
$$\alpha = \frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\ln T} \qquad \tau_r = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{2k_{\mathrm{B}} T}{nL} \qquad r = \frac{1}{\gamma-1} \frac{2k_{\mathrm{B}} n}{\kappa} \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

$$\Gamma_1 \simeq \frac{r}{r-1} \frac{1}{\tau_r} \qquad \Gamma_2 \simeq \frac{c_s^2}{\nu_m}$$

$$r \ll 1 \qquad \Gamma_1^- \simeq -\frac{r}{\tau_r}$$

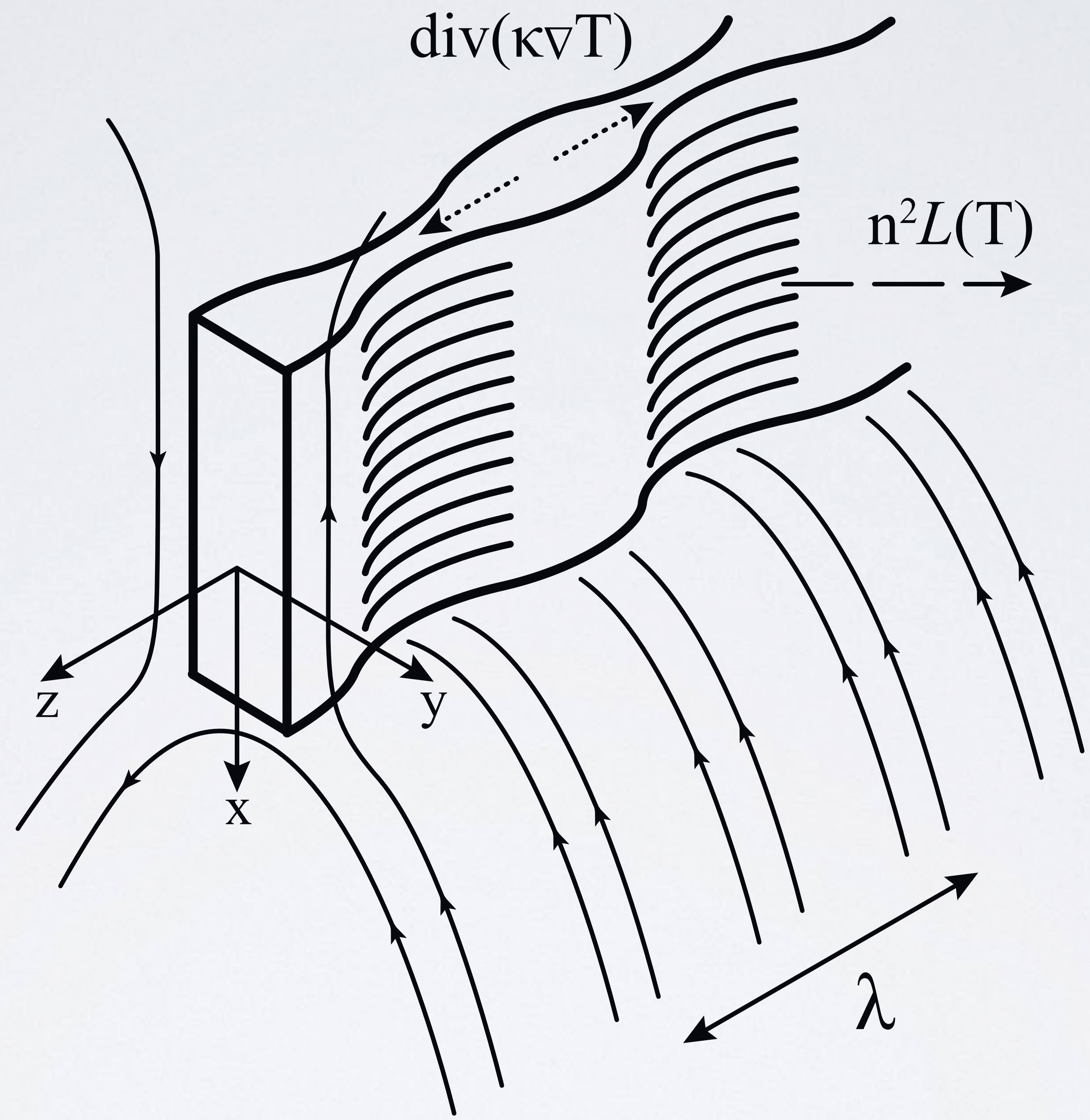
$$r \gtrsim 2 \qquad \Gamma_1^+ \simeq \frac{1}{\tau_r}$$

Неустойчивость токового слоя



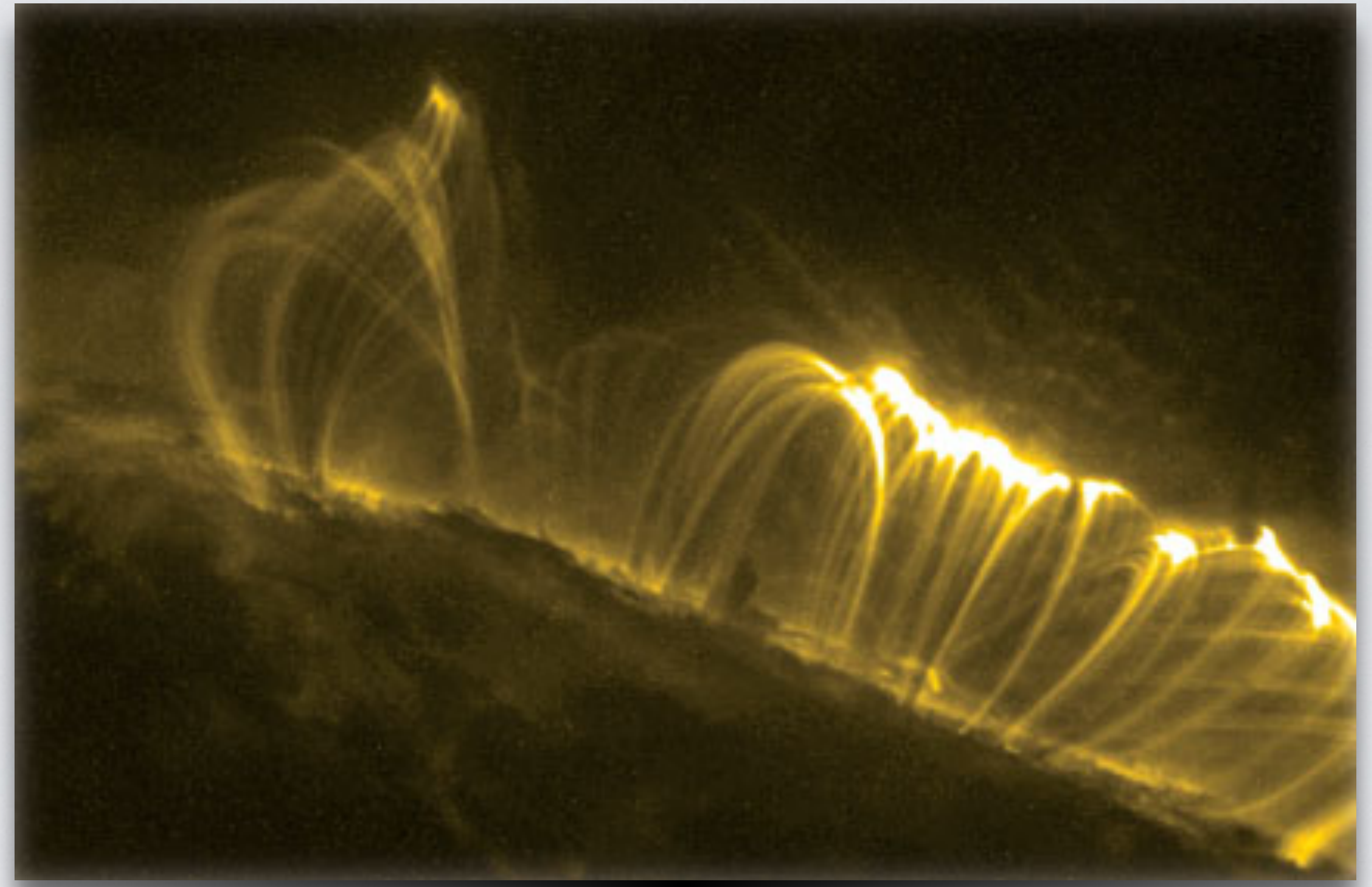
Леденцов Л.С., Сомов Б.В. Тепловая неустойчивость пересоединяющего токового слоя в солнечных вспышках. Письма в Астрономический Журнал, 42, с. 925 (2016)

Неустойчивость токового слоя



Леденцов Л.С., Сомов Б.В. Тепловая неустойчивость пересоединяющего токового слоя в солнечных вспышках. Письма в Астрономический Журнал, 42, с. 925 (2016)

Неустойчивость токового слоя



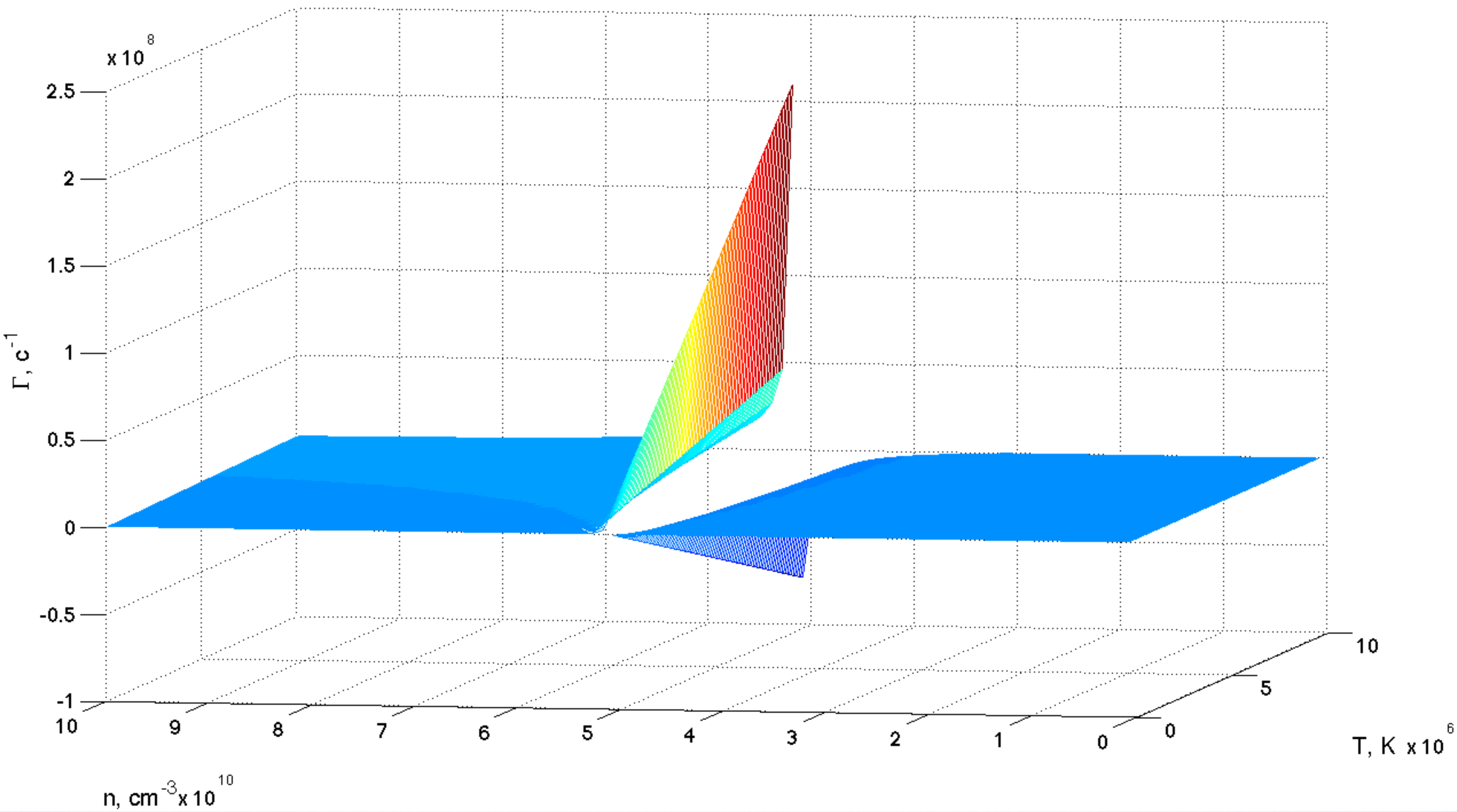
Леденцов Л.С., Сомов Б.В. Тепловая неустойчивость пересоединяющего токового слоя в солнечных вспышках. Письма в Астрономический Журнал, 42, с. 925 (2016)

Заключение

- Однородная плазма в отсутствие внешнего магнитного поля может быть неустойчива в связи с потерями тепла на лучистое охлаждение.
- В линейной фазе неустойчивость нарастает за характерное время лучистого охлаждения плазмы.
- Пространственный масштаб неустойчивости (~1Мм) согласуется с расстояниями между отдельными яркими петлями во вспышечных аркадах на Солнце.
- Неустойчивость может быть полностью подавлена теплопроводностью.

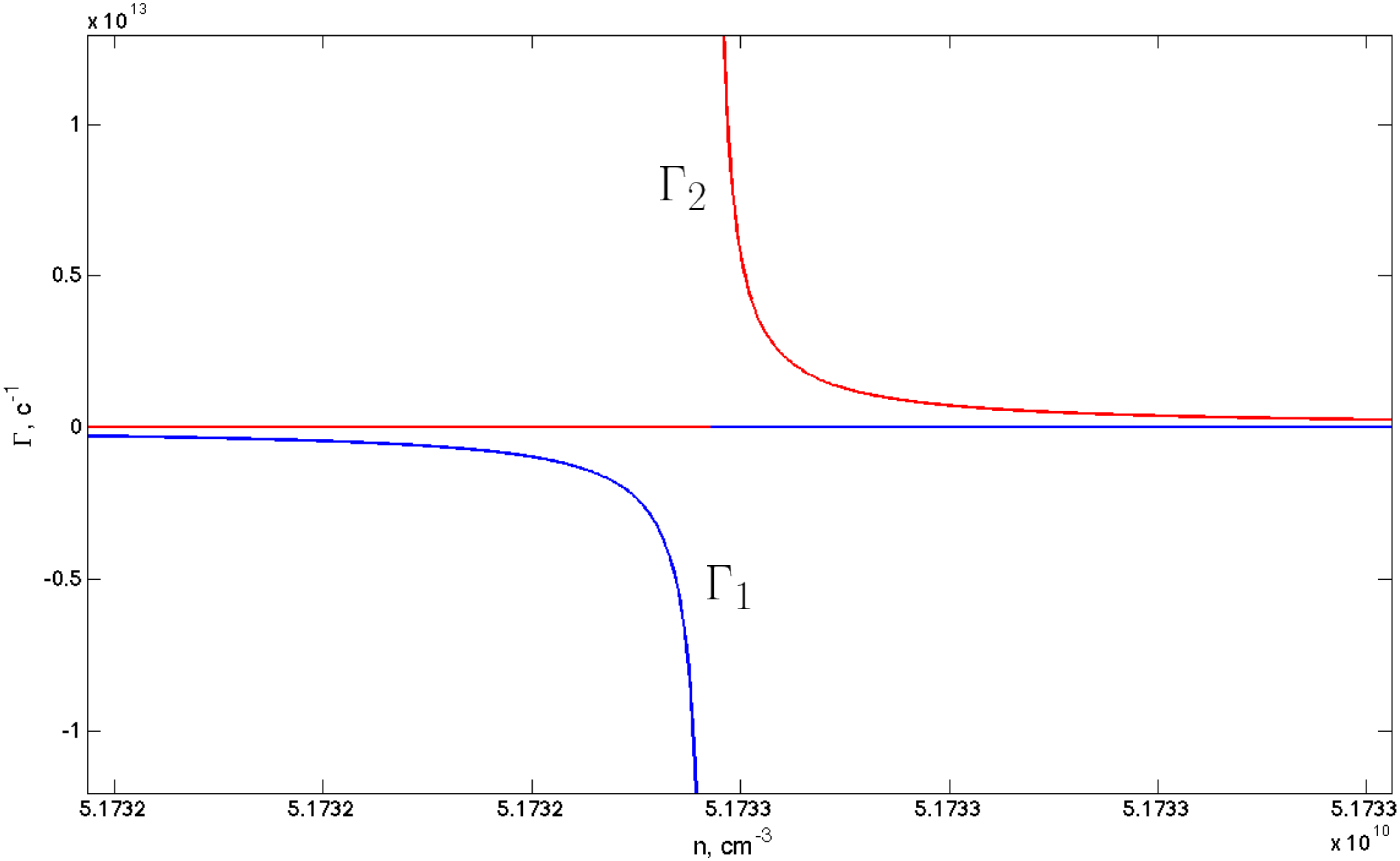
Спасибо за внимание!

$$\Gamma^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1}\right)\frac{c_s^2}{\nu_m} \right]\Gamma - \left(\frac{r}{r-1}\right)\frac{\alpha-2}{\tau_r}\frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$



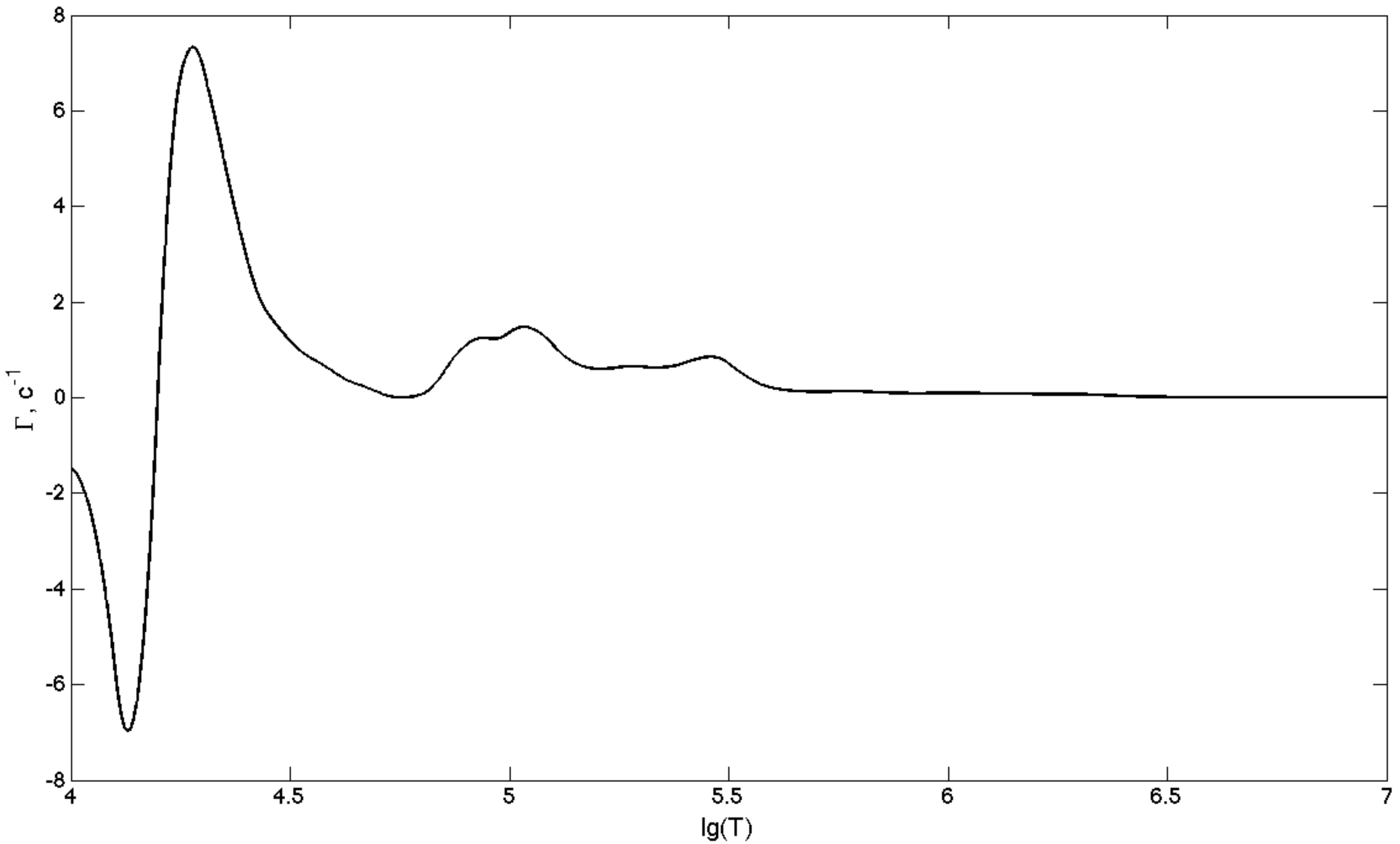
$$\Gamma_1^- \simeq -\frac{r}{\tau_r} \qquad \Gamma_1^+ \simeq \frac{1}{\tau_r} \qquad \Gamma_2 \simeq \frac{c_s^2}{\nu_m}$$

$$\Gamma^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1} \right) \frac{c_s^2}{\nu_m} \right] \Gamma - \left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\alpha - 2}{\tau_r} \frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$



$$\Gamma_1^- \simeq -\frac{r}{\tau_r} \qquad \Gamma_1^+ \simeq \frac{1}{\tau_r} \qquad \Gamma_2 \simeq \frac{c_s^2}{\nu_m}$$

$$\mathit{\Gamma}^2 + \left[\left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\gamma\alpha}{\tau_r} - \left(\frac{r-\gamma^{-1}}{r-1} \right) \frac{c_s^2}{\nu_m} \right] \mathit{\Gamma} - \left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{\alpha - 2}{\tau_r} \frac{c_s^2}{\nu_m} = 0$$



$$\Gamma_1^- \simeq -\frac{r}{\tau_r} \qquad \Gamma_1^+ \simeq \frac{1}{\tau_r} \qquad \Gamma_2 \simeq \frac{c_s^2}{\nu_m}$$