

МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЙКАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ  
ШКОЛА ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ



# РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ

С.А. Белов<sup>1,2</sup>, Д.С. Рящиков<sup>1,2</sup>, Н.Е. Молевич<sup>1,2</sup>, Д.В. Агапова<sup>1,2</sup>

1. Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН Самара , Россия
2. Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

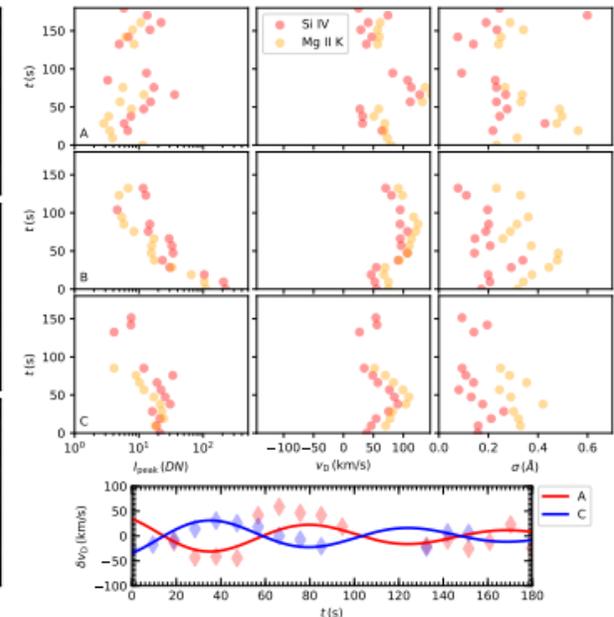
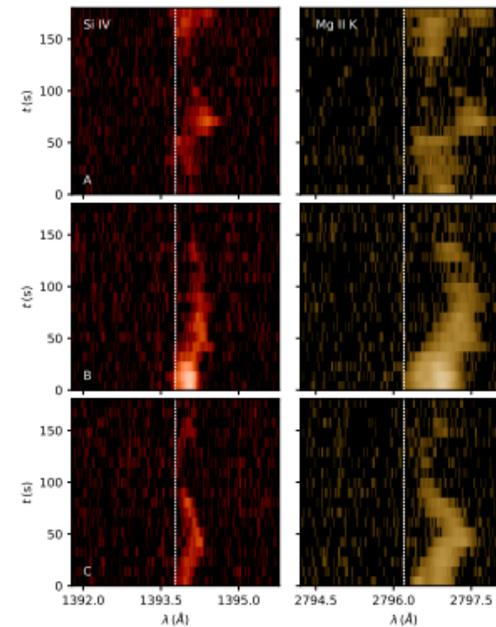
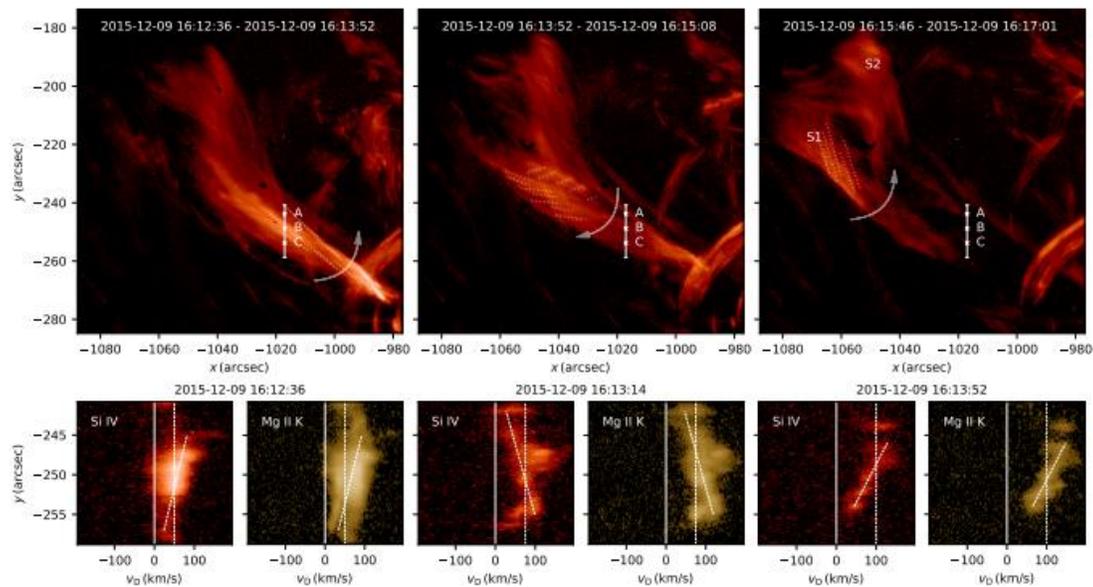
# Распространение нелинейных крутильных альфвеновских волн в магнитных трубках

1. Введение
2. Аналитические результаты
3. Численное решение
4. Заключение

# Введение

# Наблюдения крутильных альфвеновских волн

- Фотосферные яркие точки: Jess et al. (2009)
- Хромосферные спикулы: De Pontieu et al. (2012)
- В результате солнечных вспышек: Aschwanden & Wang (2020)
- Корональные структуры: Kohutova et al. (2020)

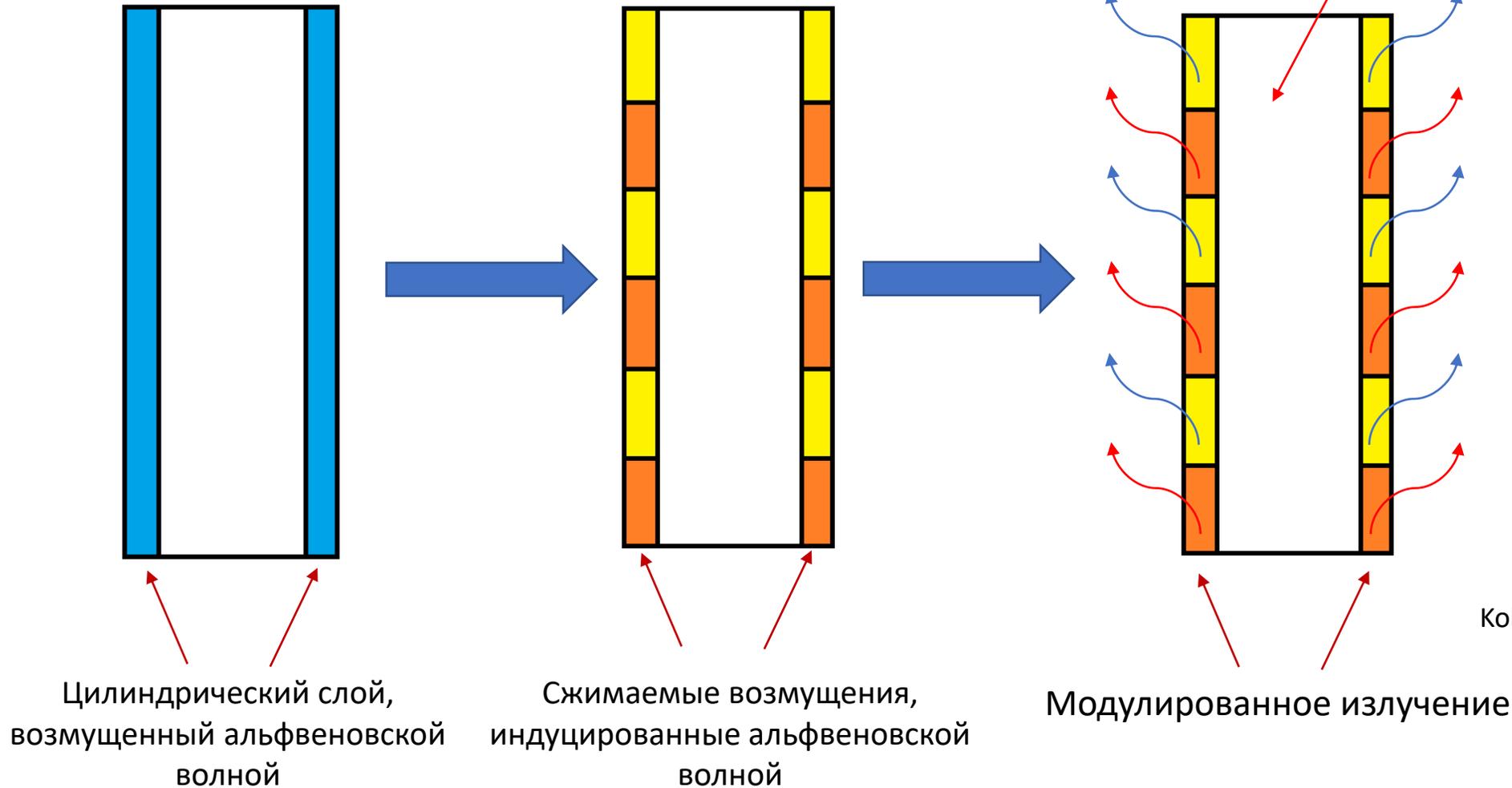


Kohutova et. al (2020)

# Модуляция излучения альфвеновскими волнами

$$\frac{\partial^2 B_\phi}{\partial t^2} - C_A^2 \frac{\partial^2 B_\phi}{\partial z^2} = 0$$

- каждая цилиндрическая поверхность эволюционирует независимо



Ничего интересного?

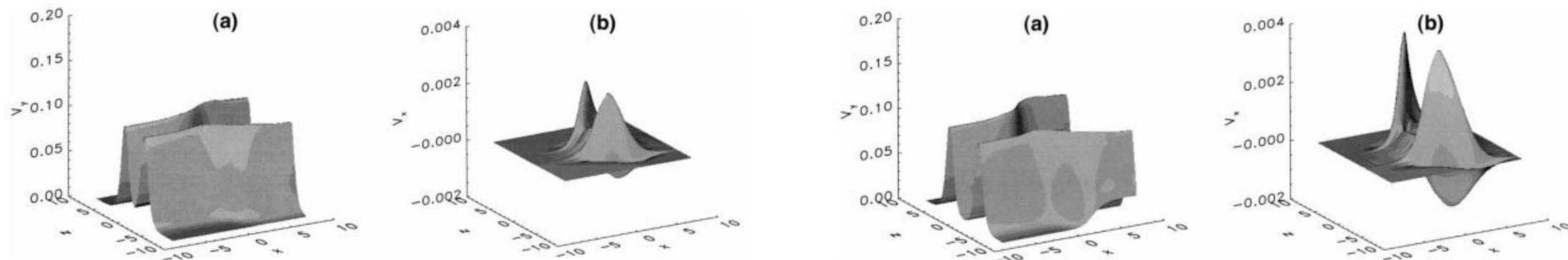
“...However, the questions of whether this effect can produce the observed periodicity, and the consistency of the observed results with the intrinsic lack of a collective behavior in Alfvén waves remain open”

Kolotkov , Nakariakov and Kontar (2018)

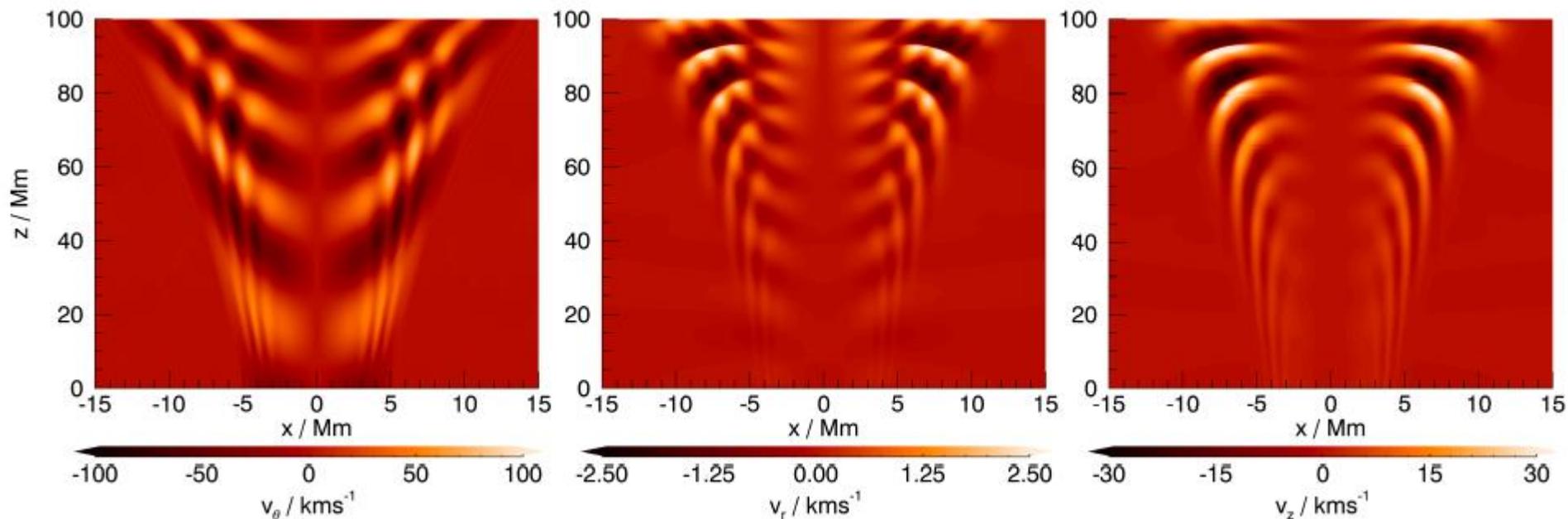
# 1.5D модели

- 1.5D модель, где возмущениями, перпендикулярными магнитному полю было пренебрежено: Hollweg, Jackson and Galloway (1982)
- Режимы, в которых альфвеновские волны создают горячую и стабильную корону достаточно узки: Antolin and Shibata (2010)
- Если корональная петля нагревается альфвеновскими волнами, то корональный дождь подавляется из-за однородного нагрева, который они создают: Antolin, Shibata and Vissers (2010)

# Смешение фаз

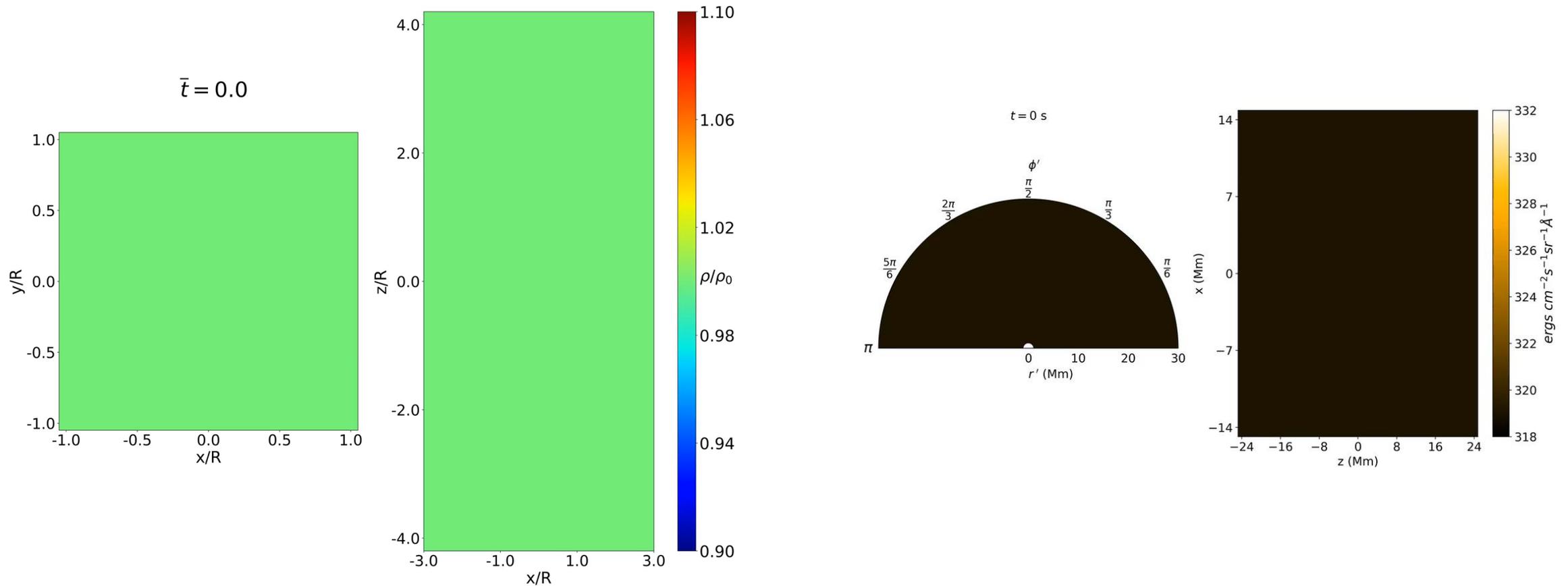


Nakariakov, Roberts, and Murawski (1996)



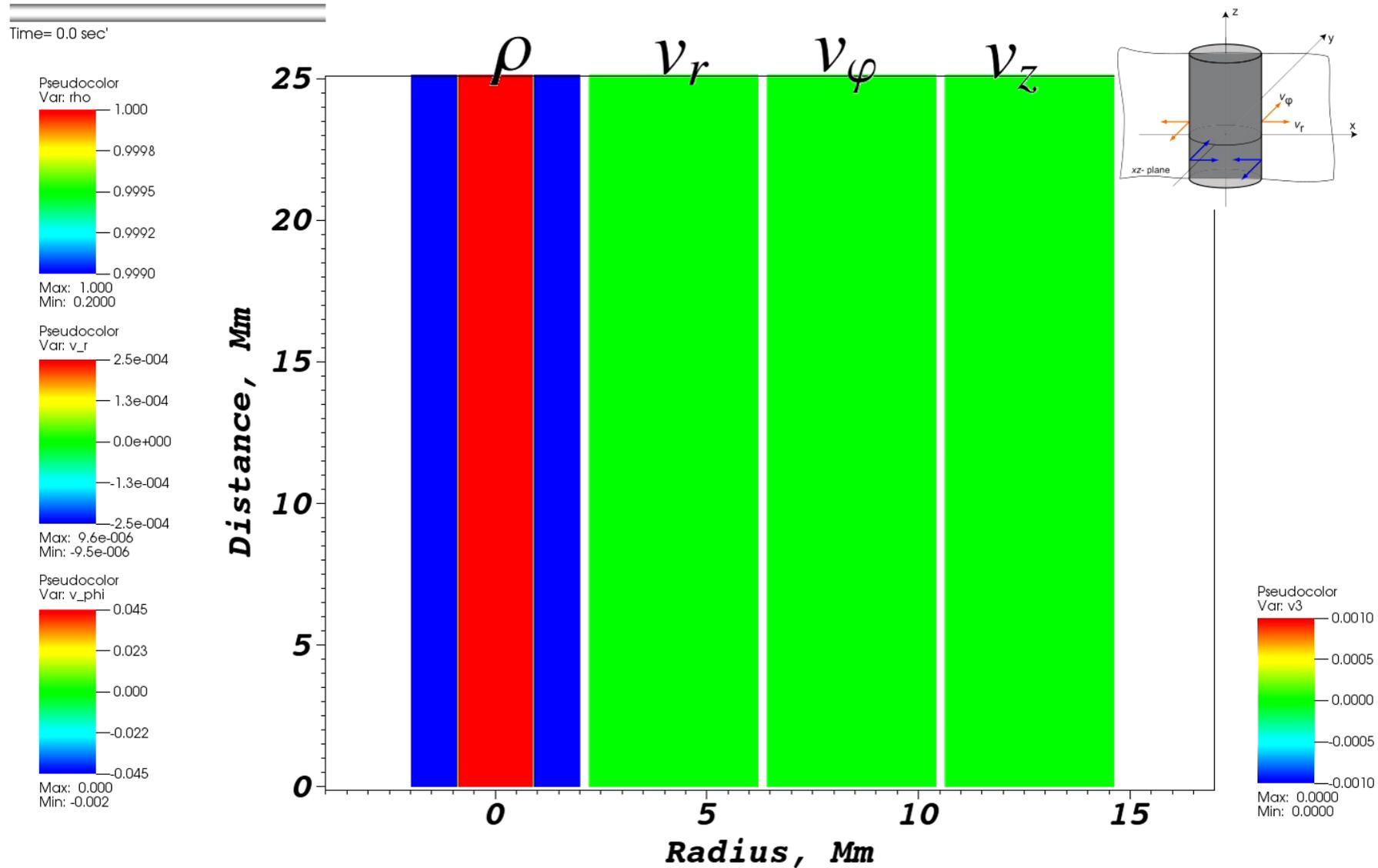
Boocock and Tsiklauri (2021)

# Формирование плотных нитей стоячими альфвеновскими волнами



Díaz-Suárez and Soler (2021)

# «Однородный» магнитный цилиндр



# Аналитические результаты

# Модель: однородный магнитный цилиндр

Система МГД

- Аксиальная симметрия
- Нет МА возмущений изначально
- Теория возмущений до второго порядка включительно



$$\rho_0 \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial t} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z} - \frac{1}{4\pi} \tilde{B}_\varphi \frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial z}, \quad \rho_0 \frac{\partial \tilde{v}_\varphi}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} B_{z0} \frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial z},$$

$$\rho_0 \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial t} - \rho_0 \frac{1}{r} \tilde{v}_\varphi^2 = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} - \frac{1}{4\pi} \left( \tilde{B}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \tilde{B}_\varphi - B_{z0} \left( \frac{\partial \tilde{B}_r}{\partial z} - \frac{\partial \tilde{B}_z}{\partial r} \right) \right),$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_r}{\partial t} - B_{z0} \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial t} - B_{z0} \frac{\partial \tilde{v}_\varphi}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{B}_z}{\partial t} + B_{z0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tilde{v}_r) = 0,$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r \tilde{B}_r}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{B}_z}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{1}{r} \rho_0 \frac{\partial r \tilde{v}_r}{\partial r} + \rho_0 \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial z} = 0,$$

$$C_V \rho_0 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} - \frac{k_B T_0}{m} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = 0, \quad \tilde{P} = \frac{k_B}{m} \tilde{\rho} T_0 + \frac{k_B}{m} \rho_0 \tilde{T}.$$

Аналогично Scalisi et al. (2021)

# Индуцированные возмущения

$$\frac{\partial^2 \tilde{B}_\varphi}{\partial t^2} - C_A^2 \frac{\partial^2 \tilde{B}_\varphi}{\partial z^2} = 0 \quad \longrightarrow \quad \tilde{B}_\varphi = \tilde{B}_\varphi(r, \xi), \quad \xi = z - C_A t$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{\rho} + \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right) D_A \frac{\tilde{B}_\varphi^2}{8\pi} + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\tilde{B}_\varphi^2}{4\pi} - \rho_0 \tilde{v}_\varphi^2 \right) = 0$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{v}_z + \frac{1}{4\pi \rho_0} \left( C_A^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) - D_A \right) \frac{\partial}{\partial t} \left( \tilde{B}_\varphi \frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial z} \right) + C_S^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial^2}{\partial z \partial t} \left( \tilde{v}_\varphi^2 - \frac{1}{4\pi \rho_0} \tilde{B}_\varphi^2 \right) = 0$$

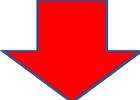
$$\downarrow \quad \tilde{B}_\varphi = \tilde{B}_\varphi(r, \xi)$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{\rho} = 0$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{v}_z + \frac{1}{8\pi \rho_0} C_A^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{\partial^2 \tilde{B}_\varphi^2}{\partial t \partial z} \right) = 0$$

# Возмущения скорости

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{v}_z + \frac{1}{8\pi\rho_0} C_A^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{\partial^2 \tilde{B}_\varphi^2}{\partial t \partial z} \right) = 0$$

  $v_z = v_z(r, \xi)$  как и другие МА возмущения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left[ \tilde{v}_z - \frac{\tilde{B}_\varphi^2}{8\pi\rho_0 C_A} \right] = 0 \quad \text{Scalisi et al. (2021)}$$

$$\tilde{v}_z = \frac{\tilde{B}_\varphi^2}{8\pi\rho_0 C_A} + \ln r \tilde{A}_1(\xi) + \tilde{A}_2(\xi) + A_3(r)\xi + A_4(r)$$

$$\tilde{v}_z = \frac{\tilde{B}_\varphi^2}{8\pi\rho_0 C_A} + \underline{V(\xi)}$$

 Должно быть определено из граничных условий

# Другие МА возмущения

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_0 C_A}{C_S^2} V$$

$$\tilde{v}_r = \left( \frac{C_A^2 - C_S^2}{C_S^2} \right) \frac{1}{r} \int r \frac{\partial V}{\partial \xi} dr - \frac{1}{8\pi \rho_0 C_A} \frac{1}{r} \int r \frac{\partial B_\phi^2}{\partial \xi} dr$$

$$\tilde{B}_z = \frac{B_{z0}}{C_A} \left( \left( \frac{C_A^2 - C_S^2}{C_S^2} \right) V - \frac{B_\phi^2}{8\pi \rho_0 C_A} \right)$$

$$\tilde{P}_T = \frac{\rho_0 C_A^3}{C_S^2} V$$

Должны выполняться

граничные условия:

$$\tilde{v}_r(r = R_0, \xi) = \tilde{v}_{r_{ext}}(r = R_0, \xi)$$

$$\tilde{P}_T(r = R_0, \xi) = \tilde{P}_{T_{ext}}(r = R_0, \xi)$$



Задача  
решена

Для иллюстративных  
целей:

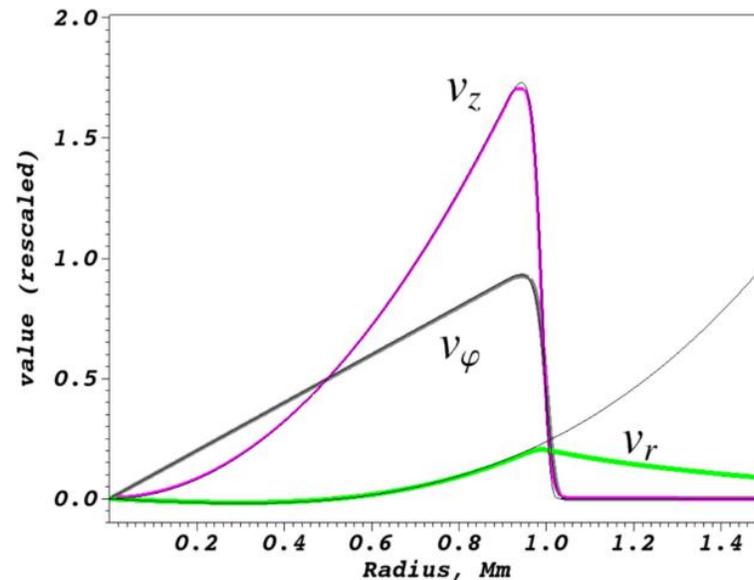
$$B_\phi = rJ(\xi)$$

$$\tilde{v}_r(r = R_0, \xi) = 0$$

$$\tilde{\rho} = \frac{R_0^2}{16\pi(C_A^2 - C_S^2)} J^2$$

$$\tilde{v}_r = \frac{R_0^2}{32\pi \rho_0 C_A} r \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right] \frac{\partial J^2}{\partial \xi}$$

$$\tilde{v}_z = \left( \frac{C_S^2 R_0^2}{16\pi \rho_0 C_A (C_A^2 - C_S^2)} + \frac{r^2}{8\pi \rho_0 C_A} \right) J^2$$

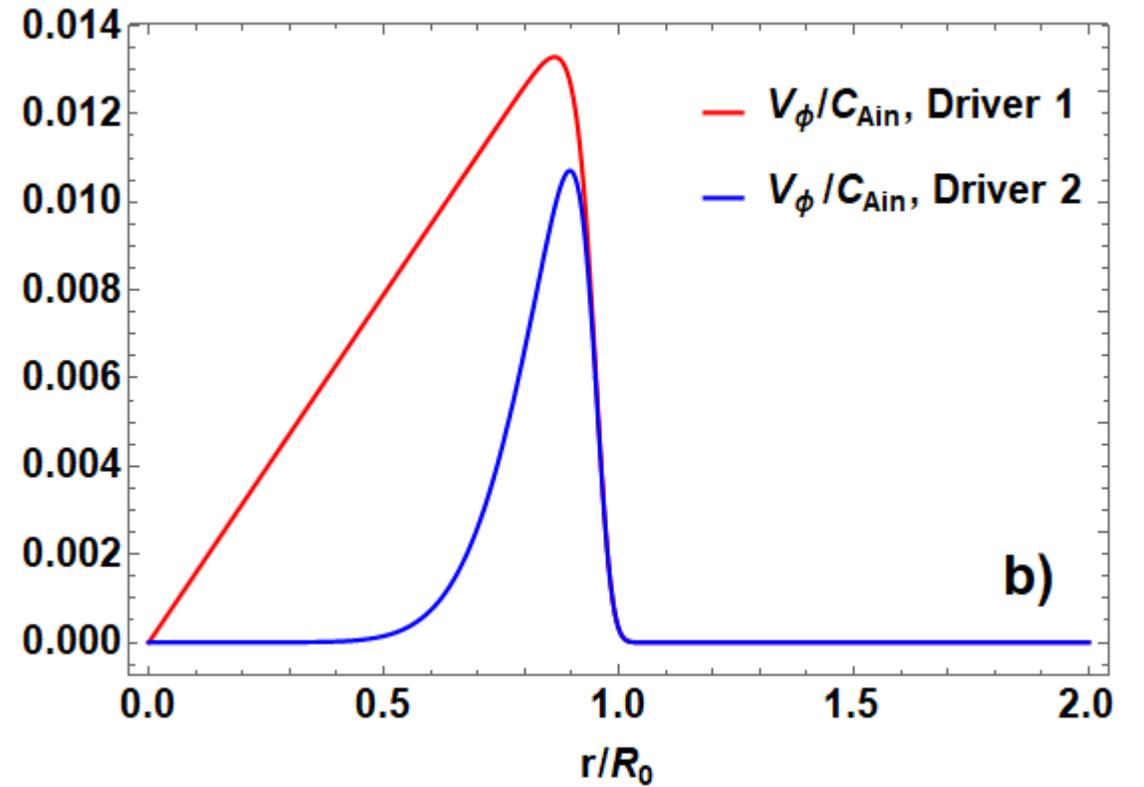
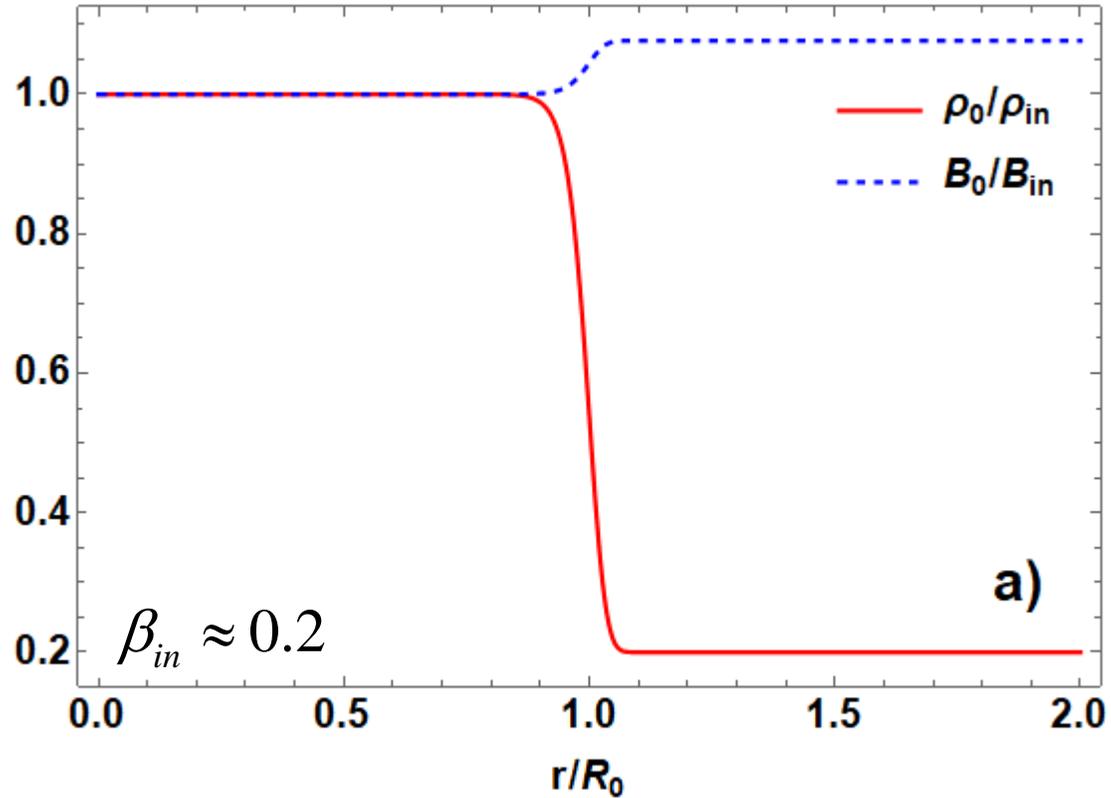


Shestov et al. (2017)

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{1}{r} \rho_0 \frac{\partial r \tilde{v}_r}{\partial r} + \rho_0 \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial z} = 0$$

Численное решение

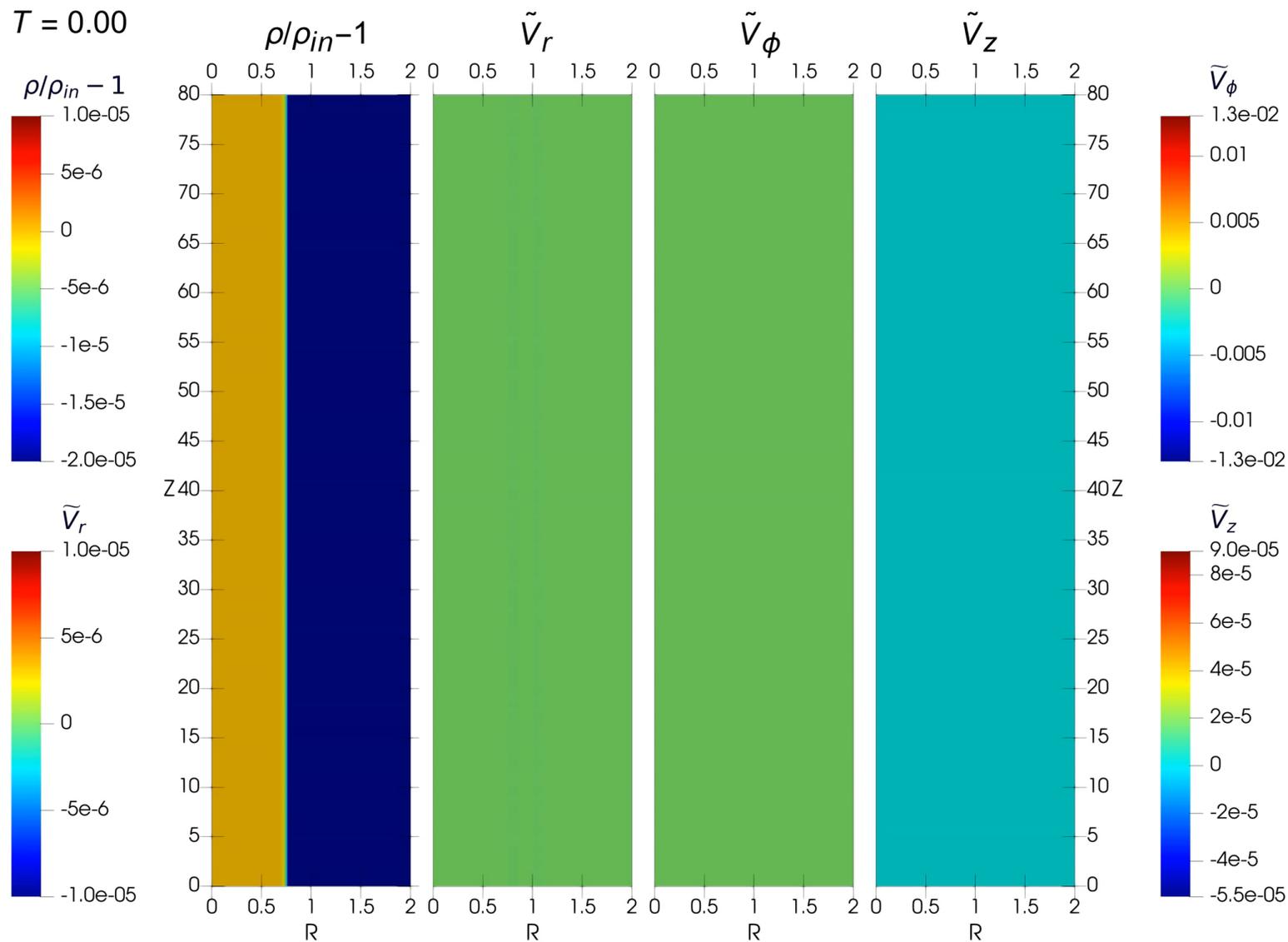
# Постановка



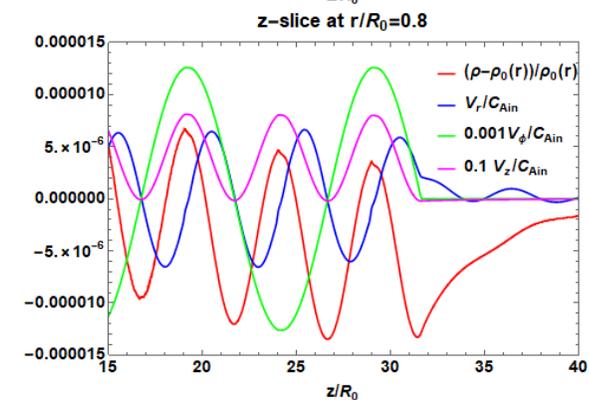
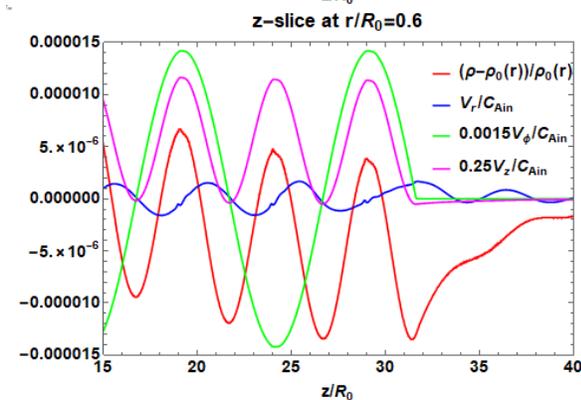
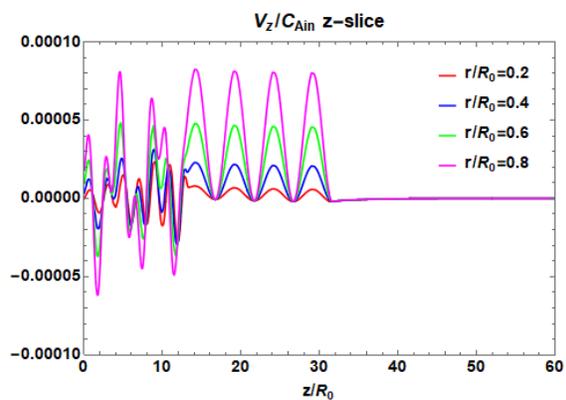
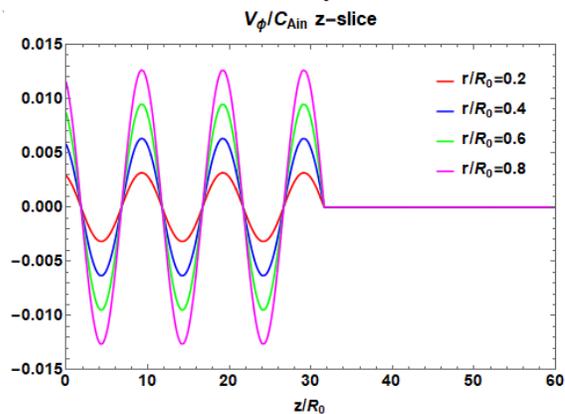
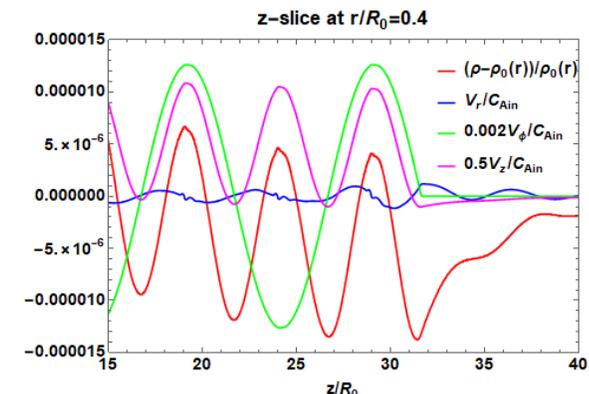
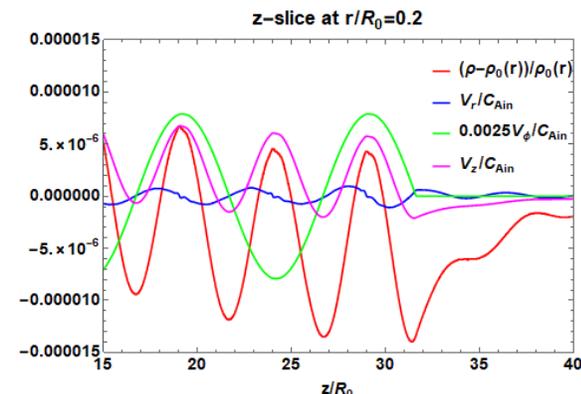
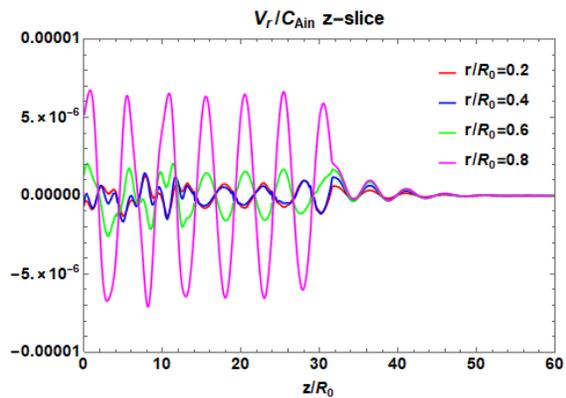
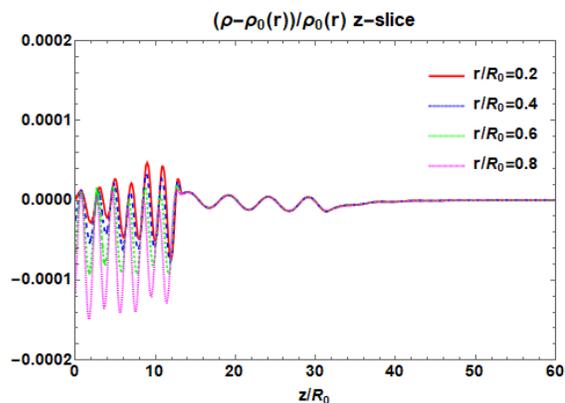
$$B_0(r) = B_{in} \sqrt{1 + 2 \frac{(\rho_{in} - \rho_{ext})}{B_{in}^2} T_0 (1 - S_0(r))} \quad \rho_0(r) = \rho_{ext} + (\rho_{in} - \rho_{ext}) S_0(r) \quad S_0(r) = \frac{1}{\cosh\left(\left(\frac{r}{R_0}\right)^\alpha\right)^2} \quad B_{in} = 3.1628 \quad \rho_{in} = 1 \quad T_0 = 1 \quad \alpha = 20$$

$$v_{\phi 1,2} = \Omega_m r \sin(\omega t) S_{1,2}(r) \quad S_1(r) = \frac{1}{\cosh\left(\left(\frac{r}{R_0} + 0.05\right)^\alpha\right)^2} \quad S_2(r) = \exp\left(-\left(\frac{r/R_0 - 1}{0.25}\right)^2\right) S_1(r) \quad \Omega_m = 0.05 \quad \omega = 2$$

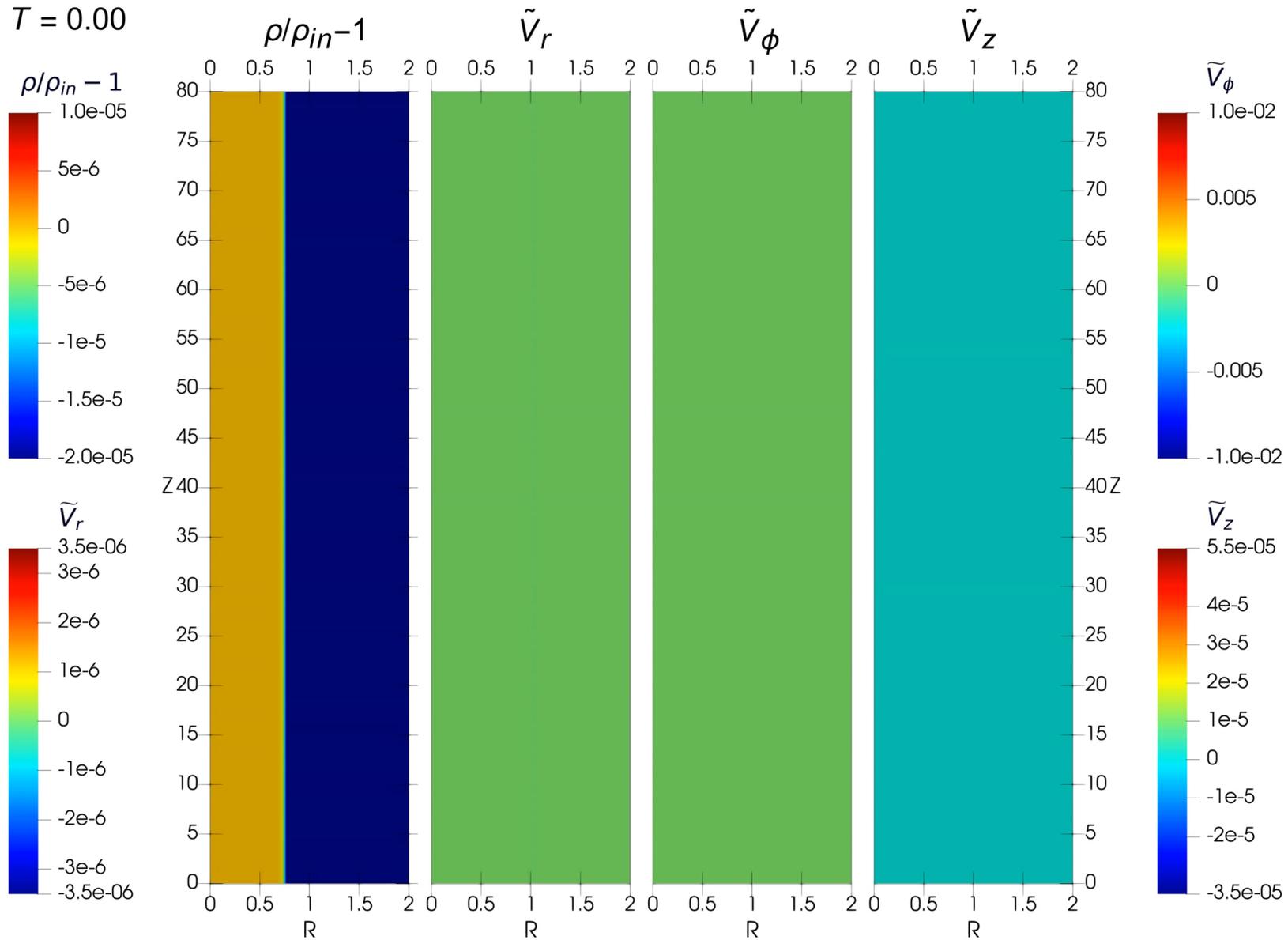
# Драйвер 1. Полная картина



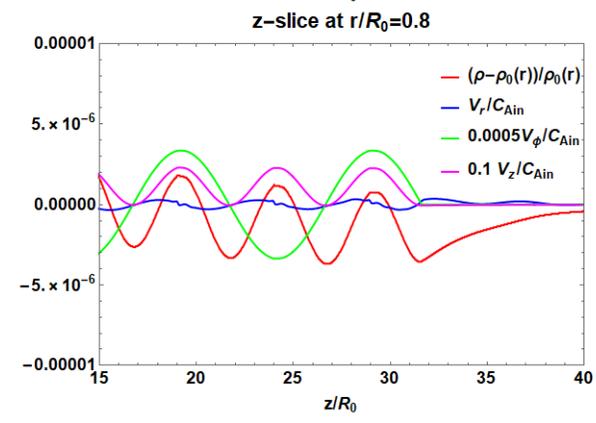
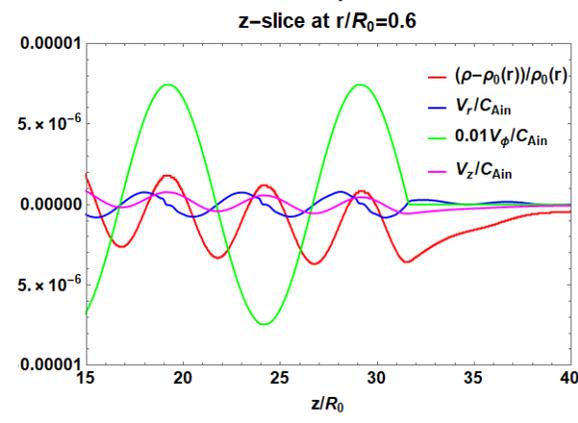
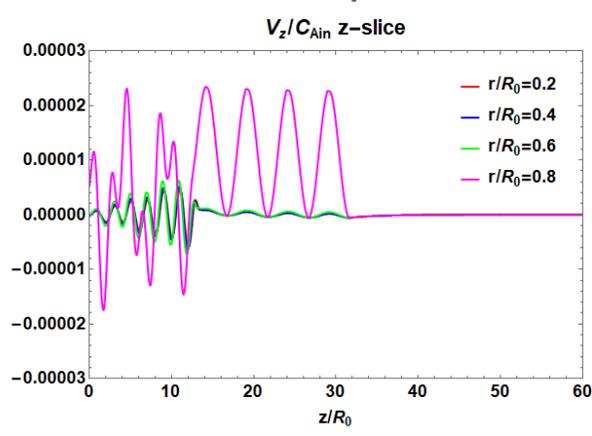
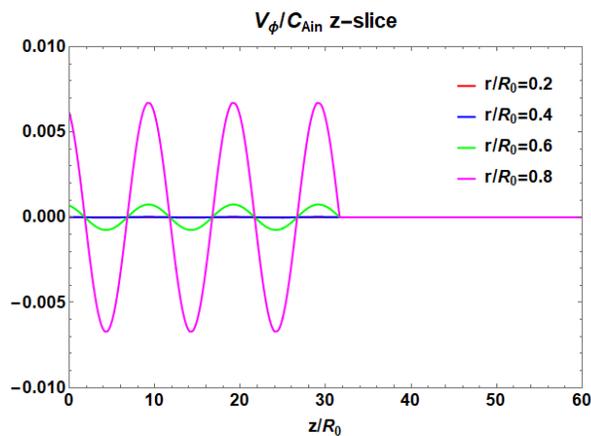
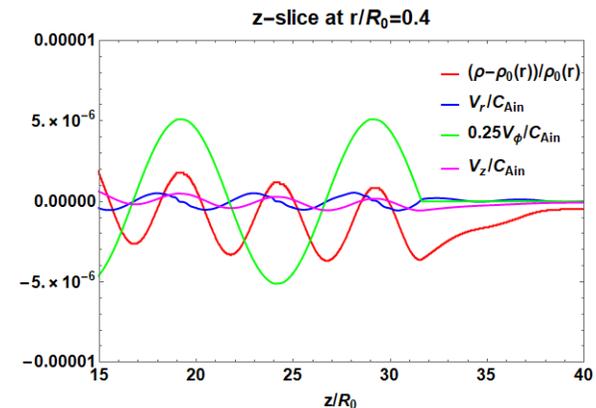
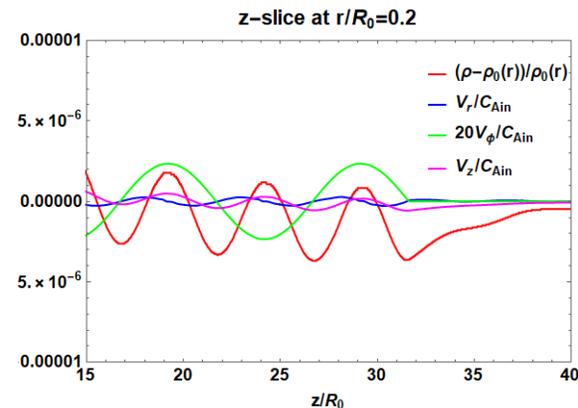
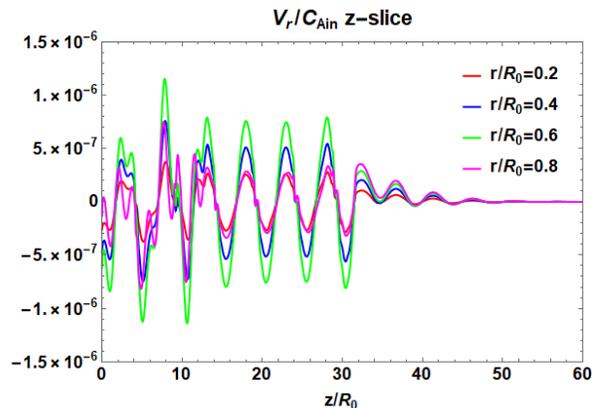
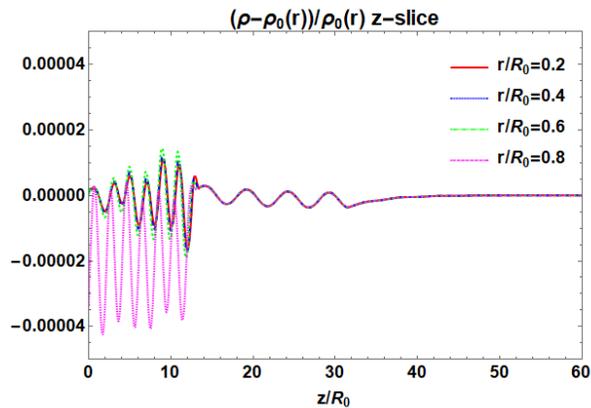
# Драйвер 1. Z-срезы



# Драйвер 2. Полная картина



# Драйвер 2. Z-срезы



# Результаты

- Крутильные альфвеновские волны индуцируют возмущения радиальной скорости плазмы. Эти возмущения ведут к появлению возмущения плотности
- Индуцированные возмущения плотности радиально однородны вне зависимости от формы драйвера.



Спасибо за  
внимание!!!