

Сравнение безразмерных параметров в астрофизических приложениях МГД и лабораторном эксперименте

Е.П. Курбатов, Д.В. Бисикало, М.В. Стародубцев, А. Ciardi,
J. Fuchs, А.А. Соловьёв, К.Ф. Бурдонов, G. Revet, S. Chen

Институт астрономии РАН, Москва
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Sorbonne Univ., Paris, France
Observatoire de Paris, PSL Research University, Paris, France
Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses–CNRS, École Polytechnique,
Univ. Paris-Saclay, France

Нижний Новгород, 2018

Объекты

Поляры и промежуточные поляры

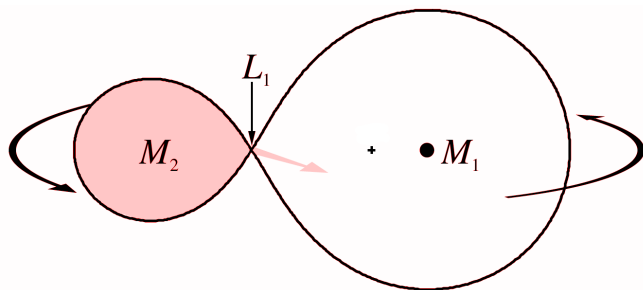
Аккректор — белый карлик

$$M_1 \lesssim 1 M_{\odot}$$

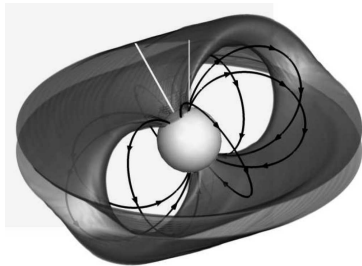
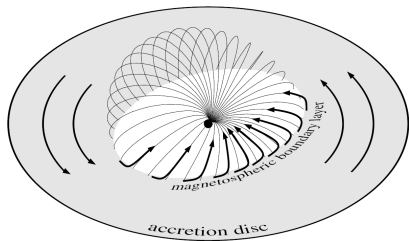
$$B_1 > 10^6 \text{ Гс}$$

Донор — красный карлик, заполняет полость Роша

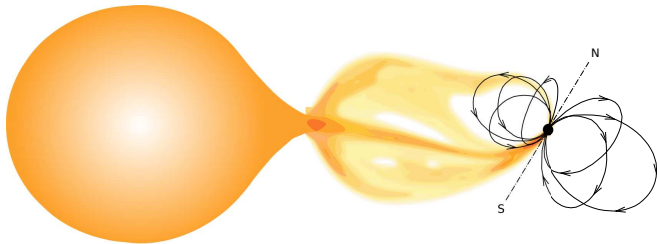
$$M_2 \lesssim M_1$$



Аккреционный диск промежуточного поляра:



Система поляра:



Астрофизическая плазма

Химический состав

- ▶ $H < 75\%$, $He < 25\%$, $O + C + Fe + \dots < 1\%$
- ▶ Доля “металлов” важна для нагрева/охлаждения
- ▶ ... но это можно обойти

Температура

- ▶ Баланс нагрева и охлаждения $\Rightarrow T \sim 10^4 \text{ K}$

Концентрация

- ▶ Работает гидродинамическое приближение

Полностью ионизованная водородная плазма с температурой $\sim 10^4 \text{ K}$

Магнитная гидродинамика

Приближение МГД

- ▶ Ионизованная квазинейтральная среда
- ▶ Масштабы явлений много больше масштаба разделения зарядов
- ▶ Пренебрегаем генерацией ЭМВ на масштабах задачи

$$\text{Sh} \partial_t \rho + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\text{Sh} \partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\text{Fr} \nabla \Phi - \text{Eu} \frac{\nabla P}{\rho} - \text{Al} \frac{\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}}{\rho} - \text{Re}^{-1} \nu \Delta \mathbf{v}$$

$$\text{Sh} \partial_t \mathbf{B} = \text{rot}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] - \text{Rm}^{-1} \eta \Delta \mathbf{B}$$

Безразмерные числа определяются характерными масштабами задачи:

$$\begin{aligned} \text{Sh} &= \frac{x_0}{v_0 t_0} & \text{Fr} &= \frac{x_0 g_0}{v_0^2} & \text{Eu} &= \frac{P_0}{\rho_0 v_0^2} \\ \text{Al} &= \frac{B_0^2}{4\pi \rho_0 v_0^2} & \text{Re} &= \frac{x_0 v_0}{\nu_0} & \text{Rm} &= \frac{x_0 v_0}{\eta_0} \end{aligned}$$

Исследуем подобие явлений:

- ▶ Лазерная абляция в магнитном поле
- ▶ Аккреция в системе промежуточного поляра EX Hydrae
- ▶ Аккреция в системе поляра AM Herculis
- ▶ Атмосфера экзопланеты WASP-12b

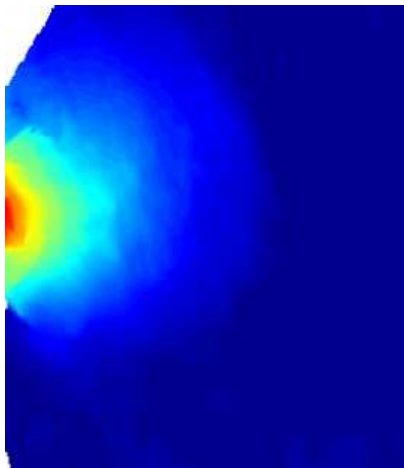
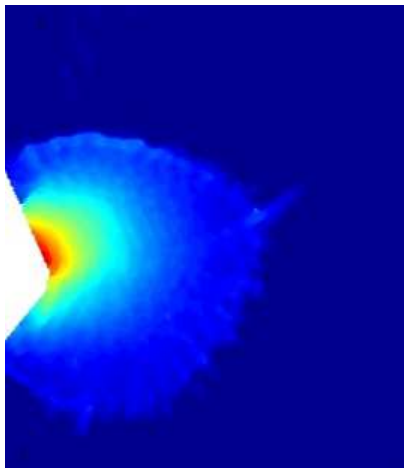
Лазерная абляция в магнитном поле

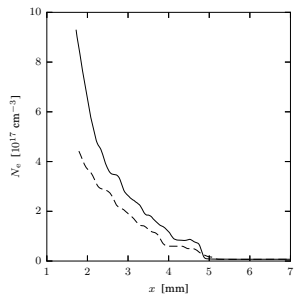
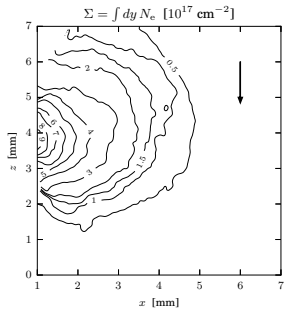
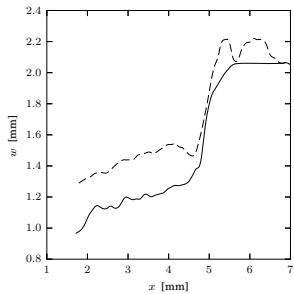
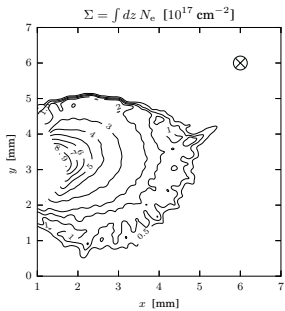
Комплекс PEARL (лазер накачки)

- ▶ Мишень: тефлон — $(C_2F_4)_n$
- ▶ Диаметр пятна: $(4 \dots 7) \times 10^{-2}$ см
- ▶ Интенсивность: 2×10^{13} Вт/см²
- ▶ Длительность импульса: 1 нс
- ▶ Однородное магнитное поле: 13.5 Тл

Плазменный факел

- ▶ Размер: \sim мм
- ▶ Скорость: 100...500 км/с
- ▶ Температура: 30 эВ
- ▶ Концентрация: $\sim 10^{17}$ см⁻³
- ▶ Степень ионизации: 3.5





Астрофизические приложения

Промежуточный поляр EX Hydrae

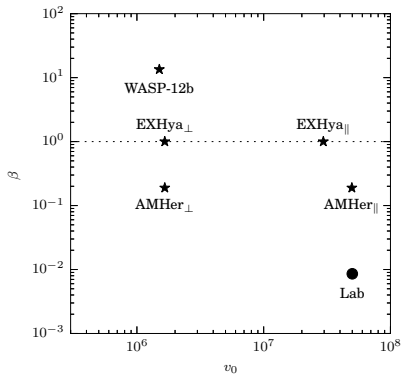
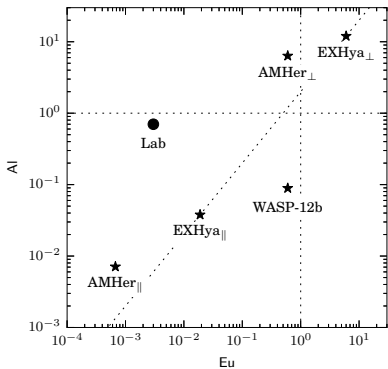
$$\begin{aligned}x_0 &\sim 10^4 \dots 10^9 \text{ см} & v_0 &\sim 10 \dots 100 \text{ км/с} \\ N_0 &\lesssim 10^{13} \text{ см}^{-3} & T_0 &\sim 10^4 \text{ К} & B_0 &\sim 10^{-2} \text{ Тл}\end{aligned}$$

Поляр AM Herculis

$$\begin{aligned}x_0 &\sim 10^9 \dots 10^{10} \text{ см} & v_0 &\sim 10 \dots 100 \text{ км/с} \\ N_0 &\lesssim 10^{12} \text{ см}^{-3} & T_0 &\sim 10^4 \text{ К} & B_0 &\sim 10^{-1} \text{ Тл}\end{aligned}$$

“Горячий юпитер” WASP-12b

$$\begin{aligned}x_0 &\sim 10^{10} \text{ см} & v_0 &\sim 10 \text{ км/с} \\ N_0 &\lesssim 10^7 \text{ см}^{-3} & T_0 &\lesssim 10^4 \text{ К} & B_0 &\sim 10^{-6} \text{ Тл}\end{aligned}$$



$$Al \propto \rho_0^{-1} v_0^{-2} B_0^2$$

$$Eu \propto v_0^{-2} T_0$$

$$\beta \propto \rho_0 T_0 B_0^{-2}$$

Выводы

Подобие эксперимента и астрофизических течений

- ▶ Уменьшить B_0 в 3...30 раз
- ▶ или увеличить ρ_0 в 10...1000 раз
- ▶ Уменьшить v_0

Тоже важно

- ▶ Морфология течения — “струя”, “шторка”
- ▶ Конфигурация магнитного поля — диполь