

Исследование влияния высвечивания на
течение газа в областях взаимодействия
звездных ветров с межзвездной средой

Титова А.В.

НИУ ВШЭ, факультет физики, кафедра физики космоса
Руководитель проф., д.ф.-м.н. Измоденов В. В.

- Рассматривается задача о взаимодействии звездного ветра и межзвездной среды
- **Цель работы – определить влияние радиационного высвечивания на структуру области взаимодействия звездного ветра и межзвездной среды.**
- Актуальность: учет высвечивания в уравнении энергии, параметрический анализ влияния функции охлаждения

– Оба ветра являются невязкими, нетеплопроводными совершенными газами с показателем адиабаты $\gamma = 5/3$.

Звездный ветер:

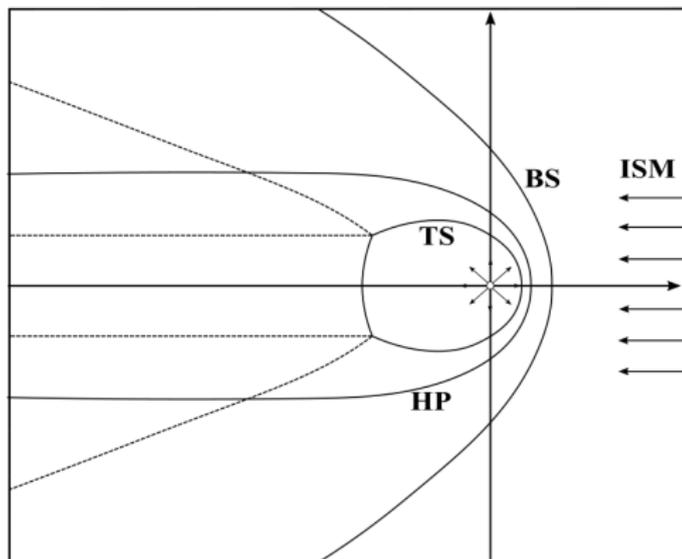
Гиперзвуковой сферически-симметричный источник:

$$\rho = \frac{\dot{M}_{\odot}}{4\pi r^2 v_0}, \mathbf{v} = v_0 \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}, p \propto \rho^{\gamma} \approx 0$$

Межзвездная среда:

Сверхзвуковой параллельный поток:

$$\rho_{\infty}, p_{\infty}, \mathbf{v}_{\infty} = -v_{\infty} \mathbf{e}_x$$



Качественная модель взаимодействия звездного ветра с межзвездной средой. ISM – невозмущенная межзвездная среда, BS – внешняя ударная волна, HP – тангенциальный разрыв, TS – внутренняя ударная волна. Пунктиром показаны вторичные ударные волны и тангенциальный разрыв

Уравнения Эйлера:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \mathbf{0},$$

$$\nabla \cdot [\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \mathbf{p} \hat{\mathbf{I}}] = \mathbf{0},$$

$$\nabla \cdot [(e + p) \mathbf{v}] = q, \quad q = -\frac{\rho^2}{m_p^2} \Lambda(T).$$

где $e = p/(\gamma - 1) + \rho v^2/2$ и

$$\Lambda(T) = \begin{cases} 0, & T < 10^4 \text{ K} \\ 10^{-24} T^{0.55}, & 10^4 \text{ K} < T < 10^5 \text{ K} \\ 6.2 \cdot 10^{-19} \cdot T^{-3/5}, & 10^5 \text{ K} < T < 4 \cdot 10^7 \text{ K} \\ 2.5 \cdot 10^{-27} \cdot T^{0.5}, & T > 4 \cdot 10^7 \text{ K} \end{cases} \quad (\text{эрг} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1})$$

Решение зависит от пяти параметров:

$\rho_\infty, p_\infty, \mathbf{v}_\infty = -v_\infty \mathbf{e}_x$ – параметры межзвездной среды

$\dot{M}_\odot = 4\pi \rho v r^2$ – расход массы звезды

\mathbf{v}_0 – терминальная скорость

Уравнения Эйлера:

$$\hat{\nabla} \cdot (\hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}) = 0,$$

$$\hat{\nabla} \cdot [\hat{\rho} \hat{\mathbf{v}} \hat{\mathbf{v}} + \hat{p} \hat{\mathbf{I}}] = \mathbf{0},$$

$$\hat{\nabla} \cdot [(\hat{e} + \hat{p}) \hat{\mathbf{v}}] = -\alpha \hat{\rho}^2 \hat{\Lambda} (\gamma M_\infty^2 \theta \frac{\hat{p}}{\hat{\rho}})$$

$\theta = T_\infty/T_0$ – отношение температуры межзвездной среды к $10^4 K$

$\alpha = \frac{R_*}{\rho_\infty v_\infty^3} \frac{\rho_\infty^2}{m_p^2} \Lambda(T_0)$ – темп радиационных потерь (R_* – расстояние до внутренней ударной волны)

Безразмерные граничные условия в межзвездной среде:

$$\hat{\rho}_\infty = 1, \quad \hat{p}_\infty = 1/(\gamma M_\infty^2), \quad \hat{v}_\infty = 1$$

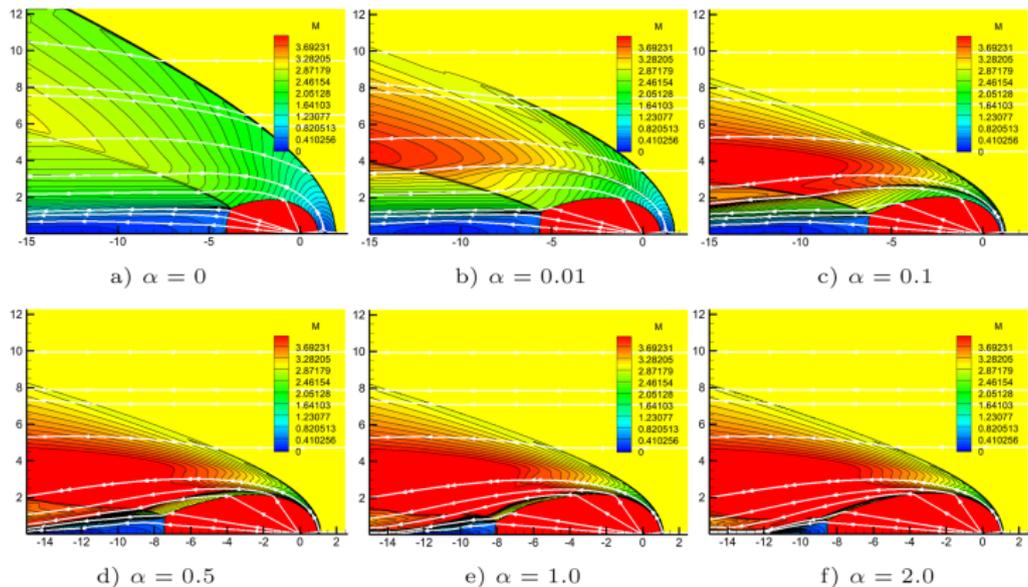
Скорость звездного ветра: $\chi = v_0/v_\infty$

Теперь решение зависит от данных параметров:

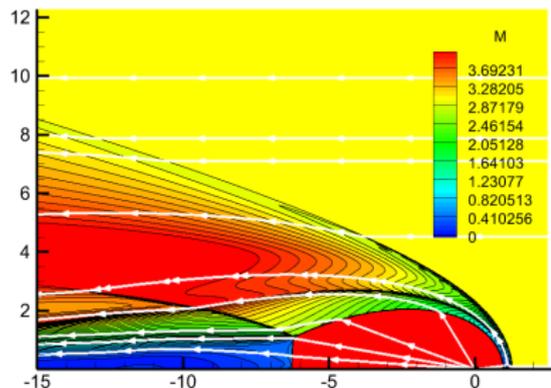
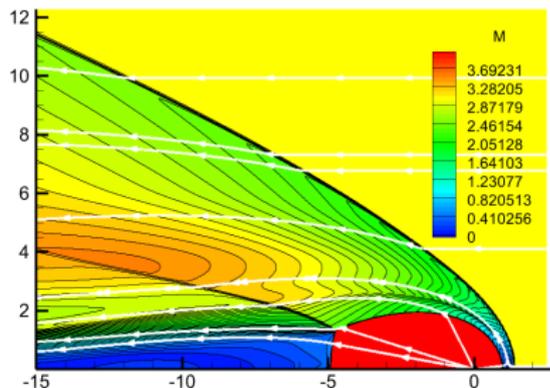
$$M_\infty, \quad \chi = v_0/v_\infty, \quad \alpha, \quad \theta$$

Для Солнечной системы $\alpha = 10^{-3}$, $\theta \sim 1$

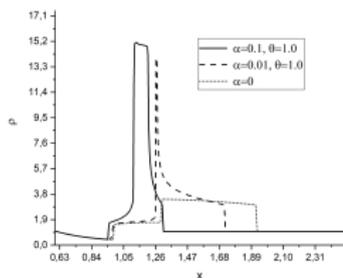
Число Маха M_∞ и χ одинаковы для всех вычислений ($M_\infty = 3$, $\chi = 1.628$).



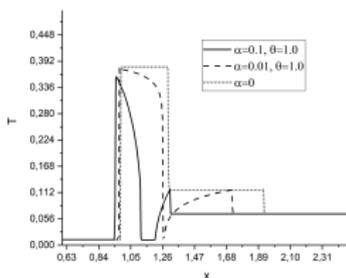
Распределение числа Маха в зависимости от параметра α , $\theta = 1.0$. По осям безразмерные расстояния. Метод HLL, количество ячеек 1792×1280 .

a) $\theta = 1.0$ b) $\theta = 0.6$

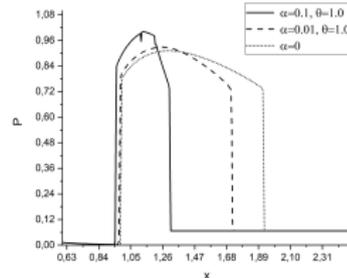
Распределение числа Маха в зависимости от параметра θ , $\alpha = 0.1$.
Метод HLL, количество ячеек 1792×1280 .



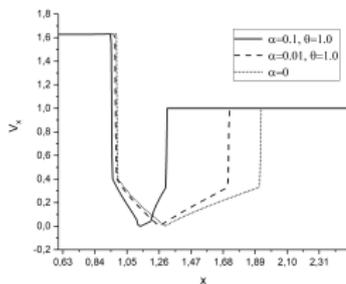
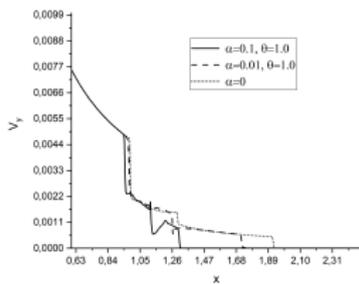
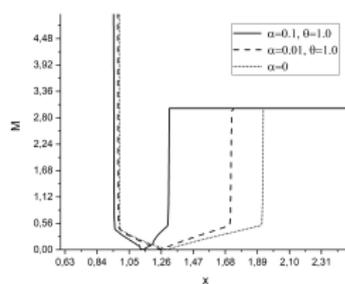
а) Плотность



б) Температура

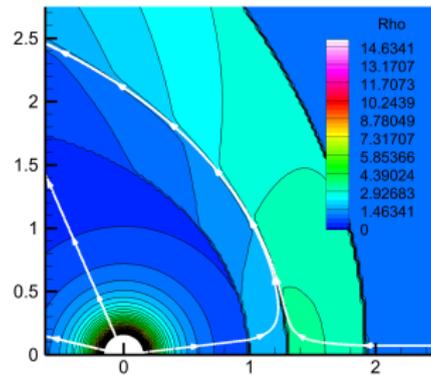
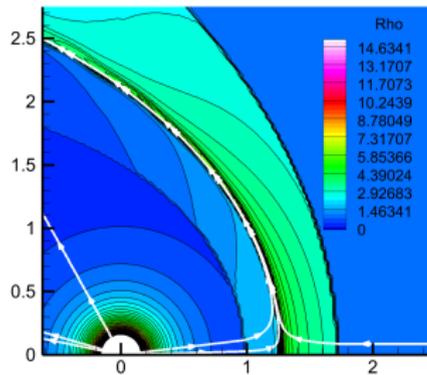
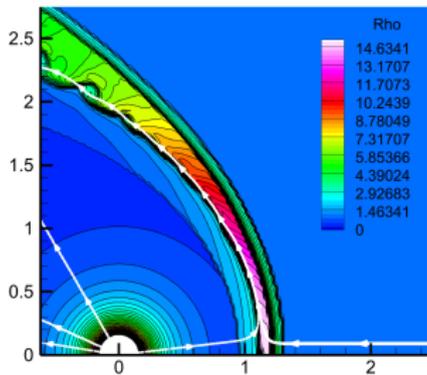
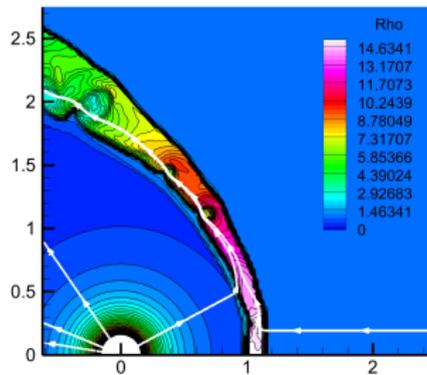


в) Давление

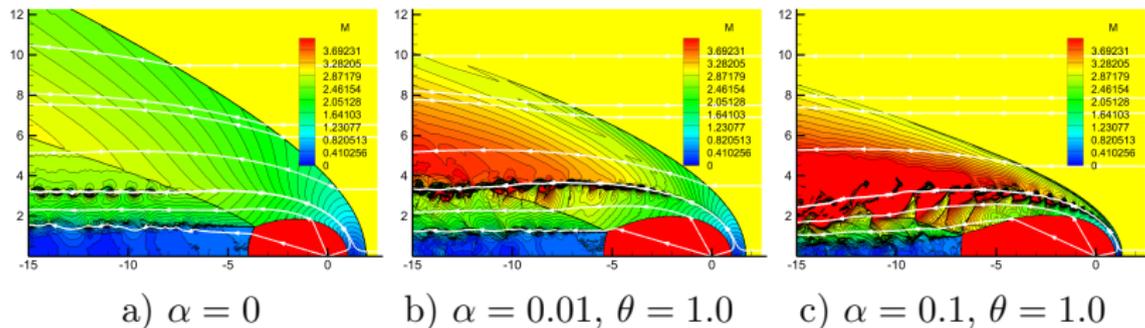

 д) Модуль скорости V_x

 е) Модуль скорости V_y


ф) Число Маха

Зависимость безразмерных газодинамических параметров от расстояния при $y=0$ в головной области течения

a) $\alpha = 0$ b) $\alpha = 0.01$ c) $\alpha = 0.1$ d) $\alpha = 0.5$

Распределение
плотности для
различных
параметров α
в головной
области
течения,
 $\theta = 1.0$



Распределение числа Маха в зависимости от параметра α . По осям безразмерные расстояния. Метод HLLC+tvд, количество ячеек 3584×2200 .

-
- Показано наличие влияния высвечивания на структуру и устойчивость астросфер
 - Охлаждение газа в области взаимодействия приводит к увеличению давления и плотности
 - При увеличении α в области возмущенного межзвездного ветра заметно разделение на более плотную и разреженную фазы
 - В случае Солнечной системы $\alpha = 0.001$, следовательно, влияние высвечивания мало