

МНОГОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ОБЛАКОВ НІ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Волгоградский государственный университет

К. С. Доманская, М. А. Еремин, В. Н. Любимов

Ростов-на-Дону 2009

Межзвездная среда



Темное облако B72 (Змея)

Постановка задачи:

Детальное численное двух- и трех- мерное моделирование неупругих столкновений облаков HI в МЗС с учетом тепловых процессов:

- 1 нагрева и охлаждения;
- 2 теплопроводности.

Stone M. E., ApJ, 1970;...

Miniati F., Jones T. W., Ferrara A., Ryu D., ApJ, 1997.

Механизмы нагрева и охлаждения газа

Процессы нагрева:

- УФ излучение звезд
- Радиация и космические лучи
- Жесткое ЭМ излучение

Процессы охлаждения:

- Тормозное излучение
- Рекомбинационное излучение
- Двухфотонное излучение
- Обратное комптоновское рассеяние
- Излучение в спектральных линиях
- Ионизация электронным ударом

Уравнения газовой динамики с учетом тепловых процессов

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left[\frac{\mathbf{u}^2}{2} + \varepsilon \right] \right) + \nabla \left(\rho \mathbf{u} \left[\frac{\mathbf{u}^2}{2} + \chi \right] \right) = \nabla[k(T)\nabla T] - \mathfrak{L}(p, n)$$

$k(T)$ – коэффициент теплопроводности,

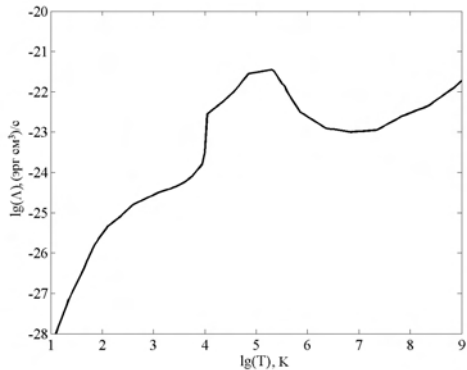
$\mathfrak{L}(p, n) = \Lambda(T)n^2 - \Gamma(T)n$ – функция тепловых потерь,

$\Lambda(T)$ – функция объемного охлаждения,

$\Gamma(T)$ – функция объемного нагрева,

$$\varepsilon = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} - \text{удельная энергия, } \gamma = 5/3$$

Функции нагрева и охлаждения

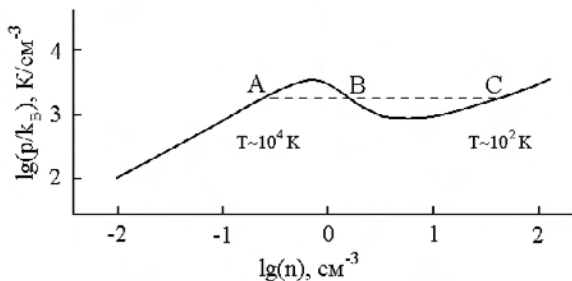


- Функция охлаждения отвечает стандартному химическому составу.
- Функция нагрева принята постоянной — $\Gamma = 1,6 \cdot 10^{-25}$ эрг/с.

Многофазность межзвездной среды

Трехкомпонентная модель (McKee C. F., Ostriker J. P., 1977):

- облака HI - «холодная» фаза ($T \lesssim 70$ K, $n \sim 10^2$ см $^{-3}$)
- межоблачный газ - «теплая» фаза ($T \sim 10^4$ K, $n \sim 10^{-1}$ см $^{-3}$)
- корональный газ - «горячая» фаза ($T \sim 10^6$ K, $n \sim 10^{-3}$ см $^{-3}$)



Кривая равновесия $\mathcal{L}(p, n) = 0$

Численный метод решения

- Аппроксимация по пространству: численная нелинейная схема типа MUSCL, удовлетворяющая TVD свойству 3-го порядка точности;
- Аппроксимация по времени: метод предиктор-корректор 2-го порядка точности (метод Рунге-Кутты);
- Вычисление потоков через границы ячеек: метод Хартена-Лакса-ван Лиира с учетом контактного разрыва (метод HLLC);
- Метод подшагов для учета радиативных потерь;
- В 2D расчетах разрешение не хуже 100 ячеек на радиус облака R_c (2000×2000), максимальное разрешение в 3D расчетах $800 \times 800 \times 800$.

Основные параметры

Характерное время охлаждения: $\tau_{rad} = \varepsilon/\mathfrak{L}$

Характерное время столкновения: $\tau_{coll} = R_c/u_c$.

Параметр охлаждения:

$$\eta = \frac{\tau_{rad}}{\tau_{coll}}.$$

Характер столкновения:

- $\eta \gg 1$ – адиабатическое столкновение
- $\eta \sim 1$ – радиативное столкновение
- $\eta \ll 1$ – изотермическое столкновение

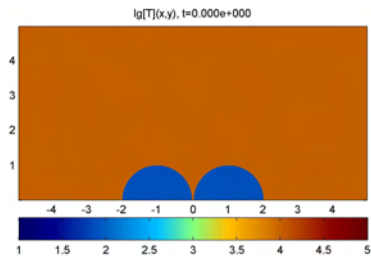
Параметры среды $T_i = 10^4$ К и $n_i = 0,1 \text{ cm}^{-3}$,

Параметры облаков $T_c = 80$ К и $n_c = 10 \text{ cm}^{-3}$.

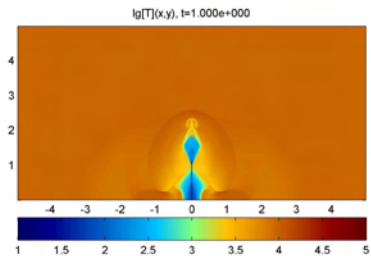
Характерный масштаб времени: $t_0 = 10^5$ лет.

Характерный пространственный масштаб: $L_0 = 1$ пк.

Модель 1: $R_c = 1$ пк, $M = 1,5$, $\eta = 0,23$

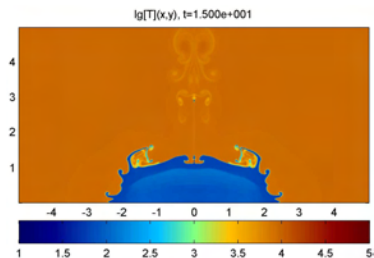


Начальное распределение

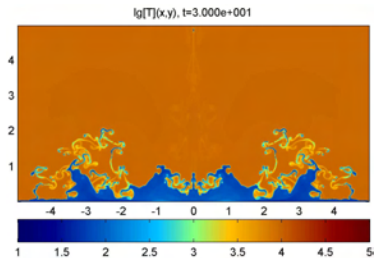


Фаза сжатия

Модель 1: $R_c = 1$ пк, $M = 1,5$, $\eta = 0,23$

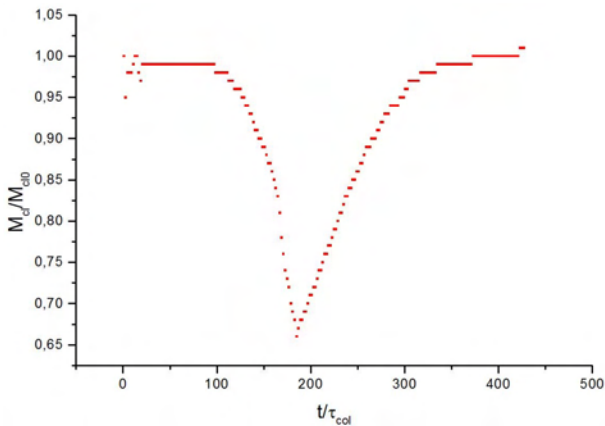


Фаза перерасширения

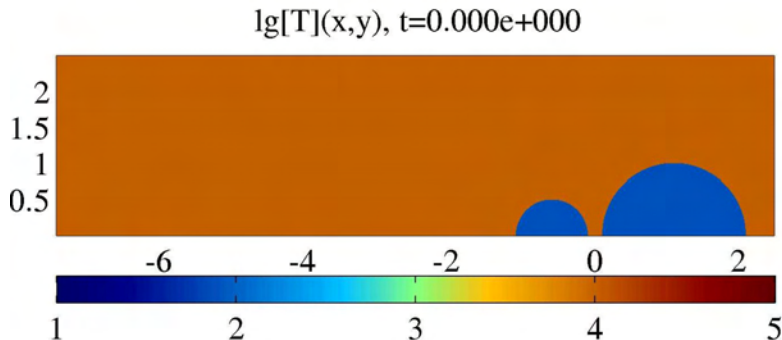


Фаза разрушения

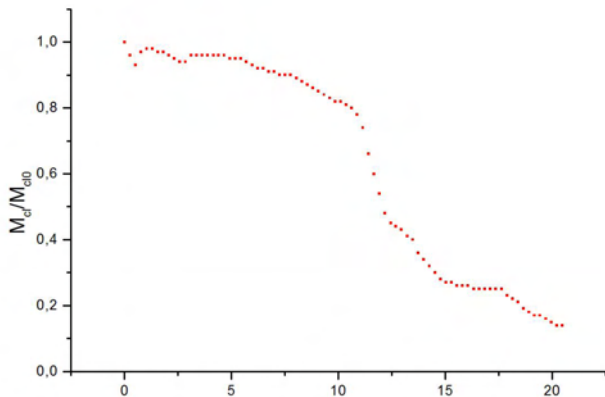
Модель 1: $R_c = 1$ пк, $M = 1,5$, $\eta = 0,23$
изменение массы холодной фазы



Модель 2: $R_{c1} = 1$ пк, $R_{c2} = 0.5$ пк, $M = 1,5$
несимметричное столкновение, начальное распределение



Модель 2: $R_c = 1$ пк, $M = 1,5$, $\eta = 0,23$
изменение массы холодной фазы



Выводы

- Для адекватного моделирования столкновений облаков необходимо использовать высокое разрешение (не менее 100 ячеек на радиус облака).
- При лобовом симметричном столкновении облака разрушаются, образуя филоментные структуры – формирование нового облака маловероятно.
- В неадиабатическом случае после разрушения облаков сохраняется разделение среды на теплую и холодную фазы.
- Учет теплопроводности приводит к подавлению неустойчивостей Рэля-Тейлора и Кельвина - Гельмгольца.