Конференция «Физика плазмы в солнечной системе»
14 -18 февраля 2011 г., ИКИ РАН

ЭВОЛЮЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ В САМОГРАВИТИРУЮЩЕМ ГАЗОВОМ СЛОЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

К.В. Краснобаев[1,2], Р.Р. Тагирова[2]

([1]МГУ им. М.В. Ломоносова, [2]ИКИ РАН)

Цели исследования взаимодействия ударных волн с плотными облаками межзвездной среды:

- вопросы происхождения нерегулярной структуры газа;
- анализ процессов, стимулирующих гравитационное сжатие;
- определение химического и ионизационного состава сжатого ударной волной вещества.

Применительно к теории эволюции Солнечной системы:

моделирование явлений проникновения горячей плазмы за фронтом ударной волны от сверхновой в протопланетное облако (присутствие в хондритах продуктов распада короткоживущих изотопов).

Качественная особенность рассматриваемых движений:

Развитие неустойчивостей различных типов (Рэлея-Тейлора, Кельвина-Гельмгольца, Рихтмайера-Мешкова и др.). Основные полученные к настоящему времени результаты относятся к частным примерам начальных условий.

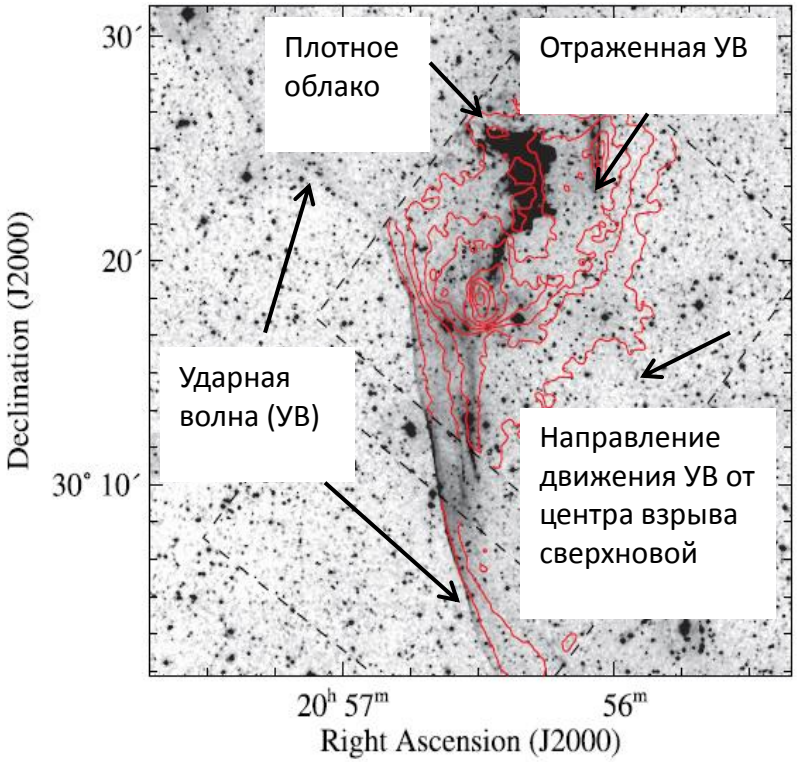
Цель настоящей работы:

Нахождение зависимости параметров течения от масштаба и амплитуды начальных возмущений.

План сообщения

- Взаимодействие ударной волны от сверхновой с плотным облаком;
  - Влияние формы облака на эффекты роста возмущений;
- Задача о движении самогравитирующего облака;
  - Динамика сжатия самогравитирующего слоя;
  - Аналитическая модель сжатия слоя;
  - Влияние граничных условий и импульсного внешнего давления на режим быстрого сжатия слоя;
  - Эволюция начальных условий.

Наблюдения структуры межзвездной среды за ударной волной



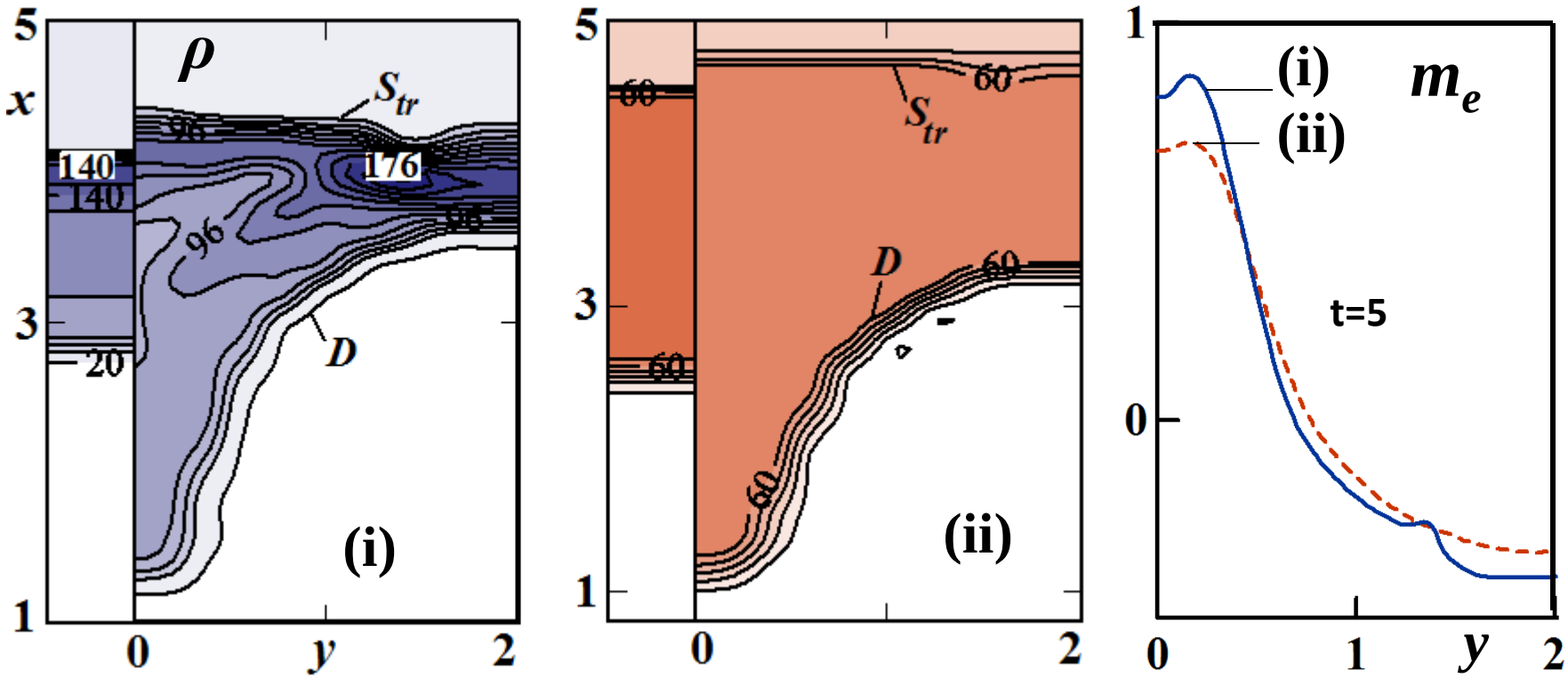
Туманность G74.0−8.5 «Петля в Лебеде»

R~21-27 пк, D~230’×160’. Параметры газа:T~10^3-10^6K, n~0.1-10^2 см$^{-3}$, V~10^2-10^3 км/с, L~1-10пк.

Результаты двумерных расчетов развития возмущений. Эффекты накопления массы

Изохоры (t=5)

Относительные интегральные массы



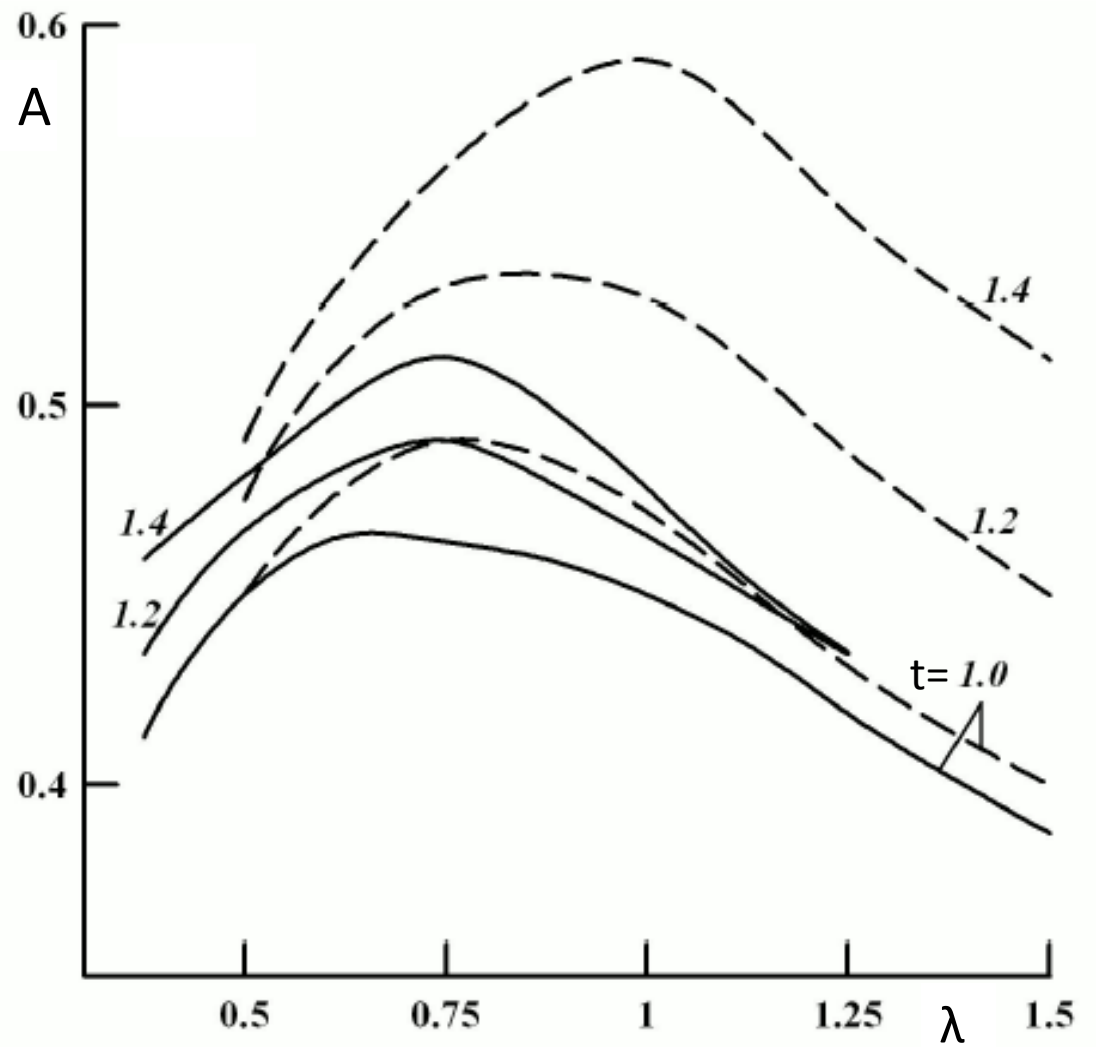
(i) – движение с высвечиванием

(ii) – адиабатическое течение

S_{tr} – преломленная ударная волна

D – тангенциальный разрыв

Нарастание двумерных деформаций границы в зависимости от высвечивания и начальных длин волн



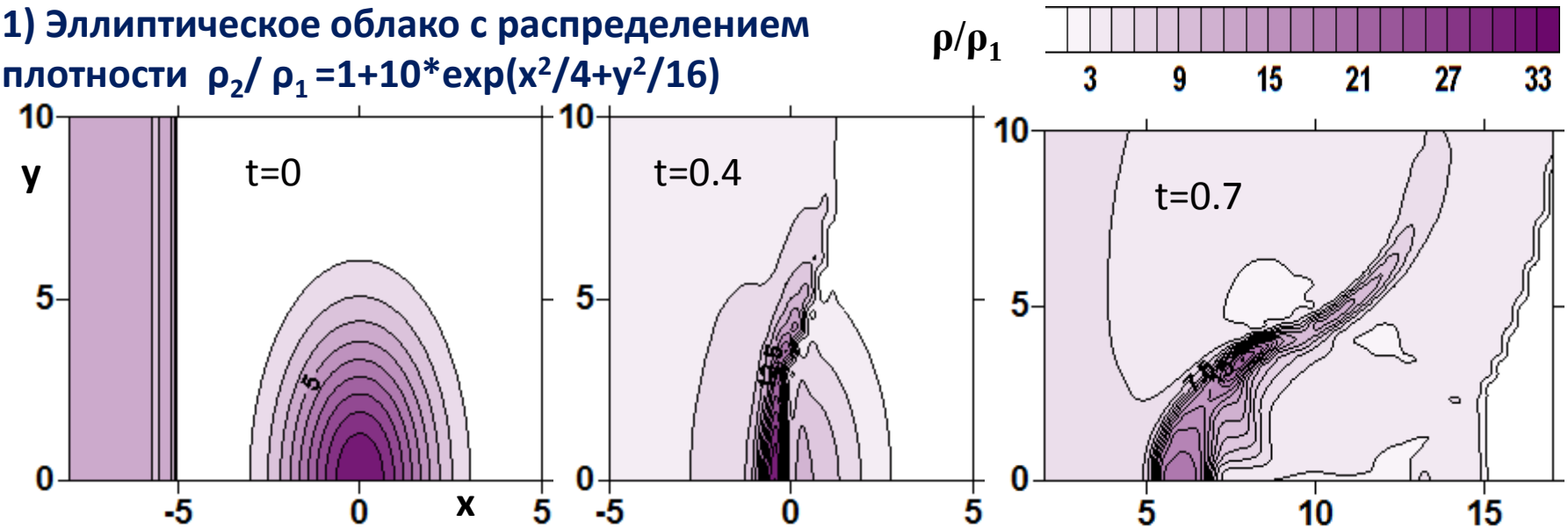
Изменение роста амплитуды возмущений от начальной длины волны

– – – адиабатическое течение

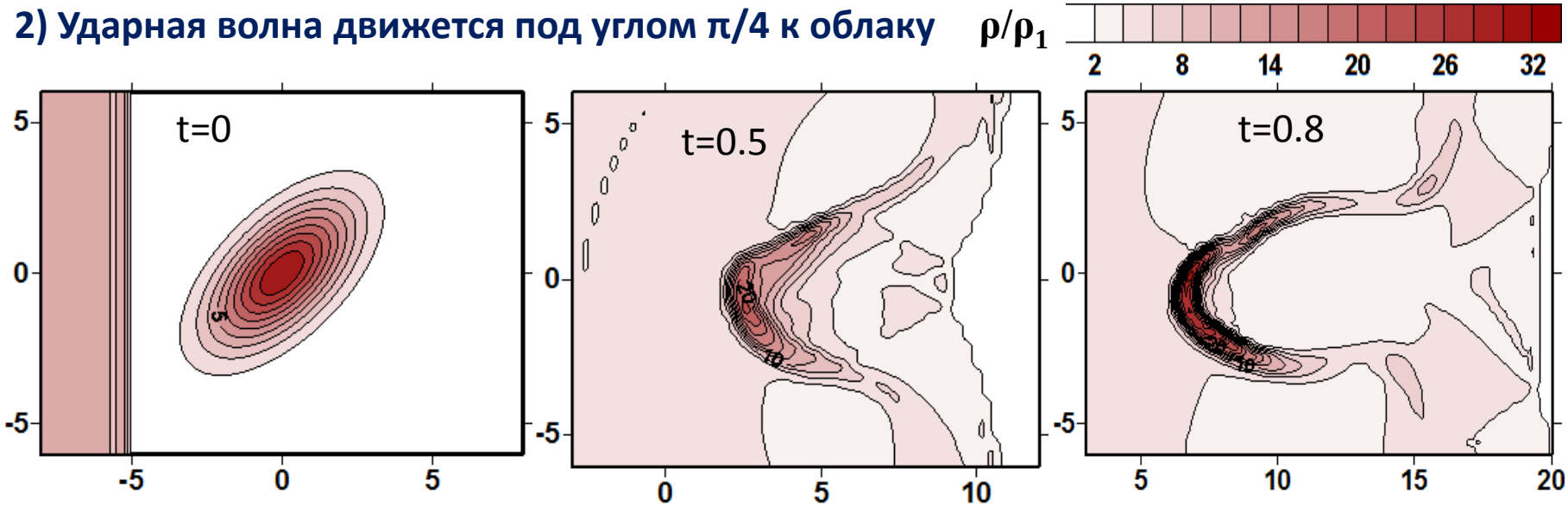
——— движение с учетом высвечивания

Влияние формы облака на эффекты роста возмущений

1) Эллиптическое облако с распределением плотности $\rho_2/\rho_1 = 1+10*\exp(x^2/4+y^2/16)$



2) Ударная волна движется под углом π/4 к облаку



Система уравнений газовой динамики с учетом гравитации в общей криволинейной системе координат

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_k(\rho v^k) = 0$$

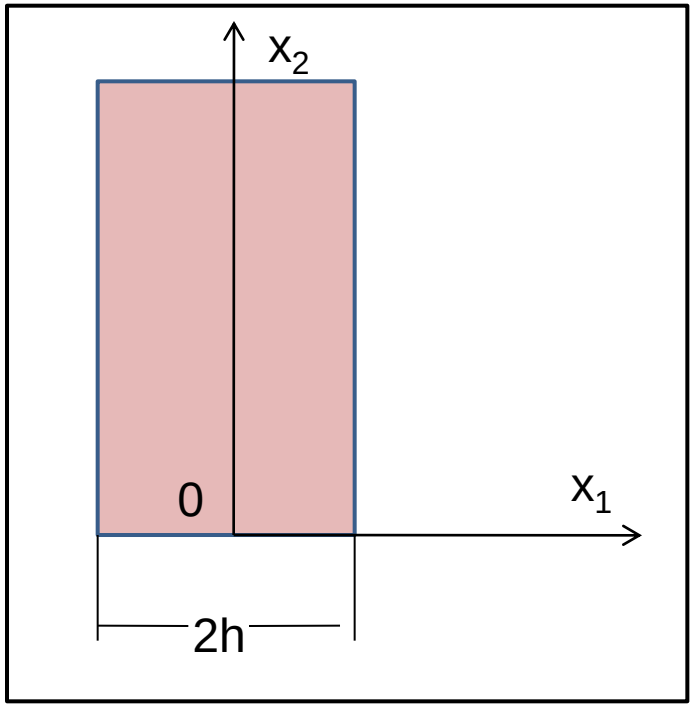
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v^i) + \nabla_k(\rho v^i v^k + g^{ik} p) = -\rho \nabla^i U$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E + \rho \frac{v^2}{2}\right) + \nabla_k\left(\rho v^k\left(E + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}\right)\right) = \mathcal{G} - \Lambda - \rho v^k \nabla_k U$$

$$\Delta U = 4\pi G \rho$$

U – гравитационный потенциал; функции нагрева- $\mathcal{G}$ и охлаждения-Λ; остальные величины имеют стандартный физический смысл.

Схематическое изображение самогравитирующего слоя



Начальные условия при t=0:

$$\rho = \rho_0 = const, u = 0$$

Граничные условия:

1) непроницаемая стенка

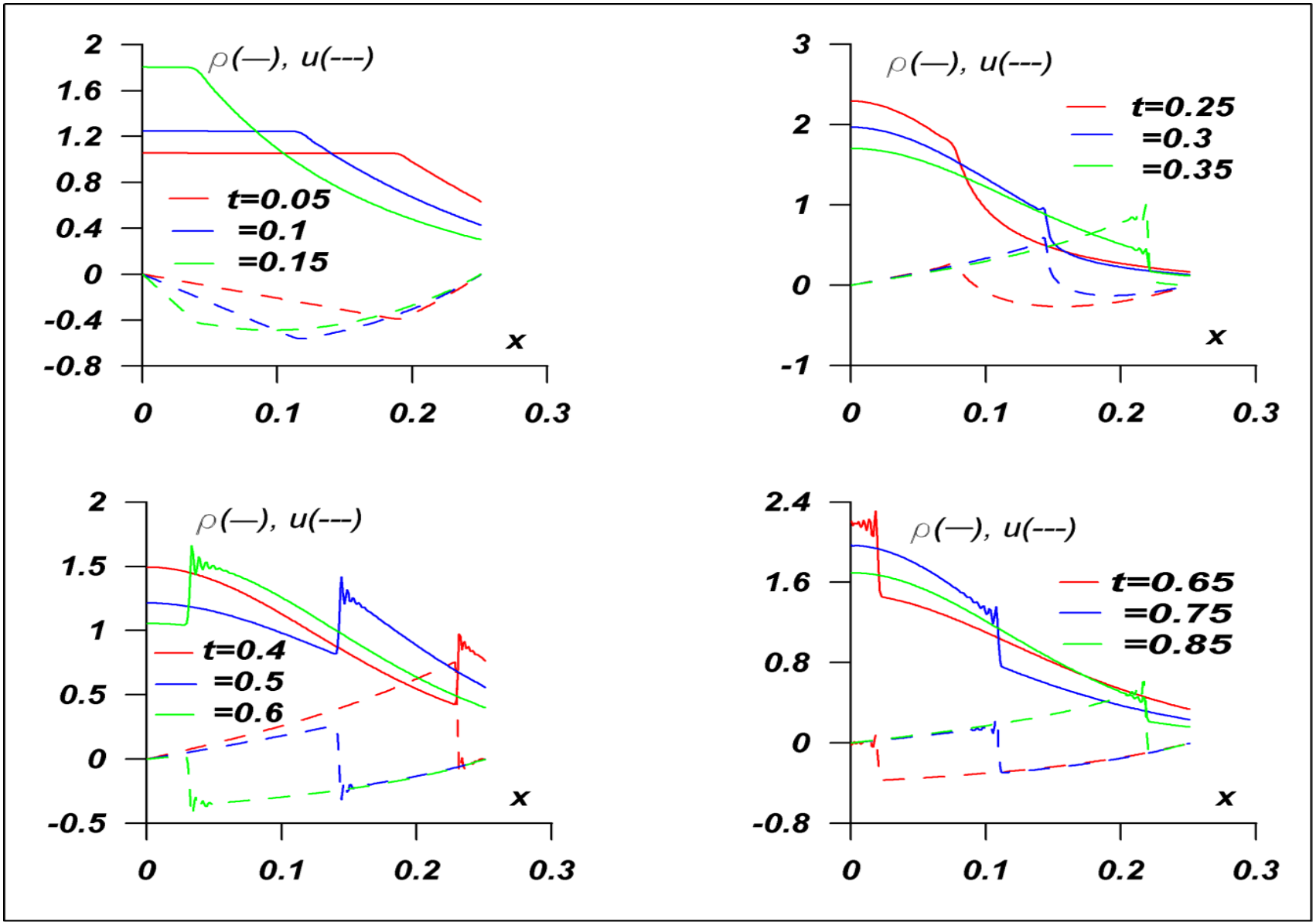
$$u(0,t) = u(0,h) = 0$$

2) контактный разрыв
3) избыточное внешнее давление

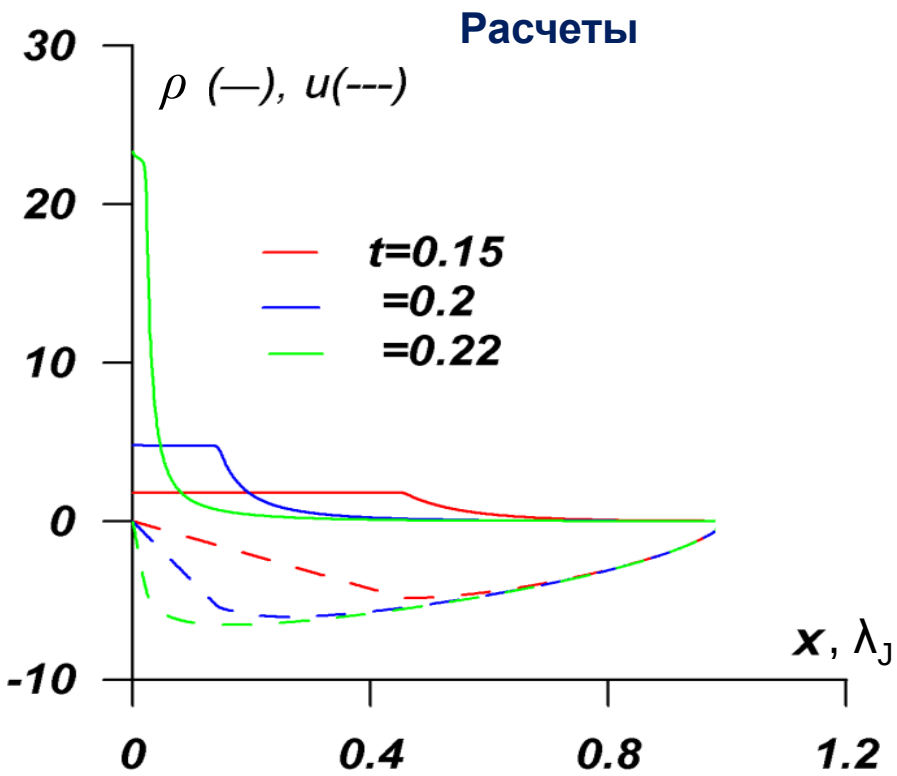
Рассматриваются *одномерные движения* совершенного газа. Для плоского слоя используются пространственная координата x_1 и время t.

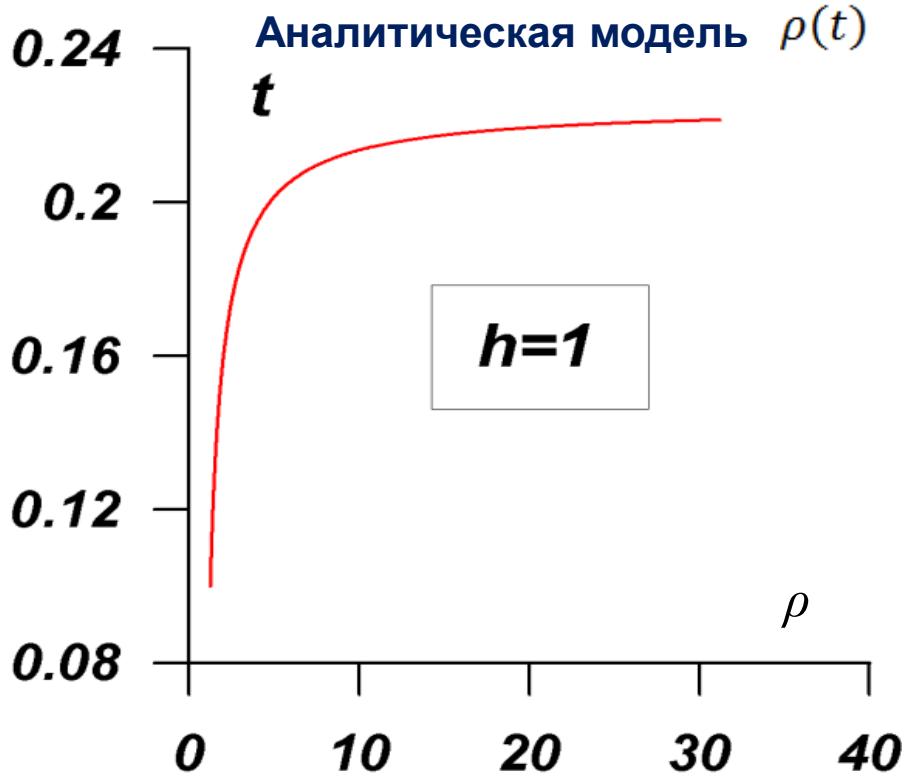
Режим установления с образованием ударных волн

Распределения плотности и скорости в различные моменты времени (h=0.25)



Режим быстрого нарастания плотности в центре слоя (h=1)





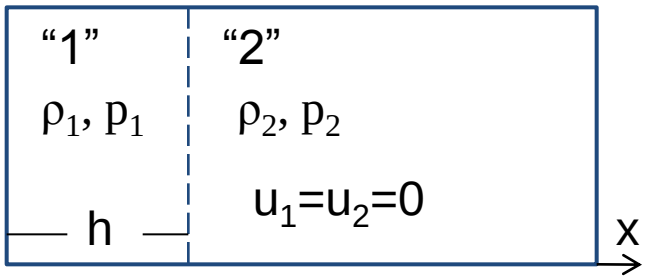
Согласно построенной аналитической модели время начала коллапса t_c= 0.2251. Расчетные значения плотности в центре и вычисленные по приближенной модели:

$$\rho(t=0.15)_{an}=1.796;\ \rho(t=0.15)_{num}=1.804;$$
$$\rho(t=0.22)_{an}=22.0;\ \rho(t=0.22)_{num}=23.25;$$

$$\rho_{max} \approx e^{8,886h}$$

Сжатие слоя (“1”), окруженного горячим газом (“2”)

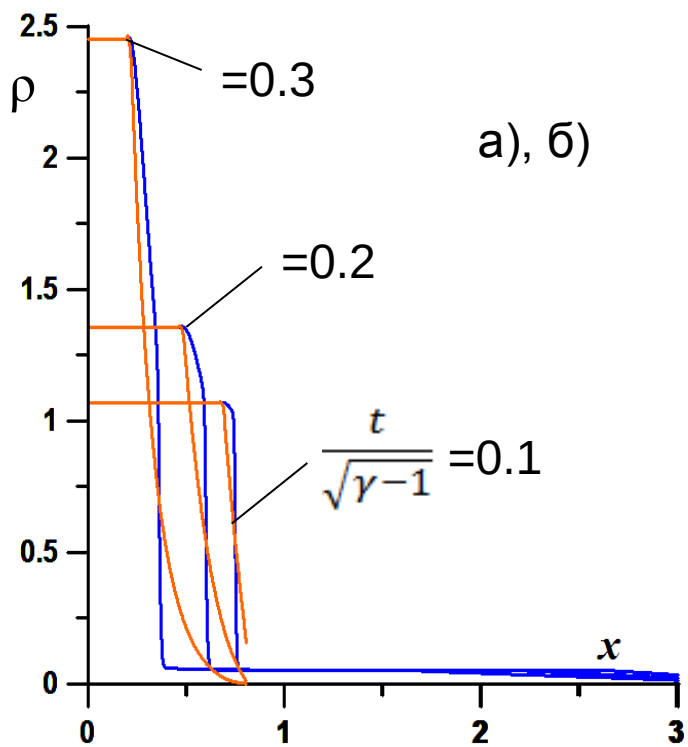
Начальное распределение параметров газа

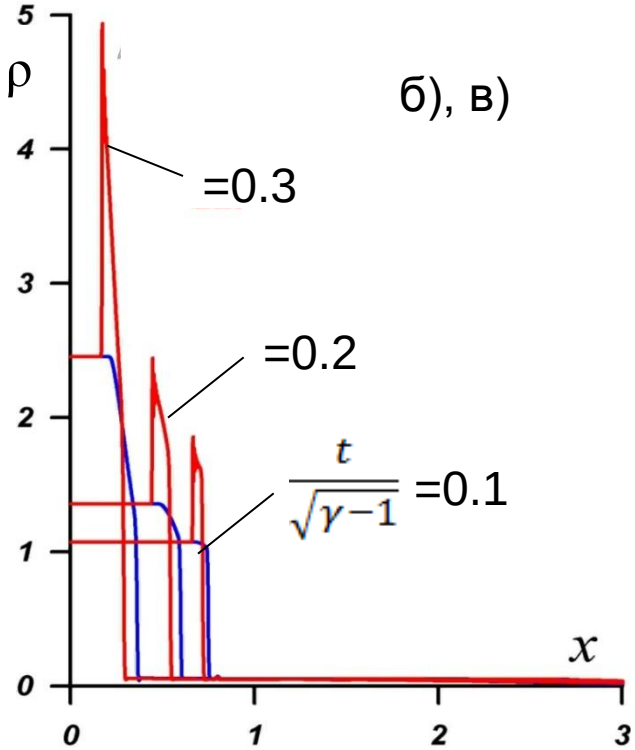


Варианты расчетов с условиями на границе слоя (h=0.8):

- а) непроницаемая стенка
- б) контактный разрыв $p_1 = p_2$
- в) избыточное внешнее давление $p_1 < p_2$, $p_2 / p_1=2$

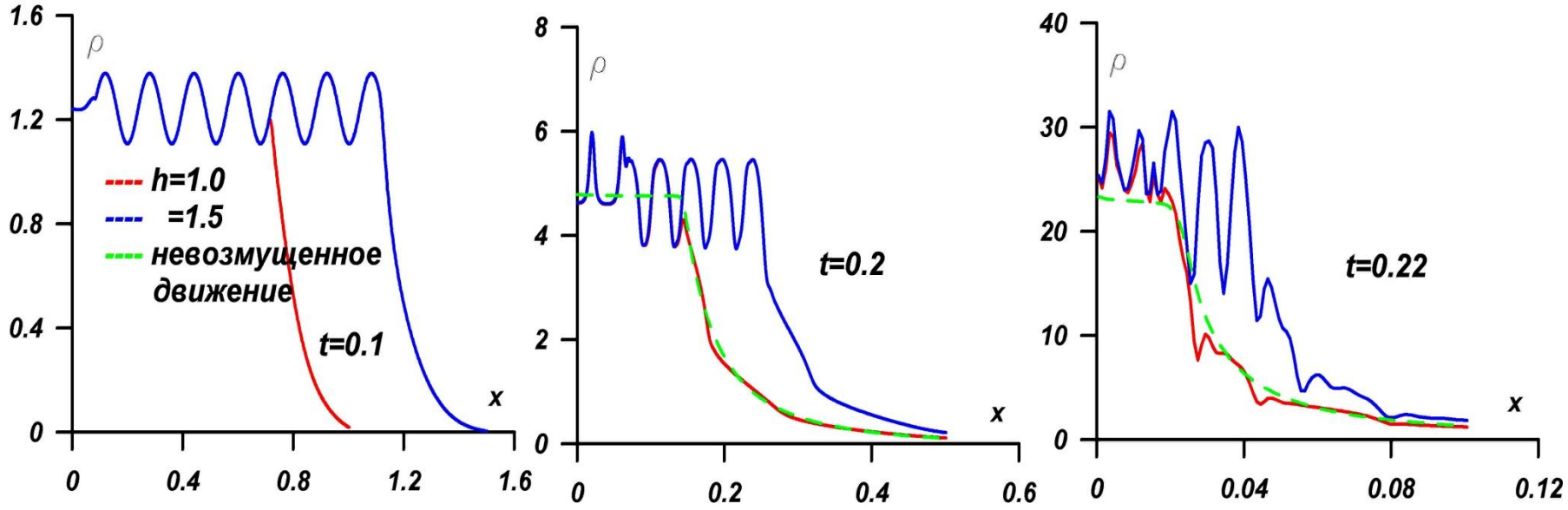
Изменение плотности со временем





Эволюция начальных возмущений в зависимости от толщины слоя (λ =0.2)

Распределение плотности



Заключение

Рассмотрены вопросы возникновения неоднородностей в межзвездном газе на примерах взаимодействия ударной волны от сверхновой с плотным облаком и сжатия самогравитирующего слоя.

Показано, что на развитие возмущений существенное влияние оказывают начальные условия движения газа.