

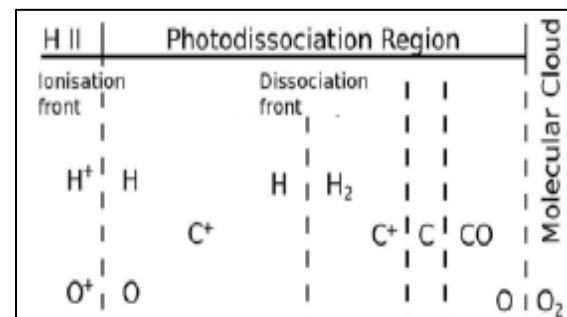
Исследование акустической моды тепловой неустойчивости в областях фотодиссоциации с учетом магнитного поля

К.В. Краснобаев^{1,2}, Р.Р. Тагирова²

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, ²Институт космических исследований РАН

- Исследуется развитие изэнтропической (акустической) моды тепловой неустойчивости в атомарной зоне области фотодиссоциации.
- Цель настоящей работы – оценить влияние магнитного поля на время развития возмущений и время опрокидывания волн.

Области фотодиссоциации – это области, в которых энергетическое и химическое состояние среды определяется излучением в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Эти области возникают в результате воздействия излучения горячих звезд O и B типа на молекулярные облака. Излучение с энергией ниже 13.6 эВ выходит за область ионизованного водорода, окружающей горячие звезды, и диссоциирует молекулярный газ. Между фронтами фотоионизации и фотодиссоциации находится атомарная зона.



- Процессы нагрева и охлаждения атомарного газа.

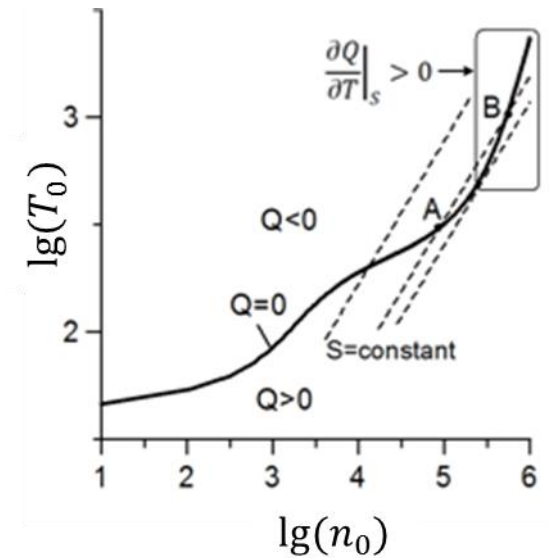
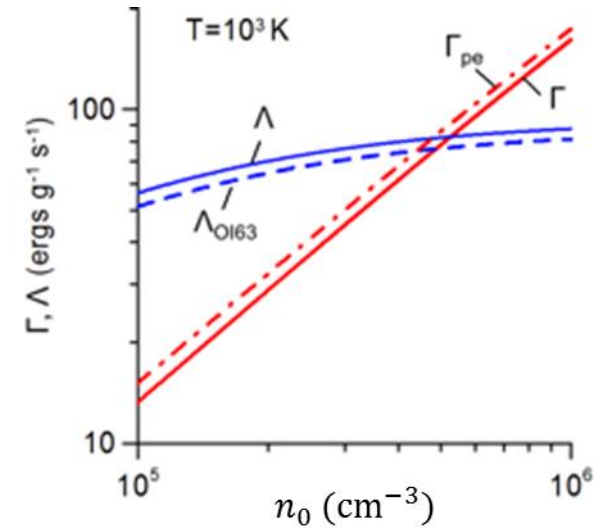
Нагревается газ за счет фотоэлектронной эмиссии от пылинок и молекул полициклических ароматических углеводородов (Вайнгартнер и Дрейн, 2001).

Охлаждается газ в результате возбуждения и последующего высвечивания уровней тонкой структуры линий СII (158 мкм) и OI (63 и 145 мкм) при столкновении с атомами водорода (Тиленс и Холленбах, 1985).

Когда функция нагрева $\Gamma(\rho, T)$ возрастает с увеличением плотности ρ или температуры газа T , а функция охлаждения $\Lambda(\rho, T)$ слабо меняется, то возможно выполнение критерия развития изэнтропической моды тепловой неустойчивости (Филд, 1965):

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial T} \right|_{s_0} = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\rho}{(\gamma - 1)T} \frac{\partial Q}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho_0, T_0} > 0, \quad \text{где } Q(\rho, T) = \Gamma - \Lambda.$$

В области фотодиссоциации критерий выполняется для очень плотного газа ($n > 10^4 \text{ см}^{-3}$) и сильного потока излучения ($G_0 > 10^4$ в единицах Хаббинга).



Краснобаев и Тагирова (2017)

- Проявление развития неустойчивости.

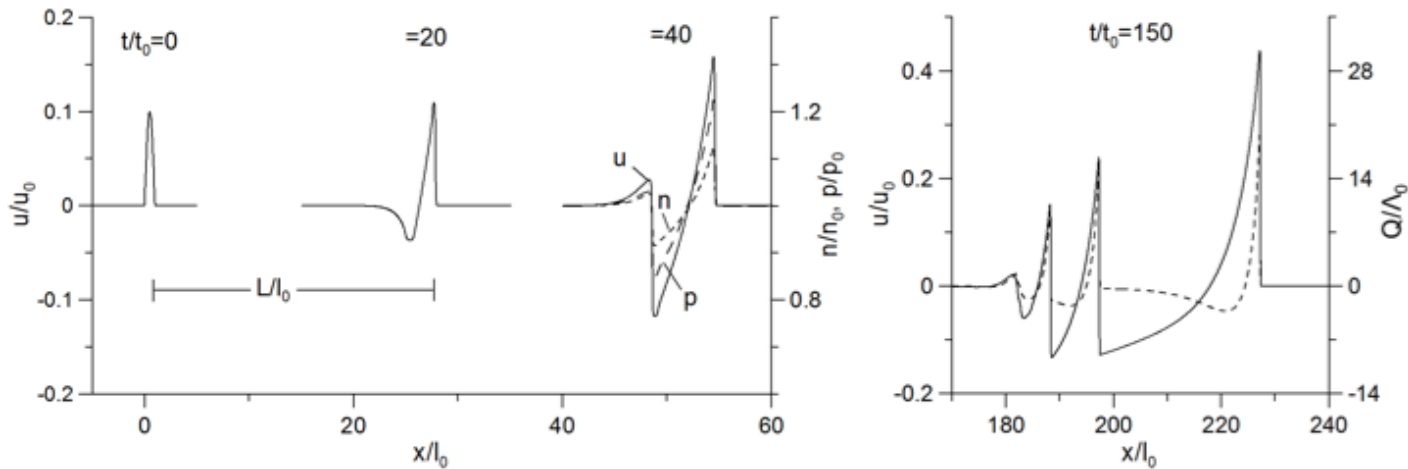
Условие $\left. \frac{\partial Q}{\partial T} \right|_{s_0} > 0$ приводит к тому, что бегущие волны давления усиливаются за счет дополнительного выделения энергии в фазе сжатия. В результате происходит опрокидывание волн и образование ударных волн.

- Представление эволюции возмущений на примере движений в отсутствие магнитного поля.

Система уравнений газовой динамики с учетом суммарного притока тепла Q к газу

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{V} = 0, \quad \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p, \quad \frac{dp}{dt} - \frac{\gamma p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = (\gamma - 1)Q(p, \rho)$$

Результаты численного моделирования (Краснобаев и Тагирова, 2017)



- Система уравнений для описания движения газа с учетом магнитного поля

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{V} &= 0 \\ \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} &= -\nabla p - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times \operatorname{rot} \mathbf{B} \\ \frac{dp}{dt} - \frac{\gamma p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} &= (\gamma - 1) Q(p, \rho) \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \operatorname{rot} \mathbf{V} \times \mathbf{B} \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0 \end{aligned}$$

В изучаемых термически неустойчивых областях фотодиссоциации характерные параметры таковы, что магнитной вязкостью, амбиполярной диффузией, теплопроводностью и омическими потерями можно пренебречь.

Характерные концентрация газа $n = 10^5 \text{ см}^{-3}$ ($n_e \approx 10^{-4} n$ – концентрация электронов), температура $T = 10^3 \text{ K}$, скорость $u_0 = 1 \text{ км/с}$, длина $L = 10^{-3} \text{ пк}$, электропроводность $\sigma = 10^{11} \text{ с}^{-1}$, индукция магнитного поля $B_0 = 300 \text{ мк Гс}$ и время развития неустойчивости $t_{inst} = 10^3 \text{ лет}$ (без магнитного поля).

Невозмущенное магнитное поле $\mathbf{B}_0 = B_0 \sin \alpha \mathbf{x}_0 + B_0 \cos \alpha \mathbf{y}_0$, где α – угол между направлением поля и распространением волн вдоль оси x .

Оценки магнитного поля $B_0 \approx (n/\text{см}^{-3})^{0.5} \text{ мк Гс}$.

- Приближение слабой нелинейности и малых отклонений от адиабатичности (Краснобаев и Тарев, 1987; Накаряков и др., 2000).

Система уравнений сводится к уравнению для описания эволюции возмущений скорости.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mu u + (C + \varepsilon u) \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\mu = -A \frac{C^2 - C_A^2 \cos^2 \alpha}{2 C^2 (2C^2 - C_S^2 - C_A^2)}, \quad \varepsilon = \frac{3C_A^2 C^4 \sin^2 \alpha + C_S^2 (\gamma + 1) (C^2 - C_A^2 \cos^2 \alpha)^2}{2 C^2 (C^2 - C_A^2 \cos^2 \alpha) (2C^2 - C_S^2 - C_A^2)}, \quad A = (\gamma - 1) \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} + C_S^2 \frac{\partial Q}{\partial p} \right) |_{\rho_0, p_0},$$

где C_S – скорость звука, C_A – скорость альфвеновской волны, C – скорость быстрой или медленной ударной волны.

Решение уравнения

$$u - F \left(x - Ct + \frac{\varepsilon}{\mu} u (1 - e^{\mu t}) \right) e^{-\mu t} = 0, \quad F = u(x, 0) = u_0 \exp \left(-\frac{x^2}{L^2} \right) - \text{начальный профиль волны.}$$

Неявное решение уравнения

$$x - Ct + \frac{\varepsilon}{\mu} u (1 - e^{\mu t}) + f(u e^{\mu t}) = 0, \quad f = x(u) - \text{неявный начальный профиль волны.}$$

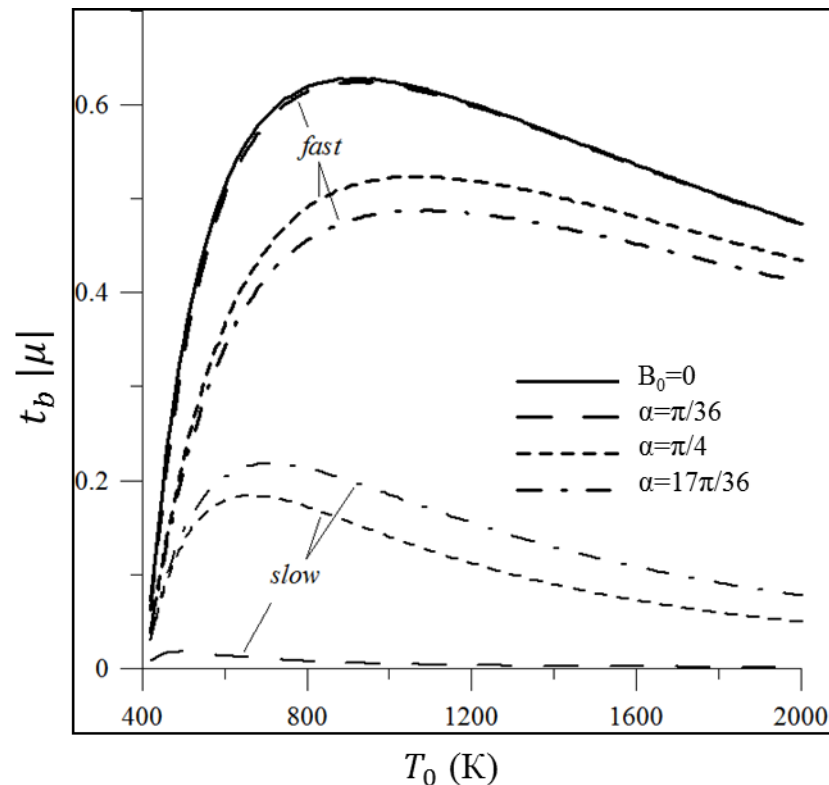
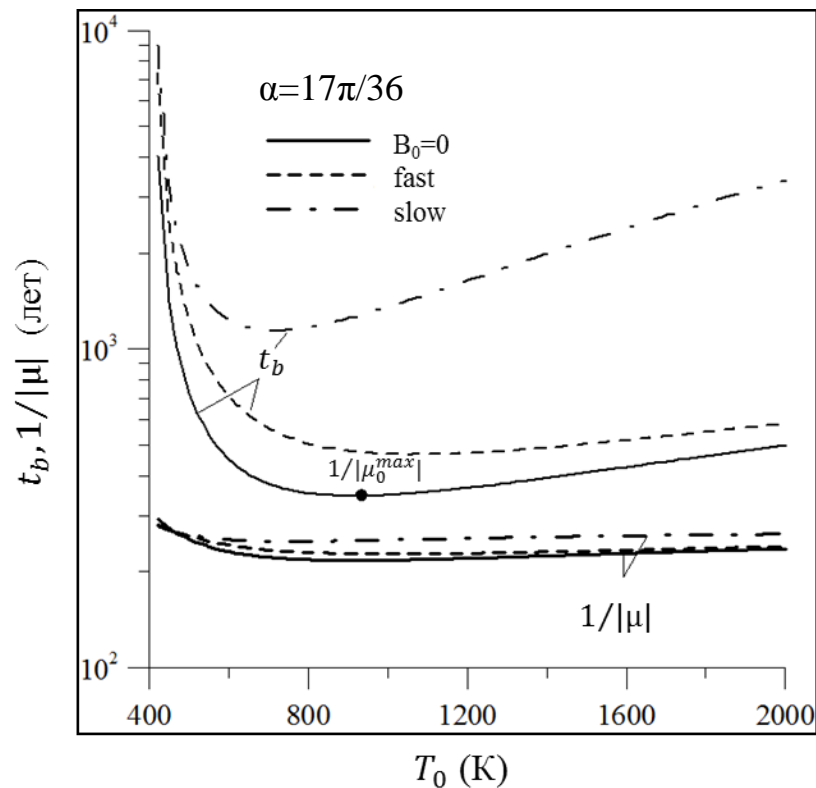
Из условий вертикальности касательной $\left. \frac{\partial x}{\partial u} \right|_t = 0$ и возникновения точки перегиба $\left. \frac{\partial^2 x}{\partial u^2} \right|_t = 0$

находим момент опрокидывания $t_b = -\frac{1}{\mu} \ln \left(1 + \frac{\mu}{\varepsilon} f' \right)$ и значение $f' = -\frac{L}{u_0} \sqrt{\frac{e}{2}}$.

- Результаты исследования (Краснобаев и Тагирова, 2019)

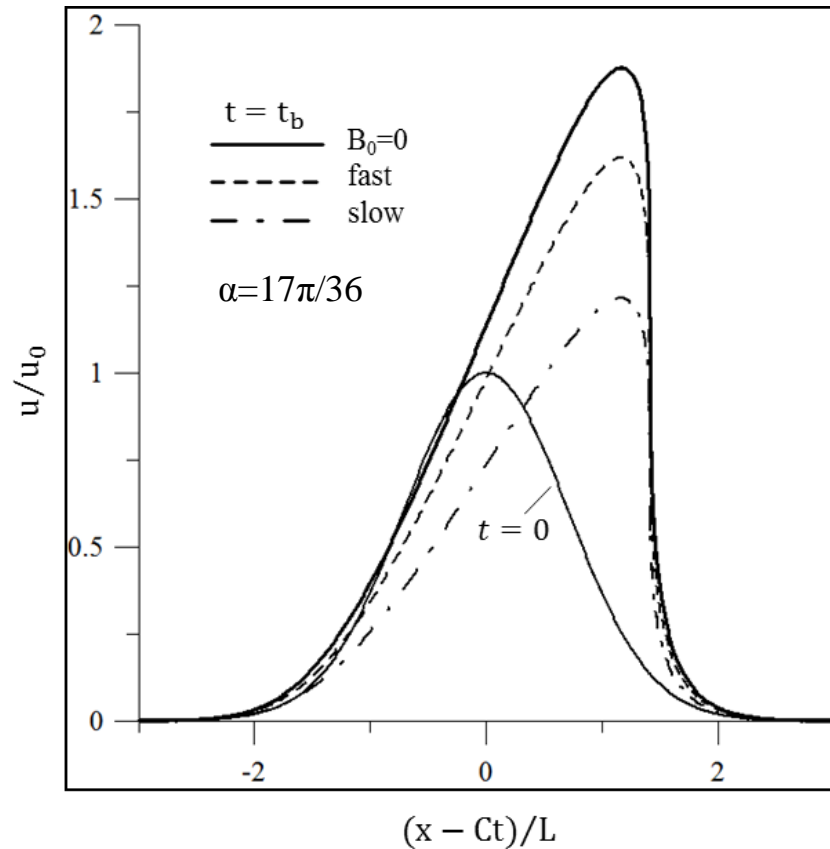
Время развития неустойчивости $1/|\mu|$
и момент опрокидывания волны t_b

Отношение момента t_b к времени $1/|\mu|$



Представлены результаты для быстрой (“fast”), медленной (“slow”) ударной волны и волны в отсутствие магнитного поля ($B_0 = 0$).

- Профиль волны в момент опрокидывания t_b



- Основные выводы

1. Проведен анализ развития изэнтропической моды тепловой неустойчивости в намагниченной плазме для атомарной зоны областей фотодиссоциации.
2. Показано, что с увеличением угла между направлением магнитного поля и распространением волн развитие возмущений и опрокидывание волн происходит медленнее.