

Экспериментальная постановка для исследования влияния переноса излучения на развитие неустойчивостей

Глазырин С.И., Шидловский Д.С.

3HH-2025

Эффекты излучения на развитие гидродинамических неустойчивостей



- Развитие гидродинамических неустойчивостей
 - Рэлея–Тейлора (PT)
 - Рихтмайера–Мешкова (РМ)
 - Кельвина–Гельмгольца (КГ)

определяется градиентами давления (плотности), тензором сдвиговых напряжений

- Перенос излучения приводит к перераспределению/потерям энергии
- Выравнивание температуры ⇒ выравнивание давления
 (-) стабилизация неустойчивостей
- Радиационные потери ⇒ изменения динамики слоёв (торможение)
 (+) усиление неустойчивостей
- Радиационные предпрогрев
 (±) различное влияние на неустойчивости

Лазерный термоядерный синтез



Типичное строение мишеней:

- Слой аблятора (внешний)
- Слой DT-льда
- Слой DT-газа (в центре)

- Лазерное излучение конвертируется в тепло и излучение, инициирующие динамику мишени
 - Для прямого облучения: $T_{
 m abl} \sim$ (1-5) кэВ
 - Непрямого облучения: $T_{\rm xray} \sim 300~{
 m sB}$
- Аблятор обычно допируют (Si, Ge) для снижения предпрогрева рентгеном
- Границы лёд–аблятор, абляционный фронт подвежены неустойчивостям
- Электронный теплоперенос один из доминирующих эффектов в мишенях
- Как излучение влияет на развитие неустойчивостей? (особенно для схем прямого облучения)
- Опыт NIF: эксперименты "high-foot" (больший прогрев мишени) дают больший выход из-за снижения роста неустойчивостей



Сверхновые

- Радиационно-доминированный слой формируется для сверхмощных сверхновых (SLSN) ($\tau \sim 1$)
- Для SLSN, которые важны для космологии, слой определяет кривые блеска



Радиативный слой как в сверхновых, так и в их остатках подвержен набору неустойчивостей

Сверхновые

- Радиационно-доминированный слой формируется для сверхмощных сверхновых (SLSN) ($\tau \sim 1$)
- Для SLSN, которые важны для космологии, слой определяет кривые блеска

Остатки сверхновых

- Радиативный слой формируется на поздних стадиях ($au \ll 1$)
- Остатки хорошо подходят для изучения низкоплотной плазмы
- Остатки естественные ускорители (слой играет в этом важную роль): источники космических лучей с энергией $E \lesssim 10^{15}$ эВ



Сверхновые

- Радиационно-доминированный слой формируется для сверхмощных сверхновых (SLSN) ($\tau \sim 1$)
- Для SLSN, которые важны для космологии, слой определяет кривые блеска

Остатки сверхновых

- Радиативный слой формируется на поздних стадиях ($au\ll 1$)
- Остатки хорошо подходят для изучения низкоплотной плазмы
- Остатки естественные ускорители (слой играет в этом важную роль): источники космических лучей с энергией $E \lesssim 10^{15}$ эВ



Сверхновые

- Радиационно-доминированный слой формируется для сверхмощных сверхновых (SLSN) ($\tau \sim 1$)
- Для SLSN, которые важны для космологии, слой определяет кривые блеска

Остатки сверхновых

- Радиативный слой формируется на поздних стадиях ($au \ll 1$)
- Остатки хорошо подходят для изучения низкоплотной плазмы
- Остатки естественные ускорители (слой играет в этом важную роль): источники космических лучей с энергией $E \lesssim 10^{15}$ эВ

Схемы для исследования радиационных эффектов в неустойчивостях

Использование стороннего источника излучения высокой мощности (Z-пинч)



Одна из сред является источником мощного излучения



Использование лазерного излучения для

- инициирования неустойчивой динамики мишени
- прогрева радиационным потоком из области лазерной короны



Схемы для исследования радиационных эффектов в неустойчивостях

Использование стороннего источника излучения высокой мощности (Z-пинч)



Одна из сред является источником мощного излучения



Использование лазерного излучения для

- инициирования неустойчивой динамики мишени
- прогрева радиационным потоком из области лазерной короны





Существующие эксперименты по радиационному влиянию

- Clayson et al "Counter-propagating radiative shock experiments on the Orion laser and the formation of radiative precursors" HEDP (2017)
- Rigon et al. "Hydrodynamic instabilities in a highly radiative environment" Phys. Plasmas (2022)
- Merlini et al. "Radiative cooling effects on reverse shocks formed by magnetized supersonic plasma flows" Phys. Plasmas (2023)
- Mishra et al. "On characterization of shock propagation and radiative preheating in x-ray driven high-density carbon foils" Phys. Plasmas (2023)

Постановка эксперимента: предложение



- Неустойчивость: РМ, 1-модовое возмущение
- Параметры лазера: $I=10^{14}~{\rm Bt/cm^2},$ $E_{\rm laser}\gtrsim 100~{\rm Дж}$
- Неустойчивая граница: СН-газ (Не, Ar) или СН-металл (Al)
- Слой Fe (0, 3, 10 мкм) регулирует радиационный прогрев
- Толщина CH (${\sim}100$ мкм) выбирается для выполнения условий сохранения динамики $M_{\rm CH}>M_{\rm Fe}$
- РМ неустойчива для всех значений A_t :

$$A_t = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \qquad \qquad \begin{array}{l} \mbox{Fas:} \ A_t^{(0)} < 0 \\ \mbox{Al:} \ A_t^{(0)} > 0 \end{array}$$

Постановка эксперимента: предложение



- Неустойчивость: РМ, 1-модовое возмущение
- Параметры лазера: $I=10^{14}~{\rm Bt/cm^2},$ $E_{\rm laser}\gtrsim 100~{\rm Дж}$
- Неустойчивая граница: СН-газ (Не, Ar) или СН-металл (Al)
- Слой Fe (0, 3, 10 мкм) регулирует радиационный прогрев
- Толщина CH (${\sim}100$ мкм) выбирается для выполнения условий сохранения динамики $M_{\rm CH}>M_{\rm Fe}$
- РМ неустойчива для всех значений A_t :

$$A_t = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \qquad \qquad \begin{array}{l} \mbox{Fas:} \ A_t^{(0)} < 0 \Rightarrow A_t^{(\mathrm{sw})} < 0 \\ \mbox{Al:} \ A_t^{(0)} > 0 \Rightarrow A_t^{(\mathrm{sw})} < 0 \end{array}$$

Постановка эксперимента



- Лазерное облучение инициирует УВ в СН
- Неустойчивость РМ развивается после прохождения ударной волной границы раздела
- Радиационный эффект: излучение из лазерной короны предпрогревает мишень перед приходом УВ
- Влияние предпрогрева зависит от состава мишени

Конфигурация 1: СН–АІ



• Расчёты по равновесной модели

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

 Толщина слоя Fe определяет степень предпрогрева, который инициирует динамику границы до прихода УВ

УВ инициирует развитие неустойчивости границы (классический РМ)



9

Конфигурация 1: СН-АІ



$$\dot{\eta} = k \Delta v A_t \eta_0, \qquad k = 2\pi/\lambda$$

- Скачок Δv одинаков для всех h
- Величина A_t на момент прохода УВ через границу растёт с h
- Сдвиговый тензор течения больше для меньших \boldsymbol{h}



- Тыльная сторона СН разлетается из-за предпрогрева
- Формируется спадающий профиль плотности
- УВ бегущая по этому профилю формирует плотный слой
- Ar поглощает сильнее He

В некоторых сверхновых радиативный слой распространяется по спадающему профилю плотности звёздного ветра. Неустойчивость этого слоя играет важную роль в формировании свечения сверхновой – критично для космологии



- Тыльная сторона СН разлетается из-за предпрогрева
- Формируется спадающий профиль плотности
- УВ бегущая по этому профилю формирует плотный слой
- Ar поглощает сильнее Не: выбор газового наполнения регулирует радиативный высвет

В некоторых сверхновых радиативный слой распространяется по спадающему профилю плотности звёздного ветра. Неустойчивость этого слоя играет важную роль в формировании свечения сверхновой – критично для космологии



Плотность (CH-Ar)

- Неустойчивость, вызванная начальными возмущениями, развивается перед слоем
- Слой не разрушается из-за малых времен эксперимента
- Радиационное охлаждение слоя слабо на данной стадии
- Данная постановка позволяет сформировать плотный слой с развивающейся неустойчивостью переднего фронта



Плотность (CH-Ar): расчёты с кинетикой ионизации (низкое разрешение)

- Неустойчивость, вызванная начальными возмущениями, развивается перед слоем
- Слой не разрушается из-за малых времен эксперимента
- Радиационное охлаждение слоя слабо на данной стадии
- Данная постановка позволяет сформировать плотный слой с развивающейся неустойчивостью переднего фронта
- Расчёты с кинетикой ионизации показывают близкую динамику



- Неустойчивость, вызванная начальными возмущениями, развивается перед слоем
- Слой не разрушается из-за малых времен эксперимента
- Радиационное охлаждение слоя слабо на данной стадии
- Ar поглощает сильнее Не: граница СН-Аг более неустойчива
- Ar поглощает сильнее Не: граница CH-Ar более неустойчива



- Неустойчивость, вызванная начальными возмущениями, развивается перед слоем
- Слой не разрушается из-за малых времен эксперимента
- Радиационное охлаждение слоя слабо на данной стадии
- Ar поглощает сильнее Не: граница CH-Ar более неустойчива
- Ar поглощает сильнее Не: граница CH-Ar более неустойчива

Заключение

- Представлена постановка для исследования влияния радиационного предпрогрева на неустойчивую границу
- Эффект излучения контролируется наполнением мишени и толщиной пластинки-фильтра
- Для АІ мишени развивается классический РМ, но с эффектами предпрогрева
- Для газового напонения формируется спадающий профиль плотности:
- ... формируется плотный слой
- ... неустойчивость развивается на переднем фронте слоя
- Эксперимент требует умеренных параметров лазера: $I\sim 10^{14}~{\rm Bt/cm^2},$ $E_{\rm laser}\gtrsim 100~{\rm Дж},~\tau\sim (3-5)$ нс
- При большем энерговложении можно достичь стадии радиативного охлаждения

Спасибо за внимание!