



ВНИИА
РОСАТОМ

Расчеты сжатия и зажигания мишени прямого облучения с учетом генерации горячих электронов

С. И. Глазырин^{1,2}, А. В. Брантов^{2,1}, М. А. Ракитина²,
К. Е. Городничев¹, В. Ю. Быченков^{2,1}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова

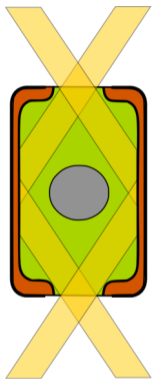
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

ЗНЧ-2023

31 мая 2023

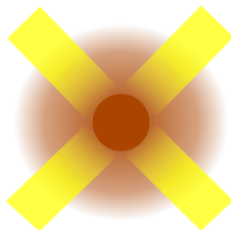
Цель: контролируемый поджиг термоядерного топлива

- Исследуются разные геометрии мишени и схемы облучения
- Сферическая геометрия – прямое и не прямое облучение
- NIF: цилиндрическая геометрия – не прямое (и прямое) облучение

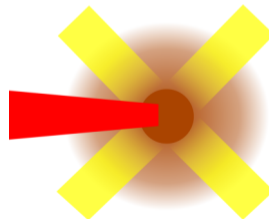


NIF

Непрямое
облучение
(цил. геом.)



Прямое облучение



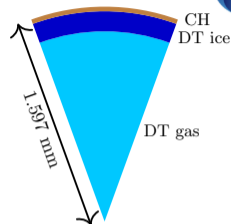
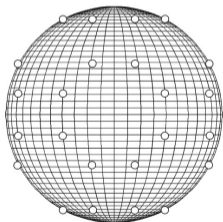
Быстрое зажигание

Российская установка мегаджоульного уровня

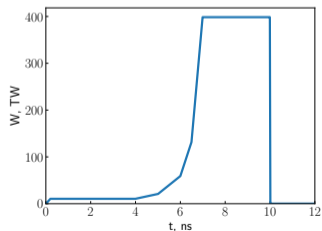


ВНИИА
РОСАТОМ

- В процессе строительства
- 192 луча
- $E = 2.6$ МДж, $\lambda = 0.51$ мкм
- Первичная схема: прямое облучение
Вторичная схема: не прямое облучение
- Сферическая геометрия облучения

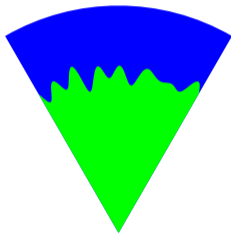


Мишень прямого облучения

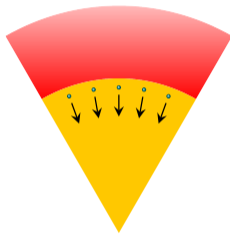


Гаранин УНФ (2011), Бельков и др. ЖЭТФ (2015)

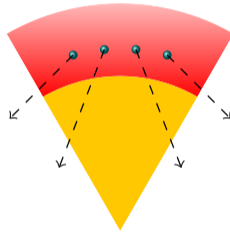
Гидродинамические
неустойчивости



Нелокальный
телоперенос



Горячие электроны от
ЛПН



Отражение лазерного
излучения



McKenty et al. PoP (2001), Craxton et al. PoP (2015), Guskov et al. PPCF (2019),
Zylstra et al. PoP (2020), Glazyrin et al. (2022), Bates et al. PoP (2023),

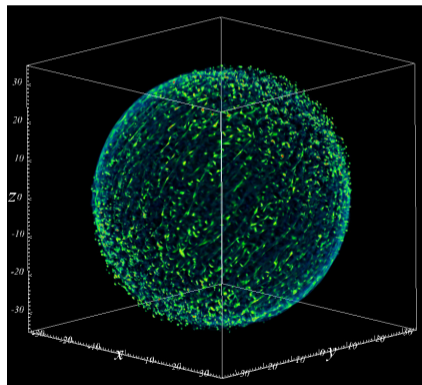
Для задач ЛТС:

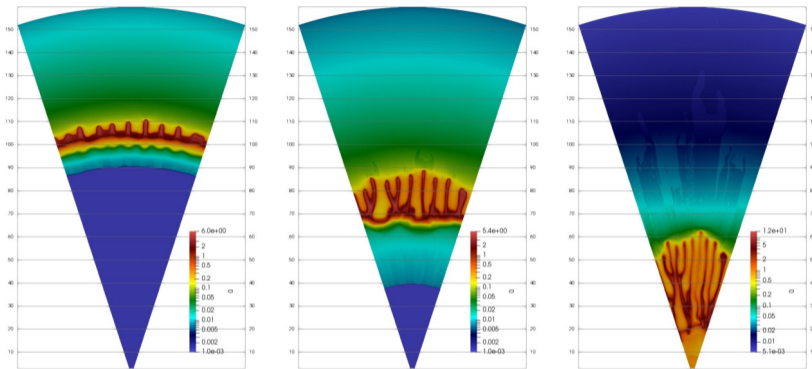
- 1Т/2Т гидродинамика плазмы
- Ядерные реакции
- Радиационная гидродинамика
- Модели ионизации
- Модели лазерного поглощения
- Модели плазменного теплопереноса (включая нелокальные)
- Электроны от лазер–плазменных неустойчивостей
- Нет динамики α -частиц

Glazyrin et al. HEDP (2020)

Urvachev et al. ApJS (2021)

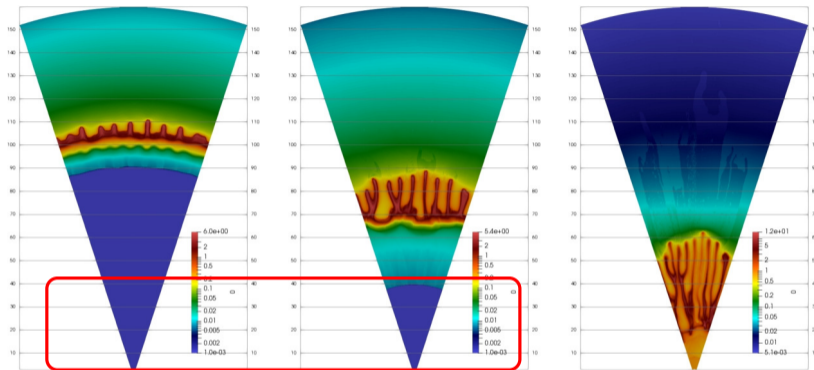
Код исходно разрабатывался для исследования процессов в сверхновых и их остатках





Гидродинамические неустойчивости являются основным фактором ограничивающим зажигание мишеней:

- Требуется высокая степень симметрии облучения и качество производства мишеней
- Конкретные требования определяются для каждой мишени индивидуально



Гидродинамические неустойчивости являются основным фактором ограничивающим зажигание мишеней:

- Требуется высокая степень симметрии облучения и качество производства мишеней
- Конкретные требования определяются для каждой мишени индивидуально

Горячие электроны в мишени

Эффект нелокальной теплопроводности

При больших пробегах электронов

$$\lambda_e \lesssim L_T = T_e / |\nabla T_e|$$

$$q_{\text{local}} = -\kappa \nabla T_e$$

$$q_e(x) = \int G(x, x') \nabla T_e(x') dx'$$

- Перенос определяется электронами с $E \sim (4 - 5)T$
- Поток энергии – градиентами температуры

Глазырин и др. Письма в ЖЭТФ (2022)

Электроны на хвостах функции распределения

Лазер–плазменные неустойчивости

- Вынужденное комбинационное рассеяние

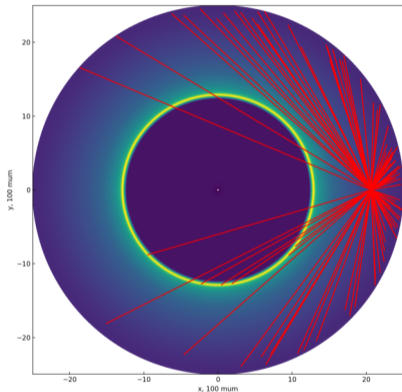
$$\omega_{\text{las}} = \omega_{\text{scat}} + \omega_{ek}$$

- Двуплазмонный распад

$$\omega_{\text{las}} = \omega_{ek} + \omega_{ek}$$

- Поток энергии – доля лазерного потока энергии
- Энергии электронов $\sim 30 - 100$ кэВ

Ускоренные электроны из короны



Прямолинейное распространение
электронов

Модель 1

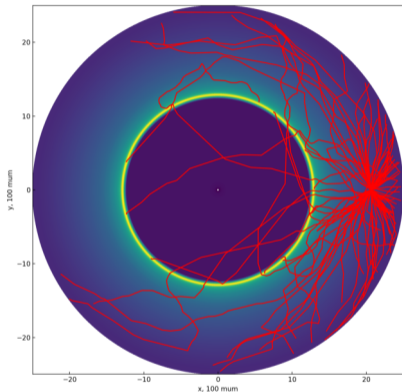
- Прямолинейное распространение электронов
- Модель энерговыделения: оценка через характерные частоты

Угловое распределение вылета электронов:

- Изотропное
- Узкий пучок вдоль лазерного луча

Пороги неуст. и потоки частиц:
Colaitis PRE (2015)

Глазырин и др. ЯФиИ (2022)



Распространение электронов с учётом множественных рассеяний

Модель 2

- Учёт множественных рассеяний
Теория Goudsmit–Saunderson

$$\lambda_{tr} \gg \lambda$$

- Взаимодействие: e-e, e-i, e-p
- Согласованная с сечениями модель энерговыделения

Угловое распределение вылета электронов:

- Изотропное
- Узкий пучок вдоль лазерного луча

Модель 2

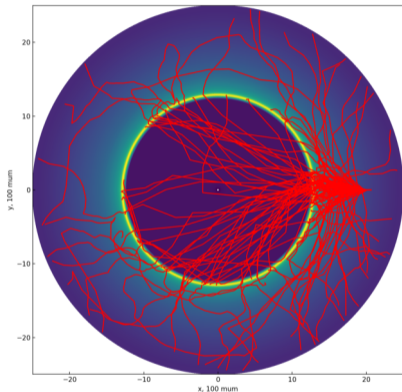
- Учёт множественных рассеяний
Теория Goudsmit–Saunderson

$$\lambda_{tr} \gg \lambda$$

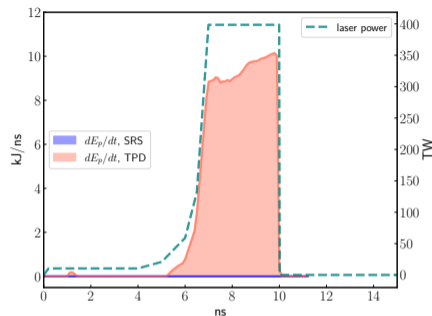
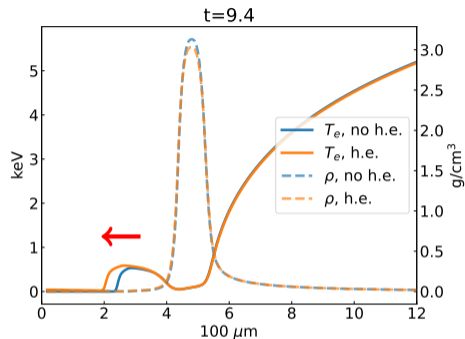
- Взаимодействие: e-e, e-i, e-p
- Согласованная с сечениями модель
энерговыведения

Угловое распределение вылета электронов:

- Изотропное
- Узкий пучок вдоль лазерного луча



Узкий пучок в сторону центра



		$E_{h.e.}$, кДж	Поглощ. %	Y_0/Y
	No e^-	-	-	1
Модель 1	Isotropic e^-	32	2.6%	1.1
	Narrow-beam	32	15%	3.1
Модель 2	Isotropic e^-	32	67%	1.4
	Narrow-beam	32	68%	1.4

- Электроны от TPD
- Предпрогрев слабо влияет на динамику волн
- Применимость модели генерации?

Заключение

- Прямое облучение является естественной схемой для сферической геометрии лучей
- Прямое облучение усиливает эффекты с горячими электронами:
- . . . нелокальный теплоперенос (горячая корона)
- . . . лазер–плазменные неустойчивости (ЛПН)
- Предварительные результаты показывают слабое влияние горячих электронов на зажигание мишени
- Необходима проверка порогов и эффективности генерации горячих электронов при параметрах сферической геометрии прямого облучения (+ эксперимент!)
- Какова доля отраженного излучения вследствие ЛПН?

Спасибо за внимание!