



ВНИИА
РОСАТОМ

Экспериментальная постановка для исследования эффекта нелокального теплопереноса в плазме

Глазырин С.И., Брантов А.В, Карпов С.А., Быченков В.Ю., Шидловский Д.С.

ЗНЧ-2025

Теплоперенос в плазме

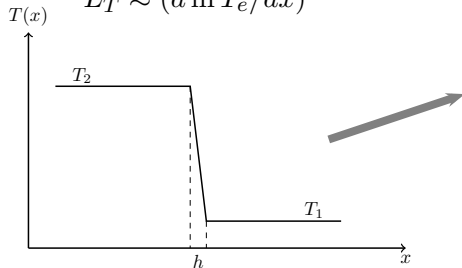
Закон Спитцера–Харма

$$q_e = -\kappa_e \nabla T_e$$

Локальный режим:

$$\lambda_{ei} < 0.06 Z^{-1/2} L_T$$

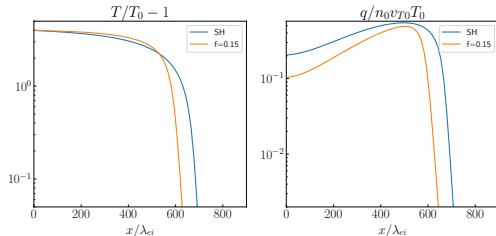
$$L_T \approx (d \ln T_e / dx)^{-1}$$



При больших потоках: ограничение теплопереноса

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{SH}} + \frac{1}{q_{lim}}$$

$$q_{lim} = f n_e v_{Te} T_e$$



$$T_2/T_1 = 5$$

Теплоперенос в плазме

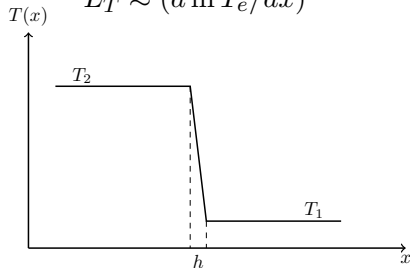
Закон Спитцера–Харма

$$q_e = -\kappa_e \nabla T_e$$

Локальный режим:

$$\lambda_{ei} < 0.06 Z^{-1/2} L_T$$

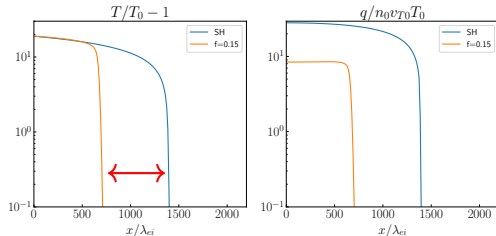
$$L_T \approx (d \ln T_e / dx)^{-1}$$



При больших потоках: ограничение теплопереноса

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{SH}} + \frac{1}{q_{lim}}$$

$$q_{lim} = f n_e v_{Te} T_e$$



При больших градиентах ограничение замедляет волну

$$T_2/T_1 = 20$$

Теплоперенос в плазме

Закон Спитцера–Харма

$$q_e = -\kappa_e \nabla T_e$$

Локальный режим:

$$\lambda_{ei} < 0.06 Z^{-1/2} L_T$$

$$L_T \approx (d \ln T_e / dx)^{-1}$$

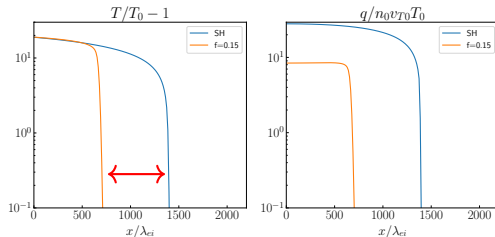
Локальные модели легко встраиваются в гидродинамику

$$\partial_t(\rho e_e) + \partial_\alpha(\rho e_e v_\alpha) + p_e \partial_\alpha v_\alpha = -\partial_\alpha q_{e,\alpha}$$

При больших потоках: ограничение теплопереноса

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{SH}} + \frac{1}{q_{lim}}$$

$$q_{lim} = f n_e v_{Te} T_e$$



При больших градиентах ограничение замедляет волну

$$T_2/T_1 = 20$$

Теплоперенос в плазме: режим нелокальности

Модель Фоккера–Планка (1D3V):

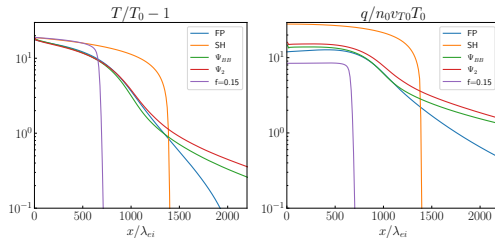
$$\lambda_{ei} \gtrsim 0.06 Z^{-1/2} L_T$$

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + v\mu \frac{\partial f_e}{\partial x} - \frac{eE_x}{m_e} \left\{ \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} (v^2 \mu f_e) + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial \mu} ((1 - \mu^2) f_e) \right\} = I_{ee} + I_{ei}.$$

Модели с ядром: $G(x - x') = \Psi(\eta(x, x'))/2a\lambda'_{ei}$

$$q_{nl}(x) = \int G(x - x') q_{SH}(x') dx'$$

- $\Psi_{\text{exp}} = \exp(-\eta), \quad \eta = |x - x'|/a\lambda'$
- $\Psi_{\text{BB}} = \frac{2}{\pi} \int \frac{dp \cos(\eta p)}{1 + p^{0.9}}$
- $\Psi_2 = \frac{\ln(1 + 1/\eta + \eta) \exp(-\eta)}{1.553}$



$$T_2/T_1 = 20$$

Глазырин С.И., Лыков В.А и др. ЖЭТФ (2022).

Теплоперенос в плазме: режим нелокальности

Модель Фоккера–Планка (1D3V):

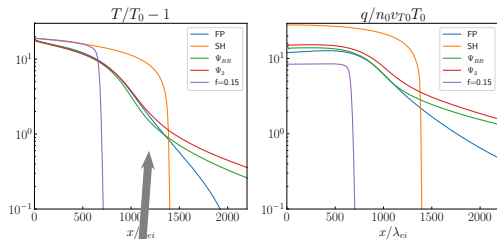
$$\lambda_{ei} \gtrsim 0.06 Z^{-1/2} L_T$$

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + v \mu \frac{\partial f_e}{\partial x} - \frac{e E_x}{m_e} \left\{ \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} (v^2 \mu f_e) + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial \mu} ((1 - \mu^2) f_e) \right\} = I_{ee} + I_{ei}.$$

Модели с ядром: $G(x - x') = \Psi(\eta(x, x'))/2a\lambda'_{ei}$

$$q_{nl}(x) = \int G(x - x') q_{SH}(x') dx'$$

- $\Psi_{exp} = \exp(-\eta), \quad \eta = |x - x'|/a\lambda'$
- $\Psi_{BB} = \frac{2}{\pi} \int \frac{dp \cos(\eta p)}{1 + p^{0.9}}$
- $\Psi_2 = \frac{\ln(1 + 1/\eta + \eta) \exp(-\eta)}{1.553}$



$$T_2/T_1 = 20$$

Глазырин С.И., Лыков В.А и др. ЖЭТФ (2022).

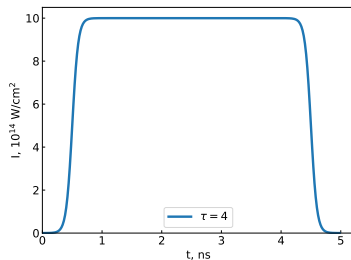
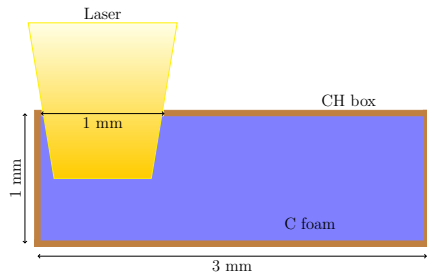
В отличие от моделей с ограничителем поток перераспределяется в пространстве

Существующие эксперименты по исследованию эффекта нелокальности

- Gregori et al. “Effect of Nonlocal Transport on Heat-Wave Propagation” Phys. Rev. Lett. (2004)
- Schurtz et al. “Revisiting Nonlocal Electron-Energy Transport in Inertial-Fusion Conditions” Phys. Rev. Lett. (2007)
- Falk et al. “Measurement of Preheat Due to Nonlocal Electron Transport in Warm Dense Matter” Phys. Rev. Lett. (2018)
- Henchen et al. “Observation of Nonlocal Heat Flux Using Thomson Scattering” Phys. Rev. Lett. (2018)

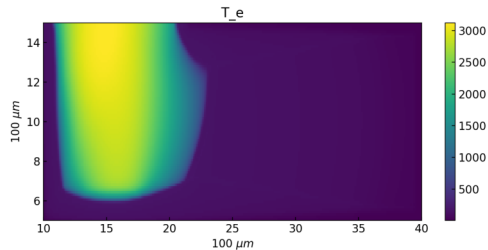
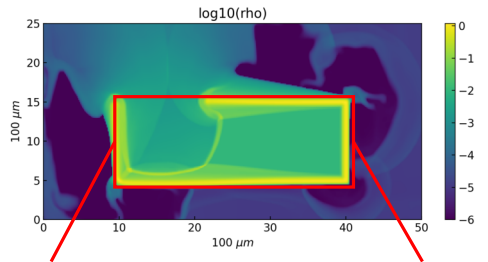
Нелокальная теплопроводность: схема эксперимента

- СН бокс (3×1 мм, $h=50$ мкм)
- Рабочее вещество
 - Аэрогель С
($\rho_0 = (3 - 20) \times 10^{-3}$ г/см³)
 - Газ Ar ($p = 1$ атм,
 $\rho_0 = 4.1 \times 10^{-3}$ г/см³)
- Лазерное излучение вводится поперёк $I_{\max} = 10^{15}$ Вт/см²,
 $\tau = 4$ нс, $E \sim 30$ кДж
- Расчёты - 2D геометрия
Код FRONT



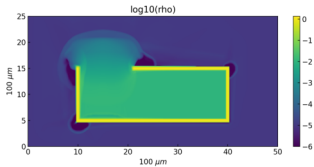
Нелокальная теплопроводность: схема эксперимента

- СН бокс (3×1 мм, $h=50$ мкм)
- Рабочее вещество
 - Аэрогель С
($\rho_0 = (3 - 20) \times 10^{-3}$ г/см³)
 - Газ Ar ($p = 1$ атм,
 $\rho_0 = 4.1 \times 10^{-3}$ г/см³)
- Лазерное излучение вводится поперёк $I_{\max} = 10^{15}$ Вт/см²,
 $\tau = 4$ нс, $E \sim 30$ кДж
- Расчёты - 2D геометрия
Код FRONT

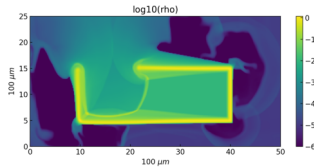


$t = 2$ нс

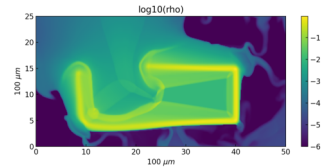
Динамика тепловой волны ($C, \rho_0 = 10 \text{ мг/см}^3$)



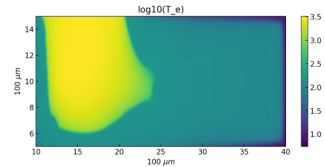
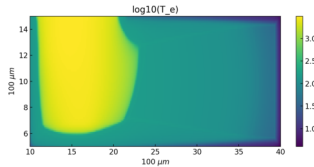
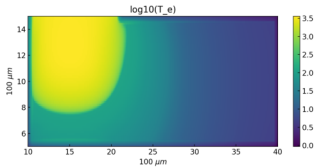
$t = 1 \text{ ns}$



$t = 2 \text{ ns}$

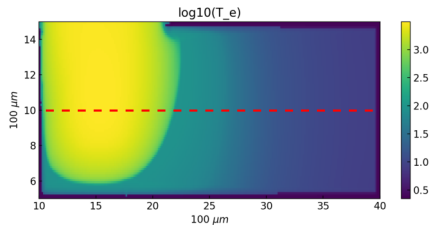


$t = 3 \text{ ns}$

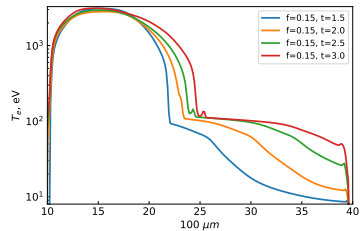


- К $t = 1.5 \text{ ns}$ область вдоль облучения прогревается целиком до $\sim 3 \text{ кэВ}$
- Тепловая волна распространяется вдоль оси цилиндра
- Разлёт стенок бокса перекрывает распространение тепловой волны

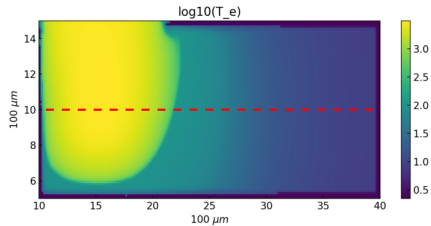
Динамика тепловой волны ($C, \rho_0 = 10 \text{ мг/см}^3$)



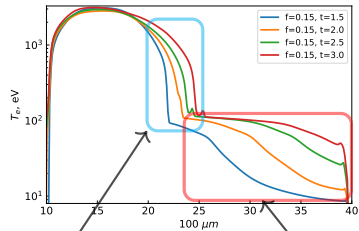
Гидродинамические расчёты (2D):



Динамика тепловой волны ($C, \rho_0 = 10 \text{ мг/см}^3$)



Гидродинамические расчёты (2D):

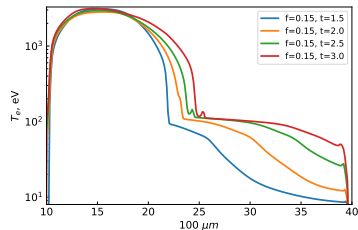
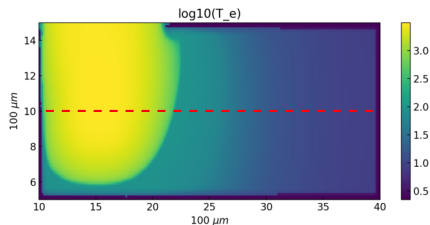


Спитцеровская
тепловая волна

Радиационный
предпрогрев

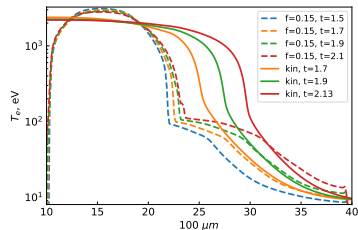
Динамика тепловой волны ($C, \rho_0 = 10 \text{ мг/см}^3$)

Гидродинамические расчёты (2D):



- Нелокальная тепловая волна распространяется значительно быстрее спитцеровской
- Предпрогрев определяется и радиационным переносом, но он ограничен по величине температурой излучения ($\lesssim 100 \text{ эВ}$)
- Горячие электроны от ЛПН могут привести к дополнительному разогреву (в процессе оценки)

Кинетические расчёты (ФП):



Допирование мишени: диагностика

Для диагностики тепловой волны удобно использовать K_α -линию элемента с умеренным Z :

- линия была выражена в спектрах
- потери на ионизацию/рассеяние на Z слабо влияли на распространение тепловой волны
- возможность допирования аэрогеля с низкой концентрацией $C = n_{\text{dop}}/n_C$.

Равновесная гидродинамика:

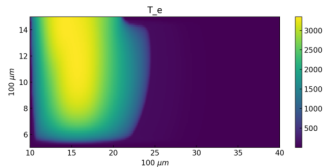
- 2Т-гидродинамика
- Многогрупповой радиационный перенос
- Ионизационное состояние: Саха
- УРС и пробеги подготовлены в табличном виде перед расчётом

Неравновесная гидродинамика:

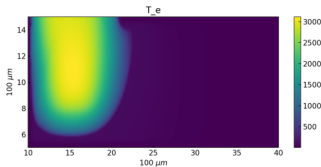
- 2Т-гидродинамика
- Многогрупповой радиационный перенос
- Кинетика ионизации: столкн./рад. процессы
- Расчёт УРС на лету основе ионизационного состояния
- Расчёт многогрупповых пробегов на лету на основе ионизационного состояния

Допирование мишени: влияние на распространение волны

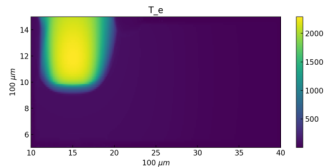
Элемент допирования: Si



$t = 1.5$ нс: $C_{\text{Si}} = 0$



$C_{\text{Si}} = 10^{-3}$

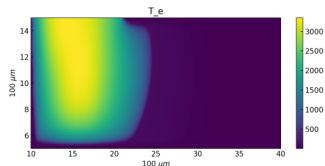


$C_{\text{Si}} = 10^{-2}$

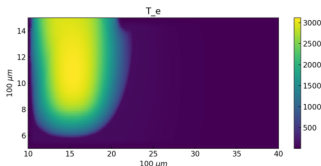
- Результаты неравновесных расчётов близки к равновесным при $C = 0$
- Наличие малой доли Si значительно влияет на формирование прогретой области в неравновесных расчётах: ограничение на степень допирования $C_{\text{Si}} < 10^{-2}$
- Оптимальное значение: $C_{\text{Si}} = 10^{-3}$
- Можно использовать материал с близким Z : Al
- Формирование прогретой области подходит для верификации кинетики ионизации

Допирование мишени: влияние на распространение волны

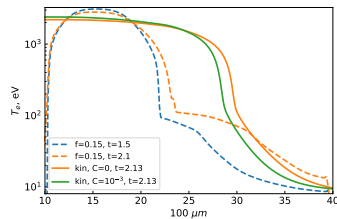
Элемент допирования: Si



$t = 1.5$ нс: $C_{Si} = 0$



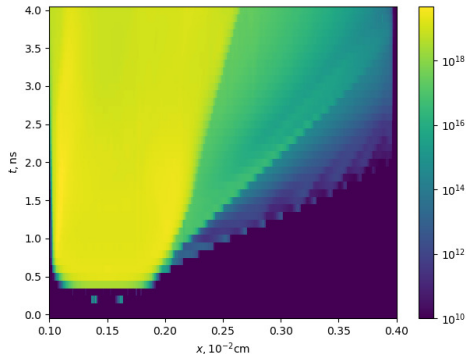
$C_{Si} = 10^{-3}$



Кин. расчёты

- Результаты неравновесных расчётов близки к равновесным при $C = 0$
- Наличие малой доли Si значительно влияет на формирование прогретой области в неравновесных расчётах: ограничение на степень допирования $C_{Si} < 10^{-2}$
- Оптимальное значение: $C_{Si} = 10^{-3}$
- Можно использовать материал с близким Z : Al
- Формирование прогретой области подходит для верификации кинетики ионизации
- $C_{Si} = 10^{-3}$ слабо влияет на нелокальную тепловую волну

Свечение



$$\nu = 2 - 3 \text{ кэВ}$$
$$\rho = 10^{-2} \text{ г/см}^3, C_{\text{Si}} = 10^{-3}$$

- Расчёт свечения: постобработка модулем радиационного переноса кода FRONT, рассчитывается поток в Y-направлении. Учитывается поглощение стенками бокса.
- **Представлен только расчёт со спитцеровской волной**
- Свечение в рентгеновском диапазоне: положение фронтов
 - спитцеровской волны
 - радиационного прогрета
- Свечение K_{α} , учёт нелокального прогрета – в проработке

Заключение

- Представлена экспериментальная постановка для исследования теплопереноса в режиме нелокальности потока
- Использование низкоплотной мишени, углеродного аэрогеля $\rho \sim 10^{-2} \text{ г/см}^3$, позволяет тепловой волне распространяться на макроскопических масштабах $\sim 1 \text{ мм}$
- Лазерный разогрев мишени до 3 кэВ позволяет запустить тепловую волну, доминирующую над радиационным прогревом
- По расчётам нелокальная волна распространяется значительно быстрее спитцеровской
- Мишень допируется Si для диагностики положения волны: $n_{\text{Si}}/n_{\text{C}} = 10^{-3}$ (наличие допирования приводит к влиянию неравновесности по ионизации)
- Постановка подходит для исследования тепловых волн в плазме

Спасибо за внимание!