



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Исследование спектров неравновесного линейчатого излучения многозарядных ионов в пикосекундной лазерной плазме

Е.С. Борисов, Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов, С.Д. Девятков,
А.В. Емельянов, П.А. Лобода, Д.С. Носуленко, А.А. Овечкин,
А.В. Потапов, Е.А. Пряхина, Н.Ю. Титаренко

Зачем нужны данные о теплофизических свойствах веществ?



Система уравнений радиационной газовой динамики в приближении локального термодинамического равновесия вещества (ЛТР)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{сохранение массы})$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P \quad (\text{сохранение импульса})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\nabla \left[\rho \mathbf{v} \left(\frac{v^2}{2} + \varepsilon + \frac{P}{\rho} \right) + \mathbf{q} \right] \quad (\text{сохранение энергии})$$

$$\mathbf{q} = -\kappa_e \nabla T + \mathbf{q}_{\text{rad}} \quad \text{— теплопроводность}$$

$$\mathbf{q}_{\text{rad}} = \int_0^\infty d\omega \int \Omega I(\omega, \Omega) d\Omega \quad \text{— фотонная теплопроводность}$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\omega, \Omega)}{\partial t} + (\Omega \nabla) I(\omega, \Omega) = -\kappa(\omega) [I(\omega, \Omega) - I_P(\omega)] - \quad \text{— уравнение переноса}$$

$$-\kappa_s \left[I(\omega, \Omega) - \int K(\Omega, \Omega') I(\omega, \Omega') d\Omega' \right]$$

Замыкающие соотношения

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T), \quad P = P(\rho, T) \quad \text{— уравнение состояния (УРС)}$$

$$\kappa_e = \kappa_e(\rho, T) \quad \text{— электронная теплопроводность}$$

$$\kappa(\omega) = \kappa(\omega, \rho, T) \quad \text{— коэффициент поглощения фотонов}$$

Когда есть ЛТР?

- Высокие ρ и/или низкие T (столкновительные процессы важнее радиационных) или
- Равновесное планковское поле излучения
 - от внешнего источника или
 - собственное излучение тела с большой оптической толщиной $\kappa(\omega) L$

таблицы, которые можно
рассчитать заранее

Что будет, если нет ЛТР?

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P$$

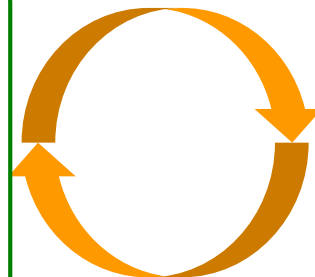
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\nabla \left[\rho \mathbf{v} \left(\frac{v^2}{2} + \varepsilon + \frac{P}{\rho} \right) + \mathbf{q} \right]$$

$$\mathbf{q} = -\kappa_e \nabla T_e + \mathbf{q}_{\text{rad}}$$

$$\mathbf{q}_{\text{rad}} = \int_0^{\infty} d\omega \int \Omega I(\omega, \Omega) d\Omega$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\omega, \Omega)}{\partial t} + (\Omega \nabla) I(\omega, \Omega) = -\kappa(\omega) I(\omega, \Omega) +$$

$$+j(\omega) - \kappa_s \left[I(\omega, \Omega) - \int K(\Omega, \Omega') I(\omega, \Omega') d\Omega' \right]$$



температура свободных электронов

$$\varepsilon = \varepsilon[\rho, T_e, U(\omega)], \quad P = P[\rho, T_e, U(\omega)]$$

$$\kappa_e = \kappa_e[\rho, T_e, U(\omega)]$$

$$\kappa(\omega) = \kappa[\omega, \rho, T_e, U(\omega)]$$

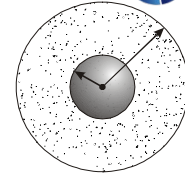
$$j(\omega) = j[\omega, \rho, T_e, U(\omega)]$$

зависят от решения уравнения переноса для конкретной задачи, в общем случае нельзя рассчитать заранее

Задача усложняется, так как всё становится взаимосвязанным.

Но такие задачи имеют прикладное значение, и их тоже нужно уметь решать

Как мы моделируем неравновесную плазму?



1. Неравновесная модель среднего атома

- Одноцентровое приближение, приближение сферической симметрии

$$\Psi_{\epsilon l m}(\mathbf{r}) = \frac{R_{\epsilon l}(r)}{r} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

- Приближение самосогласованного поля

$$R_{\epsilon l}''(r) + 2 \left[\frac{m_e}{\hbar^2} (\epsilon - V(r)) - \frac{l(l+1)}{2r^2} \right] R_{\epsilon l}(r) = 0 \quad \longrightarrow \quad n_e(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \sum_{\epsilon l} N_{\epsilon} R_{\epsilon l}^2(r)$$

$$V(r) = -\frac{Z e^2}{r} + e^2 \int \frac{n_e(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} + V_{xc}(n_e(r))$$

- Приближение одной эффективной конфигурации электронов со средними (нецелыми) числами заполнения оболочек

$$\frac{dN_i}{dt} = -N_i L_i + (g_i - N_i) S_i - \text{уравнения радиационно-столкновительного баланса}$$

2. Построение набора электронных конфигураций \longrightarrow Расчёт оптических свойств

- Приближение биномиального распределения вероятностей конфигураций

...

Много приближений \longrightarrow Нужна экспериментальная проверка

Как моделировать экспериментальные спектры излучения?

I подход. Приближение однородного оптически тонкого слоя

- Разумное приближение, т.к. мишень в обкладках
- $T_e = \text{const}$ – из сравнения $[I(\text{Ly}_\alpha)/I(\text{He}_\alpha)]_{\text{расч}}$ и $[I(\text{Ly}_\alpha)/I(\text{He}_\alpha)]_{\text{эксп}}$
- $\rho = \text{const}$ – из сравнения абсолютных значений расчётной и экспериментальной интенсивности

Диагностика
состояния
мишени

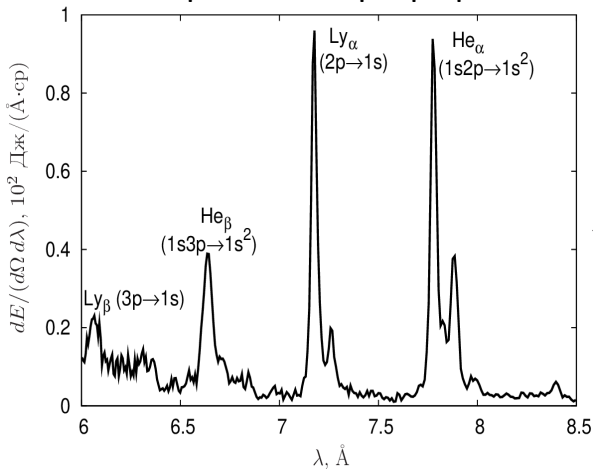
$$\kappa(\omega) L \ll 1 \Rightarrow U(\omega) \ll U_P(\omega)$$

$$\kappa, j[\omega, \rho, T_e, U(\omega)] \approx \kappa, j[\omega, \rho, T_e, 0]$$

можно рассчитать
заранее (до решения
уравнения переноса)

Нужно оценить экспериментальную интенсивность

Измерено спектрографом



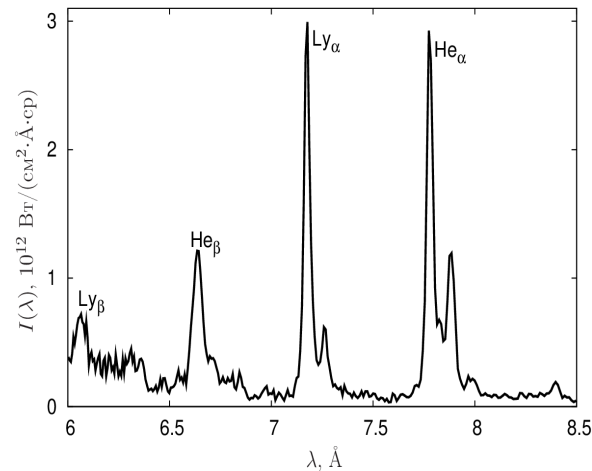
1 мкм В + 0.1 мкм Аl + 1 мкм В
 $I_{\text{лаз}} = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ Вт/см}^2$

$$I(\lambda) \approx \frac{1}{S_{\text{фок}} \tau_{\text{РИ}}} \frac{dE}{d\lambda d\Omega} \approx \frac{I_{\text{лаз}} \tau_{\text{лаз}}}{E_{\text{лаз}} \tau_{\text{РИ}}} \frac{dE}{d\lambda d\Omega}$$

$$I_{\text{лаз}} = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ Вт/см}^2, \quad \tau_{\text{лаз}} = 1 \text{ пс}$$

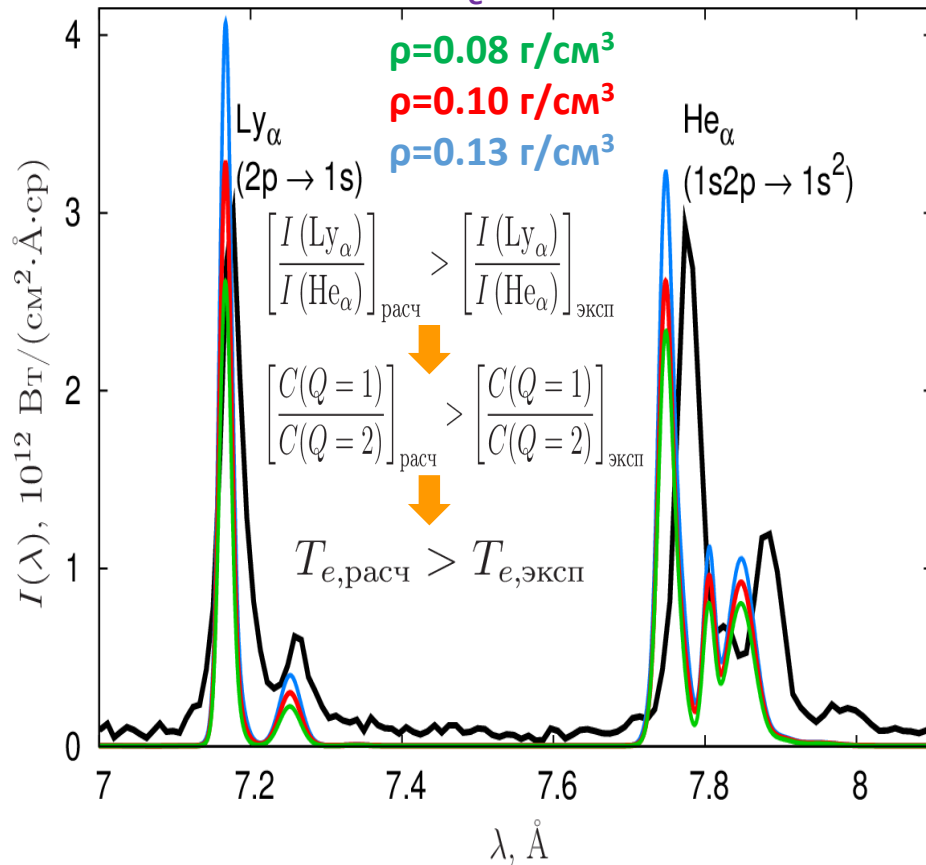
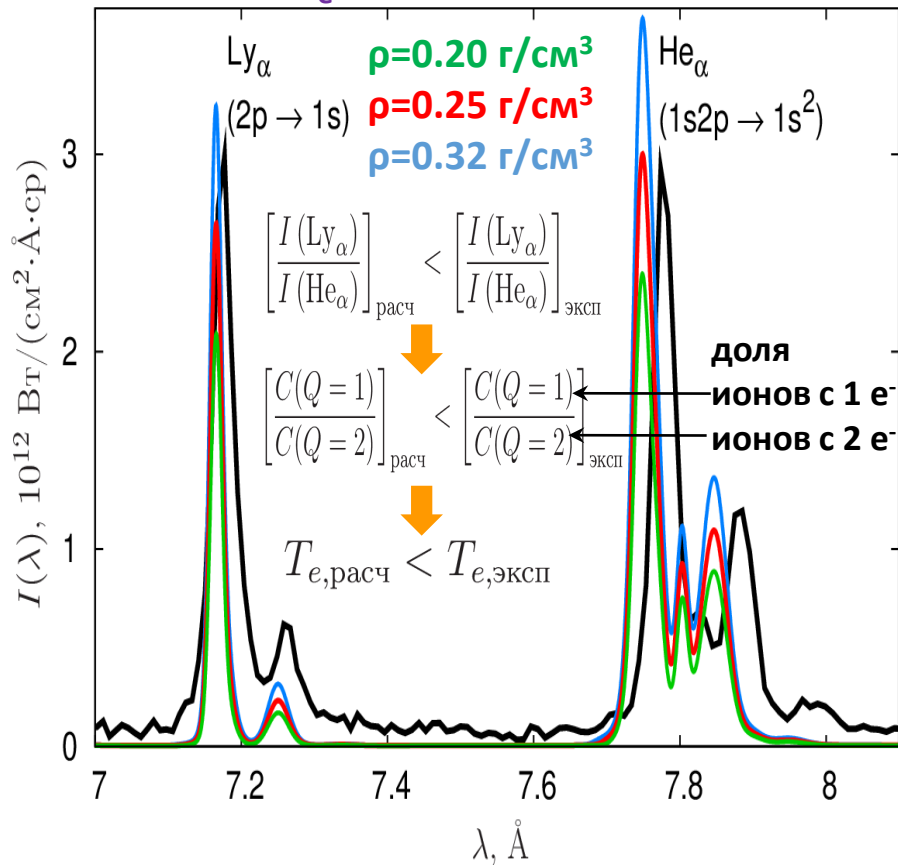
$$E_{\text{лаз}} = 21.7 \text{ Дж}, \quad \tau_{\text{РИ}} = 34 \text{ пс}$$

измерено стрик-камерой



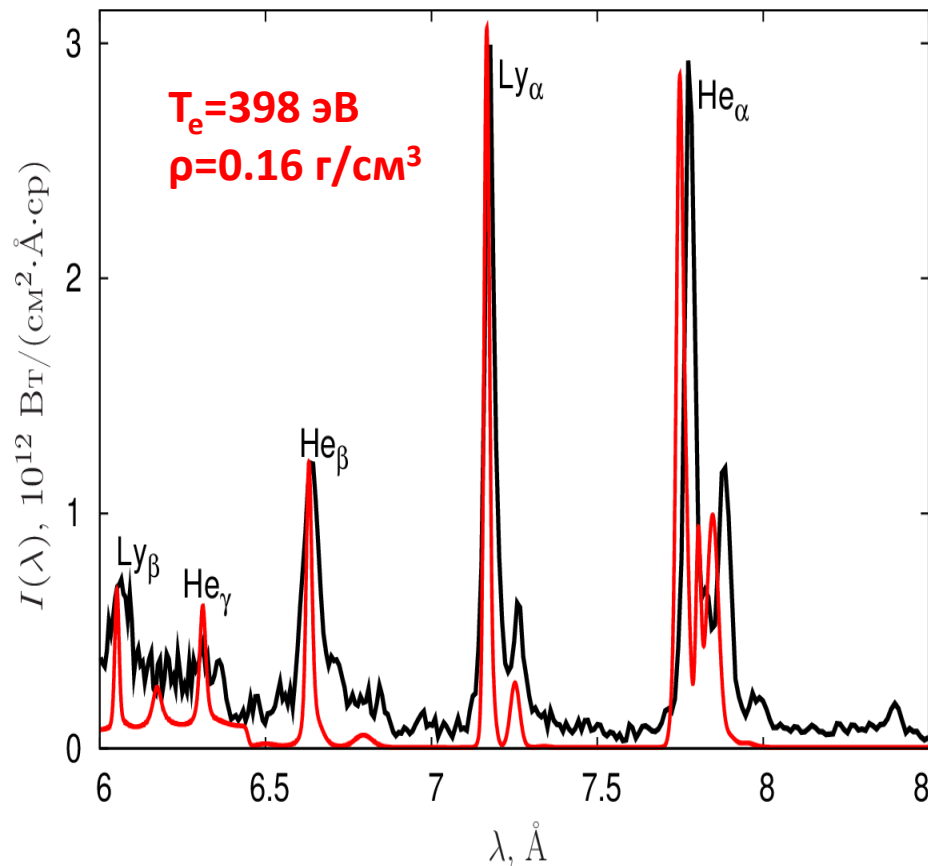
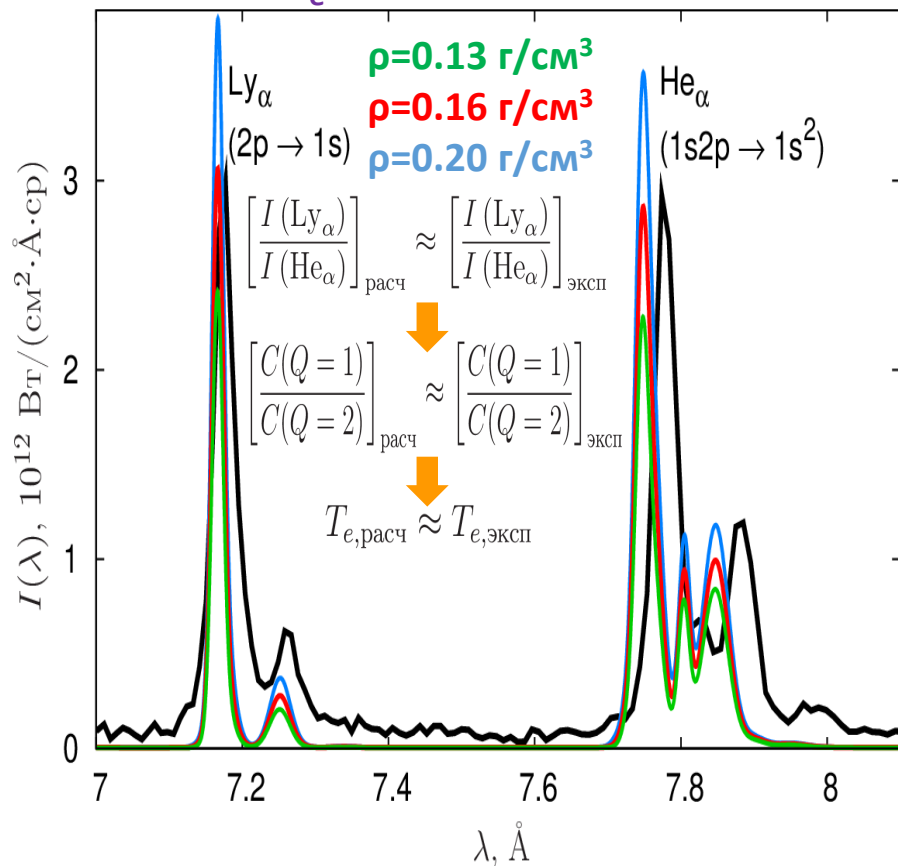
Эксперимент vs расчёт в приближении оптически тонкого слоя

$T_e = 355$ эВ 1 мкм В + 0.1 мкм Al + 1 мкм В, $I_{\text{лаз}} = 2.3 \cdot 10^{17}$ Вт/см² $T_e = 447$ эВ



Эксперимент vs расчёт в приближении оптически тонкого слоя

$T_e = 398$ эВ 1 мкм В + 0.1 мкм Al + 1 мкм В, $I_{\text{лаз}} = 2.3 \cdot 10^{17}$ Вт/см²



Как моделировать экспериментальные спектры излучения?

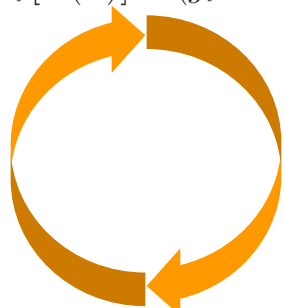


РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

II подход. Согласованное решение уравнения переноса и уравнений радиационно-столкновительного баланса для однородного слоя

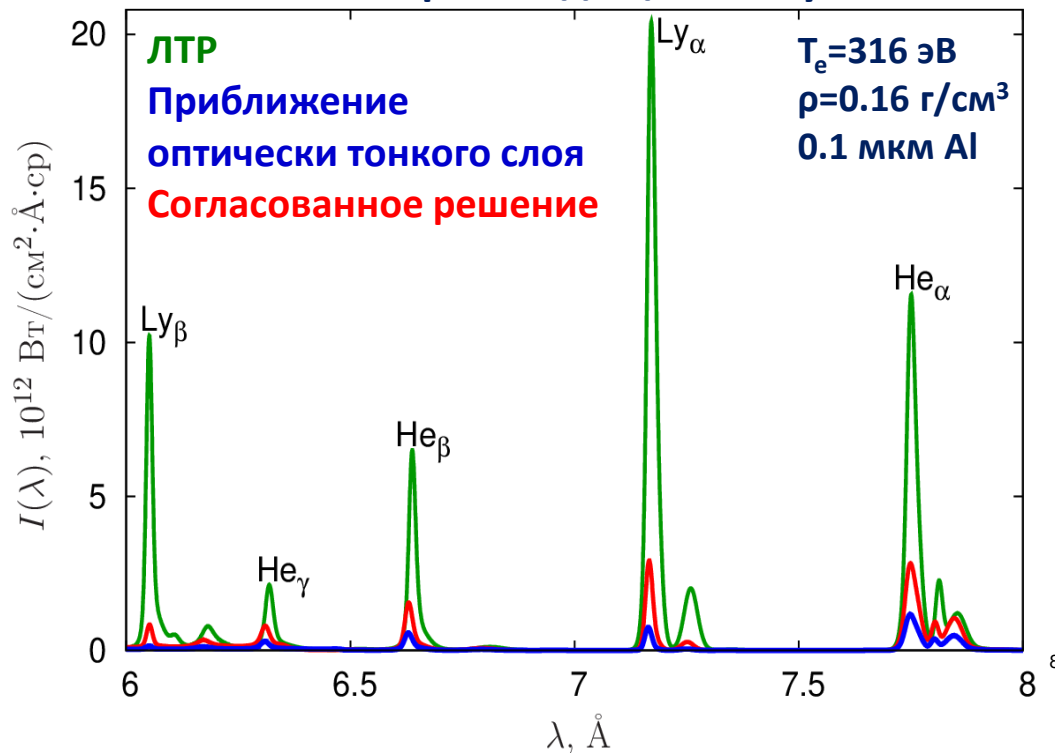
Влияние неравновесности ионного состава на спектр выходящего излучения

$$\frac{dN_i}{dt} = -N_i L_i [U(\omega)] + (g_i - N_i) S_i [U(\omega)] = 0$$



$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\omega, \Omega)}{\partial t} + (\Omega \nabla) I(\omega, \Omega) = -\kappa(\omega, \mathbf{N}) I(\omega, \Omega) + j(\omega, \mathbf{N}) - \kappa_s \left[I(\omega, \Omega) - \int K(\Omega, \Omega') I(\omega, \Omega') d\Omega' \right]$$

$$U(\omega) = \frac{1}{c} \int I(\omega, \Omega) d\Omega$$

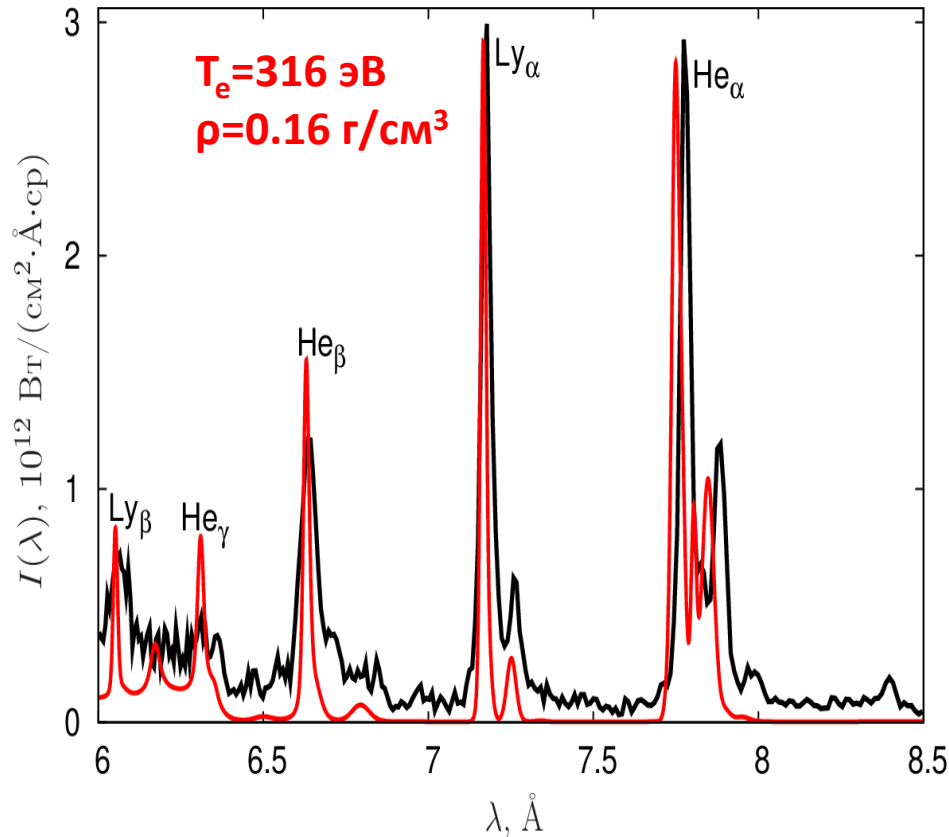
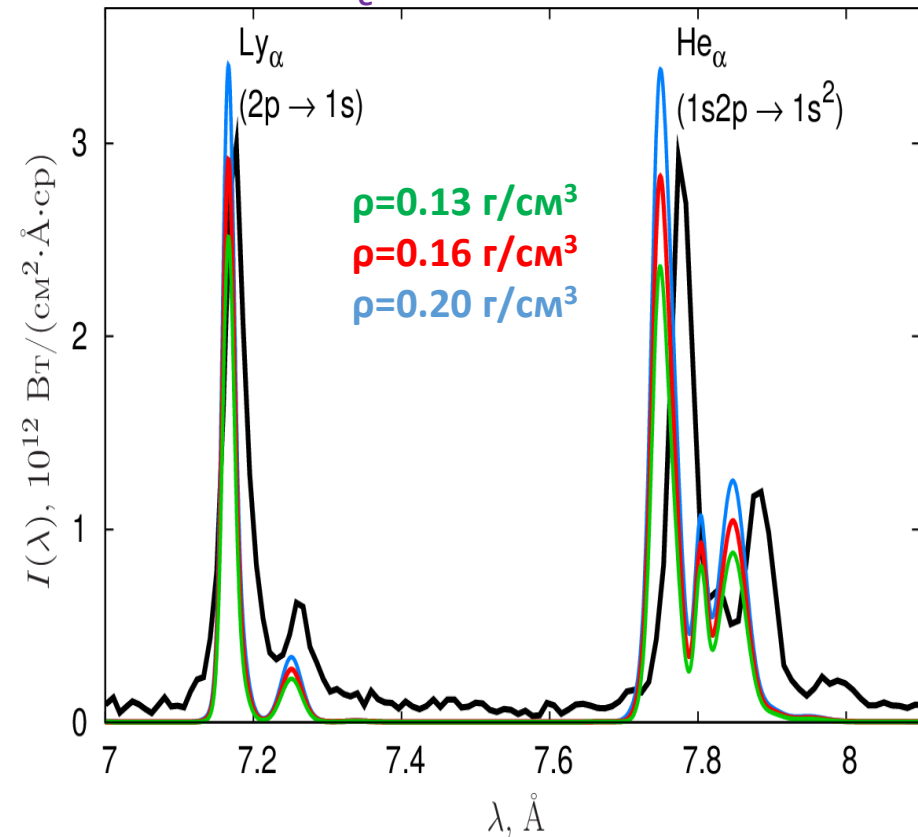


Эксперимент vs расчёт с согласованным решением уравнения переноса и уравнений радиационно-столкновительного баланса

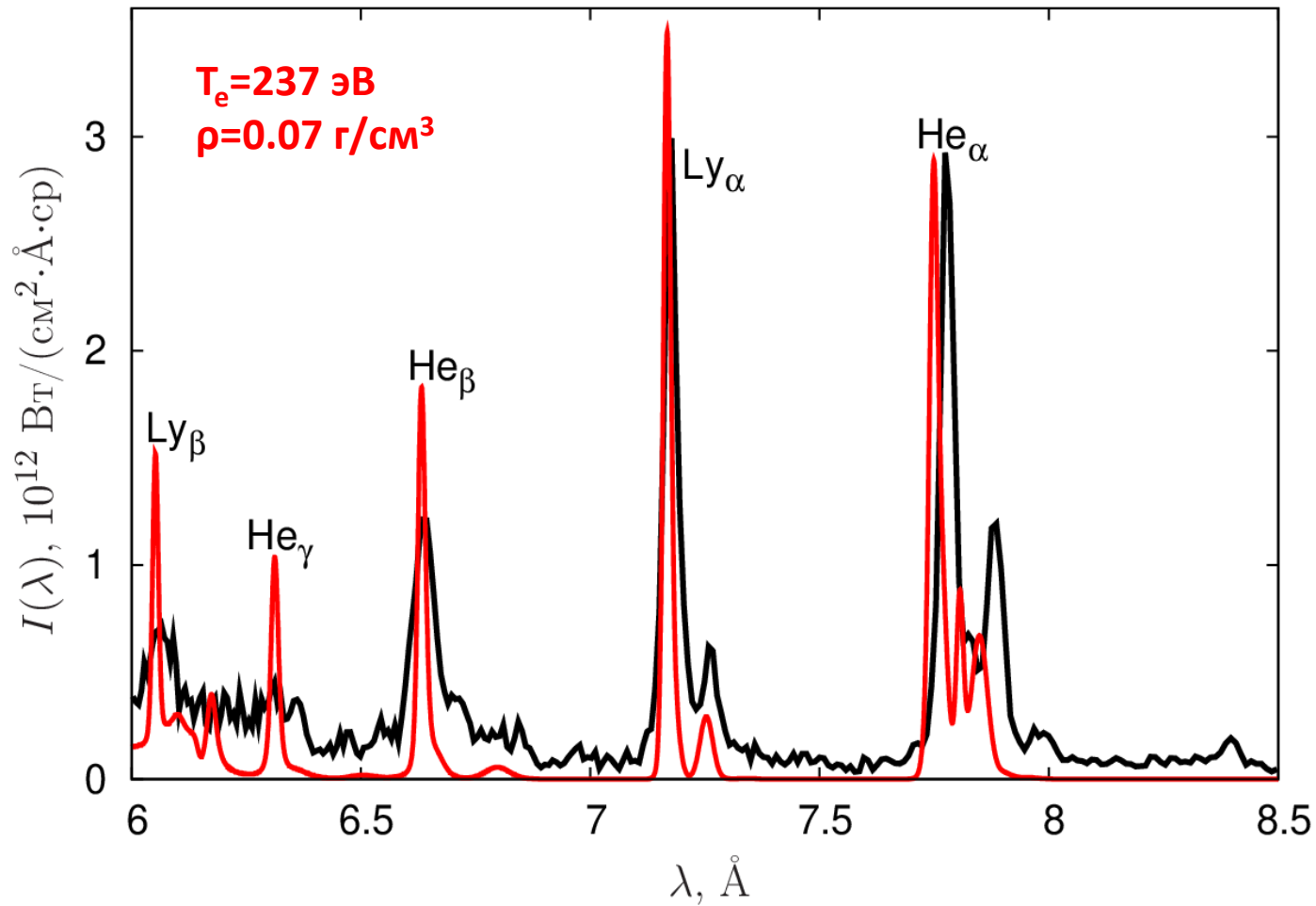


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

$T_e = 316$ эВ



Эксперимент vs расчёт в приближении ЛТР



Температура свободных электронов в мишени на стадии излучения

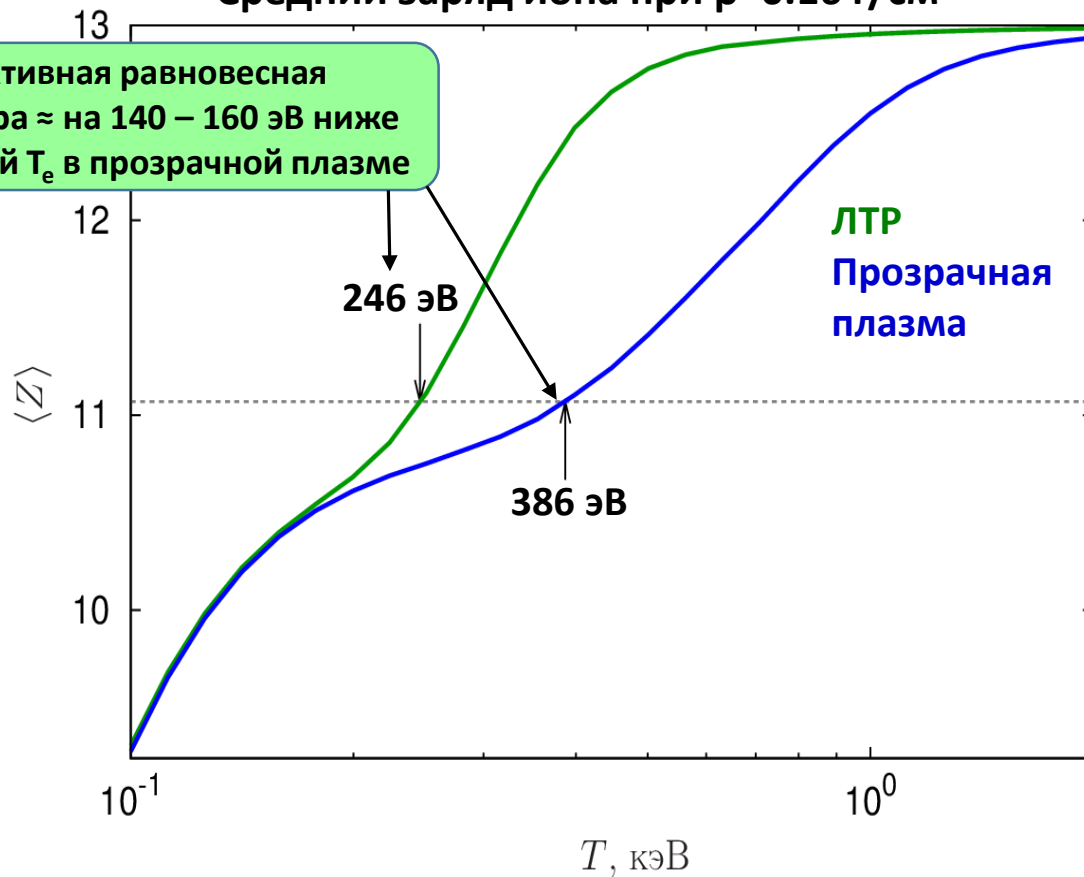
Средний заряд иона при $\rho=0.16 \text{ г/см}^3$

Эффективная равновесная температура \approx на 140 – 160 эВ ниже фактической T_e в прозрачной плазме

ЛТР:
 $\approx 240 \text{ эВ}$

Приближение оптически тонкого слоя:
 $\approx 400 \text{ эВ}$

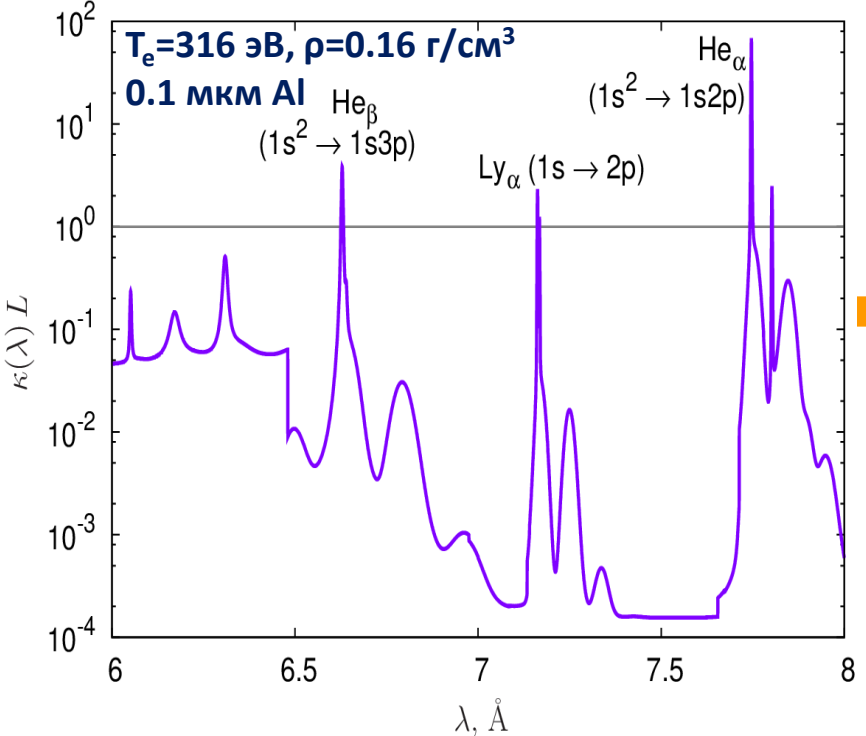
Согласованное решение уравнения переноса и уравнений радиационно-столкновительного баланса:
 $\approx 320 \text{ эВ}$



Можно ли рассчитать оптические коэффициенты мишени,

- не считая её оптически тонкой,
- не используя приближение ЛТР,
- не решая уравнение переноса?

Оптическая толщина мишени



Приближение оптически толстых линий

переходов $1s \rightarrow 2p, 1s \rightarrow 3p$

- Скорости радиационных процессов зависят от плотности энергии излучения $U(\omega)$ в линиях
- Для оптически толстой линии $U(\omega)$ определяется отношением сечений поглощения и излучения.

- Эти сечения неравновесные $\Rightarrow U(\omega) \neq$ планковской плотности энергии:

$$U(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{\sigma_{\beta\alpha}^{\text{em}} / \sigma_{\alpha\beta}^{\text{abs}}}{1 - \sigma_{\beta\alpha}^{\text{em}} / \sigma_{\alpha\beta}^{\text{abs}}}$$

- В нашей модели $\frac{\sigma_{\beta\alpha}^{\text{em}}}{\sigma_{\alpha\beta}^{\text{abs}}} = \frac{N_{\beta} (g_{\alpha} - N_{\alpha})}{N_{\alpha} (g_{\beta} - N_{\beta})}$

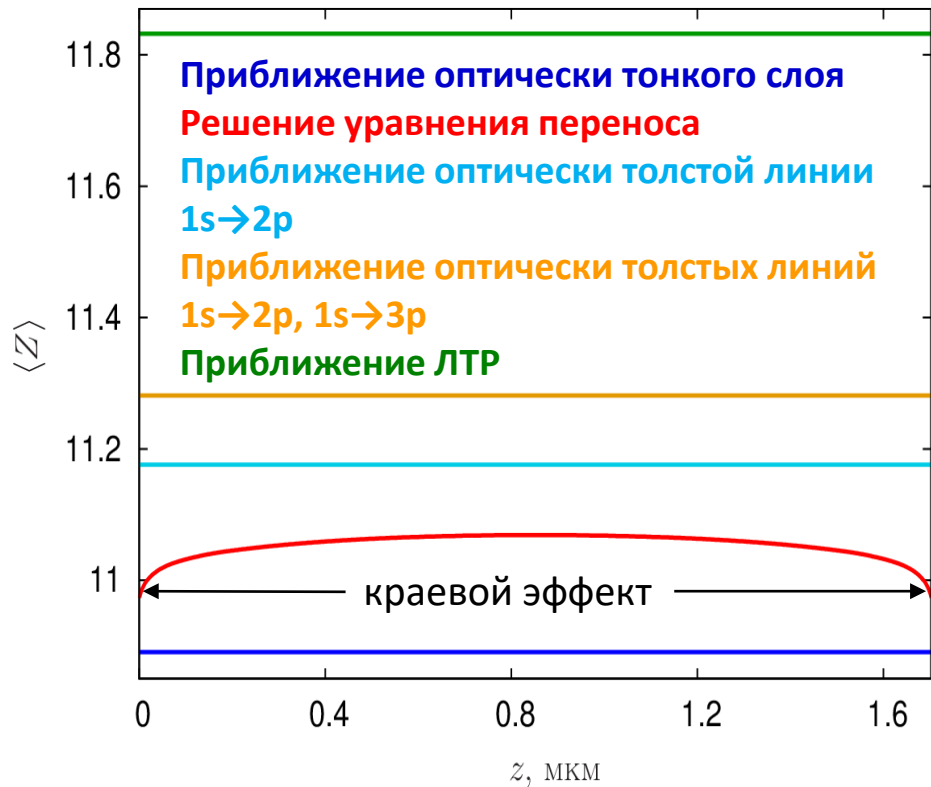
Приближение оптически толстых линий $1s \rightarrow 2p$, $1s \rightarrow 3p$ vs

Приближение оптически тонкого слоя vs

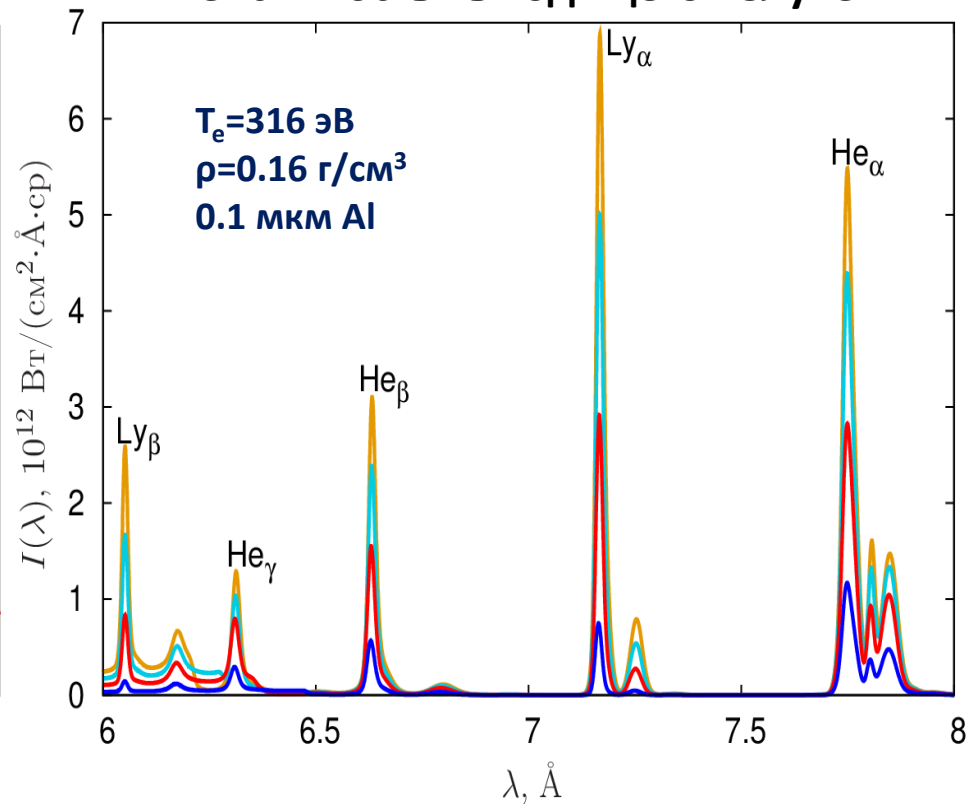


Решение уравнения переноса с учётом неравновесности ионного состава

Средний заряд ионов в мишени



Интенсивность выходящего излучения



Как моделировать экспериментальные спектры излучения?

III подход

1D расчёт воздействия лазерного излучения на мишень в приближении ЛТР



$$T_e(z, t), \quad \rho(z, t)$$



Согласованное решение уравнения переноса и уравнений радиационно-столкновительного баланса для неоднородных слоёв на различные моменты времени



Сравнение с экспериментом (без подгоночных параметров)

Выводы

1. В РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся экспериментальные и теоретические исследования теплофизических свойств высокотемпературной плазмы
2. Измерены спектры излучения алюминиевых мишеней, облучённых мощными пикосекундными лазерными импульсами, которые
 - несут важную информацию о состоянии мишеней
 - позволяют тестировать модели расчёта оптических свойств неравновесной плазмы и модели взаимодействия лазерного излучения с веществом