

ФГУП "ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ им. Н.Л.Духова"

Влияние пространственных и временных масштабов в короне на взаимодействие лазера с плазмой

С. И. Глазырин $^{1,3},$ А. В. Брантов $^{2,1},$ В. Ю. Быченков 2,1

¹Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова ²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН ³Институт теоретической и экспериментальной физики НИЦ КИ

Снежинск – 2019

Лазерный термоядерный синтез



Непрямое облучение

Цель: поджиг термоядерного топлива

Необходимо согласование многих параметров системы:

- специальные схемы облучения
- многослойные мишени
- профили лазерного импульса



 $E \sim M_{\star}$

Прямое облучение



Механизмы поглощения и рассеяния

Обратнотормозной механизм:

$$x_{\rm abs} = \frac{1}{c} \frac{\omega_{\rm pe}^2}{\omega_{\rm las}^2} \nu_{\rm ei}$$

Лазер-плазменные неустойчивости:

- Ионно-звуковая неустойчивость (IAI)
- BPME (SBS)
- BKP (SRS)
- Двуплазмонный распад (TPD)
- Резонансное поглощение (RA)
- Теплоперенос (локальный/нелокальный)

Необходимо понимание механизмов поглощения!





Неустойчивости в мишени



- Рассеянный свет потери энергии
- Горячие электроны предпрогрев мишени







Лазер-плазменные неустойчивости

• Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР)

$$n \leq n_c/4$$
 $\omega_0 = \omega_{pe} + \omega_s$
 $I_{
m th}^{
m SRS} = 82 \, T_{
m keV}/(L_{\mu
m m}\lambda_{\mu
m m}) \, imes \, 10^{14} \, {
m Br/cm}^2$

• Двуплазмонный распад

$$n = n_c/4$$
 $\omega_0 = \omega_{pe} + \omega_{pe}$
 $I_{\rm th}^{\rm TPD} = 995/(L_{\mu m}^{4/3} \lambda_{\mu m}^{2/3}) \times 10^{14} \ {
m Br/cm}^2$

5

Пороги определяются масштабом неоднородности плазмы!

Kruer "The Physics of LPI", Colaitis et al. PRE (2015)







Развитие ЛПН на больших временах



FRONT

$$I_{
m th}^{
m SRS} \propto 1/L^{4/3}$$

 $I_{
m th}^{
m TPD} \propto 1/L$

$$I=1 imes 10^{14}~{
m Bt}/{
m cm}^2$$
 $E\gtrsim 1~{
m \kappa}$ Дж

Rosenberg et al. PRL (2018): при больших масштабах ЛПН могут иметь другую динамику

Аномальное поглощение

Glenzer et al. PRL (2002)



NOVA laser Мишень: Au E = 3.8 кДж

- Поглощение растёт при росте интенсивности
- Упрощённая модель ИЗТ отлично ложится на эксперимент по сравнению с обратнотормозным механизмом
- Нет полного понимания картины явления



Ионно–звуковая неустойчивость (турбулентность) Bychenkov, Rozmus Phys. Plasmas (2017)

- Быстрые электроны (теплопереноса) вызывают обратный ток
- Обратный ток генерирует ионно-звуковую турбулентность (ИЗТ) за счёт ионно-звуковой неустойчивости



9

- Лазерное излучение поглощается на неоднородностях (на ИАТ)
- ИАТ даёт существенный вклад в поглощение для Z>20 и $T\gtrsim 1$ кэВ

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \frac{\partial I}{\partial \mathbf{r}} = -\frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \left(\nu_{\rm ei} + \nu_{\rm eff} + \nu_{\rm eff}^R \right)$$

• У поглощения появляется зависимость от поляризации

$$u_{\text{eff}} = \nu_{\parallel} (\mathbf{e}_0 \times \mathbf{n})^2 + \nu_{\perp} [\mathbf{e}_0 \times \mathbf{n}]$$



Аномальное поглощение на ИЗТ

• Уравнение для лазерной интенсивности:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \frac{\partial I}{\partial \mathbf{r}} = -\frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \left(\nu_{\rm ei} + \nu_{\rm eff} + \nu_{\rm eff}^R \right)$$

• Эффект дополнительного поглощения силён

$$\frac{\nu_{\rm an}}{\nu_{\rm ei}} \sim \left(\frac{Zm_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T_e}{T_i}\right) \cdot \left(n_e r_D^3\right)$$

• Поглощение зависит от поляризации

$$u_{\rm eff} = \nu_{\parallel} (\mathbf{e}_0 \cdot \mathbf{n})^2 + \nu_{\perp} [\mathbf{e}_0 \times \mathbf{n}]^2$$

10

Bychenkov, Rozmus Phys. Plasmas (2017)



Критерий возникновения аномального поглощения Критерий развития ионно-звуковой неустойчивости:

$$\gamma(k) = \gamma_e(k) - \gamma_i(k),$$

Система неустойчива, если

$$\max_k \gamma(k) > 0.$$



$$\left(\frac{\lambda_{ei}}{T_e}\frac{dT_e}{dx} > 0.009\frac{Z+2.12}{Z+0.5}\sqrt{\frac{2Z}{A}}\left(1+\delta\right)\right), \quad \delta = 43Z\sqrt{\frac{AT_e^3}{T_i^3}}\exp\left(-\frac{ZT_e}{2T_i}\right)$$

Критерий может быть переписан через тепловой поток:

$$\frac{q_e}{n_e T_e c_s} > 7.4 \cdot \frac{Z + 2.12}{Z + 0.5} \cdot \frac{Z + 0.24}{Z + 4.2} \cdot (1 + \delta).$$
(1)

Brantov et al. Phys. Plasmas (2001), Bychenkov et al. Phys Plasmas (2017)



Расчёты с аномальным поглощением



- ИЗТ: $I\gtrsim 10^{15}~{
 m Bt/cm^2}$
- В стационарной короне неуст. возникает $n \sim n_{\rm cr}$
- Сколько лазерного излучения доходит до *n*_{cr}?



Экспериментальные постановки



Вопросы для дальнейшего исследования

- Генерация электронов при больших масштабах неоднородностей в плазме (ВКР, ДР, ИЗТ). Диаграммы направленности электронов.
- Тепловой поток ограничивается за счёт ИЗТ. Модель теплопереноса должна быть согласована с ИЗТ! Manheimer Phys. Fluids (1977)
- Адвекционный снос ионно–звуковой турбулентности в плазме.
 Насколько велика область поглощения в таком случае?



Выводы

- Понимание механизмов поглощения лазера и генерации горячих элекронов важно для ЛТС
- При развити
и ЛПН $\sim 1-5\%$ энергии уходит в горячие электроны
- ИЗТ может значительно усилить поглощение, но эффект является пороговым ($I \gtrsim 10^{15} \text{ Br/cm}^2$)
- Отличается ли характер развития данных неустойчивостей для МДж установок?
- Необходимы специальные постановки экспериментов для детального исследования лазер-плазменных эффектов



Спасибо за внимание!



