



РОСАТОМ

РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академика Е.И.Забабихина

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



РФЯЦ-ВНИИТФ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ С
УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В
ПРОЦЕССАХ ДВУХПЛАЗМОННОГО РАСПАДА И
ВЫНУЖДЕННОГО РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ**

**В.А.Лыков, Е.С.Бакуркина, Н.Г.Карлыханов, Г.Н.Рыкованов,
В.Е.Черняков и Е.В. Щеголев**

**Международная конференция
XIII Забабихинские научные чтения**

Снежинск, 21 марта 2017

ВВЕДЕНИЕ

- 1. Модель поглощения лазерного излучения с учетом процессов двухплазмонного распада и вынужденного Рамановского рассеяния**
- 2. Верификация новой модели поглощения лазерного излучения по экспериментам, проведенным на установках JANUS и ARGUS**
- 3. Верификация модели с использованием экспериментальных данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF**
- 4. Моделирование мишени для мегаджоульной установки с длиной волны лазерного излучения $\lambda=0,53$ мкм.**

ВЫВОДЫ

Российская мегаджоульная лазерная установка*) будет работать на 2-ой гармонике излучения Nd-лазера, - в отличие от лазера NIF, который работает на 3-ей гармонике Nd-лазера.

При увеличении длины волны лазера снижается эффективность столкновительного поглощения и усиливается роль нелинейных процессов, приводящих к рассеянию ЛИ и генерации надтепловых электронов. Быстрые электроны, проникая в плотные слои мишени, вызывают их разогрев, что препятствует достижению высоких плотностей, необходимых для термоядерного зажигания мишени.

Поэтому вопросы взаимодействия лазерного излучения с плазмой представляются весьма актуальными, особенно при планировании экспериментов с мишенями прямого облучения на мегаджоульной установке с длиной волны лазерного излучения $\lambda = 0,53$ мкм.

*) С.Г. Гаранин. УФН, 181, 434 (2011).

В основу новой модели поглощения лазерного излучения сферической мишенью положена разработанная ранее физическая модель, которая учитывала самосогласованным образом [1]:

- **обратно-тормозное, резонансное и параметрическое поглощение лазерного излучения;**
- **укручение профиля плотности;**
- **рефракцию лазерного излучения;**
- **вынужденное рассеяние Мандельштама- Бриллюэна;**
- **особенностей фокусировки лазерного излучения на мишень.**

[1] Е.Н.Аврорин, А.И.Зуев, Ю.Н.Лазарев, В.А.Лыков, Н.П.Ситников, О.С.Широковская. Модель поглощения лазерного излучения сферической мишенью. ВАНТ. Методики и программы численного решения задач математической физики, вып. 2, 1985, стр. 10-20.

Поглощение лазерного излучения при двухплазмонном распаде фотона в плазме



Двухплазмонный распад - трехволновой нелинейный процесс в плазме, в результате которого электромагнитная волна с частотой (ω_0) параметрически распадается на две продольные (Ленгмюровские) волны:

$$\omega_0 = \omega + \omega' \quad \vec{k}_0 = \vec{k} + \vec{k}'$$

Коэффициент поглощения ЛИ за счет двухплазмонного распада в области плотности плазмы, равной четверти критической равен [1]:

$$A_{qc} = 0,01 \times (G_{qc}/4)^6, \text{ если } G_{qc} < 4 \text{ и } A_{qc} = 0,01 \times (G_{qc}/4)^{1,2} \text{ если } G_{qc} \geq 4,$$

где: $G_{qc} = 1,7 \times 10^6 \frac{\langle Z \rangle}{\langle Z^2 \rangle} \left(\frac{L_{qc}}{\lambda} \right) \frac{I_{qc} \lambda^2}{T_e} \xi_{qc}$; λ (мкм) - длина волны лазерного излучения; T_{eqc} (кэВ) -

температура электронов; L_{qc} (см) - масштаб неоднородности плотности; I_{qc} [10^{14} Вт/см²] - интенсивность лазерного излучения в области плотности, равной четверти критической $\rho_{qc} = \rho_c / 4$; ξ_{qc} - параметр порядка 1.

Процессы двухплазмонного распада приводят к генерации быстрых электронов с эффективной температурой [1]:

$$T_{h2} = 15 \times \max\{1; (G_{qc} - 1)\} \text{ [в кэВ]}$$

Поглощение лазерного излучения с учетом вынужденного Рамановского рассеяния



Коэффициент поглощения ЛИ при вынужденном Рамановском рассеянии в области плотности, ниже четверти критической равен [1]:

$$A_{\text{SRS}} = 0,125 \cdot \{1 - \exp[-(G_{\text{SRS}}^{1/3} - 1)]\}, \text{ если } G_{\text{SRS}} \geq 1$$

$$A_{\text{SRS}} = 0, \text{ если } G_{\text{SRS}} < 1,$$

где $G_{\text{SRS}} = 215 \cdot L_{\text{qc}}^{4/3} \lambda^{2/3} \cdot I_{\text{qc}} \cdot \frac{\langle Z \rangle}{\langle Z^2 \rangle} \xi_{\text{SRS}}$; λ (мкм) - длина волны лазерного излучения; L_{qc} (см) - масштаб неоднородности; I_{qc} [10^{14} Вт/см²] - интенсивность лазерного излучения в области плотности, равной четверти критической: $\rho_{\text{qc}} = \rho_c / 4$; ξ_{SRS} -- параметр порядка 1.

Процессы Рамановского рассеяния приводят к генерации быстрых электронов с эффективной температурой [1]:

$$T_{\text{h3}} = T_{\text{eqc}} (1 + 3 \cdot \Delta_{\text{SRS}}^2) / \Delta_{\text{SRS}}^2 \text{ [кэВ]},$$

где параметр $\Delta_{\text{SRS}} \approx 0,3$ [1].

Верификация новой модели поглощения лазерного излучения по экспериментам, проведенным на установках JANUS и ARGUS



Эксперимент #75060402 JANUS [1,2]

Мишень: стеклянная оболочка диаметром $D = 86,6$ мкм с толщиной стенки $\Delta = 0,70$ мкм была заполнена ДТ-газом до плотности $\rho_{dt} \approx 2,5$ мг/см³.

Лазерный импульс: $E_L = 28,3$ Дж, $P_L \approx 0,4$ ТВт, $t_{1/2} = 70$ псек.

Эксперимент # 36120910 ARGUS [1,2]

Мишень: стеклянная оболочка диаметром $D = 88$ мкм с толщиной стенки $\Delta = 0,88$ мкм была заполнена ДТ-газом до плотности $\rho_{dt} \approx 3,1$ мг/см³.

Лазерный импульс: $E_L = 128$ Дж, $P_L \approx 4$ ТВт, $t_{1/2} = 32$ псек.

Сжатие газа и оболочки происходило в режиме с высоким уровнем энтропии ("exploding – pusher" - взрывающаяся оболочка), который обусловлен прогревом оболочки мишени быстрыми электронами.

Эксперименты [1,2] использовались ранее для калибровки программы «ЭРА» [3]

1. Storm E., Ahlsrom H., Boyle M. et. al. Phys. Rev. Lett., v. 40, № 24, p. 1570-1573 (1978).
2. N. M. Ceglio and L. W. Coleman, Phys. Rev. Lett. 39, 20 (1977).
3. Е.Н. Аврорин, и др., ВАНТ. Методики и программы, вып. 2, 1985 , 21-28

Верификация модели поглощения лазерного излучения по экспериментам, проведенным на установках JANUS и ARGUS в 70ГГ

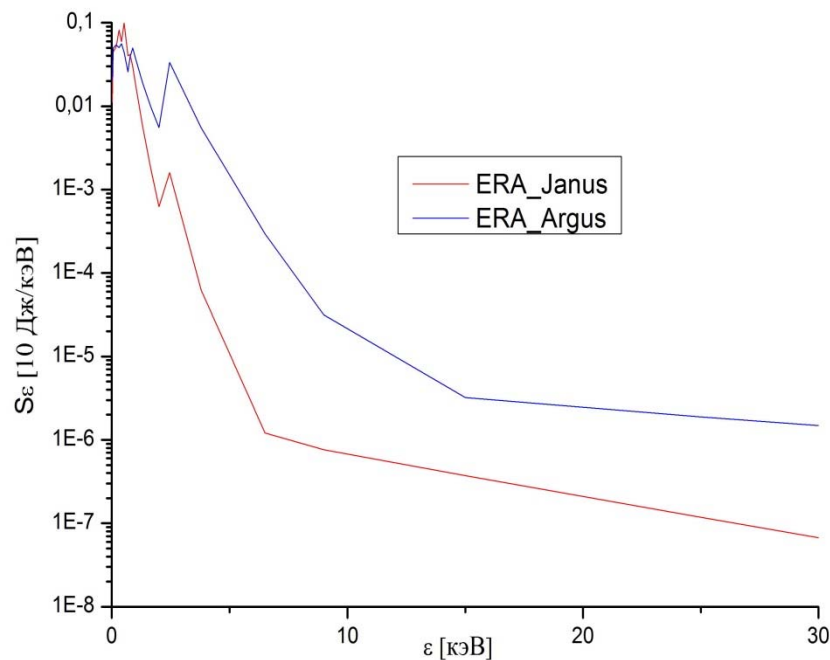
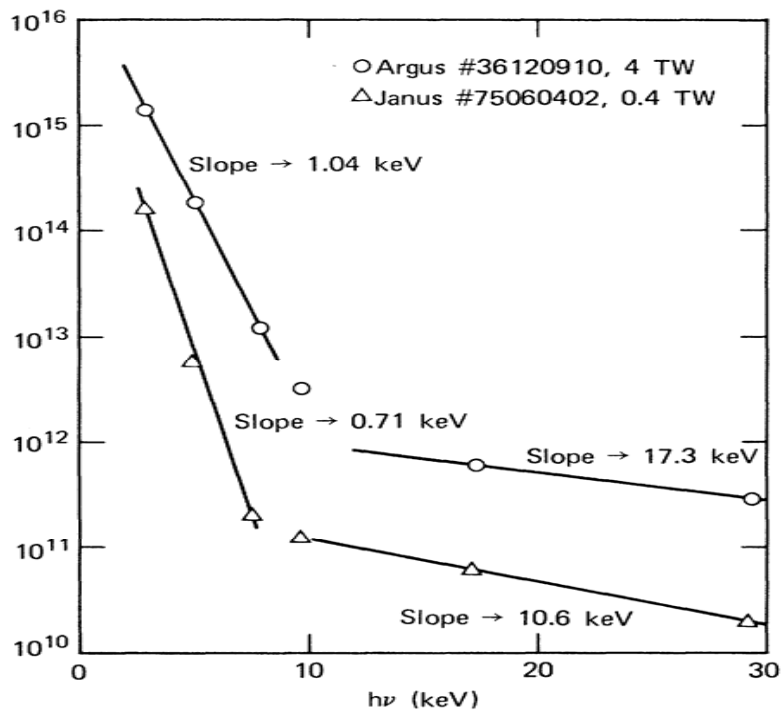
Результаты экспериментов [1, 2] и расчетов по программе ЭРА

	E_a Дж	N_{dt}	T_i кэВ	δ	Параметры РИ		
					T_c	T_h	E_x
75060402 JANUS	~6,4	$(4,6 \pm 0,4) \cdot 10^6$	≤ 2	~100	0,71	10,6	~0,4
Расчет ЭРА [3]	7,3	4×10^6	1,4	180	0,6	11	0,65
Расчет ЭРА новый	6,9	$5,2 \times 10^6$	1,3	46	0,69	8,7	0,57
36120910 ARGUS	~28	$(8,0 \pm 1,4) \cdot 10^8 n$	$7,6 \pm 1,4 (n)$	~50	1,0	17,3	~3,9
		$(7,9 \pm 1,4) \cdot 10^8 \alpha$	$5,2 \pm 1,5 (\alpha)$				
Расчет ЭРА [3]	25	2×10^9	6	120	0,9	20	2
Расчет ЭРА новый	29	$1,4 \times 10^9$	5,5	40	0,92	21	1,9

Здесь: E_a (Дж) - поглощенная энергия лазерного излучения; N_{dt} - нейтронный выход; T_i (кэВ) - температура ионов сжатого ДТ-топлива; δ - объемное сжатие ДТ-газа; T_c и T_h (кэВ)- эффективные температуры, найденные по наклону спектра рентгеновского излучения в области энергий квантов ниже и выше 10 кэВ; E_x (Дж) – выход рентгеновского излучения в интервале энергий квантов $0,3 < \epsilon < 17$ кэВ

1. Storm E., Ahlsrom H., Boyle M. et. al. Phys. Rev. Lett., v. 40, № 24, p. 1570-1573 (1978).
2. N. M. Ceglio and L. W. Coleman, Phys. Rev. Lett. 39, 20 (1977).
3. Е.Н. Аврорин, и др., ВАНТ. Методики и программы, вып. 2, 1985 , 21-28

Верификация модели поглощения лазерного излучения по экспериментам, проведенным на установках JANUS и ARGUS в 70ГГ



Спектры рентгеновского излучения, зарегистрированные в опытах [1] #75060402-JANUS, #36120910-ARGUS (слева) и полученные в расчетах по программе ЭРА с новой моделью поглощения ЛИ (справа)

Верификация модели поглощения лазерного излучения по экспериментам, проведенным на установках JANUS и ARGUS в 70ГГ



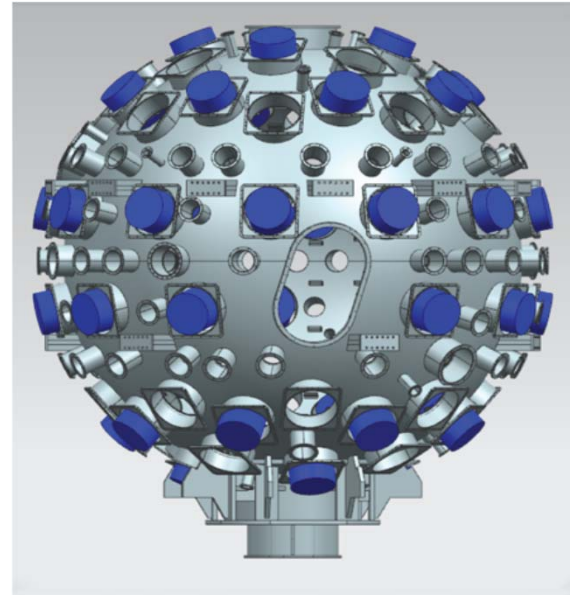
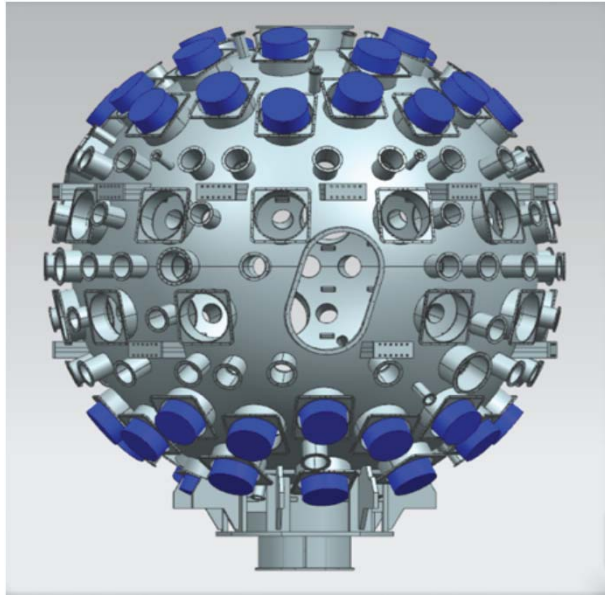
Поглощение и рассеяние ЛИ в расчетах, проведенных по программе ЭРА для условий экспериментов JANUS и ARGUS

Расчет ЭРА	E_a Дж	N_{dt}	QE Дж	QBE Дж	SBE Дж	T_{qc} кэВ	A_{p+n} %	A_{qc} %	A_{SRS} %	A_t %	Π_B %
для JANUS	6,9	$5,2 \times 10^6$	2,7	2,1	4,2	0,64	22	2E-4	0	2,0	91
для ARGUS	29	$1,4 \times 10^9$	6,4	6,0	23	0,97	20	5E-5	0	0,27	75

Здесь: E_a - поглощенная энергия ЛИ; QE – энергия ЛИ, перешедшая в тепловые электроны; QBE- разогрев мишени быстрыми электронами (БЭ), SBE- поток энергии БЭ через внешнюю границу; T_{qc} – температура электронов в «короне»; A_{p+n} , A_{qc} , A_{SRS} , A_t – доли энергии ЛИ, поглощенные за счет резонансного и параметрического поглощения, двухплазмонного распада, Рамановского рассеяния, обратно-тормозного механизма; Π_B - ослабления лазерного излучения за счет ВРМБ.

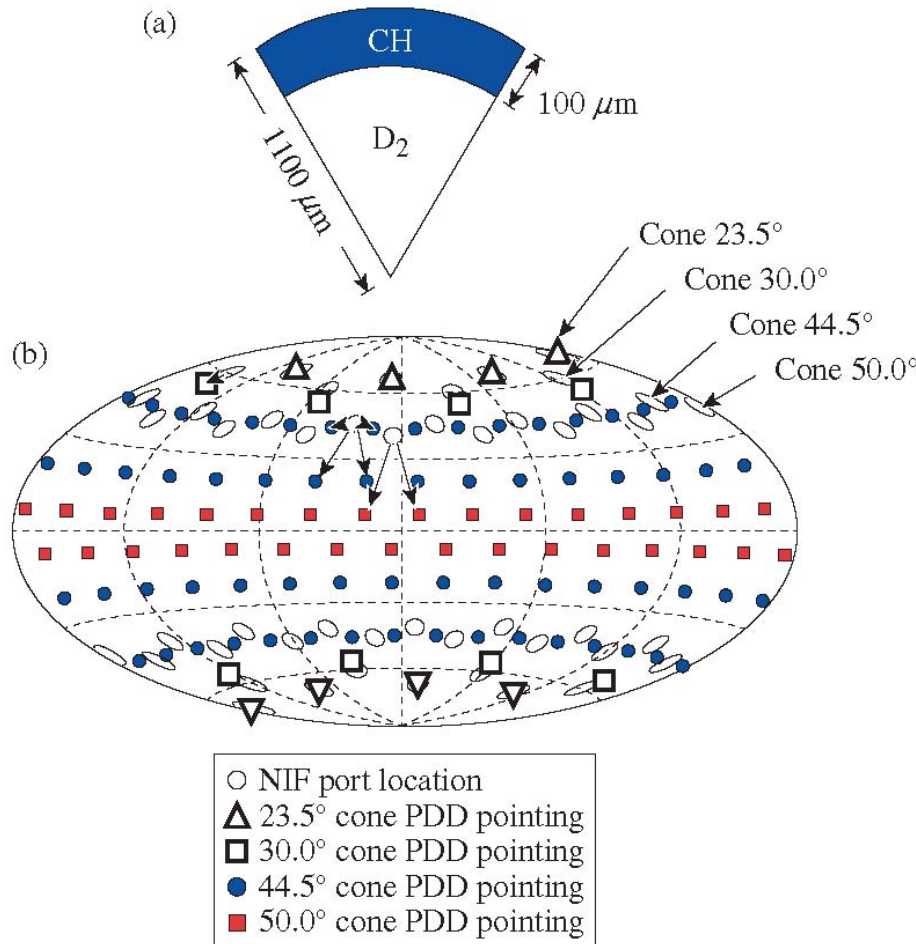
Введение процессов двухплазмонного распада и вынужденного Рамановского рассеяния не повлияло на интерпретацию опытов, проведенных на лазерных установках JANUS и ARGUS. Причиной этого являются малые размеры мишени и длительности лазерных импульсов в опытах 70ГГ.

Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



Мишенная камера установки NIF для облучения мишеней с непрямым воздействием (слева). Реконфигурация камеры для прямого облучения мишеней (справа) требует остановки экспериментов. Вместо этого было предложено использовать схему полярного облучения мишеней с прямым воздействием (PDD - polar-direct-drive) [1].

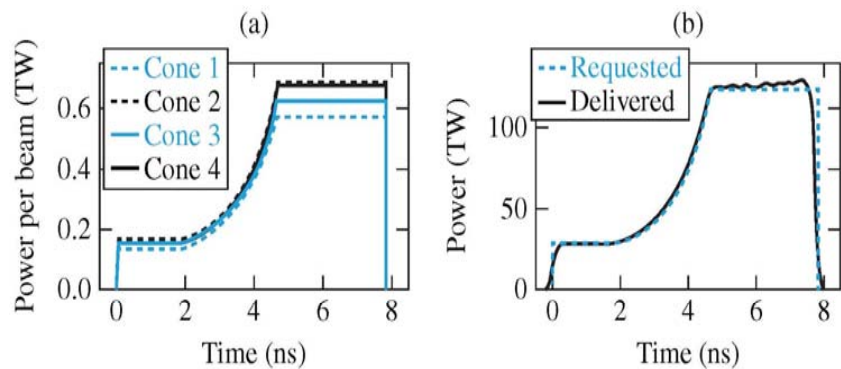
Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



Типичная мишень и схема облучения, которые использовались в экспериментах по полярному облучению мишеней на установке NIF. Открытые кружки - расположение оптики на мишенной камере. Красные квадраты и синие кружки – точки прицеливания лучей на поверхности мишени (из работы [1])

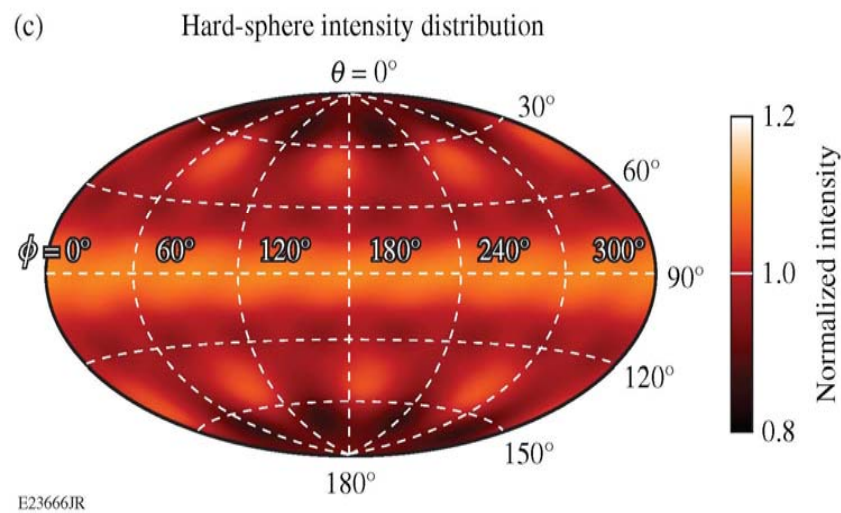
E23751JR

Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



Мощности лазерного излучения от времени в опыте #131210 (a);

Сравнение затребованной формы лазерного импульса и в опыте (b);



Проекция распределения интенсивности лазерного излучения на сферу с диаметром мишени (c) (из работы [1])

Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



В расчетах ЭРА использовались параметры мишени и лазера из работы [1]. Учитывалось ограничение электронной теплопроводности предельным потоком с коэффициентом $f=0,06$. Полярная схема облучения заменялась на двухсторонне облучение мишени лазерным импульсом с $\lambda=0,35$ мкм через оптику F/1 и фокусировкой на расстоянии $d=0,97$ мм за центр мишени

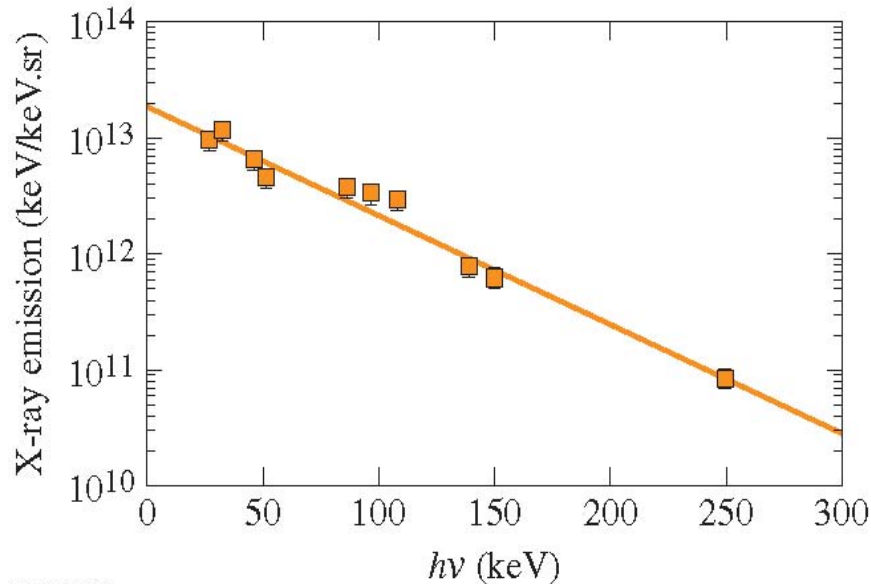
Поглощение и рассеяние ЛИ в расчете ЭРА для опыта #131210 на NIF

K_a %	QE кДж	QBE кДж	SBE кДж	T_{qc} кэВ	A_{p+n} %	T_{p+n} кэВ	A_{qc} %	T_{qc} кэВ	A_{SRS} %	T_{SRS} кэВ	A_t %	Π_B %
70	420	3,1	3,5	3,4	0,29	2,7	0,48	60	0,26	50	69	66

Здесь: K_a - поглощенная доля энергии ЛИ; QE – энергия ЛИ, перешедшая в тепловые электроны; QBE- разогрев мишени быстрыми электронами (БЭ), SBE- поток энергии БЭ через внешнюю границу; T_{qc} (кэВ) – температура электронов при $n_e=n_{ec}/4$ на момент $t=6$ нс; A_{p+n} , A_{qc} , A_{SRS} – доли энергии, поглощенные за счет резонансного и параметрического поглощения, двухплазмонного распада, Рамановского рассеяния, температуры их БЭ: T_{p+n} , T_{qc} , T_{SRS} соответственно; A_t – доля энергии ЛИ, поглощенная за счет обратно-тормозного механизма; Π_B - ослабления лазерного излучения за счет ВРМБ.

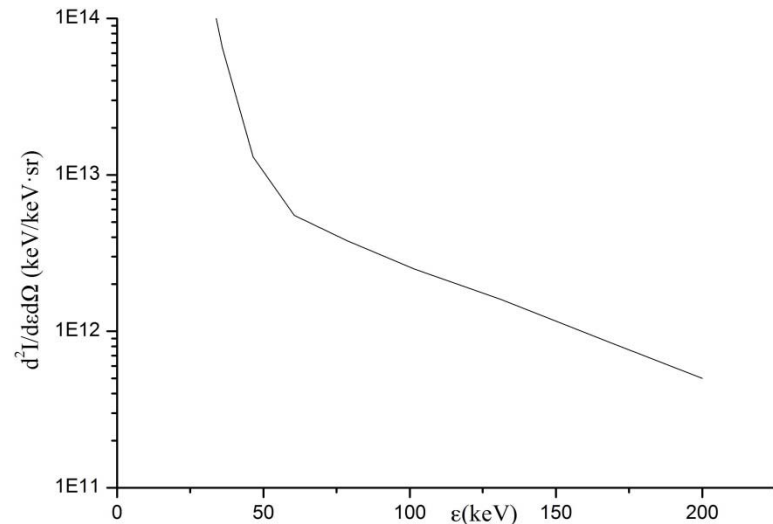
**Разогрев мишени от быстрых электронов составил ~ 3 кДж или ~ 0,5% от E_L .
Учет ВРМБ снизил эффективность поглощения ЛИ с 91% до 70 % от E_L , что согласуется с расчетами по программе DRACO, проведенных без и с учетом процесса СВЕТ [1].**

Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



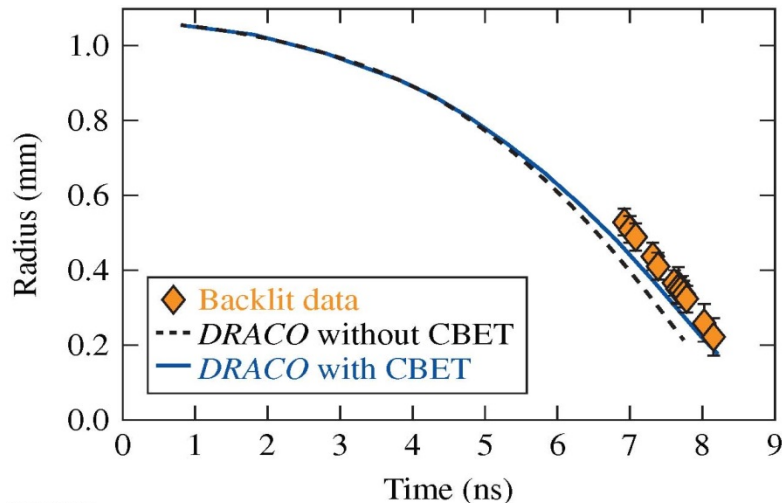
E23753JR

Спектр рентгеновского излучения, зарегистрированный в опыте #131210. Сплошная линия отвечает быстрым электронам с температурой $T_h \approx 46 \pm 2$ кэВ и полной энергией $E_h \approx 2,5 \pm 0,3$ кДж [1]

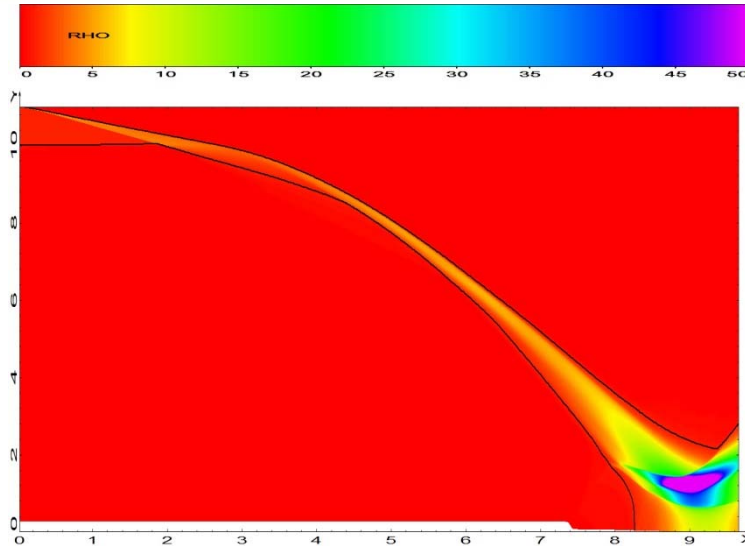


Спектр рентгеновского излучения в расчете ЭРА для опыта #131210. Спектр отвечает эффективной температуре $T_p \approx 58$ кэВ и энергии быстрых электронов, переданной в мишень QBE ≈ 2 кДж.

Верификация модели с использованием данных по прямому облучению сферической мишени на установке NIF



E23670JR
Траектория плотной части оболочки:
Эксперимент (ромбы), расчет DRACO без учета СВЕТ (пунктир) и с учетом СВЕТ (сплошная синяя линия) [1]



Распределение плотности в расчете ЭРА в координатах: время в [нс] - Эйлеров радиус в [100 мкм]. Сплошные черные линии – изолинии с плотностью 1 г/см³

Предложенная модель поглощения лазерного излучения успешно выдержала проверку при сравнении с данными, полученными на NIF и с аналогичными расчетами, выполненными по программе DRACO [1].

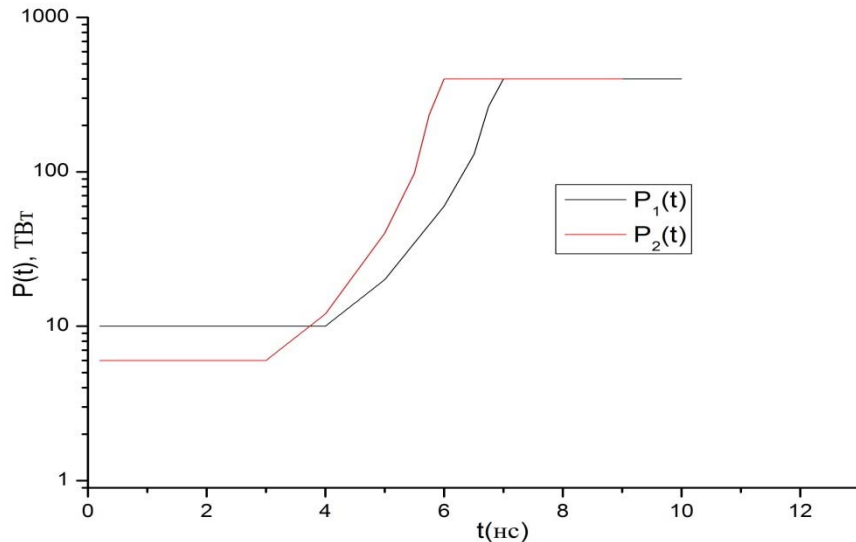
Моделирование мишени для мегаджоульной установки с длиной волны лазерного излучения $\lambda=0,53$ мкм



В работе [1] предложена мишень прямого облучения для зажигания на установке с энергией ~ 2 МДж и длиной волны $\lambda=0,53$ мкм.

DT 0,0006 г/см ³	DT 0,25 г/см ³	CH 1,05 г/см ³
R(мм) 1,414	1,563	1,597

В программе ЭРА учитывалось ограничение электронной теплопроводности предельным потоком с коэффициентом $f=0,06$.



Условия облучения:

48 лазерных пучков облучают мишень через оптику F/8, центр фокусировки – за мишень на расстоянии 1,6-2,0 мм при размере фокального пятна 400 мкм.

$P_1(t)$ – из работы [1], оптимальна при 100% поглощении ЛИ.

$P_2(t)$ – оптимизирована на $E_L=2,5$ МДж при обратно-тормозном поглощении с учетом рефракции ЛИ (поглощение $\sim 60\%$ от E_L)

Мощность лазерного излучения от времени:
 $P_1(t)$ – из работы [1], $P_2(t)$ – исправленная.

Моделирование мишени для мегаджоульной установки с длиной волны лазерного излучения $\lambda=0,53$ мкм



Результаты 1D- расчетов по программе ЭРА при учете различных процессов

	$P_{1,2}$	E_L МДж	A_t %	$E_{БЭ}$ кДж	A_{p+n} %	A_{qc} %	A_{SRS} %	T_{SRS} кэВ	Π_B %	W_Q	ρ г/см ³	T_i кэВ	$E_{т.я.}$ МДж	$E_{т.я.}^*$ МДж
1	P_1	1,5	100	--	-	-	-	-	-	1,6	39	7,7	0,25	31
2	P_1	2,5	59	-	-	-	-	-	-	0,9	28	5,6	0,08	0,26
3	P_2	2,5	59	-	-	-	-	-	-	1,8	57	7,7	0,19	58
4	P_2	2,5	59	42	1,9	-	-	-	-	1,8	58	8,0	0,23	59
5	P_2	2,5	61	43	1,8	2,8	-	100	-	1,4	38	7,3	0,15	8,7
6	P_2	2,5	63	54	1,6	2,6	4,4	100	-	0,4	12	6,5	0,05	0,08
7	P_2	2,5	43	36	0,8	1,2	1,8	80	59	0,2	6,9	4,4	0,01	0,01

Здесь: A_t - обратно-тормозного поглощение; $E_{БЭ}$ - разогрев мишени от БЭ; A_{p+n} , A_{qc} , A_{SRS} - поглощение за счет резонансного и параметрического поглощения, двухплазмонного распада, Рамановского рассеяния; T_{SRS} - температура БЭ при SRS; Π_B - ослабление ЛИ за счет ВРМБ; ρ и T_i - максимальная плотность и ионная температура в центре мишени; $E_{т.я.}$ и $E_{т.я.}^*$ - выход термоядерной энергии без и с учетом термоядерного горения топлива.

W_Q - запас по термоядерному зажиганию [1] с учетом потерь может быть представлен в виде:

$$W_Q = (n - 1) \int_{t_0}^{t_{pmax}} \frac{dQ_{м.я.} / dt}{E + Q} dt, \quad n - \text{показатель степени в аппроксимации } \langle \sigma v \rangle_{dt} \sim T^n.$$

Генерация быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада и Рамановского рассеяния катастрофически снижают запас по термоядерному зажиганию мишени

1. Разработана модель поглощения лазерного излучения для проведения одномерных расчетов мишеней прямого облучения с учетом генерации быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рассеяния (ВКР).
2. Проведена верификация разработанной модели на основе сравнения с экспериментами, выполненными на установках JANUS и ARGUS, а также с данными, полученными в опытах на установке NIF.
3. Показано, что ВРМБ и генерация быстрых электронов в процессах ДПР и ВКР могут катастрофически снизить вероятность достижения условий термоядерного зажигания мишеней прямого облучения на мегаджоульных установках при использовании лазерного излучения с $\lambda = 0,53$ мкм.
4. Необходимо дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение нелинейных процессов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и проведение оптимизации мишеней с их учетом для условий предполагаемых экспериментов на мегаджоульной установке.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ