# Кинетика ультрарелятивистской лазерной плазмы

Жидков А.Г.

Институт Лазерных и Плазменных технологий НИЯУ МИФИ

Релятивистская лазерная плазма является сравнительно новым объектом исследований, который обязан своим появлением развитию и совершенствованию мощных фемто- и пикосекундных лазеров. За последние пару декад мощность лазеров непрерывно росла от нескольких Тераватт до сверх Петтоваттного уровня. Тенденция роста мощности лазеров остается постоянной, и в настоящее время. Плазма при это остается основным объектом взаимодействия такого уровня мощности лазерных импульсов с веществом. Сформированная при этом плазма с температурой в много миллиардов градусов является ультрарелятивистской и существенно отличатся от традиционной плазмы, в первую очередь появлением в ней значительно числа как классических, так и квантовых процессов, связанных со сверхсильными электромагнитными полями и характерных только для такой плазмы. Кинетика такой плазмы представляет в первую очередь научный интерес, но и вопросы практических результатов как всегда актуальны.

## Современные лазерные системы

Характеристики релятивистской лазерной плазмы определяются как известно параметром  $a_0 = eE_L/mc\omega$ . «Релятивистская» граница  $a_0 = 1$  достигается при интенсивностях лазерного излучения ~10<sup>17</sup> (СО<sub>2</sub> лазер)- 10<sup>19</sup> (Ti-Saph лазер) Втсм<sup>-2</sup>.

Лазер	Энергия	Длительность	
Фемта-Луч	70 J	70 fs	
Pearl	24 J	43 fs	
ELF	200 J	0,7 ps	
Callisto	18J	60 fs	
Trident	100J	0.5 ps	
Hercules	17 J	50 fs	
Texas Petwatt	186J	165 fs	
LWIR ( $CO_2$ )	30 J	0.5 ps	
BELLA	40 J	40 fs	
Vulcan	500J	0.5 ps	
Astra Gemini	2x20J	40 fs	
LULI	30J	300fs	
LOA	2.5 J	25 fs	Интенсивность
Atlas	2 J	25 fs	
PHELIX	500 J	0.5 ps	$I=10^{23} Bmcm^{-2} (a_{2} \sim 200)$
LFEX	<10 kJ	1-10 ps	
J-KARREN	26 J	30 fs	можно считать
LAPLACIAN	5 J	<100 fs	достигнутой
GIST	30 (70) J	30 fs	
SIOM	12 J	25 fs	
ELI-NP (Romania)	2x10 PW	25-160 fs	

OPAL-75 PW in the USA, the XCELS-200 PW in Russia, the ELI-200 PW in Europe and the SEL-100 PW in China

## Основные процессы в релятивистской лазерной плазме

- 1. Оптическая и полевая ионизация в дополнении к обычным процессам
- 2. Ускорение электронов и ионов сверхсильными полями
- 3. Мощное рентгеновское излучение (бетатронное, гармоники, комптоновское рассеяние)
- 4. Ядерные реакции

### Рекорды:

Ускорение электронов в кильватерной волне~8 GeV ( 5pC)Ускорение протонов, фольги,~150 MeV (Ziegler, et al. Nat. Phys. 20, 1211 (2024))Мощность рентгеновского излучения (~1-3 keV)~10<sup>19</sup> W/cm<sup>2</sup>

#### Практические результаты:

Фемтосекундный электронный микроскоп (1-10 МэВ) Электронные пучки, энергия ~300-600 МэВ, заряд ~20-30 рС Нейтронные пучки (LFEX, FELIX) Оптический инжектор ионов углерода для углеродной терапии

> На подходе полностью оптический XFEL. Оптические электронные пучки с энергий 300 МэВ серьезный конкурент гамма-излучению в работе с пролекарствами (pro-drug). Проблема стабильности становится ключевой.

Full optical, jitter free

#### Моделирование взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой

Существует несколько общепринятых кодов, основанных не методе частицы в ячейке. Некоторые из них: OSIRIS, FPlaser3D, FBPIC, WARP, EPOCH

Fplaser3D включает не только стандартную PIC схему Yee с коррекцией дисперсионного уравнения, но и кинетическую сетку, на которой вычисляются столкновения (упругие, ионизация, иные релаксационные процессы), полевая ионизация. Достигается это добавлением случайной силы в уравнение движения. Включена также классическая сила радиационного трения. Код протестирован на множестве задач за последние две декады.

Для ряда задач РЛП приходится использовать релятивистскую систему отсчета. (L->L/γ<sub>R</sub>) Это нетривиальная задача. В случае с электронными пучками и плазмой удалось расширить FPlaser на произвольную систему отсчета. При этом найдены заметные отличия от работ Vay и др. D.O.Espinos, A. Zhidkov et al., Phys. Rev. Accelerators and Beams (2025)

Проблема здесь:  $\omega_{pl}$  – инвариант, то  $\omega_{l}$  ->  $\omega_{l}/2\gamma_{R}$ , при больших  $\gamma_{R}$ :  $\omega_{l} < \omega_{pl}$ ?



#### Высокие интенсивности

Оставим пока процессы поляризации вакуума и vacuum breakdown. Что нового нас ожидает при достижении *I*=10<sup>24</sup> Втсм<sup>-2</sup>, до которой осталось как кажется совсем немного.

$$g=ma_0/M^{\sim}1$$
  $E_y = B_z = A\cos(\omega t - kx)$ ,  $u = p/Mc$ 

$$\frac{du_x}{dt} = \frac{u_y}{\gamma}g\cos(\tau - \tilde{x}),$$
$$\frac{du_y}{dt} = g\cos(\tau - \tilde{x}) - \frac{u_x}{\gamma}g\cos(\tau - \tilde{x})$$
$$u_y = g\sin(\tau - \tilde{x}), u_x = u_y^2/2$$

Ионы достигают релятивистских энергий при прямом ускорении лазерным импульсом. Это может привести к инжекции протонов в ускоряющую фазу кильватерного поля.

Остальные кинетические процессы в целом могут меняться только колличественно.

## Расчет методом частицы в ячейке с учетом силы радиационного трения.

Линейно поляризованные лазерные импульсы с длиной волны 1 мкн, длительностью 10 фс распространяются в направлении х (продольном) справа налево в пре-ионизированной полу-бесконечной плазме. Интенсивность лазерного импульса изменяется от 10<sup>23</sup> до 10<sup>24</sup> Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует *a*<sub>0</sub> от 10<sup>2</sup> до 10<sup>3</sup>. Интенсивности импульсов 10<sup>23</sup>-10<sup>24</sup> Вт/см<sup>2</sup> в фокусе соответствуют энергиям от 0,75 кДж до 7,5 кДж и, соответственно, мощности от 75 до 750 ПВт.

Начальные условия для поперечных компонент полей принимаются как известное решение параксиальных уравнений с w<sub>0</sub>=5 мкм и соответствующей рэлеевской длиной 75 мкм. При моделировании размер движущегося окна составляет (100 мкм) x(100 мкм) с высоким пространственным разрешением λ/200 в 2D и (30 мкм)x(30 мкм)x(30 мкм)с максимальным разрешением λ/50 в 3D. Плотность однородной плазмы являлась параметром в диапазоне от N<sub>e</sub> =2N<sub>cr</sub> до 100N<sub>cr</sub>.



*Трехмерное распределение плотности ионов (красный цвет) и* интенсивности лазерного импульса (голубой цвет) при облучении лазерным импульсом с интенсивностью  $10^{24}$  Втсм<sup>-2</sup> и длительностью 10 фс при t=300 фс. Начальная плотность N=5N<sub>cr</sub>. Размеры окна XxYxZ =30 мкм x 30 мкм x30 мкм.

# Некоторые результаты



Зависимость глубины проникновения лазерного импульса в плотную мишень в зависимости от ее плотности для лазерных импульсов 10<sup>24</sup> (1) и 10<sup>23</sup> (2) Втсм<sup>-2</sup>.



Пространственное распределение поля лазерного импульса  $I=10^{24}$ в плотную мишень в момент его остановки (а) плотность плазмы  $N_e=2N_{cr}$  и время t=1300 фемтосекунд (б) плотность плазмы  $N_e=100N_{cr}$  и время t=200 фемтосекунд. Вставка показывает распределение импульсов электронов в начальный момент облучения



Пространственное распределение поля лазерного импульса  $I=10^{23}$  в плотную мишень в момент его остановки (а) плотность плазмы  $N_{\rm e}=2N_{\rm cr}$  и время t=800 фемтосекунд (б) плотность плазмы  $N_{\rm e}=10N_{\rm cr}$  и время t=200 фемтосекунд.



Пространственное распределение ионов в плазме  $N_e = 2N_{cr}$  при распространении лазерного импульса  $10^{23}$  Втсм<sup>-2</sup> (a) t = 300 (б) 500 и (в) 700 фемтосекунд.





Пространственное распределение плотности (в единицах  $N_{cr}$ ) ионов (красное) и электронов (синее) в плазме с начальной плотностью  $N_e=10N_{cr}$  облучаемой импульсом с интенсивностью  $10^{24}$  Втсм<sup>-2</sup> при t=300 фемтосекунд с учетом (а) и без учета (б) силы радиационного трения.

Спектральные характеристики лазерных импульсов в момент их остановки в плазме для начальной плотности плазмы (а)  $N_e = 5N_{cr} u$  (б)  $N_e = 10N_{cr}$ ; черная кривая-  $I = 10^{23}$  Втсм<sup>-2</sup> и красная кривая-  $I = 10^{24}$  Втсм<sup>-2</sup>. Вставка показывает спеткр при  $\lambda < 1.5$  микрон.

#### Ускорение частиц

Распределение ускоренных электронов по энергии при интенсивности лазерного излучения 10<sup>23</sup> Втсм<sup>-2</sup> (а) и 10<sup>24</sup> Втсм<sup>-2</sup> (б) при начальной плотности (1) 2N<sub>cr</sub> (2) 5N<sub>cr</sub> (3) 10N<sub>cr</sub>.

Высокие энергии электронов, но сложно формировать устойчивый моно-энергетичный пучок





Распределение ускоренных ионов по энергии при интенсивности лазерного излучения 10<sup>23</sup> Втсм<sup>-2</sup> (а) и 10<sup>24</sup> Втсм<sup>-2</sup> (б) при начальной плотности (1) 2N<sub>cr</sub> (2) 5N<sub>cr</sub>, (3) 10N<sub>cr</sub>.

Аномальное ускорение ионов

Стандартное ускорение ионов

## Излучение.

Можно ожидать реализации режима существенного влияния излучения на кинетику плазмы при *I*=10<sup>24</sup> Втсм<sup>-2</sup>.



эффективность 4х10<sup>-5</sup>. При зависимости роста как /<sup>5</sup> (*d*<sub>0</sub><sup>-5</sup>), энергия излучения должна сравнится с лазерной уже при энергии импульса в 1 кДж. Однако сила радиационного трения может внести коррективы.



# Пробные частицы для расчета спектров

# Заключение.

1. Дальнейшее увеличение мощности коротких лазерных импульсов имеет серьезное научное значение. Оценки показывают, что их развитие до энергий порядка 10 кДж в импульсе возможно, хотя и будет сопровождаться серьезными техническими трудностями.

2. Имеющиеся лазерные установки с энергией порядка 10-500 Дж также имеют серьезное практическое применение для развития полностью оптических техник ультра-быстрых измерений. Здесь вопросы стабильности и воспроизводимости процессов генерации быстрых частиц встают очень остро.

3. Хотя численные методы в значительной степени позволяют проводить моделирование основных кинетических процессов в релятивистской лазерной плазме, все еще остаются нерешенные проблемы и здесь. Такие как моделирование спектров коротковолнового излучения ab-initio, моделирование процессов в плазме большой протяженности и ряд других.

# Спасибо за внимание!