

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ» 19–23 мая 2025 г. Снежинск, Россия

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ КОГЕРЕНТНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

### **С.С. Макаров**<sup>1,2</sup>



<sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

\*seomakarov28@gmail.com

# Метод рентгеновской радиографии в экспериментах по ФВПЭ



# Сверхъяркие синхротронные источники нового поколения - лазеры на свободных электронах (XFEL)

- яркость в ~10<sup>7</sup> раз выше, чем у традиционных СИ (> 10<sup>11</sup> ph/pulse)
- энергия фотонов 1-25 кэВ (ΔЕ/Е ~ 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup>)
- интенсивность > 10<sup>18</sup> Вт/см<sup>2</sup> (рекорд ~10<sup>22</sup> Вт/см<sup>2</sup>)
- высокая когерентность и монохроматичность излучения
- длительность импульса 10-100 фс

Facility	Location	E <sub>ph</sub> , keV	E <sub>e</sub> , GeV	Date
LCLS (up to 120 Гц)	США	10	15	2009
SACLA (up to 60 Гц)	Япония	20	8.5	2011
European XFEL (up to 27 кГц)	Германия	24	17.5	2017
PAL-XFEL (up to 60 Гц)	Корея	12	10	2017
SwissFEL (up to 100 Гц)	Швейцария	12	6	2018
LCLS-II (up to 1 МГц)	США	25	13.5	2019
«СИЛА» СИнхротрон+ЛАзер	Россия	12	6	2033



Coherent source

Ζ

**Z1** 

ХFEL в сочетании с оптическими лазерами суб-кДж и суб-ПВт\_

мощности — уникальная платформа для исследований по HEDP

**Z2** 

# Зонд XFEL: во время снимка частицы "замораживаются"



Для обеспечения разрешения в микронном масштабе длительность рентгеновского импульса должна быть ~ суб-пс.

Длительность импульсов XFEL намного короче → во время рентгенографического снимка δx, мала

### Метод фазово-контрастной рентгенографии с использованием пучков рентгеновских лазеров на свободных электронах



#### I. Использование расходящегося пучка XFEL

#### Пространственное разрешение метода

 $\Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{x}_{\text{детектора}} / \mathbf{M}$ 

#### Недостатки:

- ограничение на поле зрения при сильном увеличении
- замытие изображения от эффекта фазового контраста на больших расстояниях
- необходимо точно контролировать распределение интенсивности внутри расходящегося пучка РЛСЭ

### Поле зрения: ограничено апертурой детектора при большом увеличении

Размер пучка: сотни нм – несколько мкм

#### II. Использование параллельного пучка XFEL



#### Пространственное разрешение метода

 $\Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{X}_{\text{детектора}}$ 

Поле зрения: Определяется апертурой пучка и размером детектора (X,Y)

### Метод фазово-контрастной рентгенографии с использованием пучков рентгеновских лазеров на свободных электронах



#### І. Использование расходящегося пучка XFEL

**II. Использование параллельного пучка XFEL** 

Nov. 2019

#### Пространственное разрешение метода

 $\Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{x}_{\text{детектора}} / \mathbf{M}$ 

#### Недостатки:

- ограничение на поле зрения при сильном увеличении
- замытие изображения от эффекта фазового контраста на больших расстояниях
- необходимо точно контролировать распределение интенсивности внутри расходящегося пучка РЛСЭ



#### Пространственное разрешение метода

 $\Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{X}_{\text{детектора}}$ 

Поле зрения: Определяется апертурой пучка и размером детектора (X,Y)

6

# (I) - LCLS MEC: Использование схемы с расходящимся пучком XFEL

#### Эволюция ударной волны в лазерно-нагруженном алмазе A. Schropp et al., Sci.Rep, 5:11089 (2015) a) 1.2 ns shock front b) 1.8 ns lens defects c) 2.4 ns d) 3.0 ns ~ 0.5 µm Magn. 37.6X b = 4329 mm $\Delta \mathbf{x}_{eff}$ $\mathsf{E}_{\mathsf{ph}}$ 8.2 keV FOV ~150 µm

### $\Delta x_{eff} \sim 0.2 \ \mu m$ 8.2 keV E<sub>ph</sub> Magn. 20X Simultaneously with FOV ~250 µm

B.Nagler et al., RSI, 87, 103701 (2016)

### Преимущества:

- Разрешение ∆х может быть лучше 200 нм
- Использование сфокусированного пучка XFEL позволяет объединить рентгенографию с XRD

### Ограничения:

- требуется большое пространство для обеспечения большого R объект-детектор (FOV ~1/R)
- перекрытие дифракционных полос из близко расположенных точек плотности (с увеличением расстояния R)



F. Seiboth et al., Appl. Phys. Lett., 112, 221907 (2018))

Magn. 7.7X FOV ~500 µm

YAG:Ce scintillator based CCD  $\Delta x_D$  =2.25 um



### Упруго-пластичные УВ в Si + XRD

A. Nagler et al., RSI, 87, 103701 (2016))

# (I) - LCLS MEC: Использование схемы с расходящимся пучком XFEL

<sub>60</sub> μm

E<sub>ph</sub>

FOV

#### Эволюция ударной волны в лазерно-нагруженном алмазе A. Schropp et al., Sci.Rep, 5:11089 (2015) a) 1.2 ns shock front b) 1.8 ns lens defects c) 2.4 ns d) 3.0 ns Magn. 37.6X ~ 0.5 µm b = 4329 mm $\Delta \mathbf{X}_{eff}$ $\mathsf{E}_{\mathsf{ph}}$ 8.2 keV FOV ~150 µm R= 600 mm R= 100 mm 1.8 1.6 1.2 1.4 1.2 1.0 mm 1.0 0.8 0.8 0.6 0.6 2.2 um 6.2 um 0.4 0.4 0.2 0.2

0.0

20

40

0.0

0

20

### Упруго-пластичные УВ в Si + XRD

A. Nagler et al., RSI, 87, 103701 (2016))





B.Nagler et al., RSI, 87, 103701 (2016)

### Преимущества:

- Разрешение ∆х может быть лучше 200 нм
- Использование сфокусированного пучка XFEL позволяет объединить рентгенографию с XRD

### Ограничения:

- требуется большое пространство для обеспечения большого R объект-детектор (FOV ~1/R)
- перекрытие дифракционных полос из близко расположенных точек плотности (с увеличением расстояния R)

### (II) - Использование схемы с несфокусированным пучком XFEL

# Фазово-контрастная рентгеновская радиография процесса распространения лазерно-индуцированной ударной волны в твердом веществе

<u>S. Makarov et al. MRE (2023)</u> "Direct imaging of shock wave splitting in diamond at Mbar pressure" Best Paper Award

# Регистрация расщепления ударной волны в алмазе с помощью XFEL

S. Makarov et al. // Matter Rad. Extremes 8, 066601 (2023)



#### Цель:

Пронаблюдать распространение фронта пластической УВ за упругим предвестником и исследовать морфологию малоконтрастной парной волновой структуры в твердом веществе методом когерентной рентгеновской радиографии.



#### Параметры оптического лазера:

- Длина волны I = 532 нм
- Длительность: 5 нс
- Пространственный профиль: супер Гаусс с R = 125 мкм
- Энергия лазера ~ 8 Дж, Интенсивность 6 ТВт/см<sup>2</sup>

# Регистрация расщепления ударной волны в алмазе с помощью XFEL



#### S. Makarov et al. // Matter Rad. Extremes 8, 066601 (2023)

#### Параметры оптического лазера:

- Длина волны I = 532 нм
- Длительность: 5 нс
- Пространственный профиль: супер Гаусс с R = 125 мкм
- Энергия лазера ~ 8 Дж, Интенсивность 6 ТВт/см<sup>2</sup>



### 11

### Сравнение эксперимента с 2D SPH расчетами



### Оценка ширины фронтов ударных волн



### (II) - Использование схемы с несфокусированным пучком XFEL

# Фазово-контрастная рентгеновская радиография с субмикронным разрешением развития неустойчивостей Релея-Тейлора в лазерно-индуцированной плазме.

### Исследование развития неустойчивостей Релея-Тейлора в лазерно-индуцированной плазме





### Результаты рентгенографии НРТ мишени в динамике





0.1 мм

0.1 мм

0.1 мм

0.1 мм





Rigon G., et al. Nat Commun 12, 2679 (2021).

180х190 мкм<sup>2</sup>

Высокое разрешение диагностики позволяет наблюдать морфологические детали, которые прежде были недоступны:

- отчетливо визуализируется эволюция пиков и ножек модуляций.
- □ линейную фазу можно исследовать до времен ~ 50 нс для мишени с мономодуляциями поверхности.
- □ напрямую наблюдается переход эволюции HPT в турбулентную фазу

Сравнение С гидродинамическим моделированием позволяет восстанавливать основные параметры индуцированного лазерно-плазменного потока (ионизация, ионная плотность, вязкость, число Рейнольдса и др.).

### Результаты измерения пространственного спектра



#### В спектре можно выделить четыре зоны:

- □ Низкие частоты (f<sub>k</sub> < 0.12 мкм<sup>-1</sup>): согласуется со стандартной теорией турбулентности. Описывается степенным законом f<sup>q</sup>, где q увеличивается со временем и стремится к q = -1,75 ± 0,25. Это согласуется с теорией Колмогорова (q = 5/3).
- Средние частоты (0.12 мкм<sup>-1</sup> < f<sub>k</sub> < 0.2 мкм<sup>-1</sup>): также подчиняется степенному закону, но с гораздо более высоким коэффициентом q=-6,6 ± 1.3.
- □ Промежуточная область (0.2 мкм<sup>-1</sup> < f<sub>k</sub> < 0.68 мкм<sup>-1</sup>): в спектре наблюдается локальная немонотонность на масштабах f<sub>k</sub><sup>-1</sup> = 3.9±0.1 мкм, которая проявляется только в поздние времена (турбулентная фаза) и не имеет теоретического объяснения.
- Высокие частоты f (за пределом разрешения, f<sub>k</sub> > 0.68 мкм<sup>-1</sup>): спектры становятся почти одной амплитуды с шумами. Данная область соответствует пределу пространственного разрешения используемой геометрии (~ 1.4 мкм).



### Российский XFEL - проект "СиЛа" (Синхротрон + Лазер) (Протвино 2021-2033)



### Российский XFEL - проект "СиЛа" (Синхротрон + Лазер) (Протвино 2021-2033)



### Ожидаемые параметры станции ВЭкС



Оптические каналы									
	Фемтосекундная линия	Наносекундная линия							
	V ∼дес-ки мкм³, Е <sub>іmpact</sub> ∼ ед. Дж	V ~ мм <sup>3</sup> , E <sub>impact</sub> > 100 J							
	(t ~ fs, I > 10 <sup>18</sup> Bm/см <sup>2</sup> )	(t ~ нс, I ~ 10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup> Вт/см <sup>2</sup> )							
λ	(0,75 – 1,0 мкм)	(1,0 – 1,1 мкм)							
E	до 10 Дж	до 8000 Дж							
Ι	>10 <sup>20</sup> Вт/см <sup>2</sup>	до 10 <sup>15</sup> Вт/см <sup>2</sup>							
τ	30-50 фс	1-10 нс							
ν	10 Гц	0.1 Гц							
	Индуцированная плазма:								
	<ul> <li>"kinetic"</li> <li>strong electromagnetic fields</li> <li>Nonequilibrium</li> <li>hot (MeV)</li> </ul>	<ul> <li>"thermal"</li> <li>equilibrium</li> <li>dense</li> <li>hot (eV-keV)</li> </ul>							

# Заключение

- С появлением синхротронных источников нового поколения (XFEL) создаются принципиально новые возможности в направлении исследований по Физике Высокой Плотности Энергии. В частности, для исследования малоконтрастных гидродинамических явлений в плазме:
  - <u>фс-длительность</u>импульсов от таких установок <u>обеспечивает высокое временное разрешение</u>
  - монохроматичность, высокая когерентность и яркость позволяют получать дифракционноулучшенные изображения объектов <u>с малыми градиентами плотности и поглащением менее 1%</u>.



- Разрабатываемый в России XFEL (СИЛА) будет обладать передовыми параметрами, не уступающими параметрам существующих источников.
  - В состав первой очереди станции войдет **станция для изучения вещества в экстремальных состояниях (ВЭкС)**. Сегодня формируется конфигурация и научная программа станции.

### Визуализация мишени до воздействия оптического лазера



Faenov, A.Y., Pikuz, T.A. et al. Sci Rep 8, 16407 (2018)

### Разработка 2D модели разрушения алмаза при распространения ударной волны

Метод расчета - Гидродинамика сглаженных частиц (SPH)

Разработка модели: Алмаз – хрупкий материал, реакция которого близка к реакции карбидокремниевой керамики. [R.S. McWilliams et al., PRB,81(2010)]

Модель разрушения карбидокборовой керамики при ударной нагрузке разработана в [S.A. Dyachkov et al., JAP, 124 (2018)]

Параметры модели разрушения были откалиброваны для алмаза с использованием данных VISAR об одноосном ударном сжатии в направлении <100> [R.S. McWilliams et al., PRB,81(2010)]



with delay of 2.05 ns

# XFEL, оснащенные станциями для исследований по HEDP



imaging of high pressure shock waves in matter

Динамическое сжатие > 1 МБар

### Визуализация мишени до воздействия оптического лазера



Faenov, A.Y., Pikuz, T.A. et al. Sci Rep 8, 16407 (2018)

# Сравнение с гидродинамическими моделированиями на последней стадии линейной фазы (Flash и Multi)



Основываясь на сходстве расчетов с экспериментом (для линейной фазы развития НРТ) из моделирования были получены основные физические параметры системы.

Параметры системы получены для конечной стадии линейной фазы. Таким образом, они могут быть экстраполированы для турбулентой фазы.

- Наблюдается схожая общая морфология границы раздела в моделировании и эксперименте вплоть до 50 нс.
- Расчеты не могут быть выполнены для времен турбулентной фазы, поскольку эта фаза не воспроизводится при моделировании.

Расчетный параметр	Формула	MULTI	FLASH	
Положение границы (L)	расчет	388 мкм	391 мкм	
Плотность СН (ρ)	расчет	0.2 г/см <sup>3</sup>	0.22 г/см <sup>3</sup>	
Температура (Т)	расчет	1.1 эВ	0.8 эВ	
Давление (Р)	расчет	43 кбар	26 кбар	
Скорость струи (u)	расчет	5.7 км/с	5.5 км/с	
	Полученные параметры			
Ионизация (Z <sub>C</sub> , Z <sub>H</sub> , Z <sub>O</sub> )	модель Томаса — Ферми	0.9, 0.4, 1	0.8, 0.4, 1	
Средняя ионизация	(15Z <sub>C</sub> +12Z <sub>H</sub> +4Z <sub>O</sub> )/31	0.7	0.7	
Вязкость η	Clérouin formula [122]	5·10 <sup>-4</sup> см <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	4·10 <sup>-4</sup> см <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	
Re	uL/η	4·10 <sup>7</sup>	<b>6</b> ·10 <sup>7</sup>	
Инерционная длина <i>е</i>	5.31e5ne <sup>-0.5</sup>	52 нм	50 нм	
Инерционная длина ионов	$2.28e7/Z \cdot (m_i/(amu \cdot n_i))^{0.5}$	7.7 мкм	7.4 мкм	
Длина диссипации	L/Re <sup>3/4</sup>	0.7 нм	0.6 нм	

### Предел разрешения пространственного спектра

10<sup>4</sup>

(б)

 $R_2 = 5 \text{ MM}$ 

 $R_2 = 10 \text{ MM}$ 

 $10^{2}$ 

 $10^{4}$ 

Модель: N шариков в области 200 × 200 мкм<sup>2</sup>:

r = 5 мкм (N = 20)

•

٠





Makarov, S.S., Pikuz, S.A., Astron. Rep. 67, 61–70 (2023).

 $R_2 = 20 \text{ MM}$