

Создание нейтронного источника с использованием реакций (ү,п) на лазерно-плазменном ускорителе и его использование для диагностики параметров электронного пучка

<u>Д.А. Горлова^{1,2},</u> А.Ю. Заворотный^{1,2}, И.Н. Цымбалов^{1,2}, К.А. Иванов^{1,3}, А.Б. Савельев^{2,3}, А.Л. Полонский¹

¹Институт ядерных исследований РАН ²МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет ³Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

Научный коллектив

Сотрудники: Иван Цымбалов, Константин Иванов, Илья Мордвинцев, Сергей Шуляпов, Роман Волков, Александр Лапик, Андрей Туринге, Артур Русаков, Андрей Полонский, Андрей Савельев

Аспиранты: Диана Горлова, Аким Заворотный, Владислав Прокудин

Студенты: Екатерина Стародубцева, Валерия Скибина, Анастасия Сивко

Реакций ИЯИ РАН



Лаборатория Релятивистской Лазерной плазмы ФФ МГУ



0. Введение, актуальность работы

- 1. Ускорение электронов на 1 ТВт лазерной системе МГУ
- 2. Генерация нейтронов полученными электронами в фотоядерных реакциях
- 3. Методика диагностики параметров пучка на основе измерения выхода нейтронов
- 4. Выводы и перспективы



Ядерная фотоника

Ядерная фотоника: результаты и перспективы

В.Г. Недорезова, С.Г. Рыковановб, А.Б. Савельева,

[®]Институт ядерных исследований Российской академии наук, проспект 60-летия Октября 7а, Москва, 117312, Российская Федерация [©]Сколковский институт науки и технологий, Территория Инновационного Центра Сколково , Большой бульвар 30, стр.1, Москва, 121205, Российская Федерация [®]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы 1 стр. 2, Москва, 119991, Российская Федерация [©]ГФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, Москва, 119991, Российская Федерация

10.3367/UFNr.2021.03.038960

ЯДЕРНАЯ ФОТОНИКА

© 2017 г. В. Г. Недорезов^{a, *, А. Б. Савельев-Трофимов^b}

^aФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

 b Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет *e-mail: vladimir@cpc.inr.ac.ru

Поступила в редакцию 10.06.2017 г.

10.1134/S207956291606004X





3rd International Conference on Nuclear Photonics (NP2020)

Dates June 7-11, 2021

Актуальность работы

Зачем изучать взаимодействие лазерных импульсов релятивистской интенсивности с веществом?

Современные лазерные системы имеют частоту повторения 0.1-1 кГц и мощности 1 ТВт-10 ПВт и могут быть использованы для создания компактных ускорителей заряженных частиц

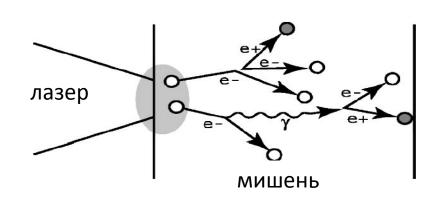
Требования к источнику:

- Высокий пиковый поток частиц
- Желательно высокий средний поток
- Стабильность
- Высокая частота повторения
- Компактность, простота, дешевизна



$$I \sim 10^{18} \div 10^{21} W / cm^2$$

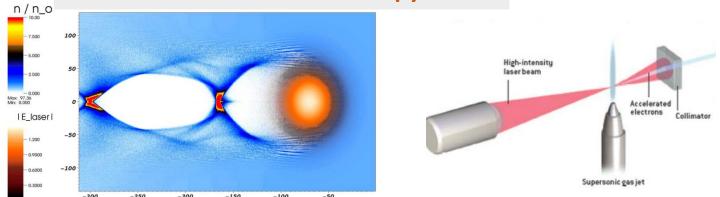




gh-Repetition-Rate Advanced Petawatt Laser System of ELI Beamlines, photo by Lawrence Livermore National Laboratory.

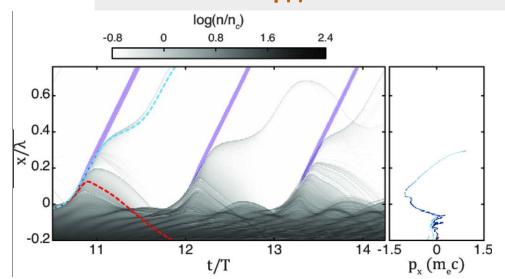
Актуальность работы

Низкоплотные мишени – струи газа



Esarey E. et al. Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 3

Плотные твердотельные мишени



xi (laser wavelengths)

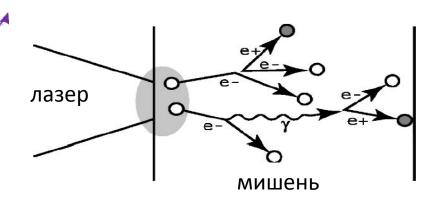
⊃1.4mm

Mao, J. Y., et al. *Applied Physics Letters* 106.13 (2015): 131105.

Релятивистские интенсивности:

$$I \sim 10^{18} \div 10^{21} W / cm^2$$





Thévenet, M., et al. *Nature Physics* 12.4 (2016): 355.

Актуальность работы

Зачем изучать взаимодействие лазерных импульсов релятивистской интенсивности с веществом?

- компактные ускорители электронов и источники рентгеновского излучения
- исследование фотоядерных реакций
- моделирование астрофизических явлений
- Источники для медицинских приложений



Нужны коллимированные пучки электронов

с большим зарядом



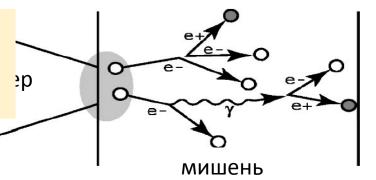
Для лазерных систем десятки ТВт

мощностью единицы –



$$I \sim 10^{18} \div 10^{21} W / cm^2$$





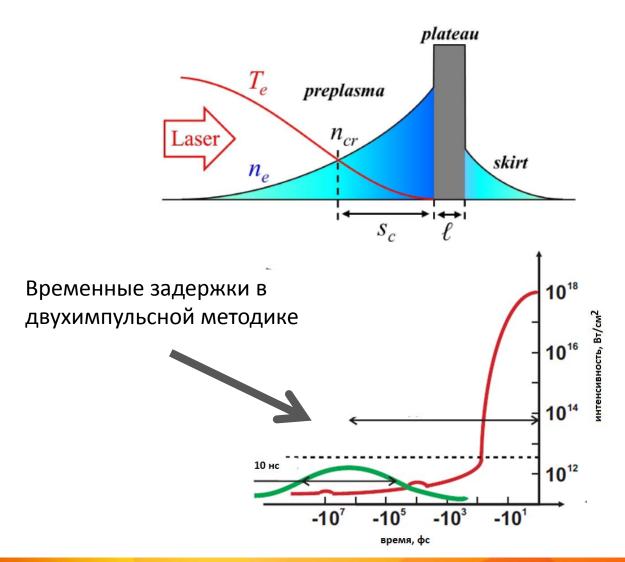
Твердотельные мишени

Ho! Необходимо найти «оптимальную» мишень

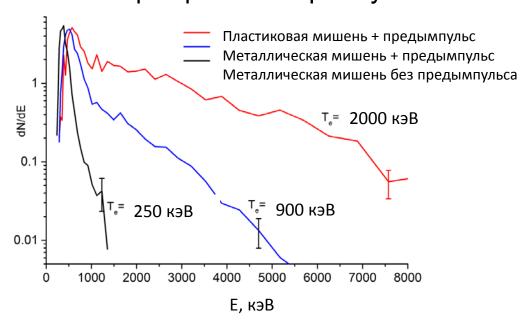
- 0. Введение, актуальность работы
- 1. Ускорение электронов на 1 ТВт лазерной системе МГУ
- 2. Генерация нейтронов полученными электронами в фотоядерных реакциях
- 3. Методика диагностики параметров пучка на основе измерения выхода нейтронов
- 4. Выводы и перспективы



Выход ү-излучения увеличивается при использовании искусственного предымпульса



Спектр тормозного у-излучения

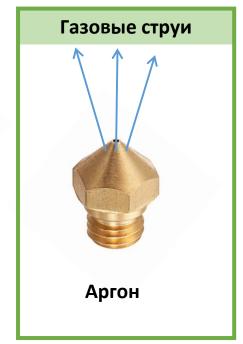


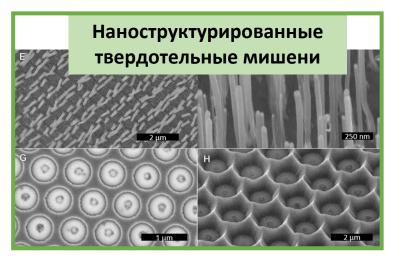
K. A. Ivanov et al., Physics of Plasmas 21, 093110 (2014)

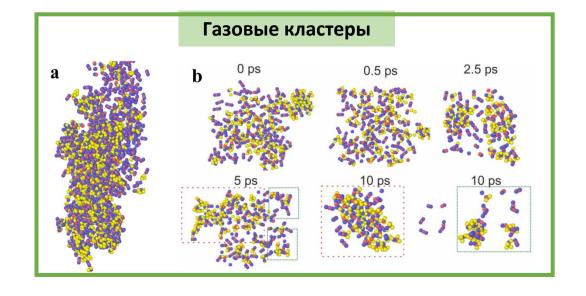
Типы мишеней в эксперименте



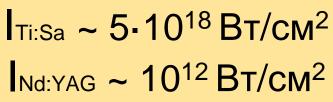


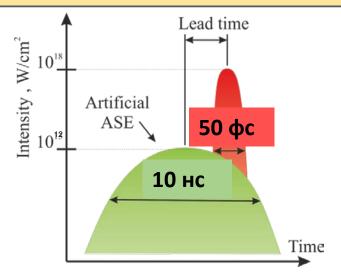






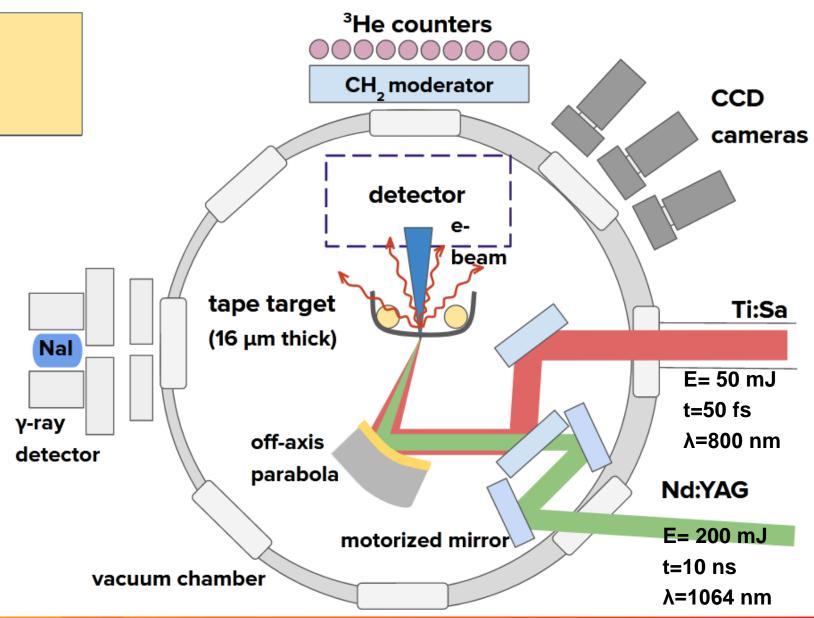
Экспериментальная установка





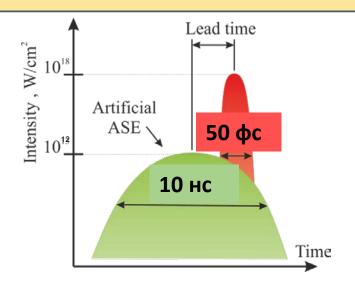
Детекторы:

- **Сцинтиллятор LANEX**
- Магнитный спектрометр
- Цилиндр Фарадея
- He³ счетчики



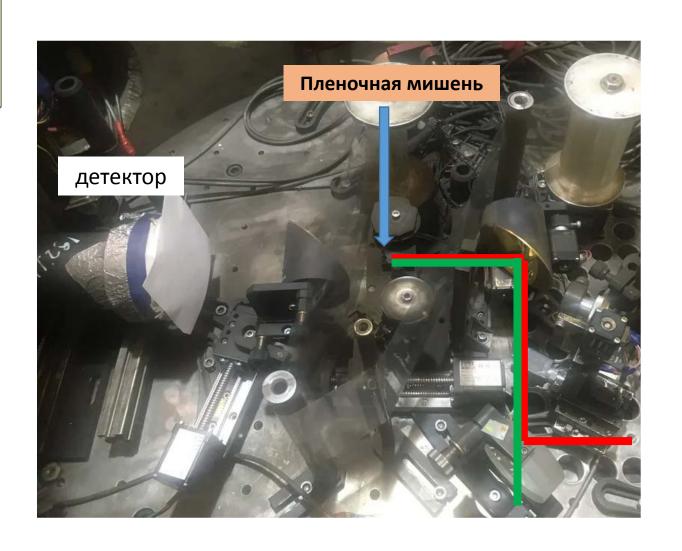
Экспериментальная установка

 $I_{\text{Ti:Sa}} \sim 5.10^{18} \, \text{BT/cm}^2$ $I_{\text{Nd:YAG}} \sim 10^{12} \, \text{BT/cm}^2$



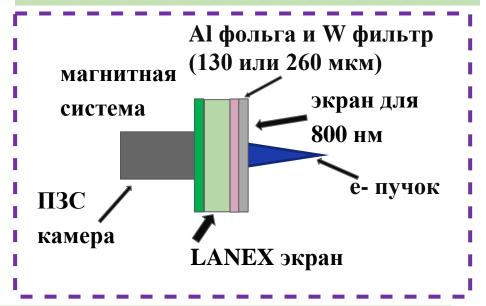
Детекторы:

- Сцинтиллятор LANEX
- Магнитный спектрометр
- Цилиндр Фарадея
- He³ счетчики



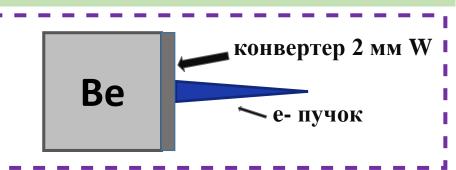
Описание детекторов

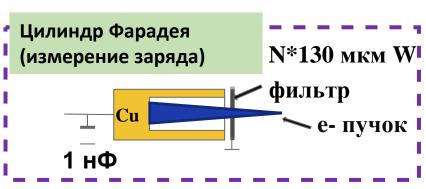


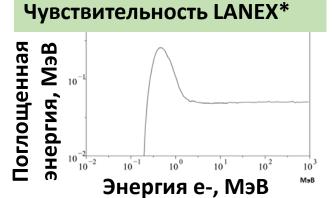




Вторичная мишень для генерации нейтронов

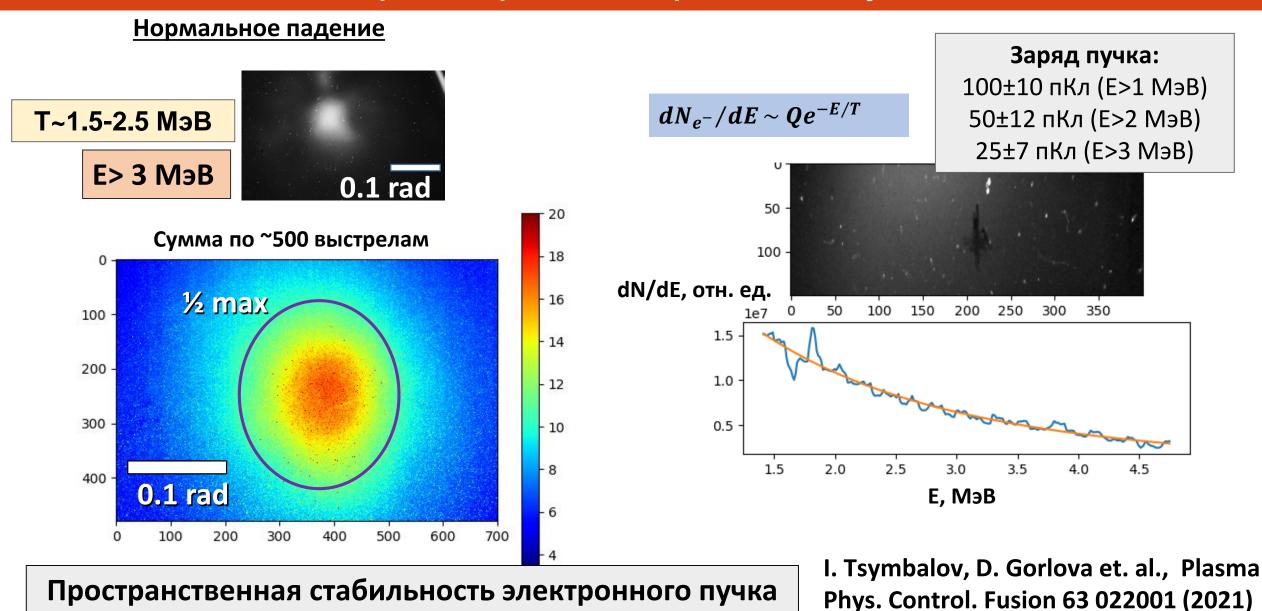




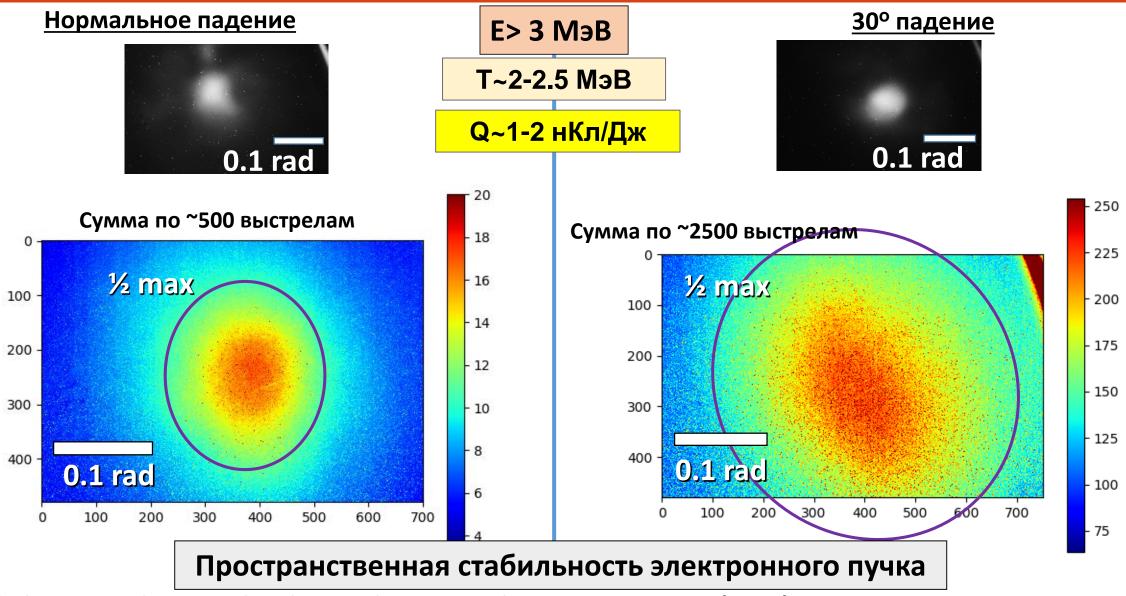


*Y. Glinec *et al.Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, no. 10, 2006

Параметры электронного пучка

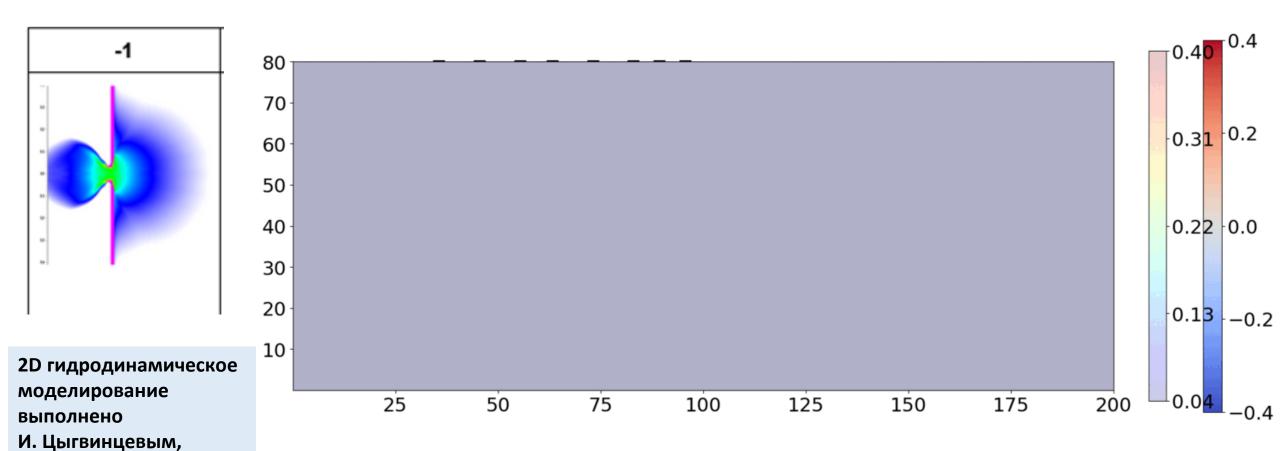


Параметры электронного пучка



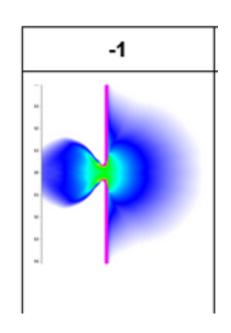
I. Tsymbalov, D. Gorlova et. al., Plasma Phys. Control. Fusion 63 022001 (2021)

Численное PIC моделирование

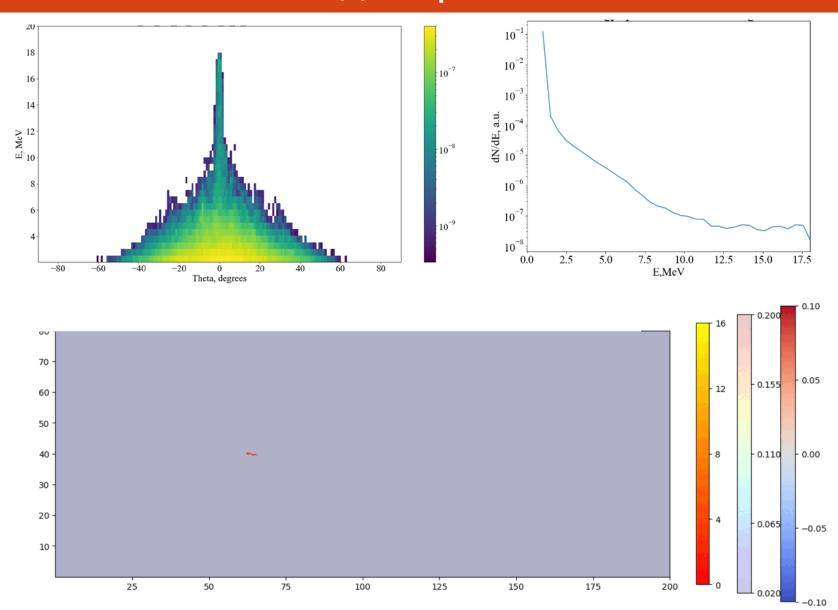


Ф. Корнеевым

Численное PIC моделирование



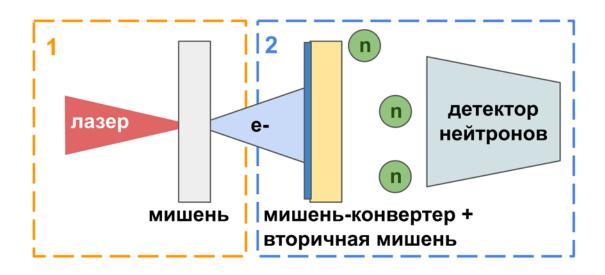
2D гидродинамическое моделирование выполнено И. Цыгвинцевым, Ф. Корнеевым



- 0. Введение, актуальность работы
- 1. Ускорение электронов на 1 ТВт лазерной системе МГУ
- 2. Генерация нейтронов полученными электронами в фотоядерных реакциях
- 3. Методика диагностики параметров пучка на основе измерения выхода нейтронов
- 4. Выводы и перспективы



Фотоядерные реакции на лазерах



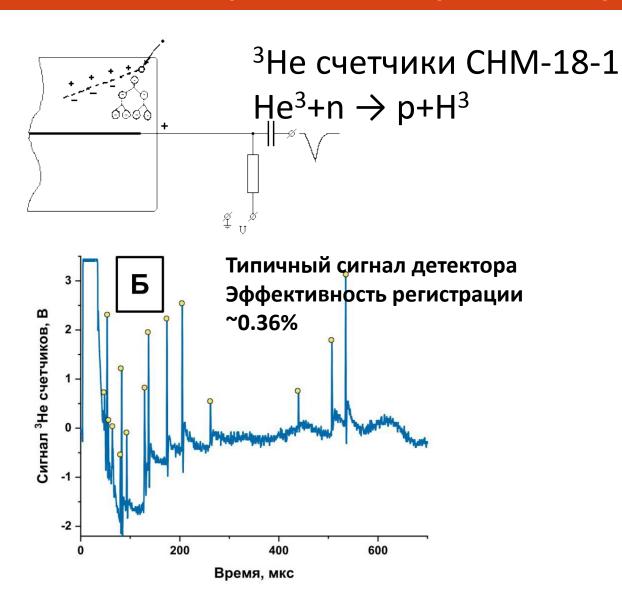
Преимущества лазеров:

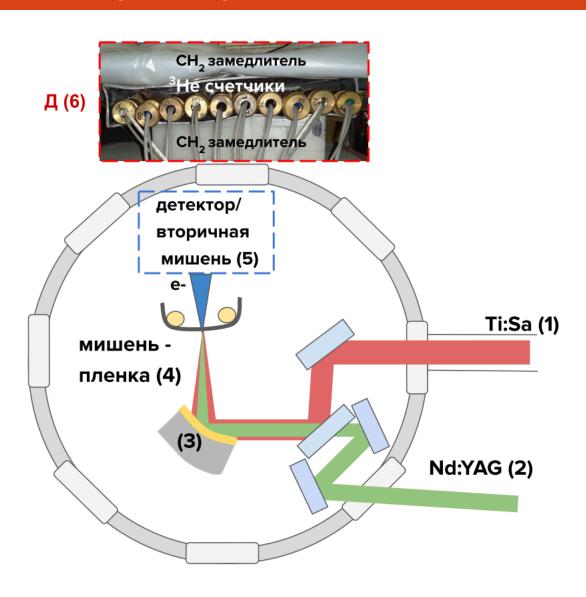
- Высокий пиковый поток гамма-квантов
- Времяразрешенные исследования
- Исследования по схеме совпадений
- Широкий спектр энергий электронов и гамма-квантов
- Длительность импульса нейтронов <нс

Мы работаем в области Е<10 МэВ Сечения реакций (ү,п) для: 500 Be (x100) D (x100) 238[] 400 ж 300 -б 200 200 100 Б 10 12

Е,, МэВ

Генерация нейтронов в фотоядерных реакциях





Генерация нейтронов в фотоядерных реакциях

Вторичная мишень и ее геометрические размеры	Ве 40х30х30 мм	D (в форме D₂0) 100х150х30 мм	U (природный) диск диаметром 75 мм и толщиной 15 мм	Pb 200х120х50 мм	W 40x20x20 mm
Среднее число нейтронов/выстрел	9,3±2,1	5,1±2,4	<1	<1	<1
Максимальное число нейтронов/выстрел	15	9	1	1	1
Число нейтронов/с*срад	~10 ⁵		~104		
Эффективность нейтронов/Дж*с*срад	~10 ⁶		~10 ⁵		

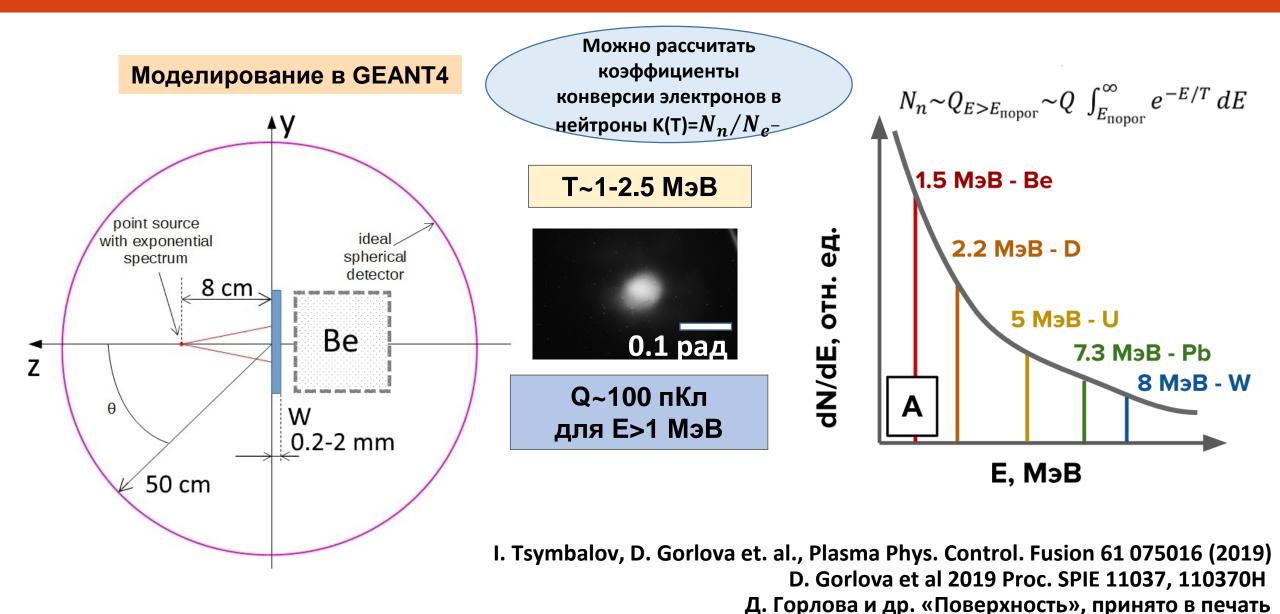
Число зарегистрированных нейтронов и параметры нейтронного источника, для различных вторичных мишеней – Ве, D, U, РЬ, W. Рекордный поток ~10⁶ нейтронов/с*срад

получен в реакциях (p,n) на 50 Дж лазерной системе с I ~10²⁰ Вт/см2

- 0. Введение, актуальность работы
- 1. Ускорение электронов на 1 ТВт лазерной системе МГУ
- 2. Генерация нейтронов полученными электронами в фотоядерных реакциях
- 3. Методика диагностики параметров пучка на основе измерения выхода нейтронов
- 4. Выводы и перспективы

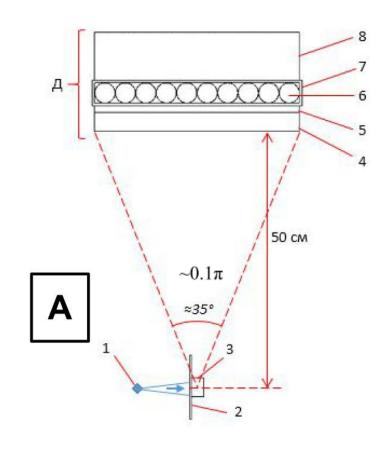


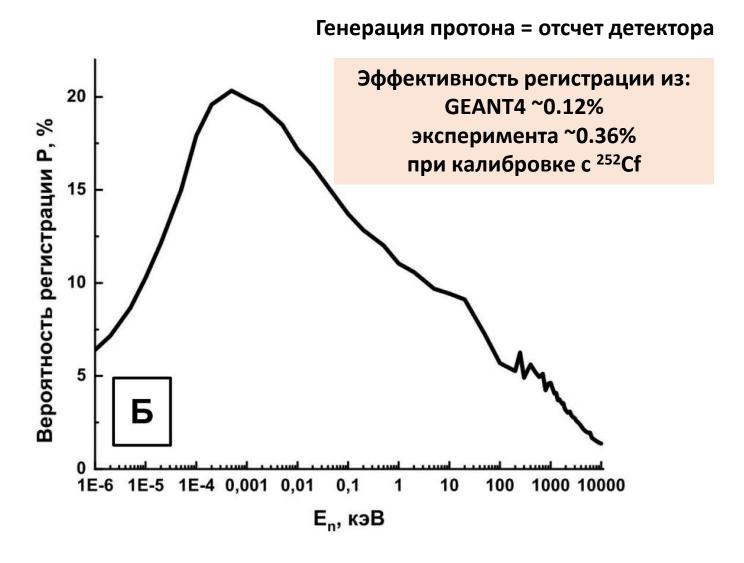
Фотоядерная методика измерения заряда пучка



Расчет чувствительности детектора в GEANT4

Моделирование в GEANT4





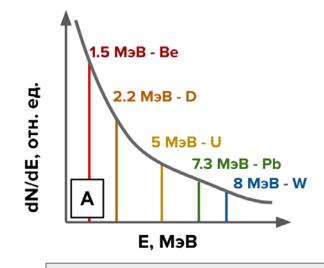
Д. Горлова и др. «Поверхность», принято в печать

Фотоядерная методика измерения заряда пучка

Вторичная мишень	Ве	D	U	Pb	W	
Т, МэВ	Коэффициент K(T)= $N_n/N_{ m e^-}$, полученный в моделировании GEANT, \cdot 10 $^{-}$					
	10					
1	6,8±1,0	-	-	-	-	
1.5	23,4±1,8	0,20±0,15	3,5±1,2	2,6±0,5	3,2±0,9	
2	50±3	2,9±0,5	27±4	17,8±1,2	20,2±2,2	
2.5	100±4	9,5±1,0	119±14	74±4	73±4	
Т, МэВ	Заряд Q для электронов с E>1 МэВ , пКл					
1	270±70	-	-	-	-	
1.5	109±26	(7±6)*10 ³	80±27	105±20	85±24	
2	60±14	(0,6±0,3)*10 ³	11,8±1,9	18,2±1,2	16,0±1,7	
2.5	33±8	190±90	3,0±0,4	4,8±0,3	4,8±0,3	

Полученные в моделировании GEANT4 коэффициенты пересчета в заряд пучка, а также оцененные с их использованием заряды Q для различных вторичных мишеней. Д. Горлова и др. «Поверхность», принято в печать

Из GEANT4 коэффициенты конверсии K(T)= N_n/N_{e^-}



Заряд пучка:

100±10 пКл (E>1 МэВ) 50±12 пКл (E>2 МэВ) 25±7 пКл (E>3 МэВ)

Фотоядерная методика измерения заряда пучка

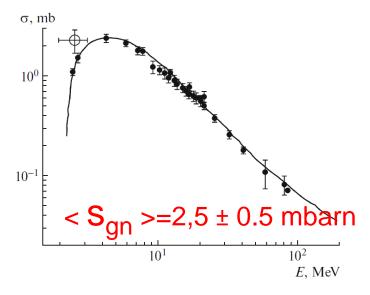
Вторичная мишень	Ве	D	U	Pb	W	
Т, МэВ	Коэффициент K(T)= N_n/N_{e^-} , полученный в моделировании GEANT, ·10 $^{\circ}$					
	10					
1	6,8±1,0	-	-	-	-	
1.5	23,4±1,8	0,20±0,15	3,5±1,2	2,6±0,5	3,2±0,9	
2	50±3	2,9±0,5	27±4	17,8±1,2	20,2±2,2	
2.5	100±4	9,5±1,0	119±14	74±4	73±4	
Т, МэВ	Заряд Q для электронов с E>1 МэВ , пКл					
1	270±70	-	-	-	-	
1.5	109±26	(7±6)*10 ³	80±27	105±20	85±24	
2	60±14	(0,6±0,3)*10 ³	11,8±1,9	18,2±1,2	16,0±1,7	
2.5	33±8	190±90	3,0±0,4	4,8±0,3	4,8±0,3	

Полученные в моделировании GEANT4 коэффициенты пересчета в заряд пучка, а

также оцененные с их использованием заряды Q для различных вторичных мишеней. Д. Горлова и др. «Поверхность», принято в печать

Из GEANT4 коэффициенты конверсии K(T)= N_n/N_{e^-}

$D(\gamma,n)$ cross section



I. Tsymbalov et.al., Physics of **Atomic Nuclei 80 397 (2017)**

- 0. Введение, актуальность работы
- 1. Ускорение электронов на 1 ТВт лазерной системе МГУ
- 2. Генерация нейтронов полученными электронами в фотоядерных реакциях
- 3. Методика диагностики параметров пучка на основе измерения выхода нейтронов
- 4. Выводы и перспективы



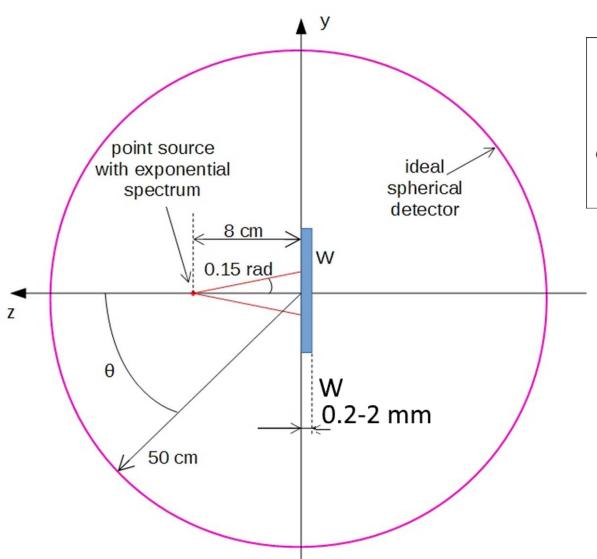
Выводы

- Экспериментально и численно была продемонстрирована генерация стабильного (флуктуация положения~0.1 рад), коллимированного (~0.05 рад) электронного пучка с зарядом 50-100 пКл (E>1.7 МэВ) и температурой ~1.5-2.5 МэВ с использованием пленочной мишени. Была достигнута эффективность преобразования~1-2 нКл/Дж в электроны с E>1.7 МэВ на 1 ТВт лабораторной лазерной системе. Механизмом ускорения является прямое лазерное ускорение (DLA) в плазменном канале.
- Был создан лазерно-плазменный источник нейтронов с потоком ~10⁵-10⁶ с⁻¹срад⁻¹ с использованием реакций (γ, n) на 1 ТВт лазерной системе
- Предложена и реализована методика измерения заряда Q и температуры Т пучка электронов на лазерно-плазменном ускорителе по измерению выхода нейтронов. Полученные значения хорошо согласуются со значениями, измеренными стандартными средствами диагностики пучка.
- Основными преимуществами предложенной фотоядерной методики являются: простота использования, помехоустойчивость; наличие четко определенного порога измерения, связанного с порогом реакции; возможность измерения заряда сильно расходящегося пучка, а также возможность использования совместно с источником нейтронов.



Спасибо за внимание!

Перспективы: генерация позитронов



Processes leading to the pair production

Trident process Bethe-Heitler process

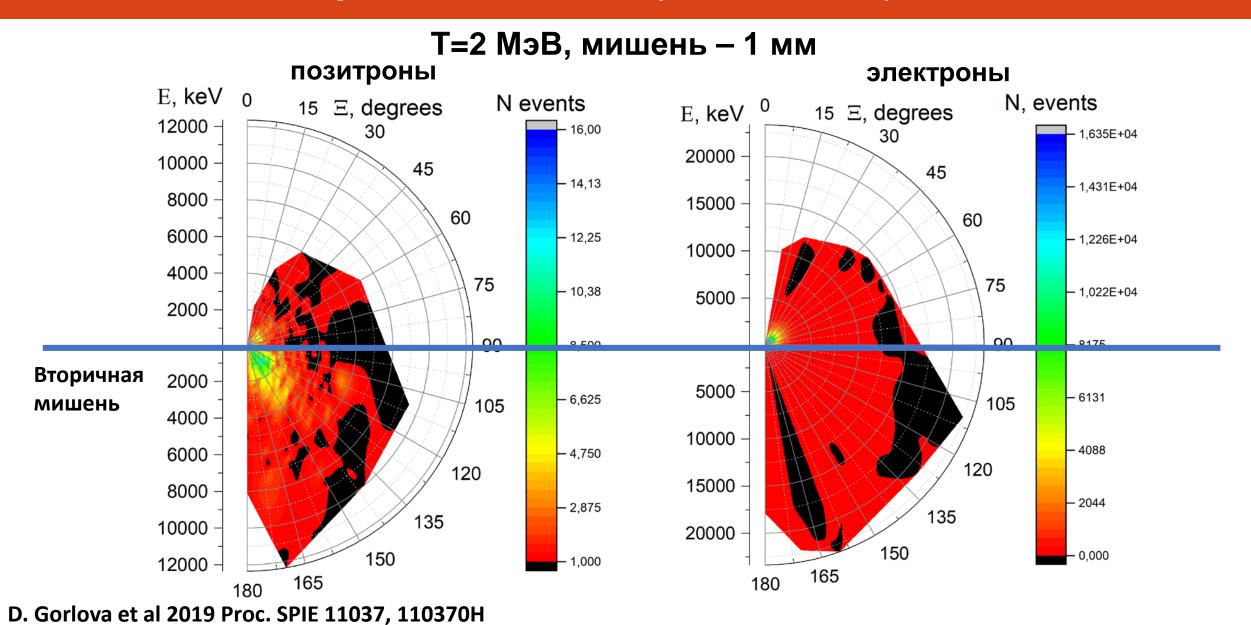
$$e^{-} + Z \rightarrow 2e^{-} + e^{+} + Z$$
 $e^{-} + Z \rightarrow e^{-} + Z + \gamma$
 $E_{e} > 2m_{e}c^{2}$ $\gamma + Z \rightarrow e^{+} + e^{-} + Z$

Simulation $N_{\rm el} = 5*10^7$ geometry

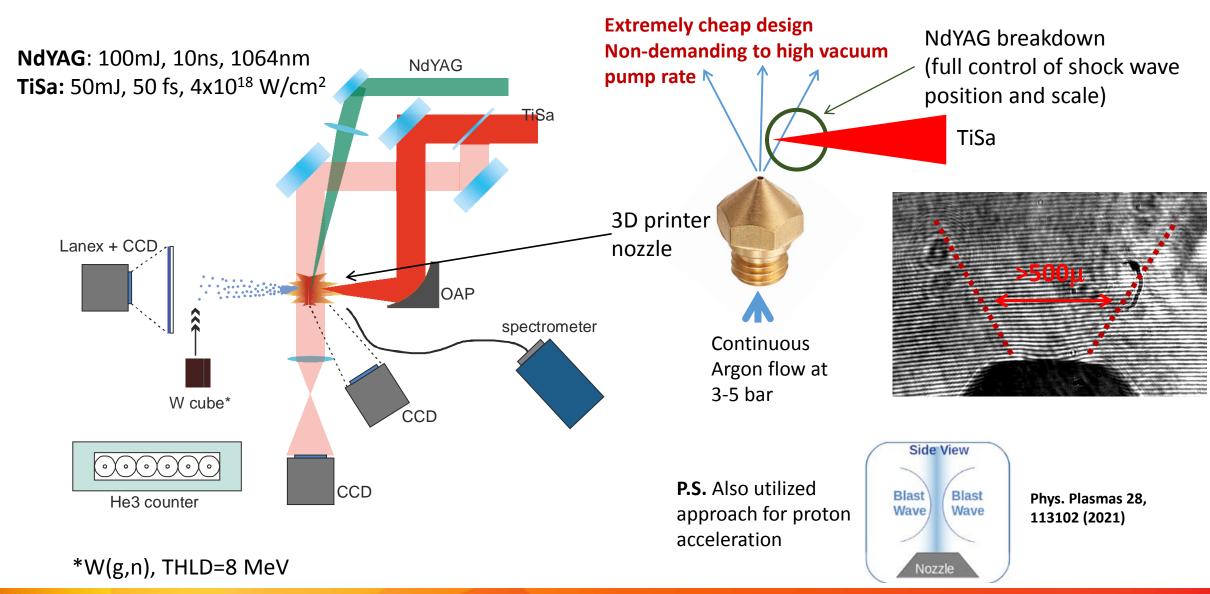
W target thicknesses: 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 mm Electron spectrum slope: 1, 1.5, 2 MeV

D. Gorlova et al 2019 Proc. SPIE 11037, 110370H

Перспективы: генерация позитронов



Перспективы: мишени – газовые струи



Перспективы: мишени – газовые струи

