

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ВБЛИЗИ ПОРОГА НА УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРЕ

А. А. Туринге^{1,}, В. Г. Недорезов¹, А. Б. Савельев²*

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Дан краткий обзор работ по исследованию фотоядерных реакций вблизи порога на линейном ускорителе электронов ЛУЭ (8,5 МэВ) ИЯИ РАН и фемтосекундном лазерном комплексе тераваттной мощности МЛЦ МГУ им. М. В. Ломоносова. Основное внимание уделено моделированию экспериментов с помощью программы GEANT-4. Это позволило сравнить возможности разных методов и определить основные направления будущих исследований.

A brief review of the work on the study of photonuclear reactions near the threshold on the linear electron accelerator LUE 8.5 MeV of the Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences and the femtosecond laser complex of the terawatt power of the ILC of the Lomonosov Moscow State University is given. The main attention is paid to simulation of experiments using the GEANT-4 program. This allowed us to compare the possibilities of different methods and determine the main directions of future research.

PACS: 29.30.Kv

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ВБЛИЗИ ПОРОГА

В последние годы в мире заметно возрос интерес к изучению фотоядерных реакций вблизи порога. Актуальность таких исследований связана с возможностью получения новых фундаментальных знаний о природе ядерной материи, а также решения различных прикладных задач. Среди фундаментальных направлений можно отметить исследование коллективных возбуждений (пигми-резонансов) в ядрах, у которых согласно теоретической интерпретации проявляются новые моды колебаний типа тороидальных, компрессионных, «ножничных» и др. [1, 2]. Прикладные задачи связаны с появлением

*E-mail: turinge56@mail.ru

гамма-источников нового поколения, в которых используется метод обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронах высоких энергий. Ожидаемые параметры новых гамма-пучков (энергия до 20 МэВ, монохроматичность лучше 1 %, интенсивность до 10^{13} с⁻¹, степень поляризации 100 %) позволяют по-новому решать проблемы ядерного нераспространения, дефектоскопии, медицинской диагностики и др. Подробные материалы на эту тему содержатся в материалах последних международных конференций по ядерной фотонике и обзоре [3].

Однако, несмотря на очевидные успехи нового направления, получившего за рубежом название «ядерная фотоника», реальных результатов по исследованию фотоядерных реакций вблизи порога пока достигнуто немного. В первую очередь это связано с высокими требованиями к параметрам пучков электронов, о которых говорилось выше. В настоящее время декларируемые параметры существенно уступают достигнутым. Для реализации метода обратного комптоновского рассеяния требуются лазеры петаваттной мощности, которых в мире пока немного. Поэтому представляет интерес сравнить возможности традиционных фотоядерных методов, основанных на использовании электронных ускорителей и фемтосекундных лазеров тераваттной мощности.

В данной работе методом моделирования с помощью программы GEANT-4 проведены исследования возможности изучения фотоядерных реакций по следующим направлениям: возбуждение спиновых изомеров в ядрах кадмия и индия вблизи порога, фоторасщепление ядер дейтерия при энергии фотонов ниже 10 МэВ, генерация позитронов и нейтронов низких энергий. Полученные данные моделирования сравниваются с первыми результатами экспериментов, выполненных на тормозном пучке линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН и фемтосекундном лазерном комплексе ММЛЦ МГУ.

1. ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВОК

Для начала сравним возможности получения пучков гамма-квантов с энергиями до 10 МэВ на линейном ускорителе электронов ЛУЭ (8,5 МэВ) ИЯИ РАН и фемтосекундном лазерном комплексе тераваттной мощности МЛЦ МГУ им. М. В. Ломоносова. Параметры пучков электронов представлены в табл. 1. На лазере пучки электронов в результате ускорения в плазме, создаваемой мощным импульсным излучением, имеют следующие параметры: длину волны 800 нм, длительность импульса 50 фс, частоту повторения 10 Гц, энергию фотонов в импульсе 50 мДж, выделяемую мощность на мишени 10^{19} Вт/см². Механизмы ускорения электронов при такой мощности лазера подробно рассмотрены в [4].

Таблица 1. Параметры пучков электронов, получаемых на ЛУЭ (8,5 МэВ) и фемто-секундном лазере тераваттной мощности

Параметр	Ускоритель	Лазер
Энергия	Монохроматическая, регулируется в пределах от 5 до 9 МэВ	Спектр экспоненциальный с максимальной энергией около 10 МэВ
Частота повторения импульсов, Гц	100	10
Длительность импульса	3 мкс	50 фс
Число электронов в 1 с	10^{14}	10^6 (при пороге 0,5 МэВ и коллимации 1°)
Фокус излучателя	8 см	4 мкм
Угловая расходимость	10^{-4} рад	Излучение практически изотропно

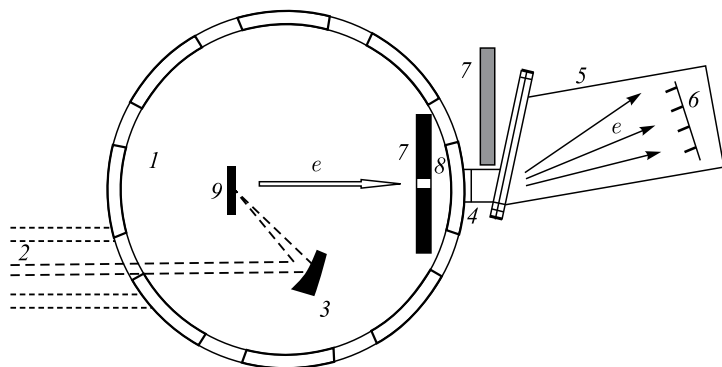


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — вакуумная камера; 2 — лазерное излучение; 3 — параболическое зеркало; 4 — магнит; 5 — камера спектрометра; 6 — детектирующая линейка; 7 — свинцовая защита от рентгена с коллиматором для электронов; 8 — индукционный датчик тока электронов; 9 — мишень

Приведенные в табл. 1 результаты для лазера экспериментально получены с помощью магнитного спектрометра [5]. Схема эксперимента и полученный результат представлены на рис. 1, 2 соответственно.

Для исследования фотоядерных реакций на данном этапе требуются пучки жестких гамма-квантов. Сечения электро-ядерных реакций при низких энергиях на два порядка меньше, чем фотоядерных, и пока в программу исследований не входят. На пучках электронов с энергией до 10 МэВ пучки гамма-квантов с достаточно высокой интенсивностью можно получить только с по-

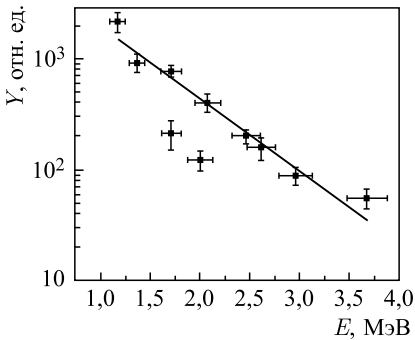


Рис. 2. Экспериментально измеренный спектр электронов

деления фотонов, вылетающих из тормозной вольфрамовой мишени толщины 0,4 мм, которая согласно моделированию является оптимальной с точки зрения получаемого выхода фотонов. Поскольку интенсивности пучков на лазере и ускорителе сильно различаются, в качестве параметра для сравнения выходов взято время экспозиции, которое позволяет оценить выход фотонов в единицах абсолютной шкалы.

Для более детального сравнения спектров в интересующей нас области энергии от 3 до 9 МэВ эти распределения показаны при пороге 3 МэВ.

Видно, что в отличие от энергетических распределений тормозных фотонов угловые распределения различаются слабо. При этом число тормозных

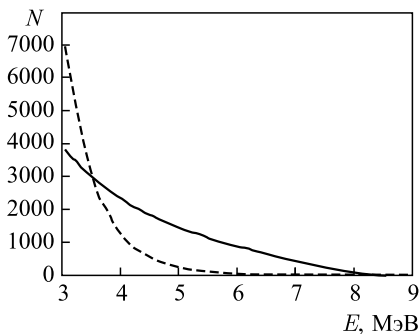


Рис. 3. Энергетические распределения фотонов, вылетающих из тормозной мишени ($W = 0,4$ мм): сплошная линия — ускоритель, время экспозиции 10 нс; штриховая — лазер, время экспозиции 6 мин

мощью тормозного излучения. При более высоких энергиях электронов, получаемых на лазерах петаваттной мощности, становится доступен метод обратного комптоновского рассеяния, и параметры пучков существенно улучшаются. Один из первых экспериментов по использованию обратного комптоновского рассеяния и его особенности были описаны в [6].

В данной работе мы ограничились изучением возможностей лазеров тераваттной мощности. На рис. 3, 4 показаны энергетические и угловые распре-

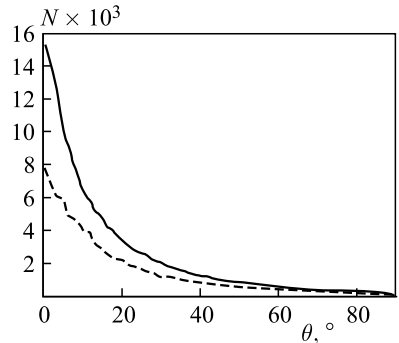


Рис. 4. Угловые распределения фотонов с энергией свыше 3 МэВ, вылетающих из тормозной мишени: сплошная линия — ускоритель, время экспозиции 10 нс; штриховая — лазер, время экспозиции 6 мин

фотонов с энергией свыше 3 МэВ от ускорителя за одинаковое время более чем на 10 порядков выше, чем от лазера.

2. ВЫХОДЫ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ И ВРЕМЯ ЭКСПОЗИЦИИ

Среди основных направлений исследования фотоядерных реакций при низких энергиях рассмотрим следующие. Во-первых, представляет интерес изучение генерации позитронов, поскольку экспериментальные данные по коэффициентам e^-e^+ -конверсии вблизи порога в специальной литературе практически отсутствуют. Моделирование по программе GEANT-4 позволяет на основе расчетов получить предварительные данные для этого процесса. На рис. 5 приведены расчетные выходы позитронов из тормозной вольфрамовой мишени для лазерного и ускорительного экспериментов [7].

Видно, что за счет большей доли электронов высокой энергии в случае ускорительного эксперимента доля высокоэнергичных позитронов для него существенно больше. Полный выход позитронов за указанное время экспозиции составит на ускорителе и лазере 6900 ± 80 и 2500 ± 50 соответственно.

Второе направление, представляющее интерес на современном этапе, связано с исследованием полных сечений фотопоглощения, а именно изучением коллективных возбуждений ядер (пигми-резонансов), у которых согласно теоретической интерпретации проявляются новые моды колебаний типа тороидальных, компрессионных, «ножичных» и др. В настоящее время это делается в основном путем измерения сечений упругого и неупругого рассеяния фотонов на ядрах (радиационных переходов) с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения. Однако следует рассмотреть и другие возможности, в частности, прямое измерение полных сечений методом поглощения и измерение выходов спиновых изомеров в зависимости от энергии фотонов. В данной работе на линейном ускорителе электронов ЛУЭ (8,5 МэВ) были сделаны измерения выходов спиновых изомеров (изомерных состояний) ядер в реакциях $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$, $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ с помощью метода наведенной активности. Для получения абсолютных значений выходов использовались данные моделирования, позволившие оценить потоки

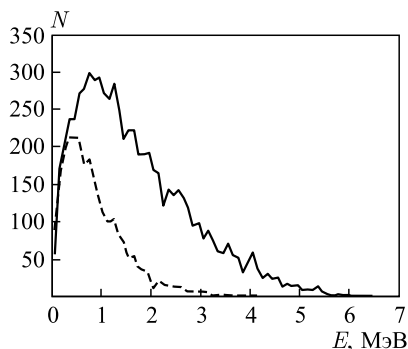


Рис. 5. Выходы позитронов из тормозной мишени ($W = 0,4$ мм): сплошная линия — ускоритель, время экспозиции 100 нс; штриховая — лазер, время экспозиции 30 мин

Таблица 2. Результаты измерений сечений на эквивалентный фотон для изотопов кадмия и индия при потоке гамма-квантов $N_\gamma = 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$

Элемент	Число отсчетов в пике S	Эффективность регистрации	Число ядер в образце N , 10^{21} см^{-2}	Выход Y , с^{-1}	Сечение на эквивалентный фотон σ_q , мкб
^{111}Cd	211914	0,099	1,04	$4,5 \cdot 10^3$	$2,2 \pm 0,2$
^{113}In	43400	0,116	0,39	$2,4 \cdot 10^3$	$3,1 \pm 0,2$
^{115}In	593087	0,076	8,89	$7,3 \cdot 10^4$	$0,48 \pm 0,05$

и спектры гамма-квантов, прошедших через образцы. Результаты измерений приведены в табл. 2. Время экспозиции при стандартном режиме работы ускорителя (см. табл. 1) составляло около 2 ч. Подробно методика измерений и предварительные результаты (см. табл. 2) описаны в работе [8].

Видно, что измерение выходов спиновых изомеров индия и кадмия требует довольно высоких интенсивностей гамма-пучка, которые пока можно получить только на ускорителе электронов. В ближайшем будущем планируется измерение энергетической зависимости сечений и теоретические расчеты изомерных отношений с целью определения полных сечений фотопоглощения и изучения пигми-резонансов в рассматриваемой области энергии.

Наконец, третье направление исследований в 2017 г. было связано с генерацией нейтронов в мишени из тяжелой воды, облучаемой пучком вторичных фотонов от лазера [9]. На рис. 6 показан экспериментально измеренный временной спектр замедляющихся нейтронов в сравнении с результатами

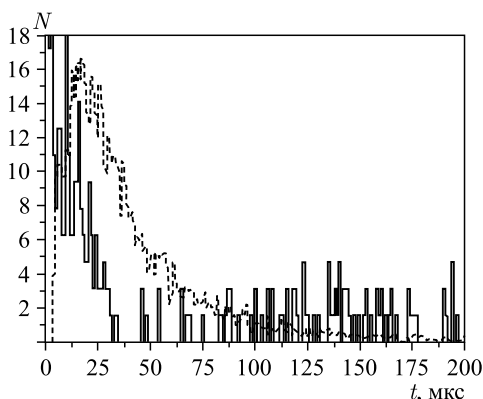


Рис. 6. Временные распределения замедляющихся нейтронов, полученные за 150 импульсов — 15 с. Сплошная кривая — результаты измерений; штриховая — результаты моделирования

моделирования по программе LOENT ((Low Energy Neutron Transport) [10]). В качестве детектора нейтронов использовались стандартные счетчики ^3He марки CNM-18 с общей чувствительной поверхностью около 100 см^2 . Видно, что в течение $\sim 50 \text{ мкс}$ после импульса пучка экспериментальный выход заметно ниже расчетного. Следовательно, после импульса пучка на экспериментальном временном спектре возникает мертвая зона, когда счетчик не регистрирует никаких частиц. Очевидно, это связано с воздействием радиационного излучения, вызванного мощным лазерным импульсом. Подобные эффекты при работе с импульсным пучком электронов наблюдались ранее для газовых счетчиков на импульсных ускорителях электронов [11].

Итак, эксперименты на тормозных пучках от лазера имеют определенную специфику и полученные в настоящее время данные по сечениям фоторасщепления дейтрона при низких энергиях (рис. 7) следует считать предварительными. Таким образом, развитие и совершенствование фотоядерных методов на лазере для генерации нейтронов представляют большой интерес.

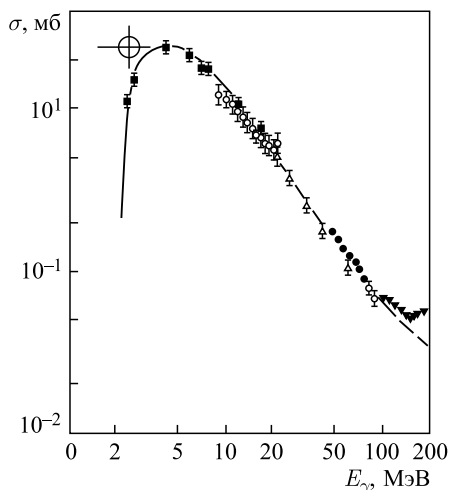


Рис. 7. Расчетная кривая и экспериментальные данные (точки) энергетической зависимости сечения реакции $D(\gamma, n)H$ из монографии [12]. Отдельно стоящая точка — измеренное в данной работе сечение фоторасщепления дейтрона при энергии $E_\gamma = (3,6 \pm 0,3) \text{ МэВ}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование экспериментов и первые экспериментальные результаты показывают, что исследование фотоядерных реакций при низких энергиях можно проводить как на традиционных ускорителях электронов, так и на фемтосекундных лазерных установках тераваттной мощности. В настоящее время основные параметры лазерных установок уступают ускорительным, но, учитывая новизну лазерного метода и значительный прогресс, достигнутый в последние годы, можно ожидать существенных результатов в ближайшем будущем. На данном этапе это в основном достигается путем увеличения мощности лазера от тераваттного до петаваттного диапазона.

Как было показано в табл. 1, существенным положительным отличительным признаком, который дает определенные преимущества пучкам, полу-

чаемым на фемтосекундном лазере, является малый размер фокуса излучателя. При существующих параметрах представляет интерес получение пространственно-когерентного рентгеновского излучения для интроскопии слабо контрастных объектов по методу фазового контраста, а точнее говоря, по методу рефракционной интроскопии. Эта тематика активно развивалась на пучках синхротронного излучения, реализуемых на накопителях электронов высоких энергий (см., например, [13]). Теперь, очевидно, пришло время для ее использования на компактных и мобильных лазерных установках.

Таким образом, основное направление работ в настоящее время на тераваттных лазерных комплексах, очевидно, должно быть связано с возможностью улучшения параметров установки. Существенным моментом в этой работе является возможность качественной диагностики плазмы с помощью фотоядерных методов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу научной группы, участвующей в проведении экспериментов, в частности сотрудникам ИЯИ РАН А. А. Русакову, А. М. Лапику, С. В. Зуеву, Е. С. Конобеевскому, Н. М. Соболевскому, а также аспирантам и сотрудникам МГУ им. М. В. Ломоносова К. А. Иванову, Р. В. Волкову, С. А. Шуляпову и И. Н. Цымбалову, участие которых обеспечило наличие подавляющего большинства экспериментальных и расчетных данных, приведенных в этой статье.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант 16-12-10039, и частично поддержана грантом РФФИ 16-02-00213 в части изучения генерации позитронов электронным пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Savran D.* Recent Results on the Pygmy Resonance // *J. Phys. Ser.* 2015. V. 590, No. 1. P. 012011.
2. *Tertychny G., Tselyaev V., Kamerdzhev S., Grummer F., Krewald S., Speth J., Avdeenkov A., Litvinova E.* // *Phys. Lett. B.* 2007. V. 647. P. 104.
3. *Habs D., Gunter M. M., Jentschell M.* Nuclear Photonics. arXiv:1201.4466v1[physics.acc-ph].
4. *Андреев А. В., Гордиенко В. М., Савельев А. Б.* Ядерные процессы в высокотемпературной плазме, индуцируемой сверхкоротким лазерным импульсом // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 31. С. 941.
5. *Русаков А. В., Иванов К. А., Борисов Н. А., Цымбалов И. Н., Горлова Д. А., Лалик А. М., Ларькин А. С., Лисин В. П., Мордвинцев И. М., Мушкаренков А. Н., Недорезов В. Г., Полонский А. Л., Савельев-Трофимов А. Б., Туринге А. А.* Электронный магнитный спектрометр для экспериментов на тераваттном фемтосекундном лазере // *ПТЭ.* 2017. Т. 5. С. 1–5.
6. *Недорезов В. Г., Туринге А. А., Шатунов Ю. М.* Эксперименты на пучках гамма-квантов, получаемых методом обратного комптоновского рассеяния // *УФН.* 2004. Т. 174, № 4. С. 353.

7. Горлова Д. А., Недорезов В. Г., Иванов К. А., Савельев А. Б., Туринге А. А., Цымбалов И. Н. К возможности генерации позитронов низких энергий на электронных ускорителях с энергией пучка несколько МэВ и на тераваттных лазерах // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. С. 272.
8. Недорезов В. Г., Конобеевский А. С., Зуев А. В., Полонский А. Л., Туринге А. А. Возбуждение изомерных состояний ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In фотонами с энергией до 8 МэВ // ЯФ. 2017. Т. 80, № 5. С. 423.
9. Цымбалов И. Н., Волков Р. В., Еремин Н. В., Иванов К. А., Недорезов В. Г., Пасхало А. А., Полонский А. Л., Савельев А. Б., Соболевский Н. М., Туринге А. А., Шуляков С. А. Исследование реакции $\text{D}(\gamma, n)\text{H}$ вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения // Там же. № 3. С. 1–5.
10. Latysheva L. N., Sobolevsky N. M., Koptelov E. A., Ilić R. D. Mathematical Simulation of the INR RAS SVZ-100 Neutron Spectrometer // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2015. V. 9. P. 1126–1129.
11. Кузнецов В. Л., Недорезов В. Г., Никитина Н. В. Влияние γ -излучения на эффективность регистрации осколков деления в искровом счетчике // ПТЭ. 1979. Т. 5. С. 72.
12. Эрикссон Т., Вайзе В. Пионы и ядра. М.: Наука, 1991. 335 с.
13. Podurets K. M., Pogorelyi D. K., Manushkin A. A., Nedorezov V. G., Somenkov V. A., Shchetinkin S. A., Kononov N. K., Kuvardina A. P. Refraction Introscopy at the “Mediana” Station of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source // Crystallogr. Rep. 2004. V. 49, Suppl. 1. P. 50–54.