

## К программе фотоядерных исследований на пучке обратных комптоновских квазимонохроматических $\gamma$ -квантов с перестраиваемой энергией $E_\gamma \lesssim 40$ МэВ

С.С. Бельшев,<sup>1</sup> В.В. Варламов,<sup>2</sup> Л.З. Джилавян,<sup>3,\*</sup> А.А. Кузнецов,<sup>1,2</sup>  
А.М. Лапик,<sup>3</sup> А.Л. Полонский,<sup>3</sup> А.В. Русаков,<sup>3</sup> В.И. Шведун<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей ядерной физики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>3</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук.  
Россия, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а

(Поступила в редакцию 10.01.2023; принята к публикации 05.02.2023)

На основе анализа развития изучения фотоядерных реакций при  $E_\gamma \lesssim 40$  МэВ и уникальных параметров разрабатываемого комптоновского источника  $\gamma$ -квантов предложена программа приоритетных фотоядерных исследований на этом источнике. Программа включает исследования структуры гигантских Е1 резонансов и пигми-резонансов; сечений парциальных фотонуклонных реакций; ядерной резонансной флуоресценции; фотоделения; задач астрофизики и нуклеосинтеза.

PACS: 25.20.-x УДК: 539.1.

Ключевые слова: обратное комптоновское рассеяние лазерных фотонов на ультрарелятивистских электронах, гигантские и пигми-резонансы в атомных ядрах, сечения фотонуклонных реакций, фотоделение ядер, ядерная резонансная флуоресценция, нуклеосинтез.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330204](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330204)

### ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая программа составлена для исследований фотоядерных реакций в области энергий  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$  от нескольких мегаэлектронвольт до  $\approx 40$  МэВ на пучке квазимонохроматического  $\gamma$ -излучения с перестраиваемой энергией, генерируемого комптоновским источником (КИ) от обратного комптоновского рассеяния (ОКР) лазерных фотонов на ультрарелятивистских электронах, который разрабатывается в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) № 6 «Ядерная и радиационная физика», направление 6.5.1. Программа ориентирована на использование особенностей пучка  $\gamma$ -квантов нового типа по сравнению с пучками, использовавшимися ранее для фотоядерных исследований в вышеуказанной области энергий  $\gamma$ -квантов тормозного источника (ТИ) от тормозного излучения электронов полного сплошного спектра и квазимоноэнергетических  $\gamma$ -квантов от аннигиляционного источника (АИ) при аннигиляции на лету падающих ультрарелятивистских позитронов с электронами мишени. Главная задача обсуждаемых исследований — получение точных, надежных и достоверных данных о сечениях как полных, так и парциальных

фотоядерных реакций с возможным выделением в последних разнообразных характеристик образующихся частиц и легких ядер. Особенности параметров пучка для разрабатываемого КИ на базе проектируемого ЛУЭ при его работе в односустковом режиме с энергией электронов на выходе  $E_e \gtrsim 500(700)$  МэВ и при расстоянии от места встречи пучков ультрарелятивистских электронов и лазерных фотонов до коллиматора  $S \approx 10$  м (см. [1] и приводимую здесь таблицу) влияют на выбор основных направлений исследований на этом пучке.

В особенности параметров пучка  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ, по сравнению с пучками  $\gamma$ -квантов от традиционно применявшихся ТИ и АИ, входят:

- форма и определённость распределения энергии  $E_\gamma$  по её отклонениям  $\Delta E_\gamma$  при каждой настройке  $\gamma$ -пучка с сохранением довольно большой интенсивности этого пучка  $N_\gamma$ ;
- поляризация  $\gamma$ -квантов;
- малые поперечные размеры и угловой разброс используемого  $\gamma$ -пучка;
- малая длительность импульсов пучка.

Для ряда фотоядерных задач указанное в таблице для рассматриваемого КИ наличие поляризации  $\gamma$ -квантов, малые поперечные размеры и угловой разброс используемого  $\gamma$ -пучка, малая длительность импульсов пучка могут оказаться существен-

\* E-mail: [dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru)

Таблица. Параметры источника комптоновских  $\gamma$ -квантов на ЛУЭ с  $E_e \gtrsim 500(700)$  МэВ при  $S \approx 10$  м

Возможность поляризации $\gamma$ -квантов	Есть
Частота повторения импульсов, $\text{с}^{-1}$	до $10^3$
Длительность импульса $\Delta t$ , с	$\sim 10^{-12}$
Диаметр мишени, мм	$\approx 1.5$
Угловой разброс (угол коллимации), мкрад	$\approx 72.5$
$E_\gamma$ , МэВ	до $\approx 15(40)$
$\Delta E_\gamma / E_\gamma$	$\approx 0.5\%$
$N_\gamma$ , $\text{с}^{-1}$	до $10^7$

ными преимуществами. Так, малая длительность  $\gamma$ -пучка может позволить вместе с применением современных приборов существенно улучшить точность времяпролетных измерений, например, для реакции  $(\gamma, n)$  и значительно поднять эффективность регистрации фотонейтронов за счёт возможности уменьшения пролётной базы для этих фотонейтронов. Кроме того, такая уменьшенная пролётная база делает более реалистичной программу измерения угловых распределений испускаемых быстрых нейтронов с фиксацией переходов на различные состояния дочерних ядер, что особенно интересно с учётом возможной поляризации падающих  $\gamma$ -квантов. С другой стороны, благодаря малым поперечным размерам и угловой расходимости падающего пучка  $\gamma$ -квантов становится более доступной работа с изотопически обогащенными мишенями за счёт уменьшения их поперечных размеров.

Представляется, что важнейшее преимущество пучков  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ, по сравнению с пучками  $\gamma$ -квантов от ТИ и АИ, обусловлено формами их энергетических спектров  $\gamma$ -квантов с учётом интенсивностей этих пучков.

Преимущества формы спектра пучка  $\gamma$ -квантов от КИ [1, 2], по сравнению с формой, например, спектра пучка  $\gamma$ -квантов от ТИ, очевидны — процесс получения данных по сечениям исследуемых реакций практически не требует решения обратной задачи для извлечения (развертки) сечения реакции из экспериментально измеряемого выхода — интеграла от произведения (свертки) сечения реакции с непрерывным спектром  $\gamma$ -квантов тормозного излучения.

Форма спектра аннигиляционных  $\gamma$ -квантов от АИ с максимумом практически при энергии позитронов характеризуется [3–6] достаточно большой эффективной шириной (намного превышающей ширину на половине высоты линии от аннигилирующих позитронов), плавным спадом этой линии со стороны больших энергий и присутствием вклада («хвоста») непрерывного спектра тормозного излучения позитронов со стороны меньших энергий. Последнее обстоятельство требует организации разностных экспериментов на пучках позитронов и электронов с интерпретацией их разности как искомого результата, соответствующего результату измерения при энергии  $\gamma$ -квантов, равной

(близкой) с энергией позитронов. Такая организация «прямых» измерений сечений реакций приводит к появлению систематических погрешностей, связанных с определением как величины (во многих случаях в сечениях реакций наблюдаются физически запрещенные отрицательные значения) [7], так и формы (вследствие плохого энергетического разрешения экспериментов на пучках как позитронов, так и электронов может теряться информация о структуре гигантских резонансов (ГР)) [8] этих сечений реакций. Кроме того, необходимость применения разностной схемы существенно снижает статистическую точность определяемых сечений реакций, по крайней мере, при  $E_\gamma$  выше положения максимума сечения измеряемой фотоядерной реакции.

Форма спектра моноэнергетических  $\gamma$ -квантов от КИ характеризуется резким спадом со стороны больших энергий по сравнению с положением максимумом их спектра и быстро спадающим «хвостом» со стороны меньших энергий, а также весьма малой энергетической шириной  $\Delta E_\gamma / E_\gamma$  (в рассматриваемом случае  $\Delta E_\gamma / E_\gamma \approx 0.5\%$ ). Следует отметить, что вклад низкоэнергетического «хвоста» в спектре  $\gamma$ -квантов от КИ определяется не присутствием физически неизбежных фотонов тормозного излучения позитронов и/или электронов, а параметрами электронного и лазерного пучков и используемого коллиматора [1, 2].

Таким образом, уникальные параметры пучка  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ позволяют организовать на качественно новом уровне прямые непосредственные измерения сечений самых разнообразных полных и парциальных фотоядерных реакций в области энергий налетающих фотонов от энергетических порогов реакций до  $E_\gamma \approx 40$  МэВ, а также разнообразных характеристик образующихся в этих реакциях продуктов. Новые данные, полученные с помощью пучка  $\gamma$ -квантов от КИ, в свою очередь, дадут возможность получить новую достоверную информацию о целом ряде фундаментальных проблем электромагнитных взаимодействий атомных ядер, в первую очередь таких как коллективные моды ядерных возбуждений, соотношения между различными каналами распада высоковозбужденных состояний ядер, механизмы реакций с вылетом различных количеств нуклонов и многих других.

Среди направлений фотоядерных исследований, перспективы которых наиболее очевидны при использовании пучка  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ, как основные могут быть выделены следующие:

1. Изучение структуры гигантских дипольных резонансов электрического (Е1 ГР) и магнитного (М1 ГР), а также дипольного пигми-резонанса;
2. Прямые измерения сечений парциальных фотонейтронных реакций;
3. Изучение фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц;
4. Исследования ядерной резонансной флуоресценции;
5. Изучение фотоделения;
6. Получение данных для задач астрофизики и нуклеосинтеза.

### 1. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГИГАНТСКИХ ДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО (Е1 ГР) И МАГНИТНОГО (М1 ГР), А ТАКЖЕ ДИПОЛЬНОГО ПИГМИ-РЕЗОНАНСА

Гигантские резонансы (ГР) представляют собой проявления коллективных возбуждений различного вида в поле волны налетающих  $\gamma$ -квантов. ГР различаются своей мультипольностью и природой (изоскалярной или изовекторной). Так, изовекторный электрический дипольный Е1 ГР представляет собой коллективные колебания ядра — когерентные вклады многих частично-дырочных ( $1p-1h$ ) возбуждений. В рамках макроскопических моделей изовекторный Е1 ГР представляет собой коллективные колебания протонов ядра относительно нейтронов в поле электромагнитной волны налетающих  $\gamma$ -квантов. В рамках микроскопических и предравновесных моделей пытаются описывать различные ядерные возбуждения. Согласно некоторым из этих моделей коллективные входные  $1p-1h$  состояния определяют гросс-структуру Е1 ГР (ширины примерно несколько мегаэлектронвольт), связь входных состояний с более сложными состояниями коллективного характера приводит к формированию резонансов (с шириной примерно 1 МэВ) промежуточной структуры Е1 ГР, а взаимодействие входных состояний ядра с неколлеktivными многочастично-многодырочными возбуждениями — к появлению резонансов с шириной  $\sim 100$  кэВ [7].

Проблема существования (гросс, промежуточной и тонкой) структуры Е1 ГР является актуальной с самого начала исследований фотоядерных реакций и до настоящего времени. Дело в том, что очень явно выраженная структура Е1 ГР в сечениях, полученных в экспериментах с тормозным  $\gamma$ -излучением от ТИ, практически отсутствует в сечениях, полученных в экспериментах с квазимоноэнергетическими аннигиляционными  $\gamma$ -квантами

от АИ. Эти расхождения прямо обусловлены принципиально разными способами получения информации о сечениях реакций.

В экспериментах на пучках тормозных  $\gamma$ -квантов от ТИ данные о сечении реакции в относительно узком интервале энергий налетающих фотонов получаются в результате решения обратной задачи развертки сечения реакции из её измеренного выхода, для чего использовался ряд специально разработанных для этого математических методов (Пенфолда-Лейсса, наименьшей структуры, регуляризации Тихонова, редукции и некоторые другие). Как результат, с определенными небольшими искажениями, обусловленными отличием формы эффективного спектра фотонов от идеальной линии гауссовой формы, получается информация о сечении реакций именно в достаточно узкой области энергий фотонов (с типичным разрешением  $\sim 100, 200, 300$  кэВ). Поскольку информация о сечении реакции получается в результате решения обратной задачи развертки его из экспериментального выхода, существуют разные мнения о надежности и достоверности наблюдаемых в сечениях структурных особенностей. Так как проявляющиеся в сечении максимумы однозначно соответствуют характерным изломам в экспериментальной кривой выхода реакции, которые при исключительно высокой статистической точности (число регистрируемых актов реакции достигает  $\sim 10^6$ ) наблюдаются однозначно, считается, что структурные особенности Е1 ГР наблюдаются, но их форма и амплитуда нуждаются в определении более прямыми способами [9].

Оценки, выполненные с использованием нескольких специально разработанных методов [8], свидетельствуют о том, что в экспериментах на пучках аннигиляционных  $\gamma$ -квантов от АИ эффективное энергетическое разрешение существенно хуже ширины на половине высоты аннигиляционной линии, которая декларируется как достигаемое энергетическое разрешение. Последнее неверно, поскольку результат традиционного разностного эксперимента, интерпретируемый как искомое сечение, по существу, таковым не является, а есть лишь разность двух выходов реакции, то есть тоже лишь выход (вместо декларируемого по ширине аннигиляционной линии разрешения  $\sim 200-400$  кэВ эффективное разрешение может быть до  $\sim 1600-2000$  кэВ). Для данных о сечении реакции — это результат с плохим разрешением. Это обусловлено тем, что результат измерения на пучке позитронов имеет плохое разрешение, поскольку в спектре фотонов, кроме аннигиляционной линии, есть «хвост» тормозного излучения от позитронов, а результат измерения на пучке электронов, естественно, имеет еще худшее разрешение, поскольку аннигиляционная линия в нем отсутствует. Притом и уменьшаемое, и вычитаемое имеют плохое разрешение, и разрешение разности никак не может быть хорошим. В противном случае имелся бы своеобразный «вечный двигатель». В связи со сказанным результат эксперимента такого

типа представляет собой, по существу, не сечение, а выход реакции, который с точки зрения его интерпретации как сечения представляет собой, по крайней мере, при  $E_\gamma$  выше положения максимума сечения измеряемой фотоядерной реакции лишь «сечение с разрешением результата измерений с тормозным излучением».

Высокое энергетическое разрешение экспериментов на пучке  $\gamma$ -квантов от КИ должно позволить существенно продвинуться в решении проблемы структуры  $E1$  ГР.

Соответственно уникальные параметры пучка  $\gamma$ -квантов от КИ позволят существенно продвинуться и в области детальных исследований так называемого дипольного пигми-резонанса, который обусловлен дипольными колебаниями нейтронов избытка относительно нейтронного кора, и  $M1$  ГР, имеющего спин-флиповую природу. К настоящему времени для большого числа ядер получены разнообразные данные (выходы и сечения разных фотоядерных реакций и обратных им реакций радиационного захвата нейтронов и заряженных частиц, энергетические и угловые распределения продуктов реакций и др.) о процессах возбуждения и распада высоко- и низко- возбужденных ядерных состояний разнообразных гигантских и пигми-резонансов. Природа тех или иных механизмов, проявляющихся в колебаниях разного типа, может быть изучена с помощью точных и достоверных данных о конкуренции каналов распада резонансов с испусканием  $\gamma$ -квантов или нуклонов. Характеристики пучка фотонов КИ позволяют определять с большой точностью соответствующие branching ratios в широкой области энергий налетающих  $\gamma$ -квантов.

## 2. ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ПАРЦИАЛЬНЫХ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ

Данные, прежде всего по реакциям  $(\gamma, 1n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$ , востребованы и широко используются и собственно в ядерной физике, и в разнообразных приложениях, включая физику высоких энергий, ядерные разделы энергетики, химии, геологии, материаловедения, медицины, экологии, астрофизики. Практически все доступные в настоящее время данные по сечениям таких реакций получены в экспериментах с помощью пучков квазимоноэнергетических аннигиляционных  $\gamma$ -квантов или  $\gamma$ -квантов тормозного  $\gamma$ -излучения. В исследованиях, выполненных с использованием объективных физических критериев (например, [10–18]) было установлено, что экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций на большом числе ядер таким критериям не соответствуют и, следовательно, не являются достоверными. Было показано, что это обусловлено систематическими погрешностями использованных непрямых методов разделения фотонейтронов по множественности и особенностями использованных детекторов, эффективность которых существенно зависела от энергии нейтронов.

В этой связи интенсивность пучка  $\gamma$ -квантов от КИ позволяет при некотором общем снижении общей эффективности регистрации нейтронов [19] обеспечить условия, при которых эта эффективность от энергии нейтронов практически не зависит и которые вследствие этого позволяют получать экспериментальные данные о сечениях парциальных реакций, соответствующие физическим критериям достоверности [20]. С другой стороны, активационные измерения на том же пучке  $\gamma$ -квантов могут в ряде случаев обеспечить контрольные данные для таких исследований.

## 3. ДАННЫЕ ПО ФОТОНЕЙТРОННЫМ РЕАКЦИЯМ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

По сравнению с многочисленными исследованиями фотонейтронных реакций, выполненных на пучках как тормозного излучения ТИ, так и квазимоноэнергетических аннигиляционных  $\gamma$ -квантов от АИ, исследований реакций с образованием протонов и тем более дейтронов, тритонов и альфа-частиц, проведено относительно немного [9].

В экспериментах на пучках тормозного излучения это обусловлено тем, что изучение процессов с образованием заряженных частиц существенным образом осложняется присутствием значительного фона от электронов. Необходимость отделения этого фона приводит к использованию специальных методов «очистки», результатов измерений с соответствующим возрастанием статистических и систематических погрешностей [21, 22].

В экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных  $\gamma$ -квантов это обусловлено тем, что их интенсивность весьма невелика (вследствие многоэтапного процесса получения  $\gamma$ -квантов от аннигиляции позитронов), что с относительно невысокой статистической точностью позволяет получать данные по фотонейтронным реакциям, в которых возможно использование толстых мишеней, и не позволяет получать данные по фотопротонным реакциям, в которых использование толстых мишеней невозможно.

На пучках  $\gamma$ -квантов от КИ возможно эффективное отделение фона электронов, поскольку пучки рассеянных электронов и рассеянных фотонов геометрически разведены. Уникальные характеристики пучка КИ интересны для организации на новом современном уровне разнообразных исследований фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц. Прежде всего, это относится к определению сечений фотопротонных реакций для большого количества ядер, которые в настоящее время отсутствуют. Получение такой информации и ее детальное сравнение с результатами фотонейтронных исследований позволило бы на новом уровне изучить явление изоспинового расщепления  $E1$  ГР, а также уточнить сведения о таком явлении, как конфигурационное расщепление  $E1$  ГР. Этому будет способствовать реализация новых возможностей по изме-

рению энергетических и угловых распределений вылетающих протонов (как и других заряженных продуктов реакций). Данные о таких процессах позволят уточнить многие известные и изучить неизвестные пока особенности процессов фоторасщепления ядер, свойств электромагнитных взаимодействий.

Дополнительно следует отметить, что во многих случаях данные по таким реакциям, как  $(\gamma, 1p)$  и  $(\gamma, 1\alpha)$ , представляют особый интерес с точки зрения решения известной астрофизической проблемы — образования 35 обойденных  $p$ - ядер от  $^{74}\text{Se}$  до  $^{196}\text{Hg}$ , которые не могут быть образованы в  $s$ - и  $r$ - процессах (см. разд. 6).

#### 4. ЯДЕРНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ

Все сказанное выше относится к области энергий налетающих фотонов, превышающих энергии отделения разных частиц (нуклонов и легких ядер) от исследуемых ядер — энергетические пороги реакций. Однако весьма важная информация об электромагнитных взаимодействиях ядер может быть получена и при меньших энергиях в процессах так называемой ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). ЯРФ является идеальным инструментом для исследования характеристик ядерных уровней с высокой точностью. Ниже порогов фотонуклонных реакций в ядре индуцируются электромагнитные дипольные (E1 и M1) и квадрупольные (E2) переходы из основного состояния ядра. Детальный анализ таких переходов и характеристик ядерных состояний возможен с помощью исследования переходов из возбужденных состояний обратно в основное. Поскольку процессы таких возбуждений и распадов являются чисто электромагнитными, ЯРФ позволяет полностью модельно-независимыми методами изучать самые разнообразные характеристики ядерных состояний, прежде всего такие, как энергии возбуждения и спины-четности возбужденных ядерных состояний, branching ratios для разных распадов, отношения смешивания разных распадов, прежде всего M1/E2, сечения, ширины переходов, абсолютные силы переходов. Характеристики пучка  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ (прежде всего высокое энергетическое разрешение и малые геометрические размеры) интересны для проведения таких исследований с высокой эффективностью.

#### 5. ФОТОДЕЛЕНИЕ

Исследования фотodelения позволяют селективно изучать экстремально деформированные ядерные состояния и продвинуться по пути понимания природы нескольких максимумов (барьеров деления) в ядерном потенциале. Селективность измерений параметров таких барьеров в процессах фотопоглощения обусловлена хорошо определяемыми величинами передаваемого углового момента. Среди наиболее интересных для изучения характери-

стик процессов фотodelения могут быть отмечены такие, как формы и величины разных барьеров деления, состояния, возбуждаемые в областях энергий между разными барьерами деления. На пучке  $\gamma$ -квантов от рассматриваемого КИ с высоким разрешением могут быть выполнены исследования массовых, зарядовых, энергетических зависимостей фрагментов фотodelения, соответствующих распадам хорошо определенных состояний, возбуждаемых в разных минимумах между барьерами деления. Уникальные характеристики пучка фотонов КИ позволяют организовать эффективные исследования динамики процесса фотodelения ядер, проводить изучение эффектов кластеризации в процессах с участием супер- и гипер- деформированных компаунд-состояний, поиск экзотических мод распада таких систем, например тройное деление.

#### 6. АСТРОФИЗИКА И НУКЛЕОСИНТЕЗ

Одной из центральных проблем ядерной астрофизики является понимание природы синтеза химических элементов. Большинство тяжелых элементов, существующих в природе, образуется в звездах в процессах радиационного захвата нейтронов — так называемых  $s$ - и  $r$ - процессах, соответственно медленных (slow) и быстрых (rapid) в сравнении с конкурирующими процессами  $\beta^-$ -распада. Вместе с тем известны 35 нейтронно-дефицитных, так называемых обойденных,  $p$ - ядер от  $^{74}\text{Se}$  до  $^{196}\text{Hg}$ , которые не могут быть образованы в упомянутых  $s$ - и  $r$ - процессах, и которые были упомянуты выше в связи с новыми возможностями исследования фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц. Формирование таких ядер возможно в фотоядерных реакциях  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  или  $(\gamma, \alpha)$ . В этой связи данные по фотоядерным реакциям играют важную роль в предсказании и описании процессов формирования в природе  $p$ -ядер. В последнее время существенно возрос интерес к определению сечений фотонейтронных реакций в области энергий вблизи порога, особенно важной с точки зрения астрофизики. Использование для этого  $\gamma$ -квантов от КИ, с одной стороны, интересно для выявления особенностей этих сечений типа проявления пигми-резонансов и E1 и M1 гигантских резонансов или образования ядер в изомерных состояниях, а с другой — заставляет вернуться к проблеме систематических расхождений данных, полученных в экспериментах разного типа.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка КИ  $\gamma$ -излучения в настоящее время активно ведется в нескольких мировых научных центрах. Реализация проектов КИ в России позволит проводить современные научные исследования с использованием интенсивного и близкого к монохроматическому  $\gamma$ -излучения, перейти на качественно новый уровень исследований взаимодействия электромагнитного излучения с ядрами.



Представляется, что начинать надо со сравнительно простых экспериментов с регистрацией наведенной активности с помощью одно- или двухканальных (последние для регистрации временных совпадений)  $\gamma$ -спектрометров. В этих начальных экспериментах должны быть, прежде всего, отработаны методики настройки и мониторингования  $\gamma$ -пучка, а также детально изучена фоновая обстановка. Эксперименты этого типа имеют и фундаментальную ценность для выяснения вопросов множественности образования фотонейтронов, а также наличия сравнительно узких особенностей в энергетической структуре сечений фотонейтронных реакций. При этом предлагаемые эксперименты являются шагом вперёд благодаря особым характеристикам пучка (значительно увеличенная доступность работы с изотопически обогащенными мишенями за счёт уменьшения поперечного размера мишени, а также существенно улучшенное энергетическое разрешение).

Однако в качестве основной программы исследований предлагается выбрать фотонуклонные ре-

акции с измерением спектров испускаемых в таких реакциях быстрых нуклонов с использованием как амплитудной информации, так и весьма привлекательной, благодаря параметрам пучка, времяпролётной информации. Представляется, что начинать следует с фотонейтронных реакций из-за значительно большей проникающей способности фотонейтронов по сравнению с имеющейся у фотопротонов. Позже можно попытаться опробовать и эксперименты с измерением энергетических спектров образуемых фотопротонов. Высокая монохроматичность пучка  $\gamma$ -квантов, наряду с существенно улучшенным разрешением измерения времени пролёта, позволят перейти к новому этапу в исследовании парциальных каналов реакций с фиксацией состояний конечного ядра, что обеспечит значительно более детальные данные для изучения физики гигантских резонансов в атомных ядрах.

Выполнение настоящей работы было поддержано в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) № 6 «Ядерная и радиационная физика», направление 6.5.1.

- [1] *Artyukov I.A., Belyshev S.S., Dzhilavyan L.Z., Ermakov A.N., Kuznetsov A.A. et al.* Compton g-ray Source Based on 500 MeV Electron Accelerator: Unique Parameters and Possible Applications. / LXXII International conference «Nucleus-2022». Book of Abstracts. Saratov: Amirit., 2022. P. 272; *Шведун В.И., Ермаков А.Н., Артюков И.А., Бельшев С.С., Варламов В.В.* и др. Разработка источника комптоновского излучения для исследований в области биологии, медицины, материаловедения, быстропотекающих процессов, ядерной физики. / Отчёт НИИЯФ МГУ. Москва, 2022.
- [2] *Utsunomiya H., Hashimoto S., Miyamoto S.* // *Nuclear Physics News.* **25**, N 3. 25. (2015).
- [3] *Tzara C.* // *Compt. Rend. Acad. Sci.* **245**, N 1. 56. (1957).
- [4] *Miller J., Schuhl C., Tzara C.* // *Nuclear Physics.* **32**, 236. (1962).
- [5] *Dietrich S.S., Berman B.L.* // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* **38**, N 2, 199. (1988).
- [6] *Berman B.L., Fultz S.C.* // *Reviews of Modern Physics.* **47**, N 3, 713. (1975).
- [7] *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S.* Study of consistency between  $(\gamma, xn)$ ,  $[(\gamma, n) + (\gamma, np)]$  and  $(\gamma, 2n)$  reaction cross sections using data systematics. / International Atomic Energy Agency, 2002. No. INDC (CCP)-433.
- [8] *Варламов В.В.* и др. // *Ядерная физика.* **67**, № 12, 2131. (2004). (*Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., D.S.Rudenko, M.E.Stepanov.* // *Physics of Atomic Nuclei.* **67**. 2107 – 2121. (2004).)
- [9] *Ишханов Б.С., Капитонов И.М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Издательство Московского университета, 1979.
- [10] *Варламов В.В.* и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **80**, № 3, 351. (2016). (*Varlamov V.V., Davydov A.I., Makarov M.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **80**, 317–324 (2016).)
- [11] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н.* // *Ядерная физика.* **79**, № 4, 315. (2016). (*Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Peskov N.N.* // *Physics of Atomic Nuclei.* **79**(4). 501 - 513. (2016).)
- [12] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // *Ядерная физика.* **80**. № 6, 632. (2017). (*Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Peskov N.N.* // *Physics of Atomic Nuclei.* **80**(6). 1106-1118. (2017).)
- [13] *Варламов В.В.* и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **81** № 6, 738. (2017). (*Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N., Peskov N.N.* // *Bull. Rus. Acad. Sci. Phys.* **81**(6). 664 - 669. (2017).)
- [14] *Varlamov V.V. et al.* // *The European Physical Journal A.* **54**, N 5, 1. (2018).
- [15] *Varlamov V. et al.* // *Phys. Rev. C.* **99**. N 2, 024608. (2019).
- [16] *Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N.* // *Am. J. of Phys. and Appl.* **8**. N 5, 64. (2020).
- [17] *Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н.* // *Ядерная физика.* **84**. № 4, 278. (2021). (*Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N.* // *Physics of Atomic Nuclei.* **84**(4). 389 - 400. (2021).)
- [18] *Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N.* // *The European Phys. J. A.* **57**. N 10, 1. (2021).
- [19] *Utsunomiya H. et al.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* **871**. 135. (2017).
- [20] *Varlamov V.V., Davydov A.I.* // *Physics of Atomic Nuclei.* **85**. № 1. 1. (2022).
- [21] *Varlamov V.V. et al.* // *Nuclear Physics A.* **222**. N 3, 548. (1974).
- [22] *Ishkhanov B.S. et al.* // *Nuclear Physics A.* **283**. N 2, 307. (1977).

## On the Program of Photonuclear Research Using the Backward Compton Quasi-Monochromatic $\gamma$ Quanta with Tunable Energy $E_\gamma \lesssim 40$ MeV

S.S. Belyshev<sup>1</sup>, V.V. Varlamov<sup>2</sup>, L.Z. Dzhilavyan<sup>3,a</sup>, A.A. Kuznetsov<sup>1,2</sup>, A.M. Lapik<sup>3</sup>,  
A.L. Polonski<sup>3</sup>, A.V. Rusakov<sup>3</sup>, V.I. Shvedunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia*

<sup>3</sup>*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow 117312, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>dzhil@inr.ru*

Based on the analysis of the progress in studying photonuclear reactions at  $E_\gamma \lesssim 40$  MeV and the unique parameters of the Compton source of  $\gamma$ -quanta which is now under development, a program of priority photonuclear research using this source has been proposed. The program includes studies of the structure of giant E1- and pigmy resonances; cross sections of partial photonuclear reactions; nuclear resonance fluorescence; photofission; astrophysics and nucleosynthesis problems.

PACS: 25.20.-x

*Keywords:* backward Compton scattering of laser photons on ultrarelativistic electrons, giant and pigmy resonances in atomic nuclei, cross sections of photonuclear reactions, nuclear photofission, nuclear resonance fluorescence, nucleosynthesis

*Received 10 January 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2023. 78, No. 3. Pp. 284–290.*

### Сведения об авторах

1. Бельшев Сергей Сергеевич — ассистент; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: [belyshev@depni.sinp.msu.ru](mailto:belyshev@depni.sinp.msu.ru).
2. Варламов Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. научн. сотр.; тел.: (495) 939-34-83, e-mail: [vvvarlamov@gmail.com](mailto:vvvarlamov@gmail.com).
3. Джилавыян Леонид Завенович — доктор физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.; тел.: (499) 198-07-61, e-mail: [dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru), [nucleus009@mail.ru](mailto:nucleus009@mail.ru)
4. Кузнецов Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент, зам. директора, ст. научн. сотр.; e-mail: [kuznets@depni.sinp.msu.ru](mailto:kuznets@depni.sinp.msu.ru).
5. Лاپик Александр Михайлович — научн. сотр.; тел.: (499) 135-33-37, e-mail: [lapik@inr.ru](mailto:lapik@inr.ru).
6. Полонский Андрей Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.; e-mail: [polonski@inr.ru](mailto:polonski@inr.ru).
7. Русаков Артур Владимирович — научн. сотр.; тел.: (499) 135-33-37, e-mail: [rusakov@inr.ru](mailto:rusakov@inr.ru).
8. Шведунув Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. научн. сотр., тел.: (495) 939-24-51, e-mail: [shvedunov@gmail.com](mailto:shvedunov@gmail.com).