

К мониторингу на проектируемом γ -источнике от обратного комптоновского рассеяния для фотоядерных исследований при $E_\gamma \leq 40$ МэВ

С. С. Бельшев,¹ В. В. Варламов,² Л. З. Джилаван,^{3,*} А. А. Кузнецов,^{1,2}
 А. М. Лапик,³ А. Л. Полонский,³ А. В. Русаков,³ В. И. Шведун²

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

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

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

(Поступила в редакцию 31.12.2022; после доработки 25.01.2023; принята к публикации 10.02.2023)

Исходя из сопоставления параметров проектируемого γ -источника от обратного комптоновского рассеяния и известных путей мониторинга собственно самих пучков γ -квантов для мониторинга интенсивности и спектра энергий γ -квантов в их пучках на этом γ -источнике при фотоядерных исследованиях в области от нескольких мегаэлектронвольт до ~ 40 МэВ предложена система из сцинтилляционных пластиковых и неорганических детекторов, а также парного магнитного спектрометра.

PACS: 25.20.-x УДК: 539.1.

Ключевые слова: мониторинг интенсивности и энергетического спектра γ -лучей при энергиях (1–40) МэВ; пластиковые сцинтилляционные детекторы; магнитные парные гамма-спектрометры; неорганические сцинтилляционные гамма-спектрометры полного поглощения.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330203](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330203)

ВВЕДЕНИЕ

Согласно имеющимся представлениям мультипольные гигантские резонансы в атомных ядрах (ГР) тесно связаны со свойствами ядерной материи и нуклон-нуклонных взаимодействий в ядерной среде. ГР (особенно низших мультипольностей) — одни из простейших и универсальных типов коллективных движений в ядрах и должны рассматриваться как обязательный «испытательный полигон» для выработки теории ядра. Сюда входят вопросы и возбуждения ГР, и их релаксации.

Ядерные реакции под действием реальных γ -квантов привлекают уникальной «выделенностью» в их сечениях вклада поперечного электрического изовекторного дипольного (E1) ГР. Благодаря этому после создания циклических ускорителей электронов (бетатронов и синхротронов) реальные γ -кванты, получаемые при сворачивании пучка электронов на внутреннюю мишень-радиатор с испусканием при этом тормозных γ -квантов, позволили впервые экспериментально обнаружить E1 ГР.

Тормозные реальные γ -кванты длительное время являлись единственным инструментом для изучения E1 ГР, и, несмотря на расширение исследований ГР на использование пробников, иных, чем

реальные γ -кванты (см., например, для электрических ГР обзор [1]), привлекательность исследований E1 ГР с интенсивными источниками реальных тормозных γ -квантов остается весьма высокой (см., например, [2–5]). К сожалению, у реальных γ -квантов от тормозного излучения электронов далекий от монохроматического сложный сплошной и спадающий с ростом энергии γ -квантов спектр. К тому же есть серьезные трудности в определении поведения спектра вблизи верхней границы, которое как раз наиболее существенно при нахождении сечений исследуемых реакций. Поэтому извлечение из экспериментальных данных, полученных с тормозными γ -квантами полного спектра, сведений, относящихся к γ -квантам, близким к монохроматическим, встречает серьезные трудности, чреватые большими ошибками конечных результатов. Эти трудности препятствуют получению прецизионных данных, адекватных растущим требованиям современных ядерно-физических исследований.

В значительной степени указанные трудности можно попытаться избежать при переходе к исследованиям с реальными γ -квантами, получаемым с применением различных методов «монохроматизации» фотонов (см., например, [2–5]), включая рассматриваемый здесь метод, использующий обратное комптоновское рассеяние (ОКР) лазерных фотонов на пучках ультрарелятивистских электронов [6, 7]. Используемый ОКР импульсный источник γ -квантов в области ГР разрабатывается

* E-mail: dzhil@inr.ru

в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) 6.5.1 «Ядерная и радиационная физика». Согласно проекту предполагается, что этот источник (см. разд. 1 настоящей работы) будет обладать как весьма привлекательными параметрами, так и специфическими, требующими тщательного учёта особенностями.

Возможности экспериментов с использованием разрабатываемого источника реальных γ -квантов на основе ОКР зависят от обеспеченности такого источника прецизионным мониторингом параметров получаемого пучка γ -квантов. В этой методике необходимо точно мониторировать, настраивать и сохранять параметры сгустков сталкивающихся пучков электронов и лазерных фотонов и аккуратно сводить эти сгустки друг с другом с обеспечением при этом «нацеливания» искомого пучка γ -квантов на установленный коллиматор. Альтернативный путь мониторинга и настройки при столкновениях таких пучков состоит в мониторинге параметров самого γ -пучка после коллиматора (прежде всего интенсивности и энергии выделяемых γ -квантов, в частности из-за возможностей ухода оси γ -пучка с центра коллиматора или же изменений энергии E_e в ускорителе). Очень важна при этом альтернативном пути мониторинга получаемого пучка γ -квантов возможность осуществлять его и в процессе набора самих фотоядерных данных.

Важным аналогом указанной в предыдущем абзаце задачи являлась необходимость мониторинга в вышеупомянутых экспериментах по изучению ядерных реакций в области ГР под действием реальных тормозных γ -квантов от внутренних мишеней-радиаторов на циклических ускорителях электронов. При этом из-за трудностей определения условий генерации тормозных γ -квантов (эффективных значений и тока пучка падающих на мишень-радиатор электронов, и толщины этой мишени из-за малого «шага сворачивания» пучка электронов на мишень-радиатор в традиционных бетатронах и синхротронах) была разработана методика мониторинга самого образуемого пучка тормозных γ -квантов. Опыт применения такого мониторинга представляет интерес при решении настоящей задачи. Существенные особенности этого опыта приведены в разд. 2 данной работы.

В разд. 3 приведены наиболее существенные сведения о мониторах пучков γ -квантов при проведении экспериментов по изучению Е1 ГР на известных установках с γ -источниками на основе ОКР.

Исходя из изложенного в разд. 1–3, в разд. 4 данной работы предложены типы мониторов γ -пучка для импульсного γ -источника на основе ОКР, создаваемого в рамках проекта НЦФМ 6.5.1.

1. ОЖИДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ γ -ПУЧКА НА γ -ИСТОЧНИКЕ ОТ ОКР В РАМКАХ ПРОЕКТА НЦФМ 6.5.1 «ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА»

Приведём для импульсного γ -источника на основе ОКР, разрабатываемого в рамках проекта НЦФМ 6.5.1 «Ядерная и радиационная физика», ожидаемые параметры пучка γ -квантов на каскаде линейных ускорителей электронов с фотоэлектронной эмиссией в инжекторе от пучка дополнительного лазера (ускорителя-накопителя после такого каскада нет) в лабораторной системе так, как они даны в [8]. Но заметим, что в [8] даны приближённые значения энергии фотонов от основного лазера E_{ph} до ОКР для первой (основной) и четвёртой гармоник лазера (1 эВ и 4 эВ), а на самом деле эти энергии $\cong 1.165$ эВ и 4.66 эВ соответственно. После ОКР энергия γ -кванта E_γ [8]:

$$E_\gamma \approx \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \varphi),$$

где φ — угол между направлениями движения начального электрона и налетающего на него лазерного фотона; θ — угол между направлениями движения начального электрона и γ -кванта, претерпевшего ОКР; $\gamma = (E_e/\mu)$; E_e — полная энергия налетающего электрона; μ — полная энергия покоящегося электрона; $\gamma \gg 1$; $\theta \ll 1$.

При лобовом столкновении ($\varphi = 180^\circ, \theta = 0$): $E_\gamma \approx 3.83$ МэВ для $E_e = 500$ МэВ и $E_{ph} = 1$ эВ; $E_\gamma \approx 15.32$ МэВ для $E_e = 500$ МэВ и $E_{ph} = 4$ эВ; $E_\gamma \approx 9.80$ МэВ для $E_e = 800$ МэВ и $E_{ph} = 1$ эВ; $E_\gamma \approx 39.2$ МэВ для $E_e = 800$ МэВ и $E_{ph} = 4$ эВ.

Согласно [8] для идеальных электронного и лазерного пучков для $E_e = 500$ МэВ и $(\Delta E_\gamma/E_\gamma) = 0.5\%$ нужен угол коллимации 72.5 мкрад, то есть при расстоянии 10 м от места встречи пучков диаметр отверстия коллиматора — 1.45 мм. При реалистичных выбранных параметрах электронного и лазерного пучков на четвёртой гармонике (когда $E_\gamma \approx 15.32$ МэВ) ожидается, что при частоте повторений импульсов до 10^3 с⁻¹ длительность импульса $\Delta t \approx 2 \times 10^{-12}$ с; для вышеуказанного коллиматора число γ -квантов в импульсе до $\approx 10^4$ γ /импульс, то есть средний поток γ -квантов до $\approx 10^7$ γ /с.

2. МОНИТОРЫ ТОРМОЗНОГО γ -ПУЧКА ОТ ВНУТРЕННИХ РАДИАТОРОВ НА ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИМЕНЯВШИЕСЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ОБЛАСТИ Е1 ГР

В экспериментальных исследованиях Е1 ГР под действием реальных тормозных γ -квантов от внутренних мишеней-радиаторов на циклических ускорителях электронов применялись (см., например, [2]) как «прозрачные», так и «абсолютные» мониторы интенсивности пучка γ -квантов. «Про-

зрачные» мониторы, приводящие только к малому ослаблению и искажению падающего γ -пучка, например тонкостенные ионизационные камеры, обычно размещались перед физической мишенью. «Абсолютные» мониторы интенсивности пучка γ -квантов, например толстостенные ионизационные камеры, обеспечивающие поглощение значительной падающей расчёту или измерениям доли падающего γ -пучка, обычно размещались после сборки («прозрачный» относительный монитор + физическая мишень) или после «прозрачного» относительного монитора (без мишени) при калибровке «прозрачного» относительного монитора.

При этом для калибровки энергетической шкалы получаемого тормозного излучения (см. например в [2, 3]) чаще всего использовались пороги фото-ядерных реакций или характерные изломы в кривых выхода на некоторых изотопах. Но были примеры (см. [2]) применения и более изощрённых способов как при измерении изохромат для узкой линии 15.11 МэВ в сечении упругого рассеяния γ -квантов на ядрах ^{12}C , так и с использованием парного магнитного спектрометра.

3. МОНИТОРЫ γ -ПУЧКОВ, ИМЕЮЩИЕСЯ НА ИЗВЕСТНЫХ γ -ИСТОЧНИКАХ ОТ ОКР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ Е1 ГР В АТОМНЫХ ЯДРАХ

К настоящему времени в нескольких научных центрах созданы γ -источники на основе ОКР, на которых удалось провести эксперименты по физике атомного ядра и элементарных частиц (см., например, [9, 10] и ссылки в них). При $E_\gamma > 1$ МэВ преимущественно эти γ -источники использовались для исследований в области энергий E_γ значительно выше, чем область Е1 ГР. Немаловажной причиной такого предпочтения является то, что в согласии с изложенным в разд. 1 настоящего отчёта для ОКР максимальная энергия $E_\gamma \sim E_e^2$. Так что при росте E_e растёт эффективность «перекачивания» энергии ультрарелятивистского электрона в энергию получаемого при ОКР квазимонохроматического γ -кванта. Необходимо также учитывать, что почти во всех этих γ -источниках, в отличие от рассматриваемого в настоящей работе, использованы кольцевые ускорители-накопители, что приводит к существенным различиям во временных распределениях ожидаемых в нашем проекте γ -пучков по сравнению с имеющимися в уже созданных γ -источниках на основе ОКР.

Согласно [10] в настоящее время практически только на двух использующих ОКР γ -источниках доступны исследования фотоядерных реакций в полной области Е1 ГР: High Intensity γ Source (Durham, USA.) (см. обзор [11]), доступный диапазон $E_e \sim (1 - 100)$ МэВ; NewSUBARU (Hyogo, Japan), доступный диапазон $E_\gamma \sim (1 - 40)$ МэВ.

В обоих этих γ -источниках используются накопительные кольца. Однако согласно [11] на первом из этих источников исследования были сосредоточены, по крайней мере в значительной степени, на ядерной резонансной флуоресценции, физике малонуклонных систем и элементарных частиц. Источник же NewSUBARU (см., например, [12, 13]) «нацелен» на систематические исследования Е1 ГР. Поэтому можно рассматривать опыт этих последних исследований как основной существенный для нас пример решения задач мониторинга γ -пучка.

В экспериментах на NewSUBARU при определении интенсивности пучка γ -квантов отсутствовали «прозрачные относительные» мониторы, а был только «абсолютный» монитор интенсивности, в качестве которого использовался конечный (по ходу γ -пучка) детектор-спектрометр на основе большого ($8'' \times 12''$) кристалла NaI(Tl) подобно тому, как это было в экспериментах [9, 14] на установке РОКК в Новосибирске на накопителе ВЭПП-4. При обеспечении корректного динамического диапазона для таких детекторов, то есть при отсутствии искажений импульсов в «просматривающих» детектор фотоэлектрических умножителях (ФЭУ) и связанных с ними последующих блоках электроники, амплитуда пика полного фотопоглощения растёт пропорционально суммарной энергии γ -квантов, упавших на детектор внутри интервала с длительностью, меньшей, чем временное разрешение детектора. Согласно [12, 13] на NewSUBARU удалось обеспечить, по крайней мере с приемлемой точностью, требуемый динамический диапазон для E_γ во всём диапазоне Е1 ГР и при импульсной загрузке внутри интервала временного разрешения от единиц до ~ 20 импульсов. Но в показаниях такого монитора интенсивности γ -квантов необходимо учитывать искажения из-за взаимодействия γ -пучка с физической мишенью, которые могут доходить до десятков процентов.

Для измерений распределений γ -квантов по E_γ на NewSUBARU использовались сначала полупроводниковые γ -спектрометры из сверхчистого Ge (при $E_\gamma \approx 10$ МэВ), а позже неорганические скинтилляционные γ -спектрометры на основе кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (для $E_\gamma \approx 40$ МэВ), которые можно вводить в γ -пучок только между собственными ядерно-физическими измерениями, чтобы исключить при таких измерениях неприемлемые искажения γ -пучка.

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МОНИТОРЫ γ -ПУЧКА НА РАЗРАБАТЫВАЕМОМ В ПРОЕКТЕ НЦФМ 6.5.1 γ -ИСТОЧНИКЕ ОТ ОКР

Согласно вышеизложенному у γ -пучка от γ -источника на основе ОКР, разрабатываемого в проекте НЦФМ 6.5.1, ожидается важная особенность: большое число γ -квантов (до $\sim 10^4$) в импульсе длительностью $\Delta t \approx 2 \times 10^{-12}$ с. Так

Таблица. Ослабление потока γ -квантов в различных слоях веществ

Материал	Радиационная длина X_0 , см	Толщина, см	Толщина/ X_0	Коэффициент ослабления
Воздух	30323.0	1000	3.3×10^{-2}	0.9884
Золото	0.3358	10^{-3}	3.0×10^{-3}	0.9988
Пластик	41.96	0.1	2.4×10^{-3}	0.9994

что при полной импульсной интенсивности такого источника в случае использования традиционных мониторов различных типов отделять по времени друг от друга сигналы, вызванные каждым отдельным γ -квантом внутри одного импульса пучка, скорее всего, не представляется возможным. Должен наблюдаться суммарный эффект.

Поэтому предлагается на этом γ -источнике использовать систему мониторинга параметров γ -пучка, состоящую (по ходу пучка) из: «прозрачного» относительного монитора интенсивности γ -пучка; «прозрачного» монитора энергии γ -квантов; «абсолютного» монитора интенсивности γ -пучка.

Предполагается выполнение следующих условий: для совокупности «прозрачных» мониторов искажения потока падающих квазимонохроматических γ -квантов $\lesssim 0.1 - 1\%$, эффективность регистрации γ -квантов для «абсолютного» монитора интенсивности γ -пучка $\approx 100\%$ во всём диапазоне Е1 ГР.

Рассмотрим использование для «прозрачных» мониторов помещенного в однородное магнитное поле парного магнитного спектрометра сэндвича из Au радиатора и пластикового сцинтиллятора с толщинами 10 мкм и 1 мм соответственно. В таблице для случая, когда пучок γ -квантов с $E_\gamma = 20$ МэВ проходит либо 10 м воздуха, либо 10 мкм Au, либо 1 мм пластика, даны соответствующие ослабления потока γ -квантов. Видно, что для учитывающего ослабление γ -пучка коэффициента $\gtrsim 0.99$ нужен вакуумированный пучкопровод для γ -квантов от ОКР.

На рис. 1 показаны энергетические спектры γ -квантов, электронов и позитронов после сэндвича (Au-радиатор 10 мкм + пластик 1 мм), рассчитанные для падающего пучка γ -квантов, имеющих энергии 20 МэВ при разбросе FWHM 0.5%.

На рис. 2 показана схема варианта парного магнитного спектрометра из работ [15, 16] при изучении тонкой структуры полных сечений фотопоглощения легких ядер. В помещённой в однородное магнитное поле вакуумированной камере парного магнитного спектрометра падающий пучок γ -квантов может образовывать в тонком радиаторе пары из электрона и позитрона, которые в поле поворачиваются в противоположные стороны и после прохождения энергетических щелей регистрируются на совпадения каждый своим пластическим сцинтилляционным детектором. Но из-за малости в нашем случае длительности импульса Δt сто-

ит рассматривать одноканальный вариант парного спектрометра, как это было в [15].

При эффективности используемого парного магнитного спектрометра $\sim 10^{-6}$ (см., например, [2–4, 15, 16]) и числе γ -квантов в импульсе 10^4 [8] вероятность появления сигнала от одного импульса составляет $\sim 10^{-2}$, то есть будет $\sim 1\%$ наложений, а среднее число импульсов совпадений в спектрометре за 2 мин при частоте их повторения 10^3 с^{-1} [8] составит ~ 1200 .

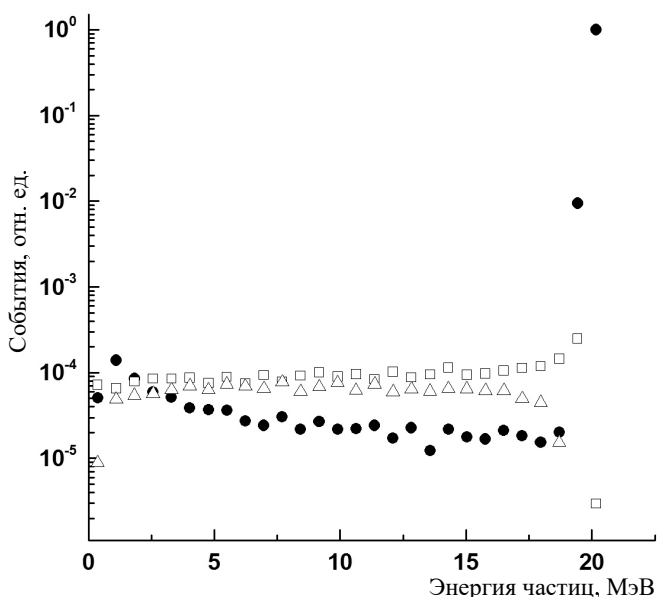


Рис. 1. Спектры по энергии γ -квантов (закрытые кружки), электронов (открытые квадраты) и позитронов (открытые треугольники) после сэндвича (Au-радиатор 10 мкм + пластик 1 мм)

Заметим, что в работах в Стэнфорде (США) [17] и во Фраскати (Италия) [18] на пучках квазимонохроматических аннигиляционных γ -квантов в качестве мониторов спектров γ -квантов тоже использовались парные магнитные спектрометры.

Аналогично тому, как это было сделано в [13], в качестве детектора для «абсолютного» монитора интенсивности γ -пучка здесь можно использовать сравнительно большие кристаллы NaI(Tl) или германата висмута BGO — $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Причём последний вариант даже более предпочтителен благодаря меньшим размерам кристаллов BGO в миллиметрах (при одинаковых размерах в радиацион-

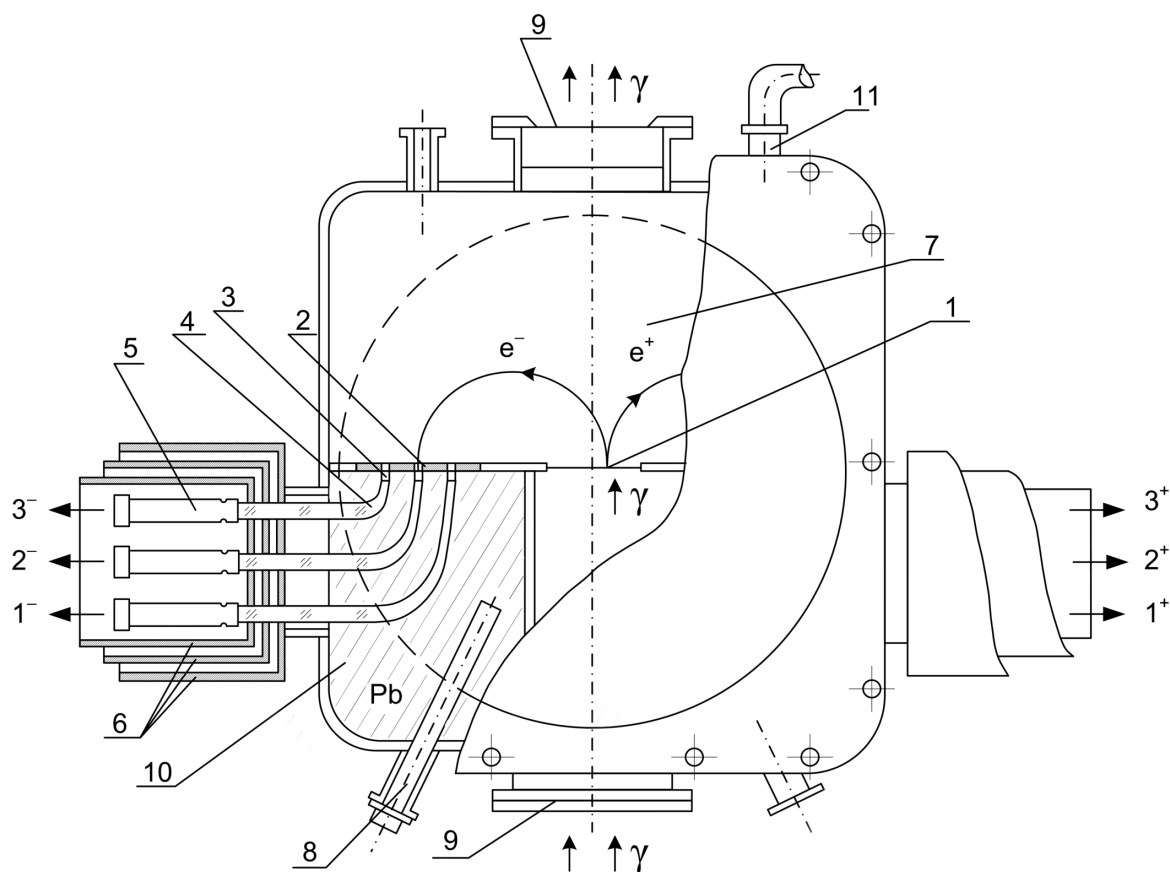


Рис. 2. Схема парного магнитного спектрометра из [16]: 1 — Au-радиатор; 2 — система Pb-щелей; 3 — сцинтилляторы; 4 — световоды; 5 — фотоэлектрические умножители ФЭУ-36; 6 — три слоя магнитной защиты; 7 — область однородного магнитного поля; 8 — катушка магнетометра (стабилизация по методу ядерного протонного резонанса); 9 — входное и выходное окна для пучка тормозных γ -лучей; 10 — Pb-защита; 11 — патрубок откачки

ных длинах X_0), их неигроскопичности и большей радиационной стойкости. Однако выполнение требований к «абсолютному» монитору интенсивности γ -пучка — способности эффективно поглощать γ -кванты с энергиями, соответствующими всему диапазону Е1 ГР (вплоть до максимальной энергии γ -квантов $E_{\gamma max} \approx 40$ МэВ), и большому динамическому диапазону (вплоть до энерговыделения $\approx E_{\gamma max} N_{\gamma max}$) может быть трудно выполнимой задачей. Поэтому следует считать обязательной задачей для такого монитора обеспечение калибровки «прозрачного» относительного монитора интенсивности γ -пучка при малых значениях такой интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных обзора и анализа существующих мониторов интенсивности и энергии γ -квантов в их пучках при исследованиях на этих пучках Е1 ГР в атомных ядрах, в особенности на γ -источнике от ОКР, удалось предложить реалистичные мониторы γ -квантов для такого типа фотоядерных экспериментов на γ -источнике, разрабатываемом в рамках проекта НЦФМ 6.5.1 «Ядерная и радиационная физика».

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

- [1] *van der Woude A.* Int. Review of Nuclear Physics. 7. Electric and Magnetic Giant Resonances in Nuclei (edited by J. Speth). Singapore: World Scientific, 1991, pp. 99–232.
- [2] *Богданжевич О.В., Николаев Ф.А.* Работа с пучком тормозного излучения (особенности методики физических исследований на электронных ускорителях). М.: Атомиздат, 1964.

- [3] *Ишханов Б.С., Капитонов И.М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Издательство Московского университета, 1979.
- [4] *Ишханов Б.С., Капитонов И.М.* // УФН. **191**, 147. (2021).
- [5] *Джиллаван Л.З.* Фотоядерные исследования в области гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ

- РАН, 2017.
- [6] Арутюнян Ф.Р., Туманян В.А. // ЖЭТФ **44**, № 6. 2100 (1963); *Arutyunian F.R., Tumanyan V.A.* // Phys. Lett. **4**, 176. (1963); Арутюнян Ф.Р. Туманян В.А. // УФН **83**. 3. (1964).
- [7] *Milburn R.H.* // Phys. Rev. Lett. **10**(3), 75. (1963).
- [8] *Artyukov I.A., Belyshev S.S., Dzhilavyan L.Z.* et al. // Compton γ -ray Source Based on 500 MeV Electron Accelerator: Unique Parameters and Possible Applications. / LXXII International conference «Nucleus-2022». Book of Abstracts. Amirit. Saratov, 2022. P. 272. <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>
- [9] Недорезов В.Г., Туринге А.А., Шатунов Ю.М. // УФН. **174**. 353. (2004).
- [10] *Howell C.R., Ahmed M.W., Afanasev A.* et al. 2020 International Workshop on Next Generation Gamma-Ray Source. arXiv:2012.10843v1 [nucl-ex] Dec 2020.
- [11] *Weller H.R., Ahmed M.W., Gao H.* et al. // Prog. Part. Nucl. Phys. **62**, 257. (2009).
- [12] *Utsunomiya H., Gheorghe I., Filipescu D.M.* et al. // Nucl. Instrum. Methods A. **871**, 135. (2017).
- [13] *Gheorghe I., Utsunomiya H., Katayama S.* et al. // Phys. Rev. C **96**, 044604 (2017).
- [14] Казаков А.А., Кезерашвили Г.Я., Лазарева Л.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ **40**, вып. 10. 445. (1984).
- [15] *Burgov N.A., Danilyan G.V., Dolbilkin B.S.* et al. // Soviet Physics JETP **16**, N 1. 50. (1963).
- [16] *Dolbilkin B.S., Korin V.I., Lazareva L.E.* et al. // Nucl. Phys. **72**, 137. (1965).
- [17] *Ballam J., Chadwick G.B., Guiragossian Z.G.T.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. **73**, 53. (1969).
- [18] *De Sanctis E., Anghinolfi M., Capitani G.P.* et al. // Phys. Rev. C. **34**, N 2. 413. (1986).

On Monitoring on the Under-Development γ Source Based on Backward Compton Scattering for Photonicuclear Research at $E_\gamma \leq 40$ MeV

S.S. Belyshev¹, V.V. Varlamov², L.Z. Dzhilavyan^{3,a}, A.A. Kuznetsov^{1,2},
A.M. Lapik³, A.L. Polonski³, A.V. Rusakov³, V.I. Shvedunov²

¹*Division of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

³*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia*

E-mail: ^a*dzhil@inr.ru*

Proceeding from the comparison of parameters for the γ -ray source based on backward Compton scattering, which is under development now, and the known methods of monitoring γ -ray beams themselves to monitor the intensity and energy spectrum of quanta in the beams from this γ -ray source during photonicuclear research in the energy range from a few mega-electronvolts to ~ 40 MeV, a system comprising scintillation plastic and inorganic detectors, as well as a magnetic pair spectrometer, has been proposed.

PACS: 25.20.-x

Keywords: monitoring the intensity and γ -ray energy spectrum in the energy range of (1–40) MeV, plastic scintillation detectors, magnetic pair spectrometers, total-absorption inorganic scintillation spectrometers.

Received 31 December 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 3. Pp. 278–283.

Сведения об авторах

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