

УДК 539.17:621.039

**О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ НЕЙТРОНОВ ИЗ (γ, n) -РЕАКЦИЙ
ПО ЭНЕРГИИ И УГЛАМ НА γ -ПУЧКАХ
ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ $E_\gamma \lesssim 40$ МэВ**
© 2024 г. А. М. Лапик¹, С. С. Бельшев², В. В. Варламов³, Л. З. Джилавян^{1,*}, А. А. Кузнецов^{2, 3},
А. Л. Полонский¹, А. В. Русаков¹, В. И. Шведунов³

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

*e-mail: dzhil@inr.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Для изучения E1 гигантского резонанса в ядрах важны исследования структур распределений по энергии и углам испускания быстрых нейтронов из (γ, n) -реакций. В работе рассмотрены некоторые особенности таких исследований на пучках γ -квантов обратного комптоновского рассеяния с малыми разбросами γ -квантов по энергии, углам, поперечным размерам, длительности и поляризации в этих пучках. При этом предполагается применение спектрометров быстрых нейтронов с использованием и амплитудных, и времяпролетных данных.

Ключевые слова: комптоновское рассеяние лазерных фотонов на пучках ускоренных электронов, гигантские E1 резонансы в атомных ядрах

DOI: 10.31857/S0367676524080028, **EDN:** ORWGQX

ВВЕДЕНИЕ

Мультипольные гигантские резонансы (ГР) проявляются в ядерных реакциях с разными пробными частицами. ГР (особенно низших мультипольностей) — одни из простейших типов коллективных движений в ядрах и рассматриваются как обязательный “испытательный полигон” для выработки адекватных представлений о физике ядра.

Большая привлекательность для экспериментальных исследований ГР (особенно изовекторных ГР) у пробных частиц, для которых взаимодействие с ядром можно рассматривать как чисто электромагнитное (например, для реальных фотонов в фотоядерных реакциях или виртуальных фотонов при неупругом рассеянии электронов на атомных ядрах [1]). Причина в том, что это взаимодействие наиболее изучено и в то же время достаточно слабое, чтобы пренебрегать частью сопутствующих процессов, например, многократным рассеянием пробника внутри ядра (в отличие от адронных пробников, например α -частиц, для которых такие эффекты существенно

затрудняют интерпретацию результатов). Относительная слабость электромагнитного взаимодействия позволяет в рассмотрении использовать методы теории возмущений, и для электромагнитных пробников в сравнении с иными характерна большая роль ГР по отношению к другим процессам. Благодаря этому реальные фотоны позволили впервые экспериментально обнаружить ГР, а затем они длительное время являлись единственным инструментом для изучения ГР, но и теперь привлекательность исследований ГР с реальными фотонами остается весьма высокой.

К настоящему времени в связи с развитием как теории, так и экспериментальной техники наиболее востребованы для дальнейшего развития адекватного описания изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса (E1 ГР) в атомных ядрах исследования не только процессов возбуждения E1 ГР, но и его девозбуждения с заселением основного и низлежащих состояний дочерних ядер. Для реакций с испусканием нуклонов, включая, в частности, изучение распределений по энергии и углам испускания быстрых нейтронов, образующихся в парциальных

реакциях под действием и реальных, и виртуальных фотонов рассматривался, например, проект [2], направленный на исследования девозбуждения ГР низших мультипольностей в реакциях эксклюзивного неупругого рассеяния электронов на атомных ядрах. В полной мере эти соображения относятся и к парциальным (γ, n)-реакциям (см. об этом, например, в [3]). Есть ранние исследования (γ, n)-реакций, показавшие наличие узких особенностей в структуре сечений этих реакций в зависимости от энергии падающих γ -квантов E_γ (начиная от порогов реакций $E_{\text{порог}}$) и спектров энергий испускаемых быстрых нейтронов при девозбуждении преобладающего Е1 ГР и на средних [3], и на тяжелых ядрах [4]. Как отмечено в [5], для таких исследований очень привлекательны измерения на разрабатываемых γ -пучках обратного комптоновского рассеяния [6] из-за малых разбросов по энергии, поперечным размерам, углам направленности, а также длительности и поляризации в таких пучках.

В настоящей работе рассматриваются некоторые вопросы таких исследований с применением системы спектрометров быстрых нейтронов, использующих и амплитудные, и времяпролетные данные.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЕКТИРУЕМОГО
 γ -ИСТОЧНИКА ОБРАТНОГО
КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Проект импульсного комптоновского γ -источника обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на ультрарелятивистских электронах для исследований фотоядерных реакций в области энергий γ -квантов E_γ от нескольких МэВ до ≈ 40 МэВ предложен в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Ядерная и радиационная физика» (направление 6.5.1) [1]. Этот проект базируется на разрабатываемом каскаде импульсных линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) с выходной энергией электронов до $E_{\text{е макс}} = 750$ МэВ, работающих в одноструйковом режиме и без ускорителя-накопителя на выходе этого каскада.

В инжекторе указанного каскада предполагается фотоэлектронная эмиссия под воздействием специального инжекторного лазера с длительностью импульса $\tau \sim 10^{-12}$ с. На выходе каскада сгусток ускоренных электронов претерпевает лобовое столкновение со сгустком фотонов из основного лазера, у которого на основной гармонике энергия падающих фотонов $E_{ph} \approx 1,2$ эВ [и $E_{ph} \approx 4,8$ эВ на четвертой гармонике этого лазера, предполагаемой к использованию при энергиях рассеянных назад комптоновских γ -квантов, близких к максимально достижимым (до ~ 40 МэВ)]. Далее для выделения пучка квазимонохроматических комптоновских γ -квантов используется по оси пучка электронов на расстоянии $S \approx 10$ м от места встречи пучков электронов и лазерных фотонов коллиматор диаметром $d = 1,5$ мм. Ожидаемые параметры такого комптоновского источника γ -квантов даны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры источника комптоновских γ -квантов на каскаде ЛУЭ с $E_{\text{е макс}} \sim 750$ МэВ при $S \approx 10$ м

Возможность поляризации γ -квантов	Есть
Частота повторения импульсов, с ⁻¹	До 10^3
Длительность импульса τ , с	$\sim 10^{-12}$
Диаметр коллиматора, мм	1.5
Угол коллимации, мкрад	72.5
E_γ , МэВ	До ≈ 40
$\Delta E_\gamma / E_\gamma$	$\approx 0.5\%$
N_γ , с ⁻¹	До 10^7

ПРЕДЫДУЩИЕ ПОПЫТКИ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Соображения о важности изучения девозбуждения ядер при E_γ от $E_{\text{порог}}$ до ~ 40 МэВ усиливаются из-за наличия весьма интересных узких структурных особенностей при исследованиях спектров быстрых фотонейтронов по их энергиям, проведенных на пучках тормозных γ -квантов усилиями двух групп в Оттаве (на импульсном ЛУЭ, Division of Physics, National Research Council of Canada) и в Москве (на импульсном электронном синхротроне С-3 ИЯИ РАН) (см. соответственно [4] и [3] и содержащиеся там ссылки).

В [4] применялся спектрометр быстрых нейтронов по времени пролета с откаченным нейтронородом (длина $L = 31.2$ м), идущим под углом $\theta \approx 90^\circ$ к направлению образуемого в Та- радиаторе (толщина 0,05 мм) γ -пучка с импульсами длительностью (6; 10; 20) нс и частотой повторения 720 с⁻¹. В мишени из обогащенного свинца ($\varnothing 15$ см, толщина 4.5 мм) содержалось: ^{208}Pb 91 % и ^{207}Pb 7 %. Детектор нейтронов — пластиковый сцинтиллятор ($\varnothing 30$ см, толщина 76 мм) защищенный от γ -вспышки спереди Вi-пластинкой (толщиной 1 см) и «просматриваемый» фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Авторы утверждали, что смогли выделить более 50 пиков в спектрах быстрых нейтронов при энергиях $0.4 \text{ МэВ} < E_n < 4 \text{ МэВ}$ для реакции $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)$ и переходов из начальных возбужденных состояний материнских ядер ^{208}Pb к основному (g) и двум первым возбужденным состояниям дочерних ядер ^{207}Pb с нахождением коэффициентов ветвления. На рис. 1 из [4] представлены зависимости от E_γ дифференциального сечения $(d\sigma_g / d\Omega)_{90^\circ}$ образования в этой реакции быстрых нейтронов с $E_n > 520 \text{ keV}$ при $\theta \approx 90^\circ$, приводящих к заселению основного состояния ^{207}Pb . Дополнительная шкала по оси ординат на рис. 1 дана для оцененного полного по углам сечения σ_g (левая шкала с примерной точностью $\pm 10\%$) для этой реакции. На рис. 2 даны из [4] спектры нейтронов, приводящих к заселению основных состояний ^{207}Pb для реакции $^{208}\text{Pb}(\gamma, n_g)$, в зависимости от времени пролета t и энергии нейтронов E_n (нелинейная шкала) для указанного набора значений верхней границы энергий тормозных γ -квантов

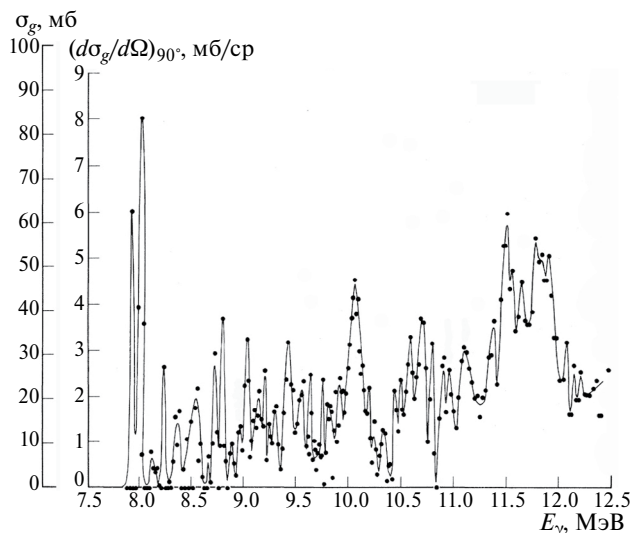


Рис. 1. Зависимости от E_γ измеренных $(d\sigma_g/d\Omega)_{90^\circ}$ и оцененных σ_g (левая шкала с примерной точностью $\pm 10\%$) для реакции $^{208}\text{Pb}(\gamma, n_g)$ при энергиях нейтронов $E_n > 520$ кэВ [4].

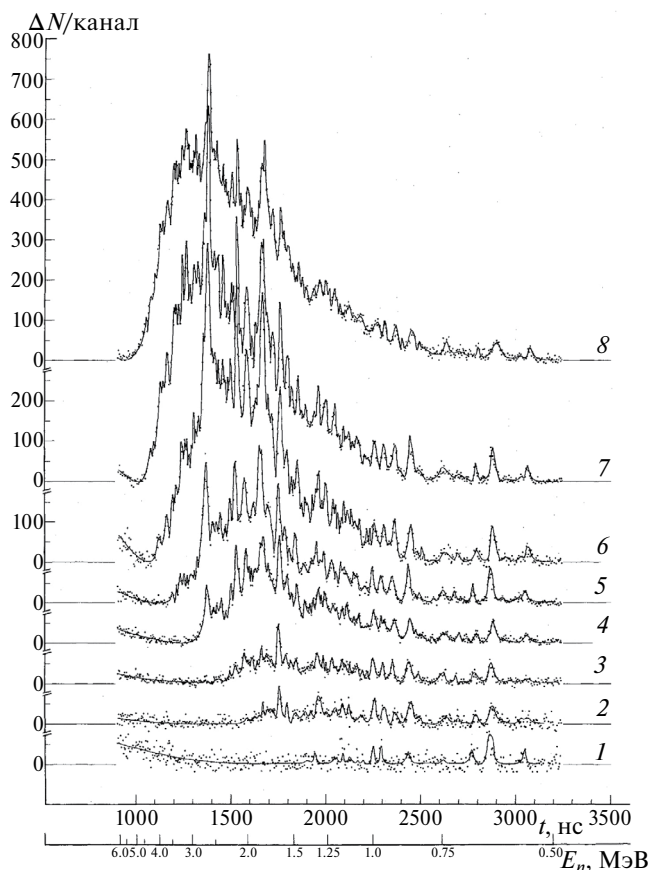


Рис. 2. Спектры нейтронов [4], дающих заселение основных состояний ^{207}Pb для реакции $^{208}\text{Pb}(\gamma, n_g)$, в зависимости от времени пролета t и энергии нейтронов E_n (нелинейная шкала) для различных верхних границ энергий тормозных γ -квантов $E_{\gamma\text{ макс}}$: 8.8 (1); 9.4 (2); 9.9 (3); 10.4 (4); 10.9 (5); 11.5 (6); 12.0 (7); 12.5 (8).

$E_{\gamma\text{ макс}}$. В спектрах авторы выделили 26 пиков и пытались выделить вклады изоскалярного электрического квадрупольного (E2) ГР.

В [3] применен основанный на измерениях амплитуд сцинтилляционный спектрометр быстрых нейтронов на базе стильбенового детектора ($\varnothing 50$ мм, толщина 50 мм), сочлененного с ФЭУ. При этом для отделения фона от γ -квантов использовалась дискриминация по форме импульса (ДФИ, см. подробнее о работе этого спектрометра на импульсных ускорителях электронов в [7, 8]). В [3] проведены исследования образования быстрых нейтронов с $E_n > 3.7$ МэВ в реакции (γ, n) на ядрах ^{52}Cr и ^{51}V . Здесь приводятся в качестве примера результаты только для ^{51}V , для которого применялась металлическая мишень толщиной $16.7 \text{ г} \times \text{см}^{-2}$ естественного изотопного состава ($^{51}\text{V} - 99.75\%$). Детекторы нейтронов были расположены под углом $\theta \approx 135^\circ$ к направлению γ -пучка.

На рис. 3 представлены сечения образования в реакции $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ нейтронов как с энергиями $E_n > 3.7$ МэВ (открытые кружки), измеренные в [3], так и с $E_n > 0$ из [9] (закрытые кружки), последние взяты для сопоставления. Для измеряемых спектров быстрых нейтронов в [3] проводилось вычитание составляющих, рассчитанных по статистической модели с подогнанными параметрами. На рис. 4 представлены полученные после такого вычитания спектры нейтронов из реакции $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ [3], измеренные при указанных верхних границах тормозного спектра $E_{\gamma\text{ макс}}$.

У работ [3] и [4] есть свои серьезные сложности и недостатки. Как уже указывалось, обе работы проводились на пучках тормозного излучения со сплошным спектром γ -квантов, требующим для получения информации, относящейся к монохроматическим γ -квантам, решения обратной задачи. При этом, если в [3] разброс $E_{\gamma\text{ макс}}$ был ~ 10 кэВ и использовалось

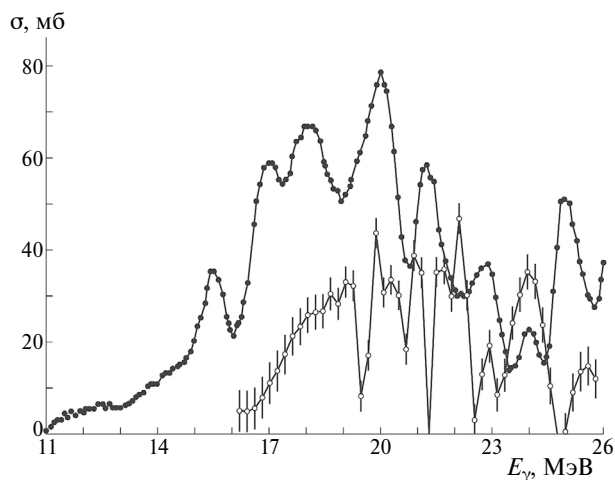


Рис. 3. Зависимости от E_γ измеренных сечений испускания нейтронов в реакции $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ с энергией нейтронов $E_n > 0$ [9] (закрытые кружки) и $E_n > 3.7$ МэВ [3] (открытые кружки).

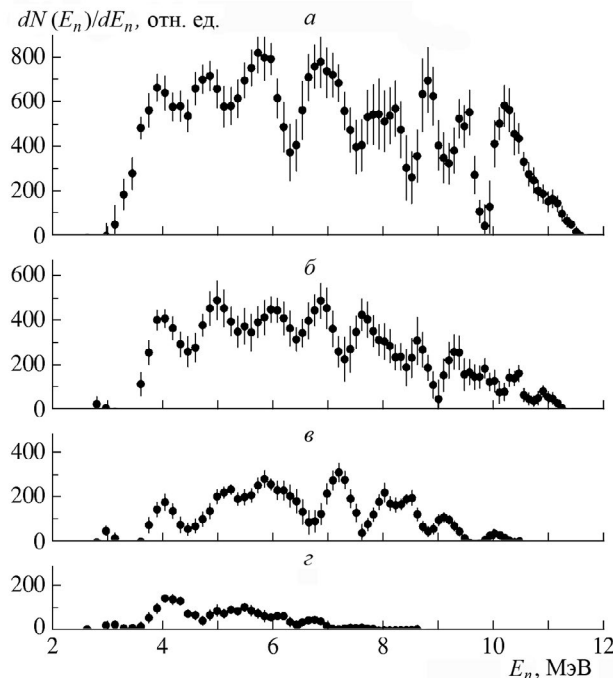


Рис. 4. Спектры нейтронов из реакции $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ [3] без рассчитанного по статистической модели «вклада», измеренные при различных верхних границах тормозного спектра $E_{\gamma \text{ макс}}$: 25.5 (а); 23.0 (б); 21.0 (в); 18.5 МэВ (г).

современное представление спектров тормозных γ -квантов [10], то в [4] разброс $E_{\gamma \text{ макс}}$ был на порядки больше из-за довольно толстого радиатора и большого разброса энергий пучка электронов ($\pm 4\%$), и использовалось представление Шиффа для спектров тормозных γ -квантов [11], в котором значительно «обеднено» содержание γ -квантов вблизи их верхней границы по энергии, что наиболее существенно при выделении узких структурных особенностей в сечениях реакций [12]. Кроме того, если в [3] при решении такой обратной задачи использован весьма разработанный метод регуляризации (а также для контроля метод редукции), то в [4] — внушающий большие сомнения метод разности фотонов с двумя энергиями электронов на одном и том же радиаторе [13]. С другой стороны, у спектрометра нейтронов в [3] были серьезные характерные для стильбенового детектора сложности с функцией отклика, затрудняющие решения своей обратной задачи (по энергиям нейтронов). Тем не менее, наличие узких структурных особенностей в спектрах и сечениях образуемых нейтронов в [3] и особенно в [4] (несмотря на указанные возможные причины искажений результатов) очень интересно для понимания физики ГР в атомных ядрах. Но важна достоверность, а для этого нужны прецизионные исследования. Достоинства

пучков γ -квантов от проектируемого источника (см. табл. 1) весьма привлекательны для таких исследований. Представляется также, что измерения угловых распределений испускаемых быстрых нейтронов с использованием возможной поляризации проектируемого γ -пучка могут существенно увеличить информативность таких экспериментов.

МЕТОДИКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Предлагаемые эксперименты используют систему спектрометров быстрых нейтронов, в которых измеряются и время пролета нейтронов, и амплитуды вызванных ими сцинтилляций. В качестве детекторов нейтронов предлагаются герметичные кюветы ($\varnothing 50$ мм, толщина 50 мм), «сочлененные» с ФЭУ и заполненные жидким сцинтиллятором, например, типа EJ-309 (имеющим однородные и изотропные свойства и пригодным для ДФИ). Центры кювет расположены равномерно по окружности с радиусом $R = 1$ м, имеющей свой центр на оси γ -пучка (для $E_n = 0.4$ МэВ $t \cong 114.3$ нс, а для $E_n = 12$ МэВ $t \cong 20.87$ нс). Окружность лежит в плоскости, перпендикулярной оси γ -пучка и проходящей через центр мишени. Ось каждой кюветы идет из центра мишени. Телесный угол, стягиваемый каждым детектором, составляет $\Omega \approx 2 \times 10^{-3}$ ср. Эффективность регистрации нейтронов используемыми детекторами ε зависит от энергии нейтронов E_n . При этом $\varepsilon(E_n = 12 \text{ МэВ}) \sim 0.1$ [14].

Параметры пучка позволяют использовать физические мишени малых поперечных размеров (вплоть до $\varnothing 1.6$ мм). Толщину же мишеней определяет ослабление потока падающих γ -квантов по этой толщине (см., например, [15]). Например, для свинцовых мишеней можно ограничиться их толщиной такой же, как в [4], то есть ~ 4.5 мм (но у нас с массой $m \sim 0.1$ г). Такие малые размеры и масса мишени, с одной стороны, делают более доступными обогащенные мишени (например, свинцовые, обогащенные изотопом ^{208}Pb), а с другой стороны, ослабляют искажения потоков и спектров быстрых нейтронов, образуемых в мишенях и испускаемых из них.

ОЦЕНКИ ДЛЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ^{208}Pb

Оценим $N_{n \text{ рег}}$ — ожидаемое число зарегистрированных быстрых нейтронов с энергией $E_n = 12$ МэВ, испускаемых из материнских ядер ^{208}Pb и приводящих к заселению основных состояний в дочерних ядрах ^{207}Pb , в одном предлагаемом детекторе от одного импульса γ -квантов обратного комптоновского рассеяния [6] при их энергии $E_g \cong 20.1$ МэВ:

$$N_{n \text{ рег}} \sim N_{\gamma \text{ имп}} \cdot \left(\frac{d\sigma_g}{d\Omega} \right)_{90^\circ} \cdot \Omega \cdot \varepsilon \cdot N_A \cdot \frac{x_{\text{Pb}} \rho_{\text{Pb}}}{M_{\text{Pb}}} \approx 1.5 \times 10^4 \text{ имп}^{-1},$$

где: $N_{\gamma \text{ имп}} \sim 10^4 \text{ имп}^{-1}$ — количество таких γ -квантов в импульсе длительностью $\sim 2 \times 10^4 \text{ пс}$;

$$\left(\frac{d\sigma_g}{d\Omega} \right)_{90^\circ} \approx 5 \times 10^{-27} \text{ см}^2 \text{Хср}^{-1}; \Omega \approx 2 \times 10^{-3} \text{ ср}; \varepsilon \sim 0.1;$$

$N_A \cong 6.022 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ — число Авогадро; $x_{\text{Pb}} \sim 0.45 \text{ см}$ — толщина Pb-мишени; $\rho_{\text{Pb}} \cong 11.35 \text{ г} \times \text{см}^{-3}$ — плотность Pb-мишени; $M_{\text{Pb}} \approx 208 \text{ г} \times \text{моль}^{-1}$ — грамм-моль Pb-мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ и приближенные оценки показывают значительную перспективность исследований распределений быстрых нейтронов из (γ, n) -реакций по их энергии и углам испускания на проектируемом комптоновском источнике квазимонохроматических γ -квантов в области Е1 ГР. Надо отметить, что довольно высокая интенсивность рассматриваемых разрабатываемых γ -пучков при низком ожидаемом фоне электронов открывает новые возможности для изучения и фотопротонных реакций.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Woude A., van der* // In International review of nuclear physics. V. 7. Electric and Magnetic Giant Resonances in Nuclei. Singapore: World Scientific, 1991. P. 99.
2. *Гуревич Г.М., Джилаван Л.З., Долбилкин Б.С. и др.* Проект программы исследований на Московском разрезном микротроне непрерывного действия с максимальной энергией ускоренных электронов 175 Мэ В. Препринт ИЯИ РАН. П-1040. Москва, 2000. 83 с.
3. *Вербицкий С.С., Лапик А.М., Ратнер Б.С. и др.* // Ядерн. физика. 2009. Т. 72. С. 420; *Verbitsky S.S., Lapik A.M., Ratner B.S. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2009. V. 72. P. 387.
4. *Sherman N.K., Ferdinande H.M., Lokan K.H., Ross C.K.* // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. P. 1215.
5. *Бельшев С.С., Варламов В.В., Джилаван Л.З. и др.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2023. Т. 78. № 3. С. 2330204; *Belyshev S.S., Varlamov V.V., Dzhilavyan L.Z. et al.* // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2023. V. 78. No. 3. Art. No. 2330204.
6. *Шведун В.И., Ермаков А.Н., Артюков И.А., et al.* Разработка источника комптоновского излучения для исследований в области биологии медицины, материаловедения, быстропотекающих процессов, ядерной физики. Отчет о НИР. НИИЯФ МГУ. Москва, 2022. 111 с.
7. *Джилаван Л.З., Лапик А.М., Недорезов В.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 468; *Dzhilavyan L.Z., Lapik A.M., Nedorezov V.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No 4. P. 356.
8. *Джилаван Л.З., Лапик А.М., Недорезов В.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. С. 552; *Dzhilavyan L.Z., Lapik A.M., Nedorezov V.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No 4. P. 455.
9. *Горячев Б.И., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. С. 1736.
10. *Seltzer S.M., Berger M.J.* // Nucl. Instrum. Meth. B. 1985. V. 12. P. 95.
11. *Schiff L.I.* // Phys. Rev. 1951. V. 83. P. 252.
12. *Джилаван Л.З.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. С. 581; *Dzhilavyan L.Z.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. P. 537.
13. *Sherman N.K.* // В кн.: Электромагнитные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях. Труды IV семинара. М.: Наука, 1979. С. 149.
14. *Кухтевич В.И., Трыков Л.А., Трыков О.А.* Одно-кристалльный сцинтилляционный спектрометр (с органическим фосфором). М.: Атомиздат, 1971. 136 с.
15. *Гайтлер В.* Квантовая теория излучения. М.: Иноиздат, 1956. 491 с.; *Heitler W.* The quantum theory of radiation. Oxford: The Clarendon Press, 1954.

On distributions of neutrons from (g, N) -reactions in energy and angles on g-beams of backward Compton scattering at $E\gamma \lesssim 40$ MeV

A. M. Lapik¹, S. S. Belyshev², V. V. Varlamov³, L. Z. Dzhilavyan^{1,*}, A. A. Kuznetsov^{2, 3},
A. L. Polonski¹, A. V. Rusakov¹, V. I. Shvedunov³

¹ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia*

² *Lomonosov Moscow State University, Physics Department, Moscow, 119991, Russia*

³ *Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Nuclear Physics Institute, Moscow, 119234, Russia*

* e-mail: dzhil@inr.ru

To study the E1 giant resonance in atomic nuclei, it is important to study distributions of energy and emission angles of fast neutrons from (γ, n) -reactions. The paper considers some features of such studies on beams of γ -quanta of backward Compton scattering with small spreads of their energy, angles, transverse dimensions, duration, and polarization in these beams. In this case, it is assumed that fast neutron spectrometers will be used using both amplitude and time-of-flight data.

Keywords: Compton scattering of laser photons by beams of accelerated electrons, E1 giant resonances in atomic nuclei