
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ
ПОЛНЫХ ЯДЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ
В ОБЛАСТИ ПИГМИ РЕЗОНАНСА

© 2021 г. А. А. Туринге^а, *, В. Н. Пономарев^а, Г. В. Солодухов^а, В. Г. Недорезов^а

^аИнститут ядерных исследований Российской академии наук, пр. 60-летия Октября 7а, Москва, 117312 Россия

*E-mail: turinge56@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 15.07.2021 г.

Приведены результаты моделирования эксперимента по исследованию полных сечений фотопоглощения ядер на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН в области энергий фотонов 5–10 МэВ, которая получила название пигми резонанса. Мотивацией для подготовки эксперимента послужили новые экспериментальные данные о фотовозбуждении спиновых изомеров среднетяжелых ядер, где были получены косвенные указания на изменение мультипольности фотопоглощения ядер вблизи порога. Настоящий эксперимент предполагает прямое изучение обнаруженных эффектов путем измерения полных сечений фотопоглощения на фотонном пучке. Моделирование выполнено по программе GEANT-4. Проведена оптимизация параметров установки и обоснован выбор детекторов для проведения измерений.

Ключевые слова: фотон, электрон, мультипольность, пигми резонанс

DOI: 10.56304/S2079562920060585

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования пигми резонанса, лежащего у порога фотоядерных реакций (ниже гигантского дипольного резонанса), в настоящее время представляют большой интерес, потому что связаны с изучением ряда новых эффектов, включая возбуждение экзотических (ножничных, компрессионных) мод коллективных возбуждений ядер (см., например, обзоры [1, 2]). Совсем недавно были получены указания на изменение мультипольности фотопоглощения ядер вблизи порога [3]. Было впервые установлено, что отношение инклюзивных сечений возбуждения ядер — изомеров реальными и виртуальными фотонами резко падает при уменьшении энергии фотонов, что не согласуется с предсказаниями теоретических моделей. Эта тема лежит в рамках нового научного направления, получившего за рубежом название “ядерная фотоника” [4].

Полученные к настоящему времени экспериментальные данные по исследованию мультипольности фотопоглощения вблизи порога ограничены как числом исследованных ядер (индий и кадмий), так и методикой измерений (возбуждение изомеров). Поэтому представляет интерес исследовать возбуждение более широкого круга ядер с измерением полных сечений фотопоглощения прямым методом [5]. Этот метод хорошо зареко-

мендовал себя при измерении полных сечений фотопоглощения в области гигантского дипольного резонанса, но поскольку сечение возбуждения пигми резонанса примерно на два порядка ниже, чем сечения гигантского дипольного резонанса, то используемый метод предъявляет повышенные требования к проведению эксперимента и требует его детального моделирования.

При планировании эксперимента определяющую роль в обеспечении достижимости ожидаемых результатов играет выбор целого ряда параметров. Во-первых, необходимо создать гамма пучок с тормозным спектром малой угловой расходимости. Во-вторых, необходимо иметь детектор с достаточно узкой аппаратной функцией, подавляющую часть которой должен составлять пик полного поглощения. Для этого гамма-квант, попавший в активное вещество детектора и рассеянный в нем на любой угол, должен с достаточной вероятностью целиком поглотиться в нем и дать вклад в пик полного поглощения без заметного уменьшения его доли в поглощенной энергии. В-третьих, учитывая низкий коэффициент заполнения пучка ускорителя ($\text{duty cycle} = 10^{-3}$), необходимо просчитать интенсивность пучка, обеспечивающую измерения без наложений импульсов.

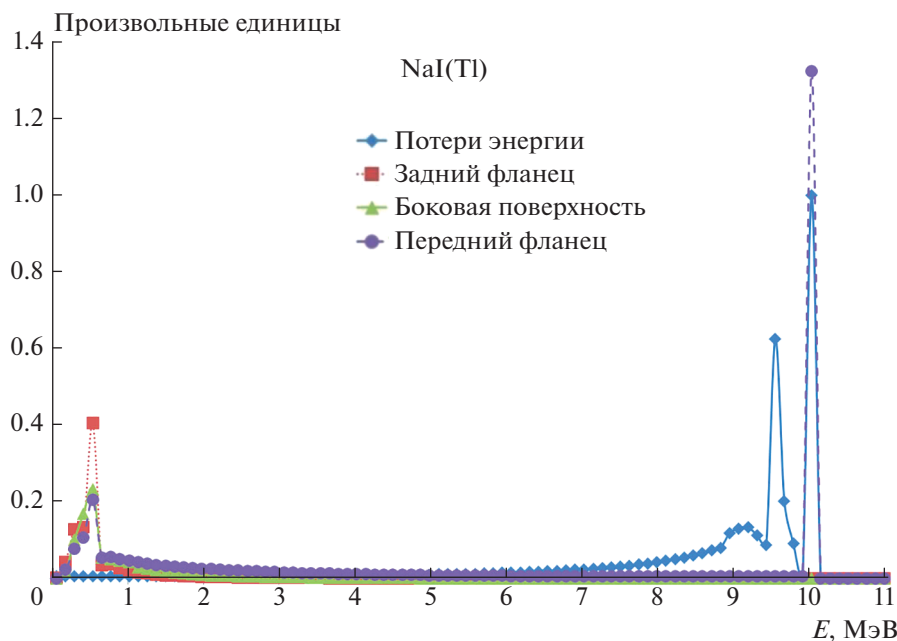


Рис. 1. Потери энергии в кристалле NaI(Tl) (ромбы, сплошная линия), энергии частиц, ушедших через передний фланец (круги, пунктирная линия), задний фланец (квадраты, точки) и боковую поверхность (треугольники).

2. ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В настоящей работе проведено моделирование основных параметров планируемого эксперимента по программе GEANT-4 [6]. Для каждой выбранной конфигурации эксперимента моделировался миллион событий.

Выполнен модельный анализ спектроскопических свойств сцинтилляционных детекторов: на основе германата висмута (Bismuth Germanium Oxide — BGO) и NaI(Tl). Сравнивались детекторы цилиндрической формы с осями, параллельными пучку фотонов. Для большей определенности в вы-

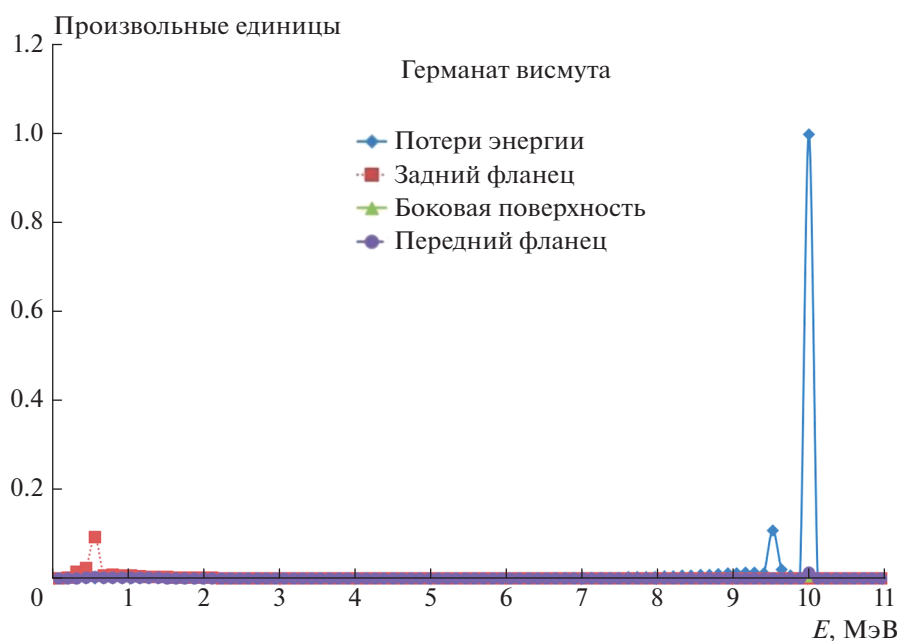


Рис. 2. Потери энергии в кристалле германата висмута (ромбы, сплошная линия), энергии частиц, ушедших через передний фланец (круги, пунктирная линия), задний фланец (квадраты, точки) и боковую поверхность (треугольники).

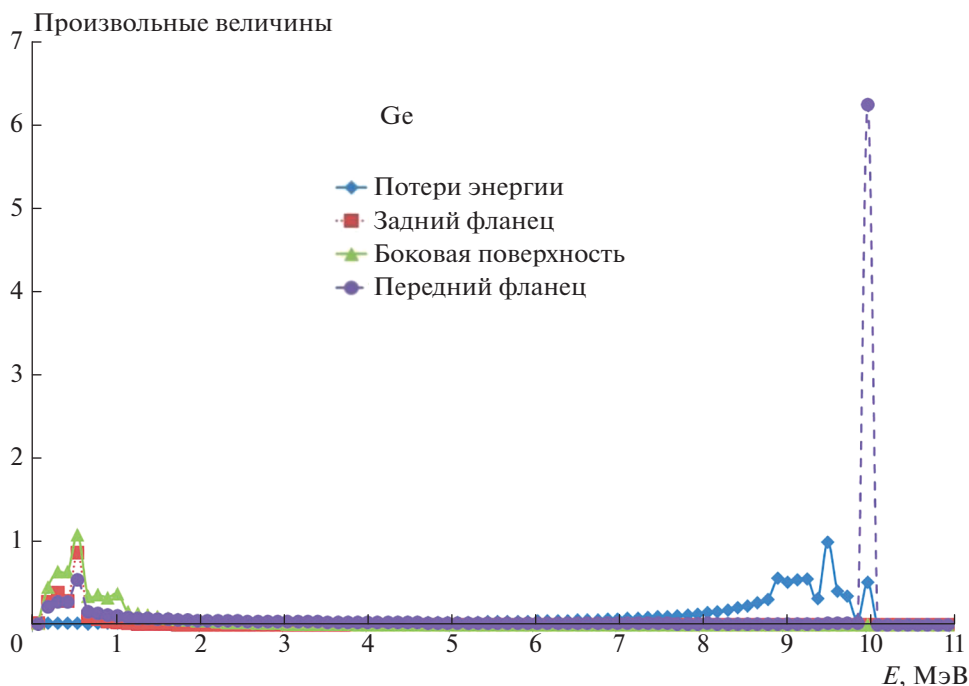


Рис. 3. Потери энергии в кристалле германиевого детектора (ромбы, сплошная линия), энергии частиц, ушедших через передний фланец (круги, пунктирная линия), задний фланец (квадраты, точки) и боковую поверхность (треугольники).

явлении формы аппаратурной функции на входе детектора задавался коллимированный монохроматический пучок гамма-квантов с энергией 10 МэВ. Помимо вещества детектора варьировались его радиус, толщина по направлению падающего излучения, а также диаметр падающего пучка фотонов. Фиксировались энергия первичного фотона и вторичных частиц, поглощенная в детекторе, а также утечки энергии в направлениях вперед и назад (соответственно, через выходной и входной фланцы детектора) и через боковую поверхность детектора. Для каждого модельного события контролировалось равенство суммы энергий, поглощенных в детекторе и трех упомянутых утечек энергии налетающего фотона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные результаты для двух типов детекторов (NaI(Tl) и BGO) соответственно, представлены на рис. 1, 2. Размеры сцинтилляторов: диаметр — 150 мм, толщина по пучку — 100 мм для NaI(Tl) и 150 мм для BGO (рассматривались промышленно доступные типоразмеры). Радиус пучка гамма-квантов составлял 5 мм. Здесь представлены часть энергии гамма-кванта, поглощенная в кристалле, доля энергии, потерянная из-за пролета насквозь и доли потерь энергии через боковые поверхности и переднюю стенку кристалла.

Для наглядности максимальное значение потерь энергии в детекторе было нормировано на единицу. Видно, что при равных размерах аппаратурная функция сцинтиллятора BGO оказывается предпочтительной для дальнейшей обработки экспериментальных данных благодаря тому, что радиационная длина BGO (1.13 см) почти в 2.5 раза меньше чем у NaI(Tl) (2.6 см).

В иллюстративных целях энерговыделение и утечки были промоделированы также для промышленного германиевого детектора радиусом 28 мм, глубиной 55 мм, то есть объемом 135 см³ (рис. 3) Видно, что германиевый детектор рассмотренных при моделировании размеров явно не оптимален для восстановления реального спектра фотонов в диапазоне энергий в несколько мегаэлектронвольт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено моделирование основных параметров планируемого эксперимента по программе GEANT-4. Выполнен модельный анализ спектроскопических свойств сцинтилляционных детекторов на основе BGO и NaI(Tl) по отношению к коллимированному пучку фотонов с энергией 10 МэВ. Показано, что функция отклика детектора BGO более предпочтительна и этот детектор позволяет решить поставленную задачу

по измерению полных сечений фотопоглощения ядер при энергии 5–10 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Savran D., Aumann T., Zilges A.* // *Progr. Part. Nucl. Phys.* 2013. V. 70. P. 210.
2. *Kamerdzhiyev S., Shitov M.* // *Eur. Phys. J. A.* 2020. V. 56 (10). P. 265.
3. *Nedorezov V., Konobeevski E., Polonski A. et al.* // *Phys. Scripta.* 2019. V. 94 (1). P. 015303.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaed6b>
4. *Nedorezov V.G., Savel'ev-Trofimov A.B.* // *Yad. Fiz. Inzhin.* 2016. V. 7. P. 479.
5. *Gurevich G.M., Lazareva L.E. et al.* // *Nucl. Phys. A.* 1981. V. 351. P. 257.
6. geant4.web.cern.ch.

Simulation of an Experiment to Study the Total Nuclear Photoabsorption Cross Sections in the Pygmy Resonance Region

A. A. Turinge^{1, *}, V. N. Ponomarev¹, G. V. Solodukhov¹, and V. G. Nedorezov¹

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

**e-mail: turinge56@mail.ru*

Received October 21, 2020; revised July 15, 2021; accepted July 15, 2021

Abstract—An experiment to study total nuclear photoabsorption cross sections at the linear electron accelerator LUE-8-5 (INR, RAS) in the photon energy region of 5–10 MeV called the pygmy resonance is simulated. The motivation for the experiment is new experimental data on photoexcitation of spin isomers of medium-heavy nuclei, which indirectly indicate a change in multipolarity of near-threshold photoabsorption of nuclei. The experiment implies direct investigation of the observed effects by measuring total photoabsorption cross sections in the photon beam. The simulation is performed using the GEANT-4 code. The parameters of the facility are optimized, and the choice of the detectors for the measurements is substantiated.

Keywords: photon, electron, multipolarity, pygmy resonance