

УДК 539.17.01:539.142:539.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ ЯДЕР В ОБЛАСТИ ПИГМИ-РЕЗОНАНСА

© 2020 г. Г. В. Солодухов¹, *, В. Н. Пономарев¹, В. Г. Недорезов¹

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

*E-mail: solod@inr.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Дан обзор исследований полных ядерных сечений фотопоглощения в области пигми резонанса (от 5 до 10 МэВ). Описан метод полного фотопоглощения, который ранее использовался в области гигантского дипольного резонанса (10–30 МэВ) и теперь адаптируется к области низких энергий. Этот метод позволяет получить данные о статической и динамической деформации и квадрупольных моментах исследуемых ядер. Описаны возможности прикладного использования полученных результатов.

DOI: 10.31857/S036767652008030X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию пигми резонанса обусловлен возможностью получения новых данных о природе низколежащих коллективных возбуждений ядер при энергии возбуждения ниже энергии связи нуклона в ядре (см., например, обзор [1]). В этой области энергий вылет нуклонов сильно подавлен и механизм возбуждения и распада ядра обусловлен радиационными переходами между его уровнями. Следовательно, становится возможным прямое определение радиационных силовых функций, которые связаны с деформацией ядер и их квадрупольным моментом. При этом для среднетяжелых и тяжелых ядер (⁷⁰Ni, ²⁰⁸Pb и др.) теоретически отмечается возможность возбуждения экзотических, например, компрессионных, тороидальных, ножничных колебательных мод и других [2].

Следует отметить, что поиск экзотических характеристик ядер при низких энергиях возбуждения активно проводился в 70-х годах прошлого века после открытия у трансурановых ядер изомерии формы (см. обзор [3]). В частности, были измерены моменты инерции у ряда среднетяжелых ядер, указывающие на то, что ядерная материя при энергии возбуждения 2–3 МэВ может находиться сверхтекучем состоянии. При этом параметры деформации не изменяются. Были также получены указания на существование пузырьковых ядер и др. При этом для изучения ядерных параметров, включая квадрупольные моменты и среднеквадратичные радиусы, использовались разные методы, в

том числе метод лазерной оптической спектроскопии. К сожалению, эти направления исследований почти забыты к настоящему времени, хотя в последние годы работы в этом направлении активизировались. В этой связи изучение свойств пигми резонансов в ядрах при энергии возбуждения вблизи порога фотонуклонных реакций представляет большой интерес.

Экспериментальных фотоядерных данных при низких энергиях фотонов опубликовано мало. Среди современных данных следует отметить результаты по неупругому рассеянию фотонов на ядрах ⁷⁶Se [4], полученные на пучке монохроматических поляризованных фотонов с энергией около 3.5 МэВ. Такой пучок фотонов был получен с помощью метода обратного комптоновского рассеяния. Современный уровень эксперимента позволил измерить радиационные силовые функции для *E1* и *M1* переходов для указанного ядра. Было установлено, что *E1* переход доминирует (более 90%) при низких энергиях возбуждения.

Исследование сечений образования изомеров проводилось в работах [5–8]. На рис. 1 показаны результаты по возбуждению изомерных состояний в ядрах ¹¹¹Cd, ¹¹³In, ¹¹⁵In, полученные на пучке тормозных фотонов [5, 6]. Поскольку изомерные отношения слабо зависят от энергии возбуждения указанных ядер, по форме полученных сечений можно судить о форме сечения полного фотопоглощения.

В настоящей работе обсуждаются предварительные результаты по разработке метода полно-

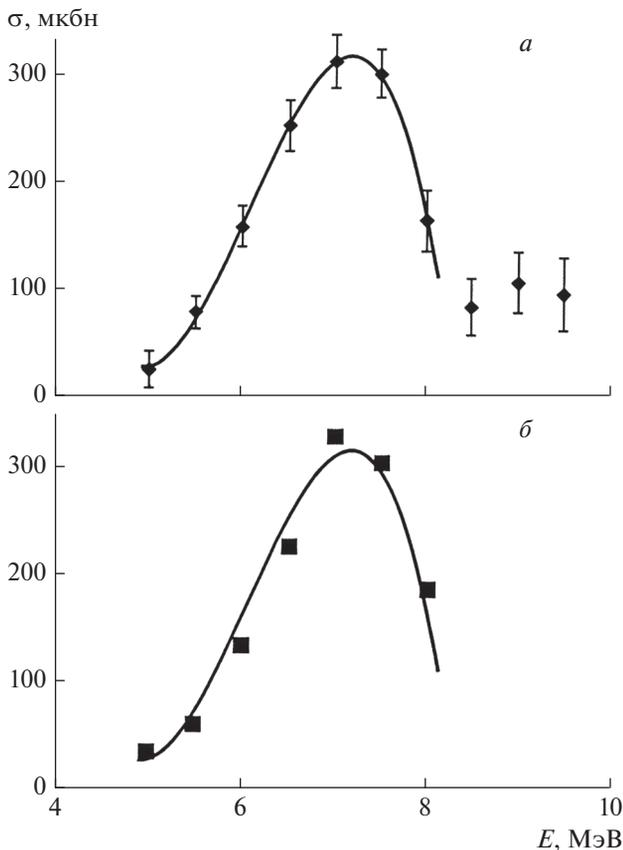


Рис. 1. Энергетическая зависимость сечения возбуждения изомера ^{111m}Cd : *a* – экспериментальные данные (точки) из работы [5], *b* – результат восстановления этого сечения (квадраты) из работы [6], сплошная кривая – результат аппроксимации экспериментальных точек [6].

го фотопоглощения, который ранее успешно применялся для измерения полных сечений в области гигантского дипольного резонанса [9], и теперь адаптируется для околопороговой области энергий.

Следует отметить, что исследование фото-ядерных реакций при низких энергиях в последние годы стимулировало развитие нового научного направления, получившего название “ядерная фотоника” [10]. Ключевыми проблемами в этой теме являются разработки гамма источников нового поколения на базе электронных накопителей и фемтосекундных лазеров (см., например, обзор [11]).

МЕТОД ПОЛНОГО ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ

Метод основан на измерении коэффициента ослабления хорошо сколлимированного пучка гамма-квантов поглотителем из исследуемого ма-

териала. Условие “хорошей коллимации” означает, что вследствие поглощения или отклонения от первоначального направления в поглотителе практически все первичные и вторичные гамма-кванты выходят за пределы того малого телесного угла, в котором фотоны регистрируются детектором. В этом случае работает экспоненциальный закон ослабления интенсивности потока, из которого впрямую определяется суммарное сечение всех возможных процессов взаимодействия падающего излучения с веществом исследуемого образца. В нашем случае измеряемая в эксперименте величина состоит из двух слагаемых: сумма сечений атомных процессов и искомое ядерное сечение. Использование для регистрации гамма-квантов детектора с высоким энергетическим разрешением позволяет исследовать структуру ядерного сечения, работая с непрерывным, например, с тормозным спектром гамма-излучения. Это обстоятельство является весьма важным, так как дает возможность, имея в любом исследуемом интервале энергий высокую интенсивность гамма-излучения, проводить детальные исследования в широком диапазоне энергий. Другими словами, этот метод при работе с тормозным спектром эквивалентен работе с квазимонохроматическим пучком фотонов переменной энергии, имеющим энергетическое разрешение, соответствующее разрешению используемого детектора.

Этот метод применим практически ко всем стабильным ядрам и позволяет однозначно учесть вклад всех возможных парциальных реакций. Основным недостатком метода является его большая трудоемкость, связанная с тем, что ядерное сечение составляет лишь малую часть от измеряемого полного сечения фотопоглощения. Отсюда возникает необходимость набора высокой статистики, достаточной для вычитания атомного сечения из измеряемого полного сечения и последующей нормировки нуля ядерного сечения. Положительным фактором здесь является то, что атомные сечения практически постоянны в рассматриваемой области энергий, а ядерные сечения, как видно из полученных на сегодня данных, имеют резонансный характер. Некоторая неопределенность в значениях сечений атомных процессов значительно слабее сказывается на точности определения энергетического положения структуры в исследуемом сечении и его структуры, чем на абсолютных значениях сечений.

В интересующем нас диапазоне энергий основной вклад в неядерные процессы взаимодействия излучения с веществом дает комптоновское рассеяние. Оценки угловых и энергетических распределений рассеянных фотонов тормозного излучения с максимальной энергией до 10 МэВ дают, с учетом вклада многократных процессов, уширение моноэнергетической линии в детекторе не более,

чем на 1%, при телесном угле регистрации около 10^{-4} ср.

Схема эксперимента, реализуемого в настоящее время на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН, показана на рис. 2. Исследуемый образец (оптимально толщиной в 2–3 радиационных длины) помещается на оси коллимированного гамма пучка. Проблема высокой интенсивности в импульсе, свойственной ускорителям применяемого типа, может быть отчасти решена помещением в пучок тормозного излучения поглотителя из легкого вещества, например, из алюминия или графита, роль которого сводится не только к ослаблению суммарной интенсивности пучка, но и к некоторому преимущественному уменьшению загрузки спектрометра мешающей низкоэнергетической частью спектра. Геометрия существующих экспериментальных залов дает возможность обеспечить угол регистрации, необходимый для выполнения условий хорошей геометрии. Пролетный промежуток от исследуемого образца до спектрометра в силу его большой длины и сравнительно малых энергий должен быть вакуумирован.

Параметры пучка электронов, полученные на радиационном комплексе ЛУЭ-8-5 с помощью магнитной системы формирования пучка, приведены в табл. 1. Высокая монохроматичность и стабильность пучка электронов играют в этом эксперименте существенную роль для достижения минимальных систематических ошибок и особенно важны для максимально точного измерения в отдельном эксперименте функции отклика спектрометрического тракта. Общим недостатком, характерным для импульсных электронных ускорителей, является низкий коэффициент заполнения пучка (*duty cycle* около 0.1%), что делает необходимым серьезное внимание на проблему борьбы с наложениями импульсов.

Следует отметить, что наличие реальной возможности использования в эксперименте пучка электронов в диапазоне 4–10 МэВ с разрешением не хуже 100 кэВ и интенсивностью в импульсе порядка 10^{13} электронов за 3 мкс (что соответствует среднему току пучка 1 мкА) уникальна, но явно избыточна для обычно применяемых детекторов. Однако, эта избыточность дает экспериментатору возможность широкого применения различных дополнительных фильтров и методик для повышения качества получаемого экспериментального материала.

СПЕКТРОМЕТР ФОТОНОВ

Серьезная проблема настоящего эксперимента связана с низким коэффициентом заполнения пучка и вытекающей отсюда необходимостью применения методик исключения наложений

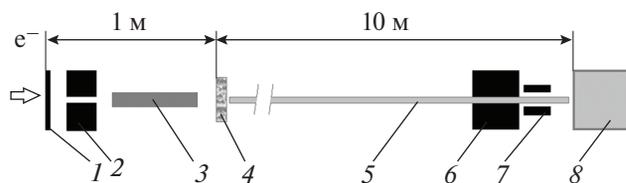


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению полных сечений фотопоглощения: 1 – тормозной конвертер из W толщиной 0.4 мм, 2 – фильтр-ожестчитель, 3 – коллиimator из Pb толщиной 10 см и диаметром 0.5 см, 4 – исследуемый образец из ^{111}Cd толщиной 3 см, 5 – вакуумированный тракт, 6 – коллиimator из Pb толщиной 10 см и диаметром 1 см, 7 – очищающий магнит, 8 – детектор полного фотопоглощения.

импульсов, решаемого с помощью известных спектрометрических методов. Вторая проблема – учет наличия “хвоста” функции отклика спектрометра, связанного с возможным неполным поглощением энергии кванта в детекторе. Эта проблема частично может быть решена с помощью модульного гамма спектрометра типа “спагетти” [12], внешние элементы которого могут быть использованы в качестве антикомптоновской защиты. Предполагается сделать мозаику из 24-х гексагональных модулей с полным диаметром 9 см. При этом каждый модуль имеет диаметр 3 см и длину 10 см. Каждый модуль просматривается с торца кремниевым фотоумножителем AgauC-60035-4P производства Hamamatsu. В настоящее время проведены испытания прототипа из 3-х модулей, показывающие перспективность данной разработки [13].

Для настоящего эксперимента разработана система сбора и обработки данных на базе файловой системы NTUPLE с помощью программы ROOT.

Предварительные результаты, полученные на пучке ЛУЭ-8-5, показывают, что полный набор необходимой статистики для одного ядра, требует около трех месяцев непрерывной работы на пучке. Такое относительно большое время измерений связано с тем, что сечения полного фотопоглощения ядер в области пикми резонанса примерно на два порядка ниже, чем в области ГДР. Тем не менее, результаты моделирования экспе-

Таблица 1. Параметры пучка электронов, полученные на радиационном комплексе ЛУЭ-8-5РВ после магнитной системы формирования пучка

Энергетический диапазон, МэВ	4–10
Ширина энергетического спектра (FWHM), %	<1.0
Средний ток, мкА	6
Частота повторения импульсов, с^{-1}	300
Длительность импульса, мкс	3

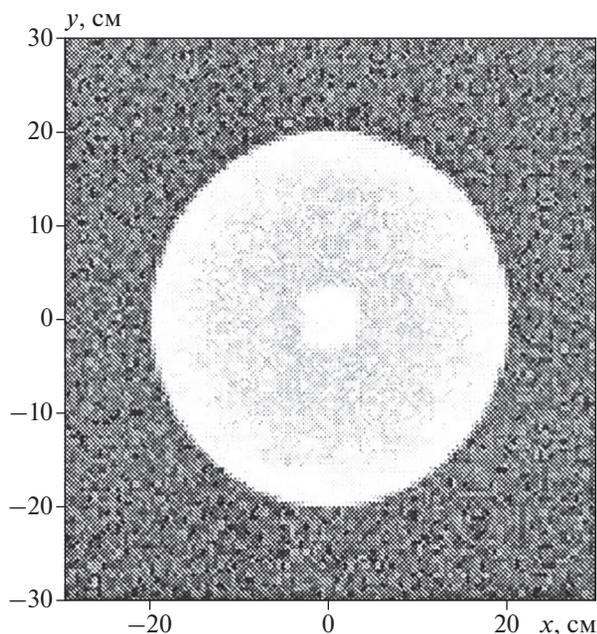


Рис. 3. Изображение уранового кубика (6 см) в свинцовом контейнере толщиной 1 см (результаты моделирования по программе GEANT4 [12]).

римента, выполненные по программе GEANT4, указывают на возможность его проведения. Для этого пришлось выполнить ряд методических работ, включая модификацию магнитной системы формирования электронного, увеличение базы (расстояния между тормозной мишенью и детектором), модернизацию системы сбора и обработки данных. Полученная при этом информация представляет интерес, несмотря на отсутствие новых экспериментальных данных на настоящем этапе проведения эксперимента. Достигнутые в результате методические результаты, включая параметры ускорителя, приведены в табл. 1. В настоящее время начаты работы по получению физической информации.

ПРИКЛАДНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ РАЗРАБОТКИ

Обычно применяемые в настоящее время методики неразрушающего определения содержимого крупнотоннажных контейнеров основаны на измерении ослабления потока гамма излучения, прошедшего через контейнер, и не дают информации об элементном составе груза. Использование с этой целью так называемого дуального метода подразумевает облучение тормозным излучением с двумя оперативными переключаемыми максимальными энергиями, что, очевидно, усложняет проблему. Альтернативный способ, описанный в [13], основан на измерении не только ослабления, но и формы энергетических спектров гамма-кван-

тов, прошедших через контейнер. Этот метод позволяет разделить содержимое крупнотоннажных контейнеров по атомным номерам содержимого на несколько групп, проводя облучение тормозным спектром только с одной максимальной энергией. В этой работе показано, что оптимальная эффективность разделения материалов по атомному номеру может быть достигнута при максимальной энергии тормозного спектра как раз в области 8–10 МэВ. На рис. 3 показаны результаты моделирования с помощью GEANT4, которые демонстрируют возможности предлагаемого метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы возобновился интерес к исследованию полных ядерных сечений фотопоглощения при низких энергиях вблизи энергии связи нуклонов в ядре. Вначале этот интерес был связан, главным образом, с изучением спиновых изомеров ядер. Теперь основное внимание уделяется изучению пигми резонанса в ядрах, его связи с фононными возбуждениями, проявлением экзотических коллективных состояний ядер.

Возобновление интереса к этой проблеме в значительной степени обусловлено разработкой гамма источников нового поколения на базе электронных накопителей и мощных фемтосекундных лазеров. На этой базе сейчас формируется новое научное направление, получившее название “ядерная фотоника”. Метод полного поглощения, разработанный ранее для области гигантского дипольного резонанса, вполне может конкурировать с указанными методами. Такой эксперимент, как показано в настоящей работе, может быть выполнен на линейном ускорителе ЛУЭ-8-6 ИЯИ РАН, хотя он потребовал больших методических доработок. Однако, для полной реализации возможной широкой программы исследований требуются непрерывные пучки электронов с энергией от 5 до 10 МэВ и током порядка 10 мкА. Такие ускорители промышленно производятся в мире (см., например, [14]) и их стоимость относительно невелика (около 2 млн евро). Развитие на их базе фотоядерных методов в России имело бы большое значение, учитывая большие возможности не только для фундаментальных, но и прикладных исследований.

Авторы выражают благодарность С.П. Камерджиеву, Л.З. Джилавяну и Г.М. Гуревичу за полезные обсуждения, А.Ф. Губеру за помощь в разработке гамма-спектрометра, А.А. Туринге за предоставление предварительных результатов моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Savran D., Aumann T., Zilges A.* // *Progr. Part. Nucl. Phys.* 2013. V. 70. P. 210.
2. *Ачаковский О.И., Камерджиев С.П., Целяев В.И.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 104. № 6. С. 387; *Achakovskiy I., Kamerdzhiiev S.P., Tselyaev V.I.* // *JETP Lett.* 2016. V. 104. № 6. P. 374.
3. *Недорезов В.Г., Поликанов С.М.* // *ЭЧАЯ.* 1977. Т. 8. С. 374.
4. *Goddard P.M., Cooper N., Wemer V. et al.* // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 88. Art. № 064308.
5. *Мазур В.М., Соколюк И.В., Биган З.М. и др.* // *ЯФ.* 1993. Т. 56. С. 20.
6. *Зуев С.В., Недорезов В.Г., Конобеевский Е.С., Туринге А.А.* // *ЯФ.* 2018. Т. 81. № 4. С. 409; *Zuev S.V., Nedorezov V.G., Konobeevski E.S., Turinge A.A.* // *Phys. Atom. Nucl.* 2017. V. 81. № 4. P. 442.
7. *Shevchenko O., Dovbnja F., Ranyuk Yu.N.* // *Vestnik Kharkov Univ.* 2005. V. 710. P. 61.
8. *Гангерский Ю.П., Тончев А.П., Балабанов Н.П.* // *ЭЧАЯ.* 1996. Т. 27. С. 1.
9. *Gurevich G.M., Lazareva L.E., Mazur V.M. et al.* // *Nucl. Phys. A.* 1981. V. 351. P. 257.
10. *Недорезов В.Г., Савельев-Трофимов А.Б.* // *Ядерн. физ. и инжиниринг.* 2016. Т. 7. № 6. С. 479.
11. *Bantes B., Bayadilov D., Beck R. et al. (GRAAL collaboration)* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 587. № 1. Art. № 012042.
12. *Зеленая А.В., Зеленый М.Е., Туринге А.А., Недорезов В.Г.* // *ЭЧАЯ.* 2019. Т. 50. № 5. С. 680.
13. *Gavrish Yu.N., Berdnikov Ya.A., Spirin D.O. et al.* // *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2010. № 3. P. 123.
14. <https://videotronicsuk.com/manufacturers/rodotron.html>.