

УДК 539.17

ВЫХОДЫ МНОГОЧАСТИЧНЫХ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПЕ ^{209}Bi

С. С. Бельшев, А. Н. Ермаков, Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов,
И. В. Макаренко, В. А. Четверткова, В. И. Шведунов
(НИИЯФ)

E-mail: irina@depni.sinp.msu.ru

Экспериментально измерены относительные выходы многочастичных фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi с вылетом из ядра от двух до семи нейтронов. Эксперимент проведен на тормозном пучке импульсного разрезного микротрона RTM-70 НИИЯФ МГУ с максимальной энергией фотонов $E_\gamma^m = 67.7$ МэВ.

Энергетическую область ядерных возбуждений до 100 МэВ можно разделить на три части: доминирующую с точки зрения величины сечения область гигантского дипольного резонанса — ГДР (10–30 МэВ), область ниже ГДР и область выше ГДР. Область ГДР отвечает высокоэнергичным коллективным ядерным возбуждениям, в которые вовлечены практически все нуклоны ядра. Эта область достаточно хорошо исследована. Область ниже ГДР, отвечающая возбуждению отдельных ядерных уровней, с спектроскопической точки зрения изучена наиболее полно. В то же время область выше ГДР, являющаяся энергетически наиболее протяженной (≈ 30 –100 МэВ), исследована значительно хуже и о механизме взаимодействия ядер с γ -квантами таких энергий известно менее всего. Основная причина в том, что в этой области энергии возбужденные состояния распадаются, как правило, с испусканием нескольких нуклонов, прежде всего нейтронов, поскольку, в отличие от области ГДР, распад которого завершается вылетом одного (реже, двух) нуклонов, фоторасщепление при энергиях 30–100 МэВ приводит к вылету из ядра до 10 нуклонов. Традиционные методы детектирования продуктов распада, используемые в области энергий ГДР, трудно использовать в области более высоких энергий из-за низкой эффективности одновременной регистрации нескольких частиц в конечном состоянии. В то же время исследования в этой области энергий представляют интерес, так как в этой области изменяется механизм взаимодействия фотонов с ядрами. Если в области энергий ГДР фотоны взаимодействуют с ядром как с единым объектом, то в области за гигантским резонансом фотон взаимодействует и с отдельными ядерными кластерами, и в первую очередь с квазидейтронами. Проблема диссипации энергии, поглощенной отдельными фрагментами ядра, передача энергии другим степеням свободы является не до конца изученной.

Фоторасщепление средних и тяжелых ядер за ГДР протекает практически исключительно посред-

ством эмиссии из возбужденного ядра нескольких нейтронов. Многочастичные фотоядерные (прежде всего фотонейтронные) реакции представляют собой практически неисследованную область. Не известны выходы и сечения этих реакций для большинства ядер.

В исследованиях фоторасщепления ядер за ГДР наиболее перспективным методом является метод наведенной активности. В этом методе мишень облучается в тормозном пучке γ -квантов с максимальной энергией E_m электронного ускорителя и затем после переноса к γ -спектрометру уже вне пучка измеряются γ -спектры остаточной активности. Таким методом возможно в результате одного эксперимента по γ -спектрам облученной мишени получить сведения обо всех фотонуклонных реакциях, возможных при энергии фотонов $E < E_m$. Проведение измерений вне пучка, облучающего мишень γ -излучения, кардинально снижает фон, резко повышает чувствительность опыта и позволяет исследовать каналы реакций с низкими эффективными сечениями.

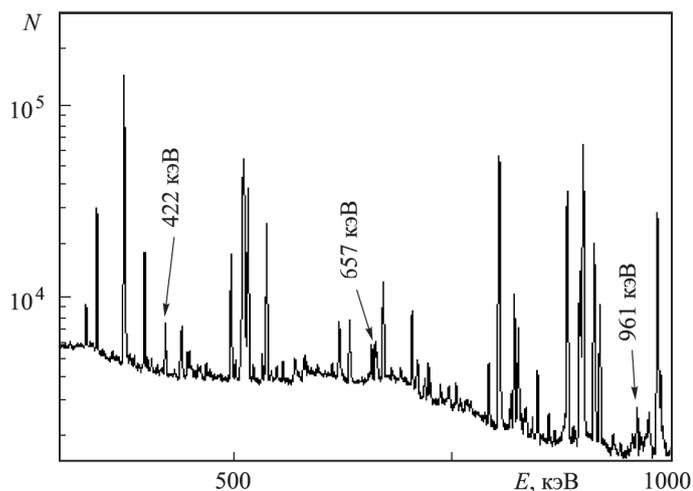
В настоящее время в НИИЯФ МГУ создана соответствующая экспериментальная база и методом наведенной активности проводятся исследования многочастичных фотоядерных реакций для ядер различных массовых чисел A . В настоящей работе представлены результаты исследования многонейтронных реакций на ядре ^{209}Bi , включающие реакции с вылетом из этого ядра от 2 до 7 нейтронов.

Эксперимент выполнен на пучке тормозных γ -квантов разрезного микротрона RTM-70 НИИЯФ МГУ [1], позволяющего ускорять электроны до энергии 67.7 МэВ. Исследуемая мишень была изготовлена из естественного металлического висмута. Содержание изотопа ^{209}Bi в естественной смеси изотопов висмута составляет 100%. Максимальная энергия E_m тормозных γ -квантов составляла 67.7 МэВ. Облучение мишени длилось 4.3 ч при токе электронного пучка микротрона 3–4 мА.

Спектрометром γ -квантов был детектор из сверхчистого германия с эффективностью 30% и энергетическим разрешением 1–2 кэВ. Параметры ускорителя и спектрометра позволили наблюдать идущие с малой вероятностью фотоядерные реакции с вылетом из ядра ^{209}Bi от двух до семи нейтронов. Наблюдение реакции с вылетом одного нейтрона — (γ, n) — в настоящих исследованиях было невозможным из-за большого периода полураспада остаточного ядра ^{208}Bi ($3.68 \cdot 10^5$ лет).

Идентификация типа реакции осуществлялась посредством анализа γ -спектров остаточной активности, а также характера временного спада этой активности. Данный метод идентификации позволяет надежно разделить различные каналы реакций с различной множественностью нейтронов в конечном состоянии, поскольку в настоящее время имеется исчерпывающая информация о γ -спектрах ядер, являющихся конечными продуктами многонуклонных фотоядерных реакций, и периодах их полураспада. Общая длительность экспозиции наведенной активности в данном эксперименте составляла 170 дней. Наблюдались активности конечных ядер реакций с периодами полураспада от 2 ч до 30 лет.

В измеренных γ -спектрах остаточной активности облученного образца ^{209}Bi наблюдались линии, соответствующие реакциям с вылетом из ядра ^{209}Bi от 2 до 7 нейтронов. В эксперименте γ -спектры измерялись в диапазоне от 40 кэВ до 3 МэВ. На рисунке приведен участок γ -спектра в диапазоне 300–1000 кэВ, измеренного в течение 2 ч сразу после окончания облучения. Линии, соответствующие реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma, 7n)^{202}\text{Bi}$, отмечены подписями.



Спектр γ -излучения, измеренный в течение 2 ч сразу после окончания облучения. Показан участок спектра в диапазоне 300–1000 кэВ. Подписями показаны γ -линии, соответствующие реакциям $^{209}\text{Bi}(\gamma, 7n)^{202}\text{Bi}$

Выходы фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi

Реакция	Конечное ядро реакции	Порог реакции, МэВ	Выход, отн. ед.
$(\gamma, 2n)$	^{207}Bi	14.35	1.00 ± 0.01
$(\gamma, 3n)$	^{206}Bi	22.45	0.15 ± 0.01
$(\gamma, 4n)$	^{205}Bi	29.48	0.093 ± 0.002
$(\gamma, 5n)$	^{204}Bi	37.95	0.0169 ± 0.0009
$(\gamma, 6n)$	^{203}Bi	45.15	0.0069 ± 0.0008
$(\gamma, 7n)$	^{202}Bi	54.03	0.00015 ± 0.00007

По интенсивностям γ -линий в спектрах остаточной активности были рассчитаны выходы всех наблюдаемых фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi (таблица). Все выходы нормированы на выход реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma, 2n)^{207}\text{Bi}$. Из таблицы видно, что выходы реакций довольно быстро падают с увеличением их множественности. Так, фотонейтронный выход реакции наибольшей множественности — $(\gamma, 7n)$ — составляет всего 10^{-4} от выхода реакции $(\gamma, 2n)$. Выходы реакции каждой множественности, а также общая тенденция уменьшения выхода с увеличением множественности являются хорошим тестом проверки возможных механизмов фоторасщепления ядер за гигантским дипольным резонансом. Основных механизмов такого фоторасщепления два: возбуждение ГДР, высокоэнергичная часть которого, плавно спадая, тянется на несколько десятков МэВ, и квазидейтронное (КД) фоторасщепление. При возбуждении ГДР в ядре возникают самоподдерживающиеся синхронные дипольные колебания всех протонов относительно всех нейтронов, которые затухают за счет эмиссии нуклонов (одного или нескольких) из компаунд-состояния ядра-мишени, достигаемого в результате термализации энергии дипольных колебаний. Причем в первом приближении можно ограничиться рассмотрением только равновесной эмиссии нейтронов, так как «испарение» протонов сильно подавляется кулоновским барьером. При квазидейтронном механизме γ -квант передает свою энергию не всему ядру в целом, а отдельным пространственно коррелированным нейтрон-протонным (квазидейтронным) парам [3]. При этом значительная часть нуклонов вылетает из ядра, не достигнув стадии статистического равновесия, т.е. до его полной термализации. Сравнение экспериментальных многонейтронных выходов с теоретическими, рассчитанными в рамках обеих моделей высокоэнергичного ядерного фоторасщепления [4–6], позволит получить однозначный ответ о роли каждого из этих механизмов в фоторасщеплении ядер за гигантским дипольным резонансом.

Авторы выражают глубокую благодарность старшему научному сотруднику НИИЯФ МГУ В. Н. Орлину за полезные обсуждения результатов.

Литература

1. *Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Gribov I.V.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 2005. **A550**. P. 39.
2. *Бобошин И.Н., Варламов В.В., Иванов Е.М.* и др. // Тр. Всерос. науч. конф. «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24–29 сентября 2001. М., 2001. С. 19 (<http://cdfe.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html>).
3. *Levinger J.S.* // Phys. Rev. 1951. **84**. P. 43.
4. *Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // ЭЧАЯ. 2007. **38**. P. 84.
5. *Chadwick M.B.* et al. // Phys. Rev. 1991. **C44**. P. 814.
6. *Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // Ядерная физика. 2008. **71**. С. 517.

Поступила в редакцию
10.03.2007