

ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДРА ^{209}Bi В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ФОТОНОВ ЗА ГИГАНТСКИМ ДИПОЛЬНЫМ РЕЗОНАНСОМ

С.С. Бельшев¹, А.Н. Ермаков², Б.С. Ишханов^{1,2}, И.М. Капитонов¹,
И.В. Макаренко¹, В.А. Четверткова¹, В.И. Шведунов²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет; ²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени

Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

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

The relative yields of multiparticle photonuclear reactions in ^{209}Bi isotope with the the emission of 1 to 7 neutrons were measured. The experiment was carried out with bremsstrahlung with maximum photon energy $E'_m = 67.7$ MeV from the racetrack microtron RTM-70 SINP MSU.

Энергетическую область ядерных возбуждений до ~ 100 МэВ можно разделить на три части: доминирующую с точки зрения величины сечения область гигантского дипольного резонанса - ГДР ($\approx 10-30$ 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 ($\approx 30-100$ 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, т.к. 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 посредством 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 данной работе представлены результаты исследования многонейтронных реакций на ядре ^{209}Bi , включающие реакции с вылетом из этого ядра от 2-х до 7 нейтронов.

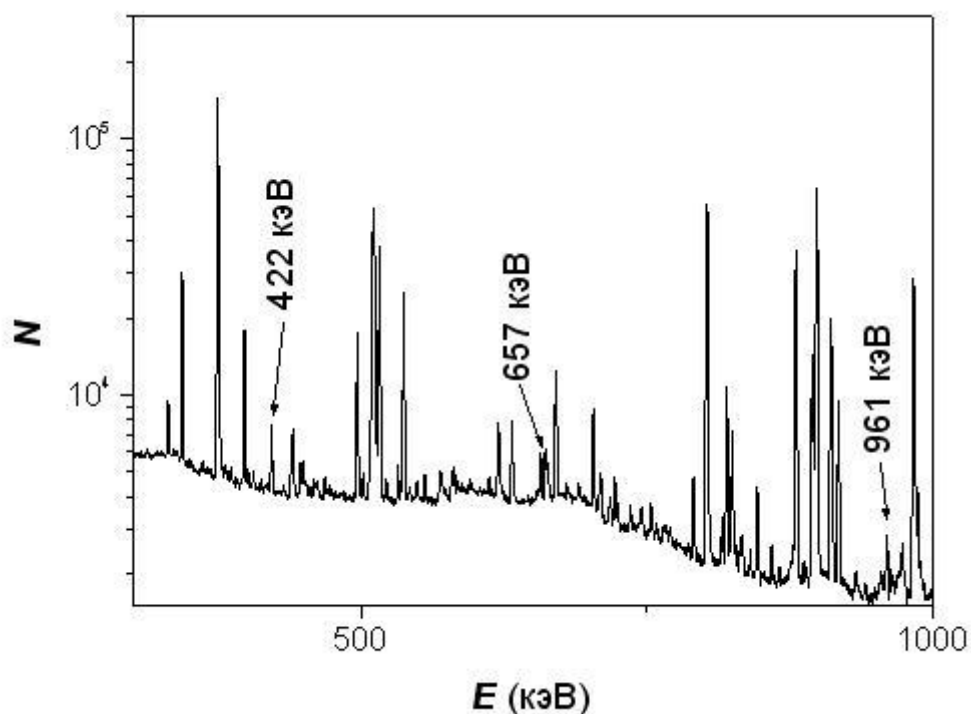


Рис. 1. γ -Спектр, измеренный в течение 2-х часов сразу после окончания облучения. Показан участок спектра в диапазоне 300-1000 кэВ. Подписями показаны γ -линии, соответствующие реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma, n)^{202}\text{Bi}$.

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 часа 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 часов 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-х до 7 нейтронов. В эксперименте γ -спектры измерялись в диапазоне от 40 кэВ до 3 МэВ. На рис. 1 приведен участок γ -спектра в диапазоне 300-1000 кэВ, измеренного в течение 2-х часов сразу после окончания облучения. Линии, соответствующие реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma, 7n)^{202}\text{Bi}$, отмечены подписями.

Таблица 1

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 1). 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.

1. V.I.Shvedunov, A.N.Ermakov, I.V.Gribov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **550**, 39 (2005)
2. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Е.М.Иванов, С.В.Иванов, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов, В.В.Чесноков. Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24 – 29 сентября 2001г. ISBN 5-211-04521-1. Издательство Московского университета, Москва 2001, сс. 19 – 21: URL – (<http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html>).
3. J.S.Levinger, Phys.Rev., 84, 43 (1951).
4. Б.С.Ишханов, В.Н.Орлин, ЭЧАЯ, 38, 84 (2007).
5. M.V.Chadwick *et al.*, Phys. Rev. C 44, 814 (1991).
6. Б.С.Ишханов, В.Н.Орлин, Ядерная физика (в печати).