

СЕЧЕНИЯ МНОГОЧАСТИЧНЫХ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПАХ $^{203,205}\text{Tl}$

И.М. Капитонов, И.В. Макаренко

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет*

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

An experiment of natural mixture of $^{203,205}\text{Tl}$ isotopes irradiation with bremsstrahlung from the racetrack microtron RTM-70 SINP MSU with electron energy of 67.7 MeV was carried out. The yields and integral cross sections of multiparticle photonuclear reactions in $^{203,205}\text{Tl}$ isotopes were measured.

В настоящее время многочастичные фотоядерные реакции, протекающие при энергиях фотонов выше максимума гигантского дипольного резонанса (30-100 МэВ), представляют собой практически не исследованную область. В работе представлены новые результаты экспериментального исследования многочастичных фотоядерных реакций на изотопах таллия.

Эксперимент выполнен на тормозном пучке импульсного разрезного микротрона RTM-70 НИИЯФ МГУ [1].

Исследуемый образец был изготовлен из сульфата таллия Tl_2SO_4 с естественным содержанием изотопов таллия и упакован в пластиковую ампулу. Размеры мишени составляли 1 см × 1 см × 1 см. Естественная смесь изотопов таллия содержит два стабильных изотопа ^{203}Tl ($29.524 \pm 0.014\%$) и ^{205}Tl ($70.476 \pm 0.014\%$).

Реакции (γ, in) на изотопе ^{203}Tl и $(\gamma, (i+2) n)$ на изотопе ^{205}Tl , где $i = 1, 2, 3, \dots$, приводят к образованию одних и тех же конечных изотопов таллия. Поэтому активность радиоактивных изотопов таллия, образующихся в результате фотоядерных реакций, позволяет рассчитать суммарные выходы вышеуказанных реакций на двух стабильных изотопах таллия $^{203,205}\text{Tl}$. В дальнейшем приводятся суммарные выходы парных интерферирующих реакций $^{205}\text{Tl}(\gamma, (i+2) n)^{205-i-2}\text{Tl}$ и $^{203}\text{Tl}(\gamma, in)^{203-i}\text{Tl}$.

Облучение образца было проведено при максимальной энергии тормозных фотонов 67.7 МэВ. Длительность облучения составила 4 ч.

γ -Спектры наведенной активности измерены через 1 мин после облучения образца. Проведено 654 серии измерений γ -спектров остаточной активности облученного образца: 36 серий измерений длительностью по 10 мин, затем 503 серии измерений длительностью по 30 мин общей длительностью 10.8 сут непрерывных измерений. Также через 197 сут после облучения проведены 115 серий измерений по 1 ч общей длительностью 4.8 сут непрерывных измерений. Общая длительность экспозиции спектров составила 202 сут.

γ -Спектры измерены в диапазоне энергий γ -квантов от 40 кэВ до 2980 кэВ.

Пороги фотоядерных реакций на стабильных изотопах таллия ^{203}Tl и ^{205}Tl , а также периоды полураспада образующихся в результате этих реакций ядер,

приведены в таблицах 1 и 2, соответственно (для реакции $^{203}\text{Tl}(\gamma,5n)^{198}\text{Tl}$ приводится также период полураспада изомерного состояния ядра ^{198}Tl). Приведены данные для реакций, конечные ядра которых наблюдались в эксперименте.

Таблица 1

Пороги фотоядерных реакций на изотопе ^{203}Tl и периоды полураспада конечных ядер

Реакция	Порог реакции	Период полураспада конечного изотопа
$^{203}\text{Tl}(\gamma,n)^{202}\text{Tl}$	7.85	12.23 дн
$^{203}\text{Tl}(\gamma,2n)^{201}\text{Tl}$	14.72	3.0421 дн
$^{203}\text{Tl}(\gamma,3n)^{200}\text{Tl}$	22.93	26.1 ч
$^{203}\text{Tl}(\gamma,4n)^{199}\text{Tl}$	29.99	7.42 ч
$^{203}\text{Tl}(\gamma,5n)^{198}\text{Tl}$	38.63	5.3 ч, 1.87 ч
$^{203}\text{Tl}(\gamma,6n)^{197}\text{Tl}$	45.85	2.84 ч

В эксперименте наблюдаются фотонейтронные реакции на изотопах таллия с образованием изотопов $^{197-202}\text{Tl}$, а также реакция $^{205}\text{Tl}(\gamma,np)^{203}\text{Hg}$.

Отметим, что наблюдение реакции $^{205}\text{Tl}(\gamma,n)^{204}\text{Tl}$ не предполагалось, поскольку β -распады конечного ядра данной реакции ^{204}Tl происходят без испускания γ -квантов и не сопровождаются характеристическим рентгеновским излучением [2].

Таблица 2

Пороги фотоядерных реакций на изотопе ^{205}Tl и периоды полураспада конечных ядер

Реакция	Порог реакции	Период полураспада конечного изотопа
$^{205}\text{Tl}(\gamma,n)^{204}\text{Tl}$	7.55	3.78 лет
$^{205}\text{Tl}(\gamma,2n)^{203}\text{Tl}$	14.20	Стаб.
$^{205}\text{Tl}(\gamma,3n)^{202}\text{Tl}$	22.05	12.23 дн
$^{205}\text{Tl}(\gamma,4n)^{201}\text{Tl}$	28.93	3.0421 дн
$^{205}\text{Tl}(\gamma,5n)^{200}\text{Tl}$	37.13	26.1 ч
$^{205}\text{Tl}(\gamma,6n)^{199}\text{Tl}$	44.19	7.42 ч
$^{205}\text{Tl}(\gamma,7n)^{198}\text{Tl}$	52.83	5.3 ч, 1.87 ч
$^{205}\text{Tl}(\gamma,8n)^{197}\text{Tl}$	60.06	2.84 ч
$^{205}\text{Tl}(\gamma,np)^{203}\text{Hg}$	13.91	46.594 дн

На рис. 1 в качестве примера приведен фрагмент спектра, содержащий пики, соответствующие изотопу ^{202}Tl (пики отмечены подписями).

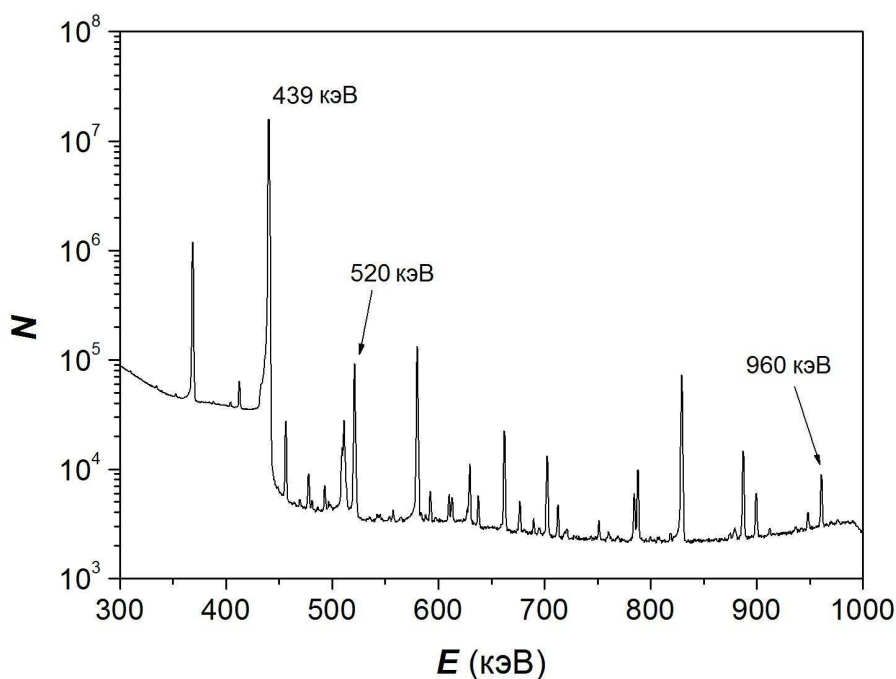


Рис. 1. Фрагмент γ -спектра, содержащий γ -переходы ^{202}Tl . Длительность измерения 7.7 сут. Измерение начато через 9 ч 44 мин после окончания облучения

По интенсивностям γ -пикув в спектрах впервые рассчитаны выходы многочастичных фотоядерных реакций на изотопах таллия $^{203,205}\text{Tl}$ с вылетом из исходного ядра до 6-8 нуклонов. Расчеты проведены с учетом поправок на зависимость эффективности детектора от энергии фотонов и самопоглощение фотонов в исследуемом образце. Выходы реакций показаны во втором столбце таблицы 3. Величины выходов нормированы на величину суммарного выхода реакций $^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl}$ и $^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{202}\text{Tl}$.

Таблица 3

Относительные выходы фотонейтронных реакций на изотопах таллия

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)	Теор. выход [3] (отн. ед.)
$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{202}\text{Tl}$	1.00 ± 0.03	1.0000
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{201}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{201}\text{Tl}$	0.18 ± 0.06	0.211
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{200}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{200}\text{Tl}$	0.029 ± 0.003	0.032
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{199}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{199}\text{Tl}$	0.011 ± 0.002	0.013
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 7n)^{198}\text{Tl}$	0.004 ± 0.001	0.003
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{197}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 8n)^{197}\text{Tl}$	0.0012 ± 0.0005	0.0008
$^{205}\text{Tl}(\gamma, np)^{203}\text{Hg}$	0.0035 ± 0.0012	0.0040

Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими оценками, выполненными в рамках модели [3]. Модель описывает фотопоглощение атомными ядрами в области энергий до мезонного

порога с учетом двух конкурирующих механизмов фоторасщепления – через возбуждение гигантского дипольного резонанса и путем расщепления квазидейтронов. Результаты теоретических оценок выходов реакций показаны в третьем столбце таблицы 3. Хорошее согласие полученных теоретических оценок с экспериментальными результатами подтверждает используемую модель.

Из анализа полученных данных по выходам многочастичных фотоядерных реакций на изотопах таллия были получены новые данные по интегральным сечениям этих реакций.

Для оценки интегральных сечений фотоядерных реакций на изотопах таллия были использованы формы энергетической зависимости сечений реакций и соотношения между вероятностями парных интерферирующих реакций, полученные в работе [3]. Для получения абсолютной величины сечений данные были нормированы на экспериментальные значения интегральных сечений реакций $(\gamma, n) + (\gamma, 2n)$ на изотопах $^{203,205}\text{Tl}$, полученные в работе [4]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Интегральные сечения фотоядерных реакций на изотопах таллия

Реакция	Интегральное сечение, МэВ·мб
$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl}$	2280 ± 70
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{201}\text{Tl}$	787 ± 260
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{200}\text{Tl}$	225 ± 23
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{199}\text{Tl}$	198 ± 36
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl}$	112 ± 30
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{197}\text{Tl}$	56 ± 23
$^{205}\text{Tl}(\gamma, n)^{204}\text{Tl}$	2240 ± 70
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{203}\text{Tl}$	923 ± 150
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{201}\text{Tl}$	240 ± 20
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{200}\text{Tl}$	206 ± 50
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{199}\text{Tl}$	126 ± 30
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{198}\text{Tl}$	71 ± 20
$^{205}\text{Tl}(\gamma, np)^{203}\text{Hg}$	20 ± 7

В настоящей работе для области энергий до 67.7 МэВ получены новые экспериментальные данные по относительным выходам многочастичных фотоядерных реакций на изотопах таллия. Впервые получены абсолютные величины интегральных сечений многочастичных фотоядерных реакций на изотопах таллия $^{203,205}\text{Tl}$. Подтверждены предсказания теоретической модели [3] многочастичного фоторасщепления, учитывающей два конкурирующих механизма фоторасщепления – через возбуждение гигантского дипольного резонанса и путем расщепления квазидейтронов в ядре.

1. V.I. Shvedunov, A.N. Ermakov, I.V. Gribov, E.A. Knapp, G.A. Novikov, N.I. Pakhomov, I.V. Shvedunov, V.S. Skachkov, N.P. Sobenin, W.P. Trower and V.R. Yajlijan. "A 70 MeV racetrack microtron". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. V. 550, pp. 39-53, 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». (24 – 29 сентября 2001г., Новороссийск) ISBN 5-211-04521-1. Издательство Московского университета. Сс. 19–21. URL – (<http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html>).
3. Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин "Предравновесная модель фотонуклонных реакций, базирующаяся на ферми-газовых плотностях". Ядерная физика, т. 71, с. 517, 2008.
4. G.P. Antropov, I.E. Mitrofanof, A.I. Prokofev, V.S. Russkikh. "Photoneutron cross sections for ^{203}Tl and ^{205}Tl ". Izv. Kaz. Akad. Nauk, Ser.Fiz.-Mat, V. 34, p. 116, 1970.