

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАСЕЛЕНИЯ $^{178m,177}\text{Ta}$ В (γ, xn) -РЕАКЦИЯХ

*В. А. Желтоножский^a, М. В. Желтоножская^{a,1}, А. В. Саврасов^b,
А. П. Черняев^a, С. В. Варзарь^a, В. В. Кобец^в*

^a Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

^b Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В (γ, xn) -реакциях впервые измерены средневзвешенные выходы для $^{178m,177}\text{Ta}$ при граничных значениях энергии тормозных γ -квантов 20, 40 и 55 МэВ. Результаты моделирования с использованием программного кода TALYS-1.9 демонстрируют доминирование статистических процессов.

The weighted average yields for $^{178m,177}\text{Ta}$ in (γ, xn) reactions were measured for the first time at the 20, 40, and 55 MeV boundary energies of bremsstrahlung γ -quanta. The simulation results using the TALYS-1.9 program code demonstrate the dominance of statistical processes.

PACS: 23.35.+g; 29.30.Kv; 27.50.+e; 24.10.Lx

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия фотонов с атомными ядрами продолжается уже несколько десятков лет, и, несмотря на это, пока наиболее изучены сечения (γ, n) - и (γ, γ') -реакций [1, 2]. Реакции $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ и $(\gamma, 4n)$, особенно с возбуждением высокоспиновых изомеров, исследованы значительно хуже. В то же время они позволяют пролить свет как на механизмы протекания этих реакций, так и на структуру возбужденных уровней остаточного ядра в области непрерывного и дискретного спектров. Поэтому получение новых экспериментальных данных о фотоядерных реакциях на различных мишенях с $Z = 73$ (тантал) в широком диапазоне энергий тормозных γ -квантов имеет важное фундаментальное значение. Реакции $^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178m}\text{Ta}$ и $^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$ на сегодняшний день не изучались, а реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178}\text{Ta}$ исследовалась в работе [3] для монохроматических γ -квантов до энергии 36 МэВ.

Исходя из вышеизложенного целью нашей работы является исследование (γ, xn) -реакций на естественном тантале при граничной энергии тормозных γ -квантов 20, 40 и 55 МэВ.

¹E-mail: zhelton@yandex.ru

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты осуществлялись с использованием гамма-активационных методов. Была проведена серия облучений мишеней металлического тантала естественного изотопного состава на линейных ускорителях электронов. Облучение мишеней проводилось на тормозных γ -пучках для электронов с энергией $E^{\max} = 20, 40$ и 55 МэВ. Продолжительность облучения образцов в разных экспериментах составляла от 20 до 80 мин.

При $E^{\max} = 20$ МэВ облучаемая мишень тантала представляла собой пластинку размером $1 \times 1 \times 0,043$ см, весом около 0,7 г. При $E^{\max} = 40$ МэВ мишень тантала была в виде пластинки $0,6 \times 2 \times 0,011$ см и весом около 0,22 г. При $E^{\max} = 55$ МэВ образец тантала был размером $2,0 \times 2,0 \times 0,02$ см, весом около 1,3 г. Для расчета потока тормозных γ -квантов для всех граничных энергий использовалась хорошо изученная ядерная реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ [4] на этих же мишенях.

Спектры γ -лучей облученных мишеней измерялись на гамма-спектрометрах, собранных на базе сверхчистых полупроводниковых GEM-детекторов объемом 100–200 см³ фирм Canberra и Ortec с эффективностью регистрации 15–40% по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3''$. Энергетическое разрешение спектрометров составило 1,2 кэВ на γ -линии 343 кэВ ^{175}Hf и 1,8–2,0 кэВ на γ -линиях 1173,1332 кэВ ^{60}Co .

Регистрация активности ^{178m}Ta проводилась по γ -линии 426,4 кэВ (рис. 1). Фрагменты измеренных γ -спектров приведены на рис. 2. Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы Winspectrum [5]. Эффективность регистрации γ -квантов распада была определена с помощью стандартных калибровочных источников $^{152,154}\text{Eu}$ и ^{133}Ba .

Для определения средневзвешенных выходов ($\langle Y \rangle$) реакций необходимо знать потоки тормозных γ -квантов на мишенях. Для их получения определялись интенсивности γ -линий 93,3 и 103,6 кэВ, сопровождающие распад ^{180}Ta , и средневзвешенный выход реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$. Этот выход определялся в результате свертки табличных значений сечения этой реакции для монохроматических γ -квантов с шагом

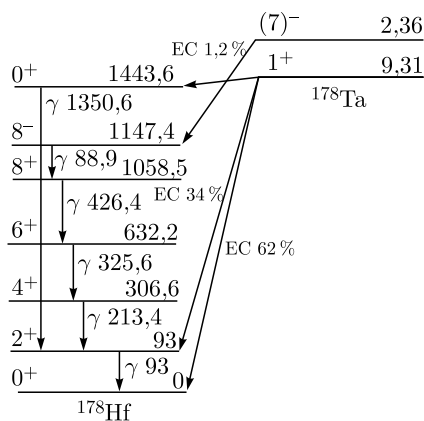


Рис. 1. Фрагмент схемы распада $^{178m,g}\text{Ta}$

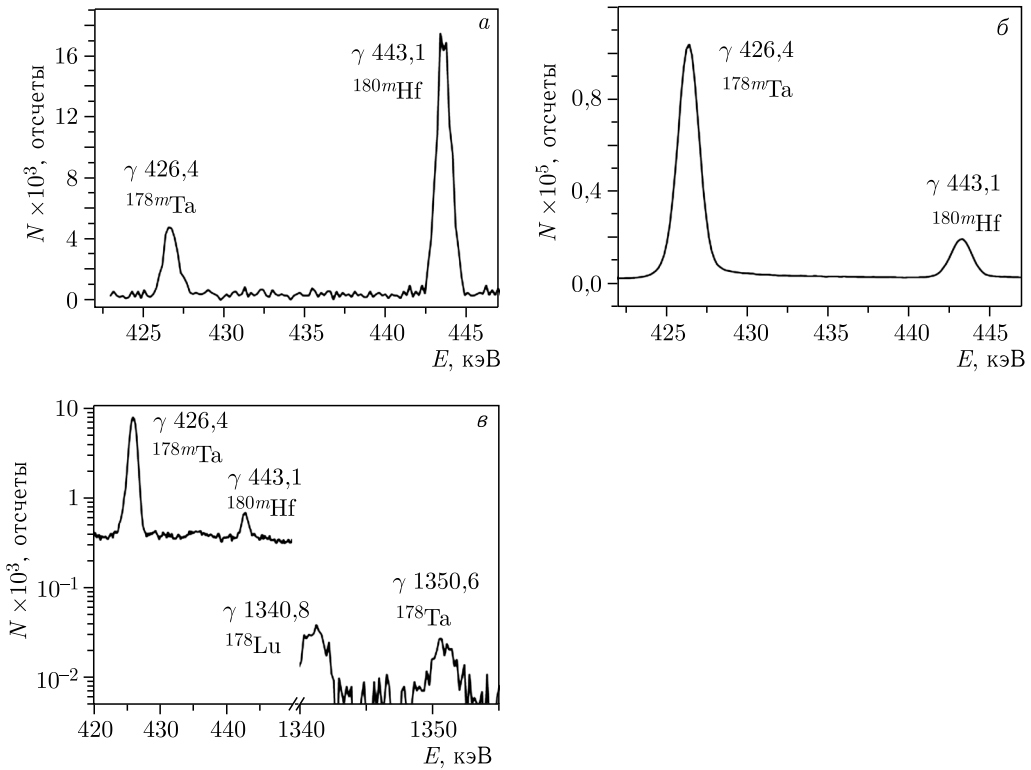


Рис. 2. Фрагменты γ -спектра мишени естественного Ta, облученной тормозными γ -квантами с $E^{\max} = 20$ МэВ (а), $E^{\max} = 40$ МэВ (б) и $E^{\max} = 55$ МэВ (в)

1 МэВ с относительными величинами смоделированного в Geant4 [6] спектра тормозных γ -квантов (рис. 3) по формуле:

$$Y_{\text{МОН}}^{\text{CP}}[\delta] = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \varphi_i}, \tag{1}$$

где σ_i — табличные значения сечений реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ для монохроматических γ -квантов [3]; φ_i — относительные величины потока смоделированного в Geant4 спектра тормозных γ -квантов, приведенные к пороговой величине $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ реакции. При облучении геометрия мишеней учитывается в самом программном коде Geant4, т. е. учитывается ослабление потока для низкоэнергетических тормозных γ -квантов. В нашем случае этими поправками можно пренебречь вследствие высоких пороговых энергий тормозных γ -квантов для исследуемых реакций.

После этого рассчитывались потоки тормозных γ -квантов по формуле

$$F = \frac{S\lambda A}{(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{окл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \xi k \eta Y_{\text{МОН}}^{\text{CP}} N_A m p}, \tag{2}$$

где S — площади фотопиков, соответствующих распаду ^{180}Ta ; η — квантовые выходы γ -квантов при распаде ^{180}Ta ; ξ — эффективности регистрации γ -квантов, со-

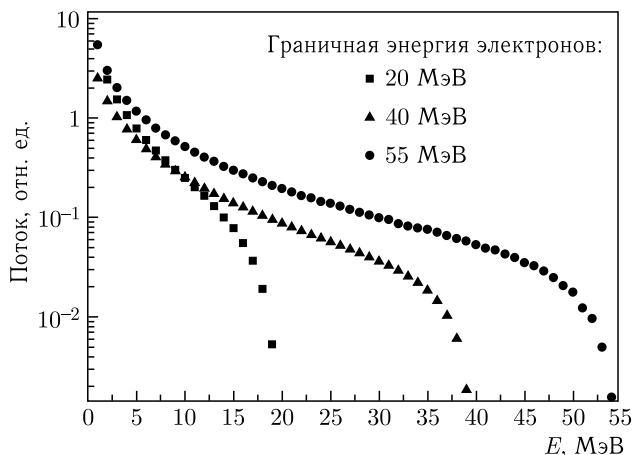


Рис. 3. Смоделированный спектр тормозных γ -квантов для величин энергии электронов 20, 40 и 55 МэВ

прождающих распад ядер ^{180}Ta ; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{охл}}$, $t_{\text{изм}}$ — времена облучения, охлаждения и измерения соответственно (с); k — коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада. Они рассчитываются после моделирования реальных облучаемых мишеней в программном коде MCNP [7]. Рассчитывается эффективность регистрации нужных γ -линий для точечной ($\varepsilon_{\text{т}}$) и реальной ($\varepsilon_{\text{р}}$) мишеней и вводится поправка на самопоглощение $k = \varepsilon_{\text{р}}/\varepsilon_{\text{т}}$. При этом эффективность регистрации для точечной мишени совпадает с экспериментальной, полученной с помощью калибровочных точечных источников; p — абсолютное содержание ^{181}Ta в естественной смеси; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро; $Y_{\text{мон}}^{\text{ср}}$ — средневзвешенный выход реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$, рассчитанный согласно (1) (б); m — массы мишеней тантала на единицу площади ($\text{г}/\text{см}^2$);

Таблица 1. Экспериментальные и теоретические средневзвешенные выходы ($\langle Y \rangle$) получения $^{177,178\text{m}}\text{Ta}$

Реакция	Энергия E^{max} , МэВ	$\langle Y \rangle$, мб						
		Эксперимент	TALYS-1.9, модели плотностей уровней*					
			ld1	ld2	ld3	ld4	ld5	ld6
$^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	20	48,5±5,0	61	56	61	25	73	56
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	40	1,50±0,15	6,7		7	3	7	5,4
	55	1,3±0,1	4,5	4,6		2,5	5	3,8
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$	40	9,3±0,9	3,8	3,3	3,7	2,5	2,2	2,7
	55	6,1±0,9	5,8	5,6	5,2	4,1	4,6	5,3

* ld1 — постоянная температуры и ферми-газа [9], используется по умолчанию; постоянные: ld2 — обратно смещенная ферми-газа [10]; ld3 — обобщенная сверхтекучая [11]; ld4 — микроскопическая из таблиц Goriely (силы Скирма) [12]; ld5 — микроскопическая из комбинаторных таблиц Hilaire (силы Скирма) [13]; ld6 — микроскопическая из комбинаторных таблиц Hilaire (силы Когни) [14].

$A = 181, 180$ — массовые числа атомов изотопов тантала; λ — постоянная распада ^{180}Ta (с^{-1}). Величины λ , α , A , p берутся из [8]; S — из экспериментальных γ -спектров, а ξ — из калибровочных кривых, дополнительно проверенных с помощью моделирования с использованием программного кода Geant4.

Далее по формуле (2) с использованием этих данных и поправок на разницу энергетических порогов исследуемых реакций и реакций на мониторах рассчитывались $\langle Y \rangle$ реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178m}\text{Ta}$, $^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$ при $E^{\text{max}} = 40$ и 55 МэВ и $^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178m}\text{Ta}$ при $E^{\text{max}} = 20$ МэВ. Результаты приведены в таблице. Следует отметить, что содержание ^{180}Ta в естественной смеси $0,012\%$, а порог реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$ составляет $22,2$ МэВ. Поэтому при облучении естественного тантала тормозными γ -квантами с $E^{\text{max}} = 20$ МэВ она запрещена согласно закону сохранения энергии, а при $E^{\text{max}} = 40$ и 55 МэВ полностью доминирует.

Статистическая погрешность в наших измерениях составила менее 5% . В то же время моделирование спектра тормозных γ -квантов достаточно сложная задача, так как при облучении использовались разные по размерам и массам сборки. Наша оценка погрешности за счет формы тормозного γ -спектра составила около 10% . Для оценки систематической погрешности измерения проводились на разных спектрометрах, в таблице указана общая погрешность.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки механизмов протекания исследуемых ядерных реакций нами проведено моделирование этих процессов с использованием программного кода TALYS-1.9. Более детально моделирование с помощью этого кода изложено в [15], в нем учитываются доминирующие статистические и предравновесные процессы.

При теоретических расчетах определяются сечения для каждого изотопа отдельно с шагом 1 МэВ для монохроматических γ -квантов и далее по (1) рассчитываются средневзвешенные выходы исследуемых реакций.

Результаты наших расчетов приведены в таблице. Как видно, при граничной энергии 20 МэВ для $(\gamma, 2n)$ -реакции достигается неплохое согласие теоретических и экспериментальных данных. Отметим, что в данной реакции процессы происходят между высокоспиновыми состояниями с $J^\pi 9^- \rightarrow 7^-$ и мы наблюдаем хорошее согласие практически для всех моделей плотности уровней. Эти данные резко контрастируют с исследованиями с заселением высокоспиновых состояний с $K = 8$. Средневзвешенные выходы для (γ, n) -реакции в этом случае даже качественно не описываются в коде TALYS-1.9 [16]. Это указывает на то, что статистические переходы слабо заселяют состояния, в которых происходит значительная перестройка их структуры.

Средневзвешенные выходы $(\gamma, 3n)$ - и $(\gamma, 4n)$ -реакций, на наш взгляд, успешно описываются в программном коде TALYS-1.9, что указывает на доминирование статистических процессов в этих реакциях. Некоторая аномалия для $(\gamma, 4n)$ -реакции в соотношении выходов при 40 и 55 МэВ может быть обусловлена тем, что максимум функции возбуждения этой реакции находится в области $40\text{--}45$ МэВ и смещение его на 5 МэВ изменяет выход $(\gamma, 4n)$ -реакции при $E^{\text{max}} = 40$ МэВ в разы. В то же время для 55 МэВ такое смещение не играет столь кардинальной роли.

ВЫВОДЫ

Впервые измерены средневзвешенные выходы ядерных реакций $^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178m}\text{Ta}$ при $E^{\max} = 20$ МэВ, $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178m}\text{Ta}$ и $^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$ при $E^{\max} = 40$ и 55 МэВ. Результаты моделирования в рамках программного кода TALYS-1.9 демонстрируют доминирование статистических процессов. В целом, можно сделать вывод о том, что модель ферми-газа лучше описывает экспериментальные данные, чем микроскопические расчеты в области граничных энергий больше 30 МэВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-51-00009. Выражаем благодарность сотруднику НИИЯФ МГУ С. С. Бельшеву за помощь в облучении образцов на разрезном микротроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гангерский Ю. П., Мазур В. М.* Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33, вып. 1. С. 158–200.
2. *Ditrich S. S., Berman B. L.* Atlas of Photoneutron Cross Sections Obtained with Monoenergetic Photons // *Atom. Data Nucl. Data Tables*. 1988. V. 38, No. 2. P. 199–338.
3. *Bergère R., Beil H., Veysière A.* Photoneutron Cross Sections of La, Tb, Ho and Ta // *Nucl. Phys. A*. 1968. V. 121, No. 2. P. 463–480.
4. *Varlamov V. V., Ishkhanov B. S., Orlin V. N., Peskov N. N., Stepanov M. E.* // *Phys. Atom. Nucl.* 2013. V. 76. P. 1403.
5. *Strilchuk N. V.* The WinSpectrum Manual. 2000.
6. *Agostinelli S. et al. (Geant4 Collab.).* Geant4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 506. P. 250.
7. *Briesmeister J. F.* MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Los Alamos National Lab. Report LA-12625-M. 1997. 989 p.
8. *Firestone R. B.* Table of Isotopes. 8th ed. New York: Wiley Intersci., 1996.
9. *Gilbert A., Cameron A. G. W.* A Composite Nuclear-Level Density Formula with Shell Corrections // *Can. J. Phys.* 1965. V. 43. P. 1446.
10. *Dilg W., Schantl W., Vonach H., Uhl M.* Level Density Parameters for the Back-Shifted Fermi Gas Model in the Mass Range $40 < A < 250$ // *Nucl. Phys. A*. 1973. V. 217, No. 2. P. 269–298.
11. *Ignatyuk A. V., Weil J. L., Raman S., Kahane S.* Density of Discrete Levels in ^{116}Sn // *Phys. Rev. C*. 1993. V. 47. P. 1504.
12. *Goriely S., Tondeur F., Pearson J. M.* A Hartree–Fock Nuclear Mass Table // *Atom. Data Nucl. Data Tables*. 2001. V. 77, No. 2. P. 311–381.
13. *Goriely S., Hilaire S., Koning A. J.* Improved Microscopic Nuclear Level Densities within the Hartree–Fock–Bogoliubov plus Combinatorial Method // *Phys. Rev. C*. 2008. V. 78. P. 064307.
14. *Hilaire S., Girod M., Goriely S., Koning A. J.* Temperature-Dependent Combinatorial Level Densities with the D1M Gogny Force // *Phys. Rev. C*. 2012. V. 86. P. 064317.
15. *Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C.* TALYS: Comprehensive Nuclear Reaction Modeling // *AIP Conf. Proc.* 2005. V. 769, No. 1. P. 1154–1159.
16. *Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M.* Excitation of $^{179}\text{Hf}^{m2}$ with (γ, n) -Reaction // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2019. V. 456. P. 116–119.

Получено 11 ноября 2020 г.