

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ K -ИЗОМЕРОВ $^{180,182}\text{Hf}$ и ^{177}Lu В (γ, α) -РЕАКЦИЯХ

*В. А. Желтоножский^а, М. В. Желтоножская^{а, 1}, А. В. Саврасов^б,
А. П. Черняев^а, В. Н. Яценко^в*

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

^б Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

^в Государственный научный центр Российской Федерации Федеральный медицинский
биофизический центр им. А. И. Бурназяна, Москва

Впервые измерены средневзвешенные выходы заселения ^{180m}Hf , ^{182m}Hf и ^{177}Lu в (γ, α) -реакциях при граничных значениях энергии тормозных γ -квантов 40 и 55 МэВ. Проведено моделирование в рамках программного кода TALYS-1.9.

The weighted average population yields of ^{180m}Hf , ^{182m}Hf , and ^{177}Lu were measured for the first time in (γ, α) -reactions at the 40 and 55 MeV boundary energies of bremsstrahlung γ -quanta. The simulation was carried out within the framework of the TALYS-1.9 program code.

PACS: 23.35.+g; 23.20.Nx; 82.80.Jp; 07.05.Tr; 24.10.Lx

ВВЕДЕНИЕ

Исследование сечений возбуждения высокоспиновых изомеров является одним из актуальных направлений для понимания механизмов ядерных реакций. При возбуждении таких изомерных состояний в разных реакциях могут проявляться различные вклады статистических и нестатистических каналов реакций. Изомеры $^{180,182}\text{Hf}$ в этом ряду — интересные объекты исследования, так как эти K -запрещенные изомеры ($\Delta K = 8$) похожи и имеют одинаковые $I^\pi = 8^-$ и близкие величины энергии возбуждения, 1141 и 1173 кэВ соответственно.

Особый интерес вызывает исследование (γ, α) -реакций с заселением этих ядер. Данных о (γ, α) -реакциях мало. Основной причиной этого является то, что их сечения значительно ниже по сравнению с (γ, n) -каналом вследствие кулоновского барьера. В то же время в (γ, α) -реакциях могут возбуждаться состояния, часто недоступные для (γ, n) -канала. Также для фотоядерных реакций с вылетом α -частиц ожидается значительный вклад прямых и полупрямых процессов, особенно при заселении высокоспиновых K -изомеров. На сегодняшний день реакции $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180m}\text{Hf}$ и

¹E-mail: zhelton@yandex.ru

$^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182m}\text{Hf}$ не изучались, а реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, \alpha)^{177}\text{Lu}$ исследовалась в работах [1, 2] для тормозных фотонов с граничной величиной энергии 23 и 37 МэВ соответственно. Но в работе [1] для $E_{\text{гр}} = 23$ МэВ был получен лишь выход ^{177}Lu по отношению к выходу реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$.

Исходя из вышесказанного целью нашей работы является исследование возбуждения ядер ^{180m}Hf , ^{182m}Hf и ^{177}Lu в (γ, α) -реакциях для граничных энергий тормозных γ -квантов 40 и 55 МэВ.

ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование сечений проводилось методом наведенной активности на тормозных γ -пучках для электронов с величиной энергии 40 и 55 МэВ. Было проведено несколько серий облучений и измерений. Продолжительность облучения образцов составляла 60–80 мин.

Мишени изготавливали из металлических вольфрама и тантала естественного изотопного состава. При $E_{\text{гр}} = 40$ МэВ мишень состояла из прямоугольной полосы тантала и квадратной полосы вольфрама размерами $0,6 \times 2 \times 0,011$ см и весом около 220 мг и $2 \times 2 \times 0,0057$ см и весом около 441 мг соответственно. При $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ образец представлял собой квадратную полоску тантала и прямоугольную полоску вольфрама размерами $2 \times 2 \times 0,02$ см и весом около 1,3 г и размерами $1,3 \times 1,5 \times 0,005$ см и весом около 186 мг соответственно. Для расчета потока тормозных γ -квантов в обоих случаях использовалась хорошо изученная ядерная реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ [3].

Наведенную активность измеряли γ -спектрометрами на базе HPGe-детекторов с эффективностью регистрации 15–40% по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3''$ и энергетическим разрешением 1,8–2 кэВ на γ -линиях ^{60}Co . Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы Winspectrum [4]. 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 нужно знать потоки тормозных γ -квантов на мишенях. Для их получения определялись интенсивности γ -линий 93,3 и 103,6 кэВ, сопровождающие распад ^{180}Ta (рис. 1 и 2) и средневзвешенный выход реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$.

Средневзвешенный выход вышеуказанной реакции определялся в результате свертки табличных значений сечений этой реакции для монохроматических γ -квантов

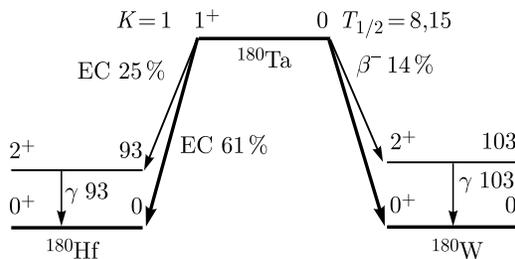


Рис. 1. Фрагмент схемы распада ^{180}Ta

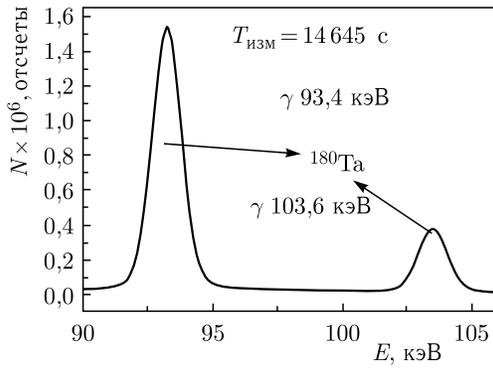


Рис. 2. Фрагмент γ -спектра тантала, облученного тормозными γ -квантами с $E_{\text{гр}} = 55 \text{ МэВ}$

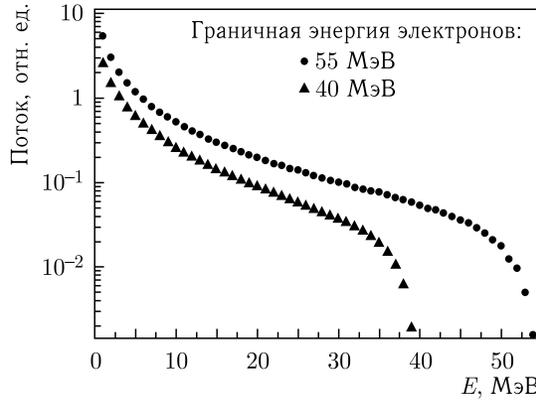


Рис. 3. Спектр тормозных γ -квантов для разных величин энергии электронов

с шагом 1 МэВ с относительными величинами моделированного в Geant4 [5] спектра тормозных γ -квантов (рис. 3) по формуле

$$Y_{\text{мон}}^{\text{cp}}[\delta] = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \varphi_i}, \quad (1)$$

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, моделированного в Geant4 спектра тормозных γ -квантов, приведенные к пороговым величинам реакции на мониторе.

После этого рассчитывались потоки тормозных γ -квантов по формуле

$$F = \frac{S\lambda A}{(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \xi k \alpha Y_{\text{мон}}^{\text{cp}} N_A m p}, \quad (2)$$

где S — площади фотопиков, которые сопровождают распад ^{180}Ta ; α — квантовые выходы γ -квантов при распаде ^{180}Ta ; ξ — эффективность регистрации γ -квантов, сопровождающих распад ядер продуктов реакций на мониторинжной мишени; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{охл}}$, $t_{\text{изм}}$ — времена облучения, охлаждения и измерения соответственно (с); k — коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада; p — абсолютное содержание ^{181}Ta в естественной смеси; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро (б); $Y_{\text{мон}}^{\text{cp}}$ — средневзвешенный выход реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$, рассчитанный согласно (1); m — массы мишеней тантала, отнормированные на площадь мишени ($\text{г}/\text{см}^2$); $A = 181$ — массовое число атомов тантала (а. о. м); λ — постоянная распада ^{180}Ta (с^{-1}). Величины λ , k , α , A , p взяты из [6], S — из экспериментальных γ -спектров, а ξ — из калибровочных кривых, дополнительно проверенных с помощью моделирования в Geant4.

Далее по формуле (2) с использованием этих потоков и поправок на разницу энергетических порогов рассчитывались $\langle Y \rangle$ реакций (γ, α) на естественных вольфраме и тантале, приводящих к активации K -изомеров в $^{180,182}\text{Hf}$ и основного состояния ^{177}Lu . Фрагменты схем распада ^{180m}Hf , ^{182m}Hf и ^{177}Lu приведены на рис. 4. Для получения средневзвешенных выходов заселения ^{177}Lu и изомерных состояний ^{180m}Hf ,

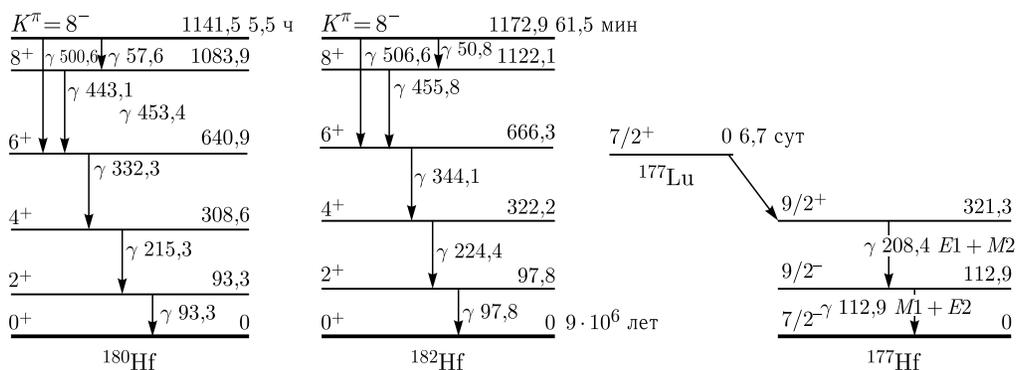


Рис. 4. Фрагменты схем распада: ^{180m}Hf , ^{182m}Hf , ^{177}Lu

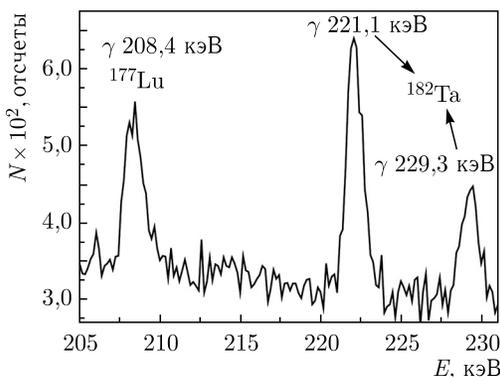


Рис. 5. Фрагмент γ -спектра облученной при $E_{\text{тр}} = 55$ МэВ мишени Та

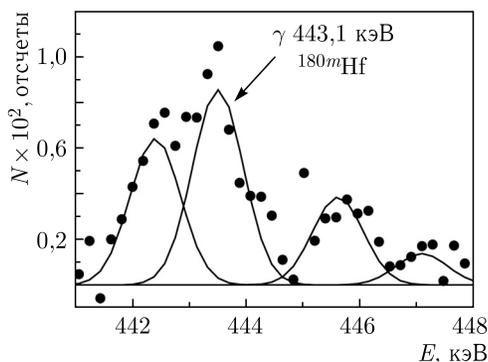


Рис. 6. Фрагмент γ -спектра облученной при $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ мишени $^{\text{nat}}\text{W}$ (реакция $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$)

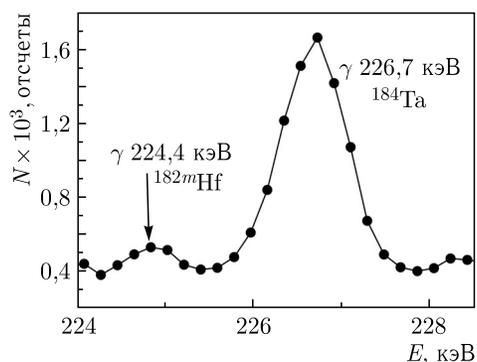


Рис. 7. Фрагмент γ -спектра облученной при $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ мишени $^{\text{nat}}\text{W}$ (реакция $^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$)

Экспериментальные средневзвешенные $\langle Y \rangle$ выходы наработки $^{180\text{m}}\text{Hf}$, $^{182\text{m}}\text{Hf}$ и ^{177}Lu

Реакция	$E_{\text{гр}}$, МэВ	$\langle Y \rangle$, эксп., мкб	$\langle Y \rangle$, TALYS-1.9, мкб
$^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$	40	1,0(2)	0,004
$^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$	55	2,5(3)	0,005
$^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$	40	5,7(17)	0,001
$^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$	55	2,8(9)	0,003
$^{181}\text{Ta}(\gamma, \alpha)^{177}\text{Lu}$	40	33(8)	0,160

$^{182\text{m}}\text{Hf}$ определяли площади фотопиков γ -линий 208,4 кэВ, 443,2 кэВ и 224,4 кэВ соответственно (рис. 5–7). Результаты расчетов приведены в таблице.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки механизмов протекания исследуемых ядерных реакций нами проведено моделирование этих процессов с использованием программного кода TALYS-1.9. Более детально о моделировании с помощью этого кода изложено в [7], в нем учитываются доминирующие статистические и предравновесные процессы.

При теоретических расчетах определяются сечения 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, для обеих граничных величин энергии не достигается согласия теоретических и экспериментальных данных как для параметров по умолчанию, так и для их вариации в разумных пределах. Теоретические выходы остаются ниже экспериментальных величин приблизительно на три порядка.

Поэтому нами рассмотрен механизм полупрямых реакций [8]. При таком подходе α -частица вылетает из ядра за время $t \sim 10^{-21}$ с, а время формирования кулоновского барьера 10^{-18} – 10^{-19} с [9, 10]. После вылета α -частицы ядро распадается через обычные статистические переходы. В нашем случае распадаются остаточные ядра $^{180,182}\text{Hf}$

и ^{177}Lu аналогично, как и при (γ, γ') -реакциях [11]. Рассчитанные средневзвешенные выходы в коде TALYS-1.9 для модели плотности уровней постоянной температуры и ферми-газа [12], которая используется по умолчанию, дают для $^{180,182}\text{Hf}$ величины $\langle Y \rangle \approx 2-3$ мкб, а для ^{177}Lu на порядок больше, т. е. находятся в хорошем согласии с экспериментом.

ВЫВОДЫ

Впервые измерены средневзвешенные выходы ядерных реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, \alpha)^{177}\text{Lu}$, $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180m}\text{Hf}$ и $^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182m}\text{Hf}$ при $E^{\text{max}} = 40$ и 55 МэВ. Результаты моделирования в рамках программного кода TALYS-1.9 демонстрируют доминирование нестатистических полупрямых процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-51-00009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karamian S. A.* Z Dependence of the (γ, α) Reaction Yield // *Phys. Atom. Nucl.* 2014. V. 77. P. 1429.
2. *Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M., Zheltonozhskaya M. V., Chernyaev A. P.* Excitation of $^{177,178}\text{Lu}$ in Reactions with Bremsstrahlung with Escaping of Charged Particles // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2020. V. 476. P. 68–72.
3. *Varlamov V. V., Ishkhanov B. S., Orlin V. N., Peskov N. N., Stepanov M. E.* // *Phys. Atom. Nucl.* 2013. V. 76. P. 1403.
4. *Strilchuk N. V.* The WinSpectrum Manual. 2000.
5. *Agostinelli S. et al. (Geant4 Collab.).* Geant4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 506. P. 250.
6. *Firestone R. B.* Table of Isotopes. 8th ed. New York: Wiley Intersci., 1996.
7. *Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C.* TALYS: Comprehensive Nuclear Reaction Modeling // *AIP Conf. Proc.* 2005. V. 769, No. 1. P. 1154–1159.
8. *Ishkhanov B. S., Kapitonov I. M.* Giant Dipole Resonance of Atomic Nuclei. M.: Moscow State Univ., 2008. 148 p. (in Russian).
9. *Morinaga H.* Effects of Isotopic Spin Selection Rules on Photonuclear Yields // *Phys. Rev.* 1955. V. 97. P. 444.
10. *Akyüz R. Ö., Fallieros S.* Energy Displacement of Dipole Isodoublets // *Phys. Rev. Lett.* 1971. V. 27. P. 1016.
11. *Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M. V., Savrasov A. N., Chernyaev A. P., Yatsenko V. N.* Investigation of Excitation of K -Isomers $^{179m2}\text{Hf}$ and ^{180m}Hf in (γ, γ') Reactions // *Phys. Atom. Nucl.* 2020. V. 83. P. 539–544.
12. *Gilbert A., Cameron A. G. W.* A Composite Nuclear-Level Density Formula with Shell Corrections // *Can. J. Phys.* 1965. V. 43. P. 1446.

Получено 11 ноября 2020 г.