Uzbek Journal of Physics

Vol.20(№2) 2018 PP.74-79

СЕЧЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ В РЕАКЦИЯХ (γ, n) И (n, 2n) НА ЯДРЕ ^{76}Ge

С.Р. Палванов[1], Э.Х. Бозоров[2], С. Ахмедов[1]

[1]Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан, satimbay@yandex.ru

[2]Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент, Улугбек, Узбекистан

(Получена 25.02.2018)

Киритилган активлик методи билан ^{76}Ge ядродаги (n, 2n) ва (γ, n) реакцияларда изомер ҳолатлар уйғониш кесимлари тадқиқ қилинди. 12–24 МэВ энергиялар соҳасида ^{76}Ge(γ,n)^{75m}Ge реакция кесими 1 МэВ қадам билан илк бор аниқланилди. Тажриба натижалар бошқа ишлар натижалари ва TALYS-1.6 дастурлар пакети ёрдамида ҳисобланган натижалар билан солиштирилган.

Методом наведенной активности исследованы сечения возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) и (n, 2n) на ядре ^{76}Ge. Впервые определены сечения реакции ^{76}Ge(γ,n)^{75m}Ge в области энергий 12–24 МэВ с шагом 1 МэВ. Экспериментальные результаты сравниваются с данными других работ и с расчетами, проведенными с помощью программного пакета TALYS-1.6.

The excitation cross section of isomeric states in the (γ, n) and (n, 2n) reactions on the ^{76}Ge nucleus was studied by the induced-activity method. The cross section for the ^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge reaction was first determined in the energy range 12–24 MeV in steps of 1 MeV. The experimental results are compared with the data of other works and calculations carried out using the software package TALYS-1.6.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование относительных вероятностей возбуждения изомерных и основных состояний конечного ядра в ядерных реакциях имеет фундаментальное и прикладное значение. Сопоставление экспериментальных данных по изомерному отношению с результатами расчета, основанного на статистической теории, позволяет получить информацию о спиновой зависимости плотности уровней ядра [1]. Важное значение имеет изучение образования изомерных состояний ядер в ядерных реакциях с различными бомбардирующими частицами, что позволяет получать сведения о механизмах ядерных реакций и о свойствах возбужденных состояний атомных ядер [2]. Особенно интересным является изучение ядерных реакций типа (n, 2n) и (γ, n), в результате которых образуется одинаковое ядро [3].

В настоящей работе методом наведенной активности исследованы сечения образования изомерных состояний ^{75m,g}Ge в реакциях типа (γ, n) и (n, 2n) на ядре ^{76}Ge в области энергий 12–24 МэВ.

Изомерные отношения выходов и сечений реакции ^{6}Ge(γ, n)^{75m,g}Ge изучены слабо. Имеется несколько работ [4-6], в которых указанные изомерные отношения определены при фиксированных энергиях. Эксперименты же по измерению энергетической зависимости изомерных отношений выходов в широком диапазоне энергий не проводились.

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на нейтронном генераторе НГ-150 ИЯФ АН РУз. Нейтронный генератор НГ-150 реализует потоки быстрых нейтронов с энергиями ~2.4 и 14 МэВ из реакций D+d→^{3}He+n или T+d→α+n при использовании дейтериевых и тритиевых мишеней. При этом потоки нейтронов составляют соответственно ~10^8 и 10^{10} н/сек. Время облучения нейтронным потоком с энергией 14 МэВ составляет 20 мин. Мониторирование потока нейтронов осуществляли с помощью пластинки из алюминия натурального изотопного состава, которая облучалась вместе с мишенями. Масса монитора составляет 151.4 мг. В качестве мишеней использовали образцы оксида германия (GeO_2) весом 2–3 г в виде таблеток диаметром 15 мм, приготовленных прессованием. Для исключения влияния фоновых нейтронов (тепловых нейтронов) образцы упаковывали в кадмиевые экраны толщиной 1 мм. Кроме того, в качестве монитора к образцам прикрепили спереди и сзади алюминиевую фольгу. Время облучения 20–40 мин.

Наведенную γ-активность мишеней измеряли на гамма-спектрометре фирмы Canberra, состоящего из германиевого детектора HPGe (с относительной эффективностью 15%, разрешением 1.8 кэВ для линии ^{60}Co 1332 кэВ), цифрового анализатора DSA 1000 и персонального компьютера с программным пакетом Genie 2000 для набора и обработки гамма-спектров. Гамма-активность облученной мишени также измеряли с помощью спектрометра на базе полупроводникового Ge(Li)-детектора с разрешением ~3.0 кэВ для линии 1.173 МэВ ^{60}Co. Гамма-спектрометр по энергии калибровали с помощью стандартного набора источников ОСГИ. Измерения выполняли в стандартной геометрии, в которой градуировали детектор по эффективности. Время измерения наведенной γ-активности мишеней составляет 3–40 мин.

Заселение изомерного и основного уровней идентифицировали по γ-линиям. Ядерно-физические характеристики ядер-продуктов реакций (γ, n) и (n, 2n), необходимые для обработки результатов измерений, взяты из [7] и приведены в табл. 1, где I^π – спин и четность уровня, $T_{1/2}$ – период полураспада ядра, I_γ – интенсивность распада γ-квантов данной энергии, p – коэффициент ветвления γ-перехода.

Таблица 1. Ядерно-физические характеристики ядер-продуктов реакции (γ, n) и (n, 2n) на ядрах.

Ядро-продукт	I^π	$T_{1/2}$	E_γ, кэВ	I_γ, %	p
^{75m}Ge	$7/2^+$	48 с	139.80	40	0.99
^{75g}Ge	$1/2^-$	82.8 мин	264.8	12	–

Изомерные отношения выходов рассчитывали по формуле, приведенной в [8]:

$$d = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[\frac{\lambda_g F_m(t)}{\lambda_m F_g(t)} \left(C \frac{N_g I_m \varepsilon_m}{N_m I_g \varepsilon_g} - p \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) + p \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1}, \qquad (1)$$

где

$$F_m(t) = \left[1 - \exp(-\lambda_m t_0)\right] \exp(-\lambda_m t_n) \left[1 - \exp(-\lambda_m t_c)\right],$$
$$F_g(t) = \left[1 - \exp(-\lambda_g t_0)\right] \exp(-\lambda_g t_n) \left[1 - \exp(-\lambda_g t_c)\right],$$

λ_m, λ_g – постоянные распада изомерного и основного состояний соответственно; C – коэффициент, учитывающий просчеты регистрирующей аппаратуры и положение импульсов; N_m, N_g – число зарегистрированных актов распада соответственно изомерного и основного состояний; I – интенсивность γ-квантов данной энергии на распад; ε – эффективность спектрометра; p – коэффициент ветвления γ-перехода; t_0, t_n, t_c – соответственно время облучения, паузы и измерения.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты по сечениям возбуждений изомерных состояний в реакциях (γ, n) и (n, 2n) на ядре ^{76}Ge приведены на рис. 1 и 2 и в табл. 2 и 3. Абсолютная ошибка изомерных отношений выходов определяется статистической погрешностью счетов в фотопике измеряемой γ-линии и эффективностью регистрации γ-излучения.

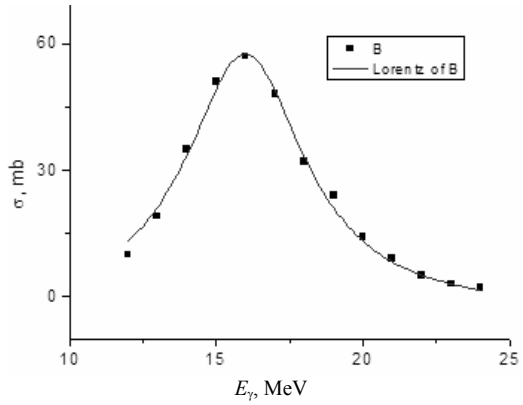


Рис. 1. Сечение реакции ^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge.

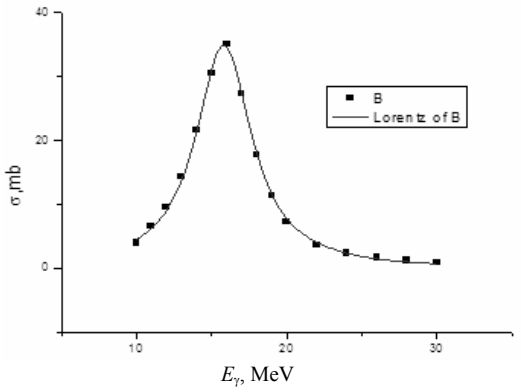


Рис. 2. Сечение реакции ^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge (TALYS-1.6).

Функции возбуждений (γ, n)-реакции получены по экспериментальным изомерным отношениям $d=Y_m/Y_g$ [9] и полным сечениям фотонейтронной реакции σ_n [10]. Спектр тормозных фотонов рассчитывался по программе GEANT4 [11]. Расчет сечения проводили методом Пенфолда-Лисса с шагом 1 МэВ [12].

Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2 в виде функции возбуждения $\sigma(E_\gamma)$, которая имеет одногорбую форму с положением максимума ~16 МэВ. Экспериментальная зависимость сечений реакции ^{76}Ge(γ, n)^{75m,g}Ge от граничной энергии тормозных квантов аппроксимировалась функцией Лоренца:

$$\sigma(E_\gamma) = \sigma_m \frac{E_\gamma^2 \Gamma^2}{\left(E_\gamma^2 - E_m^2\right)^2 + E_\gamma^2 \Gamma^2},$$

где E_m – положение максимума резонанса; σ_m – величина сечения в максимуме резонанса; Γ – ширина резонанса на половине высоты максимума. Параметры (E_m, σ_m и Γ) функции Лоренца определяли методом наименьших квадратов по набору экспериментальных значений. Данные по параметрам аппроксимации и интегральные сечения реакции приведены в табл. 2. Погрешности оценены, исходя

из статистики зарегистрированных отчетов, ошибки определения сечений мониторной реакции и эффективности регистрации детектора 0.56±0.02.

Изомерные отношения сечений реакций равны $r = \sigma_m/\sigma_{tot}$=0.53±0.03 или σ_m/σ_g = 1.13±0.07.

Таблица 2. Сечение реакции ^{76}Ge(γ, n)^{75m,g}Ge.

Реакция	E_m, МэВ	Γ, МэВ	σ_m, мб	σ_{int}, МэВ·мб	E_h, МэВ	Источник
^{76}Ge(γ, n)^{75}Ge	15.34	5	110.3	733	26.5	[13]
^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge*	15.8±0.1	4.5±0.1	12.1	251	24	Настоящая работа
^{76}Ge(γ, n)^{75m,g}Ge	16.0±0.1	4.9±0.3	58.5±0.5	480	24	Настоящая работа

Примечание. *Расчет сечений проводился по программе TALYS-1.6; σ_{int} – интегральное сечение реакции, E_h – верхний предел интегрирования.

Для оценки и сравнения экспериментальных результатов нами проведен расчет сечения реакции с помощью программного пакета TALYS-1.6 [14]. Результаты теоретических расчетов приведены также в табл. 2. Как видно из данных таблицы, значения ширины распределения на половине его высоты Γ во всех работах в пределах погрешности измерений согласуются между собой. На рис. 2 показана энергетическая зависимость сечения реакции ^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge, полученная с помощью программного пакета TALYS-1.6.

Для сравнения с экспериментом нами проведены расчеты изомерных отношений по статистической модели ядра. Плотность уровней возбужденного ядра оценивалась по формуле [1]

$$\rho(U,J) = \frac{2J+1}{24\sqrt{2}a^{1/4}U^{5/4}\sigma^3}\exp\left[2\sqrt{aU} - \frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right], \qquad (2)$$

где σ – параметр ограничения спина, a – параметр плотности уровней, U – энергия возбуждения, под которой понимается эффективная энергия [1].

Улучшить количественное согласие расчетов с экспериментом удалось при фиксации параметра спинового ограничения σ. При этом удовлетворительное согласие достигается при $\sigma = 2/8\hbar$.

В случае реакции (n, 2n) определены сечения образования изомерного и основного состояний и их изомерных отношений σ_m/σ_g. Для получения абсолютных значений сечений основного и изомерного состояний использовали методы сравнения выходов исследуемой и мониторной реакции. В качестве мониторной использовали реакцию ^{27}Al(n, α)^{24}Na ($T_{1/2}$=15 ч, E_γ=1368 кэВ), сечение которой равно σ_m =121.57±0.57 мбн при E_n =14.1 МэВ [15]. При определении сечений учитывались статистическая погрешность счетов в фотопике измеряемой γ-линии, ошибка определения сечения мониторной реакции, эффективность регистрации γ-излучения и самопоглощения гамма-лучей. Расчеты изомерных отношений сечений σ_m/σ_g осуществлялись по формуле, приведенной в работе [8].

В табл. 3 приведены значения сечений образования изомерных состояний ^{75m,g}Ge, полученные в настоящей и в других работах. Как видно из таблицы, наши результаты по изомерным отношениям сечений σ_m/σ_g в пределах погрешностей

Таблица 3. Сечение реакции ^{76}Ge(n, 2n)^{75}Ge.

E_n, МэВ	σ_m, мб	σ_g, мб	σ_m/σ_g	Источник
13.73	713±70	478±57	–	[16]
14.42	778±63	513±61	–	[16]
14.77	842±63	535±64	–	[16]
11.720	–	–	0.73±0.05*	[17]
14.680	–	–	0.80±0.04*	[17]
14.1	770±80	600±50	–	[18]
13.87	696.85±42.09	329.82±24.46	2.11±0.21	[19]
14.36	740.11±43.67	330.10±25.46	2.24±0.22	[19]
14.80	754.56±46.86	335.70±26.80	2.25±0.23	[19]
14.7	–	–	1.3±0.15	[8]
14.1	735±45	373±26	1.97±0.14	Настоящая работа
14.0	725	397	1.83	TALYS-1.0.
14.5	752	399	1.88	TALYS-1.0.

Примечание. *Приведено значение σ_m/σ_{tot}

измерений согласуются с данными других работ. При E_n=14.1 МэВ наши результаты по изомерным отношениям сечений хорошо согласуются с данными работы [4] и расчётными данными, которые проводили по программе TALYS-1.6. Результаты измерений, приведенные в табл. 3, свидетельствуют, что относительная вероятность возбуждения изомеров в случае реакции типа (n, 2n) в несколько раз выше, чем в реакции (γ, n). Вероятно, это связано с вносимым в ядро моментом, который в случае (n, 2n) реакции больше, чем в фотоядерных реакциях.

Анализ экспериментальных данных, полученных в настоящей и в других работах, показывает, что возбуждения изомерных состояний в фотоядерной реакции ^{76}Ge(γ,n)^{75m,g}Ge практически не изучены. В дальнейшем для этой реакции необходимо тщательно проводить измерения изомерных отношений выходов и сечений в области энергий от порога реакции 25 МэВ с малым шагом изменения энергии. Благодаря этим исследованиям можно получать информацию о плотности ядерных уровней и вкладе прямых процессов в механизм фотоядерных реакций в данной области энергий.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены экспериментальные данные по сечению образования изомерных состояний ^{75m,g}Ge в ядерных реакциях (γ, n) и (n, 2n) на ядре ^{76}Ge в области энергий 12–24 МэВ. Впервые определены сечения реакций ^{76}Ge(γ, n)^{75m}Ge. Также проведены теоретические расчеты сечений образования изомерных состояний с помощью программы TALYS-1.6. Установлено, что сечения (γ, n)^m на ядре ^{76}Ge имеют одногорбую форму с положением максимума ~16 МэВ.

Полученные экспериментальные результаты по изомерным отношениям выходов и сечений реакций (γ, n) и (n, 2n) на ядре ^{76}Ge могут быть использованы при изучении механизма фотоядерных реакций и разработке методик гамма- и нейтронно-активационного анализа.

В заключение автор выражает благодарность М. Каюмову и О. Жураеву за облучение образцов на нейтронном генераторе, Ж. Рахмонову за помощь в измерениях, С.В. Артемову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Н.П. Балабанов, ЭЧАЯ **27**, №4, 1043 (1996).
2. В.М. Мазур, ЭЧАЯ **31**, №2, 1043 (2000).
3. С.Р. Палванов, ЯФ **77**, №1, 1 (2014).
4. М.Г. Давыдов, В.Г. Магера, А.В. Трухов, Атомная энергия **62**, №4, 236 (1987).
5. П. Гангрский, П. Зузаан, Н.Н. Колесников и др., Изв. РАН, сер. физ. **65**, №1, 111 (2001).
6. С.Р. Палванов, О. Раджабов, Атомная энергия **87**, №1, 75 (1999).
7. C. Lederer, V. Shirley. Table of Isotopes (New York, Jon Willey & Sons Inc., 2000).
8. R. Vanska, R. Rieppo, Nucl. Instrum. Meth. **179**, 525 (1981).
9. С.Р. Палванов, Узбек. физич. журн. **7**, №2, 91 (2005).
10. A.V. Varlamov, V.V. Varlamov, D.S. Rudenko, M.E. Stepanov. Atlas of Giant Dipole Resonances (Vienna, INDS (NDS)-394, IAEA, 1999).
11. S. Agostinelli et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **506**, 250 (2003).
12. О.В. Богданкевич, Ф.А. Николаев. Работа с пучком тормозного излучения (Москва, Атомиздат, 1964).
13. P. Carlos, H. Beil, R. Bergere, J. Fagot, A. Lepretre, A. Veyssiere, G.V. Solodukhov, Nucl. Phys. A **258**, 365 (1976).
14. A.J. Koning, S. Hilaire, M.C. Duijvestijn,“TALYS-1.0”. Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology –ND2007, Eds O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin and S. Leray, EDPSciences (Nice, France, May 22-27, 2007, p. 211, 2008).
15. Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements, 1991. neandc/indc nuclear standards file (Uppsala University, Uppsala, Sweden, Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development, 1992).
16. F.M.D. Attar, S.D. Dhole, S. Kailas, V.N. Bhoraskar, Nuclear Physics, Section A **828**, 253 (2009).
17. Birn, S.M. Qaim, B. Strohmaier, H. Freiesleben, Journal Nuclear Science and Engineering **116**, 25 (1994).
18. L. Casanova, M.L. Sanchez, Journal Anales de Fisica Quimica **72**, part 3, 186 (1976).
19. M. Bhike, F. Krishichayan, W. Tornow, Physical Review C **95**, 054605 (2017).