

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЫСОКОСПИНОВЫХ ИЗОМЕРОВ ^{190}Ir , ^{196}Au В (γ, n) -РЕАКЦИИ

И. Н. Вишнеvский, О. И. Давыдовская, В. О. Желтоножский,
Е. В. Кулич¹, А. Н. Саврасов, Н. В. Стрильчук

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

¹*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев*

Измерены отношения выходов изомерных и основных состояний ^{190}Ir и ^{196}Au в реакции (γ, n) при некоторых значениях граничной энергии тормозных γ -квантов в диапазоне 12 ÷ 22 МэВ. Проведено сравнение расчетов по модифицированной каскадно-испарительной модели с экспериментальными данными. Показан статистический характер реакции.

Ядерные реакции с различными бомбардирующими частицами служат важным источником сведений как о механизмах ядерных реакций, так и о свойствах возбужденных состояний атомных ядер. Одним из направлений таких исследований является измерение изомерных отношений, т.е. измерение отношения сечений реакций образования остаточных ядер в изомерном и основном состояниях. Эти отношения зависят от спина ядра-мишени и вносимого углового момента, который определяется массой и энергией бомбардирующей частицы, а также от механизма данной реакции, свойств возбужденных состояний как в непрерывной, так и в дискретной областях [1]. Таким образом, из данных о изомерных отношениях исследуются механизмы ядерных реакций и статистические свойства возбужденных состояний атомных ядер. Полученная информация будет более однозначной для простых ядерных реакций, таких как (γ, n) , (n, γ) , (d, p) , (p, γ) . Во всех этих реакциях вносится небольшой угловой момент $(1/2 \div 1)\hbar$, а дисперсия моментов после вылета частицы меняется в диапазоне $(1 \div 2)\hbar$. При изучении реакций в околопороговой области можно выбрать не очень большой диапазон энергий возбуждения остаточного ядра. Все это позволяет значительно упростить анализ изомерных отношений и определить более однозначно ядерные параметры в модифицированной каскадно-испарительной модели.

Целью данной работы является измерение изомерных отношений в $^{190m,g}\text{Ir}$ и $^{196m,g}\text{Au}$ в реакциях с тормозными γ -квантами.

К данным ядрам имеется особый интерес из-за высоких спинов изомеров ($I^\pi = 11^-$ для ^{190}Ir и $I^\pi = 12^-$ для ^{196}Au), заселение которых вблизи порога может быть сильно подавлено по статистическому каналу. Поэтому исследование возбуждения этих изомеров на мишенях с малыми спинами и бомбардирующими частицами, которые вносят небольшой угловой момент и имеют энергию вблизи порога соответствующей реакции, позволяет более адекватно оценить роль нестатистических процессов.

Описание эксперимента и результаты

Измерения изомерных отношений в (γ, n) -реакциях проводились методом наведенной активности на тормозном γ -пучке микротрона М-30 ИЭФ НАН Украины и бетатрона Ужгородского университета для энергий электронов: 12, 12,5, 16 и 22 МэВ. Спектр тормозного излучения электронов был непрерывным, простирающимся вплоть до максимальной энергии электронов. Было проведено несколько серий облучений. Время облучения образцов золота составляло 1,5 - 4 ч, образцов иридия 2 - 4 ч.

Мишени изготавливали из металлического золота и иридия природного изотопного состава. Образцы представляли собой прямоугольные полосы размером 1 см² и массой около 1 г.

Наведенную активность измеряли γ -спектрометрами на базе германиевых детекторов с эффективностью регистрации 30 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами 3" × 3" и энергетическим разрешением 2 кэВ на γ -линиях ^{60}Co .

Ядерные реакции вызывали тормозные γ -кванты с энергией от энергетического порога соответствующей реакции и до максимальной энергии электронов.

Ядро ^{190}Ir имеет изомерное состояние с $I^\pi = 11^-$, а основное с $I^\pi = 4^+$. Для получения выходов заселения изомерного состояния с $I^\pi = 11^-$ определяли интенсивности фотопиков γ -линий 0,502 и 0,616 МэВ, которые разряжают уровни ^{190}Os при распаде только изомерного состояния ($T_{1/2} = 3,25$ ч).

Для определения заселенности основного состояния ^{190}Ir ($T_{1/2} = 11,8$ ч) использовали γ -переход 371 кэВ с уровня 558 кэВ ^{190}Os , который заселяется при электронном захвате только этого основного состояния (рис. 1).

Выход заселения основного состояния $Y_g(I^\pi = 2^-)$ и изомерного состояния $Y_m(I^\pi = 12^-)$ ^{196}Au в реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196m,g}\text{Au}$ определяли по пикам с энергиями 0,356 и 0,188 МэВ (рис. 2).

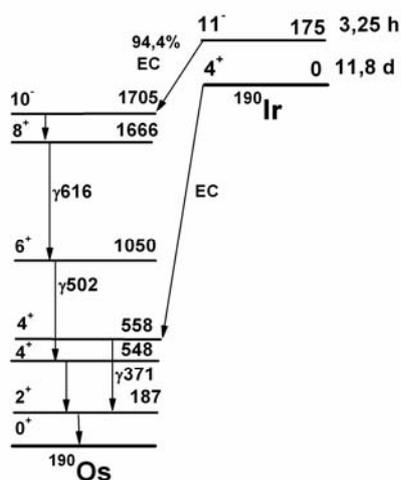
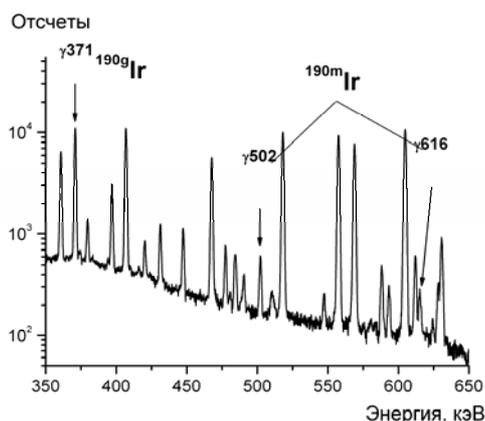


Рис. 1. Спектр, полученный при $E^{TP} = 12,5$ МэВ, и схема распада $^{190m,g}Ir$.

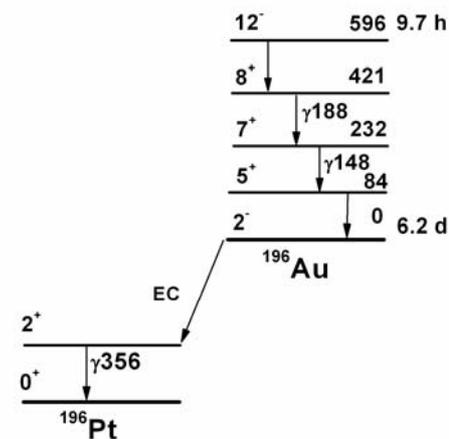
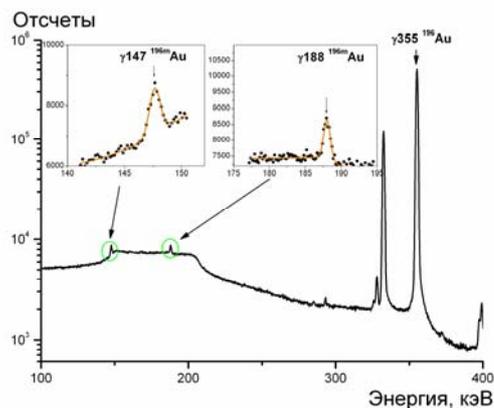


Рис. 2. Спектр, полученный при $E^{TP} = 22$ МэВ, и схема распада $^{196m,g}Au$.

Однако как видно из схемы уровней $^{196m,g}Au$, γ_{356} подпитывается из распада ^{196m}Au . Для оценки этого вклада измерения распада $^{196m,g}Au$ проводились в два этапа: непосредственно после облучения и через 2 сут после облучения. Из этого измерения было получено, что вклад ^{196m}Au в

распад ^{196g}Au не превышал $6 \cdot 10^{-4}$, поэтому в пределах погрешности измерений (3 - 4 %) распады $^{196m,g}Au$ можно считать независимыми.

Из экспериментальных γ -спектров определяли изомерные отношения выходов Y_m/Y_g для ^{196}Au и ^{190}Ir по формуле [2]

$$d(E_{\gamma_{max}}) = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[\frac{\lambda_g}{\lambda_m} \cdot \frac{f_m(t)}{f_g(t)} \left(\frac{\xi_m k_m \alpha_m}{\xi_g k_g \alpha_g} \cdot \frac{N_g}{N_m} - p \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) + p \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где

$$f_m(t) = [1 - \exp(-\lambda_m \cdot t_{обл})] \cdot \exp(-\lambda_m \cdot t_{охл}) \cdot [1 - \exp(-\lambda_m \cdot t_{изм})], \quad (2)$$

$$f_g(t) = [1 - \exp(-\lambda_g \cdot t_{обл})] \cdot \exp(-\lambda_g \cdot t_{охл}) \cdot [1 - \exp(-\lambda_g \cdot t_{изм})], \quad (3)$$

N_m, N_g – интенсивности фотопиков, сопровождающих распад дочерних ядер в изомерном (m) и основном (g) состояниях; $\alpha_{m,g}$ – выход γ -квантов при распаде изомерного и основного состояний; $\xi_{m,g}$ – эффективность регистрации γ -квантов распада; $t_{обл}, t_{охл}, t_{изм}$ – время облучения, охлаждения и измерения соответственно; $k_{m,g}$ – коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада; p – коэффициент ветвления (отношение вероятности перехода изомерного уровня на основной к полной вероятности

распада изомерного уровня); λ_m, λ_g – постоянные распада изомерного и основного состояний.

Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы Winspectrum [3]. Эффективность регистрации γ -квантов распада была определена с помощью стандартных калибровочных источников $^{152,154}Eu, ^{133}Ba$. Величины $\lambda_m, \lambda_g, p, k_{m,g}, \alpha_{m,g}$ были взяты из [4].

Полученные данные о изомерных отношениях с разными γ -квантами приведены в таблице.

Изомерные отношения выходов в (γ, n) -реакции для ядер ^{196}Au и ^{190}Ir

Реакция	$E_{\text{гр}}$, МэВ	$[\sigma_m/\sigma_g] \cdot 10^5$ расчет	$[Y_m/Y_g] \cdot 10^5$		E^* , МэВ
			Эксперимент	Данные других авторов	
$^{191}\text{Ir}(\gamma, n)^{190\text{m,g}}\text{Ir}$	12	3,1	$(5,3 \pm 1,0)$		3,75
	12,5	3,6	$(5,2 \pm 0,4)$		4,25
	16	55	(61 ± 5)		7,75
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$	12	0,5	$(1,1 \pm 0,4)$	10 [6]	3,3
	12,5	0,8	$(2,2 \pm 0,6)$		3,8
	21,5			37,8 [5]	12,8
	22	65	(59 ± 2)	60 [7]	13,3
	23,5			300 [6]	14,8

E^* - энергия возбуждения остаточного ядра.

Обсуждение и выводы

В таблице приведены результаты наших измерений и ранее полученные данные. Как видно, изомерные отношения для (γ, n) -реакции на $^{190\text{m,g}}\text{Ir}$ получены впервые. Фотоядерные реакции на ^{197}Au изучались во многих работах [5 - 7], в основном в области энергий больше 20 МэВ. Данные в области 12 МэВ ранее изучались только в работе [6], где для 12 МэВ была получена величина $\sigma_m/\sigma_g = 1 \cdot 10^{-4}$, т.е. на порядок больше, чем в наших исследованиях. Это было одной из причин проведения измерений при 22 МэВ, где надежно наблюдаются γ -переходы $^{196\text{m}}\text{Au}$ (см. рис. 2) и ранее в этой области были проведены измерения в нескольких работах. Полученная величина Y_m/Y_g для этой энергии хорошо согласуется с данными из [7] и в пять раз наше значение занижено по сравнению с [6] для $E_{\text{гр}}^{\text{макс}} = 23,5$ МэВ (см. таблицу). Поэтому нами сделан вывод о том, что в данных [6] присутствует систематическая ошибка.

Фотоядерные реакции – это классический пример статистических процессов в составном ядре. Исходя из этого, полученные результаты были проанализированы в рамках модифицированной каскадно-испарительной модели (МКИМ) [1]. В этой модели заселение изомерной пары проводится согласно известной из эксперимента схеме разрядки низколежащих состояний, учитывается возможность прохода иррадирующей из состояний в окрестности иррадирующей, угловые моменты которых превышают угловой момент метастабильного состояния. При анализе мы использовали среднюю энергию γ -квантов в остаточном ядре в виде [8]

$$\bar{E}_\gamma = 4 \sqrt{\frac{E^*}{a} - \frac{\sigma}{a^2}}, \quad (4)$$

где E^* – энергия возбуждения остаточного ядра,

определяется из энергетического баланса ядерной реакции; a – плотность одночастичных уровней; σ – параметр ограничения по спину. Величины параметров a и σ определяли из систематических и теоретических расчетов [1]. Полученные результаты приведены в таблице.

Как видно, для ^{190}Ir расчетные и экспериментальные изомерные отношения выходов в околопороговой области близки, но теоретические расчеты занижены примерно в два раза. Разумной вариацией параметров a и σ не удалось согласовать экспериментальные значения изомерных отношений с теоретическими. На наш взгляд, это может быть обусловлено примесью E2-компонента в статистических E1-переходах. В МКИМ процент примеси является третьим свободным параметром. Расчет изомерных выходов для средних энергий, полученных по формуле (4) с примесью 0,1 % E2-мультипольности в статистических γ -переходах полностью согласует расчетные и экспериментальные величины для этих энергий в $^{190\text{m,g}}\text{Ir}$.

Отметим, что при больших энергиях расчетные и экспериментальные данные совпадают в пределах погрешности измерений. Это качественно согласуется с необходимостью учета E2 мультипольности в большей степени для малых энергий, когда относительная роль E2-компоненты существенно больше.

Погрешность измерений для $^{196\text{m,g}}\text{Au}$ в (γ, n) -реакции при 12 МэВ не позволяет сделать столь однозначную оценку расхождения расчетных и экспериментальных данных как для $^{190\text{m,g}}\text{Ir}$, однако качественно и эти данные согласуются между собой при учете вклада E2-мультипольности на уровне (0,05 - 0,1) %.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод о статистическом характере (γ, n) -реакции даже в околопороговой области, где средняя энергия статистических γ -квантов (см. формулу (4)) достигает 300 - 400 кэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богила Е.А., Коломиец В.М.* Изомерные отношения в модифицированной каскадно-испарительной модели // Укр. физ. журн. - 1989. - Т. 34, № 1. - С. 7 - 14.
2. *Vanska R., Rieppo R.* The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique // Nucl. Instr. and Meth. - 1981. - Vol. 179. - P. 525 - 532.
3. *Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Зелинский А.Г. и др.* Атомно-ядерные эффекты в процессе внутренней конверсии γ -лучей // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 1999. - С. 60 - 65.
4. *Firestone R.B., Shirley V.S., Baglin C.M. et al.* The 8th edition of the Table of Isotopes // CD-ROM. 1996. Ver. 1.
5. *Thiep T.D., An T.T., Vinh N.T. et al.* Experimental study and theoretical consideration of the isomeric ratio in photonuclear reaction $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ in the giant dipole resonance region // Письма в ЭЧАЯ. - 2006. - Т. 3, № 4. - С. 7 - 16.
6. *Джилаван Л. З., Лазарева Л. Е., Пономарев В. Н. и др.* Изомерные отношения выходов реакций $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au}(e, e' n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ // Ядерная физика. - 1981. - Т. 33, №3. - С. 591 - 600.
7. *Гангрский Ю. П., Колесников Н. Н., Лукашик В. Г. и др.* Изомерные отношения в перекрестных реакциях образования нечетно-нечетных ядер ^{184}Re , ^{190}Ir и ^{196}Au // Изв. Акад. наук. Сер. физ. - 2004. - Т. 68, №. 2. - С. 167 - 172.
8. *Мальшев А.В.* Плотность уровней и структура атомных ядер. - М.: Атомиздат, 1969. - 215 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ВИСОКОСПНОВИХ ІЗОМЕРІВ ^{190}Ir , ^{196}Au В (γ, n) -РЕАКЦІЇ

**І. М. Вишневський, О. І. Давидовська, В. О. Желтоножський, Є. В. Куліч,
А. М. Саврасов, М. В. Стрільчук**

Виміряно відношення виходів ізомерних та основних станів ^{190}Ir і ^{196}Au в (γ, n) -реакції при деяких значеннях граничної енергії гальмівних γ -квантів у діапазоні 12 ÷ 22 MeV. Проведено порівняння розрахунків згідно з модифікованою каскадно-випаровувальною моделлю з експериментальними даними. Показано статистичний характер реакції.

INVESTIGATION OF EXCITATION OF HIGH SPINS ISOMERS IN ^{190}Ir , ^{196}Au IN (γ, n) -REACTION

**I. M. Vyshnevskiy, O. I. Davidovskaya, V. A. Zheltonozhsky, E. V. Kulich,
A. N. Savrasov, N. V. Strilchuk**

Isomeric yield ratios in ^{190}Ir , ^{196}Au have been measured in (γ, n) -reaction for some values of the end-point energies of bremsstrahlung photons in the range 12 ÷ 22 MeV. Calculation has been performed using modified cascading-evaporating model and has been compared with experimental data. Statistical nature of reactions with γ -rays has been shown.

Поступила в редакцію 14.02.08,
после доработки – 09.04.08.