

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ВЫХОДОВ
В (γ, n)-РЕАКЦИИ НА ¹²¹Sb

И. Н. Вишневский¹, О. И. Давидовская¹, В. А. Желтоножский¹, А. Н Саврасов¹,
П. Н. Трифонов¹, В. М. Мазур², Д. М. Симочко²

¹Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев
²Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

Измерены изомерные отношения выходов ^{120m.g}Sb в реакции (γ, n) в области энергий γ-квантов 9,6 - 25 МэВ. Проведены расчеты изомерных отношения выходов с использованием программного пакета TALYS-1.0. Показан статистический характер (γ, n)-реакции как в припороговой области, так и в области больших энергий.

Ключевые слова: изомерные отношения выходов, активационный метод, гамма-спектроскопия, статистическая модель.

Фотоядерные реакции служат важным источником сведений как о механизмах ядерных реакций, так и о свойствах возбужденных состояний атомных ядер. Исследование гигантского дипольного резонанса (ГДР) является до настоящего времени одним из актуальных направлений современной ядерной физики. Одним из методов таких исследований является измерение изомерных отношений выходов, т.е. измерение отношения выходов остаточных радиоактивных ядер в изомерном и основном состояниях. Эти отношения зависят от спина ядра-мишени и энергии γ-квантов, а также от механизма данной реакции, свойств возбужденных состояний как в непрерывной, так и в дискретной областях. Таким образом, используя данные о изомерных отношениях выходов радиоактивных ядер, можно исследовать механизмы ядерных реакций и статистические свойства возбужденных состояний атомных ядер. Важной особенностью является и то, что в фотоядерных реакциях вносится небольшой угловой момент $(I \pm 1)\hbar$, где I – спин основного состояния ядра, а дисперсия моментов после вылета частицы меняется в диапазоне $(I \div 2)\hbar$. Это позволяет значительно упростить анализ изомерных отношений и определять более однозначно ядерные параметры.

Целью данной работы является измерение изомерных отношений выходов в широком диапазоне энергий в (γ, n)-реакции с тормозными γ-квантами на ¹²¹Sb.

К этому ядру имеется особый интерес из-за большой разницы спинов основного и изомерного состояний ($\Delta I = 7\hbar$). Заселение таких высокоспиновых состояний вблизи порога очень чувствительно как к выбору вида функции, описывающей плотность возбужденных состояний, так и к наличию экспериментальных данных о структуре уровней вблизи высокоспинового изомера. При заселении изомеров в низкоэнергетической области может проявиться вклад полупрямых процессов, а в области высоких энергий предравновесных процессов.

Описание эксперимента и результаты

Измерения изомерных отношений выходов проводились методом наведенной активности на тормозном γ-пучке микротрона М-30 ИЭФ НАН Украины для энергий электронов от 9,6 до 25,0 МэВ (см. таблицу). Спектр тормозного излучения электронов был непрерывным, простирающимся вплоть до максимальной энергии электронов. Было проведено несколько серий облучений. Время облучения образцов составляло 1,5 - 4 ч.

Изомерные отношения выходов в (γ, n)-реакции для ядер ¹²⁰Sb

E ^{γp} , МэВ	[Y _m /Y _g] · 10 ³ эксперимент	[Y _m /Y _g] · 10 ³ расчет	E ^{γp} , МэВ	[Y _m /Y _g] · 10 ³ эксперимент	[Y _m /Y _g] · 10 ³ расчет
9,6	0,3(1)	0,42	17,0	80	65
9,8	0,12(2)	0,40	18,0	80	69
10,0	1,9	0,72	19,0	82	71
10,5	2,7	2,6	20,0	90	72
12,0	18	17	21,0	95	73
12,5	18	21	22,0	96	74
13,5	36	25	23,0	94	74
14,5	42	39	24,0	98	74
15,0	53	58	25,0	98	74

В качестве мишеней были использованы образцы естественной металлической сурьмы в виде дисков диаметром 20 мм и массой около 15 г.

В (γ, n) -реакции образуется $^{121}\text{Sb}(\gamma, n)^{120m,g}\text{Sb}$ ($T_{1/2} = 5,8$ сут и 15,9 мин), фрагмент схемы распада которого приведен на рис. 1.

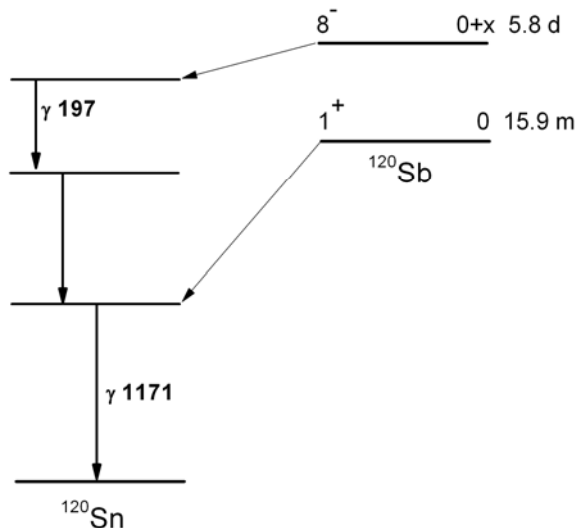
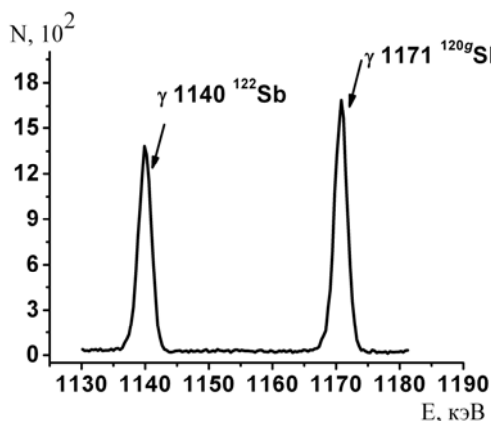


Рис. 1. Фрагмент схемы распада $^{120m,g}\text{Sb}$.

Наведенную активность ^{120g}Sb ($T_{1/2} = 15,9$ мин) измеряли γ -спектрометрами на базе германиевых детекторов, в том числе на Ge-детекторах с эффективностью регистрации 30 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3''$ и энергетическим разрешением 2 кэВ на γ -линиях ^{60}Co .



Долгоживущие радиоактивные ядра изучались на этих же спектрометрах, а в низкоэнергетической области на антикомptonовском спектрометре на базе Ge-детектора с эффективностью регистрации 20 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3''$ и энергетическим разрешением 1,8 кэВ на γ -линиях ^{60}Co .

Измерения проводились с помощью специальной программы (Netspectrum) [1], которая позволяет записывать спектры во время измерений через заданные интервалы времени.

Измерялись активности $^{120m,g}\text{Sb}$ ($J^\pi = 8^-, 1^+$) по γ -линии 1171 кэВ. Для этого, во время набора, спектры записывались через каждые 30 мин на протяжении 4 - 6 ч. С учетом периодов полураспада определялась интенсивность γ 1171 кэВ как для основного, так и для изомерного состояний. При слабой активности ^{120m}Sb из-за большого разброса в $T_{1/2}$ измерение активностей $^{120m,g}\text{Sb}$ проводилось в два этапа. Сразу после облучения измерялась активность ^{120g}Sb на обычном спектрометре, а распад ^{120m}Sb исследовался через 3-4 сут. В измерениях использовалась естественная сурьма, поэтому в (γ, n) -реакции на ^{123}Sb нарабатывалась активность ^{122g}Sb ($T_{1/2} = 2,7$ сут). Так как активности $^{120m,g}\text{Sb}$ определялись по γ 1171 кэВ, то для привязки абсолютных активностей использовался распад ^{122g}Sb , в γ -спектре которого присутствует γ -линия с энергией 1140,6 кэВ (рис. 2). Это позволило значительно уменьшить систематические погрешности.

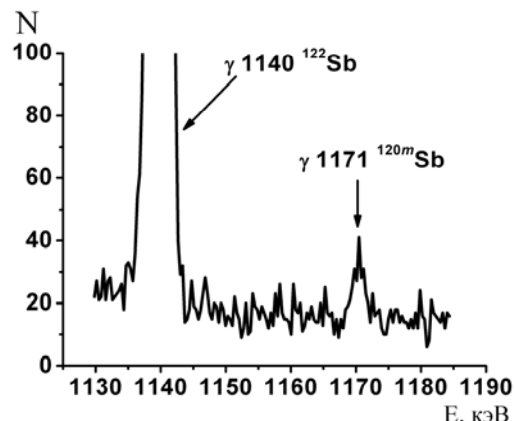


Рис. 2. Фрагмент спектра γ -квантов $^{120m,g}\text{Sb}$, измеренный сразу после облучения (а) и через 44 ч (б) при $E_{\text{пр}} = 10,0$ МэВ.

Активность ^{120m}Sb для энергий 9,6 и 9,8 МэВ была очень низкой, поэтому она определялась по γ 197 кэВ, эффективность регистрации которой в 3-4 раза выше, чем для γ 1171 кэВ. Однако в этом случае возникают проблемы учета самопоглощения. Учет самопоглощения проводился по измерению соотношения $I_\gamma(197)/I_\gamma(1171)$ кэВ при облучении тормозными γ -квантами с энергией

10,5 МэВ, так как при таких энергиях надежно наблюдались γ -линии как ^{120m}Sb , так и ^{120g}Sb .

На рис. 2 приведен фрагмент спектра. Как видно, даже в околороговой области нами надежно выделяются все активности.

Из экспериментальных γ -спектров определялись изомерные отношения выходов Y_m/Y_g по формуле [2]

$$d(E_{\gamma\max}) = \frac{\lambda_m f_g(t) \xi_g k_g(t) \alpha_g N_m}{\lambda_g f_m(t) \xi_m k_m(t) \alpha_m N_g}, \quad (1)$$

где

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

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

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; $t_{\text{обл}}, t_{\text{охл}}, t_{\text{изм}}$ – время облучения, охлаждения и измерения соответственно; $k_{m,g}(t)$ – коэффициенты учета мертвого времени; 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 $^{152,154}\text{Eu}$ и ^{133}Ba . Величины $\lambda_m, \lambda_g, k_{m,g}, \alpha_{m,g}$ были взяты из [4].

Полученные данные о изомерных отношениях выходов радиоактивных ядер с разными граничными энергиями γ -квантов приведены в таблице.

Здесь необходимо отметить, что ранее нами использовались данные из таблиц [5], где выход $^{120\text{m}}\text{Sb}$ занижен по сравнению с [4] на 22 %. Данные о калибровочных источниках в то время также были занижены. Все это привело к значительным систематическим погрешностям. Поэтому в данной работе нами были выполнены с высокой точностью измерения величины d в максимуме ГДР при граничной энергии тормозных γ -квантов 16 МэВ. Используя эти данные, была проведена переоценка ранее проведенных измерений [6]. Все это ухудшило погрешность проведения измерений. Она, как правило, не превышала 10 %.

Обсуждение

При теоретическом описании изомерных отношений выходов $^{120\text{m}}\text{Sb}$ возникают дополнительные трудности. Общепринятая процедура теоретического расчета изомерных отношений опирается на аппроксимацию плотности уровней формулой с различными модификациями $\rho(U, J) = \rho(U)\rho(J) = \rho(U) \exp[-(J+1/2)^2/2\sigma^2]$, где $\rho(U)\rho(J)$ – энергетическая и спиновая части формулы плотности уровней; σ – параметр спиновой зависимости плотности уровней, который можно вы-

числить по формуле [7]: $\sigma^2 = 0,0889 \sqrt{aU} A^{2/3}$. Здесь a – параметр плотности уровней, A – массовое число, U – тепловая энергия возбуждения. Параметр σ варьируется из условия наилучшего согласия с экспериментом [8]. К сожалению, при использовании такой процедуры для фотонейтронных реакций трудно выделить систематическое поведение этих параметров. Часто для удовлетворительного описания эксперимента используются значения параметров, которые не согласуются с их теоретическими оценками. Кроме того для эффективного использования метода изомерных отношений необходимы: во-первых, корректный учет индивидуальной структуры низколежащих дискретных уровней и особенности разрядки этих уровней; во-вторых, единый модельный подход с корректной систематикой (или базой данных) параметров плотности уровней в достаточно широком диапазоне энергий возбуждения и угловых моментов. Как уже обсуждалось в [9], даже в области максимума ГДР для $^{120\text{m}}\text{Sb}$ экспериментальное значение $d \approx 0,1$, а теоретические оценки по статистической модели показывают, что $d \leq 10^{-3}$. Естественно, что вблизи порога расчеты приводят к цифрам $10^{-8} \div 10^{-7}$. Для решения этих проблем нами проанализированы и оценены по-новому имеющиеся экспериментальные данные о структуре уровней в этой области ядер (см. ниже).

Для расчета теоретических изомерных отношений выходов нами использовался программный пакет TALYS-1.0 [10]. В программе есть несколько вариантов модельных подходов к описанию плотности уровней. Схемы дискретных уровней учитываются в автоматическом режиме. Сложность расчетов в этой области энергии обусловлена тем, что энергетический спектр тормозных γ -квантов имеет непрерывный характер с уменьшением от максимальных значений до нуля. Предполагалось, что в нашем эксперименте реализуется условие тонкой гомогенной мишени и поэтому для расчетов тормозного спектра была использована формула Шиффа [11]. Основные ошибки при таких расчетах связаны с формой спектра в высокоэнергетической области (примерно ~ 1 МэВ от граничной энергии для $E_{\text{гр}} > 10$ МэВ). Оценки показывают, что это может привести к погрешности в расчетах для $E_{\text{гр}} = 9,6$ и $9,8$ МэВ до 20 %, а для $10,0$ и $10,5$ МэВ до 10 %. Вторым источником ошибок является погрешность в определении граничной энергии тормозных γ -квантов. Как правило, она 50 - 60 кэВ. Для $E_{\text{гр}} = 9,6$ и $9,8$ МэВ это может увеличить погрешность на 5 - 10 %. Для более высоких энергий погрешность расчетов, вызванная формой тормозного спектра, не превышает 5 %.

Как уже обсуждалось, при расчете по статистической модели экспериментальные и теоретические данные в области максимума ГДР расходятся на 2-3 порядка. Еще большее расхождение наблюдается в околопороговой области. На наш взгляд, это обусловлено отсутствием экспериментальной информации о возможных высокоспиновых низколежащих состояниях в ^{120}Sb . Для оценки положения таких состояний мы проанализировали экспериментальные данные в ^{122}Sb и ^{124}Sb . Уровни этих ядер заселяются в (n, γ) -реакции, которая является наиболее полным источником информации о структуре низколежащих уровней, заселяющихся статистическими переходами. В этих ядрах выявлены в области 100 - 1000 кэВ 5^- , 6^- и 7^- -состояния. Ясно, что они являются членами протонных и нейтронных мультиплетов. Число протонов в ядрах $^{120,122,124}\text{Sb}$ не меняется, поэтому энергетическое положение 8^- -состояний с большими спинами будет привязано к $h_{11/2}$ -подоболочке. Для оценки энергий таких состояний мы использовали энергии $h_{11/2}$ -состояний в нечетных изотопах $^{119-125}\text{Te}$ и имеющиеся экспериментальные данные о высокоспиновых состояниях в нечетно-нечетных изотопах $^{120-124}\text{Sb}$. Было получено, что в ^{120}Sb должны находиться следующие высокоспиновые состояния: 270 кэВ (6^-), 330 кэВ ($7^-, 8^-$), 500 кэВ (6^-), 630 кэВ (6^-), 900 кэВ ($6^-, 7^-$), которые разряжаются на изомерный уровень 8^- и уровень 600 кэВ (5^-) с разрядкой на уровень 270(6^-). Погрешности в определении энергий этих состояний могут достигать 10 - 20 %.

Используя эту оценочную информацию о схеме уровней ^{120}Sb , мы рассчитали изомерные отношения выходов для $^{120m,g}\text{Sb}$ (см. таблицу и рис. 3).

Как видно, с учетом обсуждавшихся выше погрешностей в экспериментальных данных наблюдается согласие между экспериментальными

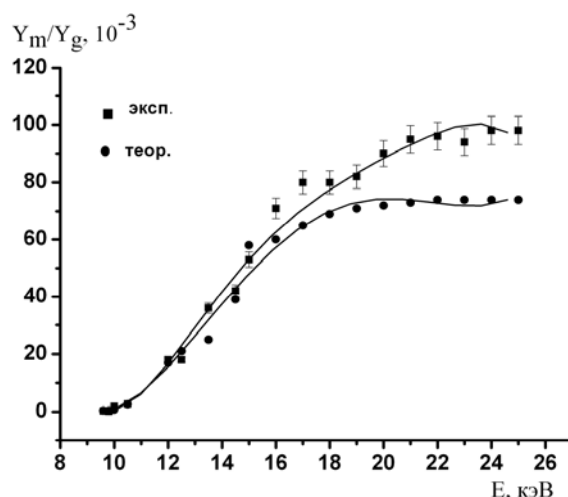


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные изомерные отношения выходов для $^{120m,g}\text{Sb}$.

и теоретическими данными как в околопороговой области, так и в области максимума ГДР.

Варьирование энергий оценочных уровней даже на 100 кэВ изменяет, кроме случая с 9,6 МэВ, величину d не более чем на 15 - 20 % в области граничных энергий тормозных γ -квантов до 12 МэВ и не более чем на 5 % в высокой области энергий, т. е. важен сам факт наличия таких состояний в низкоэнергетической области.

Здесь необходимо отметить, что теоретические расчеты проводились без варьирования входных параметров с плотностью уровней в модели Ферми-газа. Использование модели Ферми-газа со смещением увеличивает величину d на 5 - 7 %. Для расчетов брались теоретические значения как для a , так и для σ . Таким образом, мы можем сделать вывод как о наличии низкоэнергетических высокоспиновых состояний отрицательной четности в ^{120}Sb , так и о том, что процесс возбуждения ^{120}Sb в (γ, n) -реакции носит статистический характер даже при энергиях возбуждения остаточных ядер 300 - 500 кэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Зелинский А.Г. и др. Атомно-ядерные эффекты в процессе внутренней конверсии γ -лучей // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 1999. - С. 60 - 65.
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. Желтоножский В. А., Стрильчук Н. В., Панкратовна Е. С., Хоменков В. П. Изучение эффектов проникновения в l-запрещенном переходе ядра ^{121}Sb // Изв. РАН. Сер. физ. - 2002. - Т. 66, № 10. - С. 1447 - 1449.
4. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. - New York, 1978.
5. Firestone R.B., Shirley V.S., Baglin C.M. et al. The 8th edition of the Table of Isotopes // CD-ROM. - 1996. - Ver. 1.
6. Мазур В. М., Бохинюк В. С., Биган З. М., Соколюк И. В. Фотовозбуждение изомерного состояния в реакции (γ, n) на ядрах ^{81}Br и ^{121}Sb // Укр. физ. журн. - 1992. - Т. 37, № 11. - С. 1632 - 1635.
7. Малышев А.В. Плотность уровней и структура атомных ядер. - М.: Атомиздат, 1969. - 215 с.
8. Желтоножский В. А., Мазур В. М., Биган З. М. Изучение возбуждения метастабильных состояний ^{197}Pt и ^{197}Hg в (γ, n) - и $(d, 2n)$ -реакциях // ЯФ. - 2004. - Т. 67, № 5. - С. 899 - 905.
9. Бесиийко О.А., Вишневецкий И.Н., Желтонож-

- ский В.А. и др. Исследование изомерных отношений в (γ, n) - и (γ, p) -реакциях на ядрах $^{120,122m,g}\text{Sb}$ и $^{117m,g}\text{In}$ // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005. - Т. 69, № 5. - С. 663 - 666.
10. Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling // Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. - 2005. - Vol. 769. - P. 1154 - 1159.
11. Schiff L. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1951. - Vol. 83. - P. 52 - 53.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОМЕРНИХ ВІДНОШЕНЬ ВИХОДІВ В (γ, n) -РЕАКЦІЇ НА ^{121}Sb

**І. М. Вишневський, О. І. Давидовська, В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов,
П. М. Трифонов, В. М. Мазур, Д. М. Симочко**

Поміряно ізомерні відношення виходів $^{120m,g}\text{Sb}$ в реакції (γ, n) в області енергій γ -квантів 9,6 - 25 МеВ. Проведено розрахунки ізомерних відношень виходів із використанням програмного пакета TALYS-1.0. Показано статистичний характер (γ, n) -реакції як у біляпороговій області, так і в області вищих енергій.

Ключові слова: ізомерні відношення виходів, активаційний метод, гамма-спектроскопія, статистична модель.

INVESTIGATION OF ISOMERIC YIELDS RATIO IN (γ, n) -REACTION IN NUCLEUS OF ^{121}Sb

**I. M. Vyshnevskiy, O. I. Davidoskaya, V. O. Zheltonozhsky, A. M. Savrasov,
P. M. Trifonov, V. M. Mazur, D. M. Symochko**

Isomeric yield ratios in $^{120m,g}\text{Sb}$ have been measured in (γ, n) -reaction for the several end-point energies of bremsstrahlung photons from 9.6 to 25 MeV. Theoretical values of the isomeric yield ratios in $^{120m,g}\text{Sb}$ have been calculated by using code TALYS-1.0. Statistical nature of reactions with γ -rays has been shown both in the around threshold energy region and in the high energy region of the bremsstrahlung photons.

Keywords: isomeric yields ratio, activation method, γ -ray spectroscopy, statistical model.

Поступила в редакцію 08.10.09,
после доработки - 18.11.09.