

ФОТОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА ЯДРАХ ^{118}Sn И ^{121}Sb С ВЫЛЕТОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

И. Н. Вишнеvский¹, В. А. Желтоножский¹, В. М. Мазур², Е. В. Кулич³,
А. Н. Саврасов¹, Н. В. Стрильчук¹

¹Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

²Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

Измерены изомерные отношения выходов (γ, p) - и (γ, α) -реакций для $^{117m,g}\text{In}$. Для граничной энергии тормозных γ -квантов 22 МэВ получено значение $Y^m/Y^g = 1,18(9)$ и $0,23(9)$ соответственно. Показан статистический характер реакций при таких условиях. Проведен расчет изомерных отношений с использованием программного пакета TALYS.

Введение

Фотоядерные реакции являются одним из наиболее изученных каналов возбуждения ядра [1]. В этих реакциях в ядро вносится определенный угловой момент ($1\hbar$), а дисперсия моментов после испускания частиц невелика. Это открывает большие возможности для изучения свойств возбужденных состояний атомных ядер, используя измерение изомерных отношений.

Изомерные отношения (или изомерные выходы в фотоядерных реакциях) – это отношения сечений (соответственно выходов) реакций образования конечного ядра в изомерном и основном состояниях [2]. Величина изомерных отношений зависит от спина ядра мишени, вносимого углового момента, механизма протекания реакции и свойств возбужденных состояний как в дисперсной, так и в непрерывной областях спектра. Поэтому изучение изомерных отношений позволяет исследовать как механизмы реакций, так и статистические свойства ядер в области непрерывного спектра (зависимость плотности возбужденных состояний от энергии возбуждения и углового момента).

Исследование изомерных отношений в фотоядерных реакциях наиболее полно проведено в (γ, n) - и (γ, γ) -реакциях [3, 4]. Реакции (γ, p) изучены намного меньше. Данные об изомерных отношениях в (γ, α) -реакции отсутствуют. Основными причинами этого являются значительно меньшие сечения (γ, p) - и (γ, α) -каналов по сравнению с (γ, n) -реакцией. Например, при облучении ядер фотонами тормозного излучения с граничной энергией в районе гигантского дипольного резонанса (ГДР) выходы реакций (γ, p) в подбарьерной области энергий оказываются на три-четыре порядка меньше (γ, n) -реакций.

В то же время изучение изомерных отношений в реакциях с вылетом заряженных частиц представляет определенный интерес из-за их су-

щественного отличия от (γ, n) -реакции. Это отличие связано с тем, что в них возбуждаются другие состояния, часто недоступные для (γ, n) -канала. Кроме того, именно для фотоядерных реакций с вылетом заряженных частиц ожидается значительный вклад прямых и полупрямых процессов.

Целью данной работы является измерение изомерных отношений в (γ, p) - и (γ, α) -реакциях для $^{117m,g}\text{In}$. Выбор данного ядра обусловлен удобными периодами полураспада для измерения активности и в некоторой мере является продолжением нашей работы в этой области [5].

Экспериментальная методика

Изучение фотоядерных реакций проводилось с использованием тормозного излучения с граничной энергией 15 и 22 МэВ. Источником тормозного излучения являлись выведенные пучки электронов бетатрона Ужгородского государственного университета и микротрона М30 Института электронной физики НАН Украины. Облучаемые мишени помещались на бетатроне непосредственно за алюминиевым поглотителем. Облучалась сборка, состоящая из трех образцов (^{118}Sn -обогащения 98 %, естественных мишеней из сурьмы и золота). Данные о числе γ -квантов в тормозном спектре определяли из выхода реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196m,g}\text{Au}$.

В работе использовалась активационная методика, основанная на измерении спектров γ -излучения, образующихся продуктов реакции [4].

На микротроне М30 проводились облучения мишени из олова, обогащенной ^{118}Sn до 98 %. Масса мишени составляла около 1 г. Граничная энергия тормозных γ -квантов составляла 15 МэВ. Электроны “тормозились” на танталовой мишени.

Спектры γ -лучей облученных образцов измерялись на полупроводниковых спектрометрах с детекторами из сверхчистого германия. Эффек-

тивность регистрации γ -лучей составляла 30 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3'' \times 3'$ и энергетическим разрешением 2,0 кэВ на γ -линиях ^{60}Co . Измеренные спектры накапливались на персональных компьютерах и в дальнейшем обрабатывались с помощью программы <Winspectrum> [6]. Характерные спектры приведены на рис. 1, там же приведена схема распада $^{117\text{m}}\text{In}$.

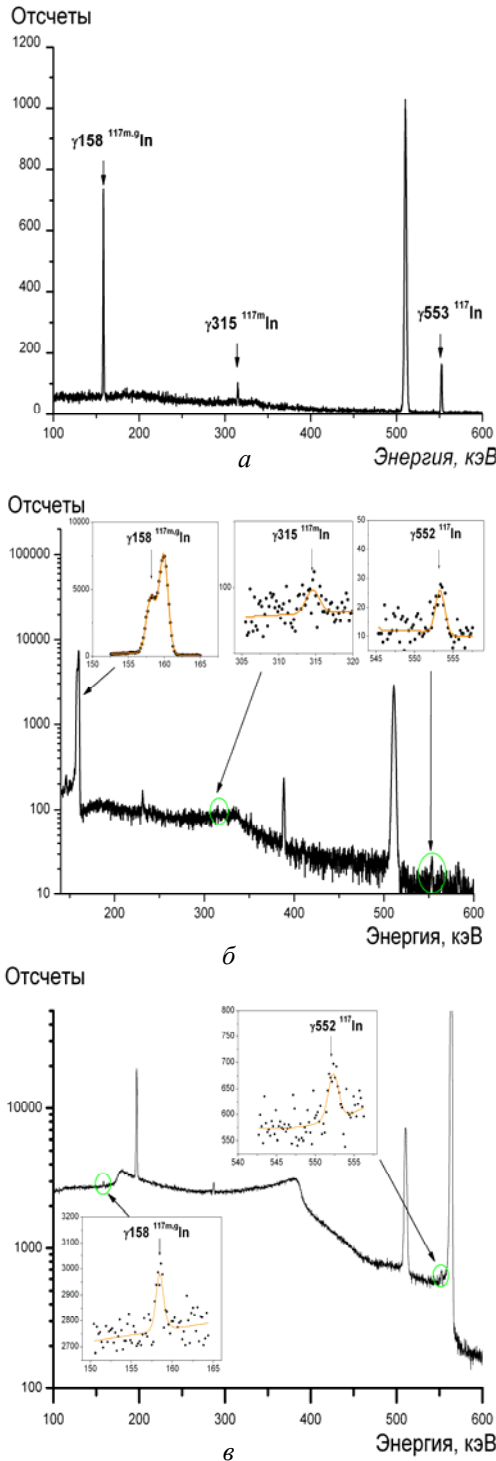


Рис. 1. Гамма-спектры (γ, p) -реакции на ^{118}Sn при $E^{\text{пр}} = 22$ МэВ (а) и $E^{\text{пр}} = 15$ МэВ (б) и γ -спектры (γ, α) -реакции при $E^{\text{пр}} = 22$ МэВ на ^{121}Sb (в).

Анализ и обработка измеренных спектров γ -излучения позволили определить интенсивности γ -линий, связанных с распадом изотопов, образующихся в фотоядерных реакциях. Из этих данных были получены выходы реакций (число ядер – продуктов реакции), что позволило определить изомерные отношения выходов этих реакций.

Для расчета изомерных отношений выходов использована формула [4]

$$d = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{\lambda_g - \lambda_m}{\left\{ c \frac{N_g}{N_m} \frac{\varphi_m}{\varphi_g} (\lambda_g - \lambda_m) - p \lambda_m \right\} \frac{\lambda_g}{\lambda_m} \frac{f_m(t)}{f_g(t)} + p \lambda_g},$$

$$f_{m,g} = \left[1 - e^{-\lambda_{m,g} t_{\text{обл}}} \right] e^{-\lambda_{m,g} t_{\text{охл}}} \left[1 - e^{-\lambda_{m,g} t_{\text{изм}}} \right],$$

$$\varphi_{m,g} = \xi_{m,g} k_{m,g} \alpha_{m,g}.$$

Здесь ξ_m, ξ_g - фотоэффективность детектора при регистрации γ -линий от распада изомерного (m) и основного (g) состояний соответственно; k_m, k_g - поправки на самопоглощение соответствующих линий; α_m, α_g - интенсивность γ -линий, ответственных за распад изомерного и основного состояний; λ_m, λ_g - постоянные распада изомерного и основного состояний; $t_{\text{обл}}, t_{\text{охл}}, t_{\text{изм}}, t_{\text{охл}}$ - время облучения, охлаждения и измерения; N_m, N_g - число импульсов в соответствующих фотопиках; c - поправка на просчеты и наложения импульсов; p - коэффициент ветвления.

Из наших данных о интенсивностях γ -переходов были получены для (γ, p) -реакции $Y^m/Y^g = 1,18(9)$ для граничной энергии фотонов 22 МэВ и $Y^m/Y^g = 6,7(9)$ для 15 МэВ. В (γ, α) -реакции $Y^m/Y^g = 0,23(9)$ для граничной энергии фотонов 22 МэВ.

Как уже обсуждалось выше, выход образовавшихся ядер нормировался на выход $^{196\text{m,g}}\text{Au}$, который исследовался в тех же условиях, что и для $^{118}\text{Sn}, ^{121}\text{Sb}$. Нами в γ -спектре наблюдались γ -линии как $^{196\text{m}}\text{Au}(T_{1/2} = 9,7$ ч), так и $^{196\text{g}}\text{Au}(T_{1/2} = 6,2$ сут). Спектр γ -лучей облучаемого образца ^{197}Au приведен на рис. 2, там же приведена кривая эффективности спектрометра. Для калибровки использовались источники $^{152,154,155}\text{Eu}$, измеренные в той же геометрии, что и основные измерения.

Из этих данных нами было определено изомерное отношение, которое оказалось равным $Y_m/Y_g = (5,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$. Оно близко к значениям, полученным в других работах. Это является указанием на то, что калибровка спектрометра не содержит значительных методических погрешностей.

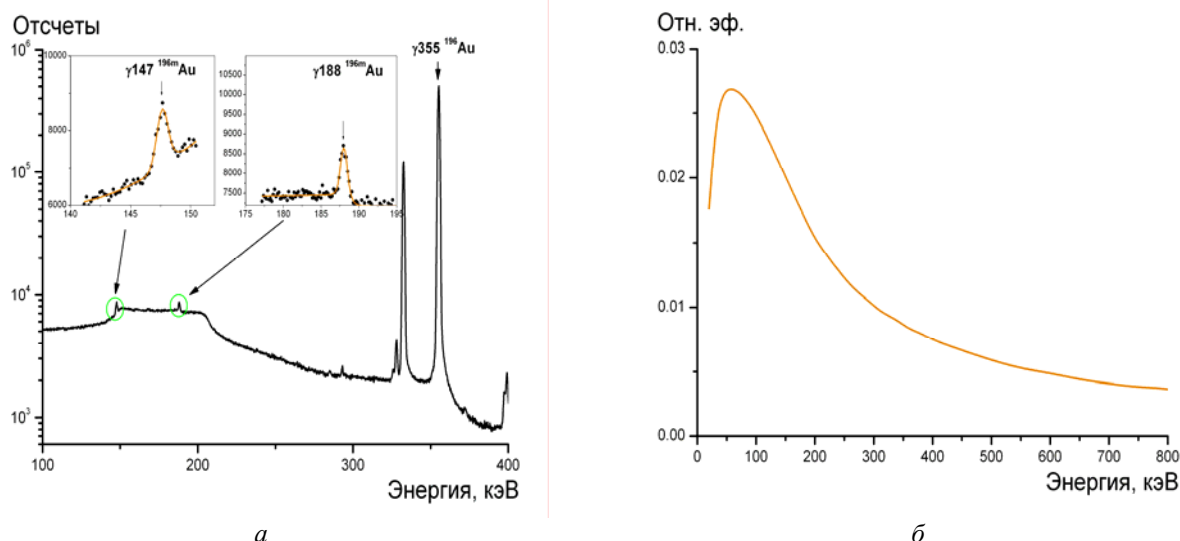


Рис. 2. Гамма-спектр (γ , n)-реакции на ^{197}Au (а) и кривая эффективности спектрометра (б).

Результаты и обсуждение

Измерение выходов (γ , p)-реакции для граничной энергии 15 МэВ выполнено с целью улучшения погрешности ранее проведенных исследований [5]. В данном случае получено значение $Y_m/Y_g = 0,15 \pm 0,03$. Оно хорошо согласуется с ранее полученным значением $Y_m/Y_g = 0,09 \pm 0,07$, однако в наших измерениях точность значительно выше. Здесь хотелось отметить соотношение в возбуждении $^{117m,g}\text{Sn}$ по сравнению с $^{117m,g}\text{In}$ в (γ , n)-реакции, которое оказалось равным $Y(^{117}\text{In})/Y(^{117m}\text{Sn}) = 2,4 \cdot 10^{-3}$. Видно, что вклад (γ , p)-канала составляет десятки доли процента. Это указывает на необходимость тщательного измерения возможных примесей в мишени.

В (γ , p)-реакции при $E^{\text{пр}} = 22\text{МэВ}$ в наших измерениях $Y_m/Y_g = 1,18 \pm 0,09$. Это соотношение значительно больше, чем при $E^{\text{пр}} = 15$ и 16 МэВ [5]. В то же время значение, полученное нами, расходится с данными из [7], где эта величина $Y_m/Y_g = 0,26 \pm 0,03$. Здесь необходимо отметить, что данные о (γ , p)-реакции для $^{117m,g}\text{In}$ очень противоречивы. В таблице нами приведены имеющиеся экспериментальные данные. Как видно, практически нет повторяющихся данных. Наши данные кажутся нам более достоверными по нескольким причинам. Во-первых, изомерное отношение нами определялось по интенсивности линий γ_{315} и γ_{552} кэВ. Статистическая погрешность определения интенсивности γ_{315} кэВ составила 5 %, а γ_{552} кэВ – 2 %. На рис. 2 приведена кривая эффективности γ -спектрометра. Как видно, энергии этих γ -переходов находятся в области плавного изменения эффективности, поэтому относительные погрешности для указанных энергий будут даже меньше эксперимен-

тальных, т.е. в любом случае они не превышают 5 %. Во-вторых, нами одновременно облучались мишени из ^{118}Sn , сурьмы и золота. Из данных о выходах $^{196m,g}\text{Au}$ мы определили $Y_m/Y_g = (5,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ для ^{196m}Au . Измерения проводились на одном и том же спектрометре и в одной геометрии, как и для ^{118}Sn . Выходы активностей определялись по γ_{147} , γ_{187} и γ_{356} кэВ. Полученные нами значения оказались близкими к результатам из [8], где $Y_m/Y_g = 6,1 \cdot 10^{-4}$. Это указывает на отсутствие значительных методических погрешностей.

И, наконец, нам хотелось бы прокомментировать возможный источник ошибок в ранее выполненных исследованиях. Из спектра γ -лучей, приведенного в [7], видно, что в спектре присутствуют γ_{160} , 313 и γ_{552} кэВ, хотя они возбуждали $^{119m,g}\text{In}$. Наличие γ_{160} кэВ может быть обусловлено реакциями $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ и $^{124}\text{Sn}(\gamma, n)^{123m,g}\text{Sn}$. Как видно из спектра на рис. 1, даже при нашем энергетическом разрешении спектрометров γ_{158} и γ_{160} кэВ наполовину разделяются. Спектрометры, использовавшиеся в ранее проведенных исследованиях, имели значительно худшее энергетическое разрешение, т.е. γ_{158} и γ_{160} кэВ были одной γ -линией. Разделение этих переходов по периодам полураспада очень сложно, так как мы имеем смесь переходов с $T_{1/2} = 116$ мин (^{117m}In), 43 мин (^{117g}In), 13,6 сут (^{117m}Sn) и 40 мин (^{123m}Sn). На наш взгляд, это является одним из основных источников расхождений. Хотя не исключено и влияние формы тормозного спектра, которая может сильно зависеть от выбранной тормозной мишени, что может сдвигать эффективную энергию возбуждения.

Из данных о возбуждении ^{117}In в (γ , α)-реакции на ^{121}Sb нами впервые определено изомерное отношение для тормозного излучения с гранич-

Изомерные отношения выходов (γ , p)-реакции при заселении высокоспиновых состояний по отношению к низкоспиновым для ядра ^{117}In

$E, \text{ МэВ}$	Y_h/Y_l	Литература	$E, \text{ МэВ}$	Y_h/Y_l	Литература
15	$0,09 \pm 0,07$	[5]	24	$0,26 \pm 0,03$	[7]
15	$0,15 \pm 0,03$	настоящая	24	$0,07 \pm 0,02$	[12]
16	$0,24 \pm 0,02$	[5]	25	$0,34 \pm 0,03$	[11]
18	$0,17 \pm 0,03$	[9]	30	$0,32 \pm 0,3$	[11]
22	$0,105 \pm 0,04$	[10]	30	$1,52 \pm 0,16$	[11]
22	$0,85 \pm 0,04$	настоящая	40	$1,18 \pm 0,12$	[11]
22	$0,38 \pm 0,04$	[11]	43	$1,09 \pm 0,01$	[12]

ной энергией 22 МэВ $Y_m/Y_g = 0,23 \pm 0,09$. Как следует из эксперимента, при испускании α -частиц происходит доминирующее заселение высокоспиновых состояний. Анализ Q-величин, спинов мишеней показывает, что при испускании протонов для ^{118}Sn минимальная кинетическая энергия, необходимая для преодоления кулоновского барьера $E_K \sim 7$ МэВ. Таким образом, с учетом кулоновского барьера максимальная энергия возбуждения остаточного ядра пучком тормозных γ -квантов от бетатрона составляет 5 МэВ. Для протонов с энергией 5 МэВ орбитальный момент может варьироваться от 0 до 2. Фактически у нас образуются состояния с полными моментами от $1/2^-$ до $7/2^-$. В спектре дискретных возбужденных состояний ^{117}In в области меньше 1 МэВ есть состояния $748(7/2^+)$ и $881(5/2^+)$ кэВ, которые полностью разряжаются в высокоспиновое состояние. С учетом этих факторов γ -переходы из области энергий 2 - 5 МэВ будут равновероятно заселять основное и изомерное состояния ^{117}In , что и наблюдается в эксперименте.

Иная ситуация наблюдается в (γ , α)-реакции. Для (γ , α)-реакции $Q_\alpha = 2$ МэВ, спин основного состояния ^{121}Sn $I^\pi = 5/2^+$. Таким образом, в области ГДР будут возбуждены состояния со спинами $I^\pi = 3/2^-, 5/2^-$ и $7/2^-$ (α -частица наиболее “упакованное” ядро и она уносит большой угловой момент, поэтому можно ожидать, что спин остаточного ядра значительно изменится в большую сторону по сравнению с (γ , p)-реакцией, где имеется одно I^- -состояние). Оценки в статистическом подходе показывают, что в этом случае $Y_m/Y_g \approx 0,2$, т.е. полностью совпадает с нашим экспериментальным значением.

Из всего вышеизложенного следует, что испарительные процессы доминируют и при вылете заряженных частиц в области выше кулоновского барьера.

Нами проведен расчет изомерных отношений с помощью программного пакета TALYS [14]. В

пакете пять вариантов модельных подходов к описанию плотности уровней (выбор их задается входным параметром *ldmodel*). 50 нижних дискретных уровней учитываются в автоматическом режиме, их характеристики и схемы распада берутся из библиотеки RIPL-2. Расчеты изомерных отношений проводились при следующих энергиях γ -квантов:

для $E^\gamma = 15$ МэВ, начиная с порога $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)$ -реакции и до 15 МэВ с шагом 1 МэВ;

для $E^\gamma = 22$ МэВ, начиная с порога $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$ -, $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)$ - и $^{121}\text{Sb}(\gamma, \alpha)$ -реакций и до 22 МэВ с шагом 1 МэВ.

Результаты расчетов позволили выделить следующие тенденции:

для (γ , p)-реакции Y^m/Y^g изменяется от 5,48 при $E_\gamma = 14$ МэВ до 2 при $E_\gamma = 22$ МэВ, уменьшаясь с ростом энергии. Эта же тенденция наблюдается и в эксперименте, однако теоретическое значение при $E_\gamma = 22$ МэВ завышено примерно в два раза;

для (γ , α)-реакции Y^m/Y^g изменяется от 0,91 при $E_\gamma = 14$ МэВ до 0,4 при $E_\gamma = 22$ МэВ, уменьшаясь с ростом энергии. Здесь теоретическое значение для $E_\gamma = 22$ МэВ также завышено в два раза;

для $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$ $^{196m,g}\text{Au}$ -реакции $Y^m/Y^g = 2,3 \cdot 10^{-4}$ при $E_\gamma = 22$ МэВ, т.е. занижено примерно в два раза.

С учетом того, что спин изомера в ^{117}In низкий ($1/2^-$), а в ^{196}Au – высокий (12^-), из наших данных следует, что модельная плотность низкоспиновых состояний завышена примерно в два раза как для ядер с $A \sim 120$, так и для $A = 196$ в области возбуждения остаточного ядра $E \sim 10$ МэВ.

На наш взгляд, это указывает на наличие значительного вклада прямых реакций. Мы же во всех случаях для описания плотности уровней использовали модель Ферми-газа со смещенной энергией [15]. При этом вклад предравновесной компоненты в общее сечение реакций не превышал 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишиханов Б.С., Капитонов И.М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. - М.: Изд-во МГУ, 1979. - 215 с.
2. *Huizenga J.R., Vandebosch R.* Interpretation of isomeric cross-section ratios for (n, γ) and (γ , n) reactions // *Phys. Rev.* - 1960. - Vol. 120, No. 4. - P. 1305 - 1312.
3. *Гангрский Ю.П., Мазур В.М.* Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний // *ЭЧАЯ.* - 2002. - Т. 33, вып. 3. - С. 158 - 200.
4. *Ditrich S., Bertan B.* Atlas of photoneutron cross sections obtained with monoenergetic photons // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* - 1988. - Vol. 38, No. 2. - P. 199 - 338.
5. *Беспийко О.А., Вишневецкий И.Н., Желтоножский 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.
6. *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.
7. *Гангрский Ю.П., Зузан П., Колесников Н.Н. и др.* Изомерные отношения в реакциях (γ , p) при энергиях гигантского дипольного резонанса // *Ядерная физика.* - 1999. - Т. 62, № 10. - С. 1733 - 1739.
8. *Thiep T.D., An T.T., Vinh N.T. et al.* Experimental study and theoretical consideration of the isomeric ratio in photonuclear reaction $^{197}\text{Au}(\gamma, n) ^{196m,g}\text{Au}$ in the giant dipole resonance region // *Письма в ЭЧАЯ.* - 2006. - Т. 3, № 4. - С. 7 - 16.
9. *Kolev D., Ernst J.* The role of angular-momentum removal in photonuclear reactions as deduced from the isomeric ratios for $^{120m,g}\text{Sb}$ and $^{117m,g}\text{In}$ // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* - 1998. - Vol. 24, No. 3. - P. 589 - 599.
10. *Давыдов М.Г., Магера В.Г., Трухов А.В. и др.* Изомерные отношения выходов фотоядерных реакций для гамма-активационного анализа // *Атомная энергия.* - 1985. - Т. 58, вып. 1. - С. 47 - 50.
11. *Палванов С.Р., Рагжабов О.* Изомерные отношения выходов фотоядерных реакций при $E_{\gamma\text{max}}$ 25 и 30 МэВ // *Атомная энергия.* - 1999. - Т. 87, вып. 1. - С. 75 - 78.
12. *Kolev D., Dobрева E., Nenon N. et al.* A convenient method for experimental determination of yields and isomeric ratios in photonuclear reactions measured by the activation technique // *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A.* - 1995. - Vol. 356, No. 2 - 3. - P. 390 - 396.
13. *Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карпетян Г.С.* Анализ изомерных отношений в (γ , n)- и (γ , p)-реакциях в области энергий гигантского резонанса // *Ядерная физика.* - 2002. - Т. 65, № 2. - С. 390 - 395.
14. *Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C.* TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling // *Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology.* - 2005. - Vol. 769. - P. 1154 - 1159.
15. *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. - Vol. 217, No. 2. - P. 269 - 298.

ФОТОЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ НА ЯДРАХ ^{118}Sn І ^{121}Sb З ВИЛЬОТОМ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

**І. М. Вишневецкий, В. О. Желтоножский, В. М. Мазур, С. В. Кулич,
А. М. Саврасов, М. В. Стрільчук**

Визначено ізомерні відношення виходів (γ , p)- і (γ , α)-реакцій для $^{117m,g}\text{In}$. Для граничної енергії гальмівних γ -квантів 22 МеВ отримано значення $Y_m/Y_g = 1,18(9)$ і $0,23(9)$ відповідно. Показано статистичний характер реакцій за таких умов. Проведено розрахунок ізомерних відношень із використанням програмного пакета TALYS.

**PHOTONUCLEAR REACTIONS ON NUCLEI OF ^{118}Sn AND ^{121}Sb
WITH ESCAPING OF CHARGED PARTICLES**

**I. M. Vyshnevskiy, V. A. Zheltonozhskiy, V. M. Mazur, E. V. Kulich,
A. N. Savrasov, N. V. Strilchuk**

The isomeric yield ratios of (γ , p)- and (γ , α)-reactions on $^{117m,g}\text{In}$ have been measured. It has been found that $Y_m/Y_g = 1,18(9)$ and $0,23(9)$, respectively, for the end-point of the bremsstrahlung photons equal to 22 MeV. It has been shown that reactions have statistical character in such conditions. The calculation of isomeric ratios has been done using a code TALYS.

Поступила в редакцию 05.12.07,
после доработки – 27.12.07.