

УДК 539.144.7

ИЗОМЕРНЫЕ ОТНОШЕНИЯ В РЕАКЦИЯХ $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ И $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ ПРИ $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ

**О. А. Бесшейко¹, А. Н. Водин², Л. А. Голинка-Бесшейко¹, А. Н. Довбня², И. М. Каденко¹,
О. А. Киверник¹, В. А. Кушнір³, В. В. Митроченко³, С. Н. Олейник², А.В. Тертичный⁴,
Г. Е. Туллер², И.А. Шаповал⁴**

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, 03022, Киев, ул. Глушкова, 6

²Институт физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ ХФТИ, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

e-mail: vodin@kipt.kharkov.ua

³НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

⁴Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Поступила в редакцию 12 января 2010 г.

Приведены результаты измерений и расчетов изомерных отношений для ядра $^{87\text{m.g}}\text{Y}$, образующегося в реакциях $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ и $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$. Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-40 ННЦ ХФТИ при $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ. Использовалась методика измерения наведенной γ -активности образцов HPGe-детектором. Полученные результаты сравнивались с расчетами в коде TALYS 1.0 с использованием статистического и предравновесного модельных подходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изомерные отношения, фотоядерные реакции, нейтроны, цирконий, TALYS

ISOMER RATIOS IN REACTIONS $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ AND $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ AT $E_{\gamma\text{max}} = 84$ MeV

**O.A. Bezshyyko¹, A.N. Vodin², L.O. Golinka-Bezshyyko¹, A.N. Dovbnya², I.M. Kadenko¹, O.A. Kivernik¹,
V.A. Kushnir³, V.V. Mitrochenko³, S.N. Olejnik², I.A. Shapoval⁴, A.V. Tertichnyi⁴, G.E. Tuller²**

¹Taras Shevchenko National University of Kiev, b.11, 6, Glushkova st. Kiev, 03022

²Institute of High-energy Physics and Nuclear Physics NSC KIPT, 1, Academichna st., Kharkiv, 61108

³Research and Development Complex "Accelerator" of NSC KIPT, 1, Academichna st., Kharkiv, 61108

⁴V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody sq, Kharkiv, 61077

The results of measurements and calculations of isomeric ratios for the $^{87\text{m.g}}\text{Y}$ nuclei, as products of the $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ and $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ photonuclear reactions, are presented in this work. The samples were irradiated by using bremsstrahlung of the electron linear accelerator LEA-40 with endpoint energy $E_{\gamma\text{max}} = 84$ MeV. The method of the induced activity measurement by a HPGe-detector was used to obtain experimental isomer ratios. The results were compared with calculations in the TALYS 1.0 code using statistical and pre-equilibrium modeling approaches.

KEY WORDS: isomer ratios, photonuclear reactions, neutrons, zirconium, TALYS

ИЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ В РЕАКЦІЯХ $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ І $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ ПРИ $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МеВ

**О. О. Безшійко¹, О. М. Водін², Л. О. Голинка-Бесшейко¹, А. М. Довбня², І. М. Каденко¹, О. А. Ківерник¹,
В. А. Кушнір³, В. В. Мітроченко³, С. М. Олійник², А.В. Тертичний⁴, Г. Е. Туллер², І.А. Шаповал⁴**

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03022, Київ, вул. Глушкова, 6,

²Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики ННЦ ХФТИ, 61108, Харків, вул. Академічна, 1

³НДК «Прискорювач» ННЦ ХФТИ, 61108, Харків, вул. Академічна, 1

⁴Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61077, Харків, пл. Свободи, 4

Наведено результати вимірів і розрахунків ізомерних відношень для ядра $^{87\text{m.g}}\text{Y}$, що утворюється в реакціях $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ і $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$. Опромінення зразків проводилося на лінійному прискорювачі електронів ЛПЕ-40 ННЦ ХФТИ при $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МеВ. Використовувалася методика виміру наведеної γ -активності зразків HPGe-детектором. Одержані результати порівнюються з розрахунками в коді TALYS 1.0 з використанням статистичного та передрівноважних модельних підходів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ізомерні відношення, фотоядерні реакції, нейтрони, цирконій, TALYS

За последние годы произошел значительный прогресс в развитии теоретических подходов, претендующих на описание свойств фотоядерных реакций в области энергий γ -квантов 30-100 МэВ. Так, например, получила заметное развитие квази-дейтронная модель [1] и предложен целый ряд подходов к описанию протекания предравновесных процессов и множественного вылета частиц [2, 3]. Кроме того, проблема создания новых источников энергии на базе подкритических сборок, управляемых ускорителями и существенный прогресс в разработке высокоинтенсивных источников квази-моноэнергетических γ -квантов [4] стимулирует интерес к проведению подобных исследований. К тому же малое количество детальных экспериментальных данных по взаимодействию γ -квантов с ядрами в области энергий (30-100) МэВ сильно ограничивает возможности для тестирования и усовершенствования разработанных модельных подходов.

Настоящая работа выполнена с целью получить экспериментальные данные и рассчитать изомерные отношения для ядра $^{87\text{m.g}}\text{Y}$, образующегося в реакциях $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ и $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87\text{m.g}}\text{Y}$ при максимальной энергии тормозных γ -квантов $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения изомерного отношения применялась методика измерения наведенной активности образцов. Облучение образцов проводилось γ -квантами тормозного спектра электронов при максимальной энергии 84 МэВ. В качестве источника электронов использовался линейный ускоритель ЛУЭ-40 ННЦ ХФТИ [5]. Нестабильность потока налетающих электронов не превышала 2%.

На выходе ускорителя электронов был установлен танталовый конвертор толщиной 1,05 мм, за которым находился алюминиевый поглотитель электронов с размерами $\varnothing 90 \times 100$ мм. Расстояние от Та-конвертора до Al-поглотителя составило 20 мм, до исследуемого образца - 200 мм.

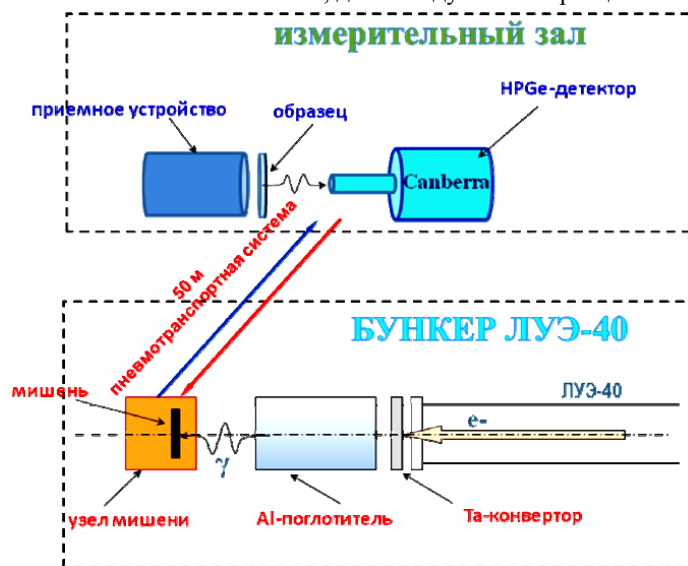


Рис.1. Схема эксперимента

Для облучения использовались образцы металлического циркония в виде порошка массой 206,36 мг, обогащенные по изотопу ^{90}Zr и оксида циркония массой 463,9 мг, обогащенные по изотопу ^{91}Zr . Время облучения образцов под пучком тормозного излучения составляло 720 с и 480 с, соответственно для ^{90}Zr и ^{91}Zr . После сеанса облучения образец посредством пневмотранспортной системы доставлялся в измерительный зал (~8 с), в котором проводились измерения γ -спектров наведенной активности продуктов фотоядерных реакций.

Измерения наведенной γ -активности образцов проводились с помощью полупроводникового спектрометра на базе HPGe-детектора с разрешением 1,9 кэВ для γ -линии $E_\gamma = 1332$ кэВ ^{60}Co . Выдержка образца от момента облучения до набора γ -спектра

составляла от 8 с до нескольких суток. Через разные интервалы времени проводился набор серии последовательных γ -спектров. Временные интервалы измерений выбирались с учетом схем γ -распада изомерной пары, которые брались из базы данных ENSDF [6]. Набор γ -спектров проводился на разных расстояниях образец - детектор с целью оптимизации времени измерений и входной загрузки спектрометра.

Абсолютная калибровка спектрометра по эффективности проводилась с помощью стандартного набора монохроматических источников ОСГИ-II для всех расстояний образец - детектор, при которых проводился набор γ -спектров. Отклонение калибровочных значений эффективности от линейной зависимости в дважды логарифмическом масштабе не превышало 2%.

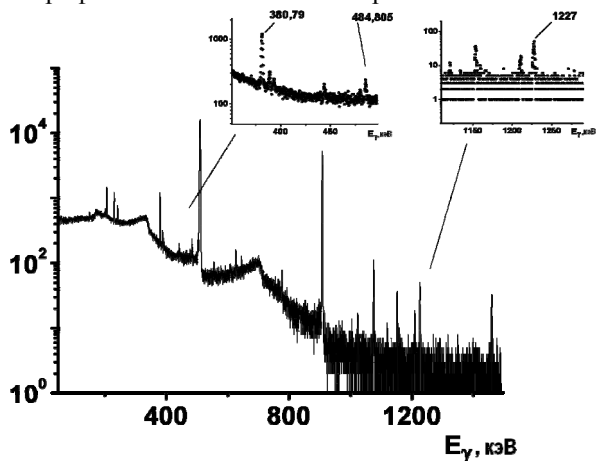


Рис. 2. Гамма-спектр продуктов активации после облучения образца ^{90}Zr γ -квантами тормозного спектра с $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ. Время выдержки - 4770 с.

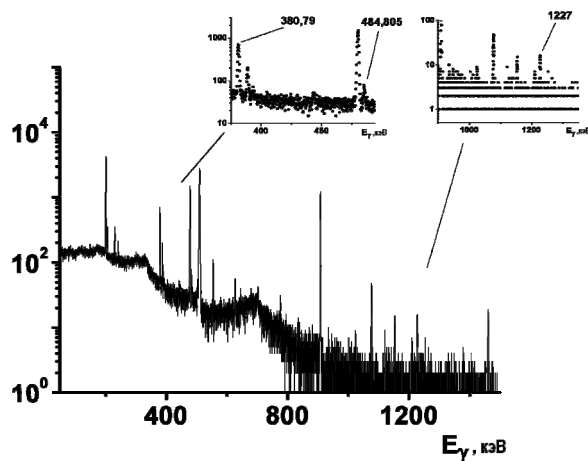


Рис. 3. Гамма-спектр продуктов активации после облучения образца ^{91}Zr γ -квантами тормозного спектра с $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ. Время выдержки - 8564 с.

Примеры γ -спектров и значения энергий аналитических γ -линий, которые использовались для расчета изомерных отношений приведены на рис. 2 и 3, соответственно.

ТЕХНИКА РАСЧЕТА

Изучая отношение заселения изомерного уровня к заселению основного состояния ядра при разрядке возбужденных состояний путем излучения γ -квантов можно оценивать средние величины спинов начальных

возбужденных состояний ядер-продуктов реакций, а также исследовать механизмы разрядки возбужденных состояний ядер [7, 8]. Для моноэнергетического потока налетающих частиц изомерное отношение r определяется как отношение сечений $\sigma_m(E)/\sigma_g(E)$, где $\sigma_{g(m)}$ - сечение образования ядра в основном и изомерном состояниях. Часто изомерное отношение определяется как $\sigma_h(E)/\sigma_l(E)$, т.е. как отношение сечений состояний с большим $\sigma_h(E)$ и меньшим $\sigma_l(E)$ спинами. В случаях, когда спектры налетающих частиц существенно отличается от моноэнергетического (особенно в экспериментах с тормозными γ -квантами), используют изомерное отношение d выходов основного и изомерного состояний при максимальной энергии тормозного излучения: $d(E_{\gamma\max}) = Y_m(E)/Y_g(E)$, при этом выход реакции определяется по следующей формуле:

$$Y_{m,g} = N_t \int_{E_{por}^{m,g}}^{E_{\max}} \sigma_{m,g}(E) W(E, E_{\max}) dE, \quad (1)$$

где N_t - количество ядер мишени, $Y_{m,g}$ - выход реакции с образованием конечного ядра в метастабильном (m) или основном (g) состоянии, E_{\max} - максимальная энергия налетающих частиц, $W(E, E_{\max})$ - энергетический спектр налетающих частиц, $\sigma_i(E)$ ($i = g, m$) - сечение реакции с образованием конечного ядра в основном (метастабильном) состоянии для энергии E налетающих частиц, E_{por}^i ($i = g, m$) - порог реакции с образованием конечного ядра в основном (метастабильном) состоянии.

В случае постоянного во времени потока γ -квантов и для простой схемы разрядки изомерного уровня путем прямого перехода на основной уровень и β -распада, а основного уровня - путем только β -распада, с учетом дополнительного вклада ядра-предшественника в заселение изомерного и основного уровня, при условии, что ядро-предшественник само является изомером можно записать систему дифференциальных уравнений [9, 10, 11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_{Am}}{dt} = Y_{Am} - \lambda_{Am} \cdot N_{Am} \\ \frac{dN_{Ag}}{dt} = Y_{Ag} - \lambda_{Ag} \cdot N_{Ag} + p_{AmAg} \cdot \lambda_{Am} \cdot N_{Am} \\ \frac{dN_{Bm}}{dt} = Y_{Bm} - \lambda_{Bm} \cdot N_{Bm} + p_{AmBm} \cdot \lambda_{Am} \cdot N_{Am} + p_{AgBm} \cdot \lambda_{Ag} \cdot N_{Ag} \\ \frac{dN_{Bg}}{dt} = Y_{Bg} - \lambda_{Bg} \cdot N_{Bg} + p_{AmBg} \cdot \lambda_{Am} \cdot N_{Am} + p_{AgBg} \cdot \lambda_{Ag} \cdot N_{Ag} + p_{BmBg} \cdot \lambda_{Bm} \cdot N_{Bm} \end{array} \right., \quad (2)$$

где N_{Ai} , $i = g, m$ - заселенность основного (метастабильного) уровня ядра-предшественника, Y_{Ai} - выход реакции с образованием этого ядра, λ_{Am} , λ_{Ag} - постоянные распада основного и изомерного состояния ядра-предшественника, N_{Bi} - заселенность основного (метастабильного) уровня исследуемого ядра, Y_{Bi} - выход реакции с образованием исследуемого ядра, λ_{Bm} , λ_{Bg} - постоянные распада основного и изомерного состояния исследуемого ядра, p_{ij} ($i = A, B$; $j = g, m$) - коэффициент ветвления (отношение вероятности перехода на уровень к полной вероятности распада этого уровня).

Поскольку изомерное отношение выходов $d = Y_m/Y_l$ для исследуемых ядер бралось, как $d = Y_m/Y_g$, то окончательно имеем $Y_m/Y_l = Y_m/Y_g$, где величины Y_m и Y_g (в нашем случае Y_{Bm} и Y_{Bg}) находились при решении системы (2). Эффекты каскадного суммирования были пренебрежимо малы за счет достаточно больших расстояний образец-детектор (не менее 100 мм) при наборе аппаратурных спектров и их вкладом можно пренебречь, в то же время самопоглощение γ -квантов в образце учитывалось в каждом рассматриваемом случае. При этом эффективность регистрации γ -квантов учитывалась (с погрешностью $< 2\%$) в каждом измерении аппаратурного γ -спектра после соответствующего времени выдержки t_2 при изменении расстояния образец-детектор. Кроме того, учитывались временные факторы-поправки на время облучения, время переноса мишени к детектору и время измерения спектров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения изомерного отношения выходов использовались γ -линия с $E_\gamma = 380,79$ кэВ, характерная для метастабильного состояния и γ -линия с $E_\gamma = 484,805$ кэВ, характерная для основного уровня ядра $^{87m,g}\text{Y}$. Период полураспада основного состояния ядра $^{87m,g}\text{Y}$ составляет 13,37 ч, метастабильного – 79,8 ч, соответственно. Важно учесть вклад в заселение уровней исследуемого ядра от β -распада $^{87m,g}\text{Zr}$, являющегося продуктом реакций $^{90}\text{Zr}(\gamma, 3n)^{87m,g}\text{Zr}$ и $^{91}\text{Zr}(\gamma, 4n)^{87m,g}\text{Zr}$, которые также протекают при максимальной энергии $E_{\gamma\max} = 84$ МэВ. (см. рис. 4).

Для учета доли от распада $^{87m,g}\text{Zr}$ в заселение уровней исследуемого ядра использовалась γ -линия с $E_\gamma = 1,227$ МэВ, характерная для основного состояния этого ядра. Разрядка же изомерного уровня ядра $^{87m,g}\text{Zr}$ происходила путем прямого перехода на основной уровень этого ядра. Изомерное отношение определялось, как $d = Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$. Экспериментальные величины изомерных отношений выходов $d = Y_{9/2^+}(E_\gamma)/Y_{1/2^-}(E_\gamma)$ для ядра $^{87m,g}\text{Y}$, образующегося в реакциях $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87m,g}\text{Y}$ и $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87m,g}\text{Y}$ при граничной энергии $E_{\gamma\text{max}} = 84$ МэВ представлены на рис. 5.

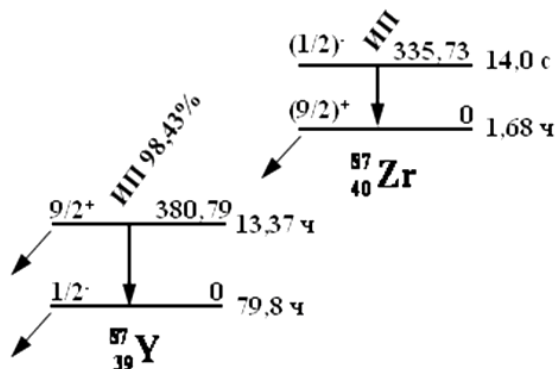


Рис. 4. Фрагмент изобарной цепочки, иллюстрирующий вклад в заселение уровней ядра $^{87m,g}\text{Y}$ от распада $^{87m,g}\text{Zr}$. ИП – изомерный переход.

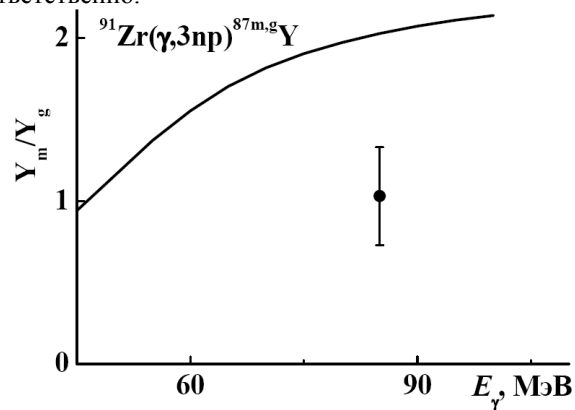
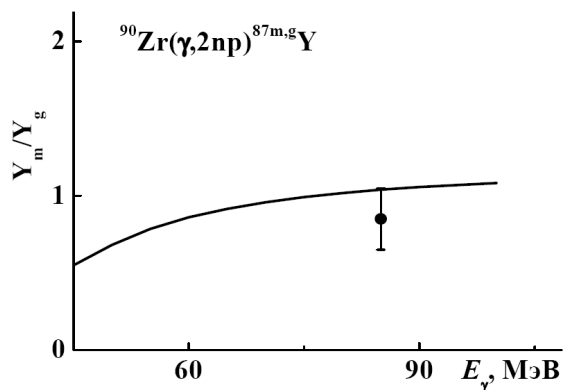


Рис. 5. Экспериментальные и теоретические значения Y_m/Y_g для ядра $^{87m,g}\text{Y}$, образующегося в реакциях $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87m,g}\text{Y}$ и $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87m,g}\text{Y}$.

Таблица 1. Изомерные отношения выходов для ядра $^{87m,g}\text{Y}$ в фотоядерных реакциях на $^{90,91}\text{Zr}$

Реакция	I_0^π	I_m^π	I_g^π	$d^{\text{эсп.}}$	$d^{\text{теор.}}$
$^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87m,g}\text{Y}$	0^+	$9/2^+$	$1/2^-$	$0,85 \pm 0,20$	1,05
$^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87m,g}\text{Y}$	$5/2^+$	$9/2^+$	$1/2^-$	$1,03 \pm 0,30$	2,08

При расчете изомерных отношений использовался код TALYS 1.0, в котором учитывались статистический и предравновесный модельные подходы. Для описания плотности уровней использовалась комбинированная модель Ферми-газа и постоянной температуры [15].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования на ЛУЭ-40 ННЦ ХФТИ показали, что результаты расчета изомерного отношения для $^{87m,g}\text{Y}$, образующегося в реакции $^{90}\text{Zr}(\gamma, 2\text{np})^{87m,g}\text{Y}$ хорошо согласуются с величиной изомерного отношения, полученной из эксперимента. Для $^{87m,g}\text{Y}$, образующегося в реакции $^{91}\text{Zr}(\gamma, 3\text{np})^{87m,g}\text{Y}$ расчет в коде TALYS 1.0 дает примерно в два раза завышенную величину изомерного отношения выходов по отношению к экспериментальному значению. Для объяснения этого факта необходимо получить дополнительную экспериментальную информацию об изомерных отношениях выходов в более широком диапазоне энергий тормозных γ -квантов.

Работа частично поддержана грантом НАН Украины ЯМРТ Х-9-242.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chadwick M.B., Oblozinsky P., Hodgson P.E. et al. Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption // Phys. Rev. C. - 1991. - Vol. 44. - P. 814.
2. Herman M., Oblozinsky P., Capote R. et al. // Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technology "ND2004". Sept. 26-Oct. 1, 2004. Santa Fe (USA). N.-Y., 2005; AIP Conf. Proc. - 2005. - Vol. 769. - P. 1184. <http://www.nndc.bnl.gov/empire219/manual.pdf>
3. Talou P., Kawano T., Young P.G. et al. The McGNASH nuclear reaction code and its use for gas production cross-section calculations // Nucl. Instrum. Meth. A. - 2006. - Vol. 562. - P. 823.
4. <http://higs.tunl.duke.edu>.
5. Довбня А.Н., Айзацкий Н.И., Борискин В.Н. и др. Параметры пучка линейного ускорителя электронов 10-см диапазона на энергию 30 ÷ 100 МэВ // ВАНТ Сер.: Ядерно-физические исследования. - 2006. - №2 (46). - С. 11.
6. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
7. Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. -М.: МГУ, 1979. - 215 с.
8. Гангрский Ю.П., Тончев А.П., Балабанов Н.П. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях // ЭЧАЯ. - 1996. - Т. 27, № 4. - С. 1043.
9. Vänskä R., Rieppo R. The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique // Nucl. Instr. and Meth. - 1981. - Vol. 179. - P. 525.
10. Kolev D., Dobрева E., Nenov N., Todorov V. A convenient method for experimental determination of yields and isomeric ratios in photonuclear reactions measured by the activation technique // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. - 1995. - Vol. 356. - P. 390.
11. Бохинюк В.С., Мазур В.М., Саболчий М.Т. и др. // УФЖ. - 1998. - Т. 43. - С. 907.
12. <http://www.talys.eu>.
13. Schiff L.I. Energy-Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1951. - Vol. 83. - P. 252.
14. Недорезов В.Г., Ранюк Ю.Н. Фотоделение ядер за гигантским резонансом. - К.: Наук. Думка, 2008. - 190 с.
15. Gilbert. A. and Cameron A.G. A Composite nuclear-level density formula with shell corrections // Can. J. Phys. - 1965. - Vol. 43. - P. 1446.

© О. А. Бешейко, А. Н. Водин, Л. А. Голинка-Бешейко, А. Н. Довбня, И. М. Каденко, О. А. Киверник, В. А. Кушнир, В. В. Митроченко, С. Н. Олейник, А.В. Тертичный, Г. Е. Туллер, И.А. Шаповал, 2010