

МОНИТОРИРОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПУЧКОВ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕАКЦИИ $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$

*Ю.Н. Ранюк,¹ О.С. Шевченко¹, В.Н. Гостищев², И.И. Шаповал², В.И. Нога¹,
А.А. Немашкало¹, Марио Тешейра², Э.Л.Купленников¹*

¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт»;

*²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
Институт высоких технологий, Физико-технический факультет*

На электростатическом ускорителе на 3.0 МВ ELIAS Харьковского физико-технического института установлено устройство для проведения экспериментов по исследованию образования изомеров с помощью тормозного излучения. Приведено детальное описание этого устройства. Показана возможность использования $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ -реакции для абсолютной калибровки тормозного спектра в интервале энергии фотонов до 3.0 МэВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается большой интерес к исследованию резонансного поглощения фотонов ядрами при энергии $E_\gamma < 4$ МэВ. Значительное место в этих исследованиях занимают работы по изучению закономерностей возбуждения и де-возбуждения ядерных изомеров, – это исследование коллективных дипольных переходов в ядрах (так называемая «ножничная мода») [1], изучение проблем

создания γ -лазера [2] и ядерных квантовых генераторов [3], сюда же примыкают вопросы синтеза изотопов во Вселенной [4].

Проведение экспериментов в указанной области энергий имеет свои особенности: малые сечения взаимодействия фотонов с ядрами (на несколько порядков ниже, чем в «гигантском» резонансе) и резонансный характер поглощения фотонов. Эти особенности обуславливают привлекательность исследований ввиду их большой информативности и возможности надежной интерпретации получаемых данных, но они же объясняют трудность в их проведении.

С целью увеличения выхода реакций пучки фотонов в этой области энергий формируются путем торможения электронов в толстых радиаторах, поэтому обработка получаемых результатов требует применения методов математического моделирования.

При измерении сечений фотоядерных реакций или определении активационных доз часто используется относительный метод измерения. Здесь имеется в виду распространенная практика использования мониторинговых реакций, сечения которых хорошо известны из других экспериментов и они используются как стандарты. В этом случае объектом измерения становится отношение выходов исследуемого ядра и стандарта, облучаемых одновременно в одной и той же геометрии. Тем самым устраняются систематические неопределенности, вносимые при из-

мерении дозы γ -излучения в абсолютном методе и упрощается сам процесс измерения [5].

Выбор мониторинговой реакции определяется надежностью имеющихся экспериментальных данных о ней, удобством и доступностью материала, из которого можно приготовить образцы, временем жизни образовавшегося радиоактивного ядра. В экспериментах с фотонами обычно используются реакции $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$, $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$, $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$, $^{27}\text{Al}(\gamma, ^3\text{He})^{24}\text{Na}$ и другие [6, 7].

При энергиях фотонов ниже порога расщепления ядра использование мониторинговых реакций теряет свою простоту и наглядность. Цель настоящей работы – отработка методики использования мониторинговых реакций на низкоэнергетических пучках электронов. Здесь наиболее употребительной является реакция $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ – возбуждение изомерного состояния ядра индия.

2. $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ РЕАКЦИЯ

Впервые возбуждение изомерных состояний при неупругом рассеянии γ -квантов ядрами наблюдали Б. Понтекорво и А. Лазард в 1938 году [8]. В довоенные годы эти исследования получили развитие в работах М. Корсунского с сотрудниками [9, 10], которые были выполнены в области энергий 0.5...1.5 МэВ в Украинском физико-техническом институте. Был получен изомер $^{115\text{m}}\text{In}$ [9] и определен его активационный уровень (1079 ± 50) КэВ.

Ядро ^{115}In является почти идеальным для использования его в фотоактивационной методике для мониторингования пучков электронов или фотонов. Его первый уровень, являющийся изомерным состоянием с энергией 336 КэВ, имеет спин $J^\pi = 1/2^-$ и период полураспада $T^{1/2} = 4,49$ ч, в то время как основное состояние ($J^\pi = 9/2^+$) практически стабильно с периодом полураспада $4,41 \times 10^{14}$ лет. Изомер распадается в основное состояние с вероятностью 95%, однако коэффициент ветвления составляет 45.8% [11-13] из-за большого коэффициента конверсии (см. упрощенную схему распада на рис. 1 [14]).

Подробные измерения фотовыхода изомера ^{115m}In в интервале энергий электронов 0.9...2.9 МэВ были выполнены Бузом и Броунсоном [15], Нейманом-Козелом и др. [16].

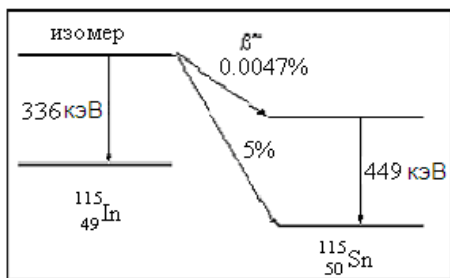


Рис. 1. Схема распада ^{115m}In

Одной из последних работ, посвященных изучению закономерностей фотовозбуждения изомера ^{115m}In , является работа [17], выполненная на Штудгартском ускорителе DYNAMITRON.

3. СТЕНД ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЙ

С запуском в Национальном научном центре „Харьковский физико-технический институт” электростатического ускорителя электронов ELIAS на энергию 3.0 МэВ появилась уникальная возможность для проведения опытов по изучению образования и превращения изомеров. Такие качества пучка ускорителя как высокая интенсивность тока (до 500 мкА), моноэнергетичность, стабильность и возможность плавного изменения энергии пучка в интервале 0.5...3.2 МэВ делают проведение подобных опытов весьма эффективным.

Диаметр пучка электронов равен 2 мм. Его энергия измеряется роторным вольтметром, который калибровался с помощью реакции фоторасщепления бериллия. Неопределенность калибровки составляла 50 кэВ [18].

Настоящий эксперимент проводился с помощью активационной методики. Схема стенда для облучения образцов (мишеней) показана на рис.2.



Рис. 2. Схема стенда для облучения образцов

Стенд состоит из выходного вакуумного окна электропровода, представляющего собой фольгу из нержавеющей стали толщиной 80 мкм, за которой следует водяной промежуток 1,7 мм, затем танталовый радиатор 0,5 мм, снова слой воды 1,7 мм и

фольга из нержавеющей стали 80 мкм, за которой непосредственно располагаются активируемые мишени. Ускоритель оборудован системой для измерения количества электронов, попавших на танталовый радиатор.

Электроны полностью тормозились в танталовом радиаторе, а активация образцов осуществлялась образовавшимися при торможении электронов фотонами.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ИЗОМЕРА ^{115m}In В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

Мишени представляли собой индиевые фольги толщиной 0,2 и диаметром 15 мм, каждая из которых взвешивалась отдельно.

Время облучения мишеней составляло от 30 до 60 мин при токе электронов от 50 до 200 мкА. Экспозиция удлинялась, а ток пучка увеличивался с уменьшением энергии электронов чтобы компенсировать уменьшение сечения реакции.

Измерение наведенной в каждой мишени активности осуществлялось с помощью Ge(Li) γ -спектрометра с рабочим объемом 40 см³. Энергетическое разрешение в зависимости от энергии фотона составляло от 1,2 КэВ (для энергии фотона 122 КэВ) до 2,5 КэВ (для энергии 1332 КэВ). На рис.3 представлен типичный спектр излучения облученной индиевой мишени.

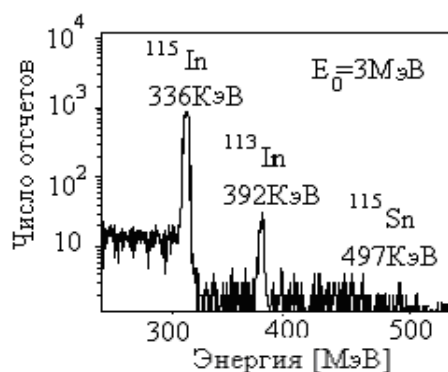


Рис. 3. Спектр излучения изомеров ^{115m}In и ^{113m}In (Естественная смесь изотопов)

Видны пики, соответствующие излучению изомера ^{115m}In и ^{113m}In .

5. РАСЧЕТ КРИВОЙ ВЫХОДА

Возбуждение изомера происходит путем поглощения расположенными выше него уровнями (активационные уровни) фотонов, образовавшихся при торможении электронного пучка в танталовом радиаторе. Эти уровни распадаются с заселением изомерного состояния непосредственно или через каскад. Функция выхода изомеров может быть рассчитана по формуле:

$$Y = \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(E) \frac{dN_\gamma(E, E_0)}{dE} dE, \quad (1)$$

где E и E_0 – энергия фотона и электрона соответственно; E_{th} – пороговая энергия; $\frac{dN_\gamma(E, E_0)}{dE}$ – спектр тормозных фотонов с граничной энергией E_0 ; $\sigma(E)$ – сечение фото-поглощения в зависимости от энергии фотонов; Y – выход изомера, отнесенный к одному налетающему электрону и одному ядру на см^2 мишени.

$\sigma(E)$ состоит из отдельных, далеко отстоящих друг от друга резонансов, ширина которых достаточно мала для того, чтобы считать $\frac{dN_\gamma(E, E_0)}{dE}$ константой в каждом резонансе. В этом случае уравнение (1) упрощается:

$$Y = \sum_J (\sigma\Gamma)_{iso}^J \frac{dN_\gamma^J}{dE}, \quad (2)$$

где \sum_J – суммирование по всем активационным уровням; $(\sigma\Gamma)_{iso}^J$ – интегральное сечение возбуждения J -го уровня; $\frac{dN_\gamma^J}{dE}$ – число фотонов с энергией, соответствующей возбуждению J -го уровня.

На рис. 4 приведен рассчитанный с помощью программы GEANT3.21 [19] спектр тормозных фотонов, образующихся в танталовой фольге толщиной 0,5 мм при торможении в ней электронов с кинетической энергией 1 МэВ (нижняя кривая). Статистика: 10^7 запусков; интервал группирования составляет 10 КэВ, энергия обрезания каскада равна 10 КэВ. Результаты представлены в пересчете на один электрон.

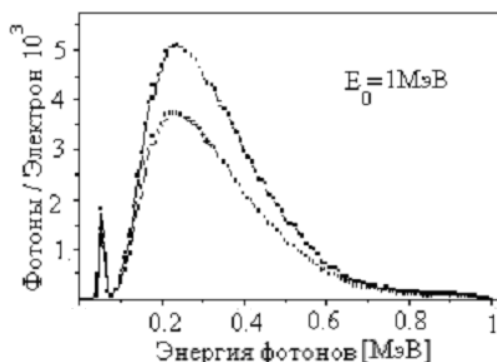


Рис. 4. Проинтегрированный по углу спектр тормозного излучения с максимальной энергией фотонов $E_0=1$ МэВ. Фотоны сгруппированы в интервалах энергии 10 КэВ (см. текст)

В экспериментальном устройстве облучаемая мишень находится вблизи тормозной мишени, поэтому фотоны попадают на мишень под различными углами ($\pm 80^\circ$). Это обстоятельство обуславливает увеличение пробега фотонов в

мишени и, следовательно, увеличение эффективной толщины мишени.

Увеличение эффективной толщины мишени мы учли путем соответствующей “деформации” расчетного фотонного спектра. Таким образом, мы вносили поправку не в толщину мишени, а в интенсивность спектра фотонов. (Фотон с удвоенным вследствие большого угла внедрения пробегом в мишени мы заменяли в спектре двумя фотонами с той же энергией, оставляя толщину мишени неизменной).

Верхняя кривая на рис. 4 получена путем внесения поправки описанным выше способом.

На рис. 5 приведен типичный спектр фотонов для граничной энергии 3 МэВ, рассчитанный методом Монте-Карло. Ширина ступени гистограммы 50 кэВ. Ниже энергии электронов или фотонов 500 кэВ расчеты прекращались, поскольку первый активационный уровень, вносящий вклад в возбуждение изомера ^{115m}In , имеет энергию 0,934 кэВ. Статистика при каждом значении энергии электрона составляла 10^6 . Учтена поправка на угловой разброс пучка тормозного излучения.

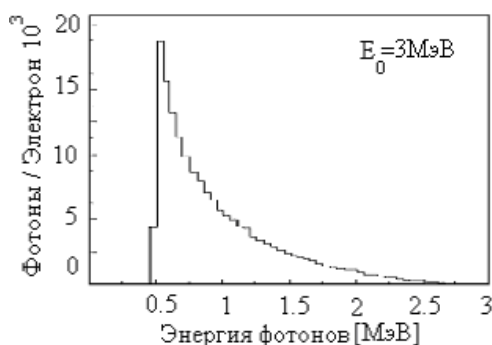


Рис. 5. Спектр тормозных фотонов с граничной энергией тормозного спектра 3.0 МэВ

Необходимые для решения уравнения (2) характеристики изомерных уровней известны [17], и они представлены в таблице.

Свойства низколежащих изомерных уровней ($E_\gamma < 3$ МэВ), наблюдаемых при фотоактивации ^{115m}In [17]

Энергия уровня (МэВ)	$(\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ б
1,49	0,78(27)
1,61	0,25(12)
2,42	1,12(39)
2,8	5,7(11)

На рис. 6 точками представлены результаты измерения выхода реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$. Ломаная линия – результат расчета по формуле (2); пунктир – разброс расчетных значений, обусловленный относительными ошибками, приведенными в таблице.

Таким образом, выполнены измерения выхода реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ в интервале граничной энергии тормозного спектра до 3,2 МэВ. Выход этой же реакции был рассчитан путем суммирования

парциальных интегральных сечений. Результаты эксперимента и расчетов в пределах ошибок согласуются между собой, что свидетельствует о надежности методики измерений и результатов моделирования.

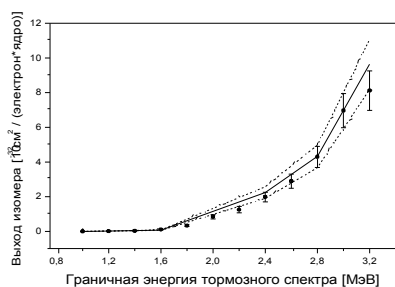


Рис. 6. Экспериментальное (точки) и расчетное (ломаная линия) значение выхода реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$. Пунктирной линией обозначена ошибка в расчетном значении выхода, обусловленная ошибкой в значении интегральных сечений (см. таблицу)

Продемонстрирован экспериментальный метод абсолютной калибровки тормозного излучения с конечной энергией до 3 МэВ. Калибровка состоит в измерении функции выхода $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ реакции. Анализ всех возможных погрешностей свидетельствует о том, что систематическая ошибка в абсолютной калибровке составляет порядка 30 %.

Авторы благодарны экипажу ЭСГ ELIAS во главе с В. Борисенко и И. Гончарову за помощь в выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Richter. Nucl. Phys. Electron scattering and elementary excitations // *Nucl. Phys.* 1991, v. A 522, p. 139.
2. C.B. Collins, F.W. Lee, D.M. Shemwell, B.D. DePaola, S. Olariu, and I. Popescu // *J. Appl. Phys.* 1982, v. 53, p. 4645.
3. C.B. Collins, F. Davanloo, M.C. Iosif et al. Accelerated emission of Gamma Rays from the 31-yr Isomer of ^{178}Hf Induced by X-ray Irradiation // *Phys. Rev. Letter.* v. 82, N 4, p. 695 – 698.
4. C.B. Collins, J.J. Carrol, T.W. Sinor et al. Resonant excitation of the reaction $^{180}\text{Ta}^m(\gamma, \gamma')$ // *Phys. rev.* 1990, v. 42, p. R1813.

5. P. von Neumann-Cosel, N. Huxel, A. Richter, C. Spieler, J.J. Carrol, C.B. Collins. Absolute calibration of low energy, thick target bremsstrahlung // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 1994, v. A 338, p. 425 – 431.

6. Ю.П. Гангрский, А.П. Топчиев, Н.П. Балабанов. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 1996, т. 27, в. 4, с. 1043 – 1076.

7. Ю.П. Гангрский, В.М. Мазур. Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2002, т. 33, в. 1, с. 159 – 200.

8. B. Pontecorvo, A. Lazard // *Compte Rend. Acad. Sci.* 1938, v. 208, p. 99.

9. М.И. Корсунский, Ф.Ф. Ланге, В.С. Шпинель. Порог возбуждения изомера In^{115} рентгеновыми лучами // *Докл. АН СССР.* 1940, т. 26, с. 145 – 146.

10. М.И. Корсунский, В.Е. Ганенко, С.И. Цыпкин. Возбуждение изомерии In^{115} электронным ударом // *Докл. АН СССР.* 1941, т.30, с. 401 – 402.

11. Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. *Квантовое излучение радиоактивных нуклонов.* М.: «Атомиздат», 1971.

12. E. Brown, R.B. Firestone. Table of Radioactive Isotopes // *V.S. Shirley.* N.Y. 1986.

13. R.B. Firestone. Table of Isotopes // *V.S. Shirley (Ed.).* Wiley, New York, 1996.

14. U. Kneissl. Photoactivation and Photon-Scattering Experiments of Astrophysical Relevance // *Progress in Particle and Nuclear Physics.* 2001, v. 46, p. 79 – 88.

15. C. Edward. Booth and John Brownson. Electron and photon excitation of nuclear isomers // *Nuclear Physics.* 1967, v. A98, p. 529 – 541.

16. P. von Neumann-Cosel, A. Richter, C. Spieler, W. Ziegler, J.J. Carrol, T.W. Sinor, D.G. Richmond, K.N. Taylor, C.B. Collins. Resonant photoexcitation of isomers. $^{115}\text{In}^m$ as a test case // *Phys. Lett.* 1991, v. B. 266, p. 9 – 13.

17. D. Belic, J. Besserer, C. Arlandini et al. The new photoactivation facility at the 4.3 MV Stuttgart DYNAMITRON: setup, performance and first applications // *NIM in Phys. Research.* 2001, v. A 463, p. 26 – 41.

18. А.М. Астахов, Д.Ю. Баранков, В.Н. Борисенко и др. Градуировка роторного вольтметра электростатического генератора ELIAS // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение».* 2003, № 6(84), с. 127 – 128.

19. R. Brun, F. Bruyart, M. Maire, A.C. McPherson and P. Zanarini, GEANT3, CERN report DD/EE/84-1 (1987).

MONITORING OF LOW ENERGY BREMSSTRAHLUNG WITH HELP OF $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ REACTION

Yu.M. Ranyuk, O.S. Shevchenko, V.N. Gostishchev, I.I. Shapoval, V.I. Noga, A.A. Nemashkalo

At the 3.0 MV electrostatic ELIAS accelerator a bremsstrahlung irradiation facility was installed for photoexcitation experiments for systematic isomer states population and depopulation investigations. The setup of this facility is described in details. The use of the $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ reaction for an absolute calibration of bremsstrahlung spectra up to 3.0 is demonstrated.

МОНІТОРУВАННЯ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПУЧКІВ ГАЛЬМОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕАКЦІЇ $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$

*Ю.М. Ранюк, О.С. Шевченко., В.М. Гостицев, І.І. Шаповал, В.І. Нога,
А.А. Немашкало*

На електростатичному прискорювачі на 3.0 МВ ELIAS встановлено пристрій для систематичного проведення дослідження популяції і депопуляції ізомерів за допомогою гальмового випромінювання. Детально описано цей пристрій. Показана можливість використання $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ реакції для абсолютної калібровки гальмового випромінювання в інтервалі енергії фотонів до 3.0 МеВ.