ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА
2019. Т. 50. ВЫП. 5. С. 739–744

ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ ЯДЕР Cd И In РЕАЛЬНЫМИ И ВИРТУАЛЬНЫМИ ФОТОНАМИ В ОБЛАСТИ 4–9 МэВ

*С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский *, М. В. Мордовской, В. Г. Недорезов, В. Н. Пономарев, Г. В. Солодухов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Представлены новые экспериментальные результаты по фотовозбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами (электронами) в области пороговой энергии. Измерения проводились с использованием электронного линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Результаты сопоставлены с теоретическими расчетами в рамках феноменологических моделей. Существует несоответствие между экспериментальными данными и теоретическими расчетами.

New experimental results on photo-excitation of Cd and In spin isomers by real and virtual photons (electrons) in the threshold energy region are presented. Measurements have been performed using the INR electron linac LUE-8. The results are compared with theoretical calculations within the framework of phenomenological models. There is a discrepancy between experimental data and theoretical calculations.

PACS: 25.20.Dc

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интерес к изучению фотоядерных реакций вблизи порога значительно возрос. Такие исследования стали важными, в частности, благодаря открытию низколежащих коллективных ядерных возбуждений (пигми-резонансов) в среднетяжелых ядрах, где проявляются новые колебательные моды, и ввиду появления теоретических исследований, направленных на их интерпретацию. В связи с этим представляет интерес изучение изомерных состояний в реакциях (γ, γ') на среднетяжелых ядрах, поскольку вероятность заселения изомерами может зависеть от мультипольности начальной стадии взаимодействия фотон–ядро.

*E-mail: konobeev@inr.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В настоящей работе выходы $A(\gamma,\gamma')A^m$-реакции для изотопов Cd и In при энергии фотонов от 4 до 9 МэВ измерялись методом наведенной активности с использованием реальных и виртуальных фотонов [1]. Реальные фотоны (пучок тормозного излучения) были получены на линейном ускорителе ЛУЭ-8 Института ядерных исследований РАН. Выход реакции с реальными фотонами измеряли, используя в качестве тормозной мишени вольфрамовый радиатор толщиной 0,4 мм, расположенный на расстоянии 7 см перед мишенью из Cd или In (рис. 1). При измерении выхода реакции с виртуальными фотонами (электронами) радиатор удалялся из пучка. Энергия электронов в обоих случаях была одинаковой. Диаметр электронного пучка на радиаторе или мишени составлял 8 мм, длительность импульса 3 мкс, частота повторения 50 Гц и ширина спектра (FWHM) около 0,5 МэВ, ток электронов ~ 1 мкА.

После облучения образцы помещали в низкофоновую камеру с детектором из особо чистого германия (HPGe) объемом 130 см^3 [2]. Защита от фона состояла из свинца толщиной 15 см, меди (2 см) и олова (1 см). Общий уро-

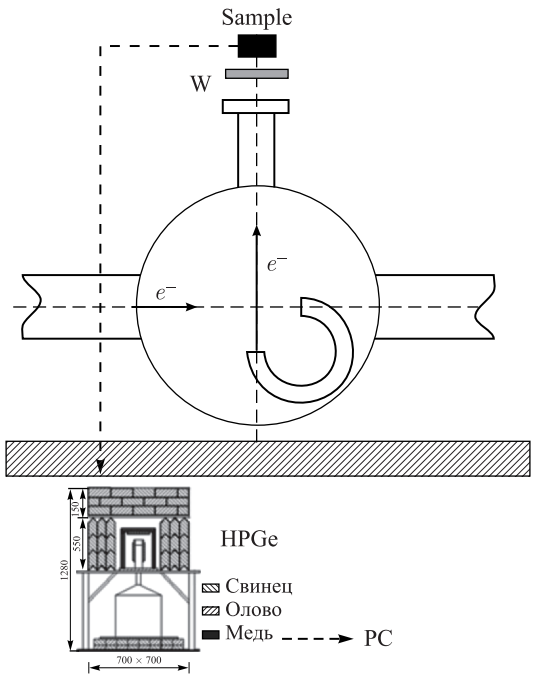

Рис. 1. Схема установки для изучения реакций фотовозбуждения

вень фонового счета в интервале значений энергии $E = 100{-}1000$ кэВ не превышал 3 с^{-1}.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Выход исследуемой реакции S_i (или число отсчетов в i-аналитическом пике) может быть представлен как

$$S_i = \frac{m_i g_i N_A p_i a_i}{M_i \lambda_i} J_i E(t_1, t_2, t_3),$$

где J_i — скорость реакции: $J_i = \int\limits_0^\infty \sigma_i(E)\,\Phi(E)\,dE$, $E(t_1, t_2, t_3) = (1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i t_1})\,\mathrm{e}^{-\lambda_i t_2}(1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i t_3})$ — фактор, учитывающий наработку и распад радиоактивного изотопа за время облучения (t_1), задержки (t_2) и измерения

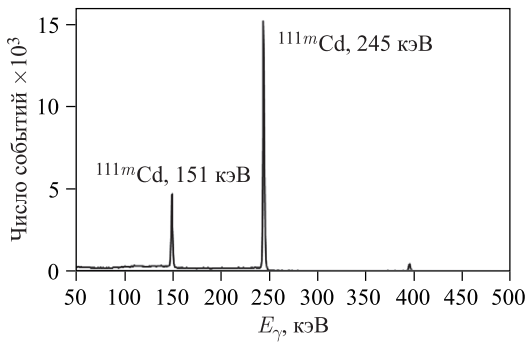

Рис. 2. Гамма-спектр активированного образца Cd. $E_{\gamma\,\max} = 9$ МэВ, время облучения 1200 с, время измерения 1200 с

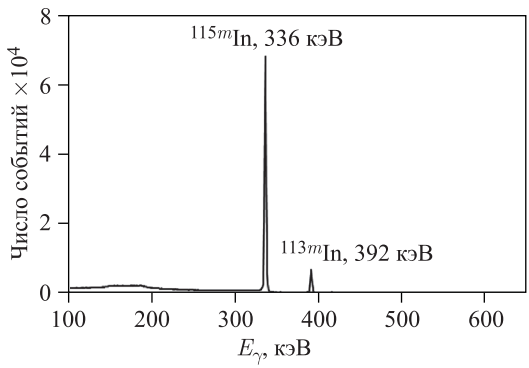

Рис. 3. Гамма-спектр активированного образца In. $E_{\gamma\max} = 7{,}5$ МэВ, время облучения 900 с, время измерения 1200 с

(t_3), $\sigma_i(E_\gamma)$ — сечение ядерной реакции в зависимости от энергии налетающего фотона, $\Phi(E)$ — спектральная плотность потока гамма-излучения, а остальные коэффициенты — экспериментальные множители.

Типичные активационные спектры показаны на рис. 2 и 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты эксперимента представлены на рис. 4: $\sigma_q(E_{\gamma\,\max})$ — сечение на эквивалентный фотон фотовозбуждения фотонами и $\sigma_e(E_e)$ — сечение фотовозбуждения электронами. Представленные значения индуцированных электронами сечений $\sigma_e(E_e)$ были скорректированы на вклад тормозного излучения, создаваемого в мишени движущимися электронами.

Экспериментальные точки, приведенные в работах [3, 4], соответствуют измерениям с урановой мишенью. Результат предыдущей работы [1] представляет собой усредненное по изученным ядрам Cd и In значение. Теоретические кривые представляют расчеты с использованием борновского приближения с плоскими (PWBA) [5] и искаженными (DWBA) [4] волнами, ограниченные вкладом $E1$.

Следует отметить, что отношение σ_q/σ_e имеет относительный характер и не требует абсолютного измерения. Поэтому его погрешности зависят главным образом от оценки потоков для нормализации. Эта процедура одинакова для разных изотопов, поэтому полученный результат носит общий характер.

В соответствии с теоретическими предсказаниями в рамках борновского приближения с плоскими волнами [5] отношение σ_q/σ_e можно представить

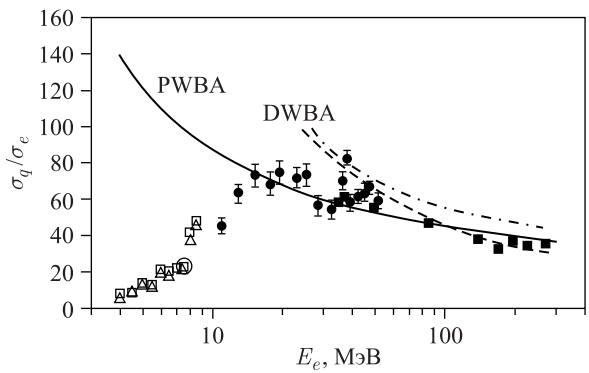

Рис. 4. Отношение $\sigma_q(E_{\gamma\,\max})/\sigma_e(E_e)$ как функция энергии электронов. Экспериментальные данные: ● и ■ — приведены в работах [3,4]; ○ — из работы [1]; □ — ^{113m}In (настоящая работа); △ — ^{115m}In (настоящая работа). Кривые: PWBA — результат вычисления по формуле (1), DWBA — результаты расчета методом искаженных волн [4]

в виде

$$\frac{\sigma_q}{\sigma_e} = \frac{\pi}{2\alpha}\left[\ln\left(\frac{E_e}{m_e}\right) - m_e\right]^{-1}, \tag{1}$$

где α — постоянная тонкой структуры; m_e — масса электрона.

Видно, что отношение $\sigma_q(E_{\gamma\,\max})/\sigma_e(E_e)$ в рамках существующих моделей не зависит от заряда ядра мишени. Таким образом, их можно сравнить с данными, имеющимися для тяжелых делящихся ядер. Представленные в литературе экспериментальные результаты очень стары и скудны, но тем не менее позволяют сделать некоторые выводы.

Другие теоретические кривые получены с учетом влияния искаженных волн и размера ядра, но все они учитывают только вклад $E1$. Видно, что значения отношения для всех теоретических кривых увеличиваются к порогу, но экспериментальные точки показывают максимум вблизи $E_e = 20$ МэВ. Чтобы объяснить это различие между теорией и экспериментом, можно предположить, что виртуальные фотоны имеют различную мультипольность в областях низких ($E_e < 20$ МэВ) и высоких ($E_e > 20$ МэВ) энергий. Возможно, это означает, что в дополнение к вкладу $E1$ возбуждения $E2$ могут играть важную роль вблизи порога.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые экспериментальные результаты по фотовозбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами (электронами) в области пороговой энергии. Измерения проводились с использованием электронного линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Результаты сопоставлены с теоретическими расчетами в рамках феноменологических моделей. Существует несоответствие между экспериментальными данными и теоретическими расчетами. Первые результаты экспериментов и моделирования показывают, что изучение фотоядерных реакций при низких энергиях с реальными и виртуальными фотонами может дать новую фундаментальную информацию о свойствах ядер. Новые эксперименты могут быть проведены с традиционными ускорителями электронов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 16-12-10039.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Недорезов В. Г., Конобеевский Е. С., Зуев С. В., Полонский А. Л., Туринге А. А.* Возбуждение изомерных состояний ^{111m}Cd, ^{113m}In, ^{115m}In фотонами с энергией до 8 МэВ // ЯФ. 2018. Т. 80. С. 423–426.
2. *Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И.* Низкофоновый гамма-спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // ЯФ и инжиниринг. 2016. Т. 4. С. 879–882.

3. *Nedorezov V., Konobeevski E., Polonski A., Ponomarev V., Savel'ev A., Solodukhov G., Tsymbalov I., Turinge A., Zuyev S., Gorlova D.* Photoexcitation of Spin Isomers of In and Cd Nuclei in the Pigmy Resonance Region // Phys. Scripta. 2018. V. 94. P. 015303(1–11).

4. *Недорезов В. Г., Ранюк Ю. Н.* Деление ядер под действием фотонов и электронов промежуточных энергий // ЭЧАЯ. 1984. Т. 15, вып. 2. С. 379–417.

5. *Batii V. G., Vladimirov Yu. V., Rakivnenko Yu. N., Ranyuk Yu. N., Rastrepin O. A., Skakun E. A.* Radionuclide Accumulation for Photo- and Electron Disintegration of Nuclei in the $A \sim 90$ Region // At. Energy. 1987. V. 63. P. 386–389.