

УДК 539.172.48.16

СЕЧЕНИЯ (n, α) -РЕАКЦИЙ НА $^{112,114,116}\text{Sn}$ ПРИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 14,6 МэВ

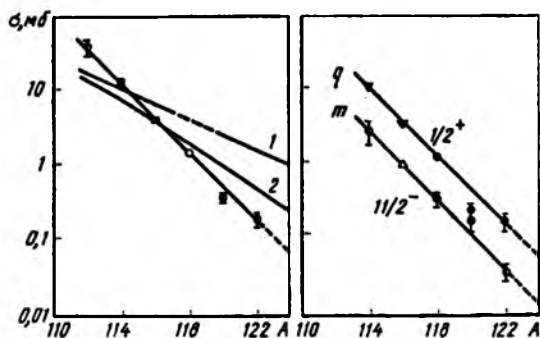
Голыч П.М., Демченко М.Н., Залюбовский И.И., Кизим П.С.
(Харьковский государственный университет)

В работе [1] предсказан, в работе [2] впервые установлен эффект регулярного спинowego расщепления сечений (n, α) -реакций на нейтронах энергией 14 МэВ, который существенно уточняет и детализирует известное правило Левковского [3] и позволяет, в частности, намного точнее предсказывать еще не измеренные сечения. В настоящей работе при энергии нейтронов 14,6 МэВ впервые измерено сечение реакции $^{112}\text{Sn}(n, \alpha)^{109}\text{Cd}$ ($T_{1/2} = 461,9$ сут) и с помощью систематик найдены оценки интегральных и парциальных сечений (n, α) -реакций на $^{114,116}\text{Sn}$; подтверждены также проявления эффекта регулярного спинowego расщепления сечений таких реакций на легких изотопах олова.

Измерения выполнены активационным методом с помощью нейтронного генератора НГ-150М Харьковского университета. Изотопно обогащенный образец ^{112}Sn массой ~ 2 г облучали нейтронами энергией $14,6 \pm 0,2$ МэВ и исследовали наведенную в нем активность γ -спектрометром с Ge(Li)-детектором чувствительным объемом $\sim 50 \text{ см}^3$ и энергетическим разрешением $\sim 3,5$ кэВ на ^{60}Co . При измерении фоновых γ -спектров и γ -спектров облученного образца детектор (с образцом или без него) размещали в массивной многослойной Pb—Cd—Cu защите, снижающей естественный γ -фон примерно в 5 раз. При определении искомого сечения σ_{112} реакции $^{112}\text{Sn}(n, \alpha)^{109}\text{Cd}$ аналитической была γ -линия 88,0 кэВ (3,61 %) из распада ^{109}Cd ($T_{1/2} = 461,9$ сут), опорными были сечение $\sigma_{01} = 1300 \pm 210$ мб реакции $^{112}\text{Sn}(n, 2n)^{111}\text{Sn}$ ($T_{1/2} = 35,3$ мин) с получением ^{111}In и сечение $\sigma_{02} = 180 \pm 110$ мб реакции $^{112}\text{Sn}(n, d) + (n, np)^{111}\text{In}$. Обе эти реакции приводят к образованию ^{111}In с $T_{1/2} = 2,83$ сут, который идентифицировали по γ -линии 171,3 кэВ (90,3%) и 245,4 кэВ (94,0%). В γ -спектрах облученного образца наблюдали также γ -линии 255,0 кэВ (1,85%) и 391,7 кэВ (64,2%) из распада ^{113}Sn с $T_{1/2} = 115,1$ сут, который образуется в реакции $^{114}\text{Sn}(n, 2n)^{113}\text{Sn}$ на примесном ^{114}Sn .

Были выполнены две серии длительных измерений спектров естественного γ -фона и спектров γ -излучения облученного образца: спустя месяц ($\sim 10 T_{1/2}$ для ^{111}In) и три месяца ($\sim 35 T_{1/2}$ для ^{111}In) после облучения. Во всех фоновых спектрах наблюдали только слабую линию рентгеновского излучения энергией ~ 75 кэВ (от свинца в защите детектора) и слабый пик аннигиляционных γ -квантов. В первой серии измерений в γ -спектрах облученного образца наблюдали γ -линию 88,0 кэВ из распада ^{109}Cd , γ -линии 171,3, 245,4 кэВ из распада ^{111}In и 255,0, 391,7 кэВ из распада ^{113}Sn . Во второй серии измерений наблюдали только γ -линии 88,0 кэВ и 255,0; 391,7 кэВ.

Сечение реакции $^{112}\text{Sn}(n, \alpha)^{109}\text{Cd}$ по результатам первой серии измерений было найдено относительно линейной (с коэффициентами, определяемыми условиями измерений) комбинации приведенных опорных сечений σ_{01} , σ_{02} и оказалось равным 44 ± 11 мб. При этом аналитическими γ -линиями были 88,0 кэВ (^{109}Cd) и 171,3, 245,4 кэВ (^{111}In). По результатам первой серии измерений было найдено также количество примесного ^{114}Sn ($7,1 \pm 1,5\%$) в изотопном образце ^{112}Sn . При этом аналитическими γ -линиями были 171,3, 245,4 кэВ (^{111}In) и 391,7 кэВ (^{113}Sn), а сечение реакции $^{114}\text{Sn}(n, 2n)^{113}\text{Sn}$ принимали равным 1160 ± 130 мб. Сечение реакции $^{112}\text{Sn}(n, \alpha)^{109}\text{Cd}$ по результатам второй серии измерений найдено с использованием только что определенного количества примесного ^{114}Sn относительно приведенного интегрального сечения реакции $^{114}\text{Sn}(n, 2n)^{113}\text{Sn}$ и оказалось равным 52 ± 18 мб. При этом аналитическими γ -линиями были 88,0 кэВ (^{109}Cd) и 255,0, 391,7 кэВ (^{113}Sn). Эти два значения искомого сечения (44 ± 11 и 52 ± 18 мб) найдены относительно разных опорных сечений с использованием результатов разных измерений и рассматривались как независимые. После их усреднения для итогового искомого сечения реакции $^{112}\text{Sn}(n, \alpha)^{109}\text{Cd}$ при энергии нейтронов $14,6 \pm 0,2$ МэВ имеем: $\sigma_{112} = 45 \pm 10$ мб. Основной вклад в погрешность найденного значения вносит



Изотопные систематики интегральных (слева) и парциальных (справа) сечений (n, α)-реакций на четных изотопах олова при энергии нейтронов ~ 14 МэВ: g — кривая, соединяющая значения парциальных сечений реакций, приводящих к образованию остаточных ядер в основном $1/2^+$ состоянии; m — то же для парциальных сечений реакций, приводящих к образованию остаточных ядер в изомерном $11/2^-$ состоянии; A — массовое число ядра-мишени

статистическая погрешность в определении площади аналитической y -линии 88,0 кЭВ, так как ее наблюдали на непрерывном пелинейном фоне комптоновски рассеянных y -квантов от более высокоэнергетических линий ^{111}In , ^{113}Sn или только ^{113}Sn .

Спектрометр по эффективности регистрации y -излучения калибровали с помощью образцовых y -источников ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{139}Ce , ^{241}Am из набора ОСГИ. При построении кривой эффективности использовали также результаты измерений с источником ^{122}Sb ($T_{1/2} = 4,2$ мин), распадающегося с испусканием y -излучения энергией 61,4 и 76,1 кЭВ, относительная интенсивность которого известна. Все упоминаемые сведения о свойствах радиоактивных изотопов заимствованы из работы [4], сечения — [5].

На левой части рисунка приведена изотопная систематика экспериментальных значений ($\circ$) интегральных сечений (n, α)-реакций на четных изотопах олова при энергии нейтронов ~ 14 МэВ. Для $A = 112$ интегральное сечение найдено в настоящей работе, для $A = 118, 120, 122$ интегральные сечения найдены как сумма соответствующих парциальных сечений по данным [5] ($A = 118$) и [2] ($A = 120, 122$). Кривая — — в полулогарифмическом масштабе проведена по экспериментальным точкам, $\square$ на этой кривой — найденные с ее помощью методом интерполяции оценки интегральных сечений (n, α)-реакций на ^{114}Sn ($\sigma_{114} \approx 13$ мб) и ^{116}Sn ($\sigma_{116} \approx 4,0$ мб). Экстраполяция кривой на область $A = 124$ показана штриховой линией, с помощью которой можно оценить ожидаемое интегральное сечение (n, α)-реакции на ^{124}Sn . Кривая 1 соединяет оценки интегральных сечений (n, α)-реакций на изотопах олова, которые найдены в работе [6] с использованием систематик и привлечением результатов теоретических расчетов (эти значения согласованы с Государственной службой стандартных справочных данных). В области $A = 118$ кривая проведена — —, так как в работе [6] оценка соответствующего сечения не приведена. Кривая 2 рассчитана по полуэмпирической формуле для оценки интегральных сечений (n, α)-реакций, которая найдена в работе [7] и подтверждена [8, 9]. Из рисунка видно, что изотопная систематика интегральных сечений на олове соответствует известному правилу Лешковского [3] и методы оценки таких сечений нуждаются в совершенствовании (оценки [6] лучше воспроизводят сечения для реакций на легких и хуже для реакций на тяжелых изотопах олова, оценки [7] лучше для реакций на тяжелых и хуже для реакций на легких изотопах олова). Существенные отличия экспериментальных сечений (n, α)-реакций на $^{112,118,120,122}\text{Sn}$ ($Z = 50$) от их оценок [6, 7] связано, наиболее вероятно, с магнитностью этих ядер. На аномальность сечений (n, α)-реакций с нейтронами энергией 14 МэВ на изотопах олова по отношению к сечениям этих реакций на изотопах других близких к нему элементов и возможную связь этих отличий с магнитностью ядер-мишеней обращено внимание в работе [10].

Для $A = 114$ —124 на каждом из четных изотопов олова в (n, α)-реакциях на нейтронах энергией 14 МэВ образуются нечетные изотопы кадмия, каждый из которых имеет по два долгоживущих состояния. На правой части рисунка приведена изотопная систематика парциальных сечений этих реакций (^{109}Cd изомеров не имеет, поэтому измеренное нами сечение (n, α)-реакции на ^{112}Sn — это интегральное сечение реакции и на рисунке систематику парциальных сечений на область $A = 112$ распространить нельзя). Измеренные парциальные сечения ($\circ, \bullet$) для $A = 114$ [11], $A = 118$ [5] и $A = 120, 122$ [2] приведены по известным данным; Δ — оценка парциального сечения σ_{116}^m реакции $^{116}\text{Sn}(n, \alpha)^{113m}\text{Cd}$ ($T_{1/2} = 14,1$ года), которая найдена [11] при интерполяции изотопной систематики измеренных парциальных сечений ($\circ$) (n, α)-реакций на изотопах олова с $A = 114, 118, 120, 122$, приводящих к образованию дочерних изотопов кадмия в изомерном состоянии с $I^\pi = 11/2^-$. Оценки парциального сечения $\sigma_{114}^m \approx 10$ мб реакции $^{114}\text{Sn}(n, \alpha)^{113}\text{Cd}$ (стабильный) и парциального сечения $\sigma_{116}^m \approx 3,1$ мб реакции $^{116}\text{Sn}(n, \alpha)^{113}\text{Cd}$ ($T_{1/2} = 9,3 \cdot 10^{15}$ лет) показаны $\blacktriangle$. Оценка σ_{114}^m найдена как разность интегрального сечения $\sigma_{114} \approx 13$ мб (наша оценка по графику на левой части рисунка) и парциального $\sigma_{114}^m = 2,6 \pm 0,9$ мб (эксперимент [11]).

Оценка σ_{116}^f найдена как разность интегрального сечения $\sigma_{116} \approx 4,0$ мб (наша оценка по графику на левой части рисунка) и парциального $\sigma_{116}^m \approx 0,9$ мб (оценка [11]). Как видно из рисунка, парциальные сечения (n, α) -реакций на $^{114,116,118,120,122}\text{Sn}$, приводящие к образованию дочерних изотопов кадмия в основном $1/2^+$ -состоянии (темные значки) и изомерном $11/2^-$ -состоянии (светлые значки), хорошо ложатся в изотопной систематике на отдельные плавные кривые (прямые в полулогарифмическом масштабе). Следовательно, эффект регулярного спинового расщепления сечений (n, α) -реакций на нейтронах энергией 14 МэВ, установленный ранее на четных изотопах олова с $A = 118-122$ [2], проявляется и в более широком массовом диапазоне $A = 114-122$. Естественно предположить, что эффект будет проявляться и при $A = 124$. В этом случае экстраполяция найденных зависимостей (—) на область $A = 124$ (показана - - -) позволяет оценить и ожидаемые парциальные сечения (n, α) -реакций на ^{124}Sn . Экспериментальные парциальные сечения приводят к изомерным отношениям $r = \sigma^m/\sigma^f = 0,24 \pm 0,04$ ($A = 114, 116, 118, 122$), $r = 0,71 \pm 0,07$ ($A = 120$) и $R = \sigma^m/(\sigma^m + \sigma^f) = 0,20 \pm 0,04$ ($A = 114, 116, 118, 122$), $R = 0,42 \pm 0,04$ ($A = 120$), а эмпирические соотношения дают в этих случаях $r = 1,0$ [7] и $R = 0,93$ [9]. Изомерные отношения r и R , вычисленные по оценкам парциальных сечений из работы [8], близки к r и R , вычисленным по соотношениям из работ [7, 9]. Учитывая точность этих эмпирических соотношений, согласие вычисленных с их помощью изомерных отношений и изомерных отношений, найденных из экспериментальных данных, можно считать хорошим. С предсказаниями [7, 9] согласуется и тот факт, что найденные по результатам измерений изомерные отношения сечений (n, α) -реакций с нейтронами энергией 14 МэВ на изотопах олова от массового числа ядра-мишени в целом не зависят.

Таким образом, впервые измеренное нами сечение (n, α) -реакции на ^{112}Sn при $E_n = 14,6 \pm 0,2$ МэВ позволяет также методом интерполяции надежно оценить интегральные сечения таких реакций на $^{114,116}\text{Sn}$ и парциальные сечения (n, α) -реакций на этих ядрах, которые приводят к образованию ядер-продуктов в стабильном долгоживущем состоянии и измерение которых активационным методом невозможно. Данные подтверждают также проявление эффекта регулярного спинового расщепления сечений (n, α) -реакций на четных изотопах олова в диапазоне массовых чисел $A = 114-122$.

Выражаем благодарность М. Ламмеру (Вена, МАГАТЭ) и М. Конечному (Париж, Евратом) за помощь при получении литературных источников, а также Р.И. Гопыч за техническую помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гопыч П.М., Забашта О.И., Залюбовский И.И. и др. Регулярное спиновое расщепление сечений (n, p) -реакций на изотопах олова. — Ядерная физика, 1988, т. 47, с. 602—603.
2. Гопыч П.М., Залюбовский И.И., Кизим П.С. и др. Эффект регулярного спинового расщепления сечений ядерных реакций под действием 14 МэВ нейтронов. — Письма в ЖЭТФ, 1989, т. 50, с. 273—275.
3. Левковский В.Н. Сечения реакций (n, p) и (n, α) при энергии нейтронов 14—15 МэВ. — Ядерная физика, 1973, т. 18, вып. 4, с. 705—709.
4. Reus U., Westmeier W. Catalog of gamma-rays from radioactive decay. — Atomic Data & Nuclear Data Tables, 1983, v. 29, p. 193—404.
5. Меднис И.В. Сечения ядерных реакций, применяемых в нейтронно-активационном анализе. Справочник. Рига: Зинатне, 1991.
6. Бычков В.М., Манохин В.Н., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982.
7. Forrest R.A. Systematics of Neutron-Induced Threshold Reactions with Charged Products at About 14.5 MeV. Rep. AERE-R 12419, Harwell Laboratory, 1986.
8. Kopecky J., Nierop D. Contents of EAF-2. A Supplement to the EAF-2 Data File. Rep. ECN-1-91-053, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, 1991.
9. Badikov S.A., Grudzevich O.T., Ignatyuk A.V. e.a. Cross-sections evaluations for activation data library. — In: Nuclear Data for Science and Technology (Juelich, 1991), Springer Verlag, 1991, p. 930—932.
10. Гопыч М.П., Гопыч П.М., Демченко М.Н. Оболочечные эффекты в систематике сечений (n, α) -реакций на 14 МэВ нейтронах. — Известия РАН, сер. физ., 1994, т. 58, № 11, с. 196—203.
11. Гопыч П.М., Демченко М.Н., Кизим П.С. и др. Эффект регулярного спинового расщепления сечений и сечение (n, α) -реакции на олове-114. — В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. Межд. сов. Минск, 16—19 апреля 1991 г. Л.: Наука, 1991, с. 250.