

Выходы ^{111}In и ^{114m}In в ядерных реакциях с протонами, дейтронами и альфа-частицами

ДМИТРИЕВ П. П., ДМИТРИЕВА З. П., КРАСНОВ Н. Н., МОЛИН Г. А., ПАНАРИН М. В.

УДК 621.039.8.002

Изотопы ^{111}In ($T_{1/2} = 2,81$ суток) и ^{114m}In ($T_{1/2} = 50$ суток) находят широкое применение в различных исследованиях. Изотоп ^{111}In получается лишь в реакциях с заряженными частицами и является типичным циклотронным изотопом; ^{114m}In в форме «с носителем» получается в реакции $^{113}\text{In}(n, \gamma)$.

В настоящей работе измерены зависимости выхода ^{111}In и ^{114m}In от энергии бомбардирующих частиц при облучении толстых мишеней металлического кадмия протонами и дейтронами и выходы ^{111}In при облучении металлического серебра α -частицами. Активность ^{111}In измерялась по фотопику γ -линии 247 кэв (выход 0,94 квант/распад), активность ^{114m}In измерялась через ≈ 30 суток после облучения (после распада ^{111}In) по фотопику 191,6 кэв (выход 0,17 квант/распад). Значения периодов полураспада, энергий и квантовых выходов γ -линий взяты из работы [1]. Методики облучения образцов и измерения активности и выходов изотопов аналогичны описанной в работах [2].

В таблице приведены реакции, в которых образуются ^{111}In и ^{114m}In , энергетические пороги реакций, а также выходы, измеренные при максимальной энергии бомбардирующих частиц. На рисунке показаны экспериментальные кривые зависимости выходов ^{111}In и ^{114m}In от энергии частиц. Для получения кривой выхода ^{111}In при облучении серебра использовалась стопка серебряных фольг толщиной 15–20 мг/см². Измеряли функцию возбуждения реакции $^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$, которая с точ-

ностью 5–10% совпала с функцией возбуждения этой реакции, показанной в работе [7]. Погрешность измеренных значений выходов ^{111}In и ^{114m}In оценена $\pm 12\%$. Экспериментальные функции возбуждения реакции $^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$ имеются в работах [9–13]; полученные в этих работах результаты в основном удовлетворительно согласуются с данными работы [7].

Сечения реакций с образованием ^{111}In и ^{114m}In при облучении кадмия протонами измерялись в работах [3, 4, 14–16].

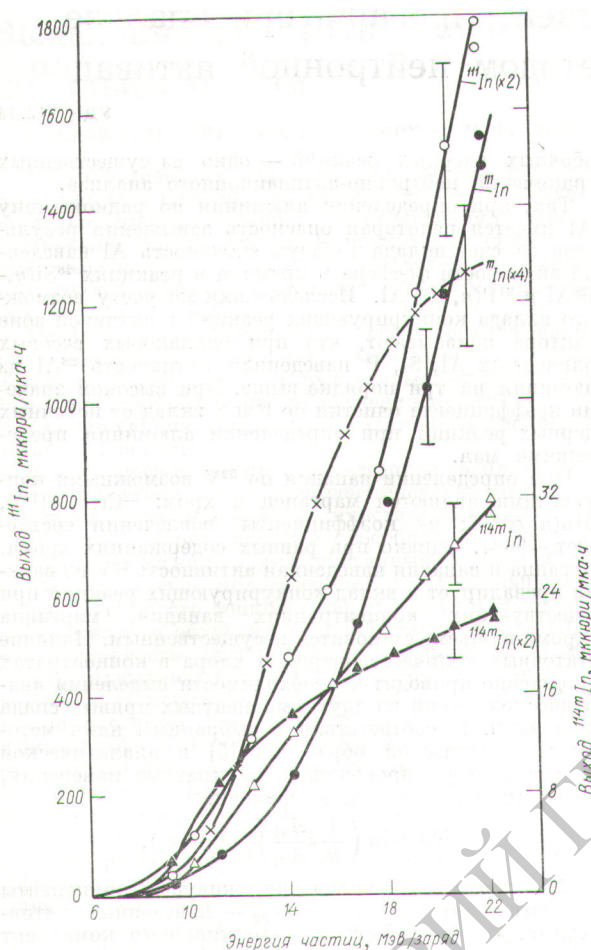
Экспериментальные функции возбуждения реакций $^{111}\text{Cd}(p, n)^{111}\text{In}$ и $^{114}\text{Cd}(p, n)^{114m}\text{In}$ получены в работе [14] до $E_p = 6,5$ Мэв и в работе [4] до $E_p = 10,5$ Мэв; сечения этих реакций в одной точке при $E_p = 12$ Мэв измерены в работе [15]. В работе [3] имеются экспериментальные функции возбуждения реакций $^{111}\text{Cd}(p, n)^{111}\text{In}$ до $E_p = 14,5$ Мэв и $^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$ до $E_p = 37$ Мэв. Полученные в этих работах значения сечений реакции удовлетворительно согласуются между собой. Нами было выполнено интегрирование по пробегу функций возбуждения из работ [3, 4]; в таблице приведены значения выходов ^{111}In и ^{114m}In при $E_p = 10,5$ Мэв (работа [4]) и выход ^{111}In при $E_p = 22$ Мэв [3].

В работе [16] сечения реакций $^{111,112,113,114,116}\text{Cd}(p; n, 2n, 3n, 4n, 6n)^{111}\text{In}$ и $^{114,116}\text{Cd}(p; n, 3n)^{114m}\text{In}$ измерены в диапазоне энергии протонов 70–400 Мэв.

Выходы ^{111}In и ^{114m}In

Реакция образования	Энергетический порог реакции, Мэв	Содержание исходного изотопа, %	Данные по выходам		
			Энергия частиц, Мэв	Выход, мккюри/мкА·ч	Источник
$^{111}\text{Cd}(p, n)^{111}\text{In}$			22,3±0,2	1510±180	Настоящая работа [3] [4] [5] [6]
	1,9	12,76	22	1620*	
$^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$	11,37	24,04	10,5	80*	
$^{113}\text{Cd}(p, 3n)^{111}\text{In}$	17,97	12,28	16	515±60**	
$^{110}\text{Cd}(d, n)^{111}\text{In}$		12,37			Настоящая работа
$^{111}\text{Cd}(d, 2n)^{111}\text{In}$	4,17	12,76	22,1±0,2	890±110	
$^{112}\text{Cd}(d, 3n)^{111}\text{In}$	13,74	20,04			Настоящая работа
			43±0,7	310±37	
$^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$	14,8	48,65	42±0,5	290±30*	Настоящая работа [7] [8]
			30	200	
$^{114}\text{Cd}(p, n)^{114m}\text{In}$	2,05	28,8	22,3±0,2	11,2±1,3	Настоящая работа [4]
$^{116}\text{Cd}(p, 3n)^{114m}\text{In}$	17,02	7,6	10,5	5,6*	
$^{114}\text{Cd}(d, 2n)^{114m}\text{In}$	4,33	28,8	22,1±0,2	31±4	Настоящая работа

* Данные получены интегрированием функций возбуждения.
 ** Использовалась окись CdO, обогащенная ^{111}Cd до 96,5%.
 *** Тонкая мишень (толщина ~ 30 мг/см²).



Зависимость выходов ^{111}In от энергии бомбардирующих частиц при облучении толстых мишеней кадмия протонами и дейтронами и серебра α -частицами:

● — $(\text{Cd} + p) \rightarrow ^{111}\text{In}$; ○ — $(\text{Cd} + d) \rightarrow ^{111}\text{In}$; × — $(\text{Ag} + \alpha) \rightarrow ^{111}\text{In}$; ▲ — $(\text{Cd} + p) \rightarrow ^{114m}\text{In}$; △ — $(\text{Cd} + d) \rightarrow ^{114m}\text{In}$.

В работах [5, 6, 8] приведены данные по выходам ^{111}In при облучении различного типа производственных мишеней. В работе [5] окись кадмия CdO , обогащенная по ^{111}Cd до 96,5%, облучалась протонами с энергией 16 Мэв. При толщине мишени $\sim 500 \text{ мг/см}^2$ получен выход ^{111}In , равный $515 \pm 60 \text{ мккюри/мкА}\cdot\text{ч}$, примесь ^{114m}In составляла 0,012%. В работе [8] металлическое

серебро облучалось α -частицами с энергией 30 Мэв, получен выход ^{111}In , равный 200 мккюри/мкА·ч. В работе [6] металлический кадмий толщиной 25–30 мг/см² облучался при $E_p = 15 \text{ Мэв}$, выход ^{111}In составлял 140 мккюри/мкА·ч, примесь ^{114m}In приблизительно 3% (эта величина явно завышена). В литературе отсутствуют данные по выходам и сечениям ядерных реакций с образованием ^{111}In и ^{114m}In под действием дейтронов.

Исследованные нами способы получения ^{111}In и ^{114m}In наиболее эффективны. Изотоп ^{114m}In , свободный от примеси ^{111}In , получается через 35–40 суток после облучения, а ^{111}In , свободный от примеси ^{114m}In , получается при облучении серебра α -частицами. При облучении кадмия протонами и дейтронами содержание примеси ^{114m}In в конце облучения составляет соответственно 0,8 и 3,5% при энергии протонов и дейтронов 22 Мэв, однако выход ^{111}In при этом в три — пять раз больше, чем при облучении серебра α -частицами с энергией $\sim 44 \text{ Мэв}$.

Если, например, использовать кадмиевую мишень толщиной 500 мг/см², то протоны с энергией 22 Мэв будут тормозиться в ней до 15 Мэв. Как видно из рисунка, выход ^{111}In составит при этом 1150 мккюри/мкА·ч и выход ^{114m}In — всего 2,9 мккюри/мкА·ч, т. е. содержание примеси ^{114m}In уменьшится до 0,25%.

Авторы благодарят Г. Н. Гриненко за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 11/II 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lederes C. e. a. Tables of Isotopes. N.Y., Z. Wiley, 1967.
2. Дмитриев П. П. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, с. 157; 1972, т. 32, с. 426.
3. Otozai K. e. a. Nucl. Phys., 1966, v. 80, p. 335.
4. Wing J., Huizenga J. Phys. Rev., 1962, v. 128, 280.
5. Brown L., Beets A. J. Appl. Rad. and Isotopes, 1972. v. 23, p. 57.
6. Dahe J., Tilbury R. Ibid, p. 431.
7. Fukushima S. e.a. Nucl. Phys., 1965, v. 69, p. 273.
8. Thakur M., Nunn A. Ibid, p. 139.
9. Ghoshol S. Phys. Rev., 1948, v. 76, p. 417.
10. Bleuler E. e. a. Phys. Rev., 1953, v. 90, p. 460.
11. Porges K. Phys. Rev., 1956, v. 101, p. 225.
12. Grover J. Phys. Rev., 1962, v. 127, p. 2142.
13. Smend F. e. a. Z. Phys., 1968, B. 214, S. 437.
14. Blaser J. e. a. Helv. Phys. acta, 1951, v. 24, p. 1.
15. Blosser H., Handley T. Phys. Rev., 1955, v. 100, p. 1340.
16. Nieckarz W., Caretto A. Phys. Rev., 1969, v. 178, p. 1887.