

УДК 539.172.12

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ ЛАНТАНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 30 МЭВ С ЯДРАМИ Ва-135

И. А. Хоменко, Е. С. Кормазева, В. И. Новиков, Р. А. Алиев

Представлены результаты эксперимента по облучению мишеней $[^{135}\text{Ba}]\text{BaCO}_3$ пучком протонов с начальной энергией 30 МэВ. Впервые измерены сечения образовавшихся в результате ядерных реакций $^{135}\text{Ba}(p, x)$ радиоизотопов лантана и бария и проведено их сравнение с теоретическими данными. Показана возможность наработки ^{135}La и ^{133}La для дальнейшего медицинского использования.

Ключевые слова: пучки протонов, ядерные реакции, сечения, лантан-135.

Введение. Радионуклиды применяются для диагностики и лечения рака путем введения их в организм пациента в виде радиофармпрепаратов, способных накапливаться в опухоли. В течение последних нескольких лет растет интерес к радиоизотопам лантана, поскольку они имеют подходящие свойства для ядерной медицины. ^{132}La ($T_{1/2} = 4.8$ ч) и ^{133}La ($T_{1/2} = 3.912$ ч) испускают позитроны, используемые в позитронно-эмиссионной томографии [1], ^{135}La ($T_{1/2} = 19.5$ ч) – Оже-электроны, перспективные для терапии [2].

Для планирования метода получения радионуклидов с помощью пучков заряженных частиц необходимы надежные величины сечений ядерных реакций. В случае ^{135}La исследованы реакции на ядрах бария естественного изотопного состава под действием протонов [3, 4], дейтронов [5] и альфа-частиц [6], а также реакция $^{133}\text{Cs}(\alpha, 2n)$ [7]. Для получения ^{133}La предложены реакции под действием протонов, дейтронов и альфа-частиц на $^{\text{nat}}\text{Ba}$, а также реакции $^{139}\text{La}(p, x)$ [8] и $^{\text{nat}}\text{Ce}(p, x)$ [9]. Хотя реакция $^{135}\text{Ba}(p, x)$ была использована для наработки ^{135}La и ^{133}La [1, 10], ранее ее сечения измерены не были.

НИИ “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1; e-mail: khomenko.ia@mail.ru.

Данная работа посвящена исследованию сечений реакций $^{135}\text{Ba}(p, x)$ методом стопки фольг, а также рассмотрению данной реакции как способа наработки ^{133}La и ^{135}La для медицинского использования.

Экспериментальная часть.

Мишени. Тонкие слои из $^{135}\text{BaCO}_3$ (1.9–4.5 мг/см², Ø 1 см, изотопный состав: ^{135}Ba – 94.9%, ^{136}Ba – 2.31%, ^{138}Ba – 2.01%, ^{137}Ba – 0.59%, ^{134}Ba – 0.19%, “Электрохимприбор”, г. Лесной, Свердловская обл., Россия) были нанесены на алюминиевую подложку (~30 мкм) методом седиментации из суспензии с ацетоном и коллодием (1–2% динитроцеллюлозы от массы мишени). Для механической защиты дополнительно использовалась Al фольга (~8 мкм). В стопку между 7 мишенями были помещены Al поглотители, толщина их была подобрана таким образом, чтобы обеспечить равномерное уменьшение входной энергии пучка при прохождении через стопку мишеней. Также в стопке были размещены Cu фольги (~10 мкм) для контроля параметров пучка методом мониторинговых реакций.

Облучение и гамма-спектрометрия. Всю стопку облучали на ускорителе У-150 (НИЦ “Курчатовский институт”) протонами с энергией 30.0 ± 0.5 МэВ в течение 30 мин при токе 191 ± 12 нА, значение которого было уточнено с помощью мониторинговых реакций $^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x)^{62,65}\text{Zn}$ [11]. Расчет энергетических потерь в мишенной конструкции был выполнен при помощи программы SRIM 2008.04 [12] и алгоритма линейной аппроксимации пробега из [13].

Активность продуктов реакций определялась гамма-спектрометрически с помощью детектора из сверхчистого германия ORTEC GEM 35P4. Калибровку проводили с помощью сертифицированных точечных источников ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am . Обработку спектров проводили в программе SpectraLine 1.6.8420 (ЛСРМ, Россия). Использовали данные из базы ядерных данных NuDat 3.0. Каждую мишень ^{135}Ba измеряли 2-3 раза в течение 2-3 суток после облучения.

Обработка результатов. Расчет сечений выполняли по уравнению активации. Относительная неопределенность сечений рассчитана как квадратный корень суммы квадратов относительных неопределенностей калибровки (5%), толщины мишени (10%), тока протонов (6%), ядерных данных (1%) и неопределенности площади фотопика (3–32%). Расчет выходов реакций проводился с использованием программы RYC [14]. Теоретические значения сечений реакций взяты из базы данных TENDL-2023 [15].

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены идентифицированные продукты реакции $^{135}\text{Ba}(p, x)$, в табл. 2 – численные значения полученных сечений реакций, на рис. 1 – их сравнение с теоретическими кривыми из TENDL-2023.

Т а б л и ц а 1

Продукты реакции $^{135}\text{Ba}(p, x)$ и их ядерно-физические свойства (NuDat3.0.)

Радионуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	E_γ , кэВ	I_γ , %	Реакция образования	Энерг. эффект реакции, МэВ
^{133}La	3.912 ч	ЕС $\beta+$	278.8	2.44	$^{135}\text{Ba}(p, 3n)$	-19.3
^{135}La	19.5 ч	ЕС $\beta+$	480.5	1.52	$^{135}\text{Ba}(p, n)$	-1.9
^{133m}Ba	38.93 ч	IT, ЕС	275.9	17.7	$^{135}\text{Ba}(p, p2n)$	-16.4
					$^{135}\text{Ba}(p, dn)$	-14.2
^{135m}La	28.7 ч	IT	268.2	16	$^{135}\text{Ba}(p, p')$	-0.27

Т а б л и ц а 2

Экспериментально полученные при облучении ^{135}Ba пучками протонов сечения образования радионуклидов $^{133,135}\text{La}$, $^{133m,135m}\text{Ba}$

E , МэВ	σ , мб			
	^{133}La	^{135}La	^{133m}Ba	^{135m}Ba
29.8 ± 0.5	1214.8 ± 136.8	71.2 ± 11.3	39.5 ± 4.6	41.9 ± 4.9
25.0 ± 0.7	1005.2 ± 113.5	107.7 ± 15.5	9.6 ± 1.3	45.3 ± 5.3
19.8 ± 1.0	15.7 ± 9.7	121.3 ± 16.5	0.7 ± 0.5	36.4 ± 4.3
12.1 ± 1.5		783.9 ± 91.0		10.4 ± 1.4
9.5 ± 1.7		423.5 ± 51.9		3.4 ± 0.9
6.7 ± 2.2		61.8 ± 12.0		1.4 ± 0.6
3.5 ± 3.0		3.3 ± 2.0		1.9 ± 0.4

Выход на толстой мишени в энергетическом диапазоне $29.8 \rightarrow 3.5$ МэВ для реакции $^{135}\text{Ba}(p, n)^{135}\text{La}$ составляет 428 МБк/(мкА·ч); в энергетическом диапазоне $29.8 \rightarrow 19.8$ МэВ для реакции $^{135}\text{Ba}(p, 3n)^{133}\text{La}$ – 3.9 ГБк/(мкА·ч).

По данной реакции при облучении в течение 8 часов и токе 10 мкА в энергетическом диапазоне $19.8 \rightarrow 3.5$ МэВ возможна наработка ~ 26 ГБк ^{135}La (на конец облучения) без примеси ^{133}La . При облучении в энергетическом диапазоне $29.8 \rightarrow 19.8$ МэВ в течение 2 часов при токе 10 мкА можно наработать до 65 ГБк ^{133}La с содержанием радиоизотопных примесей 2.7% на конец облучения (^{135}La).

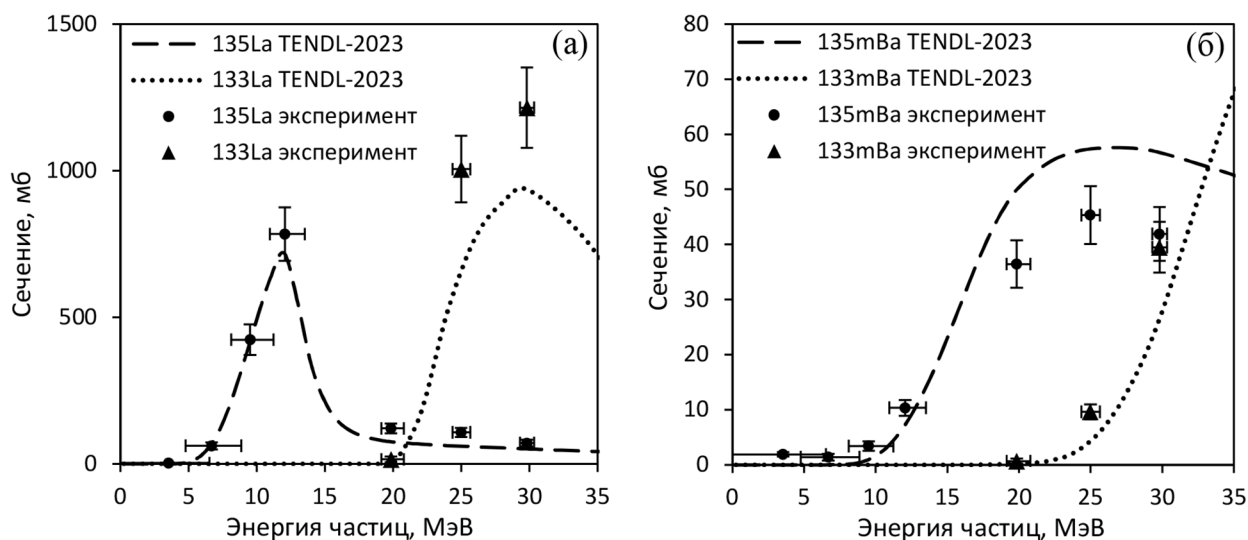


Рис. 1: Сечения реакций: (а) $^{135}\text{Ba}(p, x)^{133,135}\text{La}$; (б) $^{135}\text{Ba}(p, x)^{133m,135m}\text{Ba}$.

Заключение. В данной работе были экспериментально определены сечения реакций $^{135}\text{Ba}(p, x)^{133,135}\text{La}$, $^{133m,135m}\text{Ba}$ в энергетическом диапазоне $29.8 \rightarrow 3.5$ МэВ. Сечения для данной реакции были изучены впервые, что дополнит базу экспериментальных ядерных данных. Экспериментальные значения для образования $^{133,135}\text{La}$ и $^{133m,135m}\text{Ba}$ согласуются с теоретическими функциями возбуждения, взятыми из TENDL-2023. Нарбатываемая активность и чистота продукта удовлетворяют критериям применимости в медицине.

Работа выполнена в рамках государственного задания Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. J. Nelson, B. S. Ferguson, M. Wuest, et al., *Journal of Nuclear Medicine* **63**(4), 584 (2022). DOI: 10.2967/jnumed.121.262459.
- [2] J. B. Fonslet, B. Q. Lee, T. A. Tran, et al., *Physics in Medicine and Biology* **63**(1), 1 (2018). DOI: 10.1088/1361-6560/aa9b44.
- [3] F. Tárkányi, F. Ditrói, B. Király, et al., *Applied Radiation and Isotopes* **68**(10), 1869 (2010). DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.03.010.
- [4] K. Prescher, F. Peiffer, R. Stueck, et al., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* **53**, 105 (1991). DOI: 10.1016/0168-583X(91)95645-T.

- [5] F. Tárkányi, A. Hermanne, F. Ditrói, et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B **414**, 18 (2018). DOI: 10.1016/j.nimb.2017.09.022.
- [6] I. A. Khomenko, E. S. Kormazeva, V. N. Unezhev, R. A. Aliev, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **535**, 47 (2023). DOI: 10.1016/j.nimb.2022.11.022.
- [7] N. P. M. Sathik, M. A. Ansari, B. P. Singh, R. Prasad, Pramana **47**(5), 401 (1996). DOI: 10.1007/bf02847827.
- [8] K. V. Becker, E. Vermeulen, C. J. Kuttyreff, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **468**, 81 (2020). DOI: 10.1016/j.nimb.2020.02.024.
- [9] F. Tárkányi, A. Hermanne, F. Ditrói, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **412**, 46 (2017). DOI: 10.1016/j.nimb.2017.09.008.
- [10] K. S. Pedersen, C. Deville, U. Søndergaard, et al., Applied Radiation and Isotopes **192**, 110612 (2023). DOI: 10.1016/j.apradiso.2022.110612.
- [11] A. A. Hermanne, V. V. Ignatyuk, R. Capote, et al., Nuclear Data Sheets **148**, 338 (2018). DOI: 10.1016/j.nds.2018.02.009.
- [12] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **268**(11-12), 1818 (2010). DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
- [13] C. F. Williamson, J.-P. Boujot, J. Picard, Tables of Range and Stopping Power of Chemical Elements for Charged Particles of Energy 0.5 to 500 MeV. CEQ-R-3042 (1966).
- [14] M. Sitarz, E. Nigrón, A. Guertin, et al., Instruments **3**(1), 1 (2019). DOI: 10.3390/instruments3010007.
- [15] A. J. Koning, D. Rochman, J.-Ch. Sublet, et al., Nuclear Data Sheets **155**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.nds.2019.01.002.

Поступила в редакцию 24 сентября 2024 г.

После доработки 11 ноября 2024 г.

Принята к публикации 12 ноября 2024 г.