

Выход вторичного излучения с поверхности тяжелых мишеней, облучаемых протонами средних энергий ($E_p \sim 1$ ГэВ)

Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко, А.А. Янович
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В последние годы появился большой интерес к проблеме трансмутации долгоживущих радиоактивных элементов и практическому использованию энергии деления урана в глубокоподкритическом реакторе, в котором цепная реакция поддерживается внешним источником нейтронов [1, 2, 3]. Мощные потоки нейтронов можно получить при облучении тяжелых мишеней высокоинтенсивными пучками протонов с энергией ~ 1 ГэВ.

В данной работе представлены экспериментальные данные по скоростям реакций, полученных с помощью пороговых активационных детекторов при облучении вольфрамовой мишени протонами с энергиями 0.895 и 1.21 ГэВ и хлоридной мишени протонами с энергиями 0.8 и 1.2 ГэВ (проекты МНТЦ № 157 и 477). Работа выполнена в ГНЦ ИФВЭ на высокоинтенсивном ускорителе протонов У-1.5.

Пучок протонов, выведенный из У-1.5, транспортируется по вакуумированному ионопроводу на исследуемую мишень. Расстояние ~ 2 м от выходного окна ионопровода до передней плоскости мишени пучок проходит по воздуху. Настройка положения пучка осуществляется с помощью телевизионного монитора и двух координатных δ -камер. За время экспозиции возможен эпизодический уход пучка от геометрического центра мишени в пределах ± 5 мм как по горизонтали, так и по вертикали.

Мишень с выбранной системой координат показана на рис. 1.

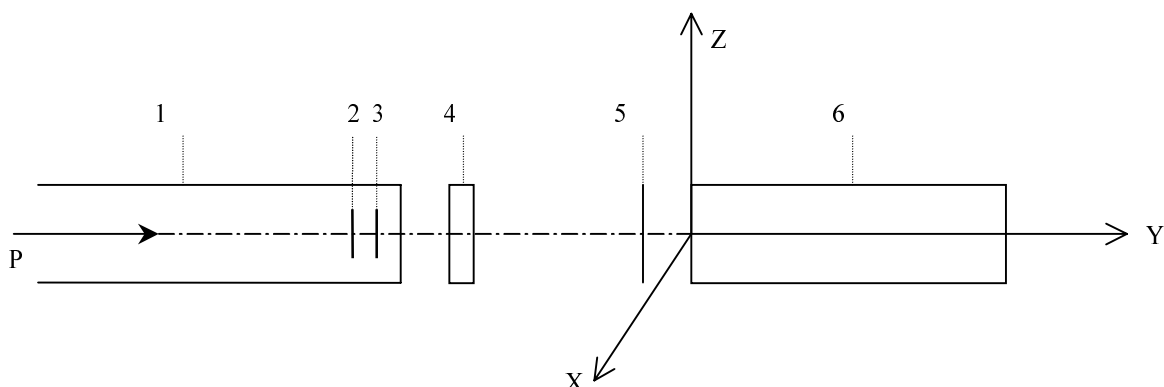


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – вакуумированный ионопровод; 2, 3 – δ -камеры; 4 – индукционный датчик тока; 5 – алюминиевая фольга; 6 – мишень.

Мишень в первом случае вольфрамовая, плотность $\rho = 19.3$ г/см³, набрана из отдельных дисков \varnothing 200 мм и толщиной 20 мм, общая длина мишени по пучку 600 мм; во втором случае мишень хлоридная, твердая, плотность $\rho = 3.047$ г/см³ набрана из отдельных дисков \varnothing 200 мм и толщиной 50 мм, общая длина мишени по пучку 2000 мм. Химический состав мишени 70% молей – NaCl и 30% молей – PbCl₂; весовые доли химических элементов распределены так: Na – 0.129; Cl – 0.371; Pb – 0.5. Активационные детекторы размещались на боковой поверхности мишени при следующих значениях y :

- $y_1 = 20, y_2 = 80, y_3 = 120, y_4 = 170, y_5 = 300, y_6 = 550$ мм (вольфрамовая мишень);
- $y_1 = 25, y_2 = 190, y_3 = 380, y_4 = 740, y_5 = 1230, y_6 = 1660, y_7 = 1970$ мм (хлоридная мишень).

Число выведенных из У-1.5 протонов определялось индукционным датчиком тока в течение каждого суперцикла длительностью ~ 1.5 с, которые следуют с периодом ~ 10 с. В наших экспозициях интенсивность пучка изменялась в пределах $(1-1.3)10^{13}$ протонов за суперцикл. Погрешность определения числа протонов $\pm 5\%$.

Характеристики используемых активационных детекторов можно найти в работе [4]. Режим облучения детекторов: $\Delta T_{\text{обл}}$ – длительность облучения много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, образующегося в детекторе радионуклида, т.е. $\Delta T_{\text{обл}} \ll T_{1/2}$. Обсчет бета-активных нуклидов проведен на радиометрическом измерительном тракте; гамма-активных – на полупроводниковом спектрометре измерительного комплекса, описанного в [4]. Программа обработки информации с измерительного комплекса, учитывая индивидуальные характеристики активационных детекторов, позволяет получить нормированные на один протон значения скоростей реакций используемых активационных детекторов. Полученные данные по скоростям ядерных реакций с погрешностями приведены в **табл. 1** и **2** для вольфрамовой мишени при энергиях протонов $E_p = 0.895$ и $E_p = 1.21$ ГэВ, а для хлоридной мишени – в **табл. 3** и **4** при энергиях $E_p = 0.8$ и $E_p = 1.2$ ГэВ соответственно.

Оценка погрешности δY измерения скорости реакции Y выполнена по формуле

$$\delta Y = \sqrt{(\delta I_p)^2 + (\delta ST)^2 + (\delta G_{\gamma(\beta)})^2},$$

где δI_p – погрешность определения числа протонов за экспозицию; δST – погрешность определения площади фотопика, обусловленная статистикой и методом оценки площади фотопика при работе на гамма-спектрометре, в случае работы на радиометрическом тракте эта погрешность обусловлена статистикой; $\delta G_{\gamma(\beta)}$ – погрешность градуировочных измерений с помощью образцовых источников гамма и бета-излучений.

Следует отметить некоторые *общие закономерности*:

- рост скорости реакции с увеличением энергии первичных протонов;
- рост скорости реакции с увеличением атомного номера мишеней;
- наличие сечения мишени, на котором наблюдается максимальное значение скорости реакции.

В заключение авторы выражают признательность главному менеджеру проектов МНТЦ № 157 и 477 В.И. Белякову-Бодину за предложение принять участие в радиационно-физических исследованиях и обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Venneri F, Bowman C.D, Wender S.A. “The Physic Design of Accelerator - Driven Transmutation Systems”. – Proc. of Int. Conf., GLOBAL’95, Sep. 11-14, 1995, France, pp. 474-481.
- [2] Адо. Ю.М. – Препринт ИФВЭ 93-24, Протвино, 1993.
- [3] Rubbia C. et al. CERN/AT/95-44 (ET), 1995.
- [4] Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А. – Препринт ИФВЭ 2000-30, Протвино, 2000.

Таблица 1: Экспериментальные значения скоростей реакций при $E_p = 0.895$ ГэВ.

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон ⁻¹					
	Y ₁ =20, мм	Y ₂ =80, мм	Y ₃ =120, мм	Y ₄ =170, мм	Y ₅ =300, мм	Y ₆ =550, мм
Rh→ ^{103m} Rh	2.31•10 ⁻²⁷ ±6.1%	4.30•10 ⁻²⁷ ±6.0%	3.90•10 ⁻²⁷ ±6.0%	2.70•10 ⁻²⁷ ±6.0%	7.49•10 ⁻²⁸ ±6.5%	2.10•10 ⁻²⁹ ±7.6%
In→ ^{115m} In	5.75•10 ⁻²⁸ ±6.7%	9.88•10 ⁻²⁸ ±6.6%	9.47•10 ⁻²⁸ ±6.6%	7.17•10 ⁻²⁸ ±6.6%	2.02•10 ⁻²⁸ ±6.6%	6.17•10 ⁻³⁰ ±17.0%
P→ ³¹ Si	1.44•10 ⁻²⁸ ±22.6%	2.34•10 ⁻²⁸ ±22.6%	2.15•10 ⁻²⁸ ±22.6%	1.79•10 ⁻²⁸ ±22.6%	5.81•10 ⁻²⁹ ±22.6%	1.63•10 ⁻³⁰ ±22.7%
S→ ³² P	3.60•10 ⁻²⁸ ±22.6%	4.33•10 ⁻²⁸ ±22.6%	3.78•10 ⁻²⁸ ±22.6%	2.76•10 ⁻²⁸ ±22.6%	6.67•10 ⁻²⁹ ±22.7%	1.73•10 ⁻³⁰ ±22.7%
Al→ ⁷ Be	1.05•10 ⁻³¹ ±52.9%	3.25•10 ⁻³¹ ±29.6%	4.12•10 ⁻³¹ ±27.3%	4.49•10 ⁻³¹ ±28.4%	2.43•10 ⁻³¹ ±31.6%	-
Al→ ²⁷ Mg	4.49•10 ⁻²⁹ ±8.6%	7.10•10 ⁻²⁹ ±6.6%	5.14•10 ⁻²⁹ ±6.6%	3.22•10 ⁻²⁹ ±6.6%	9.96•10 ⁻³⁰ ±6.6%	2.37•10 ⁻³¹ ±7.9%
Al→ ²⁴ Na	3.64•10 ⁻²⁹ ±6.6%	5.89•10 ⁻²⁹ ±6.6%	5.01•10 ⁻²⁹ ±6.6%	3.48•10 ⁻²⁹ ±6.6%	1.02•10 ⁻²⁹ ±6.6%	3.52•10 ⁻³¹ ±8.0%
Al→ ²² Na	4.22•10 ⁻³⁰ ±7.6%	8.88•10 ⁻³⁰ ±6.8%	1.01•10 ⁻²⁹ ±7.2%	8.02•10 ⁻³⁰ ±7.5%	2.80•10 ⁻³⁰ ±10.6%	3.58•10 ⁻³¹ ±18.2%
C→ ¹¹ C	5.94•10 ⁻³⁰ ±22.6%	1.54•10 ⁻²⁹ ±22.6%	1.34•10 ⁻²⁹ ±22.5%	1.64•10 ⁻²⁹ ±22.5%	5.77•10 ⁻³⁰ ±22.6%	2.73•10 ⁻³¹ ±23.2%
Bi→ ²⁰³ Bi	2.50•10 ⁻²⁹ ±24.7%	5.85•10 ⁻²⁹ ±16.1%	5.24•10 ⁻²⁹ ±26.6%	4.09•10 ⁻²⁹ ±28.6%	2.21•10 ⁻²⁹ ±17.1%	4.25•10 ⁻³¹ ±38.5%
Bi→ ²⁰⁴ Bi	6.29•10 ⁻²⁹ ±6.6%	1.10•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.03•10 ⁻²⁸ ±6.6%	9.48•10 ⁻²⁹ ±6.6%	3.28•10 ⁻²⁹ ±6.6%	9.60•10 ⁻³¹ ±6.6%
Bi→ ²⁰⁵ Bi	9.32•10 ⁻²⁹ ±6.6%	-	1.57•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.20•10 ⁻²⁸ ±18.0%	2.53•10 ⁻²⁹ ±26.6%	1.09•10 ⁻³⁰ ±48.6%
Bi→ ²⁰⁶ Bi	1.54•10 ⁻²⁸ ±6.6%	2.43•10 ⁻²⁸ ±6.6%	2.50•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.49•10 ⁻²⁸ ±6.6%	6.34•10 ⁻²⁹ ±6.6%	1.57•10 ⁻³⁰ ±8.7%
Bi→ ²⁰⁷ Bi	3.46•10 ⁻²⁸ ±8.1%	5.63•10 ⁻²⁸ ±5.9%	5.20•10 ⁻²⁸ ±6.2%	3.37•10 ⁻²⁸ ±7.3%	1.27•10 ⁻²⁸ ±7.7%	-

Таблица 2: Экспериментальные значения скоростей реакций при $E_p = 1.21$ ГэВ.

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон ⁻¹					
	Y ₁ =20, мм	Y ₂ =80, мм	Y ₃ =120, мм	Y ₄ =170, мм	Y ₅ =300, мм	Y ₆ =550, мм
Rh→ ^{103m} Rh	3.89•10 ⁻²⁷ ±5.9%	6.28•10 ⁻²⁷ ±5.9%	5.24•10 ⁻²⁷ ±6.1%	4.05•10 ⁻²⁷ ±5.9%	1.42•10 ⁻²⁷ ±6.1%	4.20•10 ⁻²⁹ ±8.2%
In→ ^{115m} In	1.32•10 ⁻²⁷ ±6.6%	1.79•10 ⁻²⁷ ±6.6%	1.66•10 ⁻²⁷ ±6.6%	1.19•10 ⁻²⁷ ±6.6%	3.62•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.10•10 ⁻²⁹ ±6.8%
P→ ³¹ Si	3.43•10 ⁻²⁸ ±22.6%	4.26•10 ⁻²⁸ ±22.6%	3.93•10 ⁻²⁸ ±22.6%	2.88•10 ⁻²⁸ ±22.6%	9.15•10 ⁻²⁹ ±22.6%	3.11•10 ⁻³⁰ ±22.6%
S→ ³² P	4.87•10 ⁻²⁸ ±22.6%	6.53•10 ⁻²⁸ ±22.6%	6.27•10 ⁻²⁸ ±22.6%	4.42•10 ⁻²⁸ ±22.6%	1.39•10 ⁻²⁸ ±22.6%	4.52•10 ⁻³⁰ ±22.6%
Al→ ²⁷ Mg	8.09•10 ⁻²⁹ ±6.6%	1.02•10 ⁻²⁸ ±6.6%	8.86•10 ⁻²⁹ ±6.6%	6.44•10 ⁻²⁹ ±6.6%	2.49•10 ⁻²⁹ ±26.0%	4.54•10 ⁻³¹ ±6.6%
Al→ ⁷ Be	2.37•10 ⁻³¹ ±27.3%	7.95•10 ⁻³¹ ±17.5%	8.02•10 ⁻³¹ ±15.1%	5.85•10 ⁻³¹ ±21.5%	4.03•10 ⁻³¹ ±23%	-
Al→ ²⁴ Na	6.95•10 ⁻²⁹ ±6.6%	9.66•10 ⁻²⁹ ±6.6%	7.91•10 ⁻²⁹ ±6.6%	6.26•10 ⁻²⁹ ±6.6%	2.25•10 ⁻²⁹ ±6.6%	6.58•10 ⁻³¹ ±6.6%
Al→ ²² Na	8.16•10 ⁻³⁰ ±6.6%	1.46•10 ⁻²⁹ ±6.6%	1.44•10 ⁻²⁹ ±6.7%	1.27•10 ⁻²⁹ ±6.7%	5.32•10 ⁻³⁰ ±8.4%	6.60•10 ⁻³¹ ±11.8%
C→ ¹¹ C	7.35•10 ⁻³⁰ ±22.6%	2.21•10 ⁻²⁹ ±22.6%	2.58•10 ⁻²⁹ ±22.6%	2.31•10 ⁻²⁹ ±22.6%	1.14•10 ⁻²⁹ ±22.6%	7.09•10 ⁻³¹ ±22.6%
Bi→ ²⁰³ Bi	2.69•10 ⁻²⁹ ±26.9%	9.78•10 ⁻²⁹ ±16.6%	7.23•10 ⁻²⁹ ±15.9%	6.38•10 ⁻²⁹ ±13.3%	2.82•10 ⁻²⁹ ±13.9%	9.78•10 ⁻³¹ ±21.0%
Bi→ ²⁰⁴ Bi	1.05•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.65•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.56•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.38•10 ⁻²⁸ ±6.6%	5.76•10 ⁻²⁹ ±6.6%	2.62•10 ⁻³⁰ ±6.8%
Bi→ ²⁰⁵ Bi	1.61•10 ⁻²⁸ ±6.6%	2.51•10 ⁻²⁸ ±6.6%	2.24•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.58•10 ⁻²⁸ ±6.7%	8.57•10 ⁻²⁹ ±6.8%	3.07•10 ⁻³⁰ ±13.8%
Bi→ ²⁰⁶ Bi	3.06•10 ⁻²⁸ ±6.6%	4.58•10 ⁻²⁸ ±6.6%	4.08•10 ⁻²⁸ ±6.6%	3.60•10 ⁻²⁸ ±6.6%	1.41•10 ⁻²⁸ ±6.6%	3.23•10 ⁻³⁰ ±6.7%
Bi→ ²⁰⁷ Bi	5.85•10 ⁻²⁸ ±6.9%	7.99•10 ⁻²⁸ ±4.0%	7.10•10 ⁻²⁸ ±3.6%	6.13•10 ⁻²⁸ ±3.6%	2.30•10 ⁻²⁸ ±5.0%	-

Таблица 3: Экспериментальные значения скоростей реакций при $E_p = 0.8$ ГэВ.

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон ⁻¹						
	Y ₁ =25, мм	Y ₂ =190, мм	Y ₃ =380, мм	Y ₄ =740, мм	Y ₅ =1230, мм	Y ₆ =1660, мм	Y ₇ =1970, мм
Rh→ ^{103m} Rh	5.07•10 ⁻²⁸ ±7.0%	7.63•10 ⁻²⁸ ±7.0%	6.92•10 ⁻²⁸ ±7.0%	2.83•10 ⁻²⁸ ±7.0%	5.90•10 ⁻²⁹ ±9.0%	4.78•10 ⁻³⁰ ±29.7%	-
In→ ^{115m} In	2.40•10 ⁻²⁸ ±8.2%	3.52•10 ⁻²⁸ ±8.6%	2.83•10 ⁻²⁸ ±8.8%	1.21•10 ⁻²⁸ ±9.0%	1.50•10 ⁻²⁹ ±9.4%	2.15•10 ⁻³⁰ ±10.6%	1.46•10 ⁻³⁰ ±13.9%
P→ ³¹ Si	5.30•10 ⁻²⁹ ±25.5%	8.14•10 ⁻²⁹ ±25.5%	6.09•10 ⁻²⁹ ±25.5%	3.03•10 ⁻²⁹ ±25.5%	4.44•10 ⁻³⁰ ±25.6%	4.53•10 ⁻³¹ ±26.2%	2.71•10 ⁻³¹ ±26.9%
S→ ³² P	9.79•10 ⁻²⁹ ±25.5%	1.59•10 ⁻²⁸ ±25.5%	1.16•10 ⁻²⁸ ±25.5%	5.07•10 ⁻²⁹ ±25.6%	6.60•10 ⁻³⁰ ±26.2%	8.44•10 ⁻³¹ ±36.0%	6.11•10 ⁻³¹ ±46.0%
Al→ ⁷ Be	5.58•10 ⁻³² ±34.0%	2.85•10 ⁻³¹ ±12.4%	4.97•10 ⁻³¹ ±8.4%	4.06•10 ⁻³¹ ±9.3%	4.63•10 ⁻³² ±29.0%	-	-
Al→ ²⁷ Mg	1.01•10 ⁻²⁹ ±13.5%	1.69•10 ⁻²⁹ ±12.1%	1.30•10 ⁻²⁹ ±9.3%	5.02•10 ⁻³⁰ ±8.0%	5.62•10 ⁻³¹ ±9.3%	5.12•10 ⁻³² ±12.7%	3.40•10 ⁻³² ±11.5%
Al→ ²⁴ Na	1.01•10 ⁻²⁹ ±6.2%	2.02•10 ⁻²⁹ ±6.5%	1.85•10 ⁻²⁹ ±6.3%	8.27•10 ⁻³⁰ ±6.3%	1.30•10 ⁻³⁰ ±6.2%	1.41•10 ⁻³¹ ±6.3%	5.84•10 ⁻³² ±7.1%
Al→ ²² Na	1.44•10 ⁻³⁰ ±7.2%	6.12•10 ⁻³⁰ ±6.2%	6.97•10 ⁻³⁰ ±6.1%	4.18•10 ⁻³⁰ ±7.1%	1.25•10 ⁻³⁰ ±9.1%	-	-
C→ ¹¹ C	7.37•10 ⁻³¹ ±25.6%	3.01•10 ⁻³⁰ ±25.5%	3.87•10 ⁻³⁰ ±25.5%	1.93•10 ⁻³⁰ ±25.5%	9.95•10 ⁻³¹ ±25.5%	4.23•10 ⁻³² ±25.8%	1.65•10 ⁻³² ±26.0%
Nb→ ^{92m} Nb	3.35•10 ⁻²⁹ ±6.5%	6.22•10 ⁻²⁹ ±7.6%	4.79•10 ⁻²⁹ ±6.5%	2.07•10 ⁻²⁹ ±8.7%	4.48•10 ⁻³⁰ ±8.0%	3.10•10 ⁻³¹ ±13.3%	1.10•10 ⁻³¹ ±12.2%
Bi→ ²⁰¹ Bi	-	-	3.33•10 ⁻³⁰ ±30.8%	-	-	-	-
Bi→ ²⁰² Bi	1.01•10 ⁻²⁹ ±11.9%	3.47•10 ⁻²⁹ ±11.9%	2.90•10 ⁻²⁹ ±12.2%	1.59•10 ⁻²⁹ ±14.5%	3.26•10 ⁻³⁰ ±13.7%	3.26•10 ⁻³¹ ±12.9%	7.62•10 ⁻³² ±28.7%
Bi→ ²⁰³ Bi	1.07•10 ⁻²⁹ ±14.7%	4.00•10 ⁻²⁹ ±17.7%	4.59•10 ⁻²⁹ ±15.1%	2.53•10 ⁻²⁹ ±17.0%	5.81•10 ⁻³⁰ ±16.5%	3.25•10 ⁻³¹ ±18.4%	-
Bi→ ²⁰⁴ Bi	1.77•10 ⁻²⁹ ±7.4%	5.66•10 ⁻²⁹ ±7.4%	5.56•10 ⁻²⁹ ±7.0%	3.03•10 ⁻²⁹ ±8.6%	9.68•10 ⁻³⁰ ±6.9%	4.06•10 ⁻³¹ ±8.3%	1.38•10 ⁻³¹ ±18.7%
Bi→ ²⁰⁵ Bi	2.62•10 ⁻²⁹ ±7.3%	6.75•10 ⁻²⁹ ±7.9%	6.83•10 ⁻²⁹ ±7.3%	3.58•10 ⁻²⁹ ±7.7%	1.24•10 ⁻²⁹ ±6.6%	6.05•10 ⁻³¹ ±10.0%	1.79•10 ⁻³¹ ±22.9%
Bi→ ²⁰⁶ Bi	3.68•10 ⁻²⁹ ±7.0%	9.42•10 ⁻²⁹ ±7.1%	8.47•10 ⁻²⁹ ±7.1%	3.59•10 ⁻²⁹ ±8.3%	8.93•10 ⁻³⁰ ±6.5%	5.35•10 ⁻³¹ ±10.1%	1.84•10 ⁻³¹ ±10.5%
Bi→ ²⁰⁷ Bi	-	1.36•10 ⁻²⁸ ±30.6%	8.92•10 ⁻²⁹ ±40.3%	-	-	-	-

Таблица 4: Экспериментальные значения скоростей реакций при $E_p = 1.2$ ГэВ.

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон ⁻¹						
	Y ₁ =25, ММ	Y ₂ =190, ММ	Y ₃ =380, ММ	Y ₄ =740, ММ	Y ₅ =1230, ММ	Y ₆ =1660, ММ	Y ₇ =1970, ММ
Rh→ ^{103m} Rh	5.39•10 ⁻²⁸ ±7.0%	9.52•10 ⁻²⁸ ±7.0%	7.80•10 ⁻²⁸ ±7.0%	3.93•10 ⁻²⁸ ±7.0%	1.38•10 ⁻²⁸ ±8.0%	4.02•10 ⁻²⁹ ±9.0%	1.25•10 ⁻²⁹ ±12.0%
In→ ^{115m} In	3.27•10 ⁻²⁸ ±7.8%	5.34•10 ⁻²⁸ ±7.9%	4.46•10 ⁻²⁸ ±8.7%	2.15•10 ⁻²⁸ ±8.0%	6.06•10 ⁻²⁹ ±9.4%	1.47•10 ⁻²⁹ ±11.0%	5.35•10 ⁻³⁰ ±12.0%
P→ ³¹ Si	7.71•10 ⁻²⁹ ±25.5%	1.27•10 ⁻²⁸ ±25.5%	1.13•10 ⁻²⁸ ±25.5%	5.79•10 ⁻²⁹ ±25.5%	1.72•10 ⁻²⁹ ±25.5%	4.16•10 ⁻³⁰ ±25.6%	1.52•10 ⁻³⁰ ±25.7%
S→ ³² P	1.52•10 ⁻²⁸ ±25.5%	2.57•10 ⁻²⁸ ±25.5%	2.16•10 ⁻²⁸ ±25.5%	1.08•10 ⁻²⁸ ±25.5%	2.95•10 ⁻²⁹ ±25.6%	6.29•10 ⁻³⁰ ±26.1%	2.42•10 ⁻³⁰ ±27.8%
Al→ ⁷ Be	9.87•10 ⁻³² ±17.0%	6.49•10 ⁻³¹ ±8.6%	9.59•10 ⁻³¹ ±8.2%	7.79•10 ⁻³¹ ±7.4%	4.25•10 ⁻³¹ ±10.6%	1.07•10 ⁻³¹ ±16.5%	-
Al→ ²⁷ Mg	1.41•10 ⁻²⁹ ±9.5%	2.40•10 ⁻²⁹ ±8.9%	2.50•10 ⁻²⁹ ±10.3%	1.27•10 ⁻²⁹ ±9.9%	9.77•10 ⁻³¹ ±8.3%	3.87•10 ⁻³¹ ±7.9%	1.88•10 ⁻³¹ ±7.3%
Al→ ²⁴ Na	1.73•10 ⁻²⁹ ±6.1%	3.22•10 ⁻²⁹ ±6.3%	3.02•10 ⁻²⁹ ±6.2%	1.53•10 ⁻²⁹ ±6.1%	4.72•10 ⁻³⁰ ±6.3%	1.14•10 ⁻³⁰ ±6.1%	3.70•10 ⁻³¹ ±6.3%
Al→ ²² Na	2.80•10 ⁻³⁰ ±6.5%	9.15•10 ⁻³⁰ ±6.2%	1.05•10 ⁻²⁹ ±6.3%	6.52•10 ⁻³⁰ ±6.0%	2.65•10 ⁻³⁰ ±6.9%	7.67•10 ⁻³¹ ±11.1%	-
C→ ¹¹ C	1.01•10 ⁻³⁰ ±25.6%	3.14•10 ⁻³⁰ ±25.5%	6.16•10 ⁻³⁰ ±25.5%	6.00•10 ⁻³⁰ ±25.5%	1.65•10 ⁻³⁰ ±25.5%	6.40•10 ⁻³¹ ±25.5%	2.97•10 ⁻³¹ ±25.5%
Nb→ ^{92m} Nb	5.60•10 ⁻²⁹ ±6.0%	9.13•10 ⁻²⁹ ±6.1%	8.28•10 ⁻²⁹ ±6.2%	4.09•10 ⁻²⁹ ±6.3%	1.29•10 ⁻²⁹ ±6.5%	2.72•10 ⁻³⁰ ±8.8%	9.95•10 ⁻³¹ ±10.3%
Bi→ ²⁰¹ Bi	-	-	5.12•10 ⁻³⁰ ±28.8%	-	-	-	-
Bi→ ²⁰² Bi	1.22•10 ⁻²⁹ ±8.5%	4.77•10 ⁻²⁹ ±7.8%	4.85•10 ⁻²⁹ ±7.7%	2.79•10 ⁻²⁹ ±7.7%	1.02•10 ⁻²⁹ ±9.0%	3.30•10 ⁻³⁰ ±8.3%	1.32•10 ⁻³⁰ ±9.3%
Bi→ ²⁰³ Bi	1.73•10 ⁻²⁹ ±15.5%	5.98•10 ⁻²⁹ ±17.2%	5.83•10 ⁻²⁹ ±15.6%	3.85•10 ⁻²⁹ ±15.3%	1.22•10 ⁻²⁹ ±16.7%	3.65•10 ⁻³⁰ ±17.0%	1.42•10 ⁻³⁰ ±18.8%
Bi→ ²⁰⁴ Bi	3.10•10 ⁻²⁹ ±6.9%	8.39•10 ⁻²⁹ ±7.0%	8.19•10 ⁻²⁹ ±7.7%	4.87•10 ⁻²⁹ ±8.3%	1.57•10 ⁻²⁹ ±9.2%	4.75•10 ⁻³⁰ ±9.8%	1.75•10 ⁻³⁰ ±9.7%
Bi→ ²⁰⁵ Bi	4.48•10 ⁻²⁹ ±7.4%	1.05•10 ⁻²⁸ ±6.9%	1.08•10 ⁻²⁸ ±7.2%	5.78•10 ⁻²⁹ ±7.9%	2.11•10 ⁻²⁹ ±8.4%	5.88•10 ⁻³⁰ ±7.9%	2.26•10 ⁻³⁰ ±7.1%
Bi→ ²⁰⁶ Bi	6.88•10 ⁻²⁹ ±7.0%	1.34•10 ⁻²⁸ ±7.5%	1.14•10 ⁻²⁸ ±7.8%	6.88•10 ⁻²⁹ ±7.7%	1.82•10 ⁻²⁹ ±9.0%	3.97•10 ⁻³⁰ ±8.9%	1.57•10 ⁻³⁰ ±9.5%
Bi→ ²⁰⁷ Bi	1.45•10 ⁻²⁸ ±4.3%	2.89•10 ⁻²⁸ ±5.8%	2.62•10 ⁻²⁸ ±5.0%	1.32•10 ⁻²⁸ ±6.9%	4.12•10 ⁻²⁹ ±8.9%	-	-