

P1-2001-167

В.С.Бутцев, Г.Л.Бутцева, С.Ю.Дударев, С.В.Корнеев¹,
Б.А.Марцинкевич², А.М.Хильманович², С.Е.Чигринов¹,
Д.Чултэм

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ
ОБРАЗОВАНИЯ ^7Be ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ С ВОДОЙ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹Академический научно-технический комплекс «Сосны», Минск

²Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Белоруссии, Минск

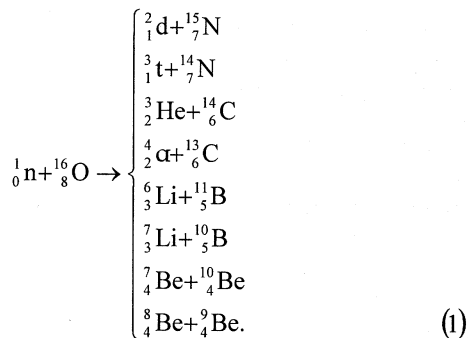
1. Введение

В установках по электроядерному способу получения энергии при взаимодействии протонов с мишенью рождаются быстрые нейтроны с широким спектром энергий (вплоть до энергии падающих протонов) ~1ГэВ. Эти нейтроны, взаимодействуя с делящимися материалами подкритических систем, вызывают ядерные реакции с выделением энергии.

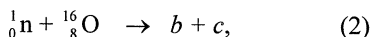
В будущих подкритических системах помимо делящихся материалов должны присутствовать конструкционные материалы и теплоносители. В связи с этим возникает вопрос: в какой степени активизируется то или иное вещество под действием нейтронов высоких энергий. Наибольший интерес представляют радиоактивные ядра-продукты, которые вносят определяющий вклад в дозовую нагрузку.

Среди материалов, которые будут использоваться в будущих системах для получения энергии, предполагается применять окислы элементов, в частности воду. Делящиеся материалы подкритических систем также могут использоваться в виде окислов.

При взаимодействии нейтронов с энергиями < 20 МэВ с водой долгоживущие радионуклиды не образуются. Для более высоких энергий возможны многочастичные реакции, приводящие к распаду ядра ^{16}O на отдельные фрагменты. Ниже рассматриваются случаи двух фрагментов в конечных состояниях:



В формуле (1) приведены ядерные реакции



в которых образуются наиболее устойчивые частицы или ядра. Все перечисленные ядерные реакции являются пороговыми. В табл. 1 представлены значения пороговой энергии T_p , рассчитанные на основе данных [1] по формуле

$$T = Q \frac{A+1}{A}, \quad (3)$$

где Q означает дефект масс нейтрона и ядра $^{16}_8\text{O}$ и ядер-продуктов реакции b и c :

$$Q = (\Delta_n + \Delta_{^{16}\text{O}}) - (\Delta_b + \Delta_c). \quad (4)$$

Коэффициент $(A+1)/A$ учитывает движение ядер в системе координат, связанной с центром инерции. В этой же таблице приведены периоды полураспада ядер-продуктов $T_{1/2}$.

Таблица 1

Значения пороговых энергий T ядерных реакций и периодов полураспада ядер-продуктов $T_{1/2}$

№ реакции	Ядро-продукт (b)	$T_{1/2}(b)$	Ядро-продукт (c)	$T_{1/2}(c)$	T , МэВ
1	^2_1d	стабил.	$^{15}_7\text{N}$	стабил.	20,90
2	^3_1t	12,3 лет	$^{14}_7\text{N}$	стабил.	6,81
3	^3_2He	стабил.	$^{14}_6\text{C}$	5730 лет	15,53
4	$^4_2\alpha$	стабил.	$^{13}_6\text{C}$	стабил.	2,35
5	^6_3Li	стабил.	$^{11}_5\text{B}$	стабил.	20,63
6	^7_3Li	стабил.	$^{10}_5\text{B}$	стабил.	25,10
7	^7_4Be	53,29 сут	$^{10}_4\text{Be}$	$1,6 \cdot 10^6$ лет	26,61
8	^8_4Be	$\approx 2,3 \cdot 10^{-16}$ с	^9_4Be	стабил.	13,77

Анализ значений энергий пороговых реакций показывает, что нейтроны, образующиеся при взаимодействии протонов со свинцовой мишенью, обладают достаточной энергией для деления ядра $^{16}_8\text{O}$ на два осколка.

Из всех перечисленных реакций наибольший интерес с точки зрения радиационной техники безопасности представляет реакция №7 с образованием нуклида ^7_4Be , имеющего период полураспада 53,29 суток. Остальные ядро-продукты не представляют большой опасности вследствие их малого периода полураспада (^8_4Be), большого периода полураспада и отсутствия γ -квантов ($^{10}_4\text{Be}$) или возможности образовывать летучие химические соединения, аналогичные радионуклидам природного происхождения (^3_1t , $^{14}_6\text{C}$).

Ядро ^7_4Be имеет благоприятные для экспериментального исследования ядерно - физические характеристики ($T_{1/2} = 53,29$ сут, $E_\gamma = 477,6$ кэВ и выход γ -квантов на один распад ядра $p = 0,103$). Порог реакции № 7 с образованием ^7_4Be ($T = 26,61$ МэВ) – наибольший среди остальных реакций, приведенных в табл. 1.

Отметим, что помимо реакции №7 ${}^1_0\text{n} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^{10}_4\text{Be}$ (1) радионуклид ${}^7_4\text{Be}$ может образовываться и в более сложных процессах (${}^1_0\text{n} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \text{X}$) с испусканием трех и более фрагментов. Однако пороговое значение энергии для таких процессов $T > 26,61$ МэВ, а эффективное сечение, по-видимому, меньше. Таким образом, в настоящей работе измеряется суммарное значение сечения реакций образования ${}^7_4\text{Be}$ при взаимодействии быстрых нейтронов с водой.

Авторам не известны экспериментальные работы по измерению поперечного сечения реакции ${}^1_0\text{n} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^{10}_4\text{Be}$. В [2] приведены функции упругого, неупругого и общего сечений для рассматриваемой области энергий нейтронов $E_n = 26 \dots 50$ МэВ. В соответствии с рисунками (см. [2, с. 107, 108]) сечение неупругих процессов $\sigma_{\text{in}}(E_n)$ плавно уменьшается от $\sigma_{\text{in}}(26 \text{ МэВ}) = 5,7$ барн до $\sigma_{\text{in}}(50 \text{ МэВ}) = 0,4$ барн.

2. Экспериментальная часть

Пучок протонов с энергией 0,9 ГэВ падает на свинцовую мишень, имеющую форму цилиндра диаметром 100 мм и длиной 500 мм. Дважды дистиллированная вода объемом 2 л помещается в цилиндрический сосуд диаметром 100 мм и длиной 250 мм. Оси обоих цилиндров параллельны между собой. Расстояние между осями составляет 210 мм. За время облучения $t_a = 195$ мин полная интенсивность протонов равна $5,6 \cdot 10^{13}$.

Облученная нейтронами вода после перемешивания заливалась в сосуд Маринелли ёмкостью 1 л. Сосуд с облученной водой помещался на детектор γ -спектрометра [3]. Эффективность регистрации спектрометром γ -квантов с $E_\gamma = 477,6$ кэВ для образца воды в сосуде Маринелли составляет $\epsilon = 0,0317$. После выдержки в течение $t_s = 18$ суток активность облученной воды регистрировалась в течение $t_m = 24$ часов. Для учета возможного вклада фона в область фотопика с $E_\gamma = 477,6$ кэВ в аналогичных условиях регистрировался γ -спектр с необлученной водой. Фоновых отсчетов в спектре в области данного фотопика не обнаружено. Было выполнено несколько измерений γ -спектров для доказательства присутствия в облученной воде излучающего нуклида ${}^7_4\text{Be}$, имеющего период полураспада $T_{1/2} = 53,29$ суток.

Экспериментальное значение удельной активности A_0 образовавшегося нуклида ${}^7_4\text{Be}$ на момент окончания облучения нейтронами:

$$A_0 = \frac{S}{m \epsilon \exp(-\lambda t_s) [1 - \exp(-\lambda t_m)] / \lambda}, \quad (5)$$

составило 0,0925 Бк/г. При расчете по этой формуле использованы значения: $S = 22347$ – число отсчетов в фотопике, $m = 1000$ г – масса воды, $\lambda = 1,505 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ – постоянная распада. Относительная статистическая погрешность числа отсчетов $\delta S = 0,7 \%$.

Плотность потока быстрых нейтронов мониторировалась с помощью пороговых активационных детекторов Co, Au и Bi.

3. Анализ полученных экспериментальных результатов и выводы

Очевидно, что значения удельной активности для разных точек объема облучаемой воды различны. Вместе с тем оценки показывают, что они отличаются от среднего значения менее чем на 10 %. Процедура перемешивания воды приводит к усреднению наведенной активности по объему.

Скорость реакции или активационный интеграл

$$I = \int_T^{E_{\max}} \sigma(E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (6)$$

связан с удельной активностью A_0 известным соотношением:

$$A_0 = \frac{kN_A}{M} [1 - \exp(-\lambda_a)] I. \quad (7)$$

Здесь N_A – число Авогадро, $M = 16$ – атомная масса кислорода, $k = 0,888$ – массовая часть кислорода в воде. После подстановки численных значений физических величин в (7) имеем $I = 1,58 \cdot 10^{-21} \text{ c}^{-1}$.

Значение искомой величины – усредненного по спектру нейтронов сечения реакции $\langle \sigma(E_n) \rangle$ – рассчитывается как

$$\langle \sigma(E_n) \rangle = \frac{I}{F}, \quad (8)$$

где F – плотность потока быстрых нейтронов с энергией выше порога реакции T . Расчет функции $\phi(E_n)$ представляет значительную трудность. Однако в нашем случае ее можно обойти следующим образом. Порог реакции $^{197}\text{Au}(n, 4n)^{194}\text{Au}$ равен $T = 23,3$ МэВ и близок к порогу реакции № 7 с образованием ^7_4Be ($T = 26,6$ МэВ). Поэтому, зная функцию $\sigma(E_n)$ и экспериментальное значение скорости реакции $^{197}\text{Au}(n, 4n)^{194}\text{Au}$, можно рассчитать плотность потока быстрых нейтронов: $F = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$. Предполагая, что зависимости от энергии сечений обеих реакций сходны по форме, полученное значение плотности потока нейтронов можно использовать для расчета усредненного по спектру нейтронов сечения реакции $^1_0n + ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^7_4\text{Be} + ^{10}_4\text{Be}$. Расчет дает значение $\langle \sigma(E_n) \rangle = 0,0013$ барн. Относительная погрешность найденного значения сечения не превышает 20%.

В заключение отметим, что существуют трудности при объяснении аномально большой распространенности нечетного изотопа лития ^7_3Li [4] по

отношению к четному - ${}^6_3\text{Li}$. По-видимому, реакция взаимодействия быстрых нейтронов с кислородом ${}^1_0\text{n} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^{10}_4\text{Be}$, имеющая достаточно большое сечение, является существенным источником образования ${}^7_3\text{Li}$.

Отметим также, что помимо реакции №7, приводящей к образованию радионуклидов в соответствии со схемой (1), возможна и реакция № 6 ${}^1_0\text{n} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^{10}_5\text{B}$ с прямым образованием нуклида ${}^7_3\text{Li}$. Однако регистрация такого процесса более сложная: ядра ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^{10}_5\text{B}$ являются стабильными.

Авторы выражают признательность за внимание и помощь в выполнении работы сотрудникам ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна), Института радиационных физико-химических проблем НАН Белоруссии (г. Минск) и Фонду фундаментальных исследований Республики Белоруссии.

Литература

1. В.А.Кравцов. Массы атомов и энергии связи ядер. Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1974.
2. В.С.Барашенков. Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Дубна: ОИЯИ, 1993.
3. С.Ф.Бульга, В.Г.Гуло, И.В.Жук, А.И.Киевицкая, С.В.Корнеев, С.Э.Мазаник, В.П.Петрушкевич, И.Л.Рахно, Л.П.Рогинец, Л.И.Сальников, И.Г.Серафимович, Д.В.Скабицкий, Ю.Г.Фоков, И.А.Цеханович, С.Е.Чигринов, Б.А.Марцынкевич, А.М.Хильманович, Г.Г.Воронин, В.Л.Захаренко, А.В.Морозов, Н.П.Пикулас, Г.И.Гусев. Нейтронный генератор НГ-12-1 – базовая установка для проведения исследований в Нейтронном центре Национальной академии наук Беларуси. Препринт ИРФХП-21. Минск, 1998.
4. Я.М.Крамаровский, В.П.Чечев. Синтез элементов во вселенной. М.: Главная редакция физмат. литературы, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 августа 2001 года.

Бутцев В.С. и др.

P1-2001-167

Экспериментальное определение значения эффективного сечения реакции образования ${}^7\text{Be}$ при взаимодействии быстрых нейтронов с водой

В работе измерено сечение образования ${}^7\text{Be}$ при взаимодействии быстрых нейтронов с ${}^{16}\text{O}$. Быстрые нейтроны образовывались в результате взаимодействия протонов с энергией 0,9 ГэВ со свинцовой мишенью длиной 500 мм. Измеренное сечение, усредненное по ${}^7\text{Be}$ спектру нейтронов, дало значение $\langle\sigma(E_n)\rangle = 0,0013$ б с относительной погрешностью 20 %.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Buttsev V.S. et al.

P1-2001-167

An Effective Cross Section of Fast Neutron Reaction ${}^{16}\text{O}(n,x){}^7\text{Be}$ in Light Water

An averaged cross section of production of ${}^7\text{Be}$ by fast neutrons from $\varnothing 8 \times 50$ cm lead target irradiated with 0,9 GeV protons has been determined. It is equal: $\langle\sigma(E_n)\rangle = 0.00130 \pm 0.00026$ b.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 28.09.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,7
Тираж 385. Заказ 52875. Цена 70 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области