

УДК 539.172.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ (γ, p) - И $(\gamma, 2n)$ -РЕАКЦИЙ НА ПРОЦЕССЫ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНОГО ПУЧКА γ -КВАНТОВ

С. С. Бородина, Б. С. Ишханов, В. И. Моксеев

(НИИЯФ)

Исследовано влияние различных каналов фоторасщепления ядер на временную эволюцию изотопов трансмутационной цепочки ^{90}Sr . Показано, что каналы со сравнительно небольшим вкладом (до 15%) в полное сечение могут значительно влиять на временную эволюцию изотопов.

Изучение временной эволюции изотопов под действием γ -квантов высокой интенсивности необходимо при решении ряда прикладных (расчет трансмутации радиоактивных изотопов, создание источников высокой интенсивности, допинг полупроводников) и фундаментальных (изучение нуклеосинтеза, эволюции звезд) задач.

В работах [1, 2] развита модель описания временной эволюции цепочки изотопов ($A > 60$), образующихся под действием тормозного пучка фотонов с энергией до 100 МэВ. Как известно, вклад (γ, n) -реакций в полное сечение фоторасщепления этих ядер составляет 70–80%. В связи с этим в модели [2] учи-

тывались только (γ, n) -реакции и β^\pm -распады образующихся в фотонейтронных реакциях изотопов. Согласно [3, 4], следующими по величине интегрального сечения являются (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакции. Для учета этих каналов трансмутационную цепочку необходимо дополнить изотопами Rb, образующимися в (γ, p) -реакциях на Sr, а также изотопами Y и Zr, заселяемыми в $(\gamma, 2n)$ -реакциях (пунктир на рис. 1). Сложная динамика взаимных переходов может приводить к существенным изменениям не только в составе, но и в содержании изотопов. Таким образом, представляет интерес исследовать влияние вкладов (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакций на процессы трансмутации.

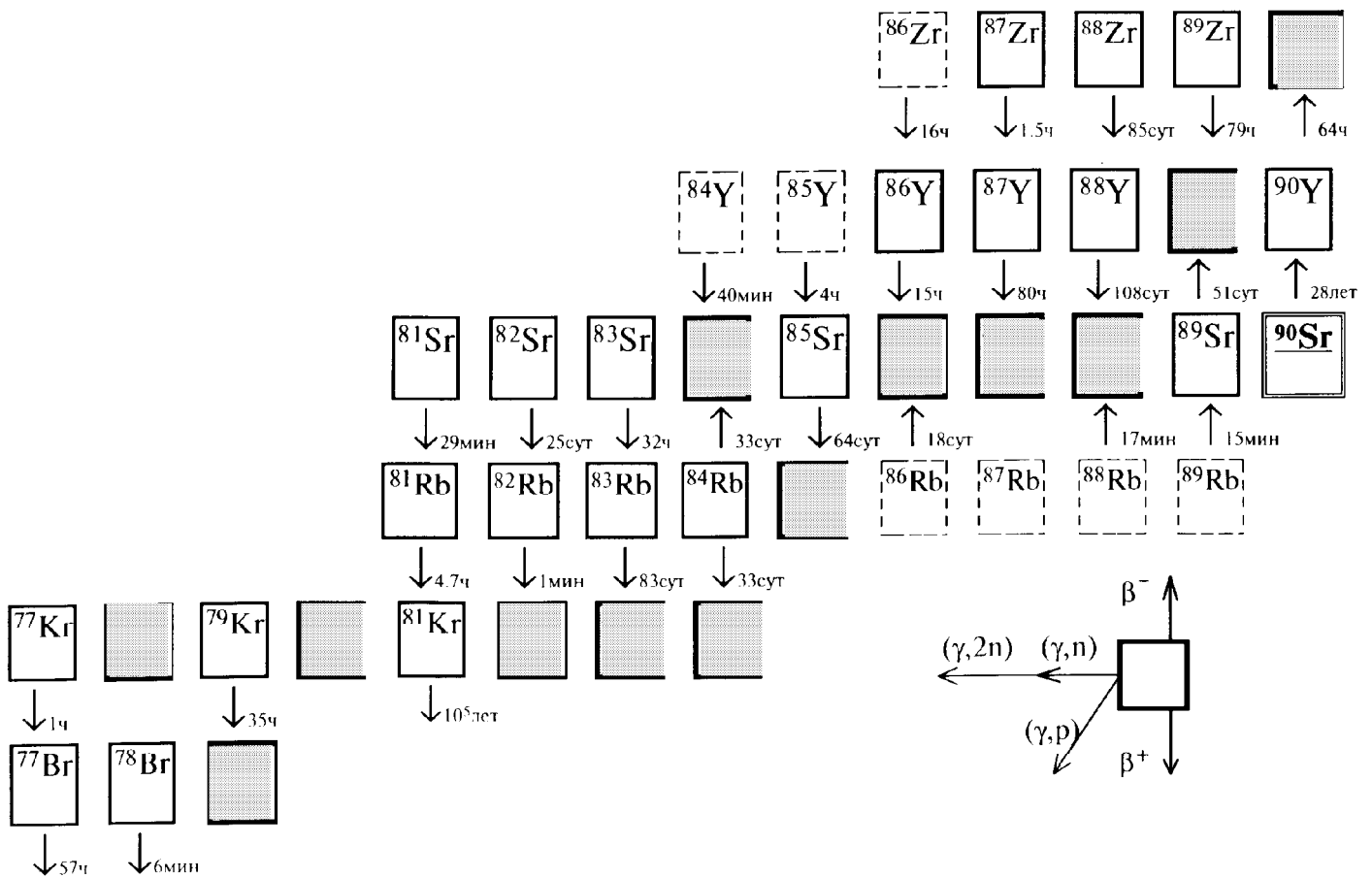


Рис. 1. Трансмутационная цепочка ^{90}Sr . Запунктированные ячейки — стабильные изотопы, пунктирные — изотопы, образующиеся в результате (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакций

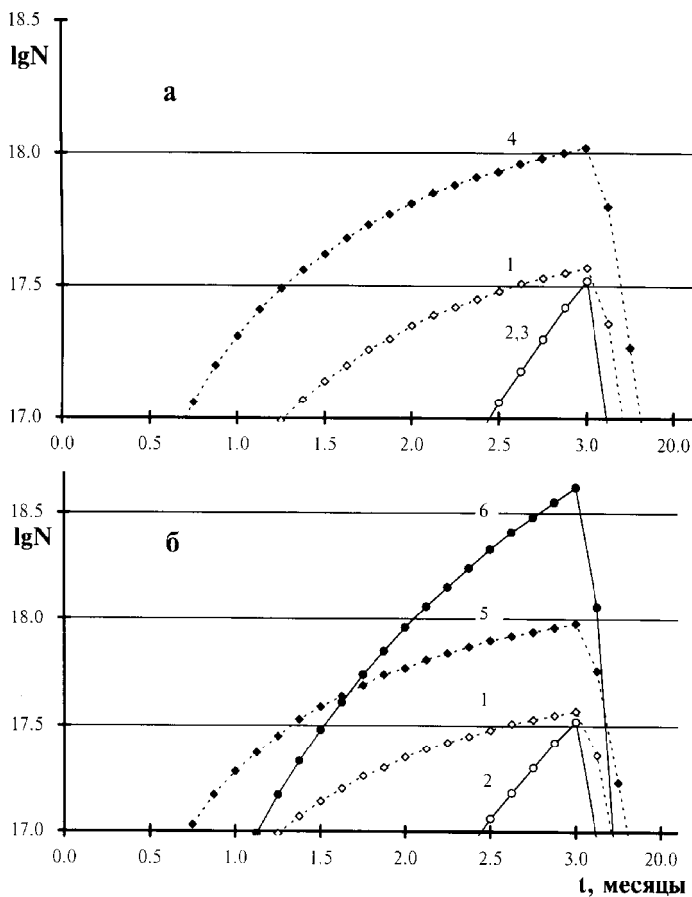


Рис. 2. Временная эволюция содержания изотопов ^{88}Zr и ^{84}Rb с учетом только (γ, n) -реакций на всех изотопах (соответственно кривые 1 и 2 на рис. а и б), дополнительного вклада (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакций только на ядре ^{90}Zr (4, 3) и на всех изотопах (5, 6)

Большинство ядер цепочки — радиоактивные изотопы, поэтому экспериментальная информация о сечениях их фоторасщепления отсутствует. В связи с этим необходимо оценить влияние ошибок вычисления парциальных сечений на отдельных изотопах на описание процессов трансмутации в целом. С этой целью первоначально были выполнены расчеты временной эволюции содержания элементов трансмутационной цепочки ^{90}Sr с учетом вклада (γ, n) -реакций. В начальный момент облучения пучком тормозных фотонов интенсивностью 10^{18} фотон/(с·см²) с верхней границей спектра 30 МэВ содержание ^{90}Sr составляло 10^{22} ядер, остальные изотопы отсутствовали. При этом (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакции дополнительно учитывались только на ^{90}Zr . Полученные временные зависимости содержания изотопа, близко расположенного к ^{90}Zr (^{88}Zr) и удаленного (^{84}Rb), представлены на рис. 2, а.

Выполненные расчеты показали, что учет реакций (γ, p) и $(\gamma, 2n)$ на ^{90}Zr приводит к изменению содержания близлежащих изотопов. Наблюдается увеличение в содержании ^{88}Zr в 3 раза. Это связано с тем, что малое время жизни ^{89}Zr ($T_{1/2}=79$ ч) препятствует образованию ^{88}Zr путем двух последовательных

(γ, n) -переходов, и этот изотоп заселяется в существенной мере за счет $(\gamma, 2n)$ -реакций. Таким образом, специфика динамики взаимных превращений изотопов Zr приводит к большим изменениям в содержании ^{88}Zr при учете вклада $(\gamma, 2n)$ -канала, несмотря на его малую долю в полном сечении фоторасщепления ^{90}Zr (8%).

Изменения (до 15%) парциальных сечений фоторасщепления на отдельных изотопах [3, 4] влияют на временную эволюцию лишь близлежащих ядер и почти не меняют удаленные. Содержание изотопа ^{84}Rb представлено на рис. 2, а.

Таким образом, для описания цепочки в целом возможно использовать усредненные по изотопам парциальные сечения фоторасщепления.

На следующем этапе был выполнен расчет временной эволюции трансмутационной цепочки ^{90}Sr (при описанных выше условиях облучения) с учетом вкладов (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -каналов на всех изотопах. Серьезной проблемой является отсутствие экспериментальных сечений этих реакций на всех включенных в цепочку изотопах (кроме ^{90}Zr). Поэтому в расчетах использовались усредненные оценки. Согласно систематике данных [2, 3] в области массовых чисел от 70 до 100 сечения (γ, p) -реакций составляют 10%, а $(\gamma, 2n)$ -реакций — 15% полного сечения фотопоглощения. На рис. 2, б показаны результаты расчетов содержания изотопов ^{88}Zr и ^{84}Rb . Учет (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакций для всей совокупности изотопов цепочки оказывает влияние на временную эволюцию всех ядер. Эффект особенно выражен на удаленных изотопах: содержание ^{84}Rb возрастает на порядок величины, что связано с дополнительным заселением этого ядра в (γ, p) -реакциях на изотопах Sr, Y и Zr (рис. 1).

Учет (γ, p) - и $(\gamma, 2n)$ -реакций ведет к возрастанию (на порядок величины) суммарной активности системы в начальный период облучения. Это связано с образованием короткоживущих изотопов ^{88}Rb и ^{89}Rb в (γ, p) -реакциях. Однако после выключения пучка эти изотопы быстро распадаются и суммарная активность оказывается такой же, как и в случае, когда учитывается только (γ, n) -канал.

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что модель [2], учитывающая лишь основной (γ, n) -канал фоторасщепления, позволяет описать снижение суммарной активности изотопов в процессе трансмутации. Детальное описание временной эволюции содержания и активности отдельных изотопов требует учета конкуренции различных каналов фоторасщепления.

Литература

1. Бородина С.С., Ииханов Б.С., Мокеев В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 2. С. 6 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 2).

2. *Бородин С.С., Ииханов Б.С., Мокеев В.И.* // Там же. 1998. № 1. С. 22 (Ibid. 1998. No. 1).
3. *Варламов В.В., Сапуненко В.В., Степанов М.Е.* Фотоядерные данные 1976–1995. М., 1996.
4. *Berman B.L.* Atlas of Photoneutron Cross-sections Obtained with Monoenergetic Photons.

Поступила в редакцию
29.10.97