

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.17

ТРАЕКТОРИИ ТРАНСМУТАЦИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИЗОТОПОВ $^{120,122,124}\text{Sn}$ ИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ γ -КВАНТОВ

Б. С. Ишханов, С. И. Павлов

(НИИЯФ)

E-mail: pavlov@depni.npi.msu.su

Трансмутация атомных ядер под действием интенсивных потоков γ -квантов приводит к образованию химических элементов с зарядом Z и массовым числом A , отличными от заряда и массового числа исходного облучаемого изотопа. Введено понятие траектории трансмутации как эволюции плотности распределения по A и Z количества ядер, образующихся в процессе трансмутации во времени. Траектория трансмутации позволяет наглядно представить трансмутационный процесс в динамике и выявить общие тенденции и глобальное поведение трансмутационной цепочки.

Введение

Для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач представляет интерес исследование трансмутации атомных ядер под действием интенсивных потоков γ -излучения с энергией до 30 МэВ. В этой области энергий реакция идет через образование и последующий распад дипольного гигантского резонанса, при этом полное сечение $\sigma(\gamma, \text{tot})$ взаимодействия фотонов с атомными ядрами определяется суммой сечений следующих основных каналов реакций

$$\sigma(\gamma, \text{tot}) = \sigma(\gamma, p) + \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n) + \sigma(\gamma, pn).$$

Для тяжелых ядер ($A > 60$) основными каналами являются каналы реакции (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, суммарный вклад всех остальных каналов реакции в случае тяжелых ядер, как правило, не превышает нескольких процентов. При этом каналы реакции (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ составляют соответственно 70–80% и 20–25% от полного сечения поглощения γ -квантов [1–4].

В результате облучения исходного изотопа (A, Z) , имеющего заряд Z и массовое число A , образуется большое число изотопов в широком диапазоне A и Z . Введем понятие траектории трансмутации. Траекторией трансмутации мы называем эволюцию плотности распределения по A и Z количества ядер, образующихся в процессе трансмутации во времени. Плотности распределения A_ρ и Z_ρ в момент времени t определяются как средневзвешенное по количеству ядер значение A и Z :

$$A_\rho = \frac{\sum N(A, Z; t)A}{\sum N(A, Z; t)}, \quad Z_\rho = \frac{\sum N(A, Z; t)Z}{\sum N(A, Z; t)},$$

где $N(A, Z; t)$ — временная эволюция количества изотопа (A, Z) .

Целью настоящей работы являлось исследование формирования траектории трансмутации при облучении исходных изотопов $^{120,122,124}\text{Sn}$ интенсивным потоком γ -квантов с верхней границей 30 МэВ. Исходные ядра $^{120,122,124}\text{Sn}$ были выбраны из следующих соображений. Элемент Sn имеет магическое число протонов ($Z = 50$), поэтому у него максимальное число стабильных изотопов — 10. При этом между стабильными изотопами ^{124}Sn и ^{122}Sn находится относительно долгоживущий изотоп ^{123}Sn ($T_{1/2} = 129.2$ д, β^-), между стабильными изотопами ^{122}Sn и ^{120}Sn находится короткоживущий изотоп ^{121}Sn ($T_{1/2} = 20.06$ ч, β^-). Изотопы $^{119-114}\text{Sn}$ являются стабильными изотопами. Самым легким стабильным изотопом является ^{112}Sn . Изотоп ^{113}Sn является β^+ -радиоактивным ($T_{1/2} = 115.09$ д, β^+). Такая конфигурация ядер позволяет выделить интересные особенности образования трансмутационной цепочки и траектории трансмутации. Исследование выполнено методом численного моделирования. Был создан комплекс программ, выполняющий в автоматизированном режиме построение трансмутационных цепочек и расчет временной эволюции количества ядер, образующихся при облучении произвольно выбранного исходного ядра интенсивным пучком γ -излучения [3].

Метод расчета

Временная эволюция количества каждого элемента трансмутационной цепочки (A, Z) определяется процессами его накопления и распада. Уменьшение содержания изотопа (A, Z) происходит в процессах α - и β -распада и в результате реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и (γ, p) . Накопление происходит за счет фотоядерных реакций на соседних ядрах, а также α - и β -распадов соседних ядер, в результате которых может образоваться рассматриваемый изотоп (A, Z) (рис. 1).

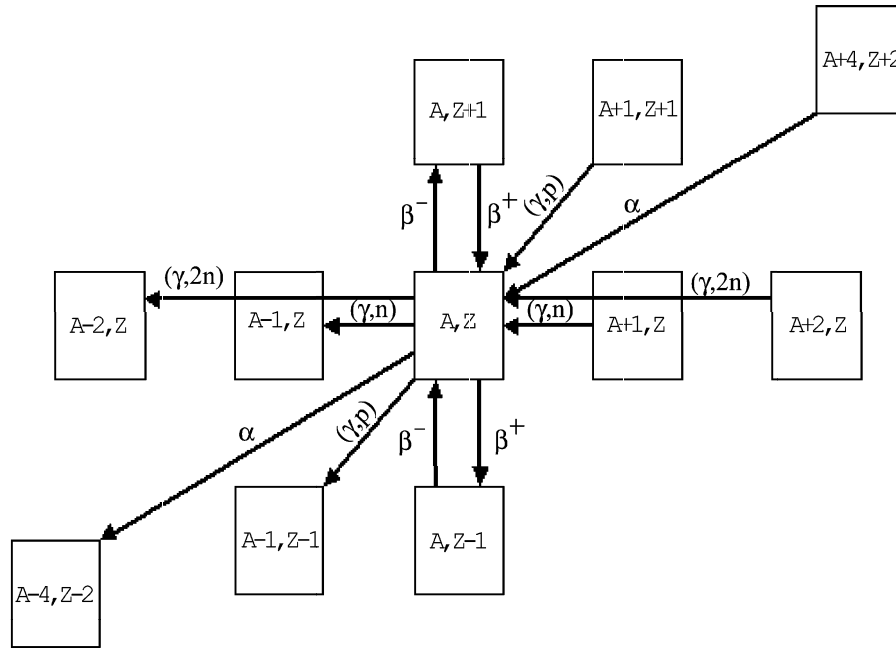


Рис. 1

С подробным описанием метода расчета можно ознакомиться в работе [1].

Результаты расчетов

В качестве исходных выбирались изотопы $^{120,122,124}\text{Sn}$. Моделировалось облучение каждого из изотопов в течение 30 месяцев потоком γ -квантов интенсивностью $\Phi = 10^{18}$ фотон/(с·см²). Исходное число ядер каждого изотопа $^{120,122,124}\text{Sn}$ было

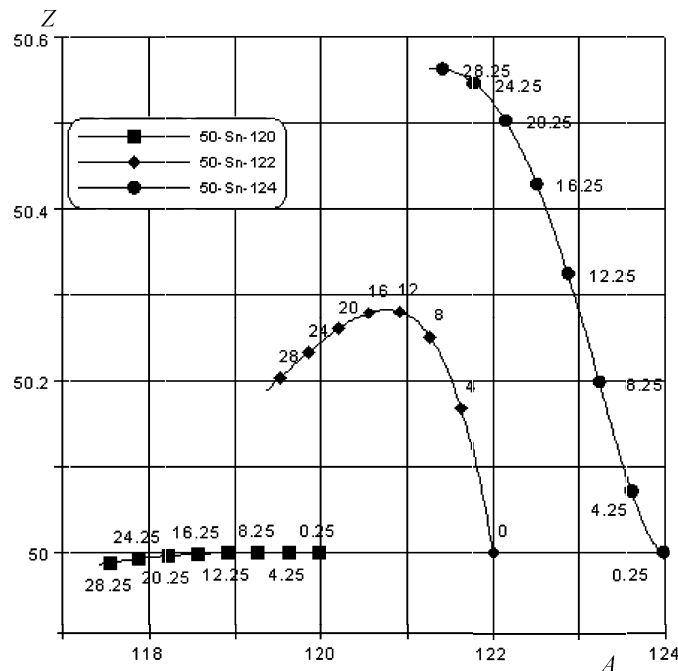


Рис. 2. Траектория трансмутации изотопов $^{120,122,124}\text{Sn}$ при облучении в течение 30 месяцев потоком тормозных фотонов с плотностью потока 10^{18} фотон/(с·см²). Рядом с точками показано соответствующее им время облучения (месяцы)

выбрано 10^{22} . Траектория трансмутации изотопов $^{120,122,124}\text{Sn}$ показана на рис. 2.

Конечное распределение количества изотопов после 30 месяцев облучения для начального изотопа ^{122}Sn показано на рис. 3.

Исследование траектории трансмутации позволяет выявить общие тенденции, свойственные трансмутации на данном изотопе, преобладающие типы β -активности, влияние свойств соседних ядер на процесс трансмутации.

Можно отметить, что A_p траектории трансмутации за время трансмутации сместилась практически на одинаковую величину $\Delta A \approx 2.5$ по оси A для всех трех изотопов. Это связано с тем, что изменение массового числа A в основном определяется каналами реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, причем сечения этих реакций мало меняются при одном и том же A и мало изменяющихся Z . Образующиеся β -актив-

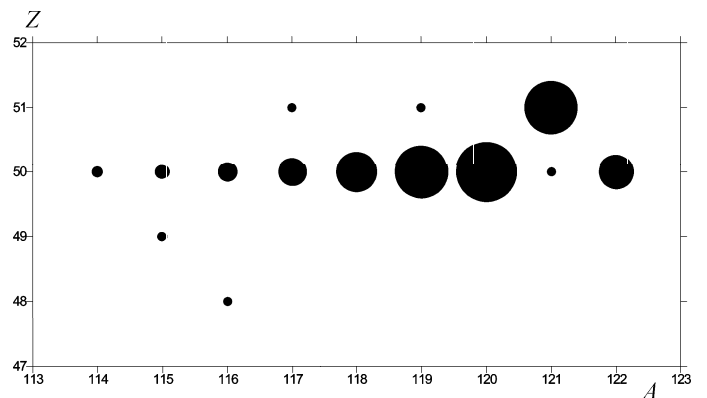


Рис. 3. Ядра трансмутационной цепочки ^{122}Sn после 30 месяцев облучения потоком тормозных фотонов с плотностью потока 10^{18} фотон/(с·см²). Радиус окружностей пропорционален количеству образовавшихся ядер

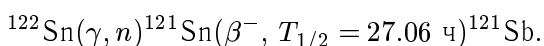
ные изотопы приводят к изменению заряда ядер трансмутационной цепочки, что отражается соответствующим образом на эволюции трансмутационной кривой. β^- -активность увеличивает заряд, а β^+ -активность уменьшает заряд. Поэтому по временной эволюции кривой трансмутации можно определить преобладающий тип активности образующихся изотопов. Канал реакции (γ, p) также меняет и заряд, и массу образующегося изотопа, но вклад этого канала мал ($\sim 5\%$) и практически не влияет на траекторию трансмутации.

Траектория трансмутации ^{120}Sn

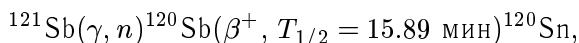
Плотность распределения количества образовавшихся ядер Z_ρ практически не изменяется со временем. Это объясняется тем, что при трансмутации в основном образуются стабильные изотопы $^{119-114}\text{Sn}$. Небольшое уменьшение Z_ρ , которое наблюдается после 20 месяца облучения, говорит о том, что в этот период начинают образовываться значительные количества радиоактивных изотопов Sn с массовым числом меньше 114, а также накапливается достаточное количество изотопов In ($Z = 49$), образующихся по каналу (γ, p) . Временной ход траектории трансмутации указывает на преобладающий тип β -активности — β^+ .

Траектория трансмутации ^{122}Sn

В отличие от предыдущего изотопа для траектории трансмутации ^{122}Sn до 14 месяцев наблюдается рост плотности распределения по Z_ρ при облучении, что указывает на преобладающий тип β^- -активности. Основная реакция в этом временном интервале



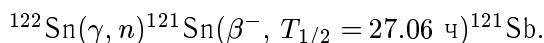
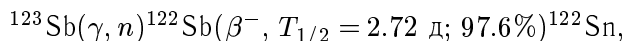
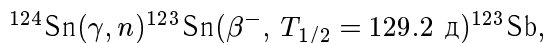
Дальнейший спад Z_ρ определяется, как и в случае ^{120}Sn , накоплением значительных количеств стабильных изотопов $^{119-114}\text{Sn}$ (см. рис. 3), так и реакцией



в которой образуются β^+ -радиоактивный изотоп ^{120}Sb .

Траектория трансмутации ^{124}Sn

Для траектории трансмутации наиболее тяжелого стабильного изотопа ^{124}Sn наблюдается картина еще более ярко выраженной β^- -активности. К окончанию облучения изотопов с $Z > 50$ образуется больше, чем изотопов с $Z = 50$. Основной канал образования β^- -радиоактивных изотопов описывается цепочкой последовательных реакций



Заключение

Трансмутация атомных ядер под действием интенсивных потоков γ -квантов приводит к образованию химических элементов с зарядом Z и массовым числом A , отличными от заряда и массового числа исходного облучаемого изотопа. Появление в смеси изотопов таких ядер обусловлено тем, что образующиеся в фотоядерных реакциях атомные ядра β -радиоактивны.

Траектория трансмутации позволяет наглядно представить трансмутационный процесс в динамике и выявить общие тенденции и глобальное поведение трансмутационной цепочки.

Литература

1. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И., Павлов С.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 6. С. 30.
2. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 1. С. 22.
3. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И., Павлов С.И. // Препринт НИИЯФ МГУ № 1999-32/950.
4. Borodina S.S., Ishkhanov B.S., Mokeev V.I. // Intern. Nucl. Phys. Conf. (INPC/98), August 24–28. 1998. Paris. P. 794.
5. Brun R., Bruyant F., Maire M. et al. GEANT 3.21 (User's Guide). CERN, Geneva, Switzerland, 1987.
6. Nuclear Wallet Cards N.Y., 2000 (<http://www.nndc.bnl.gov>).
7. Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. Atlas of Giant Dipole Resonance, IAEA, Nuclear Data Section. Austria, Vienna, 1999.
8. Dietrich S., Berman B.L. // Atomic Data And Nuclear Data Tables. 1998. N 38. P. 199.

Поступила в редакцию
05.08.03