

УДК 539.17

ТРАНСМУТАЦИЯ ИЗОТОПА ^{165}Ho В ИНТЕНСИВНОМ ПОТОКЕ γ -КВАНТОВ

Б. С. Ишханов, И. А. Лютиков, С. И. Павлов

(НИИЯФ)

E-mail: kabin@depni.sinp.msu.ru, bsi@depni.sinp.msu.ru

В статье рассматривается трансмутация изотопа ^{165}Ho при воздействии пучка тормозного γ -излучения с интенсивностью потока $\Phi = 10^{17}$ фотон \cdot с $^{-1}$. Анализируется влияние на формирование трансмутационной цепочки короткоживущего изотопа ^{164}Ho , образующегося в результате реакции $(\gamma-n)$, распадающегося со сравнимой интенсивностью по β^+ , β^- каналам.

Исследовалась трансмутация изотопа ^{165}Ho в интенсивном потоке тормозного γ -излучения. Исследование было выполнено методом компьютерного моделирования. В качестве исходного был выбран изотоп ^{165}Ho , так как он является единственным стабильным изотопом гольмия. На рис. 1 показана таблица, представляющая собой фрагмент $N-Z$ диаграммы окружения изотопа ^{165}Ho . В этой таблице использованы следующие сокращения и обозначения: первый столбец — порядковый номер элемента (Z), в строках указаны изотопы данного элемента, верхний индекс изотопа — массовое число (A), строка под изотопом соответствует периоду полураспада для радиоактивных изотопов (м — минуты, ч — часы, д — дни, л — годы) или процентному содержанию данного изотопа в естественной смеси — для стабильного изотопа.

Трансмутация изотопов происходит в результате фотоядерных реакций и последующих β -распадов. Образование каждого элемента трансмутационной цепочки происходит в реакциях $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ и $(\gamma-p)$ или в результате β^+ , β^- -распадов. Для всех

элементов трансмутационной цепочки были выбраны следующие соотношения между сечениями фотоядерных реакций [1]:

$\sigma_{\text{tot}} = \frac{60NZ}{A}$ (МэВ \cdot мб) — полное интегральное сечение,

$\sigma_{(\gamma,n)} \sim 0.7\sigma_{\text{tot}}$ — сечение $(\gamma-n)$ канала,

$\sigma_{(\gamma,2n)} \sim 0.25\sigma_{\text{tot}}$ — сечение $(\gamma-2n)$ канала,

$\sigma_{(\gamma,p)} \sim 0.05\sigma_{\text{tot}}$ — сечение $(\gamma-p)$ канала.

Расчет трансмутации изотопа ^{165}Ho был выполнен для интенсивности потока γ -квантов $\Phi = 10^{17}$ фотон \cdot с $^{-1}$. Время облучения составило 30 мес, а время наблюдения — 90 мес включая время облучения; исходное количество изотопа ^{165}Ho — 10^{22} ядер.

На рис. 2 и в таблице представлено распределение изотопов, образовавшихся на момент окончания облучения $T = 30$ мес. Площадь круга пропорциональна количеству образовавшегося изотопа.

Число ядер исходного изотопа ^{165}Ho на момент окончания облучения составило около 72% от начального. На рис. 2 видно, что накопилось сравнимое количество изотопов ^{163}Ho , ^{164}Er ,

69	^{158}Tm 3.98м	^{159}Tm 9.13м	^{160}Tm 9.4м	^{161}Tm 30.2м	^{162}Tm 21.7м	^{163}Tm 1.81ч	^{164}Tm 2.0м	^{165}Tm 30.6ч	^{166}Tm 7.7д	^{167}Tm 9.25д
68	^{157}Er 18.65м	^{158}Er 2.2ч	^{159}Er 36м	^{160}Er 28.58ч	^{161}Er 3.21ч	^{162}Er 0.14	^{163}Er 75.0м	^{164}Er 1.61	^{165}Er 10.36ч	^{166}Er 33.6
67	^{156}Ho 56м	^{157}Ho 12.6м	^{158}Ho 11.3м	^{159}Ho 33.05д	^{160}Ho 25.6м	^{161}Ho 2.48ч	^{162}Ho 15м	^{163}Ho 4570л	^{164}Ho 29м	^{165}Ho 100
66	^{155}Dy 9.9ч	^{156}Dy 0.06	^{157}Dy 8.14ч	^{158}Dy 0.10	^{159}Dy 144.4д	^{160}Dy 2.34	^{161}Dy 18.9	^{162}Dy 25.5	^{163}Dy 24.9	^{164}Dy 28.2
65	^{154}Tb 22.7ч	^{155}Tb 5.35д	^{156}Tb 5.32д	^{157}Tb 99л	^{158}Tb 180л	^{159}Tb 100	^{160}Tb 72.3д	^{161}Tb 6.68д	^{162}Tb 7.6м	^{163}Tb 19.5м
64	^{153}Gd 241.6д	^{154}Gd 2.18	^{155}Gd 14.8	^{156}Gd 20.47	^{157}Gd 15.65	^{158}Gd 24.84	^{159}Gd 18.48ч	^{160}Gd 21.86	^{161}Gd 3.66м	^{162}Gd 8.4м

Рис. 1. Фрагмент $N-Z$ диаграммы вблизи ^{165}Ho . Используются следующие обозначения: м — минуты, ч — часы, д — дни, л — годы, ■ — стабильные, □ — β^+ -активные, ◻ — β^- -активные, ◻ — β^-, β^+ -активные

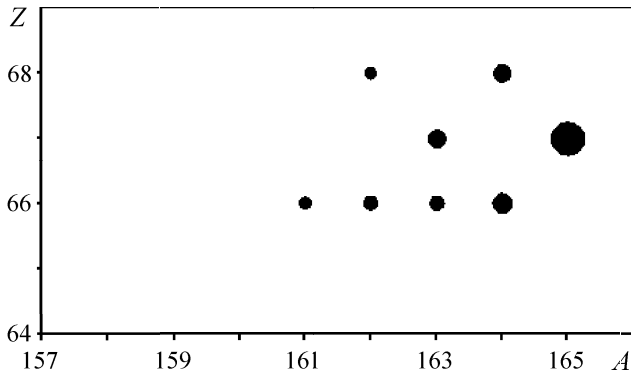
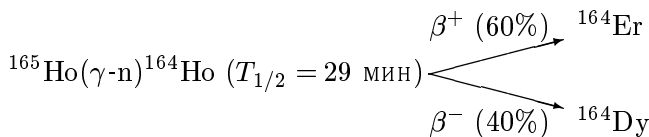


Рис. 2. Ядра трансмутационной цепочки ^{165}Ho . Время облучения $T_{\text{rad}} = 30$ мес. Интенсивность потока γ -квантов $\Phi = 10^{17}$ фотон \cdot с $^{-1}$. Площадь круга пропорциональна количеству образовавшихся ядер данного изотопа

Количество образовавшихся изотопов на момент окончания облучения ^{165}Ho

Изотоп	A	Z	Количество
Dy	161	66	3.75×10^{19}
Dy	162	66	1.33×10^{20}
Er	162	68	2.63×10^{19}
Dy	163	66	1.46×10^{19}
Ho	163	67	3.75×10^{20}
Dy	164	66	1.15×10^{21}
Er	164	68	6.87×10^{20}
Ho	165	67	7.17×10^{21}

^{164}Dy . В результате реакций $^{165}\text{Ho}(\gamma-n)^{164}\text{Ho}$ изотоп ^{165}Ho превращается в короткоживущий изотоп ^{164}Ho ($T_{1/2} = 29$ мин), а реакция $^{165}\text{Ho}(\gamma-2n)^{163}\text{Ho}$ приводит к образованию долгоживущего изотопа ^{163}Ho ($T_{1/2} = 4570$ лет, β^+). Дальнейшее продвижение к более легким изотопам Ho ($A < 163$) в результате реакций $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ оказывается сильно подавленным, так как изотопы $^{162-160}\text{Ho}$ являются β^+ -радиоактивными с соответствующими периодами полураспада ^{160}Ho ($T_{1/2} = 25.5$ мин), ^{161}Ho ($T_{1/2} = 2.48$ ч), ^{162}Ho ($T_{1/2} = 15$ мин). Изотоп ^{164}Ho имеет две моды распада (40% — β^- , 60% — β^+), благодаря этому факту возникает интересная особенность в формировании трансмутационной цепочки:



Один канал приводит к накоплению стабильного изотопа ^{164}Er , другой — к образованию стабильного изотопа ^{164}Dy .

Из изотопа ^{164}Er в результате реакции $^{164}\text{Er}(\gamma-2n)^{162}\text{Er}$ образуется стабильный изотоп ^{162}Er , а в реакции $^{164}\text{Er}(\gamma-n)^{163}\text{Er}$

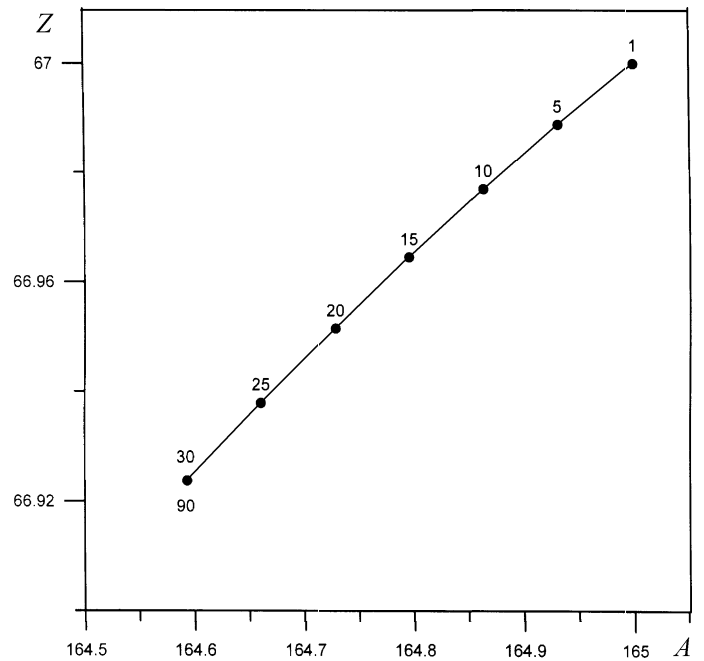


Рис. 3. Траектория трансмутации для интенсивности потока γ -квантов $\Phi = 10^{17}$ фотон \cdot с $^{-1}$. Время облучения $T_{\text{rad}} = 30$ мес. Полное время наблюдения 90 мес. На траектории трансмутации нанесено время от начала облучения (мес)

($T_{1/2} = 75$ мин, β^+) — короткоживущий изотоп ^{163}Er , который распадается на долгоживущий изотоп ^{163}Ho . Накопление изотопа ^{163}Ho происходит также в результате реакции $^{165}\text{Ho}(\gamma-2n)^{163}\text{Ho}$ ($T_{1/2} = 4570$ лет, β^+) и $^{164}\text{Er}(\gamma-n)^{163}\text{Er}$ ($T_{1/2} = 75$ мин, β^+) ^{163}Ho , сравнимо с количеством изотопа ^{164}Er , образовавшегося только в реакции $^{165}\text{Ho}(\gamma-n)^{164}\text{Ho}$ ($T_{1/2} = 29$ мин, β^-) ^{164}Er . Дальнейшее образование более легких изотопов Er ($A < 162$) в реакциях $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ подавлено по причине их малого времени жизни. Из изотопа ^{164}Dy в результате последовательных $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ реакций образуются стабильные изотопы $^{161-164}\text{Dy}$. Кроме того, накопление изотопов ^{161}Dy и ^{162}Dy также может происходить в результате β^+ -распадов радиоактивных изотопов Ho. На рис. 2 и 3 видно, что количество изотопов ^{162}Dy и ^{163}Dy практически одинаково. Такая ситуация складывается в связи с тем, что накопление изотопа ^{163}Dy в основном происходит в результате реакции $(\gamma-n)$, а накопление изотопа ^{162}Dy — в результате нескольких реакций: $^{164}\text{Dy}(\gamma-2n)^{162}\text{Dy}$, $^{163}\text{Dy}(\gamma-n)^{162}\text{Dy}$, $^{163}\text{Ho}(\gamma-n)^{162}\text{Ho}$ ($T_{1/2} = 15$ мин, β^+) ^{162}Dy . Образование изотопа ^{161}Dy также происходит в результате фотоядерных реакций $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ и в результате β^+ -распада ^{161}Ho ($T_{1/2} = 2.48$ ч β^+).

Общие тенденции трансмутационного процесса позволяет оценить траектория трансмутации. Она представляет собой эволюцию плотностей распре-

делений массового числа A_ρ и заряда ядра Z_ρ в процессе трансмутации во времени. A_ρ и Z_ρ определяются как средневзвешенные по количеству ядер значения A и Z :

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

где $N(A, Z, t)$ — количество изотопа (A, Z) в момент времени t .

На рис. 3 показана траектория трансмутации изотопа ^{165}No при интенсивности потока γ -квантов $\Phi = 10^{17}$ фотон \cdot с $^{-1}$. Рядом с траекторией указано время от начала облучения в месяцах.

В связи с тем что основное влияние на формирование трансмутационной цепочки оказывает изотоп ^{164}No , распадающийся по β^+ , β^- каналам со сравнимой интенсивностью, образование изотопов с $Z = 66$ и $Z = 68$ также происходит со сравнимой интенсивностью. Поэтому в траектории трансмутации происходит слабое изменение Z_ρ . Так, в начальный момент $Z_\rho(t = 0) = 67$, а к концу облучения $Z_\rho(t = 30 \text{ мес}) = 66.93$. Изменение A_ρ происходило от $A_\rho(t = 0) = 165$ до $A_\rho(t = 30 \text{ мес}) = 164.6$. Небольшое изменение A обусловлено тем, что при интенсивности потока γ -квантов $\Phi = 10^{17}$ фотон \times с $^{-1}$ сгорает около 28% исходного изотопа ^{165}No и в процесс трансмутации вовлечено небольшое количество изотопов. Так как к концу облучения преимущественно образуются стабильные изотопы, изменение Z_ρ в результате последующих β -распадов практически не происходит, что хорошо видно на рис. 3.

В результате облучения ^{165}No образуются две группы атомных ядер с $Z = 66$ и $Z = 68$. Образование этих двух химических элементов обусловлено каналами распада изотопа ^{164}No . Образование самого легкого изотопа Er происходит в результате реакции $^{164}\text{Er}(\gamma-2n)^{162}\text{Er}$, что находится в качественном согласии с ранее проведенными исследованиями [2]. Образование изотопов No с $A < 163$ в результате реакций $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ оказывается сильно подавленным, так как изотопы $^{160-162}\text{No}$ являются β^+ -радиоактивными с соответствующими периодами полураспада ^{160}No ($T_{1/2} = 25.6$ мин), ^{161}No ($T_{1/2} = 2.48$ ч), ^{162}No ($T_{1/2} = 15$ мин). В результате $(\gamma-2n)$ образуется только один радиоактивный изотоп ^{163}No с большим периодом полураспада $T_{1/2} = 4570$ лет. В связи с тем что изотопы Du являются стабильными, их образование происходит преимущественно в результате $(\gamma-n)$, $(\gamma-2n)$ реакций. Так как канал реакции $(\gamma-p)$ составляет 5%, он играет существенную роль только в образовании двух изотопов — ^{162}Du и ^{164}Du .

Литература

1. Varlamov A. V., Varlamov V. V., Rudenco D. S., Stepanov M. E. // Atlas of Giant Dipole Resonance. IAEA Nuclear Data Section. Austria, Vienna, 1999.
2. Ишханов Б. С., Павлов С. И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 1. С. 21 (Moscow University Phys. Bull. 2002. N 1. P. 16).

Поступила в редакцию
03.07.03

УДК 539.17

К ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ МЕЖДУ ЯДЕРНЫМИ УРОВНЯМИ

А. В. Андреев, Р. А. Чалых

(кафедра общей физики и волновых процессов)

E-mail: andreev@srl.phys.msu.ru

Рассмотрена возможная схема получения инверсии населенностей между первым возбужденным и основным состояниями ядра Ge^{73} , основанная на селекции ядер в первом возбужденном состоянии. Проведено моделирование динамики инверсии в этой схеме и проанализировано влияние параметров системы на инверсию населенностей.

Введение

Возможность получения инверсии населенностей между ядерными уровнями вызывает большой интерес в связи с перспективой создания усилителя или генератора направленного когерентного гамма-излучения. Для достижения инверсии необходимо обеспечить либо накачку ядер в промежуточное возбужденное состояние, либо селекцию ядер,

уже образовавшихся в возбужденном состоянии в результате различных внутриядерных процессов, например, радиоактивного распада. В настоящей работе обсуждается вторая возможность.

Для селекции ядер, находящихся в изомерных возбужденных состояниях, могут быть применены методы лазерного разделения изотопов [1–4], в которых селективность достигается за счет высокой