

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.17

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРНОГО УРОВНЯ 135.5 кэВ В ЯДРЕ ⁹²Nb
МЕТОДОМ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

**Р. А. Алиев, А. Н. Ермаков, Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов,
Джо Джо Тун, И. В. Макаренко, К. А. Стопани**

(НИИЯФ; кафедра общей ядерной физики)

В ядре ⁹²Nb в результате фотоядерной реакции ⁹³Nb(γ, n)⁹²Nb^m возбуждается изомерный уровень с энергией 135.5 кэВ. Экспериментально определено отношение выходов фотоядерных реакций ⁹³Nb(γ, n)⁹²Nb^m и ⁹³Nb(γ, 3n)⁹⁰Nb на ядре ⁹³Nb: Y(γ, n)/Y(γ, 3n) = 63 ± 1.

Целью работы является экспериментальное определение соотношения выходов фотоядерных реакций на ядре ⁹³Nb, а также возбуждение изомерного уровня с энергией 135.5 кэВ ядра ⁹²Nb.

Многочастичные фотоядерные реакции в настоящее время представляют собой практически не исследованную область, не известны сечения этих реакций для большинства ядер. В настоящей работе экспериментально определены выходы реакций ⁹³Nb(γ, n)⁹²Nb, ⁹³Nb(γ, 3n)⁹⁰Nb, причем выход реакции с вылетом трех нейтронов на ядре ⁹³Nb получен впервые [1].

Эксперимент проводился на электронном пучке разрезного микротрона RTM-70 НИИЯФ МГУ. Исследуемая мишень ⁹³Nb облучалась тормозными γ-квантами с максимальной энергией E_{γ^m} = 50 МэВ. Гамма-спектр остаточной активности (рис. 1) облученного образца измерялся с помощью HPGe-детектора с эффективностью 30%, изготовленного из сверхчистого германия. Разрешение детектора 1.1 кэВ (для E_γ = 122 кэВ) и 2.0 кэВ (для E_γ = 1332 кэВ).

Исследуемый образец ⁹³Nb облучался в течение 15 мин. Мишень весом 8 г была изготовлена из металлического ниобия. Спектр остаточной активности измерялся в течение 2.2 ч спустя 1 ч после окончания облучения.

На исследуемой мишени возможны следующие фотоядерные реакции (табл. 1).

Конечные ядра, образующиеся в результате фотопротонных реакций, стабильны, за исключением ядра ⁹⁰Zr^m, для которого период полураспада составляет 809.2 мс. Однако условия проведенного эксперимента не позволяют регистрировать подобные распады, поэтому далее эти реакции не рассматриваются.

Образующееся в результате фотоядерной реакции (γ, n) ядро ⁹²Nb имеет метастабильный уро-

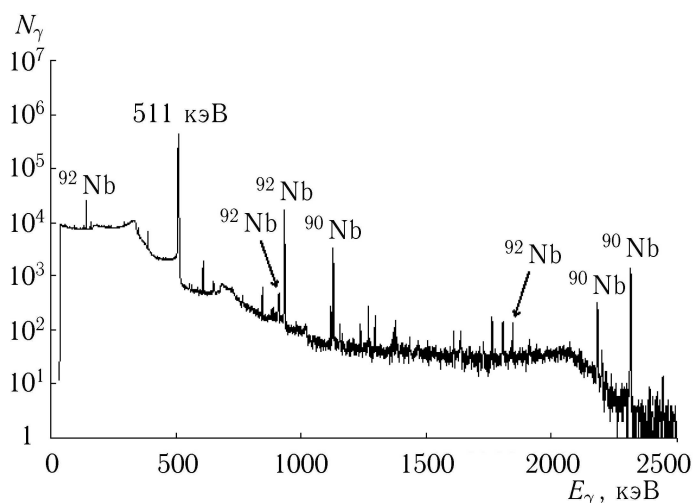


Рис. 1. Спектр остаточной активности исследуемого образца ⁹³Nb

Таблица 1
Фотоядерные реакции на исследуемой мишени ⁹³Nb

Реакция	Порог реакции, МэВ	Конечное ядро	Период полураспада t _{1/2} конечного ядра
(γ, n)	8.83	⁹² Nb	3.47 · 10 ⁷ лет
	8.97	⁹² Nb ^m	10.15 дней
(γ, 2n)	16.71	⁹¹ Nb	680 лет
	17.75	⁹¹ Nb ^m	60.86 дней
(γ, 3n)	28.76	⁹⁰ Nb	14.6 ч
(γ, 4n)	38.91	⁸⁹ Nb	1.9 ч
	38.94	⁸⁹ Nb ^m	1.18 ч
(γ, p)	6.04	⁹² Zr	стабильно
(γ, np)	14.68	⁹¹ Zr	стабильно
(γ, 2np)	21.88	⁹⁰ Zr	стабильно
	24.19	⁹⁰ Zr ^m	809.2 мс

вень, поэтому для расчета полного выхода реакции необходимо суммировать распады из изомерного и основного состояния конечного ядра. Образующееся в результате реакции (γ, n) ядро

Таблица 2

**Фотоядерные реакции на ядре ^{93}Nb и соответствующие γ -линии
экспериментального спектра остаточной активности исследуемого образца**

Реакция	Конечное ядро реакции, продукт и период β -распада	E_γ , кэВ	I_γ , отсчеты	Природа перехода
(γ, n)	$^{92}\text{Nb} \rightarrow ^{92}\text{Zr}$ 10.15 дней	934	$5.69 \cdot 10^4$	934 (2^+) \rightarrow 0 (0^+)
		913	$9.79 \cdot 10^2$	1847 (2^+) \rightarrow 934 (2^+)
		1847	$4.04 \cdot 10^2$	1847 (2^+) \rightarrow 0 (0^+)
$(\gamma, 3n)$	$^{90}\text{Nb} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$ 14.60 ч	1129	$1.09 \cdot 10^4$	3448 (6^+) \rightarrow 2319 (5^-)
		2319	$6.80 \cdot 10^3$	2319 (5^-) \rightarrow 0 (0^+)
		141	$3.37 \cdot 10^4$	3589 (8^+) \rightarrow 3448 (6^+)
		2186	$1.38 \cdot 10^3$	2186 (2^+) \rightarrow 0 (0^+)

^{92}Nb в основном состоянии является долгоживущим ($t_{1/2} = 3.47 \cdot 10^7$ лет), и его распады не удается надежно наблюдать. Поэтому экспериментальные данные позволяют наблюдать только заселение изомерного уровня.

В экспериментальном спектре наблюдаются γ -пики, соответствующие реакциям $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92}\text{Nb}^m$ и $^{93}\text{Nb}(\gamma, 3n)^{90}\text{Nb}$ (табл. 2). На рис. 1 эти γ -пики показаны подписями ^{92}Nb и ^{90}Nb соответственно. В табл. 2 приведены указанные фотоядерные реакции, периоды полураспада конечных β -активных ядер. Приведены также энергии и интенсивности измеренных γ -линий спектра, соответствующие этим реакциям, указана природа соответствующих γ -переходов в ядрах $^{90,92m}\text{Zr}$ (энергии (в кэВ), спин-четность начального и конечного состояний изотопов циркония). Точность определения экспериментальных значений интенсивностей большинства γ -пииков составляет около 1% (для пииков с интенсивностью $\sim 10^3 - 10^4$ отсчетов). Для менее интенсивных γ -пииков ($\sim 10^2$ отсчетов) погрешность определения интенсивности составляет $\sim 10\%$, для наиболее интенсивных γ -пииков погрешность не превышает 0.5%.

Схемы распадов конечных ядер, образующихся в результате указанных реакций, приведены на рис. 2, 3.

В настоящем эксперименте наблюдались распады изомерного уровня 135.5 кэВ ядра ^{92}Nb . Образование изомерного состояния происходит в результате реакции $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92}\text{Nb}^m$. К моменту окончания облучения число ядер ^{92}Nb в изомерном состоянии составляло $1.8 \cdot 10^{10}$.

Исходя из экспериментальных данных рассчитано отношение выходов реакций

$$Y(\gamma, n)/Y(\gamma, 3n) = 63 \pm 1.$$

Выходы реакций оценивались по γ -линиям 934 кэВ и 1129 кэВ ядер ^{92}Zr и ^{90}Zr , образующихся

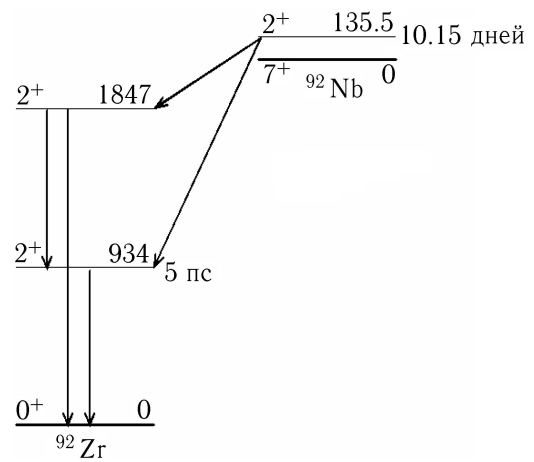


Рис. 2. Схема распадов изомерного уровня 135.5 кэВ ядра ^{92}Nb

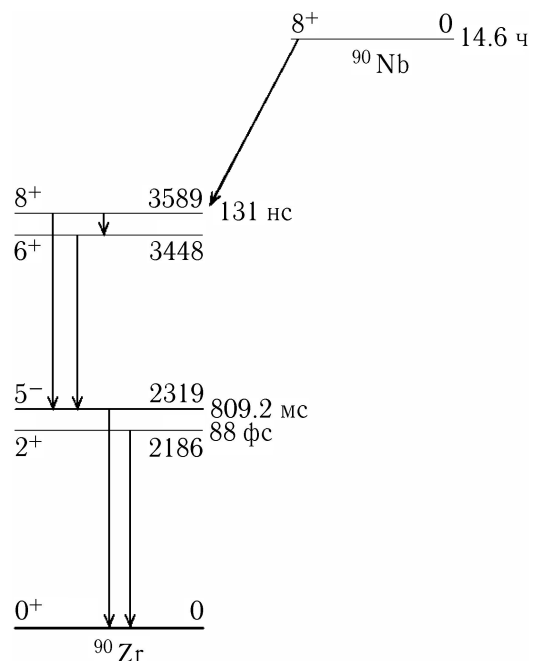
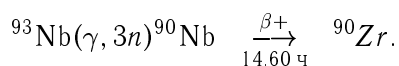
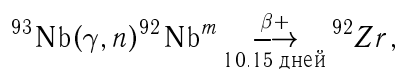


Рис. 3. Схема распадов основного состояния ядра ^{90}Nb

в реакциях



Соответствующие данные приведены в табл. 3. Интенсивности γ -линий приведены с учетом поправок на зависимость эффективности детектора от энергии γ -квантов, поглощение в мишени и зависимость интенсивностей γ -пиков от периодов полураспада распадающихся ядер.

Таблица 3

Интенсивности γ -линий остаточной активности ядер ${}^{92}\text{Zr}$ и ${}^{90}\text{Zr}$

Энергия γ -линии E_γ , кэВ	Интенсивность γ -линии, отсчеты	Погрешность интенсивности, %
934	$6.51 \cdot 10^6$	0.46
1129	$1.04 \cdot 10^5$	1.18

Модель испарений позволяет оценить сечения фотоядерных реакций [2]. При этом считается, что основными каналами являются фотонейтронные каналы вплоть до $(\gamma, 5n)$, поскольку в тяжелых и среднетяжелых ядрах (с числом нуклонов $A \geq 60$) кулоновский барьер подавляет испускание протонов.

Энергетическое распределение фотонейтронов, которое аппроксимируется максвелловским спектром, позволяет рассчитать вероятность испарения определенного числа нейтронов. Полное сечение фотопоглощения в модели аппроксимируется лоренцевой кривой в случае тяжелых ($A \geq 100$) сферических ядер. В деформированном ядре сечение гигантского дипольного резонанса (ГДР) расщепляется на два пика, отвечающих продольным и поперечным дипольным колебаниям. В этом случае для аппроксимации сечения фотопоглощения ис-

пользуется суперпозиция двух лоренцевых линий. В среднетяжелых ядрах ($60 \leq A \leq 100$) помимо деформационного расщепления гигантского резонанса учитывается также изоспиновое расщепление ГДР.

Теоретические оценки, основанные на модели испарений, дают

$$Y(\gamma, n)/Y(\gamma, 3n) = 97.$$

Сравнение экспериментального значения и теоретических оценок для отношения выходов реакций указывает на то, что в случае реакции (γ, n) заселение основного и метастабильного состояний ядра ${}^{92}\text{Nb}$ происходит со сравнимой вероятностью.

Этот результат не является неожиданным и объясняется большим значением спина основного состояния ядра ${}^{93}\text{Nb}$ ($J^P = 9/2^+$). При поглощении дипольных γ -квантов могут возбуждаться состояния с $J = 11/2, 9/2, 7/2$, распад которых с учетом орбитального момента нейтрона приводит к сравнимым вероятностям образования конечного ядра ${}^{92}\text{Nb}$ в изомерном состоянии $J^P = 2^+$, $E_\gamma = 0.135$ МэВ и в основном состоянии $J^P = 7^+$.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-1619.2003.2).

Литература

1. Бобошин И.Н., Варламов В.В., Иванов Е.М. и др. // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24–29 сентября 2001 г. М., 2001. С. 19; <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html>.
2. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Лютиков И.А. и др. Атлас фотонейтронных сечений. М., 2005.

Поступила в редакцию
01.03.06