

Исследование влияния резонансного окружения (мёссбауэровский экран) на наблюдаемое значение периода полураспада изомера $^{119m1}\text{Sn}$ ($E = 23.8$ кэВ, $T_{1/2} \sim 18$ нс)

Ю. Е. Логинов¹⁾, А. И. Егоров, Э. И. Малютенков, С. Э. Малютенкова, В. В. Мартынов

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН
188300 Гатчина, Россия

Поступила в редакцию 26 октября 2007 г.

После переработки 27 ноября 2007 г.

В целях исследования влияния резонансного окружения на γ -распад возбужденных состояний ядер методом ($e-\gamma$)-совпадений измерен период полураспада изомера $^{119m1}\text{Sn}$ ($E = 23.8$ кэВ, $T_{1/2} \sim 18$ нс), получающегося из распада состояния $^{119m2}\text{Sn}$ ($E \sim 89$ кэВ, $T_{1/2} \sim 293$ дня), на образцах, состоявших из смеси оксидов олова, содержащих стабильные ядра ^{119}Sn и радиоактивные ядра $^{119m2}\text{Sn}$ с различными значениями отношения $^{119}\text{SnO}_2/^{119m2}\text{SnO}_2$. Для образцов, где это отношение составляло $6.2 \cdot 10^4$, $1.2 \cdot 10^6$, $6.5 \cdot 10^6$ и $1.7 \cdot 10^7$, соответствующие значения $T_{1/2}$ оказались равными 18.69(2), 18.71(2), 18.91(5) и 19.43(4) нс. Для образца сравнения (металл с отношением $^{119}\text{Sn}/^{119m2}\text{Sn}$, равным $1.5 \cdot 10^5$) получено значение $T_{1/2} = 18.68(6)$ нс.

PACS: 21.10.Tg, 23.20.Lv, 76.80.+y

Теоретическое исследование возможности влияния на γ -распад возбужденных состояний ядер различных видов их окружения проведено Высоцким [1] методом квантовой электродинамики. В частности, оказалось, что когда излучающее ядро окружено идентичными ядрами, энергия возбуждения которых в точности совпадает с его энергией возбуждения, константа γ -распада при наличии окружения отличается от таковой, когда окружения нет. По мнению автора, это связано с многократным переизлучением по механизму Мёссбауэра первоначально испущенного кванта.

Экспериментальные исследования влияния окружающих тел на скорость распада короткоживущих состояний ядер описаны в работах, где источники излучений ^{57m}Fe ($E = 14$ кэВ, $T_{1/2} \sim 100$ нс) [2] и $^{119m1}\text{Sn}$ [3] окружались экранами, находившимися на расстоянии от источников и содержащими стабильные ядра ^{57}Fe и ^{119}Sn . В обоих случаях отмечено увеличение $T_{1/2}$ примерно на 1% по сравнению с ситуацией, когда действия экранов не было.

Ниже описываются эксперименты по измерениям периода полураспада изомерного состояния $^{119m1}\text{Sn}$ ($E = 23.8$ кэВ, $T_{1/2} \sim 18$ нс) на образцах, состоящих из смеси оксидов олова с различными соотношениями количеств радиоактивных и стабильных ядер. Последние образуют мёссбауэровский экран. Были также проведены измерения на металлическом олове. Все измерения производились при комнатной темпе-

ратуре. Фактор Дебая–Уоллера для оксида при этой температуре ~ 0.5 [4], а для металла ~ 0.04 [5]. Поэтому ожидаемый эффект может проявиться для оксидных образцов и будет отсутствовать для металла. Измерения проводились методом ($e-\gamma$)-совпадений.

Исследуемое изомерное состояние $^{119m1}\text{Sn}$ образуется в результате распада долгоживущего изомера $^{119m2}\text{Sn}$ ($E \sim 89$ кэВ, $T_{1/2} \sim 293$ дня) посредством перехода типа М4 (КВК ~ 5000) [6]. Измерения проводятся методом совпадений электронов конверсии М4-перехода и γ -квантов изомерного перехода типа М1 ($E_\gamma \sim 23.8$ кэВ).

Экспериментальная установка показана на рис.1. Детекторами излучений служат фотоумножители ФЭУ-36 с пластмассовыми скintилляторами (1, 2). Сигналы с детекторов поступают через быстрые дискриминаторы (3, 4) на входы “старт” и “стоп” время-амплитудного конвертора (ВАК) (5). Электроны регистрируются малым скintиллятором ($0.5 \times 1 \times 1$ см), скintиллятор для γ -лучей имеет размеры $1 \times 3 \times 3$ см. Сигналы “старт” с детектора 1, соответствующие регистрации электронов конверсии, отмечают начало отсчета времени запаздывания прихода γ -квантов изомерного перехода в “стоп”-детектор 2. ВАК преобразует это время в амплитудный спектр, который накапливается в памяти 4096-канального анализатора 6 на основе ПК.

Градуировка и линейность измерительной системы определялись в диапазоне ~ 400 нс путем подачи сигналов импульсного генератора на вход “старт” ВАК и, через переменную задержку, на вход “стоп”.

¹⁾e-mail: yurlo@npi.spb.ru

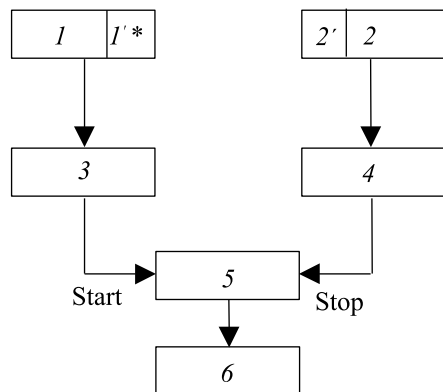


Рис.1. Измерительная система: 1, 2 – фотоумножители ФЭУ-36; 1' – пластмассовый сцинтиллятор с радиоактивным источником $^{119m2}\text{Sn}$, $0.5 \times 1 \times 1$ см; 2' – пластмассовый сцинтиллятор, $1 \times 3 \times 3$ см; 3, 4 – быстрые дискриминаторы, модель 473 А, ORTEC; 5 – конвертер времени в амплитуду, модель 437, ORTEC; 6 – амплитудный анализатор (4096 кан.)

Задержка осуществлялась отрезками кабеля РК-50 переменной длины. Время задержки определялось с точностью ~ 0.1 нс на осциллографе Tektronix TDS 2022. Зависимость положения пика совпадений от времени задержки аппроксимировалась полиномом второй степени. Значения его линейного и квадратичного членов составили $1.1 \cdot 10^{-1}$ и $2 \cdot 10^{-8}$, соответственно. В целом, временное разрешение системы равно ~ 5 нс в диапазоне энергий 40–60 кэВ для электронов и ~ 24 кэВ для γ -лучей.

Четыре навески $^{118}\text{SnO}_2$ и одна навеска металлического олова весом ~ 0.005 г с обогащением по ^{118}Sn , равным 97.7% и 80%, соответственно, облучены в реакторе ВВР-М (ПИЯФ, Гатчина) в течение 24 ч. Активность образцов составляла примерно 1.5 мкКи (-55 кБк), в каждом из образцов содержалось $\sim 10^{12}$ ядер долгоживущего изомера $^{119m2}\text{Sn}$. Образцы для измерений готовились путем смешивания каждого из облученных оксидов с определенным количеством оксида стабильного ^{119}Sn , обогащенного до 95%. К одной из оксидных навесок стабильный оксид не добавлялся (в дальнейшем этот образец называется “исходный оксид, ИО”). Образцы помещались внутри малых пластмассовых сцинтилляторов, устанавливавшихся поочередно на “старт”-ФЭУ.

На рис.2 представлен в полулогарифмическом масштабе типичный спектр запаздывающих ($e-\gamma$)-совпадений, трансформированный из 4096-канального в 512-канальный путем сложения по 8 каналов с ценой 0.87 нс/канал. Пик мгновенных совпадений обусловлен одновременной регистрацией в “старт”-канале конверсионных K -электронов и сопутствующих им рентгеновских K_x -квантов олова

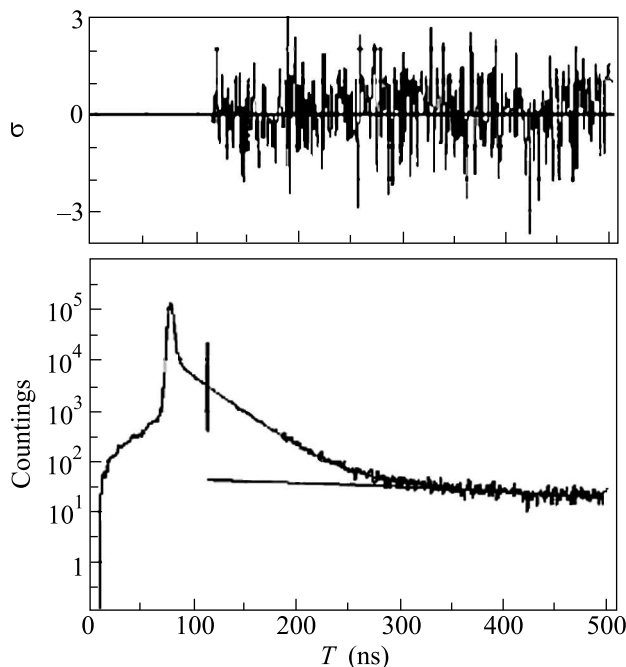


Рис.2. Типичный спектр задержанных ($e-\gamma$)-совпадений при распаде $^{119m2}\text{Sn} \rightarrow ^{119m1}\text{Sn}$. Начало области аппроксимации отмечено вертикальной чертой. На верхней части рисунка показано отклонение экспериментальных значений от аппроксимирующей зависимости

в “стоп”-канале. Далее наблюдаются линейное в этом масштабе распределение, соответствующее распаду изомера $^{119m1}\text{Sn}$, и фон случайных совпадений. Спад слева от пика есть следствие попадания в “старт”-детектор небольшой части γ -лучей исследуемого изомерного перехода, а в “стоп”-детектор – K_x -квантов олова, соответствующих заселению изомерного состояния.

Период полураспада изомера определяется по наклону его распадной кривой путем прямой подгонки по МНК в гипотезе “Экспонента плюс линейный фон случайных совпадений” [7].

Аппроксимация всех спектров согласно этой гипотезе проводилась единообразно. Начало участка аппроксимации отмечено на рис.2. Отступление от максимума сделано для исключения влияния аппаратной формы пика мгновенных совпадений. Участок спектра, по которому определяется показатель экспоненты, составляет, примерно, 8 значений $T_{1/2}$. Участок определения линейности измерительной системы превышает это число почти в 2 раза. В верхней части рисунка показана разность в каждой точке спектра (в числе стандартных отклонений) между экспериментальными значениями и аппроксимирующей зависимостью. Значения разностей не превышают $\pm 3\sigma$.

Полученные в эксперименте значения $T_{1/2}(\text{эксп})$, соответствующие образцам с различными соотношениями количеств стабильных и радиоактивных ядер ^{119}Sn , показаны на рис.3. Треугольником отмечено

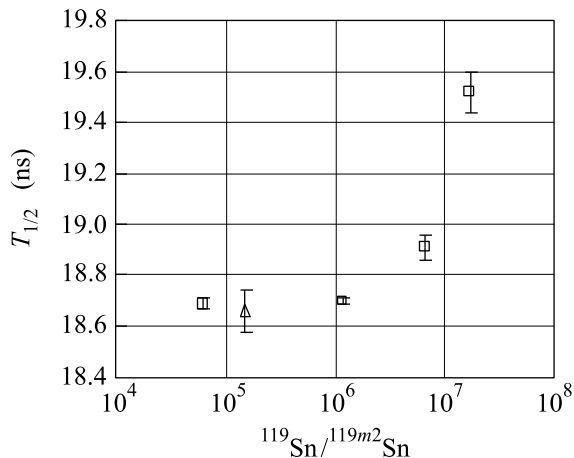


Рис.3. Влияние резонансного окружения (стабильные ядра ^{119}Sn) на наблюдаемое значение $T_{1/2}$ периода полураспада состояния $^{119m1}\text{Sn}$ ($E = 23.8$ кэВ). Значение, соответствующее металлическому олову $^{119m1}\text{Sn}$, обозначено треугольником. Остальные точки соответствуют оксидным образцам $^{119m1}\text{SnO}_2$

значение $T_{1/2}(\text{эксп})$ для металла. Остальные точки соответствуют оксидным образцам. Те же результаты представлены в таблице.

Образец	$^{119}\text{Sn}/^{119m2}\text{Sn}$	$T_{1/2}(\text{эксп})$
Исх. оксид (ИО)	$6.2 \cdot 10^4$	18.69(2)
Металл	$1.5 \cdot 10^5$	18.68(6)
ИО + 0.001 г $^{119}\text{SnO}_2$	$1.2 \cdot 10^6$	18.71(2)
ИО + 0.0056 г $^{119}\text{SnO}_2$	$6.5 \cdot 10^6$	18.91(5)
ИО + 0.0118 г $^{119}\text{SnO}_2$	$1.7 \cdot 10^7$	19.43(4)

Может быть предложено следующее качественное объяснение полученных результатов. Распад долгоживущего изомера задает начало отсчета времени регистрации в “стоп”-канале последующих γ -распадов короткоживущего изомера $^{119m1}\text{Sn}$. Для некоторых из них γ -излучение испытывает отдачу и в каких-либо резонансных процессах не участвует. Другая часть γ -квантов испускается без отдачи и может быть поглощена также без отдачи стабильными ядрами из $^{119}\text{SnO}_2$ -окружения с образованием новых изомерных ядер $^{119m1}\text{Sn}$ со свойственными им каналами распада. Гамма-излучение этих ядер обуславливает дополнительное запаздывание сигналов в “стоп”-канале по сравнению с запаздыванием при регистрации γ -квантов, первоначально испытывавших отдачу.

Как видно из таблицы и рис.3, значение $T_{1/2}(\text{эксп})$ для металла и образцов ИО и ИО + 0.001 г $^{119}\text{SnO}_2$ одинаковы в пределах погрешностей. Возможно, что

содержание стабильных ядер в этих последних образцах недостаточно для образования эффективного мёссбауэровского экрана. Только при значениях отношения $^{119}\text{Sn}/^{119m2}\text{Sn}$, превышающих $\sim 6 \cdot 10^6$, действие экрана приводит к значимому увеличению наблюдаемого значения $T_{1/2}(\text{эксп})$.

Следует отметить, что полученное в эксперименте значение $T_{1/2}(\text{эксп}) = 18.68(6)$ нс для металла (где участие в резонансном процессе не предполагается) отличается от измеренного в [8] $T_{1/2} = 18.30(2)$ нс. Это различие увеличивается при сопоставлении с данными других работ, сделанных в разное время (в основном, до 1980 г.) и в разных условиях. Так, в компиляции Nuclear Data Sheets [9] в качестве принятого (adopted) значения приведено $T_{1/2} = 18.03(7)$, измеренное в работе [10] на источнике SnCl_2 и на имплантированной в пластмассовый сцинтиллятор активности ^{119m}Sn . Там же приводится средневзвешенное, по другим известным данным, значение $T_{1/2} = 18.09(6)$ нс. Из экспериментальных данных, представленных на рис.3 и в таблице, следует вывод о наличии эффекта, предсказанного Высоцким [1].

Мы не исключаем, что такое расхождение данных может быть связано с необнаруженной нами систематикой. Тем не менее, это не препятствует сопоставлению между собой полученных в эксперименте значений $T_{1/2}$ для источников с различными соотношениями количеств $^{119}\text{Sn}/^{119m2}\text{Sn}$ и выводу о том, что, начиная с некоторого значения этого отношения, образуется среда, где излученный первоначально квант испытывает переизлучение по мёссбауэровскому механизму.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект # 05-02-16018).

- V. I. Vysotskii, Phys. Rev. C **57**, 337 (1998).
- V. I. Vysotskii, A. A. Kornilova, and A. A. Sorokin, Laser Physics **11**, 1 (2001).
- V. I. Vysotskii, M. S. Bugrov, and A. A. Kornilova, Proc. of Int. Conf. On the Physics of Nuclear Science and Technology, Oct. 5–8, 1998, v. 2, New York, p. 1739.
- Фам, Зуи Хиен, В. С. Шпинель, ЖЭТФ **44**, 393 (1963).
- Химические применения мессбауэровской спектроскопии, М.: Изд. “МИР”, 1970.
- C. M. Lederer and V. S. Shirley (Ed's), Wiley & Sons, New York, Table of Isotopes, 1978.
- Б. А. Аликов, М. Будзински, Р. Ион-Михай, ЭЧАЯ **7**, 421 (1976).
- R. Roggwiler and W. Kündig, Phys. Rev. B **11**, 4179 (1975).
- S. Ohya and K. Kitao, Nuclear Data Sheets **89**, 345 (2000).