

Instytut Fizyki UMCS
Zakład Fizyki Jądrowej
Kierownik: doc. dr hab. Tomasz Goworek

Ян ВАВРЫЩУК, Ирина ГРОМОВА,
Влодзимеж ЖУК, Роза ИОН-МИХАЙ, Эдвард КРУПА,
Генрык ЛИЗУРЕЙ, Талиб МУМИНОВ***
Виктория ТАНЬСКА-КРУПА, Исабек ХОЛБАЕВ***

Возмущенные гамма-гамма угловые корреляции при распаде ядер
 $^{155}, ^{153}, ^{151}, ^{149}\text{Tb}$ имплантированных в Fe и Ni-фольги

Zaburzone korelacje kątowe promieniowania gamma
emitowanego przy rozpadzie jąder $^{155}, ^{153}, ^{151}, ^{149}\text{Tb}$ zaimplantowanych do folii Fe i Ni

Perturbed Gamma-Gamma Angular Correlations
in the Decay of $^{155}, ^{153}, ^{151}, ^{149}\text{Tb}$ Nuclei implanted into Fe and Ni Foils

ВВЕДЕНИЕ

Использование в методике возмущенных гамма-гамма угловых корреляций сверхтонких магнитных полей, действующих на примесные ядра в ферромагнетиках, дает возможность определения g -факторов короткоживущих ядерных состояний. Одним из простейших методов внедрения радиоактивных ядер в ферромагнитную матрицу является электромагнитная имплантация.

В настоящей работе представлены результаты исследований дифференциальных (ДВУК) и интегральных (ИЗУК) возмущенных гамма-гамма угловых корреляций при радиоактивном распаде нечетных ядер тербия, с $A = 155, 153, 151$ и 149 , имплантированных с энергией 70 кэВ в ферромагнитные фольги железа и никеля.

Целью этих исследований было уточнение значений эффективных магнитных полей на ядрах гадолиния в Fe и Ni, изучение факторов, ослабляющих возмущенные угловые корреляции в используемых имплантированных образцах, и определение g -факторов уровней 165 кэВ в ^{149}Gd , 108 кэВ в ^{151}Gd , 110 и 129 кэВ в ^{153}Gd .

* ОИЯИ, Дубна

** ИАФ, Бухарест

*** ТашГУ, Ташкент.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Радиоактивные изотопы Tb получались в реакции глубокого расщепления ядер Ta протонами 660 МэВ на синхроциклотроне ОИЯИ. Из облученных мишеней, радиохимическими методами, выделялся элемент тербия, который затем разделялся по массам на электромагнитном масс-сепараторе [1]. При этом ионы выбранного одного изотопа дополнительно ускорялись в коллекторной камере и внедрялись в Fe или Ni -фольги толщиной 12 мкм (фольги производства Johnson Matthey Chemicals Ltd). Полное ускоряющее напряжение составляло 70 кВ. Доза имплантированных ионов не превышала 10^{11} ион/см². Из имплантированных фольг вырезались отрезки с наибольшей активностью, размерами 15 x 3 мм². Отжиг фольг не проводился. По данным [2,3] в процессе отжига ионы редкоземельных элементов имплантированные в железную, ферромагнитную фольгу мигрируют в немагнитные центры. Кроме того, почти в три раза увеличивается толщина окисленного слоя на поверхности фольги [4].

АППАРАТУРА

Измерения ДВУК проводились на многоканальном временном спектрометре с двумя $NaJ(Tl)$ -детекторами, размером ϕ 40 x 40 мм с фотоумножителями типа XP 1021, установленными под углом 135° - измерялась функция $R(135^\circ, \pm B, t)$. Анализ временных распределений совпадений проводился с помощью время-амплитудного конвертора типа "старт-стоп" и I024-канального анализатора импульсов. Для формирования временных сигналов применялись быстрые формирователи типа "Constant fraction".

Энергетический отбор гамма-квантов проводился по обычному быстро-медленному принципу, с помощью дифференциальных дискриминаторов и медленной схемы совпадений. Временное разрешение установки, при регистрации гамма-квантов с энергиями 90 и 180 кэВ (энергетические окна шириной 15%), составляло $2\tau_c = 2,5$ нс.

Измерения ИВУК проводились на автоматизированном корреляционном спектрометре с $Ge(Li)$ и двумя $NaJ(Tl)$ -детекторами [5]. Исследовались угловые корреляции выделенного каскада, при углах между детекторами $\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 210^\circ, 240^\circ$

и 270° , для двух противоположных направлений магнитного поля, поляризующего ферромагнитную фольгу. Совпадения регистрировались в памяти многоканального анализатора импульсов, разделенной на 16 секторов. Угловые положения $\text{NaI}(\text{Cl})$ -детекторов менялись автоматически, циклическим образом, с временем экспозиции 200 с, а направление тока электромагнита - после окончания каждого цикла.

Интегральные параметры $R(135^\circ, \pm \text{В})$ измерялись на этой же установке и на корреляционном спектрометре с двумя $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторами, работающими на линии с ЭВМ, в двухмерном режиме с цифровыми окнами [6]. Использовались $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторы с чувствительными объемами 35 и 40 см^2 и энергетическим разрешением около 3 кэВ на гамма-линии 1333 кэВ ^{60}Co .

Электромагнит для выстраивания доменов ферромагнитных фольг состоял из С-образного железного сердечника (средняя длина магнитной линии составляла 210 мм, зазор между полюсами 10 мм, сечение 10 x 2 мм) с обмоткой содержащей 2000 витков медного провода с $\phi = 0,35$ мм.

Имплантированные фольги крепились непосредственно к полюсам электромагнита. Степень намагничивания используемых Fe и Ni -фольг проверялась в контрольных измерениях зависимости параметра $R(135^\circ, \pm \text{В})$ от тока катушки для каскада 180 - 86 кэВ при распаде ^{155}Gd , имплантированного в эти же фольги. Эффект насыщения (рис. 1) для обеих фольг достигался при токе $I \approx 0,1$ А.

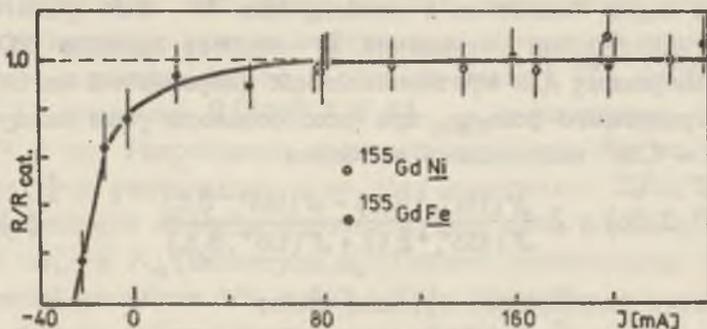


Рис. 1. Зависимость параметров $R(135^\circ, \pm \text{В})$ для каскада 180-86 кэВ в ^{155}Gd , имплантированном в Fe и Ni -фольги, от тока электромагнита (кривая намагничивается)

С целью уменьшения влияния рассеяного поля электромагнитна на умножители, в измерениях ИВУК применялись сцинтилляционные головки с двумя магнитными экранами. В течение всего эксперимента считывались импульсы одноканальных анализаторов, отдельно для каждого угла и направления магнитного поля, по которым вводились поправки в конечные числа совпадений. Значения этих поправок, учитывающих влияние магнитного поля на усиление фотоумножителей, нестабильности амплитудных трактатов и центровку источника, не превышали 1,5%.

В случае измерений ДВУК особое внимание обращалось на компенсацию сдвига центра тяжести кривых задержанных совпадений, вызванного изменением магнитного поля. При этом, не всегда достигалась полная компенсация изменений усиления фотоумножителей, что проводило к нормировочным поправкам от 1 до 3%.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

а) Измерения ДВУК для каскада 180 - 86 кэВ в ^{155}Gd

Относительно длинное время жизни уровня 86 кэВ в ^{155}Gd ($\tau \approx 9,3$ нс) и наличие интенсивного каскада 180 - 86 кэВ с большим коэффициентом A_2 функции γ - γ угловой корреляции ($A_2 \approx 0,2$ и $A_4 = 0$) способствуют измерениям частоты ларморовской прецессии магнитного момента этого состояния методом ДВУК ($g_{86} = -0,376 \pm 0,026$ [7]).

Целью наших измерений было определение сверхтонких магнитных полей на ядрах гадолиния в исследуемых Zr и Ni -фольгах. По спектрам задержанных совпадений γ -квантов каскада 180 - 86 кэВ, измеренных для противоположных направлений магнитного поля поляризирующего фольгу, при фиксированном угле между детекторами $\theta = 135^\circ$ вычислились значения

$$R(135^\circ, \pm B, t) = 2 \frac{N(135^\circ, +B, t) - N(135^\circ, -B, t)}{N(135^\circ, +B, t) + N(135^\circ, -B, t)} \quad (1)$$

к которым затем подгонялась функция типа:

$$R(135^\circ, \pm B, t) = 2b_2' e^{-\lambda_2 t} \sin 2\omega_L(t-t_0) \quad (2)$$

где b_2' - коэффициент определенный коэффициентом A_2 функции угловой корреляции измеряемого гамма-каскада, λ_2 - релаксационный параметр, ω_L - частота ларморовской прецессии, t_0 - фазовый сдвиг.

Положение энергетических окон в гамма-спектре ^{155}Gd , с помощью которых выделялись гамма-кванты переходов 86 и 180 кэВ, представлены на рис. 2.

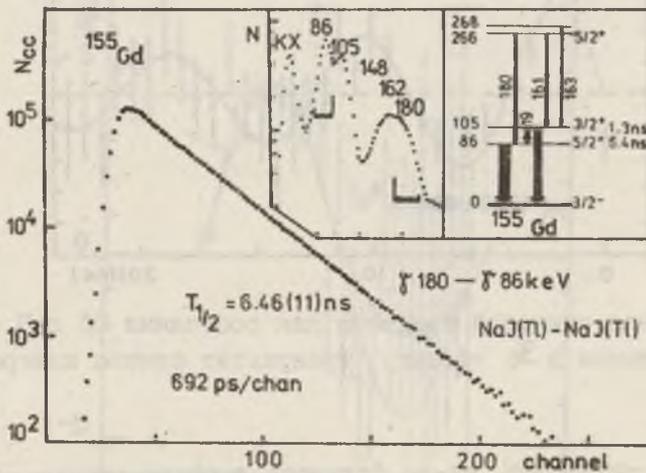


Рис. 2. Кривая распада уровня 86 кэВ в ^{155}Gd , полученная в условиях измерений ДВУК, участок γ -спектра при распаде ^{155}Gd (положение энергетических окон) и фрагмент схемы уровней ^{155}Gd .

На этом же рисунке показан фрагмент схемы уровней ^{155}Gd и кривая распада уровня 86 кэВ, получаемая в эксперименте. Так как в окна 86 кэВ и 180 кэВ попадали также гамма-кванты интенсивных переходов 105, 161 и 163 кэВ, совпадения которых искажали истинную кривую задержанных совпадений каскада 180 - 86 кэВ, особенно сильно в области малых t ($T_{1/2}(105 \text{ кэВ}) \approx 1,2 \text{ нс}$), значения $R(135^\circ, \pm V, t)_{\text{эксп}}$ вычислялись, начиная с $t - t_0 \approx 2 \text{ нс}$. Разрешающее время спектрометра при подгонке функции (2) не учитывалось - во всех измерениях $\pi/\omega_L \tau_0 \gg 3$ и для дальнейшего анализа использовались лишь значения параметров ω_L и λ_2 (амплитуда b_2 содержит значительную примесь совпадений каскадов 161 + 163 - (19) - 86 кэВ).

Измерения выполнены для двух образцов Fe и двух образцов Ni (в комнатной температуре), имплантированных ионами ^{155}Gd в одинаковых условиях при $U_{\text{ИМП}} = 70 \text{ кВ}$. В случае Fe образцов наблюдалось экспоненциальное затухание амплитуды функции $R(135^\circ \pm V, t)$ - рис. 3.

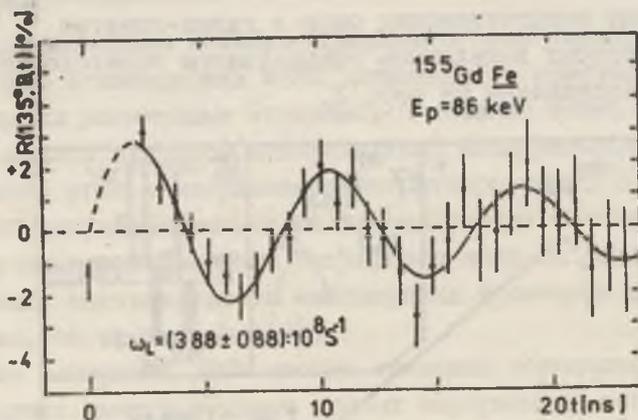


Рис. 3. Кривая спиновой прецессии для состояния 86 кэВ в ^{155}Gd , имплантированном в Fe -фольгу (результат одного измерения)

Для M -образцов, из-за большого периода ларморовской прецессии, трудно было сделать такой вывод и поэтому обработка результатов проводилась с учетом и без учета параметра (рис. 4). Среднее значение ω_L и λ_L полученные из этих измерений и вычисленные затем значения магнитных полей $B_{\text{Gd}}^{\text{эф}}$ (Fe) и $B_{\text{Gd}}^{\text{эф}}$ (M) собраны в таблице I. Для g -фактора состояния 86 кэВ принято значение данное в работе [7].

б) Измерения ИВУК для каскада 180 - 86 кэВ в ^{155}Gd

Измерялось угловое распределение совпадений $N(\theta, \pm \theta)$ гамма-квантов 86 кэВ, выделяемых с помощью подвижных $[\text{Na}](\text{Jl})$ -детекторов, с участком гамма-спектра охватывающим фотопик 180 кэВ (в $\text{Ge}(\text{Li})$ -тракте при углах $\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 210^\circ$ и 270°). Использовались те же самые имплантированные Fe и M -образцы, что и в измерениях ДВУК, и один Fe -образец, полученный при имплантации ^{155}Jb с энергией 25 кэВ. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Из подготовки к экспериментальным значениям $\kappa(\theta, \pm \theta)$ функции

$$\kappa(\theta, \pm \theta) = \kappa_0 [1 + b_2 \cos 2(\theta \mp \Delta\theta_2)] \quad (3)$$

определены коэффициенты $b_2 = b_2 [1 + (2\omega_L \tau)^2]^{-1/2}$ и углы поворота $\Delta\theta_2 = \arctg 2\omega_L \tau / 2$ функции возмущенной угловой корреляции исследуемого каскада для ^{155}Gd в Fe и M , а затем соответствующие им значения ларморовских частот ω_L (таблица 2).

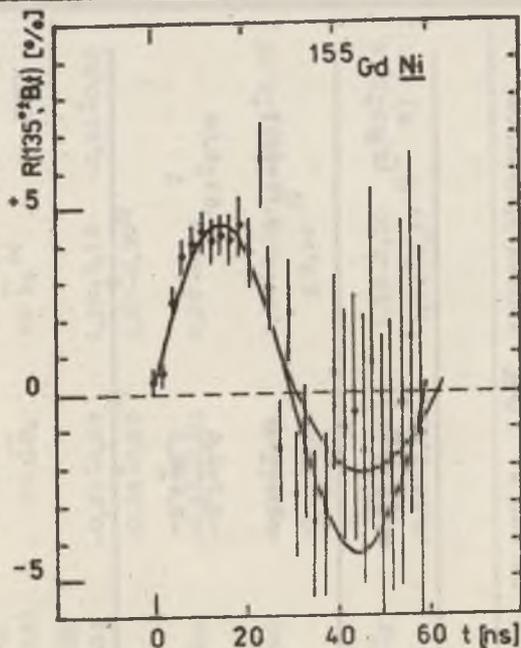


Рис. 4. Кривая спиновой прецессии для состояния 86 кэВ в ^{155}Gd , имплантированном в Ni -фольгу (результат одного измерения)

Для обоих типов образцов значения ω_L вычисленные отдельно из полученных значений $\Delta\theta_2$ и b_2 (без учета и с учетом коэффициента λ_2) заметно отличаются между собой и являются существенно меньшими по сравнению с результатами, вытекающими из измерений ДВУК.

в) Измерения ДВУК для каскада 287 - 108 кэВ в ^{151}Gd . Спыт проводился с ядрами ^{151}Tb имплантированными в Fe -фольги ($U_{\text{имп}} = 70$ кВ) с целью определения g -фактора состояния 108 кэВ в ядре ^{151}Gd . Методика измерений и обработка результатов была такая же, как и в случае исследований ДВУК в ядрах ^{155}Gd . Положения энергетических окон в гамма-спектре ^{151}Tb (выделяемых каскад 287 - 108 кэВ), фрагмент схемы возбужденных уровней ядра ^{151}Tb и кривая распада уровня 108 кэВ представлены на рис. 6. Пример кривой $R(135^\circ \pm B, t)$ показан на рис. 7.

Табл. 1. Результаты измерений ДРУК для каскада 180 - 86 кэВ в ^{155}Gd имплантированном в Fe и Ni -фольги / $U_{\text{лп}} = 70 \text{ кВ}$

Мат.	$\omega_{\lambda}(10^8 \text{ с}^{-1})$	$\lambda_2(10^8 \text{ с}^{-1})$	$\text{В эф}(\Gamma)$ G_d	$G_2^a)$
Fe	$-3,88 \pm 0,08$	$0,46 \pm 0,14$	$-21,5 \pm 1,6$	$0,70 \pm 0,07$
Ni	$-0,48 \pm 0,09$	$0,25 \pm 0,12$	$-2,7 \pm 0,6$	$0,81 \pm 0,08$
	$-0,52 \pm 0,02$	$\equiv 0^b)$	$-2,9 \pm 0,3$	1

а) Принято $G_2 = (1 + \lambda_2 \tau)^{-1}$; $\tau_{86} = 9,32 \pm 0,15 \text{ нс}$

б) См. текст.

Табл. 2. Результаты измерений ДВУК для каскадов 180 - 86 кэВ в ^{155}Gd имплантированном в ^{56}Fe и ^{58}Ni , и 287 - 108 кэВ в ^{151}Gd имплантированном в ^{56}Fe

Мат.	Ядро	U имп (кВ)	\bar{b}_2	$\overline{\Delta\theta_2}$ (град)	$\bar{\omega}_2$ из $\overline{\Delta\theta_2}$	$ \bar{\omega}_2 $ из \bar{b}_2 а)	ω_2 из ДВУК
Fe	^{155}Gd	70	$-0,051 \pm 0,003$	-233 ± 21	$-0,25 \pm 0,03$ $-0,36 \pm 0,05$ б)	$1,35 \pm 0,19$ $1,27 \pm 0,30$ б)	$-3,61 \pm 0,08$
Fe	^{155}Gd	25	$-0,072 \pm 0,004$	-98 ± 24	$-0,10 \pm 0,03$	$0,89 \pm 0,08$	
Ni	^{155}Gd	70	$-0,118 \pm 0,005$	-89 ± 10	$-0,09 \pm 0,01$ $-0,11 \pm 0,02$ б)	$0,37 \pm 0,06$ $\leq 0,34$ б)	$-0,45 \pm 0,09$
Fe	^{151}Gd	70	$-0,089 \pm 0,011$	-250 ± 27	$-0,27 \pm 0,04$ $-0,33 \pm 0,05$ б)	$1,19 \pm 0,20$ $1,14 \pm 0,27$ б)	$-1,85 \pm 0,15$

а) Принято: $b_2 = -0,147 \pm 0,006$ для каскада 180-86 кэВ [9, 9] и $b_2 = -0,230 \pm 0,010$ для каскада 287-108 кэВ [24].

б) После учета поправки λ_2 полученной из ДВУК.

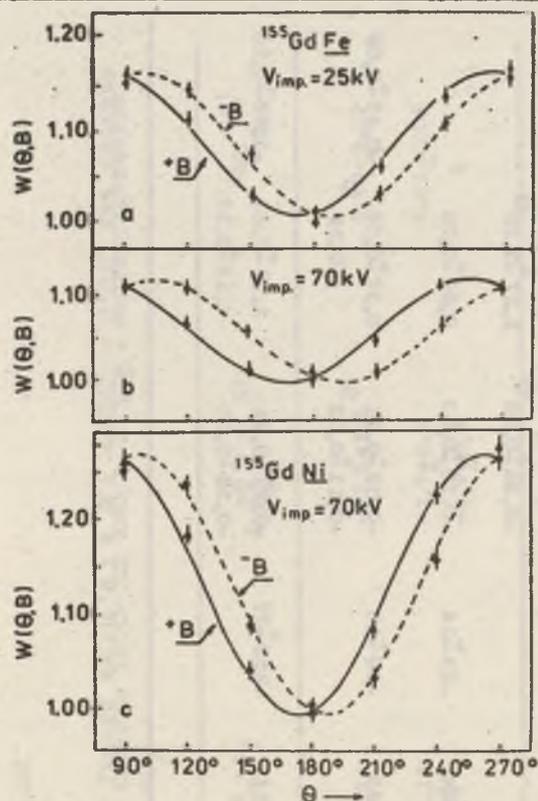


Рис. 5. Угловые распределения совпадений γ -квантов 180-86 кэВ при распаде ^{155}Jb , имплантированного в Fe -фольгу с энергией 25 кэВ (а) и 70 кэВ (б) и в Ni -фольгу с энергией 70 кэВ (в), для двух противоположных направлений магнитного поля, поляризующего фольги

По результатам трех серий измерений получено:

$$\omega_L = -(0,43 \pm 0,03) \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}, \quad \lambda_2 = (0,6 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$$

г) Измерения ИВУК для каскада 287 - 108 кэВ в ^{151}Gd

Измерения проводились по методике описанной при исследовании ИВУК каскада 180 - 86 кэВ в ^{155}Gd , на установке с $\text{Ge}(\text{Li})$ и двумя $\text{NaJ}(\text{Tl})$ -детекторами. Использовались те же самые три источника ^{151}Jb в Fe , что и в измерениях ДВУК. Энергетические окна устанавливались в $\text{NaJ}(\text{Tl})$ -трактах на фотопике 108 кэВ и на комптоновской части спектра за этим фотопиком. $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектор регистрировал участок γ -спектра, содержащий фотопик 287 кэВ. Результат одного измерения представлен

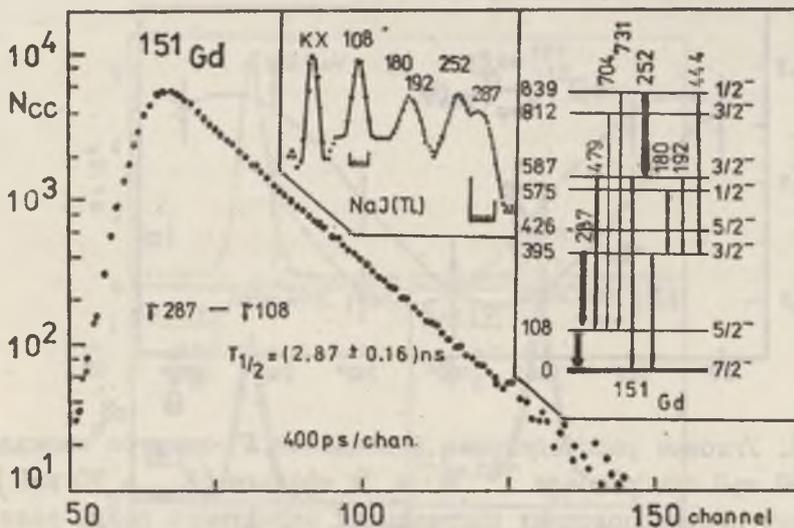


Рис. 6. Пример кривой распада уровня 108 кэВ в ^{151}Gd получаемой в измерениях ДВУК, участок γ -спектра ^{151}Gd и фрагмент схемы уровней ^{151}Gd

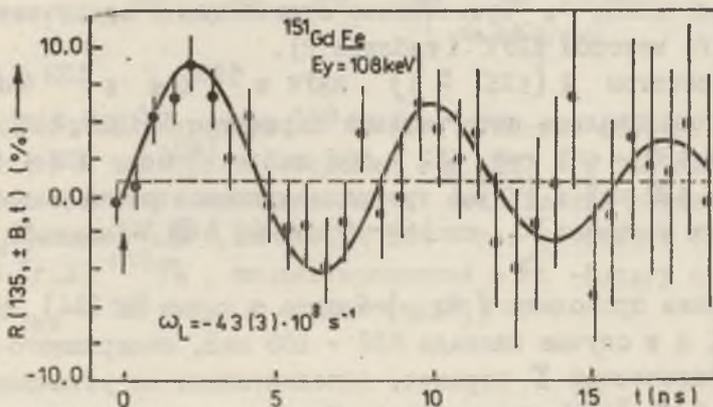


Рис. 7. Кривая спиновой прецессии для уровня 108 кэВ в ^{151}Gd , имплантированном в Fe -фольгу (результат измерений с одним источником)

на рис. 8. Подгонка функции (3) к значениям $\mathcal{M}(0, \pm B)$ проводилась после вычета совпадений от конкурирующих каскадов и случайных совпадений. Как в случае ИВУК в ^{155}Gd , результаты этих измерений:

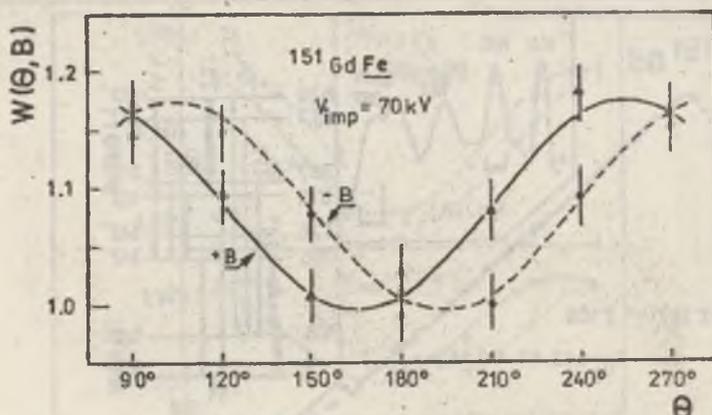


Рис. 8. Угловые распределения совпадений γ -квантов каскада 287-108 кэВ при распаде ^{151}Tb в Fe -фольге ($U_{\text{имп}} = 70$ кэВ), для двух противоположных направлений магнитного поля, поляризующего фольгу

$\bar{\theta}_2 = -0.089 \pm 0.011$ и $\Delta\bar{\theta}_2 = -(0.15 \pm 0.03)$ рад приводят к значениям ω_L существенно отличающимся от значения, полученного методом ДВУК (таблица 2).

д) Параметры $R(135^\circ \pm V)$ ИВУК в ^{149}Gd и ^{153}Gd

Исследовались интегральные параметры $R(135^\circ, \pm V)$ для γ -каскадов 187 - 165 кэВ, 652 - 165 кэВ в ^{149}Gd , 102 - 109 кэВ и 82 - 129 кэВ в ^{155}Gd при радиоактивном распаде соответствующих изотопов Tb , имплантированных в Fe -фольги ($U_{\text{имп}} = 70$ кэВ).

Измерения проводились на установке с двумя $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторами, а в случае каскада 652 - 165 кэВ, содержащего высоко-энергетический γ -переход, дополнительно на установке с $\text{Ge}(\text{Li})$ и 2 $\text{NaI}(\text{Tl})$ -детекторами. Угол между детекторами составлял 135° . Направление тока в электромагните менялось после каждых 400 с. Значения параметра $R(135^\circ, \pm V)$ для каждого каскада определялось по параллельно измеренным совпадениям $\gamma_1 - \gamma_2$ и $\gamma_2 - \gamma_1$ после высчета совпадений от комптоновских распределений под фотопиками обоих переходов и случайных совпадений (измерения проводились с 8-мью цифровыми окнами). В качестве примера, на рис. 9 показаны участки спектров совпадений, полученных при исследовании каскада 187-165 кэВ в ^{149}Gd .

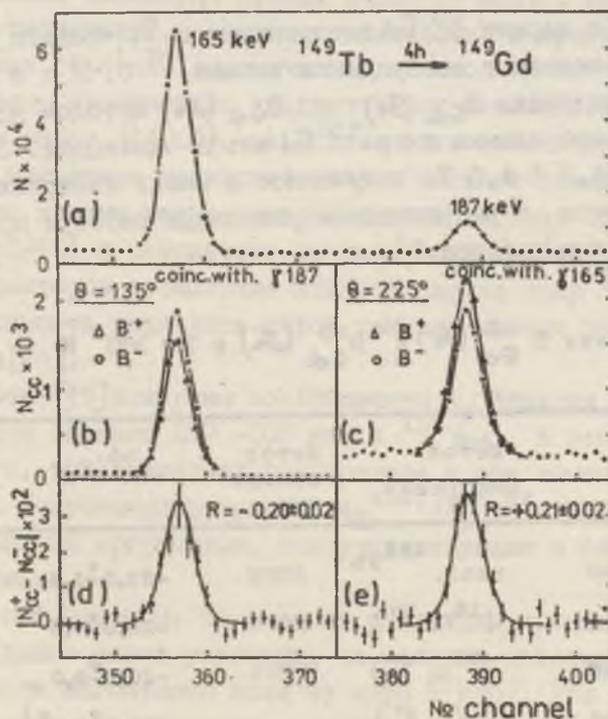


Рис. 9. Участок γ -спектра ^{149}Tb (а), фотопики 165 кэВ (б) 187 кэВ (в) в спектрах совпадений с γ 187 и γ 165 кэВ, соответственно, для противоположных направлений магнитного поля; разности $|N_c(\theta^+, B^+) - N_c(\theta^-, B^-)|$ для фотопиков 165 и 187 кэВ (г, д) ^{149}Tb , имплантированный в Fe - фольгу с $E_{\text{имп}} = 70$ кэВ, $\theta = 135^\circ$ (225°)

Окончательные результаты всех измерений собраны в таблице 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

а) Эффективные магнитные поля на ядрах Gd в Fe и Ni -матрицах

Сверхтонкое магнитное поле, действующее на ядра Gd в Fe -матрице, впервые было измерено Г р о д з и н с о м и др. [11] и Б о э м о м и др. [12]. В обеих работах измерения проводились

методом ИВУК с ядрами ^{156}Gd внедренными в Fe -фольги в процессе их кулоновского возбуждения ионами ^{16}O . Клеппер и др. [13] исследовали $V_{\text{Gd}}(\text{Fe})$ и $V_{\text{Gd}}(\text{Ni})$ методом ДВУК при кулоновском возбуждении ядер ^{156}Gd альфа-частицами. Значение $V_{\text{Gd}}(\text{Fe}) = 24,5 \pm 1,6$ Т, полученное в наших измерениях, хорошо согласуется с результатами указанных работ и превосходит их точностью (таблица 3).

Табл. 3. Значения $V_{\text{Gd}}^{\text{эф}}(\text{Fe})$ и $V_{\text{Gd}}^{\text{эф}}(\text{Ni})$ в $T \approx 300^\circ\text{K}$

Мат.	Ядро	Метод внедрения	Метод измерения	$V^{\text{эф}}(\text{T})$	Работа
	^{155}Gd	импл. ^{155}Tb	ДВУК	$-21,5 \pm 1,6$	наст.
Fe	^{156}Gd	$(^{16}\text{O}, \gamma)$	ИВУК	$-18,0 \pm 9,0$	[11]
	^{156}Gd	$(^{16}\text{O}, \gamma)$	ИВУК	$-20,0 \pm 5,0$	[12]
	^{156}Gd	(α, γ)	ДВУК	$-26,0 \pm 3,0^{\text{a}}$	[13]
Ni	^{155}Gd	импл. ^{155}Tb	ДВУК	$-2,7 \pm 0,6$	наст.
	^{156}Gd	(α, γ)	ДВУК	$-17,5 \pm 4,5^{\text{a}}$	[13]
	$^{155,160}\text{Gd}$	$(^{12}\text{C}, \gamma)$	ИВУК	$-3,8$	[14]

a) $T = 425^\circ\text{K}$

В случае Ni -матрицы, наш результат и результат Клеппера и др. [13] (см. табл. 3) резко отличаются между собой. Если учесть, что условия наших измерений были существенно лучше, чем в работе [13], в которой измерялась частота ларморовской прецессии для состояния 89 кэВ в ^{156}Gd с временем жизни почти в три раза меньшим по сравнению с временем жизни уровня 86 кэВ в ^{155}Gd , то можно отдать предпочтение нашему результату. Указывают на это также данные работы [14].

Затухание амплитуды кривых $R(135^\circ, \pm B, t)$, полученных в наших экспериментах, связано, по-видимому, с существованием в исследуемых образцах динамических взаимодействий магнитного типа. Вклады статических квадрупольных взаимодействий, судя по данным работ [14, 16], не должны быть существенными. Динамические магнитные взаимодействия в металлических образцах с примесными ионами редко-земельной области были обнаружены в работах [15-18] в результате исследований температурной зависимости факторов ослабления ИВУК. В случае ядер ^{155}Gd в Fe, эта зависимость оказалась такой как для чистых релаксационных процессов [16].

В работе [19] измерены коэффициенты A_2 функции угловой корреляции для каскада $287 - 108$ кэВ в ^{151}Gd , в немагнитной Fe-фольге, при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Полученный результат $A_2^{\text{ком.}}/A_2^{\text{ж.аз.}} \approx 1,5$ является дополнительным аргументом, свидетельствующим в пользу принятых предположений.

С другой стороны, подавление амплитуды кривых $R(135^\circ, \pm B, t)$ и их затухание может указывать на наличие небольшой вариации сверхтонкого магнитного поля от ядра к ядру. Для анализа этого эффекта, вместе с обсуждаемыми динамическими взаимодействиями, не хватало статистической точности наших экспериментов.

б) Ослабление эффекта ИВУК

Как уже отмечалось выше, измерения ИВУК для ядер ^{155}Gd в Fe и Ni и ядер ^{151}Gd в Fe приводят к значениям ω_L значительно меньшим, чем это следует из измерений методом ДВУК. Расхождения останутся и после учета динамических эффектов (таблица 2).

Это разногласие можно объяснить, если предположить, что часть имплантированных ионов в ферромагнитной фольге занимает "немагнитные центры" [20]. В таком случае измеряемая функция ИВУК представляет собой суперпозицию возмущенной функции $N(\theta, B)$ и невозмущенной функции $N(\theta)$, и имеет вид:

$$N(\theta, B) = fN(\theta, B) + (1-f)N(\theta) \quad (4)$$

где f - фракция примесных ядер на которые действует сверхтонкое магнитное поле.

Примесь невозмущенной функции $N(\theta)$ должна приводить к сильному подавлению, наблюдаемой в ИВУК, величины $\Delta\theta_2$ и увеличению амплитуды \bar{b}_2 . Сравнивая выражения (3) и (4), получаем:

$$\bar{\omega}_L \tau = \frac{f G_2^2 \omega_L \tau}{f G_2 + (1-f) 1 + [(2\omega_L \tau G_2)^2]}, \quad \text{где } \bar{\omega}_L \tau = \frac{1}{2} \text{tg } 2\bar{\Delta\theta} \quad (5)$$

и

$$\left(\frac{\bar{b}_2}{b_2}\right)^2 = \frac{f G_2 [f G_2 + 2(1-f)]}{1 + (2\omega_L \tau G_2)^2} + (1-f)^2 \quad (6)$$

Используя эти соотношения и принимая для ω_L и G_2 значения полученные в измерениях ДВУК, вычислены коэффициенты f (по $\bar{\Delta\theta}_2$ и \bar{b}_2 , проведенным в таблице 2) для исследуемых нами образцов \mathcal{M} имплантированных ионами ^{155}Tb и ^{151}Tb и образцов \mathcal{M} имплантированных ^{155}Tb . Результаты представлены в таблице 4.

Табл. 4. Значение коэффициентов f для ядер ^{155}Tb и ^{151}Tb имплантированных в Fe и Ni-фольги

Мат.	Ядро	$U_{\text{имп}}$ (кВ)	физ \bar{b}_2/b_2	физ $\bar{\Delta\theta}_2$	$f_{\text{ср}}$
Fe	^{155}Tb	25	$0,53 \pm 0,07$	$0,61 \pm 0,06$	$0,58 \pm 0,05$
	^{155}Tb	70	$0,70 \pm 0,09$	$0,80 \pm 0,05$	$0,78 \pm 0,04$
	^{151}Tb	70	$0,71^{+0,14}_{-0,10}$	$0,73 \pm 0,06$	$0,73 \pm 0,06$
Ni	^{155}Tb	70	$0,46^{+0,30}_{-0,14}$	$0,39^{+0,10}_{-0,06}$	$0,41^{+0,09}_{-0,06}$

Оказалось, что в Fe-фольге фракция ядер Gd чувствующих сверхтонкое магнитное поле (фракция ионов Tb внедренных в узлы кристаллической решетки), почти в две больше чем в Ni-фольге и в среднем для ^{155}Gd и ^{151}Gd , составляет $(77 \pm 3)\%$ при имплантации с энергией 70 кэВ, и $(58 \pm 5)\%$ при имплантации с $U_{\text{имп}} = 25$ кэВ.

Явное уменьшение f с понижением энергии имплантации с 70 до 25 кэВ (для Fe-фольги) можно объяснить, если учесть окисленный, поверхностный слой фольги. Это видно из рис. 10 на котором представлены, вычисленные по модели LSS [21], распределения пробегов ионов ^{155}Tb имплантированных в Fe и Ni-ми-

шени в условиях нашего эксперимента. При имплантации с энергией 70 кэВ средний пробег этих ионов в Fe превышает 150 Å. В окисленном слое, толщина которого в Fe-фольге около 40 Å [4], содержится тогда 1% внедренных ионов. Уменьшение энергии до 25 кэВ увеличивает число этих ионов до около 10%, что и отражается в эксперименте.

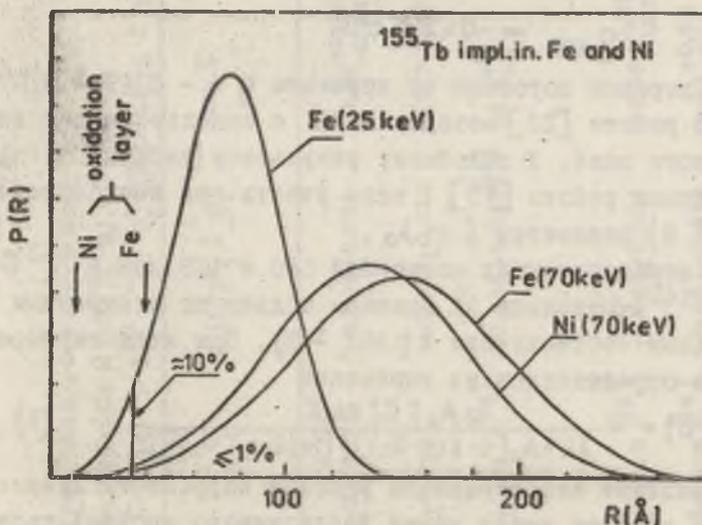


Рис.10. Распределение пробегов по теории \mathcal{LSS} [21], ионов ^{155}Tb в Fe и Ni, имплантированных с энергиями 25 и 70 кэВ.

Определить однозначно природу других немагнитных центров в ферромагнитной фольге, занимаемых имплантированными ионами, без дополнительных исследований затруднительно. Трудно также объяснить, что является основной причиной малого значения фракции f в случае Ni-фольги (толщина окисленного слоя в Ni меньше, чем в Fe [4], распределения пробегов ионов ^{155}Tb с энергией 70 кэВ - сравнимы).

Согласие значений параметров f и λ_2 полученных для ядер ^{155}Gd и ^{151}Gd в Fe-фольге ($U_{\text{имп}} = 70$ кэВ) позволяет предполагать, что также для других изотопов Gd, внедренных в эту же Fe-фольгу в идентичных условиях, значения V_{Gd} , f и λ_2 постоянные или меняются в небольших пределах. На базе этого предпо-

ложения, ниже, оцениваются g -факторы короткоживущих, возбужденных уровней в ядрах ^{153}Gd и ^{149}Gd .

в) g -факторы состояний 108 кэВ в ^{151}Gd , 109 и 129 кэВ в ^{153}Gd , и 165 кэВ в ^{149}Gd

Значение g -фактора состояния 108 кэВ ($T_{1/2} \approx 3\text{нс}$) в ^{151}Gd определено из частоты ларморовской прецессии его магнитного момента (^{151}Gd в Fe) измеренной методом ДВУК. Полученный результат

$$g_{108} = -0,42 \pm 0,04$$

находится в хорошем согласии со значением $g = -0,49 \pm 0,07$ измеренным в работе [22] методом ИВУК с использованием внешнего магнитного поля. К подобному результату (таблица 5) приводят также данные работы [19], если учесть при вычислении ω_L из $R(135^\circ, \pm B)$ параметры f и λ_2 .

g -факторы короткоживущих состояний 109 и 129 кэВ в ^{153}Gd и 165 кэВ в ^{149}Gd (таблица 5) оценены только по измеренным нами интегральным соотношениям $R(135^\circ, \pm B)$. При этом ларморовская частота определялась из выражения

$$R(135^\circ, \pm B) = - \frac{12 A_2 f G_2^2 \omega_L \tau}{\{4 + A_2 [1 - f(1 - G_2)]\} \{1 + (2\omega_L \tau G_2)^2\}} \quad (7)$$

(A_2 коэффициент невозмущенной угловой корреляции данного каскада, а τ среднее время жизни исследуемого уровня) полученного при предположении, что функция ИВУК имеет вид (4) и $A_4 = 0$. Для обоих ядер приняты одинаковые значения параметров f и λ_2 , установленные в экспериментах с ядрами ^{155}Gd и ^{151}Gd , имплантированными в Fe -фольгу при $U_{\text{имп}} = 70$ кВ. Остальные данные используемые в расчетах, заимствованные с работ других авторов, представлены в таблице 5.

g -фактор состояния 129 кэВ измерен также в работе [23], методом ИВУК во внешнем магнитном поле. Согласие результатов этой работы ($g = 0,25 \pm 0,05$) и полученного нами ($g = 0,22 \pm 0,07$)

может свидетельствовать о том (подобное согласие результатов наблюдается и в случае g -фактора уровня 108 кэВ в ^{151}Gd - таблица 5), что принятая простая модель, разделяющая ядра имплантированные в ферромагнитную фольгу на чувствующие и нечувствующие сверхтонкое магнитное поле, при определении

g -факторов ядерных состояний методом ИВУК, приводит к достоверным результатам. Однако, необходимость учета, в этом слу-

Табл. 5. Значения β -факторов некоторых возбужденных состояний ядер $^{149}, ^{151}, ^{153}\text{Gd}$ полученные из анализа параметров $R(135^{\circ})$

$$/f = 0,77 \pm 0,03, \quad \lambda_2 = (0,48 \pm 0,14) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad B_{E2}^{\text{эф}}(3\%) = -215 \pm 1,6 \text{ Т /}$$

Ядро	$E_{\text{ур}}$ (кэВ)	J^{π}	τ (нс)	Каскад (кэВ)	$\bar{\lambda}_2$	$R(135^{\circ})$ В	$\omega \tau$	β
					$A_4 = 0$			
^{149}Gd	165	$5/2^-$	$2,4 \pm 0,1$ [10]	187-165	$-0,342 \pm 0,016$	$-0,200 \pm 0,015$	$-0,55^{+0,24}_{-0,16}$	$-0,22^{+0,09}_{-0,07}$
				652-165	$+0,184 \pm 0,019$	$+0,107 \pm 0,012$	$-(0,7-0,4)$	
^{151}Gd	108	$5/2^-$	$4,3 \pm 0,1$ [25]	287-108	$-0,258 \pm 0,013$ [24]	$-0,065 \pm 0,010$ [9]	$-2,3^{+0,7}_{-0,9}$	$-0,52 \pm 0,22$ $-0,42 \pm 0,04$ а)
^{153}Gd	110	$5/2^-$	$0,5 \pm 0,1$ [25]	102-110	$+0,158 \pm 0,010$ [26]	$-0,025 \pm 0,004$	$+0,08^{+0,02}_{-0,01}$	$+0,16 \pm 0,06$
				82-129	$+0,135 \pm 0,025$ [26]	$-0,061 \pm 0,014$	$+0,82^{+0,53}_{-0,23}$	$+0,22^{+0,16}_{-0,07}$
	129	$3/2^-$	$3,6 \pm 0,2$ [10]			или	$+0,40 \pm 0,17$	$+0,11 \pm 0,05$

а) Результат полученный методом ДВУК.

чае, добавочных параметров f и λ_2 , определяемых чаще всего в отдельных экспериментах, усложняет измерения и увеличивает погрешности окончательных результатов.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность проф. К.Я. Громову за поддержку и постоянный интерес к работе, дру Д. Мончко за помощь при электромагнитной имплантации, дру Н. А. Лебедеву за приготовление радиоактивных препаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П. Афанасьев, А.Т. Василенко, И.И. Громова и др.: Препринт ОИЯИ, 13-4763, Дубна 1969.
2. Nielsen K. B., Deutch B. I.: Phys. Letters 208 (1968).
3. Deutch B. I.: Hyperfine Interactions in Excited Nuclei, Gordon and Breach, N. Y. 1971, 137.
4. Bottiger J., Davies J. A., Deutch B. I.: Proceedings of the XI Winter School on Nuclear Interactions, Zakopane 1973, 176.
5. Б.А. Аликов, М. Будзыньски, Я. Ваврышук и др.: Препринт ОИЯИ, P13-9607, Дубна 1976.
6. Б.А. Аликов, М. Будзыньски, Я. Ваврышук и др.: Препринт ОИЯИ, P13-9608, Дубна 1976.
7. Hrynkiwicz A. Z., Ogaza S., Styczeń J. I in.: Nucl. Phys. 80, 608 (1966).
8. Hrynkiwicz A. Z., Kisielewski J., Stachura Z. I in.: Preprint JINR, E6-3906, Dubna 1968.
9. Я. Ваврышук, В.А. Морозов, Т.М. Муминов и др.: Препринт ОИЯИ, 6-5287, Дубна 1970.
10. Э.Е. Берлович, С.С. Василенко, Ю.Е. Новиков: Времена жизни возбужденных состояний атомных ядер, Ленинград 1972.
11. Grodzins L., Borchers R., Hagemann G. B.: Phys. Letters 21, 214 (1966)
12. Boehm F., Hagemann G. B., Winter A.: Phys. Letters 21, 217 (1966).

13. Klepper O., Speher H., Wertz N.:
Z. Phys. 217, 425 (1968).
14. Brenn R., Lehmann L., Spehl H.:
Z. Phys. 209, 197 (1968).
15. Caspari M., Frankel S., Wood G. T.:
Phys. Rev. 127, 1519 (1962).
16. Deutch B. L.: Proceedings of the XI Winter School on
Nuclear Interactions, Zakopane 1973, 172.
17. Deutch B. L., Bonde Nielsen K.,
Bernas H.; Phys. Letters 27B, 209 (1968).
18. Waddington J. C., Hagemann K. A.,
Ogaza S. I in: Nuclear Reactions Induced by Heavy -
Ions, North-Holland Publ. Co., 1970, 987.
19. Afanasiev V. P., Budzyński M., Demeter
L. I in: Preprint JINR, E6-8327, Dubna 1974.
20. Bożek E., Hrynkiwicz A. Z., Merdinger
J. C., Vivien J. P.: Phys. Rev. C, 12, 1873
(1975).
21. Lindhard J., Scharff M., Schitt H.E.:
Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat.-Fys. Medd. 33 No 14 (1963).
22. Badica T., Bogdan D., Ciortea C. I in:
Z. Phys. A277, 217 (1976).
23. Badica T., Bogdan D., Ciortea C.:
I in: Hyperfine Interac. 3, 423 (1977).
24. Я. Ваврышук, В. Жук, Р. Ион-Михай и др.:
Acta Phys. Polonica B 10, 339 (1979).
25. В.П. Афанасьев, И.И. Громова, Н.А. Лебеде
деви др.: Препринт ОИЯИ, Р6-6426, Дубна 1972.
26. Б.А. Аликов, М. Будзьянски, Т. Бэдикэи др.:
Acta Phys. Polonica 59 (1976).

STRESZCZENIE

Badano różniczkowe i całkowite zaburzone korelacje kierunkowe $\delta^{\sim} - \delta^{\sim}$, wybranych kaskad, przy rozpadzie β jąder $^{155}, ^{153}, ^{151}, ^{149}\text{Tb}$ zaimplantowanych do ferromagnetycznych folii Fe i Ni. Wyznaczono: wartości efektywnych pól magnetycznych działających na jądra ^{155}Gd w Fe i Ni, czynniki giromagnetyczne poziomów 165 keV w ^{149}Gd , 108 keV w ^{151}Gd , 109 i 129 keV w ^{153}Gd .

SUMMARY

The integral and differential perturbed angular correlations of selected $\delta^{\sim} - \delta^{\sim}$ cascades in the decay of Tb nuclei with $A=149, ^{151}, ^{153}$ and 155 implanted into Fe and Ni foils have been investigated. The results of investigations have allowed to determine the characteristics of hyperfine magnetic fields $B_{\text{Gd}}(\text{Fe})$ and $B_{\text{Gd}}(\text{Ni})$, as well as the value of g-factors for the levels of 165 keV in ^{149}Gd , 108 keV in ^{151}Gd , 109 and 129 keV in ^{153}Gd .

Złożono w Redakcji 26 IV 1983 roku.