

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P6-86-675

В.Н.Абросимов, Э.Крупа, В.А.Морозов,
В.М.Разов¹, В.Таньска-Крупа, Э.Худайбердиев²

**СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
УСТАНОВКИ $e\text{-}\gamma$ -СОВПАДЕНИЙ - МЛС
ДЛЯ ON-LINE ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Направлено в Оргкомитет 37 Совещания
по ядерной спектроскопии
и структуре ядра /Юрмала, 1987/

¹ Дальневосточный государственный университет

² Самаркандский государственный университет

1986

Введение

В данной работе представлены результаты проведенных исследований спектрметрических характеристик спектрометра e - γ -совпадений - МЛС, созданного на базе магнитно-линзового спектрометра с треугольной формой магнитного поля и предназначенного для работы на пучке протонов фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в линию с масс-сепаратором /1/.

Мы остановимся на следующих характеристиках: разрешение МЛС $R = \Delta B_p / B_p$ в зависимости от размеров источника, порог регистрации электронов, относительная эффективность регистрации электронов и γ -переходов, разрешающее время спектрометра e - γ -совпадений с различными детекторами.

Приведенные характеристики установки получены в off-line экспериментах. Полное описание спектрометра в линии с масс-сепаратором будет опубликовано позднее.

Постановка эксперимента

При изучении спектров конверсионных электронов и бета-спектров, а также временных спектров в режиме e - γ -совпадений использовалась электроника фирмы ORTEC, включающая в себя быстрые усилители - ГГА 579, быстрые дискриминаторы - СFD 584 и время-амплитудный преобразователь - ТРНС 467. Измерения e - γ -совпадений производились в режиме быстрых совпадений. Спектры электронов регистрировались на анализаторе ICA -70 в мультискейлерном режиме. В сцинтилляционных спектрометрах применялись фотоумножители типа XP 2020 Q. В бета-спектрометре излучение регистрировалось пластическим сцинтиллятором - NE 104, а в γ -спектрометре применялись как пластический сцинтиллятор, так и неорганический кристалл $NaJ(Tl)$. Для питания МЛС использован управляемый стабилизатор тока /2/, долговременная стабильность которого была не хуже 0,01% за 24 часа. В измерениях применялись радиоактивные источники, приготовленные различным способом: методом испарения в вакууме и осаждения на алюминиевую подложку (^{57}Co , ^{169}Yb), электролитического осаждения на медную подложку (^{60}Co) и выпариванием на алюминиевую подложку (^{160}Tb). Для изучения влияния размера источника

на энергетическое разрешение спектрометра на источники ^{57}Co и ^{169}Yb одевались алюминиевые маски толщиной 1 мм с отверстиями 1, 2 или 3 мм.

Результаты измерений

а) Энергетические характеристики бета-спектрометра

На рис. 1 показан спектр конверсионных электронов ^{169}Yb (рис. 1а соответствует источнику без маски). На МЛС может быть достигнуто

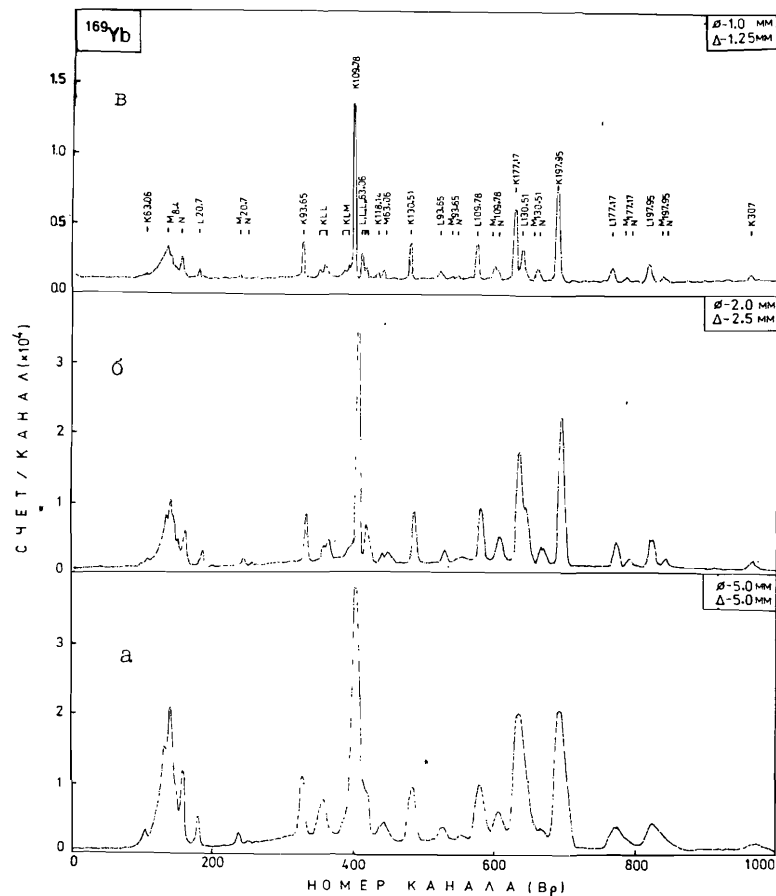


Рис. 1. Спектр конверсионных электронов ^{169}Yb при разных размерах источника и щели выходной диафрагмы.

разрешение $\Delta B_p/B_p \approx 0,4\%$ при источнике \varnothing 1 мм и величине щели выходной диафрагмы 1,25 мм (рис. 1в). Светосила в этом случае достигает $T = 0,6\%$. При источнике \varnothing 2 мм и величине щели 2,5 мм - $\Delta B_p/B_p = 0,8\%$ (рис. 1б). При этом существенно возрастает эффективность регистрации электронов ($T \approx 2\%$). Наблюдаемое увеличение фона при наложении на источник маски, ограничивающей размеры источника, связано с регистрацией комптоновских электронов, выбитых из маски.

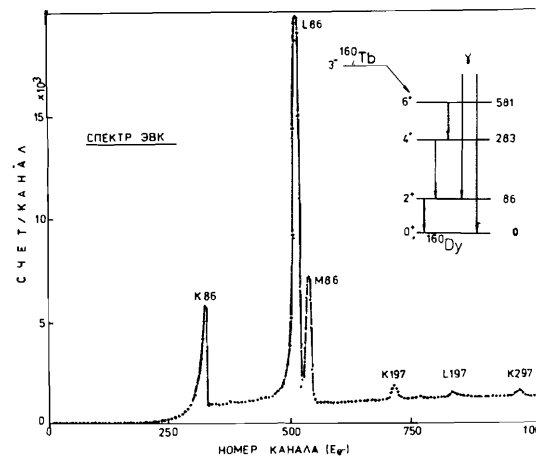


Рис. 2. Спектр конверсионных электронов и β -спектр ^{160}Tb .

На рис. 2 представлена начальная часть спектра конверсионных электронов и β -спектра ^{160}Tb .

Порог регистрации электронов не превышает 4+6 кэВ, что видно на примере K-63, M-8,4 ^{169}Yb и KLL -14,4 ^{57}Co (рис. 3).

Необходимо отметить, что в данных условиях понижение порога дискриминатора не приводило к увеличению интенсивности низкоэнергетических электронов. Этот предел в регистрации электронов, очевидно, связан с величиной светового выхода сцинтиллятора и светосбора регистрируемого излучения на ФЭУ.

На рис. 4 приведено амплитудное распределение импульсов на выходе ФЭУ при регистрации конверсионных электронов ^{57}Co .

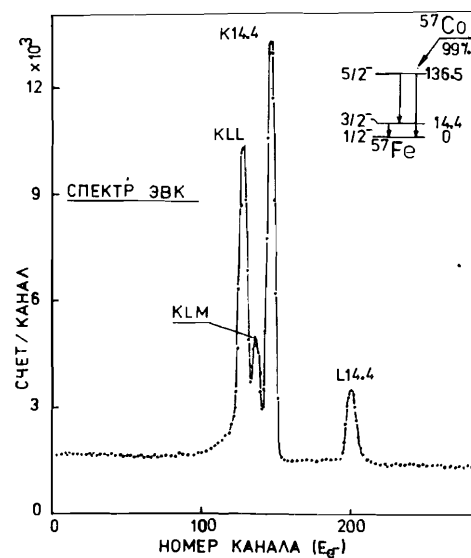


Рис. 3. Спектр конверсионных электронов ^{57}Co .

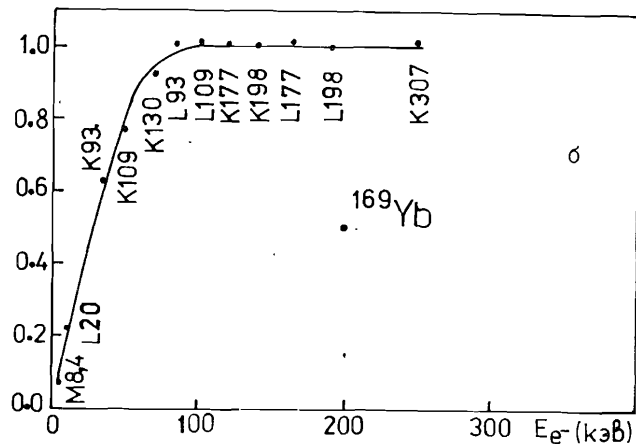
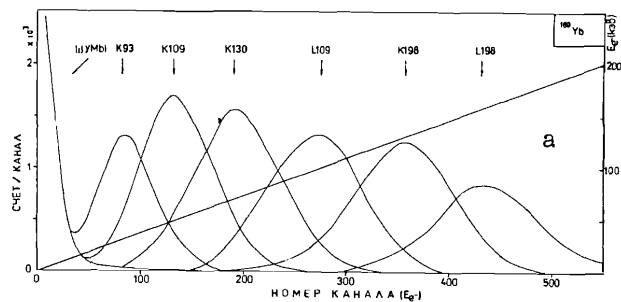


Рис. 4. Амплитудное распределение импульсов на выходе ФЭУ (а) и кривая эффективности (б) при регистрации конверсионных электронов.

онных электронов ^{169}Yb (а) и кривая эффективности их регистрации (б). Как видно из рис. 4б, относительная эффективность регистрации электронов с энергией ниже 70 кэВ существенно уменьшается ($< 0,8$). Но для того чтобы оценить реальную возможность применения МЛС в исследованиях низкоэнергетических переходов, надо принять во внимание относительно высокую долю конверсионных электронов по сравнению с интенсивностью γ -лучей в этих переходах.

На рис. 5 приведены значения абсолютной эффективности регистрации электромагнитных переходов с учетом светосилы спектрометров (в данном случае светосила β -спектрометра $T = 1\%$ и величина телесного

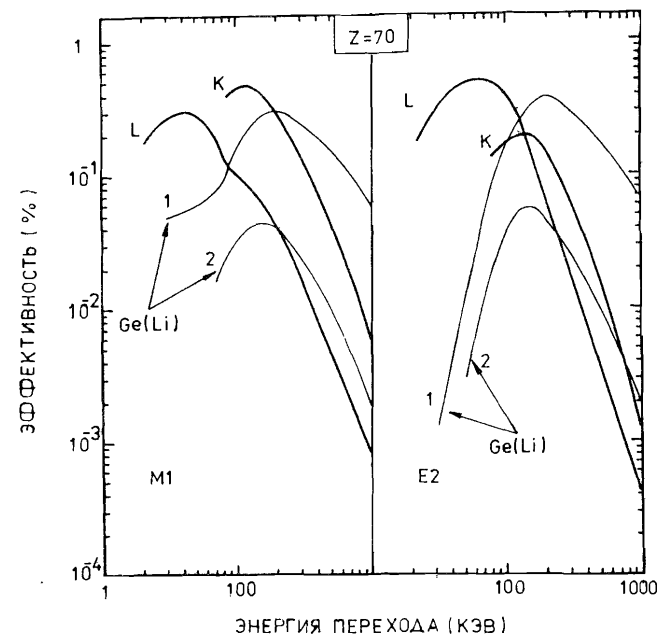


Рис. 5. Эффективность регистрации электромагнитных переходов типа M1, E2 по конверсионным электронам и γ -лучам для спектрометра - K, L и Ge(Li)-детекторов: 1 - объем 38 см³, 2 - объем 1,3 см³.

угла для γ -спектрометров также равна 1%), абсолютной эффективности регистрации излучения и доли соответствующего излучения (конверсия или γ -лучи) на распад. Интенсивность перехода принята равной 1. Расчеты были проведены в предположении, что переход идет в ядре с $Z = 70$, для мультипольностей наиболее часто встречающихся переходов - E2 и M1.

Очевидно, что эффективность регистрации переходов по конверсионным электронам

$$\epsilon_{abc}(K) \sim \frac{\alpha_K}{1 + \sum_i \alpha_i}, \quad \epsilon_{abc}(L) \sim \frac{\sum \alpha_L}{1 + \sum_i \alpha_i};$$

$\sum \alpha_L$ используется вследствие конечного разрешения β -спектрометра.

При регистрации перехода по γ -лучам

$$\varepsilon_{abc}(\gamma) \sim \frac{1}{1 + \sum \alpha_i}$$

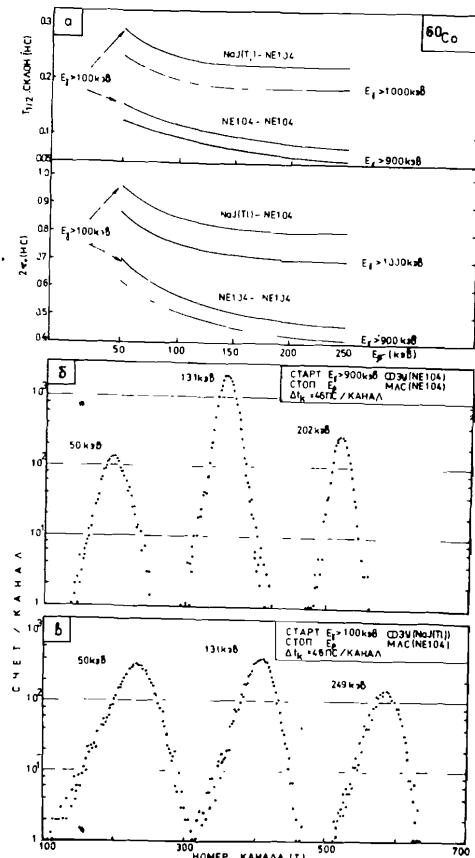
где $\sum \alpha_i$ - сумма коэффициентов конверсии на К, L, M и т.д. оболочках. На этом же рисунке для сравнения приведены эффективности регистрации переходов для полупроводниковых детекторов различных размеров, обладающих энергетическим разрешением, сравнимым с разрешением бета-спектрометра. Несомненно, что в области энергий < 150 кэВ в рассмотренном случае эффективность регистрации переходов по конверсионным электронам более высокая, чем по γ -излучению.

б) Временные характеристики спектрометра совпадений

Временные характеристики спектрометра совпадений были изучены на источнике ^{60}Co в режиме β^- - γ -совпадений. Электроны регистрировались на бета-спектрометре в диапазоне от 50 + 250 кэВ, а γ -лучи - на сцинтилляционном спектрометре в определенном энергетическом диапазоне, который выбирался с помощью интегральных дискриминаторов. Результаты измерений представлены на рис. 6, где приведены значения разрешающего времени установки, крутизны склона и формы кривых мгновенных совпадений (КМС) в различных энергетических интервалах. При использовании в γ -спектрометре пластического сцинтиллятора и выборе $E_\gamma > 900$ кэВ при $E_\beta = 250$ кэВ, было получено разрешение $2\tau_0 = 410$ пс и крутизна склона кривой мгновенных совпадений $T_{I/2} = 50$ пс.

Нами была проведена оценка вклада в разрешающее время спектрометра неизохронности траекторий электронов с учетом

Рис. 6. Временные характеристики МЛС.



конечной скорости электронов определенной энергии для данной формы сцинтиллятора, регистрирующего электроны (конус $\varnothing 25$ мм, $h = 30$ мм). МЛС предполагается использовать в одном из следующих режимов, отличающихся углом захвата электронов входными диафрагмами:

1. $\alpha = 23 + 37^\circ$ для работы с наибольшей светосилой ($T \approx 5\%$) и разрешением $R = 2,5\%$.
2. $\alpha = 25 + 35^\circ$, $T \approx 4\%$ и $R \approx 2\%$.
3. $\alpha = 26 + 34^\circ$ при работе с точечными источниками $T \approx 3\%$ и $R \approx 1\%$.

Расчеты длин траекторий электронов в МЛС при помощи программы RTUCSDS [3] показали, что разность длин траекторий электронов при их регистрации или вершиной, или основанием конуса равна 33 мм, 25 мм и 20 мм соответственно. Зависимость разности времени пролета электронов в МЛС от энергии электронов и аксептанса входных диафрагм приведена на рис. 7. Как видно из рисунка, уже при энергиях электронов

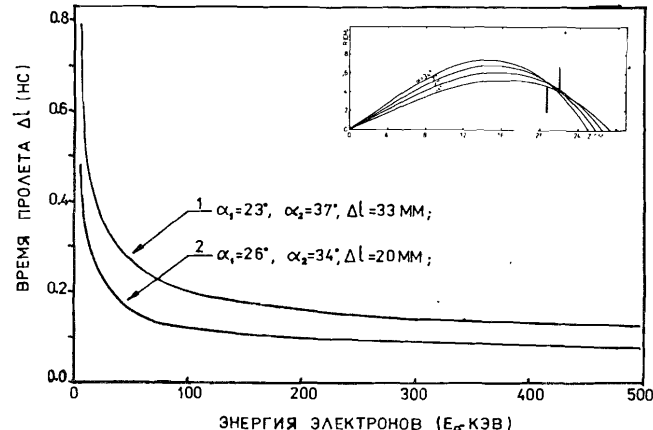


Рис. 7. Зависимость разности времени пролета электронов в бета-спектрометре по разным траекториям от энергии электронов.

< 100 кэВ этот вклад в разрешающее время спектрометра совпадений становится существенным (кривая 1). Уменьшить влияние этого вклада можно за счет применения входной диафрагмы с меньшим аксептансом (кривая 2) и соответствующим уменьшением щели выходной диафрагмы. Помимо изучения мгновенных совпадений нами были проведены исследования задержанных совпадений на источниках ^{57}Co , ^{160}Tb и ^{169}Yb . Результаты проведенных исследований представлены в таблице и на рис. 8, 9 и 10. Наблюдается хорошее согласие с ранее известными данными.

Периоды полураспада возбужденных состояний в ^{57}Fe , ^{160}Dy , ^{169}Tm

Ядро	$E_{ур.}$ (кэВ)	Совпадения $e-\gamma$	$T_{I/2}$ (нс) наст. раб.	$T_{I/2}$ (нс)*
^{57}Fe	14,4	(K-I4,4)- $E_\gamma > 120$ кэВ	100,5(I,4)	99,7(2)
				99,3(3)
^{169}Tm	8,4	(M-8,4)- $E_\gamma > 30$ кэВ	4,22(II)	4,04(6)
				4,13(12)
				4,10(21)
^{160}Dy	86,7	(L-86,7)- $E_\gamma > 800$ кэВ	1,95(5)	2,03(2)
				1,97(4)
				2,01(5)
				1,92(5)
				1,89(5)

* Ссылки на оригинальные работы приведены в /4/.

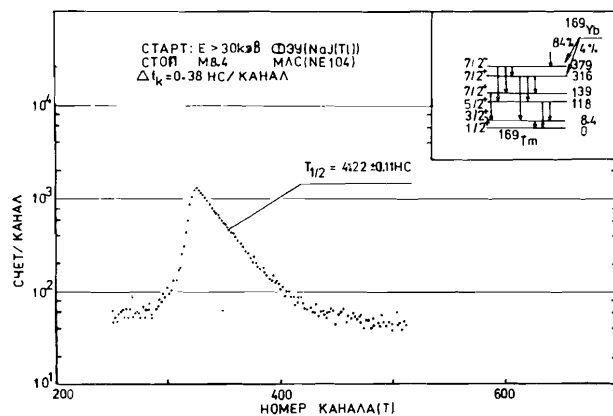


Рис. 8. Спектр задержанных совпадений при распаде 8,4 кэВ уровня в ^{169}Tm .

в) Программа обработки экспериментальных данных

Обработка кривых задержанных совпадений (КЗС) с целью определения периода полураспада возбужденного уровня $T_{I/2} = \ln 2 / \lambda$ проводилась исходя из однокомпонентного экспоненциального распределения задержанных совпадений с учетом временного разрешения установки и

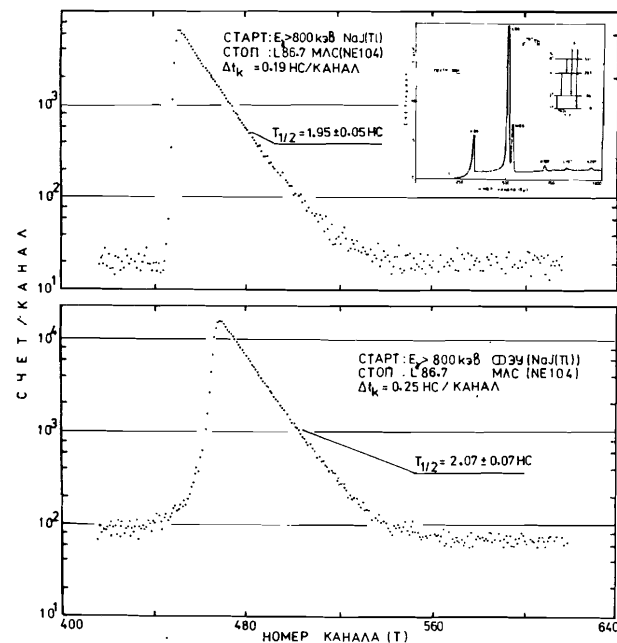


Рис. 9. Спектр задержанных совпадений при распаде 86,7 кэВ уровня ^{160}Dy .

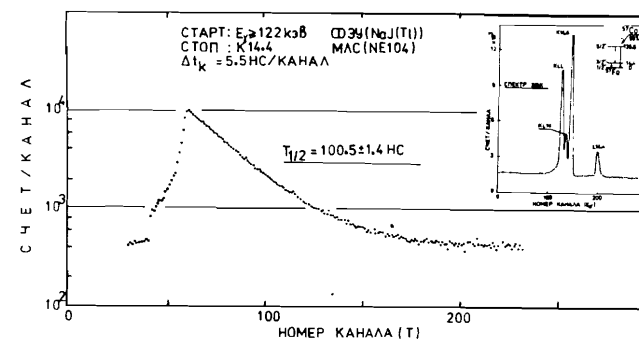


Рис. 10. Кривая распада 14,4 кэВ уровня ^{57}Fe .

формы кривой мгновенных совпадений, представляемой в виде или симметричного гауссиана (программа TIMLSQ), или несимметричного (программа TDGAUS).

Программа TIMLSQ

Эта программа написана на языке FORTRAN и предназначена для обработки временных спектров методом подгонки свертки экспоненциального распада с учетом КМС к экспериментальному распределению при наличии фона. В подгонке используется программа FUNFIT, которая минимизирует функцию

$$\frac{\chi^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i \text{exp}} - Y_i(X_i(1), \dots, X_i(k), A(1), \dots, A(M))}{\Delta Y_i} \right)^2,$$

где N - число экспериментальных значений $Y_{i \text{exp}} \pm \Delta Y_i$, к которым подгоняется теоретическая функция Y_i , зависящая от координат $X_i(1), \dots, X_i(k)$ и от параметров $A(1), \dots, A(M)$.

Аналитическая функция получается как результат свертки функций

$$F_E(t) = S \lambda e^{-\lambda(t-t_0)} \quad F_G(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$$

и имеет вид

$$F(t) = \int_{t_0}^{\infty} S \lambda e^{-\lambda(t'-t)} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t'-t)^2}{2\sigma^2}} dt' + FON.$$

Эта функция приводится к более удобному виду

$$F(t) = \frac{S \lambda}{2} \exp\left[\frac{\lambda^2 \sigma^2}{2} - \lambda(t-t_0)\right] \left[1 - \text{ERF}\left(\frac{t_0 - (t - \lambda \sigma^2)}{\sigma \sqrt{2}}\right)\right] + FON, \quad (I)$$

где $\text{ERF}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dx$;

- S - площадь (интенсивность) КЗС;
- λ - постоянная распада;
- σ - дисперсия КМС;
- t_0 - номер канала, определяющий нулевой момент времени;
- FON - фон случайных совпадений.

Перечисленные параметры определяются при подгонке выражения (I) к экспериментальному распределению методом наименьших квадратов.

Программа позволяет определять как положительные, так и отрицательные значения λ , т.е. проводить определение $T_{1/2}$ уровня в зависимости от формы КЗС или по левому, или по правому склону временного распределения.

Программа TDGAUS

Эта программа аналогична предыдущей и используется в тех случаях, когда КМС можно представить в виде несимметричного гауссиана:

$$F_{G+} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{S_0}{\sigma_1 + \sigma_2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_1^2}} \quad \text{при } t \geq t_0,$$

$$F_{G-} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{S_0}{\sigma_1 + \sigma_2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_2^2}} \quad \text{при } t < t_0.$$

Свертка такой несимметричной кривой Гаусса с экспонентой дает следующую аналитическую функцию

$$F_+(t) = \frac{S \lambda}{\sigma_1 + \sigma_2} e^{-\lambda(t-t_0)} \left\{ \sigma_1 e^{\frac{\lambda^2 \sigma_1^2}{2}} \text{ERFC}\left(\frac{\lambda \sigma_1}{\sqrt{2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \sigma_2 e^{\frac{\lambda^2 \sigma_2^2}{2}} \left[\text{ERF}\left(\frac{\lambda \sigma_2}{\sqrt{2}}\right) + \text{ERF}\left(\frac{\lambda \sigma_2}{\sqrt{2}} - \frac{t-t_0}{\sqrt{2} \sigma_2}\right) \right] \right\} + FON \quad \text{для } t \geq t_0,$$

$$F_-(t) = \frac{S \lambda}{\sigma_1 + \sigma_2} e^{-\lambda(t-t_0) + \frac{\lambda^2 \sigma_2^2}{2}} \text{ERFC}\left(\frac{\lambda \sigma_1}{\sqrt{2}} - \frac{t-t_0}{\sqrt{2} \sigma_1}\right) \quad \text{для } t < t_0.$$

По сравнению с программой TIMLSQ программа TDGAUS включает еще один добавочный параметр при подгонке: вместо σ (TIMLSQ) - σ_1 и σ_2 (TDGAUS).

Выбор программы обработки спектра зависит от конкретных экспериментальных условий, набранной статистики, а также формы КМС.

Заключение

Полученные экспериментальные результаты дают представление об области применения спектрометра совпадений на основе светосильного магнитного линзового бета-спектрометра в измерениях времен жизни уровней. В зависимости от схемы распада нуклида и применяемых λ -детекторов диапазон измеряемых времен жизни простирается от долей наносекунды до микросекунды (10^{-10} - 10^{-6} с). Наиболее целесообразно применять спектрометр данного типа при исследованиях возбужденных состояний ядер, связанных в каскаде с сильноконвертированными низкоэнергетическими переходами.

В заключение авторы выражают свою благодарность Н.А.Лебедеву и А.Иноятову за предоставление радиоактивных источников.

Литература

1. В.М.Абазов и др. Сообщение ОИЯИ Р6-86-238, Дубна, 1986.
2. Б.А.Аликов и др. ОИЯИ, 13-9844, Дубна, 1976.
3. В.М.Абазов, О.В.Савченко. ОИЯИ, Б1-13-9782, Дубна, 1976.
4. С.М.Lederer, V.S.Shirley. "Table of Isotopes", 7 ed. A. Wiley - Interscience Publication New York (1978).

Рукопись поступила в издательский отдел
9 октября 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Абросимов В.Н. и др.

P6-86-675

Спектрометрические характеристики установки е-γ-совпадений - МЛС для on-line экспериментов

Представлены основные спектрометрические характеристики спектрометра е-γ-совпадений на базе магнитно-линзового бета-спектрометра для on-line экспериментов. На спектрометре достигнуто разрешение по импульсу $\Delta V_p/V_p \approx 0,4\%$ при источнике ϕ 1 мм и светосиле $T = 0,6\%$ и $\Delta V_p/V_p = 0,8\%$ при ϕ 2 мм / $T \approx 2\%$. На источнике ^{60}Co с использованием в γ-спектрометре пластического сцинтиллятора получено временное разрешение $2\tau_0 = 410$ пс при крутизне склона кривой мгновенных совпадений $T_{1/2} = 50$ пс и $E_\gamma > 900$ кэВ при $E_\beta = 250$ кэВ. Измерены времена жизни возбужденных состояний 14,4 кэВ в ^{57}Fe - /100,5 + 1,4/ нс, 86,7 кэВ в ^{160}Dy - /2,07 + 0,07/ нс, 8,4 кэВ в ^{189}Tm - /4,22 + 0,11/ нс.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Abrosimov V.N. et al.

P6-86-675

Spectrometric Characteristics of e-γ Coincidence Spectrometer with Magnetic Lens for On-Line Experiments

The main spectrometric characteristics of e-γ coincidence spectrometer on the base of magnetic lens beta-spectrometer for on-line experiments are presented. The momentum resolution achieved is $\Delta V_p/V_p \approx 0.4\%$ for ϕ 1 mm source and transmission $T = 0.6\%$, and $\Delta V_p/V_p = 0.8\%$ at ϕ 2 mm source / $T \approx 2\%$. On ^{60}Co source using plastic scintillator in γ-spectrometer at $E_\gamma > 100$ keV and $E_\beta = 250$ keV the time resolution $2\tau_0 = 410$ ps with slope of prompt curve $T_{1/2} = 50$ ps has been obtained. Lifetimes of 14.4 keV in ^{57}Fe - /100.5 + 1.4/ ns, 86.7 keV - in ^{160}Dy - /2.07 + 0.07/ ns, 8.4 keV in ^{189}Tm - /4.22 + 0.11/ ns have been measured.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986