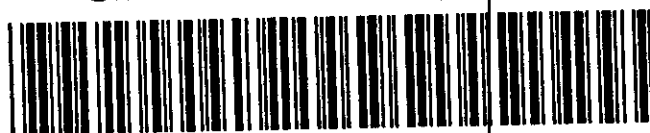


ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

CERN LIBRARIES, GENEVA



P6-99-3

SCAN-2001018

В.А.Морозов, В.Б.Злоказов, А.И.Калинин,  
В.Г.Калинников, Н.А.Лебедев, Н.В.Морозова, И.Н.Чурин

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЙ  $\gamma$ -ЛУЧЕЙ  
В РЕЖИМЕ ВНУТРЕННЕЙ КАЛИБРОВКИ  
ИССЛЕДУЕМОГО РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1999

Прецизионное определение физических величин производится на основе их сравнения с нормальными. В случае определения энергии  $\gamma$ -лучей такими нормальными могут быть нормали первого порядка, значение которых определяется фундаментальными постоянными. К ним относятся значение энергии аннигиляционного излучения и энергии рентгеновских линий. Используются также и нормали более высоких порядков, которые являются производными от нормалей первого, второго и т.д. порядков, соответственно. Для прецизионного определения энергий  $\gamma$ -лучей в спектре исследуемого радиоактивного изотопа можно использовать однодетекторный спектрометр или многодетекторные спектрометры совпадений, а также один из двух режимов измерений: режим внешней калибровки  $\gamma$ -спектрометра и режим внутренней калибровки  $\gamma$ -спектрометра. При использовании однодетекторного варианта в режиме внешней калибровки происходит очередное измерение спектров радиоактивных изотопов, дающих нормали определенного порядка, а также исследуемого источника. В режиме внутренней калибровки одновременно измеряются все радиоактивные изотопы, дающие нормали  $\gamma$ -лучей и  $\gamma$ -спектр исследуемого источника. Очевидны недостатки, присущие этим методам. В режиме внешней калибровки существенной проблемой может оказаться необходимость обеспечения температурной и временной стабильности спектрометра, а также идентичности параметров спектрометра при разных загрузках, особенно в случае исследования или короткоживущих изотопов, или изотопов, интенсивность которых сильно отличается от интенсивности изотопов, дающих нормали  $\gamma$ -лучей. В режиме внутренней калибровки существенной проблемой становится усложнение формы  $\gamma$ -спектра, что может сказаться при определении энергии не только исследуемой  $\gamma$ -линии, но и при определении положения нормалей в  $\gamma$ -спектре, если, например,  $\gamma$ -пик нормали попадает в район края комптоновского распределения от другого  $\gamma$ -перехода или перекрывается с исследуемым  $\gamma$ -переходом. Одновременное измерение с отдельной регистрацией исследуемого и реперного источника можно осуществить при использовании многодетекторного спектрометра совпадений. Число детекторов будет равно в этом случае числу радиоактивных источников + 1. Разделение  $\gamma$ -спектров от раз-

ных источников можно осуществить за счет введения разных по величине электронных задержек во временные каналы каждого детектора, что приведет к регистрации многокомпонентной кривой мгновенных совпадений. Выбирая при сортировке тот или другой пик на кривой совпадений, мы можем вывести интересующий нас  $\gamma$ -спектр. К недостаткам подобного подхода следует отнести существенное усложнение спектрометрического комплекса и трудность обеспечения одинаковой геометрии измерений для всех источников.

Двухкомпонентная кривая мгновенных совпадений может быть получена и при использовании двух спектрометров, если детекторы разнесены и расстояние между ними является той базой, которая определяет время распространения (задержки)  $\gamma$ -излучения от одного детектора к другому. Недостатки, присущие этому подходу, очевидны — даже в оптимальной геометрии для разнесения кривых мгновенных совпадений, когда каждый источник находится в непосредственной близости от своего детектора, получается малая эффективность регистрации истинных совпадений по отношению к случайным совпадениям и не обеспечивается одинаковая геометрия измерений реперного и исследуемого источника.

Из наиболее важных факторов, связанных с аппаратурой и влияющих на точность определения энергии  $\gamma$ -лучей, следует отметить: долговременную стабильность спектрометра, форму линии, отношение интенсивностей фотопик/фон, набранную статистику на фотопике, цену канала анализатора и нелинейность измерительного тракта. Вопросы прецизионного определения энергий и интенсивностей  $\gamma$ -лучей при помощи ППД, процедуры измерений и обработки экспериментальных результатов рассмотрены в работе [1].

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе предлагается иной подход для одновременного измерения источников нормалей и исследуемого радиоактивного источника на ППД на основе использования метода задержанных совпадений и оптической линии задержки (ОЛЗ). Этот метод наиболее эффективен для измерения радиоактивных источников, претерпевающих  $\beta^-$ -распад или имеющих сильноконвертируемые  $\gamma$ -переходы, совпадающие с другими  $\gamma$ -лучами. Измерения возможны и для ядер, распадающихся  $K$  — захватом,  $\beta^+$ - или  $\alpha$ -распадом, если  $K$  — захват,  $\alpha$ - или  $\beta^+$ -переходы идут на возбужденные состояния ядра или наблюдаются каскады сильноконвертированных переходов. Спектрометр задержанных совпадений включает в себя спектрометр с полупроводниковым детектором и сцинтилляционный детектор. Радиоактивные источники включены в пластмассовые сцинтил-

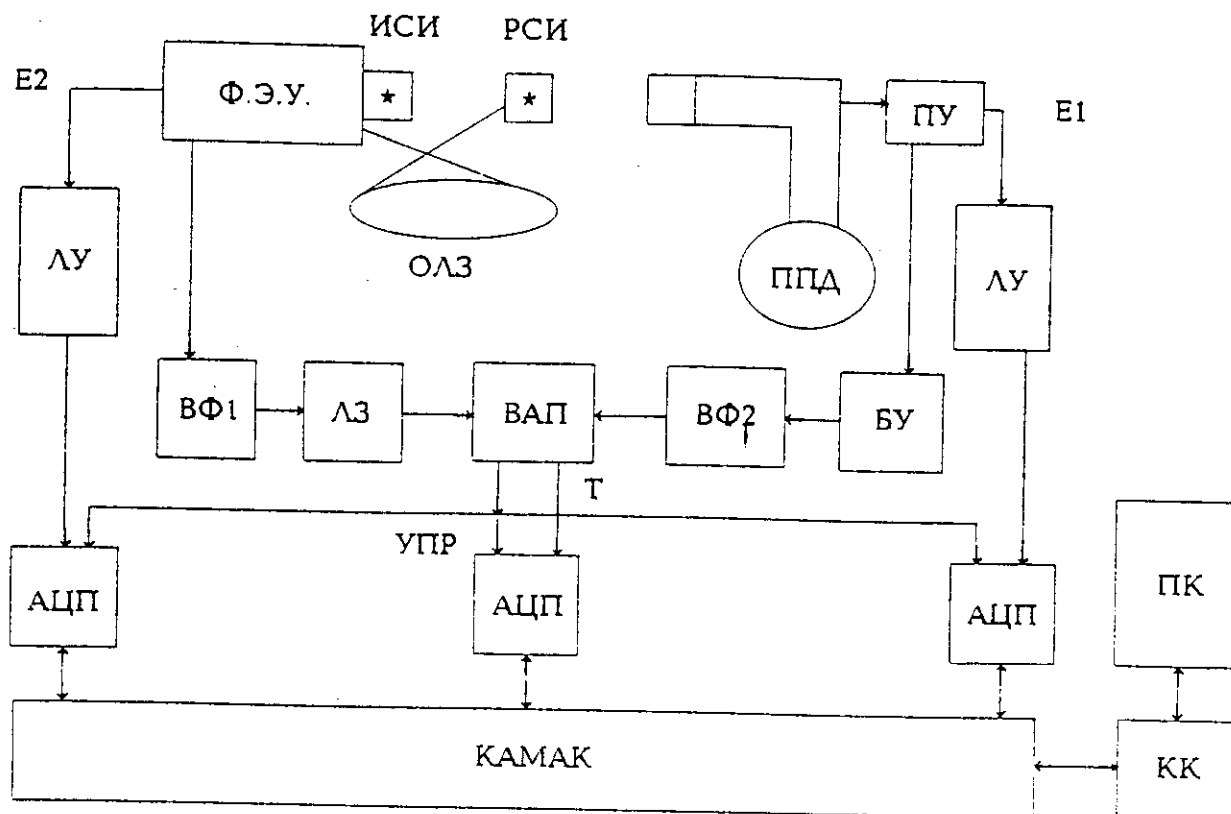


Рис. 1. Блок-схема спектрометра задержанных совпадений

ляторы малых размеров, достаточных для полного поглощения электронов, испускаемых источниками. Таким образом, обеспечивается  $4\pi$ - или  $2\pi$ -геометрия при регистрации электронного излучения. В эксперименте использовались 2 набора радиоактивных источников:  $^{60}\text{Co} - (^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu})$  и  $^{60}\text{Co} - ^{60}\text{Co}$  с тем, чтобы продемонстрировать возможность прецизионного определения энергий  $\gamma$ -лучей как в широком энергетическом диапазоне, так и в узком — при энергии  $\gamma$ -лучей исследуемого источника, совпадающей или близкой к энергии  $\gamma$ -лучей нормали. Один из источников помещался на фотокатод ф.э.у., а второй помещался на ОЛЗ, другой конец которой пристыковался к фотокатоду ф.э.у. Схематическое изображение размещения источников приведено на рис.1, где приведена также и блок-схема спектрометра задержанных совпадений. Так как гибкая ОЛЗ позволяет свободно перемещать реперный сцинтилляционный источник (РСИ) по отношению к ППД, то этим обеспечивается выбор желательной геометрии измерений. Задержка, вносимая ОЛЗ, пропорциональна ее геометрической длине, т.е.  $\Delta t \approx l \cdot n / c$ , где  $l$  — длина линии,  $n$  — коэффициент преломления света, а  $c$  — скорость распространения света. Оптическая длина линии превосходит ее ге-

ометрическую длину вследствие многократного внутреннего отражения света, проходящего по линии. В нашем случае  $\Delta t = 26,33$  нс. Таким образом, кривая задержанных совпадений представляет собой два пика, обусловленных совпадениями от Исследуемого Источника (ИСИ) и РСИ. При этом подразумевается, что введенная задержка превышает собственное временное разрешение спектрометра. Совершенно очевидно, что, выделяя при сортировке тот или другой временной пик, мы можем выделить или реперный  $\gamma$ -спектр, или исследуемый  $\gamma$ -спектр.

В измерениях применялся спектрометр задержанных совпадений, предназначенный для измерения времен жизни уровней ядер по сдвигу центров тяжести кривых задержанных и мгновенных совпадений с использованием ППД и сцинтилляционного спектрометра. Применение ОЛЗ позволило проводить одновременное измерение источников мгновенных и задержанных совпадений с возможностью разделения их энергетических спектров при дальнейшей сортировке четырехмерных (E1–T–E2–Q)-спектров совпадений [2]. E1, E2 определяют энергию  $\gamma$ -лучей и электронов, соответственно, T — временное распределение, Q характеризует фронт нарастания импульса. В нашем случае мы анализировали только (E1–T)-спектры, не производя выборки по E2 и Q. В спектрометре применялись временные формирователи (ВФ) ORTEC CFD — 584, время-амплитудный преобразователь (ВАП) — ORTEC THPH — 467, АЦП — КА007 [3], линейные спектрометрические усилители (ЛУ), контроллер крейта КАМАК (КК) — КК009 [4], персональный компьютер (ПК) типа РС-386. Сигнал управления всеми АЦП брался от ВАП. Система накопления и сбора информации подробно описана в работе [5]. Она обеспечивает набор необходимой статистики, визуализацию набора данных и контролирует скорость счета совпадений.

В спектрометре задержанных совпадений использовался полупроводниковый Ge(Li)-детектор объемом  $50 \text{ см}^3$  с разрешением 2,9 кэВ на линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . В сцинтилляционном детекторе применялся фотоумножитель XP2020Q. Временное разрешение спектрометра для источника  $^{60}\text{Co}$  без применения ОЛЗ составляло  $2\tau_0 = 5,3$  и  $9,2$  нс с использованием ОЛЗ. Реперные источники изотопов Eu и  $^{60}\text{Co}$  приготавливались методом выпаривания на сцинтилляторе  $\varnothing 2$  мм и длиной 10 мм и состыковывались с ОЛЗ из плексигласа  $\varnothing 2$  мм и длиной 4 м. Исследуемый источник включался в пластмассовый сцинтиллятор размером  $\varnothing 10 \times 6$  мм. Заметим, что источники ИСИ и РСИ могут обращаться. Так как при использовании ОЛЗ происходит поглощение света в световоде, то для ОЛЗ желательно выбирать источник, имеющий более высокую энергию электронного излучения. Следует также отметить, что лучшее временное разрешение спектрометра позволяет использовать меньшую длину ОЛЗ, что повышает эффективность регистрации совпадений с более мягким излучением.

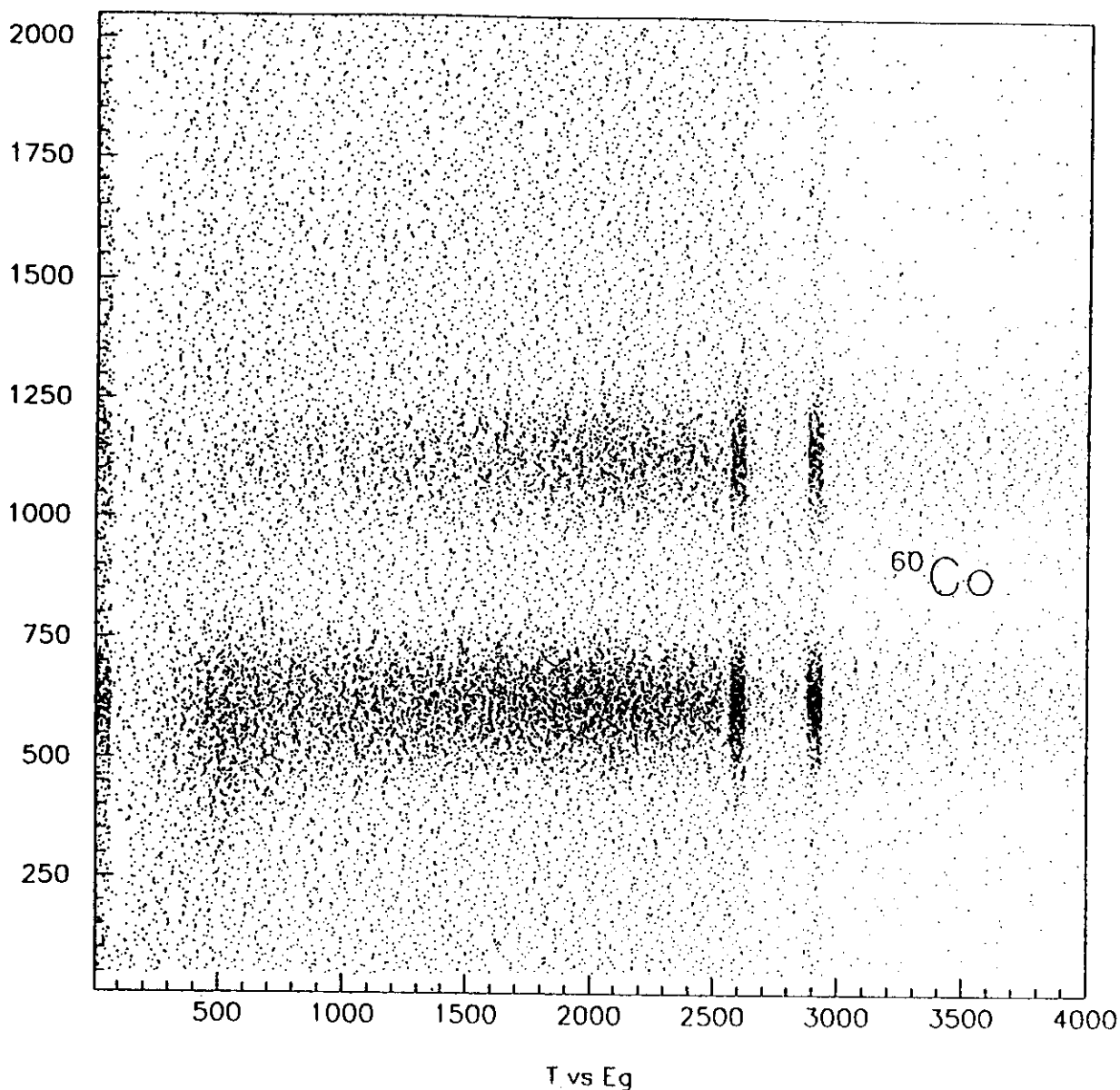


Рис. 2.  $(\beta^- - \gamma)$ -совпадения  $^{60}\text{Co}$  (ИСИ) и  $(\beta^- - \gamma)$ -совпадения  $^{60}\text{Co}$  (РСИ)

Нами были получены два спектра совпадений для каждого набора источников с целью демонстрации возможности прецизионного определения энергий  $\gamma$ -лучей в единичном эксперименте как при сравнительно небольшой статистике, набранной в  $\gamma$ -линии (около 1500 отсчетов), так и при статистике от 8000 до 18000 отсчетов. Общее число отсчетов в каждом из спектров совпадений составляло 400000 событий.

На рис.2,3 представлены двумерные спектры совпадений от источников  $^{60}\text{Co}$ – $^{60}\text{Co}$  и  $^{60}\text{Co}$ –( $^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ ). На рис.4 приведен спектр временного рас-

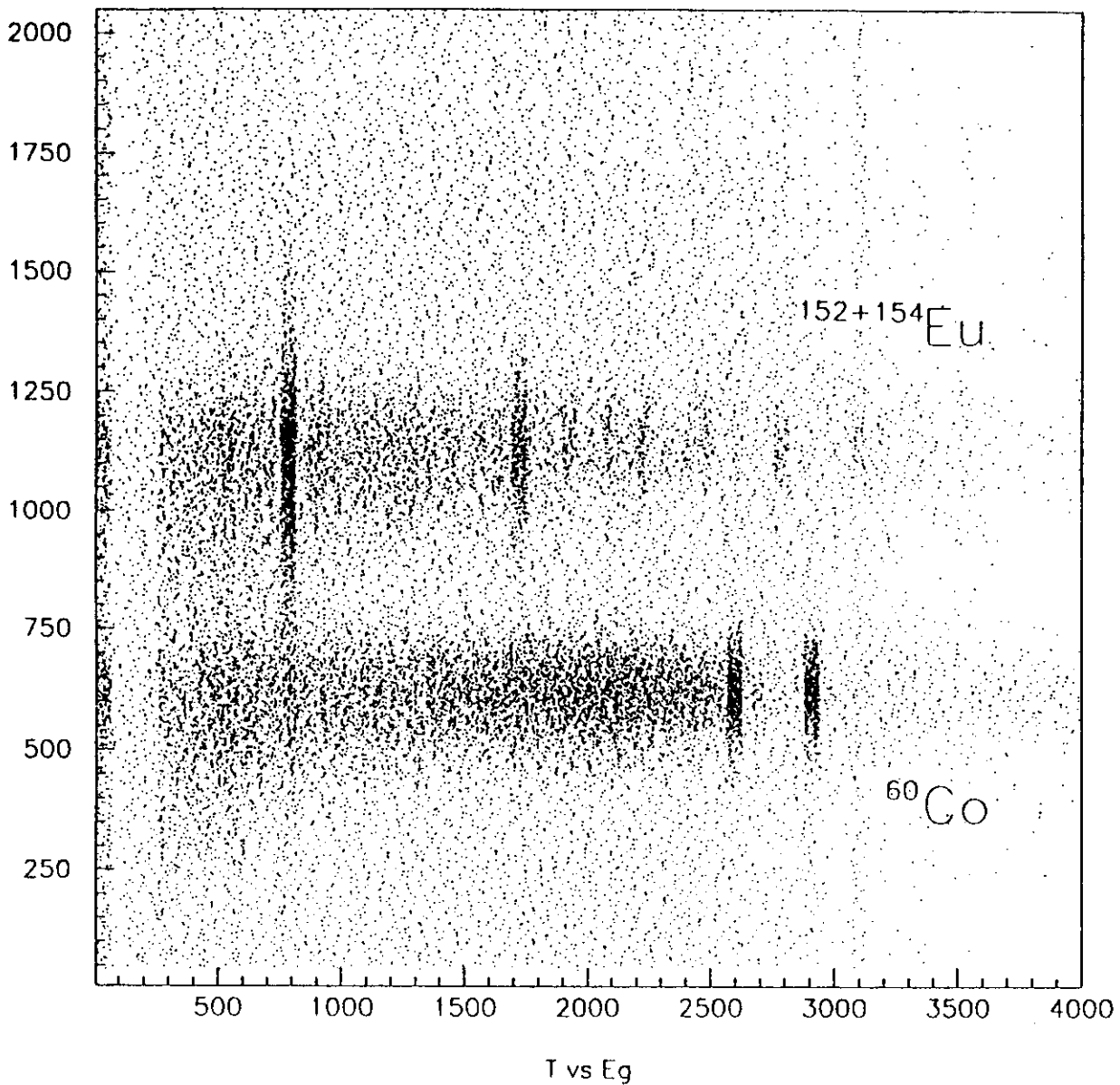


Рис. 3.  $(\beta^- - e - \gamma)$ -совпадения  $(^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu})$  (ИСИ) и  $(\beta^- - \gamma)$ -совпадения  $^{60}\text{Co}$  (РСИ).

пределения для источников  $^{60}\text{Co} - (^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu})$ . Временной спектр для источников  $^{60}\text{Co} - ^{60}\text{Co}$  идентичен спектру, приведенному на рис.4. На рис.5,6,7 представлены  $\gamma$ -спектры совпадений: интегральный  $\gamma$ -спектр и  $\gamma$ -спектры при выборке соответствующих временных окон, показанных на рис.4 —  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  (вычитание спектров случайных совпадений в этом случае не производилось). Цель

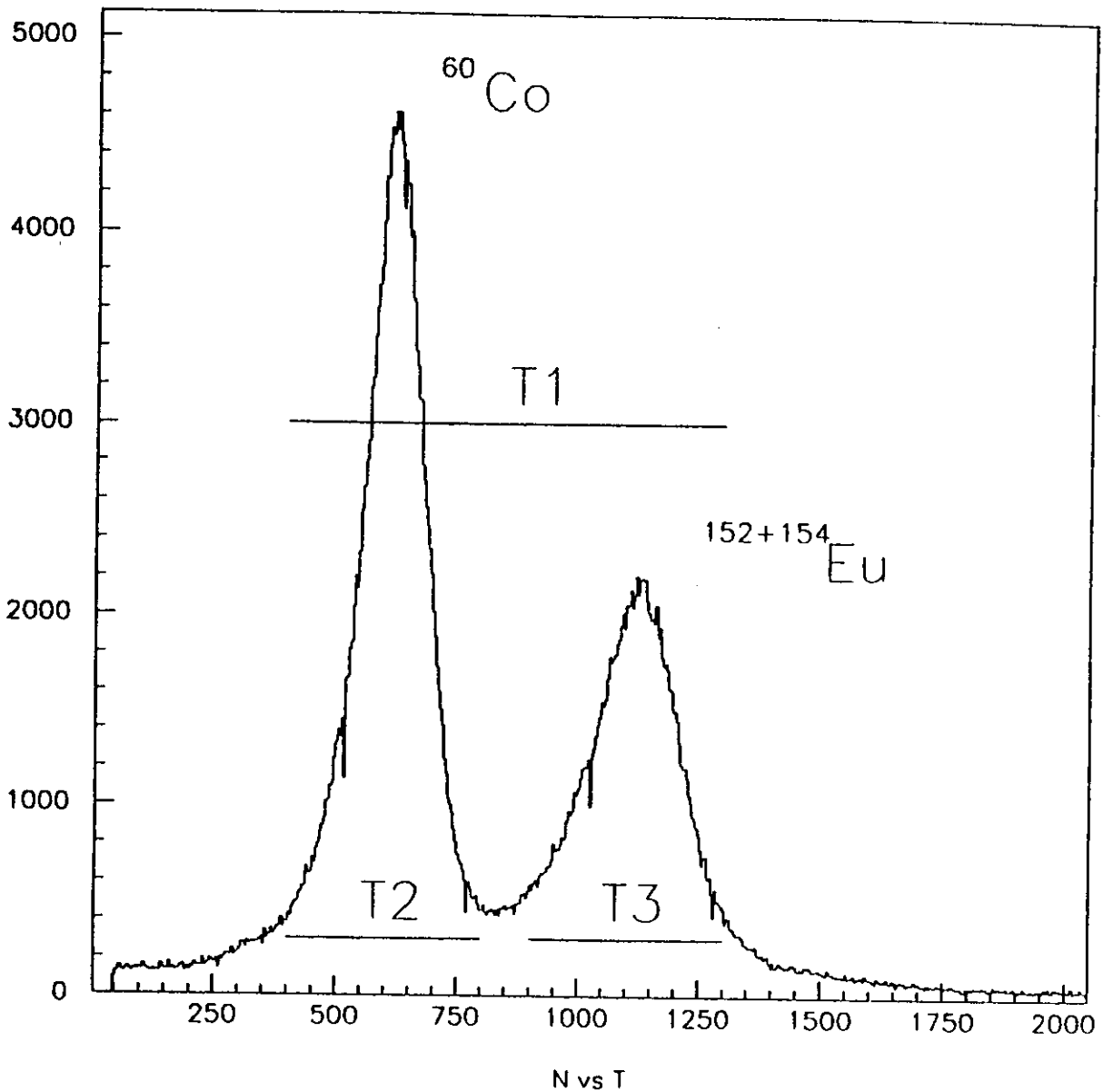


Рис. 4. Временной спектр задержанных совпадений для источников  $^{60}\text{Co}-(^{152}\text{Eu}+^{154}\text{Eu})$

измерений заключалась в определении энергии одного  $\gamma$ -перехода  $^{154}\text{Eu}$  ( $E=1274$  кэВ) при использовании в первом случае интегрального спектра совпадений (окно  $T1$ ), а в качестве нормалей для калибровки спектрометра энергии  $\gamma$ -лучей  $^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}$ . В табл.1 приведены данные, характеризующие нормали  $\gamma$ -излучения реперных источников. Во втором случае проводилось формирование спектров совпадений при выборке окон  $T2$  и  $T3$ , в каждом из этих спектров



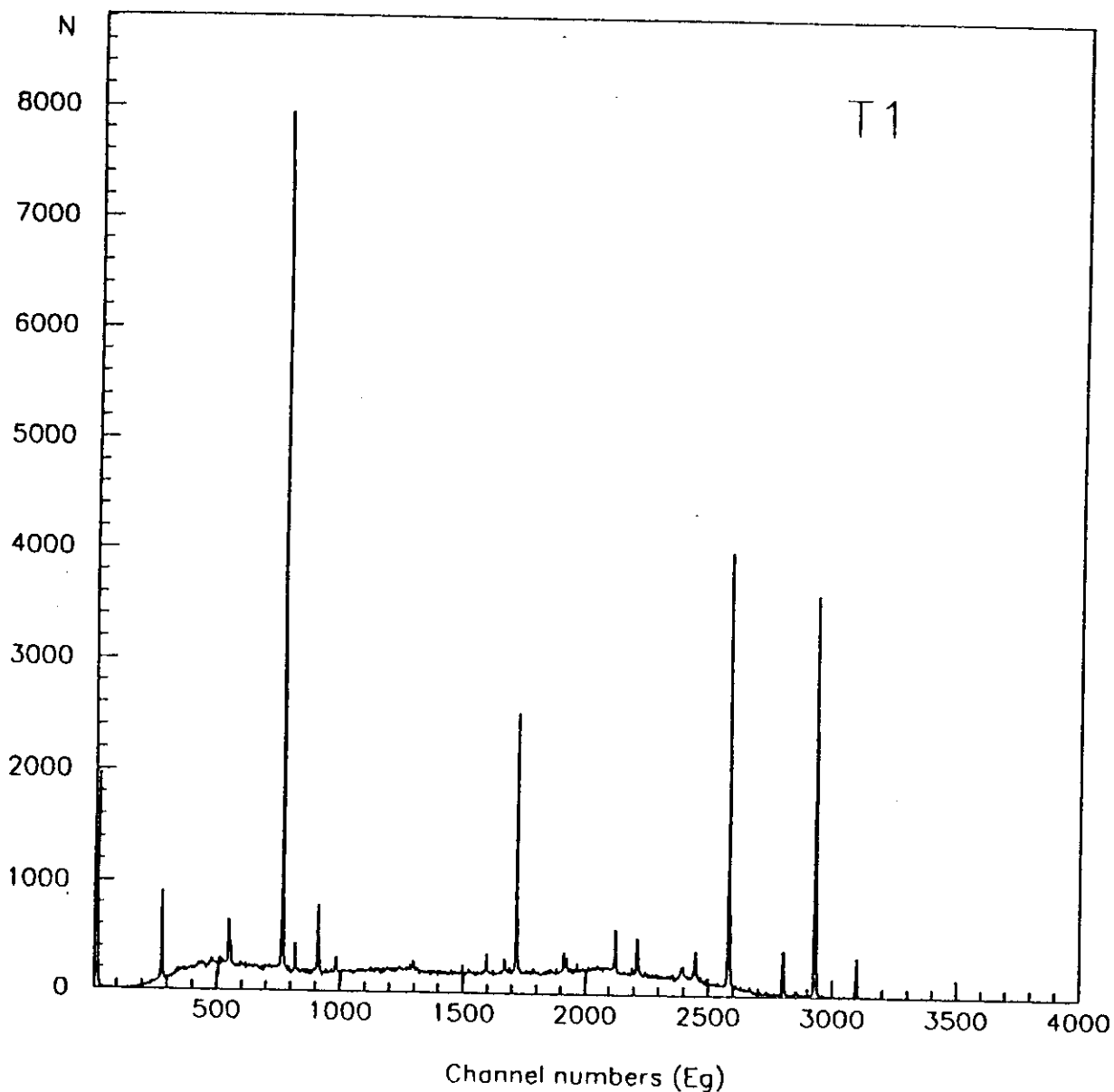


Рис. 5. Спектр  $(e, \beta^- - \gamma)$ -совпадений ( $^{60}\text{Co}-^{152}\text{Eu}-^{154}\text{Eu}$ ) (сечение  $T1$ )

проводилось определение положения пиков нормалей для источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}$ . Эти данные использовались для проведения калибровки  $\gamma$ -спектра, полученного при выборке окна  $T3$ , после чего определялась энергия  $\gamma$ -перехода  $^{154}\text{Eu}$  (табл. 2). Цену канала анализатора можно определить из табл. 1. Она составляла около 430 эВ/канал. Тип энергетической калибровки, который выбирался для

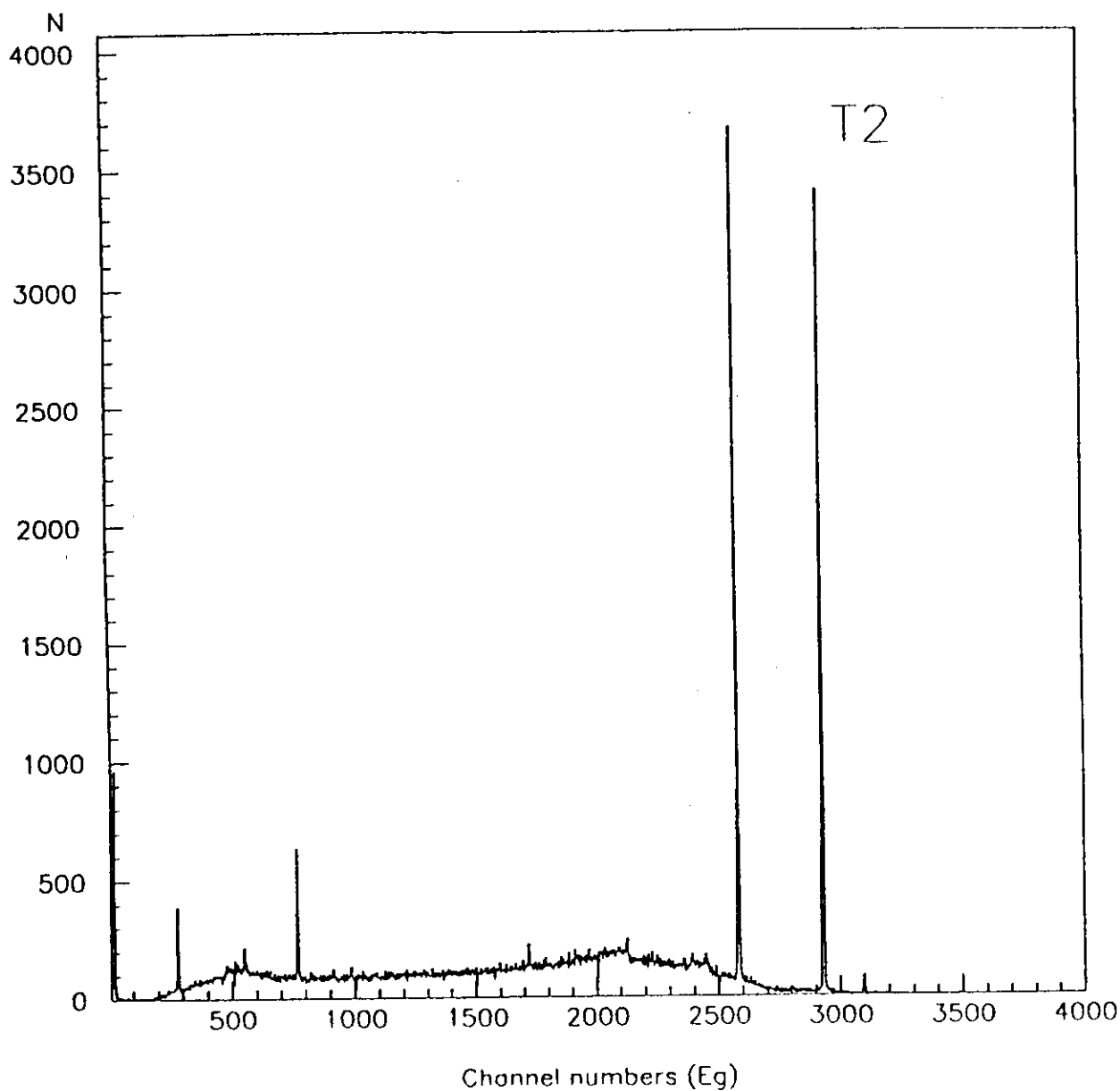


Рис. 6. Спектр  $(\beta^- - \gamma)$ -совпадений  $^{60}\text{Co}$  (сечение T2)

первого и второго случая, — сплайн. В третьем случае для калибровки использовались нормали только от  $\gamma$ -лучей  $^{60}\text{Co}$ , так как энергия изучаемого  $\gamma$ -перехода  $^{154}\text{Eu}$  лежит внутри сравнительно узкого энергетического интервала  $\gamma$ -лучей  $^{60}\text{Co}$ . Вследствие этого была использована линейная калибровка спектрометра.

В табл. 2 приведены также данные по определению энергии  $\gamma$ -лучей  $^{60}\text{Co}$  при использовании в качестве реперного — другого источника  $^{60}\text{Co}$ . В этом экс-

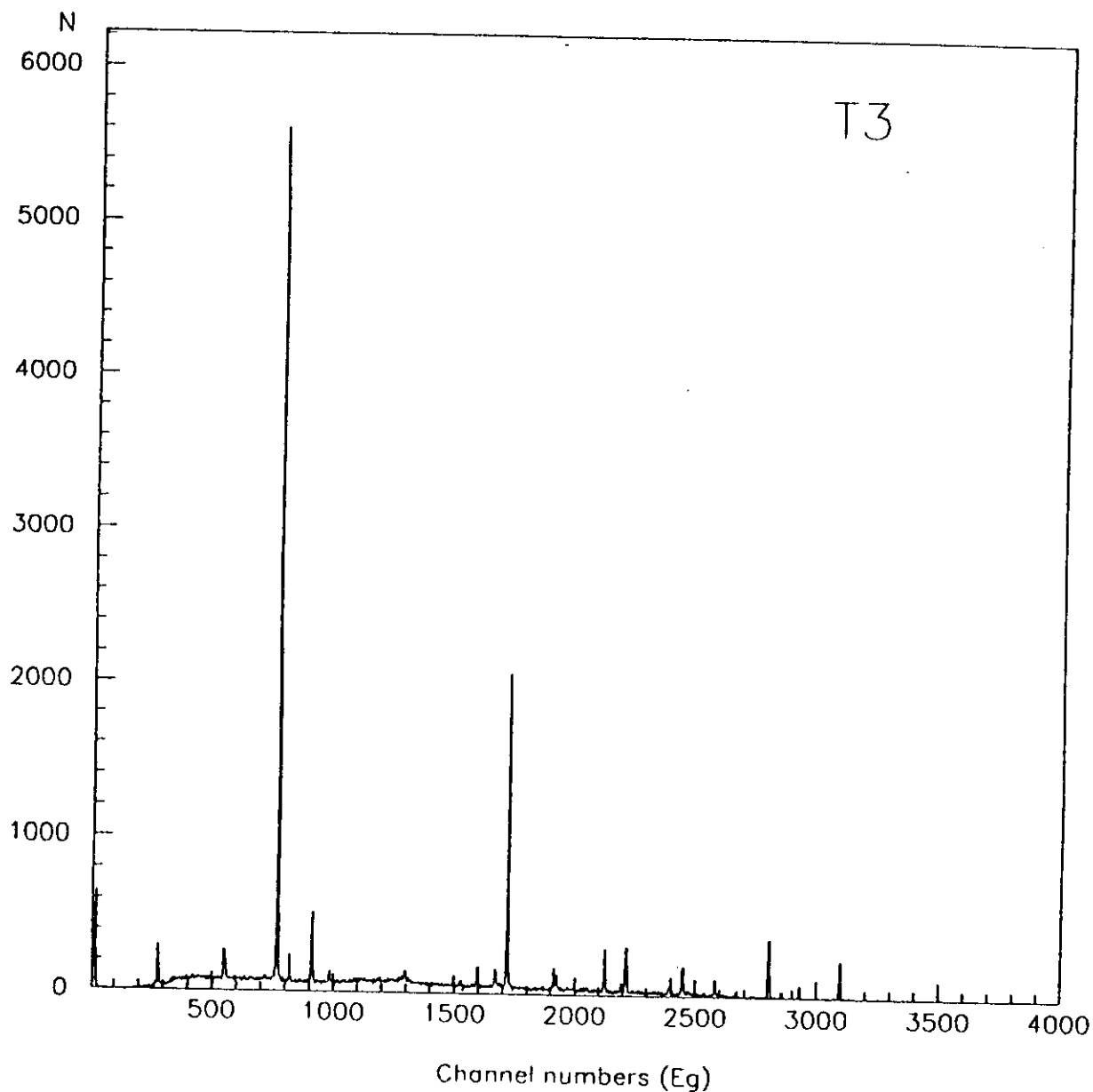


Рис. 7. Спектр  $(e, \beta^- - \gamma)$ -совпадений ( $^{152}\text{Eu}-^{154}\text{Eu}$ ) (сечение T3)

перименте была продемонстрирована возможность разделения  $\gamma$ -лучей, совпадающих по энергии, от разных источников. Процедура калибровки была полностью идентична процедуре калибровки, использованной в третьем случае.

Сортировка многомерных спектров совпадений, определение положения пиков  $\gamma$ -лучей, проведение энергетической калибровки спектрометра, вычитание фонового распределения, определение энергии  $\gamma$ -излучения и интенсивностей  $\gamma$ -пиков проводилось с помощью программы UPEAK [7]. При обработке  $\gamma$ -спек-

Таблица 1. Данные относительно реперных линий

Источник	$E_{\text{норм.}}, \text{кэВ [6]}$	$N_k$	$N$
$^{60}\text{Co}$ (РСИ)	1173,228(3) 1332,490(6)	2582,549(21) 2931,094(35)	18390(142) 16072(132)
$^{152}\text{Eu}$ (РСИ)	964,053(4) 1408,011(4)	2124,217(107) 3096,114(117)	996(51) 1022(39)

$N_k$  — номер канала (положение центра тяжести пика),

$N$  — число отсчетов в  $\gamma$ -линий.

Таблица 2. Определение энергий  $\gamma$ -лучей, возникающих при распаде  $^{60}\text{Co}$  и  $^{154}\text{Eu}$

Источник	Тип	Окно	$E_{\text{норм.}}, \text{кэВ [6]}$	$E_{\text{эксп.}}, \text{кэВ}$	$N$
$^{60}\text{Co} + ^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ $^{60}\text{Co} + ^{152}\text{Eu}$	ИСИ РСИ	T1	1274,427(4)	1274,410(81)	1425(68)
$^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ $^{60}\text{Co} + ^{152}\text{Eu}$	ИСИ РСИ	T3 T2	1274,427(4)	1274,383(80)	1423(44)
$^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ $^{60}\text{Co}$	ИСИ РСИ	T3 T2	1274,427(4)	1274,391(80)	1423(44)
$^{60}\text{Co}$ $^{60}\text{Co}$	ИСИ РСИ	T3 T2	1173,228(3) 1332,490(6)	1173,236(29) 1332,488(32)	8653(110) 7724(102)

$N$  — число отсчетов в  $\gamma$ -линии исследуемого источника.

тров проводилось также вычитание фона, обусловленного случайными совпадениями.

Сравнение полученных результатов свидетельствует о том, что точность определения энергии  $\gamma$ -переходов в нашем случае идентична точности определения энергий в традиционном подходе. Полученные результаты согласуются в пределах среднеквадратичной ошибки с известными данными, что свидетельствует о том, что показана принципиальная возможность применения данного метода для прецизионного определения энергий  $\gamma$ -лучей. Дальнейшее повышение точности определения энергии  $\gamma$ -лучей, в первую очередь, будет связано с набором большей статистики в фотопике и уменьшением цены канала анализатора, регистрирующего энергетический спектр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К несомненному преимуществу рассмотренного метода следует отнести возможность фактического совмещения режима внешней и внутренней калибровки спектрометра, т.е. одновременного измерения реперного и исследуемого источника и отдельного анализа  $\gamma$ -спектров. Можно использовать несколько реперных источников, состыкованных с ОЛЗ различных длин, что обеспечивает разделение спектров совпадений от разных источников на временной шкале и получение, соответственно, при сортировке отдельных спектров  $\gamma$ -лучей. При использовании данной методики энергия реперной  $\gamma$ -линии может даже совпадать с энергией  $\gamma$ -линии исследуемого изотопа. При данном методе сравнения реперных и исследуемого источников разрешается также проблема исключения влияния температурной, временной и загрузочной нестабильности спектрометра при определении энергии  $\gamma$ -переходов. Необходимо отметить, что при исследовании ядер, испытывающих  $\beta^-$ -распад, может быть достигнута такая же скорость счета ( $\beta^- - \gamma$ )-совпадений, как и при регистрации одиночного  $\gamma$ -спектра. Исключение влияния нелинейности спектрометрического тракта достигается подбором соответствующих РСИ, имеющих спектр излучения, совпадающий с изучаемым в узком энергетическом интервале, и применением соответствующего типа калибровки.

К очевидным недостаткам метода при изучении ядер, претерпевающих электронный захват следует отнести возможное отсутствие некоторых  $\gamma$ -линий в спектре ( $e - \gamma$ )-совпадений, вследствие возможного отсутствия совпадений с ними сильноконвертированных каскадных  $\gamma$ -переходов. Следует также учитывать то обстоятельство, что при изучении таких ядер для набора определенной статистики в спектрах ( $e - \gamma$ )-совпадений потребуется большее время по сравнению с временем набора простых  $\gamma$ -спектров.

Данный метод может найти применение в метрологических лабораториях при изучении энергетических спектров долгоживущих и короткоживущих ядер и для прецизионного определения энергий  $\gamma$ -переходов, возникающих при радиоактивном распаде или в ядерных реакциях.

Не менее перспективным является использование этого подхода при определении времен жизни ядерных уровней по сдвигу центров тяжести кривых мгновенных и задержанных совпадений при одновременном, что особенно важно в этом случае, измерении временных спектров от источников мгновенных и задержанных совпадений для исключения возможных систематических ошибок.

Авторы выражают благодарность Б.А.Аликову и И.Миношвили за предоставление образцов сцинтилляторов и световодов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вылов Ц., Горожанкин В.М., Желев Ж. и др. — Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Ташкент: изд.: «Фан», 1980.
2. Антюхов В.А., Банифатов А.Е., Калинин А.И. и др. — В сб.: XVII Межд. Симп. по ядерной электронике. (Варна, 15—21 сент.,1997), ОИЯИ, Д13-98-66, Дубна, 1998, с.211.
3. Антюхов В.А., Выонг Дао Ви, Динель З. и др. — Препринт ОИЯИ 10-80-650, Дубна, 1980.
4. Антюхов В.А., Георгиев А, Гонс З. и др. — Препринт ОИЯИ P10-87-928, Дубна, 1987.
5. Морозов В.А., Чуринов И.Н., Морозова Н.В. — Препринт ОИЯИ P13-96-453, Дубна,1996.
6. Firestone R.B. — Table of Isotopes, VII. John Wiley & Sons, INC, 1996.
7. Zlokazov V.B. — Comp. Phys. Comm., 1978, v.13, No.5/6, p.389.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 января 1999 года.

Морозов В.А. и др.

P6-99-3

Новый метод измерения энергий  $\gamma$ -лучей в режиме внутренней калибровки исследуемого радиоактивного источника

Отработана методика измерения энергий  $\gamma$ -лучей в режиме внутренней калибровки исследуемого радиоактивного источника с использованием спектрометра задержанных совпадений и оптической линии задержки. Данная методика позволяет проводить сравнение энергий реперной и исследуемой  $\gamma$ -линий, даже если их энергии или близки, или совпадают. Возможность прецизионного измерения энергий  $\gamma$ -лучей показана на примере определения энергий  $\gamma$ -лучей  $^{60}\text{Co}$  и  $^{154}\text{Eu}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Morozov V.A. et al.

P6-99-3

A New Method for Measuring of Gamma Ray Energies at Internal Calibration of the Radioactive Source

A new method for measuring of gamma ray energies at internal calibration of the radioactive source under study is developed. The measurements are carried out with a spectrometer of delayed coincidences and an optical delay line (fibre light guide). The method allows the energies of the reference line and the gamma line under study to be measured if their energies are close or even coincide. To illustrate the possibility of precise gamma ray energy measurement, the energies of  $^{60}\text{Co}$  and  $^{154}\text{Eu}$  gamma lines are found.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1999

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 31.03.99  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,05  
Тираж 335. Заказ 51269. Цена 1 р. 26 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области