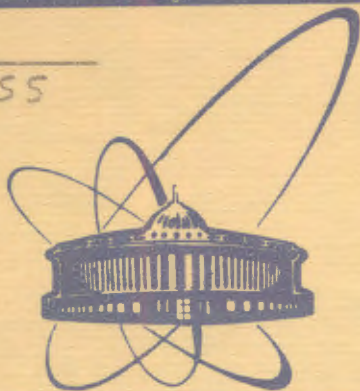


12422

e

Г-655



Объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
Дубна

3903/2-79

1/10-79

13 - 12422

М. Гонусек, Я. Липтак, К. М. Муминов, Т. М. Муминов,  
Ф. Пражак, Р. Р. Усманов, В. М. Цупко-Ситников

ТРЕХМЕРНЫЙ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ  
ГАММА-СОВПАДЕНИЙ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

1979

13 - 12422

М.Гонусек, Я.Липтак, К.М.Муминов, Т.М.Муминов,  
Ф.Пражак, Р.Р.Усманов, В.М.Цупко-Ситников

ТРЕХМЕРНЫЙ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ  
ГАММА-СОВПАДЕНИЙ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Направлено в сборник "Прикладная ядерная спектроскопия"

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Гонусек М. и др.

13 - 12422

Трехмерный амплитудно-временной анализ  
гамма-совпадений с применением полупроводниковых  
детекторов

Описана система трехмерного амплитудно-временного анализа гамма-совпадений, в которой используются только полупроводниковые или полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы. Установка работает на линии с ЭВМ HP-2116C. Обобщен опыт работы на установке и опыт создания программного обеспечения для обработки трехмерной информации.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Honusek M. et al.

13 - 12422

Three-Dimensional Amplitude-Time Analysis of  
Gamma-Coincidences with the Application of  
Semiconductor Detectors

A system of three-dimensional amplitude-time analysis of gamma-coincidences with the application of semiconductor detectors alone or both semiconductor and scintillation detectors is described. The setup operates on-line with the HP-2116C computer. The operating experience is generalized and software created to process three-dimensional information is described.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

## § 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование характеристик каскадного гамма-излучения позволяет получать ценную информацию о схемах распада и структуре возбужденных состояний атомного ядра. Данные по  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадениям обеспечивают информацию, необходимую для установления положения уровней в схемах распада и размещения между ними электромагнитных переходов. Измерения времен жизни возбужденных состояний атомных ядер позволяют определить абсолютные вероятности электромагнитных переходов, весьма чувствительные к тонким деталям структуры ядра.

До недавнего времени эти два типа измерений осуществлялись раздельно, и каждая из областей имела свои достижения. Успехи в технике  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений в последние годы были связаны с применением полупроводниковых детекторов с их высоким энергетическим разрешением. Однако трудности получения хорошего временного разрешения от полупроводниковых детекторов долгое время препятствовали их применению для временных измерений. Поэтому измерения времен жизни возбужденных состояний ядер в наносекундном диапазоне базировались на сцинтилляционных детекторах. Но при хорошем временном разрешении сцинтилляционные детекторы не позволяют выявлять и исследовать тонкие детали каскадных процессов при снятии возбуждений в атомном ядре.

С развитием техники временной привязки к сигналам от полупроводниковых детекторов<sup>1,2</sup> открылась возможность постановки временных измерений на их базе. В целом ряде случаев ППД, уступаая сцинтилляционным детекторам во временном разрешении и эффективности регистрации  $\gamma$ -излучения, позволяют получить интересную информацию за счет высокого энергетического разрешения. Поэтому большой интерес представляет постановка трехмерных измерений в режиме амплитуда-амплитуда-время. На одной аппаратуре в одном измерении решаются две задачи - получается информация о гамма-гамма-совпадениях и о временных распределениях между зарегистрированными гамма-квантами ядерного каскада.

При этом, естественно, возрастает количество накапливаемой информации, и при желании сохранить высокое разрешение в энергетических каналах, имея хорошее разрешение во времени, — данные могут занимать объем кубической матрицы размером  $4096 \times 4096 \times 4096$  каналов. Это обстоятельство предъявляет специальные требования к регистрирующей аппаратуре. Прямая запись матрицы такого размера практически невозможна. Обычно применяются методы выборочной регистрации информации /установка цифровых окон/<sup>1-3/</sup>, различные способы сжатия данных<sup>4/</sup> или прямая запись всей информации в неотсортированном виде на магнитную ленту через специализированные устройства<sup>5/</sup> или ЭВМ<sup>6/</sup>.

Для нашего случая это означает последовательную запись трех кодов, соответствующих двум энергиям гамма-квантов и временному интервалу между ними, на магнитную ленту. Такой метод является наиболее приемлемым для физиков, так как позволяет полностью регистрировать всю информацию и при необходимости получить ее в виде, удобном для анализа. Трудности, связанные с необходимой для этого сортировкой информации, записанной на магнитной ленте, постепенно преодолеваются путем совершенствования методов сортировки и использования для этих целей быстрых современных ЭВМ с объемом памяти в несколько мегабайт. Все осложнения, связанные с обработкой большого объема многомерной информации, окупаются возможностью получить в одном эксперименте любые спектры мгновенных и задержанных совпадений и временные распределения между каскадными гамма-переходами.

Регистрация всей информации по трем каналам, помимо предоставления экспериментатору полного объема данных, существенно упрощает постановку эксперимента, так как освобождает от необходимости заранее устанавливать цифровые окна, что требует времени, опыта и предварительной информации, которая часто вообще отсутствует.

Ниже описывается система трехмерного амплитудно-временного анализа гамма-совпадений, в которой используются только полупроводниковые или полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы. Система создана на базе детекторов и электроники, разработанных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Управление экспериментом и регистрация информации осуществляются ЭВМ НР-2116С измерительного центра ЛЯП.

## § 2. БЛОК-СХЕМА УСТАНОВКИ

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка состоит из детекторов излучения, электронной ап-

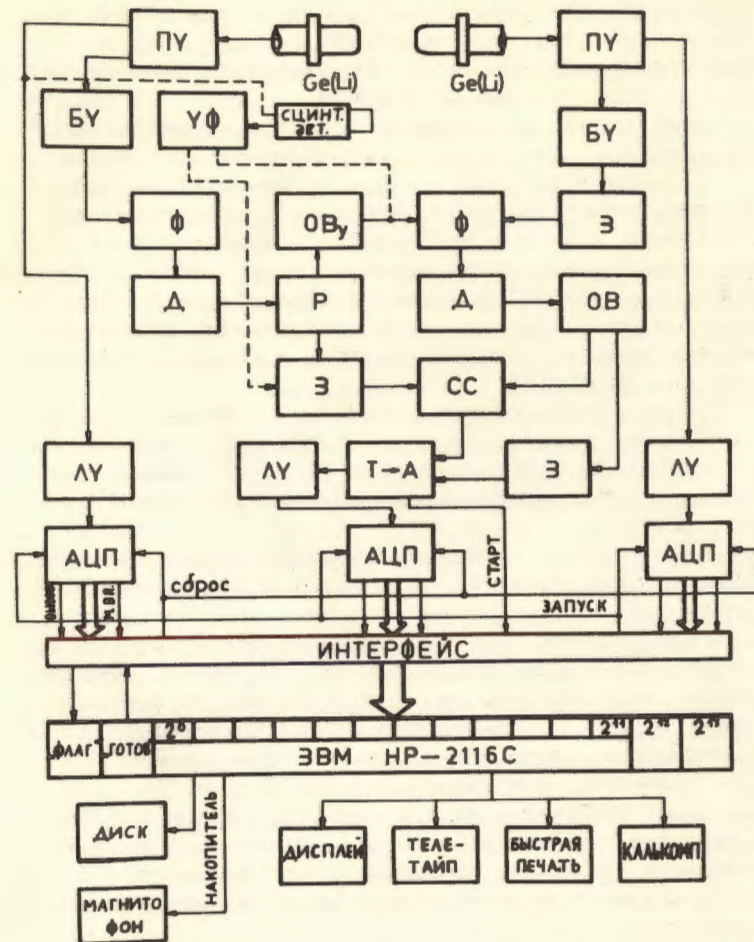


Рис.1. Блок-схема установки трехмерного анализа  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений. Пояснения в тексте.

паратуры анализа сигналов, устройства связи и ЭВМ.

Электронная аппаратура собрана по стандартной быстро-медленной схеме. При работе с сигналами от полупроводниковых детекторов важно обеспечить высокое энергетическое разрешение при максимальном сохранении временной информации.

С этой целью применяется малощумящий зарядово-чувствительный предусилитель /ПУ/, выделяющий быструю временную компоненту сигнала детектора и имеющий два выхода: временной и линейный спектрометрический<sup>/7/</sup>. Коэффициент усиления ПУ с разомкнутой обратной связью  $K=20000$ .

С линейного выхода ПУ импульсы подаются на амплитудный тракт, состоящий из линейного спектрометрического усилителя /ЛУ/<sup>/8/</sup> и амплитудно-цифрового преобразователя /АЦП/<sup>/9/</sup>. Характеристики спектрометрического тракта следующие: пределы регулировки усиления от 2 до 2000; температурная стабильность коэффициента усиления не хуже  $5 \cdot 10^{-3} \% / ^\circ\text{C}$ ; применяется однократное RC-дифференцирование и шестикратное RC-интегрирование, тракт имеет восстановитель постоянной составляющей. Используется АЦП на 4096 каналов с частотой преобразования 20 МГц<sup>/9/</sup>.

Относительно малый уровень сигнала с временного выхода требует включения между детектором и формирователем временной привязки /Ф/ быстрого усилителя /БУ/<sup>/7/</sup>, имеющего дополнительное интегрирование для уменьшения шумов  $\tau_{\text{и}} = 2 \div 100 \text{ нс}$ ,  $K=1500/$ .

Во временном тракте Ge(Li)-детектора помимо формирователей временной привязки /Ф/ используется и дискриминатор длительности /Д/<sup>/7/</sup>, исключающий короткие шумовые импульсы.

Во временном тракте сцинтилляционного детектора использован универсальный формирователь /УФ/<sup>/10/</sup>, обычно работающий в режиме следящего порога. Использование во временной привязке метода следящего порога для компенсации амплитудной зависимости позволяет получить хорошее временное разрешение в широком диапазоне энергий.

В блок-схеме применена логика отбора полезных событий, которая позволяет уменьшить загрузки время-амплитудного преобразователя сигналами одиночных стартов или стопов, что существенно улучшает временное разрешение и уменьшает мертвое время установки.

Через разветвитель /Р/ сигнал "стартового" канала запускает одновибратор управления /ОВУ/ формирователем "стопового" канала. Длительность импульса одновибратора равна ширине диапазона конвертора время-амплитуда /Т-А/. Импульс стопового канала, задержанный на величину, равную половине ширины временного диапазона конвертора, пропускается /ОВУ/ через формирователь /Ф/ и, пройдя дискриминатор длительности, запускает одновибратор /ОВ/. В результате схема совпадений /СС/ дает на выходе сигнал "Старт" /с задержкой, равной ширине временного диапазона/, который запустит конвертор. Сигнал одновибратора, также задержанный на величину временного диапазона, подается на конвертор в качестве стопового

сигнала. Результирующая задержка стопового импульса относительно стартового равна половине ширины временного диапазона конвертора. Если же импульса в "стоповом" канале нет, то и стартовый сигнал не пройдет через схему совпадений и, таким образом, не попадет на конвертор. При использовании в сцинтилляционном тракте блока /УФ/, имеющего встроенные формирователи импульсов по длительности, отпадает необходимость в блоках /Р/ и /ОВУ/. Одновибратор /ОВУ/, схема совпадений, разветвитель, время-амплитудный конвертор и линия задержки, применяемые в схеме отбора полезных событий, разработаны в ЛЯП ОИЯИ<sup>/11/</sup>.

При регистрации гамма-квантов обоими детекторами в интервале времени, задаваемом схемой отбора полезных событий, на выходе время-амплитудного преобразователя появляется управляющий сигнал, который подается на вход "Старт" устройства связи с ЭВМ /интерфейс/<sup>/12/</sup>. В интерфейсе вырабатывается сигнал "Запуск", разрешающий преобразование спектрометрической информации, поступающей на входы АЦП, в коды. На выходах АЦП появляются сигналы "Мертвое время", запрещающие повторный их запуск до окончания преобразования и передачи кода в память ЭВМ. При наличии сигнала "Готовность" от ЭВМ и сигналов "Вызов" от АЦП, которые появляются после окончания процессов преобразования, интерфейс вырабатывает сигнал "Флаг", управляющий передачей информации в ЭВМ HP-2116C. Таким образом, для каждого трехмерного события через канал прямого доступа в ЭВМ поступает информация, представляющая собой три слова, каждое длиной 16 бит. Первые 12 бит несут спектрометрическую информацию /4096 каналов/, 13 и 14 биты представляют номер канала интерфейса, 15 и 16 биты свободны /на рис. 1 они не показаны/. При параллельном переносе информации от преобразователя в ЭВМ прекращается сигнал "Готовность" на время обращения к памяти. В конце последовательной передачи информации от трех преобразователей в интерфейс вырабатывается сигнал "Сброс", и устройство готово к следующему циклу измерений.

### § 3. НАКОПЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Как указывалось выше, для каждого события совпадений  $i$  записываются в ЭВМ, и через нее на магнитную ленту три слова /обозначим их  $a_i, b_i, c_i$ /. На одну ленту можно записать  $1,2 \cdot 10^7$  слов, то есть  $4 \cdot 10^6$  событий. В среднем, в течение, например, десятичасового эксперимента, идущего с интенсивностью порядка 1000 событий в секунду, заполняется несколько магнитных лент.

Для обеспечения многомерных измерений и последующей обработки информации создано специальное программное обеспечение<sup>13/</sup>. Процесс накопления информации с записью ее на магнитную ленту осуществляется следующим образом /реализуется программой "SAVE 3"<sup>13/</sup> /. В памяти ЭВМ выделяются два буфера для приема данных, поступающих в виде группы из трех слов по 16 бит. Во время заполнения одного буфера второй обрабатывается, то есть записанная в нем информация проверяется на наличие сбоев, например, в порядке следования слов в каждом событии по номеру спектрометрического тракта /в случае ошибки весь буфер - 850 событий, отбрасывается/. Если результат проверки удовлетворителен, то содержание буфера переписывается на магнитную ленту и, кроме того, строятся суммарные /интегральные/ спектры совпадений для всех осей. После заполнения одного из буферов они меняются местами: обработанный и записанный на ленту буфер ставится на заполнение, а заполненный обрабатывается и переписывается на ленту. Под суммарными /интегральными/ спектрами совпадений имеются в виду три одномерных спектра А, В, С длиной в 4096 каналов, формируемые следующим образом: для каждого события совпадений  $(a_i, b_i, c_i)$  добавляется единица в каналы  $a_i, b_i, c_i$  спектров А, В, С, соответственно.

Суммарные спектры совпадений служат для контроля хода эксперимента и используются для выбора окон, по которым ведется последующая сортировка.

Процесс сортировки трехмерной информации о совпадениях, записанной на магнитную ленту, представляет собой следующую процедуру. Пусть, для определенности, выбраны окна на первой и второй осях. Результатом сортировки должен быть спектр событий третьего тракта /оси/, для которых события первой и второй осей /трактов/ попадают в выбранные окна. Полученный спектр совпадений третьего тракта длиной 4096 каналов обозначим буквой D. Тогда, если  $a_i$  попадает в окно на первой оси и одновременно  $b_i$  в окно на второй оси, то в канал  $c_i$  спектра D добавляется единица. Сортировка представляет собой процесс последовательного перебора всех событий совпадений, считываемых по участкам с магнитной ленты, и выявления среди них случаев, отвечающих поставленным условиям /в нашем примере цифровым окнам на первой и второй осях/.

Обычно сортировка ведется по большому количеству окон одновременно, так как необходимо установить связи между большим числом гамма-переходов. Эти связи проявляются в соответствующих ответных спектрах, представляющих собой

или временные распределения между событиями, если окна установлены на двух энергетических осях, или, например, гамма-спектр, отвечающий во втором энергетическом тракте определенному гамма-переходу в первом и выбранному временному интервалу в третьем тракте. Одномерные спектры, получаемые в результате сортировки /обозначим их как  $D_n$ /, записываются и хранятся в рассматриваемой системе многомерного анализа на магнитном диске.

Однако сортировка информации, содержащейся на магнитной ленте, основанная на процессе простого последовательного перебора данных совпадений с записью, удовлетворяющих условиям событий в соответствующие спектры на магнитном диске, требует больших затрат машинного времени, сравнимых с временем набора статистики или даже значительно больших. Основные потери времени при этом связаны с частым обращением к диску для чтения и записи спектров, в которые добавляются найденные события, и неоптимальным режимом работы процессора.

Так, без принятия специальных мер сортировка одной магнитной ленты по 50 окнам даже для двухмерных совпадений занимает четыре часа. Оптимизацией же этого процесса удалось свести время сортировки до 12 мин., то есть сократить в 20 раз<sup>13/</sup>.

Ускорение сортировки трехмерных совпадений достигается оптимизацией программы работы центрального процессора и уменьшением числа обращений к диску. Пусть спектр  $D_j$ , полученный в результате сортировки, соответствует одновременному попаданию события  $a_i$  в  $k$ -ое окно на первой оси и события  $b_i$  в  $l$ -ое окно на второй оси. Всего по каждой оси может быть установлено 64 окна. Для нумерации спектров  $D_j$ , соответствующих возможным комбинациям окон, вводится вспомогательный массив Q размерностью /64x64/ слова. Тогда  $Q(k, l) = j$  - номер соответствующего спектра  $D_j$  или ноль, если коды  $a_i$  и  $b_i$  не соответствуют установленным окнам. Кроме Q, вводятся еще вспомогательные массивы B1 и B2, каждый длиной 4096 слова, в которых по адресам, отвечающим цифровому окну, записывается номер данного окна, а по всем остальным - нули<sup>14/</sup>. Тогда  $B1(a_i) = k$  и  $B2(b_i) = l$  или нулю, если коды  $a_i$  и  $b_i$  в окна не попадают. Следовательно, информацию о том, в какое окно попадает событие  $(a_i, b_i, c_i)$ , можно получить путем индексации, то есть присвоения кодам  $a_i$  и  $b_i$  номера окна согласно операции  $k_i = B1(a_i)$ ;  $l_i = B2(b_i)$ , и далее, путем индексации по двум параметрам, определяется номер спектра  $j = Q(k_i, l_i)$ .

В буфере  $F$  /возможно большей длины/, резервированном в центральном процессоре, для каждого  $j \neq 0$  записываются два слова, содержащие код и номер спектра ( $c_{1,j}, j_1$ ). После заполнения буфера  $F$  производится запись информации в спектры  $D_j$ , которые последовательно вызываются с диска и пополняются событиями с данным  $j$ .

Таким образом, существенный выигрыш во времени сортировки информации был достигнут за счет двух основных моментов: выделения вспомогательных массивов индексации, позволяющих простыми операциями определить принадлежность просматриваемых кодов установленным окнам, и создания большого вспомогательного буфера в оперативной памяти.

Еще более эффективно сортировка многомерной информации может быть осуществлена на больших ЭВМ, обладающих оперативной памятью в сотни или тысячи килобайтов и имеющих высокое быстродействие.

Помимо программ накопления и сортировки многомерной информации имеется комплекс программ обработки уже отсортированных спектров, которые для случая  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ -анализа могут представлять собой, в зависимости от выбора осей и окон, либо одномерные гамма-спектры мгновенных или задержанных совпадений, либо спектры временных распределений между различными гамма-переходами.

Эти две группы спектров имеют свою специфику, соответствующий подход и программное обеспечение для извлечения физической информации.

Для получения количественной информации о совпадениях /энергия, интенсивность/ ответные гамма-спектры окон, в принципе, могут обрабатываться как обычные одномерные гамма-спектры. Однако эти спектры отличаются от обычных фоном, который не может быть учтен методами, принятыми при обработке одномерных спектров.

Для оценки интенсивности линии в ответном спектре, совпадающей с какой-то линией на установочном, надо правильно вычестть фон, который имеет следующие составляющие:

а/ события истинных совпадений с другими линиями установочного спектра, представленными комптоновскими амплитудами в выбранном окне; эти события не имеют отношения к определяемой интенсивности и должны быть вычтены /что невозможно сделать простым линейным вычитанием фона, так как эти события дают вклад только в пик/.

б/ остальной фон истинных совпадений /за счет совпадений событий в пике установленного окна с комптоновским распределением от линий ответного спектра и за счет комптоновских событий окна с комптоновскими квантами ответного

тракта/ дает непрерывное распределение под пиками ответного спектра.

в/ фон случайных совпадений, проявляющийся в ответном спектре в виде ложных пиков и непрерывного распределения.

Фон за счет истинных совпадений может быть оценен при установлении вспомогательного окна на линейной области вблизи основного /или двух окон по обе стороны основного/. Ответный спектр "фонового" окна /или усредненный по двум окнам/ после соответствующей нормировки может быть прямо вычтен из обрабатываемого спектра. Результирующий спектр уже не содержит в пике фоновых событий и может обрабатываться как обычный одномерный.

Оценка и, при необходимости, вычитание фона случайных совпадений могут быть проведены аналогичным образом, только в этом случае при сортировке временное окно должно быть установлено с достаточной задержкой, чтобы отбиралось действительно случайные совпадения.

Программы обработки одномерных гамма-спектров, полученных в совпадениях, предоставляют следующие возможности. Положения и интенсивности /площади/ пиков определяются путем МНК подгонки участка спектра с использованием гауссовой кривой в качестве модели линии и линейного фона /программа INSPD /. Первоначально подгоняются одиночные пики, строится зависимость полуширины от номера канала. Затем обрабатывается весь спектр, причем подгонка идет с уже фиксированной полушириной. На дисплей выводится исходный спектр и результат подгонки.

Следующим этапом является калибровка полученных данных по энергии и интенсивности /программа OLGA /.

Для обработки серий спектров, полученных в результате сортировки данных многомерных измерений, используется программа INSP2. При фиксированных положениях и полуширинах линий /полученных, например, программой INSPD из суммарного спектра совпадений/ осуществляется МНК подгонка участка с гауссовой формой пиков и линейным фоном.

При обработке серий спектров одного источника, измеренного в условиях, когда может измениться усиление и порог электроники, используется специальная программа /OMA/, трансформирующая спектры путем сдвига и растяжения /сжатия/ так, что они приводятся к идентичным условиям измерения и могут поканально складываться.

Помимо перечисленных используется целый ряд других программ, обеспечивающих подготовку данных, передачу информации, вывод результатов на внешние устройства, развитый

диалог человек-ЭВМ и выполнение вспомогательных процедур /нормировка, вычитание фона и т.д./.

Временное разрешение установки при использовании в ней сцинтилляционного и Ge(Li) -детектора коаксиального типа обычно позволяет определять прямыми измерениями времена жизни в области  $T_{1/2} \geq 5$  нс. Определение меньших значений времен жизни  $/T_{1/2} \leq 5$  нс/ связано с использованием метода сдвига центра тяжести временных распределений. Применение обычного варианта этого метода, требующего измерений мгновенных реперов, из-за практических причин /увеличения времени измерений, высоких требований к стабильности аппаратуры, необходимости подбора идентичных условий для измерений исследуемых и реперных распределений и т.д./ ограничено.

Существенно проще эти проблемы можно решить в многомерных измерениях, основываясь на том, что они содержат, как правило, одновременно с измеряемыми и калибровочные данные. При этом используется метод определения времен жизни по отклонениям центров тяжести временных распределений задержанных совпадений для разных энергий от линии, проходящей через центры тяжести временных распределений, соответствующих мгновенным совпадениям, полученным также для разных энергий <sup>14/</sup>.

Сущность этого метода заключается в определении центров тяжести временных распределений совпадений фиксированного участка одного спектра с различными участками другого. При этом из временных распределений, соответствующих совпадениям с фотопиками, вычитаются вклады от совпадений участков комптоновского распределения гамма-лучей, лежащих под этими фотопиками. Эти вклады определяются путем интерполяции временных распределений совпадений двух ближайших к фотопику /справа и слева/ участков гамма-фона. После этих операций строится график зависимости позиций центров тяжести временных кривых от энергий излучения, и через центры тяжести временных распределений, соответствующих мгновенным совпадениям, проводится линия /она достаточно хорошо аппроксимируется гиперболой <sup>15/</sup>/. По величине смещений центров тяжести временных распределений задержанных совпадений от этой "нулевой" линии определяются времена жизни  $\tau = T_{1/2} / \ln 2$  "изомерных" состояний.

#### § 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже приводится несколько примеров, иллюстрирующих возможности системы трехмерного анализа для изучения схем распада радиоактивных ядер.

На рис. 2 приведена схема распада  $^{161}\text{Yb} - ^{161}\text{Tm}$  /время жизни  $^{161}\text{Yb} - 4,2$  мин/, предложенная впервые на основе данных  $\gamma - \gamma - t$  трехмерного анализа, выполненного с использованием двух полупроводниковых Ge(Li) -детекторов /41 и 55 см<sup>3</sup> и разрешением 2,4 и 2,8 кэВ для  $^{60}\text{Co}$ , соответственно/. Временное разрешение аппаратуры - 25 нс, временной диапазон составлял 2 мкс. ( $\Delta E_{\gamma 1} \approx \Delta E_{\gamma 2} = 50 \div 1330$  кэВ.

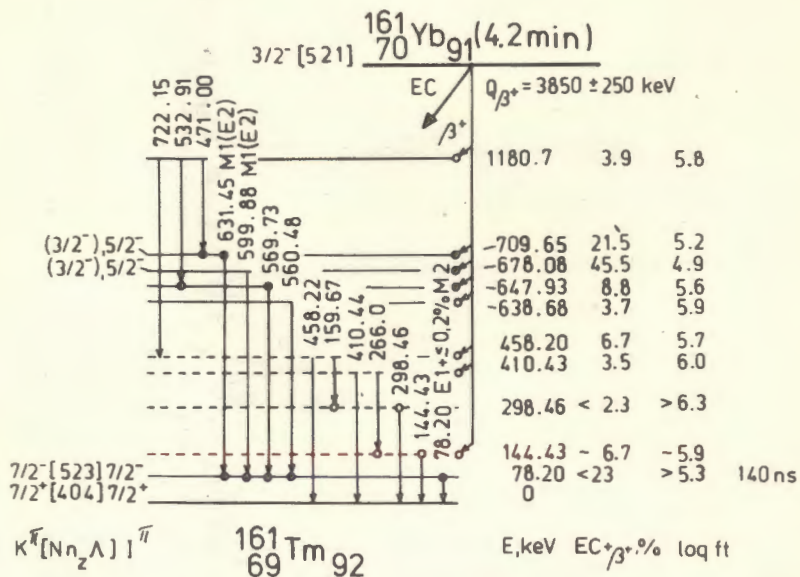


Рис.2. Схема распада  $^{161}\text{Yb} - ^{161}\text{Tm}$  /  $T_{1/2} = 4,2$  мин/.

Трехмерная матрица, полученная в этих измерениях, содержит полную информацию о  $\gamma - \gamma$ -совпадениях, включая данные задержанных совпадений в широком временном интервале.

Рис. 3 иллюстрирует возможности методики при построении схемы распада. На нем приведена часть ответного спектра гамма-лучей, полученного как задержанные совпадения с энергетическим окном на линии 78,2 кэВ /первая ось/ и широким временным окном в диапазоне задержек /50 ÷ 250/ нс, установленным на временном спектре за пиком мгновенных совпадений /третья ось/. Переход 78,2 кэВ, имеющий большую интенсивность и время жизни  $140 \pm 20$  нс, соответствует разрядке



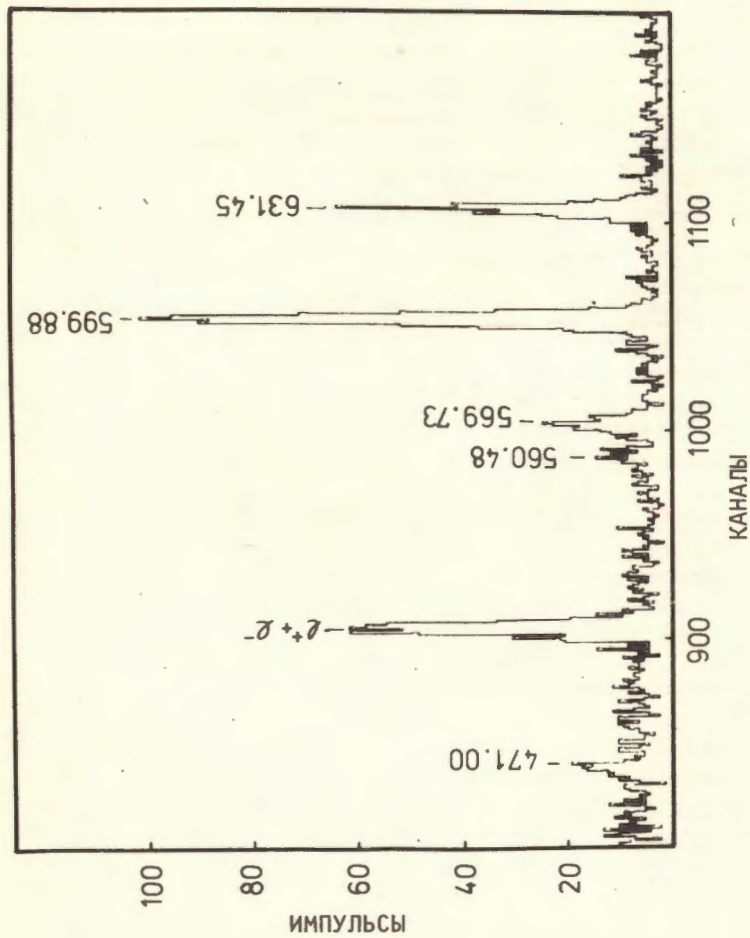


Рис. 3. Часть ответного спектра  $\gamma$ -лучей  $^{161}\text{Tm}$ , полученного как задержанные совпадения с энергетическим окном на линии 78,2 кэВ, и временным окном в диапазоне задержек  $/50 \pm 250/$  нс.

уровня 78,2 кэВ в основное состояние ядра  $^{161}\text{Tm}$ . Время жизни этого уровня определено из анализа матрицы совпадений в режиме сортировки с окнами по энергетическим осям. Соответствующее временное распределение для энергетических окон, установленных на линиях 78,2 кэВ /первая ось/ и 599,9 кэВ /вторая ось/, приведено на рис. 4.

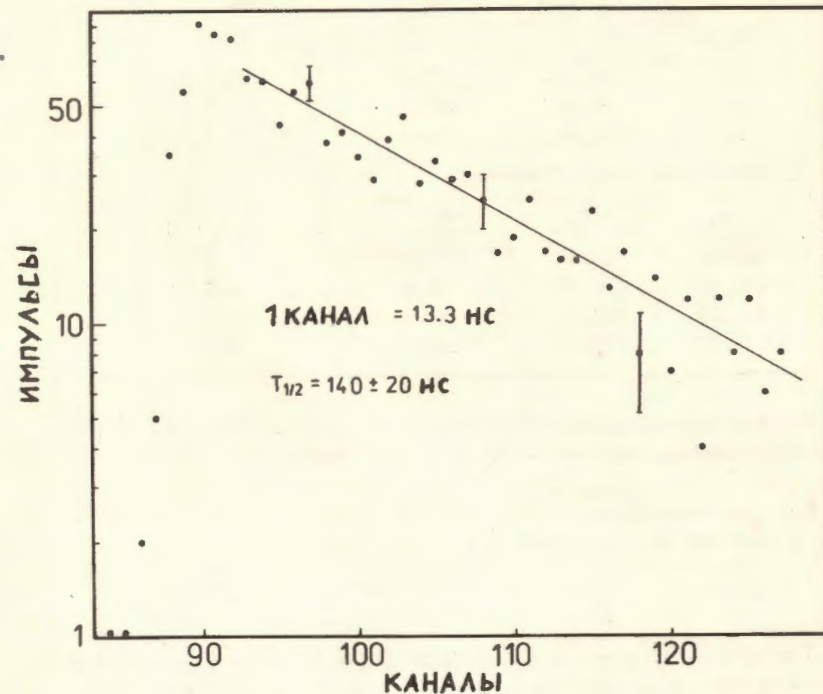


Рис. 4. Временное распределение для  $\gamma$ -квантов при установке энергетических окон на линиях 599,9 кэВ и 78,2 кэВ в спектре совпадений для распада  $^{161}\text{Yb} - ^{161}\text{Tm}$ . Из него получено время жизни уровня 78,2 кэВ:  $T_{1/2} = 140 \pm 20$  нс.

В табл. 1 приведены результаты обработки  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  совпадений.

Анализ по энергиям и интенсивностям пиков спектра задержанных совпадений, показанного на рис. 3, позволил построить часть схемы распада, опирающуюся на уровень 78,2 кэВ.

Таблица 1

Результаты обработки  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ -совпадений в распаде  $^{161}\text{Yb}$ .

## I. Задержанные совпадения с переходом 78,20 кэВ

$E_{\gamma_1}$	$E_{\gamma_2}$	$I_{\text{эксп. совп.}}^{\text{a)}$	$I_{\text{теор. совп.}}^{\text{b)}$
78,20	560,48	~8,5	10,0
	569,73	25,8	26,7
	599,88	122,0	122,0
	631,45	64,3	65,4

II. Мгновенные  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадения

$E_{\gamma_1}$	$E_{\gamma_2}$	$I_{\text{эксп. совп.}}^{\text{a)}$	$I_{\text{теор. совп.}}^{\text{b)}$
569,73	532,91	~7,3	4,8
631,45	471,00	12,6	12,6
144,28	266,0	~3,4	6,0
298,46	159,67	~3,0	8,3

а/ Ошибки интенсивности совпадений составляют 20% для сильных совпадений и около 50% для остальных /обозначенных ~ /.

в/ При расчете  $I_{\text{совп.}}^{\text{теор}}$  берется во внимание наша схема распада; в случае II принимается  $I_{\text{полн}} = I_{\gamma}$ .

Достаточно полно возможности установки для трехмерного анализа на базе двух полупроводниковых детекторов можно показать и на результатах эксперимента по изучению распада  $^{79}\text{Rb}$  /  $T_{1/2} = 22,8$  мин /<sup>16</sup>/. На рис. 5 и 6 приведены примеры спектров совпадений, полученных в результате сортировки по временным и энергетическим окнам информации трехмерного анализа.

Помимо определения периодов полураспада уровней с достаточно большим  $T_{1/2}$  /временное разрешение  $2\tau_0 = 25$  нс/, как это видно из рис. 5, можно хорошо разделить амплитудные спектры совпадений в случае, когда энергетическое разрешение недостаточно для независимого выбора окон для двух по энергии близких переходов, а время жизни состояний, высвечивающих эти переходы, заметно отличается.

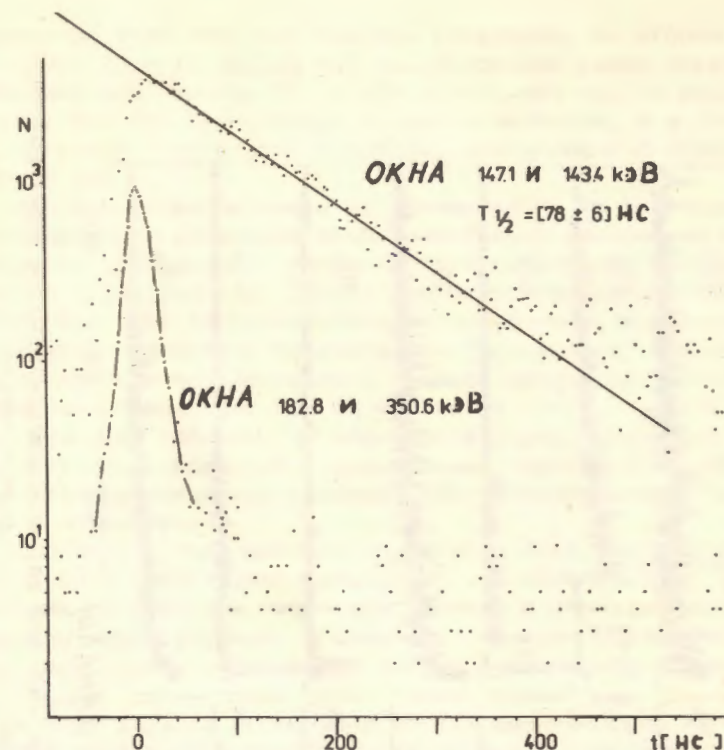


Рис. 5. Временные распределения  $\gamma$ -квантов из распада  $^{79}\text{Rb}$  для двух случаев установки энергетических окон: 147,1 и 143,4 кэВ /  $T_{1/2} = 78 \pm 6$  нс / и 182,8 и 350,6 кэВ /мгновенные совпадения/.

Хорошим примером могут служить переходы 147,06 и 149,34 кэВ, возникающие при распаде  $^{79}\text{Rb}$ . Переход 147,06 кэВ разряжает уровень 147,06 кэВ с  $T_{1/2} = 78$  нс /рис. 5/ и совпадает с переходами, которые питают прямо или через каскад этот уровень /143,41; 302,4; 382,5; 397,6; 461,5; 541,0; 774,1 и 788,3 кэВ/.

Переход 149,34 кэВ совпадает без заметной задержки с переходами 154,82; 201,2; 218,8 и 384,1 кэВ. На рис. 6 показаны спектры совпадений /второй и третий снизу/, в которых амплитудное окно одно и то же, то есть /147,06+149,34 кэВ/.

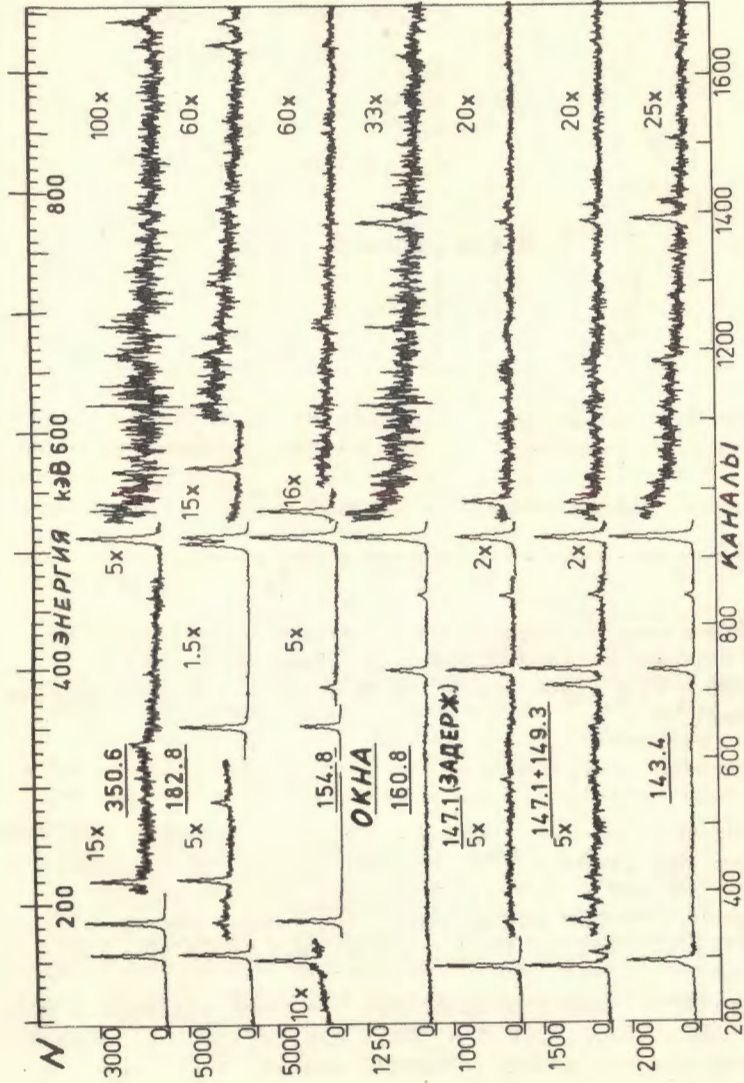


Рис.6. Спектры совпадений из распада  $^{79}\text{Rb}$  для разных энергетических и временных окон. Над спектрами цифрами указаны временные окна. Пояснения в тексте.

Временные окна при этом выбраны следующие: во втором спектре снизу  $t_1 = -15$  нс,  $t_2 = 15$  нс, в третьем снизу спектре, обозначенном "задерж.",  $t_1 = 30$  нс и  $t_2 = 60$  нс. Из рисунка видно, что эти два спектра сильно отличаются, и в спектре с задержкой отсутствуют переходы, совпадающие с переходом 149,34 кэВ.

Это хорошо видно также из данных табл. 2, в которой приведены для сравнения экспериментально измеренные интенсивности совпадений и интенсивности переходов, рассчитанные по схеме распада  $^{79}\text{Rb}$  /с учетом коэффициентов конверсии/. При этом экспериментальные интенсивности сравниваются с интенсивностями рассчитанных "мгновенных" гамма-переходов для случая трехмерного анализа амплитуда-амплитуда-временных совпадений при  $\Delta t = 30$  нс / $t_1 = -15$ ,  $t_2 = +15$  нс/. Как видно из таблицы, интенсивности хорошо совпадают за исключением совпадений с задержанным переходом 147,06 кэВ, где экспериментальные значения дают интенсивности, заниженные в четыре раза.

Соответствующим выбором временного окна эта разница может быть существенно увеличена, что обеспечивает для близких по энергиям переходов, идущих с отличающихся по времени жизни уровней, в ответных спектрах совпадений присутствие линий, совпадающих только с одним или другим переходом.

В ряде случаев информация по совпадениям была использована для выявления сложной структуры линий, проявившихся в  $\gamma$ -спектре распада  $^{79}\text{Rb} - ^{79}\text{Kr}$  как одиночные пики. Так, например, для пиков с энергиями 219, 303, 348 и 506 кэВ совпадения проявили 2, 3, 2 и 2 компонента, соответственно. Относительные интенсивности компонент этих мультиплетов были оценены из спектров совпадений.

Данные, приведенные в табл. 1 и 2 по сравнению расчетных и экспериментальных интенсивностей совпадений, показывают, что установка дает не только качественную, но надежную количественную информацию, которая существенно облегчает построение схемы распада.

Трехмерный режим измерения позволяет при последующей сортировке получить мгновенные и задержанные гамма-спектры, соответствующие выбранному окнам во временном распределении /в этом случае можно определить времена жизни возбужденных уровней по спаду интенсивности фотопиков/.

При выборе окон в двух энергетических спектрах гамма-излучений времена жизни определяются прямо по экспоненциальному спаду временных кривых или по величине сдвига их центра тяжести относительно центра тяжести кривых мгновенных совпадений<sup>/14/</sup>.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные интенсивности  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений в распаде  $^{79}\text{Rb}$

Энергия кэВ	Интенсивность		Энергия кэВ	Интенсивность	
	Экспер.	Расчетн.		Экспер.	Расчетн.
<u>Окно (I41,65+I43,41) кэВ</u>					
I47,06 <sup>a)</sup>	8,6	39,8	84I,6	0,1	0,15
382,5	0,6	-	II37,7	0,25	0,31
397,6	I4,5	I5,6	II84,I	0,62	0,64
46I,5	2,7	3,I	I4I6,9	да	0,II
774,I	I,4	I,5	I504,7	да	0,08
778,3	0,4	0,48			
<u>Окно (I47,08+I49,34) кэВ</u>					
I43,4I <sup>a)</sup>	IO,0	39,8	397,6 <sup>a)</sup>	2,4	IO,I
I54,82	2,0	2,5	46I,5 <sup>a)</sup>	0,5	2,I
20I,2	0,3	0,38	54I,0 <sup>a)</sup>	0,4	2,I
2I8,8	0,I6	0,I6	774,I <sup>a)</sup>	да	I,0
302,4 <sup>a)</sup>	да	0,82	788,3 <sup>a)</sup>	да	0,3I
382,5 <sup>a)</sup>	да	0,34	II84,I <sup>a)</sup>	да	0,42
384,I	2,I	2,5			
<u>Окно I82,77 кэВ</u>					
I07,72	0,3	0,29	786,0	0,3	0,24
I49,34	да	0,37	92I,6	0,8	0,65
I54,82	25,7	26,4	94I,2	0,7	0,58
20I,2	0,6	0,75	III7,0	0,2	0,I8
2I8,8	4,4		I208,0	да	0,I4
2I9,3			I245,6	0,I	0,I5
286,2	I,7	I,7	I29I,9	0,2I	0,28
350,6	30,5	30,5	I427,2	0,24	0,3I
505,4	44,8	44,7	I629,7	да	0,07
569,2	3,5	3,9	I678,4	0,I6	0,II
663,I	да	0,I3	I922,5	да	
724,4	0,4	0,26	2I83,7	(да)	0,I6

a/ Совпадения с 147,06 кэВ.

Точность определения времен жизни существенно повышается с улучшением временного разрешения установки и формы временного распределения.

Работа установки на линии с ЭВМ позволяет применять метод компенсации зависимости временных сдвигов от амплитуды введением поправок, определенных предварительно по смещениям центров тяжести временных распределений, соответствующих мгновенным совпадениям в узких амплитудных окнах<sup>15/</sup>

На рис. 7 и 8 приведены результаты обработки информации трехмерного анализа типа  $\gamma$ - $\gamma$ -t, полученной при исследовании распада  $^{160}\text{Yb}$  /  $T_{1/2} = 4,8$  мин /<sup>17/</sup>.

В установке использовался Ge(Li)-детектор /с двумя открытыми концами объемом 41 см<sup>3</sup>/ в стоповом канале, сцинтилляционный детектор с кристаллом стиблена / $\phi$  40x40 мм/ и ФЭУ типа XP1020 - в стартовом.

Спектры задержанных гамма-лучей  $^{160}\text{Yb}$  приведены на рис. 7, ширина временного окна выбрана 4 нс. Фотопик интенсивного гамма-перехода 264,0 кэВ  $^{160}\text{Er}$  /дочернего ядра в цепочке распада  $^{160}\text{Yb}$  /, разряжающего состояние с малым периодом полураспада, не исчезает полностью вследствие случайных совпадений.

На рис. 8 показаны положения центров тяжести временных распределений совпадений КХ-лучей с фотопиками гамма-переходов /светлые "точки"/. Темные квадраты - экспериментальные точки центров тяжести временных распределений для участков фона, взятых рядом с линиями соответствующих гамма-переходов. Кривая, проходящая через эти центры тяжести, лежит выше, чем центры тяжести временных распределений мгновенных совпадений КХ- $\gamma$  197 кэВ и КХ- $\gamma$  246,0 кэВ, что указывает на задержанность гамма-фона, обусловленного, по-видимому, комптоновским распределением  $\gamma$ -излучений, идущих с изомерных уровней в распаде  $^{160}\text{Yb}$ .

С учетом этой задержки проведена "нулевая" временная линия. Величина смещения позиций центров тяжести временных распределений: КХ- $\gamma$  98,2, КХ- $\gamma$  125,7, КХ- $\gamma$  132,2, КХ- $\gamma$  140,4 и КХ- $\gamma$  /173,7+174,4/ и КХ- $\gamma$  215,8 кэВ определяется временами жизни соответствующих состояний  $^{160}\text{Tm}$  и  $^{160}\text{Er}$ .

По смещению центров тяжести временных распределений совпадений КХ- $\gamma$  215 кэВ и КХ- $\gamma$  126 кэВ определены периоды полураспада уровня 215 кэВ в  $^{160}\text{Tm}$  и 126 кэВ в  $^{160}\text{Er}$  как  $0,65 \pm 0,15$  нс и  $0,85 \pm 0,15$  нс, соответственно. Последнее значение хорошо согласуется с известными данными. Смещения временных распределений КХ- $\gamma$  /98+99/ кэВ, КХ- $\gamma$  132 кэВ, КХ- $\gamma$  140 кэВ, КХ- $\gamma$  /173+174/ кэВ обусловлены тем, что переходы 98, 132, 140 и 174 кэВ связаны с разрядкой уровня

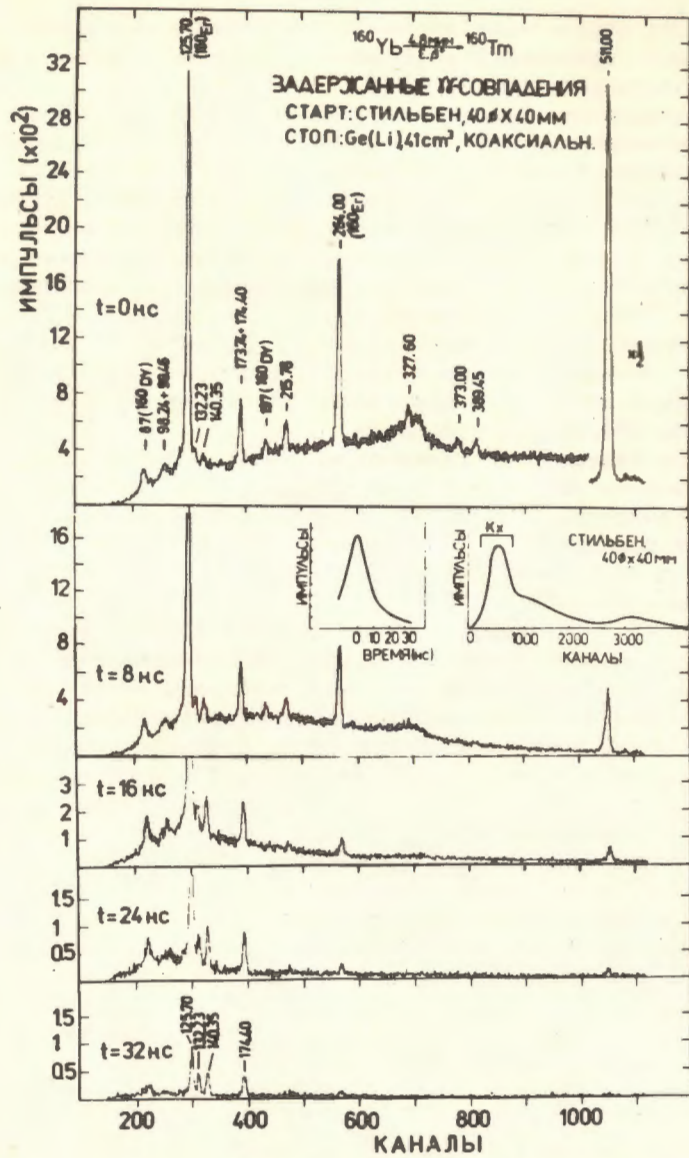


Рис. 7. Спектры задержанных  $\gamma$ -совпадений для распада  $^{160}\text{Yb} \rightarrow ^{160}\text{Tm}$  /  $T_{1/2} = 4,8$  мин/. Временная задержка указана в начале соответствующих спектров. На вставках приведены: спектр временного распределения совпадений и  $\gamma$ -спектр сцинтилляционного детектора.

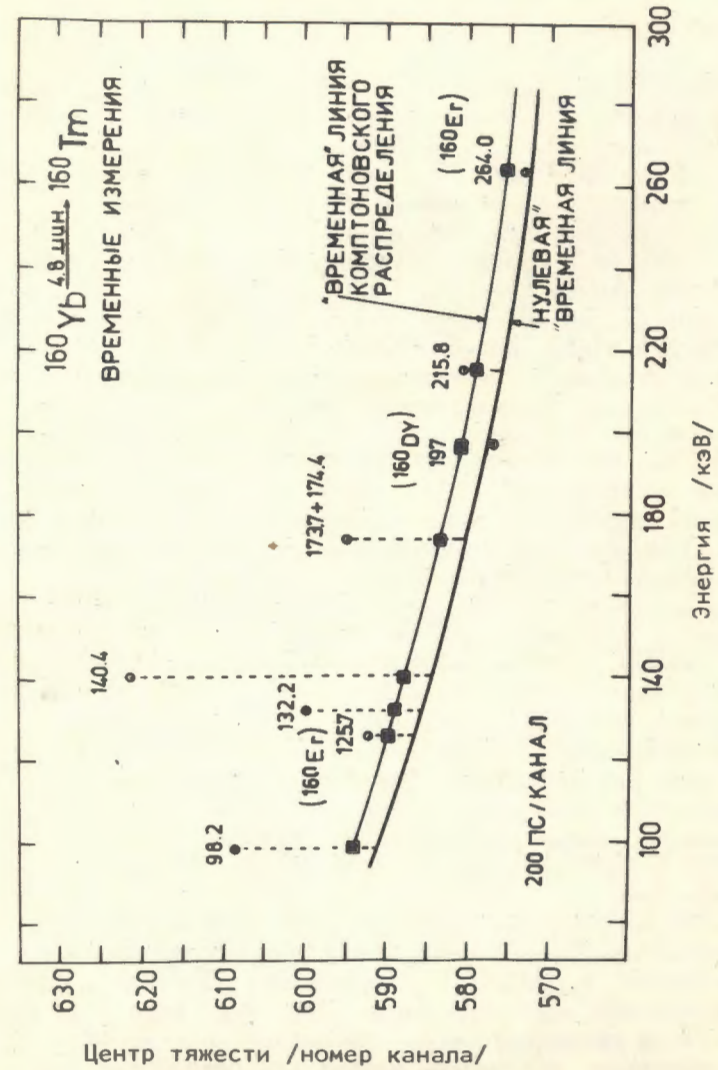


Рис. 8. Временные измерения для распада  $^{160}\text{Yb} \rightarrow ^{160}\text{Tm}$ . Пояснения в тексте.

174 кэВ с  $T_{1/2} = 17 \pm 1$  нс. В связи со сложностью фотопиков этих переходов и ограниченностью измеряемого временного диапазона совпадений  $/t = 50$  нс/ смещения этих распределений относительно "нулевой" линии ослаблены.

## § 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка, блок-схема которой приведена на рис. 1, является универсальной, и трехмерный анализ представляет собой один из возможных режимов, наиболее полно использующих ее возможности. Интерфейс<sup>/2/</sup> и программное обеспечение<sup>/13/</sup> позволяют проводить одновременно независимые измерения трех гамма-спектров /при этом временной тракт заменяется на энергетический с соответствующим детектором/, а также измерения двумерных спектров типа  $y-y$  или  $y-t$ .

От других систем многомерного анализа, использовавшихся в ЛЯП ОИЯИ для задач ядерной спектроскопии<sup>/18-22/</sup>, описанная система отличается универсальностью. Предыдущие разработки базировались на анализаторы<sup>/20/</sup> или ЭВМ<sup>/18,21,22/</sup>, имеющие ограниченные возможности как по собственной памяти<sup>/22/</sup>, так и, что еще более существенно для многомерного анализа, по внешним устройствам<sup>/18,21/</sup> /отсутствие дисков, магнитофоны с малой плотностью записи информации<sup>/18/</sup>/. Поэтому ранние системы были ориентированы на решение частных задач с учетом возможностей техники.

Помимо возможностей ЭВМ, определяющих в значительной степени успех в создании универсальной системы многомерного анализа, важным фактором является качество полупроводниковых детекторов, аналоговой электроники энергетических и временных трактов и амплитудно-цифровых преобразователей.

При большом объеме информации, характерном для многомерного анализа, дополнительным фактором, определяющим эффективность использования системы, является программное обеспечение и, прежде всего, система развитого диалога человек-ЭВМ и программы быстрой сортировки информации с магнитных лент.

Описанная система эксплуатируется в течение трех лет. На ее базе выполнен большой цикл физических исследований, главным образом, в области короткоживущих изотопов с периодами полураспада выше двух минут. Для таких ядер чаще всего отсутствует предварительная информация, и  $y-y$  совпадения являются основным источником данных для разработки схем распада. Система многомерного анализа с регистрацией всей информации наиболее полно отвечает решению этой задачи.

Развитие системы будет идти по пути использования более совершенной аналоговой и цифровой электроники в стандарте "КАМАК" через соответствующее устройство связи с ЭВМ<sup>/23/</sup>, совершенствования системы программ обработки данных в направлении повышения эффективности и автоматизации процессов, переноса тяжести обработки информации, в том числе сортировки с магнитных лент, на большие ЭВМ.

Описанная система базируется на разработках Отдела автоматизации физического эксперимента ЛЯП и оборудовании измерительного центра Лаборатории. В связи с этим мы хотим отметить большую помощь со стороны коллектива отдела и выразить ему благодарность в лице А.Н.Синаева, С.В.Медведя, Ю.К.Акимова и А.И.Калинина.

Большая работа по разработке и отладке отдельных узлов системы была выполнена В.И.Гилевым, Х.-Г.Ортлеппом, С.И.Орманджиевым и Р.Лушинским; значительный вклад в разработку математического обеспечения внесли П.Нойберт, В.-Г.Фромм и В.Хабенихт, которым мы глубоко благодарны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дуда Ф. и др. ОИЯИ, 10-4236, Дубна, 1968.
2. Медведь С.В. и др. ОИЯИ, 10-6884, Дубна, 1973.
3. Нефедьев О.К., Шульце В. ОИЯИ, 13-7288, Дубна, 1973.
4. Громов К.Я. и др. ОИЯИ, Р6-7355, Дубна, 1973.
5. Жуков Г.П. и др. Труды 5 научно-технич. конф. по ядерной электронике, ч. 2, том 2, с. 115, Госатомиздат, М., 1963.
6. Андерт К. и др. ОИЯИ, Р6-8564, Дубна, 1975.
7. Akimov Yu.K. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1972, 104, p. 581.
8. Андерт К., Габриель Ф., Калинин А.И. ОИЯИ, 13-7125, Дубна, 1973.
9. Антюхов В.А., Семенов Б.Ю. ОИЯИ, 13-7085, Дубна, 1973.
10. Балдин Б.Ю., Крумштейн Э.В., Ронжин А.И. ОИЯИ, 13-9850, Дубна, 1976.
11. Борейко В.Ф. и др. ОИЯИ, 13-6396, Дубна, 1972.
12. Гилев В.И. и др. ОИЯИ, 13-9993, Дубна, 1976.
13. Гонусек М., Фромм В. ОИЯИ, 10-10007, Дубна, 1976.
14. Андрейчев В. и др. ОИЯИ, Р13-11312, Дубна, 1978.
15. Аликов Б.А. и др. ОИЯИ, 13-10204, Дубна, 1976.
16. Lipták J., Krištiak J., Krištiaková K. ОИЯИ, Е6-11090, Дубна, 1977.

17. Адам И. и др. ОИЯИ, Р6-11425, Дубна, 1978.
18. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, 10-7034, Дубна, 1973.
19. Андерт К. и др. ОИЯИ, Р6-8564, Дубна, 1975.
20. Медведь С.В. и др. ОИЯИ, 10-6884, Дубна, 1973.
21. Орманджиев С.И. и др. ОИЯИ, 13-8797, Дубна, 1975.
22. Арльт Р. и др. ОИЯИ, Р10-7723, Дубна, 1974.
23. Антюхов В.А. и др. ОИЯИ, 10-10116, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 апреля 1979 года.