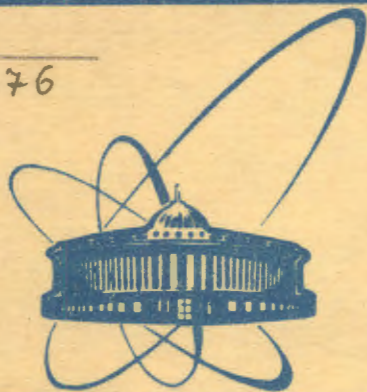


B-676



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

3902/2-79

1/10-79
10 - 12400

Н.Г.Волков, В.М.Цупко-Ситников, А.К.Чураков

ПРОГРАММА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

γ - γ СОВПАДЕНИЙ PROSPEC

1979

10 - 12400

Н.Г.Волков, В.М.Цупко-Ситников, А.К.Чураков

ПРОГРАММА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

γ - γ СОВПАДЕНИЙ PROSPEC

*Направлено в сборник
"Прикладная ядерная спектроскопия"*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Волков Н.Г., Цупко-Ситников В.М.,
Чураков А.К.

10 - 12400

Программа автоматической обработки двумерных
спектров $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений PROSPEC

Разработан комплекс программ полной автоматической обработки спектров $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений. Программа может осуществлять обработку как отсортированных, так и неотсортированных спектров. Описаны методика поиска пиков совпадений в отсортированных и неотсортированных спектрах и метод определения параметров пиков совпадений. Объем пиков совпадений определяется с помощью аппроксимации двумерной поверхности аналитической функцией с использованием метода наименьших квадратов. Мультиплеты в двумерных спектрах разделяются с помощью метода регуляризации. Полная обработка спектра $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений размерностью $4096 \times 4096 \times 4096$ каналов, содержащего 10^7 событий, занимает 2 часа процессорного времени на ЭВМ с быстродействием 3×10^5 операций в секунду /ЕС-1040/.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Volkov N.G., Tsupko-Sitnikov V.M.,
Churakov A.K.

10 - 12400

"PROSPEC" Automatic Program System
for Analysis of Two-Dimensional $\gamma\text{-}\gamma$ -Coincidence
Data

The system for automatic $\gamma\text{-}\gamma$ -coincidence spectra analysis is developed. It could work with rough data and with data after preliminary sorting operation done. The methods of the continuous peak searching and parameter determination are described. The coincidence peak volumes are found by approximating two-dimensional surface with analytical function and using the least square method. For a multiplet resolution in two-dimensional spectra the method of regularization is used. Full time for the analysis of data, represented by coincidence spectrum of $4096 \times 4096 \times 4096$ channels with 10^7 events, is 2 h for the processor with the $3 \cdot 10^5$ operation/s on the EC-1040.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

В изучении структуры атомного ядра важную роль играет многомерный корреляционный анализ типа $\gamma\text{-}\gamma$, $\theta\text{-}\gamma$, $\alpha\text{-}\gamma$, $\gamma\text{-}t$, $\gamma\text{-}\theta$, дающий ценную информацию о схемах распада, временах жизни и квантовых характеристиках основных и возбужденных состояний ядра.

В последние годы применение полупроводниковых детекторов, высококачественной спектрометрической аппаратуры для первичной обработки сигналов и ЭВМ для накопления информации /практически в неограниченном объеме/ обеспечивает постановку многомерных измерений в наиболее полной форме, то есть с одновременной регистрацией всех измеряемых параметров во всем диапазоне их возможных значений.

Такие измерения /даже при избыточности получаемой информации в некоторых случаях/ представляют большой интерес по ряду причин. Наличие полной информации не ставит ограничений при последующем анализе; упрощается работа с электронной аппаратурой и вся подготовка эксперимента; удешевляется эксперимент в целом за счет более рационального использования времени на ускорителях или реакторах.

Однако при полном многопараметрическом анализе возникают трудности с обработкой информации. Регистрация данных ведется, как правило, без предварительной сортировки /так как она потребовала бы в случае обработки спектров гамма-гамма совпадений размерности 1024×1024 или 4096×4096 каналов оперативной памяти ЭВМ с числом ячеек $10^6 - 10^7$ /, и результатом многомерного измерения является несколько магнитных лент, содержащих $10^7 - 10^8$ сложных событий.

Обычная схема обработки такой информации выглядит следующим образом. На суммарном спектре совпадений одного из каналов задают "окна" /пики, фон/, совпадения с событиями которых излучения, регистрируемого другим трактом, представляют интерес. По установленным окнам при просмотре всей информации отбираются ответные события второго тракта и формируются соответствующие одномерные спектры. Затем эти спектры обрабатываются как обычные одномерные, но с учетом особенностей фона, связанных с совпадениями. Конечная цель - установление количественной зависимости между совпадающими переходами.

Далее эта информация используется при построении схем распада, то есть установлении системы уровней ядра, размещения между ними электромагнитных переходов и определения их квантовых характеристик. Весь этот процесс довольно длителен и трудоемок и часто заканчивается получением лишь одного из вероятных вариантов.

Автоматизация всего этого процесса началась с последнего этапа - создания программ построения схем распада на базе известной информации о совпадениях, энергиях уровней и энергиях и интенсивностях переходов.

Первые стадии обработки - задание окон для сортировки и обработка полученных одномерных спектров - инициируются и контролируются экспериментатором. Помимо того, что такая обработка отличается длительностью и трудоемкостью, она требует от экспериментатора владения искусством работы на малой ЭВМ и опыта.

Дополнительным осложняющим обстоятельством является, как правило, большая загруженность, малое быстродействие и недостаточность технических средств /память, внешние устройства/ малых ЭВМ, на которых эта обработка обычно осуществляется в диалоговом режиме.

Поэтому представляет интерес разработка программного обеспечения для полностью автоматизированной обработки данных о совпадениях на мощных ЭВМ с выдачей информации в виде матрицы совпадений с указанием энергий переходов и интенсивностей их совпадений.

Ниже описывается единый комплекс программ, обеспечивающий полную автоматическую обработку данных гамма-гамма совпадений, начиная с определения условий для сортировки и

кончая выдачей матрицы с количественными данными об интенсивностях совпадений.

Система написана на ФОРТРАНе и реализована на ЭВМ ЕС-1040 измерительного центра Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Приводятся результаты использования программ для обработки спектра $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений ядра ^{149}Tb .

2. МЕТОДИКА ПОИСКА ПИКОВ В СПЕКТРАХ $\gamma\text{-}\gamma$ СОВПАДЕНИЙ

Перед началом обработки экспериментатор задает предполагаемые дисперсии пиков по обеим осям X и Y, а также несколько точек /не более 40/ на одной из осей, скажем Y, которыми спектр разбивается на ряд полос /см. рис. 1/; программа быстрой сортировки, использующая принцип, описанный в работах /1,2/, набирает ряд одномерных спектров, в каждом из которых в одну точку на оси X суммируются все события по Y в пределах данной полосы. Если мы имеем отсортированный спектр, то эта операция запишется как

$$N^K(i) = \sum_{j=j_H^K}^{j=j_B^K} L(i, j), \quad /1/$$

где K - номер полосы, $K = 1, 2, \dots, K_{\max}$, j_H^K - нижняя граница K-й полосы, j_B^K - верхняя граница K-й полосы, $N^K(i)$ - одномерный спектр, $L(i, j)$ - исходный спектр.

Эти одномерные спектры последовательно обрабатываются программой обработки одномерных спектров AUTOS, которая определяет не только точные положения пиков и их границы, но и точные значения ширины на половине высоты для каждого пика /ШППВ/. После обработки каждого очередного спектра эти результаты сравниваются, и если оказывается, что центры совпадают в пределах заданной погрешности, то результаты корректируются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ЛГ}_X^K &= \min(\text{ЛГ}_X^{K-1}, \text{ЛГ}_X^K), \\ \text{ПГ}_X^K &= \max(\text{ПГ}_X^{K-1}, \text{ПГ}_X^K), \end{aligned} \quad /2/$$

где $ЛГ_X^K$ и $ПГ_X^K$ - соответственно левая и правая граница K -того пика.

После того как все одномерные спектры будут проанализированы, делается операция, аналогичная /1/, для найденных окон по оси X :

$$M^r(j) = \sum_{i=i_H^r}^{i_B^r} L(i, j) \quad /3/$$

Здесь $M^r(j)$ - одномерный спектр, r - номер полосы и номер одномерного спектра, j - номер канала по оси Y , i_B^r - правая граница полосы, i_H^r - левая граница полосы.

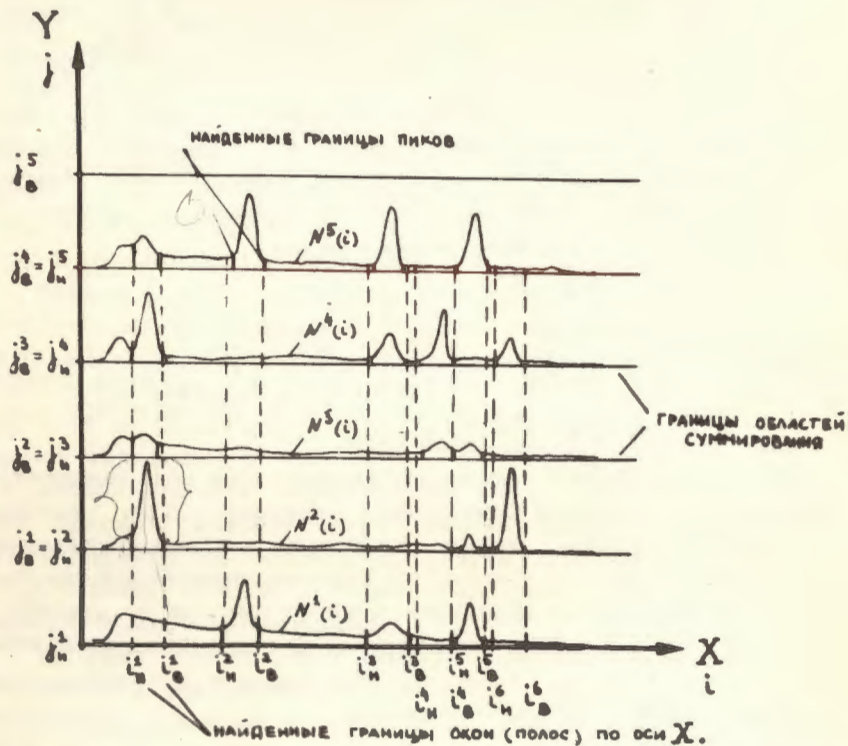


Рис. 1. Иллюстрация первого этапа работы программы поиска пиков - набор одномерных спектров в полосах вдоль оси X /по автоматической произвольной разбивке на K_{max} полос по оси Y /. Поиск и образование окон /полос/ по оси X .

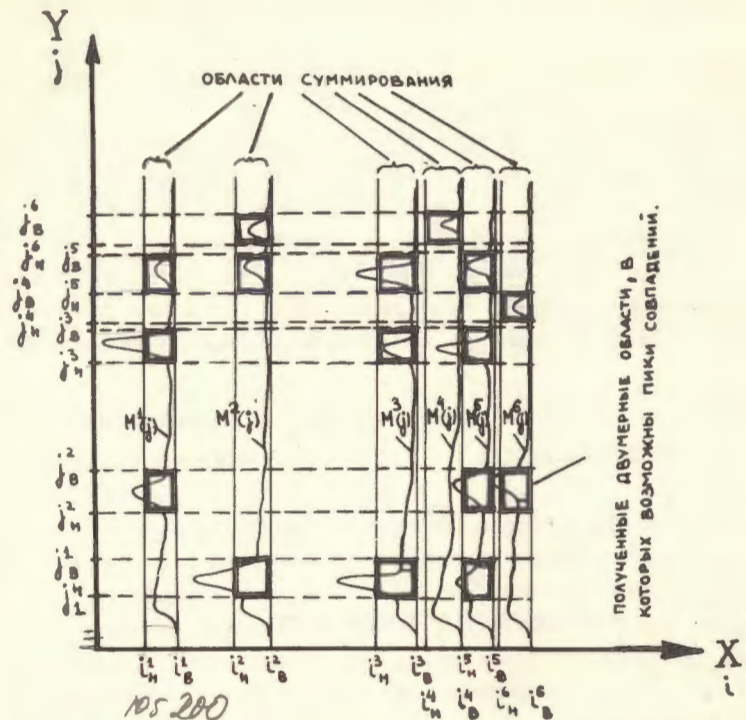


Рис. 2. Образование одномерных спектров вдоль оси Y в окнах, найденных вдоль оси X . Поиск окон вдоль оси Y и формирование двумерных областей с возможными пиками совпадений.

Анализ этого набора одномерных спектров дает нам полный набор границ возможных пиков совпадений /см. рис. 2/. Так же как и в первом случае, все результаты последовательно уточняются по формулам /2/ и формируется массив, в котором в порядке возрастания запоминаются номера граничных каналов пиков по оси Y . Завершает этот этап обработки калибровка обоих спектрометрических трактов. Калибровка проводится методом аппроксимации калибровочной кривой полиномом или с помощью метода сплайн-МНК в зависимости от числа реперных пиков. Следующий этап обработки начинается с формирования n_{max} - двумерных спектров, каждый из которых соответствует одному из двумерных окон, полученных при поиске границ пиков по осям X и Y / n_{max} - число найденных возможных пиков совпадений/.

3. БЫСТРАЯ СОРТИРОВКА ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Задача быстрой сортировки данных по двумерным окнам решается с помощью видоизмененного метода индексации, описанного в [1,2]. Идея метода состоит в следующем: каждое событие регистрируется при наборе спектра с помощью пары чисел, каждое из которых соответствует номеру канала в соответствующем амплитудно-цифровом преобразователе /АЦП/. Назовем массив этих чисел $\{SP\} = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots)$. Перед началом сортировки выделяются четыре массива /по длине равные числу каналов АЦП/, каждый из которых будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{INX}(i) &= K \\ \text{INXI}(i) &= i - i_H^K + 1 \end{aligned} \right\}, \quad \text{если} \quad i_H^K \leq i \leq i_B^K, \quad K = 1, 2, 3, \dots, K_{\max};$$

$$\left. \begin{aligned} \text{INY}(j) &= r \\ \text{INYI}(j) &= j - j_H^r + 1 \end{aligned} \right\}, \quad \text{если} \quad j_H^r \leq j \leq j_B^r, \quad r = 1, 2, 3, \dots, r_{\max};$$

$$\left. \begin{aligned} \text{INX}(i) &= 0 \\ \text{INXI}(i) &= 0 \\ \text{INY}(j) &= 0 \\ \text{INYI}(j) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{во всех остальных случаях.}$$

/Здесь K и r обозначают номер окна по осям X и Y , а индексы "H" и "B" - нижнюю и верхнюю границы полос/. Так же выделяется еще один массив размерностью $K_{\max} \times r_{\max}$ вида: $\text{IFC}(K, r) = n$, если при предварительном поиске /по Y / обнаружена возможность совпадений для этого окна. $n = 1, 2, \dots, n_{\max}$ - номер пика /прямоугольного окна/.

$$\left. \begin{aligned} \text{IFC}(0, r) &= 0, \\ \text{IFC}(K, 0) &= 0, \\ \text{IFC}(0, 0) &= 0, \\ \text{IFC}(K, r) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad \text{во всех остальных случаях.}$$

Здесь K и r - соответственно номера окон по X и Y .

После этих приготовлений анализ каждого события будет состоять из следующих операций:

$$NX = \text{INX}(x_\ell);$$

$$NY = \text{INY}(y_\ell);$$

$NN = \text{IFC}(NX, NY)$, если $NN=0$, то переход к следующему событию;

$$i = \text{INXI}(x_\ell);$$

$$j = \text{INYI}(y_\ell);$$

$$\text{SPEKTR}(NN, i, j) = \text{SPEKTR}(NN, i, j) + 1.$$

Здесь $\text{SPEKTR}(NN, i, j)$ - это массив, содержащий двумерные спектры, соответствующие каждой из областей совпадений. NN - номер двумерного спектра; i, j - номера каналов по обеим осям.

Этот метод мы назвали методом двойной индексации. Следует заметить, что в реальном случае границы могут частично перекрываться и алгоритм получается несколько сложнее.

4. РАЗРЕШЕНИЕ МУЛЬТИПЛЕТОВ В ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРАХ γ - γ СОВПАДЕНИЙ

В том случае, если при поиске возможных пиков совпадений дисперсия или форма пиков позволяют предположить, что в данной области содержатся несколько наложенных пиков совпадений, необходимо определить число и приблизительные параметры этих пиков. Эта задача решается восстановлением "истинного" спектра /т.е. спектра до искажения его детектором и аппаратурой/ путем решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода вида

$$U_\delta(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-\xi, y-\eta) Z(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad /4/$$

где $U_\delta(x, y)$ - полученный экспериментально спектр; $K(x-\xi, y-\eta)$ - аппаратная функция спектрометрического тракта; $Z(\xi, \eta)$ - истинный спектр.

Применяя двумерное фурье-преобразование и метод регуляризации решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода, получаем решение в виде

$$Z(\xi, \eta) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\bar{K}^*(\omega_1, \omega_2) \bar{U}_\delta(\omega_1, \omega_2) e^{-i(\omega_1 \xi + \omega_2 \eta)}}{\bar{K}(\omega_1, \omega_2) \bar{K}^*(\omega_1, \omega_2) + \alpha(\omega_1^2 + \omega_2^2)} d\omega_1 d\omega_2, \quad /5/$$

где $\bar{K}(\omega_1, \omega_2)$ - фурье-образ $K(x-\xi, y-\eta)$, $\bar{K}^*(\omega_1, \omega_2)$ - оператор, сопряженный ему, $\bar{U}_\delta(\omega_1, \omega_2)$ - фурье-образ экспериментального спектра, α - параметр регуляризации.

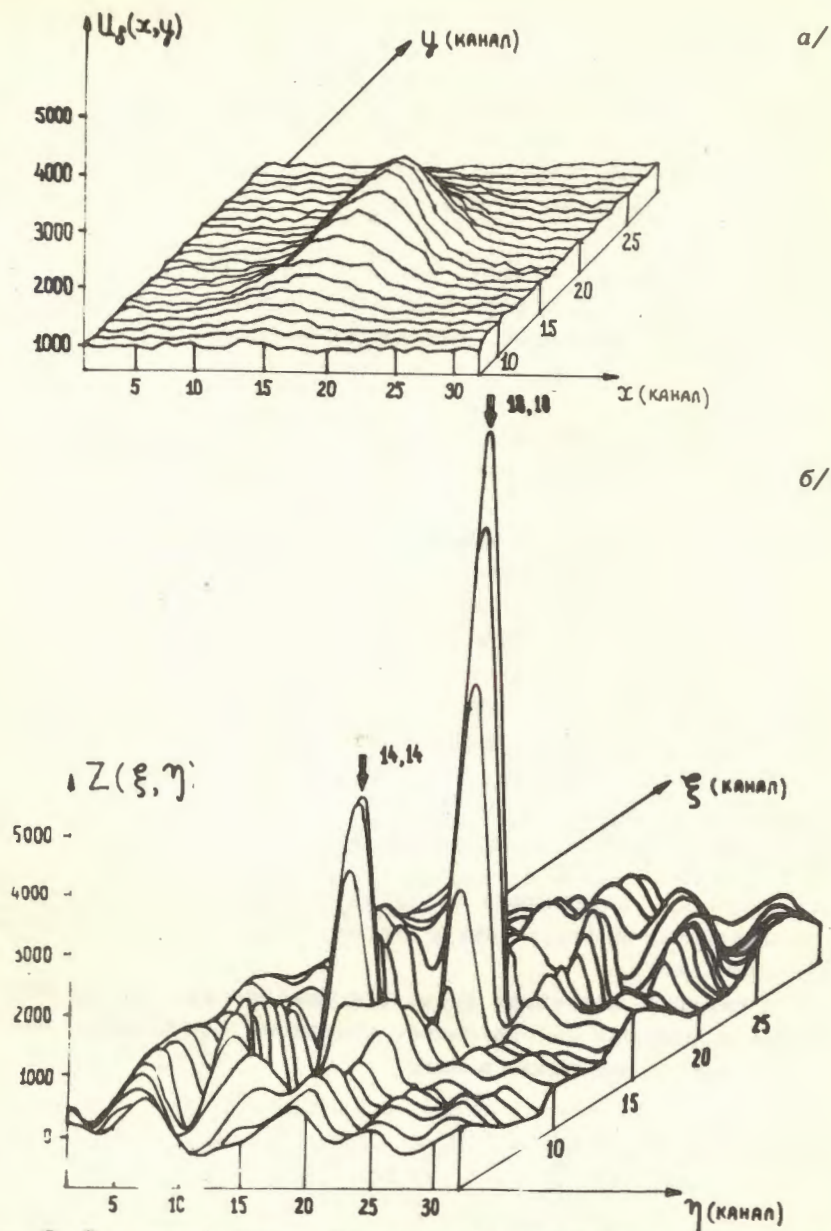


Рис. 3. В верхней части рисунка а/ - модельный мультиплет: пики с амплитудой 500 и 1500, расположенные в каналах 14,14 и 18,18 ($\sigma_x = \sigma_y = 4$). На нижней части рисунка б/ - полученное решение $Z(\xi, \eta)$; $a = 10^{-6}$.

При вычислениях интегралы заменяются суммами и используется стандартная подпрограмма быстрого трехмерного фурье-преобразования HARM.

Подобный подход был разработан и проверен в работе¹³. Исследования области применимости такого алгоритма показали, что двумерные пики хорошо разрешаются при расстоянии между центрами не менее $1,2\sigma$ и соотношении интенсивностей /в дуплете/ 1:5. Пример разрешения модельного мультиплета показан на рис. 3.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПИКОВ γ - γ СОВПАДЕНИЙ

Объем и положение пиков совпадений определяются при помощи аппроксимации экспериментальных данных аналитическими функциями, в число параметров которых входят эти величины. Эта задача решается в два этапа. На первом этапе с помощью нелинейного метода наименьших квадратов получаем значение положений и σ^2 /дисперсий/ двумерных пиков совпадений. Для этого из экспериментального двумерного спектра /соответствующего одному из окон, найденных ранее/ получаем два интегральных одномерных спектра $I_X(i)$ и $I_Y(j)$ /проекции спектра на оси X и Y /. Эти спектры аппроксимируются функцией вида

$$f(p, l) = p_1 \exp\left[-\frac{(p_2 - l)^2}{2p_3^2}\right] + p_4 l + p_5 \quad /6/$$

/или суммой гауссианов и фоном в случае мультиплета/. Полученные значения p_2 , соответствующего положению пика, и p_3 , соответствующего σ , используются в качестве констант на втором этапе, когда для определения объема пика совпадений мы аппроксимируем двумерный спектр SPECTR (NN, i, j) аналитической поверхностью вида

$$H(a, i, j) = \frac{a_1}{2\pi a_4 a_5} \cdot \exp\left[-\frac{(i - a_2)^2}{2a_4^2} - \frac{(j - a_3)^2}{2a_5^2}\right] +$$

I

$$\begin{aligned}
 & + a_6 (a_7 - i) \exp\left[-\frac{(j - a_3)^2}{2a_5^2}\right] + a_8 (a_9 - j) \exp\left[-\frac{(i - a_2)^2}{2a_4^2}\right] + \\
 & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{II}} \\
 & + a_{10} i + a_{11} j + a_{12} ij + a_{13} \\
 & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{III}}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Первая часть этой формулы описывает пик γ - γ совпадений, часть II - совпадения событий, соответствующих комптоновскому распределению с событиями, соответствующими одной из γ -линий / γ -комpton-совпадения/. Совпадения событий, принадлежащих двум комптоновским распределениям /совпадения комптон-комpton/, описываются третьей частью формулы /7/. В случае мультиплета аппроксимация должна производиться соответственно суперпозицией таких поверхностей с общим фоном. Поверхность такого вида впервые использовалась в работе /4/, она хорошо описывает как распределение истинных совпадений, так и распределение случайных совпадений /см. §8 настоящей работы/. Следует заметить, что поскольку параметры гауссианов a_2 , a_3 , a_4 и a_5 нам известны после первого этапа обработки, задача аппроксимации может быть решена линейным МНК, что существенно упрощает вычисления и повышает надежность результатов. Параметр a_1 в формуле /6/ соответствует объему пика совпадений. В случае, если $a_1 \geq q \cdot \Delta a_1$ /здесь Δa_1 - полученная погрешность определения a_1 , q - коэффициент надежности: $q \geq 2$ /, мы считаем, что в данном месте присутствует пик γ - γ совпадений и полученные данные заносятся в таблицу результатов обработки. Погрешности значений параметров определяются, как корень из диагональных элементов дисперсионной матрицы параметров, умноженной на остаточную сумму квадратов отклонений, отнесенную к числу степеней свободы.

6. СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

Композиционно программа состоит из трех независимых частей, которые могут использоваться самостоятельно. Первая часть PROSPEC состоит из программы поиска двумерных пиков в спектрах γ - γ совпадений и подпрограмм быстрой сортировки SORTX и SORTY, формирующих интегральные спектры для заданного набора границ полос /вдоль осей X и Y /, а также подпрограммы чтения спектров с магнитной ленты и подпрограммы анализа одномерных спектров AUTOS. Результаты поиска выводятся на рабочую МЛ. Минимальный объем памяти, необходимый для работы этой части программы, равен приблизительно $(2 \times N \times L + 26000)$ байтов, где N - число γ -линий в спектре /интегральном/ исследуемого образца, участвующих в совпадениях, L - число выделенных каналов АЦП.

Вторая часть программы DDSORT осуществляет быструю сортировку, то есть набор двумерных спектров, соответствующих найденным на первом этапе областям, в которых возможны пики γ - γ совпадений. Минимальный объем памяти, необходимый для этой программы, равен $(2 \times n_{\max} \times l_x \times l_y + 20000)$ байтов, здесь n_{\max} - число областей, $l_x \times l_y$ - максимальный размер участка спектра, содержащего один двумерный пик. Скорость сортировки достаточно высока и определяется в основном скоростью считывания с МЛ. Сортировка одной стандартной бобины МЛ на ЕС-1040 занимает приблизительно 15 минут.

Третья часть программы состоит из основной программы DDFITT, осуществляющей аппроксимацию двумерных пиков с помощью линейного МНК, и трех подпрограмм: DUFITT, FITTY и TABLE. Подпрограммы DUFITT и FITTY осуществляют аппроксимацию одномерных интегральных спектров с помощью метода переменной метрики /Дэвидона/, подпрограмма TABLE, осуществляет редактирование результатов. Минимальный объем памяти, необходимый для работы этой части программы, примерно равен объему, необходимому для DDSORT. Скорость аппроксимации составляет приблизительно 2 секунды на 1 пик.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

После проверки работоспособности программы на модельных спектрах нами был обработан ряд экспериментальных спектров

Таблица 1

Часть результатов поиска двумерных областей с возможными пиками совпадений. В каждой строке приведены границы двумерных областей, центры возможных пиков совпадений. В последнем столбце - площадь предполагаемого пика при поиске в интегральном спектре по оси Y

№ ПИКА	ЛЕВАЯ ГРАНИЦА ПО X	ЦЕНТР ПО X	ΔX	ПРАВАЯ ГРАНИЦА ПО X	ЛЕВАЯ ГРАНИЦА ПО Y	ЦЕНТР ПО Y	ΔY	ПРАВАЯ ГРАНИЦА ПО Y	ПЛОЩАДЬ (ПЕКС ПО Y)
1.	218.	225.18	0.13	232.	351.	361.47	0.05	369.	110.
2.	"	"	"	"	388.	388.64	0.09	398.	152.
3.	"	"	"	"	399.	401.18	0.09	408.	112.
4.	"	"	"	"	509.	516.89	0.10	525.	153.
5.	"	"	"	"	571.	579.54	0.14	586.	238.
6.	"	"	"	"	686.	695.27	0.09	702.	228.
7.	"	"	"	"	750.	760.02	0.06	766.	226.
8.	"	"	"	"	885.	895.97	0.11	905.	87.
9.	"	"	"	"	911.	922.02	0.06	927.	87.
10.	"	"	"	"	968.	978.33	0.20	986.	126.
11.	"	"	"	"	1218.	1230.41	0.17	1237.	86.
12.	"	"	"	"	1577.	1590.14	0.13	1596.	67.
13.	291.	297.29	0.16	305.	351.	361.47	0.05	369.	462.
14.	"	"	"	"	399.	401.18	0.09	408.	129.
15.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	118.
16.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	251.
17.	"	"	"	"	750.	760.02	0.06	766.	238.
18.	"	"	"	"	885.	895.97	0.11	905.	102.
19.	"	"	"	"	968.	978.33	0.20	986.	125.
20.	"	"	"	"	1218.	1230.41	0.17	1237.	128.
21.	"	"	"	"	1513.	1525.20	0.13	1531.	58.
22.	"	"	"	"	1577.	1590.14	0.13	1596.	78.
23.	313.	323.41	0.07	332.	351.	361.47	0.05	369.	1326.
24.	"	"	"	"	399.	401.18	0.09	408.	1812.
25.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	767.
26.	"	"	"	"	750.	760.02	0.06	766.	2202.
27.	"	"	"	"	885.	895.97	0.11	905.	409.
28.	"	"	"	"	968.	978.33	0.20	986.	638.
29.	"	"	"	"	1218.	1230.41	0.17	1237.	1652.
30.	"	"	"	"	1513.	1525.20	0.13	1531.	133.
31.	"	"	"	"	1577.	1590.14	0.13	1596.	326.
32.	"	"	"	"	1596.	1605.13	0.15	1611.	580.
33.	"	"	"	"	1919.	1928.48	0.28	1930.	112.
34.	"	"	"	"	2160.	2165.63	0.30	2171.	88.
35.	345.	349.82	0.35	356.	251.	259.93	0.12	265.	108.
36.	"	"	"	"	351.	361.47	0.05	369.	520.
161.	1453.	1462.95	0.19	1471.	351.	361.47	0.05	369.	135.
162.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	117.
163.	"	"	"	"	750.	760.02	0.05	766.	517.
164.	1513.	1526.52	0.13	1534.	351.	361.47	0.05	369.	415.
165.	"	"	"	"	399.	401.18	0.09	408.	259.
166.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	1085.
167.	1533.	1541.42	0.13	1548.	351.	361.47	0.05	369.	762.
168.	"	"	"	"	686.	695.23	0.09	702.	110.

Таблица 2

Результаты аппроксимации части областей отобранных пиков /по критериям, указанным в §5/ и определения объемов

χ^2	ΔX	ΔY	ΔV	ΔE_x	ΔE_y
1.07	224.96	0.13	368.54	0.03	227.
0.83	225.24	0.13	516.37	0.14	369.
0.87	225.18	0.13	579.70	0.14	323.
0.70	225.28	0.13	921.71	0.06	402.
1.10	494.73	0.16	360.78	0.05	334.
1.13	294.50	0.16	684.77	0.09	1334.
1.32	261.46	0.07	360.82	0.05	3662.
1.96	321.82	0.07	400.00	0.09	11422.
1.28	321.44	0.07	664.56	0.09	2768.
2.67	321.73	0.07	709.37	0.07	15700.
1.03	321.74	0.07	896.34	0.11	1418.
1.18	321.69	0.07	977.67	0.40	5146.
2.78	321.72	0.07	1229.47	0.17	16938.
0.78	321.47	0.07	1644.29	0.13	668.
0.99	321.71	0.07	1809.44	0.13	2332.
1.67	321.82	0.07	1804.29	0.16	3396.
0.82	321.81	0.07	1924.18	0.48	770.
0.96	321.94	0.07	4165.47	0.30	857.
0.83	349.79	0.36	459.96	0.12	128.
0.87	349.88	0.36	679.59	0.14	731.
0.96	350.03	0.36	771.94	0.26	431.
0.81	360.21	0.36	1166.58	0.38	201.
2.00	360.52	0.19	361.47	0.06	11400.
1.29	369.83	0.19	664.56	0.09	376.
1.16	369.18	0.19	709.66	0.06	380.
1.34	369.30	0.19	666.31	0.11	1645.
0.87	369.29	0.19	977.67	0.20	606.
1.01	369.50	0.19	1609.20	0.13	1702.
0.88	370.72	0.44	516.47	0.10	160.
0.95	370.67	0.44	679.49	0.14	171.
0.77	474.38	0.16	259.91	0.12	429.
1.04	474.91	0.16	409.46	0.26	218.
1.00	474.68	0.16	578.19	0.14	219.
0.89	473.99	0.16	594.66	0.09	246.
0.72	474.32	0.16	921.90	0.06	664.
0.75	474.40	0.16	1114.91	0.19	502.
1.00	1461.04	0.19	360.87	0.05	486.
0.70	1480.94	0.19	694.51	0.09	376.
0.38	1481.19	0.19	759.38	0.08	4098.
1.42	1524.60	0.13	360.79	0.05	1790.
0.99	1526.06	0.13	400.57	0.09	1750.
1.77	1524.91	0.13	694.62	0.09	8508.
1.61	1539.90	0.13	360.86	0.06	4836.
0.90	1540.26	0.13	694.58	0.09	126.

ров γ - γ совпадений. В качестве иллюстрации приведем результаты обработки двумерного спектра, полученного на установке γ - γ совпадений в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ ^{5/} для распада смеси изотопов тербия / ^{148}Tb , ^{149}Tb , ^{150}Tb , ^{151}Tb , ^{152}Tb /. В *табл. 1* представлена часть результатов поиска возможных пиков γ - γ совпадений. В *табл. 2* приведены результаты, полученные после аппроксимации областей отобранных пиков и определения объемов. Для удобства использования информации о совпадениях эти результаты выводятся в виде *табл. 3*. В клетке *табл. 3*, соответствующей

Таблица 3

Результаты обработки всего спектра совпадений, представленные для удобства в виде матрицы. На пересечении строк и столбцов энергий - объемы /интенсивности/ соответствующих пиков совпадений, включая случайные

Э ₁	108.9	150.	165.	180.	187.	192.	251.5	270.	287.	344.	352.	388.	464.	479.	511.	537.	652.	616.	653.	662.
108.9				125			229		638						162					
150.			300							1428										
165.			334 3982		11280						2906 14953 1352			3039		18001 4.36	1790 4832			
180.			227						705											
187.				11422							447 1069 1362			775					1750	
192.								218												
251.5			358			160			167					562						
270.										445										
287.		623			731	171 219														
344.			1334					330							213					
352.				2787		375 246					1947 4724 5638			1960		501 376	8508 125			
388.				15765		980					4574 437 2968			1587		6612 4086				
388.					231															
444.									373											
464.				1417		1642					5834 3391			281						
479.	201							664												
486.																	248			
511.			5145		505				292		2838 2181 311			15353 247 811						
537.						502			157											
616.				201																
637.																	283			
652.				15838							365 6382			679						
773.											1022									
816.				668							357 4137			332						
853.				2331		1701					6808			672						
862.				5395										388						
1042.				769																
1176.				897																

данной паре энергий, записан объем пика совпадений /если совпадения не обнаружены то - пропуск/.

Из рассмотрения *табл. 3* видно, что полученные результаты включают в себя как информацию об истинных совпадениях, так и данные о случайных совпадениях /например, пики само-совпадений 165 кэВ - 165 кэВ, 352 кэВ - 352 кэВ, 388 кэВ - 388 кэВ/. Учету вклада случайных совпадений посвящен следующий параграф.

8. УЧЕТ СЛУЧАЙНЫХ СОВПАДЕНИЙ

Поскольку схема отбора совпадений имеет определенное разрешающее время τ , отличное от нуля, существует вероятность регистрации случайных совпадений. С увеличением активности источника количество случайных совпадений растет квадратично в отличие от линейного роста истинных совпадений. Если плотность потока событий по каждой из осей /или трактов/ имеет вид

$$p(x) = A_1 \exp\left[-\frac{(x-c_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] + b_1 x + d_1,$$

$$p(y) = A_2 \exp\left[-\frac{(y-c_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] + b_2 y + d_2,$$

то вероятность случайных совпадений будет равна:

$$R(x, y, \tau) = 2\tau p(x)p(y) = \{A_1 A_2 \exp\left[-\frac{(x-c_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-c_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] + A_1 \exp\left[-\frac{(x-c_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] (d_2 + b_2 y) + A_2 \exp\left[-\frac{(y-c_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] (d_1 + b_1 x) + (d_1 + b_1 x) \cdot (d_2 + b_2 y)\} \cdot 2\tau.$$

Из сравнения выражений /6/ и /9/ видно, что отличить по форме распределения истинных и случайных совпадений невоз-

можно. В то же время для интенсивных линий объем пика случайных совпадений, пропорциональный $2A_1A_2\tau$, может быть достаточно велик.

Для учета вклада случайных совпадений можно использовать два способа: первый способ применим, если в эксперименте регистрировались не только энергии пришедших γ -квантов, но и время, разделяющее эти события / γ - γ - t измерения/. В этом случае интегральный временной спектр имеет вид распределения, приведенного на рис. 4.

В точке T_0 временной интервал между приходом γ -квантов равен нулю /мгновенные совпадения/. Интервалы T_1-T_2 и T_3-T_4 выбираются так, что в них попадают в основном случайные совпадения. В интервал T_2-T_3 попадают как случайные, так и истинные совпадения. Введя при наборе спектров дополнительную сортировку по времени в окна T_1-T_2 и T_3-T_4 , можно получить спектр случайных совпадений, который при условии, что

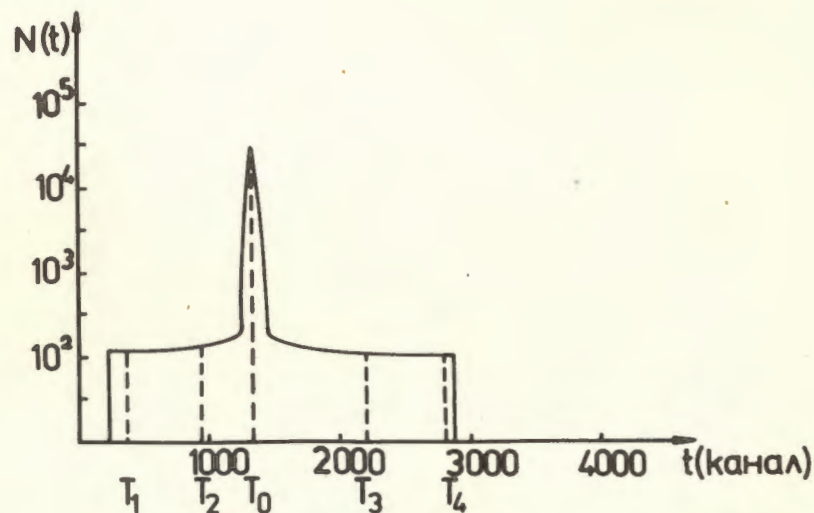


Рис. 4. Временной спектр задержанных совпадений. T_0 - центр кривой мгновенных совпадений. T_1-T_2 и T_3-T_4 - временные интервалы, выбранные для сортировки с целью получения фона случайных совпадений в рабочем интервале T_2-T_3 .

$T_2 - T_1 + T_4 - T_3 - T_3 - T_2$, позволит судить о количестве случайных совпадений в спектре, соответствующем окну $T_2 \div T_3$.

В табл. 3 и 4 приведены полученные таким образом данные о совпадениях в спектре изотопов Tб для окон по оси $t: T_2 \div T_3$ и $T_1 \div T_2 + T_3 \div T_4$ соответственно. Как видно из табл. 4, найденные объемы пиков случайных совпадений несколько меньше объемов случайных совпадений, присутствующих в исходном спектре /табл. 3/: сравним, например, самосовпадения 164 кэВ - 164 кэВ и 352 кэВ - 352 кэВ. Объяснить это можно изменением эффективности регистрации совпадений при увеличении временного интервала между событиями.

Избавиться от этого расхождения можно, выбрав ширину окон таким образом, чтобы число случайных совпадений в них было эквивалентным. В то же время можно заметить, что поскольку результаты отличаются на постоянный множитель Q, величину которого легко узнать, усреднив отношения объемов всех найденных пиков самосовпадений /табл. 3 и 4/, то данные могут быть скорректированы уже после обработки.

Второй способ учета случайных совпадений может быть применен в случае, если у нас нет данных о времени задержки между событиями. Из формулы /9/ видно, что интенсивность случайных совпадений определяется произведением $2\tau A_{E1} A_{E2}$. В том случае, если у нас имеются данные о совпадениях, которые, как мы полагаем, заведомо случайны /например, объемы пиков самосовпадений или объемы пиков совпадений для переходов, совпадения между которыми невозможны по схеме распада/, мы можем установить значения $\sqrt{2\tau A_E}$ для всех достаточно интенсивных линий. Например, для самосовпадений $\sqrt{2\tau A_{165\text{keV}}} = \sqrt{V_{165-165\text{keV}}} = 63$, $\sqrt{2\tau A_{352\text{keV}}} = \sqrt{V_{352-352\text{keV}}} = 44,6$. Тогда объем пика случайных совпадений $V_{165-352\text{keV}}$ /эти совпадения невозможны по схеме распада/ равен $V_{165-352\text{keV}} = 2\tau A_{165} \cdot A_{352} = 2710$, что хорошо согласуется с экспериментальными значениями 2906 и 2787. В том случае, если у нас имеется информация об относительных интенсивностях /или площадях пиков при отсутствии калибровки по эффективности/ линий, участвующих в совпадениях, теоретически достаточно знать объем одного пика случайных совпадений для того, чтобы получить всю матрицу случайных совпадений.

Таблица 4

Матрица случайных совпадений, полученная сортировкой событий по временным окнам, удаленным от пика мгновенных совпадений. Результат отнормирован на весь диапазон временного конвертора

E_1	108e5	150.	165.	180.	187.	192.	251.5	270.	287.	344.	352.	388.	466.
108.9													
150.			150.										
165.		211.	3305.		396				78	131	2197	1050	215
180.													
187.		450			106						279	179	
192.													
215.5													
270.													
287.													
344.													
352.		134	1865		297						1256	648	193
388.											630	352	86
395.													
444.													
464.				522								157	96
479.													
496.													
511.				296								126	132
587.					75								
616.													
637.													
652.												251	128
773.													
816.												170	95
853.												174	
862.													
1041.													
1176.													

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные проверки показали, что программа хорошо находит пики совпадений /практически так же, как оператор, работающий со световым карандашом/, может обрабатывать спектры в автоматическом режиме, обеспечивая хорошую точность результатов, зависящую только от статистической обеспеченности спектров, и обеспечивает сравнительно высокое быстродействие.

Полученные экспериментальные результаты по обработке спектров $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений изотопов тербия /табл. 3/ подтверждаются известными данными об их схемах распада, в частности схемой распада ^{149}Tb , приведенной в работе ^{6/}.

Время обработки в общем случае прямо пропорционально числу событий в анализируемом спектре и количеству пиков совпадений. Представленные выше результаты обработки спектра совпадений изотопов тербия размерностью 4096x4096x4096 каналов / $\gamma\text{-}\gamma\text{-}t$ измерения/, содержащего $2 \cdot 10^6$ событий и около 200 пиков совпадений, получены за два часа работы ЭВМ с быстродействием $3 \cdot 10^5$ событий в секунду и емкостью ОЗУ 1024 К байтов /ЕС-1040/. Следует сказать, что в зависимости от задачи емкость памяти, необходимая для работы программ, может быть существенно уменьшена. Можно ожидать, что данный комплекс программ найдет применение для экспрессной обработки спектров $\gamma\text{-}\gamma$ совпадений в лабораториях, располагающих мощными ЭВМ.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность коллективу измерительного центра Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ за постоянную помощь в работе, а также М.Гонуску за полезные советы и обсуждения и В.В.Кузнецову и З.Гонсу за участие в оценке и обсуждении результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуда Ф. и др. ОИЯИ, 10-4236, Дубна, 1968.
2. Гонусек М., Фромм В.Д. ОИЯИ, 10-1007, Дубна, 1976.

3. Гончарский А.В., Ягола А.Г., Леонов А.С. ЖВМФ, 1971, т.11, №5, с.1296-1301.
4. Кабина Л.П. и др. Препринт ЛИЯФ, №450, Л., 1978.
5. Гонусек М. и др. ОИЯИ, Р13-12422, Дубна, 1979.
6. Вылов Ц. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1972, т.36, №10, с.2124.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1979 года.