

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P6-88-100

B 294

Д.Венос, И.Адам*, В.Гнатович*, М.Гонусек*

**СИСТЕМА ПРОГРАММ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ,
РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА МНОГОДЕТЕКТОРНОЙ
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ (МУК)**

* Институт ядерной физики, Ржеж

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование многодетекторных установок является одним из направлений в развитии экспериментальной техники в области изучения структуры атомного ядра. В результате их применения накапливается большой объем данных, имеющих многомерный характер, которые надо регистрировать и обрабатывать.

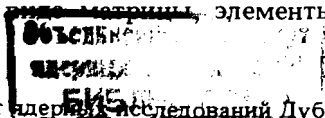
Многомерная корреляционная установка (МУК) предназначена для изучения пространственно-временных корреляций гамма-излучения короткоживущих радиоактивных изотопов в рамках программы ЯСНАПП^{1/}. В состав установки входит 7 Ge(Li)-детекторов, расположенных в одной плоскости равномерно по окружности, в центре которой находится источник гамма-излучения. Если свести все углы между детекторами к первому квадранту, то при вышеупомянутом расположении получается 3 разных корреляционных угла и каждый из них, благодаря симметрии в расположении детекторов, реализуется для 7 пар детекторов.

В ходе корреляционного эксперимента регистрируются мгновенные и задержанные совпадения гамма-квантов для всех пар детекторов, для данных корреляционных углов. Каждый акт совпадения представлен в виде последовательности 4 шестнадцатиразрядных слов, которые записываются в форме блоков (по 4096 слов) на магнитную ленту. В словах содержатся параметры совпадения: номер пары детекторов i и j ($i, j = 1, 2, \dots, 7$), временной интервал между совпадающими импульсами T_{ij} ($0 \div 2047$ каналов) и соответствующие две амплитуды импульсов A_i, A_j ($0 \div 4096$ каналов), определяющие энергию зарегистрированных гамма-квантов. По сравнению с классическим трехмерным амплитудно-временным экспериментом^{2/} в этом случае добавляется еще один параметр — число пары детекторов.

Для определения относительных эффективностей детекторов на установке измеряются одиночные гамма-спектры длиной 4096 каналов, которые тоже записываются на магнитную ленту.

2. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИИ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ЕЕ ОБРАБОТКИ

Всю информацию, расположенную последовательно на магнитной ленте, можно представить путем суммирования совпадений с одинаковыми параметрами в виде матрицы, элементы которой обозначают



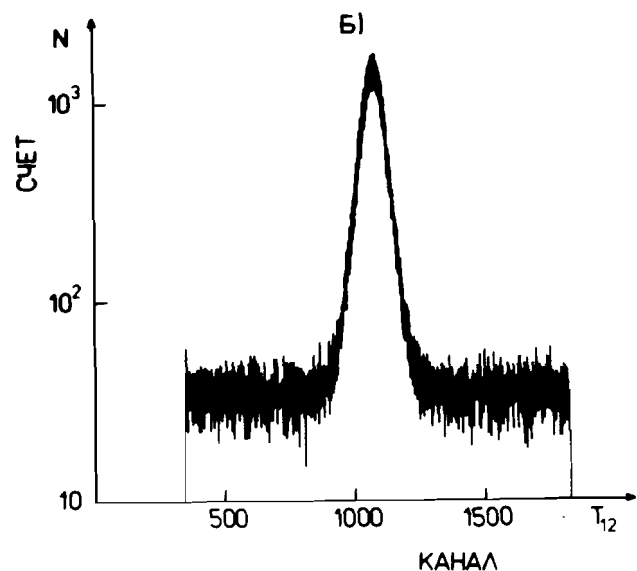
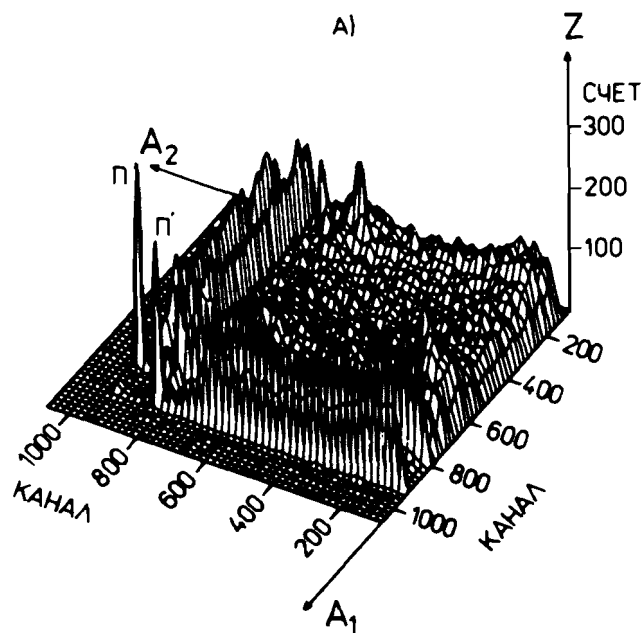


Рис.1. А) – двухмерный спектр гамма-гамма совпадений источника ^{60}Co для пары детекторов 1,2 в аксонометрическом изображении. Б) – интегральная временная кривая, соответствующая А.

число совпадений. Эти элементы обозначим $C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j)$. Если игнорировать T_{ij} , т.е. провести суммирование

$$C'(i, j, A_i, A_j) = \sum_{T_{ij}=0}^{2047} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j),$$

можно спектр совпадений для пары детекторов i, j (матрицу C') изобразить в трехмерном пространстве. Рис.1А показывает пример такого спектра в аксонометрическом изображении. Рисунок был получен в эксперименте с источником ^{60}Co , где наблюдается только один каскад гамма-переходов с энергиями 1173 и 1333 кэВ. По оси Z отложено число совпадений импульсов с данными A_1, A_2 . Путем суммирования чисел совпадений в матрице C' в направлении A_i или A_j получается два амплитудных интегральных спектра:

$$\text{AIS}(i, j, A_j) = \sum_{A_i=0}^{4095} C'(i, j, A_i, A_j)$$

или

$$\text{AIS}(i, j, A_i) = \sum_{A_j=0}^{4095} C'(i, j, A_i, A_j)$$

с осями отклика A_j или A_i соответственно. Если провести в матрице C суммирование по A_i, A_j , т.е.

$$\text{TIS}(i, j, T_{ij}) = \sum_{A_i, A_j=0}^{4095} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j),$$

то получается временной интегральный спектр (см. пример на рис.1Б). В этом спектре выделяется центральная часть в форме линии Гаусса, представляющая мгновенные совпадения, которая накладывается на подложку случайных совпадений*.

*Экспериментальная аппаратура настроена таким образом, что максимум временной кривой от каждой пары детекторов находится на одном и том же номере канала.

Обработка измерения заключается в следующем:

а) определение относительных эффективностей детекторов с помощью анализа простых гамма-спектров;

б) сортировка интегральных спектров совпадений и определение окон на осях амплитуд для линий гамма-переходов, входящих в заданные каскады;

в) сортировка временных спектров для заданных каскадов и определение окон на временной кривой;

г) определение числа истинных совпадений, т.е. объемов пиков, которые соответствуют заданным каскадам (на рис.1А эти пики обозначены буквами П' и П) для всех пар детекторов. После внесения коррекций на относительную эффективность регистрации гамма-излучения в детекторах производится расчет значений коэффициентов угловой корреляции A_{22} и A_{44} .

3. ОБЩАЯ СТРУКТУРА ПРОГРАММ

В ходе методических разработок установки была создана система программ для обработки корреляционного опыта. Все программы написаны на языке Фортран и внедрены на ЭВМ ЕС-1040 (объем оперативной памяти 1 Мбайт) измерительного центра ЛЯП ОИЯИ.

Форма записи экспериментальных данных на магнитных лентах не является пригодной для чтения этих лент программой на Фортране. Эта проблема была решена при использовании библиотечной подпрограммы IOPROG^{3/}.

Общей чертой всех программ является то, что они в начале входных данных требуют заголовка длиной не больше 68 символов. В результате обработки экспериментальных данных некоторыми программами получается большое число различных спектров, которые надо хранить для дальнейшей обработки. Эти спектры вместе с одиночными спектрами записываются с помощью написанной нами процедуры SPETA в едином формате на рабочую магнитную ленту — РМЛ (процедура SPETA позволяет проводить также чтение спектров из РМЛ). Каждому спектру на этой ленте предшествует метка, которая служит идентификатором спектра. Эта метка представляет собой массив размерностью 46 слов, используемых по таблице.

В систему программ входят:

а) вспомогательные программы:

- OSET — перепись одиночных спектров на РМЛ,
- LLT — распечатка меток группы смежных спектров с РМЛ,
- LST — поканальная распечатка содержимого заданных спектров с РМЛ,
- SACE — расчет поправок на телесные углы Q_{22} , Q_{44} по работе⁴;

Слово	Содержание слова
1	— порядковый номер спектра на РМЛ
2-3	— номер начального и конечного каналов спектра
4-10	— служебные характеристики спектра в зависимости от программы, записавшей спектр
11-12	— название программы, которая записала спектр
13-29	— копия заголовка из записывающей программы
30-46	— копия метки из первой ленты с экспериментальными данными

б) основные программы:

- LEV — обработка одиночных спектров (определение положений, энергий и площадей гамма-линий),
- PS — вычерчивание одномерных спектров на графопостроителе "DIGIGRAF",
- SIS — сортировка интегральных спектров совпадений,
- STS — сортировка временных спектров совпадений для заданных каскадов гамма-переходов,
- SADC — сортировка чисел совпадений для заданных каскадов (т.е. объемы пиков совпадений), внесение поправок в эти числа и расчет коэффициентов угловой корреляции.

Рис.2 показывает взаимоотношение между программами и магнитными лентами с данными.

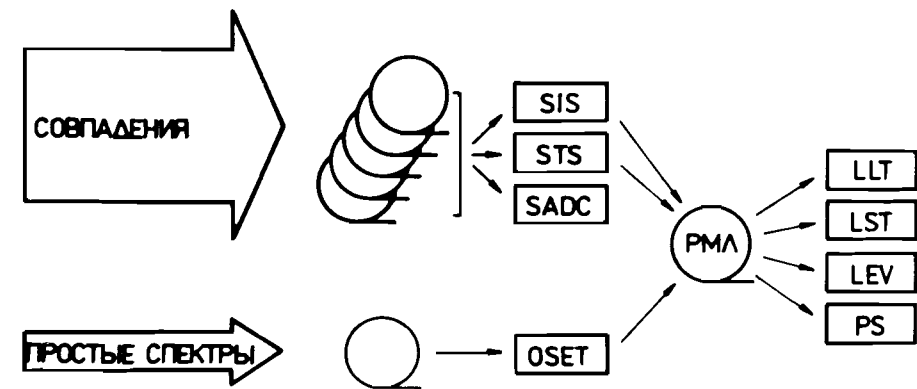


Рис.2. Взаимоотношение между программами и данными на магнитных лентах.

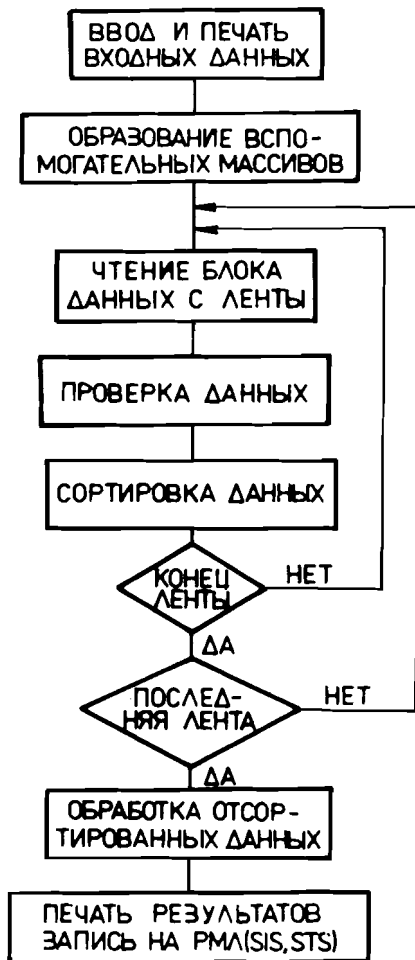


Рис.3. Общая блок-схема программ сортировки SIS, STS, SADC.

Программы SIS, STS, SADC имеют прежде всего сортирующий характер, т.е. в зависимости от заложенного в них алгоритма и входных данных выбирают из совокупности совпадений, записанных на ленте, те случаи, которые подлежат сортировке, и формируют их в спектры (SIS и STS) или в числа совпадений (SADC). Программы, аналогичные SIS и STS, описаны в работе ^{5/}, но только для обработки информации с двухдетекторных установок. Сортирующие программы имеют общие черты, что позволяет их описать общей блок-схемой (см. рис.3). После ввода входных данных формируется содержимое вспомогательных массивов. Они используются в ходе сортировки для определения принадлежности данного случая совпадения к сортируемому спектру (SIS, STS) или к числу совпадений (SADC) по методу индексации. Применение этого метода и хранение отсортированной информации в оперативной памяти ЭВМ сокращает время обработки ^{2/}. Далее в основу программ входит проверка данных и сортировка. При проверке данных контроли-

руется структура информации для каждого случая совпадения. Программы SIS и STS могут обрабатывать информацию, полученную с 2 ÷ 7, и программа SADC с 3 ÷ 7 детекторами в составе установки. Такой подход позволяет получать результаты даже в случае эксперимента с неполным комплектом детекторов.

4. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОГРАММ

LEV-программа проводит автоматическую обработку заданных гамма-спектров, которые вводятся из РМЛ. Поиск линий проводится по методу обобщенной второй производной ^{6/}. Чувствительность процедуры выбирается такой, чтобы можно было найти все нужные линии.

После нахождения приближенных позиций линий определяются участки спектра, содержащие одиночные линии или мультиплеты. Эти участки программа обрабатывает при использовании линейризованного метода наименьших квадратов с затуханием для точного определения положений, площадей и полуширин линий. Предполагается линейный ход комптоновского фона и описание одиночной линии с помощью кривой Гаусса. После обработки участка анализируется величина

$$Res_{i \max} = \text{MAX}_{n \leq i \leq k} (N_i - N_i^{\text{расч}}) / \sqrt{N_i},$$

где N_i — число импульсов в канале i ; $N_i^{\text{расч}}$ — вычисленная величина содержания i -го канала; n, k — начальный и конечный каналы участка; $i \max$ — значение канала, для которого правая сторона уравнения достигает максимальной величины. Если $Res_{i \max}$ окажется больше заданного значения (обычно оно выбирается равным 3,0), то обработка участка повторяется с добавлением линии в канале $i \max$.

PS — графическая программа, которая для заданных спектров из РМЛ готовит файлы с графическими данными и записывает их на магнитную ленту. Вычерчивание спектров происходит на графопостроителе DIGIGRAF в автономном режиме, т.е. без связи с ЭВМ. Для каждого спектра задается участок, который нужно нарисовать, тип масштаба (линейный, логарифмический, корень квадратный из двух), масштаб и шаг в оси каналов.

SIS — эта программа может работать в двух вариантах. Результатом первого варианта являются все возможные интегральные спектры в полной аналогии со случаем двух детекторов. Если в составе установки 7 детекторов, то получается 42 амплитудных и 21 временных спектров, что представляет довольно большой объем информации для дальнейшего анализа. Помимо того, если используется полный диапазон амплитуд и времен (т.е. 0 ÷ 4095 и 0 ÷ 2047 каналов соответственно), то не хватает оперативной памяти ЭВМ для одновременного хранения этих спектров. Поэтому более часто используется второй вариант, при котором получается только свертка интегральных амплитудных спектров (AIS'), максимально их семь

$$AIS'(i, A_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^7 AIS(i, j, A_j) \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, 7.$$

Во всех суммируемых интегральных спектрах положение пиков одинаково, хотя несколько различаются их интенсивность и ход комптоновского фона. При этом происходит сжатие информации, но для определения окон такой подход вполне удовлетворителен. Временные спектры получаются по-прежнему.

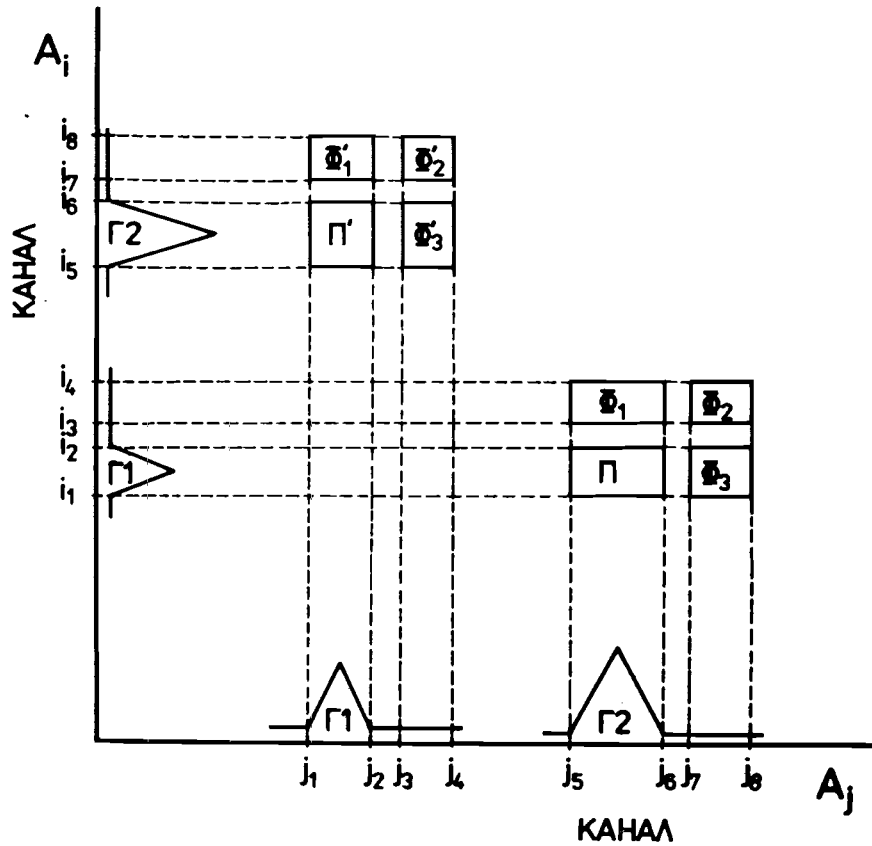


Рис.4. Графическое изображение окон на паре детекторов i, j для сортировки дифференциальных временных спектров каскада гамма-квантов Г1-Г2 (A_i, A_j — оси амплитуд); Π — двумерные окна, где присутствуют обе линии; Φ — двумерные окна, где хотя бы одна из линий не присутствует; $i_1, i_2; i_3, i_4 \dots$ и $j_1, j_2; j_3, j_4 \dots$ — границы окон в каналах на осях A_i и A_j соответственно).

Интегральные спектры печатаются при помощи быстропечатающего устройства, и их также можно записать на РМЛ.

STS сортирует по заданным окнам на линиях и на фоне за этими линиями, а также для заданных каскадов для каждой пары детекторов дифференциальные временные спектры в соответствии со следующим определением (см.рис.4):

$$DTS^{\Pi}(i, j, T_{ij}) = \sum_{A_i=i_1}^{i_2} \sum_{A_j=j_5}^{j_6} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j),$$

$$DTS^{\Phi_1}(i, j, T_{ij}) = \sum_{A_i=i_3}^{i_4} \sum_{A_j=j_5}^{j_8} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j),$$

$$DTS^{\Phi_2}(i, j, T_{ij}) = \sum_{A_i=i_3}^{i_4} \sum_{A_j=j_7}^{j_8} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j),$$

$$DTS^{\Phi_3}(i, j, T_{ij}) = \sum_{A_i=i_1}^{i_2} \sum_{A_j=j_7}^{j_8} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j).$$

Аналогичные выражения имеют место для второго пика совпадений, т.е. тогда, когда гамма-кванты Г1 и Г2 регистрируются в детекторах j и i соответственно. После завершения сортировки фоновые временные спектры умножаются на нужный вес, и с подходящим знаком суммируются, в результате чего получается экстраполированный фоновый спектр (DTS^{Φ}), который следует ожидать в области совпадений обеих линий в предположении неменяющегося хода комптоновского распределения в рассматриваемой области линий, т.е.

$$DTS^{\Phi} = \frac{i_2 - i_1}{i_4 - i_3} DTS^{\Phi_1} - \frac{i_2 - i_1}{i_4 - i_3} \frac{j_6 - j_5}{j_8 - j_7} DTS^{\Phi_2} + \frac{j_6 - j_5}{j_8 - j_7} DTS^{\Phi_3}.$$

$DTS^{\Phi'}$ получается аналогичным образом. Этот подход является достаточным для оценки качества временных кривых и позволяет подходящим образом ввести окна на временной оси.

Чтобы поместить в памяти все сортируемые спектры (для одного каскада сортируется 8×21 спектров), во время сортировки в зависимости от количества заданных каскадов проводится сжатие этих спектров. Если фактор сжатия равен K , то новые спектры определяются по формуле:

$$DTS(i, j, T'_{ij}) = \sum_{T_{ij}=\alpha}^{\beta} DTS(i, j, T_{ij}),$$

где

$$\alpha = 1 + K \times (T'_{ij} - 1), \quad \beta = K \times T'_{ij}.$$

Сжатый спектр имеет $2048/k$ каналов.

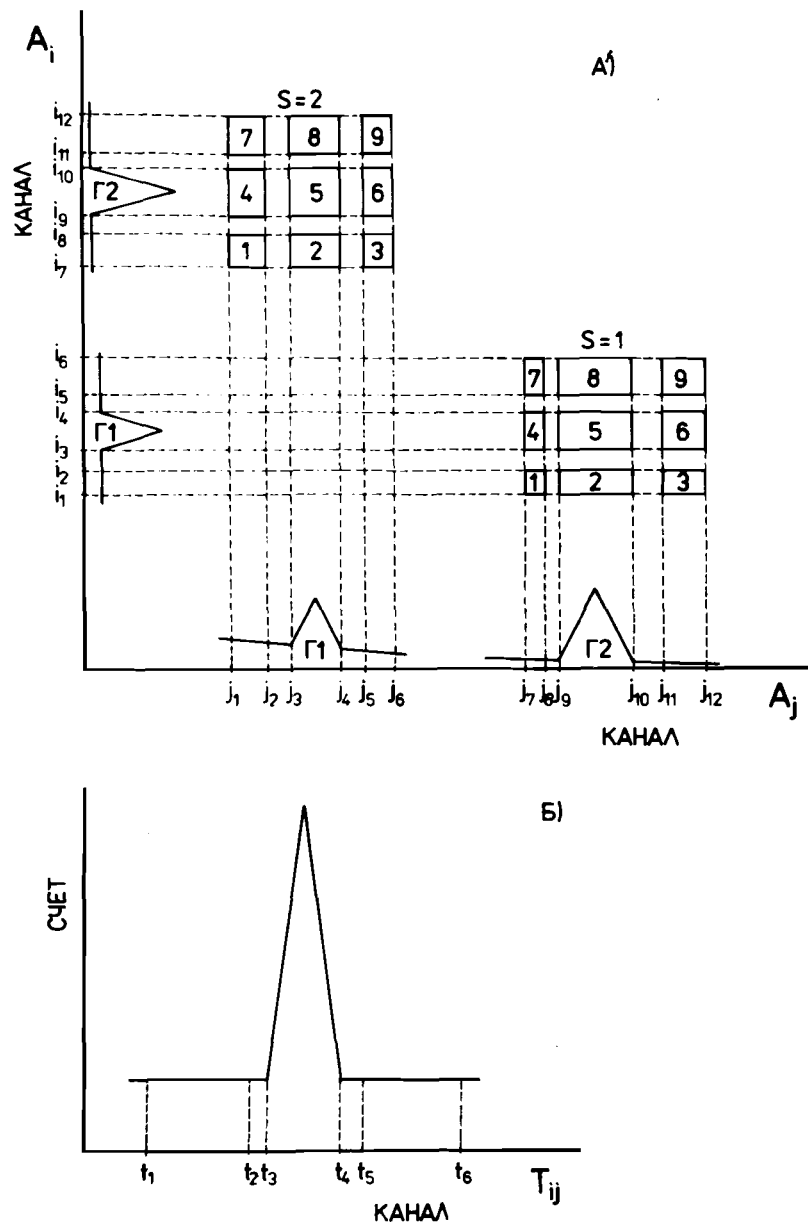


Рис.5. Графическое изображение окон для сортировки чисел совпадений каскада Г1-Г2 на паре детекторов i, j на осях амплитуд – А) и на временной оси – Б) ($i_1, i_2; i_3, i_4 \dots i_1, j_2; j_3, j_4 \dots$ и $t_1, t_2; t_3, t_4; t_5, t_6$ – границы окон в каналах на осях A_i, A_j и T_{ij} соответственно).

Спектры $DTS_{\Pi}, DTS_{\Phi}, DTS_{\Pi'}, DTS_{\Phi'}$ выводятся на печать, их также можно записать на ПМЛ.

SADC — для определения числа истинных совпадений гамма-квантов надо ввести помимо окон на линиях и фоне на осях амплитуд также окна на соответствующей временной кривой. На рис.5Б изображены эти окна: $t_1 \div t_2$ и $t_5 \div t_6$ в районе случайных совпадений и $t_3 \div t_4$ — в области случайных и истинных совпадений. Программа сортирует для заданных каскадов и всех пар детекторов числа истинных и случайных (окно $t_3 \div t_4$), а также случайных (окна $t_1 \div t_2 + t_5 \div t_6$) совпадений по следующим формулам (см.рис.5):

$$TA^s(i, j, \gamma) = \sum_{A_i = i_k}^{i_{k+1}} \sum_{A_j = j_l}^{j_{l+1}} \sum_{T_{ij} = t_3}^{t_4} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j)$$

и

$$A^s(i, j, \gamma) = \sum_{A_i = i_k}^{i_{k+1}} \sum_{A_j = j_l}^{j_{l+1}} \left[\sum_{T_{ij} = t_1}^{t_2} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j) + \sum_{T_{ij} = t_5}^{t_6} C(i, j, T_{ij}, A_i, A_j) \right]$$

соответственно. Для комбинаций $k = 1, 3, 5$ и $l = 7, 9, 11$ получаем случай, когда гамма-квант Г1 зарегистрирован в детекторе i , Г2 — в детекторе j ($s = 1$). Обратный случай $s = 2$ описывают индексы $k = 7, 9, 11$ и $l = 1, 3, 5$. Индекс $\gamma = 1, 2, \dots$ или 9 в зависимости от k и l (см.рис.5А). После завершения сортировки вычисляется число совпадений гамма-переходов в предположении линейного хода комптоновского распределения с учетом размера и положения окон (переменные i, j и индекс s в выражениях $TA^s(i, j, \gamma), A^s(i, j, \gamma)$ для простоты опущены)

$$TA_0^s(i, j) = TA(5) - TA(4)F_1(j) - TA(6)F_2(j) - [TA(2) - TA(1)F_1(j) - TA(3)F_2(j)] F_1(i) - [TA(8) - TA(7)F_1(j) - TA(9)F_2(j)] F_2(i).$$

и

$$A_0^s(i, j) = A(5) - A(4)F_1(j) - A(6)F_2(j) - [A(2) - A(1)F_1(j) - A(3)F_2(j)] F_1(i) -$$

$$-[A(8) - A(7) F_1(j) - A(9) F_2(j)] F_2(i),$$

где

$$F_1(j) = \frac{j_{10} - j_9 + 1}{j_8 - j_7 + 1} (1 - F),$$

$$F_2(j) = \frac{j_{10} - j_9 + 1}{j_{12} - j_{11} + 1} F,$$

$$F = \frac{j_9 + j_{10} - j_7 - j_8}{j_{11} + j_{12} - j_7 - j_8},$$

$$F_1(i) = \frac{i_4 - i_3 + 1}{i_2 - i_1 + 1} (1 - F'),$$

$$F_2(i) = \frac{i_4 - i_3 + 1}{i_6 - i_5 + 1} F'$$

$$F' = \frac{i_4 + i_3 - i_1 - i_2}{i_6 + i_5 - i_2 - i_1}.$$

Число истинных совпадений получается по формуле

$$T^s(i, j) = TA_0^s(i, j) - A_0^s(i, j) \frac{t_4 - t_3 + 1}{t_2 - t_1 + t_6 - t_5 + 2}.$$

Погрешности истинных совпадений $T^s(i, j)$ определяются при условии, что погрешности величин $TA^s(i, j, r)$ и $A^s(i, j, r)$ даются выражениями $\sqrt{TA^s(i, j, r)}$ и $\sqrt{A^s(i, j, r)}$. Интенсивности совпадений определены соотношениями

$$I^1(i, j) = \frac{T^1(i, j)}{\epsilon(\Gamma_1, i) \epsilon(\Gamma_2, j)}, \quad I^2(i, j) = \frac{T^2(i, j)}{\epsilon(\Gamma_2, i) \epsilon(\Gamma_1, j)},$$

где $\epsilon(\Gamma_1, i)$, $\epsilon(\Gamma_2, j)$, $\epsilon(\Gamma_2, i)$ и $\epsilon(\Gamma_1, j)$ представляют собой относительные эффективности регистрации гамма-квантов Γ_1 и Γ_2 в детекторах i и j . Таким образом, для каждого корреляционного угла получается 14 интенсивностей, из которых определяется взвешенное среднее $I(\theta_j)$, соответствующие погрешности разброса и весовая погрешность⁷⁾. Конечным шагом является расчет коэффициентов углового распределения A_{22} , A_{44} , погрешностей этих величин и статистической корреляции между A_{22} и A_{44} путем решения системы уравнений

$$I(\theta_1) = A_0 [1 + A_{22} G_{22} P_2(\cos \theta_1) + A_{44} G_{44} P_4(\cos \theta_1)],$$

где G_{22} , G_{44} — поправки на телесные углы; $P_2(\cos \theta_1)$, $P_4(\cos \theta_1)$ — полиномы Лежандра; θ_1 — корреляционный угол ($i = 1, 2, 3$); A_0 — нормировочный множитель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи описанной системы программ в течение двух лет обработано около 10 корреляционных опытов. Результаты некоторых опытов опубликованы в работах^{1, 8)}. Система оказалась удобной для обработки такого типа экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абросимов В.Н. и др. ОИЯИ, Р6-86-320, Дубна, 1986.
2. Гонусек М. и др. ОИЯИ, 13-12422, Дубна, 1979.
3. Евсиков И.И., Иванченко И.М. ОИЯИ, Р10-87-52, Дубна, 1987.
4. Crane K.S. Nucl. Instr. and Meth., 1972, 98, p.205.
5. Волков Н.Г. ОИЯИ, 10-81-159, Дубна, 1981.
6. Routti J.T., Prussin S.G. Nucl. Instr. and Meth., 1969, 72, p.125.
7. Джелепов Б.С. Свойства атомных ядер. Л.: Наука, 1974, вып. 17.
8. Абросимов В.Н. и др. Тезисы докладов XXXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Юрмала, 14-17 апреля 1987 г. Л.: Наука, 1987, с.539.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 февраля 1988 года.