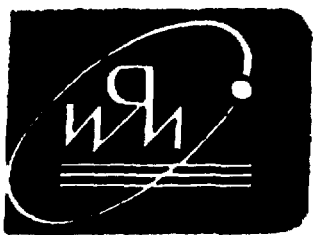


2000000001

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР



**ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

КИЧАІ -- 89.43

Препринт КИЯИ-89-43

Ю.О.Васильев, А.Ю.Гасвенко, С.Б.Кумшаев

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ  
СПЕКТРОВ**

**КИЕВ**

**АКАДЕМИИ НАУК УССР**

**Ю.О.Васильев, А.Ю.Гаврилюк, С.Б.Куликов**

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ**

**Киев. Институт ядерных исследований АН УССР. 1989**

Ю.О.Васильев, А.Ю.Гавенко, С.Б.Кумшаев

## ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Предложен метод интерактивной обработки экспериментальных данных, представленных в виде двумерной матрицы. Описаны наиболее существенные особенности данного метода и соответствующая ФОРТРАН-программа. Приведены результаты обработки тестовых примеров и реальных спектров.

The method of interactive processing of experimental data presented in two-dimensional matrix form is proposed. The most essential features of the given method and corresponding FORTRAN-program are described. The results of processing of the test examples and practical spectra are given.

Yu.O.Vasilyev, A.Yu.Gavenko, S.B.Kumshaev

## INTERACTIVE PROCESSING OF TWO-DIMENSIONAL SPECTRA

## ВВЕДЕНИЕ

Практически в каждой современной работе в области ядерной физики средних и низких энергий необходимо производить обработку экспериментальных данных, представленных двумерными гистограммами. Особую популярность получили  $\Delta E \cdot E$ -методы идентификации сорта частиц [1], в которых используется тот факт, что удельные ионизационные потери энергии заряженных частиц являются функцией  $Z$  и  $M$ , где  $Z$ —заряд частицы,  $M$ —ее масса.

В этих методах события, соответствующие попаданию частицы в  $\Delta E$ - и  $E$ -детекторы, обычно представляются в координатах:  $X=E$ ,  $Y=\Delta E$  или  $X=E$ ,  $Y=k \cdot \Delta E \cdot E$  (двумерных матрицах—гистограммах) и располагаются в локусах, соответствующих данным  $Z$  и  $M$ . Если для легких частиц —  $p$ ,  $d$ ,  $T$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  $\alpha$  — разделение частиц по массам в локусе с данными  $Z$  не представляет особой сложности, то в ядерных реакциях с тяжелыми ионами аналогичная задача невыполнима без привлечения средств обработки двумерных гистограмм на ЭВМ или без значительного усложнения экспериментальной установки (применение комбинированных методов идентификации —  $\Delta E \cdot E$  плюс идентификация по времени пролета). Кроме этих технических трудностей существует целый класс корреляционных экспериментов, в котором аналогичные задачи выделения перекрывающихся локусов в двумерных спектрах вытекают из необходимости получения экспериментальной спектрометрической информации о квантовых характеристиках возбужденных состояний ядер.

Так, например, если средняя ширина урсенов  $\langle \Gamma \rangle$  больше среднего

расстояния  $\langle D \rangle$  между соседними уровнями (что сравнимо для больших энергий возбуждения ядра), в энергетическом спектре частиц, испускаемых из этой области возбуждения, будут наблюдаться перекрытые резонансы при любом энергетическом разрешении экспериментальной установки.

В последнее время интенсивно изучается распад ядерных резонансов на 3 и более фрагментов [2,3]. Для получения экспериментальной информации о таких процессах необходимо проводить корреляционные эксперименты с регистрацией 2-х и более частиц, совпадающих по времени попадания в детекторы. Данные, полученные в таком эксперименте, обычно представляются в виде двумерных гистограмм в координатах:  $X=E_2$ ,  $Y=E_1$ , где  $E_1, E_2$  - энергии регистрируемых частиц. Если число частиц в выходном канале реакции больше 3, экспериментальная информация располагается внутри области, граница которой определяется из законов сохранения энергии и импульса.

Если такую реакцию схематически представить в виде



где

$B, T$  - излетающая частица и ядро-мишень,

1,2,3,4 - частицы выходного канала реакции,

$R^{*}_{234}$  - ядро в возбужденном состоянии,

то в двумерном спектре совпадения частиц 1 - 2 будут наблюдаться области, соответствующие возбужденным состояниям ядра  $R^{*}_{234}$ . Для сравнения экспериментальных данных с теоретической моделью необходимо выделить в данном двумерном спектре события, соответствующие определенному возбужденному состоянию ядра  $R^{*}_{234}$ , что приводит нас к задаче, аналогичной выделению спектра одного изотопа из локуса с данным  $Z$ . Один из методов решения задач, подобных этим, представляется в данной работе.

### 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СПЕКТРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Для регистрации ионизирующих частиц удаляются ионизационные потери рассчитываются по приближенной формуле:

$$\frac{dE}{dX} = kZ^2/V^2, \quad (1.1)$$

где  $k$  - константа,  $Z, V$  - заряд и скорость регистрируемой частицы.

Учитывая (1.1), для произведения  $(dE/dX) \cdot E$  можно записать

$$(dE/dX) \cdot E = kZ^2/2, \quad (1.2)$$

где  $M$  - масса регистрируемой частицы.

Уравнение (1.2) определяет на плоскости  $X-E$ ,  $Y=dE/dX$  семейство

кривых, вдоль которых распределены события, соответствующие регистрации частиц с одинаковым значением  $Z$  и  $N$ . Если удельные ионизационные потери энергии частиц в  $\Delta E$ -детекторе не слишком велики (именно эта ситуация и рассматривается в данной работе), задача выделения сорта частиц с данной массой  $N$  при одинаковых  $Z$ , сводится к

- 1) выделению локуса с данным  $Z$  в двумерном спектре в  $\Delta E, E$  координатах;
- 2) разбиению локуса на  $X$ -сечения;
- 3) выделению в каждом из этих сечений частиц с данной массой путем аппроксимации их суммой гауссианов.

При этом, если двумерный спектр представлен в координатах  $\Delta E, E$ , для каждого  $X$ -сечения положения центроидов гауссианов будут различны. Число параметров в аппроксимирующей функции равно  $2 \cdot (N+1) + 1$ , где  $N$  - число изотопов с данным  $Z$ . Нахождение этих параметров является нелинейной задачей, следовательно, требует значительных временных затрат, поскольку ее нужно решать для каждого  $X$ -сечения. Кроме того, ошибки определения нелинейных параметров могут быть так велики, что обесценивается конечный результат. Существует интересный способ обойти эти трудности и резко сократить время обработки спектра. Если произвести аналогичную сортировку в координатах  $X-E$ :  $Y = E - dE/dX$  локуса с данными  $Z$ , события, соответствующие регистрации частиц с различными массами будут расположены в соответствии с (1.2) вдоль линий, параллельных оси  $X$ . Другими словами, это означает, что положения центроидов гауссианов не будут изменяться в каждом  $X$ -сечении; следовательно, число варьируемых параметров уменьшится до  $N+3$ . Причем 3 параметра  $X_1, \sigma$  и  $\Delta X$  (положение, дисперсия и расстояние между центроидами гауссианов) можно определить с помощью аппроксимации проекции на ось  $Y$  двумерной матрицы. Таким образом, задача свелась к аппроксимации  $X$ -сечений, в каждом из которых необходимо найти  $N$  переменных (интенсивностей), что является линейной задачей и не требует практически временных затрат.

Разработанная в ИЯИ АН УССР интерактивная система обработки ядерно-физических данных "ВЕГА" удовлетворяет всем необходимым требованиям к формированию двумерной матрицы, являющейся входной информацией для задачи идентификации изотопного состава спектра заряженных частиц.

## 2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ MLOC

Программа MLOC предназначена для разделения изотопов в локусе двумерного спектра, построения гистограмм зависимости сечения реак-

ции  $d^2\epsilon/d\epsilon dE$  от  $E$  для каждого изотопа и отображения результатов расчета на графическом цветном дисплее.

Входной информацией для программы HLDC является:

- размеры исходного двумерного спектра  $IDIMX, IDIMY$ ;
- границы выделенного локуса  $XMIN, XMAX, YMIN, YMAX$ ;
- $NX$  одномерных спектров  $(IX=XMAX-XMIN+1)$ , соответствующих сечениям локуса по координате  $X, X=XMIN, XMIN+1, \dots, XMAX$ ;
- одномерный спектр, представляющий собой проекцию выделенного локуса на ось  $Y$ .

Обработка локуса включает в себя три основных этапа:

1. Обработка проекции на ось  $Y$ .
2. Обработка всех  $X$ -сечений.
3. Построение результирующих гистограмм.

### 2.1. ОБРАБОТКА СПЕКТРА-ПРОЕКЦИИ НА ОСЬ $Y$

Задачей первого этапа является нахождение положения центров пиков  $Y_I, I=1, \dots, N$ , для заданного числа изотопов  $N$  и параметра  $\delta$ , характеризующего полуширину пиков. Для нахождения искомого параметра решается задача аппроксимации одномерного спектра выражением вида

$$F(Y) = \sum_{I=1}^N (S_I / \delta \sqrt{2\pi}) \cdot \exp[-(Y - Y_I)^2 / 2\delta^2], \quad (2.1)$$

Исходя из физического смысла задачи, предполагается, что:

- 1)  $\delta$  одинаковы для всех пиков;
- 2) центры пиков лежат на одинаковом расстоянии друг от друга, т.е.

$$Y_I = Y_1 + (I-1) \cdot \Delta Y, \quad I=1, \dots, N. \quad (2.2)$$

Таким образом, аппроксимирующая функция (2.1) зависит от  $N+3$  неизвестных параметров

$$S_1, S_2, \dots, S_N, Y_1, \Delta Y, \delta,$$

значения которых рассчитываются по методу Ньютона с укороченной второй производной [4], реализованному в программе FUMILI [5].

Программа FUMILI требует задания начальных приближений искомого параметра. Для получения начальных приближений положения пиков  $Y_I, I=1, \dots, N$  в исходном спектре ищутся участки с отрицательным значением второй производной (разности второго порядка). Для каждого такого участка, характеризующегося границами  $Y_L$  и  $Y_R$ , находят положение центра тяжести

$$Y_I = \frac{\sum_{Y=Y_L}^{Y_R} N(Y) \cdot Y}{\sum_{Y=Y_L}^{Y_R} N(Y)}, \quad (2.3)$$

где  $N(Y)$  — число отсчетов в канале  $Y$ . Значение  $Y_1$  принимается за начальное приближение положения пика.

Далее, в соответствии с принятой постановкой задачи необходимо представить найденные значения  $Y_1$ ,  $I=1, \dots, N$  в виде (2.2). С этой целью ищут минимум функционала

$$\Phi = \sum_{I=1}^N [Y_I - Y_1 - (I-1) \cdot \Delta Y]^2 \rightarrow \min, \quad (2.4)$$

т.е. вычисляется приближение  $Y_1$  и  $\Delta Y$  по методу наименьших квадратов.

Полученные значения  $Y_1$ ,  $\Delta Y$ ,  $\beta$  используются на втором этапе для обработки  $X$ -сечений локуса. Возможность нахождения этих параметров по спектру — проекции на ось  $Y$ , обладающему лучшей статистикой, чем спектры отдельных сечений, обеспечивается предварительной сортировкой исходного двумерного спектра.

## 2.2. ОБРАБОТКА $X$ -СЕЧЕНИЙ

На втором этапе последовательно обрабатываются все  $X$ -сечения исходного локуса и находятся для каждого  $X$  площади пиков  $S(X)$ ,  $I=1, \dots, N$ . Параметры  $Y_1$ ,  $\Delta Y$ ,  $\beta$  считаются теперь фиксированными, поэтому в выражении (2.1) для аппроксимирующей функции остается  $N$  неизвестных параметров, входящих в него линейно. Это обстоятельство позволяет существенно сократить время обработки сечений программой FUMILI.

Результатом расчета являются  $N$  одномерных распределений  $S_I(X)$ ,  $X=1, \dots, IDIMX$ , для  $I=1, \dots, N$ , соответствующих разделяемым источникам.

## 2.3. ОТОБРАЖЕНИЕ КОНЕЧНЫХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов отображаются в графическом виде на цветном телевизионном дисплее [6] с использованием пакета графических подпрограмм PASTR [7], являющегося реализацией международного стандарта GKS.

Поле отображения дисплея разделено на три зоны, как показано на рис. 2. В нижнем углу выводится исходный спектр проекции на ось  $Y$  (экспериментальные значения, интервалы ошибок), график построенной аппроксимирующей функции и  $N$  ее составляющих. В левом верхнем углу последовательно по мере расчета изображаются спектры  $X$ -сечений. В правой части экрана выводятся в виде гистограмм  $N$  результирующих одномерных распределений.

Существует возможность получения твердой копии полученного изображения на модифицированном для вывода графики мозаичном печатающем ус-



## 2.4. УПРАВЛЕНИЕ ХОДОМ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Результаты расчета по программе NLOS в значительной степени зависят от адекватности предварительной сортировки, степени перекрытия соседних пиков, статистики исходного спектра и т.д. С учетом всех перечисленных факторов формальная оценка корректности получаемых результатов представляет значительные трудности, поэтому в программе предусмотрена возможность для пользователя оценивать промежуточные результаты вычислений, вносить в них поправки и тем самым управлять процессом расчета.

В частности, пользователь имеет возможность:

- 1) задать ожидаемое количество изотопов N;
- 2) после завершения первого этапа, получив значения  $Y_I$ ,  $I=1, \dots, N$  и  $\sigma$  в цифровой форме, а также графическое представление результатов обработки проекции на ось Y, выбрать один из следующих вариантов действия:

- перейти ко второму этапу;
- задать другие начальные приближения параметров и повторить обработку проекции;
- задать и зафиксировать некоторые значения параметров, диктуемые физическим смыслом задачи или наличием какой-либо иной дополнительной информации.

## 2.5. ТЕСТОВЫЕ ПРИМЕРЫ ДЛЯ ПРОГРАММЫ NLOS

Для проверки работоспособности программы NLOS были просчитаны два тестовых примера. На рис.1 представлена двумерная матрица, сгенерированная в плоскости XY по следующей формуле:

$$N(X, Y) = \sum_{I=1}^N F_I(X) \cdot G_I(Y), \quad (2.5)$$

где N=2- число изотопов с данными Z;

$$F_I(X) = (A_I / \sqrt{\pi D_I X_I}) \cdot \exp[-1/2 D_I (\sqrt{X} - \sqrt{X_I})^2]$$

$$G_I(Y) = (1/\sigma \sqrt{2\pi}) \cdot \exp[-(Y - Y_I)^2 / 2\sigma^2]$$

при следующих значениях:  $X_1=27.5$        $D_1=0.55$        $Y_1=12$   
 $X_2=35.5$        $D_2=0.47$        $Y_2=20$   
 $A_1=A_2=1000$        $\sigma=3.$

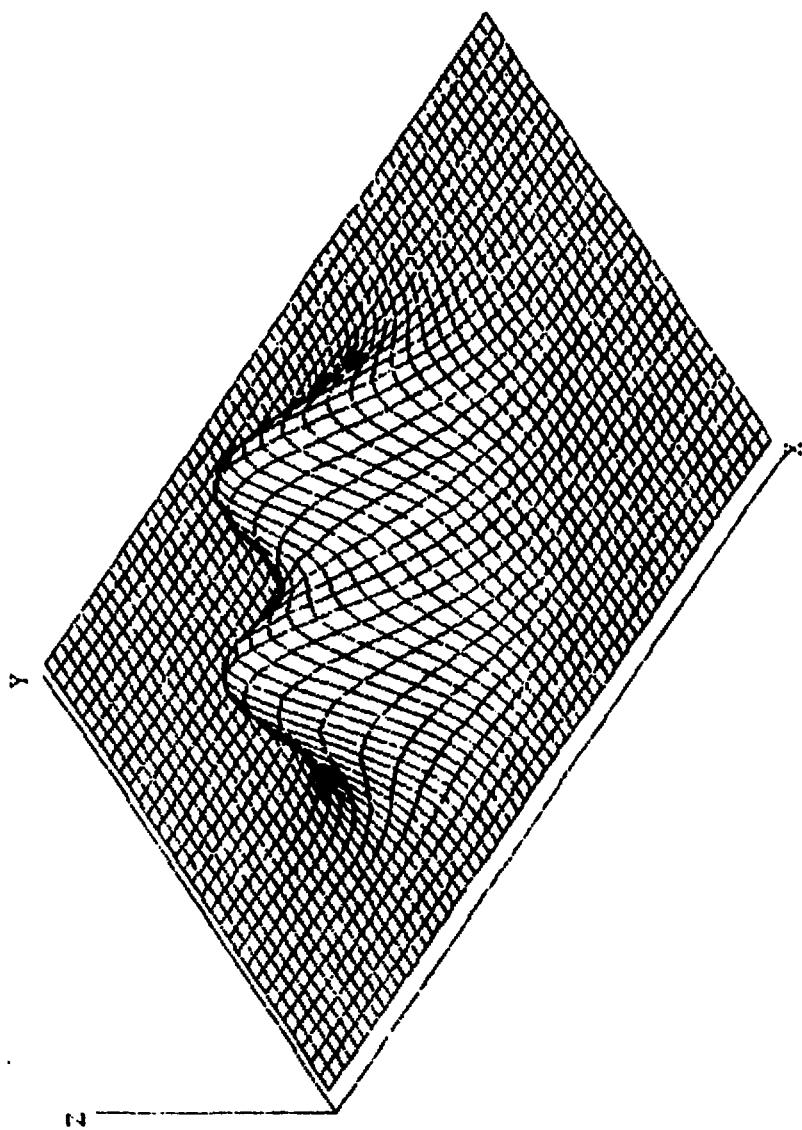


Рис.1. Тестовый двойная пики

При генерации входной матрицы осуществлялся разброс случайным образом значений  $N(X, Y)$  в пределах статистической погрешности.

На рис.2 представлены результаты работы программы HLOC: аппроксимация  $Y$ -проекции, аппроксимация одного из  $X$ -сечений и результирующее одномерное энергетическое распределение для каждого из изотопов.

На рис.3 представлены аналогичные иллюстрации к работе программы для  $N=4$ .

На рис.4 представлены иллюстрации к обработке реального спектра, полученного в работе [8] в реакции  $^{58}\text{Ni}(^{14}\text{N}, ^9\text{Be})Z$  при  $E_{^{14}\text{N}}=136$  кэВ.

### 3. ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ В ЧЕТЫРЕХЧАСТИЧНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Одним из методов экспериментального исследования многочастичных распадов ядерных резонансов является корреляционный эксперимент с регистрацией, как минимум, двух фрагментов на совпадения. Один из трактов энергетической установки служит для выделения случаев образования исследуемого состояния, второй - для исследования инклюзивных спектров одной из распадных частиц.

Двумерная матрица совпадений в реакции  $X=E_1$ ,  $Y=E_2$  ( $E_{1,2}$ -энергии частиц), полученная в таком эксперименте, имеет характерный вид: вся информация, соответствующая образованию 4-х частиц в конечном состоянии в реакции  $B+T \rightarrow 1+2+3+4$  располагается внутри локуса, границы которого определяются из кинематических расчетов [9]. Причем, образованию исследуемых состояний соответствуют события, расположенные вдоль линий, параллельных оси  $X$ . Задача получения энергетического распределения частиц, испущенных из конкретного состояния ядра  $R^*_{234}$ , является полным аналогом (в математическом смысле) задачи, описанной в п.2. Единственным отличием будет вид аппроксимирующей функции для  $Y$ -проекции и для  $X$ -сечения. Последняя имеет вид:

$$F(Y) = \rho(Y) \cdot \left( \sum_m F_m + B \right) \quad (3.1)$$

$$F_m = A_m \cdot \Gamma_m / \left[ (Y - E_m^R)^2 + \Gamma_m^2 / 4 \right],$$

где  $E_m^R, \Gamma_m$  - положение и ширина  $m$ -го резонанса,

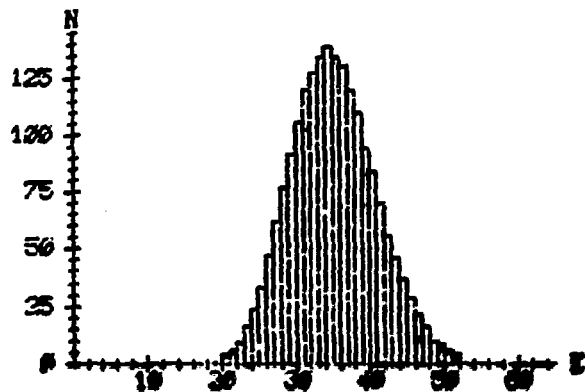
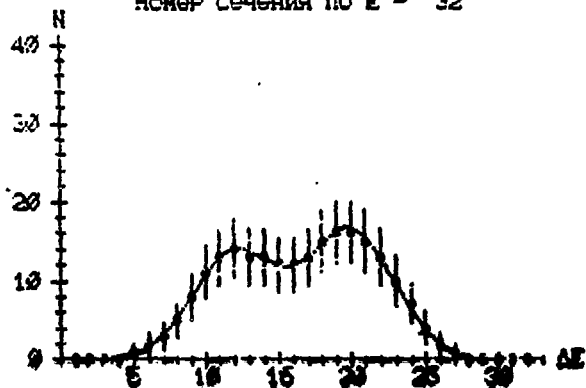
$A_m$  - интенсивность резонанса,

$B$  - коэффициент, характеризующий вклад процесса одновременного развала,

$\rho(Y)$  - функция плотности состояний [10].

В остальном (двумерный локус на входе, набор энергетических распре-

Номер сечения по E - 32



Проекция на ось  $\Delta E$

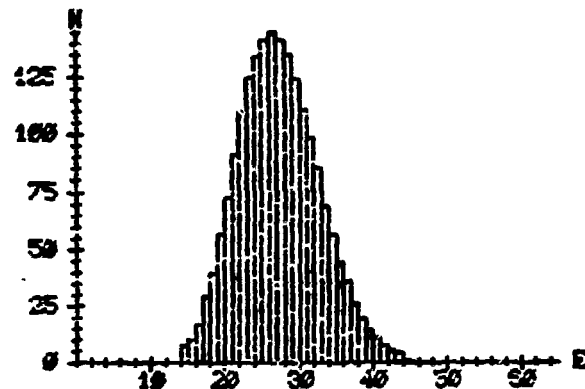
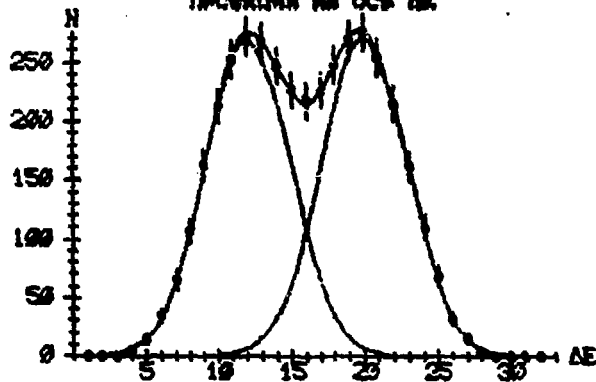
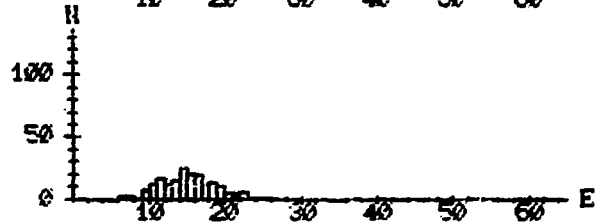
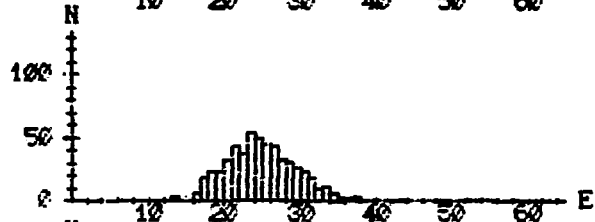
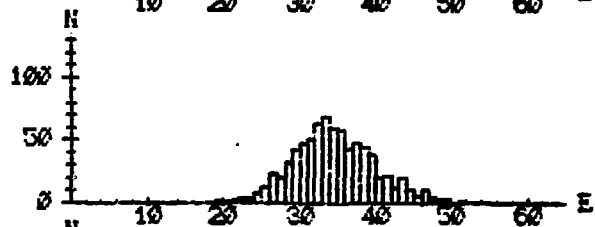
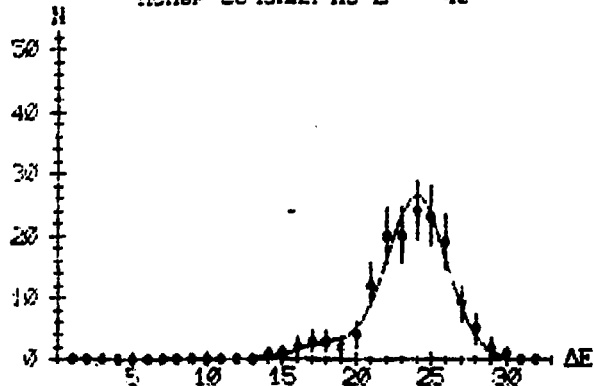


Рис.2. Обработка тестового примера с двумя изотопами

Номер сечения по Е - 43



Проекция на ось ΔE

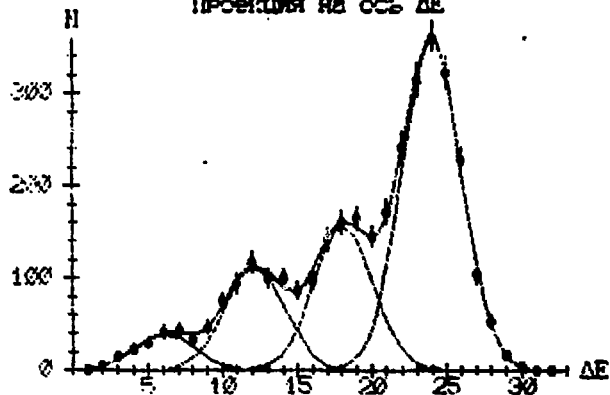


Рис. 3. Обработка тестового приёма с четырьмя испытаниями

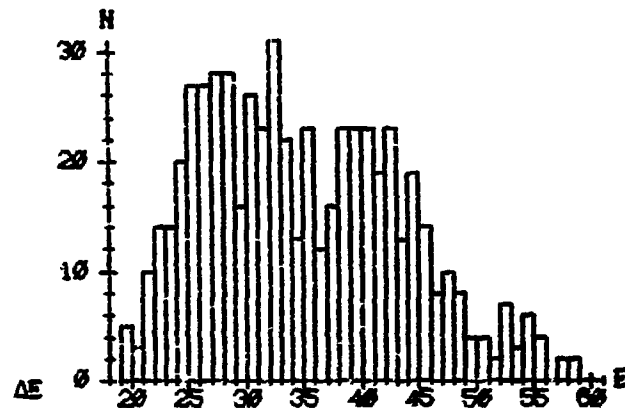
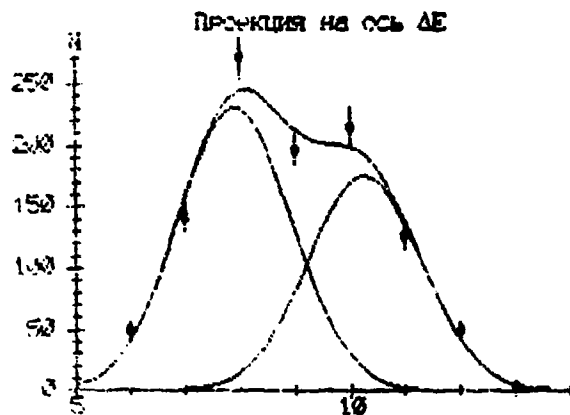
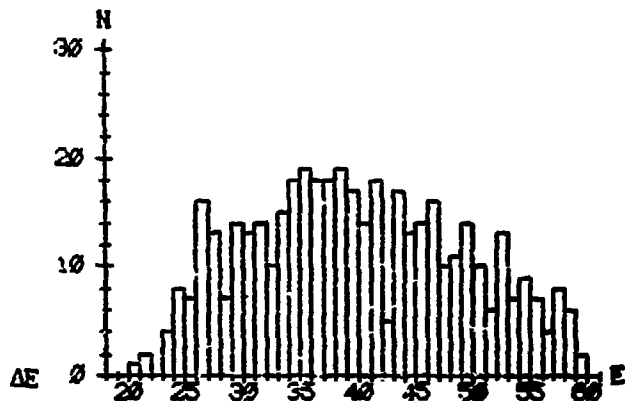
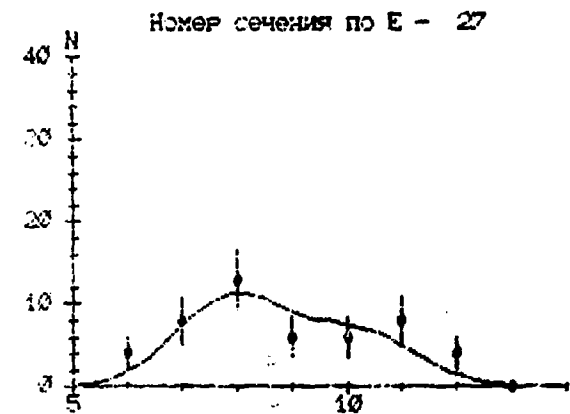


Рис. 4. Пример обработки реального спектра

деления частиц, полученных из исследуемых состояний, на выходе программы) задачи полностью идентичны. На рис.5 представлены энергетические распределения  $k$ -частиц, полученных из возбужденных состояний ядра  $^{96}\text{Zr}$  ( $E^* = 2.429; 3.05; 4.716.76$  МэВ), полученные программой HLOC при обработке двумерной матрицы  $k$ - $\alpha$  совпадений (рис.6). Данные о полюсах и виртуальных углах ядра  $^{96}\text{Zr}$  были взяты из каталога [11].

Результатом работы программы в этом случае являются  $N$  одномерных зависимостей

$$\frac{d^3 \sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dE_2},$$

где  $\Omega_1, \Omega_2, E_2$  - телесные углы детекторов 1 и 2 и энергия частицы 2.

Поскольку определение интенсивностей при обработке  $X$ -сечения является линейной задачей, в программе вычисляются ошибки определения  $I_j(x)$  для каждого  $N$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа HLOC предназначена для обработки двумерных матриц, полученных в ядерно-физическом эксперименте, и позволяет извлекать экспериментальные данные в виде  $N$  одномерных распределений. Программа HLOC позволяет:

- выделять из двумерного локуса спектры частиц с одинаковым зарядом  $Z$ , но различными массами  $M_1, \dots, M_N$ ;
- выделить энергетические распределения заряженных частиц, полученных из конкретного возбужденного состояния, полученного на промежуточном этапе в четырехчастичной ядерной реакции.

Программа написана на языке ФОРТРАН и может быть включена в систему обработки данных ядерно-физического эксперимента в ИИИ АН УССР. Программа работает на ЭВМ типа СМ-1420 с графическим цветным телевизионным дисплеем.

Программа позволяет освободить экспериментаторов от рутинных ручных операций по обработке двумерных спектров и существенно сократить время обработки.

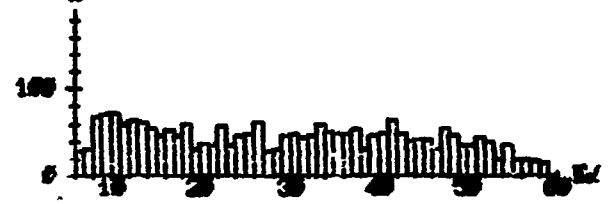
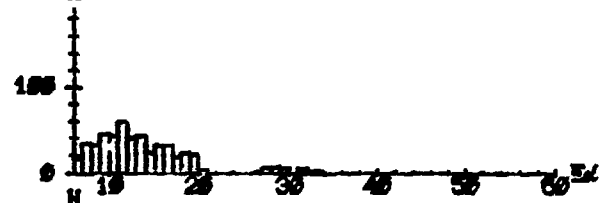
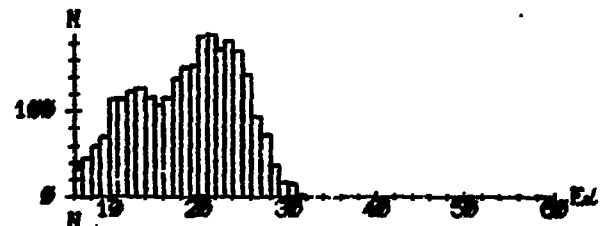
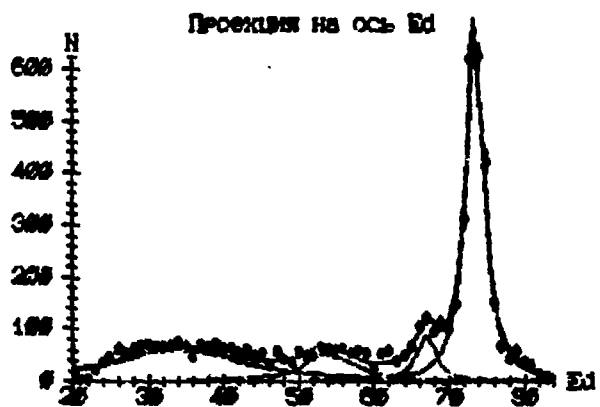
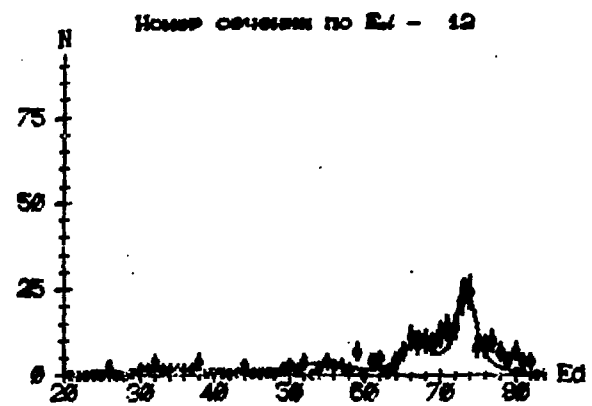


Рис. 5. Обработка спектра d-v. совпадений



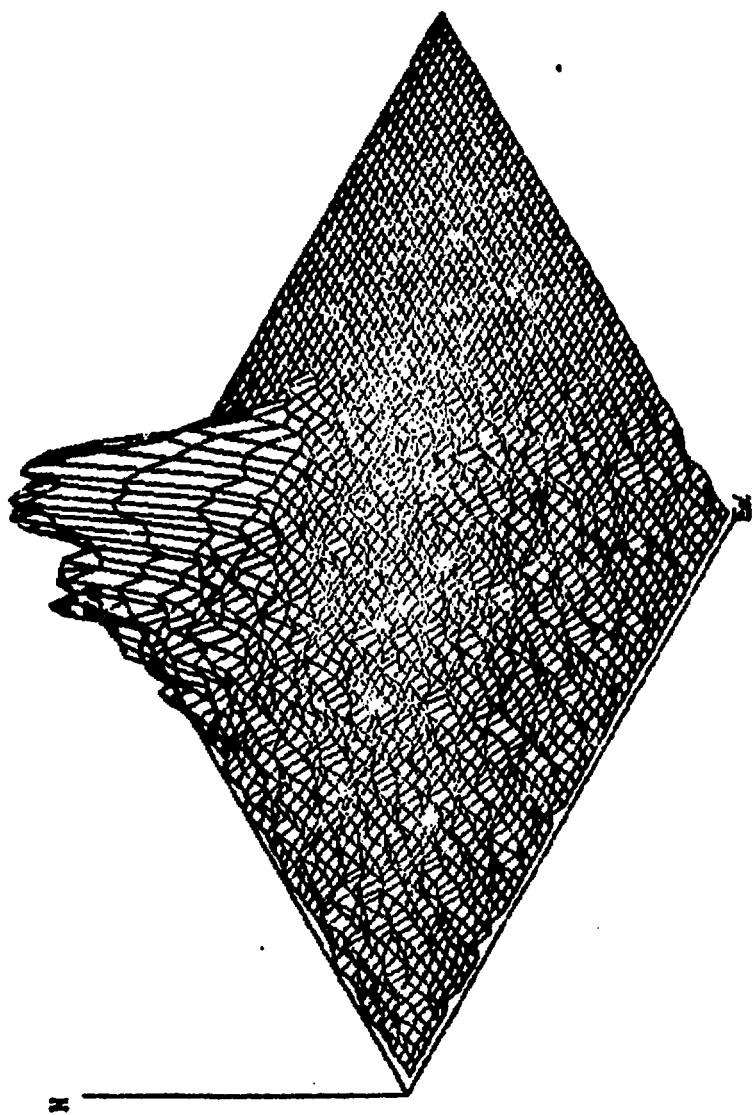


Рис. 6. Двухлучный спектр  $\delta$ - $\gamma$  совпадения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Намец О.Ф., Тереницкая К.О. Ядерные реакции. К., Вища школа, 1977, 243с.
2. Корыневичев А.А. Некоторые задачи по изучению многократного распада ядер.—Препринт ИАЭ-4533/2, М., 1977.
3. Данилкин В.В. и др. Трехкратные распады ядер  $^{69}\text{Ge}$ ,  $^{69}\text{Ni}$  и энергетические спектры  $\alpha$ -частиц и нейтронов. — ЯФ, т.46, вып.2(9), 1987.
4. Himmelblau D.M. Applied nonlinear programming. Texas, McGraw Company, 1972.
5. Гринин В.К. и др. Математическая обработка и интерпретация физического эксперимента. М., 1986, с.С18.
6. Офенгенден Р.Г., Светличный П.Н., Голык В.В., Доронин М.Н. Контроллер телевизионного дисплея. — В сб: Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях. /Материалы III Всесоюзного семинара, Тбилиси, 22-26 окт. 1984/. Тбилиси, Издательство, 1984, с.134-135.
7. Гаврилко А.Ю., Кумзаев С.В. Система интерактивной именной графики "РАСТР".—Препринт ИЯИИ-87-46, Киев, 1987.
8. Васильев Ю.О. и др. Неупругие процессы при рассеянии ионов  $^{14}\text{N}$  с энергией 136 МэВ на изотопах  $^{59,64}\text{Ni}$ . — Тезисы 39-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ташкент, 1989, с.381.
9. Ohlsen G.G. Kinematic relations in reactions of the form  $A+B \rightarrow C+D+E$ . — Nucl. Instr. and Meth., 1965, V.37, P.240-243.
10. Franke F. et al.—Nucl. Phys. A433, 1985, p.351-368.
11. Aizerberg-Selove F.—Nucl. Phys., A413, 1984, No 1, p.107-123.

Юрий Олегович Васильев  
Александр Юрьевич Гавренко  
Сергей Борисович Кунцаев

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ**

(Препринт КИЯИ-89-43)

Редакторы: Солдатенко Н.А.  
Малежская Л.П.

Подписано к печати	17957		
ВФ	13.12.89 г.	Бунага офсетная	Усл.-печ.л. - 1.1
Изд. и КИЯИ-89-43		Печать офсетная	Уч. -изд.л. - 0.5
Тип. заказ № 54		формат бунаги 60x90/16	
Тираж 200 экз.			Цена 4 коп.

---

СКТБ с ЗПИ Института ядерных исследований АН УССР  
252028, Киев-28, проспект Науки, 47