

Виноградов В. Б.  
С 344.1т + 08406

В - 493

3089/76  
Б1-10-9858.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

и  
Б1-10-9858

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1976

К ВОПРОСУ О ПРОГРАММЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕКОВ  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ГЛУБОКОНЕУПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ МЮОНОВ  
НА СПС ЦЕРН,а (NA-4 ЭКСПЕРИМЕНТ).

В.Б.Виноградов  
(3 февраля 1976 г.)

Введение

1. Краткое описание спектрометра и характеристик мюонного пучка.
2. Поведение мюонных треков в спектрометре.
3. Состав информации со спектрометра.
4. Методы распознавания треков.
  - 4.1. Метод вращения.
  - 4.2. Метод перебора базисных линий.
  - 4.3. Метод преобразующей функции.
  - 4.4. Метод двумерной гистограммы.
  - 4.5. Метод следования по треку.
  - 4.6. Метод главных компонент.
  - 4.7. Метод удаления фоновых точек.
  - 4.8. Сравнение скорости и эффективности различных методов.
5. Предложенные алгоритмы распознавания треков для NA-4 спектрометра.
6. Предлагаемый алгоритм распознавания треков для NA4 спектрометра.

Принят в печать  
9 июня 1976

## В в е д е н и е.

Одной из программ ЭВМ, необходимых для обработки экспериментальной информации, которая будет получена с помощью сооружаемого тороидального спектрометра /1/, является программа распознавания треков (*the pattern recognition program*).

Задачей этой программы является выделение из совокупности сигналов, зарегистрированных пропорциональными камерами, массивов координат, принадлежащих реальным трекам, и опознавание среди этих треков трека искомого глубоконеупругого события. Обсуждение алгоритма этой программы содержится в предположении эксперимента /1/ и в последующих меморандумах /2,4,6,8,9/. При этом были высказаны различные идеи.

В настоящей работе мы попытаемся систематизировать эти идеи, а также соответствующие программы, используемые в других экспериментах, с тем, чтобы предложить алгоритм распознавания треков. В последующем предполагается его реализация на ЭВМ СДС 6400 ОМЯИ, проверка его эффективности и определение времени ЭВМ с помощью сканированных методом Монте-Карло мюонных треков /5/

Прежде чем рассматривать алгоритмы распознавания треков, остановимся кратко на необходимых для дальнейшего обсуждения характеристиках спектрометра и поведении мюонных треков в спектрометре.

### 1. Краткое описание спектрометра и характеристик мюонного пучка.

Спектрометр /1/ представляет собой цилиндр из намагниченного железа диаметром 280 см, по оси которого расположена жидководородная (жидкодейтериевая) мишень и состоит из 10 супермоду-

лей по 4,5 м длиной /33/. Каждый супермодуль состоит из четырех модулей, длиной по 100 см, которые расположены на расстоянии 10 см друг от друга.

Каждый модуль состоит из девяти железных круглых пластин диаметром 280 см и толщиной 10 см. В центре пластин находится круглая дыра диаметром 30 см, необходимая для размещения мишени и проводников электрического тока. Полное количество пластин - 360. Полная длина спектрометра - 48 м.

Траектория рассеянного мюона будет определяться с помощью 40 пар плоскостей пропорциональных камер, имеющих размер  $3 \times 3 \text{ м}^2$ , и 40 триггерных спинтилляционных счетчиков /19/. Камеры и счетчики будут располагаться в 10 см щелях между блоками. Диаметр водородного сосуда составляет 110 мм и был выбран исходя из требования, чтобы 99% мюонного пучка, в худшем случае, проходило через мишень.

В проекте /1/ сказано, что 99% мюонного пучка лежит в пределах  $\pm 32$  мм по вертикали и  $\pm 42$  мм по горизонтали.

Последующие расчеты /26/ показали, что радиальное распределение пучка может быть аппроксимировано гауссовой функцией со стандартным отклонением  $\sigma \approx 2,1$  см в начале спектрометра и  $\sigma \approx 3,1$  см - в конце.

99% падающего потока (без учета гало) содержится в круге диаметром 12 см в начале спектрометра и 17 см - в конце.

Кроме основной компоненты в пучке присутствуют гало-мюоны, которые грубо можно представить распределенными равномерно по сечению детектора с интенсивностью порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  от полной интенсивности пучка. При максимальной величине  $10^9$   $\mu$  /импульс и 1 сек времени сброса это соответствует  $5 \cdot 10^6$  частиц/сек, проходящих через камеры.

## 2. Поведение мюонных треков в спектрометре.

В пренебрежении эффектами многократного рассеяния, ионизационными потерями и при условии, что железный тор имеет достаточные размеры, мюоны того же заряда, как и первичный пучок, отклоняются магнитным полем таким образом, что совершают периодические осцилляции внутри намагниченного железа, симметричные относительно главной оси спектрометра /1/. Эти осцилляции могут быть охарактеризованы амплитудой  $\Delta$  и длиной полуволны  $\lambda_{1/2}$ . Они связаны простым образом с кинематикой процесса неупругого рассеяния:

$$\lambda_{1/2} = 6.66 P_t / B$$

$$\Delta = \frac{M_p}{0.3 B} \frac{q^2}{q^2_{\text{макс.}}} \quad (\text{единицы} - \text{ГэВ}, \text{Т}, \text{М}),$$

где  $P_t$  - поперечный импульс рассеянного мюона,

$B$  - величина напряженности однородного магнитного поля в железе магнита,  $q^2$  - переданный четырехмерный импульс,  $q^2 = 2E_0 E_M (1 - \cos \theta_M)$ ,  $q^2_{\text{макс}} = 2M_p E_0$  - максимальный переданный импульс,  $E_0$  - энергия падающего мюона,  $E_M, \theta_M$  - энергия и угол рассеянного мюона.

При учете постоянных ионизационных потерь мюонная траектория представляет собой логарифмическую спираль. В полярных координатах  $(r, \theta)$  траектория может быть представлена в виде\*:

$$r = r_0 \exp [a(\theta - \theta_0) / \beta]$$

где  $a = 1,2 \text{ ГэВ/м}$  - ионизационные потери  $\frac{1}{dx} \frac{dE}{dx} = -a$  для мюонов

\* Это следует из уравнений:

$$P = 0,3 \beta \hbar c R = \beta R \quad \text{и} \quad P = P_0 - a L = (L = R \theta) = P_0 - a R \theta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = \beta \Delta R \\ \Delta P = -a R \Delta \theta \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \beta \Delta R = -a R \Delta \theta \\ \ln R = -\frac{a}{\beta} (\theta - \theta_0) \end{array} \quad R = R_0 \exp \left[ \frac{a}{\beta} (\theta - \theta_0) \right]$$

в железе и  $v = 0,3xv = 0,6 \text{ ГэВ/л}$  - константа, характеризующая кривизну траектории в магнитном поле  $B=2T$ . Индексом "0" отмечены начальные параметры.

Если взаимодействие произошло точно на оси спектрометра, то траектория рассеянного мюона будет лежать в плоскости, натянутой на касательную в точке взаимодействия и ось спектрометра. В противном случае частица будет колебаться относительно плоскости.

В табл.1 приведены некоторые данные, взятые из /19/ о расстояниях, пройденным мюоном от точки взаимодействия до точки входа в железо ( $L_1$ ), внутри железа ( $L_2$ ), внутри отверстия в магните до следующей встречи с железом ( $L_3$ ), суммарное расстояние, пройденное за полуволну  $\lambda_{1/2}$  ( $L_4$ ) в зависимости от величин  $E_0$ ,  $E_M$ ,  $q^2$ ,  $x$ ,  $y$ . Здесь  $x$  и  $y$  - скейлинговые переменные:

$$y = (E_0 - E_M) / E_0, \quad x = q^2 / 2M_p (E_0 - E_M) = \frac{1}{y} q^2 / q^2_{\max}$$

Таблица 1

$E_0$	$E_M$	$q^2$	$x$	$y$	Расстояние, М			$L_4$
					$L_1$	$L_2$	$L_3$	
120	24	12	0,1	0,8	4,5	4	6	11,5
120	60	56	0,5	0,5	3,3	15	5	21
120	96	13,5	0,3	0,8	8	8	12	22
200	100	94	0,5	0,5	4,5	22	5	29
280	56	294	0,7	0,8	2,2	23	2	26
280	140	131	0,5	0,5	4,5	25	7	33

Как видно из этой таблицы, расстояние, проходимое мюоном за полуволну, составляет 11-33 м, при этом в железе - 4-25 м.

Поведение мюонных треков в спектрометре с учетом многократного рассеяния и ионизационных потерь изучалось Кухтиным и Вес-

тергомби путем моделирования методом Монте-Карло треков с помощью программы HALO /3/.

В таблице 2 приведены некоторые данные, полученные в работе /2/ в результате моделирования мюонных траекторий, о зависимостях углов  $\varphi$  и  $\varphi'$  и <sup>координаты</sup> коэффициенты  $y'$  от координаты  $Z$ .

Здесь  $\varphi = \arctg \frac{y}{x}$  - полярный угол точки траектории с координатами  $x, y, z$ , ось  $Z$  - направлена вдоль оси спектрометра,  $\varphi' = \arctg \frac{y'}{x'}$  - полярный угол точки траектории в приведенной к точке взаимодействия системе координат, оси  $X'$  и  $Y'$  этой системы повернуты относительно оси  $Z$  так, что  $X'$  компонента импульса мюона равна нулю;  $Y'$  -  $Y$ -координата текущей точки траектории в системе  $X'Y'Z$ .

Таблица 2.

Зависимость  $\varphi, \varphi', y'$  от координаты  $Z$   
 $E_0 = 200$  ГэВ,  $V = 160$  ГэВ,  $q^2 = 60(\text{ГэВ}/c)^2 \cdot \frac{\Delta E}{\Delta x} = 0, X_B = Y_B = 0, Z_B = 1\text{м}$ .

$Z, \text{м}$	$\bar{\varphi}^\circ$	$\delta\varphi^\circ$	$\bar{\varphi}'^\circ$	$\delta\varphi'^\circ$	$\bar{y}', \text{мм}$	$\delta y', \text{мм}$
3	0	0	0	0	0	0
5	-0,5	17,5	0,02	.8	0,1	4,6
10	-2,6	30,0	0,3	3,2	2,7	27,6
15	0,7	34	0,7	7,2	4,9	49,6
20	-0,01	13	0,0	8,2	2,7	31,2
30	-2,2	28	0,1	6,4	.5	60,0
40	-1,3	28	0,4	14,5	-6,0	66,7
47	-2,3	30	-0,6	9,3	-5,1	71,6

Здесь  $V = E_0 - E_\mu$ ,  $X_B, Y_B, Z_B$  - координаты точки взаимодействия.

Из этой таблицы видно, что из-за многократного рассеяния точки траектории перестают находиться в одной плоскости и разбро-

саны относительно средних значений со среднеквадратичными отклонениями для  $y'$  до 7 см, для  $\psi'$  до  $15^\circ$  и для  $\psi$  - до  $35^\circ$ .

В таблице 3 приведены зависимости расстояний от оси спектрометра до траекторий с различными параметрами  $q^2$  и  $V$ .

Таблица 3

Зависимость величины  $R$  от координаты  $Z$  ( $E_0=200$  ГэВ)

$R = \sqrt{x^2 + y^2}$  - расстояние от оси спектрометра до траектории.

$Z, \text{ м}$	$R, \text{ мм}$		
	$q^2=60$ $V=40$	$q^2=60$ $V=160$	$q^2=225$ $V=120$
3	-	-	237
5	173	324	456
7	255	431	654
10	358	504	907
15	473	400	1215
20	518	89	1392
25	491	366	1515
30	392	506	
35	224	371	
40	69	156	
47	292	460	

### 3. Состав информации со спектрометра.

Информация, получаемая со спектрометра (сигналы с пропорциональных камер и спинтилляционных счетчиков), кроме координат мюонного трека искомого глубоконеупругого события, в принципе может содержать шумовые сигналы, координаты фоновых частиц, гало-мюонов пучка, мюонных треков от взаимодействия нескольких падающих мюонов в мишени. Кроме того, часть координат полезного трека может быть не зарегистрирована из-за неэффективности камер.



Рассмотрим эти пункты по отдельности.

1) Общий фон в зале. Благодаря большому расстоянию зала от ускорителя (1200 м) /34/, этот фон будет отсутствовать.

2) Фон гало мюонов пучка является основным источником фона. Интенсивность гало мюонов, проходящих через спектрометр, составляет  $5 \cdot 10^6$  сек.

В таблице 4 представлены вероятности появления в событии 0, 1, ..., 4 гало треков при длительности ворот 30 нсек.

Таблица 4

Количество гало треков	Количество событий, %
0	82
1	15
2	2,3
3	0,3
4	0,5

3) Количество событий с двумя мюонами, взаимодействующими с мишенью.

Оценка таких событий выполнена в /27/. При расчете принимались во внимание рассеянные мюоны, вылетающие под углами, большими пучковых годоскопических счетчиков за разрешающее время 20 нсек. Оценка дает следующее относительное количество таких событий: 1% - для  $N_2$  мишени и 26% - для С-мишени.

Оценка вероятности появления второго взаимодействия за разрешенное время 20 нсек в случае  $N_2$ -мишени, которую можно выполнить по данным, приведенным на рис.17 /1/, дает существенно меньшую величину -  $2 \cdot 10^{-5}$

( $y \geq 0,1$ ,  $\frac{q^2}{q_{\text{макс}}^2} \geq 0,02$ ,  $E_0 = 120$  ГэВ,  $1,6 \cdot 10^9 \mu$  /импульс, количество образованных событий -  $2 \cdot 10^3$  событий/сек.).

В таблице 5 приведены вероятности образования двух и более событий в случае С мишени за время 20 нсек.

Таблица 5

Количество взаимодействий	Вероятность, %
1	65
2	26
3	6,8
4	1,8
5	0,5

4) Пропорциональные камеры.

Неэффективность пропорциональных камер, известная для камер различной конструкции /29-32/, составляет  $\epsilon = 0,03 - 1\%$ . В таблице 6 приведены рассчитанные по формуле

$$P = 100 C_{80}^K \epsilon^K (1 - \epsilon)^{80-K} \cdot \%$$

вероятности треков, прошедших через весь спектрометр (80 однокоординатных камер) с  $K$  незарегистрированными координатами.

Таблица 6

K	$C_{80}^K$	P, %	
		$\epsilon = 0,01$	$\epsilon = 0,001$
0	1	41,5	92,0
1	80	35,0	7,4
2	$3,16 \times 10^3$	14,3	0,3
3	$8,22 \times 10^4$	3,7	
4	$1,58 \times 10^6$	0,7	
5	$2,4 \times 10^7$	0,1	

Количество шумовых сигналов составляет 10-100/проводок .сек /29-32/. Если проводки расположены через 4 мм, то их количество - 750/камеру. Количество шумовых сигналов, в худшем случае, за время 30 нсек во всем спектрометре равно

$$100 \frac{\text{сигналов}}{\text{проводка.сек}} \cdot 750 \frac{\text{проводок}}{\text{камера}} \cdot 80 \text{ камер} \cdot 3 \times 10^{-8} \text{ сек} =$$

$$= 0,18 \text{ шумовых сигналов /30 нсек.}$$

Таким образом, количество шумовых сигналов пренебрежимо мало.

В таблице 7 приведены вероятности событий с различным числом треков для  $H_2$  и С-мишеней (с учетом гало-мюонов и нескольких взаимодействий в мишени)

Таблица 7

Число треков	Вероятности событий, %	
	$H_2$	С
1	30	41,4
2	16	41,0
3	3,8	13,0
4	0,5	3,7
5	-	0,9

#### 4. Методы распознавания треков.

Задачей программы распознавания треков является отбор из совокупности записанных координат искр тех, которые принадлежат реальным трекам /16/. В результате работы программы в памяти ЭВМ должны находиться массивы координаты искр, упорядоченных согласно изображениям различных треков.

Выбор определенного метода (или комбинации методов) распознавания треков зависит от типа изучаемых событий, фоновых условий, количества недостающих и ложных искр в каждой камере (эффективности камеры), погрешности измерения координаты искры, быстродействия ЭВМ, формы треков, времени доступного на ЭВМ для обработки одного события, заданной эффективности распознавания. При этом ряд требований к программе, например, высокая эффективность распознавания и желательное малое время ЭВМ, затрачиваемое на распознавание события, находится в противоречии друг с другом

Известны следующие методы распознавания треков: метод вращения, метод перебора базисных линий, метод преобразующей функции, метод двумерной гистограммы, метод следования по треку, метод главных компонент.

Рассмотрим каждый из этих методов по отдельности.

#### 4.1. Метод вращения.

Этот метод применим только к проекциям треков в виде прямых линий и заключается в следующем /21/. Система координат вращается вокруг начала маленькими угловыми числами и на каждом шаге строится гистограмма с заранее заданными ширинами ячеек, например,  $X$  -координат точек. Если существует трек, то он будет давать пик, причем пик будет становиться все более и более явным по мере того, как угол между осью  $X$  и направлением трека будет приближаться к  $90^\circ$ .

Поиск начинается при относительно больших ячейках гистограммы и угловом шаге. Если, при какой-то угловой ориентации  $\theta$  найдена ячейка гистограммы, в которой число точек превышает заданное, то поиск повторяется с более узкими ячейками гистограммы и с меньшими угловыми шагами в интервале вокруг  $\theta$ . Процесс повторяется до тех пор, пока ширина ячейки не станет сравнимой с ожидаемым разбросом центров искр вокруг трека.

Существует модификация метода - не вращение системы координат, а вычисление для каждой точки полярного угла  $\theta$  и подсчет числа точек в заданных угловых интервалах  $\Delta\theta$ . Этот метод используется при анализе информации со спирального измерителя /25/. В этом случае полярные углы  $\theta$  точек начального участка трека располагаются в узком диапазоне  $\Delta\theta = 0,06$  радиан. Поэтому обнаружение определенного количества точек по некоторому направлению  $\theta_i, \theta_i + \Delta\theta_i$  свидетельствует о "кандидате" в треки /25/.

#### 4.2. Метод перебора базисных линий.

Метод перебора базисных линий является широко применяемым методом для распознавания линейных проекций треков /15,16/.

Трек определяется как набор точек, расстояние которых до базисной линии не превышает величины  $d$ . Этот набор должен содержать не менее  $t$  точек ( $2 \leq t \leq n$ ,  $n$  - количество плоскостей камер спектрометра). Камера может быть представлена в наборе не более, чем одной точкой.

Базисными линиями служат прямые, проведенные через какие-либо две точки двух разных плоскостей камер спектрометра. Углы наклона  $S$  этих прямых должны находиться в заданных пределах  $S_1 \leq S \leq S_2$ . Естественно, что пользоваться этим методом можно лишь тогда, когда существуют ограничения  $S_1, S_2$  на углы вылета частиц, вытекающие из условий эксперимента. Параметры  $t, d, S_1$  и  $S_2$ , вообще говоря, различны для разных экспериментов и определяют пороговые условия для физически возможных и допустимых треков.

Вначале программа поиска треков отбирает две таких плоскости, в которых количество точек - минимально, а расстояние между ними - максимальное. Далее конструируются прямые, связывающие точки одной плоскости с точками другой плоскости всеми возможными способами. Линия, наклон которой находится в границах  $S_1 \leq S \leq S_2$ , отбирается, чтобы стать осью коридора шириной  $2d$ , пересекающего спектрометр. Число искр, лежащих внутри коридора, подсчитывается, и если оно больше или равно  $t$ , то эта совокупность искр считается треком.

Точки, попавшие в набор точек трека, намечаются и при поиске следующих треков не рассматриваются. Если не находится кандидата, удовлетворяющим условиям принадлежности к трекам, то исследуется новая пара плоскостей. Определенная таким образом итерационная про-

цедура будет сходящейся, потому что точки удаляются из первоначального массива, как принадлежащие треку или фону, не способному к образованию трека.

Этот алгоритм был запрограммирован и использовался как общая подпрограмма в широком разнообразии случаев. Небольшие изменения были сделаны для некоторых специальных случаев. Например, в некоторых случаях было трудно фиксировать величину  $t$  для надежного распознавания треков. Обычно эта величина выбирается достаточно близкой к  $n$ , для того чтобы избежать образования треков из фоновых точек и в то же время достаточно малая, чтобы избежать потери треков с малым количеством точек. В одном из вариантов программы порог по  $t$  автоматически уменьшается от максимальной до минимальной величины в процессе поиска. Существуют также варианты программы, в которых полуширина коридора  $d$  определяется в зависимости от наклона трека.

Модификация метода (*CHANELLING*) приведена в работе /21/. Перебор линий производится только с одной стороны спектрометра. На каждой итерации конструируется треугольник, основанием которого является область рождения частиц (мишень), а вершиной - одна из точек какой-либо плоскости. Этот треугольник определяет границы поиска точек в каждой плоскости.

На основе метода перебора базисных линий, в частности, была создана программа распознавания треков *LINTR* для ЭВМ БЭСМ-4 /20/ и ЭВМ ИР-2116В /28/.

С помощью специально составленной программы моделирования было определено время и эффективность распознавания треков с помощью *LINTR*. Время распознавания на ЭВМ БЭСМ-4 было в пределах от 60 до 200 мсек для числа камер 8-10, количества точек в камере 4-5,

максимального количества треков в событии 1-3. Для исследования программы на эффективность было смоделировано 10 000 событий с параметрами: количество камер 6-10, количество треков 1-3,  $d=0,5-3$  мм, эффективность камер 0,8-0,9. Фон в каждой камере не превышал двух точек, каждая из которых появлялась с вероятностью 0,9, эффективность поиска оказалась в пределах 91-99%.

Программа *LINTR* использовалась также в /23/ для опознавания траекторий пучковых частиц, зарегистрированных с помощью 10 проводочных искровых камер с памятью на ферритовых кольцах. При этом использовались параметры  $d = 3$  мм,  $t = 6$  точек.

Метод перебора базисных линий используется также для нахождения треков в бесфильмовом искровом спектрометре (БИС) ОИЯИ/37,18/

Эффективность поиска определялась методом Монте-Карло путем моделирования правильной траектории и дополнительных фоновых искр в каждой камере, распределенных равномерно по площади, и фоновых треков, идущих из распадной области. При этом оказалось, что эффективность нахождения треков при 1 случайной фоновой искре в камере и одном фоновом треке близка к расчетной и составляет 95,7% при  $\varepsilon = 0,8$  и 99,6% - при  $\varepsilon = 0,95$ .

Здесь  $\varepsilon$  - эффективность искровой камеры, траектория проходит через 15 двухкоординатных искровых камер, 9 камер до магнита и 6 камер - после. Вероятность множественных решений оказалась равной 1%. Кроме того была определена эффективность нахождения полутраектории (части траектории до магнита или после магнита) в зависимости от числа случайных искр (от 0 до 4), фоновых треков (1 и 2). Оказалось, что в указанных пределах изменение этих параметров эффективность остается постоянной и равной  $\approx 99\%$ . Количество множественных решений колеблется от 0,5% до 1,5%.

Среднее время опознавания одного события составляло 0,6 сек на ЭВМ СДС-1604А и 0,3 сек на ЭВМ СДС-3300.

Метод перебора базисных линий используется также в программе распознавания треков установки "Фотон" ОИЯИ /13, 14/. В этом случае пределы наклонов базисных линий  $S_1, S_2$  определяются размерами мишени и канала черенковского спектрометра полного поглощения, в котором зарегистрирован ливень. Обработка по этому алгоритму событий, смоделированных по методу Монте-Карло, показала высокую эффективность метода поиска при большой фоновой загрузке камер ( 6 искр в камере ) /14/.

#### 4.3. Метод преобразующей функции.

Этот метод основан на использовании преобразующей функции  $H = H(x, y)$ . Если подставить координаты точек  $\{x_i, y_i\}$  в эту функцию и построить гистограмму по величине  $H(x_i, y_i)$ , то будет наблюдаться пик, являющийся указанием на существование трека.

а) Простейший случай - поиск прямой линии

$$y = m x + c \quad (1)$$

для которой функция  $H$  определяется как:

$$H = \arcsin \left\{ \frac{y - y_1}{x - x_1} \right\}$$

где  $(x_1, y_1)$  первая точка в списке точек. Частотное распределение функции  $H$  покажет пик при  $H = \arcsin m$ , если прямая линия (1) существует и проходит близко к  $\{x_1, y_1\}$ . Если пик не наблюдается, то это означает, что точка  $\{x_1, y_1\}$  принадлежит к фону, и пробуются следующая точка  $\{x_2, y_2\}$  в качестве начальной точки и т.д. до тех пор, пока не появится пик в гистограмме или точки будут исчерпаны. Для кругового трека  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = R^2$  выбор начальной точки на треке или вблизи трека приводит к уравнению:  $(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2 = R^2$



Для произвольной точки  $(x, y)$  на окружности:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = (x_1-a)^2 + (y_1-b)^2 \quad \text{или}$$

$$[(x^2-x_1^2) + (y^2-y_1^2)] / [2(x-x_1)] = a + b \frac{y-y_1}{x-x_1}$$

Преобразование

$$(y-y_1)/(x-x_1) \rightarrow X$$

$$[(x^2-x_1^2) + (y^2-y_1^2)] / 2(x-x_1) \rightarrow Y$$

будет отображать окружность

на прямую линию:  $Y = a + bX$

. Вторая точка  $(x_2, y_2)$ , чье отображение

выбирается, и функция  $H$  определяется как:

$$H = \arctg \left\{ (Y-Y_2) / (X-X_2) \right\}$$

Прямая линия может быть обнаружена как в пункте а). Процесс повторяется для различных пар точек до тех пор, пока пик в распределении  $H$  не обнаружится.

с) Обобщение этого принципа может быть выполнено для трека, функциональная форма которого неизвестна, но который может быть аппроксимирован полиномом степени  $n$  :

$$y = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$$

Этот метод особенно ценен для таких форм трека, как эллипс, где прямой подход, как в методе б), невозможен. Точка  $(x_1, y_1)$ , лежащая на треке или вблизи трека, удовлетворяет полиному, уравнение которого может быть записано в виде:

$$y - y_1 = b_1(x-x_1) + \dots + b_n(x-x_1)^n,$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_n$  — функции величин  $x_1, y_1, a_0, a_1, \dots, a_n$

Отсюда:  $(y - y_1)/(x - x_1) = b_1 + b_2(x-x_1) + \dots + b_n(x-x_1)^{n-1}$

Преобразование  $(x-x_1) \rightarrow X, \frac{y-y_1}{x-x_1} \rightarrow Y$  будет отображать полином степени  $n$  в полином степени  $(n-1)$ :

$$Y = b_1 + b_2 X + \dots + b_n X^{n-1}$$

Повторение этого процесса уменьшает степень полинома до тех пор, пока она не станет равной 1. Метод а) в таком случае используется

для обнаружения линии.

Многие кривые треки искровых камер аппроксимируются дугами парабол ( $n=2$ ), оси которых параллельны или перпендикулярны электродам искровых камер. Если  $n = 2$  и начальная точка  $(x_1, y_1)$  выбрана, то парабола  $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  может быть отображена на прямую линию:  $Y = \beta_1 + \beta_2 X$ . Выбор второй точки  $(x_2, y_2)$  дает возможность использовать метод а) для обнаружения линии.

Прямые треки также могут быть обнаружены при отображении параболой, как частный случай.

Этот метод был реализован в виде программы MAPPING для ЭВМ типа IBM 7090. Результаты приведены в пункте 4.8.

#### 4.4. Метод двумерной гистограммы.

В работе /35/ предложен простой и быстрый метод распознавания треков - метод двумерной гистограммы. В этом методе каждый прямой трек отображается в виде пика на двумерной гистограмме, по оси  $x$  которой откладываются наклоны всех возможных пар искр, а по оси  $y$  - interceptы прямых, проходящих через эти пары. При этом фоновые точки будут распределены по площади этой гистограммы. Если в спектрометре зарегистрировано несколько треков, то каждый из них произведет отдельный пик в гистограмме.

В случае кривых треков предлагается через три точки трека проводить окружность, и по трем осям откладывать  $x_c, y_c$  координаты центра окружности и радиус  $R$ , если искомая траектория - окружность, то совокупности параметров  $x_c, y_c, R$  правильных комбинаций трех точек будут сконцентрированы вокруг одной точки гистограммы.

для обнаружения линии.

Многие кривые треки искровых камер аппроксимируются дугами парабол ( $n=2$ ), оси которых параллельны или перпендикулярны электродам искровых камер. Если  $n = 2$  и начальная точка  $(x_1, y_1)$  выбрана, то парабола  $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  может быть отображена на прямую линию:  $Y = \beta_1 + \beta_2 X$ . Выбор второй точки  $(x_2, y_2)$  дает возможность использовать метод а) для обнаружения линии.

Прямые треки также могут быть обнаружены при отображении параболой, как частный случай.

Этот метод был реализован в виде программы MAPPING для ЭВМ типа IBM 7090. Результаты приведены в пункте 4.8.

#### 4.4. Метод двумерной гистограммы.

В работе /35/ предложен простой и быстрый метод распознавания треков - метод двумерной гистограммы. В этом методе каждый прямой трек отображается в виде пика на двумерной гистограмме, по оси  $x$  которой откладываются наклоны всех возможных пар искр, а по оси  $y$  - интерсепты прямых, проходящих через эти пары. При этом фоновые точки будут распределены по площади этой гистограммы. Если в спектрометре зарегистрировано несколько треков, то каждый из них произведет отдельный пик в гистограмме.

В случае кривых треков предлагается через три точки трека проводить окружность, и по трем осям откладывать  $x_c, y_c$  координаты центра окружности и радиус  $R$ , если искомая траектория - окружность, то совокупности параметров  $x_c, y_c, R$  правильных комбинаций трех точек будут сконцентрированы вокруг одной точки гистограммы.

#### 4.5. Метод следования по треку.

Метод следования по треку заключается в следующем /20/ в первой (или одной из первых) плоскости выбирается точка и направление поиска. В прогнозируемой области соседней плоскости по критерию близости отыскивается следующая точка и т.д. Присоединение точек к набору прекращается при достижении последней плоскости или при отсутствии точек в прогнозируемых областях нескольких камер. Считается, что найденный набор точек есть трек, если количество точек в нем превосходит заданную величину.

Эта идея реализована в работе /21/ следующим образом. В первой камере выбирается искра А, как начальная точка для линии. Во второй камере просматривается примыкающая область, расположение и размеры которой зависят от ожидаемого угла пересечения трека с плоскостью камеры 2. В этой области фиксируется искра В и просматривается 3 камера с целью нахождения искры С. Центром поиска служит точка пересечения линий, соединяющей центры искр А и В, со средней плоскостью камеры и ширина области поиска постоянна для третьей и последующих искр на линии. Процедура повторяется в 4-й камере, при этом используются искры, найденные во 2-й и 3-й камерах, по которым проводится линия, определяющая направление поиска. Если, на какой-либо стадии поиска находится камера, в которой в вычислительных пределах не обнаруживается искры, то просматривается следующая камера. При этом границы поиска расширяются. Процесс присоединения искр завершается, если встречаются две соседние камеры без искр. Считается, что присоединение прошло успешно, если объединено по крайней мере три искры.

По данному алгоритму была составлена программа *STRINGING* для ЭВМ типа IBM 7090. Метод присоединения точек также применяет-

ся для фильтрации информации со сканирующих автоматов. Отметим, что числовая информация, поступающая со сканирующего автомата, например типа "спиральный измеритель", аналогична информации, поступающей со спектрометра. Она состоит из массива чисел  $R$  и  $\Theta$  ( $R$  - расстояние,  $\Theta$  - угол), являющихся полярными коэффициентами последовательности точек пересечения спирали с треками измеряемого события, треками пучка, треками дополнительных событий на снимке, а также с побочными шумовыми образованиями, имеющимися на снимках /24/.

Опознавание треков событий, измеренных с помощью "спирального измерителя" ОИЯИ, производится следующим образом /25/. Вначале методом вращения отыскивается совокупность точек, могущих принадлежать треку. Для этого в массиве  $\{R_i, \theta_i\}$  первых 15-20 витков спирали подсчитывается число точек, попавших в полосы  $\Delta \Theta$ , ориентированные во всех направлениях. Если число точек в этой области более  $p=10$ , то такое направление считается содержащим "кандидаты" в треки.

По точкам, лежащим в этой области, методом наименьших квадратов проводится кривая, представляющая уравнение трека в плоскости  $(R, \Theta)$ :

$$\Theta = \Theta_0 + \alpha R + \frac{\beta}{R} + \gamma R^3 \quad (2)$$

и определяются параметры  $\Theta_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\sigma_\Theta$ .

Здесь  $\Theta_0$  - угол между полярной осью и касательной к треку в вершине взаимодействия,  $\alpha = \frac{1}{r}$ ,  $r$  - радиус кривизны трека,  $\gamma = \frac{1}{\delta} \alpha^3$ ,  $\beta$  - мера близости трека к вершине,  $\sigma_\Theta$  - среднеквадратичный разброс точек относительно аппроксимирующей кривой (1).

Далее делается выбор точек, отстоящих от кривой на  $\pm 2,5\sigma$ . Повторяется подгонка кривой (2) к оставшимся точкам, определяет-

ся  $\beta$ , делается выбор и т.д. Итерационная процедура прекращается или когда точки перестанут выбрасываться или их останется меньше  $P$ .

По уточненным после выбора значениям параметра  $\beta$  производится вычеркивание треков с параметрами  $\beta > \beta_{max}$  - порога, превышение которого означает, что трек не относится к данному событию.

Далее, находя точку пересечения касательной к полученной кривой и следующего  $m+1$ -го витка спирали, предсказывается наиболее вероятное положение для следующей точки трека, которая определяется как точка, ближайшая к нему в коридоре  $\pm 2,5 \Delta$  ( $\Delta$  - средняя ширина трека).

Полученная точка включается в массив точек трека для новой подгонки по МНК кривой (2) с последующим выбросом точек и уточнением параметра  $\beta$ . Этот процесс прослеживания продолжается до конца трека, определяемого границами области сканирования, или до появления подряд трех пропусков прогнозируемых точек,

Процесс прослеживания треков может быть ускорен путем:

а) уменьшения числа параметров кривой (2) до трех (на первых  $m$  оборотах исключается  $\gamma$ , а потом  $\beta$ );

б) сохранение постоянного числа точек в массиве, по которому осуществляется подгонка по МНК (при включении в этот массив новой точки исключается одна из точек с противоположного конца трека).

Окончательная подгонка и выброс с учетом всех четырех параметров делается по общему массиву точек, отнесенных к треку при прослеживании, после выхода на конец трека.

Методика следования по треку существенно использует экстраполяцию при поиске очередной точки. Это оказывается недостатком при обработке информации с установок с большими расстояниями между узкозачерными искровыми камерами, а также при наличии большого количества фоновых искр и невысокой эффективности камер /21/.

Преимущество метода - отсутствие ограничения на форму кривой.

#### 4.6. Метод главных компонент.

Красивым математическим методом, применяемым для распознавания треков, является метод главных компонент (*the principal components method*). Этот метод служит примером применения техники многомерного анализа к обработке данных со спектрометров /10/.

Метод базируется на свойстве совокупности координат трека  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_N)$  группироваться после выполнения над ними некоторого преобразования  $T$

$$\vec{y} = T \vec{x} \quad (3)$$

в гиперплоскости меньшей размерности ( $L$ ), чем размерность ( $N$ ) первоначального пространства. При этом новые координаты  $y_{L+1}, \dots, y_N$  должны быть равны нулю в пределах погрешностей. Критерием группировки может также служить евклидово расстояние до  $L$ -размерной гиперплоскости, т.е. величина

$$d = \left\{ \sum_{l=L+1}^N y_l^2 \right\}^{1/2} = 0$$

(в пределах погрешностей).

Метод главных компонент доказал свою полезность в ряде областей, отличных от физики высоких энергий. Его успех в обработке треков основан на том обстоятельстве, что количество измерений, которое делается на треке, обычно превосходит число незави-

симых параметров, координаты точек трека группируются в 5- или 6-размерной гиперплоскости. Такая концентрация трековой информации в 5-мерном подпространстве происходит благодаря тому, что трек полностью определяется 5 параметрами, например, трехмерным вектором-импульсом и точкой траектории с координатами  $x_0, y_0$  в фиксированной плоскости  $Z_0$ . Первые пять преобразованных координат, которые фиксируют положение трека на гиперплоскости, могут быть использованы для определения импульса и угла; остальные  $N-5$  координат (для  $N$  измерений), принадлежащие треку, лежат вне гиперплоскости. В результате экспериментальных ошибок и нелинейного соотношения между измерениями и параметрами трека, обнаружено, что координаты точек трека лежат близко, но не точно на пятиразмерной гиперплоскости. В этом случае  $\xi_6$ , первой "незначительной" координатой нельзя пренебречь и только  $\xi_7, \dots, \xi_N$  могут быть использованы как уравнения связи.

Нахождение матрицы преобразования (3), вообще говоря нелинейного, может быть произведено следующим образом /7/.

1. На основе смоделированных или реальных треков вычисляется корреляционная матрица:

$$A_{ij} = \sum_{\alpha=1}^{NT} (x_i^{\alpha} - \bar{x}_i) (x_j^{\alpha} - \bar{x}_j),$$

где  $\alpha$  - индекс трека,  $NT$  - полное количество треков

$$\bar{x}_i = \frac{1}{NT} \sum_{\alpha=1}^{NT} x_i^{\alpha}$$

2. Вычисляются собственные значения и собственные вектора матрицы  $A$ .

3. Собственные значения располагаются в порядке уменьшения  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ . Собственные вектора  $\vec{W}^1, \dots, \vec{W}^N$



$\vec{W}^k = \{W_1^k, W_2^k, \dots, W_N^k\}$  образуют ортонормальный базис в  $N$ -мерном пространстве:

$$\vec{W}^l \cdot \vec{W}^m = \delta_{lm} \quad (l, m = 1, \dots, N)$$

4. С помощью преобразования  $W$  определяется вектор  $\vec{\xi}$ :

$$\xi_j = \sum_{i=1}^N W_{ij} x_i \quad (j = 1, \dots, N)$$

Оказывается, что это преобразование  $W$  является именно искомым преобразованием  $T$ .

Этот факт был проверен для R603 спектрометра /7/, но, вообще говоря, не является справедливым для любого детектора.

Метод главных компонент обладает следующим недостатком. Если событие содержит  $n$  треков и на каждом из них сделано  $k$  измерений, то необходимо проверить  $n^k$  комбинаций измерений. Такая проверка может занять много времени (например, для  $n=10$ ,  $k=10$  необходимо перепробовать  $10^{10}$  комбинаций), и поэтому необходим предварительный отбор вероятных комбинаций. Таким образом могла бы являться, например, проверка на линейность траектории в проекции, параллельной напряженности магнитного поля.

Неэффективность детектора, приводящая к отсутствию измерений на треке, и наклон детекторов вводят дополнительные проблемы. На практике проблема недостаточности точек является сильным ограничением для многомерного подхода. Преобразование может быть определено для любого набора измерений на треке, но эти измерения должны быть сделаны в тех же самых точках вдоль трека для всех треков. Недостаточные точки приводят к полностью отличному преобразованию, и такое преобразование необходимо для каждого возможного набора измерений.

Описанный метод был использован для распознавания треков в R 603 спектрометре /7,11/. Детекторами в этом спектрометре слу-

пропорциональные

или высокоэффективные камеры (10 плоскостей  $x, y$ ). Матрица  $T$  была определена на основе 1000 смоделированных треков.

Метод был проверен на выборке 200 сгенерированных событий, с 10 треками каждое, на ЭВМ СДС 7600. Величины  $\xi_6 - \xi_{10}$  оказались маленькими, т.е. порядка измерительных ошибок в точке, и были использованы как уравнения связи для решения вопроса о том, принадлежит ли данная комбинация координат к реальному треку.

Введение погрешностей измерения координат ( $\pm 0,5$  мм) несколько увеличило величины  $\xi_6, \dots, \xi_{10}$  (таблица 8).

Таблица 8

Координаты $\xi$	Без измерит. ошибок, мм	С измерит. ошибками, мм
6	0,8	0,8
7	0,25	0,5
8	0,04	0,5
9	0,02	0,6
10	0,01	0,6

Отбор треков производился или с помощью неравенств  $\xi_i^2 \leq 1 \text{ мм}^2$  ( $i=6, \dots, 10$ ) или условия  $d^2 = \sum_{i=6}^{10} \xi_i^2 < \text{const}$

В результате применения данного метода распознавания треков было получено, что 198 событий правильно идентифицировано, 1 событие содержало лишний трек, 1 событие - 2 лишних трека. Таким образом из 2000 треков, 2003 треков были выделены, 3 из них неправильно.

Необходимо отметить, что перебор всех комбинаций для 10-трековых событий ( $10^5$  комбинаций) требует весьма большое время ЭВМ, поэтому выполнялся предварительный грубый отбор комбинаций. Проверялось, чтобы в  $Y$  проекции отобранная комбинация координат представляла собой прямой трек, прежде чем применять метод главных компонент.

Затраченное время ЭВМ СДС 7600 составляло 10 мсек на одно 10-трековое событие и 2 мсек - на 3-трековое событие.

#### 4.7. Метод удаления фоновых точек.

В том случае, если каким-либо методом удалось выделить совокупность точек, состоящую из одного трека и некоторого количества фоновых точек, то для их удаления можно воспользоваться методом наименьших квадратов, как например в /20/.

С этой целью были написаны две программы на ЭВМ БЭСМ-4 - *LINE1* и *LINE2*.

В программе *LINE1* отбор точек, принадлежащих треку, производится методом итераций. На каждой итерации определяются параметры  $a, b, \sigma$ , соответствующие минимуму функции

$$M = \sum_{i=1}^n \omega_i (x_i^2 - a z_i + b)^2, \text{ где } \omega_i - \text{вес } i\text{-ой точки,}$$
$$\sigma = (M_{\min} / n - 2)^{1/2}.$$

Если  $\sigma > \sigma_n$  ( $\sigma_n$  - пороговое значение оценки отклонения аппроксимирующей функции  $x = a z + b$  от экспериментально измеренных значений  $x_i^2$ ) и  $n > n_{\min}$ , то выбрасывается точка, давшая максимальный вклад в  $M_{\min}$ . Если  $\sigma < \sigma_n$  и  $n > n_{\min}$ , то данная совокупность точек считается треком.

В программе *LINE2* отбор производится по иной схеме. На  $k$ -ой итерации определяется подмножество данных, состоящее из  $n-k$  точек, такое, что значение  $\sigma$ , вычисленное для него, минимально среди  $\sigma_i$ , соответствующих всем подмножествам, получаемым из исходного путем отбрасывания  $k$  точек.

Основное преимущество программы *LINE2* перед *LINE1* в том, что она позволяет с большей эффективностью отбирать полезную информацию. Недостаток ее в том, что время работы *LINE2*

больше, чем *LINE 1*. Это время зависит от количества выбрасываемых точек, и при количестве выбрасываемых точек от 0 до 3 (из 10) составляет для *LINE 1* 0,02-0,07 сек и для *LINE 2* - 0,02 - 2,9 сек.

#### 4.8. Сравнение скорости и эффективности различных методов.

Провести полное сопоставление скорости и эффективности различных методов распознавания треков не удается из-за разнородности опубликованных данных (быстрдействие ЭВМ отличается на несколько порядков, число треков от 2 до 10 и т.д.). Только в работах /21,28/ те же образцы были обработаны с помощью различных методов, и эти данные мы приведем.

Методы следования по треку, перебора базисных линий, вращения и преобразующей функции были реализованы в виде программ *STRINGING*, *CHANELLING*, *ROTATING*, *MAPPING (A)* и *MAPPING (C)* для ЭВМ ИВМ 7090 /21/, а также в виде программы *LINTR* (метод перебора базисных линий) для ЭВМ БЭСМ-4 и НР-2116В /28/ и опробованы на трех образцах: а) прямой трек, б) парабола, в) двухлучевая звезда из прямых треков. Треки проходили через 20 камер, причем в 3-5 камерах искры отсутствовали. Кроме того, случайно по камерам было "разбросано" 9-11 ложных искр. Результаты приведены в таблице 9.

Как видно из этой таблицы, в случае рассмотренных образцов все методы удаляли ложные искры. Метод следования по треку, хотя и является наиболее универсальным методом, работает медленнее для одного прямого трека, чем метод преобразующей функции а), и менее эффективен, чем метод преобразующей функции с), для кривых треков в области, где частица проходит под малым углом по отношению к электродам камеры.

Таблица 9

Образец	Метод	Число точек трека	Обнаруженное число треков	Время (сек) IBM 7090	Ссылка	ЭВМ
а	STRINGING	16	16	0,09	21	IBM 7090
"	CHANNELING	16	16	0,13	"	
"	ROTATING	16	16	0,56	"	
"	MAPPING A	16	15	0,08	"	
"	MAPPING C	16	16	0,26	"	
б	STRINGING	16	13	0,10	"	
"	MAPPING	16	15	0,45	"	
в	STRINGING	21	20	0,10	"	
"	ROTATING	21	17	1,8	"	
а	LINTR			0,060	28	БЭСМ-4 НР-2116В
а	LINTR			0,015	"	

5. Предложенные алгоритмы распознавания треков для NA4 спектрометра.

В предложении NA-4 эксперимента (Голутвин и др., август 1974 г.) /1/ о программе распознавания треков сказано следующее. "Программа распознавания треков может быть сделана простой и быстрой. Мы оценили, что реконструкция полного события не будет требовать более чем 500 мксек CPU ЭВМ СДС 7600. Эффективность реконструкции чрезвычайно хорошая, даже, если несколько ложных треков и неэффективность камер добавлены".

Из работы /4/:

"В настоящее время кажется достаточным ограничиться распознаванием только одного трека в спектрометре. Требование квазикомплярности искр при больших радиусах в 80-90% случаев будет достаточно для того, чтобы отделить рассеянный мюон от гало-мюона. Эффективность распознавания треков в присутствии -лучей, не-

эффективности камер, стереоуглов и возможного отсутствия модуля должна быть изучена в первую очередь".

Из работы /2/:

"Очевидно, что если следить за изменением угла  $\varphi$  мюонной траектории, начиная от  $X, Y$  точки, которая отлична от  $X = Y = 0$ , тогда в принципе можно получить величины  $\varphi$  в диапазоне  $\pi \leq \varphi \leq \pi$ . Поэтому трудно или, по-видимому, невозможно ввести критерий отбора мюонной траектории, основываясь на рассмотрении угла  $\varphi$ , определенном простым способом в лаб. системе.

Поэтому для процедуры отбора предлагается следующий алгоритм. В начале траектории отбираются три точки и определяется новая система координат, которая повернута относительно лаб. системы. Если эти начальные точки действительно принадлежат к мюонной траектории, тогда другие точки легко могут быть отобраны с помощью критерия  $\varphi' \leq \delta\varphi$ . Как видно из табл. 2, для первого растущего куска траектории ( $Z < 10$  м)  $\delta\varphi'$  не превышает  $4^\circ$ . Более того, если добавить критерий для  $y'$ , тогда будет нетрудно определить траекторию".

В заметке Ренарди и Смади /9/ также рассмотрены принципы построения программы распознавания треков. В ней отмечается, что "Низкая плотность треков порядка 1 на  $m^2$  ожидается в спектрометре. Поэтому представляется полезным производить поиск мюонной траектории вначале в азимутальной плоскости, так как траектория приблизительно плоская. От каждой пары сцинтиллятор-камера поступает информация -  $R, \theta, x, y, z$  и объединяется в набор точек в пространстве -  $P_i(R, \theta, x, y, z)$  таким образом, что исключаются некоторые ложные сигналы. Каждый трек должен появиться как пик в

гистограмме по  $\theta$ . Если метод будет основан на таком отборе, то методом Монте-Карло должна быть выполнена проверка, используя "гало-ленту", эффекта гало треков, ширины траектории по  $\theta$  и т.д., а также исследование того, как много треков может быть безопасно разделено".

Массив точек, принадлежащих  $\theta$ -пику, исследуется далее. Строится гистограмма по величине  $R$ . Экстремальные величины в этом распределении определяют длину волны осцилляции трека, с помощью которой точки могут быть связаны в прямой или круговой сегменты - "кандидат в треки". Каждому "кандидату в треки" соответствует трубка, диаметр которой зависит от качества сегмента. Полный трек получается, когда допустимая последовательность трубок связывается с областью взаимодействия.

Если этот метод оказывается ненадежным, то предлагается использовать другой метод. Начиная от области взаимодействия и используя  $R$  гистограмму, следить за треком, идущим через спектрометр /9/.

Брун в заметке /6/ высказал некоторые общие идеи о распознавании треков. Он предложил общую схему алгоритма, состоящего из двух ветвей. Прежде всего для события вырабатывается простой критерий, определяющий сложность события.

Если событие простое, то оно обрабатывается по упрощенному, но очень быстрому алгоритму, например, методом <sup>главных</sup> ~~принципиальных~~ компонент. При этом вычисляется матрица  $T$ , собственные вектора и делается преобразование (3). Если событие сложное, то используется общий медленный алгоритм.

В работе /8/ Брун развивает эти идеи. Для грубого распознавания треков он использует гистограмму углов  $\varphi$ . Так как многократное рассеяние не очень важно, то должен получиться пик при

некотором значении  $\varphi$ , соответствующий треку. Однако, если число треков большое или, если фоном нельзя пренебречь, трудно отличить точки трека от фона. Но, если ввести критерий отбора, например, границы  $\varphi$ , определенные с помощью сцинтилляционных счетчиков, то можно гистограммировать только величины  $\varphi$  в пределах этих границ.

Было сгенерировано 10 000 событий с числом треков от одного до пяти с полным количеством ~~точек~~<sup>ТРЕКОВ</sup> 32000. Из них 28000 точек соответствовало сгенерированным трекам, остальные 4000 являлись искусственно введенным фоном.

Из 28000 хороших ~~точек~~<sup>ТРЕКОВ</sup> (их положение моделировалось случайным образом между 0 и 180°) 6000 перекрывались из-за многократного рассеяния (стандартное отклонение - 10°).

Время, необходимое для заполнения  $\varphi$  гистограммы и реконструкции пика, занимало примерно 300 мксек на ДСД 7600 для каждой гистограммы (т.е. события) метод, используемый для обнаружения пика, состоял из нелинейного преобразования, примененного к содержимым ячейки гистограммы.

Преобразование  $b_i = a_i^2$  увеличивает разность между пиками, а преобразование  $c_i = b_{i-1} + b_i + b_{i+1}$  приводит к сглаживанию гистограммы. Здесь  $a_i$  - содержимое  $i$ -ой ячейки гистограммы. Если в одной гистограмме было более, чем пять пиков, эффективность реконструкции резко падала.

Описанный метод позволяет исключить огромное количество плохих комбинаций (без отбрасывания хороших). Для обнаружения хороших координат трека необходимо более строгий критерий.

Такой критерий может быть основан на методе ~~принципиальных~~<sup>главных</sup> компонент /7/. Этот метод был также реализован Бруном на ЭВМ



СДС 7600 (в работе /8/ приведена гистограмма величин  $R = \sum_{i=1}^{2NC} \xi_i^2$   $n = 5, 6, NC$  - количество камер). Однако сведений об эффективности метода и скорости счета в этой статье не содержится.

Таким образом, для распознавания треков в  $\Lambda A$  спектрометра в явном виде были предложены метод вращения (отбор по углу  $\varphi$  или  $\varphi'$ ) /2,4,6,8,9/ и метод главных компонент /6,8/. При этом в /9/ для исключения ложных сигналов предлагается использовать информацию с триггерных эцинтилляционных счетчиков.

Отметим, что, на наш взгляд, метод главных компонент не является адекватным для  $\Lambda A$  спектрометра. Согласно пункту 4,6 для выполнения преобразования (3) в памяти ЭВМ пришлось бы хранить сотни матриц  $T$ , поскольку искомый трек может быть разной длины и зарегистрирован различным набором камер. Кроме того, согласно таблице 6, нельзя полностью игнорировать отсутствие регистрации координат трека в отдельных камерах, а это приводит к необходимости знать матрицы  $T$  для случаев, когда в какой-либо камере отсутствует сигнал. Все это приводит к большим затратам времени ЭВМ на распознавание треков события.

#### 6. Предлагаемый алгоритм распознавания треков для $\Lambda A-4$ спектрометра.

В результате рассмотрения различных методов распознавания треков, их использования на различных спектрометрах, предложенных алгоритмов и состава информации с  $\Lambda A-4$  спектрометра, мы пришли к следующему алгоритму.

Прежде всего подсчитывается среднее количество сигналов с пропорциональных камер. Если количество сигналов близко к 1 (при усреднении не участвуют камеры, в которых нет сигнала), то в спектрометре зарегистрирован один трек (в 80% событиях

для  $H_2$ -мишени и  $\approx 40\%$  для С мишени) и распознавать нечего.

Перед определением импульса имеет смысл проверить трек на гладкость и отбросить нулевые сигналы. Для этого можно воспользоваться методом удаления фоновых точек (пункт 4.7).

Трек или куски трека аппроксимируются полиномом  $k$ -ой степени:

$$R = R(a, z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_k z^k \quad (4)$$

и вычисляется среднеквадратичный разброс точек относительно аппроксимирующей кривой (4)

$$\Delta R = \sqrt{\chi^2_{\min} / (n - k)} \quad (5)$$

Здесь

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad - \text{расстояние от оси спектрометра до точки с координатами } (x, y),$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n [R_i - R(a, z_i)]^2,$$

$n$  - количество пар камер  $(x, y)$ , в которых зарегистрирован трек.

Если  $\Delta R < C_1$ , то выбрасывается точка с максимальным  $\Delta R_i$  и процедура повторяется до тех пор, пока или  $\Delta R < C_1$  или  $n = k$ .

Совокупность точек считается треком, если количество точек в ней превышает величину  $C_2$  и ее (или отдельные куски) можно аппроксимировать полиномом (4) со среднеквадратичным отклонением меньшим  $C_1$ .

Если зарегистрированное количество координат в некотором числе камер (например пяти) составляет 2 и более, то зарегистрировано по крайней мере два трека и необходимо их распознавание (в 16% событий для  $H_2$ -мишени и 41% событий для С-мишени).

Прежде всего необходимо удалить ложные комбинации  $\{x, y\}$ . Для этого предлагается использовать сигналы с триггерных счетчи-

ков. Правильная комбинация  $(x, y)$  должна удовлетворять неравенствам

$$\begin{cases} R_1^k \leq R \leq R_2^k \\ \varphi_c - \Delta\varphi^k \leq \varphi \leq \varphi_c + \Delta\varphi^k \end{cases}$$

Здесь  $\varphi = \text{arctg } y/x$ ,  $\varphi_c$  - зарегистрированная угловая координата в кольце счетчика с номером  $k$ . Величины  $R_1^k, R_2^k, \varphi^k$ , взятые из /36/, приведены в таблице 10.

Таблица 10

№ счет- чика	$R_1^k, \text{ см}$	$R_2^k, \text{ см}$	$\Delta\varphi^k, \text{ град}$
1	40	60	8,6
2	60	80	6,2
3	80	100	4,8
4	100	120	3,7
5	120	150	3,2

Далее предлагается два метода распознавания треков:

Первый метод использует выделение "кандидата в треки" методом вращения и последующее удаление фоновых точек. Для этого подсчитывается количество точек в различных интервалах по углу  $\varphi' = \text{arctg } \frac{y-y_1}{x-x_1}$ . В качестве первой точки с координатами  $(x_1, y_1)$  берутся последовательно все точки в первой паре камер  $(\dots)$ , в которых зарегистрированы сигналы. Размер интервала по углу  $\varphi'$  равен  $C_3$ . Считается, что в данном интервале находится "кандидат в треки", если количество попавших в него точек превышает величину  $C_4$ . Если по соседству с этим интервалом находится интервал с количеством точек  $C_5$ , то они объединяются вместе. Далее из определенного таким образом "кандидата в треки" производится удаление фоновых точек методом, описанным ранее.

Для того, чтобы быть уверенным, что не потеряны точки трека, производится экстраполяция по параболе в соседние левую и правую камеры. Если в этих камерах найдутся точки с координатами  $\varphi, R$  в интервалах  $|\varphi - \bar{\varphi}| < C_6$  и  $|R - R^{\bar{\varphi}}| < C_7$ , то происходит присоединение этих точек к треку. Здесь  $\bar{\varphi}$  - среднее значение азимутального угла для точек трека,  $R^{\bar{\varphi}}$  - экстраполированное значение  $R$ .

Если присоединение произошло, то для образовавшейся совокупности точек трека вычисляются коэффициенты  $a_0, \dots, a_k$  и процедура повторяется.

Для того, чтобы отличить гало-мюон от образовавшегося в мишени мюона вычисляется производная в первой точке трека

$$dR/dz = \sum_{l=1}^k l a_l z^{l-1}$$

Если  $|dR/dz| < C_8$ , то трек считается от гало-мюона.

Второй метод распознавания треков базируется на идеях метода двумерной гистограммы (пункт 4.4) и на свойствах треков  $\Lambda A$  спектрометра - квазикомпланарность и возможность аппроксимации параболой. Из первого вытекает, что разности полярных углов двух точек трека  $\Delta \varphi_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i$  должны быть постоянны, из второго - постоянство второй производной  $\partial^2 R / \partial z^2 = 2a_2$ . Вторую производную приближенно можно определить по формуле:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial z^2} = \frac{(\frac{\partial R}{\partial z})_{i+1} - (\frac{\partial R}{\partial z})_i}{z_{i+1} - z_i} \approx \frac{R_{i+2} - 2R_{i+1} + R_i}{(\Delta z)^2}$$

$$\Delta z = z_{i+2} - z_{i+1} = z_{i+1} - z_i \quad - \text{расстояние между камерами.}$$

Если построить двумерную гистограмму, по одной оси которой откладывать величины  $\Delta \varphi$ , другой - вторые производные  $\partial^2 R / \partial z^2$ , то точки, принадлежащие треку, будут концентрироваться в виде пика.

Поэтому предлагается следующий метод. Для возможных комбинаций пар соседних точек вычисляются величины  $\Delta \varphi$ , а для всех сосед-

них троек - величины  $\frac{\partial^2 R}{\partial z^2}$ . Подсчитывается количество точек в прямоугольной плоскости с размерами  $S_9$  x  $S_{10}$ . Если количество точек в каком-либо прямоугольнике превышает величину  $S_{11}$ , то это является указанием на существование трека. Далее производится удаление фоновых точек и опознавание гало-мюона.

Константы  $S_1-S_{11}$  и степень полинома  $K$  предполагается определить с помощью смоделированных программой HALO треков /3,5/

Определение эффективности предложенных алгоритмов распознавания и скорости счета на ЭВМ предполагается выполнить на основе моделирования регистрируемой информации со спектрометра (сигналы с пропорциональных камер и триггерных счетчиков) для различных комбинаций треков глубоконеупругорассеянных мюонов, треков гало-мюонов и шумовых сигналов в пропорции, определенной в пункте 3.

*Смирнов*

Л и т е р а т у р а.

1. I. Golutvin et al. An experiment to extend the inclusive deep inelastic muon scattering on hydrogen and deuterium to the highest energies and four-momentum transfers available at the SPS. CERN/SPSC/74-79. Date - 1.8.74.
2. V. Kukhtin, G. Vesztergombi. Some outputs from new version of Monte-Carlo program (HALO program). Memorandum-18.05.75. *Proceedings of the CERN-JINR NA4 collaboration, 1975.*
3. V. Kukhtin, G. Vesztergombi. M-C program for NA-4 experiment. Memorandum - 16.05.75. *CERN, NA4 Collaboration, 1975.*
4. Software people NA4 collaboration. Organization of programs to study characteristics and performance of the set-up. Date - 15.5.75. *CERN, Memorandum NA4 Collaboration, 1975.*
5. V. Kukhtin, G. Vesztergombi. M-C tape with muon trajectories. 17.5.75. *CERN, Memorandum NA4 Collaboration, 1975.*
6. R. Brun. Some ideas about pattern recognition and momentum fitting. *CERN, Memorandum NA4 Collaboration, 1975.*
7. M. Hansroul. A track finding method for the R 603 spectrometer. *CERN, Memorandum, 1975.*
8. R. Brun. Software status, Pattern recognition and momentum fit. 3.9.75. *CERN, Memorandum NA4 Collaboration, 1975.*
9. J. F. Renardy, G. Smadja. Mini memo on the off-line analysis of experiment P19. *CERN, Memorandum NA4 Collaboration, 1975.*
10. M. Hansroul et al. The application of multi-dimensional analysis techniques to the processing of event data from large spectrometers. CERN-DD/73/21, 1973.
11. M. Hansroul and C. Verkerk. Point and Track Finding Processors for Multiwire Chambers. CERN-DD/73/23, 1973.
12. H. Grote et al. Identification of Digitized Particle Trajectories. CERN-DD/73/23, 1973.

13. Р.Г.Аствацатуров и др. ПТЭ, 5,21,1972.
14. Н.Н.Говорун и др. Программа распознавания и геометрической реконструкции событий, регистрируемых установкой "Фотон". Труды совещания по программированию и математическим методам решения физических задач, ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974.
15. Н.Н.Говорун и др. Определение параметров бесфильмовых искровых камер. ОИЯИ, Р5-5397, 1970.
16. P.Zanella. Data processing for film and filmless spark chamber experiments. ОИЯИ, Р10-4245, 1968. Лекция, прочитанная на школе ОИЯИ по применению ЭВМ.
17. Д. Вестергомби и др. Программа геометрической реконструкции событий для бесфильмового искрового спектрометра. ОИЯИ, Р10-7284 1973.
18. Д.Вестергомби. Геометрич.прогр.реконстр.событ.ОИЯИ,1-7799,1974.
19. V.Kukhtin. Some comments about the logics for the trigger of the experiment NA-4, Memorandum - 15.9.75. CERN, NA4 Collaboration, 1975.
20. Н.Н.Говорун и др. Программы распознавания прямолинейных треков, регистрируемых посредством искровых камер. ОИЯИ,10-7303, 1973.
21. B.C.Duff et al. The selection of spark chamber tracks by computer methods. NIM 54 (1967) 132.
22. D.R.Gilbert et al. Track recognition code for a magnetic multiparticle spectrometer. NIM 116 (1974) 501.
23. В.В.Вишняков и др. Программы сбора и обработки данных с бесфильмовых проволочных камер пятиметрового искрового спектрометра МИС ОИЯИ, ОИЯИ,10-7966, 1974.
24. Г.А.Ососков. Математич.моделирование треков при спиральном сканировании. ОИЯИ,Р11-4463,1969.
25. В.Е.Комолова и др. Матем.обеспечение просмотрного автомата типа "Спиральный измеритель". Прогр.фильтрации. Материалы совещ. по программированию. ОИЯИ,11-4655,1969, стр.149.
26. N.Doble. Notes on size and halo of the muon beam M2. 23.9.1974. CERN, Memorandum, 1974.
27. Rome-Naples group. Beam Hodoscopes for experiment NA4. December 1975. CERN, Memorandum NA4 Collaboration.

28. Л.А.Саннер . Программа на автокоде HP-АССЕМБЛЕР для распознавания прямолинейных треков, регистрируемых проволочными камерами. ОИЯИ 10-8428, 1974.
29. В.К.Барулев и др. Конструкция и рабочие характеристики пропорциональной камеры площадью  $600 \times 300 \text{ мм}^2$ , ОИЯИ, 13-7013, 1973.
30. Р.А.Астабатьян и др. Конструкция и характеристики пропорциональной камеры с рабочей площадью  $900 \times 300 \text{ мм}^2$ . ОИЯИ P13-8188, 1974.
31. В.Г.Аджеев и др. Исследование пропорциональных камер с регистрирующей электроникой, переданной в производство фирме "Полон". ОИЯИ 8829, 1975.
32. А.В.Зарубин и др. Характеристики малых разборных однокоординатных пропорциональных камер. ОИЯИ, 8941, 1975.
33. F.Muller, I.Golutvin. Short meeting on april, 24, 1975. CERN, Memorandum NA4 Collaboration.
34. G.Vesztergombi. Some speculations about Halo reduction (16.4.1975). CERN, Memorandum NA4 Collaboration.
35. J.F.Arens. IEEE Transactions on Nuclear Science NS-21, No.6, 403, 1974. Spark chamber track finding program.
36. C.Rubbia. Status report on the trigger counters for the SPS experiment P19. CERN/D.Ph. II /T M002/1975.