



✓  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

SU8807853

ITEP -- 147 (1987)

Б.В.БОЛОНКИН, В.В.МИЛЛЕР,  
В.Н.НОЗДРАЧЕВ, А.И.СУТОРМИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В 6-МЕТРОВОМ СПЕКТРОМЕТРЕ ИТЭФ

Препринт №147

Москва - Ленинград - 1987

УДК 539.172

М-16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА 6-МЕТРОВОМ  
СПЕКТРОМЕТРЕ ИТЭФ: Препринт ИТЭФ 87-147/

Б.В.Болонкин, В.В.Мельер, В.Н.Ноздрачев, А.И.Сутормин - М.:  
ИНИИатоминформ, 1987 - 28с.

Рис. - 16, список лит. - 10 назв.

## 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ СПЕКТРОМЕТРА

6-метровый магнитный спектрометр ИТЭФ /1/ установлен на пучке вторичных частиц протонного синхротрона ИВЭЭ.

Кинематика отдельных случаев взаимодействия частиц пучка и мишени восстанавливается путем определения координат и импульсов заряженных продуктов реакций, регистрируемых трековой частью спектрометра.

### 1. Электродинамические искровые камеры

Трековый детектор размещается в зазоре электромагнита длиной 6 м, сечением  $150 \times 80$  см<sup>2</sup>, с номинальным значением индукции 1,9 Тл в середине зазора. Детектор состоит из 64 искровых камер с электродинамическим способом съема информации /2/. Камеры располагаются приблизительно равномерно с шагом 8,5 см. Проволочные электроды камер имеют шаг намотки 1,5 мм, расстояние между электродами 14 мм. Намотка одного из электродов - по вертикали, второго - под углом  $+15^\circ$  или  $-15^\circ$  к вертикали.

При подаче на камеры высоковольтного импульса сигналы с пьезодатчиков, содержащие информацию о координатах искр, поступают на время-цифровые преобразователи (ВЦП). Информация с ВЦП считывается в ЭВМ и записывается на магнитную ленту. С каждого электрода может быть принято до 16 сигналов, в том числе два реперных, используемых при определении индивидуальной скорости ультразвуковой волны в звуководах и при калибровке спектрометра.

Частота генератора ВЦП 20 МГц. Скорость ультразвуковой волны в звуководах  $\sim 3,17 \cdot 10^3$  м/с, но зависит от материала звуковода и от температуры.

В камерах используется постоянное электрическое очищающее поле ( $\sim 150$  В/см). В комбинации с магнитным оно обеспечивает определенное поперечное смещение ионизованного следа за время от пролета частицы до подачи высоковольтного импульса. Направления поперечных смещений искр в соседних камерах противоположны. Величина смещения используется для выявления треков, не относящихся к изучаемому событию.

Специальная расстановка камер с чередованием различных углов наклона проволок и положений звуководов и датчиков на звуководах позволяет исключить систематические ошибки при определении траекторий частиц, по которым восстанавливаются их импульсы.

Исследования характеристик электродинамических камер в реальных условиях эксплуатации /2/, /5/ дали следующие результаты:

- средняя точность локализации искры в плоскости электродов (для треков с углами к нормали камеры  $< 0,5$  радиан)  $\sim 0,4$  мм;
- пространственное разрешение 2 искр  $\sim 6$  мм;
- время памяти камер  $\sim 1,5$  мкс ;
- временное разрешение  $\sim 100$  нс ;
- эффективность регистрации 6 искр  $\sim 0,8$  .

В работах /2/, /5/ была показана также необходимость тщательного учета как индивидуальных геометрических характеристик и взаимного расположения камер, так и специальных параметров расчетной модели и их зависимости от величины магнитного поля вдоль траектории частицы.

2. Геодезические измерения. Система координат

Принятая на спектрометре общая система координат имеет начало в середине зазора на переднем срезе железа магнита (на входе пучка). Ось X направлена горизонтально вдоль оси магнита (по пучку), ось Y - горизонтально влево, ось Z - вверх. Точная привязка системы координат к железу магнита описана в работе /3/.

На спектрометре имеется журнал геодезической аттестации всех изготовленных электродинамических камер.

Геодезические съёмки взаимного расположения камер в пакете и всего пакета относительно системы координат проводятся перед началом и по окончании каждого сеанса, а также при ремонте и замене отдельных камер. Результаты измерений для всех сеансов хранятся на магнитной ленте. Данные приведены к общей системе координат спектрометра и содержат следующие величины для каждого из 128 электродов:

1. Координаты точек касания двух реперных проволок со звуководом и точек, симметричных им относительно оси  $Y$ .

2. Тангенсы углов наклона проволок к оси  $Z$ ; положительные углы отсчитываются от положительного направления оси  $Z$  к положительному направлению оси  $Y$ .

Точность геодезических измерений:

$$\Delta X = 0,5 \text{ мм}, \Delta Y = 0,1 \text{ мм}, \Delta Z = 0,3 \text{ мм}.$$

### 3. Магнитное поле

Магнитное поле спектрометра измерено в объеме  $11,5 \times 1,28 \times 0,68 \text{ м}^3$  с точностью  $5 \cdot 10^{-4}$  Тл при трех значениях тока электромагнита: номинальном,  $0,8 I_{\text{ном}}$  и  $0,45 I_{\text{ном}}$  /4/. Сетка измерений имеет шаг 0,2, 0,8 и 0,4 см по осям  $X, Y, Z$  соответственно. Значение вертикальной компоненты в середине зазора при номинальном токе составляет  $\sim 1,9$  Тл. Поле является существенно неоднородным, особенно вблизи границ рабочего объема, и требует учета всех трех компонент.

При магнитных измерениях уделялось особое внимание геодезической привязке сетки измерений к общей системе координат спектрометра и параллельности измеряемых компонент поля направлениям осей координат.

Система стабилизации тока магнита обеспечивает стабильность магнитного поля во время сеансов не ниже  $5 \cdot 10^{-4}$  Тл. Соответствие поля с данными магнитных измерений проверяется пробными измерениями в контрольной точке по методике ядерного магнитного резонанса.

Выбор рабочего тока магнита определяется типом изучаемых физических процессов.

При обработке событий используется аналитическое представление поля /4/ или разреженная сетка с линейной интерполяцией.

## II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

### I. Анализ калибровочных пучковых серий

Обработка материала конкретного эксперимента начинается с анализа специальной калибровочной серии пучковых треков, снятой при различных значениях очищающего и магнитного полей. В результате анализа определяются поправки к геодезическим данным, учитывающие форму и задержки сигналов в электронике съема информации, задержку тока искр относительно тока в реперных проволоках. Эти поправки позволяют уточнить значения отсчетов ВЦЦ, соответствующие точкам  $Y = Z = 0$  (оси спектрометра) для каждого звуковода.

Здесь же производится и оценка специальных констант расчетной модели камеры /5/, определяемых пространственной формой искры и подвижностью электронов ионизованного канала в газовой смеси.

К ним относятся:

I. Расстояние "эквивалентных" поверхностей электродов с вертикальными ( $d_1$  норм) и наклонными ( $d_2$  норм) проволоками от геометрической средней плоскости камеры. Эти поверхности выделяют часть канала искры, параллельную траектории частицы. Константы отнесены к нормировочному магнитному полю, в качестве которого выбирается  $B_z$  - компонента в середине зазора магнита ( $X=300$  см,  $Y=Z=0$ ).

2. Компонента  $B_0$ , входящая в формулу зависимости  $d_1, d_2$  и поперечного сноса  $S$  от магнитного поля (см. раздел III).

Методика подбора констант описана в работе /5/. Значения  $d_{1\text{норм}}$ ,  $d_{2\text{норм}}$ ,  $B_0$  уточняются после пробного определения параметров треков с большими углами в горизонтальной плоскости ( $\sim 1000$  событий).

Порядок величины используемых констант:  $d_{1\text{норм}} = 3.5$  мм,  $d_{2\text{норм}} = 5.0$  мм,  $B_0 = (0.7 + 1.3)$  Тл.

## 2. Результаты программы поиска треков

Существенной частью системы обработки является программа поиска треков. Среди всех зарегистрированных в событии отсчетов ВШП программа выделяет последовательности, относящиеся к отдельным траекториям. Применяемая в настоящее время методика описана в работе /6/.

Найденные треки представляются в виде последовательностей из 128 чисел, соответствующих всем 128 электродам камер в порядке их расстановки в пакете. Треки могут начинаться и оканчиваться в произвольных позициях этих последовательностей, а также иметь пропуски из-за неэффективности регистрации и поиска. Позиции, не содержащие данных для трека, отмечаются специальным признаком и в обработке не используются.

Все числа приведены к общей системе координат по формуле:

$$M_i = \pm (L_i - 0.5(R_{1i} + R_{2i})) + h_i, \quad i = 1, 2, \dots, 128,$$

где  $L_i$  - исходный отсчет ВШП для точки трека на  $i$ -м электроде,  $R_{1i}$ ,  $R_{2i}$  - отсчеты ВШП, соответствующие 1 и 2 реперным проволокам на  $i$ -м электроде,  $h_i$  - поправки, определяемые при анализе пучковой серии.

Знак выбирается так, чтобы числа  $M_i$  возрастали в направлении оси  $Y$  спектрометра.

Отсчеты для двух треков с расстоянием менее 6 мм друг от друга снабжаются специальным признаком меньшей надежности.

Найденные треки зарегистрированы не менее чем в 5 камерах, по крайней мере две из которых имеют противоположные направления поперечного сноса искр. Это гарантирует возможность определения параметров.

В каждом событии определяются также значения отсчетов ВПЦ, соответствующие 1 и 2 реперным проволокам для всех звуководов.

Результаты работы программы поиска треков вместе с константами  $d_{1\text{норм}}$ ,  $d_{2\text{норм}}$ ,  $B_0$  и результатами геодезической привязки камер являются исходными данными для программы определения параметров треков заряженных частиц в магнитном поле.

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Назначением программы определения параметров является восстановление с наименьшими ошибками координат хотя бы одной из точек траектории и определение в ней величины и направления импульса частицы. К числу определяемых параметров относится также величина поперечного смещения искр, характеризующая время возникновения трека в спектрометре.

#### I. Восстановление пространственных координат искр на треках

Пространственные координаты искр согласно расчетной модели электродинамической камеры /5/ определяются на геометрически средней поверхности между электродами.

Существенным является предположение о наличии в искре промежутка, параллельного траектории частицы, хотя и смещенного в направлении оси  $Y$ . Это дает возможность учесть влияние горизонтального ( $\varphi$ ) и вертикального ( $\lambda$ ) углов траектории в отдельных камерах на формирование отсчетов ВПЦ.

Параллельный траектории участок искры ограничен "эквивалентными" положениями электродов, расстояния которых от медианной поверхности камеры различны для вертикальных ( $d_1$ ) и наклонных ( $d_2$ ) проволок. Поэтому и величины соответствующих угловых поправок различны. Знаки поправок противоположны для электродов, расположенных за и перед средней плоскостью относительно направления пролета частицы.

Расстановка камер в пакете такова, что передними оказываются поочередно электроды с наклонными (2) и вертикальными (1) проволоками (в первой камере первый электрод с наклонными). Если обозначить индексом "1" электрод с вертикальными, а индексом "2" - с наклонными проволоками, для отсчетов ВЦП можно записать:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{1}{V_1} (Y - Z \operatorname{tg} \alpha_1 + f(N) \cdot d_1 \operatorname{tg} \varphi - f(N) \cdot \frac{d_1}{\cos \varphi} \operatorname{tg} \lambda \operatorname{tg} \alpha_1 \\ M_2 = \frac{1}{V_2} (Y - Z \operatorname{tg} \alpha_2 - f(N) \cdot d_2 \operatorname{tg} \varphi + f(N) \cdot \frac{d_2}{\cos \varphi} \operatorname{tg} \lambda \operatorname{tg} \alpha_2 \end{cases} \quad (1)$$

где  $Y Z$  - пространственные координаты искры на медианной поверхности камеры,

$\varphi \lambda$  - горизонтальный и вертикальный углы наклона траектории в этой точке,

$V_1 V_2$  - скорости ультразвуковой волны в звуководах [см / период генератора ВЦП ],

$\alpha_1 \alpha_2$  - углы наклона проволок электродов,

$d_1 d_2$  - расстояния эквивалентных электродов от медианной поверхности в данной точке.

$$f(N) = \begin{cases} +1 & \text{для нечетных номеров камер } N, \\ -1 & \text{для четных; } N = 1, 2, \dots, 64. \end{cases}$$

Решая (1) относительно  $Y$  и  $Z$ , получим:

$$Z = \frac{M_2 V_2 - M_1 V_1}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1} - f(N) \frac{d_2 + d_1}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1} \operatorname{tg} \varphi + f(N) \frac{d_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + d_1 \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\cos \varphi},$$

$$Y = M_1 V_1 + Z \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 - f(N) \cdot d_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi + f(N) \cdot \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\cos \varphi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Поскольку углы  $\varphi$  и  $\lambda$  заранее неизвестны, вычисление пространственных координат ведется методом последовательных приближений. В качестве нулевого приближения определяются:

$$Z^0 = \frac{M_1 V_1 - M_2 V_2}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}, \quad Y^0 = M_1 V_1 + Z^0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Координаты  $X$  точек  $(Y, Z)$  на медианной поверхности каждой камеры вычисляются из геодезических данных (координат точек касания звуководов и реперных нитей) линейной интерполяцией.

$\operatorname{tg} \varphi$  в каждой точке определяется в предположении его линейной зависимости от  $X$  вдоль траектории:

$$\operatorname{tg} \varphi = A + B \cdot X.$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  оцениваются методом наименьших квадратов. Для этого предварительно вычисляются:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{Y_{i+1}^0 - Y_{i-1}^0}{X_{i+1} - X_{i-1}} \quad \text{в точках} \quad X_i = X_{i-1} + \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2},$$

$$i = 2, 3, \dots, 64.$$

Индексы  $i+1$ ,  $i-1$  соответствуют зарегистрированным искрам, а  $i$  — промежуточным точкам. Шаг через одну камеру выбран для исключения влияния поперечного сноса искр, направленного в противоположные стороны в соседних камерах.

Уточнение координат производится по формулам:

$$Z^1 = Z^0 - f(N) \cdot \frac{d_2 + d_1}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad Y^1 = Y^0 - f(N) \cdot d_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

$\operatorname{tg} \lambda$  оценивается как параметр  $F$  прямой  $Z = E + F \cdot X$  и определяется методом наименьших квадратов по уточненным значениям  $Z_i^1$ . Если точек на треке достаточно много, для упрощения при вычислении  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $\operatorname{tg} \lambda$  используется лишь часть из них.

Дальнейшее уточнение координат производится по формулам:

$$Z = Z^1 + f(N) \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad Y = Y^1$$

Здесь мы пренебрегаем слагаемыми  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  мм.

Положения эквивалентных поверхностей электродов в зависимости от величины  $B_z$  магнитного поля в каждой точке /5/ вычисляются по формулам:

$$d_i = \frac{D}{2} - \left( \frac{D}{2} - d_{i \text{ норм}} \right) \cdot \frac{1 + \left( \frac{B_z \text{ норм}}{B_0} \right)^2}{1 + \left( \frac{B_z}{B_0} \right)^2}, \quad i = 1, 2,$$

где  $B_0, d_{i \text{ норм}}$  - константы, определенные по калибровочной серии,

$B_z \text{ норм}$  - поле в середине зазора магнита (нормировочное),

$D$  - геометрическая ширина искрового промежутка камер.

Скорость ультразвуковой волны в звуководах определяется делением длины звуковода между реперными проволоками на разность соответствующих им отсчетов ВЦП в каждом событии. Опыт показывает возможность более редкого контроля благодаря плавности изменений температуры в зазоре магнита.

Вычисленные пространственные координаты  $(X, Y, Z)_i$ .

$i = 1, 2, \dots, N$  искр на треке используются в процедуре определения параметров треков.

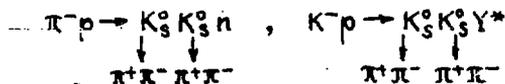
При фитировании расчетных траекторий (см. след. раздел) после исключения поперечного сноса искр получаются следующие типичные среднеквадратичные отклонения искр на треках от точек расчетной

траектории:

$$\overline{\Delta Y} = 0,45 \text{ мм}, \quad \overline{\Delta Z} = 2,3 \text{ мм}.$$

(при импульсах  $0,5 < p < 36 \text{ ГэВ/с}$ ).

На рис. I-3 приведены гистограммы среднеквадратичных отклонений по  $Y$  и  $Z$  на треках и распределение треков по количеству зарегистрированных искр для реакций из "нейтрального триггера" типа:



## 2. Основной алгоритм программы определения параметров

Параметры трека частицы определяются в точке на расчетной траектории с координатой  $X$ , соответствующей первой зарегистрированной на треке искре. Исключения составляют значения поперечного сноса, которое нормируется на магнитное поле в середине зазора магнита, и модуль импульса, не меняющийся в магнитном поле.

Список параметров:

1.  $Y$  - координата [см] точки траектории,
2.  $Z$  - координата [см] точки траектории,
3.  $\frac{q}{p}$ , где  $p$  - модуль импульса [ГэВ/с],  
 $q$  - заряд (со знаком) [e],
4.  $\varphi$  - горизонтальный угол [радиан] проекции вектора импульса на плоскости  $XY$ , отсчитываемый от положительного направления оси  $X$  к положительному направлению оси  $Y$ ;  $0 \leq \varphi < 2\pi$ .
5.  $\lambda$  - вертикальный угол [радиан] вектора импульса; положительные значения соответствуют углам, отсчитываемым от горизонтальной плоскости к положительному направлению оси  $Z$ ;  $-\frac{\pi}{2} < \lambda < +\frac{\pi}{2}$ .

6.  $S_{\text{норм}}$  - Значение поперечного сноса искр [ см ], приведенное к магнитному полю в середине зазора магнита.

"Измеренными" величинами считаются восстановленные пространственные координаты искр  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ;  $(i = 1, 2, \dots, N)$ .

Метод определения параметров является традиционным и неоднократно применялся ранее на различных физических установках /7/. Он основан на численном решении системы двух дифференциальных уравнений второго порядка для траектории заряженной частицы в магнитном поле и использовании метода наименьших квадратов при оценке параметров и их ошибок.

Новым является включение дополнительного параметра - поперечного сноса искр в скрещивающихся электрическом и магнитном полях - в число параметров, оцениваемых методом наименьших квадратов. Это вызвано необходимостью достижения максимальной точности с учетом зависимости сноса от величины магнитного поля в каждой камере. Новый параметр характеризует время возникновения трека в спектрометре по отношению к сигналу запуска и используется для выявления треков, не относящихся к данному событию.

Схема вычислений следует из вида уравнений траекторий:

$$\begin{cases} \frac{p}{qk} Y'' = (1 + Y'^2 + Z'^2)^{\frac{1}{2}} \cdot [ B_x Z' + B_y Y' Z' - B_z (1 + Y'^2) ] \\ \frac{p}{qk} Z'' = (1 + Y'^2 + Z'^2)^{\frac{1}{2}} \cdot [ -B_x Y' - B_z Y' Z' + B_y (1 + Z'^2) ], \end{cases}$$

где  $Y' = dY/dX$ ,  $Z' = dZ/dX$ ,

$k$  - константа, зависящая от выбора системы единиц.

При  $[l] = \text{см}$ ,  $[B] = \text{кгаусс}$ ,  $[q] = e$ ,  $[p] = \text{ГэВ}/c$

$k = 2.997925 \cdot 10^{-4}$ .

Вычисления проводятся в следующей последовательности:

1. Определение необходимости и задание координат  $X$  дополнительных промежуточных точек на треке для учета неоднородности магнитного поля.

2. Поворот системы координат для обеспечения условий быстрой сходимости итераций:  $|Y'| < 1$ ,  $|Z'| < 1$ .

3. Интерполяция по измеренным точкам и вычисление  $Y_i$  и  $Z_i$  - координат дополнительных промежуточных точек.

Численная оценка первых производных  $Y'_i$  и  $Z'_i$  по интерполяционной кривой.

Вычисление компонент магнитного поля  $(B_x, B_y, B_z)_i$  для измеренных и дополнительных точек,  $i = 1, 2, \dots, N_{sum}$  в повернутой системе координат.

4. Вычисление правых частей в уравнениях траектории для всех измеренных и дополнительных точек:

$$\frac{d}{dk} Y_i'' = A(X_i), \quad \frac{d}{dk} Z_i'' = C(X_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_{sum}$$

5. Проведение сглаживающих кривых среди значений  $A(X_i)$ ,  $C(X_i)$  и численная оценка однократных

$$I(X_i) = \int_{v=X_1}^{v=X_i} A(v) dv, \quad J(X_i) = \int_{v=X_1}^{v=X_i} C(v) dv$$

и двойных интегралов сглаживающих кривых:

$$II(X_i) = \int_{u=X_1}^{u=X_i} I(u) du, \quad JJ(X_i) = \int_{u=X_1}^{u=X_i} J(u) du$$

для измеренных и дополнительных точек.

После этого координаты точек расчетной траектории можно представить в виде:

$$Y_i^P = a_1 + a_2 X_i + \frac{qk}{p} II(X_i), \quad Z_i^P = b_1 + b_2 + \frac{qk}{p} JJ(X_i),$$

где константы интегрирования имеют смысл:

$a_1$  - координата  $Y$ ,

$b_1$  - координата  $Z$ ,

$a_2$  - тангенс горизонтального угла  $\varphi$ ,

$b_2$  - тангенс вертикального угла  $\lambda$

в первой зарегистрированной точке ( $X=X_1$ ).

6. Применение стандартной процедуры метода наименьших квадратов с учетом недиагональной весовой матрицы измерений (см., например, /8/). По  $N$  измеренным (без промежуточных точек) значениям  $Y_i, Z_i$  (всего  $2 \cdot N$  данных) определяются 6 параметров трека:  $a_1, b_1, a_2, b_2, q/p, S_{\text{норм}}$  и соответствующая матрица ошибок параметров. При этом измеренные значения  $Z_i$  сравниваются с расчетными  $Z_i^P$ , а измеренные значения  $Y_i$  - с  $Y_i^{P+j(N) \cdot S_i}$ , где  $S_i$  - поперечный снос в данной точке /5/:

$$S_i = \frac{1 + \left(\frac{B_{Z\text{норм}}}{B_0}\right)^2}{B_{Z\text{норм}}} \cdot \frac{|B_{Zi}|}{1 + \left(\frac{B_{Zi}}{B_0}\right)^2} \cdot S_{\text{норм}}$$

7. Проверка условий достаточности итераций. Уточнение значений первых производных в измеренных и дополнительных точках:

$$Y'_i = a_2 + \frac{qk}{p} \cdot I(X_i), \quad Z'_i = b_2 + \frac{qk}{p} \cdot J(X_i), \quad i=1, 2, \dots, N_{\text{SUM}}$$

и начало новой итерации с п.4.

8. По завершении последней итерации производится преобразование параметров и матрицы ошибок из повернутой в исходную систему координат спектрометра и переход от  $\text{tg}\varphi, \text{tg}\lambda$  к углам  $\varphi, \lambda$ . Для упрощения преобразования матрицы ошибок используется промежуточный переход от переменных  $\text{tg}\varphi, \text{tg}\lambda, q/p$  к  $p_x, p_y, p_z$ . Преобразования матрицы ошибок выполняются по формулам:

$$(M)_{\text{нов}} = (D) \cdot (M)_{\text{стар}} \cdot (D)^T$$

где  $(D)$  – матрица I-х производных новых переменных по старым,  
 $(D)^T$  – транспонированная матрица  $(D)$ .

При определении необходимости учета магнитного поля в промежуточных точках (п.1) достаточным считается наличие на треке точек с шагом 8,5 см вдоль оси X. На таких интервалах даже линейная интерполяция имеет точность магнитных измерений в основном объеме магнита и  $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$  в области наибольшего градиента поля.

При повороте системы координат предполагается, что условие  $|Z'| < 1$  выполняется автоматически и достаточным является лишь поворот в горизонтальной плоскости, так чтобы новая ось X была параллельна проекции прямой, соединяющей первую и последнюю точки трека.

В п.п. 3 и 5 мы целиком используем методику, разработанную и описанную в работе /7/, которая дает выигрыш во времени (при одинаковой точности) по сравнению с методом Рунге-Кутты.

Сглаживание сплайнами 3 порядка среди значений  $A(X_i)$ ,  $C(X_i)$ , содержащих информацию о неоднородности магнитного поля, эквивалентно приближению траектории сплайнами 5 порядка.

Метод интегрирования приблизительно соответствует методу Симпсона.

В программе используются получившие широкое распространение подпрограммы SPLFIT, SPLIN3, DTSP (CERN).

При реализации метода наименьших квадратов (п.6) учитывается неравноточность "измеренных" данных  $Y_i$  и  $Z_i$  и их взаимозависимость. Весовая матрица для пары переменных Y, Z в одной камере вычисляется из приближенных формул:

$$Y \approx y_1, \quad Z \approx \frac{1}{\tan \alpha_2} \cdot y_1 - \frac{1}{\tan \alpha_2} \cdot y_2,$$

где  $y_1 = M_1 V_1$ ,  $y_2 = M_2 V_2$  (см. восстановление пространственных координат).

Если считать  $Y_1$  и  $Y_2$  независимыми и примерно равноточными с  $\epsilon = \overline{\Delta Y} = 0.45$  мм, для матрицы связей переменных  $(Y, Z)$  получается:

$$(S) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2} & -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon^2 & 0 \\ 0 & \epsilon^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2} \\ 0 & -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon^2 & \frac{\epsilon^2}{\operatorname{tg} \alpha_2} \\ \frac{\epsilon^2}{\operatorname{tg} \alpha_2} & \frac{2\epsilon^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha_2} \end{pmatrix}$$

и для их весовой матрицы:

$$(W) = (S)^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{2}{\epsilon^2} & -\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\epsilon^2} \\ -\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\epsilon^2} & \frac{1}{\epsilon^2} \end{pmatrix}.$$

Измерения  $(Y, Z)$  в разных камерах считаются независимыми.

Для точек, отмеченных при поиске треков признаком меньшей надежности, используется удвоенная ошибка  $\epsilon$ .

Кулоновское рассеяние частиц на веществе спектрометра оценивается по приближенной формуле:

$$\epsilon_1^2 = \frac{2.25 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot l_{\text{рад}}} \cdot \frac{l^3}{p^2},$$

где  $p$  - импульс частицы [ГэВ/с],

$l$  - расстояние [см] от I-й точки трека,

$l_{\text{рад}}$  - средняя радиационная длина вещества спектрометра,

$$l_{\text{рад}} = 6800 \text{ см.}$$

При  $p = 10$  ГэВ/с,  $l = 200$  см,  $\epsilon_1^2 = 0.33 \epsilon^2$ .

Влияние кулоновского рассеяния учитывается отдельно в каждой камере путем введения поправки в её весовую матрицу.

Если считать суммарной дисперсией  $(\epsilon')^2$  на звуководе  $(\epsilon')^2 = \epsilon^2 + \epsilon_1^2$ , то новая весовая матрица будет:

$$(W') = (W) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_1^2}{\epsilon^2}},$$

Поправки вводятся на второй итерации, т.к. до этого отсутствует информация об импульсе частицы.

Расчеты МНК ведутся подпрограммами LSFIT, SYMMAT (библиотека CERN), модифицированными для вычисления дополнительного параметра.

Опыт эксплуатации программы определения параметров показал, что в подавляющем большинстве случаев процесс сходится после второй итерации. Это объясняется тем, что исходные данные не являются "сырыми" измерениями, а подвергаются тщательному предварительному отбору в программе поиска треков.

По этой же причине при анализе отклонений "измеренных" точек от расчетной траектории мы ограничиваемся исключением только одной "плохо измеренной" точки, если она существует.

"Плохо измеренными" считаются:

1) точки, пространственные координаты которых выходят за пределы чувствительного объема камер. Этот случай возможен лишь из-за ошибок чтения магнитной ленты, сбоев ЭЕМ и т.п., т.к. аналогичная проверка делается и в программе поиска треков. Весь трек считается ошибочным, и параметры не определяются;

2) точки, отклонения которых, вычисленные после первой итерации

$$\Delta_i^2 = (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2 > 3 \approx (6 \cdot \bar{\Delta})^2.$$

Если количество оставшихся на треке точек больше 10, данная точка исключается занулением весовой матрицы.

3. После второй итерации проверяется ошибка определения импульса частицы. Если  $\epsilon_p/p > \lim(p)$  и количество точек на треке больше 10, определяется точка с наибольшим отклонением  $\Delta Y_{\max}$ . Если  $\Delta Y_{\max} > 1.7 \cdot \bar{\Delta}_{\text{ср}}$ , точка исключается занулением весовой матрицы и определение параметров повторяется сначала. Такая про-

верка проводится только один раз. Значение  $\ell(\pi(\rho))$  подбирается экспериментально для каждого тока магнита.

Кроме параметров трека в первой точке и матрицы их ошибок в программе вычисляется и записывается на магнитную ленту ряд других величин, которые могут оказаться полезными при последующей обработке:

1. Параметры в последней зарегистрированной точке трека.
2. Количество измеренных точек  $N$  на треке.

$$3. \chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Y_i)^2 \cdot WY_i + \sum_{i=1}^N (\Delta Z_i)^2 \cdot WZ_i + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \Delta Y_i \cdot \Delta Z_i \cdot WYZ_i}{2 \cdot N - 6},$$

где  $\Delta Y_i, \Delta Z_i$  - отклонения координат измеренных точек от расчетной траектории (за вычетом поперечного сноса искр);  $WY_i, WZ_i, WYZ_i$  - элементы весовой матрицы для  $i$  - камеры.

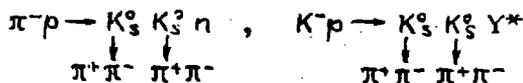
$$4. \bar{\Delta}_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Y_i)^2 \cdot WY_i}{\sum_{i=1}^N WY_i}} - \text{среднеквадратичное}$$

отклонение точек по  $Y$ .

$$5. \bar{\Delta}_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Z_i)^2 \cdot WZ_i}{\sum_{i=1}^N WZ_i}} - \text{среднеквадратичное отклонение точек по } Z.$$

6. Длина зарегистрированной части трека.
7.  $X_0, Y_0$  - приближенные координаты центра окружности проекции трека на плоскость  $XY$ .
8. Среднее значение  $B_z$  - компоненты магнитного поля по треку.
9. Номер трека в событии.

На рис. 4-16 приведены гистограммы  $\chi^2$  треков, определяемых параметров и их среднеквадратичных ошибок. Использован материал для изучения реакций с рождением и распадом нейтральных "странных" частиц типа:



При токе магнита 0,45 Гном для частиц с импульсами  $0,5 < |p| < 36$  ГэВ/с получаются следующие типичные ошибки параметров:

$$\begin{array}{l} \delta\gamma = 0,3 \text{ мм} \quad , \quad \delta z = 1,2 \text{ мм} \quad , \quad \frac{\delta p}{p} \cdot 100\% = 0,7\% \quad , \\ \delta\psi = 0,4 \text{ мрад} \quad , \quad \delta\lambda = 0,5 \text{ мрад} \quad , \quad \delta s_{\text{норм}} = 0,25 \text{ мм} . \end{array}$$

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный алгоритм определения параметров был реализован в виде программы на трех ЭВМ: малой РДР-15, БЭСМ-6 и ЕС 1060.

Среднее быстдействие программ: на РДР-15 - 0,25, на БЭСМ-6 - 2,2, на ЕС 1060 - 5,3 трек/с.

Начиная с 1983 г. по ним было обработано ~30000 событий нейтрального триггера. Результаты физических исследований представлены в нескольких работах (см., например, /9/, /10/). Обсуждаемые в них данные, полученные при анализе реакций с использованием параметров зарегистрированных частиц, подтверждают соответствие определяемых параметров действительным и их удовлетворительную точность.

Авторы выражают благодарность В.В.Соколовскому, И.Я.Королькову, О.Я.Моисеенко, В.И.Лисину за полезные консультации и помощь в работе.

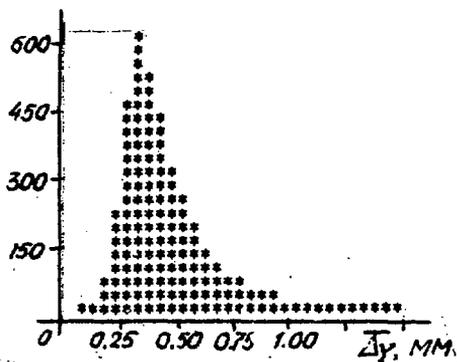


Рис.1. Среднеквадратичные отклонения точек на треках по оси Y

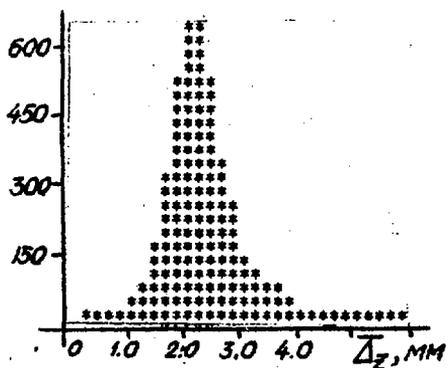


Рис.2. Среднеквадратичные отклонения точек на треках по оси Z

Рис. 4. Значения  $X^2$  для тлецов.

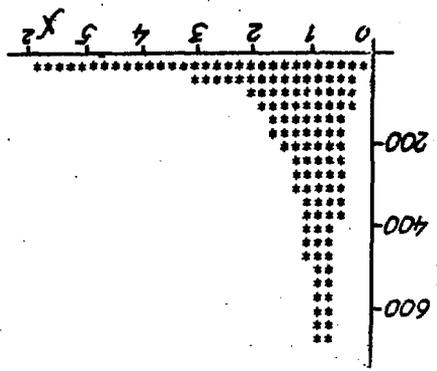
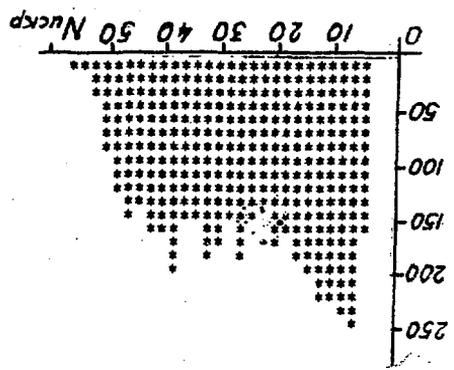
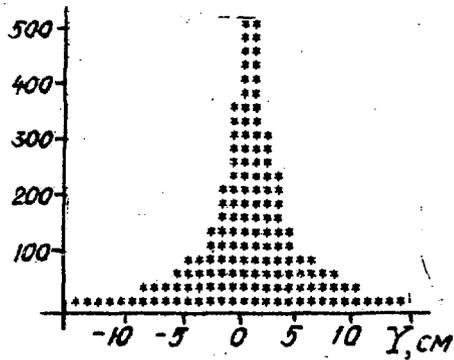
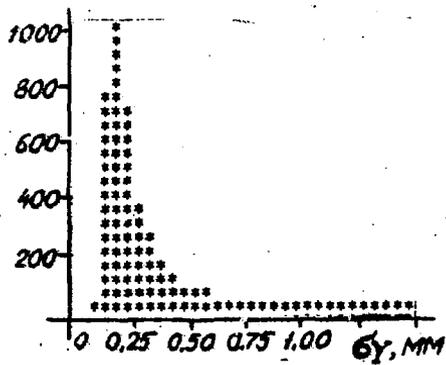


Рис. 3. Распределение тлецов по числу загерметизированных жерп.



Рис.5. Параметры трезов  $Y$ .Рис.6. Среднеквадратичные ошибки параметров  $Y$ .

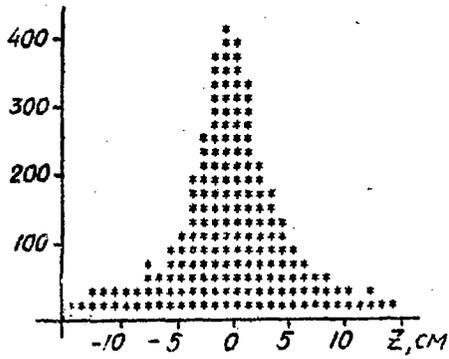
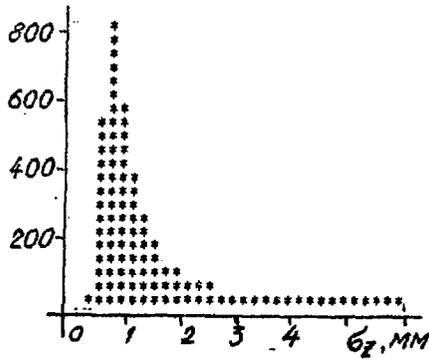
Рис.7. Параметры треков  $Z$ .Рис.8. Среднеквадратичные ошибки параметров  $Z$

Рис. 10. Относительные ошибки интулов трекон (в процентах).

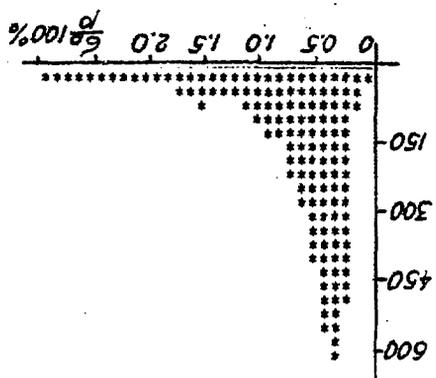


Рис. 9. Параметр трекон  $p/q$ .

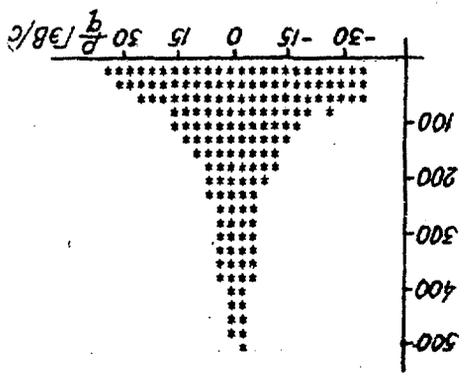


Рис. 12. Среднеквадратичные ошибки параметров  $\lambda$

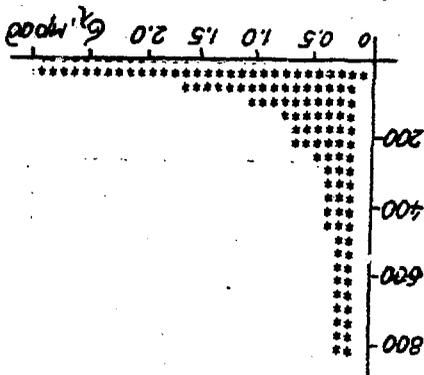
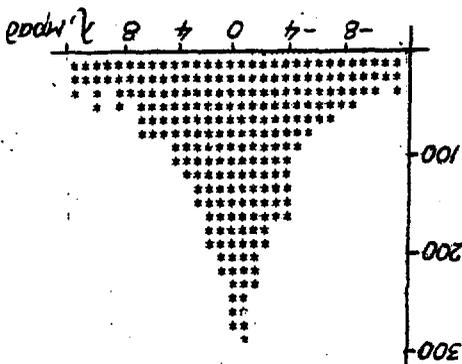
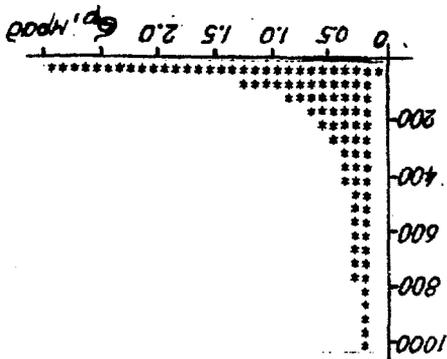


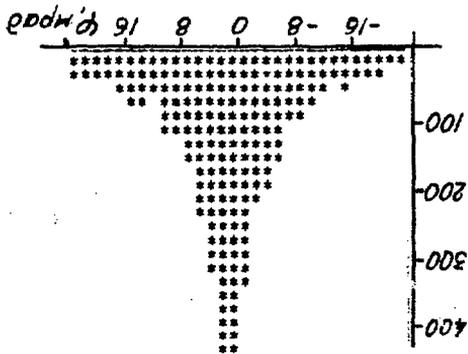
Рис. 11. Параметры тренда  $\lambda$



Фиг. 14. Среден размер на грешките при измерване



Фиг. 13. Разпределение на грешките



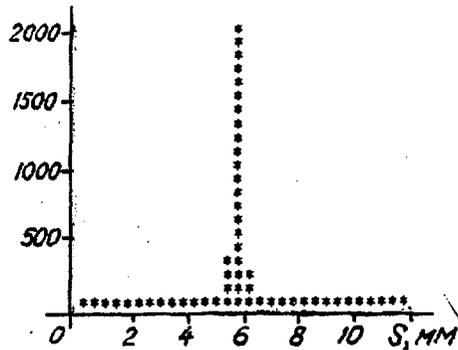


Рис.15. Параметры треков  $S_{\text{норм}}$ .

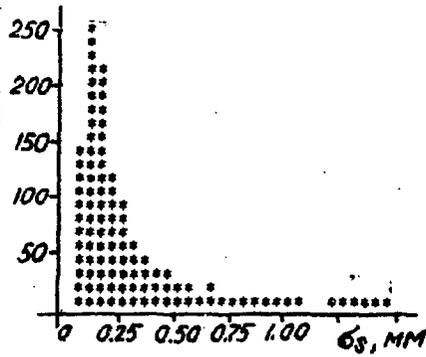


Рис.16. Среднеквадратичные ошибки параметров  $S_{\text{норм}}$ .

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Болонкин Б.В. и др. 6-метровый магнитный искровой спектрометр ИТЭФ, М., Препринт ИТЭФ, 1973, № 86.
2. Болонкин Б.В. и др. Электродинамические искровые камеры 6-м спектрометра ИТЭФ. М., Препринт ИТЭФ, 1981, № 154.
3. Болонкин Б.В. и др. Геодезические измерения на спектрометре МИС ИТЭФ с электродинамическими камерами и константы геометрического восстановления. М., Препринт ИТЭФ, 1981, № 62.
4. Болонкин Б.В. и др. Измерения и аналитическое представление поля магнита 6-метрового спектрометра ИТЭФ. М. Препринт ИТЭФ, 1983, № 4.
5. Болонкин Б.В. и др. Расчетная модель электродинамической камеры. М.: Препринт ИТЭФ, 1985, № 13.
6. Ноздрачев В.Н., Соколовский В.В. Методика поиска треков в событиях 6-метрового спектрометра МИС ИТЭФ. М., Препринт ИТЭФ, 1985, № 167.
7. Wind H. *Momentum analysis by using a quantum spline model for the track.* // *Nucl. Inst. and Meth.*, 1974, 115, 431.
8. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.
9. Болонкин Б.В. и др. Исследование реакции  $K^+p \rightarrow K^0K^0\pi$  при импульсе 40 ГэВ/с. // ЯФ, 1986, 43, 1211.
10. Болонкин Б.В. и др. Наблюдение резонансов  $\theta$  (1700) и  $\xi$  (2230) в реакции  $P^+p \rightarrow K^0K_s^0\pi$  при импульсе 40 ГэВ/с. М., Препринт ИТЭФ, 1987, № 52.

Б.В.Болонкин и др.

Определение параметров треков заряженных частиц на 6-метровом спектрометре ИГЭФ.

Редактор И.Н.Ломакина

Корректор О.Д.Ольховникова

Работа поступила в ОНТИ 27.07.87

---

Подписано к печати 30.07.87      Т16533      Формат 60x90 1/16  
Офсетн.печ. Усл.-печ.л.1,75. Уч.-изд.л.1,3. Тираж 170 экз.  
Заказ 147      Индекс 3624      Цена 19 коп.

---

Отпечатано в ИГЭФ, И17253, Москва, Б.Черемухинская, 25

