

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3851/82

16/8-82

10-82-391

В.В.Вишняков, П.Лаурикайнен*, С.Я.Сычков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ
ПУЧКОВЫХ ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
НА УСТАНОВКЕ МИС ОИЯИ

*Университет в Хельсинки.

1982

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе описывается процедура определения параметров трека частиц пучка в экспериментах по изучению взаимодействия мезонов с ядрами, выполненных на установке МИС ОИЯИ на ускорителе ИФВЭ в Серпухове^{/1/}.

Схема канала и расположение регистрирующей аппаратуры показаны на рис.1.

Информация с проволочных пропорциональных и с двухкоординатных искровых проволочных камер^{/2/} принималась ЭВМ НР 2100А и записывалась на магнитную ленту.

Восстановление треков пучковых частиц проводится независимо в четырех областях /рис.1/. Области I и II - z- и y-проекции, по девять плоскостей регистрации; области IV и V - u-проекции, по четыре плоскости регистрации.

Области I и II используются для определения координат и углов хода пучковой частицы в мишень, IV и V - для определения величины $\Delta p/p_0$, Δp - отклонение импульса частицы от его среднего значения в пучке p_0 .

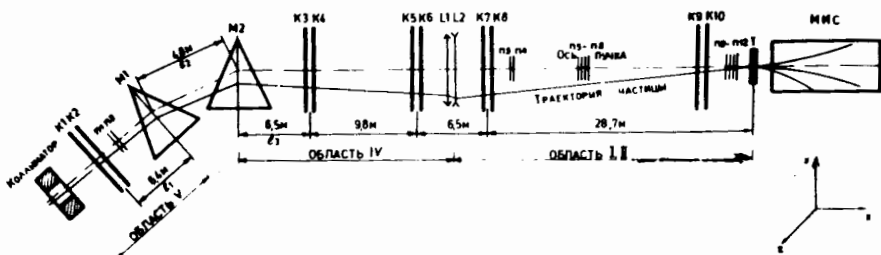
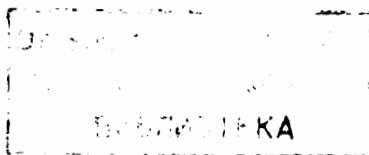


Рис.1

2. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКА С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Треки пучковых частиц считались прямыми и восстановление их параметров проводилось методом наименьших квадратов /МНК/^{/3,4/}.



Выбрав систему координат с осью x , направленной по пучку, а также горизонтальной и вертикальной осями y и z , параллельными проволочкам в камерах, мы можем написать, например, для горизонтальной проекции xu следующее линейное соотношение:

$$Y = X \cdot \Theta + \xi$$

или $y_i = y_0 + y'_0 x_i + \epsilon_i ; i = 1, \dots, n$
 где n - число искр на треке;

$$\Theta = (y_0, y'_0)^T$$

- вектор двух неизвестных параметров - координаты на мишени и углового коэффициента трека;

$$Y = (y_1, \dots, y_n)^T$$

- вектор измерений в горизонтальной проекции;

$$\xi = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_n)^T$$

- вектор ошибок измерений;

$$X = \begin{pmatrix} 1, & \dots, & 1 \\ x_1, & \dots, & x_n \end{pmatrix}^T$$

- матрица размером $n \times 2$ / x -координат плоскостей регистрации.

Ошибка измерений складывается из двух независимых компонент:

$$\xi = \xi_m + \xi_s,$$

где ξ_m определяется координатной точностью камер, а ξ_s - ошибка, возникающая в результате многократного рассеяния, испытываемого пучковой частицей.

Распределение координатных ошибок ξ_m описывается n -мерным нормальным распределением $N_n(0, M)$ с диагональной ковариационной матрицей размером $n \times n$ $M = \{\sigma_i^2 \cdot \delta_{ij}\}$, где σ_i - среднеквадратичная ошибка измерения в камере с номером i .

Распределение ошибок ξ_s , возникающих из-за многократного рассеяния, описывается n -мерным нормальным распределением $N_n(0, C)$ с ковариационной матрицей $C = \{c_{ij}\}$, где $c_{ij} = \text{cov}(y_i, y_j)$. Многократное рассеяние приводит к возникновению корреляции между измерениями y_i . Иными словами, матрица C недиагональна.

Метод вычисления элементов матрицы C изложен в Приложении. Этим методом были построены матрицы для всех четырех областей.

Для случая, когда из-за неэффективности детекторов число отсчетов n уменьшается, из полной матрицы вычеркиваются строки и столбцы, соответствующие несработавшим плоскостям.

Необходимость учета недиагональных элементов ковариационной матрицы ошибок, вызванных многократным рассеянием, показана в работе ^{6/}, в которой приведены результаты исследования работы алгоритма с моделированными событиями для данной установки.

МНК для линейной модели даст следующие выражения для оценок параметров трека и матриц ошибок параметров $D(\Theta)$:

$$\Theta = (X^T W^{-1} X)^{-1} X^T W^{-1} Y,$$

$$D(\Theta) = (X^T W^{-1} X)^{-1}, \quad W = C + M.$$

Квадратичная форма $Q^2 = (Y - X\Theta)^T W^{-1} (Y - X\Theta)$ распределена как $\chi^2(n-2)$. Распределение уровней достоверности фита (CL), полученных при подстановке величины Q^2 в теоретическое распределение χ^2 с соответствующим числом степеней свободы, при правильном определении матрицы W и использовании для фитирования трека искр, действительно принадлежащих треку, должно быть равномерным. Это обстоятельство использовалось для контроля корректности работы алгоритма.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Результаты обработки пучковых данных используются в дальнейшем для совместного анализа с फिल्मовой информацией, получаемой с оптических искровых камер установки МИС. Фильмовая информация, при получении которой условия эксперимента не менялись, набиралась и обрабатывалась пленками, имеющими определенный номер /в пленке ~1500 событий/. Поэтому и работа программы обработки бесфильмовой информации **BEAM** проводится по пленкам.

Обработка информации для каждой пленки проходит в два этапа. На первом определяются смещения камер и ширина импульсного распределения пучка, на втором этапе проводится поиск треков и вычисление их параметров.

Необходимость определения смещений камер для каждой пленки вызвана тем, что часть камер была установлена на подвижных платформах, которые при ряде работ на установке двигались и устанавливались опять с недостаточной для данной задачи точностью.

Положение камер определяется независимо в каждой области относительно двух опорных камер, которые во время эксперимента не двигались.

Для определения смещений в подпрограмме **ALIGN** для каждой из плоскостей строится распределение отклонений искр от линии, проведенной через все комбинации пар искр в двух опорных плоскостях. Эти распределения /пример показан на рис.2/ складываются из двух: узкого гауссоподобного распределения, получаемого при использовании искр, принадлежащих одному треку, и широкого, связанного с "неверными" комбинациями искр. Положение узкого пика определяется смещением камеры.

Полученные распределения фитировались с помощью подпрограммы **FUMILI** ^{7/} суммой двух гауссовских распределений с шестью свободными параметрами.

После определения положения камер входная лента возвращается обратно, и начинают выполняться подпрограммы геометрической реконструкции.

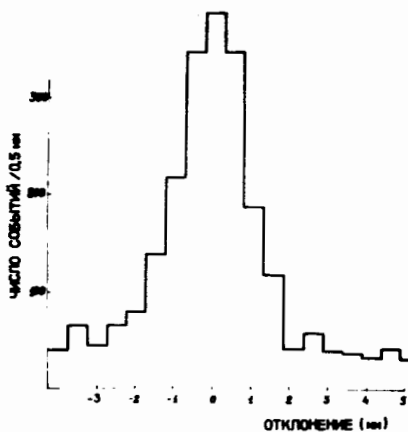


Рис. 2

В областях I и II поиск искр, принадлежащих треку, проводится в две ступени с помощью подпрограммы TRACK1. На первой ступени методом "гистограмм" определяются число треков и их параметры с точностью до размера шага гистограммы, далее осуществляется поиск искр в коридоре вдоль найденных треков.

Размеры шага гистограммы и ширина коридора выбирались экспериментально.

Такой двухступенчатый поиск искр в нашем случае узкого пучка и малой угловой расходимости частиц позволяет эффективно отделять искры, принадлежащие треку, от фоновых.

В подпрограмме TRACK2, которая используется для реконструкции трека в областях IV и V, вначале выделяются элементы трека, причем элементом трека могут являться две искры в соседних плоскостях, либо одиночная искра. Через все комбинации двух элементов трека проводятся прямые, параметры которых должны удовлетворять условию точечного источника:

$$|y_0 - y_0' \times k| < d.$$

Это условие выполняется в областях IV и V, близких к пучковому коллиматору. Константы k и d определялись экспериментально.

После нахождения искр, принадлежащих трекам, в подпрограмме CHOOSE готовятся матрицы для вычисления параметров треков изложенным выше методом.

Отклонение импульса частицы от его среднего значения определяется по формуле, приведенной в работе ^{12/}.

Найденные параметры треков пучковых частиц записываются по событиям на выходную магнитную ленту, информация с которой используется в дальнейшей обработке на этапе получения DST.

В программе BEAM предусмотрены возможности определения эффективности камер, контроля работы программы и используемых алгоритмов, получение средних характеристик пучка, манипуляции с данными различных детекторов, входящих в состав установки, информация с которых имеется на входной ленте.

Программа BEAM написана на языке фортран и поставлена на ЭВМ ICL-1906 в ИФВЭ. Подпрограммы для обращения с маг-

нитными лентами, перекодировки информации из 16- в 24-рядные слова, расшифровки информации с камер, объединения соседних сработавших проволочек в группы и определения их координат использовались на обоих этапах работы программы.

При выполнении операций с матрицами и вычислении вероятности χ^2 используются подпрограммы из библиотеки стандартных программ ^{17/}.

Для работы с распределениями и представления в удобном для изучения виде результатов счета программы, экономного использования памяти ЭВМ и спасения состояния программы при ее аварийных прерываниях используются широкие возможности пакета программ для гистограммирования ^{18/}.

Скорость выполнения программы BEAM составляет 4 мин процессорного времени ЭВМ ICL-1906 на 1000 событий.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВЫХ ЧАСТИЦ

Точность вычисления смещений камер определяется, в первую очередь, статистической обеспеченностью и получается не хуже, чем 0,1 мм.

Эффективность восстановления треков пучков частиц определяется эффективностью камер и интенсивностью пучка, эффективность программы близка к 100%.

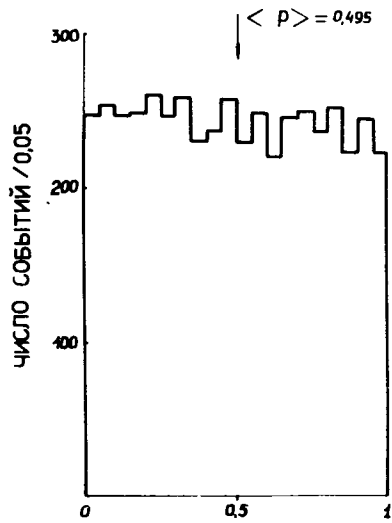
Точность определения параметров треков также зависит от эффективности камер, поскольку при прочих равных условиях определяется числом искр, использованных для фита. Поэтому ниже приводятся цифры, усредненные по обработанной статистике.

Для 95% событий находятся пространственные параметры трека и для 80% событий определяется величина $\Delta p/p_0$ при интенсивности пучка ~100 тыс. частиц в секунду, которая была достаточной для большинства экспериментов на установке. При максимальной интенсивности ~500 тыс. частиц в секунду цифры снижались до 85% и 40% соответственно.

Точность определения координаты трека на мишени при энергии частиц в пучке 40 ГэВ составляет 0,25 мм, угла - 0,07 мрад. Отношение $\Delta p/p_0$ вычисляется с точностью 0,18%.

На рис. 3 показан пример распределения уровней достоверности (CL) для восстановленных треков в области 1, на рис. 4 и 5 - угловые размеры и профиль на мишени реконструированного пучка в вертикальной проекции. Пример импульсного распределения частиц в пучке показан на рис. 6.

Близость распределения на рис. 3 к равномерному дает нам основание предполагать, что матрица ошибок W вычислена правильно, и число фоновых искр, участвовавших в фите, незначительно, в результате чего оценки параметров и их ошибки получаются несмещенными.



ВЕРЯТНОСТЬ (P)

Рис. 3

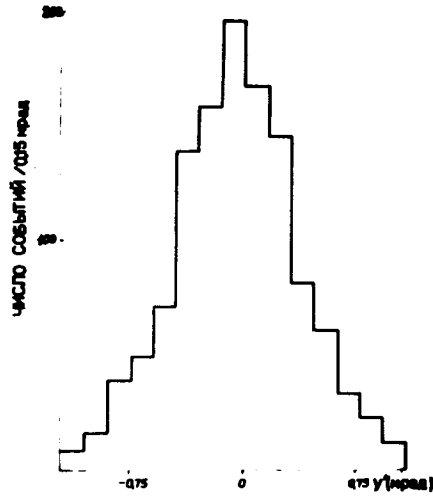


Рис. 4

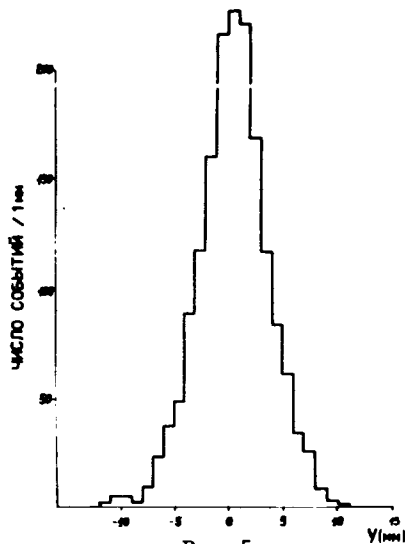


Рис. 5

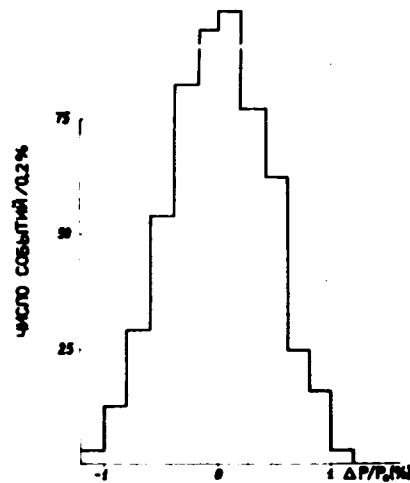


Рис. 6

В заключение авторы выражают благодарность А.Ф.Грушину за проведение расчетов матрицы ошибок, О.А.Займидороге, Ю.И.Иваньшину, Л.К.Лыткину и А.А.Тяпкину за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе.

Мы глубоко признательны также А.А.Лебедеву за большую помощь и консультации при постановке программы на ЭВМ ICL-1906 в ИФВЭ.

Один из авторов /С.Я.Сычков/ благодарит Э.И.Мальцева за поддержку работы, постоянный интерес к ней, и Ю.П.Петухова за полезные советы и критические замечания.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Вычисление элементов ковариационной матрицы ошибок, возникающих из-за многократного рассеяния

Пусть в камере с номером β координата и угол трека были y_β и y'_β . Тогда координата трека в детекторе с номером $a, a > \beta$ будет равна:

$$y_a = y_\beta + (x_a - x_\beta)y'_\beta + t_{a\beta}, \quad /1/$$

где $t_{a\beta}$ - смещение, вызванное многократным рассеянием на участке между камерами β и a .

Используя свойства ковариаций ^{/3/}, условие независимости величин y_β и $t_{a\beta}$ ^{/6/} и соотношение /1/, получаем следующее выражение для элемента искомой матрицы:

$$\text{cov}(y_a, y_\beta) = \text{cov}(y_\beta, y_\beta) + (x_a - x_\beta) \cdot \text{cov}(y_\beta, y'_\beta). \quad /2/$$

Разобьем путь частицы на участки, каждый из которых представляет собой плоскопараллельный слой однородного вещества, плоскости которого ортогональны оси x .

Участок с номером i определим тремя величинами: длиной l_i ; x - координатой конца участка r_i и $B_i = \left(\frac{0,021}{p}\right)^2 \cdot \frac{1}{2L_i}$, где L_i - радиационная длина вещества участка, p - импульс частицы в ГэВ/с.

Изменение координаты и угла, y_i и y'_i при прохождении участка i описывается двумерным нормальным распределением $N_2(0, D_i)$ с ковариационной матрицей $D_i = D(y_i, y'_i)$, равной ^{/5/}:

$$D_i = \begin{pmatrix} \text{cov}(y_i, y_i) & \text{cov}(y'_i, y_i) \\ \text{cov}(y_i, y'_i) & \text{cov}(y'_i, y'_i) \end{pmatrix} = B_i \begin{pmatrix} \frac{l_i^3}{3} & \frac{l_i^2}{2} \\ \frac{l_i^2}{2} & l_i \end{pmatrix}. \quad /3/$$

Изменение координаты и угла в камере β , внесенное многократным рассеянием на участке i , равно:

$$\begin{pmatrix} y_{\beta i} \\ y'_{\beta i} \end{pmatrix} = M_{\beta i} \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} \quad M_{\beta i} = \begin{pmatrix} 1 & x_\beta - r_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad /4/$$

а матрицы $D(y_1, y'_1)$ и $D(y_{\beta 1}, y'_{\beta 1})$ связаны соотношением:

$$D(y_{\beta 1}, y'_{\beta 1}) = M_{\beta 1} D(y_1, y'_1) M_{\beta 1}^T. \quad /5/$$

Если частица до плоскости β прошла m_{β} участков, то в силу независимости рассеяния на каждом из участков, можно провести суммирование:

$$D(y_{\beta}, y'_{\beta}) = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} D(y_{\beta i}, y'_{\beta i}) = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} M_{\beta i} D(y_1, y'_1) M_{\beta i}^T. \quad /6/$$

Подставив значения матриц из выражений /3/ и /4/ в уравнение /6/, получим:

$$\text{cov}(y_{\beta}, y'_{\beta}) = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} B_i \left(\frac{\ell_i^3}{3} + \ell_i^2(x_{\beta} - r_i) + \ell_i(x_{\beta} - r_i)^2 \right), \quad /7/$$

$$\text{cov}(y_{\beta}, y'_{\beta}) = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} B_i \left(\frac{\ell_i^2}{2} + \ell_i(x_{\beta} - r_i) \right).$$

И, наконец, подставив полученные соотношения в равенство /2/, получим следующее выражение для элемента ковариационной матрицы:

$$c_{\beta\alpha} = c_{\alpha\beta} = \text{cov}(y_{\beta}, y_{\alpha}) = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} B_i \left(\frac{\ell_i^3}{3} + \ell_i^2(x_{\beta} - r_i) + \ell_i(x_{\beta} - r_i)^2 \right) + (x_{\alpha} - x_{\beta}) \sum_{i=1}^{m_{\beta}} B_i \left(\frac{\ell_i^2}{2} + \ell_i(x_{\beta} - r_i) \right).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Frabetti P.L. et al. Nucl.Phys., 1979, B158, p.57.
2. Bellini G. et al. CERN-EP/81-40, Geneva, 1981.
3. Вишняков В.В. и др. ОИЯИ, 13-11751, Дубна, 1978.
4. Статистические методы в экспериментальной физике. Под ред. А.А.Тяпкина, "Атомиздат", М., 1976.
5. Худсон Д. Статистика для физиков. "Мир", М., 1970.
6. Росси Б. Частицы больших энергий. ГИТЛ, М., 1955.
7. Laurikainen P. Report of Universiti of Helsinki, HU-P-145, Helsinki, 1978.
8. CERN Computer Centre. Program Library, CERN, 1979.
9. Белокопытов Ю.А. и др. Препринт ИФВЭ ОНФ 77-121, Серпухов, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1982 года.

Вишняков В.В., Лаурикайнен П., Сычков С.Я. 10-82-391
Определение параметров пучковых частиц в экспериментах на установке
МИС ОИЯИ

Описана процедура обработки информации с установки МИС ОИЯИ для определения параметров треков частиц пучка их импульсов.

Для восстановления параметров треков используется МНК. Построение полной ковариационной матрицы, описывающей ошибки и корреляции, возникающие из-за многократного рассеяния, испытываемого частицами, описано в приложении.

В результате корректного учета многократного рассеяния определяются несмещенные оценки параметров треков и их ошибок, которые составили 0,07 мрад и 0,25 мм для угла и координаты трека на мишени, ошибка в определении $\Delta p/p_0$ равна 0,18%.

Работа выполнена в Серпуховском научно-экспериментальном отделе
и в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Vishnyakov V.V., Laurikainen P., Sychkov S.Ya. 10-82-391
Determination of Beam Particle Track Parameters in Experiments on MIS
Installation (JINR)

The method of MIS installation (JINR) data processing for determination of beam track parameters is described. The least-squared method for determination of track parameters is used. The construction of the complete covariance matrix of errors and correlations arising in beam particle multiple scattering is given in the appendix. Undisplaced estimations of track parameters and their errors are determined as a result of correct consideration of multiple scattering. The errors are 0.07 mrad and 0.25 mm for angle and the coordinate of track on a target, the error of $\Delta p/p_0$ is 0.18%.

The investigation has been performed at the Serpukhov Scientific-Experimental Department, and in Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.