

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.12

### МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ В СПЕКТРОМЕТРЕ С ВЕРШИННЫМ ДЕТЕКТОРОМ

© 1998 г. П. Ф. Ермолов, А. В. Кубаровский, М. С. Левицкий\*

*НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119899, Москва, Воробьевы горы*

Поступила в редакцию 11.03.98 г.

Описан новый метод распознавания и реконструкции треков заряженных частиц в гибридных широкоапертурных спектрометрах с вершинным детектором. Предлагаемый метод – метод переменного импульса – основан на простой процедуре подгонки импульса частицы в спектрометре по измеренным в вершинном детекторе угловым характеристикам трека и координатам вершины взаимодействия. Дается сравнительный анализ характеристик нового и используемых в настоящее время методов. Отмечается ряд преимуществ нового метода. Приводятся результаты апробации метода при анализе экспериментальных событий протон-протонных взаимодействий при энергии 70 ГэВ, измеренных в спектрометре с вершинным детектором на ускорителе ИФВЭ.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью современного ускорительного эксперимента в физике частиц высоких энергий является создание больших многофункциональных установок. Как правило, они состоят из множества самых разнообразных детекторов, обеспечивающих идентификацию заряженных и нейтральных частиц и измерение их четырех импульсов. Сюда относятся такие детекторы, как электромагнитные и адронные калориметры, черенковские и сцинтилляционные детекторы, детекторы переходного излучения и магнитные спектрометры, содержащие большое число трековых многоканальных дрейфовых и пропорциональных газовых приборов и полупроводниковых детекторов.

Характерным для экспериментов последнего времени является наличие в установке вершинного детектора. Он располагается вблизи мишени (или сам служит мишенью), и его задачей является локализация с прецизионной точностью как вершины первичного взаимодействия падающей частицы с мишенью, так и возможных вторичных вершин, связанных с распадом или взаимодействием вторичных заряженных и нейтральных частиц.

В качестве вершинных используются детекторы на основе микростриповых полупроводниковых приборов, газовых многопроволочных приборов, фотоэмульсионные детекторы и специальной конструкции быстроциклирующие пузырьковые камеры. В последних двух случаях эксперимент относится к разряду так называемых гибридных экспериментов.

\* Государственный научный центр "Институт физики высоких энергий", Протвино Московской области.

Основной и наиболее трудной задачей последующего анализа данных эксперимента (off line-обработка) является распознавание и реконструкция треков в магнитном спектрометре, что обусловлено при высоких энергиях большой множественностью и широким импульсным спектром рождающихся и распадающихся частиц. Начало разработки идей и методики распознавания было положено еще в 60–70-х годах при оцифровке и последующей обработке треков в пузырьковых камерах автоматическими сканирующими устройствами типа HPD и PEPR [1]. Примером дальнейшего развития методики восстановления треков в магнитных спектрометрах с использованием большого количества проволочных пропорциональных камер может служить программа TRIDENT (и ее модификации), разработанная в CERN для многоцелевого ОМЕГА-спектрометра [2]. Для повышения надежности и эффективности распознавания и реконструкции треков, а также минимизации затрачиваемого компьютером времени при анализе данных с магнитных спектрометров уже разрабатываются аппаратно-программные средства, основанные на применении нейронных сетей [3].

В известных на сегодня программах последовательность операций при восстановлении треков в гибридных установках с вершинным детектором сводится к следующему. Поиск треков начинается в магнитном спектрометре, для чего вначале восстанавливаются все пространственные точки (обычно по трем плоскостям газовых камер  $U, Y, V$ ). Используя тот или иной алгоритм распознавания, этим точкам ставятся в соответствие треки, траектории которых затем протягиваются в направлении вершины до пересечения с некоторой плоскостью. На эту же плоскость проектируются треки,

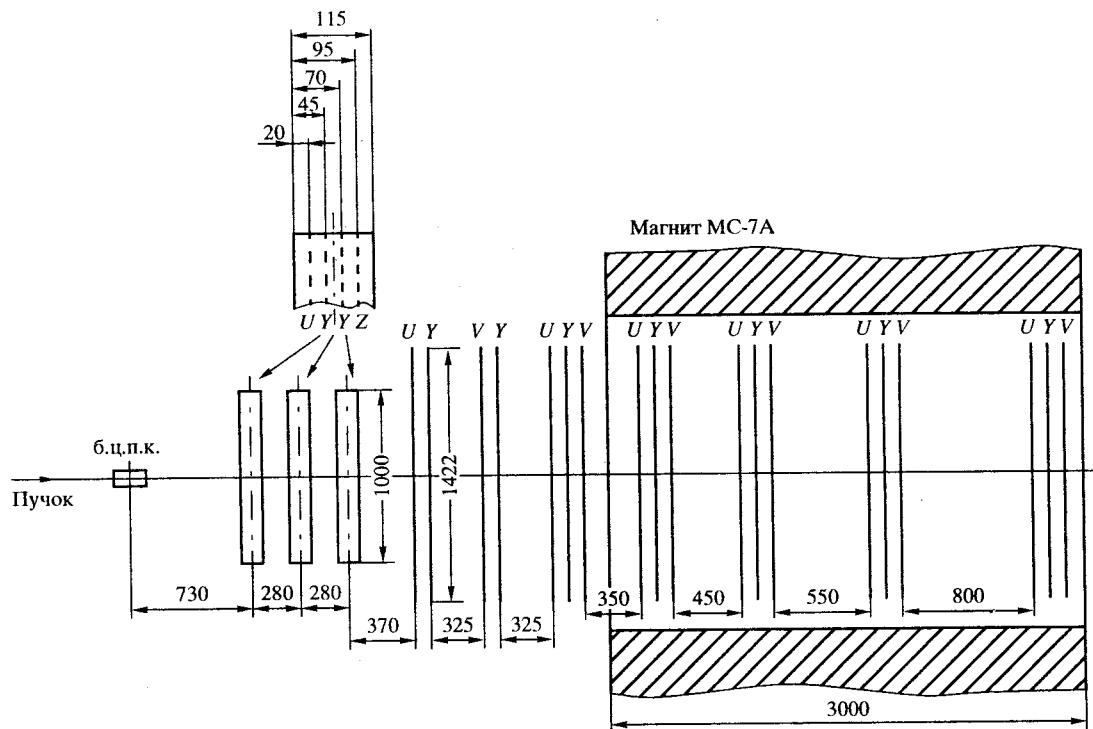


Рис. 1. Схема расположения пропорциональных камер в магнитном спектрометре СВД.

найденные и восстановленные в вершинном детекторе. Их сравнение, таким образом, определяет "сшивку" или гибридизацию треков, после чего может быть проведено глобальное фитирование трека с определением его параметров. Такие процедуры были использованы при анализе данных с Европейского гибридного спектрометра (ЕГС) в CERN [4]. Следует отметить, что интерактивный режим работы используется в этом методе только для контроля физиком правильности указанной последовательности при анализе сложных и наиболее интересных событий, как это было разработано для ЕГС и эксперимента WA-92 по поиску рождения  $c$ - и  $b$ -кварков в адронных взаимодействиях [4, 5].

В данной работе описан метод, использующий измеренные в вершинном детекторе угловые характеристики трека непосредственно в процедуре распознавания и реконструкции трека. Метод был использован для анализа данных с установки СВД (спектрометр с вершинным детектором).

## 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ СВД

Установка СВД [6] была разработана для исследования околорогового рождения очарованных частиц в протон-протонных взаимодействиях при энергии 70 ГэВ. Основными элементами установки являются быстроциклирующая водо-

родная пузырьковая камера, широкоапертурный магнитный спектрометр и детектор  $\gamma$ -квантов из 2000 черенковских счетчиков полного поглощения. Важную роль при проведении эксперимента играют система формирования, дозировки и модуляции интенсивности пучка и система мониторинга, триггирования, регистрации и сбора событий.

Кратко остановимся на б.ц.п.к. и спектрометре, важных для понимания описываемого метода.

Взаимное расположение вершинного детектора и координатных камер магнитного спектрометра и связанных с ними локальных систем отсчета показаны на рис. 1 и 2.

Быстроциклирующая пузырьковая камера (б.ц.п.к.) [7], используемая в качестве вершинного детектора, работает без магнитного поля с частотой 20–30 Гц до 10 расширений за сброс пучка и имеет диаметр 150 мм и глубину 50 мм. Фотографирование снимков производится двумя фотокамерами на две фотопленки. Средняя нагрузка пучковыми частицами была выбрана относительно высокой и составляет до 30–40 частиц на кадр. Плотность трека составляет около 80 пузырьков на сантиметр при диаметре пузырька 25–30 мкм. Отбор и измерение наиболее интересных событий осуществляется в основном с помощью автоматизированных просмотрно-измерительных устройств ПУОС-4 [8], обеспечивающих точность измерения координат 2 мкм. Программа

реконструкции треков в б.ц.п.к. [9] определяет угол  $\varphi'$ , равный проекции полярного угла на базовую плоскость фотопленки  $OYZ$ , и глубинный угол  $\lambda'$ , равный углу между вектором импульса и базовой плоскостью  $OYZ$ . Точность определения этих углов составляет 1.1 и 4.5 мрад соответственно. Координаты вершины взаимодействия или распада определяются с точностью  $\Delta x = \Delta y = 10$  мкм,  $\Delta z = 50$  мкм.

Для измерения вектора импульса вторичных заряженных частиц в состав СВД введен широкоапертурный магнитный спектрометр с проволочными пропорциональными камерами. Используется электромагнит МС-7А [10] с длиной (вдоль направления пучка) полюсов 3 м и апертурой 1.8 м (ширина)  $\times$  1.3 м (высота). При импульсе первичных частиц не более 70 ГэВ/с этот магнит работает при пониженном токе ( $I = 4$  кА) и имеет в рабочем объеме достаточно однородное поле величины около 1.18 Тл. Из-за выступающих вдоль пучка и отогнутых вверх и вниз обмоток образуется сильное рассеянное магнитное поле, величина которого на расстоянии 1.5 м от ярма магнита составляет 0.3 Тл.

Расположение пропорциональных камер (п.к.) магнитного спектрометра показано на рис. 1. С функциональной точки зрения магнитный спектрометр СВД является двухступенчатым. Первую ступень образует передний блок из 12 плоскостей камер, расположенный перед магнитом в рассеянном поле. Этот блок служит, в частности, для измерения малых импульсов частиц, испущенных под большими углами. Входящие в этот блок камеры с шагом 2 мм и рабочей областью 1 м<sup>2</sup> объединены в три квадруплета с ориентацией проволочек  $UYVX$ , где  $Y$  – вертикальные проволочки,  $X$  – горизонтальные, а  $U$  и  $V$  наклонены по отношению к вертикали под углами  $\pm 10.5^\circ$ . Общее число сигнальных анодных проволочек в этих камерах достигает 5424. Отметим, что плоскости  $X$  предназначены для выработки триггера 2-го уровня и не используются в обработке данных.

Центральный блок, расположенный в апертуре магнита, состоит из 19 камер с шагом 2 мм и рабочей площадью  $1.0 \times 1.5$  м<sup>2</sup> [11]. Передние четыре камеры объединены в дуплеты  $UY$  и  $VY$ , а остальные 15 камер сгруппированы в виде триплетов  $UYV$ . Эти камеры составляют вторую ступень спектрометра и обеспечивают измерение импульсов частиц, испущенных в переднем конусе. Полное число сигнальных анодных проволочек равно 12608. Как показывает моделирование [12], средняя точность измерения импульса в спектрометре в интервалах 1–3, 3–8, 8–13, 13–18, 18–28, 28–70 ГэВ/с составляет 5.1, 2.3, 1.4, 1.8, 1.6, 2.8% соответственно. Измеряются те же углы проекции полярного угла вектора импульса  $\varphi$  и его угла наклона  $\lambda$ , но относительно другой базовой плос-

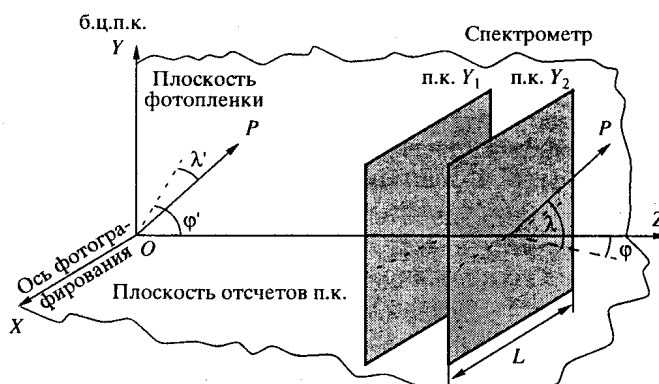


Рис. 2. Связь координатных систем б.ц.п.к. и спектрометра.

кости – плоскости  $OXZ$ . Точность измерения углов в магнитном спектрометре составляет 0.7 и 4.1 мрад для углов  $\varphi$  и  $\lambda$  соответственно.

Отметим, что важной для реконструкции треков особенностью установки СВД является тот факт, что конструктивно базовые плоскости, в которых ведется измерение координат для б.ц.п.к. и магнитного спектрометра, параллельны оси пучка и повернуты друг относительно друга на  $90^\circ$  (рис. 2). Если рассматривать измерение углов в двух системах координат независимо, то они связаны соотношениями:

$$\sin \varphi = \sin \lambda' / \cos \lambda, \quad \operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \varphi' \cos \varphi. \quad (1)$$

Как следует из приведенных выше значений, для б.ц.п.к. проекция полярного угла измеряется точнее, чем глубинный угол, в то время как в системе координат для магнитного спектрометра, наоборот, глубинный угол измеряется точнее, чем проекция полярного угла. Таким образом, измерение глубинного угла в б.ц.п.к. может быть уточнено по данным магнитного спектрометра. Комбинирование измерений в двух системах дает  $\Delta \varphi \approx \Delta \lambda < 1$  мрад. Это в свою очередь приводит к повышению точности при определении кинематических характеристик частиц и уменьшению вероятности случайных наложений в методе восстановления, который описывается ниже.

### 3. ПРИНЦИП МЕТОДА ПОИСКА И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ

Принципиальная идея метода состоит в следующем. Зарегистрированные в вершинном детекторе вторичные треки данного события взаимодействия характеризуются координатами вершины (или вершин)  $x, y, z$  и углами вылета  $\varphi', \lambda'$ , измеренными с достаточно высокой точностью. Если треки данного события продолжить из вершинного детектора в спектрометр и варьировать и знак заряда, и величину его импульса в заданных пределах, то при определенных импульсе и

знаке рассчитанные значения отсчетов в пропорциональных камерах спектрометра совпадут с зарегистрированными реальными отсчетами и, таким образом, будет идентифицирован трек и определены его параметры. Поэтому данный метод может быть назван методом переменного импульса.

В этом методе стратегию распознавания и определения точных параметров трека в данном событии можно условно разделить на две стадии. На первой стадии проводится поиск трека, на второй – его фитирование. Существенным для первой стадии является определение дорожки, внутри которой должны находиться отсчеты, принадлежащие искомому треку. Ее ширина, зависящая от месторасположения п.к., определяется ошибками углов, задаваемых измерениями в вершинном детекторе, и разрешением по импульсу  $P_k$ , которое, в свою очередь, зависит от величины  $P_k$ . Ширина дорожки  $\Delta l_i$  в горизонтальной плоскости спектрометра ( $i$  – номер триплета п.к.,  $i = 1-10$  в случае СВД-спектрометра) может быть найдена из соотношения:

$$\Delta l_i = \sqrt{(\Delta l_i)_1^2 + (\Delta l_i)_2^2 + (\Delta l_i)_3^2}, \quad (2)$$

где

$$(\Delta l_i)_1 = \frac{0.3 L_k B \Delta P_k}{2 P_k \cos \lambda P_k},$$

$$(\Delta l_i)_2 = L_k \Delta \varphi \approx L_k \sigma_\lambda,$$

$$(\Delta l_i)_3 = L_k \Delta \lambda \operatorname{tg} \beta \approx L_k \sigma_\varphi \operatorname{tg} \beta,$$

$L_k$ , м – длина трека;  $B$ , Тл – величина магнитного поля;  $P_k$ , ГэВ/с – импульс частицы;  $\beta$  – угол между проволочками  $YV$ - или  $YU$ -п.к.;  $\Delta l_i$ , мм – ширина дорожки;  $\sigma_\lambda$ ,  $\sigma_\varphi$ , мрад – среднеквадратичные ошибки углов по измерениям в вершинном детекторе.

Если потребовать, чтобы в дорожке находилось ~70% отсчетов, принадлежащих искомому треку, тогда необходимо выбрать ширину дорожки, равную  $2\Delta l_i$ , что составляет 6–50 мм при изменении импульсов и длин в интервалах соответственно 0.5–70 ГэВ/с и 1–5 м. Таким образом,  $\Delta l_i$  больше или значительно больше минимального интервала между отсчетами, равного расстоянию между проволочками  $r$ .

На первой стадии поиска варьируется только значение задаваемого импульса  $P_k$ , а значения углов  $\lambda$  и  $\varphi$ , пересчитанные в систему координат спектрометра, фиксируются. Результаты сканирования трека дорожкой гистограммируются, и число градаций  $k$  (число бин гистограммы) по импульсу соответствует разрешению  $\Delta P_k/P_k$  и в зависимости от величины задаваемого импульса и его знака меняется в интервале от 20 до 240. На

этой стадии поиска кандидат (или кандидаты) в искомый трек считается найденным, если при данном  $P_k$  в гистограмме имеется максимум, который содержит не менее  $n$  квазипространственных точек (т.е. всего  $3n$  отсчетов, соответствующих трем п.к. в данном триплете). Число  $n$  зависит от длины трека и должно подбираться экспериментально. Это обусловлено возможным появлением в дорожке “случайных” отсчетов, принадлежащих другим трекам данного события, фоновым отсчетам, или сбоями электроники.

Оценим число “случайных” отсчетов для случая, когда отсчеты являются полностью статистически независимыми. В этом приближении вероятность “случайных” отсчетов кратности  $m$  может быть получена из соотношения

$$W_m = \prod_{i=1}^{i=m} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{2\Delta l_i}{\bar{n}_i l_i} \right)^2 \right] (\bar{n}_i - 1), \quad (3)$$

где  $\bar{n}_i$  – среднее число отсчетов для  $i$ -го триплета, определяемое средней множественностью вторичных частиц, а также случайными фоновыми отсчетами,  $l_i$  – длина п.к. в направлении, перпендикулярном пучку (рис. 2),  $\bar{n}_i$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения отсчетов по длине  $l_i$ , связанной с угловым распределением вторичных частиц.

В случае данного эксперимента величина  $\bar{n}$  равна 0.3 для переднего блока п.к. и возрастает до 1 для последних по направлению пучка п.к. В формуле (3) выражение в квадратных скобках представляет собой отнесенную к единичному треку вероятность  $W_i$  появления в  $i$ -ом триплете одной случайной квазипространственной точки (появление трех отсчетов, соответствующих  $U$ -,  $Y$ -,  $V$ -плоскостям п.к.). Произведение  $W_i (n-1)$  дает эту же вероятность при среднем числе “случайных” отсчетов  $i$ -го триплета, равном  $n_i$ . Произведение “однократных” совпадений даст вероятность появления “кратного совпадения”, т.е. появление двух, трех и т.д. “случайных” квазипространственных точек при выбранной ширине дорожки с данным  $P_k$ . Ясно, что условие статистической независимости (слабой корреляции) будет выполняться, во-первых, для “случайных отсчетов”, не связанных с треками, а также для треков данного события, если брать в качестве произведения отсчеты в достаточно удаленных друг от друга триплетах. Численные оценки по формуле (3), усредненные по импульсам, дают при  $\bar{n}_i = 10$  для величины “случайных двукратных и трехкратных совпадений” значения  $W_2(3, 8) = 10^{-2}-10^{-4}$  и  $W_3(2, 6, 10) = 10^{-3}-10^{-6}$  соответственно. Число “случайных” совпадений (кандидатов в треки) определяется как произведение

$$N_c = W_m k. \quad (4)$$

Как видно из приведенных оценок с учетом, что число переборок  $k$  по импульсу составляет  $\sim 100$ , число кандидатов в треки (появление ложных максимумов в гистограмме) относительно мало. Этот факт свидетельствует о том, что на первой стадии поиска трека не может быть больших неоднозначностей. Тем не менее, если такие события имеются, они идентифицируются на второй стадии анализа, основанной на стандартной процедуре фитирования по методу наименьших квадратов. На этой стадии варьируются три параметра ( $P$ ,  $\lambda$ ,  $\varphi$ ) с относительно малыми приращениями в пределах выбранной дорожки и определяется критерий согласия  $R$ :

$$R = \frac{\min \sum_s \left( \frac{\Delta X_s}{\sigma_x} \right)^2}{(N_s - 3)}, \quad (5)$$

где  $\Delta X_s$  – разность координат в горизонтальной плоскости между рассчитанной при данных  $P_k$ ,  $\lambda_k$ ,  $\varphi_k$  траекторией и измеренными отсчетами;  $\sigma_x$  – ожидаемая среднеквадратичная ошибка в  $X$ -координате (равная в случае СВД-спектрометра  $\sim 0.7$  мм),  $N_s$  – общее ожидаемое число отсчетов для данной траектории по всем плоскостям п.к.

В процессе фитирования резко сужается ширина дорожки и уменьшается фон “случайных” отсчетов, а также смешанный фон “случайных” и истинных отсчетов.

Трек считается окончательно найденным и его параметры определены, если  $R$  не слишком сильно отличается от 1 и если общее число отсчетов, предназначенных искомому треку, соответствует ожидаемому.

Как показало использование данного метода на моделированных событиях, принципиальные вопросы нахождения и реконструкции треков соответствовали ожидаемым.

#### 4. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ С УСТАНОВКИ СВД

Для реализации метода переменного импульса была написана относительно простая программа TRAF (Track Reconstruction and Fitting), позволяющая проводить восстановление треков в спектрометре и фитировать импульсы и углы треков как в автоматическом, так и в интерактивном режимах.

Основная часть программы написана на языке Fortran 77 с использованием стандартных библиотек CERNLIB и X11 для реализации графического пользовательского интерфейса. Программа реализована на компьютере Silicon Graphics с процессором R4000 (частота 100 МГц, оперативная память 48 Мбайт), работающим под управле-

нием операционной системы IRIX 5.3. Так как программа не использует никаких машинозависимых процедур, кроме библиотек X11, она легко может быть перенесена на графические станции, работающие под другими версиями UNIX, а также на э.в.м. типа VAX/VMS.

Программа состоит из следующих основных блоков:

- 1) считывание и преобразование исходных данных б.ц.п.к. и спектрометра;
- 2) вычисление траектории трека в спектрометре, найденного в б.ц.п.к.;
- 3) нахождение кандидатов в искомый трек для выбранной дорожки отсчетов при вариации импульса и знака заряда частицы;
- 4) фитирование треков и восстановление импульсов, получение точных значений импульсов и углов;
- 5) графический интерфейс пользователя.

Программа работает в единой системе координат. Для этого данные с б.ц.п.к. (значения углов и координаты вершин) сначала преобразовываются к системе координат спектрометра. Константы преобразования были получены из геодезических измерений, а также при обработке данных для событий без магнитного поля и анализа пучковых треков.

Основной блок программы – экстраполяция треков из пузырьковой камеры в спектрометр. Первым шагом является потенциальная длины трека и кандидатов в более быстрые частицы, т.е. треков с длиной, сравнимой с полной длиной спектрометра и с небольшими углами вылета. Именно эти треки начинают обрабатываться первыми. Для каждого трека осуществляется переборка импульсов от  $P_k^{\max}$  до  $P_k^{\min}$ . Для сокращения числа переборок по  $P_k$  начальное значение  $P_k$  выбирается из условия ограниченности поперечных импульсов

$$P_k^{\max} \leq \frac{P_{\perp}}{\sqrt{\sin^2 \lambda + \sin^2 \varphi}}. \quad (6)$$

Константа  $P_{\perp}$  выбирается равной 0.8 ГэВ/с для всей совокупности событий и равной 2 ГэВ/с для кандидатов в события с образованием очарованных частиц,  $P_k^{\min}$  принимается равным 50 МэВ/с.

Движение однозарядных частиц в неоднородном магнитном поле рассчитывается методом Рунге–Кутты с использованием измеренной с высокой точностью карты магнитного поля. При пересечении расчетной траектории трека с данным импульсом  $P_k$  с плоскостями пропорциональных камер спектрометра для всех трех проекций расчетные значения координат пересечения заносятся в массив для дальнейшего анализа. По

формуле (2) оценивается ширина дорожки для каждой п.к. и определяется число реальных отсчетов, попавших в дорожку. Если это число, суммированное по трем проекциям, превышает 5 (что с учетом эффективности пропорциональных камер соответствует примерно двум квазипространственным точкам), принимается, что кандидат в искомый трек найден, и его начальные параметры запоминаются для проведения процедуры фитирования. Аналогичная процедура повторяется для каждого  $P_k$  данного трека. Та же процедура повторяется для обратного знака искомого трека.

Затем все найденные кандидаты в треки фитируются с изменением  $P_k$ ,  $\phi$ ,  $\lambda$  и нахождением минимума функционала (5) с помощью пакета MINUIT из библиотеки CERNLIB<sup>1</sup>. За искомый трек в случае неоднозначности принимается тот, который имеет минимальную величину  $R$  и максимальное число принадлежащих ему отсчетов. Параметры восстановленного трека запоминаются, а все отсчеты в п.к., принадлежащие ему, "стираются", с тем чтобы уменьшить фон "случайных" совпадений для подлежащих обработке последующих треков.

Все последующие треки данного события анализируются аналогичным образом.

В условиях данного эксперимента на установке СВД имеется также значительное число событий, в которых нет соответствия между треками, найденными на снимках в б.ц.п.к., и отсчетами в спектрометре: "ложный" триггер, регистрирующий случайные совпадения событий в спектрометре от взаимодействий вблизи рабочего объема б.ц.п.к. со взаимодействиями в рабочем объеме водорода б.ц.п.к. Для событий этого типа в программе предусмотрено прекращение обработки, если первые два трека не гибридизируются.

Наконец, помимо автоматизированного процесса обработки в программе с помощью блока "Графический интерфейс" предусмотрен интерактивный режим работы поиска треков. Графический интерфейс реализован с использованием пакета HIGZ [13] и позволяет непосредственно на экране монитора наблюдать процедуру восстановления треков. Существует возможность вывода на экран информации для всех трех плоскостей п.к. ( $U$ ,  $Y$ ,  $V$ ), а также вид каждой из проекций в увеличенном масштабе. Пользователь может управлять работой программы из командной строки, реализованной с помощью пакета KUIP, входящего в состав библиотеки CERNLIB.

При запуске программы происходит считывание данных о карте магнитного поля. После этого на экран выводится графическое окно и программа переходит в диалоговый режим, ожидая ввода

<sup>1</sup> В действительности, для получения симметричной ошибки фитируется не сам импульс  $P$ , а обратная величина ( $1/P$ ), пропорциональная кривизне трека.

команд. Пользователь производит считывание в память события, которое состоит из данных б.ц.п.к. (координаты вершин, углы вылета и соответствующие ошибки) и из данных спектрометра (номера сработавших проволочек на каждой п.к.). Событие выводится в графическом окне в проекции, которая задается с помощью команды geometry/set. Также на экран выводятся все данные о событии. Программа готова к процедуре реконструкции. В интерактивном режиме пользователь сам может менять вычисляемые параметры трека, пытаясь подобрать наилучшие совпадения расчетного трека с истинными отсчетами.

Этот режим используется для редких или сложных событий с большим уровнем фона и событий с малоэнергичными треками, для анализа треков (распады частиц), возникших за пределами б.ц.п.к. При этом пользователь может с помощью специальных подпрограмм проводить простые кинематические тесты, например оценки инвариантных масс продуктов распада.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данный метод используется объединением СВД для поиска редких событий образования и распада очарованных частиц в протон-протонных взаимодействиях при энергии 70 ГэВ. В настоящее время проанализировано около 500 событий со множественностью вторичных частиц от 4 до 18, содержащих вторичную вершину на расстоянии 0.2–5.0 мм от первичной (распады заряженных или нейтральных частиц, вторичные взаимодействия и т.д.). При обработке практически не возникало никаких трудностей в восстановлении параметров всех треков, если на треке имеется хотя бы 5 отсчетов, просуммированных по трем плоскостям п.к. Исключение представляет всего лишь несколько треков, претерпевших вторичные взаимодействия в веществе вне водорода б.ц.п.к. На этом основании можно сделать вывод, что эффективность данного метода при восстановлении треков, попадающих в апертуру спектрометра, близка к 100%. Среднее число переборок импульса  $P_k$  обоих знаков составляет около 200. С использованием интерактивного режима восстанавливаются импульсы частиц практически во всем доступном интервале от 0.017–70 ГэВ/с.

Время обработки типичного восьмилучевого события на э.в.м. Silicon Graphics составляет 50 с.

В качестве иллюстрации метода на рис. 3 приведен пример реконструкции 16-трекового события с образованием и распадом  $K_s^0$ -мезона. Заметим, что в представленном примере по техническим причинам две плоскости пропорциональных камер в последнем триплете не работали, а на некоторых треках из-за неэффективности пропорциональных

камер для многотрековых событий (в среднем 24%) отсутствуют соответствующие отсчеты. Несмотря на это, как видно из рис. 3, все 14 треков, вошедших в апертуру спектрометра, найдены и восстановлены. В таблице приведены результаты обработки этого события как для случая использования всех трех проекций п.к., так и для случая нахождения и реконструкции треков только по одной проекции (Y), имеющих не менее 5 отсчетов. Некоторые треки имеют повышенное значение R, что является следствием малого количества отсчетов, принадлежащих треку, или наличием рассеяния вне б.ц.п.к. (трек № 2).

Из таблицы можно видеть, что при восстановлении треков по трем проекциям фитированные значения углов отличаются от измеряемых в вершинном детекторе. Это, в первую очередь, относится к измерению угла  $\varphi$ . Возможно, что это есть следствие повышения точности в их измерениях. Среднее значение количества кандидатов в треки на один трек составляет 1.4, что соответствует ожидаемому и свидетельствует о низком уровне "фона" при использовании данного метода.

Сравнение вариантов восстановления по трем и одной проекциям показывает увеличение числа кандидатов в треки в последнем случае в среднем до 1.8, но все же является приемлемым. С другой стороны, значения импульсов и углов после фитирования отличаются в обоих случаях, что свидетельствует об ухудшении точности в их опреде-

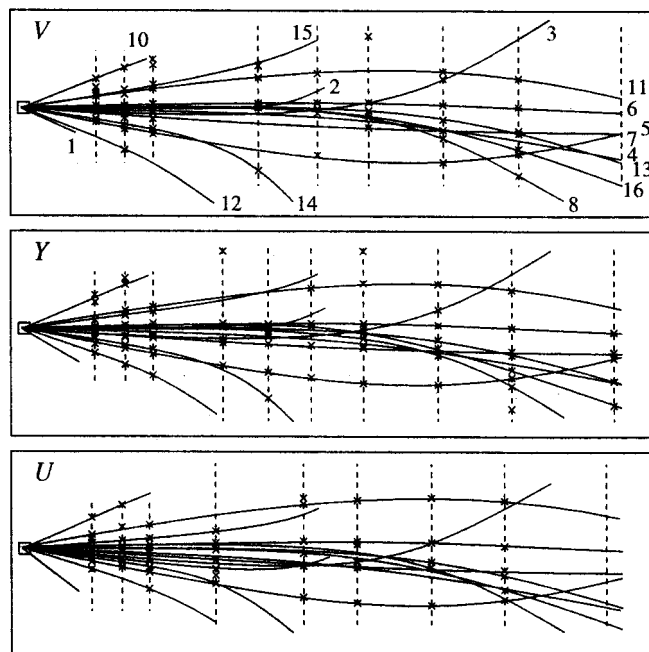


Рис. 3. Событие pp-взаимодействия, зарегистрированное в б.ц.п.к. и восстановленное в спектрометре в проекциях V, Y, U. Цифры при кривых соответствуют номерам треков.

ления из-за ограниченности общего числа отсчетов. На рис. 4 приведены распределения по инвариантным массам  $K_s^0$ ,  $\Lambda$ -частиц, распадные

№ трека	Значения углов в б.ц.п.к.		Значения фитированных параметров в спектрометре									
			плоскости п.к. U, Y, V					только плоскости Y				
	$\lambda$ , рад	$\varphi$ , рад	кол-во кандидатов в данный трек	$\lambda$ , рад	$\varphi$ , рад	$P$ , ГэВ/c	$\cdot R$	кол-во кандидатов в данный трек	$\lambda$ , рад	$\varphi$ , рад	$P$ , ГэВ/c	$R$
1	0.601	-0.485										
2	0.224	-0.076	3	0.2246	-0.0705	-1.866	10.74					
3	0.098	-0.061	2	0.1007	-0.0560	-1.549	2.191					
4	0.041	-0.036	2	0.0437	-0.0312	6.560	1.215	3	0.041	-0.0301	6.212	1.328
5	0.018	-0.164	1	0.0204	-0.1646	-2.797	0.884	1	0.018	-0.163	-2.828	1.012
6	-0.007	0.020	1	-0.0063	0.0210	13.369	0.614	1	-0.007	0.1956	14.01	0.931
7	-0.017	-0.058	1	-0.0165	-0.0549	-17.048	0.981	1	-0.017	-0.0540	-17.25	1.328
8	-0.028	0.027	2	-0.0260	0.0265	1.765	1.577	3	-0.028	0.0257	1.843	2.121
9	-0.029	0.014										
10	-0.079	0.323	1	-0.0790	0.3221	-0.383	4.129					
11	-0.079	0.135	1	-0.0720	0.1317	3.353	1.321					
12	-0.175	0.289	2	-0.1750	0.2780	0.152	4.275					
13	0.200	0.087	1	0.1978	0.0932	-0.625	2.310					
14	0.009	-0.004	1	-0.0089	-0.0134	3.362	1.341	2	0.009	-0.0092	3.729	1.612
15	0.025	0.014	1	0.0250	0.0131	3.801	1.121					
16	-0.030	-0.120	1	-0.0298	-0.124	0.245	2.872					

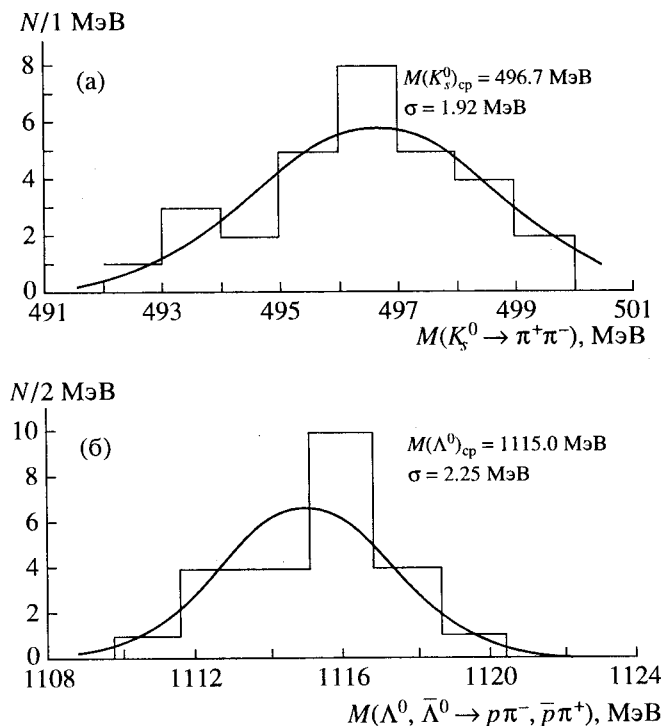


Рис. 4. Распределение по инвариантным массам двух заряженных частиц: а –  $K_s^0$ -мезоны, б –  $\Lambda$ -гипероны.

вершины которых зарегистрированы в б.ц.п.к. и оба трека от которых входят в спектрометр и восстановлены данным методом. Полученные значения масс  $K_s^0$ -мезонов и  $\Lambda$ -гиперонов хорошо соответствуют табличным значениям, и разрешение по массам (0.4% для  $K_s^0$  и 0.2% для  $\Lambda$ ) является достаточно высоким. Для сравнения Европейский гибридный спектрометр, также использующий в качестве вершинного детектора пузырьковую камеру, имеет разрешение по инвариантной массе 1.5% для  $K_s^0$  и 0.3% для  $\Lambda$ [4].

В заключение сформулируем основные преимущества предложенного способа поиска и реконструкции треков в широкоапертурных спектрометрах с использованием вершинного детектора по сравнению с общепринятыми методами и укажем пути его развития.

1. Используется простой и ясный алгоритм распознавания треков, позволяющий с низким уровнем помех работать в любом неоднородном магнитном поле с эффективностью, близкой к 100% для всех треков, входящих в апертуру спектрометра и имеющих некоторое минимальное количество отсчетов в плоскостях трековой системы.

2. Не требуется восстановление пространственных точек по отсчетам пропорциональных камер различных проекций ( $U$ ,  $Y$ ,  $V$ ), поскольку реконструкция импульса проводится путем сопоставления модельных и реальных траекторий по проекциям. С одной стороны, достигается использование полной информации по отсчетам на всех проекциях, с другой стороны, не очень критичными являются потери некоторых отсчетов из-за снижения эффективности координатных камер для многочастичных событий или по другим причинам. В принципе, если из данных вершинного детектора значения углов известны с достаточной точностью ( $<1$  мрад), траектория трека в пространстве однозначно определяется наличием лишь одной проекции камер (например,  $Y$ ), проволочки которой расположены перпендикулярно вектору магнитного поля. Другие проекции ( $U$ ,  $V$ ) могут использоваться для уменьшения фона случайных наложений, что определяется условиями эксперимента.

Таким образом, использование метода может приводить к существенному упрощению аппаратуры спектрометров, и это необходимо учитывать при проектировании будущих экспериментов. В частности, в настоящее время подготовлено предложение [12] по модификации установки СВД-1, в которой б.ц.п.к. заменяется вершинным детектором с использованием микростриповых пластин, и в реконструкции треков планируется использовать данный метод.

3. В методе отсутствует процедура “сшивки”, поскольку трек реконструируется и глобально фитируется в один этап с привлечением всей координатной информации, доступной от вершинных детекторов и координатных камер спектрометра.

4. Метод допускает естественное включение интерактивного режима для анализа сложных событий, при котором пользователь может анализировать событие по представлению координат от всех трех проекций камер спектрометра на мониторе компьютера, выбирая шаг фитирования, вариации углов, уточнение количества вершин, “висящих” треков, включение элементов кинематического анализа и т.д.

5. Достигнутая при обработке событий на СВД скорость распознавания и реконструкции событий на э.в.м. эквивалентной мощности сравнима с другими общепринятыми программами геометрической реконструкции. Однако поскольку основное время вычислений определяется числом переборки величин импульса при данных значениях углов, можно значительно сократить общее время вычислений за счет введения заранее рассчитанной табличной матрицы траекторий трека по импульсам и углам. Оценки показывают, что



при соответствующем увеличении ресурса работы компьютера можно увеличить при этом общую скорость обработки события, по крайней мере, в 10 раз.

Авторы выражают благодарность А.М. Моисееву, С.Г. Басиладзе, С.А. Зоткину, Л.А. Тихоновой, С.И. Лютову, а также многим участникам эксперимента на СВД из ИФВЭ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ за обсуждение и полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-05226).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд А., Хамфри У. // УФН. 1965. Т. 86. Вып. 1. С. 141.
2. Lassale J.C., Carena F., Pensotti S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1980. V. 176. P. 371.
3. Клименко С.В., Слободюк Е.А., Самойленко В.Д., Ухова Т.П. и др. Препринт ИФВЭ 96-75. Протвино, 1996.
4. Фисьяк Ю.В. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук 91-177. Протвино: ИФВЭ, 1991; Aguilar-Benitez M., Allison W.W.M., Bailly J.L. et al. // Nucl. Instrum. Methods. 1987. V. A258. P. 26.
5. Адамович М.И., Александров Ю.А., Завертяев М.В. и др. Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН, 1995. № 7-8.
6. Андришин А.М., Ардашев Е.Н., Бабинцев В.В. и др. Препринт ИФВЭ № 84-3. Серпухов, 1984.
7. Ardashev E.N., Boguslavski I.V., Vishnjakov I.A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. V. A356. P. 210.
8. Бравина Л.В., Бодягин В.А., Веселовская Т.В. и др. Препринт НИИЯФ МГУ 87-01. М., 1987.
9. Кравцов В.Д., Кутов А.Я. Препринт ОИЯИ P10-93-354. Дубна, 1993.
10. Богуславский И.В., Григорьев А.Н., Зернин Ю.Д. и др. Сообщение ОИЯИ P1-90-247. Дубна, 1990.
11. Богданова Г.А., Вишневецкая А.М., Волков В.Ю. и др. Препринт НИИЯФ МГУ 97-8/459. М., 1997.
12. Ardashev E., Bogolyubsky M., Bulgakov N. et al. Preprint IHEP 96-98. Protvino, 1996.
13. HIGZ-High level Interface to Graphics and ZEBRA. CERN Program Library Long Writeup Q120. Geneva, 1993.