

УДК 539.12

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЧАСТИЦ

М. И. Адамович, Ю. А. Александров, М. В. Завертяев, Н. А. Локтионова,
П. Ю. Нечаева, С. П. Харламов

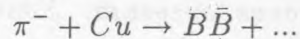
Описана организация и возможности разработанной интерактивной программы геометрической реконструкции элементарных актов взаимодействия частиц при очень высоких энергиях. Удачное сочетание вычислительных возможностей современной графической рабочей станции и уникальной "реконструкционной" способности человеческого глаза позволяют эффективно интерпретировать события парного рождения очарованных и прелестных частиц.

Исследование свойств короткоживущих частиц, таких как "очарованные" и "прелестные" барионы и мезоны, предъявляет специфические требования к экспериментам. Проблема обусловлена, с одной стороны, очень малым сечением рождения этих тяжелых частиц, то есть высоким уровнем фона, а, с другой стороны, малыми временами жизни, то есть очень малыми пробегами частиц до распада и относительно высокой множественностью заряженных частиц, рождающихся во взаимодействиях. Следовательно, успех выделения распадов тяжелых короткоживущих частиц определяется эффективностью и однозначностью восстановления треков заряженных частиц по данным детекторов, точностью восстановления вторичных вершин, возможностью использовать кинематические особенности процесса (высокие поперечные импульсы распадных частиц, наличие "отклонения" восстановленных треков относительно вершины первичного взаимодействия и т.д.) для отбора "подходящих" событий на уровне триггера и в процессе первичной обработки.

Возможность получения хороших точностей восстановления вблизи вершины взаимодействия обеспечивается в современных экспериментах использованием прецизионных микростриповых детекторов. Однако построение эффективных алгоритмов восстановления является сложной задачей и практически достижимая эффективность мала.

Восстановление сложной многовершинной топологии рождения и распадов частиц является многопараметрической задачей распознавания образов и в ее решении (как и в поиске эффективного алгоритма восстановления) целесообразно использовать уникальную "реконструкционную" способность человеческого глаза. Интерактивная программа геометрической реконструкции позволяет объединить вычислительные возможности современной графической рабочей станции и опыт физика-экспериментатора по анализу сложных событий.

Ниже мы приводим краткое описание такой программы, созданной для совместного эксперимента WA92 [1], нацеленного на изучение рождения "прелестных" частиц в реакции



и покажем, в какой мере такой подход позволяет увеличить эффективность работы. Эксперимент WA92 проводился в Европейском Центре Ядерных Исследований (CERN) на спектрометре Омега.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Пучок пи-минус мезонов с энергией 350 ГэВ после прохождения пучкового телескопа (определение положения входного трека) взаимодействует в мишени. Частицы, рожденные в результате взаимодействия, регистрируются детекторными системами спектрометра. Прецизионные распадный и вершинный микростриповые детекторы предоставляют данные для детальной реконструкции топологии события вблизи вершины. Существенно отметить, что распадный детектор (17 микростриповых плоскостей с размером рабочей области 5×5 мм² и шагом 10 микрон, 8704 канала) является электронным аналогом пузырьковой камеры и перекрывает первые 3 см после мишени. Вершинный детектор (размер плоскостей 5×5 см², шаг 25 микрон, 17 плоскостей) поставяет быструю информацию для специального процессора, обеспечивающего on-line поиск вторичных вершин. Указанные кремниевые детекторы расположены перед магнитом спектрометра "Омега" в области очень слабого магнитного поля. Трековая система спектрометра состоит из трех больших групп многопроволочных пропкам, находящихся в дипольном магнитном поле большого сверхпроводящего магнита ($B_{max} = 1,8T$, $\int Bdl = 7,3T \cdot м$) и вместе с дрейфовыми камерами на выходе магнита обеспечивает точность измерения импульса

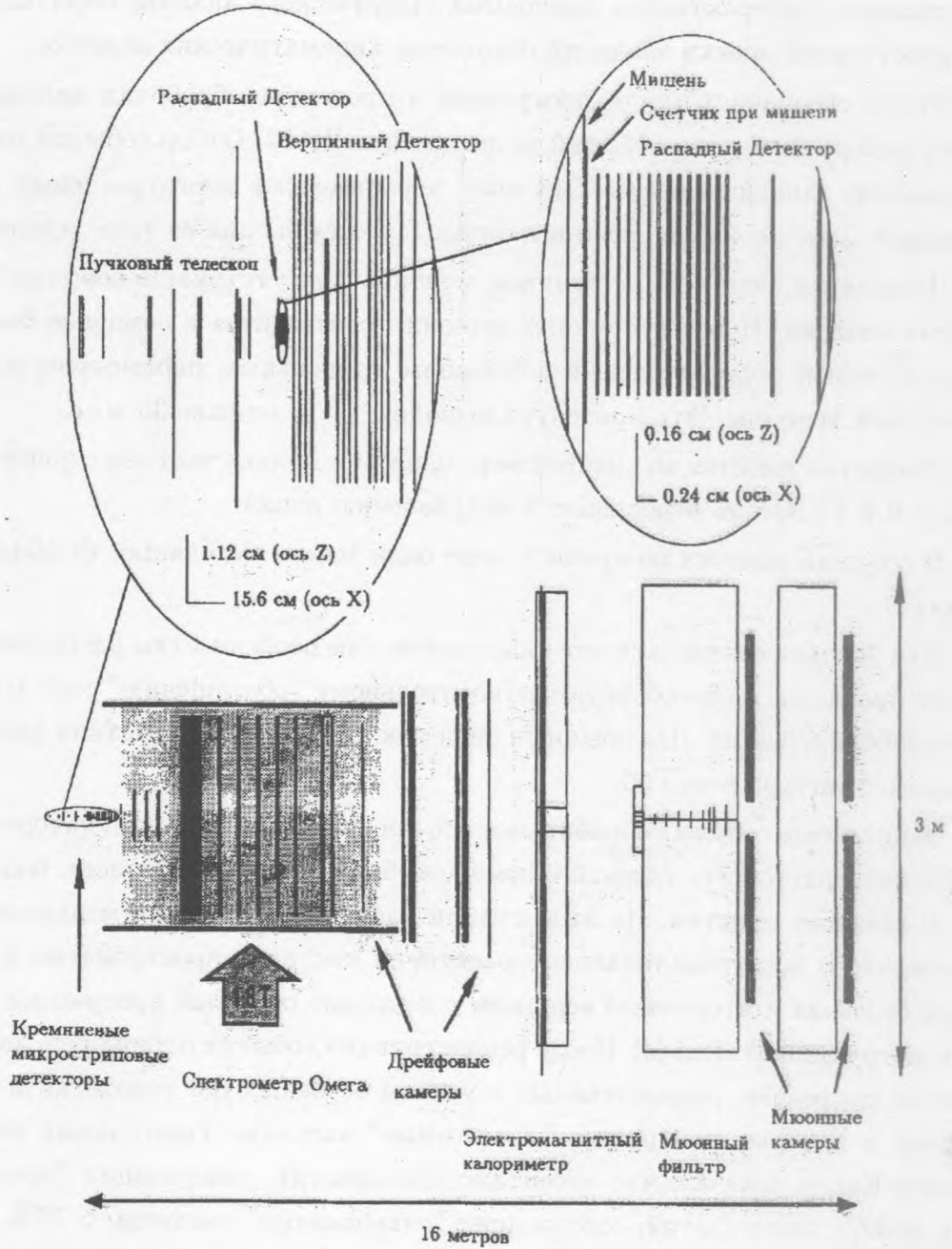


Рис. 1. Схема установки эксперимента WA92.

10^{-4} . Электромагнитный калориметр, мюонный фильтр и сцинтилляционные годоскопы используются для идентификации и отбора частиц с высоким поперечным импульсом.

С использованием стандартного графического пакета Hviz [2] на языке Fortran бы-

ла написана интерактивная программа графического анализа событий с элементами количественной оценки значений некоторых кинематических величин.

Чтобы обозначить место программы в процедуре обработки данных, рассмотрим схему отбора и анализа событий эксперимента WA92. Отбор событий начинался еще в процессе их записи на ленты. Для этого использовался многоуровневый триггер, разрешающий запись события, если выполняются хотя бы два из трех условий:

По крайней мере одна вторичная вершина присутствует в событии и расположена вблизи мишени. Поиск вторичных вершин производится с помощью быстрого процессора, который отбирает треки с большим прицельным параметром по отношению к первичной вершине. Эта процедура выполняется в течение 35 мкс.

В событии имеется по крайней мере одна заряженная частица с поперечным импульсом $> 0,6 \text{ ГэВ}/c$ по отношению к направлению пучка.

В событии имеется по крайней мере один мюон, выходящий из области взаимодействия.

Эти условия соответствуют кинематическим особенностям распадов частиц с тяжелыми кварками и способствуют относительному "обогащению" ими зарегистрированного набора событий. Для обычных пион-нуклонных взаимодействий фактор подавления данного триггера равен 30.

Записанные события обрабатывались программой-фильтром, которая проверяла выполнение триггерных условий с помощью быстрой реконструкции, подавляющей заведомо фоновые события. На этой стадии количество данных уменьшалось в три раза. После этого восстанавливались траектории частиц в пространстве, а также находились основная и вторичные вершины с помощью основной программы геометрической реконструкции Trident [3]. После реконструкции события отбирались автоматически на основе критериев, разработанных с учетом особенностей топологии и кинематики событий, в которых рождаются "прелестные" частицы. Тщательный анализ по методу Монте-Карло показал, что аксеитанс для событий, содержащих "прелестные" частицы, $\simeq 39\%$, для событий, содержащих "очарованные" частицы, $\simeq 10\%$. Интерактивная графическая программа позволяет наблюдать события и производить количественные оценки интересующих величин во всех трех проекциях.

Программа использует в качестве входных данных информацию о событиях, специально записываемую программой Trident в формате ASCII, удобном для передачи по сети или с помощью внешних носителей данных между вычислительными машинами произвольных типов. Рассмотрим подробнее возможности программы.

На дисплее высокого разрешения можно получать изображения различных частей установки: пучкового телескопа, распадного и вершинного детекторов и многопроволочных камер спектрометра "Омега". В каждом детекторе отмечаются сработавшие каналы. В распадном детекторе дополнительно могут быть показаны амплитуды импульсов сработавших каналов, условно изображаемые с помощью горизонтальных отрезков, имеющих длину, пропорциональную значению соответствующей амплитуды.

Для треков, восстановленных с помощью программы Trident, доступна информация об их заряде, импульсе, значениях углов вылета, значениях поперечного импульса по отношению к направлению полета любой распавшейся частицы, вершина распада которой восстановлена, и значение прицельного параметра по отношению к любой из восстановленных вершин. При желании может быть произведена линейная экстраполяция треков, находящихся вне магнитного поля. Эта возможность используется в случае, если в детекторе имеется видимый след из кластеров сработавших каналов, соответствующий одному из восстановленных треков, однако сам трек по какой-либо причине не продолжается в этой области. Возможен также линейный фит любой произвольно выбранной группы кластеров в одной проекции, что позволяет восстановить треки, потерянные программой реконструкции.

В программе имеются возможности для оценки значения массы вторичной вершины, при этом выбранным трекам присваиваются определенные значения масс в соответствии с проверяемой гипотезой. Треки объединяются в вершину, и проверяется качество этой вершины. Вычисляется инвариантная масса вершины.

В случае, если поперечные импульсы частиц, выходящих из этой вершины, не сбалансированы таким образом, что прицельный параметр суммарного импульса по отношению к первичной вершине равен 0, может быть проверена гипотеза о существовании нейтрального трека, выходящего из данной вторичной вершины. Может быть вычислено значение минимально возможной инвариантной массы данной вершины и значение минимально возможного импульса для случая, когда поперечный импульс нейтральной частицы восстанавливает общий баланс и прицельный параметр принимает нулевое значение.

Возможен параллельный перенос треков в данной проекции. Такая возможность используется в случае, если какой-либо трек восстановлен только в многопроволочных камерах спектрометра "Омега", однако имеются точки в вершинном и распадном детекторах, по которым можно восстановить трек с близким значением угла в данной проекции, но слегка смещенный относительно экстраполированного в область мишени

из спектрометра "Омега". Это позволяет скорректировать реконструкцию и в дальнейшем оперировать с большим количеством пространственных треков, что полезно при вычислении кинематических величин.

Данная программа позволяет иметь дело как с реальными данными, так и с моделированными событиями, для которых программа Trident записывает в структуру данных дополнительную информацию. Это дает возможность изобразить такие события также в первоначальном виде, что оказывается необходимым для оценки эффективности и характерных проблем процедуры реконструкции. Интерактивная графическая программа использовалась при отборе и окончательной реконструкции событий, содержащих тяжелые мезоны и барионы ("очарованные" и "прелестные"). Поскольку времена жизни тяжелых мезонов и барионов достаточно малы (порядка $10^{-13} - 10^{-12}$ с), то для топологии таких событий характерно наличие нескольких вторичных вершин на расстоянии нескольких миллиметров от первичной. Из схемы установки видно, что эти вторичные вершины должны находиться в распадном детекторе. Поэтому основным источником фона для событий с "очарованными" и "прелестными" частицами являются вторичные взаимодействия в плоскостях этого детектора, образующие дополнительные вторичные вершины. Однако эти взаимодействия в большинстве случаев сопровождаются большим локальным энерговыделением (осколки ядер, медленные заряженные частицы) и могут быть отброшены на основе анализа амплитуд зарегистрированных сигналов вблизи вторичной вершины.

Эффективность восстановления треков программой Trident в спектрометре "Омега" $\sim 90\%$, а в распадном и вершинном детекторах $\sim 80\%$, и убывает с уменьшением энергии частицы и с увеличением угла между направлением ее вылета и направлением пучка. Поэтому вероятность того, что все треки, выходящие из вершины, окажутся восстановлены, убывает с возрастанием множественности треков, принадлежащих данной вершине. Вероятность, что все треки, выходящие из вершины, будут восстановлены в распадном и вершинном детекторах, для вторичной вершины с множественностью 2 равна $\sim 64\%$, для вершины с множественностью 3 — $\sim 51\%$, а для вершины с множественностью 4 — всего $\sim 41\%$. Здесь приведены средние значения вероятностей, они повышаются с увеличением энергии треков, что увеличивает шанс восстановить вершину, образовавшуюся в результате распада тяжелой частицы. Однако при взаимодействии с плоскостями распадного детектора могут рождаться и частицы с низкой энергией, треки которых при автоматической реконструкции могут оказаться не восстановленными. Такая "вершина" может быть ошибочно принята за распад частицы,

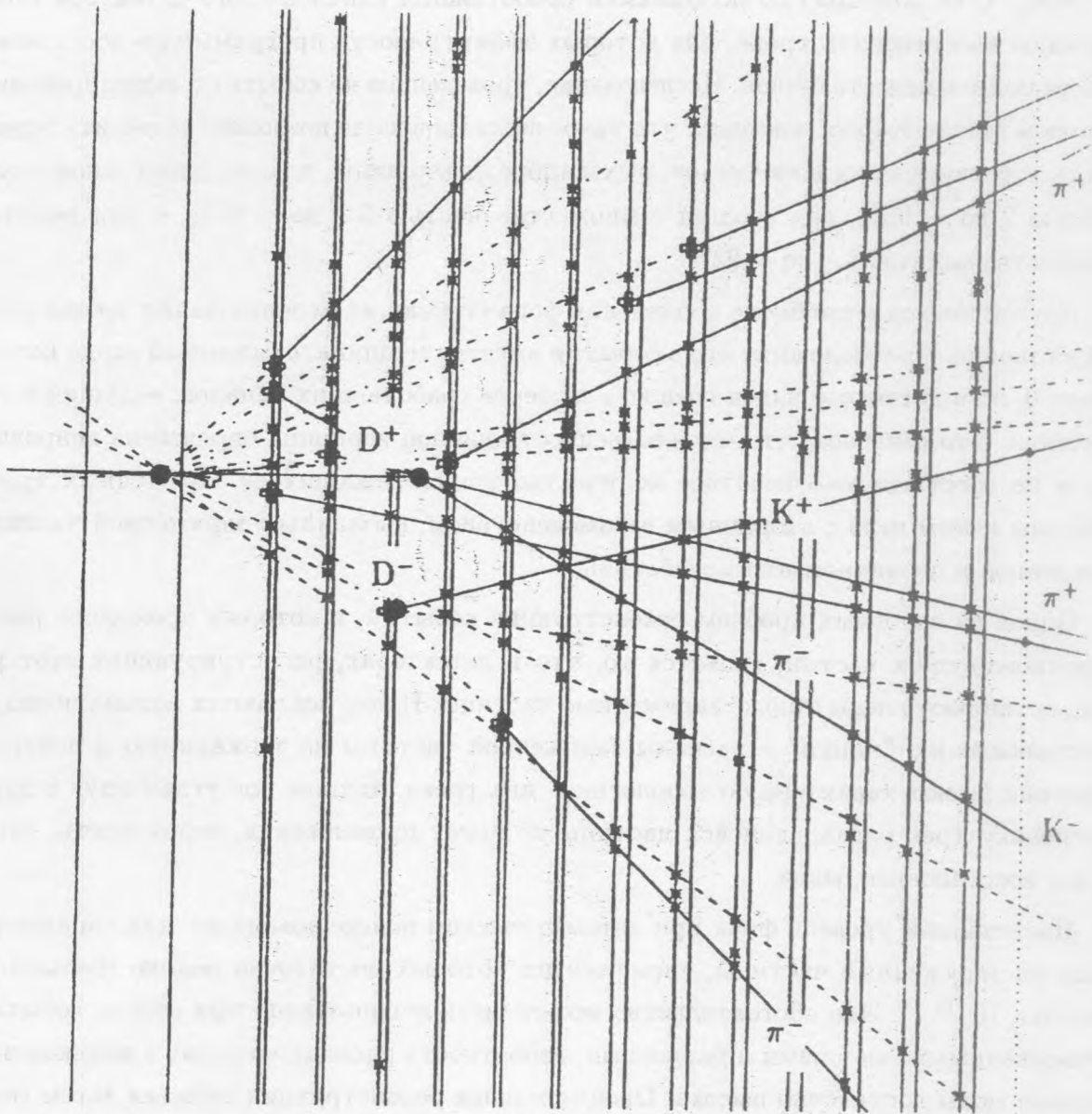


Рис. 2. Рождение и распад пары D^+D^- ($D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$, $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$), зарегистрированные в распадном детекторе и восстановленные при помощи интерактивной графической программы.

если инвариантная масса восстановленных треков совпадет с ожидаемой массой для данной частицы.

Графическая интерактивная программа дает уникальную возможность использо-

вать высокую эффективность регистрации заряженных треков в распадном детекторе ($\sim 98\%$). С ее помощью по положениям сработавших каналов этого детектора можно вручную восстановить треки, для которых эффективность программного восстановления оказалась недостаточной. Исследование, проведенное на событиях, моделированных методом Монте-Карло, показало, что такое восстановление позволяет повысить вероятность восстановления всех треков, выходящих из вершины, для вершин с множественностью 2 до $\sim 96\%$, для вершин с множественностью 3 – до $\sim 94\%$, а для вершин с множественностью 4 – до $\sim 92\%$.

Другой подход к проблеме подавления фона основан на использовании закона сохранения заряда. Предположим, что в событии имеется вершина, суммарный заряд которой равен 0, но в детекторе виден след из кластеров сработавших каналов, ведущий к этой вершине. Это означает, что множественность данной вершины определена неправильно, и не восстановлено нечетное количество принадлежащих ей заряженных треков, либо мы имеем дело с вторичным взаимодействием, вызванным заряженной частицей, рожденной в первичном взаимодействии.

Одной из основных проблем реконструкции событий, в которых произошел распад короткоживущих частиц, является то, что в детекторах, регистрирующих этот распад, оставляют следы только заряженные частицы. Плохо поддаются автоматическому восстановлению "кинки" – распады заряженной частицы на заряженную и нейтральную, они имеют характерную топологию – два трека, идущие под углом друг к другу. Поскольку трек распадающейся частицы не имеет продолжения, вероятность, что он будет восстановлен, мала.

Наименьший уровень фона при автоматическом поиске возникает для каналов распада на заряженные частицы, время жизни которых достаточно велико (больше или порядка 10^{-10} с). Это обстоятельство может быть использовано при отборе событий с "очарованными" мезонами и барионами, вероятность распада которых в целом заряженные моды достаточно высока. Окончательная реконструкция события затем может быть произведена интерактивным способом при помощи данной графической программы.

На рис. 2 приведен пример события, в котором родилась пара "очарованных" мезонов. В результате обработки 20% статистики эксперимента WA92 таким способом было найдено и полностью восстановлено 102 события, в которых произошло рождение пары "очарованных" частиц. Для оценки фона моделированные события, не содержащие "очарованных" частиц, проходили такую же процедуру обработки и анализа, что

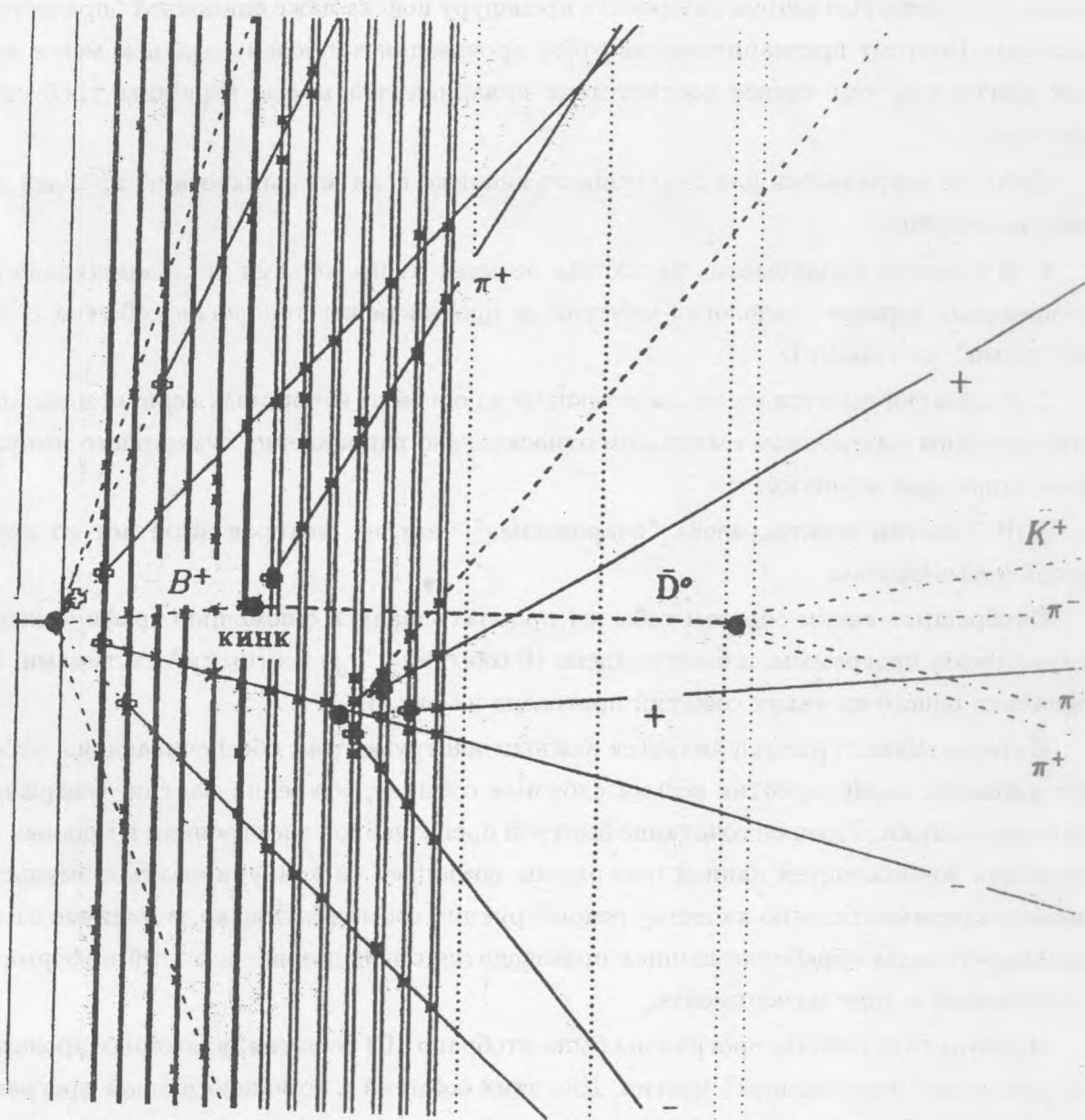


Рис. 3. Рождение и распад B^+ мезона, восстановленные при помощи интерактивной графической программы. $B^+ \rightarrow \pi^+ \bar{D}^0$; $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$. Событие отобрано по наличию в нем вершины, значение инвариантной массы которой находится в диапазоне, соответствующем "очарованным" частицам. Вершина распада B^+ мезона найдена интерактивно.

и экспериментальные. Полученный уровень фона $< 0,01$. Эти же данные (20% статистики эксперимента) использовались для поиска "прелестных" мезонов. Поскольку

топология событий с такими частицами более сложна, чем в предыдущем случае, невозможно полностью автоматизировать процедуру поиска даже одиночной "прелестной" частицы. Поэтому предварительный отбор производился с использованием менее жестких критериев, чем точное соответствие инвариантной массы вершины требуемому значению.

Событие сохранялось для дальнейшего анализа, если выполнялось по крайней мере одно из условий:

1. В событии наблюдается распадная цепочка из нескольких последовательно расположенных вершин (топология события не противоречит топологии событий с "прелестными" частицами).

2. В событии имеется мюон, вылетающий из одной из вторичных вершин и обладающий высоким поперечным импульсом относительно направления суммарного импульса этой вторичной вершины.

3. В событии восстановлена "очарованная" частица, которая вылетает из другой вторичной вершины.

Отобранные таким образом события просматривались с помощью графической интерактивной программы, и было найдено 16 событий с "прелестными" частицами. Изображение одного из таких событий приведено на рис. 3.

Интерактивная графика является важным инструментом, обеспечивающим отбор и исследование характеристик весьма сложных событий рождения частиц, содержащих тяжелые кварки. Удачное сочетание быстрой прецизионной электроники и мощных графических возможностей данной программы позволяет ей конкурировать с эмульсионными экспериментами по качеству реконструкции событий. Однако, в отличие от них, предварительная обработка данных производится с использованием всей информации, накопленной в ходе эксперимента.

В результате работы программы было отобрано 102 события, в которых происходило рождение "очарованных" частиц. Для этих событий с помощью данной программы была полностью восстановлена топология парного рождения, что дало возможность исследовать корреляционные характеристики рождения пар $c\bar{c}$ [5]. При помощи этой программы было найдено также 16 событий, содержащих "прелестные" частицы, и восстановлена топология по крайней мере для одной из пары родившихся частиц.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 94-02-04101.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] BEATRICE collaboration, The WA92 Experiment, to be submitted to Nucl. Instr. and Meth.
- [2] HIGZ – High level Interface to Graphics and Zebra, CERN Program Library Long Writeup Q120 (1993).
- [3] Lassale J. C., Carena F. and Pensotti S., Nucl. Instr. and Meth., **176**, 371 (1980).
- [4] Adinolfi M. et al., A Microstrip Decay Detector for Beauty Physics, preprint CERN-PPE/92-181, 30 September 1992.
- [5] BEATRICE collaboration, Study of charm correlation in π^-p interactions at $\sqrt{s} = 26 \text{ GeV}/c^2$.

Поступила в редакцию 18 апреля 1995 г.