

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Н.М.Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

| | |
|---|------|
| ВВЕДЕНИЕ | 1499 |
| ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ПУЧКАХ | 1503 |
| ТРЕХКООРДИНАТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ | 1506 |
| ВРЕМЯПРОЕКЦИОННЫЕ КАМЕРЫ | 1507 |
| ПРИМЕНЕНИЕ КАМЕР ТИПА «ДЖЕТ» | 1522 |
| ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ | 1536 |
| МУЛЬТИДРЕЙФОВЫЕ И СОЛОМЕННЫЕ ТРУБКИ | 1539 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 1541 |

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Н.М.Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены этапы развития и современное состояние методики газонаполненных трехкоординатных вершинных детекторов, методов считывания и регистрации топологий сложных событий, регистрируемых с помощью вершинных детекторов. Обсуждаются особенности таких трехкоординатных вершинных детекторов, как времяпроекционные камеры, «образные» (jet) камеры, векторные дрейфовые камеры и вершинные детекторы, создаваемые на базе «соломенных трубок». Приводятся таблицы, содержащие параметры наиболее известных газонаполненных вершинных детекторов, используемых в экспериментах с фиксированной мишенью и на коллайдерах.

Modern state and development of the technique gaseous three-coordinate (three-dimensional) detectors are considered. The methods of the readout and registration complicated events registered by gaseous vertex detectors are described. The peculiarity such three-coordinate vertex detectors as time projection chambers, pictorial (jet) chambers, vector chambers and chambers which based on straw tubes are discussed. The tables having characteristics most well-known gaseous three-coordinate detectors used in both fixed target and experiment and on colliders are given.

1. ВВЕДЕНИЕ

После открытия J/ψ -частицы в ноябре 1974 г. начался новый этап в развитии физики элементарных частиц, электронных методов физики высоких энергий и ускорительной техники, потребовавший изучения свойств короткоживущих частиц с временем жизни меньше 10^{-8} с. В соответствии с принятой классификацией по времени жизни [1] элементарные частицы и резонансы разделяются на три группы.

1. Долгоживущие частицы с временем жизни свыше 10^{-8} с. Порождаемые в столкновениях при высоких энергиях, они имеют длину распада порядка 1 м и более (K^\pm , π^\pm , μ^\pm ...). Детектирование и наблюдение таких частиц с помощью обычных трековых детекторов не представляет особых трудностей, а для их идентификации дополнительно используются черенковские счетчики.

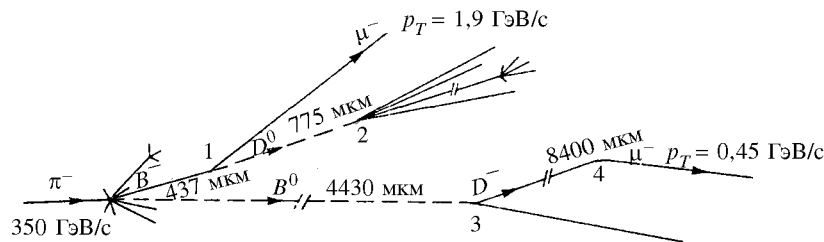


Рис.1. Топология типичного события, содержащего несколько вершин распада (для π^0 -мезонов с энергией 350 ГэВ/с). Событие зарегистрировано с помощью фотоэмульсии

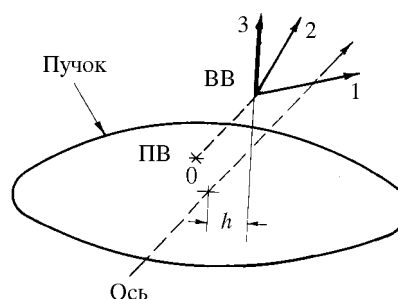
2. Нейтральные частицы (γ , K_L^0 , n ...), наблюдаемые с помощью калориметров.

3. Частицы с временем жизни порядка 10^{-10} с (K_S^0 , Σ^\pm , Λ ...). Изучение свойств таких частиц не требует применения вершинных детекторов. Широкий спектр проблем в физике элементарных частиц, начиная с середины 70-х годов, возник в связи с изучением свойств короткоживущих частиц с временем жизни меньше 10^{-11} с.

Особый интерес представляет, например, семейство таких элементарных частиц, как τ -лептоны, адроны, очарованные и прелестные частицы (10^{-12} – 10^{-13} с), длина распада которых составляет сотни микрометров. Эти частицы детектируются и идентифицируются с помощью физических установок, содержащих вершинные детекторы. Обычно наряду с первичной вершиной распада имеются две или более вторичных вершин, находящихся на расстоянии L одна от другой. Типичное значение L составляет сотни микрометров (рис.1) [1]. Казалось бы, путем непосредственного измерения этой величины и характеристик продуктов распада можно с высокой точностью найти время жизни τ . Однако такой метод измерения в настоящее время практически не используется вследствие ряда причин: высокого уровня фона в экспериментах и выведенных пучках высоких энергий, проводимых на коллайдерах; невозможности непосредственного измерения координаты первичной вершины распада, которая находится внутри ионопровода, где сталкиваются встречные пучки; невозможности определения импульса частицы в случае распада нейтральных частиц. Поэтому для определения координат вершин распада применяется косвенный метод, основанный на измерении прицельного параметра каждого трека (рис.2).

Прицельный параметр представляет собой расстояние h , на которое трек из вторичной вершины распада при экстраполяции назад отклоняется

Рис.2. Определение прицельного параметра h в случае, когда неизвестна координата первичной вершины распада (ПВ); 1,2,3 — оси координат. ВВ — вторичная вершина распада



от первичной вершины. Существенным является то, что значение этого параметра не зависит от импульса частицы, и поэтому он используется как для определения координат вершин распада, так и для измерения времени жизни короткоживущих частиц [2]. Пожалуй, впервые возможность использования прицельного параметра для определения координат вершин распада частиц была показана в [3]. С учетом малой величины времени жизни τ точность измерения прицельного параметра, особенно в области, близкой к мишени, должна составлять десятки и даже единицы микрометров. Для достижения столь высокой точности применяются различные типы детекторов: фотоэмульсионные пластины, пузырьковые камеры, высокопрецизионные газонаполненные детекторы, микровершинные полупроводниковые детекторы, а также микровершинные детекторы на основе сцинтилляционных волоконно-оптических световодов (СВОС).

Высокая точность, присущая пузырьковым камерам, позволяет непосредственно наблюдать и измерять параметры и топологии событий с короткоживущими частицами. При диаметре пузырька 20 мкм разрешение двух треков составляет 20 мкм, а точность измерения координаты точки вдоль трека 5 мкм. Аналогичная точность получается и с помощью фотоэмульсионной методики, однако при ее использовании оставляет желать лучшего скорость набора статистики, и, кроме того, она не позволяет использовать электронные методы отбора и реконструкции полезных событий с помощью многоуровневых триггерных систем регистрации и фильтрации физической информации. Поэтому как в современных, так и во вновь планируемых экспериментах в области физики высоких и сверхвысоких энергий применяются электронная и электронно-оптическая методики, где в качестве вершинных детекторов используются многоячеечные дрейфовые трехкоординатные детекторы, полупроводниковые детекторы различных модификаций и СВОС.

В табл.1 приведены сравнительные параметры перспективных вершинных детекторов.

Таблица 1. Сравнительные параметры вершинных детекторов

| Параметр | Детектор | | | | | |
|---|----------|--------|--------------------------------|----------------------------------|-------|------|
| | ВПК* | jet-** | Мульти- дрейфовые трубки | Микро- полосковый детектор | ПЗС | СВОС |
| Пространственное разрешение, мкм | 200 | 20—100 | 10—50 | 2—20 | 3—5 | 25 |
| Разрешение двух треков, мкм | 2500 | 35—500 | — | 50—60 | 40—50 | 52 |
| Точность определения прицельного параметра, мкм | — | 35—100 | 35—100 | 40 | 30 | 10 |

*ВПК — времяпроекционные камеры.

**jet — газонаполненные микровершинные детекторы.

Быстродействие времяпроекционных камер в основном определяется временем дрейфа, и вследствие большого дрейфового промежутка время дрейфа электронов составляет десятки микросекунд. Это приводит к тому, что информация, регистрируемая в ВПК, не может использоваться для выработки быстрого триггерного сигнала первого уровня. Камеры типа «джет» с временной растяжкой, мультидрейфовые и соломенные трубки имеют на порядок более высокое быстродействие по сравнению с ВПК, поэтому они не ограничивают возможности регистрирующей электронной аппаратуры. Остальным типам детекторов присуще высокое быстродействие, которое практически трудно реализовать из-за большого количества каналов регистрации. Поэтому чаще всего для чтения данных от микрополосковых детекторов используются мультиплексоры. Чтение информации от ПЗС-матриц и СВОС выполняется последовательным способом, поэтому оно требует времени порядка десятков миллисекунд.

Цель данного обзора состоит в том, чтобы в сжатой форме систематизировать многочисленные публикации, посвященные прецизионным газонаполненным вершинным детекторам, ассоциированным с ними электронными системами считывания и специализированными процессорами для детектирования вершин распада частиц и вычисления прицельного параметра. В разд.2 рассмотрены особенности методики экспериментов с фиксированной мишенью и экспериментов на сталкивающихся пучках. В разд.3 кратко рассмотрены вопросы развития и особенности трехмерных газонаполненных детекторов. В разд.4 описаны конструктивные особенности и характеристики наиболее известных времяпроекционных камер. Пятый раздел посвящен более быстрым и точным по сравнению с ВПК джет-камерам.

В разд.6 описаны векторные вершинные детекторы и камеры с временной растяжкой. Седьмой раздел посвящен таким перспективным газонаполненным вершинным детекторам, в которых используются мультидрейфовые и «соломенные» трубки.

2. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ПУЧКАХ

Существует два типа экспериментов по физике высоких энергий, выполняемых на ускорителях.

В первом случае используется взаимодействие ускоряемой пучковой частицы с покоящейся частицей мишени (эксперименты с фиксированной мишенью). В этих условиях энергия системы центра масс растет как корень квадратный из энергии пучка частиц. При этом большинство продуктов взаимодействия распространяется от мишени под небольшим углом к оси пучка.

Второй случай — использование коллайдеров, где ускоряемые частицы циркулируют в противоположных направлениях и сталкиваются внутри малой области пересечения пучков. Энергия в системе центра масс растет линейно с энергией пучков. Поэтому такие ускорители имеют большие перспективы развития. Достигнутая в настоящее время энергия пучка на протонном коллайдере в США составляет 1 ТэВ.

Особенности экспериментов с фиксированной мишенью в тераэлектронвольтовой области энергий заключаются в следующем: все треки концентрируются в малом угле порядка 100 мрад; большая множественность регистрируемых треков в событиях; высокая скорость регистрации событий (несколько сот килогерц); большой импульс частиц. В связи с последними обстоятельствами в ряде случаев можно пренебречь эффектом многократного рассеяния, и поэтому вершинный детектор может состоять из нескольких расположенных перпендикулярно пучку годоскопических плоскостей с высоким пространственным разрешением, причем расстояние от первой плоскости до мишени известно: оно должно быть порядка величины $\gamma c\tau$, где γ — релятивистский фактор, c — скорость света, $\tau \sim 10^{-13}$ — характерное время жизни очарованных частиц.

С точки зрения методики физического эксперимента опыты на коллайдерах отличаются от опытов с фиксированной мишенью в нескольких аспектах.

1) Поскольку столкновение частиц происходит в системе центра масс, то они могут разлетаться изотропно, и поэтому детектор должен покрывать всю или бóльшую часть пространства взаимодействия.

2) Множественность частиц, рождаемых в результате столкновения, существенно повышается с ростом энергии и может составлять 100 и более. Наблюдается даже такой феномен, называемый струей (jet), когда вблизи мишени содержится множество треков частиц, расходящихся под небольшими углами друг к другу.

3) Поскольку точка взаимодействия находится внутри ионопровода, то ее координата может быть определена лишь путем экстраполяции зарегистрированных треков частиц. Типичная величина области взаимодействия в направлении пучка (z -координата) составляет 50 см, а в поперечном сечении — 1 мм.

4) Меньшая, чем в опытах с фиксированной мишенью, кривизна треков не позволяет пренебрегать многократным рассеянием частиц.

5) Возникает также проблема радиационной стойкости электроники, расположенной близко вокруг ионопровода.

Все эти и другие факторы сказываются на сложности физических установок в целом, их конфигурации и методах обработки трековой информации и идентификации частиц. Поэтому вершинный детектор, по существу, представляет собой композицию отдельных детекторов, имеющих различный принцип действия, разрешающую способность и размеры. На рис.3 в качестве примера приведено схематическое изображение установки ALERH, предназначенной для проведения экспериментов в ЦЕРН [4]. Установка содержит ряд отдельных и довольно сложных детекторов, выполняющих свои специфические функции. Через центр установки проходит ионопровод, где происходит встреча e^+e^- -пучков. Типичный диаметр ионопровода равен 2,5 см. Трековая система включает в себя три детектора: вершинный детектор, состоящий из двух слоев микрополосковых детекторов с двусторонним считыванием, дрейфовая камера с внешним радиусом 35 см, которая к тому же является частью триггерной системы, и времяпроекционная камера с внешним радиусом 125 см. Первоначально вместо полупроводникового вершинного детектора использовалась газонаполненная камера типа джет. Следует обратить внимание на два типа детекторов, которые будут описаны более детально в следующих разделах обзора. Первый из них расположен непосредственно у ионопровода, где плотность треков наиболее высока. Это так называемая джет-камера, которая выполняет функции микровершинного прецизионного детектора. В последнее время в качестве микровершинных детекторов применяются также ПЗС-матрицы. С помощью ВПК (внешний диаметр 2 м) регистрируются треки, расположенные вдали от первичной вершины распада. Времяпроекционная камера помещена в магнитное поле, необходимое для измерения кривизны треков. Установка содержит также ряд детекторов, с помощью которых получается дополнительная информация. Так, с помощью калориметров измеряется

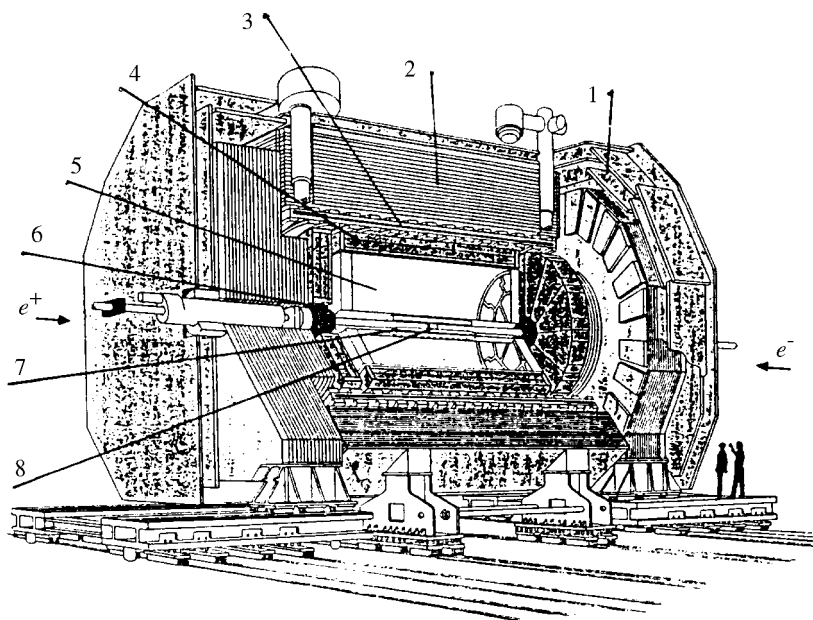


Рис.3. Схематическое изображение установки ALEPH: 1 — мюонные камеры, 2 — адронный калориметр, 3 — сверхпроводящий магнит, 4 — электромагнитный калориметр, 5 — времяпроекционная камера, 6 — система индикации пучка, 7 — внутренняя трековая камера, 8 — прецизионный вершинный детектор

энергия частиц, а с помощью годоскопических калориметров — координаты и размеры кластеров.

Следует отметить, что прецизионные детекторы будут играть также важную функцию и в будущих экспериментах на Большом адронном коллайдере. Как отмечается в [5], детектирование вершин распада преследует две цели: отделение первичной вершины распада в событиях с большой множественностью и разделение первичной и вторичной вершин распада, содержащих короткоживущие частицы.

В зарубежной литературе вершинным детекторам уделяется много внимания. В работе [2] обсуждаются различные аспекты техники измерения времени жизни короткоживущих частиц; рассматривается физика процессов, приводящих к топологиям событий, содержащих первичные и вторичные вершины распада; приводятся примеры применения вершинных детекторов различного класса. В работе [1] подробно рассматривается физика полупроводниковых детекторов и их применение в качестве вершинных де-

текторов, обсуждаются проблемы радиационной стойкости и принципиальные ограничения, накладываемые на точность регистрации треков частиц, а также приводятся примеры построения различных типов вершинных полупроводниковых детекторов, методы регистрации и считывания данных. В [6] рассматриваются различные требования, которые предъявляются к вершинным детекторам, предназначенным для экспериментов как с фиксированной мишенью, так и на коллайдерах.

3. ТРЕХКООРДИНАТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Среди координатных детекторов в 70-х годах наиболее популярными являлись многопроволочные пропорциональные камеры (МПК). Эти детекторы стали классическими, их подробное описание можно найти в работе [7]. Особенно плодотворной оказалась идея катодного считывания. Об этом методе стоит рассказать подробнее, поскольку он получил широкое применение в современных трехкоординатных газонаполненных детекторах. На катодной плоскости МПК наводится сигнал положительной полярности, причем катодная плоскость может состоять из проволок, полосковых линий (стрипов) или групп проволок (рис.4). Эти электроды используются для измерения наведенного заряда, центр которого совпадает с центром облака электронов, возникающего в результате ионизации заряженной частицей газа-

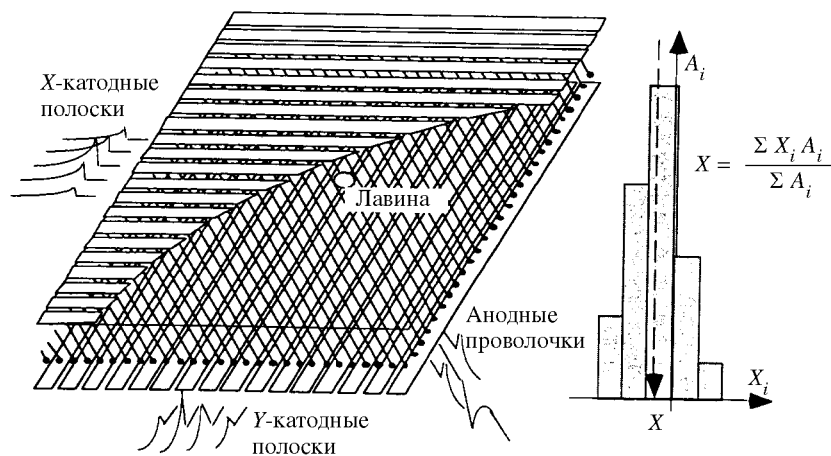


Рис.4. МПК с чтением сигналов положительной полярности от катодной плоскости. Справа на рисунке показан метод определения центра тяжести лавины

наполнителя камеры. Важно, что амплитуда и развитие во времени наведенных на стрипах импульсов зависит от позиции лавины электронов по отношению к катодным электродам. Это явление используется для измерения пространственного положения и, соответственно, второй координаты взаимодействия частицы с высокой точностью до 30 мкм, поскольку оцифровка аналоговых сигналов выполняется с помощью прецизионных АЦП (свыше десяти бит) [8].

Дальнейшее усовершенствование МПК стимулировалось необходимостью идентификации сложных событий в условиях большой множественности и высокой плотности треков. Так появилась дрейфовая камера, с помощью которой путем измерения времени дрейфа электронов между сигнальными проволочками появилась возможность измерять с высокой точностью одну из координат трека [9]. Таким образом, в трехмерном газонаполненном детекторе одна координата траектории частицы — это позиция сигнальной проволочки, другая — позиция центра лавины, наводимой на катодных стрипах, а третья координата вычисляется по времени дрейфа электронной лавины. Нередко одна из координат определяется методом деления заряда, наводимого на резистивной чувствительной проволочке или с помощью линии задержки. Важно, что дрейфовые камеры могут иметь различную конфигурацию. Наиболее широкое применение нашли цилиндрические дрейфовые камеры. Трудность, связанная с лево-правой неоднозначностью, которая возникает в дрейфовых камерах при идентификации треков частиц, устраняется путем введения дополнительной плоскости или другими конструктивными методами (см. ниже). Таким образом, дрейфовые камеры, и прежде всего дрейфовые камеры с большим дрейфовым промежутком, послужили прототипами трехкоординатных газонаполненных детекторов, к которым в настоящее время относятся времяпроекционные камеры (ВПК), струйные (jet), векторные дрейфовые камеры и мультидрейфовые и «соломенные» трубки (straw tube). Эти детекторы широко используются, в частности, в качестве вершинных детекторов.

4. ВРЕМЯПРОЕКЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Одна из первых разработок описана в [10,11]. На первый взгляд, ВПК имеет простую конструкцию. По форме она чаще всего представляет собой цилиндр, наполненный смесью аргона и метана, в центре которого проходит ионопровод ускорителя. Центральная проводящая мембрана, находящаяся под потенциалом 150 кВ, разделяет цилиндр на две половины. У торцов камеры расположены МПК с катодным считыванием, которые разделены на шесть сегментов. В свою очередь, каждый сегмент содержит 192 пропорциональные проволоки, расположенные под углом к радиаль-

ному направлению камеры. Расстояние между проволоками равно 4 мм. Каждой проволоке соответствует катодный стрип, разделенный на 12 площадок (пэдов) размером $0,8 \times 0,8$ мм. Цилиндр помещен в магнитное поле.

В результате ионизации заряженной частицей газовой смеси вдоль траектории частицы образуются группы электронов, которые под действием электрического поля дрейфуют со скоростью порядка 50 мкм/нс в направлении МПК, где они детектируются. Две координаты r и ϕ определяются по позиции стрипов и проволочек, а третья координата z по времени дрейфа электронов вдоль оси пучка частиц. Таким образом, обеспечивается измерение трех координат на каждом треке. Дипольный магнит выполняет две функции: отклоняет заряженные частицы в плоскости МПК с целью изме-

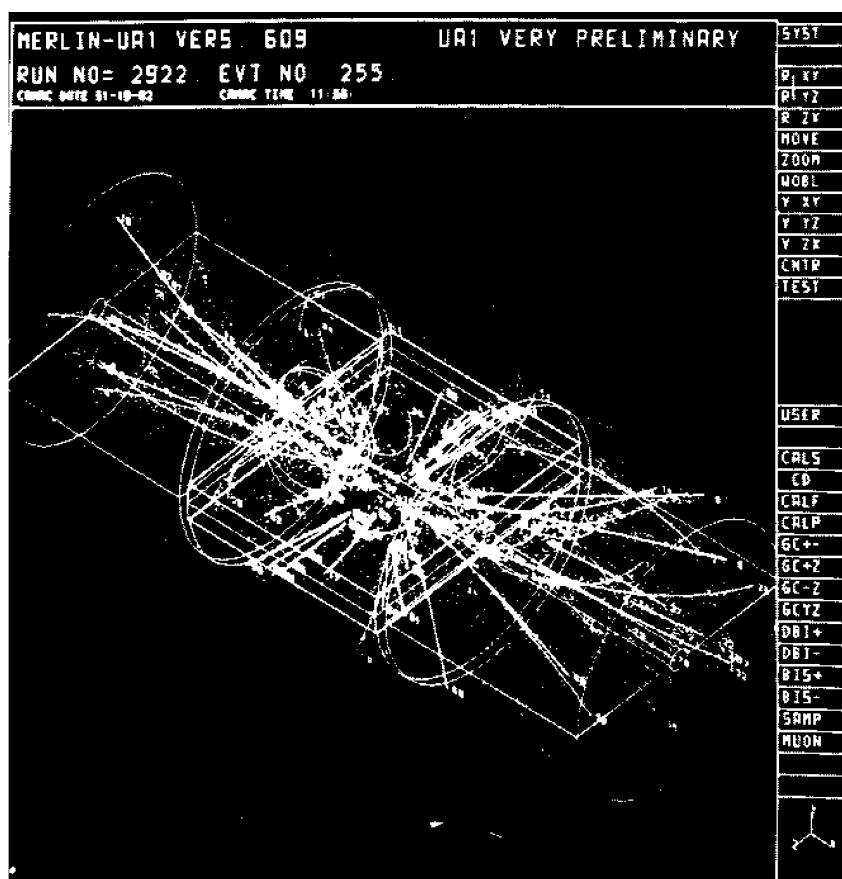


Рис.5. Сложное событие, зарегистрированное с помощью времяпроекционной камеры (вид на дисплее после обработки на ЭВМ)

Рис.6. Схематическое изображение ВПК прямоугольной формы

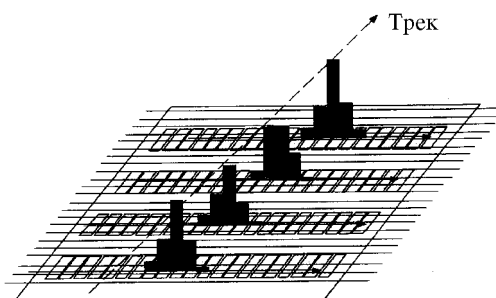
рения импульса частиц и уменьшает диффузию ионизационных электронов. Функции трекового детектора обеспечиваются тем, что эти электроны детектируются по мере подхода к электродам МПК.

Применение современной электронной аппаратуры позволяет регистрировать сотни треков с высокой разрешающей способностью (сотни мкм). На рис.5 в качестве примера приведено сложное событие, зарегистрированное с помощью ВПК РЕР-4 в Беркли [12]. Характеристики этой камеры приведены в табл.2. Число каналов регистрации в такой камере равно 16020, из них 2196 каналов служат для пропорциональных проволоочек и 13824 предназначено для катодных стрипов. В [13] описана схема типичного канала регистрации, которая состоит из усилителя, аналоговой задержки, созданной на основе ПЗС-матрицы и схемы оцифровки. Для быстрых многостоповых временных измерений используются многоканальные кодировщики на основе модулей памяти [14].

Как будет показано ниже, применение находят также ВПК прямоугольной формы, как это показано на рис.6. Времяпроекционная камера состоит из наполненного газом большого дрейфового объема, где вследствие пролета заряженных частиц возникает ионизация. На одном или двух торцах располагаются МПК с катодным считыванием. С целью регистрации треков в пространстве, наряду с двумя спроецированными координатами, измеряемыми с помощью МПК (рис.7), определяется также время дрейфа электронов. Для обеспечения регистрации треков (больше одного) катодная плоскость состоит из множества пэдов (площадок) [15]. С помощью соответствующей электронной системы считывания эти сигналы длительностью 50 нс усиливаются, оцифровываются и передаются для дальнейшего анализа. Учитывая размеры



Рис.7. Профиль заряда, наведенного на пэдах времяпроекционной камеры



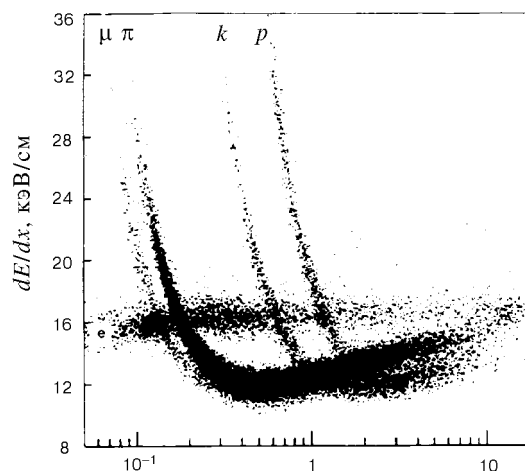


Рис.8. Зависимость потерь энергии от импульсов частиц

камер и время дрейфа электронов, равное 50 мкм/нс, максимальное время дрейфа может составлять сотни микросекунд. Практически это значит, что данные, регистрируемые от ВПК, не могут использоваться в триггерной системе первого уровня.

Ценным качеством ВПК является также возможность использования такой информации, как потери энергии частицами (dE/dx) (рис.8) для их идентификации. Использование этой величины для идентификации частиц, особенно в релятивистской области, требует разрешения лучшего, чем 3%. Ключом к решению этой проблемы является возможность получения до сотни независимых измерений dE/dx для каждого трека. Эта информация получается путем измерения заряда, собираемого на чувствительных проволочках. Более того, используя быстродействующие АЦП с частотой оцифровки до 100 МГц [16], можно с высокой точностью измерять также и форму сигнала, что позволяет улучшить такой важный параметр, как разрешение двух треков. Ниже будут рассмотрены особенности ряда ВПК, используемых в крупных физических установках.

ВПК ТОРАЗ. ВПК (РЕР-4) стала прототипом для разработки ряда других детекторов этого класса, проведенной с учетом новых достижений в методике физического эксперимента. В [17] описана ВПК ТОРАЗ, в которой катодные пэды, используемые для регистрации азимутальных координат ϕ , имеют большие размеры, нежели в камере РЕР-4, и, что важно, зигзагообразную форму, что позволяет при меньшем числе каналов регистрации

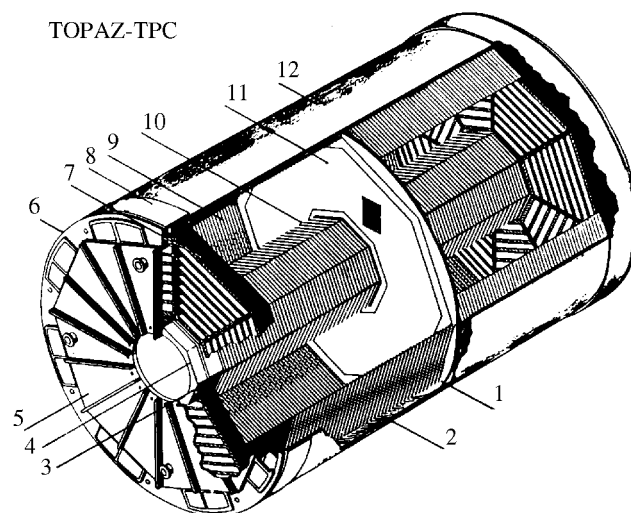


Рис.9. Общий вид времяпроекционной камеры TOPAZ: 1 — антитрековая камера, 2 — камера, создающая направляющее поле, 3 — внутреннее кольцо, 4 — закрепляющее кольцо, 5 — торец, 6 — внешнее кольцо крепления, 7 — сектор, 8 — внешнее кольцо, 9 — внешняя полевая камера, 10 — внутренняя полевая камера, 11 — центральная мембрана, 12 — внешний цилиндр

получить более высокую точность в определении координат. Более подробно конструкция электродов данной камеры описана в [18].

Общий вид ВПК TOPAZ изображен на рис.9. Камера предназначена для проведения e^+e^- -экспериментов на ускорителе TRISTAN и обеспечивает хорошее импульсное разрешение $\Delta p/p = 1\%p$ (для $p > 2$ ГэВ/с) и высокое значение dE/dx порядка 4%. Аналоговые сигналы после усиления и формирования считываются с частотой 10 МГц с помощью ПЗС-матриц и после временного хранения оцифровываются с помощью АЦП. Для обработки цифровых данных и передачи их в ЭВМ используется система FASTBUS. Кроме того, для ВПК и расположенной внутри камеры типа «джет» разработана оригинальная триггерная система и специализированный процессор для определения координат вершин распада частиц (см. ниже).

ВПК HISS. В Брукхэйвенской лаборатории (BNL) ВПК прямоугольной формы, состоящая из трех модулей, предназначена для использования на пучке тяжелых релятивистских ионов в условиях большой множественности частиц (порядка 100), что следует из рис.10, где показано восстановленное

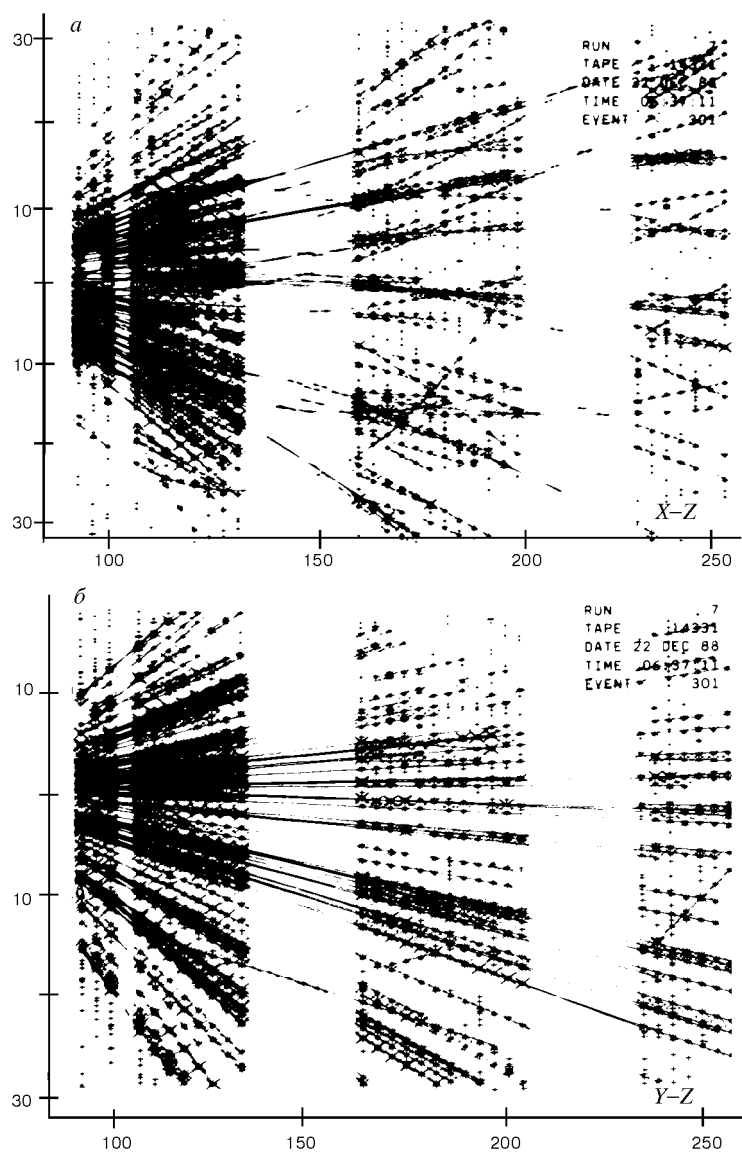


Рис.10. Событие, состоящее из 102 треков: а) проекция на плоскость xz, б) проекция на плоскость yz, в) проекция на плоскость xy, г) изображение, повернутое на 180°

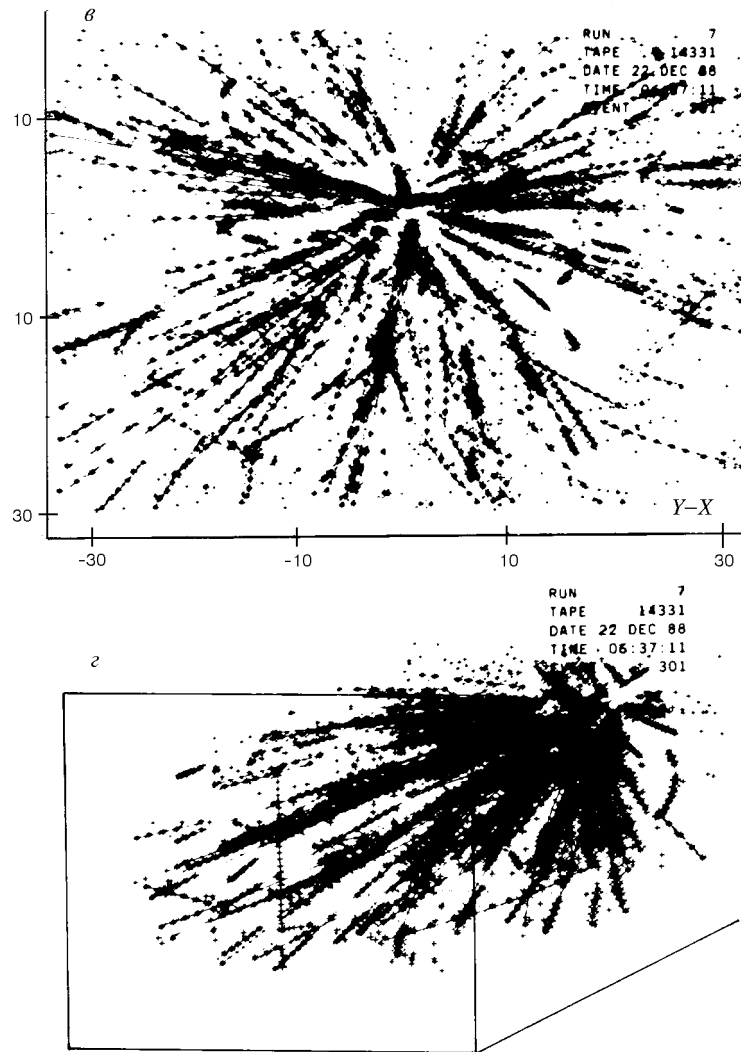


Рис.10в,г

событие, содержащее 102 трека. Хорошее двухтрековое разрешение получено благодаря большому числу независимых каналов чтения с использованием специализированных интегральных микросхем. В частности, была применена система из коротких (1 см) анодных проволок, расположенных параллельно пучку, и смесь газов с малым коэффициентом диффузии [19].

Таблица 2. Параметры ВПК

| Характеристика | Установка | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | HISS [20] | PEP-4 [10,11] | ALEPH [26—29] | TOPAZ [17—18] | DELPHI [23—25] | CDF [32] |
| Диаметр, см: | | | | | | |
| внешний | — | 180 | 360 | 260 | 280 | |
| (активный) | | | | | 116 | 21 |
| внутренний | — | 31 | 70 | — | 120 | |
| (активный) | | | | | 32,5 | 7 |
| Длина, см | — | 200 | 220 | 300 | 2 × 150 | |
| (активная) | | | | | 2 × 134 | 35,3 |
| Размер катодной плоскости, м | 1,5 × 1 | — | — | — | — | |
| Число элементов считывания (пэдов) | 120 × 128 | 13824 | 44000 | 4096 | 2 · 10 ⁴ | |
| Размер пэда, мм | 12 × 8 | 7,5 × 75 | 6,2 × 30 | 12 × 10 | | 4,12 × 4 |
| Пространственное разрешение, мкм | — | 100 ± 3 | 150 ± 5 | — | — | |
| Давление, атм | 1 | 10 | 1 | 3 | 4 | 1 |
| Дрейфовое расстояние, см | 2 × 75 | 2 × 1 | 2 × 20 | 2 × 20 | 368 | 15,25 |
| Частота выборки dE/dx , МГц | 100 | 10 | 11,4 | 1,4 | 14 | 10,6 |
| Коэффициент газового усиления | 3000 | — | — | — | — | |
| Магнитное поле, кГс | 13 | 13 | 1 Тл | 1 Тл | 12 | 1,5 Тл |
| Рабочее напряжение, кВ | | | | | — 50 | |
| Электрическое поле, В/см | 120 | — | 260 | — | 150 | 320 |
| Число каналов регистрации | 15360 | 16020 | 5 × 10 ³ | — | — | 3072 |
| Разрешение двух треков, см | 2,5 | — | — | — | 1,5 | |
| Скорость дрейфа, мкм/с | 50 | 70 | — | — | 64 | 46 |
| Время дрейфа, мкс | 75 | — | — | 24 | 20 | 3,5 |
| Число проволок МПК | — | 2196 | 6336 | | 2300 | |
| Смесь газов | 90%Ar + 10%CH ₄ | 80%Ar + 20%CH ₄ | 91%Ar + 9%CH ₄ | 90%Ar + 10%CH ₄ | 80%Ar + 20%CH ₄ | 50%Ar + 50%CH ₄ |

Примечание: (—) означает, что данных нет.

В свою очередь, использование коротких анодных проволок позволило улучшить такой параметр, как dE/dx , используемый для идентификации частиц в условиях большой множественности.

Более совершенная разработка ВПК прямоугольной формы HISS также предназначена для изучения множественных событий, порождаемых в столкновениях релятивистских ионов [20], но с гораздо большей множественностью (множественность t порядка 200). Параметры камеры приведены в табл.2.

Камера HISS, имеющая активную область $150 \times 96 \times 75$ см, предназначена для работы при атмосферном давлении. Она помещена между диполями магнита. Область дрейфа электронов составляют, с одной стороны, МПК с катодным считыванием, а с другой — плоский электрод, находящийся под высоким напряжением. Между ними расположена прямоугольная сеточная камера высотой 15 см, обеспечивающая прочность детектора и однородность поля в катодной плоскости. Катодная плоскость содержит 15360 пэдов с размерами $1,2 \times 0,8$ см, которые занимают площадь 150×95 см. Анодные проволоки находятся под напряжением 1170 В и обеспечивают коэффициент газового усиления порядка 3000.

Особенность регистрирующей электронной системы ВПК HISS заключается в том, что не только усилители, но и такие схемы, как формирователи, аналоговая память и мультиплексоры, расположены непосредственно на катодной плоскости. Аналоговые сигналы запоминаются в многоканальной специализированной микросхеме, состоящей из матрицы переключаемых микроконденсаторов, выполненных по КМОП-технологии. Возможно также считывание данных с помощью ПЗС-матриц.

ВПК, разработанная в ОИЯИ. В [21,22] описан детектор на основе пропорциональных камер (ПК) с дрейфовым промежутком, который вместе с многоканальной электронной системой считывания и регистрации, по существу, представляет собой ВПК. Прибор состоит из двух модулей: входной ПК и ПК с дрейфовым промежутком. Входная ПК предназначена для определения координат Y и Z частицы на входе ее в детектор. С помощью второго модуля измеряются такие величины, как ионизация частицы вдоль ее трека, длина пробега частицы, если она остановилась внутри модуля, время дрейфа электронов, что позволяет определить траекторию частицы в плоскости XZ , перпендикулярной нитям, и деление заряда лавины на омическом сопротивлении некоторых сигнальных нитей, что дает Y -координату точек на треке. Описанный прибор является хорошим инструментом для идентификации и спектрометрии медленных частиц. С гелиевым наполнителем он может служить поляриметром протонов и дейтронов.

ВПК DELPHI. ВПК на установке DELPHI является основным трековым детектором и выполняет функции центрального детектора. Камера имеет следующие размеры: радиус $R = 120$ см и длина $L = 2 \times 150$ см, полезный объем 14 м^3 . Торцевая цилиндрическая поверхность, где расположена МПК, разделена на 6 секторов, каждый из которых содержит по

192 чувствительные проволоки и по 16 пэдов. Предусилители расположены непосредственно на МПК. После двухкаскадного усиления сигналы поступают на входы 8-разрядных параллельных АЦП, которые обеспечивают оцифровку сигналов с частотой 14 МГц. На торце камеры расположены также шесть миниатюрных лазеров, которые обеспечивают имитацию треков в процессе диагностики детектора.

В результате тестирования ВПК, используемой на установке DELPHI [23,25], получены следующие параметры: скорость дрейфа 64 мкм/нс, разрешение $\sigma(dE/dx) = 5,5 \pm 0,5\%$, разрешение в плоскости $r\phi$ равно 180—280 мкм и разрешение двух треков составляет 1,5 см. Информация, считываемая от ВПК, используется также для выработки триггерного сигнала и восстановления треков с помощью специализированного трекового процес-

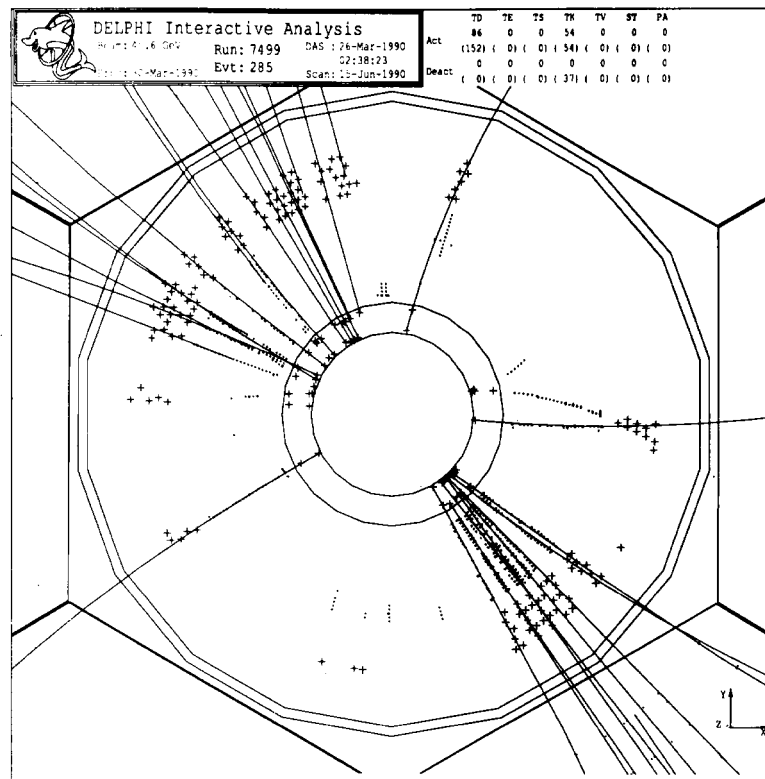


Рис.11. Дисплейная картина прохождения частиц сквозь микровершинный детектор, внутренний детектор и через ближайшую секцию ВПК DELPHI

сора, основанного на хорошо известном алгоритме непрерывной маски [24]. Центральный детектор выполняет следующие функции: 1) измерение координат треков частиц; 2) эффективное e/π -разделение; 3) в сочетании с полупроводниковым микровершинным, внутренним и внешним детектором измерение импульсов частиц.

На рис.11 показано событие, зарегистрированное с помощью трековой системы детектора DELPHI, состоящей из полупроводникового микровершинного детектора, внутренней джет-камеры и ВПК.

ВПК ALEPH (ALEPH: «A detector for LEP Physics»). ВПК коллаборации ALEPH является наиболее крупной камерой, разработанной для экспериментов на LEP. В целом установка создана для решения широкого круга задач и, в частности, для детального изучения параметров стандартной модели слабых взаимодействий, таких как продукты и распады мод Z^0 - и W^\pm -бозонов, для проверки КХД при больших Q^2 , для поиска топ-кварка и т.д. [24—26]. Непосредственно ВПК, как трековый детектор, используется для измерения импульсов и углов вылета заряженных частиц с высоким разрешением и определения плотности ионизации dE/dx , с помощью которой отделяются треки пионов и электронов. Координата Z получается путем измерения времени дрейфа при известной скорости дрейфа, равной 5,2 см/мкс, $r\phi$ -координата находится путем интерполяции сигналов, считываемых с пэдов, и для нахождения r -координаты используется положение пэда в радиальном направлении. С помощью ВПК и быстрых АЦП измеряется 21 точка для каждого трека. Траектории заряженной частицы внутри объема камеры представляют собой винтовые линии, а в проекции на торцах получаются дуги или окружности. В [26] приведены результаты измерения величины пространственного разрешения ВПК ALEPH, которая равна (150 ± 5) мкм. В табл.3 приведены некоторые важные характеристики ВПК (см. также табл.2).

Таблица 3. Некоторые характеристики ВПК ALEPH

| | | | |
|--|---|------------|------------|
| Разрешение в плоскости $r\phi$ | 160 мкм при угле пересечения пэда 0° 400 мкм при угле пересечения пэда 10° | | |
| Разрешение z -координаты при полярном угле | 90° | 45° | 20° |
| для пэдов, мм | 0,7 | 1,7 | 2,3 |
| для проволок, мм | 3 | 2 | 2 |
| Разрешение по импульсу $\Delta p/p^2$ | $1,5 \cdot 10^{-3} (\text{ГэВ}/c)^{-1}$ | | |
| Разрешение dE/dx | 4,5% для 280 проволок | | |

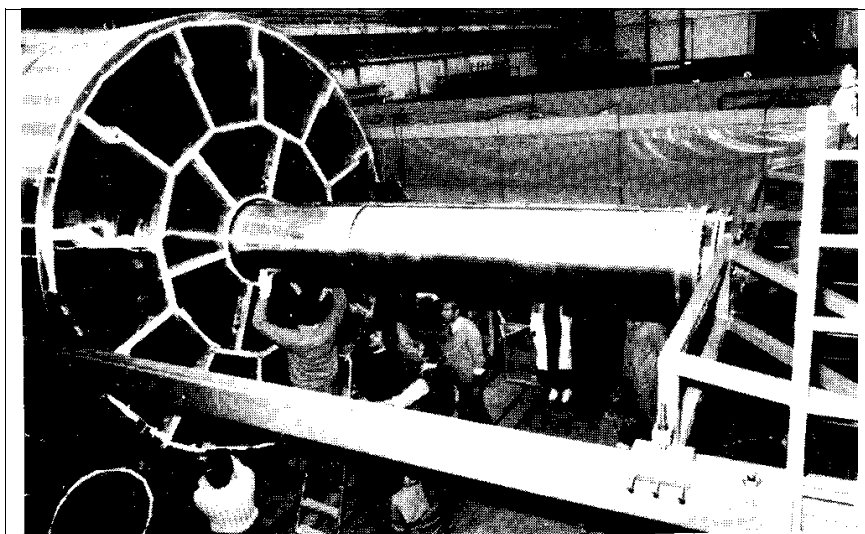


Рис.12. Общий вид ВПК ALERH на канале пучка частиц

ВПК ALERH входит в состав большого центрального детектора, в который входят внутренняя трековая камера и ВПК. По форме времяпроекционная камера представляет собой цилиндр (рис.12) с аксиально-параллельным магнитным и электрическим полем. В середине камеры имеется центральная мембрана, которая разделяет камеру на две половины. Электроны, порождаемые пролетающей заряженной частицей, дрейфуют в направлении одного из торцов камеры, где расположены чувствительные электроды МПК. МПК, расположенные у торцов камеры, разделены на 18 секторов. На рис.13,*а* в качестве примера приведена геометрия торцевого детектора (МПК с катодным считыванием). На рис.13,*б* более детально показаны схемы секторов М, W и К. Катодные пэды находятся на расстоянии 4 мм от чувствительных проволок. Причем каждый из секторов содержит различное число пэдов, общее число которых равно 41004 (количество анодных проволок равно 6000). С учетом времени дрейфа порядка 45 мкс информация, считываемая от ВПК, используется на втором уровне отбора событий. С помощью параллельных АЦП аналоговые сигналы оцифровываются и запоминаются в буферной памяти. На одно событие приходится 25 мбайт данных [28]. Важно, что информация о треках, полученная с помощью данной камеры, была обработана с помощью нейронной сети [29]. Получены качественные изображения треков частиц в режиме «оф-лайн», одно из которых приведено на рис.14.

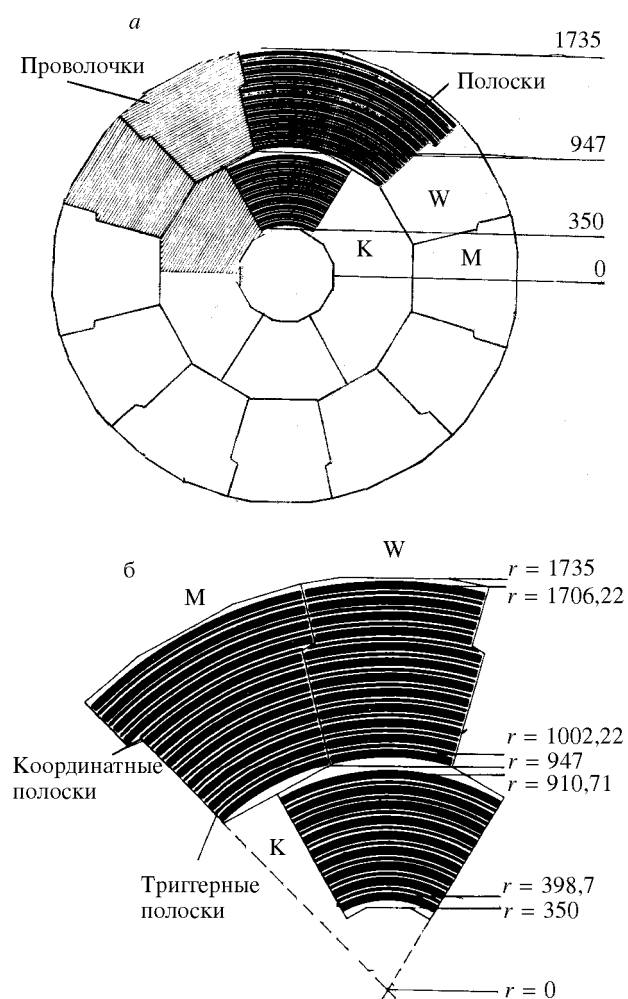


Рис.13. а) Геометрия катодной плоскости ВПК ALEPH.
 б) Более детальное изображение секторов К, Н, и W

Использование ВПК в эксперименте WA71. Нередко ВПК помещаются в той части установки, где треки частиц имеют меньшую плотность и большой угол разлета треков. Поэтому такие детекторы используются в сочетании с детекторами меньших размеров и с более высокой разрешающей способностью. В эксперименте, описанном в [30,31], две ВПК прямоугольной формы работают совместно с микрополосковым кремниевым телеско-

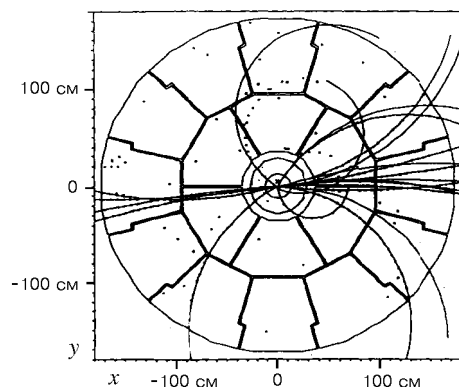


Рис.14. Событие, зарегистрированное в режиме «он-лайн» с помощью ВПК ALEPH

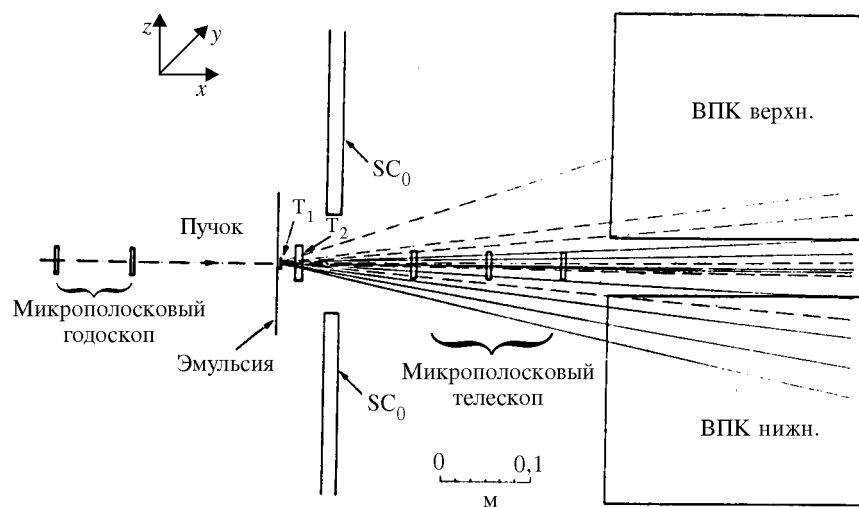


Рис.15. Схематическое изображение спектрометра WA71

пом. Камеры работают в магнитном поле спектрометра «Омега» и являются частью вершинного детектора, схема которого приведена на рис.15. Он предназначен для поиска прелестных частиц, порождаемых в эмульсии, облучаемой пучком π^- -мезонов при энергии 350 ГэВ/с. С помощью микрополоскового телескопа регистрируются координаты частиц с высокой точностью в небольших углах $\theta \leq 90$ мрад. При этом разрешение двух треков равно 150 мкм.

Таблица 4. Параметры ВПК WA71

| | |
|---|--|
| Диаметр анодной проволоки, мкм | 20 |
| Диаметр катодной проволоки, мкм | 100 |
| Диаметр полевой проволоки, мкм | 100 |
| Расстояние между анодными проволоками, мм | 12 |
| Пропорциональный промежуток, мм | 6 |
| Дрейфовый промежуток, мм | 160 |
| Размер пэда, мм | 6 × 8 |
| Количество анодных проволок | 16 |
| Количество полосковых пэдов | 3 |
| Количество пэдов на полоске | 32 |
| Газовая смесь | 70% аргон + 29% изобутан + 1% спирт |

Назначение ВПК состоит в том, чтобы регистрировать треки частиц в области $65 \leq \theta < 600$ мрад. Важным качеством ВПК является также малая толщина вещества (в единицах радиационной длины), вносимая конструкцией камеры. Основные параметры ВПК приведены в табл.4.

Для измерения импульсов частиц и величины dE/dx используются 7-разрядные параллельные АЦП. Точность определения вершины распада по оси z равна 800 мкм и по оси x — 1 мм (направление пучка).

ВПК для эксперимента CDF. Следует также отметить ВПК, используемую в эксперименте CDF [32], которая является одним из основных трековых детекторов для экспериментов на коллайдере в Лаборатории им.Ферми (CDF — Collider Detector at Fermilab). Конструктивно времяпроекционная камера состоит из восьми сдвоенных ВПК (модулей), окружающих ионопровод (рис.16) и сдвинутых друг относительно друга на $11,3^\circ$. Каждый из модулей имеет центральную сетку, находящуюся под высоким потенциалом и разделяющую камеру на два дрейфовых промежутка длиной 15,25 см каждый. При скорости дрейфа 46 мкм/нс максимальное время дрейфа составляет 3,5 мкс и хорошо согласуется с временем встречи пучков 3,5 мкс. Электроны дрейфуют от центра сетки, проходят через катодные электроды и попадают на проволоки МПК. Торцевые чувствительные плоскости разделены на октанты, каждый из которых состоит из проволочек и пэдов. В табл.2 приведены основные параметры ВПК.

Основные функции, выполняемые вершинной времяпроекционной камерой, заключаются в следующем.

- 1) Нахождение координаты z -вершины распада.
- 2) Восстановление топологий всех событий в пределах полярного угла $3,5^\circ \leq \gamma \leq 176,5^\circ$.

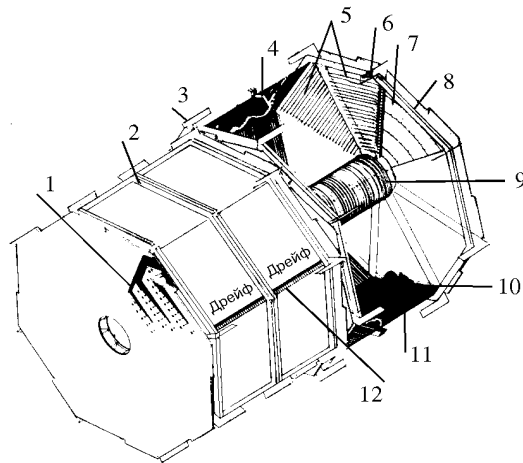


Рис.16. Общий вид ВПК CDF:
 1 — микрополоски для чтения сигналов; 2 — углеродная волоконная прокладка; 3 — радиальная крышка; 4 — центральная высоковольтная сетка; 5 — чувствительные проволочки; 6 — контакты для чтения сигналов; 7 — катодные микрополоски; 8 — углеродные волокна; 9 — внутренняя полевая клетка; 10 — катодные микрополоски; 11 — внешняя полевая клетка; 12 — резистивный делитель

- 3) Восстановление треков в событиях с большой множественностью.
- 4) Детектирование заряженных частиц вблизи вершины взаимодействия, где содержится малое количество вещества.
- 5) Регистрация треков в диапазоне углов $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$. В этой угловой области данные, получаемые от ВПК и центрального детектора, используются как для регистрации треков, так и для измерения импульсов.
- 6) Информация, получаемая от проволок МПК, используется в плоскости $r\phi$ для переднего калориметра и т.д.

5. ПРИМЕНЕНИЕ КАМЕР ТИПА «ДЖЕТ»

ВПК имеют два существенных недостатка: относительно малое быстродействие, определяемое временем дрейфа, и трудности идентификации событий в области, где имеет место большая плотность треков. Этим недостаткам лишены более сложные детекторы — джет-камеры (микровершинные детекторы), которые обычно располагаются непосредственно около ионопровода. Нередко они еще называются внутренними дрейфовыми камерами, поскольку располагаются внутри ВПК. Обзор [33] посвящен истории развития джет-камер и более совершенных трехмерных газовых детекторов — векторных детекторов. Их прототипом является детектор MARK I, состоящий из четырех цилиндрических искровых камер. С помощью такого детектора был зарегистрирован распад $\psi' \rightarrow \psi \pi^+ \pi^-$ (рис.17,а). Дальнейший рост энергий частиц, их импульсов и множественности изучаемых событий стимулировал совершенствование трехкоординатных газовых детекторов.

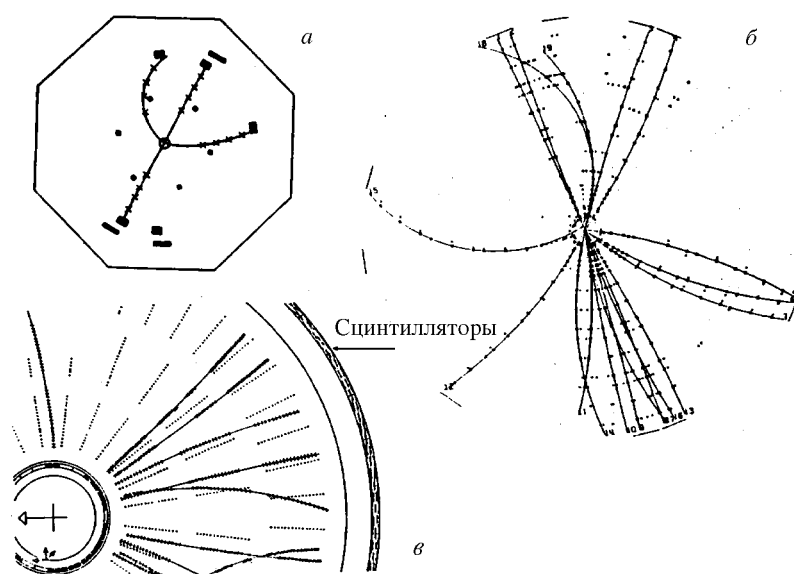


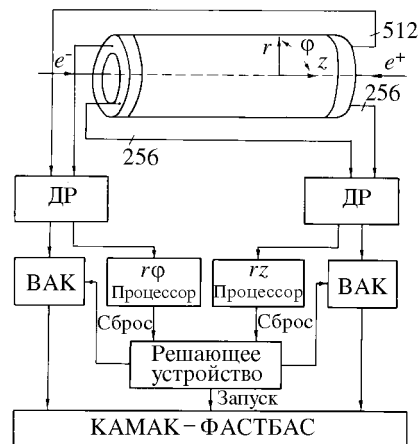
Рис.17. *а*) Распад $\psi' \rightarrow \psi\pi^+\pi^-$, зарегистрированный с помощью четырех концентрических искровых камер (детектор MARK I). *б*) Событие $e^+e^- \rightarrow$ адроны, зарегистрированное с помощью детектора TASSO, содержащего 2430 дрейфовых ячеек. *в*) Типичное событие, зарегистрированное с помощью детектора джет-камеры JADE

Наметились две тенденции, которые были реализованы в последующих разработках. В установке MARK II детектор состоит из четырех концентрических слоев, каждый из которых заполнен множеством независимых дрейфовых ячеек. Появилась возможность с высокой точностью измерять три координаты в пространстве: z , r и ϕ (рис.17,*б*). Эта методика получила широкое применение и в других спектрометрах. Например, детектор в установке TASSO [34] содержит 15 слоев (2430 ячеек) с дрейфовым промежутком 16 мм. Более совершенный тип детектора JADE, получивший название «образной» (pictorial) камеры [35], имеет длину 2,4 м, внешний диаметр 1,6 м и внутренний диаметр 0,4 м. Если рассматривать вдоль окружности, то объем камеры разделен на 24 независимых модуля. В свою очередь, каждый модуль, если рассматривать в радиальном направлении, состоит из четырех дрейфовых ячеек, по 16 анодных проволочек в каждой ячейке. Неопределенность типа «слева-справа» разрешается путем сдвига на несколько сот микрон чувствительных проволочек друг относительно друга. Высокая плотность чувствительных точек в объеме камеры обеспечивает реконструкцию событий с еще большей множественностью (рис.17,*в*).

Следует отметить, что концепция «образных» камер получила весьма широкое распространение и стимулировала разработку эффективной регистрирующей электронной аппаратуры и методики специализированных процессоров. Быстродействие этого класса трехкоординатных газовых детекторов на порядок более высокое по сравнению с ВПК. Сказанное будет проиллюстрировано на конкретных примерах. Ниже дается также краткое описание конструкций наиболее известных микровершинных джет-детекторов.

Микровершинная камера TOPAZ [34]. Установка имеет 4 π -геометрию и разработана для детектирования заряженных и нейтральных частиц на ускорителе TRISTAN (Япония). Она состоит из ВПК, времяпролетных счетчиков и внутренней джет-камеры.

Микровершинная камера, используемая в установке TOPAZ, выполняет следующие функции: выработка быстрых триггерных сигналов и прецизионное измерение позиций треков в $r\phi$ - и rz -плоскостях. Для достижения этих целей применены специальные конструктивные разработки. В частности, камера содержит 10 слоев, заполненных дрейфовыми ячейками. В азимутальном направлении 4 внутренних слоя, так же, как и 6 остальных внешних слоев, содержат по 128 дрейфовых ячеек. Для точного измерения z -координаты введены 8 зигзагообразных линий задержки цилиндрической формы. Для эффективного отбора треков с помощью специализированных процессоров поиск ведется независимо в плоскостях $r\phi$ и rz . На рис.18 приведена блок-схема электронной системы. Предусилители, выполненные по гибридной технологии с коэффициентом усиления 200 для анодных линий и 700 для линий задержек располагаются непосредственно на детекторе. С помощью скрученных пар проводов длиной 25 м сигналы передаются на



входы дискриминаторов, выходы которых выполняют также функции разветвителей логических сигналов с уровнями ТТЛ и ECL. Сигналы, получаемые от джет-камеры, прежде всего используются для выработки импульса предварительного запуска спектрометра. С учетом того, что время встречи пучков на ускорителе, где находится данная установка, равно 2,5 мкс, решающее устройство должно

Рис.18. Блок-схема электронной системы джет-камеры TOPAZ: ДР — дискриминаторы-размножители, ВАК — времяамплитудные конверторы

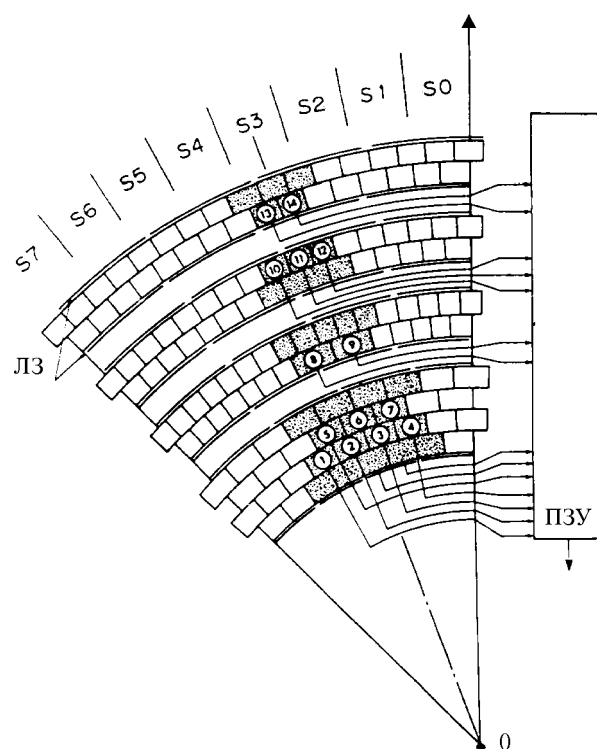


Рис.19. Структура ячеек, используемых для поиска треков в плоскости $r\phi$: S_i — секторы детектора, ЛЗ — линии задержки, ПЗУ — программируемое запоминающее устройство

иметь мертвое время не более 2 мкс. Для достижения такого быстродействия используются как особенности геометрии и конструкции камеры, так и табличные методы решения.

На рис.19 приведена структура анодных ячеек, предназначенная для поиска треков в плоскости $r\phi$. Сигналы совпадения от двух соседних слоев используются для получения импульсов $T1 + T15$. Ячейки, находящиеся в соответствующих слоях, группируются по азимуту, образуя 64 сектора. Показанный на рис.19 один из секторов состоит из 4-3-2-3-2 ячеек. В программируемой памяти предварительно записываются образы наиболее вероятных треков, и по мере совпадения с зарегистрированными треками через 150 нс вырабатывается сигнал совпадения. Образцы траекторий, записанные в памяти, в случае необходимости могут меняться.

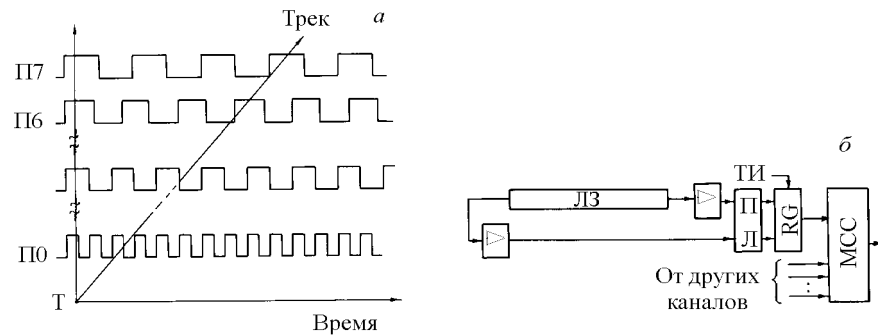


Рис.20. Пояснение метода поиска треков в плоскости rz : а) тактовые импульсы, используемые для сдвига данных от линий задержек в сдвиговые регистры; по оси Y — частоты сдвига; б) устройство для поиска треков: П — правый, Л — левый, ТИ — тактовые импульсы, РГ — регистр сдвига, МСС — мажоритарная схема совпадений

Метод поиска треков в плоскости rz поясняется с помощью рис.20,а,б. Линии задержки находятся в 8 радиальных слоях, и по азимуту они разделены на 32 сегмента, каждый из которых имеет свой трековый процессор. Основу логической схемы процессора составляют модули ВАК, мажоритарные схемы совпадений МСС и сдвиговые регистры.

Рассмотрим кратко работу процессора. Первый по времени сигнал, поступающий от одного из концов линии задержки, запускает генератор пачек импульсов ГПЧИ. Путем измерения времени прихода сигнала можно узнать, по какую сторону — правую или левую от точки взаимодействия пучков — находится трек. Сигналы от другого конца линии задержки записываются в сдвиговый регистр, причем частота сдвига переменная (она зависит от положения линии задержки). После записи всех сигналов с помощью МСС анализируется количество единиц, зарегистрированных в радиальном направлении и, если эта величина равна предварительно установленному значению, вырабатывается сигнал. Время поиска трека в плоскости rz складывается из следующих величин: максимальное время дрейфа электронов (250 нс), время распространения сигнала в половине длины линии задержки (260 нс), задержка в кабелях (130 нс), задержка в дискриминаторах (50 нс), время решения трекового процессора (750 нс) и задержка в МСС (60 нс).

Совпадение сигналов, вырабатываемых в обоих трековых процессорах, необходимо для занесения информации, поступающей от модулей ВАК на решающую систему второго уровня, где происходит поиск вершин взаимодействия. При этом используется также информация, поступающая от ВПК и системы времяпролетных счетчиков, следующим образом [37].

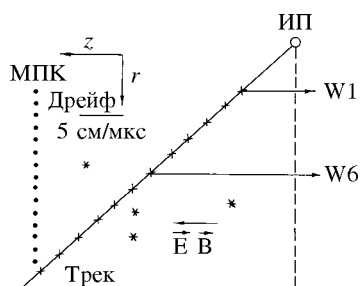


Рис.21. Сигналы, поступающие от проволочек МПК времяпроекционной камеры. ИП — ионопровод; W1 ÷ W6 каналы регистрации

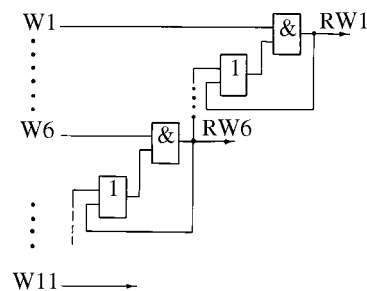


Рис.22. Логическая цепочка, используемая для «протяжки» трека

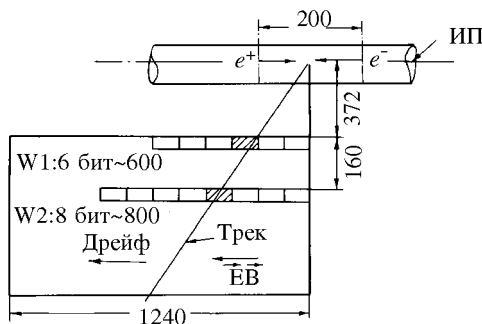


Рис.23. Схема определения координаты первичного взаимодействия. ИП — ионопровод

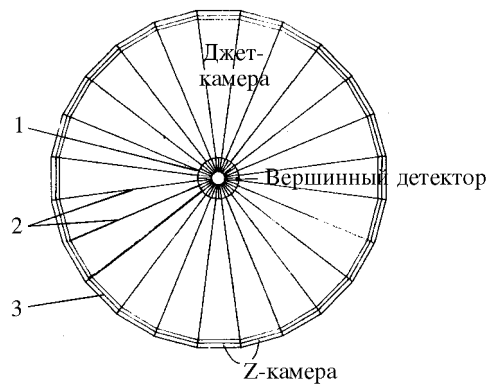
Пропорциональная камера, расположенная на торце ВПК, разделена на 8 секторов по 176 чувствительных проволочек в каждом секторе. Причем каждый сектор имеет собственный трековый процессор. Те 88 проволочек из 176, которые находятся ближе к пучку, используются для реконструкции треков. С целью увеличения помехоустойчивости с помощью элементов «ИЛИ» они объединены в 11 групп, на выходах которых в случае прохождения трека формируются сигналы W1 ÷ W11 (рис.21), которые поступают на логическую цепочку (рис.22). Поскольку сигналы поступают в разные моменты времени, то для получения совпадения они соответствующим образом задерживаются. Нетрудно заметить, что сигнал на выходе RW1 появится в том случае, если одновременно появятся сигналы на входах RW1 и RW2. Другими словами, схема, изображенная на рис.22, восстанавливает трек частицы. Для этого достаточно отметить две временные точки RW1 и RW6. При этом предполагается, что треки имеют малую кривизну.

После нахождения треков в другом процессоре находятся координаты вершины распада (рис.23). Основу вершинного процессора составляют сдвиговые регистры, в которых запоминаются временные отметки, соответствующие найденному треку, и полученные таким способом данные с учетом поправочных коэффициентов сравниваются с масками, образы которых хранятся в модуле памяти емкостью 256 Кбайт. Точность регистрации координаты вершины распада составляет 10 см, а время расчета 30 мкс.

Джет-камера в установке OPAL [36—39]. Совместно с трековым процессором микровершинная камера применяется, например, для нахождения первичной вершины распада в спектрометре OPAL и для идентификации частиц. Для выработки триггера используется информация о таких физических процессах, как 1) e^+e^- , 2) $q\bar{q}$, 3) $\gamma\gamma$, 4) $\tau^+\tau^-$, 5) $\mu^+\mu^-$, 6) $e^+e^-q^+q^-$ и 7) различные экзотические события. События 1—3 детектируются с помощью калориметра и поэтому непосредственно используются для выработки триггера. Что касается событий 4—7, то они выделяют мало энергии, и для их детектирования и реконструкции требуется специализированный процессор с временем решения не более 22 мкс (период встречи банчей).

Вершинный детектор состоит из малой высокопрецизионной дрейфовой камеры, непосредственно примыкающей к ионопроводу и второй джет-камеры, которая, в свою очередь, окружает малую камеру (рис.24). Малая камера имеет диаметр 47 см, длину 100 см и находится в магнитном поле 0,4 Тл. Каждая камера в направлении $r\phi$ имеет по 36 ячеек, структура которых приведена на рис.25.

Как видно из рисунка, дрейфовая ячейка внутренней камеры покрывает 10° в направлении ϕ -координаты и содержит по 12 чувствительных анодных проволок с радиусами $103 \div 162$ мм. Внешние кольца стереоячеек, расположенных под углом 5° к оси z , имеют по шесть таких проволок с радиусами $188 \div 213$ мм. В целом имеется 648 чувствительных проволок. Микро-



вершинная камера работает под давлением 4 бар с газовой смесью из аргона, метана и изобутана в отношении 89 : 8 : 3, имеет скорость дрейфа 45, газовое усиление 10^5 и максималь-

Рис.24. Схематическое изображение джет-камер OPAL в плоскости $r\phi$: 1 — малая джет-камера (микровершинный детектор); 2 — вторая джет-камера; внешние дрейфовые камеры

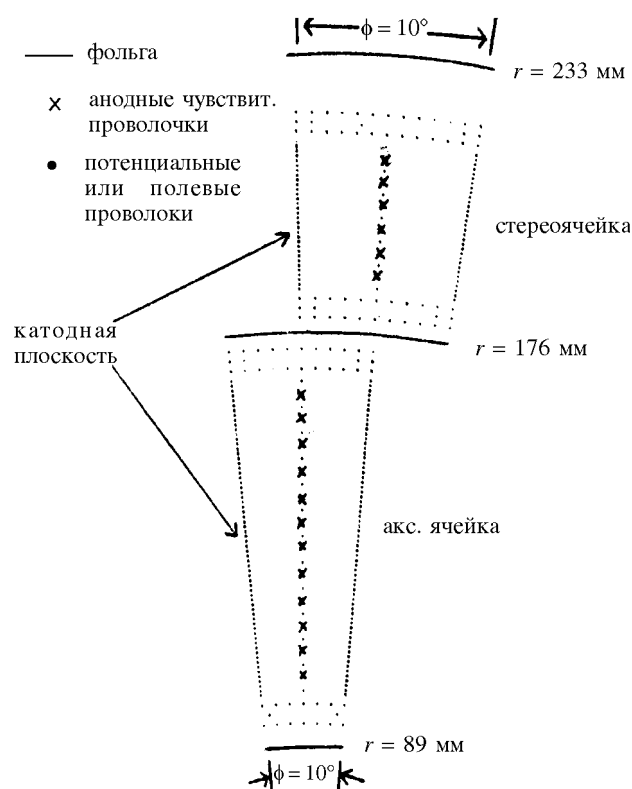


Рис.25. Геометрия одной аксиальной и одной стереоячейки джет-камеры OPAL

ный дрейфовый промежуток 20 мм. Она обеспечивает точность регистрации координат частиц в плоскости $r\phi$, определяемых с помощью времяамплитудных преобразователей, порядка 50 мкм и по оси z 3 см. Эта координата определяется путем вычисления разницы во времени прихода сигналов на концы проволоки.

Большая джет-камера имеет длину 4 м и разделена на 24 сектора по азимуту (ϕ). Каждый сектор содержит по 159 аксиальных чувствительных проволок. Ниже будет рассмотрено, каким образом особенности джет-камер используются для построения эффективного трекового процессора [41]. Как оказалось, наиболее просто треки, исходящие из вершины взаимодействия, ищутся в плоскости rz .

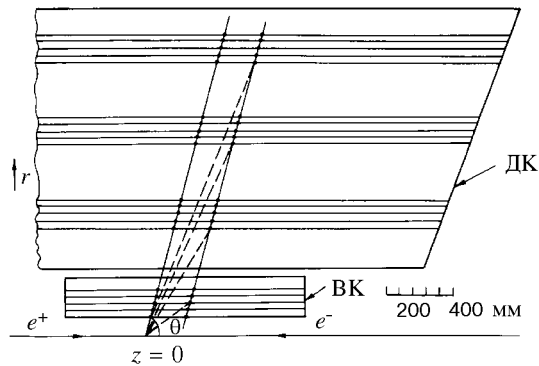


Рис.26. Метод восстановления координаты вершины распада в вершинном детекторе OPAL в плоскости rz : ДК — дрейфовая камера; ВК — микровершинная камера; Z — точка взаимодействия

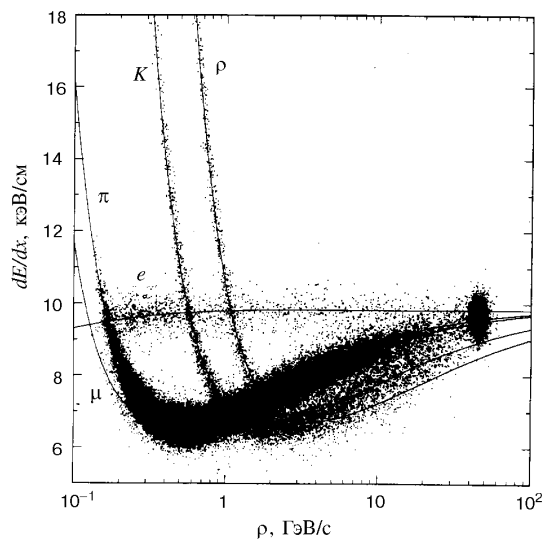


Рис.27. Зависимость dE/dx от импульсов частиц

Принцип действия процессора поясняется с помощью рис.26. Если трек исходит из вершины взаимодействия, то для всех слоев камеры отношение z/r остается постоянной величиной. При этом треки находятся по пику на гистограмме, которая вычисляется с помощью быстрого процессора. В [39—41] детально описана триггерная система всей установки и электронная система считывания и регистрации. В [41] приведено описание более совершенного трекового процессора, в котором наряду с гистограммированием используется систолический процессор и метод трансформации переменных, основанный на преобразовании Гофа. В [42] приведена процедура калибровки, используемая для измерения потерь энергии частиц. Получено

разрешение 3—4%, позволяющее идентифицировать частицы, сопровождающие события с Z^0 -распадом с импульсом до 20 ГэВ/с. На рис.27 приведены кривые потерь энергии в мультиадронных и в димюонных событиях в зависимости от импульсов частиц.

Микровершинный детектор для эксперимента UA1. Для известного эксперимента UA1 была разработана прецизионная джет-камера, рабочее давление газа в которой равно 3 атм и разрешающая способность для одной проволоки равна 50 мкм. Малое расстояние (1,58 мм) между чувствительной и потенциальной проволоками обеспечивает выборку до 16 координат на длине 5 см вдоль радиуса [43]. Общие параметры джет-камеры приведены в табл.6. По азимуту камера разделена на 16 ячеек. Каждая ячейка содержит по 16 чувствительных проволок, между которыми располагаются проволоки, создающие электрическое поле, причем чувствительные проволоки сдвинуты относительно последних на 100 мкм, что позволяет разрешать неопределенность типа «слева-справа». Максимальный дрейфовый промежуток равен 16 мм, что обеспечивает хорошее разрешение треков. В 1985 г. в течение трех недель детектор стабильно работал на пучке коллайдера.

Джет-камера для эксперимента UA2. Детектор представляет собой цилиндрическую дрейфовую камеру, которая располагается близко к ионопроводу, где находится внутренний полупроводниковый вершинный детектор. Он предназначен для эксперимента UA2 [44] и позволяет измерять с высокой точностью треки частиц вблизи ионопровода, где имеют место распады короткоживущих частиц. Камера успешно работает с 1987 г. в CERN.

На рис.28 приведена геометрия одного сектора камеры. Камера содержит 16 таких секторов. В табл.5 приведены основные параметры детектора.

С целью разрешения неопределенностей типа «слева-справа» соседние чувствительные проволоки, расстояние между которыми равно 6,44 мм, сдвинуты друг относительно друга на ± 200 мкм. На рис.29 показано двухтрековое событие, восстановленное с помощью времяпролетной электронной системы на основе измерения времени дрейфа электронов. Оцифровка сигнала

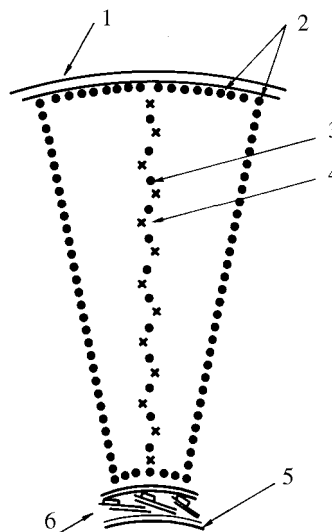
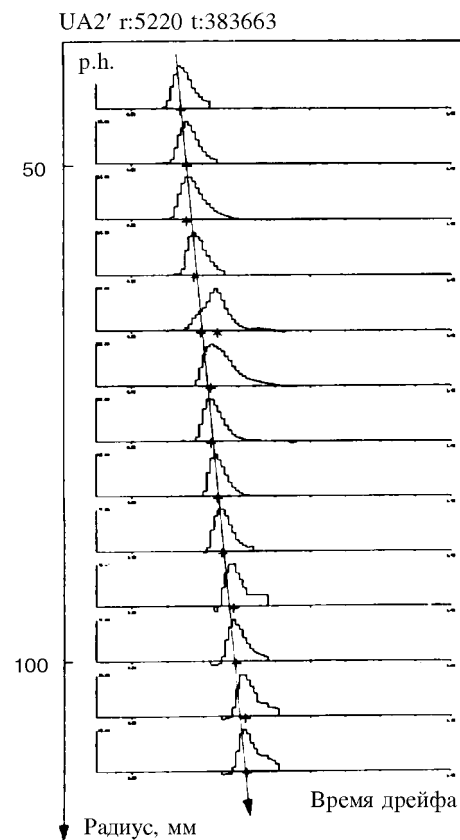


Рис. 28. Геометрия одного сектора джет-камеры UA2: 1 — камера; 2 — проволоочки, формирующие поле; 3 — защитные проволоочки; 4 — чувствительные проволоочки; 5 — бериллиевая трубка; 6 — полупроводниковый микровершинный детектор

Таблица 5. Параметры джет-камеры UA2

| | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Чувствительная длина, мм | 1000 |
| Внутренний радиус, мм | 34 |
| Внешний радиус, мм | 128,5 |
| Внутренний чувствительный радиус, мм | 40 |
| Внешний чувствительный радиус, мм | 123,8 |
| Число секторов | 16 |
| Число проволок в секторе | 13 |
| Шаг проволок, мм | 6,44 |
| Сдвиг проволок, мм | 0,2 |
| Смесь газов | аргон (60%) + этан (40%) |
| Давление, атм | 1 |
| Скорость дрейфа, мкм/нс | $51,8 \pm 0,3$ |
| Электрическое поле, кВ/см | - 1,05 |



лов выполнялась с помощью параллельных АЦП. Видно, что даже в том случае, когда импульсы перекрываются, радиальная координата частицы определяется вполне точно. Максимальное время дрейфа 500 нс.

Микровершинный детектор Mark II [45,46]. Детектор создан для регистрации и исследования Z^0 -распадов путем идентификации тяжелых цветных кварков, измерения времени жизни тяжелых кварков и лептонов на линейном ускорителе в Стенфорде (SLAC). Основная проблема при создании детектора заключалась в получении высокого пространственного разрешения порядка 30 мкм и хорошего разрешения двух треков —

Рис.29. Пример использования джет-камеры для реконструкции треков. Расстояние между центрами «тяжести» от распределения импульсов равно 4 мм

не менее 1000 мкм. Для решения этих проблем, наряду с созданием конструкции камеры и дрейфовых ячеек с высокой точностью, большое внимание уделено контролю за давлением внутри камеры и температурой. Активная область детектора имеет длину 55 см и от 5 до 17 см в радиальном направлении. Объем камеры разделен на 10 джет-ячеек, которые наклонены в радиальном направлении. Эта особенность геометрии ячеек облегчает разрешение неопределенности типа «справа-слева», облегчает измерение скорости дрейфа в процессе калибровки и обеспечивает более качественную регистрацию треков.

Каждая ячейка содержит анодную плоскость, состоящую из чувствительных проволок диаметром 20 мкм и расположенных между ними потенциальных проволок диаметром 225 мкм. На границах ячейки имеются се-

Таблица 6. Параметры джет-камер

| Эксперимент | MARK II [45,46] | MARK J [55—56] | SLD [53] | CDF [53] | ZEUS [50] | H1 [52] | ALEPH [27] | OPAL [38—41] | TOPAZ [36,37] | UA1 [43] |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------|-----------------|--------------|------------|---------------|-----------------|------------------|-------------|
| Радиус, мм: | | | | | | | | | | |
| внутренний | 192 | 100 | 200 | 277 | 162 | 200 | 160 | 89 | 106 | 25 |
| внешний | 1440 | 242 | 961 | 1320 | 785 | 769 | 260 | 233 | 293 | 89 |
| активный | 250 | — | 238 | 309 | 190 | 215 | — | — | — | — |
| Активная длина, мм | 2300 | 576 | 1800 | 3214 | 2050 | 2400 | 2000 | 1000 | 1500 | 800 |
| Количество слоев | 72 | — | 80 | 84 | 72 | 64 | 8 | 2 | 10 | — |
| суперслоев | 12 × 16 | — | 10 × 8 | 12 + + 6 + 6 | 9 × 8 | 2 × 32 | — | — | — | — |
| Число чувствительных проволок | 5832 | 168 | 5120 | 6156 | 4608 | 2560 | 960 | 648 | — | 256 |
| Стереоугол | 3,8° | — | 1,7° | 3° | 5° | 7° | — | — | — | — |
| Макс. дрейф. промежуток, мм | 33 | 27,5 | 26 | 35 | 25 | 51 | 20 | — | 16 | — |
| Скорость дрейфа, мкм/нс | 52 | 7 | 9 | 50 | 50 | 35 | 49 | 52,7 | — | 51 |
| Макс. время дрейфа, нс | 600 | — | 3000 | 700 | 500 | 1500 | 140 | 5800 | — | — |
| Магнитное поле, Тл | — | — | — | — | — | — | — | 0,435 | — | — |
| Частота выборки, МГц | — | — | — | — | — | — | — | 100 | — | — |

точные плоскости из проволок диаметром 150 мкм, которые уменьшают перекрестные помехи и повышают стабильность электрического поля чувствительных проволок, расположенных друг от друга на расстоянии 2,9 мм. Сеточная (охранная) плоскость находится на расстоянии 1,8 мм от анодной плоскости. Камера работает при давлении в 3 атм при смеси газов $\text{CO}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ (92/8). Катодные плоскости, состоящие из проволок диаметром 225 мкм, находятся посередине между охранными плоскостями. Высоковольтное напряжение обеспечивает электрическое поле 2,3 кВ. Для считывания и оцифровывания сигналов используются параллельные АЦП, работающие на частоте 100 МГц.

В табл.6 приведены основные параметры джет-камер и векторных дрейфовых камер.

Большая цилиндрическая камера для детектора VENUS. Детектор VENUS представляет собой установку общего назначения для проведения экспериментов на ускорителе TRISTAN (энергия которого равна 70 ГэВ). [47,48]. Цилиндрическая дрейфовая камера является основным трековым детектором на установке. Для обеспечения регистрации событий с большой множественностью (> 20) и узких струй с пространственной точностью 150—200 мкм серьезное внимание было уделено структуре дрейфовых ячеек. Прототипом здесь послужила джет-камера PEP-4. Камера имеет внутренний радиус 25 см, внешний радиус 126 см и длину 300 см. Общее число чувствительных проволок 7104 и потенциальных — 21312.

На рис.30 приведена схема четверти камеры и геометрия ячейки [47]. Для измерений в проекции $r\phi$ (плоскость, перпендикулярная к оси пучка) имеется 20 аксиальных слоев дрейфовых ячеек. Кроме того, каждые два слоя, сдвинутые друг относительно друга на пол-ячейки, образуют сдвоенный слой. Поскольку в такой паре слоев каждая частица срабатывает дважды, то имеется возможность измерять координаты частиц в плоскости $r\phi$ и вдоль трека. Такие уникальные возможности позволяют более четко распознавать треки с большой кривизной, разрешать неопределенности типа «слева-справа» и повысить эффективность работы камеры в целом. В [49] описан метод реконструкции треков в режиме «оф-лайн».

Другие типы джет-камер. Разработан и испытан на ускорителе HERA прототип микровершинного детектора для установки ZEUS [50]. При столкновении протонов с энергией в 1 ТэВ с электронами с энергией 30 ГэВ ожидается большой поток тяжелых цветных частиц, порождаемых при электрослабом взаимодействии. Очарованные и прелестные частицы имеют длину пробега в несколько микрометров в плоскости $r\phi$, поперечной к пучку. С учетом этого фактора и разработана микровершинная камера. Внешний радиус камеры 159 мм и внутренний 99 мм. Дрейфовая ячейка имеет три радиальные плоскости: центральная плоскость содержит 13 полевых прово-

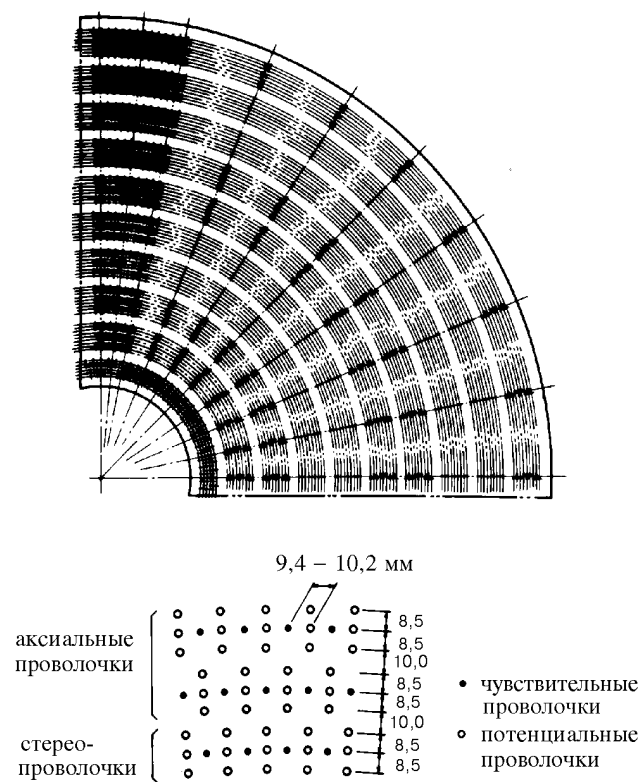


Рис.30. Схема одной четверти камеры и геометрия дрейфовой ячейки джет-камеры TRISTAN

лок, между которыми имеется 12 чувствительных электродов и две боковые плоскости, содержащие по 25 дрейфовых проволок. Угол наклона, равный $1,5^\circ$ между плоскостями, дает дрейфовый промежуток от 2,6 до 3,6 мм. Получена эффективность 96% и пространственное разрешение 35 мкм в центральной области камеры.

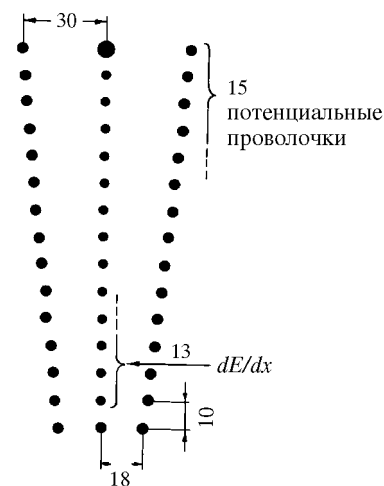
Дрейфовая камера ARGUS создана для экспериментов на накопительном e^+e^- -кольце ускорителя DORIS-II [51]. Соленоидальный магнит обеспечивает магнитное поле 0,8 Тл. Внутри соленоида находится дрейфовая камера, времяпролетные и ливневые счетчики. Эксперимент предназначен для изучения и прелестных мезонов, включая эксклюзивные реакции с большой множественностью. Задача заключалась в том, чтобы обеспечить высокое импульсное разрешение в пределах 50 МэВ/с до 5 ГэВ/с.

6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Векторные вершинные детекторы. Дальнейшие усовершенствования трехкоординатных газовых детекторов направлены на повышение качества реконструкции треков с большой кривизной, а также возможность определения направления треков событий. Эти камеры получили название векторных дрейфовых камер [33]. Такие камеры имеют многослойную структуру. В качестве примера рассмотрим две векторные камеры — CDF и MARK III.

Векторная камера CDF представляет собой большую дрейфовую камеру, предназначенную для проведения экспериментов в условиях большого магнитного поля и большой плотности изогнутых треков на адронном коллайдере в Лаборатории им.Э.Ферми [53]. Детектор имеет сложную геометрию, он содержит 84 слоя, которые, в свою очередь, образуют 9 суперслоев. Те пять суперслоев, у которых проволоки параллельны оси пучка, содержат по 12 чувствительных проволок в слое. Эти пять аксиальных слоев расположены вперемежку с четырьмя суперслоями стереопроволок, в которых чувствительные проволоки сдвинуты друг относительно друга на $\pm 3^\circ$. Каждый стереосуперслой содержит по 6 чувствительных проволок. Оба суперслоя разделены на дрейфовые ячейки, так что максимальное дрейфовое расстояние не превышает 40 мм, что соответствует 800 нс времени дрейфа. В табл.6 приведены основные параметры вершинного детектора CDF.

Векторная дрейфовая камера в спектрометре MARK III [54—55] имеет 8 слоев. Первый слой представляет собой малую дрейфовую камеру с четырьмя слоями. Второй слой, по существу, представляет собой джет-камеру, состоящую из 32 дрейфовых ячеек (рис.31). Она имеет плотную сеть чувствительных ячеек, что позволяет реконструировать изогнутые треки и с высокой точностью измерять значение dE/dx . Характерной особенностью суперслоев 3—8 является наличие трех сдвинутых на 300 мкм чувствительных проволок в каждой дрейфовой ячейке (рис.32).



Метод поиска треков в векторных дрейфовых камерах описан в [54]. С целью достижения быстрого и эффективного поиска треков используются как программные, так и современные аппаратные средства, которые обеспечивают

Рис.31. Геометрия дрейфовой ячейки внутреннего слоя векторной дрейфовой камеры MARK III

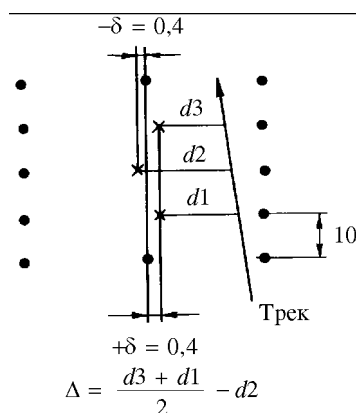


Рис.32. Геометрия дрейфовой ячейки одного из внешних слоев векторной дрейфовой камеры MARK III

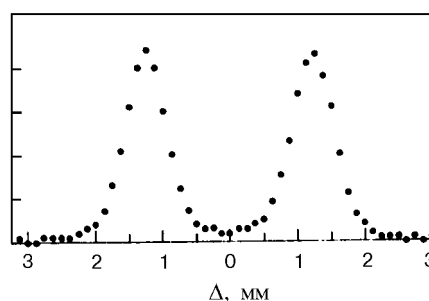


Рис.33. Распределение величины Δ в зависимости от места прохождения частицы по отношению к дрейфовой ячейке. Два пика соответствуют трекам, проходящим слева и справа от ячейки

полную реконструкцию событий с треками большой кривизны за 37 мс. На рис.32 и 33 показано, каким образом разрешается неопределенность типа «слева-справа». Для триплета проволок, сдвинутых на величину $\pm \delta$, величина Δ , определяющая расстояние прохождения трека заряженной частицы от чувствительной проволоки, вычисляется из выражения [54]:

$$\Delta = v_d [(t_1 + t_3) / 2 - t_2],$$

где t_1 , t_2 и t_3 — измеряемые величины времени для частицы, проходящей через данную ячейку. Как видно из рис.33, величина Δ имеет два пика, а ее знак дает информацию о том, по какую сторону от ячейки прошла частица.

Микровершинные детекторы с временной растяжкой [57—59]. Для получения высокой точности измерения прицельного параметра (вплоть до 100 мкм) используются также так называемые дрейфовые камеры с временной растяжкой (time expansion chambers). Их особенности заключаются в следующем [55].

1. Наличие области с небольшой напряженностью поля (скорость дрейфа 5 мкм/нс вместо 50 мкм/нс в обычных джет-камерах), отделенной от области с большой напряженностью поля.

2. Использование параллельных АЦП с частотой оцифровки 100 МГц для более точного вычисления времени дрейфа методом определения центра

**Таблица 7. Основные параметры
времяпроекционной камеры MARK J**

| | |
|--|---|
| Внутренний диаметр, мм | 100 |
| Внешний диаметр, мм | 242 |
| Чувствительная длина, мм | 576 |
| Количество сегментов | 12 |
| Количество чувствительных проволок в сегменте | 14 |
| Общее число чувствительных проволок | 168 |
| Расстояние между анодами, мм | 2,4 |
| Расстояние между потенциальными проводами, мм | 2,54 |
| Расстояние между сеточными электродами, мм | 0,6 |
| Скорость дрейфа, мкм/нс | 7,0 |
| Смесь газов | CO ₂ – i – CH ₄ (80% + 20%) |
| Пространственная точность, мкм | 35 |

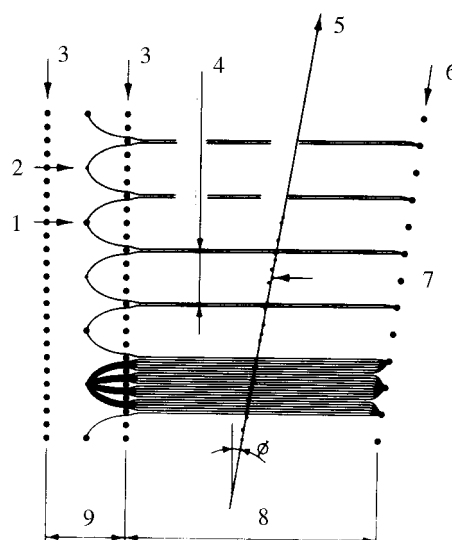
«тяжести». Применение газовой смеси по возможности с меньшим коэффициентом диффузии и малым углом Лоренца.

В качестве примера детекторов этого типа можно назвать джет-камеру MARK J, предназначенную для экспериментов на ускорителе в DESY. В табл.7 приведены основные параметры детектора.

Времяпроекционная камера нашла также применение в эксперименте L3 [59], где получено разрешение для одной проволоочки 51 мкм и разрешение двух треков 650 мкм. Принцип работы камеры поясняется с помощью рис.34, где показана геометрия ячейки. Здесь область дрейфа электронов разделена на область с малым однородным полем и область с большим электрическим полем (область усиления), где находится чувствительная плоскость. Эти области разделены плоскостью, находящейся под нулевым потенциалом. Между анодными проволоками имеются так называемые фокусирующие проволоки, с помощью которых повышается точность регистрации треков. Основные параметры камеры: внешний и внутренний диаметры 937 и 170 мм соответственно, длина 1260 мм, максимальное время дрейфа не более 10 мкс. Объем камеры разделен на два концентрических цилиндра: внутренний цилиндр, содержащий 12 секторов, и внешний цилиндр, состоящий из 24 секторов. Максимальный дрейфовый промежуток равен 35,4 мм для внутренней камеры и 53,2 мм для внешней камеры.

Детекторы с прецизионными ячейками. Еще одно направление в развитии быстродействующих и прецизионных трехмерных газовых детекторов связано с разработкой дрейфовых ячеек с высокой разрешающей способностью. Здесь можно выделить две оригинальные разработки. В [60] описа-

Рис.34. Схема ячейки ВПК с временной растяжкой: 1 — фокус; 2 — анод; 3 — сеточные проволочки; 4 — величина акцептанса; 5 — трек заряженной частицы; 6 — катодные проволочки; 7 — кластер; 8 — область дрейфа; 9 — область детектирования



ны две камеры, основу которых составляют множество дрейфовых ячеек квадратной формы размером 21×21 мм с дрейфовым промежутком 10,5 мм и шестиугольной формы с дрейфовым промежутком 25 мм. Достигнуто пространственное разрешение 25—30 мкм.

Отмечается, что такое направление в развитии прецизионных трехкоординатных газовых детекторов, в которых используются ячейки, формирующие цилиндрическое дрейфовое поле, в сочетании с газовой смесью с малой диффузией, имеет лучшие перспективы по сравнению с камерами с временной растяжкой в силу более простой конструкции детектора.

7. МУЛЬТИДРЕЙФОВЫЕ И СОЛОМЕННЫЕ ТРУБКИ

Оригинальная разработка создана на базе мультидрейфовых трубок [61]. Задача состоит в том, чтобы создать прецизионный трехмерный газовый детектор, работающий в условиях большой светимости пучка 10^{33} и с малой памятью порядка 30—50 нс. Дрейфовые ячейки имеют шестиугольную форму и объединены в виде модуля. Он состоит из множества дрейфовых трубок радиусом 1,45 мм. 70 таких ячеек помещаются в трубке диаметром 30 мм и длиной 80 см. Каждой анодной проволочке соответствуют шесть катодных. Из таких модулей был изготовлен детектор, содержащий 8000 анодных резистивных проволочек. При этом достигнута точность позиции проволочек лучше чем 30 мкм. Проблемы, возникающие при использовании мультидрейфовых трубок в качестве вершинных детекторов в условиях больших нагрузок, обсуждаются в [62]. В частности, требуется разработка нового подхода к созданию регистрирующей электроники. При мертвом времени порядка 50 нс и возможности получения до 50 выборок на трек такой детектор может быть использован в триггерной системе.

Соломенные трубки (straw-tube). Еще одним перспективным направлением в создании быстродействующих прецизионных вершинных детекторов являются детекторы, которые делают на основе тонких майларовых трубок диаметром $3 \div 5$ см и толщиной $25 \div 300$ мкм. В центре отдельной трубки длиной $45 \div 100$ мм расположена анодная проволока, а в качестве земляной шины служит алюминизированная стенка трубки. Отмечаются следующие положительные качества таких детекторов.

1. Относительно небольшая стоимость.

2. В отличие от классических дрейфовых камер соломенные трубки изолированы одна от другой и поэтому повреждение одной трубки не влияет на работу других.

3. Меньше сказываются перекрестные помехи.

4. Малое время дрейфа — $30 \div 100$ нс.

5. Высокая точность регистрации координат — несколько микрометров.

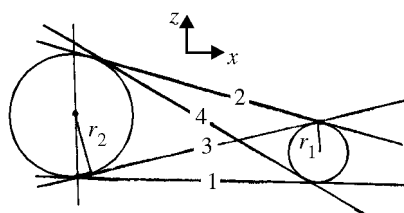
В качестве существенного недостатка можно отметить наличие дополнительного материала — майлара, что приводит к уменьшению разрешающей способности детектора по импульсу. Ведутся исследования, направленные на уменьшение эффекта многократного рассеяния [63]. В [64] приведены параметры ряда детекторов, созданных на основе соломенных трубок (см. табл.8).

В качестве примера рассмотрим кратко устройство микровершинной камеры MARK III [65]. Она состоит из 12 концентрических слоев трубок, расположенных между радиусами 5,4 см и 13 см от точки взаимодействия. Общее количество трубок равно 640, диаметр трубки 8 мм.

Таблица 8. Параметры детекторов с соломенными трубками [64]

| Эксперимент | HRS | MAC | MARK II | MARK III | CLEO | TPC | AMY |
|------------------------|-------|-------------------|-----------------------|----------|-------|-----------------------------------|---------|
| Диаметр трубки, мм | | | 8,0 | 8,0 | 5,9—7 | 8 | 5,3—5,9 |
| Длина, см | 41—46 | 43 | 75 | 84 | 51 | 40—60 | 56 |
| Диаметр проволоки, мкм | 20 | 30 | 20 | 50 | 15 | 30 | 15 |
| Толщина трубки, мкм | 85 | 100 | 75 | 75 | 32 | 100 | 38 |
| Количество трубок | 352 | 324 | 552 | 640 | 192 | 984 | 144 |
| Разрешение, мкм | 100 | 45 | 90 | 49 | 90 | 50 | 85 |
| Давление, атм | 1 | 4 | 1 | 3 | 1 | 4 | 1,5 |
| Газ | Ar/Et | ArCo ₂ | CH ₄ Ar/Et | Ar/Et | Ar/Et | ArCo ₂ CH ₄ | Ar/Et |
| Напряжение, кВ | 1,65 | 3,9 | 1,9 | 3,9 | 1,6 | 4 | 1,75 |

Рис.35. К пояснению алгоритма реконструкции прямых треков, регистрируемых с помощью соломенных дрейфовых трубок



В [66] описан метод реконструкции треков и их пересечений для детектора, созданного на базе соломенных дрейфовых трубок для эксперимента E735. Принцип реконструкции треков показан на рис.35. Здесь видны два слоя трубок с радиусами r_1 и r_2 . Треки 1 ÷ 4 удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\sin(t)(X_2 - X_1) - \cos(t)(Z_2 - Z_1) + (r_2 - r_1) = 0,$$

$$\sin(t)(X_2 - X_1) - \cos(t)(Z_2 - Z_1) - (r_2 - r_1) = 0,$$

$$\sin(t)(X_2 - X_1) - \cos(t)(Z_2 - Z_1) - (r_2 + r_1) = 0,$$

$$\sin(t)(X_2 - X_2) - \cos(t)(Z_2 - Z_2) + (r_2 + r_1) = 0.$$

После вычисления t из каждого уравнения определяется наклон $\tan t$ и точка пересечения. После нахождения такой прямой она проецируется на следующую плоскость, и выполняется сравнение с измеренной координатой. Если разница не превосходит заданную величину, то прямая найдена, и т.д. Причем в качестве критерия используется функция χ^2 .

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика трехкоординатных газонаполненных вершинных детекторов совместно с регистрирующей электроникой и вычислительными средствами отбора и восстановления топологий сложных событий достигла высокого совершенства. Этот класс детекторов отличается радиационной стойкостью, хорошим разрешением двух треков и относительно высоким быстродействием. Кроме того, возможность регистрации событий с большим углом разлета частиц позволяет успешно использовать трехмерные газонаполненные вершинные детекторы в сочетании с другими типами детекторов в экспериментах с высокой светимостью на современных и будущих коллайдерах. Широкие перспективы развития имеют также газонаполненные микроплоскостовые микровершинные детекторы, создаваемые методами полупроводниковой технологии, которые рассмотрены в обзоре [67].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Damarell C.J.H.** — Preprint Rutherford Appleton Lab. RAL-86-077, Chilton, 1986.
2. **Crote H.** — Rep. Progr. Phys., 1987, v.50, p.475.
3. **Petrero S., Romano G.** — Nucl. Instr. and Meth., 1980, v.170, p.61.
4. **Barber G.I., Belk A.T. Beuslink B.A. et al.** — Preprint Blackett Lab. ALEPH-IC-88-12, London, 1988.
5. **Gadomski S., Turala M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, v.A344, p.125.
6. **Manfredi P.P., Ragusa F.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A252, p.208.
7. **Заневский Ю.В.** — Многопроволочные пропорциональные камеры. М.: Атомиздат, 1975.
8. **Charpak G.** — Phys. Today, 1978, v.31, p.23.
9. **Walenta A.H., Heintze J., Schurlein B.** — Nucl. Instr. and Meth., 1971, v.92, p.373.
10. **Heintze J.** — Nucl. Instr. and Meth., 1978, v.156, p.227.
11. **Nygren D.R., Marx J.N.** — Phys. Today, 1978, v.31, p.46.
12. **Sauli T.** — Preprint CERN-EP/89-74, Geneva, 1989.
13. **Aihara H., Altson-Garnjost M., Bartke J.A. et al.** — IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1983, v.NS-30, p.162.
14. **Eggert K., Engster C., Koningswell L. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1980, v.176, p.223.
15. **Sauly F.** — Preprint CERN PPE/94-195, Geneva, 1994; Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A242, p.237.
16. **Atiua M., Ito M., Haggerty J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A279, p.180.
17. **Kamae T., Aihara H., Enomoto R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A252, p.423.
18. **Miki T., Iton R., Kamae T.** — Preprint Ut-HE-84/2, Tokio, 1984.
19. **Etkin A., Eseman S.E., Foley K.J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.557.
20. **Rai G., Arthur A., Bieser F. et al.** — Preprint LBL-2841, Berkeley, 1990.
21. **Зломанчук Ю., Наврот А., Никитин В. А. и др.** — ПТЭ, 1982, №5, с.53.
22. **Будилов А.А., Заневский Ю.В., Зломанчук Ю. и др.** — ПТЭ, 1985, №2, с.48.
23. **Brand C., Cairanti S., Charpentier P. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.567.
24. **Darbo G., Heck B.W.** — IEEE Trans. on Nucl. Science, 1987, v.NS-34, p.227.
25. **Aarnio P., Abie H., Aeu P. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1991, v.A303, p.233.
26. **Amendolia S.R., Barczewski T., Bauerdick L.A.T. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.573.
27. **Decamp D., Deschiaux B., Lees J.-P. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1991, v.A294, p.121.
28. **Amendolia S.R., Fidecaro F., Lusiani A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, v.A289, p.569.
29. **Stimpl-Abele G.** Computer Phys. Comm., 1991, v.64, p.46.
30. **Benso S., Darbo G., Rossi L. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.A217, p.194.
31. **Dameri M., Darbo G., Lamana E. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, v.A235, p.279.

32. **Sinder F., Binkley M., Huth J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, v.A268, p.75.
33. **Saxon D.H.** — Preprint Ruth. Appl. Lab. RAL-87-022, Chilton, 1987.
34. **Boerner H., Ficher H.M., Hartman H.C.** — Nucl. Instr. and Meth., 1980, v.176, p.151.
35. **Drumm H., Eichler R., Granz B.** — Nucl. Instr. and Meth., 1980, v.176, p.333.
36. **Imanishi A., Ishii T., Kato S. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, v.A269, p.513.
37. **Enomoto R., Tsukuda K., Ujii N. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, v.A269, p.507.
38. **Carter A.A., Carter J.R., Heuer R.D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A250, p.503.
39. **Carter A.A., Carter J.R., Hill J.C. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, v.A286, p.107.
40. **Klevenz F., Conen W., Zoz R. et al.** — In: Proc. Int. Conf. on Computing in High Energy Physics, CERN 92-07, p.251.
41. **Arignon M., Ball A.H., Bell K.W. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, v.A313, p.103.
42. **Hauschild M., Heuer R.-D., Kleinwort C. et al.** — CERN-PPE/91-130, Geneva, 1991.
43. **Muller T.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A252, p.387.
44. **Bosi F., Garboni G., Cavasini V. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.532.
45. **Hanson G.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A252, p.343.
46. **Alexander J.P., Baggs R., Fujino D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.519.
47. **Arai R., Boerner H., Ishihara N. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.217, p.181.
48. **Yamada Y., Hayshi K., Ishihara N. et al.** — KEK Preprint 92-166, Ibaraki-ken.
49. **Oyama T., Horose T., Amako K. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1991, v.A305, p.71.
50. **Alvisi C., Anzino G., Azzarello F. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1991, v.A305, p.30.
51. **Danilov M., Hasemann H., Kim P. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.217, p.153.
52. **Beck G.A., Dainton J.B., Gabathuler E. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.471.
53. **Bedeshi F., Berge J.P., Bofill J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, v.A268, p.50.
54. **Roehrig J., Ensweller K., Hutchinson D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1984, v.226, p.319.
55. **Bernstein D., Bernstein J., Bunnell K. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1984, v.226, p.301.
56. **Becker J.J., Brown J.S., Coffman D.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, v.A235, p.502.
57. **Anderhub H., Anders H., Ansari S. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, v.A252, p.357.
58. **Anderhub H., Anders H., Ansari S. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, v.A263, p.l.

59. **Anderhub H., Bauer W., Beauvais F. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, v.332, p.34.
60. **Commichau V., Dederichs K.H. Deutschmann M. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, v.A239, p.487.
61. **Boucler R., Charpak G., Erskine G.A.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.509.
62. **Sauli F.** — Preprint CERN 88-02, Geneva, 1988.
63. **Aulchenko V., Chilingarov A.G., Kolachev G.M. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A283, p.528.
64. **Toki W.H.** — Preprint SLAC-PUB-5232, Stanford, 1990.
65. **Adier J., Bolton T., Bunnell K. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, v.A276, p.42.
66. **Oh S.H., Wesson D.K., Goshav A.T. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1991, v.A303.
67. **Никитюк Н.М.** — ЭЧАЯ, 1997, т.28, вып.1, с.191.