

А. В. Каравдина^{1,2}, **Д.А. Горбачев**¹, **Ф. В. Игнатов**¹, **С. Г. Пивоваров**¹,
А. С. Попов^{1,2}, **А. А. Рубан**^{1,2}, **А. Л. Сибиданов**¹, **И. Г. Снопков**¹, **Б. И. Хазин**^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: karavdina@gmail.com

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ДРЕЙФОВОЙ КАМЕРЕ ДЕТЕКТОРА КМД-3 *

В работе описаны конструкция дрейфовой камеры детектора КМД-3, ее электроника, алгоритм восстановления событий с помощью метода гистограммирования и процедура калибровки по событиям, записанным в тестовых экспериментах с космическими частицами. Координатное разрешение дрейфовой камеры составило 70 мкм (в минимуме) в поперечной плоскости и 1,5 мм вдоль проволок.

Ключевые слова: дрейфовая камера, метод гистограммирования, калибровка по событиям.

Введение

В настоящее время в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г. И. Будкера СО РАН вводится в строй коллайдер со встречными e^+e^- пучками ВЭПП-2000 с энергией до 2 ГэВ в системе центра масс и светимостью $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Многочисленные физические задачи, которые будут решаться с его помощью, разделяются на две группы: 1) прецизионные измерения фундаментальных констант и изучение фундаментальных симметрий физики элементарных частиц; 2) изучение эксклюзивных каналов адронных сечений и связанной с ними физики адронов.

Для решения этих задач необходим быстродействующий универсальный детектор, сочетающий высокую эффективность регистрации многочастичных каналов реакций с хорошим разрешением по импульсу для заряженных частиц и высоким энергетическим разрешением для фотонов. Эти требования

были учтены при изготовлении детектора КМД-3 [1], который предполагается использовать для проведения экспериментов на ВЭПП-2000 вместе с детектором СНД [2].

Общий вид криогенного магнитного детектора КМД-3 представлен на рис. 1. Пучки электронов и позитронов сталкиваются в центре вакуумной камеры экспериментального промежутка (1). Магнитный спектрометр, охватывающий область взаимодействия пучков, состоит из дрейфовой камеры (2), предназначенной для определения координат, углов вылета и импульсов заряженных частиц – продуктов e^+e^- взаимодействий, Z-камеры (4), которая используется для определения z-координаты заряженных частиц и выработки сигнала заряженного триггера и тонкого ($0,15 X_0$) сверхпроводящего соленоида, создающего магнитное поле 1,5 Тл (5). Измерение энергии и координат фотонов осуществляется с помощью цилиндрического калориметра на основе жидкого ксенона (6) и кристаллов CsI (7), а также торцевого

* Авторы выражают благодарность В. М. Титову и В. С. Охупкину за участие в изготовлении камеры, а также всему коллективу детектора КМД-3, в той или иной степени способствовавших выполнению этой работы.

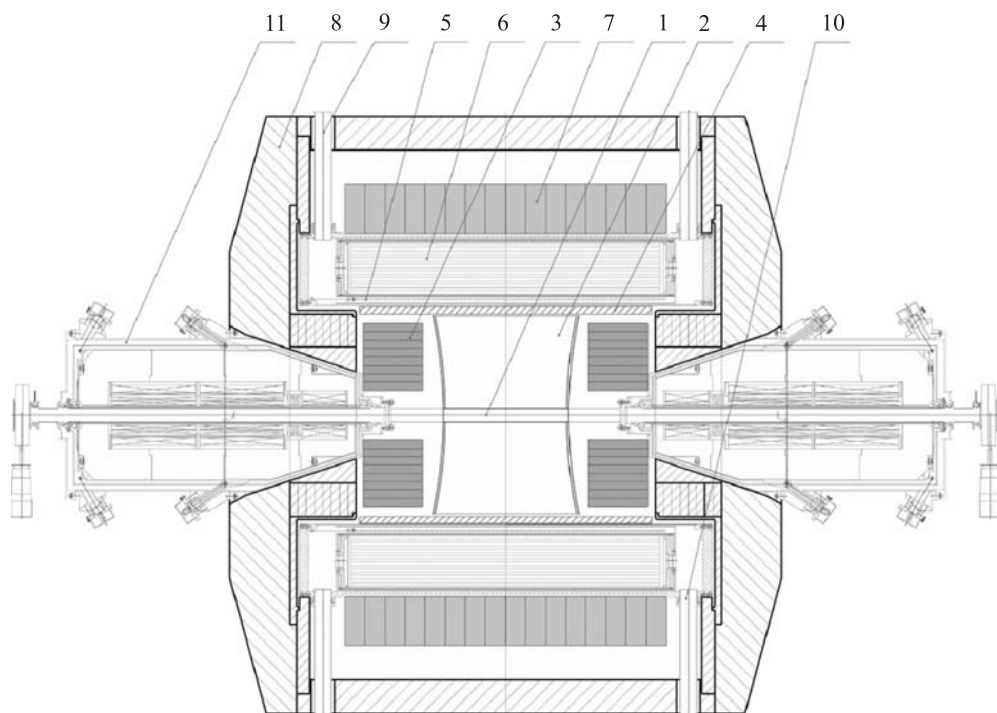


Рис. 1. Схема детектора КМД-3: 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовая камера; 3 – торцевой калориметр на основе кристаллов BGO; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий соленоид детектора; 6 – калориметр на основе жидкого ксенона; 7 – калориметр на основе кристаллов CsI; 8 – ядро; 9 – подвод жидкого гелия; 10 – откачка вакуумного объема; 11 – сверхпроводящие фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000

калориметра на основе кристаллов BGO (3). На внешней поверхности детектора размещена мюонная система из сцинтилляционной пластмассы для подавления фона космических частиц и идентификации мюонов, рождающихся в e^+e^- взаимодействиях.

Все элементы детектора изготовлены, сейчас идет процесс их отладки и измерения параметров с помощью событий космических

частиц. Данная работа посвящена дрейфовой камере детектора.

Дрейфовая камера

Дрейфовая камера детектора КМД-3 представляет собой цилиндрический объем длиной 44 см и диаметром 60 см. На рис. 2 приведена схема камеры с основными размерами. Чтобы уменьшить прогиб фланцев из-за нагрузки, создаваемой проволочками (~ 300 кг), и сделать минимальным количество пассивного вещества перед торцевым калориметром, фланцы имеют форму сферических секторов. Камера содержит 1 218 аксиальных ячеек гексагональной формы со стороной 9 мм. Сигнальные (анодные) проволочки, расположенные в центре шестиугольника, находятся под нулевым напряжением, а на полевые (потенциальные) подается отрицательное напряжение. Гексагональная геометрия ячейки позволяет наиболее эффективно заполнить всю площадь фланцев одинаковыми ячейками, описываемыми одной и той же калибровочной зависимостью координаты от времени дрейфа. В силу высокой

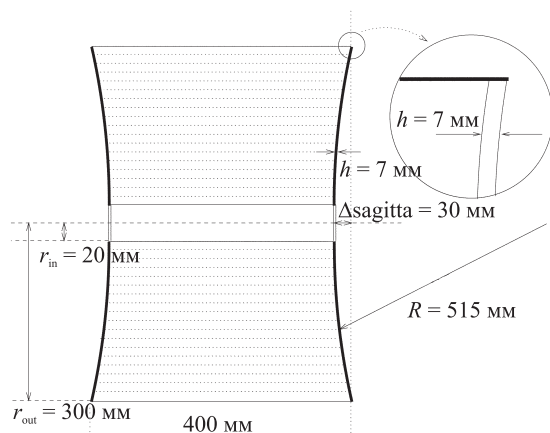


Рис. 2. Схема дрейфовой камеры

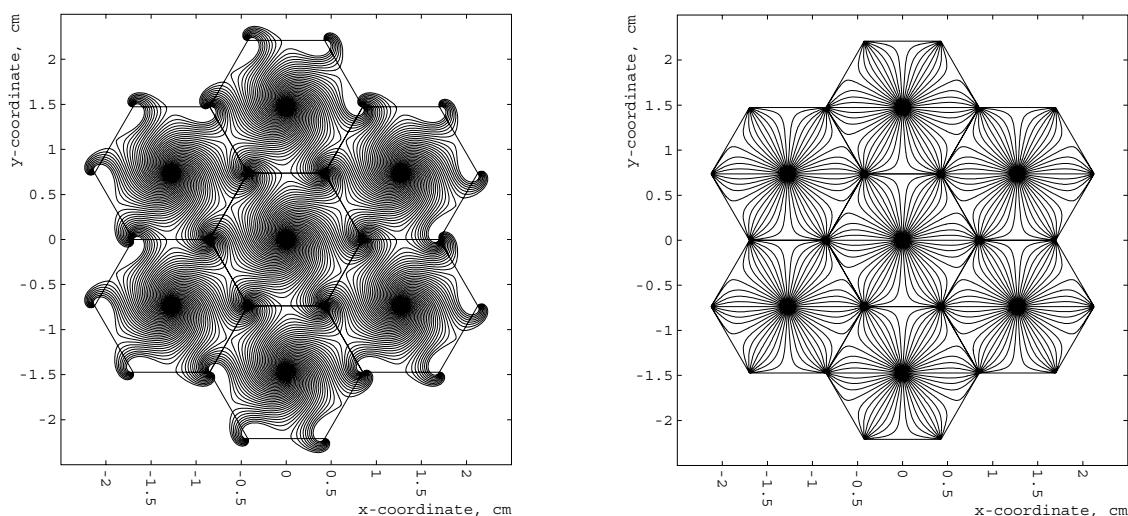


Рис. 3. Линии дрейфа в ячейках камеры. Разность потенциалов между сигнальными и полевыми проволочками 2 кВ: а – моделирование с магнитным полем 1,5 Тл; б – моделирование без магнитного поля

степени симметрии ячеек эта зависимость достаточно проста.

Принцип работы дрейфовой камеры. Заряженная частица, проходя через вещество, теряет часть энергии на возбуждение атомов и их ионизацию. В результате вдоль пути частицы образуются электроны и положительные ионы. Они дрейфуют в электрическом поле между катодом и анодом (которыми в нашем случае являются полевые и сигнальные проволочки). При достаточно большом значении напряженности поля электроны могут приобрести энергию, достаточную для ионизации газа камеры, что приводит к образованию лавины вблизи сигнальной проволочки. Время между моментом прохождения регистрируемой частицы через ячейку и приходом электронов на сигнальную проволочку называется временем дрейфа. Для определения координаты точки через которую прошла заряженная частица в плоскости перпендикулярной проволочке, необходимо знать форму изохроны – линии, от которой ионизация достигает сигнальной проволочки за одинаковое время, и угол, под которым ее касается трек. Форма изохроны сложным образом зависит от распределения электрического и магнитного полей, состава газовой смеси камеры, ее давления и температуры. Очень приблизительно изохроны представляют собой окружности. Гораздо лучшего соответствия реальности можно получить, если для расчета формы изохрон использовать пакет программ Garfield, который предназначен для

расчета плоских и трехмерных дрейфовых камер с учетом всех вышеупомянутых условий [3]. Линии дрейфа, полученные моделированием в Garfield, показаны на рис. 3.

Дрейфовая камера продувается смешиваемой «в потоке» газовой смесью аргон – изобутан в пропорции 80 : 20. Газовое усиление, т. е. увеличение числа первоначально произведенных носителей заряда, составляет примерно 10^5 [4].

Координата вдоль проволочек (Z -координата) измеряется методом деления заряда: координата образования лавины определяется соотношением величин зарядов, протекших через концы сигнальной проволочки. Z -координата определяется согласно выражению:

$$Z = \frac{L}{2} \left[\frac{A_1 \left(2 \frac{R_1}{R} + 1 \right) - A_0 \left(2 \frac{R_0}{R} + 1 \right)}{A_1 + A_0} \right], \quad (1)$$

где A_0 и A_1 – заряды, собранные с разных концов проволочки; R_0 и R_1 – входные сопро-

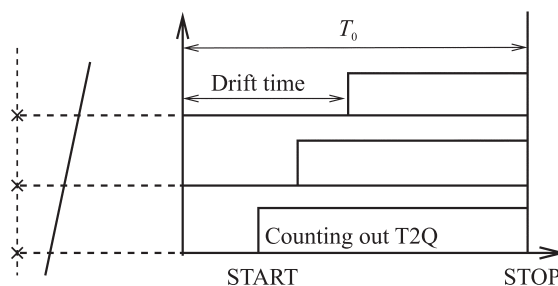


Рис. 4. Принцип измерения времени дрейфа электроныкой, работающей в режиме с «общим стопом»

тивления усилителей ($\sim 75 \text{ Ом}$); R – сопротивление проволоочки ($\sim 400 \text{ Ом}$); L – ее полная длина.

Электроника дрейфовой камеры. Чтение и оцифровка сигналов производится с помощью плат T2Q (рис. 4). Каждая плата обслуживает шестнадцать проволоочек дрейфовой камеры. Платы T2Q работают в режиме с «общим стопом». Для каждой проволоочки измеряются заряды, прошедшие через каждый конец проволоочки, и время между сигналом «СТАРТ», который вырабатывается индиви-

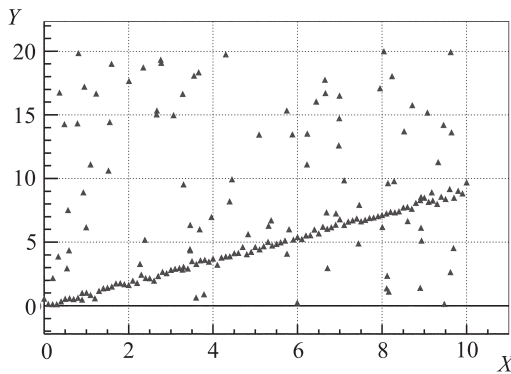


Рис. 5. Прямая, проходящая через начало координат

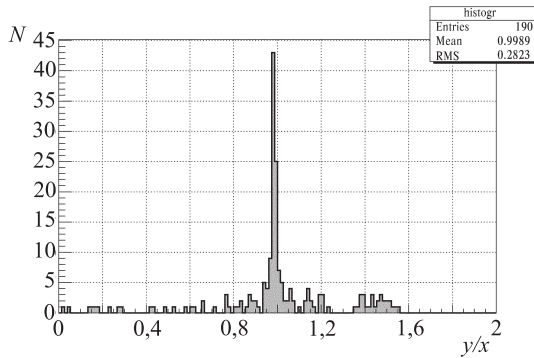


Рис. 6. Одномерная гистограмма

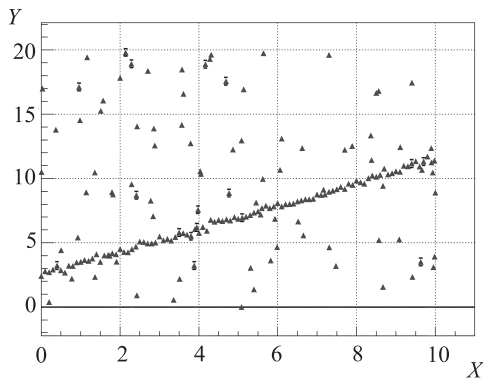


Рис. 7. Прямая, не проходящая через начало координат

дуально для каждой проволоочки с помощью дискриминатора, на его вход подается суммарный сигнал с обоих концов проволоочки, и сигналом «СТОП», который формируется внешним триггером и поступает одновременно на все платы.

Для проверки работоспособности и определения параметров преобразования аналого-цифрового тракта проводится процедура электронной калибровки: на входы платы подаются импульсы, имитирующие сигналы в камере, известной амплитуды и измеряется отклик платы. Для учета нелинейности преобразования входного заряда функция отклика аппроксимируется параболой. С помощью таких электронных калибровок определяется также отношение входного сопротивления усилителя к сопротивлению проволоочки, цена временного канала и порог дискриминатора. Затем эти параметры используются при восстановлении событий.

Цена временного канала составляет $\sim 0,15 \text{ нс}$. Верхняя оценка ошибки определения времени, как было получено из электронных калибровок, составляет около 3 каналов платы T2Q, т. е. $0,45 \text{ нс}$. Связанная с этим ошибка в определении координаты в поперечной плоскости при скорости дрейфа $\sim 50 \text{ мкм/нс}$ (приблизительная скорость дрейфа без магнитного поля) будет около 20 мкм . Точность же определения Z -координаты исходя из (1) с учетом только электронных шумов дается формулой

$$\frac{\sigma_z}{L} = \frac{\left(\frac{R_0}{R} + \frac{R_1}{R} + 1\right)}{(A_0 + A_1)^2} \sqrt{A_1^2 \sigma_{A_0}^2 + A_0^2 \sigma_{A_1}^2}. \quad (2)$$

Так как $\frac{R_0}{R}$ и $\frac{R_1}{R} \sim 0,2$, среднее значение амплитуды с одного конца проволоочки ~ 900 каналов и шумы в амплитудном тракте T2Q чуть меньше 4 каналов, то ожидаемое разрешение можно оценить как $\frac{\sigma_z}{L} \approx \frac{1,4\sqrt{2} \cdot 900 \cdot 4}{(1800)^2} \approx 0,2 \%$.

Восстановление событий

Для восстановления событий в камере используется *метод гистограммирования*. Пояснить его можно на следующих примерах.

Рассмотрим задачу восстановления прямой, проходящей через начало координат.

Пусть кроме точек, принадлежащих этой прямой, в массив данных входят случайные точки – в реальности это могут быть точки от других треков и шумы (рис. 5). Проведем через каждую точку и начало координат прямые линии, а углы, под которыми эти линии проходят через начало координат, будем заносить в гистограмму. Очевидно, что угол, под которым проходит восстанавливаемая прямая, будет встречаться наиболее часто, и максимум гистограммы придется именно на это значение (рис. 6). Зная угол, под которым проходит прямая, можно отобрать принадлежащие ей точки.

Для восстановления прямой, не проходящей через начало координат (рис. 7), потребуется двумерная гистограмма. Возьмем одну точку на координатной оси и будем считать ее новым началом координат. Далее, как и в предыдущем случае, будем проводить через эту точку и каждую точку массива прямые линии, но в гистограмму вносить не только углы, под которыми эти линии проходят в новой системе координат, а еще и координату выбранной точки. Затем будем сдвигать точку по оси и вносить полученные углы и координаты в гистограмму. В этом случае максимум гистограммы также окажется при значении угла, под которым проходит восстанавливаемая прямая. На рис. 8 показан пример такой гистограммы в случае, когда точка сдвигалась с шагом 0,05 по оси Oy .

В однородном магнитном поле траектория заряженной частицы – винтовая линия, для описания которой требуется пять параметров: R – радиус кривизны, φ , θ – углы вылета частицы, Z – координата по оси Oz точки трека, ближайшей к месту встречи пучков, а также ρ – прицельный параметр (кратчайшее расстояние от места встречи до трека). Треки частиц восстанавливаются в плоскостях (R, φ) и (Z, θ) отдельно. При этом, в первую очередь, необходимо найти хотя бы одну точку, принадлежащую треку. Для этого отбираются несколько сработавших ячеек, расположенных рядом (в реализации описываемого алгоритма это 3–4 ячейки), проводятся все возможные касательные к изохронам этих ячеек и выбирается наименее изломанная траектория. Критерием изломанности является сумма углов между всеми сегментами. Одна из трех предполагаемых точек трека (рис. 9) берется за начало координат в проце-

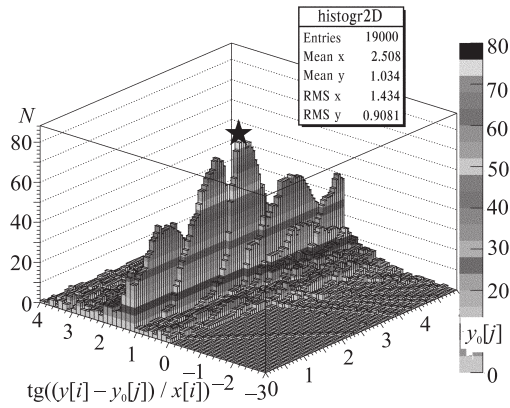


Рис. 8. Двумерная гистограмма (звездочкой отмечен пик гистограммы)

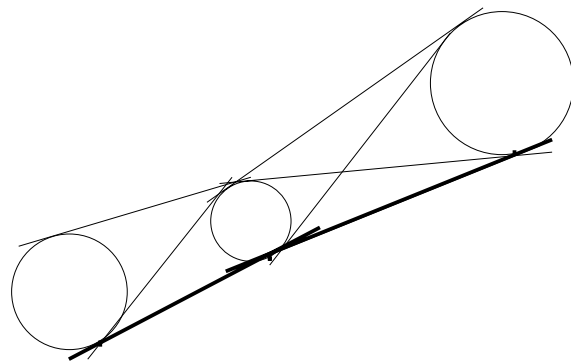


Рис. 9. Выбор начальной точки трека (жирными линиями показана траектория, по которой определяются три предполагаемые точки трека)

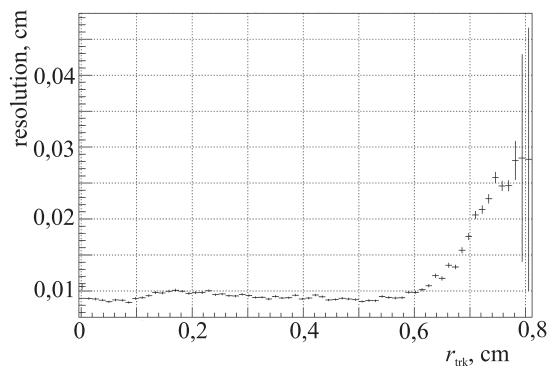


Рис. 10. Разрешение в плоскости (R, φ) в зависимости от расстояния между треком и проволокой (при моделировании космических событий исходные расстояния между треком и проволокой разбрасывались в соответствии с нормальным распределением с дисперсией 100 мкм)

дуре гистограммирования, описанной выше. Если после гистограммирования число сработавших ячеек на треке оказывается больше некоторого порога, то такой кандидат в трек подвергается дальнейшей, более точной аппроксимации. В противном случае выбирается следующая возможная траектория с минимальной суммой углов между сегментами.

Проверка работоспособности алгоритма на моделировании. Алгоритм отлаживался с помощью событий, полученных моделированием вертикальных космических треков (у таких треков $Z = 0$ и $\theta = 90^\circ$), равномерно распределенных по объему камеры. Ячейки, которые этот трек пересекал, считались сработавшими, и для них вычислялись времена дрейфа. Информация о номерах сработавших ячеек и соответствующих временах дрейфа передавалась в программу восстановления событий, где единственным параметром аппроксимации был угол φ . Таким образом, можно было сравнивать точно известные начальные параметры трека с теми, что получались после восстановления. Также было проведено моделирование, в котором в программу обработки отдавались не исходные расстояния между треком и проволокой, а разбросанные по нормальному распределению с дисперсией 100 мкм. Разрешение, полученное для этого случая, представлено на рис. 10. Ухудшение разрешения для точек трека, расположенных на расстояниях больше 0,6 см, связано с формой изохрон: угол касания изохроны при таких расстояниях определяется неточно, и это ведет к неточному определению параметров трека.

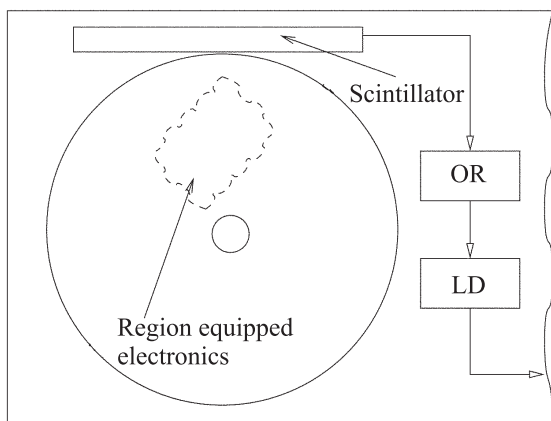


Рис. 11. Схема эксперимента: OR – дискриминатор; LD – линия задержки

Но в остальной области параметры, использованные в моделировании, воспроизводятся при восстановлении с хорошей точностью.

Калибровка по событиям (offline калибровка). Кроме моделирования проверка работы программ реконструкции производилась на данных, полученных в результате тестового захода без магнитного поля. Сигнал «общий стоп» формировался с помощью сцинтиляционных счетчиков, оборудованных фотоумножителями ФЭУ-30. Сигналы с ФЭУ поступали на входы дискриминаторов, выходные сигналы объединялись по схеме ИЛИ и, после прохождения через линию задержки длительностью 400 нс, генерировали сигнал «общий стоп» (рис. 11). Размер и расположение сцинтиляционных счетчиков обеспечивали широкий телесный угол регистрируемых треков космических частиц.

Отсчеты платы T2Q преобразуются во времена дрейфа как

$$t_{\text{drift}} = T_0 - N_{\text{T2Q}} \cdot \tau_{\text{step}}, \quad (3)$$

где T_0 – «нулевое» время дрейфа (включающее в себя все задержки в электронном тракте), которое соответствует правому краю спектра на рис. 12 и отвечает частицам, пересекающим сигнальную проволочку; N_{T2Q} – число отсчетов каналов платы T2Q с временным шагом $\tau_{\text{step}} = 0,15$ нс. Для определения T_0 обрабатываются временные спектры каждой сигнальной проволочки, пример такой аппроксимации показан сплошной линией на рис. 12.

Временное разрешение триггера, равное 2 нс, приводит к тому, что момент пролета частицы и момент срабатывания триггера могут отличаться. Соответствующая неопределенность во времени дрейфа в ячейке даст вклад в координатное разрешение ≈ 100 мкм. Поэтому введение согласно формуле (4) в аппроксимацию трека дополнительного параметра – момента пролета космической частицы t_0 – существенно улучшало координатное разрешение:

$$t_{\text{drift}} = T_0 - N_{\text{T2Q}} \cdot t_{\text{step}} - t_0. \quad (4)$$

Распределение по величине параметра t_0 представлено на рис. 13.

На события накладывались следующие условия отбора: число сработавших ячеек на треке должно быть больше трех и измерен-

ные амплитуды с проволочек должны быть выше порога (в процессе offline калибровки пороги устанавливались индивидуально для каждой рабочей проволочки).

Для определения с помощью измеренного времени дрейфа расстояния до сигнальной проволочки используется зависимость $t(R, \varphi)$, которая находится в результате offline калибровки. В качестве первоначального приближения берутся изохроны, вычисленные программой Garfield, и строятся отклонения найденных координат от прямолинейных треков космических частиц в зависимости от расстояния между треком и проволочкой. Для каждой ячейки находят поправки $\delta t(R)$ к изохронам (рис. 14).

Финальная реконструкция событий. Результатом гистограммирования являются кандидаты в треки, т. е. наборы сработавших ячеек, и параметры R, φ, ρ, τ и Z .

Точное определение параметров производится при аппроксимации треков методом наименьших квадратов. При этом минимизируется расстояние между координатами точек в сработавших ячейках и аппроксимирующей кривой отдельно в поперечной (R, φ) и продольной плоскостях. В плоскости (R, φ) минимизируется функционал

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{(t_{\text{трека}}(R, \varphi) - t_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad (5)$$

где t_i – время дрейфа, фактически измеренное в ячейке; $t_{\text{трека}}(R, \varphi)$ – расчетное время дрейфа от восстановленного трека до сигнальной проволочки; $1/\sigma_i$ – вес точки, который определяется зависимостью координатного разрешения от времени дрейфа. Параметрами аппроксимации в этой плоскости являются R, φ, ρ и t_0 (в тестовых экспериментах не было магнитного поля, поэтому радиус кривизны для космических треков считался равным бесконечности). Аналогично проводится аппроксимация в продольной плоскости, где параметрами являются Z и θ , только в качестве σ_i берется ошибка определения Z по формуле (2). Минимизация производится стандартным пакетом ROOT¹ – TMinuit. После этого делается попытка присоединить к получившемуся треку сработавшие ячейки из тех, что были отброшены в результате гистограмми-

рования. Если такие ячейки найдены, трек аппроксимируется еще раз. Скорость работы алгоритма около 200 треков/с. По полученным трекам проводятся процедуры offline

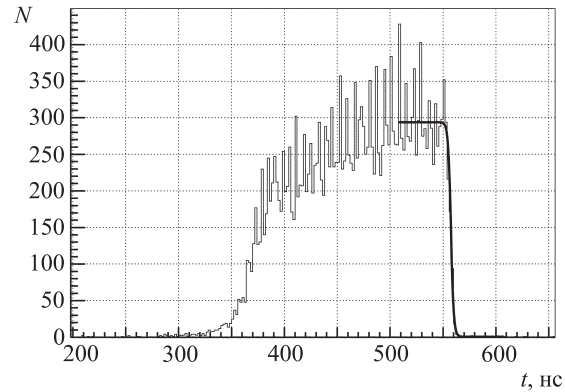


Рис. 12. Временной спектр сигналов с проволочки (линией показано определение T_0)

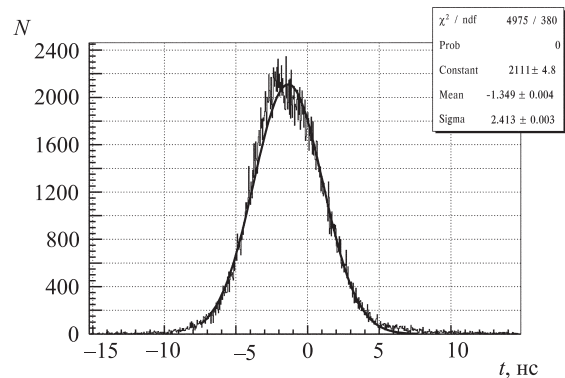


Рис. 13. Распределение по моменту пролета космической частицы t_0 плоскости в зависимости от расстояния между треком и проволочкой (при моделировании космических событий исходные расстояния между треком и проволочкой разбрасывались в соответствии с нормальным распределением с дисперсией 100 мкм)

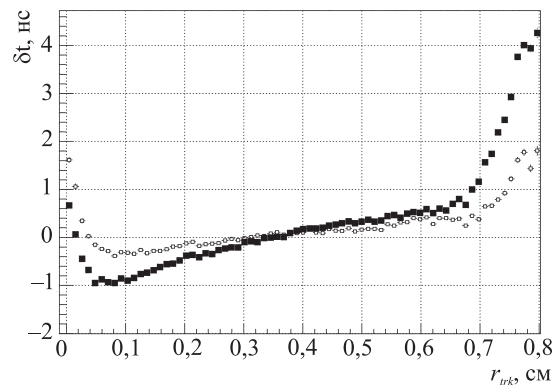


Рис. 14. Поправки к изохронам, вычисленным программой Garfield (■ – первая итерация, □ – вторая итерация)

¹ Официальный сайт ROOT: <http://root/cern.ch/>

калибровок (калибровка изохрон, калибровка dE/dX и калибровка Z -координаты).

Финальная реконструкция событий позволяет получить фактическое координатное разрешение. Для этого набирается гистограмма разницы между длиной дрейфа, измеренной в ячейке, и расстоянием между треком и сигнальной проволокой. Каждый канал этой гистограммы аппроксимируется нормальным распределением, и среднеквадратичный разброс каждого из этих распределений откладывается на графике. Полученное координатное разрешение в плоскости (R, φ) представлено на рис. 15. Видно, что для длин дрейфа меньше 6 мм разрешение меньше 100 мкм (после включения в аппроксимацию трека параметра t_0). Пространственные флуктуации места ионизации приводят к большим флуктуациям времен дрейфа для треков, проходящих вблизи сигнальной про-

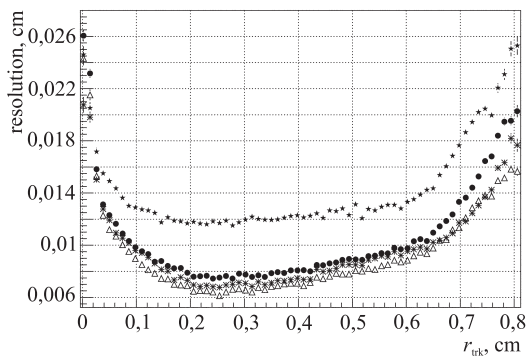


Рис. 15. Разрешение в плоскости (R, φ) в зависимости от расстояния между треком и проволокой:

- ★ – без использования в аппроксимации параметра t_0 ;
- – с использованием t_0 ; * – после калибровки изохрон;
- △ – вторая итерация калибровки изохрон

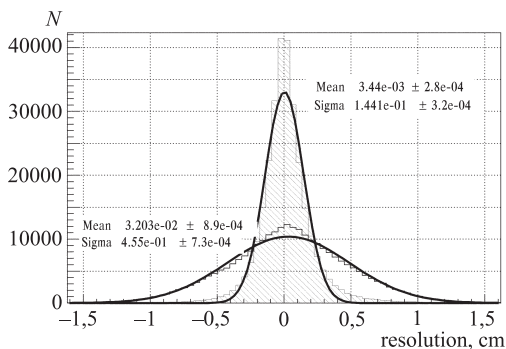


Рис. 16. Разрешение по Z -координате (незаштрихованная гистограмма – после электронных калибровок, заштрихованная – после offline-калибровок)

волочки. Этот эффект, называемый кластерным, приводит к ухудшению разрешения для малых расстояний. При больших расстояниях разрешение определяется диффузией дрейфующих электронов и краевыми эффектами распределения полей в ячейке. Последний эффект хорошо виден на рис. 10 для моделированных треков.

По гистограмме разницы между восстановленной Z -координатой трека и измеренной Z -координатой в ячейке можно определить разрешение по Z -координате.

Как видно из рис. 16, разрешение, полученное при использовании параметров из электронных калибровок (см. выше), около 4 мм (1 % от длины проволоки). При электронных калибровках длиной проволоки считается расстояние между фланцами. Однако на практике она определяется точками, в которых зажата проволока в удерживающей латунной трубке. Поэтому длина проволоки, коэффициенты преобразования амплитудного канала и отношение сопротивлений проволоки к сопротивлению усилителей калибруются по событиям. В процессе этой калибровки методом наименьших квадратов минимизируется систематический сдвиг между Z -координатой трека и измеренной Z -координатой для каждой проволоки. Предварительные результаты по offline калибровкам (узкое распределение на рис. 16) Z -координаты соответствует разрешению, определяемому шумами электроники ($\approx 1,5$ мм). Следует отметить, что треки, зарегистрированные в тестовом заходе, результаты которого представлены в статье, в основном имеют угол $\theta \approx 90^\circ$ из-за постановки эксперимента, и разрешение по Z -координате при полном спектре углов ухудшится.

Заключение

Трековая система для измерения параметров заряженных частиц является неотъемлемой частью детектора в современном эксперименте по физике высоких энергий. Высокая точность и эффективность восстановления треков частиц существенно уменьшают систематическую погрешность полученных в эксперименте результатов.

В рамках данной работы реализован алгоритм восстановления треков заряженных частиц в дрейфовой камере детектора КМД-3. Были учтены поправки к расчетным изохро-

нам и разрешение первичного триггера. Характер поведения полученного координатного разрешения качественно соответствует физическим эффектам (кластерному эффекту, диффузии и краевым эффектам распределения полей в ячейке). Полученное экспериментальное координатное разрешение составило ~ 70 мкм (в минимуме) для поперечной координаты и $\sim 1,5$ мм – для продольной. В настоящее время продолжается развитие программ обработки на заходах с космическими частицами, ведутся работы по калибровке Z -координаты и калибровке dE / dX .

Список литературы

1. Акульченко В. А. и др. Проект детектора КМД: Препр. / Институт ядерной физики СО РАН; № 45 – 2001. Новосибирск, 2000.

2. Abramov G. N. et al. SND Upgrade, e^+e^- Physics at Intermediate Energies Workshop, SLAC. Stanford, California, 2001.

3. Veenhof R. Garfield, a drift-chamber simulation program: Users guid. Version 5.13, Cern Program Library entry W5050, 1995.

4. Игнатов Ф. В. Изучение разрешения дрейфовой камеры детектора КМД-2: Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. Новосибирск, 1999.

Материал поступил в редколлегию 16.05.2007