

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

В.М. Аульченко, Д.В. Бондарев, А.Е. Бондарь,
Г.М. Колачёв, Л.М. Курдадзе, А.М. Сухарев,
А.В. Чегодаев, М.А. Шубин

МЮОННАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТОРА КЕДР

ИЯФ 2000-48

НОВОСИБИРСК
2000

Мюонная система детектора КЕДР

*В.М. Аульченко, Д.В. Бондарев, А.Е. Бондарь,
Г.М. Колачёв, Л.М. Курдадзе, А.М. Сухарев,
А.В. Чегодаев, М.А. Шубин*
Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

В мае 2000 года завершена сборка мюонной системы детектора КЕДР. Данная работа содержит информацию о конструкции, методах калибровки и настройки системы. Дано описание моделирования системы, приведены результаты моделирования величины многократного рассеяния мюонов в веществе детектора и вероятностей выхода мюонов и π -мезонов в слои системы в зависимости от энергии. Описаны процедуры реконструкции космических событий и измерения координатного разрешения в условиях стенда.

Muon system of KEDR detector

*V.M. Aulchenko, D.V. Bondarev, A.E. Bondar,
G.M. Kolachev, L.M. Kurdadze, A.M. Suharev,
A. V. Chegodaev, M.A. Shubin*
Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

Recently, the muon system is installed in KEDR detector. This paper contains the information on the construction of the system, on the calibration and the tuning methods. A description of MC simulation of the muon system is given, including results on the probability of muon's and π 's penetration through layers of the system, dependently on energy, and muon's multiple scattering in the detector material. The reconstruction procedure as well as spatial resolution measurement with cosmic particles are described.

© *Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия*

Содержание

1 Введение	4
2 Конструкция системы	5
2.1 Режим работы	5
2.2 Рабочий газ	7
2.3 Геометрия системы	9
2.4 Электроника	9
3 Калибровка системы	11
3.1 Определение рабочего напряжения	11
3.2 Восстановление координаты пролета частицы	12
3.3 Генераторная калибровка	13
3.4 Калибровка по временным спектрам	14
4 Моделирование системы	16
4.1 Особенности моделирования	16
4.2 Параметры “разрешение” и “эффективность”	17
4.3 Результаты	17
5 Стендовые измерения	23
5.1 Измерение эффективности	23
5.2 Восстановление треков космических частиц	24
5.2.1 Подгонка трека	24
5.2.2 Разделение многотрековых событий	25
5.3 Измерение продольного разрешения	26
6 Заключение	27
А Приложение	27
Список литературы	30

1 Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН продолжаются эксперименты с детектором КЕДР [1] на накопителе ВЭПП-4М. Накопитель позволяет изучать физические процессы на встречных электрон-позитронных пучках в широком диапазоне энергий – от 2 до 12 ГэВ в системе центра масс. Проектная светимость ВЭПП-4М составляет от $2 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в области энергии J/ψ до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в области Υ -резонансов.

Универсальный магнитный детектор КЕДР состоит из совокупности различных систем для регистрации частиц, рождённых в e^+e^- -столкновениях. При помощи вершинного детектора можно с высокой точностью восстанавливать вершину события по трекам, исходящим из места встречи. Дрейфовая камера позволяет определять импульс и координаты треков заряженных частиц и проводить разделение по ионизационным потерям. Пороговые аэрогелевые черенковские счётчики служат для идентификации частиц. Цилиндрическая и торцевая время-пролётные системы используются для запуска детектора и идентификации частиц по времени пролёта. Цилиндрический калориметр на основе жидкого криптона и торцевой калориметр на основе кристаллов йодистого цезия предназначены для регистрации фотонов, нейтральных и заряженных частиц и определения их энергии и координат с высокой точностью. Сверхпроводящий соленоид создаёт однородное магнитное поле с напряжённостью до 18 кГс в центральной части. Массивное железное ярмо служит для замыкания магнитного потока. В зазорах ярма располагается мюонная система, предназначенная для разделения мюонов и пионов. Система регистрации рассеянных электронов позволяет выделять двухфотонные процессы. Оперативное измерение светимости ВЭПП-4М производится по процессу двойного тормозного излучения.

Среди основных задач детектора КЕДР можно выделить следующие:

- измерение полного сечения $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ в указанной области энергий;
- изучение распадов J/ψ и других состояний системы $\bar{c}s$ -кварков;

- изучение параметров τ -лептона, в т.ч. прецизионное измерение его массы;
- физика двухфотонных процессов.

В дальнейшем предполагается изучение семейства Υ -резонансов.

Мюонная система является одной из основных регистрирующих систем детектора КЕДР. Возможность идентификации мюонов позволит отбирать события процессов $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, а также распадов Ψ , Ψ' в пару мюонов. Кроме того, система будет использоваться для подавления фона космических частиц.

Развитие мюонной системы можно проследить по работам [3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12]. Блоки системы были изготовлены в 1990-м году. За прошедшее время была проведена работа с ними на стенде; часть блоков устанавливалась в детектор. Сейчас мюонная система впервые собрана в практически полной конфигурации.

В настоящей работе описано текущее состояние мюонной системы и работа, проведённая с ней за последние три года.

2 Конструкция системы

Мюонная система детектора КЕДР состоит из четырёх слоёв мюонных камер цилиндрической части и одного слоя торцевой части (рис. 1). В настоящее время на детекторе установлены три внутренних слоя цилиндрической части системы.

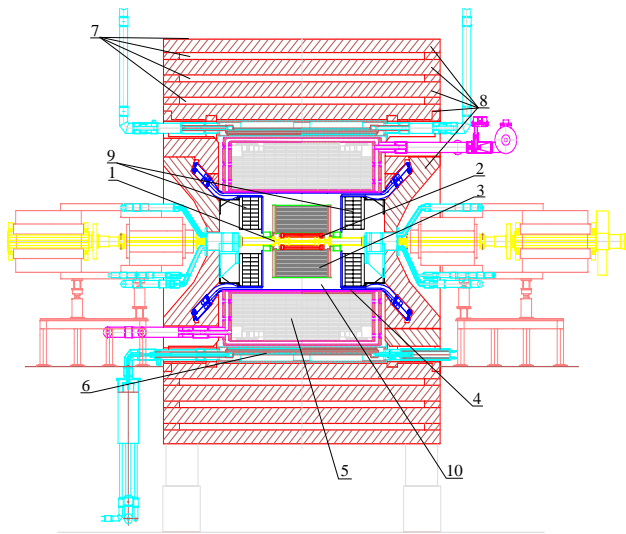
Внутренние слои системы расположены в зазорах магнитного ярма детектора; таким образом, перед каждым из них имеется слой железного поглотителя толщиной 23 см, что составляет 1.4 ядерной длины. Четвёртый слой будет расположен на внешней поверхности ярма, толщина поглотителя между ним и третьим слоем – 20 см (1.2 ядерной длины).

Телесный угол, охватываемый цилиндрической частью системы, равен $0.74 \times 4\pi$.

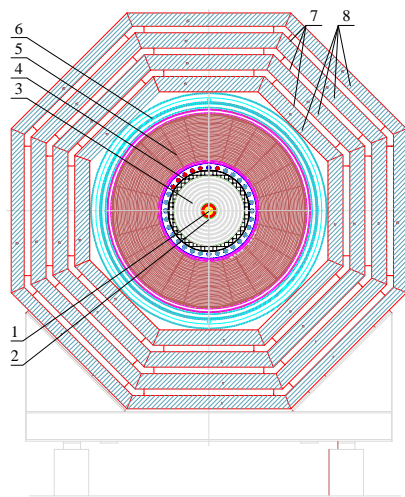
2.1 Режим работы

Мюонная система детектора КЕДР изготовлена на основе цилиндрических газовых проволочных счётчиков, работающих в т.н. самогасящемся стримерном (СГС) режиме. Камеры состоят из трубки-катода, по оси которой натянута проволочка-анод, герметично зафиксированная в торцах изолирующими пробками.

Подробный обзор СГС-режима приведён в работе [2].



Продольный разрез.



Поперечный разрез.

Рис. 1: Детектор КЕДР. Числами обозначены: 1 – вакуумная камера, 2 – вершинный детектор, 3 – дрейфовая камера, 4 – время-пролётная система, 5 – цилиндрический LKr калориметр, 6 – обмотка магнита, 7 – мюонная система, 8 – ярмо магнита, 9 – торцевой CsI калориметр, 10 – аэрогелевые черенковские счётчики.

При малом приложенном напряжении такое устройство будет работать в режиме ионизационной камеры. При увеличении напряжения происходит переход к пропорциональному режиму, затем, в зависимости от выбора газовой смеси и диаметра анодной проволоочки, к гейгеровскому или к самогасящемуся стримерному режиму [4]. При дальнейшем увеличении напряжения происходит искровой пробой.

Механизм развития стримерного разряда – фотонный. При пролёте заряженной частицы сквозь чувствительный объём возникает ионизация. При этом электроны, дрейфующие к аноду, образуют лавину в области высокой напряжённости электрического поля вблизи анодной проволоочки. Первичная лавина возбуждает и ионизирует рабочий газ. Процессы рекомбинации и снятия возбуждения атомов газа идут с испусканием ультрафиолетовых фотонов, которые вызывают вторичные лавины.

Для получения СГС-режима необходимо, чтобы длина пробега фотона была сравнима с размерами лавины (в противном случае разряд быстро распространится вдоль анода, и счётчик перейдёт в гейгеровский режим); при этом анод должен быть достаточно толстым, чтобы ионизация от первичной лавины могла исказить поле, создав выделенное направление. Наиболее вероятным в этом случае будет развитие вторичных лавин вдоль направления развития первичной лавины, при этом разряд локализован и через небольшое время гасится. Такой разряд называется стримером.

Чтобы получить рабочий газ с малой длиной пробега фотонов, используются различные органические добавки, молекулы которых имеют широкий спектр поглощения фотонов, причём в противовес фотоионизации может происходить диссоциация молекулы или диссипация энергии по колебательным и вращательным степеням свободы.

Стримерный разряд развивается от одного из первых электронов первичной ионизации, поэтому при правильном выборе газовой смеси и рабочего напряжения эффективность регистрации близка к 100% [4].

Преимуществами СГС-режима являются независимость от начальной ионизации стандартная форма сигнала, большая амплитуда (~ 1 мА) и малая длительность (~ 100 нс) сигнала, малый разброс амплитуд, что упрощает и удешевляет регистрирующую электронику, повышает её помехоустойчивость и надёжность [4].

2.2 Рабочий газ

На основании результатов работ по исследованию стримерного режима, выполненных в ИЯФ, и опыта работы детектора КМД-2 [3, 4, 5, 1, 7] в

качестве рабочей газовой смеси мюонной системы была выбрана смесь аргона и n-пентана в соотношении 75% к 25%.

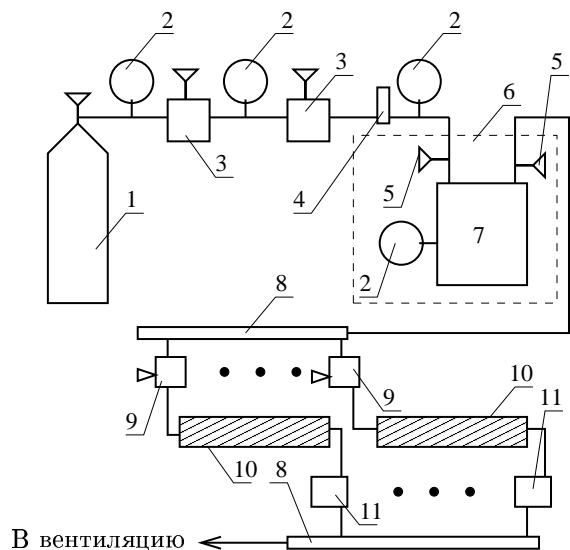


Рис. 2: Схема газовой системы. Числами обозначены: 1 – баллон с аргоном, 2 – манометры, 3 – редукторы, 4 – предохранительный клапан, 5 – вентили, 6 – холодильник, 7 – сатуратор, 8 – коллекторы, 9 – накататели, 10 – октанты мюонной системы, 11 – масляные газовые затворы.

Схема газовой системы представлена на рис. 2. В каждом октанте (секторе) трубки системы продуваются последовательно, октанты соединены между собой параллельно.

Для приготовления рабочей газовой смеси системы используется сатуратор, в котором аргон пропускается через жидкий пентан. Сатуратор находится в холодильнике при температуре 0°C (именно при такой температуре отношение давлений аргона и насыщенных паров пентана составляет 3:1). В целях обеспечения пожарной безопасности термореле вынесено за пределы холодильной камеры.

Готовая рабочая смесь продувается через систему при давлении чуть выше атмосферного. Расход жидкого пентана составляет примерно 1 л в сутки.

2.3 Геометрия системы

В описываемой системе используются стримерные трубки диаметром 4 см из нержавеющей стали с толщиной стенки 300 мкм. Анод — проволочка из позолоченного молибдена диаметром 100 мкм.

Единицей построения системы является блок. Блок включает в себя определённое количество трубок, расположенных в два слоя (это сделано для повышения эффективности регистрации) со сдвигом между слоями на радиус трубки, камерную электронику и приспособления для крепления.

Существует 7 типоразмеров блоков цилиндрической части. Их параметры приведены в табл. 1. В блоках внешнего слоя длина трубок 500 см, в остальных слоях — 450 см.

Таблица 1: Параметры блоков пробегной системы детектора КЕДР

тип блока	число трубок	число каналов электроники	ширина, мм	шаг в слое, мм	расстояние между слоями, мм
ЦБ	32	8	685	43.0	35
1ЦБ32	32	8	646	42.8	35
1ЦБ16	16	4	320	41.3	36
2ЦБ20	20	4	400	43.5	37
2ЦБ8	8	2	165	41.7	36
3ЦБ8	8	2	181	46.9	35
4ЦБ20	20	4	432	43.5	37

В целом мюонная система детектора КЕДР содержит 120 блоков, 768 каналов электроники и 3136 трубок.

2.4 Электроника

Продольная координата в стримерных трубках определяется по разности времён прихода сигналов от стримера на противоположные концы трубки. Несколько трубок соединяются последовательно для уменьшения числа каналов регистрирующей электроники. Чтобы снизить вероятность срабатывания двух трубок одной связки от одной ионизирующей частицы, в связку объединяются не соседние, а расположенные через одну трубки одного слоя. Как было показано в [4, 7], такая конструкция не вносит заметного ухудшения в характеристики системы.

Поперечная координата определяется по номеру сработавшей трубки. Пространственное разрешение в поперечном к трубкам направлении зависит от геометрического расположения трубок в блоке [7].

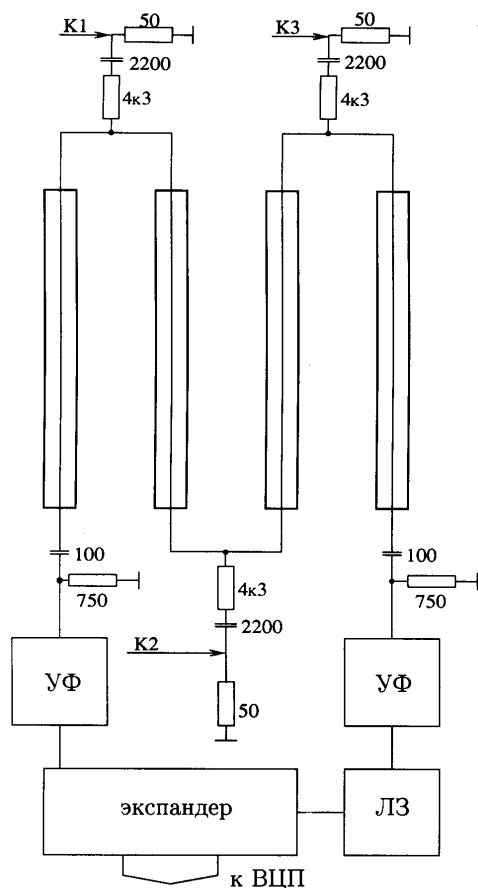


Рис. 3: Схема одного канала электроники.

Схема канала камерной электроники приведена на рис. 3. С каждого конца связки сигнал через высоковольтную развязку подаётся на отдельный усилитель-формирователь (УФ), который формирует стандартный логический импульс. Сигналы с УФ подаются на входы “старт” и “стоп” экспандера, который формирует на выходе прямоугольный импульс стандартной амплитуды, длительность которого пропорциональна разности времён прихода сигналов “старт” и “стоп”. Коэффициент экспандирова-

ния составляет приблизительно 40. Усилители-формирователи и экспандеры устанавливаются непосредственно на блоках. Сигнал с УФ “старт” подаётся непосредственно на вход “старт” экспандера, сигнал с УФ “стоп” идёт на вход “стоп” через линию задержки; это требуется для того, чтобы сигнал “старт” всегда приходил на экспандер раньше сигнала “стоп”. Линия задержки сделана из витой пары соответствующей длины, уложенной между трубок блока.

Парафазный сигнал передаётся с выхода экспандера по витой паре на время-цифровой преобразователь (ВЦП) — плату ТП стандарта “КЛЮК-ВА” [8].

Временное разрешение описанной камерной электроники составляет 15 пс, интегральная нелинейность экспандера — не более 1.5%, временная нестабильность — не более 50 пс в сутки. Потребление тока электроникой восьмиканального блока составляет: по напряжению +12 В — 100 мА, -12 В — 150 мА, +6 В — 1.2 А [10]. Дискретность оцифровки времени платой ТП — 2 нс.

3 Калибровка системы

3.1 Определение рабочего напряжения

Для определения рабочего напряжения снимается загрузочная характеристика, т.е. зависимость частоты срабатывания канала при пролётах космических частиц от напряжения на аноде.

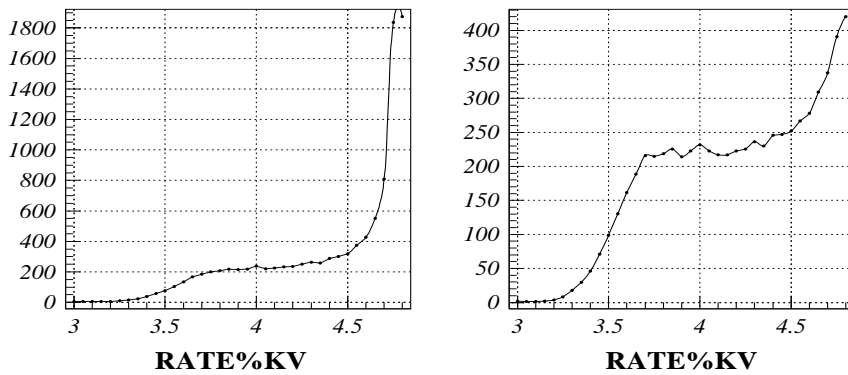


Рис. 4: Пример загрузочной характеристики.

Пример загрузочной характеристики приведен на рис. 4. Рабочее напряжение выбирается в середине “плато” – горизонтального участка характеристики.

3.2 Восстановление координаты пролета частицы

Как было сказано выше, продольная координата срабатывания определяется методом разности времён прихода сигнала. Разность времён прихода сигналов на концы связки пропорциональна расстоянию вдоль анодной проволоочки до места образования стримера. Таким образом, продольная координата и время, измеренное ВЦП, связаны соотношением

$$\begin{aligned}
 z &= (L_{tube} + L_{conn}) \frac{T - T_{begin}}{T_{end} - T_{begin}} - \frac{L_{conn}}{2} \text{ для чётных трубок,} \\
 z &= (L_{tube} + L_{conn}) \frac{T_{end} - T}{T_{end} - T_{begin}} - \frac{L_{conn}}{2} \text{ для нечётных трубок,} \quad (1)
 \end{aligned}$$

где L_{tube} – длина проволоочки в одной трубке, L_{conn} – длина перемычки между трубками в связке, T – время, полученное с ВЦП, T_{begin} , T_{end} – времена, соответствующие стыкам данной трубки с соседними, причём $T_{begin} < T_{end}$ (см. рис. 5).

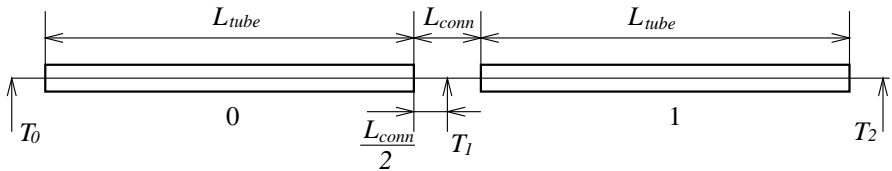


Рис. 5: Пояснение к определению опорных констант T_i . Показаны две первые трубки связки. Стрелками указаны точки, которым соответствуют значения T_0, T_1, T_2 . Нумерация трубок в связке начинается с нуля.

Задача калибровочной процедуры – определение величин T_{begin} , T_{end} для каждой трубки каждого канала. Ясно, что T_{end} для i -ой трубки равно T_{begin} для $(i + 1)$ -ой, так что на n -трубочный канал требуется определить $n + 1$ опорных значений T_i . Для i -ой трубки $T_{begin} = T_i, T_{end} = T_{i+1}$.

Координаты в поперечной плоскости принимаются равными координатам проволоочки сработавшей трубки. Номер сработавшей трубки определяется по попаданию времени T в один из интервалов (T_i, T_{i+1}) .

3.3 Генераторная калибровка

Для определения опорных констант T_i могут быть использованы сигналы от генератора. Конструкция блоков системы предусматривает три входа для подачи таких сигналов (точки K1, K2, K3 на рис. 3).

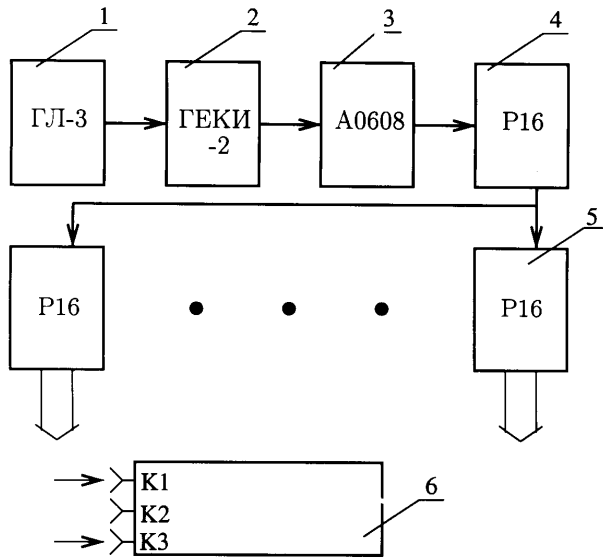


Рис. 6: Схема системы генераторной калибровки. Цифрами обозначены: 1 – генератор логических импульсов, 2 – генератор калибровочных импульсов, 3 – аттенуатор, 4 – первый разветвитель, 5 – разветвители на блоки мюонной системы, 6 – подключение блока.

Схема, реализующая этот метод, приведена на рис. 6. Она работает под управлением компьютера через КАМАК-интерфейс.

Применение электронной калибровки ограничено несколькими причинами. Во-первых, к блокам в детекторе подведено по два калибровочных кабеля (см. рис. 6), и возможно получение только двух опорных констант T_i из пяти или семи (в зависимости от числа трубок в данной связке) требуемых. Этого явно недостаточно. Во-вторых, необходимо отметить, что сигнал генератора не полностью имитирует импульс от стримерного разряда, что приводит к систематической погрешности. Кроме того, использование нескольких методов калибровки заметно повышает надёжность системы.

На практике генераторная калибровка используется для проверки исправности электроники и кабелей. Кроме того, возможно использование данных генераторной калибровки в качестве начальных значений для процедуры калибровки по временным спектрам (см. ниже).

3.4 Калибровка по временным спектрам

Для точной калибровки системы производится набор временных спектров при пролётах космических частиц. Типичный временной спектр представлен на рис. 7.

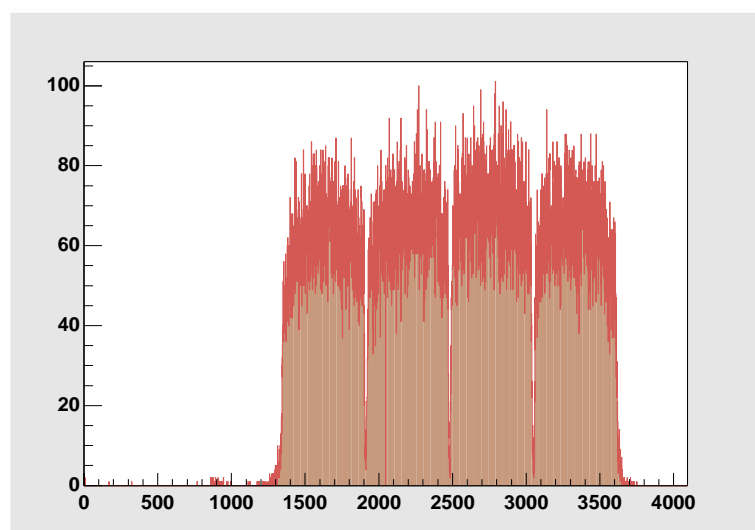


Рис. 7: Пример временного спектра (спектр получен на стенде).

Провалы в спектре соответствуют переключкам между трубками. Определение координат провалов и границ спектра даст искомые значения опорных констант T_i соответствующего канала. Для этого в каждой области вблизи провалов и границ производится подгонка спектра специальной функцией.

В идеальном спектре провал должен был бы иметь прямоугольную форму, при этом константы T_i соответствуют серединам провалов. Из-за конечного разрешения электроники происходит “размывка” границ трубок. Считая распределение измеренного значения относительно истинного гауссовым со среднеквадратичным отклонением σ , получаем уравне-

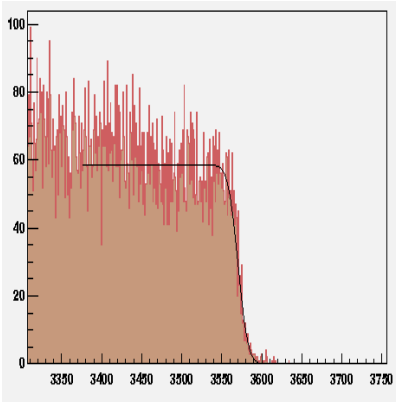


Рис. 8: Пример подгонки границы спектра.

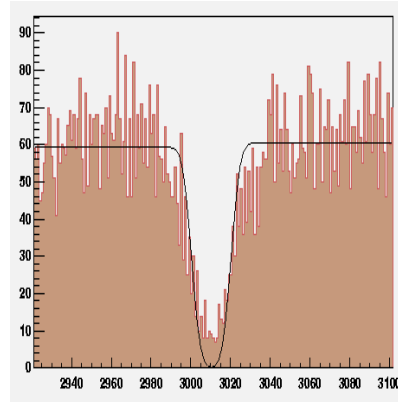


Рис. 9: Пример подгонки провала в спектре.

ние спектра на краю трубки:

$$\begin{aligned}
 f(T) &= A \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{T - (T_i - W/2)}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \text{ на правом краю трубки,} \\
 f(T) &= B \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(T_i + W/2) - T}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \text{ на левом краю трубки,} \quad (2)
 \end{aligned}$$

где A, B – нормировочные коэффициенты, T_i – значение опорной константы для соответствующего стыка, W – величина L_{conn} , выраженная во временных единицах.

Функции (2) используются для подгонки границ спектра (см. рис. 8). Провалы подгоняются функцией

$$\begin{aligned}
 f(T) &= A \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{T - (T_i - W/2)}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \\
 &\quad + B \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(T_i + W/2) - T}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right), \quad (3)
 \end{aligned}$$

пример подгонки приведён на рис. 9.

При подгонке варьируются параметры A, B, T_i, σ .

Затраченные значения калибровок для подгонки могут быть получены несколькими способами – определены по результатам электронной калибровки, взяты из предыдущих калибровок, найдены специальной процедурой поиска провалов в спектре. В частности, написана программа

off-line калибровки, использующая для определения затравочных значений процедуру поиска провалов в спектре.

Описанные процедуры электронной калибровки и калибровки по космическим частицам в настоящее время используются для контроля работы и стабильности системы и для получения опорных констант для реконструкции.

4 Моделирование системы

Для изучения возможности идентификации мюонов с помощью описанной системы необходимо провести моделирование методом Монте-Карло. Программа моделирования детектора КЕДР написана на основе пакета GEANT [13]. Её части, относящиеся к мюонной и магнитной системам, сделаны на основе работы [11].

Моделирование мюонной системы включает в себя описание четырёх слоёв баррельной части, процедуры поиска срабатывания и его оцифровки.

Моделирование магнитной системы включает в себя описание катушки магнита, баррельной и торцевых частей магнитного ярма.

4.1 Особенности моделирования

Особенностью мюонной системы детектора КЕДР является большое количество регистрирующих объёмов — несколько тысяч трубок. Описание каждой из них значительно замедляет работу программы, поэтому геометрия системы представлена четырьмя восьмигранными призмами-слоями (в пакете GEANT они называются PGON). На основании точки входа частицы в чувствительный объём и её импульса вычисляются трубки, которые должен пересечь трек.

В пакете GEANT имеется стандартная процедура вычисления параметров проведения трека (таких, как длина шага и т.п.) В программе моделирования детектора КЕДР использование этой процедуры по умолчанию отключено, используются параметры, предоставляемые программой. Для ярма магнита и мюонной системы, характеризующихся большими геометрическими размерами, это часто приводит к превышению максимально допустимого числа шагов и обрыву проводимого трека; кроме того, неправильно моделируется возникновение δ -электронов в железе ярма. Поэтому в моделировании ярма магнита и мюонной системы всегда используется автоматическое вычисление параметров проведения трека внутренними средствами GEANTa.

4.2 Параметры “разрешение” и “эффективность”

Программа моделирования может получать в качестве параметров продольное разрешение и эффективность регистрации мюонной системы.

Соответствующая карта GEANTa имеет вид:

`MUPR resolution efficiency`

Значения по умолчанию – 0 и 1.

При определении координат пересечения трека с трубкой и оцифровке к z -координате добавляется случайное число, имеющее нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением, равным параметру `resolution`.

Параметр `efficiency` определяет вероятность срабатывания при пролёте частицы для т.н. суперблока. Суперблок представляет собой одну грань одного слоя системы. При попадании частицы в суперблок с вероятностью $(1 - \text{efficiency})$ она не даст срабатывания ни в одной из трубок суперблока.

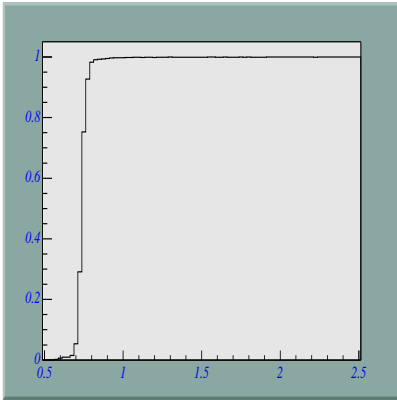
4.3 Результаты

Проведено моделирование эффективности выхода мюонов и заряженных π -мезонов в слои системы в зависимости от энергии. Для обоих типов частиц было сделано по две серии моделирования. В одном случае исходная частица запускалась из центра детектора перпендикулярно к одной из граней яма магнита, во втором угол падения частицы составлял 60° . Магнитное поле в детекторе не моделировалось, поскольку его вклад не должен сильно изменить наблюдаемую картину. Энергия исходной частицы менялась в диапазоне от 0.5 ГэВ до 2.5 ГэВ с шагом 25 МэВ. В каждой точке по энергии набиралось 20000 событий.

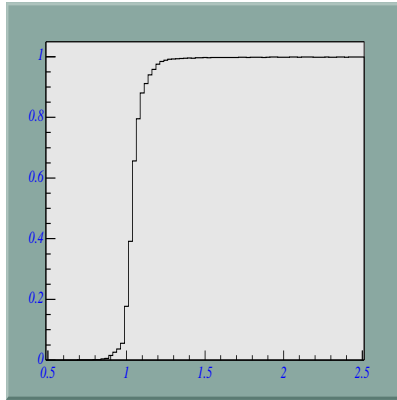
Результаты представлены на рис. 10, 11, 12, 13. Из полученных распределений видно, что мюонная система может служить для разделения мюонов и адронов в данной области энергий.

Проведено моделирование многократного рассеяния мюонов с энергией 1.5 ГэВ в веществе детектора. Результаты представлены на рис. 14. Полученные распределения соответствуют величине отклонения: в первом слое ~ 5 см, во втором ~ 8 см, в третьем ~ 12 см. В четвёртом слое распределение не получено, т.к. для него эффективность выхода мюонов с энергией 1.5 ГэВ слишком мала.

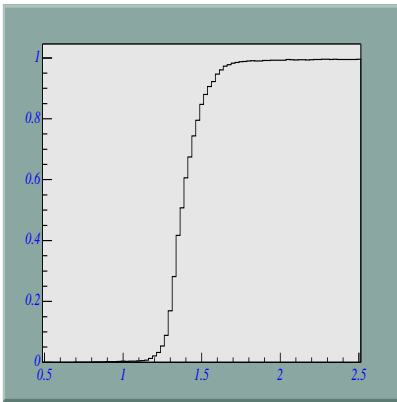
Таким образом, многократное рассеяние частиц в веществе детектора заметно превышает полученное координатное разрешение.



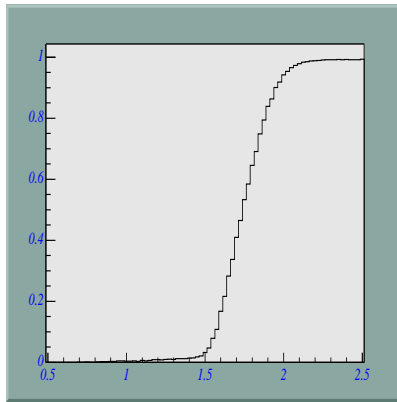
1 слой



2 слой

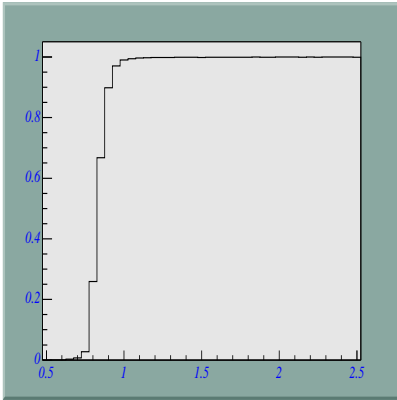


3 слой

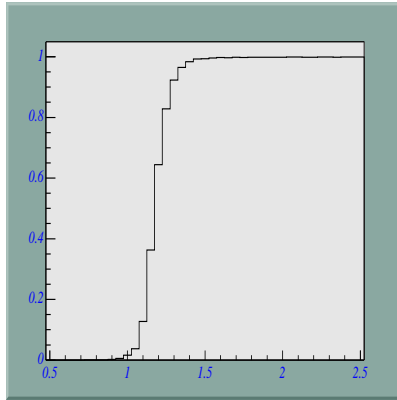


4 слой

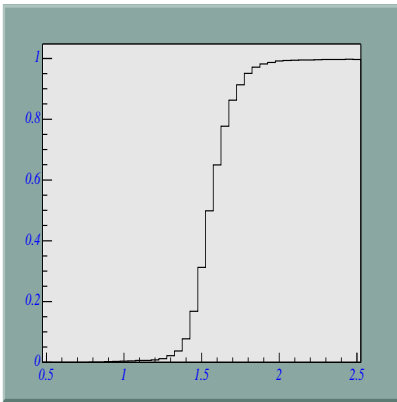
Рис. 10: Вероятность выхода мюонов в слой системы в зависимости от энергии при нормальном падении. $0.5 \leq E \leq 2.5$ ГэВ, в каждой точке по энергии набрано 20000 событий.



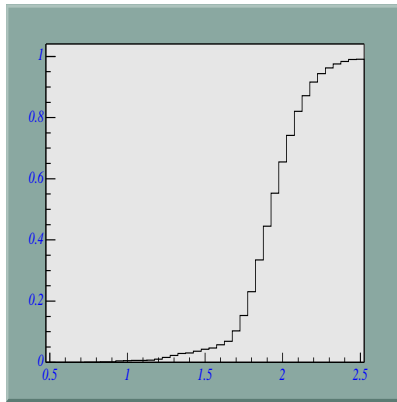
1 слой



2 слой

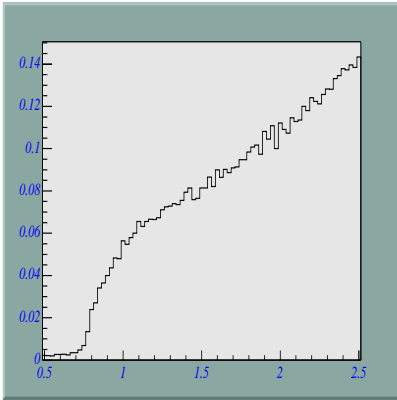


3 слой

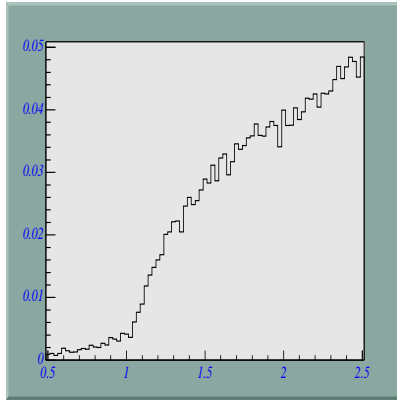


4 слой

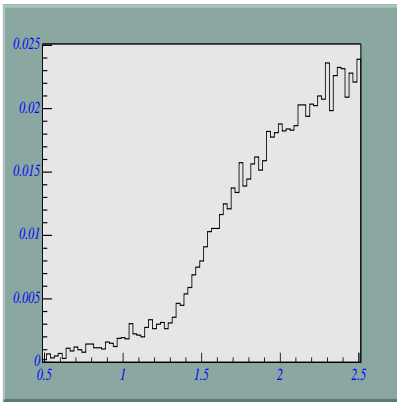
Рис. 11: Вероятность выхода мюонов в слой системы в зависимости от энергии при падении под углом 60° . $0.5 \leq E \leq 2.5$ ГэВ, в каждой точке по энергии набрано 20000 событий.



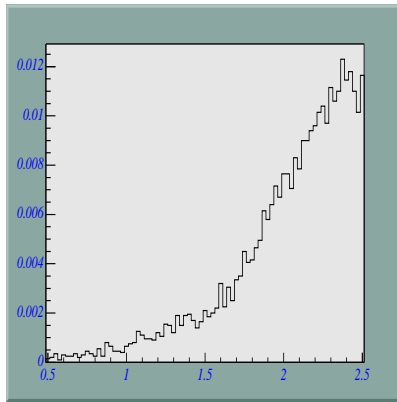
1 слой



2 слой

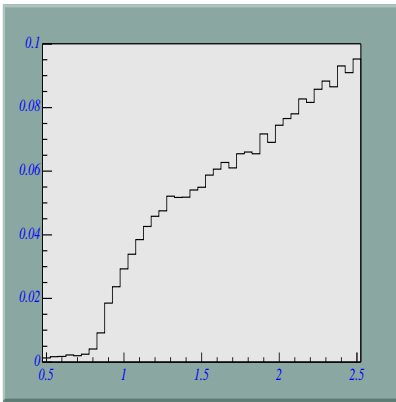


3 слой

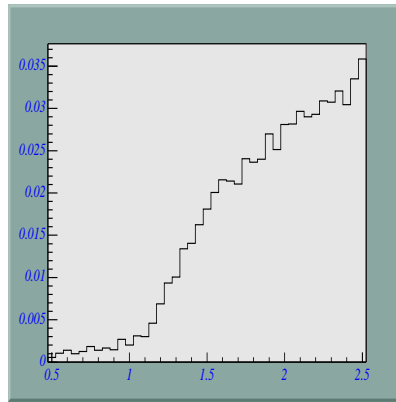


4 слой

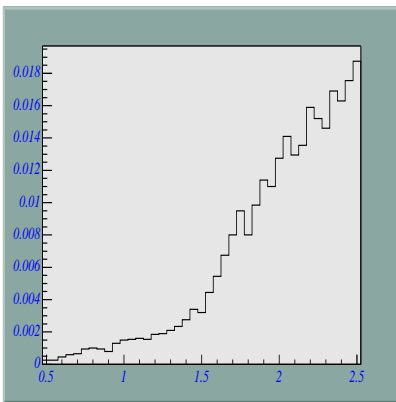
Рис. 12: Вероятность выхода π -мезонов в слой системы в зависимости от энергии при нормальном падении. $0.5 \leq E \leq 2.5$ ГэВ, в каждой точке по энергии набрано 20000 событий.



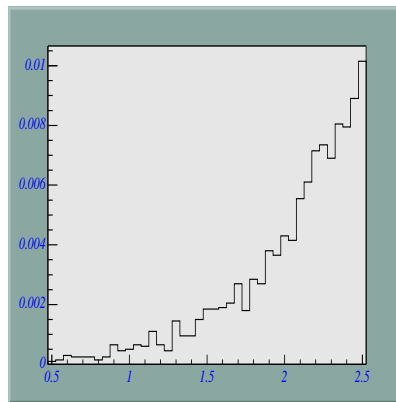
1 слой



2 слой

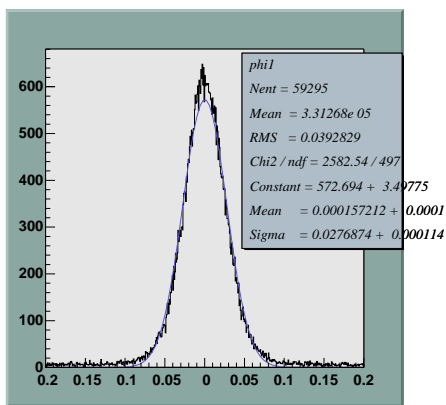


3 слой

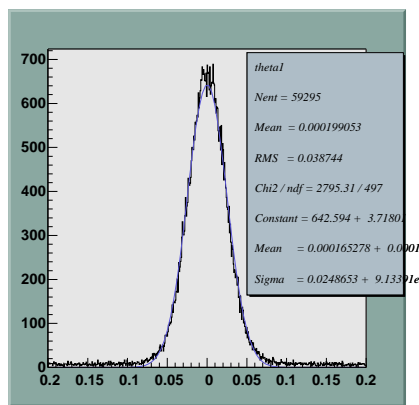


4 слой

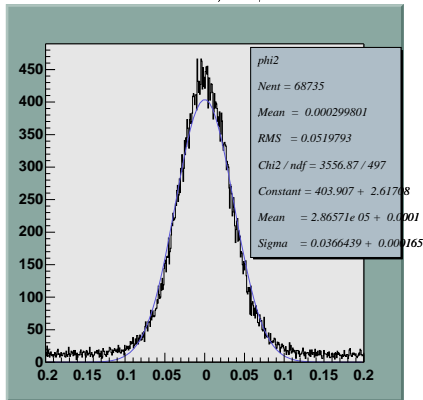
Рис. 13: Вероятность выхода π -мезонов в слой системы в зависимости от энергии при падении углом 60° . $0.5 \leq E \leq 2.5$ ГэВ, в каждой точке по энергии набрано 20000 событий.



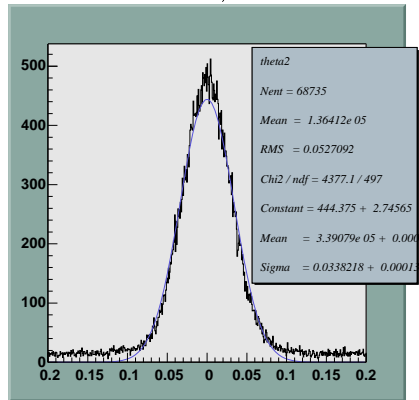
1 слой, $\Delta\phi$



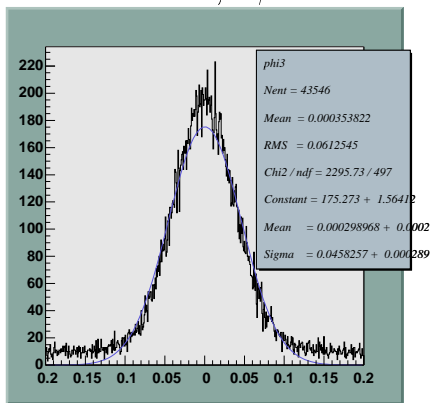
1 слой, $\Delta\theta$



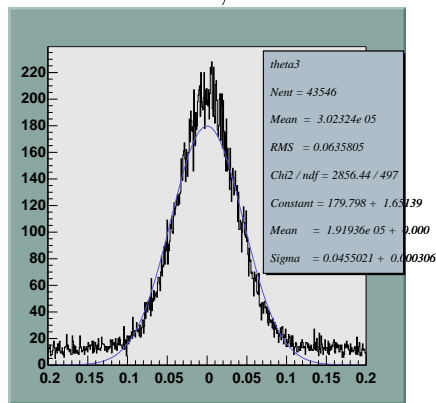
2 слой, $\Delta\phi$



2 слой, $\Delta\theta$



3 слой, $\Delta\phi$



3 слой, $\Delta\theta$

Рис. 14: Многократное рассеяние мюонов с энергией 1.5 ГэВ в веществе детектора.

5 Стендовые измерения

Перед установкой в детектор блоки мюонной системы проходят проверку на стенде. Проводится проверка работы камерной электроники, герметичности блоков. Снятие нагрузочных характеристик, измерение эффективности и продольного разрешения производится на событиях от космических частиц. Стенд представляет собой этажерку, в которую несколько

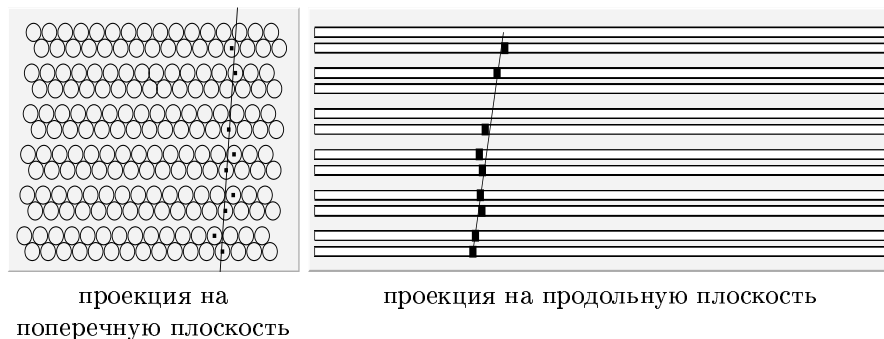


Рис. 15: Событие от космической частицы на стенде. Отмечены срабатывания, линией показан восстановленный трек.

блоков укладываются один над другим. Система сбора данных аналогична используемой в детекторе. Запуск ВЦП осуществляет имитатор первичного триггера при срабатывании хотя бы одного канала.

5.1 Измерение эффективности

Для каждого набора блоков записывалось несколько сот тысяч космических событий. Для измерения эффективности из этих событий отбирались такие, в которых в верхнем и в нижнем блоках было по крайней мере по одному срабатыванию. В таких условиях эффективность остальных блоков определяется как доля событий, в которых они сработали; эффективности верхнего и нижнего блоков не измеряются.

Измеренная таким методом эффективность регистрации составляла не менее 99.5% [12].

Небольшую систематическую погрешность вносят события, в которых через блоки одновременно прошло несколько космических частиц. Как показывают оценки, она составляет не более 0.5%, и в рамках задачи контроля работоспособности блоков ею можно пренебречь.

5.2 Восстановление треков космических частиц

Для определения координатного разрешения системы необходимо проводить реконструкцию треков космических частиц. При работе детектора процедура реконструкции может быть использована для калибровки других систем детектора, а также для поиска изломов треков.

После первичной обработки событие в мюонной системе представляет собой набор точек в трёхмерном пространстве. При этом координаты (x_i, y_i) соответствуют оси i -ой сработавшей трубки.

5.2.1 Подгонка трека

Определение параметров трека космической частицы (предполагается, что трек прямой) производится методом наименьших квадратов в два этапа.

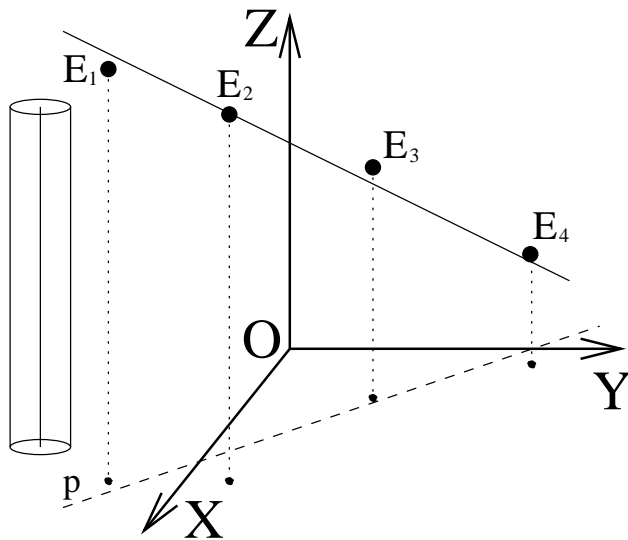


Рис. 16: Иллюстрация восстановления трека. E_1, E_2, E_3, E_4 – точки срабатываний, p – проекция восстановленного трека на плоскость OXY , перпендикулярную трубкам. Положение трубок показано слева.

Сперва определяются параметры проекции трека на поперечную к трубкам плоскость OXY (см. рис. 16). Проекция p ищется в виде $y(x) = a(x - \bar{x}) + \bar{y}$, поскольку искомая прямая, как можно показать, проходит че-

рез точку (\bar{x}, \bar{y}) , где $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$, (x_i, y_i) — координаты оси i -ой сработавшей трубки. Расстояние от i -ой точки прямой p

$$\Delta r_i^2 = \frac{(y(x_i) - y_i)^2}{1 + a^2},$$

где N — число подгоняемых точек. Тогда функция правдоподобия

$$L(a) = \sum_{i=1}^N \Delta r_i^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(a(x_i - \bar{x}) + \bar{y} - y_i)^2}{1 + a^2}$$

Её экстремум находится из уравнения

$$\frac{\partial L}{\partial a} = 0 = \sum_{i=1}^N \frac{2(x_i - \bar{x})(a(x_i - \bar{x}) + \bar{y} - y_i)(1 + a^2) - 2a(a(x_i - \bar{x}) + \bar{y} - y_i)^2}{(1 + a^2)^2}$$

и достигается в точках

$$a_{1,2} = \frac{-\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^2 - (y_i - \bar{y})^2)}{2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})} \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^2 - (y_i - \bar{y})^2)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}.$$

Полученная таким образом прямая p задаёт параллельную оси OZ плоскость, в которой ищется трек. Каждой точке (x_i, y_i) ставится в соответствие координата l_i вдоль прямой p . Зависимость $z(l)$ подгоняется обычным методом наименьших квадратов. Соответствующие формулы можно найти в [14].

Пример события с восстановленным треком показан на рис. 15.

5.2.2 Разделение многотрековых событий

Для выделения из целого события срабатываний, находящихся на одном треке, используется следующий алгоритм. Производится перебор всех возможных пар срабатываний. Для каждой пары вычисляются величины

n — число срабатываний, которые могут лежать на одном треке с ней, и $R = \sum_{i=1}^n \Delta r_i^2$ — расстояние от i -го срабатывания до прямой, проходящей через данную пару точек. Набор, имеющий наибольшее n и наименьшее R , считается принадлежащим одному треку и “вырезается” из события для дальнейшей обработки.

5.3 Измерение продольного разрешения

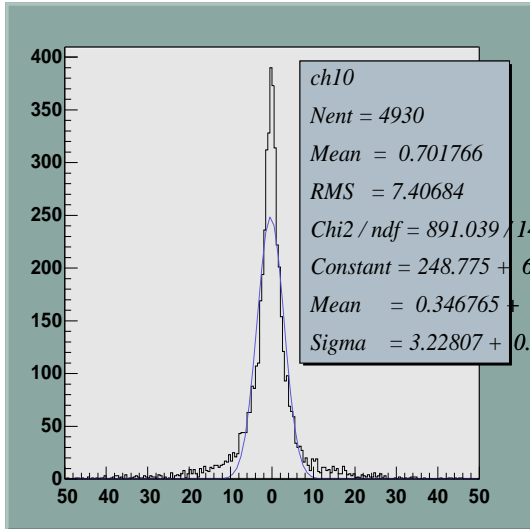


Рис. 17: Пример распределения Δz

Для определения продольного разрешения блоков системы производился набор событий от космических частиц. В каждом событии приведённым выше способом погонялись параметры трека пролетевшей частицы. Для каждого канала набирались распределения величины Δz_i — разницы z -координаты срабатывания в i -ом канале и z -координаты пересечения сработавшей трубки с восстановленным треком. Пример такого распределения приведён на рис. 17. Продольное разрешение (σ) составляло от 3 до 5 см для различных каналов системы. Основной вклад в него дают электроника системы и неточности калибровки. В дальнейшем улучшении разрешения нет необходимости, т.к. многократное рассеяние частиц в веществе детектора даст заметно больший вклад.

Для проверки работы приведённого выше алгоритма восстановления

треков было проведено моделирование. Моделировались прямые треки; при этом каждое срабатывание смещалось по продольной координате на случайную величину, имеющую нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1, 3, 5$ см. Затем для получившегося набора данных проводилось восстановление треков и измерение разрешения. Полученные значения продольного разрешения соответствовали заложенной в моделирование величине σ .

6 Заключение

В настоящее время блоки трёх внутренних слоёв мюонной системы прошли проверку на стенде и установлены в детектор. Эффективность регистрации блоков составляла не менее 99.5%, разрешение по продольной координате варьировалось от 3 до 5 см для различных каналов системы. Идёт подготовка к запуску системы в составе детектора.

Разработаны и опробованы процедуры калибровки системы и реконструкции космических событий. Написана часть программы моделирования детектора КЕДР, относящаяся к мюонной системе.

Проведено моделирование вероятности выхода мюонов и π -мезонов в слои системы в зависимости от энергии и моделирование величин многократного рассеяния мюонов в веществе детектора. Полученные значения позволяют сделать выводы о возможности разделения мюонов и π -мезонов в мюонной системе и о достаточности достигнутого разрешения по продольной координате для нормальной работы.

Авторы выражают глубокую благодарность Б.А. Шварцу за плодотворные обсуждения и консультации. Авторы также благодарят А.П. Соколова за помощь при наладке и ремонте блоков системы и А.Г. Шамова за помощь при настройке программного обеспечения.

А Приложение

Для вычисления давления насыщенных паров *n*-пентана может использоваться эмпирическая формула:

$$\log p = 7.00126 - \frac{1075.780}{T + 233.205} \quad (4)$$

где p — давление, 10^{-3} атм, T — температура, °С. Формула применима в интервале температур $-50 \div +58$ °С.

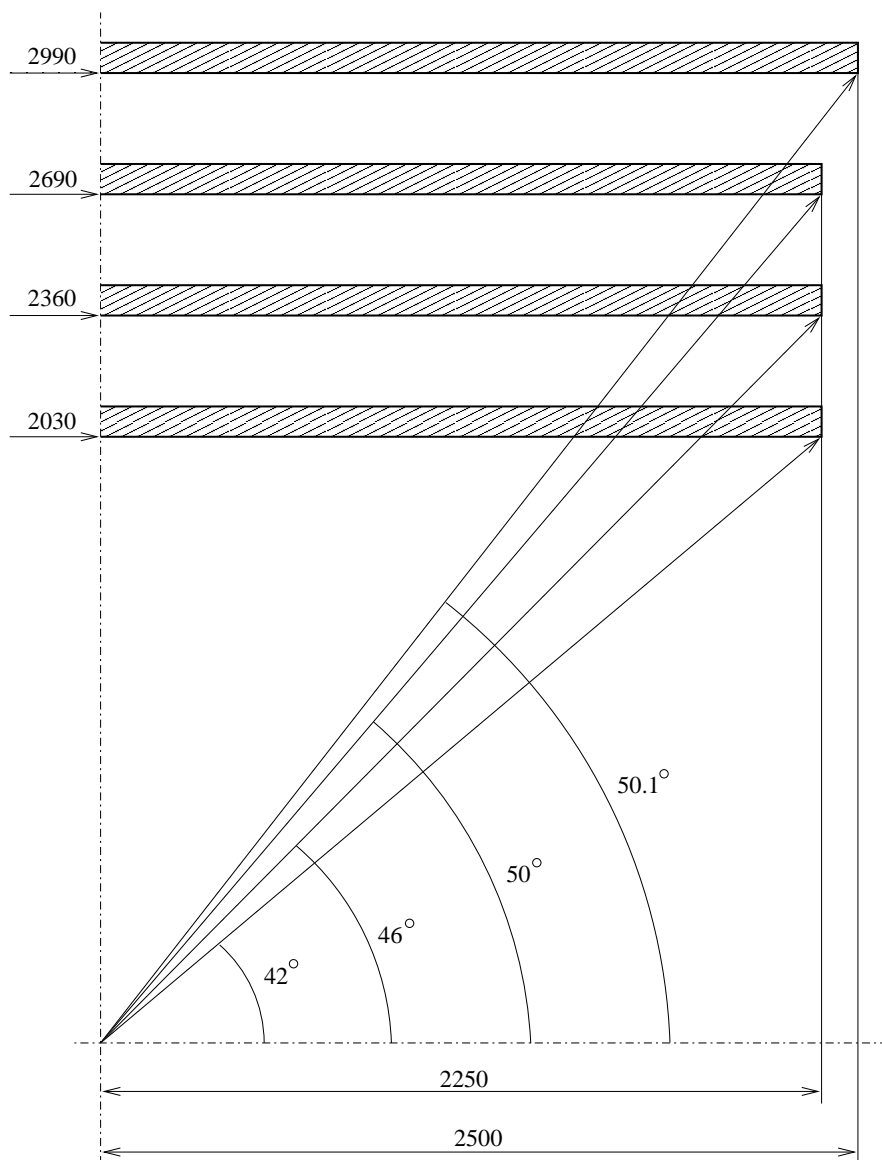


Рис. 18: Геометрические характеристики мюонной системы.

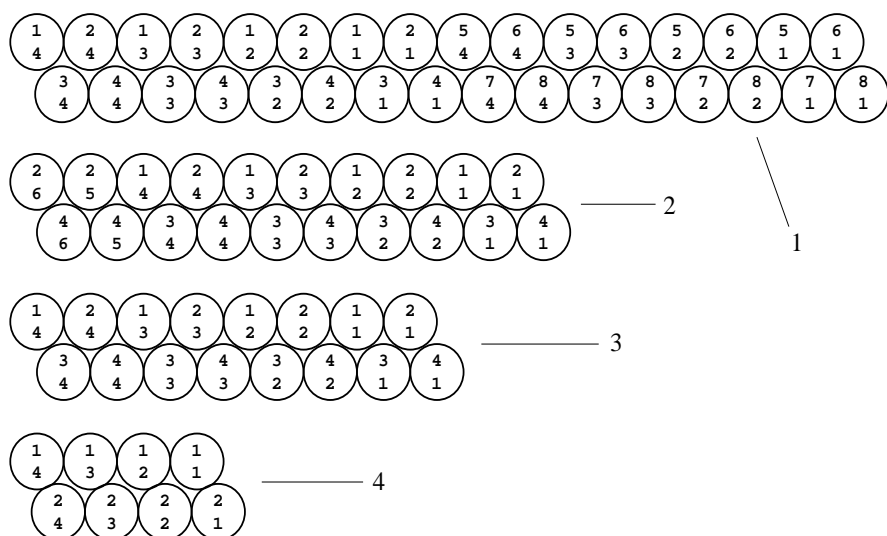


Рис. 19: Расположение трубок в блоках. 1 — ЦБ, 1ЦБ32, 2 — 2ЦБ20, 3 — 1ЦБ16, 4 — 2ЦБ8, 3ЦБ8. Цифры в трубках — $\frac{\text{номер канала}}{\text{номер трубки}+1}$.

Таблица 2: Расположение блоков системы в детекторе.

номер слоя	номер блока в слое			
	1	2	3	4
1	1ЦБ32	1ЦБ16	ЦБ	—
2	ЦБ	2ЦБ20	2ЦБ8	ЦБ
3	ЦБ	ЦБ	3ЦБ8	ЦБ
4	ЦБ	4ЦБ20	ЦБ	ЦБ

В верхнем октанте блоки нумеруются справа налево, если смотреть в направлении электронного пучка ВЭПП-4М. Полный номер блока в детекторе представляет собой трёхзначное число, первая цифра которого — номер октанта, вторая — номер слоя, третья — номер блока в слое.

Список литературы

- [1] *В.В. Анашин и др.* Проект детектора КЕДР. Труды международного симпозиума по координатным детекторам в ФВЭ, ОИЯИ (1988), 58.
- [2] *Г.Д. Алексеев и др.* ФЭЧАЯ, т. 13, вып. 3 (1982), 701.
- [3] *V.M. Aulchenko et al.* Mylar tubes for tracking. Preprint 84-166, INP SB AS USSR.
- [4] *В.М. Аульченко и др.* Стримерные трубки: измерение продольной и поперечной координат. Препринт 85-122, ИЯФ СО АН СССР (1985).
- [5] *А.Б. Номероцкий.* Дипломная работа “Годоскопический детектор мюонов”, НГУ, 1985.
- [6] *V.M. Aulchenko et al.* Nucl. Instr. and Meth., A252 (1986), 586.
- [7] *В.М. Аульченко и др.* Координатный детектор большой площади на стримерных трубках. Труды международного симпозиума по координатным детекторам в ФВЭ, ОИЯИ (1988), 132.
- [8] *В.М. Аульченко и др.* Информационные платы ТП, ΔT , Т2А системы сбора данных “КЛЮКВА”. Препринт 88-22, ИЯФ СО АН СССР (1988).
- [9] *V.V. Anashin et al.* Status Report "KEDR detector for VEPP4-M", 1990, INP, Novosibirsk.
- [10] *Т.К. Жанаберганов.* Дипломная работа “Тестирование модулей мюонной системы детектора КЕДР”, НГУ, 1990.
- [11] *В.Е. Лапаев.* Дипломная работа “Программа моделирования мюонной системы детектора КЕДР”, НГУ, 1995.
- [12] *А.М. Сухарев.* Квалификационная работа на соискание степени бакалавра “Измерение эффективности регистрации пробежных систем детекторов КМД-2 и КЕДР”, НГУ, 1998.
- [13] GEANT — Detector Description and Simulation Tool. Руководство пользователя.
- [14] *Букин А.О., Эйдельман С.И.* ЭВМ в планировании и обработке эксперимента.