



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

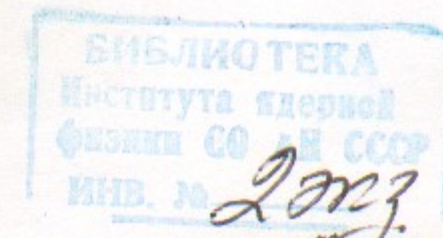
*А.64
1999*

Э.В. Анашкин, А.Е. Бондарь, Н.И. Габышев,
Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, П.П. Кроковный,
А.С. Кузьмин, И.Б. Логашенко, П.А. Лукин,
Т.А. Пурлац, Н.И. Роот, Н.М. Рыскулов,
В.П. Смахтин, Е.П. Солодов, А.И. Суханов,
Б.А. Шварц, М.А. Шубин, Г.В. Федотович,
Б.И. Хазин, Д.В. Черняк, С.И. Эйдельман

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА КМД-2

ИЯФ 99-1

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК

1999

Сибирское отделение Российской Академии наук

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

Э.В. Анашкин, А.Е. Бондарь, Н.И. Габышев,
Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, П.П. Кроковный,
А.С. Кузьмин, И.Б. Логашенко, П.А. Лукин,
Т.А. Пурлац, Н.И. Роот, Н.М. Рыскулов,
В.П. Смахтин, Е.П. Солодов, А.И. Суханов,
Б.А. Шварц, М.А. Шубин, Г.В. Федотович,
Б.И. Хазин, Д.В. Черняк, С.И. Эйдельман

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА КМД-2

ИЯФ 99-1

НОВОСИБИРСК

1999

Моделирование детектора КМД-2

Э.В. Анашкин, А.Е. Бондарь, Н.И. Габышев,
Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, П.П. Кроковный,
А.С. Кузьмин, И.Б. Логашенко, П.А. Лукин,
Т.А. Пурлац, Н.И. Рот, Н.М. Рыскулов,
В.П. Смазгин, Е.П. Солодов, А.И. Суханов,
Б.А. Шварц, М.А. Шубин, Г.В. Федотович,
Б.И. Хазин, Д.В. Черняк, С.И. Эйдельман

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

Данная работа представляет собой описание полного моделирования детектора КМД-2, сделанного на основе пакета GEANT.

CMD-2 detector simulation

E.V. Anashkin, A.E. Bondar, N.I. Gabyshev,
D.N. Grigoriev, V.F. Kazanin, P.P. Krovovny,
A.S. Kuzmin, I.B. Logashenko, P.A. Lukin,
T.A. Purlatz, N.I. Root, N.M. Ryskulov,
V.P. Smakhtin, E.P. Solodov, A.I. Sukhanov,
B.A. Shwartz, M.A. Shubin, G.V. Fedotovitch,
B.I. Khazin, D.V. Chernyak, S.I. Eidelman

The description of the total simulation of CMD-2 detector, based on GEANT is presented.

Содержание

1	Введение.	5
2	Моделирование с помощью GEANT — основные сведения	6
3	Первичное моделирование и распады частиц	10
4	Описание детектора КМД-2 в программе моделирования	12
4.1	Вакуумная камера	13
4.2	Дрейфовая камера	14
4.3	Z-камера	16
4.4	Цилиндрический калориметр на основе CsI	17
4.5	Торцевой калориметр на основе BGO	18
4.6	Мюонная система	19
4.7	Пассивное вещество магнитной системы детектора	20
5	Проведение частиц через детектор	22
6	Структуры данных моделирования детектора КМД-2	23
6.1	Формат банка MCEV	23
6.2	Формат банка частицы	25
7	Оцифровка данных систем детектора	27
7.1	Дрейфовая камера	27
7.1.1	Моделирование эффективности срабатывания проволочек	29
7.1.2	Моделирование координатного разрешения дрейфовой камеры в плоскости R-φ	33
7.1.3	Моделирование координатного разрешения дрейфовой камеры в Z проекции	35
7.2	Z-камера	37
7.3	Калориметр CsI и BGO	38
7.4	Мюонная система	38
7.5	Моделирование триггера детектора	39
8	Сравнение моделирования с экспериментом	40
8.1	Эффективность и разрешение координатной части детектора	40
8.2	Сравнение энергетического и координатного разрешения в калориметре CsI	44

8.3 Сравнение энерговыделения в калориметре для разных программ моделирования ядерного взаимодействия	45
9 Заключение	48
Приложения	50
А Карты для моделирования КМД-2	50
Б Первичные генераторы моделирования КМД-2	56
Список литературы	58

1 Введение.

С 1992 года в Институте ядерной физики им. Будкера ведутся эксперименты с Криогенным Магнитным Детектором (КМД-2 [1]) на накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М [2] в области энергий от 360 до 1400 МэВ в системе центра масс.

Эксперименты, проводимые на детекторе, в первую очередь направлены на изучение свойств легких векторных мезонов: ϕ , ρ и ω . Другой важной задачей является измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ во всем диапазоне энергий, необходимое для уточнения адронного вклада в поляризацию вакуума.

Неотъемлемой частью любого эксперимента в физике частиц является моделирование методом Монте-Карло. При изучении какого-либо физического процесса необходимо знать отклик детектора как на сам исследуемый процесс, так и на фоновые процессы. Основной задачей моделирования является вычисление эффективности регистрации событий и нахождение ожидаемых распределений по энергии, углам и другим физическим величинам. Кроме того, моделирование детектора необходимо для оптимизации триггера и проверки программ реконструкции событий.

Программа моделирования, в идеале, должна полностью имитировать физические процессы в детекторе, начиная с взаимодействия электрона и позитрона и получения набора частиц, вылетающих из места встречи, (**первичное моделирование**) и, далее, процессы взаимодействия рожденных частиц с веществом детектора (**вторичное моделирование**). Следующим этапом является **оцифровка**, т.е. моделирование отклика чувствительных элементов детектора. Результатом работы программы должен быть файл с "сырыми" данными такого же формата, как и экспериментальные события. Кроме того, для данных моделирования естественно записывать дополнительную информацию о структуре события, параметрах рожденных частиц и т.п. Дальнейшая обработка данных моделирования программами реконструкции практически не отличается от обработки экспериментальных событий, за исключением возможности доступа к дополнительной информации.

Таким образом, программа функционально распадается на три части: первичное моделирование, т.е. генерация параметров начальных частиц, вторичное моделирование, представляющее собой проведение частиц через элементы детектора, и, наконец, оцифровка и запись файла с выходной информацией. Основное время, как правило, затрачивается программой на втором этапе, так как имитация процессов, происходящих при прохождении частиц через вещество детектора, приводит к рассмотре-

нию большого количества вторичных частиц, рождаемых в таких процессах. Важными параметрами моделирования являются минимальные энергии частиц (электронов, фотонов и др.), при которых еще рассматривается их взаимодействие с детектором. Чем меньше эти пороговые энергии, тем точнее моделирование события, но тем больше количество вторичных частиц и, следовательно, время счета.

В данной работе описана программа полного моделирования детектора КМД-2 на основе пакета GEANT [3], основные свойства которого описаны в разделе 2. В разделе 3 обсуждаются особенности первичного моделирования для КМД-2, а в разделе 4 приводится общее описание детектора КМД-2 с точки зрения конструкции, геометрии и формата записей о срабатывании чувствительных элементов. В разделе 5 обсуждаются особенности проведения частиц через детектор КМД-2. Структуры данных моделирования описаны в разделе 6. Затем в разделе 7 обсуждаются алгоритмы формирования отклика систем детектора, а раздел 8 посвящен сравнению моделирования и эксперимента.

2 Моделирование с помощью GEANT — основные сведения

Пакет GEANT, созданный в CERN, активно применяется для моделирования экспериментов по физике высоких энергий в лабораториях всего мира. На основе такого интенсивного использования и тестирования GEANT постоянно обновляется. В настоящий момент в большинстве научных центров используется версия 3.21.

GEANT представляет собой набор программ, на основе которых создаются программы моделирования конкретного детектора. Можно использовать GEANT в интерактивной моде, что очень удобно для отладки программы моделирования, т.к. предоставляется широкий набор возможностей визуализации детектора и треков частиц. Однако, в рабочем режиме полное моделирование детектора производится в неинтерактивной моде. Необходимо иметь головную программу, в которой последовательно вызываются следующие подпрограммы:

- **GZEBRA** — инициализация системы ZEBRA [4], осуществляющей управление оперативной памятью при работе с GEANT
- **GINIT** — инициализация переменных GEANT
- **GFFGO** — чтение и интерпретация входных карт

- **GZINIT** — инициализация распределения памяти для системы ZEBRA
- **GPART** — создание структуры данных о частицах
- **GMATE** — заполнение таблицы набора веществ
- **UGEOM** — описание геометрии конкретной установки, задание чувствительных элементов
- **GPHYSI** — подготовка таблиц сечений различных процессов и потерь энергии для всех используемых веществ
- **GRUN** — цикл по моделируемым событиям
- **UGLAST** — завершение работы, запись итоговых файлов

Подпрограмма GRUN, осуществляющая цикл по событиям, работает следующим образом. В начале каждого события генерируются первичные частицы, образующиеся при столкновении электрона и позитрона, и их характеристики записываются в буфер ожидания. Затем для каждой очередной частицы из буфера ожидания определяется величина перемещения. Этот шаг определяется как минимальное значение между расстоянием до границы с другим блоком, пробегом до точки взаимодействия и ограничениями шага, задаваемыми при описании веществ. В процессе перемещения разыгрываются различные физические процессы, которые могут происходить с данной частицей, и ее параметры либо соответствующим образом изменяются (например, потери энергии в результате ионизации или изменение угла вследствие многократного рассеяния), либо частица исчезает в результате взаимодействия, образуя новые частицы (например, распад). Продукты взаимодействия (вторичные частицы) также могут быть записаны в буфер ожидания для дальнейшего проведения через детектор. Проведение частицы заканчивается, когда ее энергия становится ниже пороговой для частиц такого типа. Когда все частицы из буфера ожидания будут рассмотрены, цикл переходит на следующее событие.

Пользователь имеет возможность управлять моделированием события на различных уровнях с помощью подпрограмм, вызываемых GRUN на определенных этапах, используя необходимую информацию из common блоков GEANT.

- **GUKINE** — генерация кинематики события, т.е. задание точки вылета первичных частиц (вершины) и характеристик всех первичных частиц (тип частицы, три компонента импульса). Как правило, управление первичными генераторами осуществляется с помощью стандартной карты **KINE**, в которой задается тип генератора и необходимые параметры. Организация такого управления индивидуальна для моделирования конкретной установки. Формат карты **KINE** в программе моделирования детектора КМД-2 приведен в Приложении Б.
- **GUTREV** — управление моделированием события. Пользователь имеет возможность вставить необходимые действия в программу перед началом моделирования события (до вызова подпрограммы **GTREVE**, осуществляющей цикл по всем частицам события) и по окончании события. Как правило, перед событием инициализируются переменные, создаются банки данных с информацией о событии. В конце события вызываются программы оцифровки для чувствительных элементов детектора, заполняются выходные структуры данных.
- **GUTRAK** — управление проведением одной частицы. Перед началом проведения текущей частицы доступна информация о ее исходных параметрах, которую можно записать при необходимости в банки данных моделирования. После завершения проведения частицы через детектор можно проанализировать и записать отклик систем детектора на данную частицу, причину ее гибели и т.п.
- **GUSTER** — управление перемещением (шагом) частицы в веществе. На этом уровне пользователь определяет, какие из рожденных вторичных частиц проводить далее через детектор, и с каким статусом (в определенных случаях можно присвоить рожденным частицам статус "первичных" и записывать их не только в буфер ожидания для проведения через детектор, но и сохранять о них более детальную информацию в банках данных). Кроме того, важной функцией подпрограммы **GUSTER** является подготовка записей о срабатываниях чувствительных систем детектора. На уровне этой подпрограммы доступны `common` блоки с информацией об энерговыделении на данном шаге, других произошедших физических процессах, времени пролета частицы и т.п. Из таких данных формируются записи срабатываний (банки **HITS**) для систем детектора, которые по окончании события анализируются для моделирования отклика.

Одной из наиболее важных частей моделирования программой **GEANT** является проведение частиц через детектор, который представляет собой сильно неоднородную среду. Детектор описывается как набор блоков различных геометрических форм, каждый блок заполнен так называемой "средой", свойства которой задаются при описании детектора. Среда характеризуется не только типом вещества, но и наличием и распределением магнитного поля, ограничениями на величину перемещения.

При моделировании взаимодействия частиц с веществом **GEANT** учитывает следующие процессы:

- рождение e^+e^- пар фотонами
- рождение δ -электронов
- аннигиляция позитронов на лету
- тормозное излучение электронов, позитронов и мюонов
- взаимодействия адронов с ядрами
- распады частиц на лету
- ионизационные потери заряженных частиц
- многократное рассеяние
- Комптон-эффект на свободных электронах
- рассеяние заряженных частиц на электронах атомов
- фотоэффект на электронных оболочках атомов
- рассеяние мюонов на ядрах
- расщепление ядра, индуцированное фотоном
- рэлеевское рассеяние

Адронные взаимодействия могут моделироваться по выбору пользователя одной из программ моделирования адронных ливней: **GHEISHA** [9] или **FLUKA** [10, 11].

Управление физическими процессами (отключение каких-либо взаимодействий, выбор способа моделирования ионизационных потерь и т.п.), так же как и установка значений пороговых энергий для проведения электронов, фотонов и адронов осуществляется с помощью стандартных карт **GEANT** (см. Приложение А).

3 Первичное моделирование и распады частиц

В настоящий момент существует следующий набор подпрограмм для моделирования начальной кинематики физических процессов, регистрируемых КМД-2:

- **Двухчастичные процессы** без учета радиационных поправок $e^+e^- \rightarrow XY$, где X, Y — частицы, вылетающие из вершины с определенными значениями импульсов. Это простейшие генераторы образования двух частиц при известной полной энергии системы центра масс. В зависимости от параметра, задающего тип генерируемого процесса, выбираются следующие конечные состояния: e^+e^- , $\gamma\gamma$, $\eta\gamma$, $\mu^+\mu^-$, K^+K^- , $\pi^0\gamma$, $\pi^+\pi^-$, $K_S K_L$, $\eta'\gamma$. Параметрами для задания генератора двухчастичных процессов являются тип процесса, полная энергия, а также минимальный угол вылета частиц по отношению к оси пучков.
- **Процессы с учетом радиационных поправок.** На сегодняшний день в моделировании КМД-2 можно использовать генераторы с излучением фотона для процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\gamma)$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$. Работа над учетом радиационных поправок в других процессах ведется, и со временем соответствующие генераторы будут включены в программу моделирования КМД-2.
- **конверсионные распады.** Группа генераторов, описывающая конверсионные распады векторных мезонов, содержит следующие моды: ηe^+e^- , $\pi^0 e^+e^-$, $\eta\mu^+\mu^-$, $\pi^0\mu^+\mu^-$. Параметрами являются мода генератора, полная энергия, минимальный угол вылета частиц и способ моделирования формфактора в зависимости от q^2 (см. Приложение Б).
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Генератор образования трех пионов можно использовать в двух модах: через промежуточное состояние $\rho\pi$ и по фазовому объему. Параметры аналогичны предыдущим случаям.
- $e^+e^- \rightarrow \pi\pi\pi\pi$. Генератор образования четырех пионов по фазовому объему, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ или $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$.
- $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$.
- $e^+e^- \rightarrow \omega\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ для изучения распада $\phi \rightarrow \omega\gamma$, идущего с нарушением С-четности.

Моделирование распадов частиц также можно рассматривать как часть первичного моделирования, т.к. оно не зависит от описания детектора, и часто частица распадается еще до начала проведения через детектор. Для частиц, входящих в стандартный набор GEANT [3], предусмотрены моды распада и их вероятности (соответствующие таблицы можно найти в описании GEANT). В программе моделирования КМД-2 можно переопределить набор и вероятности распадов для любой частицы с помощью карты DTBn (см. Приложение А). Частица η' , не вошедшая в стандартный список частиц, добавлена в моделирование КМД-2 со свойствами (масса, время жизни и др.), соответствующими данным обзора свойств частиц [12].

При стандартном моделировании распадов частиц в GEANT как для двухчастичных, так и для трехчастичных распадов разыгрывается изотропное угловое распределение в системе центра масс, а затем делается преобразование Лоренца в лабораторную систему отсчета. Однако, угловые распределения частиц от трехчастичных распадов в таком подходе не описываются. Особенно наглядно это проявляется в случае Далиц распадов, например, $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$, где e^+ и e^- должны лететь под малым углом друг к другу, а не изотропно в системе покоя π^0 .

В моделировании КМД-2 реализованы свои собственные трехчастичные распады для следующих случаев:

- **Далиц распады** ($\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$, $\eta \rightarrow \gamma e^+e^-$).
Используется простейший феноменологический матричный элемент [13], значение параметра a из линейного разложения формфактора берется из [12] и равно 0.032 для случая с π^0 и 0 — для η .
- **Трехпионные распады К-мезонов** ($K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^+\pi^-$, $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0\pi^0$, $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$).
Моделируются с использованием стандартной параметризации из [12].
- **Полулептонные распады К-мезонов** ($K^\pm \rightarrow e^\pm\nu_e\pi^0$, $K^\pm \rightarrow \mu^\pm\nu_\mu\pi^0$, $K_L^0 \rightarrow \pi^\pm e^\mp\nu_e$, $K_L^0 \rightarrow \pi^\pm\mu^\mp\nu_\mu$).
Моделируются с использованием стандартной параметризации с учетом вклада только векторного тока [12]. Для всех полулептонных распадов К-мезонов параметр $\lambda_+ = 0.03$.
- **Трехпионные распады η -мезона** ($\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$).
Используется параметризация из [14] и значение параметров из [12].

- $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta, \eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\eta$

Моделирование этих распадов основано на параметризации из [15] со значениями параметров из [12].

- $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma, \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$

Используется простейшее феноменологическое выражение для матричного элемента в предположении $\rho\gamma$ промежуточного механизма.

4 Описание детектора КМД-2 в программе моделирования

При написании программы моделирования на основе GEANT важной частью является задание геометрии детектора: описание веществ и материалов, из которых состоит детектор, магнитного поля, описание частей детектора в виде блоков различной геометрической формы из стандартного набора GEANT, задание чувствительных блоков детектора и формата записей о срабатывании чувствительных элементов. Тщательное описание активных частей детектора (камеры, калориметры и т.п.) и пассивного вещества элементов конструкции необходимо для правильного учета физических процессов, происходящих с частицами при движении в детекторе. В то же время точное описание всех деталей конструкции реального детектора вряд ли представляется возможным. Описание геометрии и веществ детектора в программе моделирования всегда представляет собой некоторое приближение. Кроме того, подробное разбиение на множество блоков небольшого размера (например, описание каждой проволоочки в дрейфовой камере) значительно увеличивает процессорное время моделирования, т.к. при проведении частицы на каждом шаге анализируется расстояние от текущей точки до ближайших блоков, на основании чего выбирается величина следующего перемещения. Поэтому в программах моделирования сложных детекторов проволоочки в камерах задаются усредненно методом "размазывания" вещества проволоочек по всему объему камеры, т.е. изменением параметров среды газового объема таким образом, чтобы правильно воспроизвести многократное рассеяние на проволоочках. Подобным же образом поступают при описании кабелей, катушки и другого пассивного вещества. Точность описания геометрии детектора должна более или менее соответствовать точности моделирования процессов, происходящих в веществе.

Детектор КМД-2 в продольном и поперечном сечении представлен на Рис. 1.

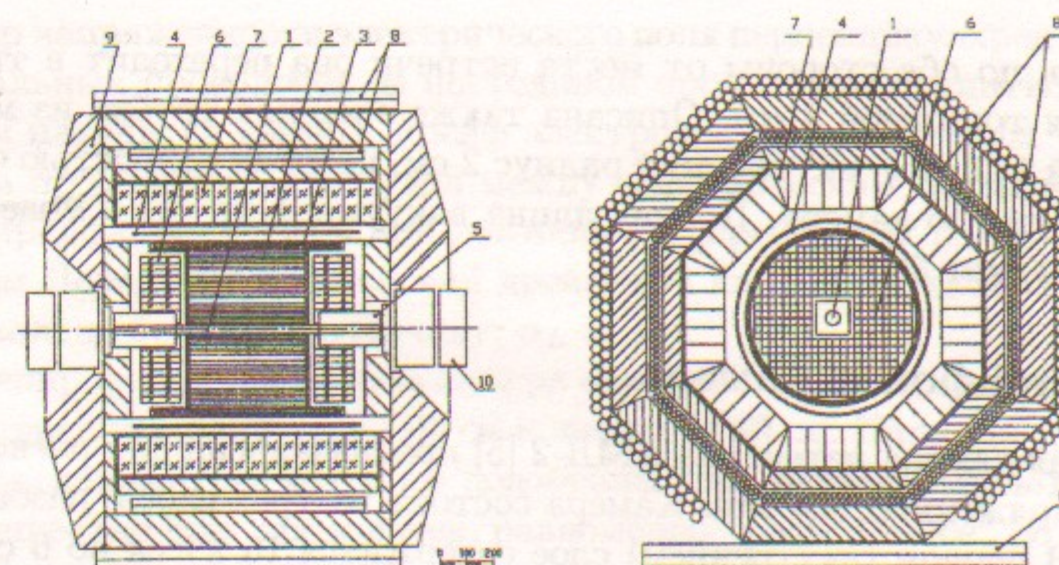


Рис. 1: Продольный и поперечный разрезы детектора КМД-2. 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовая камера; 3 — Z-камера; 4 — основной сверхпроводящий соленоид; 5 — компенсирующий соленоид; 6 — торцевой калориметр на основе BGO; 7 — цилиндрический калориметр на основе CsI; 8 — мюонная система; 9 — ярмо магнита; 10 — квадрупольные линзы.

Рассмотрим подробно описание детектора КМД-2 для GEANT. Начало координат совпадает с точкой рождения первичных частиц. Ось Z направлена по направлению движения пучка позитронов. Главный (по принятой терминологии "материнский") объем, в который помещаются все блоки детектора, представляет собой заполненный вакуумом параллелепипед с размерами $200 \times 200 \times 200 \text{ см}^3$. В центр материнского объема помещен объем цилиндрической формы с радиусом 37.5 см и продольным размером 100 см, внутри которого моделируется магнитное поле. По умолчанию — это однородное магнитное поле, направленное вдоль оси пучков, величина которого в кГс задается в картах данных (см. Приложение А). Предусмотрен вариант работы с магнитным полем, соответствующим реальному распределению магнитного поля в детекторе, которое несколько отличается от однородного, особенно вблизи компенсирующих соленоидов.

4.1 Вакуумная камера

Центральная часть вакуумной камеры описана в виде трубки из бериллия толщиной 770 мкм. Длина этой трубки 25.8 см, внешний радиус 1.7

см. Далее, по обе стороны от места встречи она переходит в трубу из алюминия толщиной 3 мм. Описана также внешняя трубка из майлара толщиной 150 мкм, внутренний радиус 2 см, которая полностью охватывает вакуумную камеру. Полная длина вакуумной трубы в моделировании составляет 50 см.

4.2 Дрейфовая камера

Дрейфовая камера детектора КМД-2 [5] предназначена для регистрации треков заряженных частиц. Камера состоит из трех слоев, разбитых на ячейки. В первом (внутреннем) слое содержится 16 ячеек по 6 сигнальных проволочек в каждой. Второй слой имеет 32 ячейки по 7 проволочек, третий — 32 ячейки по 6 сигнальных проволочек. Таким образом, в общей сложности дрейфовая камера содержит 512 сигнальных проволочек.

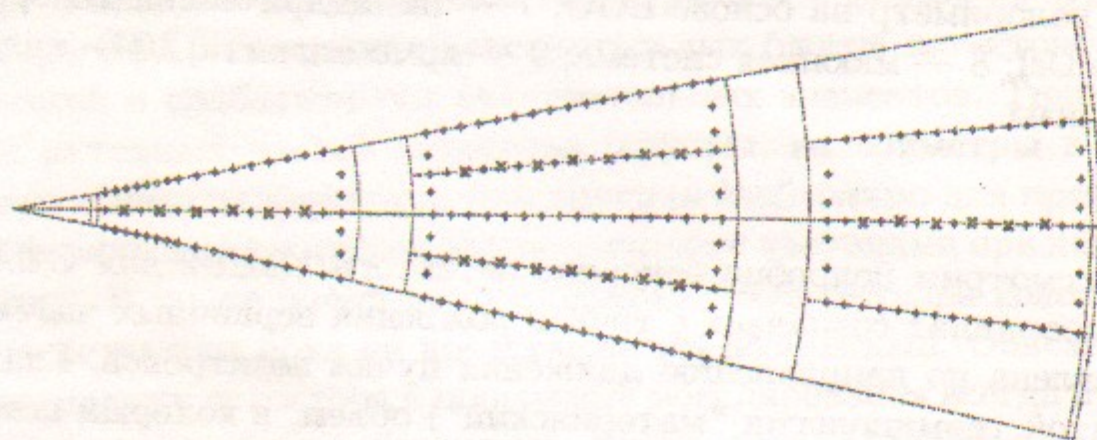


Рис. 2: Расположение проволочек в ячейках дрейфовой камеры. Изображена ячейка первого слоя, две ячейки второго и ячейка третьего слоя. Сигнальные проволочки показаны крестиками, полевые — точками.

Расположение проволочек показано на Рис.2. Сигнальные проволочки в ячейке расположены вдоль радиуса со смещением 300 мкм в левую и правую стороны через одну для устранения неопределенности в восстановлении координаты трека по времени дрейфа. Только две первые проволочки в ячейках первого слоя не смещены. Полевые проволочки расположены на границах ячеек. На них подаются напряжения, рассчитанные таким образом, чтобы электрическое поле в ячейке было близко к однородному. Между соседними сигнальными проволочками расположены потенциальные проволочки, которые служат для регулировки коэффициента газового усиления на сигнальных проволочках.

Вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости сигнальных проволочек. В постоянном продольном магнитном поле, в котором находится камера, дрейф электронов происходит под углом к плоскости проволочек. Этот угол между электрическим полем и направлением дрейфа электронов при движении в скрещенных полях называется углом Лоренца и для условий дрейфовой камеры детектора КМД-2 имеет довольно большую величину, $\alpha_L \approx 30^\circ$.

В моделировании дрейфовая камера описана в виде цилиндра длиной 44 см, внутренним радиусом 2.05 см и внешним 30 см. Цилиндр заполнен веществом, параметры которого подобраны так, чтобы учесть газовую смесь и вещество всех проволочек, равномерно "размазанное" по объему камеры. Внешняя обечайка представляет собой трубу из стеклотекстолита толщиной 2 мм, внутренний радиус 29.5 см, длина 44 см. Торцевые фланцы также описаны в виде стеклотекстолитовых колец толщиной 10 мм, внутренний и внешний радиусы 2.3 см и 29.7 см, расположены фланцы на расстоянии 22.4 см по обе стороны от центра. Камера разбита на три слоя, каждый из которых разделен на ячейки. Как уже упоминалось, сами проволочки в моделировании не описаны.

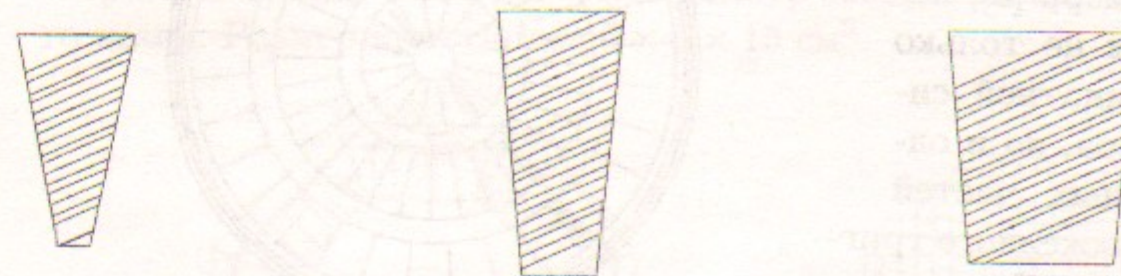


Рис. 3: Разбиение на чувствительные области ячеек первого, второго и третьего слоя дрейфовой камеры при угле Лоренца $\alpha_L = 30^\circ$.

Чувствительными элементами камеры являются области ячейки в форме трапеций, соответствующие каждой сигнальной проволочке (см. Рис. 3). Центр чувствительной области находится в точке расположения проволочки. Трапеция образуется двумя линиями, идущими под углом, равным углу Лоренца на расстоянии 3.3 мм по обе стороны от центра, а остальные размеры ограничиваются размерами ячейки. Вообще говоря, это даже не трапеция, а сумма двух трапеций по обе стороны от проволочки, которые не эквивалентны друг другу в случае крайних проволочек, когда линия, идущая под углом Лоренца, может пересечь верхнюю или нижнюю границу ячейки. Угол Лоренца и ширина чувствительной области задаются в специальной карте. Такой подход к описанию чувствительных областей, хотя и усложняет задание геометрии камеры, за-

метно упрощает вычисление времени дрейфа и амплитуды и представляется весьма естественным.

Трапециевидная область является основой для формирования записей о срабатываниях дрейфовой камеры. В такой записи, которая образуется отдельно для каждой заряженной частицы, проходящей через каждую чувствительную область, содержатся координаты пересечения частицей трапеции на входе и выходе из нее, время пролета частицы до попадания в область, номер проволоочки, суммарная выделившаяся энергия внутри чувствительной области. При оцифровке события на основе информации, сохраненной в виде таких записей, формируется отклик дрейфовой камеры.

Расположение всех ячеек дрейфовой камеры показано на Рис. 4.

4.3 Z-камера

За дрейфовой камерой располагается двухслойная цилиндрическая пропорциональная Z-камера [6], которая является не только частью координатной системы детектора, но и одной из основных частей первичного заряженного триггера. Сегментация Z-камеры в азимутальном направлении соответствует сегментации дрейфовой камеры, т.е. каждый слой разделен на 32 сектора (см. Рис.4). Внешний слой сдвинут относительно внутреннего на половину ширины сектора.

Геометрия Z-камеры в GEANT также цилиндрична и представлена в следующей таблице:

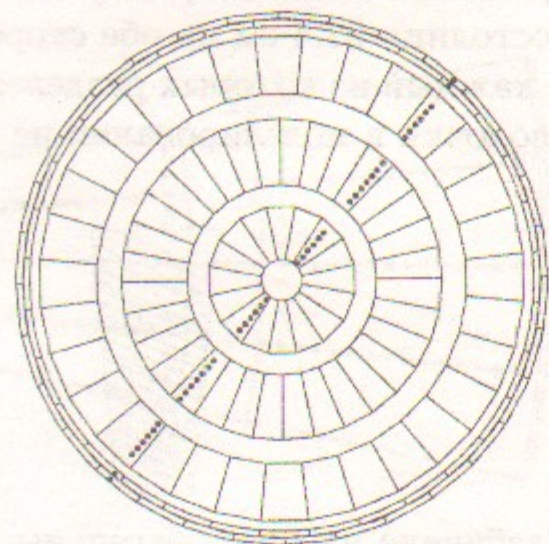


Рис. 4: Сегментация дрейфовой камеры и Z-камеры в азимутальной плоскости.

	внутренний радиус, см	внешний радиус, см	длина, см	позиция по Z, см
внутренний катод	30.540	30.640	79.0	0.0
внутренний слой	30.640	31.425	79.0	0.0
средний катод	31.425	31.525	79.0	0.0
внешний слой	31.525	32.335	79.0	0.0
внешний катод	32.335	32.435	79.0	0.0
торцы	30.40	32.435	0.75	±40.25

Вещество, из которого состоят все катоды — стеклотекстолит, а слой камеры заполнены газом, описанным в моделировании как CF_4 (фреон).

Чувствительным элементом является сектор каждого из слоев. Формат записи о срабатывании Z-камеры такой же, как и в случае дрейфовой камеры: координаты пересечения заряженной частицей сектора на входе и выходе из него, время пролета частицы до попадания в сектор, номер сектора, суммарная выделившаяся энергия.

4.4 Цилиндрический калориметр на основе CsI

Цилиндрический калориметр детектора КМД-2 [7, 8] расположен за сверхпроводящей обмоткой. Калориметр состоит из кристаллов йодистого цезия. Размер кристаллов $6 \times 6 \times 15 \text{ см}^3$.

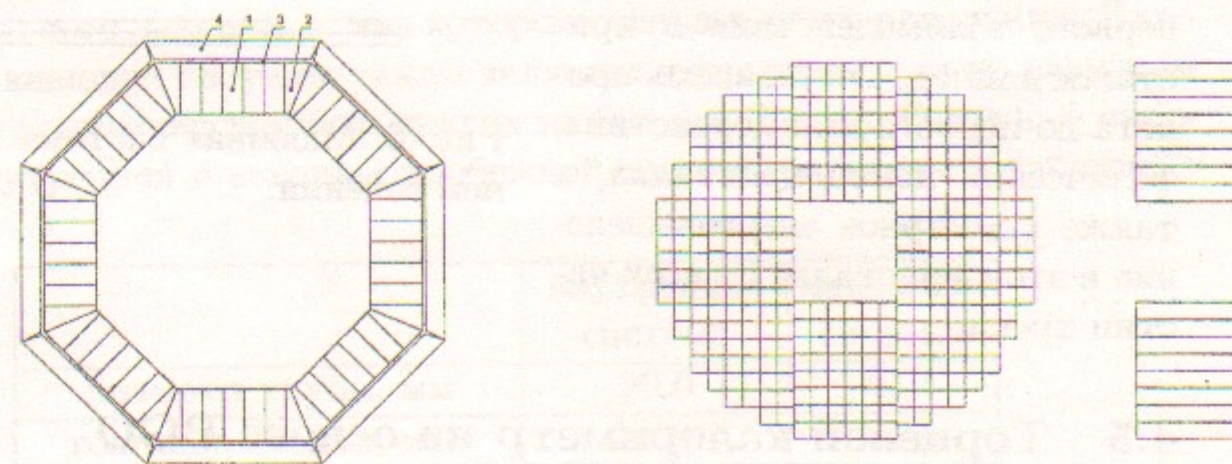


Рис. 5: Слева: Калориметр на основе CsI в поперечном сечении. 1 — кристалл стандартной формы, 2 — кристалл усеченной формы, 3 — стальная полоса, 4 — алюминиевая плита. Справа: Один из торцов BGO калориметра в поперечном и продольном сечении.

Калориметр состоит из восьми октантов. Каждый октант содержит семь модулей (линеек), закрепленных на дюралевой плите (описана как алюминиевая). В октант входит 5 стандартных линеек и 2 линейки из

кристаллов специальной, усеченной формы для обеспечения сопряжения октантов без зазоров. Линейка содержит 16 счетчиков CsI, закрепленных на стальной полосе. На Рис.5 показано поперечное сечение цилиндрического калориметра в том виде, как он описан в GEANT¹. Внутренний радиус калориметра — 39.8 см, длина линейки 98 см. Толщина алюминиевой плиты 5.5 см, стальной полосы — 1 см.

Полное число счетчиков составляет 892 (место четырех кристаллов занято трубой криостата).

Элементом записи срабатывания для калориметра, очевидно, является кристалл CsI. Запись образуется для каждого "трека", попавшего в вещество CsI. При этом под "треком" понимается частица, независимо от ее заряда, имеющая в терминологии GEANT статус "первичной", вместе с образованным ею каскадом вторичных частиц. В записи сохраняются координаты точки первого взаимодействия в кристалле данного трека, время пролета до первого взаимодействия, физический номер кристалла, а также суммарное энерговыделение в этом кристалле от всех частиц трека.

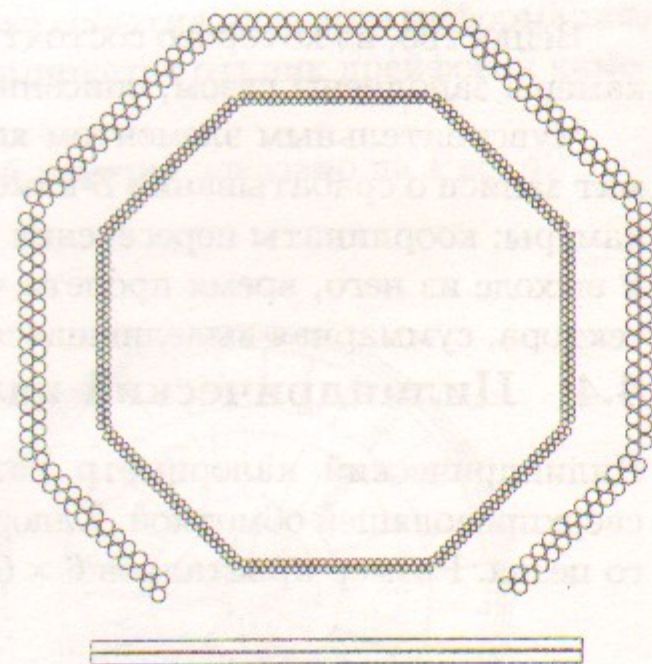


Рис. 6: Мюонная система в поперечном сечении.

4.5 Торцевой калориметр на основе BGO

Торцевой калориметр состоит из 680 кристаллов ортогерманата висмута $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO).

Кристаллы, из которых собирается калориметр, имеют прямоугольную форму, размеры кристалла $2,5 \times 2,5 \times 15$ см³.

Торцевой калориметр состоит из двух частей, с разных сторон от места встречи. Каждая часть представляет собой плотно уложенную матрицу из 340 кристаллов — см. Рис.5. Калориметр собирается из линеек по 6, 8 и 10 кристаллов.

Чувствительным элементом является один кристалл BGO. Запись о срабатывании полностью аналогична записи для цилиндрического калориметра CsI.

4.6 Мюонная система

Мюонная пробежная система является самой наружной системой детектора КМД-2 и служит для регистрации частиц, прошедших калориметр и ярмо магнита.

Система изображена на Рис.6. Она состоит из двух частей: внутренней и внешней, каждая из которых содержит восемь октантов. Октант представляет собой блок стримерных труб.

Трубы в блоках внутренней и внешней части пробежной системы расположены в два слоя, а слои сдвинуты друг относительно друга на полшага. Из-за расположения криостата во внутренней части имеется блок нестандартного размера, длина которого меньше, чем у остальных. Нижний блок внешней системы также является нестандартным по размерам и развернутым относительно других на 90° (см. Рис.6). Основные параметры внутренней и внешней пробежной систем приведены в таблице:

	внутренняя система	внешняя система
диаметр трубы, мм	20.0	40.0
толщина стенки, мкм	200.0	300.0
длина трубы, см (стандартный блок)	89.5	115.0
длина трубы, см (нестандартный блок)	79.5	140.0
шаг в слое, см	2.25	4.38
сдвиг между слоями, см	1.8	3.48
число труб в блоке	48	32
полное число труб	384	232

¹Все рисунки элементов детектора, приводимые в данной работе, получены из программы моделирования КМД-2 с помощью стандартных средств GEANT — и поэтому иллюстрируют геометрию, которая была внесена в программу.

При описании мюонной системы в моделировании трубы располагались внутри прямоугольных блоков, заполненных вакуумом, которые затем позиционировались в цикле с соответствующей матрицей поворота. Эти блоки пересекаются между собой, поэтому описаны с ключом 'MANY'. При этом, как видно из рисунка, сами трубы мюонной системы не пересекаются. Вещество стенок труб описано как железо, а в качестве газа, заполняющего трубки, в программе моделирования используется просто воздух.

Чувствительным элементом для срабатываний мюонной системы является объем газа внутри трубки. Запись о срабатывании содержит координаты пересечения трубы на входе и выходе частицы, время пролета до трубы, номер трубы, а также номер канала, соответствующего связке труб.

4.7 Пассивное вещество магнитной системы детектора

Катушка основного магнита, компенсирующие соленоиды и ярмо магнита (см. Рис. 7) занимают заметную часть детектора.

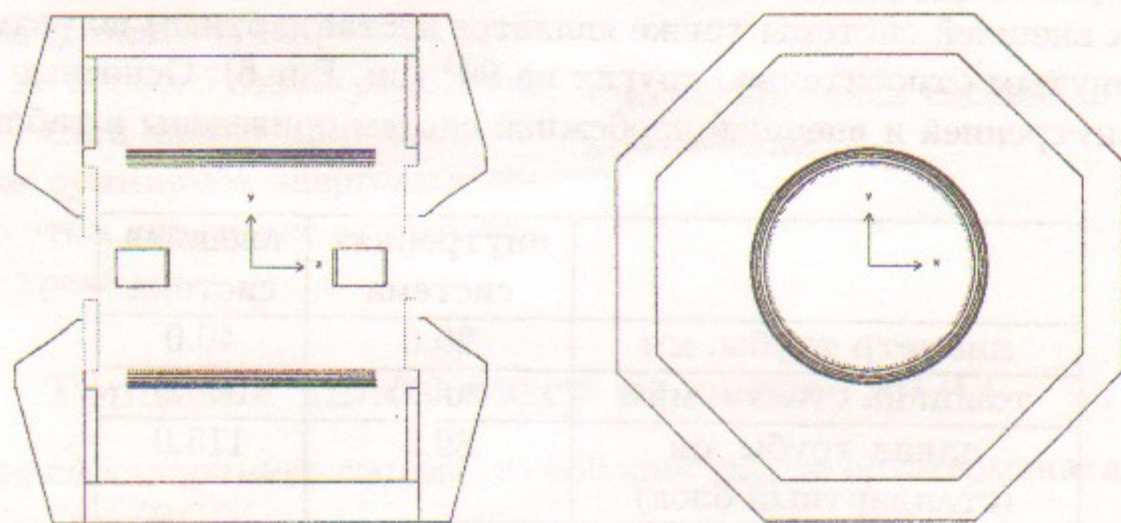


Рис. 7: Вещество магнитной системы детектора.

Ярмо магнита и сопутствующие торцевые конструкции описаны в виде, изображенном на рисунке, и состоят из железа. Катушка описана в виде чередующихся цилиндров длиной 80 см, представленных в следующей таблице:

внутренний радиус, см	внешний радиус, см	вещество
33.0	33.2	алюминий
34.0	34.15	алюминий
35.5	35.66	медь
35.66	35.693	свинец
36.5	36.657	железо
37.5	37.65	алюминий
38.1	38.4	алюминий
36.5	36.657	железо
35.5	35.66	медь

Каждый из компенсирующих соленоидов представляет собой следующую конструкцию. Это параллелепипед из алюминия длиной 16 см по оси Z и поперечными размерами $12 \times 12 \text{ см}^2$ с цилиндрическим отверстием вдоль Z радиусом 5.4 см. К алюминиевому блоку пристыкован со стороны места встречи блок из железа такой же геометрии в поперечном направлении, но длиной 1 см. Внутри компенсирующих соленоидов описана соответствующая часть вакуумной трубы из алюминия толщиной 3 мм, внешний радиус 2 см. Катушка компенсирующего магнита описана в виде вложенных цилиндров:

внутренний радиус, см	внешний радиус, см	вещество
2.50	2.85	специальная смесь
2.90	3.25	специальная смесь
3.30	3.65	специальная смесь
4.1	4.2	железо
4.3	4.4	железо
4.5	4.6	железо
4.7	4.8	железо
5.1	5.4	железо

В качестве специальной смеси берется состав из железа, меди, олова и свинца с весами 0.2442, 0.5578, 0.0994 и 0.0986 соответственно. Плотность смеси задана 8.65 г/см^3 . Такое описание позволяет правильно задать количество вещества в катушке, реально представляющей из себя гораздо более сложную конструкцию.

5 Проведение частиц через детектор

Процессы, происходящие с частицами в детекторе, величина перемещения в веществе, потери энергии полностью определяются заданием геометрии и вещества детектора, а также входными картами данных GEANT.

Управление проведением через вещество производится с помощью программы GUSTEP, вызываемой на каждом шаге. Основные действия, производимые данной подпрограммой в моделировании КМД-2, следующие:

- Обработка вторичных частиц, рожденных на данном шаге. Частицы, рожденные в различных процессах, могут по разному включаться в дальнейшее рассмотрение для проведения. Программа моделирования КМД-2 с этой точки зрения имеет следующие особенности:
 - нейтрино любых типов выключаются из дальнейшего рассмотрения
 - частицы, рожденные в результате распада или на стенках вакуумной трубы, получают статус "первичных".
- Заполнение записей о срабатываниях. На каждом шаге анализируется, не находится ли частица в каком либо из чувствительных блоков, и заполняются соответствующие записи — суммируется энергосодержание, запоминаются координаты пересечения границ и т.п.
- Заполнение структур данных моделирования. В процессе проведения частиц готовится информация для занесения в банки данных о моделировании — для "первичных" частиц запоминаются ссылки к материнским частицам для последующего формирования дерева частиц, заполняются маски срабатывания, точка гибели и др.

Моделирование КМД-2 можно производить в два этапа. Первый этап представляет собой проведение через детектор. Если моделирование ограничивается этим этапом, то выходной файл содержит для каждого события банк записей о срабатываниях (стандартные банки GEANT с именем HITS) и структуры данных моделирования. Второй этап представляет собой оцифровку и подготовку данных о физическом отклике детектора. В выходной файл записываются сырые данные в том же формате, что и экспериментальные, а также структуры данных моделирования. Естественно, можно производить моделирование сразу до конечного этапа, не сохраняя промежуточные записи о срабатываниях.

6 Структуры данных моделирования детектора КМД-2

Выходной файл программы моделирования может содержать следующие структуры данных:

1. **SIMP** — пустой банк верхнего уровня, задающий начало последовательной цепочки банков данных, каждый из которых соответствует одной из карт данных (имя банка, как правило, совпадает с ключевым словом карты). В этой структуре можно найти основные параметры, задающие условия работы GEANT (стандартные карты GEANT, задающие пороговые энергии, включение различных физических процессов, параметры генератора первичной кинематики события и т.п.), а также содержимое специальных карт моделирования КМД-2: величина магнитного поля, угол Лоренца, параметры для подпрограмм оцифровки. Структура **SIMP** обязательно содержится в начале выходного файла моделирования, независимо от того, проводится моделирование до этапа записи банков HITS или до уровня сырых данных. Причем в случае, когда моделирование проводится в два этапа, такая структура появляется дважды, т.к. на каждом этапе вводятся свои карты данных. Программа реконструкции сохраняет структуры **SIMP**, перенося их без изменений в начало выходного файла реконструированных событий.
2. **HITS** — стандартный банк данных GEANT с информацией о срабатываниях частиц в чувствительных элементах детектора.
3. **MCEV** — содержит общую информацию о событии в целом и является вершиной дерева банков с информацией о частицах. Такое дерево воспроизводит дерево генерации частиц в событии (связи идут от материнских частиц к дочерним).
4. **CMD2** — содержит оцифрованные данные об отклике детектора точно в формате сырых данных, поступающих с КМД-2. Эта структура полностью определяется банками **HITS** и может генерироваться на втором этапе моделирования.

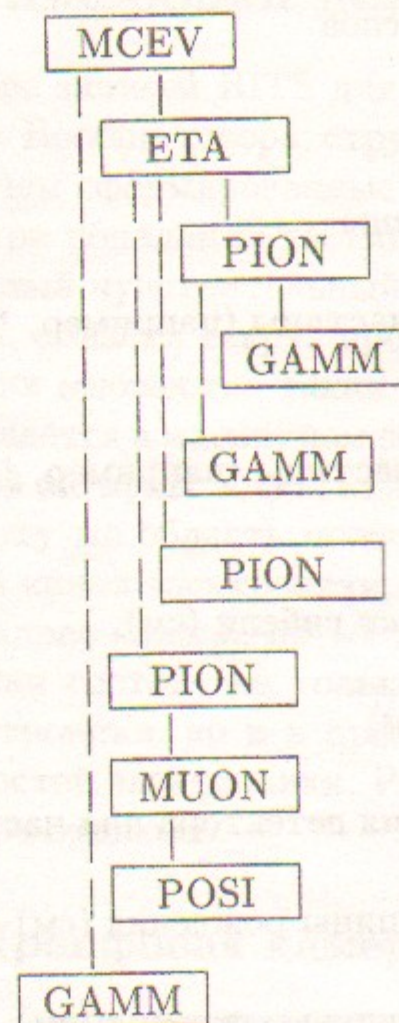
6.1 Формат банка MCEV

Сам банк верхнего уровня **MCEV** содержит общую информацию о событии моделирования (Monte Carlo Event).

Банк <MCEV>, 8 слов

Сдвиг	Тип данных	Содержимое
+1	INTEGER*4	NRNDM(1) начальные случайные числа
+2	INTEGER*4	NRNDM(2) для данного события
+3	INTEGER*4	полное число частиц
+4	INTEGER*4	число заряженных частиц
+5	INTEGER*4	число фотонов
+6	INTEGER*4	маска срабатывания детектора события: $10^4 \cdot \text{BGO} + 10^3 \cdot \text{MU} + 10^2 \cdot \text{CsI} + 10 \cdot \text{ZC} + \text{DC}$, где BGO, MU, CsI, ZC, DC равны 0 или 1
+7	REAL	энерговывделение в калориметре CsI (ГэВ)
+8	REAL	энерговывделение в калориметре BGO (ГэВ)

Банк MCEV имеет до 10 структурных связей к банкам частиц, получившим при генерации статус "первичных". Идентификатор банка частицы представляет собой переменную типа CHARACTER*4, совпадающую с первыми четырьмя символами имени частицы NAPART(1) из GEANT (COMMON /GCKINE/). Каждый банк частицы тоже может иметь до 10 структурных связей к банкам частиц, рожденных данной частицей. Например, структура MCEV может выглядеть следующим образом:



6.2 Формат банка частицы

Идентификатор банка различен для частиц разных типов, например, <GAMM> для фотона, <PION> для пиона (одно имя для π^+ , π^- и π^0), <ETA> для η -мезона и т.п.

Банк < >, 16 слов

Сдвиг	Тип данных	Содержимое
+1	INTEGER*4	GEANT код частицы
+2	INTEGER*4 (hollerith)	механизм гибели частицы (например, 'DCAY')
+3	INTEGER*4 (hollerith)	вещество гибели частицы (например, 'CSI')
+4	REAL	$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ точки гибели (см)
+5	REAL	Z точки гибели (см)
+6	INTEGER*4	маска срабатывания детектора для частицы
+7	REAL	X координата вершины рождения (см)
+8	REAL	Y координата вершины рождения (см)
+9	REAL	Z координата вершины рождения (см)
+10	REAL	компонента импульса P_X (ГэВ)
+11	REAL	компонента импульса P_Y (ГэВ)
+12	REAL	компонента импульса P_Z (ГэВ)
+13	REAL	полная энергия (ГэВ)
+14	REAL	энерговывделение в CsI (ГэВ)
+15	REAL	энерговывделение в BGO (ГэВ)
+16	REAL	время рождения частицы (нсек)

7 Оцифровка данных систем детектора

На основе записей HITS для каждого события моделируется отклик детектора. Вообще говоря, структура HITS содержит много больше информации, чем сформированные сырые данные. Запись срабатываний образуется при попадании частицы на вход чувствительного блока. Поэтому конкретный чувствительный элемент (сектор Z-камеры, кристалл калориметра, область вокруг проволочки в дрейфовой камере) может иметь в событии множество таких записей. Если частица с малым импульсом закручивается в магнитном поле, она многократно пересекает область одной и той же проволочки, каждый раз образуя новую запись HITS, кроме того, в эту же область может попасть и другая частица. Физически же это один канал электроники, и в конечную запись сырых данных войдут только адрес канала, время дрейфа и амплитуды. Задача подпрограмм оцифровки состоит не только в пересчете физических величин в каналы электроники, но и в правильной обработке срабатываний с учетом особенностей электроники. Рассмотрим оцифровку для каждой системы детектора отдельно.

7.1 Дрейфовая камера

Первым этапом оцифровки события является считывание записей HITS из банка. При этом устанавливается ограничение на число записей о срабатываниях в дрейфовой камере, равное 300. Если количество срабатываний дрейфовой камеры в событии превышает этот порог, то считываются первые 300 и выдается соответствующее сообщение.

Следующим этапом оцифровки является сортировка записей по номерам проволочек, т.е. определяются группы срабатываний для каждой проволочки дрейфовой камеры. Здесь также имеется ограничение на число записей с одной и той же проволочки — не более 20. При большем количестве берутся только первые 20. Очевидно, что при таком большом количестве попаданий в одну проволочку, правильное моделирование отклика детектора практически невозможно.

Следующий уровень — оцифровка одной проволочки, формирование отклика каналов детектора, соответствующих данной конкретной проволочке. В реальном эксперименте каждая сигнальная проволочка дрейфовой камеры детектора КМД-2 выдает информацию из шести слов: адрес временного канала, время, адрес первого амплитудного канала, амплитуда A_1 , адрес второго амплитудного канала, амплитуда A_2 .

В моделировании стоит задача правильно определить время дрейфа

ионизации до проволоочки. Запись HITS содержит координаты пересечения треком чувствительной области на входе и выходе. В настоящий момент используется следующая весьма упрощенная модель вычисления расстояния L_{dr} от трека до проволоочки: трек внутри чувствительной области представляется прямой линией, соединяющей точки входа и выхода, а расстояние до точки расположения проволоочки вычисляется как расстояние от этой прямой вдоль направления угла Лоренца. Время, измеряемое дрейфовой камерой, вычисляется по формуле:

$$T_{dr} = T_0 - TOF - \frac{L_{dr}}{V_{dr}},$$

где T_0 — время, привязанное к срабатыванию триггера, TOF — время пролета трека до попадания в чувствительную область, V_{dr} — скорость дрейфа.

Перед определением времени к L_{dr} добавляется поправка, соответствующая координатному разрешению дрейфовой камеры. Подробное обсуждение моделирования координатного разрешения дрейфовой камеры вынесено в отдельный подраздел 7.1.2.

Кроме того, после вычисления длины дрейфа определяется вероятность несрабатывания проволоочки, и, в соответствии с этой вероятностью, сигнал от данной проволоочки либо записывается в файл, либо точка считается потерянной. Моделирование эффективности описано в подразделе 7.1.1.

В эксперименте координата Z дрейфовой камеры определяется методом деления заряда по амплитудам с разных концов проволоочки. В моделировании стоит обратная задача: имея координату срабатывания Z и амплитуду (энергия, выделившаяся в чувствительной области около проволоочки), нужно вычислить значения амплитуд A_1 и A_2 . Перед таким вычислением в координату Z добавляется поправка, описывающая разрешение (см. подраздел 7.1.3). Затем амплитуды вычисляются по формуле:

$$A_1 = A \cdot \frac{1-R}{2}, A_2 = A \cdot \frac{1+R}{2}, \text{ где } A \text{ — полная амплитуда на проволочке, } R = R_{min} + (R_{max} - R_{min}) \cdot \frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}}, Z_{min} = -23.05, Z_{max} = 23.05, R_{min} = -0.8, R_{max} = 0.8.$$

В случае неоднократного срабатывания одной проволоочки в качестве времени выбирается максимальное из всего набора срабатываний, оцифрованных по описанной процедуре. Амплитуды же суммируются для всех срабатываний, отличающихся от максимального времени не более чем на 300 нсек.

Заключительным этапом оцифровки является перевод полученных значений амплитуд и времени из ГэВ и нсек в число каналов электро-

ники, определение соответствующих адресов и подготовка записи в банк сырых данных. Время в числе каналов определяется из расчета 2 нсек на канал. Коэффициенты перевода амплитуды из ГэВ в число каналов задаются во входных картах. Кроме того, учитывается ограниченный диапазон электроники, т.е. при превышении 4096 каналов происходит сброс амплитуды и отсчет с нуля.

7.1.1 Моделирование эффективности срабатывания проволоочки

Потери эффективности в дрейфовой камере возникают из-за поглощения электронов первичной ионизации в газе и краевых эффектов в ячейке. Для правильного учета в моделировании неэффективности дрейфовой камеры в течение эксперимента проводилась следующая процедура. Отбирались события упругого e^+e^- рассеяния с двумя хорошо восстановленными треками в дрейфовой камере, имеющими продолжение в Z -камере. Каждый из таких треков имеет достаточно большой импульс (510 МэВ для данных в области ϕ мезона) и должен вызывать срабатывания всех 19 проволоочек дрейфовой камеры, расположенных на разных радиусах. Реально трек иногда имеет "пропавшие" точки, причем для реконструированного трека легко вычислить, на каком расстоянии от проволоочки должна была находиться первичная ионизация. По отобранным событиям упругого рассеяния изучалась вероятность потери срабатывания для трека e^+ в зависимости от угла φ внутри ячейки, характеризующего расстояние дрейфа ионизации до проволоочки. Выбирался трек именно с положительным знаком заряда, потому что при условиях набора данных детектором КМД-2 (отрицательное значение магнитного поля) кривизна положительно заряженного трека соответствует направлению угла Лоренца. В этом случае трек, пересекая границу ячеек, вызывает срабатывание одной проволоочки на одном уровне по радиусу, в то время как трек с отрицательным зарядом иногда будет вызывать срабатывание двух проволоочек одного уровня в соседних ячейках, что усложняет алгоритм вычисления эффективности. Таким образом, изучались распределения по вероятности срабатывания от трека e^+ , усредненные для проволоочек, расположенных на одном радиусе. Всего получалось 19 таких спектров для каждого из слоев дрейфовой камеры. Причины потерь срабатываний грубо можно разделить на следующие:

- Из-за большого значения угла Лоренца на некоторых проволоочках геометрически возникает область неэффективности, что можно ви-

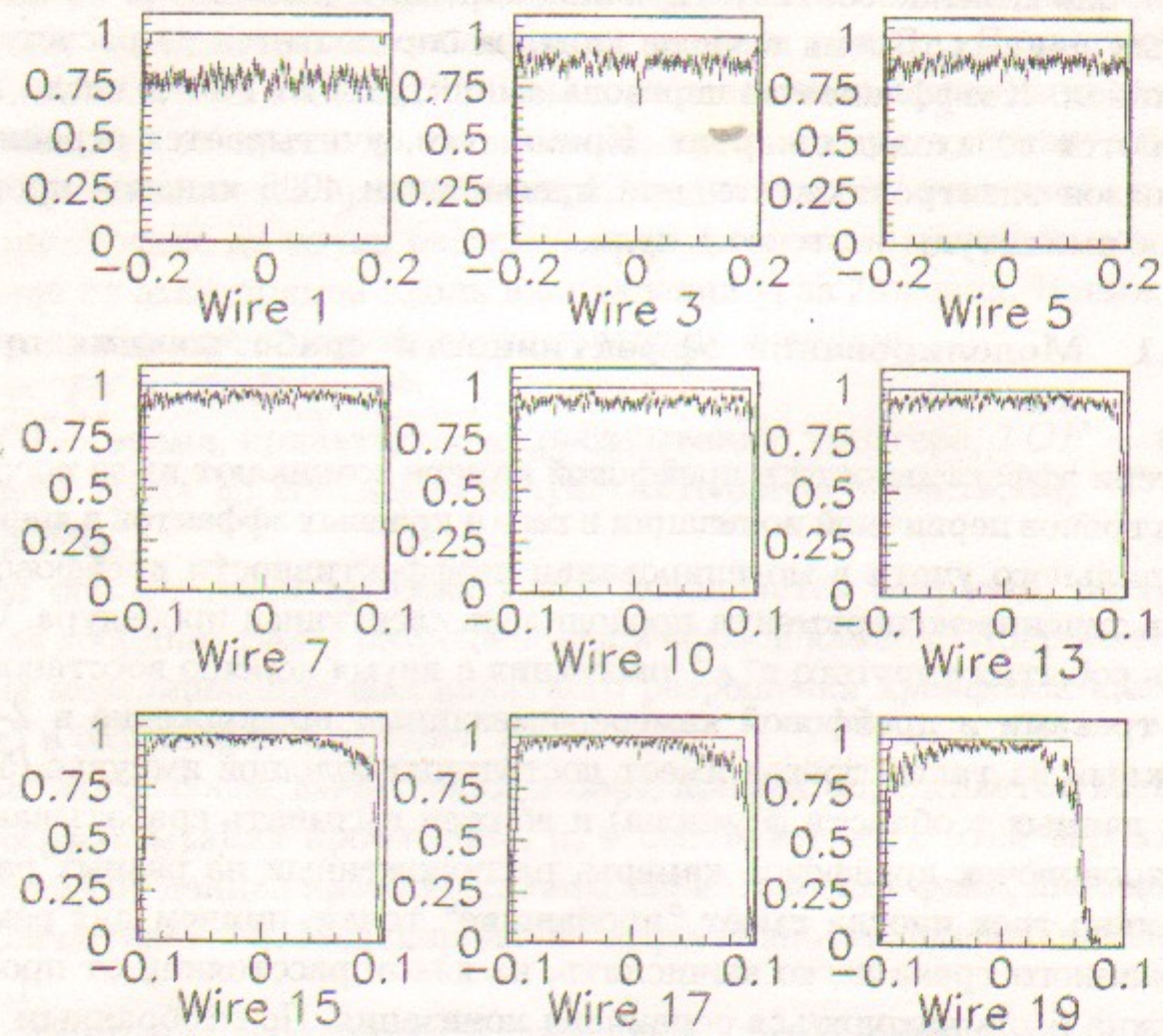


Рис. 8: Вероятность срабатывания проволочек дрейфовой камеры данных 1996 года в зависимости от угла φ в ячейке для проволочек, расположенных на разных радиусах. Точки с ошибками — эксперимент, сплошная линия — моделирование, учитывающее только геометрические факторы.

деть из Рис.3. Этот эффект автоматически учитывается в моделировании при правильном задании значения угла Лоренца. Величина угла Лоренца подбиралась для описания экспериментальных данных по эффективности дальше от места встречи проволочки (19 слой). Для данных 1996 года при скорости дрейфа 0.0045 см/нсек угол Лоренца равен 28° .

- Из-за малой длины трека при пересечении края чувствительной области. Срабатывание в моделировании возникало бы, даже если трек слегка задел чувствительную область. Поэтому была введена поправка, учитывающая зависимость эффективности проволочки от длины трека внутри чувствительной области.

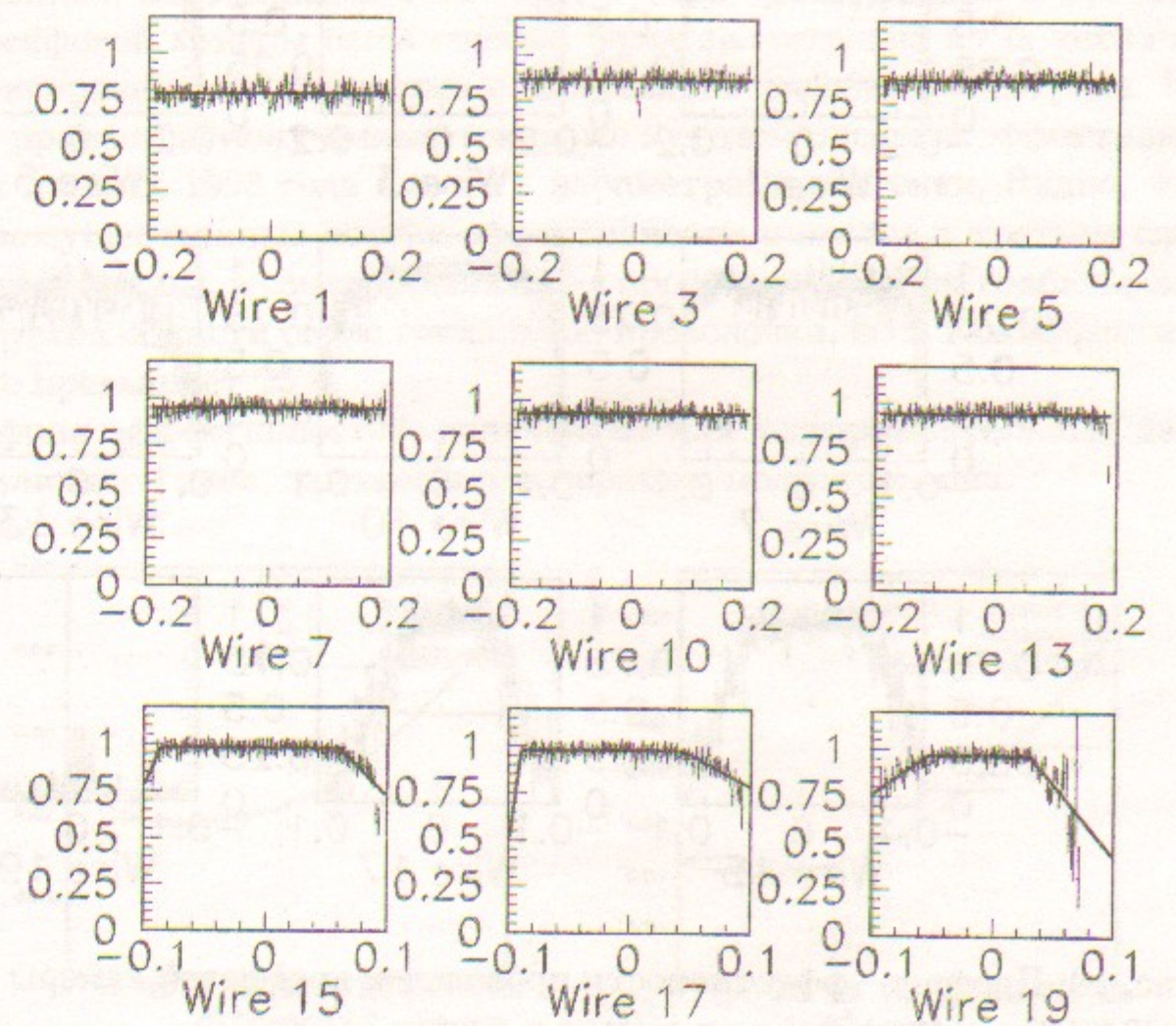


Рис. 9: Профиль эффективности проволочек дрейфовой камеры данных 1996 года в зависимости от угла φ в ячейке.

- И, наконец, потери эффективности, определяемые такими физическими процессами в дрейфовой камере, как поглощение в газе, флуктуации амплитуды и т.п. Именно эту часть необходимо получить из экспериментальных данных.

На Рис. 8 приведены распределения для вероятности срабатывания проволочек, полученные из данных последнего сканирования ϕ -мезона 1996 года. В первом ряду распределений представлены 3 проволочки из первого слоя дрейфовой камеры, в среднем ряду — из второго слоя, и в нижнем — третьего. Там же показаны соответствующие распределения из моделирования, полученные с учетом только длины трека в чувствительной области и геометрического фактора за счет угла Лоренца. Рисунок иллюстрирует правильность учета этих факторов, т.к. положение и наклон краев распределения хорошо описывается.

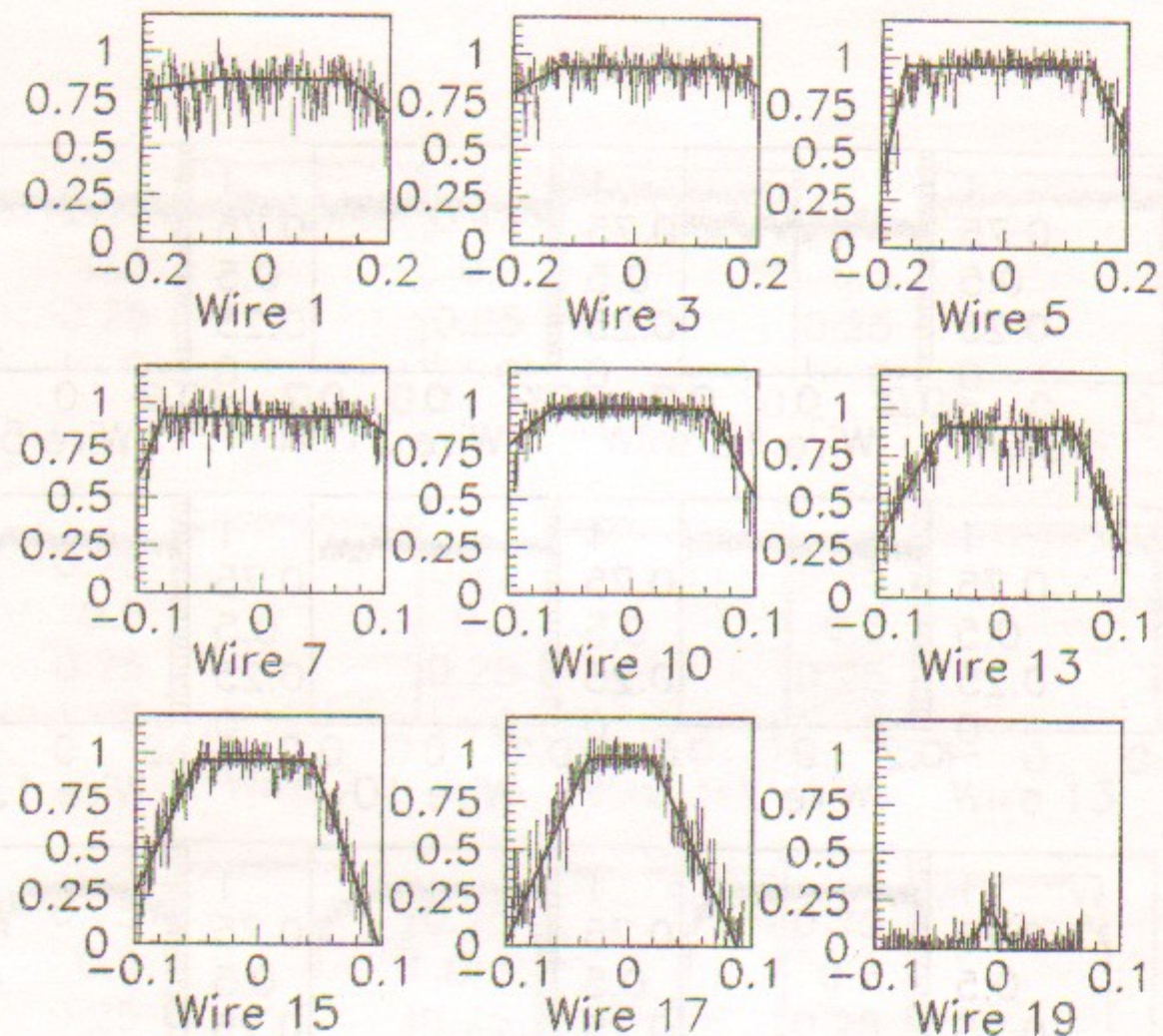


Рис. 10: Профиль эффективности проволочек дрейфовой камеры данных 1993 года в зависимости от угла φ в ячейке.

Эффективность проволочек за счет поглощения в газе и т.п. определяется как отношение приведенных на Рис. 8 гистограмм. На Рис. 9 приведены такие отношения вместе с функциями подгонки, которые и закладывались в моделирование для описания данных 1996 года. Можно видеть, что для первых двух слоев дрейфовой камеры эффективность не зависит от угла в ячейке, а в последнем, третьем слое уже наблюдаются краевые эффекты в ячейке и эффекты поглощения. В этом случае эффективность описывалась функцией, которая принимала постоянное значение в некоторой области углов, а за пределами этой области линейно уменьшалась.

Параметры, задающие эффективность проволочек, довольно заметно меняются в течение одного эксперимента (например, различные сканирования ϕ мезона 1996 года). Необходимо аккуратно усреднить эти параметры по заходам, используемым для конкретного анализа. Такая работа проводится, и в ближайшее время в программу будет введена дополнительная карта SCAN для более подробного разбиения данных на группы.

В данных, набранных в 1993 году, потеря срабатываний в третьем слое дрейфовой камеры была гораздо более значительна из-за технических неисправностей, связанных с замыканием внешнего электрода. На Рис. 10 приведены полученные таким же методом профили эффективности для данных 1993 года вместе с параметрами подгонки. Видно, что наиболее существенные потери эффективности имеются в третьем слое дрейфовой камеры, а самая дальняя 19-я проволочка вообще срабатывает лишь в узкой области около сигнальной проволочки, но и там эффективность не превышает 25%.

Профили эффективностей, полученные для экспериментальных данных различного типа, заложены в программу моделирования.

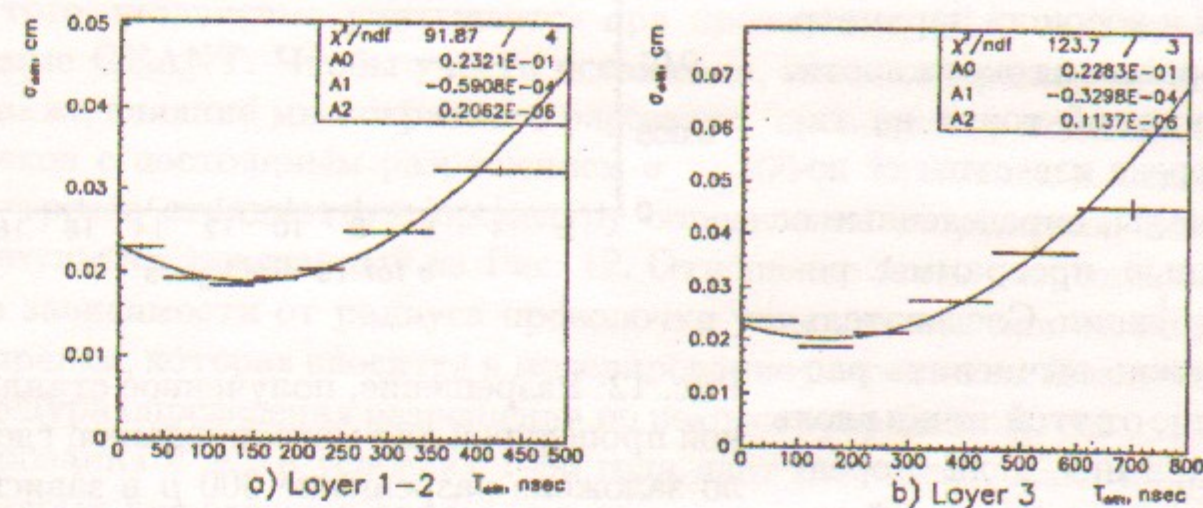


Рис. 11: Разрешение в зависимости от времени, измеренного в дрейфовой камере, для данных 1996 года. а) — для первых двух слоев камеры, б) — для третьего слоя.

7.1.2 Моделирование координатного разрешения дрейфовой камеры в плоскости R- φ

Параметры для моделирования координатного разрешения извлекаются из экспериментальных данных. Координатное разрешение дрейфовой камеры менялось в процессе работы детектора, поэтому группы данных, записанные в разное время, должны моделироваться со своими параметрами. Разбиение данных на группы, в которых вычисляются параметры разрешения, зависит от точности, предъявляемой к моделированию. Предварительно можно разбить данные на группы в соответствии с годом проведения эксперимента, пренебрегая изменениями в пределах одного года набора данных. В настоящий момент тип данных в моделировании задается с помощью карты YEAR (см. Приложение А). Возможно,

в дальнейшем для прецизионных экспериментов потребуется более детальное разбиение данных на группы.

Для изучения координатного разрешения дрейфовой камеры в $R-\varphi$ плоскости применялась следующая процедура. Для каждого набора данных проводился отбор "хороших" треков, т.е. выходящих из области пучка, имеющих достаточно большое число точек и хороший параметр χ^2 проведения окружности. Для каждой точки на таком треке известны ее координаты, определенные с помощью программы реконструкции. Следовательно, можно вычислить расстояние от этой точки вдоль направления угла Лоренца до восстановленной окружности, которое и характеризует разрешение камеры. Выделяя достаточно небольшую область по времени, можно построить соответствующее одномерное распределение по отклонению точки от восстановленного трека, которые хорошо описываются нормальным распределением, и в результате подгонки можно извлечь σ отклонения для фиксированной области по времени. Эти величины среднеквадратичных отклонений изучались в зависимости от времени, измеренного в камере, для проволочек, расположенных на разных радиусах. Такие распределения для проволочек первых двух слоев камеры не противоречат друг другу и могут быть объединены, третий слой несколько отличается как по диапазону допустимых времен, так и собственно по величине разрешения.

На Рис. 11 приведено разрешение в зависимости от времени дрейфа для типичного захода 1996 года. По этой же процедуре проверялись и другие заходы, набранные в 1996 году при сканировании ϕ -мезона. Параметры функции, описывающей разрешение (полином второй степени), различаются не более чем на 2-3%.

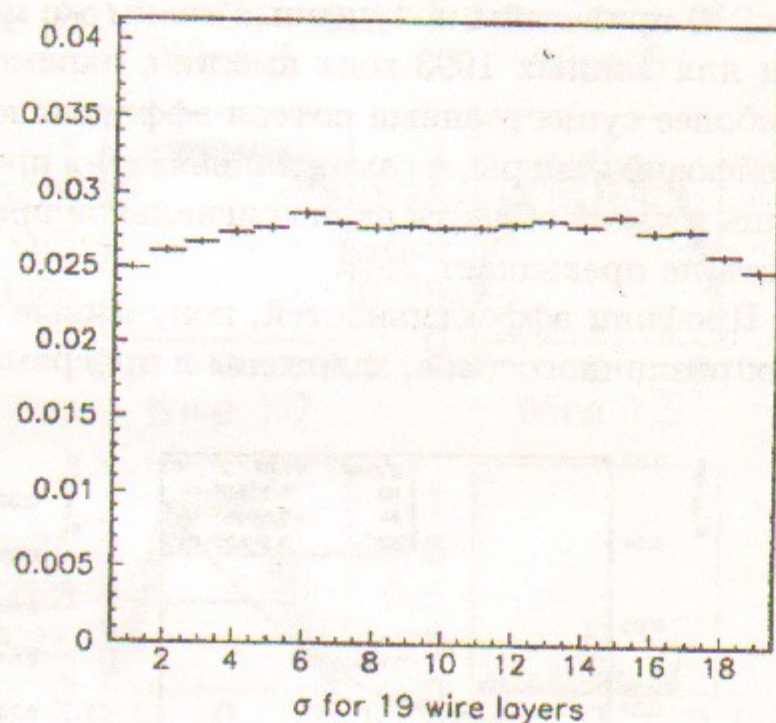


Рис. 12: Разрешение, полученное стандартной процедурой для моделирования, где было заложено разрешение 300μ в зависимости от номера слоя проволочки по радиусу.

Аналогично вычислялись зависимости разрешения от времени для данных 1993 года. Определение параметров разрешения в $R-\varphi$ проекции будет произведено для всех данных.

Необходимо заметить, что прямая подстановка разрешения, полученного из экспериментальных данных, в моделирование не вполне корректна, т.к. вычисление отклонений точек от трека происходит после подгонки трека программой реконструкции, что несколько занижает истинное разрешение из-за конечного числа точек, по которым подгоняется трек. Величина эффекта зависит от радиуса, на котором находится проволочка. Кроме того, при подстановке полученного разрешения в моделирование эффект многократного рассеяния в дрейфовой камере учитывается дважды, т.к. он входит в разрешение, извлеченное из эксперимента, а, кроме того, независимо учитывается при проведении через вещество в программе GEANT. Чтобы учесть искажения, вносимые реконструкцией, а также влияние многократного рассеяния, проводилось моделирование треков с постоянным разрешением $\sigma = 300 \mu$. Применяя к такому набору треков стандартную процедуру определения разрешения, получаем результат, показанный на Рис. 12. Отношение этого разрешения к 300μ в зависимости от радиуса проволочки учитывалось при вычислении поправки, которая вносится в моделирование разрешения. После этой процедура определения разрешения по реконструированным событиям моделирования e^+e^- в условиях 1996 года дает результат, идентичный полученному для экспериментальных данных.

7.1.3 Моделирование координатного разрешения дрейфовой камеры в Z проекции

Аналогичным образом определяются параметры, характеризующие разрешение дрейфовой камеры вдоль оси Z. Отклонения измеренной Z координаты точки от расчетной по параметрам трека также изучались в зависимости от времени дрейфа, т.е. от положения точки по φ . Такие отклонения для Z координаты в отличие от $R-\varphi$ проекции уже нельзя подогнать одним нормальным распределением. Они описываются суммой двух нормальных распределений с разными ширинами. Кроме того, часть точек трека, восстановленных в $R-\varphi$ проекции, не имеют Z координаты по различным причинам. Такая потеря эффективности также учитывается в зависимости от времени дрейфа.

На Рис.13 приведены ширины двух нормальных распределений, описывающие разрешение по Z, в зависимости от времени, доля нормального распределения с малой шириной в суммарной подгонке, а также ве-

5093 Run, Wire 1-3

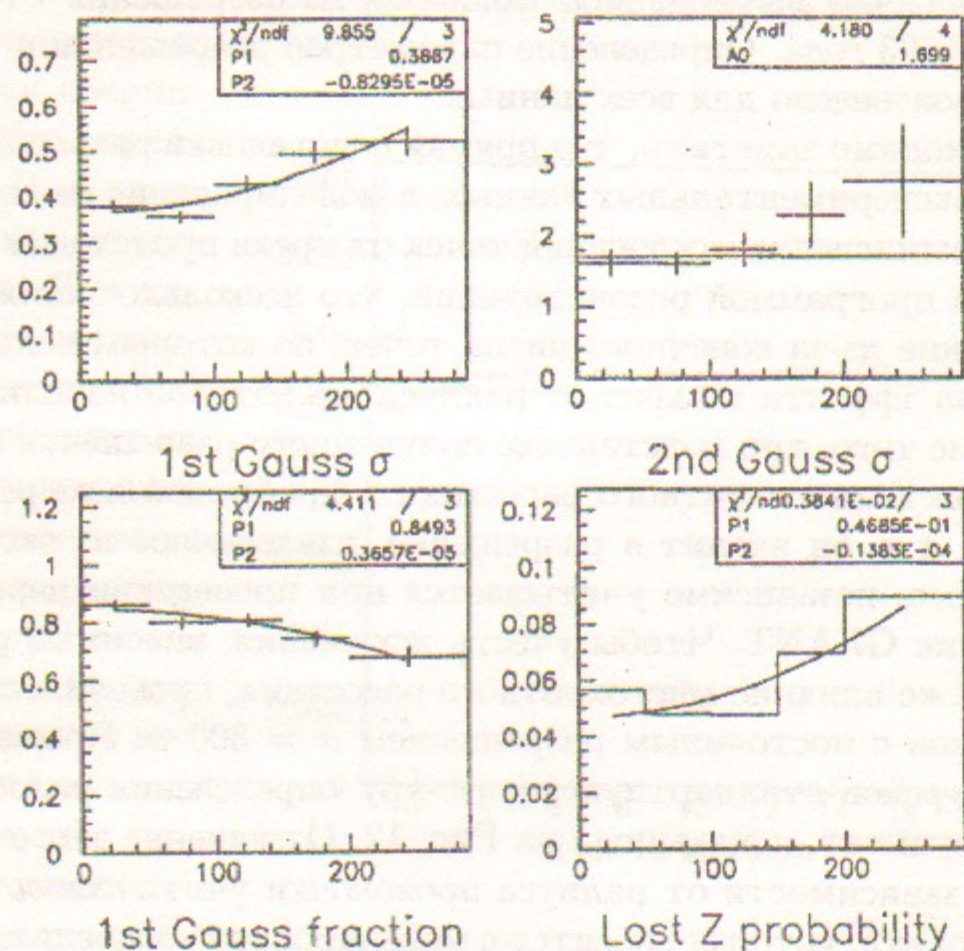


Рис. 13: Параметры Z разрешения дрейфовой камеры для первых трех проволок, описываемого суммой двух нормальных распределений с малой и большой шириной: ширина каждого распределения в зависимости от времени, измеренного камерой, доля нормального распределения с малой шириной в суммарной подгонке, вероятность потери Z координаты.

роятность вообще не восстановить Z координату. Данные, приведенные на рисунке, получены на одном из заходов 1996 года для трех проволок, ближайших к пучку. Параметры для Z разрешения получались для групп из трех-четырех проволок в двух первых слоях дрейфовой камеры, а третьего слоя — целиком. Такое разбиение связано с тем, что резкое ухудшение разрешения происходит вблизи края ячейки, а поскольку мы параметризуем разрешение в зависимости от времени, то необходимо разбивать на группы, внутри которых граница по времени дрейфа незначительно изменяется. Таким образом, для каждой группы данных изучались и фитировались такие распределения, что затем использовались в моделировании.

7.2 Z-камера

При оцифровке сигналов Z-камеры ограничение на число срабатываний устанавливается отдельно для внутреннего и внешнего слоя — не более 100 в каждом.

Z-камера выдает информацию двух типов: анодную и катодную. Первая представляет собой данные о времени срабатывания и амплитуде сигнала секторов камеры в R-φ плоскости. Эта информация естественным образом извлекается из записей срабатываний Z-камеры, т.к. чувствительным элементом как раз является сектор. Амплитуда представляет собой суммарную амплитуду от всех срабатываний в данном секторе. Перевод амплитуды из ГэВ в число каналов с учетом ограничения динамического диапазона электроники осуществляется в соответствии с коэффициентами, заданными в картах.

Катодная структура Z-камеры в моделировании явным образом не описана, поэтому распределение амплитуд по катодным полоскам вычисляется в программе оцифровки. Делается это следующим образом. Каждая запись хита содержит координату Z пересечения анодной проволочки и полную выделившуюся энергию внутри сектора A. Определяются все кольцевые полоски шириной 6.5 мм вдоль Z, на которые, согласно приведенной ниже формуле, приходится более 0.1% амплитуды:

$$A_{ring} = \frac{2A}{\pi} \left| \arctg(e^{-\frac{\pi(Z_{end}-Z)}{2h}}) - \arctg(e^{-\frac{\pi(Z_{beg}-Z)}{2h}}) \right|$$
, где Z_{beg} , Z_{end} — координаты начала и конца кольца, $h = 4$ мм — зазор между катодом и анодом.

Эта формула является аналитическим решением задачи о распределении заряда, расположенного между двумя плоскостями [16].

Далее, для этих колец вычисляется распределение амплитуды по угловым сегментам: 16 ближайших к центру колец разделены на 4 равные части, по 10 колец с каждого края камеры оставлены сплошными, остальные кольца разделены пополам.

Распределение амплитуды на кольце по угловым сегментам вычисляется по аналогичной формуле в соответствии с положением хита $\varphi = \arctg(Y/X)$:

$$A_{\varphi} = \frac{2A_{ring}}{\pi} \left| \arctg(e^{-\frac{\pi R(\varphi_{end}-\varphi)}{2h}}) - \arctg(e^{-\frac{\pi R(\varphi_{beg}-\varphi)}{2h}}) \right|$$
, где φ_{beg} , φ_{end} — угловые границы сегмента, R — радиус соответствующего слоя Z-камеры.

Расчитанные амплитуды переводятся в число каналов и формируется запись сырых данных от катодной части Z-камеры, представляющая собой последовательность адресов сработавших каналов и соответству-

ющей амплитуды.

7.3 Калориметр CsI и BGO

Оцифровка калориметрической части детектора весьма проста: необходимо лишь просуммировать различные срабатывания в одном и том же кристалле, перевести амплитуду в число каналов и при превышении порога записать адрес кристалла и амплитуду. Коэффициенты перевода амплитуды и пороги управляются с помощью карт.

Предусмотрена возможность учета неоднородности светосбора, величина которой задается в картах.

Кроме стандартной амплитудной информации, цилиндрический калориметр CsI выдает еще информацию о времени пролета с каждой линейки кристаллов. Энерговыделение всех кристаллов линейки суммируется и, при превышении специального порога на амплитуду линейки, минимальное время из хитов данной линейки записывается вместе с ее адресом.

7.4 Мюонная система

Сырые данные мюонной системы содержат два типа информации: разница времени прихода сигналов на концы цепочки труб и время дрейфа. Первая часть данных используется для определения Z координаты трека, вторая — для определения радиуса внутри трубы.

Элементом хита в мюонной системе, как уже говорилось, является одна трубка. Физический канал представляет собой связку труб. Поэтому при оцифровке группируются хиты от труб из одной цепочки, а затем определяется разность минимальных времен прихода на два конца цепочки ΔT и минимальное время дрейфа в трубке T_{dr} . Скорость дрейфа в газе пробной системы может задаваться в картах, по умолчанию ее значение 0.00286 см/нсек.

Первая группа данных пробной системы представляет собой последовательность адрес канала — время, где время рассчитывается по формуле

$(\Delta T + 60 + \delta T) \cdot F$, где δT — случайное число, сгенерированное в соответствии с нормальным распределением с шириной, соответствующей разрешению по Z-координате 5 см, F — фактор перевода в число каналов (по умолчанию 40.0).

Следующая группа данных, также в формате адрес канала — время, содержит в качестве времени целую часть от $\frac{T_{delay} - T_{dr}}{2.4}$, где T_{delay} — время задержки, по умолчанию 9200 нсек.

7.5 Моделирование триггера детектора

В записи каждого экспериментального события присутствует триггерная маска, которая содержит информацию о срабатывании триггеров систем детектора. Очевидно, необходимо правильно моделировать эту запись. Необходимо заметить, что в моделировании записываются все события, независимо от срабатывания триггера, поэтому при работе с событиями моделирования анализ триггерной записи существенен.

Первый бит маски триггера соответствует срабатыванию так называемого трекфайндера или трекового процессора детектора КМД-2 [17]. Это устройство, используемое в системе первичного триггера, позволяет по информации о сработавших проволоках дрейфовой и Z камер принять быстрое решение о наличии хотя бы одного трека, выходящего из места встречи пучков и описывающего движение заряженной частицы в магнитном поле. Опорная точка для поиска трека берется из Z-камеры. Ячейки первых двух слоев дрейфовой камеры объединяются в области возможных треков, проходящих через определенную опорную точку. Моделирование трекфайндера делается на этапе оцифровки на основе записей срабатываний дрейфовой камеры и Z-камеры. Проверяется соответствие набора сработавших ячеек и опорной точки Z-камеры маскам трекового процессора, и в результате определяется логическая переменная срабатывания трекфайндера.

Следующий бит триггерной маски — триггер Z-камеры. Он взводится в случае, когда в событии сработал хотя бы один сектор Z-камеры.

Третьим битом маски является триггер цилиндрического калориметра. Он считается сработавшим, если энерговыделение одной из линеек кристаллов CsI превышает устанавливаемый в картах порог.

Далее следует бит триггера мюонной системы, который не равен нулю в случае срабатывания хотя бы одного канала системы.

В маске присутствует также бит, соответствующий нейтральному триггеру. Это устройство [18] является частью системы первичного триггера. На основе информации об энерговыделении в линейках калориметра и данных трекового процессора нейтральный триггер определяет наличие в калориметре полезного события. Триггер проверяет наличие в калориметре кластера (т.е. непрерывная последовательность сработавших модулей), определяет величину максимальной дырки (последовательность несработавших модулей), анализирует величину энерговыделения во всех 56 линейках и информацию от координатных систем. Положительное решение триггера есть совпадение различных комбинаций аргументов. Моделирование нейтрального триггера производится на

основе записей срабатываний в калориметре и координатных системах.

8 Сравнение моделирования с экспериментом

8.1 Эффективность и разрешение координатной части детектора

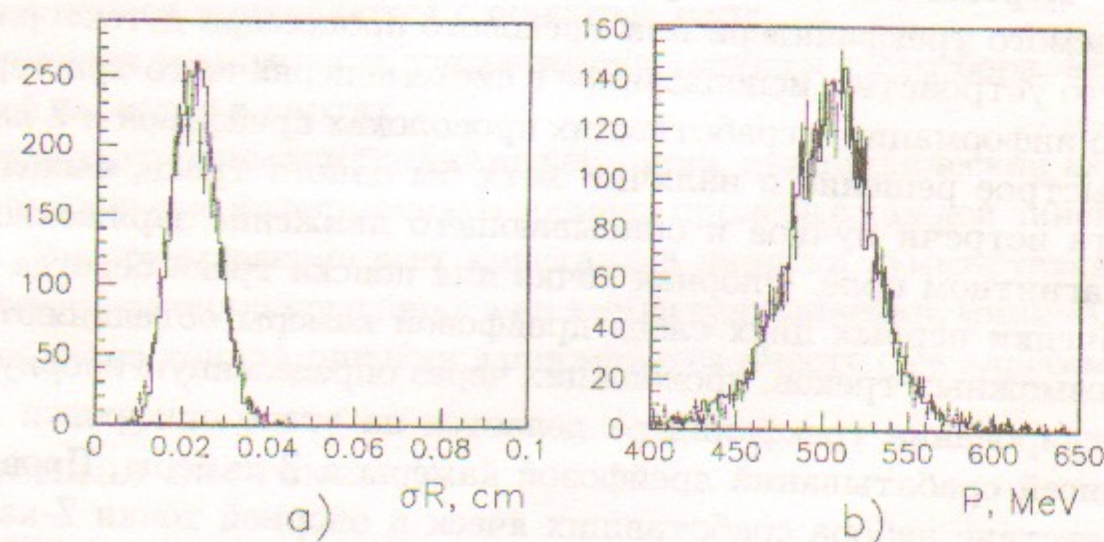


Рис. 14: а) — Среднеквадратичное отклонение точек, по которым был проведен трек, от восстановленной окружности; б) — Распределение по полному импульсу. В обоих случаях гистограммой показано моделирование, а точками с ошибками — экспериментальные данные.

В предыдущих разделах было описано, как извлекаются параметры координатного разрешения и эффективности дрейфовой камеры с помощью отобранных событий упругого e^+e^- рассеяния. Учет разрешения и вероятности потери точки на треке производится на уровне моделирования срабатывания одной проволоочки. Сравним теперь разрешение и эффективность для трека в целом по данным программы реконструкции.

Рассмотрим для примера сравнение по различным параметрам для событий упругого e^+e^- рассеяния, отобранных на одном из заходов 1996 года, и моделирования событий e^+e^- с соответствующими параметрами.

Сравнение среднеквадратичного отклонения точек на треке от восстановленной окружности, приведенное на Рис.14 а), показывает вполне хорошее согласие моделирования с экспериментом. Еще лучше выглядит сравнение распределений по импульсу, Рис.14 б). На Рис.15 показаны распределения по расстоянию от места встречи до вершины и по минимальному расстоянию от одного трека до точки взаимодействия. Эти

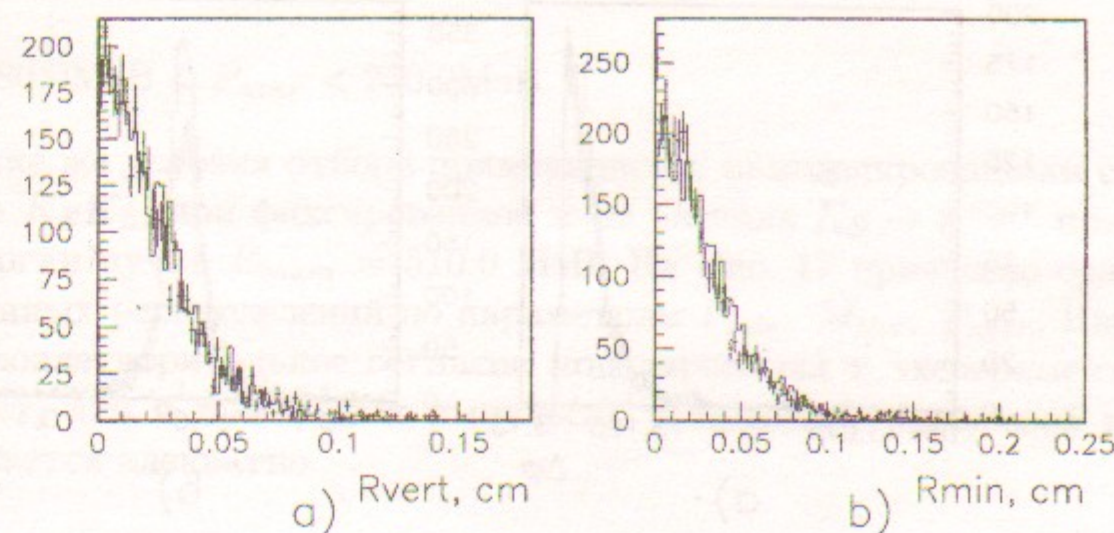


Рис. 15: а) — Распределение по расстоянию от точки взаимодействия до восстановленной вершины R_{vert} ; б) — Распределение по минимальному расстоянию от точки взаимодействия до трека R_{min} . Гистограмма — моделирование, точки с ошибками — эксперимент.

распределения определяются не только координатным разрешением, но и размерами пучка.

На Рис.16 приведены распределения по разнице углов между треками в процессе e^+e^- в $R-\varphi$ плоскости ($\Delta\varphi$) и в направлении оси пучков ($\Delta\theta$). Некоторое отличие моделирования и эксперимента наблюдается для случая б), где показаны распределения по разнице углов θ . Разрешение по углу θ определяется не только разрешением дрейфовой камеры в направлении Z , но и разрешением Z -камеры, т.к. точка в Z -камере используется для восстановления трека в Z -проекции. Однако, различия в этих распределениях для разных заходов 1996 года такого же порядка величины, как и разница моделирования и эксперимента на данном конкретном заходе, поэтому в среднем моделирование соответствует экспериментальным данным и по ширине угловых распределений.

Как упоминалось в разделе 7.1.2, параметры моделирования для описания разрешения дрейфовой камеры подбирались с использованием процесса упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, где импульсы частиц в области энергий ϕ мезона достаточно велики, ~ 500 МэВ. Важно сравнить получаемые после реконструкции параметры треков не только на процессе $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, но и для физического процесса, где импульсы принимают меньшие значения. Подходящим процессом для такого сравнения является $\phi \rightarrow K_S K_L$, когда K_S распадается на $\pi^+\pi^-$. Здесь значения импульсов π^+ и π^- уже не фиксированы при данной энергии пучка, как в случае упругого рассеяния, поэтому напрямую разрешение по импульсу получить нельзя. Вместо этого из измеренных в дрейфовой камере значений им-

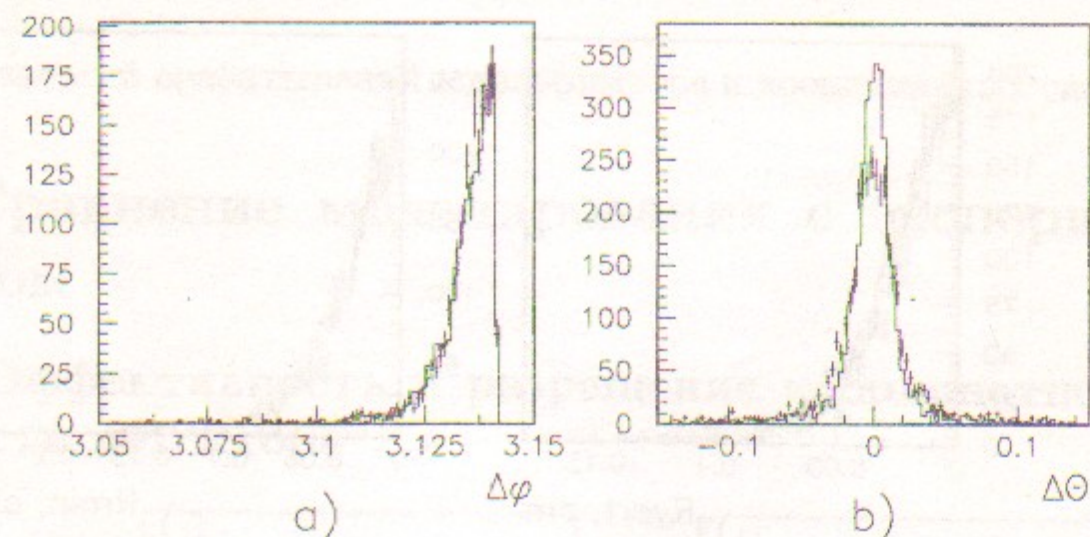


Рис. 16: а) — Распределение по разнице углов между e^+ и e^- $\Delta\varphi$; б) — то же для $\Delta\theta$.

пульсов и углов π^+ , π^- можно вычислить следующие параметры:

- P_{mis} — недостающий импульс в вершине распада $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$, $P_{mis} = \sqrt{E_{beam}^2 - m_{K^0}^2}$, что в пике ϕ мезона составляет 109.9 МэВ.
- M_{inv} — инвариантная масса системы $\pi^+\pi^-$, $M_{inv} = m_{K_S} = 497.7$ МэВ.
- P_{aver} — средний импульс пионов $P_{aver} = (P_{\pi^+} + P_{\pi^-})/2$. В пике ϕ мезона величина среднего импульса составляет 211.1 МэВ.

Для сравнения с моделированием были отобраны события $\phi \rightarrow K_S K_L$ из данных 1996 года при энергии пучка $E_{beam} = 510.0$ МэВ в соответствии с условиями:

- В событии есть 2 трека, противоположных знаков заряда, идущие из ближайшей к пучку вершины.
- Расстояние от вершины до точки пучка в $R - \varphi$ плоскости $R_{vert} < 1.5$ см.
- Величины полярных углов пионов $0.95 < \theta_{1,2} < \pi - 0.95$
- Импульсы пионов удовлетворяют условию: $140.0 \text{ МэВ} < p_{1,2} < 300.0 \text{ МэВ}$
- $50 \text{ МэВ} < P_{mis} < 190 \text{ МэВ}$
- $450 \text{ МэВ} < M_{inv} < 550 \text{ МэВ}$

- $180.0 \text{ МэВ} < P_{aver} < 250.0 \text{ МэВ}$

Такие же условия отбора применялись к намоделированным событиям $\phi \rightarrow K_S K_L$, при фиксированной моде распада $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ при такой же энергии пучка $E_{beam} = 510.0$ МэВ. На Рис. 17 приведено сравнение полученных распределений по параметрам P_{mis} , M_{inv} , P_{aver} . Наблюдается удовлетворительное согласие моделирования и эксперимента, что означает, что и при малых импульсах разрешение дрейфовой камеры описывается адекватно.

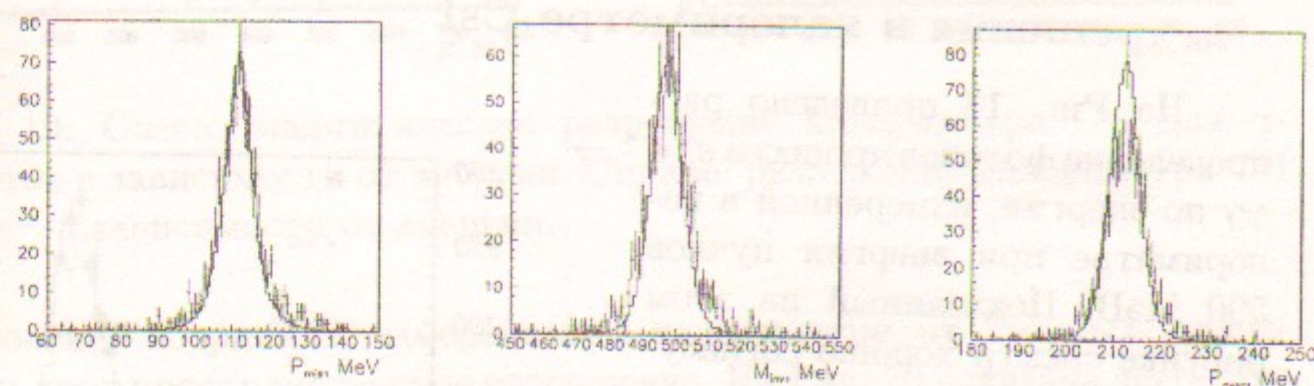


Рис. 17: Распределение по недостающему импульсу P_{mis} , инвариантной массе M_{inv} и среднему импульсу P_{aver} пионов от распада $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$. Гистограмма — экспериментальные данные, точки с ошибками — моделирование.

Важно сравнить также и эффективность регистрации. Изучение распада $\phi \rightarrow K_S K_L$ при $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ предоставляет такую возможность, т.к. для этого распада существует метод получения эффективности реконструкции в дрейфовой камере непосредственно из событий. Коротко говоря, метод определения эффективности реконструкции распада $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ в дрейфовой камере состоит в отборе событий на основе информации из калориметра, с минимальным привлечением информации из дрейфовой камеры (требовалось лишь наличие одного трека, выходящего не из пучка). После чего проверялось, были ли данные события правильно восстановлены программой обработки событий в дрейфовой камере (см. [19]). Таким образом можно извлечь эффективность реконструкции одного трека ε_{rec}^{1tr} и вычислить эффективность реконструкции события в целом $\varepsilon_{rec}^{event}$.

Были получены следующие величины неэффективности для данных четвертого сканирования 1996 года и моделирования:

	моделирование	эксперимент
$1 - \varepsilon_{rec}^{1tr}, \%$	4.2 ± 0.9	2.9 ± 1.2
$1 - \varepsilon_{rec}^{event}, \%$	12.7 ± 1.5	13.1 ± 1.6

Видно, что полученные из эксперимента значения неэффективности не противоречат моделированию.

8.2 Сравнение энергетического и координатного разрешения в калориметре CsI

На Рис. 18 приведено распределение фотонов процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ по энергии, измеренной в калориметре при энергии пучков 500 МэВ. Показанный на этом рисунке спектр хорошо согласуется с экспериментальным.

На Рис. 19 приводится энергетическое разрешение CsI-калориметра для фотонов с энергией $E_\gamma = 200 - 700$ МэВ. Моделирование проводилось при двух значениях коэффициента неоднородности светосбора: $\eta = 0$ и $\eta = 10\%$. Наблюдается удовлетворительное согласие с экспериментальными значениями.

На Рис. 19 приведено сравнение моделирования и экспериментальных данных по энергетическому разрешению для электронов и позитронов. Видно различие экспериментальных значений и моделирования, природа которого пока не ясна.

Для определения пространственного разрешения CsI-калориметра использовались события упругого e^+e^- -рассеяния. По измеренным в дрейфовой камере параметрам трека находилась точка входа электрона (или позитрона) в калориметр. Координаты этой точки являются "точными" т.к. пространственное разрешение дрейфовой камеры (особенно в $R - \varphi$ -плоскости) существенно лучше, чем у калориметра. Среднеквадратичное

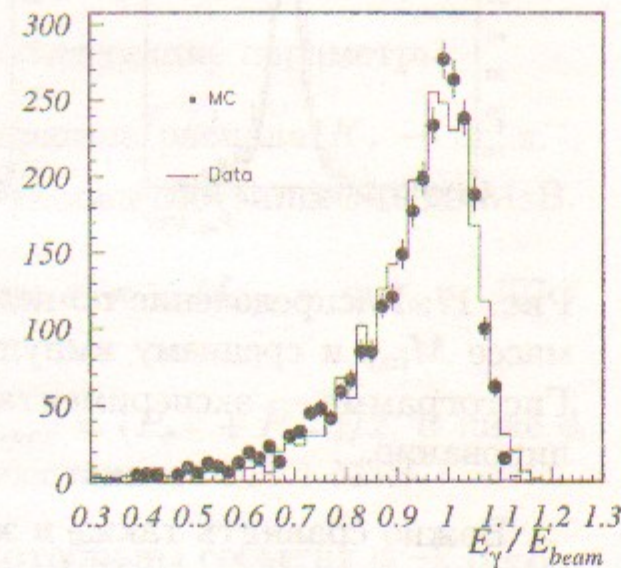


Рис. 18: Спектры энергосодержания фотонов в CsI-калориметре. Гистограмма — экспериментальные данные, точки — моделирование.

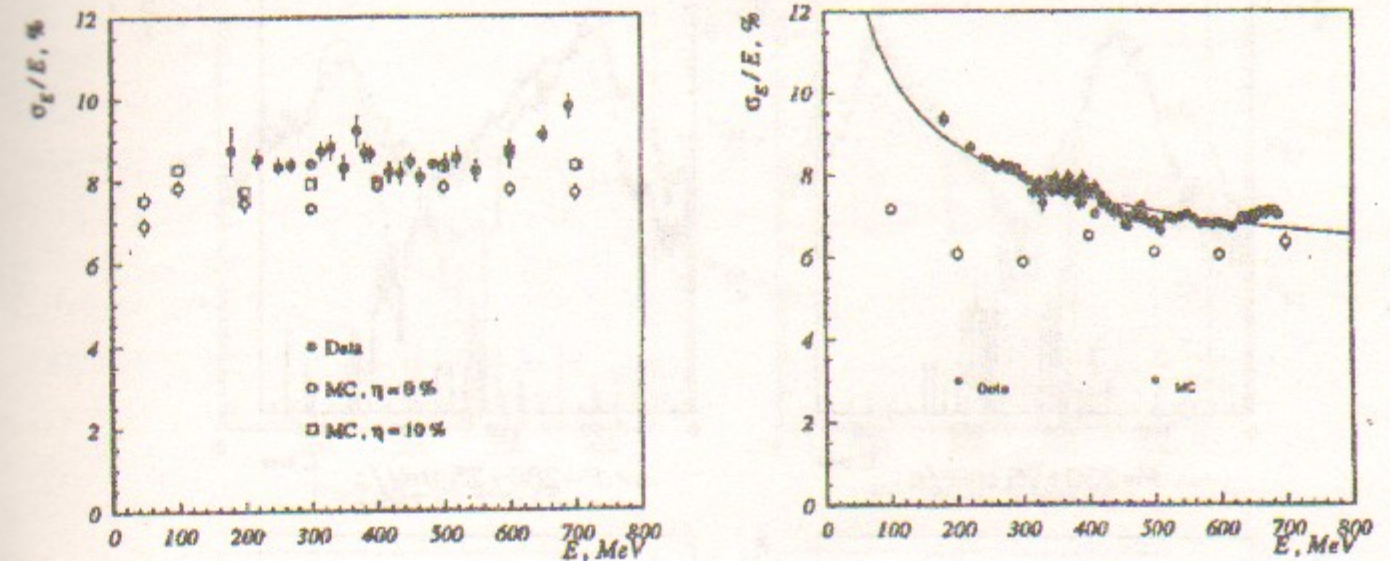


Рис. 19: Слева: энергетическое разрешение калориметра CsI для γ -квантов в зависимости от энергии. Справа: разрешение калориметра CsI для e^\pm в зависимости от энергии.

отклонение координат, измеренных в калориметре, от "точных" значений и дает пространственное разрешение. На Рис. 20 показана энергетическая зависимость определенного таким образом углового разрешения калориметра.

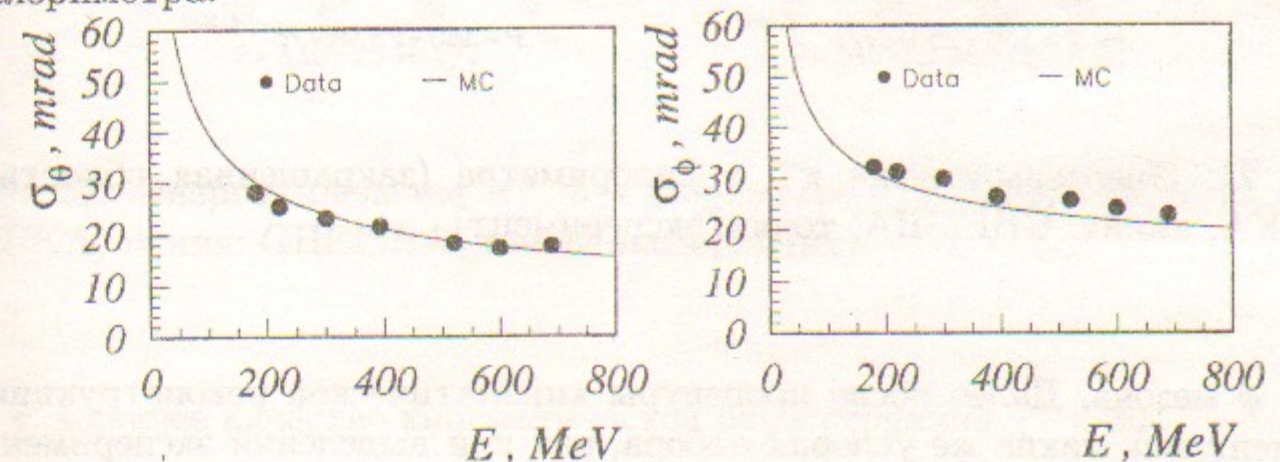


Рис. 20: Пространственное разрешение CsI-калориметра для e^\pm в зависимости от энергии

8.3 Сравнение энергосодержания в калориметре для разных программ моделирования ядерного взаимодействия

Сравнение различных программ моделирования ядерного взаимодействия с экспериментальными данными проводилось для процесса $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Было проведено полное моделирование 300 тысяч событий в

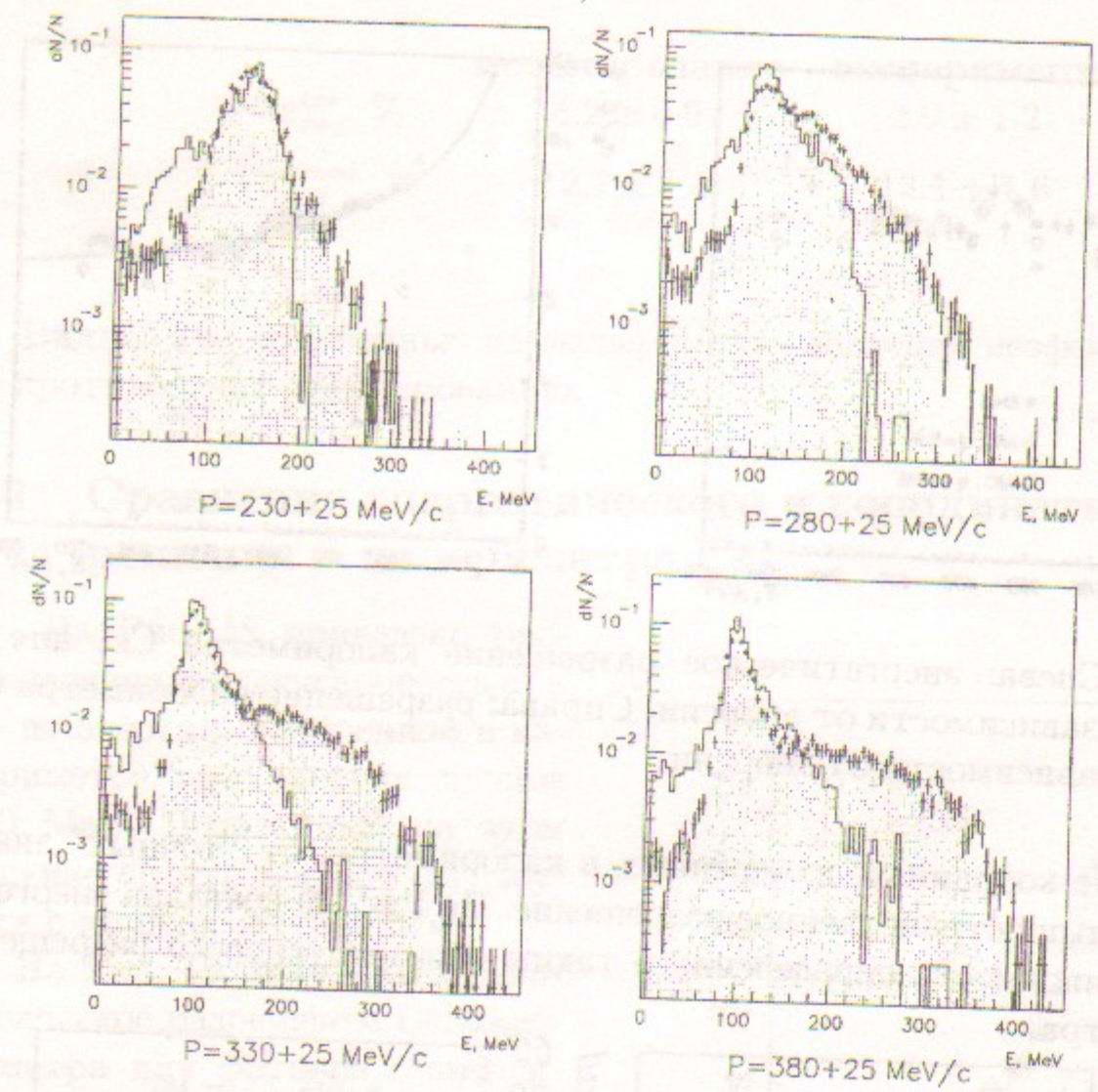


Рис. 21: Энерговыведение π^+ в калориметре (закрашенная область: FLUKA, линия: GHEISHA, точки: эксперимент).

пике ϕ мезона. Далее после процедуры кинематической реконструкции применялись такие же условия отбора, как при выделении экспериментальных данных $\pi^+\pi^-\pi^0$:

- два трека разных знаков
- вершина треков близка к месту встречи пучков $R_{vert} < 0.2$ см, $|Z_{vert}| < 6$ см
- два фотона или более
- полный импульс системы $|P_{x,y,z}| < 80$ МэВ
- два фотона образуют инвариантную массу π^0 $|M_{\gamma\gamma} - 130| < 40$ МэВ

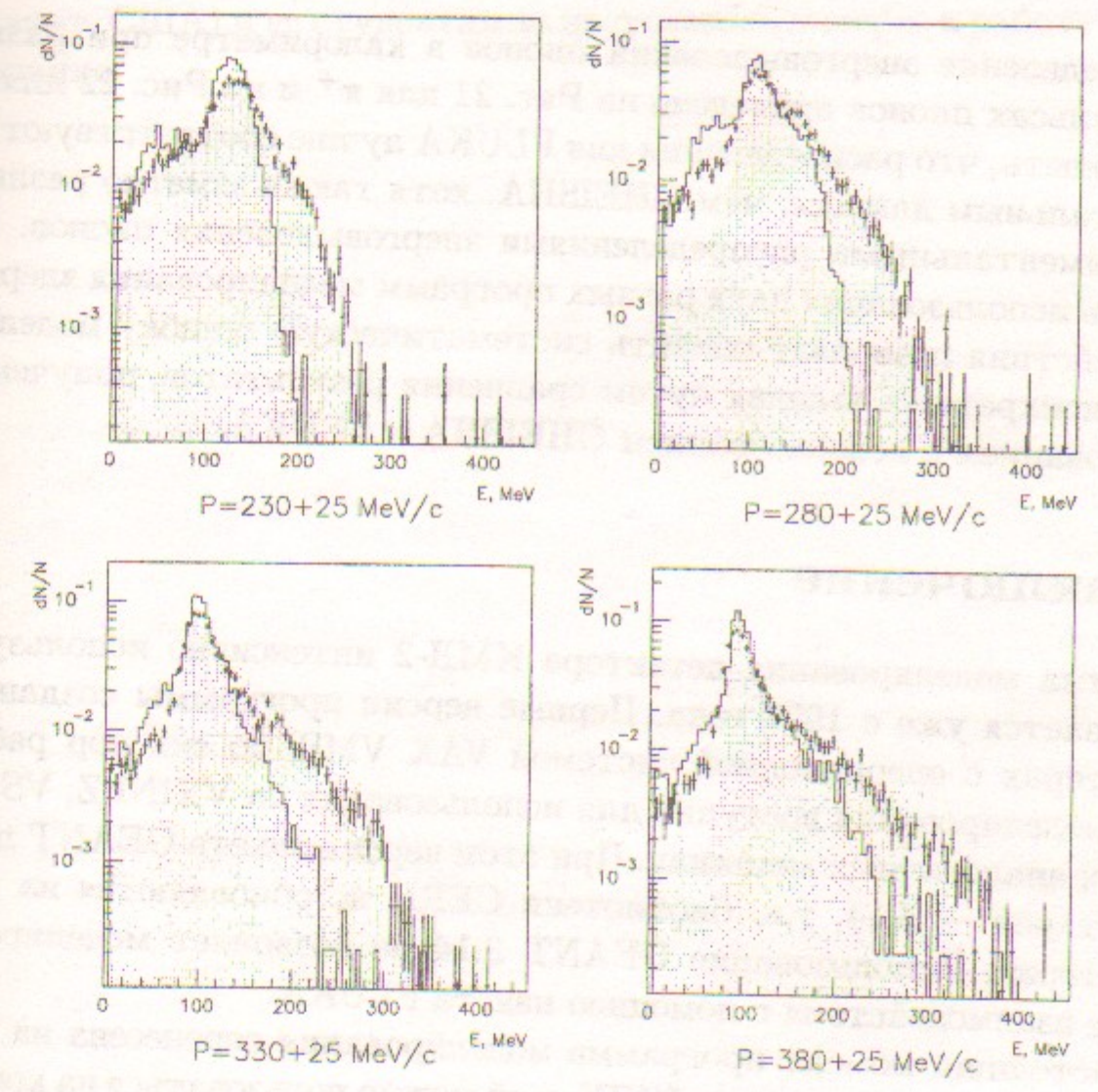


Рис. 22: Энерговыведение π^- в калориметре (закрашенная область: FLUKA, линия: GHEISHA, точки: эксперимент).

- хорошее качество кинематической реконструкции $\chi^2 < 20$
- треки не коллинеарны $\cos(\Delta\psi) > -0.9$, где $\Delta\psi$ — пространственный угол между треками
- один из треков должен быть "хорошим". Трек считался хорошим, если
 - число срабатываний каждого трека $N_{hits} \geq 7$
 - отклонения точек от восстановленного трека $\sigma_r < 0.05$, $\sigma_z < 3$
 - $130 < P_{tot} < 600$ МэВ
 - направление трека ведет в CsI калориметр $|\Theta_{track} - \pi/2| < 0.67$

Распределение энергосвыделений пионов в калориметре при различных импульсах пионов приведено на Рис. 21 для π^+ и на Рис. 22 для π^- . Можно видеть, что распределения для FLUKA лучше соответствуют экспериментальным данным, чем GHEISHA, хотя также заметно различие с экспериментальными распределениями энергосвыделения пионов. Возможность использования двух разных программ моделирования ядерного взаимодействия позволяет оценить систематическую ошибку моделирования в конкретных задачах путем сравнения результатов, полученных моделированием с использованием GHEISHA и FLUKA.

9 Заключение

Программа моделирования детектора КМД-2 интенсивно используется и развивается уже с 1992 года. Первые версии программы созданы на компьютерах с операционной системой VAX VMS, до сих пор рабочая версия моделирования доступна для использования на VXINPZ, VSCMD и других аналогичных машинах. При этом версия пакета GEANT достаточно старая — 3.14, т.к. библиотеки CERN не обновляются на VAX-компьютерах. Использование GEANT 3.14 не позволяет моделировать ядерные взаимодействия с помощью пакета FLUKA.

В настоящий момент программа моделирования перенесена на платформу операционной системы UNIX, и ей можно пользоваться на компьютерах Silicon Graphics и персональных компьютерах с системой LINUX. На этих машинах доступна версия GEANT 3.21, позволяющая использовать в полном объеме описанные в данной работе возможности. Было проведено тщательное сравнение версий программ моделирования для VAX и UNIX для моделирования различных физических процессов. С точностью до различия версий пакета GEANT эти программы моделирования дают одинаковые результаты.

Работа над программой моделирования непрерывно продолжается. По мере появления новых данных подбираются параметры, описывающие разрешение и эффективность очередной группы заходов. Добавляются первичные генераторы для описания физических процессов, изучаемых на детекторе КМД-2. И, разумеется, исправляются найденные ошибки и неточности.

Авторы глубоко признательны В. Савинову, Р. Деминой, А. Номероцкому, В. Заварзину, А. Максимову и Е. Попкову, принимавшим участие в создании ранних версий программы моделирования. Нам приятно также выразить благодарность профессору Дж. Томпсон (Питтсбургский Уни-

верситет, США) и ее студентам за постоянный интерес к работе и ценные замечания.

ПРИЛОЖЕНИЯ

A Карты для моделирования КМД-2

Управление вводом данных для программы моделирования КМД-2, производится, как и для GEANT, при помощи пакета FFREAD[20]. Ниже приводится описание карт. Часть списка — стандартные карты GEANT, наиболее существенные для моделирования, остальные — специальные карты программы моделирования КМД-2. Если какая-либо карта опущена во входном потоке, или часть последних чисел в карте не заданы, используются значения по умолчанию.

В приведенном списке карт имеется следующая информация:

- KEY, ключевое слово карты из четырех символов
- T, типы данных для переменных
(I — INTEGER, F — REAL, H — CHARACTER*4)
- VAR, фортрановские имена переменных
- краткое описание
- значения по умолчанию (default)

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
-----	---	-----	------------------	---------

Карты управления GEANT:

RNDM	I	NRNDM(1)	Начальные случайные	0
	I	NRNDM(2)	числа (2 слова)	0
RUNG	I	IDRUN	Номер захода	1
	I	IDEVT	Отсчет номера события	0
TRIG	I	NEVENT	Число событий	10 ⁷
KINE	I	IKINE	Флаг генератора	0
	F	PKINE(10)	10 данных	10 ¹¹

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
CUTS				
Пороги на энергию:				
F		CUTGAM	для фотонов	0.001
F		CUTELE	для электронов	0.001
F		CUTNEU	для нейтральных адронов	0.01
F		CUTHAD	для заряженных адронов	0.01
F		CUTMUO	для мюонов	0.01
F		VCUTE	для тормозного излучения электронов	0.001
F		VCUTM	для тормозного излучения мюонов и адронов	0.001
F		DCUTE	для δ -излучения e^-	10 ⁴
F		DCUTM	для δ -излучения μ	10 ⁴
F		PPCUTM	Порог рождения пар мюонами	0.01
F		TOFMAX	максимальное время пролета (сек)	10 ¹⁰

Флаги физических процессов (см. описание GEANT, PHYS 001):

ANNI	I	IANNI	Аннигиляция	1
BREM	I	IBREM	Тормозное излучение	1
COMP	I	ICOMP	Комптон эффект	1
DCAU	I	IDCAU	Распады	1
DRAY	I	IDRAY	δ -излучение	0
HADR	I	IHADR	Адронные взаимодействия	1
LOSS	I	ILOSS	Энергетические потери	2
MULS	I	IMULS	Множественное рассеяние	1
MUNU	I	IMUNU	Ядерное взаимодействие μ	1
PAIR	I	IPAIR	Рождение пар	1
PFIS	I	IPFIS	Фотопоглощение	0
PHOT	I	IPHOT	Фотоэффект	1
RAYL	I	IRAYL	Рэлеевское рассеяние	0
FLUK	I	IFLUK	Флаг выбора GHEISHA/FLUKA 0 — GHEISHA 1 — FLUKA 2 — FLUKA с сечениями СНД	0

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
-----	---	-----	------------------	---------

Специальные карты КМД-2:

STEP	I	SimStep	1 — проведение через КМД-2, запись файла GEANT\$DATA с банками HITS, MCEV; 2 — чтение банков из файла GEANT\$DATA, оцифровка, запись файла RAW\$DATA; 0 — выполнение обоих шагов без промежуточной записи GEANT\$DATA с HITS	0
------	---	---------	--	---

SOUT	I	RAWDATA_ flag	запись банка CMD2 при SimStep=0,2 или банка HITS при SimStep=1	1
	I	MCEV_ flag	запись банка MCEV	1

Флаги моделирования систем детектора:

0 — отключена, 1 — как вещество, 2 — как детектор

IFSY	I	IFDC	Дрейфовая камера	—
	I	IFZC	Z-камера	—
	I	IFCS	CsI калориметр	—
	I	IFMU	мюонная система	—
	I	IFBG	BGO калориметр	—
	I	IFIR	пассивное вещество	—

BMPR	I	Sigbeam_ flag	Флаг учета размера пучка	0
	F	Sigma_X	σ по X, см	—
	F	Sigma_Y	σ по Y, см	—
	F	Sigma_Z	σ по Z, см	—

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
-----	---	-----	------------------	---------

DTBN N=1:3	I	IPDECN	тип частицы	—
	F	BRDECN(6)	вероятности (%)	—
	I	MODECN(6)	моды распадов	—

ETAP	I	mode	распады η' : 0 1 — $\eta' \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$, 2 — $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$, 3 — $\eta' \rightarrow \eta\pi^0\pi^0$, другое — все 3 моды	—
------	---	------	--	---

Ограничение объема распада частицы (цилиндр)

FIDN N=1:2	I	Ipart_fiduN	Тип частицы	0
	F	R_fiduN	Радиус	$4 \cdot 10^5$
	F	Z_fiduN	Длина по Z	$4 \cdot 10^5$

FIEL	F	FIEL	магнитное поле	—
	F	FIEAN	максимальный угол поворота в поле на шаге	10.
	I	FIELD_CS	флаг учета неоднородности поля	—

DCLR	F	ANLORD	Угол Лоренца	24.
	F	DRW	Полуширина области дрейфа, см	.333

YEAR	I	Year_of_ data	Тип данных: год эксперимента	0
------	---	---------------	------------------------------	---

Моделирование трекового процессора

TRFN	H	Tr_Finder	включение	'ON'
	H	TF_set_of_masks	набор масок	'M003'
	H	Z_Chamber_logic	'AND' или 'OR'	'AND'

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
<i>Параметры оцифровки дрейфовой камеры</i>				
DCPR	F	T0	Время задержки	950.
	F	V0	Скорость дрейфа	0.0045
	F	DC_const1	амплитуда → каналы	10 ⁸
	F	DC_const2	пьедестал	0.
<i>Параметры оцифровки Z-камеры, анодная часть</i>				
ZCPR	F	ZCA_const1	амплитуда → каналы	10 ⁸
	F	ZCA_const2	пьедестал	0.
<i>Параметры оцифровки Z-камеры, катодная часть</i>				
ZCCP	F	ZCC_const1	амплитуда → каналы	10 ⁹
	F	ZCC_const2	пьедестал	0.
<i>Параметры оцифровки CsI калориметра</i>				
CSPR	F	CsI_const	амплитуда → каналы	6666.7
	I	Amp_threshold	порог на кристалл (в каналах)	10
CSNL	F	CsI_nonun	неоднородность светосбора, %	0.
CSIT	F	CsI_int	время интегрирования, мксек	10 ⁶
CTPR	F	TOF_const1	время → каналы	10.
	F	TOF_const2	пьедестал	1000.
	I	Line_threshold	порог на линейку в каналах	267
<i>Параметры оцифровки мюонной системы</i>				
MUPR	F	MU_const	время → каналы	40.
	F	MU_resol	разрешение по Z	5.
	F	MU_delay	время задержки	9200.
	F	MU_vdrift	скорость дрейфа	0.00286

KEY	T	VAR	Краткое описание	default
<i>Параметры оцифровки BGO калориметра</i>				
BGPR	F	BGO_const	амплитуда → каналы	6666.7
	I	BGO_threshold	порог на кристалл (в каналах)	10
BGVR	I	bgnoise_flag	флаг учета шумов	1
	F	bgnoise_flag	σ шума	0.001
BGGM	I	gmflag	тип геометрии BGO	0
			0 – стандартная	
			1 – 1996	
			2 – 1997	
BGNL	F	BGO_nonun	неоднородность светосбора, %	0.
BGIT	F	BGO_int	время интегрирования, мксек	10 ⁶
<i>Параметры Нейтрального триггера</i>				
NTEN	F	Elin_thres	порог на линейку	0.02
	F	Etot_thres(1)	порог 1	0.3
	F	Etot_thres(2)	порог 2	0.3
	F	Etot_thres(3)	порог 3	0.
	F	Etot_thres(4)	порог 4	0.
	F	Etot_thres(5)	порог 5	0.3
NTLI	I	Lim1_hole	пределы на	35
	I	Lim2_hole	размеры	25
	I	Lim3_hole	дырок	15

Б Первичные генераторы моделирования КМД-2

Параметры первичных генераторов задаются с помощью стандартной GEANT карты KINE следующего формата: KINE IKINE PKINE(10)

Таблица доступных генераторов:

- **Одиночные частицы** IKINE<0
(Т. Пурлац)

|IKINE| = GEANT код частицы; PKINE(1) = P, импульс частицы; PKINE(2) = θ , угол вылета относительно оси пучков; PKINE(3) = ϕ , угол вылета в плоскости XY. при $\phi > 999$. генерируется равномерное распределение по ϕ ; PKINE(4,5,6) — координаты вершины, по умолчанию (0., 0., 0.).
- $e^+e^- \gamma$ IKINE=1
Упругое рассеяние с радиационными поправками (А. Букин, UNIMOD)

PKINE(1) — пороговая энергия γ для перехода к использованию других формул (рекомендуется 0.03); PKINE(2) — полная энергия в системе центра масс; PKINE(3) — минимальный угол вылета для заряженных частиц.
- **псевдоскаляр + лептон + лептон** IKINE=5
(М. Лехнер, Н. Габыев)

PKINE(1) — мода генератора: 1. — ηe^+e^- , 2. — $\eta \mu^+ \mu^-$, 3. — $\pi^0 e^+e^-$, 4. — $\pi^0 \mu^+ \mu^-$; PKINE(2) — полная энергия; PKINE(3) — минимальный угол вылета частиц (по умолчанию 0); PKINE(4) — способ моделирования формфактора $F(q^2)$: 1. — $F = const = 1$, 2. — модель векторной доминантности, 3. — $F(q^2) = 1 + Fact \cdot q^2$ (по умолчанию PKINE(4) = 2); PKINE(5)=Fact для случая PKINE(4)=3 (по умолчанию Fact = 0)

- $\pi^+ \pi^- \gamma$ IKINE=6
(В. Астахов)

PKINE(1) — модель резонанса f_0 : 1. — $q\bar{q}$, 2. — молекула $K\bar{K}$, 3. — $q\bar{q}q\bar{q}$; PKINE(2) — полная энергия; имеются также еще параметры PKINE(3-8), задающие параметры моделей, для всех предусмотрены разумные значения по умолчанию
- XY IKINE=102
(С. Эйдельман)

PKINE(1) — мода генератора: 1. — e^+e^- , 2. — $\gamma\gamma$, 3. — $\mu^+ \mu^-$, 4. — $\pi^+ \pi^-$, 5. — $K^+ K^-$, 6. — $K_L K_S$, 7. — $\eta\gamma$, 8. — $\pi^0 \gamma$, 9. — $\eta' \gamma$; PKINE(2) — полная энергия; PKINE(3) — минимальный угол вылета частиц (по умолчанию 0)
- $\pi^+ \pi^- \pi^0$ IKINE=103
(С. Эйдельман)

PKINE(1) — мода генератора: 1. — через $\rho\pi^0$, 2. — по фазовому объему; PKINE(2) — полная энергия; PKINE(3) — минимальный угол вылета частиц (по умолчанию 0)
- $\pi\pi\pi\pi$ IKINE=104
(С. Эйдельман)

PKINE(1) — мода генератора: 1. — $\pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$, 2. — $\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$; PKINE(2) — полная энергия; PKINE(3) — минимальный угол вылета частиц (по умолчанию 0)
- $\omega\pi^0$ → IKINE=105
 $\pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
(С. Эйдельман)

PKINE(1) — мода генератора: 1. — с учетом интерференции; 2. — без учета интерференции; PKINE(2) — полная энергия

- $\omega\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ **IKINE=106**
(С. Эйдельман) PKINE(1) — мода генератора (dummy); PKINE(2) — полная энергия
- $\mu^+\mu^-(\gamma)$ **IKINE=107**
(А. Шер) PKINE(1) — мода генератора (dummy); PKINE(2) — полная энергия

Примеры использования карты **KINE**:

Для моделирования событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ с полной энергией 1.0194 ГэВ и минимальным углом вылета θ для позитрона и электрона на 40° :

KINE 1 .03 1.0194 40.

Для моделирования событий $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ при энергии 1.0194 ГэВ и фиксированной моде распада $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$:

KINE 102 7. 1.0194 0.

DTB1 17 100. 0. 0. 0. 0. 0. 080907 0 0 0 0 0

Список литературы

- [1] Г.А. Аксенов и др., Детектор КМД-2 для накопителя ВЭПП-2М. Препринт ИЯФ 85-118, Новосибирск, 1985.
- [2] В.В. Анашин и др., Препринт ИЯФ 84-114, Новосибирск, 1984.
- [3] R. Brun et. al., GEANT3. User's guide. CERN DD/EE/84-1, Geneve, 1987.
- [4] R. Brun, J. Zoll. ZEBRA User Guide, CERN Computer Centre Program Library Long Write-up; Y250, Geneve, 1987.
- [5] V.M. Aulchenko et al., A Drift Chamber for the CMD-2 detector at VEPP-2M. Nucl.Instr. & Meth., A252 (1986) 299-303.
- [6] ZC Preprint
- [7] В.М. Аульченко и др., Цилиндрический калориметр детектора КМД-2. Препринт ИЯФ 93-1, Новосибирск, 1993.
- [8] V.M. Aulchenko et al., CMD-2 barrel calorimeter. Nucl.Instr. & Meth., A336 (1993) 53-58.
- [9] H.C. Fesefeldt. Simulation of hadronic showers, physics and applications. Technical Report PITHA 85-02, III Physikalisches Institut, RWTH Aachen Physikzentrum, 5100 Aachen, Germany, September 1985.
- [10] P.A.Aarnio et al. Fluka user's guide. Technical Report TIS-RP-190, CERN, 1990.
- [11] A. Fasso et al. A comparison of FLUKA Simulations with measurements of Fluence and Dose in Calorimeter Structures. Nucl.Instr. & Meth., A332 (1993) 332-459.
- [12] C.Caso et al., Review of Particle Physics, Eur. Phys. J. C3(1998)1.
- [13] А.Д. Букин и др., UNIMOD — универсальная программа моделирования экспериментов на встречных e^+e^- -пучках. Препринт ИЯФ 84-33, Новосибирск, 1984.
- [14] L. Montanet et al., Review of Particle Properties, Phys.Rev. D50 (1994) 1454.
- [15] L. Montanet et al., Phys.Rev. D10 (1974) 916.

- [16] E. Mathieson, J.S. Gordon. Cathode charge distributions in multiwire chambers. Nucl.Instr.& Meth., A227 (1984) 267-282.
- [17] В.М. Аульченко, Г.С. Пискунов, Е.П. Солодов, В.М. Титов. Трековый процессор для КМД-2. Препринт ИЯФ 88-43, Новосибирск, 1988.
- [18] В.М. Аульченко и др., Электроника калориметра КМД-2. Препринт ИЯФ 92-28, Новосибирск, 1992.
- [19] П. Лукин, Изучение процесса $\phi \rightarrow K_L K_S$. Меморандум КМД-2, Phys-54, 1996.
- [20] FFREAD User Guide and Reference Manual, CERN DD/US/78 - 2.

Э.В. Анашкин, А.Е. Бондарь, Н.И. Габышев,
Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, П.П. Кроковный,
А.С. Кузьмин, И.Б. Логашенко, П.А. Лукин,
Т.А. Пурлац, Н.И. Рот, Н.М. Рыскулов,
В.П. Смахтин, Е.П. Солодов, А.И. Суханов,
Б.А. Шварц, М.А. Шубин, Г.В. Федотович,
Б.И. Хазин, Д.В. Черняк, С.И. Эйдельман

Моделирование детектора КМД-2

E.V. Anashkin, A.E. Bondar, N.I. Gabyshev,
D.N. Grigoriev, V.F. Kazanin, P.P. Krovovny,
A.S. Kuzmin, I.B. Logashenko, P.A. Lukin,
T.A. Purlatz, N.I. Root, N.M. Ryskulov,
V.P. Smakhtin, E.P. Solodov, A.I. Sukhanov,
B.A. Shwartz, M.A. Shubin, G.V. Fedotovitch,
B.I. Khazin, D.V. Chernyak, S.I. Eidelman

CMDM-2 detector simulation

ИЯФ 99-1

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 12.01. 1999 г.

Сдано в набор 12.01.1999 г.

Подписано в печать 12.01.1999 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 3.0 печ.л., 3.7 уч.-изд.л.

Тираж 180 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.