Институт ядерной физики имени Г.И.Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Логашенко
Иван Борисович

Прецизионное измерение сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ в области энергий 0.61 — 0.96 ГэВ с детектором КМД-2

Специальность 01.04.16 – физика ядра
и элементарных частиц

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата
физико - математических наук

Научные руководители:
кандидат физико - математических
наук, В.П.Смахтин,
кандидат физико - математических
наук, Б.И.Хазин

НОВОСИБИРСК – 1999

Содержание

Введение **3**

1 Детектор КМД-2 **9**

1.1 Дрейфовая камера 9
1.2 Z-камера 12
1.3 Цилиндрический калориметр 13
1.4 Торцевой калориметр 14
1.5 Пробежная система 14
1.6 Система запуска детектора 16
1.7 Система автоматизации 18
1.8 Система анализа данных 22
1.9 Программа моделирования детектора 22

2 Система автоматизации детектора КМД-2 **24**

2.1 Общее описание 24
2.2 История развития системы автоматизации 26
2.3 Программное обеспечение системы автоматизации 37
2.4 Система контроля и управления 45
2.5 База данных мониторинга детектора 54
2.6 Система сбора данных 60
2.7 Анализ событий в режиме реального времени (третичный триггер) . . . 70

3 Измерение сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ **85**

3.1 Набор экспериментальных данных 85
3.2 Общее описание методики измерения 86
3.3 Отбор коллинеарных событий 87
3.4 Разделение коллинеарных событий 89
3.5 Определение сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ 107
3.6 Определение параметров ρ-мезона и $\rho - \omega$ интерференции 128

Заключение **135**

Благодарности **136**

Литература **137**

Введение

С 1992 года в Институте Ядерной Физики им. Г.И.Будкера проводятся эксперименты с Криогенным Магнитным Детектором (КМД-2) на накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М в области энергий от 360 до 1400 МэВ в системе центра масс.

Эта область энергий изучается с момента появления самой методики встречных пучков. Первые эксперименты были проведены на накопителях АСО (Орсэ, Франция) и ВЭПП-2 (Новосибирск) в конце 60-х годов. В 70-х–80-х годах проводились исследования на детекторах MN3 и DM1 на накопителе АСО и на детекторах ОЛЯ, КМД и НД на накопителе ВЭПП-2М, пришедшем на смену накопителю ВЭПП-2. Обилие интересных физических задач в данной области энергий привело к модернизации накопителя ВЭПП-2М и созданию детекторов нового поколения КМД-2 и Сферического Нейтрального Детектора (СНД), работающих на накопителе в настоящее время.

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2М, схема которого приведена на рис. 1, состоит из инжектора ИЛУ, синхротрона Б3М, бустера БЭП и накопителя ВЭПП-2М [1]. Накопитель ВЭПП-2М представляет собой жесткофокусирующее кольцо с четырьмя прямолинейными промежутками. В одном из промежутков находится ускоряющий резонатор, в противоположном — сверхпроводящий вигглер-магнит (“змейка”), служащий для получения большей светимости за счёт увеличения радиального фазового объёма пучка. В двух других промежутках установлены детекторы КМД-2 [2,3] и СНД [4]. Основные параметры накопителя и зависимость светимости от энергии пучков приведены на рис. 2.

Детектор КМД-2 является универсальным детектором с телесным углом регистрации частиц близким к 4π. Он представляет собой магнитный спектрометр, окруженный электромагнитным калориметром на основе кристаллов CsI (цилиндрическая часть) и кристаллов BGO (торцевая часть), и пробежной системой. Магнитное поле величиной 10 кГс создается тонким сверхпроводящим соленоидом. Конструкция детектора позволяет измерять импульсы, энергии и углы с хорошей точностью как для заряженных частиц, так и для фотонов. Описанию детектора и его систем посвящена Глава 1.

Важной частью детектора КМД-2 является система автоматизации, в функции ко-

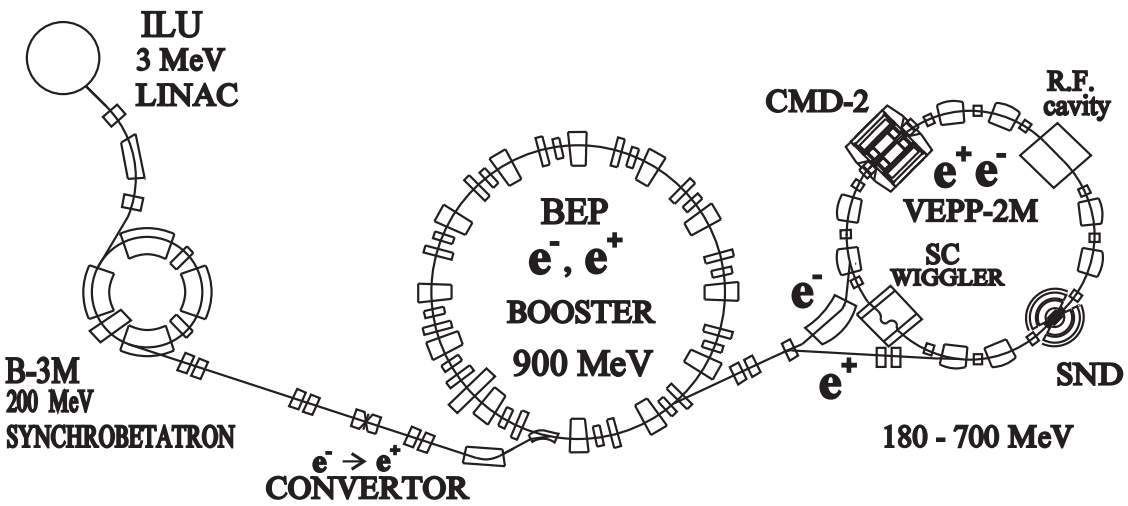
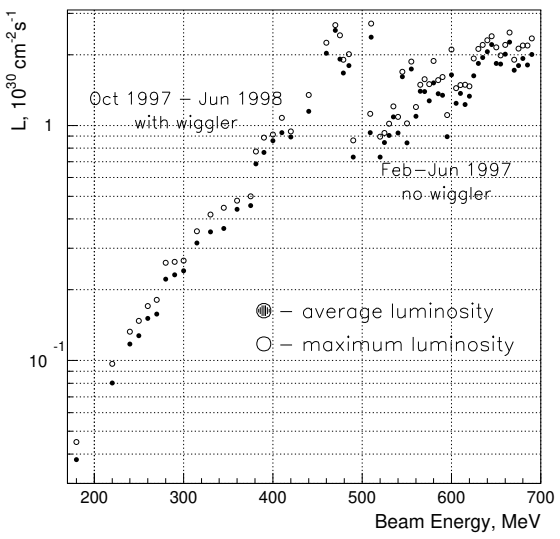


Рис. 1: Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2М.

Энергия пучков, МэВ	180–700
Количество сгустков в пучке	1
Периметр орбиты, м	17.88
Размеры пучка в месте встречи	
вертикальный, мкм	10
радиальный, мкм	400
длина сгустка, см	2
Ток в пучке, мА	∼50
Максимальное поле	
в поворотных магнитах, Тл	1.8
Радиус кривизны орбиты	
в поворотных магнитах, м	1.22

(а) Основные параметры накопителя.



(б) Светимость накопителя.

Рис. 2: Основные параметры и светимость накопителя ВЭПП-2М.

торой входит оцифровка и запись данных на магнитную ленту, управление работой детектора, осуществление контроля систем детектора и получаемых данных. За время эксплуатации системы автоматизации с 1992 года произошел бурный прогресс в области информационных технологий, изменились как вычислительная техника, так и подходы к разработке программного обеспечения. Это привело к тому, что система постоянно модернизировалась и развивалась, все время подстраиваясь под растущие нужды эксперимента. Описанию системы автоматизации, этапов ее развития и ключевых элементов системы посвящена Глава 2.

Физическая программа детектора включает в себя изучение свойств легких векторных мезонов ρ, ω и φ, а также прецизионное измерение сечений аннигиляции пары e^+e^- в различные адронные состояния [5]. Измерение полного сечения аннигиляции пары e^+e^- в адроны (или так называемого отношения $R = \sigma(e^+e^- \to \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$) в области низких энергий необходимо для точного вычисления ряда физических величин, таких как

- вклады поляризации вакуума адронами в аномальный магнитный момент мюона $(g-2)_\mu$ [6] и в значение бегущей константы связи электромагнитного взаимодействия при энергии Z-бозона $\alpha(M_Z^2)$ [7];
- параметры КХД, получаемые с помощью правил сумм [8];
- проверка гипотезы сохраняющегося векторного тока через сравнение сечений $e^+e^- \to$ адроны со структурными функциями соответствующих адронных распадов τ-лептона [9–11].

Измерение сечений аннигиляции e^+e^- в адроны в области низких энергий особенно актуально в связи с проведением в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США) эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона. Набор экспериментальных данных в эксперименте начался в 1997 году, и первые результаты уже опубликованы [12]. Ожидаемая точность эксперимента равна 0.35 ppm, что обеспечит чувствительность к вкладу взаимодействий вне рамок Стандартной Модели не хуже той, что может быть достигнута на строящемся в ЦЕРН коллайдере LHC. Для этого точность теоретического вычисления $(g-2)_\mu$ в рамках Стандартной Модели, которая определяется точностью определения вклада поляризации вакуума адронами a_μ^{had}, не должна уступать точности эксперимента.

В однопетлевом приближении, вклад поляризации вакуума адронами a_μ^{had} вычисляется через дисперсионный интеграл [13]

$$\Delta a_\mu^{had} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_\pi^2} \frac{R(s)K(s)}{s^2} ds, \qquad (1)$$

где явная форма электродинамического ядра $K(s)$ приведена, например, в [7]. Отношение $R(s) = \sigma(e^+e^- \to \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$ может быть вычислено теоретически в области высоких энергий (более 5 ГэВ в с.ц.м.), однако в области низких энергий интеграл (1) вычисляется численно по экспериментальным данным $R(s)$. Оказывается, что около 90% всей величины a_μ^{had} определяется областью энергий ВЭПП-2М, и около 70% всей величины — вкладом процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. При этом точность вычисления интеграла в значительной степени определяется систематической точностью измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. Существующая систематическая ошибка в величине сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ на уровне нескольких процентов приводит к точности определения вклада поляризации вакуума адронами в аномальный магнитный момент мюона, составляющей $0.7 - 1.5$ ppm, в зависимости от применяемого способа вычисления [7,14]. Эта ошибка в 2-3 раза хуже, чем ожидаемая экспериментальная точность измерения $(g-2)_\mu$. Для улучшения точности теоретического расчета $(g-2)_\mu$ необходимо в несколько раз улучшить систематическую точность измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ в области малых энергий.

Используя лоренцовую инвариантность и закон сохранения электромагнитного тока, матричный элемент взаимодействия пиона с электромагнитным током (рис. 3) можно записать в следующем виде [15]:

$$< \pi|J_\mu^{em}|\pi >= (k_1 + k_2)_\mu \cdot F_\pi(s),$$

где $F_\pi(s)$ — электромагнитный формфактор заряженного пиона, который несет в себе всю нетривиальную информацию о физике взаимодействия пионов с фотоном. Во времениподобной области $s > 4m_\pi^2$ пионный формфактор прямо связан с сечением процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$:

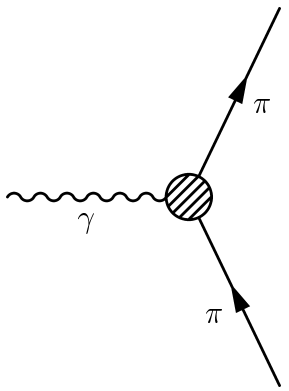


Рис. 3: Диаграмма Фейнмана для взаимодействия пиона с электромагнитным током.

$$\sigma = \frac{\pi\alpha^2}{3s}\,\beta_\pi^3\,|F_\pi(s)|^2. \qquad (2)$$

История измерения пионного формфактора во времениподобной области насчитывает более 30 лет. В первых экспериментах на накопителях АСО [16] (Орсэ, Франция) и ВЭПП-2 [17] (Новосибирск) в конце 60-х годов была наблюдена резонансная структура формфактора, измерены параметры ρ-мезона и подтверждена правильность модели векторной доминантности [18]. В последующие годы измерения продолжались на накопителях АСО, ВЭПП-2М, ADONE. Наиболее точные экспериментальные данные были получены в конце 70-х – начале 80-х годов детекторами КМД и ОЛЯ [19].

Детектором КМД сечение $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ было измерено в 24 точках по энергии в диапазоне 0.36-0.82 ГэВ в с.ц.м. с систематической ошибкой около 2%. Детектором ОЛЯ был просканирован диапазон энергий 0.64-1.40 ГэВ в с.ц.м. с малым шагом, при этом систематическая ошибка измеренного сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ составляла около 4% в области ρ-мезона и около 15% в области энергий около 1.4 ГэВ. Суммарная статистика двух экспериментов составляла около 150000 событий.

Другим источником информации о пионном формфакторе являются структурные функции распадов $\tau \to \pi^-\pi^0\nu_\tau$. В рамках гипотез сохраняющегося векторного тока [9] и изоспиновой инвариантности, изовекторная компонента сечения аннигиляции $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ связана со структурной функцией $v_{1,\pi^-\pi^0}$:

$$\sigma^{I=1}_{e^+e^-\to\pi^+\pi^-} = \frac{4\pi\alpha^2}{s} v_{1,\pi^-\pi^0}. \tag{3}$$

Следует отметить, что в таком подходе можно получить только изовекторную компоненту сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, в то время как в e^+e^- аннигиляции наблюдается и изоскалярная компонента. Первые результаты по измерению структурных функций $v_{1,\pi^-\pi^0}$ были получены в середине 90-х годов на детекторе ALEPH [20]. Статистика эксперимента составляла около 100000 событий, однако систематическая ошибка также составляла несколько процентов.

Детектор КМД-2 является первым универсальным магнитным детектором в области низких энергий, оптимизированным для измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ с малой систематической ошибкой:

- одновременное измерение импульсов и энерговыделений частиц упрощает процедуру выделения событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$;
- прецизионное измерение z-координаты в Z-камере позволяет определить телесный угол регистрации с высокой точностью;
- наличие тонкой вакуумной камеры приводит к уменьшению трудно рассчитываемых поправок, связанных с ядерным взаимодействием пионов.

На детекторе набрана рекордная статистика — 2 миллиона событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$.

Глава 3 посвящена измерению сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ в области энергий 0.61-0.96 ГэВ в системе центра масс (с.ц.м.), основанному на части всей набранной статистики. Описаны общие характеристики эксперимента, анализ экспериментальных данных и приведены оценки систематической ошибки. Обсуждены теоретические модели, используемые для описания экспериментальных данных и получены новые значения параметров ρ-мезона с точностью лучше среднемировой.

Основные результаты работы перечислены в Заключении.

Глава 1

Детектор КМД-2

КМД-2 (**К**риогенный **М**агнитный **Д**етектор) [2,3] — это универсальный детектор, позволяющий регистрировать и измерять с высокой точностью параметры заряженных частиц и фотонов. Схема детектора представлена на рис. 4. Координаты, углы вылета и импульсы заряженных частиц измеряются координатной системой детектора, состоящей из дрейфовой и Z-камер, расположенных в магнитном поле, создаваемом основным соленоидом. Цилиндрический и торцевой электромагнитные калориметры, изготовленные из сцинтилляционных кристаллов CsI и BGO, обеспечивают измерение энергии и углов фотонов, а также позволяют разделять электроны и адроны. Пробежная система служит для разделения мюонов и адронов.

Вакуумная камера в прямолинейном промежутке имеет диаметр 40 мм и длину 1 м. Для уменьшения многократного рассеяния её центральная часть длиной 20 см изготовлена из бериллия толщиной 0.8 мм.

Магнитная система детектора [21,22] состоит из основного и двух компенсирующих сверхпроводящих магнитов. Основной магнит, толщиной 0.38 радиационной длины, создаёт магнитное поле 10 кГс вдоль оси пучков.

1.1 Дрейфовая камера

Регистрация заряженных частиц осуществляется дрейфовой камерой [23–26] длиной 44 см и диаметром 60 см, расположенной соосно с вакуумной камерой. Схема дрейфовой камеры показана на рис. 5.

Камера состоит из трех слоев, разбитых на ячейки струйного типа. 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 имеет 512 сигнальных проволочек. Сигнальные проволочки диаметром 18 мкм изготовлены из золоченого вольфрама. Полевые проволочки диаметром от 150 до 300 мкм выполнены из титана, покрытого

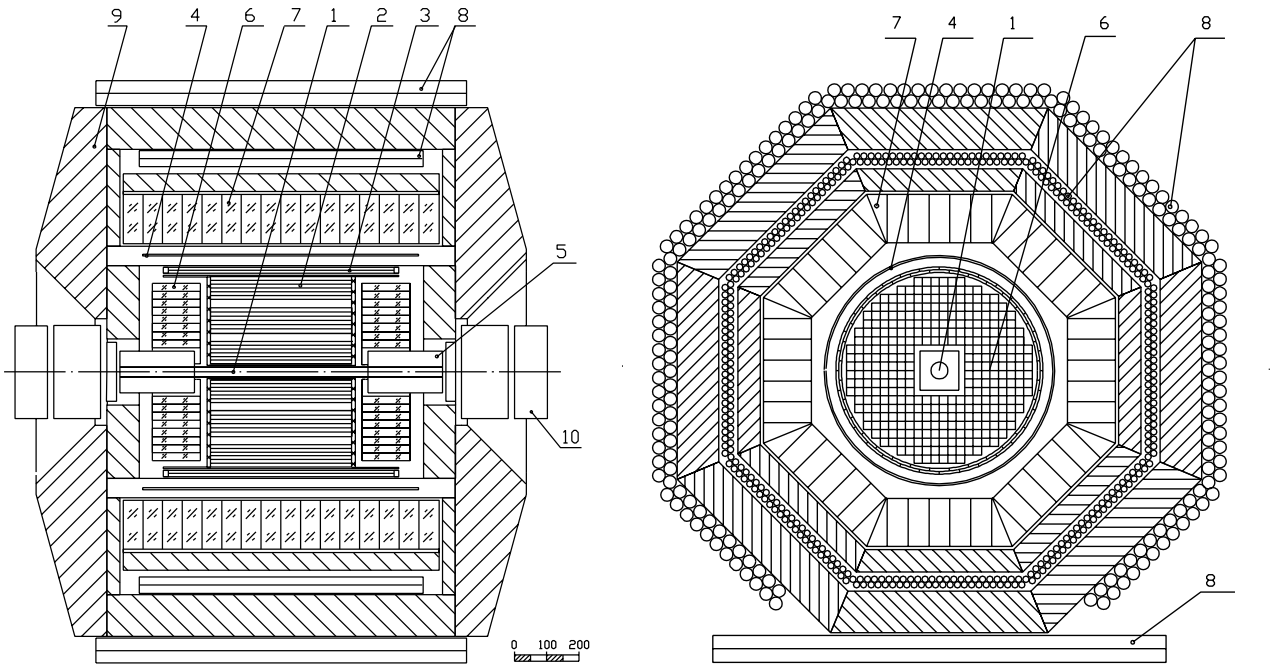


Рис. 4: Детектор КМД-2. 1 — вакуумная камера, 2 — дрейфовая камера, 3 — Z-камера, 4 — основной сверхпроводящий соленоид, 5 — компенсирующие соленоиды, 6 — торцевой (BGO) калориметр, 7 — цилиндрический (CsI) калориметр, 8 — пробежная система, 9 — ярмо магнита, 10 — квадрупольные линзы.

медью. Расположение проволочек показано на рис. 6.

Сигнальные проволочки в ячейке расположены вдоль оси пучков в окрестности радиальной плоскости со смещением на 300 мкм в левую и правую стороны через одну для устранения неопределённости в измерении координаты трека по времени дрейфа (с какой стороны от проволочки прошла частица). Первые две проволочки в ячейках первого слоя не смещены. Полевые проволочки расположены на границах ячеек. На них подается напряжение, рассчитанное таким образом, чтобы электрическое поле в ячейке было как можно ближе к однородному. Вектор напряжённости электрического поля перпендикулярен плоскости сигнальных проволочек. В постоянном продольном магнитном поле, в котором находится камера, электроны ионизации дрейфуют под углом Лоренца к направлению электрического поля. Для условий дрейфовой камеры детектора КМД-2 угол Лоренца имеет величину $\alpha_L \approx 30^\circ$. Между соседними сигнальными проволочками расположены потенциальные проволочки, которые служат для регулировки коэффициента газового усиления. Дрейфовая камера заполнена газовой смесью 80% аргона и 20% изобутана.

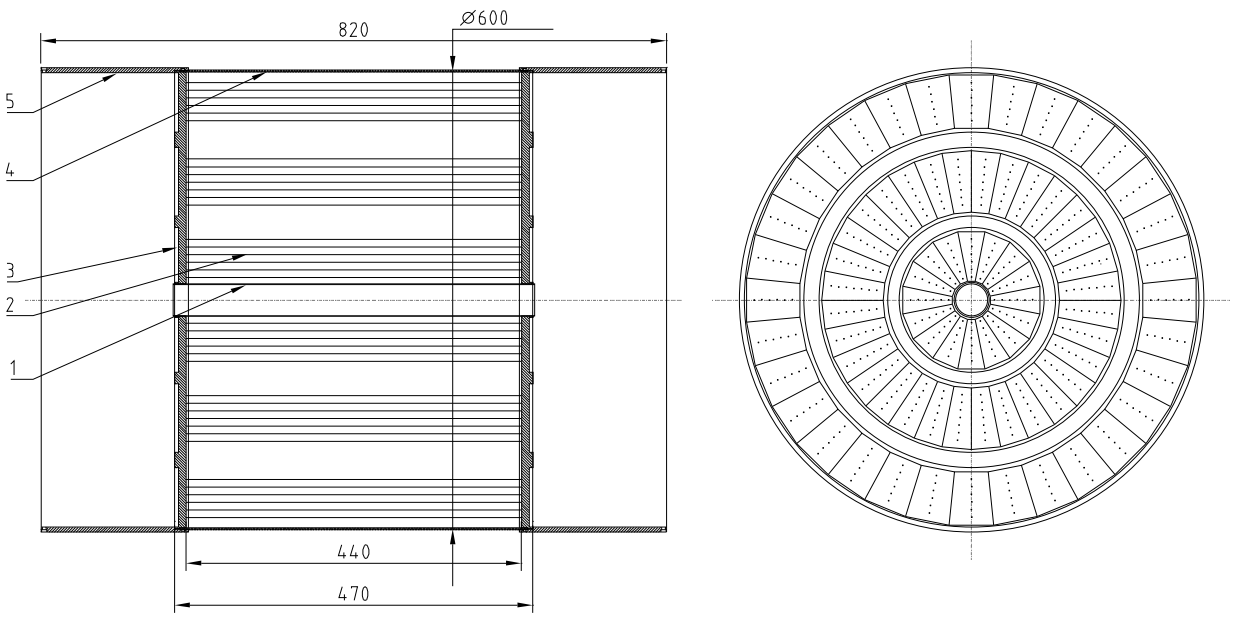


Рис. 5: Схема дрейфовой камеры детектора КМД-2. 1 – герметизирующая трубка, 2 – проволочки, 3 – фланец, 4 – обечайка, 5 – кольца для поддержки кабелей.

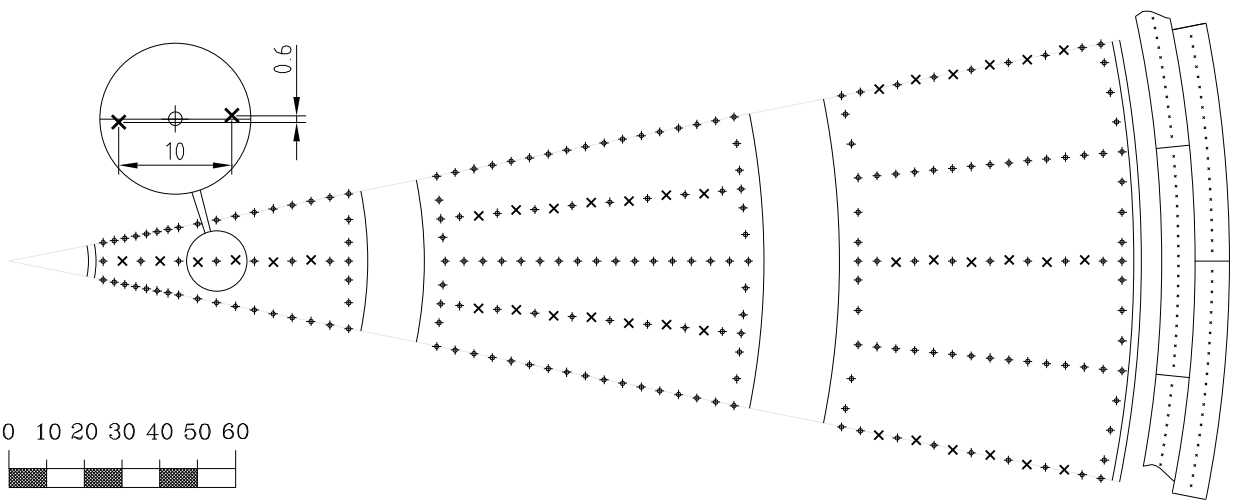


Рис. 6: Расположение проволочек в ячейках дрейфовой камеры. Крестиками показано расположение сигнальных проволочек, кружками — полевых и потенциальных проволочек. Снаружи от сектора дрейфовой камеры показаны сектора Z-камеры.

Сигнал с каждой проволочки снимается с обоих её концов и после усиления поступает на плату T2A [27], позволяющую измерять время прихода и амплитуды сигналов.

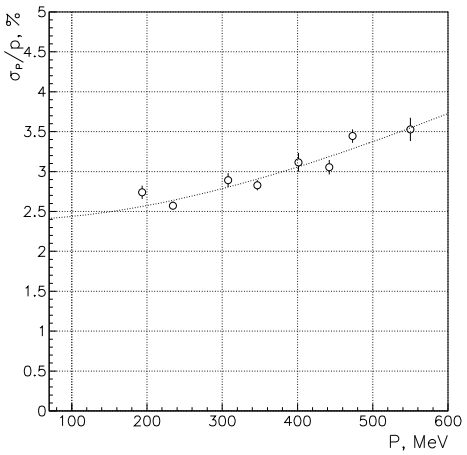


Рис. 7: Импульсное разрешение дрейфовой камеры.

Координаты трека пролетевшей частицы в плоскости проволочек (x, y) определяются по номеру сработавшей проволочки и времени дрейфа. Координата z (вдоль проволочки или, соответственно, вдоль направления пучков) определяется методом деления заряда. Кроме того, измерение амплитуды сигнала используется для идентификации частиц по величине ионизационных потерь dE/dx. Координатное разрешение дрейфовой камеры в плоскости $R-\varphi$ составляет 250 мкм, а вдоль проволочки — 4 мм [25]. Импульсное разрешение составляет 2.5% при импульсе 200 МэВ/с и 3.5% при импульсе 500 МэВ/с (рис. 7).

1.2 Z-камера

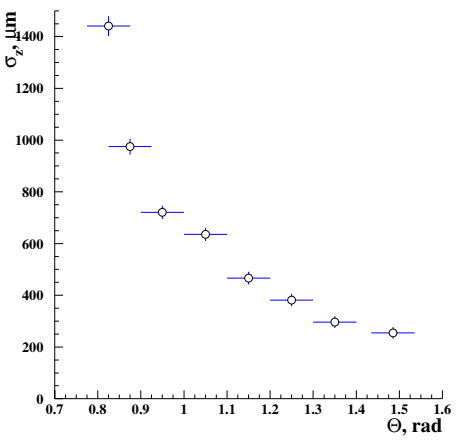


Рис. 8: Зависимость координатного разрешения Z-камеры от полярного угла трека.

За дрейфовой камерой располагается двухслойная цилиндрическая пропорциональная Z-камера [28] со съёмом информации с катодов и с анодов.

Z-камера является координатным детектором, измеряющим z-координату пересечения трека с камерой, а также используется для формирования сигнала первичного заряженного триггера. С ее помощью осуществляется временная привязка события к моменту столкновения пучков. Период оборота пучков в ВЭПП-2М составляет 60 нс, что определяет требования на временной разброс сигналов с Z-камеры. Для решения этой задачи в Z-камере используется быстрая газовая смесь $80\%CF_4+20\%iC_4H_{10}$ и маленькое расстояние между анодными проволочками. Для увеличения эффективности регистрации камера выполнена в виде двух независимых слоев. Каждый слой имеет 256 ка-

тодных полосок с независимым съемом сигналов и 704 анодные проволочки. Для уменьшения числа каналов электроники проволочки каждого слоя объединены в 32 сектора по 22 штуки в каждом. Внешний слой сдвинут относительно внутреннего на половину ширины сектора (рис. 6).

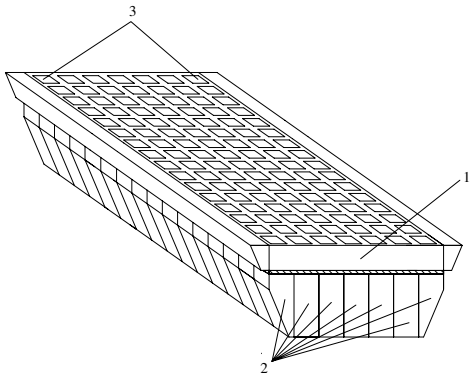
Координатное разрешение Z-камеры составляет 250 мкм для нормально падающей частицы и ухудшается до 700 мкм при угле падения 45° (рис. 8). Временное разрешение для одного трека составляет 4,7 нс.

1.3 Цилиндрический калориметр

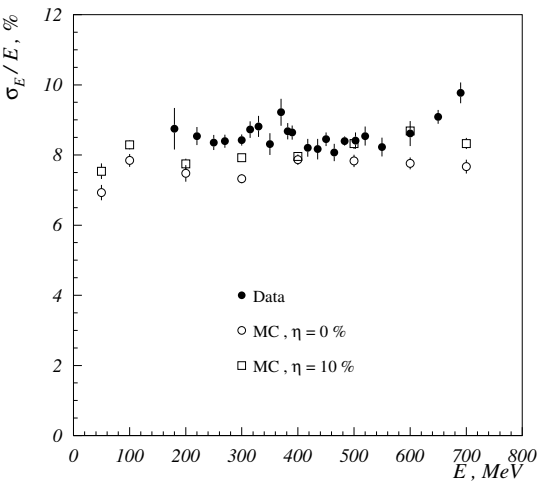
Цилиндрический калориметр [29,30] расположен между сверхпроводящей катушкой и внутренним годоскопом пробежной системы. Калориметр состоит из сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) размером $6 \times 6 \times 15$ см^3. Толщина калориметра для нормально падающей частицы составляет около 8 радиационных длин. Такая толщина активного вещества калориметра выбрана как компромисс между необходимой эффективностью регистрации и энергетическим разрешением калориметра, с одной стороны, и доступным для размещения калориметра пространством и стоимостью с другой.

Цилиндрический калориметр состоит из восьми октантов. Каждый из них содержит семь линейных модулей (линеек), закрепленных на дюралевой плите. Схема октанта показана на рис. 9(а). В октант входят 5 стандартных линеек и 2 линейки счетчиков специальной формы для того, чтобы обеспечить сопряжение октантов без зазоров. Линейки представляют собой 16 счетчиков CsI , закрепленных на стальной полосе толщиной 10 мм. Сцинтилляционный свет регистрируется с помощью фотоумножителей ФЭУ-60. Сигналы с ФЭУ поступают на усилители-формирователи ($\tau = 2$ мкс), а затем по витой паре передаются на платы амплитудно-цифровых преобразователей А32 [31].

Как показывает моделирование, в CsI выделяется в среднем около 80 % энергии падающего фотона, а энергетическое и пространственное разрешения определяются флуктуациями утечек ливня и составляют, соответственно, $\sigma_E/E = 8 - 10$ % (рис. 9(б)) и $\sigma_x = 8 - 12$ мм в интересующем нас диапазоне энергий 100-700 МэВ. Свет с каждого кристалла регистрируется фотоумножителем ФЭУ-60 с рабочим диаметром фотокатода 14 мм и высотой 70 мм. Цилиндрический калориметр покрывает область полярных углов от 0.7 до 2.44 радиан.



(а) Октант цилиндрического калориметра. 1 — алюминиевая плита, 2 — кристаллы, 3 — делители напряжений ФЭУ.



(б) Зависимость энергетического разрешения цилиндрического калориметра от энергии для процесса $e^+e^- \to \gamma\gamma$. Жирные точки — эксперимент.

Рис. 9: Конструкция и энергетическое разрешение цилиндрического калориметра.

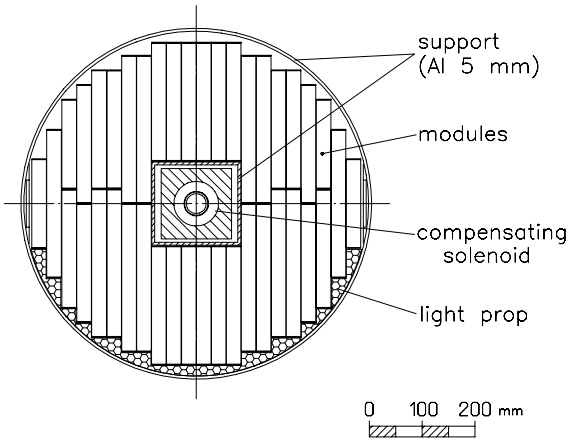
1.4 Торцевой калориметр

Торцевой калориметр [32] на основе кристаллов ортогерманата висмута $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO) состоит из двух идентичных торцов по обе стороны от места встречи. Каждый торец представляет собой плотно уложенную матрицу из 340 кристаллов BGO (рис. 10(а)). Размер кристалла $2,5 \times 2,5 \times 15$ см^3. Таким образом, толщина калориметра для нормально падающей частицы составляет 13,4 радиационных длин. Свет регистрируется при помощи фототриодов, способных работать в сильном продольном магнитном поле.

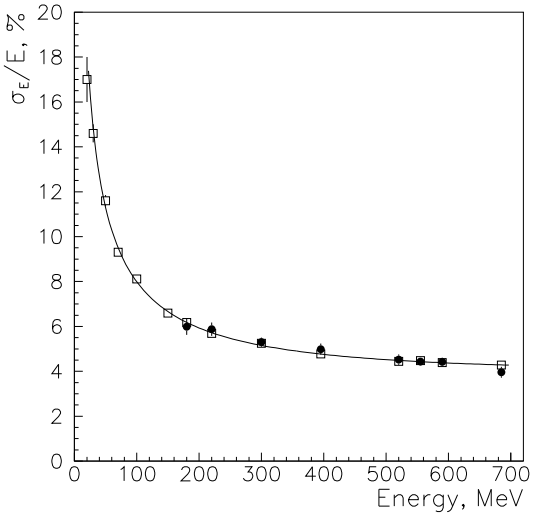
Энергетическое разрешение калориметра составляет $\sigma_E/E = 4.6\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$ (рис. 10(б)), а угловое — $\sigma_{\varphi,\theta} = 0.02/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$ радиан. Торцевой калориметр покрывает область полярных углов от 0.28 до 0.86 и от 2.28 до 2.86 радиан.

1.5 Пробежная система

Пробежная система [33] состоит из двух частей: внутренней и внешней. Обе части выполнены в виде восьми октантов, каждый из которых представляет собой блок



(а) Половинка торцевого калориметра.



(б) Зависимость энергетического разрешения торцевого калориметра от энергии для процесса $e^+e^- \to \gamma\gamma$. Жирные точки — эксперимент.

Рис. 10: Конструкция и энергетическое разрешение торцевого калориметра.

стримерных трубок. Внутренние блоки расположены сразу за цилиндрическим калориметром, при этом толщина вещества перед ними 0.58 ядерных длин. Внешние блоки устанавливаются за ярмом магнита толщиной 13 см железа, что составляет 0.76 ядерных длин. Телесный угол закрываемый пробежной системой, составляет около 50 % от полного телесного угла.

Каждая трубка блока стримерных труб представляет собой газовый детектор, работающий в ограниченном стримерном режиме. Катодом является тонкостенная (300 мкм) трубка из нержавеющей стали диаметром 20 мм для внутренней и 40 мм для внешней систем, а анодом 100 мкм проволочка из золочёного молибдена. Координата вдоль трубки измеряется по разности времён прихода сигналов на концы проволочки. Поперечная координата определяется по номеру сработавшей трубки.

Всего в пробежной системе 64 независимых канала электроники. Каждый канал вырабатывает логический сигнал с длительностью пропорциональной координате вдоль связки труб. Длительность измеряется платой ТП [27]. Координатная точность пробежной системы составляет 30 мм вдоль трубки.

1.6 Система запуска детектора

Важным элементом электроники детектора является система запуска, служащая для того, чтобы в течение 1 мкс принять решение о полезности события и инициировать оцифровку и считывание информации в ЭВМ.

Запуск детектора КМД-2 может вызываться сигналами одного из следующих триггеров: заряженного, нейтрального и торцевого калориметра, включенных по “ИЛИ” (рис. 11).

Заряженный триггер. Основу заряженного триггера составляет трекфайндер TF (трековый процессор) [34], который грубо анализирует расположение сработавших проволочек дрейфовой камеры и срабатывает при нахождении хотя бы одного подобия трека. Начало работы трекфайндера инициируется сигналом срабатывания Z-камеры, стробированного сигналом фазы накопителя. Время анализа информации дрейфовой камеры составляет 400 нс.

Частота срабатывания трекфайндера для событий фона слишком высока, что, как правило, не позволяло записывать весь поток данных с запуском только от TF. Для уменьшения частоты запусков в качестве заряженного триггера использовалось совпадение сигналов TF и CSI — сигнала о наличии энерговыделения больше порогового ($\approx$20 МэВ) хотя бы в одной линейке цилиндрического калориметра.

Нейтральный триггер. В качестве исходной информации для нейтрального триггера [35] используются 56 логических сигналов, соответствующих наличию в линейке цилиндрического калориметра энерговыделения, превышающего пороговое. По расположению сработавших линеек определяется число кластеров в $R-\varphi$ плоскости и углы между кластерами. По этим параметрам все события разбиваются на классы. Сигнал NT появляется, если полное энерговыделение в калориметре превышает некоторый порог, различный для каждого класса событий. Время принятия решения нейтральным триггером составляет 960 нс с момента старта, задаваемого сигналом “ИЛИ” срабатывания всех линеек, стробированного сигналом “фаза” ускорителя.

Для мониторирования работоспособности триггера, в систему запуска был добавлен альтернативный нейтральный триггер, сигнал NTN которого появляется в случае превышения относительно высокого порога суммарных энерговыделений в двух половинках цилиндрического калориметра.

Триггер торцевого калориметра. Триггер торцевого калориметра настроен на запуск событий $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \gamma\gamma$, в которых конечные частицы регистри-

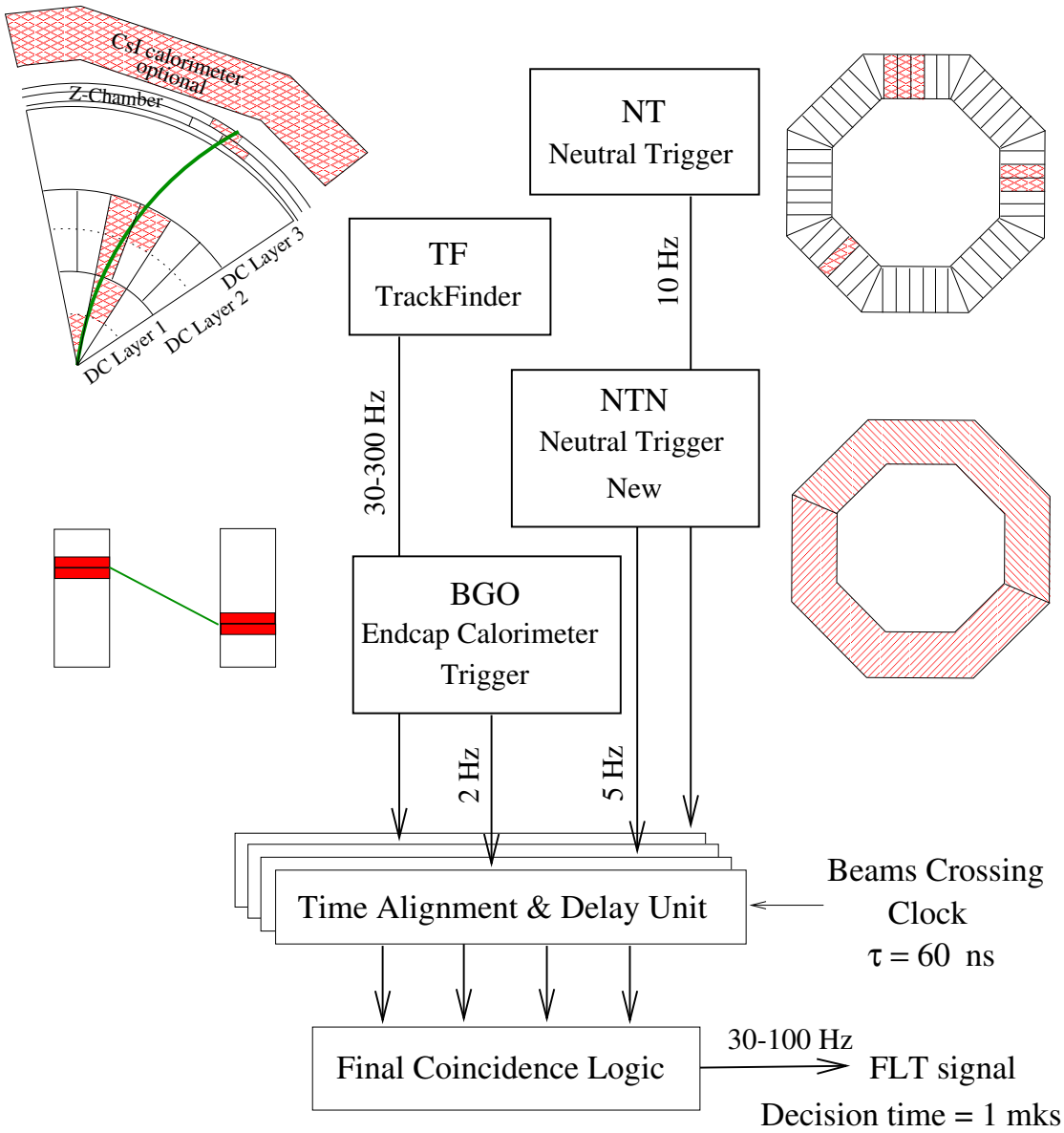


Рис. 11: Схема первичного триггера детектора КМД-2.

руются в торцевом калориметре. Такие события использовались для оперативного измерения светимости и калибровки торцевого калориметра. Сигнал BGO появляется в случае превышения суммарного энерговыделения в двух противоположных группах кристаллов, расположенных в разных торцах, некоторого порога.

Характерная частота запусков детектора при светимости $1 \div 2 \cdot 10^{30}$ $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$ была около $30 \div 70$ Гц. Частота полезных событий, вызванных e^+e^- взаимодействиями, составляла несколько событий в секунду, около 10 Гц было обусловлено космическими частицами, остальные запуски вызывались фоном частиц пучка рассеянных на элементах накопителя.

1.7 Система автоматизации

Задачами системы автоматизации детектора является считывание данных из электроники и запись их на магнитную ленту, мониторинг систем детектора, управление работой детектора. В системе автоматизации выделяются две основные части: система контроля и управления и система сбора данных (рис. 12). Система контроля и управления осуществляет мониторинг детектора, взаимодействие с оператором, управление работой подсистем детектора. Система сбора данных осуществляет чтение данных из оцифровывающей электроники, производит быстрый анализ данных и записывает их на магнитную ленту.

Оцифровывающая электроника, используемая в системе сбора данных детектора КМД-2, выполнена в стандарте КЛЮКВА [36], разработанном в Институте ядерной физики СО РАН. Данный стандарт позволяет создавать автоматизированную систему оцифровки аналоговых сигналов и подготовки данных для считывания в компьютер, при этом решены вопросы синхронизации работы запускающей, оцифровывающей и считывающей электроники.

Общая схема организации оцифровывающей аппаратуры изображена на рис. 13. Регистрирующая аппаратура размещается в специальных крейтах с циклом магистрали 100 нс. В крейте размещены до 16 информационных плат (производящих собственно оцифровку данных) и 4 служебных платы. Служебными платами являются:

1. Процессор вывода (ПВ), производящий чтение, отбор, запоминание и передачу информации, зафиксированной в информационных платах.

2. Размножитель служебных сигналов (РСС), осуществляющий обмен управляющими сигналами с центральной системой управления (см. ниже).

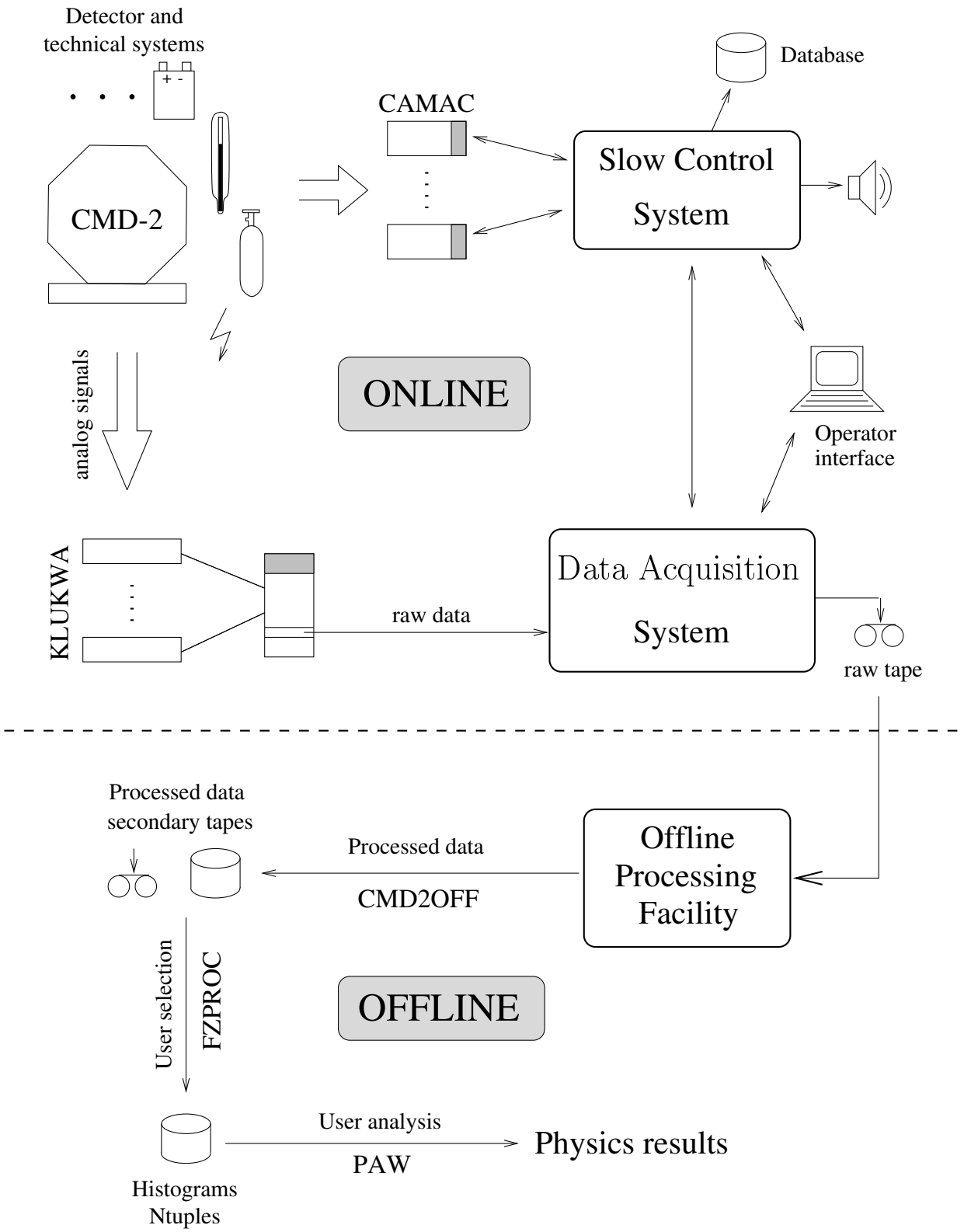


Рис. 12: Общая структура вычислительной системы детектора КМД-2.

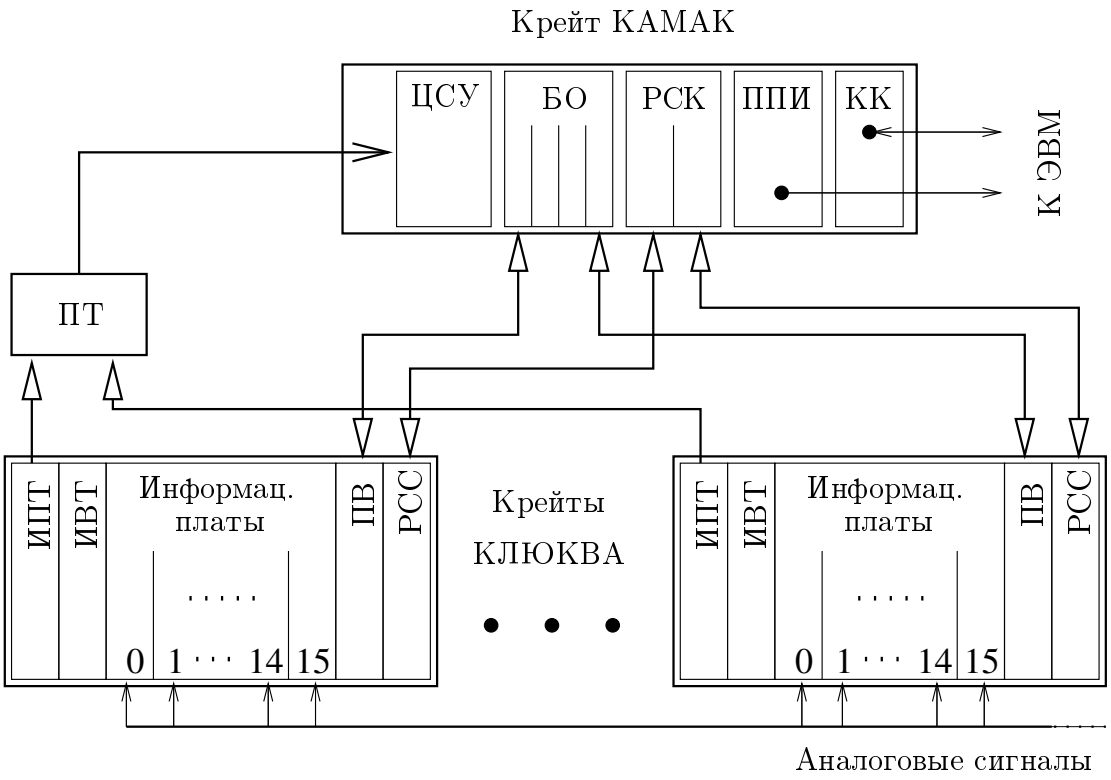


Рис. 13: Оцифровывающая электроника стандарта “КЛЮКВА”.

3. Интерфейс первичного триггера (ИПТ), поставляющий информацию для первичного триггера.

4. Интерфейс вторичного триггера (ИВТ), не использующийся на КМД-2.

ПВ и РСС являются обязательными для работы крейта, ИПТ и ИВТ не являются обязательными. Для хранения считанной информации в ПВ имеется два ОЗУ данных емкостью по 1К 14-разрядных слов. Использование ОЗУ данных позволяет осуществлять разравнивание потока данных перед считыванием в ЭВМ.

На детекторе КМД-2 используются следующие информационные платы:

1. Плата ТП [27] — 16-канальный время-цифровой преобразователь.

2. Плата Т2А [27] — 4-канальный преобразователь “время+2 амплитуды”, разработанный для обработки сигналов с дрейфовых камер с измерением Z-координаты методом деления заряда.

3. Плата А32 [31] — 32-канальный амплитудно-цифровой преобразователь.

4. Плата “Да-Нет” — 1-канальный регистр, отображающий состояние 12 логических входов.

Управление электроникой стандарта КЛЮКВА производится с помощью нескольких служебных блоков, выполненных в стандарте КАМАК. Центральная система управления (ЦСУ) осуществляет взаимодействие между всеми узлами аппаратуры. Также ЦСУ формирует сигнал стандартной частоты 200 МГц, используемый всеми информационными платами. Размножители сигналов КЛЮКВА (РСК) осуществляют связь ЦСУ с РСС каждого крейта КЛЮКВА. Блоки обмена (БО) являются КАМАК-интерфейсами процессоров вывода; к одному БО могут быть подключены два ПВ.

При поступлении сигнала запуска от первичного триггера, ЦСУ генерирует сигналы “запуск” и “блокировка”. По окончании времени, необходимого для завершения преобразования “аналог $\rightarrow$ цифра”, ЦСУ определяет в какую группу ОЗУ ПВ будет считывать информацию. Если оба ОЗУ заняты, то ЦСУ ждет, пока не будет считана информация в компьютер хотя бы из одного ОЗУ. При наличии свободного ОЗУ, ЦСУ генерирует и раздает сигнал “пуск чтения”. По завершении операции “чтение” ПВ спецкрейтов посылают сигнал готовности в ЦСУ. Когда все ПВ закончат чтение, ЦСУ выставит сигнал готовности на магистраки КАМАК и одновременно разблокирует первичный триггер, разрешая прием нового события.

Оцифровывающая электроника связана с ЭВМ с помощью полуавтоматического КАМАК-контроллера К0607А с памятью на команды. При появлении сигнала готовности от ЦСУ, контроллер вычитывает данные из ОЗУ ПВ всех спецкрейтов с помощью блоков обмена БО и передает данные в ЭВМ. После вычитывания данных, соответствующее ОЗУ в ПВ освобождается и готово к считыванию очередной порции данных. Загрузка и чтение команд ПВ производится с помощью блоков обмена. Для пересылки данных в ЭВМ на КМД-2 в разное время использовался либо сам крейт-контроллер, либо специальный последовательно-параллельный интерфейс ППИ-К. При использовании ППИ-К появляется возможность управления электроникой (загрузка, проверка, сброс и т.п.) осуществлять с одного компьютера, а основной поток данных посылать в другой компьютер.

Управление и контроль за работой систем детектора осуществляется с помощью электроники, разработанной в стандарте КАМАК. Программы, составляющие систему контроля и управления, непрерывно следят за множеством датчиков, контролирующих работу систем детектора, периодически посылают текущую информацию в базу данных, осуществляют взаимодействие с оператором и т.п.

Подробно система автоматизации и ее ключевые элементы описаны в Главе 2.

1.8 Система анализа данных

Для проведения анализа физических процессов информация, записанная во время эксперимента, должна быть преобразована в физические характеристики события (число частиц, их импульсы и направления, параметры, характеризующие тип частицы и т.п.). Для преобразования первичной ("сырой") информации в физическую используется программа полной реконструкции CMD2OFF. Результаты обработки записываются на *вторичные* ленты.

Обработка события программой CMD2OFF состоит из двух этапов. Сначала информация реконструируется независимо для каждой подсистемы детектора. На этом этапе производится поиск треков и вершин в дрейфовой камере [26], восстановление кластеров в цилиндрическом [30] и торцевом калориметре [37], восстановление кластеров в Z-камере [38] и поиск "частиц" в пробежной системе. На втором этапе — этапе глобальной реконструкции — производится объединение информации, полученной с разных систем. На этом этапе формируются *заряженные частицы* (трек с подшитыми кластерами в калориметре, срабатываниями Z-камеры и пробежной системы) и *фотоны* (кластеры в калориметре, для которых нет соответствующего трека).

В результате работы CMD2OFF формируется "обработанное" событие, представленное в виде дерева банков в формате ZEBRA [39]. Каждое событие представляет собой отдельное дерево, которое имеет ветви, соответствующие каждой системе детектора, а также для результатов работы глобальной реконструкции. Каждый банк содержит информацию, описывающую конкретный объект (трек, кластер, фотон и т.п.)

На вторичную ленту записываются не все события, а только те, которые прошли предварительные мягкие критерии отбора, которые позволяют отбраковать фоновые события на раннем этапе реконструкции. Как правило, на вторичной ленте остается 25%-50% "сырых" событий.

Дальнейший отбор событий, относящихся к данному процессу, происходит при анализе вторичных лент с помощью программы FZPROC. Информация о событиях, прошедших критерии отбора конкретного пользователя, сохраняется в виде электронных таблиц (Ntuples [40]), которые и используются в окончательном анализе.

1.9 Программа моделирования детектора

Моделирование методом Монте-Карло является неотъемлемой частью любого эксперимента в физике частиц. Программа моделирования имитирует 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 является файл с "сырыми" данными такого же формата, как и экспериментальные события. Кроме того, для данных моделирования записывается дополнительная информация 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.

Пакет GEANT [41], 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. Программа моделирования КМД-2 работает в настоящий момент на основе версии 3.21.

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 частицы при проведении через вещество.

Адронные взаимодействия в GEANT могут моделироваться по выбору пользователя одной из программ моделирования адронных ливней: GHEISHA [42] или FLUKA [43,44].

В совокупности пакет GEANT, набор первичных генераторов, геометрическое описание детектора с учетом использованных материалов и программы оцифровки составляют программу полного моделирования детектора КМД-2 — CMD2SIM [45].

Глава 2

Система автоматизации детектора КМД-2

2.1 Общее описание

Вычислительный комплекс детектора условно подразделяется на две независимые системы: *систему автоматизации* (online) и *систему обработки данных* (offline) (рис. 12). Задачами системы автоматизации являются считывание данных из оцифровывающей электроники и запись их на магнитную ленту, мониторинг систем детектора, управление работой детектора. Задачей системы обработки данных является многоуровневый анализ набранной статистики и получение физических результатов.

Система автоматизации, в свою очередь, естественно разделяется на две большие части: *систему контроля и управления* и *систему сбора данных*. Система контроля и управления осуществляет мониторинг детектора, взаимодействие с оператором, управление работой подсистем детектора. Система сбора данных осуществляет чтение данных из крейтов КЛЮКВА, производит быстрый анализ данных и записывает их на магнитную ленту. Разбиение системы автоматизации на две подсистемы не случайно. Для системы сбора данных характерен практически однородный поток информации, в то время, как система контроля и управления имеет дело с весьма разнообразной информацией. Быстродействие является существенным требованием к системе сбора данных, но не к системе контроля и управления, которая имеет дело с относительно редкими и медленными процессами. Подобные отличия приводят к тому, что требования и, соответственно, реализация для данных подсистем могут существенно отличаться.

Электроника, используемая в системе автоматизации, может быть разбита на две основные группы: *оцифровывающая* и *КАМАК-электроника*. Оцифровывающая электроника разработана в стандарте КЛЮКВА [36], описанном в разделе 1.7. Она используется для оцифровки аналоговых сигналов, пришедших с регистрирующих систем детектора. Оцифровывающая электроника полностью стандартизована — существует весьма ограниченный набор вариантов плат; протокол считывания данных не зависит от того, какая конкретно плата используется. В эту же группу стоит отнести управля-

ющие и интерфейсные блоки стандарта КЛЮКВА, выполненные в стандарте КАМАК.

КАМАК-электроника (разработанная в стандарте КАМАК) используется для управления техническими системами детектора, управления триггером, мониторинга детектора и т.п. На детекторе используется большое количество различных плат стандарта КАМАК [46], многие из которых индивидуальны и предназначены для решения специальных задач.

Для связи крейтов КАМАК с ЭВМ используются крейт-контроллеры К0607 (К0607А) разработки ИЯФ СО РАН и интерфейсные платы семейства ППИ [47], установленные на шине ЭВМ. Контроллеры связаны с интерфейсными платами последовательной линией (коаксиальный кабель) с пропускной способностью 10 Мбит/с. Существуют варианты интерфейсных плат для различных компьютеров. ППИ-8, устанавливаемая на шину Q-bus (Электроника МС1212), позволяет подключить до 8 крейтов. ППИ-16, также устанавливаемая на шину Q-bus (VAX), позволяет подключить до 16 крейтов. ППИ-АТ, устанавливаемая на шину ISA (PC-286 и выше), позволяет подключить до 2 крейтов. Существует также вариант интерфейсной платы ППИ-К, выполненный в стандарте КАМАК, который позволяет управлять несколькими крейтами одним крейт-контроллером, либо связать крейт КАМАК с несколькими компьютерами.

Общая схема работы системы автоматизации следующая. Задачи, составляющие систему контроля и управления, непрерывно следят за множеством датчиков, контролирующих работу систем детектора, периодически посылают текущую информацию в базу данных, осуществляют взаимодействие с оператором и т.п. Эти процессы происходят постоянно, вне зависимости от того, есть ли пучки в накопителе, готов ли детектор к набору экспериментальных данных, происходит ли набор данных и т.п.

После запуска *захода*, т.е. когда детектор набирает экспериментальные данные, становится активной цепочка задач, составляющих систему сбора данных. При появлении сигнала триггера, оцифровывающая электроника оцифровывает аналоговые сигналы, пришедшие с регистрирующих систем детектора, запоминает данные во внутренних буферах памяти (ОЗУ процессоров вывода) и формирует сигнал готовности. При появлении этого сигнала, система сбора данных считывает цифровую информацию из ОЗУ всех крейтов КЛЮКВА и формирует *сырое событие* — блок данных, содержащий результаты оцифровки сигналов со всех систем детектора для одного запуска триггера. Типичный размер сырого события составляет около 1.4 кБ. События анализируются, при этом часть из них может быть отбракована (третичный триггер). Все события, прошедшие отбор, записываются на магнитную ленту. Часть событий посылается специальной задаче для их визуализации в режиме реального времени. Результаты анализа событий, а также условия набора данных периодически контролируются, и, в случае

обнаружения каких-либо проблем, оператору посылается предупреждающий сигнал.

Важной частью системы автоматизации является *база данных мониторинга*. В ней накапливается информация о состоянии детектора, предоставляемая системой контроля и управления за все время работы детектора.

Структура главы следующая. В разделе 2.2 описаны основные этапы развития системы автоматизации детектора. В разделе 2.3 описана общая структура программного обеспечения. В последующих разделах описаны ключевые элементы системы автоматизации: система контроля и управления (раздел 2.4), база данных мониторинга (раздел 2.5), система сбора данных (раздел 2.6) и система анализа данных в режиме реального времени (раздел 2.7).

2.2 История развития системы автоматизации

Первоначальный вариант системы автоматизации детектора [48] был создан в 1991 году к началу набора детектором экспериментальных данных. К этому времени в Институте были доступны только компьютеры типа Электроника МС1212, что и определило конкретную схему реализации системы. Однако детектор нового поколения КМД-2 требовал использования современной вычислительной техники и программного обеспечения, поэтому не удивительно, что первый же опыт работы показал, что созданная система не может решить стоящих перед ней задач в полной мере. В первые же годы работы детектора новая вычислительная техника и аппаратура связи стали становиться все более доступными, что позволило поэтапно обновлять систему автоматизации.

Развитие системы происходило в условиях, когда детектор регулярно производил набор данных, и, поэтому, система автоматизации должна была быть в работоспособном состоянии большую часть времени. Поэтому обновление системы происходило поэтапно — на каждом шаге создавался новый работающий вариант системы автоматизации, базирующийся на элементах предыдущего варианта и являющийся при этом шагом вперед. В течение нескольких лет, которые потребовались для завершения процесса модернизации, постоянно появлялись как новое вычислительное оборудование, так и новые подходы к разработке программного обеспечения. Одновременно с этим росла светимость накопителя, развивался детектор и улучшалось понимание проблем и критических элементов. Поэтому в процессе развития системы автоматизации менялись и требования к ней.

Всего за время работы детектора было создано 5 работающих вариантов: “MC” (первоначальная система, 1992), “AP32” (1993), “VXCMD” (1994), “VSCMD” (1996) и “PC” (1997). Названия вариантов отражают название нового или ключевого элемента,

который отличает данный вариант. В следующих разделах каждый из вариантов будет подробно описан.

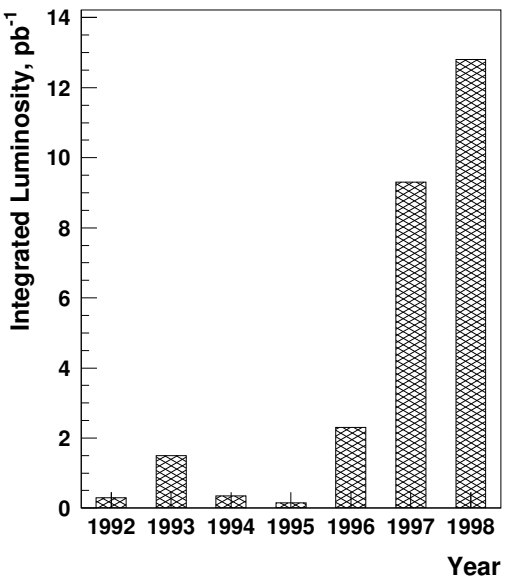
На рис. 14 приведены некоторые параметры, демонстрирующие развитие системы сбора данных. На рис. 14(а) показан интеграл светимости, набранный детектором в разные годы. На рис. 14(б) показана отношение живого времени к полному (параметр, характеризующий эффективность работы системы сбора данных) в зависимости от загрузки первичного триггера для различных вариантов системы сбора данных. На рис. 14(в) показан средний поток данных, считываемый из оцифровывающей электроники, в разные годы работы детектора. На рис. 14(г) показана средняя эффективность работы системы сбора данных для разных лет работы детектора. Как видно из приведенных зависимостей, несмотря на растущий поток данных, эффективность работы системы сбора данных значительно выросла и вплотную приблизилась к максимально возможной величине 92.5%, определяемой блокировками системы на время перепусков пучков.

2.2.1 Вариант “МС”

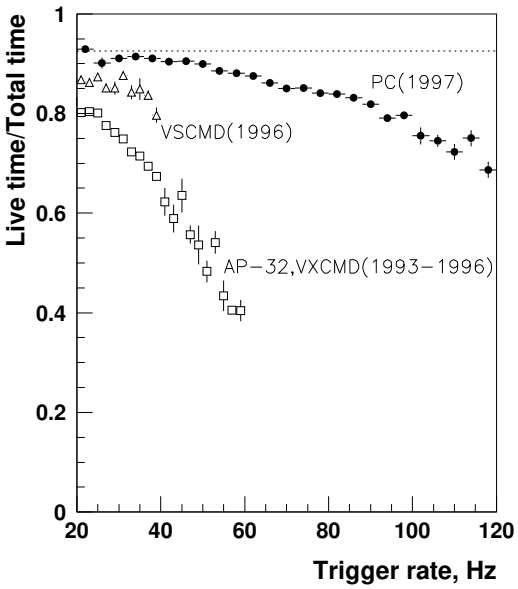
Первоначальный вариант системы автоматизации содержал 3 компьютера (рис. 15): МС-1212 “Центральная ЭВМ”, МС-1212 “Инженерная ЭВМ”, обе под операционной системой RSX-11M, и PDP-11/73 под операционной системой RT-11. Крейты КАМАК были подсоединены как к “Центральной”, так и к “Инженерной” ЭВМ через интерфейс ППИ-8. Для передачи информации между машинами использовалась 3-портовая память “Электроника 2Мб” [49], к которой были подсоединены все три компьютера.

“Центральная” ЭВМ вычитывала сырые события из оцифровывающей электроники, обращаясь к контроллеру крейта КАМАК, в котором располагались управляющие блоки стандарта КЛЮКВА, и передавала их через 3-портовую память в PDP-11/73, которая осуществляла запись данных на магнитофон Exabyte 8200.

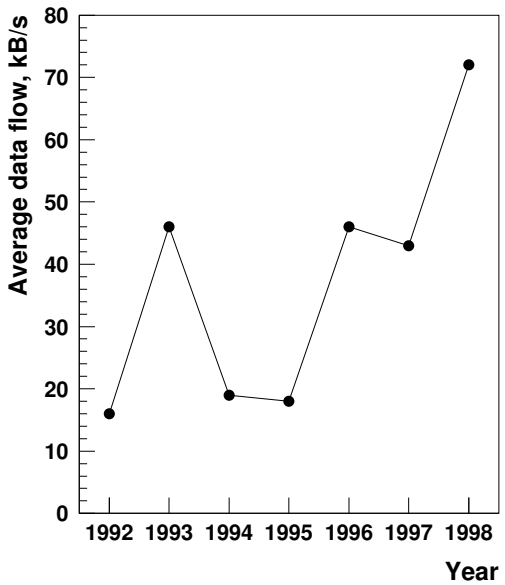
Около 20 задач, работавших на “Инженерной” и “Центральной” ЭВМ, осуществляли управление детектором и его мониторинг. Каждая задача была запущена на той ЭВМ, к которой был подсоединен крейт КАМАК, с которым работает задача. Задачи, работавшие на “Инженерной” ЭВМ, составляли систему мониторинга, т.е. осуществляли периодический контроль аппаратуры. Задачи, работавшие на “Центральной” ЭВМ, составляли систему управления — управляли триггером, оцифровывающей электроникой, запускали и останавливали заходы. Все задачи, работавшие на “Инженерной” и “Центральной” ЭВМ, были разработаны в рамках PDP-ONLINE [50] — универсальной системы сбора данных, разработанной в ЦЕРН. Во время захода информация о состоянии детектора добавлялась в основной поток данных в виде события специаль-



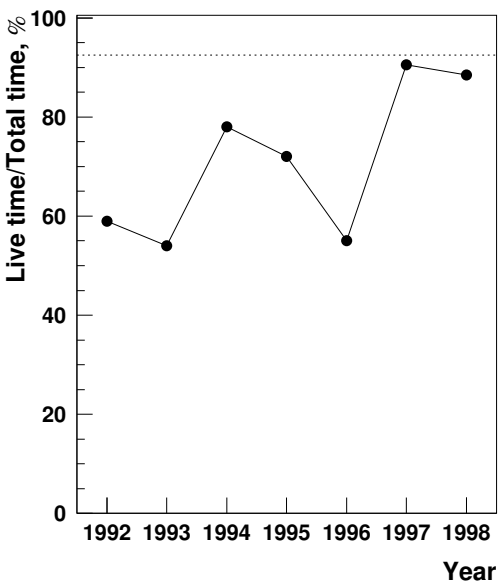
(а) Интеграл светимости, набранный детектором в разные годы работы детектора.



(б) Пропускная способность (отношение живого времени к полному) в зависимости от загрузки первичного триггера для различных вариантов системы сбора данных.



(в) Средний поток сырых событий в системе сбора данных, кб/с.



(г) Эффективность системы сбора данных (отношение живого времени к полному).

Рис. 14: История развития системы сбора данных.

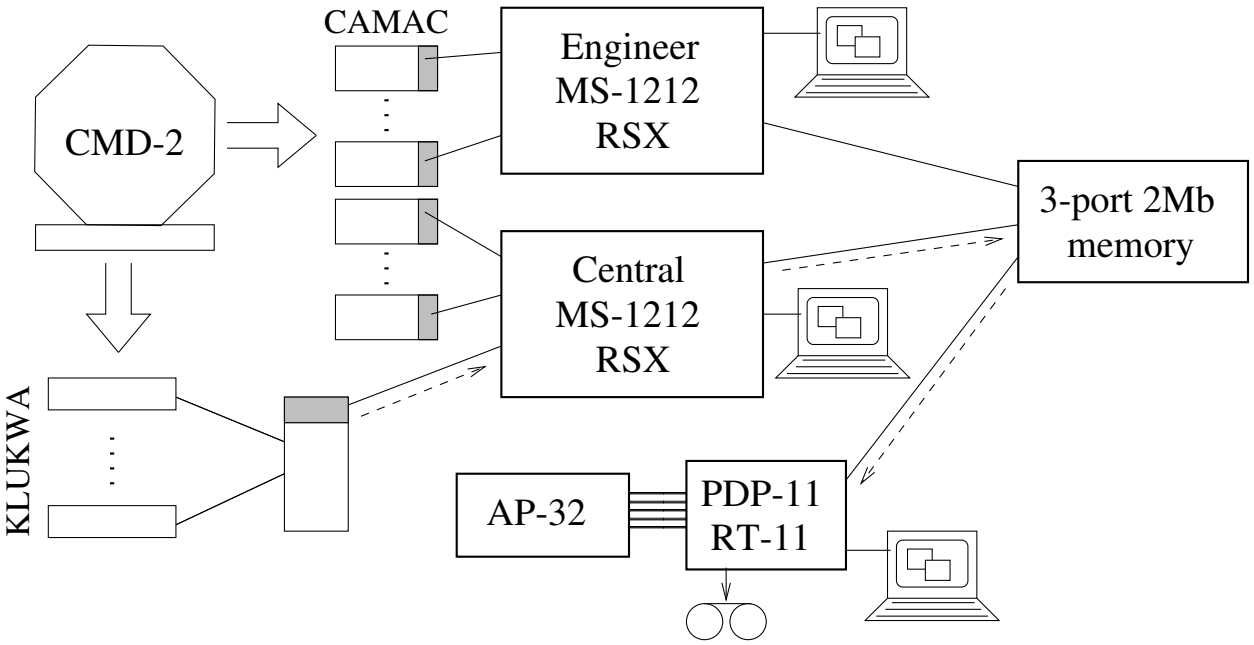


Рис. 15: Система автоматизации — вариант “МС”.

ного формата. Это событие формировалось на “Инженерной” ЭВМ и передавалось в “Центральную” ЭВМ, где и подмешивалось к потоку данных.

Пропускная способность данной системы определялась максимальной скоростью считывания сырых событий в “Центральную” ЭВМ, которая составляла около 20 кб/с. В целом функции системы контроля и управления были распределены между “Центральной” и “Инженерной” ЭВМ, а функции системы сбора данных — между “Центральной” ЭВМ и PDP-11/73.

Данный вариант использовался в первом сезоне работы детектора весной 1992 года [51].

2.2.2 Вариант “АП32”

Наиболее существенным недостатком первоначального варианта системы автоматизации являлась ее низкая пропускная способность. Для преодоления этого недостатка был разработан другой канал передачи основного потока данных в обход медленной “Центральной” ЭВМ (рис. 16).

Новым элементом в данном варианте является процессор АП-32 [52,53] — универсальный 32-разрядный арифметический процессор быстродействием 10 MIPS с оригинальной системой команд. АП-32 является автономным процессором, однако в качестве основного канала ввода-вывода используется ЭВМ “накачки” PDP-11/73. Сопряжение

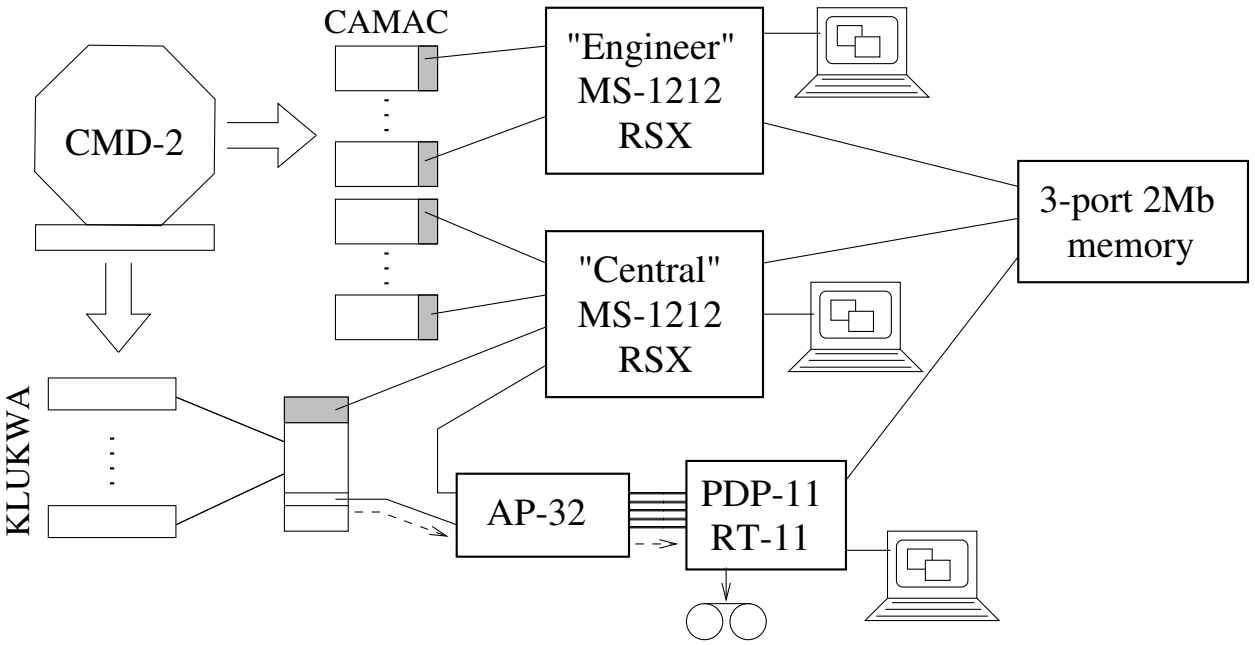


Рис. 16: Система автоматизации — вариант “AP32”.

АП-32 с PDP-11/73 осуществляется с помощью специально разработанного интерфейса [54]. Разработка программ для АП-32 производится на PDP-11/73 с помощью кросс-компиляторов, производящих код, непосредственно загружаемый в АП-32 [55]. Из собственных внешних устройств АП-32 имеет интерфейс связи БАП и 2 графических дисплея ЦДР-3. Графические дисплеи использовались для визуализации событий в режиме реального времени. Интерфейс БАП использовался для получения сырых событий и для связи с “Центральной” ЭВМ.

Интерфейс связи БАП [56] позволяет связывать АП-32 с внешними устройствами последовательным каналом связи ППИ. БАП имеет 2 независимых канала, каждый из которых обладает внутренним ОЗУ емкостью 16 кБ. При приеме данных внешний передатчик заполняет ОЗУ канала БАП и передает сигнал, что передача закончена. По получению сигнала БАП выставляет в статусном регистре бит готовности, сигнализирующий процессору, что блок данных готов к чтению в ОЗУ АП-32. При передаче данных АП-32 заполняет ОЗУ канала БАП и выставляет в статусном регистре бит готовности. При получении сигнала готовности внешний приемник вычитывает ОЗУ канала БАП. Таким образом, во время самого процесса передачи данных в линию процессор свободен для анализа данных.

Для передачи данных из оцифровывающей электроники в БАП использовался интерфейс ППИ-К, разработанный в стандарте КАМАК. Крейт-контроллер К0607А крейта КАМАК, в котором расположены управляющие блоки стандарта КЛЮКВА, подсоеди-

нен к “Центральной” ЭВМ. В том же крейте размещается интерфейс ППИ-К. Контроллер К0607А имеет внутреннее ОЗУ для хранения NAF, что позволяет использовать его как в стандартном режиме исполнения одиночных NAF по запросу ЭВМ, так и в автономном режиме. В этом режиме ЭВМ сначала загружает в ОЗУ контроллера программу, состоящую из NAF и команд управления, и запускает ее. После этого контроллер выполняет эту программу без взаимодействия с ЭВМ.

Управление оцифровывающей электроникой (загрузка, проверка, запуск и т.п.) проводилось как и ранее программами работающими на “Центральной” ЭВМ. При запуске основного цикла чтения данных из оцифровывающей электроники “Центральная” ЭВМ загружала в К0607А специально разработанную программу и запускала ее. Программа К0607А представляла собой бесконечный цикл состоящий из ожидания сигнала готовности от ЦСУ, чтения данных из блоков обмена и пересылки их в БАП, передачи сигнала окончания пересылки в БАП и перехода к ожиданию следующего события. Для остановки цикла чтения данных “Центральная” ЭВМ прерывала исполнение программы в К0607А.

Во время захода в АП-32 работала программа DAQ32, которая ожидала прихода очередного сырого события в БАП, производила его быстрый анализ и передавала событие в PDP-11/73 для записи магнитную ленту. По результатам быстрого анализа часть событий отбраковывалась (третичный триггер), а также отбирались события упругого рассеяния $e^+e^- \to e^+e^-$ на большие углы, по которым производилось измерение набранного интеграла светимости. Часть событий отображалась на графических дисплеях, подключенных к АП-32. Следует отметить, что в первоначальном варианте отсутствовала возможность производить первичный анализ сырых событий в режиме реального времени.

Второй канал БАП был подключен через интерфейс ППИ-8 к “Центральной” ЭВМ. Он использовался для передачи управляющих сигналов (начало и конец захода) и специальных данных, которые добавлялись к основному потоку данных (калибровочные массивы, информация о состоянии детектора). Подобные данные оформлялись в виде событий специального формата, которые записывались на магнитную ленту вместе с сырыми событиями.

В остальном программное обеспечение на “Центральной” и “Инженерной” ЭВМ не претерпело изменений. Пропускная способность данного варианта определялась скоростью записи данных на магнитную ленту и составляла около 50 кб/с. В целом функции системы контроля и управления были распределены между “Центральной” и “Инженерной” ЭВМ, а функции системы сбора данных — между АП-32 и PDP-11/73.

Данный вариант использовался при наборе статистики в период с весны 1993 года

по лето 1994 года.

2.2.3 Вариант “VXCMD”

К 1994 году наиболее ненадежным и устаревшим узлом в системе автоматизации детектора стала система контроля и управления. Основной причиной этого было то, что система базировалась на устаревших ЭВМ Электроника МС1212. Их программное обеспечение не развивалось и не поддерживалось. Это приводило к существенным ограничениям на возможности прикладных программ, осуществляющих функции контроля и управления. Кроме того, на МС1212 отсутствовали удобные средства разработки и отладки программ. При этом уже стали доступны более современные ЭВМ и программное обеспечение.

Новым элементом в данном варианте (рис. 17) стала ЭВМ VAX Server 3300, в дальнейшем именуемой VXCMD, под операционной системой VMS. В качестве внешней шины в VXCMD используется Q-bus, для которого был разработан интерфейс ППИ-16. Этот интерфейс позволяет подключить к VXCMD до 16 крейтов КАМАК. Кроме того, была разработана библиотека подпрограмм [57], позволяющая работать с электроникой КАМАК крейтов из пользовательских программ.

В системе автоматизации VXCMD заменил “Инженерную” ЭВМ — центр системы мониторинга. Все крейты КАМАК, за исключением тех, которые связаны с управлением триггером и оцифровывающей электроникой, были подключены к VXCMD. Были написаны новые программы, осуществляющие периодический контроль аппаратуры. Программы для VXCMD были разработаны в рамках XONLINE [58] (раздел 2.3.3) — универсальной системы сбора данных, созданной в ИЯФ. “Инженерная” ЭВМ в системе автоматизации больше не использовалась.

Несмотря на то, что старые программы могли быть запущены в новой программной среде с минимальными переделками, при переносе программного обеспечения с “Инженерной” ЭВМ на VXCMD было решено переписать все программы заново. Причиной данного решения было то, что реализация старых программ была в значительной степени обусловлена требованиями и ограничениями, налагаемыми средой разработки “Инженерной” ЭВМ. Дополнительные трудозатраты, связанные с написанием новых программ, с лихвой окупились новыми возможностями, появившимися в системе.

Важным новым элементом системы автоматизации стала база данных мониторинга детектора [59]. Все задачи, осуществляющие контроль работы систем детектора, с периодом от нескольких минут до нескольких часов записывают информацию о состоянии систем детектора в базу данных. Появление базы данных позволило перевести контроль за работой систем детектора на новый уровень.

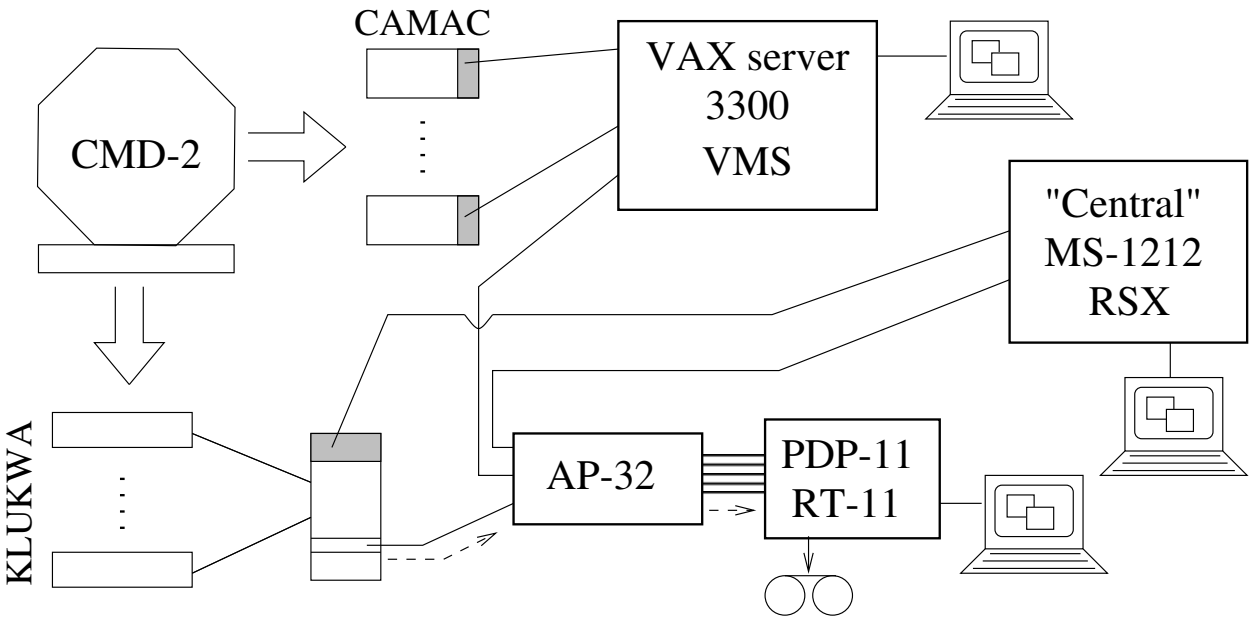


Рис. 17: Система автоматизации — вариант “VXCMD”.

Система сбора данных и система управления оцифровывающей электроникой и триггером не претерпела изменений. Как и ранее, управление оцифровывающей электроникой и триггером осуществлялось из “Центральной” ЭВМ. Запуск основного цикла чтения событий осуществлялся загрузкой программы в память и пуском контроллера K0607A. Данные поступали в АП-32, где происходил их быстрый анализ и визуализация. Для записи на магнитную ленту события передавались на PDP-11/73.

Во время захода данные о работе систем детектора периодически посылались из VXCMD в АП-32 для записи на магнитную ленту вместе с основным потоком событий. Для организации связи между VXCMD и АП-32, для АП-32 был изготовлен второй интерфейс связи БАП, один из каналов которого был подключен к интерфейсу ППИ-16 VXCMD. Т.о., АП-32 был подключен к трем внешним источникам данных:

1. К крейту КАМАК, в котором располагались управляющие блоки стандарта КЛЮКВА. Из этого источника поступал поток сырых событий.

2. К “Центральной” ЭВМ, от которой поступали сигналы о запуске и остановке захода.

3. К VXCMD, откуда поступали данные о работе систем детектора.

В процессе быстрого анализа потока данных, АП-32 накапливал гистограммы, характеризующие работу регистрирующих систем детектора, состав потока событий и т.п. Эти гистограммы периодически во время захода и по концу захода сохранялись

в виде файла на диске PDP-11/73, откуда они передавались по FTP в VXCMD для хранения и анализа.

Пропускная способность системы автоматизации не изменилась, поскольку система сбора данных не претерпела изменений. Функции системы контроля и управления были распределены между VXCMD и "Центральной" ЭВМ, а системы сбора данных — между АП-32 и PDP-11/73.

Данный вариант использовался при наборе статистики в период с осени 1994 года по лето 1996 года.

2.2.4 Вариант "VSCMD"

К 1996 году наиболее существенными недостатками системы автоматизации стали ненадежность "Центральной" ЭВМ и низкая скорость записи данных на PDP-11/73. Для устранения этих недостатков в систему автоматизации была введена ЭВМ VAXstation 4000-90 (в дальнейшем именуемая VSCMD), которая стала выполнять функции "Центральной" ЭВМ и, частично, PDP-11/73 (рис. 18).

В предыдущих вариантах системы автоматизации "Центральная" ЭВМ выполняла функции управления триггером и оцифровывающей электроникой и управления заходами. В течение весны-лета 1996 было разработано программное обеспечение для управления триггером и оцифровывающей электроникой для VXCMD [60,61]. С этого момента все крейты КАМАК были подсоединены к VXCMD, и управление триггером и электроникой осуществлялось с VXCMD. Для VSCMD было разработано программное обеспечение осуществляющее управление заходами, чтение данных и запись их на магнитную ленту или диск. Программы для VSCMD разрабатывались на базе XONLINE, который был модифицирован для работы в распределенном комплексе.

Все управление и контроль за работой систем детектора осуществлялось с VXCMD. Перед запуском захода, из VXCMD осуществлялась загрузка оцифровывающей электроники и программы чтения событий в память крейт-контроллера. Сигнал запуска захода, инициированный оператором на VSCMD, передавался через VXCMD на АП-32. После получения этого сигнала АП-32 начинал чтение сырых событий, проводил их быстрый анализ и передавал все события, прошедшие третичный триггер, на VXCMD через интерфейсы БАП и ППИ-16. События из VXCMD по сети Ethernet попадали на VSCMD, где записывались на магнитную ленту.

"Центральная" ЭВМ не использовалась в системе автоматизации, а PDP-11/73 использовалась только как ЭВМ "накачки" для АП-32 и для передачи контрольных гистограмм, набранных в процессе быстрого анализа сырых событий, на VSCMD.

Пропускная способность данного варианта определялась скоростью обработки сы-

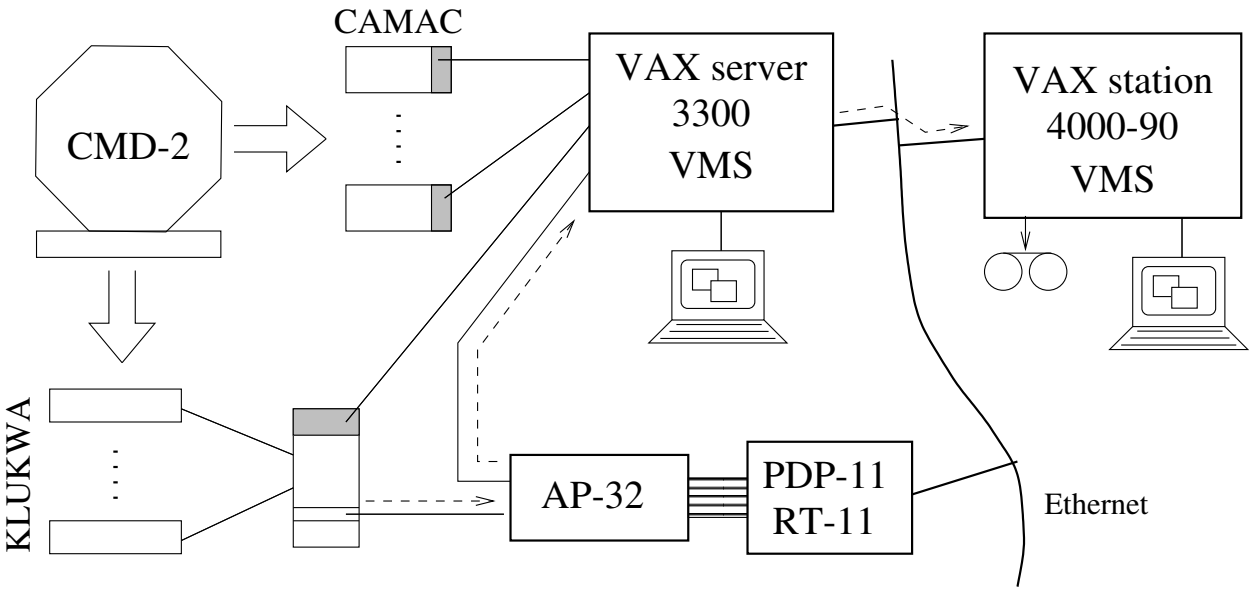


Рис. 18: Система автоматизации — вариант “VSCMD”.

рых событий на АП-32 и составляла около 70 кб/с. Функции системы контроля и управления были распределены между VXCMD и VSCMD, а системы сбора данных — между АП-32, VXCMD и VSCMD.

Данный вариант использовался в наборе статистики осенью 1996 года.

2.2.5 Вариант “PC”

Возросшая, но все же недостаточная, пропускная способность варианта “VSCMD” в основном ограничивалась скоростью прохождения данных через АП-32. Другая проблема была связана с участившимися сбоями АП-32. Поскольку АП-32 являлся уникальным изделием, поддержание его в рабочем состоянии требовало постоянных усилий разработчиков. С другой стороны, к тому времени появились высокопроизводительные, дешевые и широко распространенные компьютеры на базе процессора Intel 486. Очередным шагом в развитии системы автоматизации стало исключение АП-32 (и связанной с ним PDP-11/73) из системы с распределением его функций между ЭВМ PC-486 и VSCMD (рис. 19).

В предыдущем варианте системы автоматизации АП-32 выполнял функции передачи данных из крейтов КЛЮКВА в VXCMD и функции третичного триггера. PC-486, заменившая АП-32, выполняла только функции передачи данных. Данные, как и ранее, поступали из крейта КАМАК, в котором размещались управляющие блоки стандарта КЛЮКВА, через интерфейс ППИ-К в интерфейс ППИ-2, установленный на шине ISA PC-486. Поступающие данные записывались по прямому доступу в память PC-486. При

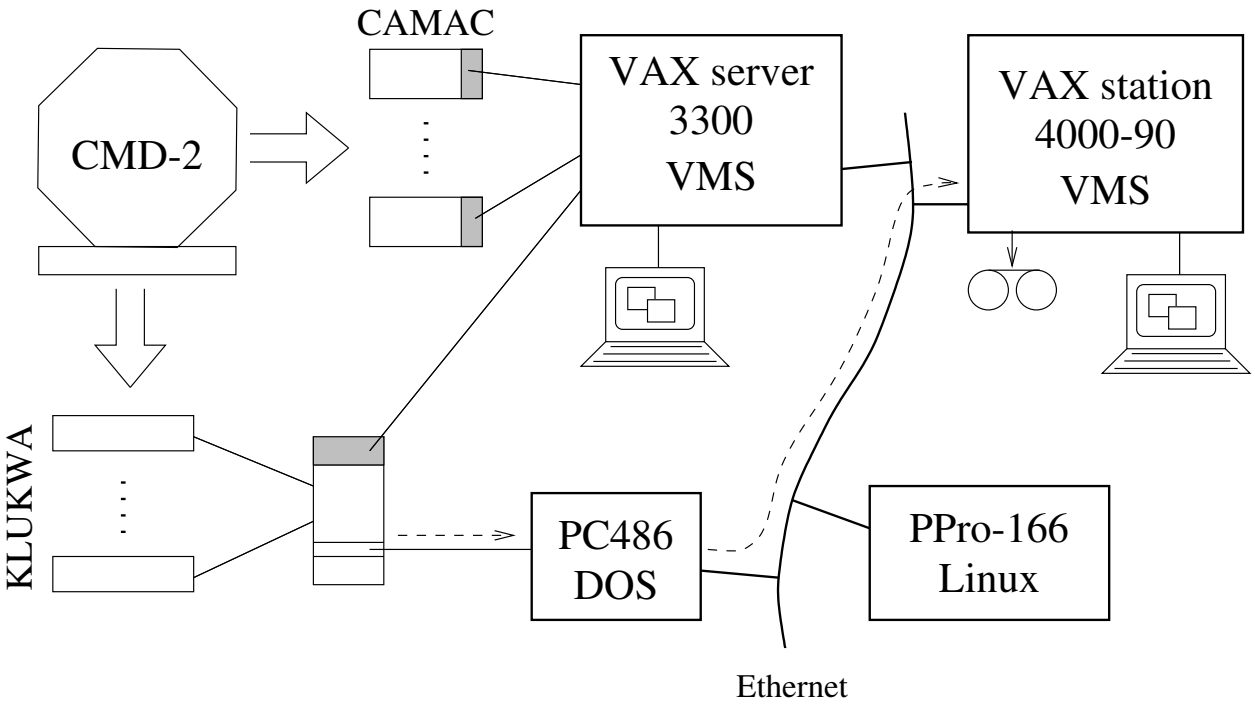


Рис. 19: Система автоматизации — вариант “PC”.

заполнении буфера памяти генерировалось прерывание, программа CAMRD в PC-486 читала очередную порцию данных и посылала их в VSCMD (напрямую, а не через относительно “медленную” VXCMD) по сети Ethernet. В PC-486 был также реализован буфер событий объемом 1 Мб, что позволило эффективно разравнивать поток данных.

Функции третичного триггера перешли к VSCMD, для чего было разработано новое программное обеспечение (пакет TLT), реализующее быстрый анализ сырых событий и третичный триггер. При получении сигнала запуска захода, инициированного оператором, VSCMD посылала управляющие сигналы задачам на VXCMD, осуществляющим инициализацию триггера и оцифровывающей электроники и загрузку программы чтения сырых событий в крейт-контроллер. После запуска программы чтения, поток сырых событий поступал в PC-486, откуда они посылались на VSCMD, пропускались через третичный триггер и записывались на магнитную ленту. Работа системы контроля и управления не изменилась.

В течение нескольких месяцев после запуска данного варианта АП-32 продолжал использоваться для визуализации событий в режиме реального времени. Небольшая доля событий посылалась из VSCMD в VXCMD, откуда они через БАП попадали в АП-32 и отображались на графических дисплеях. Впоследствии программа визуализации событий была адаптирована для работы в среде X-Windows и запущена на VSCMD, после чего АП-32 был исключен из системы сбора данных.

В начале 1998 года в систему автоматизации была добавлена ЭВМ Pentium-166 под операционной системой Linux. На ней была организована полная реконструкция части потока данных в режиме реального времени. По результатам реконструкции производился анализ работоспособности детектора на основе физических характеристик зарегистрированных событий (например, по импульсному разрешению дрейфовой камеры).

Пропускная способность данного варианта определялась скоростью передачи событий из КАМАК-крейта в PC-486 и составляла около 140 кб/с. Функции системы контроля и управления распределились между VXCMD и VSCMD, а системы сбора данных — между PC-486 и VSCMD.

Этот вариант был запущен в начале 1997 года и использовался во всех последующих сеансах работы детектора.

2.3 Программное обеспечение системы автоматизации

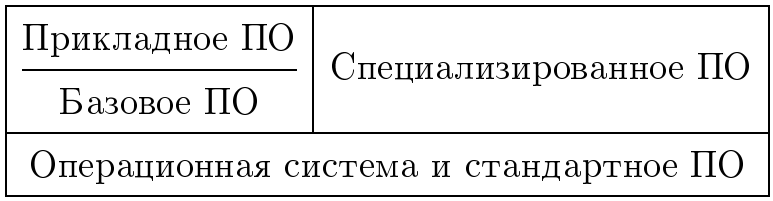
Система автоматизации является распределенным программным комплексом — множеством отдельных программ, работающих на различных компьютерах и взаимодействующих между собой. Общая схема программного обеспечения изображена на рис. 20. Программное обеспечение (ПО), используемое в системе, можно условно разделить на несколько уровней (рис. 20).

Операционная система и стандартное ПО — системные вызовы и средства, предоставляемые операционной системой для прикладных программ, а также широко распространенные библиотеки, такие, как CERNLIB [62].

Базовое ПО — библиотеки, разработанные специально для создания основной массы прикладных программ системы автоматизации, при этом слабо связанные с конкретной спецификой детектора. Базовое ПО предоставляет удобные механизмы управления задачами, взаимодействия задач, стандартный пользовательский интерфейс и т.п.

Прикладное ПО — прикладные программы, выполняющие конкретные функции в системе автоматизации, разработанные с использованием базового ПО. Использование базового ПО позволяет программисту, разрабатывающему прикладное ПО, сконцентрироваться на реализации прикладных функций программы.

Специализированное ПО — немногочисленный класс “нестандартных” (разработанных без использования базового ПО) программ, реализующих некоторые клю-



Специализированное ПО

ACP

DAQ32

TLT

CAMRD

Базовое ПО

PDP-ONLINE

XONLINE

IMAN

Прикладное ПО

- **общего назначения**
  AUTOLOGGER, LOGGER, ALARM
- **мониторинг детектора**
  CONTROL, VOLCHE, LUMIN, XNMR, VALVEALL
- **управление заходами**
  RECORDER, RUNINFO, RAWEXTR, PICSEL
- **управление триггером**
  TRIGGER, TRFIND, NTFIL, BGOFIL
- **управление оцифровывающей электроникой**
  KLUMAN
- **калибровочные программы**

Рис. 20: Общая структура программного обеспечения системы автоматизации.

чевые функции в системе автоматизации.

Основу вычислительного комплекса системы автоматизации в разное время составляли компьютеры типа Электроника MC1212 под операционной системой RSX или компьютеры типа VAX под операционной системой VMS. Базовым ПО для MC1212 являлся PDP-ONLINE [50], разработанный в ЦЕРН. Базовым ПО для VAX являлся XONLINE [58], разработанный в ИЯФ СО РАН для использования на детекторах КМД-2 и КЕДР. На компьютерах PDP-11/73, АП-32 и PC-486 использовалось только специализированное ПО, поэтому для этих компьютеров базовое ПО не разрабатывалось.

Специализированное и базовое ПО описано в разделах 2.3.1–2.3.4. Прикладное ПО описано в разделах 2.4 и 2.6.

2.3.1 Специализированное ПО

`ACP`[1] — программа для записи данных на магнитофон Exabyte, разработанная для PDP-11/73 . Помимо собственно записи данных на ленту, программа позволяет оператору производить управляющие операции, например монтирование ленты, перемотку, получение листинга и т.п.

`DAQ32` — программа сбора данных, разработанная для АП-32. В ее функции входит получение сырых событий из оцифровывающей электроники, их быстрый анализ и фильтрация, мониторирование качества данных, визуализация событий в режиме реального времени, передача данных на PDP-11/73 для записи на ленту. Программа DAQ32 описана в разделе 2.7.1.

`TLT` — программный пакет, предназначенный для быстрого анализа сырых событий. На его основе был создан третичный триггер и система мониторирования качества данных. TLT описан в разделе 2.7.2.

`CAMRD`[2] — программа, разработанная для PC-486 (DOS), организующая буферизацию и передачу данных из оцифровывающей электроники на VSCMD.

2.3.2 Базовое ПО для MC-1212 — PDP-ONLINE

Программное обеспечение PDP-ONLINE [50], разработанное в ЦЕРН в конце 70-х – начале 80-х годов, является универсальной системой автоматизации, которая может быть настроена и расширена для использования в конкретном эксперименте. Версия,

[1] Разработчик программы Ю.И.Мерзляков.

[2] Разработчики программы А.Г.Шамов и В.Н.Козлов.

использованная на КМД-2, была предназначена для работы в распределенном комплексе компьютеров типа МС-1212. PDP-ONLINE представляет собой ряд служебных программ и набор библиотек, которые предоставляют следующие возможности:

1. Централизованное управление прикладными программами.
2. Стандартный интерфейс оператора, представляющий собой систему меню.
3. Механизмы для управления заходами.
4. Механизмы распределения событий, прочитанных из оцифровывающей электроники.
5. Централизованную протокольную систему.
6. Централизованную систему доступа к гистограммам, набранным прикладными программами.

Выделенный "центральный" процесс SCHEDULER осуществляет управление системой, определяя порядок исполнения прикладных программ и организуя к ним доступ оператора с любого терминала системы. Другие служебные задачи организуют работу с магнитофоном, протокол работы системы, управление заходами, конфигурирование системы и т.п.

PDP-ONLINE предоставляет шаблон для разработки прикладных программ. Все служебные функции, как то взаимодействие с SCHEDULER и т.п., скрыты от программиста. Разработчик прикладной программы должен написать несколько подпрограмм (от 1 до 6) со стандартными именами и интерфейсом, которые вызываются шаблоном по мере необходимости. Подпрограммы, реализуемые разработчиком, соответствуют основным состояниям прикладной программы: инициализация, пользовательский интерфейс, выход, основной цикл работы с возможностью периодического запуска, окончание захода и обработка физического события. Пользовательский интерфейс организован в виде системы меню. Прикладная программа имеет только один поток исполнения, поэтому при взаимодействии с оператором основной цикл работы приостанавливается.

2.3.3 Базовое ПО для VAX/VMS — XONLINE

XONLINE [58,59] представляет собой набор программных модулей, на основе которых можно строить развитую систему автоматизации детектора. Первоначально XONLINE был предназначен для создания системы автоматизации детектора КЕДР. В середине 1994 года, когда началась работа по замене компьютеров типа МС-1212

компьютерами типа VAX в системе автоматизации детектора КМД-2, XONLINE был выбран в качестве нового базового ПО. К тому времени основные модули XONLINE были уже разработаны. Система автоматизации КМД-2 была первым местом, где использовался XONLINE, поэтому одновременно с его внедрение происходила и отладка в условиях реального использования. В последующие несколько лет, по мере все более широкого использования XONLINE и появления новых требований, происходило и развитие собственно XONLINE.

XONLINE состоит из следующих основных модулей (рис. 21).

- **PIEMAN** — **P**rocess **I**nternal **E**vent **MAN**ager
  Данный модуль позволяет организовать прикладную программу как управляемую внутренними программными событиями. В прикладной программе могут быть определены *внутренние программные события*, каждому из которых соответствует подпрограмма-обработчик. При этом основной цикл исполнения программы состоит из циклов *появление события* $\rightarrow$ *обработка события*. События могут появляться через указанный промежуток времени, при появлении сигнала от аппаратуры (LAM), при вводе с клавиатуры, при получении сигнала от другой задачи, генерироваться во время обработки другого события и т.д. Каждое событие имеет определенный приоритет, существует очередь событий. Благодаря подобной организации, программа может иметь несколько активных потоков исполнения.

- **APRON** — **A**utonomous **PR**ocess m**ON**itor
  Монитор автономных задач APRON, совместно с модулем TINMAN (см. ниже), позволяет управлять распределенной многозадачной системой с ограниченного числа терминалов. Каждая программа, разработанная в рамках XONLINE, представляет собой автономную задачу, не связанную с конкретным терминалом. APRON представляет собой привелигированный сервер, который по запросу клиентов запускает и останавливает задачи, изменяет их статус, поддерживает журнальный файл и образ терминала. К каждой задаче можно временно подключить конкретный терминал, при этом образ терминала копируется на реальный экран.

- **TINMAN** — **T**erminal **IN**teraction **MAN**ager
  Данный модуль включает в себя библиотеку подпрограмм и исполняемую программу. С помощью данного модуля осуществляется подключение и отсоединение прикладной программы к терминалу, реализуется пользовательский интерфейс в виде командной строки и (или) системы меню [63]. Пользовательский интерфейс может быть реализован как независимый поток исполнения в прикладной программе, что позволяет организовать управление в режиме реального времени.

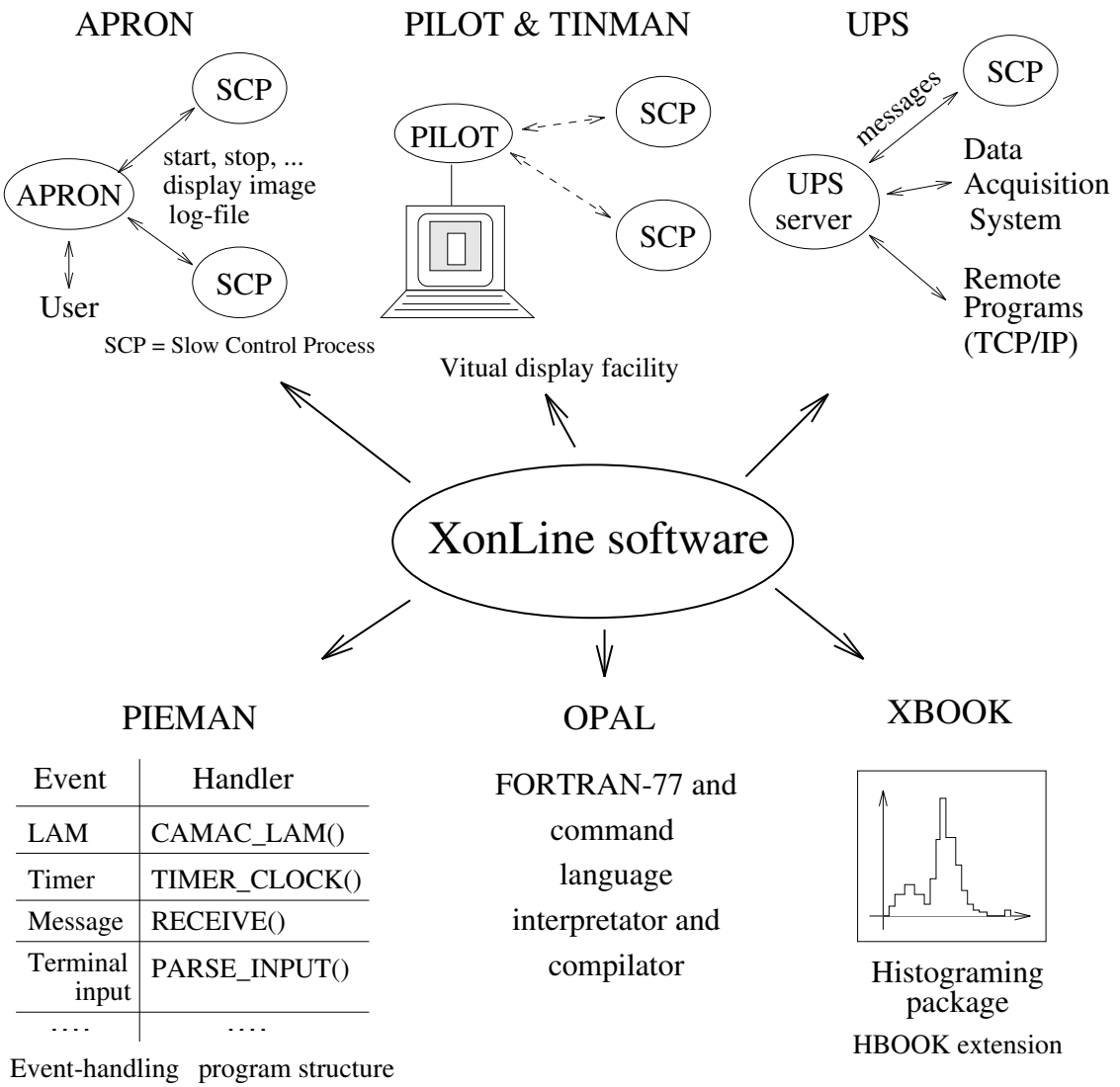


Рис. 21: XONLINE — набор модулей для разработки системы автоматизации.

- **OPAL** — **O**pen **P**hysical **A**nalysis **L**anguage
  Данный модуль [64] представляет собой интерпретатор команд, который позволяет пользователю определять собственные команды при создании интерфейса прикладной программы. Синтаксис команд расширяет правила языка DCL — командного языка ОС VMS. Существует широкий набор предопределенных команд, в который, в том числе, входят команды для работы с аппаратурой, выполненной в стандарте КАМАК. Помимо интерпретатора команд, OPAL является интерпретатором языка FORTRAN-77.

- **XBOOK** — e**X**ternal histogram **BOOK**ing package
  Данный модуль базируется на пакете HBOOK [40], но представляет предостав-

ляет пользователям возможности для работы с гистограммами на уровне команд OPAL.

- **UPS** — **U**niversal **P**ublishing **S**ervice

  Данный модуль, представляя собой библиотеку подпрограмм и исполняемую задачу-сервер, обеспечивает всевозможное межзадачное общение между процессами системы [65]. Основной механизм передачи сообщений следующий. В системе определяется *группа сообщений* (edition в терминах UPS, аналог электронных конференций). Любая задача может *подписаться* на группу сообщений. Если какая-либо задача пошлет сообщение в группу, то его получат все задачи, подписанные на нее. Существует возможность фильтрации поступающих сообщений. Для каждого получателя организуется очередь сообщений. Возможна посылка и ожидание сообщений как в синхронном, так и в асинхронном режиме, с подтверждением и без подтверждения, и т.п. Возможна посылка сообщений и конкретному адресату. Одной из функций UPS является раздача клиентам сырых событий, прочитанных из оцифровывающей электроники.

XONLINE может быть использован в распределенном комплексе компьютеров VAX/VMS. На каждом компьютере при этом работают собственные копии серверов APRON и UPS, взаимодействующие с соответствующими серверами на остальных компьютерах. При этом прикладная программа работает в единой среде на любом компьютере.

Суммируя вышесказанное, прикладная программа, разработанная в рамках XONLINE, обладает следующими основными возможностями:

1. Работает как автономная задача, при этом управление осуществляется с любого терминала системы.

2. Имеет пользовательский интерфейс в виде системы меню и (или) командной строки. Команды могут вводится с клавиатуры, или посылаться из другой программы системы.

3. Может иметь несколько активных потоков управления. Типичными потоками являются основной цикл измерений, ввод данных с клавиатуры, получение сообщений от других задач и т.п.

4. Может получать сырые события из системы сбора данных. Существуют развитые возможности для взаимодействия с другими программами.

Прикладные программы как правило используют следующие механизмы межзадачного обмена:

1. В случае ярко выраженных отношений типа клиент-сервер, как правило используется механизм посылки команд от одной задачи к другой.

2. В случае, когда необходима синхронизация задач, либо пересылка больших объемов данных (что характерно, например, при обработке сырых событий, получаемых из системы сбора данных), используется механизм пересылки сообщений в рамках UPS.

3. В случае, когда необходимо предоставить результаты, полученные одной задачей, для использования другим задачам и при этом не требуется синхронизовать работу задач, используется механизм передачи данных через IMAN (см. следующий раздел). Подобный подход характерен для задач мониторинга, которые сохраняют в IMAN текущие значения мониторируемых датчиков.

Прикладные программы разрабатываются либо прямо на базе средств предоставляемых XONLINE, либо с помощью специально разработанного шаблона [66], который скрывает от разработчика тонкости и позволяет быстро создавать “типичные” для системы автоматизации программы.

2.3.4 IMAN

IMAN [67], разработанный в ИЯФ СО РАН на детекторе СНД, является удобным средством, позволяющим организовывать единое информационное пространство для задач в системе автоматизации.

IMAN построен по модели клиент-сервер. Сервер, запущенный на VSCMD, хранит предоставляемую клиентами информацию в памяти машины и периодически сохраняет ее на диск. Клиенты взаимодействуют с сервером по TCP/IP. Существуют библиотеки подпрограмм для языков C, FORTRAN и Java.

Информация в IMAN хранится в *доменах* (аналогах директорий). В каждом домене хранятся *элементы*, являющиеся числами или массивами целого, вещественного и т.п. типа, либо строкой переменной длины. Клиенты могут создавать или удалять домен, создавать или удалять элемент, прочесть или изменить значение элемента.

IMAN предоставляет удобный механизм хранения информации, которая производится одной задачей и может использоваться другими задачами, в случаях, если не требуется синхронизация задач или накопление истории. В системе автоматизации IMAN используется для хранения части конфигурационной информации, а также текущих значений датчиков, контролируемых системой мониторинга.

2.4 Система контроля и управления

Система контроля и управления [59] состоит из ряда программ, которые позволяют оператору контролировать и управлять работой систем детектора. В данной работе описана система контроля и управления в том виде, как она сложилась с 1994 года — после перехода на ЭВМ типа VAX. Система контроля и управления на ЭВМ Электроника МС1212 функционально близка к описанной, хотя количество программ и распределение функций между ними отличалось.

2.4.1 Программы общего назначения

Программы, составляющие данную группу, реализуют функции общего назначения, используемые другими программами: протокольную систему и управление сигналом сирены.

Протокольная система

Каждая программа, разработанная на базе XONLINE, может генерировать специальные текстовые сообщения (далее именуемые “протокольными сообщениями”), которые автоматически собираются вместе и сохраняются. Как правило, такие протокольные сообщения несут информацию о важных явлениях, происходящих в системе автоматизации: запуск задачи, выход какого либо контролируемого значения за допустимые пределы, запуск захода и т.п. Протокольная система состоит из следующих элементов [60].

- Библиотеки подпрограмм, надстроенная над XONLINE, скрывающая от пользователей реализацию методов передачи сообщений. Пользователям предоставляется следующий интерфейс: посылка протокольного сообщения, получение протокольных сообщений от других задач с возможностью фильтрации, анализ протокольных сообщений.

- Программы AUTOLOGGER, постоянно работающей на VSCMD, получающей все протокольные сообщения и сохраняющей их в файлах на диске.

- Программы, позволяющей пользователям производить поиск протокольных сообщений по различным критериям: времени, отправителю, контексту и т.п.

- Программы LOGGER, получающей все протокольные сообщения и отображающей их на экране в порядке поступления. Эта программа позволяет оператору видеть сообщения от всех задач в едином месте.

Управление сигналом сирены

Множество задач в системе автоматизации использует специальное устройство, расположенное в пультовой детектора, которое подает звуковой сигнал сирены для привлечения внимания оператора. Это устройство управляется с помощью специальной платы, выполненной в стандарте КАМАК, и расположенной в крейте, подключенном к VXCMD. Для совместного использования сирены многими задачами была разработана специальная программа-сервер ALARM [60], работающая на VXCMD. ALARM позволяет программам-клиентам включать и выключать сигнал сирены на одном из 16 независимых каналов, подавать серию сигналов определенной длительности, блокировать и освобождать канал сирены. Команды на выполнение той или иной операции могут быть получены как из командной строки, так и из других программ. Программы, использующие сигнал сирены, управляют им, посылая команды программе ALARM.

2.4.2 Мониторинг детектора

Значительную часть системы контроля и управления составляют задачи, обеспечивающие мониторинг детектора. Эти задачи ответственны за контроль работоспособности систем детектора и своевременное оповещение оператора о неполадках. Информация о состоянии систем детектора периодически (как правило, раз в 15-60 минут) посылается в *базу данных медленного контроля*, описанную в разделе 2.5.

Всего системой мониторинга контролируется около 500 датчиков. Все контролируемые параметры разбиты на *группы* — множества датчиков, значения которых считываются одновременно и которые логически составляют единое целое. Например, группой является множество из 3 датчиков ЯМР, измеряющих магнитное поле в детекторе. Группа является неделимым целым в системе мониторинга — например, в базу данных могут быть записаны или прочитаны одновременно только значения всех датчиков, принадлежащих группе. Контролируемые группы датчиков перечислены в таблице 1.

Система мониторинга состоит из 4 задач: CONTROL, VOLCHE, LUMIN и XNMR (рис. 22). Задачи CONTROL и VOLCHE осуществляют контроль датчиков, в которых контролируемой величиной является напряжение. Задача LUMIN мониторирует работу системы сбора данных (загрузки систем, интеграл светимости и т.п.), а также осуществляет связь с системой автоматизации накопителя. Задача XNMR мониторирует магнитное поле в детекторе по датчикам ЯМР. Подробнее задачи мониторинга описаны ниже.

Задача	Группа датчиков			Система
контроля	Назв.	Размер	Δt, сек	детектора
CONTROL	CRYO	30	30	Магнитная и криогенная
	BGOT	8	60	Температуры
	BGT1	8	60	торцевого калориметра
	GASF	6	60	газовая
	NEWT	20	60	СП трансформатор (основная)
	TRAN	4	10	(быстрая)
	ENVI	20	60	Температуры в системе охлаждения
	TSUP	20	60	Температуры коллайдера
VOLCHE	CC01	8	180	Питание крейтов
	⋮			КЛЮКВА
	CC18			(группа на крейт)
	HVDC	8	180	Высоковольтное питание (ДК)
	HVZC	5	180	(Z-камера)
	HVMU	4	180	(пробежн. система)
	HVCS	60	180	(цилиндр. калориметр)
	GR33	10	180	Низковольтное питание (ДК+ZK)
	SPMU	15	180	(пробежн. система)
	SP32	20	180	(цилиндр. калориметр)
	MOIS	4	180	Датчики влажности
LUMIN	MONI	50	10	Система сбора данных
	VEPP	20	10	Параметры накопителя
	RATE	20	10	Первичный триггер
XNMR	XNMR	6	60	Магнитная система (ЯМР)

Таблица 1: Группы датчиков, контролируемых системой мониторинга детектора.

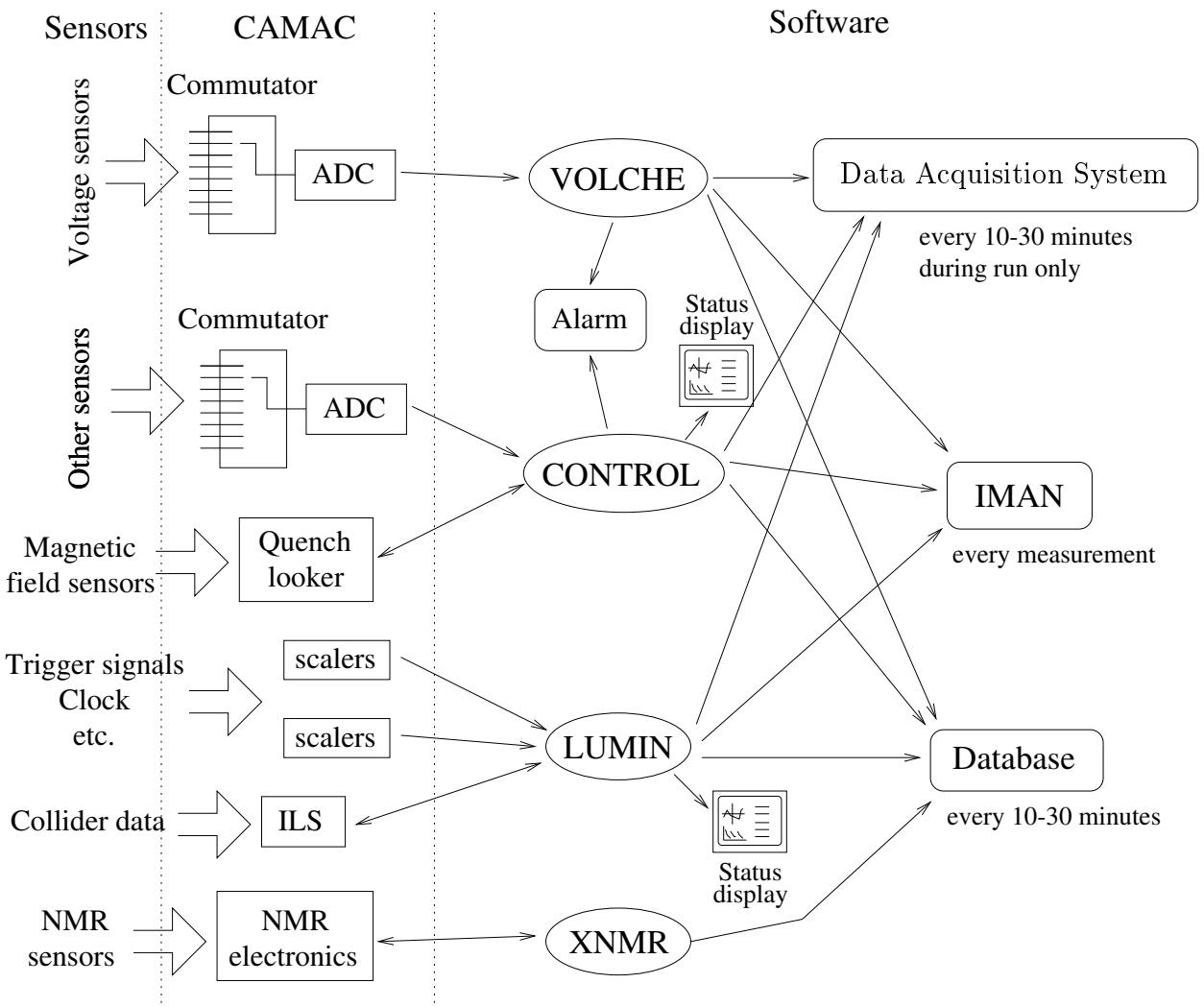


Рис. 22: Структура системы мониторинга детектора КМД-2.

CONTROL и VOLCHE

Для большинства контролируемых датчиков выходным значением является напряжение. Программы VOLCHE и CONTROL [68] осуществляют мониторинг именно таких датчиков, причем программа VOLCHE мониторирует непосредственно датчики контроля напряжений (питание оцифровывающей электроники, регистрирующих систем, высоковольтное питание и т.п.), а программа CONTROL мониторирует все остальные датчики (потоки газов, температуры, уровень жидкого гелия и т.п.). Все датчики, выходным значением которых является напряжение, подключены к нескольким коммутаторам аналоговых сигналов КАС-128 [46], сигналы с выхода которых подаются на одноканальные АЦП интегрирующего типа Ц0609 [46]. Программы VOLCHE и CONTROL подключают на вход АЦП поочереди все датчики, напряжение на них оцифровывается,

преобразуется в физические единицы и анализируется.

Поскольку функционально VOLCHE и CONTROL очень близки, была разработана единая конфигурируемая программа, расчитанная на работу с описанной аппаратурой, из которой конкретные программы были получены изменением конфигурации и незначительными переделками. В стандартный модуль были заложены следующие свойства.

1. Все контролируемые датчики разбиты на группы. Количество групп, соответствие между физическим каналом коммутатора и датчиком, и параметры каждого датчика (преобразование из напряжения в физическую единицу) задаются в ряде файлов, считываемых при запуске программы.

2. Каждая группа может быть поставлена на контроль или снята с контроля. Разные группы могут иметь различный период измерения.

3. Массив показаний датчиков одной группы может просматриваться на терминале; периодически записывается в базу данных; периодически посылается в системы сбора данных во время захода для записи на магнитную ленту вместе с событиями.

4. Для каждого датчика может быть задан диапазон, в котором должны лежать измеренные значения. При выходе значения за границы диапазона оператор информируется сообщениями на терминале и сигналом сирены.

5. Интерфейс программы представляет собой систему меню, имеющего уровни оператора и эксперта. На уровне оператора разрешено снимать и ставить группы на контроль, просматривать текущие значения датчиков, получать список плохих каналов. На уровне эксперта можно помимо этого изменять конфигурацию.

Программа VOLCHE, мониторирующая системы электропитания, была получена на основе стандартного модуля заданием правильной конфигурации датчиков. Программа CONTROL, контролирующая работу технических систем детектора, дополнена следующими функциями.

1. Показания датчиков постоянно отображаются на статусном графическом дисплее.

2. Добавлена система слежения за срывами магнитного поля. Для этого сигналы с восьми датчиков, отражающих работу соленоида и системы запитки, подаются на цифровой осциллограф АЦП-101 [69], выполненный в стандарте КАМАК. Датчики оцифровываются с периодом 8 мс и результаты сохраняются во внутренней памяти АЦП емкостью 4096 слов. При уменьшении величины магнитного поля до некоторого уровня срабатывает дискриминатор, формирующий сигнал “Стоп”

для АЦП. Получив сигнал “Стоп”, АЦП останавливает измерительный цикл и формирует сигнал готовности LAM, по которому происходит прерывание программы CONTROL и результаты измерений за последние 8 с перед срывом поля считываются в ЭВМ и сохраняются на диске.

3. Добавлена система слежения за работоспособностью самой программы CONTROL. Программируемый таймер сбрасывается при каждом цикле измерений, производимом CONTROL. В случае, если сброс не происходит в течение 30 секунд, срабатывает сирена и оператор оповещается о неполадках в системе мониторинга.

Благодаря использованию однотипного оборудования и конфигурируемости программ, система контроля напряжений оказалась достаточно гибкой, и добавление новых датчиков в систему не представляет труда.

LUMIN

Программа LUMIN [68] мониторирует загрузки систем и триггера детектора, работу системы сбора данных, светимость и энергию пучков в накопителе ВЭПП-2М, осуществляет обмен данными с системой автоматизации накопителя, управляет работой мониторов светимости [70].

Контролируемыми датчиками для LUMIN являются пересчетки. Периодически (как правило, раз в 10 секунд) значение с нескольких десятков каналов пересчеток считывается программой. По полученным значениям вычисляются светимость накопителя, загрузки систем детектора, загрузка триггера, “живое” время системы сбора данных и т.п. Одновременно из специализированного блока ИЛС, выполненного в стандарте КАМАК и предназначенного для передачи цифровых массивов по последовательной линии, считывается информация, переданная системой автоматизации накопителя (токи, режим, поле в магнитах и т.п.). Во время набора статистики LUMIN получает из системы сбора данных информацию о статусе захода, количестве записанных событий, набранном интеграле светимости и т.п. Все мониторируемые величины сформированы в три группы (см. таблицу 1). Периодически массив значений, соответствующий каждой группе, посылается в базу данных. Во время набора статистики информация о работе накопителя и загрузках систем посылается в систему сбора данных для записи на магнитную ленту вместе с физическими событиями. Информация о загрузках систем и статусе захода периодически посылается в систему автоматизации накопителя через тот же блок ИЛС. Вся основная мониторируемая информация отображается на графическом статусном дисплее.

Программа LUMIN имеет пользовательский интерфейс в виде системы меню, имеющего уровни оператора и эксперта. На уровне оператора разрешено отображать текущие значения контролируемых параметров. На уровне эксперта разрешено также изменять параметры и конфигурацию программы, управлять работой и осуществлять калибровку мониторов светимости и т.д.

XNMR

Программа XNMR[3] осуществляет измерение магнитного поля по датчикам ЯМР[4] и управляет процессом поддержания магнитного поля. Измеренные значения магнитного поля периодически посылаются в базу данных.

2.4.3 Управление триггером

Триггер детектора представляет собой аппаратуру, выполненную в стандарте КАМАК, расположенную в нескольких крейтах, подключенных к VXCMD. Управление триггером осуществляется с помощью нескольких задач, работающих на VXCMD.

TRIGGER

Программа TRIGGER [60] позволяет оператору управлять триггером детектора в целом: оперировать маской триггера (какие сигналы вызывают срабатывание триггера), устанавливать задержки сигналов, управлять порогами дискриминаторов, управлять генератором и т.п. TRIGGER предназначен для управления триггером в целом, обслуживанием отдельных элементов триггера занимаются другие программы, описанные ниже. В программе предусмотрено сохранение стандартных и текущих параметров триггера, которые могут быть восстановлены в любой момент. Программа имеет пользовательский интерфейс как в виде меню для оператора, так и в виде системы команд, используемых другими программами для управления триггером. Таким образом, TRIGGER является и самостоятельной программой, используемой оператором, и сервером, выполняющим запросы других программ. В меню предусмотрено два уровня: оператора, в котором можно только загрузить стандартную конфигурацию и изменить маску триггера, и эксперта, в котором можно совершать любые операции с триггером.

[3]Разработчики программы А.И.Шехтман и С.В.Карпов.

[4]Измерение магнитного поля по датчикам Холла осуществляется программой CONTROL.

TRFIND

Программа TRFIND [60] предназначена для обслуживания наиболее сложного элемента первичного триггера — трекфайндера [34]. TRFIND позволяет производить загрузку, чтение, сравнение, тестирование памяти трекфайндера, как полностью так и частично. В программе предусмотрена загрузка нескольких конфигураций трекфайндера. TRFIND имеет пользовательский интерфейс в виде системы меню, в которой выделяется два уровня: оператора, на котором предусмотрена только загрузка стандартной конфигурации, и эксперта, на котором разрешены любые операции.

NTFIL

Программа NTFIL[5] предназначена для обслуживания нейтрального триггера [35]. NTFIL позволяет оператору загрузить нейтральный триггер в стандартной конфигурации, либо производить разнообразное тестирование экспертом. В процессе загрузки требуется управлять состоянием оцифровывающей электроники, для чего NTFIL взаимодействует с программой KLUMAN.

BGOFIL

Программа BGOFIL[6] предназначена для обслуживания триггера BGO [37]. BGOFIL позволяет оператору загрузить триггер BGO в стандартной конфигурации, либо производить разнообразное тестирование экспертом. Программа имеет пользовательский интерфейс как в виде меню, как правило используемое экспертом, так и в виде системы команд, используемых другими программами для управления триггером BGO. Так, например, при загрузке стандартной конфигурации триггера, программа TRIGGER использует BGOFIL для загрузки триггера BGO.

2.4.4 Управление оцифровывающей электроникой

Управление оцифровывающей электроникой осуществляется с помощью программы KLUMAN [61]. Данная программа реализует все функции, необходимые для управления электроникой, выполненной в стандарте КЛЮКВА: загрузку и чтение процессоров ввода-вывода, запуск и останов процесса чтения событий, чтение тестовых событий, очистку буферов и т.п. В зависимости от выполняемых операций — запуск стандартного захода, калибровка системы и т.п. — оцифровывающая электроника должна быть загружена по разному. KLUMAN предоставляет возможность определять различные

[5]Разработчик программы А.И.Суханов.

[6]Разработчик программы Д.Н.Григорьев.

именны́е *конфигурации* оцифровывающей электроники и производить загрузку различных конфигураций. Программа имеет пользовательский интерфейс в виде меню, в котором выделяется два уровня: оператора, на котором можно производить только основные операции (загрузка стандартной конфигурации, запуск и останов процесса чтения событий), и эксперта, на котором можно производить любые операции (загрузка именных конфигураций, редактирование конфигураций и т.п.). Программа имеет также развитый набор команд, с помощью которых другие программы в системе автоматизации управляют оцифровывающей электроникой.

2.4.5 Калибровочные программы

Особый класс программ составляют *калибровочные* программы. Как следует из названия, они предназначены для управления процессом калибровки отдельных систем детектора.

Типичная калибровка системы осуществляется следующим образом. На вход регистрирующей системы подаются сигналы известной амплитуды, которые оцифровываются и считываются системой сбора данных. Полученные "калибровочные" события анализируются программой калибровки, и по результатам анализа формируется калибровочная информация, необходимая для обработки данных, поступающих с системы.

С точки зрения системы сбора данных процесс калибровки ничем не отличается от процесса набора статистики, кроме того, что используются специальные конфигурации оцифровывающей электроники и триггера, а также не производится запись данных на магнитную ленту. Более того, зачастую конфигурация триггера и электроники должна меняться в процессе калибровки.

Помимо калибровочных программ, в системе автоматизации существуют *мониторирующие* программы. Основная их задача — выхватывать сырые события из основного потока данных, анализировать их по специализированным алгоритмам и по результатам анализа мониторировать работоспособность той или иной системы. С точки зрения системы автоматизации, мониторирующие программы являются упрощенными вариантами калибровочных программ и в дальнейшем они не будут выделяться в отдельный класс.

В отличие от программ, описанных в предыдущих разделах, калибровочные программы создаются разработчиками калибруемой системы, а не системы автоматизации. Поэтому был разработан шаблон [66], который позволяет пользователю разработать программу, которая может выполнять все функции, необходимые для калибровки:

1. Взаимодействуя с программами TRIGGER и KLUMAN, загрузить необходимые

конфигурации триггера и электроники.

2. Запустить и остановить процесс чтения событий.

3. Анализировать поступающие события.

4. Управлять КАМАК-электроникой в любой момент процесса калибровки.

Всего в системе автоматизации существует более десятка различных калибровочных программ — по нескольку для каждой системы. В процессе набора статистики они, как правило, не запущены и используются только в режиме наладки и калибровки отдельных систем детектора.

2.5 База данных мониторинга детектора

Важным элементом системы контроля и управления является *база данных мониторинга детектора* [59,68]. В ней хранятся значения всех важных мониторируемых датчиков за весь период работы детектора (с 1994 года). Наличие базы данных позволяет получать полную информацию о работе систем детектора в тот или иной момент времени и производить ее анализ.

2.5.1 Общая структура базы данных

База данных мониторинга основана на СУБД HEPDB [71] — универсальной системе управления базами данных, разработанной в ЦЕРН, предназначенной для использования в экспериментах по физике высоких энергий.

Общая структура базы данных мониторинга детектора изображена на рис. 23. Для хранения и манипуляции данными HEPDB использует пакет ZEBRA [39]. Каждая база данных представляет собой файл прямого доступа (в пакете ZEBRA — RZ-файл), внутри которого организованы директории с произвольным уровнем вложенности, аналогичные файловой структуре операционной системы UNIX. В директориях лежат объекты, являющиеся одним или несколькими связанными банками формата ZEBRA. Каждый объект идентифицируется директорией, в которой он хранится, и уникальным набором **ключей**. Ключи бывают двух типов: обычные, когда задается только значение ключа (например время измерения, имя объекта, номер объекта и т.д.), и **диапазоны действительности**, когда задается диапазон значений какой-либо величины, для которого этот объект имеет смысл (например, начальное и конечное время, когда действительна калибровка). Для того, чтобы выбрать один или несколько объектов из базе данных, требуется указать имя директории и ключи, по которым необходимо провести отбор.

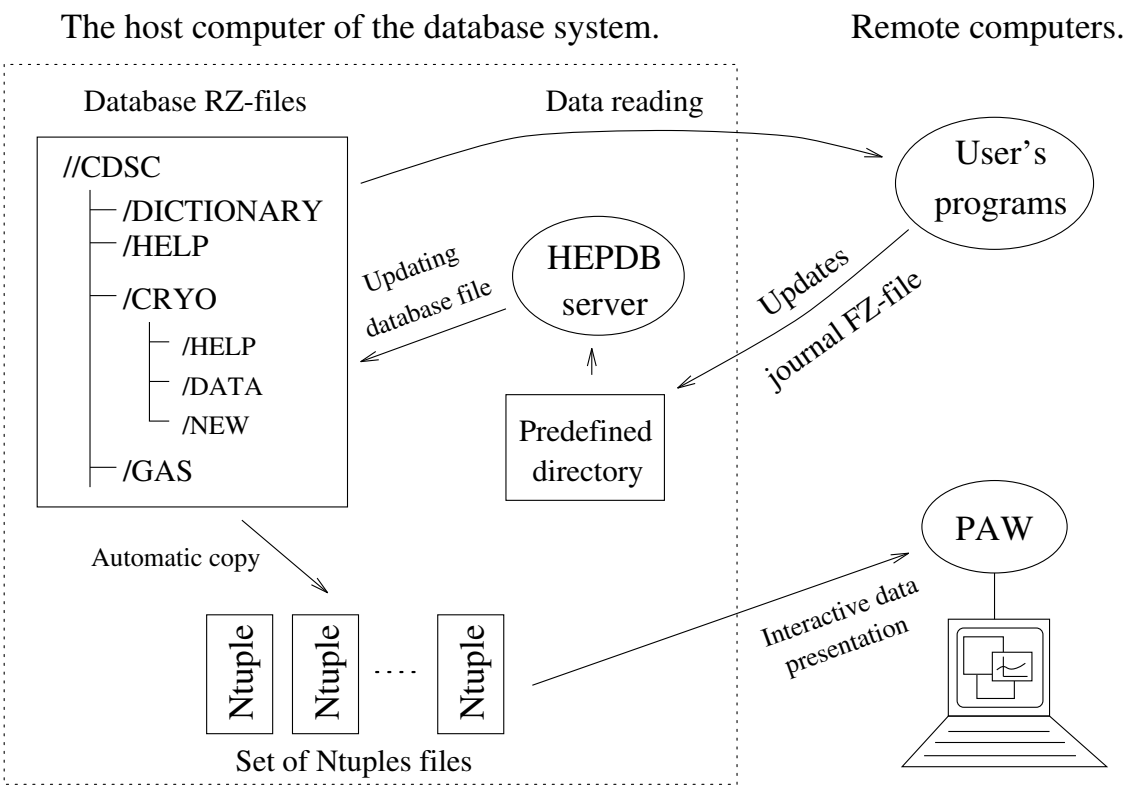


Рис. 23: База данных мониторинга детектора.

Функционирование HEPDB осуществляется по принципу *клиент–сервер*. Пользовательские задачи (клиенты) читают данные прямо из базы данных, используя библиотеку подпрограмм HEPDB. При необходимости внести изменения в базу данных пользовательская задача посылает сообщение с изменениями в специальную очередь (физически организованную в виде директории на диске), которую периодически просматривает специальная задача-сервер "HEPDB server", являющаяся составной частью системы HEPDB, и изменяет базу данных. Для пользователя вся эта цепочка скрыта, хотя существует небольшая временная задержка между запросом и действительным изменением базы данных. Такой принцип работы базы данных и использование пакета ZEBRA позволяет организовать работу базы данных в вычислительном комплексе, составленном из многих компьютеров различного типа, характерном для экспериментов в физике высоких энергий.

Объекты, хранящиеся в базе данных, представляют собой банки ZEBRA — универсальные иерархические структуры данных. Существуют специальные подпрограммы, осуществляющие перекодировку массивов чисел и текстовой информации в (из) банки ZEBRA. Для уменьшения объемов хранящихся данных в HEPDB осуществляется автоматическое сжатие данных по нескольким алгоритмам. В HEPDB существует биб-

лиотека подпрограмм, позволяющая пользовательским программам производить любые операции с данными, однако практически отсутствует интерфейс для интерактивной работы.

Объектами, хранящимися в базе данных мониторинга, являются массивы вещественных чисел — значений датчиков, принадлежащих к одной группе (определение групп дано в 2.4.2). Как правило в базу данных записывается либо мгновенное значение датчика на момент записи, либо усредненное значение с момента предыдущей записи и стандартное отклонение от среднего значения. Операции записи или чтения могут производятся только со всем массивом в целом одновременных значений датчиков, принадлежащих одной группе. Каждый объект идентифицируется следующими ключами: имя записавшей программы; время, когда было сделано измерение; диапазон времени, для которого действительны данные значения. Схема функционирования базы данных автоматически устанавливает начальное время диапазона действительности равным времени измерения и конечное время диапазона действительности равным времени следующего измерения. Такое определение диапазона действительности удобно для поиска данных: клиент задает время и получает самое последнее измерение, сделанное к заданному времени.

Каждой группе в базе данных соответствует уникальная директория. Каждая из таких "групповых" директорий содержит три стандартных поддиректории: `HELP`, в которой содержится описание данных, принадлежащих данной группе; `DATA`, в которой сохраняются данные записанные за все время работы; `NEW`, в которую поступают новые данные.

Клиенты записывают новые данные в поддиректорию `NEW`, при этом период обновления данных варьируется от нескольких минут до нескольких часов для различных групп. Периодически специальная программа "HEPDB Mover" просматривает все поддиректории `NEW`. При наличие новых данных, они перемещаются в соответствующую поддиректорию `DATA`, при этом у них формируются правильные диапазоны действительности (поскольку заранее неизвестно, когда будет произведено следующее измерение, они не могут быть сформированы заранее). Одновременно, все поступившие данные копируются в соответствующие электронные таблицы (Ntuple), используемые для интерактивного доступа к данным.

2.5.2 Доступ к данным

Доступ к данных, хранящимся в базе данных мониторинга, может осуществляться как из пользовательских программ, так интерактивно. Доступ из программ осуществляется с помощью стандартных подпрограмм, входящих в библиотеку HEPDB. Однако

такой доступ используется крайне редко. Наиболее полезным и используемым является интерактивный доступ к данным, позволяющий специалисту анализировать работу детектора в тот или иной момент. Поскольку в HEPDB отсутствует возможность удобного интерактивного доступа к данным, был разработан механизм доступа к данным с помощью программы PAW [72], предоставляющей богатые средства для анализа и графического представления данных.

В PAW не существует средств работы с базами данных HEPDB. В связи с этим механизм работы базы данных был разработан таким образом, чтобы обеспечить автоматическое копирование всех данных в электронные таблицы (Ntuple), с которыми умеет работать PAW. Каждой группе соответствует несколько электронных таблиц одинаковой структуры. Каждая таблица содержит точное время измерения и значения всех датчиков, принадлежащих группе, за значительный промежуток времени (обычно несколько месяцев), в течение которого происходил набор статистики детектором. Для того, чтобы выбрать определенную таблицу, необходимо указать название группы и идентификатор захода (например, заход 97a и группа CRYO).

Среда PAW позволяет производить достаточно сложный анализ данных, хранящихся в таблицах, однако использование стандартных команд требует определенных навыков. Поэтому для удобства использования был разработан ряд дополнительных команд, реализующих упрощенный язык для работы именно с данными мониторинга. Все команды реализованы с помощью командного языка PAW и COMIS — встроенного интерпретатора языка FORTRAN. Возможно одновременное использование стандартных и дополнительных команд, что необходимо при проведении сложного анализа данных.

Основным принципом, заложенным при разработке языка, была простота использования дополнительных команд. Каждая команда, запущенная без параметров, выдает подсказку. У каждой команды определено множество необязательных параметров, позволяющих значительно расширить ее возможности. Однако все параметры можно опускать, что упрощает работу для неопытного пользователя.

В таблице 2 перечислены все определенные дополнительные команды PAW, предназначенные для работы с базой данных мониторинга. Все дополнительные команды подразделяются на следующие группы.

1. *Команды общего назначения.* Сюда входят команды, позволяющие получать различные подсказки и изменять стандартные параметры остальных команд.

2. *Команды работы с таблицами.* Эти команды позволяют пользователю указать, из какой таблицы будет производится отбор данных, а также узнать названия датчиков, принадлежащих той или иной группе.

Команда	Описание
Команды общего назначения.	
ONLINE	Инициализация среды, получение подсказок и т.п.
SETDEF	Изменение значений параметров дополнительных команд по умолчанию.
Команды работы с таблицами.	
USERUN	Просмотр списка существующих заходов и выбор рабочего захода.
USE	Просмотр списка существующих групп и выбор рабочей группы.
NAMES	Просмотр названий датчиков, принадлежащих выбранной группе.
NTOPEN	Открытие таблицы для последующей работы с ней стандартными средствами PAW. Как правило не используется.
Команды работы с данными.	
MENU	Выбор с помощью меню одной из набора стандартных картинок. Предназначена для оператора.
TYPE	Напечатать значения выбранных датчиков в зависимости от времени.
LOOK	Нарисовать значения выбранных датчиков в зависимости от времени.
LOOK2	Нарисовать зависимость величины одного датчика от величины другого датчика, или распределение значений датчика за заданный промежуток времени.

Таблица 2: Дополнительные команды PAW, предназначенные для работы с базой данных мониторинга детектора.

3. *Команды для работы с данными.* Эти команды позволяют пользователю производить отбор и анализ данных. Существует несколько предопределенных функций-модификаторов данных (`DLTX()`, `DLTY()`, `DLTZ()`, `DXDT()`, `DYDT()`, `DZDT()`) с помощью которых можно анализировать не только сами значения датчиков, но и их изменения или производные.

В таблице 3 перечислены параметры дополнительных команд. Все параметры могут быть разбиты на следующие группы.

1. *Параметры, задающие интересующий промежуток времени.* С помощью параметров `date`, `from`, `tmin` и `tmax` можно указать промежуток времени, для которого необходимо выбрать значения интересующего датчика. По умолчанию происходит выборка значений за текущие сутки. Выбор по умолчанию может быть изменен с помощью команды `SETDEF`.

2. *Параметры, задающие выбор значений данных.* С помощью параметров `ymin`,

Параметр	Значение по умолчанию	Описание
Параметры для выбора интересующего промежутка времени.		
`date=YYMMDD`	`today`	Конечная дата.
`from=YYMMDD` `from=-N`	`=date`	Начальная дата. В случае `-N` означает количество дней перед конечной датой.
`tmin=HHMM`	`0000`	Начальное время (относится к начальной дате).
`tmax=HHMM`	`2400`	Конечное время (относится к конечной дате).
Параметры для выбора значений данных.		
`ymin=`*value*	нет отбора	Минимальное значение выбранного датчика.
`ymax=`*value*	нет отбора	Максимальное значение выбранного датчика.
`xmin=`*value*	нет отбора	Минимальное значение выбранного датчика (используется только в `LOOK2`).
`xmax=`*value*	нет отбора	Максимальное значение выбранного датчика (используется только в `LOOK2`).
`sel=`*expr*	нет отбора	Условие, по которому отбирать данные. Используется для сложных выборок.
Параметры графического отображения.		
`mark=`*id*	26 (△)	Задание маркера, которым рисовать точки.
`msiz=`*value*	0.5	Задание размера маркера, которым рисовать точки.
`col=`*id*	1 (черный)	Задание цвета маркера, которым рисовать точки.
`win=␣` `win=NO` `win=NULL`	`␣`	Управление выводом: `␣`— нарисовать новый график, `NO` — добавить на существующий график, `NULL` — не рисовать.

Таблица 3: Параметры дополнительных команд PAW.

`ymax`, `xmin` и `xmax` можно задать диапазон величин, в котором должно лежать значение интересующего датчика. Для более сложных отборов можно использовать параметр `sel`.

3. *Параметры графического отображения.* Эти параметры позволяют модифицировать графическое представление отображаемых данных.

Ниже приведен пример работы пользователя при анализе данных мониторинга.

`USE CRYO`	Выбрать группу `CRYO` и текущий заход.
`LOOK HOLL1`	Нарисовать магнитное поле от времени за текущие сутки.
`LOOK DYDT(HE) from=-2`	Нарисовать расход жидкого гелия за последние трое суток.

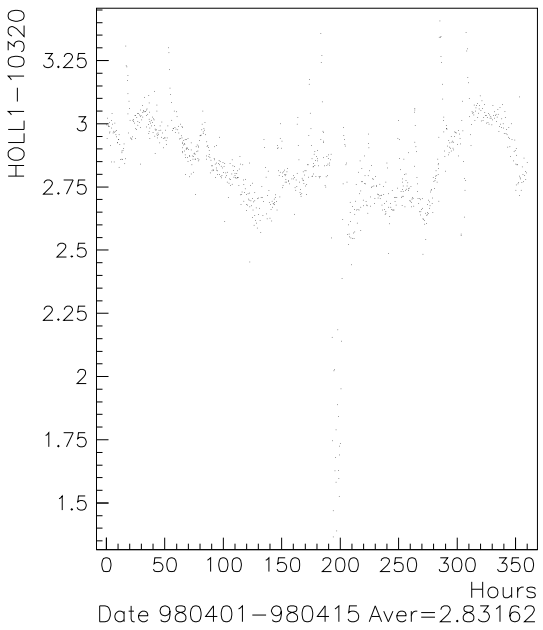
На рис. 24 приведены зависимости значений некоторых датчиков от времени, полученные из базы данных мониторинга с помощью описанных команд.

2.6 Система сбора данных

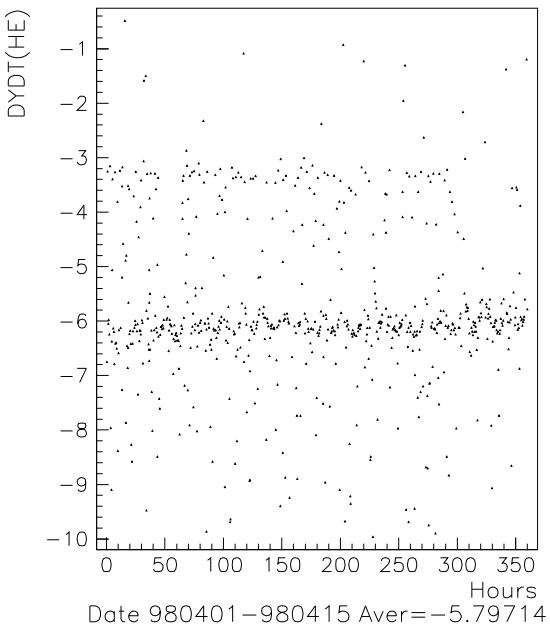
2.6.1 Общая структура

Основной функцией системы сбора данных является чтение информации из оцифровывающей электроники и запись ее на магнитную ленту. Однако помимо этой основной задачи в функции системы сбора данных входит управление заходами (подготовка к началу набора статистики, запуск и останов процесса набора статистики), быстрый анализ и мониторинг потока данных, визуализация событий в режиме реального времени.

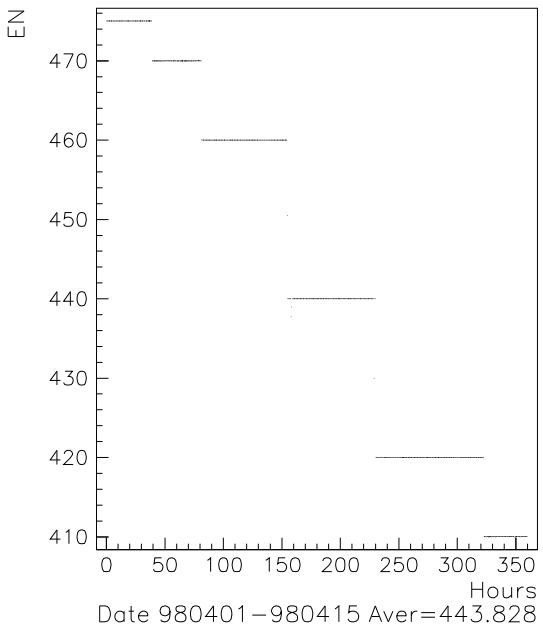
За время работы детектора существовало 3 варианта системы сбора данных (см. раздел 2.2). В 1992 году данные считывались из оцифровывающей электроники в “Центральную” ЭВМ и передавались на PDP-11/73 для записи на магнитную ленту. В 1993-1996 годах данные из оцифровывающей электроники считывались в АП-32, из которого они передавались в PDP-11/73 для записи на магнитную ленту. Ядром этого варианта системы сбора данных являлась программа DAQ32, функционировавшая на АП-32, описанная в разделе 2.7.1. И, наконец, с 1997 года данные из оцифровывающей электроники считывались в PC-486, из которой они передавались на VSCMD, где и записывались на магнитную ленту. В данном разделе будет описан только последний вариант системы сбора данных.



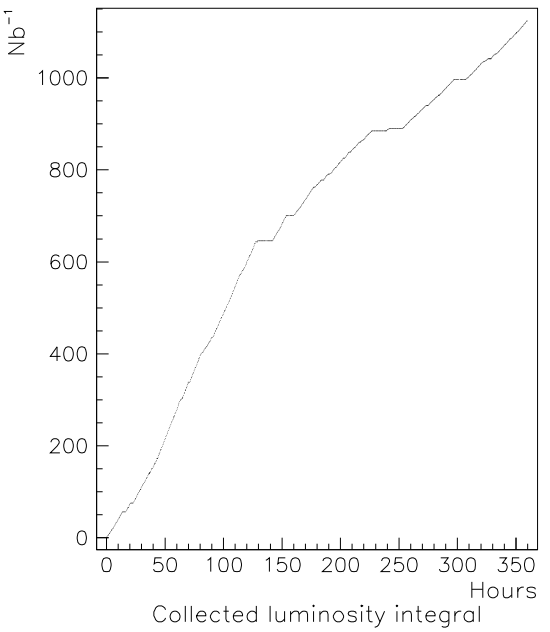
(а) Магнитное поле в детекторе по показаниям датчика Холла номер 1, Гаусс.



(б) Расход жидкого гелия в криогенной системе, литров/час.



(в) Энергия пучков в накопителе, МэВ.



(г) Набранный интеграл светимости, 1/нб.

Рис. 24: Примеры зависимостей показаний различных датчиков от времени, полученных из базы данных мониторинга. Все зависимости приведены за период с 1 по 15 апреля 1998 года.

Программа полуавтоматического КАМАК-контроллера K0607A считывает данные из оцифровывающей электроники и передает их по последовательной линии в ЭВМ PC-486 (рис. 19). Программа `CAMRD` в PC-486 организует буфер поступающих событий и пересылает их по сети Ethernet в VSCMD, где их принимает задача-сервер в XONLINE (раздел 2.3.3), ответственная за передачу данных между задачами. Вся дальнейшая обработка событий и запись их на магнитную ленту производится несколькими программами, работающими на VSCMD, и разработанными в рамках XONLINE. Запуск и останов цикла чтения данных из оцифровывающей электроники осуществляется запуском и остановкой программы в полуавтоматическом КАМАК-контроллере, производимыми программой KLUMAN.

Функции системы сбора данных на VSCMD выполняют следующие задачи.

`RECORDER` — "ядро" системы сбора данных. Эта программа считывает весь поток данных, анализирует его с помощью встроенного третичного триггера и записывает данные на магнитную ленту. Ее функциями также является управление заходами.

`RUNINFO` — мониторинг процесса набора статистики. Эта программа следит за показаниями различных датчиков (например, наличие токов в накопителе) и анализируя результаты обработки событий третичным триггером.

`RAWEXTR` — запись части событий в файл на диске, который затем пересылается на ЭВМ PPro-166 для полной реконструкции.

`EVTDSP` — отображение событий в режиме реального времени.

`PICSEL` — эта программа работает вместе с `EVTDSP`, обеспечивая отбор событий для отображения в режиме реального времени.

Важнейшим элементом системы сбора данных является организация потоков данных между задачами. Поскольку все задачи разработаны в рамках XONLINE, для межзадачного обмена используется механизм посылки сообщений, предоставляемый подсистемой UPS (см. стр. 43). В системе определено несколько *групп сообщений* (edition). Каждая задача подписана на несколько групп. При посылке сообщения в группу одной задачей, его получают все остальные задачи, подключенные к данной группе. Для каждой задачи существует очередь поступающих сообщений.

Основные потоки данных, существующие в системе сбора данных, изображена на рис. 25. Прямоугольниками на рисунке обозначены основные программы системы сбора данных, а овалами обозначены группы сообщений. Существующие группы перечислены в таблице 4. Потоки данных между программами обозначены стрелочками. Около

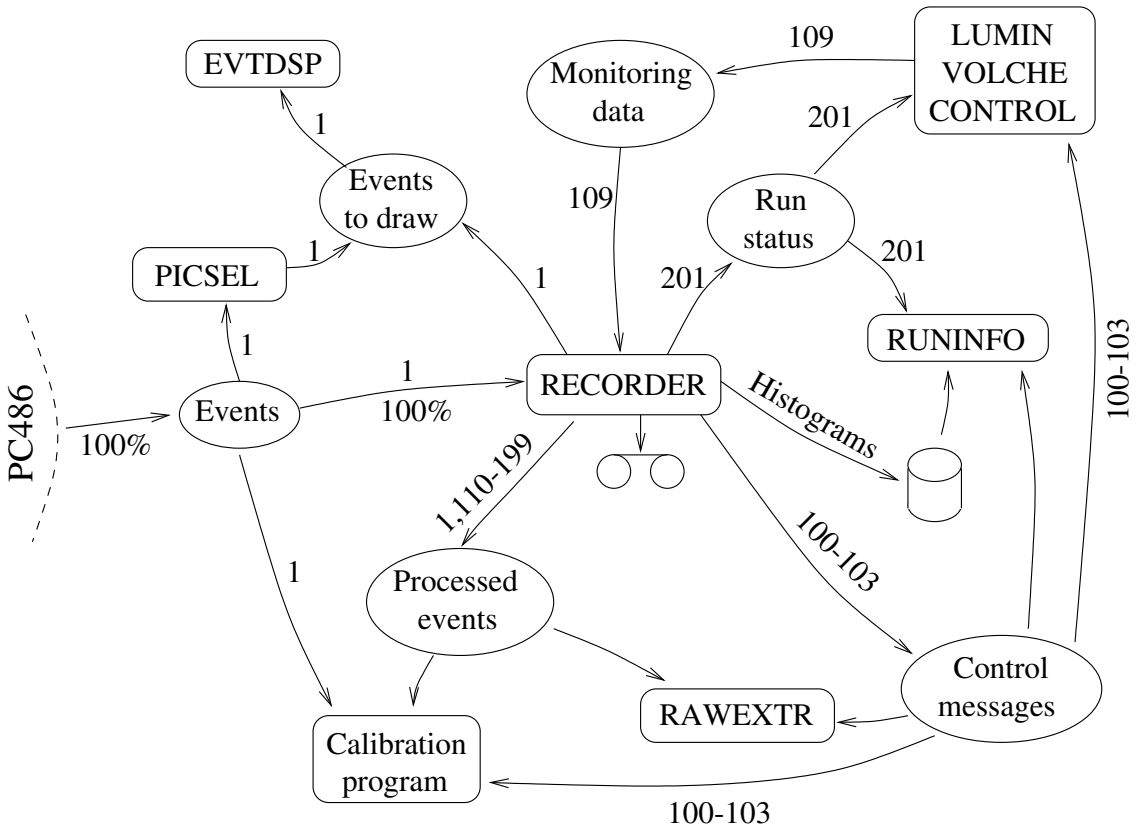


Рис. 25: Основные потоки данных в системе сбора данных.

каждой стрелки обозначены типы сообщений, которые пересылаются в рамках данной группы. Основные типы сообщений, существующие в системе, перечислены в таблице 5.

Система сбора данных может работать в двух основных режимах: в тестовом и режиме захода. Эти режимы отличаются только функционированием программ на VSCMD, организация потока данных до VSCMD одинакова в обоих режимах. По умолчанию система сбора данных находится в тестовом режиме. Переход в режим захода осуществляется при посылке программой RECORDER специальных сообщений, предназначенных для управления заходами, описанных в следующем разделе.

Тестовый режим предназначен в основном для проверки работоспособности оцифровывающей электроники и проведения калибровок систем. В этом режиме программы RECORDER, RUNINFO, RAWEXTR как правило не работают и программы системы мониторинга детектора не взаимодействуют с системой сбора данных. Режим *захода* предназначен для набора статистики. В этом режиме все программы функционируют и взаимодействуют между собой.

Основной поток данных организован следующим образом. Сырые события из PC-486 передаются в VSCMD в группу сообщений “Events”, причем потеря данных при этой

Группа	Источник	Получатели	Описание
Events	PC-486	RECORDER PICSEL Калибр.пр.	Основной поток данных — сырые события, прочитанные из оцифровывающей электроники.
Processed events	RECORDER	RAWEXTR Калибр.пр.	Сырые события, обработанные третичным триггером. Имеют тот же формат, что и исходные события, однако содержат метку о принадлежности к различным классам событий.
Events to draw	RECORDER PICSEL	EVTDSP	Сырые события, предназначенные для визуализации в режиме реального времени.
Control messages	RECORDER	LUMIN VOLCHE CONTROL RUNINFO RAWEXTR	Управляющие сообщения, посылаемые по началу и концу захода, по началу и концу процесса набора статистики.
Monitoring data	LUMIN VOLCHE CONTROL	RECORDER	Сообщения, посылаемые системой мониторинга, содержащие информация о работе систем детектора.
Run status	RECORDER	LUMIN VOLCHE CONTROL RUNINFO	Сообщения, содержащие информацию о процессе набора статистики: число прочитанных и записанных событий, интеграл светимости и т.п.

Таблица 4: Основные группы сообщений (потоки данных) в системе сбора данных.

пересылке невозможна (значок “100%” на рис. 25). В случае, если сервер на VSCMD не успевает принимать данные от PC-486, и буфер сырых событий в PC-486 заполнен, процесс чтения данных из оцифровывающей электроники приостанавливается и триггер детектора блокируется.

В тестовом режиме сырые события передаются в те программы, которые их запрашивают — обычно PICSEL и калибровочные программы, если они запущены. При этом программы-получатели получают только часть сырых событий, посланных в “Events” — ровно столько, сколько запрашивают или успевают использовать. Неиспользованные сырые события в “Events” просто замещаются новыми.

В режиме захода основным получателем сырых событий из “Events” является программа RECORDER, причем она гарантированно получает все 100% данных, послан-

Тип	Размер	Описание
1	≈1.5 кб	Сырое событие (данные, прочитанные из оцифровывающей электроники).
100	12 байт	Начало захода (SOR).
101	12 байт	Конец захода (EOR).
102	12 байт	Начало набора статистики (SOB).
103	12 байт	Конец набора статистики (EOB).
109	≈0.5 кб	Данные мониторинга.
201	30 байт	Информация о наборе статистики.
110-199	1-10 кб	Калибровочная информация.

Таблица 5: Основные типы сообщений, существующие в системе сбора данных.

ных PC-486 в “Events”. Таким образом, в режиме захода все данные, прочитанные из оцифровывающей электроники, обязательно попадают в RECORDER. Полученные сырые события обрабатываются третичным триггером и записываются на магнитную ленту. Как правило, на ленту записываются либо все события, либо отмеченные третичным триггером как “хорошие” и определенная доля “плохих” событий, которые нужны для определения эффективности третичного триггера впоследствие.

Все или часть обработанных сырых событий посылается в группу сообщений “Processed events”. В разное время в “Processed events” посылались либо события Баба-рассеяния на большие углы, либо все “хорошие” события. Основным получателем этих данных является программа RAWEXTR, которая записывает их в файл на диске. По окончания захода записанный файл посылается на ЭВМ PPro-166 для полной реконструкции, по результатам которой мониторируются глобальные параметры детектора, такие как разрешение дрейфовой камеры и т.п. Обработанные сырые события также может получать калибровочная программа в том случае, когда желательно проводить калибровку по событиям определенного класса во время захода.

Помимо описанного основного потока данных в системе сбора данных можно выделить потоки данных, связанные с управлением заходами, мониторингом процесса набора статистики и визуализацией событий в режиме реального времени. Эти потоки описаны детально в следующих разделах.

2.6.2 Управление заходами

Заходом называется непрерывный промежуток времени, в течение которого детектор набирал статистику. Типичный заход длится от одного до нескольких часов и сохраняется в виде одного файла на магнитной ленте размером несколько сотен мегабайт. Структура файла изображена на рис. 26. Файл состоит из последовательных записей. Первая запись содержит сообщение #100 о начале захода, далее записаны сообщения #110-199, содержащие калибровочную информацию, далее записано сообщение #102, после которого записаны физические события, иногда перемежающиеся записями #109, содержащими мониторирующую информацию о работе систем детектора. Файл заканчивается двумя последовательными записями #103 и #101 (конец набора статистики и конец захода). Такая структура файла использовалась в PDP-ONLINE, и была сохранена впоследствии для совместимости.

Управление заходами осуществляется программой RECORDER, которая синхронизует действия следующих программ: RUNINFO, RAWEXTR, KLUMAN, VOLCHE, CONTROL и LUMIN. Заход инициируется при выборе оператором соответствующего пункта меню. Можно выделить несколько стадий запуска захода.

1. *Предварительная.*
   Во время этой стадии RECORDER посылает программе KLUMAN команду остановить процесс чтения данных из оцифровывающей электроники.

2. *Начало захода.*
   RECORDER посылает сообщение #100 (SOR — Start-Of-Run) всем остальным задачам, подключенным к группе сообщений “Control messages”. На этой стадии RECORDER открывает файл на магнитной ленте, инициализирует третичный триггер, инициализирует все счетчики, считывает калибровочную информацию, записывает ее на магнитную ленту и посылает в группу сообщений “Processed events”. Программа RUNINFO инициализирует все счетчики и запоминает время начала захода. Программа RAWEXTR открывает файл на диске и записывает в него калибровочную информацию, прочитанную из “Processed events”. Программы системы мониторинга (LUMIN, VOLCHE, CONTROL) инициализируют все необходимые счетчики (например, CONTROL вычисляет среднее магнитное поле в детекторе в течение захода).

3. *Начало набора статистики.*
   RECORDER посылает сообщение #102 (SOB — Start-Of-Burst) и посылает программе KLUMAN команду запустить цикл чтения событий из оцифровывающей

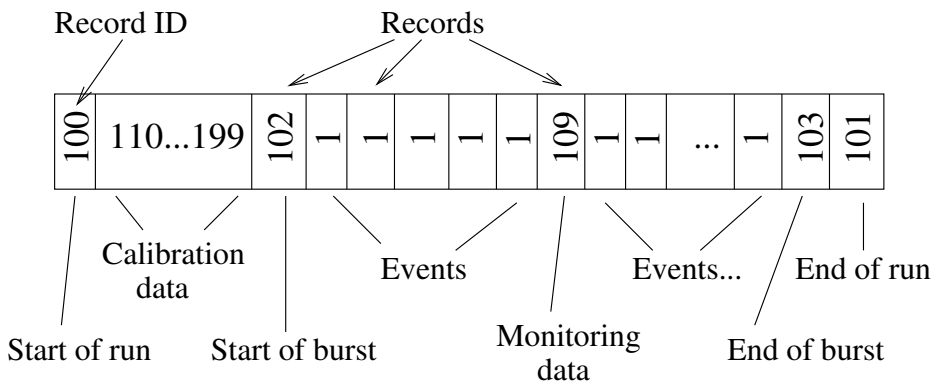


Рис. 26: Структура файла на магнитной ленте, соответствующему одному заходу.

электроники. После получения SOB все программы системы сбора данных переходят в состояние набора статистики.

В состоянии набора статистики RECORDER читает поступающие сырые события из “Events”, обрабатывает их и записывает на магнитную ленту; RUNINFO осуществляет мониторинг процесса набора статистики; RAWEXTR читает обработанные сырые события из “Processed events” и записывает их в файл на диске; программы системы мониторинга LUMIN, VOLCHE и CONTROL периодически посылают сообщения о работе систем в “Monitoring data”, откуда их читает RECORDER и записывает на магнитную ленту вместе с сырыми событиями.

Окончание захода инициируется при выборе оператором соответствующего пункта меню программы RECORDER. Процедура окончания захода состоит из двух стадий.

1. *Прекращение набора статистики.*

   Во время этой стадии RECORDER посылает программе KLUMAN команду остановить процесс чтения данных из оцифровывающей электроники и вычитывает все события, накопившиеся в промежуточных буферах, а также записывает гистограммы, накопленные третичным триггером, на диск. После этого RECORDER посылает сообщение #103 (EOB — End-Of-Burst) всем остальным задачам, подключенным к группе “Control messages”. После получения EOB, все остальные программы формируют необходимую статистическую информацию о заходе, а программы системы мониторинга делают запись в базу данных о состоянии детектора на момент окончанию захода.

2. *Окончание захода.*

   RECORDER посылает сообщение #101 (EOR — End-Of-Run) и закрывает файл на магнитной ленте. Программы, получившие EOR, прекращают операции, про-

изводимые только в течение захода (например, CONTROL прекращает посылать информацию о работе систем детектора в “Monitoring data”); RAWEXTR закрывает файл на диске. Система сбора данных в целом переходит в “тестовый” режим.

2.6.3 Мониторинг процесса сбора данных

В режиме захода работа системы сбора данных постоянно контролируется программой RUNINFO. Можно выделить три основных направления контроля.

1. *Контроль внешних условий.*
   Во время захода RUNINFO постоянно контролирует условия проведения захода, анализируя информацию, предоставляемую программами LUMIN, VOLCHE и CONTROL. Например, контролируется, не меняется ли энергия накопителя в процессе захода; есть ли пучки в накопителе; не продолжается ли заход слишком долго и т.п.

2. *Контроль работы оцифровывающей электроники.*
   Во время захода RUNINFO следит за сбоями оцифровывающей электроники. Например, контролируется наличие потока данных; не является ли “мертвое” время слишком большим; не является ли частота срабатывания триггера детектора слишком большой или слишком малой и т.п.

3. *Контроль работы регистрирующих систем.*
   В процессе анализа событий третичный триггер накапливает множество гистограмм, характеризующих работу систем детектора (например, частота срабатывания проволочек в дрейфовой камере, энерговыделение в калориметре для событий $e^+e^- \to e^+e^-$ и т.п.). Периодически в течение захода и всегда по окончания захода RECORDER записывает эти гистограммы в файл на диске и посылает сигнал программе RUNINFO. Она анализирует ряд ключевых гистограмм и вычисляет основные параметры работы систем (например, количество плохих и шумящих каналов и т.п.) Финальные гистограммы для всех заходов сохраняются на диске и доступны для последующего анализа.

Основная информация о статусе захода отображается на статусном дисплее программы LUMIN, которая получает всю необходимую информацию от программ RECORDER и RUNINFO. В случае обнаружения каких-либо неисправностей, RUNINFO сигнализирует об этом оператору, который предпринимает необходимые действия. RUNINFO также формирует специальный файл, содержащий всю основную информацию о заходе, такую как количество событий, интеграл светимости, время начала и

конца захода и т.п. Впоследствие данные из этих файлов копируются в *базу данных заходов*.

2.6.4 Визуализация событий в режиме реального времени

Визуализация событий в режиме реального времени производится программой EVTDSP. В качестве графического дисплея может использоваться любой терминал стандарта X-Windows. EVTDSP представляет собой модифицированную программу DAQ32 (раздел 2.7.1), в которой был оставлен только модуль, осуществляющий графическое отображение событий, и переписаны подпрограммы низкого уровня, связанные с отображением графических примитивов и с механизмами получения физических событий.

EVTDSP получает сырые события из группы сообщений “Events to draw” и отображает их на графический терминал. События для отображения посылаются в “Events to draw” двумя программами: PICSEL и RECORDER. PICSEL посылает для отображения либо определенную долю от всех входящих в систему сырых событий, либо случайные события через определенный промежуток времени (характерный период составляет от 1 до 10 секунд). Алгоритм выбора событий изменяется в меню задачи. PICSEL может работать как в течение захода, так и вне захода, причем алгоритм ее работы не зависит от наличия захода. Основной задачей PICSEL является управление визуализацией сырых событий в тестовом режиме работы системы сбора данных.

Во время захода сырые события посылаются для отображения также и программой RECORDER. Алгоритм отбора событий для визуализации в этом случае более сложный. RECORDER посылает для отображения фиксированную долю событий определенного класса, причем события могут быть отобраны как по битам первичного триггера, так и по результатам обработки событий в режиме реального времени. Алгоритм выбора изменяется в меню RECORDER и может быть изменен в любой момент во время захода. Такой механизм визуализации сырых событий во время захода предоставляет возможность оператору просматривать только интересующие события, а не случайные, что упрощает “визуальный” контроль за работоспособностью регистрирующих систем детектора.

На рис. 27 показан мгновенный снимок экрана консоли VSCMD — терминала дежурного оператора. На экране показаны меню верхнего уровня системы контроля и управления, меню программы RECORDER, окно, в котором отображаются все сообщения протокольной системы, и окна, в которых отображаются сырые события в режиме реального времени.

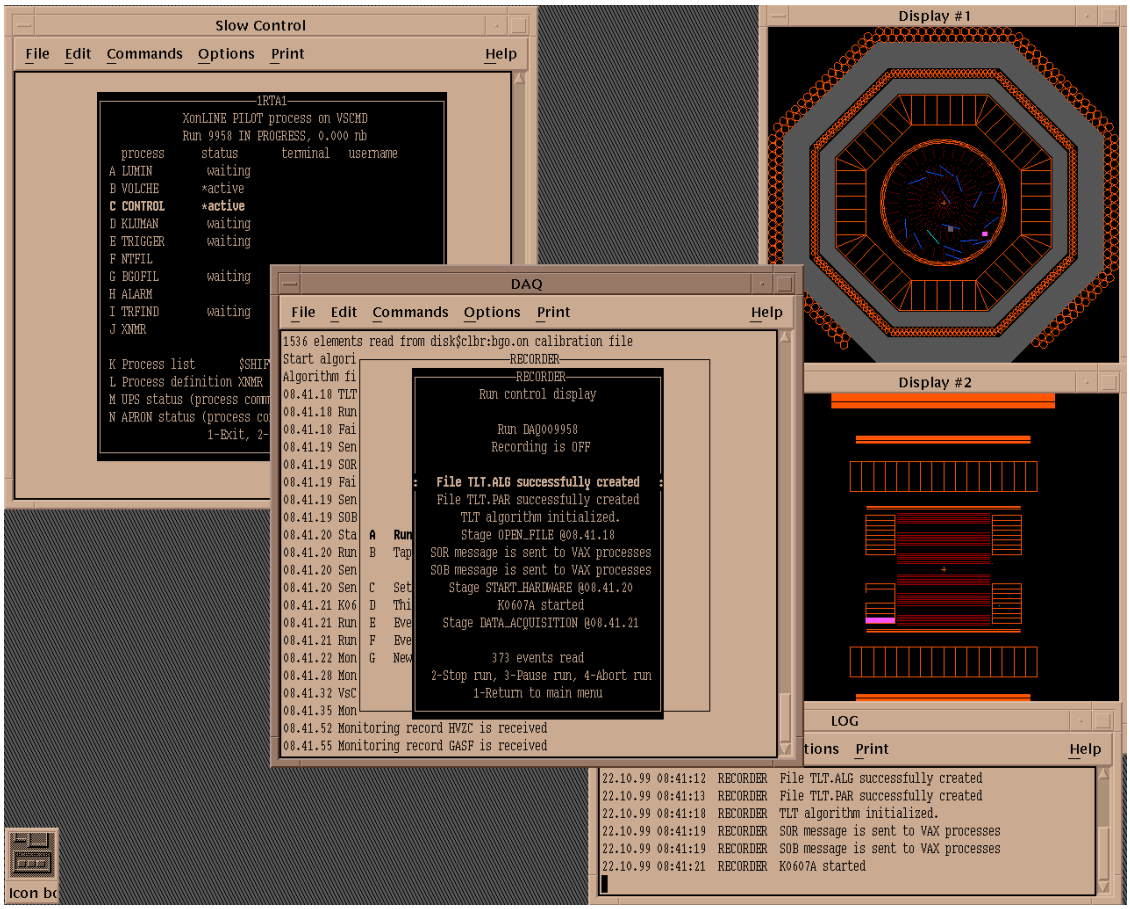


Рис. 27: Мгновенный снимок экрана терминала дежурного оператора.

2.7 Анализ событий в режиме реального времени (третичный триггер)

Одним из важных компонентов системы сбора данных является *третичный триггер* (ТТ) — программное обеспечение, позволяющее осуществить первичный анализ “сырых” событий в режиме реального времени. Быстрый анализ потока событий используется в системе сбора данных для реализации следующих функций:

1. Фильтрации событий перед записью на магнитную ленту (собственно третичный триггер).

2. Контроль работоспособности детектора по физическим параметра, получаемым в результате анализа (мониторинг потока сырых событий).

3. Измерение светимости по событиям упругого рассеяния $e^+e^- \to e^+e^-$ на большие углы.

Третичный триггер появился с системе сбора данных в 1993 году, и за время работы детектора было создано 2 варианта ТТ.

2.7.1 Программа DAQ32

Впервые оперативный анализ данных появился в системе сбора данных в варианте "АР32" весной 1993 года как часть программы DAQ32 [53,68,73], работавшей на АП-32. Структуру программы определили в основном два фактора. Во-первых, АП-32 не имеет собственной операционной системы и поэтому DAQ32 должна сама реализовать все необходимые функции. Во-вторых, поскольку в АР-32 отсутствует многозадачность, программа должна сама заботиться о "разделении времени". DAQ32 почти полностью написана на FORTRAN-4.

Структура программы изображена на рис. 28. DAQ32 состоит из нескольких почти независимых модулей — этапов анализа данных. Каждый модуль представляет собой подпрограмму со стандартным интерфейсом, из которой могут вызываться другие подпрограммы. "Ядро" DAQ32 представляет собой простой менеджер, который сначала поочередно вызывает подпрограмму инициализации для каждого модуля, а затем входит в бесконечный цикл, вызывая по очереди все модули.

Первым вызывается модуль BAPIO, отвечающий за связь DAQ32 с внешними источниками через интерфейсы БАП. BAPIO находится в состоянии бесконечного цикла до получения сигнала SOR ("Начало захода") от "Центральной" ЭВМ или VXCMD. После получения SOR BAPIO получает заголовок захода (калибровочную информацию) от того компьютера и передает управление другим модулям для обработки заголовка и записи на магнитную ленту. После получения сигнала SOB ("Начало чтения") BAPIO начинает читать события из оцифровывающей электроники и после чтения каждого события передает управление другим модулям. После получения сигналов EOB и EOR ("Конец чтения и захода") BAPIO передает управление другим модулям для окончательных действий и закрытия захода, после чего опять входит в состояние ожидания SOR.

После чтения каждого события поочередно вызываются следующие модули: LEVEL3 (собственно третичный триггер, анализирующий событие на предмет необходимости его записи на ленту), BHABHA (поиск событий $e^+e^- \to e^+e^-$ для определения светимости и мониторинг потока событий), EVTDSP (отображение события на графический терминал в режиме реального времени; вызывается не на каждое событие), RECORD (передача данных на PDP-11/73 для записи на магнитную ленту). Алгоритмы быстрого анализа данных были реализованы в виде отдельных подпрограмм, вызываемых из модулей LEVEL3 и BHABHA.

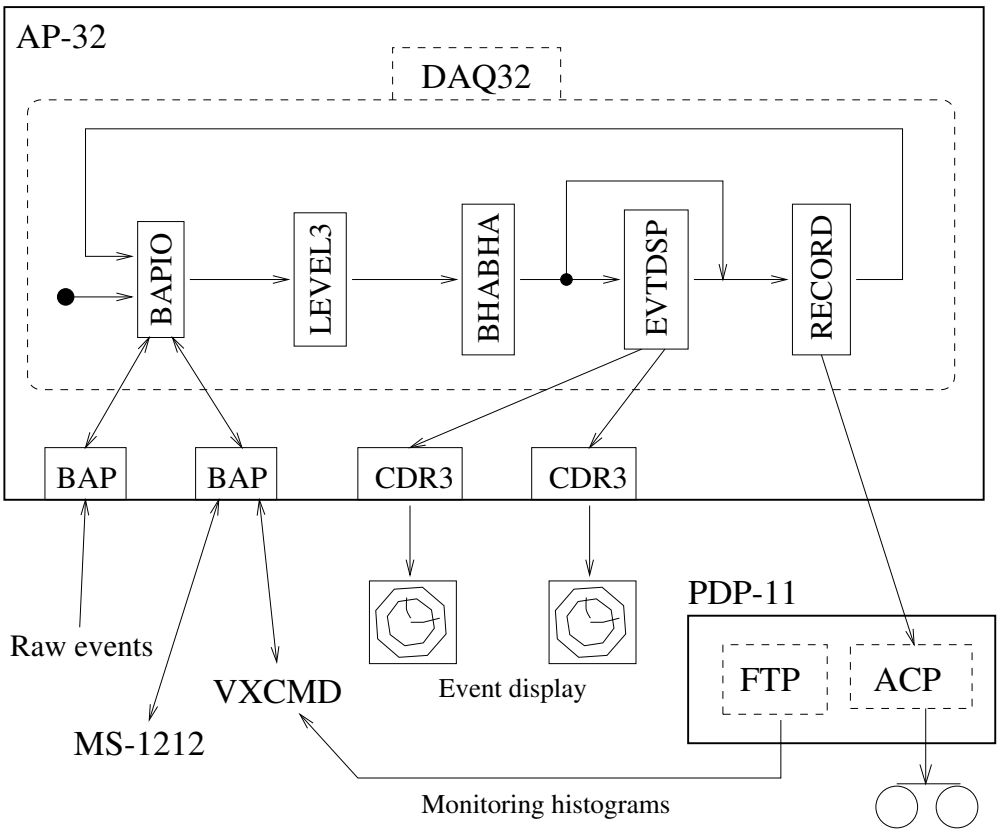


Рис. 28: Структура программы DAQ32 на АП-32.

Появление системы быстрого анализа данных позволило улучшить работу детектора сразу по нескольким параметрам.

1. Вплоть до 1996 года запись данных производилась на магнитофон Exabyte, подключенный к PDP-11/73. Низкая скорость записи (около 50 кб/с, определяемую производительностью PDP-11/73) являлась узким звеном системы сбора данных. Появление третичного триггера позволило уменьшить скорость записи и соответственно увеличить “живое” время.

2. Появление системы мониторинга событий позволило повысить качество работы систем детектора. Полная обработка данных как правило производилась через значительный промежуток времени после их записи. Проблемы, связанные с неполадками в регистрирующих системах, которые ранее могли быть незамечены до проведения полной обработки, теперь стали обнаруживаться во время набора статистики.

3. Появилась возможность измерять светимость по событиям Баба-рассеяния на большие углы. Для КМД-2 этот метод дает хорошую статистическую и наилуч-

шую систематическую ошибки.

Система быстрого анализа данных на АП-32 использовалась в течение ряда лет (1993-1996). По опыту работы был осознан ряд ее недостатков.

1. Алгоритмы анализа были "жестко" зафиксированы их реализацией в виде соответствующих подпрограмм. Даже небольшое изменение алгоритма требовало пересборки и переустановки всей DAQ32. Это существенно ограничивало гибкость системы, особенно важную на этапе разработки и настройки алгоритмов.

2. Анализ данных производился по нескольким независимым алгоритмам, каждый из которых вызывал свои независимые подпрограммы. При такой реализации возникали ситуации, когда одни и те же этапы анализа повторялись несколько раз, что приводило к потери быстродействия.

3. Все подпрограммы анализа были разработаны именно для DAQ32, что затрудняло их использование в другом программном обеспечение (для этого требовалось создать для них ту же "инфраструктуру").

2.7.2 Программный пакет TLT

В начале 1997 года был разработан новый вариант системы быстрого анализа данных, в которым была сделана попытка преодолеть перечисленные недостатки. Разработка новой системы была инициирована необходимостью отказа от использования АП-32 (а соответственно и DAQ32) в системе сбора данных.

Общее описание

Новый вариант системы быстрого анализа данных представляет собой отдельный программный модуль (библиотеку подпрограмм) под названием TLT (Third Level Trigger), который может быть легко встроен в любую программу, оперирующую с физическими событиями. С точки зрения пользователя, библиотека имеет единственную "внешнюю" подпрограмму `CMDFAN` (CMD-2 Fast Event Analyser), которая используется для связи пользовательской программы и TLT:

```
CMDFAN(ACT,EVENT,MASK1,MASK2,IRC).
```

Входными параметрами `CMDFAN` являются `ACT` — действие, которое необходимо выполнить (см. ниже) и `EVENT` — указатель на область памяти, где находится сырое событие. Результатом работы третичного триггера являются код возврата `IRC`, маски события

MASK1 и MASK2. Также в процессе анализа третичный триггер заполняет гистограммы, определенные пользователем, которые в любой момент можно записать в файл на диске.

В отличие от предыдущего варианта системы быстрого анализа данных, TLT является *средой*, с помощью который пользователь может легко разработать свой собственный алгоритм обработки. Другими словами, алгоритм работы третичного триггера не зафиксирован в библиотеке. Библиотека содержит большое множество предопределенных методов обработки событий, а также простой *язык описания алгоритма*, с помощью которых пользователь создает свой алгоритм. Перед началом анализа данных интерпретатор переводит конкретный алгоритм в некий внутренний код, который затем исполняется для каждого физического события.

Диаграмма состояний TLT изображена на рис. 29. Пользовательская программа должна начать свою работу с TLT вызовом CMDFAN с ACT=0. При этом произойдет первичная инициализация системы, и TLT перейдет в состояние ожидания начала захода. Перед началом анализа физических событий (как правило, в начале захода) пользовательская программа должна вызвать CMDFAN с ACT=100, при этом TLT прочитает и откомпилирует во внутренний код алгоритм анализа из файла TLT.ALG, прочтет параметры методов анализа из файла TLT.PAR и считает необходимые калибровочные данные из файлов, указанных в TLT.PAR. После этого TLT готов к анализу физических событий. Далее, пользовательская программа для каждого события запускает CMDFAN с ACT=1. TLT анализирует событие согласно заданному алгоритму и возвращает IRC, MASK1 и MASK2, которые могут использоваться пользовательской программой, например, для решения о необходимости записи события на магнитную ленту. По окончании захода пользовательская программа вызывает CMDFAN с ACT=101, при этом накопленные гистограммы записываются в файл TLT.HRAW на диск, и TLT переходит в ожидание начала захода. Текущие гистограммы могут быть в любой момент сохранены на диск в процессе анализа с помощью вызова CMDFAN с ACT=101.

Код возврата IRC определяется пользователем в алгоритме и является любым целым числом. Например, в стандартном алгоритме третичного триггера, используемого программой RECORDER, IRC=1 для “хороших” событий, которые нужно записывать на магнитную ленту. Маски события MASK1 и MASK2 используются для классификации событий. Каждый бит в масках соответствует определенному типу событий. Например, в стандартном алгоритме первый бит соответствует многотрековым событиям, второй — событиям $e^+e^- \to e^+e^-$ в цилиндрическом калориметре, третий — событиям $e^+e^- \to e^+e^-$ в торцевом калориметре и т.п. Установленный бит в MASK1 означает, что данное событие проверялось на принадлежность к данному типу, а установленный бит в MASK2 означает, что событие принадлежит к данному типу. Соответствие между

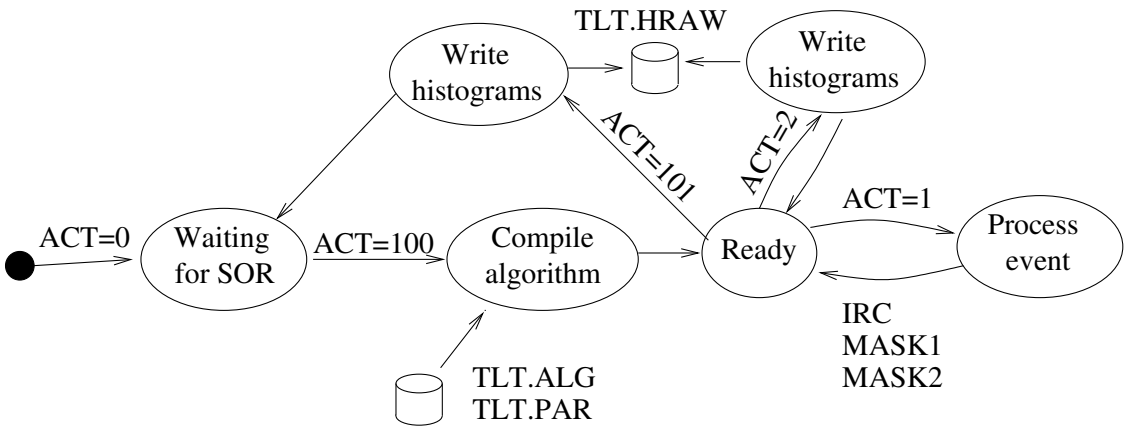


Рис. 29: Диаграмма состояний системы быстрого анализа данных.

битами и типом событий (и определение типов событий) задается также в алгоритме.

С программной точки зрения TLT состоит из следующих основных компонентов: основного менеджера CMDFAN, интерпретатора Parser, исполнителя Executor, анализаторов Analysers, интерфейсов переменных Values, контейнеров данных Data Containers и гистограмм Histograms.

Интерпретатор интерпретирует алгоритм обработки данных во внутренний код, который затем исполняется *исполнителем* для каждого физического события.

При разработке алгоритма пользователь может использовать большой набор *предопределенных переменных* — величин, которые характеризуют событие и могут использоваться для отбора событий. Примерами таких переменных являются число кластеров в калориметре, энерговыделения кластеров, количество сработавших проволочек дрейфовой камеры и т.п.. В текущей версии TLT имеется 95 предопределенных переменных. Каждой предопределенной переменной соответствует *интерфейс переменной* — подпрограмма, которая вызывается исполнителем при необходимости получить значение соответствующей величины. Как правило, эти переменные не производят никакого анализа, а просто копируют соответствующие поля контейнеров данных в возвращаемую структуру, известную исполнителю.

Собственно анализ данных производят *анализаторы*. Анализаторы реализуют отдельные шаги анализа. Например, анализатор `unpack_dc` распаковывает часть события, относящуюся к дрейфовой камере и вычисляет некоторые параметры, такие как количество сработавших проволочек, среднюю амплитуду и т.п.; анализатор `form_csi_clus` формирует кластеры в цилиндрическом калориметре и вычисляет их энерговыделения, положения и т.п. В процессе работы анализаторы заполняют соответствующие поля контейнеров данных. Анализаторов в несколько раз меньше, чем предопределенных пе-

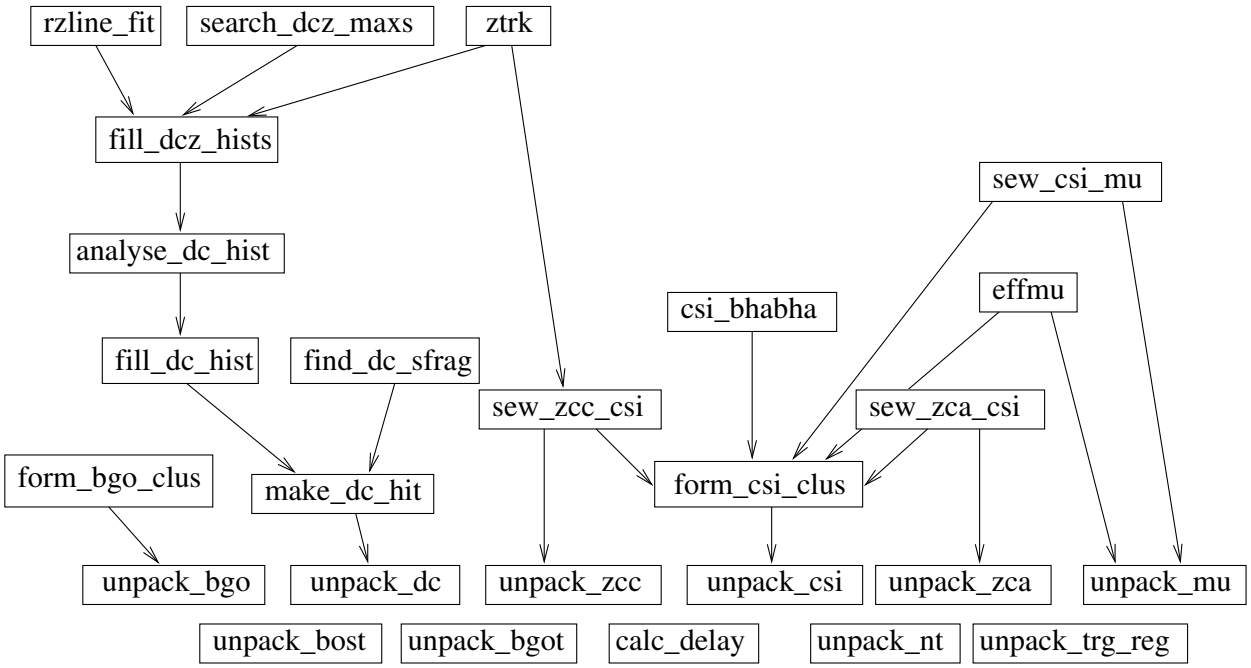


Рис. 30: Иерархия анализаторов в текущей версии TLT.

ременных; в текущей версии определено 27 анализаторов.

Как было сказано выше, интерфейсы переменных используют поля в контейнерах данных, которые должны быть заполнены соответствующим анализатором. Анализаторы также могут использовать поля в контейнерах данных, которые заполняются другими анализаторами. Поэтому важно обеспечить правильный порядок запуска подпрограмм. Для этого для каждого интерфейса переменных определяется, от каких анализаторов он *зависит*. Аналогично, для каждого анализатора определяется, от каких анализаторов он зависит. Циклические зависимости запрещены. Например, переменная `NCLCSI` (число кластеров в калориметре) зависит от анализатора `form_csi_clus`, который в свою очередь зависит от анализатора `unpack_csi`. Иерархия анализаторов в текущей версии TLT приведена на рис. 30. Предопределенные переменные, существующие в текущей версии TLT, перечислены в таблице 6.

Как анализаторы, так и интерфейсы переменных, могут иметь параметры, которые задаются перед началом анализа данных. Параметры считываются из файла `TLT.PAR`, где они описаны в виде:

{`имя_анализатора_или_переменной`}.{`название_параметра`} = {`значение`}

Существуют также и глобальные параметры, которые могут быть использованы любым анализатором или интерфейсом переменной. Примером такого глобального параметра является энергия пучков в накопителе. Значения глобальных параметров также

Переменные	Анализатор
NEVT:I, NWEVT:I, CSUBUF:I, TLTMARK:I, ERROR:I	
DOSCHET:I, MAINDOSCHET:R, MAINELECDEL:R, ELECDEL[3]:R	calc_delay
ETOTCSI:R, NHCSI:I, ICRCSI[NHCSI]:I, ECRCSI[NHCSI]:R, NLINECST:I, ELINECST[NLINECST]:R, ILINECST[NLINECST]:I, TLINECST[NLINECST]:R	unpack_csi
NCLCSI:I, ECLCSI[NCLCSI]:R, PHICLCSI[NCLCSI]:R, THCLCSI[NCLCSI]:R	form_csi_clus
NHZACSI[NCLCSI]:I	sew_zca_csi
NHMUCSI[NCLCSI]:I	sew_csi_mu
IBHCLCSI[2]:I, DLTPHICLCSI:R, DLTTHCLCSI:R	csi_bhabha
NHBGO[2]:I, ETOTBGO[2]:R, ICRBGO[NHBGO]:I, ECRBGO[NHBGO]:R, XCRBGO[NHBGO]:I, YCRBGO[NHBGO]:I	unpack_bgo
NHBGOT:I, IHBGOT[NHBGOT]:I, ITBGOT[NHBGOT]:I	unpack_bgot
NCLBGO[2]:I, ECLBGO[NCLBGO]:R, ENDCLBGO[NCLBGO]:I, NCRCLBGO[NCLBGO]:I, PHICLBGO[NCLBGO]:R, THCLBGO[NCLBGO]:R, XCLBGO[NCLBGO]:R, YCLBGO[NCLBGO]:R, MRCLBGO[NCLBGO]:R	form_bgo_clus
NHDC:I	unpack_dc
DCHQLT[3]:I, HSECFSL:I, IWIREDC[NHDC]:I, ICELLDC[NHDC]:I, IRWIREDC[NHDC]:I, AWIREDC[NHDC]:R, TWIREDC[NHDC]:R, ISL1WIREDC[NHDC]:I, ISL2WIREDC[NHDC]:I, ISL3WIREDC[NHDC]:I	make_dc_hit
ISSFRAG:L	find_dc_sfrag
NDCMAXS:I, HDCMAXS[NDCMAXS]:I, WDCMAXS[NDCMAXS]:I	analyse_dc_hist
NHZDC:I, LZMAXS[NHZDC]:R, RZMAXS[NHZDC]:R	search_dcz_maxs
ZVRTX[6]:R	ztrk
BASEPOINTS[NBOST]:I, IMASKTF[NBOST]:I	unpack_bost
ARGNT[16]:I, MASKNT[16]:I, ICLENDNT[56]:I, ICLSTARTNT[56]:I, ILINENT[56]:I	unpack_nt
TRGREG:I, FLT[16]:L	unpack_trg_reg
TSTOP:R, NHZCA:I, ASCZCA[NHZCA]:I, ISCBadZCA[NHZCA]:I, ISCGoodZCA[NHZCA]:I, TSCZCA[NHZCA]:I	unpack_zca
IHZCC[NHZCC]:I, AHZCC[NHZCC]:I, LHZCC[NHZCC]:I, MHZCC[NHZCC]:I, RHZCC[NHZCC]:I, TORHZCC[NHZCC]:I, ZHZCC[NHZCC]:I, ZHZC[NHZCC]:R	unpack_zcc
MUHITS:I, ICHBadMU[MUHITS]:I, ICHGoodMU[MUHITS]:I, ITCHBadMU[MUHITS]:I, ITCHGoodMU[MUHITS]:I	unpack_mu

Таблица 6: Предопределенные переменные, реализованные в текущей версии TLT. В квадратных скобках указана размерность, через двоеточие — тип переменной.

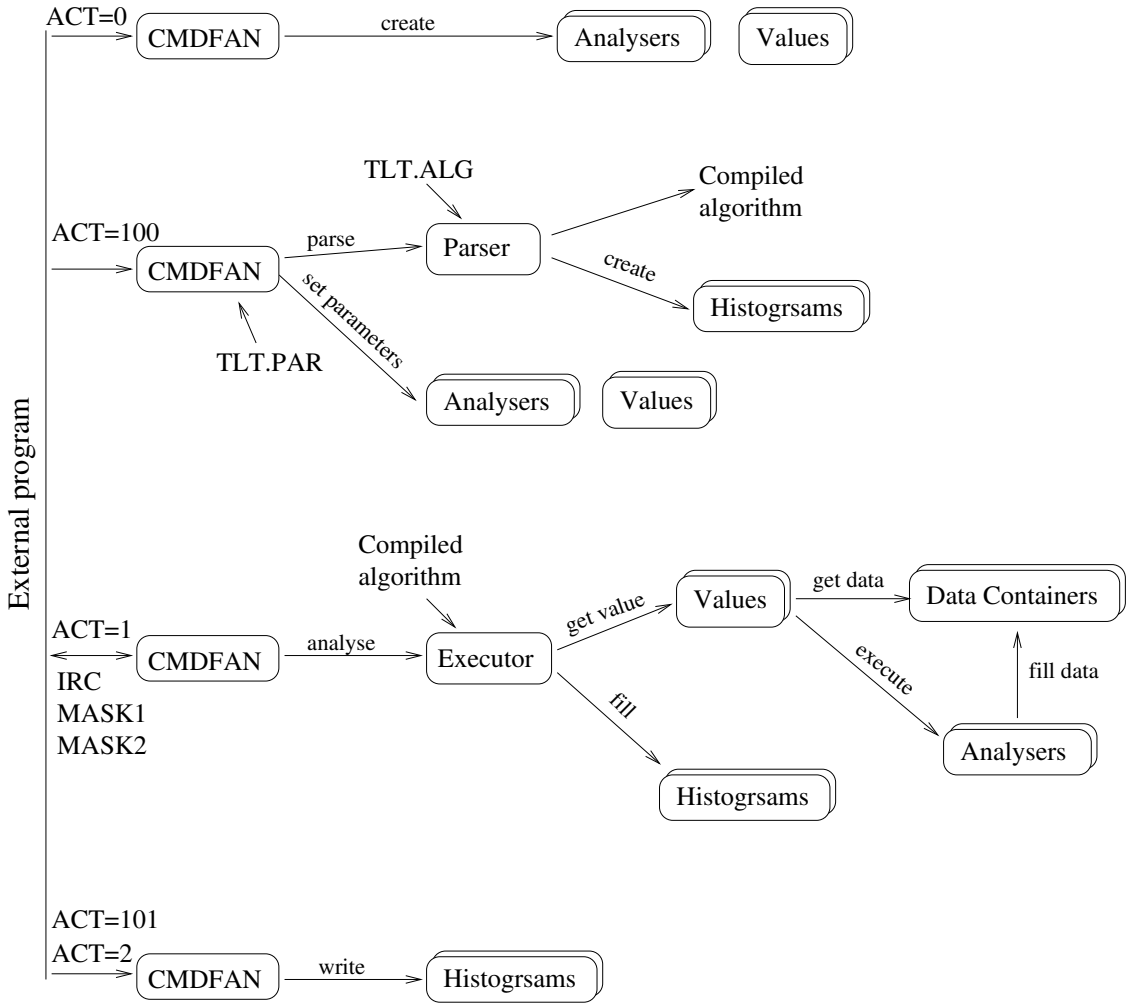


Рис. 31: Взаимодействие основных компонентов TLT.

задаются в `TLT.PAR`.

На рис. 31 изображены основные сценарии работы TLT. На этапе первичной инициализации (`ACT=0`) `CMDFAN` создает анализаторы и интерфейсы переменных и формирует их иерархическое дерево.

По началу захода (`ACT=100`) интерпретатор читает алгоритм обработки из файла `TLT.ALG` и транслирует его во внутренний код, создавая при этом гистограммы, описанные в алгоритме. После этого `CMDFAN` читает параметры из файла `TLT.PAR` и передает их соответствующим анализаторам и интерфейсам переменных.

При анализе физического события исполняется оттранслированный алгоритм. Когда во время исполнения требуется узнать значение той или иной переменной, запускается соответствующий интерфейс переменной. При этом автоматически проверяется, были ли предварительно запущены все анализаторы, от которых зависит данная переменная и при необходимости они запускаются, причем в правильном порядке и только те,

которые не были исполнены при анализе данного события. Таким образом, в процессе анализа события каждый анализатор может быть запущен не более одного раза и только в случае, если он нужен. По аналогичной схеме построены и интерфейсы переменных. Если одна и та же переменная используется в алгоритме обработки несколько раз, то ее интерфейс запускается только один раз. Более того, то же самое верно и для всех производных переменных (полученных из предопределенных арифметическими, логическими и т.п. операциями). В процессе анализа исполнитель также заполняет гистограммы.

По концу захода (`ACT=101`) и по специальному запросу (`ACT=2`) все определенные гистограммы записываются в файл `TLT.HRAW` на диск.

Описанная программная схема TLT (интерпретатор–анализаторы–интерфейсы переменных) позволила добиться следующих преимуществ.

1. *Гибкость использования.* Поскольку алгоритм обработки легко задается и изменяется, то TLT может быть использован для любой задачи, в которой требуется быстрый анализ событий. TLT легко встраивается в любое программное обеспечение, поскольку не требует никакой дополнительной инфраструктуры.

2. *Оптимальность исполнения.* Основное процессорное время затрачивается анализаторами. Разработанная схема гарантирует запуск каждого анализатора только при необходимости и только один раз. Выделение каждого шага обработки в виде отдельного анализатора минимизирует количество “лишних” вычислений.

3. *Удобство разработки.* Подобный подход к декомпозиции программного проекта позволяет сузить и упростить задачи, стоящие перед программистами. Автором был разработан проект в целом и написана вся его “системная” часть. В написании анализаторов и интерфейсов переменных приняло участие несколько физиков — представителей от соответствующих систем детектора (П.А.Лукин, В.Ф.Казанин, Н.И.Габышев и др.). При этом организация совместной работы нескольких человек не вызвала дополнительных проблем, т.к. сама структура проекта подразумевает минимальное пересечение между задачами, стоящими перед различными его участниками.

4. *Удобство развития.* Возможности TLT легко расширяются добавлением новых анализаторов и соответствующих интерфейсов переменных. При этом предыдущий опыт всегда накапливается, поскольку новые анализаторы могут использовать результаты работы существующих анализаторов.

Как следует из описанной структуры TLT, при его создании использовались подходы, характерные для объектно-ориентированного проектирования программного обес-

печения. Однако в качестве языка реализации был выбран язык C, поскольку он наиболее стандартен для тех платформ, на которых планировалось использование пакета. При разработке интерпретатора использовались утилиты YACC и LEX, упрощающие разработку лексических и синтаксических анализаторов.

Язык описания алгоритма

В данном разделе приведено неформальное описание языка TLT — языка описания алгоритмов обработки. Пользователю предоставляются следующие возможности:

1. Создавать одномерные, двумерные и профильные гистограммы.

```
book {idh} {title} {nbin} {xmin} {xmax};
book2d {idh} {title} {nbinx} {xmin} {xmax} {nbiny} {ymin} {ymax};
bookpr {idh} {title} {nbin} {xmin} {xmax};
```

2. Создавать производные переменные на базе предопределенных или ранее определенных переменных с помощью следующих операций и функций:

Арифметические операции	* / + - %
Логические операции	&& || !
Операции сравнения	> < >= <= ==
Условная операция	{условие} ? {значение1} : {значение2}
Операция выбора	[ ]
Функции	LEN() SOME() ALL() NTRUE() ITRUE() NFALSE() IFALSE() ABS() INT() REAL() MIN() MAX() RNDM()

3. Устанавливать значения битов в маске события в зависимости от условий.

```
mark {условие} in {номер_бита};
```

4. Устанавливать код возврата.

```
return {код_возврата};
```

5. Производить заполнение гистограмм.

```
fill {idh} by {значение};
fill {idh} by {значение_y} versus {значение_x};
fillbit {idh} by {целое_значение};
```

6. Производить операции (заполнение гистограмм, возврат, установление битов в маске) в зависимости от условий.

```
if {условие} {блок_операций}; [ else {блок_операций};]
```

7. Выводить информацию на печать.

```
print {значение_или_текст} [, {значение_или_текст}]... ;
```

Командный язык может оперировать с логическими, целочисленными и вещественными переменными, а также с символьными строками. Логические, целочисленные и вещественные переменные являются либо скалярами (вектором единичной длины), либо векторами фиксированной или переменной длины. Векторная природа переменных является особенностью самих анализируемых данных. Так, например, переменная NCLCSI (количество кластеров в CsI калориметре) является скаляром; переменная ECLCSI (энерговыделения кластеров в калориметре) является вектором переменной длины (равной NCLCSI); переменная ETOTBGO (полное энерговыделение в торце калориметра BGO) является вектором фиксированной длины 2 (количество торцов). Все операции, производимые между переменными, подразумевают векторную природу переменных. Так, например, результат операции сложения зависит от размерности переменных: в случае двух переменных одинаковой длины сложение будет производиться покомпонентно; в случае сложения скаляра и вектора величина скаляра будет прибавлена к каждому элементу вектора; в случае сложения двух векторов разной длины результат неопределен.

Помимо предопределенных переменных существуют также логические, целочисленные и вещественные константы, а также *глобальные* переменные. Как правило переменные являются *локальными*, т.е. определенных только в процессе анализа одного события; при анализе следующего события их значения перевычисляются. Значения глобальных переменных определены внутри одного захода и не сбрасываются при переходе от одного события к другому. Глобальные переменные создаются с ключевым словом `global` и должны быть проинициализированы при создании:

```
global {название_глобальной_переменной} = {константа};
```

Операция выбора `[ ]` предназначена для выбора подвектора из вектора. Для этого в квадратных скобках указывается целочисленный вектор, содержащий индексы элементов вектора, которые необходимо выбрать. Подобный индекс может быть сформирован с помощью функций `ITRUE()` и `IFALSE()`, которые производят целочисленный вектор, содержащий индексы истинных (ложных) элементов логического вектора. В качестве примера рассмотрим переменную `XCLBGO[ITRUE(ECLBGO>100)]`. `ECLBGO` — вещественный вектор, содержащий энерговыделения кластеров в калориметре BGO; `ECLBGO>100` — логический вектор имеющий ту же размерность, что и `ECLBGO`, элемент которого истиннен,

если энерговыделение соответствующего кластера больше 100 МэВ; `ITRUE[ECLBGO>100]` — целочисленный вектор, содержащий индексы кластеров с энерговыделением более 100 МэВ. Таким образом, вся конструкция позволяет получить вектор, содержащий координаты кластеров с энерговыделениями больше 100 МэВ.

Все директивы языка можно разделить на *описательные* и *исполнительные*. Описательными директивами являются создания гистограмм и определение новых переменных. Они используются только в момент интерпретации алгоритма. Исполнительными директивами являются `mark`, `fill`, `fillbit`, `return`, `print` и `if`. Они исполняются для каждого события и только те переменные, которые в них используются, вычисляются в процессе анализа.

Пример файла с описанием алгоритма обработки данных приведен на рис. 32. Приведенный пример не является "осмысленным" алгоритмом, однако он отражает общую структуру файла `TLT.ALG`.

Использование TLT в системе сбора данных

В программном обеспечении детектора TLT используется в трех программах:

1. Универсальной программе-фильтре, которая позволяет отписывать из файла с событиями интересующие события в другой файл.

2. В программе RECORDER, где он используется в качестве третичного триггера и для заполнения мониторирующих гистрограмм.

3. В программе полной реконструкции CMD2OFF, где он используется для предварительного отбора событий, что значительно ускоряет процесс полной обработки в некоторых случаях.

RECORDER анализирует все события перед записью их на магнитную ленту. Алгоритм выделяет следующие типы событий (в скобках указан соответствующий бит в маске события): заряженные многотрековые (бит 1), $e^+e^- \to e^+e^-$ в CsI (бит 2), $e^+e^- \to e^+e^-$ в BGO (бит 3), нейтральные (бит 4), предназначенные для отписывания (бит 5), длинные (бит 11), двухкластерные (бит 12), однотрековые (бит 13), однотрековые однокластерные (бит 14), не предназначенные для записи на магнитную ленту (бит 16). Маска события, возвращаемая TLT, используется RECORDER для вычисления интеграла светимости, при посылке событий для визуализации и для отписывания в файл. Возвращаемая маска сохраняется в физическом событии, в формате которого предусмотрены соответствующие поля.

```
/* Initialize event counter */
global NEVENT = 0;

/* Create  histograms */
book   4000 'First Level Trigger Bits ' 16 1 17;
book   4005 'TF+2*NT+4*BGO+8*NTN' 16 0 16;
book   4611 'e+e- -> e+e- energy ' 50 0 2000;
book   4612 'e+e- -> e+e- phi distribution '  56 0 56;
bookpr 4110 'Average amplitude vs time, DC ' 100 0 600;
book2  4901 'Hitted BGO crystals' 22 0.5 22.5 22 0.5 22.5;

/* New variables definition */
TF_event      = FLT[1];
Neutral_event = FLT[12] && !TF_event;
SingleTrack  = NDCMAXS==1 && HDCMAXS<18 && WDCMAXS<7;
Bhabha_Ecl_Min = 300.0;
IHardCsiClusters = ITRUE(ECLCSI>300);
CsI_Bhabha = (ETOTCSI>500) && (NCLCSI>1) && (NCLCSI<4) &&
             LEN(IHardCsiclusters)==2 &&
             ALL(NHZACSI[IHardCsiClusters]>0);
TriggerCombination = ( FLT[1]  ? 1 : 0 ) + ( FLT[12] ? 2 : 0 ) +
                     ( FLT[5]  ? 4 : 0 ) + ( FTL[10] ? 8 : 0 );

/* Mark events:                                          */
/* Bit    Event type                                     */
/*   1    Event, triggered by trackfinder                */
/*   2    Neutral event, trigger by neutral trigger only */
/*   3    e+e- -> e+e- event in CsI calorimeter          */
mark ( TF_event ) in 1;
mark ( Neutral_event ) in 2;
mark ( CsI_Bhabha ) in 3;

/* Fill histograms */
fillbit 4000 by FLT;
fill 4005 by TriggerCombination;
if ( CsI_Bhabha ) {
   fill 4611 by ETOTCSI;
   fill 4612 by PHICLCSI[IHardCsiClusters];
}
if( SingleTrack ) fill 4110 by AWIREDC versus TWIREDC;
fill 4901 by YCRBGO versus XCRBGO;

/* Print trace information */
NEVENT = NEVENT + 1;
if( (NEVENT%1000)==0 ) print NEVENT,' events processed';

/* Specify return code /
if( !SingleTrack ) return 1; else return 0;
```

Рис. 32: Пример алгоритма обработки данных.

“Плохими” событиями (не предназначенными для записи на магнитную ленту) считаются однотрековые однокластерные события, которые были запущены только заряженным триггером. Для плохих событий TLT возвращает `IRC=0`, для остальных `IRC=1`. В разное время RECORDER или отбрасывал плохие события, или записывал все события на магнитную ленту. Во втором случае, 10% плохих событий записывалось на магнитную ленту для последующего определения эффективности третичного триггера.

Важной задачей алгоритма, помимо классификации событий, является заполнение мониторирующих гистограмм. Всего в текущей версии алгоритма заполняется 100 гистограмм (в DAQ32 их заполнялось около 40). Гистограммы характеризуют работы всех систем детектора и подобраны с таким расчетом, чтобы в случае сбоев достаточно точно локализовать причину. Условия, при которых происходит набор гистограммы, зависит от информации, хранящейся в ней. Часть гистограмм набираются по случайным событиям, часть — по событиям определенного класса. По концу захода весь набор гистограмм сохраняется в файле, который впоследствии используется в качестве своеобразного “паспорта” захода.

Глава 3

Измерение сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$

3.1 Набор экспериментальных данных

Весь диапазон энергий, доступный на накопителе ВЭПП-2М, был просканирован в шести сеансах, перечисленных в таблице 7. С точки зрения эксперимента по измерению сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, весь диапазон энергий ВЭПП-2М естественно разбивается на три интервала — от 0.36 до 0.6 ГэВ в с.ц.м. ("низкие" энергии), от 0.6 до 1.0 ГэВ (область ρ-мезона) и от 1.0 до 1.4 ГэВ ("высокие" энергии).

Для разделения электронов, мюонов и пионов используется информация с дрейфовой камеры и калориметра. В области низких энергий для разделения предпочтительней использовать информацию с дрейфовой камеры, поскольку импульсное разрешение в этой области энергий в несколько раз лучше, чем разница между импульсами частиц, а энерговыделения частиц отличаются мало. В области энергий выше 0.6 ГэВ в с.ц.м. для разделения частиц привлекается информация с калориметра, поскольку импульсы частиц становятся слишком близкими для разделения с помощью информации дрейфовой камеры. В области высоких энергий сечение процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ становится меньше сечения процесса $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, и одновременно изменяется структура фона. Все это приводит к тому, что методика анализа данных существенно отличается для указанных диапазонов энергий.

Область энергий ρ-мезона была просканирована дважды - в 1994-1995 годах и в 1998 году, причем статистика второго сканирования в несколько раз превышала статистику первого. В первом сканировании энергия пучков измерялась методом резонансной деполяризации в каждой точке по энергии, что позволяет получить меньшую систематическую ошибку по сравнению со вторым сканированием.

В диссертации представлен анализ данных первого сканирования области ρ-мезона, набранных в течение трех сеансов 1994–1995 годов. Данные были набраны в 43 точках в диапазоне энергий в с.ц.м. от 0.61 до 0.96 ГэВ с шагом 0.01 ГэВ. В узкой области энергий вокруг ω-мезона использовался меньший шаг от 0.002 до 0.006 ГэВ. Всего на ленту бы-

Номер сеанса	Дата начала и конца	Энергия в с.ц.м., ГэВ	Кол-во точек по энергии	Число событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$
1	январь–февраль 1994	0.81–1.02	14	35000
2	ноябрь–декабрь 1994	0.78–0.81	10	66000
3	март–июнь 1995	0.61–0.79	20	85000
4	октябрь–ноябрь 1996	0.37–0.52	10	4500
5	февраль–июнь 1997	0.98–1.32	37	75000
6	март–июнь 1998	0.36–0.97	37	1900000

Таблица 7: Заходы по набору статистики со сканированием широких диапазонов энергий.

ло записано около 40 миллионов событий. Предварительные результаты анализа были опубликованы в [74,75].

3.2 Общее описание методики измерения

События $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ принадлежат к классу *коллинеарных* событий, в которых две заряженные частицы в конечном состоянии летят в противоположные стороны. Помимо $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, коллинеарными событиями являются $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$. Космические события (мюоны), которые пролетают вблизи места встречи, также восстанавливаются в детекторе как коллинеарные события.

Коллинеарные события характеризуются следующими параметрами (рис. 33): $\Theta_{1,2}$ — полярные углы вылета конечных частиц, отсчитываемые от оси пучков; $\phi_{1,2}$ — азимутальные углы вылета частиц; $p_{1,2}$ — импульсы конечных частиц; $E_{1,2}$ — энерговыделения конечных частиц в калориметре; ρ — расстояние от вершины взаимодействия до оси пучков; z — координата 4вершины взаимодействия вдоль оси, параллельной оси пучков; $\Delta\Theta = \Theta_1 - (\pi - \Theta_2)$ — полярный угол расколлинеарности; $\Delta\phi = \pi - |\phi_1 - \phi_2|$ — азимутальный угол расколлинеарности; $\Theta_{avr} = [\Theta_1 + (\pi - \Theta_2)]/2$ — средний полярный угол; $p_{avr} = (p_1 + p_2)/2$ — средний импульс.

В исследуемом диапазоне энергий импульсы всех типов коллинеарных событий близки, и импульсного разрешения дрейфовой камеры детектора недостаточно для разделения событий. Поэтому информация с дрейфовой камеры используется для выделения коллинеарных событий, и параметры отбора подобраны так, чтобы эффективность отбора была одинаковой для всех типов коллинеарных событий. Эффективность регистрации коллинеарных событий зависит от полярного угла Θ вылета конечных частиц.

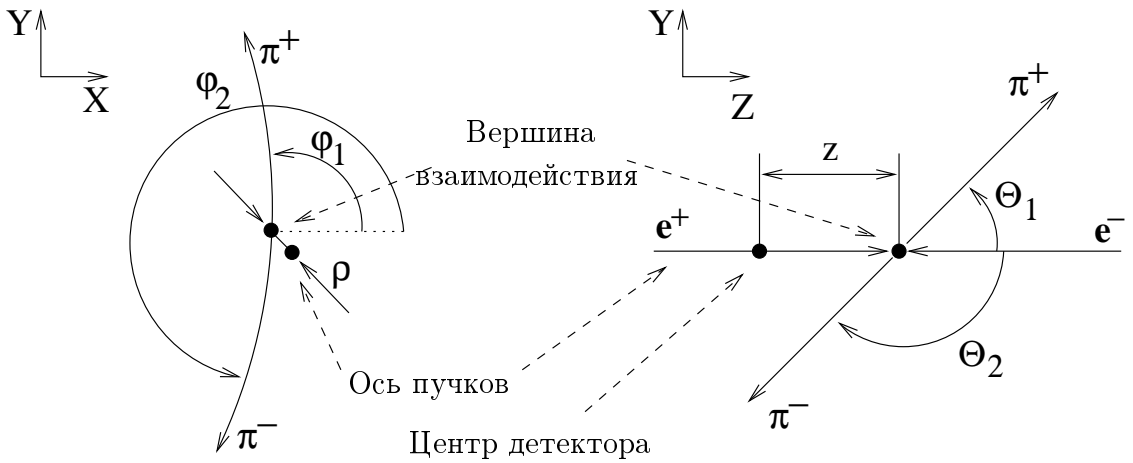


Рис. 33: Геометрия событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$.

Если этот угол достаточно велик и частицы, пересекая все слои дрейфовой камеры, попадают в цилиндрический калориметр, эффективность регистрации близка к 100%. Поэтому для анализа отбирались только коллинеарные события с большим углом вылета обеих частиц. Методика отбора коллинеарных событий описана в разделе 3.3.

Для разных типов частиц энерговыделение в калориметре сильно отличается, поэтому информация с цилиндрического калориметра используется для разделения коллинеарных событий на $e^+e^- \to e^+e^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$. Методика разделения коллинеарных событий описана в разделе 3.4. Последовательная схема анализа (отбор по дрейфовой камере и разделение по калориметру) позволяет контролировать эффективности восстановления событий.

Пионный формфактор вычисляется по формуле

$$|F_\pi(s)|^2 = \frac{N(\pi^+\pi^-)}{N(e^+e^-) + N(\mu^+\mu^-)} \cdot \frac{\sigma(e^+e^-) + \sigma(\mu^+\mu^-)}{\sigma(\pi^+\pi^-)}, \qquad (4)$$

где $N(X)$ — количество найденных событий $e^+e^- \to X$, $\sigma(X)$ — расчетное сечение регистрации таких событий (сечение рождения с учетом эффективности регистрации, радиационных поправок и т.п.). При расчете сечения $\sigma(\pi^+\pi^-)$ используется единичный формфактор. Сечения регистрации коллинеарных событий и все поправки, необходимые для их вычислений, обсуждаются в разделе 3.5.

3.3 Отбор коллинеарных событий

Коллинеарные события отбирались согласно следующим критериям.

1. В событии сработал заряженный триггер. При этом разрешено срабатывать и

другим триггерам.

2. В событии найдена одна вершина, причем из этой вершины вылетают только два трека. В событии могут присутствовать дополнительные одиночные треки, не пришитые к вершине. В дальнейшем будут упоминаться только два трека, подшитых к вершине.

3. Расстояние от вершины до оси пучков ρ не более 0.3 см.

4. Расстояние от вершины до места встречи вдоль оси пучков $|z|$ не более 8 см.

5. Средний импульс двух треков p_{avr} лежит в диапазоне от 200 до 600 МэВ/с.

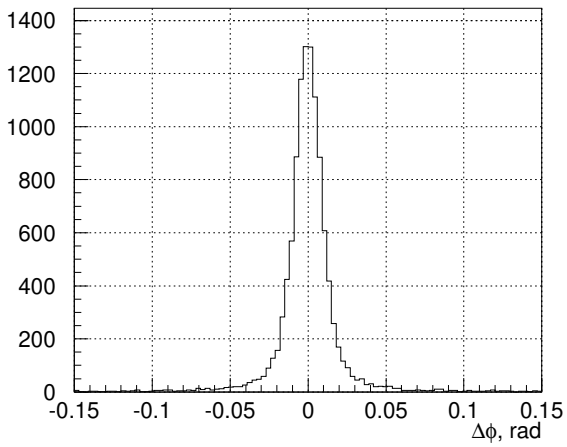
6. Азимутальный угол расколлинеарности треков $|\Delta\phi|$ не превышает 0.15 радиан. Распределение отобранных событий по углу $\Delta\phi$ показано на рис. 34(а).

7. Полярный угол расколлинеарности треков $|\Delta\Theta|$ не превышает 0.25 радиан. Распределение отобранных событий по углу $\Delta\Theta$ показано на рис. 34(б).

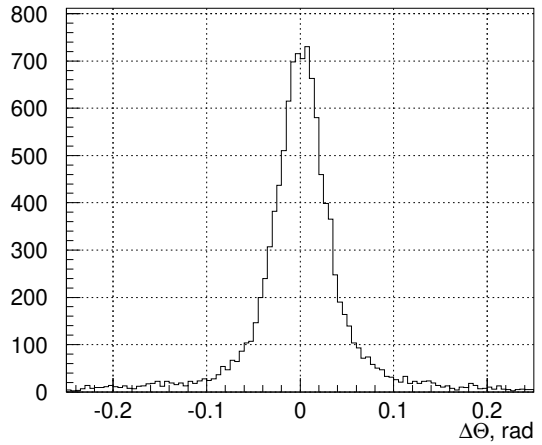
8. Средний полярный угол двух треков Θ_{avr} лежит в пределах от 1.1 до $(\pi - 1.1)$ радиан. Данное условие определяет телесный угол регистрации отобранных событий. Как упоминалось выше, телесный угол выбран таким образом, чтобы частицы пересекали все три слоя дрейфовой камеры и попадали в цилиндрический калориметр.

Перечисленные критерии отбора основаны на информации с дрейфовой камеры. Для отобранных событий определялось энерговыделение каждой частицы как сумма энерговыделений во всех кристаллах калориметра вблизи точки пересечения трека частицы с калориметром. Если энерговыделение частицы не превышало 10 МэВ, оно считалось равным нулю.

Во время сканирования диапазона энергий от 0.61 до 0.784 ГэВ отсутствовало высокое напряжение на двух соседних линейках цилиндрического калориметра, поэтому при анализе этих данных события, в которых продолжение трека попадало в “мертвую” зону калориметра (что соответствует $4.35 < \phi_+ < 4.95$ или $3.90 < \phi_- < 4.50$ радиан), были исключены из анализа.



(а) Распределение по углу $\Delta\phi$.



(б) Распределение по углу $\Delta\Theta$.

Рис. 34: Распределения по углам расколлинеарности для отобранных событий.

3.4 Разделение коллинеарных событий

3.4.1 Функция максимального правдоподобия

В отобранную группу входят события $e^+e^- \to e^+e^-$, $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и космический фон — космические мюоны, пролетающие сквозь детектор вблизи места встречи. Для разделения событий используются энерговыделения в калориметре положительно и отрицательно заряженных частиц (E^+ и E^-, соответственно). Двумерное распределение E^+ от E^- показано на рис. 35. Электроны и позитроны создают электромагнитные ливни в калориметре, теряя при этом всю свою энергию, тогда как мюоны (как пучковые, так и космические) взаимодействуют с калориметром как минимально ионизирующие частицы, и их энерговыделения малы. Пионы взаимодействуют с калориметром либо как минимально ионизирующие частицы с относительно малым энерговыделением, либо испытывают ядерные взаимодействия, характеризующиеся широким распределением энерговыделения.

Разделение событий основано на минимизации функции максимального правдоподобия:

$$L = -\sum \ln\left(\sum_a N_a \cdot f_a(E^+, E^-)\right) + \sum_a N_a, \tag{5}$$

где a — тип события ($a = ee$, $\mu\mu$, $\pi\pi$, фон), N_a — количество событий каждого типа, $f_a(E^+, E^-)$ — плотность вероятности для события каждого типа иметь энерговыделения положительно и отрицательно заряженных частиц E^+ и E^-, соответственно.

Предполагается, что двумерная плотность вероятности $f_a(E^+, E^-)$ факторизуется:

$$f_a(E^+, E^-) = f_a^+(E^+) \cdot f_a^-(E^-),$$

т.е. энерговыделение одной частицы не зависит от энерговыделения другой частицы в том же событии. Данное предположение не является точным — корреляции между энерговыделениями появляются за счет их зависимости от полярного угла Θ треков, а также за счет излучения фотонов начальными частицами. Первый эффект обсуждается в разделе 3.4.3, а второй эффект был смоделирован и оказался пренебрежимо малым.

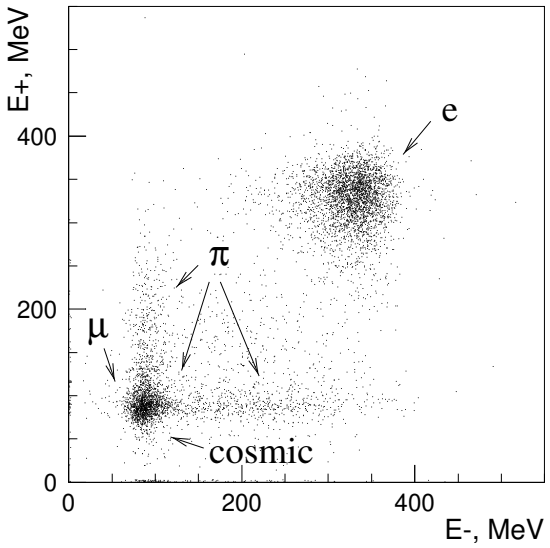


Рис. 35: Двумерное распределение энерговыделения положительно заряженной частицы E^+ от энерговыделения отрицательно заряженной частицы E^- в отобранных коллинеарных событиях при энергии пучков 0.8 ГэВ в с.ц.м.

Распределения энерговыделений положительно и отрицательно заряженных частиц в случае пар e^+e^-, $\mu^+\mu^-$ и космического мюона одинаковы, поэтому для них полагается $f_a^+ \equiv f_a^-$. Энерговыделения π^+ и π^- существенно отличаются, поэтому для них f_a^+ отличается от f_a^-. Подробно энерговыделения различных частиц обсуждаются в последующих разделах.

При минимизации функции правдоподобия, отношение числа событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ к числу событий $e^+e^- \to e^+e^-$ фиксировалось равным теоретическому значению с учетом радпоправок и эффективностей регистрации:

$$\frac{N_{\mu\mu}}{N_{ee}} = \frac{\sigma_{\mu\mu} \cdot (1 + \delta_{\mu\mu}) \cdot \varepsilon_{\mu\mu}}{\sigma_{ee} \cdot (1 + \delta_{ee}) \cdot \varepsilon_{ee}},$$

где σ — Борновское сечение, δ — радиационная поправка, ε — эффективность регистрации для соответствующего типа события.

Функция правдоподобия (5) была переписана таким образом, чтобы вместо N_{ee}, $N_{\pi\pi}$ и N_{bg} основными параметрами подгонки являлись

$$(N_{ee} + N_{\mu\mu}), \quad \frac{N_{\pi\pi}}{N_{ee} + N_{\mu\mu}}, \quad N_{bg}.$$

Благодаря этому упростилась процедура вычисления статистической ошибки измеренного значения сечения процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$.

3.4.2 Определение числа фоновых событий N_{bg}

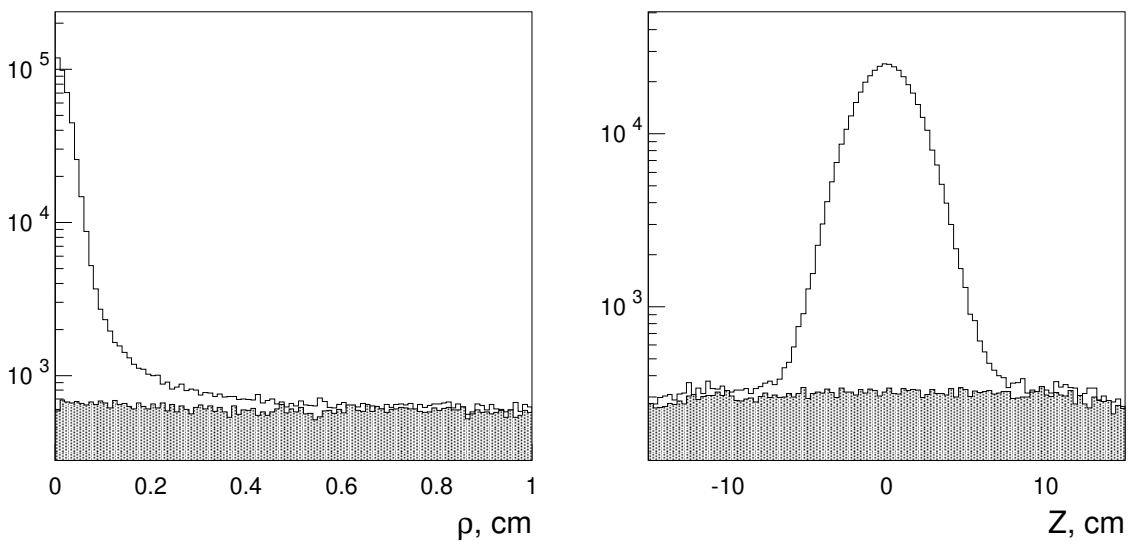
Фоновые события (космические мюоны, пролетающие вблизи места встречи) отделяются от пучковых коллинеарных событий ($e^+e^- \to e^+e^-, \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-$) по распределению расстояния от вершины взаимодействия до места встречи. Как видно из рис. 36(а), распределение по расстоянию от вершины до оси пучков (параметр ρ) представляет собой узкий пик вблизи $\rho = 0$ для пучковых событий и практически однородно для фоновых событий. Аналогично, распределение по координате вершины вдоль оси пучков (параметр z) имеет максимум вблизи $z = 0$ для пучковых событий и однородно для фоновых событий (рис. 36(б)). Количество фоновых событий определяется из распределений по параметрам ρ и z в следующих предположениях:

1. Для коллинеарных событий параметры ρ и z не коррелированы между собой.

2. Все события с $\rho > 0.5$ см или $|z| > 9$ см являются фоновыми.

Выделим на двумерной $\rho - z$ диаграмме область, в которую попадают отобранные коллинеарные события ($\rho < 0.3$ см и $|z| < 9$ см), а также три области, содержащие только фоновые события:

1. $\rho < 0.3$ см и $9 < |z| < 15$ см;



(а) Распределение по параметру ρ.

(б) Распределение по параметру Z.

Рис. 36: Распределения по параметрам ρ и Z для коллинеарных и фоновых событий. Нештрихованные гистограммы соответствуют всем коллинеарным событиям, заштрихованные — только фоновым событиям.

2. $0.5 < \rho < 1.0$ см и $|z| < 9$ см;

3. $0.5 < \rho < 1.0$ см и $9 < |z| < 15$ см.

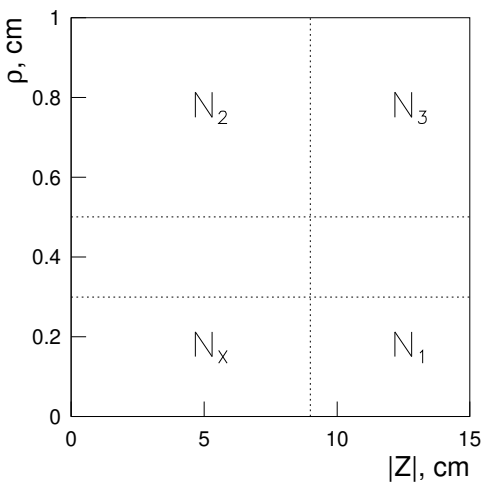


Рис. 37: Иллюстрация к определению числа фоновых событий N_{bg}.

Пусть N_X — количество фоновых событий в отобранных коллинеарных событиях, $N_{1,2,3}$ — количество событий (фоновых) в областях 1, 2 и 3 соответственно (рис. 37). Согласно сделанным предположениям,

$$N_X = \frac{N_2}{N_3} \cdot N_1 = \frac{N_1}{N_3} \cdot N_2.$$

При этом, N_X является математическим ожиданием количества фоновых событий N_{bg}, а не их точным числом. Доверительный интервал для N_{bg}, соответствующий одному стандартному отклонению, равен

$$N_{bg} \approx N_X \pm 2\sqrt{N_X}. \qquad (6)$$

При минимизации функции правдоподобия количество фоновых событий фиксировалось равным N_X, однако по окончании минимизации ΔN_{bg} квадратично добавлялось к $\Delta N_{\pi\pi}$.

3.4.3 Коррекция зависимости энерговыделения от полярного угла трека

Поскольку с изменением полярного угла Θ меняется эффективная толщина калориметра, плотность вероятности $f_a(E)$ для частицы типа a выделить энергию E зависит не только от E, но и от Θ. [1] В коллинеарном событии присутствуют две частицы, и угол Θ для них сильно коррелирован, поэтому появляется корреляция и между энерговыделениями частиц в событии. Как следствие, становится невозможным факторизовать двумерную плотность вероятности $f_a(E^+, E^-)$, что существенно усложняет функцию правдоподобия.

Для упрощения функции правдоподобия, вместо энерговыделения E в ней было использовано *поправленное* энерговыделение $\overline{E}$, в котором учтена зависимость энерговыделения от Θ. Другими словами, вместо E используется некая функция $\overline{E}(E, \Theta)$ такая, что плотность вероятности $f_a(E, \Theta)$ превращается в $f_a(\overline{E})$. Поскольку зависимость

[1] В действительности, энерговыделение зависит от угла влета частицы в калориметр, который, в свою очередь, зависит от угла вылета частицы.

энерговыделения от Θ различна для частиц разного типа, поправленное энерговыделение было определено таким образом, чтобы минимизировать зависимость энерговыделения от Θ для всех типов частиц.

Для построения поправленного энерговыделения отбирались события упругого электрон-позитронного рассеяния и космические мюоны. Такие события могут быть отобраны с хорошей эффективностью практически без примеси фона, и они характеризуются как большим (электроны), так и малым (мюоны) энерговыделениями.

Зависимость энерговыделения электронов от Θ объясняется относительно малой толщиной калориметра (около $8X_0$), которая приводит к значительным утечкам ливня. Для разных значений Θ эффективная толщина калориметра различна, и, соответственно, изменяется доля утечек ливня. Зависимость среднего энерговыделения электронов (позитронов) от Θ была параметризована квадратичной зависимостью:

$$E_e(\Theta) = E_1 \cdot \left[1 + \alpha(\Theta - \pi/2)^2\right],$$

где E_1 и α свободные параметры подгонки.

Космические мюоны являются минимально ионизирующими частицами и их энерговыделение прямо пропорционально длине пути, проходимого частицей в калориметре. Длина пути пропорциональна $1/\sin\Theta$, поэтому среднее энерговыделение космических мюонов было параметризовано функцией

$$E_\mu(\Theta) = E_0/\sin\Theta,$$

где E_0 свободный параметр. Пример зависимости энерговыделения электронов и космических мюонов от Θ приведен на рис. 38(а), пример подгонки средних энерговыделений описанными функциями — на рис. 38(б).

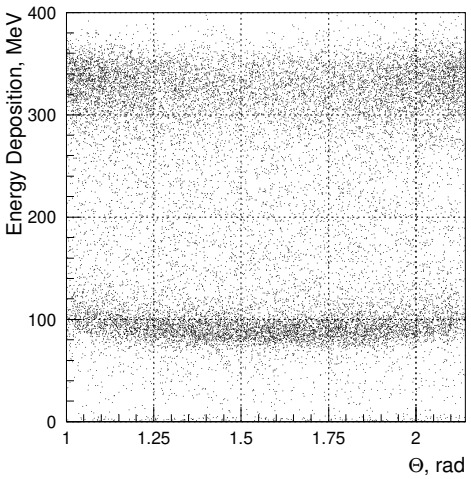
После определения параметров E_0, E_1 и α из подгонки средних энерговыделений, поправленное энерговыделение для частиц всех типов определялось как

$$\overline{E}(E,\Theta) = E \cdot \left[k_\mu(\Theta) + \frac{k_e(\Theta) - k_\mu(\Theta)}{E_e(\Theta) - E_\mu(\Theta)} \cdot (E - E_\mu(\Theta))\right], \tag{7}$$

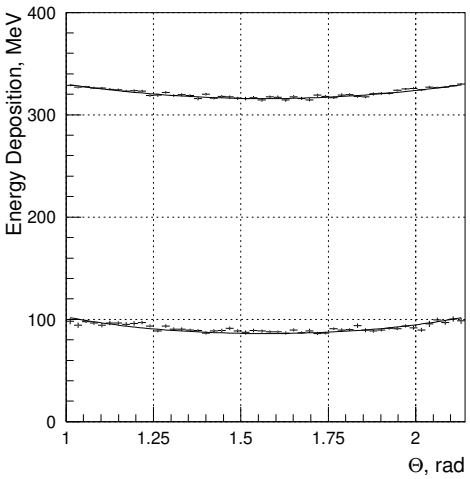
где

$$\begin{aligned} E_e(\Theta) &= E_1 \cdot [1 + \alpha(\Theta - \pi/2)^2], & k_e(\Theta) &= E_1/E_e(\Theta), \\ E_\mu(\Theta) &= E_0/\sin\Theta, & k_\mu(\Theta) &= E_0/E_\mu(\Theta). \end{aligned}$$

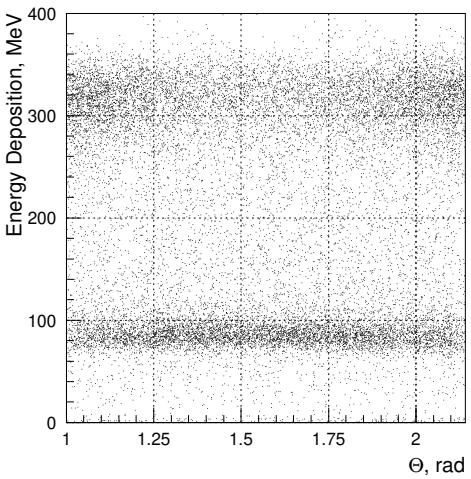
Для определенного таким образом поправленного энерговыделения его среднее значение для электронов и космических мюонов не зависит от Θ. Действительно, $\overline{E}(E_e(\Theta),\Theta) = E_1$ и $\overline{E}(E_\mu(\Theta),\Theta) = E_0$.



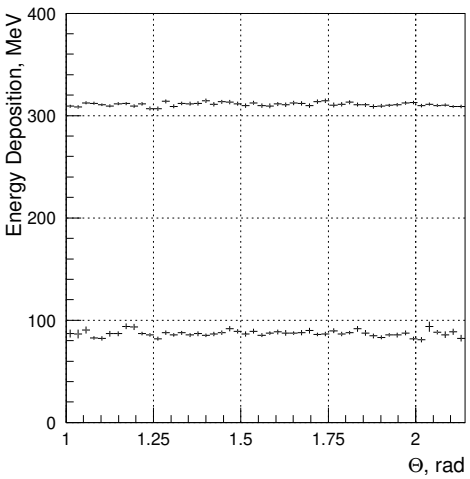
(а) Энерговыделение в зависимости от Θ для коллинеарных событий.



(б) Среднее энерговыделение в зависимости от Θ для электронов и космических мюонов.



(в) Поправленное энерговыделение в зависимости от Θ для коллинеарных событий.



(г) Среднее поправленное энерговыделение в зависимости от Θ для электронов и космических мюонов.

Рис. 38: Поправка энерговыделения в калориметре на полярный угол Θ вылета частицы для коллинеарных событий.

Поскольку энерговыделение космических мюонов не зависит от энергии пучков, параметр E_0 должен быть одинаковым для всех точек по энергии. Поскольку калибровка калориметра проводилась не в каждой точке по энергии, отличие значения E_0 от среднего значения отражает небольшие вариации в калибровке калориметра. Для коррекции этих вариаций поправленное энерговыделение было умножено на коэффициент $85/E_0$, где 85 МэВ — условно выбранная константа, близкая к среднему значению E_0.

Пример зависимости поправленного энерговыделения электронов и космических мюонов от Θ приведен на рис. 38(в), пример средних поправленных энерговыделений — на рис. 38(г). Как видно из рисунков, поправленное энерговыделение практически не зависит от Θ. Описанная процедура была применена ко всем точкам по энергии. В дальнейшем везде под энерговыделением понимается поправленное энерговыделение.

3.4.4 Параметризация энерговыделений

Для построения функции правдоподобия (5) удобно найти аналитическую форму для распределений энерговыделения (плотностей вероятности) $f_a(E)$ для всех типов частиц. Для параметризации всех распределений используется линейная комбинация функций двух типов — нормального и логарифмического распределений Гаусса, описанных ниже. Поскольку эти функции нормированы и хорошо описывают экспериментальные распределения энерговыделений, с их помощью легко строить нормированные плотности вероятностей. Параметризация энерговыделений частиц всех типов подробно описана в последующих разделах.

Распределение Гаусса $\mathbf{G(x|x_0}, \sigma)$:

$$G(x|x_0,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right], \tag{8}$$

где x_0 и σ — положение максимума и ширина на половине высоты, деленная на 2.35, соответственно. Данная функция нормированна в интервале $(-\infty, +\infty)$, в то время как энерговыделения лежат в диапазоне $(E_{min}, +\infty)$, где $E_{min} = 10$ МэВ (если энерговыделение частицы меньше E_{min}, оно считается равным нулю). Поэтому в случаях, где это существенно, используется распределение Гаусса, нормированное в интервале $(E_{min}, +\infty)$:

$$\frac{G(x|x_0,\sigma)}{1 - I\left(-\dfrac{E_{min}-x_0}{\sigma}\right)}, \quad \text{где} \quad I(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \tag{9}$$

Логарифмическое распределение Гаусса $\mathbf{G_L(x|x_0},\sigma,\eta)$ [76]:

$$G_L(x|x_0,\sigma,\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\cdot\frac{\eta}{\sigma_0}\cdot\exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln^2\left(1-\frac{x-x_0}{\sigma}\eta\right)}{\sigma_0^2}+\sigma_0^2\right]\right), \qquad (10)$$

$$\text{где}\quad \sigma_0 = \ln\left(\eta\sqrt{2\ln 2}+\sqrt{1+\eta^2\cdot 2\ln 2}\right)\Big/\sqrt{2\ln 2}\,.$$

Это распределение характеризуют три параметра: x_0 — положение максимума, σ — ширина на половине высоты, деленная на 2.35, и η — параметр, связанный с асимметрией распределения. При $\eta = 0$ данное распределение совпадает с нормальным распределением Гаусса. Данная функция нормирована в интервале $(-\infty, x_0+\sigma/\eta)$ при $\eta > 0$ и в интервале $(x_0+\sigma/\eta, +\infty)$ при $\eta < 0$. В случаях, когда хвостами распределения пренебречь нельзя, используется его модификация, нормированная в интервале $(E_{min}, +\infty)$:

$$\frac{G_L(x|x_0,\sigma,\eta)}{N(x_0,\sigma,\eta)}, \quad \text{где} \quad N(x_0,\sigma,\eta) = I\left[\frac{1}{\sigma_0}\ln\left(1-\frac{E_{min}-x_0}{\sigma}\eta\right)-\sigma_0\right]. \qquad (11)$$

3.4.5 Энерговыделение фоновых событий

Для изучения энерговыделения были отобраны фоновые события (космические мюоны) без примеси пучковых коллинеарных событий. Для этого были наложены условия отбора коллинеарных событий, с одним отличием — требовалось, чтобы вершина далеко отстояла от оси пучков ($0.5 < \rho < 1$ см вместо $\rho < 0.3$ см). Отобранные события являются фоновыми, что показывает их распределение по параметру z (см. рис. 36).

Для отобранных событий строилось распределение по величине их энерговыделения в калориметре. Оказалось, что распределение энерговыделений для верхнего кластера, соответствующего входу мюона в калориметр, совпадает с распределением энерговыделений для нижнего кластера, соответствующего выходу мюона из калориметра. В соответствие с этим, энерговыделения обоих кластеров были объединены в одно распределение, показанное на рис. 39, при этом использовались данные со всех точек по энергии.

Полученное распределение было подогнано функцией

$$f(E) = p\cdot G_L(E;E_0,\sigma,\eta) + (1-p)\cdot G_L(E;E_0+\alpha\sigma,\beta\sigma,\gamma\eta). \qquad (12)$$

Результаты подгонки приведены на рис. 39. Параметры подгонки были зафиксированы и полученная функция использовалась в качестве плотностей вероятности $f_{bg}^{+}(E^{+})$ и

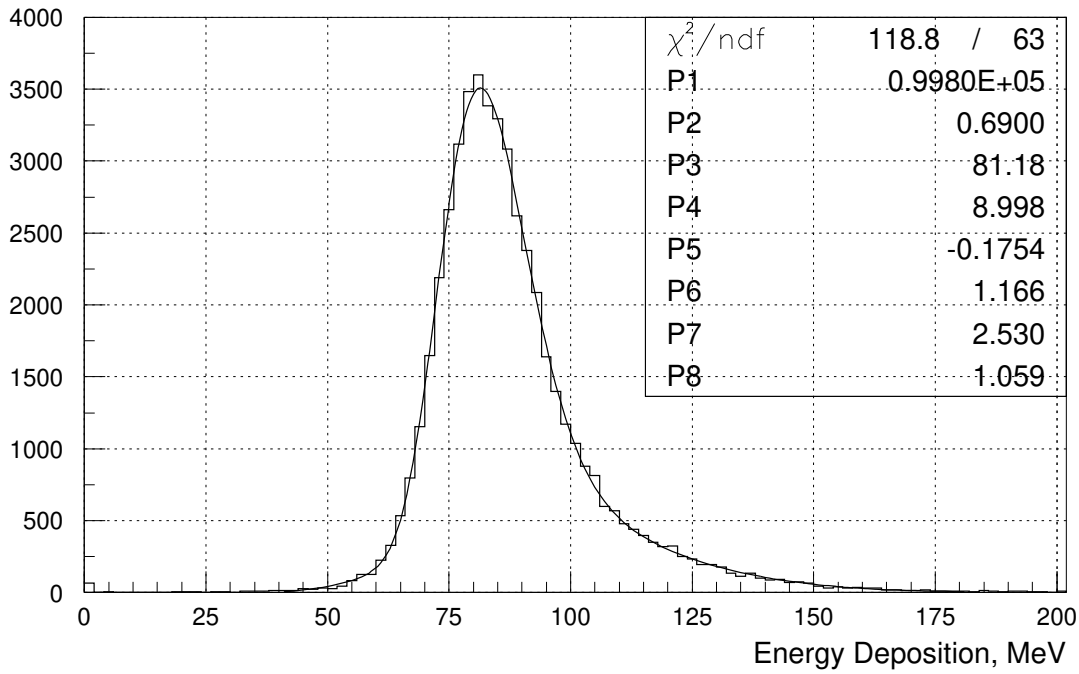


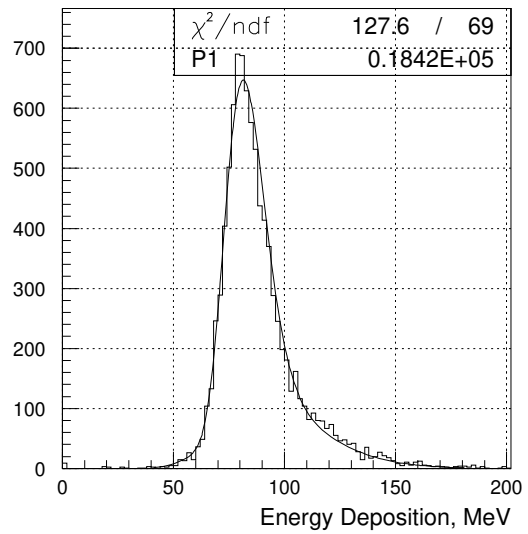
Рис. 39: Параметризация энерговыделения фоновых событий. Параметры подгонки функцией (12): P1 – количество событий, P2 – p, P3 – E_0, P4 – σ, P5 – η, P6 – α, P7 – β, P8 – γ.

$f_{bg}^{-}(E^{-})$ для фоновых событий:

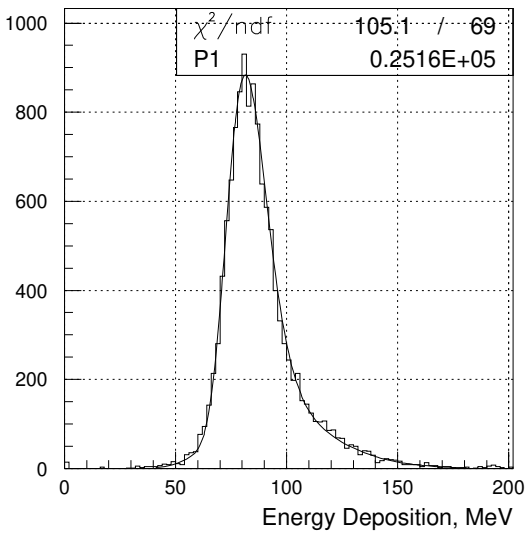
$$f_{bg}^{+}(E) \equiv f_{bg}^{-}(E) \equiv f_{bg}(E),$$
$$f_{bg}(E) = 0.69 \cdot G_L(E; 81.2, 9.0, -0.175) + 0.31 \cdot G_L(E; 91.7, 22.8, -0.186). \quad (13)$$

Также было получено, что вероятность иметь энерговыделение в любом из двух кластеров фонового события меньше 10 МэВ пренебрежимо мала — менее 0.1%.

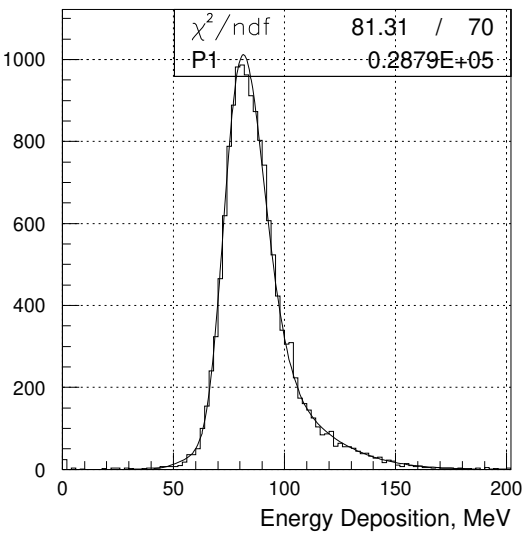
Для проверки стабильности энерговыделения фоновых событий, все данные были разбиты на четыре группы: $0.61 < 2E_b < 0.70$, $0.71 < 2E_b < 0.778$, $0.780 < 2E_b < 0.810$ и $0.81 < 2E_b < 0.96$, где E_b обозначена энергия пучков. В соответствие с описанной методикой, энерговыделение фоновых событий было получено независимо для каждой группы и подогнано функцией (13). Результаты подгонки показаны на рис. 40. Несмотря на то, что описанная функция неплохо описывает экспериментальные распределения, χ^2 подгонки значительно отличается от 1. Однако, как было показано с помощью моделирования, подобное несоответствие между экспериментальным распределением и теоретической плотностью вероятностью никак не влияет на результаты минимизации функции правдоподобия (5).



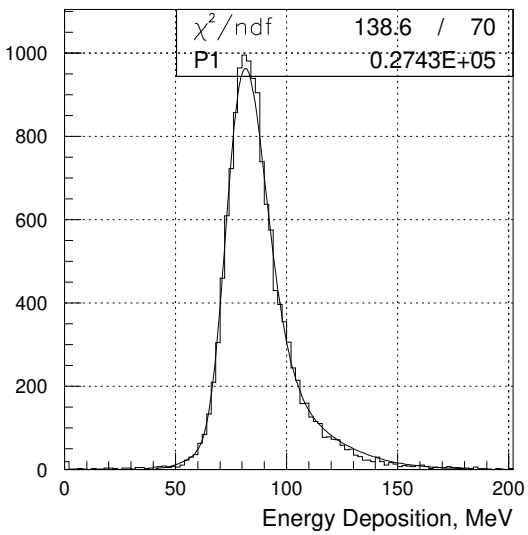
(а) Группа $0.61 < 2E < 0.70$ ГэВ.



(б) Группа $0.71 < 2E < 0.778$ ГэВ.



(в) Группа $0.780 < 2E < 0.810$ ГэВ.



(г) Группа $0.81 < 2E < 0.96$ ГэВ.

Рис. 40: Энерговыделение фоновых событий для различных групп данных. Параметры подгонки функцией (40): P1 – количество событий.

3.4.6 Энерговыделение электронов и позитронов

Как и в случае с фоновыми событиями, энерговыделение электронов (позитронов) было получено из анализа экспериментальных данных. Электроны (позитроны) могут быть выделены из коллинеарных событий используя их большие энерговыделения.

Для анализа отбирались коллинеарные события с более жестким требованием на расстояние от вершины до оси пучков ($\rho < 0.15$ см вместо $\rho < 0.3$ см), что помогало лучше подавить фоновые события. Для дополнительного подавления событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ использовался отбор по среднему импульсу двух частиц: $(E_b - 10) < p_{avr} < (E_b + 10)$ МэВ/с. При анализе энерговыделений электронов дополнительно требовалось, чтобы энерговыделение положительно заряженной частицы лежало в пределах от $(0.92E_b - 100)$ МэВ/с до $0.92E_b$ МэВ/с. Аналогично, при анализе энерговыделений позитронов, накладывалось дополнительное требование на энерговыделение отрицательно заряженной частицы. Благодаря описанным отборам удалось подавить примесь частиц других типов, т.е. получить тестовый набор "чистых" электронов и позитронов. Для применения описанной методики необходимо, чтобы энерговыделения электронов и позитронов были независимы. Незначительная корреляция между ними появляется за счет радиационных эффектов, однако, как было проверено на моделировании, этот эффект пренебрежимо мал.

В каждой точке по энергии, энерговыделения электронов и позитронов, полученные по описанной методике, параметризовались функцией

$$f(E) = (1 - p_w) \cdot G_L(E; E_0, \sigma, \eta) + p_w \cdot G_L(E; E_0 + \alpha\sigma, \beta\sigma, \gamma\eta). \tag{14}$$

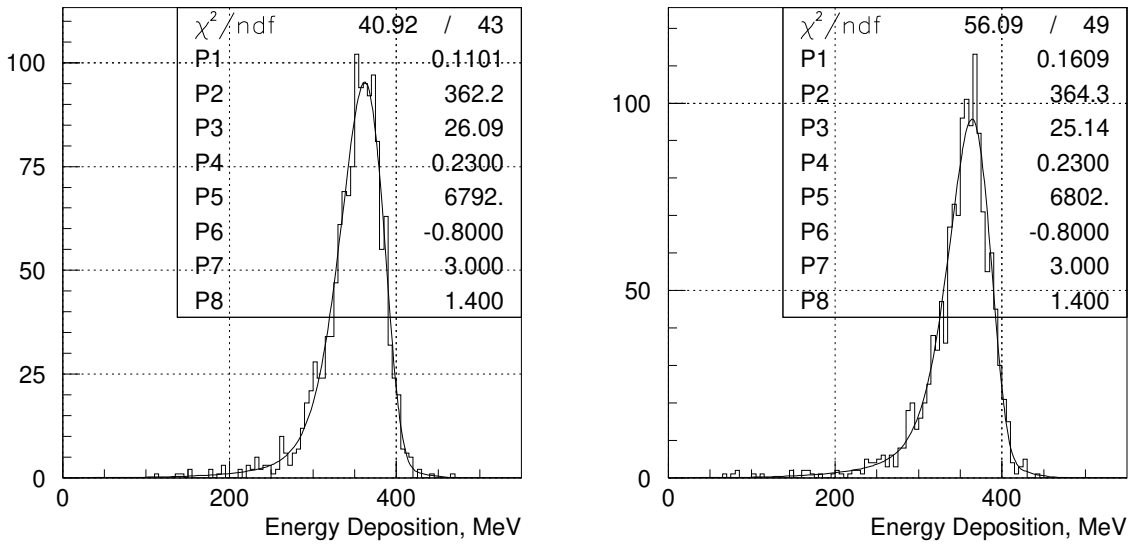
Примеры подгонки экспериментальных распределений функцией (14) приведены на рис. 41, из которого видно, что энерговыделения электронов и позитронов одинаковы. В соответствие с результатами подгонки, были зафиксированы следующие параметры:

$$\alpha = -0.8, \quad \beta = 3.0, \quad \gamma = 1.4.$$

Также, как и в случае фоновых событий, было получено, что вероятность электрону или позитрону выделить менее 10 МэВ в калориметре пренебрежимо мала.

Окончательно, в качестве распределений энерговыделения (плотности вероятностей) для электронов и позитронов в функции правдоподобия (5) использовались следующие выражения:

$$\begin{gathered} f^+_{ee}(E^+) \equiv f^-_{ee}(E-) \equiv f_{ee}(E), \\ f_{ee}(E) = (1 - p_w) \cdot G_L(E; E_0, \sigma, \eta) + p_w \cdot G_L(E; E_0 - 0.8\sigma, 3\sigma, 1.4\eta), \end{gathered} \tag{15}$$



(а) Энерговыделение позитронов.

(б) Энерговыделение электронов.

Рис. 41: Подгонка энерговыделений электронов и позитронов, отобранных при энергии пучков $2E_b = 0.9$ ГэВ. Параметры подгонки функцией (14): P1 – p_w, P2 – E_0, P3 – σ, P4 – η, P5 – количество событий, P6 – α, P7 – β, P8 – γ.

3.4.7 Энерговыделение пучковых мюонов

Мюоны, рожденные в реакции $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ в описываемом диапазоне энергий в с.ц.м., взаимодействуют с калориметром как минимально ионизирующие частицы — вероятность мюону остановиться в веществе калориметра пренебрежимо мала. Их энерговыделение было получено с помощью полного моделирования. Разыгрывались события $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ в 18 точках по энергии в диапазоне энергий в с.ц.м. от 0.6 до 1.0 ГэВ по 10000 событий в точке. Моделированные данные восстанавливались стандартной программой и коллинеарные мюоны отбирались по стандартным критериям отбора, после чего производилась процедура поправки энерговыделения в зависимости от угла Θ вылета мюона.

Полученное энерговыделение мюонов параметризовалось функцией

$$f^{\mu}_{SIM}(E) = p_1 \cdot [\, p_2 \cdot G_L(E; E_0, \sigma_0, \eta) + \\ +(1-p_2) \cdot G_L(E; E_0, \beta\sigma_0, \gamma\eta)] + (1-p_1) \cdot G(E; E_1, \sigma_1). \tag{16}$$

По результатам подгонки в разных точках по энергии были получены зависимости параметров подгонки p_1, p_2, E_0, σ_0, E_1, σ_1, η, β и γ от энергии мюонов. Было показано, что распределения энерговыделений для μ^+ и μ^- практически совпадают. Пример мо-

делированного энерговыделения мюонов и зависимости параметров E_0 и σ_0 от энергии мюона приведены на рис. 42.

В моделировании предполагается, что калориметр идеально калиброван, в то время как в экспериментальных данных присутствует дополнительный вклад в разрешение калориметра, связанный с неточностью его калибровки. В результате, экспериментальные распределения имеют большую ширину, чем моделированные. Помимо этого, может присутствовать также масштабный коэффициент между моделированным и экспериментальным распределениями. Поэтому, для описания экспериментальных распределений энерговыделения пучковых мюонов, использовалась следующая модификация функции (16):

$$f^{\mu}_{MIP}(E;k,\sigma_x) = \frac{1}{k}\cdot\Bigg[p_1\cdot\Big[p_2\cdot G_L(\tilde{E};E_0,\tilde{\sigma}_0,\eta)+ \\ +(1-p_2)\cdot G_L(\tilde{E};E_0,\beta\tilde{\sigma}_0,\gamma\eta)\Big]+(1-p_1)\cdot G(\tilde{E};E_1,\tilde{\sigma_1})\Bigg], \qquad (17)$$

где $\tilde{E}=E/k, \quad \tilde{\sigma}_0=\sqrt{\sigma_0^2+\sigma_x^2}, \quad \tilde{\sigma}_1=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_x^2}.$

Зависимости параметров p_1, p_2, E_0, σ_0, E_1, σ_1, η, β и γ от энергии мюона известны (получены в моделировании), поэтому эта функция имеет только два свободных параметра: k — масштабный коэффициент и σ_x — дополнительный вклад в разрешение калориметра.

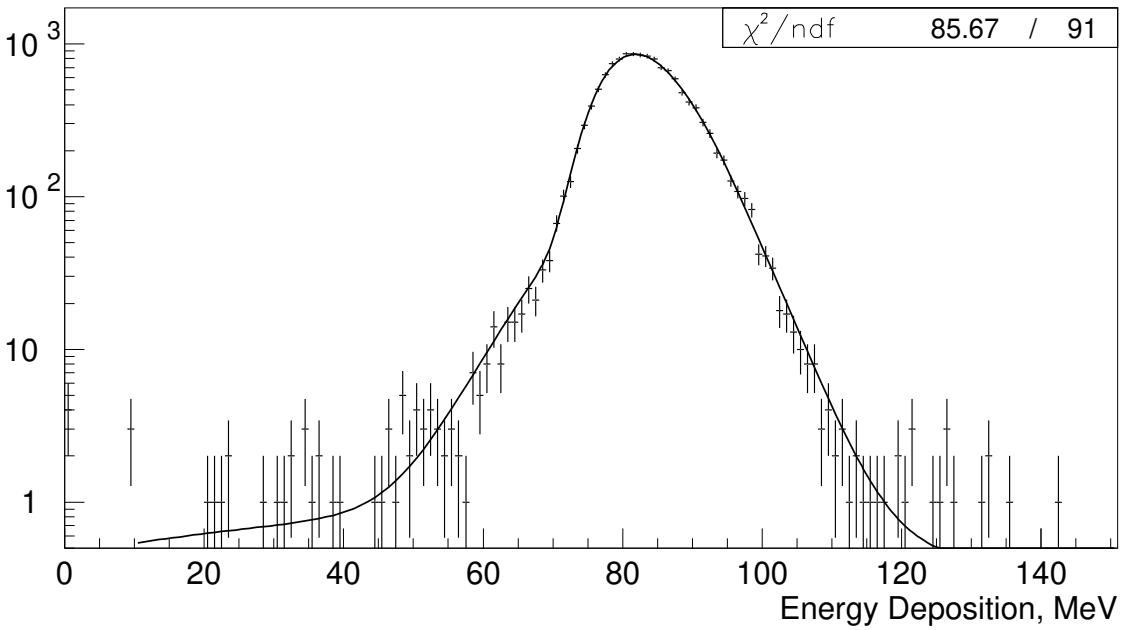
Функция (17) использовалась в качестве плотностей вероятности $f^+_\mu(E^+)$ и $f^-_\mu(E^-)$ в функции правдоподобия:

$$f^+_\mu(E)\equiv f^-_\mu(E)\equiv f_\mu(E)=f^{\mu}_{MIP}(E;k,\sigma_x).$$

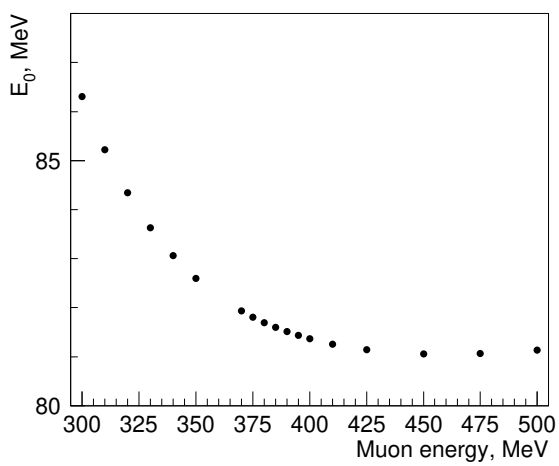
3.4.8 Энерговыделение пионов

В отличие от мюонов, пионы могут взаимодействовать с веществом калориметра как минимально ионизирующие частицы или испытывать ядерные взаимодействия. В связи с этим, распределение энерговыделения пионов состоит их двух компонент: энерговыделения минимально ионизирующих и энерговыделения ядерно провзаимодействовавших пионов.

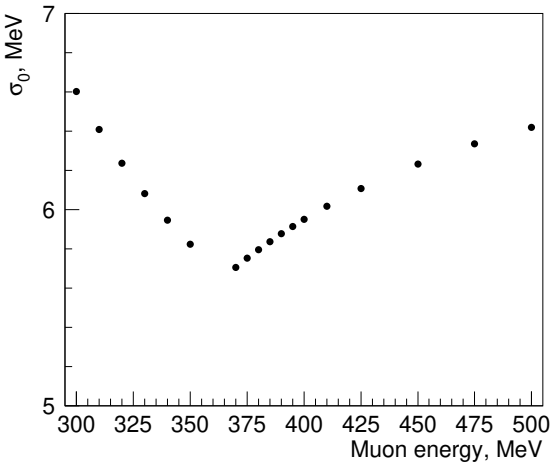
Энерговыделение минимально ионизирующих пионов было получено с использованием моделирования, также, как это было сделано в случае пучковых мюонов. Разыгрывались события $e^+e^-\to\pi^+\pi^-$ в 12 точках по энергии в диапазоне энергий в с.ц.м. от 0.6 до 1.0 ГэВ по 10000 событий в точке. При моделировании прохождения пионов через



(а) Энерговыделение мюонов с энергией 375 МэВ.



(б) Зависимость параметра E_0 от энергии мюона.



(в) Зависимость параметра σ_0 от энергии мюона.

Рис. 42: Моделирование энерговыделения пучковых мюонов.

вещество детектора их ядерные взаимодействия с веществом были отключены. Моделированные данные восстанавливались стандартной программой, коллинеарные пионы отбирались по стандартным критериям отбора, после чего производилась процедура поправки энерговыделения в зависимости от угла Θ вылета пиона.

Полученное энерговыделение минимально ионизирующих пионов параметризовалось функцией (16). По результатам подгонки в разных точках по энергии были получены зависимости параметров подгонки p_1, p_2, E_0, σ_0, E_1, σ_1, η, β и γ от энергии пиона. Было показано, что распределения энерговыделения для минимально ионизирующих π^+ и π^- практически совпадают. Пример моделированного энерговыделения мюонов и зависимости параметров E_0 и σ_0 приведены на рис. 43.

Как и для пучковых мюонов, для описания экспериментальных распределений энерговыделения минимально ионизирующих пионов использовалась модификация функции (16), учитывающая неточность калибровки калориметра:

$$f^{\pi}_{MIP}(E;k,\sigma_x) = \frac{1}{k}\cdot\Bigg[p_1\cdot\Big[p_2\cdot G_L(\tilde{E};E_0,\tilde{\sigma}_0,\eta)+ \\ +(1-p_2)\cdot G_L(\tilde{E};E_0,\beta\tilde{\sigma}_0,\gamma\eta)\Big]+(1-p_1)\cdot G(\tilde{E};E_1,\tilde{\sigma_1})\Bigg], \qquad (18)$$

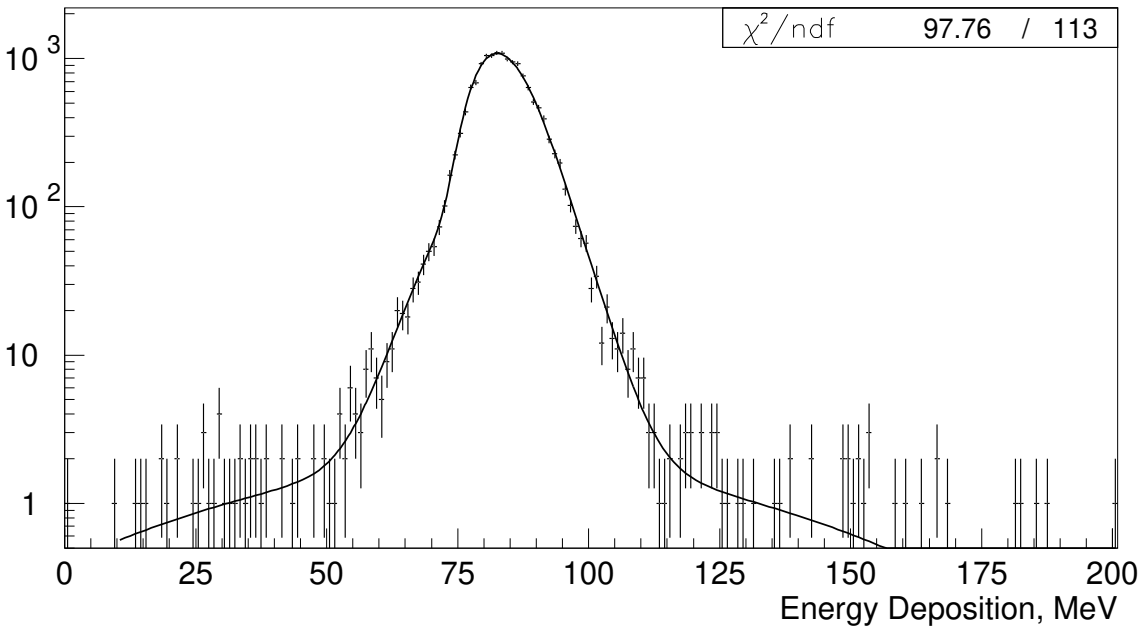
где $\quad \tilde{E}=E/k, \quad \tilde{\sigma}_0=\sqrt{\sigma_0^2+\sigma_x^2}, \quad \tilde{\sigma}_1=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_x^2}.$

Функция (18) имеет только два свободных параметра: k — масштабный коэффициент и σ_x — дополнительный вклад в разрешение калориметра.

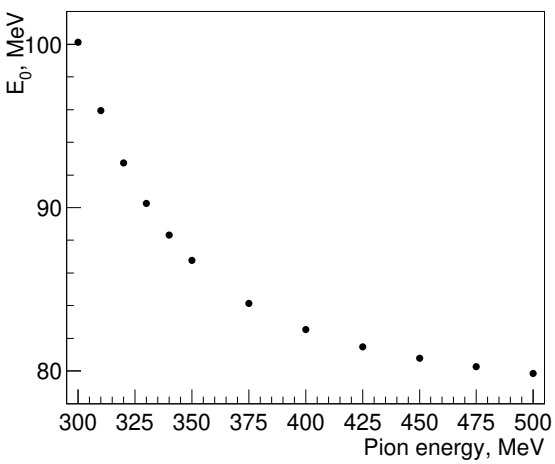
Поскольку существующее моделирование ядерного взаимодействия пионов недостаточно хорошо описывает их энерговыделение [77], для описания энерговыделения ядерно провзаимодействовавших пионов была выбрана эмпирическая функция вида

$$f^{\pi}_{NI}(E;\nu,p_{1\ldots N}) = \frac{G(E;0,\nu E_0/2)+\sum\limits_{i=1}^{N} G(E;\nu E_0,\nu E_0/2)\cdot p_i^2}{1+\sum\limits_{i=1}^{N} p_i^2}, \quad \text{где} \quad E_0=\frac{E_b}{N+1}. \qquad (19)$$

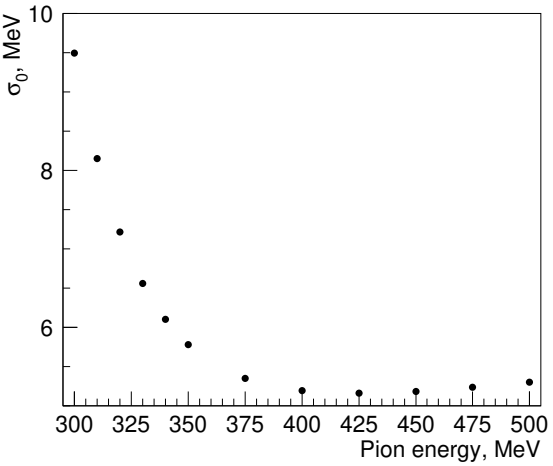
Данная функция представляет собой сумму $(N+1)$ равноудаленных гауссовых распределений с одинаковой шириной, равной половине расстояния между максимумами. Свободными параметрами этой функции являются ν — масштабный фактор и $p_{1\ldots N}$ — относительные вклады различных гауссианов. Эмпирически получено, что при $N=6$ данная функция хорошо описывает экспериментальные распределения. Энерговыделения ядерно провзаимодействовавших π^+ и π^- существенно отличаются, поэтому параметры функции (19) различны для π^+ и π^-.



(а) Энерговыделение минимально ионизирующих пионов с энергией 400 МэВ.



(б) Зависимость параметра E_0 от энергии пиона.



(в) Зависимость параметра σ_0 от энергии пиона.

Рис. 43: Моделирование энерговыделения минимально ионизирующих пионов.

В отличие от частиц других типов, для пионов существует отличная от нуля вероятность не иметь энерговыделения в калориметре (точнее, иметь энерговыделение менее 10 МэВ), причем эта вероятность отличается для π^+ и π^-. Полное энерговыделение пионов в калориметре описывалось следующими функциями, которые использовались в качестве плотностей вероятности в функции правдоподобия (5):

$$f_\pi^+(E) = p_0^+ \cdot \delta(E) + (1 - p_0^+) \times \\ \times \left[p_{MIP}^+ \cdot f_{MIP}^\pi(E; k, \sigma_x) + (1 - p_{MIP}^+) \cdot f_{NI}^\pi(E; \nu^+, p_{1\ldots N}^+) \right], \quad (20)$$

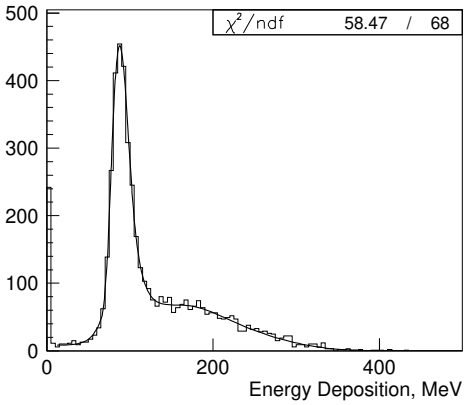
$$f_\pi^-(E) = p_0^- \cdot \delta(E) + (1 - p_0^-) \times \\ \times \left[p_{MIP}^- \cdot f_{MIP}^\pi(E; k, \sigma_x) + (1 - p_{MIP}^-) \cdot f_{NI}^\pi(E; \nu^-, p_{1\ldots N}^-) \right]. \quad (21)$$

Энерговыделение пионов описывается следующими параметрами: $p_0^\pm$ — вероятность иметь энерговыделение менее 10 МэВ, $p_{MIP}^\pm$ — вероятность провзаимодействовать как минимально ионизирующая частица, k и σ_x — параметры энерговыделения минимально ионизирующих пионов, $\nu^\pm$ и $p_{1\ldots N}^\pm$ — параметры энерговыделения ядерно провзаимодействовавших пионов. Параметры, помеченные знаком "$\pm$", отличаются для π^+ и π^-.

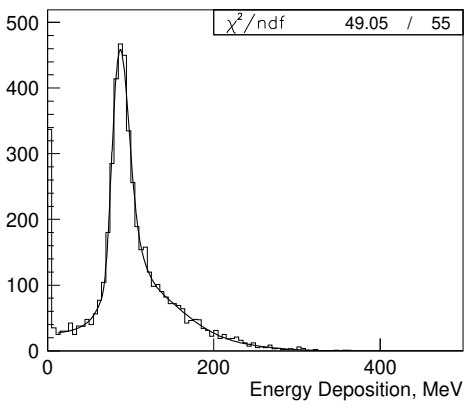
Чтобы проверить применимость функций (20) и (21) для описания энерговыделений пионов было отобрано около 100000 π^+ и π^-, рожденных в распаде $\phi \to \pi^+\pi^-\pi^0$. Детектором КМД-2 было зарегистрировано более 20 миллионов ϕ-мезонов, около 15% которых распадается на 3 пиона. Данный распад является хорошим источником "чистых" пионов, поскольку, при регистрации всех трех пионов в детекторе, события данного типа могут быть отобраны практически без фона. При этом импульс пионов покрывает практически всю интересующую область. Пионы из распада $\phi \to \pi^+\pi^-\pi^0$ были отобраны таким образом, чтобы воспроизвести угловое распределение коллинеарных пионов. Затем они были сгруппированы в "точки" по энергии шириной 10 МэВ каждая, и для каждой точки проводилась процедура поправки энерговыделения в зависимости от угла Θ вылета пиона. Для каждой точки по энергии энерговыделение π^+ и π^- подгонялось функциями (20) и (21), соответственно. Было показано, что эти функции хорошо описывают энерговыделение пионов во всем диапазоне энергий. Примеры подгонки экспериментальных энерговыделений пионов с энергиями в диапазонах $345 < E_\pi < 355$ МэВ и $425 < E_\pi < 435$ МэВ приведены на рис. 44.

3.4.9 Результаты минимизации

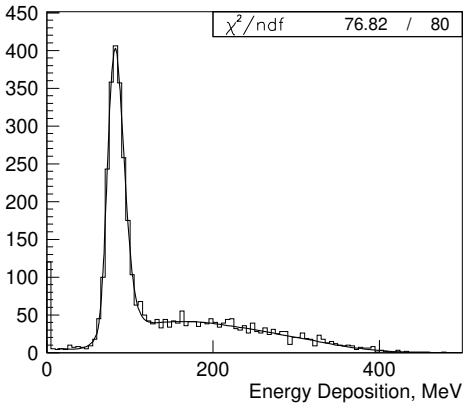
Описанная функция правдоподобия минимизировалась для каждой точки по энергии. Минимизация производилась с 27 свободными параметрами:



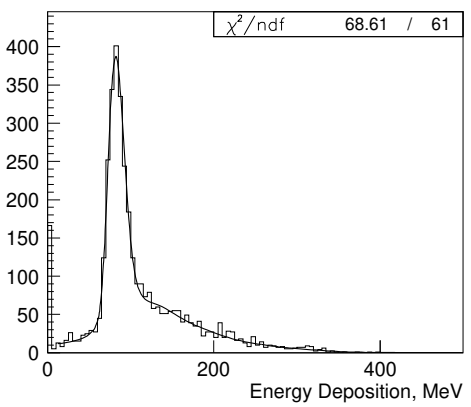
(а) π^+, $345 < E_\pi < 355$ МэВ.



(б) π^-, $345 < E_\pi < 355$ МэВ.



(в) π^+, $425 < E_\pi < 435$ МэВ.



(г) π^-, $425 < E_\pi < 435$ МэВ.

Рис. 44: Пример подгонки экспериментальных энерговыделений пионов функциями (20) и (21). Пионы отобраны из распада $\phi \to \pi^+\pi^-\pi^0$.

- основные параметры

$$(N_{ee} + N_{\mu\mu}), \quad \frac{N_{\pi\pi}}{N_{ee} + N_{\mu\mu}};$$

- параметры энерговыделения электронов и позитронов

$$p_W, \quad E_0, \quad \sigma, \quad \eta;$$

- параметры энерговыделения минимально ионизирующих мюонов и пионов

$$k_{MIP}, \quad \sigma_x^\mu, \quad \sigma_x^\pi;$$

- параметры энерговыделения пионов

$$p_0^+, \quad p_0^-, \quad p_{MIP}^+, \quad p_{MIP}^-, \quad \nu^+, \quad \nu^-, \quad p_{1\ldots N}^+, \quad p_{1\ldots N}^-, \quad N = 6.$$

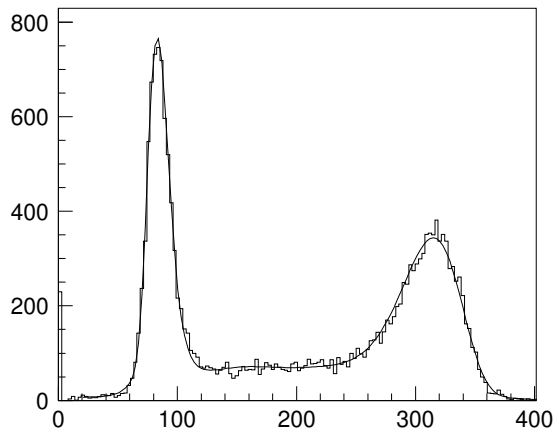
Минимизация проводилась с использованием пакета MINUIT [78]. Количество коллинеарных событий разного типа, полученное в результате минимизации, приведено в таблице 8. Пример результатов минимизации для точки по энергии 0.782 ГэВ приведен на рис. 45. Поскольку затруднительно показать подогнанное двумерное распределение E^+ от E^-, на рисунке показаны его проекции — энерговыделения положительно и отрицательно заряженных частиц.

3.5 Определение сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$

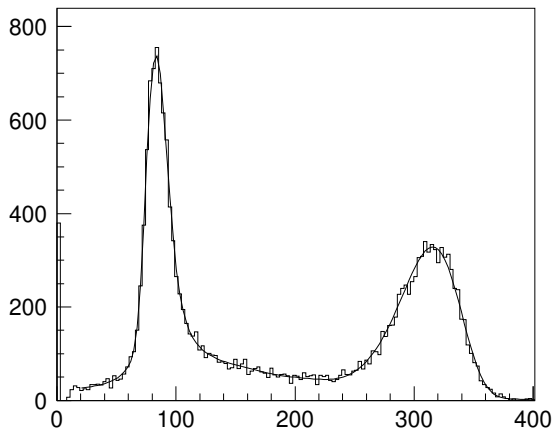
После минимизации функции правдоподобия, пионный формфактор определялся по формуле:

$$|F_\pi|^2 = \frac{N_{\pi\pi}}{N_{ee}+N_{\mu\mu}} \cdot \frac{\sigma^B_{ee}\cdot(1+\delta_{ee})\,\varepsilon_{ee} + \sigma^B_{\mu\mu}\cdot(1+\delta_{\mu\mu})\,\varepsilon_{\mu\mu}}{\sigma^B_{\pi\pi}\cdot(1+\delta_{\pi\pi})\,(1-\Delta_H)\,(1-\Delta_D)\,\varepsilon_{\pi\pi}} - \Delta_{3\pi}, \tag{22}$$

где экспериментальное отношение $N_{\pi\pi}/(N_{ee}+N_{\mu\mu})$ получено в результате минимизации, σ^B_a — сечения регистрации в борновском приближении, δ_a — радиационные поправки, ε_a — эффективность регистрации событий соответствующего процесса, Δ_H и Δ_D — поправки, связанные с потерями пионов из-за ядерного взаимодействия с веществом вакуумной трубы и из-за распада на лету, соответственно, и $\Delta_{3\pi}$ — поправка, связанная



(а) Энерговыделение положительно заряженных частиц.



(б) Энерговыделение отрицательно заряженных частиц.

Рис. 45: Результат минимизации функции правдоподобия для точки по энергии 0.782 ГэВ. Гистограмма показывает экспериментальное энерговыделение частиц, линия — энерговыделение, полученное в результате минимизации.

2E (MeV)	N_{ee}	$N_{\mu\mu}$	$N_{\pi\pi}$	N_{bg}
610.50	1513 ± 39	145 ± 12	322 ± 44	342 ± 37
620.50	3354 ± 59	322 ± 18	878 ± 63	532 ± 46
630.50	3397 ± 61	325 ± 18	1001 ± 65	596 ± 48
640.51	3380 ± 58	323 ± 18	1022 ± 64	560 ± 47
650.49	2427 ± 50	231 ± 15	851 ± 53	329 ± 36
660.50	2824 ± 54	270 ± 17	1057 ± 55	318 ± 35
670.50	2866 ± 53	273 ± 17	1239 ± 61	445 ± 42
680.59	2843 ± 54	270 ± 17	1572 ± 66	448 ± 42
690.43	3933 ± 64	374 ± 20	2301 ± 72	393 ± 39
700.52	4124 ± 65	392 ± 20	2822 ± 76	342 ± 37
710.47	3319 ± 60	316 ± 18	2647 ± 82	577 ± 48
720.25	4501 ± 65	430 ± 21	4180 ± 88	446 ± 42
730.24	2774 ± 54	264 ± 17	2852 ± 79	410 ± 40
740.20	2890 ± 54	276 ± 17	3251 ± 80	401 ± 40
750.28	3438 ± 59	329 ± 19	4383 ± 93	615 ± 49
760.18	3519 ± 62	337 ± 19	4671 ± 101	721 ± 53
764.17	4128 ± 66	395 ± 20	5489 ± 96	339 ± 36
770.11	3597 ± 61	344 ± 19	4938 ± 93	414 ± 40
774.38	3351 ± 59	319 ± 18	4517 ± 88	285 ± 33
778.17	2806 ± 54	266 ± 17	4018 ± 83	263 ± 32
780.17	2996 ± 56	286 ± 17	4107 ± 85	230 ± 30
782.23	8139 ± 93	793 ± 29	9830 ± 134	709 ± 53
784.24	3068 ± 55	304 ± 18	3584 ± 75	205 ± 28
786.04	2660 ± 52	266 ± 17	2739 ± 79	496 ± 44
790.10	2683 ± 53	268 ± 17	2896 ± 82	536 ± 46
794.14	3792 ± 43	377 ± 19	3802 ± 93	812 ± 57
800.02	4898 ± 57	485 ± 22	4857 ± 98	698 ± 52
810.14	7035 ± 79	694 ± 27	6185 ± 109	753 ± 54
820.02	3161 ± 57	309 ± 18	2658 ± 72	314 ± 35
829.97	3086 ± 55	301 ± 18	2252 ± 69	336 ± 36
				продолжение на следующей странице

Таблица 8: Количество событий $e^+e^- \to e^+e^-$, $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и космического фона, полученное в результате минимизации функции правдоподобия.

2E (MeV)	N_{ee}	$N_{\mu\mu}$	$N_{\pi\pi}$	N_{bg}
839.10	2738 ± 50	267 ± 17	1657 ± 62	313 ± 35
849.24	2324 ± 49	226 ± 15	1209 ± 54	228 ± 30
859.60	2417 ± 49	234 ± 16	1301 ± 54	227 ± 30
869.50	3800 ± 61	368 ± 20	1585 ± 60	269 ± 32
879.84	1365 ± 37	132 ± 12	523 ± 37	139 ± 23
889.72	5000 ± 70	483 ± 23	1605 ± 60	246 ± 31
900.04	6434 ± 78	621 ± 26	1905 ± 67	340 ± 36
910.02	5254 ± 72	506 ± 23	1375 ± 60	304 ± 34
919.56	5063 ± 71	488 ± 23	1172 ± 56	269 ± 32
930.11	3419 ± 58	328 ± 18	750 ± 46	198 ± 28
942.19	6324 ± 77	606 ± 25	1257 ± 57	277 ± 33
951.84	7150 ± 84	685 ± 27	1259 ± 62	405 ± 40
961.52	6563 ± 79	627 ± 26	1088 ± 56	288 ± 33

Таблица 8: Количество событий $e^+e^- \to e^+e^-$, $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и космического фона, полученное в результате минимизации функции правдоподобия.

с наличием малой вероятности принять событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\pi^0$ за событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. Все перечисленные величины обсуждаются в последующих разделах.

Сечение процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ определялось по формуле

$$\sigma_{\pi\pi} = \frac{\pi\alpha^2}{3s}\left(1 - \frac{4m_\pi^2}{s}\right)^{3/2} \cdot |F_\pi|^2. \tag{23}$$

В каждой точке по энергии, по результатам минимизации определялся интеграл светимости, который использовался при анализе событий других типов. Интеграл светимости определялся по формуле:

$$\int Ldt = \frac{N_{ee} + N_{\mu\mu}}{\sigma_{ee}^B \cdot (1+\delta_{ee})\,\varepsilon_{ee} + \sigma_{\mu\mu}^B \cdot (1+\delta_{\mu\mu})\,\varepsilon_{\mu\mu}}. \tag{24}$$

3.5.1 Борновские сечения и радиационные поправки

Дифференциальные по углам вылета конечных частиц сечения коллинеарных процессов в борновском приближении хорошо известны и приведены ниже:

$$\frac{d\sigma_a}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} \cdot f_a(\Theta), \quad a = ee, \mu\mu, \pi\pi, \quad \text{где}$$

$$f_{ee} = \left(\frac{3+\cos^2\Theta}{1-\cos\Theta}\right)^2, \quad f_{\mu\mu} = \beta_\mu \cdot \left(1 + \frac{1}{\gamma_\mu^2} + \beta_\mu^2 \cos^2\Theta\right), \quad f_{\pi\pi} = \frac{1}{2}\beta_\pi^3 \sin^2\Theta.$$

Для расчета сечений коллинеарных процессов в борновском приближении, приведенные дифференциальные сечения интегрировались по телесному углу регистрации:

$$\sigma_a = \frac{\pi\alpha^2}{2s} \cdot \int\limits_{\Theta_{min}}^{\pi-\Theta_{min}} \frac{d\sigma_a}{d\Omega}\, d(\cos\Theta), \quad a = ee, \mu\mu, \pi\pi, \quad \text{где} \quad \Theta_{min} = 1.1\,\text{рад}. \tag{25}$$

Для определения сечений регистрации необходимо учесть поправки, связанные с поляризацией вакуума (петлевые поправки), и радиационные поправки, связанные с излучением фотонов начальными или конечными частицами.

Поправки, вызванные поляризацией вакуума, необходимо учесть только для сечений σ_{ee} и $\sigma_{\mu\mu}$ процессов $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, соответственно. Это связано с тем, что в качестве экспериментальных данных принято приводить именно "одетые" сечения $e^+e^- \to$ адроны, включающие в себя все виртуальные поправки. Другими словами, эффекты, вызванные поляризацией вакуума, входят в определение формфактора пиона. Процессы же $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ являются в данном эксперименте мониторирующими, и для них сечение регистрации должно учитывать все возможные эффекты, включая поляризацию вакуума.

Расчет вклада поляризации вакуума лептонами и узкими адронными резонансами проводился аналитически [79]. Расчет вклада поляризации вакуума адронами проводился с помощью численного интегрирования экспериментальных сечений $e^+e^- \to$ адроны (в области низких энергий) и экспериментального отношения $R = \sigma(e^+e^- \to \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$ (в области высоких энергий). При этом данные по сечению $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, полученные в данной работе, не использовались, поскольку вклад поляризации вакуума мал и точности существующих экспериментальных данных ($\approx$0.1%) достаточно.

Расчет радиационной поправки к сечениям $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ основан на работах [80,81]. В работе [80] приведены дифференциальные сечения с учетом радиационной поправки, проинтегрированные по всей кинематической области конечных частиц, кроме полной энергии, унесенной фотонами. Точность расчетов составляет 0.2%,

однако результаты работы применимы только в случае излучения относительно мягких фотонов (с суммарной энергией не превышающей 10% от энергии начальных частиц). Это ограничение связано с тем, что при излучении жестких фотонов кинематика конечного состояния существенно меняется, и необходимо учитывать влияние критериев отбора. Для этого необходимо знать дифференциальные сечения, не проинтегрированные по кинематической области конечных частиц. В работе [81] сечения посчитаны в предположении, что излучается не более одного фотона. Точность формул при этом хуже (около 1%), однако приведенные дифференциальные сечения правильно описывают кинематику конечного состояния.

Процедура расчета радиационных поправок к сечениям $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ использовала оба подхода. В случае, если суммарная энергия, унесенная излученными фотонами, меньше некоторой промежуточной энергии ΔE, применялись формулы [80], в противном случае применялись формулы [81]. Промежуточная энергия ΔE является свободным параметром. В результате моделирования было показано, что в широком диапазоне значений ΔE величина полученного сечения от него не зависит с точностью, лучше 0.2%. Учитывая точность исходных формул, точность описанного подхода оценивается в 0.35%.

Как упоминалось выше, радиационная поправка к процессу $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ сильно зависит от поведения самого сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, определение которого и является целью данного анализа. Поэтому применялась итерационная процедура. Радиационная поправка, рассчитаная с использованием имеющихся экспериментальных данных, использовалась для получения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. Полученное сечение использовалось для расчета радиационной поправки на следующем шаге итерации и т.д. Как оказалось, данная процедура сходится через 2-3 шага — и сечение, и радиационная поправка перестают меняться.

Расчет радиационной поправки к сечению процесса $e^+e^- \to e^+e^-$ основывался на работе [82]. Формулы, приведенные в работе, позволяют получить дифференциальное сечение процесса $e^+e^- \to e^+e^-$ с учетом излучения не более двух фотонов в "коллинеарной" области (излученных в узкий конус вокруг направления импульса любой из четырех частиц) и не более одного фотона на большой угол. Граница между коллинеарной и неколлинеарной областями является свободным параметром, от которого полное сечение не зависит. Точность расчета оценивается в 0.2%.

Стоит отметить, что расчет радиационных поправок к сечению процесса $e^+e^- \to e^+e^-$ в большинстве предыдущих экспериментов в исследуемой области энергий был основан на работе [83], в которой было найдено дифференциальное сечение с учетом излучения одного фотона. Точность такого подхода оценивалась авторами в 1%. Оказа-

лось, что существует систематическая разница между результатами расчетов в новом и традиционном подходах — в используемых критериях отбора полное сечение процесса $e^+e^- \to e^+e^-$ уменьшилось приблизительно на 0.7%.

Зависимость радиационных поправок (как полной δ_a, так и вклада от поляризации вакуума $\delta_a^{(VP)}$), сечений в борновском приближении σ_a^B и полных сечений регистрации $\sigma_a^B \cdot (1 + \delta_a)$ от энергии показаны на рис. 46.

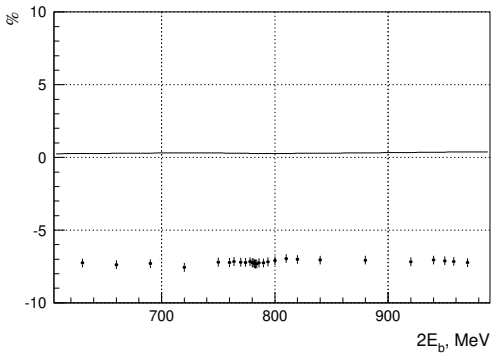
3.5.2 Эффективность триггера

Эффективность регистрации ε_a в формуле (22) включает в себя два вклада — эффективность триггера ε^{trig} (вероятность, что событие было оцифровано и попало на магнитную ленту) и эффективность восстановления ε^{rec} (вероятность, что событие было правильно реконструировано программой восстановления).

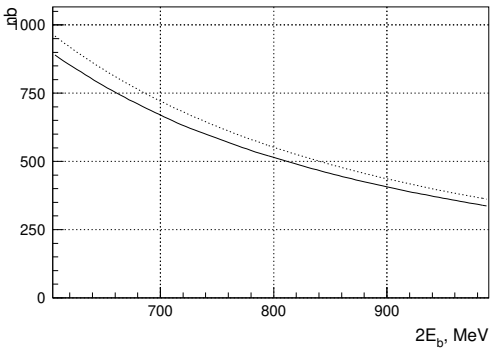
Во время набора данных использовались две разные конфигурации триггера. Данные в диапазоне энергий 0.82–0.96 ГэВ в с.ц.м. набирались с использованием триггера `TF*CSI`, когда требовалось одновременное срабатывание сигналов трекфайндера `TF` и сигнала триггера цилиндрического калориметра `CSI`. Во время набора данных в диапазоне энергий 0.61–0.81 ГэВ в с.ц.м требовалось срабатывание только сигнала трекфайндера.

Для срабатывания трекфайндера требуется наличие определенного количества сработавших проволочек в двух внутренних слоях дрейфовой камеры, при этом анализируется не только количество, но и положение проволочек. Вероятность срабатывания трекфайндера для частиц, летящих из центра камеры, с импульсами в анализируемом диапазоне, очень высока (более 90%), так как среднее количество сработавших проволочек в дрейфовой камере существенно превышает необходимый минимум. Более того, в коллинеарных событиях есть две частицы, каждая из которых может вызвать срабатывание триггера. Поэтому вероятность срабатывания трекфайндера для события в целом превышает 99%. Частицы разного типа (e, μ и π) в исследуемом диапазоне импульсов с точки зрения дрейфовой камеры практически неотличимы. Незначительная разница в средних импульсах и ионизационных потерях в камере не оказывают никакого влияния на вероятность срабатывания трекфайндера. Поэтому эффективность трекфайндера ε^{TF} предполагалась одинаковой для всех типов коллинеарных событий, и, соответственно, сокращалась в выражении (22).

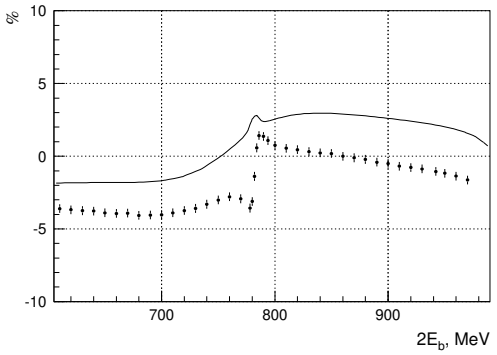
В последующих сеансах в электронику детектора было добавлено специальное устройство — блок обработки сигналов трекфайндера (БОСТ) [84], которое позволяло получать информацию о том, какие частицы в событии вызвали срабатывание сигнала `TF`. Анализ данных, полученных с помощью БОСТ, подтверждает сделанные предполо-



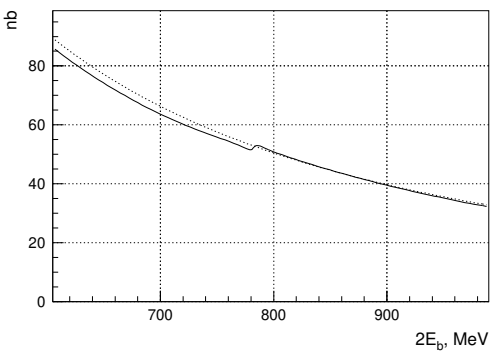
(а) $\delta_{ee}^{(VP)}$ (линия) и δ_{ee} (точки).



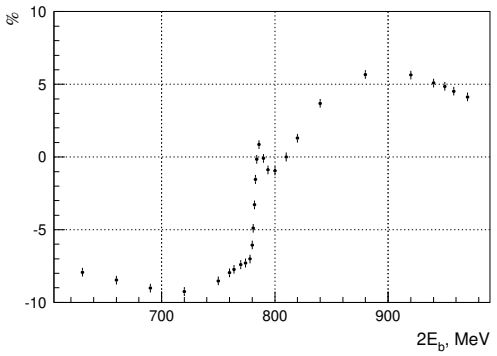
(б) σ_{ee}^{B} (точки) и $\sigma_{ee}^{B} \cdot (1+\delta_{ee})$ (линия).



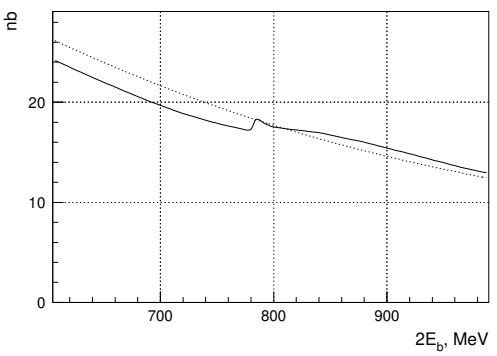
(в) $\delta_{\mu\mu}^{(VP)}$ (линия) и $\delta_{\mu\mu}$ (точки).



(г) $\sigma_{\mu\mu}^{B}$ (точки) и $\sigma_{\mu\mu}^{B} \cdot (1+\delta_{\mu\mu})$ (линия).



(д) $\delta_{\pi\pi}$ (точки).



(е) $\sigma_{\pi\pi}^{B}$ (точки) и $\sigma_{\pi\pi}^{B} \cdot (1+\delta_{\pi\pi})$ (линия).

Рис. 46: Радиационные поправки и сечения коллинеарных процессов. В левой колонке приведены радиационные поправки. Сплошной линией показаны поправки $\delta_a^{(VP)}$, вызванные поляризацией вакуума. Точками показаны полные радиационные поправки δ_a, включающие в себя как вклад от поляризации вакуума, так и вклад от излучения мягких фотонов. В правой колонке показаны сечения в борновском приближении σ_a^B (точки) и полные (с учетом радиационных поправок) сечения $\sigma_a^B \cdot (1 + \delta_a)$ коллинеарных процессов в телесном угле регистрации.

жения.

В отличие от сигнала трекфайндера, вероятность срабатывания триггера калориметра может отличаться для различных типов коллинеарных событий, поскольку их энерговыделение существенно отличается. Для определения эффективности срабатывания сигнала CSI использовался тот факт, что в коллинеарных событиях присутствуют две частицы, которые независимо друг от друга могут вызвать срабатывание этого сигнала, если их энерговыделение в любой из линеек калориметра превышает пороговое значение. Были отобраны коллинеарные события согласно обычным критериям отбора. Поскольку критерии отбора используют информацию только из дрейфовой камеры, они не изменяют значения эффективности. Для каждой частицы измерялась зависимость вероятности срабатывания сигнала CSI в любой из линеек калориметра, находящихся вблизи продолжения трека. Полученные зависимости свертывались с известными распределениями энерговыделения для каждого типа частиц, и, таким образом, определялась эффективность срабатывания триггера калориметра для частиц каждого типа. Эффективность срабатывания сигнала CSI для события в целом вычислялась в предположении, что каждая из частиц вызывает его срабатывание независимо. Описанная процедура была проведена для всех точек по энергии в диапазоне 0.82–0.96 ГэВ, и полученные эффективности приведены на рис. 47. Эффективность срабатывания сигнала CSI для событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ была принята равной 99.5%, для событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$— 99.2%. Эта эффективность учитывалась только для точек из энергетического диапазона 0.82–0.96 ГэВ.

3.5.3 Эффективность восстановления

Существует вероятность того, что коллинеарное событие будет неправильно реконструировано программой восстановления и выпадет из анализа. Соответствующая эффективность восстановления может быть легко получена для событий $e^+e^- \to e^+e^-$, однако для других типов коллинеарных событий ее определение затруднительно. Однако, как и в случае с эффективностью триггера, коллинеарные события всех типов очень похожи друг на друга, поэтому естественно ожидать, что эффективности восстановления событий всех типов одинаковы, и, следовательно, сокращаются в формуле (22). Для косвенного анализа этого утверждения было проведено несколько специальных исследований, описанных ниже. Следует заметить, что получение эффективности восстановления для событий $e^+e^- \to e^+e^-$ является важной задачей, поскольку это требуется для определения набранного интеграла светимости (см. (24)).

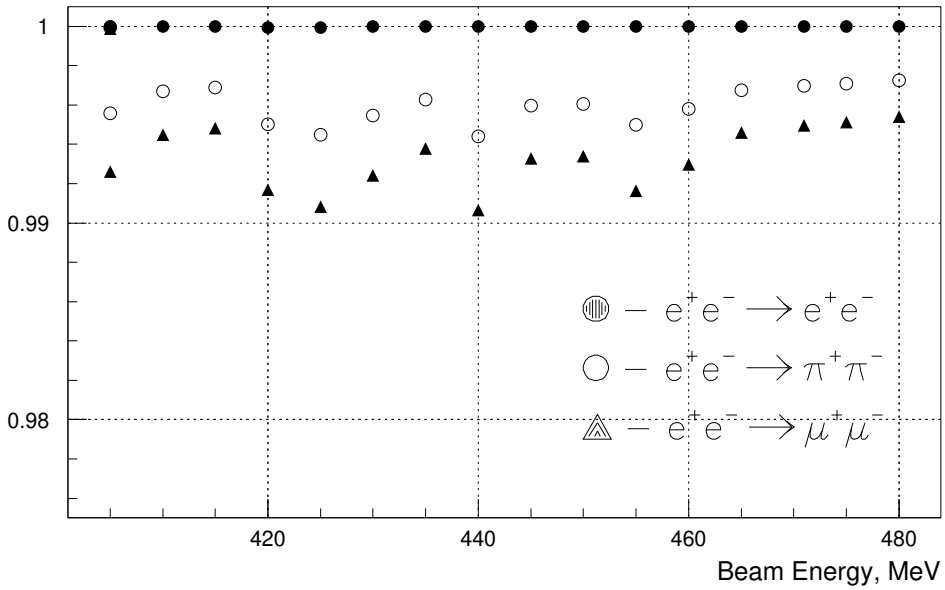


Рис. 47: Эффективность срабатывания триггера калориметра для различных типов коллинеарных событий.

Определение эффективности восстановления событий $e^+e^- \to e^+e^-$

Для определения эффективности восстановления ε_{ee}^{rec} событий $e^+e^- \to e^+e^-$ были отобраны "тестовые" события $e^+e^- \to e^+e^-$ без использования информации с дрейфовой камеры. Применялись следующие критерии отбора:

1. В событии сработал трекфайндер и, возможно, другие триггера.

2. В калориметре найдено только два кластера, причем геометрия кластеров соответствует геометрии коллинеарного события с учетом поворота частиц в магнитном поле.

3. Вблизи каждого кластера есть сработавшие сектора Z-камеры (таким образом оба кластера соответствуют заряженным частицам).

4. Энерговыделения обоих кластеров лежат в пределах от $(0.82E_b - 40)$ до $(0.82E_b + 50)$ МэВ, что соответствует основному пику энерговыделения e^+ и e^-.

Отобранное множество событий состоит практически только из событий $e^+e^- \to e^+e^-$ с пренебрежимо малой ($< 0.5\%$) примесью фона. Пусть полное количество отобранных событий равно N_0, и пусть количество тестовых событий, которые прошли также критерии отбора коллинеарных событий, равно N_1. Тогда эффективность восстановления

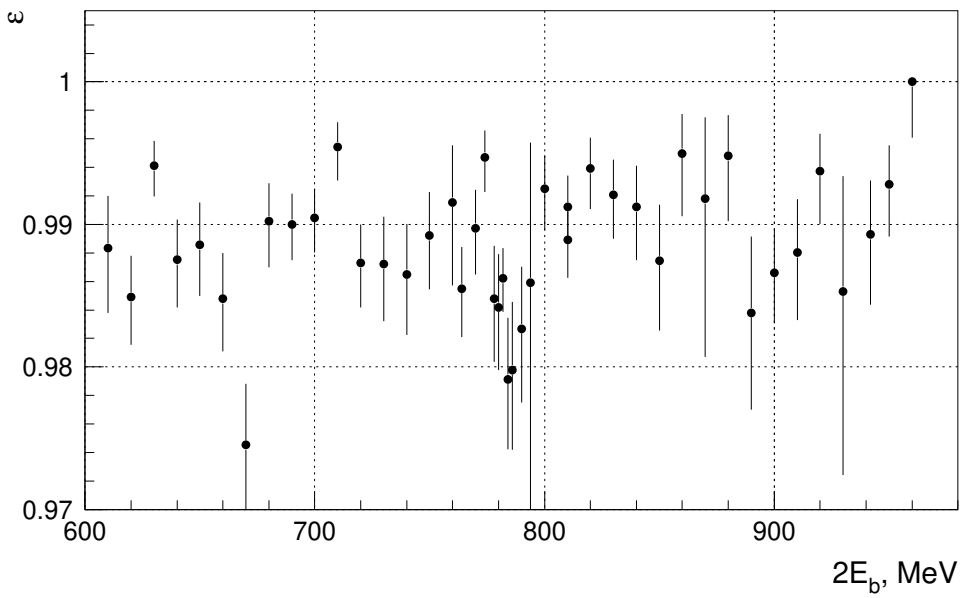


Рис. 48: Эффективность восстановления событий $e^+e^- \to e^+e^-$ для всех точек по энергии.

событий $e^+e^- \to e^+e^-$ определялась как

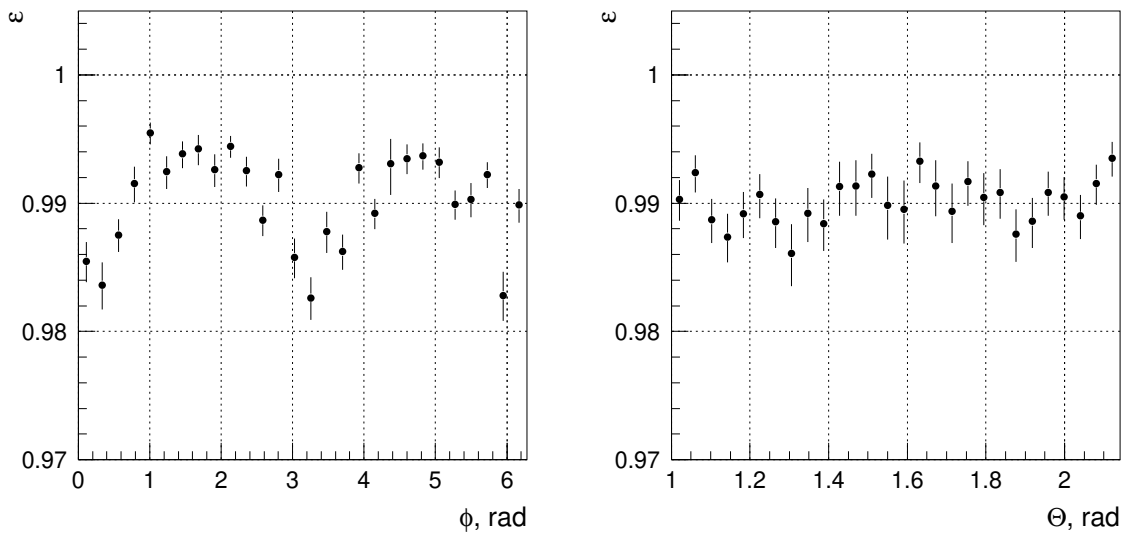
$$\varepsilon_{ee}^{rec} = \frac{N_1}{N_0}.$$

Результаты измерения эффективности восстановления для всех точек по энергии приведены на рис. 48. Небольшое резонансное падение эффективности восстановления в области ω-мезона связано с наличие малой примеси распадов $\omega \to \pi^+\pi^-\pi^0$ в тестовых событиях.

Необходимо сделать существенное замечание. При проверке соответствия тестовых событий критериям отбора для коллинеарных событий, в стандартном наборе критериев отбора следует сделать небольшое изменение, а именно, убрать ограничение на $\Delta\Theta$ двух треков. Причина этого состоит в том, что полярный угол вылета частиц измеряется в калориметре с заметно худшей точностью, чем в дрейфовой камере. Поэтому события, в которых начальные частицы излучили фотон, достаточно жесткий для появления угла расколлинеарности $|\Delta\Theta| > 0.25$ радиан, могут быть включены в набор тестовых событий. Влияние эффектов, связанных с излучением фотонов, было учтено ранее при расчете радиационной поправки. Поэтому, чтобы избежать двойного учета, ограничение на $\Delta\Theta$ должно быть убрано.

Угловые зависимости эффективности восстановления

Зависимость эффективности восстановления от углов вылета конечных частиц является потенциальным источником разницы в эффективностях восстановления коллинеарных событий различного типа, поскольку угловые распределения для событий разного типа заметно различаются. Зависимость эффективности восстановления событий $e^+e^- \to e^+e^-$ от углов может быть получена с помощью методики, описанной в предыдущем разделе. Для этого необходимо отобрать тестовые события в различных интервалах углов, и определить эффективность восстановления для каждого интервала независимо. Для данного анализа была объединена статистика со всех точек по энергии. Полученные зависимость эффективности восстановления от углов ϕ и Θ показаны на рис. 49. Наблюдается слабая зависимость эффективности от азимутального угла ϕ, которая связана с небольшой примесью событий фона (космических мюонов) в тестовых событиях. Однако, поскольку распределение всех типов коллинеарных событий по азимутальному углу одинаково, наличие этой зависимости не приводит к различию в эффективностях. Зависимость эффективности восстановления от полярного угла Θ, которая могла бы привести к появлению разницы, отсутствует на имеющемся уровне статистики.



(а) Зависимость ε_{ee}^{rec} от азимутального угла вылета частиц ϕ.

(б) Зависимость ε_{ee}^{rec} от полярного угла вылета частиц Θ.

Рис. 49: Зависимость эффективности восстановления ε_{ee}^{rec} событий $e^+e^- \to e^+e^-$ от углов вылета конечных частиц.

Стоит отметить, что отсутствие зависимости эффективности восстановления от угла Θ косвенно указывает на отсутствие зависимости эффективности восстановления и от величины ионизационных потерь частиц в дрейфовой камере (которые меняются на 50% в зависимости от Θ) — другого потенциального источника появления разницы.

Эффективность восстановления коллинеарных событий различных типов

Основная трудность в получении эффективностей восстановления событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ связана с невозможностью получить "чистый" набор тестовых событий — при как угодно жестких отборах остается заметная примесь событий фона (космических мюонов). Поэтому для сравнения эффективностей восстановления коллинеарных событий различного типа был применен метод, основанный на вычитании фоновых событий.

Было отобрано три набора тестовых событий с использованием следующих критериев отбора:

1. В событии сработал трекфайндер и, возможно, другие триггера.
2. В событии не сработал внешний слой пробежной системы;
3. В калориметре найдено только два кластера, причем азимутальный угол расколлинеарности кластеров с учетом поворота частиц в магнитном поле $|\Delta\phi| < 0.1$ радиан.
4. Вблизи каждого кластера есть сработавшие сектора Z-камеры (таким образом оба кластера соответствуют заряженным частицам).
5. Энерговыделения двух кластеров лежат в пределах:

   тип 1: $(0.82E_b - 40) < E_{1,2} < (0.82E_b + 50)$ МэВ;

   тип 2: $150 < \max(E_1, E_2) < (0.82E_b - 40)$ МэВ, $70 < \min(E_1, E_2) < 120$ МэВ;

   тип 3: $70 < E_{1,2} < 120$ МэВ.
6. В событии восстановлен по крайней мере один трек (более 99.8% событий, прошедших предыдущие критерии отбора, удовлетворяют этому требованию).

Таким образом, события 1-го типа являются событиями $e^+e^- \to e^+e^-$, в которых оба кластера имеют большое энерговыделение. События 2-го типа являются событиями $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, в которых один пион минимально ионизирующий, а другой провзаимодействовал ядерным образом в калориметре. И, наконец, события 3-го типа являются

смесью событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, в которых обе частицы минимально ионизирующие. В событиях любого типа присутствует примесь событий фона. При расчете угла поворота частиц в магнитном поле для событий типа 1 использовалась масса электрона, типа 2 — пиона и типа 3 — мюона.

Для событий каждого типа были построены два распределения по z-координате вершины вылета одного восстановленного трека — одно для событий, прошедших критерии отбора для коллинеарных событий, другое для не прошедших. Распределения, полученные при использовании всей статистики, показаны на рис. 50. Каждое распределение было подогнанно гауссовым распределением с параболической подложкой. Количество событий, описываемых гауссовым распределением (приведенное на каждой гистограмме), считалось количеством событий, летящих из пучка (т.е. оставшихся после вычитания фона). Эффективность восстановления определялась как отношение количества пучковых тестовых событий, прошедших критерии отбора для коллинеарных событий, к полному числу пучковых тестовых событий. Были получены следующие средние по всем точкам по энергии значения эффективностей восстановления:

события 1-го типа: $1 - \varepsilon^{rec} = (0.98 \pm 0.05)\%$;

события 2-го типа: $1 - \varepsilon^{rec} = (1.2 \pm 0.9)\%$;

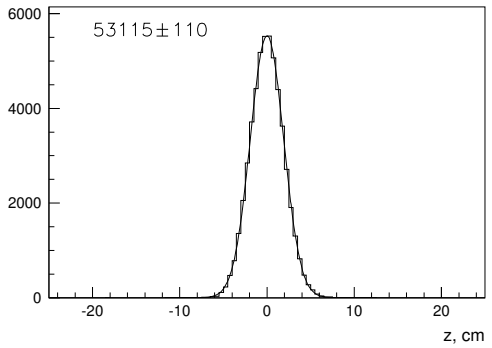
события 3-го типа: $1 - \varepsilon^{rec} = (1.9 \pm 0.9)\%$.

Указанные ошибки являются статистическими. Систематическая ошибка оценивается в (0.3-0.5)%. Полученные результаты не противоречат гипотезе, что эффективности восстановления одинаковы для всех типов коллинеарных событий.

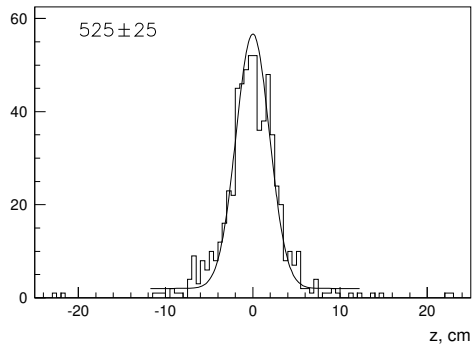
Окончательно, предполагалось что эффективности восстановления ε^{rec}_{ee}, $\varepsilon^{rec}_{\mu\mu}$ и $\varepsilon^{rec}_{\pi\pi}$ одинаковы, и, следовательно, сокращаются в (22).

3.5.4 Поправка на потерю пионов за счет ядерных взаимодействий

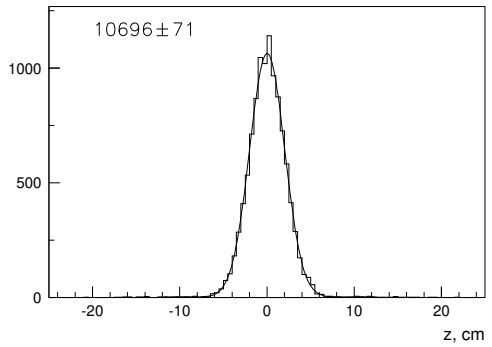
В отличие от мюонов и электронов, малая доля пионов испытывает ядерные взаимодействия в веществе вакуумной трубы, и может быть отброшена при отборе коллинеарных событий. Соответствующая поправка вычислялась в предположении, что событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ отбраковывается, если хотя бы один из двух пионов испытал неупругие ядерные взаимодействия в веществе вакуумной трубы или во внутреннем слое дрейфовой камеры. Для получения вероятности проводилось моделирование с использованием двух пакетов, доступных для моделирования ядерных взаимодействий пионов — FLUKA



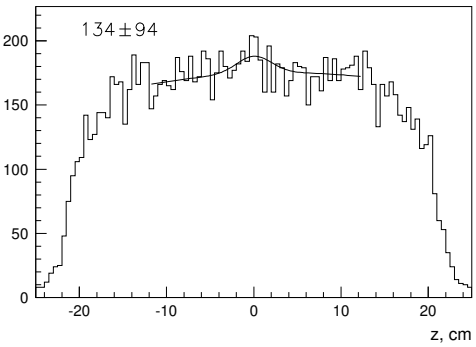
(а) События 1-го типа, прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.



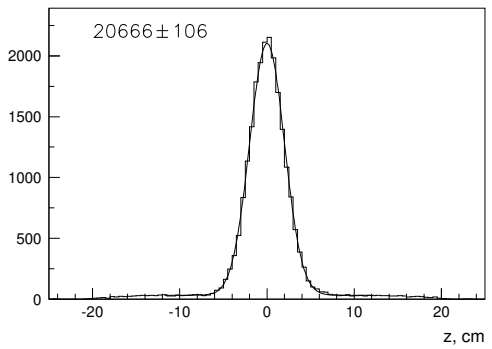
(б) События 1-го типа, не прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.



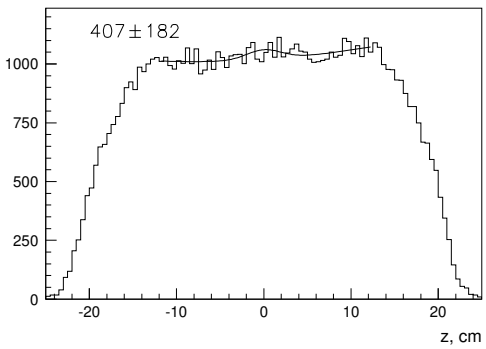
(в) События 2-го типа, прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.



(г) События 2-го типа, не прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.



(д) События 3-го типа, прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.



(е) События 3-го типа, не прошедшие критерии отбора коллинеарных событий.

Рис. 50: Распределения по z-координате точки вылета одной из частиц в отобранных тестовых событиях различного типа. На каждом распределении указано количество событий, лежащих под пиком, соответствующему событиям, летящим из пучка.

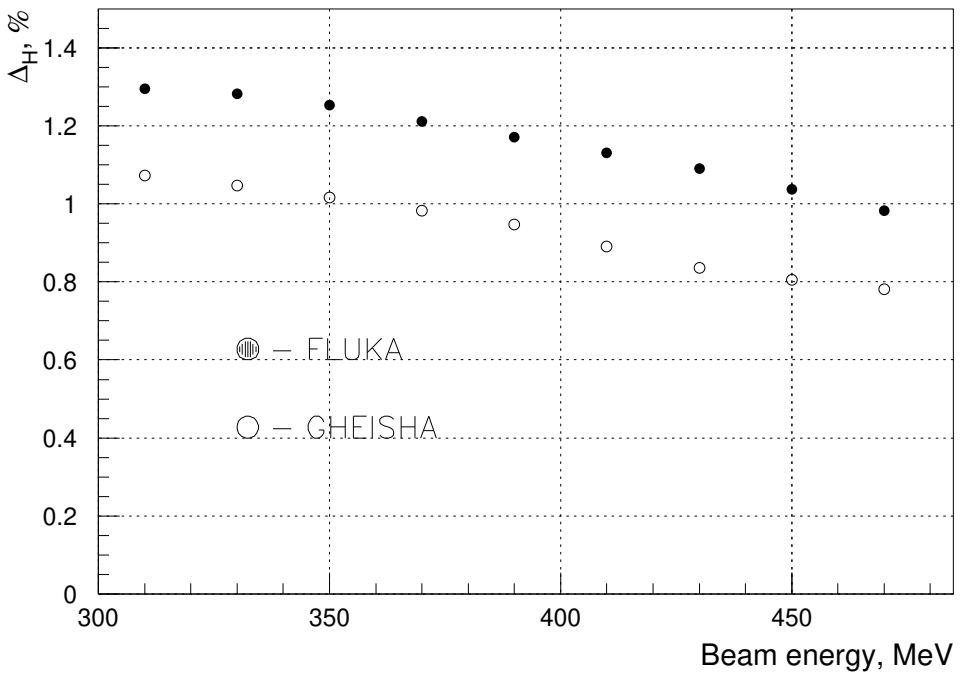


Рис. 51: Поправка Δ_H к пионному формфактору на потерю пионов за счет ядерных взаимодействий.

[43] и GHEISHA [42]. Результаты моделирования приведены на рис. 51. Как было показано в [77], FLUKA лучше описывает взаимодействие пионов с веществом детектора в исследуемой области энергии. Поэтому в качестве поправки Δ_H использовались результаты, полученные с помощью FLUKA, однако разница между двумя вычислениями была добавлена в систематическую ошибку.

3.5.5 Поправка на потерю пионов за счет распадов на лету

Небольшая доля пионов, рожденных в процессе $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, распадается на лету внутри дрейфовой камеры. В случае, если рожденный в процессе распада мюон отклонится на достаточно большой угол от первоначального направления полета пиона, программа реконструкции может не восстановить такое событие как коллинеарное. В зависимости от энергии в с.ц.м., в 2-4% событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ присутствует распавшийся пион. Поскольку максимальный угол распада в изучаемом диапазоне энергий мал — 0.08-0.15 рад в зависимости от энергии, то более 90% таких событий восстанавливается как коллинеарная пара пионов. Вероятность Δ_D потерять событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ за счет распада одного из пионов на лету была получена с помощью моделирования, результаты которого показаны на рис. 52.

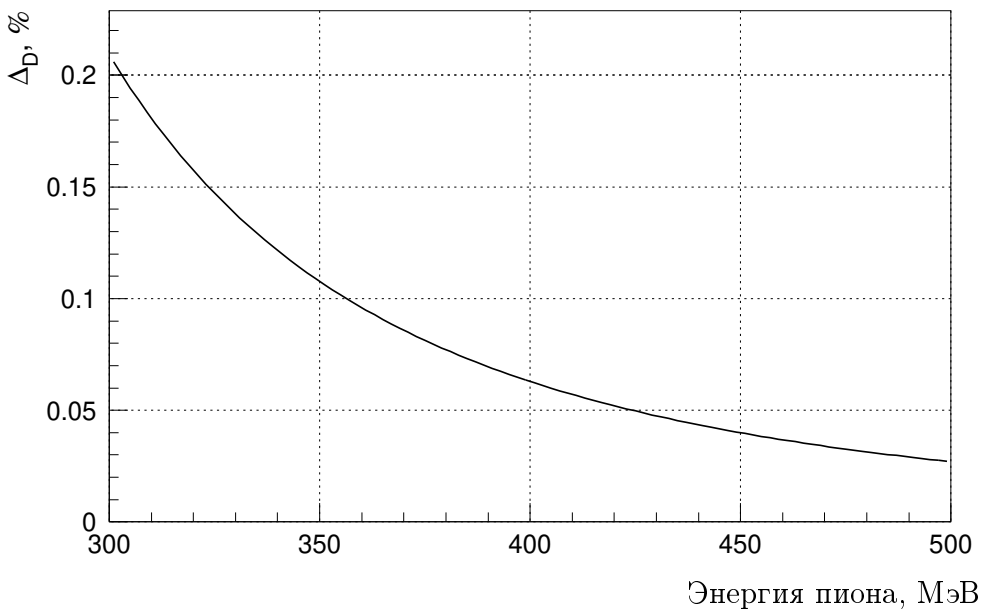


Рис. 52: Поправка Δ_D к пионному формфактору на потерю пионов за счет распада на лету.

3.5.6 Поправка на фон от распадов $\omega \to \pi^+\pi^-\pi^0$

Существует вероятность принять событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\pi^0$ за событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. Это происходит в случае, когда рожденный π^0 практически покоится и два γ-кванта, на которые он распадается, не регистрируются в детекторе. Благодаря этому эффекту, наблюдаемое сечение $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ слегка больше, чем оно есть на самом деле. Очевидно, что описываемый эффект заметен только в узкой области энергий вокруг ω-мезона, в которой сечение $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\pi^0$ значительно.

Вероятность принять событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\pi^0$ за событие $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ было получено на моделировании и для используемых критериев отбора для коллинеарных событий она оказалась равна $(4.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$. Соответствующая поправка $\Delta_{3\pi}$ к формфактору и сечению, вычисленная с использованием среднемировых параметров ω-мезона [85], приведена на рис. 53.

3.5.7 Результаты измерений и анализ систематических ошибок

На рис. 54 представлены результаты измерений в сравнении с результатами, полученными на детекторах ОЛЯ и КМД. Измеренные значения формфактора заряженного пиона и сечения процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ приведены в таблице 9. В таблице указаны

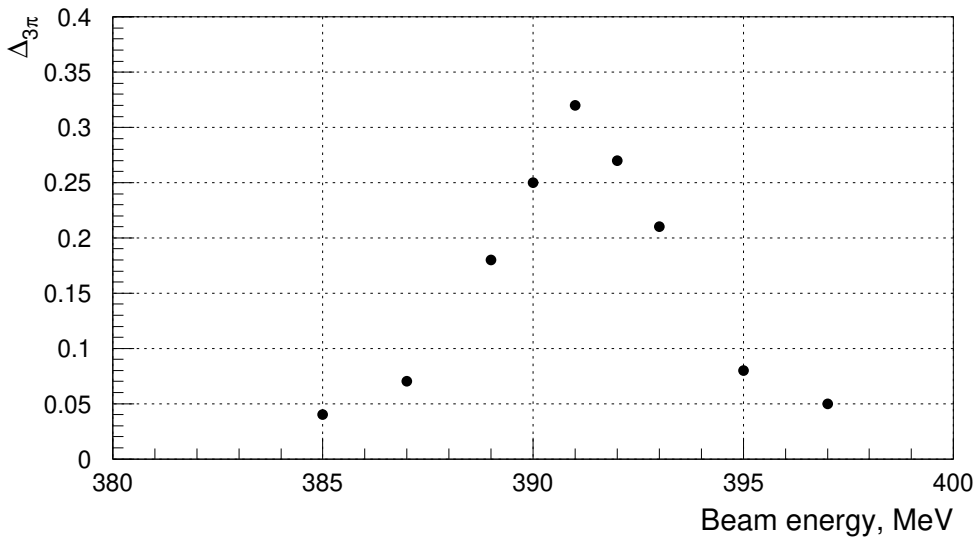


Рис. 53: Поправка $\Delta_{3\pi}$ к пионному формфактору на фон от событий $\omega \to 3\pi$.

только статистические ошибки. Систематическая ошибка оценивается в 0.6%. Основные источники систематической ошибки перечислены в таблице 10 и обсуждены ниже.

Точность определения энергии накопителя

Как уже упоминалось ранее, практически для всех точек энергия накопителя определялась с помощью методики резонансной деполяризации [86]. Систематическая точность в определении энергии в с.ц.м. при этом оценивается лучше чем 70 кэВ. Соответствующая систематическая ошибка в величине пионного формфактора не превышает 0.1% для всех точек по энергии, кроме узкой области вокруг ω-мезона, где ее максимальное значение достигается в точке 0.782 ГэВ и равно 0.7%.

Точность определения телесного угла регистрации

Телесный угол регистрации коллинеарных событий определяется условием $1.1 < \Theta_{avr} < (\pi - 1.1)$ радиан. Как можно показать, точность определения среднего полярного угла двух треков Θ_{avr} определяется точностью измерения z-координаты точки пересечения трека с Z-камерой в самой Z-камере. Это связано с тем, что при проведении трека программой восстановления точка в Z-камере имеет значительно больший вес, чем точки в дрейфовой камере, поэтому проведенный трек фактически всегда проходит через точку, измеренную Z-камерой [2]. Как показано в [38], систематическая точность

[2] Аналогично, точность определения z-координаты вершины определяется точностью измерения z-координат дрейфовой камерой.

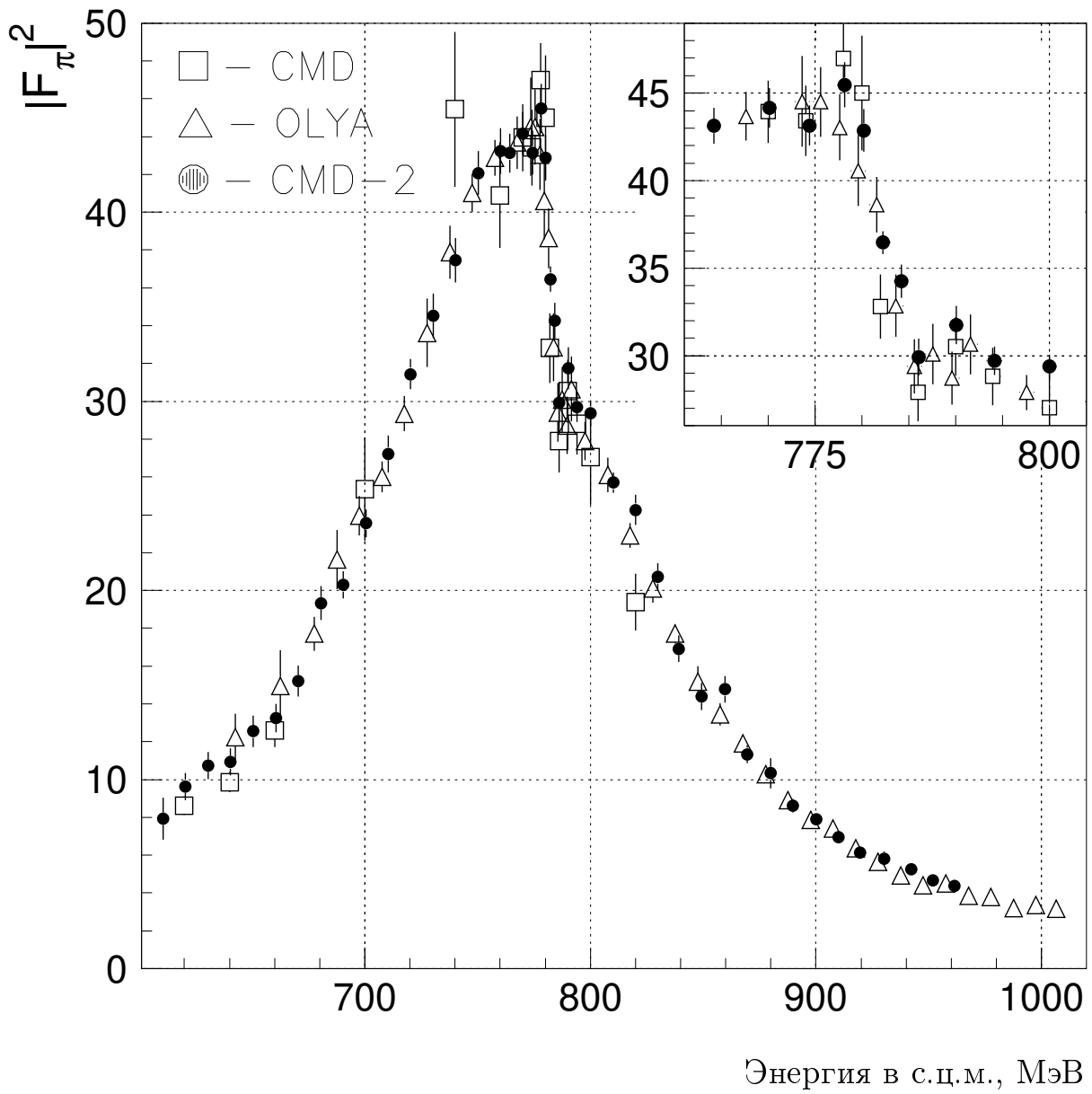


Рис. 54: Сравнение экспериментальных данных в области энергий 0.6–1.0 ГэВ, полученных на детекторах КМД (квадраты), ОЛЯ (треугольники) и в данной работе (жирные точки).

2E (MeV)	$\sigma_{\pi\pi}$ (nb)	$\lvert F_\pi\rvert^2$
610.50	325.0 ± 46.0	7.93 ± 1.12
620.50	387.2 ± 28.9	9.64 ± 0.72
630.50	422.7 ± 28.5	10.73 ± 0.72
640.51	421.5 ± 27.6	10.92 ± 0.72
650.49	474.5 ± 31.2	12.55 ± 0.83
660.50	491.2 ± 27.6	13.26 ± 0.75
670.50	552.2 ± 29.4	15.21 ± 0.81
680.59	687.2 ± 32.1	19.33 ± 0.90
690.43	707.0 ± 25.1	20.29 ± 0.72
700.52	804.0 ± 25.3	23.55 ± 0.74
710.47	910.7 ± 32.8	27.23 ± 0.98
720.25	1030.7 ± 26.4	31.43 ± 0.81
730.24	1109.0 ± 37.9	34.52 ± 1.18
740.20	1179.2 ± 36.9	37.45 ± 1.17
750.28	1297.8 ± 35.8	42.07 ± 1.16
760.18	1307.8 ± 36.6	43.25 ± 1.21
764.17	1293.6 ± 30.7	43.13 ± 1.02
770.11	1308.8 ± 33.4	44.16 ± 1.13
774.38	1268.1 ± 33.7	43.15 ± 1.15
778.17	1326.5 ± 37.9	45.48 ± 1.30
780.17	1245.3 ± 35.1	42.87 ± 1.21
782.23	1054.9 ± 19.0	36.46 ± 0.66

2E (MeV)	$\sigma_{\pi\pi}$ (nb)	$\lvert F_\pi\rvert^2$
784.24	987.1 ± 27.7	34.26 ± 0.96
786.04	859.4 ± 30.5	29.93 ± 1.06
790.10	904.4 ± 31.5	31.76 ± 1.10
794.14	839.3 ± 22.8	29.71 ± 0.81
800.02	820.4 ± 19.2	29.38 ± 0.69
810.14	703.5 ± 14.8	25.70 ± 0.54
820.02	651.2 ± 21.3	24.26 ± 0.79
829.97	545.2 ± 19.5	20.71 ± 0.74
839.10	437.6 ± 18.4	16.92 ± 0.71
849.24	365.1 ± 18.1	14.40 ± 0.71
859.60	367.2 ± 17.2	14.77 ± 0.69
869.50	276.6 ± 11.5	11.34 ± 0.47
879.84	247.2 ± 19.2	10.33 ± 0.80
889.72	202.2 ± 8.2	8.61 ± 0.35
900.04	182.2 ± 6.8	7.91 ± 0.30
910.02	157.5 ± 7.3	6.97 ± 0.32
919.56	136.4 ± 6.9	6.14 ± 0.31
930.11	126.6 ± 8.1	5.81 ± 0.37
942.19	112.2 ± 5.3	5.27 ± 0.25
951.84	97.6 ± 5.0	4.66 ± 0.24
961.52	90.3 ± 4.8	4.39 ± 0.23

Таблица 9: Результаты измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и формфактора пиона детектором КМД-2.

Источник систематической ошибки	Величина
Точность определения энергии накопителя	0.1%
Точность определения телесного угла регистрации	0.2%
Точность определения эффективностей регистрации	0.2%
Систематическая ошибка процедуры разделения частиц	0.2%
Точность определения поправок на потерю пионов	0.2%
Точность вычисления радиационных поправок	0.4%
Суммарная систематическая ошибка	0.6%

Таблица 10: Основные источники систематической ошибки.

измерения z-координаты Z-камерой лучше 0.1 мм, что соответствует систематической точности в определении пионного формфактора лучше 0.1%.

Другой возможный эффект, который может привести к систематической ошибке, связан с наличием экспериментального разрешения при измерении Θ_{avr}. Наличие разрешения приводит к небольшому изменению борновских сечений σ_a^B в (22), поскольку в интеграле (25) должны стоять дифференциальные сечения, свернутые с экспериментальным разрешением, а не теоретические дифференциальные сечения $d\sigma_a/d\Omega$. Оценка этого вклада показала, что учет углового разрешения трековой системы детектора приводит к поправкам, не превышающим 0.2%.

Для дополнительной проверки влияния этих факторов, измерение пионного формфактора было проведено для более широкого отбора коллинеарных событий $1.0 < \Theta_{avr} < (\pi - 1.0)$ радиан. При этом средняя по всем точкам по энергии разница в величине формфактора составляет 0.1% при статистической ошибке 0.3%.

Окончательно, вклад в систематическую ошибку, связанный с точностью определения телесного угла регистрации, оценивается в 0.2%.

Точность определения эффективностей регистрации

Вклад в систематическую ошибку, связанный с точностью определения эффективностей регистрации, оценивается в 0.2%. Для получения данной оценки зависимость эффективности реконструкции от угла Θ (рис. 49) аппроксимировалась различными функциями и затем оценивалась разница эффективностей восстановления событий $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$. Стоит отметить, что систематическая точность определения самой эффективности регистрации заметно хуже — около 1%, однако в формулу (22) входит только отношение эффективностей.

Систематическая точность процедуры разделения

Оценка систематической точности процедуры разделения была получена при помощи моделирования.

Во-первых, было проведено моделирование событий $e^+e^- \to e^+e^-$, $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ и фона во всех точках по энергии, при этом энерговыделение для всех частиц моделировалось по тем же формулам, которые использовались в функции правдоподобия. Было получено, что систематическая ошибка процедуры разделения в этом случае не превышает 0.02%.

Далее, было изучено влияние конкретной формы функций, использованных для параметризации плотностей вероятности в функции правдоподобия, на результат минимизации. Для этого модифицировались функции, описывающие энерговыделения электронов и ядерно провзаимодействовавших пионов, использовались различные функции для описания энерговыделений электронов и позитронов и т.п. Было получено, что систематическая разница в результатах минимизации не превышает 0.2%.

Наконец, было проведено моделирование событий $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma)$, $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \to \pi^+\pi^-(\gamma)$ с использованием процедуры полного моделирования (раздел 1.9). На рис. 55 показана разница между принятым в моделировании и полученным формфакторами. Как следует из рисунка, разница никогда не превышает статистическую ошибку и в среднем равна $0.07 \pm 0.3\%$.

Окончательно, систематическая ошибка процедуры разделения оценивалась в 0.2%.

Точность определения поправок на потерю пионов

Систематическая точность поправки на потерю пионов за счет распадов на лету пренебрежимо мала, что связано с малой величиной самой поправки. Систематическая точность поправки на потерю пионов за счет ядерного взаимодействия с веществом оценивалась по разнице результатов моделирования с помощью различных пакетов подпрограмм, описывающих ядерное взаимодействие пионов с веществом. Соответствующий вклад в систематическую ошибку оценивается в 0.2% [77].

Точность вычисления радиационных поправок

Количество событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ мало по сравнению с количеством событий $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ в исследуемом диапазоне энергий, поэтому при расчете вклада в систематическую ошибку измерения пионного формфактора необходимо учитывать только систематические ошибки расчета δ_{ee} и $\delta_{\pi\pi}$, которые составляют 0.2% и 0.35%, соответственно. В предположении, что эти ошибки независимы, вклад в сис-

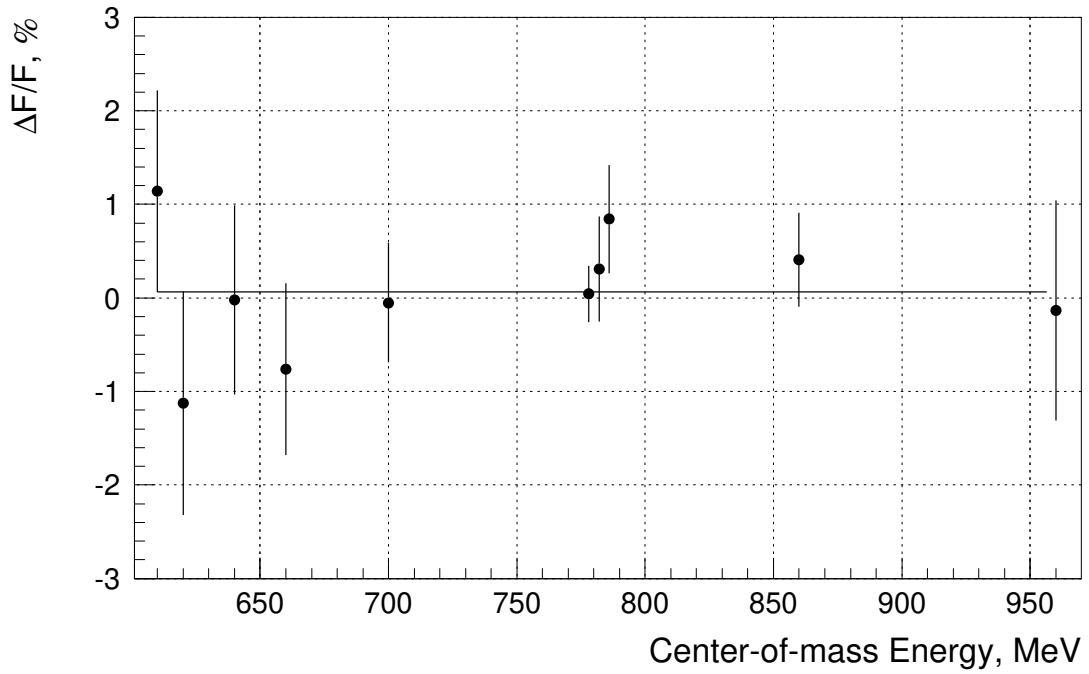


Рис. 55: Сравнение формфактора, заложенного в моделирование, с формфактором, полученным в результате анализа.

тематическую ошибку, связанный с точностью вычисления радиационных поправок, оценивается в 0.4%.

3.6 Определение параметров ρ-мезона и $\rho - \omega$ интерференции

Для описания пионного формфактора было предложено множество моделей. При этом хорошо известно [19], что для описания экспериментальных данных должны быть учтены как основной вклад от ρ-мезона, так и вклад, связанный с $\rho - \omega$ интерференцией. Помимо этого должен быть учтен нерезонансный в области ρ-мезона вклад, описываемый различными моделями либо как вклад высших ρ резонансов, либо как вклад прямого перехода $\gamma\pi\pi$.

Для получения параметров ρ-мезона и $\rho-\omega$ интерференции, в данной работе использовались две параметризации, основанные на модели Гунариса-Сакураи [87] и модели скрытой локальной симметрии [88]. Параметризации, основанные на модели Гунариса-Сакураи, успешно применялись как для описания пионного формфактора во временипободной области [19], так и связанных с ним величин — фазы $\pi\pi$ рассеяния и структур-

ных функций распадов $\tau^- \to \pi^-\pi^0\nu_\tau$ [20]. В последнее время появился большой интерес к модели, в которой ρ-мезон появляется в результате спонтанного нарушения скрытой локальной симметрии. Как показано в [89], такая модель успешно описывает существующие экспериментальные данные.

3.6.1 Модель Гунариса-Сакураи (GS)

В используемой модели учитывались основной вклад от $\rho(770)$-мезона, вклад интерференции ρ- и ω-мезона и вклад одного высшего возбуждения ρ-мезона $\rho(1450)$. Пионный формфактор записывался в виде

$$F_\pi(s) = \frac{\mathrm{BW}^{\mathrm{GS}}_{\rho(770)}(s) \cdot \dfrac{1+\delta\,\mathrm{BW}_\omega(s)}{1+\delta} + \beta\,\mathrm{BW}^{\mathrm{GS}}_{\rho(1450)}(s)}{1+\beta}, \tag{26}$$

где δ и β — параметры модели, описывающие относительные вклады $\rho-\omega$ интерференции и одного возбужденного состояния ρ-мезона $\rho(1450)$.

Вклад ρ-мезонов $\mathrm{BW}^{\mathrm{GS}}_{\rho(\mathrm{M}_\rho)}$ параметризовался согласно работе [87]:

$$\mathrm{BW}^{\mathrm{GS}}_{\rho(\mathrm{M}_\rho)} = \frac{\mathrm{M}_\rho^2\,(1 + d\cdot\Gamma_\rho/\mathrm{M}_\rho)}{\mathrm{M}_\rho^2 - s + f(s) - i\mathrm{M}_\rho\Gamma_\rho(s)}, \quad \text{где} \tag{27}$$

$$f(s) = \Gamma_\rho \frac{\mathrm{M}_\rho^2}{p_\pi^3(\mathrm{M}_\rho^2)}\left[p_\pi^2(s)\left(h(s) - h(\mathrm{M}_\rho^2)\right) + (\mathrm{M}_\rho^2 - s)\,p_\pi^2(\mathrm{M}_\rho^2)\left.\frac{dh}{ds}\right|_{s=\mathrm{M}_\rho^2}\right], \tag{28}$$

$$h(s) = \frac{2}{\pi}\frac{p_\pi(s)}{\sqrt{s}}\ln\frac{\sqrt{s}+2p_\pi(s)}{2m_\pi}, \tag{29}$$

$$\left.\frac{dh}{ds}\right|_{s=\mathrm{M}_\rho^2} = h(\mathrm{M}_\rho^2)\left[\frac{1}{8p_\pi^2(\mathrm{M}_\rho^2)} - \frac{1}{2\mathrm{M}_\rho^2}\right] + \frac{1}{2\pi\mathrm{M}_\rho^2}, \tag{30}$$

$$p_\pi(s) = \frac{1}{2}\sqrt{s - 4m_\pi^2}. \tag{31}$$

Зависимость ширины резонанса от энергии записывается следующим образом

$$\Gamma_\rho(s) = \Gamma_\rho\left[\frac{p_\pi(s)}{p_\pi(\mathrm{M}_\rho^2)}\right]^3\left[\frac{\mathrm{M}_\rho^2}{s}\right]^{1/2}, \tag{32}$$

что соответствует изменению фазового объема двух конечных пионов в P-волне.

Требование нормировки $\mathrm{BW}^{\mathrm{GS}}_{\rho(\mathrm{M}_\rho^2)}(0) = 1$ определяет значение параметра d:

$$d = \frac{3}{\pi}\frac{m_\pi^2}{p_\pi^2(\mathrm{M}_\rho^2)}\ln\frac{\mathrm{M}_\rho + 2p_\pi(\mathrm{M}_\rho^2)}{2m_\pi} + \frac{\mathrm{M}_\rho}{2\pi p_\pi(\mathrm{M}_\rho^2)} - \frac{m_\pi^2\mathrm{M}_\rho}{\pi p_\pi^3(\mathrm{M}_\rho^2)}. \tag{33}$$

Для описания вклада ω-мезона использовалась обычная параметризация Брейта-Вигнера:

$$\mathrm{BW}_\omega(s) = \frac{\mathrm{M}_\omega^2}{\mathrm{M}_\omega^2 - s - i\mathrm{M}_\omega\Gamma_\omega}. \tag{34}$$

При этом для описании вклада ω-мезона использовалось произведение пропагаторов $\mathrm{BW}_\omega(s) \cdot \mathrm{BW}_\rho^{\mathrm{GS}}(s)$, таким образом предполагалось, что прямой распад $\omega \to \pi^+\pi^-$ отсутствует.

Для получения лептонной ширины ρ-мезона в выражении (26) выделялась резонансная часть, соответствующая ρ-мезону, которая, согласно модели векторной доминантности, имеет вид:

$$F_\pi(s)|_{s\approx \mathrm{M}_\rho^2} = \frac{g_{\rho\gamma}g_{\rho\pi\pi}}{\mathrm{M}_\rho^2 - s - i\mathrm{M}_\rho\Gamma_\rho}. \tag{35}$$

Сравнивая (26) и (35), получаем

$$g_{\rho\gamma}g_{\rho\pi\pi} = \frac{\mathrm{M}_\rho^2\,(1 + d\cdot\Gamma_\rho/\mathrm{M}_\rho)}{(1+\delta)(1+\beta)}. \tag{36}$$

Используя соотношения модели векторной доминантности [89]

$$\Gamma_{V\to e^+e^-} = \frac{4\pi\alpha^2}{3\mathrm{M}_V^3} g_{V\gamma}^2, \tag{37}$$

$$\Gamma_{V\to\pi^+\pi^-} = \frac{g_{V\pi\pi}^2}{6\pi}\frac{p_\pi^3\,(\mathrm{M}_V^2)}{\mathrm{M}_V^2} \tag{38}$$

и полагая, что $\Gamma_{\rho\to\pi^+\pi^-} = \Gamma_\rho$, получаем

$$\Gamma_{\rho\to e^+e^-} = \frac{2\alpha^2 p_\pi^3\left(\mathrm{M}_\rho^2\right)}{9\mathrm{M}_\rho\Gamma_\rho}\frac{(1+d\cdot\Gamma_\rho/\mathrm{M}_\rho)^2}{(1+\delta)^2(1+\beta)^2}. \tag{39}$$

Аналогичный подход используется для получения относительной вероятности распада $Br(\omega\to\pi^+\pi^-)$ [90]. Для этого в выражении (26) выделялась резонансная часть, соответствующая ω-мезону, которая, согласно модели векторной доминантности, имеет вид:

$$F_\pi(s)|_{s=\mathrm{M}_\omega^2} = \frac{g_{\omega\gamma}g_{\omega\pi\pi}}{\mathrm{M}_\omega^2 - s - i\mathrm{M}_\omega\Gamma_\omega}. \tag{40}$$

Сравнивая (26) и (40), получаем

$$g_{\omega\gamma}g_{\omega\pi\pi} = \frac{\delta\cdot\mathrm{M}_\omega^2\cdot|\mathrm{BW}_{\rho(770)}^{\mathrm{GS}}(\mathrm{M}_\omega^2)|}{(1+\delta)(1+\beta)}. \tag{41}$$

Используя соотношения (37) и (38), окончательно получаем

$$Br(\omega\to\pi^+\pi^-) = \frac{2\alpha^2 p_\pi^3(\mathrm{M}_\omega^2)}{9\mathrm{M}_\omega\Gamma_{\omega\to e^+e^-}\Gamma_\omega}\left|\mathrm{BW}_{\rho(770)}^{\mathrm{GS}}(\mathrm{M}_\omega^2)\right|^2\frac{\delta^2}{(1+\delta)^2(1+\beta)^2}. \tag{42}$$

3.6.2 Модель скрытой локальной симметрии (HLS)

В модели HLS [88,89] ρ-мезон появляется в качестве калибровочного бозона скрытой локальной симметрии в нелинейном киральном лагранжиане. Эта модель предсказывает появление нерезонансной вершины $\gamma\pi^+\pi^-$, описываемой действительным параметром a. При описании пионного формфактора используется параметризация, учитывающая основной вклад от $\rho(770)$-мезона, вклад интерференции ρ- и ω-мезонов и вклад нерезонансной вершины $\gamma\pi\pi$:

$$F_\pi(s) = -\frac{a}{2} + 1 + \frac{a}{2} \cdot \mathrm{BW}_\rho(s) \cdot \frac{1 + \delta\,\mathrm{BW}_\omega(s)}{1+\delta}. \tag{43}$$

Для описания вклада ρ-мезона использовалась параметризация Брейта-Вигнера с учетом зависимости ширины резонанса от энергии:

$$\mathrm{BW}_V(s) = \frac{\mathrm{M}_V^2}{\mathrm{M}_V^2 - s - i\mathrm{M}_V\Gamma_V(s)}. \tag{44}$$

Зависимость $\Gamma_\rho(s)$ описывалась формулой (32). Для описания вклада ω-мезона использовалась обычная параметризация Брейта-Вигнера (34).

Применяя подход, который был использован для модели GS, получаем лептонную ширину ρ-мезона и относительную вероятность распада $Br(\omega \to \pi^+\pi^-)$:

$$\Gamma_{\rho\to e^+e^-} = \frac{2\alpha^2 p_\pi^3\left(\mathrm{M}_\rho^2\right)}{9\mathrm{M}_\rho\Gamma_\rho}\left[\frac{a}{2(1+\delta)}\right]^2, \tag{45}$$

$$Br(\omega \to \pi^+\pi^-) = \frac{2\alpha^2 p_\pi^3(\mathrm{M}_\omega^2)}{9\mathrm{M}_\omega\Gamma_{\omega\to e^+e^-}\Gamma_\omega}\left|\frac{a}{2}\mathrm{BW}_\rho(\mathrm{M}_\omega^2)\right|^2 \frac{\delta^2}{(1+\delta)^2}. \tag{46}$$

3.6.3 Сравнение результатов с предыдущими экспериментами

При подгонке экспериментальных данных минимизировался следующий функционал:

$$\chi^2 = \sum_{i=1\ldots43} \frac{\left(|F_\pi|^2_{exp}(s_i) - |F_\pi|^2_{theor}(s_i)\right)^2}{\Delta_i^2} + \sum_{j=1\ldots N_p} \frac{(p_j - p_{0j})^2}{\sigma_j^2}, \tag{47}$$

где $|F_\pi|^2_{exp}(s_i)$ и $|F_\pi|^2_{theor}(s_i)$ — экспериментально измеренные и рассчитанные в определенной модели значения формфактора при энергии $\sqrt{s}$ в с.ц.м., Δ_i — статистическая ошибка соответствующего значения, N_p — количество параметров модели, p_j и p_{0j} — значение и ожидаемое значение j-го параметра модели соответственно и σ_j — оценка ошибки параметра модели. Параметрами моделей являются (все ожидаемые значения взяты из [85]):

1. Масса ω-мезона: $p_{01} = 781.94$ МэВ, $\sigma_1 = 0.12$ МэВ.
2. Ширина ω-мезона: $p_{02} = 8.41$ МэВ, $\sigma_2 = 0.09$ МэВ.
3. Лептонная ширина ω-мезона: $p_{03} = 0.60$ кэВ, $\sigma_3 = 0.02$ кэВ.
4. Масса $\rho(1450)$-мезона: $p_{04} = 1465$ МэВ, $\sigma_4 = 25$ МэВ
5. Ширина $\rho(1450)$-мезона: $p_{05} = 310$ МэВ, $\sigma_5 = 60$ МэВ.

При подгонке экспериментальных данных моделью HLS используются только первые три параметра (т.е. N_p=3).

Предполагалось, что параметр β принимает действительные значения. Параметр δ первоначально принимался комплексным, однако, поскольку его фаза оказалась совместима с нулем ($2.5^0 \pm 3.7^0$), в окончательной подгонке она принималась равной нулю. Экспериментальные данные вместе с теоретической функцией в модели Гунариса-Сакураи показаны на рис. 56. Параметры ρ-мезона, полученные в результате подгонки экспериментальных данных в двух моделях, приведены в таблице 11. Для каждого параметра приведены две ошибки — статистическая (первая) и систематическая (вторая). Для оценки систематической ошибки параметров ρ-мезона, экспериментальные данные варьировались в пределах их систематических ошибок. Как следует из таблицы, обе модели хорошо описывают экспериментальные данные в рамках имеющейся статистики.

Параметры ρ-мезона являются модельнозависимыми, поскольку не существует надежного теоретического описания резонансов с большой шириной. Кроме того, значения параметров ρ-мезона, полученные в экспериментах на выведенных пучках и на встречных e^+e^- пучках заметно отличаются [85]. Поскольку анализ экспериментальных данных первой группы заметно сложнее и менее определен (сильные взаимодействия при-

	Модель GS	Модель HLS
M_ρ, МэВ	$776.72 \pm 0.66 \pm 0.25$	$775.87 \pm 0.64 \pm 0.25$
Γ_ρ, МэВ	$147.33 \pm 1.28 \pm 0.30$	$146.93 \pm 1.31 \pm 0.30$
$Br(\omega \to \pi^+\pi^-)$, %	$1.39 \pm 0.23 \pm 0.02$	$1.39 \pm 0.24 \pm 0.02$
$\Gamma(\rho \to e^+e^-)$, кэВ	$6.85 \pm 0.10 \pm 0.04$	$6.83 \pm 0.11 \pm 0.04$
β (GS)	$-0.0766 \pm 0.0055 \pm 0.0020$	—
a (HLS)	—	$2.359 \pm 0.016 \pm 0.007$
χ^2/n	0.75	0.76

Таблица 11: Результаты подгонки экспериментальных данных в различных моделях.

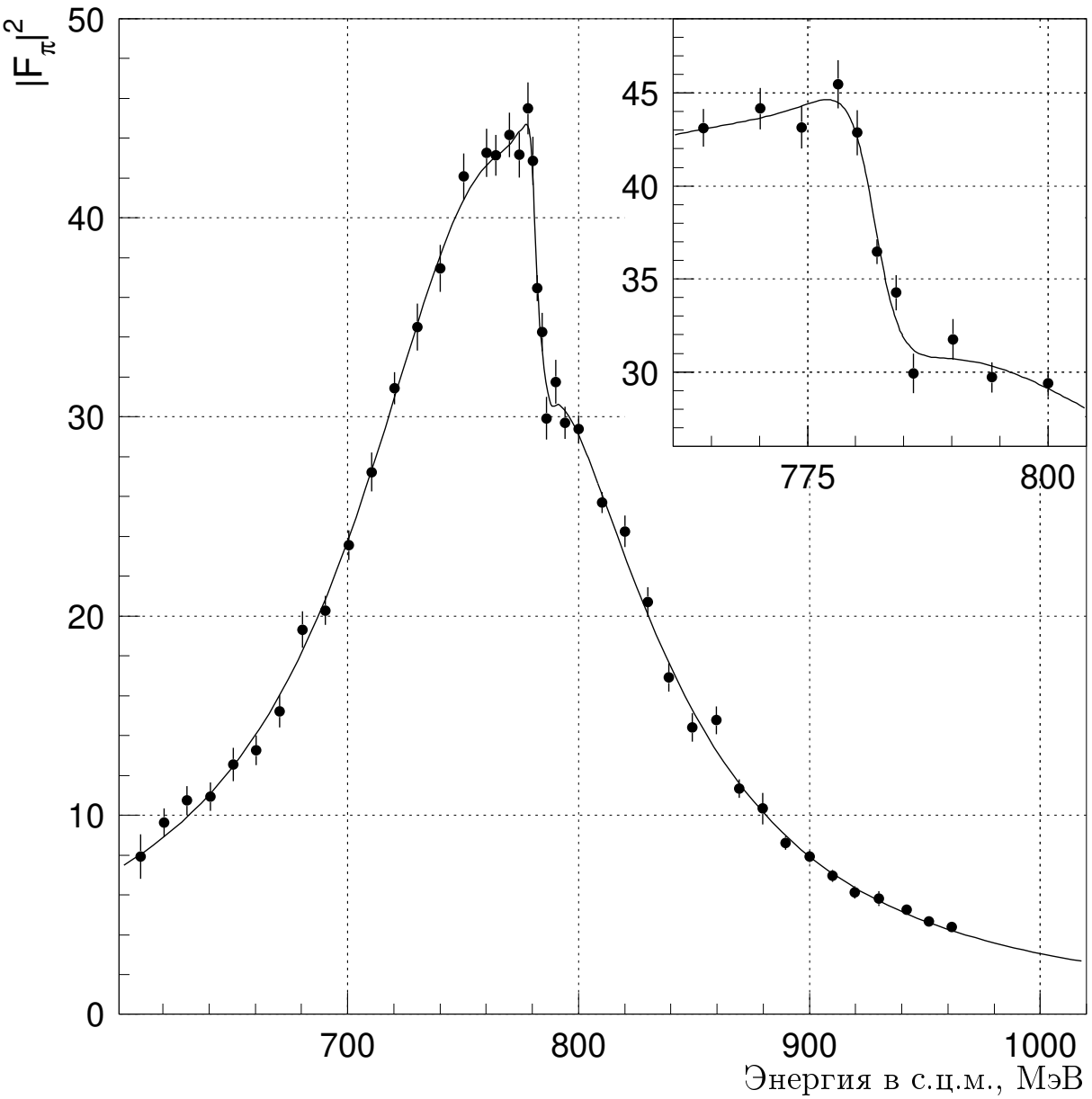


Рис. 56: Параметризация экспериментальных данных в рамках модели Гунариса-Сакураи.

	КМД-2 (94,95)	PDG (98)
M_ρ, МэВ	776.7 ± 0.7	776.0 ± 0.9
Γ_ρ, МэВ	147.3 ± 1.4	150.5 ± 2.7
$Br(\omega \to \pi^+\pi^-)$, %	1.39 ± 0.23	2.1 ± 0.4
$\Gamma(\rho \to e^+e^-)$, кэВ	6.85 ± 0.11	6.77 ± 0.32

Таблица 12: Сравнение среднемировых значений параметров ρ-мезона, взятых из [85], и результатов КМД-2.

сутствуют и в начальном состоянии, зачастую необходимо производить фазовый анализ и т.п.), то наиболее точная информация о свойствах ρ-мезона извлекается при анализе данных, полученных на встречных e^+e^- пучках, либо в распадах τ-лептона.

Среднемировые значения параметров ρ-мезона в основном базируются на результатах двух работ [19,20]. Для параметризации экспериментальных данных в них использовались модели, аналогичные модели GS, поэтому в качестве окончательных в данной работе были выбраны параметры ρ-мезона, полученные в этой модели. В таблице 12 приведено сравнение найденных параметров ρ-мезона с их среднемировым значением, взятым из [85]. Как следует из таблицы, полученная относительная вероятность распада $\omega \to \pi^+\pi^-$ на два стандартных отклонения отличается от среднемирового значения, которое практически полностью базируется на результатах измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ детекторами ОЛЯ и КМД [19]. Необходимо отметить, что в результате параметризации данных [19] в рамках моделей GS и HLS, для $Br(\omega \to \pi^+\pi^-)$ было получено значение $(1.9 \pm 0.3)\%$, вместо $(2.2 \pm 0.4)\%$, приведенного в оригинальной работе. Этот факт также отмечен в [90].

Согласно [7,91], вклад сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ в области энергий 0.61–0.96 ГэВ в с.ц.м. в интеграл (1) (т.е. в аномальный магнитный момент мюона) составляет приблизительно 50% от всей величины a_μ^{had}. При использовании существующих экспериментальных данных, ошибка теоретического расчета этого вклада составляет 0.79 ppm. При использовании результатов измерения сечения $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, полученных в данной работе, ошибка теоретического расчета уменьшается до 0.27 ppm, что соответствует почти трехкратному улучшению.

Заключение

Основные результаты данной работы состоят в следующем.

1. Разработана система автоматизации детектора КМД-2, осуществляющая считывание информации с систем детектора и запись ее на магнитную ленту (система сбора данных), управление работой детектора и мониторинг считываемых данных и состояния систем детектора (система контроля и управления). Высокая пропускная способность системы сбора данных позволяет набирать экспериментальные данные с малым мертвым временем ($\approx$10%). За время эксплуатации с 1992 по 1999 года система автоматизации непрерывно модернизировалась, отслеживая увеличение светимости накопителя и развитие вычислительной техники.

2. Разработана база данных мониторинга детектора, хранящая информацию о работе детектора за все время его эксплуатации.

3. Разработана гибкая система анализа данных в режиме реального времени. С помощью этой системы организованы оперативное измерение светимости по событиям упругого рассеяния $e^+e^- \to e^+e^-$ на большие углы и оперативный контроль качества набираемой статистики.

4. Произведен анализ около 130000 событий $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$, набранных детектором в 1994-1995 годах, и измерено сечение аннигиляции пары e^+e^- в пару пионов с рекордно малой систематической ошибкой, составляющей 0.6%.

5. Аппроксимируя измеренное сечение различными теоретическими моделями, получены следующие параметры ρ-мезона и $\rho-\omega$ интерференции с точностью, лучше среднемировой:

$$\begin{aligned}
&\mathrm{M}_\rho\,(\text{МэВ}) && = 776.72 \pm 0.66 \pm 0.25,\\
&\Gamma_\rho\,(\text{МэВ}) && = 147.33 \pm 1.28 \pm 0.30,\\
&\Gamma(\rho \to e^+e^-)\,(\text{кэВ}) && = 6.85 \pm 0.10 \pm 0.04,\\
&Br(\omega \to \pi^+\pi^-) && = (1.39 \pm 0.23)\%.
\end{aligned}$$

Благодарности

В заключение я хочу выразить искреннюю благодарность моим научным руководителям В.П. Смахтину и Б.И. Хазину за постоянное внимание и активное участие в этой работе. Работа по созданию системы сбора данных проходила в тесном сотрудничестве с А.Г. Шамовым, которому я благодарен за огромную помощь и ценные консультации. Я признателен Л.М. Баркову за постоянный интерес к работе и поддержку. Я также признателен С.И.Эйдельману, Б.А.Шварцу, Е.П.Солодову и А.Е.Бондарю за многочисленные обсуждения данной работы. В процессе работы над системой сбора данных мне было приятно сотрудничать с В.А.Моничем, В.Г.Заварзиным, Г.А.Аксеновым, Ю.И.Мерзляковым, А.Н.Путьмаковым, А.В.Маглели, А.В.Максимовым, А.Г.Чертовским, П.А.Лукиным, В.Ш.Банзаровым, И.Г.Снопковым и др. Я благодарен за большую помощь при анализе экспериментальных данные Г.В.Федотовичу, А.Л.Сибиданову, П.П.Кроковному, Д.В.Черняку, Н.И.Рооту и др. В течение многих лет мне было приятно работать вместе с Д.Н.Григорьевым, А.И.Сухановым, Э.В.Анашкиным, А.А.Кузьминым, К.Ю.Михайловым, С.В.Карповым, Ю.В.Юдиным, А.А.Рубаном и др. Наконец, я хочу поблагодарить весь коллектив детектора КМД-2 и комплекса ВЭПП-2М за их огромный вклад в эксперимент, а также дирекцию Института за постоянную поддержку.

Литература

1. В.В.Анашин, И.Б.Вассерман, В.Г.Вещеревич и др., Электрон-позитронный накопитель-охладитель БЭП., Препринт ИЯФ 84-114, Новосибирск, 1984.
2. Г.А.Аксенов, В.М.Аульченко, Л.М.Барков и др., Проект детектора КМД-2., Препринт ИЯФ 85-118, Новосибирск, 1985.
3. E.V.Anashkin, V.M.Aulchenko, S.E.Baru et al., General Purpose Cryogenic Magnetic Detector CMD-2 for Experiments at The VEPP-2M Collider., ICFA Instrumentation Bulletin, 1988, **v.5** p.18.
4. В.М.Аульченко, В.А.Аксенов, П.М.Бесчастнов и др., СНД — Сферический Нейтральный Детектор для ВЭПП-2М., Препринт ИЯФ 87-36, Новосибирск, 1987.
5. R.R.Akhmetshin, G.A.Aksenov,...,I.B.Logashenko et al., Recent results from CMD-2 detector at VEPP-2M, Preprint INP 99-11, Novosibirsk, 1999.
6. T.Kinoshita, B.Nižić and Y.Okamoto, Hadronic contributions to the anomalous magnetic moment of the muon., Phys. Rev. **D31** (1985) 2108.
7. S.Eidelman and F.Jegerlehner, Hadronic contributions to $g-2$ of the leptons and to the effective fine structure constant $\alpha(M_Z^2)$., Z.Phys. **C67** (1995) 585.
8. M.A.Shifman, A.I.Vainshtein, V.I.Zacharov, QCD And Resonance Physics. Nonperturbative Effects In Operator Expansion., Nucl. Phys. **B147** (1979) 385.
9. Y.S.Tsai, Decay Correlations Of Heavy Leptons In $e^+e^- \to l^+l^-$., Phys. Rev. **D4** (1971) 2821.
10. H.B.Thacker, J.J.Sakurai, Lifetimes And Branching Ratios Of Heavy Leptons., Phys. Lett. **B36** (1971) 103.
11. S.I.Eidelman, V.N.Ivanchenko, e^+e^- annihilation into hadrons and exclusive tau decays., Phys. Lett. **B257** (1991) 437.
12. R.M.Carey, W.Earle,..., I. Logashenko et al., New measurement of the anomalous magnetic moment of the positive muon, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1632.
13. M. Gourdin, E. de Rafael, Nucl. Phys. **B10** (1969) 667.
14. M.Davier, A.Höcker, Improved determination of $\alpha(M_Z^2)$ and the anomalous magnetic moment of the muon., Phys. Lett. **B419** (1998) 419.
15. Дж.Д.Бьёркен, С.Д.Дрелл, Релятивистская квантовая теория. М. Мир, 1983.
16. J.Augustin, D.Benaksas, J.Buon et al., $\pi^+\pi^-$ production in e^+e^- collisions and $\rho-\omega$ interference., Nuovo Cimento Lett., v.2 (1969) 214.
17. В.Л.Ауслендер, Г.И.Будкер, Е.В.Пахтусова и др., Исследование ρ-мезонного резонанса на встречных электрон-позитронных пучках., Ядерная физика, т.9 (1969) 114.
18. Фейнман Р., Взаимодействие фотонов с адронами., М., Мир, 1975.

19. L.M.Barkov, A.G.Chilingarov, S.I.Eidelman et al., Electromagnetic pion form factor in the timelike region., Nucl. Phys. **B256** (1985) 365.
20. R.Barate, D.Buskulic, D.Decamp et al., Measurement of the spectral functions of vector current hadronic tau decays., Z.Phys. **C76** (1997) 15.
21. L.M.Barkov, V.S.Okhapkin, S.G.Pivovarov et al., The magnetic system of the CMD-2 detector., Proc. of the 5th Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, March 1990, Novosibirsk.
22. L.M.Barkov, N.S.Bashtovoy, S.V.Karpov et al., Superconducting rectifier fluxpump for magnet system of the CMD-2 detector., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, v.9 (1999) 4585.
23. V.M. Aulchenko, B.I.Khazin, E.P.Solodov et al., A Drift Chamber for the CMD-2 Detector at VEPP-2M., Nucl. Instr. and Meth. A 252 (1986) 299-303.
24. E.V. Anashkin, V.M.Aulchenko, S.E.Baru et al., A Coordinate System of The CMD-2 Detector., Nucl. Instr. and Meth. A 283 (1989) 752-754.
25. D.V.Chernyak, D.A.Gorbachev, F.V.Ignatov et al., The performance of the drift chamber for the CMD-2 detector., Nucl. Instr. and Meth. A 419 (1998) 370-374.
26. Ф.В.Игнатов, П.А.Лукин, А.С.Попов и др., Дрейфовая камера КМД-2., Препринт ИЯФ 99-64, Новосибирск, 1999.
27. В.М.Аульченко, Б.О.Байбусинов, В.М.Титов, Информационные платы ТП, ΔТ и Т2А системы сбора данных КЛЮКВА., Препринт ИЯФ 88-22, Новосибирск, 1988.
28. E.V. Anashkin, V.M.Aulchenko, V.E.Fedorenko et al., Z-Chamber and the Trigger of the CMD-2 Detector., Nucl. Instr. and Meth. A 323(1992), 178-183.
29. V.M.Aulchenko, B.O. Baibusinov, A.E. Bondar et al., CMD-2 barrel calorimeter., Nucl. Instr. and Meth. A 336 (1993) 53.
30. А.С.Кузмин, Изучение процесса $e^+e^- \to 3\pi$ в области энергий ϕ-мезона с детектором КМД-2, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 1998.
31. В.М.Аульченко, Л.А.Леонтьев, Ю.В.Усов, Информационная плата А32 системы сбора данных КЛЮКВА., Препринт ИЯФ 88-30, Новосибирск, 1988.
32. D.N.Grigoriev, R.R.Akhmetshin, V.P.Smakhtin et al., IEEE Trans.Nuc.Sci., v.42 (1995) 505.
33. V.M.Aulchenko, B.O.Baibusinov, A.G.Chilingarov et al., Muon system based on streamer tubes with time-difference readout., Nucl. Instr. and Meth. A 265 (1988) 137.
34. В.М. Аульченко, Г.С. Пискунов, Е.П. Солодов, В.М. Титов, Трековый процессор для КМД-2., Препринт ИЯФ 88-43, Новосибирск, 1988.
35. В.М.Аульченко, Б.О.Байбусинов, А.Е.Бондарь и др., Электроника калориметра

КМД-2., Препринт ИЯФ 92-28, Новосибирск, 1992.

36. В.М.Аульченко, С.Е.Бару, Г.А.Савинов, Электроника новых детекторов ИЯФ., Препринт ИЯФ 88-29, Новосибирск, 1988.
37. Григорьев Д.Н., Торцевой калориметр детектора КМД-2 на основе кристаллов ортогерманата висмута., Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 1999.
38. Э.В.Анашкин, Прецизионное измерение параметров ω-мезона с детектором КМД-2, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 1999.
39. ZEBRA users guide. CERN, 1991.
40. J.Shiers et al., HBOOK. Reference Manual., CERN Program Library entry Y250, CERN, Geneva, 1992.
41. R.Brun, GEANT3. User's guide., CERN DD/EE/84-1, Geneve, 1987.
42. 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.
43. P.A.Aarnio et al., Fluka user's guide. Technical Report TIS-RP-190, CERN, 1987, 1990.
44. A.Fasso, G.Stevenson, J.Zazula et al., A comparison of FLUKA Simulations with measurements of Fluence and Dose in Calorimeter Structures., Nucl. Instr. and Meth. A 332 (1993) 332.
45. Э.В.Анашкин, А.Е.Бондарь,..., И.Б.Логашенко и др., Моделирование детектора КМД-2., Препринт ИЯФ 99-1, Новосибирск, 1999.
46. Блоки, выполненные в стандарте КАМАК. Информационный материал. Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1985.
47. В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Путьмаков А.И. и др., Контроллер и драйвер для организации связи в последовательнов виде между ЭВМ "Электроника-60" и крейтами КАМАК., Препринт ИЯФ 82-90, Новосибирск, 1982.
48. G.A.Aksenov, E.V.Anashkin, V.M.Aulchenko et al., The CMD-2 Data Acquisition and Control System., Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics (CHEP-92), Annecy (France), 1992.
49. В.Ш.Банзаров, Б.Н.Шувалов, М.В.Ясенев, Электронный псевдодиск для микро-ЭВМ "Электроника-60"., Препринт ИЯФ 85-106, Новосибирск, 1985.
50. OC-DEC PDP-11 On-line Data Acquisition System Manual. Version 02A., July 1983.
51. R.R.Akhmetshin, G.A.Aksenov,..., I.B.Logashenko et al., Measurement of ϕ parameters with CMD-2 detector at VEPP-2M collider., Phys. Lett. B 364 (1995) 199-206.
52. Г.А.Аксенов и др., Универсальный арифметический процессор АП-32. Архитектура,

система команд, технические характеристики., Препринт ИЯФ 89-175, Новосибирск, 1989.

53. Ю.И.Мерзляков, Разработка архитектуры и программного обеспечения быстродействующих процессоров для экспериментов на встречных пучках., Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1993.
54. Г.А.Аксенов и др. Универсальный арифметический процессор АП-32. Канал управления и ввода-вывода, драйвер операционной системы., Препринт ИЯФ 90-3, Новосибирск, 1990.
55. Г.А.Аксенов и др., Программное обеспечение процессора АП-32. Часть 1., Препринт ИЯФ 90-64, Новосибирск, 1990.
56. А.Г.Чертовских, Плата связи БАП для АП-32.
57. А.Г.Шамов, Библиотека подпрограмм для работы с КАМАК под VAX/VMS. Информационный материал, ИЯФ, 1994.
58. А.Г.Шамов, XonLINE или XonXoff. Меморандум КМД-2, 1994.
59. I.B.Logashenko, A.G.Shamov, Software of the slow control system for the CMD-2 detector., Proc. of the Int. Conf. Computing in High Energy Physics, (Rio-de-Janejro, Brazil, September 1995), p. 864.
60. К.А.Чилингаров, Развитие системы сбора данных детектора КМД-2., Квалификационная работа на соискание степени магистра. НГУ, Новосибирск, 1997.
61. И.Б.Логашенко, Описание программы KLUMAN (KLUkwa MANager). Меморандум КМД-2, 1996.
62. CERNLIB, CERN Program Library., CERN Geneva, Switzerland.
63. А.Г.Шамов, XonLINE Terminal INteraction MANager. Пакет для работы с меню. Меморандум КМД-2, 1995
64. A.G.Shamov, OPAL, Open Physics Analysis Language., Proc. of the Int. Conf. Computing in High Energy Physics, (Berlin, Germany, April 1997).
65. А.Г.Шамов, UPS — Universal Publishing Service. Меморандум КМД-2, 1994.
66. И.Б.Логашенко, Как писать программы в системе контроля и управления детектора КМД-2., Меморандум КМД-2, 1996.
67. I.A.Gaponenko, A.A.Salnikov, Information management system for SND experiment, Preprint INP 98-39, Novosibirsk, 1998.
68. И.Б.Логашенко, Система оперативного контроля детектора КМД-2., Квалификационная работа на соискание степени магистра. НГУ, Новосибирск, 1995.
69. А.М.Батраков, В.Р.Козак, Регистраторы формы импульсных сигналов серии “S” АЦП-101S., Препринт ИЯФ 85-9, Новосибирск, 1985.

70. I.B.Logashenko, R.R.Akhmetshin, D.N.Grigoriev et al., Performance of the BGO luminosity monitor of the CMD-2 detector., Nucl. Instr. and Meth. A 379 (1996) 366.
71. HEPDB. Database Management Package. Reference Manual. CERN, 1994.
72. R.Brun et al., PAW. The Complete Reference., CERN Program Library entry Q121, CERN, Geneva, 1993.
73. В.А.Монич, Третичный триггер детектора КМД-2., Дипломная работа. НГУ, Новосибирск, 1993.
74. R.R.Akhmetshin, G.A.Aksenov,...,I.B.Logashenko et al., Measurement of $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ cross-section with CMD-2 detector., Proc. of the Int. Conf. Hadron Spectroscopy '97, Brookhaven National Laboratory, USA, 1997, p. 787.
75. R.R.Akhmetshin, E.V.Anashkin,...,I.B.Logashenko et al., Measurement of $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ cross section with CMD-2 around ρ-meson., Preprint INP 99-10, Novosibirsk, 1999.
76. В.Идье, Д.Драйард, Ф.Джеймс и др., Статистические методы в экспериментальной физике., Пер. с англ. Под ред. А.А.Тяпкина., Москва, Атомиздат, 1976.
77. П.П.Кроковный, Моделирование ядерных взаимодействий заряженных π-мезонов и сравнение с экспериментом на детекторе КМД-2, Дипломная работа, НГУ, Новосибирск, 1998.
78. F.James, MINUIT. Function minimization and error analysis. Reference Manual., CERN Geneva, Switzerland, 1994.
79. Результаты по расчетам поляризации вакуума предоставлены Г.В.Фетодовичем.
80. E.A.Kuraev, V.S.Fadin, On Radiative Corrections To e^+e^- Single Photon Annihilation At High Energy., Sov. J. Nucl. Phys. **41** (1985) 466.
81. A.B.Arbuzov, E.A.Kuraev, V.A.Astakhov et al., Radiative corrections for pion and kaon production at e^+e^- colliders of energies below 2 GeV., JHEP 10 (1997) 006.
Программа для вычисления радиационных поправок к сечению процессов $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \to \pi^+\pi^-$ предоставлена Г.В.Фетодовичем и А.Шером..
82. A.B.Arbuzov, E.A.Kuraev, G.V.Fedotovich et al., Large angle QED processes at e^+e^- colliders at energies below 3 GeV., JHEP 10 (1997) 001.
Программа для вычисления радиационных поправок к сечению процесса $e^+e^- \to e^+e^-$ предоставлена Г.В.Фетодовичем.
83. F.A.Berends and R.Kleiss, Distributions In The Process $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma)$., Nucl. Phys. **B228** (1983) 537.
84. А.А.Рубан, Блок обработки сигналов трекового процессора, Дипломная работа, Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ), 1992.
85. C.Caso, G.Conforto, A.Gurtu et al., Review of Particle Physics., Eur. Phys. J. C3 (1998) 1.

86. A.Lysenko, I.Koop, A.Polunin et al., Beam energy measurement and stabilization at the storage ring VEPP-2M., Nucl. Instr. and Meth. A359 (1995) 419.
87. G.J.Gounaris and J.J.Sakurai, Finite-width corrections to the vector-meson-dominance prediction for $\rho \to e^+e^-$., Phys. Rev. Lett. **21** (1968) 244.
88. M.Bando, T.Kugo, S.Uehara et al., Is Rho Meson A Dynamical Gauge Boson Of Hidden Local Symmetry?, Phys.Rev.Lett. **54** (1985) 1215.
89. M. Benayoun, S.Eidelman, K.Maltman et al., New results in ρ^0 meson physics., Eur.Phys.J. **C2** (1998) 269.
90. S.Gardner, H.B.O'Connell, Extracting $BR(\omega \to \pi^+\pi^-)$ from the timelike pion form-factor, Phys. Rev. **D59** (1999) 076002.
91. С.И.Эйдельман. Частное сообщение.