

Г. 83
4999

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН**

На правах рукописи

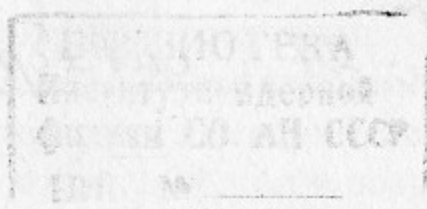
ГРИГОРЬЕВ Дмитрий Николаевич

**ТОРЦЕВОЙ КАЛОРИМЕТР
ДЕТЕКТОРА КМД-2 НА ОСНОВЕ
КРИСТАЛЛОВ ОРТОГЕРМАНАТА ВИСМУТА**

01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**



НОВОСИБИРСК-1999

+

88.1
9811

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Барков — академик,
Лев Митрофанович Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

Смахтин — кандидат физ.-мат. наук,
Владимир Петрович Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Середняков — доктор физ.-мат. наук, профессор,
Сергей Иванович Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

Куденко — кандидат физ.-мат. наук,
Юрий Григорьевич Институт ядерных исследований РАН,
г. Москва.

ВЕДУЩАЯ — Объединенный институт ядерных
ОРГАНИЗАЦИЯ: исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится "2" декабря 1999 г. в
"10⁰⁰" часов на заседании диссертационного совета Д.002.24.01 в
Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан "27" октября 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,
профессор

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

С 1992 года в Институте ядерной физики им. Будкера ведутся 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.

Основными физическими задачами детектора являются изучение физики легких векторных мезонов и измерение сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны, в том числе вклада адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона. Последняя задача особенно важна в связи с проводящимся экспериментом по точному измерению аномального магнитного момента мюона E821 (БНЛ, США).

Данная область энергий изучается на встречных пучках довольно давно. Первые работы были выполнены на накопителях АСО (Орсэ, Франция) и ВЭПП-2 (Новосибирск) в конце 1960-х годов. В дальнейшем исследования проводились с детекторами M3N и DM1 на накопителе АСО и с детекторами ОЛЯ, КМД и НД на накопителе ВЭПП-2М. В настоящее время на модернизированном накопителе ВЭПП-2М работают детекторы КМД-2 и Сферический Нейтральный Детектор СНД.

Детектор КМД-2 является первым универсальным магнитным детектором с близким к 4π телесным углом регистрации частиц, работающий в диапазоне энергий $340 \div 1400$ МэВ. Он представляет собой магнитный спектрометр, окруженный электромагнитным калориметром, состоящим из цилиндрического калориметра на основе кристаллов CsI и торцевого калориметра на основе кристаллов ВГО. Такая конструкция детектора обеспечивает как измерение импульсов и углов заряженных частиц, так и регистрацию фотонов, измерение их энергий и углов с достаточно хорошей точностью.

Многие из изучаемых процессов характеризуются наличием двух и более гамма-квантов в конечном состоянии. Для регистрации таких процессов важно иметь телесный угол калориметра максимально близкий к 4π . Использование торцевого калориметра увеличивает телесный угол калориметра с $0.65 \times 4\pi$ до $0.94 \times 4\pi$ и позволяет существенно увеличить эффективность регистрации многочастичных процессов. Улучшение параметров детектора и увеличение светимости накопителя позволило выйти на новый уровень точности проводимых экспериментов.

Цель работы состояла в следующем:

разработка и изготовление торцевого калориметра детектора КМД-2, его запуск и эксплуатация;
разработка и создание системы калибровки калориметра;
разработка алгоритмов обработки полученной с калориметра информации и создание необходимого программного обеспечения.

Научная новизна работы.

Разработан и создан компактный калориметр на основе кристаллов ВГО с использованием вакуумных фототриодов, работающий в магнитном поле 1Т.

Совместно с Институтом Неорганической Химии СО РАН впервые в России разработана технология выращивания кристаллов ВГО высокого качества. Технология была внедрена в производство на Красноярском заводе цветных металлов и Опытном заводе СО РАН. В настоящее время торцевой калориметр детектора КМД-2 является единственной в России крупной установкой на основе кристаллов ВГО.

Достигнута величина энергетического эквивалента шумов 0.9 МэВ, что не уступает лучшему в настоящее время калориметру, построенном на основе кристаллов ВГО с использованием фотоприемников с низким коэффициентом усиления, детектора L3.

Разработан и создан алгоритм реконструкции кластеров и восстановления энергии и углов вылета частиц по информации в калориметре, работающий при наличии относительно большого уровня электронных шумов и протяженных границ калориметра.

Научная и практическая ценность работы.

Разработан и создан компактный калориметр детектора КМД-2 на основе кристаллов ВГО с использованием вакуумных фототриодов, работающий в магнитном поле 1Т. Начиная с 1996 года торцевой калориметр используется при наборе статистики в полном объеме. За это время записан интеграл светимости 22.5 пбн^{-1} . Использование торцевого калориметра позволяет значительно увеличить эффективность регистрации многочастичных процессов и, соответственно, точность полученных результатов.

Совместно с Институтом Неорганической Химии СО РАН разработана технология выращивания кристаллов ВГО, было налажено их производство на Красноярском заводе цветных металлов и Опытном заводе СО РАН.

Созданы методики проверки кристаллов, вакуумных фототриодов и

блоков электроники и калибровки калориметра. Опыт, накопленный при разработке, изготовлении и эксплуатации торцевого калориметра детектора КМД-2 активно использовался при создании расположенного под малыми углами калориметра для детектора BELLE.

Создано программное обеспечение реконструкции кластеров и восстановления энергии и углов вылета частиц по информации в торцевом калориметре, которое может быть использовано при создании аналогичных программ для других калориметров.

Апробация работы.

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск), Корнельский (г.Итака, США) и Йельский университеты (г.Нью-Хавен, США). Кроме того, результаты работы докладывались на Международном симпозиуме по ядерной науке (г.Норфолк, США, 1994) и на Международной конференции по методике встречных электрон-позитронных пучков (г.Новосибирск, 1996).

Структура работы.

Диссертация состоит из шести глав, включающих введение, четыре основных главы и заключение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко сформулированы основные задачи данной работы, описана структура и содержание диссертации.

Во второй главе дано краткое описание ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М и детектора КМД-2.

Комплекс ВЭПП-2М состоит из инжектора, синхротрона Б-3М, бустера БЭП и накопителя ВЭПП-2М. Энергия пучков в накопителе составляет $160 \div 700 \text{ МэВ}$.

Детектор КМД-2 – это универсальный детектор, позволяющий регистрировать и измерять с высокой точностью параметры как заряженных частиц, так и фотонов. Схема детектора представлена на рис. 1.

Координатная система детектора, состоящая из дрейфовой (2) и Z-камер (3), измеряет координаты и импульсы заряженных частиц. Она находится внутри основного соленоида (4). Магнитное поле направлено вдоль оси пучков и в различных экспериментах составляло 1-1.2 Т.

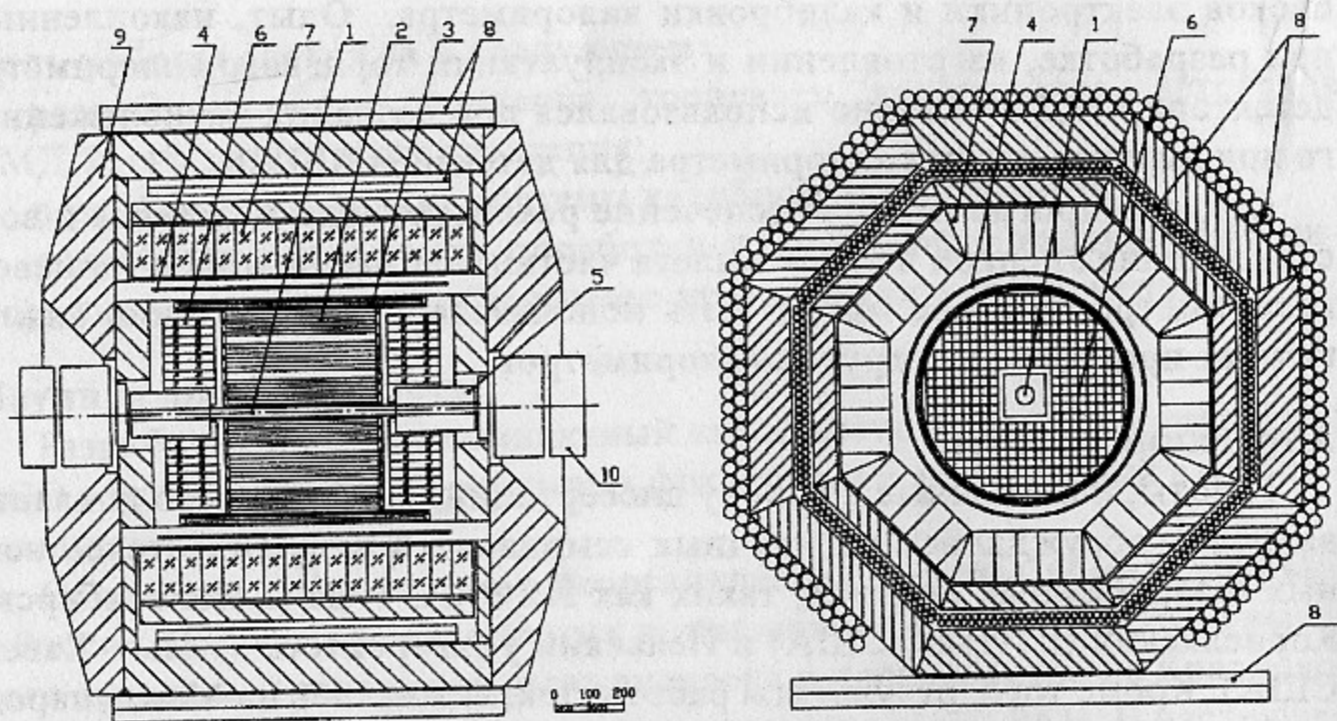


Рис. 1: Детектор КМД-2 в $R-\phi$ и Z проекциях. 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовая камера; 3 — Z -камера; 4 — основной сверхпроводящий соленоид; 5 — компенсирующий соленоид; 6 — торцевой калориметр на основе BGO; 7 — цилиндрический калориметр на основе CsI; 8 — пробежная система; 9 — ярмо магнита; 10 — квадрупольные линзы.

В совокупности координатная и магнитная системы детектора создают магнитный спектрометр. Снаружи магнитный спектрометр окружен торцевым (6) и цилиндрическим (7) электромагнитными калориметрами, изготовленными из сцинтилляционных кристаллов BGO и CsI соответственно. Калориметры обеспечивают измерение энергии и угла фотонов, а также позволяют разделять электроны и адроны по соотношению энерговыведения в калориметре и измеренному в дрейфовой камере импульсу. Пробежная система (8) расположена за цилиндрическим калориметром и служит для разделения мюонов и адронов.

В третьей главе приведено описание торцевого калориметра детектора КМД-2.

Торцевой калориметр состоит из 680 сцинтилляционных кристаллов ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) и покрывает полярные углы от 16° до 49° и от 131° до 164° . Полный телесный угол, покрываемый торцевым калориметром, $0.3 \times 4\pi$. Калориметр состоит двух одинаковых торцов. Каждый торец является плотно упакованной матрицей кристаллов. Кристаллы имеют форму прямоугольного параллелепипеда размером $25 \times 25 \times 150 \text{ мм}^3$ ($13.5 X_0$). Поперечный размер кристал-

лов был выбран как компромисс между координатным разрешением и числом фотоприемников и каналов электроники. Общий вес кристаллов около 450 кг. Сцинтилляционный свет регистрируется вакуумными фототриодами с внешнего торца. Малый коэффициент усиления фототриодов порядка 10 вместо типичного для ФЭУ 10^{5-7} потребовал использования малошумящей электроники для обеспечения допустимого уровня шумов. Вклад шумов в разрешение калориметра характеризуется энергетическим эквивалентом шумов — отношением шумового сигнала к сигналу, соответствующему энерговыведению 1 МэВ.

Малое доступное пространство (204 мм) обусловило выбор в качестве сцинтилляционного материала торцевого калориметра кристаллов BGO, которые имеют среди широко использующихся в физике высоких энергий сцинтилляторов максимальную плотность и минимальную радиационную длину. Кристаллы выращивались на основе модифицированного метода Чохральского с низкими температурными градиентами, разработанным в Институте неорганической химии СО РАН. Основная масса кристаллов была выращена на Красноярском заводе цветных металлов и Опытном заводе СО РАН, а небольшая партия кристаллов — в Институте неорганической химии СО РАН.

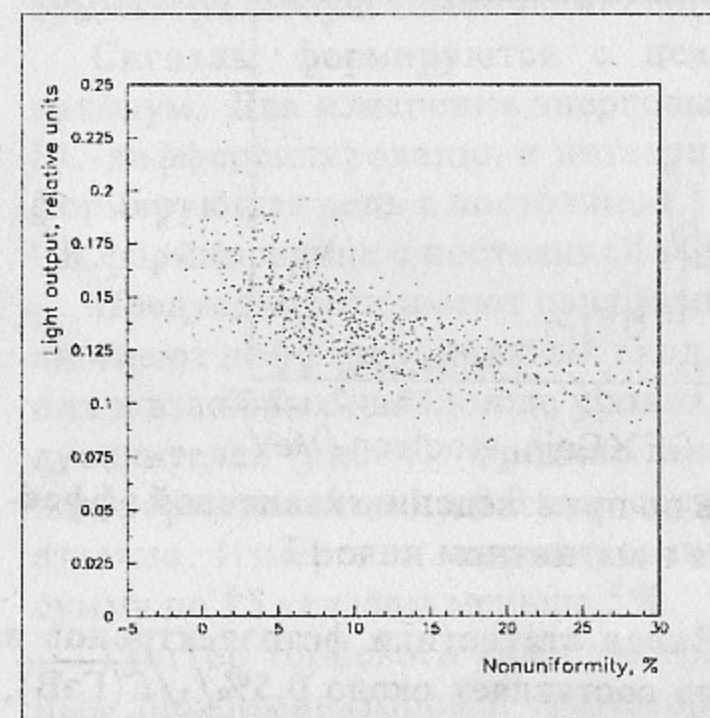


Рис. 2: Зависимость световыхода кристаллов от его неоднородности.

Для каждого кристалла контролировались два параметра: величина световыхода и его неоднородность вдоль кристалла. Световыход кристаллов определялся относительно тестового кристалла BGO диаметром 25 мм и высотой 25 мм. Кристаллы, имеющие световыход меньше 0.1 или неоднородность световыхода хуже 20% отбраковывались. В основном кристаллы браковались по неоднородности световыхода. На рис. 2 приведена зависимость световыхода кристаллов от его неоднородности. Из рисунка видна четкая корреляция: большой неоднородности световыхода соответствует малая его величина и наоборот. Это значит, что неоднородность световыхода определяется поглощением и рассеянием сцинтилляционного света в кристалле.

Наличие в объеме торцевого калориметра сильного магнитного поля не позволяет использовать традиционные фотоумножители. В качестве фотоприемников были выбраны вакуумные фототриоды, которые разработаны и произведены в Институте ядерной физики СО РАН. Диаметр фототриодов 22 мм хорошо соответствует размеру кристаллов ВГО торцевого калориметра. Длина цилиндрической части фототриодов меньше 26.5 мм, полная длина около 45 мм. В качестве анода использовалась сетка с шагом 0.25 мм, которая имела прозрачность около 80% и обеспечивала работоспособность фототриодов в продольных магнитных полях до 2 Т. Важными преимуществами фототриодов являются стабильность коэффициента усиления и его слабая зависимость от приложенных напряжений. Напряжение на фотокатоды (-800 В) и диноды (-200 В) подается от отдельных источников.

Для каждого фототриода измерялось произведение квантовой эффективности на коэффициент усиления в магнитном поле 1 Т (см. рис. 3), которое определяет величину заряда на входе предусилителя и, соответственно, величину энергетического эквивалента шумов. Фототриоды, имеющие данный параметр меньше 0.35 элек-

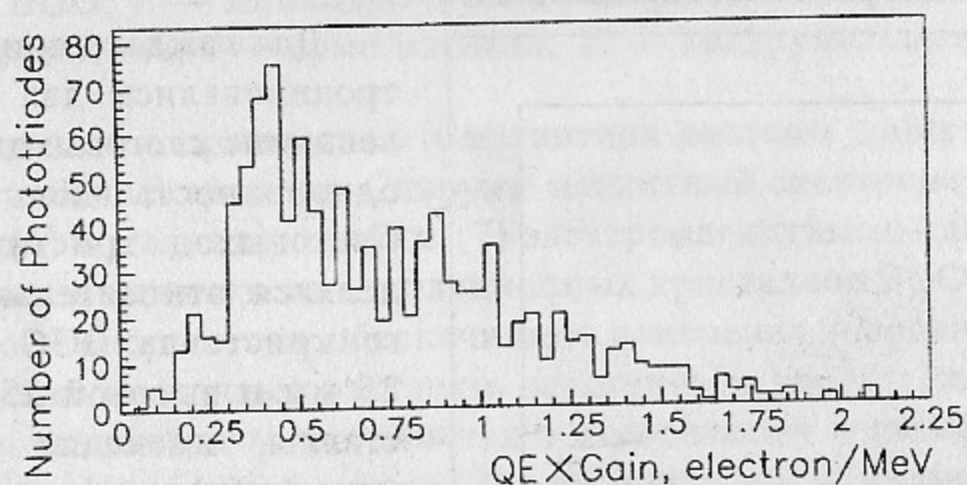


Рис. 3: Распределение фототриодов по произведению квантовой эффективности на коэффициент усиления в магнитном поле 1Т.

трона/фотон, отбраковывались. Вклад статистики фотоэлектронов в разрешение торцевого калориметра составляет около $0.5\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$, что существенно меньше вкладов флуктуаций утечки ливня и шумов электроники. Потому квантовая эффективность и коэффициент усиления были измерены только для части фототриодов. Их характерная величина оказалась 10% и 10 раз соответственно

Основная масса фототриодов имела ток утечки меньше 0.1 нА, что дает пренебрежимо малый вклад в шумы. Фототриоды, имеющие ток утечки больше 0.5 нА, отбраковывались.

Электроника торцевого калориметра состоит из аналоговой электроники (зарядочувствительных предусилителей и формирующих усилителей), блоков триггера и оцифровывающей электроники.

Сигнал с фототриодов усиливается зарядочувствительными предусилителями. Он построен по широко используемой каскодной схеме с полевым транзистором JFET-типа на входе, которая обеспечивает минимальный уровень шумов при достаточном для калориметрических задач быстродействии. Для уменьшения шумов предусилители расположены непосредственно на фототриодах внутри детектора и недоступны во время проведения сеансов набора статистики. Остальная электроника доступна для обслуживания во время работы накопителя.

Сигналы с зарядочувствительных предусилителей поступают на входы формирующих усилителей по кабелям длиной 6 м из витой пары в экране с внешней изоляцией. Типичный коэффициент усиления составляет 200. Он может регулироваться вручную в 3 раза и от компьютера в 2 раза.

Для триггера осуществляется аналоговое суммирование по 15 кристаллам. Индивидуальные сигналы поступают на сумматор через управляемые от компьютера ключи. Ключи позволяют подключить ко входу сумматора любую комбинацию сигналов.

Сигналы формируются с целью улучшения соотношения сигнал/шум. Для измерения энерговыделения используется состоящая из RC-дифференцирования и интегрирования на схеме двойного Т-моста формирующая цепь с постоянной 3 мкс, а для триггерного канала — RC-CR формирование с постоянной 0.3 мкс.

Предусилители имеют парафазный выход, а формирующие усилители имеют дифференциальный вход, что обеспечивает подавление внешних и взаимных наводок до уровня, меньшего собственных шумов предусилителей (рис. 4). Средние величины шумов, измеренных с временем формирования 3 и 0.3 мкс, составили 290 и 350 электронов соответственно. Измерения коррелированных шумов показали, что их вклад в сумму по 15 каналам меньше 5%.

Триггер торцевого калориметра состоит из двух блоков амплитудных дискриминаторов и сумматора АДис (по одному на торец), блоков геометрии и финального решения. Выделяется 3 класса событий: прохождение космической частицы, упругое рассеяние $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и двухквантовая аннигиляция $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$. Блок АДис преобразует аналоговые суммарные сигналы формирующих усилителей в логические сигналы срабатывания групп кристаллов и формирует аналоговый сигнал полного энерговыделения, который поступает на 4 дискримина-

Наличие в объеме торцевого калориметра сильного магнитного поля не позволяет использовать традиционные фотоумножители. В качестве фотоприемников были выбраны вакуумные фототриоды, которые разработаны и произведены в Институте ядерной физики СО РАН. Диаметр фототриодов 22 мм хорошо соответствует размеру кристаллов ВГО торцевого калориметра. Длина цилиндрической части фототриодов меньше 26.5 мм, полная длина около 45 мм. В качестве анода использовалась сетка с шагом 0.25 мм, которая имела прозрачность около 80% и обеспечивала работоспособность фототриодов в продольных магнитных полях до 2 Т. Важными преимуществами фототриодов являются стабильность коэффициента усиления и его слабая зависимость от приложенных напряжений. Напряжение на фотокатоды (-800 В) и диноды (-200 В) подается от отдельных источников.

Для каждого фототриода измерялось произведение квантовой эффективности на коэффициент усиления в магнитном поле 1 Т (см. рис. 3), которое определяет величину заряда на входе предусилителя и, соответственно, величину энергетического эквивалента шумов. Фототриоды, имеющие данный параметр меньше 0.35 элек-

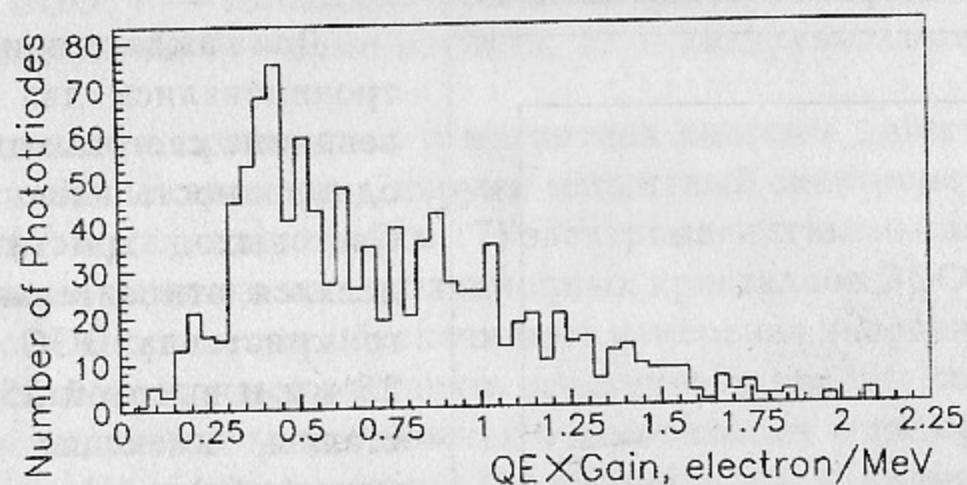


Рис. 3: Распределение фототриодов по произведению квантовой эффективности на коэффициент усиления в магнитном поле 1Т.

трона/фотон, отбраковывались. Вклад статистики фотоэлектронов в разрешение торцевого калориметра составляет около $0.5\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$, что существенно меньше вкладов флуктуаций утечки ливня и шумов электроники. Потому квантовая эффективность и коэффициент усиления были измерены только для части фототриодов. Их характерная величина оказалась 10% и 10 раз соответственно

Основная масса фототриодов имела ток утечки меньше 0.1 нА, что дает пренебрежимо малый вклад в шумы. Фототриоды, имеющие ток утечки больше 0.5 нА, отбраковывались.

Электроника торцевого калориметра состоит из аналоговой электроники (зарядочувствительных предусилителей и формирующих усилителей), блоков триггера и оцифровывающей электроники.

Сигнал с фототриодов усиливается зарядочувствительными предусилителями. Он построен по широко используемой каскодной схеме с полевым транзистором JFET-типа на входе, которая обеспечивает минимальный уровень шумов при достаточном для калориметрических задач быстродействии. Для уменьшения шумов предусилители расположены непосредственно на фототриодах внутри детектора и недоступны во время проведения сеансов набора статистики. Остальная электроника доступна для обслуживания во время работы накопителя.

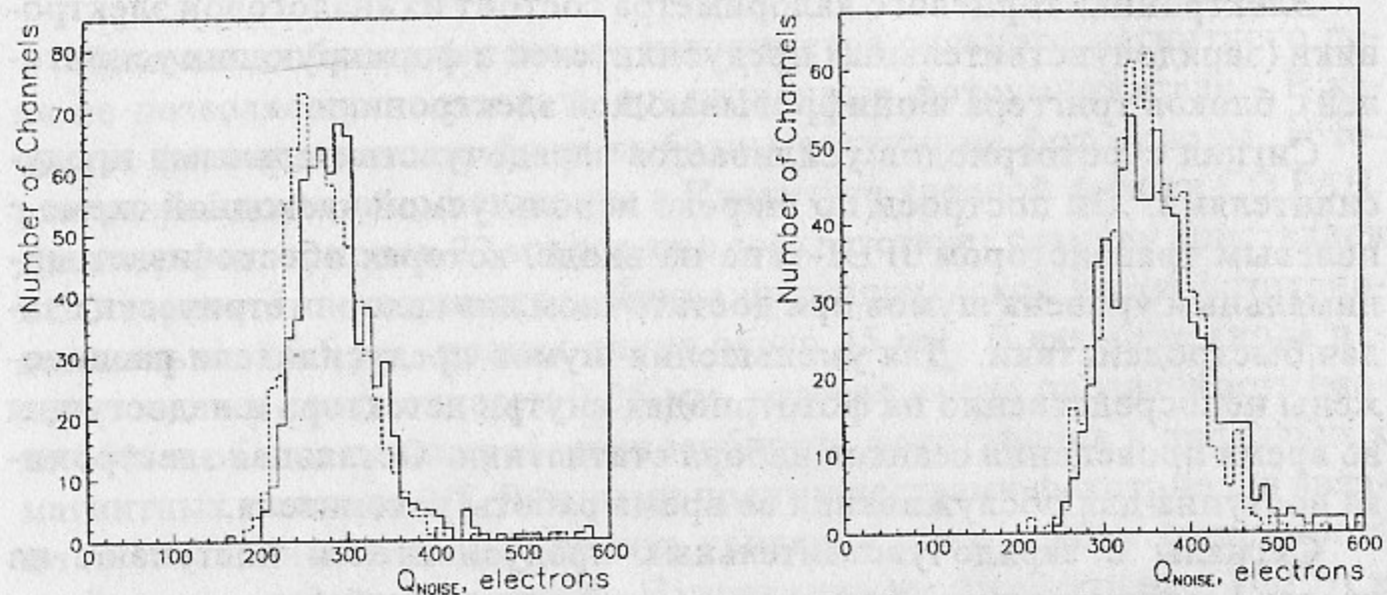
Сигналы с зарядочувствительных предусилителей поступают на входы формирующих усилителей по кабелям длиной 6 м из витой пары в экране с внешней изоляцией. Типичный коэффициент усиления составляет 200. Он может регулироваться вручную в 3 раза и от компьютера в 2 раза.

Для триггера осуществляется аналоговое суммирование по 15 кристаллам. Индивидуальные сигналы поступают на сумматор через управляемые от компьютера ключи. Ключи позволяют подключить ко входу сумматора любую комбинацию сигналов.

Сигналы формируются с целью улучшения соотношения сигнал/шум. Для измерения энерговыделения используется состоящая из RC-дифференцирования и интегрирования на схеме двойного Т-моста формирующая цепь с постоянной 3 мкс, а для триггерного канала – RC-CR формирование с постоянной 0.3 мкс.

Предусилители имеют парафазный выход, а формирующие усилители имеют дифференциальный вход, что обеспечивает подавление внешних и взаимных наводок до уровня, меньшего собственных шумов предусилителей (рис. 4). Средние величины шумов, измеренных с временем формирования 3 и 0.3 мкс, составили 290 и 350 электронов соответственно. Измерения коррелированных шумов показали, что их вклад в сумму по 15 каналам меньше 5%.

Триггер торцевого калориметра состоит из двух блоков амплитудных дискриминаторов и сумматора АДиС (по одному на торец), блоков геометрии и финального решения. Выделяется 3 класса событий: прохождение космической частицы, упругое рассеяние $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и двухквантовая аннигиляция $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$. Блок АДиС преобразует аналоговые суммарные сигналы формирующих усилителей в логические сигналы срабатывания групп кристаллов и формирует аналоговый сигнал полного энерговыделения, который поступает на 4 дискримина-



а) время формирования 3 мкс

б) время формирования 0.3 мкс

Рис. 4: Распределение каналов по величине шумов, измеренных в рабочих (сплошная гистограмма) и лабораторных условиях (пунктирная гистограмма).

тора. Блок геометрии анализирует взаимное расположение сработавших групп кристаллов. В блоке финального решения сигналам с блока геометрии ставятся в соответствие сигналы дискриминаторов полного энерговыделения с блоков АДис. Если сработала разрешенная комбинация сигналов, блок вырабатывает сигнал запуска детектора и сигнал "e⁺e⁻-рассеяние" для измерения текущей светимости накопителя.

Оцифровывающая электроника состоит из блоков амплитудно-цифровых преобразователей А32 и время-цифровых преобразователей ТП, выполненных в стандарте КЛЮКВА. На входы А32 поступают выходные сигналы формирующих усилителей, а на входы ТП – сигналы дискриминаторов блоков АДис.

Базовым элементом конструкции торцевого калориметра является линейка кристаллов. Торцевой калориметр собирается из 80 линеек трех типов: 8 линеек из 6 кристаллов, 44 – из 8 кристаллов и 28 – из 10 кристаллов. Каждая линейка оборудуется фототриодами, двумя платами с предусилителями и платой высоковольтных фильтров. Используемая модульная конструкция упрощает сборку калориметра и его общую конструкцию.

Кристаллы в линейке склеены друг с другом по фаскам высотой 0.5-0.7 мм. Между кристаллами проложена тонкая папиросная бумага для предотвращения повреждения их поверхности и затекания клея в зазор между ними. Для защиты кристаллов от повреждений при вставлении

в калориметр к крайним кристаллам линейки приклеены пластины толщиной 1 мм, а торцы кристаллов закрыты крышкой толщиной 0.5 мм (все из стеклотекстолита). Для увеличения светосбора между торцами кристаллов и крышкой помещен зеркальный отражатель из алюминизированного лавсана толщиной 20 мкм. Фототриоды приклеиваются к кристаллам специальным оптическим клеем, склейку которым можно осторожно разрушить для замены фототриода.

Для электрической и оптической изоляции линейка заворачивается в алюминизированный лавсан толщиной 20 мкм, а для защиты от механических повреждений – в обычный лавсан толщиной 100 мкм.

В калориметре линейки устанавливаются вертикально друг на друга. Нижний ряд линеек устанавливается на подставки индивидуальной для каждой позиции формы. Характерный зазор между кристаллами составляет 0.2-0.3 мм и определяется в основном толщиной лавсана, в который завернуты линейки.

В четвертой главе приведено описание системы калибровки торцевого калориметра.

Для контроля за состоянием калориметра и определения необходимых для восстановления событий параметров производится его калибровка. Процедура калибровки торцевого калориметра состоит из калибровки пьедесталов А32, калибровки интегрального коэффициента преобразования электронного тракта (электронной калибровки) и калибровки калориметра по космическим частицам. Первые две калибровки производятся при помощи генератора обычно раз в неделю.

Для нахождения коэффициентов преобразования из выделенной в кристалле энергии в код А32 используются события прохождения космических частиц. Геометрия калориметра позволяет использовать достаточно простой алгоритм калибровки. Для каждого кристалла рассматриваются две пары соседних: сверху и снизу, справа и слева. Кристалл считается сработавшим, если сработали оба кристалла одной пары и не сработал ни один кристалл другой пары. Данный отбор отбрасывает срабатывания, вызванные шумами и прохождением частиц через углы кристалла. Энерговыделения в прошедших отбор кристаллах заносятся гистограммы, которые подгоняются распределением Ландау. В результате калибровки измеряется код А32 соответствующий наиболее вероятному энерговыделению космических частиц.

Характерное время набора статистики составляет 2-3 часа, количество отобранных событий примерно 500 событий/кристалл. При этом статистическая ошибка составляет примерно 1%. Калибровка калори-

метра по космическим частицам производится 1-2 раза в месяц в перерывах набора статистики. При обработке информации результаты калибровки по космическим частицам нормируются на данные калибровок электронного тракта. Это позволяет производить замену и настройку блоков электроники без проведения калибровки по космическим частицам, которая не всегда возможна.

Для определения наиболее вероятного энерговыделения космических частиц в кристалле было проведено моделирование методом Монте-Карло прохождения мюонов через торцевой калориметр с учетом вещества всего детектора. Полученное значение 22.7 МэВ (9.1 МэВ/см) согласуется с табличными данными 9.2 МэВ/см.

Вычисленные по результатам калибровок коэффициент преобразования из выделенной энергии во входной заряд предусилителя (интегральный световыход) и энергетический эквивалент шумов составили 350 электронов/МэВ и 0.9 МэВ в магнитном поле 1 Т и 600 электронов/МэВ и 0.5 МэВ без магнитного поля соответственно (рис. 5). Разница результатов в зависимости от наличия магнитного поля соответствует измеренному падению коэффициента усиления фототриодов.

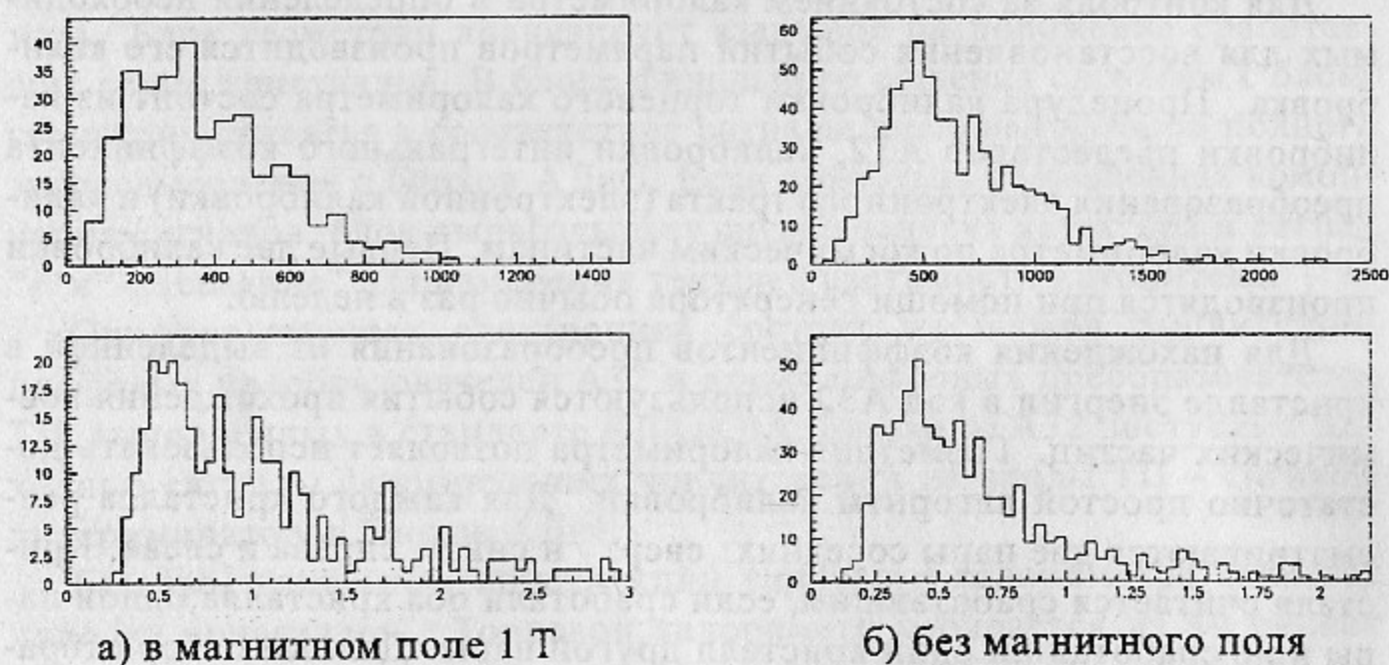


Рис. 5: Распределение каналов по входному заряду предусилителей в электрон/МэВ (верхние рисунки) и энергетическому эквиваленту шумов в МэВ (нижние рисунки).

Для проверки стабильности коэффициента преобразования из выделенной в кристалле энергии во входной заряд предусилителя была изучена зависимость среднего по каналам отношения положения пика энерговыделения космических частиц к амплитуде электронной кали-

бровки (среднего световыхода) от времени. Измеренная зависимость световыхода кристаллов от температуры составила -1.3%/градус. После введения температурной поправки зависимость от времени в пределах разброса точек $\pm 0.5\%$ не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии на этом уровне радиационного повреждения кристаллов и деградации фототриодов (рис. 6).

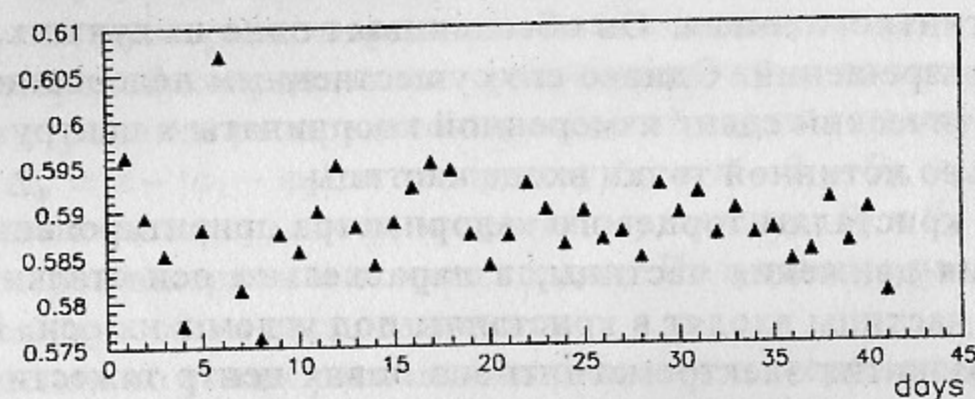


Рис. 6: Зависимость среднего световыхода (ось ординат) от времени.

Пятая глава посвящена обработке информации с торцевого калориметра и получению координатного и энергетического разрешения. Также описана процедура калибровки по записанным на магнитные ленты событиям прохождения космических мюонов через торцевой калориметр, которая проводится для улучшения разрешения калориметра.

Основной задачей программы обработки информации в торцевом калориметре является поиск кластеров (ассоциированных с одной частицей группы сработавших кристаллов) и определение их параметров. Кристаллы считаются сработавшими, если энерговыделение в них больше 2σ шума.

Кластеры формируются из соседних кристаллов (имеющих хотя бы одно общее ребро) с энерговыделением больше 5 МэВ. Дополнительное условие на превышение 4σ шума подавляет возникновение ложных кластеров из-за наличия в калориметре каналов с повышенным уровнем шума. К сформированным кластерам присоединяются сработавшие кристаллы, если они являются соседними или если расстояние от их центров до центра кластера меньше R. R равен 3.8 см при $E < 30$ МэВ, 7.8 см при $E > 200$ МэВ и аппроксимирован плавной кривой в промежутке. Кластеры, состоящие из одного кристалла, выделяются в одиночные кристаллы. Для γ -квантов с энергиями 20 МэВ и 50 МэВ определенная из моделирования эффективность дать кластер составляет 55% и 92% соответственно и близка к полученной так же из моделирования эффективности нахождения кластеров в цилиндрическом калори-

метре. Вероятность не зарегистрировать γ -квант меньше 1% при энергии $E_\gamma > 20$ МэВ.

Энерговыделение в кристалле вычисляется с использованием результатов калибровок. Энергия кластера вычисляется суммированием по энерговыделениям всех кристаллов, а координаты кластера вычисляются методом центра тяжести. Метод центра тяжести является самым простым и модельно-независимым методом измерения координат электромагнитного ливня. Он обеспечивает одно из лучших пространственных разрешений. Однако его существенным недостатком является систематический сдвиг измеренной координаты к центру кристалла относительно истинной точки входа частицы.

Так как кристаллы торцевого калориметра ориентированы не вдоль направления движения частицы, а параллельно оси сталкивающихся пучков, то частицы входят в кристаллы под углом к их оси. Из-за продольного развития электромагнитного ливня центр тяжести проекции распределения энерговыделения оказывается смещен в среднем дальше от оси пучков. В результате возникает систематический сдвиг измеренного полярного угла относительно истинного.

С целью нахождения поправочных функций для коррекции систематических сдвигов измеренных координат было проведено моделирование прохождения γ -квантов с энергиями 50-700 МэВ через торцевой калориметр. Оно показало, что внесение поправки на сдвиг измеренной координаты к центру кристалла не улучшает координатного разрешения, а систематический сдвиг измеренного полярного угла в несколько раз превышает ширину распределения. Поэтому поправка вносилась только на систематический сдвиг измеренного полярного угла.

Для экспериментальной проверки найденных из моделирования поправочных функций было проведено сравнение значений полярных углов вылета частиц в процессе упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, определенных по торцевому калориметру и по дрейфовой камере. Средняя разница между ними составила 4 мрад при ширине на полувисоте распределения 80 мрад.

Для определения энергетического и координатного разрешения торцевого калориметра выбирались попавшие в него события упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и события двухквантовой аннигиляции $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ в диапазоне энергий пучков от 180 до 685 МэВ. События отбирались по энерговыделениям в кластерах калориметра и их углам расколлинearности. Для выделения событий двухквантовой аннигиляции требовалось отсутствие треков в дрейфовой камере. Полученные результаты сравнивались с данными моделирования.

Разрешение торцевого калориметра определяется в основном флуктуациями утечек ливня, неоднородностью светосбора кристаллов, неточностью калибровки, нестабильностью электроники и температуры, а при низких энергиях к этим эффектам добавляется вклад шумов электроники. Все эти вклады в разрешение учитывались при проведении моделирования. Кроме того, при обработке событий и проведении моделирования учитывались измеренные по коллинеарным событиям на большие углы размеры и координаты положения пучков.

Для измерений координатного разрешения в γ - ϕ -плоскости и в γ - z -плоскости строились распределения событий соответственно по азимутальному $\Delta_\phi = \pi - |\phi_1 - \phi_2|$, и полярному $\Delta_\theta = \pi - \theta_1 - \theta_2$, углам расколлинearности кластеров, где ϕ_1 и ϕ_2 – азимутальные, θ_1 и θ_2 – полярные углы кластеров в первом и втором торцах. Полученные распределения подгонялись гауссовым распределением.

Разрешения по углам расколлинearности кластеров при различных энергиях γ -квантов, полученные в эксперименте и рассчитанные в моделировании, приведены в таблице 1. Хорошее согласие между экспериментом и моделированием позволяет использовать последнее для определения координатного разрешения для одиночного γ -кванта.

Таблица 1: Сравнение разрешений по азимутальному $\sigma_{\Delta\phi}$ и полярному углам $\sigma_{\Delta\theta}$ расколлинearности кластеров, полученных в эксперименте и рассчитанных в моделировании, в зависимости от энергии γ -квантов.

$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\sigma_{\Delta\phi} \text{ экс, мрад}$	$\sigma_{\Delta\phi} \text{ мод, мрад}$	$\sigma_{\Delta\theta} \text{ экс, мрад}$	$\sigma_{\Delta\theta} \text{ мод, мрад}$
180	42.06 ± 1.32	43.00 ± 0.31	53.4 ± 1.3	54.9 ± 0.4
220	39.44 ± 1.38	40.81 ± 0.31	57.3 ± 1.7	58.0 ± 0.4
300	37.44 ± 0.77	38.10 ± 0.29	62.8 ± 1.2	60.0 ± 0.4
395	35.71 ± 0.96	36.18 ± 0.27	69.9 ± 1.2	69.9 ± 0.4
520	30.12 ± 1.05	29.55 ± 0.22	59.0 ± 1.4	62.2 ± 0.4
555	28.43 ± 0.74	28.59 ± 0.21	58.1 ± 1.0	59.0 ± 0.4
590	29.17 ± 0.98	28.85 ± 0.21	65.6 ± 2.1	69.4 ± 0.4
685	28.59 ± 1.60	27.50 ± 0.20	65.2 ± 2.3	65.9 ± 0.4

Изучение зависимостей разрешений от расстояния до оси пучков показало, что разрешение в γ - ϕ -плоскости хорошо описывается координатным разрешением σ_x , а γ - z -плоскости – угловым разрешением σ_θ . Зависимость разрешений от энергии γ -кванта аппроксимировались функциями $\sigma_x[\text{мм}] = \frac{0.44}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}} + 4.40$ при $E_\gamma < 0.1$ ГэВ и $\sigma_x[\text{мм}] = \frac{3.26}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}}$ при $E_\gamma > 0.1$ ГэВ (рис. 7а), $\sigma_\theta[\text{мрад}] = \frac{11.2}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}} + 7.2$ (рис. 7б).

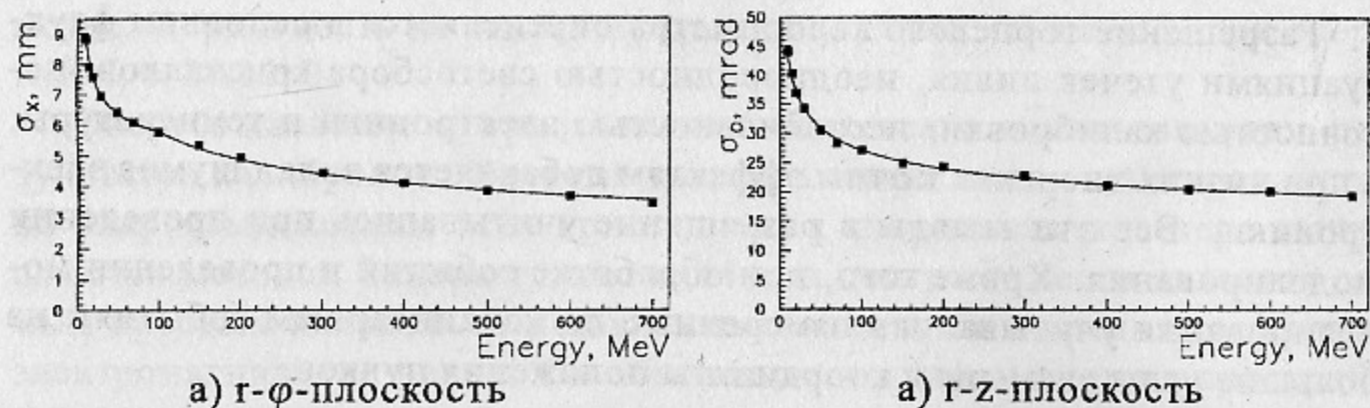


Рис. 7: Зависимость координатного разрешения от энергии γ -кванта (моделирование). Кривая – аппроксимация.

Необходимо отметить, что разрешение по полярному углу для событий двухквантовой аннигиляции и других нейтральных событий определяется продольным размером пучков в накопителе. А для событий с двумя и больше заряженными частицами, вклады в разрешение по полярному углу координатного разрешения калориметра и неопределенности точки вылета примерно одинаковы.

При измерениях энергетического разрешения калориметра спектры энерговыделений в кластерах подгонялись распределением логарифмического гаусса. Это асимметричное распределение лучше описывает отклик калориметра, чем традиционное гауссово распределение. В качестве энергетического разрешения калориметра использовалась ширина распределения на полувысоте, деленная на 2.36.

Зависимости энергетического разрешения от энергии (рис. 8)

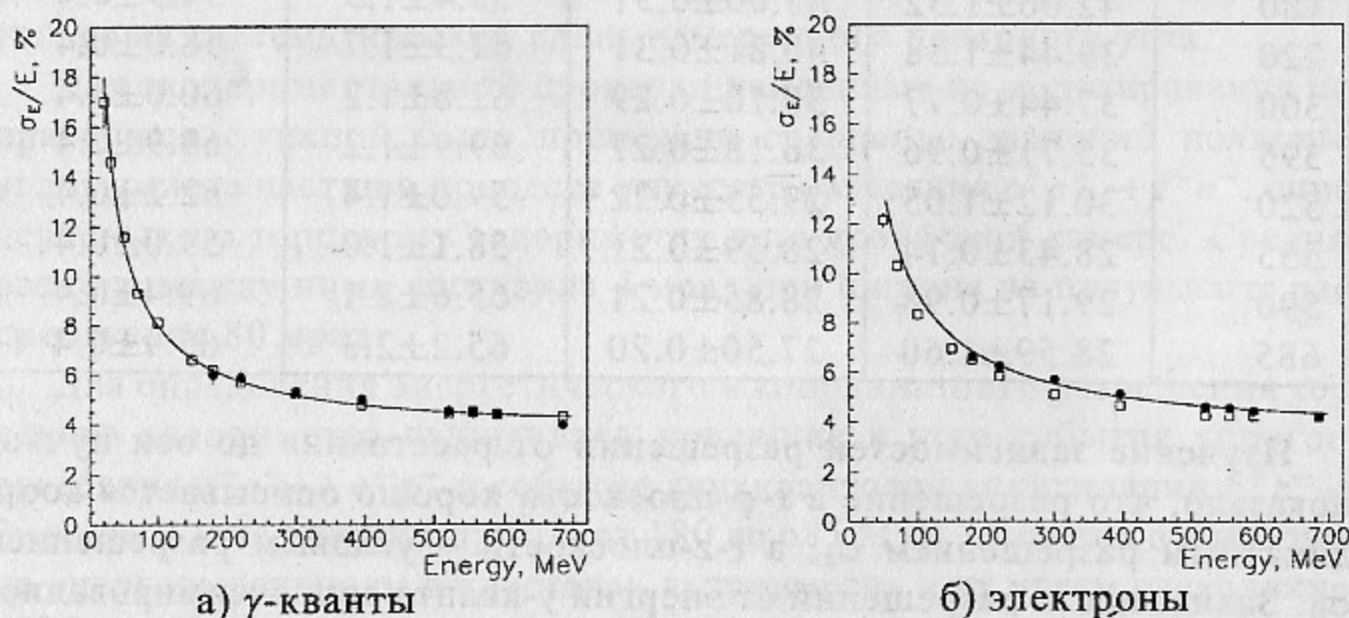


Рис. 8: Энергетическое разрешение в зависимости от энергии. Темные круги – эксперимент. Светлые квадраты – моделирование. Кривая – аппроксимация.

для γ -квантов хорошо аппроксимируется кривой $\sigma_E/E[\%] = \frac{3.2}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]} + 1.4 \ln(E[\text{ГэВ}]) + 0.9$, а для электронов кривой $\sigma_E/E[\%] = \frac{4.1}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]} + 1.7 \ln(E[\text{ГэВ}])$. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования. Энергетическое разрешение для электронов несколько хуже, чем для γ -квантов, по причине более сильного влияния на разрешение вещества перед калориметром и неоднородности световых выходов кристаллов.

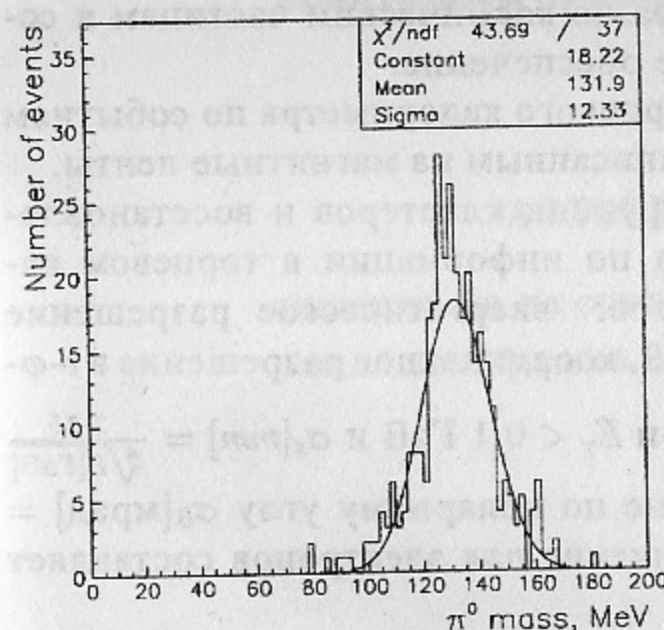


Рис. 9: Разрешение по массе π^0 -мезона в процессе $\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$.

На рис. 9 приведен спектр инвариантных масс двух γ -квантов, попавших в торцевой калориметр в процессе $\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$. На нем четко виден пик на массе π^0 -мезона. Для увеличения статистики в гистограмме оставлены события, в которых один или даже оба γ -кванта попали на края калориметра. Небольшой сдвиг восстановленной массы π^0 -мезона связан с неучтенной асимметрией спектров энерговыделения в калориметре.

В заключении приведены основные результаты работы.

1. Разработан и создан компактный торцевой калориметр детектора КМД-2 на основе кристаллов BGO с использованием вакуумных фототриодов, работающий в магнитном поле 1Т. Набранный с торцевым калориметром интеграл светимости составляет 22.5 пбн^{-1} . Использование торцевого калориметра позволяет значительно увеличить эффективность регистрации многочастичных процессов, например, $\phi \rightarrow \eta' \gamma, \eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta, \eta \rightarrow \gamma \gamma$ примерно в 2 раза, $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0, \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ более, чем в 3 раза.
2. Совместно с Институтом неорганической химии СО РАН разработана технология выращивания кристаллов BGO, было налажено их производство на Красноярском заводе цветных металлов и Опытном заводе СО РАН. В настоящее время торцевой калориметр детектора КМД-2 является единственной в России крупной установкой на основе кристаллов BGO.

3. Достигнутые характеристики кристаллов, вакуумных фототриодов и электронного тракта позволили получить энергетический эквивалент шумов 0.9 МэВ, что не уступает лучшему в настоящее время калориметру, построенном на основе кристаллов BGO с использованием фотоприемников с низким коэффициентом усиления, детектора L3.

4. Созданы методики проверки кристаллов, вакуумных фототриодов и блоков электроники. Все компоненты торцевого калориметра были проверены перед установкой в детектор.

5. Разработаны методики контроля и калибровки электронного тракта, оперативной калибровки калориметра по космическим частицам и создано соответствующее программное обеспечение.

6. Создана процедура калибровки торцевого калориметра по событиям прохождения космических частиц, записанным на магнитные ленты.

7. Разработаны программы реконструкции кластеров и восстановления энергии и углов вылета частиц по информации в торцевом калориметре. Получены для γ -квантов: энергетическое разрешение

$$\sigma_E/E[\%] = \frac{3.2}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]} + 1.4 \ln(E[\text{ГэВ}]) + 0.9, \text{ координатное разрешение в } r\text{-}\phi\text{-плоскости } \sigma_x[\text{мм}] = \frac{0.44}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]} + 4.40 \text{ при } E_\gamma < 0.1 \text{ ГэВ и } \sigma_x[\text{мм}] = \frac{3.26}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}}$$

при $E_\gamma > 0.1$ ГэВ, угловое разрешение по полярному углу $\sigma_\theta[\text{мрад}] = \frac{11.2}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]} + 7.2$. Энергетическое разрешение для электронов составляет

$$\sigma_E/E[\%] = \frac{4.1}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]} + 1.7 \ln(E[\text{ГэВ}])).$$

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. E.V.Anashkin, V.M.Aulchenko, ..., D.N.Grigoriev *et al.*, General Purpose Cryogenic Magnetic Detector CMD-2 for Experiments at the VEPP-2M Collider., ICFA Instrumentation Bulletin, 1988, v.5 p.18.

2. D.N.Grigoriev, R.R.Akhmetshin, P.M.Beschastnov *et al.*, Performance of the BGO endcap calorimeter with phototriode readout for the CMD-2 detector., IEEE Trans. Nucl. Sci, 1995, v.NS-42, p.505.

3. Ya.V.Vasiliev, R.R.Akhmetshin, ..., D.N.Grigoriev *et al.*, BGO crystals grown by low thermal gradient Czochralski technique., Nucl.Instrum. and Meth., 1996, v.A379, p.533.

4. R.R.Akhmetshin, D.N.Grigoriev, V.F.Kazanin *et al.*, Testing and calibration of the BGO endcap calorimeter with phototriode readout for the CMD-2 detector., Nucl.Instrum. and Meth., 1996, v.A379, p.509.

5. R.R.Akhmetshin, G.A.Aksenov, ..., D.N.Grigoriev *et al.*, Recent results from CMD-2 detector at VEPP-2M., Препринт ИЯФ 99-11, Новосибирск, 1999.

ГРИГОРЬЕВ Дмитрий Николаевич

Торцевой калориметр
детектора КМД-2 на основе
кристаллов ортогерманата висмута

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 29.09. 1999 г.

Подписано к печати 29.09. 1999 г.

Формат 100×90 1/16 Объем 1,3 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №78

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.