

На правах рукописи

АХМЕТШИН Равель Равилович

**ТОРЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ВGO
ДЛЯ ДЕТЕКТОРА КМД-3**

**01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ГРИГОРЬЕВ – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
Дмитрий Николаевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

МИЗЮК – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник лаборатории тяжелых кварков и лептонов.
Роман Владимирович

СОКОЛОВ – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино, ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики.
Анатолий Александрович

ВЕДУЩАЯ – Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна.
ОРГАНИЗАЦИЯ

Защита диссертации состоится « 20 » декабря 2017 г. в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 18 » октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Криогенный Магнитный Детектор КМД-3 является дальнейшим развитием детектора КМД-2, который успешно работал в ИЯФ СО РАН с 1992 по 2000 гг. на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М в области энергий от 360 до 1400 МэВ в системе центра масс. За этот период на детекторах КМД-2 и СНД набран суммарный интеграл светимости более 60 пб^{-1} . Это позволило измерить с высокой точностью сечения аннигиляции e^+e^- в адроны, а также массы и ширины векторных мезонов и вероятности редких каналов их распадов.

В то же время, процессы на встречных пучках в области энергий от 1,4 до 2 ГэВ были изучены гораздо хуже. Эти измерения проводились различными экспериментальными группами в Орсе (Франция) и Фраскати (Италия). Суммарный набранный ими интеграл светимости в указанной области энергий составлял около 6 пб^{-1} .

С 2010 года в ИЯФ начал работу новый электрон-позитронный ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2000 с энергией от 320 МэВ до 2 ГэВ в системе центра масс. На новом накопителе работают модернизированный детектор СНД и новый детектор КМД-3.

Детектор КМД-3 — универсальный детектор, предназначенный для измерения параметров как заряженных частиц, так и γ -квантов. В детекторе КМД-3 использованы наиболее дорогостоящие элементы от детектора КМД-2 — кристаллы ВГО и CsI. В то же время, все системы детектора подвергнуты значительной модификации или изготовлены заново.

Некоторые из физических задач, которые предполагается решить с помощью детектора КМД-3:

- Прецизионные измерения сечений $e^+e^- \rightarrow$ адроны, например:
 - $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$;
 - $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$;
 - $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$;
 - $e^+e^- \rightarrow 5\pi, 6\pi$;
 - $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$;
 - $e^+e^- \rightarrow K_s K_l$;
 - $e^+e^- \rightarrow 2K2\pi, 2K3\pi$.
- Прецизионные измерения относительных вероятностей распадов векторных мезонов, например:

- $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma, \eta'\gamma;$
- $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \eta\gamma;$
- $e^+e^- \rightarrow \omega l \rightarrow K\bar{K}, K\bar{K}\pi, K\bar{K}\pi\pi, \rho\pi, \omega\pi\pi, \omega\eta, \pi^0(\eta, \eta')\gamma;$
- $e^+e^- \rightarrow \rho l \rightarrow K\bar{K}, \pi^+\pi^-, 4\pi, 6\pi, \pi^0(\eta, \eta')\gamma.$

- Прецизионные измерения масс и ширин $\rho, \omega, \phi, \rho', \omega l$.
- Поиск экзотических состояний — глоболов и гибридов.
- Измерение электромагнитных формфакторов нуклонов вблизи порога рождения.

Многие из приведённых процессов имеют два и более гамма-кванта в конечном состоянии. Для лучшей эффективности их регистрации важно иметь телесный угол калориметра максимально близкий к 4π . Полный телесный угол, покрываемый всеми калориметрами детектора КМД-3, составляет $0,94 \times 4\pi$, а доля торцевого калориметра в нём равна 30%. Поэтому торцевой калориметр позволяет существенно улучшить параметры детектора.

Цель работы состояла в следующем:

- разработка конструкции и изготовление торцевого калориметра на основе кристаллов BGO с использованием в качестве фотоприёмников кремниевых PIN фотодиодов;
- разработка методик тестирования кристаллов и фотодиодов перед сборкой блоков торцевого калориметра;
- разработка методики тестирования блоков торцевого калориметра перед установкой в детектор;
- разработка системы термостабилизации торцевого калориметра, интегрированной в систему крепления калориметра в детекторе;
- определение энергетического и координатного разрешения торцевого калориметра.

Личный вклад автора

Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его активном участии.

Научная новизна

Впервые в России разработан и изготовлен электромагнитный калориметр на основе кристаллов BGO с использованием в качестве фотоприёмников полупроводниковых кремниевых фотодиодов. Калориметр работает в составе детектора КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере

ВЭПП-2000. Впервые в России разработана и изготовлена система термостабилизации такого достаточно большого и сложного калориметра. Использование термостабилизации обеспечивает существенное улучшение отношения сигнал/фон, что даёт выигрыш в энергетическом разрешении калориметра, особенно при низких энергиях фотонов.

Научная и практическая ценность

Торцевой калориметр на основе кристаллов ВГО изготовлен, установлен в детектор КМД-3 и успешно отработал в составе детектора с 2010 по 2013 год. Разработанная конструкция калориметра и предварительное тестирование модулей перед сборкой в детектор обеспечили надёжность и стабильность его работы. Была разработана процедура калибровки калориметра с использованием мюонов космического излучения, позволяющая определять калибровочные коэффициенты каналов торцевого калориметра с точностью около 1%. Была разработана методика определения энергий и угловых координат γ -квантов, попавших в торцевой калориметр, а также определены его энергетическое и координатное разрешения. Данные результаты имеют важное значение для проведения анализа данных, набранных детектором КМД-3, для физических процессов с участием γ -квантов в конечном состоянии. Опыт и методики, полученные при создании торцевого калориметра, могут быть использованы при создании новых калориметров для следующего поколения детекторов в физике высоких энергий.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Разработка, изготовление и запуск торцевого калориметра детектора КМД-3 на основе кристаллов ВГО с использованием в качестве фотоприёмников кремниевых PIN фотодиодов.
- Разработка методик для проверки качества составных элементов калориметра — кристаллов и фотодиодов.
- Разработка методики проверки собранных блоков с помощью энергосъёмки от космических частиц.
- Разработка и изготовление системы термостабилизации торцевого калориметра, интегрированной в систему крепления калориметра в детекторе.
- Определение для γ -квантов, попадающих в торцевой калориметр, энергетического и координатного разрешения.

Апробация работы

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались автором на научных семинарах ИЯФ СО РАН, а также международных конференциях: Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН 2008, Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН 2012, International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14) 2014, International Conference on Calorimetry in Particle Physics (CALOR 2016). Часть материалов, изложенных в диссертации, неоднократно докладывалась соавторами на международных конференциях. Основные результаты опубликованы в статьях [1–5].

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 129 страниц, включая 82 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает в себя 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и предмет исследования, а также описана структура диссертации.

В первой главе приведено краткое описание ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 и детектора КМД-3.

Комплекс ВЭПП-2000 (до остановки на модернизацию в 2013 году) состоял из инжектора ИЛУ, синхротрона Б-3М, конверсионной системы получения позитронов, бустерного накопителя БЭП и накопительного кольца ВЭПП-2000. В коллайдере применён принципиально новый метод круглых пучков, в результате чего планируется получить светимость до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при энергии 2 ГэВ в системе центра масс. Детекторы КМД-3 и СНД успешно отработали на накопителе ВЭПП-2000 и набрали интеграл светимости примерно 60 пб^{-1} каждый. В 2013 году эксперимент был остановлен для модернизации инжекционного комплекса и бустерного накопителя. Работа коллайдера возобновлена в 2016 году.

Детектор КМД-3 — универсальный детектор, включающий в себя магнитный спектрометр для измерения импульсов заряженных частиц и электромагнитный калориметр для определения энергий и координат γ -квантов. Общий вид детектора представлен на Рис. 1. Для определения координат, углов и импульсов заряженных частиц используется цилиндрическая дрейфовая камера (2), помещённая в продольное магнитное поле напряжённостью до 1,3 Тл. Это поле создаётся сверхпро-

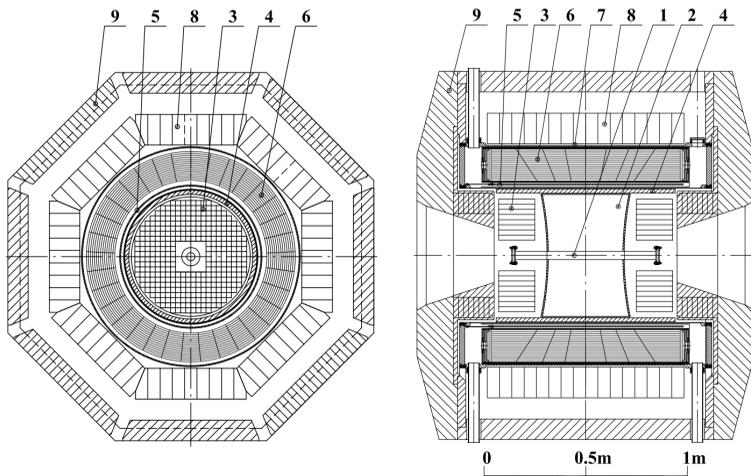


Рис. 1. Схема детектора КМД-3. 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовая камера; 3 – торцевой ВГО калориметр; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий соленоид; 6 – калориметр на основе жидкого ксенона (LXe); 7 – время-пролётная система; 8 – калориметр на основе кристаллов CsI; 9 – ярмо магнита.

водящим соленоидом (5). Снаружи детектора магнитный поток замыкается по ярму (9), изготовленному из железа АРМКО. Для определения z-координаты заряженных частиц и выработки сигнала заряженного триггера используется Z-камера (4). Измерение энергии и координат γ -квантов осуществляется с помощью цилиндрического калориметра на основе жидкого ксенона (6) и кристаллов CsI (8), а также торцевого калориметра (3) на основе кристаллов ВГО. Между LXe и CsI калориметрами располагается время-пролётная система (7) на основе сцинтилляционных счётчиков. Для подавления фона от космических частиц и разделения мюонов и адронов служит пробегная система на основе сцинтилляционной пластмассы, расположенная на внешней поверхности детектора.

Во второй главе дано общее описание торцевого калориметра. В этой главе описаны кристаллы, фотодиоды, электроника, конструкция калориметра в целом и система его температурной стабилизации.

Торцевой калориметр состоит из двух одинаковых торцов по 340 кристаллов в каждом. Он расположен в боковых частях детектора между дрейфовой камерой и торцевым железом ярма магнита. Калориметр позволяет регистрировать заряженные частицы и γ -кванты с полярными углами вылета от 16 до 49 и от 131 до 164 градусов, что составляет телесный угол $0,3 \times 4\pi$ стерадиан. Кристаллы изготовлены из ортогермана-

та висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO). Этот сцинтилляционный материал имеет большую плотность ($7,13 \text{ г/см}^3$) и малую радиационную длину ($1,12 \text{ см}$), поэтому при ограниченном доступном пространстве (196 мм) его использование в торцевом калориметре является оптимальным выбором среди других сцинтилляторов, применяемых в физике высоких энергий. Длина каждого кристалла 150 мм , что соответствует $13,4$ радиационным длинам. Поперечные размеры кристаллов $25 \times 25 \text{ мм}^2$ выбирались из соображений оптимизации пространственного разрешения калориметра и количества каналов электроники. Все грани кристалла полированы и светосбор осуществляется на основе полного внутреннего отражения.

В качестве фотоприёмников в торцевом калориметре используются кремниевые PIN фотодиоды, способные работать в сильно неоднородном магнитном поле, которое создают фокусирующие соленоиды коллайдера ВЭПП-2000. Преимуществом фотодиодов являются компактность, высокая надежность, стабильность коэффициента усиления и высокая квантовая эффективность ($QE \sim 80\%$ при длине волны $\lambda = 480 \text{ нм}$, соответствующей максимуму спектра высвечивания BGO).

Для уменьшения шумов электронного тракта предусилители расположены внутри детектора непосредственно возле фотодиода. Остальная электроника торцевого калориметра расположена снаружи детектора.

С целью упрощения механической конструкции торцевого калориметра и облегчения процедуры его сборки, кристаллы склеиваются в линейки, или блоки. Каждый блок комплектуется фотодиодами и предусилителями. Калориметр собирается из блоков двух типов: по 4 и 6 кристаллов в каждом. Полное количество блоков — 152. Блоки в каждом торце калориметра устанавливаются вертикально на специальные подставки в медное кольцо с внутренним диаметром 576 мм .

Это медное кольцо также является составной частью системы термостабилизации торцевого калориметра. Световыход кристаллов BGO уменьшается примерно на $1,5\%$ при увеличении температуры на 1°C . Система термостабилизации позволяет поддерживать постоянную температуру торцевого калориметра с амплитудой колебаний не более $\pm 1^\circ\text{C}$, что даёт пренебрежимо малый вклад в энергетическое разрешение. Для стабилизации температуры калориметра используется вода, которая охлаждается чиллером. Охлажденная вода с температурой 12°C циркулирует по медной трубке, припаянной к медному кольцу, в котором установлены блоки калориметра. Выбранный диапазон рабочих температур калориметра $22 - 28^\circ\text{C}$ обеспечивает штатный режим работы электроники.

В третьей главе изложена методика проверки собранных блоков калориметра перед их постановкой в детектор. Проверка блоков вклю-

чала в себя несколько разновидностей измерений. Сначала проводилась электронная калибровка зарядочувствительных преусилителей с подключёнными к ним фотодиодами, которая подтверждала работоспособность ЗЧУ после сборки блока и по которой определялись шумы каждого канала. Затем производилась калибровка коэффициента преобразования выделившегося в фотодиоде заряда в величину выходного сигнала с использованием радиоактивного источника гамма-излучения ^{241}Am . Окончательная проверка блоков производилась путём набора спектров энерговыделения при прохождении через кристаллы мюонов космического излучения. По результатам обработки спектров энерговыделений космических частиц и электронной калибровки вычислялся коэффициент преобразования из выделенной энергии во входной заряд преусилителя (интегральный световыход) и энергетический эквивалент шумов для каждого канала. Проверка всех блоков была проведена дважды: непосредственно после сборки блоков при комнатной температуре, и перед постановкой блоков в детектор при температуре, ниже планируемой рабочей температуры калориметра.

Четвёртая глава посвящена системе калибровки торцевого калориметра в детекторе. Калибровка необходима для определения соответствия между выделившейся в кристалле энергией и величиной оцифрованного сигнала. Также система калибровки служит для оперативного измерения параметров калориметра, настройки и проверки электронного тракта, выявления возможных неисправных каналов и диагностики причин выхода их из строя.

Процедура калибровки торцевого калориметра состоит из измерения пьедесталов амплитудно-цифровых преобразователей в УФО-32, калибровки интегрального коэффициента преобразования электронного тракта и полной калибровки калориметра по мюонам космического излучения. При проведении калибровки пьедесталов измеряются величины пьедесталов плат Усилителя–Формирователя–Оцифровщика (УФО-32). Результатами калибровки интегрального коэффициента преобразования электронного тракта являются значения коэффициентов преобразования из входного заряда преусилителя в код АЦП и шумов электронного тракта. На основе результатов полной калибровки калориметра по космическим частицам определяются коэффициенты пересчёта из кода АЦП в энерговыделение в кристалле. Все эти данные используются в дальнейшем для обработки информации в торцевом калориметре. Результаты калибровок анализируются с целью поиска возможных неисправностей и диагностики их причин для последующего исправления. Сравнение результатов сделанных в различное время калибровок позволяет контроли-

ровать долговременную стабильность параметров калориметра. Первые две калибровки производятся при помощи генератора 1–2 раза в неделю, а последняя — набором событий от прохождения космических мюонов через кристаллы.

Калибровка торцевого калориметра по космическим частицам проводится в двух режимах: с запуском системы сбора данных от специального триггера торцевого калориметра ("online-калибровка"), и с запуском от стандартного триггера детектора КМД-3 непосредственно во время набора статистики в физических заходах ("offline-калибровка").

Online-калибровка требует отсутствия пучков в ВЭПП-2000. Offline-калибровка возможна благодаря тому, что прохождение космических мюонов через детектор КМД-3 может вызывать срабатывание стандартного триггера детектора, и часть этих частиц при этом проходит через кристаллы торцевого калориметра. Преимуществом offline-калибровки является возможность контролировать параметры калориметра непосредственно в процессе набора данных, в то время как online-калибровка позволяет получить их только на момент проведения калибровки. Недостатком offline-калибровки является меньшая оперативность, так как результаты калибровки можно получить только после проведения полной реконструкции событий.

Для проведения калибровок используется система сбора данных детектора КМД-3. Результаты калибровок заносятся в базу данных калибровок детектора. По результатам обработки спектров космических мюонов и электронной калибровки вычисляется коэффициент преобразования из выделенной энергии во входной заряд предусилителя (интегральный световыход), а также энергетический эквивалент шумов σ_{noise} . Эти распределения всех каналов торцевого калориметра приведены на Рис. 2 и Рис. 3. Полученные калибровочные коэффициенты используются в программе реконструкции событий в торцевом калориметре.

В пятой главе описана методика обработки информации с торцевого калориметра для определения энергий и координат γ -квантов, а также процедура определения энергетического и координатного разрешений калориметра.

Основной задачей торцевого калориметра является регистрация γ -квантов. Попадая в торцевой калориметр, γ -квант рождает электромагнитный ливень, который даёт энерговыделение сразу в нескольких граничащих между собой кристаллах. Связная группа близкорасположенных кристаллов, в которых произошло выделение энергии, называется кластером. Формирование кластеров и расчёт их параметров в торцевом калориметре является задачей программы реконструкции. После форми-

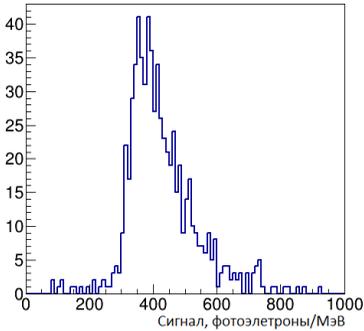


Рис. 2. Распределение всех каналов калориметра по входному заряду предусилителя (интегральному световыходу.)

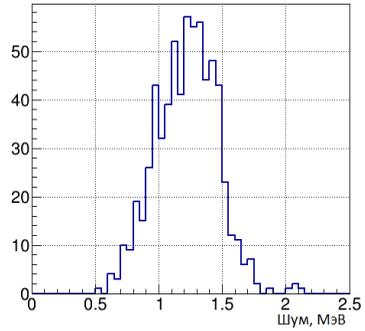


Рис. 3. Распределение всех каналов калориметра по энергетическому эквиваленту шумов.

рования кластеров программой реконструкции рассчитываются их параметры: энергия, координаты, количество кристаллов, средняя энергия и разброс энергии в кристаллах кластера и другие.

Средняя выделенная в калориметре энергия меньше энергии падающей ливнеобразующей частицы из-за выхода части кристаллов из калориметра. Для того, чтобы определить начальную энергию γ -кванта, вычисляется поправочный коэффициент, зависящий от измеренного полярного угла кластера и измеренной энергии кластера.

При вычислении полярного угла кластера методом центра тяжести ливня предполагается, что вся энергия выделяется непосредственно при входе γ -кванта в калориметр, что приводит к систематическому сдвигу вычисленного и действительного угла γ -кванта.

Для определения поправочных коэффициентов к энергии и полярному углу кластера использовалось моделирование в программном пакете GEANT4. Дополнительная поправка к энергии фотонов (абсолютная калибровка) производилась, используя события двухквантовой аннигиляции $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$.

Для определения энергетического разрешения торцевого калориметра отбирались попавшие в него события упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и события двухквантовой аннигиляции $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ во всём диапазоне энергий пучков коллайдера ВЭПП-2000 от 160 до 1000 МэВ. Полученные результаты сравнивались с данными моделирования.

На разрешение торцевого калориметра влияют флуктуации утечек ливня, неоднородность светосбора кристаллов, неточность калибровки,

нестабильность усиления электроники, нестабильность температуры и шумы электроники. Все эти параметры учитывались при проведении моделирования.

Утечки ливня учитываются при полном моделировании прохождения частиц через вещество. Неоднородность светосбора для каждого кристалла задавалась в виде линейной зависимости энерговыделения от координаты вдоль кристалла. Коэффициенты пропорциональности этой линейной зависимости для каждого кристалла брались из базы данных калибровок, в которую были занесены по результатам измерений световыхода кристаллов на ФЭУ перед их постановкой в калориметр. Шумы электроники для каждого канала калориметра вычислялись из электронной калибровки и калибровки по космическим частицам. Вклады неточности калибровки, так же как нестабильности коэффициентов усиления электронного тракта и температуры, учитывались в моделировании как шумы, пропорциональные выделенной энергии.

Для измерения энергетического разрешения строились спектры энерговыделения в кластерах для отобранных событий. Типичный спектр энерговыделения для фотона с энергией 330 МэВ показан на Рис. 4.

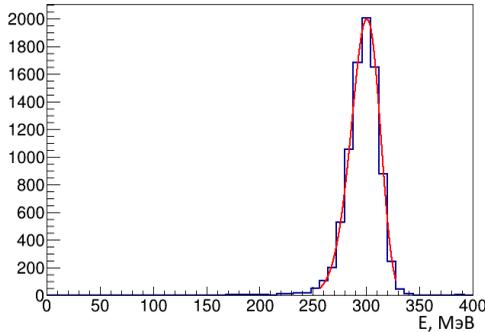


Рис. 4. Типичный пример энерговыделения фотона в торцевом калориметре, подогнанный функцией логарифмически нормального распределения.

Эти спектры подгонялись функцией логарифмически нормального распределения, которая имеет вид:

$$f(E) = \frac{Nx}{\sqrt{2\pi}\sigma_E} \exp\left\{-\frac{\ln^2\left[1 + \frac{x(E-E_p)a}{\sigma_E}\right]}{2a^2} - \frac{a^2}{2}\right\}, \quad x = \frac{\text{sh}(a\sqrt{\ln 4})}{a\sqrt{\ln 4}}.$$

Функция имеет четыре параметра: N – нормировочный множитель, E_p – положение максимума пика, σ_E – ширина пика на полувысоте, делённая

на 2,355, a – асимметрия. Из подгонки было определено энергетическое разрешение σ_E/E . Зависимости энергетического разрешения торцевого калориметра от энергии для фотонов и электронов приведены на Рис. 5.

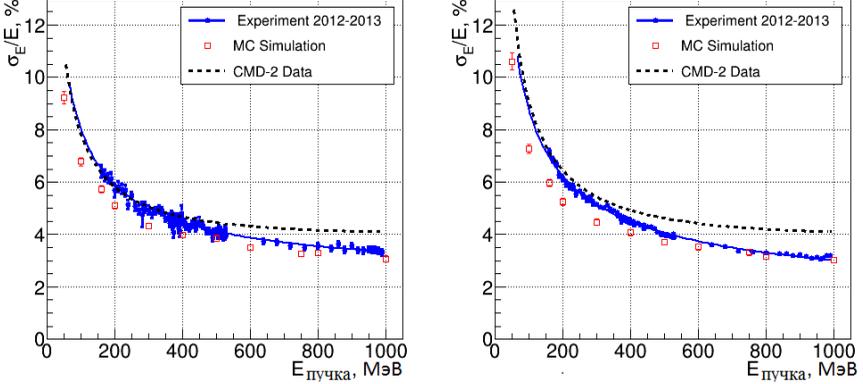


Рис. 5. Энергетическое разрешение торцевого калориметра для фотонов (слева) и электронов (справа). Заполненные кружки – эксперимент, пустые квадратики – моделирование, пунктир – КМД-2.

Для измерения координатного разрешения в r - φ -плоскости строилось распределение событий двухквантовой аннигиляции по азимутальному углу расколлинearности кластеров $\Delta\varphi = \pi - |\varphi_1 - \varphi_2|$, где φ_1 и φ_2 – азимутальные углы кластеров в первом и втором торцах, соответственно. Для точного вычисления координат кластеров были измерены реальные положения блоков в каждом торце. Далее, было учтено положение калориметра относительно места встречи пучков в коллайдере. Это было сделано в два этапа. На первом этапе, учитывалось экспериментальное измеренное положение пучка относительно центра детектора, которое получено из реконструкции треков в дрейфовой камере и записано в заголовке захода. Далее, была аналитически вычислена функция, описывающая зависимость расколлинearности кластеров $\Delta\varphi$ от азимутального угла φ_1 одного из кластеров при смещении пучка относительно центра торцевого калориметра. Эта функция зависит от параметров $X_{\text{смещ}}, Y_{\text{смещ}}$, то есть, от смещения места встречи пучков относительно центра калориметра по осям X и Y , соответственно. Экспериментальная зависимость $\Delta\varphi$ от φ_1 подгонялась указанной функцией. На Рис. 6 показан пример такой подгонки для энергетической точки 440 МэВ.

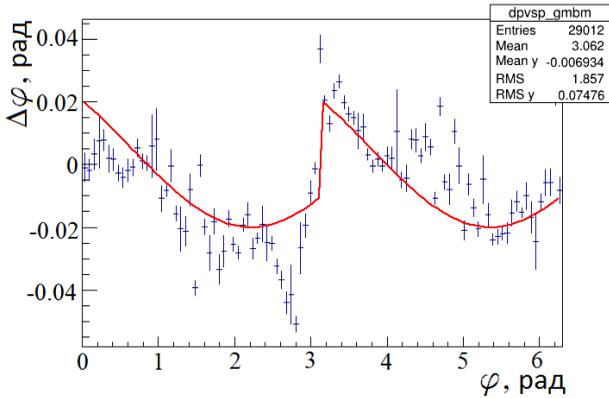


Рис. 6. Зависимость угла расколлинеарности кластеров от азимутального угла экспериментальных событий двухквантовой аннигиляции для энергетической точки 440 МэВ, аппроксимированная подгоночной функцией.

Дополнительное смещение calorиметра относительно центра детектора определялось для каждой энергетической точки. Выяснилось, что почти для всех точек по энергии дополнительное смещение примерно одно и то же. Далее, в расчёте азимутального угла кластера было учтено это смещение. Полученные после поправки распределения по параметру $\Delta\varphi$ подгонялись функцией Гаусса, из подгонки определялось угловое разрешение σ_φ . Координатное разрешение σ_x пересчитывалось по формуле $\sigma_x = \sigma_\varphi Z_0 \operatorname{tg} \theta / \sqrt{2}$, где $Z_0 = 244$ мм – расстояние вдоль оси пучков от места встречи пучков до торцевого calorиметра, а множитель $\sqrt{2}$ учитывает тот факт, что вклад в разброс $\Delta\varphi$ вносят два кластера.

Зависимость координатного разрешения σ_x от энергии фотона приведена на Рис. 7. На графике пустые кружки показывают координатное разрешение до учёта дополнительного смещения пучка, заполненные – после. Сплошной линией показана аппроксимация разрешения функцией

$$\sigma_x [\text{мм}] = \frac{3.03}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}}.$$

Пустыми квадратиками на этом рисунке показано координатное разрешение, полученное из моделирования. Для его вычисления моделировался процесс $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$, при этом в параметры моделирования закладывались реальные средние параметры пучков, взятые из базы данных заходов. Координатное разрешение для событий моделирования аппроксимируется такой же функциональной зависимостью от энергии фотона, как и для экспериментальных событий, но с другим коэффициентом: $\sigma_x [\text{мм}] = \frac{2.78}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}}$. Так как функциональная зависимость для экспери-

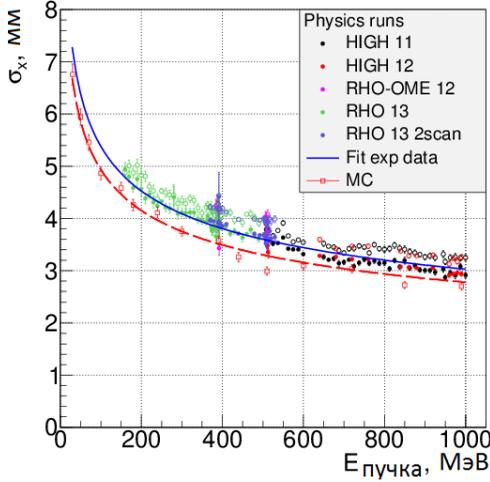


Рис. 7. Координатное разрешение для процесса двухквантовой аннигиляции в r - φ -плоскости в зависимости от энергии γ -кванта. Пустые кружки — до поправки на положение калориметра, заполненные — после.

ментальных событий и для событий моделирования одинакова, то можно использовать подгоночную кривую, определённую по экспериментальным событиям, для экстраполяции координатного разрешения в область малых энергий (ниже диапазона энергий пучка ВЭПП-2000). Полученная таким образом зависимость координатного разрешения от энергии, выраженная функцией $\sigma_x[\text{мм}] = \frac{3,03}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}}$, показана на Рис. 8. Пунктирной линией показано координатное разрешение торцевого калориметра детектора КМД-2.

Определяющий вклад в угловое разрешение по полярному углу даёт продольный размер сгустков пучков и их положение вдоль оси Z . Для получения углового разрешения строилось распределение событий двухквантовой аннигиляции по углу расколлинеарности кластеров $\Delta\theta = \pi - \theta_1 - \theta_2$, где θ_1 и θ_2 — полярные углы кластеров в первом и втором торцах, соответственно. Данное распределение строилось как для экспериментальных данных, так и для моделирования, при этом в параметры моделирования закладывались реальные средние параметры пучков, взятые из базы данных заходов. Это распределение аппроксимировалось функцией Гаусса, и угловое разрешение определялось как $\sigma_\theta = \sigma_{\Delta\theta}/\sqrt{2}$. Результаты расчётов приведены в Таблице 1.

Так как моделирование хорошо согласуется с экспериментом, оно бы-

Таблица 1. Угловое разрешение по полярному углу процесса $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$.

E_{beam} , МэВ	σ_θ , мрад (эксперимент)	σ_θ , мрад (моделирование)
200	$39,0 \pm 0,2$	$35,0 \pm 0,8$
300	$37,6 \pm 0,1$	$37,3 \pm 0,7$
391,5	$38,9 \pm 0,4$	$37,9 \pm 0,3$
440	$40,1 \pm 0,4$	$38,9 \pm 0,2$
510	$41,7 \pm 0,4$	$40,0 \pm 0,3$
720	$41,2 \pm 0,5$	$39,2 \pm 0,2$
990	$45,0 \pm 0,3$	$40,5 \pm 0,6$

ло использовано для определения углового координатного разрешения одиночных фотонов по полярному углу. Моделировался процесс $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$, так что γ -кванты вылетали из центра детектора. Данные обрабатывались программой реконструкции и вычислялась разность $\Delta\theta$ истинного и реконструированного полярных углов. Распределение по $\Delta\theta$ аппроксимировалось функцией логарифмически нормального распределения, из которой находилось угловое разрешение σ_θ . Полученная из моделирования зависимость углового разрешения от энергии показана на Рис. 9. Эта зависимость аппроксимируется функцией

$$\sigma_\theta[\text{мрад}] = \frac{11,5}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}} + 6,8.$$

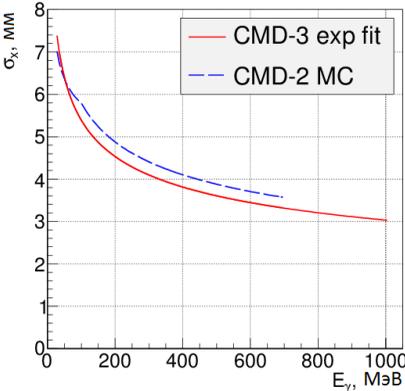


Рис. 8. Координатное разрешение торцевого калориметра в r - φ -плоскости для фотонов, полученное из экспериментальных событий двухквантовой аннигиляции.

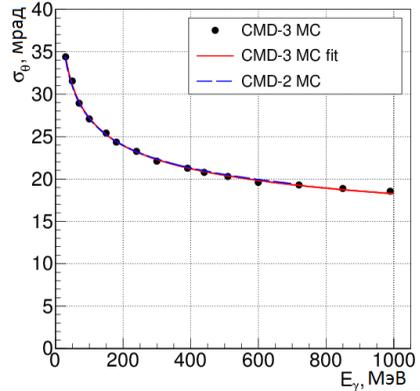


Рис. 9. Угловое разрешение торцевого калориметра по полярному углу для фотонов, полученное из событий моделирования одиночных фотонов.

В заключении приведены основные результаты:

1. Разработан и изготовлен торцевой калориметр детектора КМД-3 на основе кристаллов ВГО с использованием в качестве фотоприёмников кремниевых PIN фотодиодов. Торцевой калориметр успешно отработал в составе детектора КМД-3 в течение 2010–2013 гг. Набранный детектором интеграл светимости составил около 60 пб^{-1} .
2. Разработаны методики проверки качества составных элементов калориметра — кристаллов и фотодиодов. Перед сборкой блоков все компоненты были протестированы на соответствие их параметров техническим требованиям.
3. Разработана методика проверки собранных блоков с помощью энерговыделения от космических мюонов и протестированы все блоки перед их установкой в детектор.
4. Разработана конструкция системы термостабилизации торцевого калориметра, интегрированная в систему крепления калориметра в детекторе.
5. Получены для γ -квантов, попадающих в торцевой калориметр, энергетическое разрешение $\frac{\sigma_E}{E} [\%] = \frac{2,43}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}} \oplus 2,28$, координатное разрешение в r - φ -плоскости $\sigma_x [\text{мм}] = \frac{3,03}{\sqrt{4E[\text{ГэВ}]}}$, угловое разрешение по полярному углу $\sigma_\theta [\text{мрад}] = \frac{11,5}{\sqrt{4E[\text{ГэВ}]}} + 6,8$.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Р. Р. Ахметшин и др., Статус торцевого ВГО калориметра детектора КМД-3, Ядерная Физика, 2009, т.72, с.512.
2. D. N. Grigoriev, R. R. Akhmetshin et al., Upgrade of the CMD-3 BGO Endcap Calorimeter, IEEE Trans. Nucl. Sci. 60, no. 1, 259 (2013).
3. R. R. Akhmetshin et al. [CMD-3 Collaboration], Performance of the BGO endcap calorimeter of the CMD-3 detector, JINST 9 (2014) no.10, C10002.
4. V. E. Shebalin, R. R. Akhmetshin et al., Calorimetry of the CMD-3 detector, Nucl. Instrum. Meth. A 824 (2016) 710.
5. R. R. Akhmetshin et al., Geometric alignment of the CMD-3 endcap electromagnetic calorimeter using events of two-quantum annihilation, Journal of Instrumentation (JINST) 12 (2017) C08010.

АХМЕТШИН Равель Равилович

**Торцевой электромагнитный калориметр
на основе кристаллов ВГО
для детектора КМД-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 9.10.2017 г.

Подписано к печати 12.10.2017 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,0 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

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