

*На правах рукописи*

**ШЕБАЛИН Василий Евгеньевич**

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОТОНОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ  
КАЛИБРОВКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАЛОРИМЕТРА  
ДЕТЕКТОРА КМД-3**

**01.04.01 – Приборы и методы  
экспериментальной физики**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК – 2016**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ШВАРЦ  
Борис Альбертович – доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БУДНЕВ  
Николай Михайлович – доктор физико-математических наук,  
Иркутский государственный университет,  
г. Иркутск, декан физического факультета.

ГУСЬКОВ  
Алексей Вячеславович – доктор исследований в области наук и  
высоких технологий по направлению физика  
и астрофизика (Туринский университет  
Итальянская Республика, г. Турин) - к.ф.-м.н  
(эквивалент диплому РФ), Объединенный  
институт ядерных исследований, г. Дубна,  
начальник сектора Научно-исследователь-  
ского отдела встречных пучков Лаборатории  
ядерных проблем.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерных  
исследований Российской академии наук,  
г. Москва.

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.  
в « \_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета 003.016.03  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской  
академии наук.

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 Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Начиная с 2010 года в Институте ядерной Физики имени Г.И. Будкера проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в диапазоне энергий от 320 МэВ до 2 ГэВ в системе центра масс. Обширная физическая программа экспериментов включает в себя прецизионное измерение полного сечения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны, изучение свойств легких векторных мезонов ( $\rho, \omega, \phi$ ) и другие задачи.

Коллайдер имеет две области взаимодействия пучков, в которых установлены детекторы КМД-3 и СНД. Поскольку физическая программа экспериментов включает в себя изучение процессов, содержащих нейтральные пионы и фотоны в конечных состояниях, таких как  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ , важной частью детектора является электромагнитный калориметр. Цилиндрический калориметр детектора КМД-3 имеет комбинированную структуру, он состоит из калориметра на основе сжиженного ксенона и кристаллического CsI калориметра.

Для решения физических задач калориметр должен иметь высокое энергетическое и пространственное разрешение. Для достижения высокого энергетического разрешения важна разработка процедур точной энергетической калибровки каналов калориметра. Обычно для калибровки калориметров используются частицы с известным энерговыделением. Для этой цели применяются частицы космического излучения, а также хорошо изученные физические процессы, такие как  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . Космические частицы, как правило, используются для определения предварительных значений калибровочных коэффициентов.

Основным преимуществом жидкоксенонового калориметра в отношении точной калибровки является возможность восстановления траектории движения заряженной частицы, что позволяет существенно уточнить результаты калибровки с использованием космических частиц. При этом существенно уменьшается вклад в систематическую погрешность определения калибровочных коэффициентов от неточности описания импульсных и угловых распределений космических частиц.

Основная задача калориметра состоит в измерении кинематических параметров фотонов. Вследствие утечек электромагнитных ливней, образованных фотонами, а так же потери энергии в пассивном веществе между подсистемами калориметра, в нем регистрируется в среднем около 85% энергии ливня. Величина выделенной энергии зависит от начальной энергии фотона, координат точки конверсии фотона в электрон-позитронную пару по глубине калориметра а также углов влета фотона в калориметр. Ввиду этого необходима разработка процедуры определения энергии фотона. Кроме того, вследствие неидеальности моделирования детектора процедура восстановления энергии фотонов нуждается в экспериментальной проверке. С этой целью использовался процесс аннигиляции электрон-позитронной в два гамма-кванта.

### **Цель работы состояла в следующем:**

- разработка процедур мониторингирования характеристик CsI калориметра
- разработка процедур энергетической калибровки каналов комбинированного цилиндрического калориметра
- разработка процедур восстановления кинематических параметров фотонов

### **Личный вклад автора**

Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его определяющем вкладе.

### **Научная и практическая ценность**

Калориметр на основе кристаллов CsI успешно отработал в течение первого цикла экспериментов с детектором КМД-3 с 2010 по 2013 год. Система мониторингирования параметров CsI калориметра обеспечила непрерывный контроль состояния калориметра и работоспособности его элементов.

Задача энергетической калибровки комбинированного калориметра, состоящего из подсистем с различным принципом работы, решалась впервые. Была разработана процедура калибровки элементов калориметра, позволяющая определять калибровочные коэффициенты для элементов жидкоксеронового калориметра с погрешностью на уровне 1.5% и для ка-

налов CsI калориметра на уровне 3%, что позволило достигнут хороших параметров энергетического разрешения цилиндрического калориметра.

Была разработана процедура определения начальной энергии фотона, учитывающая утечки электромагнитного ливня и потери энергии в пассивном веществе между подсистемами цилиндрического калориметра. Также была разработана процедура восстановления координат фотонов и определено энергетическое и пространственное разрешение калориметра.

Приведенные результаты имеют большую значимость для проведения прецизионного анализа физических процессов, содержащих нейтральные пионы и фотоны в конечных состояниях.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Система мониторингирования параметров CsI калориметра.
- Процедура калибровки цилиндрического калориметра детектора КМД-3 с помощью космических частиц.
- Процедура калибровки цилиндрического калориметра с использованием событий упругого электрон-позитронного рассеяния.
- Процедура восстановления кинематических параметров фотонов.

### **Апробация работы**

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались автором на научных семинарах ИЯФ СО РАН, а также международных конференциях: The International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics 2014 (Россия, Новосибирск, 2014), Международная сессия конференция секции ядерной физики ОФН РАН 2014, Frontier Detectors for Frontier Physics 13th Pisa Meeting on Advanced Detectors (2015, Италия, о. Эльба)

Часть материалов, изложенных в диссертации, неоднократно докладывалась соавторами на международных конференциях. Основные результаты опубликованы в статьях 1 – 6.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 122 страницы, включая 73 рисунка и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 51 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описывается актуальность работы и формулируется предмет исследования.

**В первой главе** приводится описание ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и детектора КМД-3.

Ускорительный комплекс ВЭПП-2000 состоит из коллайдера ВЭПП-2000 и системы накопления и инъекции пучков, включающей бустерный накопитель БЭП и каналы инъекции. Проектная светимость коллайдера  $10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при энергии 1 ГэВ и  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при энергии 2 ГэВ в системе центра масс пучков.

Первый цикл экспериментов с детекторами КМД-3 и СНД на коллайдере ВЭПП-2000 проводился с 2010 по 2013 г. Каждым детектором был набран интеграл светимости около  $60 \text{ пб}^{-1}$ . В апреле 2013 г. эксперименты были приостановлены для модернизации комплекса ВЭПП-2000, которая включает в себя переход на новый инжекционный комплекс ВЭПП-5 и модернизацию бустера БЭП. В 2016 году планируется возобновление экспериментов.

КМД-3 — универсальный детектор, сочетающий в себе свойства магнитного спектрометра с высоким импульсным разрешением и калориметра с хорошим энергетическим разрешением. Схема детектора КМД-3 представлена на рисунке 1. Трековая система детектора состоит из Дрейфовой камеры (ДК) и Z-камеры, размещенных в однородном магнитном поле 13 кГс. Магнитное поле создается тонким ( $0.085 X_0$ ) сверхпроводящим соленоидом, расположенным в одном корпусе с калориметром на основе жидкого ксенона (LXe). Для регистрации и измерения параметров фотонов детектор оборудован калориметрическими системами: торцевым калориметром на основе кристаллов ВГО и цилиндрическим электромагнитным калориметром. Цилиндрический калориметр расположен вне соленоида и состоит из двух подсистем: ближайшего к оси пучков жидкоксенонового калориметра и расположенного за ним калориметра на основе кристаллов CsI.

**Вторая глава** посвящена описанию цилиндрического калориметра детектора КМД-3. Он служит для регистрации фотонов и электронов, вылетающих под углами к оси пучков Z — от  $39^\circ (0.68 \text{ рад})$  до  $141^\circ (2.46 \text{ рад})$  и охватывает телесный угол  $0.8 \times 4\pi$ . Калориметр имеет уникальную комбинированную структуру — он состоит из двух расположенных соосно подсистем: калориметра на основе жидкого ксенона и кристаллического CsI калориметра.

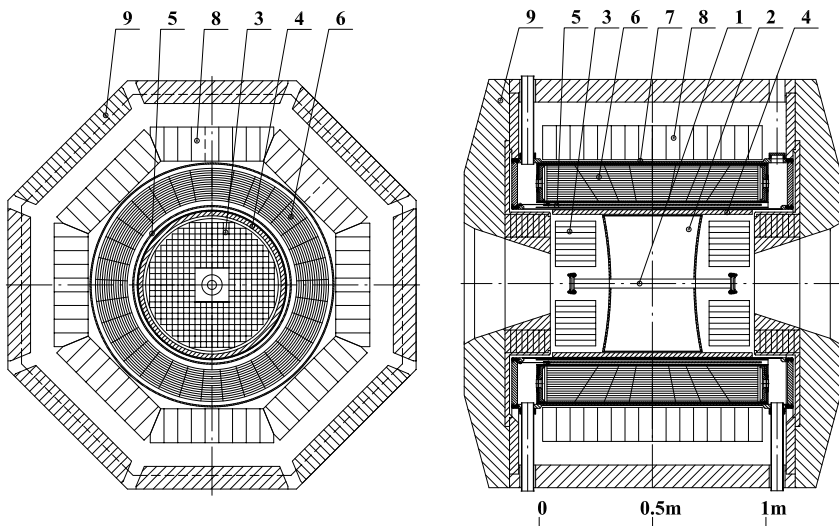


Рис. 1. Схема детектора КМД-3: 1 – вакуумный промежуток, 2 – дрейфовая камера (ДК), 3 – торцевой BGO калориметр, 4 – Z-камера, 5 – сверхпроводящий соленоид, 6 – жидкоксереновый цилиндрический калориметр (LXe), 7 – TOF, 8 – цилиндрический CsI калориметр, 9 – ярмо магнита

Жидкоксереновый калориметр работает по принципу сбора заряда ионизации. Он обладает электродной структурой высокой степени сегментации, что позволяет измерять координаты частиц с высокой точностью. Толщина активного вещества калориметра составляет  $5.4 X_0$ . Дополнительные 8.1 радиационных длин CsI калориметра, обеспечивая суммарную толщину  $13.5 X_0$ , что позволяет регистрировать большую часть энергии электромагнитного ливня. Регистрация сцинтилляций кристаллов CsI осуществляется с помощью PIN фотодиодов. На рисунке 2 представлены характерные распределения по величине выделенной энергии электронов и позитронов в цилиндрическом калориметре и его подсистемах для процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . Энергетическое разрешение калориметра определяется в основном утечками электромагнитных ливней и потерями энергии в пассивном веществе между подсистемами. Шумы электроники в каналах калориметра составляют 300 – 500 кэВ и вносят малый вклад в разрешение. Количество пассивного вещества перед калориметром составляет  $0.35 X_0$  ( $6.27 \text{ г/см}^2$ ), а между калориметрами –  $0.25 X_0$  ( $6.27 \text{ г/см}^2$ ).

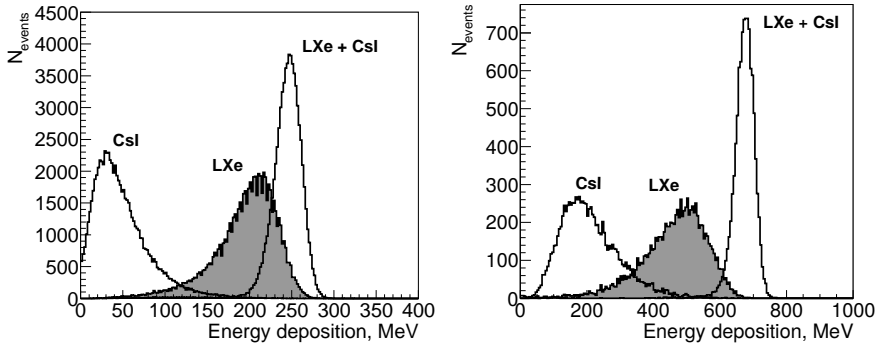


Рис. 2. Спектр энергии, выделенной в подсистемах цилиндрического калориметра, для электронов и позитронов для процесса  $e^+e^-$ -рассеяния при энергии пучков 300 МэВ (слева) и 800 МэВ (справа)

Обе подсистемы цилиндрического калориметра обслуживаются унифицированной считывающей электроникой, схема которой приведена на рисунке 3. Сигналы с зарядочувствительных преусилителей (ЗЧПУ) поступают на вход блоков УФО32, в которых сигнал разветвляется на два тракта: спектрометрический с временем формирования 400 нс для LXe и 1 мкс для CsI и триггерный, с коротким временем формирования (160 нс – LXe и 180 нс – CsI). Амплитуда сигнала в спектрометрическом тракте оцифровывается 12-битным АЦП. Триггерные сигналы поступают на вход блоков амплитудных дискриминаторов и сумматоров АДИС. Блоки АДИС производят непрерывную оцифровку сигнала с частотой 100 МГц и при превышении заданного порога передают измеренное значение энергии и позиционную информацию в блок поиска кластеров, который вырабатывает решение нейтрального триггера детектора.

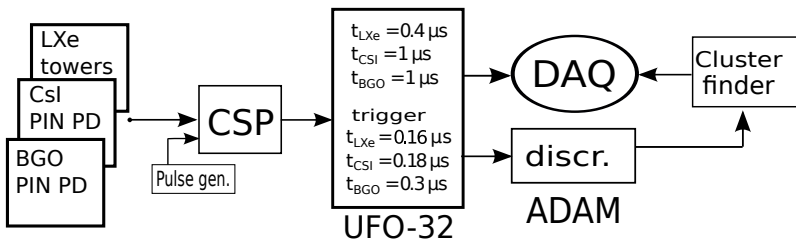


Рис. 3. Схема электроники цилиндрического калориметра



В третьей главе представлена процедура энергетической калибровки цилиндрического калориметра с помощью космических частиц

Величина энерговыделения в  $i$ -м канале калориметра вычисляется в соответствии с формулой:

$$E_i = k_i \times (A_i - P_i), \quad (1)$$

где  $A_i$  – амплитуда сигнала со счетчиков, измеренная в платах УФО-32,  $P_i$  – пьедестал АЦП плат УФО-32, а  $k_i$  – калибровочный коэффициент. Задача энергетической калибровки калориметра заключается в определении коэффициентов  $k_i$  для каждого канала калориметра.

С целью предварительной энергетической калибровки CsI калориметра проводится набор специальных космических заходов. Данные набираются в отсутствие пучков в коллайдере и не требуют работы других подсистем детектора и наличия магнитного поля. В таких заходах запуск ССД осуществляется на основании информации с CsI калориметра. Таким образом, проведение предварительной калибровки и проверки работоспособности детектора может проводиться независимо от состояния детектора в целом.

По набранным данным для каждого кристалла CsI калориметра строятся распределения по величине выделенной энергии. Полученные распределения (Рис 4) аппроксимируются функцией логарифмического нормального распределения и определяется величина наиболее вероятного энерговыделения  $E_p$ .

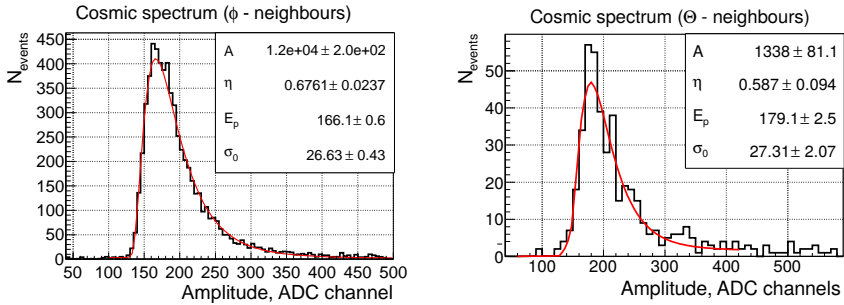


Рис. 4. Энерговыделение в кристаллах CsI калориметра с наложенным условием на срабатывание соседних по  $\phi$  (слева) и соседних по  $\theta$  кристаллов

Калибровочные коэффициенты определяются как

$$k = \frac{E_{mc}}{E_p}, \quad (2)$$

где  $E_{mc}$  – наиболее вероятное энерговыделение космических частиц, определенное из моделирования.

Во время набора экспериментальных данных, помимо физических процессов триггер пропускает заметное количество событий с космическими частицами. Их доля составляет  $\sim 30\%$ , что соответствует скорости счета  $\sim 75$  Гц. Для калибровки калориметра отбираются события соответствующие прохождению космической частицы через детектор, содержащие треки в жидкоксереновом калориметре. Для каждого трека определяются точки пересечения им внутреннего и внешнего цилиндров жидкоксеренового калориметр и строится его продолжение до пересечения с внутренней и внешней плоскостями октантов CsI калориметра. По точкам входа и выхода частицы в подсистемы калориметра, вычисляется длина ее пути в соответствующей подсистеме. К каждому треку приписывается матрица  $3 \times 3$  элемента LXe или CsI калориметра с центром в затравочном элементе, которому принадлежит точка входа частицы в калориметр. Для дальнейшего анализа отбираются треки с энергией в затравочном элементе  $E_{seed} > 20$  МэВ и  $E_{3 \times 3} - E_{seed} < 10$  МэВ, где  $E_{3 \times 3}$  – суммарное энерговыделение в матрице  $3 \times 3$  элемента подсистемы калориметра.

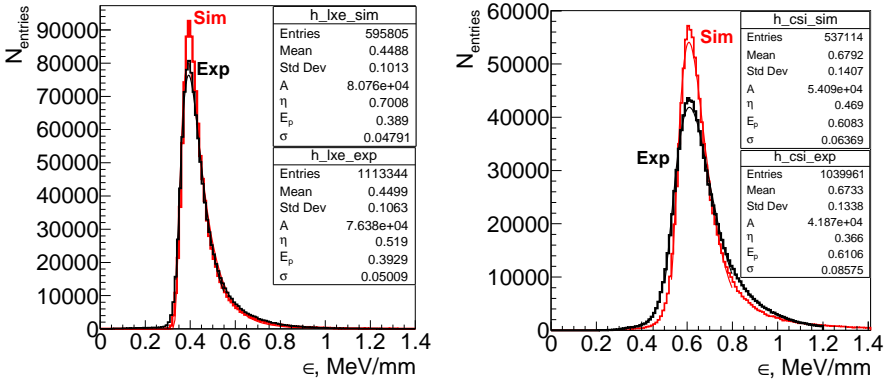


Рис. 5. Распределение удельного энерговыделения  $\epsilon$  в жидкоксереновом (слева) и CsI (справа) калориметрах в эксперименте и моделировании.

Для каждого трека определяется удельное энерговыделение  $\epsilon = E_{3 \times 3}/L$  в LXe и CsI калориметрах, которое приписывается затраговочному элементу. Для каналов калориметра строится распределение по величине  $\epsilon$  (см. рисунок 5). Данное распределение аппроксимировалось функцией логарифмически нормального распределения. Из аппроксимации определялся параметр  $\epsilon_p$  наиболее вероятного удельного энерговыделения. Калибровочные коэффициенты определялись как отношение наиболее вероятного энерговыделения в моделировании к величине в эксперименте  $k_i^{cosm} = \epsilon_p^{mc}/\epsilon_p^i$ .

**В четвертой главе** дано описание процедуры калибровки калориметра с использованием событиями  $e^+e^-$ -рассеяния.

Наиболее точные значения калибровочных коэффициентов  $k_i$  определяются из калибровки с использованием событий упругого  $e^+e^-$  рассеяния. В первую очередь производится отбор событий в соответствии с условиями:

- Восстановлено два кластера энерговыделения в калориметре;
- Два противоположно заряженных коллинеарных трека в ДК;
- Расколлинеарность по  $\theta$ :  $|\theta_1 + \theta_2 - \pi| < 0.1$ ;
- Расколлинеарность по  $\phi$ :  $|\phi_1 - \phi_2| < 0.05$ ;
- $E_{beam}/2 < E_{1,2} < 1.05 \cdot E_{beam}$ , где  $E_{1,2}$  – энерговыделение в кластерах калориметра (см. рисунок 6);
- $|p - E_{beam}| < 3 \cdot \sigma_p(p)$ , где  $p$  – импульс частицы,  $\sigma_p$  – импульсное разрешение ДК (см. рисунок 6).

Для отобранных событий рассматривается функционал

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N \frac{(E_{mc}(\theta_n, \phi_n) - \sum E_i^n k_i - E_{CsI}^n)^2}{\sigma^2(\theta_n)}, \quad (3)$$

где  $n$  – номер события,  $i$  – номер элемента LXe калориметра,  $E_{mc}^n(\theta_n, \phi_n)$  – величина энергии, выделившейся в калориметре, определенная из моделирования для данной энергии пучков,  $E_i^n$  – энерговыделение в  $i$ -м элементе LXe калориметра,  $E_{CsI}^n$  – величина энерговыделения в CsI калориметре,  $\sigma(\theta)$  – энергетическое разрешение составного калориметра как функция полярного угла  $\theta$ . Суммирование по индексу  $i$  подразумевает суммирование по всем башням LXe калориметра, которые принадлежат кластеру энерговыделения зарегистрированной частицы. Зависимости  $E_{mc}(\theta, \phi)$  и  $\sigma(\theta)$  определялись из моделирования событий

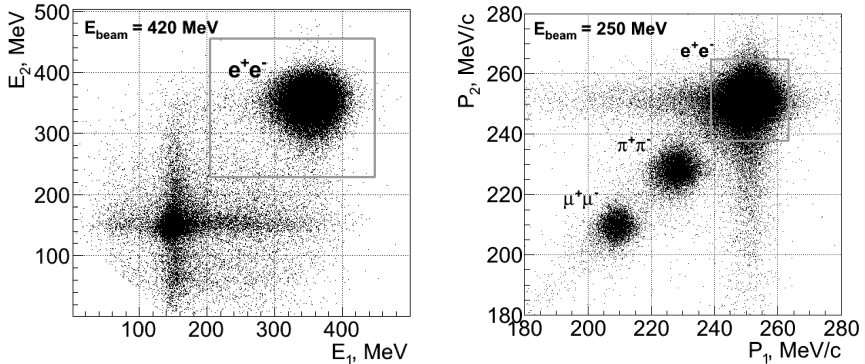


Рис. 6. Распределение по величине энергии кластеров при энергии пучков равной 420 МэВ (слева) и распределение по величинам импульсов треков при энергии пучков равной 250 МэВ (справа). Квадраты на рисунках показывают критерии отбора событий.

$e^+e^-$ -рассеяния. Требование минимума функционала  $\chi^2$  приводит к системе линейных уравнений:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial k_i} = 0 \Rightarrow \sum_j k_j Q_{ij} = R_i, \quad (4)$$

где

$$Q_{ij} = \sum_{n=1}^N \frac{E_i^n E_j^n}{\sigma^2}, R_i = \sum_{n=1}^N \frac{E_i^n (E_{mc}^n - E_{CsI}^n)}{\sigma^2}, \quad (5)$$

Решение данной системы относительно коэффициентов  $k_i$  дает искомые коэффициенты

$$k_i = \sum_j R_j (Q^{-1})_{ij} \quad (6)$$

**Пятая глава** посвящена процедурам восстановления кинематических параметров фотонов. Параметрами, измеряемыми калориметром, являются величина энергии, выделенной в калориметре, и координаты кластера энерговыделения. Измеренные величины имеют систематическое отличие от истинных кинематических параметров фотонов (энергии и углов вылета из области взаимодействия пучков). Измеренная величина выделившейся энергии меньше чем истинная энергия фотона вследствие

утечек ливня и энергопотерь в пассивном веществе между жидкоксенонным и CsI калориметрами. Также координаты, измеренные калориметром, имеют систематическое смещение относительно истинных координат фотона. Величина этой сдвижки достаточно мала в случае, если координаты были определены с использованием информации с полосковых электродов жидкоксенонного калориметра. Если координаты кластера были определены как центр тяжести элементов, принадлежащих кластеру поправка будет более существенной. Поправки к энергии, учитывающие утечки ливня и потери энергии в пассивном величине, а также поправки к координатам кластера были определены из моделирования.

Для определения начальной энергии фотона необходимо определить некоторую функцию  $\Phi(E_{dep}, \theta, \phi)$ , такую что:

$$\langle \Phi \rangle = E_\gamma. \quad (7)$$

Поскольку среднее энерговыделение фотонов в калориметре является функцией начальной энергии фотона  $E_\gamma$  и координат его входа в калориметр

$$\langle E_{dep} \rangle = f(E_\gamma, \theta, \phi), \quad (8)$$

то в качестве начального приближения для определения истинной энергии фотона можно использовать функцию, обратную  $f(E_{dep}, \theta, \phi)$ :

$$\Phi = f^{-1}(E_{dep}, \theta, \phi), \quad (9)$$

Функция  $f(E_\gamma, \theta, \phi)$  определяется из моделирования методом Моте-Карло. Для этого было проведено моделирование событий с одним фотоном, вылетающим из начала координат, в диапазоне энергий от 0 до 1000 МэВ. Энергетический диапазон разбит на 100 точек по энергии, для каждого значения энергии  $E_i$  была определена функция  $f_i(E_i, \theta, \phi)$ . На рисунке 7 представлена зависимость отношения средней величины выделенной энергии к начальной энергии фотона от угла  $\theta$  для различных значений истинной энергии фотона. Данное распределение аппроксимировалось гладкой функцией и из аппроксимации определялись параметры функций  $f_i$ . Диапазон углов  $\Theta$  от 0.3 до 2.9 радиан разбивался на 200 точек  $\theta_j$  и для каждой пары значений  $E_i, \theta_j$  табулировалась величина  $E_{ij}^{dep} = f_{ij} = f(E_i, \theta_j)$ . Таким образом, по измеренной величине энергии, выделенной в калориметре, энергия фотона определяется как  $E_\gamma = f^{-1}(E_{dep}, \theta, \phi)$  методом линейной аппроксимации между ближайшими табулированными значениями.

Как показало моделирование, вычисленная таким образом энергия удовлетворяет условию (7). На рисунке 8 представлено разрешение по

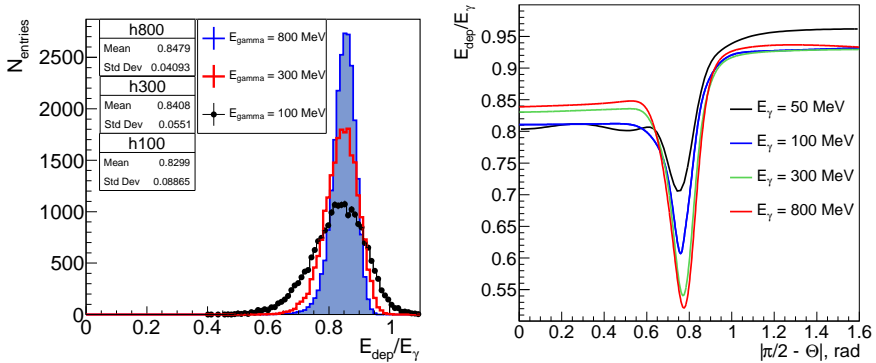


Рис. 7. Распределение отношения выделенной энергии к истинной энергии фотона в моделировании (слева). Характерный вид энергосвыделения как функции полярного угла для различных значений энергии фотона

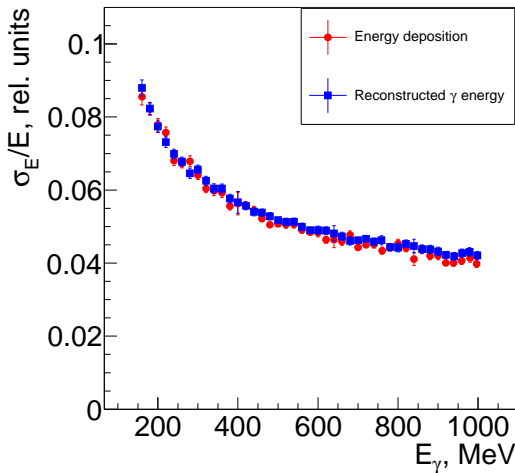


Рис. 8. Разрешение по величине выделенной энергии и разрешение по величине восстановленной энергии фотона в зависимости от его истинной энергии в моделировании

величине выделенной энергии и по величине восстановленной энергии фотона в зависимости от его начальной энергии, полученное в моделировании. Как видно из представленных графиков, алгоритм восстано-

ления энергии фотона не ухудшает энергетического разрешения.

Описанная выше процедура восстановления энергии фотонов тестировалась на экспериментальных данных процесса  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ . По обработанным данным была определена дополнительная экспериментальная поправка к измеренной энергии фотона.

**В заключении** перечислены основные результаты:

- За три года набора экспериментальных данных с детектором КМД-3 с 2010 по 2013 год калориметр на основе кристаллов CsI продемонстрировал хорошие параметры. Были разработаны процедуры мониторинга работоспособности и стабильности каналов калориметра. Стабильность отклика электроники калориметра составила не хуже 1%.
- Разработана процедура независимой от других подсистем детектора энергетической калибровки CsI калориметра с помощью космических частиц в специальных космических заходах, обеспечивающая точность определения калибровочных коэффициентов на уровне 3-5%.
- Разработана процедура совместной калибровки жидкокислородного и CsI калориметров с помощью космических частиц по данным, записанным в экспериментальных заходах, с использованием треков частиц, восстановленным в жидкокислородном калориметре. Погрешность определения калибровочных коэффициентов составила не хуже 2% для жидкокислородного калориметра и не хуже 3% для CsI калориметра.
- Разработана процедура калибровки каналов цилиндрического калориметра по событиям упругого  $e^+e^-$ -рассеяния. Погрешность определения калибровочных коэффициентов составила около 1.5%.
- Разработаны процедуры реконструкции фотонов и восстановления их кинематических параметров. Энергетическое разрешение для фотонов в эксперименте составило  $\sigma_E/E = \frac{0.036}{\sqrt{E/GeV}} \oplus 0.027$ , что близко к разрешению в моделировании, которое составило  $\sigma_E/E = \frac{0.034}{\sqrt{E/GeV}} \oplus 0.020$ .

**Основные результаты диссертации** опубликованы в работах:

1. А.В.Анисёнков, В. М. Аульченко,..., В. Е. Шебалин и др., Статус жидкоксенонового калориметра детектора КМД-3, Ядерная физика и инжиниринг, 2013, том 4, №9-10, с. 883-889
2. A.V.Anisyonkov, V.M.Aulchenko, ..., V.E.Shebalin et al, Barrel calorimeter of the CMD-3 detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 732 (2013) 463-465.
3. V.E. Shebalin et al., Combined Liquid Xenon and crystal CsI calorimeter of the CMD-3 detector, 2014 JINST 9 C10013.
4. A.V. Anisenkov, V.M. Aulchenko et al., Status of the Liquid Xenon calorimeter of the CMD-3 detector, 2014 JINST 9 C08024.
5. В.Е. Шебалин и др., Цилиндрический калориметр детектора КМД-3, Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, N 9-10 с. 839-846 (МСК СЯФ 2014).
6. V.E. Shebalin et al., CsI calorimeter of the CMD-3 detector, 2015 JINST 10 P10006.



ШЕБАЛИН Василий Евгеньевич

**Реконструкция фотонов и энергетическая калибровка  
цилиндрического калориметра детектора КМД-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 16.04.2015 г.

Подписано к печати 16.04.2015 г.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

---

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