

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
им. А. И. Алиханова

На правах рукописи

Прокудин Михаил Сергеевич

Исследование характеристик
слоёных сцинтилляционных калориметров
для эксперимента LHCb

Специальность 01.04.23 — физика высоких энергий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008 г.

УДК 539.1.074.3+535.319

Работа выполнена в ГНЦ РФ «Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» г.Москва

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук А. И. Голутвин
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук В. Б. Гаврилов
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

кандидат физ.-мат. наук А. П. Ивашкин
(ИЯИ РАН, г. Троицк)

Ведущая организация: ГНЦ РФ ИФВЭ
(г. Протвино)

Защита диссертации состоится 23 декабря 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25, конференц-зал института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан 21 ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

В. В. Васильев

1. Общая характеристика работы

В диссертации систематически изучается неоднородность отклика калориметрических модулей типа «шашлык» в зависимости от толщины и поперечных размеров сцинтилляционных пластин. Данные, полученные в ходе измерений, выполненных в 2002—2004 годах на пучке заряженных частиц ускорителя SPS в CERN, сопоставляются с результатами моделирования, выполненного по разработанному автором оригинальному методу. В работе приведены результаты измерений энергетического разрешения и световыхода модулей калориметра LHCb и прототипа калориметрического модуля с пластинами свинца и сцинтиллятора толщиной 0.5 мм. Также описана процедура контроля качества модулей калориметра LHCb на всех стадиях производства: от проверки соответствия параметров исходных материалов заданным до измерений световыхода готовых модулей на стенде с использованием космических частиц.

1.1. Актуальность темы диссертации

Калориметры типа «шашлык» доказали свою применимость в физике высоких энергий из-за своей относительно невысокой стоимости, высокой радиационной стойкости и возможности выбора на этапе проектирования как радиуса Мольера, так и стохастического члена в разрешении. Создание калориметров с высоким разрешением и малым радиусом Мольера предполагает использование тонких пластин поглотителя и сцинтиллятора. Однородность и эффективность светосбора в тонких пластинах сцинтиллятора, во-первых, много ниже чем в толстых, во-вторых, мало изучена из-за недостатка как экспериментальных данных, так и методов моделирования.

Поэтому, для дальнейшего улучшения энергетического разрешения калориметров типа «шашлык» с малым радиусом Мольера необходимо:

- 1) измерить на пучке частиц неоднородность отклика калориметрических модулей;
- 2) создать оптическую модель сцинтилляционной пластины и определить её важнейшие параметры;
- 3) с помощью созданной модели рассчитать неоднородность светосбора;

4) с использованием полученных карт неоднородности светосбора и измеренных карт вариации толщины предсказать неоднородность отклика модулей к мюонам и электронам, например, с помощью библиотек GEANT;

5) получить путём сравнения с экспериментальными данными значения оптических параметров и проверить их совпадение между собой в нескольких измерениях.

1.2. Цель диссертационной работы

Создание и проверка метода моделирования неоднородности отклика калориметрических модулей типа «шашлык».

1.3. Научная новизна

1. Систематически измерена неоднородность отклика калориметрических модулей типа «шашлык» в зависимости от поперечных размеров использованных сцинтилляционных пластин, их толщины и типа налетающей частицы.

2. Создан метод моделирования неоднородности отклика калориметрических модулей типа «шашлык».

3. Проверена работоспособность и измерены характеристики прототипа калориметрического модуля с пластинами свинца и сцинтиллятора толщиной 0.5 мм.

1.4. Результаты, выносимые на защиту

1. Измерение неоднородности отклика модулей калориметра ЛНСб и прототипа модуля с пластинами свинца и сцинтиллятора толщиной 0.5 мм;

2. Оригинальный метод моделирования процессов светосбора в сцинтилляционных пластинах калориметра;

3. Оригинальный метод моделирования неоднородностей отклика модулей калориметра типа «шашлык», учитывающий вариации эффективности светосбора и толщины сцинтилляционных пластин калориметра.

1.5. Апробация работы и публикации

Основные материалы работы опубликованы в [1–4]. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на совещаниях международных коллабораций LHCb и CBM, а также международных конференциях INSTR08 и CALOR2008.

1.6. Личный вклад диссертанта

Автор участвовал в наборе экспериментальных данных на пучке X7B в CERN и обработке полученных данных. Им была осуществлена обработка всех экспериментальных данных по неоднородности отклика калориметра и их сравнение с результатами моделирования. Автором был создан метод моделирования неоднородности отклика калориметрических модулей типа «шашлык». Также автор участвовал в обработке данных, полученных в ходе проверки качества калориметрических модулей на стенде с использованием космических частиц.

1.7. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Её объем составляет 118 страниц, включая 71 рисунок и 9 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 61 наименования.

2. Краткое содержание диссертации

Во **введении** описывается актуальность проблемы, формулируется тема исследования и приводится план расположения материала.

Первая глава посвящена обзору электромагнитных калориметров и электромагнитных калориметров типа «шашлык» в частности. Приводится классификация, физические задачи, энергетическое разрешение и другие параметры. Показано, что в современной физике высоких энергий широкое распространение получили только три типа электромагнитных калориметров: кристаллические, калориметры на основе жидкого аргона и калориметры типа «шашлык». Основные усилия по улучшению всех типов калориметров направлены на улучшение однородности отклика по поверхности. В то время как для жидкоаргоновых и кристаллических калориметров, в силу особенностей их внутреннего устройства, эта проблема стала актуальной только

сейчас, для калориметров типа «шашлык» проблема однородности отклика была актуальна на протяжении всего их исторического развития от момента создания первых прототипов в 1978 году.

Вторая глава посвящена описанию ускорителя ЛНС, особенностей рождения прелестных частиц в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ и установки ЛНСб. Особое внимание уделено физическим задачам и требованиям к калориметрической системе ЛНСб и электромагнитному калориметру в частности. Приведены пути возможной модернизации электромагнитного калориметра исходя из его физических задач и условий эксперимента.

Ускоритель ЛНС или Большой Адронный Коллайдер (БАК) расположен в ЦЕРНе. В каждом из колец ЛНС планируется ускорять 2808 сгустков по 1.1×10^{11} протонов с энергией 7 ТэВ.

Детектор ЛНСб, предназначенный, главным образом, для изучения физики прелестных частиц, представляет собой одноплечевой передний спектрометр (см. рис. 1). Телесный угол детектора составляет примерно ± 300 мрад в горизонтальной плоскости $z - x$ и ± 200 мрад в вертикальной плоскости $z - y$, за вычетом узкого конуса с углом раствора ~ 10 мрад вдоль оси z .

Конструкция детектора ЛНСб оптимизирована для исследования распадов прелестных частиц, в частности особое внимание было уделено:

- 1) восстановлению вершин распада прелестных адронов и точности измерения времен распада прелестных частиц, что является важным при изучении $B_s^0 \bar{B}_s^0$ -осцилляций и асимметрий, зависящих от времени;
- 2) точному измерению импульсов и инвариантных масс, которые важны для подавления комбинаторных фоновых событий;
- 3) эффективной системе идентификации частиц, важной для устранения опасных источников коррелированного фона;
- 4) эффективности триггерной системы.

Восстановление треков заряженных частиц и измерение их импульсов производится в трековой системе, состоящей из высокоточного вершинного кремниевое детектора VELO, станций триггерного трекового детектора ТТ и трех станций основной трековой системы. Вершинный детектор VELO состоит из 21 станции, помещённых внутрь вакуумного объёма, интегрированного с вакуумной камерой ускорителя ЛНС. Две станции триггерного трекера в совокупности представляют собой четыре плоскости высокоточных кремниевых детекторов толщиной 300 мкм. Дипольный магнит открытой геометрии,

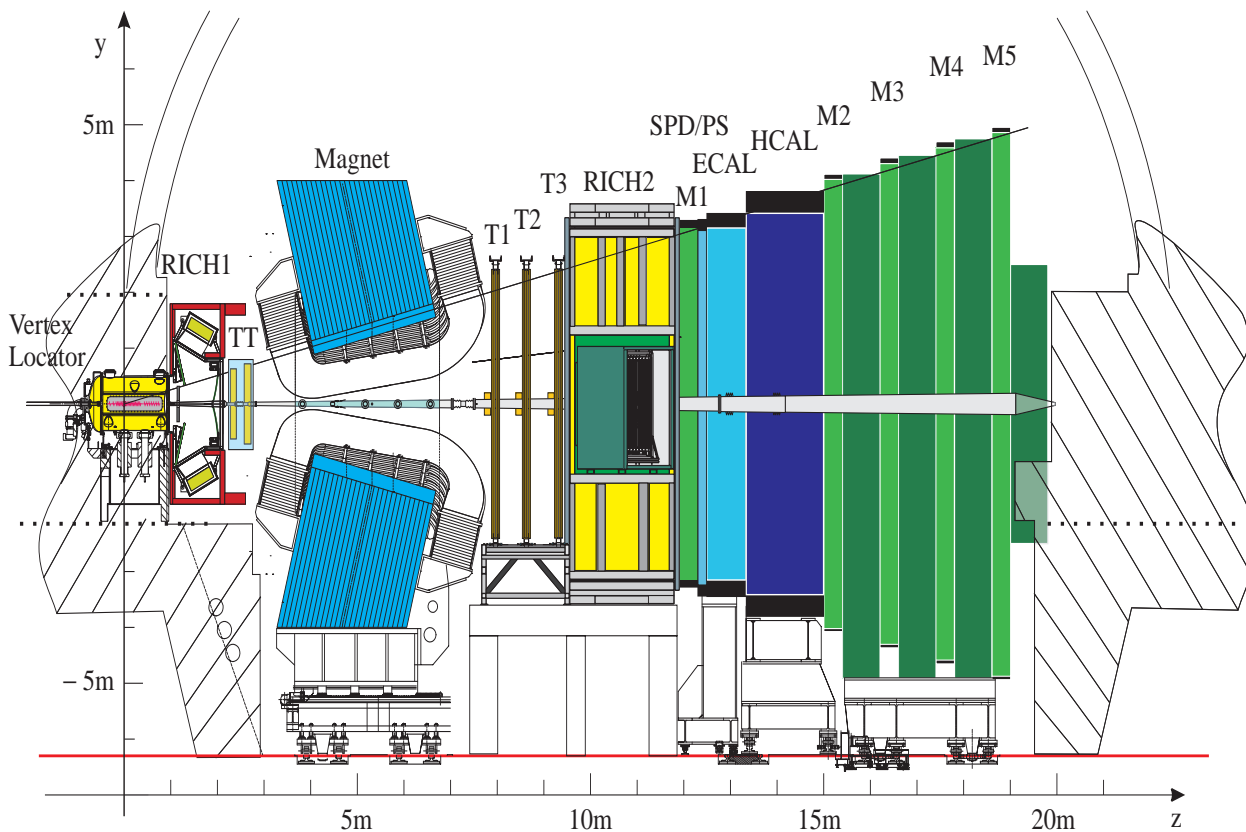


Рис. 1. Детектор LHCb: Vertex Locator – высокоточный кремниевый вершинный детектор, RICH1 и RICH2 – черенковские счетчики, ТТ – станции триггерного трекера, дипольный магнит, Т1-Т3 – станции основной трекерной системы, RS/SPD, ECAL, HCAL – калориметрическая система, М1-М5 – мюонная система.

расположенный между детектором ТТ и основной трекерной системой, обеспечивает интеграл магнитного поля ~ 4 Тм. Основная задача по измерению импульса заряженных частиц ложится на три станции основного трекера Т1-Т3, расположенные после дипольного магнита.

Каждая из станций основного трекера состоит из внутренней части IT, выполненной по технологии, аналогичной станциям ТТ, и внешней части, состоящей из модулей дрейфовых трубок. Детекторы черенковского излучения RICH1 и RICH2 предназначены для эффективного разделения K^\pm и π^\pm -мезонов в широком интервале импульсов от 2-3 ГэВ/с до 100 ГэВ/с. Мюонная система состоит из пяти станций М1-М5. Первая станция расположена перед калориметрической системой, остальные — за калориметрической системой и прослоены слоями железного фильтра.

Калориметрическая система состоит из сцинтилляционных счетчиков SPD, предливневого детектора PRS, электромагнитного и адронного калориметров в проективной геометрии. Основные характеристики калориметрической системы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики калориметрической системы.

	SPD/PRS	ECAL	HCAL
число каналов	2×6016	6016	1468
ху-размер	6.2×7.6 м ²	6.3×7.8 м ²	6.8×8.4 м ²
z-глубина	180 мм 2X ₀ , 0.1λ _I	816 мм 25X ₀ , 1.1λ _I	1655 мм 5.6λ _I
характеристики	20-30ph.e/m.i.p	$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$	$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{80\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\%$
динамический диапазон	0-100 m.i.p. 1(10) бит	E _T : 0-10 ГэВ 12 бит	E _T : 0-10 ГэВ 12 бит

В третьей главе описана конструкция электромагнитного калориметра LHCb, процесс сборки из отдельных модулей, конструкция мониторинговой системы на основе светодиодов и PIN-диодов. Также приводится детальное описание отдельных калориметрических модулей, процесса их сборки и процедуры контроля качества при их производстве, начиная от контроля качества входящих материалов до измерения готовых модулей на стенде с использованием космических мюонов. Измерение на стенде с использованием космических мюонов позволило не только отбраковывать модули, но и измерить их световыход.

Параметры калориметра приведены в табл. 2, а его структура с разбиением на секции на рис. 2.

Таблица 2. Основные параметры электромагнитного калориметра ЛНСб.

Технология	«Шашлык»
Сцинтиллятор	PSM – 115 \oplus 2.5%p – terphenil \oplus 0.01%POPOP
Поглотитель	Свинец
Отношение объёмов (свинец:сцинтиллятор)	2 : 4
Радиус Мольера	3.5 см
Радиационная длина	1.64 см
Полная длина	42 см(25 X_0)

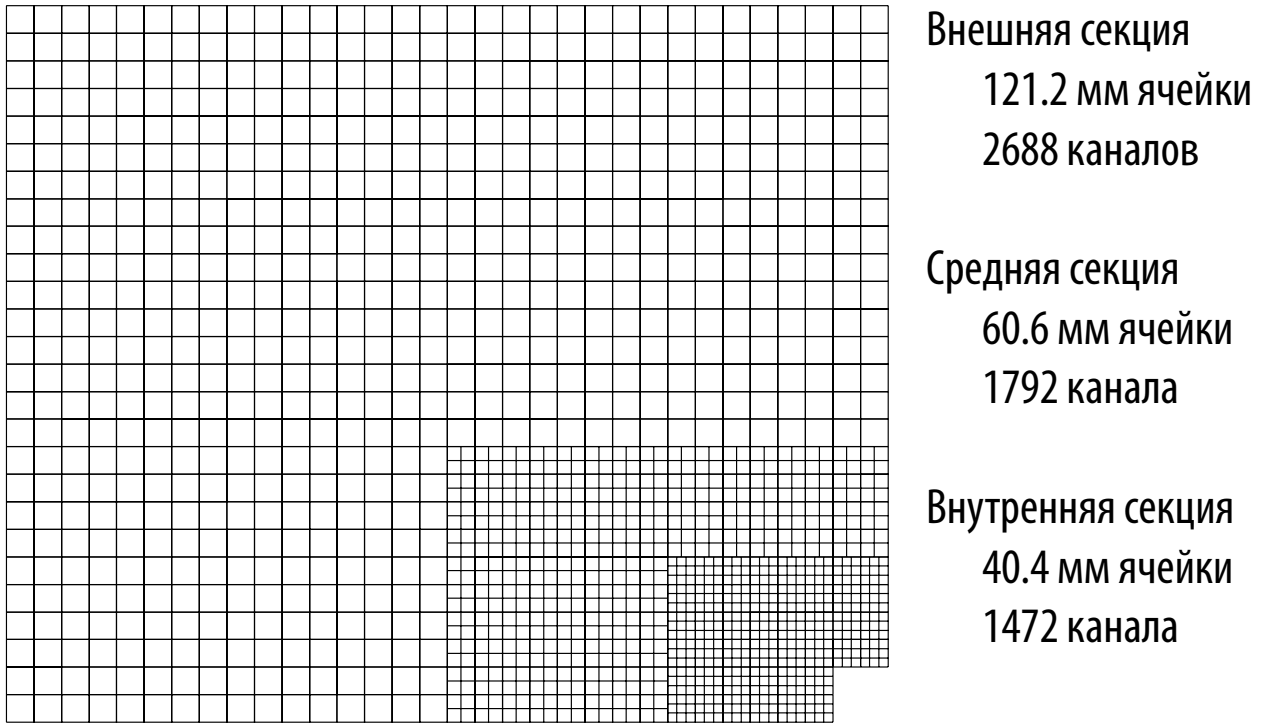


Рис. 2. Структура электромагнитного калориметра ЛНСб. Показан левый верхний квадрант.

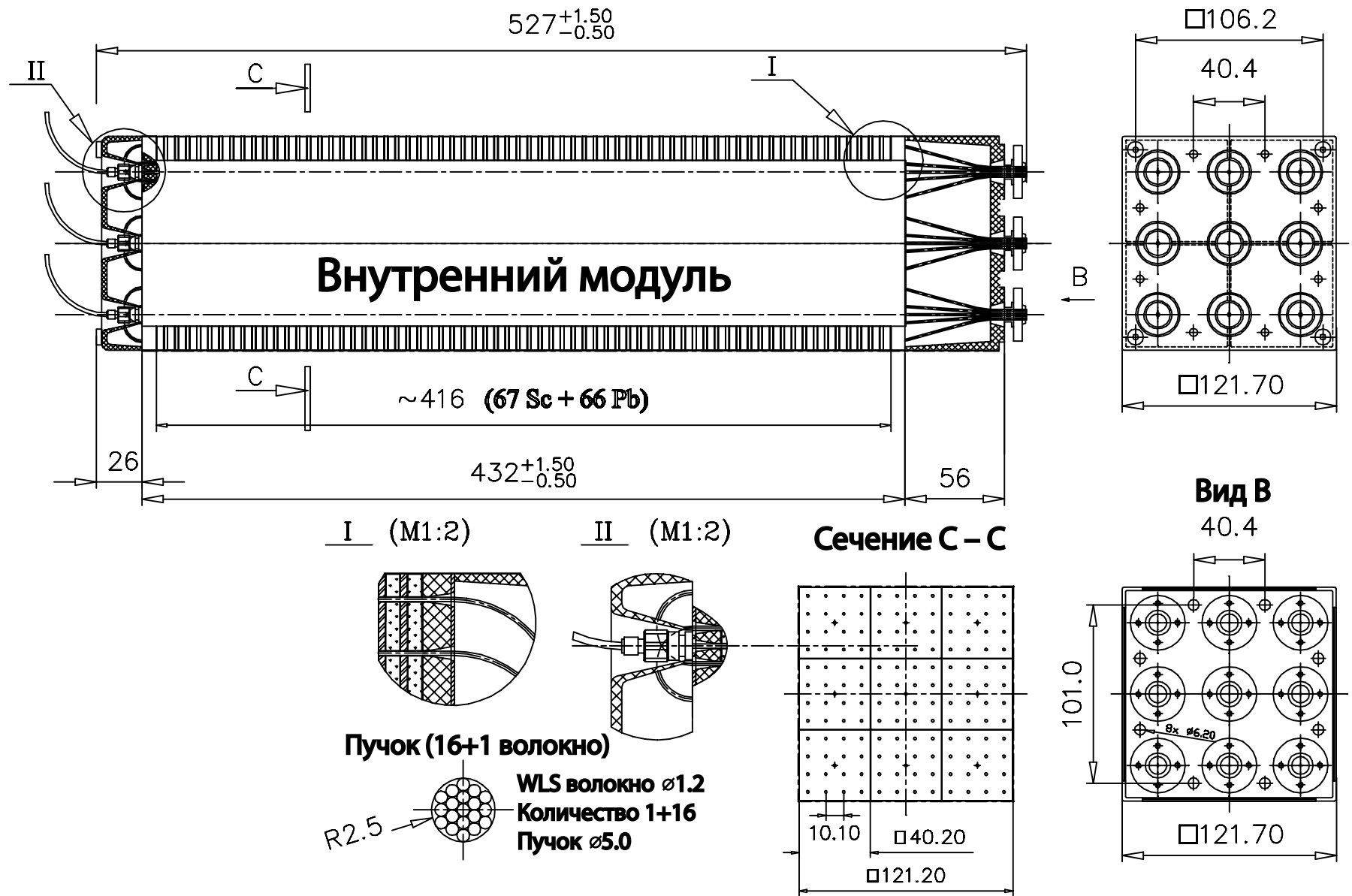


Рис. 3. Чертёж внутреннего модуля калориметра ЛНСь.

Поперечный размер модуля электромагнитного калориметра ЛНСб составляет 121.2×121.2 мм². Модуль (см. рис. 3) состоит из чередующихся слоев свинца толщиной 2 мм и сцинтиллятора толщиной 4 мм. Между слоями свинца и сцинтиллятора проложены тонкие слои специальной белой бумаги — тайвека (DuPont Tyvek®) толщиной 0.12 мм для предотвращения образования оптического контакта между свинцом и сцинтиллятором и обеспечения диффузного отражения покинувшего сцинтиллятор света. Набор слоев свинца и сцинтиллятора помещён между двумя стальными пластинами толщиной 1 мм. К торцам этих пластин приварены четыре стальных ленты толщиной 0.10 мм, которые обеспечивают механическую прочность модуля. Сцинтилляционные пластины средних и внутренних модулей калориметра ЛНСб разделены соответственно на 4 и 9 светоизолированных ячеек одинакового размера. Размер ячейки составляет 60.4×60.4 мм² для среднего модуля и 40.2×40.2 мм² для внутреннего. Белое, диффузно отражающее покрытие, нанесено на торцы и тонкую кайму у краёв сцинтилляционной пластины.

В модуле сделаны сквозные отверстия для прокладки спектросмещающих волокон Y11 производства компании Kuraray. Спектросмещающие волокна размещались в узлах квадратной сетки с 15 мм ячейками для внешних модулей калориметра ЛНСб и 10 мм ячейками для внутренних и средних модулей калориметра ЛНСб. Внешний модуль пронизан 64 спектросмещающими волокнами, средний — 36 волокнами на каждую из четырёх светоизолированных ячеек, а внутренний — 16 волокнами на каждую из девяти светоизолированных ячеек. В центре каждой светоизолированной ячейки предусмотрены отверстия под прозрачное волокно, предназначенное для транспортировки света от световодов мониторинговой системы к фотоумножителям калориметрических ячеек. С обратной стороны модуля все волокна одной ячейки собраны в пучки. Торцы волокон в каждом пучке отполированы. Свет из пучка волокон попадает в смеситель света, используемый для уменьшения систематических эффектов, связанных со значительной (до 20%) неоднородностью отклика фотоумножителя по поверхности фотокатода.

Световой сигнал считывается фотоумножителем Hamamatsu R7899-20. Каждый фотоумножитель находится в защитном экране из пермалоя и железа для устранения влияния магнитных полей и присоединён к умножителю напряжения Кокрофт-Волтона.

В дополнение к модулям, уже используемым в электромагнитном калориметре ЛНСб, также был изготовлен прототип модуля с улучшенной сег-

ментацией (далее в тексте — экспериментальный модуль). Прототип состоит из 280 слоев свинца толщиной 0.5 мм и 280 слоев сцинтиллятора толщиной 0.5 мм. Края использованных в экспериментальном модуле пластин сцинтиллятора не имеют каймы диффузного покрытия (из-за трудностей с химическим травлением тонких пластин сцинтиллятора). В остальном конструкция экспериментального модуля аналогична конструкции внутреннего модуля калориметра ЛНСб.

Таблица 3. Геометрические параметры внешнего, среднего, внутреннего и экспериментального модулей.

Параметр	внешний	средний	внутренний	экспериментальный
Количество слоев (свинец/сцинтиллятор)	66/67	66/67	66/67	280/280
Толщина слоя, мм (свинец/сцинтиллятор)	2/4	2/4	2/4	0.5/0.5
Размер ячейки, мм ²	121.2 × 121.2	60.4 × 60.4	40.2 × 40.2	40.2 × 40.2
Количество ячеек на модуль	1	4	9	9
Количество спектросмещающих волокон в ячейке	64	36	16	16
Расстояние между спектросмещающими волокнами, мм	15.25	10.10	10.10	10.10

Геометрические параметры всех модулей калориметра ЛНСб, а также экспериментального модуля, приведены в табл. 3.

Важной частью процедуры контроля качества калориметрических модулей является измерение их световыхода на стенде с использованием космических частиц. Как известно из Монте-Карло моделирования и измерений на тестовом пучке, энергетический эквивалент наиболее вероятного энерговыделения от минимально ионизирующей частицы в модулях калориметра ЛНСб составляет 0.33 ГэВ. С помощью этой информации были вычислены средние световыходы модулей всех трёх секций калориметра. Для каждой

ячейки число фотоэлектронов может быть вычислено как

$$N_{ph.e.}(LED) = \left(\frac{A_{LED}}{\sigma_{LED}} \right)^2,$$

где A_{LED} и σ_{LED} выражаются в каналах АЦП. Тогда абсолютный световыход

$$N_{ph.e.}/\text{ГэВ} = N_{ph.e.}(MIP)/0.33 \text{ ГэВ} = \frac{A_{MIP} \times A_{LED}}{\sigma_{LED}^2 \times 0.33 \text{ ГэВ}},$$

где A_{MIP} — амплитуда отклика от минимально ионизирующей частицы, выраженная в каналах АЦП. Измеренный световыход составляет в среднем 3100 фотоэлектронов/ГэВ для внутреннего модуля, 3500 — для среднего и 2600 — для внешнего.

В **четвёртой главе** приведены процедура и результаты пучковых измерений модулей калориметра ЛНСб и экспериментального модуля. Пучковые измерения модулей калориметра ЛНСб проводились в 2002 — 2004 годах на пучке X7В в CERN. В результате проведённых экспериментов

- 1) измерена неоднородность отклика по поверхности модулей калориметра ЛНСб с помощью высокоэнергичных мюонах и электронов;
- 2) измерено энергетическое разрешение калориметра;
- 3) испытан прототип светодиодной мониторинной системы;
- 4) измерен абсолютный световыход модулей разных секций калориметра;
- 5) проверена работоспособность и измерены характеристики экспериментального калориметрического модуля с пластинами свинца и сцинтиллятора толщиной 0.5 мм.

Измерения производилось на ускорителе SPS CERN на пучке вторичных частиц X7В. Для измерений использовались мюоны с энергией 100 ГэВ и электроны с энергией от 5 до 100 ГэВ. Поперечное сечение вторичных пучков составляло $10 \times 30 \text{ мм}^2$ для электронов и $30 \times 30 \text{ мм}^2$ для мюонов.

Калориметрическая сборка состояла из 9 модулей, собранных в матрицу 3×3 . Тестируемый модуль помещался в центр сборки, тогда как внешние модули использовались для контроля поперечных утечек энергии.

Для контроля стабильности работы тестовой калориметрической сборки использовалась мониторинная система, являющаяся прототипом мониторинной системы калориметра ЛНСб. В состав мониторинной системы входили два светодиода, один из которых использовался для засветки внешних модулей сборки, а второй — тестируемого модуля. Яркость световой вспышки светодиодов

контролировалась с помощью высокостабильного PIN-диода. Для поджига светодиодов использовался внешний генератор, последовательно запускавший светодиоды и систему считывания установки для контроля ширины и положения пьедесталов.

Экспериментальные условия на пучке вторичных частиц X7 характеризуются большими ($\sim 10^\circ\text{C}$ по амплитуде) вариациями температуры в течение суток, что предоставляет превосходную возможность для проверки работоспособности мониторинжной системы. Отклик калориметрической сборки к электронам с энергией 50 ГэВ измерялся в течение почти 24 часов (данные собирались в течение пяти минут раз в полчаса). Яркость световой вспышки светодиода в течение всего этого времени контролировалась как фотоумножителем, так и PIN-диодом. Положения максимумов функций Гаусса, аппроксимирующих распределения электронного сигнала, а также сигнала от светодиода, измеренного ФЭУ и PIN-диодом, нормированные к начальному моменту, показаны на рис. 4. Поправка к электронному сигналу была получена комбинированием двух независимых измерений яркости светодиодной вспышки. Поведение поправленного электронного сигнала также показано на рис. 4. Точность полученной поправки лучше чем 0.2%, что соответствует требованиям к мониторинжной системе.

Световыход калориметрических модулей измерялся при помощи мониторинжной системы. В случае малого (< 500) числа фотоэлектронов, ширина мониторингового сигнала определяется фотостатистикой, то есть флуктуациями от вспышки к вспышке количества фотоэлектронов, рождённых на фотокатодном умножителе. Тогда среднее количество фотоэлектронов может быть рассчитано по формуле (без учёта дисперсии усиления диодной системы)

$$N_{LED} = \left(\frac{A_{LED}}{\sigma_{LED}} \right)^2,$$

где A_{LED} — измеренная амплитуда сигнала от светодиода, а σ_{LED} — его Гауссова ширина. Из ширины сигнала светодиода была квадратично вычтена ширина пьедестала. Любая систематическая ошибка может вызвать только уширение сигнала, что приведёт к недооценке световыхода, поэтому для каждого модуля была проведена серия измерений с разной амплитудой поджига светодиода. Было показано, что в определённом диапазоне амплитуд отношение полученного числа фотоэлектронов к амплитуде сигнала не зависит от амплитуды поджига светодиода и имеет максимальное значение.

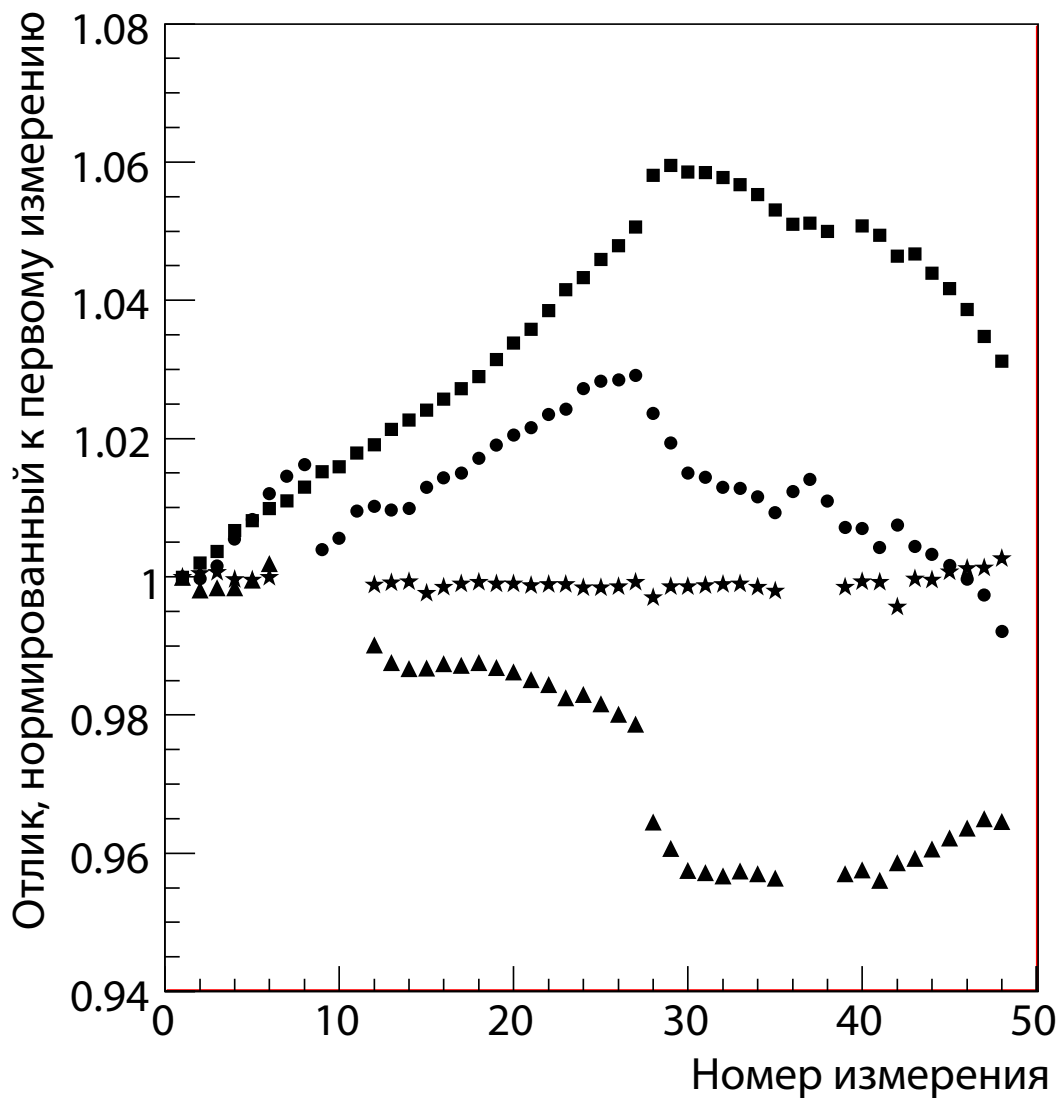


Рис. 4. Эксплуатационные качества мониторинг системы. Данные собирались в течение 22 часов. Квадратики — яркость светодиодной вспышки, измеренная PIN-диодом; кружочки — яркость светодиодной вспышки измеренная ФЭУ; треугольники — сигнал от электрона с энергией 50 ГэВ; звёздочки — электронный сигнал после поправки.

В табл. 4 приведены данные по световыходу для внешних, средних и внутренних модулей, полученные в ходе пучковых испытаний и на стенде с использованием космических мюонов. Как видно, данные, полученные в ходе пучковых измерений и на стенде с использованием космических мюонов, совпадают в пределах ошибок.

Таблица 4. Экспериментальные данные по световыходу калориметрических модулей.

	внутренний	средний	внешний	экспериментальный
пучковые испытания	3000 ± 150	3600 ± 180	2500 ± 130	700 ± 60
космический стенд	3100 ± 130	3500 ± 170	2600 ± 120	нет измерения

Для получения энергетического разрешения измерялась относительная ширина отклика калориметрической сборки к электронам разных энергий. Собранный сигнал аппроксимировался функцией Гаусса.

Полученная зависимость от энергии аппроксимировалась функцией

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E},$$

где шумовой член (c) вычислялся как квадратичная сумма ширин пьедесталов всех задействованных каналов считывающей электроники сборки, нормированная на энергию налетающего электрона, и не являлся свободным параметром при аппроксимации. Измеренная зависимость относительной ширины отклика калориметрической сборки от энергии налетающей частицы для среднего модуля составляет

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(8.5 \pm 0.2\%)}{\sqrt{E}} \oplus (0.70 \pm 0.05\%) \oplus \frac{18\%}{E}.$$

Для изучения влияния неоднородности отклика калориметра по поверхности на энергетическое разрешение для внутреннего и внешнего модулей дополнительно был проведён отбор электронов по координате попадания в калориметр. В одном случае сигнал собирался в области, размеры которой определялись размером пучка ($\sim 10 \times 30 \text{ мм}^2$), в другом размер области был ограничен $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

Как видно, и для внешнего (см. рис. 5), и для внутреннего (см. рис. 6) модулей с возрастанием размера области сбора сигнала возрастает и постоянный член (b) в разрешении калориметра, в то время как стохастический (a) не меняется.

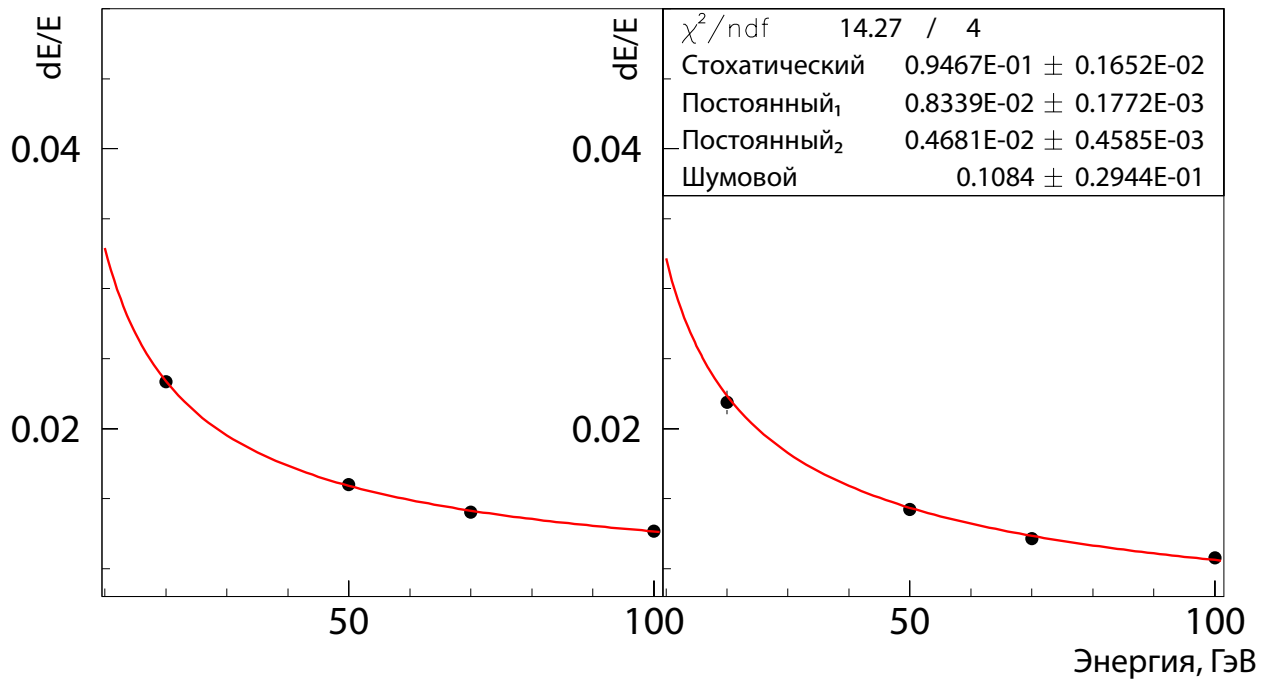


Рис. 5. Измеренное энергетическое разрешение модуля внешней секции калориметра LHCb. Совместная аппроксимация зависимости ширины электронного сигнала без отбора по координате (*слева*), и с отбором по координате (*справа*). Постоянный₁ соответствует постоянному члену измеренному (*b*) без отбора по координате, Постоянный₂ — с отбором.

Измеренная зависимость относительной ширины электронного сигнала от энергии налетающего электрона с отбором по координате для экспериментального модуля составляет

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(7.77 \pm 0.26\%)}{\sqrt{E}} \oplus (1.19 \pm 0.08\%) \oplus \frac{4.30\%}{E}.$$

Высокий постоянный член (*b*) в разрешении экспериментального модуля (даже после отбора входящих в калориметр электронов по координате) объясняется высокой, в сравнении с внутренним модулем (см. рис. 6), неоднородностью отклика экспериментального модуля по поверхности.

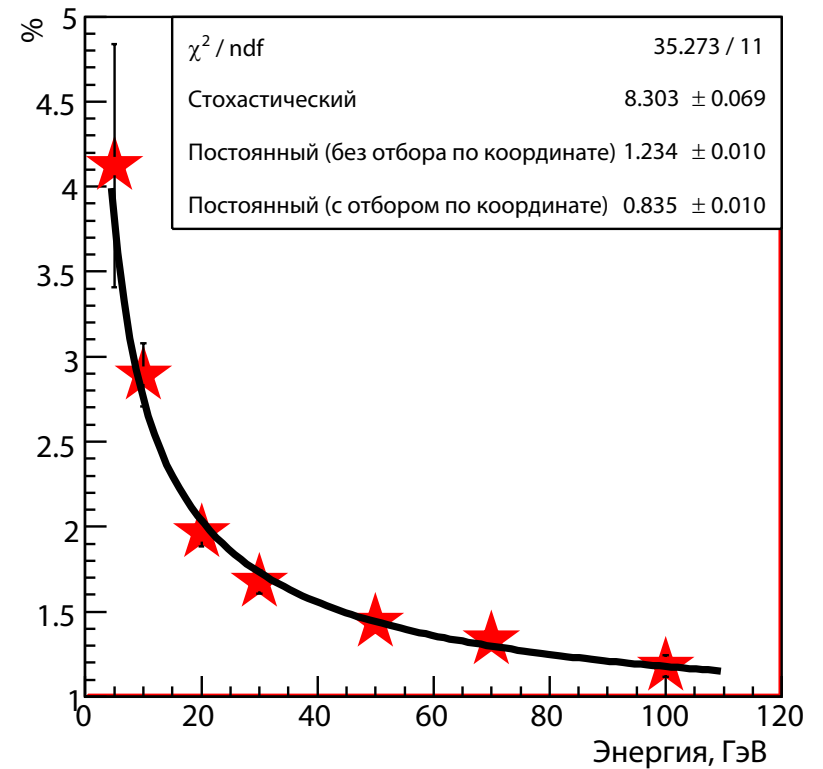
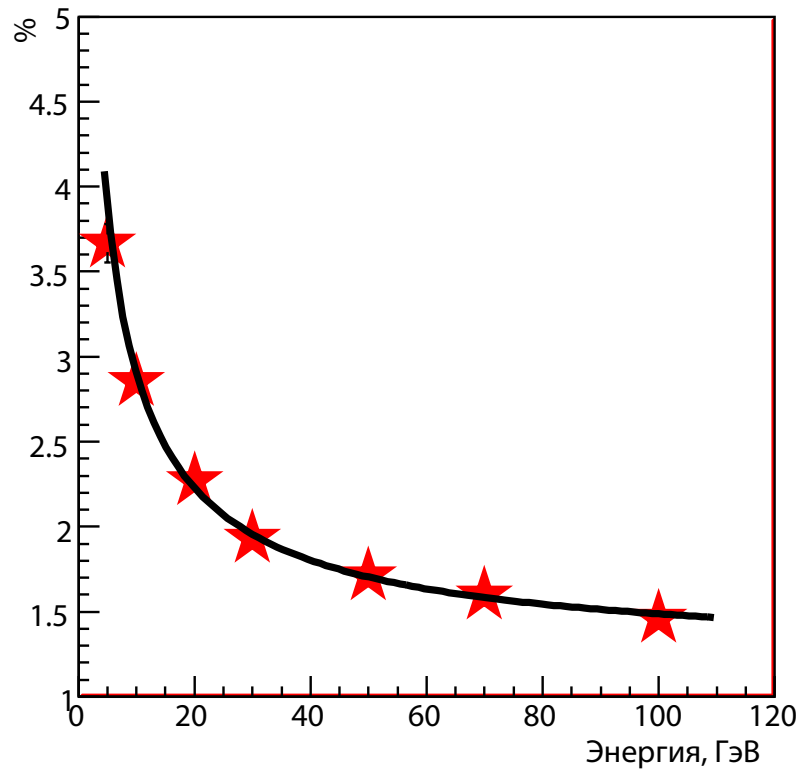


Рис. 6. Измеренное энергетическое разрешение модуля внутренней секции калориметра LHCb. Совместная аппроксимация зависимости ширины электронного сигнала без отбора по координате (*слева*), и с отбором по координате (*справа*). Шумы электроники предварительно вычтены.

При получении карты неоднородностей для мюонов исследовалась зависимость отклика калориметра от координаты точки входа мюона в калориметрическую ячейку. Мюонным сигналом называлось энерговыделение только в исследуемой ячейке. Поверхность исследуемой ячейки была разбита на квадратные области площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$, в каждой из которых было построено индивидуальное распределение мюонного сигнала. Полученные распределения сигнала аппроксимировались функцией Ландау. Положения максимумов полученных распределений помещались в двумерную гистограмму, которая и является картой неоднородности отклика калориметра для мюонов. Таким образом, были получены карты неоднородности для всех испытываемых модулей. Для внешнего модуля размер области сбора сигнала составил $1 \times 2 \text{ мм}^2$ в силу статистической ограниченности экспериментальных данных.

При проведении измерений с электронным пучком все модули сборки были предварительно откалиброваны на пучках электронов с энергией 100 и 20 ГэВ. Для получения карты неоднородности отклика калориметра использовались электроны с энергией 50 ГэВ. Электронным сигналом называлась сумма энергий, выделенная во всех ячейках центрального модуля сборки и четырёх внешних модулях, расположенных крестом относительно него. Утечки в угловые модули сборки пренебрежимо малы и поэтому не учитывались при подсчёте энергии. Поверхность исследуемой ячейки была разбита на квадратные области площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$, в каждой из которых было построено индивидуальное распределение электронного сигнала. Полученные распределения аппроксимировались распределением Гаусса. Положения максимумов полученных распределений помещались в двумерную гистограмму, которая является картой неоднородности отклика калориметра для электронов.

Пятая глава посвящена моделированию неоднородности отклика калориметра по поверхности. Созданная процедура моделирования неоднородности отклика калориметра состоит из моделирования процесса светосбора внутри сцинтилляционной пластины, прямого измерения вариации толщины сцинтилляционных пластин и симуляции на основе транспортного кода GEANT, детально учитывающей конструктивные особенности калориметрических модулей.

Для моделирования светосбора в сцинтилляционных пластинах калориметра была создана программа трассировки световых лучей. Она написана на языке C++ с минимальными зависимостями от внешних библиотек, что позволило интенсивно использовать для расчётов среду распределённых вы-

числений GRID. Для отладки программного комплекса использовалась возможность передачи промежуточных данных в программный пакет ROOT и последующая визуализация траектории фотона в сцинтилляционной пластине.

Программа учитывает преломление, диффузное и зеркальное отражение света, поглощение света в среде и на поверхности. Оптические параметры сред были заданы как функции длины волны фотона для моделирования дисперсии. В дополнение к этому, оптические параметры поверхностей зависели от локальных координат, что позволило моделировать различные световые маски, нанесённые на моделируемые поверхности, в частности, белое покрытие на краях и торцах сцинтилляционной пластины и локальные затемнения вблизи спектросмещающих волокон для описания отверстий в листах тайвека.

В программе математического моделирования геометрия сцинтилляционной пластины с волокнами и листами тайвека описана простыми геометрическими формами (цилиндр, прямоугольный параллелепипед и т.д.) и логическими операциями над ними. Так, например, сцинтилляционная пластина с отверстиями была смоделирована прямоугольным параллелепипедом с вычтенными из него цилиндрами. Для ускорения вычислений была применена процедура вокселизации.

Геометрическая модель сцинтилляционной пластины полностью соответствует реальной. Вероятность диффузного отражения от матового покрытия на торцах и краях пластины — один из основных параметров программы — зависит от длины волны падающего света. Полная вероятность диффузного отражения к тому же зависит от толщины и качества отражающего слоя. Для моделирования этой зависимости измеренная вероятность диффузного отражения умножалась на безразмерный коэффициент, называемый в дальнейшем качеством матового покрытия.

Верхняя и нижняя поверхности пластины, кроме каймы, прозрачны для фотонов с небольшой долей вероятности диффузного отражения и поглощения. Введение в оптическую модель процессов диффузного отражения и поглощения при пересечении фотоном прозрачных границ сцинтиллятора позволило эффективно моделировать различные дефекты на поверхности пластины. Численное значение суммарной вероятности диффузного отражения и поглощения, называемое в дальнейшем дефектностью поверхности сцинтиллятора, является другим важным параметром оптической модели.

Показатель преломления сцинтиллятора равен 1.58. Спектр излучения сцинтиллятора моделировали в соответствии с данными, предоставленными производителем. Сцинтилляционная пластина со спектросмещающими волокнами помещена между двух слоев белой бумаги — тайвек, в которой около каждого волокна сделаны чёрные вставки диаметром 2 мм.

Для получения карты неоднородности светосбора поверхность пластины была разбита на квадратные области 0.5×0.5 мм². Точка рождения фотонов по площади и глубине внутри каждой области разыгрывалась равномерно. Начальные направления фотонов при этом были распределены изотропно. Пересвечивание в спектросмещающих волокнах моделировалось путём разыгрывания нового направления для каждого фотона, поглощённого в сердцевине волокна. Если направление движения пересвеченного фотона позволяло ему пройти по волокну, испытывая полное внутреннее отражение, то такой фотон считался зарегистрированным. Внутри каждой квадратной области разыгрывалось 10^7 случаев рождения фотона.

GEANT-моделирование было проведено при помощи программного пакета `Geant4`, основанного на библиотеках ROOT. Геометрия и материалы установки задавалась при помощи стандартных процедур `TGeo`, что позволило использовать различные программные библиотеки транспортировки частиц и сравнивать результаты, полученные с их применением.

Для транспортировки частиц использовались GEANT3 и Geant4. Моделирование электромагнитных ливней требует большой точности, поэтому все пороги при моделировании были установлены в 10 кэВ для GEANT3 и 0.01 мм для Geant4.

Транспортировка большого числа частиц при сложной геометрии калориметрической сборки требует значительного количества процессорного времени. Чтобы исключить пересчёт для каждого нового набора параметров, энерговыделение в сцинтилляторе было просуммировано внутри каждой квадратной области 0.5×0.5 мм² по всем слоям калориметра и сохранено на диск отдельно для каждой частицы.

Для каждой частицы карта энерговыделения была свёрнута с картами толщин и эффективности светосбора. Полученное значение называлось откликом калориметра. Такая процедура позволяет получить только относительные изменения отклика прибора, но не его абсолютную величину, поскольку не учитывает энергию, выделенную в свинце, абсолютную величину световыхода пластика, затухание света в волокне и эффективность фото-

умножителя.

В **шестой главе** производится сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования и приводятся рекомендации по уменьшению неоднородности отклика калориметрических модулей типа «шашлык».

Для анализа результатов GEANT моделирования тестовой калориметрической сборки использовались алгоритмы, разработанные для обработки экспериментальных данных. Полученные модельные карты неоднородности отклика калориметра сравнивались с картами, полученными в ходе пучковых испытаний, для определения оптимальных параметров сцинтилляционной пластины. При этом модельные карты неоднородности отклика для каждого набора параметров умножались на нормировочный коэффициент n .

Отдельные линейки нормированной модельной карты неоднородности с наложенными экспериментальными данными для внутреннего модуля калориметра ЛНСб показаны на рис. 7. Верхние гистограммы соответствуют линейкам между волокнами, нижние — линейкам около волокон. Слева приведены данные для высокоэнергичных мюонов, справа — для электронов с энергией в 50 ГэВ. Видно, что модель хорошо описывает экспериментальные данные. Вариация отклика калориметра для электронов существенно меньше, чем для мюонов. В случае электрона неоднородности отклика калориметра эффективно усредняются по поверхности чувствительной ячейки в соответствии с поперечным профилем развития электромагнитного ливня. Большая ширина электромагнитного ливня также объясняет различия в поведении кривых отклика калориметра на краях сцинтилляционной пластины. В случае электронов часть энергии электромагнитного ливня теряется в «мёртвом» веществе между светоизолированными ячейками модуля. Эти потери компенсируются увеличенной эффективностью светосбора вблизи краёв пластинки из-за диффузного отражения света от покрытых белой краской каймы и торцов пластины. На нижних гистограммах чётко видны максимумы отклика прибора около спектросмещающих волокон. Для проверки моделирования карт неоднородности отклика внутреннего модуля к мюонам с энергией 100 ГэВ было также проведено с транспортным кодом Geant4. Полученные карты неоднородностей совпадают с результатами моделирования, выполненными с помощью транспортного кода GEANT3.

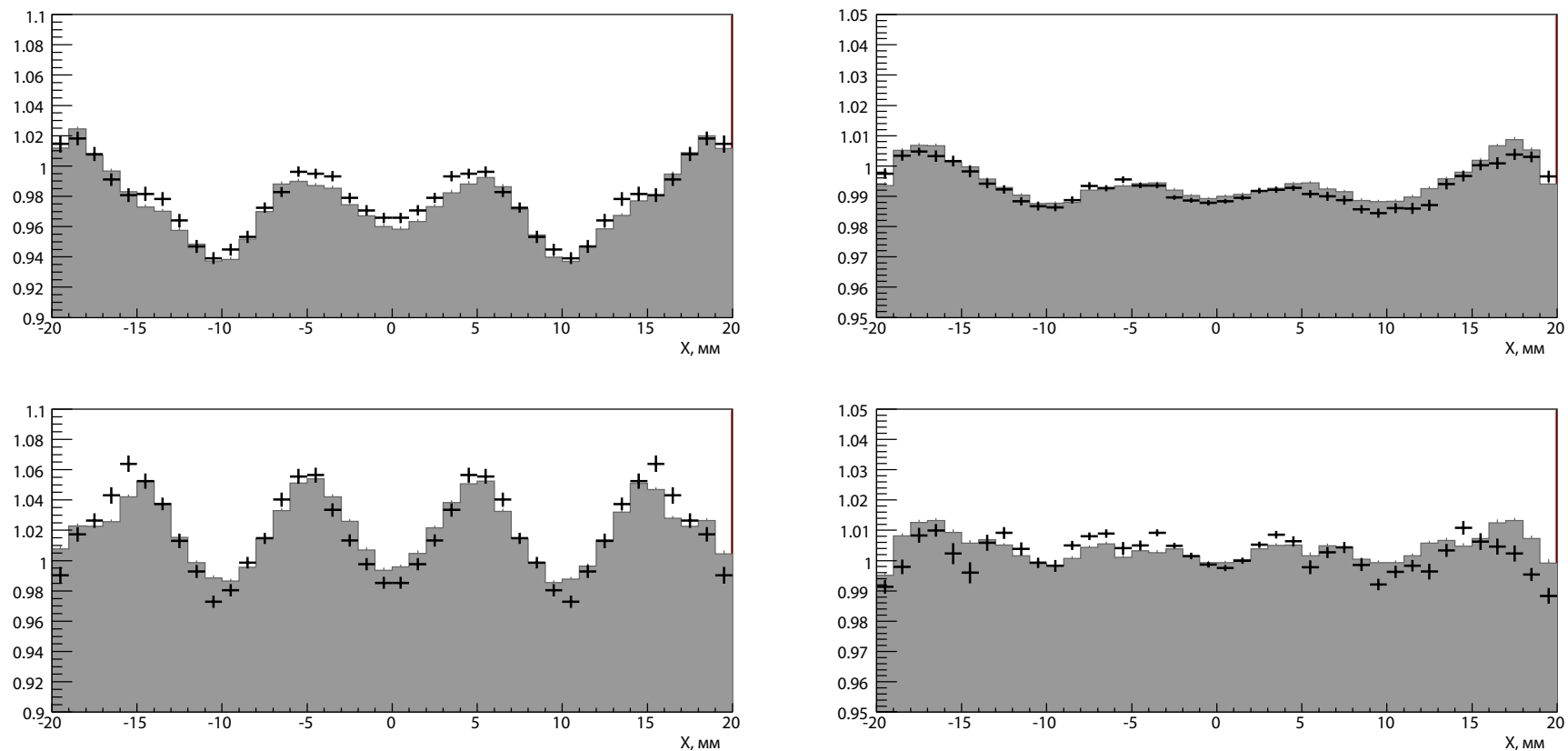


Рис. 7. Неравномерность отклика внутреннего модуля калориметра ЛНСб измеренная (чёрные крестики) и смоделированная (серая гистограмма) между волокнами (верхние распределения) и около волокон (нижние распределения). Слева представлены данные для мюонов, справа — для электронов.

Результаты моделирования и экспериментальные данные измерений с использованием высокоэнергичных мюонов внешнего модуля калориметра ЛНСб представлены на рис. 8. При наборе этих экспериментальных данных использовалось только две пропорциональные камеры, что не позволило исключить из анализа неточно восстановленные треки (во всех остальных измерениях использовалось три камеры). Поэтому кривая однородности светосбора, из-

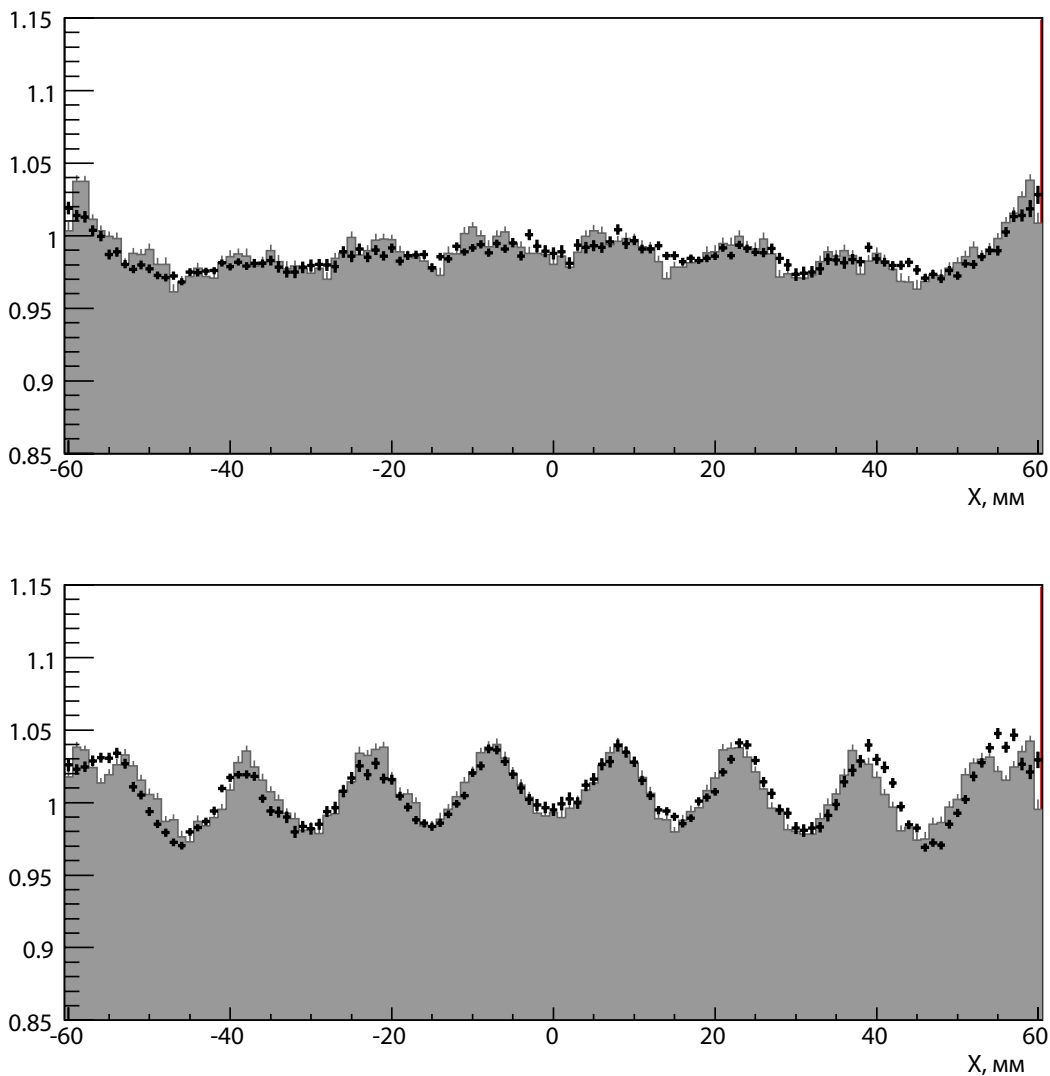


Рис. 8. Неравномерность отклика внешнего модуля калориметра ЛНСб, измененная на пучке мюонов. Экспериментальные данные обозначены чёрными крестиками, результаты моделирования — серая гистограмма. Линейка шириной 2 мм между волокон показана сверху, 2 мм линейка около волокон — снизу.

меренная с внешним модулем, испытывает дополнительное размытие из-за существенно менее точного определения координат точки входа частиц в калориметрический модуль. Указанное дополнительное размытие было также учтено при GEANT-моделировании отклика прибора. Верхняя гистограмма соответствует линейке между волокнами, нижняя — линейке около волокон.

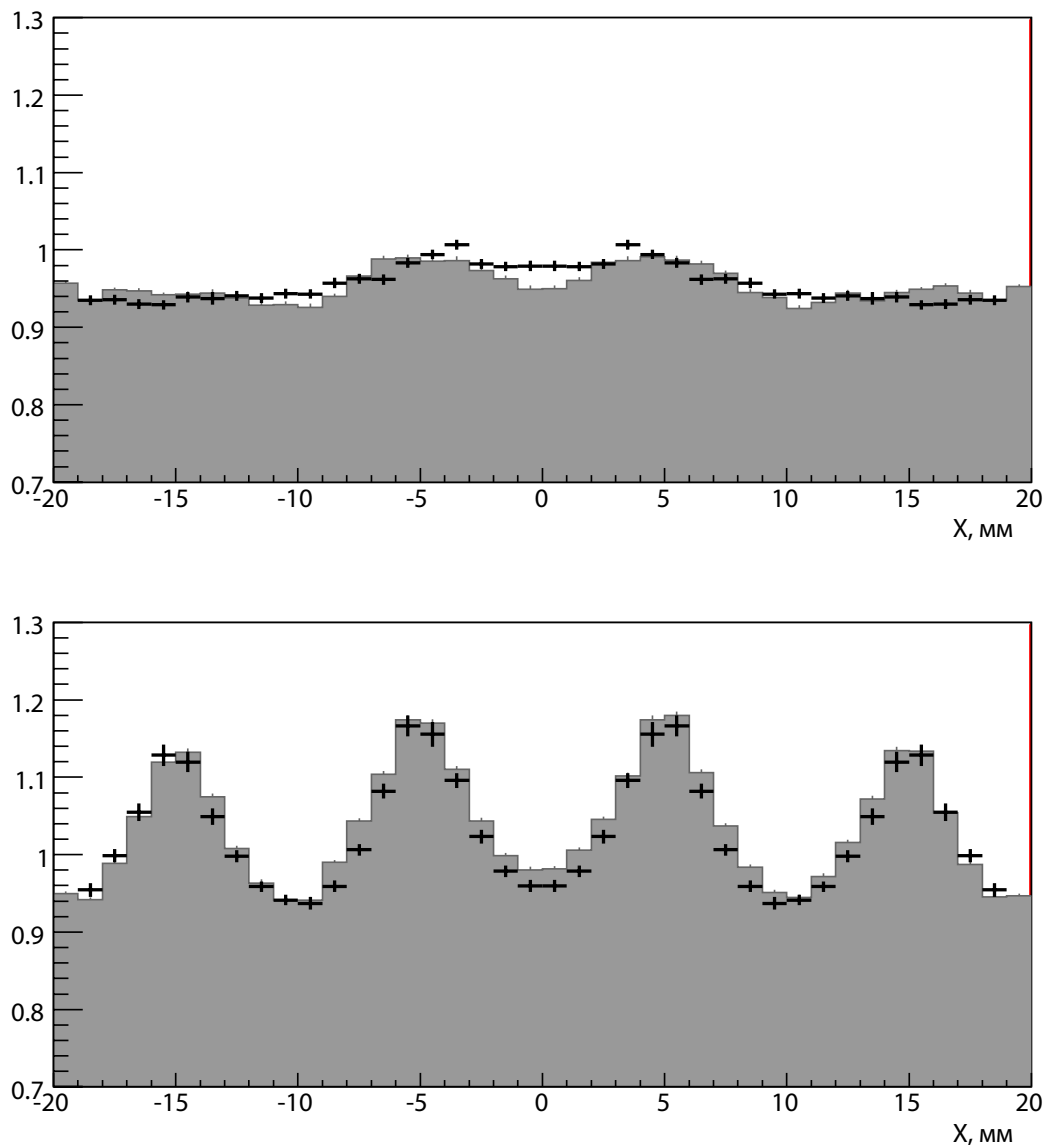


Рис. 9. Неравномерность отклика экспериментального модуля, измеренная на пучке мюонов. Экспериментальные данные обозначены чёрными крестиками, результаты моделирования — серая гистограмма. Линейка шириной 1 мм между волокон показана сверху, 1 мм линейка около волокон — снизу.

Увеличение неоднородности отклика внешнего модуля по сравнению с внутренним объясняется большим расстоянием между волокнами внешнего модуля (15 мм).

Отдельные линейки нормированной модельной карты неоднородности с наложенными экспериментальными данными для экспериментального модуля показаны на рис. 9. Резкое возрастание неоднородности отклика экспериментального модуля в сравнении с внутренним модулем калориметра ЛНСб вызвано малой толщиной сцинтилляционных пластин. Края сцинтилляционных пластин, использованных при сборке экспериментального модуля, не имели каймы белого матового покрытия, что объясняет отличное от модулей ЛНСб поведение отклика экспериментального модуля.

Для всех показанных распределений значение χ^2 (на степень свободы) находится в пределах 2 – 4, что объясняется индивидуальными особенностями измеренных модулей, учёт которых при моделировании крайне затруднителен и выходит за рамки данного исследования.

Таблица 5. Параметры модели сцинтилляционной пластины, извлечённые из сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными

	внутренний μ	внутренний e	внешний μ	экспериментальный μ
ширина каймы белого покрытия	1.0 ± 0.3 мм	1.5 ± 0.2 мм	1.0 ± 0.5 мм	0.0 ± 0.3 мм
качество белого покрытия	1.13 ± 0.02	1.14 ± 0.02	1.12 ± 0.02	1.13 ± 0.06
дефектность поверхности	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.004
доля пластин с минимальной толщиной > 3.6 мм	0.7 ± 0.1	0.75 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1

Была исследована зависимость неоднородности отклика калориметра от ширины каймы белого покрытия, его качества, качества поверхности сцинтиллятора, его показателя преломления, длины затухания в пластинах и др. Наибольшее влияние на результаты моделирования оказывают первые три параметра. Найденные значения ширины каймы белого покрытия и доли пластин с минимальной толщиной > 3.6 мм соответствуют результатам измерений параметров сцинтилляционных пластин калориметрического модуля

после его разборки.

Значения этих параметров, извлечённые из сравнения с экспериментальными данными, сведены в табл. 5. Варьирование оставшихся параметров в разумных пределах (так, например, для показателя преломления сцинтиллятора были проанализированы значения 1.48 – 1.58, а для длины затухания в пластине — 100 – 400 мм) не оказывают существенного влияния на однородность светосбора.

Таблица 6. Результаты моделирования и экспериментальные данные по световыходу калориметрических модулей

	внутренний	средний	внешний	экспериментальный
пучковые испытания	3000 ± 150	3600 ± 180	2500 ± 130	700 ± 60
космический стенд	3100 ± 130	3500 ± 170	2600 ± 120	нет измерения
моделирование	3000	3600	2570	600

Разработанная модель сцинтилляционной пластины с параметрами, извлечёнными из экспериментальных данных, использовалась для предсказания относительного световыхода во всех испытываемых модулях. Полученные результаты были нормированы на измеренное в ходе пучковых испытаний удельное (на 1 ГэВ энергии налетающего электрона) число фотоэлектронов для внутреннего модуля ЛНСб. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе пучковых испытаний и на стенде с использованием космических лучей, приведены в табл. 6.

Неоднородности светосбора могут быть разделены на локальные и глобальные. Глобальные неоднородности появляются вследствие ненулевой вероятности поглощения света на торцах пластины и подъёма эффективности светосбора на её краях. Подъём эффективности светосбора вблизи торцов пластины возникает из-за диффузного характера отражения от белого покрытия каймы. Действительно, если предположить наличие идеально отражающего зеркала на торцах сцинтилляционной пластины, то исчезнет различие между её краями и центром (см. рис. 10). Качественно, диффузное отражение от каймы означает, что фотон, родившийся около края пластины, непосредственно под белой каймой, и имеющий вертикальное направление движения, изменит его и, возможно, полетит по пластине, испытывая серию полных внутренних отражений. При отсутствии белого покрытия такой фотон с высокой вероятностью выйдет из пластины и поглотится. Увеличение

эффективности светосбора на краях пластинки призвано скомпенсировать наличие «мёртвого» вещества между ними. Подстройка качества белого покрытия на торцах и кайме пластины, а также ширины самой каймы позволяют достичь точной компенсации.

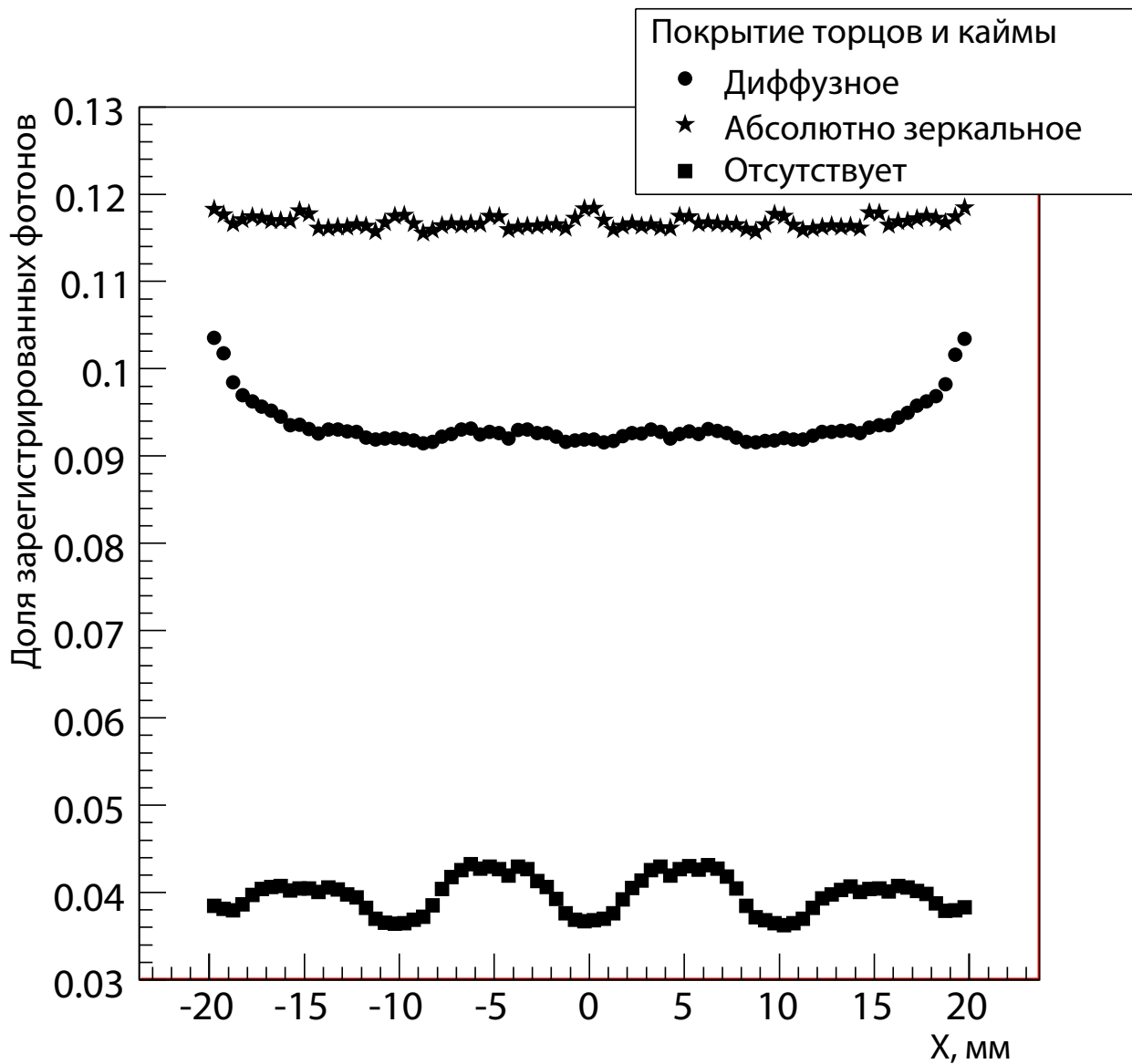


Рис. 10. Неравномерность эффективности светосбора между волокнами. Звёздочки для пластины с идеально зеркальными торцами, кружки для пластины с торцами, обработанными диффузной белой краской, квадратики для пластины с прозрачными торцами.

Локальная или межволоконная неоднородность также может быть понята из простых соображений. Значительная часть фотонов захватывается

волокнами, окружающими точку его рождения. Число таких напрямую захваченных фотонов сильно зависит от расстояния до ближайшего волокна. Вариация этого числа в зависимости от расстояния до ближайшего волокна и отвечает за межволоконную неоднородность (см. рис. 11). Оставшиеся фотоны распространяются по пластине посредством серии полных внутренних отражений и могут пересечь пластину несколько раз до захвата произвольным спектросмещающим волокном. Вероятность такого непрямого захвата не зависит от расстояния между точкой рождения фотона и ближайшим волокном и только вблизи волокон слегка падает из-за эффекта экранировки (ближайшее отверстие экранирует от фотона значительную часть других волокон). В более тонких пластинах для пересечения того же расстояния в горизонтальной плоскости фотону требуется больше отражений от верхней и нижней поверхности пластины. Поскольку существует ненулевая вероятность поглощения фотона при отражении, доля непрямого захвата фотонов падает с уменьшением толщины пластины, а локальная неоднородность возрастает.

При создании новых калориметрических систем на основе модулей типа «шашлык» с улучшенным энергетическим разрешением следует:

1. Усовершенствовать и автоматизировать процедуру контроля качества на всех этапах производства модулей. Например, устранение вариаций толщины сцинтилляционных пластин модулей калориметра ЛНСб позволяет уменьшить неоднородность их отклика на треть.

2. Торцы и тонкая кайма около краёв сцинтилляционных пластин следует матировать, а не алюминизировать. Матирование в сравнении с алюминизацией не только значительно повышает однородность отклика калориметра, но и снижает стоимость производства сцинтилляционных пластин и увеличивает световыход.

3. Рассмотреть возможность использования более плотных пластин абсорбера (в частности, вольфрамовых пластин). Использование более плотных пластин абсорбера позволяет значительно уменьшить радиус Мольера калориметра. Однако использование вольфрамовых пластин серьёзно увеличивает стоимость калориметра, а использование пластин из урана (другой очень плотный материал используемый при создании калориметров) связано с дополнительными трудностями.

4. В случае тонких (1.5 мм и тоньше) пластин сцинтиллятора основным параметром, отвечающим за величину неоднородности отклика калориметра, является качество поверхности сцинтилляционных пластин. Технологические

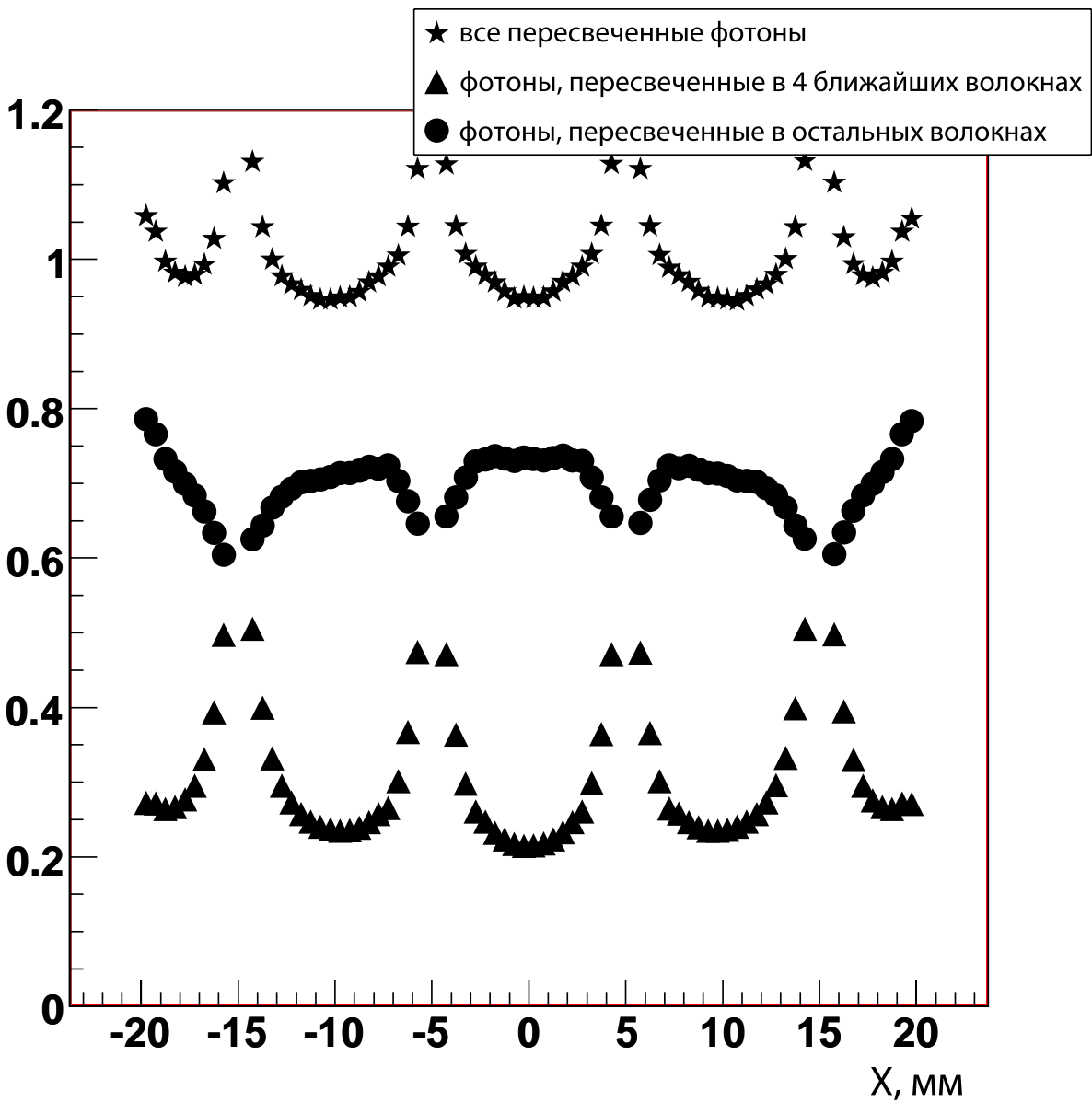


Рис. 11. Неравномерность эффективности светосбора по волокнам. Треугольники обозначают фотоны, поглощённые ближайшими к точке рождения четырьмя волокнами, кружки — остальными волокнами, звёздочки — суммарная неоднородность.

методы улучшения качества поверхности существуют и успешно применяются в промышленности (в частности при производстве фотографической оптики), но использование этих методов может привести к значительному (более чем на порядок) увеличению цены сцинтилляционной пластины.

5. Использование специальных световых масок, нанесённых на поверх-

ность пластины и тайвека, также позволяет уменьшить величину неоднородности отклика прибора. Примером простейшей световой маски является кайма около краёв сцинтилляционной пластины, которая позволяет компенсировать наличие мёртвого вещества между светоизолированными ячейками и калориметрическими модулями. Для достижения точной компенсации необходимо рассчитать как размер каймы, так и качество белого покрытия. На текущий момент оценивается эффективность световых масок более сложной формы, а также ищутся способы их простого и надёжного нанесения на поверхность сцинтиллятора и тайвека.

В **заключении** ещё раз кратко сформулированы основные результаты диссертации.

1. Разработаны и внедрены методы контроля качества модулей электромагнитного калориметра LHCb, включающие в себя, в частности, контроль световых модулей на стенде с использованием космических мюонов.

2. Измерены энергетическое разрешение и световой выход модулей всех секций электромагнитного калориметра LHCb, а также экспериментального калориметрического модуля с тонкими пластинами сцинтиллятора и поглотителя. Энергетическое разрешение модулей калориметра LHCb составило $8 - 9\%/\sqrt{E}$, что лучше требуемых $10\%/\sqrt{E}$.

3. Впервые систематически измерена неоднородность отклика по поверхности калориметрических модулей типа «шашлык» с пространственным разрешением 1 мм с использованием высокоэнергичных мюонов и электронов. Были измерены модули с различной сегментацией и с разными толщинами пластин. Неоднородность отклика модулей калориметра LHCb, измеренная с помощью высокоэнергичных мюонов, составила $\pm 6\%$, а измеренная с помощью электронов с энергией 50 ГэВ — $\pm 2\%$.

4. Для дальнейшего развития технологии «шашлык» разработан способ моделирования неоднородности отклика, а также способ оценки световых калориметрических модулей:

а) создана GEANT-модель калориметрического модуля типа «шашлык», учитывающая особенности его конструкции вплоть до характерных размеров 0.1 мм;

б) написана программа моделирования светосбора, основанная на принципе трассировки лучей, и построена оптическая модель сцинтилляцион-

ной пластины калориметра типа «шашлык». Параметры оптической модели извлечены и проверены путём сравнения с полученными в ходе пучковых испытаний данными;

в) определены параметры сцинтилляционных пластин, оказывающие наибольшее влияние на неоднородность отклика калориметра по поверхности, что необходимо для учёта при проектировании калориметрических модулей для модернизации детектора LHCb и будущих детекторов в физике высоких энергий.

5. Построен калориметрический модуль типа «шашлык» с пластинами сцинтиллятора и поглотителя толщиной 0.5 мм. Характеристики модуля, такие как световыход, энергетическое разрешение и неоднородность отклика, измерены на пучках частиц. Энергетическое разрешение экспериментального модуля составило $7.7\%/\sqrt{E} \oplus 1.2\%$, неоднородность отклика, измеренная с помощью высокоэнергичных мюонов, — около $\pm 20\%$.

6. В ходе пучковых испытаний проверена работоспособность и определены характеристики прототипа светодиодной мониторинговой системы калориметра LHCb. Временная нестабильность тестовой калориметрической сборки, измеренная на электронном пучке в течении 24 часов, составила менее 0.2%.

7. Предложены способы улучшения однородности отклика по поверхности калориметров типа «шашлык» с высокой продольной сегментацией:

а) автоматизация и совершенствование процедуры контроля качества на всех этапах производства модулей типа «шашлык»;

б) матирование, а не алюминизация, торцов и тонкой каймы около краёв сцинтилляционных пластин;

с) улучшение качества поверхности пластин, что особенно актуально для тонких сцинтилляционных пластин;

д) использование световых масок на поверхности сцинтиллятора и листа тайвика.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Арефьев А.В., Беляев И.М. ... Прокудин М.С. и др., Изучение светосбора в калориметрах типа «шашлык», Приборы и Техника Эксперимента 4 (2008) 25.

- [2] Arefev, A.V., Barsuk, S.Y. ... Prokudin M.S. and others, Beam Test Results of the LHCb Electromagnetic Calorimeter., Tech. Rep. LHCb-2007-149. CERN-LHCb-2007-149, CERN, Geneva, revised version submitted on 2008-05-15 09:09:53 (May 2008).
- [3] Arefev, A.V., Barsuk, S.Y. ... Prokudin M.S. and others, Design, construction, quality control and performance study with cosmic rays of modules for the LHCb electromagnetic calorimeter, Tech. Rep. LHCb-2007-148. CERN-LHCb-2007-148, CERN, Geneva (Jan 2008).
- [4] The LHCb Collaboration and Augusto Alves Jr et al, The LHCb Detector at the LHC, Journal of Instrumentation 3 (08) (2008) S08005.
URL <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/S08005>