

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ
ИМ А.И.АЛИХАНОВА

на правах рукописи

Крохотин Андрей Анатольевич

Калибровка Переднего Калориметра Детектора CMS

специальность 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008 г.

Работа выполнена в ГНЦ РФ “Институт Теоретической и Экспериментальной Физики“ им. А. И. Алиханова г. Москва

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

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук А. А. Волков
(ГНЦ РФ ИФВЭ, г. Протвино)

доктор физ.-мат. наук А. А. Ростовцев
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Ведущая организация: НИИЯФ МГУ
(г. Москва)

Защита диссертации состоится 29 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 28 ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

В.В.Васильев

1. Общая характеристика работы

В диссертации изучается влияние радиационных повреждений на отклик торцевых адронных калориметров. Для этого был создан программный пакет, способный описывать эффекты радиационных повреждений в детекторе. С помощью данного пакета была разработана оптимальная сегментация торцевого адронного калориметра. Также в работе описана процедура калибровки передних калориметров с помощью радиоактивного источника ^{60}Co , основанная на сравнении результатов, полученных с радиоактивного источника ^{60}Co , и на пучке электронов с энергией 100 ГэВ.

1.1. Актуальность темы диссертации

Установка CMS является одним из четырех детекторов, установленных на ускорителе БАК в CERN. Во время набора данных CMS будет работать в необычайно жестких радиационных условиях. Так, максимальная доза, ожидаемая в области торцевых адронных калориметров, за 10 лет работы установки, составит 10 МРад, что должно привести к деградации отклика детектора. В результате особую важность приобретают исследования влияния полученных доз на работоспособность детектора и оптимизация его конструкции с учетом радиационных повреждений.

Передние калориметры установки CMS расположены в области больших псевдобыстрот и предназначены для измерения энергии струй и отсутствующего поперечного импульса. Во время работы установки калибровка передних калориметров может производиться с использованием специфических физических процессов. Однако для проведения начальной калибровки необходимы другие методы. Одним из таких методов является калибровка на радиоактивном источнике. В случае передних калориметров сигнал от используемого радиоактивного источника ^{60}Co состоит из одиночных фотоэлектронов и частично перекрывается с пьедесталом, что требует разработки специальных методов выделения сигнала.

1.2. Цель диссертационной работы

Оптимизация сегментации торцевых адронных калориметров с целью создания сегментации, позволяющей лучше компенсировать падение отклика калориметров вследствие радиационных повреждений.

Калибровка передних калориметров на радиоактивном источнике.

1.3. Научная новизна

1. Предложена и апробирована методика расчета изменения отклика адронного калориметра с учетом радиационных повреждений.

2. Предложена новая сегментация торцевых адронных калориметров, позволяющая лучше компенсировать падение отклика калориметров вследствие радиационных повреждений.

3. Разработана методика извлечения сверхслабого сигнала от радиоактивного источника ^{60}Co .

4. Разработана методика калибровки модулей передних калориметров на источнике ^{60}Co ; проведено сравнение с калибровкой, полученной на пучке 100 ГэВ электронов.

5. Проведена калибровка всех считывающих каналов передних калориметров (1728 каналов).

1.4. Результаты, выносимые на защиту

1. Методика расчета изменения отклика адронного калориметра с учетом радиационных повреждений и ее применение для оптимизации сегментации торцевых адронных калориметров.

2. Методика извлечения сверхслабого сигнала от радиоактивного источника ^{60}Co .

3. Методика калибровки модулей передних калориметров на источнике ^{60}Co . Сравнение полученных результатов с калибровкой, полученной на пучке 100 ГэВ электронов.

1.5. Апробация работы и публикации

Материалы, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в [1-4], докладывались на совещаниях международной коллаборации CMS, а также на международной конференции «9th Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications» (Villa Olmo, Como, Italy, 17-21 октября 2005 г.)

1.6. Личный вклад диссертанта

Диссертант принимал активное участие в создании модели радиационных повреждений адронного калориметра. В результате проведенного им анализа было показано, какая модель сегментации торцевых адронных калориметров является наиболее предпочтительной для компенсации падения их отклика вследствие радиационных повреждений. Диссертант принимал

активное участие в разработке процедуры калибровки передних калориметров на радиоактивном источнике ^{60}Co и последующей массовой калибровке модулей передних калориметров.

1.7. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Ее объем составляет 102 страницы, включая 47 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 65 наименований.

2. Краткое содержание диссертации

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

В **первой главе** кратко описываются различные физические каналы, которые могут быть изучены на установке CMS и, как следствие, предъявляемые технические требования к детектору.

Во **второй главе** приводится описание детектора CMS. Конструкция CMS показана на рис. 1. Основой CMS является сверхпроводящий соленоид, 13 м в длину и 5.9 м в диаметре, создающий магнитное поле 3.8 Т. Магнит окружен железным ярмом, внутри которого закреплены мюонные камеры. Мюонные камеры расположены в центральной и торцевой областях, вплоть до $|\eta| < 2.4$, где величина $\eta = -\ln \text{tg}(\theta/2)$ называется псевдобыстрой.

В непосредственной близости от точки взаимодействия пучков располагается система трековых детекторов ($|\eta| < 2.4$).

Система электромагнитных калориметров установки CMS включает центральный электромагнитный калориметр ($|\eta| < 1.479$) и два торцевых калориметра ($1.479 < |\eta| < 3.0$), состоящих из кристаллов PbWO_4 . Перед каждым торцевым калориметром располагается прешауер ($1.653 < |\eta| < 2.6$). Основной целью прешауеров является идентификация нейтральных π -мезонов.

Система адронных калориметров включает в себя центральный адронный калориметр ($|\eta| < 1.3$); два торцевых калориметра ($1.3 < |\eta| < 3.0$), расположенных симметрично относительно точки столкновения пучков; внешний калориметр ($|\eta| < 1.26$) и два передних калориметра ($3.0 < |\eta| < 5.0$). Центральный и торцевые адронные калориметры расположены внутри соленоида. Они выполнены по одинаковой технологии и состоят из чередующихся слоев сцинтиллятора и латунного поглотителя. В центральной части совместное разрешение электромагнитного и адронного калориметров для π -мезонов составляет $\frac{115.3\%}{\sqrt{E}} \oplus 5.5\%$, а в области торцевых калориметров

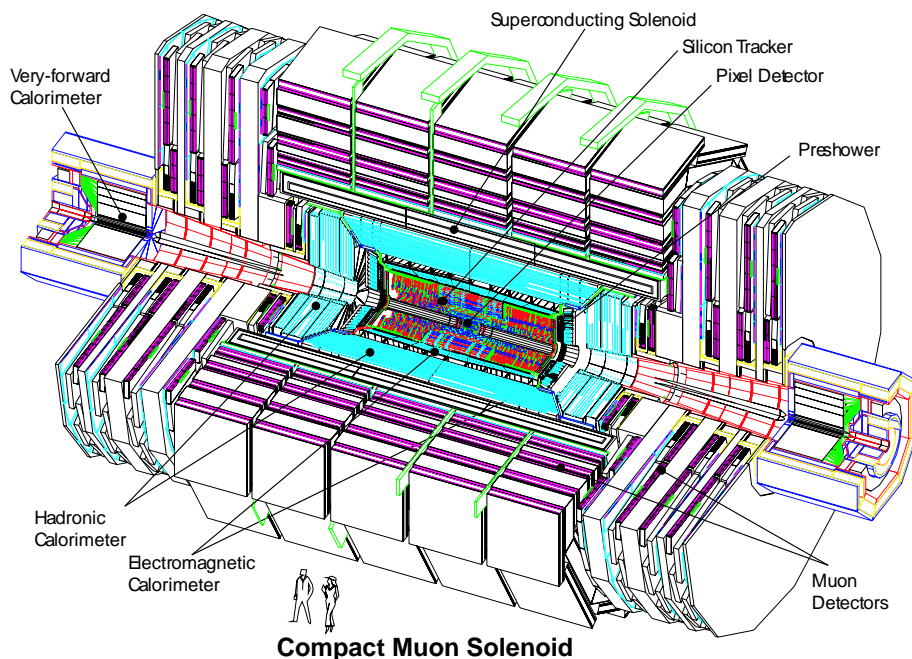


Рис. 1: Детектор CMS

$\frac{118.8\%}{\sqrt{E}} \oplus 4.0\%$. Внешний адронный калориметр состоит из нескольких слоев сцинтиллятора, установленных снаружи соленоида и предназначенных для измерения хвостов ливней, вылетающих из основного объема адронного калориметра. Передние калориметры являются черенковскими детекторами. Они сделаны из стального поглотителя со встроенными кварцевыми оптическими волокнами, которые позволяют быстро собирать черенковский свет. Энергетическое разрешение HF для электронов составляет $\frac{198\%}{\sqrt{E}} \oplus 9\%$, а для адронов $\frac{280\%}{\sqrt{E}} \oplus 11\%$.

В **третьей главе** диссертации представлено исследование воздействия радиации на отклик торцевых адронных калориметров (HE) детектора CMS. Каждый HE состоит из чередующихся слоев поглотителя и сцинтиллятора. Часть энергии, теряемой заряженными частицами на ионизацию при прохождении через сцинтиллятор, превращается в свет, который выводится из сцинтиллятора с помощью спектросдвигающих оптических волокон, а затем по обычным оптическим волокнам направляется на гибридные фотодиоды. В результате облучения уменьшается световыход сцинтиллятора, а также становятся короче длины поглощения света у сцинтиллятора и у оптических волокон. Эти эффекты сильно зависят от накопленной дозы и могут привести к заметному ухудшению отклика калориметра. Особенно сильным данное ухудшение должно оказаться на границе HE ($|\eta| \approx 3$), где ожидаются чрезвычайно высокие уровни радиации (около 10 МРад за 10 лет работы БАК). В результате проделанной работы была составлена компьютер-

ная модель, позволяющая моделировать отклик калориметра в зависимости от полученной дозы. Изменение отклика было исследовано на примере π -мезонов после 10 лет работы БАК. Для уменьшения эффектов облучения были рассмотрены различные варианты конструкции НЕ. Было показано, что при некоторых вариантах дизайна практически полная компенсация указанных эффектов может быть достигнута соответствующей перекалибровкой отклика сигнала с башен НЕ.

На рис. 2 схематически показан вид торцевого адронного калориметра сбоку. Показано расположение слоев сцинтиллятора внутри калориметра. Каждый слой сцинтиллятора поделен на индивидуальные пластины, светоизолированные друг от друга. Размер пластин определяет размеры считываемой башни.

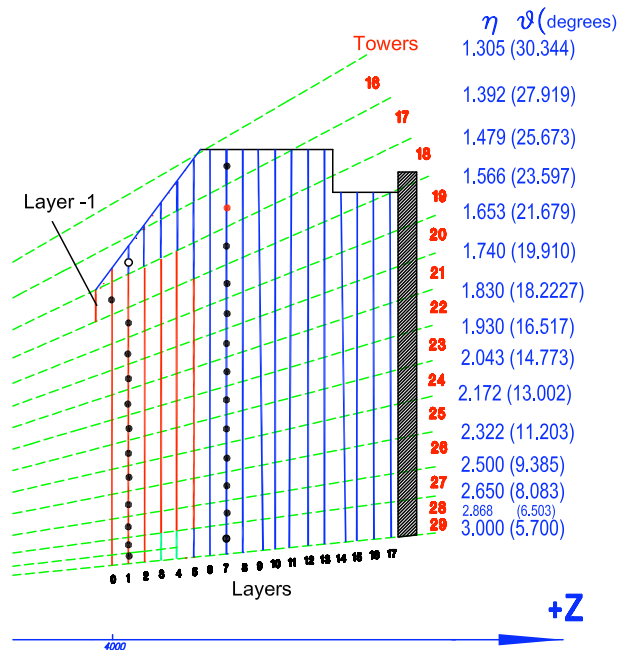


Рис. 2: Торцевой адронный калориметр (вид сбоку). Показано расположение слоев сцинтиллятора внутри калориметра. Показана поперечная и продольная сегментация.

На рис. 3 показаны дозы, ожидаемые в торцевых адронных калориметрах после 10 лет работы БАК. Дозы приведены для случаев, когда край электромагнитного калориметра доходит до $\eta = 2.9$ и до $\eta = 3.0$. Эти два варианта конструкции обсуждались на этапе создания CMS.

Чтобы компенсировать эффект радиационных повреждений были исследованы различные варианты конструкции адронного калориметра, включающие:

1. использование радиационно-стойкого сцинтиллятора в области высоких радиационных доз,

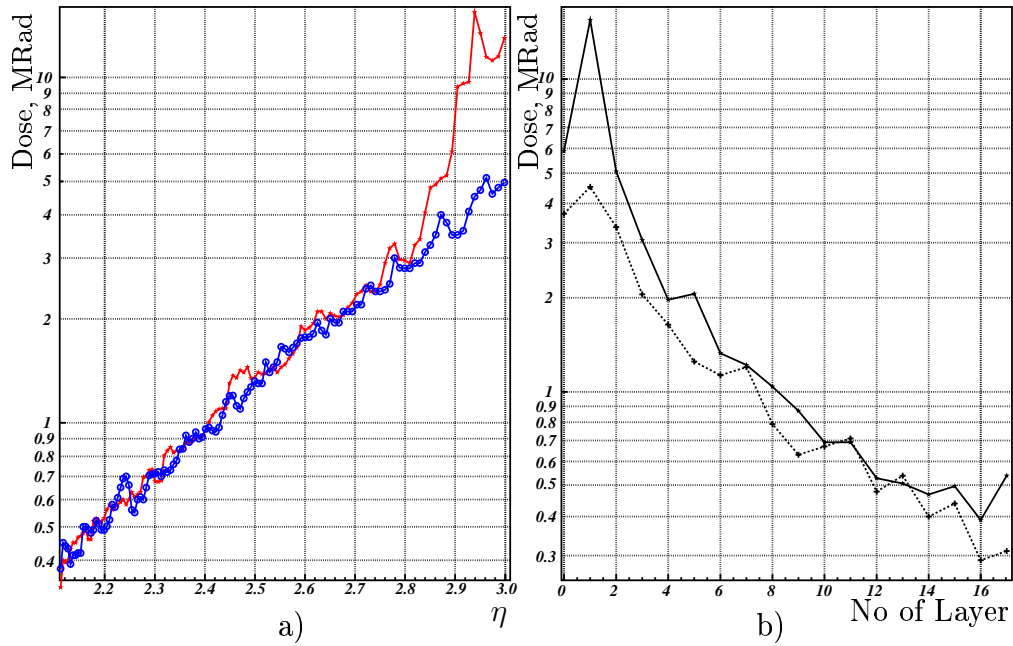


Рис. 3: а) Зависимость дозы, поглощенной в первом слое сцинтиллятора, от η б) Зависимость поглощенной дозы от глубины для $\eta = 2.94$. Верхние (нижние) кривые на обоих рисунках соответствуют варианту конструкции, при котором область покрытия торцевых электромагнитных калориметров, находящихся перед адронными калориметрами, доходит до $\eta = 3$ ($\eta = 2.9$).

2. увеличение количества продольных считывающих сегментов в области $\eta = 3$,
3. увеличение количества поперечных считывающих сегментов в области $\eta = 3$.

Предполагалось, что два последних варианта позволят достичь детального отслеживания радиационных эффектов в области $\eta \sim 3$, что позволит применять зависящие от времени поправки для восстановления однородности отклика калориметра.

На рис. 4 показаны результаты измерений световых выходов как функции поглощенной дозы для двух типов сцинтиллятора. Один из них это SCSN-81, который используется в большинстве слоев торцевого адронного калориметра, и другой — это радиационно-стойкий сцинтиллятор UPS-98, разработанный в НТК «Институт монокристаллов» НАН, г. Харьков, Украина.

Ухудшение сцинтилляционной эффективности вследствие радиационных повреждений может быть описано следующей формулой

$$I = I_1 + (I_0 - I_1) \times \exp(-D/D_0) \quad (1)$$

Кривые на рис. 4, наложенные на экспериментальные данные, отражают данную зависимость. Параметры кривых перечислены в табл. 1. Они были

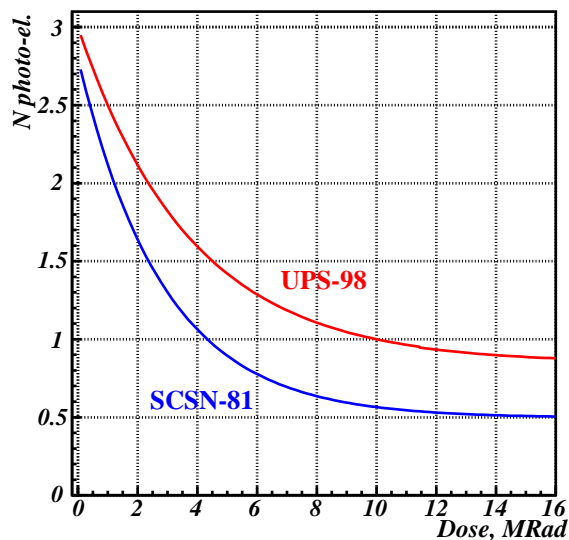


Рис. 4: Зависимость сигнала от поглощенной дозы

использованы для моделирования потерь световыхода после облучения.

Таблица 1: Параметры кривых, описываемых (1).

Параметр	SCSN-81	Kharkov
I_0	2.8	3.0
I_1	0.5	0.85
D_0	2.85	3.78

Для оценки эффекта радиационных повреждений был смоделирован отклик калориметрической системы CMS на заряженные π -мезоны. Для этого использовался пакет моделирования отклика детектора, основанный на GEANT 3.21. Моделирование радиационных повреждений сцинтиллятора осуществлялось путем умножения световыхода частицы при прохождении ее через чувствительный объем на соответствующий коэффициент. Для определения коэффициентов использовалась карта доз (рис. 3) и зависимость световыхода от полученной дозы (рис. 4).

Было рассмотрено несколько вариантов конструкции HE:

1. Различные типы сцинтиллятора:
 - а) все слои сцинтиллятора выполнены из SCSN-81
 - б) в первых пяти слоях используется радиационно-стойкий сцинтиллятор UPS-98
2. Различные типы продольной сегментации. Для обеспечения продоль-

ной сегментации различные сцинтилляционные пластины были сгруппированы в сегменты с общим считыванием. Было рассмотрено два варианта:

- а) продольная сегментация отсутствует
- б) слои были сгруппированы как показано в табл. 2

Таблица 2: Варианты группировки пластин в считывающие сегменты

НЕ	Считывающие Сегменты					Башни
	1	2	3	4	5	$1.566 < \eta < 3$
Слои	0-17					19-24
	0	1-17				25-26
	0	1	2	3-4	5-17	27 – 29*

*) в 5-17 слоях башни 28-29 должны рассматриваться как одна башня

3. Различные типы поперечной сегментации:

- а) 28 башен по η
- б) первые пять слоев ближайшей к пучку башни разделены на два сегмента, что соответствует геометрии с 29 башнями по η (рис. 2)

На рис. 5 показано среднее значение реконструированной энергии как функции η для π -мезонов с энергией 50 ГэВ. В районе $\eta = 3$ наблюдается падение отклика. Это падение обусловлено поперечными утечками адронного ливня через границу НЕ. Варьируя калибровочные константы, накладываемые на башни 28 и 29, можно выровнять отклик калориметра в области $\eta = 3$. Результаты подобных поправок для обоих типов поперечной сегментации показаны на рис. 5. Видно, что вариант с 29 башнями позволяет достичь большей однородности отклика калориметра в области $\eta = 3$ по сравнению с 28 башнями.

На рис. 6 показаны средние значения реконструированной энергии как функция η для 10 ГэВ, 50 ГэВ и 200 ГэВ π -мезонов. В каждом случае применялись поправки, вычисленные для π -мезонов с энергией 50 ГэВ. Видно, что эти поправки работают также для 10 ГэВ и 200 ГэВ π -мезонов.

На рис. 7 показана зависимость отклика калориметра на π -мезоны с энергией 50 ГэВ от η для необлученного калориметра и после облучения дозой, ожидаемой после 10 лет работы БАК. Были рассмотрены варианты с 28 и 29 башнями. После облучения значение отклика существенно уменьшилось в области $\eta = 3$.

Наиболее естественным путем восстановления отклика калориметра после облучения является поправка средних значений сигналов с каждого счи-

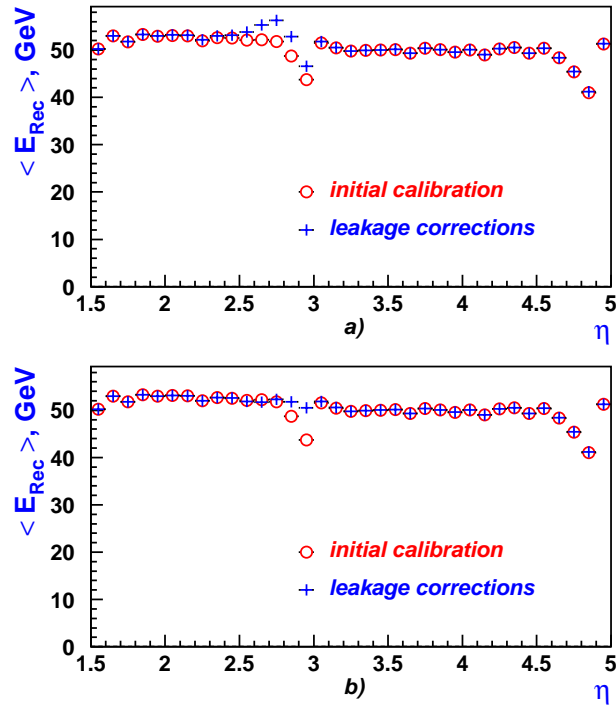


Рис. 5: Зависимость среднего сигнала от η для π -мезонов с энергией 50 ГэВ для необлученного калориметра после начальной калибровки и после поправок на утечки: а) 28 башен б) 29 башен

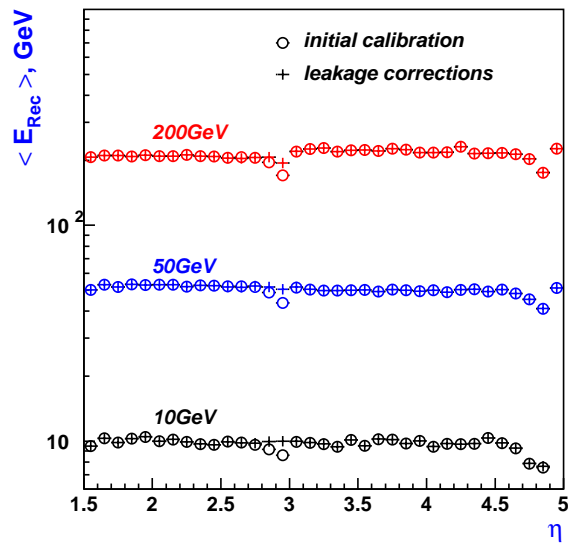


Рис. 6: Зависимость среднего сигнала от η для π -мезонов с энергиями 10 ГэВ, 50 ГэВ и 200 ГэВ для необлученного калориметра после начальной калибровки и после поправок на утечки (поправки были получены для π -мезонов с энергией 50 ГэВ).

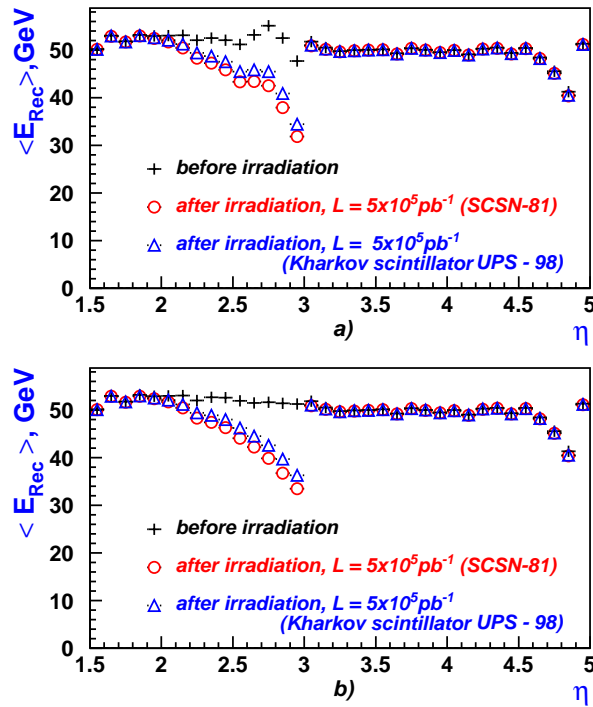


Рис. 7: Зависимость среднего сигнала от π -мезонов с энергией 50 ГэВ для облученного калориметра без поправок на радиационные повреждения: а) 28 башен, б) 29 башен. Рассматриваются варианты с сцинтилляторами SCSN-81 и UPS-98. Для сравнения показаны результаты для необлученного калориметра.

тывающего сегмента HE. Поправки определялись как отношение средних сигналов с каждого считывающего сегмента до и после облучения.

На рис. 8 показаны результаты подобной перекалибровки для облученного калориметра. Как видно, вариант с 29 башнями позволяет достичь лучшей точности калибровки по сравнению с 28 башнями. Также видно, что результаты, полученные с разными типами сцинтиллятора, практически совпадают. Поэтому в дальнейшем все результаты будут приводиться только для сцинтиллятора SCSN-81.

На рис. 9 показана зависимость энергетического разрешения адронного калориметра ($RMS/mean$) от η для π -мезонов с энергией 50 ГэВ до и после облучения и разрешение по E_T для π -мезонов с $E_T = 5$ ГэВ. Видно, что в рассмотренной модели радиационных повреждений и при условии надлежащего мониторинга калибровочных коэффициентов, разрешение по E и E_T для адронов слабо зависит от радиационных повреждений.

На рис. 10, 11 показано сравнение поправок на радиационные повреждения для модели с отдельными продольными считывающими сегментами и для модели с единственным продольным считывающим сегментом (когда

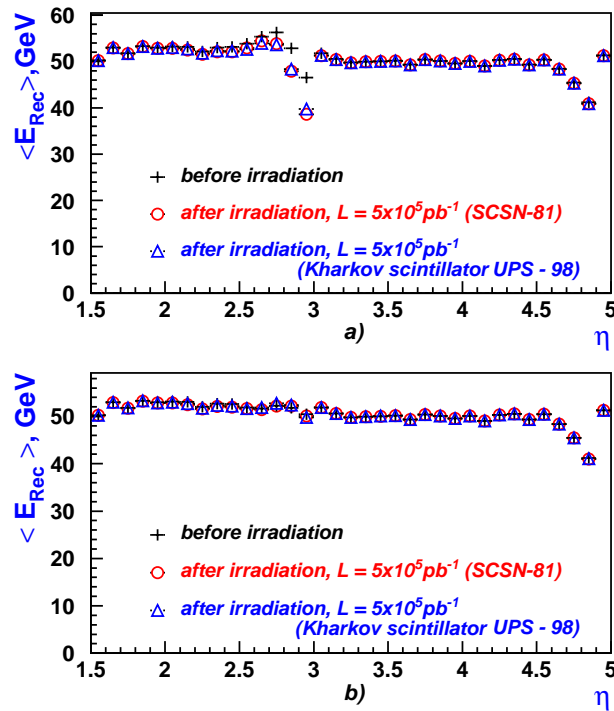


Рис. 8: Зависимость среднего сигнала от π -мезонов с энергией 50 ГэВ для облученного калориметра после поправок на радиационные повреждения: а) 28 башен, б) 29 башен. Рассматриваются варианты со сцинтилляторами SCSN-81 и UPS-98. Для сравнения показаны результаты для необлученного калориметра.

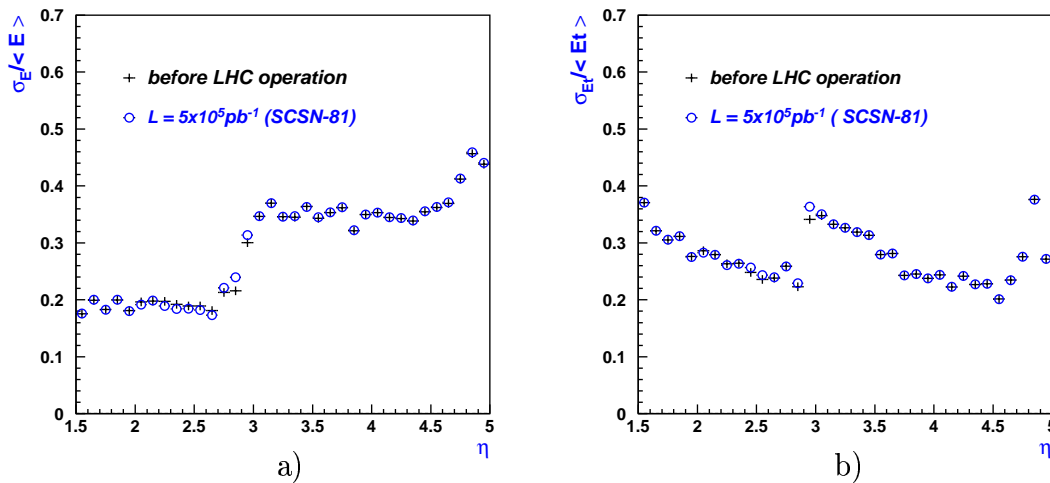


Рис. 9: а) Зависимость $\sigma_E / \langle E \rangle$ от η для 50 ГэВ π -мезонов б) Зависимость $\sigma_{E_t} / \langle E_t \rangle$ от η для π -мезонов с $E_T = 5$ ГэВ Показаны результаты для облученного калориметра после поправок на радиационные повреждения. Вычисления проведены для варианта конструкции с 29 башнями. Для сравнения показаны результаты для необлученного калориметра.

все слои сцинтиллятора, включая нулевой слой, считаются совместно). Видно, что продольная сегментация не является необходимой для корректировки радиационных повреждений.

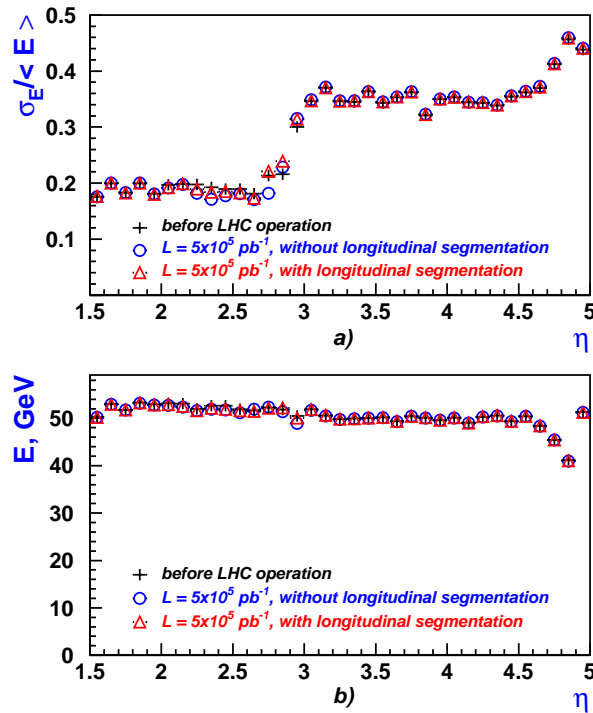


Рис. 10: Зависимость энергетического разрешения (а) и средней энергии (б) от η для 50 ГэВ π -мезонов для облученного калориметра с 29 башнями. Рассмотрены варианты с продольной сегментацией и без продольной сегментации. Для сравнения показаны результаты для необлученного калориметра.

В **четвертой** главе диссертации описывается калибровка передних калориметров (HF) детектора CMS с помощью радиоактивного источника ^{60}Co . Передние калориметры предназначены для идентификации и измерения энергий струй, летящих в переднюю область. Помимо измерения передних струй они обеспечивают герметичность детектора CMS, что позволяет улучшить точность измерения отсутствующей поперечной энергии. Во время работы БАК калибровку HF можно будет осуществлять, используя различные физические каналы. Однако для проведения начальной калибровки, до начала набора данных, необходимо использовать другие методы. Лучшим методом является калибровка с помощью тестового пучка. Однако, из-за недостатка времени, поместить все модули HF на пучок не представлялось возможным. В результате была разработана процедура перенесения калибровки с модулей, откалиброванных на тестовых пучках, на неотка-

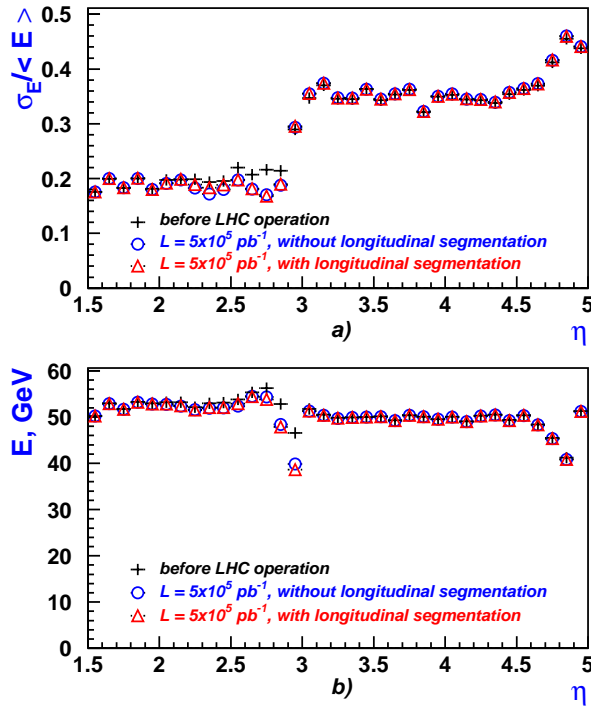


Рис. 11: Зависимость энергетического разрешения (а) и средней энергии (б) от η для 50 ГэВ π -мезонов для облученного калориметра с 28 башнями. Рассмотрены варианты с продольной сегментацией и без продольной сегментации. Для сравнения показаны результаты для необлученного калориметра.

либрованные модули с помощью радиоактивного источника ^{60}Co . Отличительной особенностью данной калибровки является сложность выделения сигнала, так как сигнал от радиоактивного источника частично перекрывается с пьедесталом. Это объясняется выбором рабочего напряжения на фотоумножителях, которое должно быть достаточно низким чтобы обеспечить возможность измерения энергий струй в широком диапазоне. Кроме того, количество пьедестальных входов превышает количество сигнальных на четыре порядка.

Для проведения калибровки с помощью радиоактивного источника было разработано несколько различных методик, которые отличаются друг от друга методом отделения сигнала от пьедестала. Был произведен анализ различных эффектов, влияющих на точность калибровки. В результате было показано, что точность калибровки на радиоактивном источнике по отношению к калибровке на тестовом пучке составляет 5 %.

HF является черенковским калориметром. Он состоит из стального поглотителя со встроенными кварцевыми волокнами. Сигнал формируется в кварцевых волокнах при прохождении сквозь них заряженных частиц ад-

ронного ливня с энергией выше черенковского порога ($E \sim 190$ кэВ для электронов). Это обуславливает чувствительность НФ в основном к электромагнитной компоненте ливня.

Чувствительный объем НФ калориметра представляет собой цилиндрическую структуру радиусом 130 см и длиной 165 см (рис. 12). В центре НФ находится цилиндрическое отверстие радиусом 12.5 см, предназначенное для прохождения пучка. НФ, по практическим соображениям, поделен на восемнадцать 20-градусных секторов. Оптические волокна уложены в специальные канавки внутри стального поглотителя, параллельно оси пучка. Поперечные размеры каждой канавки 1 мм \times 1 мм. Канавки расположены в виде решетки с шагом 5 мм. Для обеспечения продольной сегментации калориметра используются волокна двух разных длин: половина волокон проходит через всю длину поглотителя, а начало другой половины волокон удалено вглубь от передней части детектора (обращенной к точке столкновения пучков) на 22 см. Продольная сегментация калориметра необходима для того, чтобы полученные данные о продольном развитии адронного ливня использовать для более точного определения энергии струй. Длинные и короткие волокна чередуются, сигналы с них считываются отдельно, образуя длинный (L) и короткий (S) считывающие сегменты, соответственно. Волокна группируются в пучки так, чтобы внутри одного пучка они собирали сигнал с башен размером 0.175×0.175 в пространстве $\eta \times \phi$ (рис. 13). Собранный свет транспортируется по воздушным световодам, внутренняя поверхность которых покрыта металлизированным светоотражающим материалом, на фотоумножителе (R7525, производства фирмы Hamamatsu Photonics, Япония).

Каждый сектор НФ содержит 31 трубочку (рис. 13), которые используются для введения радиоактивного источника внутрь калориметра при проведении калибровки. Трубочки вставляются в канавки вместо одного из волокон. Каждая башня содержит одну или две трубочки.

Сигнал от фотоумножителей оцифровывается А.Ц.П., который позволяет измерять заряд в четырех различных диапазонах. Каждый диапазон состоит из 32 каналов. В первых 15-ти каналах заряд измеряется с одинаковым шагом, равным некоторому номинальному значению, в следующих 7-ми каналах — с шагом, в два раза большим номинального, в последующих 4-х каналах — в три раза большим, в последующих 3-х — в четыре раза большим и в 3-х последних — с шагом, в пять раз большим номинального. При калибровке радиоактивным источником используется наименьший диапазон с номинальным шагом 2.6 фКл, что позволяет измерять заряд в

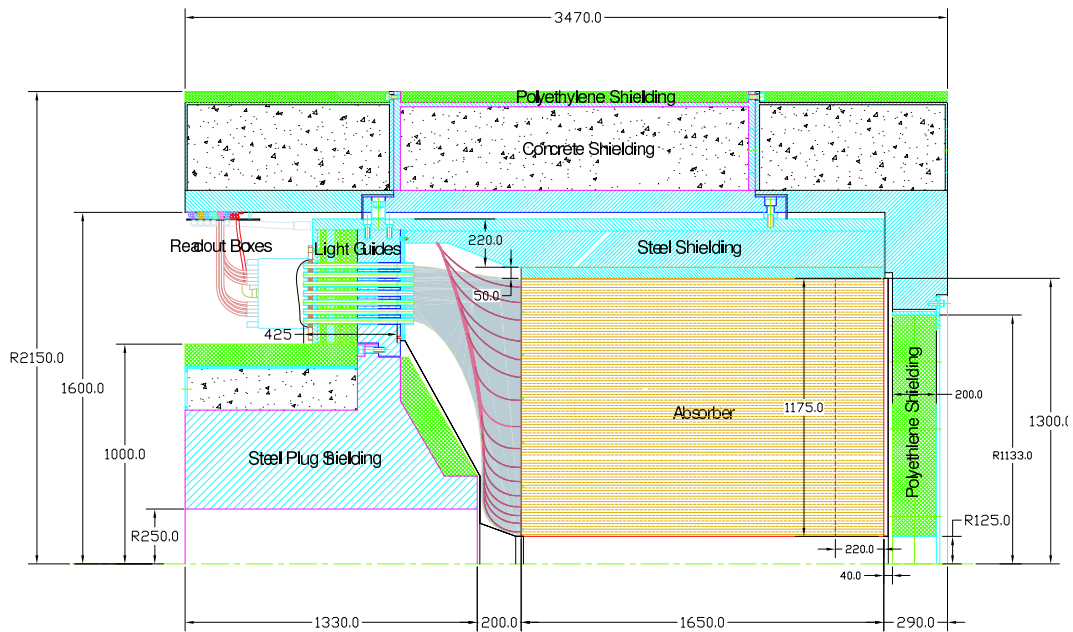


Рис. 12: На боковом сечении НФ калориметра видно, что чувствительный объем начинается со 125 мм и идет до 1300 мм в радиальном направлении. Толщина поглотителя в направлении пучка составляет 1650 мм. Пучки оптических волокон идут от задней стенки калориметра к световодам, которые проходят через защитную матрицу, собранную из стали, свинца и полиэтилена. Свет регистрируется с помощью фотоумножителей, расположенных в специальных модулях. Все размеры указаны в миллиметрах.

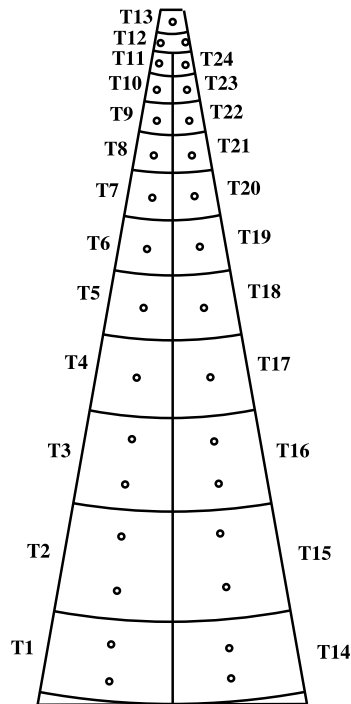


Рис. 13: Фронтальное сечение сектора НФ. Показан отдельный сектор НФ, схематически указано разбиение на считывающие башни, их нумерация, а также показано положение трубочек для введения радиоактивного источника.

диапазоне от -2.6 до 174.2 фКл. Сигнал оцифровывается с частотой 40 МГц.

В процессе набора данных радиоактивный источник с помощью электропривода перемещается из защищенного гаража, используемого для хранения источника, в калориметр. На рис. 14 показан сигнал от источника ^{60}Co , измеряемый в калориметре в зависимости от положения источника, соответственно для L (рис. 14 а) и S (рис. 14 б) считывающих каналов. Пики в распределениях появляются, когда источник проходит через область группировки оптических волокон в пучки и область расположения фотомножителей. Область постоянного отклика справа от пиков соответствует положению источника внутри калориметра.

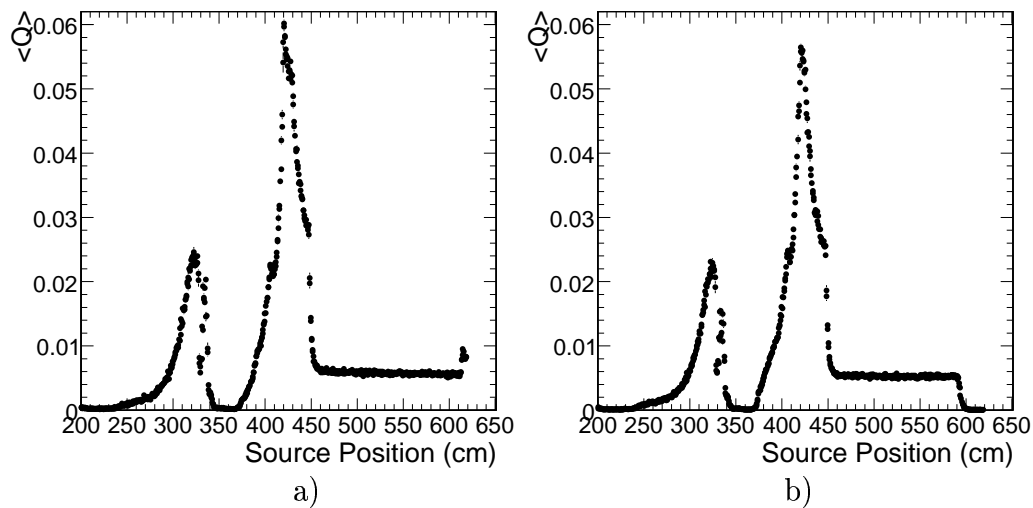


Рис. 14: Зависимость отклика калориметра от положения радиоактивного источника для а) L считывающих каналов, б) S считывающих каналов.

При работе с источником использовалась специальная гистограммная мода накопления данных. При этом данные складывались в гистограмму с частотой, соответствующей частоте оцифровки сигнала 40 МГц. После накопления 4×2^{12} входов гистограмма считывалась системой накопления данных. Таким образом, одна гистограмма соответствовала 6.55 мс данных с источника. В обычном режиме при сборе данных источник движется со скоростью 10 см/с, что соответствует набору примерно 2500 подобных гистограмм за время пока источник находится внутри поглотителя. На рис. 15 представлено типичное распределение сигнала с L и S считывающих каналов.

Из рис. 15 видно, что количество входов в области пьедестала на несколько порядков превышает количество сигнальных входов. Более того, сигнал от одного фотоэлектрона, собранный А.Ц.П., может дать два входа в ги-

стограмму. Это происходит, если сигнал с фотоумножителя приходит в момент, когда заканчивается один временной промежуток оцифровки сигнала и начинается другой. Данные от источника ^{60}Co активностью 5 мКи, использованные для разработки калибровочных методов, были набраны для пяти секторов. Для этих же секторов были доступны данные, набранные на пучке электронов с энергией 100 ГэВ. Совместный анализ этих данных позволяет сделать абсолютную калибровку с помощью источника.

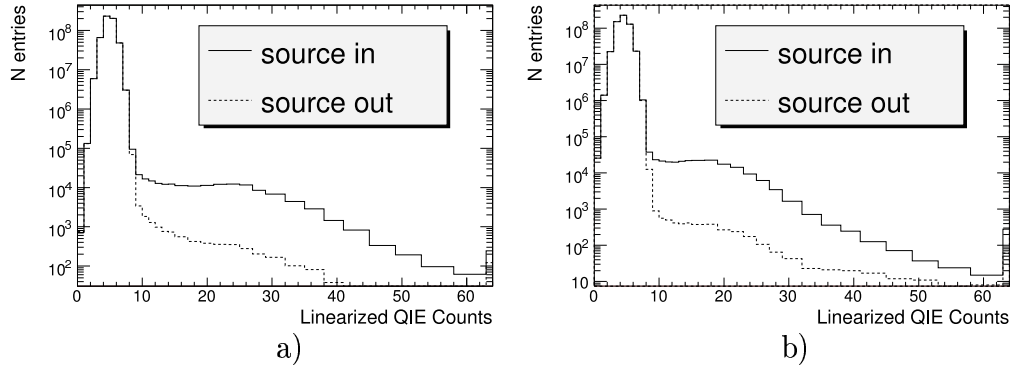


Рис. 15: Типичное распределение сигнала с а) L считывающих каналов, б) с S считывающих каналов

Было разработано несколько калибровочных методов. Они отличаются способом извлечения сигнала, связанного с активностью источника, из экспериментальных данных. Во всех методах, описанных ниже, использовались гистограммы двух типов: сигнальные — гистограммы, набранные во время нахождения радиоактивного источника внутри поглотителя, и фоновые — гистограммы, набранные во время когда источник находился вне поглотителя.

Первый из описываемых методов называется методом “среднего заряда”. В этом методе заряд (собранный в единицу времени) вычисляется отдельно для сигнальной и фоновой гистограмм с использованием следующей формулы

$$Q_i^{S/B}(\text{А.Ц.П./с}) = \frac{40\text{МГц}}{\sum_{j=1}^{32} n_j} \sum_{j=1}^{32} q_j \times n_j, \quad (2)$$

где символами S и B обозначен заряд, собираемый с сигнальной и фоновой гистограмм, соответственно, за единицу времени и измеряемый в единицах линейризованных отсчетов А.Ц.П.; i — номер трубочки; q_j — значение заряда А.Ц.П.; n_j — количество входов в j -й канал гистограммы. Разность средних зарядов, вычисленных для сигнальной и фоновой гистограмм

$$Q_i(\text{АЦП/с}) = Q_i^S - Q_i^B, \quad (3)$$

определяет заряд, связанный с энергией, выделяемой источником, как

$$E(\text{ГэВ}/\text{с}) = Q_i(\text{А.Ц.П.}/\text{с}) \frac{g_i(\text{ГэВ}/\text{А.Ц.П.})}{R_i}, \quad (4)$$

где E (ГэВ/с) — энергия, выделяемая источником в единицу времени; g_i (ГэВ/А.Ц.П.) — калибровочный коэффициент; R_i — геометрический фактор. Геометрический фактор показывает, какая часть сигнала собирается волокнами i -ой башни по отношению к башне бесконечного размера. Он зависит от расстояния от трубочки до границ башни и от положения трубочки относительно считывающего волокна.

Калибровочный коэффициент может быть выражен из (4) как:

$$g_i(\text{ГэВ}/\text{А.Ц.П.}) = \frac{U(\text{мКи})\epsilon(\text{ГэВ})R_i}{Q_i(\text{А.Ц.П.}/\text{с})} \quad (5)$$

Здесь сомножитель $U(\text{мКи})\epsilon(\text{ГэВ})$ подставлен вместо E (ГэВ/с), где $U(\text{мКи})$ — активность источника; $\epsilon(\text{ГэВ})$ — средний сигнал, который был бы собран башней бесконечных размеров от источника активностью 1 мКи.

Для каждой башни должен быть получен один калибровочный коэффициент $C^{\text{И}}$ (индекс И обозначает, что калибровочный коэффициент получен на данных с радиоактивного источника). Если башня содержит только одну трубочку, то этот коэффициент равен соответствующему значению g , если в башне две трубочки, то — среднему значению g этих трубочек. Чтобы вычислить $C^{\text{И}}$ необходимо определить единственный неизвестный параметр ϵ в (5). Он может быть найден из требования равенства единице среднего значения отношения калибровочных коэффициентов, полученных на пучке электронов с энергией 100 ГэВ и на радиоактивном источнике:

$$\frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \left[\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{C_i^{\text{И}}}{C_i^{\text{П}}} \right] = 1, \quad (6)$$

где k — количество протестированных секторов; $C_i^{\text{П}}$ — калибровочный коэффициент для $i^{\text{ой}}$ башни, полученный с использованием данных по облучению модулей HF пучком электронов с энергией 100 ГэВ. Найденное значение ϵ может быть использовано для получения калибровочных коэффициентов для всех остальных секторов.

Точность этого метода ограничена стабильностью пьедестала. В силу того, что сигнальная и фоновая гистограммы в основном состоят из пьедестальных входов, небольшие флуктуации положения пьедестала могут сильно влиять на результирующий сигнал. На рис. 16 а) показано распределение событий в плоскости $(C^{\text{И}}, C^{\text{П}})$ для всех пяти секторов. Из рисунка видно,

что малые значения C^I , соответствующие большим значениям коэффициентов усиления фотоумножителей, имеют меньший разброс относительно C^II . Это происходит из-за того, что меньшим значениям коэффициентов усиления соответствует меньший собранный сигнал, а следовательно, возрастает влияние флуктуаций пьедестала, что ведет к ухудшению точности калибровки.

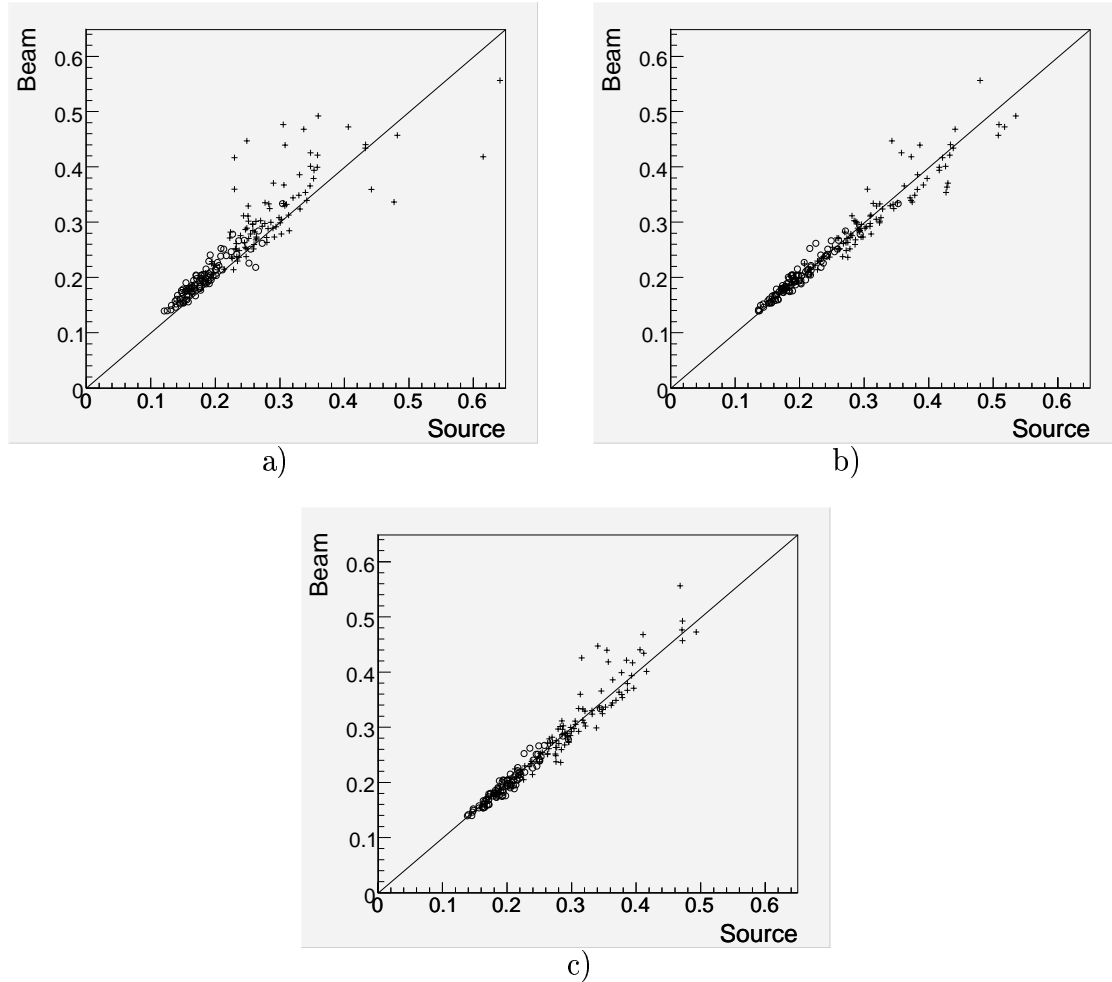


Рис. 16: Распределение событий в плоскости (C^I, C^II) для пяти секторов, для которых имеются данные, набранные на пучке e^- с энергией 100 ГэВ и на радиоактивном источнике ^{60}Co . C_i^I вычислены с использованием метода а) “среднего заряда“ б) “фиксированного интервала“ в) “экстраполяции сигнала под пьедестал“. Крестиками показаны результаты для коротких считывающих сегментов, а открытыми кружками — для длинных.

Чтобы избавиться от этой зависимости, было предложено вычислять заряд в некотором, одном и том же для всех башен, заранее фиксированном интервале каналов А.Ц.П. (метод “фиксированного интервала“). Заряд вычислялся отдельно для сигнальной и фоновой гистограмм с использованием

(2), в котором суммирование осуществлялось с 10 по 32 каналы А.Ц.П.. После чего применялась процедура калибровки, начиная с (3), описанная в методе “среднего заряда”.

На рис. 16 б) показано распределение событий в плоскости ($C^И, C^П$), полученное с использованием данного метода. Сигнал от фотоэлектрона, из-за возможного его разделения между соседними временными интервалами при оцифровке сигнала, распределен равномерно между максимально возможным значением и нулем. Поэтому заряд, вычисленный в фиксированном интервале, является лишь частью полного заряда, причем величина этой части зависит от коэффициентов усиления фотоумножителей и поэтому различна для разных башен. Это накладывает ограничения на точность данного метода.

В описанном методе сделана попытка объединить преимущества первых двух методов: учесть значение сигнала под пьедесталом (метод “среднего заряда”) и уменьшить зависимость сигнала от флуктуаций положения пьедестала (метод “фиксированного интервала”).

В третьем методе, условно названном методом “экстраполяции сигнала под пьедестал”, делается попытка учесть значение сигнала под пьедесталом (метод “среднего заряда”) и уменьшить зависимость сигнала от флуктуаций положения пьедестала (метод “фиксированного интервала”). Первым шагом этого метода является вычитание сигнальных и фоновых гистограмм. На рис. 17 (сплошная линия) показан пример гистограммы, получающейся в результате такого вычитания. Такая гистограмма показывает активность источника в области больших значений А.Ц.П., а в области малых значений А.Ц.П. форма гистограммы главным образом определяется вычитанием пьедесталов. Большой отрицательный пик в области малых значений А.Ц.П. является результатом нормировки: из-за того, что сигнальная гистограмма содержит такое же число входов, что и фоновая, она имеет гораздо меньшее количество входов в области пьедестала, компенсируя таким образом большее количество входов в области больших значений А.Ц.П.. Для того чтобы извлечь часть сигнала под пьедесталом, нужно экстраполировать сигнал в эту область. Так как форма сигнала под пьедесталом неизвестна, то экстраполяция до некоторой степени является произвольной. В данной работе для экстраполяции используется простейшая возможная функция – константа. Экстраполяция применяется к гистограмме, полученной в результате вычитания сигнальной и фоновой гистограмм. При этом значение константы фиксируется из области, где значение отклика постоянно. Эта область выбирается для каждой башни калориметра отдельно. Для гистограммы,

приведенной на рис. 17 (сплошная кривая), использована область с 12 по 16 бины. Пунктирной линией на рис. 17 показан результат экстраполяции. Ниже среднего значения пьедестала отклик предполагается равным нулю. Используя гистограмму, полученную в результате экстраполяции, можно вычислить полный заряд

$$Q_i = \frac{40\text{МГЦ}}{\sum_{j=1}^{32} n_j} \sum_{j=j_p+1}^{32} n_j \times (q_j - P),$$

где i — номер трубочки; n_j — количество входов в j -й бин гистограммы; P — положение пьедестала; j_p — бин, содержащий среднее значение пьедестала P . После вычисления значения применяется калибровочная процедура, описанная в методе “среднего заряда”.

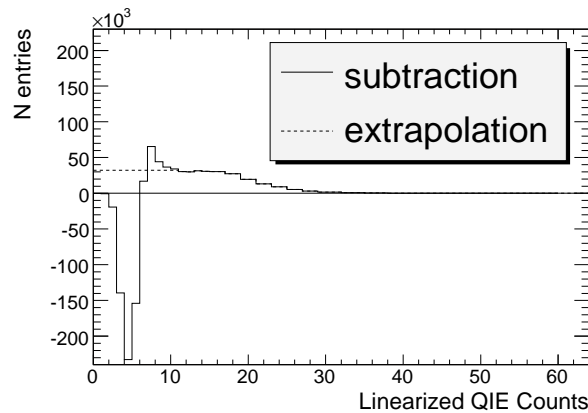


Рис. 17: Сплошная линия — результат вычитания гистограмм, полученных когда источник находится внутри поглотителя (сигнальная гистограмма) и снаружи (фоновая гистограмма). Пунктирная линия - результат экстраполяции.

На рис. 16 с) показано распределение событий в плоскости (C^I, C^II) , полученное с использованием данного метода.

Точность данного метода ограничена неопределенностью экстраполяции в область малых значений А.Ц.П.. Кроме того, независимо от метода, на точность калибровки оказывает влияние точность вычисления геометрических факторов, значения которых зависят от количества волокон внутри башни и их относительного расположения. Эти значения немного отличаются для одних и тех же башен разных секторов. Для больших башен поправка, обусловленная этой разницей, невелика, однако для малых башен 12 и 13 она возрастает. Особенно велика данная поправка для башни 12, из-за того, что трубочки, по которым передвигается источник, расположены недалеко от внешней поверхности сектора (рис. 13). В результате даже небольшие

изменения в положении трубочки от сектора к сектору сильно влияют на значения геометрических факторов.

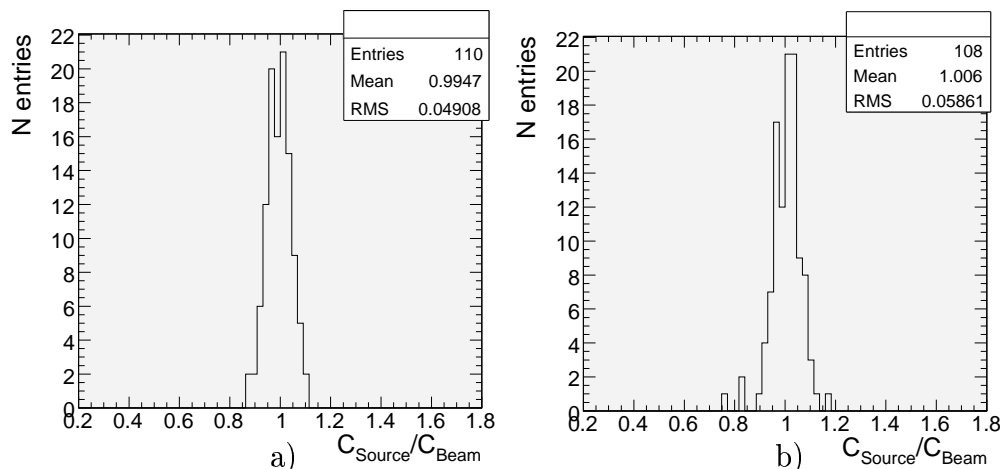


Рис. 18: Распределение величины C^I/C^II . C^I рассчитаны методом “экстраполяции сигнала под пьедестал” а) L считывающие каналы б) S считывающие каналы

Сравнивая рис. 16 а), б), с) можно сделать вывод, что методы “фиксированного интервала” и “экстраполяции сигнала под пьедестал” дают сравнимые результаты, в то время как для метода “среднего заряда” характерно худшее согласование между калибровками на пучке 100 ГэВ электронов и на радиоактивном источнике ^{60}Co . На рис. 18 показано распределение величины C^I/C^II , где C^I рассчитаны методом “экстраполяции сигнала под пьедестал”. Видно, что точность калибровки на источнике ^{60}Co относительно калибровки, полученной на пучке электронов с энергией 100 ГэВ, составляет $\sim 5\%$. Эта величина сравнима с внутренней неоднородностью отклика калориметра [4].

В **заклучении** еще раз кратко сформулированы основные результаты работы.

1. Было найдено, что отклик калориметра к π -мезонам существенно падает в области $\eta \approx 3$. Этот эффект обусловлен поперечными утечками адронного ливня через границу торцевого адронного калориметра. Вычисления показывают, что отклик может быть восстановлен в случае варианта конструкции калориметра с 29 башнями. Это достигается соответствующей перекалибровкой сигналов с 28 и 29 башен. При этом один и тот же набор поправок работает в широком диапазоне энергий π -мезонов.

2. Разработана методика расчета изменения отклика адронного калориметра вследствие радиационных повреждений. Было показано, что в рамках используемой упрощенной модели эффект радиационных повреждений

может быть скомпенсирован с помощью перекалибровки сигналов с башен адронного калориметра.

3. Показано, что дополнительная поперечная сегментация торцевого адронного калориметра помогает корректировать эффект радиационных повреждений. В частности было показано, что вариант конструкции адронного калориметра с 29 башнями имеет преимущества по сравнению с 28 башнями

4. Показано, что продольная сегментация адронного калориметра не является необходимой для корректировки эффекта радиационных повреждений.

5. Разработана методика извлечения сверхслабого сигнала от радиоактивного источника ^{60}Co и показано, что предложенные калибровочные методы позволяют достичь точности калибровки порядка 5% относительно калибровки, полученной на пучке электронов с энергией 100 ГэВ.

6. С помощью радиоактивного источника ^{60}Co была проведена калибровка всех каналов передних калориметров CMS, а полученные результаты занесены в базу данных. Данная калибровка будет использоваться в период запуска БАК и начала набора данных на детекторе CMS.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] I. Golutvin, .., A.Krokhotin *et al.*, “Simulation of radiation damage in HE scintillating tiles and Pion Energy Resolution“, CMS NOTE-2002/013
- [2] CMS Collaboration, S Chatrchyan, .. A.Krokhotin *et al.*, “The CMS experiment at the CERN LHC“, Journal of Instrumentation, Volume 3, August 2008, S08004
- [3] Н.Акчурин, В.Б.Гаврилов, ... А. А. Крохотин и др., “Калибровка переднего калориметра детектора CMS с помощью радиоактивного источника ^{60}Co “, Приборы и Техника Эксперимента, Vol. 50, No. 6, (2007) 744
- [4] S. Abdullin, .. A.Krokhotin *et al.*, “Design, performance, and calibration of CMS forward calorimeter wedges“, The European Physical Journal C - Particles and Fields, Volume 53, Number 1 / January, 2008, pp.139-166