Московский государственный
инженерно-физический институт
(технический университет)

Кафедра "Экспериментальные Методы Ядерной Физики"

Пояснительная записка
к дипломной работе на тему:

Новый Передний Нейтронный Калориметр для эксперимента H1 на ускорителе HERA

Студент: Ураев А.Ю.

Руководитель дипломной работы: Ефременко В.И.

Рецензент:

Зав.кафедры: Григорьев В.А.

Москва 2001

Содержание

1 Вступление

Сотрудничество H1 исследует физику ep взаимодействий на ускорителе HERA в г.Гамбурге(Германия). В двух точках пересечения e и p пучков установлены 2 детектора - H1 и ZEUS. H1-детектор состоит из ряда основных детекторов, окружающих точку взаимодействия, и нескольких детекторов, расположенных на различных расстояниях от точки взаимодействия. В числе этих детекторов расположенный в 107 метрах от точки взаимодействия в направлении протонного пучка Передний Нейтронный Калориметр (FNC от Forward Neutron Calorimeter), в задачу которого входит измерение энергии и угла вылета лидирующих нейтронов, рождающихся в реакции глубоко неупругого рассеяния $ep \to enX$.

FNC был установлен в эксперимент H1 в 1996 году. Используя данные, полученные с помощью FNC, сотрудничество H1 впервые на ускорителе HERA получило возможность измерить тройное дифференциальное сечение $d\sigma/(dxdQ^2dz)$ рождения лидирующих нейтронов.

В 1998 году FNC был оснащен новым преддетектором Preshower, что позволило существенно увеличить энергетическое и пространственное разрешение, а также получить хорошее разделение “нейтронных”(вызванных попадающими в калориметр нейтронами) и “электромагнитных”(возникаюших в основном за счет попадания γ-квантов) ливней.

Однако, за несколько лет использования, из-за радиационного повреждения отклик основного FNC калориметра сильно уменьшился, и значительно ухудшилось энергетическое разрешение. По этой причине было принято решение заменить старый FNC во время запланированной на 2000 год перестройки ускорителя и детектора H1.

После завершения работ по модернизации HERA, физическая программа H1 будет продолжаться еще несколько лет, поэтому модификация Переднего Нейтронного Калориметра будет ощутимым вкладом в эксперимент H1.

2 HERA

HERA является электрон-протонным коллайдером (электроны с энергией 27.6 GeV сталкиваются с протонами с энергией 920 GeV). Энергия центра масс HERA равна $300 GeV$, что на порядок больше чем в предшествующих лептон-протонных экспериментах на фиксированных мишенях.

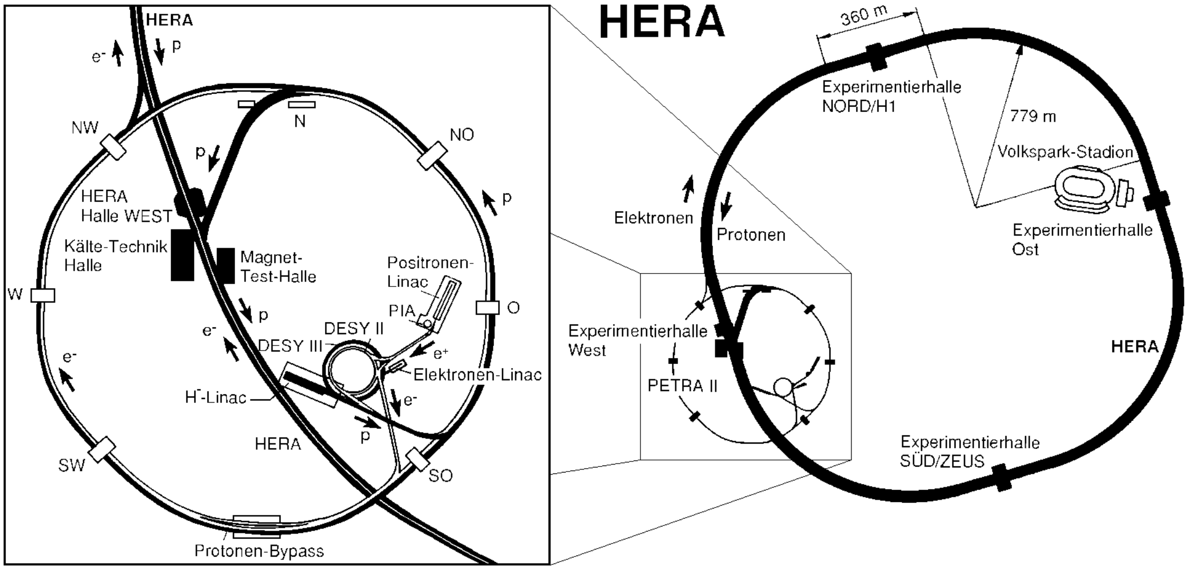

Рис. 1: Схема ускорительного комплекса HERA

Две независимые магнитные системы управляют циркуляцией и накоплением e и p пучков в независимых вакуумных трубах, образующих кольцо длиной около 6.3 км. В двух противоположных точках накопительных колец имеются две точки пересечения, в районе которых установлены два универсальных детектора H1 и ZEUS, регистрирующие результат столкновений электронов с протонами.

В каждое из колец может быть инжектировано до 210 коротких сгустков (банчей) частиц, циркулирующих на равном ($96 ns$) расстоянии друг от друга. В области встречи пучков электроны и протоны сталкиваются друг с другом внутри общей пучковой трубы под нулевым углом. Эффективная область взаимодействия имеет длину около 50 см. Пучковая труба охлаждается газообразным азотом и оснащена вакуумными насосами, поддерживающими давление остаточного газа 10^{-9} GPa.

Проект HERA был утвержден в 1984 году и в 1992 году два универсальных детектора H1 и ZEUS, установленные в области двух точек взаимодействия пучков, начали сбор данных.

Позже были запущены еще два крупных эксперимента HERMES (изучение спиновой структуры ядер путем столкновения пучка поляризованных электронов и газовой струи поляризованных ядер) и HERA-B (изучение CP нарушения в $b\bar{b}$ системах путем рассеяния протонов на неподвижной мишени).

2.1 Описание детектора H1

H1 - это, в первую очередь, международное сотрудничество, объединяющее более 300 физиков из 13-ти стран. H1, также, - название детектора, установленного в одной из точек столкновения электронного и протонного пучков на накопительном кольце HERA. H1 - универсальный детектор, предназначеный для регистрации, идентификации и определения основных параметров (энергия, направление вылета) продуктов взаимодействия электронов и протонов. На рис 2 показаны основные компаненты детектора:

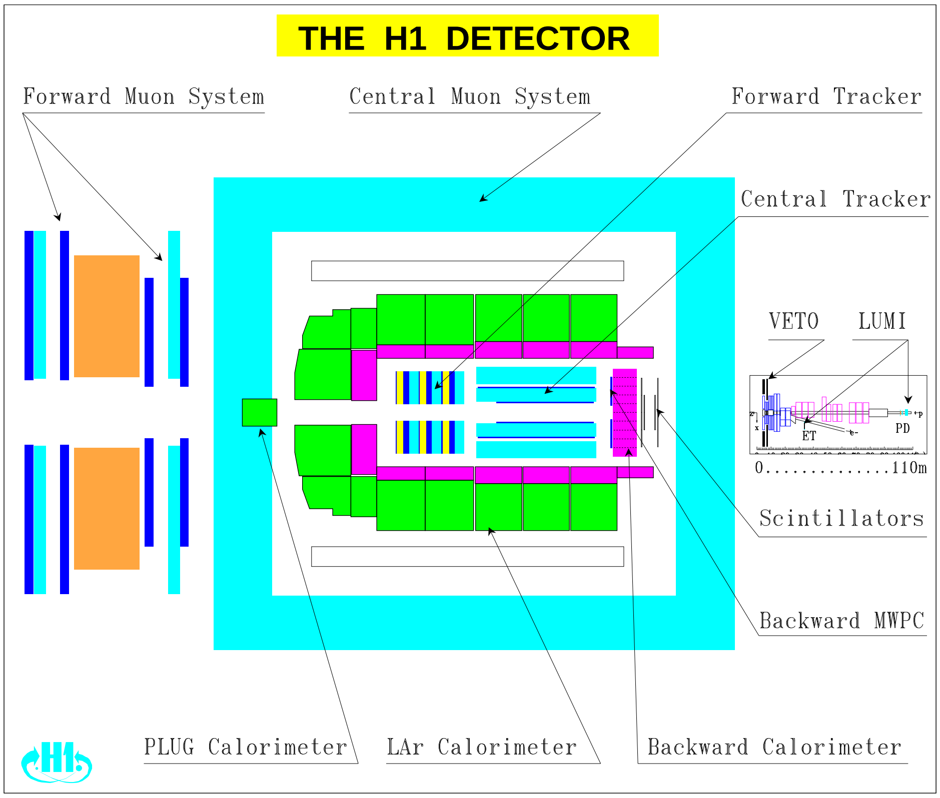

Рис. 2: Схематический вид H1 детектора (протоны двигаются справа налево)

Основная часть детектора H1 – *жидко-аргоновый калориметр*, предназначенный для измерения энергии частиц, рожденных в реакции.

Зона взаимодействия почти полностью окружена калориметром, так что практически все частицы оказываются зарегистрированными.

Калориметр делится на две части: *электромагнитный калориметр* (внутренняя часть)– поглотителем служат свинцовые пластины и *адронный калориметр*(внешняя часть)– в качестве поглотителя используется нержавеющая сталь.

Чуствительной частью калориметра, как это следует из названия, являются жидкоаргоновые ионизационные камеры, расположенные между слоями поглотителя. Кроме того, калориметр сегментирован на много маленьких ячеек, что позволяет с хорошей точностью восстанавливать направление попавших в калориметр частиц.

Для измерения треков заряженных частиц служат *передняя и центральная трековые камеры*(проволочные камеры различных типов). Точность пространственного определения точек трека достигает десятых долей миллиметра, поэтому с хорошей точностью можно определить кривизну трека в магнитном поле, а значит и момент частицы.

Для детектирования мюонов служат *передния и центральная мюонные системы*, окружающие весь детектор H1. Мюонные камеры представляют из себя совокупность огромного числа дрейфовых камер. Мюоны распознаются по их уникальной способности проходить через вещество, тратя энергию только на ионизацию, в то время как остальные частицы практически полностью теряют свою энергию на образование ливней.

Для определения энергии мюонов, летящих вперед, был установлен дополнительный *тороидальный магнит*.

3 Физическое обоснование

3.1 Физическая задача

Во многих теоретических работах высказывалось предположение о возможности использования энергичных летящих вперед барионов (лидирующих барионов), рожденных в глубоко неупругом ep рассеянии, для измерения структурной функции пиона.

В физических исследованиях ядерных взаимодействий, переданная энергия ($\Delta E = E_b - E_n$, разница между энергией пучка и энергией рассеянного нейтрона) очень важная величина. Для точного измерения ΔE в области $E_n \sim E_b$ требуется хорошая точность измерения E_n.

Для изучения рождения лидирующих нейтронов в 1996 в эксперимент был установлен Передний Нейтронный Калориметр (FNC-SpaCal, построенный по спаггети технологии и работавший ранее в эксперименте на LEP(CERN)), расположившийся в 107 метрах от номинальной точки взаимодейстаия детектора H1 по направлению движения протонов. Передний Нейтронный Калориметр предназначен для регистрации нейтронов с энергией в диапазоне от 200 GeV до энергии протонного пучка – 920 GeV и имеющих угол рассеяния до 0.6 $mrad$.

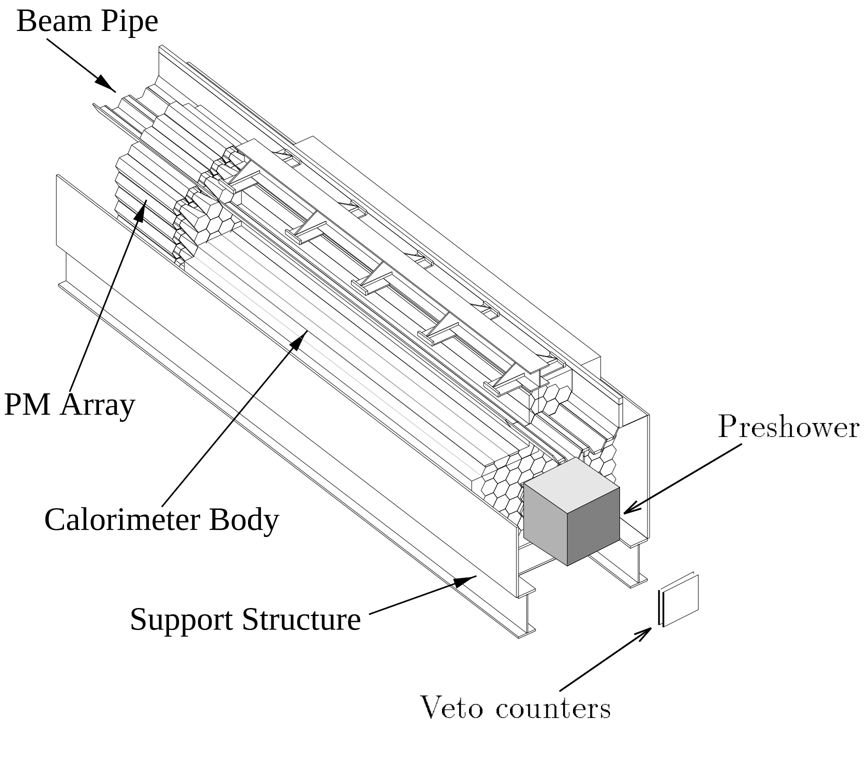

Рис. 3: Конфигурация FNC в 1998 году

В 1998 году перед основным калориметром FNC-SpaCal был установлен новый 386 миллиметровый сэндвич калориметр – *Preshower*, существенно увеличивший энергетическое и пространственное разрешение и позволивший получить хорошее разделение нейтронного и электромагнитного ливней, за счет того, что электромагнитный ливень полностью поглощается в объеме Preshower, адронный же ливень лишь начинатся в нем, а развивается в основном калориметре.

3.2 Результаты использования FNC

Из данных 1996 года были отобраны и проанализированы события, в которых FNC регистрировал нейтроны.

- Было обнаруженою, что в $(5.7 \pm 1.6)\%$ всех глубоко неупругих событий рождается лидирующий нейтрон с поперечным импульсом $p_T \leq 200MeV$ и $z = E_n/E_p^0 \geq 0.2$. Впервые на HERA было измерено тройное дифференциальное сечение $d\sigma/(dxdQ^2dz)$ рождения лидирующих нейтронов с $p_T \leq 200MeV$ в кинематическом диапазоне переданного импульса $2GeV^2 \leq Q^2 \leq 50GeV^2$, Бъеркеновской переменной $6 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 6 \cdot 10^{-3}$ и $0.2 \leq z \leq 1$. Измерения были параметризованы в терминах полу-инклюзивной структурной функции $F_2^{LN(3)}(x, Q^2, z)$, по аналогии с инклюзивной структурной функцией протона.

- Сечение рождения лидирующих нейтронов с $0.7 \leq z \leq 0.9$ может быть объяснено π^+ обменом.

3.3 Обоснование замены FNC

Основное ограничение точности измерения сечения обуславливалось ограниченным энергетическим разрешением FNC ($\sim 20\%$ в диапазоне энергий детектируемых нейтронов - между 300 и 800 GeV). К тому же, за период работы из-за радиационного повреждения материалов значительно упал отклик основного FNC-SpaCal калориметра, что сказалось на разрешении. Есть предположнение, что это было вызвано тем, что в некоторый момент FNC подвергся очень интенсивному облучению протонами в результате "потери" протонного пучка HERA в FNC, что и привело к необратимым изменениям внутри детектора. Отклик калориметра с тех пор начал уменьшаться, а энергетическое разрешение ухудшаться.

Улучшив энергетическое разрешение и статистику, можно расширить измерения сечения до значительно больших значений Q^2 и x. Расширение кинематического диапазона позволит различать существующие модели рождения частиц. Измерения при $\beta > 0.2$ [1] обеспечивают прямое сравнение получаемых данных со структурной функцией пиона, определенной в других экспериментах по пион-нуклонному рассеянию.

[1] $\beta = x/(1-z)$

4 Основы калориметрии

4.1 Электромагнитный ливень

Энергичная электромагнитно взаимодействующая частица (e^{+}, γ), попадая в вещество, порождает электромагнитный ливень(каскад), развивающийся за счет двух повторяющихся эффектов:

- *Bremsshtrahlung или радиационное торможение.* Электрон(позитрон) в поле ядер излучает жесткий γ-квант, уносящий ощутимую часть энергии электрона.
- *Рождение электрон-позитронной пары* – наиболее вероятный процесс для энергичного γ-кванта, который в поле электронов или ядер может конвертироваться в электрон-позитронную пару.

Развитие ливня прекращается, когда энергия электронов, формирующих ливень, становится меньше критической энергии E_c и ионизация становится более вероятным процессом, чем радиационное торможение.

4.1.1 Радиационная длинна (X_0)

Для описания электромагнитного ливня удобно пользоваться так называемой *радиационной длинной* X_0, определяемой как расстояние, на котором энергия электрона уменьшается в e раз за счет радиационного торможения (эффекта bremsshtrahlung).

4.1.2 Размеры электромагнитного ливня

Для того, чтобы оценить размеры ливня, можно воспользоваться моделью развития электромагнитного ливня, в которой начальный электрон через интервалы X_0 испускает по одному γ-кванту уносящему, согласно определению X_0, $1/e$ энергии электрона. Как говорилось выше, развитие ливня прекращается когда энергия электрона E становится равной критической E_c. Если начальная энергия электрона E_0, то это произойдет через n актов испускания γ-квантов, где n определяется из соотношения:

$$\frac{E_0}{e^n} = E_c$$

Откуда следует, что путь, пройденный электроном до остановки развития ливня равен:

$$X = X_0 \cdot n = X_0 \cdot ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right)$$

4.2 Адронный ливень

Проходя через вещество, высокоэнергичный адрон, в некоторой точке взаимодействует с одним из ядер. В результате взаимодействия, как правило, рождаются мезоны (π, K и т.д). Другая часть энергии адрона передается ядрам. Возбужденное ядро снимает возбуждение за счет испускания некоторого количества нуклонов, а на поздних стадиях γ-квантов. Остаток кинетической энергии ядра тратится на ионизацию.

Частицы, рожденные в реакциях (мезоны, нуклоны и т.д.), могут также терять свою энергию посредством ионизации, а могут участвовать в новых реакциях, порождая новые частицы. Таким образом, развивается адронный ливень.

Вторичные частицы, участвующие в развитии ливня, подразделяются на четыре группы:

- Высокоэнергичные фотоны и электроны, возникающие в результате распадов π^0 и η, инициируют электромагнитные ливни и образуют электромагнитную компоненту адронного ливня.
- Ионизирующие адроны (заряженные пионы, каоны, протоны и.т.д)
- Мягкие нейтроны
- Мягкие γ-кванты, возникающие в результате релаксации ядер

4.2.1 Ядерная длинна взаимодействия (λ_I)

Поскольку основная часть адронного ливня основана на ядерных взаимодействиях, вводится понятие аналогичное радиационной длине X_0 *ядерная длина взаимодействия* λ_I, определяемая как длина, на которой взаимодействуют $1/e$ адронов. В первом приближении вероятность взаимодействия определяется плотностью ядер на пути адрона. Если предположить, что число ядер на единицу объема не зависит от материала, то λ_I будет зависеть от радиуса ядер как $A^{1/3}$.

4.2.2 Minimum-Ionizing Particle (MIP)

Частица, проходящая сквозь вещество без образования ливня, теряют часть своей энергии на ионизацию. В калориметрии такую частицу принято называть MIP (от Minimum-Ionizing Particle - Минимально-Ионизирующая Частица). Доля энергии, теряемая MIP на ионизацию, в силу ограниченности числа возможных процессов, практически постоянна и зависит только от свойств вещества. Поэтому, очень часто сигнал калориметра измеряется в относительных MIP- единицах. За единицу энергии принимается отклик калориметра на частицу, прошедшую сквозь детектор и потерявшую энергию только в процессе ионизации.

4.2.3 Отношение e/h

В связи с тем, что в адронном ливне обязательно рождаются электромагнитно взаимодействующие частицы, порождающие электромагнитные каскады, важным становится такое понятие, как отношение откликов калориметра на электрон и адрон одинаковой энергии. Для идеального калориметра, размеры которого достаточно велики для полного поглощения электронного и адронного ливней, вводится понятие e/h_{intr}. Не стоит забывать, что в реальных калориметрах, за счет утечек энергии адронного ливня из объема детектора, оцениваемое (по откликам детектора на электрон и адрон) отношение e/h оказывается несколько больше чем e/h_{intr}.

Понятно, что сильное отклонение e/h_{intr} от единицы приводит к ухудшению энергетического разрешения.

Исходя из наиболее общих рассуждений, в силу природы адронного и электромагнитного ливней, отклик калориметра на электрон должен быть больше чем отклик на адрон той же энергии, из-за потерь энергии адронного ливня за счет возбуждения ядер вещества и рождения не регистрируемых нейтрино. Однако, существуют методы компенсации, позволяющие увеличивать отклик детектора на адронную компонету ливня, приближая тем самым отношениектора на адронную компонету ливня, приближая тем самым отношение e/h_{intr} к единице.
В связи с этиим водятся такие понятия, как:

- *Скомпенсированный калориметр* - детектор, для которого справедливо следующее соотношение $\mid 1 - e/h_{intr} \mid \leq 0.05$.

- *Перекомпенсированный и недокомпенсированный калориметры.* Соответственно, $e/h_{intr} \leq 0.95$ и $e/h_{intr} \geq 1.05$

4.3 Калориметры

Для измерения энергии частиц высокой энергии (измерение которой классическими методами практически невозможно или крайне затруднительно) используют калориметры – детекторы, в объеме которых частица теряет всю, или почти всю, энергию, трансформируемую тем или иным способом в измеряемый сигнал.

4.3.1 Конструктивная классификация калориметров

Гомогенные калориметры
Гомогенными называют калориметры весь объем которых является детектирующей средой, например, сцинтиллятором. Если размер такого детектора достаточно велик, чтобы полностью вместить развивающийся ливень, то сигнал с него, в силу принципов работы калориметра, прямо пропорционален энергии частицы породившей ливень. Понятно, что для регистрации частиц высокой энергии (в особенности адронов) требуются детектороры внушительных размеров, стоимость которых, с увеличением размеров, растет непропорционально быстрее чем размеры калориметра. В некотрый момент стоимость детектора посто перестает быть адекватной физической задаче. Выход из положения – использование гетерогенных калориметров.

Гетерогенные калориметры
Объем таких калориметров, независимо от варианта конструкции, является, как следует из названия, неоднородным и состоит из чередующихся слоев поглотителя и чувствительных слоев. В качестве поглотителя используют вещества с высоким Z – Fe, Pb, U, в качестве чувствительных слоев могут использоваться различные виды сцинтилляторов, газовые ионизационные камеры и т.д. Развитие ливня происходит в основном в объеме поглотителя, а чувствительные слои регистирируют проходящие через них заряженные частицы. Таким образом, лишь малая часть энергии ливня, но

тем не менее пропорциональная всей энегии ливня, детектируется чувствительными слоями. Но зато для измерения энергии адрона требуемый размер калориметра, в силу большого среднего Z, а следовательно маленькой λ_I, намного меньше чем у однородного гомогенного калориметра.

4.3.2 Энергетическое разрешение калориметров

Сигнал калориметра, вне зависимости от типа калориметра, определяется числом N высвеченных фотонов(в случае сцинтилляционной "начинки") или электронов(в случае использования ионизационных камер) образовавшихся в чуствительных слоях детектора и зарегистрированного электроникой. Совершенно очевидно, что разрешение детектора зависит от флуктуации числа частиц N.

Для возникновения флуктуаций есть множество причин. Вот основные из них:

- *Флуктуации развития ливня.* По сравнению с электромагнитными ливнями, для адронных ливней этот эффект особенно выражен из-за огромного количества возможных каналов реакций взаимодействия адронов с веществом и эффектов, связанных с возбуждением ядер поглотителя.
  Для энергетического разрешения адронных калориметров существенным оказывается отношение e/h_{intr}, сильное отклонение которого от единицы приводит к ощутимому ухудшению разрешения.

- *Флуктуации сэмплинга*, связанные с тем, что основная часть ливня развивается в слоях поглотителя, а в детектирующих слоях выделяется только малая часть всей энергии ливня.

- *Конструктивная неоднородность калориметра.* Неоднородность материалов из которых изготавливается калориметр, конструктивно заложенная неоднородность сбора фотонов(электронов), рожденных в результате прохождения сквозь детектирующий слой заряженной частицы и т.д.

- *Неопределенность калибровки.* Для получения информации о пространственном развитии ливня, калориметр, как правило, разбивается на некоторое количество независимых сегментов (ReadOut каналов). Неопределенность калибровки (точность с которой выравнены отклики отдельных каналов) зависит от многих факторов (например от конструктивной неоднородности калориметра) и не всегда может быть устранена.

- *Статистика фотоумножителей*(в случаее считывания с помощью ФЭУ). Процесс преобразования энергии световой вспышки в импульс тока многоступенчатый: фотон попадая на фотокатод ФЭУ выбивает из него электрон, который порождает электронную лавину, проходя через динодную систему. Все этапы носят статистический характер.

- *Утечки энергии.* Наиболее актуальны в адронных калориметрах. По сравнению с электромагнитным, ливень, инициированный энергичным адроном, имеет намного большие поперечные и продольные размеры и из-за ограниченных размеров калориметра часть энергии ливня может “вытекать” из объема детектора.

- *Шумы, наводки и ошибки связанные с электроникой.* К этому пункту относятся все неприятности связанные с электроникой: шумовые эффекты, внешние и внутренние наводки, нестабильность обусловленная температурной зависимостью и т.д.

В нулевом приближении можно считать, что флуктуации, связанные с конструктивной неоднородностью, отсутствуют, а все остальные подчиняются распределению Пуассона и следовательно выражение для σ имеет вид $\sigma = \sqrt{N}$. Если к тому же калориметр линейный, то N пропорционально выделенной в нем энергии, и, следовательно, энергетическое разрешение может быть записано в виде:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{Const}{\sqrt{E}}$$

На самом деле все не так просто и экспериментальное энергетическое разрешение обычно записывается как сумма трех членов:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \sqrt{\frac{C_1^2}{E} + \frac{C_2^2}{E^2} + C_3^2} = \frac{C_1}{\sqrt{E}} \oplus \frac{C_2}{E} \oplus C_3$$

где C_1, C_2 и C_3 – константы, а E выражается в GeV. Членам входящим в формулу описывающую энергетическое разрешение можно приписать физический смысл. Член, пропорциональный $1/\sqrt{E}$, который обычно называют *масштабный член* возникает за счет статистических флуктуаций в развитии ливня. Член, пропорциональный $1/E$, обусловлен существующей неопределенностью условий проведения тестов (неадекватность электроники, ошибка определения энергии пучка), как правило его не рассматривают, поскольку он является незначительной поправкой. Наконец, так называемый *постоянный член* включает все остальные флуктуации (утечки ливня, конструктивные неоднородности и нескомпенсированность)

5 Описание нового FNC

5.1 Описание детектора в целом

Передний Нейтронный Калориметр (Forward Neutron Calorimeter) предназначен для регистрации нейтронов, имеющих угол рассеяния до 0.6 $mrad$ и с энергией в диапазоне от 200 GeV до энергии протонного пучка - 920 GeV.

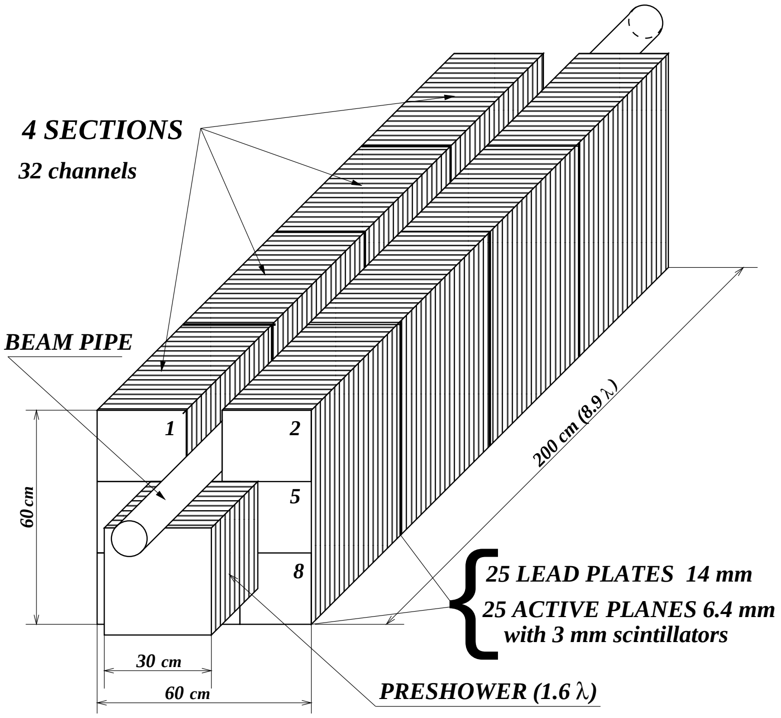

Рис. 4: Схематический вид FNC после модификации

Ниже приводится краткое описание трех основных частей экспериментальной установки FNC после модификации:

- *Главный калориметр FNC*, весящий приблизительно 6 тонн, имеет размеры $600 \times 600 \times 2000 mm^3$. Конструктивно детектор делится на 4 независимых модуля (состоящих из чередующихся 25 слоев свинца и 25 слоев сцинтиллятора), каждый из которых сегментирован на 8 независимых "башен". Таким образом, калориметр логически разбит на 32 части. Такая сегментация позволяет достичь хорошего пространственного разрешения ($\sim 2\ cm$). Схематический вид детектора и его разбиение на модули можно видеть на рис 4.

- *Маленький калориметр Preshower*, располагающийся перед основным калориметром, перейдет из старой установки без модификации. Preshower имеет электромагнитную и адронную части, каждая из которых состоит из 12 слоев: Электромагнитная секция сделана из тонких сцинтилляторов (2.6 mm) и свинцовых пластин (7.5 mm), адронная секция сделана из толстых сцинтилляторов (5.2 mm) и свинцовых пластин (14 mm).

Поперечные размеры активной области – $261 \times 261\ mm^2$. Свет с каждой сцинтилляционной пластины транспортируется к фотоумножителям по 45 световодам, объединенным в 9 пучков. Полная глубина Preshower'a состовляет около 1.6 ядерных длин.

- *Счетчики запрета заряженных частиц*, располагающиеся в $2\ m$ перед Preshower'ом, предназначены для отсечения событий, инициированных заряженными частицами.

Новый основной калориметр установки FNC было решено сделать по, так называемой, сэндвич технологии, т.е из чередующихся слоев поглотителя и детектирующих слоев.

В целях экономии средств и времени, в качестве поглотителя был выбран свинец, а в качестве материала чувствительного слоя – пластиковый сцинтиллятор.

Как известно, наилучшее энергетическое разрешение достигается при равных откликах калориметра на электромагнитный и адронный ливни ($e/h = 1$, скомпенсированый калориметр). Известно, что отношение e/h может изменяться при варьировании толщин поглотителя и чуствительного слоя. В калориметрах типа свинец/сцинтиллятор, для выполнения равенства $e/h = 1$ требуется взять отношение толщин 4:1. По ряду причин, отношение толщин поглотителя и сцинтиллятора в новом FNC было решено взять равным $4.6 : 1$. Предполагалось, что в этом случае калориметр будет немного перекомпенсирован.

Для выбранного отношения, средняя плотность калориметра равна $\sim 75\%$ плотности свинца, а ядерная длина взаимодействия $\lambda_I \sim 22.6cm$. Получается, что полная глубина калориметра(включая $1.6\lambda_I$ маленького калориметра Preshower) составляет 10.5 ядерных длин. Известно, что поглощение 95% ливня, инициированного 900 GeV адроном, требует $9.5 - 10$ ядерных длинн поглотителя. Следовательно, выбор продольных размеров FNC адекватен физической задаче, стоящей перед детектором.

Следует отметить, что подобный сэндвич-калориметр был успешно опробован в эксперименте ZEUS [7]. Энергетическое разрешение детектора по данным ускорительных тестов описывалось формулой $\sim 65\%/\sqrt{E[GeV]}$.

5.2 Техническое описание секций основного калориметра

Конструктивно основной калориметр состоит из 4 независимых модулей с поперечными размерами $600 \times 600\ mm^2$ и длиной 516mm. Полная длина калориметра составляет 2064 mm. Каждый модуль состоит из чередующихся 25 слоев свинца $PbSb_4(4\%\ Sb)$ (размером $600 \times 600\ mm^2$ и толщиной 14 mm) и 25 детектирующих слоев из пластикового сцинтиллятора *Kuraray SCSN81* $3mm$ толщины.

Каждый детектирующий слой объединяет 6 сцинтилляционных пластин с размерами $198 \times 198\ mm^2$ и 2 пластины с размером $198 \times 258\ mm^2$.

Каждая сцинтилляционная пластина оборачивается специальной белой *Tyvek* бумагой (рис 5), обладающей высокой отражающей способностью.

Для повышения прочности сборки и предотвращения сдвигов во время транспортировок, все сцинтилляционные пластины фиксируются с помощью двойного скотча и мягких прокладок(*Rohacell*) на тонких листах нержавеющей стали, того же размера, что и свинцовые пластины. Такая конструкция детектирующих слоев существенно упрощает сборку секций калориметра.

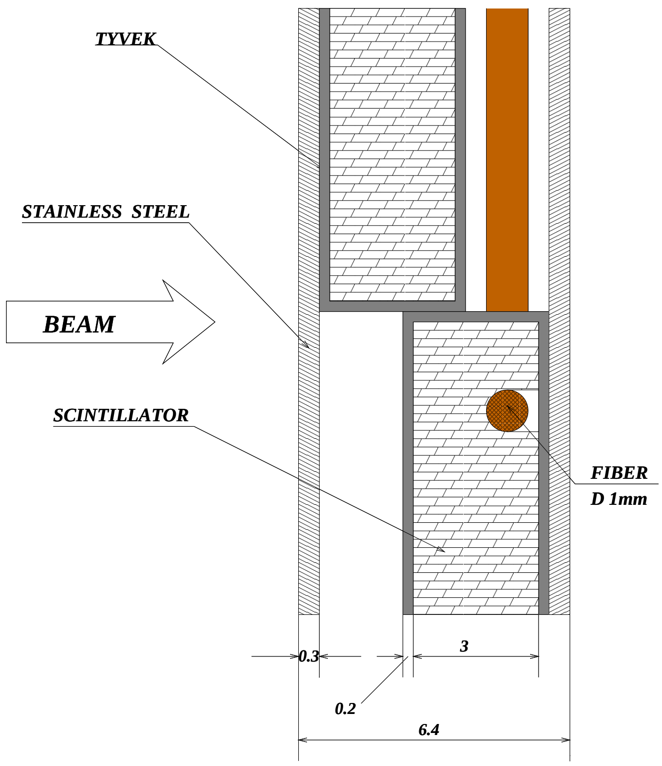

Рис. 5: Структура детектирующего слоя

Структура калориметра показана на рис 6 и обобщается в таблице 3

5.3 Система считывания

Под считыванием подразумевается способ преобразования света, рождаемого в чувствительных слоях, в электрический сигнал, пригодный для регистрации.

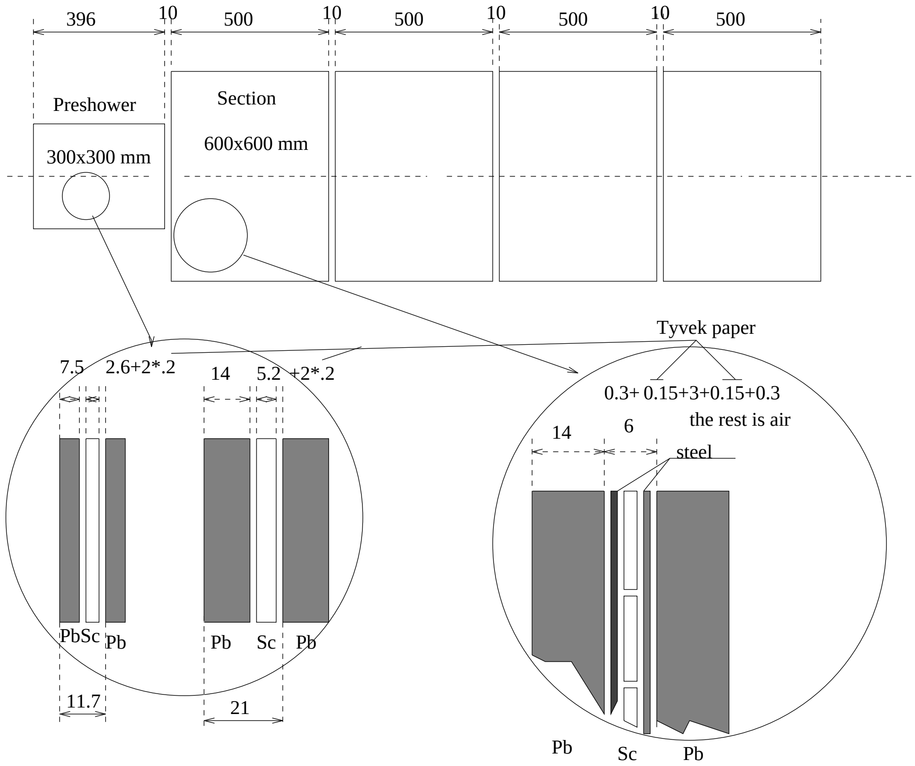

Рис. 6: Структура солоев калориметра

Материал	Толщина (mm)	Ядерные длины (λ_I)
$PbSb_4$	14	0.0820
сцинтиллятор	3	0.0034
Tyvek бумага	2×0.15	0.0000
сталь	2×0.3	0.0036
воздух	2	0.0000
Всего	20	0.089
100 слоев	2000	8.9

Таблица 1: Структура слоев калориметра

В каждой сцинтилляционной пластине прорезается круглая канавка, в которую вставляется специальный оптический световод WLS (Wavelength shifter - Сместитель спектра) (Kuraray Y11(200)). Свет, рожденный в сцинтилляторе, попадая в WLS-световод изотропно переизлучается. Те из переизлученных фотонов, которые вылетели по оси световода (с небольшими отклонениями) будут двигаться вдоль него к одному из концов. В силу того, что WLS-световод переизлучает свет, он не может использоваться для транспортировки света из-за больших потерь, поэтому, в местах где WLS-световод выходит из пластины, к нему приклеиваются прозрачные транспортные световоды. (рис 7).

Транспортные световоды 25-ти пластин, принадлежащих согласно сегментации одной “башне”, собираются в пучок, подсоединяемый к одному фотоумножителю

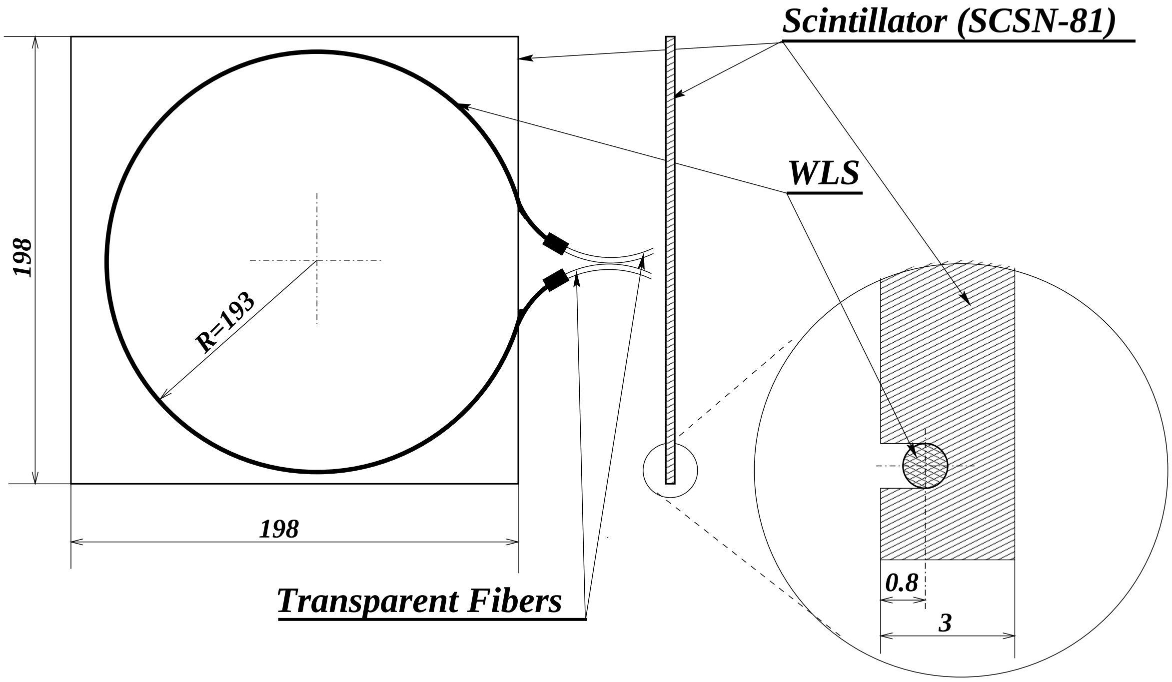

Рис. 7: Система светосбора со сцинтилляционной пластины

PHILIPS XP228B. Таким образом, из каждого модуля выходит 8 пучков световодов, просматриваемые 8 фотоумножителями. Всего основной калориметр (4 модуля) имеет 32 канала считывания.

Все компоненты калориметра, участвующие в системе считывания (сцинтилляционные пластины, составные световоды, фотоумножители), проходили индивидуальную проверку для избежания брака и улучшения однородности детектора:

5.3.1 Сцинтилляционные пластины

В создании калориметра использовался пластиковый сцинтиллятор Kuraray SCSN81 обладающий повышенной радиацинной стойкостью. Сцинтилляционные пластины имеют толщину 3 mm и поперечные размеры: 198×258 mm^2 (башни 1,2) и 198×198 mm^2(башни 3,4,5,6,7,8).
Всего в калориметре задействовано $4 \times 8 \times 25 = 800$ пластин.
В каждой пластине протачивалась круговая канавка для считываюшего световода (рис 7).
Контроль включал два этапа:

- *Контроль толщин пластин* - необходим по нескольким причинам. Во-первых, толшина пластин напрямую связана с их световыходом, во-вторых, контроль необходим для соблюдения конструктивных продольных размеров калориметра.

- *Проверка сцинтилляционных свойств* - осуществлялась с помощью радиоактивного источника. Измерялся средний световыход каждой пластины. Для это-

го пластина с устанавливаленным тестовым световодом с известными параметрами и обернутая в *Tyvek* бумагу помещалась в светоизолированый ящик. На центр пластины устанавливался источник. Свет, рожденный в сцинтилляторе, по световоду транспортировался к двум фотоумножителям (по однму на каждый конец выходящего из пластины световода). Распределение суммарного сигнала с двух ФЭУ сравнивалось с эталонным (за эталонный был принят усредненный спектр случайной выборки пластин).
Распределение световыходов пластин имело следующее отклонение от среднего:

$$RMS = 2\%$$

5.3.2 Оптические световоды

Свет с пластины собирается и транспортируется к ФЭУ с помощью составных световодов: свет собирается WLS-световодом (изотропно переизлучающим свет в нужном диапазоне длинн волн) и по транспортному световоду доставляется к ФЭУ. Таким образом, для каждой пластины имеется составной световод имеющий WLS-середину ($60\ cm$) и 2 транспортных конца ($60 - 90\ cm$).
Световоды двух типов склеивались эпоксидной смолой, обладающей особыми оптическими свойствами, а место склейки укреплялось стальной трубочкой (рис 7).
Склейка световодов достаточно тонкая и кропотливая работа: перед склейкой необходима тщательная полировка торцевых поверхностей, проделываемая вручную, индивидуально для каждого световода.
Для того, чтобы представить масштабы проделанной работы, достаточно взглянуть на таблицу 2. Из нее следует, что только на полировку требуется $6400\, min \simeq 106\, hours \simeq$ 13 восьмичасовых рабочих дней.

N	WLS-световоды	Число Транспортных световодов = Число склеек	Число полировок (время на полировку)
1 пластина	1	2	4 ($8\ min$)
8 пластин	8	16	32 ($64\ min$)
1 модуль	$8 \times 25 = 200$	$16 \times 25 = 400$	$32 \times 25 = 800$ ($1600\ min$)
Всего	$200 \times 4 = 800$	$400 \times 4 = 1600$	$800 \times 4 = 3200$ ($6400\ min$)

Таблица 2: Временные затраты на изготовление составных оптических световодов

Так же как и для пластин, для световодов проводился индивидуальный контроль, заключающийся в измерении пропускной способности склеек. Для этого использовалась следующая установка: в торец тестовой пластины с прорезанной канавкой был вклеен световод, идущий от светодиода (LED - Light Emitted Diod), на который с определенной частотой подавались импульсы тока постоянной амплитуды, что приводило к впрыскиванию в пластину периодических порций света постоянной величины.

Исследуемый световод вставлялся в канавку в тестовой пластине, а его концы подсоединялись к двум ФЭУ, которые регистрировали свет, собранный WLS-световодом и прошедщий через склейки.

Среднее значение распределения амплитуд пропорционально числу фотонов, попавших на фотокатод ($ADCcount = G \cdot N_\gamma$, где G - коэффициент усиления ФЭУ) и характеризует пропускную способность склейки. Получаемые значения заносились в базу данных и были обработаны по окончании измерений.
Ниже, для распределения пропускных способностей склеек, приводится отклонение от среднего:

$$RMS = 4\%$$

5.3.3 Изучение особенностей считывания

Известно, что для оптимального светосбора необходимо, чтобы световод проходил как можно ближе к краям пластины. С учетом того, что световод не может быть изогнут на 90°, канавка, в которую вставляется световод, должна иметь форму прямоугольника со скругленными углами.

В целях экономии времени и стоимости изготовления было решено делать канавки круглой формы, что технологически легко выполнимо. До сих пор данная геометрия считывания нигде не использовалась и по этой причине были проведены тесты по изучению однородности светосбора.

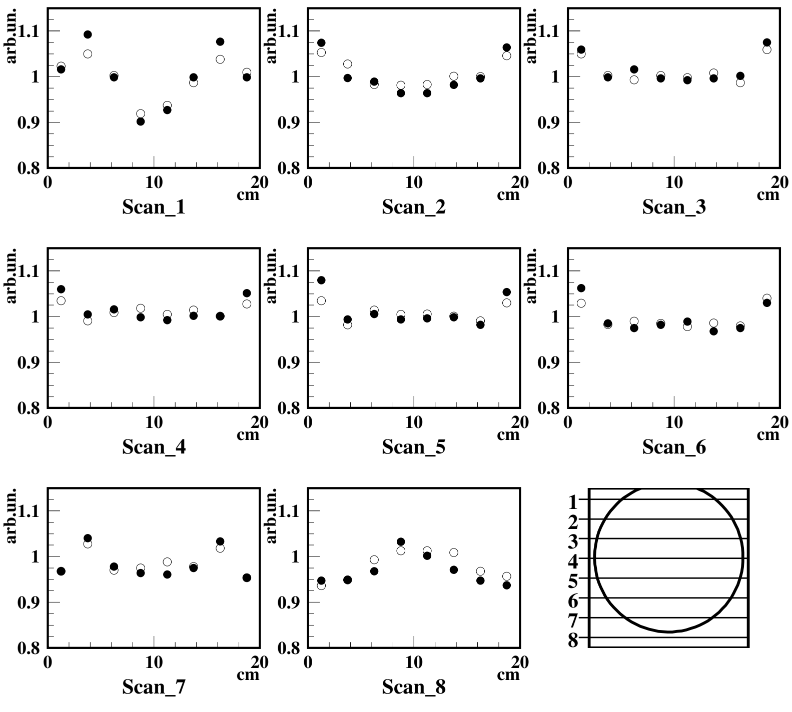

Рис. 8: Анализ неоднородности светосбора. На гистограммах наложены друг на друга результаты МонтеКарло-симуляций и тестов с радиоактивным источником. Соответствие гистограмм линиям сканирования показано на рисунке в нижнем правом углу

Для этого проводились следующие исследования:

- *Симуляция по методу Монте Карло*, заключающаяся в моделировании светосбора при прохождении частицы в различных местах пластины

- *Тесты с помощью радиоактивного источника.* Измерялся световыход пластины со вставленным в канавку световодом при сканированни пластины β-источником.

Как видно из рис 8, количество собираемого света зависит от локализации трека, прошедшей сквозь пластину заряженной частицы. Непосредственно вблизи световода светосбор максимален, в углах пластины и в месте где световод выходит из пластины наблюдается минимум светосбора.

Поскольку адронный ливень имеет большие поперечные размеры, в суммарный сигнал дают вклад все точки пластины, а общая площадь неоднородности составляет несколько процентов, поэтому вклад этого эффекта в энергетическое разрешение ожидается незначительным.
Усреденение отклика по всей пластиние дает следующие результаты:

$$RMS = 2\%$$

5.3.4 Фотоумножители

В создании калориметра использовались фотоумножители PHILIPS XP2282B. Для изучения параметров ФЭУ, была собрана установка, максимально приближенная к реальным физическим условиям, в которых будут работать фотоумножители: в сцинтилляционную пластину с помощью транспортного световода с некоторой частотой, задаваемой внешним генератором, впрыскивался свет от светодиода. Переизлучаемый сцинтиллятором свет собирался и транспортировался составным световодом к исследуемому ФЭУ.

Для каждого ФЭУ были проведены следующие измерения:

- Зависимость амплитуды сигнала от прикладываемого напряжения при неизменной длительности вспышки светодиода

- Зависимость амплитуды сигнала от длительности вспышки светодиода при постоянном напряжения на ФЭУ.

6 Предварительные исследования по методу Монте Карло

Для нового FNC были проведены расчеты по методу Монте Карло, основанные на программе GEANT 3.21 с использованием FLUKA для симуляции адронных взаимодействий.

6.1 Отношение e/h

Отношение электромагнитного и адронного откликов (e/h), рассчитанное по методу МонтеКарло близко к идеальному и равно 0.96.

6.2 Линейность

Рассчеты показали хорошую линейность отклика детектора как для электромагнитных, так и для адронных ливеней вплоть до очень больших энергий (рис 9).

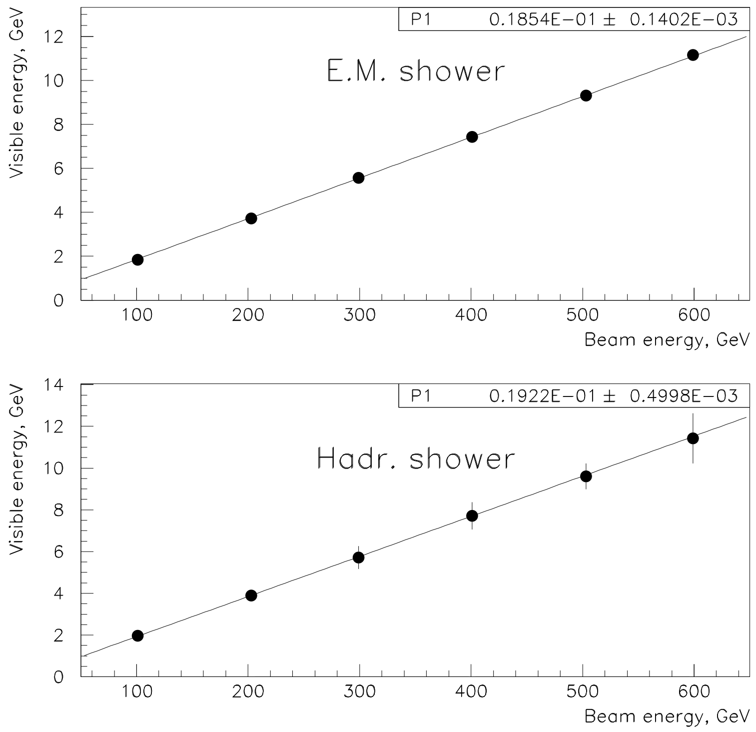

Рис. 9: Монте Карло рассчеты отклика и линейности калориметра

6.3 Энергетическое разрешение

Предсказанное энергетическое разрешение нового калориметра представлено на рис 10. Разрешение для электромагнитного ливня:

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{35\%}{\sqrt{E[GeV]}}$$

а для адронного ливня:

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{55\%}{\sqrt{E[GeV]}}$$

Если учесть, что предполагаемый постоянный член должен быть около 3%, то сходя из полученных данных, ожидаемое энергетическое разрешение нового калориметра для нейтронов с наиболее типичной энергией 600 GeV должно быть $\sim$ 5% (значительное улучшение по сравнению с 20% разрешением старого детектора). Новый калориметр способен значительно улучшить качество физических результатов.

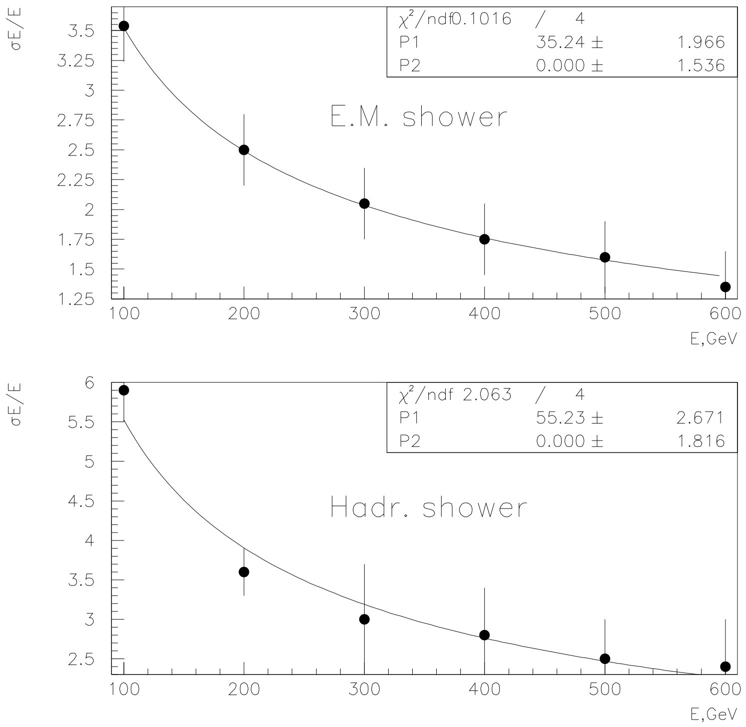

Рис. 10: Монте Карло рассчеты энергетического разрешения калориметра

7 Тесты в ИТЭФ

7.1 Организация сеанса на ускорителе в ИТЭФ

Тесты в ИТЭФ проводились на адронном пучке (π, p) с энергией $8GeV$ (без идентификации частиц). Пучок получался вследствии взаимодействия ускорительного пучка с неподвижной мишенью. Полученный пучок вторичных частиц с помощью системы магнитных линз транспортировался в экспериментальный зал.

Три модуля калориметра (последний, четвертый, модуль не был готов к моменту испытаний на ускорителе) поочередно устанавливались на подвижный стол, горизонтальное и вертикальное положение которого определялось с точностью до $0.5cm$. Положение пучка определялось с помощью лазерной системы, которая создавала видимый луч, совпадающий с пучком частиц и указывающий точку его вхождения в модуль калориметра.

Сигналы с башен калориметра проходили через электронную схему, построенную на базе крейтов CAMAC и NIM, и оцифровывались интегррирующим АЦП с ценой канала в 0.25 pC. Полученные данные записывались в виде гистограмм и затем анализировались. Результаты анализа приведены в этой главе.

7.1.1 Координатная система

Модуль устанавливался на подвижный стол таким образом, чтобы пучок входил со стороны, где первой располагалась свинцовая пластина. Если смотреть по направлению пучка (по оси Z - совпадающей с направлением пучка), башни нумеруются следующим образом: верхней левой присваивается номер 1, нижней правой - номер 8. Центральная башня, таким образом, имеет номер 4.

7.1.2 Система счетчиков

В тестах, для выделения направления пучка и организации системы триггеров, использовалось 5 сцинтилляционных счетчиков:

- S1,S2 - Широкие мониторные счетчики, используемые для измерения интенсивности адронного пучка. Счетчик S1 располагался перед последним на пути пучка отклоняющим магнитом. Счетчик S2 был помещен, соответственно, после отклоняющего магнита.

- S3,S4 - узкие ("пальчиковые") триггерные счетчики, располагались крест-накрест один за другим в непосредственной близости от калориметра. Таким образом, все частицы, вызвавшие срабатывание этих счетчиков, попадают в калориметр. На практике, для исключения случайных совпадений, вызванных прохождением космических частиц сквозь счетчики, в формировании триггеров используются также мониторные счетчики S1 и S2.

- S5 - MIP счетчик, располагающийся на оси пучка за калориметром, предназначался для выделения событий, когда адрон проходил сквозь калориметр без адронного взаимодействия, теряя энергию только на ионизацию вещества.

7.1.3 Система триггеров

Различались три типа событий, триггеры которых были построены на базе пяти используемых счетчиков:

- Основной триггер используемый в тестах – попадание адрона в объем детектора
  $T1 = S1 \times S2 \times S3 \times S4$

- Адрон провзаимодействовал в детекторе, образовав адронный ливень, и выделил в объеме калориметра всю свою энергию (нет утечек энергии в продольном направлении)
  $T2 = T1 \times \overline{S5}$

- Адрон не провзаимодействовал ядерным образом в объеме детектора (прошел насквозь, потратив энергию только на ионизацию)
  $T3 = T1 \times S5$

7.2 Тесты

7.2.1 Аппаратная форма линии отклика калориметра

Рассмотрим отклик центральной башни одного из модулей калориметра на адронный пучок с энергией 8 GeV (триггер T1). На рисунке 11 видно несколько пиков, имеющих разную ширину, форму и физическое значение.

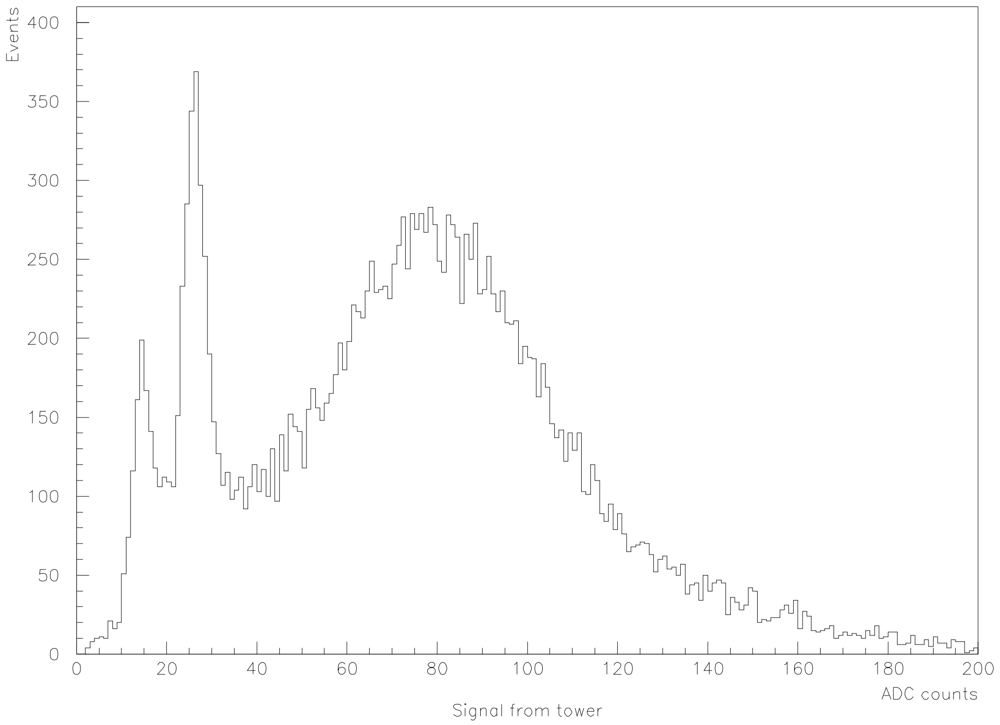

Рис. 11: Отклик одной из башен калориметра на адронный пучок 8 GeV

- Узкий пик, имеющий максимум в 15 канале, называется пьедесталом. *Пьедестал* - это, как правило, отличное от нуля значение, получаемое в АЦП, при наличии триггерного сигнала и отсутствии в тоже время физического сигнала с детектора. Существование пьедестала обусловлено наличием токов в части электронной схемы эксперимента, предшествующей АЦП. Значение пьедестала принимается за нулевое значение выделенной энергии (примером могут служить редкие случаи, когда частица, пройдя через счетчики и выработав тригер, рассеивается не дойдя до детектора). Таким образом, из реального физического сигнала всегда вычитается значение пьедестала.

- Узкий пик, имеющий максимум в 21 канале, интерпретируется как *MIP-пик*, появляющийся за счет того, что часть заряженных адронов, проходя через детектор, не взаимодействуют ядерным образом, а теряют свою энергию только на ионизацию. Доля энергии, теряемая адроном в детекторе за счет ионизации практически постоянна. Ширина MIP-пика определяется флуктуациями ионизации и разрешением калориметра: неоднородностью, флуктуациями в усилительных каскадах ФЭУ и т.д.

- Широкий пик справа – это адронный пик. *Адронный пик* - результат ионизации активных слоев калориметра всеми заряженными частицами, рожденными в ливне, инициированном адроном. Ширина пика объясняется большими флуктуациями, как в числе, так и в виде заряженных частиц в ливне, а так же в энергии, затрачиваемой на возбуждение ядер вещества. На рисунке 11 видно, что адронный пик не симметричен и имеет длинный хвост в области больших энергий. Это говорит о наличии утечек энергии из объема калориметра.

7.2.2 Зависимость отклика от напряжения на ФЭУ

Энергия, выделенная во всем калориметре, равна сумме энергий со всех башен, а сигнал калориметра соответственно складывается из сигналов отдельных башен, поэтому важно, чтобы для всех башен выделенная энергия одинаково трансформировалась в сигнал (т.е. требование равенства коэффициентов усиления башен). Добиться равенства коэффициентов усиления можно изменяя высокое напряжение на ФЭУ. Для изучения зависимости отклика башен от высокого напряжения проводились тесты, в которых при неизменных положении модуля и параметрах пучка варировалось высокое напряжение на ФЭУ.
Изменение высокого напряжения приводит к изменению коэффициента усиления, и, следовательно, к изменению масштаба рассмотренной выше аппаратной формы линии калориметра (рис 12). Адронные и MIP-пики аппроксимировались с помощью гауссовых кривых. Для каждой башни были построены зависимости найденных положений максимумов адронных пиков от приложенного высокого напряжения. Анализ показал, что экспериментальные данные хорошо аппроксимируются следующей функцией двух параметров:

$$Ampl(HV) = a \cdot (HV)^b,$$

где HV – приложенное высокое напряжение, a, b – подбираемые параметы.

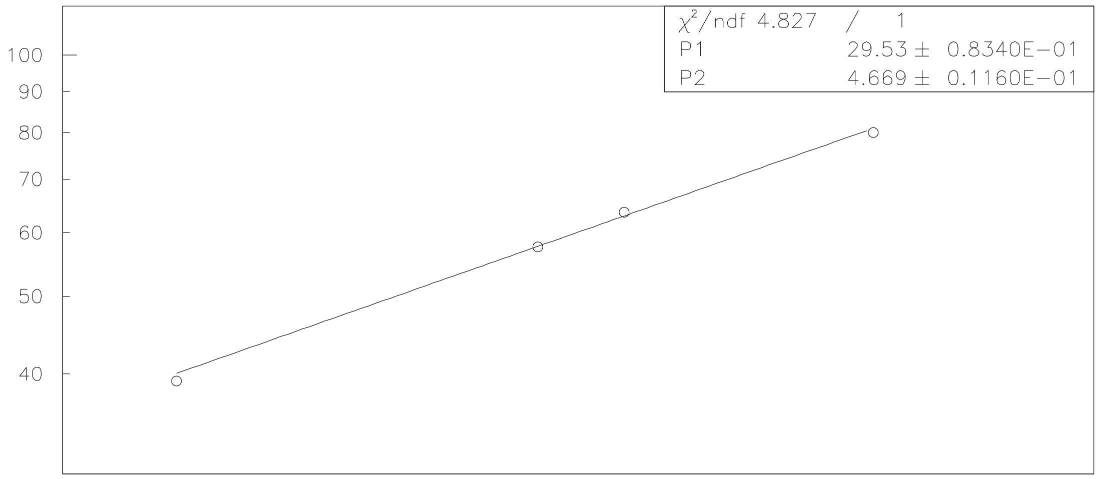

Рис. 12: График зависимости положения максимумов адронного пика от приложенного к ФЭУ высокого напряжения в дважды логарифмическом масштабе

В дальнейших испытаниях высокие напряжения на ФЭУ устанавливались такими, при которых отклики всех башен на адронный пучок были одинаковы.

7.2.3 Изучение "утечек" энергии из объема калориметра

Как уже говорилось, длинный хвост у адронного пика в области больших энергий свидетельствует о наличии утечек. Действительно, для поглощения 95% ливня, инициированного адроном с энергией 8 GeV, требуется приблизительно 4-5 ядерных длин. Каждый модуль имеет приблизительно $2\lambda_I$, следовательно, возможны утечки энергии из калориметра в продольном направлении. Поскольку размеры подвижного стола не позволяли устанавливать несколько модулей одновременно, узнать истинную величину утечек в продольном направлении не представлялось возможным. Для изучения утечек в поперечном направлении проводились простые опыты. При пучке, попадающем в одну башню, анализировался отклик соседних башен. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда пучок попадает в центральную башню, и сигнал снимается как с этой башни, так и с двух граничащих с ней (в горизонтальной плоскости).

На рисунке 13 показаны распределения сигналов с трех башен. Крайние гистограммы это и есть распределения изучаемых утечек. Величину утечек можно легко оценить из рисунка 14, на котором наложены друг на друга распределения сигнала центральной башни и суммы сигналов с центральной и двух соседних с ней башен. При энергии пучка $8GeV$ утечки из центральной башни в две соседние башни составляют 25% от энергии выделенной в трех башнях.

Лучше оценить величину и поведение утечек можно из описанных ниже опытов по изучению однородности детектора.

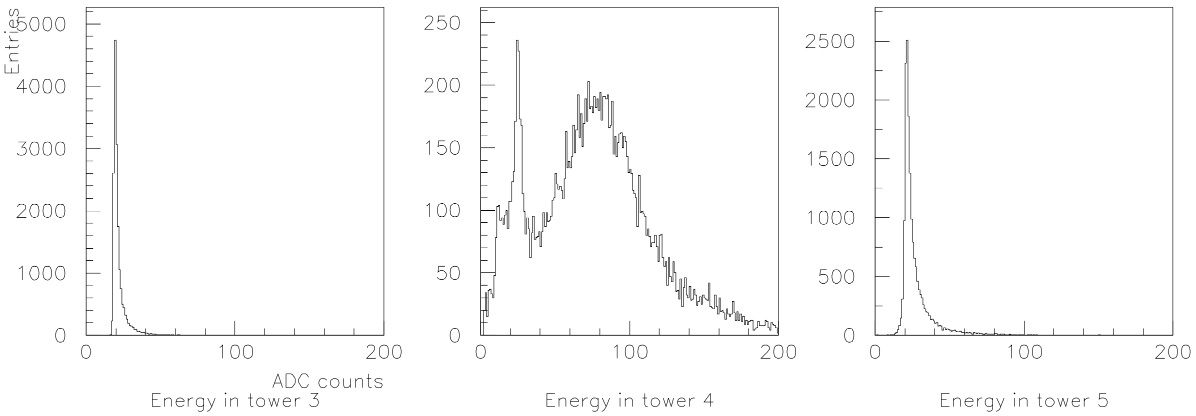

Рис. 13: Энерговыделения в трех соседних башнях при пучке входящем в центральную башню. Крайние гистограммы характеризуют утечки энергии в поперечном направлении из исследуемой башни

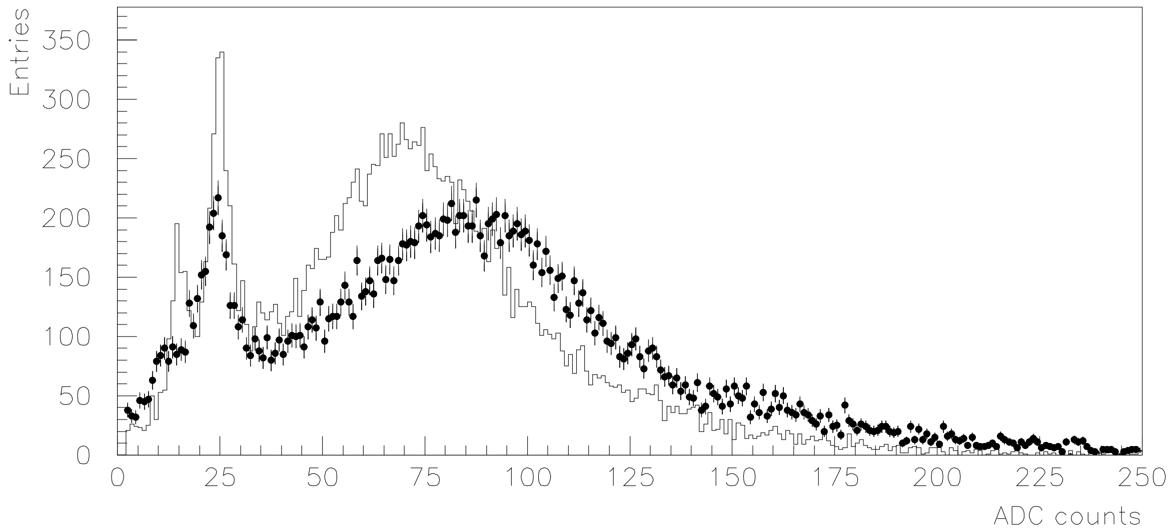

Рис. 14: Распределения сигналов с одной центральной башни (сплошная линия) и суммы сигналов с центральной и двух граничащих с ней башен (точки с ошибками)

7.2.4 Изучение однородности центральной башни калориметра в плоскости, перпендикулярной пучку

Исследуемая башня сканировалась адронным пучком с шагом 2 см. Для каждого положения пучка записывались гистограммы откликов трех башен: сканируемой башни и двух соседних. Ожидалось, что при попадании пучка в центр башни отклик должен быть максимальным, а по мере приближения к краям, из-за увеличивающихся утечек, сигнал с башни должен уменьшаться, в то время как отклик ближайшей к краю соседней башни должен пропорционально увеличиваться. Обработка результатов выявила несимметрию откликов калориметра относительно центра башни. Оказалось, что точка, относительно которой существует ожидаемая симметрия откликов, смещена влево на 1 см.

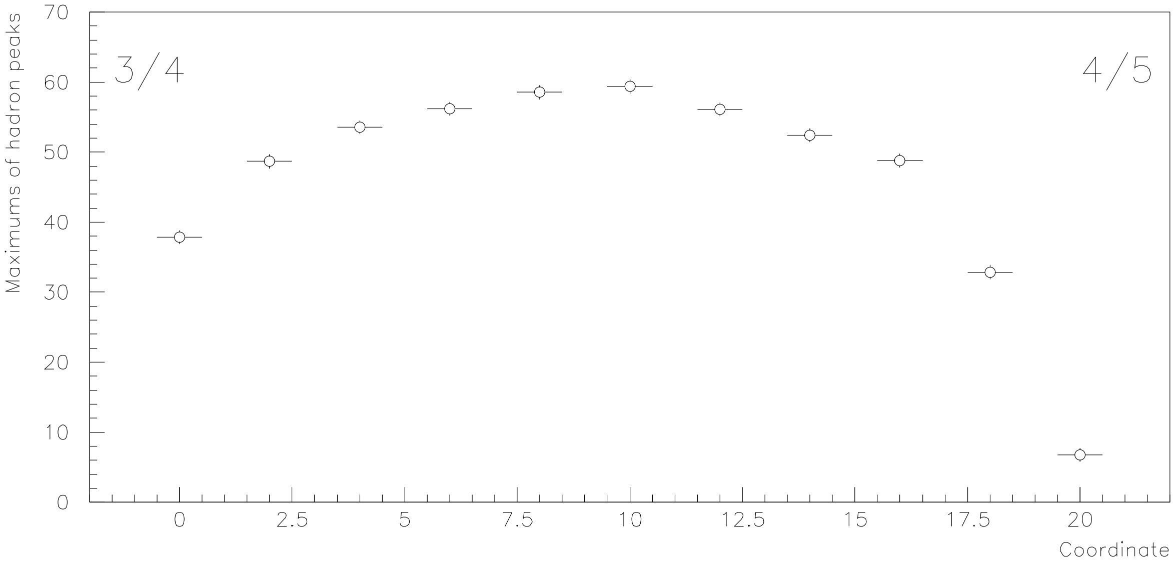

Рис. 15: Сканирование центральной башни адронным пучком в горизонтальной плоскости. Положение максимумов адронного пика в зависимости от координаты вхождения адронного пучка в исследуемую башню

Первоначально высказывалось предположение о том, что была неверно выбрана координатная привязка, но позднее было найдено другое решение. Для объяснения эффекта достаточно предположить, что ось Z калориметра не совпадала с осью пучка, т.е. калориметр был повернут на некоторый угол α. Если исходить из высказанного предположения, то из существующей несимметрии отклика башни относительно ее центра можно оценить угол α поворота калориметра относительно оси пучка:

$$\alpha = arctg(\frac{2 \cdot d}{D}) \approx 2^\circ,$$

где D–длина модуля, d–расстояние от центра башни до точки, относительно которой наблюдается симметрия отклика.

Подтверждение предположению о повороте калориметра было получено при обработке MIP данных в тестах по изучению однородности переходных областей между башнями, в которых было обнаружено деление MIP-сигнала между соседними башнями (пики присутствуют в обеих башнях), что возможно только при несовпадении оси пучка и оси калориметра.

7.2.5 Изучение однородности калориметра

Аналогичное сканирование было проведено для всего модуля в горизонтальной плоскости, начиная от начала 3-ей башни до конца 5-ой, с шагом 2 см. Записывался суммарный сигнал с трех башен. Исследовалось поведение утечек энергии из объема калориметра и однородность переходных областей между башнями.

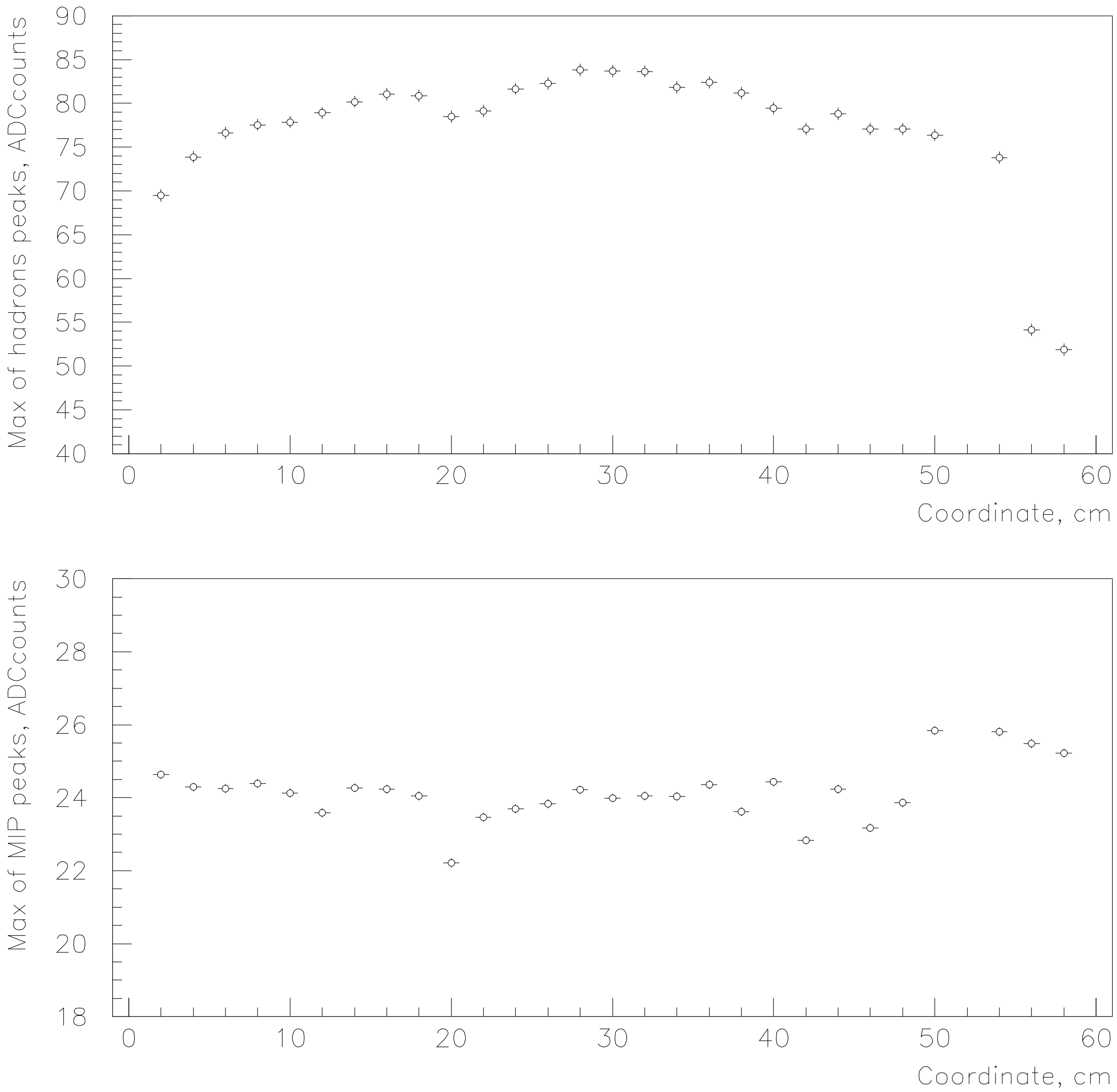

Рис. 16: Сканирование калориметра адронным пучком в горизонтальной плоскости. Положение максимумов адронного (вверху) и MIP (внизу) пиков в зависимости от координаты вхождения адронного пучка. Результирующий сигнал – сумма сигналов с трех башен.

На рисунке 16(вверху) показана зависимость положения максимума адронного пика от координаты вхождения пучка. Как и предполагалось, чем ближе точка вхождения пучка к краю калориметра, тем меньше отклик из-за увеличивающихся выливаний энергии. В области перехода между башнями наблюдается незначительное уменьшение отклика, которое можно обьяснить существованием конструктивных зазоров ($4mm$) между сцинтилляционными пластинами в детектирующих слоях. Несколько неожиданным оказалось поведение положения MIP-пика от координаты вхождения пучка. На рисунке 16(внизу) видно увеличение амплитуд MIP-пиков при приближении к краю модуля. Возможное объяснение данному эффекту - это существующая проблема стабильности пучка (в анализируемых гистограммах, начиная с некоторого момента, по непонятной причине, распределения сигналов начинают “расплыватся”, о чем свидетельствует наличие так называемых “отрицательных энергий” - значений энергии меньше пьедестала).

7.2.6 Изучение MIP сигналов

Важность информации, полученной от исследования MIP сигналов очевидна. Энергия, затрачиваемая релятивистской частицей на ионизацию вещества, через которое она проходит, слабо зависит от энергии частицы и зависит в основном от плотности вещества. Поэтому очень часто в калориметрии MIP сигналы используют в качестве единицы измерения энергии, выделенной в калориметре. Энергию, теряемую частицей за счет ионизации в чувствительных слоях калориметра, можно легко оценить. Известно, что в используемом пластиковом сцинтилляторе MIP теряет в результате ионизации 2 MeV/см. Следовательно, частица, прошедшая насквозь модуль калориметра, ионизирует 25 сцинтилляционных пластин по 3 мм каждый. Таким образом, пройдя в сумме 7.5 см пластика, частица оставляет в нем 15 MeV, преобразуемые в измеряемые сигналы ФЭУ.

Есть два способа исследовать MIP сигналы:

- Можно использовать интегральные распределения. Это не всегда хорошо, поскольку MIP пик находится на подложке адронного пика, крутизна которой, по различным причинам, может меняться. Более того, оказалось, что в зависимости от “качества” пучка различить пьедестал и MIP пик иногда не представляется возможным.

- Второй, более корректный способ, это использование MIP триггера, для выделения чистых MIP событий.

Как уже говорилось, сигнал с калориметра считался MIP если выполнялось условие $T3 = S1 \times S2 \times S3 \times S4 \times S5$, свидетельствующее о том, что частица вошла в калориметр и вышла не провзаимодействовав. С использованием данного триггера калориметр сканировался в горизонтальной плоскости.

Анализ данных в области переходов между башнями подтвердил предположение о несовпадении оси калориметра с осью пучка: в области перехода сигнал присутствовал одновременно в двух граничащих башнях, что может быть свидетельством того, что частица проходила часть пути в одной башне, а остаток в другой, тратя энергию на ионизацию в обеих башнях.

8 Тесты в CERN

8.1 Организация сеанса на ускорителе SPS в CERN

Для окончательной калибровки калориметр был доставлен в CERN. Тесты проходили в два этапа. В июне 2000 года детектор был установлен на пучок H6 ускорителя SPS. В июньских тестах использовались позитронные (e^+) и адронные(π^+) пучки с энергиями в диапазоне от 120 до 180 GeV. Все модули калориметра последовательно устанавливались на подвижный стол, горизонтальное и вертикальное положение которого определялось с точность 0.1 см. Основной задачей июньских тестов было проведение относительной калибровки модулей основного калориметра и маленького калориметра Preshower, начало набора даных необходимых для абсолютной калибровки детектора и изучения основных параметров калориметра: линейности, энергетического разрешения.

В августе калориметр был перемещен на пучок H4 где диапазон энергий адронов был несколько шире (максимальная доступная энергия адронного пучка 350 GeV). На пучке H4 запланированные испытания детектора были завершены.

За все время тестов в CERN было записано более 50 Gb данных.

8.1.1 Координатная система

Как и во время тестов в ИТЭФ, модули устанавливались на подвижный стол таким образом, чтобы пучок входил со стороны, где первой располагается свинцовая пластина. Ось Z совпадает с направлением пучка. Начало координатных осей X и Y совпадает с центром центральной башни. Направление осей X и Y были выбраны в соответствии с направлением движения подвижного стола. Так поднятие стола вверх соответствует увеличению координаты Y, движение стола вправо - увеличению координаты X (при описанных перемещениях пучок двигается вниз и влево).

8.1.2 Система счетчиков и триггеров

Для тестов использовалось 4, последовательно расположенных, сцинтилляционных тригерных счетчика S1, S2, S3, S4 расположенным аналогично тестам в ИТЭФ. Последний счетчик S4, имеющий ширину всего 3 мм, предназначался для прецизионных измерений.

В тестах в CERN не использовались MIP-счетчики, поэтому система триггеров была очень проста:
$T1 = S1 \times S2 \times S3$ - основной триггер используемый в тестах, обеспечивал выделение адронного пучка шириной $\approx 1cm$.
$T2 = S1 \times S2 \times S3 \times S4$ - добавление пальчикового счетчика обеспечивало занчительное сужение выделяемого пучка, но на практике данный триггер использовался редко, ввиду слишкой низкой скорости набора данных.

8.1.3 Система считывания

Сигналы с 32 фотоумножителей основного калориметра и 18 фотоумножителей маленького калориметра Preshower считываются с помощью Флэш АЦП F1002.

Запись сигнала Флэш АЦП

В отличае от используемых в ИТЭФ интегрирующих заряд АЦП, Флэш АЦП оцифровывает форму сигнала, записывая его амплитуду во временых каналах с шагом 10 нс. Поэтому, для получения численного значения сигнала с башни необходима дополнительная обработка данных, записываемых Флэш АЦП.

Калибровка Флэш АЦП

Для используемых Флэш АЦП закон сответствия между амплитудой подаваемого на вход напряжения и получаемым в канале АЦП числом нелинеен:

$$V = \frac{1}{(Ay_i + B)} + C$$

где V – постоянное напряжение подаваемое на вход, y_i – показание в i-ом временном канале АЦП (0-255).

У каждого электронного входа свой набор коэффициентов A и B и C. Для калибровки на вход АЦП подавалось известное постоянное напряжение и по внешнему триггеру записывалось показания 40 временных каналов (использовались первые 40 из 255). Полученные значения усреднялись и строилась зависимость отклика каждого электронного входа АЦП от подаваемого на вход напряжения. Коэффициенты определялись сглаживанием экспериментальных точек указанной выше функцией.

Процедура обработки сигнала

Как уже говорилось, для получения значения сигнала с башни необходима обработка данных, записанных Флэш АЦП. С помощью полученных калибровочных кривых восстанавливается форма сигнала с ФЭУ, после чего с помощью приводимых ниже формул рассчитывается искомое значение сигнала с башни калориметра.

За значение пьедестала принимется усредненный сигнал записываемый, АЦП до прихода реального физического сигнала:

$$Ped = \frac{1}{NPed} \sum_{j=1,NPed} V_j$$

где j – номер временного канала значение в котором не является физическим сигналом, $NPed$ – определяет число временных каналов (10 nS интервалов) до начала оцифрованного физического сигнала, V_j – восстановленное с помощью калибровочных кривых значение в канале

$$Energy = Coef \sum_{j=NPed+1,NChannel} (V_j - Ped)$$

где j – номер временного канала, значение в котором принадлежит физическому сигналу, $NChannel$ – общее число временных каналов (40), Ped – рассчитанное значение пьедестала

8.1.4 Формат данных

Последовательные события (под событием подразумевается попадание частицы в объем калориметра), полученные при неизменных условиях (положение калориметра, напряжение на ФЭУ, интенсивность и энергия пучка и т.д.) объединяются в так называемый *ран* (от run - набор). Для каждого рана имеются два типа данных:

- *Файлы исходных данных*, записываемые непосредственно в момент тестов, имеют следующую структуру:
  - *Информационный заголовок*, содержащий информацию о положении калориметра, об энергии и типе пучка, комментарии.
  - *Сырые данные* для каждого события, включают поканальные записи со всех Флэш АЦП, информацию о триггере.
- *Файлы Ntuples*, содержащие обработанные сырые данные в формате пригодном для работы с пакетом HBOOK. Каждое событие характеризуется рядом индивидуальных параметров, описанных в таблице 3.

Имя переменной	Описание
IRUN	номер run
IEVE	номер события начиная с 0
UTIME	unix время (секунды с 01.01.1970)
ILED	ILED=1 сигнал от светодиода, 0 в остальных случаях
IOVF	IOVF=1 переполнение, 0 в противном случае.
IPART	код частиц в пучке (стандарт GEANT)
EBEAM	энергия пучка, GeV
XB	X-координата пучка, см, (0,0) центр башни 4
YB	Y-координата пучка, см, (0,0) центр башни 4
ES(8,4)	сигналы со всех 32 башен калориметра
TS(8,4)	задержка сигналов с 32 башнен калориметра
EST(4)	сигналы с 4 модулей калориметра
EX(9)	сигнал с 9 X-стрипов Preshower
TX(9)	задержка сигналов с X-стрипов Preshower
EXT	суммарный сигнал с Preshower по X-проекции.
EY(9)	сигнал с Y-стрипов Preshower
TY(9)	задержка сигналов с Y-стрипов Preshower
EYT	суммарный сигнал с Preshower по Y-проекции.

Таблица 3: Описание формата файлов Ntuples

8.2 Тесты

8.2.1 Краткое описание тестов

Последовательность проведения тестов была следующей: Первым на подвижный стол был установлен последний-четвертый модуль калориметра. После проведения необходимых испытаний (описанные ниже *калибровка на электронном пучке* с целью подбора напряжений на ФЭУ для выравнивания коэффициентов усиления башен и *тесты на адронном пучке* для изучения отклика калориметра), перед четвертым установили третий модуль и повторили те же испытания. После этого были последовательно установлены второй и первый модули калориметра, и затем маленький калориметр Preshower. Таким образом, были установлены напряжения на всех ФЭУ и набраны данные, когда адронный ливень развивается сначала в одном модуле, затем в двух, трех, четырех и, наконец, во всем Переднем Нейтронном Калориметре (основной калориметр + Preshower). Подобная организация тестов позволила получить много дополнительной информации о детекторе.

Калибровка на электронном пучке

Для того чтобы выровнять отклики башен, использовался электронный пучок с энергией 120 GeV. Изменением высокого напряжения на ФЭУ подбирались коэффициенты усиления для башен таким образом, чтобы отклики на пучок, попадающий в центры башен, были одинаковы.

Известно, что электромагнитный ливень, инициированный электроном такой энергии, развивается не во всем объеме башни, поскольку его размеры, как продольные так и поперечные, меньше размеров башни. Но поскольку на этапе создания детектора проводился жесткий контроль однородности сцинтилляционных пластин и оптических световодов, есть основания полагать что башни однородны по глубине. Поэтому результаты калибровки электронным пучком можно считать достаточно точными. Возможные ошибки калибровки электронным пучком планировалось устранить на этапе обработки данных программной калибровкой, заключающейся в подборе численных коэффициентов для каждой башни, корректирующих разброс в коэффициентах усиления.

Тесты на адронном пучке

После того, как были выставлены напряжения на ФЭУ, в центр каждой башни направлялся пучок π^+ , и записывались отклики башен всех модулей, установленных на пучке в данный момент. В тестах использовался адронные пучки с энергиями 120 и 180 GeV. Для лучшего понимания особенностей детектора попутно проводились различные тесты, нацеленные на изучение однородности калориметра, поведение утечек энергии из объема детектора.

8.2.2 Отклик основного калориметра на адронный пучок

Разбиение калориметра на 32 независимые башни позволяет увидеть профиль адронного ливня – распределение выделенной энергии внутри калориметра. На рисунке 17 показан отклик всех 32 башен калориметра на пучок адронов с энергией 120 GeV, направленный в центр калориметра. Как видно основная часть энергии выделяется в центральных башнях, причем на последний четвертый модуль приходится сравнительно небольшая доля выделенной энергии.

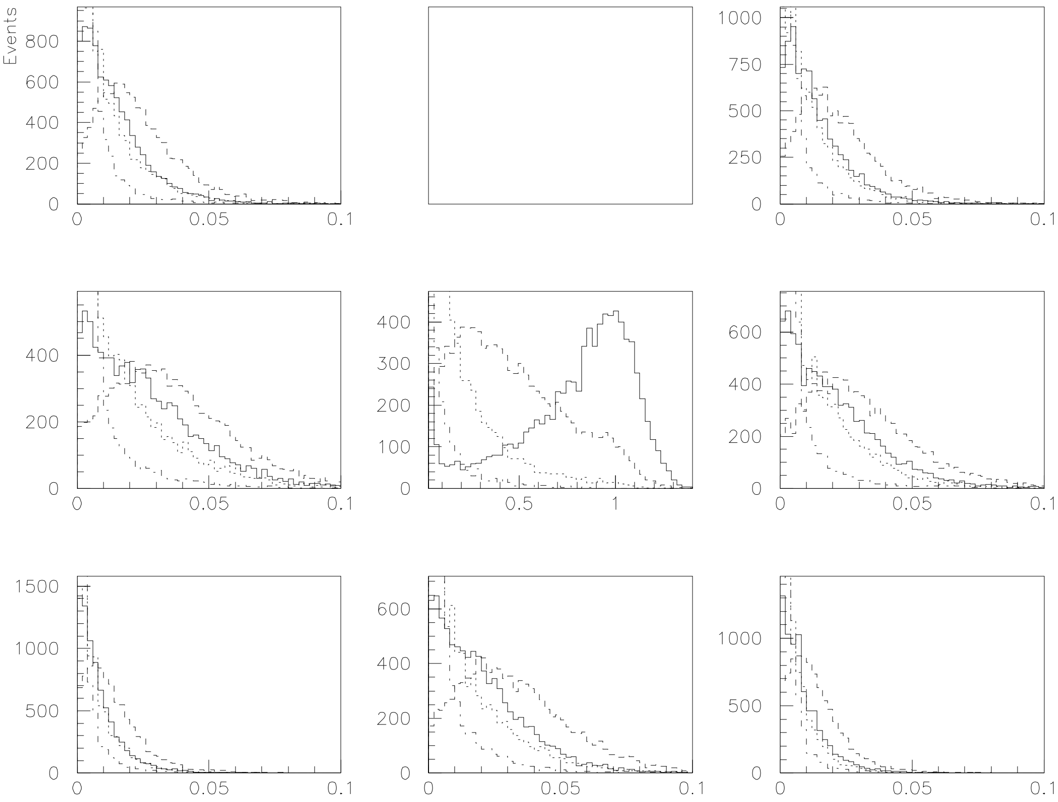

Рис. 17: Отклик 32-ух башен основного калориметра на адронный пучек 120 GeV входящий в центр центральной башни Гистограммы на рисунке расположены в соответствии с номинальным расположением башен калориметра. Пустая гистограмма в верхнем ряду соответствует конструктивному вырезу в калориметре для пучковой трубыю. На каждой гистограмме показаны распределения энергии в четырех башнях, расположенных по глубине одна за другой. Сплошная линия соответствует первому модулю, штриховая линия – второму, пунктирная – третьему и штрихпунктирная – четверому модулю

Так же можно рассмотреть продольное поведение ливня. На рисунке 18 показано распределение энерги ливня по модулям. На рисунке видно, что существует значимое число событий, в которых энерговыделение в 1-ом модуле минимально. Это ни что иное, как MIP-сигнал. Поскольку длинна одного модуля составляет $2.5\lambda_I$, то согласно определению λ_I, около $e^{-2.5} = 8\%$ π^+ из первичного потока начнут развитие ливня за первым модулем, пройдя сквозь него без ядерного взяимодействия, затрячивая энергию только на ионизацию.

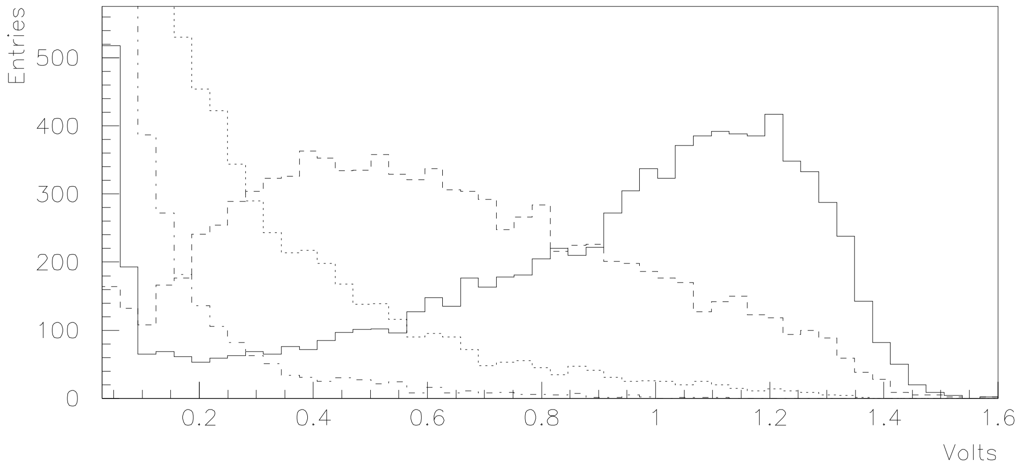

Рис. 18: Распределение энергии ливня по 4-ем модулям калориметра для π^+ пучка 120 GeV входящий в центр центральной башни.Сплошная линия соответствует первому модулю, штриховая линия – второму, пунктирная – третьему и штрих-пунктирная – четвертому модулю

Анализируя распределение энергии ливня по объему калориметра, можно получить представление о утечках в поперечном направлении, оценив выливание энергии из центральных башен в соседние при адронном пучке направленном в центр калориметра. Логически разбив детектор на 8 сегментов, образуемых четырьмя башнями, расположенными одна за другой по глубине, и рассчитав среденее энерговыделение в нецентральных сегментах, я получил следующие значени:

Выливание энергии в боковые сегменты (согласно нумерации 3,5 и 7) составляет 4.5% от суммарной энергии ливня выделенной в калориметре.

Утечки в диагональные сегменты 7 и 8 около 2%, а в сегменты 1 и 2 около 3%

Отсюда же, используя требовние симмертрии поперечного развития ливня, можно оценить, что утечки в вырез для пучковой трубы составляют около 1.5% от суммарной энергии ливня.

Суммарный сигнал со всех башен калориметра определяет энергию, выделенную в объеме детектора. На рисунке 19, для тех же событий, показано распределение суммы сигналов со всех 32 башен. Небольшой хвост в области малых энергий свидетельствует о наличии незначительных утечек (в вырез для пучковой трубы). Пик суммарного распределения – практически симметричный пик. Он может описываться гауссовым распределением, через параметры которого (μ, σ) определяют выделенную энергию и энергетическое разрешение калориметра.

8.2.3 Однородность перехода между башнями в основном калориметре

В CERN, в отличие от тестов в ИТЭФ, с целью изучения эффектов, связанных с неоднородностью переходных областей, на стыках сцинтилляционных пластин, про-

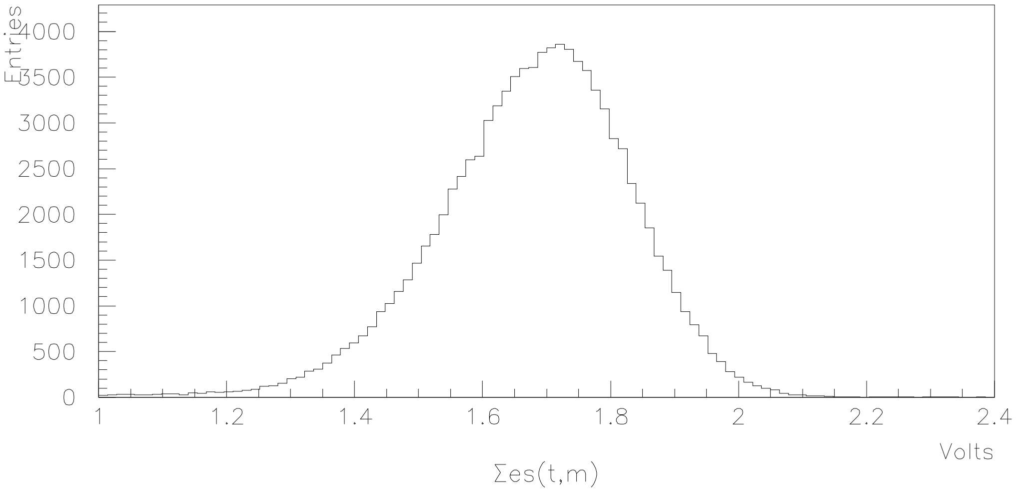

Рис. 19: Распределение суммы откликов 32-ух башен основного калориметра на адронный пучек 120 GeV входящий в центр центральной башни

водилось сканирование переходов между башнями калориметра электронным пучком.

На рисунке 20 показан результат сканирования перехода между 4 и 5 башнями

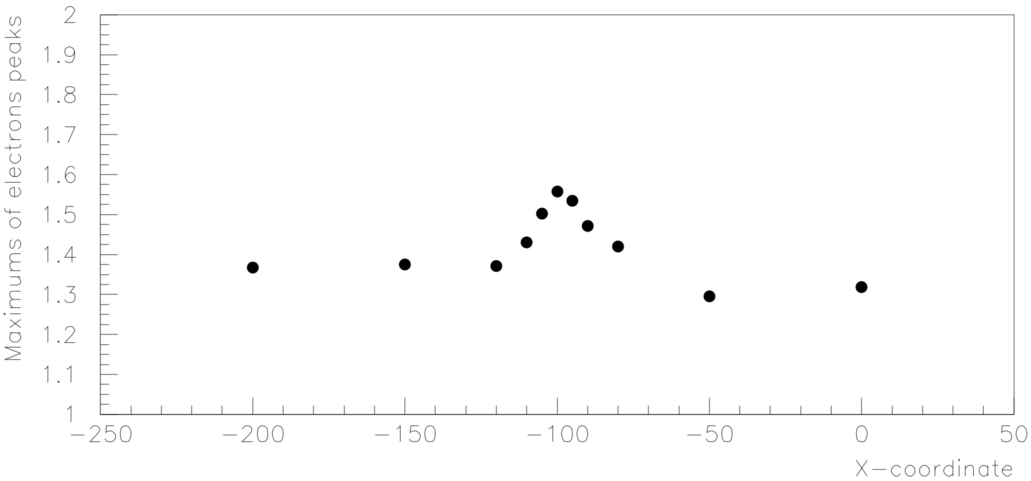

Рис. 20: Сканирование переходной области электронным пучком

калориметра. Как видно из рисунка, в переходной области наблюдается увеличение сигнала на 15% по сравнению со средним значением отклика "внутри" башен, объясняемое неоднородностью сбора света со сцинтилляционной пластины (подразумевается эффект увеличения световыхода при прохождении заряженной частицы непосредственно сквозь оптический световод, вставленный в пластину).

Эффективная область, где наблюдается усиление, меньше 3 см. Поскольку адронный ливень непредсказуемо развивается по всему объему калориметра, происходит усреднение сигнала и, следовательно, вклад рассматриваемого эффекта в энергетическое разрешение детектора незначителен.

8.2.4 Однородность основного калориметра

Для изучения однородности отклика основного калориметра (все четыре модуля детектора), центральная область детектора сканировалась с шагом 5 см пучками адронов с энергиями 120 GeV и 180 GeV. Предполагается, что основной причиной, по которой отклик калориметра зависит от положения пучка, должны быть утечки энергии из объема калориметра в поперечном направлении.

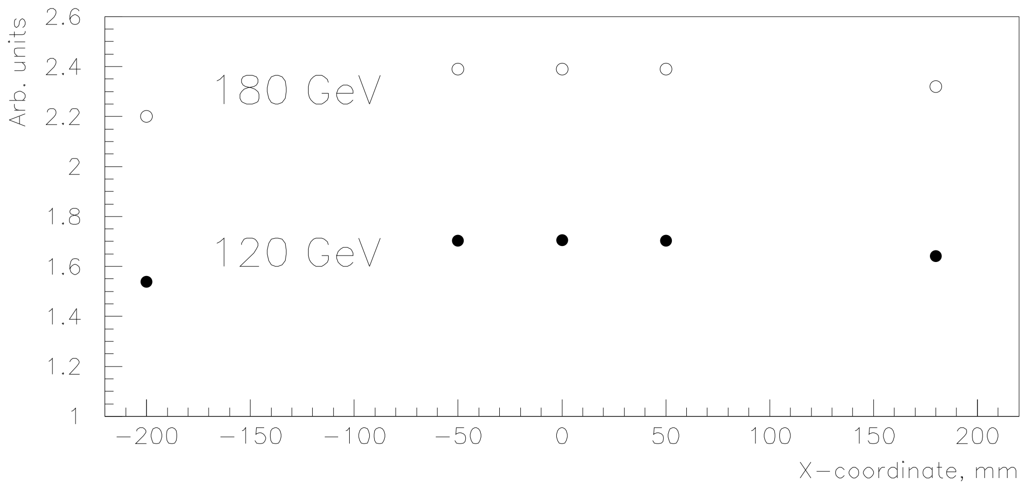

Рис. 21: Зависимость положения максимума адронного пика от координаты для адронов с энергиями 120 и 180 GeV

Для различных положений точки вхождения адронного пучка были построены распределения суммарного сигнала со всех башен калориметра. Для наглядности, в рассмотрение были включены две дополнительные точки (результат попадания адронов в башни соседние с центральной). По имеющимся данным была построена зависимость отклика калориметра от координаты (горизонтальное сканирование) показанная на рисунке 21. Как видно, максимальное значение отклика получается при вхождении пучка прямо в центр калориметра. На расстоянии 5 см от центральной точки отклик уменьшается менее чем на 1%. На расстоянии 18 см от центра отклик падает на 4%, а на 20 см на 10%.

8.2.5 Отношение e/h

Одним из наиболее важных параметров калориметра является отношение e/h. Полученное в результьтате Monte Carlo симуляций отношение e/h равно 0.96. Анализ показал отклонение смоделированного отклика калориметра от реальных физических данных. Полученное несоответствие отражено на рисунке 22. Для скомпенсированного калориметра отношение e/h=1, что означает, что положение максимумов распределений откликов калориметра на электроны и адроны одинаковой энергии должны совпадать (если утечки адронного ливня из объема детектора незначительны). На представленном рисунке видно, что электронный пик находится левее адронного пика, что подтверждает существование перекомпенсированности калориметра. Однако отношение e/h=0.78, следующее из этого рисунка, много отличается от ожидаемого 0.96.

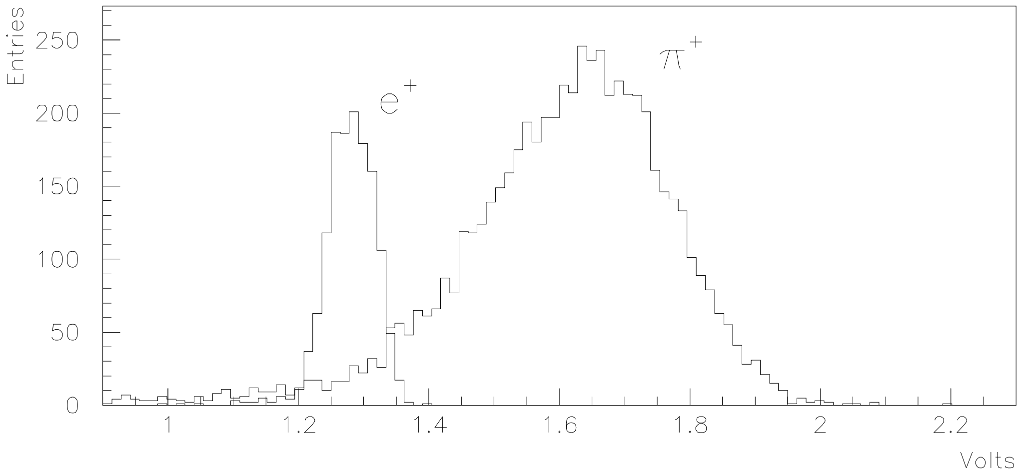

Рис. 22: Отклик основного калориметра на электронный и адронный пучки одинаковой энергии 120 GeV

Причину столь сильного расхождения экспериментальных и смоделированных данных установить пока не удалось. Есть предположение, что видимое отклонение откликов на электроны и адроны связано с тем, что существует ошибка в калибровочной зависимости измеренной энергии от выделенной в башне энергии. Правильная зависимость линейна (с углом наклона 45^o) и начинается строго из нуля. Предполагается, что по какой то причине калибровочная зависимость была построена неправильно, что и приводит к неверному восстановлению энергии выделенной в калориметре и эффектам, подобным аномальному отношению e/h.

Сильное отклонение e/h от 1 чревато серьезным ухудшением энергетического разрешения, поскольку возникает добавка Δ к постоянному члену в формуле описывающей энергетическое разрешение:

$$\Delta \sim (\frac{e}{h} - 1)$$

В настоящий момент ведется работа по изучению величины эффекта и возможностей устранения ошибки калибровки. Так что есть основания полагать, что представленное в данной работе энергетическое разрешение FNC, может быть немного улучшено.

О результатах исследования энергетического разрешения написано ниже.

8.2.6 Линейность

Среди основных характеристик калориметра, особое место занимает линейность отклика по энергии. На рисунке 23 построены зависимости отклика FNC на адронные и электронные пучки различной энергии.

Как видно, в указанном диапазоне энергий FNC линеен. Разница углов наклона зависимостей отклика калориметра на адронный и электронный пучки объясняется тем, что электромагнитный ливень, возникший в результате попадания электрона в объем детектора, полностью поглощается в маленьком калориметре Preshower, ливень же, инициированный адроном, развивается во всем объеме детектора. Следовательно, линейность FNC по энергии для электромагнитно взаимодействующих частиц полностью определяется линейностью калориметра Preshower, а для адронов – это характеристика всего детектора в целом.

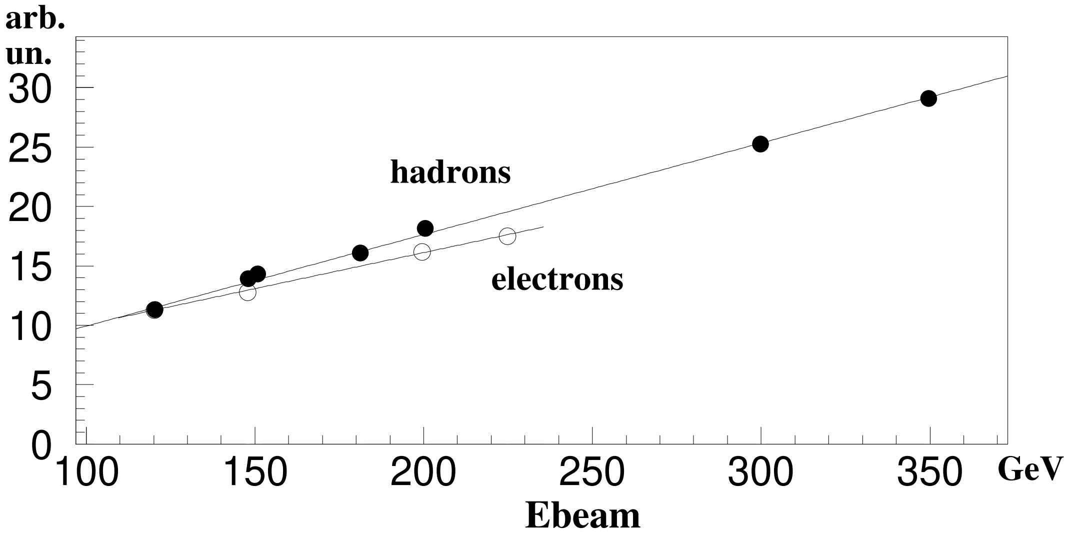

Рис. 23: Линейность FNC по энергии

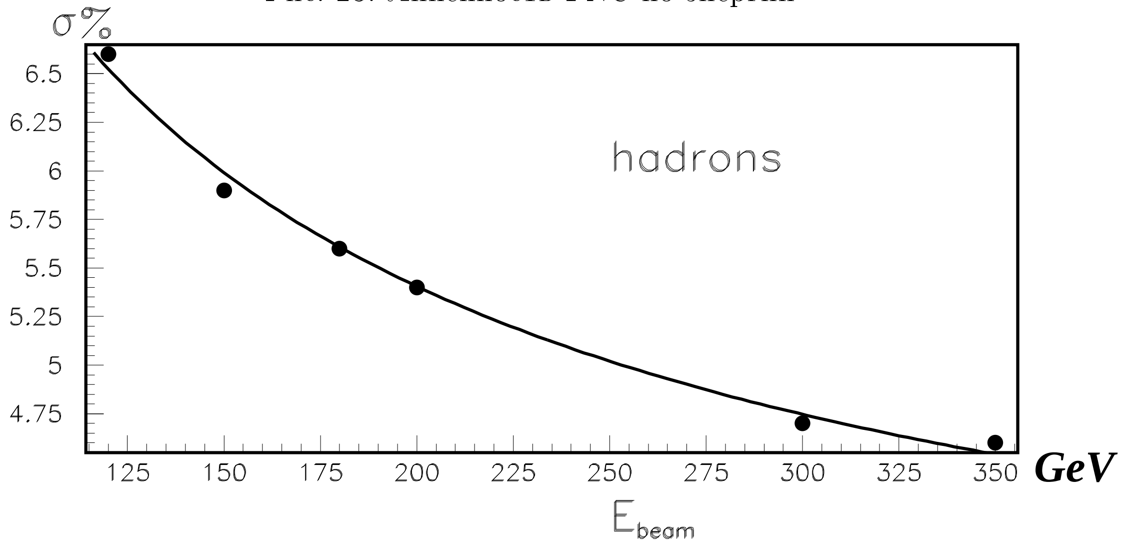

Рис. 24: Энергетическое разрешение FNC для адронов

8.2.7 Энергетическое разрешение

По результатам испытаний в CERN была построена кривая зависимости энергетического разрешения (определяемая как отношение σ пика суммарного сигнала калориметра к среднему значению сигнала) от энергии π^+ и e^+ пучков (рис 24).

Полученные точки сглаживались функцией двух параметров C_1 и C_2:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{C_1}{\sqrt{E}} + C_2$$

Для электронного пучка энергетическое разрешение, как и в случае с линейностью, определяется свойствами маленького калориметра Preshower, который полностью поглощает электромагнитный ливень. Полученные значения параметров для электронов:

$$C_1 = 30\% \quad C_2 = 3\%$$

Для адронов были получены следующие значения параметров:

$$C_1 = 62.5 \pm 0.2\% \quad C_2 = 3.15 \pm 0.2\%$$

Значения немного больше, чем рассчитоное по методу Монте Карло ($C1 \approx 50\%$). Однако, во время тестов в CERN, как выяснилось в результате обработки данных, использовалась неадекватная электроника с высоким уровнем шума и, как следствие, с низкой точностью измерений, что позволяет предположить, что реальное энергетическое разрешение детектора в действительности несколько лучше.

9 Программная калибровка

Адронный калориметр оптимизирован для измерения энергии адронов. Адрон, попадая в объем детектора, оставляет в нем некоторую энергию. Часть энергии выделяется в чувствительных слоях калориметра и преобразуется в измеряемый сигнал, переводимый АЦП в цифровой вид.
Задача калибровки – найти соответствие между значением, полученным в АЦП и реальной энергией адрона.
В случае идеального гомогенного калориметра вся энергия адрона поглощается в объеме детектора и отклик калориметра строго пропорционален энергии. В реальных условиях все не так: размеры калориметра ограничены, поэтому часть энергии адронного ливня, имеющего большие продольные и поперечные размеры, уходит из объема детектора(утечки) и не может быть зарегистрирована.

Как правило, калориметры делаются гетерогенными (чередующиеся слои поглотителя и детектирующие слои). Ливень, инициированный адроном, развивается в таком калориметре, в основном, в веществе поглотителя и лишь его малая часть, регистрируемая чувствительными слоями, вносит вклад в измеряемый сигнал.

Флуктуации в развитиии ливня определяют энергетическое разрешение калориметра. Ограниченность размеров детектора приводит к зависимости величины утечек от точки вхождения адрона и угла поворота калориметра относительно направления пучка.
Таким образом, отклик детектора даже к частицам одной энергии определяется рядом параметров, зависимость от которых необходимо учитывать при решении обратной задачи – нахождении энергии по сигналу калориметра.

Абсолютная калибровка

Нахождение коэффициентов пропорциональности между сигналами с детектора и энергией адронов называется *абсолютной калибровкой.*

На практике объем калориметра делится на некотрое количество независимых частей, сигналы с которых снимаются по отдельности. Окончательный сигнал с детектора, в этом случае, определяется как сумма сигналов со всех его частей. Подобное сегментирование приводит к необходимости *относительной калибровки* независимых частей калориметра.

Относительная калибровка

Как правило, считывание сигналов с разных частей детектора осуществляется по собственным каналам считывания, имеющим индивидуальные параметры преобразования энергии в сигнал. Более того, неоднородность конструктивного исполнения сегментов также может вносить разброс в значения откликов сегментов при одинаковой энергии, выделенной в них. *Относительная калибровка* заключается в нахождении коэффициентов, выравнивающих отклики независимых частей детектора и корректирующих тем самым все неоднородности, имеющиеся на пути трансформации энергии в измеряемый сигнал.

9.1 Обоснование необходимости относительной калибровки

Как уже говорилось выше, основной задачей тестов, проводимых в CERN, была калибровка детектора, заключающаяся в выравнивании коэффициентов усиления башен калориметра и нахождении коэффициентов пропорциональности между откликами сегментов калориметра и распределенной между сегментами энергией попавшего в детектор адрона. Следует напомнить, что для относительной калибровки башен использовался электронный пучок 120 GeV, который направлялся в центр каждой башни калориметра, и коэффициент усиления соответствующего ФЭУ подбирался таким образом, чтобы отклик башни был равен эталонному отклику, выбранному ранее. Недостатком этого метода является то, что ливень, инициированный электронами такой энергии, развивается не по всему объему башни. С большой вероятностью последние сцинтилляционные пластины оказываются не задействованы в формировании сигнала (то же распространяется на составные световоды, собирающие свет с пластин), поскольку ливень заканчивает свое развитие не доходя до них. Поэтому любое отклонение в световыходе таких пластин скажется на качестве относительной калибровки. Поскольку каждая сцинтилляционная пластина и световод проходили индивидуальный контроль, есть основания полагать, что ошибка относительной калибровки будет 2-3%. Тем не менее, устранив возможные ошибки, введя корректирующие коэффициенты для каждой башни, можно добиться улучшения энергетического разрешения.

9.2 Описание методов калибровки

9.2.1 Последовательный метод

Частично данный метод использовался для выравнивания откликов башен FNC. Основываясь на том, что электромагнитный ливень полностью поглощается в объеме одной башни, можно последовательно, направляя электронный пучок в центр каждой башни, определить калибровочные коэффициенты (как относительные так и абсолютные).

$$E_b = \alpha_i \cdot S_i \quad i = 1, 32$$

где i–номер башни, S_i–отклик i-ой башни, E_b–энергия электронного пучка, α_i–калибровочный коэффициент i-ой башни.

Выше обсуждался основной недостаток метода, связанный с тем, что электронный ливень полностью развивается в начале башни и последние сцинтилляционные пластины оказываются незадействованными и не участвуют в калибровке.

Еще одним немаловажным фактором является неожиданно сильное отклонение отношения e/h от единицы ($e/h = 0.78$), т.е. отклик калориметра на адроны больше чем отклик на электроны. Следовательно, найденные с помощью данного метода абсолютные коэффициенты будут завышены.

9.2.2 "Матричный" метод

"Матричный" метод применим тогда, когда ливень распространяется в нескольких башнях одновременно и его энергия некоторым образом распределяется между ними.

В силу того, что развитие ливня – вероятностный процесс, распределение энергии по башням для разных ливней, инициированными частицами одинаковой энергии, будет всегда различным, а сумма энергий, выделенных во всех башнях, во всех случаях определяет энергию начальных частиц. На этом и базируется "матричный" метод.

Предпложим, что ливень полностью развился (выделил всю свою энергию) в N_{tow} башнях. Обозначим сигнал в каждой башне S_i (причем S_i выражаются в условных единицах). Задача калибровки найти такие константы α_i (в единицах GeV/у.е.), которые позволяют по значаниям сигналов с башен найти абсолютное значение (в GeV) выделенной в башнях энергии: $E_i = \alpha_i S_i$. Таким образом,выделенная в калориметре энергия равна:

$$E_d = \sum_{i=1}^{N_{tow}} E_i = \sum_{i=1}^{N_{tow}} \alpha_i S_i$$

Зная ΔE – величину утечек энергии из объема калориметра (в том случае конечно, если они значимы) можно восстановить энергию начальной частицы, которая определяется как $E_d + \Delta E$.

Рассмотрим случай, когда энергия E_d постоянна от события к событию. Тогда, если башни плохо откалиброваны относительно друг друга (то есть, в случае, когда в башнях выделяется одинаковая энергия, сигналы с них тем не менее различны), то при случайном распределении в башнях энергии ливня суммарный сигнал $S_1+S_2+...+S_N$ (без введения калибровочных констант) будет распределен вокруг некоторого среднего значения, и σ распределения будет тем шире, чем хуже относительная калибровка башен. Правильный выбор констант α_i позволяет избежать уширения результирующего пика и улучшить тем самым энергетическое разрешение калориметра.

Можно написать функционал, зависящий от вектора параметров $\overrightarrow{\alpha}$, имеющий смысл среднеквадратичного отклонения величины выделенной энергии, рассчитанной с использованием калибровочных констант, от истинного значения выделенной энергии E_d, определяемой как $E_b - \Delta E$ (предполагается, что значение ΔE, определяющее величину утечек из объема калориметра, известно):

$$\sigma^2_{RMS}(\overrightarrow{\alpha}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} (\sum_{i=1}^{N_{tow}} \alpha_i S_i^k - E_d)^2$$

где N–число событий, N_{tow}–число сегментов(башен), на которые разбит объем калориметра.

Для нахождения коэффициентов α_i, минимизирующих функционал, воспользуемся методом максимального правдоподобия.

Найдя частные производные от функционала по неизвестным параметрам α_i и приравняв их к 0, получим систему N_{tow} уравнений линейную по α:

$$\frac{\partial \sigma^2_{RMS}(\overrightarrow{\alpha})}{\partial \alpha_j} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N} (\sum_{i=1}^{N_{tow}} \alpha_i S_i^k - E_d) S_j^k = 0, \quad j = 1..N_{tow}$$

Перепишем систему в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{N_{tow}} \alpha_i \sum_{k=1}^{N} S_i^k S_j^k = E_d \sum_{k=1}^{N} S_j^k$$

и введем следующие обозначения:

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^{N} S_i^k S_j^k, \quad b_j = \sum_{k=1}^{N} S_j$$

Система переписывается в матричном виде:

$$A\overrightarrow{\alpha} = E_d\overrightarrow{b}$$

где A–матрица $N_{tow} \times N_{tow}$, состоящая из элементов a_{ij}, а $\overrightarrow{b}$–вектор размером N_{tow}. Из этого уравнения находится вектор $\overrightarrow{\alpha}$:

$$\overrightarrow{\alpha} = E_d A^{-1}\overrightarrow{b}$$

Достоинство метода в том, что он позволяет обрабатывать данные со всех башен совместно, причем точка вхождения пучка не имеет особого значения (до тех пор, пока это не сказывается на величине утечек).

Для адекватного определения коэффициентов для всех башен требуется, чтобы энерговыделение в башнях, участвующих в построении функционала, не было слишком маленьким. Это связано с тем, что пропорциональные энерговыделению веса таких башен будут маленькими и, как следствие, точность определения калибровочных констант для этих башен будет низкой.

При попадании адронов в центр калориметра энерговыделение в нецентральных башнях составляет около 5% от энергии выделенной в центральной, а нецентральные башни последнего (четвертого) модуля оказываются практически незадействованы, что не позволяет определять коэффициенты с желаемой точностью. По этой причине данный метод оказался мало полезным, и попытки найти калибровочные константы не увенчались успехом.

9.2.3 Итерационный метод

Данный полуэмпирический метод, в отличии от матричного, оперирующего сразу всеми данными в записанном файле данных, пазволяет находить калибровочные коэффициенты итерационно, последовательно включая в рассмотрение записанные события.

По первому событию оцениваются значения коэффициентов, после чего рассматривается второе событие, коэффициенты корректируются, далее включается третье событие и коэффициенты вновь корректируются и т.д.

После некоторого числа итераций коэффициенты принимают значения, которые с дальнейшим ростом статистики (в том случае, если условия проведения теста постоянны) практически не меняются.

Вводятся такое понятие как вес (доля энергии, выделенная в башне):

$$W_i^k = \frac{S_i^k}{\sum S_i^k}$$

где S_i - сигнал в i-ой башне в k-ом событии и интегральный вес:

$$I_i^k = I_i^{k-1} + W_i^k$$

Калибровочные коэффициенты находятся следующим образом:

$$\alpha_i^k = \alpha_i^{k-1} \cdot (1 + \frac{W_i^k}{I_i^k}(1 - \frac{\sum_{j=1}^N S_j^k C_j^{k-1}}{E_d^k}))$$

где i-номер башни, W_i^k и I_i^k соответствующие вес и интегральный вес, E_d-значение, выделенной в калориметре энергии, которая равна $E_0 - \Delta E$, ΔE-оцениваемое значение величины утечек в k-ом событии. Для определения утечек можно использовать заранее подготовленную карту зависимости средней величины утечек от точки вхождения частицы, рассчитанную с помощью метода Монте Карло или полученную экспериментально.

Как и в матричном методе, необходимо, чтобы среднее энерговыделение в башнях не было маленьким, но теперь, как видно из формулы, не требуется постоянства величины утечек от события к событию. Следовательно, смешав случайным образом события из файлов данных для тестов, отличающихся точкой вхождения пучка, можно сравнять среднее энерговыделение в башнях.

10 Заключение

Новый Передний Нейтронный Калориметр (Forward Neutron Calorimeter) разрабатывался для эксперимента H1, изучающего ep взаимодействие на ускорителе HERA. Детектор оптимизирован для регистрации нейтронов в диапазоне энергий $200-920$ GeV и углами рассеяния до 0.6 $mrad$.
FNC состоит из чередующихся слоев свинцового поглотителя и чувствительных слоев пластикового сциннтиллятора. Конструктивно детектор состоит из 4-ех идентичных независимых модулей, каждый из которых делится на 8 “башен”, включающих по 25 сцинтилляционных пластин.
Свет с пластин собирается и транспортируется к ФЭУ с помощью составных световодов, вставленных в прорезанные в каждой пластине круговые канавки.
В период с января 2000 по январь 2001 года в ИТЭФ было полностью завершено конструирование нового Переднего Нейтронного Калориметра и проделана основная часть работы по калибровке детектора.
В работе над FNC я принимал участие практически с самого начала.
На начальном этапе в мои обязанности входили:

- проверка, отбор и калибровка фотоэлектронных умножителей
- контроль пропускной способности составных световодов
- также, я принимал посильное участие в сборке калориметра
- одновременно я занимался созданием системы сбора данных для предстоящих тестов на ускорителе в ИТЭФ.

К апрельским тестам в ИТЭФ три модуля из четырех были полностью готовы.

- Я полноценно участвовал в сменах на ускорителе, целью которых был набор данных, необходимых для изучения работоспособности детектора и его отклика на адроны низких энергий.
- После завершения сеанса на ускорителе я приступил к обработке данных. Полученные результаты представлены в соответствующей главе.

В июне 2000 года все четыре модуля были отправлены в CERN для окончательной калибровки на пучках с энергией максимально близкой к той, на которую рассчитан калориметр.

- В CERNе я участвовал как в подготовке тестов (подключение электроники, настройка программ сбора данных), так и в самих тестах.
- За время сеанса на ускорителе SPS было набрано более 50 Gb данных, обработкой которых я занимался все оставшееся время.
  - Мной были проанализированы данные тестов по изучению основных параметров калориметра: линейности, энергетического разрешения, однородности. Результат проделанной работы представлен в главе, посвященной тестам в CERN.

- Я принимал участие в создании Монте-Карло модели калориметра.
- Некоторое время было уделено изучению возможностей программной калибровки калориметров. Эта работа на данный момент не является законченной и обзорно представлена в последней главе.

11 Благодарности

В заключении, мне хотелось бы поблагодарить людей, без участия которых представленная работа была бы вряд ли закончена.

Особую благодарность я хочу выразить моему научному руководителю Ефременко Валентину Ивановичу: за более чем интересную тему диплома, за доверие, за искреннюю готовность помочь в решении возникающих проблемм, за поддержку в период неудач и одобрение в моменты успеха, за терпимость к моим вопросам (боюсь, порою чересчур надоедливым) и за столь полные и доступные ответы на них.

Хочу сказать спасибо Наговицыну Владимиру Васильевичу за уникальный опыт организации и проведения физического эксперемента полученный за время работы с ним.

Спасибо Чечельницкому Сергею Владимировичу за помощь в освоении методов физического анализа и весьма полезные советы.

Также, мне хотелось бы поблагодарить весь коллектив, работавший над созданием FNC.

Было бы верхом несправедливости не выразить признательность преподавателям кафедры “Экспериментальнные методы ядерной физики”, научивших меня всему что я знаю. Особенно, я хочу поблагодарить Финогенова Кирилла Григорьевича, под руководством которого я получил первый опыт исследовательской работы, ставший для меня фундаментальным.

Список литературы

[1] *"Instrumentation in elementary particle physics"*,
by C.W Fabjan, J.E. Pilcher, 1987

[2] *"Proposal for a Forward Neutron Calorimeter for the H1 Experiment at DESY"*,
by H1 Collaboration, August 1995

[3] *"HERA Physics"*,
by G.Wolf, DESY 94-022.

[4] *"Measurement of Leading Proton and Neutron Production in Deep Inelastic Scattering at HERA"*,
by H1 Collaboration, Eur. Phys.J. **C6** (1999) 587

[5] *"GEANT3"*,
by GEANT team, CERN 1987

[6] *"On the energy resolution of uranium and other hadrons calorimeters"*,
by Richard WIGMANS, Nucl. Instr.and Meth. **A259** (1987) 389-429

[7] *"Design and Test of a Forward Neutron Calorimeter for the ZEUS Experiment"*,
by The ZEUS FNC Group (S. Bhadra, et al.), Nucl. Instr.and Meth. **A394** (1997) 121

[8] *"Some calibration methods for calorimeters"*,
by V.V.Babintsev, IHEP 93-73