Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова

Физический факультет
Кафедра физики элементарных частиц

Изучение характеристик электромагнитного калориметра установки RAMPEX.

Дипломная работа
студента VI курса
Уханова Дениса Михайловича

"28" декабря 1999 года

Зам. Зав. кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
член корр. РАН

С.П. Денисов

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук

В.Л. Соловьянов

Протвино 1999

Оглавление

1 Введение. **3**
1.1 Экспериментальная установка. 3
1.2 Пучок. 3
1.3 Поляризованная мишень. 4
1.4 Магнитный спектрометр. 4
1.5 Электромагнитные калориметры. 4
1.6 Адронный калориметр. 4

2 Основные методы калибровки. **5**
2.1 Прямой метод калиброки (минимизация функционала). 5
2.2 Метод калибровки по центрам. 6
2.3 Метод калибровки по “эффекту”. 7

3 Калибровка. **7**
3.1 Постановка задачи. 7
3.2 Моделирование. 8
3.3 Энергетическое разрешение. 10
3.4 Набор данных. 11
3.5 Процедура калибровки. 11

4 Заключение. **17**

1 Введение.

Эксперимент RAMPEX (Russian AMerican Polarization EXperiment) это совместный русско-американский экспреримент, целью которого является изучение рассеяния протонов и π^--мезонов на поляризованной мишени. В состав установки входят: магнитный спектрометр на основе пропорциональных камер, многоканальные пороговые черенковские счетчики, электромагнитный калориметр и адронный калориметр. Эта работа посвящена исследованию некоторых свойств электромагнитного калориметра. Рассмотрены существующие методы калибровки и сделан выбор наиболее предпочтительного из них.

1.1 Экспериментальная установка.

Установка состоит из двух плеч[1]. Одно плечо включает в себя магнитный спектрометр, два черенковских счетчика C_1, C_2 для определения типа заряженных частиц, электромагнитный калориметр $EC1$ и адронный калориметр HC. Магнитный спектрометр состоит из магнита M и пяти блоков пропорциональных камер $PC1 - PC5$. На рисунке 1 это плечо составляет 9^o с осью пучка соответсвующий 90^o в СЦМ. В дальнейшем это плечо будет повернуто на угол близкий к 0^o для регистрации частиц с большим x_F и на больший угол для регистрации частиц с отрицательным x_F. Числовые оценки аксептанса и эффективности установки показали, что значения угла между 80 и 300 мрад оптимальны для этих измерений.

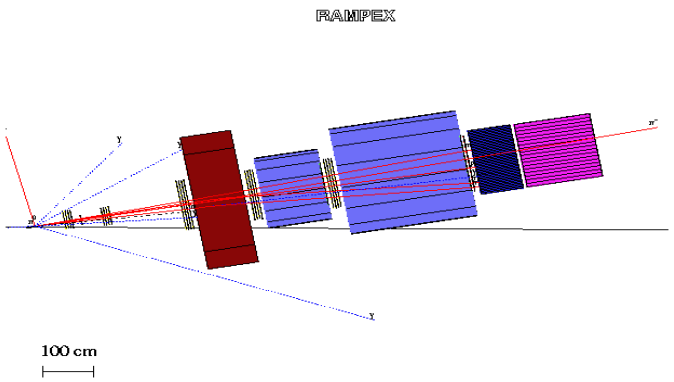

Рисунок 1. Экспериментальная установка.

1.2 Пучок.

Существующее оборудование четырнадцатого канала позволяет использовать 40 ГэВ пучок π^- с примесью 1.8% K^- и 0.3% $\bar{p}$ и неполяризованный протонный пучок при энергии 70 ГэВ/c выведенный прямо из ускорителя с помощью изогнутого кристалла кремния. Интенсивность в обоих случаях составляет $5 \cdot 10^6$. Размеры пионного пучка характеризуются

значениями $\Delta_x = \pm 8$мм, $\Delta_y = \pm 6$ мм с угловым расхождением ± 2.5 мрад и ± 1.5 мрад горизонтально и вертикально соответственно. Неопределенность в импульсе пионного пучка составляет $\delta p/p = \pm 2.5\%$.

Поперечный размер протонного пучка меньше в два раза, и угловое расхождение меньше, чем ± 0.3 мрад.

1.3 Поляризованная мишень.

Веществом мишени является пропан-диол $C_3H_8O_2$, который заполняет объем 20 мм в диаметре и 200 мм в длину. Поляризация ядер водорода в среднем около 80%. Фактор разбавления зависит от типа регистрируемой частицы и кинематики и изменяется от 6 до 10. Мишень содержит $9.3 \cdot 10^{24}$ ядер/см^2. Светимость в эксперименте оценивается как $L \sim 5 \cdot 10^{31}$ см$^{-2}$сброс$^{-1}$.

1.4 Магнитный спектрометр.

Магнитный спектрометр был разработан для проекта NEPTUN. Он включает анализирующий магнит M и пять блоков многопроволочных пропорциональных камер PC1-PC5. Каждый блок содержит четыре координатные плоскости: ортогональные x и y, а также u и v, которые наклонены на $\pm 10^\circ$ по отношению к оси y.

Магнит M имеет аппертуру 1.3×0.62 м^2 и длину 0.63 м. Интеграл магнитного поля около 1.0 Тм. Центр магнита расположен на расстоянии 4.5 м от центра мишени.

Два блока пропорциональных камер PC1 и PC2 размером 530×384 мм^2 находятся на растоянии 0.9 и 2 м от центра мишени соответственно. Три блока из камер PC3 – PC5 размерами 1422×898 мм^2 размещенны на расстояниях 3.7, 5.2 и 7.2 м от мишени. Координатные проволочки натянуты на растоянии 2 мм друг от друга во всех плоскостях.

Спектрометр позволяет измерять импульс заряженных частиц с точностью $\Delta p/p = 1.7 \cdot 10^{-3} p + 2 \cdot 10^{-3}$ и восстанавливать прямолинейные треки $x = x_0 + a_x z$ с точностью $\delta x_0 = 2$ мм, $\delta a_x = 8.8 \cdot 10^{-4}$.

1.5 Электромагнитные калориметры.

Конструкционная формула это 84 супермодулей, каждый из которых состоит из 16 ячеек, полностью таким образом, получается 1344 каналов. Матрица $EC1$ калориметра состоит из 48×28 ячеек, размером 38×38 мм^2. Модули калориметра сделаны, из чередующихся слоев Pb+Sci, которые почти перпендикулярны направлению частиц. Свет собирается с помощью световода-сместителя спектра, который проходит по всей длине ячейки. Толщина каждого слоя свинца и сцинтилятора 3 мм и 5 мм соответственно. Длина около 22 радиационных длин.

1.6 Адронный калориметр.

Он используется для регистрации нейтральных адронов, и является частью триггерной системы. Адронный калориметр компенсационного типа это матрица 18×12 модулей (всего

216 каналов). Отношение толщины свинца к толщине сцинтиллятора равно 4:1, что соответствует условию компенсации. Поперечный размер модуля 10см×10см, длина равна ≈ 6.5 ядерных длин. Компенсация требует равенства отклика от адронов и электромагнитного ливня. Это важное свойство для высококачественной адронной калориметрии.

Для адронного калориметра на тестовом пучке было измерено отношение сигнала от электронов к сигналу от адронов и оно равно $e/h = 1.01 \pm 0.03$. Энергетическое разрешение получилось:

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{57\%}{\sqrt{E}}. \tag{1}$$

Координатное разрешение равно $\sigma_x \sim 5$мм при 40-ГэВ.

2 Основные методы калибровки.

Существует много методов откалибровать электромагнитный калориметр: прямой метод калибровки(метод минимизации функционала), калибровка по центрам, метод среднего ливня, итерационный метод, калибровка по эффективной массе двух частиц, подробности можно найти в работе [3]. В этой главе мы рассмотрим только три из них.

Ячейка калориметра, как уже было отмечено выше представляет собой сэндвич из свинца и сцинтилятора у которого с одной стороны находится световод-сместитель спектра, это обстоятельство вносит сильную неоднородность в структуру калориметра и предъявляет повышенные требования к процедуре калибровки.

2.1 Прямой метод калиброки (минимизация функционала).

При попадании частицы в калориметр, зарегистрированное энерговыделение в ячейке i выражается следующим образом:

$$E_i = \alpha_i \cdot A_i, \tag{2}$$

где α_i – калибровочный коэффициент для данной ячейки, E_i – доля зарегистрированной энергии в ячейке i.

Общепринятый метод калибровки использует возможность облучения прямым пучком частиц известной энергии ячеек калориметра. При этом калибровочные коэффициенты находятся методом минимизации функционала, составленного для баланса энергии на множестве анализируемых событий. Составляется функционал вида:

$$F = \sum_j^N (\sum_i \alpha_i A_{ij} - E_b)^2, \tag{3}$$

где α_i – калибровочные коэффициенты для ячейки i; A_{ij} – измеренная амплитуда в ячейке i для события j; E_b – энергия пучка. Минимизация этого функционала относительно коэффициентов α_i приводит к системе линейных уравнений:

$$\sum_i^N \alpha_i C_{ik} = E_b * \sum_j A_{kj}, \tag{4}$$

$$C_{ik} = \sum_j A_{ij} * A_{jk} \tag{5}$$

Этот метод хорошо работает для однородных калориметров (например из свинцового стекла), но он не учитывает неоднородность отклика в области световода-сместителя спектра, так как выдает коэффициенты усредненые по поверхности ячейки. А между тем, как показали измерения на калориметре установки типа ГЕПАРД [2], конструкция которого похожа на нашу, максимальная разница световыхода составляет $\simeq 12\%$, а на границе модулей без световода $\simeq 7\%$. Для того, чтобы световыход в горячих точках не падал так сильно, в нашей установке перед сместителем спектра проложен еще слой свинца, и весь калориметр повернут на 3° в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Кроме того на границе модулей ухудшается энергетическое разрешение (так как увеличиваются флуктуации энерговыделения). В области световода-сместителя спектра (± 1 см) энергетическое разрешение ухудшается примерно в два раза, в то время, как без него на стыке счетчиков (± 0.5 см) – в полтора раза. На растояниях, больших 1 см от границ ячеек, величина σ_E/E при импульсе 26.6 ГэВ/c изменяется от 3 до 5%.

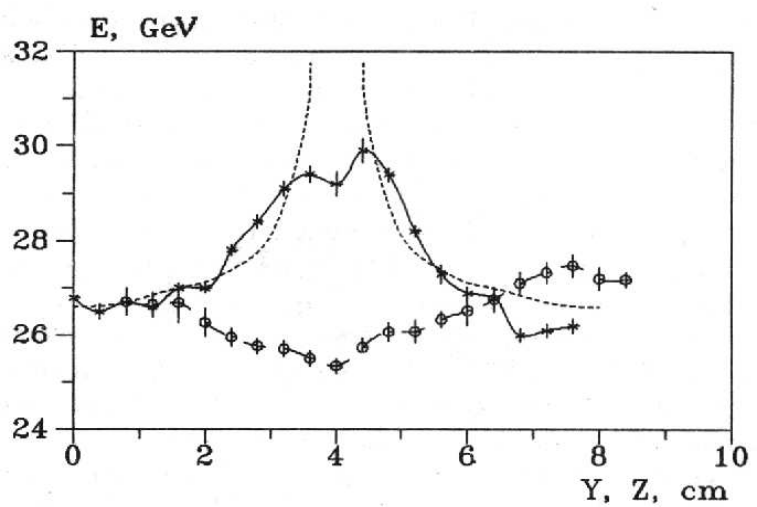

Рисунок 2. Зависимость наблюдаемого энерговыделения E от координаты точки попадания электрона в калориметр (сплошной линией соединены экспериментальные точки) [2].

Кроме того в процессе калибровки иногда бывает так, что какие-то из АЦП выходят из строя и их меняют на новые и перекалибровывают заново, в таком случае матрица получается заведомо неправильной и система линейных уравнений не решается, либо приходиться засвечивать значительно более широкую область.

2.2 Метод калибровки по центрам.

Этот метод является более технологичным, чем прямой. Он позволяет в случае замены АЦП перекалибровывать только один канал, не засвечивая область вокруг него.

Данный метод основан на последовательном приближении коэффициентов к их истинным значениям. В нашем случае калориметр был настроен таким образом, что при 26.6ГэВ амплитуда сигнала была $\simeq 800$ мВ, что соответствует примерно 2000 отсчетам АЦП.

Уравнение для энергии, которым мы будем пользоваться, имеет следующий вид:

$$E_i = \frac{E_{beam} \cdot A_i}{C_i}, \tag{6}$$

где E_{beam} – энергия пучка, A_i – амплитуда сигнала в i-том счетчике в отсчетах АЦП, C_i – калибровочный коэффициент для i-го счетчика, E_i – энергия в ГэВах в данном счетчике.

На начальном этапе все коэффициенты полагаются равными. Набирается амплитудный спектр для каждого счетчика для случая, когда пучковая частица попадает в центр ячейки. После этого спектры фитируются функцией Гаусса и, таким образом получаются средние значения амплитуды в каждом счетчике, это и есть новый коэффициент. Далее процедура повторяется, только в качестве исходного набора коэффициентов берутся уже новые, полученные в результате фита. Процедура быстро сходится (за 2-3 иттерации). К недостаткам этого метода можно отнести резкое снижение статистики (примерно квадратичное) при попытке улучшить определение положения центра энерговыделения.

2.3 Метод калибровки по “эффекту”.

Метод заключается в многократном вычислении параметров спектров, находящихся в соответствии с каждой ячейкой калориметра, при вариациях калибровочных коэффициентов до тех пор, пока параметры (средние значения, максимумы или медианы) не совместятся с заданной точностью. Этот метод полностью описан в [6]. Здесь же приводится лишь краткое описание основной идеи.

Допустим, мы имеем дело с массовым пиком, уширенным из-за разброса коэффициентов. В программе обработки заводятся два массива размерности числа каналов калориметра – BIG(n) и SMALL(n). Затем после вычисления массы происходит сравнение с табличным значением массы резонанса. Если полученная величина больше табличной, то в ячейки BIG с номерами сработавших счетчиков заносятся определенные веса. В противном случае заполняются эти же ячейки в массиве SMALL. После заполнения массивов мы действуем исходя из необходимого условия — при правильной калибровке срабатывание любой ячейки калориметра должно происходить одинаково часто справа и слева от табличного значения массы. Сравнивая содержимое ячеек поочередно варьируем все n коэффициентов. Очевидно, что если BIG(i) превосходит SMALL(i), то коэффициент i-той ячейки следует уменьшить, если наоборот – то увеличить. В следующей итерации расчет массы идет уже с улучшенными коэффициентами, а по мере роста чмсла итераций — разницы BIG(i)-SMALL(i) уменьшаются, пока не достигнут заданного предела.

3 Калибровка.

3.1 Постановка задачи.

Имеющийся электромагнитный калориметр калибровался двумя половинками, каждая из которых засвечивалась отдельно. Это обстоятельство связано с тем, что грузоподъемность платформы на которой стоит калориметр во время облучения меньше веса всего калориметра. Таким образом на самом деле у нас было два калориметра 24×28 ячеек. Это вызывает некоторые проблемы при калибровке, так как стыки калориметров в данном

случае играли роль краев и, следовательно, програмная калибровка по ним проводилась так же плохо, как и по краям (так как часть ливня оставалась за пределами калориметра). Во время экспозиции при наборе физической статистики эти половинки стоят вплотную друг к другу и стык оказывается в центре матрицы. Таким образом он должен работать так же хорошо, как и остальные, внутренние части калориметра.

Напомним, что калориметр составлен из супремодулей 4×4 ячейки. У каждой ячейки с одного края есть световод-сместитель спектра, что затрудняет калибровку, потому, что ливень, проходя через световод, практически не развивается, так как отсутствует поглотитель. С другой стороны частицы проходя через вещество световода производят черенковский свет, который дает дополнительный вклад в сигнал. Использование гасящих добавок, введенных в вещество световода, позволяет несколько уменьшить количество черенковского света [5]. Схема расположения световодов-сместителей спектра показана на рисунке 3.

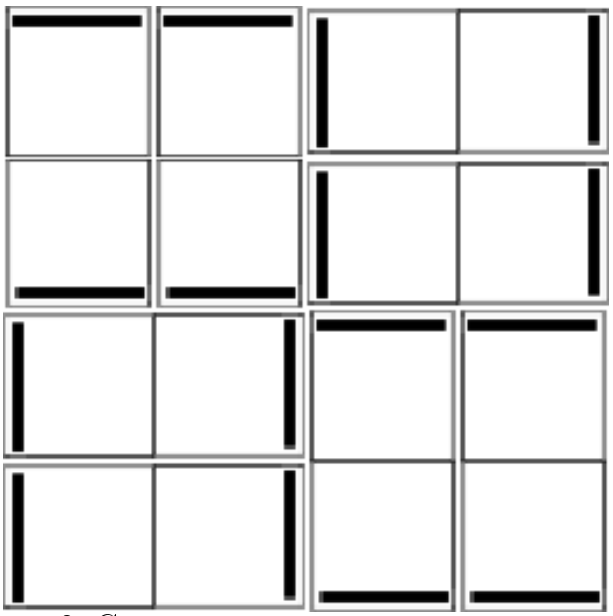

Рисунок 3. Схема расположения световодов сместителей спектра в супермодуле (вид на лицевую панель калориметра).

3.2 Моделирование.

Результаты калибровки очень важны для последующей работы с данными, так как конечным результатом должна быть зависимость ассиметрии от кинематических переменных. В процессе восстановления массы π^0 и продвижения в область все больших значений поперечного импульса ошибка, как видно из результатов расчета на рисунке 4, падает, но при этом падает и статистика, поэтому начиная с некоторого значения p_T мы просто не сможем выделить пика. Поэтому, чем лучше энергетическое разрешение электромагнитного калориметра, тем у́же та область, в которой вся эта маленькая статистика собирается. Очевидно, что та грань в поперечном импульсе, после которой мы уже ничего не можем сказать о массе π^0, отодвигается с улучшением энергетического разрешения.

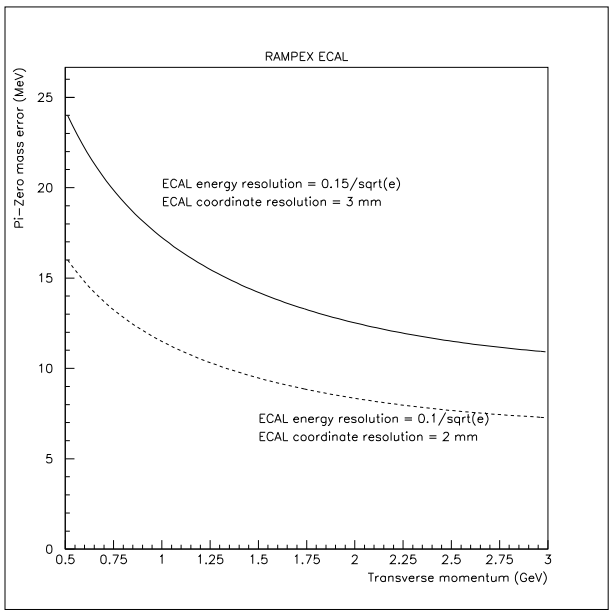

Рисунок 4. Зависимость ошибки определения массы π^0 от поперечного импульса, при разных энергетических разрешениях электромагнитного калориметра.

Энерговыделение от радиуса имеет очень резкую зависимость, как это показано на рисунке 5. На расстоянии 20 мм от центра ячейки энерговыденление падает примерно в 5 раз. Это играет двоякую роль. При попадании частицы достаточно далеко от “горячих зон”, неоднородность практически не сказывается, и калориметр ведет себя, как идеальная слоистая структура. Но при попадании пучковой частицы в область около световода происходит вытекание значительной части ливня, и, как следствие, к существенному изменению отклика [2].

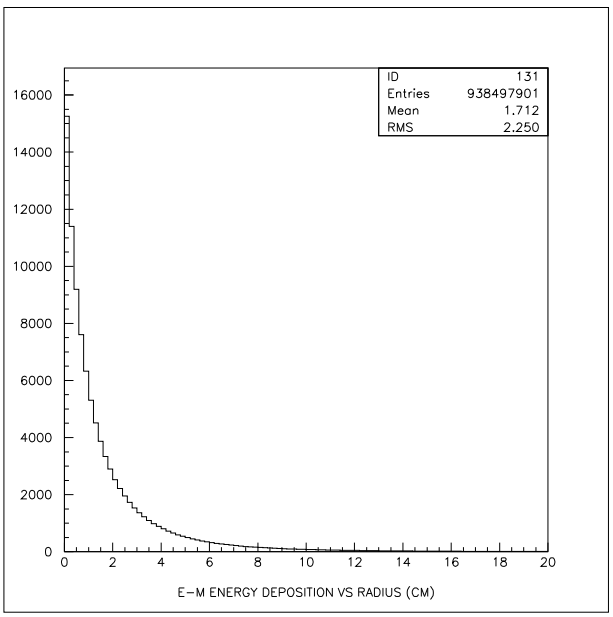

Рисунок 5. Энерговыделение в зависимости от радиуса (кривая Мольера).

3.3 Энергетическое разрешение.

В области энергий У-70 энергетическое разрешение калориметра определяется как:

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{E}\right)^2 + c^2, \tag{7}$$

где E энергия в ГэВ'ах, а - стохастический член, σ_n - шум и c постоянный член.

Есть три основные причины, для появления стохастичекого члена:

1. Флуктуации бокового развития ливня, которые для кластера 5×5 использующего алгоритм простейшего востановления есть около 1.5 % .

2. Флуктуации энергии ливня поглощенной в абсорбере, которые дают приблизительный член 10 %, (результат получен из GEANT) .

3. Распределение статистики фотонов, которое задается задается как:

$$a_{pe} = \sqrt{\frac{F}{N_{pe}}}, \tag{8}$$

где N_{pe} количество первичных электронов появившихся в фотодетекторе на ГэВ, и F фактор избыточного шума, который описывает флуктуации усиления. Этот фактор играет роль для лавинных фотодиодов и имеет величину $\simeq 2$. В нашем случае $N_{pe} \sim 10^6$, и a_{pe} пренебрежимо мало.

Наиболее важные условия появления постоянного члена, могут быть сформулированы так:

1. Флуктуации продольного развития ливня и неоднородность продольного светосбора, чтобы уменьшить влияния этого фактора световоды выравнивались черным клином, индивидуально подобранным для каждой ячейки.

2. Ошибки в определении калибровочных коэффициентов.

3. Вытекание энергии через заднюю поверхность калориметра.

4. Не корректные и не вполне скорректированные геометрические эффекты.

Постоянный член, как показала проверка на прототипе калориметра, меньше 1%.

Факторы влияющие на появления шумового члена:

1. Шум электроники.

2. Всевозможные наведенные шумы.

3. Когерентный шум, возникающий при использовании большого числа каналов.

4. Шум при оцифровке.

   В нашем случае шум электроники не превышает 10 МэВ, или одного отсчета, как это видно из рисунка 6.

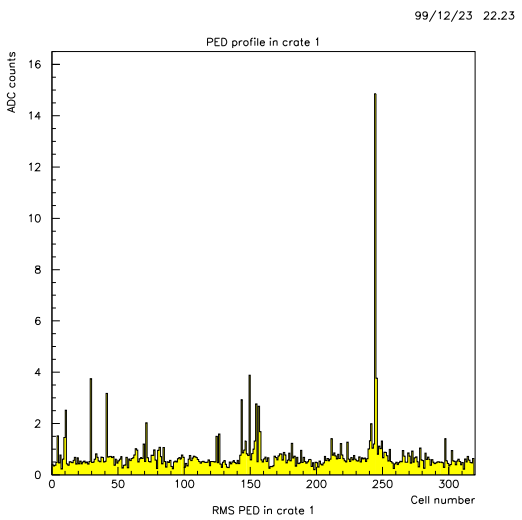

Рисунок 6. Распределение по ширине пъедесталов.

3.4 Набор данных.

Данные для калибровки набирались так: на платформе стояла одна из половинок детектора и дальше эта платформа двигалась таким образом, чтобы засветить всю поверхность детектора. Пучок электронов был с импульсом 26.6 ГэВ/c и в каждую ячейку набиралось около 3000 событий. Триггер в случае калибровки был простой, на прохождение частицы. В случае набора данных для измерения ассиметрии, триггер был более сложный и основывался на значении суммарного поперечного импульса всех частиц попавших в калориметр.

3.5 Процедура калибровки.

Процедура калибровки работает следующим образом: сначала вычитывается одно событие, это означает, что заполняется массив размерности калориметра числами, так что номер элемента массива соответствует номеру счетчика, а значение в этом элементе соответствует амлитуде сигнала в отсчетах АЦП. Пороговое значение в АЦП стояло 3 отсчета. Порог в АЦП нужен, чтобы не писать шум от самого АЦП, шумы в кабелях и т.д. Поэтому к значению амплитуды я добавлял 2 отсчета. Для того, чтобы исключить постоянно шумящие АЦП надо проверять является ли данное событие кластером, то есть вокруг центрального счетчика есть еще как минимум 9, в которых не нулевые значения.

В программе обработки – сначала было сделано три иттерации калибровки по центрам, получилось распеределение энергии по всему калориметру с разрешением порядка 5.5-

6% [Рис. 7], и с разрешением около 5% [Рис. 8] для частиц попавших в центр ячейки разрешением по энергии выделившейся в центре порядка 5% [Рис. 8].

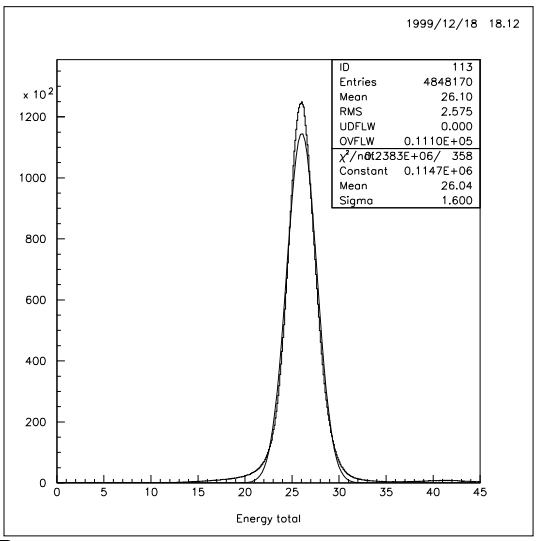

Рисунок [7]. Распределение энергии по всему калориметру, разрешение 6%.

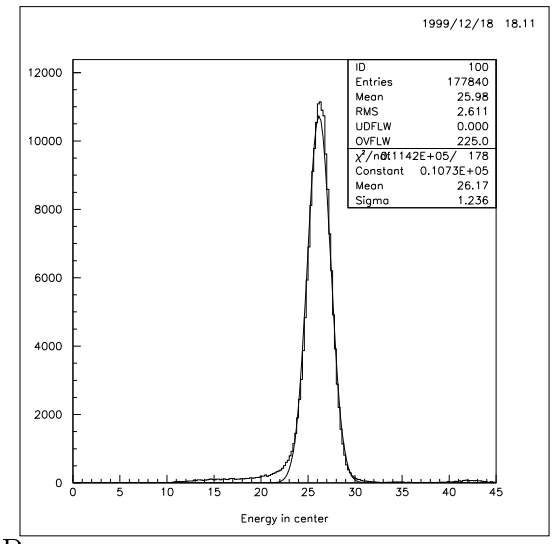

Рисунок 8. Распределение по энергии выделившейся в центре разрешение 5%.

Дальнейшее использование калибровки по центрам особого смысла не имеет, так как метод быстро сходится, и коэффициенты больше не меняются.

Пример амплитудного спектра в одном счетчике приведен на рисунке 9. Видно, что разрешение по счетчику около 3-4%, вообще в процессе калибровки некоторые счетчики калибровались плохо. Это связано с несколькими причинами: во-первых около десятка счетчиков работали не правильно, то есть либо постояно выдавали шум на уровне сигнала от пучка, либо наоборот молчали. Поэтому в процессе работы программы в этих

счетчиках не было статистики. Отсюда в распределении по разрешению [Рис. 10] счетчиков присутсвуют такие, у которых разрешение превышает 10% и те, у которых наоборот разрешение меньше 2%, разумеется эти данные не физичны, они призваны только для того, чтобы показать коэффициенты требующие ручного фитирования или просто выставления их в какое-то наиболее вероятное значение.

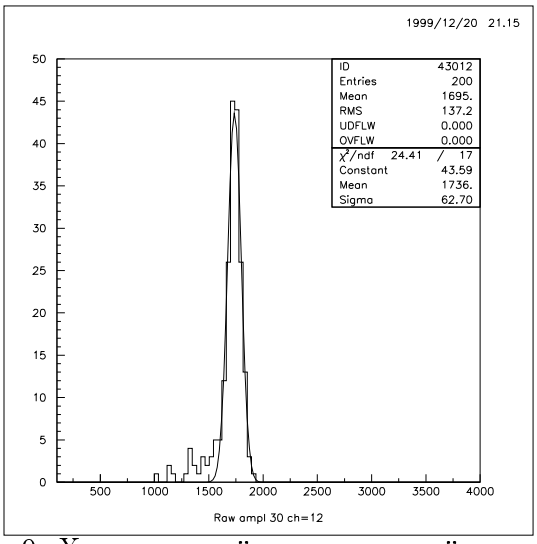

Рисунок 9. Характерный амплитудный спектр в одном из счетчиков (на рисунке с результатами програмного фита).

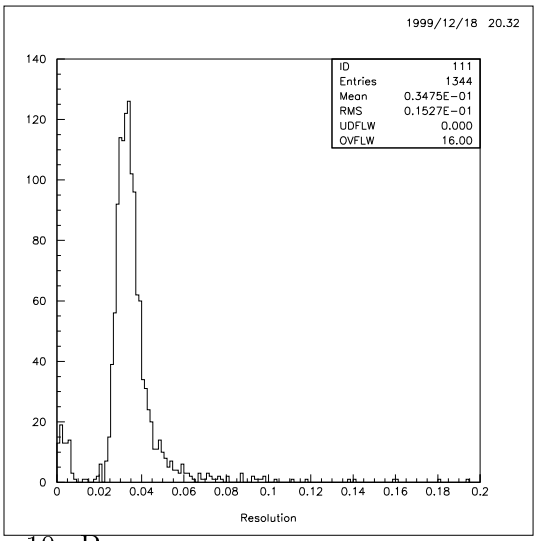

Рисунок 10. Распределение по разрешению счетчиков.

В этом случае исходили из предположения, что в центральном счетчике (ячейка в

которую попал пучок) остается порядка 75% энергии, поэтому формула, по которой производился расчет энергии приняла вид:

$$E_i = 26,6 \cdot 0.75 \frac{A_i}{C_i}, \tag{9}$$

где 26.6 – энергия пучка, 0.75 – количество энергии оставшейся в центральнои счетчике, A_i – амлитуда в отсчетах АЦП в i-том счетчике, C_i – калибровочный коэффициент для этого счетчика. Центр счетчика определяется следующим образом: необходимо, чтобы разница энерговыделения справа и слева не превосходиа 0.5 ГэВ, а также разница энерговыделения сверху и снизу была меньше 0.5 ГэВ. При этом координатная точность, с которой мы попадали в центр была ± 5 мм [Рис. 11].

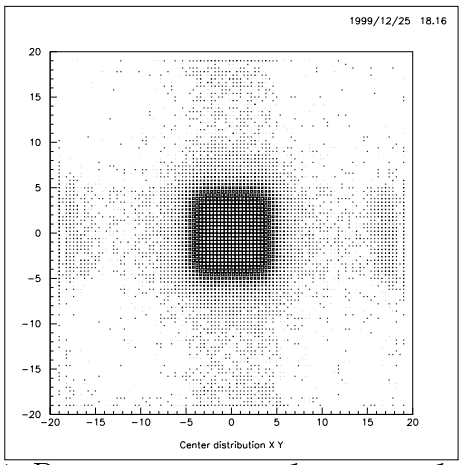

Рисунок 11. Распределение событий отобранных для калибровки по координатам x и y.

Это число (0.5 ГэВ) было получено чисто эмпирически, из тех соображений, что его уменьшение ведет к сильному падению статистики, а увеличение к “разбеганию” коэффициентов, и как следствие к уширению распределения по энергии [Рис. 12]. Края калориметра калибровались так: например для ряда самых верних счетчиков, сначала проверялось, что мы попали в центр по горизонтали, то есть энерговыделение справа и слева равны, потом проверялось, что в нижнем счетчике энерговыделение не превышает 0.8 ГэВ, и не меньше 0.2 ГэВ (это есть среднее значение энерговыделения с краю при условии, что мы попали в центр). Тем не менее суммарная энергия, при условии, что центр находится с краю, в общее распределение по энергии не входило, так как ливень в этом случае заведомо не полный.

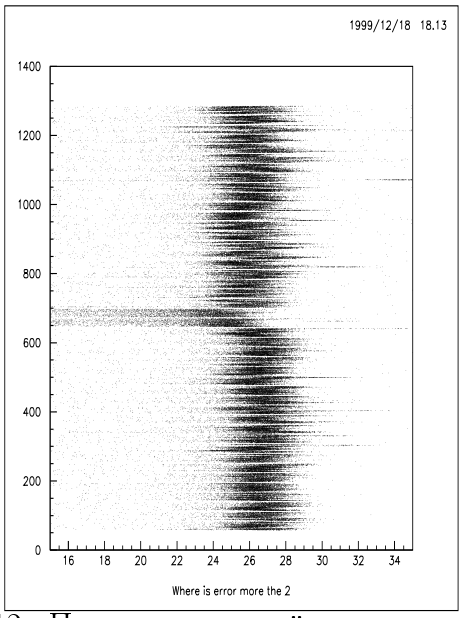

Рисунок 12. По вертикальной оси отложен номер счетчика, по горизонтальной энергия (результат после калибровки по центрам).

Далее, при использовании метода калибровки по “эффекту”, возникли соображения к его усовершенствованию. Дело в том, что идея постепенного выравнивания коэффициентов в этом методе основана на предположении о симметричности распределения (по массе, энергии, и т.д.), и если теперь предположить, что распределения в каких-то счетчиках не симметричны (как оно и есть в жизни), то есть имеют слева “хвост”, то понятно, что в итоге суммарное распределение хотя и улучшится но будет хуже, чем могло бы.

Модификация заключалась в следующем: для каждого счетчика в энергетическом спектре находим максимум и оцениваем разницу между значением, где этот максимум находится и 26.6 (где он по логике должен быть), после этого исходя из разницы считаем на сколько и куда нужно “подвинуть” коэффициент, чтобы он встал на место. Это оказалось достаточно эффективно [Рис. 13] и все максимумы действительно выстроились в линию, что дало минимальный разброс от ячейки к ячейке и сужение в распределении по энергии. Суммирование энергии для любого счетчика проходило по кластеру 3×3 с максимальным энерговыделением в том счетчике, для котрого набирался энергетический спектр.

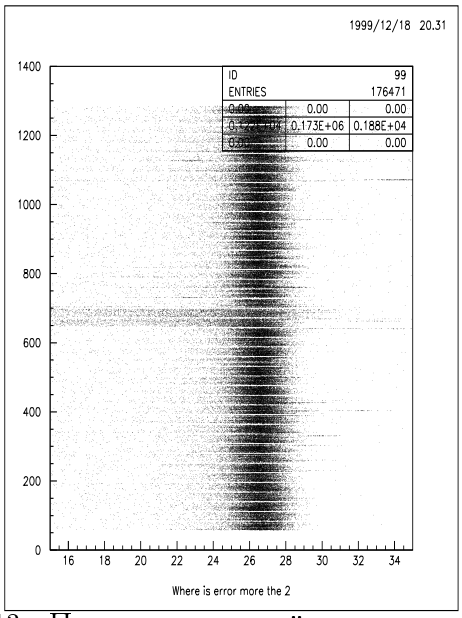

Рисунок 13. По вертикальной оси отложен номер счетчика, по горизонтальной энергия (результат после калибровки по “эффекту”).

Далее была сделана калибровка по “эффекту” в результате чего энергетическое разрешение по всему калориметру стало около 4.7%, а разрешение по энергии выделившейся в центре около 3.5%, что с учетом дисперсии пучка является теоретическим пределом (моделирование в GEANT’е дало значение $10\%/\sqrt{E}$). Также моделирование дало информацию о том, что распределение по энергии не зависит от угла (в пределах от 0 до 6°).

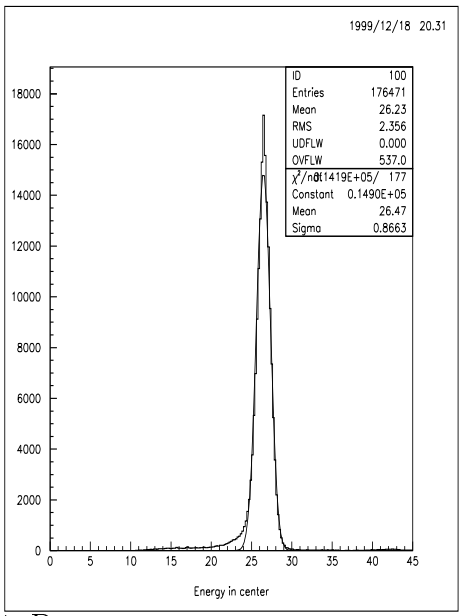

Рисунок 14. Распределение по энергии выделившейся в центре, разрешение $\simeq 3\%$ (результат после калибровки по “эффекту”).

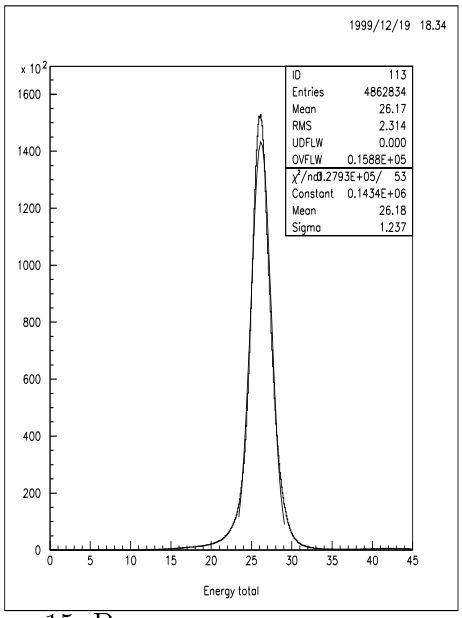

Рисунок 15. Распределение энергии по всему калориметру, разрешение 4.7% (результат после калибровки по “эффекту”).

4 Заключение.

Отработана процедура калибровки для электромагнитного калориметра установки **RAMPEX**, предложены новые методы калибровки. Дальнейшее улучшение результатов можно получить зная информацию о форме ливня, это даст возможность повысить точность определения координаты попадания частицы в калориметр.

Полученные калибровочные коэффициенты могут быть использованы при анализе физических данных полученных на поляризованной мишени в апреле 1999 года.

Литература

[1] S. Akimenko, G. Alekseev, Yu. Arestov etc. A study of one-spin asymetries in pp and $\pi^- p$ interactions at 70 and 40 GeV/c (Proposal of experiment **RAMPEX**)

[2] Б.П. Барков, Ю.В. Катинов и др. Исследование энергетических характеристик модулей электромагнитного калориметра типа ГЕПАРД. ИФВЭ 92-174 ОНФ.

[3] В.В. Бабинцев Некоторые методы калибровки калориметров. ИФВЭ 93-73 ОНФ.

[4] CMS. The electromagnetic calorimeter project. Technical design report.

[5] В.А. Качанов Прецизионная электромагнитная и адронная калориметрия в физике высоких энергий. Автореферат. ИФВЭ 99-24.

[6] А.М. Блик, И.П. Либа Калибровка калориметра "по эффекту". ИФВЭ 93-86 ОЭФ.

[7] О.В. Буянов, А.А. Федоров и др. Исследование прототипа электромагнитного калориметра изготовленного из кристаллов $PbWO_4$, на пучках частиц. ИФВЭ 93-144 ОЭФ.