



УДК 539.1

**MODELING THE RESPONSE OF AN ELECTROMAGNETIC CALORIMETER FOR CALIBRATION ON ATMOSPHERIC PARTICLE FLOW****МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ПРИ КАЛИБРОВКЕ НА АТМОСФЕРНОМ ПОТОКЕ ЧАСТИЦ****Efimov M.S. / Ефимов М.С.***PhD student / аспирант**National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Kashirskoe highway, 31, 115409**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Каширское шоссе, дом 31, 115409*

**Аннотация.** В работе рассматривается моделирование потока атмосферных мюонов и получение отклика сигнала калориметра. Также была проведена первичная оценка различного рода неидеальных условий и были промоделированы калибровочные условия для калориметра. В качестве используемого программного обеспечения использовался пакет ROOT (Geant), куда была загружена модель калориметра, состоящая из набора чередующихся пластин свинца и сцинтиллятора.

**Ключевые слова:** электромагнитный калориметр, моделирование, методы калибровки.

**Вступление.**

На сегодняшний день, задачи в области физики решаются с помощью больших комплексов оборудования [1]. Стоит отметить, что каждая часть детектора решает строго определенную работу в силу своей физической конструкции [2]. Одной из таких частей комплексов являются калориметры [3].

Для того, чтобы правильно интерпретировать полученные данные, необходимо знать точные характеристики и особенности работы калориметров. Не стоит забывать и о факторах, которые могут повлиять на результат, к которым можно отнести шумы электроники, трудоёмкость в выполнении параллельных программ [4] и т.д. В физике высоких энергий электромагнитный калориметр является одним из ключевых детекторов, выполняющий широкий спектр задач. В частности, одна из его задач - детектировать фотоны в почти полном телесном угле.

**Моделирование.**

В данной работе будет рассмотрена «сэндвич-структура» электромагнитного калориметра, в котором через отверстия в свинце и сцинтилляторе пропущены оптические волокна, которые собираются в обойму на заднем торце модуля, формируя при этом порт выхода сигнала (ячейку) с модуля калориметра. Модуль (для повышения светосбора) оборачивается полимерным материалом, что уменьшает утечку света с торцов пластин сцинтиллятора. В данном калориметре сцинтилляционный свет поглощается и транспортируется к фотодетектору оптическим волокном [5], проходящего сквозь модуль калориметра в продольном направлении.

Обычно в эксперименте используется не один модуль калориметра, а сборка, состоящая из множества ячеек. Такая геометрическая конфигурация позволяет получать обширную физическую картину (например, кластеры



электромагнитных ливней, образованные частицами, пролетающими сквозь объем калориметра). Поэтому в данной работе при моделировании была заложена такая сборка калориметров. Поскольку атмосферные мюоны летят вертикально, то плоскость генерации мюонов расположена над матрицей детекторов. Стоит отметить, что перед проведением эксперимента сначала необходимо провести калибровку калориметра, цель которой заключается в определении калибровочных коэффициентов – поправок, применяемых в качестве коэффициентов, на которые следует умножить сигнал с каждой ячейки для того, чтобы получить одинаковую амплитуду при одинаковом энерговыделении в каждой ячейке.

Как правило, выполняется следующий алгоритм. Сначала с каждой ячейки калориметра получается гистограмма энергетических потерь мюонов. Далее для каждого канала ищется наиболее вероятное значение максимума пика, на которое необходимо поделить эталонное значение энергетических потерь для получения калибровочных коэффициентов. Затем производится новый набор статистики с учетом полученных коэффициентов, в результате чего значения энергетических потерь с каждого канала должны устремиться к эталонной величине. На полученные конечные калибровочные коэффициенты и необходимо умножить данные с различных каналов калориметра для выявления истинного энерговыделения.

Для проведения моделирования использовался программный пакет ROOT (GEANT).

Схема симуляции выглядит следующим образом [6]:

- а) на первоначальном этапе генерируется событие;
- б) далее происходит оцифровка, наложение на различные фильтры [7];
- в) конечный анализ результатов моделирования.

Для проведения моделирования было сгенерировано 45 000 000 мюонов, которые летели в угловом диапазоне  $\pm 14$  градусов по отношению к вертикали, перпендикулярной к плоскости генерации мюонов и проходящей через точку образования мюона на плоскости (так называемый «мюонный душ»). Для каждого сгенерированного мюона проверяется одновременное срабатывание верхней и нижней ячейки в одном столбце, и при выполнении этого условия происходит запись энергии, потерянной в данном событии в гистограмму для каждого канала. Однако, в связи с наличием сигнала управления - «триггера», часть событий не записывается из-за отсутствия вертикальности. Стоит отметить, что вследствие этого, на один столбец приходится порядка 30 000 мюонов, вызвавших срабатывание верхней и нижней ячеек. Также было рассчитано время, которое понадобится для набора такой статистики в реальном эксперименте. Вследствие строения модуля калориметра, имеющего форму параллелепипеда, телесный угол, в пределах которого пролетают мюоны, образует четырехгранную пирамиду (рис.1).

Телесный угол рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma = 4 \cdot \arctg \frac{a \cdot b}{2 \cdot d \cdot \sqrt{(4 \cdot d^2 + a^2 + b^2)}} \quad (1)$$

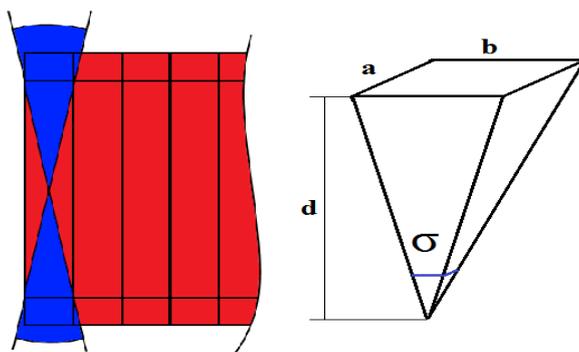


Рисунок 1 – Телесный угол калориметра.

Если принять размеры каждого канала калориметра следующими:  $a = 5.5$  см,  $b = 68.0$  см,  $d = 78.4$  см, то телесный угол будет следующим:  $\sigma = 0.056$  ср.

$$t = \frac{N1}{0.82 \cdot 10^{-2} \cdot a \cdot b} \quad (2)$$

В данной формуле  $N1 = 30000$ . В итоге, время набора составило 56 часов.

В результате моделирования были получены гистограммы энергетических потерь мюонов в отдельных каналах.

Согласно формуле Бете-Блоха, описывающей средние потери заряженных частиц за счет ионизации, в случае атмосферных мюонов форма распределения будет иметь вид распределения Ландау. Однако, полученная в моделировании форма пиков имеет не форму распределения Ландау. Поэтому фитирование проводилось комплексной функцией Ландау-Гаусса – функцией, являющейся результатом свёртки функций Ландау и Гаусса. Данный факт можно объяснить тем, что отбирались и записывались почти строго вертикальные мюоны. То есть события, которые пролетали большой путь в калориметре, но не вызывали одновременное срабатывание нижнего и верхнего канала, отбрасывались. Поэтому у полученного распределения есть сильно выраженный пик Гаусса и незначительный «хвост» от распределения Ландау.

#### Результаты моделирования.

Для приближения моделирования к реальным условиям, был введен искусственный энергетический разброс значений сигналов для каждого канала в пределах  $\pm 15\%$ .

Ниже приведены гистограммы ионизационных потерь мюонов, полученные из случайно выбранных двух каналов калориметра среди всей сборки (с учётом введенного энергетического разброса). Результаты набора статистики наиболее вероятных значений с каждого канала приведены на рис.3.

Далее был набран новый набор статистики с введением полученных калибровочных коэффициентов для уменьшения разброса значений. Результаты приведены на рис.4-5.

Достижимая точность калибровки на данный момент вышла порядка 5%.

Для сравнения на рис.6 приведено распределение наиболее вероятных величин энергетических потерь без введения их разброса по Монте-Карло.

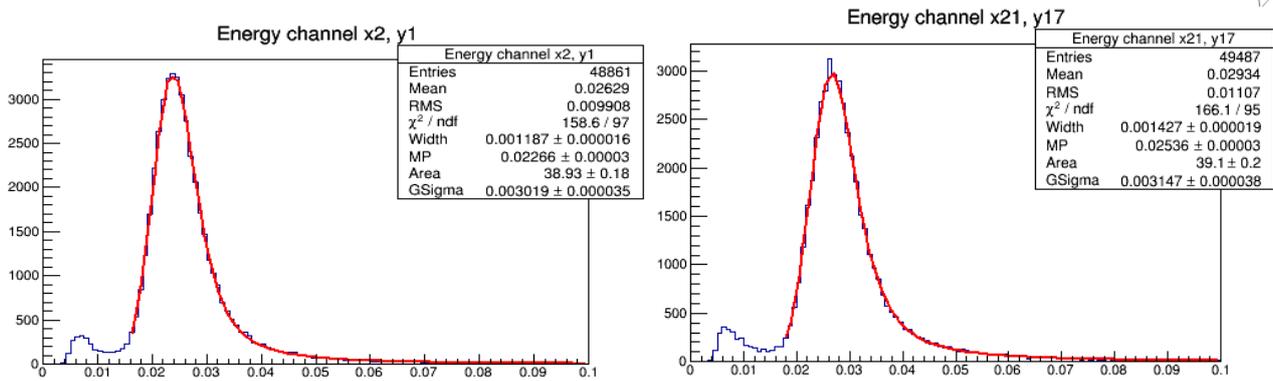


Рисунок 2 – Энергетические потери с каналов [2][1] и [21][17].

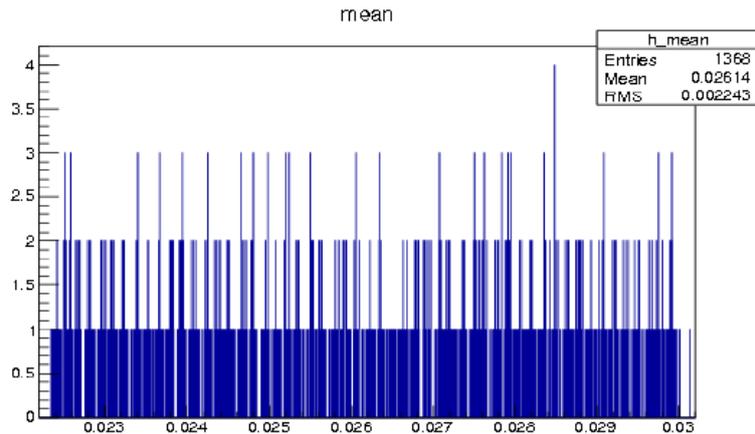


Рисунок 3 – Гистограмма наиболее вероятных значений.

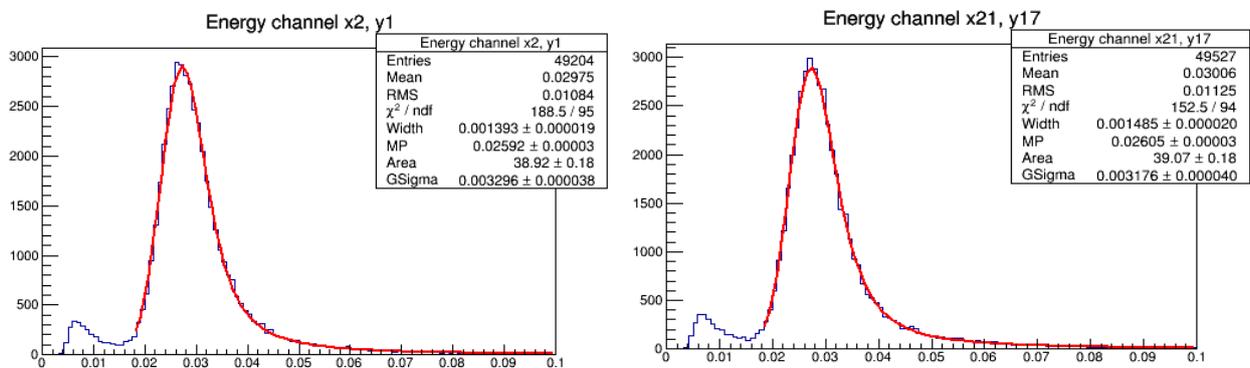


Рисунок 4 – Энергетические потери с каналов [2][1] и [21][17].

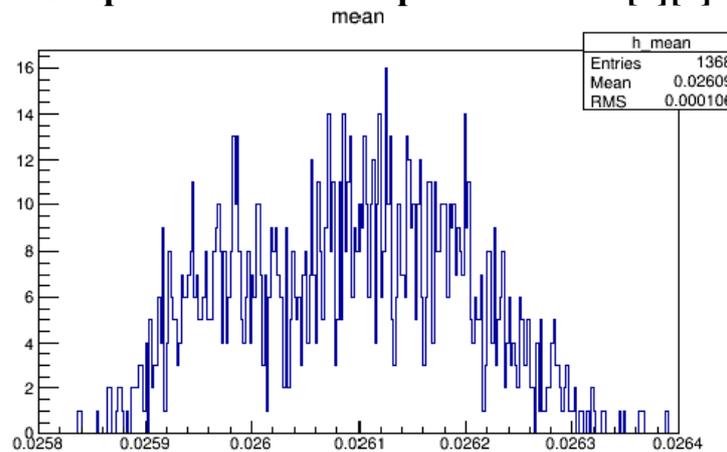
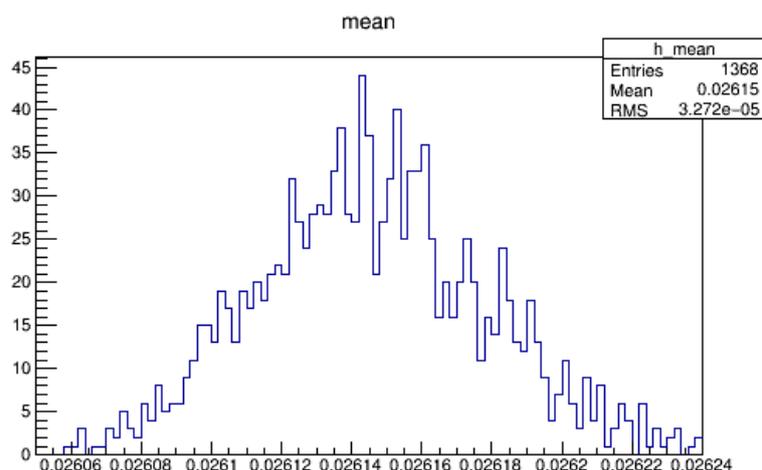
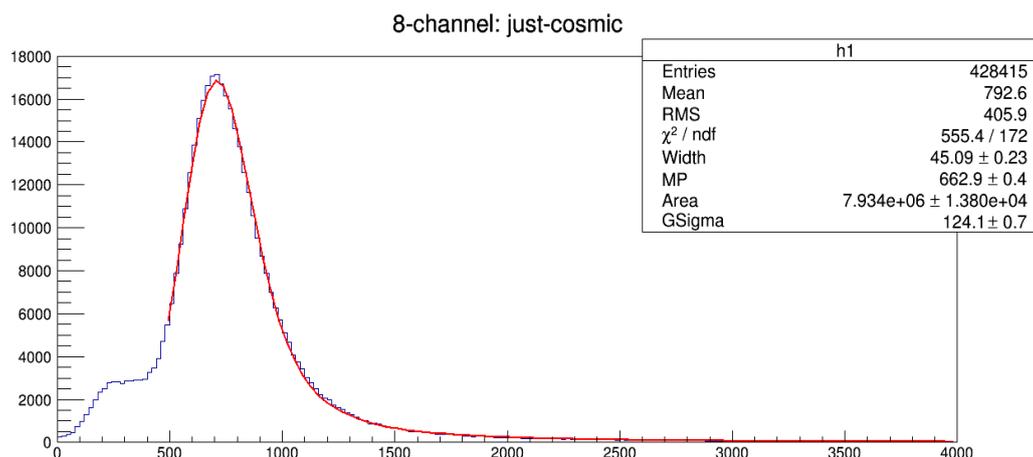


Рисунок 5 – Гистограмма наиболее вероятных значений



**Рисунок 6 – Распределение наиболее вероятных значений до введения разброса**

Сравнив приведенные два случая, можно убедиться в том, что до введения разброса отставание от среднего значения составляет 0.1%, в то время как после калибровки – 0.4%. При этом, форма реального сигнала, полученного с одного модуля калориметра выглядит следующим образом (рис.6), что находится в согласии с моделируемым результатом.



**Рисунок 6 – Энергетические потери мюонов с одного из каналов стенда**

В данном случае достижимая точность калибровки вышла приблизительно равной 7%, в то время как при моделировании получалось 5-6 %. Данные результаты хорошо согласуются друг с другом.

#### **Заключение и выводы.**

В данной работе основными задачами были: проведение моделирования отклика детектора при калибровке на атмосферных мюонах, оценка достижимой точности калибровки, а также сравнение данных моделирования с реальной формой пика, полученной со стенда.

Кроме того, для моделирования калибровки был введен разброс по энергетическим потерям в каждом канале калориметра. В результате, достижимая точность калибровки на мюонах составила около 5%. Ошибка калибровки оказалась равной 0,4%. Полученный результат можно объяснить



фактически постоянным низким уровнем шума электроники в каждой ячейке, а также постоянными порогами регистрации сигналов. По данным с тестового стенда точность калибровки составила 7%.

### Литература:

1. К. Групен. Детекторы элементарных частиц. «Сибирский хронограф», 1999
2. Тимошенко Г.Н. Методы экспериментальной ядерной физики, Международный университет природы, общества и человека. Дубна, Кафедра Биофизика, 2010
3. Вольфганг Райс. Устройство и принципы действия аналого-цифровых преобразователей различных типов. Журнал «Компоненты и технологии», № 3, 2005
4. И.В. Мачихильян. Электромагнитный калориметр эксперимента HERA-V. Москва, 2009
5. В.В. Леонтьев, И.И. Белотелов. Информационные методы в физике высоких энергий. Москва. «Университетская книга», 2011
6. И.М. Беяев, Д.Ю. Голубков, В.Ю. Егорычев, Д.В. Саврина. Калибровка электромагнитного калориметра эксперимента LHCb методом восстановления инвариантной массы нейтральных  $\pi$ -мезонов. ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия, №5, 2013
7. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005

***Abstract.** The paper considers the modeling of flying atmospheric muons and obtaining the response of the calorimeter signal. Also, an initial evaluation of various kinds of non-ideal conditions was carried out and the calibration conditions for the calorimeter were simulated. The software used was the ROOT (Geant) package, where the calorimeter model was loaded, which consisted of a set of alternating lead plates and a scintillators.*

***Key words:** calorimeter, modeling, calibration method.*

© Ефимов М.С.