

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА CMS ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ НА ПУЧКЕ CMS HCAL 2003 ГОДА

*И. А. Голутвин^а, А. В. Зарубин^а, В. Ф. Конопляников^{а,б},
П. В. Мойсенз^а, С. В. Шматов^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Гомельский государственный университет, Гомель, Белоруссия

Представлены результаты измерения пространственного разрешения торцевой части адронного калориметра CMS (HE) на основе данных, полученных при испытании прототипа HE на пучке пионов в ЦЕРН в 2003 г. Определены разрешения по полярному углу в зависимости от величин этих углов и энергии пионов. Рассчитаны коэффициенты для перехода от центра тяжести ливня к координатам частиц.

The space resolution of the hadronic endcap calorimeter CMS (HE) has been measured. The data collected at the test of HE prototype on pion beam at CERN in 2003 have been used. The dependences of the polar angle resolution on a size of angle and a pion energy are derived. The coefficients for transition from the shower centre to coordinates of particles are calculated.

PACS: 01.50.Pa

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена исследованию пространственного разрешения адронного калориметра (HCAL) установки CMS [1]. Аналогичные исследования ранее проводились с использованием результатов испытания на пучке прототипа адронного калориметра 1996 г. [2,3]. Было показано, что пространственные координаты частиц пучка (пионов) восстанавливаются с ошибкой, не превышающей 10–20% от размера башен (сегменты калориметра в η - ϕ пространстве), при энергиях пучка соответственно 20–400 ГэВ [3]. Эти результаты получены при тестах прототипа, который существенно отличался от реального калориметра как формой, так и размером и материалом башен, а также сцинтилляторами и считывающей электроникой. Поэтому ранее измеренные значения пространственного разрешения нуждаются в уточнении.

В настоящей работе были использованы результаты испытания на пучке прототипа HCAL с геометрическими и другими характеристиками башен, идентичными реальному калориметру [5]. Расчеты проводились на основе данных, полученных в сентябре 2003 г. на пучке H4 суперпротонного синхротрона (SPS) в ЦЕРН при сканировании торцевой части адронного калориметра HE по полярному углу пучком пионов π^+ разной энергии. С использованием метода итерации были определены коэффициенты для перехода от центра тяжести ливня к реконструированной координате частицы и оценены погрешности восстановления полярных углов адронов в зависимости от их координат и энергии.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НЕ

Испытываемый прототип адронного калориметра включал в себя 20°-й фрагмент торцевой части калориметра НЕ и четыре башни по направлению полярного угла ϕ . Испытания фрагмента НЕ проводились совместно с прототипом электромагнитного калориметра (ЕЕ), установленным перед фрагментом НЕ, что приближало условия эксперимента к условиям реального детектора.

Для исследований использовались данные измерений на пучках пионов с энергиями 50, 100, 200 и 300 ГэВ. В пределах одной башни ($\eta = 19$, $\phi = 4$) проводился скан по углу ϕ (рис. 1). Пучок поочередно направлялся в пять точек с полярными координатами $R = 1715$ мм и $\phi_{НЕ} = -2,5^\circ, -1,25^\circ, 0^\circ, 1,25^\circ$ и $2,5^\circ$.

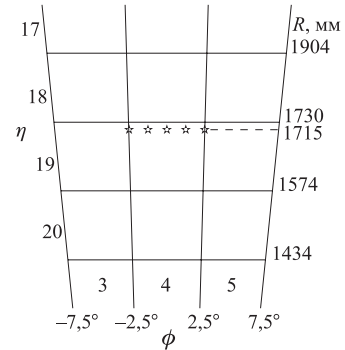


Рис. 1. Схема испытания фрагмента торцевой части прототипа адронного калориметра с указанными номерами башен в направлении η и ϕ и полярными координатами границ башен. Звездочками отмечены точки, в которые направлялся пучок пионов

Пространственное разрешение НЕ определялось путем сравнения истинных координат пионов с их реконструированными значениями. В качестве истинных рассматривались ϕ -координаты (ϕ_{beam}) точек пересечения траекторий пионов с поверхностью калориметра НЕ. При этом траектории пионов определялись с помощью пропорциональных камер.

Для определения реконструированных координат частиц использовался метод итерации [4]. Для этого исследовалась зависимость координат центра тяжести ливня ϕ_{cg} от координат частиц ϕ_{beam} при варьировании значений ϕ_{beam} в пределах одной башни. Центр тяжести ливня определялся по отсчетам аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) в 3×3 башнях ($\eta = 18-20$, $\phi = 3-5$):

$$\phi_{\text{cg}} = \frac{\sum_i E_i \phi_i}{\sum_i E_i}.$$

Здесь E_i — сигналы АЦП i -й башни; ϕ_i — угловая координата середины i -й башни.

Характеристики пучка пионов и триггерная система измерений обеспечивали непрерывность значений ϕ_{beam} в пределах $(0 \pm 3,5)^\circ$.

Из рис. 2 видно, что зависимость ϕ_{cg} от ϕ_{beam} является неоднозначной: значения ϕ_{cg} зависят не только от ϕ_{beam} , но и от положения центра пучка относительно калориметра (ϕ_{HE}). Эта неопределенность устранялась в настоящей работе наложением ограничения на направление (α_{beam}) импульсов пионов относительно оси пучка. Для анализа отбирались события с $\alpha_{\text{beam}} < 0,03^\circ$. Результат такого ограничения представлен на рис. 3.

Зависимость ϕ_{cg} от ϕ_{beam} аппроксимировалась функцией (рис. 4)

$$\phi_{cg}(\phi_{beam}) = \phi_0 + A \sinh\left(\frac{\phi_{beam} - \phi_0}{B}\right). \quad (1)$$

Здесь ϕ_0 — координата центра башни (в системе координат, использованной в настоящей работе, $\phi_0 = 0$). Значения параметров A и B приведены в табл. 1.

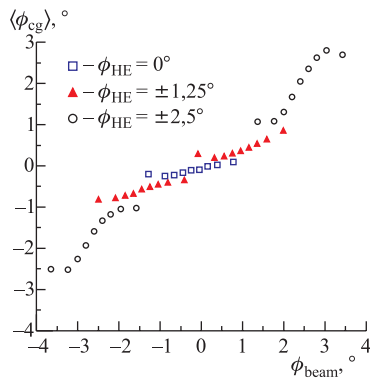


Рис. 2. Средние значения координат центра тяжести ливня ϕ_{cg} в интервалах по истинным координатам пионов ϕ_{beam} при различном положении центра пучка ϕ_{HE} ($E_{beam} = 300$ ГэВ): $\phi_{HE} = 0^\circ$, $\phi_{HE} = \pm 1,25^\circ$, $\phi_{HE} = \pm 2,5^\circ$

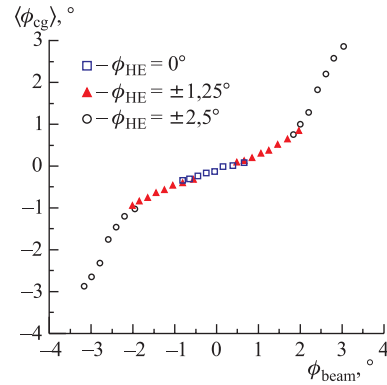


Рис. 3. Средние значения координат центра тяжести ливня ϕ_{cg} в интервалах по истинным координатам пионов ϕ_{beam} при различном положении центра пучка ϕ_{HE} ($E_{beam} = 300$ ГэВ): $\phi_{HE} = 0^\circ$, $\phi_{HE} = \pm 1,25^\circ$, $\phi_{HE} = \pm 2,5^\circ$. Отобраны события, в которых угол отклонения траекторий пионов от оси пучка не превышает $0,03^\circ$

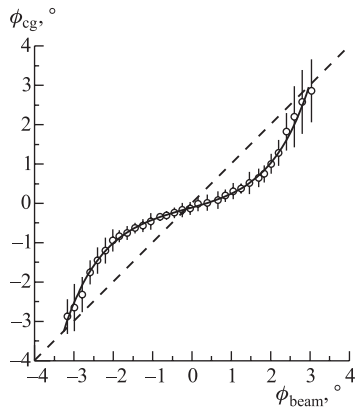


Рис. 4. Зависимость координат центра тяжести ливня от истинных координат пионов ($E_{beam} = 300$ ГэВ). Приведена аппроксимация функцией (1)

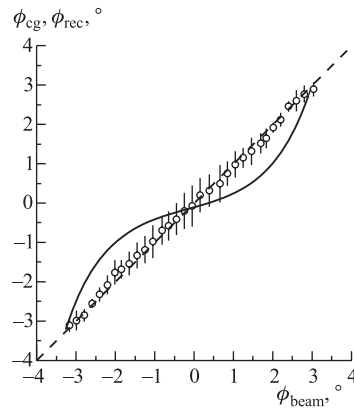


Рис. 5. Зависимость координат центра тяжести ливня (сплошная линия) и реконструированных координат пионов (кружки) от их истинных координат ($E_{beam} = 300$ ГэВ)

Таблица 1. Значения параметров функции $\phi_{\text{rec}}(\phi_{\text{cg}})$

| E_{beam} , ГэВ | A | B |
|-------------------------|-----------------|-----------------|
| 50 | $0,56 \pm 0,14$ | $1,40 \pm 0,21$ |
| 100 | $0,39 \pm 0,13$ | $1,15 \pm 0,19$ |
| 200 | $0,30 \pm 0,06$ | $1,03 \pm 0,09$ |
| 300 | $0,28 \pm 0,06$ | $1,01 \pm 0,09$ |

Таблица 2. Значения параметров функции $\sigma(\phi_{\text{beam}})$

| E_{beam} , ГэВ | σ_0 | c |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 50 | $1,044 \pm 0,008$ | $-0,052 \pm 0,002$ |
| 100 | $0,816 \pm 0,009$ | $-0,056 \pm 0,003$ |
| 200 | $0,565 \pm 0,005$ | $-0,037 \pm 0,001$ |
| 300 | $0,495 \pm 0,004$ | $-0,029 \pm 0,001$ |

Реконструированные координаты определялись с помощью обратной функции

$$\phi_{\text{rec}}(\phi_{\text{cg}}) = \phi_0 + B \operatorname{arsh} \left(\frac{\phi_{\text{cg}} - \phi_0}{A} \right).$$

В отличие от координат центра тяжести ливня реконструированные значения координат частиц совпадают в среднем с их истинными координатами (см. рис. 5).

В качестве меры разрешения координат пионов принималось среднее квадратичное отклонение (σ) разности реконструированной и истинной координат, определяемое аппроксимацией плотности распределения величины $\phi_{\text{rec}} - \phi_{\text{beam}}$ функцией нормального распределения. Наблюдается выраженная зависимость величины разрешения от координат частиц (см. рис. 6), которая может быть аппроксимирована параболой:

$$\sigma(\phi_{\text{beam}}) = \sigma_0 + c(\phi_{\text{beam}} - \phi_0)^2. \quad (2)$$

Значения аппроксимирующих параметров σ_0 и c приведены в табл. 2.

На рис. 7 представлены энергетические зависимости координатного разрешения калориметра HE для различных координат пионного пучка. Эти зависимости с хорошей

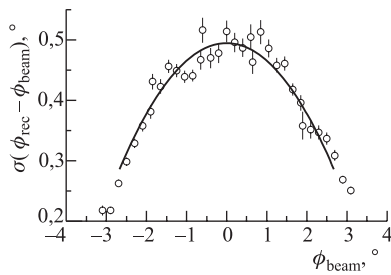


Рис. 6. Зависимость средних квадратичных отклонений реконструированных координат пионов от их истинных координат ($E_{\text{beam}} = 300$ ГэВ). Приведена аппроксимация функцией (2)

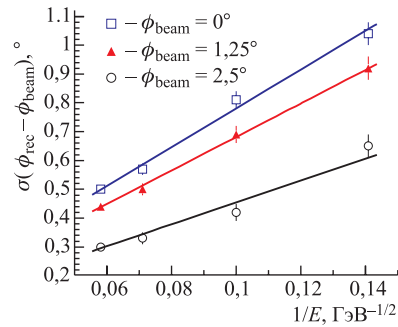


Рис. 7. Энергетические зависимости координатного разрешения калориметра HE для различных координат пионов: $\phi_{\text{beam}} = 0^\circ$, $\phi_{\text{beam}} = 1,24^\circ$, $\phi_{\text{beam}} = 2,50^\circ$. Приведена аппроксимация функцией (3)

точностью аппроксимируются функцией

$$\sigma(E_{\text{beam}}) = a + \frac{b}{\sqrt{E_{\text{beam}}}}. \quad (3)$$

Значения параметров аппроксимирующей функции приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения параметров функции $\sigma(E_{\text{beam}})$

| ϕ_{beam} , ГэВ | A | B |
|----------------------------|---------------|-------------|
| 0° | 0,108 ± 0,029 | 6,73 ± 0,43 |
| 1,25° | 0,101 ± 0,030 | 5,80 ± 0,44 |
| 2,50° | 0,075 ± 0,030 | 3,79 ± 0,43 |

Полученные значения координатных разрешений являются несколько завышенными, так как использованные в качестве истинных координаты пионов определялись неточно. Они измерялись с помощью пропорциональных камер, погрешность которых составляла 0,3 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытания прототипа торцевой части адронного калориметра позволяют с достаточно высокой точностью определить пространственное разрешение калориметра НЕ в зависимости от энергии и координат частиц. Верхняя граница этого разрешения, соответствующая попаданию адронов в середину башни с точностью до 0,01°, составляет 1,04–0,50° при энергиях пионов 50–300 ГэВ. При попадании адрона на границу башен его угловые координаты определяются с существенно меньшей погрешностью: 0,65–0,30° для тех же энергий.

Благодаря тому, что условия испытания прототипа НЕ были близки к условиям в реальном детекторе и, в частности, включали электромагнитный калориметр, найденная поправочная функция $\phi_{\text{rec}}(\phi_{\text{cg}})$ с приведенными в табл. 1 параметрами A и B может быть использована для определения координат адронов в действующем калориметре.

Рассчитанная верхняя граница пространственного разрешения НЕ составляет примерно 20–10% от размера башен, что согласуется с результатами, полученными для прототипа НЕ 1996 г., несмотря на то, что последний имел другие геометрические параметры [3]. Это позволяет надеяться на возможность обобщения полученных результатов для башен с разной формой и размерами, соответствующих различным псевдобыстротам.

Мы благодарим за активный интерес к работе В. Ладыгина, Н. Скачкова, С. Сушкова и С. Шульгу, предложивших ряд идей, которые были использованы в работе, а также В. Абрамова, А. Волкова, Д. Лазик, С. Кунори и В. Смирнова, посвятивших нас во все детали испытания НЕ на пучке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Hadron Calorimeter. Technical Design Report. CERN/LHCC 1997-31. 1997.
2. Abramov V. V. et al. Studies of the Response of the Prototype CMS Hadron Calorimeter, Including Magnetic Field Effects, to Pion, Electron and Muon Beams. CMS Note 2000/003. 2000.

3. *Kurilin A. et al.* Results of the CMS End-Cap HCAL Module Test on the H4 Beam at CERN // Proc. of Intern. School-Seminar, Gomel, 1997. Dubna, 1998. V. 2. P. 159–173.
4. *Iwata S.* Calorimeters (Total Absorption Detectors) for High-Energy Experiments at Accelerators. DPNU-3-79. 1979.
5. *Elvira V.D.* Measurement of the Pion Energy Response and Resolution in the Hadronic Barrel Calorimeter Using CMS HCAL Test Beam 2002 Data. CMS Note 2004/020. 2004.

Получено 27 августа 2007 г.