



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014-16
ОЭФ

О.В. Стенякин

**Координатная поправка для
процедуры сшивки трека и кластера
в электромагнитном калориметре**

Протвино 2014

Аннотация

Стенякин О.В. Координатная поправка для процедуры сшивки трека и кластера в электромагнитном калориметре: Препринт ИФВЭ 2014-16. – Протвино, 2014. – 14 с., 11 рис., 3 табл., библиогр.: 6.

В работе приведены значения координатных поправок для разности X -координаты реконструированного трека и несмещенной оценки координаты кластера в электромагнитном калориметре. В препринте представлены результаты, полученные на Монте-Карло для одиночных электронов (позитронов), полном Монте-Карло и реальных данных, записанных в 2011–2012 гг. Представлена параметризация поправок в зависимости от импульса трека. Результаты на данных получены отдельно для каждой зоны калориметра, а также с учётом направления магнитного поля. Написан и включён в систему реконструкции алгоритм, обеспечивающий корректное применение полученных поправок.

Abstract

Stenyakin O.V. The coordinate correction for the track-cluster matching procedure in the electromagnetic calorimeter: IHEP Preprint 2014-16. – Protvino, 2014. – p. 14, figs. 11, tables 3, refs.: 6.

The values of the coordinate correction between X -position of the reconstructed track and barycentre of the charged cluster in the ECAL are evaluated. The note presents the results obtained on Particle Gun Monte Carlo, full Monte Carlo and 2011–2012 data samples. Parametrization of the correction as a function of momentum is also proposed. The results obtained on Data include electron and positron X -corrections corresponding to different magnetic field polarities as well as individual ECAL zones. Algorithm which ensures the correct application of these X -corrections was written and included in the reconstruction system of the experiment.

1. Введение

Калориметрическая система эксперимента LHCb [1], состоящая из сцинтилляционного падового (SPD) и предливневого (PS) детекторов, электромагнитного (ECAL) и адронного (HCAL) калориметров, играет важную роль в идентификации частиц. Идентификация электронов и позитронов с помощью калориметрической системы может быть улучшена, если усовершенствовать процедуру сшивки трека и кластера в электромагнитном калориметре.

Электромагнитный калориметр имеет зонную структуру, включающую внешнюю, среднюю и внутреннюю зоны. Такое разделение учитывает различную степень загрузки частей калориметра, расположенных на разном расстоянии от оси пучка, и оптимизирует число каналов считывающей электроники.

Сшивка трека и кластера в калориметре происходит в два этапа. Опуская несущественные детали, заметим, что на первом этапе проводится сопоставление по геометрическому положению кластера. (Проверяется, указывает ли трек в данный кластер.) Качество такой процедуры оценивается на основе значения двумерного хи-квадрата χ_{2D}^2 [2, 3]. На втором этапе проверяется, указывает ли трек в центр тяжести данного кластера, а также сравнивается энерговыделение в кластере и значение импульса трека. На этом этапе для оценки качества сшивки вычисляется трёхмерный хи-квадрат χ_{3D}^2 . Следует заметить, что на втором этапе все поправки к координатам центра электромагнитного ливня и к его энергии уже применены.

Другое важное замечание, которое необходимо сделать, заключается в том, что сшивка выполняется в предположении, что электромагнитный кластер принадлежит фотону. Все поправки к его координатам и энерговыделению также применяются с учётом этого предположения. Однако, благодаря отклоняющему действию магнитного поля на заряженные треки возникает сдвиг вдоль оси X^1 координаты центра

¹В эксперименте LHCb используется декартова система координат, за начало которой принимается точка взаимодействия пучков. Ось X направлена горизонтально во внешнюю сторону LHC, ось Y — вертикально вверх, ось Z направлена вдоль оси пучков так, чтобы система координат XYZ была правой [4].

ливня после применения всех поправок и истинной координаты пересечения треком плоскости, до которой он экстраполируется для проведения сшивки.

На Рис. 1 представлены разности X - и Y -координат трека, экстраполированного к Z -координате кластера, и электромагнитного ливня $\Delta X = X_{tr} - X_{cl}$ и $\Delta Y = Y_{tr} - Y_{cl}$. На рисунке видно, что формы распределений ΔX принципиально несимметричны. Вместе с тем средние значения распределений ΔX смещены относительно нуля, а знак этого смещения зависит от знака заряда трека. Формы распределений ΔY , напротив, выглядят симметрично, и заметного сдвига среднего относительно нуля не наблюдается.

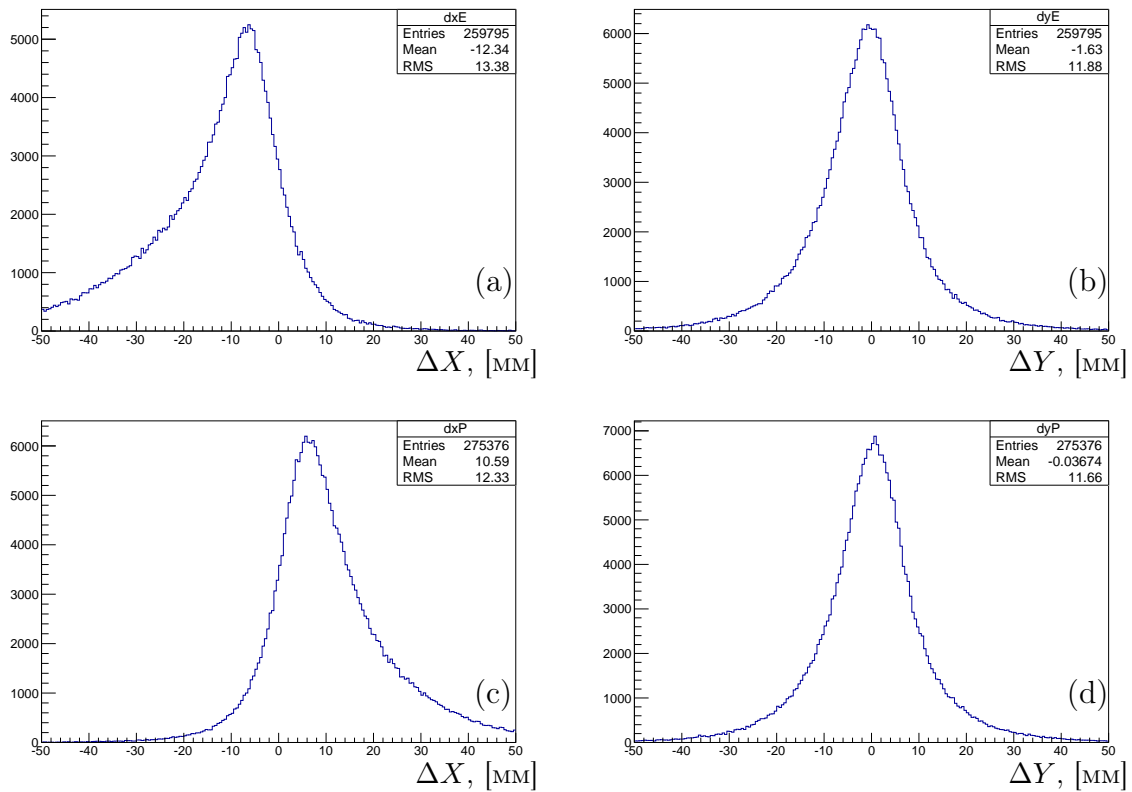


Рис. 1. ΔX и ΔY распределения, полученные на данных 2011–2012 гг. (a, b) для электронов, (c, d) для позитронов.

Ненулевая разница ΔX приводит к ухудшению качества процедуры сшивки трека и кластера, что отражается в увеличении (в среднем) значения хи-квадрата χ^2_{3D} , который является основным оценочным параметром качества сшивки электронов и позитронов калориметра ECAL. Он вычисляется как χ^2 между компонентами реконструированного трека (X_{tr}, Y_{tr}, p) и заряженного кластера (X_{cl}, Y_{cl}, E) .

Самым простым способом скорректировать разницу ΔX во время проведения сшивки является введение дополнительного члена в X -координату трека, экстраполированного к Z -координате положения кластера. Добавление X -поправки должно привести к уменьшению значения хи-квадрата χ^2_{3D} .

Основной задачей настоящей работы является нахождение подходящей X -поправки в процедуре сшивки и минимизация хи-квадрата χ_{3D}^2 , что в конечном счёте приведёт к улучшению идентификации электронов и позитронов с помощью электромагнитного калориметра.

Конкретный вид параметризации X -поправки как функции импульса трека будет обсуждаться ниже, сейчас же отметим, что при малых углах отклонения электронов и позитронов от оси пучка в магнитном поле и в предположении, что оно является постоянным и однородным, значение X -поправки можно считать обратно пропорциональным значению импульса трека $\Delta X \sim 1/p$.

Характерное распределение χ_{3D}^2 , полученное на стандартном Монте-Карло, представлено на Рис. 2. Меньшие значения хи-квадрата соответствуют электронам (позитронам), бóльшие (длинный «хвост») — мюонам, адронам и ошибкам системы реконструкции. Всюду в работе применяется ограничение на значение хи-квадрата $\chi_{3D}^2 < 500$.

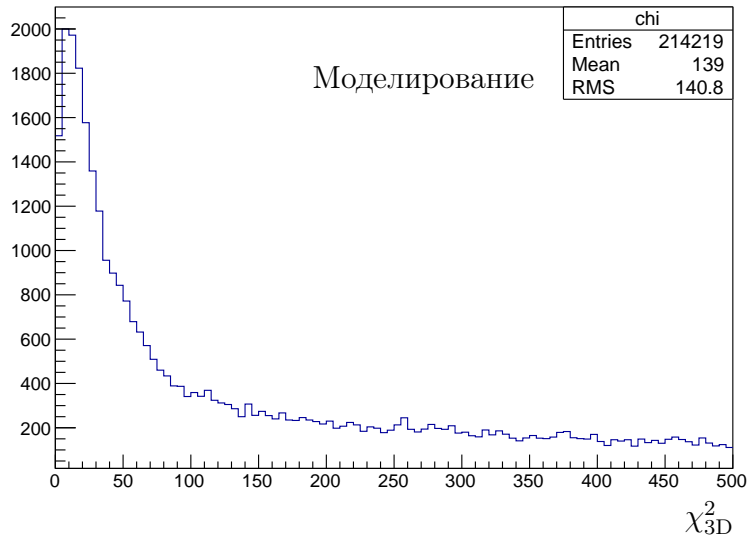


Рис. 2. Характерное распределение трёхмерного хи-квадрата χ_{3D}^2 , полученное на стандартном Монте-Карло.

2. Метод исследования

Как было отмечено выше, предполагается, что значение X -поправки обратно пропорционально импульсу трека $\Delta X \sim 1/p$. Было обнаружено, что на Монте-Карло разность ΔX между X -координатами реконструированного трека и заряженного кластера в калориметре может быть параметризована в следующем виде:

$$\Delta X = X_{tr} - X_{cl} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{1}{p} + \alpha_2 \cdot p, \quad (1)$$

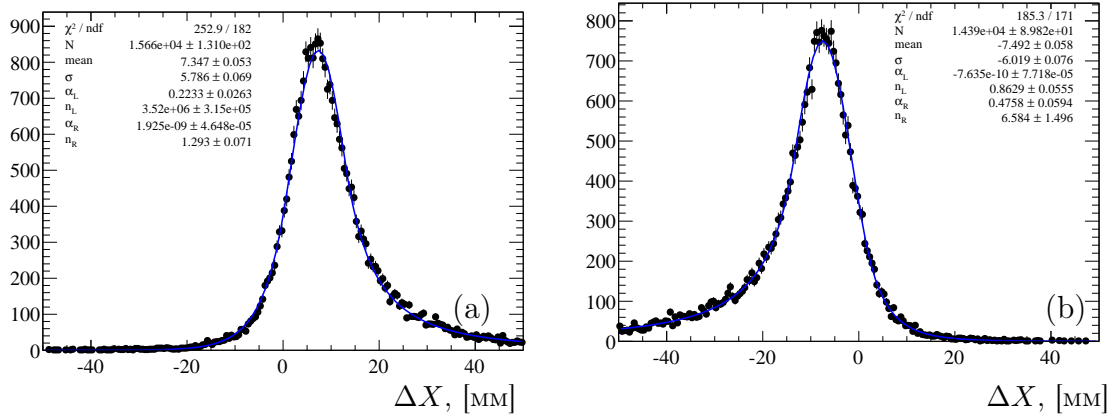


Рис. 3. Распределения ΔX , полученные на данных 2011–2012 гг. для всего калориметра в интервале импульсов $9 < p < 10$ ГэВ/с (а) для $q * \text{polarity} < 0$ (см. раздел 3.3), (б) для $q * \text{polarity} > 0$.

где импульс трека p измеряется в ГэВ/с, а значения параметров α_0 , α_1 , α_2 зависят от знака заряда трека.

Дополнительные члены с коэффициентами α_0 и α_2 добавлены для того, чтобы описать возможный постоянный сдвиг и асимптотическое поведение ΔX при больших значениях импульса. Выражение (1) применяется при описании X -поправки на Монте-Карло для одиночных электронов и полного Монте-Карло.

На данных, для того чтобы описать асимптотическое поведение ΔX при больших значениях импульса, была удалена линейная зависимость по импульсу, а для описания X -поправки при малых значениях p добавлен член, пропорциональный $1/p^2$:

$$\Delta X = X_{\text{tr}} - X_{\text{cl}} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{1}{p} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{p^2}, \quad (2)$$

где импульс трека p измеряется в ГэВ/с, а значения параметров α_0 , α_1 , α_2 являются функциями знака произведения заряда частицы на знак направления магнитного поля магнита.

Для того чтобы построить зависимости $\Delta X(p)$ на Монте-Карло для одиночных электронов и полном Монте-Карло были взяты средние значения ΔX и ошибки среднего из фитирования двусторонним распределением Гаусса (Bifurcated Gaussian, BF)² ΔX -распределений в различных интервалах импульсов.

В отличие от результатов, полученных на Монте-Карло, для данных лучшее описание обеспечивает фитирование ΔX -распределений двусторонней функцией Crystal Ball (DSCB), поэтому она использовалась в качестве базовой при работе с данными. В качестве примера приведём результаты фита функцией DSCB ΔX -распределений, полученных на данных 2011–2012 для всего калориметра в интервале импульсов $9 < p < 10$ ГэВ/с (Рис. 3).

²Распределение Гаусса с различными значениями σ по разные стороны от среднего значения.

Также при работе с данными была использована альтернативная модель фитирования ΔX -распределений двусторонним Гауссианом в интервале $\pm 2.5\sigma$ около максимального значения, для того чтобы оценить систематическую погрешность при определении средних значений ΔX . Консервативная оценка ошибок была получена следующим образом:

$$\sigma_{\text{total}}(\Delta X) = \sqrt{\sigma_{\text{DSCB}}^2(\Delta X) + (\Delta X_{\text{DSCB}} - \Delta X_{\text{BG}})^2},$$

где значения с индексами DSCB и BG соответствуют результатам фитирования с помощью функций двусторонний Crystal Ball и двусторонний Гауссиан соответственно.

Основной алгоритм для получения параметров X -поправки следующий. Вначале проводится построение зависимости ΔX как функции импульса трека в различных интервалах значений. Затем выполняется фитирование $\Delta X(p)$ с помощью выражений (1) и (2) для Монте-Карло и данных соответственно. После этого полученные из фита значения параметров α_0 и α_2 фиксируются с противоположными знаками, и проводится поиск минимума среднего значения хи-квадрата χ_{3D}^2 по параметру α_1 . В результате становятся известными все три параметра X -поправки α_0 , α_1 и α_2 .

3. Результаты

3.1. Монте-Карло для одиночных электронов (позитронов)

На начальном этапе для изучения значения X -поправки использовались Монте-Карло события с одиночными моноэнергетичными электронами и позитронами. Они были сгенерированы при следующих условиях: плоские распределения по псевдобыстроте в интервале значений $1.7 < \eta < 4.7$, электроны при $\varphi = \pi$, позитроны при $\varphi = 0$. Электроны и позитроны в данных выборках имеют импульсы 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 и 120 ГэВ/с (за исключением позитронов с импульсом 80 ГэВ/с).

Была построена разница ΔX между X -координатами трека и ливня в калориметре как функция импульса трека (Рис. 4). Проведено фитирование этой зависимости с помощью функции (1). Затем полученные из фита параметры X -поправки α_0 и α_2 были зафиксированы, и был произведён поиск минимума хи-квадрата χ_{3D}^2 по параметру α_1 . Этот поиск осуществлялся итерационно в интервале от -100 до 100 (мм·ГэВ/с) с шагом 10 (мм·ГэВ/с).

На Рис. 5 представлены результаты фитирования полиномом 2-й степени средних значений χ_{3D}^2 для электронов (а) и для позитронов (б). В качестве ошибок на графиках отложены ошибки среднего.

Значения параметров X -поправки на Монте-Карло для одиночных электронов приведены в Таб. 1. Видно, что для электронов и позитронов они отличаются по знаку, а по модулю — близки друг к другу.

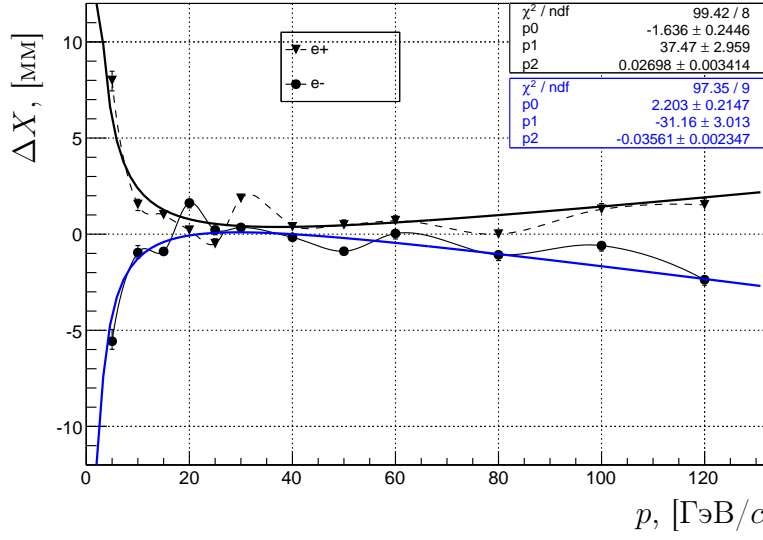


Рис. 4. Разница ΔX как функция импульса электронов и позитронов, построенная на Монте-Карло для одиночных электронов. Величины ошибок отражают статистическую неопределённость. Точка для позитронов при $p = 80$ ГэВ/с не включена в фит.

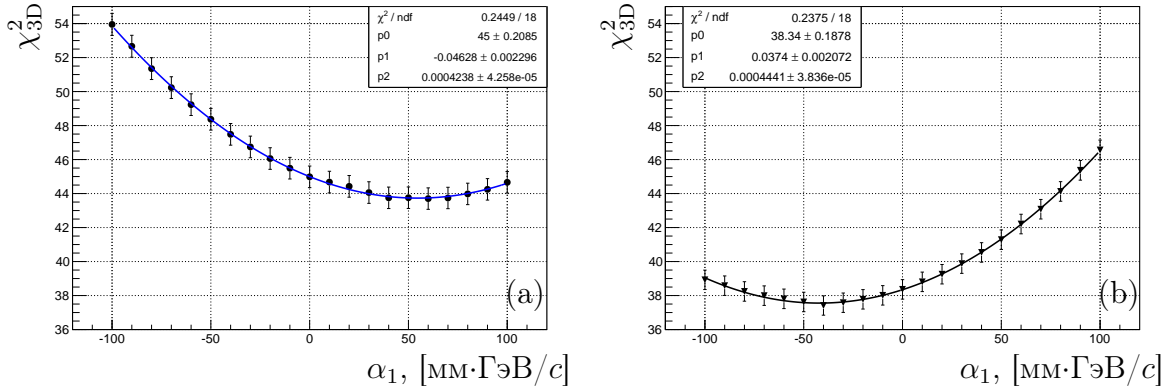


Рис. 5. χ^2_{3D} как функция α_1 для (а) электронов и (б) позитронов (Монте-Карло для одиночных электронов).

Таблица 1. Параметры X-поправки (1), полученные на Монте-Карло для одиночных электронов (позитронов).

	α_0 , (мм)	α_1 , (мм·ГэВ/с)	α_2 , (мм/ГэВ/с)
e^+	1.636 ± 0.245	-42.11 ± 4.32	-0.02698 ± 0.00341
e^-	-2.203 ± 0.215	54.61 ± 6.12	0.03561 ± 0.00235

3.2. Полное Монте-Карло

Отбор электронов и позитронов при изучении X -поправки на полном Монте-Карло проводился из полулептонных распадов B -мезонов $B \rightarrow De^\pm\nu$. Было обработано около 1.5×10^6 событий и отобрано около 11.7×10^3 электронов и позитронов из указанных Монте-Карло данных.

Электроны и позитроны отбирались с использованием «истинной» Монте-Карло информации [5]. Применялась стандартная процедура, сопоставляющая реконструированную частицу с частицей из «списка» Монте-Карло частиц. В случае совпадения функция принимает истинное значение, и частица принималась за электрон (позитрон). В противном случае частица отбрасывалась.

Аналогично случаю с Монте-Карло для одиночных электронов была построена разность ΔX как функция p , и проведено её фитирование (Рис. 6). Затем был выполнен поиск минимума χ^2_{3D} по параметру X -поправки α_1 (Рис. 7), а минимальное значение χ^2_{3D} также было определено в результате фитирования полиномом 2-й степени.

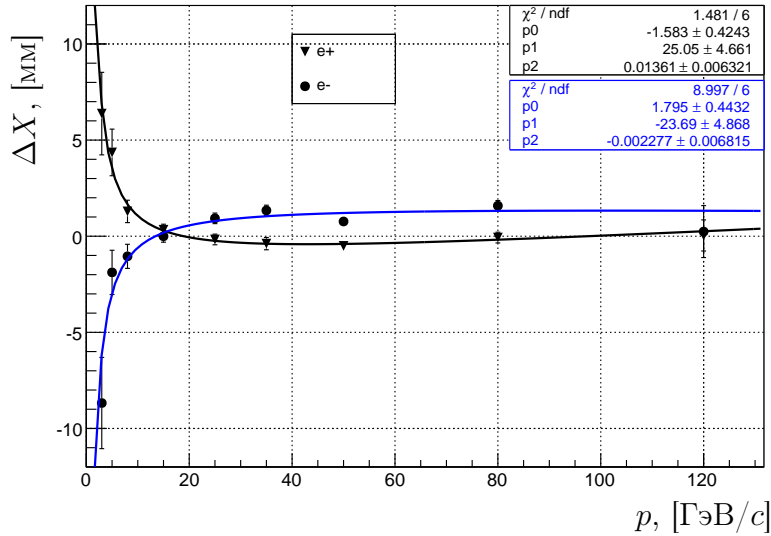


Рис. 6. Разница ΔX как функция импульса электронов и позитронов, построенная на полном Монте-Карло. Величины ошибок отражают статистическую неопределённость.

Значения параметров X -поправки для полное Монте-Карло приведены в Таб. 2. Параметры получены, как и в случае с Монте-Карло для одиночных электронов, для всего калориметра без учёта его зонной структуры.

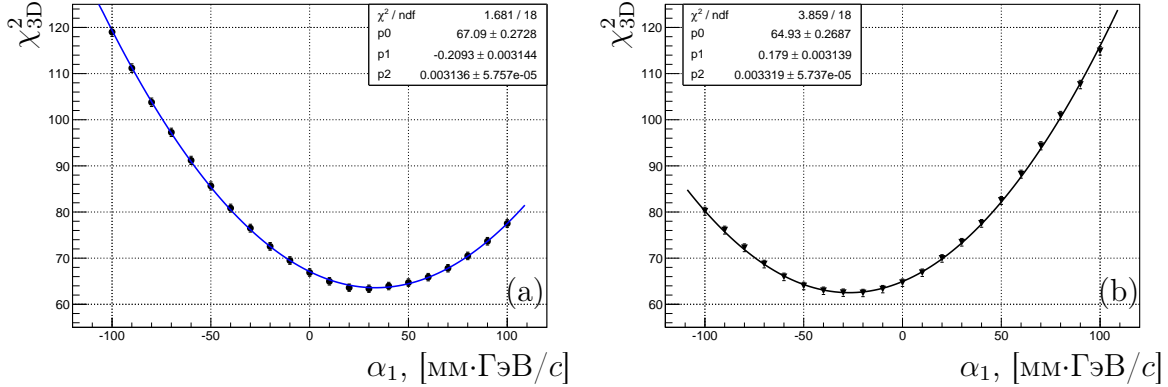


Рис. 7. χ^2_{3D} как функция α_1 для (а) электронов и (б) позитронов (полное Монте-Карло).

Таблица 2. Параметры X -поправки (1), полученные на полном Монте-Карло.

	α_0 , (мм)	α_1 , (мм·ГэВ/с)	α_2 , (мм/ГэВ/с)
e^+	1.583 ± 0.424	-26.96 ± 0.66	-0.01361 ± 0.00632
e^-	-1.795 ± 0.443	33.38 ± 0.79	0.00228 ± 0.00682

3.3. Данные

В отличие от Монте-Карло изучение X -поправки на данных проводилось как для всего калориметра, так для каждой из его зон в отдельности. В работе использовались электроны и позитроны из данных с минимальными триггерными условиями, полученных в 2011–2012 гг. в pp столкновениях с полной энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и 8 ТэВ.

Во время набора данных существует возможность периодического изменения направления магнитного поля магнита на противоположное. Обозначим (следуя стандартным обозначениям, принятым в коллаборации LHCb) через *MagUp* и *MagDown* режимы работы магнита, при которых создаваемое им магнитное поле направлено вертикально вверх или вниз вдоль оси Y соответственно. При исследовании X -поправки на данных случаи e^- *MagUp* и e^+ *MagDown* были объединены в один, а e^- *MagDown* и e^+ *MagUp* в другой. Если обозначить заряд частиц $q = \pm 1$, а направление магнитного поля $polarity = +1$ при *MagUp*, $polarity = -1$ при *MagDown*, то мы приходим к рассмотрению вместо четырёх только двух случаев, для которых достаточно будет получить X -поправки. Эти случаи удовлетворяют условиям: $q * polarity > 0$ и $q * polarity < 0$. На Рис. 8 представлены соответствующие распределения ΔX для всех четырёх случаев.

Следующие ограничения наложены на параметры событий и частиц во время обработки данных: число первичных вершин в событии $nPV \leq 2$, импульс трека $p > 3$ ГэВ/с, поперечный импульс $p_T > 300$ MeV/с. Для достижения высокой чистоты

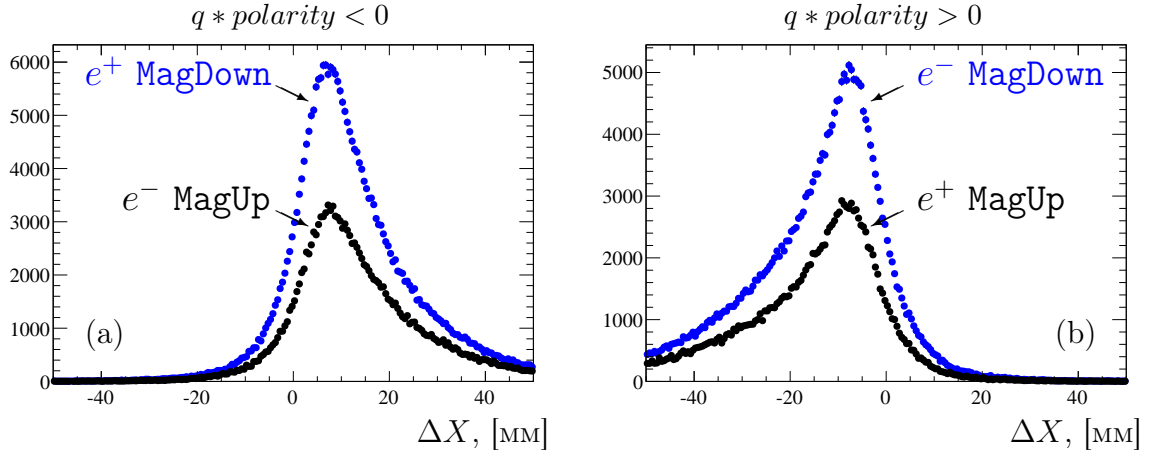


Рис. 8. ΔX распределения, полученные на данных 2011–2012 гг. (a) e^- MagUp & e^+ MagDown, $q * polarity < 0$ и (b) e^- MagDown & e^+ MagUp, $q * polarity > 0$.

ты выборки электронов и позитронов используется информация об идентификации частиц с помощью детекторов черенковского излучения RICH (разность логарифмических функций правдоподобия для электронной гипотезы $\Delta \log \mathcal{L}_e^{\text{RICH}} > 30$) и отношения E/p : $|E/p - 1| < 0.1$.

Предварительные значения параметров X -поправки, полученных на данных 2011–2012 гг., приведены в Таб. 3. Соответствующие результаты фитирования зависимостей $\Delta X(p)$ представлены на Рис. 9 и 10. Напомним, что вместо выражения (1) для описания зависимости ΔX от импульса трека используется выражение (2).

Распределения хи-квадрата χ_{3D}^2 до и после применения X -поправки приведены на Рис. 11 для внешней, средней и внутренней зон электромагнитного калориметра. Для каждой зоны наблюдается улучшение после внесения X -поправок.

Таблица 3. Параметры X -поправки (2), полученные на данных 2011–2012 гг. для всего калориметра и отдельно для каждой зоны.

Весь калориметр	α_0 , (мм)	α_1 , (мм·ГэВ/ c)	α_2 , (мм·(ГэВ/ c) ²)
$q * polarity < 0$	-6.9 ± 1.5	12.0 ± 23.2	-188.0 ± 74.1
$q * polarity > 0$	7.5 ± 1.6	-28.4 ± 26.6	312.4 ± 91.4
Внешняя зона			
$q * polarity < 0$	-18.9 ± 2.8	83.5 ± 41.2	-292.4 ± 127.2
$q * polarity > 0$	26.0 ± 2.6	-113.7 ± 35.8	406.8 ± 111.1
Средняя зона			
$q * polarity < 0$	-6.4 ± 0.8	-3.5 ± 10.8	-60.0 ± 32.0
$q * polarity > 0$	6.5 ± 0.1	6.3 ± 1.9	46.3 ± 9.2
Внутренняя зона			
$q * polarity < 0$	-4.8 ± 0.2	-1.9 ± 4.3	-17.1 ± 17.9
$q * polarity > 0$	5.5 ± 0.3	-2.0 ± 6.2	14.8 ± 32.5

4. Применение поправки

Применение полученных значений X -поправок для Монте-Карло и для данных в программе реконструкции выполнено внутри блока, отвечающего за проведение сшивки электронов (позитронов) и кластеров в электромагнитном калориметре.

Значения параметров X -поправок были внесены в базу данных, хранящую изменяющиеся во времени параметры детектора и обеспечивающую удобную работу с ними [6].

Для того чтобы скорректировать процедуру сшивки трека и кластера в калориметре с помощью внесения X -поправки, её параметры зачитываются из базы данных; запрашивается информация о направлении магнитного поля магнита; устанавливается зона калориметра, в которую указывает трек. На основе этих данных необходимое значение X -поправки добавляется в X -координату соответствующего трека, который участвует в процедуре сшивки.

Конкретное выражение для X -поправки выбрано в виде ряда по степеням $1/p$:

$$\Delta X = \alpha_0 \cdot p + \alpha_1 + \alpha_2 \cdot 1/p + \alpha_3 \cdot 1/p^2 + \dots = \sum_{i=0}^{+\infty} \alpha_i (1/p)^{i-1}. \quad (3)$$

Такое выражение наиболее полно отражает зависимость $\Delta X(p)$ и легко приводится к виду (1) и (2), которые описаны в разделе 2. Действительно, для того чтобы это выражение удовлетворяло зависимости $\Delta X(p)$ на Монте-Карло для одиночных электронов и полного Монте-Карло, достаточно использовать только первые три члена в (3) и занулить остальные. Для данных следует взять первые четыре члена данного выражения, занулить все остальные, а также α_0 .

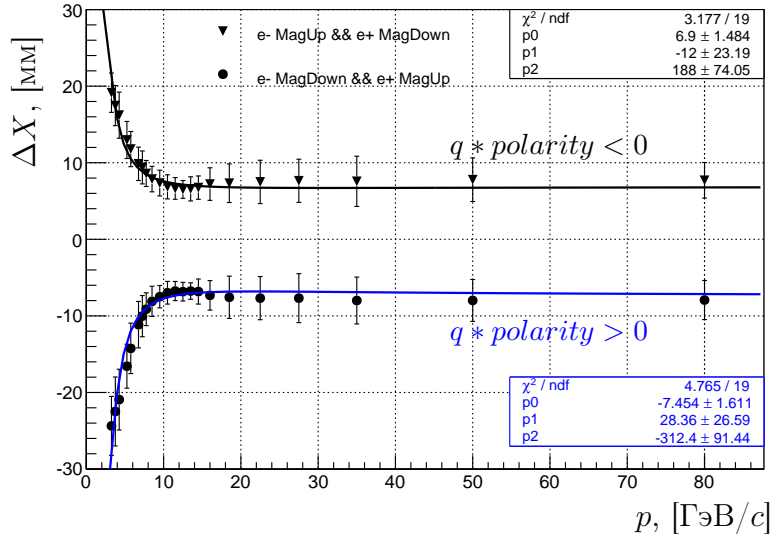


Рис. 9. Разница ΔX как функция импульса электронов и позитронов, построенная на данных 2011–2012 гг. с учётом различной полярности магнита для всего калориметра. Величины ошибок равны квадратичной сумме статистической и систематической неопределённостей.

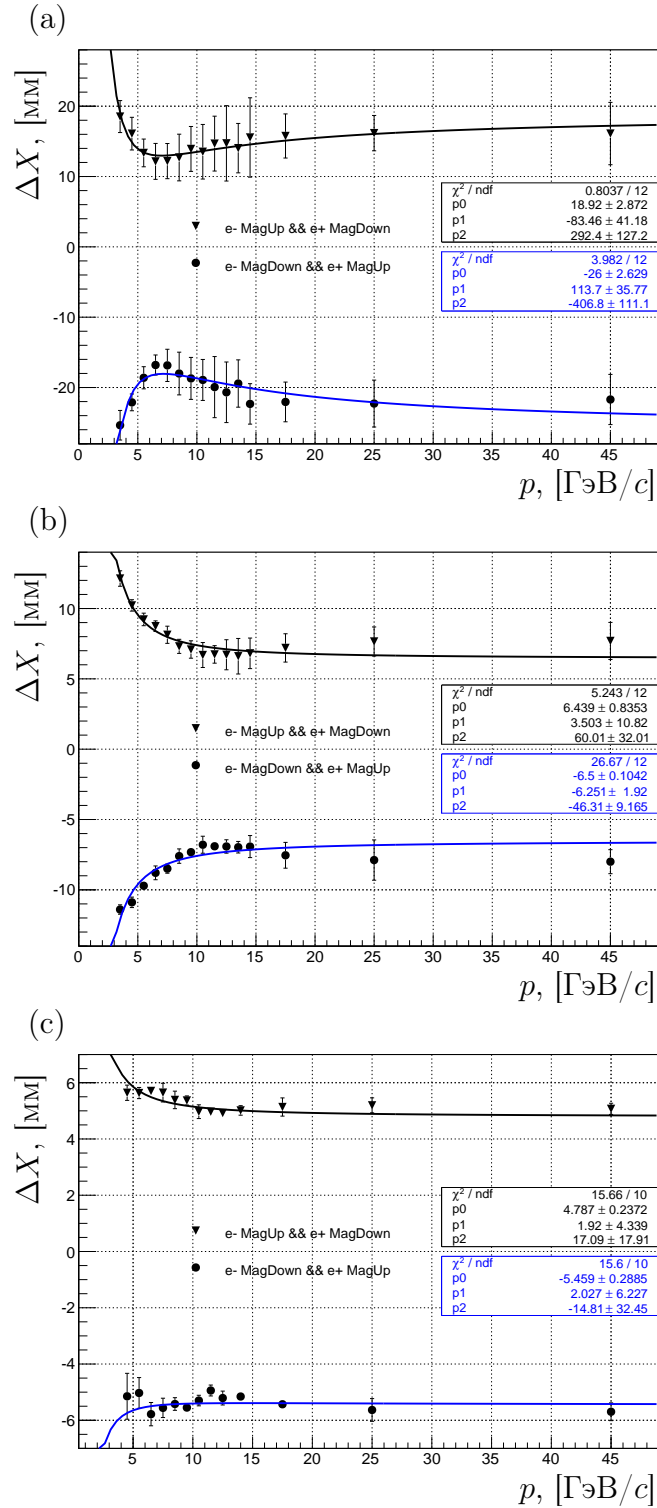


Рис. 10. Разница ΔX как функция импульса электронов и позитронов, построенная на данных 2011–2012 гг. с учётом различной полярности магнита для (a) внешней, (b) средней и (c) внутренней зон калориметра. Величины ошибок равны квадратичной сумме статистической и систематической неопределённостей.

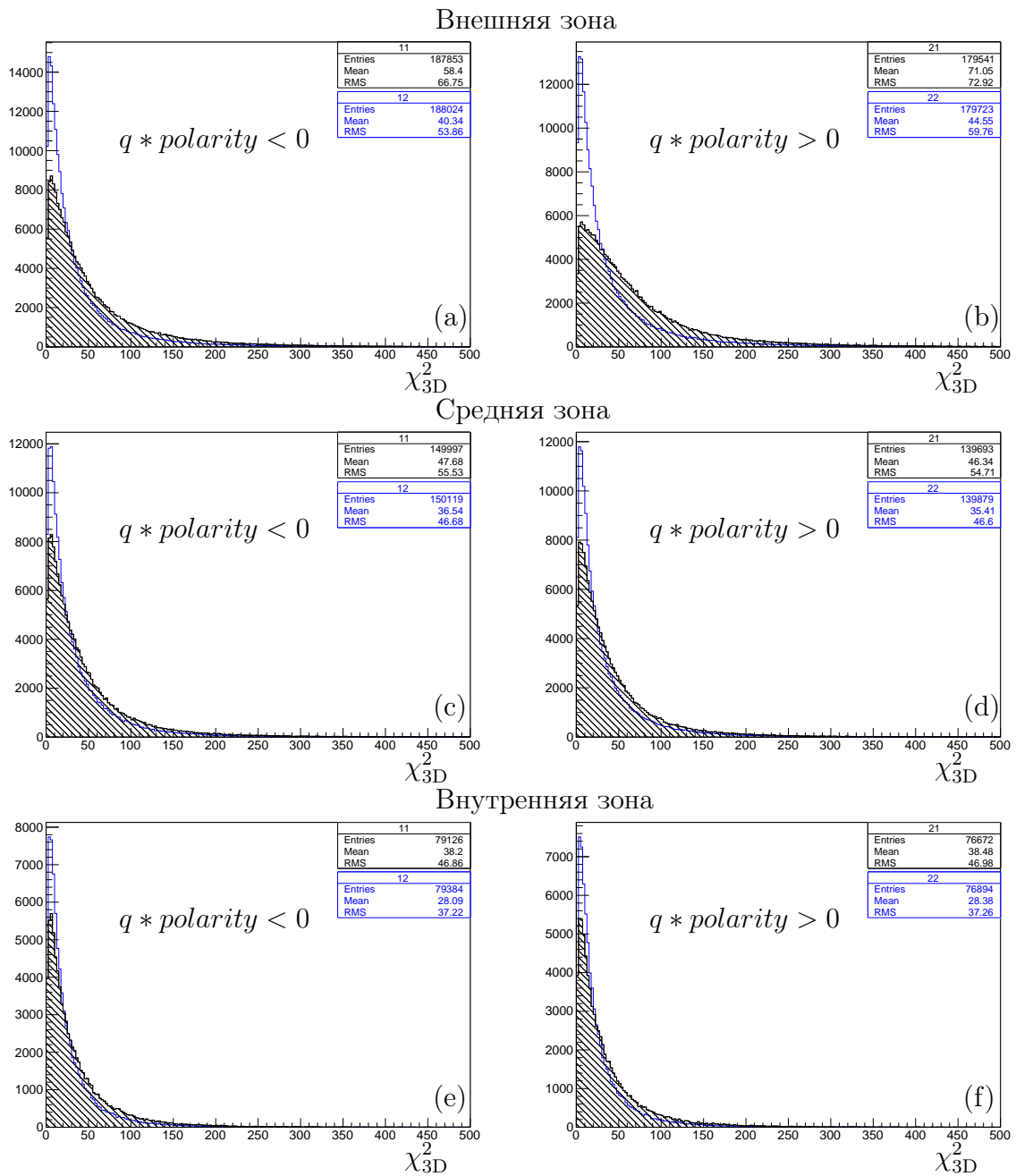


Рис. 11. Распределения χ_{3D}^2 , полученные на данных 2011–2012 гг. для (а, б) внешней, (с, д) средней и (е, ф) внутренней зон calorиметра. Заштрихованные гистограммы — до внесения X -поправки, незаштрихованные — после внесения X -поправки.

В том случае, если чтение параметров X -поправки из базы данных отключено, все значения параметров устанавливаются в нулевое значение. Кроме того, предусмотрена возможность изменения параметров X -поправки вручную.

5. Заключение

В работе представлены результаты по вычислению X -поправки в процедуре сшивки треков электронов и позитронов и электромагнитных кластеров. Параметры X -поправок получены на основе фитирования зависимостей разностей X -координат реконструированного трека и центра заряженного кластера в электромагнитном калориметре от импульса трека, а также поиска минимума хи-квадрата χ^2_{3D} .

Результаты, полученные на Монте-Карло для одиночных электронов (позитронов), полном Монте-Карло и реальных данных 2011–2012 гг. с минимальными триггерными условиями, приведены в Таблицах 1, 2 и 3.

Параметры, вычисленные для данных, получены как для всего калориметра, так и для каждой из его зон в отдельности, а также для двух вариантов полярности магнита.

Алгоритм, обеспечивающий корректное применение полученных X -поправок, включен в программный код пакета реконструкции, выполняющего сшивку электронов и позитронов с кластерами в калориметре эксперимента LHCb.

6. Благодарности

Автор хотел бы искренне поблагодарить Ивана Беляева, Виктора Егорычева и Дмитрия Голубкова за большую помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки РФ (Соглашение №14.610.21.0002, идентификационный номер RFMEFI61014X0002).

Список литературы

- [1] The LHCb Collaboration, *The LHCb Detector at the LHC*, JINST **3** (2008) S08005.
- [2] O. Deschamps *et al.*, *Photon and neutral pion reconstruction*, LHCb-2003-091, CERN, Geneva, Sep, 2003.
- [3] H. Terrier and I. Belyaev, *Particle identification with LHCb calorimeters*, LHCb-2003-092, CERN, Geneva, Sep, 2003.
- [4] R. Lindner, *Definition of the coordinate system*, LHCb-C-EN-0001, EDMS No 372642.
- [5] I. Belyaev, *LoKi: Smart & Friendly C++ Physics Analysis Toolkit*, LHCb-2004-023, CERN, Geneva, Mar, 2004.

- [6] M. Clemencic, J. Palacios and N. Gilardi, *LHCb Conditions Database*, LHCb-PROC-2006-004, 15th International Conference on Computing In High Energy and Nuclear Physics, Mumbai, India, 13–17 Feb 2006.

Рукопись поступила 27 ноября 2014 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

О.В. Стенякин

Координатная поправка для процедуры сшивки трека и кластера в электромагнитном калориметре.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 05.12.2014. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 1,54. Тираж 80. Заказ 22. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2014–16,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
