

Иван Иванович Белотелов

Влияние точности позиционирования модулей трековых детекторов на реконструкцию физического сигнала в экспериментах Hera-B и CMS и геометрическое выравнивание внешнего трекера детектора Hera-B

01.04.23 — Физика высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена в Лаборатории Физики частиц Объединённого института ядерных исследований .

Научные руководители: доктор физ.-мат. наук, профессор
Никитин Владимир Алексеевич
доктор физ.-мат. наук, профессор
Ососков Геннадий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор
Багинян Сергей Агабекович
доктор физ.-мат. наук, профессор
Сарычева Людмила Ивановна

Ведущая организация: Институт теоретической и экспериментальной
физики, г.Москва

Защита состоится 12 октября 2006 года в 15:00 на заседании диссертационного совета К 501.001.03 в МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, г.Москва, ГСП-2, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корпус, аудитория 2-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова

Автореферат разослан 8 сентября 2006 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Манагадзе А.К.

Общая характеристика работы

Настоящая работа основана на результатах исследований, выполненных при участии автора в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований в рамках сотрудничества в экспериментах Нега-В (DESY, Гамбург, Германия) и CMS (CERN, Женева, Швейцария). В диссертации описаны методы моделирования невыравненности детектора, представлены результаты исследования влияния невыравненности на различные характеристики реконструированного сигнала, представлены результаты применения метода выравнивания детектора, основанного на одновременном определении параметров треков и геометрических поправок.

Эксперимент Нега-В проектировался для измерения параметров CP-нарушения в распадах нейтральных B -мезонов. Текущая физическая программа эксперимента включает измерение сечения рождения $b\bar{b}$, исследование ядерных эффектов в рождении чармония, поиск экзотических барионов. Камеры реконструкции треков внешнего трекера (РС) являются одной из ключевых подсистем магнитного спектрометра. Измерения в них используются как триггером для отбора событий, так и программой реконструкции во время финального анализа.

РС-камеры внешнего детектора Нега-В состоят из 998 отдельных чувствительных плоскостей. Плоскости образуют 24 слоя, слои сгруппированы в 4 суперслоя. Некоторые слои повернуты на ± 80 мрад. Суперслои разделены на 2 части: (+) и (-) половины, надеваемые на трубу протонного пучка. Проектная точность измерения координаты составляет 200 мкм. Точность же позиционирования элементов детектора в слое и слоя относительно других подсистем существенно ниже. Поэтому для получения максимальной точности нужна специальная процедура геометрического выравнивания (алайнмента), позволяющая определить геометрические поправки.

Проект CMS - детектор общего назначения на большом адронном коллайдере - предназначен для проведения широкого спектра исследований. Требования, налагаемые на детектор программой физических исследований, включают надёжную идентификацию мюонов, хорошее импульсное разрешение в широком диапазоне импульсов от единиц ГэВ до нескольких ТэВ в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$, хорошее разрешение по ин-

вариантной массе ($\approx 1\%$ для $M_{inv} = 100$ ГэВ), надёжную идентификацию знака заряда для энергий вплоть до 1000 ГэВ.

Две подсистемы детектора CMS, отвечающие за реконструкцию траекторий частиц - мюонная система и трекер, являются сложнейшими составными детекторами. Мюонная система детектора CMS состоит из центральной цилиндрической части (Barrel Detector) и двух торцевых частей (Endcap Detector). Центральная часть состоит из 250 камер, собранных в 4 группы (“станции”), находящихся внутри возвратного ярма магнита детектора. Каждая станция содержит сборку из одной DT-камеры (камеры, использующие технологию дрейфовых трубок) и одной или двух RPC-камер. DT-камеры в трёх внутренних станциях состоят из 12 слоёв дрейфовых трубок, разделённых на 3 группы по 4 слоя, называемых суперслоями. 2 торцевые части состоят из 468 катодно-стриповых камер. Каждая часть состоит из 4-х групп камер, так называемых “станций”, смонтированных на дисках, закрывающих соленоидальный магнит перпендикулярно оси пучка. Каждая катодно-стриповая камера состоит из 6-ти газовых промежутков, ограниченных катодной плоскостью с нарезанными стрипами с одной стороны и анодными проволочками с другой. Внешний радиус достигает 115 см, полная длина - 540 см. Вблизи области взаимодействия в центральной части находятся 3 слоя гибридных пиксельных детекторов на радиусе от 4, 7 и 11 см. Размер пикселей составляет 100×150 мкм². В центральной части кремниевые микростриповые детекторы расположены на радиусе r между 20 и 115 см. Торцевая часть состоит из 2-х пиксельных и 9-ти микростриповых детекторов. Центральная часть делится на внутренний и внешний детекторы. Полная площадь пиксельного детектора составляет ≈ 1 м², площадь стриповых детекторов - 220 м². Внутренний трекер состоит из 66 миллионов пикселей и 9.6 миллионов кремниевых стрипов.

Такой дизайн детектора позволяет реконструировать с большой точностью мюонные треки в широком диапазоне энергий. Но, как и в случае внешнего трекера Neга-V, точность позиционирования отдельных базовых модулей детектора CMS существенно ниже, чем внутренняя точность измерения координаты самим детектором. Это происходит из-за ограниченной точности монтажа, деформации детектора под влиянием гравитации

и смещения частей детектора относительно друг друга после включения магнитного поля.

Для выполнения поставленной программы необходимо как обеспечить точное позиционирование камер и слоёв детектора, так и оценить влияние остаточной невыравненности на реконструкцию различных физических сигналов и для различных периодов накопления данных.

Актуальность темы диссертации

РС-камеры внешнего трекера имеют достаточно сложную геометрию, кроме того множественность треков в событии велика. Поэтому для обеспечения хорошего выравнивания должны быть учтены все внутренние корреляции, должны быть корректно определены и зафиксированы внешние степени свободы. Чтобы удовлетворить этим требованиям были испробованы несколько методов.

Для правильной оценки потенциала детектора CMS по выполнению пунктов программы физических исследований необходимо учесть все возможные источники систематических неопределённостей. Неидеальное позиционирование модулей детектора - один из ключевых моментов, определяющих качество реконструкции, как в области промежуточных энергий, где сосредоточены поиски бозона Хиггса, так и при поиске эффектов за пределами стандартной модели в области больших инвариантных масс.

Цели и задачи исследования

Основной целью данной работы является создание, тестирование и реализация метода внутреннего выравнивания камер OTR РС детектора Нега-В, а также изучение влияния остаточной невыравненности (мисалайнмента) на реконструкцию и качество получаемого физического сигнала. Метод основан на одновременном определении параметров треков и геометрических поправок с использованием предложенной В.Блобелем техники уменьшения размерности матрицы нормальных уравнений и сингулярного разложения. Разработаны программы, реализующие данную идею, метод был изучен на монте-карло-моделях различных уровней реалистичности. Метод был применён для данных, набранных коллаборацией Нега-В в 2002 - 2003 годах. Представлены результаты и их обсуждение.

Для детектора CMS, готовящегося к запуску в 2007, году необходимо

оценить влияние невыравненности детектора на реконструкцию различных физических сигналов. Для этого в программном обеспечении эксперимента CMS необходимо реализовать инструмент для моделирования невыравненного детектора, предусмотреть различные сценарии невыравненности, определить набор параметров, определяющих качество реконструкции и отследить их эволюцию в зависимости от величины невыравненности и характера исследуемого физического процесса.

Научная новизна и значимость работы Разработана и применена методика выравнивания детектора со сложной геометрией ($\approx 10^3$ модулей) в условиях большой загрузки (до 200 треков заряженных частиц на событие). Разработанный алгоритм позволил решить проблему внутреннего выравнивания сложного детектора, в начальной постановке являющуюся сингулярной и включающей $\approx 10^6$ параметров. Предложено, реализовано и использовано обобщение метода минимизации функционала для случая нелинейной модели трека. Особое внимание уделялось контролю глобальных степеней свободы детектора. Применение специального математического аппарата сингулярного разложения матриц позволило провести детальную диагностику сингулярности задачи.

Разработанная методика может быть использован для сложных современных детекторов, обладающих сложной геометрией и предназначенных для работы при больших загрузках, например в готовящихся экспериментах на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН, Женева). В эксперименте CMS Millepede-алгоритм для выравнивания модулей детектора применяется как для мюонной системы, так и для трекера.

Подробная программа физических исследований, разрабатываемая в последнее время для эксперимента CMS, включает описание перспектив измерения детектором различных взаимодействий в широком диапазоне энергий, а также источники теоретических и экспериментальных неопределённостей. В частности, невыравненность трековой системы - основной источник систематических ошибок при поиске эффектов новой физики в димюонном канале в области высоких масс. Для правильной оценки потенциала детектора для данных каналов (распады Z^0 , Z' , димюонные пары Дрелла-Яна, ADD- и RS-гравитоны) необходимо подробно смоделиро-

вать возможную невыравненность и изучить её влияние на реконструкцию этих распадов. В рамках подготовки данной работы разработано и протестировано программное обеспечение для моделирования выравнивания мюонной системы и внутреннего трекера в эксперименте CMS, реализованы типовые сценарии невыравненности для всех модулей этих подсистем CMS. С помощью моделирования изучено влияние выравнивания на качество реконструкции детектором CMS одиночных мюонов различных энергий (поперечный импульс 10-1000 ГэВ) и димюонных распадов в широкой области инвариантных масс (J/ψ , Z^0 , Z' , димюонные пары Дрелла-Яна). Протестировано изменение эффективности реконструкции, точность определения поперечного импульса и инвариантной массы, а также вероятность ошибки в определении знака заряда. Показана необходимость учёта ошибки выравнивания при построении и фитировании трека.

Апробация работы и публикации

Результаты, изложенные в диссертации обсуждались:

- на международной конференции «ICHEP-06» (Москва, 2006),
- на международной конференции «Symmetries and Spin» (Прага, 2003),
- на V-м Международном конгрессе по математическому моделированию (Дубна, 2002),
- на международных конференциях сообщества RDMS (Дубна, 2003; Минск, 2004; Гатчина, 2005),
- на семинарах и заседаниях научно-технического совета Лаборатории физики частиц ОИЯИ в Дубне,
- на встречах сотрудничества Нега-В в Дубне, Гамбурге и Цойтоне,
- на совещаниях коллаборации CMS в ОИЯИ (Дубна), CERN(Женева), ИТЭФ (Москва) и МГУ(Москва)

Результаты исследований также опубликованы в статьях [1]-[11] и вошли в описание детектора CMS [12] и описание физической программы CMS[13].

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из 6-ти глав, содержит 95 страниц, 61 иллюстрацию и список литературы из 109 пунктов. Первая глава содержит краткое описание работы. Вторая глава описывает эксперимент Нера-В, его физическую программу, ускорительный комплекс HERA и характеристики различных подсистем детектора. Третья глава даёт введение в проблему выравнивания детекторов, математическую формулировку проблемы, сравнительный обзор существующего математического аппарата выравнивания. Четвёртая глава представляет результаты изучения выравнивания с помощью полной монте-карло-модели детектора. Пятая глава содержит описание результатов, полученных при применении метода выравнивания к реальным данным, полученным коллаборацией Нера-В в 2002 и 2003 годах. В шестой главе представлены результаты исследования влияния невыравненности различных подсистем детектора CMS на реконструкцию различных физических сигналов в широком диапазоне энергий. В заключении формулируются основные выводы диссертации.

Содержание работы

Первая глава содержит введение в диссертацию, здесь обосновывается актуальность и значимость исследуемых проблем. Сформулированы цели работы и кратко изложена структура и материал диссертации.

Во **второй главе** даётся краткое описание проекта Нера-В - эксперимента с фиксированной мишенью на протонном пучке с энергией 920 ГэВ.

В первом разделе обсуждается физическая программа эксперимента, даётся описание CP-нарушения в рамках Стандартной модели, показывается возможность измерения в распадах B -мезонов параметра теории, связанного с CP-нарушением, - $\sin 2\beta$. Показывается, что распад $B/\bar{B} \rightarrow J/\psi K_S^0$ (так называемая золотая мода распада B -мезона) с теоретической точки зрения представляет собой удобный способ доступа к углу β унитарного треугольника стандартной модели. Эта мода распада имеет хорошо идентифицируемое в эксперименте конечное состояние - два лептона и два пиона.

Первый раздел второй главы также содержит краткое описание рас-

ширенной физической программы коллаборации Нера-В - измерение сечения рождения $b\bar{b}$, ядерные эффекты в рождении чармония, изучение рождения очарованных барионов и поиск экзотических барионных состояний.

Второй раздел даёт краткое описание ускорительного комплекса Нера в Гамбурге и описание 3-х других экспериментов, проводящихся на этом ускорителе.

Разделы с третьего по двенадцатый содержат описание детектора Нера-В и различных его подсистем: проволочная мишень входящая в гало пучка, вершинный детектор, построенный на основе одно- и двухсторонних кремниевых полупроводниковых микростриповых детекторов, отклоняющий магнит, внешний трекер, построенный по технологии гексагональных дрейфовых камер, внутренний трекер, использующий технологию микростриповых газовых счётчиков и газового электронного усиления, детектор переходного излучения, детектор черенковского излучения, электромагнитный калориметр, мюонная система.

Тринадцатый раздел описывает многоуровневую триггерную систему эксперимента, позволяющую существенно уменьшить поток событий, отсекая события, не представляющие интерес: с примерно 10 млн соб./с на входе в детектор до 25-50 соб./с, записываемых на долговременный носитель информации.

Следующий, четырнадцатый раздел содержит описание алгоритмов реконструкции событий: преобразование первичной сырой детекторной информации в различных подсистемах (подготовка хитов), распознавание различных примитивов на уровне подсистем (сегменты треков в трековых детекторах, кластеры в калориметре, кольца в черенковском детекторе), глобальная реконструкция треков во всём детекторе, построение и фитирование вершин, идентификация частиц и распадов.

Последний раздел второй главы содержит описание программ моделирования, используемых коллаборацией Нера-В: моделирование физических взаимодействий, моделирование прохождения частиц и излучения через вещество детектора и моделирование отклика детектора.

В **третьей главе** даётся введение в проблему геометрического выравнивания элементов детектора, математическая постановка задачи, об-

зор методов решения и алгоритмов.

В первом разделе формулируется идея на основании которой предполагается проводить выравнивание детектора с использованием измеренных данных - минимизации функционала, суммирующего квадраты невязок, определяемых обоими типами параметров (a_i -параметры треков и α_i -параметры выравнивания):

$$\chi^2 = \sum_{\text{events}} \sum_{\text{tracks}} \sum_{\text{hits}} \Delta_i^2 / \sigma_i^2, \quad (0.1)$$

где Δ_i - невязка для каждого хита - разность между измеренной координатой и отфитированным положением трека:

$$\Delta_i = x_{\text{fit}} - x_{\text{meas}} \quad (0.2)$$

и σ_{d_i} есть точность измерения координаты в данном детекторе. Отфитированное положение трека зависит от параметров трека и параметров выравнивания:

$$x_{\text{meas}} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot d_i + \sum_{j=1}^{\nu} \alpha_j \cdot \delta_j. \quad (0.3)$$

Также обсуждаются проблемы, возникающие при решении задачи минимизации, - большая размерность пространства параметров и неоднозначность решения задачи в её изначальной формулировке.

Во втором разделе содержится обзор методов, используемых для решения задачи минимизации функционала геометрического выравнивания. Метод итеративного фитирования осуществляет минимизацию функционала за несколько итераций, попеременно подразумевая известными параметры треков или параметры выравнивания, это позволяет достичь определённой точности внутреннего выравнивания, но не позволяет контролировать глобальные степени свободы. Метод, использующий внешние треки, позволяет выровнять субдетектор как целое относительно других подсистем установки, но точность позиционирования отдельных модулей невысока. Основным методом, выбранным для решения проблемы выравнивания, заключается в использовании особой структуры матрицы нормальных уравнений. Это позволяет найти решение используя всю информацию о геометрии детектора и все возможные корреляции между параметрами, содержащиеся в измерениях.

Детальное описание алгоритма выравнивания **Millepede** содержится в третьем разделе. Показано как используя разреженную структуру матрицы нормальных уравнений уменьшить размерность обрабатываемой матрицы на несколько порядков.

В четвёртом разделе делается анализ внешних степеней свободы - параметров, не фиксируемых начальным функционалом. Наличие внешних, незафиксированных степеней свободы приводит к возникновению неоднозначности в построении решения задачи минимизации. Показано как наложение дополнительных условий на параметры функционала позволяет выбрать единственное решение задачи минимизации.

В пятом разделе даётся краткое введение в разложение по сингулярным числам матриц - математический аппарат, позволяющий исследовать сингулярные матрицы (т. е. обладающие рангом, меньшим чем размерность матрицы). Показано как с помощью аппарата разложения матрицы по сингулярным значениям определить число и характер внешних степеней свободы.

В шестом разделе моделируется процедура выравнивания для детектора с простой геометрией, для данной простой ситуации применяется метод разложения по сингулярным значениям, производится анализ внешних степеней свободы и формулируются дополнительные условия для их фиксации. Для модельных данных выполняется процедура выравнивания с учётом наложения дополнительных условий.

Седьмой раздел содержит обобщение формализма выравнивания на случай нелинейной модели трека. Если рассматривать одновременно сдвиги, перпендикулярные оси детектора Δu , повороты вокруг этой оси $\Delta \alpha$ и смещения плоскостей вдоль оси детектора Δz :

$$\begin{aligned}
 u &= x_0 \cos(\alpha + \Delta\alpha) + t_x(z + \Delta z) \cos(\alpha + \Delta\alpha) + \\
 &+ y_0 \sin(\alpha + \Delta\alpha) + t_y(z + \Delta z) \sin(\alpha + \Delta\alpha) + \\
 &+ \Delta u \\
 &= x_0(\cos \alpha - \sin \alpha \Delta\alpha) + t_x(z + \Delta z)(\cos \alpha - \sin \alpha \Delta\alpha) + \\
 &+ y_0(\sin \alpha + \cos \alpha \Delta\alpha) + t_y(z + \Delta z)(\sin \alpha + \cos \alpha \Delta\alpha) + \\
 &+ \Delta u
 \end{aligned}$$

(0.4)

Проблема становится нелинейной - модель трека включает слагаемые, в которых одни параметры выравнивания умножаются на другие и на параметры треков. Показано, что разложением в ряд Тейлора по малым параметрам геометрических поправок можно привести модель трека к виду

$$\begin{aligned}
 u = & x_0^j \cos \alpha_i + t_x^j z \cos \alpha_i + y_0^j \sin \alpha_i + t_y^j z \sin \alpha_i + \\
 & + \Delta u_i + \\
 & + (-\widehat{x}_0 \sin \alpha - \widehat{t}_x z \sin \alpha + \widehat{y}_0 \cos \alpha + \widehat{t}_y z \cos \alpha) \Delta \alpha + \\
 & + (\widehat{t}_x \cos \alpha + \widehat{t}_y \sin \alpha) \Delta z,
 \end{aligned}
 \tag{0.5}$$

что позволяет решить задачу наименьших квадратов для данной модели трека итеративным методом, имея на каждой итерации линейную модель трека.

Третья глава посвящена изучению метода выравнивания с помощью полной монте-карло-модели внешнего трекера Нега-В.

Первый раздел содержит описание монте-карло-модели детектора, используемые программные инструменты, общую организацию процедуры моделирования.

Во втором разделе описывается способ моделирования геометрии детектора, отличной от номинальной, в общей процедуре моделирования эксперимента.

С использованием полной модели эксперимента Нега-В было смоделировано определённое количество событий и отобрано несколько сотен тысяч треков при различных сценариях начальной невыравненности детектора.

Для каждого из начальных сценариев построена матрица нормальных уравнений. Третий раздел содержит результаты применения сингулярного разложения для этих матриц и анализ соответствующих спектров (рис. 1).

Показана эволюция спектра сингулярных чисел в зависимости от наложения дополнительных условий, позволяющих выбрать единственное решение. На основе вида матрицы нормальных уравнений и анализа спектра

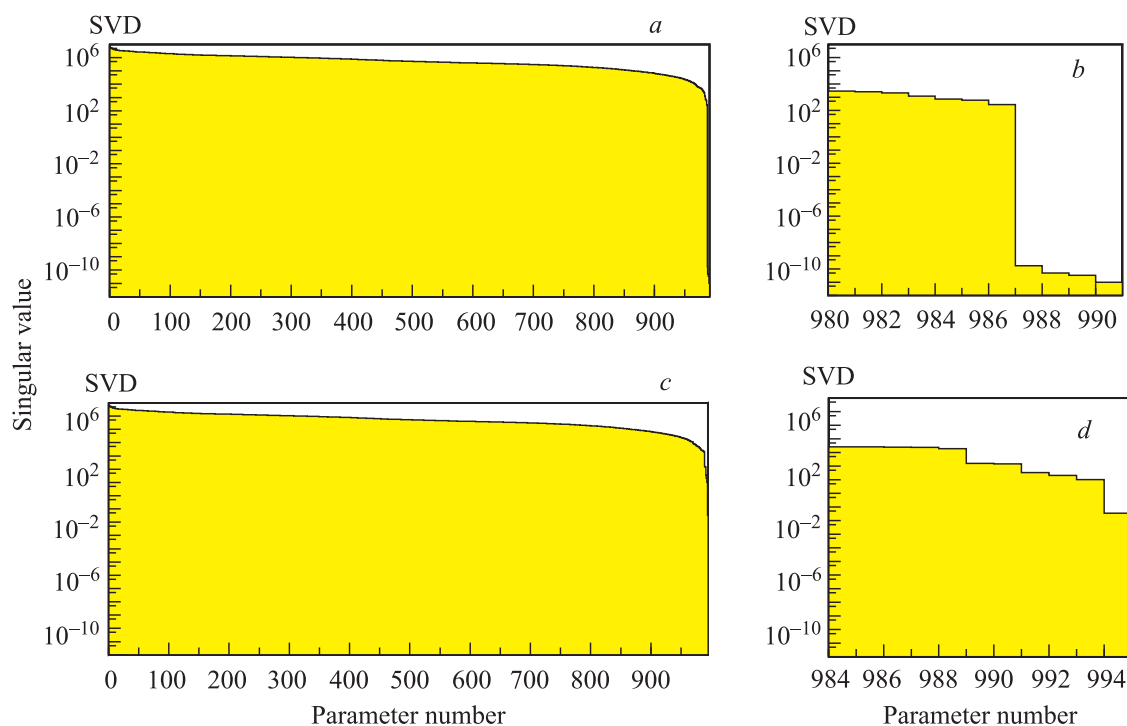


Рис. 1. Спектр сингулярных значений матрицы C' а) начальной, построенной только на основе функционала (0.1), недоопределённой, б) доопределённой с помощью лагранжевых множителей. Слева - полный спектр, справа - увеличенная правая часть полного спектра

сингулярных значений делается вывод о числе и характере внешних степеней свободы, а также об оптимальном выборе дополнительных условий.

Четвёртый раздел содержит модельное тестирование различных способов фиксации внешних степеней свободы.

Пятый раздел посвящён изучению зависимости качества выравнивания от числа использованных треков. Использовались наборы данных, содержащие различное количество треков, реконструированных в детекторе с геометрией, в разной степени отклоняющейся от номинальной. Анализ абсолютной остаточной невыравненности показывает, что зависимость от числа треков следует ожидаемому закону $1/\sqrt{N_{\text{tracks}}}$ (рис. 2).

Далее проверяется, насколько оценки ошибок определения параметров, даваемые методом наименьших квадратов, совпадают с настоящими невязками между внесённой невыравненностью и её восстановленным значением. Показано, что ширина распределения нормализованной невязки для различной начальной невыравненности и для различного числа ис-

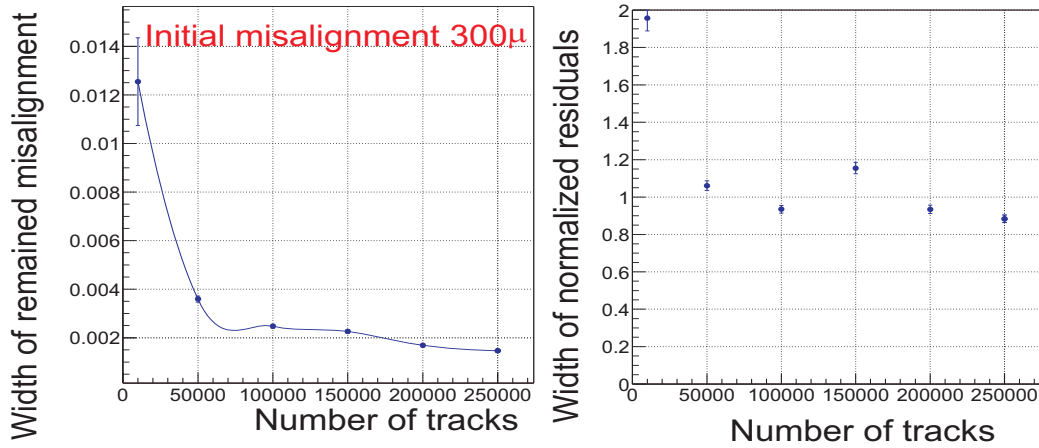


Рис. 2. Абсолютная остаточная невыравненность (слева) и нормированные невязки (справа), начальная невыравненность 500μ , использовано 250000 треков

пользованных треков близка к единице, что означает, что задача всё ещё близка к линейной, алгоритм реализован корректно и метод позволяет решать проблему такого большого числа параметров ($\approx 10^6$).

Четвёртая глава посвящена выравниванию детектора с использованием реальных данных, накопленных коллаборацией Hera-B в 2002-2003 годах.

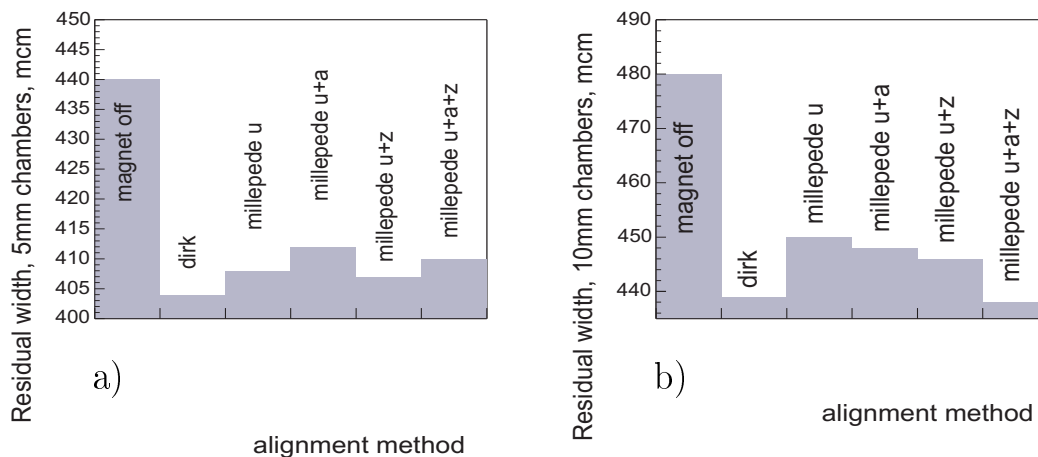


Рис. 3. Ширина распределения невязок измерений: а) в центральной; б) в периферической части внешнего трекера

Первый раздел содержит описание использованных наборов данных,

процедуры отбора треков и требования, налагаемые на события.

Второй раздел содержит результаты применения исследуемого метода геометрического выравнивания для реальных данных, а также сравнение с результатами, даваемыми альтернативными методами. Для оценки качества работы процедуры выравнивания и сравнения используется ширина распределения невязок измерений относительно офитированного трека для центральной и периферической областей внешнего трекера (рис.3), среднее число треков, реконструированных в событии, а также среднее число измерений в реконструированных треках (рис.4). Обсуждаются особенности и преимущества исследуемого метода выравнивания относительно альтернативных.

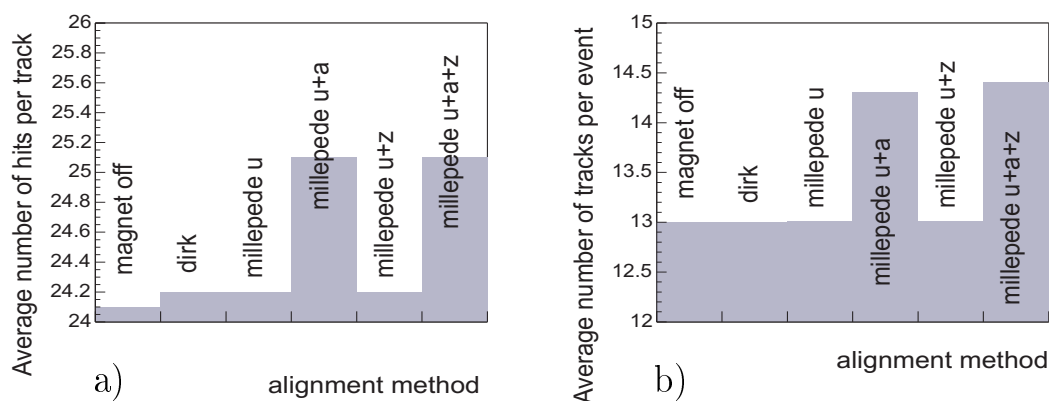


Рис. 4. Среднее число а) измерений на трек б) треков на событие

В периферической части внешнего трекера модули имеют большую длину, поэтому возможная поворотная невыравненность (вращение вокруг оси Z) оказывает большее влияние на невязки измерений, следовательно её проще оценить. Также наклон треков t_x во внешней части больше, поэтому возможно также детектировать невыравненность вдоль оси Z . Ширина распределения невязок измерений после millepede-выравнивания показывает преимущества учета поворотов и Δz -смещений.

Следующая часть работы посвящена изучению влияния невыравненности на качество реконструкции треков и физических распадов. Третий раздел содержит описание моделирования дополнительной невыравненно-

сти детектора с использованием реальных данных. При использовании данной техники исследовалось влияние невыравненности различной величины на различные аспекты реконструкции как одиночных треков, так и распадов.

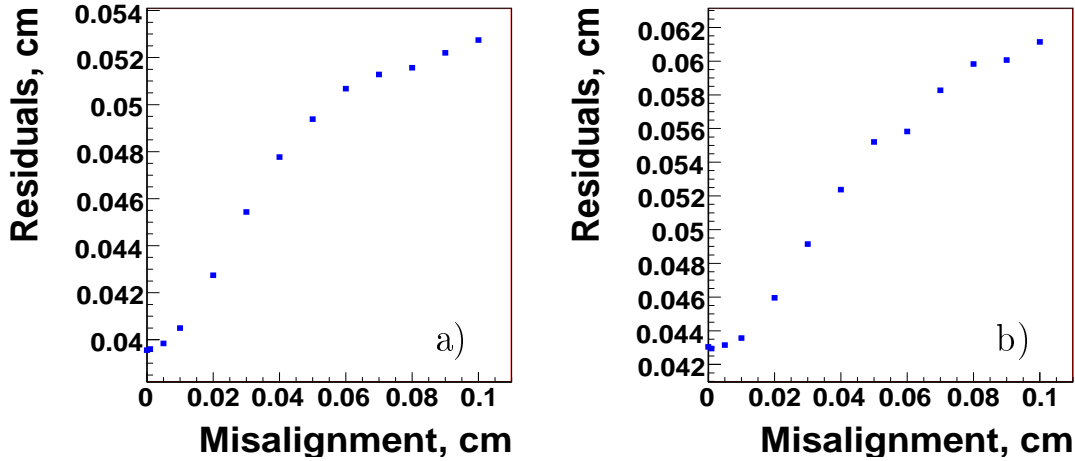


Рис. 5. Ширина распределений невязки для а) 5-мм ячеек; б) 10-мм ячеек.

В четвёртом разделе показано влияние дополнительной невыравненности на качество реконструкции отдельных треков во внешнем трекаре. Здесь, как и в предыдущей части работы используется ширина распределения невязок измерений относительно отфитированного трека для центральной и периферической областей внешнего трекара, среднее число треков, реконструированных в событии, а также среднее число измерений в реконструированных треках. Рис.5 показывает влияние выравнивания на качество реконструированных треков, используя 10000 событий из наборов данных, измеренных коллаборацией Нега-В в период запусков 2002-2003 годов.

В пятом и шестом разделах исследуется влияние дополнительной невыравненности на реконструкцию физических сигналов - распадов $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ и K_s^0 .

Для данных распадов анализируется ширина пика, число событий под пиком и положение пика (рис.6). Зависимости показывают, что пока невыравненность меньше нескольких сотен микрон, она слабо влияет на реконструкцию J/ψ . Распады K_s^0 более чувствительны к невыравненности

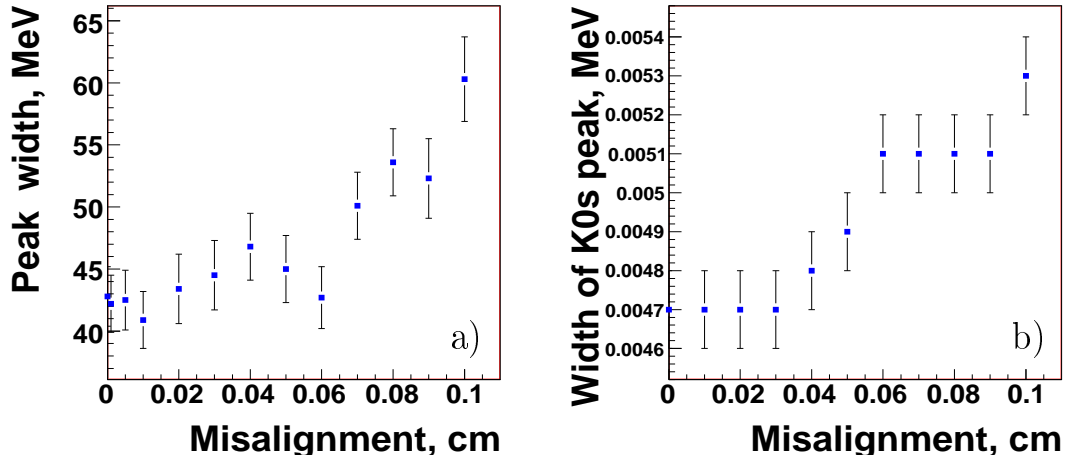


Рис. 6. Ширина пика а) $J/\psi \rightarrow \mu\mu$; б) K_s^0 -распадов в зависимости от симулированной невыравниваемости

внешнего трекера чем J/ψ , это может быть связано с тем, что в определении импульсов продуктов распада K_s^0 внешний трекер играет большую роль чем для J/ψ .

Пятая глава содержит описание работ по исследованию влияния невыравниваемости в эксперименте CMS. Первый раздел содержит краткое описание детектора CMS, с подробным описанием трековых поддетекторов (в первом параграфе описана мюонная система, во втором - трекер).

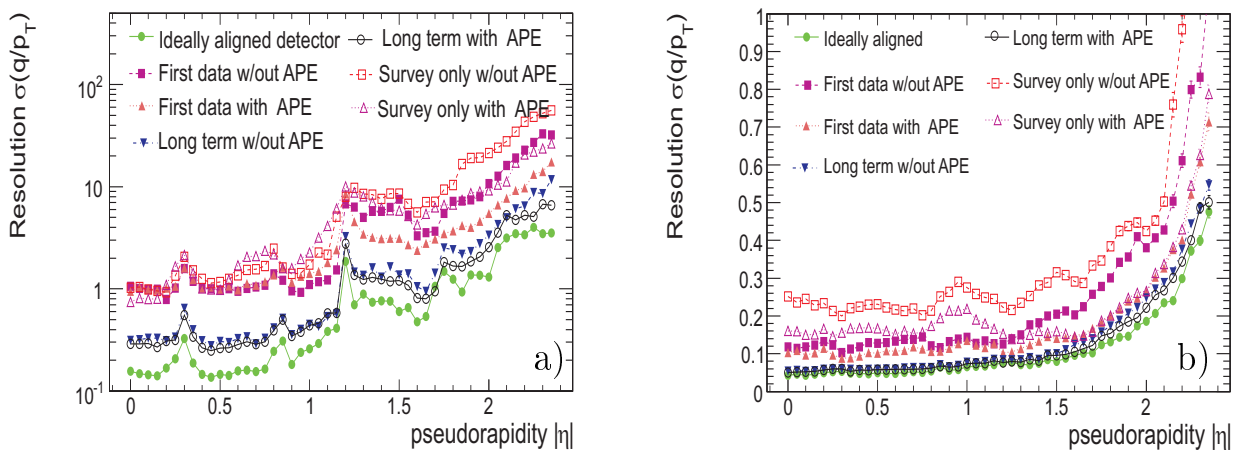


Рис. 7. Импульсное разрешение алгоритмов а) GMR и б) SA как функция η для различных сценариев выравнивания мюонной системы. Показаны результаты с мюонами поперечного импульса 1000 GeV

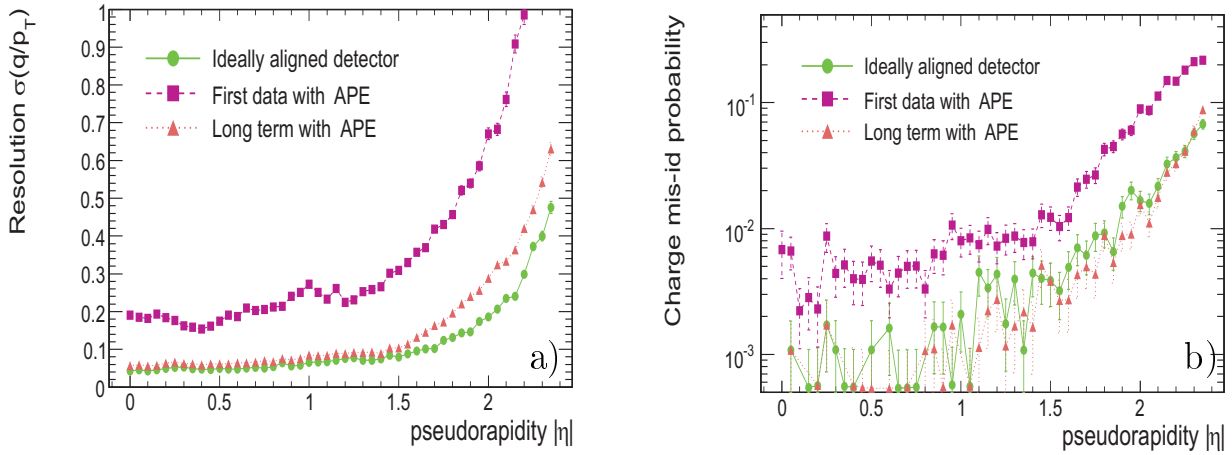


Рис. 8. Импульсное разрешение а) и вероятность ошибки определения знака заряда б) с помощью алгоритма GMR как функция η для различных сценариев невыравнивания. Мюоны с поперечным импульсом 1000 GeV

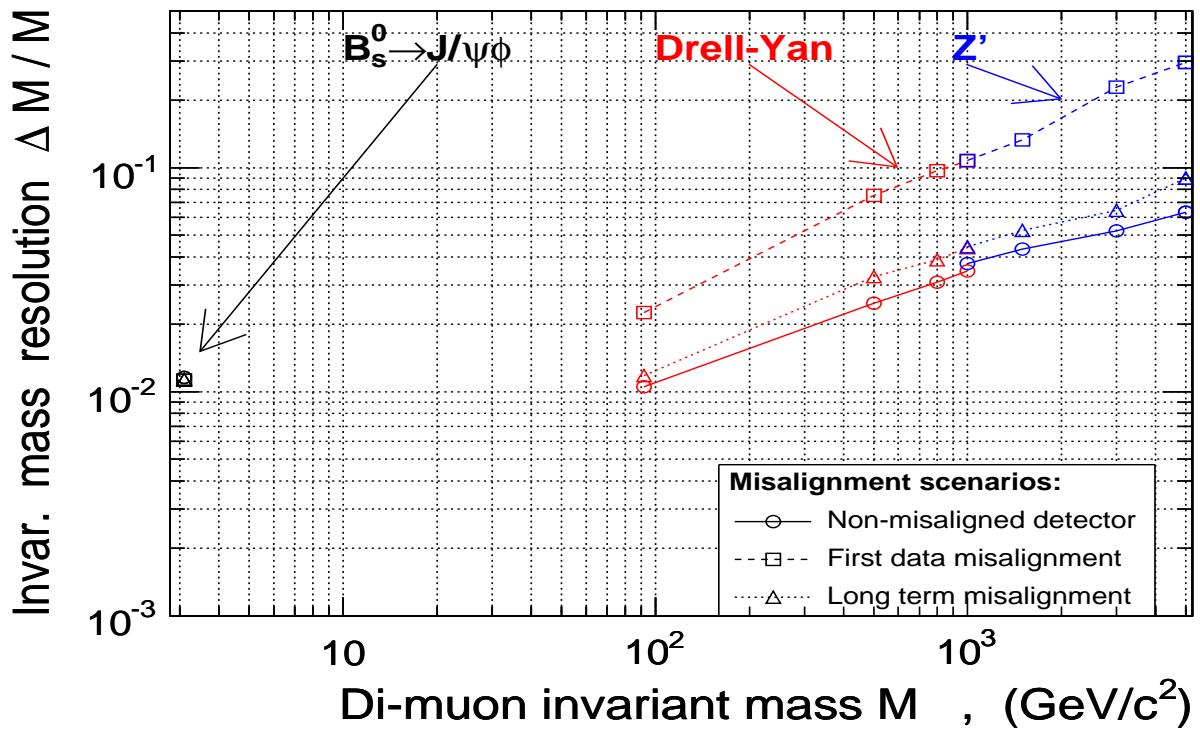


Рис. 9. Разрешение по инвариантной массе для низких, промежуточных и высоких масс при различных сценариях невыравнивания мюонной системы и трекера

Во втором разделе содержится изложение основных пунктов физической программы эксперимента CMS.

Третий раздел описывает программное обеспечение, разработанное для моделирования невыравненности различных подсистем трекера и мюонной системы CMS.

Результаты исследования влияния невыравненности мюонной системы на реконструкцию одиночных мюонов (рис.7) представлены в первом параграфе четвёртого раздела.

Следующий, пятый раздел описывает влияние комбинированной невыравненности обоих трековых детекторов - трекера и мюонной системы. Ухудшение точности реконструкции поперечного импульса - порядка 20 % для энергий 100ГэВ и 30 % (центральная часть) - 40 % (торцевая часть) для мюонов с поперечным импульсом 1 ТэВ. Определение знака заряда при реконструкции алгоритмом GMR также ухудшается при внесении невыравненности (рис.8).

Заключительный параграф четвертого раздела представляет результаты моделирования невыравненности при реконструкции димюонов различных энергий. Показано, что для димюонов наблюдается поведение, сходное с результатами тестов на одиночных мюонах - незначительная потеря эффективности, небольшое ухудшение разрешения для малых масс, значительное ухудшение разрешения для сценария выравнивания первых дней для больших масс (рис.9). Для долгосрочного сценария ухудшения не столь драматичны, но всё ещё значительны.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Разработана методика выравнивания детектора, основанная на одновременном определении параметров треков и параметров поправок выравнивания. Это позволяет учесть все возможные корреляции между всеми параметрами. При этом число параметров треков может достигать $\approx 10^4$, а число используемых для процедуры выравнивания треков может достигать $\approx 10^5$. Показано, что предложенный математический аппарат применим для проблемы выравнивания детектора, где общее число параметров, от которых зависит минимизируемый функционал, составляет $\approx 10^6$.
2. Для детального анализа глобальных степеней свободы, не фиксируемых минимизацией функционала, применена техника сингулярного разложения матрицы нормальных уравнений метода наименьших квадратов. Число нулевых сингулярных значений позволяет определить число внешних степеней свободы, нуждающихся в дополнительной фиксации. Показано, что вид сингулярных векторов, соответствующих нулевым сингулярным числам, даёт представление о характере глобальных степеней свободы.
3. Разработано программное обеспечение, воплощающее предложенный математический аппарат. Сначала метод был протестирован и отлажен на модели детектора с простой геометрией.
4. Все составляющие данного метода были применены для полной GEANT-модели детектора Neга-B OTR PC, включающей детальное описание геометрии, реалистичный отклик различных подсистем, неэффективности отдельных каналов и целых модулей, большую загрузку детектора. Задача минимизации функционала в начальной формулировке зависящего от $\approx 10^6$ параметров была сведена к задаче только относительно параметров выравнивания $\approx 10^3$, тем не менее учитывались возможные корреляции между параметрами. Протестировано несколько способов фиксации внешних степеней свободы. С

помощью полной монте-карло-модели детектора показано, что метод обеспечивает точность внутреннего выравнивания модулей детектора не хуже внутренней координатной точности детектора, сохраняя при этом глобальные степени свободы зафиксированными.

5. При учете всех параметров выравнивания, которые необходимо оценивать для каждого модуля детектора, модель трека становится нелинейной. Предложен способ линеаризации модели трека и обобщения метода для нелинейного случая.
6. Разработанный подход применён для данных, полученных коллаборацией Нега-В. Тесты показали, что метод, с одной стороны, позволяет достичь высокой точности относительного позиционирования отдельных модулей, с другой стороны, позволяет эффективно контролировать глобальное положение всего детектора.
7. Изучено влияние невыравненности внешнего трекера на качество реконструированных треков и распадов J/ψ и K_s^0 , определены параметры, наиболее чувствительные к невыравненности при различных её значениях.
8. Разработано и протестировано программное обеспечение для моделирования невыравненности мюонной системы и внутреннего трекера в эксперименте CMS. Реализованы типовые сценарии невыравненности для всех модулей этих подсистем CMS.
9. С помощью моделирования изучено влияние выравнивания на качество реконструкции детектором CMS одиночных мюонов различных энергий (10-1000 ГэВ) и димюонных распадов в широкой области инвариантных масс (J/ψ , Z^0 , Z' , димюонные пары Дрелла-Яна). Протестировано изменение эффективности реконструкции, точность определения поперечного импульса и инвариантной массы, а также вероятность ошибки в определении знака заряда. Показана необходимость учёта ошибки выравнивания при построении и фитировании трека.

Основные результаты диссертации опубликованы следующих работах.

- [1] I.I.Belotelov , G.A.Ososkov, «How to constrain external degrees of freedom during internal detector alignment», Czech. J. Phys. 53 (2003) B441.
- [2] I. Belotelov, A.Lanyov, G.Ososkov, «Alignment of Hera-B Outer Tracker with simultaneous fit of track and alignment parameters», Hera-B public note 05-009
- [3] I.Belotelov, A.Lanyov, G.Ososkov, «A Study of Millepede alignment algorithm with Monte Carlo model of Hera-B outer tracker», Part.Nucl. Lett, 2006, V.3. №4(133), P.81-98.
- [4] I.Belotelov, A.Lanyov, G.Ososkov, «Data driven alignment of Hera-B outer tracker», Part.Nucl. Lett, 2006, V.3. №5(135), P.106-111
- [5] I.Belotelov et al, «Influence of Misalignment Scenarios on Muon reconstruction», CMS Note 2006/017
- [6] I.Belotelov et al, «Simulation of Misalignment Scenarios for CMS Tracking Devices», CMS Note 2006/008
- [7] HERA-B Collaboration (I. Abt et al.), «Limits for the central production of Θ^+ and Xi^{--} pentaquarks in 920 GeV pA collisions», Phys. Rev. Lett. 93, 212003 (2004)
- [8] HERA-B Collaboration (I. Abt et al.), «Inclusive V^0 Production Cross Section from 920 GeV Fixed Target Proton-Nucleous Collisions» , Dec. 2002 Eur.Phys.J.C29:181-190,2003 hep-ex/0212040
- [9] HERA-B Collaboration (A. Zoccoli et al.), «Charm, beauty and charmonium production at HERA-B», 2005. 8pp. Published in Eur.Phys.J.C43:179-186,2005
- [10] HERA-B Collaboration (I. Abt et al.), «Measurement of the J/Psi Production Cross Section in 920 GeV/c Fixed-Target Proton-Nucleus

Interactions», DESY-05-232, Dec 2005 Submitted to Phys.Lett.B hep-ex/0512029

- [11] HERA-B Collaboration (I. Abt et al.), «Improved Measurement of the b - \bar{b} Production Cross Section in 920 GeV Fixed-Target Proton-Nucleus Collisions», DESY-05-233, Dec 2005 Submitted to Phys.Rev.D hep-ex/0512030
- [12] CMS Collaboration, «CMS Physics Technical Design Report, Volume I: Software and Detector Performance», CERN/LHCC 2006-001
- [13] CMS Collaboration, «CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance», CERN/LHCC 2006-021

Отпечатано в копицентре "СТ ПРИНТ"

Москва, Ленинские горы, МГУ, 1 Гуманитарный корпус.

www.stprint.ru email: zakaz@stprint.ru тел.: 939-33-38

Тираж 100 экз. Подписано в печать 08.09.2006 г.