

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Ключина Вячеслава Ивановича

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему  
«Карта магнитного поля установки CMS и прецизионное измерение импульсов  
мюонов из распадов бозона Хиггса на четыре лептона»  
по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика  
высоких энергий»

Диссертация В. И. Ключина представляет собой результат 15-летних исследований по разработке методики прецизионного измерения импульсов мюонов, регистрируемых в эксперименте CMS в мюонных трековых детекторах, расположенных между намагниченными блоками магнитопровода, для чего автором была создана карта магнитного поля, позволяющая определять непрерывные значения магнитной индукции вдоль траекторий частиц, к том числе и внутри стальных блоков магнитопровода, где прямые измерения магнитного поля невозможны. Итогом применения моделирования магнитного потока установки CMS стало создание карты магнитного поля во всём объёме установки и прецизионное измерение импульсов заряженных лептонов, что позволило с высокой точностью реконструировать инвариантную массу бозона Хиггса через регистрацию 4-лептонных распадов ( $4e$ ,  $4\mu$ ,  $2e2\mu$ ). Оценки импульсного разрешения заряженных лептонов определяются точностью описания распределения магнитного поля в трековом и мюонном детекторах установки CMS и вносит определяющий вклад в систематическую ошибку реконструированной инвариантной массы бозона Хиггса.

Диссертация включает результаты исследований, выполненных автором на основе данных, набранных экспериментом CMS во время первого сеанса работы Большого адронного коллайдера в 2010 – 2012 гг. при энергии столкновений протонных пучков в системе центра масс 7 и 8 ТэВ. Основные работы диссертации опубликованы в 1990 – 2024 гг.

## Актуальность темы и степень ее разработанности

Задача прецизионного измерения импульсов частиц наиболее актуальна в современных экспериментах, ставящих своей целью поиск проявления новой физики за пределами Стандартной модели, точные измерения параметров Стандартной модели для ее подтверждения или поиска возможных отклонений от теоретических расчетов. Точность восстановления импульсов заряженных частиц конечного состояния определяется не только точностью восстановления координат пересечения частиц элементов трековых детекторов, но и от точности знания карты магнитного поля, которое проходят треки заряженных частиц. Важной и актуальной физической задачей, выполненной на Большом адронном коллайдере в pp-столкновениях, явилось открытие бозона Хиггса с массой  $125 \text{ ГэВ}/c^2$ . Одним из каналов распада бозона Хиггса явился распад на два Z-бозона (реальный и виртуальный) с последующими их распадами на два противоположно заряженных лептона (электрона и позитрона или мюона) каждый. При реконструкции инвариантной массы бозона Хиггса используются четыре импульсы лептонов, для чего необходимо не только измерить их трёхмерные импульсы но и надёжно идентифицировать данные частицы. Для измерения импульсов лептонов используются прецизионные детекторы, размещённые в магнитном поле, которое придаёт траекториям частиц кривизну, зависящую от плотности магнитного потока (магнитной индукции) вдоль траектории частицы и от импульса частицы. Импульсы лептонов измеряются по радиусу кривизны треков в соленоидальном магнитном поле с магнитной индукцией 3,8 Тл. При этом для искривления траекторий мюонов за пределами трекового детектора используются стальные блоки ярма магнита CMS (магнитопровода), намагниченные возвратным магнитным потоком соленоида, в которых прямые непрерывные измерения магнитной индукции практически невозможны. Для получения точного распределения магнитной индукции во всем объёме установки применялись как измерения магнитного поля в трековом детекторе с помощью трехмерных датчиков Холла, так и численное моделирование магнитного потока в магнитопроводе методом конечных элементов, где установка датчиков Холла невозможна.

Задачи создания непрерывной карты магнитного поля являются актуальными для многих экспериментов в физике высоких энергий, особенно в экспериментах с компактным расположением детекторов и магнитопровода, где прямые измерения поля недоступны.

## **Обоснованность положений и достоверность результатов, выносимых на защиту**

В диссертации защищаются 7 положений:

1. Распределение плотности магнитного потока внутри сверхпроводящего соленоида эксперимента CMS описано с точностью 0,1%, а в стальном магнитопроводе мюонного спектрометра — с точностью 3%;
2. Расчеты, выполненные с помощью трехмерной модели магнита установки CMS, согласованы непосредственными измерениями магнитного поля датчиками ядерного магнитного резонанса, датчиками Холла и потоковыми катушками;
3. Измерения плотности магнитного потока трехмерными датчиками Холла обеспечили относительную точность определения магнитного поля в трековой системе эксперимента CMS на уровне 0,07%;
4. Измерения плотности магнитного потока в стальном ярме магнита CMS с помощью специализированных потоковых катушек и трехмерных датчиков Холла подтвердили на уровне 3% корректность распределения магнитного потока в мюонном спектрометре, полученного с помощью трехмерной модели магнита CMS.
5. Созданная трехмерная карта магнитного поля установки CMS позволяет достигнуть относительного разрешения по поперечному импульсу мюонов в интервале 20 – 100 ГэВ/с на уровне 1,3% – 2% в центральной области и не хуже 6% в торцевой области мюонного спектрометра CMS, что определяет массовое разрешение в канале распада Хиггса на четыре заряженных мюона на уровне 1–2%.
6. Вклад неоднородности магнитного поля в трековой системе CMS в ухудшение разрешения поперечного импульса заряженной частицы не превышает 1,31% при значениях псевдобыстроты, меньших 2,4;

7. Систематическая ошибка реконструкции массы бозона Хиггса в канале его распада на четыре заряженных лептона ( $4e, 4\mu, 2e2\mu$ ) более чем вдвое ниже систематической ошибки, полученной в комбинации каналов распада бозона Хиггса на два гамма-кванта и на четыре лептона, что свидетельствует о лучшей точности метода регистрации бозона Хиггса по его распаду на четыре заряженных лептона.

Соискатель разработал методику измерения распределения плотности магнитного потока внутри сверхпроводящего соленоида эксперимента CMS, полученное с помощью трехмерных датчиков Холла, установленных автоматизированной пневматической измерительной машине, перемещающейся вдоль оси сверхпроводящего соленоида. Методика и результаты измерений представлены во второй и третьей главах диссертации.

Автором была создана трехмерная модель соленоидального магнита эксперимента CMS, описанная в главе 1, с помощью которой было получено распределение магнитного потока за пределами сверхпроводящего соленоида, в том числе, внутри стальных блоков магнитопровода, используемых в мюонном спектрометре. Результаты вычисленного распределения магнитного поля подтверждены дискретными измерениями, выполненными с помощью потоковых катушек и трехмерных датчиков Холла.

Процедура создания карты магнитного поля установки CMS описана в четвертой главе диссертации. Здесь следует отметить новаторский подход к описанию сложной конфигурации магнитного поля в гетерогенной магнитной системе с помощью примитивных объёмов, позволяющих осуществлять быстрый поиск узлов пространственной сетки, содержащих значения магнитной индукции вокруг координат точек траектории заряженной частицы, и получать в данных точках требуемые значения плотности магнитного потока с помощью интерполяции по восьми ближайшим узлам сетки.

Изучению вклада неоднородности магнитного поля в разрешение по поперечному заряду частиц посвящена пятая глава диссертации. В этой же главе подробно описана процедура отбора событий рождения бозона Хиггса с помощью дилептонных триггеров и приведена систематическая ошибка в изме-

рении инвариантной массы бозона Хиггса, реконструированной по его распаду на четыре заряженных лептона ( $4e, 4\mu, 2e2\mu$ ). Малость систематической ошибки реконструированной инвариантной массы бозона Хиггса свидетельствует о прецизионном измерении импульсов заряженных лептонов.

Основные результаты, на которых основана диссертация, опубликованы в 25 работах в научных рецензируемых изданиях и представлены на 24 международных научных мероприятиях.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что положения, выносимые соискателем на защиту, достоверны, достаточно обоснованы, обладают внутренней согласованностью и значительно улучшают систематические погрешности физических измерений — массы бозона Хиггса.

### **Новизна работы**

Магнитное поле большого соленоидального гетерогенного магнита с плотностью магнитного потока 3,8 Тл впервые описано в трехмерной модели во всём объёме магнитной системы установки CMS. Модель основывается на прямых измерениях плотности магнитного потока перемещаемыми датчиками Холла внутри магнита в цилиндрическом объёме диаметром 3,448 м и длиной 7 м с относительной точностью  $7 \times 10^{-4}$ . За пределами данного измеренного объёма магнитный поток впервые рассчитан с помощью трехмерной модели магнита CMS. Внутри сверхпроводящего соленоида с центральной плотностью магнитного потока 3,8 Тл создана стационарная система измерения плотности магнитного потока с помощью 6 датчиков ядерного магнитного резонанса, установленных на границе центрального адронного калориметра и на границе трекового детектора, а также проведено мониторингирование плотности магнитного потока с помощью 4 трехмерных датчиков Холла, стационарно установленных на границе трекового детектора. С помощью оригинальной техники измерения плотности магнитного потока в сечениях стальных блоков ядра магнита с использованием потоковых катушек измерены и сравнены с расчетными значениями магнитной индукции внутри магнитопровода, используемого для определения импульсов мюонов. В цилиндрическом объёме диаметром 18 и длиной 48 м на основе 11 136 трехмерных примитивных объёмов, содержащих

компоненты плотности магнитного потока в 6 215 592 узлах пространственной сетки, создана карта магнитного поля установки CMS, используемая в программах моделирования и реконструкции событий протон-протонных взаимодействий при энергиях 7 – 13,6 ТэВ. Для оценки влияния неоднородности магнитного поля в трековом детекторе экспериментальной установки разработан метод двойных интегралов магнитного поля, позволяющий оценить вклад деградации магнитного поля в трековом детекторе в разрешение по поперечному импульсу заряженной частицы. В спектре инвариантной массы димюонов в событиях, отобранных с помощью димюонного триггера, достигнуто разрешение по массе резонансов, проявивших себя в области  $0,3\text{--}300 \text{ ГэВ}/c^2$ , на уровне  $100 \text{ МэВ}/c^2$  во всем диапазоне псевдобыстроты мюонных треков и  $70 \text{ МэВ}/c^2$  в центральной области псевдобыстроты обоих мюонов. Точностью карты магнитного поля обеспечено разрешение по поперечному импульсу мюонов  $p_T$  в области  $20 < p_T < 100 \text{ ГэВ}/c$  на уровне от 1,3% до 2% в центральной области и не более 6% в торцевой области мюонной системы CMS. В наблюдаемом распределении по массе четырех заряженных лептонов ( $4e, 4\mu, 2e2\mu$ ) хорошее разрешение по поперечному импульсу лептонов и, в частности, мюонов, достигнуто благодаря точности карты магнитного поля, обеспечило малую систематическую ошибку в измерении массы узкого резонанса, совместимого с рождением бозона Хиггса Стандартной модели, при полученном значении инвариантной массы  $m_H = 125,6 \pm 0,4(\text{стат.}) \pm 0,2(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2$ .

## Замечания

1. В разделе 1.1 в описании эксперимента CMS автор указывает, что соленоид создает магнитный поток 130 Вб, ссылаясь на [31]. Однако при проектировании магнитов экспериментов ключевой характеристикой является не поток магнитного поля, а магнитная индукция, определяющая радиус кривизны заряженных треков и, следовательно, импульсное разрешение трековой системы. В работе [31] указана как раз магнитная индукция, а не магнитный поток.
2. На стр.24 фраза «Энергетическое разрешение ECAL ... является лучшим, чем 2%» звучит стилистически неверно на русском языке. Более правиль-

ным кажется предложение «Энергетическое разрешение ECAL ... составило менее 2%».

3. При описании модели сверхпроводящего соленоида CMS (раздел 1.3) автор сообщает, что область неполного скалярного потенциала описана цилиндрами, средний диаметр которых задан с точностью 10 мкм (от 6,94625 до 6,95625 м). Чем оправдана эта точность, каково среднеквадратичное отклонение диаметров от среднего значения? Насколько модельные радиусы близки к реальному размеру области магнитного поля? Каковы допуски на механические искажения соленоида и установленных в нем детекторов в результате силы тяжести и силы магнитного притяжения намагниченных элементов экспериментальной установки? Как возможные механические искажения геометрии магнита сказываются на 3D-модели поля, разработанной автором?
4. Рисунки 1.6 а и б, изображающие модель магнита и карту магнитного поля CMS, недостаточно информативны — ни в тексте, ни в подписи к рисунку не сказано, что означают цвета и числа на рисунках, и как карта поля соотносится с геометрией экспериментальной установки.
5. Соискателем допущены неточности в используемых терминах и единицах измерения физических величин. Так, в разделе 2.4, обсуждая вихревые токи в ярме магнита CMS во время разряда соленоида, автор приводит удельное сопротивление конструкционной стали, из которой изготовлено ярмо магнита, в единицах мкОм. Скорее всего, это опечатка, т. к. удельное сопротивление измеряется в Ом\*м. На стр.66 в предложении «Было замечено, что остаточная **плотность магнитной индукции** увеличивается ...» слово «плотность» лишнее. Аналогичная опечатка допущена на стр.155 в п.6 «три компоненты плотности магнитной индукции».
6. В диссертации не уделено внимания на долговременную стабильность карты магнитного поля. Как правило, измерение магнитной индукции в узлах карты производится единоразово. Однако вариации магнитного поля внутри эксперимента могут быть вызваны модернизациями детекторов и изменения расположения ферромагнитных материалов внутри соленоида. В ярме магнита могут также происходить процессы намагничива-

ния, которые также могут влиять на общую карту магнитного поля. Проводились ли контрольные измерения магнитного поля эксперимента CMS для проверки стабильности карты магнитного поля?

7. Типичной процедурой геометрической привязки детекторов экспериментальной установки является набор данных при выключенном магнитном поле, когда можно полагать, что частицы имеют прямолинейную траекторию. Случай с CMS можно считать особым из-за наличия магнитопровода из ферромагнитного материала, имеющего способность намагничиваться. Как в CMS производилась геометрическая выравнивание детекторов, и как влияло на это остаточное магнитное поле?

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Ключин Вячеслав Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учре-

ждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Харлов Юрий Витальевич

30.03.2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(4967)713329, e-mail: Yuri.Kharlov@ihep.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.23 - «Физика высоких энергий»

Адрес места работы:

142281, (Московская область, г. Протвино, пл. Науки д. 1,

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение экспериментальной физики

Тел.: +7-(4967) 71-37-60; e-mail: fgbu@ihep.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Харлова Юрия Витальевича удостоверяю:

Ученый секретарь

Н.Н.Прокопенко

30.03.2026  
дата