

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию Ключина Вячеслава Ивановича на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук на тему: «Карта магнитного поля уста-
новки CMS и прецизионное измерение импульсов мюонов из распадов бо-
зона Хиггса на четыре лептона»
по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, фи-
зика высоких энергий

Диссертационная работа Ключина В.И. посвящена разработке методик, проведению расчетов и измерений плотности магнитного потока установки CMS с целью создания карты магнитного поля, необходимой для прецизионного измерения импульсов заряженных частиц, в частности электронов и мюонов из распадов бозона Хиггса на четыре лептона ($4e$, 4μ , $2e2\mu$) - именно этим определяется **актуальность** избранной темы исследований.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения списка сокращений и списка литературы. Объем диссертации составляет 175 страниц, включая 49 рисунков, две таблицы, 23 уравнения, список литературы из 149 наименований. Во **введении** описаны актуальность и степень разработанности темы исследования; цели и задачи работы; объект и предмет исследования; структура диссертации; научная новизна; теоретическая и практическая значимость; методология и методы исследования. Приведены положения, выносимые на защиту; указаны личный вклад автора; степень достоверности и апробация результатов; перечислены публикации автора по теме диссертации.

В начале **первой главы** кратко представлена почти сорокалетняя история разработок детекторов на основе сверхпроводящего соленоида со стальным магнитопроводом для экспериментов на встречных пучках, непосредственным участником которой был автор диссертационной работы. В разделе 1.1 описана установка CMS с рекордными параметрами соленоида: длина 12,5 м, диаметр 6 м, величина плотности магнитного потока 3,8 Тл и детекторы различного типа, размещенные как внутри соленоида, так и между слоями стального магнитопровода.

Трехмерная конечно-элементная программа TOSCA была основным инструментом, использовавшимся автором для расчета магнитного поля установки. Подходы к расчету магнитного поля, заложенные в программу, изложены в разделе 1.2. В разделах 1.3-1.4 представлены трехмерные модели соленоида и магнитопровода в программе TOSCA. Особое внимание автором уделено описанию в разделе 1.5 магнитных свойств стали, из которой изготовлен магнитопровод, поскольку его элементы находятся в сильном магнитном поле, уровень которого для большей части элементов превышает уровень насыщения.

По мере совершенствования программы TOSCA, стимулированного ростом возможностей вычислительной техники, автором проводилось усовершенствование модели магнитной системы установки CMS, описанное в разделе 1.6, позволяющее увеличивать точность расчета плотности магнитного потока.

Глава 2 посвящена вопросам разработки устройств и методик измерения и мониторинга магнитного поля установки CMS. Для измерений и мониторинга магнитного поля использовались ЯМР датчики, трехкоординатные датчики Холла и потоковые катушки.

В разделе 2.1 дано описание ЯМР датчиков компании METROLAB, а также автоматизированной машины, разработанной во FNAL при непосредственном участии автора, с трехкоординатными датчиками Холла, которая использовалась для измерения поля в объеме соленоида. В разделе 2.2 описана процедура калибровки трехкоординатных датчиков Холла, использующихся для мониторинга магнитного поля в процессе работы установки CMS. Наиболее сложной задачей является получение информации о плотности магнитного потока внутри стальных блоков магнитопровода. Для решения этой задачи разработана описанная в разделе 2.3 техника потоковых катушек, установленных на 12 стальных блоках магнитопровода, основанная на регистрации наведенного в них напряжения при быстром сбросе тока, питающего

сверхпроводящий соленоид. Описанию методов оценки вклада вихревых токов, возникающих при быстром сбросе тока, посвящен раздел 2.4.

В **главе 3** изложены результаты измерения магнитного поля установки CMS. Приведенные в разделе 3.1 результаты измерений внутри соленоида, выполненные с использованием датчиков Холла, сравниваются с результатами расчетов и измерений с помощью ЯМР датчиков. В обоих случаях имеет место неплохое согласие результатов. Погрешность измерения плотности магнитного потока внутри соленоида автор оценивает в 0,07%.

Измерение плотности магнитного потока в стальных блоках магнитопровода с помощью потоковых катушек и датчиков Холла описано в разделе 3.2. Оценки вклада вихревых токов даны в разделе 3.3. Результаты измерений сравниваются с результатами расчета, различие находится на уровне 3-4%. В дальнейшем, при составлении карты магнитного поля в области магнитопровода, используются верифицированные результаты расчетов.

Результаты расчетов и измерений плотности магнитного потока были использованы для создания трехмерной карты магнитного поля во всем объеме установки CMS, как это описано в **главе 4**. Важной задачей, успешно решенной автором, было создание такой структуры базы данных магнитного поля и метода работы с ней, которые позволили осуществлять быстрое извлечение информации о величине магнитной индукции на траектории заряженной частицы.

Глава 5 посвящена анализу влияния неоднородности магнитного поля на точность измерения импульсов заряженных частиц. В разделе 5.1 описана методика и приведены результаты оценки качества магнитного поля установки CMS. Для оценки влияния неоднородности магнитного поля на разрешение по поперечному импульсу использован метод двойных интегралов. Показано, что благодаря конструкции установки CMS – значительному превышению размеров соленоида размерам трекового детектора, вклад неоднородности поля в погрешность измерения поперечного импульса не превышает 1,3%.

Дополнительная калибровка установки производится при регистрации мюонных распадов известных резонансов.

В разделе 5.2 подробно описана работа триггеров различного уровня установки CMS, обеспечивающих отбор нужных событий, дана оценка разрешения по массе известных резонансов, составляющая 70-100 МэВ/c² в диапазоне масс 0,3 – 300 ГэВ/c². Приведены результаты измерений распределения по массе четырех заряженных лептонов с наблюдением резонанса, совместимого с рождением бозона Хиггса, указана оценка массы резонанса, а также систематической и статистической погрешности ее значения.

В **заключении** диссертационной работы суммированы основные результаты.

Степень **обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, их **достоверность** определяются тщательной калибровкой датчиков магнитного поля, использовавшихся для получения карты магнитного поля и последующего контроля поля в процессе функционирования установки CMS; использованием апробированной программы численного моделирования магнитной системы установки; многократным повторением измерений и расчетов магнитного поля с увеличивающейся точностью; хорошим согласием результатов измерений поля различными датчиками с результатами расчетов; регистрацией с высокой точностью масс известных резонансов.

Научная новизна определяется совокупностью впервые полученных результатов расчетов, технологических решений, экспериментальных исследований, приведших к созданию карты магнитного поля установки CMS.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что ее результаты были использованы в экспериментах, по открытию бозона Хиггса. Разработанные в диссертационной работе методы используются при создании детектора FCC-hh Будущего кольцевого коллайдера.

Апробация работы. Результаты работы были представлены автором на двадцати четырех международных конференциях, опубликованы в 25

печатных работах в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

По диссертационной работе могут быть сделаны следующие **замечания**.

1. Текст диссертационной работы содержит небольшое число опечаток, например, на стр. 21 вместо ссылки [76] указана ссылка [86]; на стр. 64 написано «...усредненные по измерениям *двум* датчиков...»; не понятно выражение на стр. 124 «...в слоях двух *центральных колец*, наиболее удаленных от *центрального кольца*...».

2. На большей части рисунков, где представлена установка CMS, части магнитной системы, непосредственно на рисунках нет названий элементов, нет указания габаритных размеров, что затрудняет восприятие материала.

3. В тексте диссертации содержится большое количество числовых значений различных параметров, полученных различными методами и в различное время. Сведение групп параметров в таблицы также упростило бы чтение диссертационной работы.

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, главный научный сотрудник Отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

Шведунов Василий Иванович

16.03.2026

Контактные данные:

e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

Специальности, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Адрес места работы:

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ), Отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер

Тел.: +7(495)939-18-18; e-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись сотрудника Шведунова Василия Ивановича удостоверяю:

___/к.ф.м.н. Сигаева Е.А., ученый секретарь НИИЯФ МГУ/