

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

Основными целями диссертации Ключина Вячеслава Ивановича являются измерение импульсов мюонов при распаде бозонов Хиггса. Регистрация траекторий мюонов производится в станциях мюонных камер, расположенных между намагниченными блоками магнитопровода. Для решения этой задачи необходимо знать непрерывные значения плотности магнитного потока вдоль траекторий частиц, отклоняемых магнитным полем внутри стальных блоков.

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Открытие бозона Хиггса с массой $125 \text{ ГэВ}/c^2$ стало возможным в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC) в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN, Женева, Швейцария) благодаря наблюдению сигнала о его рождении в протон-протонных столкновениях в двух каналах его распада, в том числе при распаде бозона Хиггса на два Z-бозона, каждый из которых в последующем распадался на два заряженных лептона ($2\mu, 2e$).

Научная значимость и новизна полученных результатов заключается в следующем:

Впервые для большого сверхпроводящего магнита с центральной плотностью магнитного потока $3,8 \text{ Тл}$ разработана компьютерная

трехмерная модель, основанная на расчете методом конечных элементов распределения скалярного магнитного потенциала внутри цилиндра диаметром 100 м и длиной 120 м в 7 111 713 узлах пространственной сетки. Данное распределение позволило вычислить значения трех компонент магнитной индукции во всем объеме магнитной системы установки CMS диаметром около 14 м и длиной около 44 м.

Впервые внутри сверхпроводящего соленоида диаметром 6 м и длиной 12,5 м в цилиндрическом объеме диаметром 3,448 м и длиной 7 м с помощью специально созданного автоматического картографа измерена плотность магнитного потока с относительной точностью 7×10^{-4} . Во всей области за пределами данного измеренного объема магнитный поток впервые рассчитан с помощью трехмерной модели магнита CMS. Модель воспроизводит распределение плотности магнитного потока, измеренное с помощью автоматизированного картографа внутри соленоида CMS, с точностью в пределах 0,1%, а в магнитопроводе, по сравнению с проведенными дискретными измерениями, с усредненной точностью 3%.

Впервые внутри сверхпроводящего соленоида с центральной плотностью магнитного потока 3,8 Тл проведены многократные измерения плотности магнитного потока с помощью 6 стационарно установленных датчиков ядерного магнитного резонанса. Усредненная точность измерений составляет $(4,4 \pm 1,0) \times 10^{-5}$ Тл. При этом усредненная относительная разница расчетных и измеренных значений плотности магнитного потока составляет $(-5,4 \pm 1,6) \times 10^{-4}$, что подтверждает точность моделирования распределения магнитного потока внутри соленоида CMS.

Впервые внутри сверхпроводящего соленоида с центральной плотностью магнитного потока 3,8 Тл проведено мониторингирование плотности магнитного потока с помощью 4 стационарно установленных трехмерных датчиков Холла. Усредненная точность измерений составляет

$(3,5 \pm 0,5) \times 10^{-5}$ Тл. При этом усредненная относительная разница расчетных и измеренных значений плотности магнитного потока составляет $(-2,4 \pm 4,0) \times 10^{-4}$ Тл, что подтверждает точность моделирования распределения магнитного потока внутри соленоида CMS.

Впервые с помощью оригинальной техники измерения плотности магнитного потока в сечениях стальных блоков магнитопровода с помощью стационарно размещенных 22 потоковых катушек проведены измерения плотности магнитного потока при рабочем токе магнита 18,164 кА. В сравнении с измерениями расчетная магнитная индукция на $(4,1 \pm 7,0)$ % выше измерений в блоках колец магнитопровода и на $(0,6 \pm 2,7)$ % ниже измеренной в секторах торцевых дисков магнитопровода.

Впервые в цилиндрическом объеме диаметром 18 м и длиной 48 м создана карта магнитного поля, содержащая три компоненты плотности магнитного потока в 6 215 592 узлах пространственной сетки конечных элементов и позволяющая получить значение магнитной индукции в любой точке установки CMS интерполяцией по 8 соседним узлам. Карта магнитного поля используется в программах моделирования физических процессов и реконструкции событий, зарегистрированных на установке CMS. Использование карты магнитного поля позволило измерить импульсы электронов, позитронов и мюонов из распадов бозона Хиггса на четыре лептона (4μ , $4e$, $2e2\mu$) с высокой точностью.

Впервые произведена оценка вклада неоднородности магнитного поля в трековом детекторе в деградацию разрешения по поперечному импульсу заряженной частицы по сравнению с разрешением в однородном магнитном постоянном поле. В трековом детекторе CMS деградация относительной точности измерения поперечного импульса $\delta = \Delta p_T/p_T$ быстро растет в зависимости от псевдобыстроты η до значения $\Delta\delta/\delta = 0,0125$ при $\eta = 1,63$ и

затем в интервале $\eta < 2,4$ не превышает 0,0131, что говорит о близости магнитного поля в трековой системе CMS к идеальному однородному полю.

В полученном при низкой светимости LHC спектре инвариантной массы ди-мюонов в событиях, отобранных с помощью ди-мюонного триггера, разрешение по массе резонансов в области 0,3–300 ГэВ/c² составляет около 100 МэВ/c² во всем диапазоне псевдобыстроты мюонных треков и 70 МэВ/c² в диапазоне псевдобыстроты обоих мюонов $|\eta| < 1$.

С помощью ди-лептонных и трех-электронных триггеров отобраны кандидаты в события распада бозона Хиггса на четыре заряженных лептона (4 μ , 4e, 2e2 μ) с минимальными импульсами изолированных лептонов 17 и 8 ГэВ/c для двух-лептонных и 15, 8 и 5 ГэВ/c для трех-лептонных триггеров. При этом разрешение по импульсу электронов в области от 7 до 100 ГэВ/c составило от 3,5 до 1,5%, а разрешение по поперечному импульсу мюонов в области $20 < p_T < 100$ ГэВ/c составило от 1,3% до 2% в центральной области и не превысило 6% в торцевой области мюонной системы CMS. Столь хорошее разрешение по поперечному импульсу электронов и мюонов на установке CMS определяет разрешение по массе в канале распада бозона Хиггса на четыре лептона (4 μ , 4e, 2e2 μ) на уровне 1–2%.

Наблюдаемое распределение по инвариантной массе четырех заряженных лептонов (4 μ , 4e, 2e2 μ) хорошо согласуется с ожидаемым фоном и имеет узкий резонанс, совместимый с рождением бозона Хиггса в Стандартной модели с измеренной массой $m_H = 125,6 \pm 0,4(\text{стат.}) \pm 0,2(\text{сист.})$ ГэВ/c². Столь малая систематическая ошибка свидетельствует, в частности, о малом вкладе неоднородности магнитного поля в относительную ошибку разрешения по поперечному импульсу заряженного лептона.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня благодарностей, списка сокращений и списка литературы. Объем диссертации составляет 175 страниц.

Во введении приводится обоснование актуальности темы и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов. Представлена информация об апробации работ и отмечен личный вклад автора. **В первой главе** кратко описан состав установки CMS и подробно описана методика моделирования гетерогенной магнитной системы CMS, начиная с формулирования задачи магнитостатики по моделированию магнитного потока сверхпроводящего соленоида установки CMS, заключенного в стальной магнитопровод.

Во второй главе описана разработка методики измерения и мониторинга магнитного поля установки CMS, основанная на использовании датчиков ядерного магнитного резонанса и трехмерных датчиков Холла для измерения магнитного поля внутри сверхпроводящего соленоида и на использовании потоковых катушек, специально разработанных для измерения магнитной индукции в стальных блоках магнитопровода.

В третьей главе приведены результаты измерения плотности магнитного потока внутри объема сверхпроводящего соленоида CMS, выполненные с помощью специально разработанного картографа, использующего откалиброванные трехмерные датчики Холла и датчики ядерного магнитного резонанса.

В четвертой главе описана процедура создания трехмерной карты магнитного поля установки CMS, используемой, а программах

моделирования и реконструкции событий столкновений пучков первичных частиц на установке CMS.

В пятой главе проведен анализ вклада неоднородности магнитного поля в трековой системе установки CMS в ошибки измерения импульсов заряженных частиц и рассмотрена методика регистрации четырех изолированных лептонов e и μ , позволивших реконструировать инвариантную массу бозона Хиггса.

Высокая **достоверность** представленных результатов подтверждается данными других экспериментов, теоретическими расчетами, апробацией на более чем 25 научных конференциях.

В тексте диссертации встречаются некоторые стилистические погрешности.

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 Клюхин 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,
начальник научно-экспериментального отдела
физики тяжёлых ионов на LHC

Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований

Адрес: 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6

Водопьянов Александр Сергеевич

25 марта 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +

e-mail: vodopyanov@jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий

Подпись Водопьянова Александра Сергеевича ~~заверяю~~

Ученый секретарь

Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований

Чеплаков Александр Павлович

25 марта 2026 г.

