

Заключение диссертационного совета МГУ.013.2
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук
Решение диссертационного совета от «10» апреля 2026 г. №6
О присуждении Ключину Вячеславу Ивановичу, гражданину РФ, ученой степени
доктора физико-математических наук.

Диссертация «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 принята к защите диссертационным советом 26.12.2026, протокол № 2.

Соискатель Ключин Вячеслав Иванович 1951 года рождения. В 1987 году соискатель защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Исследование квазиупругой и эксклюзивных реакций в антинейтринных взаимодействиях при энергиях 5–100 ГэВ» в диссертационном совете Д 034.02.01 Института физики высоких энергий (г. Протвино Московской области)

Соискатель работает старшим научным сотрудником в отделе экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Диссертация выполнена в отделе экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Водопьянов Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-экспериментального отдела физики тяжелых ионов на LHC лаборатории физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединённого института ядерных исследований;

Харлов Юрий Витальевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики Института физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;

Шведунوف Василий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обосновывался на их компетентности в области физики элементарных частиц и физики высоких энергий и наличии публикаций в соответствующей сфере исследования.

На диссертацию и автореферат дополнительных отзывов не поступило.

Соискатель имеет 1418 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 25 работ, все опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук (в списке печатные листы, указанные через слэш, отражают авторский вклад):

1. The CMS experiment at the CERN LHC / Klyukhin V. et al. // Journal of Instrumentation. – 2008. – Vol. 3, No. 8. -P. S08004. EDN: LKYERX. Импакт-фактор 1.3 (JIF), 19,54/0,65 п.л.
2. Сверхпроводящий соленоид для установки на встречных пучках / Вишняков И.А., Воробьев А.П., Кечкин В.Ф., Ключин В.И., Козловский Е.А., Маляев В.Х., Селиванов Г.И. // Журнал технической физики. – 1992. – Т. 62, № 2. – С. 146–156.
URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24905>. Импакт-фактор 0.558 (РИНЦ), 0,69/0,62 п.л.
3. Final Design of the CMS Solenoid Cold Mass / Kircher F., Bredy P., Calvo A., Curé B., Campi D., Desirelli A., Fabbriatore P., Farinon S., Hervé A., Horvath I., Klioukhine V., Levesy B., Losasso M., Lottin J.P., Musenich R., Pabot Y., Payn A., Pes C., Priano C., Rondeaux F., Sgobba S. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, No. 1. – pp. 407–410. DOI: 10.1109/77.828259. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,37/0,19 п.л.
4. 3D Magnetic Analysis of the CMS Magnet / Klioukhine V.I., Campi D., Curé B., Desirelli A., Farinon S., Gerwig H., Green D., Grillet J.P., Hervé A., Kircher F., Levesy B., Loveless R., Smith R.P. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, No. 1. – pp. 428–431. DOI: 10.1109/77.828264. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,31/0,28 п.л.
5. Status of the Construction of the CMS Magnet / Hervé A., Blau B., Bredy Ph., Campi D., Cannarsa P., Curé B., Dupont Th., Fabbriatore P., Farinon S., Feyzi F., Fazilleau Ph., Gaddi A., Gerwig H., Greco M., Grillet J.P., Kaftanov V., Kircher F., Klyukhin V., Levesy B., Loveless R., Maire G., Musenich R., Pabot Y., Payn A., Perinic G., Petiot P., Rondeaux F., Rykaczewski H., Sbrissa E., Sequeira Tavares S., Sgobba S., Smith R.P., Veillet L., Waurick G. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, No. 2. – pp. 542–547. EDN: MDKLPN. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,63/0,32 п.л.
6. Measuring the Magnetic Field in the CMS Steel Yoke Elements / Smith R.P., Campi D., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Grillet J.P., Hervé A., Klyukhin V., Loveless R. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, No. 2. – pp. 1830–1833. EDN: LIJZIN. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,43/0,39 п.л.

7. Developing the Technique of Measurements of Magnetic Field in the CMS Steel Yoke Elements with Flux-loops and Hall Probes / Klyukhin V.I., Campi D., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Grillet J.P., Hervé A., Loveless R., Smith R.P. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – Vol. 51, No. 5. – pp. 2187–2192. EDN: LIRVXT. Импакт-фактор 1.9 (JIF), 0,51/0,46 п.л.
8. Analysis of Eddy Current Distributions in the CMS Magnet Yoke during the Solenoid Discharge / Klyukhin V. I., Campi D., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Grillet J.P., Hervé A., Loveless R., Smith R. P. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Vol. 52, No. 3. – pp. 741–744. EDN: LIXTBH. Импакт-фактор 1.9 (JIF), 0,47/0,42 п.л.
9. Commissioning of the CMS Magnet / Campi D., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Hervé A., Klyukhin V., Maire G., Perinic G., Brédy Ph., Fazilleau Ph., Kircher F., Levesy B., Fabbriatore P., Farinon S., Greco M. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, No. 2. – pp. 1185–1190. DOI: 10.1109/TASC.2007.897754. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,63/0,32 п.л.
10. Measurement of the CMS Magnetic Field / Klyukhin V. I., Ball A., Bergsma F., Campi D., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Hervé A., Korienek J., Linde F., Lindenmeyer C., Loveless R., M. Mulders, T. Nebel, R. P. Smith, D. Stickland, G. Teafae, L. Veillet and J. K. Zimmerman // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, No. 2. – pp. 395–398. EDN: LLCYCJ. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,42/0,38 п.л.
11. The CMS Magnetic Field Map Performance / Klyukhin V. I., Amapane N., Andreev V., Ball A., Curé B., Hervé A., Gaddi A., Gerwig H., Karimaki V., Loveless R., Mulders M., Popescu S., Sarycheva L. I., Virdee T. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2010. – Vol. 20, No. 3. – pp. 152–155. EDN: MXNLVT. Импакт-фактор 1.8 (JIF), 0,51/0,46 п.л.
12. Precise mapping of the magnetic field in the CMS barrel yoke using cosmic rays / Klyukhin V. et al. // Journal of Instrumentation. – 2010. – Vol. 5, No. 3. -P. T03021. EDN: URIQOF. Импакт-фактор 1.3 (JIF), 2,32/1,74 п.л.
13. Performance of CMS muon reconstruction in pp collision events at $\sqrt{s} = 7$ TeV / Klyukhin V. et al. // Journal of Instrumentation. – 2012. – Vol. 7, No. 10. – P. P10002. EDN: RGJHWN. Импакт-фактор 1.3 (JIF), 5,42/2,71 п.л.
14. Measuring the Magnetic Flux Density in the CMS Steel Yoke / Klyukhin V., Amapane N., Ball A., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Mulders M., Hervé A., Loveless R. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2013. – Vol. 26, No. 4. – pp. 1307–1311. EDN: RFFYXZ. Импакт-фактор 1.7 (JIF), 0,41/0,37 п.л.
15. Measurement of the properties of a Higgs boson in the four-lepton final state / Klyukhin V. et al. // Physical Review D. – 2014. – Vol. 89, No. 9. – P. 092007. EDN: SKUYIT. Импакт-фактор 5.3 (JIF), 4,89/2,45 п.л.

16. Validation of the CMS Magnetic Field Map / Klyukhin V.I., Amapane N., Ball A., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Mulders M., Calvelli V., Hervé A., Loveless R. // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2015. – Vol. 28, No. 2. – pp. 701–704. EDN: UGEKOP. Импакт-фактор 1.7 (JIF), 0,36/0,32 п.л.
17. Flux Loop Measurements of the Magnetic Flux Density in the CMS Magnet Yoke / Klyukhin V.I., Amapane N., Ball A., Curé B., Gaddi A., Gerwig H., Mulders M., Hervé A., Loveless R. // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2017. – Vol. 30, No. 10. – pp. 2977–2980. EDN: XMVLAC. Импакт-фактор 1.7 (JIF), 0,31/0,28 п.л.
18. Using the Standard Linear Ramps of the CMS Superconducting Magnet for Measuring the Magnetic Flux Density in the Steel Flux-Return Yoke / Klyukhin V., Curé B., Amapane N., Ball A., Gaddi A., Gerwig H., Hervé A., Loveless R., Mulders M. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 8300504. EDN: UAWFEP. Импакт-фактор 1.9 (JIF), 0,5/0,45 п.л.
19. Design and Description of the CMS Magnetic System Model / Klyukhin V. // *Symmetry*. – 2021. – Vol. 13, No. 6. – P. 1052. EDN: UNXAFI. Импакт-фактор 2.2 (JIF), 1,78 п.л.
20. The CMS Magnetic Field Measuring and Monitoring Systems / Klyukhin V., Ball A., Bergsma F., Boterenbrood H., Curé B., Dattola D., Gaddi A., Gerwig H., Hervé A., Loveless R., Teafoe G., Wenman D., Zeuner W. Zimmerman J. // *Symmetry*. – 2022. – Vol. 14, No. 1. – P. 169. EDN: YFFQHE. Импакт-фактор 2.2 (JIF), 2,75/2,48 п.л.
21. Influence of the high granularity calorimeter stainless steel absorbers onto the Compact Muon Solenoid inner magnetic field / Klyukhin V. // *Springer Nature Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 4, No. 8. – P. 235. DOI: 10.1007/s42452-022-05122-9. Импакт-фактор 2.4 (JIF), 0,56 п.л.
22. Development of the CMS magnetic field map / Amapane N., Klyukhin V. // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15, No. 5. – P. 1030. EDN: GJVMKF. Импакт-фактор 2.2 (JIF), 1,27/1,14 п.л.
23. Comparison of Two Detector Magnetic Systems for the Future Circular Hadron-Hadron Collider / Klyukhin V., Ball A., Berriaud C.P., Curé B., Dudarev A., Gaddi A., Gerwig H., Hervé A., Mentink M., Riegler W., Wagner U., Ten Kate H. // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 18. – P. 10387. EDN: STIWDA. Импакт-фактор 2.5 (JIF), 1,23/1,11 п.л.
24. Calculation of Forces to the High Granularity Calorimeter Stainless Steel Absorber Plates in the CMS Magnetic Field / Klyukhin V. // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – P. 2017. EDN: UYPZXA. Импакт-фактор 2.2 (JIF), 1,03 п.л.
25. Analysis of Measurements of the Magnetic Flux Density in Steel Blocks of the Compact Muon Solenoid Magnet Yoke with Solenoid Coil Fast Discharges / Klyukhin V., Curé B., Gaddi A., Kehrlí A., Ostrega M., Pons X. // *Symmetry*. – 2024. – Vol. 16, No. 12. – P. 1689. EDN: GGOPRY. Импакт-фактор 2.2 (JIF), 1,66/1,5 п.л.

Определяющий вклад соискателя в коллаборационные работы [1, 12, 13, 15] подтверждается письмом от коллаборации CMS.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании результатов выполненных автором исследований решена важная научная проблема, вносящая существенный вклад в развитие физики высоких энергий. Создана карта магнитного поля во всём объёме установки Compact Muon Solenoid (CMS) на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН и выполнено прецизионное измерение импульсов электронов (позитронов) и мюонов. Это позволило с высокой точностью реконструировать инвариантную массу бозона Хиггса. Автором проведено исследование влияния неоднородности магнитного поля в трековой системе экспериментальной установки на точность измерения импульсов заряженных частиц, в частности, заряженных лептонов e и μ , происходящих из лептонных распадов бозона Хиггса. Данное исследование очень важно для оценки величины систематической ошибки при измерении массы бозона Хиггса.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Точность описания распределения плотности магнитного потока внутри сверхпроводящего соленоида диаметром 6 м и длиной 12,5 м находится в пределах 0,1%, а в стальном магнитопроводе, используемом в мюонном спектрометре – в среднем на уровне 3%.

2. Метод измерения магнитного поля датчиками ядерного магнитного резонанса, трехмерными датчиками Холла и специализированными потоковыми катушками является достаточным для проверки расчетов, выполненных с помощью трехмерной модели магнита установки CMS.

3. Метод оцифровки распределения плотности магнитного потока трехмерными датчиками Холла, перемещаемыми с помощью созданной автоматизированной пневматической машины внутри цилиндра диаметром 3,448 м и длиной 7 м, обеспечивает относительную точность определения магнитного поля в трековой системе установки CMS на уровне 0,07%.

4. Дискретные измерения плотности магнитного потока в ярме магнита CMS с помощью специализированных потоковых катушек и трехмерных датчиков Холла, подтверждают на уровне 3% корректность распределения магнитного потока в мюонном спектрометре, рассчитанного с помощью трехмерной модели магнита CMS.

5. Трехмерная карта магнитного поля установки CMS, созданная для обеспечения программ моделирования событий и реконструкции треков заряженных частиц значениями плотности магнитного потока в каждой требуемой точке установки, позволяет достигнуть относительного разрешения по поперечному импульсу мюонов в интервале 20 – 100 ГэВ/с на уровне 1,3% – 2,0% в центральной области и не хуже 6,0% в торцевой области мюонного спектрометра CMS, что определяет массовое разрешение в канале распада Хиггса на четыре заряженных мюона на уровне 1,0–2,0%.

6. Разработанный метод оценки влияния неоднородности магнитного поля в трековой системе экспериментальной установки на разрешение по поперечному импульсу заряженной частицы позволяет оценить вклад магнитного поля в деградацию разрешения по поперечному импульсу заряженной частицы на уровне существенно меньшем 1,25% при значениях псевдобыстроты частицы, меньших 1,63, и не превышающем 1,31% при значениях псевдобыстроты, меньших 2,4, что говорит о близости магнитного поля в трековой системе CMS к идеальному однородному полю.

7. Систематическая ошибка реконструкции массы бозона Хиггса по его распаду на четыре заряженных лептона ($4e$, 4μ , $2e2\mu$) равна $0,2 \text{ ГэВ}/c^2$ при массе бозона $125,6 \text{ ГэВ}/c^2$, что свидетельствует о точности метода регистрации бозона Хиггса по его распаду на четыре заряженных лептона.

На заседании 10.04.2026 диссертационный совет принял решение присудить Ключину В.И. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 11 докторов наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, действительных бюллетеней – 1.

Председатель совета, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН

Ученый секретарь совета, к.ф.-м.н.

Боос Э. Э.

Галанина Л.И.

14.04.2026