

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о теме

1.1. Шифр темы

02-0-1083-2009/2023

1.2. Лаборатория

ЛФВЭ

1.3. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.4. Наименование темы

CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC

1.4. Руководитель темы

В. Ю. Каржавин

1.6. Проекты в теме

CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC, 2020–2023 гг.

Руководитель: В. Ю. Каржавин

Модернизация детектора CMS, 2022–2023 гг.

Руководитель: В. Ю. Каржавин

2. Научный отчет об исполнении темы

2.1. Аннотация

Многоцелевая установка “Компактный мюонный соленоид” (CMS) предназначена для изучения pp–взаимодействий на Большом адронном коллайдере (LHC) с целью проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц с целью изучения фундаментальных законов природы. Среди намеченных первоочередных задач эксперимента – подтверждение одного из предлагаемых механизмов генерации масс элементарных частиц (исследование свойств открытого в 2012 г. бозона Хиггса и поиск новых скалярных частиц), прецизионная проверка стандартной модели (СМ) и поиск новой физики за ее границами. К другим важным проблемам, которые физики ОИЯИ надеются решить с помощью LHC, относится поиск путей объединения трех фундаментальных взаимодействий. Кроме того, физическая программа CMS включает комплекс исследований, направленных на изучение предсказаний стандартной модели (СМ) в новой области энергии, изучение свойств КХД при ранее недоступных значениях переданного четырехимпульса и долей переданной энергии, изучение закономерностей взаимодействий ядер при высоких энергиях, поиск кварк-глюонной плазмы и многое другое.

ОИЯИ участвует в проекте “Компактный мюонный соленоид” (Compact Muon Solenoid – CMS) в составе сотрудничества научных центров России и стран-участниц ОИЯИ (коллаборация RDMS), начиная с разработки концепции эксперимента в 1992 г. Физики ОИЯИ внесли ключевой вклад в создании установки CMS, активно участвуют в получении экспериментальной информации, обработке и анализе данных.

К приоритетным задачам физической программы группы ОИЯИ относится поиск кандидатов на роль частиц темной материи, проверка предсказаний сценариев низкоэнергетической гравитации на масштабе нескольких ТэВ, расширенных хиггсовских и калибровочных моделей. Также физики ОИЯИ принимают активное участие в изучении закономерностей образования пар лептонов (процесс Дрелла-Яна) для прецизионной проверки свойств SM и измерении множественности частиц в струях для уточнения механизмов адронизации партонов.

Основной вклад ОИЯИ был сосредоточен на создании детекторов торцевой части экспериментальной установки CMS с полной ответственностью RDMS (объединение институтов РФ и стран-участниц ОИЯИ в коллаборации CMS) за проектирование, строительство и эксплуатацию торцевого адронного калориметра (HCAL) и передней мюонной станции (ME1/1). Эта ответственность сохранялась как во время первого (2010–2012 гг.) и второго этапа работы LHC (2016–2018 гг.), так и в течение длительных остановок LHC в 2013–2015 гг. (LS1) и в 2019–2022 гг. (LS2), во время которых была проведена модернизация экспериментальной установки CMS для обеспечения эффективной работы всех систем в условиях высокой светимости более $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ с протон–протонными соударениями при полной энергии LHC $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$. Начиная с 2027 года предусмотрена работа LHC при повышенной светимости вплоть до $7.5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (High Luminosity LHC, HL–LHC), что позволит увеличить статистику более чем на порядок ($L_{\text{int}} \sim 3000 \text{ фбн}^{-1}$). С 2026 г. по 2028 г. запланирована длительная остановка (LS3) для модернизации LHC. Основной задачей модернизации установки CMS в этот период является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях в режиме HL–LHC.

В 2020–2023 гг. физики ОИЯИ принимали участие в обработке и анализе данных первого (Run 1), второго (Run 2) и третьего (Run 3) этапов работы LHC, отвечали за запуск после LS2, техническое обслуживание и эксплуатацию детекторных систем в соответствии с M&O категории В. В соответствии с меморандумами о взаимопонимании между ЦЕРН и ОИЯИ основными направлениями работ в рамках программы модернизации установки CMS являлись: модернизация мюонной системы (CMS Muon system) и адронного калориметра (HCAL), и создание калориметра высокой гранулярности (HGCAL).

Всего по результатам работ физиков ОИЯИ за отчетный период подготовлено 22 журнальные публикации (среди них пять статей коллаборации CMS), пять нот коллаборации CMS, 5 обзоров в монографиях и 2 патента. Полный список публикаций коллаборации CMS за 2020–2023 гг., в который входят представители ОИЯИ, включает более 250 научных работ. Результаты работ также были представлены в 68 докладах на конференциях и рабочих совещаниях. По тематике работ защищены две докторские и две магистерская диссертации. Основные результаты включены в регулярные обзоры по физике частиц Particle Data Group, результаты исследования отмечены Поощрительной премией ОИЯИ за 2021 г., первой премией ЛФВЭ ОИЯИ за 2021 г., второй премией ЛФВЭ ОИЯИ за 2020 г.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание выполненных работ и полученных результатов по всем проектам и активностям темы.

Программа физических исследований на установке CMS

В период 2020–2023 гг. программа физических исследований на установке CMS включала обработку и анализ экспериментальных данных Run 1 и Run 2 при энергии взаимодействия пучков протонов 8 и 13 ТэВ в с.д.м. и полной интегральной светимости до 160 фбн^{-1} , а также

развитие алгоритмов реконструкции мюонов высоких энергий, разработка алгоритмов восстановления и коррекции струй. Кроме того, осуществлялась подготовка и проведение набора, обработки и анализа данных Run 3, который стартовал в середине 2022 г. Работа велась по следующим направлениям:

- поиск новой физики в канале с двумя лептонами в конечном состоянии и проверка предсказаний сценариев за рамками Стандартной модели (гравитации на масштабе ТэВ, расширенных калибровочных моделей, сценариев с частицами-кандидатами на роль темной материи, процессов с нарушением лептонного числа и т.д.)
- поиск новой физики в канале с двумя лептонами/двумя b-кварками и потерянной поперечной энергией в конечном состоянии и проверка предсказаний сценариев за рамками Стандартной модели (поиск расширенного хиггсовского сектора и частиц-кандидатов на роль темной материи);
- исследование свойств бозона Хиггса и поиск новых скалярных бозонов за рамками СМ в каналах распада на лептоны и пары b-кварков;
- исследование процессов рождения мюонных пар в процессе Дрелла–Яна для проверки предсказаний СМ в новой области энергий, измерения слабого угла смешивания и проверки распределений структурных функций кварков и глюонов;
- изучение свойств струй КХД и уточнения функций фрагментации.

Всего физики ОИЯИ отвечали за 9 физических анализов, включая разработку программного обеспечения.

Поиск новой физики в канале с парой мюонов

При отсутствии значимого превышения наблюдаемых событий над ожидаемым фоном с уровнем достоверности (C.L.) 95 % определен верхний предел на сечение рождения пар лептонов в присутствии новых тяжелых резонансов. Модельно–независимые верхние пределы на сечения рождения резонансных состояний со спином 1 и спином 2 измерялись в приближении узкого резонанса. На рисунке 1 представлены результаты извлечения наблюдаемых (экспериментально установленных) и ожидаемых (моделирование) пределов на данных Run 2 при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [1].

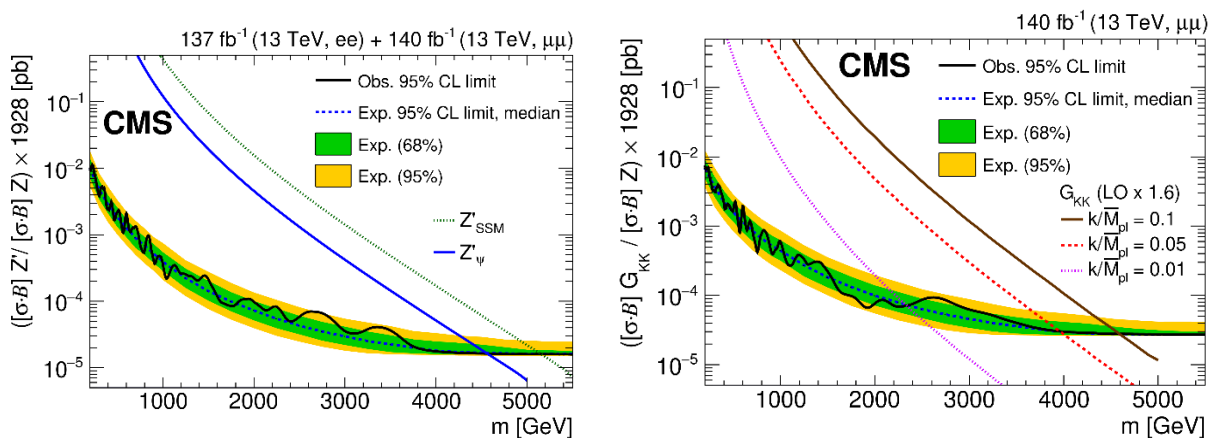


Рис. 1. Модельно-независимый верхний предел (95% CL) на сечение рождения пар мюонов (черная сплошная линия), нормированное на сечение рождения Z-бозона, для случая резонансов со спином 1 (слева) и спином 2 (справа) [1]. Пунктирная линия отвечает ожидаемому пределу в случае СМ (основанному на моделировании). Закрашенные области вокруг пунктирной линии соответствуют 68% и 95% стандартным отклонениям. Также приведены теоретические предсказания для сечений рождения новых калибровочных бозонов (модели SSM и Z'_ψ) и КК–состояния гравитона для разных констант связи сценария многомерной гравитации RS1.

Сравнение наблюдаемых верхних пределов с теоретическими предсказаниями позволили установить [1] принципиально новые экспериментальные ограничения на массы тяжелых

резонансов, предсказываемых этими моделями, и ряд других модельных параметров. В канале с парой мюонов существование новых нейтральных калибровочных бозонов исключено при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (рис. 1, левый) в области масс менее 4.89 ТэВ/ c^2 для модели SSM и 4.29 ТэВ/ c^2 для ψ -модели (одного из сценариев ТВО). При объединении данных в канале рождения пар мюонов и пар электронов эти пределы расширяются, соответственно, до 5.15 ТэВ/ c^2 и 4.56 ТэВ/ c^2 . В зависимости от значения отношения кривизны многомерного пространства анти-де Ситтера κ и фундаментальной массы Планка (0.01–0.1) сценария RS1, ограничения на массу КК–состояния гравитона составили 2.34–4.59 ТэВ/ c^2 в канале $\mu^+\mu^-$, при этом комбинированный ($\mu^+\mu^-$ и e^+e^-) предел достигает 2.47–4.78 ТэВ/ c^2 (рис. 1, правый). Данные ограничения существенно улучшают предыдущие измерения в дилептонном канале как при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ, так и при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ на неполном объеме данных.

Экспериментальные пределы на сечения рождения пар лептонов также использовались для установления экспериментальных ограничений на массы новых калибровочных бозонов в пространстве модельных параметров, зависящих от значений констант связи и углов смешивания в различных моделях (рис. 2) [1]. Полученные экспериментальные пределы в пространстве (c_u, c_d) позволяют не только расширить их на произвольную теоретическую модель (с феноменологической точки зрения расширенные калибровочные модели отличаются друг от друга только величинами констант связи), но и, в случае экспериментального обнаружения Z' , произвести отбор соответствующего ему расширения СМ.

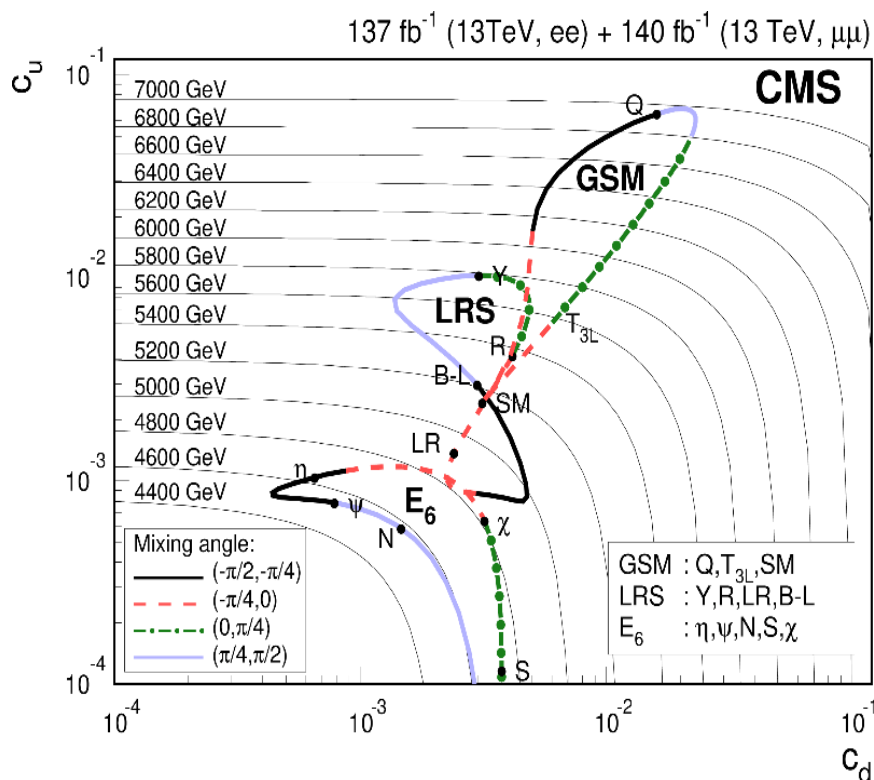


Рис. 2. Предел (95% CL) на массы бозона Z' в пространстве параметров (c_u, c_d) [1]. Тонкими линиями показаны контуры экспериментальных верхних пределов на величину (c_u, c_d) для различных масс резонанса. Жирные цветные кривые соответствуют предсказаниям расширенных калибровочных моделей GSM, LR и E_6 при различных значениях параметра смешивания.

Обобщением результатов, полученных в ходе Run 1 и Run 2, сделаны предсказания (рис. 3) на массовые пределы нового тяжелого бозона Z' расширенного калибровочного сектора СМ, которые могут быть достигнуты при работе ЛHC в режиме высокой светимости (1000–3000 fb^{-1}), с учетом последних данных CMS. Для модели SSM предсказано наступление кинематического предела в районе около 7 ТэВ/ c^2 при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, что соответствует 7–8 ТэВ/ c^2 при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ.

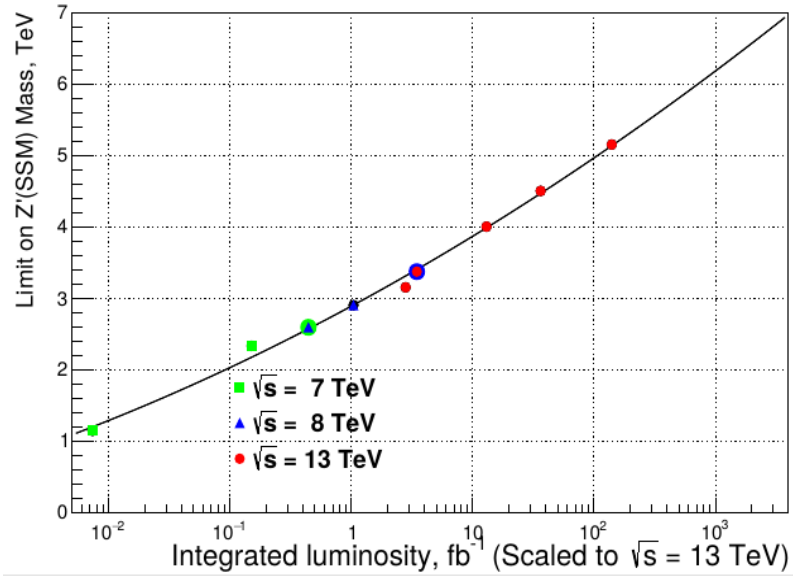


Рис. 3. Наблюдаемые при $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ массовые пределы для гипотетического калибровочного бозона Z' в модели SSM в зависимости от интегральной светимости.

В 2022–2023 годах начался набор данных Run 3 на коллайдере LHC при энергии $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. Была обработана имеющаяся статистика по димюонным событиям с интегральной светимостью 37 fb^{-1} и исследованы различные распределения. Выполнено изучение возможности поиска тяжелых резонансов в дилептонном канале в режиме работы LHC при высокой светимости (HL–LHC) [2]. Продемонстрировано, что потенциальное достижимое значение массового предела в референсной модели расширенного калибровочного сектора (SSM) составляет 6.85 ТэВ. Сечения процессов с учетом вероятностей распада, которые могут быть зарегистрированы со статистической значимостью 5σ , колеблется от 9.0×10^{-5} пб при массе резонанса 1 ТэВ до 1.8×10^{-6} пбн при 7 ТэВ. В этом случае на HL–LHC могут быть обнаружены бозоны Z_{SSM} и Z_{ψ} с массами до 6.27 ТэВ и 5.72 ТэВ, соответственно.

Установлены верхние пределы на сечение процесса нерезонансного рождения пар мюонов с виртуальным обменом КК-состояниями гравитона и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на фундаментальный масштаб многомерной гравитации Λ_T и M_S в альтернативном описании, в зависимости от числа дополнительных измерений n в модели ADD (пример $\sqrt{s} = 13$ ТэВ приведен на рис. 4) [1]. Аналогично случаю поиска резонансного сигнала, пределы определены как независимо в каналах $\mu^+\mu^-$ и e^+e^- , так и в объединенном дилептонном канале.

На основе данных Run 2 LHC ограничения на значение M_S для числа $n = 3-7$ на уровне достоверности 95% составили $5.8-8.6$ ТэВ, а на величину $\Lambda_T - 7.2$ ТэВ [1]. Комбинированный анализ мюонного и электронного каналов установил более сильные пределы: $M_S \geq 5.9-8.9$ ТэВ и $\Lambda_T \geq 7.5$ ТэВ. Масштаб контактных взаимодействий был ограничен значениями $\Lambda > 23.9-35.8$ ТэВ в зависимости рассматриваемой модели.

Выполнено исследование, направленное на обнаружение процессов, идущих с нарушением лептонного числа – в распадах на пары мюонов и электронов проверена универсальность взаимодействий в лептонном секторе (Lepton Flavour Universality Violation, LFUV) [1]. CM утверждает, что бозоны, в частности Z -бозон, распадаются на мюонные и электронные пары с одинаковой вероятностью. Однако, если CM неполна, в данных могут содержаться указания на предпочтительность распада по первому или второму каналу. На статистике RUN2 эксперимент CMS впервые смог проверить эту гипотезу в области больших инвариантных масс. Значимых указаний на подобные электронные или мюонные «предпочтения» в распадах обнаружено не было (хотя присутствуют небольшие отклонения, связанные с избытком событий в электронном

канале в области самых больших масс, за которыми предполагается пристальное наблюдение в будущем). Полученное отношение показано на рисунке 5.

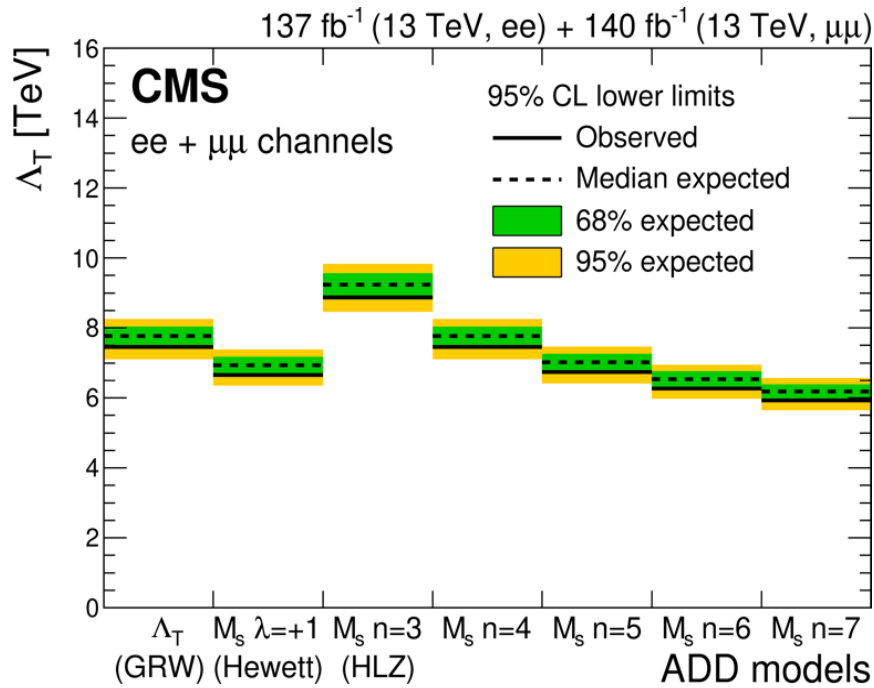


Рис. 4. Верхний предел (95% C.L.) на масштаб многомерной гравитации в рамках различных схем перенормировки GRW (Λ_T) и HLZ (M_s) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [1]. Результаты для схемы HLZ приведены в зависимости от числа дополнительных измерений n .

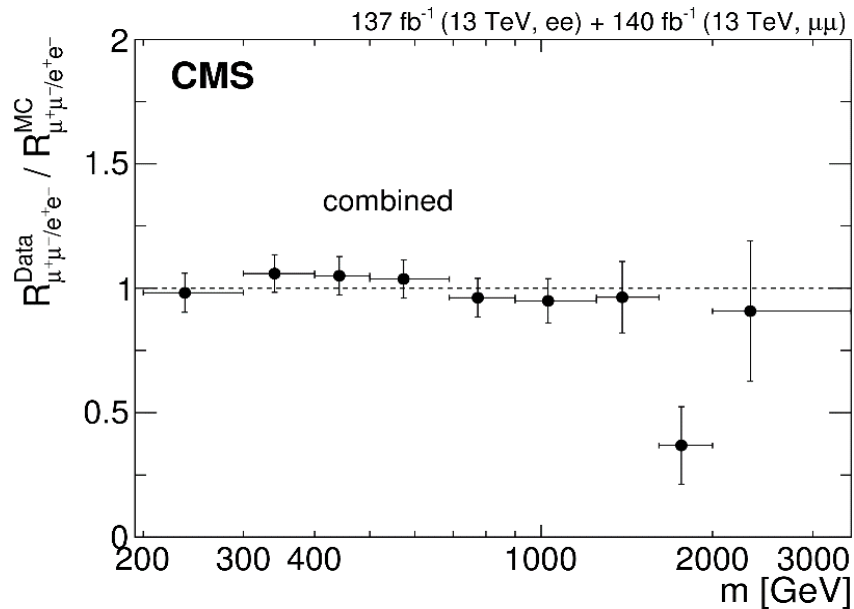


Рис. 5. Отношение вероятностей распада Z-бозона по электронному и мюонному каналу, полученное в эксперименте CMS; для сравнения показано также предсказание СМ (пунктирная линия) [3].

Выполнено изучение возможности проверки универсальности взаимодействий в дилептонном канале в режиме работы ЛHC при высокой светимости (HL-LHC) [2].

Продемонстрировано, что она может быть выполнена с точностью в 5 раз лучше текущей, таким образом, ожидается значительное улучшение чувствительности поиска новой физики.

Поиск кандидатов на роль частиц темной материи и новых хиггсовских состояний

В канале с парой противоположно заряженных лептонов проведен экспериментальный поиск переносчика взаимодействия между полями СМ и сектором темной материи [1,3]. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ в рамках упрощенной модели ТМ (с одной дираковской частицей-кандидатом на роль ТМ и одним переносчиком) установлены верхние пределы (95% С.Л.) на массы частиц ТМ и аксиально-векторного и векторного переносчиков (рис. 6). В предположении векторного переносчика с подавленной константой связи с лептонами ($g_q = 0.1$, $g_l = 0.01$) ограничения на массу переносчика m_{med} составили $1.92 \text{ ТэВ}/c^2$ при больших значениях масс частиц-кандидатов на роль ТМ. В случае одинаковых констант связи аксиально-векторного переносчика с лептонами и кварками ($g_q = 0.1 = g_l = 0.1$) ограничения на m_{Med} существенно выше и достигают $4.64 \text{ ТэВ}/c^2$. В области малых масс частиц ТМ ($m_{\text{DM}} = 0$) массовые пределы на переносчики несколько ниже и составляют, соответственно, $1.04 \text{ ТэВ}/c^2$ и $3.41 \text{ ТэВ}/c^2$.

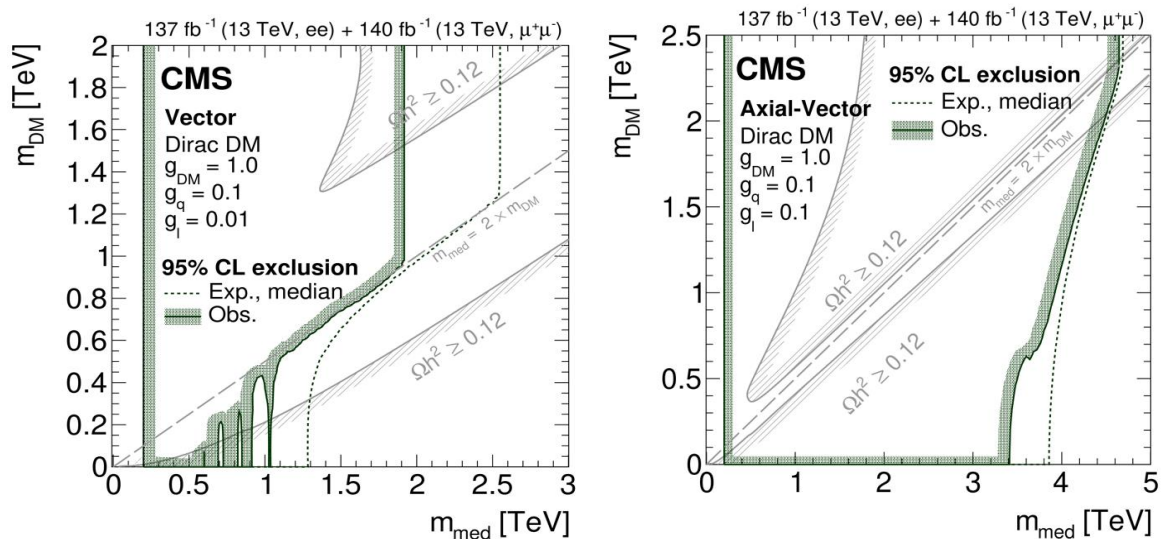


Рис. 6. Ограничения (95% С.Л.) на массы дираковских частиц темной материи m_{DM} и переносчика взаимодействия m_{Med} [1]. В рамках упрощенной модели рассмотрены случаи (слева) векторного и (справа) аксиально-векторного переносчика. Области внутри зеленых контуров дают исключенную область масс. Области $\Omega h^2 \geq 0.12$ отвечают значениям параметров, исключенным по астрофизическим соображениям (в этих областях для минимальных эффективных моделей взаимодействия темной и обычной материи плотность реликтовой ТМ превышает наблюдаемую).

Поиск новых хиггсовских состояний

Выполнен экспериментальный поиск легкого псевдоскалярного состояния в распадах на пару мюонов и два b-кварка в конечном. Анализ части данных Run 2 ($L_{\text{int}} = 35.9 \text{ фбн}^{-1}$) не подтвердил выводы, сделанные на основании анализа данных RUN1 о наблюдении пика в спектре пар мюонов в районе $28 \text{ ГэВ}/c^2$ с локальной статистической значимостью до 4.2σ . Для окончательного вывода необходим анализ всей статистики Run 2 [4]. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ в области масс от $20 \text{ ГэВ}/c^2$ до половины значения массы наблюдаемого бозона Хиггса ($125.09 \text{ ГэВ}/c^2$) установлен верхний предел (95% С.Л.) на сечения этих процессов $\sigma_h = 5\text{--}36 \text{ фбн}$. Соответствующая вероятность распада в данном канале ограничена значением $(1\text{--}6) \times 10^{-4}$. Проведена полная обработка набора данных 2017 года и выполнено сравнение событий с результатом обработкой группы НИИЯФ МГУ, дополнена нота по анализу AN-21-089 новыми разделами, описывающими отбор мюонов, использование фита димюонных вершин и фильтра на плохие глобальные мюоны.

Поиск процессов с нарушение лептонного числа

Проведен обобщающий анализ результатов и перспектив поиска сигналов многомерной гравитации в условиях ограниченной энергии LHC (14 ТэВ) [5]. Продемонстрировано, что LHC достиг порога своих возможностей в наблюдении возможных сигналов квазиклассических многомерных черных дыр RS- и ADD-типа. Дальнейший набор данных в периоды Run 3 LHC и HL-LHC ничего особенно не изменит в этой ситуации, а следующее интересное окно возможностей откроется только в эру FCC, если этот проект будет реализован в будущем. Однако существует и по-прежнему остается окно возможностей для так называемых «квантовых» черных дыр – состояний с малой энтропией (массой), рождающихся около порога многомерной гравитации. Для них характерной экспериментальной сигнатурой являются распады в двухчастичное состояние с нарушением аромата ($e\mu/\tau\mu$). Полученные ограничения на минимально допустимые значения массы квантовых черных дыр составляют от 3.6 до 5.6 ТэВ/ c^2 , в зависимости от модели и числа дополнительных измерений n .

Проверка Стандартной модели процессах рождения пар лептонов и в струях

Измерены дифференциальное сечение $d\sigma/dm$ процесса Дрелла–Яна в области значений инвариантной массы пары лептонов от 15 до 3000 ГэВ/ c^2 при энергии взаимодействия протонов $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Величина измеренных сечений находится в хорошем согласии с предсказаниями SM (NNLO КХД и NLO ЭС) во всей области инвариантных масс. Эти результаты были подтверждены независимыми измерениями в канале с парой электронов и в канале с парой мюонов, которые также совпадают. Для анализа статистики на данных Монте-Карло продолжено изучение индуцированного фотонами фона в событиях рождения пар мюонов. Проведена оценка величины фона, исследована точность расчетов сечений в зависимости от использованной статистики.

Измерена асимметрия “вперед-назад” как функция инвариантной массы пары лептонов [6]. Кроме того, на полной статистике RUN2 продолжен анализ по измерению угловых коэффициентов в зависимости от массы пары, ее быстроты и поперечного импульса. Впервые получены предварительные данные по измерению угловых коэффициентов как в области пика Z^0 , так и за его пределами [7].

Рассчитаны однопетлевые электрослабые и КХД радиационные поправки в процессе Дрелла–Яна при сверхвысоких энергиях и инвариантных массах лептонной пары. Проведен подробный численный анализ эффектов радиационных поправок к наблюдаемым сечениям и асимметрии вперед-назад для эксперимента CMS в режиме Run 3/HL-LHC [8–15].

Разработана новая техника расчета вклада в сечение четырехфермионного процесса диаграмм двухбозонного обмена с одной и двумя комплексными массами. Метод применен для учета радиационных поправок к дифференциальному (по инвариантной массе) и дважды дифференциальному (по инвариантной массе и скорости пары) сечениям, а также асимметрии “вперед-назад” процесса Дрелл–Яна в эксперименте CMS в режиме Run 3/HL-LHC [8–15].

Оценены однопетлевые электрослабые радиационные поправки к процессу рождения дилептонов в канале фотонного слияния для экспериментальной программы LHC по изучению процесса Дрелла–Яна. Прделан подробный численный анализ эффектов электрослабых радиационных поправок к наблюдаемым величинам (сечениям и асимметрии вперед-назад) в широкой кинематической области для эксперимента CMS LHC в режиме Run 3/HL-LHC [8–15].

Выполнено измерение множественности заряженных частиц в струях [16–20]. Разработан метод измерения доли глюонных струй в выборке струй, в котором используются Монте-Карло (МК) кварк-глюонные (q/g) шаблоны – МК распределения q/g -струй по дискриминатору правдоподобия. Выполнены измерения фракции g -струй в полулептонном $t\bar{b}ar$ -канале, в канале с двумя струями (“dijet”), и в канале инклюзивных струй (рис. 7). Результаты измерения глюонной фракции показывают сильное подавление g -струй относительно теоретических и

модельных предсказаний. На основе измеренной доли g-струй предложен способ мотивированной данными коррекции МК q/g-шаблонов.

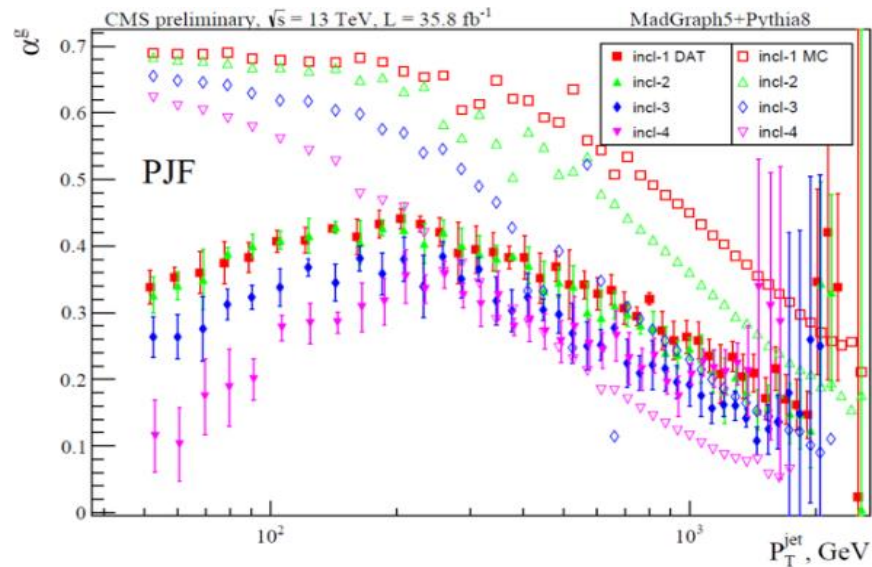


Рис. 7. Измеренные (закрашенные символы) и рассчитанные (пустые символы) доли g-струй в инклюзивных струях на данных RUN2 (2016). Рассмотрены четыре кинематических диапазона скорости струй: $[0, 0.5]$ (“incl-1”), $[0.5, 1]$ (“incl-2”), $[1, 1.5]$ (“incl-3”), $[1.5, 2]$ (“incl-4”).

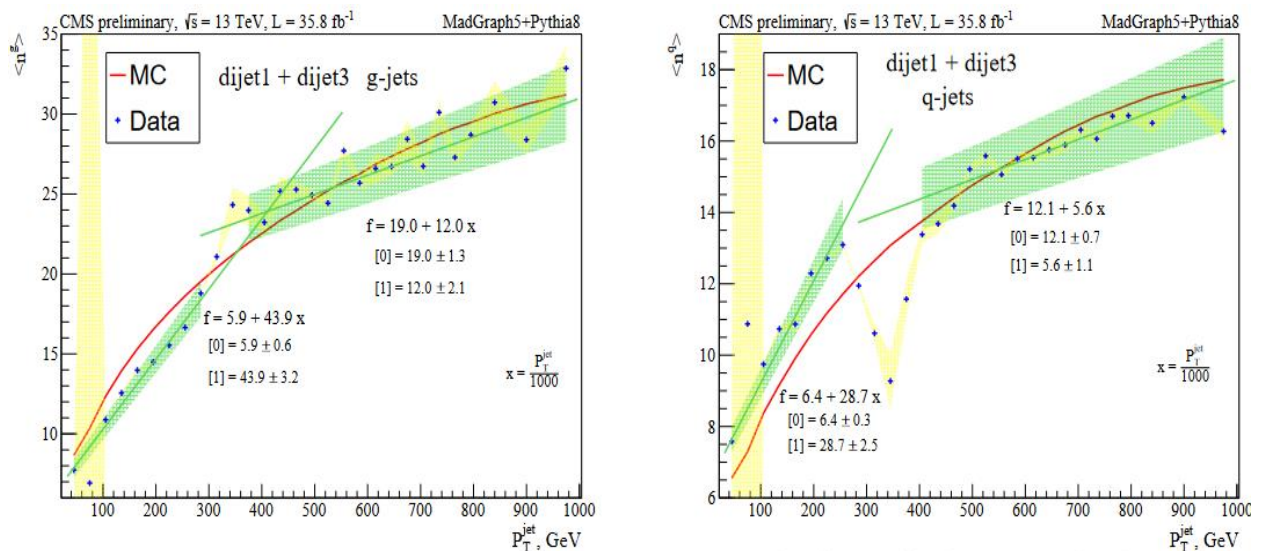


Рис. 8. Средняя множественность заряженных частиц в g-струях (слева) и в q-струях (справа), полученные на основе измеренных долей g-струй в выборках канала “dijet” на данных RUN2.

Разработана методика измерения характеристик q/g-струй, в основе которой лежит измерение доли g-струй в выборке струй. Эта методика применена для измерения средней множественности заряженных частиц в q/g-струях для данных CMS периодов RUN1 и RUN2 в канале “dijet”. На рисунке 8 показана средняя множественность заряженных частиц в q/g-струях. Неустойчивое поведение в области поперечных импульсов 300 ГэВ связано с малой разностью глюонных фракций между выборками “dijet-1” и “dijet-3”. В остальных областях наблюдается относительно гладкое поведение средней множественности заряженных частиц как функции поперечного импульса струи.

Создание алгоритмов реконструкции физических объектов и развитие алгоритмов реконструкции трек-сегментов в CSC

На данных RUN2 с измерениями параметров космических мюонов и на результатах моделирования проведена оптимизация алгоритмов реконструкции и отбора мюонов высоких энергий, исследованы свойства мюонов с большими поперечными импульсами p_T [21]. Поскольку физика этих мюонов отличается от их аналогов с меньшим импульсом, впервые были представлены, полученные на CMS специальные исследования эффективности и импульсного разрешения мюонов с высокими импульсами. В результате исследований продемонстрированы высокие эффективности идентификации и реконструкции (рис. 9) мюонов, высокая точность реконструкции и низкая ошибка неправильного определения знака заряда (рис. 10).

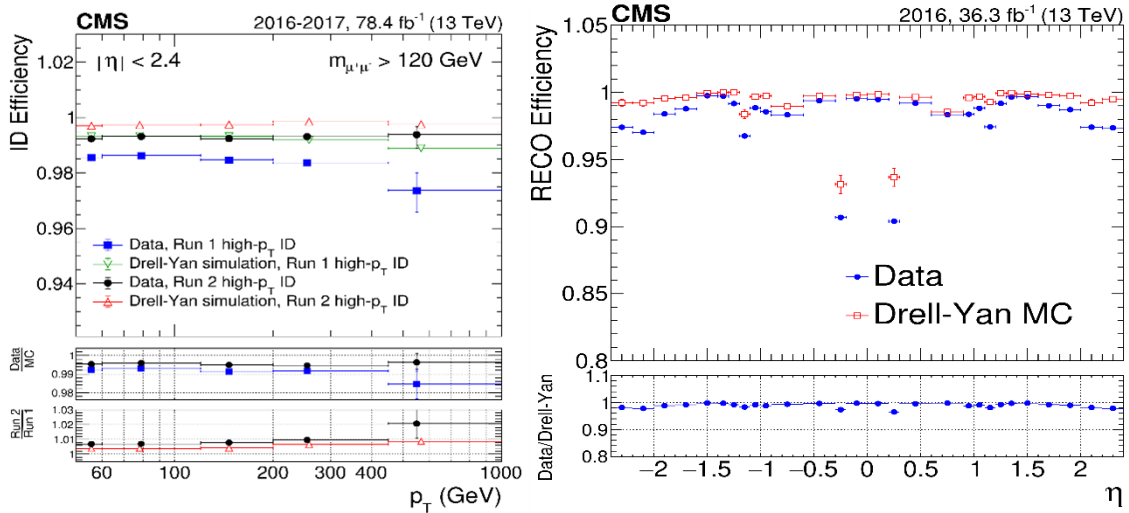


Рис. 9. Эффективность (слева) идентификации и (справа) реконструкции мюонов как функция p_T [21]. Приведены мюоны из выборки данных по рождению пар мюонов с инвариантной массой больше 120 ГэВ/с². Выполнено сравнение результатов на данных RUN1/RUN2 и моделирования.

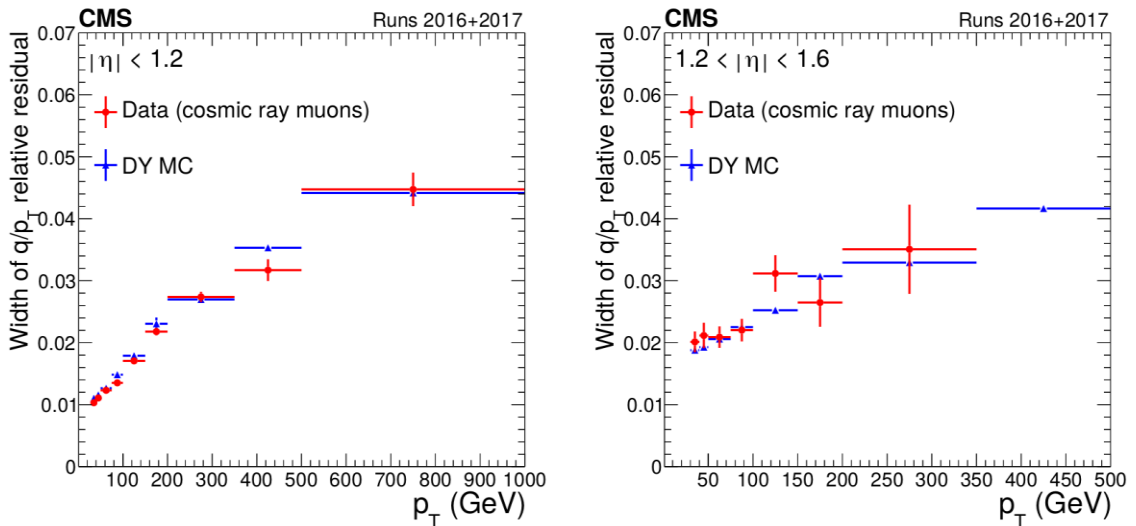


Рис. 10. Ширина гауссовского распределения импульсного разрешения в зависимости от поперечного импульса космических мюонов в данных 2016–2017 гг. [21]. Использовались три различных набора данных, полученных как в протон-протонными столкновениях, так и в сеансах по набору данных космических мюонов.

Для улучшения точности реконструкции пространственной координаты в CSC был разработан новый алгоритм построения трек-сегментов с использованием «вэйвлет-анализа». Новый алгоритм позволяет разделять до 4-х перекрывающихся сигналов на стрипах с высокой точностью (рис. 11). Для анализа использованы данные, полученные с помощью Монте–Карло моделирования. Как видно из рисунка, координата одного из сигналов с наименьшей амплитудой совпадает с исходной координатой мюона.

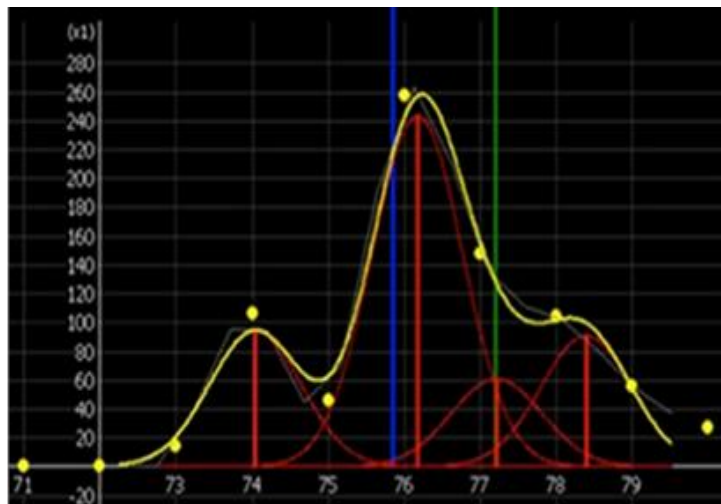


Рис. 11. Пример реконструкции четырех перекрывающихся сигналов в одном слое CSC (значение АЦП в зависимости от номера стрипа). Зеленая линия – истинная координата мюона; желтая – распределение, размытое шумовыми сигналами; синяя – координата, восстановленная стандартным алгоритмом; красная – четыре перекрывающихся катодных сигнала, распознанных предложенным алгоритмом.

Для CSC камер ME1/1, имеющих отличную от остальных CSC конструкцию, была проведена настройка алгоритма реконструкции событий и трек-сегментов [22]. Использование новых алгоритмов привело к более точной процедуре реконструкции в мюонной системе CMS и в камерах ME1/1 в частности (рис. 12). Авторский программный код внедрен в официальное программное обеспечение CMS и будет использоваться по умолчанию начиная с набора данных на LHC в Run 3.

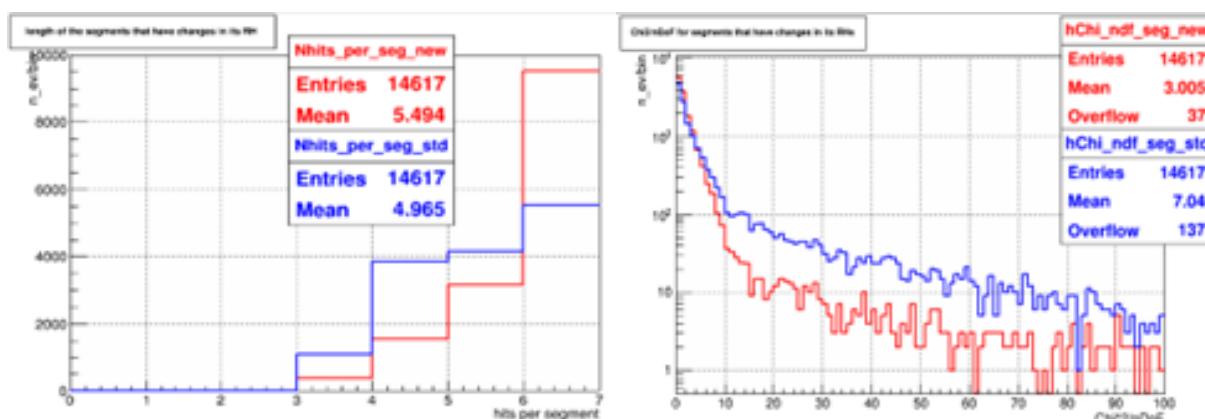


Рис. 12. Распределение событий в камерах станции ME1/1 в зависимости от радиальной координаты R. Новый алгоритм (красным) устраняет неэффективность реконструкции событий в зонах R= 115см и R=150см, характерную для стандартного алгоритма (синим).

С той же целью был разработан более быстрый алгоритм разделения двух перекрывающихся сигналов. Он показал ту же точность, что и алгоритм с использованием «вэйвлет-анализа», но при этом скорость нахождения координат оказалась на порядок выше. Как видно на рис. 12, трек-сегменты которые содержали хиты восстановленные из перекрывающихся сигналов стали длиннее, а их χ^2 уменьшился, при использовании предложенного подхода, что должно привести к более точной реконструкции глобальной траектории мюона.

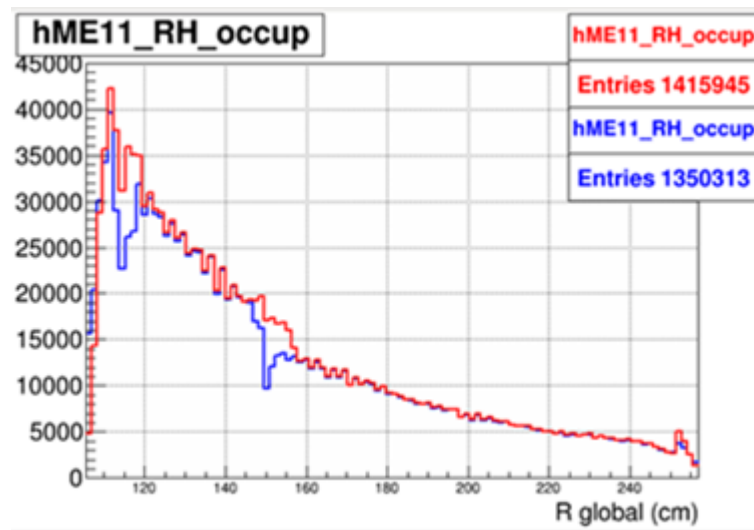


Рис. 13. Распределение событий в камерах станции ME1/1 в зависимости от радиальной координаты R. Новый алгоритм (красным) устраняет неэффективность реконструкции событий в зонах $R = 115\text{см}$ и $R = 150\text{см}$, характерную для стандартного алгоритма (синим).

Модернизация детекторных систем CMS

Начиная с 2010 г. ОИЯИ принимает участие в модернизации эксперимента CMS, которая развивается в два этапа:

- В период набора экспериментальных данных «Фаза–1», который заканчивается в 2025 году, модернизация CMS нацелена на обеспечение эффективной работы установки в проектном режиме при работе LHC с полной энергией до $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $1\text{--}2 \times 10^{34} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Первая фаза модернизации CMS проведена во время двух длительных технических перерывов в работе LHC в 2013–2015 гг. (LS1) и в 2019–2022 гг. (LS2).
- Период набора экспериментальных данных в режиме высокой светимости HL–LHC «Фаза–2» продлится с 2027 года по 2038 год. Интегральная светимость LHC будет увеличена на порядок с 300фбн^{-1} до 3000фбн^{-1} . Начиная с 2025 года по 2027 год, запланирована длительная остановка (LS3) для модернизации LHC. Основной задачей модернизации установки CMS в этот период является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях HL–LHC.

В период 2020–2023 гг. группа ОИЯИ приняла активное участие в завершении Фазы–1 модернизации адронного калориметра HCAL, а также в Фазе–2 модернизации мюонной системы CMS и создании калориметра высокой гранулярности (HGCal). Работы по модернизации выполнялись в рамках взятых ОИЯИ обязательств, в соответствии с Меморандумом о взаимопонимании по созданию детектора CMS между ЦЕРН и ОИЯИ и соответствующих приложений, а также Меморандумом о взаимопонимании по участию ОИЯИ в проекте HGCal CMS.

Модернизация детекторов торцевой мюонной системы ME1/1

Основной задачей модернизации торцевой мюонной системы CMS в период LS2 являлась замена электроники считывания CSC внутренних мюонных станций ME1/1. Специалистами

ОИЯИ разработаны и изготовлены 120 новых плат распределения и контроля низкого напряжения для CSC камер (LVDB-5). Для настройки и контроля параметров плат LVDB5(7), разработан и изготовлен автоматизированный стенд.

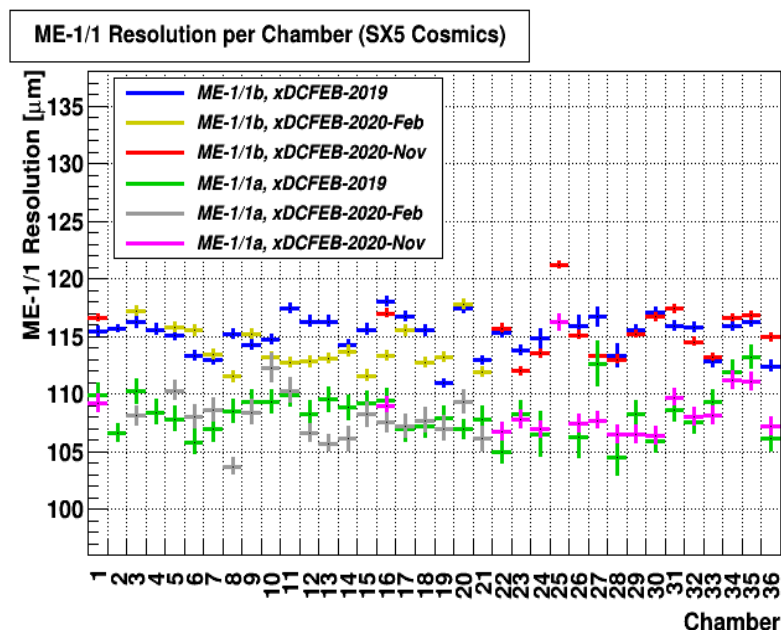


Рис. 14. Пространственное разрешение модернизированных ME1/1 CSC в космических лучах.

Были демонтированы 180 камер, перевезены в наземную лабораторию, оснащены новой электроникой, протестированы и затем вновь установлены в экспериментальную установку. Дополнительно на 72 камерах ME1/1 CSC были заменены системы охлаждения камерной электроники. Испытания собранных камер проводились в космических лучах. Результаты тестов камер ME1/1 показаны на рис. 14, где представлено их пространственное разрешение. Результаты, полученные в 2020 году, хорошо согласуются с результатами 2019 года.

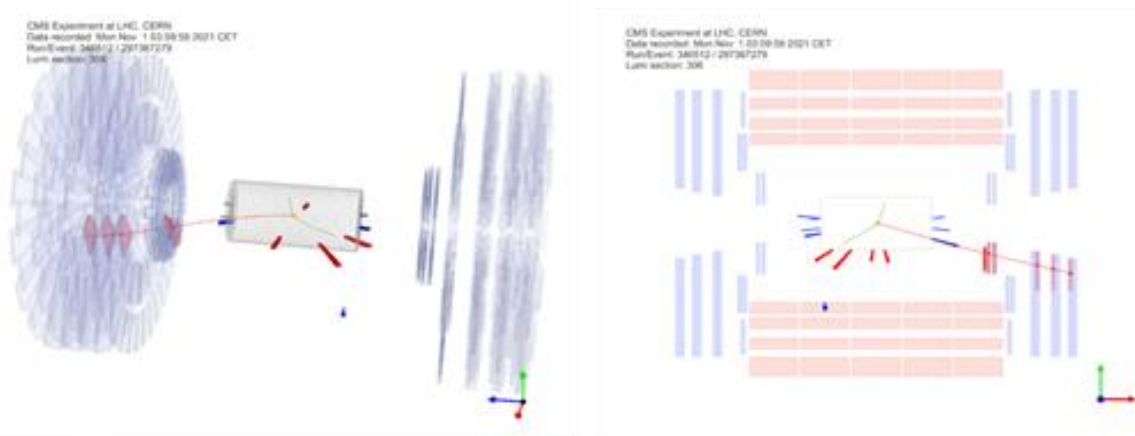


Рис. 15. Дисплей события pp-столкновения на CMS. Мюон зарегистрирован станциями торцевой мюонной системы.

В 2021 торцевые мюонные станции CMS начали работу в тесте CRAFT и первых протон-протонных столкновениях на БАК. На рисунке 15 показаны 2 проекции события в точке сведения пучков CMS, где мюон регистрируется 4 торцевыми мюонными станциями, включая ME1/1 и недавно установленную станцию GE1/1.

CSC в период набора данных CMS на pp-взаимодействиях в 2022 г.

Проведен анализ экспериментальных данных RUN3 в 2022 г. Продемонстрирована стабильная и эффективная работа катодно-стриповых камер (CSC) торцевой части установки CMS. Пространственное разрешение CSC (рис. 16), полученное на протон-протонных столкновениях, хорошо согласуется с данными предыдущего периода набора данных и свидетельствуют о стабильности работы CSC. В начальный период набора данных RUN3 (2022BCD) газовая система установки CMS работала в режиме повышенного содержания аргона в смеси (~41% против 40% по номиналу), что привело к улучшению пространственного разрешения для всех станций. Следует заключить, что данные 2022E и 2018D хорошо согласуются. На рисунке 17 представлено событие распада $Z \rightarrow \mu\mu$, зарегистрированное четырьмя станциями торцевой мюонной системы CMS.

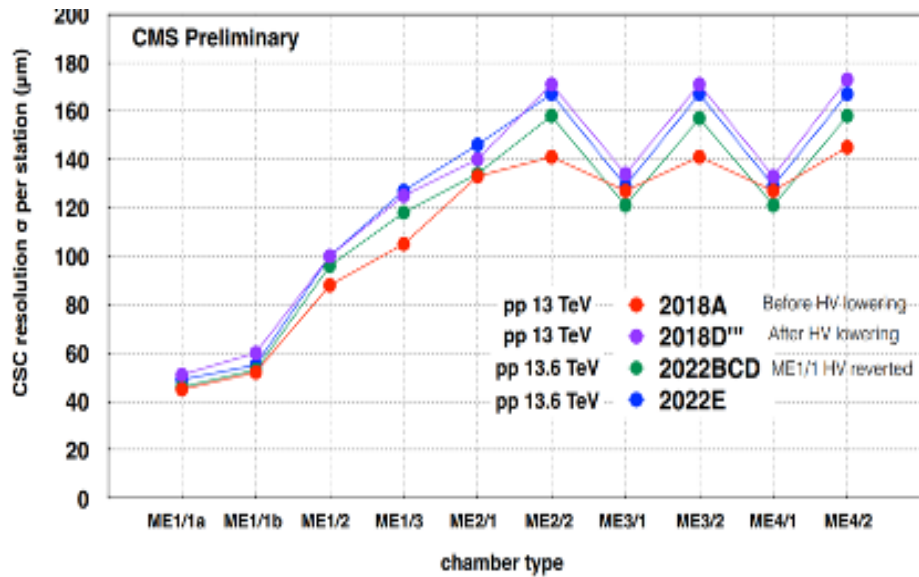


Рис. 16. Пространственное разрешение CSC различных мюонных станций (данные RUN3, 2022 г.)

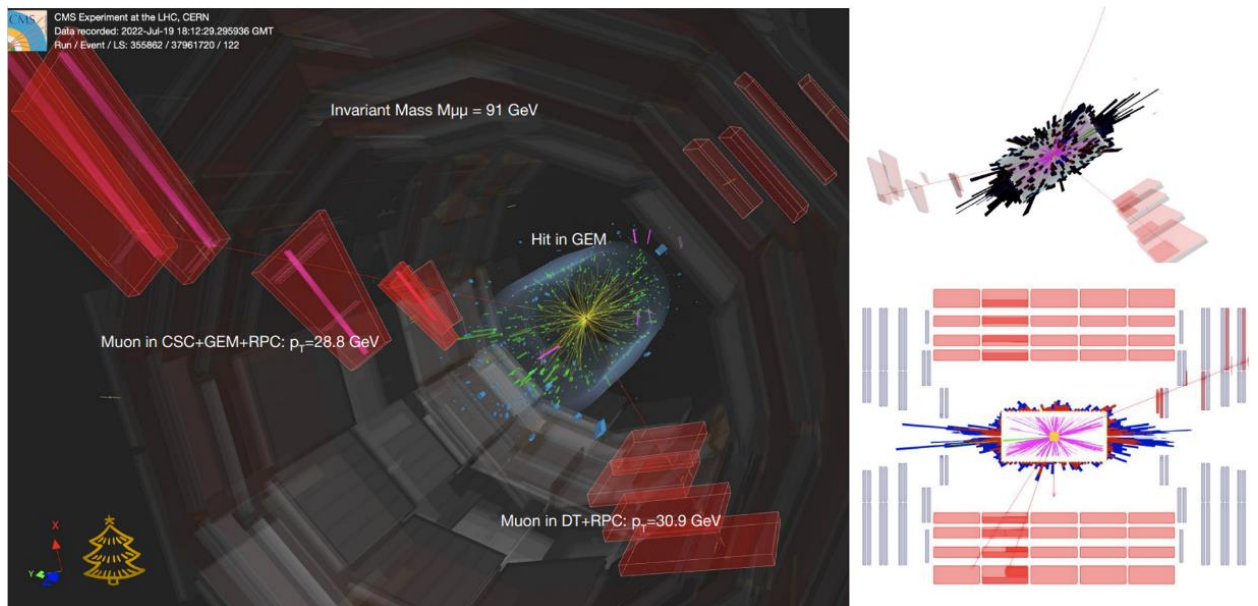


Рис. 17. Событие распада $Z \rightarrow \mu\mu$, зарегистрированное четырьмя станциями торцевой мюонной системы CMS.

В рамках обязательств ОИЯИ по 2 фазе модернизации CMS выполнена работа по интеграции кабелей и сервисных соединений детекторов ME1/1 в общую структуру торцевой части CMS. Сделана концептуальная проработка модификации соединительной панели ME1/1 (ME1/1 ПП) необходимая для того, чтобы освободить место для прокладки кабелей и сервисов нового калориметра HGCal. Создан полномасштабный прототип ME1/1 PP, представляющий собой сложное устройство, которое наряду с разъемами кабелей и сервисных соединений двух детекторов CSC включает в себя 2-е активные интерфейсные платы (PIB) для обмена информацией с электронными модулями в периферийных крейтах (рисунок 18). В настоящий момент разрабатываются чертежи для изготовления 36 ПП, которые будут установлены в CMS в период LS3.

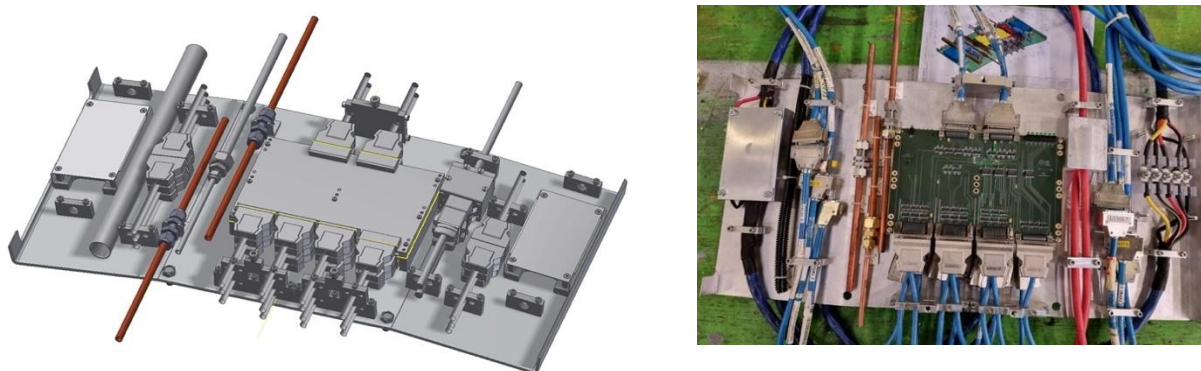


Рис. 18. Соединительная панель ME1/1 (слева – 3Д модель, справа – прототип).

Исследования характеристик CSC на GIF++

Группа сотрудников ОИЯИ принимает активное участие в подготовке и проведении исследований характеристик катодно-стриповых камер (КСК) на установке GIF++ в ЦЕРНе. Испытания проводятся на выведенном пучке мюонов H4 ускорителя SPS с гамма-источником GIF++ Cs^{-137} активностью 12 ТБк. с использованием коэффициентов поглощения от 4.6 до 100. Исследования нацелены на изучение характеристик детекторов при работе с газовыми смесями с различным содержанием CF_4 , а также изучение эффекта «старения» CSC и особенности работы камер в условиях высокого фона. Результаты исследований показывают, что пространственное разрешение полномасштабной КСК ME1/1 стабильно вплоть до величины накопленного заряда 706 мКл на сантиметр длины анодной проволоки (рисунок 19). Величина данного заряда в 3 раза выше, чем ожидается в период эксплуатации HL-LHC.

Физики ОИЯИ участвуют в экспериментах по изучению характеристик КСК и эффектов старения детекторов при работе с новыми газовыми смесями, которые планируется провести как с лабораторными радиоактивными источниками, так и на установке GIF++. Используемый в данный момент в рабочей газовой смеси CSC газ CF_4 является представителем класса парниковых газов-флюорокарбонов с очень высоким потенциалом глобального потепления равным 7390. В ближайшее время использование подобных газов будет резко ограничено. В связи с этим в дополнение к проводимым на установке GIF++ тестам CSC с использованием пониженного содержания CF_4 в смеси было принято решение начать исследования новых газовых смесей, исключая парниковые газы в своем составе. Сотрудники ОИЯИ приняли участие в проектировании и создании газового смесительного стенда для изучения работы камер с новыми экологически чистыми газовыми смесями (рисунок 20). Также для проведения этих работ группой сотрудников ОИЯИ были разработаны и изготовлены в ЦЕРНе шесть двухслойных мини-камер (CSC) с малой чувствительной областью $30 \times 30 \text{ см}^2$, которые будут использоваться для изучения эффектов старения и исследования работы CSC с новыми газовыми смесями.

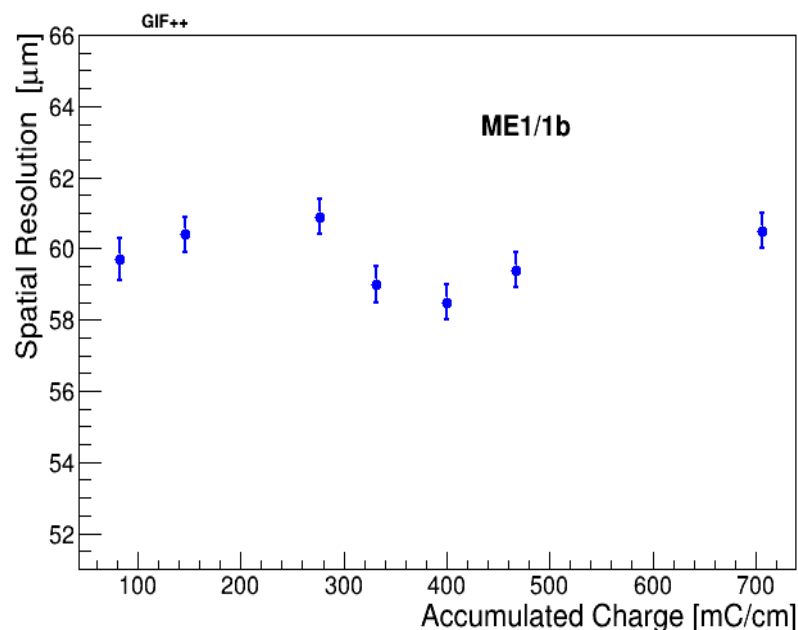


Рис. 19. Пространственное разрешение ME1/1 CSC в зависимости от накопленного заряда



Рис. 20. Газосмесительный для mini-CSC (слева); производство камер мини-CSC (справа).

Модернизации адронной калориметрии установки CMS в период длительной остановки LHC (LS2).

В течение долговременной технической остановки LS2 в 2019–2022 гг. группой ОИЯИ был проведен цикл работ, направленный на модернизацию систем регистрирующей электроники адронного калориметра установки CMS и ввод в эксплуатацию модернизированных систем. Модернизация системы регистрирующей электроники центрального адронного калориметра включала в себя как замену многоканального гибридного фотодетектора (HPD) на новый кремниевый фотоумножитель (SiPM), а также и замену всех элементов соответствующей системы.

Группа из ОИЯИ создала стенд для долговременного тестирования системы регистрирующей электроники с использованием SiPM для адронного калориметра CMS. Тестирование модулей адронного калориметра проводилось на основе анализа одно-двух-

фотоэлектронных зарядовых спектров и анализа спектра от импульса калиброванного источника света.

После подготовительных работ, проводимых в 2018–2019 годах, новая система регистрирующей электроники была установлена на детектор CMS. Были заменены 144 считывающих модуля, установлена новая система подачи напряжения смещения на SiPM, 36 калибровочных модулей и 72 модуля контроля и управления регистрирующей электроникой.

В ходе работ по введению в эксплуатацию центральных адронных калориметров проводилось изучение амплитудных и пьедестальных характеристик новой системы регистрирующей электроники, калибровка каналов электроники, регистрация и измерение уровня свето-выхода сцинтилляторов при облучении высокоинтенсивным радиоактивным источником Со60.

Выполнена работа по переходу системы регистрирующей электроники передних адронных калориметров с одномодового на мультимодовое считывание. Выполнен перенос источников питания передних адронных калориметров и сопутствующей инфраструктуры (системы питания, контроля и безопасности) из зоны с высоким радиационным фоном (до 0.1 МЗв к 2026 году) в зону с пониженным радиационным фоном (до 5 Зв к 2026 году). Разработан проект и проведена модернизация стоек источников питания для улучшения воздушного охлаждения аппаратуры.

В течение первого года набора данных сеанса RUN3 (2022 г.), осуществлялась методическая и техническая поддержка стабильной работы адронных калориметров, включая центральные, торцевые, внешние и передние калориметры. После запуска ускорителя LHC было произведено выравнивание амплитудных и временных сигналов модернизированной считывающей электроники центральных адронных калориметров с использованием данных с протон-протон столкновений. В течение RUN3 производилась еженедельная сертификация данных, полученных в результате протон-протонных столкновений, для компонентов HCAL. На данный момент отобрано 37.6 фбн–1 удовлетворяющих условиям физической задачи, потери в адронной калориметрии не превосходят 3.6% от набранных данных. В течение сеанса 2022 года обнаружены перебои в работе нескольких модулей управления и контроля адронного калориметра: 5 модулей из 108 показывали нестабильную работу на основной линии коммуникации и были переключены на соответствующие запасные линии связи. Замена неисправных модулей произведена в период зимней технической остановки 2022–2023 гг. В процессе замены неисправных модулей и ввода их в эксплуатацию, была проведена проверка обеих линий коммуникаций всех 108 модулей управления и контроля, установленных на детекторе. Обнаружены перебои в работе 8 запасных линий коммуникации (не использовались в работе детектора с момента установки в 2019 году) для соответствующих восьми модулей. Данные модули были также заменены. Проводится изучение причин отказов изъятых модулей.

Кроме того, завершена установка модифицированных источников низковольтного питания для торцевых адронных калориметров CMS. Установлены контуры защиты по напряжению для источников низковольтного питания калориметров. В рамках программы подготовки к замене крейтов считывания адронных калориметров во время технической остановки LS3 (2026–2028 гг.) продолжается работа по измерению температуры крейтов при различных нагрузках и различных потоках водяного охлаждения, а также в различных модификациях механики крейта и элементов охлаждения. Начато проектирование модернизированных контуров охлаждения крейтов. Разрабатывается программа замены крейтов на детекторе в течение длинной технической остановки LS3. Также, учитывая полномасштабные, в том числе механические, работы по модернизации детекторов CMS и замене соответствующего оборудования в течение LS3, принято решение демонтировать все модули считывания из центральных адронных калориметров. Помимо перемещения модулей калориметра в безопасное место (в спец. лабораторию) на время работ LS3, предоставляется возможность модернизации регистрирующей электроники центральных калориметров для работы в условиях жесткого радиационного фона и возрастающей светимости ускорителя. Данный проект, как и проект промежуточной модернизации адронного калориметра, находится в стадии разработки.

Создание торцевых калориметров высокой гранулярности HGCal

Калориметр с высокой гранулярностью HGCal создается в рамках глубокой модернизации торцевой части адронного калориметра (HCAL) установки CMS и позволит существенно увеличить пространственную и временную разрешающую способность детектора в условиях высокой светимости LHC. Основные требования к модернизации существующего калориметра сформулированы в Проекте эксперимента CMS по созданию HGCal и проекте ОИЯИ по модернизации детекторных систем CMS.

Калориметр состоит из последовательно расположенных слоев абсорбера, в зазоры между которыми помещены кассеты с активными элементами детектора. Подсистема конструктивно делится на электромагнитную (CE-E) и адронную части (CE-H).

Продольная структура (вдоль направления пучка) включает 47 слоев (рис. 21). Первые 26 слоев образуют электромагнитную секцию калориметра (CE-E). Следующие 21 слой образуют переднюю часть адронной секции (CE-H): первые 7 слоев внутренней части CE-H аналогичны слоям CE-E, а последние 14 в области малого радиуса (область сильной радиационной нагрузки) включают в себя как кремниевые модули, так и сцинтилляторыные ячейки с регистрацией света с помощью SiPM. За счет использования двух технологий изготовления активных элементов – на основе полупроводников (кремневые сенсоры в CE-H и внутренней части CE-H) и сцинтилляторов (в CE-H) – достигается оптимизация стоимости HGCal при сохранении требуемых характеристик. Весь калориметр находится в теплоизолированном объеме, который будет охлаждаться двухфазной газовой системой (CO₂) при температуре -30°C .

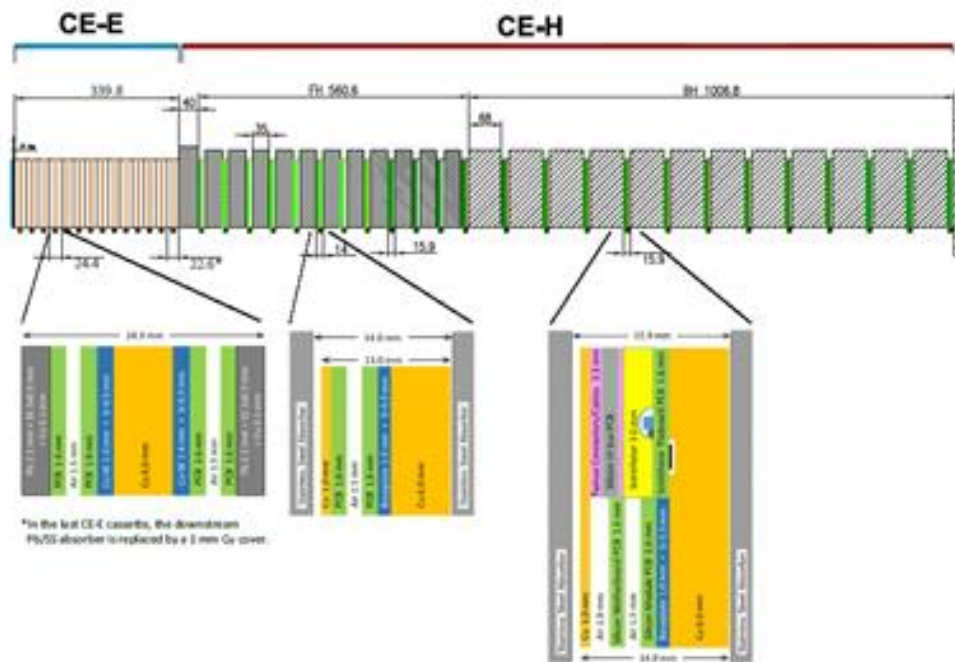


Рис. 21. Продольная структура HGCal с поперечными сечениями кассет трех типов: кассет CE-E, кассет кремниевых сенсоров CE-H и кассет смешанного типа кремния/сцинтиллятора CE-H.

Обязательства по созданию торцевых калориметров высокой гранулярности HGCal установки CMS включают создание охлаждающих панелей HGCal, создание стенда для тестирования кассет, проведение тестирования кассет, закупку кремневых сенсоров и SiPM, сборку и ввод в эксплуатацию HGCal.

Создание экспериментального комплекса для испытаний кассет HGCal

Работоспособность и характеристики собранных кассет CE-E и CE-H требуется проверить в охлажденном состоянии до -35°C . Подготовленные для тестирования кассеты планируется размещать в теплоизолированной камере между двумя сцинтилляционными плоскостями, детектирующими космические частицы, проходящие через весь набор детекторов. В сборочной зоне требуется разместить две таких камеры. Планируется проводить «холодные» испытания детекторов в одной комнате и параллельно проводить работы по извлечению исследованных кассет и подготовке к испытаниям новой партии кассет в другой камере. Такой режим обеспечит непрерывный процесс испытаний.

Охлаждение кассет планируется осуществлять по рабочей схеме с использованием перфторогексана C_6F_4 в качестве охлаждающей жидкости вместо CO_2 . Внешний вид и расположение холодильных камер показаны на рисунке 22.

В рамках выполнения обязательств ОИЯИ были сконструированы и произведены 2 низкотемпературные комнаты для системы тестирования кремневых и сцинтилляционных активных элементов HGCal. Поставка в ЦЕРН и монтаж камеры ожидается во второй половине 2023 г. Система тестирования, представленная на рисунке 23 состоит из низкотемпературной камеры, стойки для размещения нескольких кассет различного типа внутри камеры и триггерных сцинтилляционных пластин, расположенных сверху и снизу камеры. Слева на рисунке показано размещение кассеты внутри стойки.

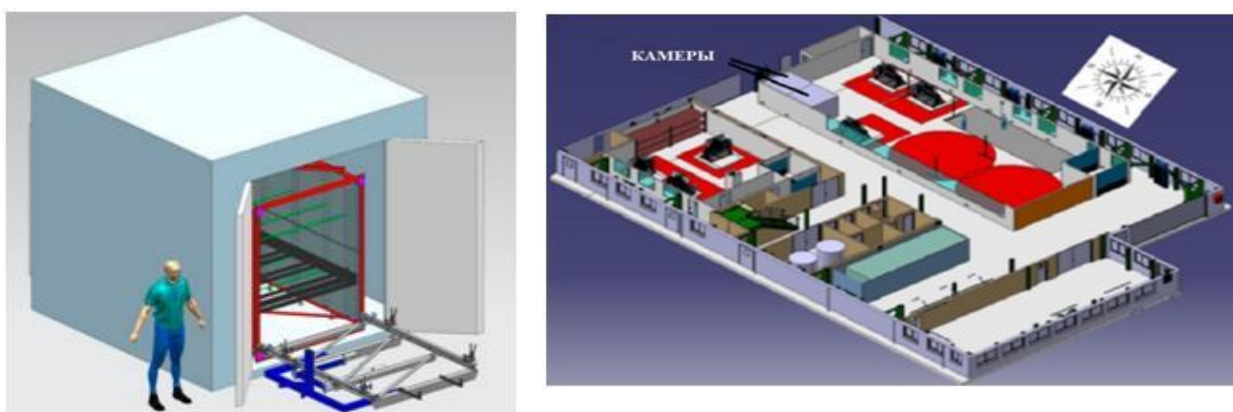


Рис. 22. Схематический вид холодильных камеры и расположение холодильных камер в сборочной зоне HGCal в здании SxA5.

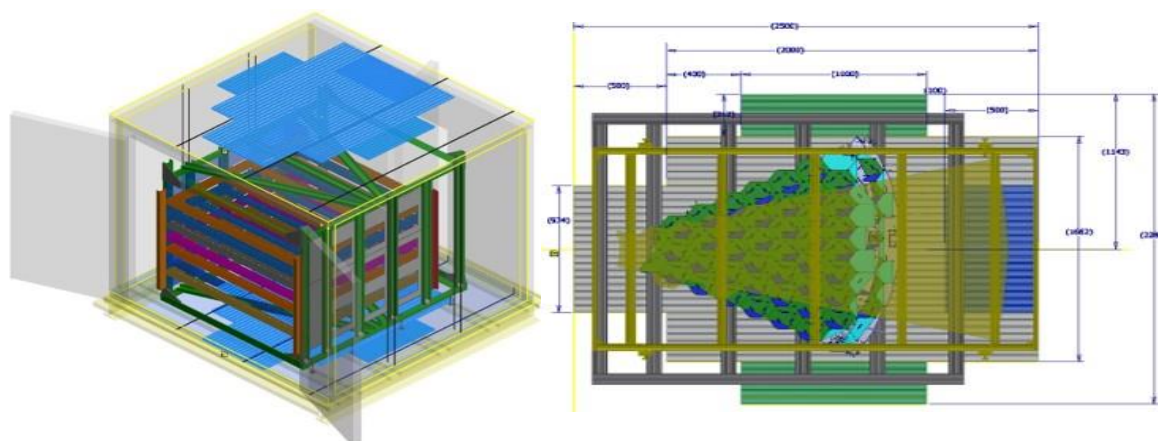


Рис. 23. Система тестирования для проведения испытаний кассет HGCal типа CE-E и CE-H.

Моделирование испытательного стенда кассет HGCal с космическими мюонами в холодной комнате

Для уточнения и оптимизации геометрических размеров сцинтилляционных пластин выполнено моделирование, предложенной конфигурация сцинтилляционного триггера. Подготовленные для тестирования кассеты планируется размещать в теплоизолированной камере между двумя сцинтилляционными плоскостями, детектирующими космические частицы, проходящие через весь набор детекторов. Кассеты образованы шестиугольными датчиками Si (пластины размером 8 дюймов), которые, в свою очередь, подразделяются на 432 шестиугольных ячейки размером 0.52 см^2 . В дальнейшем также была оценена возможность размещения триггерных плоскостей вне камеры и необходимые изменения геометрии триггерных плоскостей для этого варианта.

Геометрия испытательного стенда была реализована в автономном коде моделирования на основе пакета GEANT4, который включает описание холодильной камеры, триггерных плоскостей и кассетных стоек. Чертежи кассеты представлены на Рисунке 24.

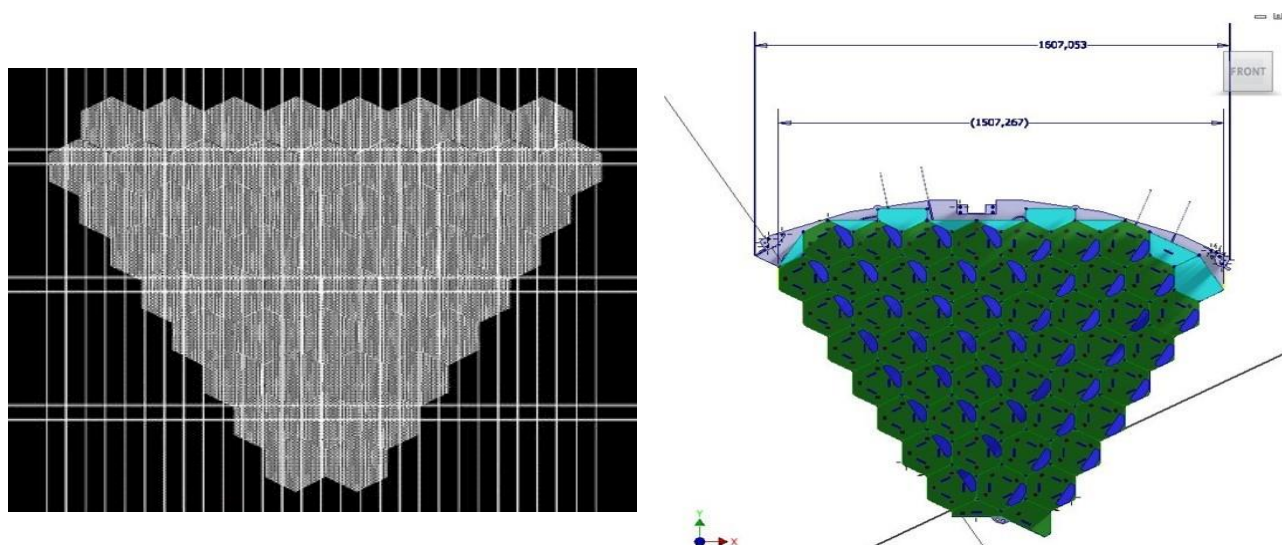


Рис. 24. Упрощенная модель кассеты GEANT4 (слева) и реалистичный рисунок кассеты (справа).

Реалистичные распределения космических мюонов по импульсам и распределения по полярным углам были смоделированы с использованием функции параметризации Рейна, используя для нормализации принятое в CMS значение для вертикальных мюонов с импульсом 100 ГэВ. Интеграл потока мюонов по всем импульсам и углам с такой функцией дает 0.986 или примерно $1/\text{см}^2/\text{мин}$. Количество мюонов, проходящих через триггерные плоскости (площадью приблизительно 70000 см^2) в течение 2 недель, составляет $1.4 \cdot 10^9$.

Распределение заполняемости ячеек для самого широкого ряда кассет для различных геометрий триггерных плоскостей показано на рисунке 26, верхний ряд. На дальних краях кассеты можно увидеть меньшее количество срабатываний.

После надлежащей нормализации самая низкая статистика за две недели накопления данных составляет 2350 мюонов на ячейку при ширине триггерной плоскости 150 см, 4250 мюонов при ширине 180 см и 4700 мюонов при ширине 190 см. Если требуется, чтобы по крайней мере 8 активных слоев (из 12) сработали от одного мюона, соответствующая статистика будет равна 2000 мюонов на ячейку при ширине триггерной плоскости 150 см, 3300 мюонов при ширине 180 см и 3570 мюонов при ширине 190 см. Наш вывод заключается в том, что ширину триггерной плоскости следует выбирать в диапазоне 180–190 см в случае размещения триггерных плоскостей внутри комнаты.

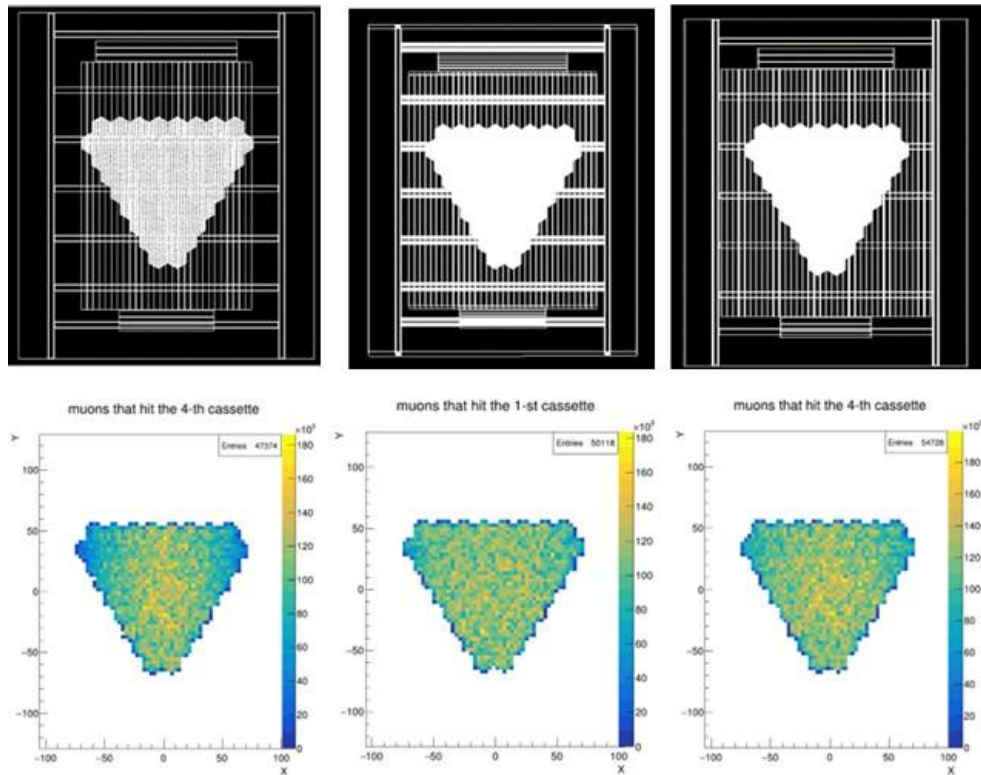


Рис.25. Геометрия триггерных плоскостей (верхний ряд) и двумерные распределения мюонов (нижний ряд) для различной ширины триггерной плоскости: 150 см (левые графики), 180 см (центральные графики) и 190 см (правые графики).

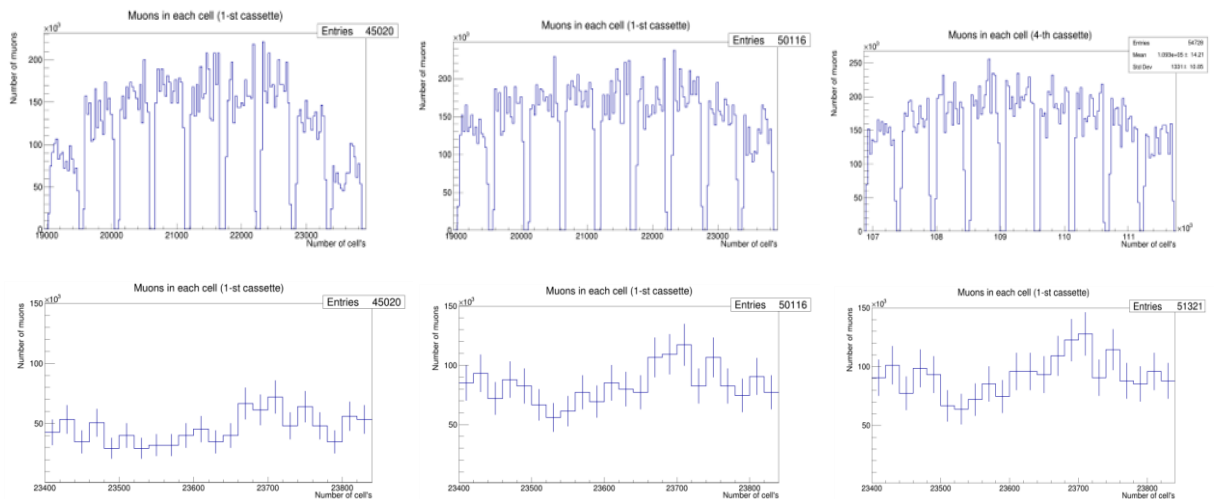


Рис. 26. Заполняемость ячеек для самого широкого ряда кассет (верхний ряд рисунка) и увеличенные распределения (нижний ряд) для наихудших областей, для размеров триггерных плоскостей 150 см (левые участки), 180 см (центральные участки) и 190 см (правые участки).

В целях удобства доступа к триггерным плоскостям, а также исключения негативных эффектов многократных циклов охлаждения и нагревания, воздействующих на оптические волокна сбора сигнала со сцинтилляторов триггерных плоскостей, также была рассмотрена возможность расположения триггерных плоскостей вне холодной комнаты.

Предварительное моделирование показало, что в случае размещения триггерных плоскостей вне холодной комнаты из-за большего расстояния между триггерными плоскостями число

срабатываний на ячейку заметно снизится и необходимо существенное изменение геометрии триггерных плоскостей, также учитывая ограниченное количество материала, имеющегося в наличии для изготовления сцинтилляторов (90 брусков 200×5 см на две плоскости). В итоге была предложена геометрия триггерных плоскостей, представленная на рисунке 27.

В результате моделирования было оценено, что после надлежащей нормализации самая низкая статистика за две недели накопления данных составляет порядка 1800–2000 мюонов на ячейку для представленной на рисунке 27 геометрии. Согласно HGCaI TDR энергетическая калибровка должна обеспечивать интеркалибровочную точность на уровне 3%. Начальное требование отношения сигнал/шум для MIP для различной активной толщины сенсора составляет 11 (300 мкм), 6 (200 мкм) и 4,5 (120 мкм). Здесь значения N и S соответствуют среднеквадратичному отклонению амплитуды шума (σ пьедестала) и наиболее вероятному энерговыделению (MPV) для MIP-сигнала, измеренному отдельной ячейкой в каналах АЦП. Результаты тестовых наборов данных показывают, что статистики сигналов около 1000 событий должно быть достаточно для измерения MIP MPV с достаточной точностью. Таким образом предложенная геометрия триггерных плоскостей, расположенных вне холодной комнаты, позволяет набрать необходимую статистику.

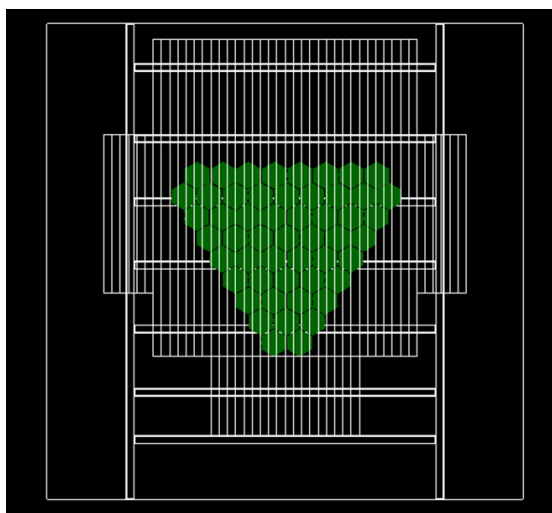


Рис. 27 Упрощенная модель триггерной плоскости и кассеты GEANT4.

Панели охлаждения калориметра HGCaI

Кассеты адронной части калориметра различаются по типу устанавливаемых активных элементов на CE-H (Si) с кремниевыми сенсорами, конструктивно собранными в 6-дюймовые гексагональные модули, и CE-H (mixed) – кассеты со смешанным набором активных элементов: кремниевых модулей на малых радиусах и сцинтилляторных модулей на внешней стороне кассеты (рис. 28). Основным механическим элементом кассет являются медные панели, используемые как конструктивный элемент для монтажа модулей сцинтилляционных и/или кремниевых детекторов, печатных узлов считывающей электроники, а также как часть абсорбера калориметра. Панели изготавливаются из высокочистой бескислородной листовой меди толщиной 6.3 мм и обеспечивают отведение тепла от активных элементов кассеты.

Панель охлаждения (рис. 29) состоит из несущей медной пластины с набором монтажных отверстий и пазом сложной формы, предназначенным для монтажа (пайкой) трубки контура охлаждения. Панель предназначена для обеспечения равномерности температуры по поверхности в пределах 1–2 °С при номинальной рассеиваемой мощности за счет регулирования расхода охлаждающей жидкости по контуру охлаждения. Каждый слой калориметра разбит на 12 сегментов, которые попарно составляют идентичные 60-градусные секции.

В рамках проекта предполагается изготовление и поставка в CERN панелей охлаждения адронной части (CE-H) калориметра HGCal. Общее количество требуемых изделий – 546 панелей с учетом запасных изделий из расчета 5–10% от общего количества. Для отработки технологии изготовления разработано и изготовлено шесть прототипов и два опытных образца панелей охлаждения HGCal (рис. 29).

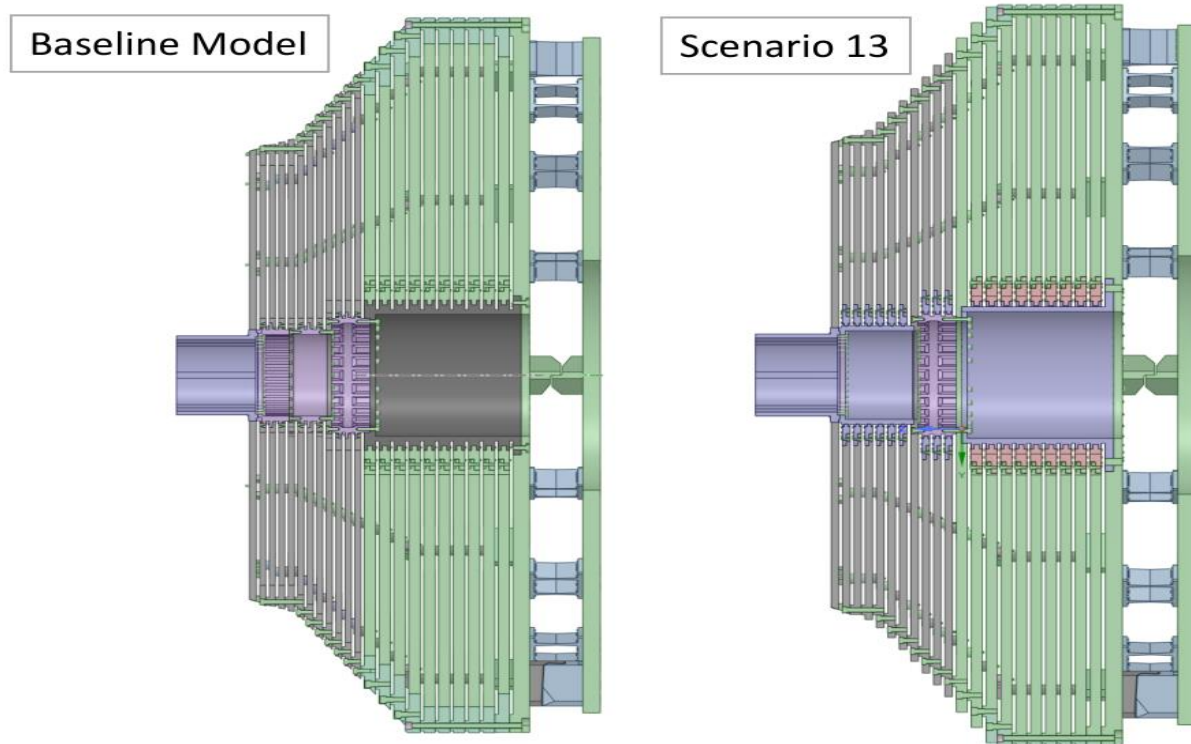


Рис. 28. Общая схема расположения CE-H секции калориметра HGCal. Серым цветом отмечены поглотители секции CE-H (Si), зеленым – CE-H (Mixed), белым – зазоры для монтажа изготавливаемых кассет. "Scenario 13" – проект калориметра с уменьшенным количеством слоев.

В ходе выполнения научно-методических работ решались вопросы сохранения плоскостности листовой меди при механической обработке и монтаже трубки, выбора оптимальной толщины слоев гальванического (Ni-Cu) или плазменного (Cu) покрытия стальной трубки охлаждения, технологии прецизионной гибки трубки. Также отработаны различные технологии монтажа трубки – ручная и автоматическая пайка с использованием специализированных столов предварительного нагрева и термозащитного кожуха, а также методы холодного прессования с дополнительным использованием термостойких клеевых составов. Отработаны различные способы удержания трубки на дне канавки в процессе пайки. Отработана возможность использования медного листа различной твердости, толщины и разных способов проката, различные составы для пайки и лужения, методы чистки изделия.

Регулярно предоставлялись списки рекомендаций для коллаборации HGCal по внесению изменений в конструкторскую документацию детектора для приведения в соответствие требований ЦЕРН по плоскостности и точности механической обработки изделий и международных промышленных стандартов на класс точности оборудования и параметры серийно изготавливаемой листовой меди. Исполнителями проекта неоднократно указывалось на существенные недостатки документации, предоставляемой коллегами из FNAL (США).

Для выполнения работ привлечены предприятия, имеющие опыт массового производства механических систем ускорителей и детекторов в ЦЕРН и ОИЯИ: ТЧУП Артмаш (Минск) и ОАО СтройТехПрогресс (Минск), на которых опробованы основные этапы технологии производства.

В первой половине 2023 г. на специальном стенде в ЦЕРН планируется провести

исследования по метрологии изготовленных прототипов панелей охлаждения, а также влиянию многократных термоциклов от +20С до -30С на их характеристики. На основании этих исследований будет определена и зафиксирована технология серийного изготовления. Серийное изготовление панелей должно начаться в 2024 году.

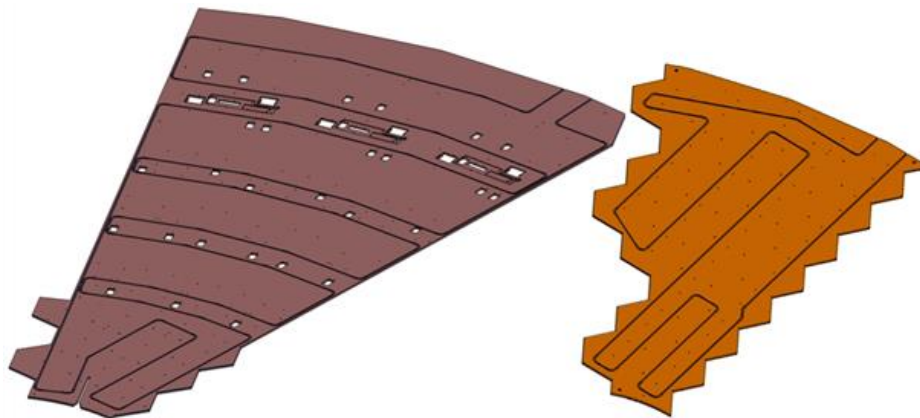


Рис. 29. Общий вид панелей охлаждения (эскизы элементов L49-D и L29-B).

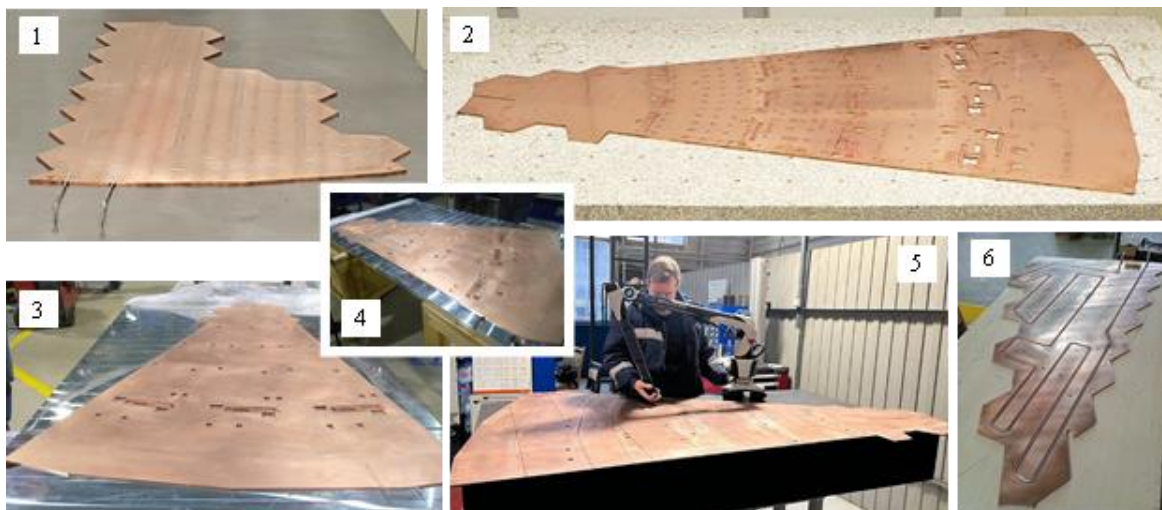


Рис. 30. Прототипы и опытные образцы панелей охлаждения CE-H калориметра HGCaI, изготовленные в рамках проекта: 1 – прототип L29-B (осень 2020), 2 – прототип L49-D (весна 2021), 3–4 прототипы L49-D и L49-D-инвертированный (осень 2021), 5 – прототип L49-D (осень 2022, автоматическая пайка), 6 – опытный образец L29-B (осень 2022, холодное прессование).

Развитие программного обеспечения для распределенных вычислений, обработки и анализа данных на основе GRID-технологий

Грид-инфраструктура ОИЯИ для CMS представлена центром уровня Tier-1 и центром уровня Tier-2. Они используются комплексно для генерации, обработки и хранения данных эксперимента CMS. Оба грид-сайта ОИЯИ обеспечивают 100% доступность и надёжность сервисов.

Система обработки данных Tier-1 была увеличена до 18656 ядер. По количеству успешно выполненных задач Tier-1 (T1_RU_JINR) занимает второе место среди других центров Tier-1 для

эксперимента CMS в мире (рис. 31а). За 2020–2023 годы обработано более 1.1 миллиарда событий, что составляет 21.3 % от 2020–2023а обработанных событий (рис. 31б) и 20.8 % от общего числа задач выполненных на всех Tier–1 центрах для эксперимента CMS. На рис. 31в показано число задач, обработанных в ОИЯИ в центре уровня Tier–1 CMS за 2020–2023 годы по разным типам потоковой обработки данных (реконструкция, моделирование, повторная обработка, анализ и т.д.).

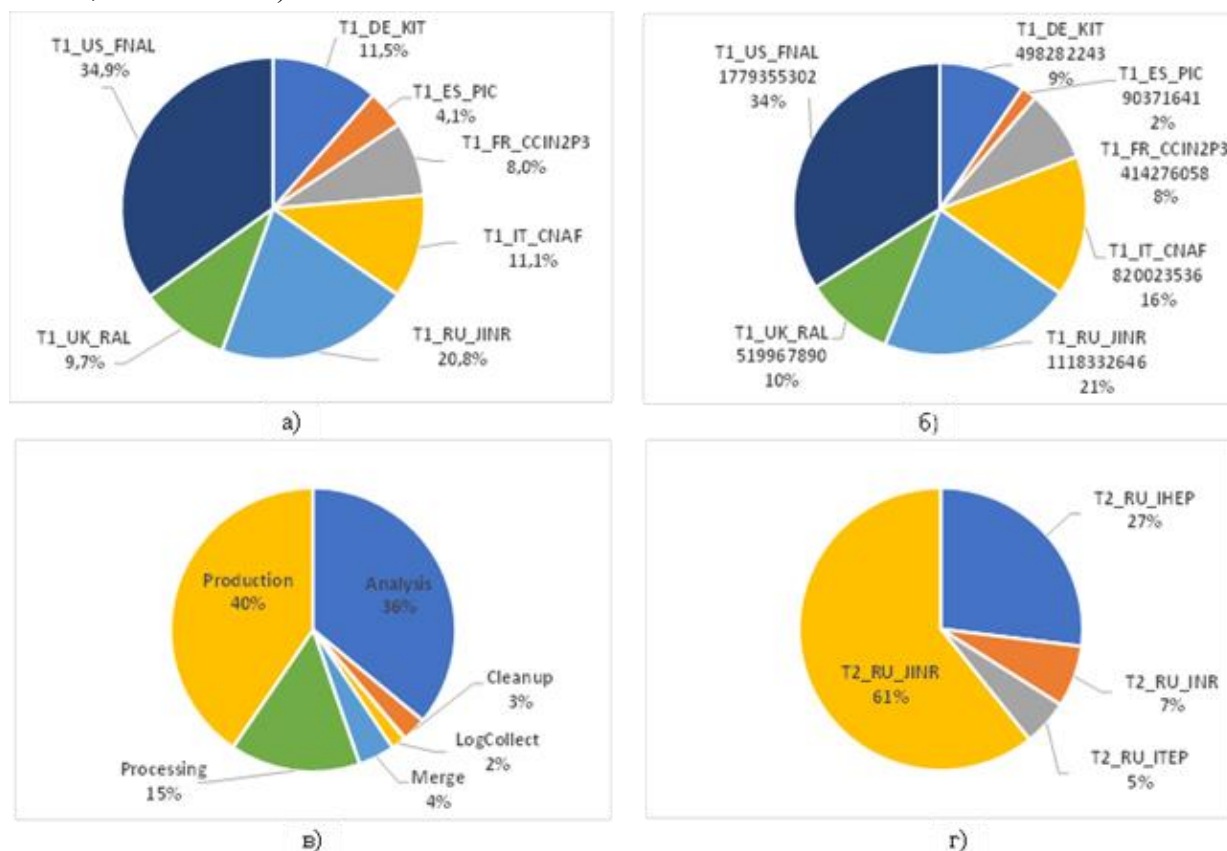


Рис. 31. Вклад мировых Tier–1 центров в обработку экспериментальных данных CMS за 2020–2023 годы: а) распределение по успешно выполненным задачам; б) количество обработанных событий в) статистика использования Tier–1 центра ОИЯИ экспериментом CMS по разным типам потоковой обработки данных в задаче за 2020–2023 годы. г) Доли успешно выполненных задач Tier–2 центрами российских институтов.

Вычислительные ресурсы центра Tier–2 предназначенные для эксперимента CMS достигли 4416 ядер, что обеспечивает ежегодную производительность 184190,115 kHS06 и позволило успешно выполнить 6919141 задач за 2020–2023 годы, что составляет 61% от всех задач выполненных российскими Tier–2 сайтами (рис. 31г).

Участие в сменах по набору данных, работы по обслуживанию и эксплуатации экспериментального комплекса

В соответствии с Меморандумом о согласии (MoA) каждый институт-участник коллаборации должен выполнить определенный объем работ по обслуживанию и эксплуатации экспериментального комплекса, включая участие в компьютеринге (Experimental Physics Responsibilities, EPR). Объем работ определяется исходя из общего количества авторов института и выражается в месяцах (EPR-месяцы), затраченных на выполнение работ, в исчисление полного

годового эквивалента (FTE) (~4 FTE-месяца¹ на автора). В работы EPR также входят обязательства по участию в центральных сменах, исчисление участие в Central Shift Points (SCP)². В 2020–2022 гг. все обязательства ОИЯИ были полностью выполнены (см. таблицу 1).

Таблица 1. Выполнение обязательств ОИЯИ по обслуживанию и эксплуатации экспериментального комплекса CMS (включая компьютеринг) в 2020–2023 гг. (в EPR-месяцах).

EPR-месяцы	2020	2021	2022	2023
Обязательные работы	88.61	91.85	81.32	84
Выполненные работы	98.95	105.00	83.5	
Центральные смены (EPR/CSP)	1.78/38.69	0.23/5	2.86/62.17	
Отношение выполненных работ к обязательным	1.14	1.15	1.06	

2.2.2. Основные публикации (список библиографических ссылок).

1. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Search for resonant and nonresonant new phenomena in high-mass dilepton final states at 13 TeV", JHEP 07, 208 (2021).
2. CMS Collaboration, "Sensitivity projections for a search for new phenomena at high dilepton mass for the LHC Run 3 and the HL-LHC", CMS-PAS-FTR-21-005, Mar. 2022.
3. M. Savina, "DM interpretations of heavy resonances and BSM-Higgs searches in ATLAS and CMS", The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics-LHCP2020, 25-30 May, 2020, PoS(LHCP2020) 176; CMS CR-2020/229, Geneva, 2020.
4. D. Barducci et al., "Search for a $\mu^+\mu^-+b$ -jet event excess at the dimuon mass of 28 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using full Run II dataset", Analysis Note AN-21-089, CERN, 2021, version of Mar. 2023
5. M. V. Savina and D. Seitova, "Program of Searches with the CMS Detector for Signals from Multidimensional Low-Energy Gravity at the Large Hadron Collider", Phys. At. Nucl. 84 №2 (2021) 190–196 (Yad. Fiz. 84 №2 (2021) 149–155).
6. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Measurement of the Drell-Yan forward-backward asymmetry at high dilepton masses in proton-proton collisions at 13 TeV", CMS-PAS-SMP-21-002, arXiv:2202.12327, submitted to JHEP.
7. I. Gorbunov and V. Shalaev, "The Drell-Yan Angular Coefficients Measurement at 13 TeV", CMS-AN-2020-220.
8. В.А. Зыкунов, "Пертурбативные расчеты в физике высоких энергий" (монография, ГГУ им. Ф.Скорины, Гомель, 2020), 277 с., ISBN 978-985-577-625-4.
9. M.P. Buhayevskaya and V.A.Zykunov, "NLO Radiative Corrections to the Drell–Yan Process at the LHC Run3", J.Phys.: Conf. Series. 1435, 012029 (2020).
10. В.А. Зыкуно, "Эффекты радиационных поправок в процессе Дрелла–Яна при сверхвысоких инвариантных массах дилептона", ЯФ 84, 348 (2021).
11. В.А. Зыкунов, "Расчет двухбозонного обмена с комплексными массами", ЯФ 84, 535 (2021).
12. В.А. Зыкунов, "Влияние электрослабых поправок на форму Z-резонанса в процессе рождения нейтрино", ЯФ 84, 524 (2021).

¹ В коллаборации CMS объем работ в рамках Experimental Physics Responsibilities выражается в EPR-месяцах (1 EPR-месяц = 1 FTE-месяцу)

² 1 EPR-месяц = CSP * 0.046

13. В.А. Зыкунов, “Двухбозонный обмен в поляризационном процессе с заряженным током”, ЯФ 85,146 (2022).
14. В.А. Зыкунов, “Эффекты электромагнитных радиационных поправок в процессе рождения лептонных пар при фотон-фотонном слиянии на LHC”, ЯФ 85, 366 (2022).
15. В.А. Зыкунов, “Электрослабые поправки к рождению дилептонов при фотонном слиянии на LHC”, ЯФ 86, 9 (2023).
16. S. Shulha, D. Budkouski, “Methodology for measuring gluon jet fraction and characteristics of quark and gluon jets for hadron-hadron collisions”, Phys. Part. Nucl. Lett. 18 № 2 (2021) 239-243, arXiv:2008.02054.
17. S. Shulha, D. Budkouski, “Measurement of mean charged-particle multiplicities in gluon and quark jets produced in pp-collisions at 8 TeV and 13 TeV with the CMS detector”, CMS AN-2021/024; January 2021.
18. S. Shulha, D. Budkouski, “Measurement of gluon jet fraction and data-driven correction of quark and gluon jets likelihood discriminator distributions for jets selected in pp-collisions at 8 TeV and 13 TeV with the CMS detector”, CMS AN-2020/143; August 2020.
19. С.Г.Шульга, Д.В.Будковский, “Об измерении долей кварковых и глюонных струй в адрон-адронных столкновениях”, Материалы конференции “The Physics of the Dimuons at the LHC”, 23-24 июня 2022, ЭЧАЯ, 2023 (в печати)
20. С.Г.Шульга, Д.В.Будковский, “Моделирование измерения долей кварковых, глюонных и неидентифицированных струй в выборке адронных струй для LHC”, Материалы конференции “The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022)”, 24-28 октября 2022, Письма в ЭЧАЯ, 2023 (в печати)
21. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Performance of the reconstruction and identification of high-momentum muons in proton-proton collisions at 13 TeV", JINST 15 (2020) P02027.
22. V.V. Palichik, N.N. Voytishin, “Muon Trajectory Reconstruction in the Cathode-Strip chambers of the CMS experiment”, to be published in PEPAN.
23. М.В. Савина, С.В. Шматов, "В поисках новой физики", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 133-215, ISBN 978-5-9530-0506-7.
24. А.В. Зарубин, А.В. Ланёв, М.В. Савина, С.В. Шматов, "Физика с тяжелыми димьюонами", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 290-317, ISBN 978-5-9530-0506-7.
25. I. A. Zhizhin, A. V. Lanyov, and S. V. Shmatov, “Search for Heavy Neutral Gauge Bosons in the Dilepton Channel in the CMS Experiment at the LHC”, Phys. At. Nucl. 84 № 10 (2021) 1–5.
26. I. A. Zhizhin, A. V. Lanyov, and S. V. Shmatov, “Searches for New Physics in the Dilepton Channel with the CMS Detector at the Large Hadron Collider”, Phys. At. Nucl. 84 №2 (2021) 184–189 (Yad. Fiz. 84 №2 (2021) 143–148).
27. A. V. Lanyov, S. V. Shmatov, I. A. Zhizhin, "Search for a High-Mass Dark Matter Mediator Decaying to Dilepton Final State in the CMS Experiment at the LHC", AIP Conference Proceedings, 2377 (2021) 030009.
28. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, "Планы и перспективы физики на LHC", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 99-111, ISBN 978-5-9530-0506-7.
29. I. Gorbunov, “Electroweak precision measurements in CMS”, CR-2020/148, Accepted by PoS.
30. I. Gorbunov, “Drell-Yan Measurements with the CMS experiment”, CR-2020/241, Accepted by PoS.

31. И.Н. Горбунов, О.В. Теряев, "Поляризационные эффекты и угловые распределения в процессах Дрелла-Яна в CMS", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 318-334, ISBN 978-5-9530-0506-7.
32. V.V. Shalaev, S.V. Shmatov, "Electroweak Physics with the CMS experiment at the LHC", Phys. At. Nucl. 84 №1 (2021) 37–41 (Yad. Fiz. 84 №1 (2021) 20-25).

2.2.3. Полный список публикаций по теме

Полный список публикаций по теме за 2020-2023 гг. включает дополнительно более 250 статей коллаборации CMS

<https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/CMS/publi.pdf>

2.2.4. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).

2.2.5. Патентная деятельность.

1. С.В. Афанасьев, А.О. Голунов, Н.В. Горбунов, Ю.В. Ершов, "Способ позиционирования сцинтилляционных ячеек в сегментированных детекторах и устройство для его осуществления", Патент № 2776102.
2. С.В. Афанасьев и др., "Сцинтилляционный детектор", Патент № 2748153.

2.3. Результаты сопутствующей деятельности

2.3.1. Научно-образовательная деятельность.

Сотрудники темы читают регулярные лекции в Университете Дубна и УНЦ ОИЯИ, являются приглашенными лекторами на школах по физике высоких энергий.

1. С.В. Шматов, "Экспериментальные методы физики элементарных частиц", регулярный курс лекций для магистров 1го года обучения. Международный университет "Дубна", УНЦ ОИЯИ.
2. М.В. Савина, "Физика за рамками стандартной модели", регулярный курс лекций для аспирантов 2го года обучения. Международный университет "Дубна", УНЦ ОИЯИ.
3. М.В. Савина, "Квантовая механика", регулярный курс лекций для студентов бакалавриата. Международный университет "Дубна", УНЦ ОИЯИ.
4. С.В. Шматов, "Physics at Energy Frontier", Курс лекций на Moscow International School of Physics, 24 July 2022 to 2 August 2022.

Список защищенных диссертаций.

1. С.В. Шматов, "Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере", Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук. Защита в ДС ФИАН 002.023.04. Дата присуждения степени – 5 марта 2020 г.
2. В.Ю. Каржавин, "Создание экспериментального комплекса передней мюонной станции установки Компактный мюонный соленоид (CMS)", Диссертация на соискание степени доктора технических наук. Защита в ДС ОИЯИ.03.01.2022.П. Дата присуждения степени – 30 апреля 2021 г.

3. К.В. Слижевский, “Поиск кандидатов на роль частиц темной материи в канале двумя мюонами и потерянной энергией, Диссертация на соискание степени магистра. Защита состоялась в Университете "Дубна" 22 июня 2022 г.
4. Д.В. Будковский, “Измерение характеристик кварковых и глюонных струй, рожденных в pp взаимодействиях при 13 ТэВ в эксперименте CMS”, Диссертация на соискание степени магистра. Защита состоялась в Университете "Дубна" 22 июня 2022 г.

2.3.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

2.3.3. Награды и премии.

1. Поощрительная премия ОИЯИ за научно-исследовательские экспериментальные работы за 2021 г. За цикл работ «Экспериментальная проверка предсказаний Стандартной Модели взаимодействий и поиск сигналов новой физики в процессах образования пар мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере» (И. А. Голутвин, А. В. Зарубин, В. А. Зыкунов, В. Ю. Каржавин, В. В. Кореньков, А. В. Ланев, В. А. Матвеев, В. В. Пальчик, М. В. Савина, С. В. Шматов)
2. Первая премия ЛФВЭ ОИЯИ по направлению "Экспериментальная и теоретическая физика частиц и ядер, проработка физической программы и моделирование процессов для комплекса NICA" за 2021 г. За цикл работ "Поиск новой физики в канале с парами лептонов высоких энергий в эксперименте CMS на LHC" (И.А. Жижин, В.А. Зыкунов, А.В. Ланёв, М.В. Савина, В.В. Шалаев, С.В. Шматов)
3. Вторая премия ЛФВЭ ОИЯИ по направлению "Экспериментальная и теоретическая физика частиц и ядер, проработка физической программы и моделирование процессов для комплекса NICA" за 2020 г. За цикл работ "Поиск нарушения лептонной универсальности взаимодействий и темной материи в канале с парой лептонов в эксперименте CMS на LHC" (И.А. Голутвин, М.Г. Гавриленко, И.А. Жижин, А.В. Зарубин, А.В. Ланёв, М.В. Савина, В.В. Шалаев, С.В. Шматов).

2.3.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризаторская деятельность).

Сотрудники темы являются рецензентами журналов ЭЧАЯ, Письма в ЭЧАЯ, Journal of High Energy Physics, ведут научно-популяризаторскую деятельность (например, подкаст “Кот ученый” Радио SPUTNIK).

3. Международное научно-техническое сотрудничество

Фактически участвующие страны, институты и организации.

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
НЕРНУ	Австрия	Австрия	Вульц К.-Э. + 57 чел.	Совместные работы
ННЛА	Армения	Ереван	Тумасян А. + 6 чел.	Совместные работы
ГГУ	Беларусь	Гомель	Максименко Н.В. + 1 чел, Андреев В.В. +3 чел.	Обмен визитами
НИИ ЯП БГУ	Беларусь	Минск	Макаренко В.В. + 22 чел.	Обмен визитами
UAntwerp	Бельгия	Антверпен	Ван Мехелен П. + 15 чел.	Совместные работы
ULB	Бельгия	Брюссель	Ванлаер П. + 31 чел.	Совместные работы
VUB	Бельгия	Брюссель	Д'Хондт Ю. + 11 чел.	Совместные работы
Ugent	Бельгия	Гент	Титгат М. + 21 чел.	Совместные работы
KU Leuven	Бельгия	Лёвен	Леро П. + 4 чел.	Совместные работы
UCL	Бельгия	Лувен-ля-Нёв	Далаере К. + 26 чел.	Совместные работы

UMONS	Бельгия	Монс	Доби Е.	Совместные работы
INRNE BAS	Болгария	София	Султанов Г. + 17 чел.	Совместные работы
SU	Болгария	София	Литов Л. + 10 чел.	Совместные работы
CBPF	Бразилия	Рио-де-Жанейро	Алвес Г. + 8 чел.	Совместные работы
UERJ	Бразилия	Рио-де-Жанейро	Мундим Л. + 39 чел.	Совместные работы
Unesp	Бразилия	Сан-Паулу	Новаес С. + 23 чел.	Совместные работы
Ун-т	Великобритания	Бристоль	Голдштейн Ж. + 24 чел.	Совместные работы
RAL	Великобритания	Дидкот	Шеферд-Земистоклиус К. + 49 чел.	Совместные работы
Imperial College	Великобритания	Лондон	Бухмюллер О. + 71 чел.	Совместные работы
Wigner RCP	Венгрия	Будапешт	Сиклер Ф. + 8 чел.	Совместные работы
Atomki	Венгрия	Дебрецен	Молнар Ж. + 6 чел.	Совместные работы
UD	Венгрия	Дебрецен	Ужвари Б. + 2 чел.	Совместные работы
RWTH	Германия	Ахен	Стал А. + 10 чел.	Совместные работы
RWTH	Германия	Ахен	Фелд Л. + 15 чел.	Совместные работы
RWTH	Германия	Ахен	Хеббекер Т. + 79 чел.	Совместные работы
DESY	Германия	Гамбург	Галло Е. + 110 чел.	Совместные работы
Ун-т	Германия	Гамбург	Шлепер П. + 76 чел.	Совместные работы
KIT	Германия	Карлсруэ	Мюллер Т. + 90 чел.	Совместные работы
INP NCSR "Demokritos"	Греция	Афины	Лукас Д. + 10 чел.	Совместные работы
NTU	Греция	Афины	Циполитис Г. + 8 чел.	Совместные работы
УоА	Греция	Афины	Сфикас П. + 26 чел.	Совместные работы
UI	Греция	Янина	Фудас К. + 14 чел.	Совместные работы
GTU	Грузия	Тбилиси	Цамалаидзе З. + 11 чел.	Совместные работы
HEPI-TSU	Грузия	Тбилиси	Цамалаидзе З. + 1 чел.	Совместные работы
NISER	Индия	Джатни	Свеин С.К. + 24 чел.	Совместные работы
SINP	Индия	Калькутта	Саркар С. + 31 чел.	Совместные работы
BARC	Индия	Мумбаи	Пант Л.М.	Совместные работы
TIFR	Индия	Мумбаи	Дугад С. + 14 чел. Мазумдар К. + 19 чел.	Совместные работы
PU	Индия	Чандигарх	Бхатнагар В. + 19 чел.	Совместные работы
IPM	Иран	Тегеран	Мохаммади М. + 6 чел.	Совместные работы
UCD	Ирландия	Дублин	Грюнвальд М. + 1 чел.	Совместные работы
CIEMAT	Испания	Мадрид	Алькарас Маестре Х. + 46 чел.	Совместные работы
UAM	Испания	Мадрид	Де Трокониз Й. + 1 чел.	Совместные работы
UO	Испания	Овьедо	Кавас Х. + 12 чел.	Совместные работы
IFCA	Испания	Сантандер	Мартинес Риверо К. + 40 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Бари	Пульезе Г. + 54 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Болонья	Фаббри Ф. + 44 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Генуя	Ферро Ф. + 10 чел.	Совместные работы
INFN LNS	Италия	Катания	Трикоми А. + 8 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Милан	Геззи А. + 41 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Неаполь	Фабоззи Ф. + 20 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Павия	Бражери А. + 19 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Падуя	Россин Р. + 81 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Перуджа	Москателли Ф. + 37 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Пиза	Вентури А. + 58 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Рим	Параматти Р. + 29 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Триест	Делла Рикка Д. + 7 чел.	Совместные работы

INFN	Италия	Турин	Солано А. + 77 чел.	Совместные работы
INFN	Италия	Флоренция	Паолетти С. + 31 чел.	Совместные работы
INFN LNF	Италия	Фраскати	Пикколо Д. + 8 чел.	Совместные работы
UCY	Кипр	Никосия	Разис П.А. + 13 чел.	Совместные работы
"Tsinghua"	Китай	Пекин	Ху Ж. + 6 чел.	Совместные работы
ИНЕР CAS	Китай	Пекин	Чен М. + 54 чел.	Совместные работы
PKU	Китай	Пекин	Мао Я. + 30 чел.	Совместные работы
ZJU	Китай	Ханчжоу	Хао М. + 9 чел.	Совместные работы
VU	Литва	Вильнюс	Ринкевисиус А. + 33 чел.	Совместные работы
Cinvestav	Мексика	Мехико	Кастилла Вальдез Х. + 10 чел.	Совместные работы
BUAP	Мексика	Пуэбла	Салазар Ибаргуен У. А. + 8 чел.	Совместные работы
TU/e	Нидерланды	Эйндховен	Эртс А. + 2 чел.	Совместные работы
UC	Новая Зеландия	Крайстчерч	Батлер Ф. + 4 чел.	Совместные работы
Ун-т	Новая Зеландия	Окленд	Крофчек Д. + 2 чел.	Совместные работы
QAU	Пакистан	Исламабад	Хурани Х.Р. + 26 чел.	Совместные работы
UW	Польша	Варшава	Кроликовски Я. + 17 чел.	Совместные работы
AGH	Польша	Краков	Малавски М. + 10 чел.	Совместные работы
AGH-UST	Польша	Краков	Идзик М.А. + 3 чел.	Совместные работы
NCBJ	Польша	Отвоцк (Сверк)	Горски М. + 8 чел.	Совместные работы
CNU	Республика Корея	Кванджу	Мун Д.Х. + 5 чел.	Совместные работы
KU	Республика Корея	Сеул	Чои С. + 18 чел.	Совместные работы
SJU	Республика Корея	Сеул	Ким Х. + 4 чел.	Совместные работы
SKKU	Республика Корея	Сеул	Чои Я. + 9 чел.	Совместные работы
SNU	Республика Корея	Сеул	Янг У. + 23 чел.	Совместные работы
Yonsei Univ.	Республика Корея	Сеул	Йо Х.Д. + 2 чел.	Совместные работы
KIST	Республика Корея	Тэджон	Рю Г. + 4 чел.	Совместные работы
НИЦ КИ ПИЯФ	Россия	Гатчина	Воробьев А.А. + 19 чел.	Совместные работы
МФТИ	Россия	Долгопрудный	Аушев Т.А.-Х. + 7 чел.	Совместные работы
ИТЭФ	Россия	Москва	Гаврилов В.Б. + 22 чел.	Совместные работы
НИИЯФ МГУ	Россия	Москва	Боос Э.Э. + 37 чел.	Совместные работы
НИКИЭТ	Россия	Москва	Орлов А.Н. + 17 чел.	Совместные работы
НИЯУ "МИФИ"	Россия	Москва	Данилов М.В. + 18 чел.	Совместные работы
ФИАН	Россия	Москва	Дремин И.М. + 9 чел.	Совместные работы
ИЯИ РАН	Россия	Москва, Троицк	Гниненко С.Н. + 29 чел.	Совместные работы
НГУ	Россия	Новосибирск	Сковпень Ю.И. + 8 чел.	Совместные работы
ИФВЭ	Россия	Протвино	Тюрин Н.Е. Качанов В.А., + 23 чел.	Совместные работы
ТГУ	Россия	Томск	Иванченко В.Н. + 5 чел.	Совместные работы
ТПУ	Россия	Томск	Бабаев А. + 4 чел.	Совместные работы
INS "VINCA"	Сербия	Белград	Аджич П. + 9 чел.	Совместные работы
U Iowa	США	Айова-Сити	Онел Я. + 44 чел.	Совместные работы
JHU	США	Балтимор	Шварц М. + 19 чел.	Совместные работы
Fermilab	США	Батавия	Канепа А. + 197 чел.	Совместные работы
BU	США	Бостон	Рольф Д. + 31 чел.	Совместные работы
NU	США	Бостон	Барбери Э. + 26 чел.	Совместные работы
CU	США	Боулдер	Кумалат Д.П. + 20 чел.	Совместные работы

UB	США	Буффало	Харчилава А. + 15 чел.	Совместные работы
UF	США	Гейнсвилл	Мицельмахер Г.В. + 38 чел.	Совместные работы
UCDavis	США	Дейвис	Конвей Д. + 33 чел.	Совместные работы
WSU	США	Детройт	Карчин П.Э. + 2 чел.	Совместные работы
Cornell Univ.	США	Итака	Рид А. + 46 чел.	Совместные работы
MIT	США	Кембридж, МА	Паус К. + 40 чел.	Совместные работы
UMD	США	Колледж-Парк	Скуджа А. + 34 чел.	Совместные работы
Texas A&M	США	Колледж- Стэйшн	Сафонов А. + 27 чел.	Совместные работы
OSU	США	Колумбус	Хилл К. + 10 чел.	Совместные работы
TTU	США	Лаббок	Акчурин Н. + 17 чел.	Совместные работы
LLNL	США	Ливермор	Райт Д. + 1 чел.	Совместные работы
UNL	США	Линкольн	Блум К. + 24 чел.	Совместные работы
KU	США	Лоренс	Бин А. + 39 чел.	Совместные работы
UCLA	США	Лос-Анджелес	Казинс Р. + 20 чел.	Совместные работы
KSU	США	Манхеттен	Маравин Ю. + 14 чел.	Совместные работы
UM	США	Миннеаполис	Русак Р. + 22 чел.	Совместные работы
UW-Madison	США	Мэдисон	Дасу Ш. + 55 чел.	Совместные работы
VU	США	Нашвилл	Джонс В. + 44 чел.	Совместные работы
UTK	США	Ноксвилл	Спанер С. + 6 чел.	Совместные работы
ND	США	Нотр-Дам	Жессоп К. + 36 чел.	Совместные работы
RU NB	США	Нью-Брансуик	Герштейн Ю. + 82 чел.	Совместные работы
RU	США	Нью-Йорк	Гулианос К. + 2 чел.	Совместные работы
UM	США	Оксфорд, MS	Кремальди Л.М. + 6 чел.	Совместные работы
Caltech	США	Пасадена	Ньюмен Х. + 29 чел.	Совместные работы
CMU	США	Питтсбург	Паулини М. + 13 чел.	Совместные работы
PU	США	Принстон	Олсен Д. + 44 чел.	Совместные работы
Brown	США	Провиденс	Хайнц У. + 46 чел.	Совместные работы
UCR	США	Риверсайд	Хансон Г. + 20 чел.	Совместные работы
UR	США	Рочестер	Бодек А. + 8 чел.	Совместные работы
SDSU	США	Сан-Диего	Брэнсон Д. + 34 чел.	Совместные работы
UCSB	США	Санта-Барбара	Инкандела Д. + 36 чел.	Совместные работы
FSU	США	Таллахасси	Проспер Х. + 26 чел.	Совместные работы
UA	США	Таскалуса	Хедерсон К. + 11 чел.	Совместные работы
BU	США	Уэйко	Хатакама К. + 14 чел.	Совместные работы
Purdue Univ.	США	Уэст-Лафейетт	Парашар Н. + 4 чел.	Совместные работы
Rice Univ.	США	Хьюстон	Падли Б.П. + 28 чел.	Совместные работы
UIC	США	Чикаго	Гейббер С.Е. + 26 чел.	Совместные работы
UVa	США	Шарлотсвилл	Кокс Б. + 20 чел.	Совместные работы
NU	США	Эванстон	Веласко М. + 14 чел.	Совместные работы
NTU	Тайвань	Тайбэй	Ху Г. + 37 чел.	Совместные работы
NCU	Тайвань	Таоюань	Ку Ч.-М. + 26 чел.	Совместные работы
CU	Турция	Адана	Думаноглу Л. + 35 чел.	Совместные работы
METU	Турция	Анкара	Зейрек М. + 25 чел.	Совместные работы
BU	Турция	Стамбул	Гюльмец Е. + 23 чел.	Совместные работы
YTU	Турция	Стамбул	Канкокак К. + 11 чел.	Совместные работы
ИЯФ АН РУЗ	Узбекистан	Ташкент	Юлдашев Б. + 5 чел.	Совместные работы
LUT	Финляндия	Лаппеэнранта	Тува Т. + 4 чел.	Совместные работы
HIP	Финляндия	Хельсинки	Вутилайнен М. + 41 чел.	Совместные работы
UH	Финляндия	Хельсинки	Вутилайнен М. + 4 чел.	Совместные работы
UL	Франция	Лион	Гаскон С. + 51 чел.	Совместные работы
IN2P3	Франция	Париж	Бод Ф. + 55 чел.	Совместные работы

IRFU	Франция	Сакле	Бесанкон М. + 30 чел.	Совместные работы
IPHC	Франция	Страсбург	Блох Д. + 40 чел.	Совместные работы
RBI	Хорватия	Загреб	Брижлевич В. + 10 чел.	Совместные работы
Ун-т	Хорватия	Сплит	Скулач Т. + 6 чел.	Совместные работы
FESB	Хорватия	Сплит	Лелас Д. + 14 чел. Пуляк И. + 12 чел.	Совместные работы
ЦЕРН	ЦЕРН	Женева	Кампорези Т. + 302 чел.	Соглашение
Ун-т	Черногория	Подгорица	Рачевич Н. + 4 чел.	Совместные работы
CU	Чехия	Прага	Фингер М. + 7 чел.	Совместные работы
PSI	Швейцария	Виллиген	Каминада Л. + 23 чел.	Совместные работы
ETH	Швейцария	Цюрих	Валли Р. + 80 чел.	Совместные работы
UZH	Швейцария	Цюрих	Килминстер Б. + 31 чел.	Совместные работы

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал сумма FTE	Ассоциированный персонал сумма FTE
1.	научные работники	17	
2.	инженеры	4.4	
3.	специалисты	2	
	Итого:	23.4	

4.2. Фактическая сметная стоимость темы / КИП

№№ п/п	Наименование работ	Полная стоимость	Расходы за год, предшествующий отчетному (тыс. долл. США)
1.	Международное сотрудничество (МНТС)	1313	215.6
2.	Материалы	2610	537.58
3.	Оборудование и услуги сторонних организаций		
4.	Пуско-наладочные работы		
5.	Услуги научно-исследовательских организаций		
6.	Приобретение программного обеспечения		
7.	Проектирование/строительство		
8.	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)		
	ВСЕГО:	3923	753.18

4.3. Другие ресурсы

Нет.

Руководитель темы

_____/_____/_____
“ ____ ” ____ 202_г.

Руководитель проекта

_____/_____/_____
“ ____ ” ____ 202_г.

Экономист лаборатории

_____/_____/_____
“ ____ ” ____ 202_г.

Список выступлений физиков ОИЯИ по теме 02-0-1083-2009/2023 “ CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC” за 2020–2023 гг.

1. S. V. Shmatov, “Searches for New Physics with the CMS Experiment at the LHC”, International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, July 18–21, 2022 г., Dubna.
2. M. V. Savina, “Dark Matter Search at the LHC”, International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, July 18–21, 2022 г., Dubna.
3. M. Savina, S. Shmatov, K. Slizhevskiy, “Search for dark matter produced in association with a leptonically decaying Z boson with the CMS Experiment at the LHC”, 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 29 Nov – 2 Dec 2022, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow.
4. V. Shalaev, S. Shmatov, “Searches for Long-Lived Particles in CMS experiment”, LXXII International conference "Nucleus–2022: Fundamental problems and applications", Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 11–16 July, 2022.
5. I. A. Zhizhin, A. V. Lanyov, S. V. Shmatov, «Searches for new physics in the dilepton channel with the CMS detector at the LHC», LXXII International conference "Nucleus–2022: Fundamental problems and applications", Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 11–16 July, 2022,
6. S.V. Shmatov, “Physics at Energy Frontier”, Moscow International School of Physics, 24 July 2022 to 2 August 2022, Dubna.
7. A.V. Zarubin, “CMS Experiment at the LHC”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
8. S.V. Shmatov, “Dimuons. The Beginning and Legacy”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
9. V. Perelygin, “CMS Muon System”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
10. P. Bunin, “CMS HCAL System”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
11. V. Palchik, “Reconstruction of High-energy Muons”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
12. A. Lanyov, «Physics with Dimuons in the CMS Experiment at the LHC», The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
13. M. Savina, “Searches for Dark Matter at the LHC”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
14. A. Hayrapetyan, M. Savina, S. Shmatov, A. Tumasyan, “Searches for Dark Matter with the CMS Detector in $bb/Z + MET$ channels”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
15. O. Teryaev, “Dilepton Angular Distributions in Standard Model and Beyond”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.

16. V. Zykunov, "Radiative corrections to dilepton production at Run3/HL LHC", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
17. I. Gorbunov, "Drell-Yan Radiative Corrections", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
18. V. Shalaev, S. Shmatov, I. Gorbunov, "Drell-Yan angular coefficients measurements with the CMS experiment at the LHC", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
19. V. Korenkov, "Computing @ LHC and NICA", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
20. A. Tumasyan, "Studies of the Standard Model Higgs Boson produced through vector boson fusion and decaying to $b\bar{b}$ ", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
21. N. Voytishin, "Development of Algorithms for CSC Track-Segment Reconstruction", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
22. A. Kamenev, "CMS Muon System Alignment", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
23. I. Gorbunov, "Anomaly detection with ML for Muon DQM Development of Machine", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
24. A. Lanyov, S. Shmatov, I. Zhizhin, "Optimization of Dimuon Selection and Photon Induced Background", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
25. S. Shulha, "Measurement of Fractions and Characteristics of Quark and Gluon Jets with the CMS", The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
26. D. Budkouski, "Measurement of Gluon Jet Fractions in Inclusive Jet Data The Workshop "The Physics of the Dimuons at the LHC" (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
27. M. Savina, S. Shmatov, K. Slizhevskiy, "Search for dark matter produced in association with a leptonically decaying Z boson with the CMS Experiment at the LHC", XXVI International Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), JINR, Dubna, 24-28 October, 2022.
28. S. Shulha, D. Budkouski, "Measurement of gluon jet fraction in the inclusive jets channel", XXVI International Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), JINR, Dubna, 24-28 October, 2022.
29. I. Zhizhin, Летняя научная школа "Супер с-тау фабрика", Национальный центр физики и математики и филиала МГУ им. Ломоносова в г. Саров Нижегородской области, Саров, Россия, 2022.
30. I. Zhizhin, «Searches for new heavy resonances in the dilepton channel», poster presented at 56th meeting of the PAC for Particle Physics, JINR, Dubna, Russia, 24.01.2022.
31. I. Zhizhin, «Search for new physics in the dilepton channel with the CMS at the LHC», poster presented at 2022 European school of high-energy physics, 05.12.2022.
32. V. Shalaev, S. Shmatov, I. Gorbunov, "Drell-Yan angular coefficients measurements with the CMS experiment at the LHC", Seminar of VBLHEP, 25 November 2022, VBLHEP JINR, Dubna, Russia.

33. V.Shalaev, S. Shmatov, I. Gorbunov, “Study of Z-boson polarization effects at the CMS experiment at the LHC”, 5-12 June 2022, Alushta, Russia.
34. V.Shalaev, S. Shmatov, I. Gorbunov, “Drell-Yan angular coefficients measurements with the CMS experiment at the LHC”, 56th meeting of the Programme Advisory Committee for Particle Physics of JINR, 24 January 2022, Dubna, Russia.
35. D. Budkouski, J. Strolugas, O. Atakisi, S. Shulha, “Double-Differential gluon jet fractions measurement in UL-2016 inclusive jet data”, 7th Yearly SMP-HAD Workshop, 2022.
36. S. Shulha, D. Budkouski, “Jet flavour discrimination and measurement of quark and gluon jet fractions”, 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA2022), November, 29 November – 2 December, 2022.
37. D. Budkouski, S. Shulha, “Measurement of gluon jet fraction and characteristics of quark and gluon jets produced in pp collisions at the CMS detector”, 56th meeting of the PAC for Particle Physics, JINR, Dubna, Russia, 2022.
38. V.A. Zykunov, “Electroweak radiative corrections to dilepton production via photon fusion at LHC”, VII International Conference “Models in Quantum Field Theory” (MQFT–2022), Saint Petersburg, Russia, October 10–14, 2022.
39. S. Shmatov (on behalf of the CMS Collaboration), “Highlights from the CMS Experiment”, The 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, JINR, INR RAS, Bruno Pontecorvo Neutrino and Astrophysics Laboratory, 19-25 August 2021, Moscow, Russia.
40. S. Shmatov (on behalf of the CMS Collaboration), “CMS Overview”, LXXI International Conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 September, St. Petersburg, Russia
41. M. Savina (on behalf of the CMS Collaboration), “Dark Matter searches at CMS”, The 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, JINR, INR RAS, Bruno Pontecorvo Neutrino and Astrophysics Laboratory, 19-25 August 2021, Moscow, Russia.
42. A. Lanyov (on behalf of the CMS Collaboration), “Electroweak measurements at CMS”, The 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, JINR, 19-25 August 2021, Moscow, Russia.
43. I. Gorbunov (on behalf of the ATLAS, CMS and LHCb Collaborations), “EWK Precision Measurements”, LHCP2021: 9th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference, 7-12 Jun 2021, Paris
44. V.V. Shalaev (on behalf of the CMS Collaboration), “CMS Standard Model Results”, LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 September, St. Petersburg, Russia
45. V. Shalaev, S. Shmatov (on behalf of the CMS Collaboration), “CMS Standard Model Results”, LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg, Russia. 20-25 September 2021.
46. V. Shalaev, S. Shmatov (on behalf of the CMS Collaboration), “Overview of precision measurements (angular coefficients, charge asymmetry, $\sin^2\Theta$, m_W , etc) at the LHC”. Particles and Nuclei International Conference (PANIC-2021), Lisbon, Portugal. 5-10 September 2021.
47. V. Shalaev, S. Shmatov (on behalf of the CMS Collaboration), “Search for New Physics in Leptonic Decays with the CMS Experiment at the LHC”, 6th Summer School on Intelligent signal processing for FrontiEr Research and Industry (INFIERI-2021), Madrid, Spain. 23 August – 5 September 2021.

48. S.V. Shmatov, “Searches for new physics with the CMS at the LHC”, Seminar “Theory of Fundamental Interactions”, BLTP JINR, Dubna, 11 February 2021.
49. V.A. Zykunov, “Effects of radiative corrections in the Drell–Yan process at ultra-high invariant mass of dilepton” на XXVIII International Seminar in memory of Prof. V.I. Kuvshinov, NPCS-2021, Minsk, May 18–21, 2021
50. V.Shalaev, S. Shmatov, I. Gorbunov, “Drell-Yan angular coefficients measurements with the CMS experiment at the LHC”. The XXV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2021), Almaty, Kazakhstan. 11-15 October 2021.
51. P. Bunin (on behalf of the CMS Collaboration), “CMS detector upgrade”, LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg, Russia. 20-25 September 2021.
52. I. Gorbunov, “Machine Learning for Data Quality Monitoring at CMS Experiment”, 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID`2021), JINR, Dubna, Russia.
53. M. Savina, “DM interpretations of heavy resonances and BSM-Higgs searches in ATLAS and CMS”, The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2020), 25-30 May, 2020, Paris, France (on-line).
54. I. Gorbunov, “EWK precision measurements in CMS”, LHCP2020: The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2020), Paris, France, 2020 (on-line).
55. I. Gorbunov, “Drell-Yan Measurements with the CMS experiment”, 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), The C11 commission of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), Prague, Czech Republic, 2020 (on-line).
56. В.В. Шалаев, С.В. Шматов, “Физика электрослабых взаимодействий в эксперименте CMS на ЛHC”, Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, Россия, 10-12 марта, 2020.
57. И.А. Жижин, А.В. Ланёв, С.В. Шматов, “Searches for new physics in the dilepton channel with the CMS detector at the LHC”, Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, Россия, 10-12 марта, 2020 г.
58. М.В. Савина, Д. Сеитова, "Программа эксперимента CMS по поиску сигналов многомерной низкоэнергетической гравитации на ускорителе ЛHC", ЯФ Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, Россия, 10-12 марта, 2020 г.
59. I. Zhizhin, A. Lanyov, S. Shmatov, “Searches for new physics in the dilepton channel with the CMS detector at the LHC”, XXVII научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов, Государственный университет “Дубна”, 14-24 апреля, 2020.
60. I. Gorbunov, V. Shalaev, S.Shmatov, “Studies of the Drell-Yan Processes with the CMS detector at the LHC”, XXVII scientific-practical conference for students, aspirants, and young specialists, Dubna State University”, 14-24 April, 2020.
61. I. Zhizhin, A. Lanyov, S. Shmatov, “Search for a high-mass DM mediator decaying to a dilepton final state”, The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), 9-13 November, 2020.
62. I. Gorbunov, V. Shalaev, S.Shmatov, "Drell-Yan angular coefficients measurements with the CMS experiment at the LHC ", The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), 9-13 November, 2020.
63. М.В. Савина, В.В. Шалаев, С.В. Шматов, “Поиск распадов бозона Хиггса с нарушением лептонного числа в эксперименте CMS на ЛHC”, Физика элементарных частиц и

космология 2020, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 23-24 ноября, 2020.

64. И.А. Жижин, А.В. Ланёв, С.В. Шматов, “Поиск темной материи в канале с парой лептонов в эксперименте CMS на LHC”, Физика элементарных частиц и космология 2020, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 23-24 ноября, 2020.
65. М.В. Гавриленко, М.В. Савина, С.В. Шматов, “Поиск процессов с нарушением лептонного числа (LFV) в эксперименте CMS на LHC”, Физика элементарных частиц и космология 2020, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 23-24 ноября, 2020.
66. Д.В. Будковский, С.Г.Шульга "Измерение множественности заряженных частиц и глюонных фракций в выборках отобранных в двухструйном канале на установке CMS на БАК", Moscow International School of Physics 2020, 3-9 Mar 2020, HSE Study Center "Voronovo" Moscow Region (Russian Federation).
67. V. Palichik, N. Voytishin “Cathode Strip Chambers Hit Reconstruction improvements in the CMS Experiment”, 9-я Ежегодная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ. 26 сентября — 3 октября 2020 г., Алушта, Россия.
68. I. Zhizhin, A. Lanyov, S. Shmatov, "Searches for heavy resonances in the dilepton channel with the CMS detector at the LHC", 9-я Ежегодная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ. 26 сентября — 3 октября 2020 г., Алушта, Россия.