

*В. Ю. Каржавин, С. В. Шматов*

## Модернизация установки CMS на LHC

Физики ОИЯИ участвуют в проекте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) в составе коллаборации научных центров России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS) со времени предложения концепции эксперимента — с 1992 г.

Вклад ОИЯИ подразумевал создание детекторов торцевой части экспериментальной установки CMS, включая проектирование, строительство и эксплуатацию торцевого адронного калориметра (HCal) и передней мюонной станции (ME1/1), в том числе участие в сеансах по набору экспериментальных данных и физическому анализу, а также поддержание эффективной работы установки.

Первый этап набора экспериментальных данных (Run1) проходил в 2009–2012 гг. при энергии сталкивающихся пучков протонов  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ. В период Run1 одним из фундаментальных достижений эксперимента CMS стало открытие бозона Хиггса. Ключевую роль в регистрации «золотого» распада нового бозона ( $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ ) играет мюонная система CMS. Передняя мюонная станция ME1/1, обладающая уникальными характеристиками (пространственным разрешением  $\sim 50$  мкм и временным разрешением  $\sim 3$  нс), обеспечи-

---

*V. Yu. Karjavine, S. V. Shmatov*

## Upgrade of the CMS Detector at the LHC

JINR physicists have been participating in the Compact Muon Solenoid (CMS) experiment as part of a collaboration of scientific centres of Russia and JINR Member States (RDMS) since the concept of the experiment was proposed in 1992.

JINR's contribution was focused on the construction of detectors for the endcap of the CMS detector, including the design, construction and commissioning of the Endcap Hadron Calorimeter (HCal) and the forward muon station (ME1/1), and the participation in runs on data taking and physical analysis, as well as maintaining the effective operation of the detector.

The first stage of the experimental data taking (Run1) took place in 2009–2012 at the energy of colliding proton beams  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV. During Run1, one of the fundamental results of the CMS experiment was the discovery of the Higgs boson. The CMS muon system plays a key role in registering the “golden” decay of a new boson ( $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ ). The

вает прецизионные измерения координат трека мюона. Во втором периоде (Run2) работы LHC в 2015–2018 гг. энергия LHC достигла  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Полный объем экспериментальных данных, записанных в эксперименте CMS за оба периода, соответствует интегральной светимости  $L_{\text{int}} \sim 190 \text{ фб}^{-1}$ .

Во время двух длительных технических перерывов в работе LHC в 2013–2015 гг. и в 2019–2022 гг. была проведена первая фаза модернизации экспериментальной установки CMS, обеспечивающая эффективную работу всех систем при высокой светимости LHC (более  $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) при повышении энергии

протон-протонных столкновений до проектного значения 14 ТэВ в системе центра масс.

Специалисты ОИЯИ внесли большой вклад в модернизацию детекторных систем адронного калориметра и мюонной системы. Проведены замена, проверка и ввод в эксплуатацию электроники считывания и сервисных систем адронного калориметра. В рамках модернизации мюонной системы 108 детекторов четырех мюонных станций, расположенных в области больших загрузок, оснащены новой электроникой повышенного быстродействия. На рис. 1 показан стенд длительной

Рис. 1. Стенд длительной проверки работоспособности детекторов ME1/1



Fig. 1. Stand for long-term testing of the performance of ME1/1 detectors

forward muon station ME1/1, which has unique characteristics (spatial resolution of  $\sim 50 \mu\text{m}$  and time resolution of  $\sim 3 \text{ ns}$ ), provides precision measurements of the muon track coordinates. In Run2 at the LHC in 2015–2018, the LHC energy reached  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ . The full volume of experimental data recorded by the CMS experiment over two runs corresponds to the integral luminosity of  $L_{\text{int}} \sim 190 \text{ fb}^{-1}$ .

During two long-term shutdowns of the LHC in 2013–2015 and in 2019–2022, the first stage of upgrading the CMS detector was carried out. It ensured the efficient operation of all systems at high luminosity of the LHC over  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  with an increase in the energy of proton–proton collisions to the c.m.s. design value of 14 TeV.

JINR specialists have made a great contribution to the upgrade of the detector systems of the hadron calorimeter and the muon system. Replacement, testing and commissioning of the readout electronics and service systems of the hadron calorimeter were carried out. As part of the muon system upgrade, 108 detectors of four muon stations located in the high-occupancy area have been equipped with new high-speed electronics. Figure 1 shows the final stage of a long-term performance test of the ME1/1 detectors before their installation into the CMS detector.

Currently, the preparation of the CMS muon system detectors for Run3 is being completed. This run will last until the end of 2025 (the expected integral luminosity will increase to  $L_{\text{int}} \sim 350 \text{ fb}^{-1}$ ).

проверки работоспособности детекторов ME1/1 перед их монтажом в экспериментальную установку.

В настоящее время заканчивается подготовка детекторов мюонной системы CMS к третьему периоду набора экспериментальных данных (Run3), который продлится до конца 2025 г. (ожидаемая интегральная светимость возрастет до  $L_{\text{int}} \sim 350 \text{ фб}^{-1}$ ).

Начиная с 2029 г. предусмотрена работа LHC при повышенной светимости (High-Luminosity LHC, HL-LHC) — вплоть до  $7,5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что позволит увеличить статистику более чем на порядок ( $L_{\text{int}} \sim 3000 \text{ фб}^{-1}$ ). Это обеспечит дальнейшее тщательное изучение природы бозона Хиггса и поиск возможных отклонений от предсказаний Стандартной модели (СМ), указывающих на проявление сигналов новых физических явлений. В частности, важно существенно повысить точность измерения констант связи бозона Хиггса (ожидаемая точность  $\sim 3\text{--}5\%$ ), так как наблюдаемый вклад от рождения новых частиц может оказаться гораздо меньше текущей точности измерений (10–30%). Увеличение статистики данных позволит осуществить поиск процессов за рамками СМ, которые характеризуются сечениями, лежащими ниже поро-

Starting from 2029, the LHC is expected to operate at increased luminosity up to  $7.5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (High Luminosity, HL-LHC). It will increase the statistics by more than an order of magnitude ( $L_{\text{int}} \sim 3000 \text{ fb}^{-1}$ ). This will further allow studying thoroughly the nature of the Higgs boson and searching for possible deviations from the SM predictions, indicating the manifestations of signals of new physical phenomena. In particular, it is important to significantly improve the accuracy of measuring the coupling constants of the Higgs boson (expected accuracy is  $\sim 3\text{--}5\%$ ), since the observed contribution from the production of new particles may be much less than the current measurement accuracy (10–30%). The increase in data statistics will allow us to search for processes beyond the SM, which are characterized by cross sections that are below the threshold of the current sensitivity of experimental measurements (scenarios with dark matter particle candidates, extended supersymmetric models, Higgs-portal theories, etc.). Among them, we are particularly interested in processes in which the production of long-lived particles (LLP) is expected with decay vertices located at a considerable (from several centime-

га текущей чувствительности экспериментальных измерений (сценарии с частицами-кандидатами на роль темной материи, расширенные суперсимметричные модели, теории хиггсовского портала и т.д.). Среди них особый интерес представляют процессы, в которых ожидается рождение так называемых долгоживущих новых частиц (Long-Lived Particles, LLP) с вершинами распада, находящимися на значительном (от нескольких сантиметров до десятков метров) расстоянии от точки взаимодействия пучков протонов (рис. 2). Также различные сценарии поиска новой физики предсказывают рождение частиц с поперечным импульсом, намного превышающим их массу (boosted objects). Как следствие, продукты их распада представляют собой очень узкие струи, пересекающиеся в пространстве.

Рис. 2. Возможные топологии событий при рождении долгоживущих частиц (LLP)

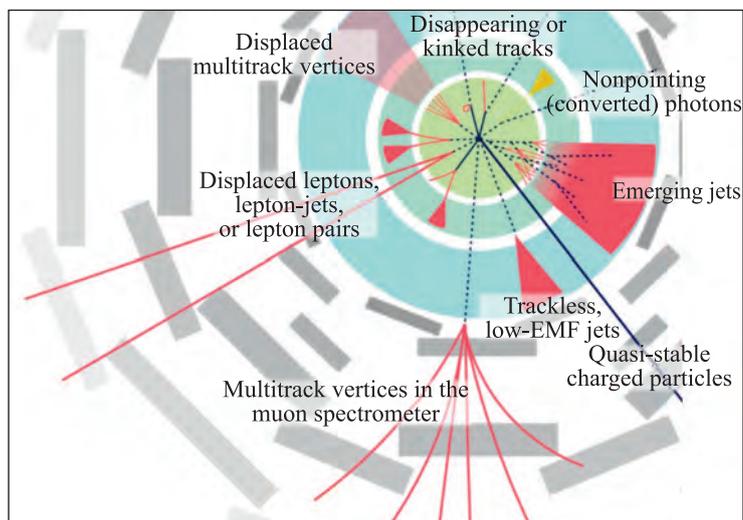


Fig. 2. Possible topologies of events at the production of long-lived particles (LLP)

ters to tens of meters) distance from the interaction point of proton beams (Fig. 2). Also, various scenarios for the search for new physics predict the production of particles with a transverse momentum much larger than their mass (boosted objects). Consequently, their decay products are very narrow jets overlapping in space.

The registration of such processes requires a significant expansion of the possibilities of the event selection system, along with the use of nonstandard algorithms for event reconstruction, for example, reconstruction of tracks and measurement of particle energy using muon stations without using a tracker. Good separation of double jets, especially at high interaction density, requires a calorimeter with good longitudinal and transverse segmentation, which facilitates the measurement of particle flow energy.

Для регистрации таких процессов требуется существенное расширение возможностей системы отбора событий, а также использование нестандартных алгоритмов реконструкции событий, например реконструкции треков и измерения энергии частиц с помощью мюонных станций без привлечения трекера. Для лучшего разделения двойных струй, особенно в условиях высокой плотности взаимодействий, необходим калориметр с такой продольной и поперечной сегментацией, которая облегчает измерение энергии потока частиц.

При увеличении светимости коллайдера детекторы и электроника считывания должны быть адаптированы для работы в условиях существенно увеличенных радиационных нагрузок. Физиками ОИЯИ проводится комплексное исследование деградации параметров детекторов при работе в условиях HL-LHC.

Вторая фаза модернизации CMS для работы в режиме HL-LHC начнется в 2026 г. и затронет все ключевые детекторные элементы установки: трекер, калориметры и мюонную систему. ОИЯИ принимает активное участие в модернизации мюонной системы CMS и в создании калориметра с высокой гранулярностью (HGCal). Выполнен большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направлен-

ных на исследование радиационных свойств материалов и поиск технических решений в создании новых систем детекторов.

Сотрудники ОИЯИ совместно со специалистами из Белорусского государственного университета (Минск) активно участвуют в создании детектирующих элементов (кассет) калориметра HGCal, состоящих из кремниевых сенсоров и сцинтилляционных модулей, смонтированных на медной панели охлаждения. Кроме того, определяющий вклад наших специалистов внесен в разработку, моделирование и создание стенда для проверки работоспособности кассет HGCal. Испытания, включая тесты с космическими лучами, будут проводиться в специальных условиях — при температуре помещения  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение двух недель.

As the luminosity of the collider increases, the detectors and readout electronics must be adapted to operate at significantly increased radiation loads. JINR physicists are conducting a comprehensive study of the degradation of detector parameters when operating under HL-LHC conditions.

The second phase of upgrading the CMS detector to operate in the HL-LHC mode will begin in 2026 and will affect all the key elements of the detector: tracker, calorimeters, and muon system. JINR takes an active part in the upgrade of the CMS muon system and in the construction of the High Granularity Calorimeter (HGCal). A large amount of research and development work has been carried out, aimed at studying the radiation properties of materials and choosing technical solutions in the development of new detector systems.

The JINR group, together with specialists from the Belarusian State University (Minsk), actively participates in the construction of detecting elements (cassettes) of the HGCal. These cassettes consist of silicon sensors and scintillation modules installed on a copper cooling panel. In addition, our specialists have made the decisive contribution to the development, simulation and construction of a stand for testing the performance of HGCal cassettes. Tests, including those with cosmic rays, will be carried out under special conditions in the laboratory at a temperature of  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  for two weeks.