

A. V. Зарубин, С. В. Шматов

Участие ОИЯИ в проекте CMS

Уже около 20 лет — с начала разработки концепции эксперимента — физики ОИЯИ участвуют в проекте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) в составе сотрудничества научных центров России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS).

В течение последних двух лет, начиная с запуска большого адронного коллайдера (LHC) при энергии 7 ТэВ в конце марта 2010 г., в эксперименте CMS группа ОИЯИ принимала участие в наборе, обработке и анализе первых данных, получаемых в столкновении пучков протонов на LHC.

В ходе работ в экспериментальном зале LHC был проведен запуск и обеспечена техническая эксплуатация внутренних торцевых детекторных систем в рамках ответственности ОИЯИ: торцевого адронного калориметра (HE) и камер передних мюонных станций (ME1/1). Эффективность работы адронного калориметра составила ~100%, а торцевых мюонных станций системы (CSC) — 98,3%.

Проводится координация и планирование участия институтов коллаборации RDMS CMS и специалистов ОИЯИ в центральных сменах по управлению установкой и набором данных. В конце октября 2010 г. была набрана статистика, соответствующая 43,17 пб⁻¹ интегральной светимости, в 2011 г. к началу октября набранная статистика достигла 3,91 фб⁻¹. Эффективность набора данных превышает 90%.

Оперативный контроль состояния и работоспособности детекторных систем, мониторинг набора и качества экспериментальных данных осуществлялся как непосредственно в центрах управления экспериментом в ЦЕРН, так и из регионального центра удаленного контроля и анализа экспериментальных данных в ОИЯИ [1]. В ходе быстрого анализа экспериментальных данных проводится измерение физико-технических характеристик и калибровка детекторных систем HE и ME1/1.

A. V. Zarubin, S. V. Shmatov

JINR Participation in the CMS Project

JINR physicists have been participating in the Compact Muon Solenoid (CMS) project for about 20 years, since the very beginning of the experiment concept work-out. JINR participates in the CMS experiment in the framework of the Russian CMS collaboration and JINR Member States.

During the last two years, since the Large Hadron Collider (LHC) start-up at the energy of proton beams 7 TeV at the end of March 2010, the JINR group has taken part in data taking, processing and physics analysis of data from the first proton beam collisions.

The commissioning and maintenance of the inner endcap detectors, where RDMS bears a full responsibility for the Endcap Hadron Calorimeters (HE) and the first Forward Muon Stations (ME1/1), were carried out in the experimental CMS cavern. The operational efficiency for HE is about 100%, while for ME1/1 it is 98.3%.

The JINR plans and coordinates participation of the RDMS CMS institutions and JINR specialists in shifts aimed at detector operation and data taking. The integrated luminosity of 43.17 pb⁻¹ was collected by the end of October 2010 and 3.91 fb⁻¹ for the beginning of October 2011. The data taking efficiency is above 90%.

Detector operation and data taking shifts, including the fast detector monitoring, monitoring of data taking and data quality, were carried out in the CMS Control Room at CERN, as well as in the remote operation centre in Dubna [1]. The detector performance measurements and detector calibration have been performed as results of fast data analysis for HE and ME1/1.

By using data of 2010 and 2011, the spatial resolution of ME1/1 chambers has been derived. The mean value of resolution is about 62 μm and it varied from 58 to 68 μm with the threshold of transverse momentum from 20 to

С помощью экспериментальных данных 2010–2011 гг. изучено пространственное разрешение мюонных станций. Исследовано влияние величины магнитного поля соленоида CMS на пространственное разрешение станции ME1/1. Средняя величина пространственного разрешения станции ME1/1 составляет ~62 мкм и варьируется от 58 до 68 мкм в зависимости от порога регистрации поперечного импульса от 20 до 2,5 ГэВ, что удовлетворяет требованиям, заложенным в техническом проекте CMS, — 75 мкм для камер ME1/1. В условиях большой загрузки (при многовершинных событиях) значение разрешения не меняется. Проведено исследование взаимного положения отдельных слоев камер станции ME1/1. Получена оценка качества сборки камер на основе данных от столкновений протонов. Среднеквадратичный разброс слоев камеры не превышает 20 мкм, что согласуется с результатами непосредственных измерений при сборке камер. Также была выполнена калибровка торцевых областей адронного калориметра (HE) с точностью ~3% в азимутальном направлении (что удовлетворяет требованиям CMS).

Выполнены исследования по разработке методики выравнивания сигналов в различных частях переднего калориметра с помощью событий с прямыми фотона-

ми и струями [2]. Предложенная методика, основанная на минимизации потерь полной поперечной энергии в калориметре, позволяет устранить погрешность предшествующих калибровок, величина которой в области переднего калориметра может достигать более 20%. Предложены ограничения на кинематические параметры события, которые позволяют использовать для калибровки переднего калориметра события с поперечными импульсами фотона более 30 ГэВ и поперечными энергиями струй более 70 ГэВ при сохранении погрешности калибровки в пределах 2%.

Завершена разработка методики определения абсолютной шкалы энергии струи в установке CMS с использованием процессов с распадами W -бозонов на легкие кварки в $t\bar{t}$ -событиях [3]. Рассчитаны поправки на систематические сдвиги шкалы, вызванные различными эффектами, которые могут достигать более 10%. С учетом поправок величина неопределенности шкалы находится в пределах 3% при поперечной энергии струи более 30 ГэВ.

Основные усилия группы ОИЯИ в физической программе CMS были сосредоточены на исследованиях различных процессов рождения пар мюонов и многоструйных событий для проверки предсказаний стан-

2.5 GeV, which satisfied the requirements of the Technical Design Project for ME1/1 (75 μm). There are no dependents on pill-up. A procedure of alignment correction of inner CSC layers of ME1/1 was developed. The layers are shifted with regard to each other by no more than 20 μm . These shifts are in a good agreement with measurements at the production phase. The calibration of the endcap hadron calorimeter was also performed with CMS required accuracy ~ 3% in the azimuthal direction.

A procedure of equalizing signals in the different parts of the forward calorimeter (HF) with prompt photons and jets was suggested [2]. This method is based on minimization of the total missing energy in the calorimeter. It allows one to eliminate the values of calibration errors which can be up to 20%. The accuracy of the method is within 2% for jet energy more than 70 GeV and photon momentum above 30 GeV.

Development of the algorithm of jet energy corrections with W -boson decays into light quarks in $t\bar{t}$ associated production was completed by the end of 2010 [3]. Different systematic effects were analyzed. It was computed that the total value of the systematic shifts can reach about 10%.

Uncertainties of jet energy scale after corrections are within 3% for jet energy more than 30 GeV.

The main efforts of the JINR group in the CMS physics programme have been focused on research of muon pairs and multiple jet production to check the Standard Model predictions and to search for physics beyond SM [4, 5].

The dimuon mass spectrum was studied for the different invariant masses (Fig. 1). The kinematic cuts were optimized and good agreement of the experimental data with Monte Carlo predictions is shown [6]. On the basis of these results, the differential cross section of Drell–Yan mass spectrum was measured in both dimuon and dielectron channels for the mass range $15 \text{ GeV} < M_{ll} < 600 \text{ GeV}$ based on $(35.9 \pm 1.4) \text{ pb}^{-1}$ of pp collisions at 7 TeV [7]. These results are compared to NNLO theoretical predictions of the Standard Model.

A search for a new high-mass resonance decaying to muon pairs has been performed. It is based upon data taken in 2010–2011 and corresponds to an integrated luminosity of 40 pb^{-1} for 2010 and 1.1 fb^{-1} for 2011 of CMS data collected at 7 TeV.

Upper limits on the inclusive cross section of heavy dilepton resonances are predicted in theoretical models

дартной модели и поиска новой физики за ее пределами [4, 5].

Исследован спектр мюонных пар в различных интервалах значений инвариантной массы (рис. 1). Проведено исследование влияния различных кинематических порогов на выделение сигнала и подавление фона, показано хорошее согласие экспериментальных данных и фона [6]. Определено дифференциальное сечение рождения мюонных пар в процессе Дрелла–Яна в диапазоне инвариантных масс от 15 до 600 ГэВ [7]. Измеренные значения хорошо согласуются с NNLO предсказаниями стандартной модели.

На статистике 2010 и 2011 гг. (40 пб⁻¹ и 1,1 фб⁻¹ соответственно), полученной CMS в столкновениях пучков протонов при энергии 7 ТэВ, проведен поиск нового тяжелого резонансного состояния в канале с двумя мюонами [6]. Рождение новых тяжелых резонансов предсказывается многими теоретическими моделями, например, моделями с дополнительными калибровочными бозонами (Z') и моделями с дополнительными измерениями (Randall–Sundrum), где присутствуют калуца–кляйновские возбужденные состояния гравитона (G_{KK}). Для расширенного калибровочного сектора с константами связи SM на 95%-м уровне достоверности были исключены новые нейтральные калибровочные

бозоны (Z_{SSM}) с массой менее 1780 ГэВ, а для калибровочной модели, обусловленной суперструнной теорией (Z_ψ), — с массой менее 1440 ГэВ. Массовый предел G_{KK} составил от 1240 до 1640 ГэВ в зависимости от величины константы связи модели k/M_{Pl} (0,05–0,1). Следует отметить, что комбинированный анализ данных по рождению мюонов и электронных пар позволил расширить эти пределы вплоть до 1940 (1620) ГэВ для Z_{SSM} (Z_ψ) и 1450–1780 ГэВ для RS1-гравитона. Таким образом, даже в условиях пониженной энергии сталкивающихся протонов эксперимент CMS существенно продвинулся в области измеренных инвариантных масс пары мюонов и установил новые ограничения по сравнению с предыдущими экспериментами на тэватроне (FNAL, США). К настоящему времени зарегистрирована димюонная пара с инвариантной массой 1203 ГэВ (рис. 2).

Для проведения исследований по поиску микроскопических квантовых черных дыр, предсказываемых в сценариях с гравитацией на масштабе \sim ТэВ, выполнен анализ теоретических предсказаний и моделирование ожидаемых событий. Рассчитан диапазон сечений рождения черных дыр и вероятности их распада для различных теоретических механизмов, используемых в генераторах CHARYBDIS2, CATFISH, BlackMax.

Рис. 1. Спектр мюонных пар и вклад от различных источников фоновых процессов

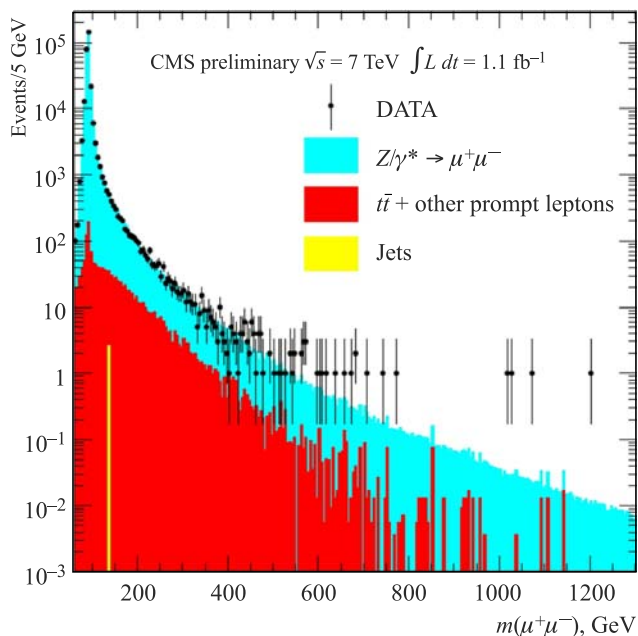


Fig. 1. The dimuon mass spectrum. The different backgrounds are given

with extra gauge bosons (Z') or as Kaluza–Klein graviton excitations (G_{KK}) in the Randall–Sundrum model. These limits exclude at 95% confidence level a Z' with Standard-Model-like couplings (Z_{SSM}) below 1780 GeV, the superstring-inspired Z_ψ below 1440 GeV [6]. The mass limits of G_{KK} was from 1240 to 1640 GeV for values of the coupling parameter k/M_{Pl} of (0.05–0.1). The combined analysis using dimuon and dielectron events increases significantly these limits up to 1940 (1620) GeV for Z_{SSM} (Z_ψ) and 1450–1780 GeV for RS1 graviton. Thus, CMS extended the invariant mass region studied so far covered by Tevatron (FNAL, USA) even at the low-energy regime of the LHC and derives the new limits on new physics. Today the heaviest invariant mass of the Drell–Yan pair detected by CMS is 1203 GeV (Fig. 2).

The analysis of theoretical predictions and Monte Carlo simulation of expected events have been fulfilled to search for microscopic quantum black holes arising in the models of TeV-scale gravity. The black hole production cross sections were computed for the different theoretical assumptions used in MC generators CHARYBDIS2, CATFISH, and BlackMax. The total transverse energy is

Сравнение теоретических предсказаний с полученными экспериментальными данными по рождению событий с большими значениями суммарной поперечной энергии частиц позволило установить пределы на минимальную массу черных дыр и значения фундаментальной многомерной постоянной Планка M_D . Значения минимальной массы черной дыры, исключенной текущими данными CMS ($1,09 \text{ fb}^{-1}$), составляют 4,1–5,1 ТэВ для значений M_D от 3,5 до 1,5 ТэВ [8].

Физики ОИЯИ принимали участие в подготовке к сеансу 2012 г. и к сеансам с высокой светимостью с ожидаемыми интегральными светимостями до 10 и 3000 fb^{-1} соответственно. Проведена оценка потенциала CMS по наблюдению сигнала новой физики за пределами стандартной модели для интегральной светимости до 10 fb^{-1} (ожидаемой к концу 2012 г.) при энергии

столкновений 7 ТэВ и для интегральной светимости до 3000 fb^{-1} — при энергии столкновений 14 ТэВ.

Физики ОИЯИ участвовали в проведении шести физических анализов, основанных на данных CMS 2010–2011 гг., и в подготовке четырех публикаций кол-лаборации.

Компьютерная ферма ОИЯИ уровня Tier-2 была активно вовлечена в обработку и анализ данных [9]. Tier-2 ОИЯИ ассоциирован с физическим анализом в группе CMS Exotica и реконструкцией физических объектов CMS Muon, связан линиями передачи данных с различными Tier-0/Tier-1/Tier-2 в ЦЕРН, Германии, Франции и т. д. В ОИЯИ было передано через систему PHEDEX около 600 ТБ данных, включая все экспериментальные события, зарегистрированные детекторными системами CMS, после предварительной обработки в центрах

Рис. 2. Визуализация экспериментального события рождения пары мюонов с инвариантной массой 1203 ГэВ

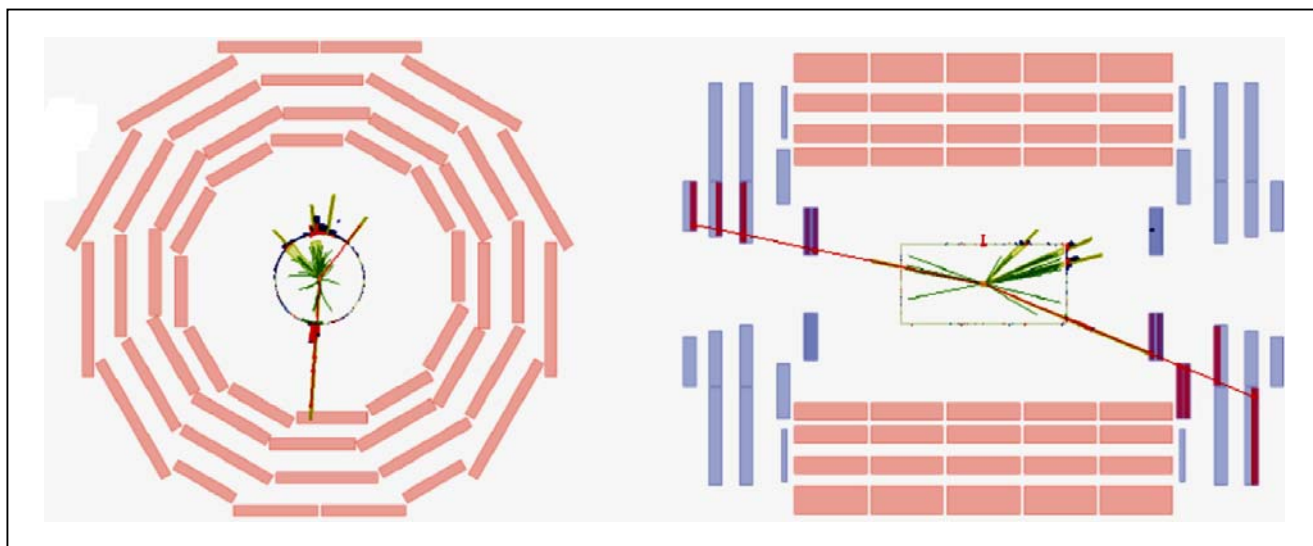


Fig. 2. Displays of the highest-mass dimuon events with a mass of 1203 GeV

used to separate black hole events from the backgrounds. Comparison of data and MC event gives the experimental limits on minimal values of a black hole and fundamental multidimensional Planck mass M_D . Depending on the model, black holes masses are below roughly 4.1 to 5.1 TeV for M_D values of 3.5–1.5 TeV [8].

Besides active participation in data processing and analysis, the JINR physicists have also taken part in preparation of the run of 2012 and the runs at high luminosity with integrated luminosities of 10 and 3000 fb^{-1} , respectively. With MC data the CMS potential to search for signals from new physics beyond the Standard Model was estimated for the integrated luminosity values up to 10 fb^{-1}

expected by the end of 2012 at 7 TeV collision energy and up to 3000 fb^{-1} at 14 TeV collision energy.

In total, JINR physicists contributed to six CMS Physics Analyses, based on CMS data of 2010–2011, and four CMS papers published in scientific journals.

In 2010–2011, the JINR Tier-2 sites have been involved actively in data processing and analysis [9]. The JINR site is associated with two CMS Physics Groups (Exotica and Muon) and is linked with Tier-0/Tier-1/Tier-2 centres in CERN, Germany, France, etc. A total of about 600 TB data including all CMS experimental data after reprocessing at Tier-1 were transferred to the RDMS of Tier-2 by using the

уровня Tier-1. Максимальная скорость передачи данных составила 149 МБ/с. Эксплуатация Tier-2 ОИЯИ в течение первого сеанса CMS по набору данных показала его высокую надежность и работоспособность.

Функционирующий в Дубне удаленный региональный центр CMS в ОИЯИ [1] продемонстрировал свою работоспособность и высокую надежность в ходе набора данных 2010–2011 гг. Были задействованы системы мониторинга качества данных HE и ME1/1, глобальной системы общего контроля качества данных как в онлайн, так и в офлайн-режимах (глобальный DQM), системы контроля высокого и низкого напряжения, системы мониторинга сбора данных (DAQ). Помимо обеспечения удаленной работы в сменах по набору данных центр обеспечивал поступление данных в режиме онлайн, их быструю обработку и анализ, публикацию полученных результатов (обработанных файлов и гистограмм) в специальной базе данных CMS.

PHEDEX system in the period of the LHC operation phase. The maximum transfer rate to RDMS Tier-2 was 149 MB/s.

The JINR CMS remote operation centre was involved efficiently in data taking in 2010–2011 [1]. The subsystem data quality monitoring, online and offline global data quality monitoring, slow control systems, DAQ monitoring system were in use remotely. The JINR ROC centre provides opportunity for participation in data taking and analysis within 24 hours during 7 TeV CMS run, online data processing and analysis, and publication of results (produced files and histograms) in the CMS data base.

Список литературы / References

1. *Golunov A. et al.* The JINR CMS Remote Operation Centre // Proc. of the 4th Int. Conf. “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education”, Dubna, June 28 – July 3, 2010.
2. *Konopliyanikov V., Shulga S., Zarubin A.* HF Calorimeter Calibration Using Events with Direct Photons and Jets. CMS IN-2011/001.
3. *Altsybeev I. et al.* Jet Energy Scale Calibration Using $W \rightarrow q\bar{q}$ Process. CMS IN-2011/010.
4. *Шматов С.В.* Поиск дополнительных измерений в эксперименте CMS на большом адронном коллайдере // Ядерная физика. 2011. Т. 74, № 3. С. 511–517.
5. *Shmatov S.V.* Search for Extra Dimension in the CMS Experiment at the Large Hadron Collider // Yad. Fiz. 2011. V. 74, No. 3. P. 511–517.
6. *Савина М.В.* Рождение черных дыр на LHC: особенности, проблемы, ожидания // Ядерная физика. 2011. Т. 74, № 3. С. 518–526.
7. *Savina M.V.* Black-Hole Production at LHC: Special Features, Problems, and Expectations // Yad. Fiz. 2011. V. 74, No. 3. P. 518–526.
8. *Acosta D. et al.* Search for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs with Collisions Gathered at 7 TeV. CMS PAS EXO-10-013; arXiv:1103.0981; JHEP. 2011. V. 05. P. 093; CMS AN-2011/222, CMS AN-2011/278, CMS PAS EXO-11-019.
9. *Belotelov I. et al.* Drell–Yan Differential Cross Section Measurement at 7 TeV in the Muon Channel. CMS AN-2011/013; *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. Measurement of the Drell–Yan Cross Section in pp -Collisions at 7 TeV. CMS PAS EWK-10-007.
10. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider. CMS PAS EXO-11-019; arXiv:1012.3375; Phys. Lett. B. 2011. V. 697. P. 434–453;
11. *Ferapontov A. et al.* Searches for Microscopic Black Holes Production in pp -Collisions at 7 TeV with the CMS Detector. CMS AN-2011/256, CMS PAS EXO-11-071.
12. *Gavrilov V. et al.* RDMS CMS Tier-2 Centres at the Running Phase of LHC // Proc. of the 4th Int. Conf. “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education”, Dubna, June 28 – July 3, 2010.