

И. А. Голутвин, А. В. Зарубин, С. В. Шматов

Участие ОИЯИ в проекте CMS

В конце 2018 г. был завершён второй сеанс (Run 2) на Большом адронном коллайдере, длившийся три года, при энергии столкновений пучков 13 ТэВ в с.с.м. в условиях светимости до $2,1 \cdot 10^{34} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В эксперименте CMS были получены важнейшие результаты по изучению свойств бозона Хиггса, прецизионным измерениям процессов Стандартной модели взаимодействий (СМ) и проверке ее предсказаний, включая редкие распады наподобие распадов бозона Хиггса или B -мезонов на пару мюонов, по поиску сигналов «новой» физики за пределами СМ [1]. Особо интересно отметить наблюдение эффекта «бегущей» массы топ-кварка, предсказанного СМ, распады бозона Хиггса на пары c - и b -кварков, а также обнаружение совместного рождения одиночного t -кварка и Z -бозона.

В ходе обработки и анализа данных LHC Run 2 с начальной статистикой, соответствующей интегральной светимости (L_{int}) до 36 фб^{-1} , в каналах с парой мюонов и множественным рождением жестких частиц

физиками ОИЯИ были получены новые экспериментальные ограничения на ряд моделей новой физики и проведена проверка предсказаний СМ. Анализ данных с $L_{\text{int}} = 140 \text{ фб}^{-1}$ также уже почти завершён, результаты в стадии утверждения коллаборацией.

Приоритетным направлением исследований группы ОИЯИ в CMS является поиск новых тяжелых резонансов, предсказываемых многими теоретическими моделями, в частности моделями с расширенным калибровочным сектором, содержащим дополнительные калибровочные бозоны (Z' со спином 1), сценариями низкоэнергетической гравитации (массивные калуца-клейновские моды гравитона — частицы со спином 2) и моделями с кандидатами в темную материю (переносчики взаимодействия между темной и видимой материей, частицы со спином 0 или 1).

Комбинированный анализ рождения мюонных и электронных пар позволил установить нижние пределы на массы предсказываемых резонансов [2]. На рис. 1, слева приведены зависимости сечений рожде-

I. A. Golutvin, A. V. Zarubin, S. V. Shmatov

JINR Participation in the CMS Project

The second run of the Large Hadron Collider (LHC Run 2) was completed at the end of 2018. It lasted about three years at a collision energy of 13 TeV with luminosity up to $2.1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

The CMS experiment obtained many pioneering results, among which the most important are: studying the properties of the Higgs boson, precision measurements of the Standard Model (SM) predictions, including rare decays of the Higgs boson or B mesons into a pair of muons, searches for signals of new physics beyond the SM [1]. Of special note are studies when CMS physicists have investigated an effect called the “running” of the top quark mass, a fundamental quantum effect predicted by the Standard Model, as well as a direct search for a Higgs boson decaying into charm and bottom quarks and observation of single top quark production together with a Z boson.

The JINR physicists have concentrated on the analysis of physics processes with pair of muons in the final states and multiple production of hard particles. They obtained new experimental limits on a number of models of new physics. The data of the LHC Run 2 with initial statistics, corresponding to an integrated luminosity (L_{int}) up to 36 fb^{-1} , were used for these studies. A measurement and detailed study of the characteristics of the lepton pairs production in the Drell–Yan process were also carried out. The analysis based on data with $L_{\text{int}} = 140 \text{ fb}^{-1}$ is also almost completed, but these results are in the stage of approval by the collaboration. Besides, it is important to note that some work was continued to complete the analysis of data from the previous LHC Run 1 (2010–2012), which took place at an energy of 7–8 TeV.

Searches for new heavy resonances predicted by different theoretical models are a priority of the JINR group.

Рис. 1. Слева: верхний предел (95% C.L.) на сечение рождения пар лептонов, нормированное на сечение рождения Z -бозона, для резонанса со спином 1. Приведены теоретические сечения для модели SSM и для калибровочной модели Z'_ψ [2]. Справа: верхний предел (95% C.L.) на значения масс частицы темной материи (дираковского фермиона) в зависимости от массы переносчика взаимодействий между СМ и ТМ, в упрощенной эффективной модели для векторного переносчика взаимодействий [2]. Направление штриховки на линиях показывает исключенные области значений

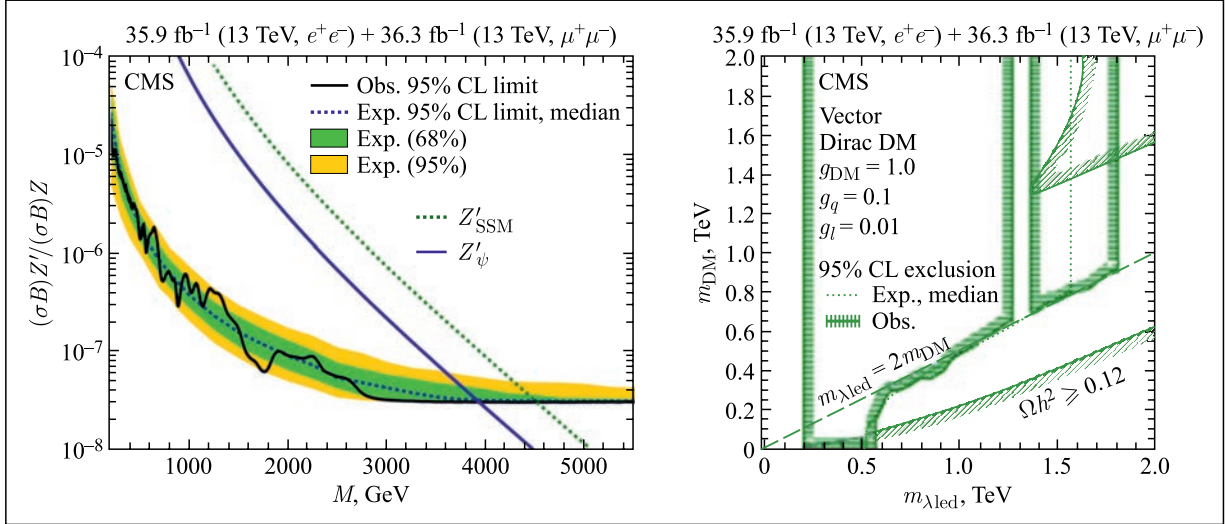


Fig. 1. Left: the upper limits at 95% CL on the product of production cross section and branching fraction for a spin-1 resonance, relative to the product of production cross section and branching fraction of a Z boson, for the combination of dielectron and dimuon channels [2]. Theoretical predictions for the spin-1 Z'_{SSM} and Z'_ψ are shown for comparison. Right: limits at 95% CL for the masses of the DM particle, which is assumed to be Dirac fermion, and its associated mediator, in a simplified model of DM production via a vector mediator [2]. The lines with the hatching represent the excluded regions

Among them are the new gauge bosons Z' with a spin 1, which arises in the models with extended gauge sector, massive Kaluza–Klein spin-2 graviton states from scenarios of low energy gravity (the Randall–Sundrum model of extra dimensions, RS1), and high-mass dark matter mediators with spin 1 or 2.

A combined analysis has been performed for new high-mass resonances decaying into electron or muon pairs [2]. Observations are in agreement with Standard Model expectations. Upper limits on the product of a new spin-1 and spin-2 resonance production cross section and branching fraction to dileptons are calculated in a model-independent manner (Fig. 1, left). The limits are expressed as a function of R_σ , which is the ratio of the cross section for dilepton production via a new boson to the measured cross section for dilepton production via the Z boson in the mass window 60–120 GeV. Expressing the limits as a ratio reduces the dependency on the theoretical prediction of the Z boson cross section as well as the correlated experimental uncertainties. For the Z'_{SSM} (Z'_ψ) particle, which arises in the sequential Standard Model (superstring-inspired model), a lower mass limit of 4.5 (3.9) TeV is set at 95% confidence level (Fig. 1, left). These limits extend the previous ones from CMS by 1.1 TeV in both models. Limits for other models with charged lepton pair production via

a Z' vector boson can, in the narrow-width approximation, be obtained by recasting the combined upper limit at 95% CL discussed above. Commonly considered models are the generalized sequential model (GSM), containing the Z'_{SSM} boson that has SM-like couplings to SM fermions; GUT models based on the E_6 gauge group, containing the Z'_ψ boson; and high-mass neutral bosons of the left (L)-right (R) symmetric extensions of the SM based on the $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_{B-L}$ gauge group, where $B-L$ refers to the difference between baryon and lepton numbers. The lightest Kaluza–Klein graviton arising in the RS1 models, with coupling parameters κ/M_{5D} of 0.01, 0.05, and 0.10, is excluded at 95% confidence level below 2.10, 3.65, and 4.25 TeV, respectively (κ is the warp factor of the five-dimensional anti-de Sitter space and M_{5D} is the reduced Planck mass) [2]. Thus, the CMS experiment has made significant progress in the field of measured invariant masses of muon pairs and has established new limits compared to previous measurements at the LHC.

The results are also interpreted in the context of a simplified model with a DM particle that has sizeable interactions with SM fermions through an additional spin-1 high-mass particle mediating the SM–DM interaction. In the simplified model under consideration, only one DM particle exists, which is assumed to be a Dirac fermion.

ния новых резонансов со спином 1 и 2, с учетом вероятности их распада на пару лептонов, от инвариантной массы лептонов. Для уменьшения влияния систематических эффектов сечения нормированы на сечение рождения Z -бозона СМ. Для расширенного калибровочного сектора с константами связи с материей, равными константам связи Z -бозона в СМ (SSM), значения масс новых нейтральных калибровочных бозонов Z_{SSM} были исключены с 95%-м уровнем достоверности вплоть до 4,5 ТэВ, а для Z'_ψ калибровочной модели, обусловленной суперструнной теорией, — до 3,9 ТэВ. В рамках приближения узкого резонанса с помощью реинтерпретации данных также были получены ограничения на массы других дополнительных векторных бозонов — в моделях с цепочками последовательных нарушений симметрии с группой E_6 , в классе моделей Generalized Sequential Model (GSM) и моделей с лево-правой симметрией (LRM), основанных на расширенной калибровочной группе $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_{B-L}$ (где B и L — соответственно барионное и лептонное число). С использованием того же наблюдаемого канала с парой конечных лептонов были определены минимально возможные значения массы первого калуца-клейновского возбуждения гравитона $G_{KK}^{(1)}$ в модели с дополнительными изме-

рениями Рэндалл–Сандрума, тип 1 (RS1) — 2,10, 3,65 и 4,25 ТэВ для константы связи $c = 0,01, 0,05$ и $0,10$ (где c определяется как отношение κ/M_{5D} , κ — кривизна пространства анти-де-Ситтера, а M_{5D} — пятимерный планковский масштаб) [2]. Таким образом, коллаборация CMS существенно продвинулась в области измеренных инвариантных масс пар мюонов и установила новые ограничения по сравнению со своими предыдущими измерениями на LHC.

Результаты по поиску новых тяжелых дилептонных резонансов были впервые проинтерпретированы в рамках эффективной модели взаимодействия СМ и скрытого сектора темной материи. Получены пределы на массы частиц темной материи и переносчиков взаимодействия из видимого в скрытый сектор для вариантов векторного (рис. 1, справа) и аксиально-векторного переносчика. В 2019 г. завершен очередной цикл исследований на данных LHC Run 2 сигналов нерезонансного типа в дилептонном канале, которые позволили установить ограничения на параметры широкого ряда физических сценариев за рамками СМ, предсказывающих отклонения от СМ. В частности, для моделей контактных взаимодействий установлен нижний предел на характерный масштаб взаимодействий Λ , который составил 20–32 ТэВ. Также в моде-

Limits at 95% confidence level on the masses of the dark matter particle and its mediator are presented for two cases with different sets of benchmark coupling values, i.e., dark matter production via a vector (Fig. 1, right) or axial vector mediator.

A search for non-resonant excesses in the invariant mass spectra of electron and muon pairs has also been completed in 2019 [3]. No significant deviation from the Standard Model is observed. Limits are set at 95% confidence level on energy scales for two general classes of non-resonant models. For a class of fermion contact interaction models, lower limits ranging from 20 to 32 TeV are set on the characteristic compositeness scale Λ . For the Arkani-Hamed–Dimopoulos–Dvali model of large extra dimensions, the first results in the dilepton final state at 13 TeV are reported, and values of the ultraviolet cutoff parameter Λ_T below 6.1–9.3 TeV are excluded [3].

Being based on Run 2 data, the CMS performed important tests of the perturbative framework of the SM. In particular, JINR group contributed to a precision measurement of the differential cross section for the Drell–Yan process at 13 TeV [4]. The total cross section is measured as a function of dilepton invariant mass in the range 15 to

2000 GeV, and compared with the perturbative predictions of the SM (Fig. 2, left). The measured differential cross sections are in good agreement with the theoretical calculations.

An additional analysis aimed to search for new physics, closely related to the study of the “pure” dilepton channel and, in a sense, its extension, is devoted to the search for light resonances in the final state with two muons of the opposite sign accompanied by at least one jet from the b quark. The cross section of the associated production with bottom quarks of a new light boson (scalar or vector), times the dimuon branching fraction of its decay, can be large in proton–proton collisions at the LHC, e.g., in 2HDM or in some Z' models. This analysis [5] is based on data from proton–proton collisions at center-of-mass energies of 8 and 13 TeV, collected with the CMS detector at the LHC and corresponding to integrated luminosities of 19.7 and 35.9 fb⁻¹, respectively. An excess of events above the background near a dimuon mass of 28 GeV is observed in the 8 TeV data, corresponding to local significances of 4.2 and 2.9 standard deviations for the different categories, respectively. A similar analysis conducted with the 13 TeV data results in a mild excess over the background in the

ли с плоскими дополнительными измерениями ADD (Arkani-Hamed–Dimopoulos–Dvali) значения фундаментального многомерного планковского масштаба были исключены ниже 6,1–9,3 ТэВ в зависимости от числа дополнительных измерений (от 2 до 7 соответственно) [3].

Также в 2018–2019 гг. были осуществлены публикации первых результатов прецизионных тестов СМ, проведенных с помощью изучения численных характеристик рождения пар лептонов в процессе Дрелла–Яна при энергии 13 ТэВ в с. с. м. [4]. Было измерено дифференциальное сечение парного рождения лептонов $d\sigma/dM$ (M — инвариантная масса пары лептонов) в диапазоне от 15 до 2000 ГэВ (рис. 2, слева) и продемонстрировано хорошее согласие полученных результатов с предсказаниями СМ в первом и во втором порядках теории возмущения (NLO и NNLO). Дополнительный анализ возможных проявлений новой физики, близко связанный с изучением «чистого» дилептонного канала и являющийся в каком-то смысле его расширением, посвящен поиску легких резонансов в финальном наблюдаемом состоянии с двумя мюонами противоположного знака в сопровождении минимум одной

струи от b -кварка и с дополнительными улучшающими точность реконструкции струями в двух различных категориях. При анализе данных, набранных CMS при энергии 8 ТэВ ($L_{\text{int}} \approx 20 \text{ fb}^{-1}$), было обнаружено превышение числа событий в области масс около 28 ГэВ по сравнению с ожиданиями СМ на уровне около 4 стандартных отклонений. Однако первые данные при 13 ТэВ не подтвердили это наблюдение — превышение составило только 2 стандартных отклонения в одной категории событий, а во второй наблюдался недостаток событий вместо избытка [5]. Для проверки этих результатов и окончательных выводов необходима обработка экспериментальных данных по полной набранной статистике Run 2.

Физики ОИЯИ активно участвуют в формировании программы исследований и в получении результатов для физических анализов, связанных с изучением процессов множественного рождения жестких частиц. Отклонение от предсказаний СМ в этом канале может служить признаком различных процессов новой физики, таких как рождение и распад микроскопических черных дыр (МЧД) в моделях низкоэнергетической многомерной гравитации (область ответственности

Рис. 2. Слева: дифференциальное сечение $d\sigma/dM$ рождения пар лептонов в процессе Дрелла–Яна [4]. Справа: зависимость ограничений на минимальную массу квазиклассических МЧД от величины фундаментального планковского масштаба M_D для различных модельных сценариев и числа дополнительных измерений n [6]

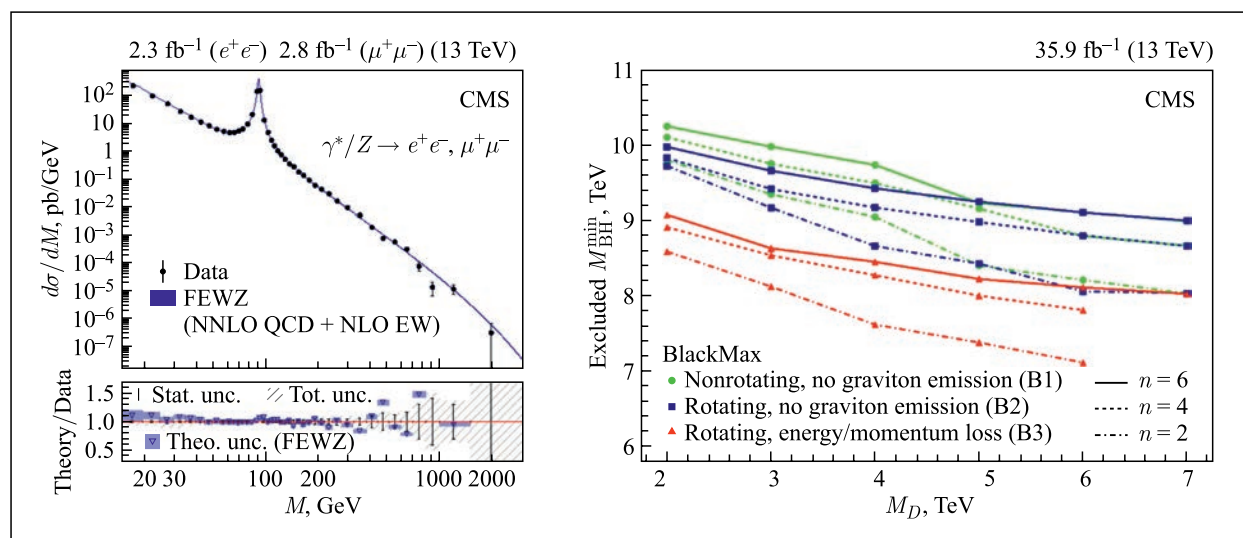


Fig. 2. Left: the differential DY cross section measured for the combination of the two channels and as predicted by the NNLO theoretical calculation of FEWZ in the full phase space [4]. Right: the observed 95% CL lower limits on $M_{\text{BH}}^{\text{min}}$ as a function of fundamental Planck scale M_D at different number of extra dimensions n for the different models [6]

first event category corresponding to a local significance of 2.0 standard deviations, while the second category results in a 1.4 standard deviation deficit [5]. To verify these results and final conclusions, it is necessary to analyze experimental data on the full Run 2 statistics.

JINR physicists actively participate in the preparation of a research programme and in obtaining results for studies of the processes of multiple production of hard particles, which are another important test of SM. Deviation from SM predictions in a multi-jet channel can be a sign of

группы ОИЯИ), каскадные процессы суперсимметрии, рождение и распад лептокварков и пр. Анализ множественного рождения жестких частиц был выполнен на основе экспериментальных данных CMS, набранных в 2015–2016 гг. с интегральной светимостью $35,9 \text{ fb}^{-1}$ [6]. Впервые были получены модельно-независимые пределы (95% C.L.) на сечения рождения жестких частиц с множественностью до $N \geq 11$ в области значений полной поперечной энергии в событии S_T от 1,5 до 8,0 ТэВ. При максимальных значениях S_T величина верхних границ сечений составляет 0,08 фб. Результаты экспериментальных измерений совпадают с предсказаниями СМ. На основании предсказаний теоретических сценариев многомерной низкоэнергетической гравитации (RS1 и ADD) были получены новые экспериментальные ограничения на минимальную допустимую массу квазиклассических и квантовых МЧД в зависимости от значения фундаментального многомерного масштаба гравитации M_D и числа дополнительных измерений n . Нижний порог на массу квазиклассической МЧД составляет 7,2–10,1 ТэВ в зависимости от различных механизмов образования и эволюции этого объекта сильнодействующей гравитации (см. рис. 2, справа). Полученные результаты значительно расширяют ограничения на соответствующие

параметры этих моделей, установленные на основе данных Run 1.

При проведении Run 2 для бесперебойного набора данных была обеспечена надежная работа внутренних торцевых детекторных систем в рамках ответственности ОИЯИ — торцевого адронного калориметра HE и передней мюонной станции ME1/1, проводился постоянный контроль их технических характеристик.

Важным этапом эксперимента CMS является плановая модернизация детекторных систем для обеспечения эффективной работы всех систем в условиях высокой светимости (более $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) в протон-протонных соударениях при полной энергии LHC. Эта фаза модернизации была начата во время первой длительной остановки LHC (Long Stop 1) в 2013–2015 гг. и продолжена во время второй длительной остановки (Long Stop 2), которая закончится в 2020 г. Физики ОИЯИ продолжают активно участвовать в работах по модернизации торцевой адронной калориметрии и торцевой мюонной системы.

Одновременно с этим группа ОИЯИ активно участвует в научно-методических исследованиях (R&D) по модернизации установки CMS для работы в условиях высокой светимости HL-LHC. Основное направление работ сосредоточено на оптимизации кон-

various specific processes of new physics: production and decay of microscopic black holes (MBH) from low-energy multidimensional gravity models (the responsibility of the JINR group) or leptokvarks, cascade supersymmetry processes, etc. The data sample corresponding to an integrated luminosity of 35.9 fb^{-1} collected with the CMS experiment in 2015–2016 has been used in energetic, high-multiplicity final states to search for evidence of physics beyond the Standard Model, such as black holes and string balls [6]. Model-independent 95% confidence level upper limits are set on the production cross section and acceptance for such final states, as a function of the minimum total transverse energy S_T up to 8 TeV for minimum final-state multiplicities between 3 and 11. These limits reach 0.08 fb at high S_T thresholds. By calculating the acceptance values for benchmark black hole and string ball signal models, these model-independent limits have been converted into lower limits on the minimum semiclassical MBH mass and string ball mass. The limits extend as high as 10.1 TeV (Fig. 2, right), thus improving significantly on previous results of Run 1.

To provide uninterrupted data taking during LHC Run 2, reliable operation of the CMS inner endcap detec-

tors was provided, where RDMS bears full responsibility on Endcap Hadron Calorimeters (HE) and First Forward Muon Stations (ME1/1). A data quality monitoring has been performed to allow one to interrogate and to analyze collected data. Studies of the detector performance were also performed.

A very important phase of the CMS experiment is scheduled to upgrade the detector systems to facilitate an effective operation of subsystems at high luminosity of more than $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in pp collisions at the nominal LHC energy. This phase was launched at the beginning of the LHC Long Stop in 2013–2015 (LS1) and is continued during the second LHC Long Stop (LS2) which will be completed in 2020. The experts from JINR continue to participate actively within JINR responsibilities for muon stations and endcap calorimetry.

In parallel, JINR group has been actively involved in R&D for the CMS Phase 2 Upgrade for operation at very high luminosities at HL-LHC. The main task was optimization of configuration and construction of the prototype of the module for the endcap hadron calorimeter to facilitate operation at 3000 fb^{-1} of integrated luminosity.

фигурации и создании прототипа модуля торцевого адронного калориметра для работы при интегральной светимости до 3000 фб^{-1} .

Физики ОИЯИ вносят определяющий вклад в анализ физических данных первого (2010–2012 гг.) и второго (2015–2018 гг.) циклов работы LHC: только за 2017–2019 гг. подготовлено 8 публикаций коллаборации CMS в рецензируемых научных журналах, а также работы (ноты) коллаборации (17 работ), статьи в журналах (9 работ), материалы международных научных мероприятий и др. (всего 35 работ). Полный список публикаций коллаборации CMS за данный период, в том числе с участием представителей ОИЯИ, включает 346 научных работ. За последние годы в рамках научной деятельности по теме были проведены международное рабочее совещание коллаборации CMS по развитию программы физических исследований и модернизации экспериментального комплекса для работы при условиях большой светимости LHC (Варна, 2017 г.) и международная конференция коллаборации RDMS CMS (Ташкент, 2018 г.). Также на постоянной основе действует общепитетский семинар «Физика на LHC» (<http://rdms.jinr.ru/>).

JINR physicists play a crucial role in physics analyses of the data of the LHC Run 1 (2010–2012) and LHC Run 2 (2015–2018): within last three years alone, the eight CMS public papers were published in scientific journals, 17 CMS notes on physics analysis and CMS operation and upgrade works for the CMS calorimeter system for high luminosity regime of LHC and number of papers with CMS results review and future physics with 13 TeV Run and proceedings (35 papers in a total) were prepared. The total list of publications by JINR scientists within the CMS collaboration includes 346 papers. In recent years the 2nd CMS workshop “Perspectives on Physics and on CMS at HL-LHC” (Varna, 2017) and the 20th Annual RDMS CMS Collaboration Conference (Tashkent, 2018) were held. The joint RDMS seminar “Physics at the LHC” also works permanently (<http://rdms.jinr.ru/>).

Список литературы / References

1. Голутвин И. А., Шматов С. В. Результаты и перспективы исследований эксперимента CMS на LHC // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, № 5. С. 604–616 / *Golutvin I. A., Shmatov S. V.* CMS Experiment at the LHC: Results and Outlooks // *Phys. Part. Nucl.* 2017. V. 48, No. 5. P. 720–726;
Шматов С. В. Некоторые результаты эксперимента CMS на LHC по поиску физики за рамками Стандартной модели // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49, № 4. С. 1291–1301 / *Shmatov S. V.* Highlights of Searches for Physics beyond the Standard Model in the CMS Experiment at the LHC // *Phys. Part. Nucl.* 2018. V. 49, No. 4. P. 735–740;
2. *Шматов С. В.* Изучение физики Стандартной модели в эксперименте CMS на LHC // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, № 5. С. 701–709 / *Shmatov S. V.* Probing the Standard Model Physics in the CMS Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2017. V. 48, No. 5. P. 796–800;
3. *Ланёв А. В.* Результаты коллаборации CMS по поиску тяжелых дилептонных и дифотонных резонансов // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, № 5. С. 677–683 / *Lanyov A. V.* CMS Results on Searching for Heavy Dilepton and Diphoton Resonances // *Part. Nucl.* 2017. V. 48, No. 5. P. 677–683.
4. *CMS Collab.* Search for High-Mass Resonances in Dilepton Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // *JHEP.* 2018. V. 06. P. 120; arXiv:1803.06292.
5. *CMS Collab.* Search for Contact Interactions and Large Extra Dimensions in the Dilepton Mass Spectra from Proton–Proton Collisions at 13 TeV // *JHEP.* 2019. V. 04. P. 114; arXiv:1812.10443.
6. *CMS Collab.* Measurement of the Differential Drell–Yan Cross Section in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // *JHEP, CMS-SMP-17-001* (submitted); CERN-EP-2018-320.
7. *CMS Collab.* Search for Resonances in the Mass Spectrum of Muon Pairs Produced in Association with *b* Quark Jets in Proton–Proton Collisions at 8 and 13 TeV // *JHEP.* 2018. V. 1811. P. 161, CERN-EP-2018-204; arXiv:1808.01890.
8. *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.).* Search for Black Holes and Sphalerons in High-Multiplicity Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // *JHEP.* 2018. V. 11. P. 042; arXiv:1805.06013;
9. *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.).* Search for Black Holes in High-Multiplicity Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 774. P. 279; arXiv:1705.01403.