

УДК 539.121.667

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

© 2023 г. С. В. Петрушанко* от имени коллаборации CMS

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: Serguei.Petrouchanko@cern.ch

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Проанализированы последние результаты, полученные коллаборацией Компактный мюонный соленоид (CMS) по изучению физики тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Проведенные на установке CMS исследования кварк-глюонной плазмы дают ценную информацию о поведении материи в экстремальном режиме ядро-ядерных соударений сверхвысоких энергий.

DOI: 10.31857/S0367676523701983, EDN: ZBPILL

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент Компактный мюонный соленоид (CMS) [1] на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРНе (CERN) — замечательная площадка для тщательного изучения столкновений тяжелых ионов ультрарелятивистских энергий. Его точный трековый детектор (область по псевдобыстроте $|\eta| < 2.5$), широкий охват калориметрической системы (электромагнитный и адронный калориметр $|\eta| < 5.2$ и калориметр CASTOR — $6.6 < \eta < -5.2$), а также высокоэффективная мюонная система ($|\eta| < 2.5$) в комбинации с сильным магнитным полем сверхпроводящего соленоида индукцией 3.8 Тл — идеальное решение для исследований столкновений ядро—ядро в условиях огромного числа рождающихся частиц.

Первые соударения Pb—Pb в установке CMS были зафиксированы в ночь с 6 на 7 ноября 2010 г. По вопросам, связанным с изучением ядро-ядерной материи, коллаборация CMS к настоящему моменту времени опубликовала уже более ста научных статей [2], представлен также целый ряд предварительных результатов [3]. В рамках данной статьи представляется невозможным описать все эти работы, поэтому основной акцент будет сделан на наиболее важных и самых интересных последних результатах.

МЯГКИЕ ТЕСТЫ АДРОННОЙ МАТЕРИИ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ НА УСТАНОВКЕ CMS

Мягкие тесты плотной адронной материи — это изучение рождения низко- и среднеэнерге-

тичных частиц: множественность частиц в событии, различные спектры частиц, азимутальная анизотропия — эллиптический и прочие потоки, разного рода корреляции между частицами и т.д.

В столкновениях p —Pb при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ и 8.16 ТэВ на пару нуклонов на установке CMS были измерены распределения заряженных частиц по псевдобыстроте η [4]. Было проведено сравнение плотности заряженных частиц с измерениями в других подобных экспериментах при энергиях ускорителей ISR, AGS, SPS, RHIC, Tevatron и LHC. Показано, что зависимость нормализованной плотности числа заряженных частиц на один взаимодействовавший нуклон в центральной области по псевдобыстроте от энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$ подчиняется степенному закону: $\sim s_{NN}^{0.158}$ для столкновений ядро—ядро, $\sim s_{NN}^{0.103}$ для протон—ядро и $\sim s_{NN}^{0.110}$ для протон—протон.

Почти полная герметичность калориметров установки CMS позволила изучить распределение по поперечной энергии E_T в диапазоне более 13.2 единиц по η в столкновениях p —Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [5]. Сравнение экспериментальных данных при энергии коллайдера LHC с данными ускорителей SPS, SIS, AGS и RHIC показало, что скорость роста плотности поперечной энергии E_T с увеличением $\sqrt{s_{NN}}$ сильнее для соударений ядро—ядро, чем в протон—ядро, вероятно, из-за повышенной тормозной способности

образующейся материи тяжелых ядер по сравнению с протонами.

Дальнодействующие (разница η между двумя частицами $2 < |\Delta\eta| < 4$) узко-угловые (разница азимутальных углов между двумя частицами $\Delta\phi \approx 0$) корреляции – так называемый “ридж”-эффект (“ridge”, эффект “горба” или “хребта”) – были обнаружены на установке CMS в столкновениях p – p при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ большой множественности [6], столкновениях p –Pb энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [7] и Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [8]. Интересно, что в p –Pb столкновениях “ридж”-эффект значительно сильнее по абсолютному значению, чем в p – p столкновениях при той же множественности частиц.

В то же время, при исследовании ультра-периферических столкновений p –Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ ТэВ на установке CMS “ридж”-эффект не удалось обнаружить [9], хотя измеренные значения эллиптического потока v_2 в таких соударениях оказались существенно выше, чем в обычных p –Pb соударениях той же множественности. Понятно, что причины появления и свойства “ридж”-эффекта в различных системах требуют дальнейшего изучения.

В эксперименте CMS измерен эллиптический поток v_2 с помощью метода кумулянтов впервые вплоть до 10 степени в соударениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [10]. Обнаружено, что значения v_2 у кумулянта 4 степени существенно ниже значений для 2 степени. В тоже время значения v_2 для кумулянта 4 степени практически не отличаются от 6, 8 и 10 степеней. Эти сведения могут существенно помочь при определении геометрии начального состояния материи до начала ее гидродинамического расширения при столкновениях ядер сверхвысоких энергий.

Для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ в эксперименте CMS были измерены значения эллиптического v_2 , триангулярного v_3 и квадрупольного v_4 потоков с помощью различных методов [11]. На рис. 1 представлены v_2 в зависимости от поперечного импульса p_T для столкновений Xe–Xe и Pb–Pb ряда центральных (от 0–5 до 60–70%). Значения v_2 для Xe–Xe несколько больше, чем у Pb–Pb для наиболее центральных столкновений, но близка или немного меньше для полужентральных и периферических. По всей видимости, это связано с большей флуктуационной составляющей в системе соударений ядер достаточно легкого ксенона по сравнению с более тяжелыми ядрами свинца.

ЖЕСТКИЕ ТЕСТЫ АДРОННОЙ МАТЕРИИ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ НА УСТАНОВКЕ CMS

Жесткие тесты – это изучение высокоэнергичных объектов в ядро-ядерных соударениях: адроны с большими поперечными импульсами, кварконии и другие тяжелых мезоны, адронные струи и т.п.

Благодаря высокоэффективной мюонной системе совместно с точным трековым детектором установка CMS идеально подходит для исследования свойств кваркониев (J/ψ и Υ) по изучению их распадов на мюоны в ядро-ядерных соударениях. Экспериментальные данные об особенностях рождения и подавления J/ψ и Υ в плотной кварк-глюонной среде – среди наиболее важных результатов по физике тяжелых ионов на установке CMS.

В соударениях Pb–Pb при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ было зафиксировано существенное подавление рождения J/ψ по сравнению с p – p соударениями таких же энергий [12]. Величины подавления рождения J/ψ для двух энергий столкновений практически не отличаются для тех же p_T и η частиц и центральности столкновений. При этом подавление J/ψ оказалось максимальным в центральных соударениях по сравнению с полужентральными и периферическими. Рождение $\psi(2S)$ подавлено существенно больше, чем J/ψ .

В соударениях Pb–Pb при энергиях также отметить, что детектор CMS впервые смог обнаружить сигнал от $\Upsilon(3S)$ в соударениях Pb–Pb. Как и для J/ψ , подавление Υ максимально для центральных соударений. Подавление всех трех состояний семейства Υ также обнаружено и в столкновениях p –Pb такой же энергии [14], но оно вполне ожидаемо оказалось меньше, чем в Pb–Pb, с аналогичной зависимостью от масс состояний. На рис. 2 представлены измеренные в эксперименте CMS инвариантные димюонные массовые спектры в области семейства Υ в p – p и p –Pb столкновениях, наглядно демонстрирующие подавление Υ -мезонов в p –Pb.

Зависимости v_2 и v_3 так называемых “прямых” (рождаются непосредственно через $c\bar{c}$ -кварковую пару) и “непрямых” (рождаются вторично при распаде b -кварка) J/ψ -мезонов от p_T и среднего числа участников ядро-ядерного взаимодействия были измерены в эксперименте CMS в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [15]. Для обоих типов J/ψ найдено существенное значение величины v_2 до $p_T < 50$ ГэВ/с. v_2 “непрямых” J/ψ оказался ниже, чем для “прямых”. С помощью детектора CMS впервые удалось измерить v_3 “прямых” и “непрямых” J/ψ отдельно, показав, для обоих типов J/ψ значение v_3 равно или очень близко к нулю. Кроме того, впервые на установке CMS в ядро-ядерных столкновениях

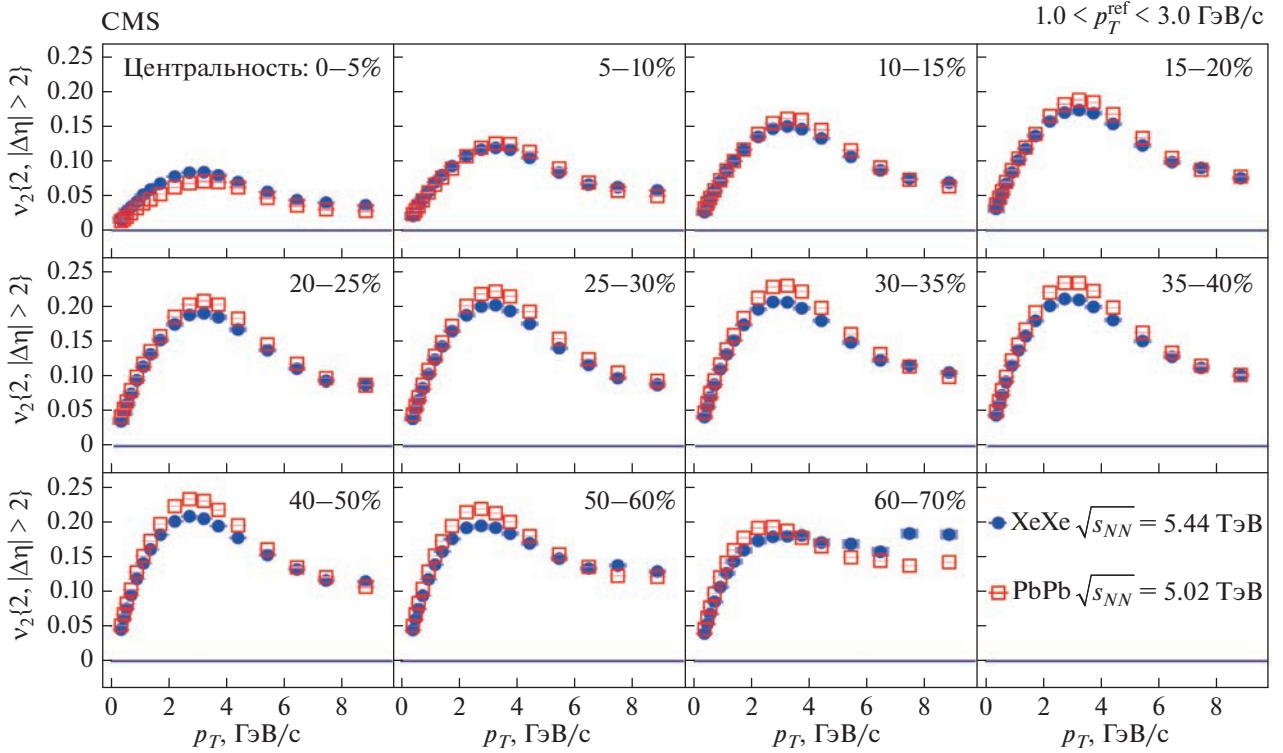


Рис. 1. Сравнение эллиптического потока v_2 , измеренного методом двух-частичных корреляций, для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (кружки) и Pb–Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (квадраты) в зависимости от поперечного импульса p_T для 11 центральностей столкновений (от 0–5 до 60–70%) на установке CMS. Адаптировано из [11].

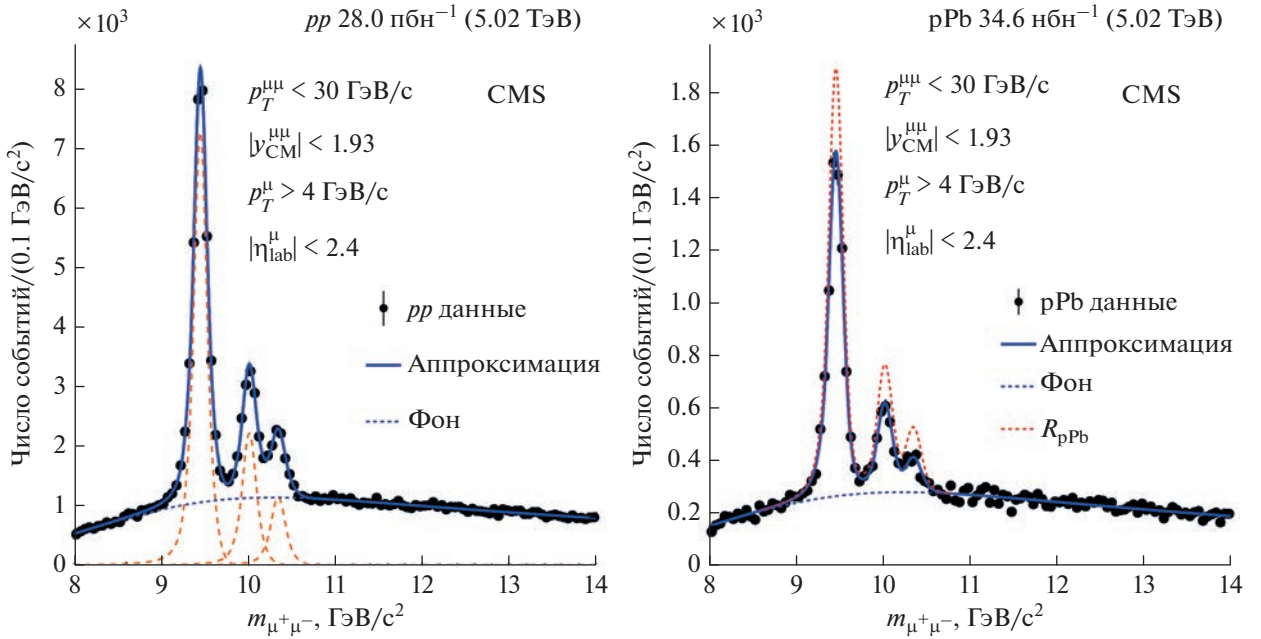


Рис. 2. Измеренный инвариантный димюонный массовый спектр в эксперименте CMS в p – p (слева) и p –Pb (справа) столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – результат их аппроксимации. На левом рисунке красными штриховыми кривыми показан результат выделения сигнала от димюонов в p – p столкновениях, на правом рисунке – он же с поправкой на статистику (для сравнения с данными p –Pb). Синие штриховые кривые – вторичный фон. Адаптировано из [14].

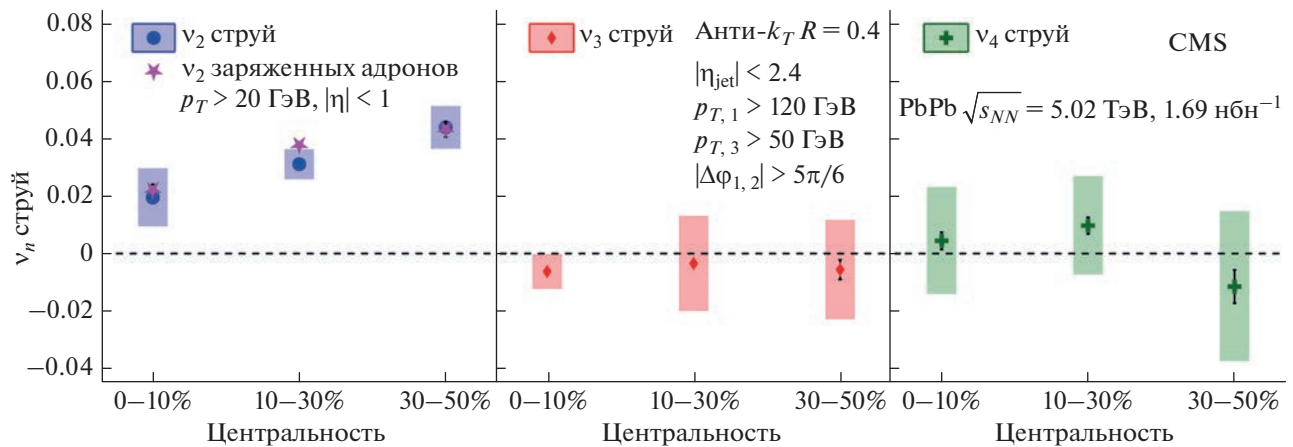


Рис. 3. Эллиптический v_2 (слева), триангулярный v_3 (в центре) и квадрупольный v_4 (справа) потоки парных струй как функция центральности в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ на установке CMS. Для сравнения слева приведены данные для v_2 заряженных адронов с $p_T > 20$ ГэВ/с тех же центральностей (звездочки). Адаптировано из [26].

измерили v_2 и v_3 для $\psi(2S)$: его v_2 также имеет существенное значение до $p_T < 50$ ГэВ/с, а v_3 — равен или близок к нулю.

В отличие от J/ψ , для $Y(1S)$ в эксперименте CMS было измерено его значение эллиптического потока v_2 , близкое к нулю как в соударениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [16], так и в соударениях p –Pb $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ ТэВ [17], что, конечно же, потребует дальнейшего экспериментального изучения и теоретической интерпретации.

Эллиптический поток v_2 D^0 -мезонов был измерен в эксперименте CMS в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [18, 19]. Было обнаружено, что его характеристики близки к v_2 для заряженных адронов. Значение v_2 “непрямых” D^0 оказался ниже, чем для “прямых”, что повторяет результат для J/ψ [15].

Сечения рождения B_s^0 - и B^+ -мезонов были измерены на установке CMS в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [20]. В ядро-ядерных столкновениях B_s^0 -мезон впервые наблюдался со статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений. Достоверной зависимости отношения вероятности рождения B_s^0/B^+ от поперечного импульса p_T обнаружено не было.

Эксперимент CMS впервые в столкновениях тяжелых ядер смог зафиксировать свидетельства рождения частицы $X(3872)$ [21]. Значимость сигнала $X(3872)$ в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ составила 4.2 стандартных отклонения. Установлено, что отношение веро-

ятности рождения $X(3872)$ к рождению $\psi(2S)$ в столкновениях Pb–Pb составляет 1.08 ± 0.49 (статистическая ошибка) ± 0.52 (систематическая ошибка) по сравнению с типичными значениями около 0.1 для столкновений p – p . Данный экспериментальный результат важен для теоретического понимания механизма образования и природы этой необычной частицы, кварковая конфигурация которой пока не ясна.

Первые доказательства образования t -кварков в ядро-ядерных столкновениях представлены в эксперименте CMS для Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [22]. Статистическая значимость сигнала от t -кварка составила 3.8 и 4 стандартных отклонения для двух разных методов анализа. Измеренные сечения соответствуют предсказаниям квантовой хромодинамики (КХД).

Одним из первых и самых важных результатов эксперимента CMS по изучению физики тяжелых ионов является обнаружение эффекта “гашения” струй (jet quenching) — сильного дисбаланса в соотношении энергии парных адронных струй в центральных и полужентральных Pb–Pb соударениях по сравнению с протон-протонными [23, 24]. Изучение эффекта продолжается, в числе последних результатов следует отметить следующую работу.

В эксперименте CMS впервые было проведено изучение адронных струй с учетом их радиусов (при использовании анти- k_T алгоритма) в столкновениях p – p и Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [25]. В центральных столкновениях Pb–Pb наблюдалось сильное подавление струй с большим поперечным импульсом $500 \text{ ГэВ/с} < p_T < 1 \text{ ТэВ/с}$, которое не зависит от радиуса струи. Результа-

ты экспериментального анализа сравнивались с несколькими современными Монте-Карло генераторами событий, однако рассмотренные модели не смогли полностью воспроизвести данные, в том числе и по струям с большим радиусом.

Что касается вопроса об азимутальной анизотропии струй, то в эксперименте CMS впервые были измерены значения потоков v_2 , v_3 и v_4 для парных струй как функция центральности в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [26]. На рис. 3 представлены v_2 , v_3 и v_4 для парных струй, а также (для сравнения) v_2 для заряженных адронов тех же центральностей. Обнаружено, что значения и зависимость от центральности v_2 парных струй близки к v_2 высокоэнергичных заряженных адронов. В то же время, v_3 и v_4 парных струй равны или близки к нулю. Измеренные значения азимутальных потоков v_2 , v_3 и v_4 дают важные сведения для более точного описания энергетических потерь в кварк-глюонной плазме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международная коллаборация эксперимента CMS на ускорителе LHC на протяжении последний 10 лет получила целый ряд интереснейших сведений о поведении кварк-глюонной плазмы в различных комбинациях сталкивающихся ядер. Состоявшийся в начале июля 2022 г. запуск третьего этапа (Run 3) исследований на LHC обязательно должен продолжить процесс познания фундаментальных свойств материи.

Автор статьи выражает благодарность организаторам LXXII Международной конференции “Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения” за возможность представить доклад на пленарной сессии и обсудить важные вопросы современного состояния физики ядро-ядерных столкновений сверхвысокой энергии, а также всем участникам многонациональной коллаборации эксперимента CMS за многолетнее сотрудничество и помощь в подготовке материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // J. Instrum. 2008. No. 3. Art. No. S08004.
2. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN>.
3. <https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/HIN>.
4. Sirunyan A.M., Tumasyan A., Adam W. et al. (CMS Collaboration) // J. High Energy Phys. 2018. No. 1. Art. No. 045.
5. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. No. 2. Art. No. 024902.
6. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration) // J. High Energy Phys. 2010. No. 09. Art. No. 091.
7. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2013. V. 718. No. 3. P. 795.
8. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // J. High Energy Phys. 2011. No. 07. Art. No. 076.
9. CMS Collaboration // arXiv: 2204.13486. 2022.
10. CMS Collaboration // CERN CMS-PAS-HIN-21-010. 2022.
11. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. Art. No. 044902.
12. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. Art. No. 509.
13. CMS Collaboration // arXiv: 2303.17026. 2023.
14. CMS Collaboration // Phys. Lett. B. 2022. Art. No. 137397.
15. CMS Collaboration // CERN CMS-PAS-HIN-21-008. 2022.
16. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2021. V. 819. Art. No. 136385.
17. CMS Collaboration // CERN CMS-PAS-HIN-21-001. 2022.
18. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2021. V. 816. Art. No. 136253.
19. CMS Collaboration // arXiv: 2212.01636. 2022.
20. Tumasyan A. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2022. V. 829. Art. No. 137062.
21. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. Art. No. 032001.
22. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. Art. No. 222001.
23. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. Art. No. 024906.
24. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2012. V. 712. No. 3. P. 176.
25. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) // J. High Energy Phys. 2021. No. 05. Art. No. 284.
26. CMS Collaboration // arXiv: 2210.08325. 2022.

Heavy-ion physics with Compact Muon Solenoid detector

S. V. Petrushanko* on behalf of CMS Collaboration

Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: Serguei.Petrushanko@cern.ch

Recent results on heavy-ion physics at the LHC (CERN) by the Compact Muon Solenoid (CMS) collaboration are analyzed. The tests of quark-gluon plasma carried out with the CMS detector provide valuable information about the behavior of matter in the extreme regime of very high energy nucleus-nucleus collisions.