

ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА УСТАНОВКЕ “КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД” (CMS) НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ (LHC)

© 2021 г. С. В. Петрушанко^{1)*}

Поступила в редакцию 05.05.2020 г.; после доработки 05.05.2020 г.; принята к публикации 05.05.2020 г.

В работе представлено краткое изложение ряда последних интересных результатов по изучению физики тяжелых ионов на установке “Компактный мюонный соленоид” (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC), включая исследования кварк-глюонной материи.

DOI: 10.31857/S0044002721010153

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение адронной материи в экстремальном режиме сверхвысоких температур и плотностей — главная задача экспериментов с использованием релятивистских соударений тяжелых ядер. Первые соударения свинец–свинец при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ на пару нуклонов на ускорителе “Большой адронный коллайдер” (LHC) были зарегистрированы 7 ноября 2010 г. в 00 : 27 по женевскому времени. На протяжении уже почти десяти лет международная коллаборация установки “Компактный мюонный соленоид” (CMS) [1] занимается изучением соударений тяжелых ионов. К данному моменту времени опубликована почти сотня статей, представлен также целый ряд предварительных результатов. Со всеми статьями коллаборации CMS по физике тяжелых ионов можно ознакомиться, перейдя по соответствующей интернет-ссылке [2].

Главные цели научной программы эксперимента CMS по изучению тяжелых ионов можно условно разделить на две группы (по энергии E и поперечному импульсу p_T объектов): “мягкая физика” (исследования рождения низко- и среднеэнергичных частиц: множественность, спектры, эллиптический поток, корреляции и т.д.) и “жесткие” тесты (изучение различных высокоэнергичных объектов: адроны с большими поперечными импульсами, адронные струи, кварконии и т.п.). Хотелось бы также отметить важную роль “нетрадиционных” объектов изучения — различные эффекты физики тяжелых ионов в соударениях протон–протон, “смешанную”

физику в несимметричных соударениях протон–свинец, а также интересные “промежуточные” результаты в соударениях ксенон–ксенон.

2. “МЯГКАЯ ФИЗИКА” ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА УСТАНОВКЕ CMS

Изучение “мягкой физики” позволяет понять глобальную картину столкновений тяжелых ионов.

Распределения заряженных адронов по псевдобыстроте η в столкновениях протон–свинец при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ и 8.16 ТэВ, полученные на установке CMS, представлены в работе [3]. Плотность частиц на взаимодействующий нуклон сравнивалась с подобными измерениями в других экспериментах; показано, что общая ее зависимость от энергии $\sqrt{s_{NN}}$ в соударениях протон–протон, протон–свинец и свинец–свинец подчиняется степенному закону.

Практически полная герметичность калориметрической системы установки CMS позволила измерить распределение поперечной энергии E_T в ширине более 13.2 единиц псевдобыстроты η в столкновениях протон–свинец при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [4].

Так называемый “ридж”-эффект или дальнедействующие (разница псевдобыстроты между двумя частицами $2 < |\Delta\eta| < 4$) узкоугловые (разница азимутальных углов между двумя частицами $\Delta\phi \approx 0$) корреляции были обнаружены с помощью установки CMS в протон-протонных столкновениях большой множественности [5], столкновениях протон–свинец [6] и свинец–свинец [7]. Одно из возможных объяснений “ридж”-эффекта — взаимодействие между независимыми эллиптическим и триангулярным азимутальными потоками частиц [8] (моделирование с использованием Монте-Карло-генератора HYDJET++ [9]).

¹⁾ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

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

Величина двух- и многочастичных угловых корреляций в протон-протонных соударениях измерена как функция множественности заряженных частиц [10]. В протон-протонных столкновениях большой множественности эти величины для заряженных адронов (главным образом, пионов), K_S^0 и $\Lambda/\bar{\Lambda}$ оказалась выше, чем для легких частиц с поперечными импульсами ниже $p_T \approx 2$ ГэВ/с. Подобное наблюдение было зафиксировано в соударениях протон-свинец и свинец-свинец [11], что может свидетельствовать о единой коллективной природе проявления дальнедействующих корреляций во всех трех видах столкновений.

Эллиптический азимутальный поток v_2 был измерен для чармированных и странных адронов в столкновениях протон-свинец при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ ТэВ [12]. Существенный v_2 был обнаружен для таких частиц в событиях с высокой множественностью. Для чармированных адронов v_2 оказался ниже, чем для других частиц, что может говорить о более слабом коллективном поведении чарм-кварков в плотной адронной материи.

Были изучены азимутальные корреляции заряженных частиц в столкновениях ксенон-ксенон при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ [13]. Величина v_2 в наиболее центральных соударениях была выше для столкновений ксенон-ксенон, чем для свинец-свинец, что может быть объяснено большей флуктуационной компонентой в более легких соударяющихся системах.

3. “ЖЕСТКИЕ” ТЕСТЫ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА УСТАНОВКЕ CMS

“Жесткие” тесты в столкновениях тяжелых ионов дают информацию о свойствах ядерной материи.

Поперечные сечения рождения $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$ были измерены в соударениях протон-протон и свинец-свинец при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ [14]. Выход всех энергетических состояний Υ в соударениях свинец-свинец оказался существенно подавлен (с последовательным усилением при увеличении массы) по сравнению с соударениями протон-протон — см. рис. 1. Более того, в соударениях свинец-свинец не удалось зафиксировать какого-либо заметного сигнала от $\Upsilon(3S)$.

В столкновениях свинец-свинец при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ на установке CMS был обнаружен эффект “гашения” струй — сильный дисбаланс поперечного импульса двойных струй в центральных и полуцентральных соударениях [15]. В то же время в периферических столкновениях свинец-свинец дисбаланс поперечного импульса

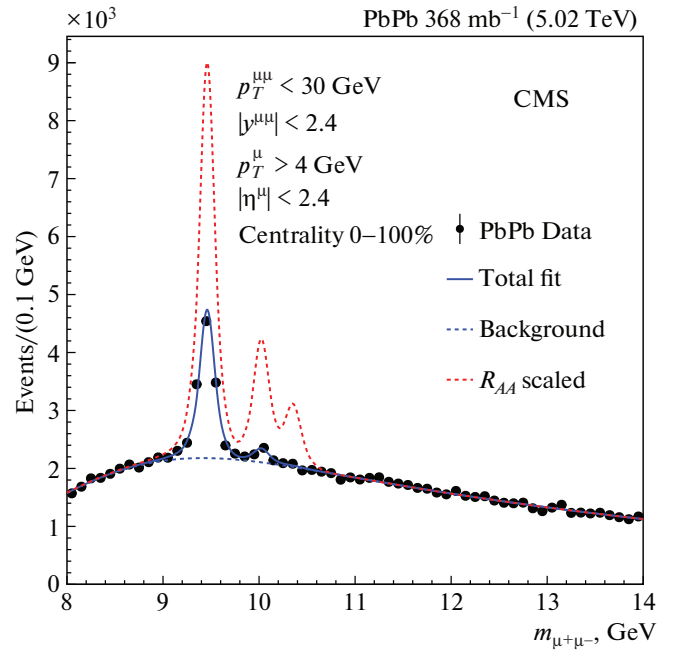


Рис. 1. Инвариантный массовый спектр димюонов на установке CMS в столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ на пару нуклонов для кинематического диапазона пар мюонов по поперечному импульсу $p_T(\mu^+\mu^-) < 30$ ГэВ/с и быстрой $|y(\mu^+\mu^-)| < 2.4$. Точки — димюоны в соударениях свинец-свинец, сплошная кривая — результат аппроксимации. Верхней штриховой кривой показан аналогичный результат для столкновений протон-протон с учетом поправки для представления в едином масштабе. Рисунок опубликован в работе [14].

двойных струй соответствовал картине для протон-протонных событий [16]. Перераспределение энергии от узких к более широким углам относительно оси струи было отмечено в столкновениях свинец-свинец по сравнению со столкновениями протон-протон [17]. Также поперечный импульс частиц менее энергичной струи перераспределялся в пользу частиц с меньшими импульсами в столкновениях свинец-свинец.

Дифференциальный выход заряженных частиц с псевдобыстротой $|\eta| < 1$ и поперечным импульсом $p_T = 0.5-100$ ГэВ/с был изучен в столкновениях ксенон-ксенон при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ [18]. Сравнение с аналогичными данными для протон-протонных соударений показало меньшее подавление выхода частиц в столкновениях ксенон-ксенон по сравнению со столкновениями свинец-свинец для частиц с поперечным импульсом выше 6 ГэВ/с, если сравнивать одинаковые центральности столкновений. Однако подавление выхода заряженных частиц в столкновениях ксенон-ксенон слегка выше, если

рассматривать столкновения с одинаковым числом взаимодействующих нуклонов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение соударений тяжелых ионов на экспериментальной установке CMS ускорителя LHC на первых двух этапах его работы (Run 1 и Run 2) привело к интереснейшим результатам по физике адронной материи в экстремальном режиме: измерен целый ряд физических наблюдаемых в разных соударяющихся системах при новых энергиях, обнаружены различные проявления коллективных потоковых эффектов, найдены подтверждения поглощения высокоэнергичных кварков и глюонов в горячей материи, изучено последовательное подавление выхода связанных состояний тяжелых кварков и т.д. Ожидается, что, начиная с запуска в 2021 г. третьего (Run 3) и с 2026 г. четвертого этапа (Run 4), с помощью существенно обновленной установки CMS и очередных рекордных энергиях и светимостях ускорителя LHC, мы сможем получить новую не менее интересную информацию о кварк-глюонной материи.

Автор выражает свою искреннюю благодарность Организаторам Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН 10–12 марта 2020 г. в г. Новосибирске за теплый и радушный прием и за возможность представить доклад. Спасибо всем участникам международной коллаборации эксперимента “Компактный мюонный соленоид” (CMS) за предоставленные материалы. Работа частично выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00155.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), JINST **3**, S08004 (2008).
2. CMS Heavy-Ion Physics Publications, <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN/>
3. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), J. High Energy Phys. **1801**, 045 (2018).
4. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), Phys. Rev. C **100**, 024902 (2019).
5. CMS Collab. (V. Khachatryan *et al.*), J. High Energy Phys. **1009**, 091 (2010).
6. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), Phys. Lett. B **718**, 795 (2013).
7. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), J. High Energy Phys. **1107**, 076 (2011).
8. G. Eyyubova, V. L. Korotkikh, I. P. Lokhtin, S. V. Petrushanko, A. M. Snigirev, L. Bravina, and E. E. Zabrodin, Phys. Rev. C **91**, 064907 (2015).
9. I. P. Lokhtin, L. V. Malinina, S. V. Petrushanko, A. M. Snigirev, I. Arsene, and K. Tywoniuk, Comput. Phys. Commun. **180**, 779 (2009).
10. CMS Collab. (V. Khachatryan *et al.*), Phys. Lett. B **765**, 193 (2017).
11. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), Phys. Lett. B **724**, 213 (2013).
12. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), Phys. Rev. Lett. **121**, 082301 (2018).
13. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), Phys. Rev. C **100**, 044902 (2019).
14. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), Phys. Lett. B **790**, 270 (2019).
15. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), Phys. Rev. C **84**, 024906 (2011).
16. CMS Collab. (S. Chatrchyan *et al.*), Phys. Lett. B **712**, 176 (2012).
17. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), J. High Energy Phys. **1805**, 006 (2018).
18. CMS Collab. (A. M. Sirunyan *et al.*), J. High Energy Phys. **1810**, 138 (2018).

HEAVY-ION PHYSICS WITH THE COMPACT MUON SOLENIID (CMS) DETECTOR AT THE LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

S. V. Petrushanko¹⁾

¹⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

A brief summary of the latest and the most interesting heavy-ion results with the Compact Muon Solenoid (CMS) detector at the Large Hadron Collider (LHC) is presented, including the study of quark–gluon matter.