

74-я международная конференция по ядерной физике  
«ЯДРО-2024: Фундаментальные вопросы и приложения»

## Научные результаты по физике тяжелых ионов в эксперименте Компактный мюонный соленоид (CMS) на Большом адронном коллайдере (ЛHC)

С.В. Петрушанко от имени коллаборации CMS<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 07.10.2024; после доработки 12.11.2024; подписана в печать 15.11.2024)

В настоящей публикации представлены последние экспериментальные данные по физике релятивистских столкновений тяжелых ионов, полученные на установке Компактный мюонный соленоид (CMS) на Большом адронном коллайдере (ЛHC) в ЦЕРНе (CERN).

PACS: 12.38.Mh; 13.20.Gd; 14.40.Gx; 14.40.Pq; 25.75.-q. УДК: 539.121.667.

Ключевые слова: ядро-ядерные столкновения, физика тяжелых ионов, Большой адронный коллайдер, кварк-глюонная плазма, азимутальная анизотропия, эллиптический поток, адронные струи, кваркони.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530205](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530205)

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение релятивистских столкновений тяжелых ядер при сверхвысоких энергиях — это возможность заглянуть вглубь материи, изучить свойства нового состояния вещества — кварк-глюонной плазмы (КГП), а также приблизиться к пониманию условий рождения нашей Вселенной при космологическом Большом взрыве. Большой адронный коллайдер (БАК. Large Hadron Collider, ЛHC) в ЦЕРНе (Европейская организация по ядерным исследованиям, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) — уникальная площадка для исследований такого рода событий, позволяющая достигнуть максимально возможных на данное время энергий взаимодействий. Научные команды всех четырех основных экспериментальных установок на ЛHC — ALICE [1], ATLAS [2], CMS [3] и LHCb [4] — активно принимают участие в такой работе.

### 1. УСТАНОВКА КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS) НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ (ЛHC)

Компактный мюонный соленоид (Compact Muon Solenoid, CMS) [3], наряду с экспериментом ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) [2], — две крупнейшие экспериментальные установки на БАК.

Изначально CMS планировался как детектор для детального изучения только протон-протонных соударений, однако уже на этапе проектирования стало понятно, что ряд его ключевых особенностей прекрасно подойдет и для изучения столкновений

ядро-ядро. В числе них в первую очередь конечно же, мюонные камеры установки CMS, способные дать регистрацию мюонов в широком пространственном ( $360^\circ$  в азимутальной плоскости,  $|\eta| < 2.4$  — по псевдобыстроте) и энергетическом диапазонах. Кремневый трековый детектор — важное дополнение для этой задачи, обеспечивающий регистрацию треков в том же пространственном диапазоне с точностью измерения поперечного импульса 1–2% заряженных частиц до  $p_T = 100$  ГэВ/с благодаря мощному магнитному полю 3.8 Тл, создаваемому сверхпроводящим соленоидом. Электромагнитные и адронный калориметры установки CMS дополняют систему эксперимента, регистрируя энергию частиц в еще более широком диапазоне до  $|\eta| < 3$  и полном охвате в азимутальной плоскости. Также обратим внимание на калориметры HF ( $3 < |\eta| < 5.2$ ), CASTOR ( $-6.6 < \eta < -5.2$ ) и ZDC ( $|\eta| > 8.3$ ), расположенные вблизи пучка.

Стоит отметить и специально разработанные триггеры нескольких уровней для регистрации наиболее интересных событий, а также особую систему записи и хранения экспериментальных данных установки CMS, позволяющую работать с большим их объемом в режиме ядро-ядерных соударений.

### 2. ПРОГРАММА ПО ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

Работа по подготовке изучения физики тяжелых ионов в эксперименте CMS началась задолго до реальных соударений. Коллаборация CMS сформулировала свои идеи в работах [5, 6], также общие предсказания для энергий ускорителя ЛHC можно найти в [7].

Первые ядро-ядерные соударения (свинец-свинец, Pb-Pb) на ускорителе ЛHC при

\* E-mail: [sergant@lav01.sinp.msu.ru](mailto:sergant@lav01.sinp.msu.ru)

энергии в системе центра масс на пару нуклонов  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ были зафиксированы в ночь с 6 на 7 ноября 2010 г. И вот уже почти 15 лет коллаборация CMS занимается изучением физики ядерной материи при сверхвысоких энергиях. В настоящий момент коллаборацией CMS опубликовано более ста научных статей по данной теме [8], также представлен целый ряд предварительных результатов [9], которые открыты для свободного доступа. В рамках этой статьи представляется невозможным рассказать о всех научных результатах работы коллаборации CMS по изучению физики тяжелых ионов. Однако попытаемся рассказать о наиболее важных из них, а также о самых последних анализах экспериментальных данных.

### 3. ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

На самом деле, исследование физики тяжелых ионов в эксперименте CMS началось еще до старта столкновений непосредственно тяжелых ионов на коллайдере LHC. В протон-протонных  $p$ - $p$ -столкновениях высокой множественности (число зарегистрированных заряженных частиц более 110) при энергии столкновений  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ впервые был обнаружен так называемый «ридж»-эффект («ridge» — эффект «горба» / «хребта») [10], ранее зарегистрированный только в столкновениях тяжелых ионов на коллайдере RHIC (The Relativistic Heavy Ion Collider) [11, 12]. По одной из предложенных интерпретаций эффекта, дальнедействующие (разница в псевдобыстроте  $\eta$  между двумя частицами  $2 < |\Delta\eta| < 4$ ) узко-угловые (разница азимутальных углов между двумя частицами  $\Delta\varphi \approx 0$ ) корреляции — проявление коллективного рождения частиц в плотной материи, образованной в столкновении ядер, возможно, связанные с появлением состояния КГП (при этом имеется ряд других объяснений этого интересного феномена, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи). В любом случае рекордная энергия столкновений на коллайдере LHC позволила зафиксировать проявления «ридж»-эффекта и для протонов, которые тоже являются ядрами, пусть и самыми легкими.

В столкновениях протон-свинец  $p$ -Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [13] и свинец-свинец Pb-Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ [14] на установке CMS «ридж»-эффект также был зарегистрирован и изучен, однако, интересно, что в  $p$ -Pb столкновениях по абсолютному значению он оказался гораздо сильнее, чем в  $p$ - $p$  столкновениях той же множественности заряженных частиц. А вот в ультрапериферических  $p$ -Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  ТэВ этот эффект коллаборацией CMS не был обнаружен [15]. При этом эллиптический поток  $v_2$  в таких соударениях оказался выше, чем в обычных  $p$ -Pb столкновениях. Это, конечно же, говорит о необходимости продолжения изучения

любопытного феномена «ридж»-эффекта.

Исследование азимутальной анизотропии родившихся в ядро-ядерных столкновениях частиц — очень важная задача для понимания начальных условий возникновения КГП. Коллаборация CMS уже представила научному сообществу целый ряд публикаций по данному вопросу, отметим ряд из них.

Анизотропия азимутального распределения заряженных частиц, возникающих при взаимодействиях Pb-Pb с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ, была измерена в эксперименте CMS еще при первом запуске ядро-ядерных столкновений на LHC [16]. Сравнение с результатами экспериментов коллайдера RHIC показано, что рост интегрального значения эллиптического потока  $v_2$  составил 15–30%, при этом характер зависимости от энергии  $\sqrt{s_{NN}}$  имеет логарифмический характер.

Коллаборацией CMS впервые в физике высоких энергий с помощью метода кумулянтов вплоть до 10-й степени измерен эллиптический поток  $v_2$  в соударениях Pb-Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [17]. Значения  $v_2$  для кумулянта 4-й степени существенно ниже значений 2-й степени, что подтверждает более ранние результаты при более низкой энергии взаимодействий [16]. Любопытно, что значения  $v_2$  для кумулянта 4-й степени практически не отличаются от 6-й, 8-й и 10-й степеней, что может дать ценные данные для понимания физических свойств и особенностей начального состояния КГП до начала ее расширения в соответствии с гидродинамической моделью.

Азимутальная анизотропия заряженных частиц (потоки от 2-го до 4-го порядков, центральность от 0–5% до 60–70%) в столкновениях, достаточно необычных для коллайдера LHC ядер ксенона — Xe-Xe, была изучена в эксперименте CMS при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  ТэВ [18]. Также было представлено сравнение этих данных с результатами для Pb-Pb столкновений энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ. Оказалось, что значения  $v_2$  для Xe-Xe несколько выше, чем у Pb-Pb в наиболее центральных столкновениях, однако, близка или немного меньше для полуцентральных и периферических. Возможно, это связано с деформированностью ядер ксенона по сравнению с гораздо более сферичными ядрами свинца.

Одним из последних интересных результатов коллаборации CMS стало изучение зарядовых корреляций адронов в соударениях  $p$ - $p$  и Pb-Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [19]. Благодаря широкому покрытию трекового детектора установки CMS (около 5 единиц по псевдобыстроте  $\eta$ ) пространственно удалось продвинуться гораздо дальше по сравнению с данными других экспериментов, дойдя до областей, в которых влияние рождения КГП на такие корреляции существенно больше. Результаты анализа CMS показали существенный приоритет гипотезы плотной КГП по сравнению с фазой обычного адронного газа.

Перейдем теперь к экспериментальным данным

коллораации CMS в событиях с «жесткими» объектами, т.е. исследованию выхода кваркониев, адронных струй с большим поперечным импульсом  $p_T$  и т.д. Подавление рождения таких объектов в ядро-ядерных соударениях по сравнению с протон-протонными — важное подтверждение рождения плотного состояния адронной материи.

Благодаря мощной системе мюонных камер в сочетании с отличным трекерным детектором коллораация CMS имеет прекрасную возможность изучения кваркониев по их мюонным распадам. Одним из важнейших результатов CMS по исследованию ядерной материи является регистрация подавления выхода  $J/\psi$ -мезонов в соударениях Pb–Pb при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  и  $5.02$  ТэВ по сравнению с их рождением в соударениях  $p$ – $p$  тех же энергий [20]. При этом был зафиксирован рост подавления выхода  $J/\psi$  при увеличении центральности соударений Pb–Pb, что означает, что подавление максимально в наиболее центральных соударениях, где, по всей видимости, рождается более плотная материя КГП. Также было обнаружено, что рождение более тяжелого  $\psi(2S)$ -мезона в соударениях Pb–Pb подавлено гораздо сильнее, чем рождение  $J/\psi$ , что также является свидетельством рождения плотной среды.

Логичное продолжение исследований кваркониев в ядро-ядерных соударениях — анализ рождения семейства  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$ . В этой связи поперечные сечения рождения этих энергетических состояний  $\Upsilon$  были измерены на установке CMS в соударениях  $p$ – $p$  и Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [21]. Выход  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$  в Pb–Pb оказался существенно подавлен по сравнению с соударениями  $p$ – $p$  и, что еще более важно, с последовательным усилением подавления при увеличении массы энергетического состояния. Отметим тот важный факт, что в эксперименте CMS впервые удалось зафиксировать сигнал от  $\Upsilon(3S)$  в соударениях Pb–Pb, хотя и очень слабый. В качестве дополнения следует отметить исследование семейства  $\Upsilon$  в столкновениях  $p$ –Pb той же энергии [22]. Подавление выхода  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$  в  $p$ –Pb оказалось существенно меньше, чем в соударениях Pb–Pb.

Еще один интересный вопрос физики кваркониев в ядро-ядерных столкновениях — изучение их азимутальной анизотропии. В эксперименте CMS зависимости эллиптического и триангулярного потоков так называемых «прямых» (рождаются непосредственно через  $c\bar{c}$ -кварковую пару) и «непрямых» (появляются вторичным путем через рождение  $b$ -кварка)  $J/\psi$ -мезонов от поперечного импульса  $p_T$  и числа участников взаимодействия были измерены в столкновениях Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [23]. В двух случаях было обнаружено существенное ненулевое значение величины  $v_2$  для кваркониев с поперечным импульсом,  $p_T$ , до  $50$  ГэВ/с, при этом  $v_2$  «непрямых»  $J/\psi$ -мезонов было ощутимо ниже, чем для «прямых», что может свидетельствовать об особенностях проявления энергетических потерь в КГП для каналов рождения  $J/\psi$ . В то же время попытка обнару-

жить ненулевое значение триангулярного потока  $v_3$  «прямых» и «непрямых»  $J/\psi$ -мезонов в столкновениях Pb–Pb не увенчалась успехом — для двух типов значение этой величины оказалось равным или очень близким к нулю. Впервые в эксперименте CMS измерили значение эллиптического и триангулярного потоков для  $\psi(2S)$ -мезона в столкновениях Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ:  $v_2$   $\psi(2S)$ -мезона также имеет существенную величину до  $p_T = 50$  ГэВ/с, но  $v_3$  — тоже равен или очень близок к нулевому значению.

При исследовании азимутальной анизотропии  $\Upsilon(1S)$ -мезона, в отличие от  $J/\psi$ , на установке CMS не удалось найти ненулевого значения эллиптического потока  $v_2$  и в соударениях Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [24], и в соударениях  $p$ –Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  ТэВ [25], что, естественно, означает необходимость дальнейшего изучения вопроса.

Из наиболее свежих результатов коллораации CMS по кваркониям следует отметить одновременную регистрацию двойного рождения  $J/\psi$ -мезонов в соударениях  $p$ –Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  ТэВ с достоверностью около  $5.3$  стандартных отклонений [26], что было сделано впервые. Анализ дает новые данные для изучения динамики множества независимых жестких расщеплений.

Открытие и изучение так называемого эффекта «гашения» струй (jet quenching) — также среди важнейших достижений коллораации CMS по изучению КГП. Суть открытия этого эффекта состоит в обнаружении сильного дисбаланса в соотношениях между энергиями адронных струй в двух-струйных центральных и полуцентральных Pb–Pb соударениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ по сравнению со столкновениями  $p$ – $p$   $\sqrt{s} = 7$  ТэВ [27, 28]. «Гашение» струй также было практически одновременно с CMS зарегистрировано коллораацией ATLAS [29].

Из последних исследований коллораации CMS по адронным струям следует отметить работу по изучению адронных струй с учетом их радиусов (при этом использовался анти- $k_T$  алгоритм) в столкновениях  $p$ – $p$  и Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [30]. Обнаружено, что в центральных столкновениях Pb–Pb имеется сильное подавление струй в том числе и с большим поперечным импульсом  $500$  ГэВ/с  $< p_T < 1$  ТэВ/с, которое не зависело от радиуса струи. Любопытно, что наиболее известные Монте-Карло генераторы событий не смогли полностью воспроизвести эти экспериментальные данные.

В эксперименте CMS впервые были измерены азимутальные потоки  $v_2$ ,  $v_3$  и  $v_4$  в двухструйных событиях в Pb–Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [31]. Обнаружено, что значения и зависимость от центральности  $v_2$  струй близки к аналогичной величине для высокоэнергетичных заряженных адронов. В то же время потоки  $v_3$  и  $v_4$  струй равны или близки к нулю, в отличие от существенно ненулевых значений для заряженных адронов.

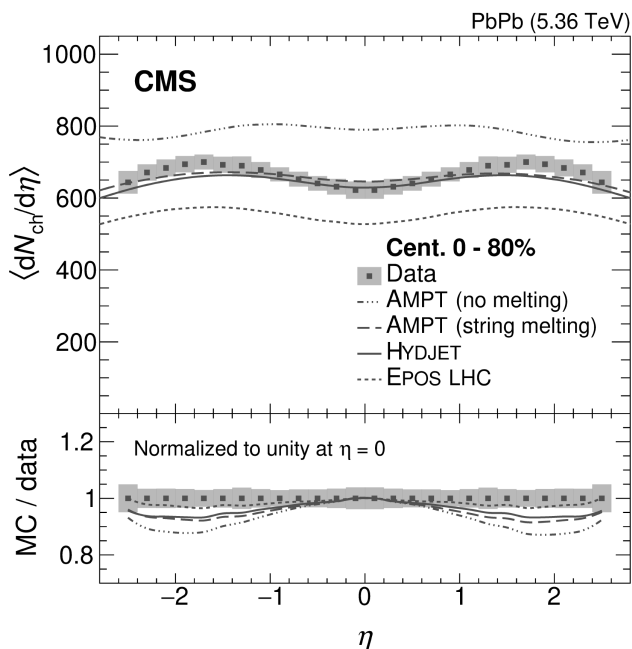


Рис. 1. Распределение заряженных адронов по псевдобыстроте по экспериментальным данным детектора CMS в столкновениях Pb–Pb центральности 0–80% при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ и его сравнение с предсказаниями Монте–Карло генераторов AMPT [36], HYDJET [37] и EPOS [38]; рисунок опубликован в работе [35]

t-Кварки впервые были зарегистрированы в эксперименте CMS в столкновениях Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [32]. Статистическая значимость обнаружения t-кварков составила 3.8 и 4 стандартных отклонения при двух различных методиках анализа экспериментальных данных (распады только через заряженные лептоны или же заряженные лептоны + b-струи). Измеренные сечения соответствуют предсказаниям квантовой хромодинамики.

На установке CMS впервые в столкновениях тяжелых ядер зафиксированы свидетельства рождения частицы X(3872) для Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [33]. Вероятность рождения частицы оказалось выше, чем в соударениях p–p, что, возможно, подскажет новые подходы для понимания механизма образования и самой физической природы этой частицы.

Несмотря на то, что адрон  $f_0(980)$  был открыт еще полвека назад, вопрос о его кварковом составе до сих пор не был определен: это может быть обычный кварк–антикварковый ( $q\bar{q}$ ) мезон, экзотическое тетракварковое ( $q\bar{q}q\bar{q}$ ) состояние, молекула каон–антикаон ( $K\bar{K}$ ) или же кварк–антикварк–глюонный гибрид ( $q\bar{q}g$ ). Проведенное коллаборацией CMS исследование на основе измерения его эллиптического потока  $v_2$  в зависимости от числа кварков, из которых он, возможно, состоит, в соударениях p–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  ТэВ [34] привело к получению убедительного доказатель-

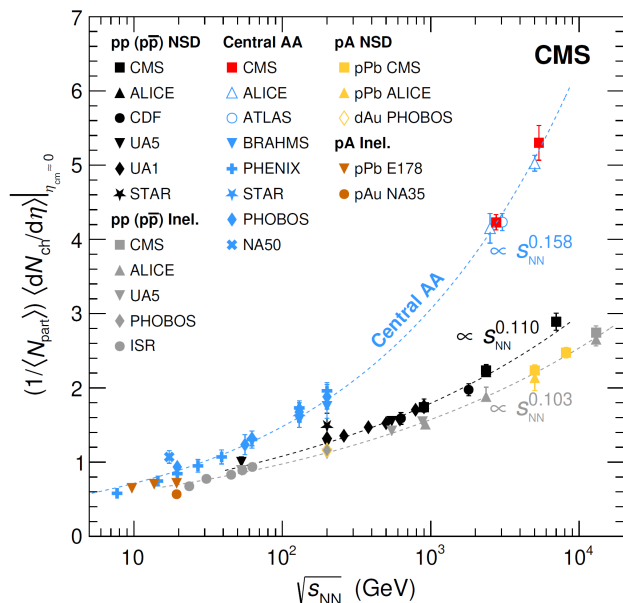


Рис. 2. Среднее число заряженных адронов на единицу псевдобыстроты в различных экспериментах в зависимости от энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}}$ , рисунок опубликован в работе [35]

ства того, что состояние  $f_0(980)$  является обычным  $q\bar{q}$ -мезоном.

Новый сеанс набора данных на LHC Run 3 начался в июле 2022 г., в октябре того же года произошли первые столкновения Pb–Pb при рекордной энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ. В эксперименте CMS было измерено распределение заряженных адронов по псевдобыстроте [35] и проведено его сравнение с моделированием Монте–Карло генераторов AMPT [36], HYDJET [37] и EPOS [38] (см. рис. 1). Тем не менее указанные генераторы не описывают форму и величину распределения заряженных адронов во всем измеренном диапазоне. На рис. 2 показано сравнение среднего числа заряженных адронов на единицу псевдобыстроты в различных экспериментах в зависимости от энергии столкновения, новое значение для энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ от коллаборации CMS соответствует степенной зависимости, выявленной в предыдущих исследованиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллаборация Компактный мюонный соленоид (CMS) около 15 лет занимается изучением физики тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере (LHC). Полученные физические результаты уже внесли свой неоценимый вклад в научное понимание поведения материи в экстремальных условиях,

близкого к состоянию Большого взрыва, а также принесли сведения о новом состоянии вещества — кварк-глюонной плазмы. Ожидается, что дальнейшие экспериментальные исследования на установке CMS прольют новый свет на этот актуальный раздел физики высоких энергий.

Автор выражает свою большую благодарность организаторам LXXIII Международной конферен-

ции «Ядро-2024: Фундаментальные вопросы и приложения», которая состоялась 1–5 июля 2024 г. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна Московской области, за возможность представить пленарный доклад. Отдельное спасибо участникам коллаборации эксперимента CMS за сотрудничество и помощь в подборке материалов.

- 
- [1] (*ALICE Collaboration*) Aamodt K. et al. // *J. Instrum.* **3**. S08002 (2008).
- [2] (*ATLAS Collaboration*) Aad G. et al. // *J. Instrum.* **3**. S08003 (2008).
- [3] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *J. Instrum.* **3**. S08004 (2008).
- [4] (*LHCb Collaboration*) Augusto Alves Jr. A. et al. // *J. Instrum.* **3**. S08005 (2008).
- [5] Baur G., Bedjidian M., Bonner B. E. et al. // *Eur. Phys. J. C.* **32**. s69 (2004).
- [6] (*CMS Collaboration*) d'Enterria D. et al. // *CMS Physics Technical Design Report: Addendum on High Density QCD with Heavy Ions*. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **34**, N 11. 2307 (2007).
- [7] Armesto N., Borghini N., Jeon S. et al. // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**. 054001 (2008).
- [8] *CMS Collaboration* // CMS Heavy-Ion Physics Publications. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN/>
- [9] *CMS Collaboration* // CMS Heavy-Ion Physics Preliminary Results. <https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/HIN/>
- [10] (*CMS Collaboration*) Khachatryan V. et al. // *J. High Energy Phys.* N 09. 091 (2010).
- [11] (*PHOBOS Collaboration*) Alver B. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **104**. 062301 (2010).
- [12] (*STAR Collaboration*) Abelev B. I. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **105**. 022301 (2010).
- [13] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *Phys. Lett. B.* **718**. 795 (2013).
- [14] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *J. High Energy Phys.* N 07. 076 (2011).
- [15] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *Phys. Lett. B.* **844**. 137905 (2023).
- [16] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *Phys. Rev. C.* **87**. 014902 (2013).
- [17] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *J. High Energy Phys.* N 02. 106 (2024).
- [18] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A. M. et al. // *Phys. Rev. C.* **100**. 044902 (2019).
- [19] *CMS Collaboration* // CERN CMS-PAS-HIN-22-005. (2023). (<https://cds.cern.ch/record/2866359>)
- [20] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A.M. et al. // *Eur. Phys. J. C.* **78**. 509 (2018).
- [21] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **133**. 022302 (2024).
- [22] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *Phys. Lett. B.* **835**. 137397 (2022).
- [23] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *J. High Energy Phys.* N 10. 115 (2023).
- [24] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A. M. et al. // *Phys. Lett. B.* **813**. 136036 (2021).
- [25] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *Phys. Lett. B.* **850**. 138518 (2024).
- [26] (*CMS Collaboration*) Hayrapetyan A. et al. // *Phys. Rev. D.* **110**. 092002 (2024).
- [27] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *Phys. Rev. C.* **84**. 024906 (2011).
- [28] (*CMS Collaboration*) Chatrchyan S. et al. // *Phys. Lett. B.* **712**, N 3. 176 (2012).
- [29] (*ATLAS Collaboration*) Aad G. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **105**. 252303 (2010).
- [30] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A.M. et al. // *J. High Energy Phys.* N 05. 284 (2021).
- [31] (*CMS Collaboration*) Tumasyan A. et al. // *J. High Energy Phys.* N 07. 139 (2023).
- [32] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A.M. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **125**. 222001 (2020).
- [33] (*CMS Collaboration*) Sirunyan A.M. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **128**. 032001 (2022).
- [34] (*CMS Collaboration*) Hayrapetyan A. et al. // [arXiv:2312.17092](https://arxiv.org/abs/2312.17092). (2023).
- [35] (*CMS Collaboration*) Hayrapetyan A. et al. // *Phys. Lett. B.* **861**. 139279 (2025).
- [36] Lin Z.-W., Ko C. M., Li B.-A. et al. // *Phys. Rev. C.* **72**, 064901 (2005).
- [37] Lokhtin I.P., Snigirev A.M. // *Eur. Phys. J. C.* **45**. 211 (2006).
- [38] Drescher H.J., Hladik M., Ostapchenko S. et al. // *Phys. Rept.* **350**. 93 (2001).

## Heavy-ion Physics Results by the Compact Muon Solenoid (CMS) Experiment at the Large Hadron Collider (LHC)

S. V. Petrushanko on behalf of CMS Collaboration

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

*E-mail: [sergant@lav01.sinp.msu.ru](mailto:sergant@lav01.sinp.msu.ru)*

This publication presents the latest experimental results on the physics of relativistic heavy ion collisions obtained at the Compact Muon Solenoid (CMS) facility at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN.

PACS: 12.38.Mh; 13.20.Gd; 14.40.Gx; 14.40.Pq; 25.75.-q.

*Keywords:* relativistic heavy-ion collision, Large Hadron Collider, quark-gluon plasma, azimuthal anisotropy, elliptical flow, hadron jets, quarkonia.

*Received 07 October 2024.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

**Сведения об авторе**

Петрушанко Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: [sergant@lav01.sinp.msu.ru](mailto:sergant@lav01.sinp.msu.ru).