

# ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО КВАРКОНИЯМ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА УСКОРИТЕЛЕ LHC

*С. В. Петрушанко* \*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Представлены последние физические результаты по кваркониям в ядро-ядерных столкновениях в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC).

The very recent results on quarkonia in heavy-ion collisions with the CMS experiment at the LHC are discussed.

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

*Памяти моего учителя Людмилы Ивановны Сарычевой (1926–2011), внесшей огромный вклад в подготовку и реализацию программы по изучению столкновений тяжелых ионов в эксперименте CMS, посвящается*

## ВВЕДЕНИЕ

Наиважнейшая цель современных экспериментов с релятивистскими соударениями тяжелых ядер — изучение адронной материи в экстремальном режиме сверхвысоких температур и плотностей частиц. Изучение ядро-ядерных столкновений при энергиях ускорителя Большой адронный коллайдер (LHC) — существенная часть общей программы физических исследований. Соударения свинец–свинец при энергии в системе центра масс на пару нуклонов  $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$  ТэВ на ускорителе LHC впервые были зафиксированы в ночь с 6 на 7 ноября 2010 г. Уже более 10 лет международная коллаборация «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [1] занимается изучением ядро-ядерных соударений на установке CMS. К настоящему времени по данному вопросу коллаборацией опубликовано более ста научных статей [2], также представлен целый ряд предварительных результатов по физическому анализу [3].

---

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

Можно достаточно условно разделить основные цели научной программы эксперимента CMS по изучению тяжелых ионов на две части (по энергии  $E$  и поперечному импульсу  $p_T$  объектов): «мягкая физика» (исследования по рождению низкоэнергетических частиц — множественности, спектров, эллиптического потока, корреляций и т. д.) и «жесткие» тесты (изучение различных высокоэнергетических объектов — адронов с большими значениями  $p_T$ , адронных струй, кваркониев и т. п.).

Кварконии — семейства состояний  $c\bar{c}$ - ( $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ ) и  $b\bar{b}$ - ( $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$ ) пар кварков — являются крайне важными компонентами программы по изучению ядро-ядерных соударений на установке CMS. Далее представим основные результаты по их исследованию.

### ИЗУЧЕНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ РОЖДЕНИЯ КВАРКОНИЕВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

Основные физические задачи, которые решаются при изучении кваркониев в ядро-ядерных соударениях на установке CMS, были сформулированы еще до запуска ускорителя LHC [4]. Исследование подавления выхода кваркониев в зависимости от центральности и числа нуклонов-участников ядро-ядерных столкновений и характеристик самих кваркониев (поперечного импульса  $p_T$ , эллиптического и триангулярного потоков  $v_2$  и  $v_3$ ) дает важную информацию о свойствах и различных этапах эволюции кварк-глюонной материи. Фактор ядерного модифицирования  $R_{AA}$  характеризует отношение рождения объектов (в нашем случае — кваркониев) в ядро-ядерных взаимодействиях по отношению к их рождению в протон-протонных столкновениях (с учетом поправки на число соответствующих нуклон-нуклонных рассеяний).

В эксперименте CMS было зафиксировано подавление выхода  $J/\psi$ -мезонов в соударениях свинец–свинец при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$  и 5,02 ТэВ по сравнению с их рождением в соударениях протон–протон при тех же энергиях [5]. При этом было зафиксировано уменьшение фактора  $R_{AA}$  при увеличении центральности соударения свинец–свинец. Таким образом, обнаружено, что подавление  $J/\psi$ -мезонов максимально в наиболее центральных соударениях. Также было обнаружено, что рождение  $\psi(2S)$  в соударениях свинец–свинец подавлено гораздо сильнее, чем рождение  $J/\psi$ -мезонов.

Поперечные сечения рождения  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$  были измерены в эксперименте CMS в соударениях протон–протон и свинец–свинец при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ [6]. Выход всех энергетических состояний семейства  $\Upsilon$  в соударениях свинец–свинец оказался существенно подавлен (с последовательным усилением подавления при увеличении массы) по сравнению с соударениями протон–протон (рис. 1). В эксперименте CMS впервые удалось зафиксировать сигнал от  $\Upsilon(3S)$  в соударениях свинец–свинец. Аналогичный анализ был проведен для соударений про-

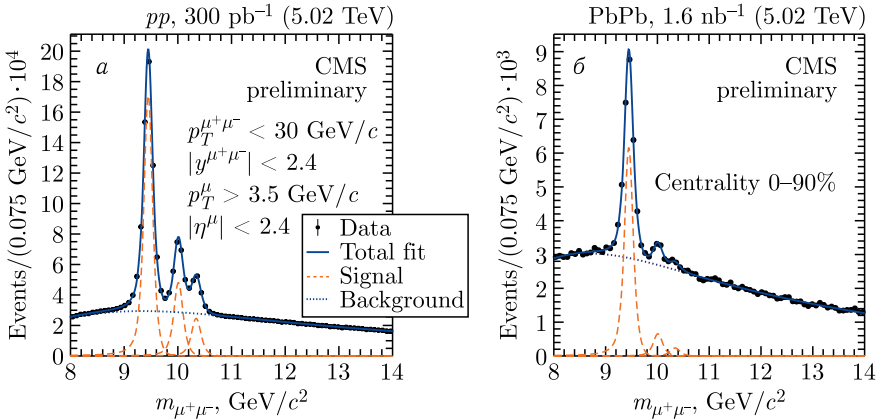


Рис. 1. Инвариантный массовый спектр димюонов в эксперименте CMS в протон-протонных (а) и ядро-ядерных (б) столкновениях для кинематического диапазона пар мюонов по поперечному импульсу  $p_T(\mu^+\mu^-) < 30$  ГэВ/с и быстрой  $|y(\mu^+\mu^-)| < 2,4$ . Точки — экспериментальные данные для димюонов в соударениях протон-протон и свинец-свинец, сплошная кривая — результат аппроксимации данных. Штриховыми кривыми показаны результаты выделения сигнала, пунктирными — вторичного фона. Рисунок представлен в физическом анализе [6]

тон-свинец при той же энергии [7]. Подавление всех трех состояний  $\Upsilon$  в этом случае оказалось меньше, чем в соударениях свинец-свинец.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО И ТРИАНГУЛЯРНОГО ПОТОКОВ КВАРКОНИЕВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

Изучение эллиптического и триангулярного потоков кваркониюв  $v_2$  и  $v_3$  при энергиях LHC также представляет существенный интерес в связи с возможностью получения ценной информации о ранних стадиях формирования кварк-глюонной материи. В эксперименте CMS получен ряд важных данных по этим величинам для  $J/\psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов.

Эллиптический  $v_2$  и триангулярный  $v_3$  потоки прямых (рождаются непосредственно через  $c\bar{c}$ -кварковую пару) и не прямых (рождаются через  $b$ -кварк)  $J/\psi$ -мезонов в зависимости от их поперечного импульса  $p_T$  и среднего числа нуклонов-участников ядро-ядерного взаимодействия были измерены на установке CMS в соударениях свинец-свинец при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ [8] (рис.2). Для  $J/\psi$ -мезонов обнаружен большой поток  $v_2$  — вплоть до  $p_T < 50$  ГэВ/с. При этом поток  $v_2$  для не прямых  $J/\psi$ -мезонов оказался существенно ниже, чем для прямых. Что касается триангулярного потока  $v_3$ , то в эксперименте CMS впервые смогли измерить его для прямых и не прямых  $J/\psi$ -мезонов отдельно и показать, что их поток  $v_3$  равен или близок к нулю (см. рис.2, снизу). Также впервые в ядро-ядерных столкновениях в эксперименте CMS измерены  $v_2$  и  $v_3$  для  $\psi(2S)$ -мезона, показано, что его поток  $v_2$  тоже

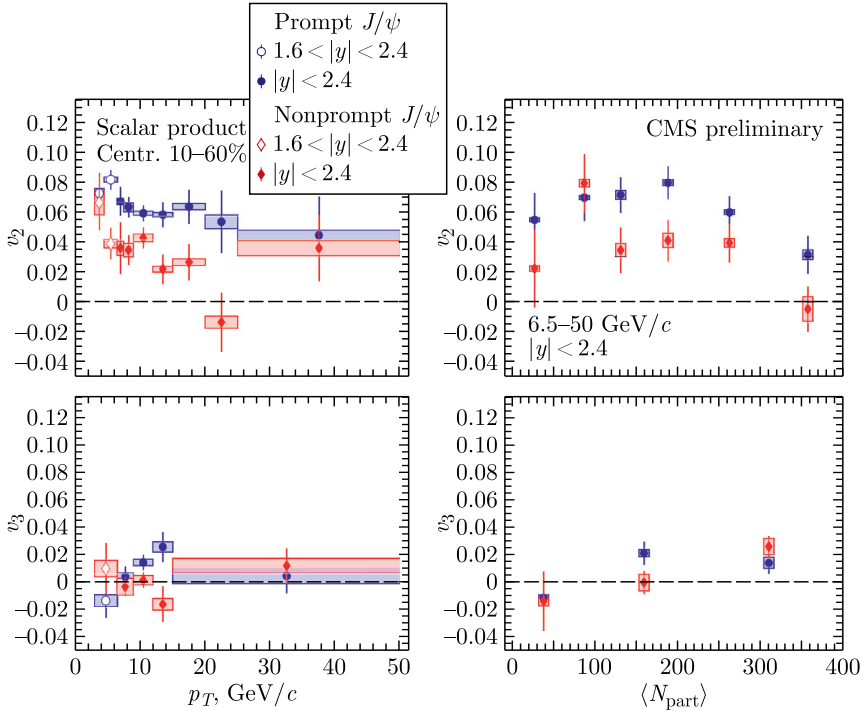


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Коэффициенты эллиптического (сверху) и триангулярного (снизу) потоков прямых (синие точки) и непрямых (красные точки)  $J/\psi$ -мезонов в зависимости от их поперечного импульса  $p_T$  (слева) и среднего числа нуклонов-участников ядро-ядерного взаимодействия (справа) в соударениях свинец–свинец при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ в эксперименте CMS. Рисунок представлен в физическом анализе [8]

имеет существенное значение — вплоть до  $p_T < 50$  ГэВ/с, а поток  $v_3$  близок к нулю.

В то же время в отличие от  $J/\psi$ -мезонов для  $\Upsilon(1S)$ -мезонов в эксперименте CMS не удалось обнаружить какого-либо существенного эллиптического потока  $v_2$  в соударениях свинец–свинец при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ [9]. Аналогичный результат обнаружен для  $\Upsilon(1S)$ -мезонов в протон-свинцовых соударениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 8,16$  ТэВ [10]. Понятно, что эти экспериментальные данные требуют дальнейшего изучения и тщательной теоретической интерпретации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение свойств кваркониумов в релятивистских соударениях тяжелых ионов на экспериментальной установке CMS ускорителя LHC уже на первых двух этапах его работы (Run 1 и Run 2) привело к получению

интереснейших результатов по физике адронной материи в экстремальном режиме. Ожидается, что, начиная с запуска в июле 2022 г. третьего (Run 3) и в 2027 г. четвертого (Run 4) этапов с помощью модернизированной установки CMS и очередных рекордных энергий и светимостей ускорителя ЛHC, мы сможем получить новую информацию о свойствах кварк-глюонной материи, продолжая изучать рождение кваркониев.

**Благодарности.** Автор выражает самую искреннюю благодарность организаторам конференции «Физика димюонов на ЛHC», проходившей 23–24 июня 2022 г. в Дубне (ОИЯИ), за исключительно теплый и радушный прием, а также за возможность представить свой доклад. Спасибо всем участникам международной коллаборации эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (CMS) за предоставленные материалы и за многолетнее плодотворное сотрудничество.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. The CMS Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08004.
2. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. CMS Heavy-Ion Physics Publications. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN/>.
3. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. CMS Heavy-Ion Physics Preliminary Results. <https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/HIN/>.
4. *CMS Collab.* CMS Physics Technical Design Report: Addendum on High Density QCD with Heavy Ions // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2007. V. 34, No. 11. P. 2307–2455.
5. *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.)*. Measurement of Prompt and Nonprompt Charmonium Suppression in PbPb Collisions at 5.02 TeV // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 509; arXiv:1712.08959 [hep-ex].
6. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. Observation of the  $\Upsilon(3S)$  Meson and Sequential Suppression of  $\Upsilon$  States in PbPb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. CERN CMS-PAS-HIN-21-007. 2022; arXiv:2303.17026 [hep-ex]. 2023.
7. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. Nuclear Modification of  $\Upsilon$  States in pPb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV // Phys. Lett. B. 2022. V. 835. P. 13797; arXiv:2202.11807 [hep-ex]. 2022.
8. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. Measurements of the Azimuthal Anisotropy of Charmonia in PbPb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. CERN CMS-PAS-HIN-21-008. 2022; arXiv:2305.16928 [hep-ex]. 2023.
9. *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.)*. Studies of Charm and Beauty Hadron Long-Range Correlations in pp and pPb Collisions at LHC Energies // Phys. Lett. B. 2021. V. 813. P. 136036; arXiv:2009.07065 [hep-ex].
10. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.)*. Azimuthal Anisotropy of  $\Upsilon(1S)$  Mesons in pPb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV. CERN CMS-PAS-HIN-21-001. 2022; arXiv:2310.03233 [hep-ex]. 2023.