

ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИФРАКЦИЯ И УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ В ALICE В RUN 3 И RUN 4

Н. Бурмасов от имени коллаборации ALICE*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

В настоящее время детекторные системы эксперимента ALICE на Большом адронном коллайдере проходят крупную модернизацию в течение Long Shutdown 2 (2019–2021). В частности, времяпроекционная камера (TPC) будет оборудована считывающими камерами на основе газовых электронных умножителей, а считывающая электроника некоторых других детекторов будет заменена на более быструю и гибкую, что позволит ALICE собирать данные с большинства детекторов в непрерывном режиме и записывать Pb–Pb-события в течение Run 3 (2021–2024) и Run 4 (2027–2030) при частотах, приблизительно равных 50 кГц. Коллаборация ALICE также рассматривает возможность сбора большого количества данных протон-протонных столкновений при частотах взаимодействий порядка 1 МГц с использованием предварительного отбора редких событий в режиме онлайн и оффлайн. Для выполнения этих задач требуется разработка совершенно новой вычислительной системы, которая будет использоваться для быстрой реконструкции событий и сжатия потока данных. В этих условиях разработка стратегии отбора становится нетривиальной задачей для случая редких событий, таких как дифракционные в протон-протонных столкновениях и ультрапериферические в ядро-ядерных свинцовых, которые характеризуются отсутствием частиц в передней и задней области быстро и наличием лишь нескольких треков в центральной области. В данной работе приведены мотивация изучения центральных дифракционных и ультрапериферических событий, а также исследование возможности отбора таких событий в Run 3 и Run 4.

The ALICE experiment at the LHC is undergoing a major upgrade during the Long Shutdown 2 (2019–2021). In particular, the Time Projection Chamber (TPC) is being equipped with new GEM-based readout chambers and the readout electronics of several detectors are being replaced with faster and more flexible technology. This will allow ALICE to read out most of the detectors in the continuous mode and record minimum bias Pb–Pb events at rates of about 50 kHz in Run 3 (2021–2024) and Run 4 (2027–2030). The ALICE Collaboration is also considering the possibility to collect a large sample of proton–proton collisions at interaction rates of about 1 MHz using online and offline preselection of rare events. These

* E-mail: nazar.burmasov@cern.ch

goals require a completely new online computing system that will be used to perform fast reconstruction and compression of the data stream. The event selection strategy becomes especially challenging for the case of central diffractive events and ultra-peripheral Pb–Pb collisions characterized by rapidity gaps at forward and backward directions with only few tracks at central rapidity. In this contribution, the motivation for studying central diffractive and ultra-peripheral events is presented, and feasibility studies for their selection in Run 3 and Run 4 will be given.

PACS: 13.60.Le; 24.10.Lx; 25.20.Lj; 25.75.-q

ВВЕДЕНИЕ

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [1] — один из четырех основных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) ЦЕРН. Он предназначен для изучения столкновений тяжелых ионов при экстремально высоких энергиях и исследования характеристик кварк-глюонной плазмы. Детектор сконструирован таким образом, чтобы справляться с высокими плотностями потока частиц при столкновениях ионов свинца на БАК: детектор имеет высокую гранулярность, высокую эффективность трекинга частиц при малых значениях поперечного импульса вплоть до $p_T \simeq 0,15$ ГэВ/с и превосходные возможности идентификации частиц до 20 ГэВ/с.

Во время Long Shutdown 2 детекторные системы ALICE будут значительно усовершенствованы. В частности, времяпроекционная камера (The Time Projection Chamber, TPC) будет оборудована считывающими камерами на газовых электронных умножителях, а считывающая электроника нескольких других детекторов будет заменена на более быструю и гибкую. Модернизация позволит ALICE взамен триггерного режима считывания в Run 1 и Run 2 перейти на непрерывное считывание данных и полную онлайн-обработку событий. Новый режим считывания данных сделает возможной запись Pb–Pb-событий при частотах около 50 кГц и протон-протонных столкновений при частотах взаимодействий около 1 МГц в течение Run 3 (2021–2024) и Run 4 (2027–2030), что приведет к увеличению объема данных в 100 раз [2]. Вычислительная часть эксперимента также будет заменена новым программным пакетом для анализа данных и моделирования O^2 [3]. Обработка данных будет разделена на две стадии: синхронную (или онлайн) и асинхронную (или оффлайн). Синхронная обработка необходима для калибровки детектора и сжатия данных. В процессе синхронной обработки будут формироваться сжатые таймфреймы (Compressed Time Frames, STF) — наборы данных с детекторов, сгруппированных по временным интервалам порядка ~ 10 мс. Данные STF и калибровочная информация будут записаны на временное дисковое хранилище, после чего будут копироваться на магнитные ленты для постоянного хранения. В периоды, когда вычислительная ферма O^2 не будет интенсивно использоваться для синхронной обработки, она бу-

дет использоваться для выполнения части оффлайн-реконструкции событий, в процессе которой данные обрабатываются повторно и генерируется конечный результат реконструкции. Часть оффлайн-реконструкции, для которой необходимые ресурсы превосходят возможности вычислительной фермы O^2 , будет проводиться с использованием сети LHC Computing Grid [4].

В следующих разделах будет обсуждаться мотивация для изучения центральных дифракционных протон-протонных столкновений и ультрапериферических Pb–Pb-столкновений в Run 3 и Run 4. В частности, темы, представляющие интерес для исследований центральной дифракции, связаны с поиском глюболов, спиновой структурой померона и изучением редких резонансов [5]. Ультрапериферические столкновения в ALICE позволят провести более точные измерения недостаточно изученных функций распределения глюонной плотности в ядрах при малых значениях x Бьёркена. Также существует возможность использования ультрапериферических столкновений для проверки предсказаний квантовой электродинамики в измерениях процесса рассеяния света на свете (light-by-light, LbyL) и поиска аксионоподобных частиц (axion-like particles, ALP) [6–8].

После модернизации детектор ALICE сможет считывать Pb–Pb-события при частотах порядка 50 кГц и pp -события при частотах порядка 1 МГц. Ввиду увеличения потока данных с детектора и предстоящего перехода к режиму непрерывного считывания данных, необходимо соответствующим образом скорректировать стратегию отбора данных. Эта задача становится нетривиальной в случае редких центральных дифракционных событий и ультрапериферических Pb–Pb-столкновений, которые характеризуются отсутствием частиц в передней и задней областях быстрот и наличием лишь нескольких треков в центральной области. В данной работе рассматриваются возможные стратегии отбора событий в Run 3 и Run 4, а также приведены результаты исследований возможности измерений на основе полного моделирования детекторных систем с использованием пакета O^2 и нескольких монте-карло-генераторов событий.

1. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИФРАКЦИЯ В ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Центральные дифракционные pp -столкновения в БАК могут быть использованы для исследований сильного взаимодействия в непертурбативном режиме. Для описания центрального эксклюзивного рождения (Central exclusive production, CEP) при малых массах обычно используется механизм двойного обмена померонами [9], который приводит к преобладанию в конечном состоянии резонансов с квантовыми числами $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++}, 2^{++}, \dots)$, а также связанных глюонных состояний (глюболов). Согласно расчетам в рамках решеточной КХД ожидается,

что самые легкие глюболы должны иметь массы $M^G(0^{++}) = 1710$ МэВ и $M^G(2^{++}) = 2390$ МэВ. В качестве возможных кандидатов в глюболы рассматривают экспериментально обнаруженные резонансы $f_0(1370)$, $f_0(1500)$ и $f_0(1710)$. Природа этих состояний до сих пор противоречива, и более точные измерения на БАК помогут лучше понять их структуру. Для обзора см., например, [10].

СЕР также можно использовать для изучения спиновой структуры померона и его взаимодействия с адронами. Хотя померон был изначально введен как траектория Редже, объясняющая медленный рост адронных сечений при высоких энергиях и проходящая через все возможные

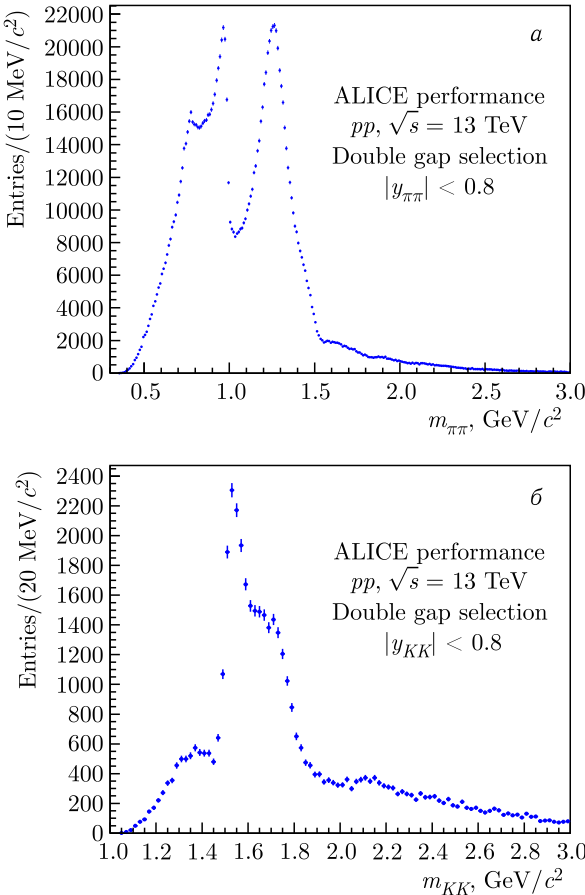


Рис. 1. Необработанные спектры по инвариантной массе пар пионов (а) и каонов (б) в событиях центральной дифракции, полученные ALICE в протон-протонных столкновениях при 13 ТэВ. Источник: [15]

спиновые состояния, в известной модели Доннаки–Лэндшофа померон был феноменологически описан как эффективный векторный ток [11]. С другой стороны, представление померона в виде глюонной лестницы в КХД и наблюдаемое сохранение спиральности в s -канале в процессах фоторождения свидетельствуют о скалярной природе померона. Однако модель скалярного померона ставится под сомнение последними измерениями спиральной структуры упругого рассеяния протонов при малых t , полученными в эксперименте STAR [12], тогда как тензорная модель померона [13] согласуется с данными STAR [14]. Парциально-волновой анализ различных конечных состояний CEP-событий может быть использован в качестве инструмента для разрешения этого вопроса и выяснения, взаимодействует ли померон как эффективный скалярный, векторный или тензорный ток.

В течение Run 2 на БАК было набрано большое количество CEP-событий (рис. 1) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с интегральной светимостью, близкой к 8 пб^{-1} . Эти данные уже могут быть использованы для проведения анализов. Коллаборация ALICE планирует собрать значительно больший объем данных в течение Run 3 и 4 при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ с ожидаемой интегральной светимостью, близкой к 200 пб^{-1} , благодаря намного лучшей эффективности режима непрерывного считывания [5].

2. УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Релятивистские тяжелые ионы являются источниками сильного электромагнитного поля, которое может быть описано в виде эквивалентного потока квазиреальных фотонов. В ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов (ultra-peripheral collisions, UPC) прицельный параметр больше суммы радиусов налетающих частиц, поэтому адронные взаимодействия подавлены, а электромагнитные преобладают. Таким образом, UPC в БАК хорошо подходят для измерений фотон-фотонных и фотоядерных взаимодействий.

В первом порядке пертурбативной КХД сечение когерентного фоторождения пропорционально квадрату глюонной плотности в ядрах, поэтому фоторождение векторных мезонов представляет особый интерес. Эксперимент ALICE покрывает интервал быстрой и импульсов, который соответствует значениям x Бьёркена между $\sim 10^{-2}$ и $\sim 10^{-5}$, а масса тяжелых кварков служит жестким масштабом для проведения пертурбативных вычислений [16]. Таким образом, когерентное фоторождение чармония в UPC может быть использовано для определения плохо изученных функций распределения глюонной плотности в ядрах, известных как ядерные глюонные экранировки [17], которые являются важным фактором при описании начальных этапов столкновений тяжелых ионов.

Извлечение глюонной экранировки из измерений фоторождения векторных мезонов затруднено тем фактом, что измеренные сечения UPC

выражаются через сумму двух членов, отвечающих вкладам при низких и высоких x , так как оба сталкивающиеся иона могут быть источниками фотонов. Ожидаемый большой объем данных UPC-событий в Run 3 и 4 может помочь разделить вклады в сечение низких и высоких x с помощью измерений дифференциальных сечений в зависимости от быстроты при наличии дополнительной нейтронной активности в детекторах ZDC (Zero Degree Calorimeters) и без нее [18] или с помощью измерения сечений процессов фоторождения в периферических столкновениях [19].

Ожидаемые ошибки экспериментальных измерений глюонной экранировки в Run 3 и 4 были рассчитаны в [6] путем оценки статистических и систематических ошибок для фактора ядерного подавления, который определяется как квадратный корень отношения сечения фоторождения $\sigma_{\gamma \text{Pb}}$, измеренного в Pb–Pb UPC, и сечения фоторождения в импульсном приближении (σ_{IA}), рассчитанного как сечение фоторождения на протонах, отмасштабированное на интеграл по квадрату ядерного фактора [17]:

$$R_{\text{Pb}}(x) = \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma \text{Pb}}}{\sigma_{\text{IA}}}}, \quad x = \frac{m_V}{\sqrt{s_{\text{NN}}}} \exp(-y).$$

Здесь m_V и y — масса и быстрота рожденного векторного мезона. При условии, что сечение когерентного фоторождения пропорционально квадрату глюонной плотности на масштабе $Q = m_V/2$, фактор ядерного подавления может быть использован для более точных измерений глюонной плотности на различных масштабах. На рис. 2 приведены псевдодан-

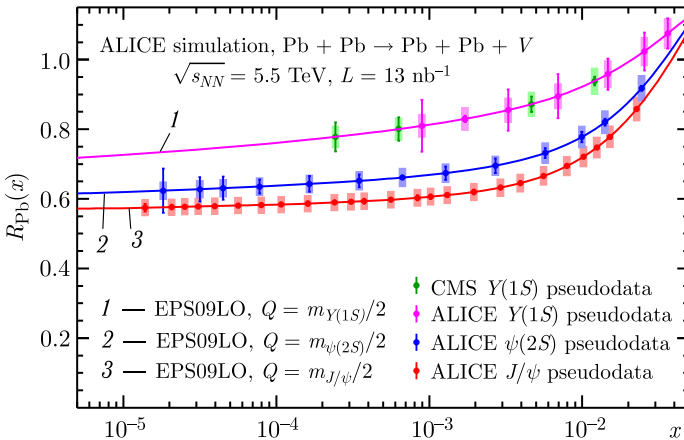


Рис. 2. Расчеты фактора ядерного подавления по псевдоданным фоторождения трех тяжелых векторных мезонов в ультрапериферических Pb–Pb-столкновениях. Псевдоданные основаны на ожидаемых сечениях фоторождения, рассчитанных с использованием глюонных экранировок из параметризации EPS09LO. Источник: [6]

ные, основанные на ожидаемых сечениях фоторождения, рассчитанных с использованием глюонных экранировок из параметризации EPS09LO.

Помимо проведения измерений тяжелых векторных мезонов, существует также возможность исследования фоторождения состояний с тяжелыми кварками, которые являются инструментом прямых измерений глюонного состава ядер [20]. Ожидается, что процесс $\gamma + g \rightarrow c\bar{c}$ ($b\bar{b}$) будет хорошо подходить для изучения благодаря высокой частоте подобных процессов, несмотря на небольшую эффективность регистрации и низкую вероятность распада в этом канале [6].

Рассматривается возможность использования UPC в ALICE для исследования процесса рассеяния света на свете $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ и поиска рождения аксиноподобных частиц $\gamma\gamma \rightarrow a \rightarrow \gamma\gamma$ в Run 3 и 4. Бестриггерный режим считывания может позволить ALICE расширить измерения коллабораций ATLAS и CMS [6, 8, 21] в область более низких инвариантных масс дифотонов.

3. ОТБОР СОБЫТИЙ

Модернизация эксперимента ALICE и переход к режиму непрерывного считывания приведут к значительному увеличению потока данных с детектора, поэтому усовершенствованный отбор событий необходим для уменьшения требуемого для данных дискового пространства.

В данной работе рассматриваются несколько возможных стратегий отбора событий для центрального эксклюзивного рождения и ультрапериферических столкновений. Первая стратегия основана на предварительном онлайн-отборе (с использованием триггера высокого уровня) временных интервалов, в которых есть признаки CEP- или UPC-событий, без полной реконструкции, а лишь с использованием информации из форвардных детекторов. Вторая стратегия использует полную реконструкцию событий в режиме реального времени с последующим отбором событий в асинхронном режиме. После отбора наиболее релевантные данные будут записаны в постоянное хранилище. В третьем подходе производится запись всех событий в постоянное хранилище и офлайн-реконструкция с последующей фильтрацией представляющих интерес событий.

Измерения CEP- и UPC-процессов основаны на поиске событий с небольшим количеством треков в области центрального барреля (например, 2- или 4-трековые события) с отсутствием сигналов в остальном детекторе [5]. Стратегия отбора подобных событий становится особенно нетривиальной в условиях непрерывного считывания данных. Идея, применяемая в алгоритме отбора, основана на требовании отсутствия активности в форвардном детекторе FIT (The Fast Interaction Trigger) для отбрасывания недифракционных (или не-UPC) событий. Однако для проверки активности в FIT для CEP- или UPC-событий необходима точная временная метка столкновения. Временная метка, рассчитанная

с использованием информации мэтчинга треков во внутренней трекинговой системе (The Inner Tracking System, ITS) и TPC, имеет значительную ошибку порядка 100 нс, тогда как типичное время между взаимодействующими пучками составляет приблизительно 25 нс для pp - и приблизительно 50 нс для Pb–Pb-столкновений. Более точная временная метка может быть получена, если один из треков имеет соответствующий хит во времяпролетном детекторе (The Time-Of-Flight detector, TOF). Таким образом, необходим поиск событий с хотя бы одним хитом в TOF и отсутствием активности в FIT в соответствующем временном интервале шириной в 25 нс.

Исследование возможности применения предварительного онлайн-отбора событий было выполнено с использованием генератора Pythia 8 для генерирования pp -столкновений при частоте взаимодействий 1 МГц при $\sqrt{s_{NN}} = 14$ ТэВ и программного пакета O^2 для полного моделирования детектора ALICE и реконструкции событий. Рис. 3 иллюстрирует типичное временное распределение сигналов из FIT и TOF в одном из временных интервалов. Можно видеть, что предварительный онлайн-отбор практически неосуществим ввиду присутствия большого количества банч-кроссингов (характерных временных интервалов между взаимодействующими пучками ~ 25 нс) с нулевой активностью в FIT и лишь одним или двумя кластерами в TOF, источником которых, главным образом, являются адронные взаимодействия в предыдущих банч-кроссингах. Следовательно, эффективный отбор временных интервалов в триггере высокого уровня не может быть построен лишь на информации об активности в FIT и TOF.

Таким образом, была выбрана стратегия, основанная на полной реконструкции событий. Эффективность реконструкции CEP-подобных событий с двумя противоположно заряженными частицами при различных

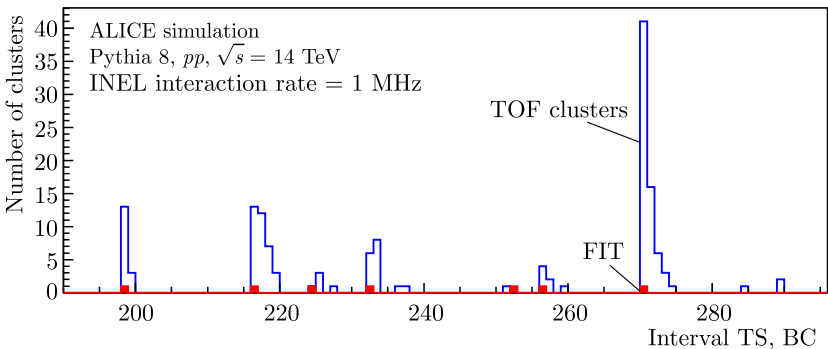


Рис. 3. Моделирование с использованием Pythia 8: типичное распределение сигналов из FIT и TOF при частоте взаимодействий 1 МГц в pp -столкновениях при 14 ТэВ; BC, или «банч-кроссинг», — характерное время между взаимодействующими пучками ~ 25 нс.

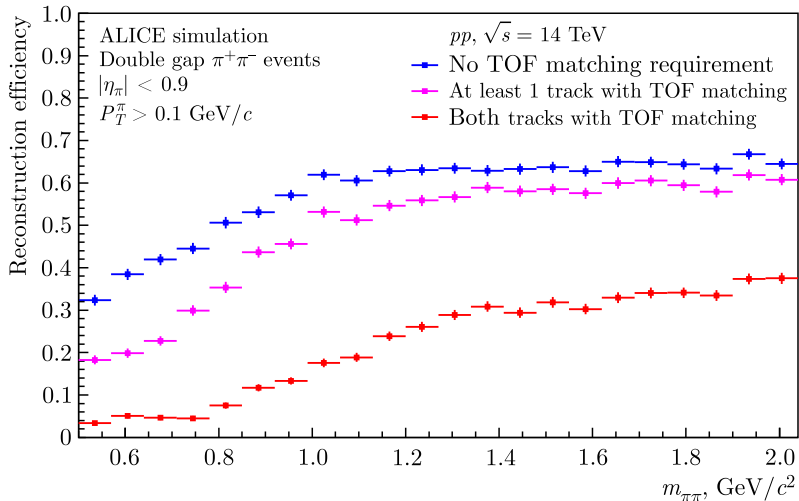


Рис. 4. Эффективность реконструкции пар пионов в центральных дифракционных событиях в протон-протонных столкновениях при 14 ТэВ

требованиях TOF-мэтчинга была исследована с использованием специально разработанного генератора событий. Набор данных из 90 000 пар пионов был сгенерирован и использован для полного моделирования детектора ALICE и реконструкции событий в режиме непрерывного считывания с использованием пакета O². Рис.4 иллюстрирует эффективность реконструкции как функцию инвариантной массы пар пионов $m_{\pi\pi}$ при наложении различных требований на наличие TOF-хитов (без требования на хиты в TOF, хотя бы один или оба трека имеют хиты в TOF). При требовании TOF-хитов для обоих треков наблюдается большая потеря эффективности, тогда как при требовании TOF-хита хотя бы одного трека эффективность снижается лишь незначительно. Так как одного TOF-хита достаточно для мэтчинга информации из FIT и TOF и проверки активности в FIT, стратегия отбора на основе требования хотя бы одного трека с хитом в TOF рассматривается как наиболее перспективная для отбора CEP- и UPC-событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено обсуждение модернизации детектора ALICE в течение Long Shutdown 2, а также мотивация для исследований событий центральной дифракции в протон-протонных столкновениях и ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов. Рассмотрены стратегии отбора событий для CEP и UPC в Run 3 и Run 4, проведены исследования различных стратегий отбора. Результаты этих исследований показывают, что предварительный отбор с использованием только информации детек-

торов FIT и TOF не представляется возможным, поэтому необходимо выполнение либо полной онлайн-реконструкции, либо оффлайн-реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aamodt K. et al. (ALICE Collab.)*. The ALICE Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08002.
2. *Buncic P., Krzewicki M., Vande Vyvre P.* Technical Design Report for the Upgrade of the Online-Offline Computing System. <https://cds.cern.ch/record/2011297>. 2015.
3. *Eulisse G., Konopka P., Krzewicki M., Richter M., Rohr D., Wenzel S.* Evolution of the ALICE Software Framework for Run 3 // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 214. P. 05010.
4. *Rohr D. et al. (ALICE Collab.)*. Overview of Online and Offline Reconstruction in ALICE for LHC Run 3 // Connecting the Dots. arXiv:2009.07515. 2020.
5. *Pachmayer Y. C. et al. (ALICE Collab.)*. Future High-Energy pp Programme with ALICE. <https://cds.cern.ch/record/2724925>. 2020.
6. *Citron Z. et al.* Report from Working Group 5: Future Physics Opportunities for High-Density QCD at the LHC with Heavy-Ion and Proton Beams // CERN Yellow Rep. Monogr. 2019. V. 7. P. 1159–1410; arXiv:1812.06772.
7. *Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.)*. Evidence for Light-by-Light Scattering in Heavy-Ion Collisions with the ATLAS Detector at the LHC // Nature Phys. 2017. V. 13. P. 852–858; arXiv:1702.01625.
8. *Sirunyan A. et al. (CMS Collab.)*. Evidence for Light-by-Light Scattering and Searches for Axion-Like Particles in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 797; arXiv:1810.04602.
9. *Forshaw J. R., Ross D. A.* Quantum Chromodynamics and the Pomeron Cambridge Lecture Notes in Physics. Cambridge Univ. Press, 1997.
10. *Crede V., Meyer C.* The Experimental Status of Glueballs // Prog. Part. Nucl. Phys. 2009. V. 63. P. 74–116; arXiv:0812.0600 [hep-ex].
11. *Donnachie S., Dosch H. G., Nachtmann O., Landshoff P.* Pomeron Physics and QCD. Cambridge Univ. Press, 2004. V. 19.
12. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)*. Single Spin Asymmetry A_N in Polarized Proton–Proton Elastic Scattering at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Lett. B. 2013. V. 719. P. 62–69; arXiv:1206.1928 [nucl-ex].
13. *Ewerz C., Maniatis M., Nachtmann O.* A Model for Soft High-Energy Scattering: Tensor Pomeron and Vector Odderon // Ann. Phys. 2014. V. 342. P. 31–77; arXiv:1309.3478 [hep-ph].
14. *Ewerz C., Lebedowicz P., Nachtmann O., Szczurek A.* Helicity in Proton–Proton Elastic Scattering and the Spin Structure of the Pomeron // Phys. Lett. B. 2016. V. 763. P. 382–387; arXiv:1606.08067.
15. *Azzi P.* Report from Working Group 1: Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC // Report on the Physics at the HL-LHC, and Perspectives for the HE-LHC / Ed. by A. Dainese, M. Mangano, A. B. Meyer, A. Nisati, G. Salam, M. A. Vesterinen. 2019. V. 7; arXiv:1902.04070.

16. *Kryshen E. et al. (ALICE Collab.)*. Recent ALICE Results on Coherent J/ψ Photoproduction in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions // PoSD. 2019. V. IS2019. P. 056.
17. *Guzey V., Kryshen E., Strikman M., Zhalov M.* Evidence for Nuclear Gluon Shadowing from the ALICE Measurements of Pb–Pb Ultra-Peripheral Exclusive J/ψ Production // Phys. Lett. B. 2013. V. 726. P. 290–295; arXiv:1305.1724 [hep-ph].
18. *Guzey V., Strikman M., Zhalov M.* Disentangling Coherent and Incoherent Quasielastic J/ψ Photoproduction on Nuclei by Neutron Tagging in Ultra-Peripheral Ion Collisions at the LHC // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 2942; arXiv:1312.6486 [hep-ph].
19. *Contreras J.* Gluon Shadowing at Small x from Coherent J/ψ Photoproduction Data at Energies Available at the CERN Large Hadron Collider // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. P. 015203; arXiv:1610.03350.
20. *Klein S.R., Nystrand J., Vogt R.* Heavy Quark Photoproduction in Ultra-Peripheral Heavy Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2002. V. 66; arXiv:hep-ph/0206220.
21. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of Light-by-Light Scattering and Search for Axion-Like Particles with 2.2 nb^{-1} of Pb–Pb Data with the ATLAS Detector. arXiv:2008.05355. 2020.