

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА τ -ЛЕПТОНА В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ НА ЛНС

Н. А. Бурмасов^{1,*}, *Е. Л. Крышень*¹,
*П. Бюлер*², *Р. Лавичка*²

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

² Институт субатомной физики им. С. Майера, Вена

Ультрапериферические столкновения тяжелых ионов дают уникальную возможность для изучения процессов, вызванных двухфотонными взаимодействиями. Рождение пар τ -лептонов в процессе $Pb + Pb \rightarrow Pb + Pb + \tau\tau$ на ЛНС представляет особый интерес, так как его сечение чувствительно к плохо изученным электромагнитным моментам τ -лептона. Возможные отклонения аномального магнитного момента $a_\tau = (g - 2)/2$ τ -лептона от предсказаний Стандартной модели могут указывать на влияние эффектов физики за ее пределами, например на участие суперсимметричных частиц в рождении лептонов, а также на составную природу τ -лептона. Рассматривается возможность для проведения измерений сечения эксклюзивного рождения пар τ -лептонов в ультрапериферических столкновениях ядер свинца на ЛНС, а также приводятся оценки возможных пределов на a_τ .

Ultra-peripheral heavy-ion collisions provide a unique opportunity to study two-photon induced processes. The production of tau-lepton pairs in the process $Pb + Pb \rightarrow Pb + Pb + \tau\tau$ at the LHC is particularly interesting since its cross section is sensitive to poorly known electromagnetic moments of the τ lepton. Possible deviations of the anomalous magnetic moment $a_\tau = (g - 2)/2$ of the τ lepton from the Standard Model predictions may indicate the presence of effects beyond the Standard Model, such as contributions of supersymmetric particles or composite nature of the τ lepton. In this work, the prospects of exclusive ditau cross section measurements in ultra-peripheral Pb–Pb collisions at the LHC are discussed and projections for possible a_τ limits are presented.

PACS: 29.20.db; 25.75.-q; 14.60.-z; 14.60.Fg

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

ВВЕДЕНИЕ

Ультрапериферические столкновения (УПС) тяжелых ионов — особый тип столкновений, в которых сумма радиусов налетающих ядер меньше величины прицельного параметра. В таких условиях сильные взаимодействия в значительной степени подавляются, при этом усиливается роль электромагнитных взаимодействий. Релятивистские ядра являются источником мощного электромагнитного поля, которое может быть описано в рамках формализма Вайцзеккера–Вильямса как поток эквивалентных фотонов. Величина этого потока пропорциональна Z^2 , поэтому сечение реакций в ультрапериферических столкновениях, вызванных взаимодействием фотонов, оказывается пропорциональным Z^4 [1, 2]. Таким образом, УПС — уникальный инструмент для исследования двухфотонных взаимодействий. Одним из последних ярких примеров таких взаимодействий является процесс рассеяния света на свете в ультрапериферических столкновениях ядер свинца, зафиксированный коллаборациями ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (ЛHC) [3, 4]. Ультрапериферические столкновения также позволяют изучать рождение лептонных пар [5–8]. Наконец, в работах [9, 10] было предложено использовать ультрапериферические столкновения ядер на ЛHC для измерения электромагнитных моментов τ -лептона, которые в настоящее время известны с плохой точностью.

Прецизионные измерения магнитных моментов лептонов $g_\ell = 2(1 + a_\ell)$ важны для проверки предсказаний квантовой электродинамики, а также для поиска эффектов физики за пределами Стандартной модели. Так, теоретическое значение аномального магнитного момента электрона является одним из наиболее точных предсказаний физики, которое согласуется с экспериментом до 9 значащих цифр [11, 12]. В то же время согласно последним исследованиям экспериментальное значение аномального магнитного момента мюона расходится с предсказаниями Стандартной модели более чем на 4σ [13]. Сильное отклонение значений аномальных магнитных моментов лептонов от данных теоретических расчетов может указывать на составную структуру лептонов [14], а также на вклад суперсимметричных частиц в процесс рождения дилептонов [15].

Измерение аномального магнитного момента τ -лептона представляет особый интерес. Согласно расширениям Стандартной модели существование суперсимметричных частиц в масштабе порядка M_s может привести к радиационным поправкам порядка $\delta a_\ell \sim m_\ell^2/M_s^2$, где m_ℓ — масса лептона. Таким образом, аномальный магнитный момент τ -лептона a_τ может быть в $m_\tau^2/m_\mu^2 \simeq 280$ раз более чувствительным к эффектам Стандартной модели, чем a_μ [15].

Однако малое время жизни τ -лептона $\simeq 10^{-13}$ с не позволяет использовать методы, основанные на измерении прецессии спина лептона в магнитном поле [16]. Альтернативой может служить измерение сечения рождения пар τ -лептонов, которое также оказывается чувствительным

к a_τ [17]. Наиболее сильные к настоящему времени ограничения были получены в коллаборации DELPHI путем измерения сечения рождения τ -лептонных пар в столкновениях электрон-позитронных пучков ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\tau\tau$) на коллайдере LEP [18]:

$$-0,052 < a_\tau < 0,013 \text{ (95\%-й уровень достоверности)}. \quad (1)$$

Теоретическое значение аномального магнитного момента $a_\tau^{\text{th}} = 0,00117721$, полученное в рамках Стандартной модели, известно с гораздо большей точностью. В свете последних результатов по измерению аномального магнитного момента мюона исследования возможности уточнения экспериментального значения для τ -лептона становятся особенно актуальными.

В данной работе рассматриваются возможности измерения аномального магнитного момента τ -лептона путем измерения дифференциальных сечений рождений τ -лептонных пар в ультрапериферических столкновениях в экспериментах ATLAS, CMS и ALICE на коллайдере LHC и проводятся сравнение и анализ теоретических предсказаний.

1. РАСПАДЫ τ -ЛЕПТОНА И ОТБОР СОБЫТИЙ

Для измерения сечения рождения пар τ -лептонов в процессе $\text{Pb} + \text{Pb} \rightarrow \text{Pb} + \text{Pb} + \tau\tau$ необходимо производить запись событий с продуктами распада τ -лептонов без какой-либо другой активности в детекторе (рис. 1).

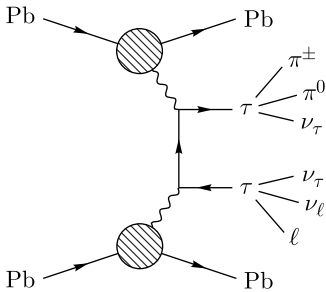


Рис. 1. Процесс рождения пары τ -лептонов в ультрапериферическом столкновении ядер свинца с распадом на более легкие частицы

Так как τ -лептон обладает большой массой и очень малым временем жизни, он распадается на более легкие лептоны (электроны, мюоны и нейтрино) и адроны (в основном, π -мезоны). Приблизительно 80% τ -лептонов распадаются на одну заряженную частицу, сопровождаемую несколькими нейтральными:

$$\tau^\pm \rightarrow \ell + \nu_\ell + \nu_\tau, \quad \tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + n\pi^0 + \nu_\tau, \quad (2)$$

а в остальных $\simeq 20\%$ случаев — на три заряженные частицы:

$$\tau^\pm \rightarrow \ell + \nu_\tau + \pi^\pm + \pi^\mp + \pi^\pm + n\pi^0. \quad (3)$$

Запись событий в экспериментах на ЛНС обычно производится при срабатывании определенных триггерных условий, таких как наличие одного или нескольких лептонов с большим поперечным импульсом [19–21]. Поэтому для измерения сечения рождения τ -лептонных пар в ультрапериферических столкновениях разумно отбирать события, в которых один из τ -лептонов распадается на электрон или мюон, а второй — на одну или три заряженных частицы.

2. ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ATLAS И CMS

Конструктивные особенности детектора ATLAS позволяют с достаточно высокой эффективностью отбирать ультрапериферические события с электронами с поперечным импульсом $p_T > 4,5$ ГэВ в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 2,5$. Также в экспериментах ATLAS и CMS есть возможность регистрировать ультрапериферические события, содержащие мюон с большим поперечным импульсом $p_T > 3$ ГэВ в сопровождении одной или нескольких заряженных частиц в интервале псевдобыстрот $|\eta| < 2,4$.

Исследования для ATLAS и CMS были проведены двумя группами. Группа Л. Бересфорда [9] провела расчеты в рамках эффективной теории поля SMEFT, которая часто применяется для тестирования различных гипотез за пределами Стандартной модели, в то время как группа М. Диндала [10] полагалась на более консервативный подход, основанный на использовании обобщенной вершины взаимодействия фотонов с лептонами. Обе группы рассматривали возможность измерения сечений рождения лептонов в УПС в сопровождении одной или трех заряженных частиц с поперечным импульсом $p_T \gtrsim 0,5$ ГэВ и представили оценки возможных пределов на a_τ , которые могут быть получены коллаборациями ATLAS и CMS с использованием уже набранной статистики Pb–Pb-столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ, соответствующей интегральной светимости $L = 2 \text{ нб}^{-1}$. Так, ожидаемые пределы, полученные группой М. Диндала в предположении систематических ошибок на уровне 5%, составляют $-0,021 \lesssim a_\tau \lesssim 0,017$ (95%-й уровень достоверности). Оценки группы Л. Бересфорда, полученные в рамках SMEFT, оказываются еще более оптимистичными. Несмотря на некоторые расхождения в предсказаниях, можно сделать вывод, что уже имеющийся набор данных позволяет улучшить результат DELPHI как минимум в 2 раза.

Отметим также, что интегральная светимость $L = 2 \text{ нб}^{-1}$ соответствует приблизительно 1200 сигнальным событиям. Большая часть пар τ -лептонов имеет низкий поперечный импульс, поэтому значительная часть событий оказывается недоступной для реконструкции в детекторах ATLAS и CMS. Продвинуться в область более низких значений поперечных импульсов можно в эксперименте ALICE.

3. ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE

В отличие от ATLAS и CMS в детекторе ALICE используется более слабое магнитное поле (0,5 Тл), что позволяет проводить реконструкцию и идентификацию заряженных частиц с более малыми поперечными импульсами (вплоть до $p_T \simeq 150$ МэВ) в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 0,9$ [21]. Измерения потерь энергии в газе времяпроекционной камеры TPC позволяют эффективно отделять треки электронов от треков более тяжелых заряженных частиц в широком диапазоне по поперечному импульсу. Поэтому в данной работе предлагается производить отбор событий, состоящих из трека электрона и второй заряженной частицы, потери энергии которой соответствуют ожидаемым потерям для π -мезонов или мюонов.

Начиная с 2022 г. в эксперименте ALICE будут набираться данные в режиме непрерывного считывания. Для отбора ультрапериферических событий в этом режиме требуется точная временная привязка треков, поэтому в данной работе накладывается дополнительное требование на поперечный импульс $p_T > 300$ МэВ для каждого трека, что необходимо для регистрации частиц во времяпролетном детекторе TOF.

Для исследования чувствительности дифференциальных сечений в зависимости от поперечного импульса электрона были проведены теоретические расчеты элементарного сечения процесса $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$ в зависимости от заданного значения a_ℓ . Дифференциальное сечение процесса можно вычислить по стандартной формуле [22]

$$\frac{d\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell)}{dz} = \frac{2\pi}{64\pi^2 s} \frac{|\mathbf{p}_\ell|}{|\mathbf{p}_\gamma|} \frac{1}{4} \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}|^2, \quad (4)$$

где $z = \cos\theta$ — косинус угла вылета конечного лептона относительно направления пучка в системе центра масс взаимодействующих фотонов; s — квадрат инвариантной массы фотонов; \mathbf{p}_ℓ и \mathbf{p}_γ — импульсы лептона и фотона соответственно. Амплитуда реакции задается формулой [22]

$$\mathcal{M} = (-i) \varepsilon_{1\mu} \varepsilon_{2\nu} \bar{u}(p_3) \left(i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\mu}(p_1) \frac{i(\not{p}_t + m_\ell)}{p_t^2 - m_\ell^2 + i\varepsilon} i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\nu}(p_2) + \right. \\ \left. + i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\nu}(p_2) \frac{i(\not{p}_u + m_\ell)}{p_u^2 - m_\ell^2 + i\varepsilon} i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\mu}(p_1) \right) v(p_4). \quad (5)$$

Здесь p_1 и p_2 — 4-импульсы фотонов, p_3 и p_4 — 4-импульсы лептонов, $\varepsilon_{1\mu}$ и $\varepsilon_{2\nu}$ — векторы поляризации фотонов, $p_t = p_2 - p_4$, $p_u = p_1 - p_4$, $\Gamma^{(\gamma\ell\ell)}$ — обобщенная вершинная функция [22], зависящая от величины переданного импульса q :

$$i\Gamma_\mu^{(\gamma\ell\ell)}(q) = -ie \left[\gamma_\mu F_1(q^2) + \frac{i}{2m_\ell} \sigma_{\mu\nu} q^\nu F_2(q^2) \right], \quad (6)$$

где $F_1(q^2)$ и $F_2(q^2)$ — формфакторы Дирака и Паули. В асимптотическом пределе $q^2 \rightarrow 0$ эти формфакторы равны соответственно 1 и a_ℓ . Это условие с хорошей точностью выполняется в ультрапериферических столкновениях ядер, в которых виртуальность фотонов не превышает величины $(\hbar c/R_A)^2 \sim 10^{-3}$ ГэВ², где R_A — радиус ядра.

Наконец, для расчета сечения процесса $\text{Pb} + \text{Pb} \rightarrow \text{Pb} + \text{Pb} + \tau\tau$ необходимо произвести свертку элементарного сечения $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$ с двухфотонной светимостью $dN_{\gamma\gamma}/(dYdM)$, которую можно с хорошей точностью вычислить в приближении эквивалентных фотонов [1]:

$$\frac{d\sigma(\text{Pb} + \text{Pb} \rightarrow \text{Pb} + \text{Pb} + \tau\tau)}{dYdM} = \frac{dN_{\gamma\gamma}}{dYdM} \sigma(\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau), \quad (7)$$

где Y и M — быстрота и инвариантная масса дилептонной пары.

Теоретические расчеты сечений были использованы для разработки специализированного генератора пар лептонов в ультрапериферических столкновениях с возможностью задавать произвольное значение a_ℓ . Моделирование распадов τ -лептонов проводилось с помощью генератора событий Pythia8 [23].

В результате моделирования были получены распределения по поперечному импульсу лидирующих электронов для различных значений a_τ в Pb–Pb-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ и интегральной светимости $L = 2,7$ нб⁻¹, соответствующей ожидаемой статистике в первый год работы эксперимента на этапе Run 3. На рис. 2 представлены примеры таких распределений для трех значений a_τ . Проведенные расчеты показывают, что в течение одного года в эксперименте ALICE можно

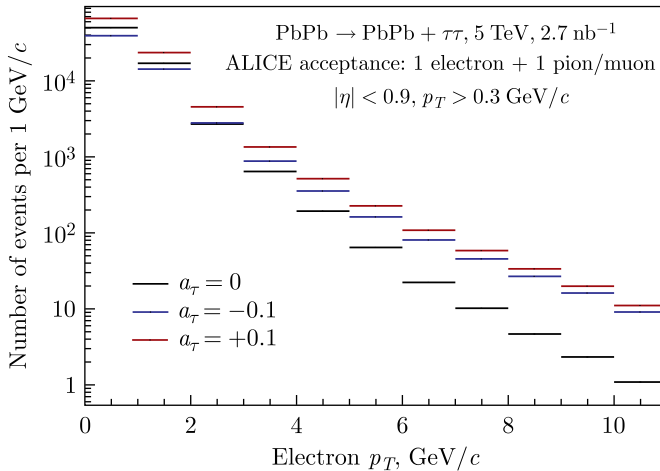


Рис. 2. Распределение событий в зависимости от поперечного импульса лидирующих электронов в ультрапериферических Pb–Pb-столкновениях при различных значениях a_τ

отобразить приблизительно 70 000 сигнальных событий, что существенно больше объема данных, имеющегося в настоящее время в экспериментах ATLAS и CMS.

Следует отметить, что зависимость спектров от a_τ отличается для разных диапазонов по поперечному импульсу: на рис. 2 распределение для $a_\tau = 0,1$ всегда лежит выше распределения, соответствующего Стандартной модели, а распределение для $a_\tau = -0,1$ находится ниже него при $p_T \lesssim 3$ ГэВ. Такое нетривиальное поведение выходов сигнала для различных значений a_τ в области малых поперечных импульсов дает возможность улучшить чувствительность дифференциальных сечений к значению аномального магнитного момента τ -лептона.

На рис. 3 приведены отношения сечений в зависимости от значения a_τ для трех диапазонов по поперечному импульсу, в которых ожидаемая статистическая ошибка выхода составит порядка 1% в течение одного года работы эксперимента ALICE. В сущности, эти отношения показывают возможные отклонения выходов электронов от предсказаний Стандартной модели для различных значений a_τ . Можно отметить, что в окрестности $a_\tau = 0$ отношения представляют собой параболические кривые, при этом разные интервалы поперечных импульсов имеют разную чувствительность к a_τ . В частности, измерения при больших поперечных импульсах позволяют улучшить чувствительность к положительным значениям a_τ , в то время как при малых поперечных импульсах обеспечивается лучшая чувствительность в области отрицательных значений a_τ .

Возможные ограничения на значение a_τ , которые могут быть получены в эксперименте ALICE, были рассчитаны на основе следующего

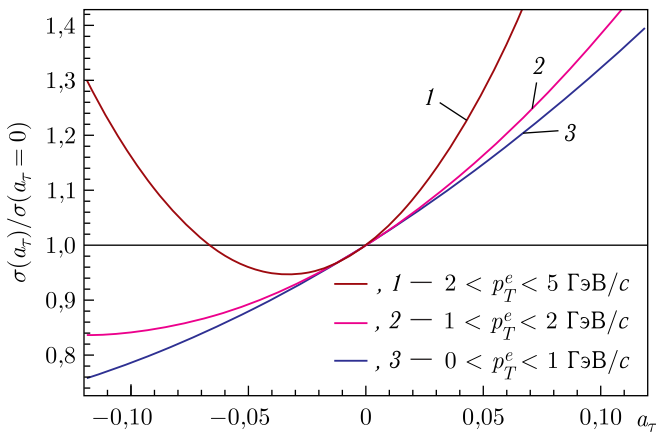


Рис. 3. Отношения сечений, зависящих от поперечного импульса лидирующего электрона, при различных значениях a_τ для трех диапазонов по поперечному импульсу

определения χ^2 :

$$\chi^2(a_\tau) = \sum_{i, \text{bins}} \frac{[S_i(a_\tau) - S_i(0)]^2}{S_i(0) + \zeta S_i^2(0)}, \quad (8)$$

где $S_i(a_\tau)$ — выход электронов в i -м диапазоне по поперечному импульсу; ζ — ожидаемый уровень относительной систематической ошибки. Пределы на уровне значимости 68 и 95 %, полученные для трех различных значений ζ (1, 3, 5 %), представлены на рис. 4.

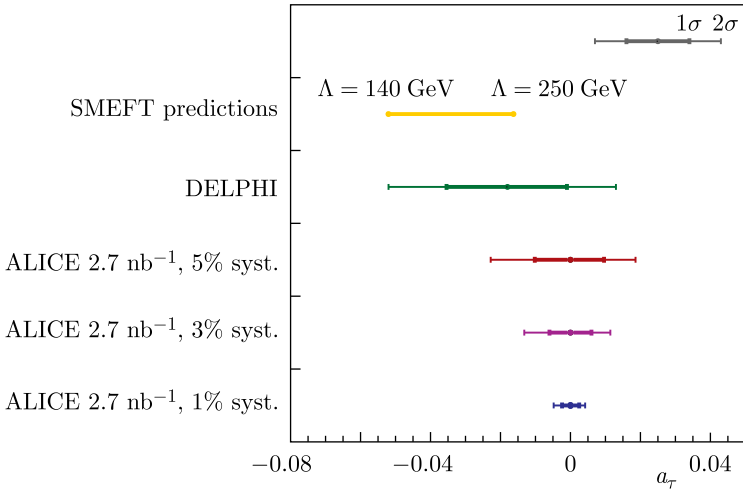


Рис. 4. Возможные пределы на a_τ в эксперименте ALICE в сравнении с результатами DELPHI и предсказаниями SMEFT [24]

Результаты расчетов показывают, что в эксперименте ALICE возможно улучшить пределы, полученные DELPHI, как минимум в $\simeq 2$ раза для самого пессимистичного сценария с систематическими ошибками на уровне 5 %. При этом вклад систематических ошибок оказывается определяющим. В качестве возможного пути уменьшения систематических ошибок может быть рассмотрено использование не самих дифференциальных сечений в зависимости от поперечного импульса, а их отношений к сечению рождения дилептонов $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$, как было предложено в работе [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан новый метод измерения аномального магнитного момента τ -лептона в ультрапериферических столкновениях ядер на коллайдере LHC, представлен обзор исследований, проведенных другими группами для детекторов ATLAS и CMS, а также приведены оценки возможных пределов, которые могут быть получены в эксперименте ALICE.

Приведенные оценки для экспериментов ATLAS, CMS и ALICE показывают, что наиболее сильные в настоящее время экспериментальные пределы для a_τ могут быть улучшены как минимум в $\simeq 2$ раза с использованием уже имеющихся данных, а также с помощью данных, которые будут собраны в первые годы работы LHC на этапе Run 3.

В дальнейшем будут исследованы эффекты поправок более высоких порядков [25, 26], а также влияние точности формализма эквивалентных фотонов на точность измерений аномального магнитного момента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-52-14006 АНФ_а) и Австрийского научного фонда (проект № I 5277-N).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baltz A. J. et al.* The Physics of Ultraperipheral Collisions at the LHC // Phys. Rep. 2008. V. 458. P. 1-171.
2. *Contreras J. G., Tapia Takaki J. D.* Ultra-Peripheral Heavy-Ion Collisions at the LHC // Intern. J. Mod. Phys. A. 2015. V. 30. 15420.
3. *Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.)*. Evidence for Light-by-Light Scattering in Heavy-Ion Collisions with the ATLAS Detector at the LHC // Nat. Phys. 2017. V. 13. P. 852-085.
4. *Sirunyan A. et al. (CMS Collab.)*. Evidence for Light-by-Light Scattering and Searches for Axion-Like Particles in Ultraperipheral PbPb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 797. 134826.
5. *Adams J. et al. (STAR Collab.)*. Production of e^+e^- Pairs Accompanied by Nuclear Dissociation in Ultraperipheral Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. 031902.
6. *Afanasyev S. et al. (PHENIX Collab.)*. Photoproduction of J/ψ and of High Mass e^+e^- in Ultra-Peripheral Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Lett. B. 2009. V. 679. P. 321-32.
7. *Abbas E. et al. (ALICE Collab.)*. Charmonium and e^+e^- Pair Photoproduction at Mid-Rapidity in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2617.
8. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Exclusive Dimuon Production in Ultraperipheral Pb + Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ATLAS // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. 02490.
9. *Beresford L., Liu J.* New Physics and Tau $g - 2$ Using LHC Heavy Ion Collisions // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. 11300.
10. *Dyndal M., Klusek-Gawenda M., Szczurek A., Schott M.* Anomalous Electromagnetic Moments of τ Lepton in $\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^-$ Reaction in Pb + Pb Collisions at the LHC // Phys. Lett. B. 2020. V. 809. 13568.
11. *Odom B., Hanneke D., D’Urso B., Gabrielse G.* New Measurement of the Electron Magnetic Moment Using a One-Electron Quantum Cyclotron // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. 030801.
12. *Hanneke D., Hoogerheide S. F., Gabrielse G.* Cavity Control of a Single-Electron Quantum Cyclotron: Measuring the Electron Magnetic Moment // Phys. Rev. A. 2011. V. 83, No. 5. P. 052122. 052122.

13. *Abi B. et al. (Muon $g - 2$ Collab.)*. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V.126. 141801.
14. *Silverman D.J., Shaw G.L.* Limits on the Composite Structure of the τ Lepton and Quarks from Anomalous-Magnetic-Moment Measurements in e^+e^- Annihilation // *Phys. Rev. D.* 1983. V.27. P. 1196.
15. *Martin S.P., Wells J.D.* Muon Anomalous Magnetic Dipole Moment in Supersymmetric Theories // *Phys. Rev. D.* 2001. V. 64. 035003.
16. *Bennett G. W. et al. (Muon $g-2$ Collab.)*. Final Report of the E821 Muon Anomalous Magnetic Moment Measurement at BNL // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 73. 072003.
17. *del Aguila F., Cornet F., Illana J.* The Possibility of Using a Large Heavy-Ion Collider for Measuring the Electromagnetic Properties of the Tau Lepton // *Phys. Lett. B.* 1991. V.271. P.256-26.
18. *Abdallah J. et al. (DELPHI Collab.)*. Study of Tau-Pair Production in Photon-Photon Collisions at LEP and Limits on the Anomalous Electromagnetic Moments of the Tau Lepton // *Eur. Phys. J. C.* 2004. V.35. P. 159-17.
19. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // *J. Instrum.* 2008. V. 3. S08003.
20. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. The CMS Experiment at the CERN LHC // *Ibid.* S0800.
21. *Aamodt K. et al. (ALICE Collab.)*. The ALICE Experiment at the CERN LHC // *Ibid.* S0800.
22. *Klusek-Gawenda M., Lebedowicz P., Nachtmann O., Szczurek A.* From the $\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}$ Reaction to the Production of $p\bar{p}$ Pairs in Ultraperipheral Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions at the LHC // *Phys. Rev. D.* 2017. V.96. 09402.
23. *Sjöstrand T.* The PYTHIA Event Generator: Past, Present and Future // *Comput. Phys. Commun.* 2020. V.246. 10691.
24. *Escribano R., Massó E.* New Bounds on the Magnetic and Electric Moments of the Tau Lepton // *Phys. Lett. B.* 1993. V. 301. P. 419-422.
25. *Hencken K., Kuraev E. A., Serbo V. G.* Exclusive and Inclusive Muon Pair Production in Collisions of Relativistic Nuclei // *Phys. Rev. C.* 2007. V. 75. 034903.
26. *Klein S., Mueller A. H., Xiao B. W., Yuan F.* Lepton Pair Production through Two Photon Process in Heavy Ion Collisions // *Phys. Rev. D.* 2020. V.102. 094013.