

На правах рукописи

Каркарьян Евгений Карапетович

**Рождение заряженных лептонов в протон-протонных  
столкновениях на БАК**

1.3.3 —  
«теоретическая физика»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН РАН).

**Научный руководитель:**

*Высоцкий Михаил Иосифович*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН РАН), отделение теоретической физики, высококвалифицированный главный научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Долгов Александр Дмитриевич* – доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», директор МЦФЭЧиАФФ.

*Дубинин Михаил Николаевич* – доктор физико-математических наук, и.о. заведующего отделом теоретической физики высоких энергий, ведущий научный сотрудник лаборатории теории фундаментальных взаимодействий НИИЯФ МГУ.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН).

Защита состоится 27 апреля 2026 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д24.1.262.04 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Д24.1.262.04,

доктор физ.-мат. наук

Чернышов Дмитрий Олегович

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

На данный момент Стандартная Модель является наиболее точной и всеобъемлющей теорией взаимодействия элементарных частиц. Эталонным примером точности обычно служит величина аномального магнитного момента электрона: совпадение теоретического вычисления [1] и экспериментального значения [2] на уровне  $10^{-12}$ . Однако существует ряд явлений, выходящих за рамки Стандартной Модели. Такие явления составляют Новую Физику, которая сейчас активно исследуется как экспериментально, так и теоретически [3–9]. В связи с этим особую важность представляет детальный анализ процессов в рамках Стандартной Модели. Если будет обнаружено расхождение теоретического расчета с экспериментальным измерением, то это может быть указанием на Новую Физику и стимулировать исследования в этом направлении.

Ускорительные эксперименты представляют собой отличный полигон для тестирования Стандартной Модели [10–13]. Текущий Run 3 Большого Адронного Коллайдера (БАК) настроен на столкновения протонов рекордно высоких энергий (в системе центра инерции протонов энергия  $\sqrt{s} = 13.6$  ТэВ), что позволяет проводить более прецизионные эксперименты по проверке Стандартной Модели и искать возможные проявления Новой Физики. Имеются некоторые указания на возможную физику за пределами Стандартной Модели, одним из которых является аномальный магнитный момент мюона. Эксперимент коллаборации Фермилаб по измерению аномального магнитного момента мюона показывает [14], что имеется некоторое отклонение от предсказания Стандартной Модели [15]. Если это про-

явление Новой Физики, то во взаимодействиях мюонов при высоких энергиях эффект может быть еще более заметен.

БАК является хорошим источником высокоэнергетических мюонов, которые рождаются в столкновениях ультрарелятивистских протонов. Особый интерес представляют так называемые ультрапериферические столкновения, в которых протоны (или ядра свинца) рассеиваются квазиупруго и выживают после столкновения [16, 17]. Такие события обладают низкой адронной активностью и хорошей сигатурой. Рождение новых частиц в ультрапериферических столкновениях, в том числе гипотетических частиц темной материи, широко экспериментально исследуется всеми коллаборациями БАК: ATLAS [18–20], CMS [21–23], LHCb [24, 25] и ALICE [26, 27]. Для анализа подобных процессов обычно используются методы Монте-Карло моделирования: STARLight [28], SuperChic [29], HERWIG [30] и т.д. Изложенный в диссертации подход позволяет выполнять простое численное интегрирование полученных аналитически выражений, не прибегая к Монте-Карло симуляциям. Такой независимый анализ обеспечивает более глубокое понимание физики рассматриваемого процесса.

Не меньший интерес представляют полуэксклюзивные процессы. В таких реакциях только один протон выживает после столкновения, в то время как другой может разрушиться, образуя другие адроны. Полуэксклюзивные процессы обладают большим сечением и являются лабораторией для исследования эффектов сильных взаимодействий [31–34] и могут быть чувствительны к Новой физике [35, 36]. Их экспериментальное исследование также проводилось на БАК [37–39]. Теоретический анализ таких процессов представляет собой более сложную, но не менее важную задачу. Развитие метода, примененного к рождению мюонов в квазиупругом протон-протонном столкновении, позволит вывести аналитическое выражение для сечения рассеяния и сравнить численный результат с экспериментальными данными без использования метода Монте-Карло. Поскольку с учетом неупругих процессов экспериментальных дан-

ных становится больше, мы можем рассчитывать на дальнейшее широкое применение наших теоретических расчетов к анализу данных.

Таким образом, детальное исследование процессов рождения мюонов в столкновениях протонов на БАК представляет собой крайне актуальную и в то же время перспективную задачу. Полученные формулы могут быть использованы для исследований более тяжелых лептонов (например,  $\tau$ -лептонов или суперсимметричных чарджино) как в других экспериментах на БАК, так и на будущих ускорителях еще более высоких энергий [40] (например, HL-LHC, SPPC, FCC). В то же время данное исследование служит дополнительной проверкой теоретических предсказаний СМ.

### **Цель работы**

Целью данной работы является вычисление сечений процессов рождения мюонных пар в протон-протонных столкновениях на БАК с учетом экспериментальных ограничений, накладываемых на фазовый объем конечных продуктов данных процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **Задачи**:

1. Рассмотреть процесс ультрапериферического рассеяния  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-p$ , который экспериментально исследовался коллаборацией ATLAS [41].
2. Получить аналитические выражения для полуэксклюзивных процессов  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$ , идущих через промежуточную двухфотонную аннигиляцию  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ , и применить их к данным эксперимента ATLAS [42], в котором измерялся подобный процесс.
3. Теоретически оценить вклад слабого взаимодействия в полуэксклюзивный процесс рождения мюонной пары в протон-протонном столкновении.

### **Методы исследования**

Основным аналитическим методом исследования является диаграммная техника Фейнмана, позволяющая вычислять матричные элементы процессов в рамках теории возмущений. С ее помощью были получены формулы для сечений рассеяния всех процессов, рассматриваемых в данной работе. Для дальнейшего численного вычисления с учетом экспериментальных ограничений, накладываемых на фазовый объем конечных продуктов, была использована и дорабатывалась библиотека *libepa* [43].

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные в данной работе результаты представляют теоретическую и практическую значимость, поскольку позволяют сравнить теоретические предсказания Стандартной Модели с экспериментальными данными и сделать вывод о том, насколько точно описывает Стандартная Модель физику в данной области энергий и соответственно насколько большое окно есть для Новой Физики. Разработанный метод позволяет анализировать как эксклюзивные (ультрапериферические столкновения), так и полуэксклюзивные (например, когда один из протонов не детектируется) процессы на БАК, и может быть обобщен для применения к подобным процессам на будущих коллайдерах более высоких энергий, которые являются основным перспективным инструментом исследования физики элементарных частиц. Выведенные аналитические формулы позволяют рассматривать не только процессы аннигиляции калибровочных бозонов в пару мюонов в рамках Стандартной Модели, но и процессы, включающие частицы вне ее рамок (например, аннигиляцию через гипотетический скалярный резонанс  $X$  (28 ГэВ), рассмотренную в одной из работ диссертации), что расширяет область применения используемого в работе подхода.

### **Научная новизна**

1. Впервые получены аналитические выражения для сечений процессов рождения пары заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК с учетом экспериментальных ограничений. Рассмотрены как эксклюзивные, так и полуэксклюзивные

процессы, доступные на эксперименте ATLAS.

2. Показано, что результат вычисления в рамках СМ совпадает в пределах 2 — 3 стандартных отклонений с экспериментальными данными. Вычисление проведено без использования Монте-Карло моделирования, как делалось ранее в литературе.
3. Впервые установлено, что поправка от слабого взаимодействия к доминирующему электромагнитному может быть значительной в определенной кинематической области и быть обнаружена на эксперименте.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный теоретический метод позволяет выводить аналитическое выражение для сечения рождения мюонной пары в протон-протонном столкновении через фотон-фотонное слияние на БАК, когда один из протонов попадает в передний детектор ATLAS, а другой может разрушиться, с учетом экспериментальных ограничений на конечный фазовый объем.
2. Подход, основанный на представлении амплитуд рассеяния в спиральном базисе, позволяет существенно упростить вычисления и приводит к ответу, согласующемуся на уровне 2 — 3 стандартных отклонений с экспериментальными данными коллаборации ATLAS.
3. Вычисленный с помощью изложенного в тексте диссертации метода теоретический вклад поправки от слабого взаимодействия в сечение полуэксклюзивного процесса рождения мюонной пары в протон-протонном столкновении может достигать 20% при определенных кинематических ограничениях на конечную мюонную пару.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов диссертационного исследования обуславливается использованием в нем апробированных в научной практике методов теоретической физики, а также их сравнением с уже известными результатами. Все результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также изложены на семинарах и международных конференциях:

1. The Physics of the Dimuons at the LHC. Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия. Июнь 2022.
2. The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна, Россия. Октябрь 2022.
3. Семинар лаборатории квантовой теории поля ОТФ ФИАН. Март 2023.
4. Twenty-First Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, МГУ им. Ломоносова, г.Москва, Россия. Август 2023.
5. Молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология», Высшая школа экономики, г.Москва, Россия. Октябрь 2023.
6. Московская международная школа по физике 2024. Учебный центр ВШЭ "Вороново", с.Вороново, Россия. Февраль-март 2024.
7. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН. ОИЯИ, Дубна, Россия. Апрель 2024.
8. Международная конференция "QUARKS-2024". Переславль-Залесский, Россия. Май 2024.

#### **Личный вклад автора**

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.



**Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 94 страницы, включая 9 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 72 наименования.

# Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий обзор текущего состояния исследований в области поиска новой физики, а также выражены благодарности автора.

В **первой Главе** рассматривается эксклюзивный процесс рождения мюонной пары через двухфотонное слияние в столкновении протонов на БАК. С использованием метода эквивалентных фотонов выводится аналитическое выражение для сечения данного процесса. При выводе учитываются форм-факторы протонов и ”фактор выживания”. Полученное выражение для дифференциального сечения рассеяния интегрируется по фазовому объему с ограничениями на фазовое пространство эксперимента ATLAS. Ставится ограничение на константу взаимодействия резонанса  $X(28 \text{ ГэВ})$  с фотонами.

В **разделе 1.1** приводится метод эквивалентных фотонов. В ультрарелятивистском случае выводится выражение для спектра эквивалентных фотонов:

$$n(\vec{q}) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2 \omega} \frac{\vec{q}_\perp^2}{(\vec{q}_\perp^2 + (\omega/\gamma)^2)^2}, \quad (1)$$

В **разделе 1.2** представлена основная формула для сечения про-

цесса  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-$  в удобных для вычисления переменных:

$$\sigma(pp(\gamma\gamma) \rightarrow pp\mu^+\mu^-) = \int_{(2m_\mu)^2}^{\infty} \sigma(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) ds \times \quad (2)$$

$$\times \int_0^{\infty} \frac{dx}{8x} n\left(\sqrt{\frac{sx}{4}}\right) n\left(\sqrt{\frac{s}{4x}}\right).$$

В разделе 1.3 приводятся экспериментальные ограничения ATLAS: Данные ограничения налагаются на выведенное сечение процесса

Инвариантная масса	$p_T$	$ \eta $
$22 \text{ ГэВ} < \sqrt{s} < 30 \text{ ГэВ}$	$> 6 \text{ ГэВ}$	$< 2.4$

Ограничения, накладываемые экспериментом ATLAS на фазовый объем мюонной пары.  $p_T$  - поперечный импульс мюона по отношению к протонному пучку,  $\eta = -\ln \tan \theta/2$  - псевдобыстрота мюона.

$p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$ .

В разделе 1.4 вводятся форм-факторы протона  $F_1(Q^2)$  и  $F_2(Q^2)$  и фактор выживания, который характеризует эффективное уменьшение сечения за счет сильных взаимодействий. Сечение эксклюзивного рождения мюонов в протон-протонном столкновении через фотон-фотонную аннигиляцию модифицируется с учетом данных факторов:

$$\sigma(pp(\gamma\gamma) \rightarrow pp\mu^+\mu^-) = \int_{\hat{s}_{min}}^{\hat{s}_{max}} ds \int_{\hat{p}_T}^{\sqrt{s}/2} dp_T \frac{d\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)}{dp_T} \times$$

$$\times \int_{1/\hat{x}}^{\hat{x}} \frac{dx}{8x} \int_{b_1>0} d^2b_1 \int_{b_2>0} d^2b_2 n\left(b_1, \sqrt{\frac{sx}{4}}\right) n\left(b_2, \sqrt{\frac{s}{4x}}\right) P(|\vec{b}_1 - \vec{b}_2|).$$
(3)

Результат численного интегрирования приводит к следующей величине сечения:

$$\sigma(pp(\gamma\gamma) \rightarrow p\mu^+\mu^-p) = 0.68 \text{ пбн.} \quad (4)$$

В разделе 1.5 рассматривается резонанс  $X$  с массой  $M_X = (28.3 \pm 0.4)$  ГэВ, указание на который было дано коллаборацией CMS. Вводится феноменологическое взаимодействие резонанса  $X$  с фотонами:

$$\Delta\hat{\mathcal{L}}_{X\gamma\gamma} = \kappa \hat{X} \hat{F}_{\mu\nu} \hat{F}^{\mu\nu}, \quad (5)$$

и вычисляется его вклад в процесс  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$  с учетом экспериментальных ограничений на конечный фазовый объем мюонной пары эксперимента ATLAS, приведенных в разделе 1.3. Результат для полной ширины резонанса  $X$   $\Gamma_X \equiv \Gamma_{X \rightarrow \mu^+\mu^-} = (1.8 \pm 0.5)$  МэВ может быть получен аналитическим интегрированием:

$$\begin{aligned} \sigma(p(\gamma\gamma)p \rightarrow pp\mu^+\mu^-)(X) &= \frac{8\alpha^2 \Gamma_{X \rightarrow \gamma\gamma} \Gamma_{X \rightarrow \mu^+\mu^-}}{\Gamma_X M_X^3} \ln^2 \frac{(2\hat{q}\gamma)^2}{M_X^2} \times \\ &\times \left[ \sqrt{1 - \frac{4\hat{p}_T^2}{M_X^2}} \left( 2\hat{\eta} + \ln \left( \frac{1 - \sqrt{1 - 4\hat{p}_T^2/M_X^2}}{1 + \sqrt{1 - 4\hat{p}_T^2/M_X^2}} \right) \right) - \ln \frac{4\hat{p}_T^2}{M_X^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Численное значение равно

$$\sigma(pp(\gamma\gamma) \rightarrow pp\mu^+\mu^-)(X) = 6.1 \times 10^4 \frac{\Gamma_{X \rightarrow \mu^+\mu^-}}{M_X} \frac{\Gamma_{X \rightarrow \gamma\gamma}}{\Gamma_X} \text{ пбн.} \quad (7)$$

Для случая  $\Gamma_X = (1.8 \pm 0.8)$  ГэВ получено численное значение

$$\sigma(pp(\gamma\gamma) \rightarrow pp\mu^+\mu^-)(X) \approx 49 \frac{\Gamma_{X \rightarrow \gamma\gamma}}{M_X} \text{ пбн.} \quad (8)$$

В конце раздела оценивается вклад петлевой диаграммы с фермионами в распад резонанса  $X$  в два фотона.

В разделе 1.6 полученные результаты для сечения эксклюзивного рождения мюонной пары в упругом рассеянии протонов через

фотон-фотонное слияние с учетом ограничений на конечный фазовый объем мюонной пары сравниваются с измерениями данного процесса коллаборацией ATLAS. Исходя из этого ставится ограничение на вклад резонанса  $X$  в исследуемый процесс:

$$\sigma(p(\gamma\gamma)p \rightarrow pp\mu^+\mu^-)(X) \lesssim 0.10 \text{ пбн} \quad (9)$$

на 95 % уровне достоверности.

Во **второй Главе** рассматривается полуэксклюзивный процесс  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  через фотон-фотонную аннигиляцию. Учитывается как вклад квазиупругого процесса  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$ , так и вклад неупругого процесса, в котором один из протонов разрушается при взаимодействии и переходит в некоторое адронное состояние  $X$ . Амплитуды соответствующих процессов выводятся в спиральном представлении. При вычислении учитываются электрический и магнитный форм-факторы протона, который рассеивается квазиупруго. Неупругое рассеяние протона рассматривается в рамках партонной модели. На выведенные аналитические выражения накладываются ограничения коллаборации ATLAS, и проводится сравнение сечения полуэксклюзивного процесса с экспериментальным значением.

В **разделе 2.1** обсуждается кинематика процесса  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$ , идущего через фотон-фотонную аннигиляцию. В эксперименте ATLAS, который измерял данный полуэксклюзивный процесс, использовались следующие ограничения на конечный фазовый объем:

$$\begin{aligned} 20 \text{ ГэВ} < W < 70 \text{ ГэВ}, \quad W > 105 \text{ ГэВ} \quad (10) \\ p_{(1,2),T} &> \hat{p}_T = 18 \text{ ГэВ}, \\ p_T^{\mu\mu} &< \hat{p}_T^{\mu\mu} = 5 \text{ ГэВ}, \\ |\eta_{(1,2)}| &< \hat{\eta} = 2.47, \\ 0.035 &< \xi < 0.08, \end{aligned}$$

где  $W$  - инвариантная масса мюонной пары  $W^2 = (k_1 + k_2)^2$ ,  $k_{(1,2)}$  - четырехимпульс мюона,  $p_{(1,2),T}$  - поперечный импульс и  $\eta_{(1,2)}$  - псевдобыстрота мюона,  $p_T^{\mu\mu} = |\vec{p}_{1T} + \vec{p}_{2T}|$  - поперечный импульс пары,

$\xi$  - потеря энергии протона на излучение. Данные ограничения с использованием кинематических соотношений позволяют определить пределы для виртуальности и частоты излученных фотонов.

В разделе 2.2 в рамках метода эквивалентных фотонов вычисляется сечение квазиупругого процесса  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$ . Используется формула для спектра эквивалентных фотонов с учетом электрического и магнитного форм-факторов:

$$n_p(\omega) = \frac{\alpha}{\pi\omega} \left\{ \left( 1 + 4u - (\mu_p^2 - 1)\frac{u}{v} \right) \ln \left( 1 + \frac{1}{u} \right) - \frac{24u^2 + 42u + 17}{6(u+1)^2} \right. \\ \left. - \frac{\mu_p^2 - 1}{(v-1)^3} \left[ \frac{1+u/v}{v-1} \ln \frac{u+v}{u+1} - \frac{6u^2(v^2 - 3v + 3) + 3u(3v^2 - 9v + 10) + 2v^2 - 7v + 11}{6(u+1)^2} \right] \right\}, \quad (11)$$

где

$$u = \left( \frac{\omega}{\Lambda\gamma} \right)^2, \quad v = \left( \frac{2m_p}{\Lambda} \right)^2. \quad (12)$$

Аналитическое выражение для сечения интегрируется с учетом ограничений эксперимента ATLAS на фазовый объем:

$$\sigma(p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p) = 8.6 \text{ фб}. \quad (13)$$

В разделе 2.3 приводится основное выражение для дифференциального сечения квазиупругого процесса рассеяния протона на кварке в рамках партонной модели  $p(\gamma\gamma)q \rightarrow p\mu^+\mu^-q$ :

$$d\sigma_{pq \rightarrow p\mu^+\mu^-q} = \frac{Q_q^2(4\pi\alpha)^2}{(q_1^2)^2(q_2^2)^2} (q_1^2 \rho_{\mu\nu}^{(1)})(q_2^2 \rho_{\alpha\beta}^{(2)}) M_{\mu\alpha} M_{\nu\beta}^* \times \quad (14) \\ \times \frac{(2\pi)^4 \delta^{(4)}(q_1 + q_2 - k_1 - k_2) d\Gamma}{4\sqrt{(p_1 p_2)^2 - m_p^4}} \frac{d^3 p'_1}{(2\pi)^3 2E'_1} \frac{d^3 p'_2}{(2\pi)^3 2E'_2},$$

где  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры,  $Q_q$  - электрический заряд кварка  $q$ ,  $\rho^{(1)}$  и  $\rho^{(2)}$  - матрицы плотности фотонов,  $M_{\mu\alpha}$  - амплитуда процесса аннигиляции  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $p_1, p'_1, p_2, p'_2$  - четыре-импульсы

протона и кварка до и после столкновения соответственно,  $E'_1, E'_2$  - энергии протона и кварка в конечном состоянии,  $d\Gamma$  - фазовый объем мюонной пары и  $m_p$  - масса протона.

В разделе 2.4 выводится выражение для матрицы плотности фотона, излученного кварком в спиральном представлении. Основной вклад дают только поперечные поляризации фотонов:

$$\rho_{++}^{(2)} = 2 \frac{x^2 E^2 q_{2\perp}^2}{\omega_2^2 Q_2^2}. \quad (15)$$

Выражение для  $\rho_{--}^{(2)}$  полностью совпадает с  $\rho_{++}^{(2)}$ .

В разделе 2.5 выводится выражение для матрицы плотности фотона, излученного протоном. Учитываются электрический и магнитный форм-факторы. Основной вклад снова дают поперечные поляризации:

$$\rho_1^{++} \approx D(Q_1^2) \cdot \frac{2E^2 q_{1\perp}^2}{\omega_1^2 Q_1^2}. \quad (16)$$

Выражение для  $\rho_{--}^{(1)}$  полностью совпадает с  $\rho_{++}^{(1)}$ .

**Раздел 2.6** посвящен выводу выражений для амплитуд процесса  $\gamma\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ , когда один из фотонов виртуальный. После перехода в спиральный базис квадраты амплитуд, просуммированных и усредненных по поляризациям начальных и конечных частиц, записаны в системе центра инерции мюонов. Для одинаковых спиральностей фотонов получено:

$$|M_{\pm\pm}|^2 = \frac{8e^4}{(1 + Q_2^2/W^2)^2(1 - v^2 \cos^2 \theta)^2} \left[ Q_2^4/W^4 v^2 \sin^2 \theta + (1 - v^2)(1 + Q_2^2/W^2)^2 \right] (1 + v^2 \cos^2 \theta) + (1 - v^2)v^2 \sin^2 \theta. \quad (17)$$

Для противоположных соответственно:

$$|M_{+-}|^2 = \frac{8e^4 v^2 \sin^2 \theta}{(1 - v^2 \cos^2 \theta)^2(1 + Q_2^2/W^2)^2} \left[ 2 - v^2 + v^2 \cos^2 \theta \right]. \quad (18)$$

При этом  $|M_{+-}|^2 = |M_{-+}|^2$ . Обсуждается эффект киральной аномалии при аннигиляции фотонов с одинаковыми спиральностями в мюоны. Показано, что даже для безмассовых мюонов рассеяние на угол 0 и  $\pi$  разрешено.

В разделе 2.7 выводится аналитическое выражение для неупругого процесса  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  в рамках партонной модели. Полученное сечение вычисляется с учетом ограничений эксперимента ATLAS. При численном интегрировании используются партонные функции распределения MSHT20nnlo\_as118 из LHAPDF. В результате получается следующее значение:

$$\sigma(pp \rightarrow p + \mu^+\mu^- + X) = 9.6 \text{ фб}. \quad (19)$$

В разделе 2.8 полученные результаты для сечений квазиупругого процесса  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$  и неупругого  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  сравниваются с экспериментальными данными ATLAS по измерению полуэксклюзивного процесса рождения мюонной пары, когда один из протонов детектируется передним детектором. Учет фактора выживания приводит к согласию теоретического расчета с экспериментальным на уровне 2 – 3 стандартных отклонений.

Глава 3 посвящена вычислению вклада  $Z$  бозона в полуэксклюзивный процесс  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$ . Показано, что наибольший вклад к лидирующему электромагнитному процессу дает реакция с рождением мюонной пары в  $\gamma Z$  слиянии, когда  $Z$  бозон излучается кварком из неупруго рассеянного протона. Наряду с поперечными поляризациями виртуального бозона, испущенного кварком, учитывается продольная. Выводится аналитическое выражение для дифференциального сечения полуэксклюзивного процесса с учетом поправки от слабого взаимодействия.

В разделе 3.1 в спиральном представлении выводится матрица плотности продольно поляризованного виртуального фотона, излученного кварком:

$$\rho_{00}^{(2)} = 4 \frac{x^2 E^2}{\omega_2^2}. \quad (20)$$



Выражение для сечения аннигиляции поперечно- поляризованного эквивалентного фотона и продольно-поляризованного виртуального фотона имеет вид:

$$\sigma_{+0}(\gamma\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-) + \sigma_{-0}(\gamma\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{16\pi\alpha^2 W^2 Q_2^2}{(W^2 + Q_2^2)^3}. \quad (21)$$

Далее выводится аналитическое выражение для сечения  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^- X$  через аннигиляцию фотонов, и обсуждаются пределы его интегрирования.

**Раздел 3.2** посвящен учету вклада процесса  $\gamma Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Показано, что матрицы плотности с учетом  $Z$  бозона, излученного кварком, могут быть выражены через матрицы плотности фотона:

$$\begin{aligned} \rho_{\pm\pm}^{\gamma Z, (2)} &= \frac{g_V^q}{2} \rho_{\pm\pm}^{(2)}, \\ \rho_{00}^{\gamma Z, (2)} &= \frac{g_V^q}{2} \rho_{00}^{(2)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Доказывается, что квадрат амплитуды электромагнитного процесса с учетом поправки от слабого взаимодействия выражается через электромагнитный процесс в следующем виде:

$$|M^{\gamma\gamma} + M^{\gamma Z}|^2 \equiv \varkappa |M^{\gamma\gamma}|^2, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varkappa(Q_2^2) &= 1 + 2 \cdot \frac{g_V^\mu}{Q_\mu} \cdot \frac{g_V^q}{Q_q} \cdot \lambda + \frac{(g_V^\mu)^2 + (g_A^\mu)^2}{Q_\mu^2} \cdot \frac{(g_V^q)^2 + (g_A^q)^2}{Q_q^2} \cdot \lambda^2, \\ \lambda &\equiv \frac{1}{(2s_W c_W)^2 (1 + M_Z^2/Q_2^2)}, \end{aligned} \quad (24)$$

Вычислен относительный вклад процесса с обменом  $Z$  бозоном в дифференциальное сечение полуклассического процесса  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^- X$ . Показано, что величина поправки от слабого взаимодействия может достигать 20% при нижнем ограничении на поперечный импульс мюонной пары  $\hat{p}_T > 70$  ГэВ.

В **заключении** обсуждаются перспективы дальнейшей разработки темы и кратко перечислены основные результаты работы.

# Заключение

## Основные результаты

В заключение кратко перечислим основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией.

1. Был рассмотрен ультрапериферический процесс  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$ . В рамках метода эквивалентных фотонов была получена аналитическая формула для сечения данной реакции. Выведенное выражение позволяет естественным образом наложить экспериментальные ограничения на фазовый объем конечных продуктов. Было получено численное значение путем прямого интегрирования без использования Монте-Карло симуляций с помощью библиотеки *libepa*. Был рассмотрен гипотетический резонанс  $X$  с массой 28 ГэВ, который наблюдался коллаборацией CMS. Из предположения о его взаимодействии с мюонами и фотонами были выведены аналитические выражения для сечения  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-p$  через резонанс  $\gamma\gamma \rightarrow X \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Из сравнения с экспериментальными данными ATLAS было поставлено ограничение на взаимодействие  $X$  с фотонами.
2. Был изучен полуэксклюзивный процесс, в котором наряду с упругим вкладом  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$  имеется неупругий вклад  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-X$ . В рамках спирального представления были получены аналитические выражения для вкладов в сечение такого процесса от разных поляризационных конфигураций фотонов. Исследование проводилось в рамках партонной

модели. Были выведены матрицы плотности в спиральном представлении для протона с учетом его электрического и магнитного форм-факторов и для кварка с учетом партонных функций распределения. Было показано, что при аннигиляции фотонов с одинаковыми поперечными поляризациями проявляется киральная аномалия. Полученное выражение для полного сечения полужексклюзивного процесса было численно проинтегрировано с ограничениями на фазовый объем конечных продуктов, которые были наложены экспериментом ATLAS при исследовании данной реакции. С учетом фактора выживания и неопределенностей в партонных функциях распределения при низких энергиях полученный результат согласуется с экспериментальным на уровне двух-трех стандартных отклонений.

3. В неупругую часть полужексклюзивного процесса  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  дает вклад слабое взаимодействие. Лидирующий борновский вклад дается излучением  $Z$  бозона из неупруго рассеивающегося протона. Были модифицированы матрицы плотности и амплитуды в спиральном представлении с учетом слабого взаимодействия. Вклад дает как интерференция диаграмм процессов  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $\gamma Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ , так и квадрат диаграммы процесса  $\gamma Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Было показано, что весь вклад от слабого взаимодействия факторизуется в функцию от виртуальности  $\kappa(Q_2^2)$ . Было вычислено дифференциальное по инвариантной массе мюонной пары сечение с учетом обмена  $Z$ . При более сильном ограничении снизу на поперечный импульс пары при отборе событий на эксперименте поправка может достигать 20 %. Такой отбор событий обладает как теоретическим, так и экспериментальным преимуществом.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Развитый в диссертации метод вычисления сечений имеет перспективы применения ко многим ускорительным экспериментам, как текущим, так и будущим. В работе [40] было рассмотрено рождение

суперсимметричных заряженных частиц - чарджино  $\chi^\pm$ , в протон-протонном столкновении через  $\gamma\gamma$  аннигиляцию на планируемых ускорителях HE-LHC ( $\sqrt{s} = 27$  ТэВ), SPPC ( $\sqrt{s} = 70$  ТэВ) and FCC ( $\sqrt{s} = 100$  ТэВ). Изложенный в диссертации способ использовался для вычисления сечения рождения как для квазиупругого, так и неупругого столкновения протонов.

Мы можем применять развитые формулы, чтобы вычислять не только лепторождение через фотон-фотонную аннигиляцию. Действительно, полученные формулы для сечения факторизуются на собственно процесс рождения лептонов через аннигиляцию фотонов и процесс излучения этих фотонов протонами. Поэтому мы можем заменить внутреннее сечения рождения лептонов в фотон-фотонном слиянии на любой другой процесс, в том числе изучать вклад возможной Новой Физики. Как уже отмечалось, выведенные аналитические выражения для сечения позволяют исследовать как квазиупругие, так и неупругие процессы. При этом мы не прибегаем к Монте-Карло симуляциям, а накладываем экспериментальные ограничения непосредственно при интегрировании теоретических формул. Пример вычисления сечения рождения аксионов в  $\gamma\gamma$  аннигиляции приведен в работе [43].

## Список публикаций по теме диссертации

- [A1] S. I. Godunov, E. K. Karkaryan, V. A. Novikov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov. LHC as a photon-photon collider: bounds on  $\Gamma_{X \rightarrow \gamma\gamma}$ . Phys.Rev.D., 103, 035016 (2021).
- [A2] S. I. Godunov, E. K. Karkaryan, V. A. Novikov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov. Forward proton scattering in association with muon pair production via the photon fusion mechanism at the LHC. Jetp Lett. 115, 59–62 (2022).
- [A3] S. I. Godunov, E. K. Karkaryan, V. A. Novikov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov.  $pp$  scattering at the LHC with the lepton pair production and one proton tagging. Eur.Phys.J.C 82 (2022) 11, 1055
- [A4] S. I. Godunov, E. K. Karkaryan, V. A. Novikov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov. Weak interaction corrections to muon pair production via the photon fusion at the LHC. Phys.Rev.D 108 (2023) 9, 093006.
- [A5] E. K. Karkaryan. Muon Production in Elastic Proton-Proton Scattering. Phys.Part.Nucl.Lett. 20 (2023) 6, 1449-1451.
- [A6] E. K. Karkaryan. The Approach of Helicity Amplitudes to Calculation of the Muon Pair Production in Proton-Proton Scattering at the LHC. Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 1, 176-179.
- [A7] E. K. Karkaryan. Z Boson Contribution into the Muon Pair Production in Proton–Proton Collisions. Moscow Univ.Phys.Bull. 79 (2024) Suppl 1, 154-157.

## Список литературы

- [1] Aoyama T., Kinoshita T., Nio M. Revised and Improved Value of the QED Tenth-Order Electron Anomalous Magnetic Moment // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 97, no. 3. — P. 036001. — 1712.06060.
- [2] Measurement of the Electron Magnetic Moment / Fan X., Myers T. G., Sukra B. A. D., and Gabrielse G. // *Phys. Rev. Lett.* — 2023. — Vol. 130, no. 7. — P. 071801. — 2209.13084.
- [3] Crivellin A., Mueller D., Saturnino F. Correlating  $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$  to the Anomalous Magnetic Moment of the Muon via Leptoquarks // *Phys. Rev. Lett.* — 2021. — Vol. 127, no. 2. — P. 021801. — 2008.02643.
- [4] Tsai Y.-D., deNiverville P., Liu M. X. Dark Photon and Muon  $g - 2$  Inspired Inelastic Dark Matter Models at the High-Energy Intensity Frontier // *Phys. Rev. Lett.* — 2021. — Vol. 126, no. 18. — P. 181801. — 1908.07525.
- [5] Fermionic portal to vector dark matter from a new gauge sector / Belyaev A., Deandrea A., Moretti S., Panizzi L., Ross D. A., and Thongyoi N. // *Phys. Rev. D.* — 2023. — Vol. 108, no. 9. — P. 095001. — 2204.03510.
- [6] Flavor probes of axion-like particles / Bauer M., Neubert M., Renner S., Schnubel M., and Thamm A. // *JHEP.* — 2022. — Vol. 09. — P. 056. — 2110.10698.

- [7]  $Z'$  models for the LHCb and  $g - 2$  muon anomalies / Allanach B., Queiroz F. S., Strumia A., and Sun S. // Phys. Rev. D. — 2016. — Vol. 93, no. 5. — P. 055045. — [Erratum: Phys.Rev.D 95, 119902 (2017)]. 1511.07447.
- [8] Krasnikov N. V., Matveev V. A. The search for new physics at the LHC // Theor. Math. Phys. — 2002. — Vol. 132. — P. 1189–1200.
- [9] LHC Searches for Dark Sector Showers / Cohen T., Lisanti M., Lou H. K., and Mishra-Sharma S. // JHEP. — 2017. — Vol. 11. — P. 196. — 1707.05326.
- [10] Aaboud M. et al. Measurement of the  $W$ -boson mass in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector // Eur. Phys. J. C. — 2018. — Vol. 78, no. 2. — P. 110. — [Erratum: Eur.Phys.J.C 78, 898 (2018)]. 1701.07240.
- [11] Adachi I. et al. Search for lepton-flavor-violating  $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$  decays at Belle II // JHEP. — 2024. — Vol. 09. — P. 062. — 2405.07386.
- [12] Aaij R. et al. Search for  $CP$  violation in the phase space of  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$  decays with the energy test // JHEP. — 2023. — Vol. 09. — P. 129. — [Erratum: JHEP 04, 040 (2024)]. 2306.12746.
- [13] Aaij R. et al. Updated determination of  $D^0$ - $\bar{D}^0$  mixing and CP violation parameters with  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  decays // Phys. Rev. D. — 2018. — Vol. 97, no. 3. — P. 031101. — 1712.03220.
- [14] Aguillard D. P. et al. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 127 ppb // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 135, no. 10. — P. 101802. — 2506.03069.
- [15] Complete Tenth-Order QED Contribution to the Muon  $g-2$  / Aoyama T., Hayakawa M., Kinoshita T., and Nio M. // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Vol. 109. — P. 111808. — 1205.5370.

- [16] Bertulani C. A., Klein S. R., Nystrand J. Physics of ultra-peripheral nuclear collisions // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 2005. — Vol. 55. — P. 271–310. — nucl-ex/0502005.
- [17] Klein S., Steinberg P. Photonuclear and Two-photon Interactions at High-Energy Nuclear Colliders // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 2020. — Vol. 70. — P. 323–354. — 2005.01872.
- [18] Aad G. et al. Measurement of exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$  production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector // *Phys. Lett. B.* — 2015. — Vol. 749. — P. 242–261. — 1506.07098.
- [19] Aad G. et al. Measurement of light-by-light scattering and search for axion-like particles with  $2.2 \text{ nb}^{-1}$  of Pb+Pb data with the ATLAS detector // *JHEP.* — 2021. — Vol. 03. — P. 243. — [Erratum: *JHEP* 11, 050 (2021)]. 2008.05355.
- [20] Aaboud M. et al. Measurement of exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$  production and search for exclusive Higgs boson production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Vol. 94, no. 3. — P. 032011. — 1607.03745.
- [21] Khachatryan V. et al. Evidence for exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$  production and constraints on anomalous quartic gauge couplings in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV // *JHEP.* — 2016. — Vol. 08. — P. 119. — 1604.04464.
- [22] Tumasyan A. et al. Search for high-mass exclusive diphoton production with tagged protons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 1. — P. 012010. — 2311.02725.
- [23] Chatrchyan S. et al. Search for Exclusive or Semi-Exclusive Photon Pair Production and Observation of Exclusive and Semi-Exclusive Electron Pair Production in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // *JHEP.* — 2012. — Vol. 11. — P. 080. — 1209.1666.



- [24] Aaij R. et al. Exclusive  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // J. Phys. G. — 2013. — Vol. 40. — P. 045001. — 1301.7084.
- [25] Aaij R. et al. Central exclusive production of  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  mesons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP. — 2018. — Vol. 10. — P. 167. — 1806.04079.
- [26] Abelev B. et al. Coherent  $J/\psi$  photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Lett. B. — 2013. — Vol. 718. — P. 1273–1283. — 1209.3715.
- [27] Abbas E. et al. 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. — Vol. 73, no. 11. — P. 2617. — 1305.1467.
- [28] STARlight: A Monte Carlo simulation program for ultra-peripheral collisions of relativistic ions / Klein S. R., Nystrand J., Seger J., Gorbunov Y., and Butterworth J. // Comput. Phys. Commun. — 2017. — Vol. 212. — P. 258–268. — 1607.03838.
- [29] Harland-Lang L. A., Khoze V. A., Ryskin M. G. Exclusive physics at the LHC with SuperChic 2 // Eur. Phys. J. C. — 2016. — Vol. 76, no. 1. — P. 9. — 1508.02718.
- [30] Bahr M. et al. Herwig++ Physics and Manual // Eur. Phys. J. C. — 2008. — Vol. 58. — P. 639–707. — 0803.0883.
- [31] Collins J. C. Hard scattering factorization with heavy quarks: A General treatment // Phys. Rev. D. — 1998. — Vol. 58. — P. 094002. — hep-ph/9806259.
- [32] Diffractive production of jets and weak bosons, and tests of hard scattering factorization / Alvero L., Collins J. C., Terron J., and Whitmore J. J. // Phys. Rev. D. — 1999. — Vol. 59. — P. 074022. — hep-ph/9805268.

- [33] Łuszczak M., Maciula R., Szczurek A. Single- and central-diffractive production of open charm and bottom mesons at the LHC: Theoretical predictions and experimental capabilities // *Phys. Rev. D*. — 2015. — Mar. — Vol. 91. — P. 054024. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.91.054024>.
- [34] Probabilities of rapidity gaps in high-energy interactions / Kaidalov A. B., Khoze V. A., Martin A. D., and Ryskin M. G. // *Eur. Phys. J. C*. — 2001. — Vol. 21. — P. 521–529. — [hep-ph/0105145](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0105145).
- [35] Searching for axion-like particles with proton tagging at the LHC / Baldenegro C., Fichet S., von Gersdorff G., and Royon C. // *JHEP*. — 2018. — Vol. 06. — P. 131. — [1803.10835](https://arxiv.org/abs/1803.10835).
- [36] Harland-Lang L. A., Tasevsky M. New calculation of semiexclusive axionlike particle production at the LHC // *Phys. Rev. D*. — 2023. — Vol. 107, no. 3. — P. 033001. — [2208.10526](https://arxiv.org/abs/2208.10526).
- [37] Aad G. et al. Measurement of differential cross sections for single diffractive dissociation in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions using the ATLAS ALFA spectrometer // *JHEP*. — 2020. — Vol. 02. — P. 042. — [Erratum: *JHEP* 10, 182 (2020)]. [1911.00453](https://arxiv.org/abs/1911.00453).
- [38] Abelev B. et al. Measurement of inelastic, single- and double-diffraction cross sections in proton–proton collisions at the LHC with ALICE // *Eur. Phys. J. C*. — 2013. — Vol. 73, no. 6. — P. 2456. — [1208.4968](https://arxiv.org/abs/1208.4968).
- [39] Chatrchyan S. et al. Observation of a Diffractive Contribution to Dijet Production in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // *Phys. Rev. D*. — 2013. — Vol. 87, no. 1. — P. 012006. — [1209.1805](https://arxiv.org/abs/1209.1805).
- [40] On production of heavy charged particles in  $\gamma\gamma$  fusion at planned  $pp$  colliders / Godunov S. I., Karkaryan E. K., Novikov V. A., Rozanov A. N., Vysotsky M. I., and Zhemchugov E. V. // *Pisma*

Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 2024. — Vol. 119, no. 1. — P. 7–8. — 2311.06636.

- [41] Aaboud M. et al. Measurement of the exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  process in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector // Phys. Lett. B. — 2018. — Vol. 777. — P. 303–323. — 1708.04053.
- [42] Aad G. et al. Observation and Measurement of Forward Proton Scattering in Association with Lepton Pairs Produced via the Photon Fusion Mechanism at ATLAS // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 26. — P. 261801. — 2009.14537.
- [43] libepa — A C++/Python library for calculations of cross sections of ultraperipheral collisions / Zhemchugov E. V., Godunov S. I., Karkaryan E. K., Novikov V. A., Rozanov A. N., and Vysotsky M. I. // Comput. Phys. Commun. — 2024. — Vol. 305. — P. 109347. — 2311.01353.

Научное издание

Каркарьян Евгений Карапетович

Рождение заряженных лептонов в протон-протонных  
столкновениях на БАК

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Принято в печать

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический  
институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук

Издательский отдел