

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

?-2016-??

На правах рукописи

ЗЫКУНОВ

Владимир Александрович

ЭФФЕКТЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВК В
СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ФИЗИКЕ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2016

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный университет транспорта”, г. Гомель

Научный консультант: **Шумейко Николай Максимович**,
доктор физико-математических наук, профессор, начальник Центра физики частиц и высоких энергий Научно-исследовательского учреждения “Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

Калиновская Лидия Владимировна, доктор физико-математических наук, начальник сектора №1 Научно-экспериментального отдела встречных пучков Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

Катаев Андрей Львович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных исследований Российской Академии наук

Кувшинов Вячеслав Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем ядерной физики и безопасности Государственного научного учреждения “Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны” Национальной академии наук Беларуси

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Защита состоится “___” _____ 2016 г. в ___ на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований (Лаборатория теоретической физики) по адресу: 141980, г. Дубна, Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Объединенного института ядерных исследований (http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm)

Автореферат разослан “___” _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 720.001.01, д. ф.-м. н.

Арбузов Андрей Борисович

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в физике высоких энергий были сделаны существенные открытия, благодаря которым расширились наши знания о фундаментальных принципах природы. С одной стороны, это прогресс в области эксперимента: обнаружение переносчиков слабого взаимодействия – массивных векторных W^\pm - и Z -бозонов, открытие третьего поколения фермионов: τ -лептона, τ -нейтрино, b - и t -кварка, обнаружение нейтринных осцилляций и, как следствие, массы у нейтрино, наконец, открытие нового скалярного бозона. С другой стороны, это грандиозный успех теории, который был достигнут на пути объединения различных типов взаимодействия. Единая электрослабая теория (конец 60-х годов) и квантовая хромодинамика (КХД) (начало 70-х годов) получили столь неопровержимые экспериментальные доказательства своей состоятельности и стали столь неотделимыми от современной физики, что сейчас носят общепринятое название: Стандартная Модель (СМ).

Несмотря на неоспоримые успехи, в СМ имеется ряд теоретических проблем, например, наличие большого числа свободных параметров; невыясненность причины повторения поколений лептонов, отсутствие обоснования их числа; тот факт, что в СМ никак не включается гравитационное взаимодействие. Проблемы имеют место как в наиболее изученном *электрослабом секторе*: недостаточно изучено нарушение СР-инвариантности, нет надежной теоретической основы для существования или несуществования аномальных вершинных (трех- и четырехчастичных) вкладов, неясны роль и параметры возможных дополнительных (например, Z' и W') калибровочных бозонов, неизвестно, до каких энергий СМ будет продолжать давать правильные предсказания для наблюдаемых величин; так и в *сильном секторе*: неизвестно, как из КХД получить низкоэнергетическую динамику, аппарата современной КХД недостаточно для последовательного рассмотрения связанных кварковых систем, функции кварк-партонных распределений вводятся до сих пор феноменологически, нуждается в разрешении проблема, поставленная спиновым кризисом.

Хотя к настоящему моменту экспериментальных данных, говорящих против СМ, не существует, а частица Хиггса, наконец, обнаружена, поиски выхода за рамки СМ не прекращаются, и причиной тому не только проблемы Стандартной Модели, упомянутые выше, но и, так сказать, инерция стремления познания природы. Среди существующих на настоящий момент вариантов выхода за рамки СМ нужно выделить теорию великого объединения (ТВО), в которой лептоны и кварки рассматриваются в рамках единой группы симметрии, и суперсимметрию (SUSY), объединяющую фермионы и

бозоны. В единую теорию можно подключить и гравитацию – описание гравитации на языке SUSY называют супергравитацией. Наконец, имеются и другие идеи, например, струнная теория, рассматривающая не элементарные точечные частицы, а объекты, совершающие колебания в многомерных пространствах и обладающие симметрией бозон-фермион (суперструны). СМ в этом подходе является лишь эффективной феноменологической теорией в низкоэнергетическом пределе. Далее, в результате объединения теории струн и суперсимметрии за последние годы сформировалась очень перспективная теория миров на бранах. Также в струнной теории получила свою вторую жизнь идея Калуцы и Кляйна относительно компактификации (сворачивания) пространственных измерений.

Научный мир, дождавшись подтверждения открытия бозона Хиггса, надеется и на обнаружение следов “новой” физики (НФ) в идущих полным ходом экспериментах на Большом адронном коллайдере LHC. Определенные надежды такого рода в свое время возлагались на LEP – кольцевой коллайдер на встречных пучках электронов и позитронов в Европейском Центре Ядерных Исследований – CERN, а затем на Tevatron – $p\bar{p}$ коллайдер в Fermilab, но они, к сожалению, не оправдались. Теперь рассматриваемые перспективы связаны, в основном, с LHC – адронным коллайдером с запланированной энергией 14 ТэВ. Заметим, что адронный коллайдер уже однажды сыграл роль машины открытия: коллаборации UA1 и UA2 в CERN в 1983 г. открыли сначала W -бозоны, а затем и Z -бозон. Однако основную роль в становлении СМ сыграли как раз эксперименты в электрослабом секторе. Так, фабрики по производству электрослабых бозонов SLC – электрон-позитронный линейный коллайдер SLAC (Стэнфорд, США) и LEP – e^+e^- коллайдер в CERN собрали столь большое количество точной информации, что за СМ был фактически утвержден статус экспериментально подтвержденной теории.

Вполне вероятно, что ближайший ход развития физики высоких энергий будет такой: успешные эксперименты ATLAS и CMS на LHC (как 30 лет назад UA1 и UA2) обусловят и мотивируют проектирование и запуск аналога для SLC и LEP, т. е. машины, которая работает с лептонами – так будет обеспечена чистота экспериментальных данных, достичь которой в случае адронных столкновений невозможно; спроектирована на заданную область энергии, возможно, на ту, где LHC найдет проявления физики за рамками стандартной модели. Физики всего мира надеются, что такая машина – Международный Линейный Коллайдер (ILC), либо конкурирующий с ним проект Компактный Линейный Коллайдер (CLIC) обязательно будет построена.

Физика высоких энергий в настоящий момент находится в непростой ситуации. Достигнуты энергии, с одной стороны соответствующие пределам

применимости СМ, а с другой – возможностям экспериментальной техники и разумной стоимости реализации проектов. Несмотря на то, что весь существующий набор экспериментальной информации находится в надежном согласии с предсказаниями СМ, большое количество факторов указывает на то, что уже на имеющихся в распоряжении энергиях должна проявиться “новая” физика, чему, в основном, и посвящены экспериментальные программы существующих и планируемых ускорителей, причем в доступной на настоящий момент области энергий “новая” физика, по всей видимости, проявится не через обнаружение новых частиц и новых явлений, а по небольшим отклонениям от предсказаний СМ. Обнаружение новых физических явлений возможно только в ходе точного детализированного сравнения экспериментальных данных с предсказаниями теории. Возрастающая экспериментальная точность требует соответственного увеличения точности теоретического описания, что определяет *актуальность* настоящей работы и ее *цель* – обеспечение ряда экспериментов, представляющих интерес для современной физики высоких энергий, надежными и прецизионными программами учета радиационных эффектов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена: в рамках государственной программы научных исследований ГПНИ “Конвергенция” (2011–2013 гг., 2014–2015 гг.), в рамках совместного проекта с ОИЯИ (№ госрегистрации 20083010) (2009 г.), при поддержке ГПФИ “Поля и частицы” и гранта БелРФФИ–ОИЯИ (Ф08Д-001) (2008–2009 гг.), при поддержке Национального Совета Канады по естественным и инженерным наукам (The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, NSERC) в 2010–2016 гг. Тематика работы соответствует п. 1202 “Физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии” Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований в Республике Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь №585 от 19.04.2010.

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в обеспечении ряда экспериментов, представляющих интерес для современной физики высоких энергий, надежными прецизионными программами учета радиационных эффектов.

В соответствии с целью решались следующие **задачи**:

1. Разработать программу прецизионного учета однопетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для экспериментов: E-158 (SLAC), MOLLER (JLab) и для планируемых экспериментов на ILC. Провести все необходимые проверки и тесты, в том числе сверку с известными результатами других групп.
2. Оценить двухпетлевые электрослабые радиационные поправки к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния, которая будет измеряться в эксперименте MOLLER (JLab). Выработать эффективную методику сложения различных вкладов от одно- и двухпетлевых радиационных эффектов в наблюдаемую поляризационную асимметрию.

3. Разработать метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые поправки к различным типам диаграмм и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий. В рамках этого метода произвести расчет однопетлевых электрослабых поправок для процесса Дрелла–Яна с большими инвариантными массами лептонной пары.
4. Произвести детальный расчет жесткого тормозного излучения фотонов и глюонов и инверсного глюонного излучения для процесса Дрелла–Яна точно и в ведущем логарифмическом приближении.
5. Разработать и оптимизировать программу численной оценки однопетлевых электрослабых радиационных эффектов (к трижды дифференциальным сечениям и к интегральным наблюдаемым) в процессе Дрелла–Яна при больших инвариантных массах лептонной пары для будущих экспериментов на коллайдере LHC с учетом экспериментальных ограничений установки CMS.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования служат реакция поляризационного мёллеровского рассеяния в низкоэнергетических экспериментах типа E-158 (SLAC), MOLLER (JLab) и при высоких энергиях будущего коллайдера (ILC, CLIC) и процесс Дрелла–Яна при больших инвариантных массах дилептона на LHC.

Предметом исследования являются радиационные эффекты высших порядков теории возмущений:

- однопетлевые (глава 2) и двухпетлевые (глава 3) электрослабые радиационные поправки к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для эксперименте E-158 в SLAC, эксперимента MOLLER в JLab и для планируемых экспериментов на ILC;
- однопетлевые электрослабые поправки (главы 4, 5) и КХД-поправки (главы 5, 6) в экспериментах по изучению процесса Дрелла–Яна при больших инвариантных массах лептонной пары на коллайдере LHC.

Недостаточно точная теоретическая оценка наблюдаемых величин в экспериментах физики высоких энергий является одним из основных факторов, ограничивающим точность физических результатов. Соответственно, **актуальность исследования** объясняется необходимостью получения прецизионной теоретической информации в рамках SM о:

- наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для эксперимента E-158 в SLAC, эксперимента MOLLER в JLab и для планируемых экспериментов на ILC;

- наблюдаемых сечений в экспериментах по изучению процесса Дрелла–Яна при больших инвариантных массах лептонной пары на коллайдере LHC.

Положения, выносимые на защиту

1. Процедура прецизионного учета полных однопетлевых и лидирующих двухпетлевых электрослабых радиационных эффектов к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для современных экспериментов: E-158 (SLAC), MOLLER (JLab) и для планируемых экспериментов на ILC, реализованная в виде компьютерной программы gcAPV.
2. Методика сложения различных радиационных вкладов в поляризационную асимметрию, наблюдаемую в экспериментах типа MOLLER (JLab), позволяющая контролировать точность учета радиационных эффектов.
3. Асимптотический метод получения компактных, удобных для анализа и быстрой оценки электрослабых поправок ко вкладам различных типов, обеспечивающий требуемую точность в области высоких энергий.
4. Аналитические формулы, полученные в ведущем логарифмическом приближении, для жесткого тормозного излучения фотонов, глюонов и инверсного глюонного излучения в процессе Дрелла–Яна и жесткого тормозного излучения фотонов в мёллеровском рассеянии.
5. Процедура прецизионного учета однопетлевых электрослабых и КХД радиационных эффектов в процессе Дрелла–Яна при больших инвариантных массах лептонной пары для экспериментов на коллайдере LHC с учетом экспериментальных условий установки CMS с последовательным использованием трижды дифференциальных сечений, дающих возможность корректировать экспериментальные данные в любой кинематической точке и области, реализованная в виде компьютерной программы READY.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора в решение рассматриваемых в диссертации задач является определяющим. Основная часть положений, выносимых на защиту, опубликована в 13 статьях, написанных автором единолично: [5]–[7], [10], [11], [13]–[15], [18], [21], [22], [31], [32].

В работах [1]–[4], [8], [16], [17], [23], [30], [34] автору принадлежат полная реализация расчета, соавторы работали с текстом и проверкой. В прочих работах вклад автора диссертации также значим: в [9], [20], [24], [25], [27]–[29], [33] автором проделан расчет асимптотическими методами и численный анализ, в [12] автор обеспечил построение кода MERADGEN всеми аналитическими выражениями и построил гистограммы, в [19] и [26] проводил независимую проверку вычислений. Автором кода FeynArts/FormCalc расчета однопетлевых электрослабых поправок в процессе мёллеровского рассеяния, который использовался в работах [20], [23]–[25], [27], [29], является А.Г. Алексеев (A.G. Aleksejevs).

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, были доложены на нижеперечисленных конференциях, симпозиумах и т.д.

1. Международная научная конференция “Компьютерная алгебра в фундаментальных и прикладных исследованиях и образовании” CAS-97 (Минск, БГУ, 8–11 дек. 1997).
2. II открытая научная конференция ОМУС (Дубна, ОИЯИ, март 1998).
3. III открытая научная конференция ОМУС (Дубна, ОИЯИ, 5–9 мар., 1999).
4. 8-й Международный семинар “Нелинейные явления в сложных системах” NPCSS’99 (Минск, 17–20 мая, 1999).
5. Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 30 июля – 8 авг., 1999).
6. 9-й Международный семинар “Нелинейные явления в сложных системах” (Минск, 17–20 мая, 2000).
7. XV Int. Workshop QFTHEP’2000 (Тверь, Россия, 7–13 сент., 2000).
8. 5th Annual RDMS CMS Collaboration meeting (Moscow, ITEP, 22–24 Nov., 2000).
9. IX International Workshop on High Energy Spin Physics (Dubna, 2–7 Aug., 2001).
10. Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 7–16 авг., 2001).
11. 6th Annual RDMS CMS Collaboration meeting (Moscow, MSU, 19–21 Dec., 2001).
12. 11-й Международный семинар “Нелинейные явления в сложных системах” (Минск, 17–20 мая, 2002).

13. 7th Annual RDMS CMS Collaboration meeting (Protvino, IHEP, 13–15 Nov., 2002).
14. Schladming Winter School (Schladming, Austria, 22–28 Feb., 2003).
15. Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 28 июля–8 авг., 2003).
16. Совещание RDMS CMS (CERN, 10 July, 2003).
17. X Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (Dubna, JINR, 16–20 Sept., 2003).
18. 8th Annual RDMS CMS Collaboration Conference (Dubna, JINR, 3–7 Dec., 2003).
19. E-158 Collaboration Meeting (Pasadena, CA, USA, 23–24 Jan., 2004).
20. XVIII Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory (Saint-Petersburg, 17–23 June, 2004).
21. The 9-th RDMS CMS Collaboration Conference (Minsk, 28 Nov. – 2 Dec., 2004).
22. VIII Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 25 июля – 5 авг., 2005).
23. The 10th Annual RDMS CMS Collaboration Conference (St. Petersburg, Russia, 10–17 Sept., 2005).
24. 2-ая Международная конференция “Проблемы взаимодействия излучения с веществом” (Гомель, ГГУ, 2006).
25. International school-workshop “Calculations for modern and future colliders” CALC-2006 (Dubna, JINR, 15–25 July, 2006).
26. ICHEP 06: XXXIII International Conference on High Energy Physics (Moscow, Russia, 26 Jul. – 2 Aug. 2006).
27. The 11th Annual RDMS CMS Collaboration Conference (Варна, Болгария, 12–16 сент., 2006).
28. Научный семинар Лаборатории Высоких Энергий (Дубна, ОИЯИ, октяб. 2006).
29. IX Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 23 июля – 3 авг., 2007).
30. The 12-th RDMS CMS Collaboration Conference (Minsk, 14-19 Sept., 2008).
31. X Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 15–26 июля, 2009).
32. The XXXIX International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2009) (Gomel, 4–9 Sept., 2009).

33. Научный семинар Лаборатории Высоких Энергий, EVO (Дубна, ОИЯИ, ноябрь 2009).
34. ICHEP 2010: 35th Int. Conference On High Energy Physics (Paris, France, 22–28 July, 2010).
35. Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова (Гомель, ГГУ, 21–22 июня, 2011).
36. Научный семинар университета Акадиа, Вульфвилл, Канада (21 авг., 2011).
37. The 5th International Workshop PAVI11 (Rome, Italy, 5–9 Sept., 2011).
38. Научный семинар Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова (Дубна, ОИЯИ, 6 апреля 2011).
39. III Международная научная конференция “Проблемы взаимодействия излучения с веществом” (Гомель, ГГУ, 26–28 окт., 2011).
40. Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 85-летию со дня рождения Б.В. Бокуня (Гомель, ГГУ, 9–11 нояб., 2011).
41. ICHEP 2012: 36th International Conference on High Energy Physics (Melbourne, Australia, 4–11 Jul. 2012).
42. Научный семинар университета Акадиа (Вульфвилл, Канада, 10 нояб., 2012).
43. 15th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research (ACAT2013) (Beijing, China, May 16–21, 2013).
44. XII Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 22 июля – 2 авг., 2013).
45. MITP Workshop on Low-Energy Precision Physics (Mainz, MITP, Germany, 23 Sept. – 11 Oct., 2013).
46. XV Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-13) (Dubna, JINR, Russia, October 8–12, 2013).
47. Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А.Н. Сердюкова (Гомель, ГГУ, 21 мая., 2014).
48. ICHEP 2014: 37th International Conference on High Energy Physics (Valencia, Spain, 2–9 Jul. 2014).
49. Международная научно-практическая конференция “Актуальные вопросы теоретической физики, физики конденсированных сред и астрофизики” (Брест, БрГУ, 2–3 окт., 2014).

50. Научный семинар “Избранные вопросы квантовой теории поля”, посвященный памяти профессора Э.А. Кураева, (Дубна, ЛТФ ОИЯИ, 6–8 апреля 2015).
51. International school-workshop “Theory challenges for LHC physics” CALC-2015 (Dubna, JINR, 20–30 July, 2015).
52. XIII Международная школа-семинар “Современные проблемы физики частиц” (Гомель, 27 июля – 7 авг., 2015).

Опубликованность результатов диссертации

Материалы диссертации полностью изложены в 61 публикации, из них статей в научных журналах – 34, статей в материалах научных конференций – 21, в препринтах – 4. Без соавторов опубликовано: статей в научных журналах – 13, в материалах научных конференций – 12, в препринтах – 1. Общий объем опубликованных материалов составляет 66,0 авторских листов, из них на статьи, соответствующие пункту 18 “Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь”, приходится 43,6 авторских листа (34 публикации).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Текст работы изложен на 217 стр., включая 32 рисунка на 32 стр. и 16 таблиц на 16 стр. Перечень цитируемой литературы насчитывает 328 наименований и содержится на 27 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** сделан обзор современной физики высоких энергий. В **разделе 1.1** обсуждается сложившаяся в ней экспериментальная ситуация: описаны современные адрон-адронные эксперименты, затем эксперименты с лептонами, наконец, лептон-адронные эксперименты. В **разделе 1.2** приведены основы построения теории в рамках СМ: приведены лагранжианы релятивистской теории поля, описан принцип локальной калибровочной инвариантности, перечислены правила Фейнмана и принципы их построения. В **разделе 1.3** кратко описаны некоторые возможные выходы за рамки СМ, т.н. “новая” физика. Наконец, в **разделе 1.4** обсуждается роль учета радиационных поправок в реализации современных экспериментов физики высоких энергий, приводится обзор литературы по этому вопросу, указывается место, которое занимают разработки автора в современной теоретической и экспериментальной физике высоких энергий.

Во **второй главе** описан прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе поляризационного мёллеровского рассеяния

$$e^-(k_1) + e^-(p_1) \rightarrow e^-(k_2) + e^-(p_2) \quad (1)$$

(в скобках указаны 4-импульсы электронов с массой m), которое (**раздел 2.1**) представляет интерес как для для точного определения поляризации электронного пучка (поляриметрии), которое осуществлялось, например, в экспериментах: SLC, E-143 и E-154 в SLAC, в ряде экспериментов JLab, MIT-Bates, COMPASS, так и для сверхточного определения важнейшего параметра СМ – синуса угла Вайнберга s_W – в экспериментах E-158 (SLAC) и MOLLER (JLab).

В **разделе 2.2** в борновском приближении описан главный объект исследования – поляризационная асимметрия

$$A_1 = \frac{\sigma_{LL} + \sigma_{LR} - \sigma_{RL} - \sigma_{RR}}{\sigma_{LL} + \sigma_{LR} + \sigma_{RL} + \sigma_{RR}} = \frac{\sigma_{LL} - \sigma_{RR}}{\sigma_{LL} + 2\sigma_{LR} + \sigma_{RR}}, \quad (2)$$

где $\sigma \equiv d\sigma/d(\cos\theta)$, θ – угол рассеяния детектируемого электрона в с.ц.м. начальных электронов, первый (второй) нижние индексы означают степени продольной поляризации пучка (мишени). Эксперимент E-158 в SLAC, в котором изучалось мёллеровское рассеяние поляризованных электронов с энергиями 45–48 ГэВ на неполяризованных электронах водородной мишени, дал следующие значения: $s_W^2 = 0.2397 \pm 0.0010$ (stat.) ± 0.0008 (syst.). Аналогичный эксперимент следующего поколения MOLLER в JLab с электронным пучком 11 ГэВ позволит измерить асимметрию (2) на новом уровне

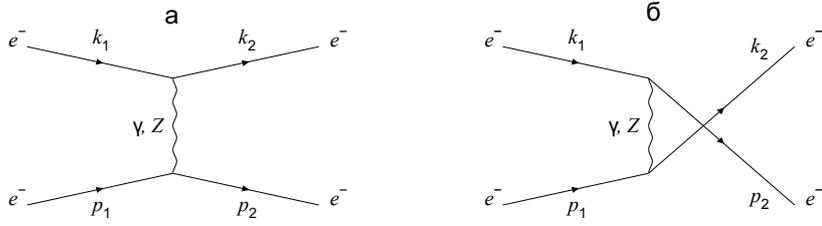


Рисунок 1 – Диаграммы, описывающие безрадиационное мёллеровское рассеяние в t -канале (а) и u -канале (б)

чувствительности 0.73×10^{-9} , что улучшит измерения s_W^2 до значения: ± 0.00026 (stat.) ± 0.00013 (syst.).

Процесс (1) на борновском уровне представлен диаграммами рис. 1. Здесь и далее u -канальные диаграммы получаются из t -канальных заменами $k_2 \leftrightarrow p_2$. Дифференциальное борновское сечение в ультрарелятивистском приближении выглядит так:

$$\sigma^0 = \frac{\pi\alpha^2}{s} \sum_{i,j=\gamma,Z} [\lambda_-^{i,j} (u^2 D^{it} D^{jt} + t^2 D^{iu} D^{ju}) + \lambda_+^{i,j} s^2 (D^{it} + D^{iu})(D^{jt} + D^{ju})]. \quad (3)$$

Используется стандартный набор переменных Мандельштама:

$$s = (k_1 + p_1)^2, \quad t = (k_1 - k_2)^2, \quad u = (k_2 - p_1)^2 \quad (4)$$

и структура

$$D^{ir} = \frac{1}{r - m_i^2} \quad (i = \gamma, Z; \quad r = t, u). \quad (5)$$

Функции $\lambda_{\pm}^{i,k} = \lambda_{1B}^{i,k} \lambda_{1T}^{i,k} \pm \lambda_{2B}^{i,k} \lambda_{2T}^{i,k}$, представляют собой комбинацию констант связи и $p_{B(T)}$ – степеней поляризации электронов пучка (мишени):

$$\lambda_{1B(T)}^{i,j} = \lambda_V^{i,j} - p_{B(T)} \lambda_A^{i,j}, \quad \lambda_{2B(T)}^{i,j} = \lambda_A^{i,j} - p_{B(T)} \lambda_V^{i,j}, \quad (6)$$

$$\lambda_V^{i,j} = v^i v^j + a^i a^j, \quad \lambda_A^{i,j} = v^i a^j + a^i v^j, \quad (7)$$

где

$$v^\gamma = 1, \quad a^\gamma = 0, \quad v^Z = (I_e^3 + 2s_W^2)/(2s_W c_W), \quad a^Z = I_e^3/(2s_W c_W). \quad (8)$$

В разделе 2.3 рассмотрены вклады в асимметрию от однопетлевых диаграмм с дополнительными виртуальными частицами (V -вклад), которые представлены на рис. 2. Подробно рассмотрена ренормализационная схема на массовой поверхности, требования калибровочной инвариантности и зависимость от ренормализационных условий для различных вкладов. Используется два набора: ренормализационные условия Деннера (РУД) и ренормализационные условия Холлика (РУХ). Подробно рассмотрен двухбозонный

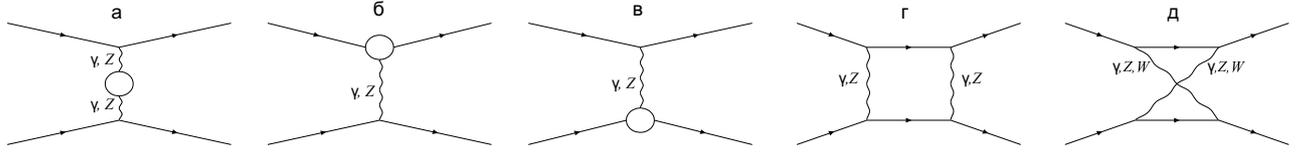


Рисунок 2 – Однопетлевые t -канальные диаграммы для процесса (1): вклады собственных энергий и вершинных функций обозначены кружками.

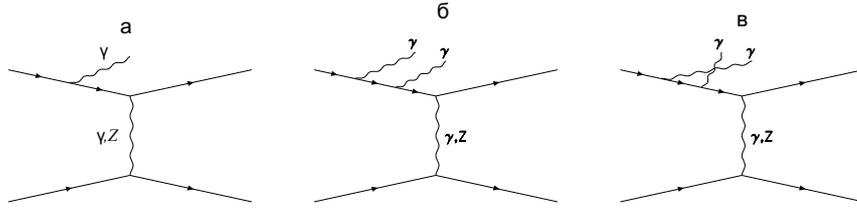


Рисунок 3 – Диаграммы тормозного излучения из первой электронной линии для процессов $e^-e^- \rightarrow e^-e^-\gamma$ (а) и $e^-e^- \rightarrow e^-e^-\gamma\gamma$ (б, в) в t -канале.

обмен, получено два варианта асимптотических формул для этого вклада в случае низких ($s, |r| \ll m_Z^2$) и сверхвысоких ($s, |r| \gg m_Z^2$) энергий. Во втором случае результат получен в форме с разложением по степеням судаковских логарифмов, для чего использовался асимптотический метод, подробно описанный в разделе 4.3.

В разделе 2.4 рассмотрен вклад в процесс от тормозного излучения (R -вклад). Пример диаграммы с излучением одного фотона из первой электронной линии (пучка) приведен на рис. 3(а). Подробно описано выделение и сокращение инфракрасной расходимости. Для части жестких фотонов получены формулы в ведущем логарифмическом приближении. Численно и аналитически доказана независимость полученного результата от нефизического параметра – максимальной энергии мягкого тормозного фотона.

В разделе 2.5 описаны возможности разработанной численной программы (gsAPV) прецизионного учета однопетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния. Приведены численные результаты для низких энергий E-158 (SLAC), MOLLER (JLab) и для планируемых сверхвысоких энергий на ILC.

Физический эффект, обусловленный вкладом C ($C = 0, \text{NLO}, \dots$), опреде-

ляется с помощью относительной поправки:

$$\delta_A^C = \frac{A_1^C - A_1^0}{A_1^0} = \frac{D_A^C - \delta^C}{1 + \delta^C}, \quad \text{где } \delta^C = \frac{\sigma_{00}^C}{\sigma_0^0}, \quad D_A^C = \frac{\sigma_L^C - \sigma_R^C}{\sigma_L^0 - \sigma_R^0}. \quad (9)$$

Индекс 00 соответствует сечению рассеяния неполяризованных частиц.

Все результаты получены на высоком уровне точности: в частности, сверены результаты, полученные в компактной аналитической и в точной (компьютерные коды) формах. В качестве тестирования точности проверена независимость численного результата от выбора ренормализационных условий РУД или РУХ в рамках схемы перенормировки на массовой поверхности, для этого подробно проанализирована структура слабых вкладов в поправку δ_A^C как для низких энергий (SLAC, JLab), так и для сверхвысоких (ILC) энергий. Расчеты в РУХ проведены с помощью FORTRAN-программы `rcAPV` (Radiative Corrections to parity-violating asymmetry A_{PV}).

Эффект рассматриваемых однопетлевых электрослабых поправок иллюстрируется рис. 4, где изображены относительная слабая (сплошная кривая) и электромагнитная (штриховая кривая, при энергии мягкого тормозного фотона $E_\gamma \leq \omega = 0.05\sqrt{s}$) поправки к борновской асимметрии A_1^0 в зависимости от \sqrt{s} при $\theta = 90^\circ$. Рисунок захватывает как область низких энергий (кинематические точки экспериментов MOLLER и E-158 обозначены последовательно слева направо), так и сверхвысоких энергий ILC. Точечная кривая, обозначенная цифрой 1, соответствует РУХ и асимптотическому расчету (approximate calculation, AC). Незначительное расхождение на краях обусловлено: слева – численной нестабильностью компьютерной программы (FeynArts/FormCalc) точного расчета (exact calculation, EC), справа – тем, что AC перестает работать в области $\sqrt{s} \geq m_W$. Кроме этого, в области сверхвысоких энергий результат [20] для слабой поправки к асимметрии совпадает с асимптотическим результатом, полученным в работе [15] (соответствует точечной кривой, обозначенной цифрой 2). При энергиях $\sqrt{s} \geq 50$ ГэВ достигается также превосходное согласие с результатами Деннера и Поццорини.

В **главе 3** произведена оценка двухпетлевых радиационных эффектов в эксперименте MOLLER. Необходимость в расчете двухпетлевых поправок обусловлена его высокой экспериментальной точностью. В **разделе 3.2** приведены основные обозначения, объяснена кинематика и структура сечений. Дифференциальное сечение на двухпетлевом уровне выглядит так:

$$\sigma = \frac{\pi^3}{2s} (M_0 M_0^+ + 2 \operatorname{Re} M_1 M_0^+ + M_1 M_1^+ + 2 \operatorname{Re} M_2 M_0^+), \quad (10)$$

где $M_0 M_0^+$ определяет сечение в борновском приближении σ^0 , $\operatorname{Re} M_1 M_0^+$ – сечение с точностью до однопетлевой ЭСП σ_1 (глава 2), $M_1 M_1^+$ – Q -часть

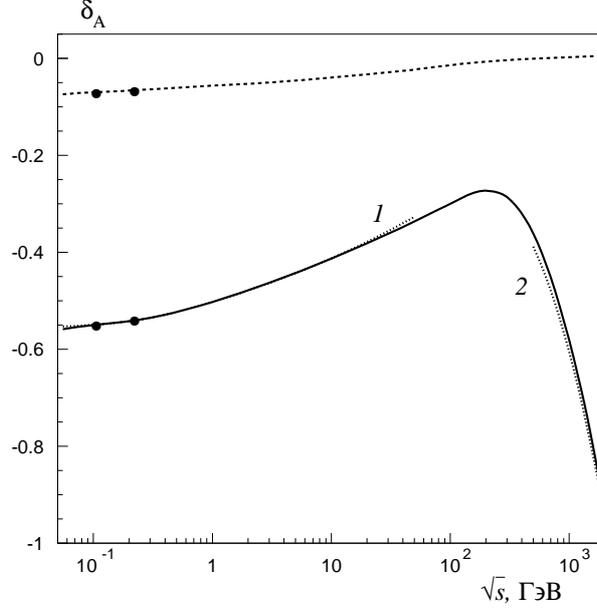


Рисунок 4 – Относительная слабая (сплошная и точечные кривые) и электромагнитная (штриховая кривая) поправки к A_1^0 в зависимости от \sqrt{s} при $\theta = 90^\circ$.

(quadratic) двухпетлевой поправки σ_Q^V , $\text{Re}M_2M_0^+$ – T -часть (Two-loop) двухпетлевой поправки σ_T^V .

Далее в **разделе 3.3** в единых обозначениях описана структура амплитуд M_1 и M_2 и решается проблема сокращения инфракрасной расходимости на одно- и двухпетлевом уровнях. Подробно рассчитывается вклад тормозного излучения двух тормозных фотонов, пример диаграмм с излучением двух фотонов из первой электронной линии (пучка) приведен на рис. 3 (б,в). Складывая V - и R -вклады, получаем инфракрасно-конечный результат для первой петли:

$$\sigma_{\text{NLO}} = \sigma_1 + \sigma_1^\gamma = \frac{\alpha}{\pi}[R_1 + \delta_1^f]\sigma^0, \quad (11)$$

и второй петли

$$\sigma_{\text{NNLO}} = \sigma_Q^V + \sigma_T^V + \sigma_2^\gamma + \sigma^{\gamma\gamma} = \sigma_O^f + \sigma_B^f + \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2[\delta_Q^f + \delta_T^f]\sigma^0, \quad (12)$$

где

$$\sigma_O^f = \frac{\alpha}{\pi}R_1\sigma_{\text{NLO}}, \quad \sigma_B^f = -\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2(R_1^2 + R_2)\sigma^0,$$

$$R_1 = -4B \ln \frac{\sqrt{s}}{2\omega} - \left(\ln \frac{s}{m^2} - 1\right)^2 + 1 - \frac{\pi^2}{3} + \ln^2 \frac{u}{t}, \quad R_2 = \frac{8}{3}\pi^2 B^2.$$

Индекс f в относительных поправках δ^f означает “конечный (finite)” и указывает на инфракрасную сходимость поправок. В (11) и (12) вклад дает только

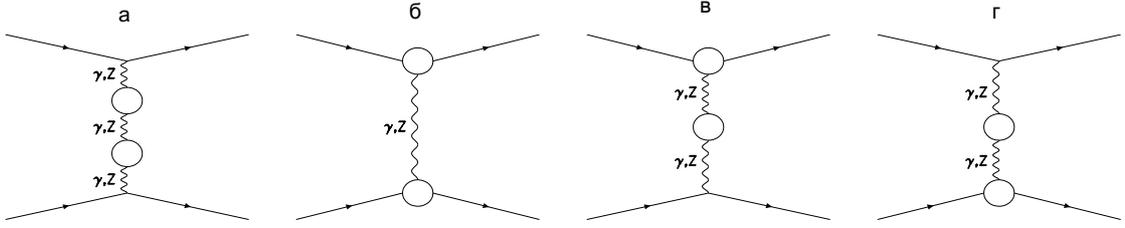


Рисунок 5 – Двухпетлевые диаграммы из калибровочно-инвариантного набора вершин и собственных бозонных энергий.

действительная часть амплитуды, так что $B = \ln \frac{tu}{m_s^2} - 1$. Проведен анализ физического вклада мнимой части амплитуды.

В разделе 3.4 представлен анализ структуры относительных поправок к асимметрии в Q - и T -частях и проведен численный анализ. В T -часть включены дающие значимый для MOLLER вклады калибровочно-инвариантного набора вершин и собственных бозонных энергий, представленного на рис. 5. Получены компактные аналитические выражения для относительных поправок к сечению и поляризационной асимметрии от отдельных вкладов.

В таблице ниже приведены выведенные вклады для относительных поправок к неполяризованному сечению и асимметрии для центральной кинематической точки MOLLER.

C	δ^C	D_A^C	δ_A^C	Опубликовано
NLO	-0.1145	-0.7302	-0.6953	[20]
O	0.0457	0.2911		[30]
B	-0.0848	-0.0848		
$(O + B)/2$	-0.0196	0.1032		
Q	0.0216	-0.0655		[25]
NLO+ $(O + B)/2 + Q$	-0.1125	-0.6925	-0.6535	
T_2	0.0119	-0.0956		[30]
двойные боксы	—	-0.0101		[28]
NLO+ $(O + B)/2 + T_2$	-0.1222	-0.7327	-0.6955	
NLO+NNLO	-0.1201	-0.6950	-0.6534	[30]

Таблица ясно иллюстрирует резкое изменение суммарной поправки к асимметрии при добавлении различных вкладов (экспериментально разделить которые невозможно) и то, что Q -часть и T -часть не компенсируют друг друга (как для δ^C , так и для D_A^C), так что вычисленные эффекты значительны. Предлагается следующая методика учета ЭСП для наблюдаемой в MOLLER асимметрии:

- рассчитать относительные поправки δ^C , D_A^C значимых вкладов,

- сложить их (это работает в силу аддитивности δ^C и D_A^C),
- рассчитать по формуле (9) физический эффект, т.е. поправку к асимметрии.

Проведенный численный анализ позволяет сделать однозначный вывод: в экспериментальной программе MOLLER учет двухпетлевых поправок необходим: так, асимметрия с учетом комбинированного эффекта одно- и двухпетлевых эффектов понижается на $\sim 65\%$, в то время как однопетлевой вклад давал понижение $\sim 69\%$, по предварительным данным экспериментальная точность MOLLER не будет превышать процента, что значительно меньше эффекта двухпетлевых вкладов. Что касается оценки прочих вкладов T -части, то часть этой работы уже проведена: двухпетлевые лестничные, декорированные и сложные боксы рассчитаны в [28], прочие типы диаграмм: боксы с вершинами и боксы с собственными энергиями [33], двойные вершины также оценены, вклады от них находятся на пределе экспериментальной чувствительности MOLLER и должны быть учтены.

В **главе 4** рассчитаны электрослабые поправки для процесса Дрелла–Яна

$$pp \rightarrow \gamma, Z \rightarrow l^+ l^- X \quad (13)$$

при больших инвариантных массах дилептона ($M \geq 1$ ТэВ), который интересен (см. **раздел 4.1**) с точки зрения возможности нахождения следов НФ (ТВО, композитности фермионов и калибровочных бозонов, сценариев с дополнительными размерностями и дополнительными калибровочными бозонами) в экспериментах на ЛНС. В настоящий момент имеются измерения дифференциального сечения $\frac{d\sigma}{dM}$ и дважды дифференциального сечения $\frac{d^2\sigma}{dM dy}$ (y – быстрота дилептона) при энергии $\sqrt{S} = 7$ ТэВ, $M \leq 1.5$ ТэВ и светимости 4.5 fb^{-1} , которые находятся в согласии с предсказаниями СМ при учете радиационных поправок с помощью FEWZ и POWHEG.

Чтобы оценить поправки быстро и точно (что важно на краях кинематической области, особенно при больших \sqrt{S} , M , где могут возникнуть вычислительные проблемы), полезно иметь компактные, не зависящие от нефизических параметров формулы. Для формул слабой части в главах 4–6 используются судаковские логарифмы (SL), $l_{i,x} = \ln \frac{m_i^2}{|x|}$ ($i = Z, W$; $x = s, t, u$), для КЭД-части – коллинеарные логарифмы (CL) $\ln \frac{m_f^2}{|x|}$ ($f = e, \mu, q$).

Для упругого партонного рассеяния $q(p_1) + \bar{q}(p_2) \rightarrow \gamma, Z \rightarrow l^+(k_1) + l^-(k_2)$ (в скобках приведены 4-импульсы частиц) вводим набор инвариантов Мандельштама:

$$s = (p_1 + p_2)^2, \quad t = (p_1 - k_1)^2, \quad u = (k_1 - p_2)^2. \quad (14)$$

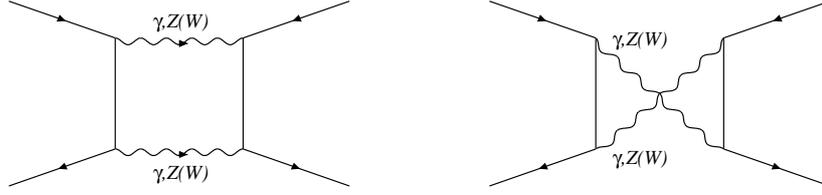


Рисунок 6 – Фейнмановские диаграммы вкладов боксов в процесс (13) на кварковом уровне: слева – прямой бокс, справа – перекрестный

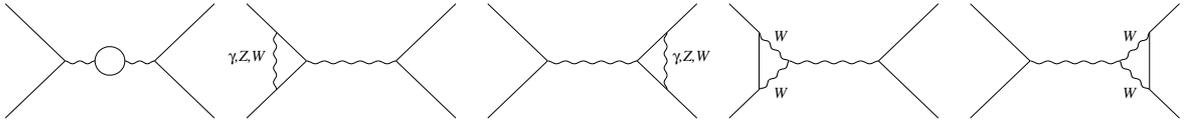


Рисунок 7 – Фейнмановские диаграммы для вкладов бозонных собственных энергий и вершинного вклада в процесс (13) на кварковом уровне

В разделе 4.2 вводятся обозначения и рассчитывается борновское сечение процесса (13). Оно (как и другие вклады с безрадиационной кинематикой) формируется по конволюционной формуле:

$$\sigma_V^H = \frac{1}{3} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \int_{-S}^0 dt \sum_{q=u,d,s,c,b} [f_q^A(x_1, Q^2) f_{\bar{q}}^B(x_2, Q^2) \sigma_V^{q\bar{q}}(t) + f_{\bar{q}}^A(x_1, Q^2) f_q^B(x_2, Q^2) \sigma_V^{\bar{q}q}(t)] \theta(s+t) \theta_M \theta_D,$$

где индекс V означает тип вклада, $f_q^H(x) dx$ – это вероятность обнаружить кварк q с долей импульса от x до $x + dx$ в адроне H , θ_M, θ_D – кинематические факторы (в форме θ -функций) определяющие физическую область реакции.

В разделе 4.3 рассчитываются вклады в ЭСП с безрадиационной кинематикой, которые представлены диаграммами рис. 6 и 7. На примере расчета вклада прямых боксов с массивными Z -бозонами подробно описан новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые поправки к различным типам диаграмм и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий. Так, в ультрарелятивистском приближении произведение прямого ZZ -бокса и борновской амплитуды обмена k -бозоном дает в сечении факто-

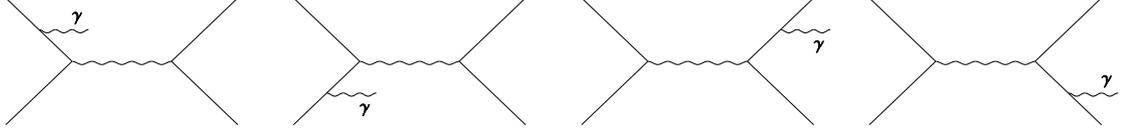


Рисунок 8 – Фейнмановские диаграммы для вкладов тормозного излучения на кварковом уровне

ризующуюся структуру вида:

$$D^{ZZ} = \frac{\text{Tr}[\gamma^\alpha \hat{p}_2 \gamma_\mu (\hat{p}_1 - \hat{k}) \gamma_\nu \rho_q^{ZZ,k}(p_1)] \text{Tr}[\gamma_\alpha \hat{k}_2 \gamma^\mu (\hat{k} - \hat{k}_1) \gamma^\nu \rho_l^{ZZ,k}(k_1)]}{((q-k)^2 - m_Z^2)(k^2 - m_Z^2)(k^2 - 2k_1 k)(k^2 - 2p_1 k)}, \quad (15)$$

где $\rho^{i,j}(p) = (v^i - a^i \gamma_5) \rho(p) (v^j + a^j \gamma_5)$, $\rho(p)$ – матрицы плотности, $q = k_1 + k_2$. Чтобы выделить часть, дающую численно значимый эффект в области $|x| \gg m_Z^2$, проводится эквивалентное преобразование:

$$D^{ZZ} = (D_{k \rightarrow 0}^{ZZ} + D_{k \rightarrow q}^{ZZ}) + (D^{ZZ} - D_{k \rightarrow 0}^{ZZ} - D_{k \rightarrow q}^{ZZ}) = D_1^{ZZ} + D_2^{ZZ}. \quad (16)$$

Интегрирование D_1^{ZZ} по 4-импульсу k проводится любым прямым методом, например, с помощью параметризации Фейнмана, причем судаковские логарифмы содержатся только в этом слагаемом. Слагаемое D_2^{ZZ} удобно вычислять методом Каханэ (интегрирования инфракрасно-конечной 4-точечной функции КЭД). В результате получаем:

$$\frac{i}{(2\pi)^2} \int d^4 k D_1^{ZZ} = -\frac{2}{s} (b_+^{ZZ,k} t^2 + b_-^{ZZ,k} u^2) \left(\frac{\pi^2}{3} + \frac{1}{2} \ln^2 \frac{m_Z^2}{|t|} \right), \quad (17)$$

$$\frac{i}{(2\pi)^2} \int d^4 k D_2^{ZZ} = b_-^{ZZ,k} u \ln \frac{s}{|t|} + \left(b_-^{ZZ,k} \frac{t^2 + u^2}{2s} + b_+^{ZZ,k} \frac{t^2}{s} \right) \ln^2 \frac{s}{|t|}, \quad (18)$$

где $b_\pm^{n,k} = \lambda_{q+}^{n,k} \lambda_{l+}^{n,k} \pm \lambda_{q-}^{n,k} \lambda_{l-}^{n,k}$. Проведенное отдельное исследование [13] показывает на партонном уровне хорошее согласие всех вкладов в ЭСП с известными результатами группы SANC и ZGRAD.

В конце главы вычислено сечение мягких тормозных фотонов, которое представлено диаграммами рис. 8.

В **главе 5** изучаются радиационные эффекты в ведущем логарифмическом приближении для процесса Дрелла–Яна. В **разделе 5.2** разобрана радиационная кинематика и фазовый объем реакции с тормозным фотоном

$$I_\Omega^6[A] = \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \iiint_\Omega dt dv dz du_1 \frac{1}{\pi \sqrt{R_{u_1}}} \theta(\hat{R}_{u_1}) \theta_M^R \theta_D^R A, \quad (19)$$

где вводятся радиационные инварианты $z = 2k_1p$, $v = 2k_2p$, $z_1 = 2p_1p$, $u_1 = 2p_2p$, p – 4-импульс тормозного фотона и R_{u_1} – определитель Грама.

Далее объяснено, как сечение перестраивается в трижды дифференциальную форму:

$$\sigma_C \rightarrow \sigma_C^{(3)} \equiv \frac{d^3\sigma_C}{dMdyd\psi}, \quad (20)$$

где $y \equiv |y(l^-l^+)|$ – быстрота дилептона, ψ – косинус угла между \vec{P}_A и \vec{k}_1 . Для построения безрадиационной части вычисляется необходимый якобиан перехода:

$$J_N = \frac{D(x_1, x_2, t)}{D(M, y, \psi)} = \frac{4M^3 e^{2y}}{S[1 + \psi + (1 - \psi)e^{2y}]^2}. \quad (21)$$

Аналогично рассчитывается якобиан для радиационной части, который выглядит так:

$$J_R^{(3)} = \frac{4Me^{2y}}{S} \frac{(v + M^2)(z_1 + M^2)(u_1 + M^2)}{[(1 + \psi)(z_1 + M^2) + (1 - \psi)e^{2y}(u_1 + M^2)]^2}. \quad (22)$$

В разделе 5.3 получены формулы в ведущем логарифмическом приближении для реакции Дрелла–Яна. В качестве примера приведем сечение части, соответствующей излучению из начального состояния (ISR), в т. н. u_1 -пике, для которого выполняется соотношение $p = (1 - \eta)p_2$, т. е. фотон коллинеарен \vec{p}_2 :

$$\begin{aligned} \sigma_R^{(3), u_1\text{-peak}} &= \frac{1}{3} J_N \frac{\alpha^3}{s_B^2} \sum_{\chi=\pm} \sum_{i,j} \sum_q Q_q^2 \lambda_{q\chi}^{i,j} \lambda_{l\chi}^{i,j} \Pi^i \Pi^{j*} (t_B^2 + \chi u_B^2) \times \\ &\times \int_{x_2^B}^{1-2\omega/M} \frac{d\eta}{\eta-1} \left[f_q^A(x_1^B) f_{\bar{q}}^B\left(\frac{x_2^B}{\eta}\right) + \chi f_{\bar{q}}^A(x_1^B) f_q^B\left(\frac{x_2^B}{\eta}\right) \right] \left(2 - \frac{1 + \eta^2}{\eta} \ln \frac{s}{m_q^2} \right), \end{aligned}$$

где $\Pi^j = (s - z - v - m_j^2 + im_j\Gamma_j)^{-1}$, а индексом B обозначаются выражения в борновской кинематике. Также в этом разделе вычислен второй пик (z_1 -пик) ISR, два пика (z -пик и v -пик) излучения из конечного состояния (FSR) и все интерференционные слагаемые.

Проблема массовой сингулярности кварков решается в рамках $\overline{\text{MS}}$ -схемы. Вид сечения, которое следует вычесть, чтобы получить физически обоснованное

ванный результат (индексы A и B для простоты опущены):

$$\sigma_{\text{QS}} = \frac{1}{3} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \int_{-S}^0 dt \int_0^{1-2\omega/M} d\eta \sum_{q=u,d,s,c,b} \left[\left(f_q(x_1, Q^2) \Delta \bar{q}(x_2, \eta) + \Delta q(x_1, \eta) f_{\bar{q}}(x_2, Q^2) \right) \sigma_0^{q\bar{q}}(t) + (q \leftrightarrow \bar{q}) \right] \theta(s+t) \theta_M \theta_D, \quad (23)$$

где

$$\Delta q(x, \eta) = \frac{\alpha}{2\pi} Q_q^2 \left[\frac{1}{\eta} f_q\left(\frac{x}{\eta}, M_{\text{sc}}^2\right) \theta(\eta - x) - f_q(x, M_{\text{sc}}^2) \right] \times \times \frac{1 + \eta^2}{1 - \eta} \left(\ln \frac{M_{\text{sc}}^2}{m_q^2} - 2 \ln(1 - \eta) - 1 \right), \quad (24)$$

M_{sc} – масштаб факторизации.

Далее, в разделе 5.4 с помощью программы READY (Radiative corrections to lArge invariant mass Drell–Yan process – радиационные поправки для процесса Дрелла–Яна с большими инвариантными массами) проводится расширенный численный анализ. Используется следующий набор предписаний:

- энергия LHC $\sqrt{S} = 14$ ТэВ;
- электрослабые параметры СМ и лептонные массы из обзора Particle Data Group;
- для массы хиггсовского бозона выбирается $m_H = 125$ ГэВ;
- все ароматы валентных и “морских” кварков, кроме t ;
- MRST2004QED–набор функций кварковых распределений с выбором $Q = M_{\text{sc}} = m_Z$ (сравнение с CTEQ6 и MSTW2008 существенного отличия не обнаружило);
- экспериментальные ограничения для детектора CMS

$$y(l)^* = -\ln \operatorname{tg} \frac{\theta^*}{2} = 2.5, \quad \zeta^* = \cos \theta^* \approx 0.9866, \quad p_T(l) \geq 20 \text{ ГэВ};$$

- т.н. чистая схема (“bare” setup) требований идентификации лептонов: нет “размазывания” (smearing) и учета условия рекомбинации детектируемого лептона и радиационного фотона.

Доказывается независимость результата от нефизических параметров: максимальной энергии мягкого фотона ω и кварковых масс.

Сравнение результатов READY для $d\sigma/dM$ с результатами групп HORACE, SANC, ZGRAD2 показывает хорошее согласие (на уровне $\sim 1\%$) при $M \geq 1$ ТэВ.

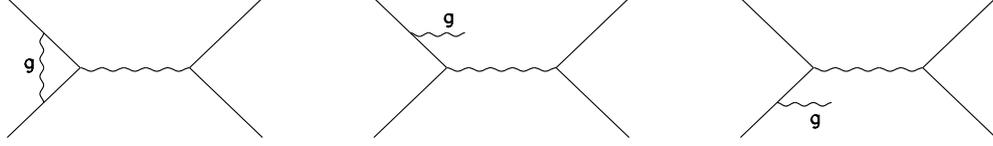


Рисунок 9 – Фейнмановские диаграммы для процесса с глюонной вершинной функцией и глюонным тормозным излучением.

Исследуется относительная поправка для трижды дифференциального сечения, которая определяется так:

$$\delta_{\text{tot}} = \sigma_{\text{tot}}^{(3)} / \sigma_0^{(3)}. \quad (25)$$

Как пример, зависимость δ_{tot} от значений M , y и ψ при $l = \mu$ и $\sqrt{S} = 14$ ТэВ приведена в таблице ниже.

y	ψ	$M=1$ ТэВ	$M=2$ ТэВ	$M=3$ ТэВ	$M=5$ ТэВ
0.0	-0.8	-0.035	-0.115	-0.191	-0.329
	-0.4	-0.043	-0.116	-0.171	-0.264
	0.0	-0.036	-0.107	-0.154	-0.231
	0.4	-0.043	-0.116	-0.171	-0.264
	0.8	-0.035	-0.115	-0.191	-0.329
0.6	-0.8	0.008	-0.074	-0.146	-0.101
	-0.4	-0.014	-0.083	-0.138	-0.114
	0.0	-0.024	-0.083	-0.128	-0.142
	0.4	-0.028	-0.093	-0.145	-0.223
	0.8	-0.052	-0.137	-0.207	-0.335
1.2	0.0	0.003	-0.013	-0.015	
	0.4	0.009	-0.018	-0.045	
	0.8	-0.024	-0.103	-0.183	

В **главе 6** изучены однопетлевые КХД поправки для процесса Дрелла–Яна на ЛНС. Часть сечения, ответственную за ISR (диаграммы приведены на рис.9), получена в **разделе 6.2** из результатов КЭД с использованием замены постоянной тонкой структуры α на константу сильного взаимодействия α_s согласно правилу:

$$Q_q^2 \alpha \rightarrow \sum_{a=1}^{N^2-1} t^a t^a \alpha_s = \frac{N^2-1}{2N} I \alpha_s \rightarrow \frac{4}{3} \alpha_s, \quad (26)$$

где $2t^a$ – матрицы Гелл-Мана, а $N = 3$. В разделе приведена радиационная кинематика и фазовый объем реакции с тормозным глюоном, получены

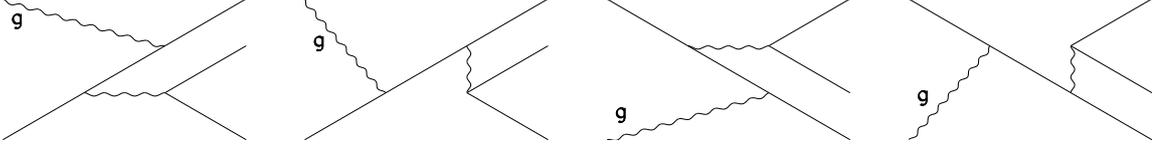


Рисунок 10 – Фейнмановские диаграммы gq (или $g\bar{q}$)-типа (первые две) и qg (или $\bar{q}g$)-типа для процесса с инверсным глюонным излучением.

формулы для ведущего логарифмического приближения, сокращаются все нефизические параметры.

Инверсное глюонное излучение (IGE) (диаграммы приведены на рис.10) рассчитано в **разделе 6.3**. Приведем конволюционную формулу для инверсных вкладов gq -типа:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & \frac{1}{3} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \int dudvdz_1 \frac{du_1}{\pi \sqrt{R_{u_1}}} \sum_q f_g^A(x_1, Q^2) f_q^B(x_2, Q^2) \times \\ & \times \frac{\alpha^2 \alpha_s}{4s^2} \sum_{i,j=\gamma,Z} \frac{4}{3} \Pi^i \Pi^{j*} \overline{\sum} |R|^2 \theta(R_{u_1}) \theta_M^R \theta_D^R. \end{aligned} \quad (27)$$

Выделена ведущая логарифмическая часть инверсного глюонного излучения. Для z_1 -пика вкладов gq (или $g\bar{q}$)-типа она выглядит так:

$$\begin{aligned} \sigma_1^{(3)} = & \frac{1}{3} J_N \frac{4 \alpha^2 \alpha_s}{3 s_B^2} \sum_{\chi=+,-} \sum_{i,j=\gamma,Z} \sum_q \Pi^i \Pi^{j*} \chi \lambda_{q\chi}^{i,j} \lambda_{l\chi}^{i,j} (t_B^2 + \chi u_B^2) \times \\ & \times \int_{x_1^B}^1 d\eta f_g^A\left(\frac{x_1^B}{\eta}, Q^2\right) f_q^B(x_2^B, Q^2) S_\chi, \end{aligned} \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} S_+ = & S_- - \frac{1 - \eta(1 - \eta)}{\eta^2} \frac{2t_B u_B^2}{s_B(t_B^2 + u_B^2)}, \\ S_- = & \frac{(1 - \eta)^2 + \eta^2}{\eta} \ln \frac{(\eta - 1)u_B}{\eta m_q^2} + 2(1 - \eta) - \frac{1 - \eta u_B}{\eta s_B}. \end{aligned} \quad (29)$$

Устранение кварковой сингулярности из сечения IGE проводится аналогично результатам предыдущей главы и сводится к замене:

$$\sigma_1^{(3)} - \sigma_{1, \text{QS}}^{(3)} = \sigma_1^{(3)}(m_q \rightarrow M_{\text{sc}}), \quad (30)$$

что справедливо с учетом условия $Q^2 = M_{\text{sc}}^2$. Аналитически и численно доказана независимость от нефизических параметров ω и кварковых масс.

В разделе 6.4 изучается зависимость относительных КХД-поправок $\delta_{\text{tot}} = \delta_{qq} + \delta_{\text{IGE}}$ от значений M , y и ψ . Так, при наборе предписаний, которые использовались в предыдущей главе и партонных распределениях MSTW2008 они принимают значения, приведенные в таблице:

y	ψ	$M=1$ ТэВ	$M=2$ ТэВ	$M=3$ ТэВ	$M=5$ ТэВ
0.0	-0.8	0.320 - 0.134	0.376 - 0.086	0.442 - 0.068	0.625 - 0.054
	-0.4	0.320 - 0.089	0.376 - 0.070	0.442 - 0.061	0.625 - 0.051
	0.0	0.320 - 0.073	0.376 - 0.065	0.442 - 0.059	0.625 - 0.051
	0.4	0.320 - 0.089	0.376 - 0.070	0.442 - 0.061	0.625 - 0.051
	0.8	0.320 - 0.134	0.376 - 0.086	0.442 - 0.068	0.625 - 0.054
0.6	-0.8	0.456 - 0.267	0.504 - 0.171	0.582 - 0.145	0.770 - 0.163
	-0.4	0.453 - 0.196	0.500 - 0.132	0.577 - 0.114	0.773 - 0.123
	0.0	0.453 - 0.140	0.492 - 0.101	0.569 - 0.090	0.767 - 0.090
	0.4	0.443 - 0.078	0.489 - 0.068	0.565 - 0.064	0.759 - 0.061
	0.8	0.429 - 0.059	0.478 - 0.054	0.555 - 0.052	0.754 - 0.049
1.2	0.0	0.595 - 0.295	0.676 - 0.234	0.849 - 0.215	
	0.4	0.596 - 0.205	0.677 - 0.161	0.850 - 0.147	
	0.8	0.577 - 0.047	0.665 - 0.053	0.850 - 0.056	

В приложении А приведены справочные формулы, касающиеся свойств дилогарифма Спенса. **В приложении Б** приводятся выражения R для сечения тормозного излучения в процессе Дрелла-Яна в ультрарелятивистском приближении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана программа прецизионного учета полных однопетлевых и лидирующих двухпетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризованной асимметрии мёллеровского рассеяния (rcAPV) для современных экспериментов: E-158 (SLAC) [7], [8], [12], [59], [60], MOLLER (JLab) [9], [12], [20], [23]–[30], [32]–[34] и для планируемых экспериментов на ILC [15], [17], [24], [29]. Результаты получены в аналитической (компактной) и независимо в точной (компьютерные коды) формах, успешно проведена сверка с результатами других групп [15], [20], [24]. Численно и аналитически доказана независимость полученного результата от нефизических параметров [15], [20], [24] и независимость от ренормализационных условий в рамках схемы перенорми-

- ровки на массовой поверхности [24], [29]. Проведен подробный численный анализ, который показывает значительный масштаб полученных эффектов: в кинематике экспериментов на SLAC и в JLab асимметрия понижается на $\sim 69\%$, для коллайдерной постановки при $\sqrt{s}=1$ ТэВ имеет место понижение на $\sim 60\%$. Исследована зависимость радиационных эффектов от экспериментальных ограничений: [20], [24], [29], [32].
2. Рассчитаны двухпетлевые электрослабые радиационные поправки: квадрат однопетлевых вкладов и вклад, образующий калибровочно-инвариантный набор двухпетлевых вершинных диаграмм и бозонных собственных энергий, к наблюдаемой поляризованной асимметрии мёллеровского рассеяния для эксперимента MOLLER (JLab) [25]–[28], [30], [33]. Достигнуто согласие результатов для Q -части (двухпетлевого вклада, обусловленного квадратом однопетлевых диаграмм), полученных независимо с применением аналитических методов в компактной форме, удобной для анализа, и альтернативно, с использованием компьютерных кодов FeynArts, FormCalc, LoopTools и Form, что доказывает надежность проведенных расчетов: [25], [30]. Подробно разобрана структура относительной поправки к асимметрии, выработана новая эффективная методика сложения различных вкладов в наблюдаемую поляризованную асимметрию от одно- и двухпетлевых радиационных эффектов, которая позволяет контролировать точность учета радиационных эффектов: [30]. Численный анализ показывает значительный масштаб полученных эффектов: в кинематике MOLLER асимметрия с учетом комбинированного эффекта одно- и двухпетлевых эффектов понижается на $\sim 65\%$, в то время как однопетлевой вклад давал понижение $\sim 69\%$: [25], [27], [30].
 3. Разработан новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые поправки к различным типам диаграмм и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий [10, 13, 14]. Проведенное отдельное исследование показывает хорошее согласие с результатами групп SANC и ZGRAD для всех вкладов в однопетлевые ЭСП.
 4. Произведен новый детальный расчет в ведущем логарифмическом приближении жесткого тормозного излучения фотонов [18], глюонов [21] и инверсного глюонного излучения [22] для процесса Дрелла–Яна и расчет жесткого тормозного излучения фотонов [24] для поляризованного мёллеровского рассеяния при произвольных энергиях.
 5. Разработана программа быстрой и точной оценки однопетлевых электрослабых и КХД радиационных эффектов в процессе Дрелла–Яна

при больших инвариантных массах лептонной пары (READY) для экспериментов на коллайдере LHC с учетом экспериментальных условий установки CMS [14], [16], [18], [31], [61]. Произведено полное описание возможностей программы READY, приведены все формулы для вкладов в сечения и кинематических ограничений: [16], [18]. Произведена разносторонняя (численная и аналитическая) проверка независимости результатов от нефизических параметров, присутствующих в расчете (максимальной энергии мягких фотонов и кварковых масс). Численный анализ, осуществленный с помощью READY, показывает значительный масштаб радиационных эффектов: [14], [16], [18]. Важнейшей опцией READY является использование трижды дифференциальных сечений, дающее возможность корректировать экспериментальные данные в любой кинематической точке (или области) [18], [21], [22], [18], [31].

Рекомендации по практическому использованию результатов

К практическому использованию рекомендуются:

1. Разработанная новая программа (аналитическое описание и компьютерный FORTRAN-код `gsAPV`) прецизионного учета однопетлевых (глава 2) и двухпетлевых (глава 3) электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния, которая с успехом была использована в эксперименте E-158 в Стэнфордском центре линейного ускорителя SLAC (глава 2). Планируется внедрение кода `gsAPV` в программу обработки данных готовящегося эксперимента MOLLER в Лаборатории им. Джефферсона JLab и для планируемых экспериментов на Международном линейном коллайдере ILC. Проведенные работы по 1) сверке результатов, полученных разными методами, 2) сверке с результатами других групп, 3) по тестам аналитической и численной независимости полученного результата от нефизических параметров и 4) независимости от ренормализационных условий в рамках схемы перенормировки на массовой поверхности, и, наконец, 5) детально проработанной реализации методики сложения различных вкладов в наблюдаемую поляризационную асимметрию показывают гибкость и надежность предлагаемой программы и гарантируют ее успешную реализацию в этих экспериментальных программах.
2. Разработанный новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые

коррекции к различным типам диаграмм и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий, с успехом примененный для расчета электрослабых радиационных поправок к наблюдаемым величинам процесса Дрелла–Яна при больших инвариантных массах дилептона (глава 4), может быть применен для расчетов радиационных эффектов в целом ряду экспериментальных программ физики высоких энергий по изучению лептон-лептонного, лептон-адронного и адрон-адронного взаимодействия (например, для глубоконеупругого и упругого рассеяния лептонов на нуклонах, для рождения одиночных заряженных бозонов в адронных столкновениях, для реакции электрон-позитронной аннигиляции и т.д.). Гарантией надежности метода является специально проделанные исследования по сравнению с результатами других групп, которые показывают хорошее согласие для всех вкладов в ЭСП.

3. Программу (аналитическое описание и компьютерный FORTRAN-код READY) учета радиационного фона: электрослабых поправок (глава 5) и КХД-поправок (глава 6), в экспериментах по изучению процесса Дрелла–Яна при больших инвариантных массах лептонной пары, которая обеспечивает как хорошую точность, так и высокую скорость счета и удобна для экспериментаторов, планируется внедрить в программу обработки данных будущих экспериментов на установке CMS коллайдера LHC, с учетом ее экспериментальных ограничений. Проведенные работы по 1) выделению и анализу ведущего логарифмического приближения, 2) взаимной сверке расчетов различными методами, 3) сверке с результатами других групп, 4) по тестам на аналитическую и численную независимость полученного результата от нефизических параметров (максимальной энергии мягких фотонов, мягких глюонов и кварковых масс), 5) представлению наблюдаемых величин в виде трижды дифференциальных сечений, показывают гибкость, удобство пользования и надежность предлагаемой программы и гарантируют ее успешную реализацию в экспериментальной программе CMS LHC.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

1. Зыкунов, В.А. О влиянии радиационных поправок к адронному току на наблюдаемые величины в глубоконеупругом рассеянии поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах / В.А. Зыкунов, С.И. Тимошин, Н.М. Шумейко // Ядерная физика. – 1995. – Т. 58. – С. 2021–2028.
2. Зыкунов, В.А. Электрослабая поправка к поляризованному глубоконеупругому рассеянию (анти)нейтрино на нуклонах. Заряженный слабый ток / В.А. Зыкунов, С.И. Тимошин, Н.М. Шумейко // Ядерная физика. – 1997. – Т. 60. – С. 1415–1424.
3. Shumeiko, N.M. Investigation of the proton spin by electron-proton colliders / N.M. Shumeiko, S.I. Timoshin, V.A. Zykunov // Journal of Physics G. – 1997. – Vol. 23. – P. 1593–1608.
4. Зыкунов, В.А. Электрослабая поправка к поляризованному глубоконеупругому рассеянию (анти)нейтрино на нуклонах. Нейтральный слабый ток / В.А. Зыкунов, С.И. Тимошин, Н.М. Шумейко // Ядерная физика. – 1999. – Т. 62. – С. 723–727.
5. Zykunov, V.A. Electroweak corrections to the observables of W -boson production at RHIC / V.A. Zykunov // European Physical Journal direct C. – 2001. – Vol. 9. – P. 1–26.
6. Зыкунов, В.А. Радиационные поправки к наблюдаемым величинам рождения W -бозонов в столкновениях поляризованных адронов / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2003. – Т. 66. – С. 910–924.
7. Зыкунов, В.А. Электрослабые радиационные эффекты в поляризационном мёллеровском рассеянии / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2004. – Т. 67. – С. 1366–1379.
8. Kolomensky, Yu. Electroweak radiative corrections to parity-violating asymmetry in Møller scattering / Yu. Kolomensky, N. Shumeiko, J. Suarez, V. Zykunov // International Journal of Modern Physics A. – 2005. – Vol. 20. – P. 7365–7374.
9. Ilyichev, A.N. Lowest order QED radiative corrections to longitudinally polarized Møller scattering / A.N. Ilyichev, V.A. Zykunov // Physical Review D. – 2005. – Vol. 72, 033018. – P. 1–10.
10. Зыкунов, В.А. Радиационные поправки к процессу Дрелла–Яна при больших инвариантных массах дилептонной пары / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2006. – Т. 69. – С. 1557–1571.

11. Зыкунов, В.А. Прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе рождения димюонных пар с большой инвариантной массой на коллайдере LHC / В.А. Зыкунов // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39). – С. 79–81.
12. Afanasiev, A. MERADGEN 1.0: Monte Carlo generator for the simulation of radiative events in parity conserving doubly-polarized Møller scattering / A. Afanasiev, Eu. Chudakov, A. Ilyichev and V. Zykunov // Comput. Phys. Commun. – 2007. – Vol. 176. – P. 218–231.
13. Zykunov, V.A. Weak radiative corrections to Drell–Yan process for large invariant mass of di-lepton pair / V.A. Zykunov // Physical Review D. – 2007. – Vol. 75, 073019, P. 1–11.
14. Зыкунов, В.А. Полный расчет электрослабых поправок к процессу Дрелла–Яна для коллайдера LHC / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2008. – Т. 71. – С. 757–770.
15. Зыкунов, В.А. Полный расчет электрослабых поправок для поляризационного мёллеровского рассеяния при высоких энергиях / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2009. – Т. 72. – С. 1540–1554.
16. Mossolov, V.A. Electroweak Corrections to the Drell–Yan Process at LHC / V.A. Mossolov, N.M. Shumeiko, J.G. Suarez, V.A. Zykunov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2009. – Vol. 12, №2, P. 106–118.
17. Babich, A.A. Polarized Møller scattering at ILC energies / A.A. Babich, V.A. Zykunov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2009. – Vol. 12, №4, P. 328–333.
18. Зыкунов, В.А. Электрослабые поправки лидирующего порядка к процессу Дрелла–Яна в эксперименте CMS на LHC / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2010. – Т. 73. – С. 1617–1637.
19. Алексеев, А.Г. Адронные радиационные поправки к наблюдаемым асимметриям экспериментов G0 и QWeak / А.Г. Алексеев, С.Г. Барканова, В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2010. – Т. 73. – С. 2077–2081.
20. Aleksejevs, A. Electroweak radiative corrections for polarized Møller scattering at future 11 GeV JLab experiment / A. Aleksejevs, S. Barkanova, A. Ilyichev, V. Zykunov // Physical Review D. – 2010. – Vol. 82, 093013, P. 1–16.
21. Зыкунов, В.А. КХД-поправки к процессу Дрелла–Яна для коллайдера LHC. Вершинные функции и глюонное тормозное излучение / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2010. – Т. 73. – С. 1269–1284.
22. Зыкунов, В.А. Вклад инверсного глюонного излучения в КХД-поправки к процессу Дрелла–Яна для экспериментов на LHC / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2011. – Т. 74. – С. 72–84.

23. Aleksejevs, A. Electroweak radiative corrections for polarized Møller scattering at one loop and beyond / A. Aleksejevs, S. Barkanova, V. Zykunov // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 29–33.
24. Алексеев, А.Г. Прецизионный расчет наблюдаемых поляризационного мёллеровского рассеяния: от энергии JLab до ILC / А.Г. Алексеев, С.Г. Барканова, В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2012. – Т. 75. – С. 231–248.
25. Aleksejevs, A. Quadratic electroweak corrections for polarized Møller scattering / A. Aleksejevs, S. Barkanova, Y. Kolomensky, E. Kuraev, V. Zykunov // Physical Review D. – 2012. – Vol. 85, 013007.
26. Ahmadov, A.I. One-loop chiral amplitudes of Møller scattering process / A.I. Ahmadov, Yu.M. Bystritskiy, E.A. Kuraev, A.N. Ilyichev, V.A. Zykunov // European Physical Journal C. – 2012. – Vol. 72:1977. – P. 1–8.
27. Aleksejevs, A. High-precision calculations of electroweak radiative corrections for polarized Møller scattering at one loop and beyond / A. Aleksejevs, S. Barkanova, Y. Kolomensky, E. Kuraev, V. Zykunov // Nuovo Cimento – 2012. – Vol. 35. – P. 192–197.
28. Aleksejevs, A.G. Double-box contributions to Møller scattering in the Standard Model / A.G. Aleksejevs, S.G. Barkanova, Yu.M. Bystritskiy, A.N. Ilyichev, E.A. Kuraev, V.A. Zykunov // European Physical Journal C. – 2012. – Vol. 72. – P. 2249–2269.
29. Aleksejevs, A. One-loop electroweak corrections for polarized Møller scattering at different renormalization schemes and conditions / A. Aleksejevs, S. Barkanova, A. Ilyichev, Yu. Kolomensky, V. Zykunov // Physics of Particles and Nuclei – 2013. – Vol. 44. – P. 161–174.
30. Алексеев, А.Г. Оценка двухпетлевых радиационных эффектов в эксперименте MOLLER // А.Г. Алексеев, С.Г. Барканова, В.А. Зыкунов, Э.А. Кураев // Ядерная физика. – 2013. – Т. 76. – С. 942–954.
31. Zykunov, V.A. Electroweak and QCD Radiative Corrections to Drell–Yan Process for Experiments at the Large Hadron Collider / V.A. Zykunov // Journal of Physics. C. G. – 2014. – Vol. 523. 012053 – P. 1–9.
32. Зыкунов, В.А. Радиационное мёллеровское рассеяние с поляризованными частицами / В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78. – С. 489–498.
33. Aleksejevs, A. NNLO Electroweak Corrections for Polarized Møller Scattering: One-Loop Insertions to Boxes / A. Aleksejevs, S. Barkanova, Yu. Bystritskiy, E. Kuraev, V. Zykunov // Physics of Particles and Nuclei Letters – 2015. – Vol. 12. – P. 645–656.

34. Алексеев, А.Г. Техника учета излучения жестких фотонов в четырехфермионном процессе // А.Г. Алексеев, С.Г. Барканова, В.А. Зыкунов // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79. – С. 20–36.

Материалы конференций:

35. Zykunov, V.A. One-loop electroweak corrections to polarization neutrino-N DIS / V.A. Zykunov // Actual Problems of Particle Physics: Proc. of Int. School-Seminar, Gomel, July 30 – August 8, 1997 / Gomel–JINR; Ed. by P. Kuzhir [et al.]. – Dubna, 1998. – V. 2. – P. 44–47.
36. Зыкунов, В.А. Электрослабая поправка к поляризационным асимметриям в глубоко неупругом лепто-нуклонном рассеянии с заряженным током / В.А. Зыкунов, С.И. Тимошин С.И. // Труды 2-ой открытой научной конференции ОМУС, ОИЯИ, Дубна, 2–6 марта 1998 / ОИЯИ; под ред. В.А. Андреев [и др.]. – Дубна, 1998. – С. 92–94.
37. Zykunov, V.A. Spin effects of the W -boson production in hadron-hadron collisions / V.A. Zykunov // Spacetime and Substance J. – 2000. – № 4/4. – P. 191–195.
38. Akushevich, I. Electroweak radiative correction to single W -boson production in hadron-hadron collisions / I. Akushevich, A. Ilychev, N. Shumeiko, V. Zykunov // Actual Problems of Particle Physics: Proc. of Int. School-Seminar, Gomel, July 30 – August 8, 1999 / Gomel/JINR; Ed. by A. Bogush [et al.]. – Dubna, 2000. – V. 2. – P. 144–155.
39. Akushevich, I. One-loop electroweak correction to the single W -production in hadron-hadron collisions / I. Akushevich, A. Ilychev, N. Shumeiko, V. Zykunov // NPC'S'99: Proc. of 8th Annual Seminar, Minsk, May 17–20, 1999 / Minsk; Ed. by L.Babichev and V. Kuvshinov. – Institute of Physics, 2000. – P. 212–221.
40. Zykunov, V.A. Lowest order electroweak radiative corrections to the single W -production in polarized hadron-hadron collisions / V.A. Zykunov // QFTHEP'2000: Proc. of the XV Int. Workshop, Tver, Russia, 7–13 Sept, 2000 / Ed. by M. Dubinin, V. Savrin. – М.: МГУ, 2001, P. 399–405.
41. Zykunov, V. Lowest order radiative corrections to W -production / V. Zykunov, I. Akushevich, A. Ilychev, N. Shumeiko // Physics Program with the CMS Detector: Proc. of 6th annual RDMS CMS Collaboration meeting, Moscow, 19–21 Dec., 2001 / MSU; Ed. by A. Zarubin. – Dubna, 2001. – P. 529–533.

42. Zykunov, V.A. Electroweak radiative corrections to the spin single asymmetries of the W-boson production at RHIC / V.A. Zykunov // Proc. of IX-th Workshop on High energy spin physics, Dubna, 2–7 August, 2001 / JINR; Ed. by A.V. Efremov and O.V. Teryaev. – Dubna, 2002. – P. 57–61.
43. Akushevich, I. Electroweak radiative corrections to the single W-production at the *pp*-colliders I. Akushevich, A. Ilychev, N. Shumeiko, V. Zykunov // Actual Problems of Particle Physics: Proc. of 6th Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, Aug. 7–16, 2001 / JINR; Ed. by A. Bogush [et al.]. – Dubna, 2002. – V. 2. – P. 234–246.
44. Zykunov, V.A. Electroweak radiative corrections to Moller scattering asymmetry for SLAC experiment E158 / V.A. Zykunov // Actual Problems of Microworld Physics: Proc. of Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, 28 July – 8 August, 2003 / Ed. by P. Starovoitov. – Dubna, 2004. – V. 2. – P. 255–266.
45. Zykunov, V.A. Radiative corrections to Moller scattering asymmetry for SLAC experiment E158 / V.A. Zykunov // Proc. of X Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, 16–20 Sept. 2003 / JINR; Ed. by A.V. Efremov and O.V. Teryaev. – Dubna, 2004. – P. 220–224.
46. Zykunov, V.A. Electroweak radiative corrections to the Parity-Violating Asymmetry for SLAC experiment E158 / V.A. Zykunov // High Energy Physics and Quantum Field Theory: Proc. of the XVIII Int. Workshop, Saint-Petersburg, 17–23 June 2004 / Ed. by M. Dubinin, V. Savrin. – M.: MAKC Ипеес, 2005. – С. 141–147.
47. Zykunov, V.A. Weak radiative corrections to the Drell–Yan process for large invariant mass of a dilepton pair / V.A. Zykunov // 33rd International Conference on High Energy Physics (ICHEP 06), Moscow, 26 Jul. - 2 Aug. 2006.: 2v. / Moscow 2006, ICHEP; Ed: A. Sissakian [et al.]. – Singapore, World Scientific, 2007. – P. 746–749.
48. Afanasiev, A. Monte Carlo generator MERADGEN for radiative event simulation within longitudinally polarized Moller scattering / A. Afanasiev, Eu. Chudakov, A. Ilyichev, V. Zykunov [et al.]. // Actual Problems of Microworld Physics: Proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, 25 July – 5 Aug., 2005 / JINR; Ed. by V. Mossolov. – Dubna, 2007. – V. 2. – P. 139–149.
49. Ilyichev, A. Electromagnetic radiative corrections for polarized Moller scattering: ultrarelativistic approximation / A. Ilyichev, V. Zykunov // Actual Problems of Microworld Physics: Proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, 25 July – 5 Aug., 2005 / JINR; Ed. by V. Mossolov. – Dubna, 2007. – V. 2. – P. 150–161.

50. Zykunov, V.A. Complete calculation of electroweak corrections to the Drell-Yan process for LHC / V.A. Zykunov // Actual Problems of Particle Physics: Proc. of the IX Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 23 – Aug. 3, 2007. Ed. by A. Ilyichev [et al.]. – Dubna: JINR, 2008. – V. 2. – P. 183–197.
51. Ilyichev, A. Monte Carlo generator READYGEN for the simulation of radiative effects in Drell-Yan process / A. Ilyichev, N. Shumeiko, V. Zykunov // Actual Problems of Particle Physics: Proc. of the IX Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 23 – August 3, 2007. Ed. by A. Ilyichev [et al.]. – Dubna: JINR, 2008. – V. 2. – P. 198–205.
52. Aleksejevs, A. Precision theory for precision measurements: Tests of the standard model via parity-violating electron-proton and Moeller scattering / A. Aleksejevs, S. Barkanova, A. Ilyichev, V. Zykunov // ICHEP2010: Proc. of 35th International Conference on High Energy Physics, Paris, France, 21–28 Jul 2010. – P. 84–86.
53. Зыкунов, В.А. Поляризационное мёллеровское рассеяние от энергий JLab до ILC / В.А. Зыкунов // Гомельский научный семинар по теор. физике, посв. 100-летию со дня рожд. Ф. И. Федорова, 20–22 июня 2011 г.: [материалы] / редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 272 с. – С. 131–136.
54. Aleksejevs, A. NLO and NNLO EWC for PV Moller Scattering / A. Aleksejevs, S. Barkanova, E. Kuraev, V. Zykunov // ICHEP2012: Proc. of 36th International Conference on High Energy Physics, Melbourne, Australia, 4–11 July 2012. – P. 470–475, arXiv:1301.1384 [hep-ph]
55. Зыкунов, В.А. Радиационное мёллеровское рассеяние с поляризованными частицами / В.А. Зыкунов // Актуальные вопросы теоретической физики, физики конденсированных сред и астрофизики: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Брест, 2–3 окт. 2014 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина; под общ. ред. А.В. Демидчика. – Брест, БрГУ, 2014. – 126 с. – С. 40–44.

Тезисы докладов:

56. Timoshin, S.I. Application of REDUCE to the investigation of the radiative effects in the DIS of polarized leptons on nucleons / S.I. Timoshin, V.A. Zykunov // CAS'97: Proc. of Int. Sc. Conference, Минск, 5–7 дек. 1997 г. – Minsk, 1997. – 230 с.

57. Зыкунов, В.А. Электрослабая поправка к сечениям в реакции (анти)-нейтрино нуклонного глубоконеупругого рассеяния с заряженным током / В.А. Зыкунов // Труды 3 открытой научной конференции ОМУС, ОИЯИ, Дубна, 5–9 марта 1999 / ОИЯИ; под ред. В. А. Андреев [и др.]. - Дубна, 1999. - 210 с.

Препринты:

58. Akushevich, I. Electroweak radiative effects in the single W production at Tevatron and LHC / I. Akushevich, A. Ilyichev, N. Shumeiko, V. Zykunov. – JLAB, 2003. – 9 P. – (Preprint/JLAB-THY-03-239). [hep-ph/0307333].
59. Zykunov, V.A. Electroweak radiative corrections to the parity-violating asymmetry for SLAC experiment E158 / V.A. Zykunov. – SLAC, 2004. – 7 P. – (Preprint/SLAC-PUB-14920).
60. Zykunov, V.A. First order QED corrections to the parity-violating asymmetry in Møller scattering / V.A. Zykunov, J.G. Suarez, B.A. Tweedie, Yu.G. Kolomensky. – SLAC, 2005. – 13 P. – (Preprint/SLAC-PUB-11378). [hep-ph/0507287v1].
61. Belotelov, I. Study of Drel–Yan dimuon production with the CMS detector / I. Belotelov, I. Golutvin, A. Lanyov, V. Palchik, E. Rogalev, M. Savina, S. Shmatov, V. Zykunov. – CERN, 2006. – 14 P. – (CERN-CMS-NOTE–2006–123).