

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

2-2000-8

На правах рукописи  
УДК 530.145

**ШАЙХАТДЕНОВ**  
Бинурадден Галамаденович

**ЭФФЕКТЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВOK В ПРОЦЕССАХ  
НА ЛЕПТОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ И РАСПАДЕ МЮОНА**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных  
исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Э.А. Кураев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С.Б. Герасимов  
(ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук  
профессор

Р.Н. Фаустов  
(НСК РАН)

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского  
государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2000 г.

на заседании специализированного Совета К-047.01.01 по адресу:  
141980, Дубна Московской обл., ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2000 г.

Ученый секретарь специализированного Совета  
кандидат физико-математических наук

  
И.И. Федотов

# Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию эффектов радиационных поправок в ряде процессов взаимодействия элементарных частиц. Расчеты проводились в рамках хорошо сегодня обоснованной Стандартной модели. Радиационные поправки вычислялись аналитически в первом и втором порядках теории возмущений. Найден ряд эффектов, имеющих нетривиальные следствия для расчетов сечений методом структурных функций.

**Актуальность проблемы.** При извлечении физической информации о взаимодействии элементарных частиц необходимо знание радиационных поправок. В настоящее время это особенно актуально в связи с впечатляющим ростом точности проведения экспериментов. Очевидно, что исключение из рассмотрения моделей, альтернативных Стандартной, может быть основано лишь на прецизионном анализе полученных на существующих установках экспериментальных данных.

Помимо количественного изменения значений наблюдаемых ожидаемых величин радиационные поправки приводят к новым эффектам, отсутствующим в борновском приближении. Диссертация посвящена исследованию таких эффектов в ряде процессов, изучаемых на современных установках. Круг рассматриваемых проблем в первую очередь определялся требованиями экспериментаторов к точности теоретически предсказываемых величин для наблюдаемых характеристик. Результаты же находят конкретное воплощение в ряде практических исследований.

Проведенное исследование имело **следующие цели:**

- Проанализировать радиационные поправки к сечению фонового процесса, идущего в рамках Стандартной модели, к безнейтринной моде радиационного распада мюона, который предсказывается различными моделями великого объединения, суперсимметричными моделями, а также некоторыми

из расширений Стандартной модели, с целью выяснения необходимости учета квантовых эффектов в однопетлевом приближении при интерпретации данных прецизионных экспериментов по оценке относительных вероятностей различных каналов распада.

- С точки зрения современных представлений исследовать эффекты учета радиационных квантовоэлектродинамических поправок в ассоциативном рождении хиггс-бозона и фотона на мюон-антимюонных коллайдерах вблизи порога рождения вышеуказанной скалярной частицы для более точного определения характера поведения сечения в околопороговой области.
- Определить радиационные поправки во втором порядке теории возмущений к дифференциальному сечению процесса электрон-позитронного рассеяния на большие углы как в кинематике с жестким фотоном, также излученным на большие углы, так и в коллинеарной кинематике, с целью повышения точности оценки основной характеристики современных коллайдеров — светимости.
- Провести последовательное вычисление в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях вклада в сечение упругого Баба-рассеяния на большие углы в двухпетлевом приближении, что также необходимо для нормировки процессов, идущих на коллайдерах.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. В рамках Стандартной модели электрослабого взаимодействия проведен анализ вкладов радиационных поправок в фоновый процесс, имитирующий безнейтринный радиационный распад мюона. Найденное значение поправки к ширине распада оказалась на три порядка выше вероятности изучаемой моды распада, что указывает на необходимость учета

квантовых петлевых эффектов при проведении анализа данных планируемых высокоточных экспериментов, направленных на обнаружение изучаемой нестандартной моды распада мюона. Показано, что для ширины этого процесса в рассмотренной области фазового пространства невозможно представление через структурные функции и сечение жесткого подпроцесса в стандартной форме.

2. В рамках квантовой электродинамики определены однопетлевые радиационные поправки к процессу ассоциативного рождения хиггс-бозона в аннигиляции  $\mu\bar{\mu}$  пары с учетом ведущих логарифмических поправок высших порядков теории возмущений посредством формализма структурных функций. Приведенные численные оценки указывают на необходимость учета квантовоэлектродинамических поправок в рассмотренной энергетической области вблизи порога рождения хиггс-бозона. Помимо этого отмечено, что применительно к данному процессу несинглетные структурные функции фермиона не описываются уравнениями эволюции для операторов твиста два, а, по-видимому, входят в систему уравнений для операторов твиста три.
3. Впервые в аналитической форме найдены нелидирующие вклады в сечение калибровочного процесса радиационного электрон-позитронного рассеяния с излучением дополнительного жесткого фотона в кинематике, когда все конечные частицы летят на большие углы. Показано, что представление сечения данного процесса в форме сечения процесса Дрелла-Яна не реализуется в силу присутствия нефакторизуемых вкладов в поправку в ведущем логарифмическом приближении. Продемонстрирована необходимость учета неведущих логарифмических вкладов во втором порядке теории возмущений для достижения необходимой точности теоретических предсказаний.

4. Проведено актуальное для коллайдеров ЛЭП 1/2 и мезонных фабрик, таких как DAΦNE, BEPS, вычисление вкладов радиационных поправок к сечению процесса радиационного Баба–рассеяния на большие углы при различных кинематических ограничениях на излучение жесткого фотона. Для случая излучения жесткого фотона коллинеарно начальному электрону (позитрону) выявлено определенное несоответствие ожидаемой формы структурной функции с фактически рассчитанной.
5. В рамках систематического анализа вкладов радиационных поправок в процесс упругого электрон–позитронного рассеяния на большие углы впервые получены аналитические выражения для некоторых вкладов в дифференциальное сечение данного процесса в двухпетлевом приближении. Показано сокращение всех вкладов, содержащих ведущие логарифмы в четвертой степени, а также частичное сокращение логарифмов в третьей степени. Вклады, содержащие наряду с большим логарифмом параметр, соответствующий порогу разрешения по энергии регистрируемых частиц, ранее в литературе не приводились. Получена форма поправки, ожидаемая от вклада остальных двухпетлевых диаграмм Фейнмана.

**Практическая ценность** диссертации определяется в первую очередь тем, что исследования всех процессов ориентированы на современные экспериментальные программы. Знание поправки к ширине процесса, имитирующего безнейтринный радиационный распад мюона, необходимо для более точного извлечения из экспериментальных данных величины относительной вероятности данной нестандартной моды распада. Уточнение поведения сечения как вблизи порога ассоциативного рождения хиггс–бозона в мюон–антимюонной аннигиляции, так и в области так называемого радиационного хвоста позволят проводить поиск данных

событий более уверенно, т.к. рассчитанные поправки, в рассматриваемом диапазоне энергий, по порядку величины гораздо существеннее электрослабых вкладов. Рассчитанные вклады поправок второго порядка к Баба-рассеянию на большие углы применяются на ЛЭП 1/2 и мезонных фабриках типа DAΦNE, BEPS при прецизионном измерении светимости установок, что зачастую позволяет напрямую уменьшить ошибку измерения ряда извлекаемых из опыта физических параметров. Помимо вышеперечисленных практических приложений, полученные результаты позволяют сделать определенные выводы о свойстве факторизуемости сечений процессов с более сложной структурой жесткого блока. Новые методы и подходы, развитые в диссертации, могут быть использованы в вычислениях радиационных поправок к другим процессам взаимодействия частиц, в частности идущим в квантовой хромодинамике.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, на XI международной конференции “Проблемы квантовой теории поля” (Дубна, 1998), а также на семинарах физических отделений университета г. Комо (Италия), Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константина (Гатчина) и Института ядерной физики (Новосибирск).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано семь работ [1–7].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Работа содержит 105 страницы, включая 11 рисунков и библиографический список литературы из 91 названий.

## Содержание работы

Во **Введении** очерчен круг исследуемых проблем, кратко сформулированы используемые методы, приведены основные положения, выносимые на защиту и изложена структура диссертации.

В **первой главе** диссертации рассмотрен процесс радиационного распада мюона в кинематике, имитирующей его безнейтринную моду, запрещенную в рамках Стандартной модели, но разрешенную в некоторых ее расширениях. Этот процесс представляется важным не только для исследования Стандартной модели самой по себе, но в то же время для исключения как ее определенных расширений, так и моделей великого объединения и различных суперсимметричных модификаций. Точное знание радиационных поправок в этой задаче является решающим, поскольку относительная вероятность исследуемой на эксперименте безнейтринной моды на три порядка меньше вклада радиационных поправок. Показано, что для ширины этого процесса в рассмотренной области фазового пространства невозможно представление через структурные функции и сечение жесткого подпроцесса в стандартной форме.

Содержание этой главы опубликовано в работе [1].

Во **второй главе** диссертации исследуется процесс ассоциативного рождения хиггс-бозона и фотона при взаимодействиях мюон-антимюонных пучков на коллайдерах, создание которых планируется в ближайшем будущем. В рассмотренной энергетической области вблизи порога рождения хиггс-бозона доминирующий вклад в поправку дают квантовоэлектродинамические эффекты, в то время как электрослабые подавлены в околопороговой области рождения двух  $W$ -бозонов. Здесь применение аппарата структурных функций обеспечивает более точное описание механизма реакции и метода поиска резонанса (хиггс-бозона) по так называемому *радиационному хвосту* спектра тормозного излучения.



Содержание второй главы опубликовано в работе [2].

Исследованию факторизации неупругих процессов типа  $2 \rightarrow 3$  на примере радиационного электрон-позитронного рассеяния на большие углы посвящены 3 и 4 главы. Факторизация, т.е. представление сечений в виде сверток сечения жесткого подпроцесса со структурными функциями, описывающими мягкую стадию процесса, была исследована и доказана лишь для жестких подпроцессов типа  $2 \rightarrow 2$ . Детальный расчет радиационных поправок к сечению процесса неупругого электрон-позитронного рассеяния в кинематике, когда все три конечные частицы летят на большие углы в системе центра масс, выявил невозможность представления сечения процесса в форме сечения процесса Дрелла-Яна. Одной из причин этому видимо является большее число независимых кинематических инвариантов, а именно пять, описывающих подпроцесс  $2 \rightarrow 3$ , чем в случае подпроцесса  $2 \rightarrow 2$ , в котором подобных инвариантов два. Другим важным аспектом является дваждылогарифмическая природа эксклюзивного сечения  $2 \rightarrow 3$  на большие углы.

В **третьей главе** диссертации изучена факторизация неупругих процессов взаимодействия частиц при высоких энергиях на примере радиационного электрон-позитронного рассеяния на большие углы. Теоретиковозмущенческое рассмотрение выявило нетривиальность структуры поправки в смысле несоответствия ее формы ожиданиям по ренормгруппе. Потеря свойства факторизуемости сечения обсуждается с позиций точного аналитического рассмотрения. Значимость нелидирующего вклада иллюстрируется численными оценками.

Содержание третьей главы опубликовано в работе [3].

В **четвертой главе** впервые вычислены во втором порядке теории возмущений радиационные поправки к Бабарассеянию с излучением жесткого фотона на малые углы по отношению к лептонному пучку. Данная кинематика обеспечивает

основной вклад в сечение в рассматриваемом порядке. Как и в случае рассеяния жесткого фотона на большие углы имеет место, в некотором смысле, нарушение теоремы о факторизации, выразившееся в модификации ядра структурной функции во втором порядке. В то же время необходимо отметить, что в лидирующем логарифмическом приближении факторизация массовых сингулярностей (выделение выражения для сечения в низшем приближении) все же наблюдается, несмотря на присутствие определенных вкладов, на первый взгляд нарушающих ожидаемую по ренормгруппе структуру поправки, но, как показывает анализ, оказывающих влияние лишь в следующем за лидирующим приближении.

В коллинеарной области предполагалось, что жесткий фотон движется внутри узкого конуса с углом раствора  $2\theta_0$  ( $1 \gg \theta_0 \gg m_e/\varepsilon$ ) с осью в направлении одной из начальных или детектируемых конечных частиц ( $\varepsilon$  есть энергия начальных пучков). Необходимо отметить, что в этой области сечение в ведущем приближении может быть представлено в форме сечения процесса Дрелла-Яна, что в принципе объяснимо, т.к. в коллинеарной области в качестве жестких подпроцессов выступают процессы квантовой электродинамики типа  $2 \rightarrow 2$  (Баба-рассеяние, комптоновское рассеяние, двухквантовая аннигиляция и процесс  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ ), для которых теорема о факторизации сечения собственно и была доказана. Тем не менее, для изучаемого процесса в случае кинематики с излучением жесткого фотона коллинеарно начальному лептону, имеет место определенная модификация ядра структурной функции.

Содержание четвертой главы опубликовано в работах [4,5].

**В пятой главе** исследован вклад радиационных поправок к сечению (квази)упругого Баба-рассеяния в двухпетлевом приближении. В отличие от случая рассеяния лептонов на малые углы, где присутствие малого параметра, угла рассеяния, существенно облегчает анализ, в данной кинематической постановке необходимо учитывать дополнительно большое число диаграмм

Фейнмана. Используя известные в литературе выражения для формфакторов, операторов поляризации вакуума в двухпетлевом приближении и интегралов по виртуальному импульсу в бокс-диаграмме получены вклады всех, за исключением двух, классов радиационных поправок. Неопределенными остались поправки, соответствующие двухпетлевым бокс-диаграммам эйконоального и декорированного типов. Для данного процесса представление сечения, с учетом радиационных поправок, в форме сечения процесса Дрелла-Яна имеет место, что находится в соответствии с теоремой о выделении массовых сингулярностей. Получены аналитические выражения в ведущем и следующем за ведущим логарифмическом приближениях, причем определенная часть вкладов, связанная с параметром обрезания по энергии сопровождающего мягкого излучения, ранее в литературе не приводилась. Показано полное сокращение ведущих логарифмических поправок (четвертой степени) во втором порядке теории возмущений, а также сокращение части вкладов третьей степени, и получено предсказание для формы поправки, ожидаемой от вклада оставшихся двухпетлевых диаграмм Фейнмана.

Содержание пятой главы опубликовано в работе [6]. В аналитических расчетах трех последних глав интенсивно использовалась таблица интегралов [7].

В **Заключении** подробно обсуждаются основные результаты работы и упоминаются экспериментальные программы, использующие (или в которых в будущем могут быть использованы) полученные теоретические предсказания.

## **Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:**

1. Проведен анализ квантовоэлектродинамических радиационных поправок к ширине фонового процесса, имитирующего радиационный безнейтринный распада мюона, и получено новое значение

для результирующей поправки. Численные оценки приводят к заключению важности вычисленного вклада наряду с поправками более высокого порядка малости по малым параметрам задачи, но в низшем приближении по константе связи электромагнитного взаимодействия. Кроме того, выявлено отсутствие свойства факторизуемости борновской структуры и ведущих логарифмических вкладов в выражении для сечения с учетом вычисленной поправки. Рассмотрение данной задачи было инициировано прежде всего планируемыми в PSI (Швейцария) и BNL (Соединенные Штаты) экспериментами, где будет достигнуто существенное улучшение точности измерения относительной вероятности процесса радиационного распада мюона.

**2.** Получена квантовоэлектродинамическая однопетлевая радиационная поправка к сечению аннигиляции мюон-антимюонной пары в хиггс-бозон и фотон с учетом ведущих логарифмических поправок высших порядков посредством формализма структурных функций. Проведенные численные оценки указывают на необходимость учета квантовоэлектродинамических поправок в рассмотренной энергетической области вблизи порога рождения хиггс-бозона, что важно для успешного осуществления экспериментальных программ, планируемых на будущих мюон-антимюонных коллайдерах и направленных, в числе задач первого приоритета, на возможное открытие хиггс-бозона и последующее изучение его свойств.

**3.** В аналитической форме найдены лидирующие и нелидирующие вклады в сечение калибровочного процесса радиационного электрон-позитронного рассеяния с излучением дополнительного жесткого фотона в кинематике с конечными частицами, летящими на большие углы. При этом вклад следующих за лидирующими слагаемых ранее в литературе не приводился. Показано, что представление сечения данного процесса через структурные функции не реализуется в силу присутствия нефакторизуемых вкладов в поправку в ведущем логарифмическом приближении, т.е. точный аналитический расчет выявил определенного рода нарушение те-

оремы о факторизации массовых сингулярностей в сечениях взаимодействий элементарных частиц при высоких энергиях. Продемонстрирована необходимость учета неведущих логарифмических вкладов во втором порядке теории возмущений для достижения необходимой точности теоретических предсказаний. Более того, приведенные численные оценки нелогарифмической поправки в сравнении с логарифмической указывают на необходимость учета первых в определенных областях фазового пространства.

4. В лидирующем и следующем за лидирующим логарифмическом приближениях получены вклады второго порядка теории возмущений в сечение процесса радиационного Бабба рассеяния в коллинеарной кинематике (с излучением жесткого фотона на малые углы). С помощью метода разбиения фазового объема на коллинеарную и полуколлинеарную кинематические области получены вклады в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях в вышеуказанной кинематике, обеспечивающей основную поправку к сечению. Представленное выражение для дифференциального сечения с учетом поправок, связанных с излучением виртуального и мягкого реального фотонов, позволяет сделать вывод о выполнении теоремы о факторизации лишь в определенной степени, т.к. ожидаемая форма структурной функции не соответствует фактически рассчитанной. Таким образом, также как и в случае процесса с рассеянием всех частиц на большие углы, выявлено определенное расхождение между структурой радиационной поправки, рассчитанной точно, и поправки, полученной методом структурных функций.

5. В рамках систематического анализа вкладов радиационных поправок в процесс упругого электрон-позитронного рассеяния на большие углы впервые получены аналитические выражения для некоторых вкладов в дифференциальное сечение в двухпетлевом приближении. Проанализированы всевозможные вклады во втором порядке теории возмущений за исключением двухпетлевых бокс-графов так называемого декорированного и эйконального типов. Показано сокращение всех вкладов, содержащих ведущие ло-

гарифмы в четвертой степени, а также частичное сокращение логарифмов третьей степени. Вклады, содержащие вместе с большим логарифмом параметр, соответствующий порогу разрешения по энергии регистрируемых частиц, ранее в литературе не приводились. Получена форма поправки, ожидаемая от вклада остальных двухпетлевых диаграмм Фейнмана. Рассчитанные поправки второго порядка к Баба-рассеянию позволят (опосредовано) уменьшить ошибку измерения большинства извлекаемых из опыта физических параметров через прецизионные измерения светимости коллайдерных установок.

## Результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] A.B. Arbuzov, O. Krehl, E.A. Kuraev, E.N. Magar, B.G. Shaikhatdenov,  
*Radiative corrections to the background of  $\mu \rightarrow e\gamma$  decay*,  
Phys. Lett. **B432** (1998) p. 421;
- [2] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, F.F. Tikhonin, B.G. Shaikhatdenov,  
*Radiative corrections to the process  $\mu^+\mu^- \rightarrow H\gamma$* ,  
ЯФ, т.**62** (1999) с. 1477; Phys. At. Nucl. **62** (1999) p. 1393.
- [3] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov,  
*Violation of the factorization theorem in large-angle radiative Bhabha scattering*,  
ЖЭТФ т.**115** (1999) с. 392; JETP **88** (1999) p. 213.
- [4] V. Antonelli, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov,  
*Collinear radiative electron-positron scattering in leading logarithmic approximation*,  
Письма в ЖЭТФ т.**69** (1999) 851; JETP Lett. **69** (1999) 900.

- [5] V. Antonelli, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov,  
*Radiative large-angle Bhabha scattering in collinear kinematics,*  
Nucl. Phys. **B563** (1999).
- [6] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov,  
*Second order contributions to elastic large-angle Bhabha scattering,*  
Mod.Phys.Lett. **A13** (1998) p. 2305.
- [7] A.B. Arbuzov, A.V. Belitsky, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov,  
*Table of integrals: asymptotical expressions for noncollinear kinematics,*  
JINR preprint E2-98-53, 1998.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 января 2000 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 25.01.2000  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,44  
Тираж 100. Заказ 51823.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области