

На правах рукописи

АРБУЗОВ  
Андрей Борисович

ВЕДУЩЕЕ И СЛЕДУЮЩЕЕ ЗА ВЕДУЩИМ  
ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ В КЭД

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2010

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
Вернов Юрий Сергеевич

доктор физико-математических наук  
Волобуев Игорь Павлович

доктор физико-математических наук  
Дорохов Александр Евгеньевич

Ведущая организация — Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН)

Защита состоится «        »                    2011 г. в                    час. на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Учреждении Российской академии наук Институте ядерных исследований РАН (117312, Москва, просп. 60-летия Октября, д. 7а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследований

Физика высоких энергий переживает в настоящее время критический момент. Мы близки к определению пределов применимости стандартной модели (СМ) [1] физики элементарных частиц и их взаимодействий. Несмотря на то, что практически все наблюдаемые на ускорителях высоких энергий явления находятся в хорошем согласии с предсказаниями СМ, множество косвенных факторов указывает на близость масштаба энергий, при которых должны проявиться новые физические феномены. Поиск таких феноменов и последней неоткрытой частицы СМ, бозона Хиггса, активно проводится в экспериментах на существующих и будущих ускорителях частиц, таких как Большой Адронный Коллайдер (БАК), Тэватрон (Tevatron), и планируемый международный линейный электрон-позитронный коллайдер. С другой стороны, обнаружение новых частиц и взаимодействий возможно только в ходе детального сравнения результатов опыта с теоретическими предсказаниями, полученными в рамках стандартной модели. Все возрастающая точность экспериментальных измерений всевозможных наблюдаемых величин в современной физике высоких энергий требует адекватного увеличения точности теоретического описания соответствующих физических явлений, что и является основной целью работы.

Диссертация посвящена развитию и применению методов построения высокоточных теоретических предсказаний для характеристик процессов взаимодействий элементарных частиц, изучаемых на современных и планируемых экспериментах физики высоких энергий. Конкретно в работе рассматриваются эффекты квантовой электродинамики (КЭД), учет которых необходим при прецизионном анализе опытных данных.

В КЭД при высоких энергиях обычно применяется метод пертурбативного разложения по константе связи,  $\alpha \approx 1/137$ , и уточнение предсказаний достигается за счет учета членов этого разложения все более высоких порядков. Развитие методов вычислений радиационных поправок высших порядков и совершенствование соответствующих компьютерных алгоритмов позволило за последние годы существенно продвинуться в точности описания ряда процессов, изучаемых экспериментально. В общем случае желательно иметь точность теоретических предсказаний не хуже, чем  $1/3$  от экспериментальной точности. Тогда окончательные результаты анализа экспериментальных данных на будут сколько-нибудь заметно страдать от теоретических неопределенностей.

Однако для многих процессов полное аналитическое решение подобной задачи еще не выполнено в силу серьезных технических трудностей.

С другой стороны, в некоторых случаях оказывается достаточно учесть только численно наиболее значимые вклады высших порядков. В КЭД при высоких энергиях эта задача решается систематическими методами, позволяющими находить все члены, усиленные степенями так называемого большого логарифма,  $L \equiv \ln(\Lambda^2/m^2)$ , где  $m$  — масса легкой заряженной частицы, участвующей в рассматриваемом процессе, а  $\Lambda$  — характерный масштаб энергии данного процесса. Условие малости массы по сравнению с масштабом энергии характерно для экспериментов физики высоких энергий. Оно обеспечивает численную значимость членов пертурбативно-го разложения, содержащих такие логарифмы в виде множителей.

В работе [2] метод ренормализационной группы был впервые применен для нахождения ведущих логарифмических поправок КЭД к процессам электрон-позитронной аннигиляции при высоких энергиях. Авторами было показано, что ведущие логарифмические вклады, усиленные логарифмом отношения энергии сталкивающихся пучков в системе центра масс к массе электрона, могут быть просуммированы и представлены в виде факторов, названных *структурными функциями электрона*. При этом проведена параллель с аналогичными вычислениями, делавшимися в КХД для процессов типа Дрелла-Яна с помощью структурных функций адрона, удовлетворяющих уравнениям Докшицера-Грибова-Липатова-Алтарелли-Паризи (ДГЛАП) [3].

Совершенствование и развитие метода ренормализационной группы в КЭД, осуществляемое в диссертации, позволяет существенно повысить точность теоретических предсказаний необходимых для прецизионной проверки стандартной модели и поиска так называемой *новой физики*, проявляющейся как отклонение от названных предсказаний.

Актуальность решаемых в диссертации задач проявляется и в том, что большинство из них выполнены с учетом особенностей конкретных экспериментов и применяются при анализе опытных данных. С другой стороны, развитые в диссертации методы и общие результаты находят применение при решении вновь возникающих задач.

### Цели и методы исследования

В диссертации решаются следующие основные задачи.

1) Развитие и применение подхода структурных функций электрона в ведущем логарифмическом приближении с целью получения аналитических и численных оценок вкладов радиационных поправок для процессов взаимодействий частиц, изучаемых в современных экспериментах.

2) Расчет полных вкладов первого порядка теории возмущений к ряду процессов и разработка схемы их учета одновременно с ведущими логарифмическими поправками, получаемыми с помощью подхода ренорма-

лизационной группы.

3) Вычисление полного вклада следующих за ведущими поправок второго порядка к Баба-рассеянию на малые углы, что необходимо для высокоточного определения светимости в экспериментах на ускорителях LEP1 и LEP2.

4) Высокоточное теоретическое описание процессов электрон-позитронной аннигиляции и Баба-рассеяния в условиях коллайдеров промежуточных энергий (порядка нескольких ГэВ в системе центра масс).

5) Построение прецизионного описания процесса глубоконеупругого рассеяния с детектированием фотона, излученного электроном из начального состояния под малым углом к оси пучка, что необходимо для расширения кинематической области, изучаемой на электрон-протонном коллайдере HERA (DESY, Гамбург).

6) Обоснование метода радиационного возвращения применительно к экспериментам на электрон-позитронных коллайдерах промежуточных энергий.

7) Разработка метода определения бегущей постоянной электромагнитного взаимодействия путем прецизионного изучения Баба-рассеяния на малые углы.

8) Создание высокоточного описания спектра распада мюона с учетом ведущих и следующих за ведущими поправок высших порядков.

Как отмечено выше, основным методом, применяемым в диссертации, является подход ренормализационной группы [4], основанный на фундаментальном физическом принципе масштабной инвариантности законов Природы. Помимо этого, при проведении теоретических построений и последующем их применении к анализу феноменологии взаимодействий частиц использовались стандартные хорошо известные методы квантовой теории поля. Важно отметить, что особенностью диссертации является, в частности, адаптация к случаю квантовой электродинамики методов, ранее разработанных для решения задач квантовой хромодинамики.

### Научная новизна и значимость

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и важными для развития современной физики высоких энергий. Приоритет автора в получении решения основных задач диссертации признается мировым сообществом, что подтверждается цитированием и использованием его результатов в дальнейших исследованиях другими учеными как в нашей стране, так и за рубежом. В диссертации существенно развит метод учета ведущих логарифмических поправок высших порядков. Разработка нового подхода, позволяющего расширить применение метода ренормализационной группы КЭД на случай следующих за веду-

щими логарифмических поправок, открывает новое широкое направление теоретических исследований. Значимость последнего обуславливается запросами современных экспериментов, для которых высокоточные теоретические предсказания абсолютно необходимы. Решаемые с помощью разработанных в диссертации методов задачи актуальны и значимы для современных экспериментов физики высоких энергий, проводимых как на ускорителях высоких энергий (HERA, LEP, LHC, Tevatron, ILC), так и при более низких энергиях, в частности, на электрон-позитронных коллайдерах с энергиями порядка нескольких ГэВ. Важно, что все основные теоретические результаты уже нашли применение при симуляции, анализе данных и погрешностей соответствующих экспериментов. Например, созданный на основе разработанных методов генератор событий разных процессов [5] использован при анализе данных коллаборации КМД-2 [6, 7], полученных на коллайдере ВЭПП-2М в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Методы, развитые в диссертации для задач физики высоких энергий, оказались востребованы и для решения задачи прецизионного описания спектра распада мюона. Последний процесс является одним из базовых *классических* процессов для физики элементарных частиц.

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

Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные результаты диссертации.

1. Развита метод учета ведущих логарифмических квантовоэлектродинамических поправок высших порядков к сечениям процессов взаимодействия частиц при высоких энергиях и ширинам распадов. Получены аналитические выражения для структурных функций электрона вплоть до пятого порядка теории возмущений. Построен и применен эффективный метод сшивки полных поправок первого порядка и ведущих поправок высших порядков.

2. С помощью подхода ренормализационной группы разработан систематический метод учета следующих за ведущими логарифмических квантовоэлектродинамических поправок к процессам взаимодействия частиц. При этом допускается возможность налагать ограничения на кинематические переменные не только заряженных лептонов, но и фотонов, что необходимо для учета реалистических экспериментальных условий.

3. Явление радиационного возвращения (эффективного уменьшения энергии взаимодействующих частиц за счет излучения фотона из начального состояния) исследовано в следующем за ведущим приближении. Получено прецизионное описание радиационных событий для глубоконеупругого рассеяния. Впервые предложено и обосновано применение метода радиационного возвращения к процессам электрон-позитронной аннигиля-

ции в адроны на коллайдерах промежуточных энергий.

4. Разработанные в диссертации методы применены к созданию высокоточных теоретических предсказаний для ряда процессов, изучаемых в современных экспериментах физики высоких энергий: электрон-позитронной аннигиляции (в мюоны, адроны или фотоны), Баба-рассеяния, процессов аннигиляции и глубоконеупругого рассеяния с детектированием тормозного излучения, тормозного излучения при рассеянии на ядрах, обратного тормозного излучения в процессе Дрелла-Яна.

5. Получено прецизионное теоретическое описание спектра распада поляризованного мюона. Впервые учтены ведущие и следующие за ведущими логарифмические поправки высших порядков, а также — точная зависимость от массы электрона в выражениях для поправок первого порядка. Это позволило достичь точности предсказаний порядка  $10^{-4}$ , необходимой для анализа данных современных и планируемых экспериментов.

### Достоверность результатов

Вычисления, проделанные в диссертации, основываются на использовании стандартных методов квантовой теории поля. Все новые результаты проверялись на предмет соответствия (для ряда предельных случаев) известным классическим достижениям в данной области теоретической физики. Аналитические преобразования, в частности, связанные со взятием многократных интегралов, всегда контролировались численно. Во многих случаях оригинальные результаты диссертации в дальнейшем проверялись и воспроизводились другими исследователями.

### Апробация работы

Результаты данной работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (Дубна), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва), на теоретических семинарах зарубежных научных центров: ЦЕРН (Женева, Швейцария), DESY (Цойген, Германия), LNF (Фраскати, Италия), Университеты городов Парма и Турин (Италия), Лаборатория TRIUMF (Ванкувер, Канада), Университет провинции Альберта (Эдмонтон, Канада), ИНЕР (Пекин, Китай), КЕК (Цукуба, Япония), PSI (Виллиген, Швейцария), MPI (Мюнхен, Германия), Brookhaven Lab. (США); на ряде международных конференций и рабочих совещаний:

- 2009, Дубна, 1—4 декабря, Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам
- 2009, 13—17 октября, Пекин (КНР), International Workshop on e+e-collisions from phi to psi" (PHIPSI09)
- 2009, 17—18 марта, Милан, Италия, Международное рабочее совеща-

ние "W-mass workshop"

- 2008, 4—8 ноября, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Sicily, Italy 12-е Международное рабочее совещание "Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research"(ACAT 2008)

- 2008, 7—15 октября, Пекин (КНР), 4-е рабочее совещание "Radiative Corrections and Generators for Low Energy Hadronic Cross Section and Luminosity"("Радиационные поправки и генераторы для адронного сечения и светимости при низких энергиях") 7-15 октября 2008 г., Пекин (КНР)

- 2008, 5—13 апреля, Фраскати, Италия, Рабочее совещание "PHIPSIO8 - International Workshop on e+e- collisions from phi to psi"и 3-е рабочее совещание "Radiative Corrections and Generators for Low Energy Hadronic Cross Section and Luminosity"

- 2008, 1—6 сентября, Дубна, Международная конференция "Renormalization Group and Related Topics"

- 2006, 27 февраля — 2 марта, Новосибирск, "International Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi"

Материалы данной диссертации широко известны специалистам, работающим в области теории и феноменологии физики высоких энергий, а также — экспериментаторам, непосредственно использующим результаты диссертации при анализе опытных данных.

### Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в виде 34 статей в ведущих российских и зарубежных физических журналах, входящих в Перечень ВАК. Из этих работ 7 выполнены без соавторов и еще 4 — совместно с аспирантами соискателя. Помимо этого, по материалам диссертации опубликованы 6 работ в трудах конференций и рабочих совещаний и три препринта, содержащих дополнительные детали вычислений. Основные работы по диссертации имеют высокую цитируемость и хорошо известны специалистам.

Вклад автора во все полученные результаты является определяющим. Автором осуществлялись: формулировка задач, разработка путей и методов их решения, развитие необходимого математического аппарата, подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями научных журналов и рецензентами.

Следует отметить, что в работе №23 А.Б. Арбузову принадлежит основной вклад в развитие теоретического подхода и в проведение аналитических вычислений, тогда как численные результаты были получены соавтором данной работы Е.В. Земляной. В работе №5 описывается один из этапов развития компьютерной программы ZFITTER. Вклад соискателя в



данную работу существенный и состоит во внедрении в программу результатов лично выполненных им работ №13 и №14. Однако сама программа ZFITTER развивалась в течение долгого времени, и в ее создание вложен труд большого коллектива ученых. Публикация №31 имеет 22 соавтора, она явилась результатом совместной работы нескольких международных групп исследователей. Личный вклад автора в основной результат этой работы существенный, он подробно описывается в третьей Главе диссертации.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы.

### I. Статьи в рецензируемых журналах

1. A.B. Arbuzov, *Radiative Corrections to High Energy Lepton Bremsstrahlung on Heavy Nuclei* // **ЖЭП**, Vol. 01 (2008) 031 (8 pages).
2. A.B. Arbuzov and R.R. Sadykov, *Inverse bremsstrahlung contributions to Drell-Yan like processes* (на англ. языке) // **ЖЭТФ**, Т. 133 N3 (2008) С.564-570.
3. A.B. Arbuzov and E.S. Scherbakova, *QED collinear radiation factors in the next-to-leading logarithmic approximation* // **Physics Letters B**, Vol. 660 (2008) pp.37-42.
4. A.B. Arbuzov and E.S. Scherbakova, *Next-to-leading order corrections to Bhabha scattering in renormalization group approach. I: Soft and virtual photonic contributions* (на англ. языке) // **Письма в ЖЭТФ**, Т. 83, N10 (2006) С.499-503.
5. A.B. Arbuzov, M. Awramik, M. Czakon, A. Freitas, M.W. Grunewald, K. Monig, S. Riemann, T. Riemann, *ZFITTER: A semi-analytical program for fermion pair production in  $e^+ e^-$  annihilation, from version 6.21 to version 6.42* // **Computer Physics Communications**, Vol. 174 (2006) pp.728-758.
6. A.B. Arbuzov, E.S. Scherbakova, *One-Loop Corrections to Radiative Muon Decay* // **Physics Letters B**, Vol. 597 (2004) pp.285-290.
7. A.B. Arbuzov, D. Haidt, C. Matteuzzi, M. Paganoni and L. Trentadue, *The running of the electromagnetic coupling alpha in small-angle Bhabha scattering* // **European Physical Journal C**, Vol. 34 (2004) pp.267-275.

8. А.Б. Арбузов, *Virtual and soft pair corrections to polarized muon decay spectrum* (на англ. языке) // **Письма в ЖЭТФ**, Т. 78 (2003) N4, С.215-218.
9. A. Arbuzov, *Higher order QED corrections to muon decay spectrum* // **ЖНЕР**, Vol. 0303 (2003) 063 (18 pages).
10. A. Arbuzov and K. Melnikov,  *$O(\alpha^2 \ln(m(\mu)/m(e)))$  corrections to electron energy spectrum in muon decay* // **Physical Review D**, Vol. 66 (2002) 093003 (6 pages).
11. A. Arbuzov, A. Czarnecki, and A. Gaponenko, *Muon decay spectrum: Leading logarithmic approximation* // **Physical Review D**, Vol. 65 (2002) 113006 (7 pages).
12. А.Б. Арбузов, *First order radiative corrections to polarized muon decay spectrum* // **Physics Letters B**, Vol. 524 (2002) 99-106, *Erratum – ibid.*, Vol. 535 (2002) p.378.
13. А.Б. Арбузов, *Higher order pair corrections to electron positron annihilation* // **ЖНЕР**, Vol. 0107 (2001) 043 (17 pages); см. также препринт этой работы: А.Б. Арбузов, *Light pair corrections to electron positron annihilation at LEP/SLC* // arXiv:hep-ph/9907500.
14. А.Б. Арбузов, *Non-singlet splitting functions in QED*, // **Physics Letters B**, Vol. 470 (1999) p.252–258.
15. А.Б. Арбузов, Э.А. Кураев, Б.Г. Шайхатденов, *Violation of the factorization theorem in large-angle radiative Bhabha scattering* (на англ. языке), // **ЖЭТФ** Т. 115 (1999) p.392-403, *ibid Поправка* Т. 134, вып. 4(10) (2003) С.960.
16. H. Anlauf, A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, *QED corrections to deep inelastic scattering with tagged photons at HERA* // **Physical Review D**, Vol. 59 (1999) 014003 (6 pages).
17. H. Anlauf, A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, *Tagged photons in DIS within the next-to-leading accuracy*, // **ЖНЕР**, Vol. 10 (1998) 013 (17 pages).
18. A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov and L. Trentadue, *Hadronic cross-sections in electron positron annihilation with tagged photon* // **ЖНЕР**, Vol. 9812 (1998) 009 (13 pages).

19. A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, B.G. Shaikhatdenov, *Second order contributions to elastic large-angle Bhabha scattering*, // **Modern Physics Letters A**, Vol. 13 (1998) p.2305–2316.
20. 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*, // **Physics Letters B**, Vol. 432 (1998) p.421–426.
21. I. Akushevich, A. Arbuzov and E. Kuraev, *Compton tensor with heavy photon in the case of longitudinally polarized fermion* // **Physics Letters B**, Vol. 432 (1998) p.222–229.
22. A.B. Arbuzov, V.A. Astakhov, A.V. Fedorov, G.V. Fedotovitch, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, *Radiative Corrections for Pion and Kaon Production at  $e^+e^-$  colliders of energies below 2 GeV* // **JHEP**, Vol. 10 (1997) 006 (13 pages).
23. A.B. Arbuzov, V.A. Astakhov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, E.V. Zemlyanaya, *Emission of Two Hard Photons in Large-Angle Bhabha Scattering* // **Nuclear Physics B**, Vol. 483 (1997) p.83–94.
24. А.Б. Арбузов, Э.А. Кураев, Н.П. Меренков и Л. Трентадуэ, *Virtual and Soft Real Pair Production in Large-Angle Bhabha Scattering* (на англ. языке), // **Ядерная Физика**, Т. 60 (1997) С.673–682.
25. A.B. Arbuzov, G.I. Gach, V.Yu. Gontchar, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Small-Angle Bhabha Scattering at LEP1. Analytical Results for Wide-Narrow Angular Acceptance* // **Physics Letters B**, Vol. 399 (1997) p.312–320.
26. N.P. Merenkov, A.B. Arbuzov, V.S. Fadin, E.A. Kuraev, L.N. Lipatov, L. Trentadue, *Analytical calculation of small-angle Bhabha cross-section at LEP1* // **Acta Physica Polonica B**, Vol. 28 (1997) p.491–507.
27. A.B. Arbuzov, V.S. Fadin, E.A. Kuraev, L.N. Lipatov, N.P. Merenkov, L.G. Trentadue, *Small-Angle Electron-Positron Scattering* // **Physics Letters B**, Vol. 394 (1997) p.218–224.
28. A.B. Arbuzov, G.V. Fedotovitch, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, V.D. Rushai, L. Trentadue, *Large Angle QED Processes at  $e^+e^-$  colliders at energies below 3 GeV* // **JHEP**, Vol. 10 (1997) 001 (21 pages).

29. A.B. Arbuzov, V.S. Fadin, E.A. Kuraev, L.N. Lipatov, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Small-Angle Bhabha Scattering with a Per Mille Accuracy* // **Nuclear Physics B**, Vol. 485 (1997) p.457–502.
30. A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Hard Pair Production in Large-Angle Bhabha Scattering* // **Nuclear Physics B**, Vol. 474 (1996) p.271–285.
31. A.B. Arbuzov, M. Bigi, H. Burkhardt, M. Cacciari, M. Caffo, H. Czyz, M. Dallavalle, J.H. Field, F. Filthaut, S. Jadach, F. Jegerlehner, E. Kuraev, G. Montagna, O. Nicrosini, F. Piccinini, B. Pietrzyk, W. Placzek, E. Remiddi, M. Skrzypek, L. Trentadue, B.F.L. Ward, Z. Was, *The Present Theoretical Error on the Bhabha Scattering Cross-Section in the Luminometry Region at LEP* // **Physics Letters B**, Vol. 383 (1996) p.238–242.
32. А.Б. Арбузов, Э.А. Кураев, *Баба-рассеяние на малые углы* // **ЭЧАЯ**, Т. 27 (1996) С.1247–1320.
33. А.Б. Арбузов, Э.А. Кураев, Н.П. Меренков и Л. Трентадуэ, *Pair Production in Small-Angle Bhabha Scattering* (на англ. языке) // **ЖЭТФ**, Т. 108 вып. 4(10) (1995) С.1164–1178.
34. A.B. Arbuzov, *On a novel equal time relativistic quasipotential equation for two scalar particles* // **Nuovo Cimento** **107A** (1994) p.1263-1274.

## II. Материалы конференций и рабочих совещаний

35. A. Arbuzov, V.S. Fadin, E. Kuraev, L. Lipatov, N. Merenkov and L. Trentadue, *Small angle Bhabha scattering for LEP* // [hep-ph/9506323]; Reports of the working groups on precision calculations for the  $Z$  resonance, D. Bardin, W. Hollik, G. Passarino (eds.), **CERN Yellow Report**, CERN 95–03 (1995) p.369–387.
36. H. Anlauf, A. Arbuzov *et al.* (24 co-authors), S. Jadach, O. Nicrosini (conveners), *Event Generators for Bhabha Scattering* // [hep-ph/9602393], **CERN Yellow Report** 96–01, vol.2, 1996, p.229.
37. H. Anlauf, A.B. Arbuzov and E.A. Kuraev, *QED corrections to DIS with a tagged photon at HERA* // [arXiv:hep-ph/9907248], Contributed to Workshop on Monte Carlo Generators for HERA Physics (Plenary Starting Meeting), Hamburg, Germany, 27-30 Apr 1998. Published in “Monte Carlo generators for HERA physics A.T. Doyle,

G. Grindhammer, G. Ingelman, H. Jung (editors), Hamburg 1998/1999, p.539-546.

38. M. Kobel, A.B. Arbuzov *et al.* [Two Fermion Working Group], *Two-fermion production in electron positron collisions* // [arXiv:hep-ph/0007180], published in **CERN Yellow Report**, S. Jadach, G. Passarino and R. Pittau (editors), "Reports of the working groups on precision calculation for LEP2 physics Geneva 1999/2000, p.269-378.
39. A.B. Arbuzov, V.S. Fadin, E.A. Kuraev, L.N. Lipatov, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Small-Angle Bhabha Scattering* // Invited talk of L.T. at the Zeuthen workshop on Elementary Particle Theory "QCD and QED in Higher Orders Rheinsberg, April 21 — 26, 1996; published in **Nuclear Physics B Proc. Suppl.**, Vol. 51S C (1996) p.154–163.
40. A. Arbuzov, U. Baur, S. Bondarenko, C. Carloni Calame, S. Dittmaier, M. Krämer, G. Montagna, O. Nicrosini, R. Sadykov, A. Vicini, D. Wackerroth, *Tuned comparison of electroweak corrections to Drell-Yan-like W- and Z-boson production - a status report* // in C. Buttar *et al.*, "Les houches physics at TeV colliders 2005, standard model and Higgs working group: Summary report," arXiv:hep-ph/0604120.

### III. Неопубликованные препринты

41. A.B. Arbuzov, *LABSMC: Monte Carlo event generator for large-angle Bhabha scattering* // arXiv:hep-ph/9907298.
42. A.B. Arbuzov, *Event generation of large-angle Bhabha scattering at LEP2 energies* // arXiv:hep-ph/9910280.
43. A.B. Arbuzov, *Tables of convolution integrals* // arXiv:hep-ph/0304063.

Наиболее важные результаты диссертации опубликованы в работах под номерами 4, 10, 12-14, 18, 28, 29.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, двух Приложений и Списка литературы. Материал изложен на 215 страницах, включает 28 рисунков, 19 таблиц, 261 библиографическую ссылку.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Здесь обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основная цель и задачи, возникающие при ее решении,

обсуждается научная новизна представленных исследований. Представляется обзор литературы в данной области исследований.

**Глава 1.** В первой Главе диссертации систематически излагается и развивается метод структурных функций электрона, позволяющий вычислять ведущие логарифмические поправки к процессам взаимодействия частиц в рамках квантовой электродинамики. В основе этого метода лежит подход ренормализационной группы и квантовомеханическое явление факторизации подпроцессов, протекающих на существенно разных масштабах расстояния. Во многом в КЭД повторяется (с некоторыми важными модификациями) предложенная Р. Фейнманом картина факторизации жесткого партонового подпроцесса и структурных функций. В КЭД в качестве партонов выступают электроны, позитроны и фотоны. При этом вычисления ведущих логарифмических поправок можно строить в различных схемах и при различном выборе масштаба факторизации. Зависимость результата от их выбора в КЭД есть, но она существенно меньше, чем в КХД, в первую очередь, из-за малости константы связи первой теории. При учете (после проведения необходимых вычислений) следующих порядков теории возмущений и схемная зависимость, и зависимость от масштаба факторизации уменьшаются, поскольку они обусловлены еще неучтенными членами высших порядков по  $\alpha$ .

Действуя по аналогии с процедурой факторизации КХД поправок к процессу Дрелла-Яна [8], мы представляем ведущие логарифмические КЭД поправки к полному сечению, например, процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{LL}^{e^+e^- \rightarrow hadrons}(s) &= \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \Theta(x_1, x_2) \\ &\times \sum_{a,b=e^+,e^-, \gamma} \mathcal{D}_{ae^-}(x_1, s) \mathcal{D}_{be^+}(x_2, s) \sigma_0^{ab \rightarrow hadrons}(sx_1x_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где суммирование ведется по всем возможным сочетаниям партонов  $a$  и  $b$ , которые могут участвовать в подпроцессе рождения адронов с сечением  $\sigma_0^{ab \rightarrow hadrons}(sx_1x_2)$ , рассчитанным без учета радиационных поправок к начальному состоянию. Функции партоновых распределений  $\mathcal{D}_{ae^-}(x_1, s)$  и  $\mathcal{D}_{be^+}(x_2, s)$  описывают плотности распределения партонов типов  $a$  и  $b$  в начальных электроне и позитроне, соответственно. Доли энергии партонов,  $x_{1,2}$ , вводятся полностью аналогично описанию кварковых и глюонных распределений в адронах, т.е.  $x_{1,2}$  задают доли энергии партонов по отношению к полной энергии излучившей их частицы. Функция  $\Theta(x_1, x_2)$  определяет область интегрирования по долям энергии партонов, соответствующую экспериментальным условиям. Отметим, что эти условия могут

быть правильно учтены только в том случае, когда они зависят только от долей энергии, но не затрагивают угловое распределение излученных частиц.

Функции распределения партонов в электроде удовлетворяют уравнениям эволюции, которые получаются из уравнений ДГАЛП [3] путем редукции неабелевой КХД к абелевой КЭД. В частности, несинглетная функция удовлетворяет уравнению

$$\mathcal{D}_{ee}^{NS}(x, s) = \delta(x - 1) + \int_{m^2}^s \frac{\alpha(t)}{2\pi} \frac{dt}{t} \int_x^1 \frac{dz}{z} P_{ee}(z) \mathcal{D}_{ee}^{NS}\left(\frac{x}{z}, t\right), \quad (2)$$

где  $s(t)$  определяют масштаб факторизации. В данной Главе подробно разбирается итерационная процедура решений этих уравнений в КЭД. Для несинглетных функций распределения электрона в электроде выводятся аналитические выражения вплоть до пятого порядка разложения по  $\alpha^n L^n$  в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_{ee}^{NS}(z, Q^2) &= \mathcal{D}_{ee}^{NS, \gamma}(z, Q^2) + \mathcal{D}_{ee}^{NS, e^+e^-}(z, Q^2), \\ \mathcal{D}_{ee}^{NS, \gamma}(z, Q^2) &= \delta(1 - z) + \sum_{n=1}^5 \frac{1}{n!} \left(\frac{\beta}{4}\right)^n P^{\otimes n}(z) + \mathcal{O}(\alpha^6), \\ \mathcal{D}_{ee}^{NS, e^+e^-}(z, Q^2) &= \frac{1}{3} \left(\frac{\beta}{4}\right)^2 P^{\otimes 1}(z) + \left(\frac{\beta}{4}\right)^3 \left[ \frac{1}{3} P^{\otimes 2}(z) + \frac{4}{27} P^{\otimes 1}(z) \right] \\ &+ \left(\frac{\beta}{4}\right)^4 \left[ \frac{1}{6} P^{\otimes 3}(z) + \frac{11}{54} P^{\otimes 2}(z) + \frac{2}{27} P^{\otimes 1}(z) \right] + \left(\frac{\beta}{4}\right)^5 \left[ \frac{1}{18} P^{\otimes 4}(z) \right. \\ &+ \left. \frac{7}{54} P^{\otimes 3}(z) + \frac{10}{81} P^{\otimes 2}(z) + \frac{16}{405} P^{\otimes 1}(z) \right] + \mathcal{O}(\alpha^6), \\ \beta &= \frac{2\alpha}{\pi}(L - 1), \quad L = \ln \frac{Q^2}{m_e^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Индексом  $\gamma$  помечена чисто фотонная часть структурной функции. Вторая часть описывает поправки за счет  $e^+e^-$  пар и, начиная с третьего порядка, с возможностью также и фотонного излучения. Функции расщепления высших порядков получаются путем конволюции:

$$\begin{aligned} P^{\otimes(n+1)}(z) &= \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 P^{\otimes 1}(x_1) P^{\otimes n}(x_2) \delta(z - x_1 x_2), \\ P^{\otimes 1}(x) &\equiv P_{ee}(x) = \left[ \frac{1+x^2}{1-x} \right]_+. \end{aligned} \quad (4)$$

Все свертки, входящие в выражение (3), найдены аналитически. Показывается, что учет вкладов пертурбативного разложения выше третьего порядка избыточен для большинства задач, в силу ограниченности экспериментальной точности. Однако в особых случаях, например, для процесса  $e^+e^-$  аннигиляции на коллайдере LEP2 и ведущие поправки четвертого порядка следует принимать во внимание. Это обусловлено появлением в радиационных поправках усиливающего фактора, связанного с радиационным возвращением на резонансное рождение  $Z$ -бозона. Кроме того, полезно численно сравнить итерационное решение с прямым учетом поправок разных порядков и аналогичные решения уравнений эволюции КЭД с экспоненциацией части слагаемых, полученными в работе [9]. Оказывается, что разница численно незначительна.

**Глава 2.** Во второй Главе поднимается вопрос об учете поправок, следующих за ведущими. Как показано в первой Главе, поправки в ВЛП дают численно наиболее значимую часть эффекта. Однако современные эксперименты требуют создания и более точных теоретических предсказаний. Для многих процессов, изучаемых в настоящее время, полные поправки первого порядка хорошо известны, их вычисления многократно проверены и опубликованы. Однако на практике для учета особых требований вновь возникающих экспериментов возникает необходимость проведения новых вычислений и в первом, и в более высоких порядках. В качестве примера в этой Главе рассматривается расчет  $\mathcal{O}(\alpha)$  поправок к процессу тормозного излучения лептоном при рассеянии на тяжелом ядре. Полученные результаты предназначены для использования при анализе данных эксперимента COMPASS, проводимого в ЦЕРН. В частности, условия эксперимента требовали аккуратного учета особенностей кинематически двойного тормозного излучения, часть диаграмм для которого приведена на Рис. 1.

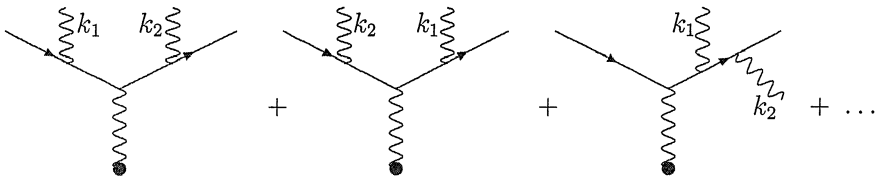


Рис. 1: Часть диаграмм Фейнмана, описывающих двойное тормозное излучение.

Далее в этой Главе обсуждается развитие метода структурных функций электрона в следующем за ведущим порядке  $\mathcal{O}(\alpha^n L^{n-1})$ . Это построение является центральным для данной диссертации. Как было показано выше, ведущие логарифмические КЭД поправки к процессам при вы-



соких энергиях можно описать с помощью подхода ренормализационной группы, используя факторизацию подпроцессов. Встает вопрос, можно ли распространить этот метод на случай вычисления следующих за ведущими поправок? Действительно, полной факторизации вкладов порядка  $\mathcal{O}(\alpha^n L^{n-1})$  относительно борновского сечения ожидать нельзя. Это хорошо видно на примере нефакторизованных нелогарифмических поправок первого порядка, рассмотренных выше. Во втором порядке по  $\alpha$  мы видим уже дополнительные источники следующих за ведущими логарифмических поправок, перепутывание которых с теми, что имелись в первом порядке, потенциально могло бы разрушить всю аналогию с ВЛП. Однако собственно применимость подхода ренормализационной группы не зависит от порядка теории возмущений ни по степеням  $\alpha$ , ни по степеням  $L$ . Из КХД берется и модифицируется к случаю КЭД мастер-формула, основанная на доказанной в КХД теореме факторизации. Рассмотрим для примера формулу, описывающую сечение Баба-рассеяния в подходе структурных функций электрона:

$$\begin{aligned} d\sigma = & \int_{\bar{z}_1}^1 dz_1 \int_{\bar{z}_2}^1 dz_2 \mathcal{D}_{ee}^{\text{str}}(z_1) \mathcal{D}_{ee}^{\text{str}}(z_2) \left( d\sigma^{\text{Born}}(z_1, z_2) + d\bar{\sigma}^{(1)}(z_1, z_2) \right. \\ & \left. + \mathcal{O}(\alpha^2 L^0) \right) \int_{\bar{y}_1}^1 \frac{dy_1}{Y_1} \int_{\bar{y}_2}^1 \frac{dy_2}{Y_2} \mathcal{D}_{ee}^{\text{frg}}\left(\frac{y_1}{Y_1}\right) \mathcal{D}_{ee}^{\text{frg}}\left(\frac{y_2}{Y_2}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $d\bar{\sigma}^{(1)}$  - это вклад порядка  $\mathcal{O}(\alpha)$  в сечение безмассового ( $m_e = 0$ ) Баба-рассеяния, рассчитанный в  $\overline{\text{MS}}$  схеме вычитания массовых сингулярностей. Второй аргумент структурных функций (масштаб факторизации) в формуле, приведенной выше, опущен для краткости. Доли энергии (по отношению к энергии исходных пучков в системе центра их масс), входящих в жесткий подпроцесс электрона и позитрона, заданы как  $z_{1,2}$ , а выходящих — как  $Y_{1,2}$ . Уравнения эволюции для структурных и фрагментационных функций решаются теперь в СВЛП аналогично тому, как это делалось в КХД. В работе (10) вычисление в СВЛП КЭД впервые проводится для случая распада, а именно, для решения задачи прецизионного описания распада мюона.

Мастер-формула (5) в следующем за ведущим приближении показывает, что все КЭД поправки порядка  $\mathcal{O}(\alpha^2 L)$  могут быть найдены, если известны формулы для сечения заданного процесса в борновском приближении и для радиационных поправок первого порядка к нему. Однако прямое применение этой формулы даст нам только инклюзивное по фотонному излучению значение для искомой поправки, тогда как в реальных случаях часто требуется наложить определенные ограничения на энергию и углы вылета испускаемых фотонов. Поэтому, учитывая высокую разре-

шающую способность современных детекторов, ставится вопрос о более детальном описании кинематики исследуемого процесса. Это достигается последовательным учетом факторизационных свойств вкладов поправок с разной кинематикой. Показывается, что путем выделения коллинеарных кинематических областей вдоль направлений движения легких заряженных частиц, можно аккуратно учесть все вклады в СВЛП и при этом иметь возможность накладывать любые экспериментальные ограничения на кинематику жестких фотонов, излученных на большие углы.

### Глава 3.

В третьей Главе представлены результаты применений разрабатываемых в диссертации методов для создания прецизионного теоретического описания конкретных процессов взаимодействия частиц, изучаемых в современных экспериментах на коллайдерах.

Одним из результатов диссертации, наиболее значимых для современной феноменологии элементарных частиц, является впервые проведенный расчет полного вклада следующих за ведущими радиационных поправок порядка  $\mathcal{O}(\alpha^2 L)$  к процессу Баба-рассеяния на малые углы в условиях экспериментов, проводившихся на LEP1 и LEP2. Эти поправки были найдены прямым счетом всех диаграмм Фейнмана относительного порядка  $\mathcal{O}(\alpha^2)$ , но при этом учитывались только вклады, усиленные большими логарифмами. Актуальность и важность данного расчета обусловлена тем, что экспериментальная точность измерения Баба-рассеяния на малые углы на LEP достигла рекордной для экспериментов при высоких энергиях точности 0.05%. Высокоточное измерение сечения данного процесса было абсолютно необходимо для выполнения физической программы LEP, поскольку по нему определялась светимость коллайдера. А экспериментальная неопределенность измерения последней давала вклад в систематические ошибки всех прецизионных тестов стандартной модели, проводившихся на LEP. Как сказано выше, желательно было иметь точность теоретического описания данного процесса на уровне одной третьей от экспериментальной, т.е. порядка 0.02%. Для такой точности необходим полный учет двухпетлевых радиационных поправок порядка  $\mathcal{O}(\alpha^2)$ , включая и те, что не усилены большими логарифмами, и ведущих логарифмических вкладов высших порядков. Более того, погрешность в определении вклада поляризации вакуума адронами на этом уровне точности уже существенна и ограничивает результирующую теоретическую точность на уровне 0.04%. Оценка теоретической неопределенности описания Баба-рассеяния на малые углы в условиях LEP, выведенная в рамках международной рабочей группы с учетом полученных в диссертации результатов, оказалась равна 0.11% для LEP1 (и 0.25% для LEP2), т.е. в два раза больше эксперимен-

тальной ошибки. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием на тот момент полных расчетов всех численно значимых КЭД радиационных поправок высших порядков. В частности, полное вычисление двухпетлевых диаграмм для данного процесса сопряжено с существенными техническими сложностями. Оно было проведено только относительно недавно [10].

Второй раздел 3-ей Главы посвящен построению систематического описания процессов, изучаемых на электрон-позитронных ускорителях с энергиями сталкивающихся пучков в системе центра масс порядка нескольких Гэв, таких как ВЭПП-2М, ВЭПП-2000 (Новосибирск), DAΦNE (Фраскати), BEPC-II (Пекин) и др. Решается задача повышения точности теоретических предсказаний за счет одновременного учета полных поправок первого порядка и ведущих логарифмических вкладов высших порядков. Для этого разрабатывается оригинальный метод шивки поправок первого и высших порядков. Метод основан на свойстве факторизации амплитуд (и сечений) подпроцессов, проходящих на разных масштабах расстояний. В частности, мы можем выделить радиационные факторы, описывающие подпроцесс жесткого тормозного излучения одного или нескольких фотонов внутри узкого конуса вдоль направления движения какой-либо заряженной частицы. Если импульс жесткого фотона  $\vec{k}$  коллинеарен импульсу, например, начальной заряженной частицы  $\vec{p}_1$  (угол между импульсами  $\vartheta_\gamma$  не превышает величины  $\vartheta_0$ ), то сечение процесса  $2 \rightarrow 2$  представимо в виде

$$\begin{aligned} & d\sigma[a(p_1) + b(p_2) \rightarrow c(q_1) + d(q_2) + \gamma(k \approx (1-z)p_1)] \\ & \approx d\hat{\sigma}[a(zp_1) + b(p_2) \rightarrow c(q_1) + d(q_2)] \otimes R_{\text{H}}^{\text{ISR}}(z), \\ R_{\text{H}}^{\text{ISR}}(z) &= \frac{\alpha}{2\pi} \left[ \frac{1+z^2}{1-z} \left( \ln \frac{E^2}{m^2} - 1 + l_0 \right) + 1 - z + \mathcal{O}\left(\frac{m^2}{E^2}\right) + \mathcal{O}(\vartheta_0^2) \right], \\ \vartheta_\gamma < \vartheta_0, \quad m/E \ll \vartheta_0 \ll 1, \quad l_0 &= \ln(\vartheta_0^2/4), \end{aligned}$$

где знак  $\otimes$  обозначает свертку сечений подпроцессов. Радиационные факторы (случай излучения из конечного состояния аналогичен) содержат логарифм  $\ln \frac{E^2}{m^2}$ , численно наиболее значимый при ультрарелятивистской энергии излучающей частицы,  $E \gg m$ . Свойство факторизации коллинеарного жесткого излучения одного фотона хорошо известно в литературе. Показано, что в высших порядках все ведущие логарифмические вклады, связанные с жестким излучением, также происходят из коллинеарных кинематических областей. Поэтому их можно учесть в приближении коллинеарной кинематики. Для повышения точности требуется выйти за рамки ведущего логарифмического приближения и учесть остальные слагаемые порядка  $\mathcal{O}(\alpha)$ . Часть из них присутствует в самих радиационных факторах, а часть — во вкладе неколлинеарного излучения, т.е. кинематической

области, в которой углы вылета фотона по отношению ко всем заряженным частицам превышают  $\vartheta_0$ . При этом важно, что последний вклад не содержит больших логарифмов. Зависимость от введенного вспомогательного параметра  $\vartheta_0$  сокращается в сумме вкладов коллинеарной и неколлинеарной кинематических областей. Вклады виртуальных (петлевых) поправок и мягкого тормозного излучения не меняют кинематики процесса. Потому учет ведущих логарифмических поправок в них сводится лишь к добавлению соответствующих слагаемых к известным результатам для поправок первого порядка. Используя эту схему, было построено прецизионное описание с теоретической точностью порядка 0.2% для процессов взаимодействия  $e^+e^-$ -пучков с образованием конечных состояний  $e^+e^-$ ,  $\gamma\gamma$  и  $\mu^+\mu^-$ , а для адронных  $\pi^+\pi^-$ ,  $K_L K_S$ , и  $K^+K^-$  точность оценена в 0.3%. В случае присутствия заряженных пионов и каонов в конечном состоянии мы использовали для них приближение точечных частиц, т.е. работали в рамках скалярной электродинамики. Это давало дополнительный источник теоретической неопределенности по сравнению со случаем чисто лептонных процессов. В случае рождения пары заряженных частиц вблизи порога, т.е. с малой относительной скоростью, помимо собственно пертурбативных поправок для учета взаимодействия в конечном состоянии учитывался и релятивизированный фактор Гамова-Зоммерфельда-Сахарова, выведенный в (34). На основании полученных формул был построен генератор событий по методу Монте-Карло [5] и использован при анализе данных экспериментов, проводившихся на ВЭПП-2М [6, 7]. Кроме того, разработанный в диссертации подход и выведенные формулы использовались независимо другими исследователями при создании программы *AfkQed*, используемой коллаборацией *VaBar* (Стэнфорд). Проводились также прецизионные сравнения с аналогичными результатами, полученными другими группами, использовавшими альтернативные методы шивки полных поправок первого порядка и ведущих логарифмических вкладов высших порядков. Получено хорошее согласие [5], что подтверждает наши оценки достигнутой теоретической точности. В недавно появившемся обзоре [11] международная рабочая группа описала современное состояние теоретических исследований в данной области.

Раздел 3.3 посвящен обоснованию и развитию *метода радиационного возвращения*. Сначала разбирается случай глубоконеупругого рассеяния (ГНР). В работе [12] было предложено утилизировать события с жестким тормозным излучением из начального состояния электрон-протонного рассеяния. На ускорителе HERA (Гамбург) эксперименты ZEUS и H1 имеют детекторы, расположенные практически под нулевым углом к налетающему электронному пучку. Как обсуждалось выше, коллинеарное

тормозное излучение усилено фактором, содержащим большой логарифм  $L = \ln(E_{\text{beam}}^2/m_e^2)$ . Вследствие этого, несмотря на подавляющий фактор  $\alpha/(2\pi)$ , набирается достаточно большое количество событий глубоководного рассеяния с детектированием жесткого тормозного фотона. Причем, практически гарантированно излучение происходило из начального состояния (остальные вклады дополнительно подавлены квадратом углового раствора детектора и не содержат  $L$ ). Таким образом, детектирование фотона позволяло полностью восстановить кинематику безрадиационного подпроцесса и расширить кинематическую область, в которой изучается ГНР, в сторону малых переданных импульсов и значений переменной Бьеркена  $x$ . В диссертации впервые найдены полные радиационные поправки порядка  $\mathcal{O}(\alpha)$  к ГНР с детектированием фотона. Показано, что величина поправок существенно зависит от выбора переменных, которые используются для экспериментального определения кинематики событий ГНР.

Позже в работе №18 нами впервые было предложено использовать *метод радиационного возвращения* для изучения процессов рождения адронов на электрон-позитронных коллайдерах с суммарной энергией пучков в системе центра масс порядка нескольких ГэВ. Ранее процесс  $e^+e^-$  аннигиляции с излучением жесткого фотона неоднократно рассматривался в литературе, в частности в [13]. В то время было подробно изучено явление радиационного возвращения на резонанс, которое состоит в том, что жесткое тормозное излучение электроном или фотоном приводит к эффективному уменьшению энергии пучков. Причем на эксперименте при этом наблюдается рождение адронных резонансов, имеющих массу меньшую, чем сумма энергий исходных пучков. В современных же экспериментах имеется возможность использовать известное ранее явление для целенаправленного исследования процессов рождения частиц с квадратом инвариантной массы меньшим квадрата суммы энергий исходных пучков. Для применения предложенного метода должны выполняться три основных условия: 1) высокая светимость ускорителя, поскольку наблюдаемые события с излучением жесткого фотона составляют лишь малую часть ( $\sim 1/\alpha$ ) от общего числа; 2) высокая экспериментальная точность определения импульсов и энергий наблюдаемых частиц, включая фотоны; 3) прецизионное теоретическое описание процессов тормозного излучения в электрон-позитронной аннигиляции. Все эти три условия реализовались в настоящее время. Эксперименты практически на всех существующих и планирующихся  $e^+e^-$  коллайдерах промежуточных энергий, таких как DAΦNE (Фраскати, Италия), PEP-II (Стэнфорд, США), KEKB (Цукуба, Япония), BEPC-II (Пекин, Китай) и ВЭПП-2000 (Новосибирск), имеют в

своей физической программе измерения с использованием метода радиационного возвращения. Активно проводятся также и дальнейшие теоретические исследования в данном направлении, см. обзор [11].

В разделе 3.4 предлагается новый метод определения бегущей постоянной электромагнитных взаимодействий из данных по наблюдению Бабарассеяния на малые углы. В настоящее время непertурбативный вклад адронов в зависимость значения  $\alpha(t)$  от квадрата переданного импульса  $t$  определяется с помощью дисперсионных соотношений из данных процессов  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны и альтернативно из адронных мод распадов тау-лептона. Важность прецизионного изучения этой зависимости обусловлена тем, что величина  $\alpha(t)$  входит в определение большинства изучаемых в современных экспериментах физики высоких энергий наблюдаемых. Кроме того, сам адронный вклад в поляризацию вакуума интересен с точки зрения исследований непertурбативной области КХД. В диссертации предлагается выделить искомую зависимость из прецизионных данных, полученных при определении светимости на LEP1, LEP2 и в будущем на международном линейном коллайдере ILC. На основании результатов раздела 3.1 мы можем утверждать, что теоретическое описание процесса Бабарассеяния на малые углы выполнено с высокой точностью. Наблюдаемое дифференциальное сечение по квадрату переданного импульса может быть представлено в виде произведения трех факторов:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma^0}{dt} \left( \frac{\alpha(t)}{\alpha(0)} \right)^2 (1 + \Delta r(t)), \quad (6)$$

где  $d\sigma^0$  — борновское сечение,  $\Delta r(t)$  — суммарный вклад пертурбативных радиационных поправок, а  $\alpha(t)/\alpha(0)$  — искомое относительное изменение константы взаимодействия, зависящее от  $t$ . Предложенный метод уже использовался коллаборацией OPAL при анализе данных LEP [14]. Было показано, что получаемая зависимость адронной поляризации находится в согласии с той, что получается при использовании стандартных методов, хотя точность результатов нового метода пока недостаточно высока. Последнее обусловлено, в первую очередь, систематическими экспериментальными погрешностями.

**Глава 4.** В четвертой Главе подробно описывается построение высокоточного теоретического описания спектра распада мюона. Актуальность этой задачи связана с проходившим в недавнее время экспериментом TWIST (Ванкувер), в котором с точностью порядка  $10^{-4}$  определялись параметры Мишеля, параметризующие модельно независимым образом названный спектр. Такая высокая точность не позволяла ограничиться известными в литературе поправкам первого порядка. Однако нахождение

полного вклада поправок второго порядка по  $\alpha$  остается до сих пор нерешенной задачей из-за существенных технических трудностей, связанных с наличием трех размерных параметров (массы мюона, массы электрона и квадрата 4-х импульса унесенного парой нейтрино). В этом случае применение развитых в диссертации методов учета наиболее значительных поправок высших порядков оказалось верным ключом к решению проблемы.

Спектр распада мюона описывается следующей формулой:

$$\frac{d^2\Gamma_{\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu}}}{dz d\cos\theta} = \Gamma_0 [F(z) - P_\mu G(z) \cos\theta], \quad \Gamma_0 \equiv \frac{G_\mu^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \left(1 + \frac{3}{5} \frac{m_\mu^2}{m_W^2}\right),$$

$$z \equiv \frac{2E}{(1+r^2)m_\mu}, \quad r \equiv \frac{m_e}{m_\mu}, \quad z_0 \leq z \leq 1, \quad z_0 \equiv \frac{2r}{1+r^2}, \quad (7)$$

где  $m_e$  и  $m_\mu$  — массы электрона и мюона;  $\theta$  — угол между направлением вылета позитрона и спина мюона (для перехода к случаю распада  $\mu^-$  достаточно поменять знак перед  $\cos\theta$ );  $P_\mu$  — степень поляризации мюона;  $E$  — энергия позитрона.

Функции  $F(z)$  и  $G(z)$  описывают изотропную и анизотропную части спектра позитрона. Их можно разложить в ряд по  $\alpha$  и по большому логарифму  $L = \ln(m_\mu^2/m_e^2) \approx 11$ :

$$F(z) = f_{\text{Born}}(z) + \frac{\alpha}{2\pi} [L f_1^{LL}(z) + f_1^{NLL}(z)] + \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 [L^2 f_2^{LL}(z) + L f_2^{NLL}(z)]$$

$$+ \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^3 L^3 f_3^{LL}(z) + \mathcal{O}(\alpha^2 L^0, \alpha^3 L^2, \alpha^4 L^4), \quad (8)$$

и аналогично для  $G(z)$ .

Во-первых, для уточнения существовавших в литературе результатов для процесса распада поляризованного мюона в диссертации был проведен полный расчет поправок первого порядка с учетом точной зависимости от массы электрона, которая ранее не была получена. Как и следовало ожидать, в пределе  $m_e \rightarrow 0$ , взятом всюду, кроме аргументов больших логарифмов, найденные выражения для  $f_1(x) = L f_1^{LL}(x) + f_1^{NLL}(x)$  и  $g_1(x)$  совпадают с классическими результатами [15].

Обратим внимание на то, что высокоточное измерение вперед–назад асимметрии по углам вылета электрона относительно направления спина распадающегося мюона дает дополнительную возможность осуществления прецизионной проверки предсказаний стандартной модели. Современные эксперименты по измерению времени жизни мюона приближаются по относительной точности к  $1 \cdot 10^{-6}$ . Измерение вперед–назад асимметрии с такой точностью помогло бы существенно продвинуться в поиске

отклонений от предсказаний стандартной модели, конечно, в комплексе с исследованиями, проводимыми сейчас при высоких энергиях на БАК.

В диссертации впервые проведены аналитические вычисления вкладов высших порядков теории возмущений КЭД к распаду мюона с помощью методов, развитых в первых двух Главах. Ранее в литературе рассматривалась только возможность экспоненциации вклада мягкого тормозного излучения. Нахождение полного вклада ведущих логарифмических поправок второго порядка  $f_2^{LL}(z)$  и  $g_2^{LL}(z)$  оказалось существенно для анализа экспериментальных данных по определению параметров Мишеля, которые можно выделить модельно независимым образом при рассмотрении Лоренц-структуры 4-х фермионных взаимодействий общего вида. В стандартной модели слабый заряженный ток взаимодействует только с левыми компонентами спинорных частиц ( $V - A$  взаимодействие), что приводит к предсказанию значений параметров Мишеля:  $\rho = 3/4$ ,  $\eta = 0$ ,  $\xi = 1$  и  $\delta = 3/4$ . Выяснилось, что эксперименты, проводившиеся ранее, существенно недооценивали систематическую ошибку, связанную с неучтенными ими радиационными поправками. Для реалистических экспериментальных условий вследствие учета поправок второго порядка в ВЛП рассчитаны следующие смещения значений параметров Мишеля:

$$\begin{aligned}\Delta\rho &\simeq 11 \cdot 10^{-4}, \\ \Delta\eta &\simeq 350 \cdot 10^{-4}, \\ \Delta\xi &\simeq 3 \cdot 10^{-4}, \\ \Delta\delta &\simeq 4 \cdot 10^{-4}.\end{aligned}\tag{9}$$

Результаты эксперимента TWIST, полученные с учетом вычисленных в диссертации поправок оказались в прекрасном согласии с предсказаниями стандартной модели:

$$\begin{aligned}\rho &= 0.7503 \pm 0.0004, \\ \eta &= 0.001 \pm 0.024, \\ \xi P_\mu &= 1.0007 \pm 0.0035, \\ \delta &= 0.7404 \pm 0.0006.\end{aligned}\tag{10}$$

Полезно отметить, что логарифмические поправки (кроме тех, что связаны с бегущей  $\alpha$ ) к спектру распада не дают вклада в полную ширину в согласии с теоремой Киношита-Ли-Науэнберга.

Для дальнейшего увеличения точности теоретического описания рассматриваемого процесса применен метод учета следующих за ведущими логарифмических поправок второго порядка,  $f_2^{NLL}(z)$  и  $g_2^{NLL}(z)$ , и поправок третьего порядка в ВЛП,  $f_3^{LL}(z)$  и  $g_3^{LL}(z)$ . Эти поправки численно сопоставимы с экспериментальной погрешностью, достигнутой экспериментом



TWIST, они были использованы для оценки теоретической неопределенности и будут востребованы при проведении в будущем более аккуратных экспериментов.

В последней части 4-ой Главы рассмотрены поправки к радиационному распаду  $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e\gamma$  с детектированием излученного фотона. Этот процесс интересен по двум причинам. Во-первых, когда суммарная энергия унесенная нейтрино мала, он дает фон к процессу безнейтринного распада  $\mu \rightarrow e\gamma$ . Во-вторых, изучение дифференциальных распределений радиационного распада позволяет получить дополнительную информацию о лоренцевской структуре слабых взаимодействий и искать отклонения от предсказаний стандартной модели.

Заметим, что все проведенные исследования, касающиеся описания распада мюона, легко переносятся на случаи распадов тау-лептона:  $\tau \rightarrow \mu\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$  и  $\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau$ . Однако точность экспериментального изучения этих распадов еще не так высока, чтобы учет поправок высших порядков стал актуальным.

**Заключение.** Здесь кратко суммируются основные научные результаты, представленные в диссертационной работе, формулируются положения, выносимые на защиту. Обсуждаются перспективы проведения дальнейших исследований по теме диссертации. Приводится неполный список семинаров и научных конференций, где докладывались и обсуждались основные результаты диссертации. Выражаются благодарности коллегам по совместной работе.

**Приложения.** Диссертация содержит два Приложения. В Приложении I приводится таблица интегралов конволюции функций, возникающих при вычислении поправок высших порядков методом ренормализационной группы. В частности, приводятся интегралы, необходимые для нахождения сверток обобщенных функций, регуляризованных плюс-прескрипцией. Аналитические выражения для всех интегралов проверены численно. Приложение II содержит сведения об основных свойствах специальных полилогарифмических функций, которые часто встречаются в аналитических формулах для радиационных поправок высших порядков, полученных в диссертации. Также приведены полезные соотношения между полилогарифмами разных аргументов. Использование этих формул позволило представить результаты в компактном виде, позволяющем легко переходить к предельным случаям.

# Список литературы

- [1] S.L. Glashow, Nucl. Phys. **22** (1961) 579;  
S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264;  
A. Salam, in "Elementary particle theory ed. N. Svartholm, Stockholm, Almqvist and Wiksel, 1968, p.367.
- [2] Э.А. Кураев и В.С. Фадин, ЯФ **41** (1985) 733.
- [3] В.Н. Грибов, Л.Н. Липатов, ЯФ, **15** (1972), 781; 1218;  
Л.Н. Липатов, ЯФ **20** (1988) 181;  
G. Altarelli and G. Parisi, Nucl. Phys. B **126** (1977) 298;  
Ю.Л. Докшицер, ЖЭТФ, **73** (1977), 1216-1249.
- [4] E.C.G. Stueckelberg, A. Peterman, Helv. Phys. Acta, **26** (1953) 499;  
M. Gell-Mann, F.E. Low, Phys. Rev. **95**, 5 (1954) 1300;  
N.N. Bogoliubov, D.V. Shirkov, Doklady AN SSSR, 103 (1955) 203.
- [5] A.B. Arbuzov, G.V. Fedotovitch, F.V. Ignatov, E.A. Kuraev and A.L. Sibidanov, *Monte-Carlo generator for  $e^+e^-$  annihilation into lepton and hadron pairs with precise radiative corrections*, Europ. Phys. J. C **46** (2006) 689–703.
- [6] R.R. Akhmetshin, E.V. Anashkin, A.B. Arbuzov et al. [CMD-2 Collaboration], *Measurement of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  cross section with CMD-2 around rho meson*, Phys. Lett. B **527** (2002) pp.161-172.
- [7] R.R. Akhmetshin, E.V. Anashkin, A.B. Arbuzov et al. [CMD-2 Collaboration] (45 co-authors), *Reanalysis of Hadronic Cross Section Measurements at CMD-2*, Phys. Lett. B **578** (2004) pp.285-289.
- [8] В.А. Матвеев, Р.М. Мурадян, А.Н. Тавхелидзе, Препринт ОИЯИ Р2-4543, Дубна, 1969;  
S.D. Drell and T.M. Yan, Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 316 [Erratum-ibid. **25** (1970) 902].
- [9] M. Przybycien, Acta Phys. Polon. B **24** (1993) 1105-1114.
- [10] A.A. Penin, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 010408.
- [11] S. Actis, A. Arbuzov, G. Balossini et al., *Quest for precision in hadronic cross sections at low energy: Monte Carlo tools vs. experimental data*, Europ. Phys. J. C **66**, Issue 3 (2010) 585-686.
- [12] M.W. Krasny, W. Placzek and H. Spiesberger, Z. Phys. C **53** (1992) 687.

- [13] В.Н. Байер, В.А. Хозе, ЖЭТФ, том 48 (1965) С.946, 1708; Ядерная физика, том 2 (1965) С.287; В.Н. Байер, В.М. Катков, В.С. Фадин, Излучение релятивистских электронов, М:Атомиздат, 1973, 375с.
- [14] G. Abbiendi *et al.* [OPAL Collaboration], Eur. Phys. J. C 45 (2006) 1-21.
- [15] T. Kinoshita and A. Sirlin, Phys. Rev. 113 (1959) 1652.

Получено 3 декабря 2010 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 06.12.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,97. Тираж 100 экз. Заказ № 57179.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)