

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-96-63

A-795

На правах рукописи
УДК 530.145

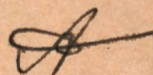
АРБУЗОВ
Андрей Борисович

ЭФФЕКТЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВOK
В БЕТА-РАСПАДЕ ПИОНА
И ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996



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:

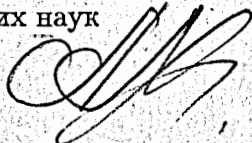
Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится "17" апреля 1996 г. 16⁰⁰
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 "12" марта 1996 г.

Ученый секретарь специализированного Совета
доктор физико-математических наук


А.Е. Дорохов

Общая характеристика работы

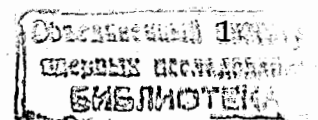
Диссертация посвящена изучению разнообразных эффектов, связанных с радиационными поправками (РП) в ряде процессов взаимодействия элементарных частиц. Теоретические расчеты проводились в рамках Стандартной модели. Принимались во внимание конкретные экспериментальные условия. РП вычислялись аналитически в первом и втором порядках теории возмущений. Найден ряд эффектов, имеющих нетривиальные следствия для наблюдаемых величин.

Актуальность проблемы. При извлечении физической информации о взаимодействии элементарных частиц необходимо знание радиационных поправок (РП). В настоящее время это особенно актуально в связи с колоссальным ростом точности экспериментальной техники. Кроме того, путь расширения наших знаний, основанный на более точном анализе доступных на существующих установках наблюдаемых процессов, выходит сейчас на первый план по сравнению с путем экстенсивного развития — повышения энергии и строительства новых установок.

Помимо своей основной роли — количественного изменения значений наблюдаемых величин, РП приводят к новым эффектам, отсутствующим в борновском приближении. Диссертация посвящена исследованию таких эффектов в ряде процессов, изучаемых на современных установках. Причем выбор задач в первую очередь определялся конкретными запросами экспериментаторов и результаты находят применение в ряде практических исследований.

Проведенное исследование имело **следующие цели:**

- С точки зрения современных представлений проанализировать квантовоэлектродинамические (КЭД), электрослабые и связанные с сильным взаимодействием радиационные поправки к ширине бета-распада заряженного пиона.
- Вычислить РП первого порядка к дифференциальному сече-



нию процесса электрон–позитронной аннигиляции в тяжелую фермионную пару с точным учетом масс рождающихся частиц.

- Исследовать односпиновые корреляции в процессах образования пары циркулярно поляризованным фотоном и тормозного излучения продольно поляризованным электроном при взаимодействии с заряженной мишенью. Предложить новые методы определения степени поляризации для современных ускорителей высоких энергий.
- Провести последовательное вычисление в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях вклада процесса образования пар в сечение Баба–рассеяния на малые и большие углы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. В рамках Стандартной модели электрослабого взаимодействия и реалистической модели киральных лагранжианов проведен анализ вкладов РП в бета–распад пиона. Найдено новое значение поправки к ширине распада с точностью необходимой для планируемого эксперимента.
2. Впервые получены аналитические формулы для поправок порядка $\mathcal{O}(\alpha)$ к конечному состоянию реакции $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}(\gamma)$ с точным учетом масс рождающихся частиц.
3. Предложены новые методы определения циркулярной поляризации фотона и продольной поляризации электрона в современных экспериментах при высоких энергиях.
4. Проведено актуальное для коллайдера ЛЭП 1 и строящихся мезонных фабрик вычисление вкладов радиационных поправок, связанных с образованием электрон–позитронных пар, к процессу Баба–рассеяния на малые и большие углы.

5. Развита новый метод вычисления нелидирующих логарифмических поправок во втором порядке теории возмущений, основанный на разбиении фазового объема конечных частиц на коллинеарную и полуколлинеарную области.

Практическая ценность диссертации определяется в первую очередь тем, что исследования всех процессов ориентированы на конкретные современные экспериментальные программы. Знание поправки к ширине бета–распада пиона необходимо для извлечения из экспериментальных данных значения матричного элемента V_{ud} матрицы Кабиббо–Кобаяши–Москава. Учет точной зависимости от масс рождающихся частиц в процессе $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ будет важен для строящихся мезонных фабрик, где будет исследоваться область энергий, близкая к порогу реакции. Полученная поправка к вперед–назад асимметрии в этой реакции используется при анализе данных по рождению b -кварков на ускорителе ЛЭП 1. Рассчитанные вклады поправок второго порядка к Баба–рассеянию на малые углы применяются на ЛЭП 1 при прецизионном измерении светимости установок, что позволяет уменьшить ошибку измерения большинства извлекаемых из опыта физических параметров. Новые методы и подходы, развитые в диссертации, могут быть использованы в вычислениях РП к другим процессам взаимодействия частиц.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, на Втором рабочем совещании "Физика на ВЛЭПП" (Протвино, 1992), на рабочем совещании "Спиновые явления в жестких столкновениях" (Гатчина, 1994) и на семинаре физического отделения университета г. Парма (Италия).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано девять работ [1–9].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Работа содержит 134 страниц, включая 26 рисунков и библиографический список литературы из 122 наименований.

Содержание работы

Во Введении очерчен круг исследуемых проблем, кратко сформулированы используемые методы. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Изложена структура диссертации.

В первой главе диссертации исследуются радиационные поправки к бета-распаду заряженного пиона. Анализируются вклады сильных, электрослабых и КЭД поправок. При анализе вкладов сильного взаимодействия используется реалистическая модель киральных лагранжианов взаимодействий мезонов в области низких энергий. Показано, что эффективным импульсом обрезания импульса виртуального фотона в расходящихся петлевых диаграммах служит масса ρ -мезона, определяющая масштаб сильного взаимодействия пиона и фотона. Для результирующей поправки δ_π , определенной через отношение ширины бета-распада пиона и распада мюона

$$\frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e)}{\Gamma(\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^+ \nu_e)} = \frac{|V_{ud}|^2 192}{30} \left(\frac{\Delta}{m_\mu}\right)^5 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} (\pi^2 - \frac{25}{4})\right) \times (1 + \delta_\pi) \left(1 - \frac{3\Delta}{2m_\pi} - \frac{5m_e^2}{\Delta^2}\right), \quad (1)$$

получено значение $\delta_\pi = -0.015$. Сделана оценка вклада в наблюдаемые на эксперименте события фонового процесса $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma \gamma$, когда инвариантная масса двух фотонов близка к массе π^0 -мезона. Фон найден пренебрежимо малым.

Содержание этой главы опубликовано в работах [1,2].

Во второй главе диссертации рассматриваются эффекты радиационных поправок к конечному состоянию реакции

$$e^+(k_2) + e^-(k_1) \rightarrow (\gamma, Z^0) \rightarrow f^+(p_2) + f^-(p_1) + (\gamma(p)). \quad (2)$$

Получены аналитические выражения для вкладов в дифференциальное сечение с точным учетом масс рождающихся фермионов (лептонов или кварков) в однопетлевом приближении. В рамках Стандартной модели электрослабого взаимодействия Глэшоу-Вайнберга-Салама учтены вклады фотона и Z -бозона в промежуточном состоянии. Учтена возможность экспериментального обрезания по энергии излучаемого фотона (или глюона). Получен вклад в поправку к вперед-назад асимметрии вылета заряженных частиц, пропорциональный первой степени массы рождающихся фермионов. Численные результаты, характеризующие процессы на существующих и планирующихся e^+e^- -коллайдерах, представлены в виде графиков.

Содержание второй главы опубликовано в работе [3].

В третьей главе диссертации изучены процессы образования пар фотоном и тормозного излучения электроном с точки зрения их возможного использования для определения степени поляризации начальных частиц. Причем предполагались условия регистрации конечных частиц, характерные для современных ускорителей средних и высоких энергий:

$$1 \gg \theta_i \gg m_e/\varepsilon, \quad (3)$$

то есть углы регистрации считаются малыми ($\sim 10^{-2}$ рад) (это существенно увеличивает статистику), но доступными для измерения (ε — энергия начальной частицы). Путем прямых вычислений найдено, что интерференция однопетлевых диаграмм Фейнмана типа взаимодействия в конечном состоянии с борновскими диаграммами приводит к появлению азимутальной асимметрии вылета продуктов реакции:

$$\frac{d\sigma(\mathbf{n}) - d\sigma(-\mathbf{n})}{d\sigma(\mathbf{n}) + d\sigma(-\mathbf{n})} = \zeta A \sin \phi(\mathbf{n}\mathbf{k}), \quad \mathbf{n} = \frac{[\mathbf{q}_1^\perp \times \mathbf{q}_2^\perp]}{[|\mathbf{q}_1^\perp \times \mathbf{q}_2^\perp|]}, \quad (4)$$

где \mathbf{k} есть единичный вектор вдоль импульса начального фотона (или электрона), ζ — степень его поляризации, \mathbf{q}_i^\perp — суть поперечные начальному пучку составляющие импульсов компонент родившейся пары (или рассеянного электрона и излученного фотона), $\phi = \widehat{\mathbf{q}_1^\perp \mathbf{q}_2^\perp}$. В обоих процессах асимметрия возникает именно как эффект радиационных поправок. Анализирующие способности реакций A пропорциональны $\alpha \approx 1/137$. Однако, как показывает численный анализ полученных выражений, при определенных правилах отбора событий рассматриваемые процессы могут служить для быстрого и точного определения степени продольной поляризации электронов или циркулярной поляризации фотонов высоких энергий в процессах их взаимодействия с заряженной мишенью.

Содержание третьей главы опубликовано в работе [4].

В **четвертой главе** впервые вычислены во втором порядке теории возмущений с учетом ведущих ($\sim (\alpha L/\pi)^2$) и следующих за ведущими ($\sim (\alpha/\pi)^2 L$) радиационных поправок к процессу Баба-рассеяния на малые углы, связанных с рождением виртуальных и реальных электрон-позитронных пар. Здесь L — так называемый *большой логарифм*, $L = \ln(Q^2/m_e^2)$, где Q^2 есть квадрат переданного импульса, $L \sim 15$ для условий ЛЭП 1. Знание рассматриваемых поправок необходимо для прецизионного определения светимости на детекторах коллайдера ЛЭП 1. Получены аналитические выражения с учетом характерных для эксперимента углов регистрации частиц и возможного обрезания по их энергиям. Представленный численный анализ показывает, что вклад процесса рождения пар невелик, но должен учитываться для достижения точности теоретических расчетов лучшей 0.1%.

Содержание четвертой главы опубликовано в работах [5,6,7].

В **пятой главе** исследован вклад РП за счет образования пар в случае Баба-рассеяния на большие углы. Отсутствие малого параметра — угла рассеяния, облегчавшего вычисления в предыдущей главе, приводит к необходимости учета дополнительно большого числа диаграмм Фейнмана. Путем использования изве-

стных в литературе формфакторов, операторов поляризации вакуума в двухпетлевом приближении и интегралов по виртуальному импульсу в бокс-диаграмме получены вклады всех, за исключением одного, классов РП, связанных с образованием виртуальных пар. Последний класс соответствует двухпетлевым бокс-диаграммам с вставкой поляризации вакуума в пропагатор одного из виртуальных фотонов. Вычисление вклада таких диаграмм в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях было проведено впервые. В случае рождения реальных электрон-позитронных пар существенным моментом был учет попарной тождественности частиц в конечном состоянии. Вклады в радиационную поправку были найдены с помощью метода разбиения на коллинеарную и полуколлинеарную кинематические области. В коллинеарной области предполагалось, что обе частицы из родившейся пары движутся 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 (ε — энергия начальных пучков). В полуколлинеарной области предполагалось, что только одна частица из родившейся пары движется внутри такого узкого конуса с осью в направлении одной из остальных (начальных или конечных) заряженных частиц. Показано, что в этих областях сечение в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях может быть представлено в виде партонной картины. В коллинеарной области в качестве жестких подпроцессов выступают процессы КЭД типа $2 \rightarrow 2$ (Баба-рассеяние, комптоновское рассеяние, двухквантовая аннигиляция и процесс $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$). В полуколлинеарной области в качестве жестких подпроцессов выступают процессы КЭД типа $2 \rightarrow 3$ (излучение жесткого фотона в e^+e^- -рассеянии и процесс образования пары в фотон-электронном (-позитронном) столкновении). В сумме вкладов рассмотренных кинематических областей вспомогательный параметр θ_0 сокращается.

Содержание пятой главы опубликовано в работах [8,9].

В **Заключении** подробно обсуждаются основные результаты

работы и приводятся конкретные экспериментальные программы, использующие полученные теоретические предсказания.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Проведен анализ сильных, электрослабых и КЭД радиационных поправок к ширине бета-распада пиона и полученное новое значение для результирующей поправки. Сделана оценка ширины фонового к бета-распаду пиона распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma \gamma$.
2. Впервые получены аналитически формулы для поправок порядка $\mathcal{O}(\alpha)$ к конечному состоянию реакции $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}(\gamma)$ с точным учетом масс рождающихся частиц. Найден вклад в поправку во вперед-назад асимметрию рассматриваемого процесса, пропорциональный первой степени массы рождающихся фермионов.
3. Выведены формулы для анализирующей способности определения степени поляризации циркулярно поляризованного фотона и продольно поляризованного электрона во взаимодействиях с заряженной мишенью при высокой энергии. Степень поляризации фотона предлагается определять по азимутальной асимметрии в процессе образования пары, а степень поляризации электрона — по азимутальной асимметрии в процессе тормозного излучения.
4. С учетом экспериментальных условий на ЛЭП 1 найден вклад в сечение Баба-рассеяния на малые углы, связанный с образованием виртуальных и реальных пар. Поправки получены в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях. Показана необходимость учета неведущих логарифмических слагаемых во втором порядке теории возмущений для достижения необходимой точности теоретических предсказаний.
5. В рамках систематического анализа вкладов РП в процесс Баба-рассеяния на большие углы получены аналитические выражения для вкладов в дифференциальное сечение, связанных с образованием электрон-позитронных пар в рассматриваемом процессе. С помощью обобщенной теоремы факторизации получены

вклады в ведущем и следующем за ведущим логарифмических приближениях.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, N.V. Makhaldiani, *Radiative corrections to the pion beta-decay*, Письма в ЖЭТФ, т.59 (1994) с.639–643.
- [2] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, N.V. Makhaldiani, *Radiative and rare μ and π decays*, Сообщения ОИЯИ, Дубна, Е4–93–196, 1993, 14 стр.
- [3] A.B. Arbuzov, D.Yu. Bardin, A. Leike, *Analytic final state corrections with cut for $e^+ e^- \rightarrow$ massive fermions*, Modern Phys. Lett. A 7 (1992) p.2029–2038; *Erratum ibid* A 9 (1994) p.1515; также — в Трудах второго рабочего совещания "Физика на ВЛЭПП", Протвино, 1992, т.1, с.169–181.
- [4] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, D.Yu. Peresunjko, A.V. Tarasov, *One-spin asymmetries in pair production and bremsstrahlung processes*, Preprint JINR, Dubna, E2–95–44, 1995, 23p.; принято к публикации в журнале "Ядерная Физика" 59 №4 (1996).
- [5] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Pair production in small angle Bhabha scattering*, ЖЭТФ, т.108 (1995) с.1164–1178; preprints JINR, Dubna, E2–95–110, 1995, 22p., CERN-TH/95-241.

- [6] A. Arbuzov, V. Fadin, E. Kuraev, L. Lipatov, N. Merenkov, L. Trentadue, *Small angle Bhabha scattering for LEP*, in D. Bardin, W. Hollik, G. Passarino (eds.) *Reports of the working groups on precision calculations for the Z resonance*, CERN Yellow Report, CERN 95-03 (1995) p.369-387.
- [7] A. Arbuzov, V. Fadin, E. Kuraev, L. Lipatov, N. Merenkov, L. Trentadue, *Small-Angle Electron-Positron Scattering with a Per Mille Accuracy*, preprints CERN-TH/95-313, UPRF-95-438, 42p.,
послано в журнал "Nuclear Physics B".
- [8] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Hard Pair Production in Large-Angle Bhabha Scattering*, Preprint JINR, Dubna, E2-95-412, 1995, 16p.
послано в журнал "Nuclear Physics B".
- [9] A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, *Virtual and Soft Real Pair Production in Large-Angle Bhabha Scattering*, Preprint JINR, Dubna, E2-95-421, 1995, 20p.
послано в журнал "Ядерная Физика".

Рукопись поступила в издательский отдел
23 февраля 1996 года.