

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-2005-3

Б-957На правах рукописи
УДК 539.12.01+539.126.33+539.126.34+539.126.3БЫТЬЕВ
Владимир ВячеславовичМЕТОД СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ
ДЛЯ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВК
К СЕЧЕНИЯМ ПРОЦЕССОВ НА КОЛЛАЙДЕРАХ
И РАСПАДАМ МЕЗОНОВ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

324.1a

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор

Э.А. Кураев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.Е. Дорохов (ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

В. Т. Ким (ПИЯФ РАН, г. Гатчина)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2005 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “___” _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.И. Федотов

Актуальность темы

Проблема вычисления радиационных поправок (РП) к сечениям процессов на коллайдерах так же как и их учет при расчете ширины распада мезонов в настоящее время является очень важной. Возросшие точности опытов предъявляют более жесткие требования к теоретическому описанию этих процессов. Учет низших поправок теории возмущений (ТВ), построенной в рамках Стандартной Модели (СМ) отвечает поправкам порядка величины постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$. В случае когда в процессе участвуют частицы, сильно различающиеся по массе, или процесс происходит при больших энергиях, соответствующие вклады могут содержать логарифмическое усиление, т.е. слагаемые типа $(\alpha/\pi)L$, $L = \ln(M^2/m^2)$, где в качестве масштаба M выступает масса тяжелой частицы или суммарная энергия $L = \ln(s/m^2)$, $s = 4E^2$ частиц в системе центра масс начальных частиц. Далее мы предполагаем эти величины много большими ненулевой массы легкой частицы: $M, 2E \gg m$. Такого типа усиленные (лидирующие) вклады не малы и соответствующие РП могут составлять десятки процентов, тогда как нелидирующие, т.е. не содержащие логарифмического усиления ($\sim (\alpha/\pi) \sim 0.0025$),

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

как правило, составляют доли процента. Для извлечения физической информации из данных прецизионного опыта оказывается недостаточным ограничиться учетом РП низшего порядка ТВ. Расчет же поправок второго порядка по константе тонкой структуры сопряжен со значительными вычислительными трудностями.

Другим аспектом, подчеркивающим необходимость прецизионных расчетов в рамках СМ и, в частности, квантовой электродинамики (КЭД), является тот факт, что сечения и вероятности процессов электродинамической природы по величине как правило превышают таковые неэлектромагнитного происхождения и представляют собой существенный фон при исследовании эффектов физики мезонов, проявлений сильных и слабых взаимодействий.

В связи с необходимостью учета вкладов высших порядков ТВ с достаточной точностью полезными являются разного рода приближенные методы расчета РП. Среди них ведущее место занимает метод, основанный на использовании группы перенормировок. Он основан на гипотезе подобия и представляет собой обобщение уравнений Гелл-Манна-Лоу и Калана-Симанзика, полученных в КЭД для двух- и трехточечных функций Грина.

Гипотеза факторизации и партонная модель, обоснованная

в квантовой хромодинамике (КХД) и получившая там большое количество приложений, оказалась чрезвычайно полезной и в квантовой электродинамике. Обобщив метод квази-реальных электронов и известные теоремы о факторизации инфракрасных расходимостей, в КЭД была построена качественно новая программа учета радиационных поправок к сечениям процессов. В ее рамках сечение представляется как свертка некоторых универсальных функций, которые представляют собой плотности вероятности найти в окружении данной начальной или конечной частицы некую другую (партон), и жесткого сечения взаимодействия партонов, рассчитанного в рамках борновского приближения. Все это называется обобщенной картиной Дрела-Яна:

$$\sigma_{AB}^{CD} = \sum_{a,b,c,d} \int dx_1 dx_2 \int \frac{dy_1}{y_1} \frac{dy_2}{y_2} D_A^a(x_1, s) D_B^b(x_2, s) \quad (1.1)$$

$$\times \tilde{\sigma}_{ab \rightarrow cd}(sx_1 x_2) D_c^C\left(\frac{y_C}{y_1}\right) D_d^D\left(\frac{y_D}{y_2}\right).$$

Универсальные функции (функции расщепления D_A^a и функции фрагментации D_d^D) описывают плотность вероятности обнаружить в начальной частице A партон a и в партоне d конечную частицу D с соответствующими долями энергии от энергий частицы-родителя и квадратом импульса q^2 (сходом с массовой поверхности), $L = \ln(|q^2|/m^2)$. Эти универсальные функции подчиняются системе интегро-дифференциаль-

ных уравнений эволюции, известных в КХД как уравнения Докшицер-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи и впервые написанных в КЭД Л. Н. Липатовым.

Приведенный выше вероятностный вид сечения открывает новые возможности для опытов. Так, например, информацию о сечениях процессов, происходящих в γe коллайдерах можно проверить и из данных, полученных в $\gamma\gamma$ и $e e$ коллайдерах. Сечение $\gamma\gamma \rightarrow X$ можно изучать в $\gamma\gamma$ и $e\bar{e}$ коллайдерах (двухфотонный механизм рождения) и γe^\pm коллайдерах. Следует однако помнить, что при использовании "чужих" коллайдеров происходит потеря статистики, поскольку для современных установок функции расщепления или фрагментации

$$D_a^b(x, L) \sim \alpha/\pi L \leq 0.1, \quad a \neq b. \quad (1.2)$$

В частности, решение уравнений эволюции в ведущем логарифмическом приближении для плотности вероятности "найти" электрон в электроне ($D_{e^-}^{e^-}$, несинглетная часть D - функции) имеет вид:

$$D_{e^-}^{e^-}(x, L) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\alpha}{2\pi} L \right)^n P^{(n)}(x), \quad (1.3)$$

$$P^{(n)}(x) = \int_x^1 \frac{dy}{y} P^{(1)}(y) P^{(n-1)}\left(\frac{x}{y}\right),$$

$$P^{(1)}(x) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} [P_{\Delta}^{(1)} \delta(1-x) + P_{\theta}^{(1)}(x) \Theta(1-x-\Delta)],$$

$$P_{\theta}^{(1)}(x) = \frac{1+x^2}{1-x}, \quad P_{\Delta}^{(1)}(x) = 2 \ln \Delta + \frac{3}{2}.$$

Здесь вспомогательный параметр $\Delta = \Delta\epsilon/\epsilon$ и величина P_{Δ} могут ассоциироваться с $\Delta\epsilon$ - максимальной энергией мягких дополнительных фотонов и вкладом в сечение от излучения виртуальных и мягких фотонов. $P_{\theta}(x)$ ассоциируется с ведущим вкладом жестких (с энергией больше $\Delta\epsilon$) фотонов.

Основной целью диссертации является проверка справедливости представления (1.1) для сечений ряда процессов в КЭД, как "квазиупругих", т.е. типа $2 \rightarrow 2$, так и "радиационных", $2 \rightarrow 3$ с излучением дополнительного жесткого фотона или пары лептонов. Для последнего случая теорема факторизации в КХД не была доказана. Конкретные расчеты, проведенные в цитируемых ниже работах, позволили улучшить точность сечения (1.1), путем учета нелидирующих вкладов $\alpha/\pi(\alpha/\pi L)^n$ в виде дополнительного множителя т. н. К- фактора в подынтегральном выражении. Как правило, не удается получить короткого аналитического выражения для К- фактора, поэтому результат его вычисления представлен для конкретных задач в виде таблицы.

Аналогичная ситуация имеет место в случае распада тяжелой частицы с массой M в конечное состояние, в котором присутствует одна или несколько легких частиц массы m . Возни-

кающий в результате электромагнитного взаимодействия в конечном состоянии "большой логарифм" имеет вид $\ln M^2/m^2$, а дифференциальная ширина распада представляется в форме, определяемой теоремой факторизации:

$$d\Gamma_a(y) = \sum_b \int \frac{dy_1}{y_1} d\Gamma_B(y_1) D_b^a\left(\frac{y}{y_1}, L\right), \quad (1.4)$$

где y_1 - доля энергии партона, впоследствии распавшегося в систему конечных частиц, содержащих частицу a .

Согласно теореме Ли-Науенберга-Киношита полная ширина, проинтегрированная по спектру энергий конечных частиц, свободна от массовых сингулярностей, т.е. конечна в пределе $m \rightarrow 0$, и не содержит большого логарифма L , что обеспечивается свойством функции фрагментации

$$\int_0^1 dz D(z, L) = 1. \quad (1.5)$$

Целью работы является вычисление радиационных поправок к процессам на коллайдерах и распадам мезонов с явным выделением лидирующих и нелидирующих поправок во всех порядках ТВ в рамках ренорм-группы, а также подтверждение гипотезы факторизации для процессов типа $2 \rightarrow 3$ в КЭД.

Научная новизна и практическая ценность.

Применена идея использования гипотезы факторизации для описания процесса полулептонного распада К-мезона. В дан-

ном подходе получен явный вид ширины распада с учетом всех лидирующих и нелидирующих поправок, приведен спектр позитрона и пиона с учетом низших поправок, вычислена поправка к полной ширине распада и на ее основе определено новое значение элемента матрицы Кабиббо- Кабайяши- Маскавы (ККМ) V_{us} , удовлетворяющий соотношению унитарности.

Рассмотрены процессы типа $2 \rightarrow 3$, для которых явно показано соответствие гипотезе факторизации, что является нетривиальным фактом из-за наличия двух типов "больших" логарифмов. Явного доказательства такого факта до сих пор в литературе приведено не было.

Сечения большинства процессов, рассмотренных в диссертации, рассчитаны со степенной точностью, что позволяет принимать во внимание эволюцию не только лидирующих слагаемых, но и следующих за нелидирующими слагаемых.

Вычислен вклад от двухпетлевых диаграмм типа "box" со вставкой поляризации вакуума с учетом разных масс частиц, то есть вычислены все логарифмические члены, включая логарифм отношения масс.

Результаты Главы 1 были применены в обработке результатов эксперимента NA48 (CERN) и FNAL, а также в экспериментах на ускорителе в Протвино.

Формулы Главы 2,3 рассчитаны для использования в симу-

ляции и обработке на коллайдерах FNAL, КЕК и Новосибирске.

Глава 4 посвящена возможности калибровки и мониторинга пучков на фотон-электронном коллайдере SEBAF в лаборатории Джефферсона.

Результаты Главы 5 рассчитаны на будущие экспериментальные установки.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного Института Ядерных Исследований, а также представлялись и докладывались на международной зимней школе ПИЯФ по физике ядра и частиц (Репино, 2003), на школе молодых ученых и специалистов (Дубна, 2004).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ в отечественных и зарубежных журналах, а также опубликован препринт ОИЯИ.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из пяти глав и шести приложений, общим объемом 113 страниц, включая 10 таблиц, 18 рисунков и список цитированной литературы из 95 наименований.

Во Введении аргументируется актуальность решаемых задач, кратко описываются применяемые методы, обсуждаются возможные приложения и использование полученных результатов. Дано краткое содержание диссертации.

В первой главе исследуется распад заряженного K -мезона на позитрон, нейтральный пион и нейтрино ($Ke3$). После традиционного анализа распределений в борновском приближении рассматриваются РП низшего порядка ТВ в явном виде, с учетом лидирующих и нелидирующих вкладов, а также с излучением дополнительного мягкого и жесткого фотонов.

Ультрафиолетовые расходимости, возникающие при вычислении виртуальных поправок низшего порядка, согласно общепринятому принципу факторизации вкладов малых расстояний, представляются (после модификации за счет эволюции от разных масштабов: ρ, c, b, t, W, Z) в виде общего множителя, перенормирующего константу распада псевдоскалярных мезонов f_k .

Показывается, что поправки низшего порядка ТВ удовлетворяют теореме факторизации и поэтому можно применить аппарат перенормировок, позволяющий учесть поправки во

всех порядках ТВ в лидирующем и следующем приближениях.

Все расчеты приведены в аналитической форме, вычислен энергетический спектр позитрона и пиона, поправка к полному распаду К-мезона и на ее основе дано новое значение элемента матрицы ККМ V_{us} . Точность расчетов оценивается на уровне 0.1% по отношению к ширине распада К-мезона в борновском приближении.

В конце Главы приведены численные оценки величин поправок к пионному и позитронному спектрам и полной ширине распада К-мезона.

Во второй главе рассмотрен процесс радиационного образования пары мюонов и пионов при электрон-позитронной аннигиляции при высоких энергиях для случая, когда все 5 независимых кинематических инвариантов являются величинами одного порядка и много больше квадрата масс участвующих частиц. Прямым вычислением было показана справедливость гипотезы факторизации для данного типа процесса, то есть представление сечения физического процесса в виде свертки сечения в борновском приближении со структурными функциями начальных (и конечных) частиц. Вычисления в этом случае оказываются весьма громоздкими, в частности, оказывается необходимым рассматривать однопет-

левые интегралы с пятью виртуальными частицами (т.н. пентагон). Нелидирующие члены учтены в виде К-фактора и их значения приведены в виде таблицы.

В третьей главе исследуется рождение мюонной и пионной пары с малой инвариантной массой (по сравнению с энергией в с.д.и. начальных частиц) при столкновении электрон-позитронных пучков. Расчет проведен в предположении зарядово-четной постановки эксперимента.

В процессе вычислений использовались результаты работы Э. А. Кураева и В. С. Фадына для комптоновского тензора с тяжелым фотоном. Показано, что выражение для сечения образования мюонной пары удовлетворяет гипотезе факторизации процессов типа $2 \rightarrow 3$. Расчеты проведены также и для случая образования пары пионов. Точность результатов оценивается на уровне 0.1%. Для этого случая удалось получить явные аналитические выражения для нелидирующих вкладов.

Этот кинематический случай известен как механизм "возвращения на резонанс" и широко используется для изучения свойств адронов при не слишком больших энергиях (много меньших массы Z бозона) на e^+e^- коллайдерах.

В четвертой главе рассмотрен процесс комптоновского рассеяния на большой угол. Этот процесс используется для

целей калибровки и мониторинга пучков на фотон-электронном коллайдере SEBAF в лаборатории Джефферсона.

Необходимость в расчете РП с учетом вкладов высших приближений вызвана возможностью постановки прецизионных опытов на установке с высокой светимостью. Используя полученный в известной работе Брауна и Фейнмана (1952) результат вычисления виртуальных поправок и дополняя его вкладом от излучения дополнительного фотона, получено дифференциальное по энергии и углу сечение, учитывающее РП высших порядков ТВ. Оно может быть также представлено с учетом всех лидирующих и нелидирующих поправок (в виде свертки D-функций с сечением жесткого подпроцесса).

Также как и в рассмотренных выше процессах это сечение обнаруживает явление "возвращения на резонанс" и проявляет рост, имитирующий δ - функцию в случае, когда энергия и угол рассеяния конечного фотона связаны функциональной зависимостью процесса в борновском приближении. Приведены численные оценки для разных постановок эксперимента, в том числе и с излучением дополнительного жесткого фотона.

В пятой главе приведены вычисления для сечения квазиупругого рассеяния электрона на мюоне. Вычисления проведены в низшем порядке ТВ, и показано, что результат нахо-

дится в согласии с предсказаниями РГ. В данной части расчеты проведены со степенной точностью. Также проведен расчет вкладов квадратов "box"- диаграмм, вершинных частей и "box"- диаграмм со вставкой поляризации вакуума (следующий порядок ТВ) с логарифмической точностью. Вклады выписаны в явном виде и показано соответствие лидирующих членов предсказаниям ренорм-группы.

В Приложениях приведены подробности вычислений (расчет квадрата "box"- диаграмм, вклады от поляризации вакуума, излучения пар лептонов и пионов и т.д.), а также необходимые известные результаты из других работ.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Впервые применена идея использования гипотезы факторизации для описания процесса полуплептонного распада К-мезона. В данном подходе получен явный вид ширины распада с учетом всех лидирующих и нелидирующих поправок, приведен спектр позитрона и пиона с учетом низших поправок, вычислена поправка к полной ширине распада и на ее основе приведено новое значение элемента матрицы ККМ V_{us} . Это значение находится в согласии с условием унитарности матрицы ККМ.

2. Рассмотрены процессы типа $2 \rightarrow 3$, для которых явно показано соответствие гипотезе факторизации, что является нетривиальным фактом из-за наличия двух типов "больших" логарифмов. Явного доказательства такого факта до сих пор в литературе приведено не было.
3. Сечения большинства процессов, рассмотренных в диссертации, рассчитаны степенной точностью по логарифмическому приближению, что позволяет учесть эволюцию не только лидирующих слагаемых, но и следующих за нелидирующими слагаемых по теории возмущений.
4. Впервые вычислен вклад от двухпетлевых диаграмм типа "box" со вставкой поляризации вакуума с учетом разных масс частиц, то есть вычислены все логарифмические члены, включая логарифм отношения масс.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. A. B. Arbuzov, V. V. Bytev and E. A. Kuraev,
Radiative muon pair production in high-energy electron positron annihilation process
JETP Lett. **79** (2004) 593
Письма в ЖЭТФ, **79** (2004) 729
2. A. B. Arbuzov, E. Bartos, V. V. Bytev, E. A. Kuraev and Z. K. Silagadze,
High accuracy description of radiative return production of low-mass muon and pion pairs at e^+e^- colliders
JETP Letters, **80**, (2004) 806
3. V. V. Bytev, E. A. Kuraev and B. G. Shaikhatdenov,
(Quasi)elastic large-angle electron muon scattering in the two-loop approximation: Contributions of the eikonal type
J. Exp. Theor. Phys. **96** (2003) 193
ЖЭТФ **123** (2003) 224
4. V. Bytev, E. Kuraev, A. Baratt and J. Thompson,
Radiative corrections to the $K^{+-}(e3)$ decay revised
Eur. Phys. J. C **27** (2003) 57,
Erratum-ibid. C **34** (2004) 523
5. V. V. Bytev, E. A. Kuraev and B. G. Shaikhatdenov,
(Quasi)elastic electron muon large-angle scattering to a two-loop approximation: Vertex contributions
J. Exp. Theor. Phys. **95** (2002) 404
ЖЭТФ **122** (2002) 472
6. A. N. Ilyichev, E. A. Kuraev, V. Bytev and Y. P. Peresun'ko,
Compton and double Compton scattering processes at colliding electron photon beams
J. Exp. Theor. Phys. **127** (2005) 37.

Получено 20 января 2005 г.