

X-936

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-82-845

ХРИСТОВА

Пенка Христова

ОДНОПЕТЛЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В ТЕОРИИ ГЛЭШОУ-ВАЙНБЕРГА-САЛАМА

Специальность: 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1982

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Д.Ю. БАРДИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор

В.Г. КАДЫШЕВСКИЙ

кандидат физико-математических наук

В.Г. СЕРБО

Ведущее научно-исследовательское учреждение: физический  
институт им. П.Н.Лебедева АН СССР, Москва.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1982 года

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1983 года  
на заседании Специализированного совета К0.47.01.01. лабора-  
тории теоретической физики Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Как известно, объединенная теория слабых и электромагнитных взаимодействий Глэшу, Вайнберга и Салама (ГВС) <sup>/1-3/</sup> получила солидное экспериментальное подтверждение на древесном уровне. Присущая этой калибровочной теории перенормируемость позволяет однозначно рассчитывать поправки высших приближений. Однако справедливость предсказаний теории для эффектов высших порядков до сих пор не доказана экспериментально.

Вплоть до 1979 года складывалось мнение, что наблюдение эффектов высших порядков этой теории находится за пределами экспериментальных возможностей. Однако с конца 1979 года это мнение стало изменяться. Первоначально авторы работы <sup>/4/</sup> нашли довольно значительные электрослабые поправки для  $P$  - нечетной асимметрии сечений глубоко-неупругого рассеяния заряженных лептонов на нуклонах. Впоследствии несколько групп авторов <sup>/5-10/</sup>, в том числе и наша, независимо друг от друга нашли достаточно большие однопетлевые поправки к массам векторных калибровочных бозонов, порядка  $3 \div 4$  ГэВ, которые эксперимент может почувствовать.

В ближайшем будущем войдут в действие новые ускорители с высокой энергией встречных пучков, на которых будет возможно обнаружить тяжелые векторные калибровочные бозоны  $W^\pm$  и  $Z^0$  и с достаточной точностью измерить их массы, а также другие наблюдаемые величины (сечения различных процессов, отношения сечений, различные асимметрии и т.п.). Таким образом новые ускорители ( $SPS, LEP$ ) обеспечат экспериментальный материал для решающей проверки справедливости высших приближений теории ГВС, по крайней мере на однопетлевом уровне.

Поэтому актуальной является задача исследовать единым образом электрослабые однопетлевые поправки для различных процессов в теории ГВС, что позволит недвусмысленно интерпретировать данные существующих и намеченных экспериментов, а также обнаружить новые возможности для экспериментальной проверки теории.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

Важным составным элементом этого исследования является выбор наиболее подходящей схемы перенормировок. В литературе до сих пор встречается ряд недоразумений между разными группами авторов при обсуждении однопетлевых электрослабых поправок  $^{1/6,9,10}$ . Эти недоразумения вызваны, в основном, неодинаковыми определениями перенормированных параметров теории ГВС, которыми пользуются отдельные авторы, работая в разных схемах перенормировок. Поэтому крайне необходимо выделить единую процедуру перенормировок с ясными, однозначными, калибровочно инвариантными, определениями параметров теории, позволяющую единообразно рассчитать однопетлевые поправки для различных процессов. Именно в результате аккуратного проведения перенормировок удалось обнаружить большие статические эффекты однопетлевого порядка, обусловленные логарифмами типа  $\ln(M_W/m_f)$ , присутствующими в вакуумных петлях, вклад которых увеличен суммированием по поколениям лептонов и кварков.

Основной целью настоящей работы является вычисление единым образом однопетлевых электрослабых поправок к амплитудам широкого класса процессов при энергиях нынешних и будущих экспериментов в рамках теории ГВС.

#### Научная новизна и практическая ценность

Полученные в диссертации формулы позволяют вычислять амплитуды любых четырехфермионных и бозон-фермионных процессов, а также многих распадов векторных и скалярных бозонов, с точностью до однопетлевых поправок.

На основе естественной схемы перенормировок в диссертации впервые разграничиваются динамические и статические эффекты однопетлевого порядка в теории ГВС. Выделение статических эффектов позволило понять не только физический смысл большой поправки к массам  $W^\pm$  и  $Z^0$  бозонов, но также и смысл разных определений параметра Вайнберга:  $\sin^2\theta_W = 1 - M_W^2/M_Z^2$ ,  $\sin^2\theta_W^F = e^2(0)/g_F^2(0)$ ,  $\sin^2\theta_W^{exp}$ .

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработана естественная схема перенормировок с произвольным унитарным смешиванием фермионных полей.

2. Вычислены матрицы однопетлевых собственно-энергетических функций и констант перенормировки  $\sqrt{Z_{fL}}$ ,  $\sqrt{Z_{fR}}$ ,  $Z_{mf}$  фермионов в унитарной калибровке.

3. Показано, что однопетлевые амплитуды недиагональных фермионных переходов с нейтральными токами имеют относительный порядок малости  $(\alpha/4\pi)(m_f^2/M_W^2)$ .

4. Рассмотрена модификация теоремы Фэрри квантовой электродинамики для теории ГВС в однопетлевом приближении для диаграмм как с фермионной, так и с  $W$  - бозонной петлей.

5. Вычислены однопетлевые поправки к массам  $W$  и  $Z$  бозонов порядка  $3,5 \div 4$  ГэВ.

6. Вычислены в однопетлевом приближении параметры Вайнберга  $\sin^2\theta_W = 1 - M_W^2/M_Z^2$  и  $\sin^2\theta_W^F = e^2(0)/g_F^2(0)$  в зависимости от  $\sin^2\theta_W^{exp}$ , полученного в эксперименте SLAC.

7. С использованием естественной схемы перенормировок в унитарной калибровке, вычислены однопетлевые электрослабые поправки к амплитудам различных процессов в теории ГВС:

- а) Вычислена электрослабая поправка к времени жизни мюона;
- б) вычислены однопетлевые поправки и рассмотрены статические и динамические эффекты однопетлевого порядка в амплитудах четырехфермионных и бозон-фермионных процессов;

в) вычислены однопетлевые амплитуды для распадов  $W^- \rightarrow f^d + \bar{f}^u$ ,  $Z^0 \rightarrow f + \bar{f}$ ,  $\chi \rightarrow f + \bar{f}$ ,  $\chi \rightarrow V_1^0 + V_2^0$ .

#### Апробация диссертации

Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, болгарского землячества и Теоретического отдела ЛЭВЗ Физического института АН им. П.Н. Лебедева в Москве, а также на сессиях ОЯФ АН СССР (1981, 1982 гг.).

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано пять статей.

#### Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и шести приложений, содержит 150 страниц машинописного текста, 2 таблицы и 7 рисунков; библиографический список литературы включает 113 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор современного состояния исследований эффектов однопетлевого порядка в теории ГВС. Обсуждается необ-

ходимость тщательного рассмотрения процедуры перенормировок для правильной интерпретации расчетов однопетлевых поправок. Обосновываются преимущества естественной схемы перенормировок. Очерчен круг вопросов, которые являются объектом диссертации.

В первой главе разработана естественная схема перенормировок в расширенной  $SU(2) \otimes U(1)$  теории ГВС с произвольным унитарным смешиванием  $N_f = 8n$  фермионных полей ( $n$  левых дублетов лептонов,  $3n$  левых дублетов цветных кварков и соответствующие правые синглеты). В § I даны основные положения для этой схемы. Независимыми параметрами являются массы фермионов, векторных калибровочных бозонов  $A$  (фотон),  $W$  и  $Z$  и скалярного бозона  $\chi$  Хиггса, а также электрический заряд  $e$ . Перенормированные массы — физические массы частиц. Для заряда  $e$  принимается известное перенормировочное условие квантовой электродинамики и известное определение при нулевой энергии (формула Томсона). Перенормировка полей делается после спонтанного нарушения симметрии и на массовой поверхности физических частиц. Параметр Вайнберга  $\sin^2 \theta_w = 1 - M_W^2 / M_Z^2$  является зависимым, как и слабый заряд  $g = e / \sin \theta_w$ . Мы принимаем один из двух подходов, рассмотренных авторами [II], согласно которому элементы матрицы смешивания фермионов  $K_{ij}$  являются конечными феноменологическими параметрами. В § 3 обсуждаются два подхода в отношении "головастиков" при перенормировке потенциала Хиггса. Показано, что оба подхода приводят к одному результату: "головастики" дают вклад только в  $3\chi$  и в  $4\chi$  — вершинные функции. В § 4 вычислена полная матрица собственно-энергетических функций фермионов в однопетлевом приближении в унитарной калибровке. В § 5 вычислены как диагональные, так и недиагональные элементы матриц констант перенормировки фермионов  $\sqrt{Z_{fL}}$ ,  $\sqrt{Z_{fR}}$  и  $Z_{mf}$ .

Во второй главе вычислены однопетлевые вершинные функции в приближении относительной малости фермионных масс

$$s, t, u, M_V^2, M_\chi^2 \gg m_f^2.$$

Полученные формулы применимы для многих процессов рассеяния и аннигиляции в теории ГВС (исключая недиагональные процессы с нейтральными фермионными токами). В § 3 дана модификация известной из квантовой электродинамики теоремы Фарри для теории ГВС, для треугольных диаграмм с фермионной петлей и нечетным числом нейтральных векторных концов: в приближении относительной малости фермионных масс и при суммировании по всем фермионным состояниям, приводящем к устранению аномалий Адлера, вклад таких диаграмм равен нулю. В § 4 рассмотрена теорема Фарри для диаграмм, содержащих замкнутую  $W$ -бозонную петлю, с нечетным числом нейтральных векторных концов.

В третьей главе вычислены однопетлевые электрослабые поправки к амплитудам четырехфермионных процессов рассеяния и аннигиляции как с заряженным (§ I), так и с нейтральным (§ 2) током фермионов, в приближении относительной малости фермионных масс для конечных членов. Обнаружено, что все ультрафиолетово расходящиеся и неунитарные члены взаимно уничтожаются. В амплитуде с нейтральными фермионными токами уничтожаются также и все недиагональные элементы. Следовательно, амплитуды недиагональных фермионных переходов с нейтральными токами имеют относительный порядок малости  $(\alpha/4\pi)(m_f^2/M_W^2)$ . Члены с инфракрасной расходимостью содержатся только в чисто электромагнитных факторизующихся вкладках в амплитуды. Динамические эффекты однопетлевого порядка для нынешнего эксперимента малы по сравнению со статическими эффектами. Это видно из рисунков I и 2, показывающих отношения  $\mathcal{F}_i(q^2, s) / \mathcal{F}_i(\hat{0})$  для формфакторов амплитуд с нейтральным током фермионов (в случае, когда заряды рассеивающихся частиц равны  $-1$ ) в зависимости от  $q^2$  для шести значений  $S = 10^2, 2 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^3, 10^4, 3 \cdot 10^4$  и  $10^5 (\text{ГэВ})^2$ . Точка  $\hat{0}$  отвечает  $S = 10^2$  и  $q^2 = 1 (\text{ГэВ})^2$ . Большие константные логарифмические члены дают заметный вклад в поправки к амплитудам. Это видно из значений формфакторов в точке  $\hat{0}$ , а именно:  $\mathcal{F}_1^Z(\hat{0}) = 1,063$ ,  $\mathcal{F}_2^Z(\hat{0}) = \mathcal{F}_3^Z(\hat{0}) = 1,088$ ;  $\mathcal{F}_4^Z(\hat{0}) = 1,093$  и  $\mathcal{F}_6^A(\hat{0}) = 1,025$ .

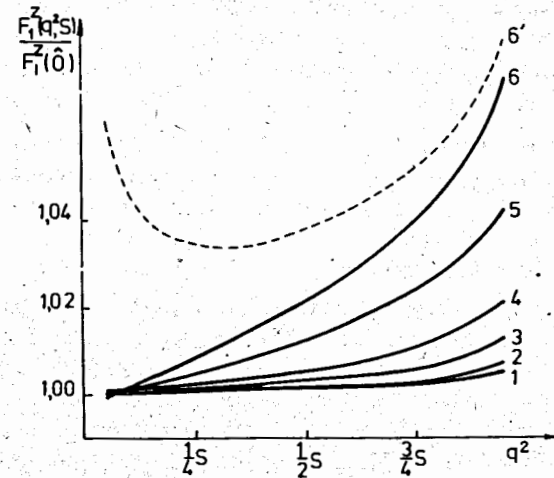


Рис. I.

Динамическое поведение формфактора  $\mathcal{F}_1^Z(q^2, s)$  для шести значений  $S = 10^2, 2 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^3, 10^4, 3 \cdot 10^4$  и  $10^5 (\text{ГэВ})^2$  (пунктир — асимптотика).

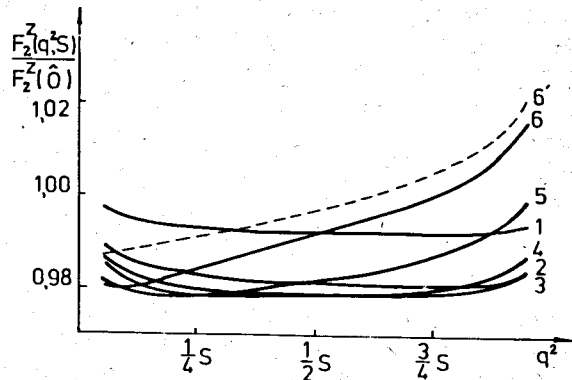


Рис. 2.  
Динамическое поведение фактора  $\mathcal{F}_2^Z(q^2, S)$  для тех же значений  $S$ , что и на рис. I.

В § 3 вычислены массы  $W$  и  $Z$  бозонов в однопетлевом приближении с помощью данных о времени жизни мюона (константа Ферми  $G_F$ ) и эксперимента SLAC ( $\sin^2 \theta_W^{exp}$ ). Конкретно для  $\sin^2 \theta_W^{exp} = 0,224$ , принимая  $M_X = 200$  ГэВ (слабая зависимость от  $M_X$  в широком диапазоне от  $10$  до  $10^3$  ГэВ), получено  $M_W = 82,5$  и  $M_Z = 93,3$  ГэВ. (В древесном приближении  $M_W^B = 78,773$  и  $M_Z^B = 89,422$  ГэВ). Вычислены также параметры Вайнберга  $\sin^2 \theta_W = 1 - M_W^2/M_Z^2$  и  $\sin^2 \theta_W^F = e^2(0)/g_F^2(0)$  в зависимости от  $\sin^2 \theta_W^{exp}$ , где  $e^2(0) = 4\pi\alpha$ , а  $g_F(0)$  связан с константой Ферми мюонного распада соотношением  $g_F^2(0)/8M_W^2 = G_F/\sqrt{2}$ . Для  $\sin^2 \theta_W^{exp} = 0,224$  получено

$\sin^2 \theta_W = 0,219$  и  $\sin^2 \theta_W^F = 0,204$ . Вычислена также электрослабая поправка к времени жизни мюона (в естественной схеме перенормировок). В § 4 найдены электрослабые поправки к вероятностям фермионных каналов распадов  $W$ ,  $Z$  и  $X$  бозонов (без тормозного излучения фотонов).

В четвертой главе вычислены однопетлевые электрослабые поправки к амплитудам аннигиляции любой фермионной пары в два нейтральных векторных бозона (или комптоноподобных процессов рассеяния нейтральных векторных бозонов на фермионе) в приближении относительной малости фермионных масс для конечных членов. Они имеют такую же структуру, как и поправки к амплитудам четырехфермионных процессов, и ситуация с динамическими и статическими эффектами однопетлевого порядка в принципе такая же. Специфическая особенность этих поправок состоит в том, что большие константные логарифмические члены присутствуют в факторах амплитуды  $\mathcal{F}_i^{\pm}(q_i^2)$  ( $i=1,2$ ) полностью, если оба нейтральных

векторных бозона -  $Z$  - бозоны; если один из них фотон, вклад этих констант уменьшен вдвое; если же имеем два фотона (комптоновское рассеяние), больших констант нет и факторы  $\mathcal{F}_i^{\pm}(q_i^2)$  принимают минимальные значения, очень близкие к единице (при энергиях и переданных импульсах нынешних экспериментов). Это означает, что в естественной схеме перенормировок остается справедливым определение постоянной тонкой структуры  $\alpha = e^2(0)/4\pi$  через значение сечения комптоновского рассеяния при нулевой энергии фотона (формула Томсона).

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении III приведены правила соответствия для пропагаторов частиц, а также перенормированный лагранжиан и лагранжиан контрчленов теории ГВС, в унитарной калибровке.

В приложении II2 даны точные выражения для некоторых интегралов и функций, встречающихся в работе.

В приложении III3 рассмотрены интегралы, характерные для вершинных функций.

В приложении IV4 приведены выражения для конечных частей собственных-энергетических функций бозонов, а также константы перенормировки.

В приложении V5 даны асимптотические выражения для факторов амплитуд четырехфермионных процессов.

В приложении VI6 даны низкоэнергетические пределы этих факторов.

#### Литература:

1. Sh. L. Glashow. Partial-symmetries of weak interactions. Nucl. Phys., 1961, v. 22, p. 579.
2. S. Weinberg. A model of leptons. Phys. Rev. Lett., 1967, v. 19, p. 1264.
3. A. Salam. Weak and electromagnetic interactions. Proc. 8th Nobel symp. (J. Wiley, N.Y., 1968) p. 367.
4. D.Yu. Bardin, O.M. Fedorenko, N.M. Shumeiko. On the radiative corrections to P-odd asymmetry in deep-inelastic scattering of polarized leptons on nucleons. JINR, E2-12564, Dubna, 1979.
5. Д.Ю. Бардин, О.М. Федоренко, Н.М. Шумейко. Радиационные поправки к P-нечетным асимметриям в глубоко неупругом рассеянии поляризованных лептонов и антилептонов на нуклонах. ЯФ, 1980, т. 32, вып. 3 (9), с. 782.



6. A. Sirlin. Radiative corrections in the  $SU(2)_L \times U(1)$  theory: A simple renormalization framework. Phys. Rev., 1980 v. D22, p. 971.
7. F. Antonelli, M. Consoli, G. Corbo. One-loop correction to vector boson masses in the Glashow-Weinberg-Salam model of electromagnetic and weak interactions. Phys. Lett., 1980, v. 91B, p. 90.
8. M. Veltman. Radiative corrections to vector boson masses. Phys. Lett., 1980, v. 91B, p. 95.
9. K.-I Aoki, Z. Hloki, R. Kawabe, M. Konuma, T. Muta. Electroweak radiative corrections to high energy  $\nu e$  scatterings. Prog. Theor. Phys., 1981, v. 65, p. 1001.
10. C.H. Llewellyn Smith, J.F. Wheeler. Electroweak radiative corrections and the value of  $\sin^2 \theta_W$ . Phys. Lett., 1981, v. 102B, p. 486.
11. W.J. Marciano, A. Sirlin. On the renormalization of the charm quartet model. Nucl. Phys., 1975, v. B93, p. 303.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Д.Ю. Бардин, П.Х. Христова, О.М. Федоренко. Об электрослабых поправках низшего порядка для рассеяния фермионов со спином  $1/2$ . (I). Однопетлевые диаграммы. Nucl. Phys., 1980, т. В175, с. 435.
2. Д.Ю. Бардин, П.Х. Христова, О.М. Федоренко. Об электрослабых поправках низшего порядка для рассеяния фермионов со спином  $1/2$ . (II). Однопетлевые амплитуды. Nucl. Phys., 1980, т. В197, с. 1.
3. Д.Ю. Бардин, О.М. Федоренко, П.Х. Христова. Эффекты однопетлевых поправок в теории Вайнберга-Салама. ЯФ, 1982, т. 35, вып. 5, с. 1220.
4. Д.Ю. Бардин, О.М. Федоренко, П.Х. Христова. Об электрослабых поправках низшего порядка для фермион-бозонного рассеяния. (I). Собственно-энергетические и вершинные диаграммы. Препринт ОИЯИ, P2-82-840, Дубна, 1982.
5. Д.Ю. Бардин, П.Х. Христова. Электрослабые однопетлевые поправки к амплитудам аннигиляции двух фермионов в два нейтральных векторных бозона. Сообщение ОИЯИ P2-82-836, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 декабря 1982 года.