ITEP-13-96

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ
Институт теоретической и
экспериментальной физики

ITEP- 13-96

М.И.Высоцкий, В.А.Новиков, Л.Б.Окунь,
А.Н.Розанов

# ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОПРАВКИ В РАСПАДАХ Z-БОЗОНА.

Fermilab Library
0 1160 0040653 2

III. Приложения M - P.

FERMILAB
AUG 20 1996
LIBRARY

Москва 1996

УДК 530.I М-I6
ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОПРАВКИ В РАСПАДАХ Z -БОЗОНА. III. ПРИЛОЖЕНИЯ М.:Р: Препринт ИТЭФ 13-96/
М.И.Высоцкий, В.А.Новиков, Л.Б.Окунь, А.Н.Розанов – М., 1996 – 36с.

В третьей части обзора приведены Приложения, не вошедшие во вторую часть, а также список литературы и рисунки.

Рис. – I6, описок лит. – 83 назв.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 1996

[5]CPPM, Marseille, France

## Приложение M

## Вершинные части $F_{Af}$ и $F_{Vf}$ и константы $C_i$.

В этом Приложении собраны вершинные функции, являющиеся частью однопетлевых электрослабых поправок к распадам $Z \to \nu\bar{\nu}$, $Z \to l^+l^-$, $Z \to u\bar{u}$, $c\bar{c}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$. В случае распада $Z \to b\bar{b}$ в петле может распространяться $t$-кварк, поэтому вершинные поправки не сводятся к числам, а являются функциями от $m_t$ (см. Приложение N).

Конечные части вершинных функций приведены в [?], стр. 29, 30. Соответствующие выражения зависят от $c_W(s_W)$ и $m_W/m_Z$. Работая в рамках однопетлевого приближения, мы заменяем $c_W$ и $m_W/m_Z$ на $c$, а $s_W$ на $s$. Поэтому тогда как вершинные функции в [?] зависят от $m_t$, $m_H$ и новой физики, наши являются числами (см. также Приложение L).

В этом Приложении приведены также отсутствующие в [?] бесконечные части, необходимые для проверки сокращения бесконечностей в физических наблюдаемых.

Начнем с распада $Z \to \nu\nu$:

$$F_\nu \equiv F_{V\nu} = F_{A\nu} = \frac{\bar{\alpha}}{4\pi}\frac{1}{4cs}\left[\frac{1}{4c^2s^2}\Lambda_2(m_Z^2, m_Z) + \right.$$
$$\left. + \frac{2s^2-1}{2s^2}\Lambda_2(m_Z^2, m_W) + \frac{3c^2}{s^2}\Lambda_3(m_Z^2, m_W)\right] \qquad \text{(M.1)}$$

Для распада на пару заряженных лептонов или кварков имеем:

$$F_{Vf} = \frac{\bar{\alpha}}{4\pi}\left[v_f(v_f^2 + 3a_f^2)\Lambda_2(m_Z^2, m_Z) + F_L^f\right] \ , \qquad \text{(M.2)}$$

$$F_{Af} = \frac{\bar{\alpha}}{4\pi}\left[a_f(3v_f^2 + a_f^2)\Lambda_2(m_Z^2, m_Z) + F_L^f\right] \ , \qquad \text{(M.3)}$$

где $a_l = a_d = -1/4sc$, $a_u = 1/4sc$, $v_f = (T_3^f - 2Q^f s^2)/2sc$ ($T_3^l = T_3^d = -1/2$, $T_3^u = 1/2$, $Q^l = -1$, $Q^d = -1/3$, $Q^u = 2/3$). Функции $F_L^f$ равны:

$$F_L^l = \frac{1}{8s^3c}\Lambda_2(m_Z^2, m_W) - \frac{3c}{4s^3}\Lambda_3(m_Z^2, m_W) \ , \qquad \text{(M.4)}$$

$$F_L^u = -\frac{1-\frac{2}{3}s^2}{8s^3c}\Lambda_2(m_Z^2, m_W) + \frac{3c}{4s^3}\Lambda_3(m_Z^2, m_W) \ , \qquad \text{(M.5)}$$

$$F_L^d = \frac{1-\frac{4}{3}s^2}{8s^3c}\Lambda_2(m_Z^2, m_W) + \frac{3c}{4s^3}\Lambda_3(m_Z^2, m_W) \ . \qquad \text{(M.6)}$$

Для вычисления $F_{Vf}$ и $F_{Af}$ надо определить значения трех констант: $\Lambda_2(m_Z^2, m_W)$, $\Lambda_2(m_Z^2, m_Z)$ и $\Lambda_3(m_Z^2, m_W)$.

$$\begin{aligned}\Lambda_2(m_Z^2, m_W) &= -\frac{7}{2} - 2c^2 - (2c^2+3)\ln(c^2) \\ &+ 2(1+c^2)^2\left[\ln c^2 \ln\left(\frac{1+c^2}{c^2}\right) - Sp\left(-\frac{1}{c^2}\right)\right] \quad , \qquad \text{(M.7)}\end{aligned}$$

где было использовано $m_W/m_Z = c$; $Sp(x)$ – функция Спенса:

$$Sp(x) = -\int_0^1 \frac{dt}{t}\ln(1-xt)\ , \quad Sp(-1) = -\frac{\pi^2}{12} \quad . \qquad \text{(M.8)}$$

Используя (??) и (??), получим:

$$\Lambda_2(m_Z^2, m_Z) = -\frac{7}{2} - 2 - 8Sp(-1) \quad . \qquad \text{(M.9)}$$

Наконец:

$$\begin{aligned}\Lambda_3(m_Z^2, m_W) &= \frac{5}{6} - \frac{2}{3}c^2 + \frac{2}{3}(2c^2+1)\sqrt{4c^2-1}\arctan\frac{1}{\sqrt{4c^2-1}} \\ &- \frac{8}{3}c^2(c^2+2)\left(\arctan\frac{1}{\sqrt{4c^2-1}}\right)^2 \quad . \qquad \text{(M.10)}\end{aligned}$$

Приведем выражения для расходящихся частей вершинных функций, описывающих связь $Z$-бозона с лептонами:

$$divF_\nu = \frac{\bar{\alpha}}{8\pi}\frac{c}{s^3}\Delta_W \quad , divF_{Vl} = divF_{Al} = -divF_\nu \qquad \text{(M.11)}$$

Перейдем к вычислению констант $C_i$. Начнем с определений. Согласно [?]

$$V_\nu(t,h) = t + T_\nu(t) + H_\nu(h) + L_\nu + D_\nu + \tilde{F}_\nu \quad , \qquad \text{(M.12)}$$

Величина $L_\nu$ описывает вклад лептонов и легких кварков в поляризационные операторы векторных бозонов и легко может быть получена из формул Приложения К для поляризационных операторов:

$$L_\nu = 4 - 8s^2 + \frac{304}{27}s^4 \quad . \qquad \text{(M.13)}$$

$D_\nu$ возникает из боксовых и вершинных электрослабых поправок к $\mu$-распаду [?]. Выражение для $D$ см. в Приложении Е, ур-ние (Е.8). Для $D_\nu$ имеем:

$$D_\nu = -\frac{16\pi s^2 c^2}{3\bar{\alpha}}\left(D - \frac{\bar{\alpha}}{\pi s^2}\Delta_W\right) \quad . \qquad \text{(M.14)}$$

Наконец:

$$\tilde{F}_\nu = \frac{128\pi s^3 c^3}{3\bar{\alpha}} F_\nu \ . \tag{M.15}$$

Сравнивая (??) и (??), приходим к выражению для $C_\nu$, все ингредиенты которого теперь определены:

$$C_\nu = L_\nu + D_\nu + \tilde{F}_\nu \tag{M.16}$$

Перейдем к $V_A$:

$$V_A(t,h) = t + T_A(t) + H_A(h) + L_A + D_A + \tilde{F}_A \ . \tag{M.17}$$

Выражения для $L_A$ и $D_A$ уже приведены:

$$L_A = L_\nu \ , \ \ D_A = D_\nu \ ; \tag{M.18}$$

приведем формулу для вершинной функции:

$$\tilde{F}_A = -\frac{128\pi s^3 c^3}{3\bar{\alpha}} F_{Al} \ . \tag{M.19}$$

Наконец:

$$C_A = L_A + D_A + \tilde{F}_A \tag{M.20}$$

Переходим к $V_R$:

$$V_R(t,h) = t + T_R(t) + H_R(h) + L_R + D_R + \tilde{F}_R \ , \tag{M.21}$$

где $D_R = D_\nu$, а $L_R = 0$, так как $\Pi_W(m_W^2)$ отсутствует в отношении $g_V/g_A$. Для $\tilde{F}_R$ имеем:

$$\tilde{F}_R = \frac{16\pi(c^2 - s^2)cs}{3\bar{\alpha}}[-F_{Vl} + (1 - 4s^2)F_{Al}] \ , \tag{M.22}$$

и формула для $C_R$:

$$C_R = L_R + D_R + \tilde{F}_R \ . \tag{M.23}$$

Это Приложение заканчиваем формулами для $C_m$:

$$C_m = L_m + D_m \ , \tag{M.24}$$

$$L_m = 4(c^2 - s^2)\ln c^2 \ , \tag{M.25}$$

$$D_m = -\frac{16\pi s^4}{3\bar{\alpha}}\left(D - \frac{\bar{\alpha}}{\pi s^2}\Delta_W\right) \tag{M.26}$$

## Приложение N.

**Функции $\phi(t)$ и $\delta\phi(t)$ в распаде $Z \to b\bar{b}$.**

Для функции $\phi(t)$ мы используем разложение из работы [?]:

$$\phi(t) = \frac{3-2s^2}{2s^2c^2}\left\{t + c^2[2.88ln\frac{t}{c^2} - 6.716+\right.$$
$$+\frac{1}{t}(8.368c^2\ln\frac{t}{c^2} - 3.408c^2) + \frac{1}{t^2}(9.126c^4\ln\frac{t}{c^2} + 2.26c^4) + \qquad \text{(N.1)}$$
$$\left.+\frac{1}{t^3}(4.043c^6\ln\frac{t}{c^2} + 7.41c^6) + ...\right\} \ ,$$

а для $\delta\phi(t)$ используем лидирующее приближение, вычисленное в [?] и [?]:

$$\delta\phi(t,h) = \frac{3-2s^2}{2s^2c^2}\left\{-\frac{\pi^2}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})t + \frac{1}{16s^2c^2}(\frac{\bar{\alpha}}{\pi})t^2\tau_b^{(2)}(\frac{h}{t})\right\} \ , \qquad \text{(N.2)}$$

где функция $\tau_b^{(2)}$ протабулирована в Таблице 4 для $m_H/m_t < 4$. Для $m_H/m_t > 4$ мы пользуемся разложением [?]:

$$\tau_b^{(2)}(\frac{h}{t}) = \frac{1}{144}[311+24\pi^2+282\ln r+90\ln^2 r-4r(40+6\pi^2+15\ln r+18\ln^2 r)+$$
$$+\frac{3}{100}r^2(24209-6000\pi^2-45420\ln r-18000\ln^2 r)], \qquad \text{(N.3)}$$

где $r = t/h$. Для $m_t = 175$ ГэВ и $m_H = 300$ ГэВ

$$\tau_b^{(2)} = 1.245 \ .$$

## Приложение О.

## Поправки $\delta_2 V_i$.

Поправки $\delta_2 V_i \sim \bar{\alpha}\hat{\alpha}_s$ возникают за счет глюонных обменов в кварковых электрослабых петлях [?] (см. также [?]). Для двух поколений легких кварков ($q = u, d, s, c$) имеем:

$$\delta_2^q V_m(t,h) = 2 \cdot [\frac{4}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_Z)}{\pi})(c^2 - s^2)\ln c^2] = (\frac{\hat{\alpha}_s(m_Z)}{\pi})(-0.377) \qquad (O.1)$$

$$\delta_2^q V_A(t,h) = \delta_2^q V_\nu(t,h) = 2 \cdot [\frac{4}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_Z)}{\pi})(c^2 - s^2 + \frac{20}{9}s^4)] = (\frac{\hat{\alpha}_s(m_Z)}{\pi})(1.750) \qquad (O.2)$$

$$\delta_2^q V_R(t,h) = 0 \qquad (O.3)$$

Результат вычислений для третьего поколения дается достаточно сложными функциями массы $t$-кварка:

$$\delta_2^t V_m(t,h) = \frac{4}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})\{tA_1(\frac{1}{4t}) + (1 - \frac{16}{3}s^2)tV_1(\frac{1}{4t}) + (\frac{1}{2} - \frac{2}{3}s^2)\ln t$$
$$- 4(1 - \frac{s^2}{c^2}) \times tF_1(\frac{c^2}{t}) - 4\frac{s^2}{c^2}tF_1(0)\} \qquad (O.4)$$

$$\delta_2^t V_A(t,h) = \delta_2^t V_\nu(t,h) = \frac{4}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})\{tA_1(\frac{1}{4t}) - \frac{1}{4}A_1'(\frac{1}{4t}) +$$
$$+ (1 - \frac{8}{3}s^2)^2[tV_1(\frac{1}{4t}) - \frac{1}{4}V_1'(\frac{1}{4t})] + (\frac{1}{2} - \frac{2}{3}s^2 + \frac{4}{9}s^4) - 4tF_1(0)\} \qquad (O.5)$$

$$\delta_2^t V_R(t,h) = \frac{4}{3}(\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})\{tA_1(\frac{1}{4t}) - \frac{5}{3}tV_1(\frac{1}{4t}) - 4tF_1(0) + \frac{1}{6}\ln t\}, \qquad (O.6)$$

где

$$\hat{\alpha}_s(m_t) = \frac{\hat{\alpha}_s(M_Z)}{1 + \frac{23}{12\pi}\hat{\alpha}_s(M_Z)\ln t} \qquad (O.7)$$

Отметим, что $\delta_2 V_i$ не зависят от $m_H$. Функции $V_1(r)$, $A_1(r)$ и $F_1(x)$ имеют очень сложную форму и были вычислены в работах [?]. Для достаточно малых значений аргументов приведем их разложение (к разложениям из [?] мы добавили кубичные члены):

$$V_1(r) = r[4\zeta(3) - \frac{5}{6}] + r^2\frac{328}{81} + r^3\frac{1796}{25 \times 27} + ... \qquad (O.8)$$

$$A_1(r) = [-6\zeta(3) - 3\zeta(2) + \frac{21}{4}] + r[4\zeta(3) - \frac{49}{18}] + r^2\frac{689}{405} + r^3\frac{3382}{7\times 25\times 27} + ... \tag{O.9}$$

$$F_1(x) = [-\frac{3}{2}\zeta(3) - \frac{1}{2}\zeta(2) + \frac{23}{16}] + x[\zeta(3) - \frac{1}{9}\zeta(2) - \frac{25}{72}] + \\ + x^2[\frac{1}{8}\zeta(2) + \frac{25}{3\times 64}] + x^3[\frac{1}{30}\zeta(2) + \frac{5}{72}] + ... \tag{O.10}$$

где $\zeta(2) = \pi^2/6, \zeta(3) = 1.2020569....$

Суммируя вклады (??) – (??) и используя разложения (??)-(??) получим (вплоть до членов $\sim 1/t^3$):

$$\begin{aligned} \delta_2^t V_m(t,h) &= (\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})[-2.86t + 0.46\ln t - 1.540 - \frac{0.68}{t} - \frac{0.21}{t^2}] = \\ &= \frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi}(-11.67) \end{aligned} \tag{O.11}$$

$$\begin{aligned} \delta_2^t V_A(t,h) &= \delta_2^t V_\nu(t,h) = (\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})[-2.86t + 0.493 - \frac{0.19}{t} - \frac{0.05}{t^2}] = \\ &= \frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi}(-10.10) \end{aligned} \tag{O.12}$$

$$\begin{aligned} \delta_2^t V_R(t,h) &= (\frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi})[-2.86t + 0.22\ln t - 1.513 - \frac{0.42}{t} - \frac{0.08}{t^2}] = \\ &= \frac{\hat{\alpha}_s(m_t)}{\pi}(-11.88) \end{aligned} \tag{O.13}$$

Эти формулы справедливы для $m_t > m_Z$. В области $m_t < m_Z$ мы либо полагаем $\delta_2^t V_i = 0$, либо используем безмассовый предел $\delta_2^t V_i = \frac{1}{2}\delta_2^q V_i$. В любом случае эта область дает пренебрежимый вклад в общий фит.

## Приложение P.
## Поправки $\delta_5 V_i$.

Во втором порядке по слабому взаимодействию появляется квадратичная зависимость от массы бозона Хиггса [?]:

$$\delta_5 V_m = \frac{\bar{\alpha}}{24\pi}(\frac{m_H^2}{m_Z^2}) \times \frac{0.747}{c^2} = 0.0011 \tag{P.1}$$

$$\delta_5 V_A = \delta_5 V_\nu = \frac{\bar{\alpha}}{24\pi}(\frac{m_H^2}{m_Z^2}) \times \frac{1.199}{s^2} = 0.0057 \tag{P.2}$$

$$\delta_5 V_R = -\frac{\bar{\alpha}}{24\pi}(\frac{m_H^2}{m_Z^2})\frac{c^2 - s^2}{s^2 c^2} \times 0.973 = -0.0032 \ . \tag{P.3}$$

Здесь в численных оценках мы использовали $m_H = 300$ ГэВ.

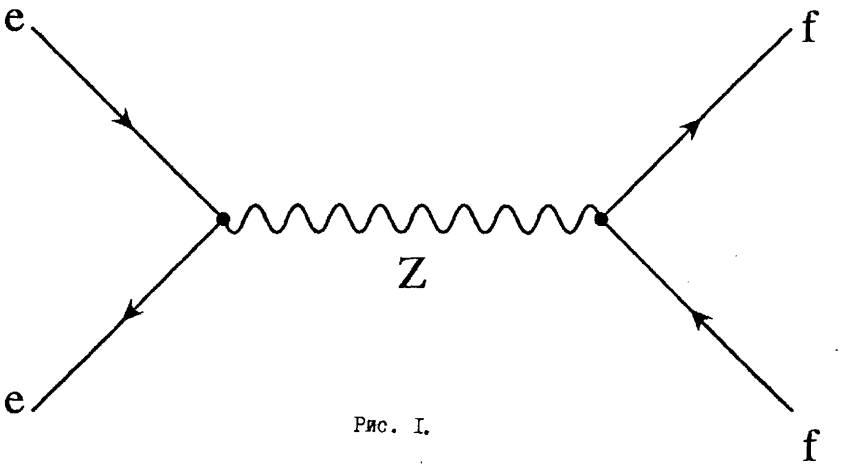



Рис. I.

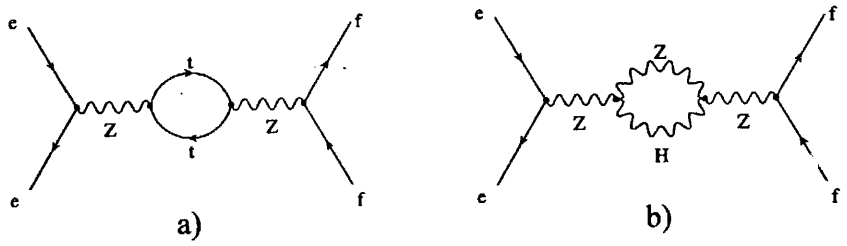



Рис. 2.

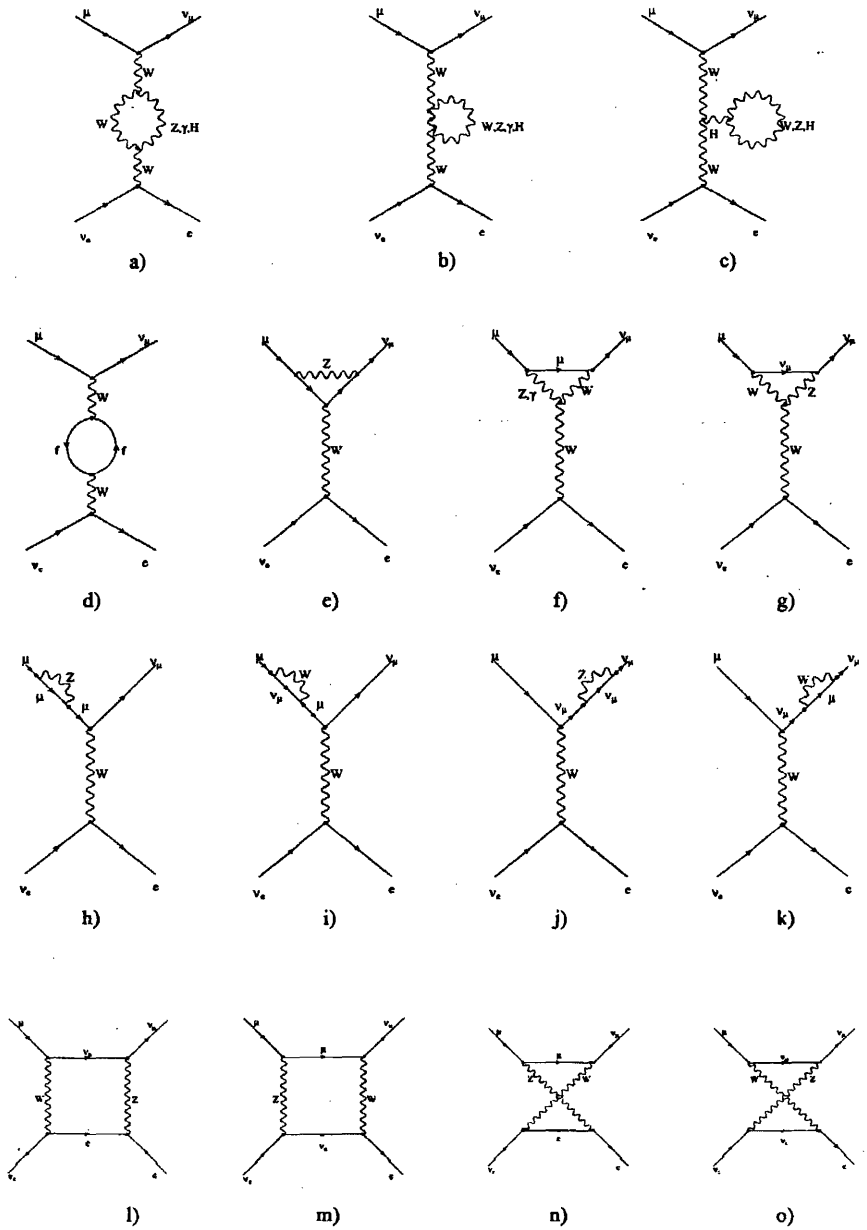



Рис. 3.

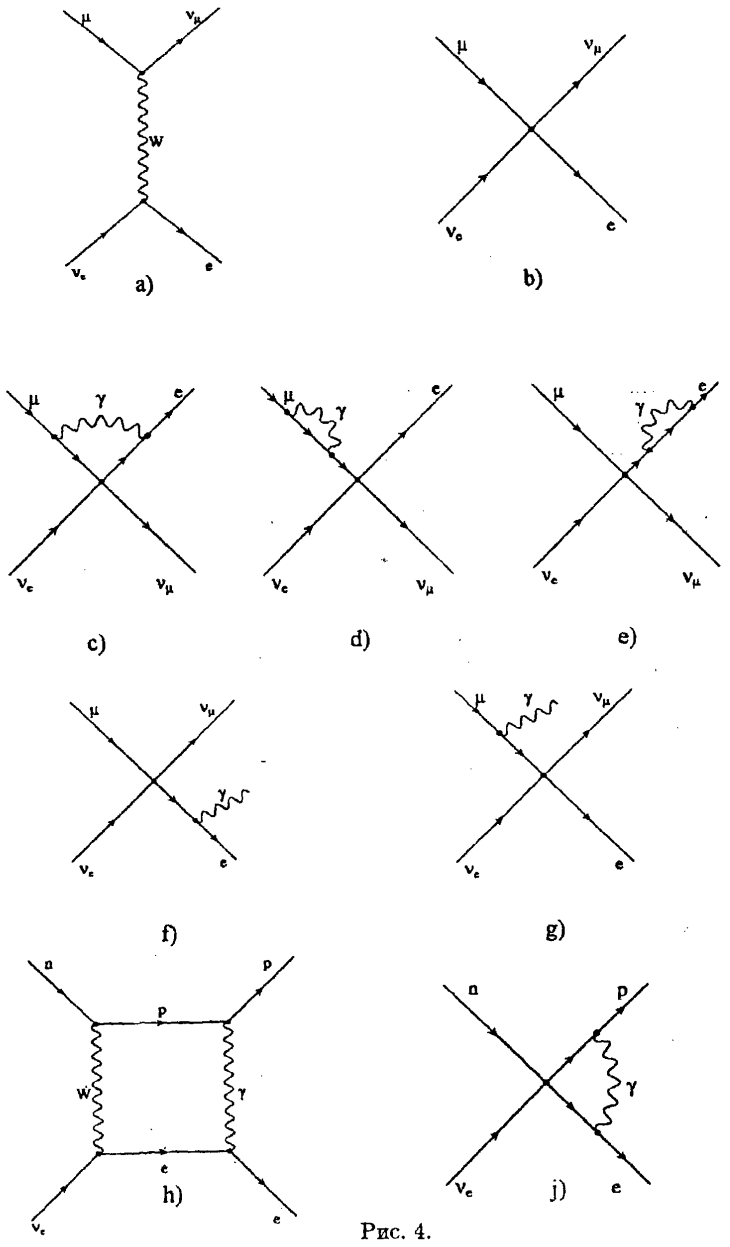

μ
νμ
W
νe
e
a)
μ
νμ
νe
e
b)
μ
γ
e
νe
νμ
c)
μ
γ
e
νe
νμ
d)
μ
γ
e
νe
νμ
e)
μ
νμ
γ
νe
e
f)
μ
γ
νμ
νe
e
g)
n
p
p
W
γ
e
νe
e
h)
n
p
γ
νe
j)
e

Рис. 4.

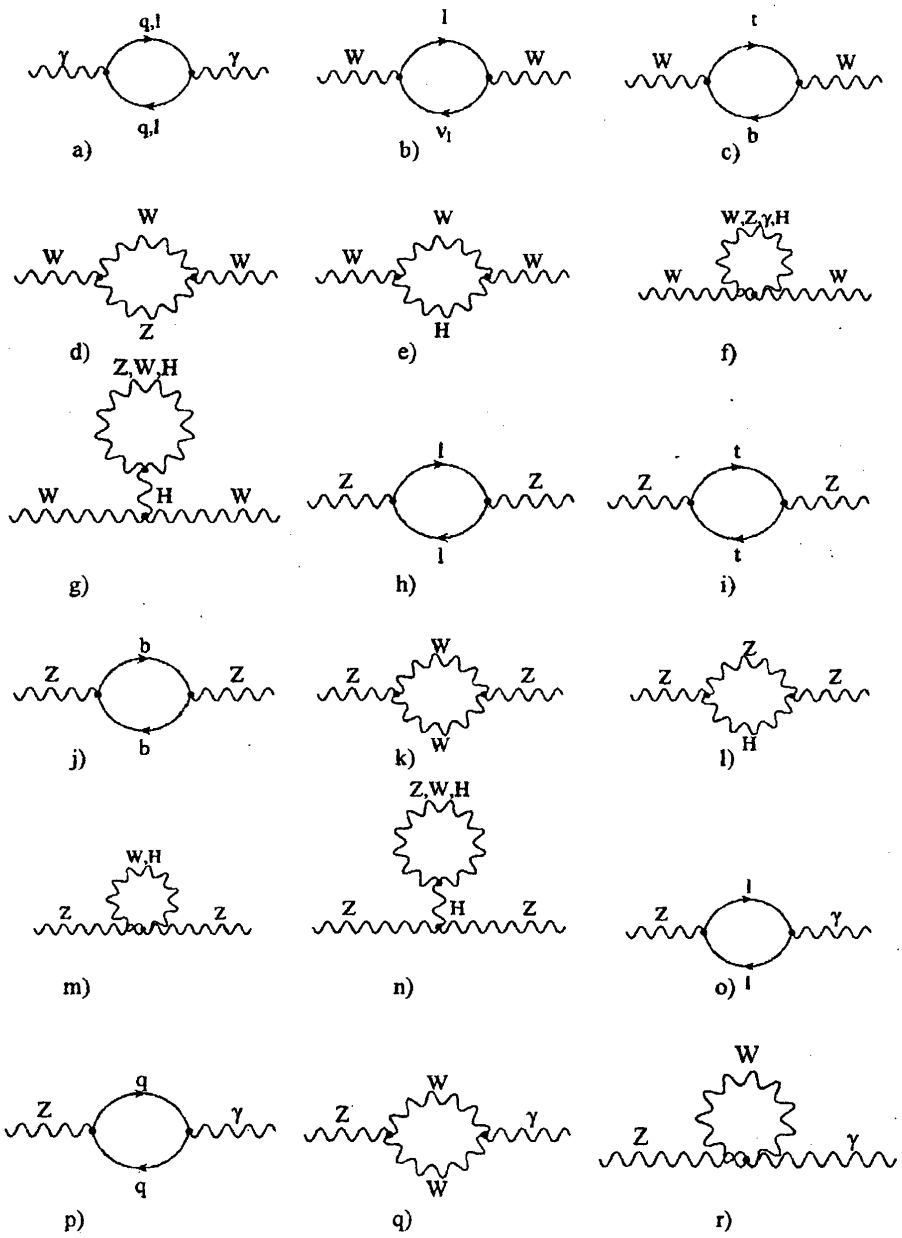

q,l
γ
γ
q,l
a)
l
W
W
$\nu_l$
b)
t
W
W
b
c)
W
W
W
Z
d)
W
W
W
H
e)
W,Z,γ,H
W
W
f)
Z,W,H
W
H
W
g)
l
Z
Z
l
h)
t
Z
Z
t
i)
b
Z
Z
b
j)
W
Z
Z
W
k)
Z
Z
Z
H
l)
W,H
Z
Z
m)
Z,W,H
Z
H
Z
n)
l
Z
γ
l
o)
q
Z
γ
q
p)
W
Z
γ
W
q)
W
Z
γ
r)

Рис. 5.

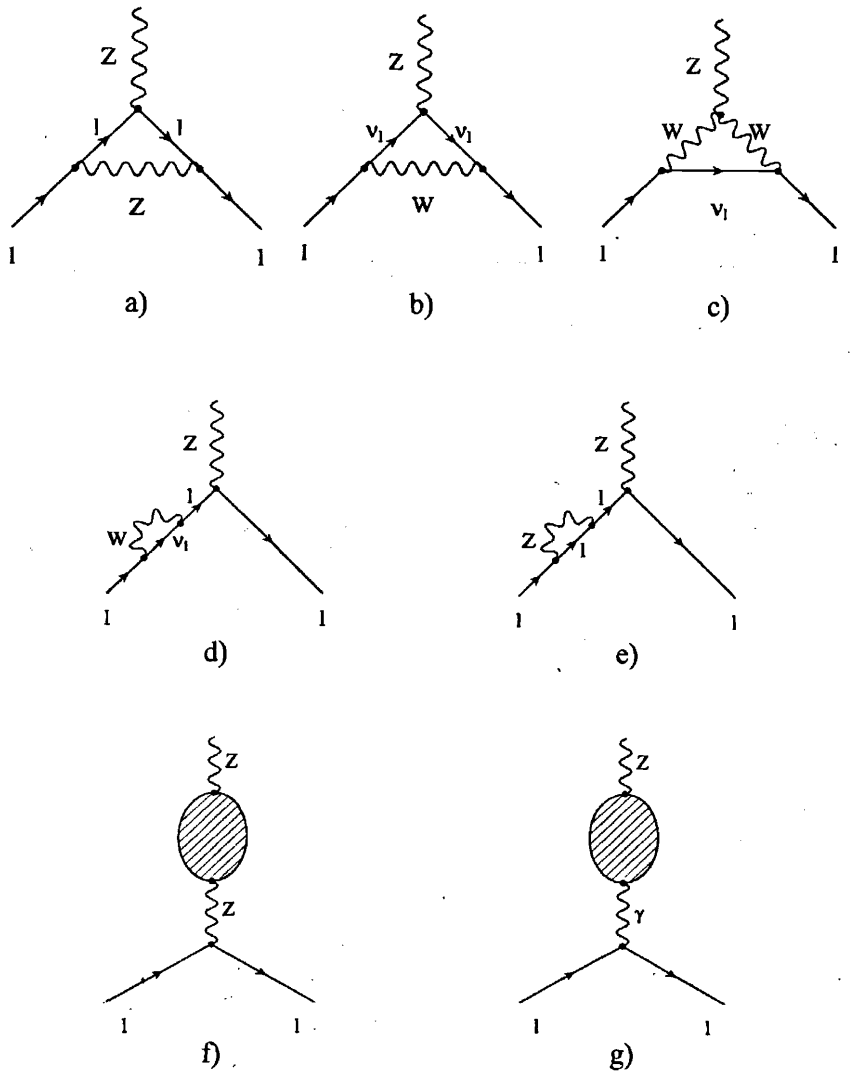
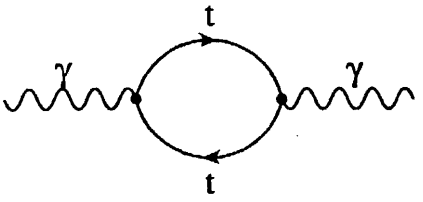
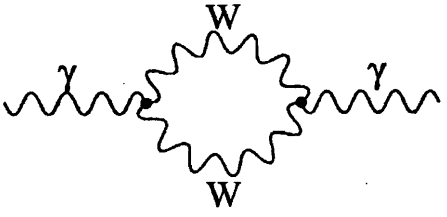

Z
l
l
Z
l
l
a)
Z
$\nu_l$
$\nu_l$
W
l
l
b)
Z
W
W
$\nu_l$
l
l
c)
Z
l
W
$\nu_l$
l
l
d)
Z
l
Z
l
l
l
e)
Z
Z
l
l
f)
Z
γ
l
l
g)

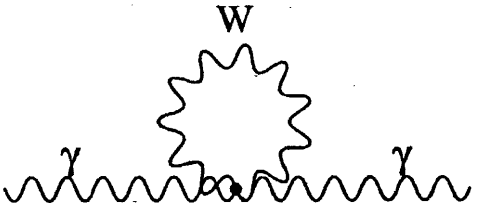
Рис.6.




a)




b)




c)

Рис.7.

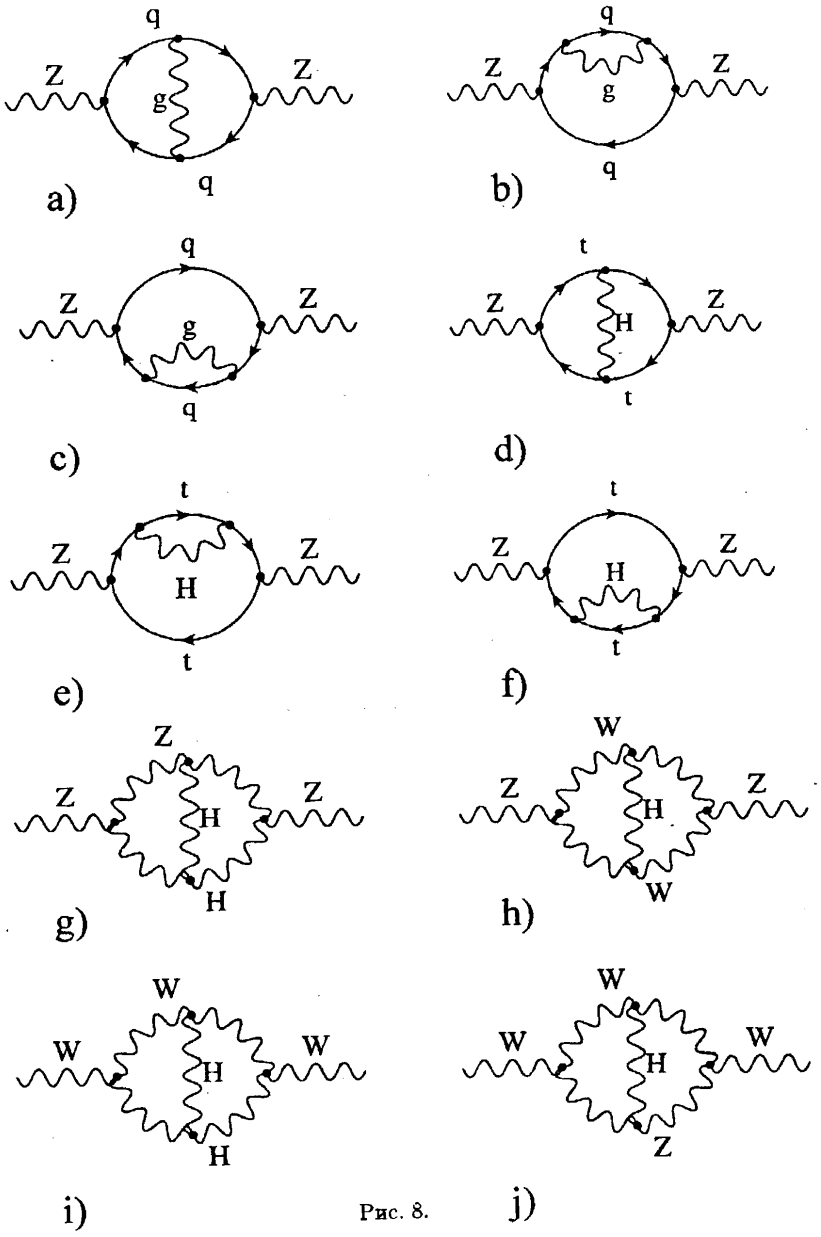
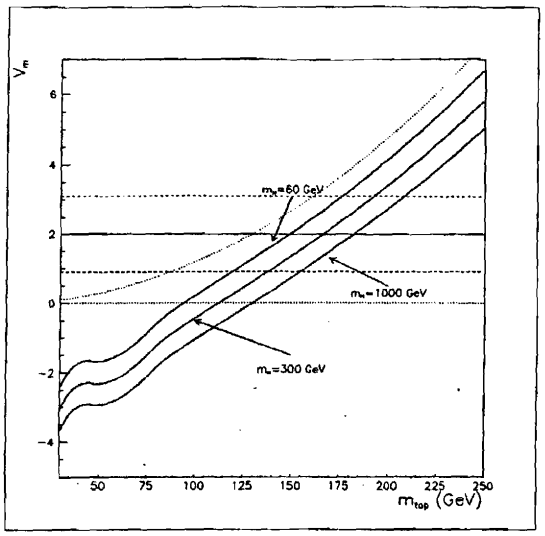
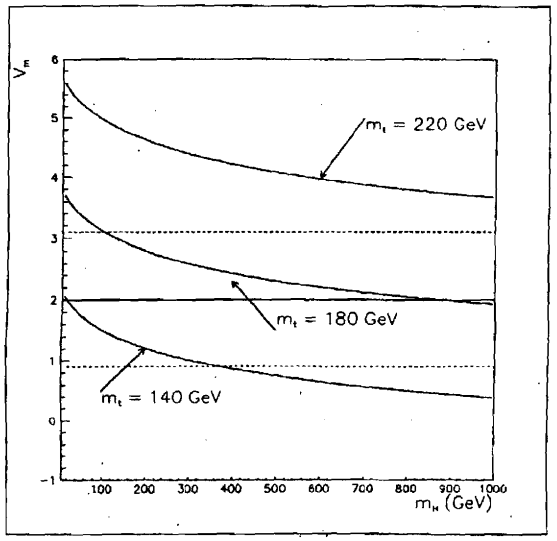

q
Z
g
Z
q
a)
q
Z
g
Z
q
b)
q
Z
g
Z
q
c)
t
Z
H
Z
t
d)
t
Z
H
Z
t
e)
t
Z
H
Z
t
f)
Z
Z
H
Z
H
g)
W
Z
H
Z
W
h)
W
W
H
W
H
i)
W
W
H
W
Z
j)

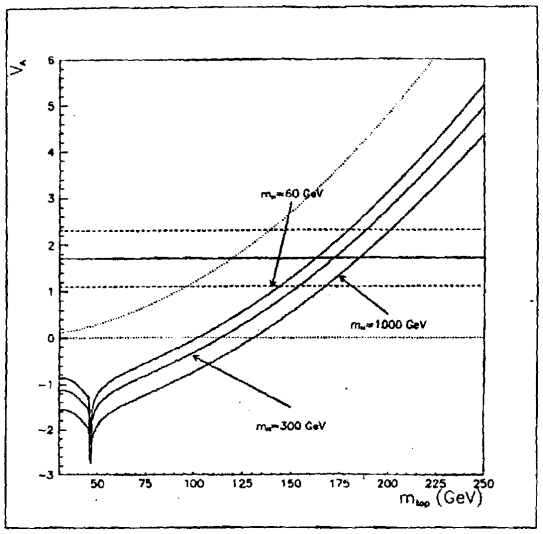
Рис. 8.


$V_R$
6
4
2
0
-2
-4
$m_H$=60 GeV
$m_H$=1000 GeV
$m_H$=300 GeV
50
75
100
125
150
175
200
225
250
$m_{top}$ (GeV)

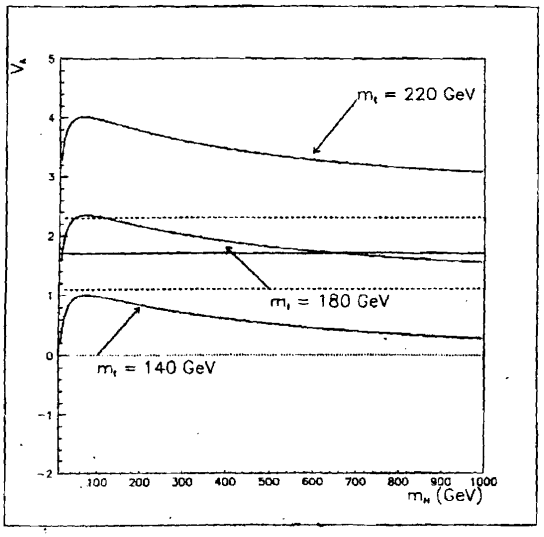
a)


$V_R$
6
5
4
3
2
1
0
-1
$m_t$ = 220 GeV
$m_t$ = 180 GeV
$m_t$ = 140 GeV
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
$m_H$ (GeV)

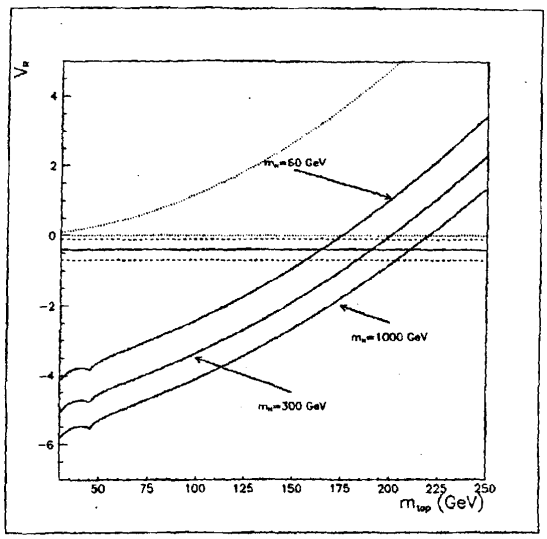
b) Рис.9.


$V_A$
$m_H$=60 GeV
$m_H$=1000 GeV
$m_H$=300 GeV
$m_{top}$ (GeV)

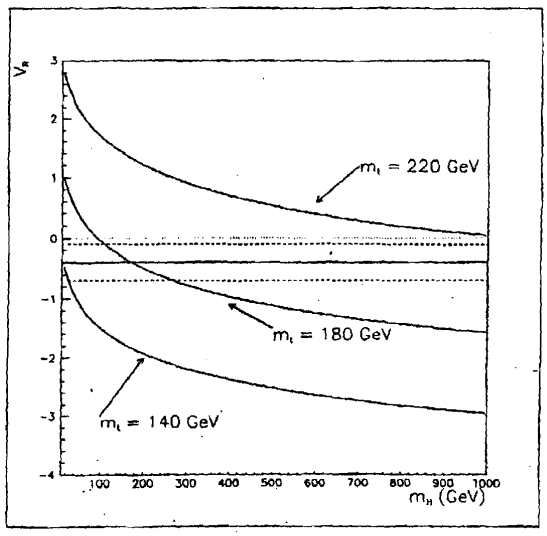
a)


$V_A$
$m_t$ = 220 GeV
$m_t$ = 180 GeV
$m_t$ = 140 GeV
$m_H$ (GeV)

b) Рис.10.


$V_R$
4
2
0
-2
-4
-6
$m_H$=50 GeV
$m_H$=1000 GeV
$m_H$=300 GeV
50
75
100
125
150
175
200
225
250
$m_{top}$ (GeV)

a)


$V_R$
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
$m_t$ = 220 GeV
$m_t$ = 180 GeV
$m_t$ = 140 GeV
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
$m_H$ (GeV)

b)

Рис.II.

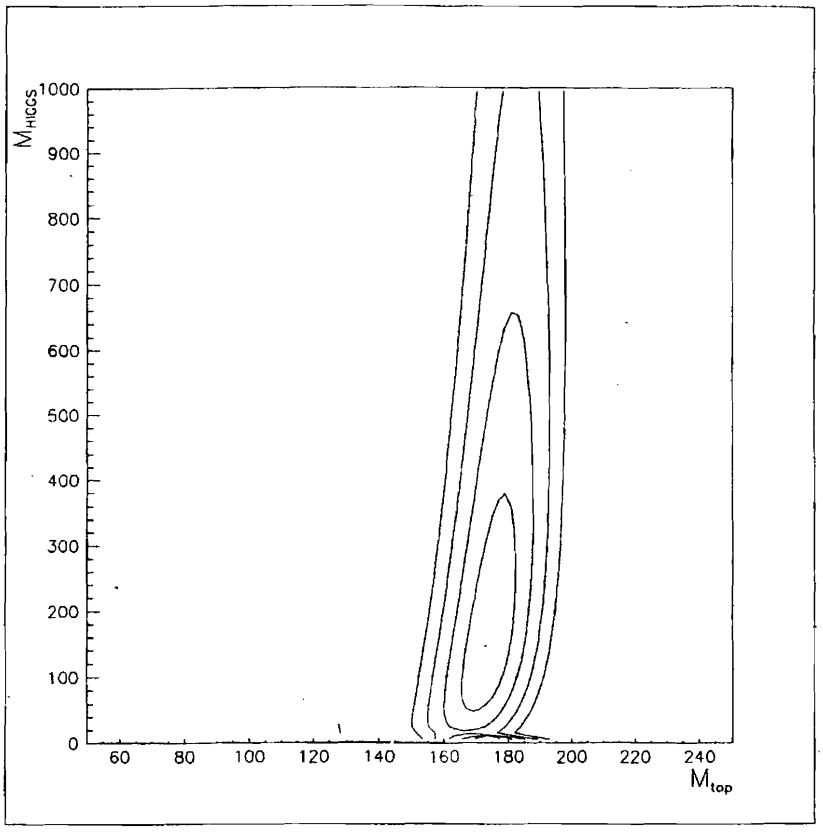

$M_{HIGGS}$
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
$M_{top}$

Рис.I4.

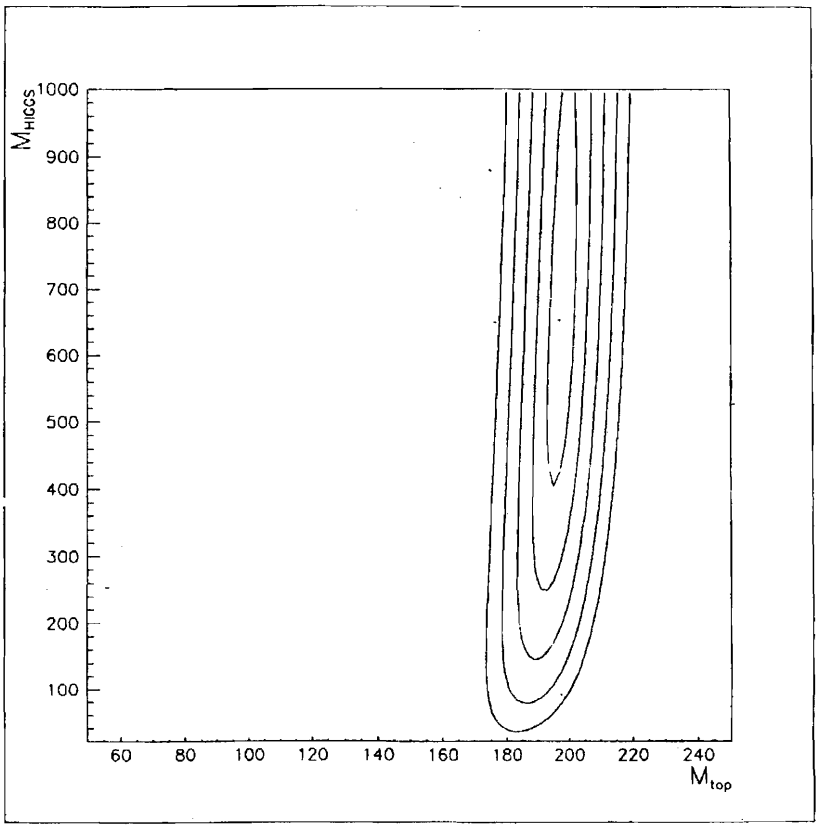

$M_{HIGGS}$
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
$M_{top}$

Рис.I5.

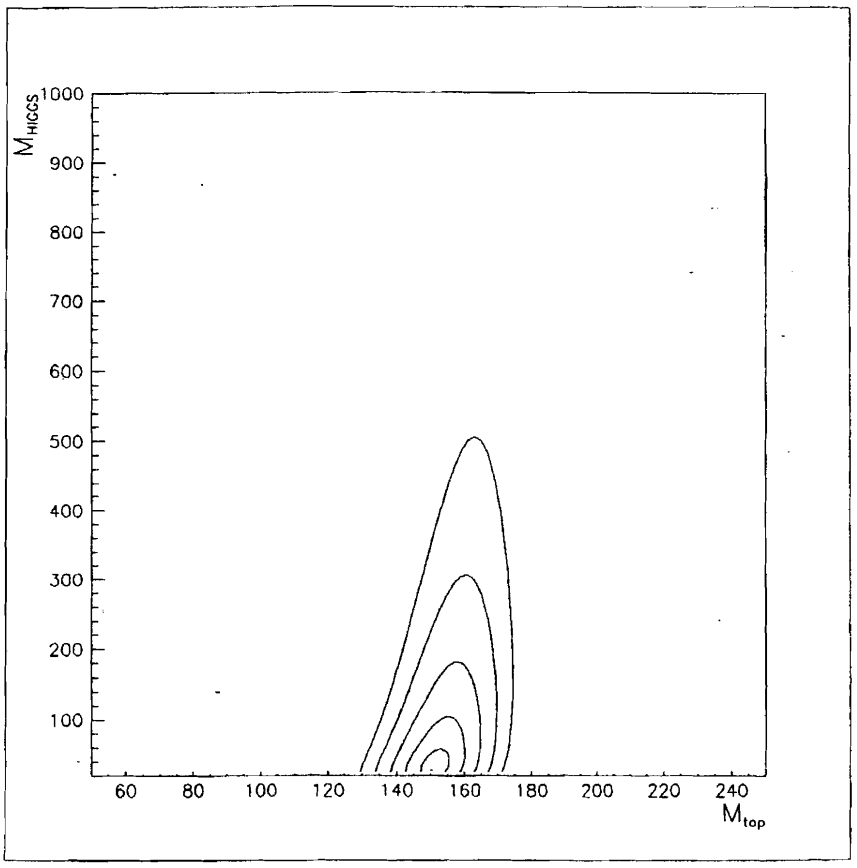

$M_{HIGGS}$
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
$M_{top}$

Рис.13.

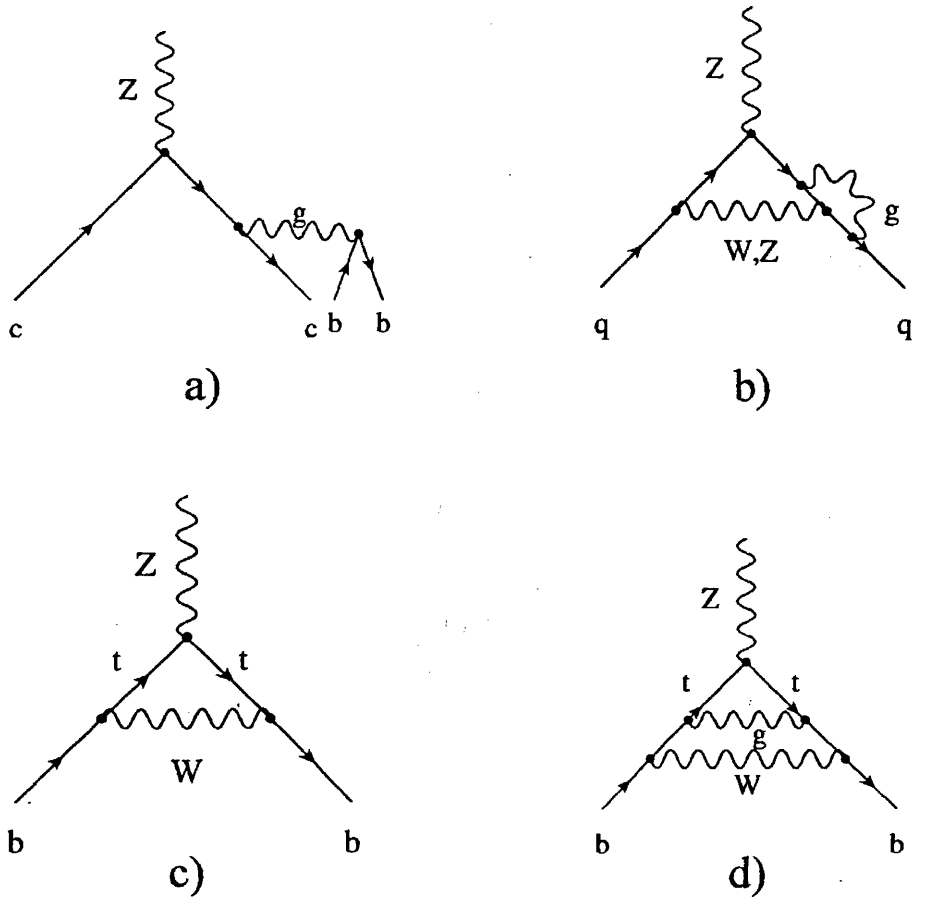



Рис.I2.

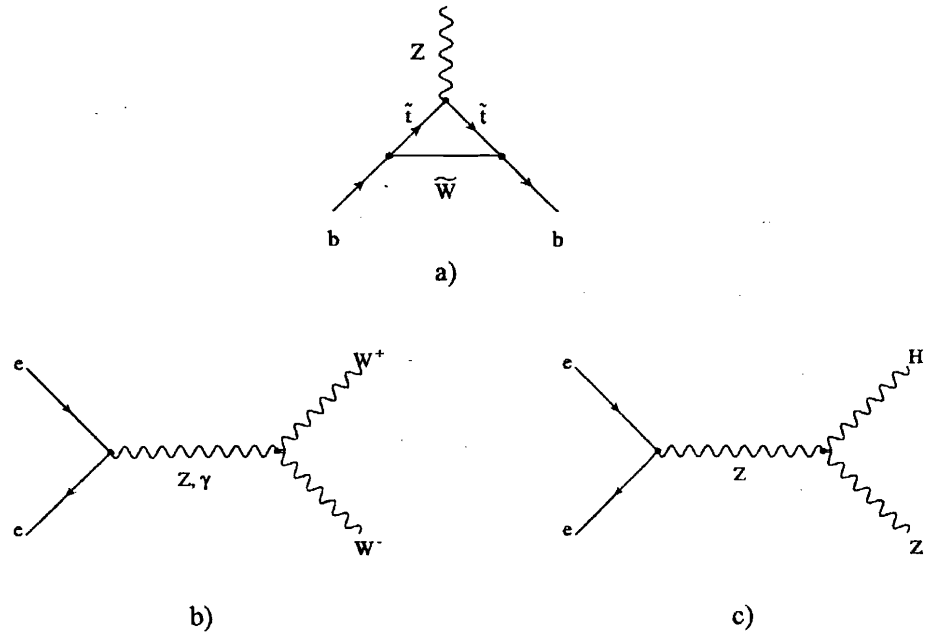



Рис.I6.

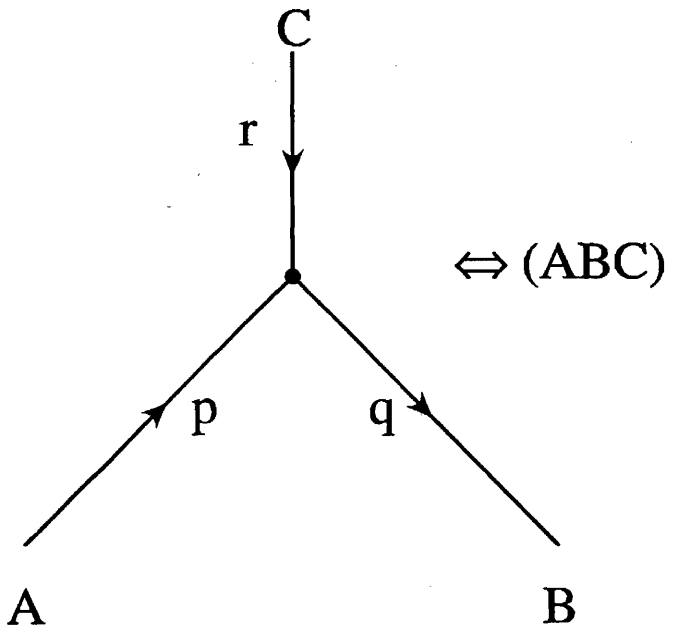



Рис.AI.

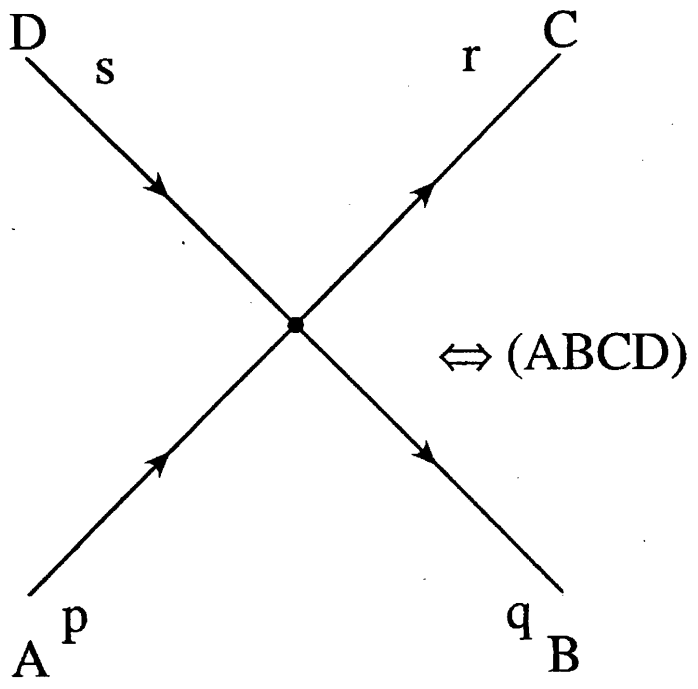



Рис.А2.

## Подписи под рисунками

Рис.1. $Z$-бозон как резонанс в аннигиляции $e^+e^-$. Пара фермион-антифермион в распаде $Z$-бозона обозначается $f\bar{f}$, где $f$ может быть как лептоном $(e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$, так и кварком $(u, d, s, c, b)$. В последнем случае за счет взаимодействия с глюонами пара кварк-антикварк превращается, как правило, в многоадронное состояние. Выходящая стрелка на этой и последующих диаграммах отвечает испусканию фермиона $(f)$ и поглощению антифермиона $(e^+)$, входящая – испусканию антифермиона $(\bar{f})$ и поглощению фермиона $(e^-)$.

Рис.2. Вклад пары $t\bar{t}$ в пропагатор $Z$-бозона (a).
Вклад петли с виртуальными $Z$-бозоном и хиггсом в пропагатор $Z$-бозона (b).

Рис.3. Однопетлевые диаграммы в распаде мюона. Петли в пропагаторе $W$-бозона (a), (b), (c), (d); в $W$-вершине (e), (f) и (g) и внешних фермионных линиях (h), (i), (j), (k) (аналогичные диаграммы для $e$ и $\bar{\nu}_e$ подразумеваются), а также диаграммы типа квадратика (l), (m), (n), (o).

Рис.4. Распад мюона в древесном приближении (a) и в локальном четырехфермионном приближении (b).
Электромагнитные поправки к распаду мюона в локальном приближении (c) -(g).
Электромагнитные поправки к $\beta$-распаду нейтрона: в древесном приближении (h), в четырехфермионном приближении (j).

Рис. 5. Фотонная поляризация вакуума, приводящая к логарифмическому бегу электромагнитного заряда $e$ и "постоянной тонкой структуры" $\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi}$, как функции $q^2$, где $q$ – 4-импульс фотона (a).
Некоторые из диаграмм, дающих вклад в собственную энергию $W$-бозона (b)-(g).
Некоторые из диаграмм, дающих вклад в собственную энергию $Z$-бозона (h)-(n).
Некоторые из диаграмм, дающих вклад в $Z \leftrightarrow \gamma$ переходы (o)-(r).

Рис. 6. Вершинные треугольные диаграммы в распаде $Z \to l\bar{l}$ (a), (b), (c).
Петли, перенормирующие волновые функции лептонов в распаде $Z \to l\bar{l}$. (Аналогичные петли имеются, разумеется, и у антилептонов) (d), (e).
Типы диаграмм, перенормирующие волновую функцию $Z$-бозона в распаде $Z \to l\bar{l}$ (f), (g). Виртуальные частицы в петлях те же, что и обсуждавшиеся выше.

Рис. 7. Виртуальные $t$-кварки (a) и $W$-бозоны (b), (c) в фотонной поляризации вакуума.

Рис. 8. Глюонные поправки к электрослабой кварковой петле собственной энергии $Z$-бозона (a)-(c).
Хиггсовы поправки к электрослабой $t$ кварковой петле $Z$ бозона (d)-(f).
Двухпетлевые хиггсовы поправки (g)-(j).

Рис. 9. $V_m$ как функция $m_t$ для трех значений $m_H$: 60, 300 и 1000 ГэВ согласно уравнению (??). Пунктирная парабола $t = (m_t/m_Z)^2$ соответствует приближению Вельтмана. Сплошная горизонтальная линия отвечает экспериментальному значению $V_m^{exp}$, а штриховые горизонтальные линии дают его верхний и нижний предел на уровне $1\sigma$ (a).
$V_m$ как функция $m_H$ для трех значений $m_t$: 150, 175 и 200 ГэВ, согласно ур-нию (??). (Горизонтальные линии те же, что на рис. 9(a),(b).)

Рис. 10. $V_A$ как функция $m_t$. (Остальные пояснения аналогичны пояснениям к рис. 9) (a).
$V_A$ как функция $m_H$ для трех значений $m_t$: 150, 175 и 200 ГэВ. (См. подпись под рис. 9) (b).

Рис. 11. $V_R$ как функция $m_t$. (Остальные пояснения аналогичны пояснениям к рис. 9) (a).
$V_R$ как функция $m_H$ для трех значений $m_t$: 150, 175 и 200 ГэВ. (См. подпись под рис. 9) (b).

Рис. 12. Распад $Z \to c\bar{c}$, сопровождаемый вторичной парой $b\bar{b}$, рожденный виртуальным глюоном $g$ (a).
Распад $Z \to q\bar{q}$ с виртуальным глюоном $g$, который связывает сторону кваркового треугольника с внешней кварковой линией. Диаграммы такого типа пока не вычислены (b).
Вершинная электрослабая диаграмма с участием $t$-кварков, дающая вклад в распад $Z \to b\bar{b}$ (c).
Одна из диаграмм, описывающих глюонные поправки к диаграмме рис. 12(c).

Рис. 13. Изолинии $\chi^2$ в плоскости $m_t, m_h$, полученные фитированием электрослабых поправок в предположении, что прямые измерения массы $t$ кварка дадут $m_t = 150 \pm 5$ ГэВ.

Рис. 14. То же, что на рис. 13, для $m_t = 175 \pm 5$ ГэВ.

Рис. 15. То же, что на рис. 13, для $m_t = 200 \pm 5$ ГэВ.

Рис. 16. Вершина с виртуальными $\tilde{t}$ скварками и вино, $\tilde{W}$ (a).
Реакция $e^+e^- \to W^+W^-$ с виртуальным фотоном или $Z$-бозоном (b).
Реакция $e^+e^- \to HZ$ (c).

Рис. A1. Трехчастичная вершина.

Рис. A2. Четырехчастичная вершина.

## Список литературы

[1] S.L.Glashow, Nucl.Phys. **22**, 579(1961); Rev. Mod. Phys. **52**, 539 (1980).
S.Weinberg, Phys.Rev.Lett.**19**, 1264 (1967); Rev.Mod.Phys. **52**, 515 (1980).
A.Salam, in Elementary Particle Theory, edited by N.Svartholm (Almquist and Wiksells, Stockholm, 1968), p. 367; Rev.Mod.Phys. **52**, 525 (1980).

[2] S.L.Glashow, J.Iliopoulos, and L.Maiani, Phys.Rev. **D2**, 1285 (1970).

[3] Воспоминания о ранней истории КХД см.
M.Gell-Mann "Quarks, Color and QCD" in "QCD – 20 Years Later", Ed. P.M.Zerwas and H.A.Kastrup, vol.1, p.3. World Scientific, 1993. Общий обзор КХД, содержащий литературные ссылки, см. в других статьях этого двухтомника.
W.Marciano and H.Pagels, Phys.Reports **36C**, 137 (1978).

[4] М.Б.Волошин, К.А.Тер-Мартиросян, Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. Энергоатомиздат, Москва, 1984;
К.Ициксон, Ж.-Б.Зюбер, Квантовая теория поля, т.1 и 2. Мир, Москва, 1984;
C.Itzykson, J.-B.Zuber, Quantum Field Theory. McGraw-Hill. New York, 1980;
Ю.Комминс, Ф.Буксбаум, Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Энергоатомиздат, Москва, 1987;
E.D.Commins, P.H.Bucksbaum, Weak interactions of leptons and quarks. Cambridge University Press, 1983;
Л.Б.Окунь, Лептоны и кварки. Наука, Москва, 1990.
Издание второе, переработанное;
L.B.Okun, Leptons and Quarks. North Holland, Amsterdam, 1982;
П.Рамон, Теория поля, Москва, Мир, 1984;
P.Ramond, Field Theory, A Modern Primer, Benjamin/Cummings, Inc., London, 1981;
А.А.Славнов, Л.Д.Фаддеев, Введение в квантовую теорию калибровочных полей. Издание 2-е, Наука, М., 1988;
Ф.Хелзен, А.Мартин, Кварки и лептоны. Мир, Москва, 1987;
F.Halzen, A.Martin, Quarks and Leptons. John Wiley, New York, 1984;
Т.П.Ченг, Л.Ф.Ли, Калибровочные теории элементарных частиц.

Мир, Москва, 1987;
T.-P.Cheng and L.-F.Li, Gauge Theory of Elementary Particle Physics. Clarendon Press, 1984;
H.Georgi, Weak Interactions and Modern Particle Theory. Benjamin/Cummings. Inc. 1984;
K.Gottfried, V.Weisskopf, Concepts of Particle Physics, v.I and II, Oxford University press. New York. 1986.

[5] N.Cabibbo, Phys.Rev.Lett. **10**, 531 (1963).

[6] H.J.Hasert et al., Phys.Lett. **B46**, 138 (1973);
H.J.Hasert et al., Nucl.Phys. **B73**, 1 (1974).

[7] Л.М.Барков, М.С.Золоторев, Письма в ЖЭТФ **26**, 544 (1978);
L.M.Barkov, M.S.Zolotorev, Phys. Lett. **B85**, 308 (1979).

[8] C.Y.Prescott et al., Phys. Lett. **B77**, 347 (1978);
C.Y.Prescott et al., Phys. Lett. **B84**, 524 (1979).

[9] J.J.Aubert et al., Phys.Rev.Lett. **33**, 1404(1974);
J.E.Augustin et al., Phys.Rev.Lett. **33**, 1406(1974).

[10] M.Kobayashi, T.Maskawa, Progr.Theor.Phys. **49**, 652 (1973).

[11] M.L.Perl et al., Phys.Rev.Lett. **35**, 1489(1975);
M.L.Perl et al., Phys.Lett. **63B**, 460(1976).

[12] S.W.Herb et al., Phys.Rev.Lett. **39**, 252 (1977).

[13] F.Abe et al., Phys.Rev.Lett. **74**, 2626 (1995).

[14] S.Abachi et al., Phys.Rev.Lett. **74**, 2632 (1995).

[15] G.'t Hooft, Nucl.Phys. **B33**, 173 (1971);
G.'t Hooft, Nucl.Phys. **B35**, 167 (1971).

[16] H.D.Politzer, Phys.Rev.Lett. **30**, 1346 (1973);
D.J.Gross, F.Wilczek, Phys.Rev.Lett. **30**, 1343 (1973);
D.J.Gross, F.Wilczek, Phys.Rev. **D8**, 3633 (1973).

[17] G.Arnison et al., Phys.Lett. **B122**, 103 (1983);
M.Banner et al., Phys.Lett. **B122**, 476 (1983);
G.Arnison et al., Phys.Lett. **B126**, 398 (1983);
P.Bagnaia et al., Phys.Lett. **B129**, 310 (1983).

[18] Reports of the working group on precision calculations for the $Z$ resonance, Eds. D.Bardin, W.Hollik, G.Passarino, CERN 95-03 (1995).

[19] H.E.Haber and R.Hempfling, Phys.Rev.Lett. **66**, 1815 (1991).

[20] Y.Okada, M.Yamaguchi, and T.Yanagida, Progr.Theor.Phys. **85**, 1 (1991);
J.Ellis, G.Ridolfi, and F.Zwirner, Phys.Lett. **B257**, 83 (1991).

[21] Physics at LEP, Eds. J.Ellis, R.Peccei, CERN 86-02 (1986).

[22] Z Physics at LEP1, Eds. G.Altarelli, R.Kleiss, C.Verzegnassi, CERN 89-08 (1989).

[23] A.Sirlin, Phys.Rev. **D22**, 971 (1980).

[24] S.M.Berman, A.Sirlin, Ann.Phys. (N.Y.) **20**, 20 (1962);
A.Sirlin, Rev.Mod.Phys. **50**, 573 (1978).

[25] E.S.Abers, D.A.Dicus, R.Norton and H.Quinn, Phys.Rev. **167**, 1461 (1968);
A.Sirlin, Nucl.Phys. **B71**, 29 (1974);
A.Sirlin, Rev.Mod.Phys. **50**, 573 (1978).

[26] H.Burkhardt, F.Jegerlehner, G.Penso and C.Verzegnassi, Z.Phys. **C43**, 497 (1989).
B.V.Geshkenbein, V.L.Morgunov, Phys.Lett. **340**, 185 (1994), preprint ITEP 19-95, Moscow, 1995;
М.И.Высоцкий, Р.Б.Невзоров, А.В.Новиков, Письма в ЖЭТФ **60**, 392 (1994), ЯФ **59**, No. 4 (1996);
M.L.Swartz, preprint SLAC-PUB-6710, 1994;
A.D.Martin, D.Zeppenfeld, preprint MAD/PH/855, 1994;
S.Eidelman, F.Jegerlehner, Z.Phys. **C67**, 585 (1995).

[27] D.Yu.Bardin, V.A.Dokuchaeva, Nucl. Phys. **B246**, 221 (1984);
S.Sarantakos, A.Sirlin, W.J.Marciano, Nucl. Phys. **B227**, 84 (1983);
R.G.Stuart, Z. Phys. **C34**, 445 (1987).

[28] A.Sirlin, W.J.Marciano, Phys. Rev. **D22**, 2695 (1980); Nucl. Phys. **B189**, 442 (1981);
J.F.Wheater, C.H.Llewellyn-Smith, Nucl. Phys. **B208**, 27 (1982) (errata: ibid, **B226**, 547 (1983));

C.H.Llewellynn-Smith, Nucl.Phys. **B228**, 205 (1983);
D.Yu.Bardin, V.A.Dokuchaeva, Preprint JINR, E2-86-260, 1986, Dubna, unpublished.

[29] M.Veltman, Nucl.Phys. **B123**, 89 (1977);
M.Veltman, Acta Phys.Pol., **B8**, 475 (1977).

[30] CDHS Collaboration: H.Abramowitz et al., Phys.Rev.Lett. **57**, 298 (1986).
A.Blondel et al., Z.Phys. **C45**, 361 (1990).

[31] CHARM Collaboration, J.V.Allaby et al., Phys.Lett. **B177**, 446 (1986).

[32] CCFR Collaboration: C.G.Arroyo et al., Phys.Rev.Lett. **72**, 3452 (1994).

[33] UA2 Collaboration: Alitti et al., Phys.Lett. **B276**, 354 (1992).

[34] CDF Collaboration: A.Abe et al., Phys.Rev.Lett. **65**, 2243 (1990).

[35] Review of Particle Properties, Phys.Rev. **D50** (1994) No.3, part 1.

[36] K.Hagiwara, Talk at LP95 (10-15 Aug. 1995, Beijing).
P.B.Renton, Talk at Europhysics Conference, Brussells, 1995.

[37] CHARM II Collaboration, Phys.Lett. **B281**, 159 (1992).
CHARM II Collaboration, Phys.Lett. **B259**, 499 (1991).

[38] V.Novikov, L.Okun, M.Vysotsky, Phys.Lett. **B298**, 453 (1993).

[39] CHARM II Collaboration, Phys.Lett. **B320**, 203 (1994).

[40] И.Б.Хриплович, Несохранение четности в атомных явлениях. Наука, М., 1988 (Второе издание);
S.A.Blundell, W.R.Johnson, and J.Sapirstein, Phys.Rev.Lett. **65**, 1411 (1990);
M.A.Bouchiat, L.Pottier, Science **234**, 1203 (1986);
J.Rosner, W.Marciano, Phys. Rev. Lett. **65**, 2963 (1990).

[41] B.W.Lynn and M.E.Peskin, report SLAC-PUB-3724 (1985) unpublished.
B.W.Lynn, M.E.Peskin and R.G.Stuart, in: Physics at LEP, report CERN 86-02 (CERN Geneva).

[42] V.Novikov, L.Okun, M.Vysotsky, Nucl.Phys. **B397**, 35 (1993).

[43] S.Willenbrock and G.Valencia, Phys. Lett. **B259**, 573 (1991);
A.Leike, T.Riemann, J.Rose, Phys. Lett. **B273**, 513 (1991);
L3 Collaboration (O.Adriani et al.), Phys. Lett. **B315**, 494 (1993);
H.Veltman, Z.Phys. **C62**, 35 (1994).

[44] The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL and the LEP Electroweak Working Group, preprint CERN-PPR/95-172 (1995).

[45] S.G.Gorishny, A.L.Kataev and S.A.Larin, Phys.Lett. **B259** (1991) 144;
L.R.Surguladze and M.A.Samuel, Phys.Rev.lett. **66** (1991) 560.

[46] K.G.Chetyrkin, J.H.Kühn, Phys.Lett. **B248** (1990) 359;
K.G.Chetyrkin, J.H.Kühn and A.Kwiatkowski, Phys.Lett. **282** (1992) 221.

[47] K.G.Chetyrkin and A.Kwiatkowski, Phys.Lett. **B305** (1993) 288;
K.G.Chetyrkin and A.Kwiatkowski, Phys.Lett. **B319** (1993) 307;
K.G.Chetyrkin, Phys.Lett. **B307** (1993) 169;

[48] S.A.Larin, T. van Ritberger, J.A.M. Vermaseren, Phys.Lett. **B320** (1994) 159;
K.G.Chetyrkin, O.V.Tarasov, Phys.Lett. **B327** (1994) 114.

[49] A.L.Kataev, Phys. Lett. **287** (1992) 209.

[50] N.Gray et al., Z.Phys. **C48** (1990) 673;
L.R.Surguladze, Univ. of Oregon Report No. OITS543 hep-ph/9405325 (1994).

[51] G.Altarelli, Proceedings of the Int. Europhysics Conf. on High Energy Physics, Marseille 1993; Eds. J.Carr and M.Perrotet (Edition Frontieres 1994);
L.Okun, ibid.;
D.Schildknecht, ibid.

[52] M.Vysotsky, proceedings of the XXVII Int.Conference on High Energy Physics, Glasgow 1994, Eds. P.J.Bussey and I.G.Knowles (Institute of Physics Publishing).

[53] R.Barbieri, M.Beccaria, P.Ciafaloni, G.Curci, A.Vicere, Phys.Lett. **B288**, 95 (1992); Nucl.Phys. **B409**, 105 (1993);

J.Fleisher, O.V.Tarasov, F.Jegerlehner, preprint BI-TP-93/24 and PSI-PR-93-14 (1993); Phys.Lett. **B319**, 249 (1993);
F.Halzen, B.A.Kniehl, M.L.Stong, Z.Phys. **C58**, 119 (1993);
R.Barbieri, P.Ciafaloni, A.Strumia, Phys.Lett. **B317**, 381 (1993).

[54] A.Djouadi, C.Verzegnassi, Phys.Lett. **B195**, 265 (1987);
B.A.Kniehl, Nucl.Phys. **B347**, 86 (1990);
F.Halzen and B.A.Kniehl, Nucl.Phys. **B353**, 517 (1991).

[55] V.Novikov, L.Okun, M.Shifman, A.Vainshtein, M.Voloshin and V.Zakharov, Phys.Rep. **41C**, 1 (1978).

[56] K.G.Chetyrkin, J.H.Kühn, M.Steinhauser, Phys.Lett. **B351**, 331 (1995); Phys.Rev.Lett. **75**, 3394 (1995);
L.Avdeev, J.Fleisher, S.Mikhailov, O.Tarasov, Phys.Lett. **B336**, 560 (1994); **B349**, 597 (1995) (E).

[57] A.A.Akhundov, D.Yu.Bardin, T.Riemann, Nucl.Phys. **B276**, 1 (1986);
J.Bernabeu, A.Pich, A.Santamaria, Phys.Lett. **B200**, 569 (1986);
W.Beenaker, W.Hollik, Z.Phys. **C40**, 141 (1988).

[58] J.Fleisher, F.Jegerlehner, P.Raczka, O.V.Tarasov, Phys.Lett. **B293**, 437 (1992);
C.Buchalla, A.Buras, Nucl.Phys. **B398**, 285 (1990);
G.Degrassi, Nucl.Phys. **B407**, 271 (1993);
K.G.Chetyrkin, A.Kwiatkowski, M.Steinhauser, Mod.Phys.Lett. **A8**, 2785 (1993).

[59] D.Bardin et al., program ZFITTER 4.9, Nucl. Phys. **B351**, 1 (1991); Z. Phys. **C44**, 493 (1989); Phys. Lett. **B255**, 290 (1991); CERN-TH.6443-92 (1992).

[60] J.Ellis, G.Fogli, Phys. Lett. **213B**, 189, 526 (1988); **232B**, 139 (1989);
J.Ellis, G.Fogli, Phys. Lett. **B249**, 543 (1990).

[61] W.Hollik, Fortschr. Phys. **38**, 3, 165 (1990);
M.Consoli, W.Hollik and F.Jegerlehner: Proceedings of the Workshop on $Z$ physics at LEP I, CERN Report 89-08 Vol. I, 7;
G.Burgers, F.Jegerlehner, B.Kniehl and J.H.Kühn: CERN Report 89-08 Vol. I, 55.

[62] G.Montagna, O.Nicrosini, G.Passarino, F.Piccinini and R.Pittau, Nucl. Phys. **B401**, 3 (1993);
G.Montagna, O.Nicrosini, G.Passarino, F.Piccinini and R.Pittau, program TOPAZO, Comput. Phys. Commun. **76**, 328 (1993).

[63] V.Novikov, L.Okun, A.Rozanov, M.Vysotsky, preprint ITEP 19-95, CPPM-1-95.

[64] CDF Collaboration, F.Abe et al., Phys.Rev.Lett. **74**, 2626 (1995).

[65] D0 Collaboration, S.Abachi et al., Phys.Rev.Lett. **74**, 2632 (1995).

[66] M.Shifman, Minnesota preprint TPI-MINN-95/32-T(1995).

[67] M.Voloshin, Int.J.Mod.Phys. **A10**, 2865 (1995).

[68] P.Z.Quintas et al., Phys.Rev.Lett. **71**, 1307 (1993);
J.P.Berge et al., Z.Phys. **C49**, 187 (1991);
M.Arneodo et al., Phys.Lett. **B309**, 222 (1993) 222;
K.Bazizi, S.J.Wimpenny, UCR/DIS/91-02;
M.Virchaux, A.Milsztajn, Phys.Lett. **274**, 221 (1992).

[69] M.Kobel, DESY-F31-91-03.

[70] M.Voloshin, Preprint ITEP-21-1980, 1980;
M.Voloshin, Doctor of Science Thesis, Moscow, 1988.

[71] V.Novikov, L.Okun, M.Vysotsky, Phys. Lett. **B324**, 89 (1994).

[72] Р.Невзоров, А.Новиков, ЯФ **59**, 540 (1996).

[73] S.A.Larin, T.Van Ritberger, J.A.M.Vermaseren, Phys.Lett. **B320**, 159 (1994);
K.G.Chetyrkin, O.V.Tarasov, Phys.Lett. **B327**, 114 (1994).

[74] In Physics at LEP1, Eds. G.Altarelli, R.Kleiss, C.Verzegnassi (CERN 89-08, Geneva, 1989), v.1, p. 7. Conveners: M.Consoli, W.Hollik. Working Group: F.Jegerlehner.

[75] М.И.Высоцкий, Н.А.Некрасов, В.А.Новиков, Л.Б.Окунь, ЯФ **57**, 883 (1994).

[76] J.Van der Bij, M.Veltman, Nucl.Phys. **B231**

[77] M.Boulware, D.Finnell, Phys.Rev. D44, 2054 (1991);
G.L.Kane, C.Kolda, J.D.Wells, Phys. Lett. B338, 219 (1994).

[78] M.Peskin, T.Takeuchi, Phys.Rev.Lett. 65, 964 (1990); Phys.Rev. D46, 381 (1992).

[79] G.Altarelli, R.Barbieri, S.Jadach, Nucl.Phys. B369, 3 (1992).

[80] Interim Report on the Physics Motivations for an Energy Upgrade of LEP 2, preprint CERN-TH/95-151, CERN-PPE/95-78.

[81] In Physics at LEP1, Eds. G.Altarelli, R.Kleiss, C.Verzegnassi (CERN 89-08, Geneva, 1989), v. 1, p.57. Conveners: G.Burgers, F.Jegerlehner. Working Group: B.Kniehl, J.Kühn.

[82] Л.Д.Ландау А.А.Абрикосов, И.М.Халатников, Докл. Акад. Наук СССР, 95, 497; 1177 (1954);
M.Gell-Mann and F.Low, Phys. Rev. 95 1300 (1954).

[83] V.A.Novikov, L.B.Okun and M.I.Vysotsky, Mod. Phys. Lett. A9, 1489 (1994).

Подписано к печати 22.02.96 Формат 60x90 1/16 Офсетн.печ.
Усл.-печ.л.2,25. Уч.-изд.л.1,6. Тираж 110 экз. Заказ 13.
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, 117259, Москва, Б.Черемушкинская, 25