



Лаборатория теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова
Объединенный институт ядерных исследований



Систематическое описание четырех-бозонных процессов в Стандартной Модели на однопетлевом уровне

по материалам кандидатской диссертации

Углов Евгений

ЛЯП ОИЯИ

24 июня 2016

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Исследование преследовало следующие цели

- Разработать вычислительную среду для аналитических и численных расчетов в рамках системы SANC четырех-бозонных процессов.
- Выполнить расчет на однопетлевом уровне точности в рамках Стандартной Модели следующих четырех-бозонных процессов: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$, а также процесса $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$.
- Создать аналитические и фортранные модули, реализующие результаты вычислений форм-факторов, спиральных амплитуд, сечений; и включить их в пакет для внешних пользователей.

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение**
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Мотивация изучения бозонных процессов

- Среди четырех-бозонных процессов наибольший интерес заслуживают процессы с $\gamma\gamma$ и gg в начальном состоянии (изучение физики на LHC, ILC):
 $\gamma\gamma (gg) \rightarrow \gamma\gamma (ZZ, Z\gamma, H\gamma, \text{ и др.})$
- Изучение Хиггс-бозона: легкая масса 125 GeV (ATLAS, CMS) делает важной модой распада в SM процесс $H \rightarrow \gamma\gamma(\gamma Z)$.
- Данный факт стимулирует работы по созданию $\gamma\gamma$ -моды на линейном e^+e^- -ускорителе, потому что $\gamma\gamma$ столкновения могут легко обеспечить чистый $\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$ сигнал на уровне от 45 до 70 событий при 500 fb^{-1} светимости в энергетическом диапазоне от 160 до 320 GeV соответственно.
- Также интересно изучение процесса $\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow \gamma Z$ из-за отношения его сечения рассеяния к сечению процесса $\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$. В SM оно предсказывается на уровне 0.71. Оценка фонового процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma(\gamma Z)$ очень важна.

Система SANC

SANC - поддержка аналитических и численных вычислений для экспериментов на коллайдерах

Компьютерная система SANC v1.10 предназначена для полуавтоматических полных вычислений на однопетлевом уровне точности: EW + QCD (QED - для обучения) реальных и псевдонаблюдаемых величин (распределения событий и ширины распада) практически для всех 3-х частичных распадов и многих 4-х частичных (под-) процессов. NB: Полные NLO вычисления: все диаграммы для изучаемого процесса в R_ξ -калибровке.

В настоящий момент используется для физических задач: горячие процессы на LHC.

Доступна на сервере в Дубне: <http://sanc.jinr.ru/>

A. Andonov, et al., Comput. Phys. Comm. 174 (2006) 481–517.

D. Bardin, et al., Comput. Phys. Comm. 177 (2007) 738–756.

A. Andonov, et al., arXiv:0812.4207 [physics.comp-ph].

A. Andonov, V. Kolesnikov, E. Uglov, Phys. Part. Nucl. Lett. 8, 765 (2011).

Предвычисления, амплитуды, форм-факторы

Предвычисления:

посчитать максимальное число однопетлевых диаграмм подпроцессов и другие вычисляемые объекты (константы перенормировки и т.д.) в общем виде (для уменьшения времени компьютерного счета)

Ковариантные амплитуды (КА) и скалярные форм-факторы (ФФ) — \mathcal{F}_i

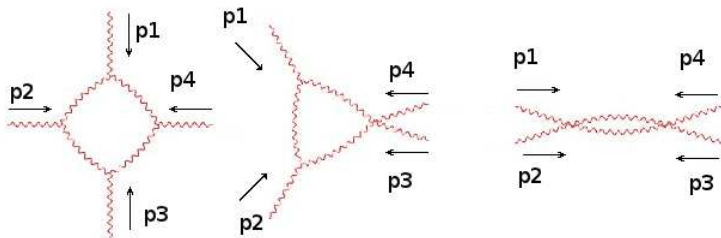
$$\mathcal{A} \propto \gamma_\mu \mathcal{F}_1 + \sigma_{\mu\nu} q_\nu \mathcal{F}_2$$

Спиральные амплитуды (СА) — $\mathcal{H}_{\{\lambda_i\}}(\mathcal{F}_i)$

Стандартный подход: $O \propto |\mathcal{A}|^2$
в терминах СА: $O \propto \sum_{\{\lambda_i\}} |\mathcal{H}_{\{\lambda_i\}}|^2$

Мультиканальный подход

Процессы аннигиляции в вакуум $\gamma\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$, $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$, $ZZ\gamma\gamma \rightarrow 0$:



Канал рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$:

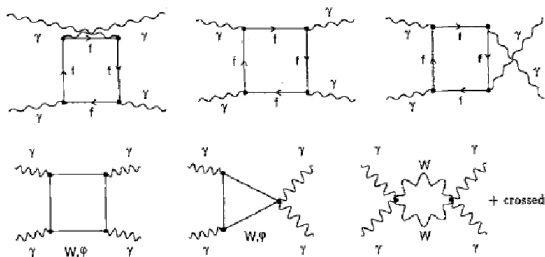
$$K_1 = p_1; K_2 = p_2; K_3 = -p_3; K_4 = -p_4;$$

Распадный канал $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$:

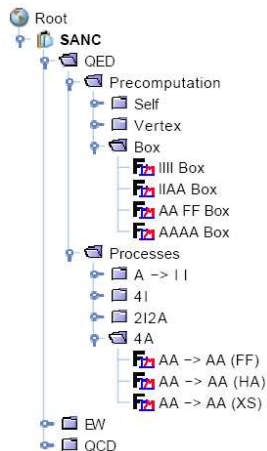
$$K_1 = -p_1; K_2 = -p_2; K_3 = -p_3; K_4 = p_4;$$

Диаграммы процессов и вклады

$$\gamma\gamma (gg) \rightarrow \gamma\gamma (ZZ, Z\gamma, H\gamma, \text{etc.})$$



Диаграммы для $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$



D. Bardin, et al., E. Uglov, arXiv:0611188[hep-ph].

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$**
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Сечение рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

4-х импульсы входящих фотонов: p_1 и p_2 , исходящих — p_3 и p_4 .

Рассеяние считается для реальных фотонов на массовой поверхности.

Закон сохранения 4х-импульсов: $p_1 + p_2 - p_3 - p_4 = 0$.

Переменные Мандельштама (в SANC используется метрика Паули):

$$\begin{aligned} s &= -(p_1 + p_2)^2 = -2p_1 \cdot p_2, & t &= -(p_1 - p_3)^2 = 2p_1 \cdot p_3, \\ u &= -(p_1 - p_4)^2 = 2p_1 \cdot p_4, & s + t + u &= 0. \end{aligned}$$

Для процесса $2 \rightarrow 2$ $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ сечение рассеяния равно:

$$d\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} = \frac{1}{j} |\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}|^2 d\Phi^{(2)},$$

где $j = 4\sqrt{(p_1 p_2)^2}$ — поток, $\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}$ — КА процесса и $d\Phi^{(2)}$ — двухчастичный фазовый объем.

Дифференциальное сечение:

$$d\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} = \frac{1}{128\pi s} |\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}|^2 d\cos\theta,$$

где $s = 4\omega^2$, ω — энергия фотонов и θ — угол рассеяния в СЦМ.

Ковариантные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

В терминах Лоренцовских структур КА для $\gamma\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$ имеет вид:

$$\mathcal{A}_{\gamma\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0} = 4e^4 Q_f^4 \sum_{i=1}^N \left[\mathcal{F}_i^b(s, t, u) + \mathcal{F}_i^f(s, t, u) \right] T_i^{\alpha\beta\mu\nu}.$$

Тензорная структура четырежды поперечна по каждому импульсу внешних фотонов: $T_i^{\alpha\beta\mu\nu} p_\alpha = T_i^{\alpha\beta\mu\nu} p_\beta = T_i^{\alpha\beta\mu\nu} p_\mu = T_i^{\alpha\beta\mu\nu} p_\nu = 0$. Для подпроцесса (вне массовой поверхности) $N = 43$, на массовой поверхности $N = 10$.

\mathcal{F}_i — скалярные форм-факторы, коэффициенты перед базисной структурой КА, представляют собой комбинацию из скалярных функций Пассарино-Вельтмана A_0, B_0, C_0, D_0 , зависят от инвариантов s, t, u , и масс частиц — фермионов и бозонов. Не содержат УФ-расходимостей. Число членов в \mathcal{F}_i равно тысячам в случае ненулевых масс петлевых частиц и значительно сокращается при полагании нулю массы фермионов где возможно.

Тензорная структура $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

Базис КА построен из 14 независимых тензорных структур:

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{(1)} &= p_{1i}p_{2j} + \frac{s}{2}\delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(2)} &= p_{3i}p_{4j} + \frac{s}{2}\delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(3)} &= p_{2i}p_{3j} + \frac{t}{2}\delta_{ij}, \\ \tau_{ij}^{(4)} &= p_{1i}p_{4j} + \frac{t}{2}\delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(5)} &= p_{1i}p_{3j} + \frac{u}{2}\delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(6)} &= p_{2i}p_{4j} + \frac{u}{2}\delta_{ij}, \\ \tau_i^{(7)} &= p_{1i} - \frac{t}{u}p_{2i}, & \tau_i^{(8)} &= p_{1i} - \frac{u}{t}p_{2i}, & \tau_i^{(11)} &= p_{4i}, & \tau_i^{(12)} &= p_{3i}, \\ \tau_i^{(9)} &= p_{1i} - \frac{s}{t}p_{3i}, & \tau_i^{(10)} &= p_{2i} - \frac{s}{u}p_{3i}, & \tau_i^{(13)} &= p_{2i}, & \tau_i^{(14)} &= p_{1i}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_1^{\alpha\beta}\tau_2^{\mu\nu}, & T_2^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_3^{\beta\nu}\tau_4^{\alpha\mu}, & T_3^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_5^{\alpha\nu}\tau_6^{\beta\mu}, & T_4^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_1^{\alpha\beta}\tau_7^{\mu}\tau_8^{\nu}, \\ T_5^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_2^{\mu\nu}\tau_9^{\beta}\tau_{10}^{\alpha}, & T_6^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_3^{\beta\nu}\tau_7^{\mu}\tau_{10}^{\alpha}, & T_7^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_4^{\alpha\mu}\tau_8^{\nu}\tau_9^{\beta}, & T_8^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_5^{\alpha\nu}\tau_7^{\mu}\tau_9^{\beta}, \\ T_9^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_6^{\beta\mu}\tau_8^{\nu}\tau_{10}^{\alpha}, & T_{10}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_7^{\mu}\tau_8^{\nu}\tau_9^{\beta}\tau_{10}^{\alpha}, & T_{11}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_1^{\alpha\beta}\tau_7^{\mu}\tau_1^{\nu}, & T_{12}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_2^{\mu\nu}\tau_9^{\beta}\tau_{14}^{\alpha}, \\ T_{13}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_3^{\beta\nu}\tau_7^{\mu}\tau_{14}^{\alpha}, & T_{14}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_4^{\alpha\mu}\tau_8^{\nu}\tau_{13}^{\beta}, & T_{15}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_5^{\alpha\nu}\tau_7^{\mu}\tau_{13}^{\beta}, & T_{16}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_6^{\beta\mu}\tau_8^{\nu}\tau_{14}^{\alpha}, \\ & & & & & & & \dots \\ T_{41}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{11}^{\mu}\tau_{13}^{\beta}\tau_{14}^{\alpha}\tau_8^{\nu}, & T_{42}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{12}^{\nu}\tau_{13}^{\beta}\tau_{14}^{\alpha}\tau_7^{\mu}, & T_{43}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{11}^{\mu}\tau_{12}^{\nu}\tau_{13}^{\beta}\tau_{14}^{\alpha}. \end{aligned}$$

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

Для процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ получаем:

$$\begin{aligned}\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} &= \sum_{\text{spins}} \left[c^{\text{bosons}} \times \mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{bosons}} + c^{\text{fermions}} \times \mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{fermions}} \right], \\ |\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}|^2 &= \sum_{\text{spins}} \left[c_{\text{bosons}}^2 |\mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{bosons}}|^2 + c_{\text{fermions}}^2 |\mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{fermions}}|^2 \right. \\ &\quad \left. + c^{\text{bosons}} c^{\text{fermions}} \left(\mathcal{H}_{\text{spins}}^{*\text{bosons}} \times \mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{fermions}} + \mathcal{H}_{\text{spins}}^{\text{bosons}} \times \mathcal{H}_{\text{spins}}^{*\text{fermions}} \right) \right].\end{aligned}$$

Общее число СА равно 16. Оно соответствует разным комбинациям проекций спина внешних частиц. Для $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ процесса имеем четыре фотона с поляризациями + и -, поэтому $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$.

Благодаря СРТ-инвариантности и кросс-симметрии среди СА имеются соотношения и равенства с точностью до смены знака и замены

Мандельштамовских переменных. Например:

$\mathcal{H}_{+--+}(s, t, u) = \mathcal{H}_{+-+}(s, u, t)$. Но данный факт не означает уменьшение числа независимых СА.

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

$$\begin{aligned}
 H_{fermion}^{++++}(s, t, u) &= -1 + \frac{u-t}{s} [B_0(u, m_f) - B_0(t, m_f)] + \left[\frac{4m_f^2}{s} + 2 \left(\frac{tu}{s^2} - \frac{1}{2} \right) \right] [uC_0(u, m_f) + tC_0(t, m_f)] \\
 &\quad - 2m_f^2 s \left(\frac{m_f^2}{s} - \frac{1}{2} \right) [D_0(s, t, m_f) + D_0(s, u, m_f) + D_0(t, u, m_f)] \\
 &\quad - tu \left(\frac{4m_f^2}{s} + \frac{tu}{s^2} - \frac{1}{2} \right) D_0(t, u, m_f);
 \end{aligned}$$

$$H_{fermion}^{+- - -}(s, t, u) = 1 - 2m_f^4 [D_0(s, t, m_f) + D_0(s, u, m_f) + D_0(t, u, m_f)];$$

$$\begin{aligned}
 H_{fermion}^{++++}(s, t, u) &= 1 - m_f^2 (s^2 + t^2 + u^2) \left[\frac{1}{tu} C_0(s, m_f) + \frac{1}{su} C_0(t, m_f) + \frac{1}{st} C_0(u, m_f) \right] \\
 &\quad - m_f^2 \left[\left(2m_f^2 + \frac{st}{u} \right) D_0(s, t, m_f) + \left(2m_f^2 + \frac{su}{t} \right) D_0(s, u, m_f) + \left(2m_f^2 + \frac{ut}{s} \right) D_0(u, t, m_f) \right].
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{boson}^{++++}(s, t, u) &= 1 - \frac{u-t}{s} [B_0(u, M_W) - B_0(t, M_W)] - \left[\frac{4M_W^2}{s} + 2 \left(\frac{tu}{s^2} - \frac{4}{3} \right) \right] [uC_0(u, M_W) + tC_0(t, M_W)] \\
 &\quad + \left[2M_W^2 s \left(\frac{M_W^2}{s} - \frac{4}{3} \right) + \frac{2}{3s^2} \right] [D_0(s, t, M_W) + D_0(s, u, M_W) + D_0(t, u, M_W)] \\
 &\quad + tu \left(\frac{4M_W^2}{s} + \frac{tu}{s^2} - \frac{4}{3} \right) D_0(t, u, M_W).
 \end{aligned}$$

M.Bohm, Z.Phys. C63, 219-225 (1994),
G.Jikia, arXiv:9312228[hep-ph].

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$**
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Сечение $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ и ширина распада $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

Сечение рассеяния процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ равно:

$$d\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z} = \frac{1}{4\sqrt{(p_1 p_2)^2}} |\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z}|^2 d\Phi^{(2)},$$

где $\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z}$ — КА процесса и $d\Phi^{(2)}$ — двухчастичный фазовый объем:

$$d\Phi^{(2)} = (2\pi)^4 \delta(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \frac{d^4 p_3 \delta(p_3^2)}{(2\pi)^3} \frac{d^4 p_4 \delta(p_4^2)}{(2\pi)^3}.$$

Для дифференциального сечения получаем:

$$d\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z} = \frac{1}{32\pi s} \left(1 - \frac{M_Z^2}{s}\right) |\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z}|^2 d\cos\theta,$$

где θ — угол рассеяния Z бозона в СЦМ.

Ширина распада Z бозона вычисляется по формуле:

$$\Gamma_Z = \frac{1}{3!384\pi^3 M_Z^3} \int |\mathcal{A}_{Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma}|^2 ds dt du \times \delta(M_Z^2 - s - t - u).$$

Ковариантные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ и $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ распада

В терминах Лоренцовских структур КА для $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$ имеет вид:

$$\mathcal{A}_{Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0} = 4e^4 Q_f^4 \sum_{i=1}^{14} \left[\mathcal{F}_i^b(s, t, u) + \mathcal{F}_i^f(s, t, u) \right] T_i^{\alpha\beta\mu\nu}.$$

Базис КА построен из 7 независимых тензорных структур:

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{(1)} &= p_{1i} p_{2j} + \frac{s}{2} \delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(2)} &= p_{2i} p_{3j} + \frac{t}{2} \delta_{ij}, & \tau_{ij}^{(3)} &= p_{1i} p_{3j} + \frac{u}{2} \delta_{ij}, \\ \tau_{ij}^{(4)} &= p_{1i} \left(p_{1j} - \frac{s}{t} p_{3j} \right), & \tau_{ij}^{(5)} &= p_{2i} \left(p_{2j} - \frac{s}{u} p_{3j} \right), \\ \tau_{ij}^{(6)} &= p_{1i} \left(p_{1j} - \frac{u}{t} p_{2j} \right), & \tau_{ij}^{(7)} &= p_{2i} \left(p_{2j} - \frac{t}{u} p_{1j} \right). \end{aligned}$$

Ковариантные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ и $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ распада

Тензор четвертого ранга с исключенным по закону сохранения импульсом p_4 и применением физических условий поперечности, нулевой массы фотона ($p_{1\alpha} = p_{2\beta} = p_{3\nu} = 0$ и $p_1^2 = p_2^2 = p_3^2 = 0$), имеет вид:

$$T_1^{\alpha\beta\mu\nu} = \left(\tau_{\beta\nu}^{(1)} - \frac{t}{u} \tau_{\nu\beta}^{(4)} \right) \delta_{\alpha\mu} - \left(\tau_{\mu\nu}^{(1)} + \frac{t}{u} \tau_{\nu\mu}^{(1)} \right) \delta_{\alpha\beta} + \left(\frac{t}{u} \tau_{\beta\alpha}^{(3)} + \frac{s+u}{u} \tau_{\alpha\beta}^{(2)} \right) \delta_{\mu\nu} \\ + \frac{t}{u} \left(\tau_{\beta\mu}^{(1)} + \tau_{\mu\beta}^{(4)} \right) \delta_{\alpha\nu} + \left(\frac{s}{u} \tau_{\nu\alpha}^{(2)} - \tau_{\alpha\nu}^{(7)} \right) \delta_{\beta\mu} - \left(\frac{s}{u} \tau_{\mu\alpha}^{(2)} + \tau_{\alpha\mu}^{(2)} \right) \delta_{\beta\nu} \\ + \frac{s-t}{2} \delta_{\alpha\beta} \delta_{\mu\nu} + \frac{(s+u)t}{2u} \delta_{\alpha\mu} \delta_{\beta\nu} - \frac{st}{2u} \delta_{\alpha\nu} \delta_{\beta\mu},$$

$$T_2^{\alpha\beta\mu\nu} = -\tau_{\beta\alpha}^{(1)} \tau_{\nu\mu}^{(3)}, \quad T_3^{\alpha\beta\mu\nu} = -\frac{t}{u} \tau_{\beta\alpha}^{(1)} \tau_{\mu\nu}^{(6)}, \quad T_4^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\beta\alpha}^{(1)} \left(\frac{t}{u} \tau_{\mu\nu}^{(6)} - \tau_{\nu\mu}^{(2)} \right),$$

$$T_5^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\mu\alpha}^{(1)} \tau_{\nu\beta}^{(3)} - \frac{t}{2} \left(\tau_{\beta\nu}^{(6)} \delta_{\alpha\mu} - \tau_{\mu\nu}^{(6)} \delta_{\alpha\beta} \right), \quad T_6^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\alpha}^{(1)} \tau_{\mu\beta}^{(2)} - \frac{u}{2} \left(\tau_{\nu\alpha}^{(5)} \delta_{\beta\mu} - \tau_{\mu\alpha}^{(5)} \delta_{\beta\nu} \right),$$

$$T_7^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\beta}^{(2)} \tau_{\mu\alpha}^{(1)}, \quad T_8^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\beta}^{(2)} \tau_{\mu\alpha}^{(5)}, \quad T_9^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\alpha}^{(3)} \tau_{\mu\beta}^{(4)}, \quad T_{10}^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\alpha}^{(3)} \tau_{\beta\mu}^{(1)},$$

$$T_{11}^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\mu\alpha}^{(3)} \tau_{\beta\nu}^{(1)} + \frac{t}{2} \left(\tau_{\mu\beta}^{(4)} \delta_{\alpha\nu} - \tau_{\nu\beta}^{(4)} \delta_{\alpha\mu} \right), \quad T_{12}^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\alpha}^{(2)} \tau_{\beta\mu}^{(1)} + \frac{u}{2} \left(\tau_{\mu\nu}^{(6)} \delta_{\alpha\beta} - \tau_{\alpha\nu}^{(6)} \delta_{\beta\mu} \right),$$

$$T_{13}^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\mu\beta}^{(2)} \tau_{\nu\alpha}^{(3)}, \quad T_{14}^{\alpha\beta\mu\nu} = \tau_{\nu\beta}^{(2)} \tau_{\mu\alpha}^{(3)}.$$

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$

Процесс рассеяния:

$$\gamma(p_1, \lambda_1) + \gamma(p_2, \lambda_2) \longrightarrow \gamma(p_3, \lambda_3) + Z(p_4, \lambda_4),$$

где $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ - спиральности внешних частиц.

Общее число СА для данного процесса равно 24. Оно соответствует различным комбинациям проекций спинов внешних частиц.

СА выражаются через скалярные форм-факторы и имеют вид:

$$\mathcal{H}_{--+-} = \mathcal{H}_{++-+} = \frac{1}{4} \frac{s^2 t}{u + t} (\mathcal{F}_4 - \mathcal{F}_3)$$

Спиральные амплитуды $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

Распад Z -бозона:

$$Z(p_4, \lambda_4) \longrightarrow \gamma(p_1, \lambda_1) + \gamma(p_2, \lambda_2) + \gamma(p_3, \lambda_3)$$

где $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ - спиральности внешних частиц.

СА выражаются через скалярные форм-факторы и имеют вид:

$$\mathcal{H}_{-+++} = \mathcal{H}_{+---} = -\frac{1}{4} \frac{st^2}{u+t} \left\{ \mathcal{F}_6 + \mathcal{F}_7 - \mathcal{F}_8 + \mathcal{F}_{12} + \frac{2}{u} \mathcal{F}_1 \right\},$$

$$s = M_Z^2 - t - u.$$

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$

$$H_{bosons}^{++++}(s, t, u) = 2\left(\frac{A_1(t, u, s)}{s_1} + \frac{A_2(s, t, u) + A_2(u, t, s) + A_3(u, s, t)}{t} + \frac{A_1(u, t, s)}{s_1} + \frac{A_2(s, u, t) + A_2(t, u, s) + A_3(t, s, u)}{u}\right);$$

$$H_{bosons}^{++-+}(s, t, u) = 2\left(\frac{A_1(s, t, u) - A_1(u, t, s) - A_2(s, t, u) + A_2(u, t, s)}{s_1} + \frac{A_3(s, t, u)}{u} - \frac{uA_3(u, t, s)}{ss_1} + \frac{A_1(s, u, t) - A_1(t, u, s) - A_2(s, u, t) + A_2(t, u, s)}{s_1} + \frac{A_3(s, u, t)}{t} - \frac{tA_3(t, u, s)}{ss_1}\right);$$

$$H_{bosons}^{++++0}(s, t, u) = \frac{\sqrt{2}}{M_Z \sqrt{stu}} \times \left(\frac{su - tM_Z^2}{s_1} A_1(t, u, s) + s(A_2(s, u, t) + A_2(t, u, s)) + \frac{suA_3(u, s, t)}{t} - \frac{st - uM_Z^2}{s_1} A_1(u, t, s) - s(A_2(s, t, u) + A_2(u, t, s)) - \frac{stA_3(t, s, u)}{u}\right);$$

...

$$A_1(s, t, u) = \frac{1}{4} \left(\frac{M_Z^2}{M_W^2} - 6\right) \times \left(\frac{4st}{t - M_Z^2} + \frac{8t}{u}(sB_1(s) - (s - M_Z^2)B_1(t)) - \frac{4M_Z^2(s + 2u)t}{(t - M_Z^2)^2} B_1(t) - 8M_W^4 tF + \frac{2st(2t + u)}{u^2} E(s, t) + \frac{8M_W^2 t}{u} E(s, t) + \frac{4M_W^2 t}{s} E(t, u) + 4M_W^2 (sC(s) + tC(t) + (u - M_Z^2)C_1(u)) - \frac{8M_W^2 (s + 2u)t}{t - M_Z^2} C_1(t) - \frac{4M_W^2 st(u + 2t)}{u} D(s, t) - 2M_W^2 (utD(t, u) + stD(s, t) + usD(u, s));$$

$$s_1 = s - M_Z^2 \dots$$

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$**
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Ковариантные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$

$$\mathcal{A}_{ZZ\gamma\gamma \rightarrow 0} = 4e^4 Q_f^4 \sum_{i=1}^{20} \left[\mathcal{F}_i^b(s, t, u) + \mathcal{F}_i^f(s, t, u) \right] T_i^{\alpha\beta\mu\nu}.$$

Базис КА построен из 5 независимых тензорных структур:

$$\tau_{ij}^{(1)} = p_{1i}p_{2j} + \frac{1}{2}s\delta_{ij},$$

$$\tau_{ij}^{(2)} = p_{2i}p_{3j} - \frac{1}{2}(M_Z^2 - t)\delta_{ij}, \quad \tau_{ij}^{(3)} = p_{1i}p_{3j} - \frac{1}{2}(M_Z^2 - u)\delta_{ij},$$

$$\tau_i^{(4)} = p_{3i} + \frac{M_Z^2 - t}{s}p_{1i}, \quad \tau_i^{(5)} = p_{3i} + \frac{M_Z^2 - u}{s}p_{2i}.$$

Ковариантные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$

Тензор четвертого ранга с исключенным по закону сохранения импульсом p_4 и применением физических условий поперечности, нулевой массы фотона, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 T_1^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\alpha}^{(1)} p_{1\mu} p_{1\nu}, & T_2^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\nu}^{(1)} \tau_{\mu\alpha}^{(1)}, & T_3^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\nu}^{(1)} \tau_{\mu\alpha}^{(3)}, \\
 T_4^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\mu}^{(1)} \tau_{\nu\alpha}^{(1)}, & T_5^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\mu}^{(1)} \tau_{\nu\alpha}^{(3)}, & T_6^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\alpha}^{(1)} p_{2\mu} p_{2\nu}, \\
 T_7^{\alpha\beta\mu\nu} &= \frac{1}{2} p_{2\mu} \left(2p_{2\nu} \tau_{\beta\alpha}^{(3)} + s \delta_{\beta\nu} \tau_{\alpha}^{(5)} \right), \\
 T_8^{\alpha\beta\mu\nu} &= \frac{1}{2} p_{1\mu} \left(2p_{1\nu} \tau_{\alpha\beta}^{(2)} + s \delta_{\alpha\nu} \tau_{\beta}^{(4)} \right), \\
 T_9^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\nu\alpha}^{(3)} p_{1\mu} \tau_{\beta}^{(4)}, & T_{10}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\mu\alpha}^{(1)} \tau_{\nu\beta}^{(2)}, & T_{11}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\nu\beta}^{(2)} \tau_{\mu\alpha}^{(3)}, \\
 T_{12}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\nu\alpha}^{(1)} \tau_{\mu\beta}^{(2)}, & T_{13}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\mu\beta}^{(2)} \tau_{\nu\alpha}^{(3)}, & T_{14}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\nu\beta}^{(2)} p_{2\mu} \tau_{\alpha}^{(5)}, \\
 T_{15}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \delta_{\alpha\beta} p_{1\mu} p_{2\nu} - \delta_{\alpha\mu} p_{1\beta} p_{2\nu} - \delta_{\beta\nu} \tau_{\mu\alpha}^{(1)}, \\
 T_{16}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \delta_{\alpha\beta} p_{1\nu} p_{2\mu} - \delta_{\alpha\nu} p_{1\beta} p_{2\mu} - \delta_{\beta\mu} \tau_{\nu\alpha}^{(1)}, \\
 T_{17}^{\alpha\beta\mu\nu} &= (\delta_{\alpha\mu} p_{1\nu} - \delta_{\alpha\nu} p_{1\mu}) \tau_{\beta}^{(4)}, & T_{18}^{\alpha\beta\mu\nu} &= (\delta_{\beta\mu} p_{2\nu} - \delta_{\beta\nu} p_{2\mu}) \tau_{\alpha}^{(5)}, \\
 T_{19}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \tau_{\beta\alpha}^{(1)} \delta_{\mu\nu}, & T_{20}^{\alpha\beta\mu\nu} &= \frac{4}{s} \delta_{\mu\nu} \left(\frac{1}{s} \tau_{\nu\beta}^{(2)} \tau_{\nu\alpha}^{(3)} + \tau_{\alpha}^{(5)} p_{3\beta} \right).
 \end{aligned}$$

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$

Общее число СА равно 36. Соотношения между СА основаны на СРТ инвариантности:

$$\mathcal{H}_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4}(s, t, u, \lambda) = \mathcal{H}_{-\lambda_1-\lambda_2-\lambda_3\lambda_4}(s, t, u, \lambda).$$

$$\mathcal{H}_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4}(s, t, u, \lambda) = \mathcal{H}_{\lambda_2\lambda_1\lambda_4\lambda_3}(s, t, u, \lambda).$$

Существует 10 наборов СА для данного процесса.

Применяя вращение вокруг u -оси и преобразование четности получаем в итоге восемь независимых СА:

$$\mathcal{H}_{++--}(s, t, u, \lambda) = \mathcal{H}_{++++}(s, t, u, -\lambda),$$

$$\mathcal{H}_{+--+}(s, t, u, \lambda) = \mathcal{H}_{+--+}(s, t, u, -\lambda),$$

$$\mathcal{H}_{++-0}(s, t, u, \lambda) = -\mathcal{H}_{+++0}(s, t, u, -\lambda),$$

$$\mathcal{H}_{+--0}(s, t, u, \lambda) = -\mathcal{H}_{+-+0}(s, t, u, -\lambda).$$

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$

| | | | | |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Set 1 : | \mathcal{H}_{++++} , | \mathcal{H}_{++--} , | \mathcal{H}_{--++} , | \mathcal{H}_{----} |
| Set 2 : | \mathcal{H}_{+++-} , | \mathcal{H}_{+-++} , | \mathcal{H}_{--+-} , | \mathcal{H}_{----+} |
| Set 3 : | \mathcal{H}_{+-++} , | \mathcal{H}_{+---} , | \mathcal{H}_{-+++} , | \mathcal{H}_{-+--} |
| Set 4 : | \mathcal{H}_{+-+-} , | \mathcal{H}_{+--+} , | \mathcal{H}_{-++-} , | \mathcal{H}_{-+-+} |
| Set 5 : | \mathcal{H}_{-+00} , | \mathcal{H}_{+-00} | | |
| Set 6 : | \mathcal{H}_{--00} , | \mathcal{H}_{++00} | | |
| Set 7a : | \mathcal{H}_{+++0} , | \mathcal{H}_{++-0} , | \mathcal{H}_{--+0} , | \mathcal{H}_{---0} |
| Set 7b : | \mathcal{H}_{++0+} , | \mathcal{H}_{++0-} , | \mathcal{H}_{--0+} , | \mathcal{H}_{--0-} |
| Set 8a : | \mathcal{H}_{+-0+} , | \mathcal{H}_{+-0-} , | \mathcal{H}_{-+0+} , | \mathcal{H}_{-+0-} |
| Set 8b : | \mathcal{H}_{+-+0} , | \mathcal{H}_{+--0} , | \mathcal{H}_{-++0} , | \mathcal{H}_{-+-0} |

Спиральные амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$

$$\gamma(p_1, \lambda_1) + \gamma(p_2, \lambda_2) \longrightarrow Z(p_3, \lambda_3) + Z(p_4, \lambda_4)$$

где $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ - спиральности внешних частиц.

Пример:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{+-0+} = & \frac{1}{32} \sin \vartheta_z \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{2} M_Z} c^+ \left\{ 4s (\mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2) - 2 \frac{\sqrt{\lambda}}{s} (k_1 \mathcal{F}_3 + k_2 \mathcal{F}_4) \right. \\ & + s \left[c^- \sqrt{\lambda} \mathcal{F}_{11} - k_2 \mathcal{F}_{12} - 4M_Z^2 \mathcal{F}_{13} + c^- \sqrt{\lambda} (\mathcal{F}_{15} - \mathcal{F}_{16}) \right] \\ & \left. - \sqrt{\lambda} k \mathcal{F}_{14} - 2M_Z^2 \left[c^- \sqrt{\lambda} (\mathcal{F}_{17} - \mathcal{F}_{20}) - k_2 \mathcal{F}_{18} - k_1 \mathcal{F}_{19} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$c^+ = 1 + \cos \vartheta_z, \quad c^- = 1 - \cos \vartheta_z,$$

$$k_1 = s - \sqrt{\lambda}, \quad k_2 = s + \sqrt{\lambda}, \quad k = sc^+ - k_2, \quad \lambda = s(s - 4M_Z^2).$$

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$**
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Ковариантные амплитуды $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

$$f_1(p_2, \lambda_2) + \bar{f}_1(p_1, \lambda_1) + W(p_4, \lambda_4) + \gamma(p_3, \lambda_3) \rightarrow 0$$

$$\mathcal{A}_{\bar{f}_1 f_1 W \gamma} = \bar{v}(p_1) \left[\sum_{j=1}^4 \text{Str}_{\mu\nu}^j \mathcal{F}^j + \sum_{j=5}^7 \text{Str}_{\mu\nu}^j (\mathcal{F}_0^j + \mathcal{F}^j) \right] u(p_2) \varepsilon_\nu^\gamma(p_3) \varepsilon_\mu^W(p_4)$$

$$\text{Str}_{\mu\nu}^1 = i \left(\not{p}_4 p_{1\mu} - \frac{1}{2} T^2 \gamma_\mu \right) p_{1\nu} \gamma_6, \quad \text{Str}_{\mu\nu}^2 = i \left(\not{p}_4 p_{1\mu} - \frac{1}{2} T^2 \gamma_\mu \right) p_{2\nu} \gamma_6,$$

$$\text{Str}_{\mu\nu}^3 = i \left(\not{p}_4 p_{2\mu} - \frac{1}{2} U^2 \gamma_\mu \right) p_{1\nu} \gamma_6, \quad \text{Str}_{\mu\nu}^4 = i \left(\not{p}_4 p_{2\mu} - \frac{1}{2} U^2 \gamma_\mu \right) p_{2\nu} \gamma_6,$$

$$\text{Str}_{\mu\nu}^5 = i (\not{p}_4 \delta_{\mu,\nu} - \gamma_\mu p_{4\nu}) \gamma_6, \quad \text{Str}_{\mu\nu}^6 = i \gamma_\mu \not{p}_4 \gamma_\nu \gamma_6,$$

$$\text{Str}_{\mu\nu}^7 = i \gamma_\nu \gamma_6 \left(p_{1\mu} - p_{2\mu} \frac{T^2}{U^2} \right).$$

Спиральные амплитуды $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

$$\mathcal{H}_{+---} = \sin \vartheta \left[\frac{1}{4} s s^- c^+ (\mathcal{F}_3(s, t, u) - \mathcal{F}_4(s, t, u)) - s^- (\mathcal{F}_5(s, t, u) + \mathcal{F}_{05}(s, t, u)) \right. \\ \left. + s \frac{c^-}{c^+} (\mathcal{F}_7(s, t, u) + \mathcal{F}_{07}(s, t, u)) \right]$$

$$\mathcal{H}_{+--+} = \sin \vartheta s c^- \left[\frac{1}{4} s^- (\mathcal{F}_1(s, t, u) - \mathcal{F}_2(s, t, u)) - \frac{1}{c^+} (\mathcal{F}_{07}(s, t, u) + \mathcal{F}_7(s, t, u)) \right]$$

$$\mathcal{H}_{+-0-} = \frac{\sqrt{s}}{M_W \sqrt{2}} \left[\frac{1}{4} c^+ (-s^2 c^+ + 2M_W^2 s - M_W^4 c^-) \mathcal{F}_3(s, t, u) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} c^+ (-s^2 c^- + 2M_W^2 s - M_W^4 c^+) \mathcal{F}_4(s, t, u) + s^- c^+ (\mathcal{F}_5(s, t, u) + \mathcal{F}_{05}(s, t, u)) \right. \\ \left. - s^+ c^- (\mathcal{F}_7(s, t, u) + \mathcal{F}_{07}(s, t, u)) \right]$$

$$\mathcal{H}_{+-0+} = \frac{\sqrt{s}}{M_W \sqrt{2}} c^- \left[\frac{1}{4} (-s^2 c^+ + 2M_W^2 s - M_W^4 c^-) \mathcal{F}_1(s, t, u) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} (-s^2 c^- + 2M_W^2 s - M_W^4 c^+) \mathcal{F}_2(s, t, u) \right. \\ \left. + s^- [\mathcal{F}_{05}(s, t, u) + \mathcal{F}_5(s, t, u) - 2(\mathcal{F}_{06}(s, t, u) + \mathcal{F}_6(s, t, u))] \right. \\ \left. + s^+ (\mathcal{F}_{07}(s, t, u) + \mathcal{F}_7(s, t, u)) \right],$$

$$\mathcal{H}_{+--+} = \sin \vartheta s \left[\frac{1}{4} s^- c^+ (\mathcal{F}_4(s, t, u) - \mathcal{F}_3(s, t, u)) + \mathcal{F}_{07}(s, t, u) + \mathcal{F}_7(s, t, u) \right],$$

J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

Для процесса $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$ мы рассматривали шесть инфракрасно расходящихся боксовских диаграмм, приводящих к шести J -функциям, которые естественным образом распадаются на три пары:

1) T_1, T_3 ; 2) T_2, T_4 ; 3) $T_6, T_{6'}$.

Основное определение типичной J -функции имеет вид:

$$i\pi^2 J = \mu^{4-n} \int d^n q \frac{v(q, p_i) \cdot v(p_i)}{d_0 d_1 d_2 d_3}. \quad (2)$$

Знаменатели d_0, d_1, d_2, d_3 — это скалярные части пропагаторов виртуальных частиц боксовских диаграмм; они присущи каждой топологии боксов. Числитель представляет собой скалярное произведение двух векторов $v(q, p_i)$ и $v(p_i)$. Эти векторы должны удовлетворять следующим двум свойствам. Первый 4-вектор является линейной комбинацией вектора интегрирования q и внешнего 4-импульса $p_{1,2,3,4}$; это важно для процедуры сокращения инфракрасной расходимости, которая возникает из-за пропагатора виртуального фотона. Второй 4-вектор выбирается для упрощения интегрирования по трем фейнмановским параметрам z, x, y .

J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

Тройной интеграл по трем параметрам Фейнмана:

$$J = \int_0^1 dx \int_0^1 y dy N_{xy} \int_0^1 dz \frac{z}{(L - zk_{xy}^2)^2},$$

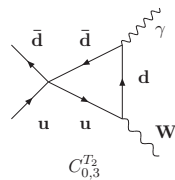
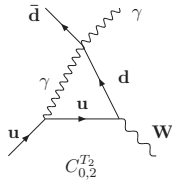
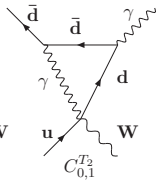
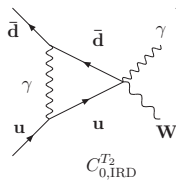
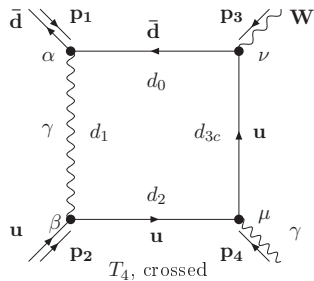
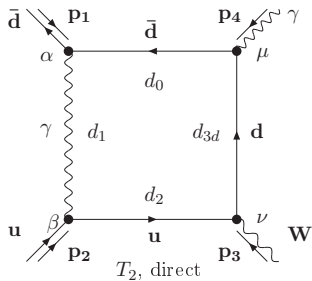
с переменными — N , L и квадратом вектора k^2 — которые являются билинейной комбинацией фейнмановских параметров y, x с коэффициентами, состоящими из параметров задачи: двух инвариантов $P_1^2, P_2^2, Q^2, T^2, U^2$ и всеми массами.

$$J_{\text{uni}}(P_1^2, P_2^2; m_1, m_2, m_3, m_4) = -\frac{1}{\sqrt{D_k}} \left(\mathcal{L}(y_{L_1^*}, y_{L_2^*}, y_{k_1}) - \mathcal{L}(y_{L_1^*}, y_{L_2^*}, y_{k_2}) \right) - \\ -\frac{1}{\sqrt{D_T}} \left(\mathcal{L}(y_{L_1^*}, y_{L_2^*}, y_{T_1}) - \mathcal{L}(y_{L_1^*}, y_{L_2^*}, y_{T_2}) \right).$$

$$\mathcal{L}(a, b, c) = \mathcal{M}(a, c) + \mathcal{M}(b, c) - \mathcal{M}(1, c) - \ln\left(1 - \frac{1}{c}\right) \ln\left(\frac{P^*}{m_3^2}\right),$$

$$\mathcal{M}(y_d, y_l) = \int_0^1 \frac{dy}{(y - y_d) \ln(1 - y/y_l)} = \ln\left(1 - \frac{y_d}{y_l}\right) \ln\left(1 - \frac{1}{y_d}\right) - \text{Li}_2\left(\frac{1 - y_d}{y_l - y_d}\right) + \text{Li}_2\left(\frac{-y_d}{y_l - y_d}\right).$$

J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$



J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

Функция J^{T_2} для прямого канала определяется следующим образом:

$$i\pi^2 J^{T_2} = \mu^{4-n} \int d^n q \frac{2(q + p_1)p_4}{d_0(m_d)d_1(0)d_2(m_u)d_{3d}(m_d)};$$

скалярные знаменатели имеют вид d_i :

$$d_0 = q^2 + m_d^2,$$

$$d_1 = (q + p_1)^2,$$

$$d_2 = (q + p_1 + p_2)^2 + m_u^2,$$

$$d_{3d} = (q - p_4)^2 + m_d^2,$$

$$d_{3c} = (q - p_3)^2 + m_u^2,$$

где d_{3d} и d_{3c} - знаменатели для прямого и перекрестного канала соответственно.

Прямая J^{T_2} функция выражается через универсальную функцию

$$J_{\text{uni}}(P_1^2, P_2^2; m_1, m_2, m_3, m_4),$$

J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

Для топологии T_2 с помощью стандартной редукции Пассарино–Вельтмана можно получить соотношения между следующими функциями: инфракрасными и массово-сингулярными $D_0(-m_d^2, -m_u^2, -M_W^2, 0, Q^2, T^2; m_d, 0, m_u, m_d)$ и $C_0(-m_d^2, -m_u^2, Q^2; m_d, 0, m_u)$; инфракрасно конечной, но массово сингулярной J^{T_2} -функцией, а также $C_0(-m_u^2, -M_W^2, T^2; 0, m_u, m_d)$ с массовой сингулярностью.

Такое соотношение, точное по массам, имеет вид:

$$J^{T_2} = (T^2 + m_d^2) D_0(-m_d^2, -m_u^2, -M_W^2, 0, Q^2, T^2; m_d, 0, m_u, m_d) - C_0(-m_d^2, -m_u^2, Q^2; m_d, 0, m_u) + C_0(-m_u^2, -M_W^2, T^2; 0, m_u, m_d).$$

J функции для процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$

$$\begin{aligned}
 J_{\text{sub}}^{T_2} = & (T^2 + m_d^2) D_0(-m_d^2, -m_u^2, -M_W^2, 0, Q^2, T^2; m_d, 0, m_u, m_d) - \\
 & - C_0(-m_d^2, -m_u^2, Q^2; m_d, 0, m_u) - \frac{T^2}{Q^2} C_0(0, -m_d^2, T^2; m_d, m_d, 0) - \\
 & - \frac{T^2 + M_W^2}{Q^2} C_0(-m_u^2, -M_W^2, T^2; 0, m_u, m_d) - \\
 & - \frac{Q^2 + M_W^2}{Q^2} C_0(0, -M_W^2, Q^2; m_d, m_d, m_u),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{\text{sub}}^{T_2, T_4}(Q^2, P^2, M_W^2) = & \frac{1}{Q^2} \left[-\ln^2\left(-\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2}\right) + \ln^2\left(\frac{M_W^2}{P^2}\right) + \right. \\
 & + 2\ln\left(-\frac{M_W^2 + i\epsilon}{P^2}\right) \ln\left(-\frac{P^2 + M_W^2}{Q^2}\right) - \\
 & \left. - 2\text{Li}_2\left(\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2 + i\epsilon}\right) + 2\text{Li}_2\left(-\frac{M_W^2}{P^2 + i\epsilon}\right) \right].
 \end{aligned}$$

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты**
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Фортранные пакеты SANC

Фортранные модули включаются в пакеты, которые содержат вспомогательное окружение для их тестирования и использования.

Каждый фортранный пакет содержит:

- документацию,
- декларацию, инициализацию и другие файлы с набором параметров,
- библиотеки,
- исполняемые файлы,
- **SSFM**: файлы, содержащие процедуры.

Скачивание фортранных пакетов SANC

SANC 4b package.

- 28/10/2013 SANC 4b v1.01 package (147 Kb tgz-file) [last stable version]
- 28/10/2013 SANC 4A v1.01 package (196 Kb tgz-file) [last stable version]

In v1.01 packages some bugs in double counting of helicities amplitude squared sum are fixed. Details are in the file CHANGES.

- 31/07/2012 SANC 4b v1.00 package (105 Kb tgz-file) [stable version]
- 19/11/2009 SANC 4A v1.00 package (21 Kb tgz-file) [stable version]

This package is intended for calculation of the 1-loop full EW correction to four bosons processes like light-by-light scattering, see D. Bardin et al., "Light-by-light scattering in SANC", hep-ph/0611188. Current processes: 4A scattering, Z3A decay and scattering. 4A package is quadro-precision (MeV region), 4B package - double-precision (GeV region).

SANC JAW packages.

- 9/12/2009 SANC JAW butd v1.01 package (6.6 Kb tgz-file) [last stable version]
- 9/12/2009 SANC JAW tbud v1.00 package (6.2 Kb tgz-file) [last stable version]
- 9/12/2009 SANC JAW udtd v1.00 package (5.1 Kb tgz-file) [last stable version]

This packages are intended for calculation of JAW functions arising at the reduction of infrared divergent box diagrams.

SANC Integrators.

MCSANC Integrator.

- 07/02/2013 MCSANC v1.01 integrator (1.1 Mb tgz-file) [last stable version]

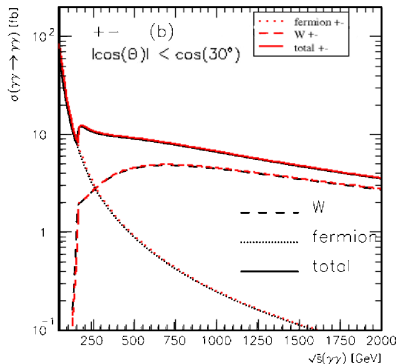
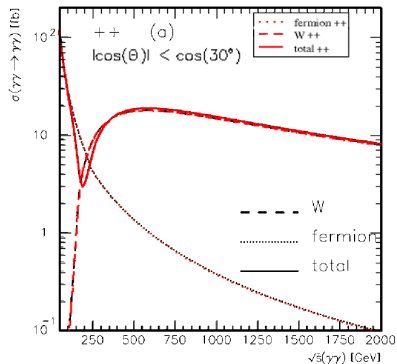
The mcsanc program is a Monte Carlo tool that allows to calculate NLO EW and QCD integrated and differential cross sections for several processes in proton-proton collisions.

Web-сайт проекта SANC <http://sanc.jinr.ru>

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ процесса

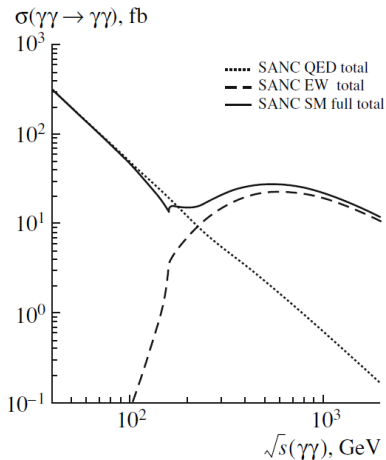
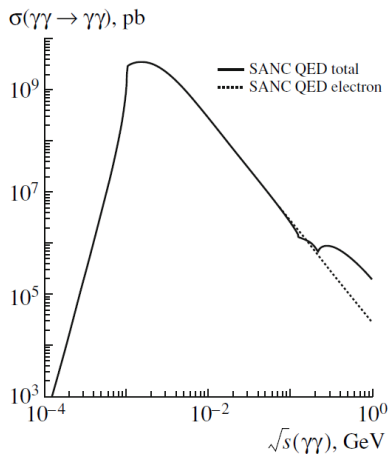
Сечение рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ процесса для поляризованных фотонов в начальном состоянии:

(Легенда: красная линия — SANC NLO, черная линия — G.Jikia)



G.Jikia, arXiv:9710459[hep-ph].

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ процесса



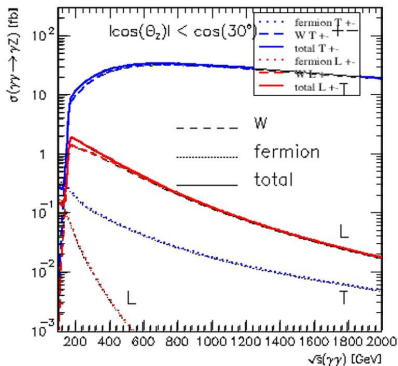
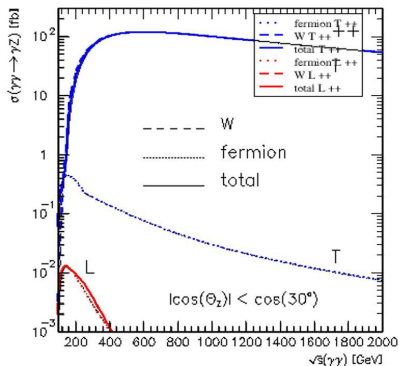
D. Yu. Bardin, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, *Yad.Fiz.* 73, 1929 (2010) [*Phys. Atom. Nucl.* 73, 1878 (2010)];

arXiv:0911.5634[hep-ph].

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ процесса

Сечение рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ процесса для поляризованных фотонов в начальном состоянии:

(Легенда: красная и синяя линии — SANC NLO, черная линия — G.Jikia)



G.Jikia, arXiv:9312274[hep-ph];

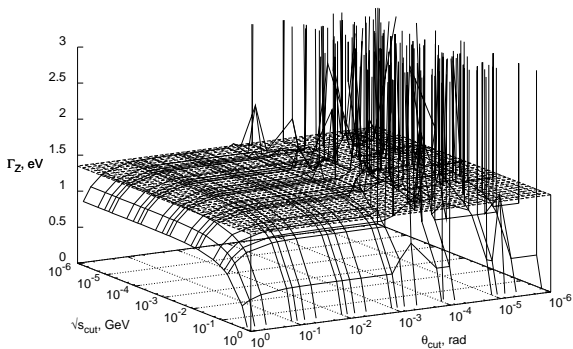
Th.Diakonidis, arXiv:0610085[hep-ph].

Численные результаты $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ распада

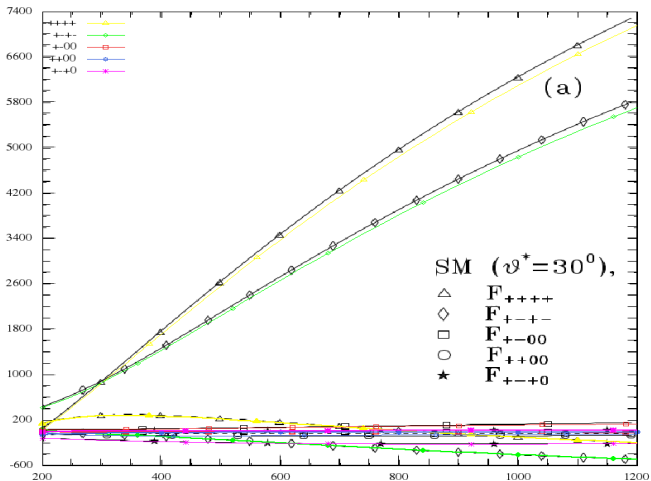
$$\Gamma_{fermions} = \frac{\alpha^4}{\sin^2 \theta_W \cos^2 \theta_W} (\sum e_f V_f) \frac{M_Z}{72\pi^3} X_F = 1.05 \times 10^{-9} \text{ GeV};$$

$$\Gamma_{bosons} = \frac{\alpha^4}{\sin^2 \theta_W \cos^2 \theta_W} \frac{M_Z}{72\pi^3} X_W = 2.03 \times 10^{-11} \text{ GeV};$$

$$\Gamma_{total} = 1.35 \times 10^{-9} \text{ GeV}.$$

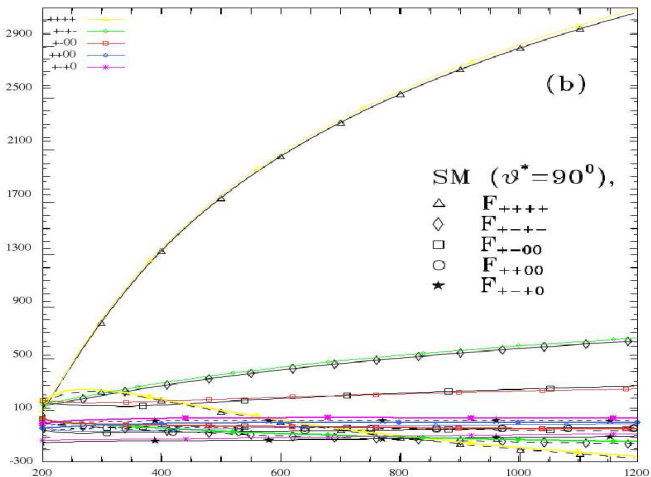


Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ процесса



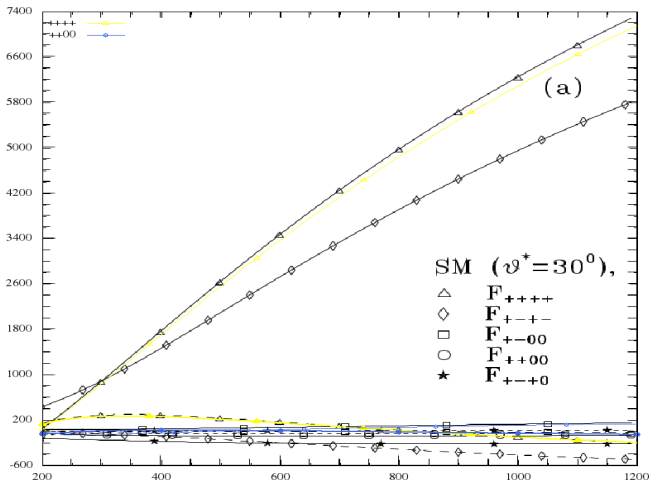
Распределение доминирующей в SM спиральной амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ при $\vartheta^* = 30^\circ$. SANC NLO - цветное, с вкладом петли Hff.

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ процесса



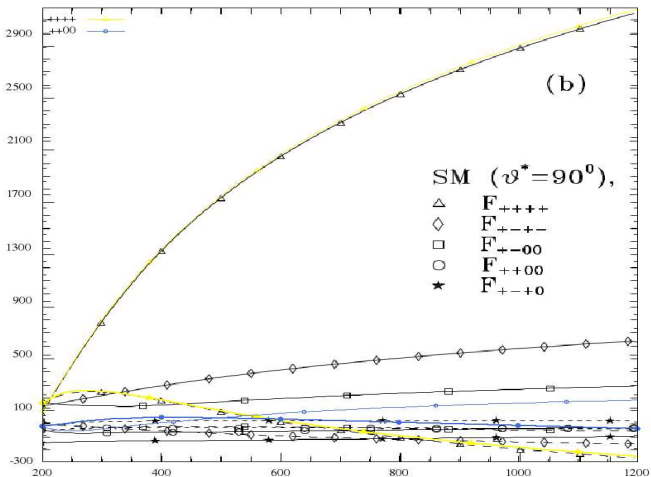
Распределение доминирующей в СМ спиральной амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ при $\vartheta^* = 90^0$. SANC NLO - цветное, с вкладом петли Hff.

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ процесса



Распределение доминирующей в СМ спиральной амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ при $\vartheta^* = 30^\circ$. SANC NLO - цветное, без вклада петли Hff.

Численные результаты $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ процесса



Распределение доминирующей в СМ спиральной амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ при $\vartheta^* = 90^\circ$. SANC NLO - цветное, без вклада петли Hff.

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты**
- 9 Список публикаций

Основные результаты выдвигаемые для защиты

- 1 Разработана и реализована вычислительная среда процедур в системе SANC для расчета сечений процессов четырех-бозонной физики в Стандартной Модели.
- 2 Получены аналитические выражения на однопетлевом уровне точности в мультиканальном подходе для сечений, ширины распада и других величин следующих процессов: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$.
- 3 Созданы автономные аналитические и фортранные модули вычисления сечений и ширины распада четырех-бозонных процессов для получения численных результатов и тщательного сравнения с другими программными продуктами и литературой.
- 4 Реализован общий метод вычисления вспомогательных функций J типа Пассарино–Вельтмана для процесса $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$.

Содержание

- 1 Цели работы
- 2 Введение
- 3 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
- 4 Расчет процесса $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$
- 5 Расчет процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$
- 6 Расчет процесса $u\bar{d}W^+\gamma \rightarrow 0$
- 7 Численные результаты
- 8 Результаты выдвигаемые для защиты
- 9 Список публикаций

Список публикаций

- 1 Standard Model light-by-light scattering in SANC: analytic and numeric evaluation, D. Yu. Bardin, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, Yad.Fiz. 73, 1929 (2010) [Phys. Atom. Nucl. 73, 1878 (2010)]; arXiv:0911.5634[hep-ph].
- 2 The SANC project status and plans, A. D. Andonov, V. .A. Kolesnikov, E. D. Uglov, Phys. Part. Nucl. Lett. 8, 765 (2011).
- 3 $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$ processes in SANC, D. Yu. Bardin, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, Yad.Fiz. 76, 1404 (2013) [Phys. Atom. Nucl. 76, 1339 (2013)]; arXiv:1212.3105[hep-ph].
- 4 SANC system and its applications for LHC, A. Arbuzov et al., E. Uglov, J.Phys.Conf.Ser. 523 (2014) 012043; arXiv:1310.3644[hep-ph].
- 5 J functions for the process $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$, D. Yu. Bardin, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, W. von Schlippe, Yad.Fiz. 79, no.1 37 (2016) [Phys. Atom. Nucl. 79, no.1 95 (2016)]; arXiv:1411.6845[hep-ph].
- 6 SANC modules for the four bosons processes, including $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$, D. Yu. Bardin, S. G. Bondarenko, P. Ch. Christova, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, W. von Schlippe, to be submitted to CPC.