

Электрон-позитронная аннигиляция в пару топ-кварков при энергии коллайдера CLIC

Трутенъ Иван Валентинович

i.truten@kipt.kharkov.ua

Корчин Александр Юрьевич

korchin@kipt.kharkov.ua

Институт теоретической физики им. А.И. АХИЕЗЕРА
ННЦ ХФТИ

5 июля, 2022



Мотивация

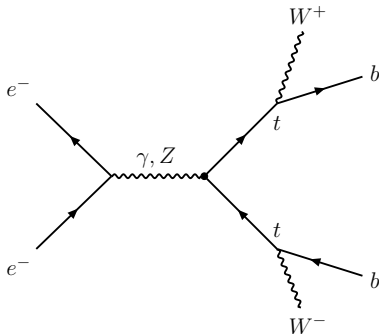
- Топ-кварк является самой тяжелой элементарной частицей, которая не образует связанные состояния, поскольку является короткоживущей.
- Изучение свойств топ-кварка представляет большой интерес в физике частиц, в частности, в поиске эффектов физики за пределами Стандартной модели (СМ).
- Считается, что более точные измерения свойств топ-кварка e^+e^- коллайдерах будут чувствительны к физике за пределами СМ.
- Данная работа ориентирована на будущий электрон-позитронный коллайдер The Compact Linear Collider (CLIC) с ожидаемой энергией в системе центра масс 380 ГэВ в первом цикле экспериментов.



Рассмотрим процесс электрон-позитронной аннигиляции в пару кварков

$$e^+e^- \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$$

На древесном уровне данный процесс может быть описан двумя диаграммами Фейнмана, включающими обмен фотоном и Z бозоном:



Вершина взаимодействия γtt и Ztt

Чтобы иметь представление о возможном вкладе новой физики произведем модификацию вершины взаимодействия виртуальной частицы - переносчика взаимодействия (фотон, Z бозон) с парой кварков.

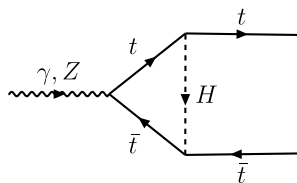
Мы полагаем, что лагранжиан, описывающий взаимодействие фотона и Z бозона с кварками, состоит из вкладов СМ и вкладов за пределами СМ. Вершина имеет такой вид, где $V = \gamma, Z$

$$\Gamma_{t\bar{t}V}^{\mu} = -ie\bar{t} \left(\gamma^{\mu} (v_t^V - a_t^V \gamma_5) + \frac{1}{2m_t} \sigma^{\mu\nu} q_{\nu} (i\kappa^V - \tilde{\kappa}^V \gamma_5) \right) t$$

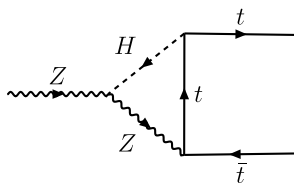
Члены пропорциональные константам связи κ^V являются CP сохраняющими, а слагаемые $\tilde{\kappa}^V$ отвечают за нарушение CP инвариантности. Основной целью является исследование эффектов нарушения CP инвариантности.



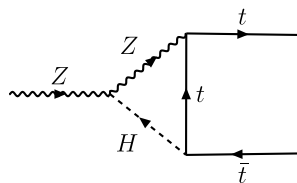
Однопетлевые поправки к вершинам γtt и Ztt



(a)



(b)



(c)

Для возникновения эффектов CP нарушения, лагранжиан взаимодействия бозона Хиггса с парой топ-кварков выбран таким образом

$$\mathcal{L}_{htt} = -\frac{m_t}{v} h \bar{t} (\alpha + i \beta \gamma_5) t$$

который включает в себя скалярную и псевдоскалярную части, где α и β являются вещественными параметрами. Значение $\alpha = 1$, $\beta = 0$ соответствуют лагранжиану в СМ.



Используя правило Каткоски (разрез диаграммы фейнмана) для диаграммы с вершиной γtt ("а")

$$\text{Im } \tilde{\kappa}(s) = \alpha\beta \frac{Q_t m_t^4}{8\pi E_t p_t v^2} \left(1 - \frac{m_h^2}{4p_t^2} \log \frac{m_h^2 + 4p_t^2}{m_h^2} \right) \theta(s - 4m_t^2).$$

Для вершины Ztt ("а") аналогичным образом

$$\text{Im } \tilde{\kappa}_z(s)_a = \frac{v_t}{Q_t} \text{Im } \tilde{\kappa}(s).$$

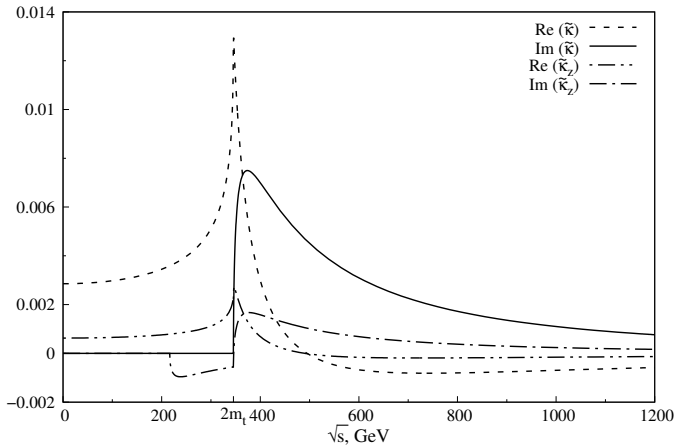
Зная выражения для мнимых частей $\tilde{\kappa}(s)$ и $\tilde{\kappa}_z(s)$ можно получить вещественные части форм-факторов, пользуясь такими соотношениями:

$$\begin{aligned} \text{Re } \tilde{\kappa}(s) &= \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{s_0}^{\infty} \frac{\text{Im } \tilde{\kappa}(s')}{s' - s} ds', \\ \text{Re } \tilde{\kappa}_z(s) &= \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{s_1}^{\infty} \frac{\text{Im } \tilde{\kappa}_z(s')}{s' - s} ds' \end{aligned}$$

PV обозначает интеграл в смысле главного значения.



$$\alpha = 1.05, \beta = 0.68$$



$$\begin{aligned}\tilde{\kappa} &= \alpha\beta (0.0068 + i 0.0104), \\ \tilde{\kappa}_Z &= \alpha\beta (0.0019 + i 0.0030) - \beta (0.0004 + i 0.0007).\end{aligned}$$



Дифференциальное сечение процесса

Нахождение сечения двухступенчатых процессов основано на формализме, согласно которому b -кварк и \bar{b} -кварк образуются в результате распадов топ-кварков на массовой поверхности.

$$d\sigma_{e^+e^- \rightarrow b\bar{b}W^+W^-} = 4 \int \frac{d\sigma_{e^+e^- \rightarrow t\bar{t}}(n^\mu, n'^\mu)}{d\Omega_t} \frac{d\Gamma_{t \rightarrow bW^+}^0}{\Gamma_t} \frac{d\Gamma_{\bar{t} \rightarrow \bar{b}W^-}^0}{\Gamma_{\bar{t}}} d\Omega_t,$$
$$\frac{d^2\sigma_{e^+e^- \rightarrow b\bar{b}W^+W^-}}{dE_b dE_{\bar{b}}} = 4 \left(\frac{m_t}{4\pi p_t p_b^0} \right)^2 \int \frac{d\sigma_{e^+e^- \rightarrow t\bar{t}}(n^\mu, n'^\mu)}{d\Omega_t} d\Omega_t d\phi_b d\phi_{\bar{b}}$$

4-векторы поляризации топ-кварка и антитоп-кварка n^μ и n'^μ определены таким образом

$$n^\mu = \alpha_b \left(-\frac{p_t^\mu}{m_t} + \frac{m_t p_b^\mu}{p_t \cdot p_b} \right), \quad n'^\mu = \alpha_{\bar{b}} \left(-\frac{p_{\bar{t}}^\mu}{m_t} + \frac{m_t p_{\bar{b}}^\mu}{p_{\bar{t}} \cdot p_{\bar{b}}} \right),$$

что они удовлетворяют таким условиям: $n \cdot p_t = n' \cdot p_{\bar{t}} = 0$, $n \cdot n = -\alpha_b^2$ и $n' \cdot n' = -\alpha_{\bar{b}}^2$. α_b и $\alpha_{\bar{b}}$ являются параметрами

асимметрии в распадах топ-кварка и антитоп-кварка, соответственно.



Энергетическое распределение

Для получения информации о членах нарушающих CP четность проанализируем сечение составного процесса. Для удобства введем безразмерную величину

$$W(E_b, E_{\bar{b}}) = \frac{1}{\sigma_0} \frac{d^2\sigma_{e^+e^- \rightarrow b\bar{b}} W^+ W^-}{dE_b dE_{\bar{b}}}$$

где $\sigma_0 \equiv \sigma_{e^+e^- \rightarrow t\bar{t}}$ - полное неполяризованное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$. Для удобства переобозначим энергии $\varepsilon \equiv E_b$ и $\bar{\varepsilon} \equiv E_{\bar{b}}$. Распределение $W(\varepsilon, \bar{\varepsilon})$ нормировано на единицу

$$\int_{E_-}^{E_+} \int_{E_-}^{E_+} W(\varepsilon, \bar{\varepsilon}) d\varepsilon d\bar{\varepsilon} = 1.$$

Общая структура энергетического распределения выглядит таким образом

$$W(\varepsilon, \bar{\varepsilon}) = S(\varepsilon, \bar{\varepsilon}) + (\varepsilon - \bar{\varepsilon}) T(s),$$

$$T(s) = [a(s) \text{Im } \tilde{\kappa}(s) + b(s) \text{Im } \tilde{\kappa}_z(s) + c(s) \text{Re } \tilde{\kappa}(s) + d(s) \text{Re } \tilde{\kappa}_z(s)]$$



Асимметрия

Вводится безразмерная величина, асимметрия энергетического распределения b и \bar{b} кварков:

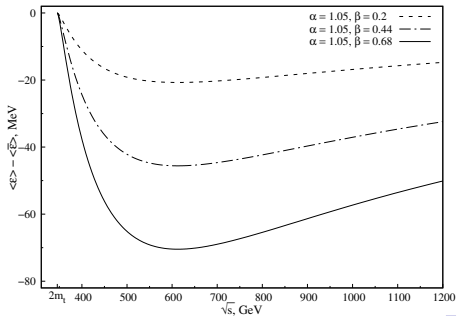
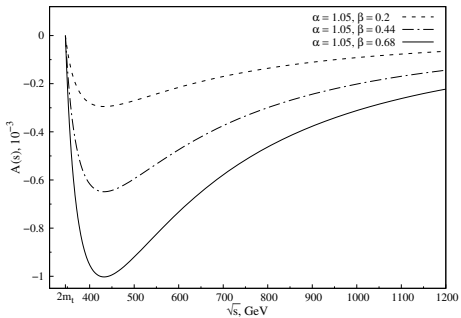
$$A(s) \equiv \int_{E_-}^{E_+} \int_{E_-}^{E_+} W(\varepsilon, \bar{\varepsilon}) [\theta(\varepsilon - \bar{\varepsilon}) - \theta(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)] d\varepsilon d\bar{\varepsilon} = \frac{1}{3} (E_+ - E_-)^3 T(s)$$

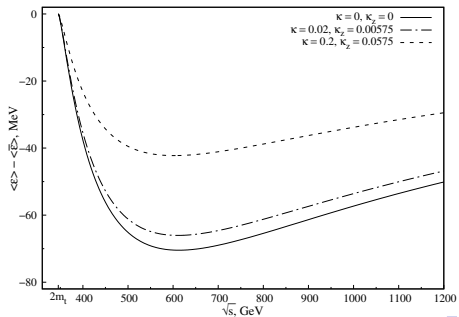
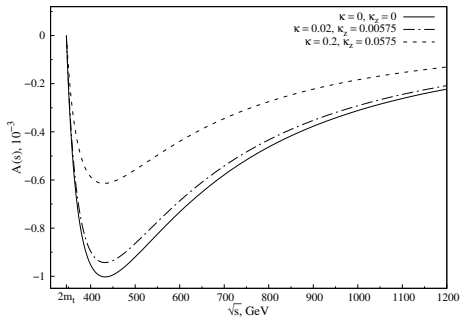
$A(s)$ соответствует экспериментально измеряемой величине в терминах количества событий $(N_{E_b > E_{\bar{b}}} - N_{E_{\bar{b}} > E_b}) / N_{tot}$.

Другая наблюдаемая величина, несущая информацию о форм-факторах $\tilde{\kappa}$ и $\tilde{\kappa}_Z$ является разность средних энергий b и \bar{b} кварков:

$$\langle \varepsilon \rangle - \langle \bar{\varepsilon} \rangle \equiv \int_{E_-}^{E_+} \int_{E_-}^{E_+} W(\varepsilon, \bar{\varepsilon}) (\varepsilon - \bar{\varepsilon}) d\varepsilon d\bar{\varepsilon} = \frac{1}{6} (E_+ - E_-)^4 T(s).$$







- Рассмотрен процесс электрон-позитронной аннигиляции в пару распадающихся топ-кварков в условиях будущего e^+e^- коллайдера.
- Предложены наблюдаемые, отвечающие эффектам нарушения CP инвариантности.
- Изучена зависимость наблюдаемых от параметра β .
- I.V. Truten, A.Yu. Korchin. Energy correlation of bottom quarks from decays of top quarks in electron–positron annihilation. J. Phys. G 49 (2022) 4, 045003. arXiv:2109.10693



Спасибо за внимание!

