

МОДЕЛЬНО-НЕЗАВИСИМЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ ТЯЖЕЛЫХ БОЗОНОВ НА БУДУЩИХ e^+e^- -КОЛЛАЙДЕРАХ

*Д. В. Синегрибов^{а, б, 1}, В. В. Андреев^{б, 2},
В. Р. Куриленко^{а, б}, И. А. Серенкова^а*

^а Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь

^б Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Представлена методика получения ограничений на новые, обобщенные, эффективные параметры Z' -бозона для процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ($f \neq e$).

This paper presents a methodology for obtaining constraints on new, generalized, effective Z' -boson parameters for the $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ($f \neq e$) process.

PACS: 12.60.-i; 12.60.Cn; 13.66.Nk

ВВЕДЕНИЕ

Стандартная модель (СМ) в настоящее время рассматривается как низкоэнергетическое приближение будущей фундаментальной теории, описывающей все взаимодействия. СМ согласуется практически со всеми экспериментальными данными, но имеет и явные недостатки, которые являются причиной для дальнейшей, более глубокой проверки СМ и поиска новой физики. Задача этого поиска является актуальной для e^+e^- -ускорителей следующего поколения: ILC ($\sqrt{s} = 0,25, 0,5, 1$ ТэВ), CLIC ($\sqrt{s} = 0,34, 1,5, 3$ ТэВ), FCC-ee ($\sqrt{s} = 91, 161, 240, 365$ ТэВ), CEPC ($\sqrt{s} = 91, 160, 250$ ТэВ) [1]. ILC и CLIC являются наилучшими вариантами для поиска и изучения нестандартной физики из-за высокой энергии и наличия возможности продольной поляризации e^+ - и e^- -пучка.

Будущие эксперименты либо согласуются со СМ, либо имеют отклонения от ее предсказаний. В первом случае данные можно использовать для ограничения расширений СМ. В случае наличия существенного отклонения можно интерпретировать его, используя параметры массивного калибровочного бозона Z' [2]. Современные ограничения на массу Z' , полученные на LHC, $m_{Z'} \sim 5150$ ТэВ [3], что заметно

¹E-mail: dvsinegribov@gmail.com

²E-mail: vik.andreev@gsu.by

больше в сравнении с планируемыми энергиями ILC и CLIC. Поэтому предоставляется возможность исследовать только косвенные эффекты Z' , проявляющиеся в виде отклонений наблюдаемой от поведения СМ, тогда экспериментальную информацию можно представить в виде ограничений на параметры Z' . Полученные ограничения можно использовать для исключения или подтверждения моделей Z' (SSM, LRM, ALRM, E_6 -модели и др.) [2, 4]. Актуальной задачей является разработка стратегии определения ограничений с большей точностью без увеличения светимости или энергии ускорителя, с использованием различных оптимальных условий эксперимента и наблюдаемых.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ РЕАКЦИИ $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$

Для выполнения модельно-независимого анализа необходимо найти представление дифференциального сечения для процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$, введя обобщенные, эффективные параметры, линейно входящие в сечение. Это необходимо для корректного использования методики по нахождению ограничений на параметры Z' .

Для такой цели дифференциальное сечение рассеяния для процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ($f \neq e$) в приближении Борна можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\sigma^{\text{SM}+Z'}}{dz}(P^-, P^+) = \frac{d\sigma^{\text{SM}}}{dz} + \frac{d\sigma^{Z'}}{dz} = N_C(1 - P^-P^+) \frac{\alpha^2 \beta \pi}{8s} \times \left[(1 - z\beta)^2 q_1^{\text{SM}+Z'} + (1 + z\beta)^2 q_2^{\text{SM}+Z'} + q_3^{\text{SM}+Z'} \right], \quad (1)$$

где $z \equiv \cos \theta$ (θ — угол между e^- и f); N_C — цветовой фактор ($N_C = 1$, если f — лептон, и $N_C = 3$, если f — кварк); α — постоянная тонкой структуры; P^+ и P^- — степени продольной поляризации e^+ - и e^- -пучка; $\beta = \sqrt{1 - 4m_f^2/s}$ ($\eta = \sqrt{1 - \beta^2}$), m_f — масса конечного фермиона; \sqrt{s} — энергия столкновения.

Параметры $q_{1,2,3}^{\text{SM}+Z'}$ определяются комбинациями $q_{\lambda_e, \lambda_f}^{\text{SM}+Z'}$ (λ_e и λ_f — спиральности начального и конечного состояния) и функцией $P_{\text{eff}} = (P^- - P^+)/ (1 - P^-P^+)$:

$$\begin{aligned} q_1^{\text{SM}+Z'} &= p_{\text{eff}}^- |q_{LR}^{\text{SM}+Z'}|^2 + p_{\text{eff}}^+ |q_{RL}^{\text{SM}+Z'}|^2, \\ q_2^{\text{SM}+Z'} &= p_{\text{eff}}^- |q_{LL}^{\text{SM}+Z'}|^2 + p_{\text{eff}}^+ |q_{RR}^{\text{SM}+Z'}|^2, \\ q_3^{\text{SM}+Z'} &= 2\eta^2 \left(p_{\text{eff}}^- \Re[q_{LL}^{\text{SM}+Z'} q_{LR}^{*\text{SM}+Z'}] + p_{\text{eff}}^+ \Re[q_{RL}^{\text{SM}+Z'} q_{RR}^{*\text{SM}+Z'}] \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $p_{\text{eff}}^\pm = 1 \pm P_{\text{eff}}$.

В свою очередь, параметры $q_{\lambda_e, \lambda_f}^{\text{model}}$, содержащие характеристики Z' -бозона (константы связи, массу и полную ширину), определяются формулами

$$\begin{aligned} q_{LL}^{\text{SM}+Z'} &= \sum_i \frac{sg_{i,e}^L g_{i,f}^L}{s - m_i^2 + im_i \Gamma_i}, & q_{RR}^{\text{SM}+Z'} &= \sum_i \frac{sg_{i,e}^R g_{i,f}^R}{s - m_i^2 + im_i \Gamma_i}, \\ q_{LR}^{\text{SM}+Z'} &= \sum_i \frac{sg_{i,e}^L g_{i,f}^R}{s - m_i^2 + im_i \Gamma_i}, & q_{RL}^{\text{SM}+Z'} &= \sum_i \frac{sg_{i,e}^R g_{i,f}^L}{s - m_i^2 + im_i \Gamma_i}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $g_{i,f}^{L,R} \equiv g_{i,f}^{\mp}$ — фермионные константы связи с бозонами $i = \gamma, Z^0, Z'$ с соответствующими массами m_i и ширинами распада Γ_i .

Фермионные константы связи с Z^0 и γ определяются значениями электрических зарядов Q_f и третьих компонент изоспина t_f :

$$g_{Z^0,f}^{\rho} = \frac{\delta_{\rho,-} t_f / 2 - Q_f s_w^2}{s_w c_w}, \quad g_{\gamma,f}^{\rho} = -Q_f, \quad \rho = \mp, \quad (4)$$

где s_w и c_w — синус и косинус угла Вайнберга–Салама θ_w .

В формуле (4) множитель $e = \sqrt{4\pi\alpha}$ вынесен из всех констант связи, включая и Z' .

Для получения ограничений удобно ввести обобщенные, эффективные параметры отклонения $\Delta q_{1,2,3}$,

$$\begin{aligned} \Delta q_1 (p_{\text{eff}}^+, p_{\text{eff}}^-) &= q_1^{\text{SM}+Z'} - q_1^{\text{SM}}, \\ \Delta q_2 (p_{\text{eff}}^+, p_{\text{eff}}^-) &= q_2^{\text{SM}+Z'} - q_2^{\text{SM}}, \\ \Delta q_3 (p_{\text{eff}}^+, p_{\text{eff}}^-) &= q_3^{\text{SM}+Z'} - q_3^{\text{SM}}, \end{aligned} \quad (5)$$

которые определяют отклонение дифференциального сечения процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ от значения в СМ.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ

Методика оценки ограничений на эффективные параметры основана на методе наименьших квадратов. Будем исходить из предположения о том, что результаты будущих экспериментов согласуются с предсказаниями СМ в пределах ожидаемой точности измерений. Тогда ограничения на параметры $\Omega = \{\Delta q_{1,2,3}\}$ можно найти, используя критерий

$$\chi^2(\Omega) = \sum_{i=1}^{\text{bins}} \left[\frac{N_i^{\text{SM}+Z'}(\Omega) - N_i^{\text{SM}}}{\delta N_i^{\text{SM}}} \right]^2 \leq \chi_{\text{min}}^2 + \chi_{\text{C.L.}}^2, \quad (6)$$

где χ_{min}^2 определяется из требования минимального значения функции $\chi^2(\Omega)$. Легко увидеть, что для нашего случая $\chi_{\text{min}}^2 = 0$.

Значение $\chi_{\text{C.L.}}^2$ задается уровнем достоверности (С.Л.). Для 95%-го уровня достоверности, используя определение квантиля, можно найти $\chi_{\text{C.L.}}^2 = 3,84, 5,99, 7,82$ для количества параметров, равного 1, 2 и 3 [3].

Для вышеизложенного анализа полезна следующая формула:

$$\chi^2(\hat{\Omega}_i \pm N\sigma_{\hat{\Omega}_i}) = \chi_{\text{min}}^2 + N^2. \quad (7)$$

В (7) функция $N = \Phi^{-1}(\beta)$ является квантилем уровня β стандартизованного нормального распределения. Этот вариант используется для нахождения доверительных интервалов параметров, когда не оцениваются интервалы всех других параметров.

Экспериментальной величиной является число событий N_i^{SM} углового интервала $|z| \leq 0,98$. В качестве модельной функции выбирается число событий $N_i^{\text{SM}+Z'}(\Omega)$, индуцируемое взаимодействиями при наличии Z' . Неопределенность СМ записывается в виде случайной ошибки: $\delta N_i^{\text{SM}} = \sqrt{N_i^{\text{SM}}}$.

Число событий в i -м бине определяется следующим образом:

$$N_i^{SM+Z'} = \mathcal{L}_{\text{int}} \epsilon_f \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left(\frac{d\sigma^{SM+Z'}}{dz} \right) dz, \quad (8)$$

где \mathcal{L}_{int} — интегральная светимость; ϵ_f — эффективность регистрации конечного состояния f .

Алгоритм получения ограничений включает в себя три этапа. Для выполнения первого этапа необходимо найти области изменения параметров (5) для различных поляризационных наблюдаемых, включая и неполяризованный случай. Вторым этапом является получение ограничений на параметры $|q_{i,j}^{SM+Z'}|$ с помощью системы уравнений (2). Целью третьего этапа является нахождение областей возможного изменения физических параметров Z' ($g_{Z',f}^{L,R}$, $m_{Z'}$ и $\Gamma_{Z'}$).

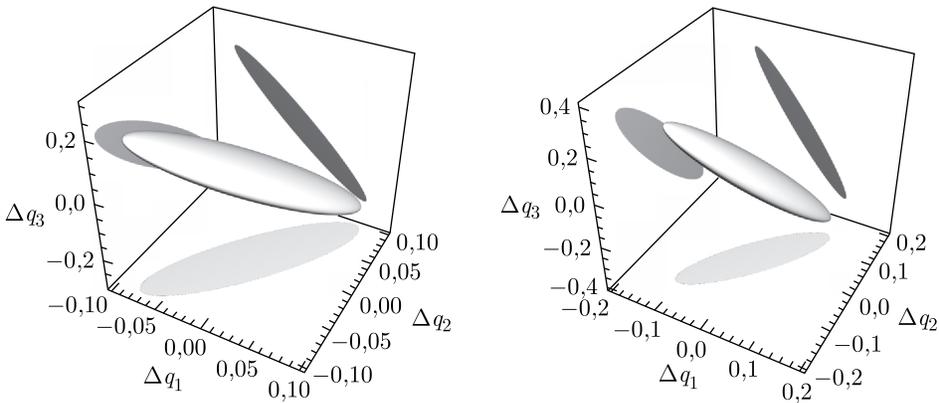
В данной работе реализуется первый этап изложенной методики на примере процесса $e^+e^- \rightarrow \tau\tau$ с использованием энергий столкновения и интегральных светимостей будущего линейного e^+e^- -ускорителя CLIC [5].

Используя (7), получим доверительные интервалы с С.Л. = 68,3% на $\Delta q_{1,2}$ для неполяризованного случая, которые представлены в таблице. Для представленного варианта не учитывается наличие корреляции между параметрами.

Учитывая корреляцию между тремя эффективными параметрами $\Delta q_{1,2,3}$ (используя формулу (6)), можно построить области ограничений в виде эллипсоида, представленного на рисунке.

Одномерные ограничения на эффективные параметры $\Delta q_{1,2}$ для неполяризованного случая

\sqrt{s} , ТэВ	\mathcal{L}_{int} , аб ⁻¹	Δq_1	Δq_2
1,5	2,5	$\pm 0,01$	$\pm 0,019$
3,0	5,0	$\pm 0,015$	$\pm 0,026$



Модельно-независимые ограничения на эффективные параметры $\Delta q_{1,2,3}$, полученные для возможного эксперимента на e^+e^- -ускорителе CLIC ($\chi_{\text{C.L.}}^2 = 3,53$)

В дальнейшем планируется получить доверительные интервалы, используя все комбинации значений P^+ и P^- , и учесть радиационные поправки для возможного улучшения точности ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена методика нахождения ограничений на параметры Z' для процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$. Основой методики является представление дифференциального сечения с частично поляризованными начальными состояниями с использованием эффективных параметров, введенных впервые. Получены модельно-независимые ограничения на обобщенные, эффективные параметры $\Delta_{q_{1,2,3}}$ в процессе $e^+e^- \rightarrow \tau\bar{\tau}$ для возможного эксперимента на e^+e^- -ускорителе CLIC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, представителям которого авторы выражают благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Das A., Dev P. S. B., Hosotani Y., Mandal S.* Probing the Minimal $U(1)_X$ Model at Future Electron–Positron Colliders via Fermion Pair-Production Channels // *Phys. Rev. D.* 2022. V. 105, No. 11. 115030; arXiv:2104.10902 [hep-ph].
2. *Leike A.* The Phenomenology of Extra Neutral Gauge Bosons // *Phys. Rep.* 1999. V. 317. P. 143–250; arXiv:9805494 [hep-ph].
3. *Workman R. L. et al.* Review of Particle Physics // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022. V. 2022, No. 8. 083C01.
4. *Leike A., Riemann S.* Z' Search in e^+e^- Annihilation // *Z. Phys. C.* 1997. V. 75. P. 341–348; arXiv:9607306 [hep-ph].
5. *Charles T. K. et al.* The Compact Linear Collider (CLIC) — 2018 Summary Report. CERN-2018-005-M, CERN-2018-005. V. 2/2018; arXiv:1812.1812.06018 [hep-ph].

Получено 1 февраля 2024 г.