

Д. В. Синегрибов<sup>1,2</sup>, В. В. Андреев<sup>1</sup>, И. А. Серенкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,  
г. Гомель, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,  
г. Гомель, Республика Беларусь

## ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАССУ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО $Z'$ -БОЗОНА ДЛЯ SSM НА ИЛС

**Введение.** Стандартная Модель (СМ) согласуется практически со всеми экспериментальными данными, но имеет и явные недостатки, которые являются причиной для дальнейшей проверки СМ и поиска «новой» физики за ее пределами. За счет расширения калибровочной группы СМ, появляются различные экзотические фермионы, тяжелые нейтрино, дополнительные нейтральные ( $Z'$ ) и заряженные ( $W'$ ) бозоны.

$Z'$ -бозон – массивная, электрически-нейтральная, синглетная по цвету, гипотетическая частица, имеющая спин 1 [1]. Задача поиска  $Z'$ -бозона является актуальной, поскольку содержится в программе исследований Международного линейного коллайдера (ИЛС) [2] и Компактного линейного коллайдера (СЛИС).

Современные ограничения на массу  $Z'$ -бозона (4–5 ТэВ в зависимости от модели) [3], полученные на Большом адронном коллайдере (ЛHC), заметно больше максимальной энергии, планируемой на ИЛС и СЛИС. Поэтому можно исследовать только косвенные  $Z'$  эффекты, вызванные  $\gamma - Z - Z'$  интерференцией. Такие эффекты должны проявляться в виде отклонения регистрируемой наблюдаемой от поведения СМ. За счет значительно меньшего фона, высокой энергии (порядка ТэВ), большей светимости и наличия возможности поляризации  $e^+$  и  $e^-$  пучка,  $e^+e^-$  ускорители следующего поколения позволяют исследовать масштабы и сценарии «новой» физики, недоступные на ЛHC [4].

Цель исследования – оценить возможность улучшения ограничений на массу  $Z'$ -бозона на основе разработанной методики для  $e^+e^-$  ускорителей следующего поколения.

В данной работе не учитывается  $Z - Z'$  массовое смешивание и взаимодействия с другими экзотическими частицами за пределами СМ.

Полученные ограничения полезны для оптимизации будущего эксперимента и важны для идентификации свойств «новой» физики.

**1. Дифференциальное сечение.** Для проведения анализа нужно получить дифференциальное сечение, содержащее эффективные параметры  $Z'$ , линейно входящие в выражение. Условие линейности необходимо для применения статистического критерия и впоследствии получения ограничений на такие параметры.

Исследуемая реакция в приближении Борна иссывается  $s$  канальными диаграммами Фейнмана, представленными на рисунке 1.

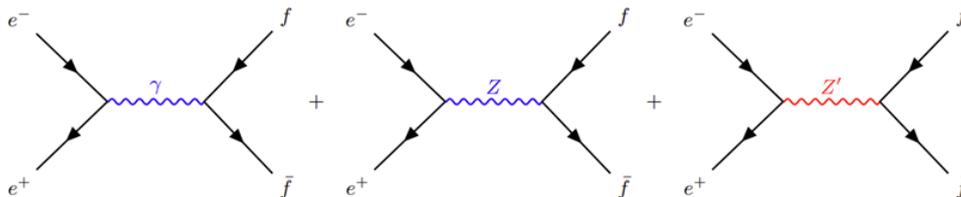


Рисунок 1 – Диаграммы Фейнмана для процесса  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  ( $f \neq e$ )

В результате было получено дифференциальное сечение с частично поляризованными начальными пучками [5], которое записывается в виде:

$$\frac{d\sigma^{SM+Z'}}{dz}(P_{e^+}, P_{e^-}) = N_C (1 - P_{e^+} P_{e^-}) \frac{\alpha^2 \beta \pi}{8s} \times \quad (1)$$

$$\times [(1 - z\beta_f)^2 Q_1^{SM+Z'} + (1 + z\beta_f)^2 Q_2^{SM+Z'} + Q_3^{SM+Z'}].$$

В выражении (1) и (2):  $z \equiv \cos \theta$  ( $\theta$  – угол между  $e^-$  и  $f$ ) и  $\beta_f = (1 - 4m_f^2/s)^{1/2}$ .

Параметры  $Q_{1,2,3}^{SM+Z'}$  определяются комбинациями  $q_{\lambda_e \lambda_f}^{SM+Z'}$  и эффективной поляризации  $P_{eff} = (P_{e^-} - P_{e^+}) / (1 - P_{e^+} P_{e^-})$ :

$$Q_1^{SM+Z'} = p_{eff}^- |q_{LR}^{SM+Z'}|^2 + p_{eff}^+ |q_{RL}^{SM+Z'}|^2,$$

$$Q_2^{SM+Z'} = p_{eff}^- |q_{LL}^{SM+Z'}|^2 + p_{eff}^+ |q_{RR}^{SM+Z'}|^2, \quad (2)$$

$$Q_3^{SM+Z'} = 2\eta_f^2 (p_{eff}^- \text{Re}[q_{LL}^{SM+Z'} q_{LR}^{*SM+Z'}])^2 + p_{eff}^+ \text{Re}[q_{RL}^{SM+Z'} q_{RR}^{*SM+Z'}])^2,$$

В формуле (4):  $\eta_f = (1 - \beta_f^2)^{1/2}$ ;  $p_{eff}^\pm = 1 \pm P_{eff}$ .

Параметры  $q_{\lambda_e \lambda_f}^{SM+Z'}$ , содержащие все параметры  $Z'$ -бозона (массу, ширину и константы связи) определяются формулами:

$$q_{\lambda_e \lambda_f}^{SM+Z'} = \sum_i \frac{sg_{i,e}^{\lambda_e} g_{i,f}^{\lambda_f}}{s - M_i^2 + iM_i \Gamma_i}, \quad (3)$$

где  $g_{i,f}^{L,R} \equiv g_{i,f}^{-,+}$  – фермионные константы связи с бозонами  $i = \gamma, Z, Z'$  с соответствующими массами  $M_i$  и ширинами  $\Gamma_i$ .

**2. Методика модельно-зависимого анализа.** Для получения ограничений вводятся следующие параметры, характеризующие отклонение наблюдаемой от поведения СМ:

$$\Delta Q_1(p_{eff}^-, p_{eff}^+) = Q_1^{SM+Z'} - Q_1^{SM} = p_{eff}^- \Delta q_{LR} + p_{eff}^+ \Delta q_{RL},$$

$$\Delta Q_2(p_{eff}^-, p_{eff}^+) = Q_2^{SM+Z'} - Q_2^{SM} = p_{eff}^- \Delta q_{LL} + p_{eff}^+ \Delta q_{RR}, \quad (4)$$

$$\Delta q_{\lambda_e \lambda_f} = |q_{\lambda_e \lambda_f}^{SM+Z'}|^2 - |q_{\lambda_e \lambda_f}^{SM}|^2. \quad (5)$$

Для получения ограничения на массу  $Z'$ -бозона разработана методика модельно-зависимого анализа, для выполнения которой необходимо:

I. Использовать статистический критерий согласия для получения ограничений на параметры отклонения  $\Delta Q_i$ . Для получения ограничений на параметры отклонения  $\Delta Q_i$  используется функция  $\chi^2$ , которая записывается:

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

где  $N_i = N_i^{SM+Z'}(Q_i^{SM+Z'}) - N_i^{SM}$  (здесь  $N_i^{model}$  – число событий для определенного углового интервала).

Для определения условия используется следующее предположение: будущие экспериментальные результаты по измерению наблюдаемой согласуются с предсказаниями СМ в пределе ожидаемой точности измерений. На основе критерия (6) можно определить нижнюю границу для массы  $Z'$ -бозона, выше которой эффекты  $Z'$  статистические неразличимы от предсказаний СМ.

II. Произвести статистическую обработку ограничений, в следствии чего получить оверительные интервалы для необходимого уровня достоверности. Извлекая доверительные интервалы важно учитывать, что имеется 3 вероятности: вероятность для эллиптической области; вероятность для прямоугольной области, которая зависит от коэффициента корреляции; вероятность горизонтальной полосы.

III. Использовать две различные наблюдаемые для составления системы уравнений и в результате ее решения получить доверительные интервалы на параметры отклонения  $\Delta q_{\lambda, \lambda_f}$ . Для составления системы уравнений можно использовать одну наблюдаемую при разной начальной поляризации и получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Delta q_{LR} &= \frac{p_{eff}^{+,b} \Delta Q_1^a - p_{eff}^{+,a} \Delta Q_1^b}{p_{eff}^{-,a} p_{eff}^{+,b} - p_{eff}^{+,a} p_{eff}^{-,b}}, & \Delta q_{RL} &= \frac{p_{eff}^{-,a} \Delta Q_1^b - p_{eff}^{-,b} \Delta Q_1^a}{p_{eff}^{-,a} p_{eff}^{+,b} - p_{eff}^{+,a} p_{eff}^{-,b}}, \\ \Delta q_{LL} &= \frac{p_{eff}^{+,b} \Delta Q_2^a - p_{eff}^{+,a} \Delta Q_2^b}{p_{eff}^{-,a} p_{eff}^{+,b} - p_{eff}^{+,a} p_{eff}^{-,b}}, & \Delta q_{RR} &= \frac{p_{eff}^{-,a} \Delta Q_2^b - p_{eff}^{-,b} \Delta Q_2^a}{p_{eff}^{-,a} p_{eff}^{+,b} - p_{eff}^{+,a} p_{eff}^{-,b}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где значения  $p_{eff}^{\pm,a}$  и  $p_{eff}^{\pm,b}$  вычисляются для набора поляризаций  $a = \{P_{e^-} = a_1, P_{e^+} = a_2\}$  и  $b = \{P_{e^-} = b_1, P_{e^+} = b_2\}$ .

IV. Получить выражение для полной ширины распада  $Z' \rightarrow f\bar{f}$  [6] (ширина распада  $Z' \rightarrow W^+W^-$  не учитывается, поскольку в данной работе не рассматривается  $Z - Z'$  массовое смешивание).

V. Использовать полученную ширину распада и константы связи для выбранной модели  $Z'$ , для получения ограничений на массу.

**3. Результаты для SSM.** «Последовательная Стандартная Модель» (SSM) основана на калибровочной группе  $SU(2)_{B-L} \times U(1)_Y \times U(1)_{Y'}$  и является наиболее популярной, поскольку фермионные константы связи  $Z'$  выбираются равными  $Z$  [1].

Для получения ограничений, которые представлены на рисунке 2, использовались проектные параметры ИС [2]. Наблюдаемой является число событий при разной начальной поляризации ( $a = \{0; 0\}$  и  $b = \{-0, 8; -0, 5\}$ ).

## ILC (1 ТэВ), 95 % C.L.

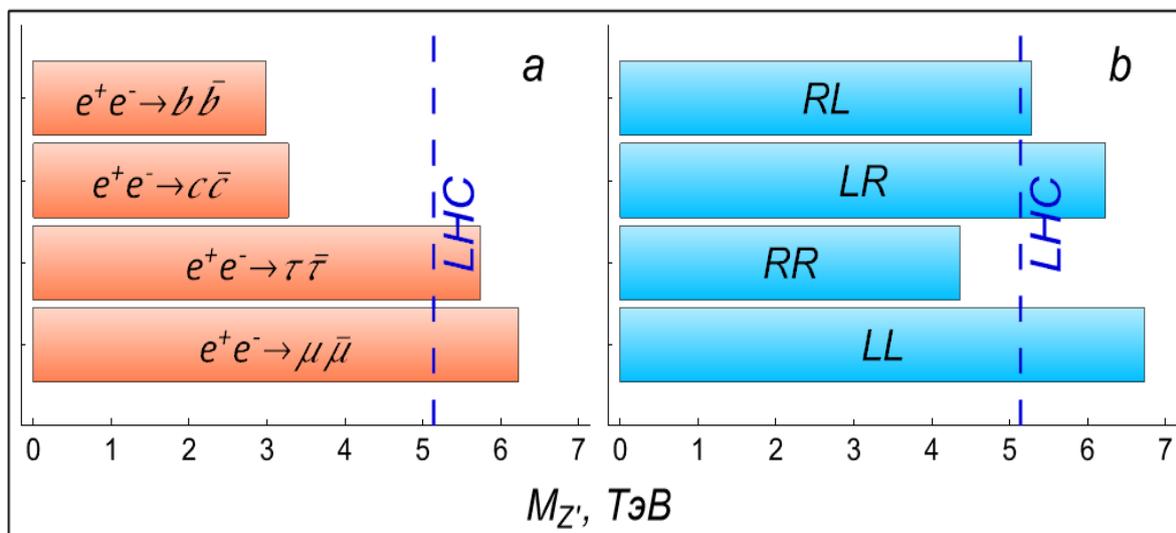


Рисунок 2 – Пороги обнаружения  $Z'$ -бозона для SSM ((a) – рассматриваются различные конечные фермионы для комбинации  $LR$ , (b) – рассматриваются различные комбинации  $\lambda_e \lambda_f$  для процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu\bar{\mu}$ )

Для результата (a), наилучшие ограничения получены для аннигиляции в мюонную пару, на основе чего можно заметить зависимость ограничений от массы конечного фермиона. Ограничения для  $c\bar{c}$  и  $b\bar{b}$  значительно хуже, поскольку экспериментально нельзя различить кварковые и антикварковые струи, поэтому для такого случая фазовый объем уменьшается на 2 (за счет чего значительно уменьшается число событий). Для результата (b), наилучшие ограничения, равные 6,730 ТэВ, получены для комбинации  $LL$  (аналогичное ограничение на LHC равно 5,150 ТэВ).

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что потенциальные возможности ILC позволяют улучшить существующие ограничения на массу  $Z'$ -бозона.

### Литература

1. Leike, A. The Phenomenology of extra neutral gauge bosons / A. Leike // Phys. Rept. – 1999. – Vol. 317. – P. 143–250.
2. The International Linear Collider: Report to Snowmass 2021 / A. Aryshev [et al.] // DESY-22-045, FERMILAB-FN-1171-PPD-QIS-SCD-TD, PNNL-SA-1608845, 2021. – P. 220.
3. Review of Particle Physics / R. L. Workman [et al.] // Prog. Theor. Exp. Phys. – 2022. – Vol. 083C01. – P. 995–999.
4. Probing the minimal  $U(1)_X$  model at future electron-positron colliders via fermion pair-production channels / A. Das, P. S. Bhupal Dev, Yu. Hosotani, S. Mandal // Phys. Rev. D. – 2022. – Vol. 105, № 11. – P. 115030.
5. Sinegribov, D. V. Model-independent constraints on extra neutral heavy bosons effective parameters at the future  $e^+e^-$  colliders / D. V. Sinegribov, V. R. Kurylenka, V. V. Andreev, I. A. Serenkova // Phys. Part. Nuclei Lett. – 2024. – Vol. 21. – P. 658–660.
6. Dreiner, H. K. Two-component spinor techniques and Feynman rules for quantum field theory and supersymmetry / H. K. Dreiner, H. E. Haber, S. P. Martin // Phys. Rept., 494, FERMILAB-PUB-09-855-T. – 2010. – P. 1–196.