

Интерференционные эффекты новых нейтральных промежуточных бозонов в процессах рождения фермионных пар на будущих электрон-позитронных коллайдерах

В. Р. Куриленко ^{a,b}, С. А. Лукашевич ^a, А. А. Панков ^{b,c}

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

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

^c Объединенный институт ядерных исследований, ОИЯИ, Дубна, Россия,
E-mail: valera.kaban4ik@gmail.com

Введение. Стандартная модель (СМ) сильных и электрослабых взаимодействий элементарных частиц достигла поистине впечатляющих успехов в описании экспериментальных данных во всем интервале достижимых на сегодняшний день энергий. Физические программы экспериментов на действующих и будущих коллайдерах высоких энергий в качестве основных задач включают в себя прецизионную проверку СМ, а также поиск новых частиц и взаимодействий, существование которых предсказывается моделями «новой» физики, являющимися обобщениями СМ. При возрастании энергии сталкивающихся пучков и светимости коллайдеров проводимые эксперименты представляются весьма перспективными с точки зрения достижения высоких точностей при проверке СМ, а также для поиска и обнаружения новых физических явлений и закономерностей.

Настоящая работа посвящена разработке метода обнаружения интерференционных эффектов новых нейтральных промежуточных бозонов в процессах рождения лептонных и кварковых пар на будущих электрон-позитронных коллайдерах таких, например, как FCC-ee, CLIC и ILC. Кроме того, оптимизация стратегии поиска эффектов нестандартной физики (новых тяжелых бозонов) на будущих электрон-позитронных коллайдерах является чрезвычайно актуальной и важной задачей. В работе поставленные задачи решаются с помощью традиционных физических наблюдаемых величин – сечения аннигиляционного рождения и асимметрии вперед-назад. В частности, в работе выполнен модельный и модельно-независимый анализ эффектов новых нейтральных промежуточных бозонов в процессах аннигиляционного рождения лептонных и кварковых пар. Определены возможности обнаружения новых бозонных состояний на электрон-позитронных коллайдерах высоких энергий.

Сечение процесса аннигиляционного рождения фермионных пар. Асимметрия вперед-назад. Дифференциальное сечение электрон-позитронной аннигиляции в пару фермионов $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ для неполяризованных начальных пучков может быть представлено в борновском приближении в виде:

$$\frac{d\sigma_{ff}}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha^2}{2s} \left[(1 + \cos^2\theta)F_1 + 2\cos\theta F_2 \right], \quad (1)$$
$$F_1 = F_1^{SM} + \Delta F_1, \quad F_2 = F_2^{SM} + \Delta F_2.$$

Функции $F_{1,2}$ зависят от констант связи и масс стандартного Z -бозона и нового тяжелого нейтрального Z' -бозона [1-3].

Парциальные ширины распада Z' -бозона в фермионные пары имеют вид:

$$\Gamma_{Z'}^{ff} = N_C \frac{\alpha_{e.m.} M_{Z'}}{3} \sqrt{1 - 4m_f^2 / M_{Z'}^2} \left[v_f^2 + a_f^2 + 2m_f^2 / M_{Z'}^2 (v_f^2 - 2a_f^2) \right]. \quad (2)$$

Полная ширина распада $\Gamma_{Z'}$, состоит из суммы парциальных фермионных и бозонных ширин распада [1-3].

Лептонный канал процесса $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ($f=l$) в предположении e - l -универсальности имеет очевидное преимущество перед процессом с произвольным конечным фермионным состоянием, состоящее в зависимости наблюдаемых от меньшего числа свободных параметров. В частности, лептонный процесс зависит от двух констант связи v'_l и a'_l , и массы $M_{Z'}$. Для описания же процесса $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ в общем случае требуется также информация о кварковых константах связи.

При анализе процесса парного рождения фермионов традиционно используется следующая пара интегральных наблюдаемых: полное сечение рассеяния σ_{ff} , и асимметрия вперед-назад A_{FB} [1]

$$\sigma_{ff} = \int_{-1}^1 \frac{d\sigma_{ff}}{d\cos\theta} d\cos\theta = N_C \sigma_{pt} F_1, \quad A_{FB} = \frac{\sigma_{FB}}{\sigma_{ff}} = \frac{\sigma_{ff}^F - \sigma_{ff}^B}{\sigma_{ff}} = \frac{3F_2}{4F_1}, \quad (3)$$

где $\sigma_{pt} \equiv \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) = (4\pi\alpha_{e.M.}^2)/s$. Цветовой фактор $N_C = 3(1)$ для кварков (лептонов). Сечения рассеяния в переднюю и заднюю полусферы определяются, соответственно, как

$$\sigma_{ff}^F = \int_0^1 \left(\frac{d\sigma_{ff}}{d\cos\theta}\right) d\cos\theta, \quad \sigma_{ff}^B = \int_{-1}^0 \left(\frac{d\sigma_{ff}}{d\cos\theta}\right) d\cos\theta, \quad (4)$$

здесь $ff = \mu^+\mu^-, b\bar{b}, c\bar{c}$.

Модельно независимые ограничения на константы связи Z' -бозона. Для количественного представления интерференционной картины рассмотрим три случая, отличающиеся друг от друга разным выбором фермионных констант связи v'_l и a'_l , но с одной и той же массой $M_{Z'}$: 1) векторный Z'_V -бозон ($v'_l=1, a'_l=0$); 2) аксиально-векторный Z'_A -бозон ($v'_l=0, a'_l=1$); 3) Z'_{AV} -бозон ($v'_l=1, a'_l=1$). Во всех случаях, представленных на рисунках 1 и 2, берется $M_{Z'} = 500$ ГэВ.

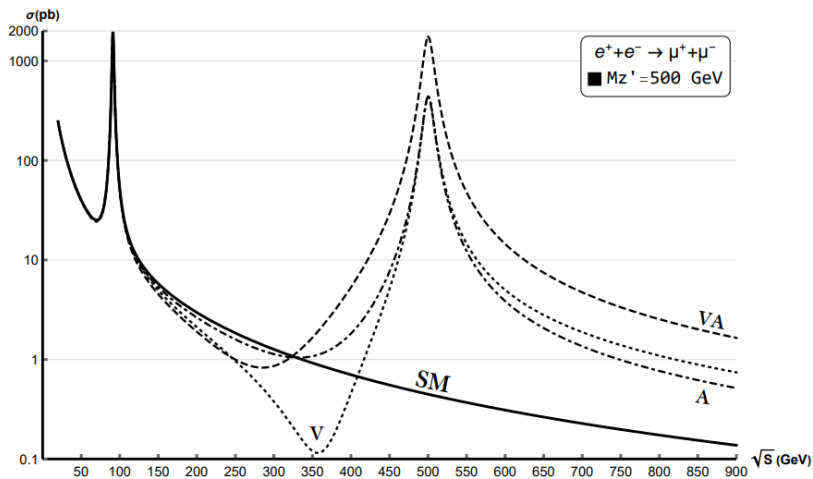


Рис. 1. Энергетическая зависимость полного лептонного сечения для Стандартной модели и для модели, предсказывающей существование Z' -бозона.

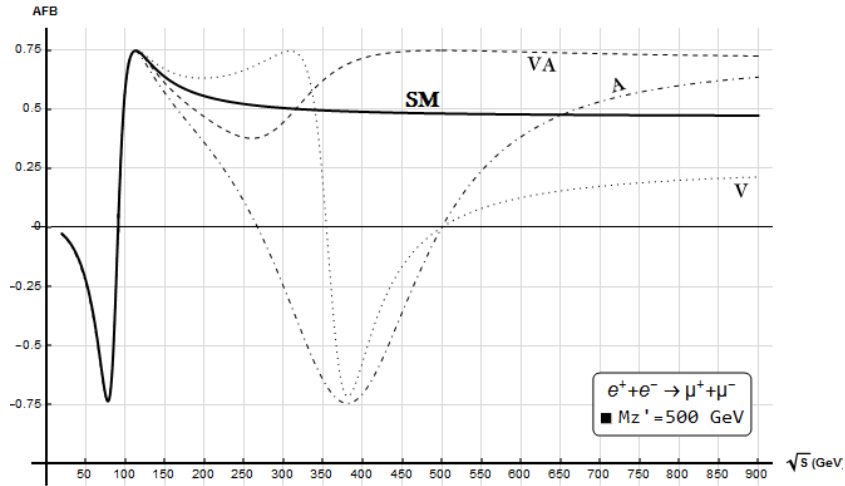


Рис.2. Энергетическая зависимость асимметрии лептонного сечения для Стандартной модели и для модели, предсказывающей существование Z' -бозона.

Если на ILC(International Linear Collider) не удастся обнаружить отклонения наблюдаемых от предсказаний СМ на уровне ожидаемой экспериментальной точности, то в этом случае можно оценить ограничения на параметры (константы связи) Z' -бозона. Далее в работе будут получены модельно независимые ограничения на лептонные и кварковые константы связи Z' -бозона на основе статистического анализа данных, ожидаемых из экспериментов на коллайдере ILC.

Чувствительность, например, полного сечения σ к параметрам Z' -бозона можно оценить с помощью функции χ^2 :

$$\chi^2 = \left(\frac{\Delta\sigma}{\delta\sigma}\right)^2. \quad (5)$$

Здесь $\Delta\sigma$ есть отклонение сечения от поведения в СМ. Экспериментальная погрешность $\delta\sigma$ учитывает как статистическую, так и систематическую ошибки.

Критерием для ограничений модельно-независимых фермионных констант связи v_f' и a_f' служит условие, согласно которому $\chi^2 < \chi_{crit}^2$. Величина χ_{crit}^2 определяется требуемым уровнем статистической достоверности. Аналогично определяется и функции χ^2 для асимметрии вперед-назад.

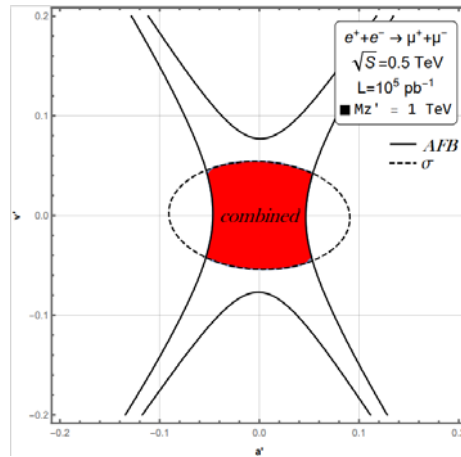


Рис. 3. Модельно-независимые ограничения на лептонные константы Z' -бозона

Результаты модельно-независимого анализа эффектов Z' -бозонов из (ожидаемых) данных коллайдера ILC по измерению физических наблюдаемых величин для лептонных и кварковых процессов представлены на Рис.3 и Рис.4.

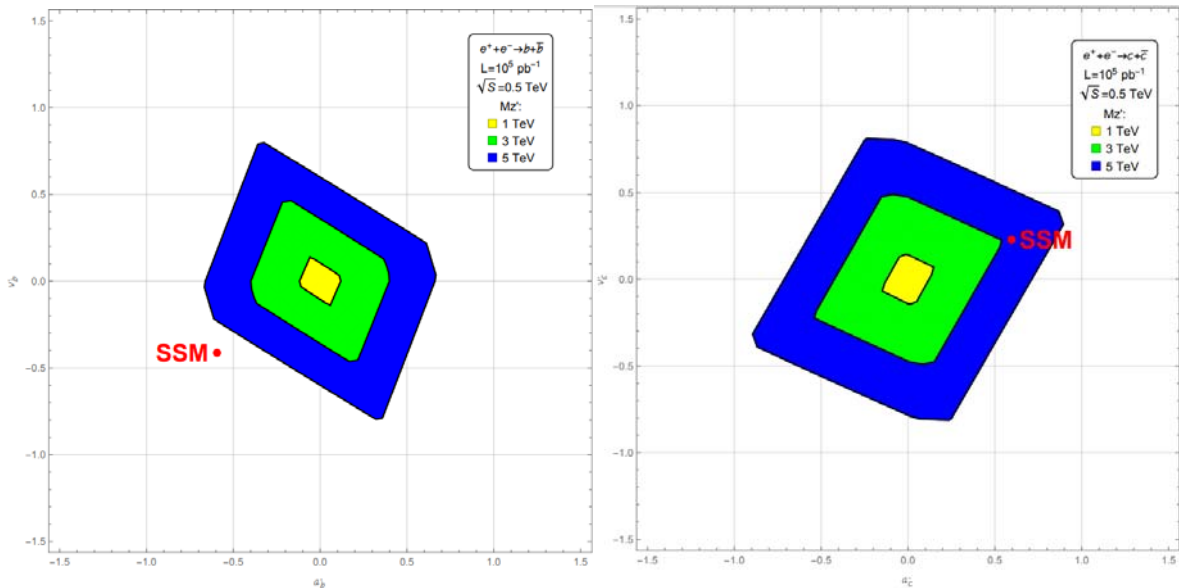


Рис.4. Модельно-независимые ограничения на константы Z' -бозонов $(a'_f, v'_f), (f = c, b)$.

Модельно-независимые ограничения, представленные на рисунках 3 и 4, получены из комбинированного анализа полного сечения и асимметрии вперед-назад.

Заключение. В работе исследованы интерференционные эффекты новых нейтральных Z' -бозонов в полном сечении и асимметрии вперед-назад в лептонных и кварковых процессах. Выявлены их характерные особенности в энергетическом поведении в сравнении с эффектами в СМ.

Выполнен статистический анализ эффектов Z' -бозонов, на основе которого впервые получены модельно-независимые ограничения на константы Z' -бозона для процессов $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$, $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$, ожидаемые из экспериментов на коллайдере ILC.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке БРФФИ.

Литература.

1. Pankov A.A., Osland P. / Z' -prime interference effects from TRISTAN to LEP-2 // Phys. Lett.B – 1997. - Vol. 403. - P. 93-100.
2. Pankov A.A., Tsytrinov A.V., Babich A.A., Karpenko N.V. / Searches for new neutral gauge Z' -prime bosons at the e^+e^- International Linear Collider and their identification // Phys. Atom. Nucl. - 2010. - Vol. 73. - P. 773-784.
3. Pankov A.A., Serenkova I.A., Osland P. / Updated constraints on Z' and W' bosons decaying into bosonic and leptonic final states using the run 2 ATLAS data // Phys. Rev. D – 2021. - Vol. 103, № 5. - P. 053009.