

УДК 530.1;539.12

## Разделение косвенных эффектов новой физики в процессе $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ на коллайдере ILC с поляризацией

ВАСИЛИЙ АНДРЕЕВ, А. А. ПАНКОВ

Модельно независимым образом были получены значения параметров, описывающих эффекты  $Z'$ -бозона, для которых эти эффекты статистически наблюдаемы (“discovery reach”).

**Ключевые слова:** аномальные калибровочные константы, модельно независимый анализ,  $Z'$ -бозон, лево-правосимметричные модели.

There have been obtained model-independent values of parameters describing  $Z'$ -boson effects for which these effects are statistically observable (“discovery reach”).

**Keywords:** anomalous gauge constants, model-independent analysis,  $Z'$ -boson, left-right symmetric models.

### Введение

С запуском Большого адронного коллайдера (БАК) физика элементарных частиц вступила в новую захватывающую эру. За несколько лет набора данных БАК сможет проверить существование различных эффектов новой физики за рамками Стандартной модели (СМ) и получить ограничения на них. В частности, появится возможность проверить существование дополнительных калибровочных бозонов, существование которых предсказывается такими расширенными калибровочными моделями, как лево-правосимметричные модели (LR), модели на основе группы  $E_6$  и другие. Интегральной светимости в  $100 \text{ фбн}^{-1}$  должно быть достаточно для того, чтобы найти или исключить существование  $Z'$ -бозона вплоть до энергий в 5 ТэВ.

Также будет возможно провести более точные измерения аномальных калибровочных констант (АКК). Такие измерения тоже могут быть использованы для исследований новой физики в бозонном секторе.

Следует, однако, отметить, что адронная среда БАК не позволит точно и в полной мере определить свойства  $Z'$ -бозонов. Также будет непросто провести измерения АКК с большой точностью. Поэтому очевидной является необходимость проведения исследований  $Z'$ -бозонов и АКК в рамках других процессов на будущих линейных  $e^+e^-$ -коллайдерах, таких, например, как ILC и CLIC. Такие исследования смогут предоставить важную дополнительную информацию о данных эффектах новой физики.

Одним из наиболее интересных с этой точки зрения процессов, особенно при энергиях, планируемых на коллайдере ILC, является процесс парного рождения  $W$ -бозонов в электрон-позитронной аннигиляции

$$e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^- . \quad (1)$$

Этот процесс является весьма чувствительным к параметрам  $Z'$ -бозона, а именно, к фермионным и бозонным константам связи, к углу  $Z - Z'$ -смешивания  $\phi$  и массе  $M_{Z'}$ . Это наиболее ярко проявляется при высоких энергиях, т.е. при  $\sqrt{s} \gg 2M_W$ . Вклад  $Z'$ -бозона в сечение процесса (1) нарушает механизм калибровочного сокращения, игра-

ющий важную роль в СМ, что существенно усиливает чувствительность данного процесса. Это также актуально и для АКК, так как при энергиях  $\sqrt{s} = 0.5 \div 1$  ТэВ чувствительность процесса к данным эффектам новой физики составит  $< 10^{-3}$  [1].

Известно, что различные эффекты новой физики (например,  $Z'$ -бозоны и АКК) могут вызывать одни и те же отклонения от СМ. Поэтому разделение эффектов новой физики является весьма непростой, но крайне важной задачей. Разработка методик распознавания источника отклонений различных наблюдаемых от поведения, предсказываемого СМ, и исключения других, конкурирующих гипотез, является актуальной проблемой. Целью данной работы является анализ принципиальной разделимости эффектов, индуцируемых АКК и  $Z'$ -бозоном, а также разработка метода, который бы позволил получить области неразличимости исследуемых эффектов новой физики и области, где такое разделение эффектов возможно.

## 1. Расширенные калибровочные модели и АКК

К числу наиболее популярных моделей, предсказывающих существование  $Z'$ -бозонов, относятся модели LR, ALR,  $E_6$  и т.д. В настоящей статье анализируются феноменологические следствия некоторых из этих моделей. В первую очередь, это  $E_6$ -модели.

В работе рассматривается класс моделей, в которых линейная комбинация

$$U(1)' = \cos \beta U(1)_\chi + \sin \beta U(1)_\psi \quad (2)$$

сохраняется вплоть до энергий, характерных для электрослабых процессов. Угол  $\beta$  удовлетворяет условию  $-1 \leq \cos \beta \leq 1$ . В зависимости от значений угла  $\beta$  различают несколько моделей на основе группы  $E_6$ :  $\chi$ -модель ( $\beta = 0^\circ$ ),  $\psi$ -модель ( $\beta = 90^\circ$ ),  $\eta$ -модель ( $\beta = -\arctan \sqrt{5/3} \simeq -52, 2^\circ$ ) и  $I$ -модель ( $\beta = \arctan \sqrt{3/5} \simeq 37, 8^\circ$ ).

Также рассматриваются лево-правосимметричные (LR) модели, в основе которых лежит калибровочная группа  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$ , и модель SSM, в которой  $Z'$ -бозон имеет такие же фермионные константы связи, как  $Z$ -бозон в СМ.

Перейдем к описанию аномальных констант. Для этого запишем эффективный лагранжиан трехбозонных взаимодействий, инвариантный относительно преобразований Лоренца, градиентных преобразований  $U(1)_{em}$ , а также преобразований  $C$ - и  $P$ -симметрии, можно представить в виде [2, 3]:

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -i e \left[ A_\mu (W^{-\mu\nu} W^+{}_\nu - W^{+\mu\nu} W^-{}_\nu) + k_\gamma F_{\mu\nu} W^{+\mu} W^{-\nu} + \frac{\lambda_\gamma}{M_W^2} F^{\nu\lambda} W^-{}_{\lambda\mu} W^{+\mu}{}_\nu \right] - \\ -i e \text{ctg } \theta_W \left[ g_1^Z Z_\mu (W^{-\mu\nu} W^+{}_\nu - W^{+\mu\nu} W^-{}_\nu) + k_Z Z_{\mu\nu} W^{+\mu} W^{-\nu} + \frac{\lambda_Z}{M_W^2} Z^{\nu\lambda} W^-{}_{\lambda\mu} W^{+\mu}{}_\nu \right]. \quad (3)$$

Здесь  $W_{\mu\nu}^\pm = \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm$ ,  $Z_{\mu\nu} = \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu$ ,  $e = \sqrt{4\pi\alpha}$  и  $\theta_W$  – угол Вайнберга. Аномальные параметры, содержащиеся в выражении (3), выражаются через отклонения аномальных констант связи от значений, предсказываемых СМ:

$$\Delta g_1^Z = (g_1^Z - 1) \equiv \text{tg } \theta_W \delta_Z, \quad \Delta k_Z = (k_Z - 1) \equiv \text{tg } \theta_W x_Z + \Delta g_1^Z = \text{tg } \theta_W (x_Z + \delta_Z), \\ \Delta k_\gamma = (k_\gamma - 1) \equiv x_\gamma, \quad \lambda_\gamma \equiv y_\gamma, \quad \lambda_Z \equiv \text{tg } \theta_W y_Z. \quad (4)$$

Таким образом, имеем пять АКК ( $\Delta g_1^Z$ ,  $\Delta k_\gamma$ ,  $\Delta k_Z$ ,  $\lambda_\gamma$ ,  $\lambda_Z$ ) или ( $\delta_Z$ ,  $x_\gamma$ ,  $x_Z$ ,  $y_\gamma$ ,  $y_Z$ ). В настоящей работе для простоты будут рассматриваться случаи, когда какая-либо одна из аномальных констант не равна нулю, в то время как остальные равны 0. То есть будут рассматриваться пять различных моделей с АКК.

## 2. Параметризация моделей с $Z'$ -бозоном

Матричный элемент процесса (1) в СМ может быть представлен в виде суммы  $t$ -канальной и  $s$ -канальной частей. Последняя может быть записана как:

$$\mathcal{M}_s^\lambda = \left( -\frac{g_{WW\gamma}}{s} + \frac{g_{WWZ}(v - \lambda a)}{s - M_Z^2} \right) \times G^\lambda(s, \theta), \quad (5)$$

где  $s$  и  $\theta$  – квадрат энергии начальных пучков в с.ц.м. и угол вылета  $W^-$ -бозона соответственно.  $a, v$  – аксиальная и векторная константы связи СМ  $Z$ -бозона с электронами,  $\lambda$  обозначает спиральность электрона,  $G^\lambda(s, \theta)$  – кинематический коэффициент.

В рамках расширенных калибровочных моделей эта часть выглядит как:

$$\mathcal{M}_s^\lambda = \left( -\frac{g_{WW\gamma}}{s} + \frac{g_{WWZ_1}(v_1 - \lambda a_1)}{s - M_{Z_1}^2} + \frac{g_{WWZ_2}(v_2 - \lambda a_2)}{s - M_{Z_2}^2} \right) \times G^\lambda(s, \theta). \quad (6)$$

Оказывается, однако, что возможно переписать выражение (6) в виде [4]:

$$\mathcal{M}_s^\lambda = \left( -\frac{\tilde{g}_{WW\gamma}}{s} + \frac{\tilde{g}_{WWZ}(v - \lambda a)}{s - M_Z^2} \right) \times G^\lambda(s, \theta), \quad (7)$$

$$\tilde{g}_{WW\gamma} = 1 + \Delta_\gamma, \quad \tilde{g}_{WWZ} = \cot \theta_W + \Delta_Z.$$

Параметры  $\Delta_\gamma, \Delta_Z$  эффективно содержат в себе новую физику и охватывают весь спектр расширенных калибровочных моделей, предсказывающих существование  $Z'$ -бозона. Данная параметризация позволяет проводить модельно независимый анализ эффектов  $Z'$ .

## 3. Наблюдаемые

В качестве наблюдаемых используются дифференциальные сечения процесса (1). Для начальных  $e^+\chi e^-_\lambda$  и конечных  $W^+_{\tau'} W^-_\tau$  состояний данное сечение может быть записано в виде:

$$\frac{d\sigma_{\tau\tau'}^{\lambda\lambda'}}{d \cos \theta} = \frac{\beta_W}{32\pi s} |\mathcal{M}_{\tau\tau'}^{\lambda\lambda'}|^2, \quad (8)$$

где  $\beta_W = \sqrt{1 - 1/\gamma_W^2}$  и  $\gamma_W = \sqrt{s}/(2M_W)$ . Индекс  $\lambda, (\lambda') = \pm 1$  обозначает спиральность электрона (позитрона), а  $\tau, (\tau') = \pm 1 (T), 0 (L)$  – спиновые состояния  $W^- (W^+)$  бозонов,  $\mathcal{M}_{\tau\tau'}^{\lambda\lambda'}$  – спиральные амплитуды процесса (1) для случая либо  $Z'$ -бозона, либо АКК.

В данном разделе введем также понятия “discovery reach” и “identification reach”.

Ограничения на параметры любой новой физики определяются отклонениями наблюдаемых, содержащих эти параметры, от предсказаний СМ. Уровень согласованности с СМ может определяться при помощи функции  $\chi^2$ :

$$\chi^2(\mathcal{O}) = \sum_{bins} \left( \frac{\Delta \mathcal{O}^{bin}}{\delta \mathcal{O}^{bin}} \right)^2, \quad \Delta \mathcal{O} = \frac{\mathcal{O}(SM + NP) - \mathcal{O}(SM)}{\mathcal{O}(SM)}, \quad (9)$$

где  $\mathcal{O} = \frac{d\sigma}{d \cos \theta}$ ,  $\delta \mathcal{O}$  – теоретические неопределенности.

“Discovery reach” – есть минимальное значение параметра(ов) новой физики, для которого отклонение от СМ статистически наблюдаемо.

Как было сказано ранее, различные эффекты новой физики могут вызывать одинаковые отклонения от СМ. В этом отношении можно ввести понятие “identification reach” как минимального значения соответствующего параметра(ов) новой физики, для которого отклонение от СМ не только статистически наблюдаемо, но и источник этого отклонения может быть однозначно выделен среди других конкурирующих гипотез.

Предположим, оказалось, что какая-либо модель с  $Z'$ -бозоном согласуется с экспериментальными данными. Назовем такую модель “правильной”. Для оценки возможности разделения эффектов, индуцируемых этой моделью, от одной из моделей с АКК, которую мы назовем “тестируемой”, можно рассмотреть следующую функцию:

$$\tilde{\chi}^2(\mathcal{O}) = \sum_{bins} \left( \frac{\tilde{\Delta}\mathcal{O}^{bin}}{\tilde{\delta}\mathcal{O}^{bin}} \right)^2, \quad \tilde{\Delta}\mathcal{O} = \frac{\mathcal{O}(AGC) - \mathcal{O}(Z')}{\mathcal{O}(Z')}, \quad (10)$$

где  $\tilde{\delta}\mathcal{O}$  – теоретические неопределенности, относящиеся к модели с  $Z'$ .

На основе функции  $\tilde{\chi}^2$  рассчитываем вероятность принятия гипотезы ( $p$ -value) [5]:

$$p = \int_{\tilde{\chi}_{min}^2}^{\infty} p(\tilde{\chi}^2) d\tilde{\chi}^2, \quad (11)$$

где  $p(\tilde{\chi}^2)$  – плотность вероятности распределения  $\tilde{\chi}^2$ .

#### 4. Численные результаты

Все результаты были получены для  $\sqrt{s} = 0.5$  ТэВ, а также интегральной светимости  $\mathcal{L}_{int} = 500$  фбн<sup>-1</sup> и степеней поляризации электронных и позитронных пучков  $P_L = \pm 80\%$  и  $P'_L = \pm 50\%$  соответственно [6].

С использованием формул (10), (11) модельно независимым образом были получены значения параметров  $\Delta_\gamma, \Delta_Z$ , описывающих эффекты  $Z'$ -бозона, для которых эти эффекты статистически наблюдаемы (“discovery reach”). Также были получены значения этих параметров, при которых весь класс моделей с  $Z'$ -бозоном можно отличить от какой-либо одной модели с АКК или от любой из пяти, рассматриваемых в работе (“identification reach”). Кроме того, были получены модельные оценки, т.е. значения параметров  $\Delta_\gamma, \Delta_Z$ , при которых какую-то из конкретных моделей с  $Z'$ -бозоном ( $\chi, \psi, \eta, I, LR$  или SSM) можно отличить от любой из пяти моделей с АКК.

Был осуществлен также переход от параметров  $\Delta_\gamma, \Delta_Z$  к физическим параметрам, а именно – к углу  $Z - Z'$ -смешивания  $\phi$  и массе  $Z_2$ -бозона (массовое состояние  $Z'$ )  $M_2$ . Получены аналогичные величины “discovery reach” и “identification reach” для этих параметров.

На рис. 1 представлены значения “discovery reach” (левый) и “identification reach” (правый) для некоторых расширенных калибровочных моделей с  $Z'$ . Области внутри парабол соответствуют областям неразличимости данных моделей от СМ (для “discovery reach”) или от любой из модели с АКК (для “identification reach”). Уровень  $1 - p = 0.95$ .

Результаты для других моделей при  $M_2 = 2$  ТэВ представлены в таблице 1.

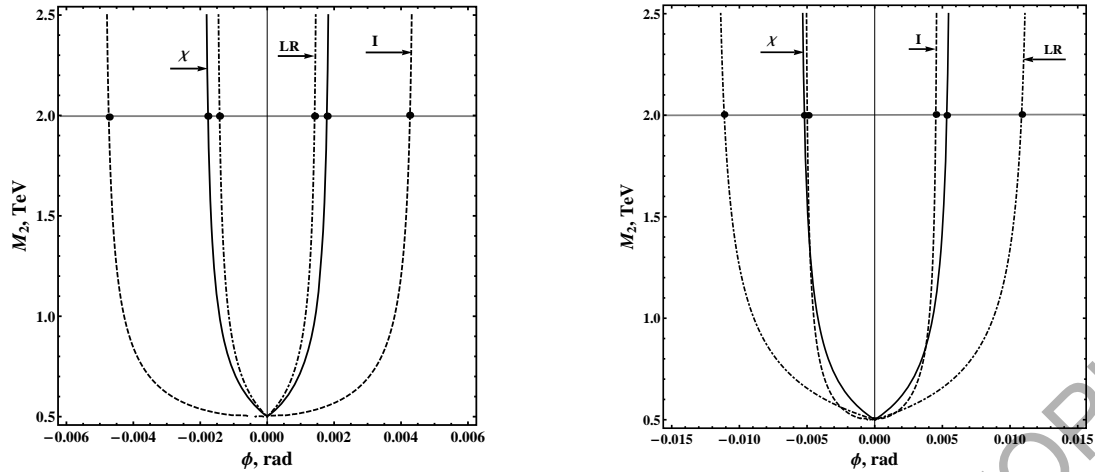

 Рисунок 1 — “Discovery reach” и “identification reach” для различных  $Z'$  моделей

 Таблица 1 — Значения  $\phi^{Disc}$  (“discovery reach”) и  $\phi^{ID}$  (“ID reach”) для различных  $Z'$  моделей.

$Z'$ модель	$\chi$	$\psi$	$\eta$	I	LR
$\phi^{Disc}, 10^{-3}$	$\pm 1.8$	$\pm 2.2$	$\pm 1.7$	$\pm 2.8$	$\pm 1.6$
$\phi^{ID}, 10^{-3}$	$\pm 4.9$	$\pm 45.0$	$\pm 23.0$	$\pm 4.7$	$\pm 11.0$

### Литература

- 1 Pankov, A.A. Initial longitudinal polarization in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  as a tool to probe trilinear gauge boson couplings / A.A. Pankov, N. Paver // Phys. Lett. — 1994. — Vol. B324. — P. 224–230.
- 2 Probing the Weak Boson Sector in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  / K. Hagiwara, R.D. Peccei, D. Zeppenfeld, K. Hikasa // Nucl. Phys. — 1987. — Vol. B282. — P. 253–298.
- 3 Gounaris, G. Trilinear selfcouplings of vector bosons and their determination in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  / G. Gounaris [et al.] // Proceedings of the Physics Potential Conf. “e+ e- collisions at 500 GeV”. Feb 4, 1991, Munich, Germany / Bielefeld Univ. — Munich, Germany, 1992. — P. 735–755.
- 4 Pankov, A.A.  $Z'$  effects and anomalous gauge couplings at LC with polarization / A.A. Pankov, N. Paver, C. Verzegnassi // Int. J. Mod. Phys. — 1998. — Vol. A13. — P. 1629–1650.
- 5 Review of Particle Physics / W.-M. Yao, C. Amsler, D. Asner [et al.] // Journal of Physics G. — 2006. — Vol. 33. — P. 1.
- 6 Brau, J. ILC Reference Design Report Volume 1 — Executive Summary. [Electronic resource] / J. Brau [et al.]. — 2007. — Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/0712.1950>. — Date of access: 24.02.2008.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступило 01.10.11

Гомельский государственный технический  
университет им. П. О. Сухого