

ФИЗИКА ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ НА БУДУЩИХ ЛЕПТОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ

*А. В. Киселев*¹

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

Рассмотрены возможности будущих лептонных коллайдеров по поиску нейтральных аномальных калибровочных констант, а также темных фотонов с невидимой модой распада.

Possibilities of future lepton colliders in searching for neutral anomaly gauge couplings and dark photons in an invisible decay mode are examined.

PACS: 12.60.-i

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных физических проблем, связанных с выходом за рамки Стандартной модели (СМ), — поиск *аномальных квадратичных калибровочных констант* (QGCs). Аномальные взаимодействия γZZZ , $\gamma\gamma ZZ$ и $\gamma\gamma\gamma Z$ изучались в экспериментах на коллайдере ЛНС, где были получены ограничения на такие константы [1, 2]. Альтернативой могут служить будущие лептонные коллайдеры [3–5]. Возможности обнаружения QGCs исследовались для коллайдеров, работающих как в моде e^+e^- [6, 7], так и в модах γe [8, 9] и $\gamma\gamma$ [10]. Одна из целей настоящей работы — изучение возможности поиска *нейтральных* аномальных констант для вершин $\gamma\gamma\gamma\gamma$ и $\gamma\gamma\gamma Z$ на лептонных коллайдерах высоких энергий [11, 12].

Другая проблема, которая нами будет изучена, — это поиск на указанных лептонных коллайдерах так называемого *темного фотона* A' (DP). Он возникает в моделях, когда поля темной материи (DM) взаимодействуют не с полями СМ напрямую, но лишь посредством *медиатора*, в качестве которого выступает DP. Мы будем полагать, что распад родившегося темного фотона идет на нерегистрируемые частицы DM. Отметим, что до сих пор поиск DP в *невидимой моде* активно велся на лептонных коллайдерах в e^+e^- -столкновениях [15–19]. Мы впервые рассмотрим рождение A' для случая, когда коллайдер работает в γe^- -моде [20].

¹E-mail: kisselev@ihep.ru

1. ПОИСК АНОМАЛЬНЫХ КОНСТАНТ КАЛИБРОВОЧНЫХ БОЗОНОВ

Аномальные калибровочные константы изучаются в рамках *эффективной теории поля*. Для рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ соответствующий лагранжиан выглядит следующим образом:

$$\mathcal{L}_{\text{QNGC}}^{\gamma\gamma\gamma\gamma} = \zeta_1 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} F_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} + \zeta_2 F_{\mu\nu} F^{\nu\rho} F_{\rho\sigma} F^{\sigma\mu}, \quad (1)$$

где $F_{\mu\nu}$ есть тензор напряженности электромагнитного поля, а квадратичные аномальные константы ζ_1 и ζ_2 имеют размерность -4 . Для процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ удобно выбирать лагранжиан

$$\mathcal{L}_{\text{QNGC}}^{\gamma\gamma\gamma Z} = g_1 F^{\rho\mu} F^{\alpha\nu} \partial_\rho F_{\mu\nu} Z_\alpha + g_2 F^{\rho\mu} F_\mu^\nu \partial_\rho F_{\alpha\nu} Z^\alpha \quad (2)$$

с аномальными константами g_1 и g_2 . Аномальные вершины для обоих случаев показаны на рис. 1.

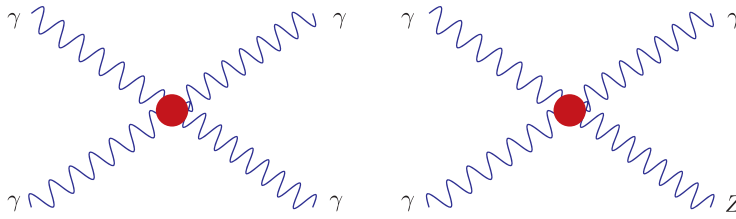


Рис. 1. Аномальные вершины $\gamma\gamma\gamma\gamma$ и $\gamma\gamma\gamma Z$

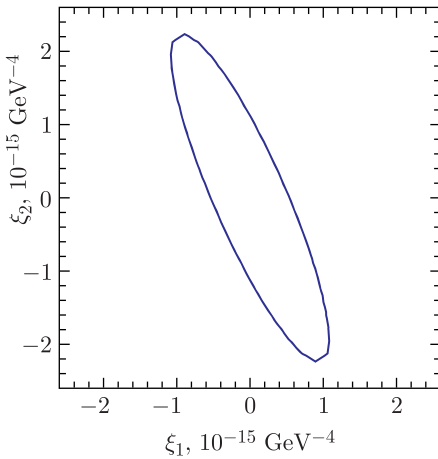


Рис. 2. Ограничения на аномальные константы (ζ_1, ζ_2) , полученные для неполяризованного рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ на коллайдере CLIC с энергией 3 ТэВ и интегральной светимостью $L = 5000 \text{ фб}^{-1}$

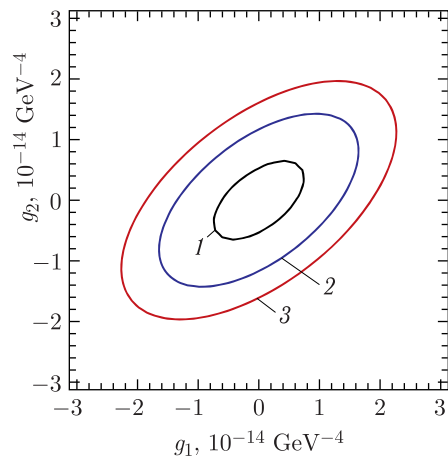


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Ограничения на аномальные константы g_1, g_2 , полученные для неполяризованного рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ на коллайдере CLIC с энергией 3 ТэВ. Систематические ошибки равны $\delta = 0\%$ (черный эллипс, 1), $\delta = 5\%$ (голубой эллипс, 2) и $\delta = 10\%$ (красный эллипс, 3)

Лептонные коллайдеры могут работать в модах e^+e^- , $e^-\gamma$ и $\gamma\gamma$ [21]. Пучки реальных фотонов получаются в результате обратного комптоновского рассеяния *лазерных* фотонов на пучках электронов. При этом фотоны уносят большую часть энергии родительских электронов x . Распределение фотонов $f_{\gamma/e}(x)$ зависит от энергии лазерного фотона, энергии электрона, а также от их поляризации. Дифференциальное сечение рассматриваемых процессов есть свертка распределений $f_{\gamma/e}(x)$ и квадратов спиральных амплитуд. Вычислив сечения, можно получить ограничения на аномальные калибровочные 4-точечные константы. Результаты вычислений [11, 12] представлены на рис. 2 и 3. Ранее был оценен потенциал коллайдеров LHC и HL-LHC по поиску аномальных 4-бозонных констант [13, 14]. Из сравнения с приведенными выше результатами следует, что ограничения на константы, которые могут быть получены на лептонном коллайдере с энергией 3 ТэВ, на порядок более строгие, чем ограничения с LHC и HL-LHC.

2. ПОИСК МАССИВНОГО ТЕМНОГО ФОТОНА

Мы будем работать в сценарии, когда частицы темной материи не взаимодействуют с полями СМ напрямую, но их взаимодействие осуществляется посредством обмена новой векторной частицей — темным фотоном, обозначаемым обычно A' . В свою очередь, он кинетически смешивается с полями СМ, отвечающими группе гиперзаряда $U(1)_Y$. Соответственно, исходный калибровочный лагранжиан выбирается в виде

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\bar{F}'_{\mu\nu}\bar{F}'^{\mu\nu} - \frac{\varepsilon}{2c_W}\bar{F}'_{\mu\nu}B^{\mu\nu}, \quad (3)$$

где $B_{\mu\nu}$ и $\bar{F}'_{\mu\nu}$ есть тензоры напряженности, отвечающие, соответственно, группе $U(1)_Y$ и «темной» группе $U(1)'$, а $\varepsilon \ll 1$ — *кинетический параметр смешивания*. После диагонализации нейтральных бозонных полей получаем лагранжиан взаимодействия для поля A'

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = eJ_\mu A^\mu - \varepsilon eJ_\mu A'^\mu + \varepsilon e't_W J'_\mu Z_\mu + e'J'_\mu A'^\mu + \mathcal{L}_{A'\chi}. \quad (4)$$

Поиск темных фотонов на e^+e^- -коллайдерах велся рядом коллабораций [15–19] в процессах с рождением пар e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ и $\pi^+\pi^-$ в конечном состоянии. Нашей целью является поиск темного фотона в процессе

$$\gamma + e^- \rightarrow A' + e^- \quad (5)$$

на будущих лептонных коллайдерах высоких энергий СЕРС, ILC и CLIC. Соответствующие диаграммы изображены на рис. 4. Предполагается, что темный фотон со 100%-й вероятностью распадается на наилегчайшие стабильные частицы темной материи, которые не регистрируются детекторами (*невидимая мода распада A'*).

Сечение процесса (5) зависит как от массы темного фотона $m_{A'}$, так и от параметра смешивания ε . Основным фоновым процессом является процесс СМ с рождением одиночного электрона и пары нейтрино–антинейтрино,

$$\gamma e^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}. \quad (6)$$

В результате получаем ограничения на массу темного фотона $m_{A'}$ и параметр кинетического смешивания ε для трех изучаемых будущих лептонных коллайдеров при разных энергиях столкновения [20]. Они представлены на рис. 5.

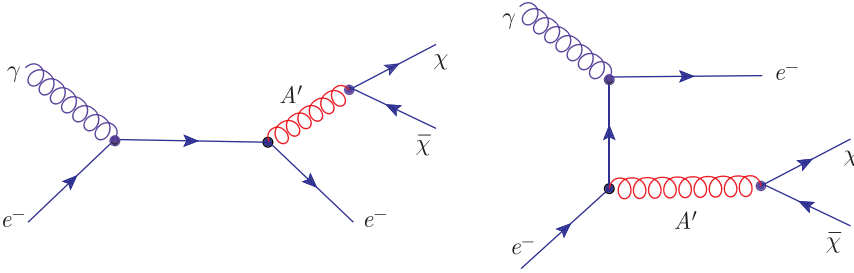


Рис. 4. Диаграммы, описывающие рождение темного фотона в γe^- -рассеянии, с его последующим распадом на частицы темной материи

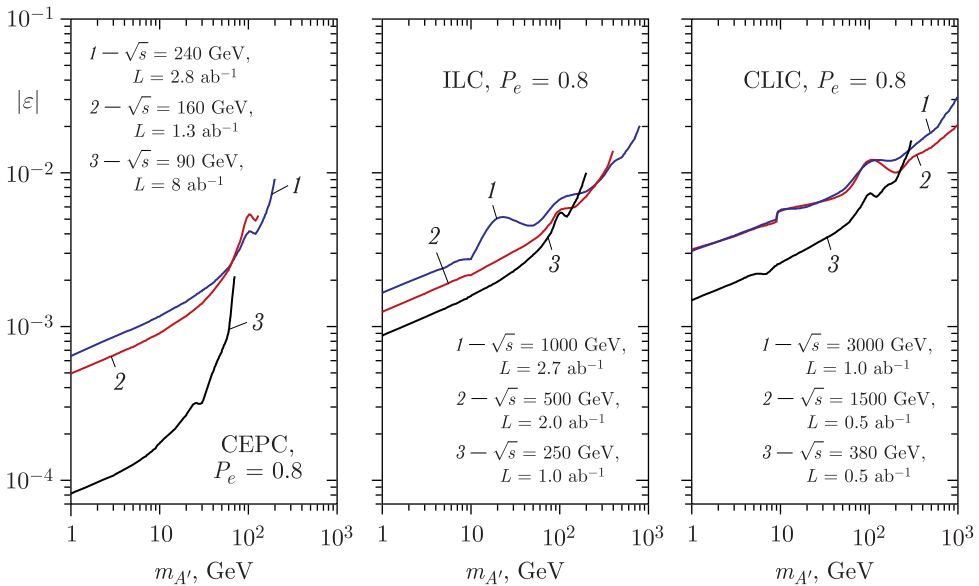


Рис. 5. Ограничения на массу темного фотона $m_{A'}$ и параметр кинетического смешивания ϵ с уровнем достоверности 95%, полученные из рождения темного фотона в рассеянии неполяризованного фотона на электроном с поляризацией 0,8

Данные ограничения в области масс темного фотона 1–10 ГэВ можно сравнить с экспериментальными ограничениями, полученными коллаборацией BaBar [15]. В частности, для коллайдера CEPC с энергией 90 ГэВ ограничения в 2–4 раза более жесткие. Для CEPC с энергией 160 ГэВ и ILC с энергией 250 ГэВ они сравнимы с результатами BaBar.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будущие лептонные коллайдеры позволят изучать физику за пределами СМ. Так, для аномальных 4-фотонных констант они позволят измерить значения вплоть до $\zeta_1 = 6,9 \cdot 10^{-4}$ ТэВ $^{-4}$, $\zeta_2 = 1,4 \cdot 10^{-4}$ ТэВ $^{-4}$, что на порядок лучше возможностей коллайдера HL-LHC с интегральной светимостью 3 аб $^{-1}$. Их чувствительность к

аномальным константам g_1 и g_2 для вершины $\gamma\gamma Z$ составляет $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ ТэВ}^{-4}$, в то время как для HL-LHC она не превышает значения $(1,0-0,7) \cdot 10^{-1} \text{ ТэВ}^{-4}$.

На коллайдерах CEPC, ILC и CLIC может быть также успешно изучено рождение темного фотона, связывающего поля темной и обычной материи, в широком интервале масс 1 ГэВ–1 ТэВ, в предположении, что он распадается лишь на частицы темной материи. Ограничения на кинетический параметр смешивания ε в зависимости от массы темного фотона $m_{A'}$ показывают, что в области $m_{A'} = 1-10 \text{ ГэВ}$ на лептонном коллайдере CEPC можно получить ограничения на ε , в несколько раз более жесткие, чем имеющиеся экспериментальные ограничения BaBar. Пределы на ε для коллайдера ILC с энергией 250 ГэВ сравнимы с ограничениями BaBar.

Все сказанное говорит о больших возможностях экспериментов на будущих лептонных коллайдерах по поиску взаимодействий за рамками Стандартной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.)*. Measurement of the Cross Section for Electroweak Production of a Z Boson, a Photon and Two Jets in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ and Constraints on Anomalous Quartic Couplings // JHEP. 2020. V. 06. P. 076.
2. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurements of $Z\gamma$ and $Z\gamma\gamma$ Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector // Phys. Rev. D. 2006. V. 93. P. 112002.
3. *Behnke T. et al. (ILC Collab.)*. The International Linear Collider Technical Design Report. V. 1. Executive Summary. arXiv:1306.6327 [physics.acc-ph].
4. *Boland M. J. et al. (CLIC and CLICdp Collab.)*. Updated Baseline for a Staged Compact Linear Collider. arXiv:1608.07537 [physics.acc-ph].
5. *The CEPC Study Group*. CEPC Conceptual Design Report. V. 1. Accelerator. arXiv:1809.00285 [physics.acc-ph].
6. *Denner A., Dittmaier S., Roth M., Wackerroth D.* Probing Anomalous Quartic Gauge Boson Couplings via $e^+e^- \rightarrow 4 \text{ Fermions} + \gamma$ // Eur. Phys. J. C. 2001. V. 20. P. 201.
7. *Köksal M.* Anomalous Quartic $ZZ\gamma\gamma$ Couplings at the CLIC // Eur. Phys. J. Plus. 2015. V. 130. Article number: 75.
8. *Éboli O. J. P., Gonzalez-Garcia M. C., Novaes S. F.* Quartic Anomalous Couplings in $e\gamma$ Colliders // Nucl. Phys. B. 1994. V. 411. P. 381.
9. *Atağ S., Şahin İ.* Anomalous Quartic $WW\gamma\gamma$ and $ZZ\gamma\gamma$ Couplings in $e\gamma$ Collision with Initial Beams and Final State Polarizations // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. P. 073003.
10. *Éboli O. J. P., Mizukoshi J. K.* Probing Anomalous Quartic Couplings in $e\gamma$ and $\gamma\gamma$ Colliders // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 075011.
11. *İnan S. C., Kisselev A. V.* Probing Anomalous Quartic $\gamma\gamma\gamma\gamma$ Couplings in Light-by-Light Collisions at the CLIC // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 664.
12. *İnan S. C., Kisselev A. V.* Probing Anomalous $\gamma\gamma Z$ Couplings through γZ Production in $\gamma\gamma$ Collisions at the CLIC // JHEP. 2021. V. 10. P. 121.
13. *Fichtel S. et al.* Light-by-Light Scattering with Intact Protons at the LHC: From Standard Model to New Physics // JHEP. 2015. V. 02. P. 165.
14. *Baldenegro C., Fichtel S., von Gersdorff G., Royon C.* Probing the Anomalous $\gamma\gamma Z$ Coupling at the LHC with Proton Tagging // JHEP. 2017. V. 06. P. 142.
15. *Lees J. P. et al. (BaBar Collab.)*. Search for Invisible Decays of a Dark Photon Produced in Collisions at BaBar // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 119. P. 131804.
16. *Ablikim B. et al. (BESIII Collab.)*. Dark Photon Search in the Mass Range between 1.5 and 3.4 GeV/ c^2 // Phys. Lett. B. 2017. V. 774. P. 252.

17. *Anastasi A. et al. (KLOE Collab.)*. Limit on the Production of a Low-Mass Vector Boson in $e^+e^- \rightarrow U\gamma, U \rightarrow e^+e^-$ with the KLOE Experiment // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 750. P. 663.
18. *Anastasi A. et al. (KLOE-2 Collab.)*. Combined Limit on the Production of a Light Gauge Boson Decaying into $\mu^+\mu^-$ and $\pi^+\pi^-$ // *Phys. Lett. B.* 2018. V. 784. P. 336.
19. *Kou E. et al. (Belle II Collab.)*. The Belle II Physics Book // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2019. V. 2019. P. 123C01; Erratum // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020. V. 2020. P. 029201.
20. *Inan S. C., Kisselev A. V.* Search for Invisible Dark Photon in γe Scattering at Future Linear Colliders // *Eur. Phys. J. C.* 2022. V. 88. P. 592.
21. *Ginzburg I. F., Kotkin G. L., Serbo V. G., Telnov V. I.* Colliding γe and $\gamma\gamma$ Beams Based on the Single-Pass e^+e^- Colliders (of VLEPP Type) // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. V. 205. P. 47.

Получено 27 октября 2022 г.