
ФИЗИКА ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ATOMIC NUCLEUS AND ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS

УДК 539.12.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРМИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОКОЛЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ СТОЛКНОВЕНИЯ С ФОТОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

И. А. ШЕРШЕНЬ¹⁾, Т. В. ШИШКИНА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Получены лоренц-инвариантные дифференциальные и полные сечения рассеяния фотонов на лептонах различных поколений. Проведены численный расчет и исследование рассеяния фотонов на лептонах различных поколений. Показано, что сечение рассеяния фотон-фермионных процессов уменьшается с увеличением массы ферми-частиц. Исследования процессов такого типа планируется проводить на Международном линейном коллайдере для проверки теории электрослабого взаимодействия, поиска эффектов за пределами Стандартной модели, а также конструирования неминимальных калибровочных теорий.

Ключевые слова: сечение; рассеяние; Стандартная модель; линейные коллайдеры.

Образец цитирования:

Шершень И. А., Шишкина Т. В. Исследование фермионов различных поколений в процессах столкновения с фотонами высокой энергии // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 67–72.

For citation:

Shershan I. A., Shishkina T. V. The different generations fermions investigation in it scattering by high energy photon beams. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 67–72 (in Russ.).

Авторы:

Иван Андреевич Шершень – магистрант кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета. Научный руководитель – Т. В. Шишкина.

Татьяна Викентьевна Шишкина – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета.

Authors:

Ivan Shershan, master's degree student at the department of theoretical physics and astrophysics, faculty of physics. undershroud@gmail.com

Tatiana Shishkina, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of theoretical physics and astrophysics, faculty of physics.

THE DIFFERENT GENERATIONS FERMIONS INVESTIGATION IN IT SCATTERING BY HIGH ENERGY PHOTON BEAMS

I. A. SHERSHAN^a, T. V. SHISHKINA^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: undershroud@gmail.com

The paper is devoted to the investigation of differential and total cross sections of photon-fermion processes and calculation of the amplitudes of such processes. The cross sections for the scattering of photons by leptons of different generations were calculated and investigated in Lorentz-invariant form. It was discovered that the scattering cross section of photon-fermion processes decreases when the fermion's masses were grows. These processes will be investigated on the planned International Linear Collider to test the theory of electroweak interaction to discover the effects beyond Standard Model and to construct of nonminimal gauge theory.

Key words: scattering; cross section; Standard Model; International Linear Collider.

После открытия бозона Хиггса основные надежды на быстрое развитие экспериментальной ситуации в физике высоких энергий принято связывать с программой исследований на линейных коллайдерах, позволяющих изучать процессы e^+e^- , $e\gamma$, $\gamma\gamma$ -рассеяний при предельно высоких энергиях, достижимых в современной науке. Поскольку максимальная энергия на коллайдерах новых поколений будет достигать нескольких тераэлектронвольт, требуется не только высокая точность измерений, но и исключительное внимание к прецизионному расчету и анализу значений измеряемых величин. Вот почему проблема получения точных выражений, учитывающих высшие порядки теории возмущений, является важной задачей [1, 2]. Такая точность при проведении теоретических и экспериментальных исследований в сочетании с предельно высокими энергиями обуславливает возможность решения одной из принципиальных задач физики элементарных частиц – обнаружение проявлений и конструирование расширенной калибровочной группы электрослабого взаимодействия.

Процессы взаимодействия элементарных частиц, рассмотренные в настоящей работе, планируется экспериментально изучать на линейных коллайдерах новых поколений [3]. Опыты, проводимые на коллайдерах такого типа, имеют ряд существенных преимуществ перед выполняемыми на других моделях. Поскольку рассеяние фотонов высокой энергии обладает большим поперечным сечением по сравнению с лептон-лептонными взаимодействиями, фотонные пучки предоставляют уникальную возможность для исследования физики электрослабого взаимодействия и квантовой хромодинамики [4–7]. Вопросы использования фотонных пучков (в том числе и циркулярно поляризованных) подробно обсуждаются при планировании экспериментальных программ Международного линейного коллайдера (International Linear Collider, ILC) [8; 9].

Лептонные столкновения обладают значительными эффектами, связанными с излучением частиц высоких энергий. Для преодоления возникающих проблем приходится корректировать форму этих пучков, уменьшая достигаемую светимость. В случае фотонных коллайдеров эти проблемы отсутствуют и можно использовать более плотные пучки указанных частиц, сохраняя высокую светимость.

В работе рассмотрены процессы лептон-фотонного взаимодействия

$$l^\pm(p) + \gamma(k) \rightarrow l^\pm(p') + \gamma(k'),$$

где p и k – 4-векторы импульса начальных лептона и фотона соответственно; p' и k' – 4-импульсы конечных частиц (лептона и фотона). При этом $p = (p^0, \vec{p})$.

Диаграммы Фейнмана, описывающие рассматриваемый процесс в борновском порядке, приведены на рис. 1. Следует отметить, что их связывает друг с другом кроссинг-симметрия.

Соответствующие данным диаграммам ковариантные выражения дифференциального и полного сечений рассеяния могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{32\pi\alpha^2}{(s-m^2)^2} \left\{ \frac{1}{4} \left(\frac{m^2 - s + Q^2}{s - m^2} + \frac{s - m^2}{m^2 - s + Q^2} \right) - \left(\frac{m^2}{s - m^2} + \frac{m^2}{m^2 - s + Q^2} \right)^2 - \left(\frac{m^2}{s - m^2} + \frac{m^2}{m^2 - s + Q^2} \right) \right\};$$

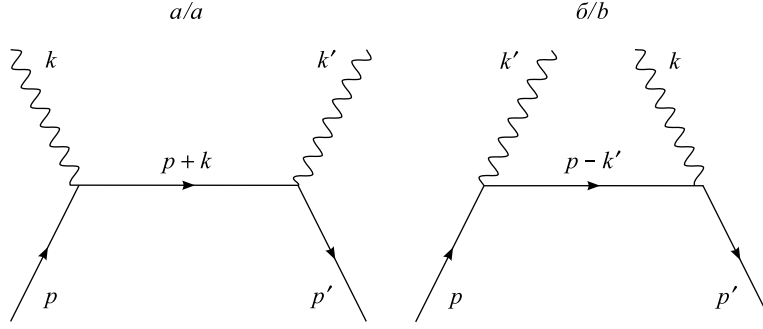


Рис. 1. Диаграммы процесса $l^-\gamma \rightarrow l^-\gamma$ в борновском приближении:

a – исходная диаграмма; b – кроссинг-симметричная диаграмма

Fig. 1. Diagrams of $l^-\gamma \rightarrow l^-\gamma$ process in the Born approximation:

a – original diagram; b – crossing symmetric diagram

$$\sigma = \frac{8\pi\alpha^2}{s-m^2} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{8m^2}{s-m^2} - \frac{m^4}{2s^2} + \left(1 - \frac{8m^4}{(s-m^2)^2} - \frac{4m^2}{s-m^2} \right) \ln \left[\frac{s}{m^2} \right] \right\},$$

где m – масса начального лептона; s и Q^2 – лоренц-инвариантные величины, выражающиеся следующим образом:

$$s = (p+k)^2, \quad Q^2 = -(p-p')^2.$$

При этом s характеризует общую энергию системы частиц, а Q^2 – передачу энергии-импульса от начальных частиц к конечным.

Цель настоящей работы – исследование процессов фотонного рассеяния лептонами различных поколений. Рассмотрим сначала рассеяние фотона на электроне.

На рис. 2 приведены графики зависимости дифференциального (см. рис. 2, a) и полного (см. рис. 2, b) сечений от инварианта s при различных значениях $\sqrt{Q^2}$ (от 800 ГэВ до 3 ТэВ). Очевидно, что дифференциальное сечение резко убывает с ростом s . Можно заметить, что при энергии начальных частиц $E = 20$ ГэВ полное сечение рассеяния не превышает 0,5 фб.

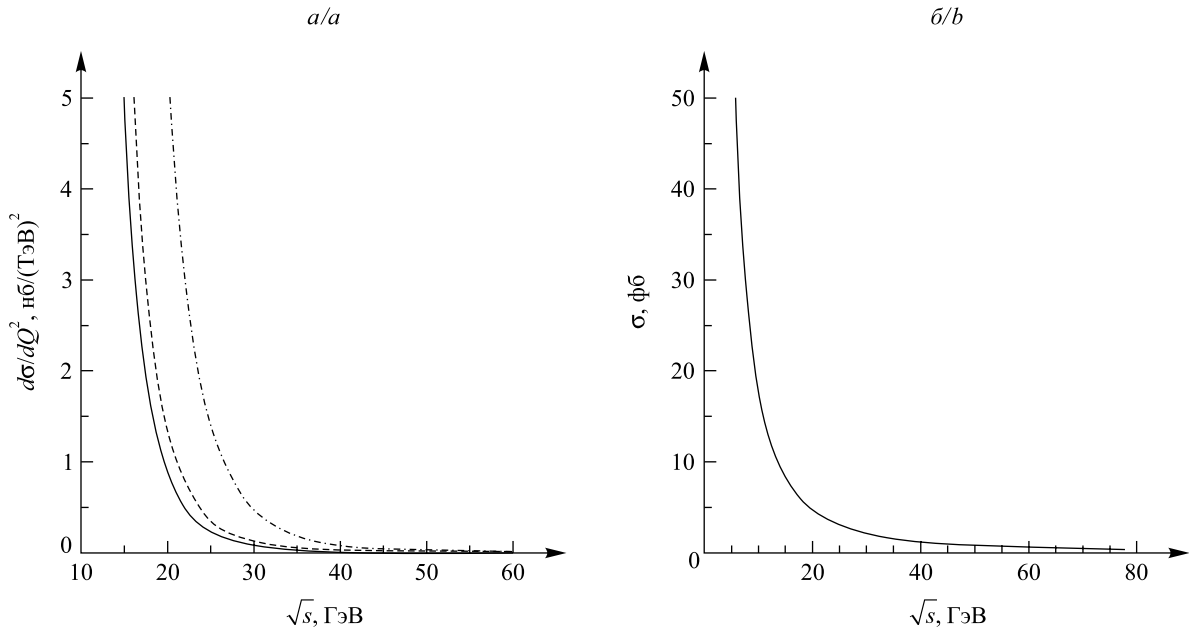


Рис. 2. Сечения рассеяния $d\sigma/dQ^2$ (a), σ (b) при следующих значениях $\sqrt{Q^2}$:

— 800 МэВ; - - - 1 ТэВ; ····· 3 ТэВ

Fig. 2. Scattering cross sections $d\sigma/dQ^2$ (a), σ (b) for the following values of $\sqrt{Q^2}$:

— 800 MeV; - - - 1 TeV; ····· 3 TeV

С изменением значения переданного импульса сечения определяются в разных кинематических областях. Чем больше переданный импульс, тем меньше кинематическая область изменения соответствующего сечения (как дифференциального, так и полного). Дифференциальное сечение увеличивается в значительной мере с ростом значения переданного импульса, что позволяет использовать процессы рассеяния частиц различных энергий для подробного анализа взаимодействий в разных частях кинематической области.

График, представленный на рис. 3, свидетельствует о том, что кинематическая область процесса ограничена с двух сторон: есть минимальное и максимальное допустимые значения для Q^2 . Причем абсолютная величина максимального значения Q^2 растет при увеличении энергии начальных фотонов, в то время как с ростом энергии фотона значения сечений уменьшаются. Наиболее вероятным исходом рассеяния при фиксированной энергии начальных частиц будет передача фотоном минимально возможной энергии частице. При этом чем меньше энергия начальных частиц, тем больше вероятность передачи фотоном минимально возможной энергии частице.

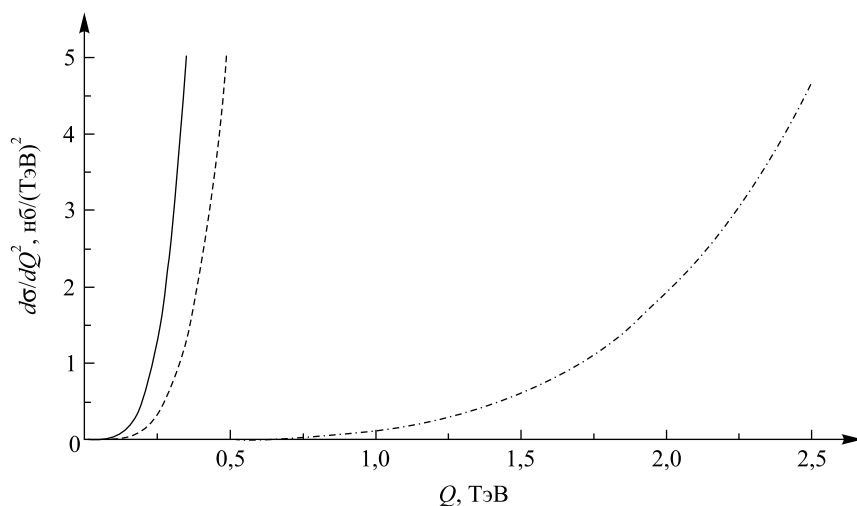


Рис. 3. Сечение рассеяния $d\sigma/dQ^2$ при следующих значениях энергии взаимодействия:
——— 800 МэВ; - - - - - 1 ТэВ; - · - · - 3 ТэВ

Fig. 3. Scattering cross sections $d\sigma/dQ^2$ for the following values of the interaction energy:
——— 800 MeV; - - - - - 1 TeV; - · - · - 3 TeV

С увеличением энергии дифференциальное и полное сечения рассеяния уменьшаются, таким образом, возникают дополнительные возможности исследования эффектов, определяемых «слабой» частью электрослабого взаимодействия. При росте энергии также увеличивается развертка сечений, которые охватывают все большую кинематическую область, что открывает новые перспективы экспериментального исследования. Эти выводы справедливы и для других видов лептонов.

Рассмотрим теперь зависимость дифференциального сечения рассеяния от массы частиц, участвующих во взаимодействии. На рис. 4 приведены дифференциальные и полные сечения рассеяния для различных типов лептонов – электрона (см. рис. 4, а), мюона (см. рис. 4, б), τ -лептона (см. рис. 4, в).

Здесь инварианты \sqrt{s} и $\sqrt{Q^2}$ в системе центра масс (СЦМ) могут быть записаны следующим образом:

$$\sqrt{s} = E_{\text{СЦМ}} = \epsilon + \omega;$$

$$\sqrt{Q^2} = \omega \sqrt{1 - \cos \theta},$$

где $E_{\text{СЦМ}}$ – энергия взаимодействия частиц в СЦМ; ω – энергия начального фотона; $\epsilon = \sqrt{\omega^2 - m^2}$ – энергия начального лептона; m – масса лептона.

В зависимости от вида частиц изменяется кинематическая область протекания реакций, поскольку минимальная энергия системы фотон – лептон не может быть меньше квадрата массы самого лептона. Это позволит в будущем выбирать адекватную область исследования с точки зрения поиска и идентификации эффектов, выходящих за рамки Стандартной модели.

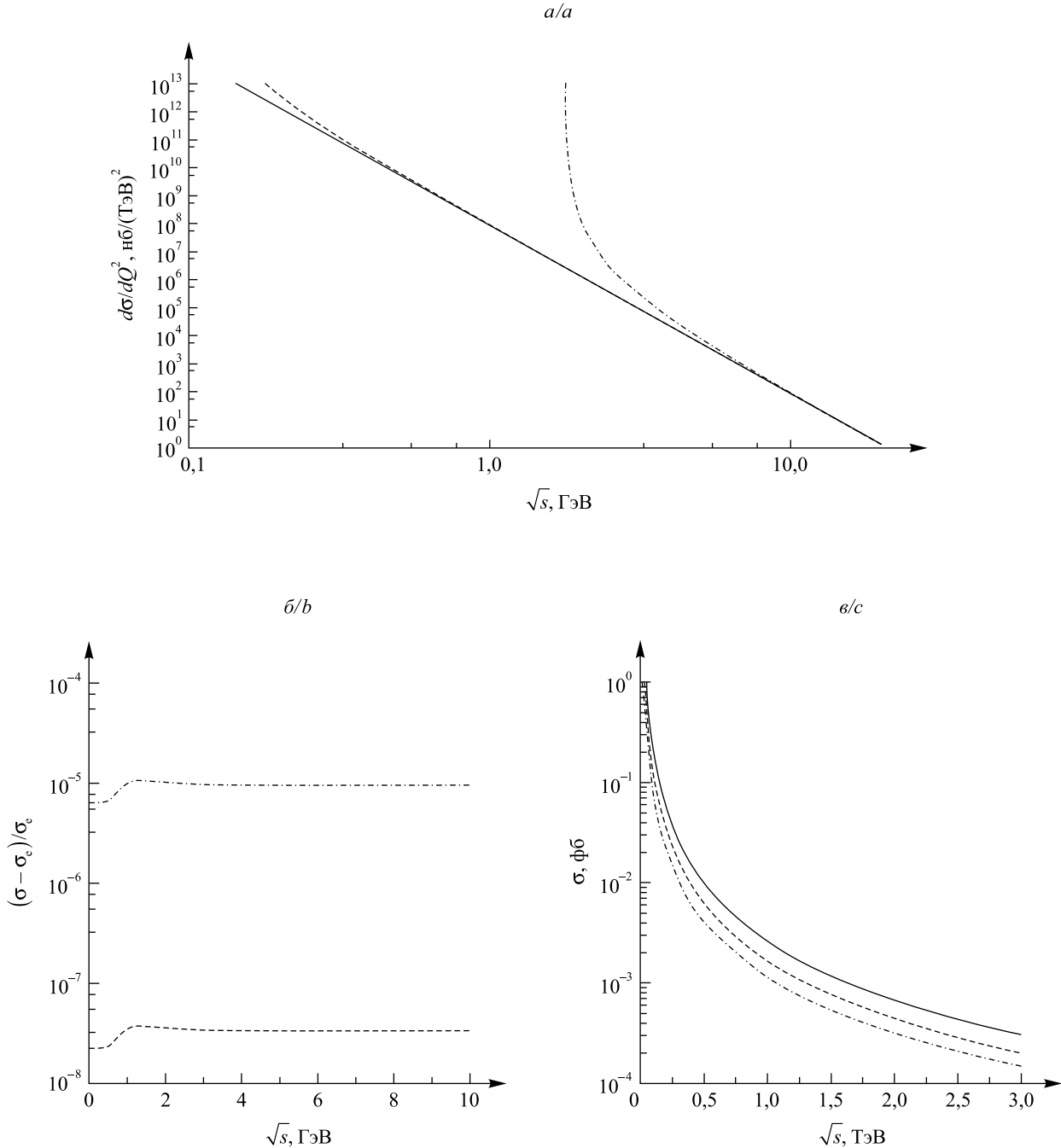


Рис. 4. Сечения рассеяния $d\sigma/dQ^2$ (a), $(\sigma - \sigma_e)/\sigma_e$ (б), σ (в) фотонов на различных типах лептонов:

————— электроны; ----- мюоны; τ -лептоны

Fig. 4. The cross sections $d\sigma/dQ^2$ (a), $(\sigma - \sigma_e)/\sigma_e$ (b), σ (c) for the photon scattering on leptons of different types:

————— electron; ----- muon; τ -lepton

Не менее важной особенностью является и то, что с увеличением массы частиц уменьшается сечение процесса. Рассеяние фотонов более легкими лептонами характеризуется сечениями с большими значениями, и в процессе поиска отклонений от общепринятых теорий и гипотез его использование оптимально. Однако рассеяния на тяжелых лептонах расширяют круг экспериментально измеряемых величин, что позволяет увеличить число последних для изучения важных проблем физики высоких энергий.

Значительные величины приведенных сечений, а также высокая точность измерений в современных экспериментах требуют учета эффектов, выходящих за рамки низшего порядка теории возмущений. Описание и расчет этих эффектов усложняются нетривиальным интегрированием, в процессе которого возникают нефизические ультрафиолетовые и инфракрасные расходимости, впоследствии взаимно

сокращающиеся [10]. Учет подобных эффектов дает возможность оценивать экспериментальные данные с точностью, соответствующей измерениям современных и планируемых экспериментов.

Полученные в настоящей работе графики демонстрируют изменения дифференциальных сечений рассеяния фотон-фермионных процессов в зависимости от ряда параметров: передачи импульса частиц, полной энергии процесса взаимодействия и массы лептона. Обнаружено, что качественных отличий при рассеянии на различных типах фермионов в древесном приближении не возникает. Однако процессы рассеяния на тяжелых лептонах расширяют круг исследуемых величин и, следовательно, важны при поиске и идентификации эффектов «новой физики», особенно учитывая тот факт, что радиационные эффекты будут искажать рассмотренные величины в значительно меньшей степени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Denner A. Techniques for the Calculation of Electroweak Radiative Corrections at the One-Loop Level and Results for W -physics at LEP 200 // *Fortschr. Phys.* 1993. Vol. 41, № 4. P. 307–420.
2. Passarino G., Veltman M. One-loop corrections for e^+e^- annihilation into $\mu^+\mu^-$ in the Weinberg model // *Nucl. Phys. B.* 1979. Vol. 160, № 1. P. 151–207.
3. The International Linear Collider Technical Design Report, 2013 [Electronic resource] / H. Baer. URL: <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report> (date of access: 15.01.2016).
4. Denner A., Dittmaier S. Production of light fermion-antifermion pairs in $\gamma\gamma$ collisions // *Eur. Phys. J. C.* 1999. P. 425–435.
5. Moretti M. Four-fermion productions at a $\gamma\gamma$ collider // *Nucl. Phys. B.* 1997. Vol. 484. P. 3–16.
6. Carimalo C., da Silva W., Kapusta F. Towards a complete $\gamma\gamma \rightarrow 4$ leptons Monte Carlo // *Nucl. Phys. Suppl.* 2000. Vol. 82. P. 391–393.
7. Shishkina T. V. Boson Birth in Linear Photon Collider. Etudes on theoretical Physics // *Études on theoretical physics : Collection of Works Dedic. to 65th Anniv. of the Dep. of theor. Phys. of Belarus. State Univ.* Singapore, 2004.
8. Кураев Э. А., Галынский М. В., Левчук М. И. О принципах и физической программе $\gamma\gamma$ -коллайдеров // *ЭЧАЯ.* 2000. № 31. С. 155–201.
9. Makarenko V., Möning K., Shishkina T. Measuring the luminosity of a $\gamma\gamma$ collider with $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ events // *Eur. Phys. J. C.* 2003. Vol. 32. P. 142–150.
10. Шершень И. А., Шишкина Т. В. Исследование фермионов различных поколений с использованием пучков фотонов высокой энергии // Сборник работ 72-й науч. конф. студентов и аспирантов БГУ (Минск, 11–12 мая 2015 г.) : в 3 т. Минск, 2015. Т. 1. С. 223–228.

REFERENCES

1. Denner A. Techniques for the Calculation of Electroweak Radiative Corrections at the One-Loop Level and Results for W -physics at LEP 200. *Fortschr. Phys.* 1993. Vol. 41, No. 4. P. 307–420. DOI: 10.1002/prop.2190410402.
2. Passarino G., Veltman M. One-loop corrections for e^+e^- annihilation into $\mu^+\mu^-$ in the Weinberg model. *Nucl. Phys. B.* 1979. Vol. 160, No. 1. P. 151–207. DOI: 10.1016/0550-3213(79)90234-7.
3. Baer H., Barklow T., Fujii K., et al. The International Linear Collider Technical Design Report, 2013 [Electronic resource]. URL: <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report> (date of access: 15.01.2016).
4. Denner A., Dittmaier S. Production of light fermion-antifermion pairs in $\gamma\gamma$ collisions. *Eur. Phys. J. C.* 1999. P. 425–435. DOI: 10.1007/s100529900049.
5. Moretti M. Four-fermion productions at a $\gamma\gamma$ collider. *Nucl. Phys. B.* 1997. Vol. 484. P. 3–16.
6. Carimalo C., da Silva W., Kapusta F. Towards a complete $\gamma\gamma \rightarrow 4$ leptons Monte Carlo. *Nucl. Phys. Suppl.* 2000. Vol. 82. P. 391–393.
7. Shishkina T. V. Boson Birth in Linear Photon Collider. Etudes on theoretical Physics. *Études on theoretical physics : Collection of Works Dedic. to 65th Anniv. of the Dep. of theor. Phys. of Belarus. State Univ.* Singapore, 2004.
8. Kuraev E. A., Galynskii M. V., Levchuk M. I. About Principles and the Physical Program of Photon-Photon Colliders. *Fiz. elementarnykh chastits at. yadra.* 2000. No. 31. P. 155–201 (in Russ.).
9. Makarenko V., Möning K., Shishkina T. Measuring the luminosity of a $\gamma\gamma$ collider with $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ events. *Eur. Phys. J. C.* 2003. Vol. 32. P. 142–150. DOI: 10.1140/epjd/s2003-01-011-7.
10. Shershan I. A., Shishkina T. V. Issledovanie fermionov razlichnykh pokolenii s ispol'zovaniem puchkov fotonov vysokoi energii. *Sb. rab. 72-i nauchn. konf. stud. i aspir. BGU* (Minsk, 11–12 May 2015) : in 3 vol. Minsk, 2015. Vol. 1. P. 223–228 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 19.02.2016.
Received by editorial board 19.02.2016.