

ОПИСАНИЕ БАБА-РАССЕЯНИЯ НА МАЛЫЕ УГЛЫ С ПОМОЩЬЮ МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОРА ReneSANCe

*А. Б. Арбузов*¹, *С. Г. Бондаренко*¹, *И. Р. Бойко*¹,
Е. В. Дыдышко^{1,2}, *Л. В. Калиновская*¹, *А. А. Кампф*^{1,*},
*Р. Р. Садыков*¹, *А. В. Тропина*¹, *В. Л. Ермольчик*^{1,2},
Ю. В. Ермольчик^{1,2}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт ядерных проблем

Белорусского государственного университета, Минск

Приведены результаты моделирования с использованием генератора Монте-Карло ReneSANCe процесса баба-рассеяния на малые углы при энергиях в системе центра масс 240 ГэВ и на резонансе Z -бозона. Для заданной точности оценки светимости будущих электрон-позитронных ускорителей порядка 10^{-4} установлен минимальный угол отсечки моделируемых событий.

The results of a simulation using a Monte Carlo generator ReneSANCe of the Bhabha small-angle scattering process at center-of-mass energies of 240 GeV and at the Z -boson resonance are presented. For a given accuracy in estimating the luminosity of future electron-positron accelerators of the order of 10^{-4} , the minimum cutoff angle for simulated events has been established.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

Процесс баба-рассеяния является фоном для многочисленных процессов двухфотонного рассеяния и ключевым компонентом для определения времени жизни пучков. Он входит в тройку базовых процессов для измерения светимости электрон-позитронных коллайдеров. Существует несколько генераторов Монте-Карло, с помощью которых можно оценить сечение процесса баба-рассеяния: BabaYaga [1–5], BHLUMI [6], BHWIDE [7], MCGPJ [8], ReneSANCe [9], и только первые два из них широко используются для оценки светимости при малых углах рассеяния (SABS — Small Angle Bhabha Scattering).

Описание процесса

$$e^+(p_1) + e^-(p_2) \rightarrow e^-(p_3) + e^+(p_4) + \gamma(p_5) \quad (1)$$

* E-mail: kampf@jinr.ru

на однопетлевом электрослабом уровне и результаты аналитических расчетов скалярных формфакторов и спиральных амплитуд поляризованного баба-рассеяния в рамках системы SANC представлены в работе [10]. Подробности внедрения этого процесса в генератор Монте-Карло ReneSANCe описаны в статье [9].

Целью данной работы является исследование сечения баба-рассеяния при сколь угодно малых или даже исчезающе малых углах рассеяния. Как будет показано ниже, при таких углах возникают дополнительные потенциально значимые вклады в значение сечения SABS.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено сравнение с результатами, полученными с помощью генератора BHLUMI, и достигнуто хорошее согласие в пределах систематических ошибок. Все расчеты проводились в настройках рабочего сообщения ЦЕРН «Event generators for Bhabha scattering» [11]: однопетлевое приближение $\mathcal{O}(\alpha)$ без учета вклада Z -обмена, интерференции вверх-вниз, поляризации вакуума с различными значениями энергетического обрезания $z_{\min} = s'/s$, где $\sqrt{s'}$ — энергия столкновения за вычетом излучения из начального состояния. Так, в случае калориметрического отбора событий при $z_{\min} = 0,1$ значение сечения ReneSANCe $\sigma = 166,33(1)$ пб против значения сечения BHLUMI $\sigma = 166,33(2)$ пб, а при $z_{\min} = 0,7$ $\sigma = 161,77(1)$ и $161,79(2)$ пб соответственно.

Наше исследование проводилось на 100 млн сгенерированных программой ReneSANCe событий рассматриваемого процесса. Анализировались события при двух энергиях в системе центра масс (с. ц. м.) — $\sqrt{s} = 91,18$ и 240 ГэВ при условии, что каждое плечо люминометра регистрировало электрон (позитрон) и/или фотон(ы). Результаты были получены в электрослабой схеме $\alpha(0)$ с использованием следующего набора входных параметров:

$$\begin{aligned} \alpha^{-1}(0) &= 137,035999084, \\ M_W &= 80,379 \text{ ГэВ}, & \Gamma_W &= 2,0836 \text{ ГэВ}, \\ M_Z &= 91,1876 \text{ ГэВ}, & \Gamma_Z &= 2,4952 \text{ ГэВ}, \\ M_H &= 125,0 \text{ ГэВ}, & m_e &= 0,51099895 \text{ МэВ}, \\ m_\mu &= 0,1056583745 \text{ ГэВ}, & m_\tau &= 1,77686 \text{ ГэВ}, \\ m_d &= 0,083 \text{ ГэВ}, & m_s &= 0,215 \text{ ГэВ}, \\ m_b &= 4,7 \text{ ГэВ}, & m_u &= 0,062 \text{ ГэВ}, \\ m_c &= 1,5 \text{ ГэВ}, & m_t &= 172,76 \text{ ГэВ}. \end{aligned}$$

Также были учтены следующие кинематические ограничения:

- угол рассеяния электронов любой, вплоть до нуля;
- угловой акцептанс люминометра $30 < \theta < 174,5$ мрад.

Мы использовали два типа отбора событий (ES): 1) ES-BARE (некалориметрический); 2) ES-CALO (калориметрический). Первый тип означает, что отбираются события, когда в каждое плечо люминометра попадает электрон (позитрон) с энергией $E_{e\pm} > 0,5E$ без учета фотонов. У отбора событий второго типа другая настройка: в одно из плеч люминометра попадает электрон (позитрон) с энергией $E_{e\pm} > 0,5E_{\text{beam}}$, а в другое — или электрон (позитрон), и/или фотон(ы) с полной энергией $E_{e,\gamma} > 0,5E_{\text{beam}}$.

Представим однопетлевое сечение рассматриваемого процесса в виде

$$\sigma^{\text{one-loop}} = \sigma^{\text{Born}} + \sigma^{\text{QED}} + \sigma^{\text{weak}}. \quad (2)$$

Сечение на борновском уровне σ^{Born} вычислялось с учетом обмена как фотоном, так и Z -бозоном. Калибровочно-инвариантный КЭД вклад σ^{QED} оценен независимо. Вклад слабых взаимодействий σ^{weak} определен как разность между полной однопетлевой электрослабой поправкой и ее КЭД-частью. Результаты расчета различных вкладов радиационных поправок представлены в виде относительных поправок

$$\delta^{\text{contr}} = \frac{\sigma^{\text{contr}}}{\sigma^{\text{Born}}}.$$

Анализ отбора событий ES-BARE и ES-CALO. В табл. 1 приведены результаты вычисления различных вкладов радиационных поправок для отбора событий первого и второго типов и сечение на борновском уровне для обеих энергий.

Таблица 1. Результаты расчета различных вкладов радиационных поправок в полное сечение для энергий в с. ц. м. $\sqrt{s} = 91,18$ и 240 ГэВ в случае отбора событий первого типа (в скобках приведены статистические ошибки)

Параметр	\sqrt{s} , ГэВ	
	91,18	240
σ^{Born} , пб	135008,457(1)	19473,628(2)
$\delta^{\text{one-loop}}$, %	-1,509(2)	-0,828(3)
δ^{QED} , %	-6,170(2)	-7,002(3)
δ^{weak} , %	0,00918(3)	-0,00675(2)
δ^{VP} , %	4,65262	6,18667
$\delta^{\text{weak+VP}}$, %	4,66180(3)	6,17992(3)

В табл. 2 приведены результаты вычисления КЭД вклада для отбора событий первого и второго типов. При обеих энергиях сечение баба-рассеяния, полученное для событий второго типа, на 3% больше сечения, полученного для событий первого типа. В основном различие обусловлено событиями с коллинеарным фотоном или событиями, когда электрон рассеивается на угол больший, чем акцептанс люминометра,

Таблица 2. КЭД относительные поправки для отборов событий первого и второго типов для энергий в с.ц.м. $\sqrt{s} = 91,18$ и 240 ГэВ (в скобках приведены статистические ошибки)

Параметр	\sqrt{s} , ГэВ	
	91,18	240
δ^{QED} (ES-BARE), %	-6,170(2)	-7,002(3)
δ^{QED} (ES-CALO), %	-3,486(4)	-3,992(4)
δ^{QED} ($\vartheta > 0,030$ рад), %	-3,349(2)	-3,854(4)
δ^{QED} ($\vartheta < 0,030$ рад), %	0,137(4)	0,138(6)

в то время как жесткий фотон, излучаемый из начального состояния, попадает в люминиметр.

Кроме того, мы наблюдаем очень важный эффект*: приблизительно $\sim 0,14\%$ от полного сечения приходится на события с углами рассеяния электронов ниже акцептанса люминиметра. Опустить такие события при анализе было бы грубой ошибкой.

Анализ угловых распределений. Проиллюстрируем полученный эффект на примере распределений доли числа событий по углу рассеяния лептонов ϑ_{14} , т.е. по углу между частицей с импульсом p_1 (начальный позитрон) и частицей с импульсом p_4 (конечный позитрон).

На рис. 1 мы видим существенную зависимость величины сечения баба-рассеяния от значения минимального угла рассеяния. Вклад в сечение событий при угле рассеяния в диапазоне (0; 30) мрад равен примерно 0,13%. При требуемой точности оценки светимости 10^{-4} [12, 13] необходимо учитывать и события от 10 до 30 мрад (см. рис. 1), а собы-

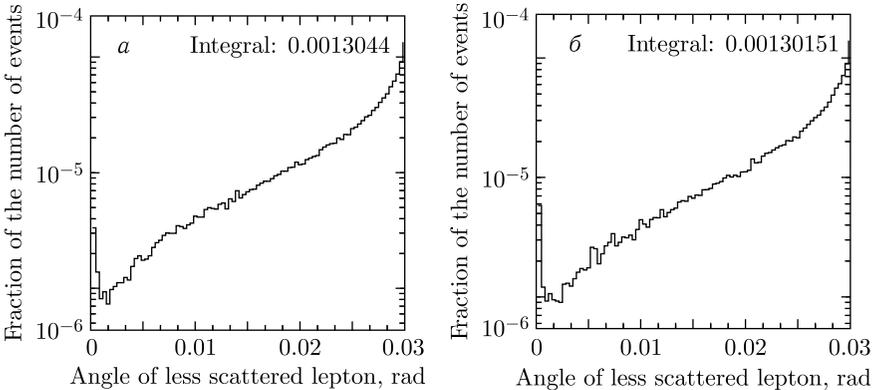


Рис. 1. Угловое распределение в диапазоне (0; 0,03) рад для энергий в с.ц.м. $\sqrt{s} = 91,18$ (а) и 240 ГэВ (б)

* Эффект оценивается как разница между двумя последними строками табл. 2.

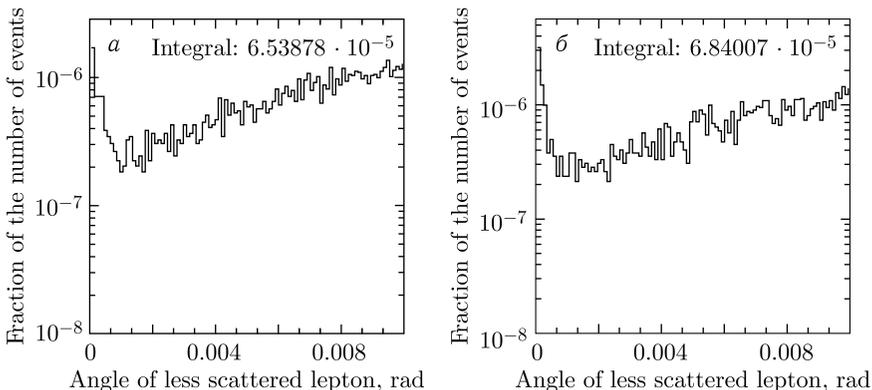


Рис. 2. Угловое распределение в диапазоне (0; 0,01) рад для энергий в с. с. м. $\sqrt{s} = 91,18$ (а) и 240 ГэВ (б)

тиями с углами вылета электронов, меньшими 10 мрад (рис. 2), можно пренебречь, так как их вклад соответствует примерно 0,0065 % от величины полного сечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс баба-рассеяния на малые углы является одним из традиционных процессов, которые могут быть использованы для оценки светимости электрон-позитронных коллайдеров. Мы исследовали этот процесс с помощью разрабатываемого нами генератора Монте-Карло ReneSANCe. При техническом сравнении найдено хорошее согласие с результатами, полученными с помощью генератора Монте-Карло BHLUMI. Благодаря уникальной способности генератора ReneSANCe работать в полном кинематическом фазовом объеме проанализированы события при различных углах рассеяния электронов вплоть до нулевого. Наши исследования выборки событий в диапазоне от 10 до 30 мрад показывают, что пренебрежение ими приводит к смещению светимости на 0,13–0,14 % как на Z -резонансе, так и при энергии в с. с. м. 240 ГэВ. Вкладом в сечение событий с меньшими углами рассеяния можно пренебречь, так как их порядок не превышает $\sim 10^{-5}$.

В дальнейшем планируется усовершенствовать генератор ReneSANCe, включив учет радиационных поправок высших порядков и экспоненциацию излучения фотонов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carloni Calame C. M., Montagna G., Nicrosini O., Piccinini F.* The BABAYAGA Event Generator // Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. 2004. V. 131. P. 48–55; arXiv:hep-ph/0312014.

2. *Balossini G., Carloni Calame C.M., Montagna G., Nicrosini O., Piccinini F.* Matching Perturbative and Parton Shower Corrections to Bhabha Process at Flavour Factories // *Nucl. Phys. B.* 2006. V. 758, No. 1. P. 227–253; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0550321306007851>.
3. *Balossini G., Bignamini C., Carloni Calame C., Montagna G., Nicrosini O., Piccinini F.* Photon Pair Production at Flavour Factories with per Mille Accuracy // *Phys. Lett. B.* 2008. V. 663, No. 3. P. 209–213; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269308004346>.
4. *Carloni Calame C.M.* An Improved Parton Shower Algorithm in QED // *Phys. Lett. B.* 2001. V. 520, No. 1. P. 16–24; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026930101108X>.
5. *Carloni Calame C.M., Lunardini C., Montagna G., Nicrosini O., Piccinini F.* Large Angle Bhabha Scattering and Luminosity at Flavor Factories // *Nucl. Phys. B.* 2000. V. 584. P. 459–479; [arXiv:hep-ph/0003268](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0003268).
6. *Jadach S., Placzek W., Richter-Was E., Ward B.F.L., Was Z.* Upgrade of the Monte Carlo Program BHLUMI for Bhabha Scattering at Low Angles to Version 4.04 // *Comput. Phys. Commun.* 1997. V. 102. P. 229–251.
7. *Jadach S., Placzek W., Ward B.F.L.* BHWIDE 1.00: $O(\alpha)$ YFS Exponentiated Monte Carlo for Bhabha Scattering at Wide Angles for LEP-1/SLC and LEP-2 // *Phys. Lett. B.* 1997. V. 390. P. 298–308; [arXiv:hep-ph/9608412](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9608412).
8. *Arbuzov A.B., Fedotov G.V., Ignatov F.V., Kuraev E.A., Sibidanov A.L.* Monte Carlo Generator for e^+e^- Annihilation into Lepton and Hadron Pairs with Precise Radiative Corrections // *Eur. Phys. J. C.* 2006. V. 46. P. 689–703; [arXiv:hep-ph/0504233](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0504233).
9. *Sadykov R., Yermolchik V.* Polarized NLO EW e^+e^- Cross Section Calculations with ReneSANCe-v1.0.0 // *Comput. Phys. Commun.* 2020. V. 256. P. 107445; [arXiv:2001.10755](https://arxiv.org/abs/2001.10755).
10. *Bardin D., Dydyshka Ya., Kalinovskaya L., Rumyantsev L., Arbuzov A., Sadykov R., Bondarenko S.* One-Loop Electroweak Radiative Corrections to Polarized Bhabha Scattering // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 98, No. 1. P. 013001; [arXiv: 1801.00125](https://arxiv.org/abs/1801.00125).
11. *Jadach S. et al.* // Event Generators for Bhabha Scattering: CERN Workshop on LEP2 Physics (followed by 2nd Meeting, June 15–16, 1995, and 3rd Meeting, Nov. 2–3, 1995); [hep-ph/9602393](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9602393).
12. *Abada A. et al. (FCC Collab.).* FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design Report. V. 1 // *Eur. Phys. J. C.* 2019. V. 79, No. 6. P. 474.
13. *Dong M. et al. (CEPC Study Group Collab.).* CEPC Conceptual Design Report. V. 2. Physics & Detector. 2018; [arXiv:1811.10545](https://arxiv.org/abs/1811.10545).