

УЧЁТ МНОЖЕСТВЕННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАССЕЯНИЯ БАБА

Студент магистрант: Корниенко В. В.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Калиновская Л. В.

Научный консультант: к.ф.-м.н. Ермольчик В. Л.

Кафедра физики элементарных частиц
физического факультета МГУ

Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ

02.06.2025

Ключевой целью физической программы планируемых e^+e^- -коллайдеров (**FCC-ee**, **ILC**, **CLIC**, **CEPC**) является прецизионное уточнение параметров Стандартной Модели и поиск признаков новой физики.

- Уточнение параметров СМ:
 - M_H , g_{HZZ} , M_Z , M_W ...
- Проверка лептонной универсальности
- Поиск эффектов новой физики

Определение светимости:

$$\mathcal{L} = \int dt N^{\text{obs}} / \sigma^{\text{theory}}$$

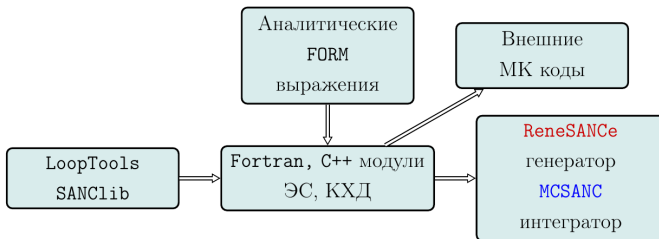
- Измерение светимости с точностью 10^{-4} или лучше необходимо для всех современных e^+e^- экспериментов.
- Традиционные процессы для измерения светимости:
 - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ – рассеяние Баба на малые углы.
 - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ – рассеяние Баба на большие углы.
 - $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ – рождение лептонной пары.
 - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ – аннигиляция в фотонную пару.

все эти процессы реализованы в проекте SANC

- Для теоретической оценки светимости на LEP использовались Монте-Карло генераторы
BNLUMI, BHWIDE, KKMC, BabaYaga, MCGPJ.

SANC – **S**upport of **A**nalytic and **N**umeric **C**alculations for experiments at colliders.

- Система на FORM по аналитическому расчету радиационных поправок (однопетлевые и выше).
- Монте-Карло программы (генератор ReneSANCe и интегратор MCSANC) для расчета наблюдаемых с учетом поляризации частиц в начальном и конечном состоянии.



Achieving 10^{-4} luminosity with LumiCal @ CEPC

2025.04.21
S. Hou

- **LumiCal group** (weekly meetings, ongoing 2yrs)
- **TDR design** accomplished, aim for 10^{-4}
- **Goal:** IP BPM, Radiative Bahbha, Survey monitoring
- **Prototyping:** Diamond, Tracking multi-scattering
forward LYSO, BPM @BES III

高能所 **IHEP**: MDI, beam-pipe, mechanics: Haoyu Shi, Quan Ji, Longyan He, ...
BPM: Jun He, ...
AC LGAD: Mei Zhao, ...

物理所 **AS**: Generator, GEANT: Suen Hou

吉林大学: Generator, BESIII BPM: Weiming Song, Jiading Gong

南京大学: Generator, GEANT4: Lei Zhang, Renjie Ma, Yilun Wang
Diamond, LYSO: Jialiang Zhang, ...
Si tracking: Changhua Hao, Yuhui Miao, Xingyang Sun, Ligang Xia

LumiCal : IHEP: Xiao Cai, Sheng Dong, Jingzhou Zhao, Jie Zhang

prototype : NJU: Lie Zhang, Liangliang Han, Zhenwu Ge



SM LEP to CEPC

SM Z-lineshape $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow q\bar{q}$
QED Luminosity by Bhabha $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

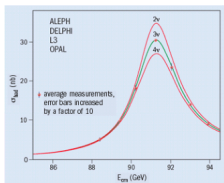
LEP: 17 Million Z (4 IP)
 $L = 4.3 \cdot 10^{31}/\text{cm}^2\text{s}$ (E=46GeV)
 $= 1 \cdot 10^{32}/\text{cm}^2\text{s}$ (E=100 GeV)



CEPC Z-pole : $2 \cdot 10^{12}$ events
 $L \sim 10^{36}/\text{cm}^2\text{s}$ (Z-pole)
 $dL/L < 10^{-4}$

$N_V = 2.9840 \pm 0.0082$

$M_Z = 91187.5 \pm 2.1 \text{ MeV}$ 2.3×10^{-5}
 $G_Z = 2495.2 \pm 2.3 \text{ MeV}$ 1‰
 $N_V = 2.9840 \pm 0.0082$
Precision luminosity 3‰



CERN COURIER 2 November 2005

Bhabha generator

was BHLUMI 4.04 ➔ **still BHLUMI ??**
 S. Jadach [CPC 101 (1997) 229]

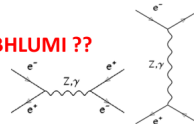
2020 systematic 0.037%
 [PLB 803 (2020) 135319]

Hardronic correction to reach 0.01%

Framework of YFS exponentiation

$e^+e^- \rightarrow e^+e^- n\gamma$

predict $n\gamma$ Poisson photons (not confirmed)



$$\mathcal{L} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{N_{\text{acc}}}{\sigma^{\text{vis}}} \quad \sigma = \frac{16\pi\alpha^2}{s} \cdot \left(\frac{1}{\theta_{\min}^2} - \frac{1}{\theta_{\max}^2} \right)$$

Challenge: QED $\alpha^2 L^2$ shall be measured

Jiading Gong
Renjie Ma

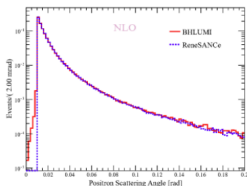
Compare

BHLUMI: YFS exponentiation $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(n\gamma)$

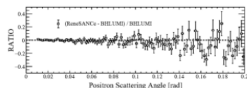
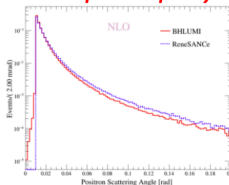
ReneSANCe: NLO calculation $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$

photons
Differ very much
Comparison

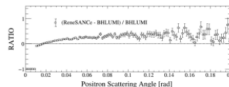
$e\gamma$ opening angle
Consistent



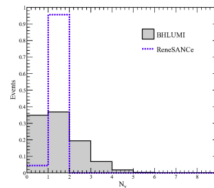
$e^\pm$ theta angle
NLO 0γ discrepancy



BHLUMI NLO : 657471
ReneSANCe NLO : 953210



BHLUMI : 1e+06
ReneSANCe : 1e+06

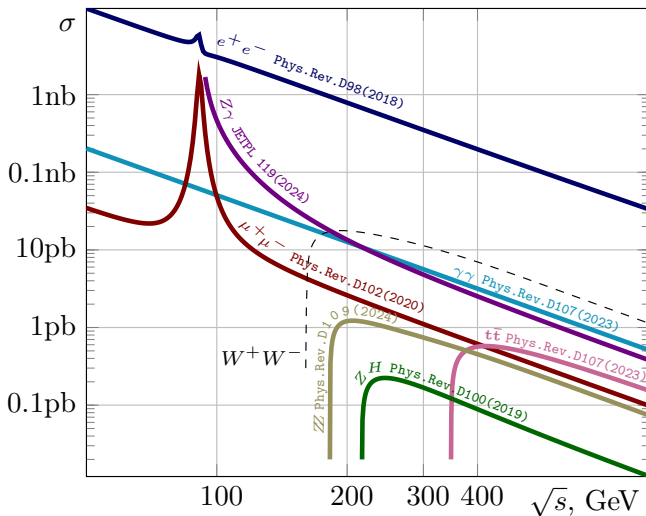


Trial3 : th1= 0.01rad, th2= 0.1rad

BHLUMI $E(\gamma) > 5\text{MeV}$

Event final states	BHLUMI generated
e^+e^-	36.4%
$e^+(e^-\gamma)$ or $(e^+\gamma)e^-$	47.8%
$(e^+\gamma)(e^-\gamma)$,	15.8%

Основные процессы СМ для e^+e^- аннигиляции



Сечение приведено для углов рассеяния $10^\circ < \theta < 170^\circ$.

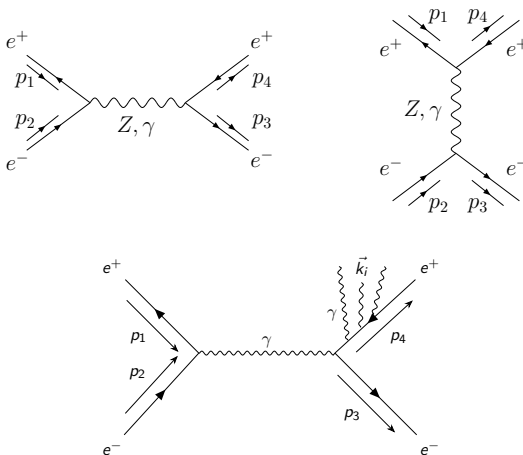
Состояние ReneSANCe на сегодняшний день

Моделирование процесса Баба-рассеяния и других процессов, используемых для мониторинга светимости, с учетом поляризации начального и конечного состояния в полном фазовом объеме.

- Реализовано: полные однопетлевые поправки для всех процессов.
- Реализовано: лидирующие двухпетлевые вклады. Включая электрослабые (**EW**) поправки $O(G_\mu^2)$ порядка и смешанные **EWxQCD** поправки порядка $O(G_\mu \alpha_s)$.
- В разработке: полные 2-петлевые поправки.

Цель работы

- Учет **многофотонного излучения** для процесса Баба-рассеяния ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$).
- Внедрение расчета в генератор **ReneSANCe**.
- Сравнение с другими расчетами.



Постановка задачи

- Вычислить амплитуды и экспоненцированные структурные функции с помощью пакетов символьной алгебры.
- Модернизировать код генератора ReneSANCe добавлением в него возможности учета многофотонного излучения методом экспоненцированных структурных функций.
- Построить процедуру сшивки (устранение двойного счета) с точным однопетлевым вычислением.
- Реализовать возможность генерации множественных фотонов методом фотонного ливня.
- Дать численные оценки, проверить сокращение нефизических параметров, исследовать зависимости от энергии и углов вылета.
- Сравнить полученные результаты с Монте-Карло генератором BabaYaga.

Подход партонных распределений

Подход партонных распределений/структурных функций (Е.Кuraev and V.Fadin 1985, КЭД):

$$\frac{d\sigma(Q^2)}{dQ^2} = D_1^{str} \otimes D_2^{str} \otimes (d\sigma^0 + d\sigma^1)(x) \otimes D_3^{frg} \otimes D_4^{frg},$$

где функции партонных распределений (D^{str}) и функции фрагментации (D^{frg}) зависят от долей энергии лептона после излучения фотонов и большого логарифма $\ln(s/m^2)$, $\otimes$ соответствует меллиновской свертке. Структурные функции удовлетворяют уравнению Докшицера-Грибова-Липатова-Алтарелли-Паризи (ДГЛАП):

$$Q^2 \frac{dD^{str}(z, Q^2)}{dQ^2} = \frac{\alpha}{2\pi} P_+ \otimes D^{str},$$

где P_+ – функция расщепления.

Варианты расчета

- Напрямую, порядок за порядком, считая по отдельности вклады с различной кинематикой.
- Используя экспоненцированные структурные функции (мультипликативные или аддитивные).

Структурные функции

Выражение для мультипликативной экспоненцированной структурной функции D^{str} с точностью до второго порядка в ведущем логарифмическом приближении имеет следующий вид:

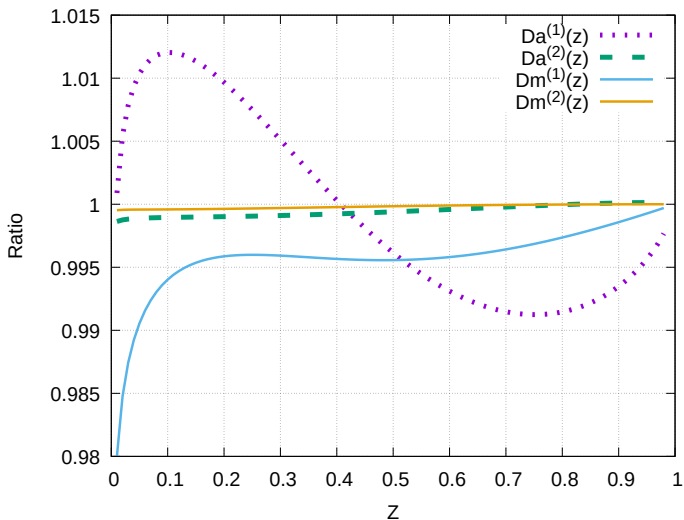
$$\text{Dm}(z, s) = GL(z, s) \left[\frac{1+z^2}{2} + \left(-\frac{1+3z^2}{2} \ln z - (1-z)^2 \right) \frac{\beta}{2} + \left(\frac{3z^2-4z+1}{2} \ln z + \frac{1+7z^2}{12} \ln^2 z + (1-z^2) \text{Li}_2(1-z) \right) \frac{\beta^2}{4} \right],$$

где $\beta = \frac{2\alpha}{\pi} \left(\ln \frac{s}{m^2} - 1 \right)$, Γ – Гамма функция, Li_2 – дилогарифм.

Явный вид функции [Грибова-Липатова](#):

$$GL(z, s) = \frac{(1-z)^{\beta/2-1}}{\Gamma(1+\beta/2)} \beta \exp \left[\frac{\beta}{2} (3/4 - \gamma_E) \right], \quad (1)$$

γ_E – константа Эйлера,



$Da^{(n)}(z) = \frac{Da_n(z)}{D(z)}$ и $Dm^{(n)}(z) = \frac{Dm_n(z)}{D(z)}$, где $Da_n(z)$ и $Dm_n(z)$ - разложенные функции до $n = 1, 2$ - порядка, а $D(z)$ - "точное" решение.

Проблема двойного счета

Необходимо сделать вычитание поправок уже учтенных в точном однопетлевом результате:

“Soft+Virt” вклад имеет борновскую кинематику:

$$\sigma_{\text{LLA}}^{\text{Soft+Virt}} = \sigma^{\text{Born}} 2 \frac{\alpha}{2\pi} (L-1) \left[2 \ln \omega + \frac{3}{2} \right],$$

Вклад, соответствующий излучению жесткого фотона можно переписать так:

$$d\sigma_{\text{LLA}}^{\text{Hard}} = \sigma^{\text{Born}} \frac{e^2}{2} \frac{d^4 R_3}{dR_2} \left(\frac{s}{(p_1 \cdot p_\gamma)(p_2 \cdot p_\gamma)} - \frac{m_1^2}{(p_1 \cdot p_\gamma)^2} - \frac{m_2^2}{(p_2 \cdot p_\gamma)^2} \right) \\ \times \left(2 - \frac{4E_\gamma}{\sqrt{s}} + \frac{4E_\gamma^2}{s} \right),$$

где $d^4 R_3$ и dR_2 - фазовые объемы для трехчастичного и двухчастичного конечного состояния соответственно.

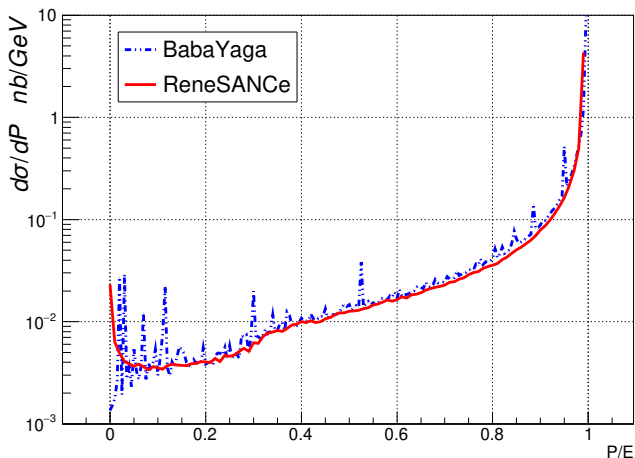


Рис. 1: График результатов распределения по энергиям $d\sigma/dP$ полученные с помощью генератора **BabaYaga** (синяя пунктирная) и генератора **ReneSANCe** (красная сплошная) при энергии 300 ГэВ .

Численные результаты

Модель	$\sigma_{\text{ReneSANCe}}$ [пб]	σ_{BabaYaga} [пб]
Борн	106.71(1)	106.71(1)
КЭД поправки	104.78(1)	105.32(17)
Многофотонное излучение	118.23(1)	104.97(16)

- ReneSANCe- 10^6 событий;
- BabaYaga - 10^7 событий;

В ходе работы было выполнено:

- Учтено многофотонное излучение для процесса Баба-рассеяния (и не только) методом экспонирования структурных функций;
- Расширены возможности использования генератора путем внедрения в него возможности производить расчеты с учетом многофотонного излучения ReneSANCe;
- Произведено сравнение результатов с Монте-Карло генератором BabaYaga;

Спасибо за внимание!