

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1, 536.911

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**АНАЛИЗ И ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОРА WHIZARD**

Руководитель НИР

к.ф.-м.н., внс.

_____ К. М. Белоцкий

Консультант

_____ Е. С. Шлепкина

Студент

_____ К. Р. Шерстнев

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	3
2	Цель работы	5
3	Модели физики	6
4	Генератор случайных чисел	8
5	Адронизация	9
6	Примеры работы с WHIZARD	9
6.1	Распад бозона Хиггса	10
6.2	Образование мюона	14
7	Заключение	16
	Список литературы	16

1. ВВЕДЕНИЕ

Генераторы событий Монте-Карло - незаменимый инструмент в физике элементарных частиц. Сравнение данных, полученных благодаря коллайдерам, с теоретической моделью значительно упрощается, если имеется выборка смоделированных событий, которая представляет собой теоретический прогноз и может быть напрямую сравнена с выборкой событий из детектора частиц. Моделирование включает в себя два шага: генерация событий на уровне частиц, а также симуляция отклика детектора.

WHIZARD был разработан в первую очередь как инструмент для запланированного тогда линейного электронно-позитронного коллайдера TESLA примерно в 1999 году. Цель состояла в том, чтобы иметь под рукой инструмент для описания электрослабой физики переносчиков слабого взаимодействия и бозона Хиггса с максимальной точностью с помощью матричных элементов. Отсюда и аббревиатура WHiZard, которая расшифровывается как **W**, **Higgs**, **Z**, and respective **decays**[1].

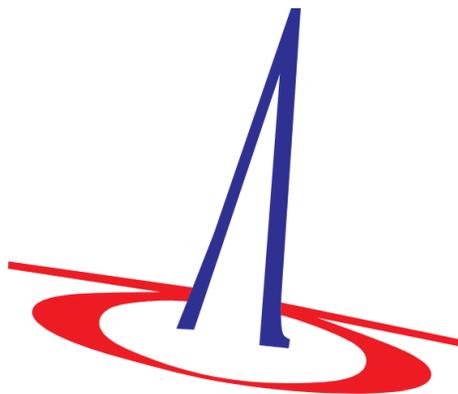


Рис. 1: Логотип WHIZARD

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Необходимость использования различных генераторов событий Монте-Карло возникает в разных областях физики частиц. Каждая задача обладает своими особенностями и требованиями к инструментам моделирования, поэтому для анализа применимости генератора событий WHIZARD следует рассмотреть, насколько широко представлены возможности, после чего сделать вывод о гибкости и универсальности пакета.

В данной работе будут рассмотрены следующие параметры:

- Возможность установки новых физических моделей,
- "случайность" вычислений,
- возможность адронизации.

3. МОДЕЛИ ФИЗИКИ

Физическая модель - это набор частиц, числовых параметров (масс, связей, ширины) и правил Фейнмана. Правила Фейнмана в квантовой теории поля - это правила соответствия между вкладами определенного порядка теории возмущений в матричные элементы матрицы рассеяния и диаграмм Фейнмана.

Многие исследования проводятся в контексте Стандартной модели (SM). Стандартная модель также является моделью по умолчанию в WHIZARD.

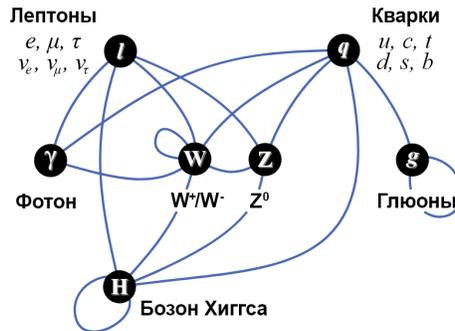


Рис. 2: Взаимодействие между различными частицами в Стандартной модели

Однако, в качестве альтернативы можно выбрать подтип SM (QED или QCD), варианты SM (например, с нетривиальной матрицей CKM или без нее) или различные расширения SM.

Таблица 1: Примеры доступных моделей

	Модель	С СКМ	Тривиальная СКМ
1	Yukawa test model	-	Test
2	QED with e, μ, τ, γ	-	QED
3	QCD with d, u, s, c, b, t, g	-	QCD
4	Standard Model	SMCKM	SM
5	SM with anomalous gauge couplings	SMacCKM	SMac
6	MSSM	MSSMCKM	MSSM
7	Littlest Higgs	-	Littlest
8	SM with graviton	-	Xdim
9	UED	-	UED
10	SQED with gravitino	-	GravTest

4. ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Генераторы случайных чисел (RNG) являются одним из ключевых моментов вычислений Монте-Карло, придавая им свою “случайность”. Универсальный генератор случайных чисел должен обладать:

- повторяемостью,
- большим периодом,
- быстрой генерацией,
- независимостью.

WHIZARD использует псевдо-RNG, который основан на одном (или нескольких) рекурсивных алгоритмах и начальных значениях, чтобы иметь воспроизводимые последовательности чисел. Напротив, действительно случайный генератор случайных чисел опирается на физические процессы.

Стандартным генератором случайных чисел в WHIZARD является TAO (“The Art Of”). Это субтрактивный генератор Фибоначчи с запаздыванием на основе 32-битной целочисленной арифметики.

Последовательность представлена формулой 1.

$$x_j = (x_{j-k} - x_{j-l}) \bmod 2^{30} \quad (1)$$

Здесь $k = 100$, $l = 37$, а длина периода: $\rho = 2^{30} - 2$.

5. АДРОНИЗАЦИЯ

В WHIZARD на данный момент нет собственного встроенного инструмента для адронизации, однако симуляция адронизации всё же возможна благодаря возможности подключения программ PYTHIA6[2] или PYTHIA8 в качестве инструмента адронизации.

6. ПРИМЕРЫ РАБОТЫ С WHIZARD

При разработке WHIZARD было принято решение унифицировать ввод данных и написание кода с помощью специального языка управления, который особенно адаптирован к потребностям интеграции по методу Монте-Карло, моделирования и простого анализа результатов.

Язык был назван SINDARIN, **S**cripting **I**Ntegration, **D**ata **A**nalysis, **R**esults display and **I**Nterfaces[3].

6.1. РАСПАД БОЗОНА ХИГГСА

Ниже приведён код SINDARIN для определения физического процесса в Стандартной модели, вычисления его поперечного сечения и генерации моделируемой выборки событий.

```
process higgs = H => e1, E1, e1, E1
n_events = 10
integrate(higgs)
simulate (higgs)
```

Результат моделирования:

It	Calls	Integral[GeV]	Error[GeV]	Err[%]	Acc	Eff[%]	Chi2	N[It]
1	4998	1.3147640E-07	6.41E-09	4.88	3.45*	3.69		
2	4996	1.3288678E-07	2.29E-09	1.72	1.22*	18.21		
3	4994	1.3158521E-07	1.49E-09	1.13	0.80*	26.08		
4	4990	1.3395138E-07	1.21E-09	0.90	0.64*	26.92		
5	4988	1.3583345E-07	1.15E-09	0.85	0.60*	21.41		
5	24966	1.3399666E-07	6.88E-10	0.51	0.81	21.41	1.39	5
6	9998	1.3205345E-07	8.01E-10	0.61	0.61	21.10		
7	9998	1.3381729E-07	8.20E-10	0.61	0.61	15.06		
8	9998	1.3293533E-07	7.85E-10	0.59	0.59*	14.59		
8	29994	1.3292143E-07	4.63E-10	0.35	0.60	14.59	1.18	3

Рис. 3: Таблица результатов интегрирования

Integration Results Display

Process: higgs-history

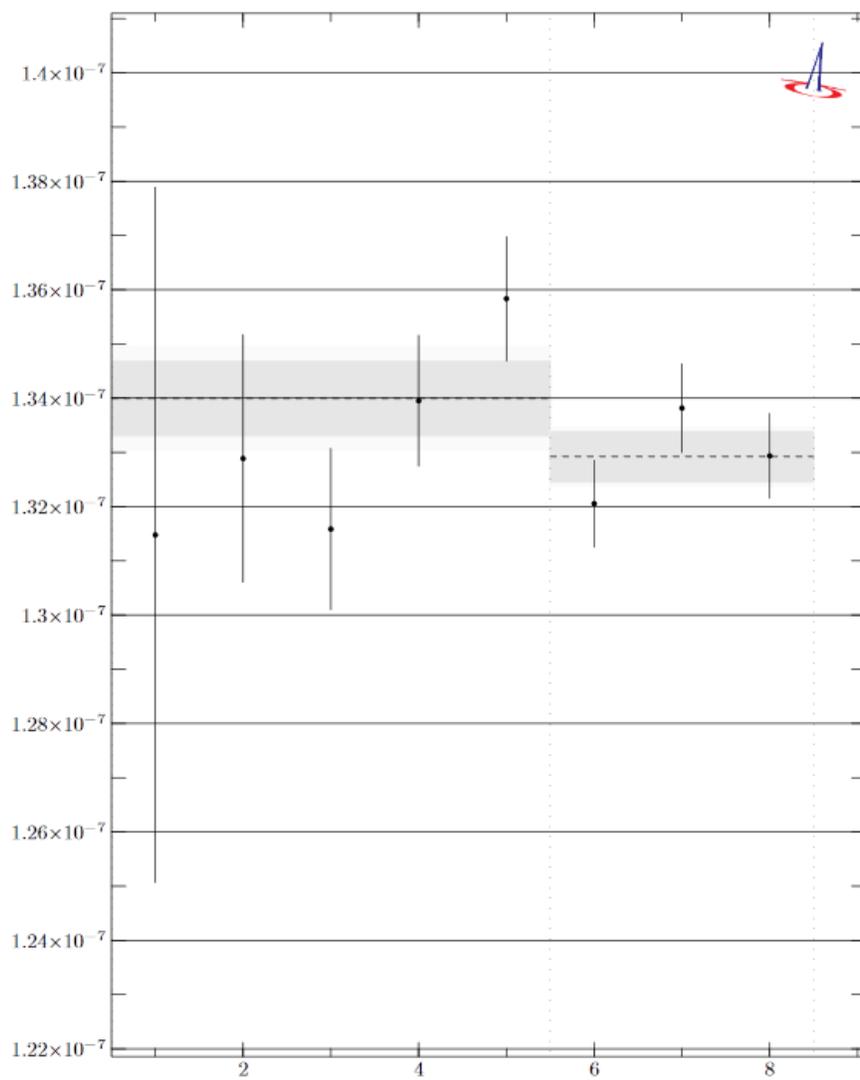


Рис. 4: График результатов интегрирования

Далее приведён код и результаты моделирования аналогичного процесса, однако значение массы бозона Хиггса изменено со стандартного на 1 ТэВ:

```
process higgs = H => e1, E1, e1, E1
mH = 1 TeV
n_events = 10
integrate(higgs)
simulate (higgs)
```

It	Calls	Integral[GeV]	Error[GeV]	Err[%]	Acc	Eff[%]	Chi2	N[It]
1	5000	1.8217019E-01	3.42E-03	1.88	1.33*	17.36		
2	4998	1.8053351E-01	1.24E-03	0.69	0.49*	45.11		
3	4996	1.7973276E-01	1.06E-03	0.59	0.42*	49.40		
4	4990	1.7970189E-01	9.96E-04	0.55	0.39*	46.01		
5	4984	1.8172738E-01	9.34E-04	0.51	0.36*	47.09		
5	24968	1.8052361E-01	5.15E-04	0.29	0.45	47.09	0.78	5
6	9996	1.8230172E-01	6.53E-04	0.36	0.36*	45.54		
7	9996	1.8061284E-01	6.61E-04	0.37	0.37	44.29		
8	9996	1.8162136E-01	6.52E-04	0.36	0.36*	41.73		
8	29988	1.8152004E-01	3.78E-04	0.21	0.36	41.73	1.67	3

Рис. 5: Таблица результатов интегрирования

Integration Results Display

Process: higgs-history

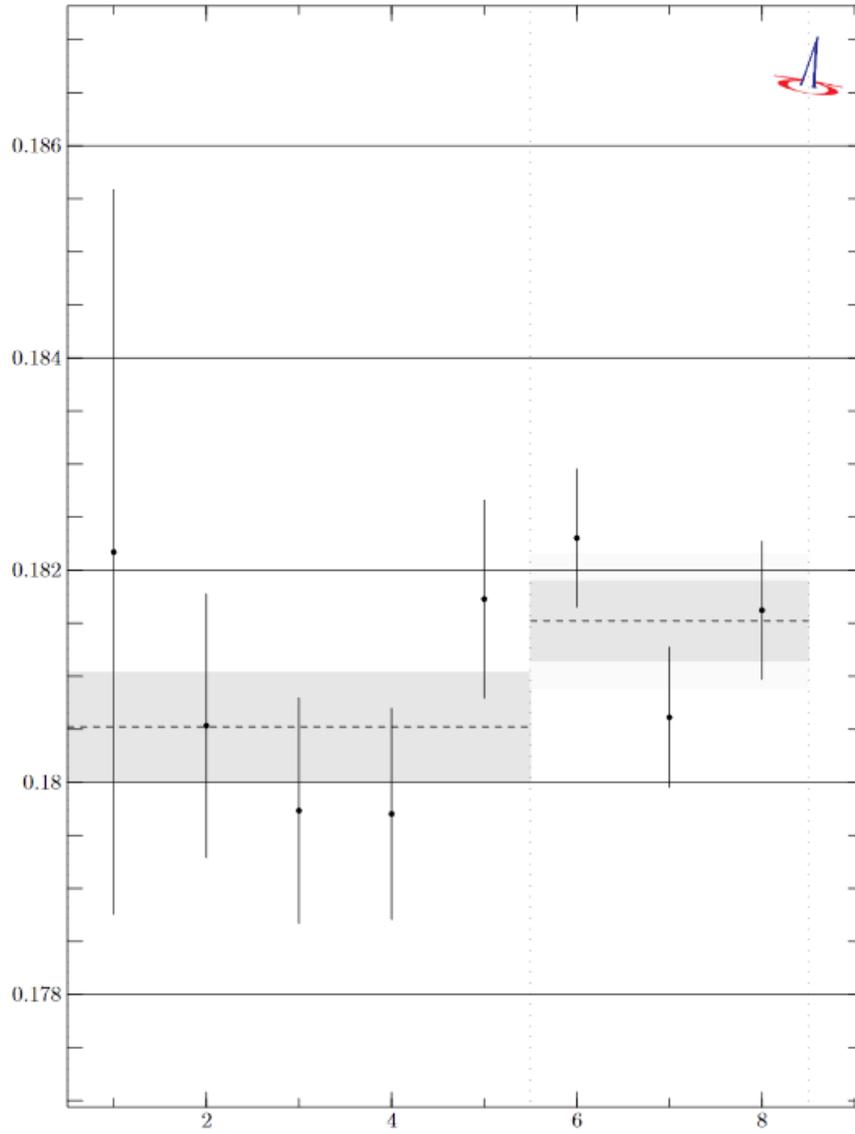


Рис. 6: График результатов интегрирования

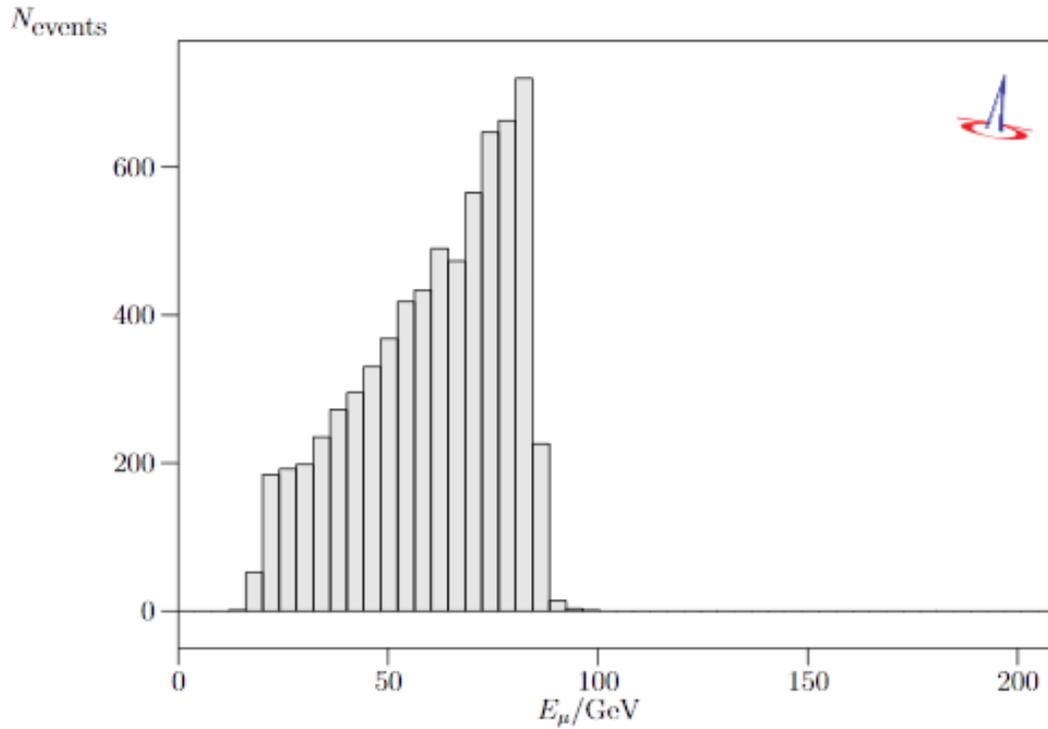
6.2. ОБРАЗОВАНИЕ МЮОНА

Следующий процесс иллюстрирует возможность анализа событий на примере получения энергии мюона.

```
model = SM
process cc10 = e1, E1 => e2, N2, u, D
mmu = 0
sqrts = 209 GeV
integrate (cc10) { iterations = 12:20000 }
luminosity = 10
$description =
"A WHIZARD Example. Charged current CC10 process from LEP 2."
$y_label = "$M_{\text{events}}$"
$title =
"Muon energy $E_{\mu}$ in $e^+e^- \to \mu^- \bar{\nu}_{\mu} u \bar{d}$"
$x_label = "$E_{\mu}/\text{GeV}$"
histogram e_muon (0 GeV, 209 GeV, 4)
analysis = record e_muon (eval E [e2])
simulate (cc10)
compile_analysis { $out_file = "cc10.dat" }
```

Muon energy E_μ in $e^+e^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu u\bar{d}$

A WHIZARD Example. Charged current CC10 process from LEP 2.



Data within bounds:

$\langle \text{Observable} \rangle = 60.57 \pm 0.22$ [$n_{\text{entries}} = 6781$]

All data:

$\langle \text{Observable} \rangle = 60.57 \pm 0.22$ [$n_{\text{entries}} = 6781$]

Рис. 7: Гистограмма энергий мюона

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа возможностей генератора следует, что WHIZARD - эффективная и многофункциональная программа для моделирования самых различных процессов, но всё же имеющая некоторые ограничения и недостатки. В дальнейшем имеет смысл более глубоко изучить различные аспекты генератора, такие как получение матричных элементов в аналитической форме, виды пользовательского интерфейса, параметризация фазового пространства, и другое. После этого станет возможно создать более полную картину универсальности и работоспособности MC-генератора WHIZARD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kilian W., Ohl T., Reuter J.* WHIZARD: Simulating Multi-Particle Processes at LHC and ILC. — In : Eur.Phys.J.C73, 2011. — P. 13.
2. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P.* PYTHIA 6.4 Physics and Manual. — JHEP0605, 2006. — P. 30.
3. *Kilian W., Ohl T., Reuter J.* WHIZARD: Simulating Multi-Particle Processes at LHC and ILC. — In : Eur.Phys.J.C73, 2011. — P. 33.