

УДК 539.121

*Е. С. Антонов*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**Первые результаты Монте-Карло моделирования
процесса $e^+e^- \rightarrow H(ZZ^*)$, $Z \rightarrow jj$ и $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-$ при
энергии 250 ГэВ на ILC**

Данная работа посвящена моделированию процесса $e^+e^- \rightarrow ZH$ с последующими распадами $H \rightarrow ZZ^*$, $Z \rightarrow jj$, $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-$ на будущем Международном Линейном Коллайдере (International Linear Collider, ILC). Соответствующий сигнал может быть измерен с помощью распределения по разности масс $M(jj\ell\ell) - M(jj) + M(Z)$ в области массы бозона Хиггса. С экспериментальной точки зрения разрешение сигнала будет включать в себя ширину Z -бозона, что тем не менее должно дать узкий пик в разности масс по сравнению с прямым измерением массы бозона Хиггса. Исследование данного канала может быть использовано для определения ширины, массы и констант связи бозона Хиггса.

Ключевые слова: Международный Линейный Коллайдер, МЛК, свойства бозона Хиггса, Монте-Карло моделирование.

*E. S. Antonov*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
National Research Nuclear University MEPhI**First results of MC studies of the process $e^+e^- \rightarrow H(ZZ^*)$,
 $Z \rightarrow jj$ and $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-$ at 250 GeV on ILC**

This paper is devoted to modeling the process $e^+e^- \rightarrow ZH$ with subsequent decays $H \rightarrow ZZ^*$, $Z \rightarrow jj$, $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-$ at the future International Linear Collider (ILC). The corresponding signal can be measured using the mass difference distribution $M(jj\ell\ell) - M(jj) + M(Z)$ in the Higgs boson mass region. From an experimental viewpoint, the resolution of the signal includes the width of Z boson, which nevertheless should give a narrow peak in the mass difference compared to a direct measurement of the Higgs boson mass. The study of this channel can be used to determine the width, mass, and coupling constants of the Higgs boson.

Key words: International Linear Collider, ILC, properties of Higgs boson, Monte-Carlo simulating.

1. Введение и предлагаемый метод исследования

На сегодняшний день Стандартная Модель физики элементарных частиц прекрасно согласуется со всеми экспериментальными результатами, полученными на коллайдерах. Последняя частица, предсказанная в рамках этой модели, – бозон Хиггса, была найдена на Большом Адронном Коллайдере (ЛHC) в июле 2012 г. [1]. Однако существует ряд указаний на неполноту Стандартной Модели.

© Антонов Е. С., 2019

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2019

Для поиска расширений Стандартной Модели был предложен проект Международного Линейного Коллайдера [2]. ИЛС будет представлять собой электрон-позитронный коллайдер, основанный на сверхпроводящих ускорительных технологиях с рабочей частотой 1,3 ГГц, обладающий высокой светимостью ($2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) [3]. Старт эксплуатации данного e^+e^- коллайдера намечен на конец 1920-х годов, однако на сегодняшний день уже активно ведется разработка физической программы исследований. Энергия пучков на старте эксплуатации коллайдера составит 250 ГэВ. При такой энергии возможен процесс $e^+e^- \rightarrow HZ$, с которым связана данная работа.

Для достижения необходимых результатов по всем заявленным физическим программам во всем диапазоне энергий центра масс (от 200 ГэВ до 1 ТэВ) разработаны два детектора, которые будут установлены на ИЛС: ILD (*International Large Detector*) и SiD (*Silicon Detector*) [4]. Физические возможности детекторов служат хорошей основой для восстановления энергий ливней с высоким разрешением. Для решения задач такого рода были разработаны методы реконструкции событий, основанные на методе потока частиц (*Particle Flow Approach*). Применяемые методы и алгоритмы позволяют добиться точности реконструкции порядка 3-4% для ливней энергии 100 ГэВ, что позволяет разделять конечные состояния W- и Z-бозонов. В данной работе реконструкция частиц проводилась на детекторе ILD.

На ЛНС наиболее чистым каналом распада бозона Хиггса является следующий 4-лептонный распад:

$$H \rightarrow Z(\ell_1 \ell_2) Z^*(\ell_3 \ell_4), \quad (1)$$

где $\ell = \mu$ или e .

В рамках ИЛС со светимостью $\sim 2 \text{ абарн}^{-1}$ данный процесс будет иметь малое число сигнальных событий: $6 \cdot 10^5 \cdot 0.026 \cdot 0.068 \cdot 0.068 \approx 70$ событий при $Bf(H \rightarrow ZZ^*) \sim 2.6\%$, $Bf(Z \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-) \sim 3.4\%$. Поэтому для достижения достаточного количества событий, необходимых для точного анализа, имеет смысл использовать следующий канал:

$$H \rightarrow Z(j_1 j_2) Z^*(\ell_1 \ell_2), \quad (2)$$

где струя (джет) $j = b, c, s, u, d$; а $\ell = \mu$ или e .

Данный канал имеет более высокую относительную вероятность за счёт распада Z в струи – $Bf(Z \rightarrow \text{адроны}) \sim 70\%$, что позволяет достичь увеличения числа событий примерно в 11 раз по сравнению с указанным выше наиболее чистым распадом, используемым на ЛНС, а конкретно ~ 800 событий. Стоит отметить, что при восстановлении данного процесса число событий сократится в связи с эффективностью идентификации лептонов алгоритмами реконструкции. Ожидаемый процент потерянных событий после восстановления составит $\sim 30\%$. Таким образом, фактическое число событий останется в районе 500, что также является достаточной статистикой для данного исследования. При этом, благодаря специфике ИЛС, процесс $H \rightarrow Z(j_1 j_2) Z^*(\ell_1 \ell_2)$ будет также довольно легко выделяться из фона. К тому же, имея два лептона с энергиями в районе 20–60 ГэВ, рожденных из Z^* , мы обеспечиваем сильное подавление фоновых событий.

Ключевым измерением данной работы является определение разности масс в области массы бозона Хиггса:

$$\Delta M = M(jj\ell\ell) - M(jj) + M(Z), \quad (3)$$

где $M(jj\ell\ell)$ – реконструированная масса бозона Хиггса, $M(jj)$ – реконструированная масса Z-бозона, $M(Z)$ – табличное значение массы Z-бозона.

Сигнальный пик разности масс должен быть узким и приблизительно соответствовать значению ширины Z-бозона $\Gamma_Z = 2.5 \text{ ГэВ}$. Вычитание реконструированной массы Z может частично устранить погрешности в восстановлении струй.

С помощью измерения инклюзивного канала $\sigma(HZ) \times Bf(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ станет возможно точно измерить константу связи g_Z , и, соответственно, из результатов данного измерения можно будет получить ширину распада бозона Хиггса Γ_H [5]:

$$\sigma(HZ) \times Bf(H \rightarrow ZZ^*) = C g_Z^4 \Gamma_H. \quad (4)$$

Константа C может быть вычислена с точностью менее 1%. Мы планируем достичь точности измерения полной ширины с использованием этого метода $\sim 5\%$ на образце с интегральной светимостью ~ 2 абарн $^{-1}$, набранном при энергии пучков в 250 ГэВ.

2. Моделирование и результаты исследования

Моделирование сигнальных событий представляет собой составление ряда программ (процессоров) с использованием специального программного обеспечения *ILCSOft*. В данной работе необходимо было провести стандартную реконструкцию сигнальных событий, включающую в себя:

- генерацию с помощью Монте-Карло генератора *WHIZARD 2.6*;
- моделирование отклика детектора в программном модуле *DD4hep*;
- реконструкцию треков в модуле *Marlin*;
- создание коллекции изолированных лептонов с помощью процессора *IsolatedLeptonTagging* и коллекции струй (джетов) при помощи процессора *JetClustering*.

Было решено выполнить стандартную реконструкцию для двух наборов данных по 5000 событий для проверки эффективности алгоритма, без натуральной ширины реального Z-бозона и с шириной. Стоит отметить, что эффективность отбора «быстрых» лептонов алгоритмом составила $\sim 70\%$. Для сбора струй был выбран алгоритм *Valencia* [6] с параметрами: $R = 2.0$, $\beta = 1.9$.

На основе полученных из моделирования данных были построены распределения массы Z-бозона $M(jj)$ на интервале $\sim [80 \text{ ГэВ}, 100 \text{ ГэВ}]$ и массы бозона Хиггса $M(jj\ell\ell)$. Данные распределения подгонялись в центральной области гауссовской функцией. Результаты подгонок можно увидеть на рис. 1. Ширины распределений имеют значения 6.3 ГэВ для массы Z-бозона и 5.8 ГэВ для массы бозона Хиггса. Широкие распределения обусловлены большими погрешностями при реконструкции струй. Отбирались события из интервала ± 10 ГэВ относительно номинальной массы Z-бозона 91.19 ГэВ.

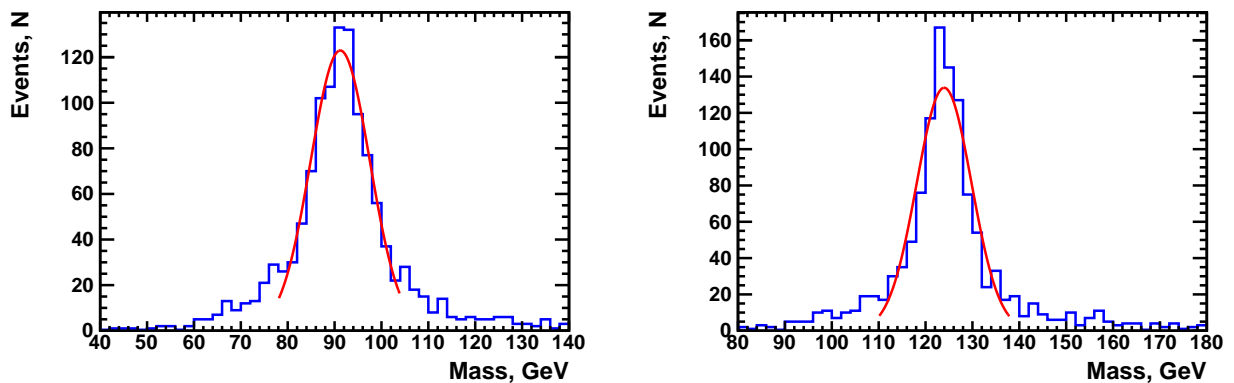


Рис. 1. (Слева) Инвариантная масса реконструированного Z-бозона. (Справа) Инвариантная масса реконструированного бозона Хиггса

На рис. 2 можно увидеть распределения разности масс для случая нулевой ширины реального Z-бозона (слева) и действительной ширины в 2.5 ГэВ реального Z (справа).

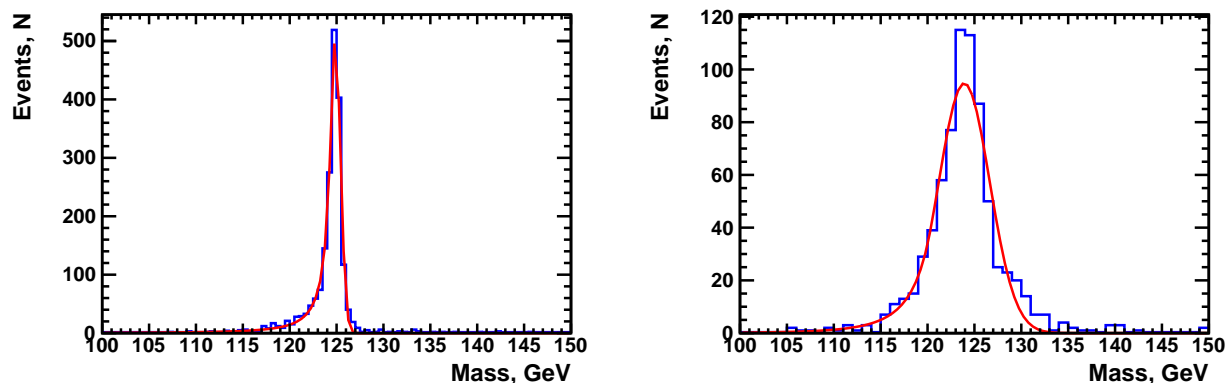


Рис. 2. (Слева) Разница масс для случая отсутствия действительной ширины у реального Z-бозона. (Справа) Разница масс для случая наличия действительной ширины у реального Z-бозона

На левом рисунке виден очень узкий пик шириной около 0,55 ГэВ, что говорит о явной работоспособности данного метода. Пик распределения с действительной шириной по-прежнему узкий, ширина $\sim 2,7$ ГэВ, что говорит о доминирующем вкладе натуральной ширины Z-бозона в неопределенность измерения ΔM . Распределения по разности масс подгонялись функцией Crystal Ball с параметрами (N, 125, 3, 2, 0,5). Необходимо понимать, что функция Crystal Ball только приближенно описывает это распределение и должна быть свернута с функцией Брейта–Вигнера для достижения лучших результатов в дальнейшем.

Выражаю благодарность моему научному руководителю А. Г. Друцкому за предоставление идеи исследования, возможность её развития и активное участие и помощь в продвижении данной работы. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (грант по постановлению правительства РФ №220, договор 14.W03.31.0026)

Литература

1. Aad G. [et al.]. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // Physics Letters B. 2012. V. 716. P. 1–29.
2. C. Adolphsen [et al.]. The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 3.I: Accelerator R&D. arXiv:1306.6353.
3. C. Adolphsen [et al.]. The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 3.II: Accelerator Baseline Design. arXiv:1306.6328.
4. T. Behnke [et al.]. The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 4. arXiv:1306.6329.
5. Друцкой А.Г. Эксперименты на линейном коллайдере ILC: ожидаемые результаты физических исследований // УФН. 2019. Т. 189. С. 478–493.
6. Marçà Boronat [et al.]. A new jet reconstruction algorithm for lepton colliders // B. Nuclear and Particle Physics Proceedings. 2014. V. 273–275. P. 2749–2751.

References

1. Aad G., et al., Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Physics Letters B. 2012. V. 716. P. 1–29.

2. *C. Adolphsen, et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 3.I: Accelerator R&D. arXiv:1306.6353.
3. *C. Adolphsen, et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 3.II: Accelerator Baseline Design. arXiv:1306.6328.
4. *T. Behnke, et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report. 2013. V. 4. arXiv:1306.6329.
5. *Drutskoy A. G.* Experiments at the ILC linear collider: expected physical results. *Phys. Usp.* 2019. V. 62 (5). DOI: 10.3367/UFNe.2018.07.038394
6. *Marça Boronat, et al.*, A new jet reconstruction algorithm for lepton colliders. *B. Nuclear and Particle Physics Proceedings.* 2014. V. 273–275. P. 2749–2751.

Поступила в редакцию 27.09.2019