

氏 名 青木 優美

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2311 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study of photon-associated Higgs production at the ILC and  
R&D for the ILD-TPC

論文審査委員 主 査 石川 明正

素粒子原子核専攻 准教授

田中 真伸

素粒子原子核専攻 教授

中浜 優

素粒子原子核専攻 准教授

栗原 良將

素粒子原子核専攻 講師

JEANS, Daniel Thomelin Dietrich

素粒子原子核専攻 准教授

藤井 恵介

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究

機構 加速器科学支援センター シニアフェロー

Junping Tian

東京大学 素粒子物理国際研究センター 助教

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 青木 優美

論文題目 Study of photon-associated Higgs production at the ILC and R&D for the ILD-TPC

The standard model (SM) of particle physics has been extremely successful in describing measurements at past and current collider experiments. There are, however, phenomena that cannot be explained by the SM. The Higgs boson is a powerful discovery tool for physics beyond the standard model (BSM) because the pattern of any deviation of the Higgs couplings to SM particles from SM predictions tells us the nature of the BSM physics. The International Linear Collider (ILC), a linear electron-positron collider, is an ideal machine to precisely measure the absolutely normalised Higgs couplings, thanks to the recoil mass technique usable only at lepton colliders. In order to precisely measure the Higgs couplings at a centre-of-mass energy of 250 GeV, where the  $W$ -fusion  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$  cross section is not large enough to model-independently determine the total Higgs decay width, we need to use the SM effective field theory (SMEFT).

It is desirable in SMEFT-based Higgs coupling analysis to improve the precision of the  $h\gamma Z$  coupling, which has not yet been measured precisely. In part 1 of this thesis, we present a world-first full simulation study of the  $e^+e^- \rightarrow h\gamma$  process using a realistic model of the International Large Detector (ILD), which is one of the detector proposals of the ILC, to study the feasibility to constrain the SMEFT  $h\gamma Z$  coefficient,  $\zeta_{AZ}$ .

We generated the signal events and 2-fermion and 4-fermion backgrounds at a centre-of-mass energy of 250 GeV with an integrated luminosity of  $900 \text{ fb}^{-1}$  each for beam polarisation combinations:  $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (-0.8, +0.3)$  and  $(+0.8, -0.3)$ . The simulated events were fed into a full reconstruction chain from detector signals to reconstructed 4-vectors. The reconstructed events were analysed in the following two Higgs decay modes:  $h \rightarrow b\bar{b}$ , and  $h \rightarrow WW^*$  semi-leptonic channels. The signal significance was estimated after the event selection combining cut-based analysis and multi-variate analysis using TMVA.

The estimated combined signal significances are 0.40 and 0.06 for  $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (-0.8, +0.3)$  and  $(+0.8, -0.3)$ , respectively. This result shows that if there is no BSM contribution the  $e^+e^- \rightarrow h\gamma$  process is much more difficult to observe than expected. We thus put upper limits on the cross section of this process. The expected combined 95% C.L. upper limits for fully polarised cross sections:  $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (-1.0, +1.0)$  and  $(+1.0, -1.0)$  are  $\frac{\sigma_{h\gamma}^L}{\sigma_{SM}^L} < 5.0$  and  $\frac{\sigma_{h\gamma}^R}{\sigma_{SM}^R} < 61.9$ , respectively. The corresponding 95% C.L. limit

on  $\zeta_{AZ}$  is  $-0.020 < \zeta_{AZ} < 0.003$ . Our expected limits turned out to be rather weaker than naively expected.

A charged particle tracker with high momentum resolution is essential for precision Higgs measurements, particularly the cross section measurement using the recoil mass technique. The main tracker of the ILD is a Time Projection Chamber (TPC), and the end-plane readout modules that can achieve high enough momentum resolution are being developed. We describe R&D of the ILD-TPC in part 2 of this thesis.

Precision momentum measurement requires good spatial resolution in both  $r \phi$  (transverse) and  $z$  (longitudinal) directions. In order to achieve the required spatial resolutions, it is essential to prevent positive ions generated by gas amplification in the TPC's end-plane readout modules from flowing back into its drift volume. To block these positive ions, we have developed a gating device with an optical aperture of 80% in collaboration with FUJIKURA company.

We carried out the world-first beam test of a prototype end-plane readout module with our gating device at DESY, which has a large prototype of ILD-TPC, and evaluated its performance in terms of spatial resolution. For the experiments, we used the 5 GeV electron test beam and acquired data under a magnetic field of 1 T. We took test beam data with and without the gating device. We decoded the collected data into detector coordinates, estimated hit positions by combining the pulses readout into rows of readout pads, and collected hits belonging to a single track and fit them to a helix. We then look at the residual between the hit position and reconstructed track position in each pad row to estimate the spatial resolutions.

Extrapolation of the prototype results to a full-scale ILD-TPC shows that the spatial resolution requirements, better than 100  $\mu\text{m}$  in the  $r \phi$  and 4 mm in  $z$  directions, are achievable over the full drift length of 2.2 m with a magnetic field of 3.5 T with our gating device. In the course of this study, we tried various methods of coordinate estimation and calibrations, details of which are also described.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 青木 優美

論文題目 Study of photon-associated Higgs production at the ILC and R&D for the  
ILD-TPC

本論文は現在計画されている国際リニアコライダー (ILC) における二つの研究からなる。一つはヒッグス粒子と光子の対生成  $e^+e^- \rightarrow H\gamma$  のフルシミュレーションによる感度の研究であり、もう一つは ILD 実験での中央飛跡検出器となる TPC 検出器でのイオンがドリフト領域に漏れる事を防ぐゲートシステムの評価である。

ヒッグス粒子が光子と Z 粒子に結合する際にはループを介する。そのループの中に標準模型を超える物理新粒子が回る可能性がある。先行研究では CEPC 実験で  $e^+e^- \rightarrow H\gamma$ ,  $H \rightarrow bb$  を用いてジェネレーターレベルの分布から感度の決定を行ったが、発見する事が出来ないと結論づけた。HL-LHC 実験においても、ヒッグス粒子の崩壊  $H \rightarrow Z\gamma$  を用いて探索可能であるが、現在の見積もりでは発見は難しい。本論文では ILD 検出器でのフルシミュレーションを用いて探索感度を見積もった。重心系エネルギー 250 GeV で電子・陽電子ビームを右巻き偏極と左巻き偏極にさせ、 $e^+e^- \rightarrow H\gamma$ ,  $H \rightarrow bb$  と  $H \rightarrow WW$  を生成した。基本的な運動学的変数による選別の後に、多変数解析を用いた背景事象抑制を行い、その感度を断面積と標準模型有効理論の係数  $\zeta_A$ ,  $\zeta_{AZ}$  への制限として導出した。残念ながら HL-LHC による測定精度との比較では、その測定精度を大きく改善するものではなかったが、これは世界で始めて得られた知見である。

TPC 検出器のゲートシステムは荷電粒子通過により生成された電子を通過させ、増幅段階で出てくるイオンを止める役割を持つ。FUJIKURA との共同開発によるゲートを用いてビームテストを行い、ゲートが TPC の性能に与える影響を明らかにした。読み出しパッドの応答関数や拡散係数を詳細に調べることにより、位置分解能を電子数、拡散係数とドリフト距離の関数として求めた。Z 方向の位置分解能の測定がシミュレーションと合わない事を詳細に考察し、回路のパルス整形時間が設計値からズレている事に起因していることを突き止めた。最終的に、ゲートにより十分な効率で電子を通過させることがわかり、また位置分解能に関しては電子の拡散が十分大きくなるセットアップを導入すれば、実機サイズの TPC においても要求性能を満たすことを示した。

以上のように二つの研究は世界で初の結果であり、今後の ILC の建設に向けて重要な知見となる。本論文は適切な英語で記述され、審査においても英語で発表し質問に回答していた。以上により、本論文は博士論文に必要な水準を満たし、学位の授与に値すると判断した。