

氏 名 小川 智久

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2034 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28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 Sensitivity to anomalous VVH couplings induced by  
dimension-6 operators at the ILC

論文審査委員 主 査 講師 大森 恒彦  
教授 野尻 美保子  
准教授 JEANS, Daniel Thomelin Dietrich  
講師 杉本 康博  
教授 藤井 恵介  
特任助教 Junping Tian  
東京大学 素粒子物理国際研究センター

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full

Tomohisa Ogawa

Title

Sensitivity to anomalous VVH couplings  
induced by dimension-6 operators at the ILC

The Standard Model (SM), which is comprised of the Glashow-Weinberg-Salam theory describing electro-weak interaction based on  $SU(2)\times U(1)$  gauge symmetry, quantum chromodynamics representing strong interaction based on  $SU(3)$  gauge symmetry, where the Higgs mechanism has a critical role for giving rise to mass to matter and gauge particles, has successfully interpreted phenomena which are observed in reality in the field of elementary particle physics. However, several phenomena which have not been included in the SM yet are known such as dark matter, neutrino mass and so on. Therefore, the SM must be expanded to explain more observation, which is called beyond the SM (BSM). In 2012 the SM-like Higgs boson was discovered at the Large Hadron Collider (LHC) and the SM was completed through verifications afterwards. At the same time, we entered a new phase where we do not have a clear map like the SM to lead us to the BSM, and we expect that one of the hints exists in the discovered Higgs boson.

A lot of BSM models, such as a general extension of the SM and a super symmetry model, predict that Higgs couplings to the SM particles would be shifted because of mixing and corrections originating from a new heavier particle and such variation will appear with a specific pattern from the SM expectations, or these models require new Lorentz structures for describing new interactions between the Higgs boson and the SM particles. Therefore, the most important task for elementary particle physicists is to explore and verify the structures relevant to the Higgs boson and those couplings. One theoretical framework for exploring the Lorentz structures, which is rather physics driven, is to employ an Effective Field Theory (EFT) where it is possible to introduce higher dimension field operators which satisfy the gauge invariance and are restrained with inverse power of a new physics scale. The EFT can verify the structures more model-independently compared to the traditional  $\kappa$ -framework. Furthermore, measurements which are not related to the Higgs boson can also effectively contribute to constraining the Higgs related Lorentz structures in the EFT.

In this thesis, we focus on the couplings and the structures between the Higgs boson and the vector bosons,  $\gamma$ ,  $Z$ , and  $W$ , which are a critical part in the Higgs sector of the SM, especially responsibility for the mass generation. By introducing relevant dimension-6 field operators to the VVH ( $V = \gamma, Z, \text{ and } W$ ) couplings under the EFT, an effective Lagrangian is given, which naturally includes the anomalous VVH couplings after imposing the symmetry breaking. Effects coming from these anomalous VVH couplings will appear in cross-sections of corresponding processes and kinematical shape distributions as deviations from the SM expectations. We expect that the future International Linear Collider (ILC) can perform measurements for these anomalous VVH couplings very precisely.

To evaluate the reachable sensitivity to these anomalous VVH couplings at the ILC, full detector simulation was performed at both operation energies of  $\sqrt{s} = 250$  and  $500$  GeV using the International Large Detector (ILD) model, which is one of the detector concepts of the ILC. The evaluation was done by analyzing all Higgs production processes such as Higgs-strahlung, ZZ-fusion, and WW-fusion, and also the decay channel of  $H \rightarrow WW$ , where all SM background are also considered. To evaluate the variation of the kinematical shape distributions, a detector response function is considered, which can describe smearing effects derived from detector resolution and physical effects. The response function can apply to any generated distributions to transfer the distribution to the detector-level distribution. The beam polarization, which is one strong point of the linear collider, can also give impact on disentanglement of  $\gamma$  and  $Z$  by exploiting the physics that the gauge fields  $B$  and  $W^3$  differ in their interactions, and give the sensitivities to both of the anomalous ZZH and  $\gamma$ ZH couplings. It turned out, as our results, that the reachable sensitivities to the anomalous VVH couplings, assuming a certain ILC full operation program, are 0.55%, 0.17%, and 0.27% for the anomalous ZZH couplings of  $\eta_Z$ ,  $\zeta_{ZZ}$ , and  $\zeta_{tZZ}$ . The reachable sensitivities to the anomalous  $\gamma$ ZH couplings are less than 0.06% for both  $\zeta_{AZ}$  and  $\zeta_{tAZ}$ . The reachable sensitivities to the anomalous WWH couplings are respectively 0.45%~0.80%, 0.88%~1.72%, and 4.40% for  $\eta_W$ ,  $\zeta_{WW}$ , and  $\zeta_{tWW}$ .

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 小川 智久

論文題目 Sensitivity to anomalous VVH couplings induced by dimension-6 operators at the ILC

本博士論文は、国際リニアコライダー (ILC) 実験の、ヒッグスボソン ( $H$ ) と電弱ゲージボソン ( $V=Z, \gamma, W$ ) 間の相互作用 ( $VVH$  結合) に現れると期待される標準理論を超える物理に起因する異常結合に対する感度を、次元 6 演算子までを含めた有効場理論の枠組みで評価したものである。評価には、International Large Detector (ILD) 測定器のフルシミュレーションを用いて検出効率、測定器応答の効果を取り入れ、ILC での関連する単一ヒッグス生成過程 ( $e^+e^- \rightarrow ZH, e^+e^-H, \nu\bar{\nu}H$ ) の全てを包括的に解析し同時フィットする手法が用いられており、世界でもこれまでに例を見ない大変意欲的な仕事である。異なるローレンツ構造を持つ相互作用演算子寄与を分離する際の角分布解析の重要性を明確化し、例えば  $Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu}H$  型の異常結合について、ルミノシティ増強後の LHC (HL-LHC) と比較して一桁以上の感度の向上が期待できることを示した。また  $Z_{\mu\nu}\tilde{Z}^{\mu\nu}H$  異常結合の研究によりヒッグスセクターに於ける CP 対称性の破れを観測出来る新しい可能性を示した。

有効場理論による解析は、250 GeV データのみで主要なヒッグス結合定数の絶対測定を可能とするものとして、国際素粒子実験コミュニティによる ILC 計画の 250 GeV ヒッグスファクトリーへの見直しの際の鍵となったが、本研究の成果はその際の入力として重要な役割を果たした。このことにより、小川氏はリニアコライダー計画の国際推進組織であるリニアコライダーコラボレーション (LCC) 物理作業部会による「250 GeV ILC の物理の意義」に関する報告書の著者の一人となっている。

本研究については、小川氏本人が、リニアコライダーに関する国際ワークショップ (LCWS 2015, 2016, 2017) のみならず、メジャーな国際会議 EPS2017 や ICHEP2018 において英語で発表しており、その内容は英文のプロシーディング等の形で公表済みである。特に ICHEP2018 での発表は、LCC 物理作業部会代表として本研究の内容も含めて、250 GeV ILC でのヒッグス精密測定に関する包括報告として行ったものである。さらに、本研究の内容をまとめた投稿論文を準備中であるが、その一部は、共著論文として既に論文誌 (Phys. Rev. D97, 053003, 2018) に掲載されている。

博士論文には、研究の動機となる物理の目標と先行研究との違い、有効場理論、異常結合の観測量への現れ方、検出効率や測定器応答に関わる補正、異常結合間の相関や角分布と生成断面積の絶対値の異常結合決定への寄与の違い等が丁寧に説明しており、博士論文が複数かけるほどの内容を含んでいる。以上のように、小川氏による本学位論文は、高い学術的意義を有する

ものと認め、審査員全員一致で本博士論文審査を合格とした。