

# 論文の要旨

氏名 川田真一

## 論文題目

Study of Higgs boson decays to tau pairs at the International Linear Collider  
(国際リニアコライダーにおけるヒッグスボソンのタウ対崩壊の研究)

素粒子物理学とは、物質の根源的要素とそれらの間の相互作用を探求する学問のことである。今日、我々は標準理論と呼ばれる理論を構築している。標準理論はゲージ原理とヒッグス機構に基づいている。ゲージ原理は、ラグランジアンが局所ゲージ変換に対して不変であることを要求し、相互作用の形が決定される。ラグランジアンが不変であるためには粒子の質量が 0 でなければならない。しかしこの結果は現実と矛盾しており、粒子が質量を獲得するための何らかの機構が必要である。そこで導入されたのがヒッグス機構である。ヒッグス機構はゲージ対称性の自発的破れによって粒子に質量を与える。ゲージ原理とヒッグス機構に基づいた標準模型の枠組みは 1970 年代に完成し、現在までの素粒子実験の結果をほぼ矛盾なく説明できる。しかし、ヒッグス機構が存在を预言するヒッグスボソンはまだ発見されていなかった。

2012年7月4日、欧州原子核研究機構(CERN)で運転されている Large Hadron Collider (LHC) での実験において、質量が  $125 \text{ GeV}/c^2$  程度であるヒッグスボソンらしき粒子が発見されたという報告がなされた。ヒッグスボソンの発見によって標準理論の枠組みが完成した。

しかし、標準理論の完成は素粒子物理学の完成を意味するものではない。標準理論は過去の様々な実験結果をほぼ矛盾なく説明できるが、その一方で、標準理論では説明できない現象も存在する。その例としては、ダークマターやダークエネルギーの存在が挙げられる。最新の観測結果によれば、我々が住む宇宙は 4.9%の物質粒子、26.8%のダークマター、68.3%のダークエネルギーによって構成されている。また標準理論は電磁気力・弱い力・強い力を記述するが、重力は含まれていない。さらに、標準理論は不自然さの問題も内包している。ヒッグスボソンは量子補正に対して不安定であり、ヒッグスボソンの質量を観測された  $125 \text{ GeV}/c^2$  にするには理論のパラメータに非常に不自然な精度の調整が必要である。以上のように、標準理論が完成しても、未解決の問題がいくつも残っている。これらの問題を解決するには標準模型を超える新しい物理が必要であり、それを研究するには新しく見つかったばかりのヒッグスボソンを精密に調べることが重要であると考えられている。

標準理論では、ヒッグスボソンとフェルミオンおよびゲージボソンとの結合定数は粒子の質量に比例する。しかし標準模型を超える新物理が存在すると、標準模型の示す比例関係から乖離する。その度合いは新物理のモデルによって様々であるが、多くのモデルでは数%程度であると見積もられている。ゆえに、ヒッグスボソンとの結合定数を数%

以下の精度で測定することで、新物理の存在を間接的に見出すことができる。

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) は、次世代の高エネルギー線形衝突型加速器として計画されている加速器である。ILC では電子と陽電子とを衝突させてその反応を測定する。LHC では複合粒子である陽子と陽子を衝突させるため、反応が非常に複雑であり、精密測定を行うのは難しい。反面 ILC で用いる電子と陽電子は素粒子であり、それらの衝突反応は陽子 - 陽子衝突に比べて単純なため、反応の精密な測定が可能である。ILC はその特徴を活かして、ヒッグスボソンの性質の精密測定が可能である。

本論文では、ヒッグスボソンのタウレプトン対崩壊 ( $h \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ) について議論する。タウレプトンはその質量が精度よく測定されており、測定結果と理論との比較が高精度で可能である。またタウレプトンはミューオンや電子よりも質量が重く、ヒッグスボソンのタウレプトン対崩壊の分岐比が他のレプトンに比べて大きく、高統計の測定が可能である。

過去に電子陽電子衝突によるヒッグスボソンのタウレプトン対崩壊の測定精度を、シミュレーションを用いて検討が行われた例は、いくつか存在する。しかしこれらの検討においては、信号事象のみを考慮し背景事象を考慮していなかったり、発見されたヒッグスボソンとは異なる質量を仮定していたり、現実には即したものではないという問題があった。そこで本研究では、できるだけ現実に即した条件で ILC におけるヒッグスボソンのタウレプトン対崩壊の検討を行い、標準理論を超えた物理の現象論的研究に対して ILC の性能として参照されるデータを提供することを目指した。

本研究では、ヒッグスボソンの質量を  $125 \text{ GeV}/c^2$ 、ヒッグスボソンのタウ対崩壊分岐比 ( $\text{BR}(h \rightarrow \tau^+ \tau^-)$ ) を 6.32%、電子 (陽電子) ビームの偏極を -0.8 (+0.3)、重心エネルギーと積分ミノシティの組み合わせを ( $250 \text{ GeV}$ ,  $250 \text{ fb}^{-1}$ )、( $500 \text{ GeV}$ ,  $500 \text{ fb}^{-1}$ ) と設定した。重心エネルギーと積分ミノシティの組み合わせの値は ILC の技術設計書 (Technical Design Report, TDR) で提唱されている値である。250 GeV ではヒッグス随伴生成過程 ( $e^+ e^- \rightarrow Zh$ ) が、500 GeV では W ボゾン融合過程 ( $e^+ e^- \rightarrow \nu \bar{\nu} h$ ) がヒッグスボソンの主な生成過程である。

まず、信号事象と背景事象の疑似事象 (モンテカルロ事象、以下 MC) サンプルを十分な統計量となるように作成した。次にこれらの MC サンプルを、ILD 測定器モデルによる詳細測定器シミュレーションに通して測定器を精密に考慮した。ILD (International Large Detector) 測定器とは ILC における測定システムの 1 つとして提案されているものである。

重心エネルギー 250 GeV における解析では、 $e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} h$ 、 $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- h$ 、

$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- h$  の 3 つのモードを検討した。 $q \bar{q} h$  モードではタウレプトンの再構成アルゴリズム、タウレプトン対不変質量補正のための collinear 近似、およびジェットクラスタリングを適用して事象再構成を行った。他 2 つのモードでは電子/ミューオンの再構成、タウの再構成および collinear 近似を行った。事象選別では、まず最適化を行う前に事前の選別を適用し、多変量解析プログラム (TMVA) によって最適化を行った。その結果、3 つのモードそれぞれに対して (生成断面積)  $\times$  (崩壊分岐比) の測定精度が 3.4%、14.4%、11.3% に達するという結果を得た。

重心エネルギー500 GeVにおける解析では、 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$ と $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ の2つのモードを検討した。 $q\bar{q}h$ モードの事象再構成は250 GeVの場合とほぼ同じ要領で行い、 $\nu\bar{\nu}h$ モードではタウレプトンの再構成のみを行った。事象選別の最適化には同じくTMVAを使用し、2つのモードに対して（生成断面積） $\times$ （崩壊分岐比）の測定精度がそれぞれ4.6%、6.9%を得た。

また、最近提唱されたILCの新しい運転シナリオについても検討を行った。その結果、ILCの性能向上を見込んだ完全な運転を想定した場合、（生成断面積） $\times$ （崩壊分岐比）は精度1.0%で測定できると期待されることが分かった。

さらに、崩壊分岐比単体での測定精度の評価も行った。ILCでは、 $e^+e^- \rightarrow Zh$ 過程の生成断面積は反跳質量法を用いて独立に測定することが可能である。これらの検討によれば、TDRシナリオでは精度（ $\Delta\sigma/\sigma$ ）2.6%で、性能向上運転では1%以下の精度で測定することが可能である。これらの結果と本論文で得られた結果を用いることで、ヒッグスボゾンのタウレプトン対崩壊分岐比の測定精度が評価できる。その結果、TDRシナリオでは精度3.6%で、性能向上運転では精度1.4%で崩壊分岐比が測定できるという結果を得た（ $\Delta\sigma/\sigma$ を1.0%と仮定）。

結論として、本研究ではILCにおけるヒッグスボゾンのタウレプトン対崩壊モードを、現実に即した設定で検討を行った。可能な性能向上運転を仮定した時、（生成断面積） $\times$ （崩壊分岐比）は精度1.0%で、崩壊分岐比は精度1.4%で測定が可能であることを示した。本研究の結果はILCによって期待される精度を示しており、標準理論を超えた物理に関する現象論的研究においてILCから得られる一次情報として参照されるものである。