

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22244031

研究課題名(和文)電子・陽電子リニアコライダーとテラスケールの物理

研究課題名(英文)Electron Positron Linear Collider and Tera-scale Physics

研究代表者

藤井 恵介(FUJII, Keisuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：30181308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、LHCの結果を踏まえ、テラスケールの物理の全容解明のため電子・陽電子リニアコライダー(ILC)が果たすべき役割を明確化しILCが取るべき具体的物理研究戦略を確立、もってILC計画早期実現に供することにある。本研究によって、ILCでは、3つの主要プローブ：ヒッグス、トップ、新粒子直接探索により、LHCから得られる知見を質的に新しい段階へと押し上げる重要な情報を提供する研究が可能となることが明らかになった。本研究で得られた成果は、ILC技術設計書物理の巻の中核をなし、欧州戦略、米国戦略(スノーマス研究)の策定のための入力として重要な役割を果たし、ILC計画実現に向け大きく貢献した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at clarifying the role to be played by the electron positron linear collider (ILC) for the full elucidation of Tera-scale physics, based on the experimental knowledge from the Large Hadron Collider (LHC), thereby establishing the ILC physics case and strategy for early realization of the ILC. In this research project, it became clear that the three major probes available at the ILC: Higgs, top, and direct search for new particles would provide promising physics potential to advance the knowledge from the LHC to a qualitatively new stage. The results obtained in this research comprise core part of the physics volume of the ILC technical design report and have served as important inputs to formulate the European and the American strategies (Snowmass study), thus made significant contribution to the promotion of the ILC project.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：電弱対称性の破れの研究 質量生成機構の研究 ヒッグス粒子の精密測定 超対称性粒子の研究 暗黒物質の研究

1. 研究開始当初の背景

本研究の実施期間は LHC の運転が開始され、テラスケールの物理の概要が見え始める時期にちょうど重なり、ヒッグス粒子探索等の LHC 結果を踏まえ、ILC 実験のための物理戦略の策定、加速器の技術設計の完成を成し遂げ、ILC 計画の正式提案へとつなげるべき特別な時期となることが予想されていた。

2. 研究の目的

素粒子物理学の喫緊の課題は、「電弱対称性の破れと質量生成機構」を解明し、「テラスケールにあると期待される新しい物理」の扉を開くことにある。本研究は、LHC の結果を即時取り入れ、テラスケールの物理の全容解明のため電子・陽電子リニアコライダーが果たすべき役割を明確化するとともに、ILC が取るべき具体的物理研究戦略を遅滞なく確立し、ILC 計画早期実現に供するものである。

3. 研究の方法

上記二つの大目標に対応し、「電弱対称性の破れと質量生成機構」を中心に検討するグループと「標準模型を超える物理の直接探索」を中心に検討するグループの2グループ編成で研究を進めた。それぞれに理論と実験のリーダーを配し、広く国内外から協力研究者を集め、主要な検討項目毎に複数の検討チームで研究を行い、代表者および専任の科研費で雇用した研究支援者で成果の整理統括を行った。リーダーは、各々、長年リニアコライダー物理の理論的実験的研究を世界的に主導してきた専門家であり、それら第一線の専門家による理論と実験の緊密な連携が本研究組織の特徴である。

専任研究支援者は、全体に共通するバックグラウンド物理過程のモンテカルロ・データ大量生成と管理、事象生成プログラムやジェット事象再構成ソフト等の共用ツール開発にも従事した。代表者、リーダー、専任研究支援者を中核にして研究の進捗状況を2ヶ月に1回程度の全体ミーティングで検討し、LHC からの新しい結果を踏まえて、適宜、チームの再編強化、軌道修正を行った。

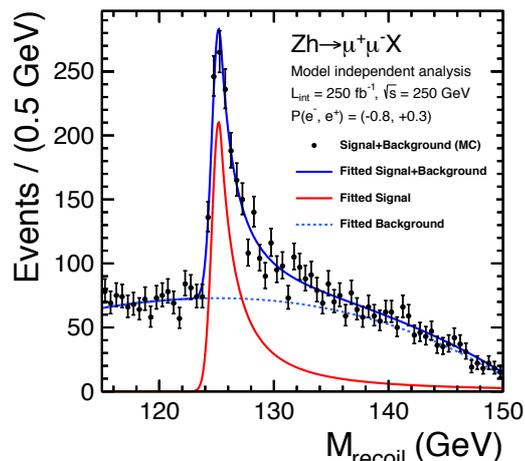
4. 研究成果

本研究で ILC における物理研究の戦略を検討する中で、電弱対称性の破れと質量生成機構の全容解明、そして標準模型を超える物理の探索を行うための主要な手段として、LHC で発見されたヒッグス粒子 H(125)、標準模型の粒子の中で最も質量の大きいトップクォーク、そして電子・陽電子衝突の提供するクリーンな実験環境を活かした感度の高い新粒子直接探索の重要性を再確認することになった。以下、本研究で得られた、この3つの手段を使った ILC 物理の戦略を概説する。

(1) ヒッグスの物理

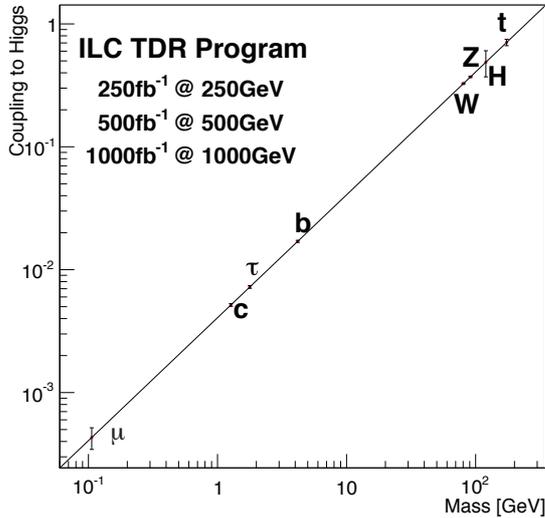
2012年のLHCによるヒッグス粒子発見は、ILC

物理戦略の方向性を決定づけた。ヒッグス場が真空中に凝縮することで電弱対称性が破れ、真空中に凝縮したヒッグス場との相互作用によって質量が生ずるとする標準模型の質量生成機構が確かめられた。しかし、真空中に凝縮する場が標準模型通りである保証はなく、とりわけ「なぜヒッグス場が真空中に凝縮したのか？」という根本的な謎が残っている。この謎の答えは標準模型の中にはない。ヒッグス粒子の精密測定を通して標準模型を超える物理を探るのが ILC の第一義的目的である。LHC でヒッグス質量が約 125GeV と定まったことで、ヒッグス粒子に関する様々な測定フルシミュレーションによる精密評価が可能になった。本研究では、まず、重心系エネルギー 250GeV でのヒッグス粒子生成反応： $e^+e^- \rightarrow ZH$ の反跳質量法による断面積測定、同反応を介した様々なヒッグス崩壊過程に対する断面積×崩壊分岐比測定のフルシミュレーションを行った。反跳質量法では、Z 粒子のレプトン対への崩壊を測定することで、ヒッグス崩壊を全く見ずにヒッグス生成を検出でき、ヒッグスの崩壊モードによらず断面積を絶対測定できる点が決定的に重要である（下図は反跳質量法によるヒッグス粒子の質量分布のシミュレーション例）。



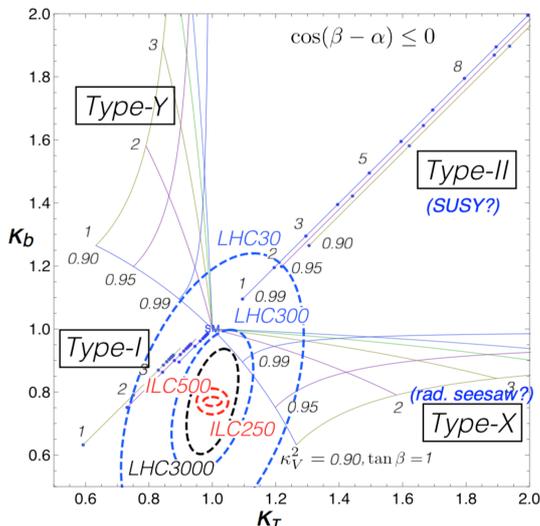
こうして得られた断面積から、崩壊分岐比がモデル非依存に決まる。また、エネルギーとともに断面積が増え 500GeV では ZH 生成を上回る WW 融合反応： $e^+e^- \rightarrow \nu\nu H$ についても断面積×崩壊分岐比測定のフルシミュレーションを行った。この反応は、 $e^+e^- \rightarrow ZH$ 測定と組み合わせることでヒッグス粒子の全崩壊幅のモデル非依存な決定を可能とする。こうして全崩壊幅と崩壊分岐比から部分崩壊幅が決まり、ヒッグス粒子と他の種々の粒子との結合定数がモデル非依存に決まる。これは、LHC では不可能である。トップ湯川結合はヒッグス崩壊では測定できないため、 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ 反応を使う。本研究では、ILC でのヒッグス結合定数の測定戦略を確立するとともに、期待される測定精度をヒッグスの主要な結合定数全てについて網羅的に評価した。ルミノシティ測定やビーム偏極測定、b-クォーク等

のフレーバー同定における実験的系統誤差や、パラメータ不定性や高次補正に起因する理論誤差の評価にも踏み込んだ。これらの結果は ILC 技術設計書 (TDR) 物理の巻[1]、ヒッグス白書[2]の中核をなしている。下図は標準模型の場合の質量とヒッグス結合の関係を期待される測定誤差とともに示したものである。



対数表示では、大部分のヒッグス結合について誤差棒はほとんど見えない。これは ILC の高い精度を示している。この結果が LHC では不可能なモデル非依存解析によるものである点を再度強調しておきたい。

このヒッグス結合と粒子質量の比例関係は、質量生成に関するヒッグス場が構造を持たないスカラー二重項一つという標準模型のヒッグスセクター（電弱対称性を破る機構）の特徴を反映している。ヒッグスセクターの多重項構造がより複雑であったり、ヒッグス場が複合場であったりすれば、直線からのずれが生じる。ずれのパターンは標準模型を超える物理によって異なる。下図は、二重項二つを持つ拡張ヒッグス模型の4つのタイプについて τ 粒子、 b -クォークとヒッグス粒子の結合に現れるずれのパターンと LHC および ILC でのそれらのずれへの感度 (68%CL) を比較した例である [3]。



この例を始め、本研究では ILC でのヒッグス結合測定による様々な新物理のモデル選別の戦略を明らかにした。ヒッグス場が複合場である場合、すなわちヒッグス粒子が複合粒子である場合には、ずれは全ての粒子に対して結合定数が小さくなる方向に生じると期待される。ヒッグス粒子が複合粒子であれば、その構成子からなる他の複合粒子が存在するはずである。それらの複合粒子の典型的な質量が大きいほど、ずれの大きさは小さくなる。本研究で、LHC のこれらの複合粒子直接探査と ILC でのヒッグス結合のずれを測ることによる間接探査が相補的であることが明らかになった。

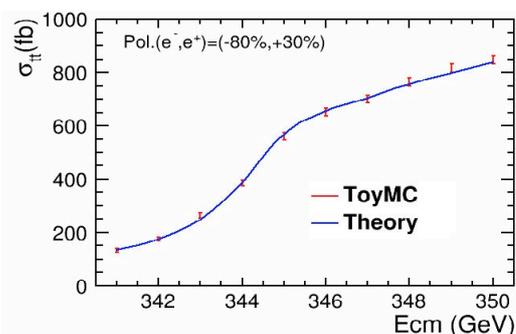
電弱対称性の破れで重要なもう一つの問題は、それが一次相転移であったのか二次相転移であったのかという問題である。この問題の鍵となるのがヒッグス粒子の3点自己結合の測定である。3点自己結合の存在の確認は、ヒッグス場を真空に凝縮させた新しい力の確認という意味で、それ自身、大変重要である。本研究では、500GeV および 1TeV での $e^+e^- \rightarrow ZHH$ 反応、1TeV での $e^+e^- \rightarrow \nu\nu HH$ 反応の詳細なフルシミュレーション研究を初めて行った。そこでは、バックグラウンド振幅による信号振幅の希釈効果による感度低下問題の存在を明らかにするとともに、自己結合に対する感度を最適化するための新しい事象荷重法や、新しいフレーバー同定アルゴリズムを開発した。これらの解析手法の大幅な改善により、標準模型の場合、500GeV で自己結合を 3σ で確認、1TeV では、10%にせまる精度で自己結合測定が可能であることを示した。一方、理論チームは、宇宙のバリオン数が電弱スケールで生成されるシナリオでは、ヒッグス3点自己結合の大きなずれが予想されることを明らかにした。これは、コライダー実験における宇宙のバリオン数生成問題の直接検証の可能性を示したものとして大変重要であり、本研究の特長である理論実験合同チームならではの成果である。

最も低いエネルギーでヒッグス3点自己結合に直接感度を持つ反応は、光子・光子衝突: $\gamma\gamma \rightarrow HH$ 反応である。本研究では、この反応についても初めて本格的な測定器シミュレーションを行った [4]。

(2) トップクォークの物理

標準模型ではヒッグス粒子と物質粒子の結合は質量に比例する。トップクォークは、標準模型の粒子群の中で最大の質量を持ち、よって、電弱対称性の破れの物理と深く関係すると期待される。特に、トップクォークはヒッグス4点自己結合にも大きな影響を与えることが知られている。ヒッグス4点自己結合の大きさはエネルギーとともに変化するが、その変化の仕方はヒッグス粒子の質量とトップクォークの質量によって変わる。ヒッグス粒子とトップクォークの現在知られている質量測定値は、非常に高いエネルギーで標

標準模型の4点自己結合が負になること、すなわち、標準模型の真空が安定性を失うことを示唆している。標準模型の真空が安定か否か、これは、LHCで新物理の兆候が見えない場合重大な問題となる。これに決着をつけるには、トップクォーク質量の精度の高い測定が必要である。理論の不定性の少ない明快なトップクォークの質量測定を可能とするのが ILC におけるトップ対生成のしきい値スキャンである。下図にしきい値領域のトップ対生成の断面積測定シミュレーション例を示す(1点 10fb^{-1})。



肩状の部分がトップ対の 1S 共鳴状態に対応する。短距離でのトップ質量 (M_S bar 質量) に対し 50MeV を切る精度が期待でき、標準模型真空の安定性問題に決着が着くと期待できる。

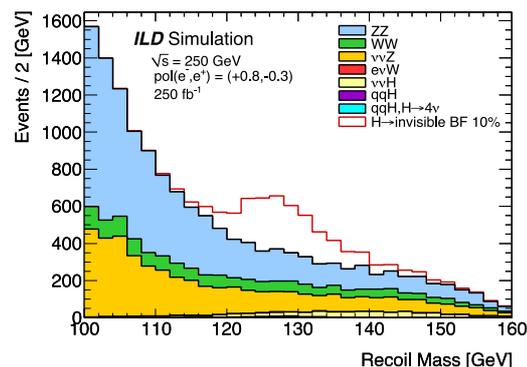
一方、ヒッグスセクターが標準模型と異なる場合、例えばヒッグス粒子が複合粒子の場合には、その複合粒子性がヒッグス粒子と強く結合するトップクォークの異常結合として現れると期待される。 500GeV でのトップクォーク対生成は、トップクォークと Z 粒子との異常結合に高い感度を持つと期待される。本研究では、国際連携チームを編成してこの課題に取り組み、トップクォークの異常結合探索が LHC の直接探索の到達範囲を超える新物理への感度を持ちうることを明らかにした。ILC での測定はビーム偏極を駆使することにより、新物理の選別にも威力を発揮することが分かった。

(3) 新粒子直接探索

標準模型には暗黒物質粒子の候補は含まれていない。よって暗黒物質粒子の発見は標準模型を超える物理の動かぬ証拠となる。暗黒物質粒子の直接探索は衝突型加速器実験の最重要課題の一つである。LHC の新粒子探索能力は極めて高く、とりわけ新粒子が強い相互作用で生成でき、終状態の信号が際立った特徴を持ちバックグラウンド事象からの分離が容易な場合には、 1TeV から 2TeV を超える質量領域までの探索を可能とする。しかし、暗黒物質粒子の直接生成や、暗黒物質粒子へ崩壊する電弱相互作用しかない新粒子の探索は、圧縮された質量スペクトルを持ち測定可能な粒子のエネルギーが小さい場合にはとりわけ難しい。圧縮質量スペクトルは、しかし、一部の風変わりな理論模型にのみ現

れる特殊な場合ではない。「自然な超対称性模型」と呼ばれる理論模型は、ヒッグス質量と大統一スケールの大きな隔たりを自然に説明しつつ LHC でこれまで超対称性の兆候が見られないことと矛盾しない有力な仮説であるが、この模型では最も軽い超対称粒子(暗黒物質候補)と次に軽い超対称粒子がともにヒッグス粒子の超対称パートナーであるヒッグシーノを主成分とするため、必然的に圧縮質量スペクトルになることが知られている。本研究では、国際研究チームを編成し、圧縮質量スペクトルを持つ超対称粒子探索のフルシミュレーション研究を行い、ILC では、質量差が 1GeV 以下となっても探索のみならず質量や断面積等の精密測定が可能であることを示した。特にビーム偏極を駆使することで、理論パラメータの抽出も可能となる。

また、暗黒物質粒子がヒッグス粒子のみを介して標準模型セクターと結合するような模型では、ヒッグス粒子の不可視崩壊の探索が極めて重要となる。ここでは、既に述べた反跳質量法による不可視ヒッグス生成の探索が威力を発揮する。下図は、Z 粒子のクォーク対への崩壊を使うことで統計を稼ぎ、ヒッグス粒子の不可視崩壊への感度を高めた場合のシミュレーション例である。



ヒッグス粒子の暗黒物質粒子への崩壊分岐比が 1% を切る所まで感度があることが分かった。これは LHC の感度を 1 桁超える。

以上のように、本研究によって、ILC では 3 つの主要プローブ：ヒッグス、トップ、新粒子直接探索により、LHC と相補的であるばかりでなく、LHC から得られる知見を質的に新しい段階へと押し上げる重要な情報を提供する研究が可能となることが明らかになった。本研究で得られた成果は、ILC 技術設計書物理の巻の中核をなし、欧州戦略、米国戦略(スノーマス研究)の策定のための入力として重要な役割を果たし、ILC 計画推進に大きく貢献した。

<引用文献>

- [1] 主要発表論文④
- [2] 主要発表論文③
- [3] 主要発表論文②
- [4] 主要発表論文①

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 53 件、内査読有:43 件)

- ① “Physics at the e+e- Linear Collider”, G. Moortgat-Pick, H. Baer, M. Battaglia, G. Belanger, K. Fujii, J. Kalinowski, S. Heinemeyer, Y. Kiyo, K. Olive, F. Simon, S. Kanemura, S. Matsumoto, et al., April 7, 2015, 180pp, Euro. Phys. J. C (掲載確定), arXiv:1504.01726. (査読なし)
<http://arxiv.org/pdf/1504.01726v1>
 - ② “Fingerprinting nonminimal Higgs sectors” By S. Kanemura, K. Tsumura, K. Yagyu, H. Yokoya, [10.1103/PhysRevD.90.075001](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.90.075001). Phys.Rev. D90 (2014) 075001. (査読有り)
 - ③ “ILC Higgs White Paper”, By D.M. Asner, T. Barklow, C. Calancha, K. Fujii, N. Graf, H.E. Haber, A. Ishikawa, S. Kanemura et al., arXiv:1310.0763 (査読なし)
<http://arxiv.org/pdf/1310.0763v3>
 - ④ “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics” By H. Baer, T. Barklow, K. Fujii, Y. Gao, A. Hoang, S. Kanemura, J. List, H. E. Logan et al., arXiv:1306.6352 (査読なし)
<http://arxiv.org/pdf/1306.6352v1>
 - ⑤ “Kalman-filter-based track fitting in non-uniform magnetic field with segment-wise helical track model” By B. Li, K. Fujii, Y. Gao, [10.1016/j.cpc.2013.11.003](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.cpc.2013.11.003). Comput. Phys. Commun. 185 (2014) 754-761. (査読有り)
 - ⑥ “Higgs Boson Decays to Tau Pairs at the ILC with the ILD Detector”, S. Kawada, K. Fujii, T. Suehara, T. Takahashi, T. Tanabe, JPS Conference Proceedings (proceedings APPC12), vol.1, 13013 (2014), [10.7566/JSPSCP.1.013013](https://arxiv.org/abs/10.7566/JSPSCP.1.013013) (査読有り)
 - ⑦ “Electroweak phase transition and Higgs boson couplings in the model based on supersymmetric strong dynamics”, S. Kanemura, E. Senaha, T. Shindou, T. Yamada, JHEP 1305 (2013) 066, [10.1007/JHEP05.2013.066](https://arxiv.org/abs/10.1007/JHEP05.2013.066) (査読有り)
 - ⑧ “A study of measurement of the Higgs boson branching ratios at the International Linear Collider”, H. Ono, A. Miyamoto, Eur. Phys. J. C (2013) 73, [10.1140/epjc/s10052-013-2343-8](https://arxiv.org/abs/10.1140/epjc/s10052-013-2343-8) (査読有り)
 - ⑨ “Feasibility study of the measurement of Higgs pair creation at a photon-photon linear collider”, S. Kawada, N. Maeda, T. Takahashi, K. Ikematsu, K. Fujii, Y. Kurihara, K. Tsumura, D. Harada, and S. Kanemura, Phys. Rev. D85, 113009 (2012), [10.1103/PhysRevD.85.113009](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.85.113009) (査読有り)
 - ⑩ “Discrimination of new physics models with the International Linear Collider”, M. Asano, T. Saito, T. Suehara, K. Fujii, R. S. Hundi, H. Itoh, S. Matsumoto, N. Okada, Y. Takubo, and H. Yamamoto, Phys. Rev. D84, 115003 (2011), [10.1103/PhysRevD.84.115003](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.84.115003) (査読有り)
 - ⑪ “Measuring the top Yukawa coupling at the ILC at sqrt(s)=500GeV”, R. Yonamine, K. Ikematsu, T. Tanabe, K. Fujii, Y. Kiyo, Y. Sumino, and H. Yokoya, Phys. Rev. D84, 014033 (2011), [10.1103/PhysRevD.84.014033](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.84.014033) (査読有り)
 - ⑫ “Extra dimensions and seesaw neutrinos at the International Linear Collider”, T. Saito, M. Asano, K. Fujii, N. Haba, S. Matsumoto, T. Nabeshima, Y. Takubo, H. Yamamoto, and K. Yoshioka, Phys. Rev. D82, 093004 (2010), [10.1103/PhysRevD.82.093004](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.82.093004) (査読有り)
- [学会発表] (計 205 件、内招待講演 37 件)
- ① K. Fujii, “Physics at ILC”, KAERU Conference 2015 (招待講演), 2015/03/25, Kavli-IPMU (千葉県柏市)
 - ② K. Fujii, “ILC Physics with focus

- mostly on Higgs”, Higgs as a Probe of New Physics (HPNP) 2015 (招待講演), 2015/02/11, 富山大学 (富山県富山市)
- ③ K. Fujii, “Overview of ILC Physics Case”, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS) 2015 (招待講演), 2014/10/06, Belgrade, Serbia
- ④ K. Fujii, “Measuring Higgs couplings at future lepton colliders”, Higgs Couplings 2014 (招待講演), 2014/10/02, Trino, Italy
- ⑤ K. Fujii, “Higgs Physics (Experiment)”, Linear Collider School 2014 (招待講義), 2014/08/13, Freuenchiemsee, Germany
- ⑥ K. Fujii, “What physics drives the optimization of a detector at the (ILC)”, Americas Workshop on Linear Colliders (AWLC) 2014 (招待講演), 2014/05/12, Fermilab, Batavia, USA
- ⑦ K. Fujii, “Physics Potential at the ILC”, Phenomenology (PHENO) 2014 (招待講演), 2014/05/07, Pittsburgh, USA.
- ⑧ 岡田安弘, “ILC の物理 (理論)”, 日本物理学会第 69 回年次大会 (招待講演), 2014/03/23, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県)
- ⑨ K. Fujii, “Higgs e+e- Future Facilities”, APS April 2013 Meeting (招待講演), 2013/04/14, Denver, USA
- ⑩ K. Fujii, “Higgs/EWSB Summary”, ECFA LC 2013 (招待講演), 2013/05/31, DESY, Hamburg, Germany
- ⑪ K. Fujii, “Higgs Physics at the LC and Requirements”, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS) 2012 (招待講演), 2012/10/24, Arlington, USA
- ⑫ 兼村晋哉, “軽いヒッグスの物理”, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (招待講演),

2012/09/12, 京都産業大学 (京都府)

- ⑬ S. Yamashita, “Japanese effort towards ILC”, Joint ACFA Physics/Detector Workshop and GDE Meeting on Linear Collider (KILC12) (招待講演), 2012/04/23, Daegu, Korea
- ⑭ K. Fujii, “Is Higgs Enough?”, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS) 2011 (招待講演), 2011/09/26, Granada, Spain

[その他]

ホームページ等

<http://www-jlc.kek.jp/jlc/ja/subg/physics>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 恵介 (FUJII, Keisuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：30181308

(2) 研究分担者

岡田 安弘 (OKADA, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・理事
研究者番号：20212334

兼村 晋哉 (KANEMURA, Shinya)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・准教授
研究者番号：10362609

高橋 徹 (TAKAHASHI, Tohru)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授
研究者番号：50253050

(3) 連携研究者

山下 了 (YAMASHITA, Satoru)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授
研究者番号：60272465

松本 重貴 (MATSUMOTO, Shigeki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授
研究者番号：00451625

(4) 専任研究支援員

田 俊平 (TIAN, Junping)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員
研究者番号：-