

後継者育成

素粒子標準理論を超えた新物理学の探究と ILC

— 加速器・物理合同 ILC 夏の合宿 2014 の報告として —

兼村 晋哉*

Report for ILC Summer Camp 2014

Shinya KANEMURA *

1. はじめに

私は素粒子理論の研究者であり、ゲージ対称性の自発的破れ（素粒子質量起源）の物理と、標準理論を超えた新しい物理モデルの構築、及びその検証可能性に関する理論研究を行っている。この分野を研究する者として、早くから線形加速器の重要性に注目してきた。特に日本が主導する国際線形加速器計画（ILC 計画）に共鳴し、ILC で検証できる物理の理論研究も数多く実施してきた。また、私は機会がある毎に、若い素粒子理論の院生や研究者らに ILC における物理の研究の重要性を強調し、彼らも巻き込んで ILC に関する様々な物理の研究を推し進めている。

ILC に関係する研究者や大学院生が、加速器・物理（実験と理論）の垣根を超えて、一つ屋根の下で数日間一緒に素粒子物理の現状や ILC の物理、加速器技術について学び、議論することができる有意義な場として、2010 年から毎年夏に催されている加速器・物理合同 ILC 夏の合宿がある。私はこの合宿に 2010 年の第 1 回目から毎回参加させていただき、2013 年の第 4 回目の合宿では私が開催責任者となって、富山で実施させていただいた。

本稿は、2014 年 7 月 19 日から 22 日まで鳥取県関金温泉で催された第 5 回加速器・物理合同 ILC 夏の合宿 2014¹⁾ の報告を書くという編集委員会からの依頼によるものである。素粒子理論の研究者が加速器学会誌に書く機会はあまり無いよ



図 1 加速器物理合同 ILC 夏の合宿 2014 の集合写真

うなので、合宿に関する報告の前に、理論研究者の立場で素粒子物理の現状はどうなっているのか、なぜ今 LHC に加えて ILC を重要と考えるのか等、日頃考えている事も含めてざっくりと書きたいと思う。

2. 素粒子物理学の現状

素粒子の標準理論は、素粒子の相互作用のあり方を支配するゲージ原理と、素粒子の質量を説明するゲージ対称性の自発的破れという 2 つの柱からなっている。第一の柱は 1980 年代に加速器実験で既に検証されていた。第二の柱を担うものとして理論に導入されていたヒッグス粒子は、長らく未発見であったが、ついに 2012 年に CERN の LHC 実験で発見・同定された。こうして第二の柱も確かに「ある」ことが実証され、その意味で標準理論は確立した。ヒッグス氏とアングレー

* 富山大学大学院理工学研究部 University of Toyama, Graduate School of Science and Engineering
(E-mail: kanemu@sci.u-toyama.ac.jp)

ル氏が2013年のノーベル物理学賞を受賞した事は我々の記憶に新しい。

しかしながら素粒子物理はこれで終わりではない。むしろヒッグス粒子の発見によって高エネルギー物理学は新しい時代、標準理論を超えた新物理学の探究、に突入したと見るべきである。

第一に、標準理論は電弱相互作用の統一的理解には成功したが、重力が入っておらず、残りの相互作用（電磁力、弱い力、強い力）の大統一も完成していない。理論的観点からすると、標準理論は暫定的な理論である。

第二に、ヒッグス粒子は発見されたが、電弱対称性の自発的破れを引き起こす部分、ヒッグスセクターは依然として未知である。標準理論では暫定的にヒッグス場を一個導入した最小形を導入しているが、仮定にすぎず、第2第3のヒッグス場を含む拡張ヒッグスセクターの可能性もある。むしろ、超対称性をはじめ新物理学のモデルには拡張ヒッグスセクターが出てくるものが多い。実験によるヒッグスセクターの決定が急務である。また、ヒッグス粒子は我々が知る唯一のスピンゼロのスカラー場であるが、その本質も未知である。素粒子か複合粒子か、あるいは余剰次元のゲージ場の余剰次元成分なのか、ヒッグス粒子の本質を問う事は、標準理論を超えた新物理学のパラダイムを問う事に他ならない。超対称性やテクニカラー理論、ゲージヒッグス統合理論等は、ヒッグス場の本性に関するを追究する過程でTeV領域に導入された。

第三に、標準理論が建設されてから長い年月の間に、ニュートリノ振動、宇宙暗黒物質、宇宙における物質・反物質非対称性等、標準理論が想定していなかった様々な現象が認識されるようになった。これらの諸現象を説明する為にも標準理論を拡張する必要が生じている。様々なアイデアが提案され、実験で検証されつつある。中でもこれらの現象を説明する機構がTeV領域の物理にあるとする物理モデルは、加速器実験で直接検証できる。

2012年にヒッグス粒子が1個発見され、標準理論が概ね正しい事が実証された事により、標準理論を超えた新物理学の探究に焦点を合わせる研究を行う時代が到来したのである。

3. ILCの重要性（物理の立場から）

前節で述べたように、ヒッグスセクターの構造決定やヒッグス粒子の本質の解明、標準理論を超えた理論の検証等、これからの加速器実験に期待されているものは多い。これ迄のLHC実験で、ヒッグス粒子以外の新粒子は見つかっておらず、標準理論が誤差の範囲内で正しいという結果になった。新粒子が発見されなかった事により、新物理学理論の候補として期待されていた最小超対称理論のシンプルなシナリオ等には厳しい制限がついた。

2015年から13-14 TeVという前人未踏の衝突エネルギーを持って再開するLHC実験の主目的は、第2の重いヒッグス粒子や超対称粒子等の新粒子の直接発見である。これにより超対称粒子等は3 TeV付近まで探索可能になる。新粒子の発見が期待される。

高い衝突エネルギーを用いたハドロンコライダーLHCは重い新粒子の発見能力が高い。その一方、縦方向の運動量の情報を使えない、QCDバックグラウンドが大きい、系統誤差の改善に限界があり、精密測定に限度があるなどの弱点もあるが、LHCには積分輝度を 3000 fb^{-1} にアップグレードする将来計画もあり、実現すればより精密な測定が期待できる。

しかし、ヒッグス粒子の結合定数やトップクォークの質量等を、新物理学理論の方向性を決定するのに必要な精密さで測るには、ILC実験が必須である。ILCは日本での建設が計画されている電子・陽電子衝突型リニアコライダーであり、衝突エネルギーは250 GeVから1 TeVまで取り得る²⁾。ILC実験は、電子、陽電子という“素粒子”を偏極させて直接ぶつける実験であり、QCDバックグラウンドも比較的少なく、素過程をまさに「ファインマン図を見るがごとくに見る」ことができる。

将来LHC実験で第2第3のヒッグス粒子や超対称粒子等の新物理粒子が発見された時には、ILCでそれらの詳細測定を行い、新粒子のスペクトルを明らかにして、次世代のラグランジアンを決定していく。

もしLHCが新粒子を発見できなくても、ヒッグス粒子やトップクォークの性質を圧倒的な精密

さで測定し、標準理論からのずれのパターンを検出することで、様々な新物理理論の予言と「指紋照合」し、新物理学の方向性を決定できる。例えば、既に発見されている質量 125 GeV のヒッグス粒子とボトムクォークやタウとの湯川結合を精密に測り、そのずれのパターンを見いだす事ができれば、例え第2のヒッグスが直接発見されていなくてもヒッグスセクターの構造がわかる(図2³⁾)。

さらに、ILC では衝突エネルギーを変化させて素過程の断面積を、エネルギーの関数として測定できる。例えばトップクォーク対生成過程のしきい値周辺の断面積を精密にエネルギーの関数として測り、理論計算と比較することでトップ質量を極めて精密に決定できる。ILCでの精密測定の結果、標準理論からのずれが見つからない場合でも、トップ質量等を高い精度で決定する事により、標準理論の適用可能エネルギーの上限値を決定し、プランクスケールや大統一スケール等の超高エネルギーの物理の大きなヒントを得る事ができる。

また、ヒッグス粒子の自己相互作用は電弱対称性の自発的破れの本質を解明する上で重要な量であり、精密に測られるべき量である。残念ながらLHCでこれを測ることは、統計量の少なさと大

きいバックグラウンドの為に厳しい。ルミノシティを強化した 3000 fb^{-1} の実験でも至難の業であろう。ILCでもヒッグス自己相互作用の測定は簡単ではないが、衝突エネルギー 1 TeV の実験を実施する事により、最高 13%の精度で測ることができる。これは宇宙の相転移構造やバリオン数生成の起源を検証する必要最小限の精度であるが、最近急遽浮上して来た TLEP 計画等の次世代円形加速器(衝突エネルギーはせいぜい 400 GeV)では絶対に達成できない測定である。

このように、ILCは標準理論を超えた新物理学を探究するという学問上の観点から不可欠な加速器であり、LHC実験での新粒子探索の結果の有無に関わらず、大きな成果を出す事ができる。すでにテクニカルデザインレポートも完成し²⁾、工学設計にかかっている。日本を含めた世界の物理学者は、日本が国際リニアコライダー実現に指導的役割を果たすことを、大いに期待している。

4. 加速器・物理合同 ILC 夏の合宿

ILC 夏の合宿は 2010 年から毎年開催されており、次の理念により国際リニアコライダーの実現と素粒子物理学の発展を目指している。

- 加速器科学者、素粒子・高エネルギー物理学者の間の情報共有、共通認識の醸成。
- 国際リニアコライダーの実現、さらには研究分野全体の発展のための異分野の研究者同士の信頼関係の構築、若手研究者間の交流促進。

第1回目の ILC 夏の合宿は、2010 年夏に宮城県鎌崎温泉で行われた。以後、毎年夏に実施され、第2回は信州志賀高原、第3回は佐賀県武雄温泉で催された。2013年の第4回は富山県呉羽丘陵で行われたが、この回から理論の研究者も多く参加するようになり、加速器、理論、実験の三者が適度な割合でバランスするようになった。それは今回の第5回でも踏襲され、ILC 夏の合宿は、加速器、実験、理論からなる ILC コミュニティの育成には欠かせない貴重な場として確立したと言えよう。

2014年の第5回合宿は、広島大学の栗木雅夫氏と高橋徹氏を幹事として全国の ILC 研究者から構成された開催組織委員会が議論を重ね、周到

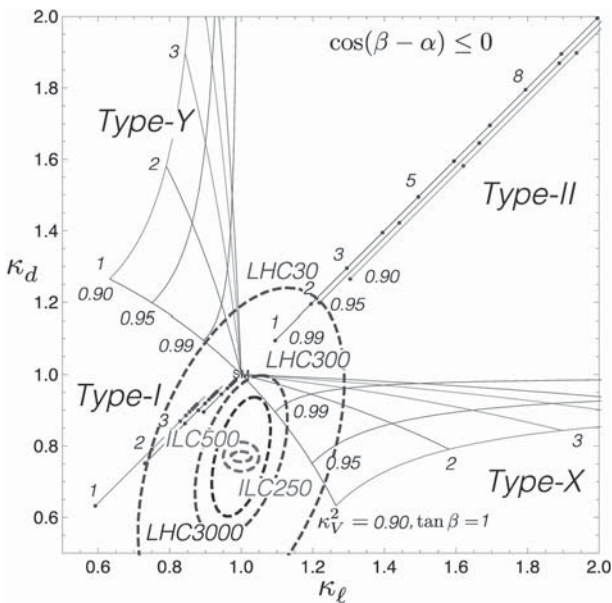


図2 ダウンタイプクォークとレプトンの湯川結合 (κ_d, κ_ℓ) の平面における標準理論の値 (1, 1) からのずれと拡張ヒッグスセクターの各タイプの関係³⁾。LHC, ILC の測定精度も示されている。

に準備された。開催地は中国地方の名峰である大山を臨む風光明媚な関金温泉に選定された。参加者の総数は 100 名を超え、北の東北大学から南の佐賀大学まで全国の ILC 研究者と大学院生らが一同に集った。

合宿では ILC 計画の現状、ILC 加速器と検出器、物理（実験と理論）に関する多くの講義と研究発表があった。昼の部と夜の部からなり、昼の部は、様々な講義に使われた。

合宿の冒頭では、ICEPP の駒宮幸男氏による ILC 計画とそこで研究できる物理に関する講演にはじまり、ILC の加速器に関する KEK の横谷馨氏の講義、ILC 検出器に関する九州大学の末原大幹氏の講義等が続いた。翌朝は、理論家の萩原薫氏が素粒子物理学の現状と高エネルギー物理学の将来に関する総合講演を行い、LHC の最新結果に関する ICEPP の山本真平氏の講義、ICEPP の田辺友彦氏による ILC 物理の講義等が行われた。さらに、理論専門家による暗黒物質、ヒッグス、QCD 等の ILC 物理に関する講義、加速器の専門家、測定器の専門家による各論の講義があった。ILC 計画の現状と政治的状況、将来の見込み等に関する報告は ICEPP の山下了氏が講演した。

本合宿での新しい試みとして、ILC の加速器、検出器、物理や LHC の結果に関連する講義のみならず、参加者の見識を拡げる為に様々な非加速器実験に関するレビュー講義も行われた。今年の上半期に話題になった宇宙マイクロ波背景放射の精密測定による重力波を通じた宇宙インフレーションシナリオの検証結果に関して佐賀大学の高橋智氏が、Kamland-Zen の実験を東北大学ニュートリノセンターの井上邦雄氏が、KAGRA 実験に関して東大宇宙線研の三代木伸二氏が分りやすく

解説した。

夜の部では、夕食後、温泉からの湯上がりの和気あいあいとしたムードの中、ILC に関連する物理の研究発表等が多く行われた。島根大学の波場直之氏、富山大学の柿崎充氏、ICRR の金田邦雄氏、埼玉大学の佐藤丈氏等、飛び入りも含めると 3 夜で合計 10 名程度が各自の研究を発表した。程よくぎつぱらんとした雰囲気の中で議論も大いに盛り上がり、ナイトセッションは毎晩深夜まで続いた。

最終日には、加速器、実験、理論の大学院生、ポスドクら若手研究者 23 名による研究発表会が行われた。

このように、2014 年の ILC 合宿も大変充実した有意義なものとなり、大成功であったと思う。ILC の実現を見据えて、加速器・物理（実験と理論）合同のコミュニティと若手の育成の為に、是非これからも ILC 夏の合宿を続けてほしいと願う。

5. 終わりに

最後になったが、今年の合宿で組織委員会の幹事を務められた栗木氏と高橋氏のご尽力と ILC コミュニティへの貢献に、心より感謝したい。

参考文献

- 1) ILC 合宿の URL:
<https://agenda.linearcollider.org/event/6329/>
- 2) H. Baer, T. Barklow, K. Fujii, Y. Gao, A. Hoang, S. Kanemura, J. List and H.E. Logan, et al., “The International Linear Collider Technical Design Report—Volume 2: Physics,” arXiv:1306.6352 [hep-ph].
- 3) D.M. Asner et al., “ILC Higgs White Paper,” arXiv:1310.0763 [hep-ph].