

## 会議報告

## LCWS 2015 会議報告

奥村 健一\*<sup>1</sup>・佐貫 智行\*<sup>2</sup>

LCWS 2015 Conference Report

Ken-ichi OKUMURA\*<sup>1</sup> and Tomoyuki SANUKI\*<sup>2</sup>

## 1. はじめに

2015年のInternational Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2015)が、25カ国から214名の研究者を集めて2015年11月2日から6日までカナダのウィスラーで開催された(写真1)。LCWSはリニアコライダの物理と加速器に関する最も大きな国際研究会であり、一年に一度開催されている。研究会の名称がLinear Collidersと複数形で終わっているのは、この研究会がInternational Linear Collider (ILC)とCompact Linear Collider (CLIC)の両方に関する会議であることを示している。ウィスラーは、2010年バンクーバーオリンピックのスキーやそりの会場となった場所である(写真2)。夏はアウトドアスポーツ、冬はパウダースノーを楽しむようだが、それらの間隙を縫って開催されたと思われるLCWS中は、どちらも楽しめるような天候でなかったことは残念だった。

## 2. ILC 計画を巡る状況

研究会は、主催者から歓迎のお言葉を戴いた後、リニアコライダー計画を巡る状況の報告から始まった。まず、リニアコライダーボード(LCB)議長の駒宮先生から報告があった。ILCの技術設計報告書(Technical Design Report; TDR<sup>1)</sup>)の完成を受けて設立されたLCBとリニアコライダーコラボレーション(LCC)の時限が2016年2月末であったが、ICFAによって2016年末まで延長されたというお話しがあった。こう聞くとILCの実現に想定以上の時間がかかっているように感じてしまうが、様々な事柄が着実に進んでいることも同時に報告された。特に重要な事柄が文部科学省のILCに関するタスクフォースとILCに関する有識者会議である。特に有識者会議については、LCWSの前に中間報告が発表されたこともあり、今回の会議中に何度も目にする事となった。中間報告に呼応してICFAから書簡を送



写真1 会場の Fairmont Chateau Whistler ホテル



写真2 Whistler オリンピックプラザ

\*<sup>1</sup> 九州大学大学院理学研究院 Kyushu University, School of Science (E-mail: okumura@phys.kyushu-u.ac.jp)

\*<sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科 Tohoku University, School of Science (E-mail: sanuki@epx.phys.tohoku.ac.jp)

り、ILCに関する真剣な議論への感謝と、中間報告に書かれた提言に対するICFAの考え方を示すことも報告された。物理・測定器や加速器の研究のみならず、ILC実現へ向けた日本国内の動きに対しても国際的に協力しながら対応していることが印象的であった。

続いて、リニアコライダーコラボレーション(LCC)のLyn Evans氏からCLICとILCについて報告があった。2018年までがCLICの技術開発段階であること、CLICで開発するX-band加速器技術は比較的小型のFELへ応用する可能性があること、実現的な建設費と消費電力の範囲内で3 TeVを念頭に置いた計画を目指していることなどが説明された。また、CLICとILCで類似の検討が必要となるビームダイナミクス、電子・陽電子源、MDI、ダンピングリング、RTML、BDS等はILCと協力しながら検討していることも報告された。ILCについては、文部科学省の検討状況や有識者会議の動きについての話が中心であった。また、欧米の研究所や企業へ日本の調査グループが訪問して聞き取り調査を実施するので協力をお願いしたいというお話しもあった。

続いて登場されたのが、KEKの山内機構長であった。山内機構長がILCの研究会に登場されるのは初めてのことで、多くの参加者がその発言内容に注目していたことと思う。やはり、と言うべきか、有識者会議が公開した中間とりまとめに関するお話しから始まった。科学的な重要性については認められた上で、いくつかの提言が出されていることが改めて報告された。提言に対しては「無理難題を突きつけられた」と感じるところもあるが、山内機構長は「ILCを実現するために必要な事柄が明確に示された」と非常に前向きに捉えていることが伝わってきた。さらに機構長は、海外の研究者に対して積極的な行動をとるように促した。ILCを日本において実現するためには、ILCを真の国際プロジェクトとして推進することが重要である。最終的には適切な費用分担が必要になるが、まずは、研究者がILCへ参加したいという願望を示すこと、そして自国の政府にILCへの参加について検討を始めるように正式に要望することが求められた。参加者からは、具体的にはどのような行動を取れば良いかという質問があり、日本に於けるILCの実現へ向けて

大きな期待(と不安)のあることがヒシヒシと伝わってきた。

ILC加速器の進展状況については、KEK/CERNの山本明先生から報告があった。主な技術的進展としては、ILCにおいて6 nmのビームサイズに相当する44 nmのビームサイズをATF2が達成したこと、FNALのクライオモジュールがILCのスペックである31.5 MV/mの加速勾配に達したこと、KEKのSTF2でクライオモジュールのインストールが終了したこと、EXFELの空洞製造が順調に進んだことなどが示された。また、TDR後の技術的な進展をまとめたInternational Linear Collider Progress Report<sup>2)</sup>が会場で配布された。

### 3. 加速器セッション

詳細な検討が進むにつれて、TDRの設計よりも優れた設計案が登場する。設計変更が繰り返されて全体の設計に不整合が生じないように、LCCでは「設計変更の提案→検討→認証」という慎重なプロセスを経ることになっている。LCWS 2015で議論された設計変更には、「メイントンネル内の遮蔽壁の厚さ」「BDSおよび陽電子源の配置」「クライオジェニックスシステムの配置の最適化」があった。

TDRでは加速器トンネル内で加速器とRF電源の間に設置する遮蔽壁の厚さは3.5 mとしていた。これは、ビーム運転中であってもRF電源側に人が立ち入ることができるという運転条件の下で検討した結果である。しかし、ビーム運転中はトンネル内に人が立ち入らないという運転条件に変更することによって、安全を担保すると同時に遮蔽壁を薄くし、建設に係る費用と時間を節約できることが示された。

BDSや陽電子源、クライオジェニックスシステム設置については、今回のLCWS中には参加者全員が同意できるような結論に至らなかった。引き続き検討を続け、次の研究会においてさらに詳細な議論が行われるはずである。

加速器セッションでは、建設へ向けた非常に具体的な検討が進んでいることを実感できた。その一方で、建設を想定している地域の地形や地質に合わせて加速器を設計しようとする雰囲気が感じられたことが非常に気になった。TDR以降は「サ

イトに特化した設計」が重点項目である。しかし、まず初めに加速器としてベストの設計をつくり、次にその設計を建設サイトで実現する方法を考えるとこの順番で「サイトに特化した設計」を進めていくことが重要であると思う。

#### 4. 物理セッション

物理関係のセッションは主にヒッグス粒子/電弱対称性の破れ, トップクォーク/QCD/ループ計算, 標準理論を超える物理の三つのセッションに分かれて行われた。

ヒッグス/電弱対称性の破れのセッションでは, ILC, CLIC におけるヒッグス粒子の質量や結合定数の測定精度予測の更新, 新しい解析方法の探求の結果, 関連する理論研究が発表された。

標準理論においてはヒッグス場の三点結合定数はヒッグス場の真空期待値とヒッグス粒子の質量で決まってしまう。しかし新物理ではその限りでは無い。特に宇宙の物質・反物質の非対称性を説明する理論では大幅にずれる可能性があり、非常に重要なパラメータである。この結合定数を測定するにはヒッグス粒子が二つ生成するような過程を見ればよいが、LHC ではそのような過程は二種類の振幅が負の干渉を起こして起こりにくい。またヒッグス粒子は主にボトムクォークへ崩壊するが、ハドロンコライダーではボトムクォークのバックグラウンドが大きくて両方のヒッグス粒子にこの崩壊過程を仮定できず、測定は非常に困難である。しかし、バックグラウンドフリーなレプトンコライダーならば測定可能である。セッションでは ILC, CLIC での三点結合定数の測定精度の新しい評価が発表された。またスケール不変性を用いることでこの結合定数が大幅にずれる新しい理論の可能性が提案された。

またレプトンコライダーでは初期状態と終状態の四元運動量を押さえることでヒッグス質量の精密測定が可能である。今回は対生成された Z ボゾンのレプトン崩壊を見る leptonic recoil mass analysis の新しいシミュレーションとボトムクォークへの崩壊を直接見る direct mass measurement の評価が発表された。

標準理論ではヒッグスと素粒子の結合は素粒子の質量に比例するが新物理の効果が入るとずれる可能性がある。この結合定数の測定にはヒッグス

の全崩壊幅の情報が必要である。LHC ではモデルに依存した推定しかできないが、リニアコライダーでは直接測定が可能で、その特徴を生かせる重要な物理チャンネルである。今回は CLIC での  $H \rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}/g\bar{g}$  結合,  $H \rightarrow WW^*/ZZ^*$  結合の測定の評価が発表された。また 2HD 模型, 最小超対称模型 (MSSM), Georgi-Machacek 模型など具体的な模型を区別できる能力の評価, 偏極ビームを用いた標準理論と異なる種類のヒッグス-ベクトルボソン結合の測定の可能性についても発表された。これらの他にも偏極を用いて W ボソン質量の精密測定を行う可能性の評価やリニアコライダーの測定精度に合わせた超対称理論でのヒッグス粒子生成断面積の高次補正の計算結果が発表された。ILC 実現に向けた加速器側の具体的な計画案の進捗に合わせてリニアコライダーの物理も着実に足場が固められている印象だった。

トップクォーク/QCD/ループ計算セッションでは主にトップクォークの閾値での対生成に関して理論計算やリニアコライダー実験に向けたモンテカルロシミュレーション (WHIZARD) の進展について発表があった。

トップクォークは標準理論で最も重い粒子であり、ヒッグス場と最も強く結合している。従ってヒッグス場自身にも強い影響を与え、またその結合定数はヒッグス場の背後にある新しい物理の重要なパラメータとなっていることが予測される。特にヒッグス粒子の発見後、不思議なことにこのパラメータの大きさが我々の住む標準理論の真空が安定か不安定かの丁度境界付近にあることが理解され、その正確な値を決めることが極めて重要な課題となっている。そのためにはトップクォークの質量を精密に測定しなければならない。しかしクォークは単独で取り出すことが出来ないのでその理論的定義は一義的では無く、理論と比較するためには定義がはっきりした質量を測定しなければならない。閾値での対生成ではトップクォーク対は水素原子のような束縛状態を形成し、その質量と閾エネルギー付近の断面積の形状の関係は摂動計算で求めることができる。これを測定すれば場の理論で定義された質量が分かる。この測定はレプトンコライダーでのみ可能である。こうして束縛状態から求めたトップクォーク質量はさらに理論計算で用いられる  $\overline{MS}$  質量に翻訳する必要





写真3 LCWS 2015 の集合写真

がある。セッションではこの変換式の高次補正についても発表があった。また、ヒッグス/電弱対称性の破れとのジョイントセッションではトップクォークとヒッグス粒子の同時生成過程でのトップ湯川結合の直接測定についても議論が行われた。

リニアコライダーで初めて実現できる高いエネルギーを持った偏極ビームを用いることでトップクォークとZボソンとの結合をトップクォークの異なるスピン状態それぞれについて精密に測定することも出来る。これらの結合定数はヒッグス粒子やトップクォークが複合粒子であった場合に敏感なパラメータである。特に今回の会議では、plenary talk で Michael E. Peskin 教授がこうしたリニアコライダーでのトップクォークの精密測定的重要性を非常に明快なプレゼンテーションで強調していたのが印象的だった。

標準理論を超える物理セッションでは LHC での超対称粒子探索の結果のレビューの後、pMSSM でのグローバルフィットや ILC での超対称粒子発見のケーススタディの結果、MSSM にゲージ場と結合しない一重項粒子を加えた NMSSM 模型の ILC での検証可能性などの発表があった。LHC Run I の結果を受けて QCD に結合しない軽い超対称粒子やヒッグス粒子とは別の軽いスカラー粒子に焦点が当てられている印象だった。超対称理論以外の新物理の可能性についても暗黒物質粒子を中心に検討された。中でも印象に残った発表は諸井先生による隠れた光子の検出実験だ。リニアコライダーでの物理実験は衝突点を中心だが、このプロポーザルはビームダンプ

でステライルニュートリノや隠れた光子など標準理論との結合が非常に弱い粒子の探索実験を行う。隠れた光子は我々の知っている光子のコピーのようなもので標準理論の物質粒子はこの光子に対する電荷を持たず直接相互作用しない。しかし通常の光子と少しだけ混合することで物質粒子と非常に弱い相互作用をする。隠れた光子には宇宙論的な制約を逃れるためにゲージ対称性を破って小さな質量が与えられる。実際の実験では光子との混合のためビームダンプで隠れた光子が制動放射される。その先にシールドを置いて通常粒子を遮断し、その向こうで隠れた光子の標準理論粒子への崩壊を見る。リニアコライダーが実際に実現すればアイデア次第で他にも様々な物理が出来るであろう。

## 5. ま と め

次のリニアコライダー関係の国際研究会は、2016年5月末からスペインにて開催される。ILCの実現へ向けて、物理・測定器の研究も加速器の開発研究も更なる進展が報告されることと思う。また、ILCの建設には、研究や技術開発だけでなく、国際合意形成へ向けた様々な取り組みも必要になる。これらについても大きな進展のあることを祈りたい。

## 参考文献

- 1) <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- 2) <http://ilcdoc.linearcollider.org/record/62872/files/ILC-Progress%20Report.pdf>