

会議報告

ヒッグスファクトリー研究会

高橋 徹*

Higgs Factory Workshop

Tohru TAKAHASHI *

Abstract

Upon the discovery of a Higgs like particle at the LHC experiment in July 2012, ideas of various types of Higgs factory were proposed. This workshop, organized by the Beam Dynamics sub-panel of ICFA, aimed to discuss situation and feasibility of all possible types of Higgs factories from a machine technological aspect. In this article, we report discussion in the workshop not being afraid of expressing author's personal impression.

1. はじめに

2012年11月14日～16日に、フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) において、Accelerators for a Higgs Factory: Linear vs. Circular (HF2012) と題した研究会が開催された。この研究会の趣旨 (研究会のHP掲載文の筆者による

訳) は:

「質量 125 GeV 付近にヒッグスボゾンが発見されたことを受けて、世界の高エネルギー物理学コミュニティは、LHC と相補的となるヒッグスファクトリーの可能性を追求している。この3日間の研究会は、将来のヒッグスファクトリーについて、特に、125 × 125 GeV の電子陽電子リニ



図 1 HF 2012 参加者の集合写真 (Fermilab 提供)

* 広島大学大学院先端物質科学研究科 Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University (E-mail: tohru-takahashi@hiroshima-u.ac.jp)

アコライダーと 125 GeV のリングコライダーの比較を加速器の観点から行う。あわせて物理からの要求、光子コライダーやミュオンコライダーなどのオプションについても議論する。」
ということである¹⁾。

筆者は、研究会のサブタイトル、“Linear vs. Circular” はあまり適当でなかったと考えている。この小文では、その理由も含めて研究会の様子を筆者の主観を交えて伝えたい。なお、筆者は加速器科学が専門では無いので、加速器技術にはあまりふれることができない。既に研究会の議長である W. Chou 氏を中心とする組織委員会メンバーによって、詳細な報告書がでている。加速器技術の詳細はそちらを参照していただきたい²⁾。

2. 研究会の様子

研究会は、P. Oddone FNAL 所長の挨拶後、Y. Kim 氏 (FNAL 副所長) による、ヒッグスの物理の現状と将来についてのレビューから始まった。ヒッグス探索の現状と可能性について、要領よくまとめていた。また、日本の高エネルギー物理学研究者会議がリニアコライダーの段階的推進の提案をとりまとめたこと、北上地区、背振地区という候補地があることについて時間を割いて触れていた。加速器の研究会ではあるが、LHC の状況とその物理的意味は重要だ。LHC による新粒子発見の話の意義について、重鎮 C. Quigg 氏がレビューした。氏は発見された新粒子の性質の精密測定的重要性を強調し、「答えを知っているふりをして、物理のビジョンを矮小化してはならない。」という言葉に続けて、大きな「？」で講演を締めくくった。

本題である。ここまでは、筆者もある意味のんびり聞いていたが、その後の講演は少し雰囲気違った。ヒッグスファクトリーについて、物理実験と加速器の観点から二つの講演が続いた。どちらも、かなりリングコライダーの優位性を強調した。話を聞いていると、リングコライダーの方がルミノシティも高く、コストも安いと言っている。その場ではなかなか分からないのだが、よくよくスライドをみると、例えばルミノシティについて、ILC は現実的な運転を想定した値を示しているのに対して、リングの方はピークルミノシティで走り続ける想定だ。リングコライダーで測定器に分

配されるルミノシティは単純に測定器の数 (IP の数) に比例すると仮定している。またコストについても、ILC のように、コストエンジニアが業者と守秘契約まで結んで内容に立ち入って算出したものと、過去の経験から概算したものをそのまま比較している。概算なのでそれが正しいかどうかの議論すること自体が意味をなさないが、そんなことはかまわずという様子だった。極めつけは、Henderson 氏のスライドの技術的な成熟度だった。リニアコライダーが○で、リングコライダーは◎である。(たぶんリニアコライダーには CLIC を含むという落ちだろうが、恣意的な印象は否めない。)

そんなこんなで、研究会は ILC に携わっているものにとってはあまり楽しくない状況で始まった。しかし議論が続くにつれて、状況がはっきりしてきた。以下、研究会の議論からリニアコライダー、リングコライダー、ミュオンコライダー、ガンマコライダーについて、筆者の理解している範囲で簡単に振り返ってみる。

2.1 リニアコライダー

リニアコライダーによるヒッグスファクトリーは、国際リニアコライダー (ILC) とコンパクトリニアコライダー (CLIC) が主なものである。

ILC は超伝導技術による全長約 31 km の電子陽電子衝突型加速器である。1980 年代から、日米欧で研究が進められていたリニアコライダー計画を超伝導技術に一本化し、2005 年に国際設計チーム (GDE) が発足した。2012 年末には技術設計書 (Technical Design Report: TDR) の草稿が完成、2013 年前半に完成する。物理と測定器の研究も、詳細設計書 (Detail Baseline Design: DBD) が完成したところである。これらの活動を元に、衝突エネルギー 250 GeV から研究を開始して 500 GeV まで拡張する、ILC の段階的推進を日本の高エネルギー物理学研究者会議が提案したことは、既に触れた。

ILC において特筆すべきことは、

- 加速器、測定器ともに技術設計ができています、
- ヒッグスはもとより、新粒子探索などの物理について、具体的な測定器モデルによるシミュレーションによる詳細な検討に基づいた研究計画が立てられている、
- 国際組織による開発研究が強力に推進されて

いる,

- 具体的な建設候補地が有り、特に日本では北上、背振の二つの候補地において、地質等に関する科学的な調査が行われている、ことなどである。他の案とは計画推進状況の次元が異なることは、強調したい。

CLIC はこれまで CERN を中心に開発が続けられてきた、2 ビーム方式による常伝導リニアコライダーである。基本的に重心系エネルギー 3 TeV という高エネルギーコライダーとして開発されてきた。ヒッグスファクトリーのための低エネルギー運転に 350 GeV または 500 GeV を想定し、複数のシナリオを考えている。技術開発については、概念設計書 (Conceptual Design Report: CDR) が昨年提出されたところである。2012 年～2016 年は開発段階、2017 年～2022 年が準備段階、2023 年～2030 年に建設というシナリオが考えられている。

2013 年 2 月に Linear Collider Collaboration (LCC) が組織され、ILC, CLIC, 物理を統括した国際推進体制が発足した。LCC のディレクターは Lyn Evans 氏 (Imperial College, London), 副ディレクターは村山 齊氏 (IPMU: Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe) である。また LCC を統括する Linear Collider Board (LCB) の議長に駒宮幸男氏 (東京大学) が就任し、リニアコライダーは設計から実現に向けた活動に移行する。

2.2 リングコライダー

質量約 125 GeV の新粒子発見をうけて、重心系エネルギー 240 GeV 程度の電子陽電子リングコライダーの提案が複数でてきた。この研究会の動機の一つは、この状況を議論し、整理することであったと思われる。研究会では以下のようなリングコライダーが議論された。

- LEP3 LEP トンネル (現 LHC トンネル) を使った重心系エネルギー 240 GeV の加速器
- TLEP 重心系エネルギー 350 GeV までの加速器。CERN 近傍
- Super TRISTAN 重心系エネルギー 240 GeV, 円周 40 km の円形加速器。KEK 近傍。より大きな加速器の案もある。
- Fermilab Site-filler 重心系エネルギー 240 GeV。その名の通り、FNAL のサイトに

入る周長 16 km の円形加速器。

- IHEP-50 km, IHEP-80 km 重心系エネルギー 240 GeV。周長それぞれ 50 km, 80 km の円形加速器。場所は不明 (中国のどこか)。

前述のように研究会初日には、240 GeV のリング型のヒッグスファクトリーの技術ができていくようなニュアンスの講演もあったが、2 日目に入ると、数々の課題が浮かび上がった。そのいくつかを挙げてみたい。

シンクロトロン放射

周知のように円形電子加速器のエネルギーを制限するもっとも主要な要因は、シンクロトロン放射によるエネルギー損失である。240 GeV のリングにおけるエネルギー損失は 100 MW 程度と想定している。当然ながら RF システムはこのエネルギー損失を補う必要がある。それには、損失を補償できるだけの高加速電場、高いエネルギー伝達効率をもつ RF システムを必要とする。加速器全体の消費電力も問題となる。LEP3 の消費電力は高周波用だけでも 200 MW と概算されているが、これは ILC の冷凍機、入射器、電磁石を含めた合計 128 MW より大きい。

シンクロトロン放射による真空システムへの影響もある。LEP2 や B ファクトリーの経験から、シンクロトロン放射の強度に耐えるシステムの構築は可能なようだ。しかしシンクロトロン放射の臨界エネルギーが従来の加速器と比べて高くなる (LEP3 で 1.5 MeV)。高強度の MeV 領域ガンマ線にさらされる真空システムは、従来とは全く異なる放射化対策を必要とされる可能性がある。議論の際に聞かれた「シンクロトロン放射の影響は強度だけではない。」というコメントは印象的だった。

Beamstrahlung

これも元をただせば、シンクロトロン放射の影響を避けるためだが、ビーム電流をできるだけ少なくして加速器のルミノシティを得るため、ビームを絞る。結果として、相互作用点におけるビーム・ビーム相互作用による放射, beamstrahlung が大きくなる。それによるビームエネルギーの広がり、リニアコライダーより小さい。しかし、リニアコライダーのビームは使い捨てだが、リン

グコライダーでは、さらに周回を重ねる。beamstrahlungによるエネルギー広がりやビーム損失、即ちルミノシティの損失につながる。ヒッグスファクトリーでは、トップアップ入射を仮定するが、損失がビームの再入射率を上回らないようにしなければならない。この問題は、Telnov氏、横谷氏らによって議論された。240 GeVの円形ヒッグスファクトリーのルミノシティは 10^{34} cm²/s程度かそれより低い。リニアコライダーと同程度となりそうである。

その他の課題

その他にも課題が指摘されている。例えば、

- 円形加速器は複数の相互作用点（測定器）を設けることができるが、測定器全体のルミノシティは単純に測定器の数に比例するのか。（いわゆる beam-beam 効果）
- 加速器のラティス設計の最適化。
- beamstrahlung やバンチ内での散乱などのエミッタンスへの影響。
- トップアップ入射の最適化

などである。

リングコライダーは将来それを陽子型に転用してより高いエネルギーへ迫ることができるとの意見がある（LEP3は除く）。一般論としては正しいが、その正当性を議論するのは時期尚早だろう。現時点では、TeV領域の次にどのエネルギースケールを探索すべきか全く分かっていない。LHCとヒッグスファクトリーによる物理の結果を踏まえて初めて議論できることである。筆者は、着実に研究を進め、その結果をもって次の段階を考えることが肝要だと考える。

2.3 ミューオンコライダーとガンマコライダー

リニアコライダーとリングコライダー以外の可能性としてミューオンコライダーとガンマコライダーについても議論された。

ミューオンコライダー

ミューオンコライダーは高強度の陽子ビームから π 中間子を生成し、さらにその崩壊によって μ 粒子ビームを生成する。この加速器の最大の利点は、 μ^+ と μ^- の反応によって直接（Sチャンネル過程によって）ヒッグス粒子を生成できることである。 μ ビームのエネルギー幅が十分に小さけれ

ば、ヒッグス粒子の自然幅、 Γ 、を直接測定できる唯一の方法となり、物理的な意義は大きい。しかし、技術的にはまだ未熟である。開発項目を列挙すると、

- 4 MWの陽子ビーム
- π 中間子をつくる標的
- μ 粒子補獲システム
- μ 粒子のイオン化冷却
- 加速システム

などである。この中でもイオン化冷却は鍵となる技術だが、まだ実証段階である。

ガンマコライダー

高エネルギー電子にレーザーを照射して、逆コンプトン散乱を起こすことによって、高エネルギーガンマ線を生成することができる。これを、リニアコライダーに応用することによって、高エネルギーの光子-光子衝突反応を起こすことが可能となる。光子-光子衝突反応では、電荷をもった粒子のループを通じてヒッグス粒子が生成される。それによって得られるヒッグス粒子の2光子崩壊幅は、ヒッグス粒子と結合する未知の粒子の影響に敏感であり、重要な物理量である。そのため、ガンマコライダーは、早くからリニアコライダーのオプションとして研究されてきた。

研究会では、リニアコライダーをベースとしたものとして、ILC, CLIC, NLC, SLCを元にしたもの、リングコライダーをベースとしたものとして、SAPPHIRE (Small Accelerator for Photon-Photon Higgs production using Recirculating Electrons)と銘打ったものが紹介された。

この方式の鍵となるのは、高エネルギー電子線を効率よく高エネルギーガンマ線に変換するための、高強度レーザーシステムの開発である。ガンマコライダーには、パルス当たりのエネルギーが約10 Jで、電子と同期した繰り返しのレーザーシステムが必要となる。筆者は、これに関する検討、特に、光共振器中にレーザーパルスを入射することによってレーザー強度を増大する技術の開発を行っている。この研究会でもその開発状況について報告した。光共振器はバンチ間隔の長い超伝導加速器を対象としているが、CLICやNLCのような、常伝導加速器では、高強度レーザーによって直接必要なパルス列を生成する方式が考え

られる。現在ガンマコライダー用にそのようなレーザーシステムの開発はなされていないが、転用可能な技術として、LLNLで開発中のLIFE (Laser Inertial Fusion Energy) というレーザーシステムについての議論があった。

ガンマコライダーに必要なレーザーシステムの開発にはまだかなりの時間がかかる。またヒッグスの物理として、ガンマコライダーだけで完結することはなく、電子陽電子反応の結果を組み合わせることが必須である。ガンマコライダーは電子陽電子リニアコライダーのオプションとして考えるべきというのが筆者の結論である。

3. まとめにかえて

以上駆け足で、研究会の様子を報告した。最後に筆者の私見を交えて、会議の様子を述べてみたい。

会議の発端は、リングコライダーによるヒッグスファクトリーについて議論し、整理することだったと思う。しかし、主催者の意図は不明だが、副題に Linear vs. Circular とつけるなど、リニアコライダーとリングコライダーを比較するような様子がうかがえた。

リニアコライダーは、技術設計書を完成し、設計から実現に向けた国際組織を構築し、納税者の理解を求めていく段階である。建設場所の候補も存在する。一方リングコライダーは課題を列挙し、それぞれについて検討を始めた段階である。課題が多いと言うことは、研究者が自由に議論を戦わせることができるということであり、リングコライダー研究者にとっては非常に楽しい雰囲気だったともいえる。

ヒッグスファクトリーの可能性について、あらゆる方法を検討することは必ず行うべきである。その意味で各種リングコライダーの提案があり、

検討されることは好ましい。しかし、全く技術開発のレベルが異なるものとの比較に意味があるとは思えない。研究会の講演のほとんどは、科学的な議論だったが、一部そのような対比があったのは残念だった。

別の観点を見てみたい。日本の高エネルギー物理学コミュニティは ILC の段階的推進の提案を決議し、ILC の国内誘致というコンセンサスに至っている。また最近、欧州の素粒子物理戦略において、“日本が ILC を主導して日本に誘致することを歓迎する。ヨーロッパはそれに参加することを議論するため、日本からの提案を心待ちにしている。”ということが謳われた。一方米国では、今年のスノーマス研究会で米国の方針が検討される。今回の研究会はその議論に資するという意味が大きいと思われる。

高エネルギー物理学では、LHC と相補的にその粒子の性質を徹底的に解明し、標準模型を超えた物理を目指すことが非常に大きな課題である。そのために、必要十分な装置で、時期を逸することなく研究に着手することが肝要だ。その方向でのグローバルな協力体制ができることを願っている。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、横谷馨氏 (KEK) から有益なコメントをいただきました。感謝いたします。

参考文献

- 1) <https://indico.fnal.gov/conferenceDisplay.py?confId=5775>
- 2) A. Blondel, A. Chao, W. Chou, J. Gao, D. Schulte and K. Yokoya, “Accelerators for a Higgs Factory: Linear vs. Circular” (HF2012), arXiv:1302.3318