

ILCに関する国内外の動き

前回の報告（平成28年4月）以降、文科省の「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」が2015年8月に公表した「これまでの議論のまとめ」[1]で示された ILC 国内誘致の可否判断に向けた課題に取り組んできた。課題は、(1)新粒子発見の可能性についての見通し、(2)欧米等の具体的な参画および国際経費分担についての見通し、(3)技術課題の解決やコスト面でのリスク低減、(4)LHC13TeV 実験の動向の注視と分析・評価、(5)国民および科学コミュニティの理解、(6)建設および運転に必要な人材の確保・育成等である。(1)、(3)、(4)については、2015年末に ICFA としての見解を手紙で有識者会議に伝えたが、後述のように、(1)、(4)については補足文書を準備中である。また(4)に関連し、750GeV 付近に見られた新粒子様バンプに関連して ILC の果たしうる役割を LCC 物理作業部会の枠組みの中で報告にまとめた[2]。(2)については、現在、日米を中心に、欧州主要国やインド等も含めて、議連、文科省、大使館、産学それぞれのレベルでの国際連携の強化が進んでいる。(5)については、ILC 推進準備室、広報室、リニアコライダー・コラボレーション(LCC)、先端加速器科学技術推進協議会(AAA)等と連携しアウトリーチ活動の強化を進めており、一般向け物理パンフレットの作成や大学巡りなどの活動を続けている。また、(6)については、有識者会議の下に設置された「人材の確保・育成方策検証作業部会」の報告が2016年7月に出ている[3]。

こうした動きの中、2016年5月31日から6月5日にかけてスペインのサンタンデルで欧州領域の LC 会合[4]が、2016年12月5日から9日にはワールドワイドな LCWS 会議 LCWS2016 が盛岡で開催された[4]。盛岡の LCWS2016 には、国内外から340人近い参加者があり（図1）、KEK 素核研の ILC グループもほぼ全員が参加した。会議の初めのプレナリーセッションではリニアコライダー国際研究所建設推進議員連盟の河村健夫議員の力強い基調講演があり、スタンディングオベーションが起きた。今回のワークショップでは、コスト削減の重要性が再認識され、そのために実験開始時の衝突エネルギーをこれまでの



図1：盛岡で開催された LCWS 2016 の参加者集合写真

500GeV から 250GeV に変更して、段階的にエネルギーを上げていく、いわゆるステージングシナリオを再検討することが確認された。また、当初の任期満了にともない再編された LCC の新執行部の発表があった。ディレクターの Lyn Evans 氏、ディレクター代理の村

山齊氏、CLIC 担当副ディレクター

の Steinar Stapnes 氏は続投、ILC 担当副ディレクターは Mike Harrison 氏から道園真一

郎氏へ、物理測定器担当副ディレクターは山本均氏から Jim Brau 氏へ交代となり、ILC 実現に向け新たなスタートを切った。

一方、測定器コンセプトグループについても前回報告した通り、正式な実験コラボレーション形成を視野に入れた組織再編が進んでおり、素核研 ILC グループが中心メンバーの一つとして参加する International Large Detector (ILD)グループでも、グループの正副代表、物理コーディネータ、ソフトウェア・コーディネータ、テクニカル・コーディネータと別途選挙で選出された4名の合計9名からなる執行部 (Executive Team: ET) が決まっているが、その後、物理、ソフト、テクニカルの3つの WG それぞれの下のサブグループとその世話人が決まり体制が固まった。ILD 新体制の中で素核研 ILC グループは、中核的な役割を担っている。

物理の検討

有識者会議によって示された上記の課題(1)および(4)を解決するため、LCC や ILD などの国際的な枠組みを通して、国内外の大学、研究機関と連携を取りつつ、ヒッグス粒子およびトップクォークの精密測定、新粒子/新現象探索の3本柱について物理の強化を進めてきた。

特に素核研 ILC グループは、LCC の物理ワーキンググループの共同世話人3人のうちの一人、ILD 物理コーディネータ、新物理 WG 世話人二人のうち一人を出すなど、中心的な役割を果たしている。

ILC でのヒッグス粒子の物理において鍵となるのが、反跳質量法を用いた $e^+e^- \rightarrow Z_h$ 反応の測定である。これは、電子・陽電子コライダーでのみ可能な Z_h 生成の全断面積の絶対値測定、従って、 hZZ 結合の絶対測定とヒッグス質量の精密測定を可能とする。他の結合は、 hZZ 結合を基準に決まるので、モデル非依存に種々のヒッグス結合を決定できる。反跳質量法では、 Z 粒子のみを見ることでヒッグス粒子の崩壊モードに依存せず Z_h 生成事象を検出できる点がポイントだが、ILC の目指すサブ%レベルでの結合定数測定のためには、 Z_h 反応検出効率のヒッグス粒子崩壊モード依存性をこれに比べて無視できるレベルに抑える必要がある。一方、 Z_h の Z 粒子の再構成の際には、例えばヒッグス粒子の ZZ^* 崩壊からの Z と混同する可能性等による Z_h 反応

検出効率のヒッグス崩壊モード依存性が生じうるため、要求されるレベルの崩壊モード非依存性の確認は重要である。今回、このレベルの崩壊モード非依存性を初めて示すことに成功した。また、重心系エネルギー 250、350、500 GeV での反跳質量法による Z_h 反応の比較を行った。これらの結果は論文誌に公表済みである [6]。高い重心系エネルギーではヒッ

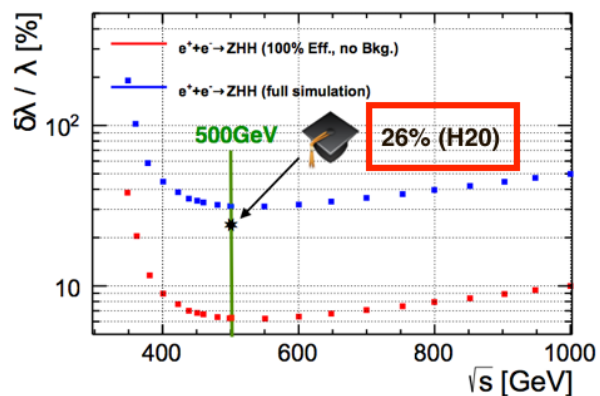


図 2：自己結合の測定精度のエネルギー依存性

ヒッグス質量の測定精度は一般的に悪化するが、精度を改善する新しい質量測定手法を開発中である。今後は加速器由来の系統誤差のスタディを行う予定である。ヒッグス粒子の三点自己結合は、電弱対称性の破れの根幹にあり、500GeVにおける Zhh 生成反応を使ったその測定は、ILC でのヒッグス物理の中心課題である。前回、ILC フルデータ (H20 シナリオ) で 28%での測定が可能と報告したが、LCWS2016 の時点で 26%まで改善した。また、前回報告した、SLAC の Tim Barklow 氏、Michael Peskin 氏らとの Effective Field Theory (EFT)を用いた解析が進み、250GeV での Zh 生成の測定や、W/Z 粒子に関

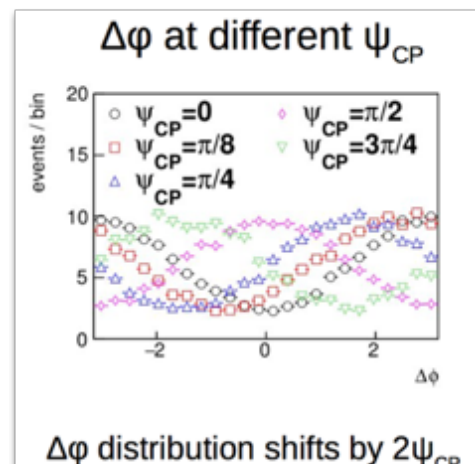


図 3: CP 混合角と崩壊面相関

する精密測定を組み合わせることでモデル非依存に自己結合を引き出す手法の開発に成功した。現在、論文にまとめる作業が進行中である。ヒッグス自己結合が、標準理論の予言値より大きかった場合、電弱バリオン数生成のシナリオの可能性が生じるが、この場合、新たな CP の破れのソースも必要になる。ヒッグス粒子の CP 混合の研究は、この意味でも重要だが、ILC では、そのクリーンな実験環境を利用し、ヒッグス粒子のタウ粒子対崩壊における各々のタウ粒子の崩壊面を再構成し、その角度相関を測ることでヒッグス粒子の CP 混合の研究が可能である (図 2)。その手法は論文誌に発表済みである [7]。フルシミュレーションの結果、250GeV で 2ab⁻¹ を貯めることで、混合角を 3.8° の精度で決定可能である。ヒッグス粒子が関与する CP の破れは、hZZ あるいは hWW の異常結合としても現れうる。この異常結合をその他の形の異常結合も含めた EFT に基づく、総合的なフルシミュレーションによる解析が進行中で、hF \bar{F} 型の CP を破る異常結合に関して、新物理スケールを 1TeV とおいた場合の異常結合係数: \tilde{b} に対し、500GeV で 500fb⁻¹ で 0.07 (3 σ) の感度が得られている。これは、2013 年の Snowmass Study での簡易シミュレーションによる結果を 2.5 倍上回る結果である。現在、可能な運動学的情報の全てを駆使した行列要素法の適用によるさらなる精度向上の研究が進んでいる。その他、ヒッグス粒子の不可視崩壊分岐比の測定の精度改善に向けた努力も続いている。

ヒッグス粒子とともに電弱対称性の破れの物理と強く関わっていると期待されるのがトップクォークである。前回報告では、トップ質量の精密測定に関する最近の際立った進展について報告したが、今回は、日仏の国際協力を中心に進めているトップクォークの異常結合測定に関して報告する。これは、ILD 測定器のフルシミュレーションに基づく、重心系エネルギー 500GeV でのトップ対生成の研究で、終状態が b ジェット 2 本と W 崩壊からの荷電レプトン 2 つの場合の完全な力学的再構成を行列要素法を駆使して行う手法によるものである。これと並行し、終状態の二つの W の一方のみがレプトンへ崩壊した場合のシミュレーション研究も進めており、いずれも「日仏 TYL 事業 学生・若手研究者支援プログラム」の支援によっている。CP 比保存結合を含む EFT による ttZ 異常結合の解析が進んでいる。余剰次元モデル等具体的なモデルでは、10TeV を超えるカルツァ・クライン質

量に対応する感度が期待できる。

ILC は、電子・陽電子衝突のエネルギーフロンティア加速器であり、そこには電弱対称性の破れを担う標準理論を超えた物理とそれに伴う新粒子の直接生成による発見の可能性がある。超対称性は、予言能力が高く、新物理の候補として常に中心的な役割を果たしてきたが、そのパラメータ空間は、LHC のカラーを持った新粒子に対する強力な探査能力によってどんどん削り取られている。その結果、ILC 探査可能な質量域に残されたのは、LHC では探査しにくいパラメータ空間、すなわち、カラーを持たない比較的軽い超対称性粒子が質量的にほとんど縮退して存在する場合のみに限られてきた。これは、いわゆる「自然

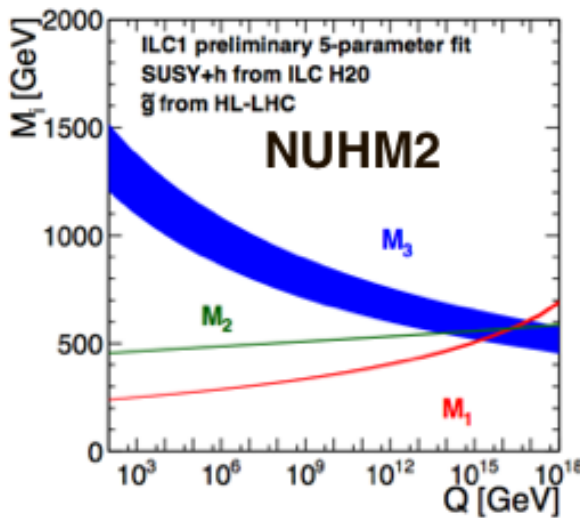


図 4：ゲージの質量統一の成否のテスト。

な超対称性」と呼ばれるモデルの場合に対応し、パラメータ空間の片隅ではなく、強い動機のパラメータ領域である。この場合、最も軽い超対称性粒子 (LSP) とその次に軽い超対称性粒子 (NLSP) は、ヒッグス粒子の超対称性パートナーであるヒグシーノを主成分とするニュートラリーノ、チャージノとなる。主成分が同じヒグシーノであることから、質量差が小さくなり、検出可能信号のエネルギーが低く、LHC での測定が困難になる。それに対して、ILC では、クリーンな実験環境のおかげで、圧縮質量スペクトルを持つ軽いヒグシーノの探索と精密測定が可能である。質量差が 10-20GeV、10GeV 程度、および 5GeV 以下の 3つの場合について ILD 測定器を用いたシミュレーションによる解析を行い、ヒグシーノの質量と生成断面積の測定精度を評価した。現在、さらなる改善の努力が進行中であるが、質量、断面積ともに、フルデータサンプル (H20) で、1%以下の精度が期待できることが分かっている。断面積と質量の精密測定により、ヒグシーノ以外の成分の抽出が可能となり、ビームエネルギーを超えるゲージノ質量パラメータを高精度で決定できることが分かった。これは、ゲージノ質量統一の成否のテスト、超対称性の破れのメカニズムの試験など高いスケールの物理への窓を開くことになる (図 4 参照)。これらの研究は、ドイツ DESY と米国の共同研究者との共同研究で、現在投稿論文を準備中である。

LHC でその存在の可能性が示唆された 750GeV バンプは、統計揺らぎによるものであることが判明したが、文科省有識者会議の課題の一つとして、これを ILC での直接生成による研究の可能性を検討した。これは、新粒子が光子を伴って生成される場合に関する一般的なシナリオを想定したシミュレーションスタディであり、同様な生成機構による新粒子生成に一般的に適用できる。結果は論文誌に発表済みであり [8]、文献 [2] への入力にもなった。

以上の進展は、全て、新物理に関する文科省有識者会議への ICFA からの手紙に対する

な超対称性」と呼ばれるモデルの場合に対応し、パラメータ空間の片隅ではなく、強い動機のパラメータ領域である。この場合、最も軽い超対称性粒子 (LSP) とその次に軽い超対称性粒子 (NLSP) は、ヒッグス粒子の超対称性パートナーであるヒグシーノを主成分とするニュートラリーノ、チャージノとなる。主成分が同じヒグシーノであることから、質量差が小さくなり、検出可能信号のエネルギーが低く、LHC での測定が困難になる。それに対して、ILC では、クリーンな実験環境のおかげで、圧縮質量スペクトルを持つ軽いヒグシーノの探索と精密測定

LCC 物理ワーキンググループによる補足文書への入力となっている。この補足文書は、現在最終編集中で、ステージング案の検討にも役立つと期待している。

ソフト開発および GRID 環境整備

物理検討および物理を最大限に引き出すための測定器設計の最適化には、イベントジェネレータから、Geant4に基づく測定器のフルシミュレーション、イベント再構成、物理解析に近いハイレベル解析ツールの整備が不可欠である。このために 2016 年春に再編された ILD の研究組織では、ソフトウェアグループを組織し、KEK はその共同世話人を務めることになった。このグループにはモンテカルロ・データ生成サブグループが設けられており KEK は日本医科歯科大の共同研究者とサブグループを務めてもいる。

データ解析ソフトウェアには詳細基本設計書 (DBD) 以降継続的に性能改善が行われてきたが、今後測定器最適化を進めていくためには DBD バージョンとの互換性の維持が難しくなってきた。そこで DBD 互換ソフトの最終バージョンを 11 月末にリリースし、今後は、DBD バージョンとは互換性がなくなるが、測定器最適化研究での使用に適した DD4Hep をベースとしたソフトウェアの開発に重点を移すことにした。5 月末に、スペイン・サンタデールで開催された ECFA LCWS での ILD 会議で最適化のモデルとして内径の大きなタイプと小さなタイプ (ILD_L1 と ILD_S1) が基準モデルとして採用された。これを契機にソフトウェアの大幅な更新を徐々に進めている。コンパイラを g++ から g++11 に変更、CERNLIB などの Fortran 依存性排除、ソフトウェアのバージョン管理を DESY の Subversion サーバーからパブリックな Github に移行、測定器ジオメトリ管理ツールを gear から DD4Hep に更新、測定器シミュレーションソフトとして Mokka をやめ DD4Hep を使用した Geant4 アプリケーション DD4Sim に移行、これらに伴いデータ解析コードの更新等である。DD4Hep に組み込まれた ILD_L1 と ILD_S1 の検証が現在進行中である。これら、のソフト群の開発とともに、b クォークや c クォーク等のフレーバー同定、ジェット再構成、レプトン同定等、ハイレベルな事象再構成ツールの性能改善の努力も続けられている。

ILC での物理と測定器の研究では、イベントジェネレータとして Whizard1.95 を標準として使用してきたが、作者からのサポートは数年前に打ち切られているので、新しいプログラム Whizard2 への移行が喫緊の課題である。Whizard2 ではデフォルトでのプログラムの振る舞いが変わるとともに、Whizard1.95 では ILC のジェネレータグループが独自に作成した Beam-strahlung 等 ILC 特有の機能が Whizard2 著者により標準で組み込まれたので移行前に十分な検証が必要である。偏極したタウレプトンの崩壊の処理のためのインターフェースは、Whizard2 には用意されていなかったため、KEK でそ

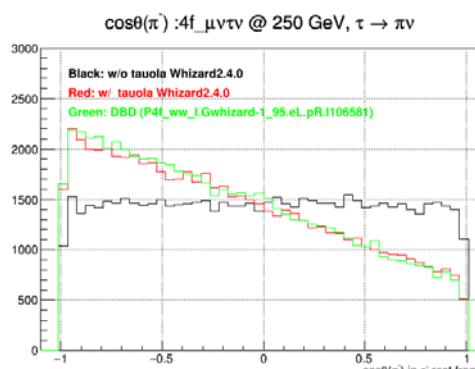


図 5: タウ粒子崩壊からの π の崩壊角分布 (ジェネレータによる比較)

のコードを開発し Whizard2 に提供した。これは、最新の Whizard2 リリースに組み込まれている。タウレプトンが偏極していることによりその崩壊時の π 粒子の崩壊角が非対称になることについて、旧来の DBD サンプルの場合、Whizard2 の場合、および偏極させない場合、について比較したものを図 5 に示す。これ以外にも、ISR 光子の角分布や 4 ジェットイベントの粒子多重度など、プログラムのバグかより正しいモデルを適用したために生じた差異なのか現時点では十分理解できていない振る舞いがある。これらの検討をさらに進め、MC プロダクションに使用できるレベルまでに検証を進めるために、11 月末に KEK と東大にて計 4 日間の専門家会議を開催した。SiD と CLICdp の担当者や、Whizard2 著者も参加した。現 Whizard2 での問題点の共通認識を確立し、解決に向けて検討会を継続して開催することになった。

ILD 測定器最適化のための MC プロダクションでは大量のデータ処理を行うために GRID 国際計算機網を使った処理が不可欠である。ILD ではこのために CLICdp グループが開発した ILCDIRAC をベースにしたツールでデータ作成を行っている。6 月に MC WG が発足した後、すでに小規模の MC データ生成はこれを用いて行われている。約 6M イベントのデータを延べ 1 か月程度の期間で作成し物理解析に提供している。その後も同様な要請がいくつかあり、その都度 MC データの作成を行い標準データとして提供している。ILD の MC プロダクションではサイズの異なるデータ(約 1GB と数 MB)を大量に(数千から数十万ファイル)作成する。これをテープ媒体 1 種類で扱うことは難しかったが、本年より日米事業で協力している米国 PNNL 研究所にディスク・ストレージが用意されたので大量プロダクション実行時の利便性とエラーの低減に役立っている。2017 年半ばより予定している測定器最適化の MC プロダクションでは 2 個以上の測定器モデルについて複数のエネルギー点でプロダクションを行う予定である。現在の ILCDIRAC のアルゴリズムでは多数のプロダクションを実行することになり ILCDIRAC サーバーの処理負荷が加重になるとともに処理を行うオペレータへの負荷も過大になる。これを避けるためにプロダクションスクリプトのさらなる改善を進めている。

ILC のための測定器開発研究の進捗

ILC 物理を実現するため、日本の ILC 物理/測定器グループは ILD グループの主要メンバーとして、特に、ILD 測定器の設計原理である PFA の要となる主要測定器要素、すなわち、バーテックス検出器 (VTX)、主飛跡検出器 (TPC)、および精細カロリメーター (CAL) に力を入れて開発研究を進めている。素核研 ILC グループは、特に VTX および TPC の国内開発拠点となっている。また、素粒子原子核研究所の低温グループと協力して超伝導ソレノイドの設計や 2 相 CO₂ 冷却システム (2PCO₂) 開発を行っている。更には、ILC 物理測定器グループにおいても、加速器と関連の深い Machine Detector Interface (MDI) 部分、ILC 加速器のための ATF・ATF2 による研究や陽電子源の開発等の ILC 加速器研究にも関わっている。以下、VTX、TPC、MDI、陽電子源開発について最近の進展を報告する。

バーテックス検出器(VTX)

Fine Pixel CCD (FPCCD)をセンサーとして用いたバーテックス検出器の R&D を東北大学等と共同で進めている。CCD は信号電荷を長距離 (数 cm) にわたって転送するため、放射線損傷で生じたトラップ準位に電荷の一部がトラップされて信号電荷が小さくなってしまい、Charge Transfer Inefficiency (CTI) が問題となる。この CTI は前もって電荷を注入してトラップを埋めてしまう、Fat-zero charge injection という方法で改善することができる。以前に中性子を照射してダメージを与えたセンサーにつ

いて、この Fat-zero charge injection の効果を調べたところ、実機のセンサーで主に寄与する水平方向の CTI が 1/9 程度まで小さくなることを実証した (図 6)。

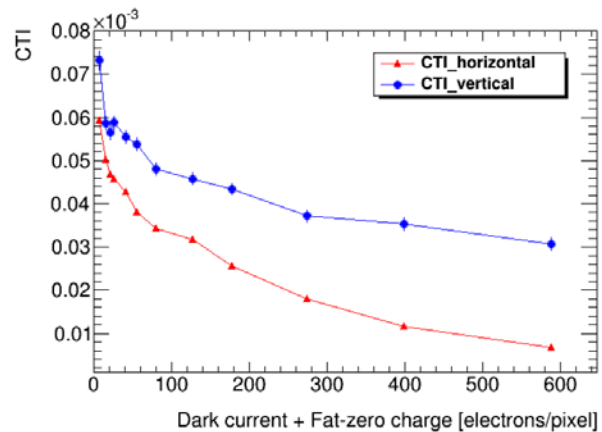


図 6: 注入電荷の関数としての 1 回の転送あたりの CTI。実機では約 120 回の垂直転送と約 10000 回の水平転送が行われる

主飛跡検出器(MPGD 読み出し TPC)

ILD 測定器の主飛跡検出器は端部検出器としてマイクロパターン・ガスディテクター (MPGD) を備えた Time Projection Chamber (TPC) であり、DESY、KEK や Saclay 等の主要研究所と多くの大学チームからなる国際研究組織 LCTPC コラボレーションの枠組みの中で、その研究開発が進んでいる。KEK と佐賀大学や広島大学等の大学チームからなる国内グループは清華大学や IHEP (北京)とも協力して LCTPC アジア・グループとして開発研究を進めている。LCTPC アジア・グループとして特に本年度の最重要課題として集中して進めたのが、企業 (フジクラ) とともに開発した実機サイズの高開口度 GEM 型ゲート装置を搭載した TPC 端部検出器の磁場中での電子ビームによる性能試験であった。LCTPC コラボレーションは、ドイツ DESY 研究所に、端部検出器の電子ビームによる性能試験のための大型プロトタイプモジュール (LP) と超伝導ソレノイドマグネット (PCMAG: これは KEK-DESY 共同研究により設置した) を設備しており、LCTPC 内の各グループが 位置分解能等の基本性能の実証試験が行えるようになっている。LCTPC グループ内で、日本グループは陽イオンゲート装置の開発を任されている。陽イオンゲート装置が要求される性能を満たすか否かは、ILD の主飛跡検出器として MPGD-TPC が解なりうるか否かを左右する最重要の課題である。そこで、LCTPC アジア・グループは、2016 年 10 月末から 11 月中旬まで、DESY にて TPC 端部検出器の性能試験を行った。今回の実験では、開口度 80% 以上の GEM 型ゲート装置を搭載した検出器、開口度 100% のデータと比較するため、GEM 型ゲート装置の代わりに電場成型器 (Field shaper) を搭載した検出器の 2 台の性能試験を行った (図 7 参照)

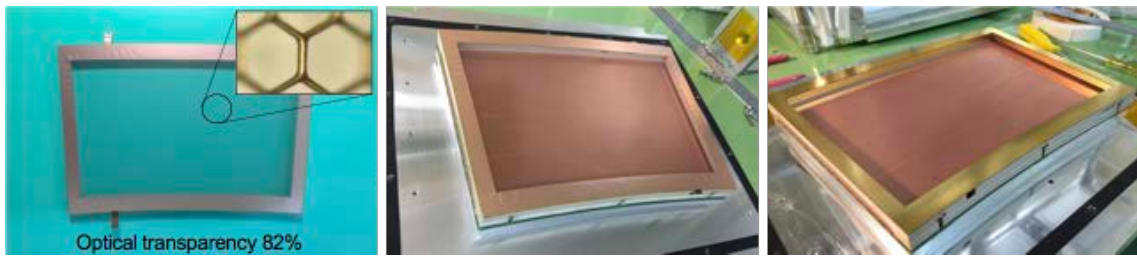


図7図：(左) 実機サイズの高開口度 GEM 型ゲート装置、(中) GEM 型ゲート装置を搭載した端部検出器、(右) 電場成型器を搭載した端部検出器

これは、高開口度 GEM 型ゲート装置を装着した世界で初めての測定である。

12 月現在、解析を始めたばかりであるので、結果は極めてプレリミナリーであるが、搭載した GEM 型ゲートが、期待通りに動いていることを表すプロットを図8に示す。左図の橙色の点は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の小型サンプルに対して 1 T の磁場中で鉄線源を用いて測定した電子透過率である。 $V_{\text{gate}}=3.5 \text{ V}$ 前後で透過率が 82%前後になることが分かる。右図は今回のビームテストにおいて、1 [T]の磁場中において、2つの検出器で得られたチャージ分布の最尤値の比をドリフト距離の関数としてプロットしたものである。全距離において GEM 型ゲート装置の信号の大きさが 82%前後に減少している。これは期待通りの変化である。諸性能を示すプロットは、前述の通り解析中であるが、次回の報告には今回の実験の幾つかのまとめを報告できると期待している。

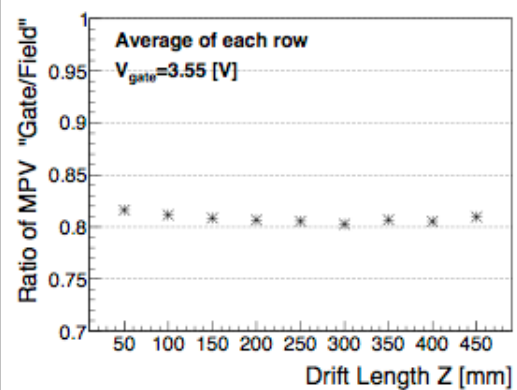
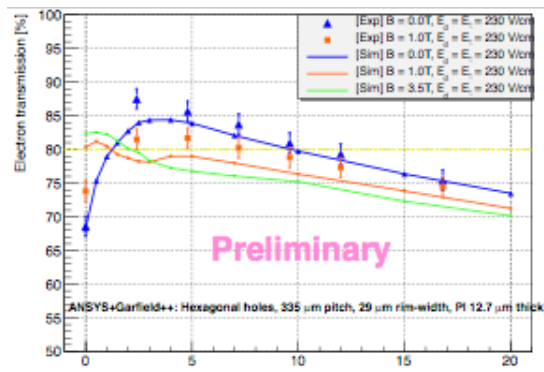


図8：(左) $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 小型サンプルを用いて 1 [T]の磁場中で測った電子透過率、(右) ドリフト距離の関数とした、2つの検出器で取られたチャージ分布の MPV の値の比

ゲート装置の性能について残る課題は、今回開発した高開口度 GEM 型ゲート装置の陽イオン阻止率を実測し性能を証明することである。そこで、GEM 型ゲート装置の陽イオン阻止率を評価するための実験を KEK で行った。十分な強度の陽イオン発生装置が調達できなかったため、今回は、電子の透過阻止率より陽イオンの透過阻止率の下限値を見積もった。陽イオンは電子に比べ重いため拡散の影響が小さく、基本的に電気力線に沿ってドリフトする。よって、電子より止めやすい。そこで、電子阻止率がわかれば、陽イオン阻止率をその下限として得られる。ちなみに、シミュレーションによる陽イオン阻止率の予想値は、 $V_{\text{gate}}=-10 \text{ V}$ 程度で $0(10^{-4})$ である。

ある[9]。右図は、実際に鉄線源とレーザーを用い、信号の大きさの比電子透過率を V_{gate} の関数としたものである[10]。

-15[V]で $0(10^{-4})$ 程度の阻止率がれることが分かる。ガスゲインが程度の場合、1個のドリフト電子リフト領域中に逆流する陽イオン個となる。実際は、増幅 GEM 自体陽イオンの逆流阻止能力があるの十分な陽イオン阻止能力があるとできる。

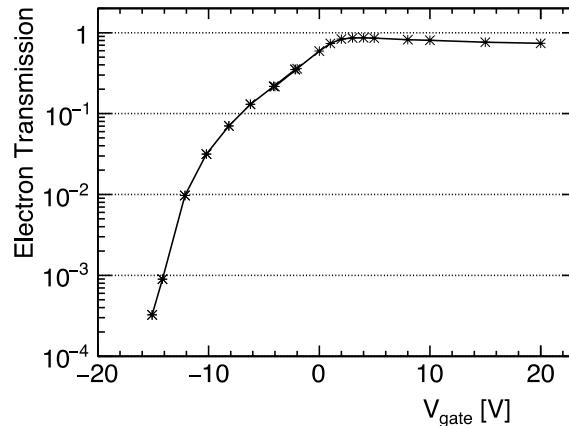


図 9：電子の透過率=陽イオン阻止率の下限

UV レ
から
評価

得ら
3000
でド
は1
にも
で、
期待

UV レーザーシステムを用いた測定の副産物として、TPC 端部検出器に用いている増幅 GEM のガス増幅率の揺らぎを測定する新しい方法を考案した。この手法は、多くの検出器に応用可能で、国際会議 VCI16、IEEE16 で報告を行った[11]。

加速器- 測定器インタフェース (MDI) と測定器インテグレーション

TDR では ILD 測定器の組み立て (インテグレーション) を 9 年間で完了するスケジュールとなっている。バレルカロリメータはソレノイドの内側に設置される。それらの設置後にソレノイドの磁場測定が行われる。これらの作業は地上のアッセンブリホールで行われる。地下の実験ホールでは、TPC などの飛跡検出器が設置される。今回、ソレノイドの冷却・全電流通電試験をバレルカロリメータの組み込み前に行うように工程を変更し、不測の事態にスムーズに対処できるようにした。そのために鉄ヨークの組み立ての期間を 1.5 年短くしなければならないことが分かった。従って 1 鉄ヨークリング当たりの組み立て期間は 6 ヶ月となった。この短縮案の実現可能性は今後検証すべき課題である。また、ソレノイドには anti-DID (Detector Integrated Dipole) を組み込まなければならない。少なくとも二つのオプションの anti-DID を含めたソレノイドの技術的な検討 (製作方法と組み立て期間など) を行っている。今年度中にその基本構造 (案) を作成する予定である。

陽電子源開発

素核研 ILC グループでは、物理検討や測定器開発に加えて、物理に触発された偏極陽電子源開発や物理屋の得意とする電磁シャワーシミュレーション等の手法を活かした陽電子源の研究開発を行っている。この研究は加速器研究施設、原研、広島大学、ANL、DESY、ハンブルグ大学、CERN、IHEP、BINP などと共同で、リニア・コライダー・コラボレーション (LCC) の ILC 陽電子源グループとして一体となって進めている。

ILC ではアンジュレーターによる偏極陽電子源がベースラインである。偏極が得られることが利点であるが、陽電子生成回転ターゲットの高速回転と高真空の両立、熱とストレスの問題、陽電子生成後にターゲットを通り抜けた光子の処理 (photon dump) などが厳しい

課題である。また電子側と陽電子側が完全に一体となることによる運転の難しさ、特に低エネルギー衝突実験時やコミッショニング時の難しさがある。そのため ILC 陽電子源グループではアンジュレーターによる偏極陽電子源の困難を克服する努力をすると同時に、建設に関する技術的リスクを最小化するためにコンベンショナル陽電子源の開発を並行して進めている。

KEK のグループは主としてコンベンショナル陽電子源の開発を中心に進めている。コンベンショナル陽電子源でもアンジュレーター陽電子源と同様に回転ターゲットを用いるが、要求される回転速度はアンジュレーター陽電子源に比べて有意に小さく(1/20)、難易度は相対的に低い。しかし、それでもかつてない挑戦的なターゲットであり、設計検討を進めるとともに、試作品を作って確認する必要がある。素核研のグループは、主としてこのコンベンショナル陽電子源の陽電子生成回転ターゲットの研究を行っている。この研究は同様の装置の経験が豊富な(株)リガクと契約して進めた。熱とストレスの解析を進め、それに対応する水冷機構の設計を進めた。また回転軸を含む中央部分の試作を昨年度行ったが、本年度はその試作機を使った真空試験を広島大学と共同で行っている。その準備状況(2016年12月)を図10の写真に示す。回転を伴う真空試験は1月に開始する予定である。ターゲットの回転真空軸受けを含む試作試験は来年度も継続して行う予定であり、予算が許せば現在完成している中央部分に実機大のディスクをつけて、実機と同じ重さとモーメントの条件での回転・真空試験に進む。この回転ターゲットの試作が完了し、真空試験において良好な結果を得ることができれば

コンベンショナル陽電子源の確実な実現に向けて大きなステップとなる。またその実績と経験は、より大型で高速回転が要求されるアンジュレーター用のターゲットの開発へも生かすことができる。コンベンショナル陽電子源では陽電子収集・加速に常伝導加速器を使うが、ここでの大電流加速もクリアすべきポイントである。これに関してもダンピングリング入射直前までの陽電子収集・加速・バンチ長圧縮部などの詳細シミュレーションをこの数年来、広島大学、加速器施設と共同で行ってきたが(図10下)、本年度はそれをさらに精密化しビームローディングを含めたシミュレーションを行い問題がないことを確認した。今後は陽電子収集部の加

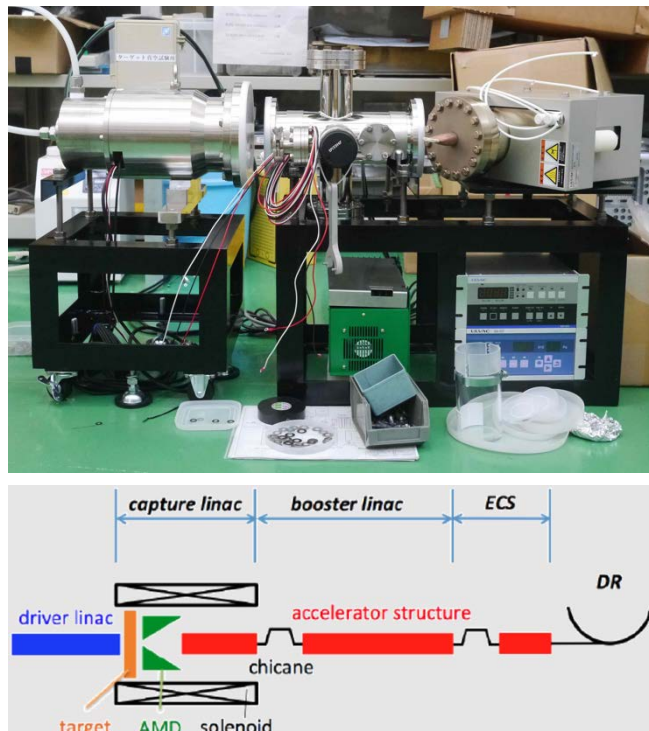


図10: (上) コンベンショナル陽電子源用回転ターゲット中央部の開発試験用セットアップ、(下) コンベンショナル陽電子源 (概念図)

速管の冷却の検討などを進める

アンジュレーター陽電子源に関しては、本年度は TDR の高圧水を用いた photon dump の設計では、窓が光子ビームで破壊されてうまく働かないことが TDR 後の詳細研究により判明した年であった。この点に関しては CERN の Peter SIEVERS 氏から新しいアイデアに基づく photon dump のコンセプトが提示されたが、Peter SIEVERS 氏および ハンブルグ大の Andriy USHAKOV 氏を本年度 KEK に招聘し、共同でシミュレーションによる研究を集中して行った。その結果、まだコンセプト設計レベルではあるが TDR 案に代わる設計案が完成した。

今年度は、後半になって ILC の初期コストを抑えるための段階的実現案が提案された。これは陽電子源の設計や技術選択にも大きく影響する。また陽電子源の技術選択は期待される物理成果に影響する。今後はこれらを物理研究者と加速器研究者の間でよく情報交換し、各種の技術選択の利害得失を理解した上で合意形成を図っていく必要がある。素核研 ILC グループはこの合意形成をリードしていきたい。

一方、上記と並行して物理に触発された逆コンプトン散乱ベースの偏極陽電子源開発の開発も行なっている。これに関しては「自発発振・光蓄積空洞の原理検証(科研費、基盤 A、課題番号 25246039、H25-29)」を得て研究を進めている。昨年度は CW 運転において自発的な発振によって、フィードバック制御を一切行うことなく 19 万倍という高い増大率でレーザー光を光空洞内に蓄積することに成功しこのアイデアの基本的な正しさを実証した。加速器ビームとレーザー光の効率の良い衝突のためにはパルス運転ができる自発発振・光蓄積空洞が必要である。このパルス化の研究を昨年度から今年度にかけて行なっている。

参考文献

- [1] ILC に関する有識者会議「これまでの議論のまとめ」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm
- [2] “Implications of the 750GeV $\gamma\gamma$ Resonance as a Case Study for the International Linear Collider”, arXiv:1607.03829
- [3] ILC に関する有識者会議「人材の確保・育成方策の検証に関する報告書」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1374374.htm
- [4] ECFA LCWS2016, <http://www2.ifca.unican.es/congreso/ECFALC2016>
- [5] LCWS2016, <http://lcws2016.sgk.iwate-u.ac.jp/>
- [6] “Measurement of the Higgs boson mass and $e^+e^- \rightarrow ZH$ cross section using $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $Z \rightarrow e^+e^-$ at the ILC”, Phys. Rev. D94 (2016) no.11, 113002
- [7] “Tau lepton reconstruction at collider experiments using impact parameters”, Nucl. Instrum. Meth. A810 (2016) 51-58
- [8] “Diphoton resonances at the ILC”, Phys. Rev. D 94 (2016) 095015
- [9] “Blocking positive ion backflow using a GEM gate: experiment and simulations”, 2013 JINST 8 C11023
- [10] “Measurements of the electron transmission rate of a full-size gating GEM in the absence of magnetic field”, <https://agenda.linearcollider.org/event/7371/contributions/37927/attachments/30877/46209/shojia>

[lcws2016.pdf](#)

[11] “A novel technique for the measurement of the avalanche fluctuation of gaseous detectors”,

[arXiv:1607.00649](#)