

5月8日、文科省が設置した「国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議」の最初の会合があり、文科省による正式な ILC 計画に関する検討作業が始まった[1]。そこでの議論を受け、各国の将来加速器構想を踏まえ ILC 物理等を検討する「素粒子原子核物理作業部会」と ILC 技術設計報告書 (TDR) の検証等を技術的専門的観点から行う「TDR 検証作業部会」の二つの作業部会が有識者会議の下に設置された。二つの作業部会は、その後現在に至るまで各々数回の会合を持ち、これまでの進捗状況を 11 月 14 日の第 2 回有識者会議に報告することになっている。素核研 ILC グループは、国内の ILC に関与する実験および理論研究者、リニアコライダー計画を推進する国際組織であるリニアコライダー・コラボレーション (LCC) の下に設置されている物理ワーキンググループと密接な連携を取りつつ、「素粒子原子核物理作業部会」に対して ILC 物理の意義を明確するための情報入力を行っている。

これら国内情勢の進展と並行して、素核研 ILC グループが主要メンバーとして参加している ILD 測定器グループでは、物理検討とともに ILD 測定器設計の最適化作業 (後述) が進んでいる。作業の進捗状況を共有し今後の方針を策定するため、9月5日から9日にかけて、岩手県奥州市において ILD グループミーティングを開催した。このミーティングには世界各国から 80 人を超える参加者があり、ILD 測定器の設計最適化や、正式な実験コラボレーション形成に向けたグループ組織の明確化等に関する活発な議論が行われた。また、ミーティングの様子は地元のマスコミにも大きく取り上げられた。続く 10 月 6 日から 10 日にかけてはセルビア、ベオグラードにてリニアコライダー (ILC だけでなく CLIC を含む) 加速器、物理測定器の関係者が一同に介する年に一度の国際ワークショップ (LCWS2014) が開催された[2] (図 1)。初日には来賓としてセルビア大統領の挨拶もあり、ILC 物理、加速器、測定器の最適化や開発設計について議論が盛り上がった。特にサイト依存な設計に関連して、地下実験室へのアクセスの方法としてアクセストンネルと立坑の併用案採用の合意がなされ、また、(目標とする物理の観点から ILC のどのエネルギーでどれだけ積分ルミノシティが必要か) RUN シナリオの検討が進んだ。



図 1: ベオグラードでの LCWS2014 WS

## ILD 測定器による ILC 物理の検討と ILD 測定器設計の再最適化

ILD 測定器の設計理念は、ILC TDR の測定器の巻に収録されている詳細基本設計 (DBD) に記載されている通り[3]、超細密カロリメータと、高いパターン認識能力を持つタイム・プロジェクション・チェンバー (TPC) を主飛跡検出器とし、その内外に高位置分解能シリコン飛跡検出器とバーテックス検出器を組み合わせた、いわゆる粒子流解析 (Particle Flow Analysis: PFA) に最適化された大型検出器システムである。この基本概念は不変であるが、次のマイルストーンである ILC 計画承認後の測定器プロポーザル公募までにはなお少し時間があるため、物理探索能力を落とさず、また ILD 測定器の基本的構成には大きな変更を加えずに、測定器コストを下げするための測定器設計の見直し作業を進めている。ILD 測定器の設計パラメータ変更に伴い物理の結果がどう変化するかをシミュレーションで明らかにすることが中心課題である。特に、コスト・ドライバーである電磁カロリメータ、構造体の大きさに対する応答を、鍵となる測定 ( $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$  反応を用いたヒッグス反跳質量法による断面積およびヒッグス質量測定、ヒッグスの不可視崩壊分岐比測定、圧縮スペクトルの場合の超対称粒子探索、一光子過程を使った暗黒物質探索等) について、DBD 以降の物理解析や測定器開発研究で得られた知見を加味し、フル・シミュレーションにより再検討している。これらの検討は、DBD 作成に用いられたソフト群を用いて行われているが、最終最適化には測定器モデル記述形式を DD4HEP ベースに刷新した新しいシミュレーション、事象再構成ソフト群を用いる予定になっており、コード開発が国際協力で進行中である。

新しいソフト群を用いた測定器設計の再最適化には大量モンテカルロ・データ生成が必要となるが、素核研 ILC グループでは、そのための準備が進行中である。DBD 作成時まで、大量モンテカルロ・データ生成には、DESY で開発された GRID ツールや KEKCC バッチシステムが使われてきた。DBD 完成以降、CERN CLIC グ

ループやもう一つの ILC のための測定器グループである SiD グループと共に、計算機資源の有効活用を図るため、CERN が中心となって開発を進めてきた ILCDirac システムを ILD の標準プロダクション・ツールとして使用するための共同作業を進めてきた。従来より、ユーザージョブを ILCDirac 経由で走らせることは行われていたが、標準モンテカルロ・データ作成に使用するためには、ILD 標準命名則に従いデータを作成し、また作成したデータ情報を管理するツールも用意する必要がある。DESY と協力して ILD 用スクリプトを開発して、現在、試験的に作成したデータの検証を進めている。DBD までは DESY が主にデータ作成を行ってきたが、標準データの作成は、今後、KEK IPNS グループが分担して作成を行う体制になる予定である。ILD で進行中の測定器最適化研究では様々な測定器モデルに対して、標準データの作成が求められており、素核研 ILC グループはこの作成を通じて ILD に貢献する予定である。

これら測定器設計の再最適化のための検討や準備と並行して、測定器性能を最大限に活かし、ヒッグスやトップ結合の標準理論からのずれに対する感度をさらに向上させ、より高い物理のパフォーマンスを実現するための解析手法の改善も進んでいる。それらの改善には、ILD 測定器の特徴を活かし TPC の dE/dx 情報や超細密カロリメータ中のシャワー形状の情報を利用した孤立レプトン同定ツール性能向上が含まれる。また、LHC でも使われている遷移行列要素法 (MEM) のためのツール開発を進めており、主要なヒッグス生成反応、それらに対応する主要なバックグラウンド反応について MEM のためのツールが揃いつつあり、それらのツールの検証作業を行っている。図2(左)は、 $e^+e^- \rightarrow Zh$  反応において Z 崩壊からのレプトン対で再構成した Z 質量と Z 崩壊におけるレプトンの方位角の二次元分布であるが、同じ分布を MEM ツールで計算した微分断面積の逆数で重みをかけた場合(図2(中))では分布が期待通りフラットとなり MEM ツールが正常に働いていることを示す検証例となっている。図2(右)は、MEM を含む4つの事象選択法 (MLP: Multi-Layer Perceptron, BDT: Boosted Decision Tree, 単純な Likelihood) の性能比較。MEM がバックグラウンド棄却能力、信号選択効率の両面で他の方法を上回っている事が分かる。

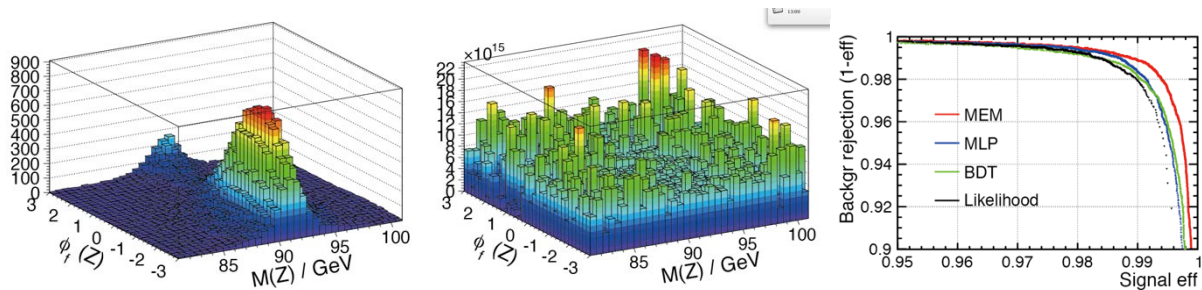


図 2: (左)  $Zh$  生成反応における Z の質量と Z 崩壊の方位角分布。(中) (左) 遷移行列法 (MEM) ツールを用いて微分断面積の逆数の重みをかけた場合。(右) 信号事象選択効率とバックグラウンド棄却効率に関する異なる事象選択手法の性能比較。

これらのツールは、今後、 $e^+e^- \rightarrow Zh$  反応を用いた反跳質量法によるヒッグスの質量および生成断面積測定、ヒッグスの分岐比測定、 $e^+e^- \rightarrow tth$  反応を用いたトップ湯川結合測定、 $e^+e^- \rightarrow Zhh, vvhh$  反応を用いたヒッグスの自己結合測定等、様々な解析に応用していくことになる。

## ILC のための測定器開発研究の進捗

物理の検討や、それを実現する測定器の全体設計の最適化は、要素測定器のハードウェア開発研究に裏打ちされたものでなければならない。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 (CAL) に力を入れ、このうち、素核研 ILC グループは 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開発に関与している。更には、ILC 物理測定器グループにおいても、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、これらの活動の内、前回報告から特に進展のあった、TPC 開発について報告する。

### 主飛跡検出器 Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) 読み出し TPC

ILD グループでは 3 次元ガス飛跡検出器である大型タイム・プロジェクション・チェンバー (TPC) を数層のシリコン検出器で囲うハイブリッド飛跡検出器を採用している。TPC による優れた飛跡連続追跡能力とシリコン検出器の高い位置分解能を組み合わせることによって、広い運動量領域の粒子に対する非常に高い運動量分解能 (高運動量極限で  $\delta p_t/p_t^2 < 2 \times 10^{-5}$ ) を得るとともに、多数の粒子ジェットが発生する環境において低い運動量領域の粒子に対しても 100% に近い高い粒子検出効率を実現する。これにより、Higgs 粒子の精密測定や LHC では見つけにくい圧縮された質量スペクトルを持つ超対称性粒子の探索が可能となる。測定器プロポーザル公募に向け、この TPC の特徴を改めて確認するシミュレーション研究にも力を入れている。

MPGD-TPC の開発は、国際的な開発研究グループである LCTPC コラボレーションの枠組みの下に行われている。コラボレーションでは DESY に設置した TPC 大型プロトタイプ (LP) ビーム試験設備を用いて各種 MPGD 端部検出器モジュールの開発研究を進め、既に位置分解能等における基本的性能の実証試験を終えている。しかし、ILC 実験環境下での要求性能を担保するには、まだ技術的課題が残されている。重要かつ緊急の課題の一つは陽イオンゲートの開発で日本グループの担当である。

加速器からのバックグラウンド粒子によって MPGD モジュールの電子ガス増幅領域で発生する陽イオンが TPC のドリフト領域に帰還すると TPC の電場歪みをもたらす粒子飛跡を歪める。これを阻止する方法として、古典的なワイヤーゲートの代わりに光学的開口度の高い GEM をゲートとして使用することが提案されている。従来の GEM ゲートの場合、陽イオンを 100% 止めることはできるが、ドリフト電子の透過度が最大でも 50% 程度で、位置分解能に劣化が見られた。この状況を打開するため、昨年来、日本グループでは 80% 以上の開口度を持つ GEM の開発を進め、小規模および中規模のサンプルについて試験を進めている。図 3 は小規模サンプルについて KEK 低温センター 1 T 超伝導ソレノイドを使用して電子透過度を測定したものである。最終結果ではないが、シミュレーションとの一致もまざまざで、目標透過率を達成できたものと考えている。今後は大型化を進めて 1 年程度で LP ビーム試験施設での実証試験を行う予定である。

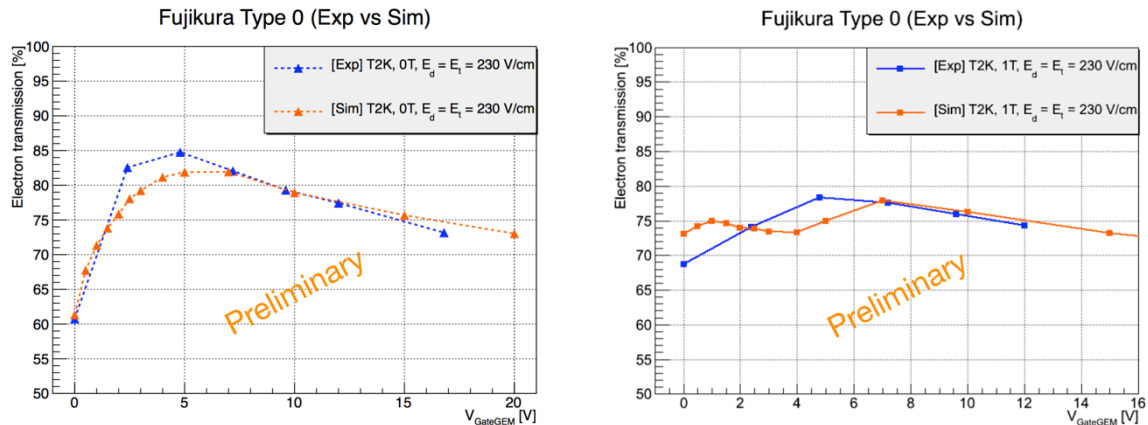


図 3 : (左) 電子透過率をゲート GEM への印加電圧の関数としてプロットしたもの (磁場無しの場合)。青が実験、橙がシミュレーション。(右) 磁場 1T の場合の同様のプロット。

前回報告したように、この他、日本グループではレーザービームによる MPGD 端部検出器の試験 (特に飛跡の局所的歪みへの対策) や端部 MPGD モジュールに直接搭載する次期読み出しエレクトロニクス (S-ALTR016) の 2 相 CO<sub>2</sub> 液体冷却や陽イオンゲートを搭載する次期モジュールの構造設計等を進めている。これらの内、特に飛跡の局所歪みについて進展があったので以下に紹介する。

モジュールに特有の局所的構造の非一様性は、ドリフト電場の局所的非一様性の原因となる。この電場非一様性は (磁場がある場合には、さらに E×B 効果が加わることで)、局所的な飛跡の歪みとなって現れる。図 4 にビーム試験において観測された飛跡歪みの例を示す。



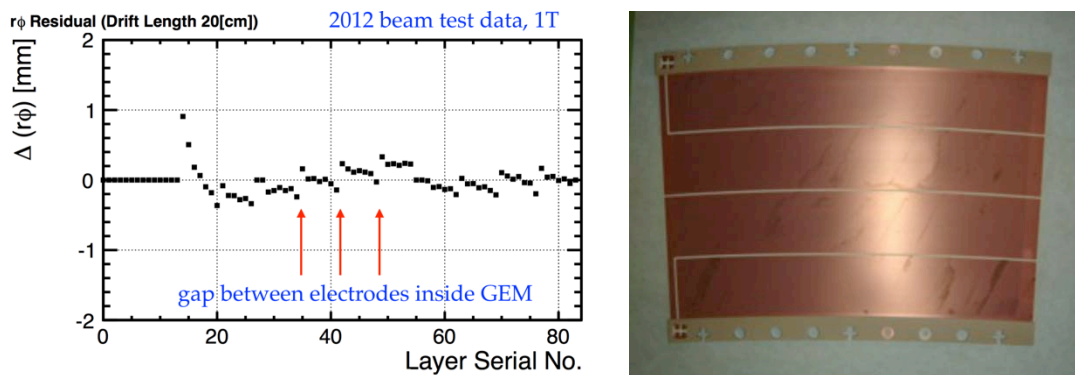


図4：(左) DESYでのビーム試験で観測された飛跡歪みの大きさをパッド列ごとに示したもの(磁場：1T、入射角0度)。(右) ビーム試験に用いたGEMモジュール。放電した際に読み出し回路が故障する問題を回避するため、電極を4分割して蓄積エネルギーを低減させる構造になっている。この分割の電極ギャップで歪みが観測された。

このような飛跡の局所歪みの問題は、詳細な電場計算と試験ビームによる測定に基づいて適切な電極を追加し、あるいはモジュール構造を変更することによって改善されるべきものである。前回報告したように、日本グループでは、試験ビームによる測定に加えて、荷電粒子とほぼ同等の飛跡を残すコンパクトなUVレーザービーム装置による測定の準備を行った。その後、このUVレーザービームをGEMモジュールに入射して読み出した飛跡の歪みとシミュレーションとの比較研究を行った。図5(左)に磁場無しでレーザービームを斜め入射(20度)させた場合に観測された歪み、図5(右)にビーム試験(磁場1T)で観測された歪みを示す。

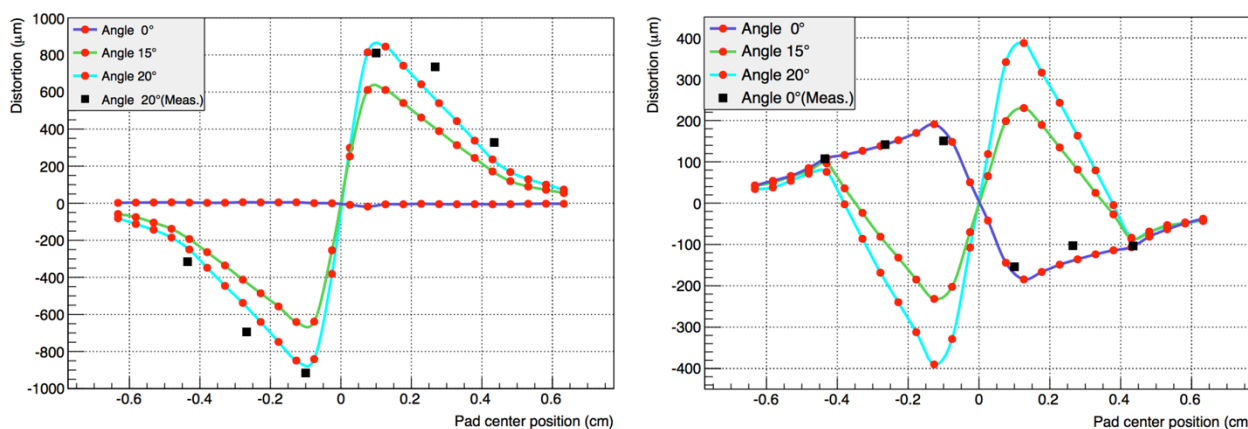


図5：(左) 電極ギャップ近傍における局所的飛跡歪みをパッド中心と電極ギャップの中心との距離の関数としてプロットしたシミュレーション例(磁場：0T)。 $\blacksquare$ は、レーザー試験(20度入射)の場合の歪みの観測値。(右) 磁場：1Tの場合の同様のプロット。 $\blacksquare$ はビーム試験での観測値。

レーザー試験、ビーム試験いずれも、シミュレーション結果は、観測された飛跡の局所歪みと良く一致している。これにより、シミュレーションによる構造最適化の信頼性が確認された。このGEMフォイルの電極ギャップの問題については、ドリフト領域に面する側の電極分割を無くす事で既に対処済みである。これらの局所歪み研究において(特にシミュレーション部分)、5月中旬から7月中旬まで、当グループに滞在した中国清華大学の Bo Li 氏の貢献による所が大であったことを申し添えておく。

以上

#### 参考文献

- [1] ILD Workshop 2014, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm)
- [2] LCWS 2014, Belgrade, Serbia, <http://lcws14.vinca.rs/gallery/>
- [3] ILC Technical Design Report, vol.4 Detectors, arXiv:1306.6329
- [4] DD4HEP, [http://cds.cern.ch/record/1473120/files/AIDA-D2\\_3.pdf](http://cds.cern.ch/record/1473120/files/AIDA-D2_3.pdf)