

### ILCに関する国内外の動き

前回報告以降、最も特筆すべきは、ILCを250 GeV Higgs Factoryとして早期に国内建設するとする高エネルギー物理学者会議（JAHEP）の提案が、ICFAで正式に承認され[1]、これを受け、国内でも、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250 GeV ILCの物理の意義、250 GeV ILC加速器の技術的成熟度とコストの再評価を進めていることである。文科省有識者会議の検討は、現在、「素粒子原子核物理作業部会」と「TDR検証作業部会」の二つの作業部会により行われており、各々既に4回の会合を持ち、報告書をまとめる段階に入っている。

また、素核研 ILC グループが中核研究所の一つとして参加している International Large Detector (ILD)測定器グループでは、後述のように、測定器フルシミュレーションのためのソフト群を刷新し、それを用いたコスト低減の可能性も含めた全体設計の再最適化の準備を進めてきたが、ようやくソフト群の検証が終わり、モンテカルロ (MC) データの大量生成が始まった。今後は、これらのMCデータを使い、あらかじめ設定された複数のベンチマーク物理過程について測定器の再最適化を行う。これらの検討結果については、2019年初頭を目処に報告書にまとめる予定である。また、それとは別の簡潔な報告書を2018年秋頃までに作成し、欧州高エネルギー物理戦略検討プロセスへの入力とする予定である。

5月28日から6月1日にかけて福岡で開催される ACFA Linear Collider Workshop 2018 (ALCW2018) では、250 GeV ILCの物理、測定器、加速器の状況、および日本および世界の情勢について欧米からの研究者を交えた活発な議論が期待される。

### 物理の検討

これまで、素核研ILCグループは、リニアコライダー・コラボレーション (LCC) や ILD 等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が、2017年度は250 GeV ILCでの物理、特にヒッグス粒子の精密測定、およびそれをプローブとした新物理探索を中心課題として検討を行った。前回報告したように、Effective Field Theory (EFT) を用いた解析により、250 GeV データのみで種々のヒッグス結合定数をモデル非依存に精度良く決める方法を、SLACのTim Barklow、Michael Peskin、東京大学のJunping Tianらと開発したが、その詳細が学術誌に掲載された[2][3]。EFT解析により、同じ積分ルミノシティに対して、250 GeV運転のみで、重心系エネルギー500 GeV運転を含んだこれまでの解析法による測定精度と同程度の精度を達成できることが明らかになった。また、これらの結果を中心に、LCC物理ワーキンググループとして「250 GeV ILCの物理の意義」に関する報告書をまとめた[4]。この報告書は、13 TeV LHCのこれまでの結果を踏まえ、250 GeV ILCの物理を総合的に検討しまとめたもので、

ICFA へ提出され、前述の ICFA 声明へ繋がるとともに、文科省有識者会議の素粒子原子核物理作業部会での議論の出発点となった。また、LCC 物理ワーキンググループでは、250 GeV ILC における陽電子偏極の役割を検討した報告書 [5] も公表している。現在、陽電子源技術のベースラインは陽電子偏極が得られるアンジュレータ方式であるが、より技術的困難が少ないが偏極のない、後述の電子駆動方式との間の最終的な技術選択は、この報告書に記載された物理の観点と技術的成熟度とのバランスを見て判断されることになると考えられる。

個別の解析では、前回保途中経過を報告した、ヒッグス粒子が関与する CP の破れを含む異常結合の探索について、シミュレーションをほぼ終え投稿論文の準備が進んでいる。hZZ あるいは hWW の異常結合の測定精度を EFT により見積もる、総合的なフルシミュレーション解析の結果は、小川智久氏の博士論文にまとめられる予定である。また、ヒッグスとタウレプトンの結合に現れると期待される CP の破れの効果に関するシミュレーションは既に投稿論文にまとめられ、現在、ILD グループ内でのレビューが行われている。また、EFT 解析の一環として、今まで詳細には見積もられていなかった HZ $\gamma$  結合のフルシミュレーションによる解析が始まった。これらヒッグス関連の物理の検討に加え、250 GeV でできる新粒子の直接および間接探索の検討も進んでいる。これらには、2-フェルミオン生成反応に現れると期待される新物理と標準理論の干渉効果の探索や、Z 粒子と弱く結合する比較的軽いスカラー粒子の探索が含まれる。これらの探索は、暗黒物質探索やゲージ・ヒッグス統一モデルの検証の観点から、関心が高まっている。

これらの個別の物理過程の研究とともに、終状態に複数ジェットを含む反応全般において大幅な測定精度向上をもたらすと期待されるジェットクラスタリングの性能向上に関する研究も続いており、深層学習の技法を取り入れた新しいジェットクラスタリング手法の開発が試みられている。同様に重要なのは、終状態の b ジェットや c ジェットの高効率での同定とその電荷符号の決定であるが、これについても TPC 内での dE/dx (単位長さあたりのエネルギー損失) を利用した K 中間子同定や、バーテックス荷電測定などの手法の改良が進んでいる。

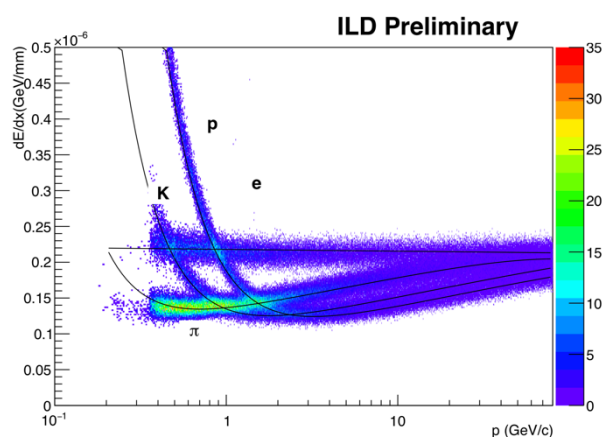


図 1: TPC 内での dE/dx の運動量依存性

### ソフト開発および MC データ生成

ILD グループの中で、素核研 ILC グループはカロリメータを中心とするシミュレーション・ソフトウェアの開発と MC データ生成を担当している。ILD グループは、ILC TDR 作成時

に行われた詳細基本設計 (DBD) 研究終了後、新しい測定器ジオメトリ記述のための枠組みである DD4Hep を用いた Geant4 シミュレータと、それに対応した解析ソフトウェアの開発を進めてきた。測定器のモデルとしては、従来とほぼ同じ大きさを持つ L モデルと、やや小さい S モデルの 2 種類を基準モデルとして用意し、測定器の最適化を行うことを目指している。

昨年 10 月より今年 4 月にかけて 2 度の試験 MC データ生成を行い、シミュレータ本体、測定器モデルや解析ソフトウェアの最終確認を進めた。試験生成では、L と S の二つの測定器モデルの基本性能を調べるため、 $\gamma$ 、 $K_L$ 、 $\mu$  粒子などの 1 粒子事象や、クォーク対生成事象に加えて、500 GeV における 2 レプトンやトップ対生成事象などの物理過程のサンプル生成を行い、ソフトウェア系の全体検証を行った。図 2 左に、12 月に行った試験生成での積算 CPU 時間の推移を、右にシミュレーションデータの蓄積状況を示す。

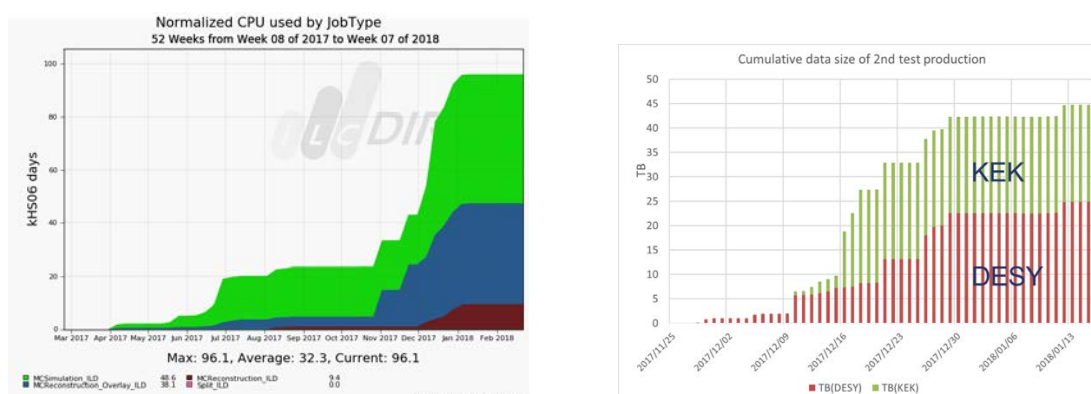


図 2 : MC 試験生成に要した積算 CPU 時間 (左)、積算 MC データ量 (右)

これらの試験生成により確立したデータ処理の流れに基づき、より短時間でより大量のデータ生成ができるように、処理の自動化をさらに進めた。また、試験生成した MC データの検証過程において見つかった、測定器モデルの不備、ビーム起源背景事象の重ね合わせ処理の問題、出力データの不完全性等、様々な問題の修正を行う一方、新しい飛跡再構成コードの性能の確認、アナログ読み出しとセミデジタル読み出しの 2 つのハドロンカロリメータシステムの Particle Flow 性能の確認なども行われた。試験生成された物理事象の MC データより  $\tau$  対生成事象中の  $\pi^0$  崩壊イベントなどにより、L モデルと S モデルの間での性能の差の違いなど最適化研究の初期結果も得られている。

これらの検証作業を通してソフトウェア系の最終確認を終え、4 月下旬に 500 GeV 標準データの作成を開始した。

### ILC のための測定器開発研究の進捗

物理シミュレーションに基づく現実的な測定器設計の最適化には、各測定器要素に関する性能パラメータを裏付けるハードウェア開発が不可欠である。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 Particle Flow Analysis (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 の国内開発拠点の役割を果たすとともに、CAL についても国内の関係大学とともに開発研究を進めるための準備を開始した。また、素核研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 CO<sub>2</sub> 冷却システム (2PCO<sub>2</sub>) 開発も行っている。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。今回は、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)

素核研 ILC グループでは高精細画素 CCD (FPCCD) を荷電粒子のセンサーとして用いたバーテックス検出器の開発研究を行っている。FPCCD の読出し速度の目標は 10Mpixel/s であるが、我々は小型のプロトタイプ FPCCD センサーを讀出し用 ASIC と組み合わせたシステムの試験を行い、この読出し速度の目標値を達成できることを示した。高速読出しに伴い、低速読出し時に比べて若干のゲインの低下 (約-6dB) が見られたが、これは CCD の出力と ASIC の入力とを結合している部分のコンデンサーの容量を小さくして時定数を変えることによって克服できると考えている。

### 主飛跡検出器(MPGD 読み出し TPC)

ILD 測定器では、主飛跡検出器としてマイクロパターン・ガスディテクター (MPGD) を端部検出器とする Time Projection Chamber (TPC) を採用している。DESY、KEK、Saclay 等の研究所、また多くの大学チームからなる国際研究組織 LC-TPC の下で、研究開発を進めている。ILC 用の TPC (LC-TPC) の実現には、ガス増幅で生成される陽イオン群がドリフト領域に逆流し位置分解能を劣化させることを防ぐ、陽イオンゲートと呼ばれる装置が必要不可欠であり、最重要課題となっていた。日本を中心とするアジアの組織である LC-TPC アジアグループは、企業 (フジクラ) とともに高開口度陽イオンゲートを開発してきた。現在、2016 年 10 月末に行ったビーム試験 (これまでの報告 2017/01, 10 参照) を用いた様々な解析を進めている

そのような解析の一つとして、ここでは、 $dE/dx$  測定について紹介する。TPC は荷電粒子の飛跡に沿って多数のヒット点を測定できる。ヒット点からは、位置情報だけでなく、ガス中での荷電粒子の電離過程によるエネルギー損失の情報が得られる。単位長さあたりのエネルギー損失  $dE/dx$  は荷電粒子の速度の関数なので、図 1 に示したように、運動量と  $dE/dx$  を測定することにより粒子識別が可能となる。相対論的領域で、5%程度の  $dE/dx$  分解能が達成できれば、カロリメーターを用いた TOF 測定と組み合わせることで数十 GeV 近辺まで  $K/\pi$  識別が可能となり、 $b$  ジェットの電荷符号同定など、物理解析への幅広い応用が期待できる。これまでのビーム

試験データによる解析で、5 GeV の電子に対し  $dE/dx$  分解能 4.7%との結果が得られている (図3)。

陽イオンゲートの電子透過率に関する理解も進んでおり、Garfield++シミュレーションに、電場の変化に即した細かなステップ処理を新たに組み込むことにより、1T の磁場下における実験結果を再現することに成功した。これは高磁場下でのシミュレーションによる予測の道を開く結果である。

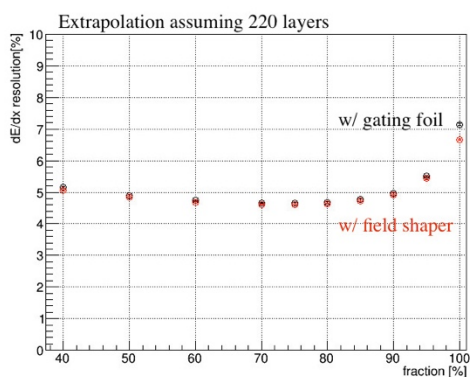


図3: トランケートミーン法による  $dE/dx$  分解能のトランケート割合依存性

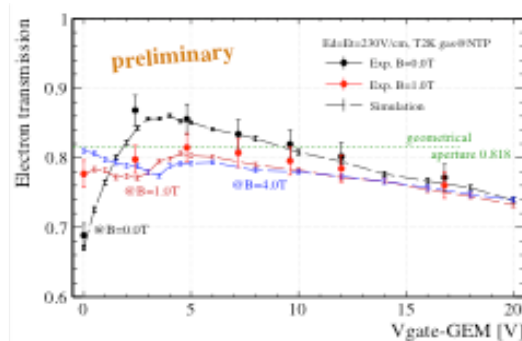


図4: ゲート GEM の電磁透過率の動作電圧依存性

### 加速器-測定器インタフェース (MDI) と実験室周りの検討

ILD グループでは、ILD 測定器の詳細技術設計を進めるために、ILD Technical Design Document (ILD 技術設計のための文書) の作成が行われている。MDI サブグループは、海外の共同研究者による測定器の製作・運転上適用される日本の法律・規制を取りまとめている。また、地下実験室の詳細設計を行う上で必須となる測定器関連の設備条件を整えながら、KEK の CFS グループと共同で衝突点付近の施設・設備の最適化を行っている。それら一連の事項に関する国際的な議論の場として、2月23日に「Mini-Workshop on ILC Infrastructure and CFS for Physics and Detectors」を KEK で開催した。そこで、各測定器サブグループによる、それぞれの測定器設備のできる限り詳細なリストの作成の必要性が合意された。また、MDI サブグループから、測定器の耐震設計をする上で必須の北上サイト特有な地盤振動の国際基準 ISO3010 に基づく入力条件を地上と地下それぞれに対して示した。

MDI サブグループは、素核研の低温グループと協力して、超電導ソレノイドからの非常に強い電磁力を受ける anti-DID コイルを効率的に支持する方法の検討を開始した。ILC-TDR で提案された厚さ 50mm のソレノイドコイル用支持シリンダ上に結合させる構造を考案した。予備的な結果であるが、この支持構造は少なくとも方位方向の電磁力に十分耐えられることが主に解析的方法で確認された。

加速器と測定器の接続部に属する研究として、ビーム起源背景事象を許容範囲に収めつつフルミノシティを最大化するビームパラメータの最適化問題がある。ILC-TDR に記載された

500 GeV ILC のビームパラメータでは、250 GeV の場合よりかなり大きなビームストラールングを許容する設計となっている。同じ程度のビームストラールングを 250 GeV でも許容することにすれば、ビームパワーを増やすことなく、パラメータの調整のみによって 250 GeV でのルミノシティを大幅に増強できる可能性がある。そこで素核研 ILC グループでは、加速器部と共同でこの可能性を検討した。ビーム衝突シミュレータである CAIN を用い、様々なビームパラメータの組み合わせをシミュレートした結果、水平エミッタンスを半減し、さらに水平および垂直 $\beta^*$ 関数を調整することにより、低いエネルギー側へのルミノシティスペクトルのテールが増えるものの、最高エネルギー250 GeV から99%以内のルミノシティを50%増やす可能性があることが判明した。そこで、テール部分の増加が反跳質量法によるヒッグス質量測定に与える影響をシミュレーションにより評価した。その結果、テールによる分解能劣化の効果をルミノシティの増加の効果が上回り質量精度の改善が期待できることが判明した。この新しいビームパラメータは、250 GeV ILC の正式ビームパラメータに採用された。ビームストラールングの増加は、低エネルギー電子・陽電子対の分布を変えるので、バーテックス検出器等への影響の評価も必要である。シミュレーションの結果、これら低エネルギー電子・陽電子対の軌道は磁場に巻きつきビームパイプ周りの限られた領域に閉じ込められるが、その包絡面が新しいビームパラメータの場合、1mm 程度外側に膨らむことが判明した。一方、一様磁場を仮定したシミュレーションによれば、現在のビームパイプ径はこれら電子・陽電子対の包絡面ちょうどクリアできる大きさであることが分かった。より詳細なシミュレーションを進めるとともに、ビームパイプ設計の安全サイドへの見直しの可能性の検討も必要と言える。現在、anti-DID を含めた非一様磁場中でのより詳細なシミュレーションが進行中である。

## 陽電子源開発

ILC は、単位時間当たりの生成量で SLC の約 30~60 倍という多量の陽電子を必要とする。この極めて難度が高い課題に対して、ILC では「ベースライン」と「バックアップ」の2つの方式で挑んでいる。ベースラインはアンジュレータに基づく方式、バックアップは従来の電子駆動方式 (e-Driven) である。ベースライン方式には技術的な不確実性があるため、バックアップを十分に開発することが重要となっている。素核研 ILC グループは、加速器研究施設、広島大学、DESY、CERN、ANL、BINP、IHEP とともに、e-Driven 方式の開発に取り組んでいる。

2017 年は陽電子源にとって節目となる多くの出来事があった。国内では第 8 回リニアコライダー加速器レビュー委員会が、国際的にはリニアコライダーコラボレーション (LCC) の陽電子技術レビューがそれぞれ行われ、両レビューとも、e-Driven 方式の方がより実現性が高いと結論した。ILC のエネルギーを 250 GeV とする 2017 年末の ICFA による正式決定は、陽電子源開発にも大きな影響を与える。これはアンジュレータ方式が高エネルギー光子源として主リニアックビームを使用するため、本質的に低ビームエネルギー運転が困難



なことに起因する。250 GeV ILC の 1 パルスあたりのバンチ数が 1300 であることから、陽電子源設計においても、これまでの 2600 バンチではなく 1300 バンチ運転に対して最適化をやり直した。これにより、e-Driven 方式の設計の困難な部分が小さくなり、かつ安価になった。 e-Driven 方式のコストは、KEK 内部の委員会と LCC によってレビューされ、e-Driven 方式の加速器コストは、アンジュレータ方式の加速器コストよりも若干安く、加えて e-Driven 方式では、トンネル長を大幅に短縮できるため、土木工事費をアンジュレータ方式よりもかなり低減できることが分かった。

電子駆動リニアックと陽電子捕捉・ブースターリニアックの設計について、広島大学で詳細なシミュレーション研究が行われた。KEK では、ターゲット・プロトタイプの回転真空試験が行われ  $5 \times 10^{-7}$  Pa の真空度を定格回転数で達成した。ILC の要求する真空レベルは  $10^{-6}$  Pa であり、これに対して約 1 桁良い真空を達成している。ただし、ベース圧力は良好であったが圧力の急激な上昇が時々観察されたことに懸念が残る。これに対しては、現在、真空シール設計の改善を検討中である。ターゲットは高レベルの放射線にさらされるため、回転真空シールに使用される磁性流体の耐放射線性を確認する試験も進行中である (図 5)。

#### 参考文献

- [1] “ヒッグスファクトリーとして 250 GeV で運転する ILC に関する ICFA 声明”, <https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20171110020000/>
- [2] “Improved Formalism for Precision Higgs Coupling Fits”, Tim Barklow, Keisuke Fujii, Sunghoon Jung, Robert Karl, Jenny List, Tomohisa Ogawa, Michael Peskin, and Junping Tian, [arXiv: 1708.08912](https://arxiv.org/abs/1708.08912), Phys. Rev. D 97, 053003 (2018).
- [3] “Model-Independent Determination of the Triple Higgs Coupling at the  $e^+e^-$  Colliders”, Tim Barklow, Keisuke Fujii, Sunghoon Jung, Michael Peskin, and Junping Tian, [arXiv: 1708.09079](https://arxiv.org/abs/1708.09079). Phys. Rev. D 97, 053004 (2018)
- [4] “Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider”, LCC Physics Working Group”, [arXiv: 1710.07621](https://arxiv.org/abs/1710.07621).
- [5] “The role of positron polarization for the initial 250 GeV stage of the International Linear Collider”, LCC Physics Working Group, [arXiv: 1801.02840](https://arxiv.org/abs/1801.02840).



図 5 : 陽電子生成ターゲットの回転真空シールに用いる磁性流体の耐放射線特性試験 (於: 高崎量子応用研究所)