素粒子原子核研究所活動報告（1） EF グループ　　2023 年 5 月 1 日

エネルギーフロンティアグループでは、 LHC-ATLAS 実験の推進と、ILC をはじめとする、将来のコライダー実験の実現に向けた研究活動を行っている。

LHC/ATLAS

LHC は、2022 年 7 月から重心系エネルギー13.6 TeV の Run 3 実験を開始し、38.5 fb^{-1} の陽子陽子衝突を供給した。リニアック、PS ブースタ，PS，SPS の入射器のアップグレードが進んだことにより、β^*-レベリングという手法を本格的に導入できるようになった。これにより、検出器が安定的に運転できる最大のルミノシティである 2×10^{34} cm^2s^{-1} を維持した状態で、長時間のデータ収集ができた。欧州における電力危機の影響で運転時間が短縮され、2022 年 11 月に調整期間に入ったが、それまでに 35.7 fb^{-1} のデータを蓄積した。Run 3 で得られた 13.6 TeV の結果として、2 光子崩壊によるヒッグス粒子生成断面積（図 1）や、トップ粒子、Z 粒子の生成断面積とその比の結果を、早々に Moriond 国際学会で報告している。2023 年 5 月から再度データ取得を再開し、Run 3 で予定している積分ルミノシティを貯めていく予定である。

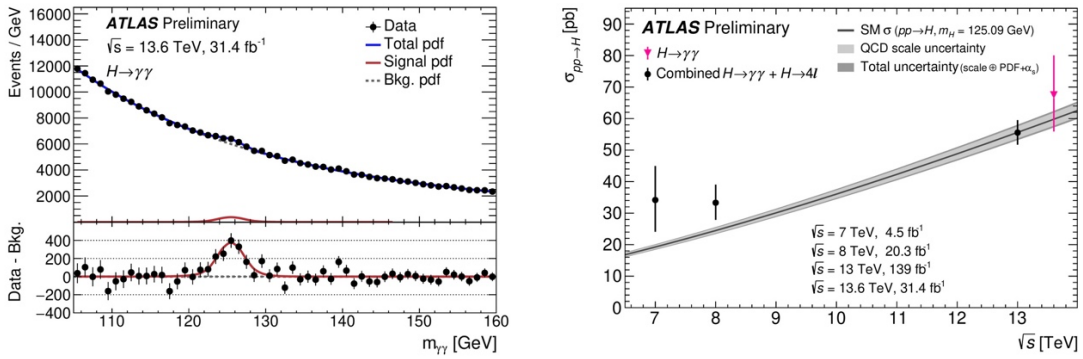

図1. 重心系エネルギー13.6 TeV での 2 光子の普遍質量分布と、ヒッグス粒子生成断面積の結果

RUN3 は開始時から、日本グループからも多くの研究者が CERN で内部飛跡検出器とミューオントリガーの運転において中核的な役割を果たしている。内部飛跡検出器のピクセル検出器では、DAQ でのデータ損失を 0.8 %に抑え、ピクセル検出器で取得したデータの内、物理解析に使用可能なデータの割合は 99.95 %を達成し、非常に安定したデータ取得を実現できた。また、将来のデータ取得に向け、顕著になってきた放射線損傷による電荷収集効率低下の影響や、計画されている β^*-レベリングの長時間化によるパイルアップが DAQ に及ぼす影響について検討を行っている。今期の調整期間中に、設定電圧や閾値のスキャンを行い、シミュレーションとデータ解析により、安定に動作できる検出器の設定値を決定した。

ミューオントリガーについては、Run 3 で導入した新たなトリガーボードが期待通り動き、11 月までのデータ取得で安定して高い効率を維持できた。今後の高い瞬間ルミノシティを想定した喫緊の

課題は、初段のトリガーレートを大きく落とすことであり、新たに導入するニュースモールホイールなどの検出器との同期をとることで実現を目指す。調整期間中もその準備を進め、2023 年始めのビームデータで、正しく信号が来ていることを確認した。次回のランが始まり次第、そのトリガー効率、安定性を調査していく。

図 2. コントロールームにてトリガー信号を確認するミューオングループ

Run 3 実験に向け新しく開発・実装した、長寿命の新粒子やヒッグス粒子対生成事象取得の専用トリガーについて、実データをもちいて詳しく性能評価を行い、期待通りの性能を確認した。また、2023 年の運転に向けてオンラインでも性能監視モニタリングを改良し、実装した。また、高輝度 LHC では、さらに高いパイルアップ環境のため飛跡再構成に計算時間がかかり、特にソフトウェアトリガーでは大幅に改良が必要になる。飛跡再構成ソフトウェアが刷新される予定であり、GPU による高速化の研究開発を開始した。

高輝度 LHC 実験のための検出器アップグレードに関しては、日本グループは、シリコンストリップセンサー、シリコンピクセル検出器、ミューオントリガー用エレキの開発、量産、 建設において中核的な役割を果たしている。ストリップセンサーに関しては、日本が製造予定の 6,350 枚のセンサーの約半数の量産が完了した。ピクセル検出器に関しては、センサーの量産を開始した。また、モジュール製造業者のある館山に検査システムを構築し、組立量産準備を整えている。現在、ダミー部材による組み立て精度の最終確認中で、いよいよ 2023 年初夏から 130 台分の試作量産(プロトタイプ機を図 3 に示す)を始め、その後 2 年かけて 2,800 台の量産を行っていく。

ミューオントリガー用エレキでは、前段回路を約 1,500 枚、前段回路を制御する回路を約 150 枚、実際にミューオントリガーと検出器の読み出しを行うトリガープロセッサーボードを約 50 枚量産する予定である。前段回路は初期量産を終え、本量産の準備を進めている。前段回路を制御する回路は量産と試験の両方を終えた。トリガープロセッサーボードは 1 号機の動作検証は良好で、試作 2 号機の製作準備を進めている。さらには、トリガープロセッサーボード上の大規模 FPGA に組み込むトリガー、読み出し、および、ボード制御ファームウェアの開発を進めている。

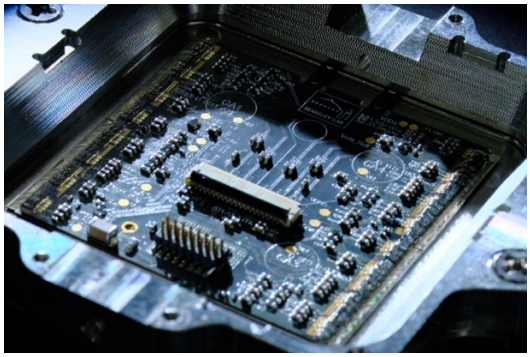

図 3. 試作量産の部材で組み立てたピクセル検出器のプロトタイプ機

ILC/ILD

将来の電子・陽電子「Higgs Factory」のための物理ケースと検出器設計を開発する、様々な活動を行っている。

ILC の物理解析では、ILD 検出器を用いた大規模シミューレションで、様々な角度で物理検討を行っている。現在行っているのは、重い右巻きニュートリノの探索研究について、特徴的な同符号レプトン生成を利用した探索である。背景事象である、標準模型事象から同符号レプトンが生成する稀なケース、例えば、ヘビーフレーバージェットのレプトン崩壊の解析が進行中である。また、タウ粒子の偏極度測定では、インパクトパラメータ情報に基づく新しい再構成法を開発している。ILC で計画されている高統計、高偏極ビームと、優れた分解能を持つ検出器により、極めて高い精度の測定が可能となり、その結果、様々なタイプの Z'ボゾンに制限を課すことができる。

Higgs Factory の候補として、線形型加速器案の ILC の他に、円形衝突型加速器案もあり、後者で ILD 検出器を可動させた場合の検討も行っている。この場合、ビーム品質を維持するための最終収束電磁石の位置で背景事象が大きく異なり、特に TPC のような多くの応答時間の長い検出器や、非常に高いルミノシティで稼働する場合に、大きな課題となることを明らかにした。シミュレーションは最新の ILD 設計を組み込んだ Geant4 で構成される。サンプルデータと解析ソフトウェアは、KEKCC と世界中の機関で構築したグリッドコンピューティングリソースで共有し、解析を行っている。

ILD 検出器のハードウェアでは、バーテックス検出器用 FPCCD センサーのための 2 相 CO_2 冷却システムと、流体の出入り間でエネルギーを伝達する同軸チューブに基づく小型熱交換器の設計とテストが進展した。電子駆動陽電子源では、磁性流体技術に基づき、回転ターゲットの真空シールの開発を進めている。2022 年度の数ヶ月間にわたる実験により、ダミー回転ターゲットを用いた試験装置で、高真空かつ安定した真空を達成することができた。

ILC International Development Team (IDT)-WG3 と ILC-Japan の物理グループにおいて、フレーバータグ付けのための機械学習、粒子の飛跡再構成などの先進技術を用いた、イベント再構成に関する一連の共催ミーティングを開始した。

将来のエネルギーフロンティア実験に向けた技術開発

半導体検出器開発では、MALTA と呼ばれるモノリシック CMOS センサーの高放射線環境下での動作検証を CERN の半導体検出器グループと共に、時間応答に優れる SiGe BiCMOS の放射線耐性試験をジュネーブ大学と共に、高い時間分解能を持つ LGAD センサーの開発を浜松フォトニクスと共に進めている。CMOS センサーに関して、MALTA を新設された AR テストビームラインで稼働させ、電子ビームのプロファイルを測定することに成功した。同検出器は、フェルミ国立研究所でのテスト実験でも稼働させ、陽子の飛跡再構成に成功している(図 4)。

将来実験において不可欠となることが想定されるエレクトロニクスと機械学習の開発も進めている。素核研のコライダーエレクトロニクスフォーラムでは、様々なプロジェクトに携わる人たちと共同で、最先端の FPGA と高速光転送技術の開発を進めるタスクフォースを立ち上げた。特に、AI アクセラレーターを組み込んだ、Versal FPGA の開発を進めている。素核研の AI フォーラムでは、加

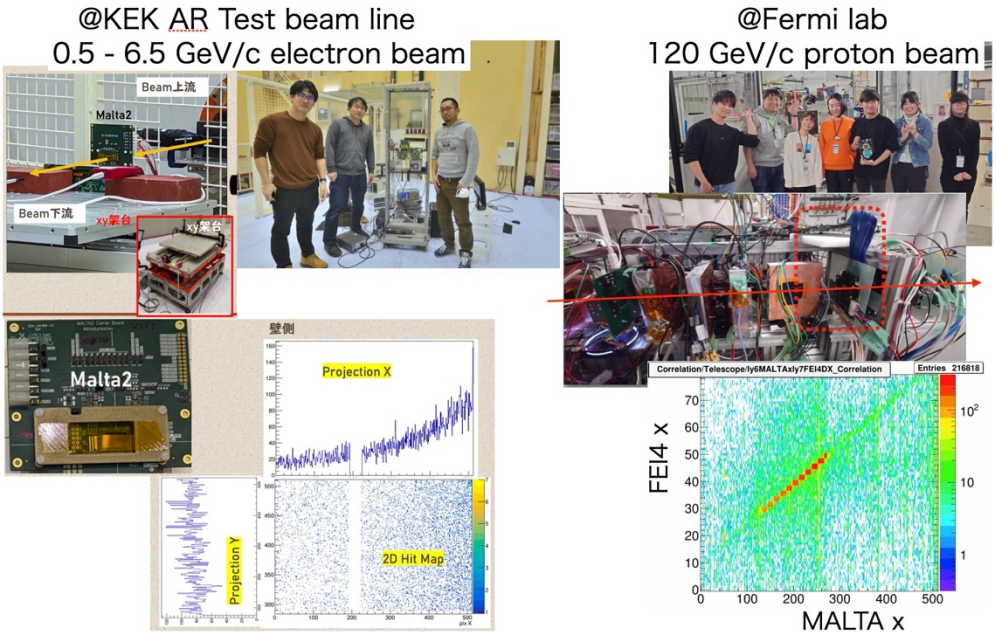

図 4. Monolithic CMOS sensor である MALTA を使ったテストビーム実験の様子

速器、素粒子実験のプロジェクト横断的に、機械学習を物理解析、粒子識別、測定器、加速器運転などへ応用する技術開発を進めている。2023 年 2 月 23 日、24 日に、”ML/AI at HEP workshop”国際会議を主催し、盛況であった(図 5、https://kds.kek.jp/event/44830/)。

コミュニティの皆さんと共同研究を展開したいと考えているので、興味ある方は、お気軽にエネルギーフロンティアグループのメンバーまでお問い合わせください。

図 5. ML/AI at HEP workshop 会議の集合写真