エネルギーフロンティアグループ　執筆年月日　2022 年 11 月 11 日

エネルギーフロンティアグループの活動

2021 年度の途中から発足したエネルギーフロンティアグループは、6 月にキックオフミーティングを行い、LHC Run 3 と 高輝度 LHC 実験を成功に導く活動、これまでの ILC グループが進めてきた研究活動のアップデート、これまでの ATLAS グループの専門性や KEK の特徴を考慮した将来のエネルギーフロンティア実験に向けた研究活動を、コミュニティーと連携しつつ、進めている。将来に向けた技術開発では、具体的には、

1. 測定器開発センター・プラットフォーム B の下での放射線耐性と時間分解能に優れる半導体検出器の開発、特に、SiGe BiCMOS 技術に基づくモノリシックセンサーの開発、
2. 物理解析、粒子識別、測定器、加速器運転などへの機械学習の応用を目指したフォーラムの下での共通技術開発の検討、
3. コライダー エレクトロニクスフォーラムの下での最先端 FPGA をはじめとする将来実験に向けた回路要素技術、特に、AI アクセレレーターを組み込んだ Versal FPGA に関する共同研究、
4. 高磁場磁石開発に関する超伝導低温工学センターや素核研低温グループへの研究協力

が、進行中である。

LHC/ATLAS と ILC の各々の進捗を以下にまとめる。

LHC/ATLAS

2022 年 7 月 4 日は、LHC 実験がヒッグス粒子発見を発表してから 10 年であった。それに関連した論文 (Nature 607, 52-59 (2022)) や最新結果が発表される (図 1) とともに、発見 10 周年を記念したシンポジウムが CERN で開催された。さらに、その翌日に、LHC は、重心系エネルギー13.6 TeV の Run 3 実験を開始した。日本においても、ヒッグス粒子発見 10 周年と Run 3 実験開始を記念した、研究者向けと一般向けのイベントを 8 月 29 日に開催して、それぞれ約 80 名が参加し(図 2)、好評だった [1]。

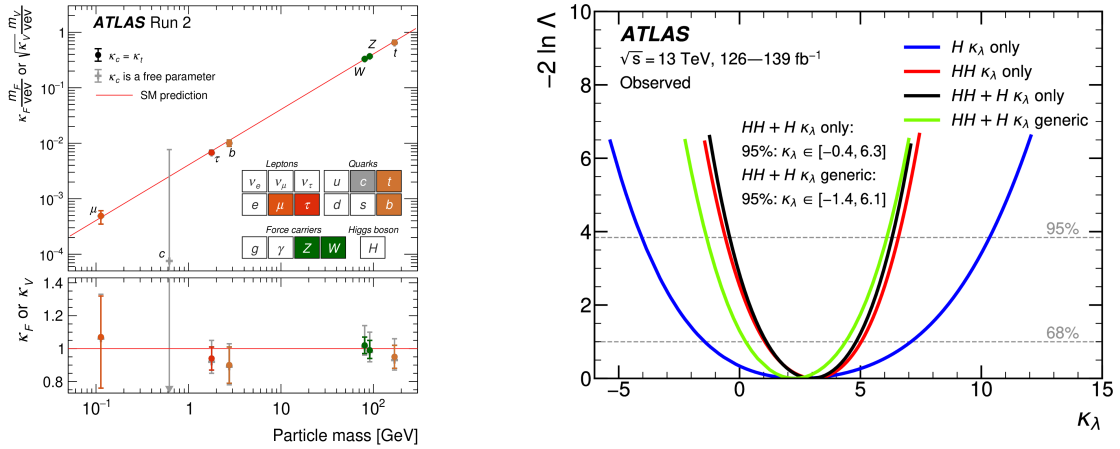

図 1 (左図) 各粒子とヒッグス粒子の結合強度の測定結果 (データ点)。素粒子標準理論での予想値 (赤線)と、誤差の範囲内で一致している。(右図) 世界最高精度のヒッグス粒子の自己(三点)結合の制限結果。

図 2 ヒッグス粒子発見 10 周年を記念した研究会での集合写真。

LHC のランプアップは順調に進んでおり、陽子のバンチ数をシングルバンチから、8 月中旬には 2500 バンチまで徐々に増加させ、最高瞬間ルミノシティは 2.0 x 10^{34} cm^{-2} s^{-1} に到達した。8 月末に LHC の ポイント 4 において cooling failure が発生したので、その修復のために LHC は 4 週間運転停止したが、9 月 20 日に再稼働した。その後、検出器側の安定運転のために、β* leveling という新手法を全面導入することによる、瞬間ルミノシティーの上限制御にも成功している。現在までに Run2 実験を上回る性能に到達し、一バンチあたりの陽子数 1.4 × 10^{11}、週に 6 fb^{-1} ペース、全部で 31 fb^{-1} の陽子陽子衝突を供給している (図 3 左図)。ATLAS 検出器は 29 fb^{-1} のデータを蓄積し、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 (図 3 右図)。今年度の残りの運転は、欧州における電力危機の影響で 2 週間短縮され、11 月終わりまで継続する予定である。

さらに、Run 3 実験のデータ取得でのトリガー系の立ち上げも順調に進行している。特に、高パイルアップ環境下で安定動作に向けた飛跡トリガーの改良や、長寿命粒子やヒッグス粒子対生成事象取得用の専用トリガーを新たに実装し、立ち上げ・初期データでの性能評価などを経て正常に稼働している。Run 3 では Run 2 の約 2 倍のデータ量を取得予定である。物理解析においては、このような高統計データや新しいトリガーを活用して、稀崩壊や未知なる位相空間への感度を高めて、ヒッグス場の性質測定・新粒子探索・量子エンタングルメント探索などを、戦略的に進めている。

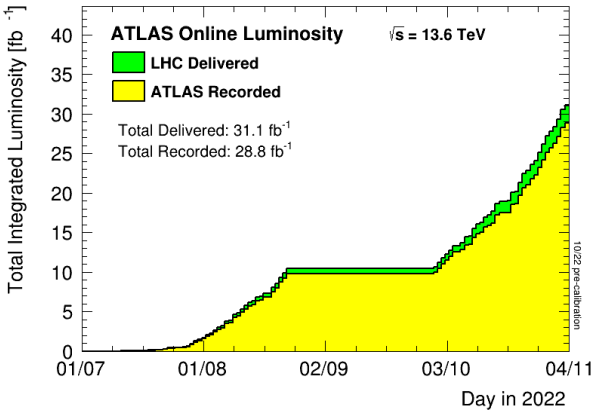

図 3 (左図) 2022 年度の LHC 運転における積分ルミノシティの推移。(右図) 内部飛跡検出器運転チームの集合写真 (ATLAS コントロールルームにて。Credit: ATLAS 実験)。

2029 年に稼働開始予定の高輝度 LHC 実験では、さらなる高統計データを活用した、ヒッグス場の全貌解明、および、素粒子標準理論を超えた新粒子・新現象の発見を科学的意義として、最高瞬間ルミノシティー 5-7×10^{34} cm^{-2} s^{-1}、重心系エネルギー 14 TeV の陽子陽子衝突という、一桁上の高輝度化実験を実現する。この厳しい環境に対応すべく検出器アップグレードが進行中であり、技術的挑戦として放射線耐性強化・検出器微細化・読み出し高速化を行うことで、一桁上の性能を実現する。特に、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クトロニクスの開発と量産において、KEK を主要拠点として中核的な役割を果たしている。

シリコンストリッププセンサーに関しては、製造予定の 3 分の 1 の量産が完了し、残りの量産も順調に進んでいる。ピクセル検出器に関しては、約 2000 枚のモジュールを量産予定であり、最終試作機を完成させた。並行して、千葉県館山市のモジュール量産サイトのクリーンルームを整備し (図 4)、初期量産の準備に取り掛かっている。ミューオントリガー用エレクトロニクスでは，前段回路を約 1500 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。前段回路とその制御回路に関しては、初期量産と本量産の準備を進めている。トリガープロセッサーボードに関しては、試作 1 号機の動作検証 と試作 2 号機の設計、トリガープロセッサーボードへ組み込むトリガー、読み出し、およびボード制御のファームウェアの開発を進めている。

図 4 整備が進行中である、ピクセルモジュール量産サイトのクリーンルーム。

ILC

ILC 文部科学省有識者会議の報告書の公表後、2022 年 4 月、ICFA 声明が出て国際推進チーム (IDT) による ILC 計画推進活動の継続が決まった。IDT の枠組み で、総括的な報告書 (ILC ホワイトペーパー：arXiv:2203.07622) をまとめ、米国スノーマスプロセスへ入力した。一方、ILD グループでは、欧州でのヒッグスファクトリー検討の進展を睨み今後の活動戦略の策定が進んでおり、2022 年 10 月、DESY で開催された ILD グループ会議での主要議題であった。会議には、30 名が対面で、その他多くの人がリモートで参加した (図 5)。今後は、ILC 関連の研究の他に、主要な新しいトピックとして、既存の ILD 検出器を、FCC-ee などの円形コライダーのヒッグスファクトリーへ導入するためには、どのような変更が必要か、さらに、どのような影響が検出器性能に及ぶかについて、研究していくことに

なる。特記すべき質問としては、高い事象レート環境下での TPC 検出器の運転、前方領域での加速器と検出器の接続部分へのインパクト、ビーム構造がサブ検出器の電力・冷却スキームへ及ぼす影響に関するものがあった。

こうした動きに並行し、250 GeV ILC 物理検討のため、最新ソフト群を使った GRID による MC データ生成が進行中である。物理のシミュレーション研究について は、τ 対生成における終状態偏極度測定の新しい方法の開発、右巻きニュートリノ探索、ミューオン g-2 異常を説明する SUSY パラメータ空間での新粒子探索等の検討が進行中である (米国 Snowmass 会議で発表)。

図 5 10 月の ILD コラボレーション会議の集合写真。

ハードウェア面では、バーテックス検出器用の高精細画素 CCD (FPCCD) の 放射線耐性を高めた新しいプロトタイプセンサーとセンサー冷却用の 2 相 CO_2 冷却システムの開発、TPC に関しては、増幅 GEM の安定動作条件の模索等の研究が進行中である。また、本年 6 月、CALICE 国際共同研究の枠組みで、Si-W 電磁 カロリメータおよびアナログ・ハドロン・カロリメータのプロトタイプのビーム 試験を CERN にて実施した。
ILC の地下実験室および地上の各種施設を加速器 CFS グループ、KEK 施設部と共同で検討中である。また、ILD 超伝導ソレノイドの現地 (衝突点近傍) 巻き方法の検討、それに必要な現地調査が東北 ILC 事業推進センターと共同で、超伝導ソレノイド用の新線材の R&D が低温グループと共同で進行中である。 素核研では加速器研究施設・広島大学・岩手大学と協力して電子駆動陽電子源の 開発を進めている。今年度は回転軸の真空シールに使用する磁性流体が、下流の陽電子捕獲用加速管での高電界発生に悪影響を与えないことを示すため、磁性流体雰囲気中での高電圧印加試験を予定である。また陽電子捕獲用加速管のコールド モデルを試作し、電磁シャワーによる加速管の加熱による加速周波数のズレが、 冷却水路の工夫により抑制可能であることを実証する計画である。

参考文献

[1] 素核研 HP における、ヒッグス粒子発見 10 周年記念イベントの開催報告記事。
https://www2.kek.jp/ipns/ja/news/3391/