

世界最高エネルギー陽子陽子衝突型加速器 LHC の第二期運転 (Run2) において, ATLAS 実験では積分ルミノシティ 149 fb^{-1} を記録し, この全データに基づいた物理解析が進行中である。7月から8月にかけてリモート開催された ICHEP2020 国際会議において, 新たに公表された結果 [1] のうち, 得に注目すべき結果として, ヒッグス粒子のミューオン対崩壊への兆候を 2σ の確度で測定した。この結果は, 誤差の範囲でヒッグス機構の予想と一致しており, 第二世代のミューオンの質量の起源もヒッグス機構によるものであることを示唆する。

今後は, 2021 年から始まる第三期運転 (Run3), 2027 年からはルミノシティを大幅に増強した高輝度運転 (高輝度 LHC) が始まる。それぞれの運転に向け, ATLAS 検出器も大幅な改良が必要であり, その準備を進めている。

Run3 に向けて

ATLAS KEK グループは, 内部飛跡検出器のシリコンピクセル検出器, 初段エンドキャップによるミューオントリガー, データ収集のより高度なトリガーの開発・運用を主導している。

ピクセル検出器は高頻度で粒子放射線にさらされるため, 検出器の運用は, 非常にデリケートである。図 1 に Run2 実験期間中のピクセル検出器の検出効率の推移を示している。放射線損傷の影響により, 検出効率の劣化, および, 不安定動作が見られたが, 2018 年に読み出し回路の種々の改良と運転パラメータの最適化により, 検出効率, 安定動作の改善が達成できた。本質的に放射線損傷の影響を避けることはできないが, その影響を最小化するプロトコルを確立した。Run3 に向けては故障した光信号変換回路の入れ替えと, 想定される放射線量による損傷を加味したシミュレーションを開発, 実装予定である。

ヒッグス粒子, W, Z ボゾン, 新粒子からの崩壊ミューオンを高効率で捉えるように, トロイド磁場よりも衝突点側に設置しているミューオン検出器の刷新を行う。これに合わせ, 初段エンドキャップミューオントリガーもエレクトロニクスを刷新した。新型コロナウイルス感染拡大のために海外渡航が制限される前に, エレクトロニクスや光ファイバーなどの接続は終わっており, KEK のリモートサイトで CERN のコントロールルームとオンラインで接続した統合試験を進めた。東京大学 ICEPP, 名古屋大学, 京都大学, 神戸大学などから, 将来的に現場のシステム運転のエキスパートとなる若手研究者が主導した (図 2)。

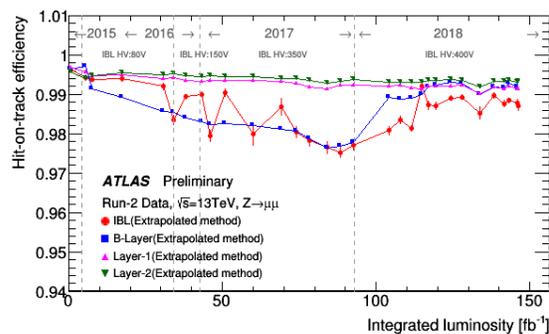


図 1: RUN2 実験期間中のピクセル検出器の検出効率の推移。



図 2: KEK リモートサイトにおける CERN との統合試験の様子。

高度な事象判断を行うハイレベルトリガーにおいては、消失飛跡など、特徴を持つ新粒子を探索する新しいトリガーの開発が行われている。機械学習などを用いた高速化により、Run3から初めてデータ取得に導入可能であることが示され、実装作業が進んでいる。これにより、Run2 まででは感度が低かった物理模型や運動学的領域における新粒子探索に大きな感度上昇を得られることが期待されている。

高輝度 LHC に向けて

高輝度 LHC では内部飛跡検出器を刷新し、直径 60 cm、長さ 6 m の史上最大のシリコン飛跡検出器に入れ替える。設計値の 7.5 倍の瞬間ルミノシティ、積分ルミノシティ $4,000 \text{ fb}^{-1}$ に耐えるため、ピクセルサイズ、ストリップサイズが小さく、高放射線耐性を備えた新センサの開発が必要となる。ATLAS KEK グループは、両検出器、共に開発を行っており、ほぼ開発を終え、現在その量産に向けて調整を進めている。

ピクセル検出器については、センサ開発のみならず、ASIC、フレキシブル基板を貼り付け、ワイヤボンディングを行う、モジュール化も担当する。モジュール製作は 2021 年から始まる予定で、量産体制に向け、急ピッチで組み立て手法、検査システムの確立を行なっている。現在は試作 ASIC を搭載した、最終形に近い形状のセンサを用いたモジュール製作を進めている（図 3）。この試作モジュールは量産に向けてのフィードバックだけでなく、構造体に載せた複合的なシステムテストに活用される。

高輝度 LHC のミューオントリガーについて、閾値を低く保ちながらトリガー頻度を十分に低く抑えるために、ミューオンの運動量分解能を向上する必要がある。そのために、ASIC、高速通信技術、大規模 FPGA を駆使した様々なエレクトロニクスの開発を進めている。Patch-Panel ASIC で、どの陽子衝突から派生したミューオンか同定した後の TGC 検出器からの全ヒット情報を、2 本の光トランシーバで 16 ギガビット毎秒で後段システムに転送する PS ボードと、放射線環境下に曝される PS ボードに搭載される FPGA の状況を監視して、必要に応じて適切に制御する JATHub ボードの試作機が完成した。これら個別の動作検証試験と二つのボードの統合試験が順調に進んでいる。また、前段回路からの TGC 検出器全ヒットの情報を集結して、大規模 FPGA 上でミューオン飛跡の再構成を行う後段トリガー判定ボードの設計も順調に進められている。これらのエレクトロニクスの開発は、東京大学 ICEPP、名古屋大学などと共同で、KEK が主導して進めている。



図 3: 試作 ASIC を搭載したシリコンピクセルモジュール。

参考文献

- [1] <https://atlas.cern/updates/atlas-news/summary-ichep-2020>