

エネルギーフロンティアグループでは、LHC/ATLAS 実験の推進、高輝度 LHC/ATLAS 実験に向けた建設準備、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。

■ 2024年のLHC稼働状況

2022年から継続しているLHCの Run 3 運転は3年目の運転を行っている。昨年の運転は、7月中旬に発生したビーム収束磁石の接続部分でヘリウム漏れの故障が発生した。故障そのものは2週間程度で調査・修理を完了したが、運転プログラムの変更があり、年内の高輝度での陽子陽子衝突運転は取りやめになり、結果として 31.9 fb^{-1} の陽子陽子衝突の供給に留まった。LHC加速器では、衝突点最終収束系のうち Inner Triplet への放射線ダメージは注視が必要な状況で、想定される放射線耐性の限界とされる 30 MGy に到達しないように放射線量の分散を行うため、光学系の微調整を行い長寿命化を行っている。2024 年の運転では積分ルミノシティを稼ぐためにLHC は本来の計画日程を3日前倒してコミショニングを始め、予定した4週間のビーム・コミショニングを順調に仕上げ、3日前倒して4月5日に $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ での安定ビーム衝突を得た。その後順調に強度の積み増しを行い、バンチあたりの陽子数 1.55×10^{11} に到達した。その後の運転は順調に推移しており、レベリングを行ったピーク衝突輝度 $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、ピーク輝度でのバンチ交差あたりの衝突数（パイルアップ） $\langle \mu \rangle \simeq 65$ にて、順調に統計量を積み増している（図1）。一方、 β^* はコリメータでの大幅なビームロスが観測されたため、現状 36 cm で制限されており約1—2%の衝突輝度のロスとなっている。1バンチ運転ではこのロスが起きる様子は見られず、バンチを詰めた状態での非線形性やビーム・ビーム効果が影響している可能性が考えられているが、明確な原因究明に至っていない。冷却系の容量については既に設計値を大幅に超えるレベルで運転をしているが、電子雲に起因する熱負荷は一樣ではなく「セクター78」が最も熱負荷が高い。これについて、段階的にコンディショニングを行うことでビーム強度を高めることに寄与している。この点については2023年は「8b4e」と「36バンチ・トレイン」の2種類を組み合わせ、総バンチ数を制限しながらも電子雲の発生を抑制できる「ハイブリッド・スキーム」を取り入れたが、2024年の運転では「セクター78」と「セクター81」の間の冷却容量の再配置によって、

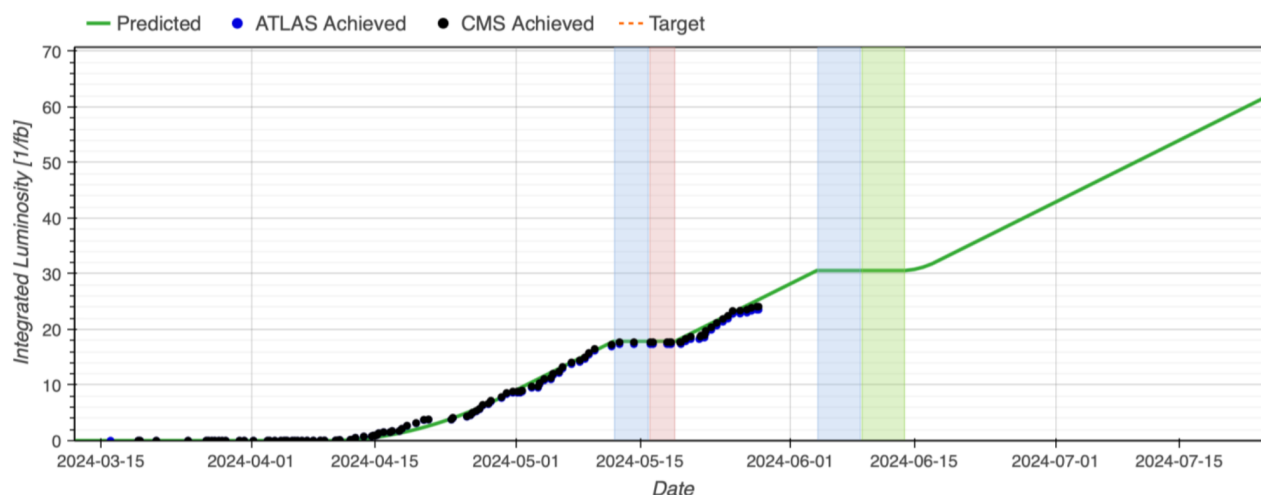


図1：2024 年の LHC 運転における計画と 5 月下旬までの実績の比較。

このハイブリッド・スキームを行わずにバンチあたりの陽子数 1.6×10^{11} に到達できた。これにより高品位のビームで、大きなバンチ数を投入することができるようになった。この結果高い輝度を実現でき、2023 年よりも100バンチ少ない状況でもビーム衝突輝度を達成している。総じて、2024 年の運転は 2023 年と同等の加速器パフォーマンスを、より一様なビームと無理の少ない制御で実現できており、なおも改善の余地を残す。6月13日現在 ATLAS に供給された積分輝度は 30.5 fb^{-1} であり、年内の運転は2025年との運転計画の調整で当初よりも 22.5 日長くなる見込みで、現状のパフォーマンスを維持すれば年内に約 110 fb^{-1} を供給できる見込みである。

■ 2024年のATLAS運転状況

ATLAS実験の2024年のデータ取得はビーム・コミッショニング時から順調に立ち上がり、5月末の段階でデータ取得効率 94.5% で、ほぼすべてのシステムが 100% に近い稼働率で運転が続いている。バンチ交差あたりの平均 $\langle \mu \rangle$ は53程度であり、レベル1トリガーは約 95 kHz で運転している。ミューオントリガーでは、Run 3から New Small Wheel (NSW) と呼ばれる新しいステーションがエンドキャップ側内層のトリガーシステムを担い、トリガー性能の向上に寄与している。NSWを構成する sTGC および Micromegas の2種類の測定器のうち、sTGC の発行するトリガーを用いた TGC とのコインシデンスは 2023 年にすでに稼働し、7—8 kHz のトリガーレートの削減に寄与した。削減量は sTGC がアクティブなトリガーセクター (TS) を 2023 年実績の 70% から 92% にまで引き上げたことにより、2024 年には削減したレートは約 14 kHz まで向上した(図2)。Micromegasを用いたコインシデンスも高いトリガー効率をキープしながら、段階的に作動させている。ATLAS ミューオントリガーの運転にあたってはKEK ATLASグループをはじめとする日本グループが主導的貢献を続けている。

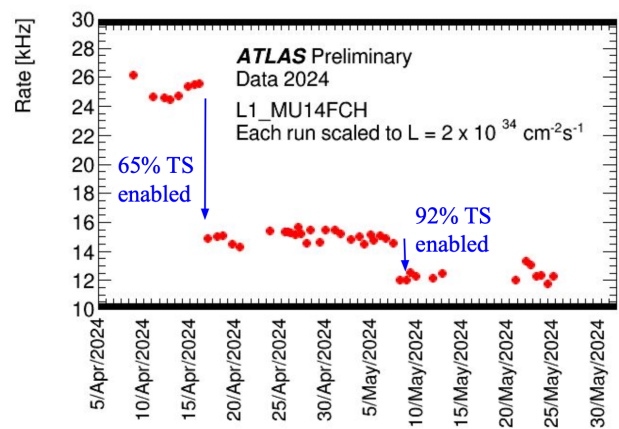


図2：2024 年のミューオントリガーの運転において、NSW の sTGC のトリガーセクター (TS) の稼働率の向上によってトリガーレートが削減する様子。

Run 3 からアップグレードした液体アルゴンカロリメータ (LAr) のトリガーシステムでは、デジタイズした信号をもとにより高いシャワー角度分解能と E_T 分解能を Feature Extractors (FEXes) という後段トリガー判断機能に供給する。3種類ある FEX のうち電子 FEX (e-FEX) はすでに2023年に稼働しておりレベル1トリガーレートを 10% 削減することに寄与している。残りのジェット FEX (j-FEX) およびグローバル FEX (g-FEX) のコミッショニングは完成に向かいつつある。これにより、ジェット/大半径ジェット/総エネルギー(H_T)/欠損エネルギー(E_T^{miss})といった重要な衝突イベントの特徴を、プリスケールすることなくL1トリガーを発行するようにできるようになる作業が進行中である。これらのトリガーの実証が完了したら、既設のトリガーシステムを順次ディスコンにしていく予定である。

■ ATLAS物理解析

物理解析については、Run 2 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ の 140 fb^{-1} を用いた解析論文が総計で 340 本を数え、 $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ の Run 3データを用い9本の論文を出版している。この9本の Run 3 初期

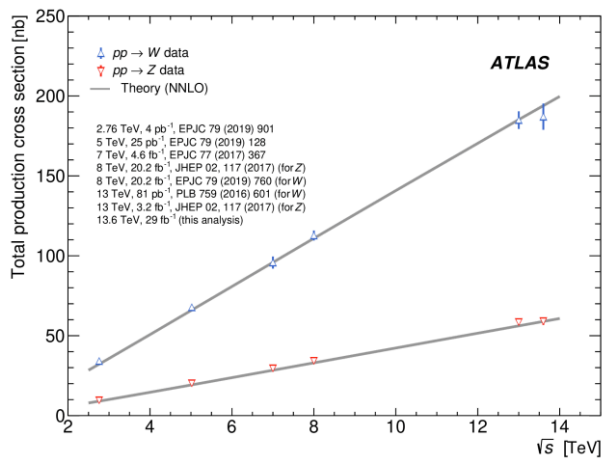


図3：WボゾンとZボゾンの全断面積と重心系衝突エネルギーの関係。新たに $\sqrt{s} = 13.6$ TeV に点が打たれた [PLB 854 (2024) 138725]。

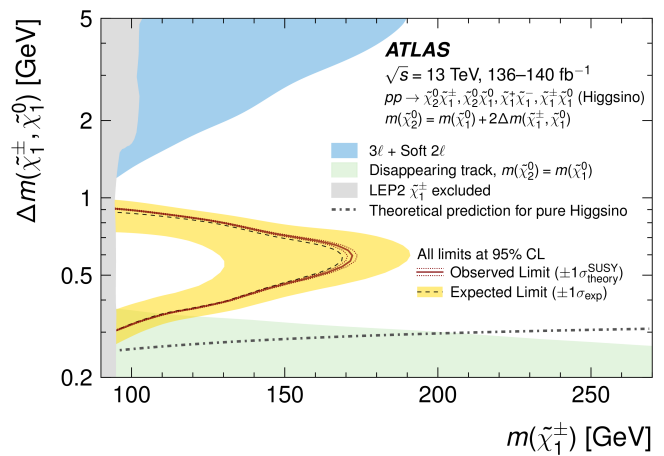


図4：縮退したヒグシーノの探索状況。左側のグレーの棄却領域が LEP の結果，上部の青い領域と下部の薄緑の領域がそれぞれソフトなレプトン対を用いた探索と消失する短い飛跡を用いた解析結果である。黄色いバンドの結果が今回の，衝突点から僅かに変位した低運動量飛跡を用いた解析結果 [PRL 132 (2024) 221801]。

データを用いた解析には $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ を用いたヒッグスの生成断面積， $t\bar{t}$ の生成断面積， $W^\pm$ および Z の生成断面積，それらの相対断面積比などを含む（図3）。Run 2 全データセットを用いた解析も引き続き進行しており，最近の結果を一つ紹介する。ヒッグス粒子の超対称パートナーであるヒグシーノのみ電弱—TeV スケール程度に軽く，はるかに思いウィーノやビーノの質量スケールとの結合・混合がほとんどない「縮退したヒグシーノ」シナリオの探索において，従来の縮退度（荷電ヒグシーノと中性ヒグシーノの質量差 Δm ）が 5 GeV 以上で有効なソフト・レプトン対を用いた解析と，理論上の完全縮退の状態の荷電ヒグシーノが長寿命になり，飛行中に崩壊して消失する短い飛跡を用いた解析が，これまで相補的に探索領域を広げてきたが， $\Delta m \simeq 0.5$ GeV の領域ではどちらの手法でも LEP の結果を超える感度は出ず，いわゆる「縮退度のギャップ」を生じていた。この領域は電子双極子モーメント (e -EDM) や LZ 実験などの暗黒物質直接測定でも感度の届きにくい領域であった。荷電ヒグシーノの崩壊に伴う運動量が $p_T \lesssim 5$ GeV と低く孤立した $\pi^\pm$ 粒子が，荷電ヒグシーノの 1 ps 程度の寿命のために主衝突点からわずかに変位した位置から発生するという事象の特徴を捉えて選別することで探索感度を得る新しい解析を Run 2 の全データを用いて行った結果である。この縮退領域において，今回 LEP の制限を超えて最大約 170 GeV のヒグシーノまで 95% 信頼度で棄却し，結果は PRL に掲載された [PRL 132 (2024) 221801]（図4）。この解析は現象論的な解析提案は日本の研究者が行い，ATLASにおける探索では KEK ATLASグループ，京都大学，東京大学が主導するなど，日本グループの貢献が大きい。

■ 高輝度LHC向けアップグレード

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，エンドキャップ部ミュ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 センサーの内，約 5,400 枚の量産が 2023 年度内に完了し，今年度中に全ての量産を完了する予定である。ピクセル検出器に関しては，センサーの量産を昨年度から開始し，日本で製造予定の 2,800 枚のうち 1,400 枚の製造を終えた。モジュール製造業者のある館山において1日に3モジュールの製造と検査を可能にするシステムを構築し，130 モジュールの量産試作を完了した（図5）。この量産試作システム今年度は実機の量産を開始する予定であり，500 枚の生



図5：ITk ピクセルモジュールのアセンブリと続く品質検査を行うクリーンルームにおいて量産試作システムを用いた検査を実施する様子。



図6：量産試作で製造した ITk ピクセルモジュールの一例。

産と検査を見込む。なお、日本におけるピクセルモジュール向けセンサーとモジュールの生産・検査システムの確立を評価され、KEK ATLASグループの中村・外川・生出の3名が2024 ATLAS Outstanding Achievement Award を ATLAS 実験から授与された。

エンドキャップ部ミュオントリガー用エレキでは、前段回路を約1,500枚、ミュ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ボードを約100枚量産する予定である。前段回路は60台の初期量産ボードを完成させ、本量産時の検査システムと、実際の実験の運用を模したテストスタンドを構築した。トリガープロセッサボードは、試作2号機の製造のために安定的に14 Gb/sを超える高速光通信を可能にする基板を新しく選定した。今年度は試作2号機を製造する。イタリアが担当するバレル部のミュオントリガーも日本が開発したトリガープロセッサボードを用いることになり、エンドキャップ部とバレル部合計で100台のトリガープロセッサボードを量産するための回路素子の調達をイタリアグループと共同で進めた。さらにトリガープロセッサボード上の大規模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。

■ ILCと将来を見据えたR&D

素核研エネルギーフロンティア(EF)グループは、IDT-WG3、ILC-Japan 物理ワーキングタスクフォース、ILC-Japan 共同研究タスクフォースなどを通じて、ILCをはじめとする将来のエネルギーコライダー実験の実現に向けた研究活動に積極的に寄与している。また、7月に東大で行われるLCWS2024 国際会議では、EFグループのDaniel Jeansがプログラム委員長を務めている。関連して、2024年4月25日—26日にワークショップ「素核研の発展—現行計画から将来計画へ」、2024年6月12日に素核研ワークショップ「将来コライダー実験に向けた共同研究」を開催するなど、コミュニティ・ビルディングにも積極的に力を入れている。

EFグループは、LHC 実験の先の将来のコライダー実験への導入、建設、運転までを見据えた、検出器の基礎開発にも携わっている。半導体検出器開発をコアプロジェクトとして、モノリシック CMOS センサの高放射線環境下での動作検証を日本の Belle II グループ、ストラスブールの半導体検出器グループ、CERN の半導体検出器グループなどと共に、時間応答に優れる SiGe BiCMOS センサ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 センサの開発を浜松フォトリクスと共に進めている。SiGe BiCMOS センサについては、東北大学 CYRIC を用いた陽子線照射により1 MeV中性子照射換算で 10^{16} MeV n_{eq}/cm^2 まで損傷を与えたサンプルを検証し、100% 近い検出効率を維持しつつ、時間分解能の悪化は 50 ps 以下に止めるこ

とができることを確かめた。これらの開発を国際的認知・強調のもとでさらに強力に進めるために、欧州の ECFA-DRD3 における共同研究に関する議論を欧州と開始した。また、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。エレクトロニクスでは、コライダーエレクトロニクスフォーラムの研究会を開催する、機械学習では、2024 年1月に ML at HEP workshop, 2024年2月に ML on FPGA スクールを開催するなど、大学・研究機関の将来性ある技術開発の方向性の模索を意欲的にオープンに進めている。

(文責：素核研EFグループ 生出 秀行)