

## ■ 研究紹介

## LHC-ATLAS 実験 コロナ禍でのアップグレードと Run 3

東京大学 素粒子物理国際研究センター

江成 祐二

yuji.enari@cern.ch

神戸大学 大学院理学研究科

前田 順平

junpei.maeda@cern.ch

2023 年 (令和 5 年) 8 月 4 日

## 1 はじめに

2022 年 7 月 5 日, 3 年半の長期シャットダウン期間を経て LHC が第三期の運転 (Run 3) を開始した。Run 3 においても, ヒッグス粒子の精密測定など様々な物理成果が期待されている。この長期シャットダウン期間に Run 3, およびその後に予定されている高輝度 LHC (HL-LHC) を見据えた検出器のアップグレードを遂行してきた。ATLAS 日本グループは, 液体アルゴンカロリメータのトリガー読み出しのデジタル化や, 初段ミューオントリガーの性能向上など, 様々な部分で中心的な役割を果たしてきた。本研究紹介では, その部分を中心に 2020 年初頭からのコロナ禍の中での様々なアップグレード作業, および Run 3 開始後の運転状況と Run 3 のデータを用いたいくつかの物理成果について紹介する。

## 2 LHC Run 3 実験

Run 3 はダイポールマグネットのトレーニングによる磁場強度の増加により, 重心系エネルギーを Run 2 の 13.0 TeV から 13.6 TeV に上げて運転している。また, LHC へのインジェクターのアップグレードにより, ビームエミッタンスを小さく保ったままバンチ当たりの陽子数を大幅向上している。衝突点でのビーム収束を絞り込めば, バンチ交差当たりの平均相互作用数 ( $\langle\mu\rangle$ ) が 100 も実現可能であり, 実際の運転でも最高瞬間ルミノシティは  $2.39 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $\langle\mu\rangle = 69.4$  を記録している (表 1)。この輝度増加を有効利用するため, Run 3 実験からルミノシティ・レベリングを本格的に行っている。これは瞬間ルミノシティを一定のレベル以上には上げられないように, 衝突点における収束度を調節する運転手法であり, 主に実験サイドからの要請<sup>1</sup>で, 事象が重なり合っても再構成の精度を保つことのできる  $\langle\mu\rangle = 60$  以下で実験を行うためである。バンチ当たりの陽子数が

<sup>1</sup>磁石の冷却システムの能力の限界による加速器サイドの要請でもある。

表 1: LHC 加速器の運転パラメーター

パラメーター	Run 2	Run 3
重心系エネルギー (TeV)	13.0	13.6
陽子数/バンチ	$1.1 \times 10^{11}$	$1.5 \times 10^{11}$
陽子数/LHC	$2.7 \times 10^{14}$	$3.5 \times 10^{14}$
バンチ数	2,544	2,452
最大相互作用数	90.5	69.4
平均相互作用数	33.7	44.6
最大瞬間輝度 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$2.10 \times 10^{34}$	$2.39 \times 10^{34}$
最大積分輝度/日 ( $\text{pb}^{-1}$ )	900	1,222

減少するに従い, ビームの収束度を上げるという調整をこまめに行い, 瞬間ルミノシティを  $2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度に数時間保ち<sup>2</sup>, 収束度が最大になった後はルミノシティが徐々に下がってくる。通常の LHC の運転サイクルは 10 時間ほどで, 総陽子数  $4 \times 10^{14}$  個が半分程度に減ったところでビームをダンプし, 次のサイクルに移行する。これにより検出器の性能を担保したまま, 単位時間当たりの積分ルミノシティを稼ぐ, 効率の良い運転をしている。表 1 の 1 日当たりの最大積分データ取得量の伸び, 図 1 に示す 2011 年以降の各年における積算ルミノシティの推移に見られる通り, 2023 年は日々の増加率ももっとも高い。これはインジェクターのアップグレードによる陽子数増加と安定したルミノシティ・レベリングを実現させた CERN 加速器グループの成果である。

## 2.1 ATLAS 実験におけるトリガー

ハドロンコライダーにおけるトリガー, 事象の取捨選択を瞬時に行うことは実験成功のためのキーポイントである。例えばヒッグス粒子の場合, 重心系エネルギー 13.6 TeV の陽子・陽子衝突では生成断面積が約 60 pb で

<sup>2</sup>2023 年 7 月の Run で 8 時間近く  $\langle\mu\rangle \sim 60$  を保っていた。

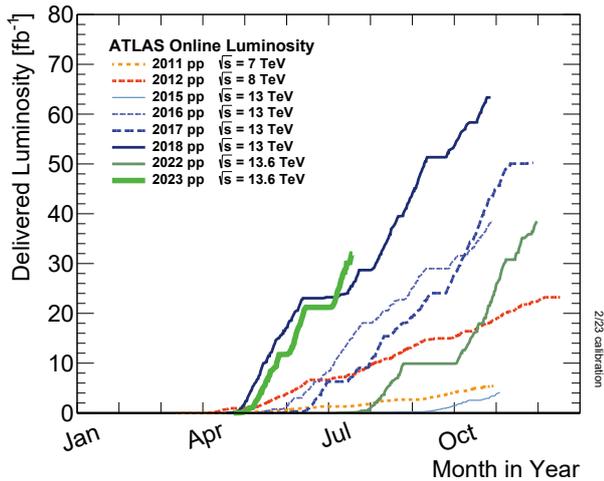


図 1: 各年の積算ミノシティの推移。2023 年は運転時の増加率をもっとも多いことが分かる。

あるのに対し、一番大きな背景事象のマルチジェット事象については約 100 mb と 6 桁も大きい。トリガーに不具合があったり、性能が悪いとマルチジェット事象だけを記録し、重要なヒッグス粒子を含む事象が起こっていても記録できない状況に陥る。測定器の観点からは状況はもっと難しい。表 1 に示す通り、1 バンチは  $1.5 \times 10^{11}$  の陽子を有し、それらが衝突点で交差するごとに平均 45 ほどの非弾性散乱が生じる。これらが 25 ns ごとに起きるため、何らかのエネルギーが見られた、といった単純な「トリガー条件」を課しただけでは、すべての事象がトリガー対象になり、そのトリガーレートは 40 MHz になってしまう。ATLAS 実験における 1 事象辺りのデータサイズは 2 MB 程度であり、テープに書き込めるレートはおおよそ 1 kHz でしかない<sup>3</sup>。

ATLAS 実験ではこのトリガーを 2 段階に分けて行っている。初段は Level-1 トリガー (L1) と呼ばれ、処理時間が決められたリアルタイムで事象の取捨選択を行うハードウェアベースのトリガーシステムであり、この出力レートの上限は 100 kHz である。後段は PC クラスタを用いる High-Level Trigger (HLT) であり、全検出器からの情報を使い事象を再構成し、記録すべき事象を選択する。この出力はテープに記録され、この出力レートは約 1 kHz となる。

言うまでもなく、L1 トリガーは全体の性能を大きく左右する。その中でもレプトントリガーの性能が重要である。これは新粒子やヒッグス粒子など興味のある事象は、 $W$  粒子や  $Z$  粒子のベクターボソンを付随する生成過程が多いためである。これらから崩壊して出てくる電子またはミュオンは、10 ~ 30 GeV 程度の横運動量

<sup>3</sup>テープに残すだけであれば、3 ~ 4 kHz が可能である。この余剰分を有効活用し、即時ではなくデータ取得停止時に解析するデータも取得している。

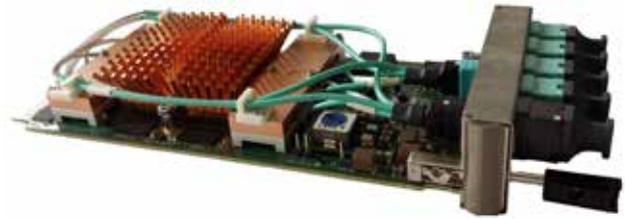


図 2: カロリメータトリガーの新デジタル読み出しのコア、ATCA 規格のメザニンカード LATOME (LAr Trigger prOcessing MEzzanines) Intel 社製 Arria-10 FPGA を搭載、Broadcom 社製 MicroPod 8 基で光ファイバ 96 本を接続。

を持つ。このような電子やミュオンが少なくとも一つあるという事実は、マルチジェット背景事象とは大きく異なる特徴であり、それを捉えてトリガーする。これらを single-EM 又は single-muon トリガーと呼び、全体の 40%にあたる約 20 kHz ずつ割り当てデータ取得している。この他にタウ粒子やジェットトリガー、欠損横エネルギー (MET) トリガーも用意されている。

2019 年から 2021 年のシャットダウンの間にこの L1 を強化した。液体アルゴン・カロリメータのトリガー読み出しのデジタル化 [1] により single-EM、そして前方ミュオン検出器の更新 (NSW の導入) [2] により single-muon の閾値を保ったままトリガー頻度を大幅に下げること成功した。その詳細を以下で紹介する。

### 3 液体アルゴン・カロリメータのトリガー読み出しのデジタル化

#### 3.1 Super Cell の導入

新トリガー読み出しは従来に比べ 10 倍細かく読み出す Super Cell (SC) を導入、EM シャワーの形状を測定することにより、電子および光子とジェットの識別能力を向上させる。従来のトリガー読み出しには物理解析用のもっと細かい読み出し配線を分岐し、約 60 個分をアナログレベルで足し上げ、モリエール半径 ( $\Delta R = 0.04$ )<sup>4</sup>の約 2 倍に相当する  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$  のタワーを使っていた。SC では深さ方向は 4 層別々に、そのうちの真ん中 2 層は  $\eta$  方向に 4 倍細かく読み出す。これにより読み出し数が 10 倍になるので、フロントエンドで信号波形をサンプリングして、一つの SC につき 12 bits のデジタルデータを 40 MHz でバックエンドに転送、そこでリアルタイム信号処理によりエネルギーと時間測定を行っている [3]。これを後段のトリガー判定を行う専用エレクト

<sup>4</sup> $z$  軸をビーム軸、 $x$  軸を LHC リングの中心方向とした右手系の座標系。 $\phi$ ,  $\theta$  はそれぞれ  $x$  軸から  $y$  軸、 $z$  軸から  $y$  軸への角度。 $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$  であり、 $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ 。

ロニクスに送信する。システム全体で 21 Tbps で受信、41 Tbps で後段に送信する膨大なデータフローとなっている。このリアルタイム信号処理を行うのが、図 2 に示す ATCA 規格のメザニンカード LATOME (LAr Trigger prOcessing MEzzanines) であり、計 96 本の光ファイバーを接続、Intel Arria-10 FPGA を搭載している。ちなみに、この名前はフランスらしく、“La Tomme” というチーズの名前と掛けてある。ATLAS 日本グループはこのバックエンドパートに携わり、ハードウェアの共同開発、そしてコアになっているエネルギーと時間測定アルゴリズム実装を担当した。このアルゴリズムは FIR フィルタリング [3] に基づく積和演算により、決まった遅延時間 110 ns で各バンチ交差においてパルスの有無を判定、全 SC の横方向エネルギーを出力する。この出力はカロリメータ自体の特性による衝突頻度に比例するベースラインシフトの補正、サチュレーションによる誤動作回避など、正しいトリガー判定をするために必要な機能を盛り込んでいる。扱うデータ量とファームウェアが大きいと、FPGA のリソース使用率の削減とタイミング違反<sup>5</sup>の解決が大きな課題であった。最終的には FPGA のロジックの 92%、メモリ 95% を使用しながら、タイミング違反は 0 というファームウェアの構築に成功し、Run 3 実験の開始を迎えることができた。

### 3.2 コロナ禍でのハードウェア製作と導入そしてシステム統合

このアップグレード計画は LHC Run 2 終了後の 2019 年、2020 年の 2 年間の長期シャットダウン中に行われる予定であった。当初、フロントエンドに新規導入するデジタイザボードの生産はそれほど順調ではなく、むしろ遅れ気味であった。そこにパンデミックが起こったのである。COVID-19 の名前にもある通り、コロナ禍の始まりは 2019 年であり、自由が奪われたのは 2020 年の 3 月であった。ヨーロッパから見れば遠いアジアで始まり、マスクをしないとイケないのは大変そうだね、という感じだったのが、全世界に広がり、すべての社会活動を止めないとイケない状況になったのである。

もともとプロジェクトの進行が遅れていたところに製作作業が半年ほど止まったことに加え、検査体制を作り上げているところで多数の人が同時に作業できない状況などが重なり、結果としてプロジェクトの完了に 10 ヶ月程度の遅れが出た。このような遅れはすべてのプロジェクトで同様であり、シャットダウン期間は 1 年ほど延ばすことになり、Run 3 の始まりは 2022 年の 7 月になった。

コロナ禍でのコミッショニングは簡単なものではない。このプロジェクトは日本、アメリカ、ロシア、ドイツ、イタリア、フランスそして CERN の多数の研究機関から多くの研究者が関わっている。各研究機関で製作された新しいハードウェアを組み合わせ、安定に運用できるシステムを作り上げるには、どうしても人が集まり、膝を付け合わせながら作業、議論をしないと進まないのである。コロナ禍であっても、このようなアップグレードに関わる案件には会合を持つことが許され、細心の注意のもと、CERN に集まり、開発を進めた。この甲斐もあり、2021 年 10 月末に行われた beam splash テスト<sup>6</sup>にもデータ取得できる体制<sup>7</sup>を整えることができた。

この beam splash については忘れられない出来事があった。実は一番最初の splash 事象は取得できなかったのである。この最初の beam splash に向けて、様々な調整を行い、何とか LHC 加速器に同期した事象を取得できるようにしたつもりであった。実際、宇宙線由来のデータ取得では ATLAS 検出器全体との同期も取れていたもので、絶対にシステムに問題は無いと信じていた。しかしながら、beam splash が起きる直前に「何か」が起き、取れていたはずの同期にずれが発生し、取得されたデータにはあるはずのパルスが見つからなかったのである。このテストでは数時間前から ATLAS コントロールルームにはすべての検出器のエキスパートが集まり、beam splash 事象に備えていた。皆が喜んでいて、われわれだけは青い顔をして何か起こったんだと動揺していたのを覚えている。結局のところ、クロック源を ATLAS 中央トリガーシステムから LHC 加速器の RF の信号に移行する過程で同期が外れてしまうことが問題の原因であると判明した。このときのファームウェアは十分にロバストにできておらず、通常なら LHC 周回一周分で同期が回復できるのであるが、その機能をテストしきれなかったのである。2 回目以降の splash 事象ではシステムの再同期をクロックの移行後に行うことにより、信号を見ることができた。

実際のトリガーで使用するためには、エネルギーとタイミングの較正が必要である。回路系にはナノ秒レベルの調整機能は無く、フィルタリング係数の調整により SC 毎に較正する。まず、あらかじめ約 1 ns 毎に位相をずらした係数セットを 2 バンチ分 (50 ns に相当) 準備する。これらを  $500\text{pb}^{-1}$  に相当する衝突データに適用し、事象毎にエネルギーが最大になる位相を選ぶ。最終的な位相は全事象の最適位相の平均値を採用した。これは検出器からのパルスは凸型で波高がエネルギーに比例する相似形になるので、エネルギーが最大になる位相が

<sup>6</sup>衝突点の上流 140 m に設置したターゲットにビームを照射、 $\mu$  粒子を ATLAS 検出器全体に入射させる。カロリメータでは LHC クロックに同期した TeV レベルの信号が見える。

<sup>7</sup>この時点では従来のトリガーシステムによるトリガーでデータ取得をしていた。

<sup>5</sup>1 クロック毎の信号伝達時間に関する要請。FPGA 内でレジスタ間の経路が長いと 1 クロックの間に信号が届かないことがある。

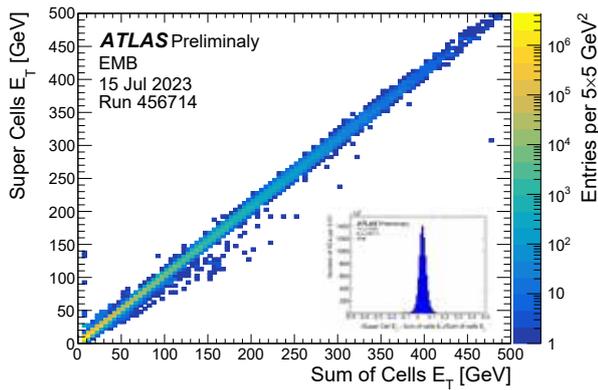


図 3: 実データにおける横エネルギー測定と比較。新デジタル読み出し（縦軸）と物理解析用読み出し（横軸）を比較。較正後は 5% ほどの範囲で一致している [4]。

実際の位相になることを利用している。図 3 は較正後の横エネルギーについて、SC 読み出しとよく理解されている物理解析用の読み出しを比較した図である。従来システムの線形性は 250 GeV までしかなかったが、SC 読み出しでは 500 GeV まで 5% の範囲で良い一致が得られた。

### 3.3 デジタルトリガーの性能

実際の L1 トリガーの発行は後段のシステムで行われる。LATOME から送られた同じ事象の横エネルギーからオブジェクトを再構成し、閾値を超えた事象に L1 トリガーを発行する。このシステムの進歩については大幅な遅れが出ていたが、2022 年の終わりに取得したデータで詳細な調整を進めた。2023 年のデータ取得では、LHC 加速器の立ち上げ期<sup>8</sup>で最終確認が完了した。このため、2023 年 5 月以降のデータ取得では新システムを使って発行した single-EM トリガーに完全移行している。2023 年現在は新システムの不具合等による dead channel は 0.3% と低く、順調に運転をしている。図 4 に示す通り、従来のシステムと比べ、新システムのトリガー効率の立ち上がりは鋭く、それ以降の効率も高い。背景事象の抑制能力が高く、トリガー頻度を 25% ほど削減している。これはほぼ計画通りの性能である。

<sup>8</sup> 毎年の LHC 加速器の立ち上げは 1.5 ヶ月ほどかかる。beam splash や重心系エネルギーも 900 GeV での衝突などを経て、13.6 TeV まで到達する。そのあとは、 $\langle \mu \rangle$  が低く、バンチ数も数個から始まり、徐々に瞬間ルミノシティを上げていく。

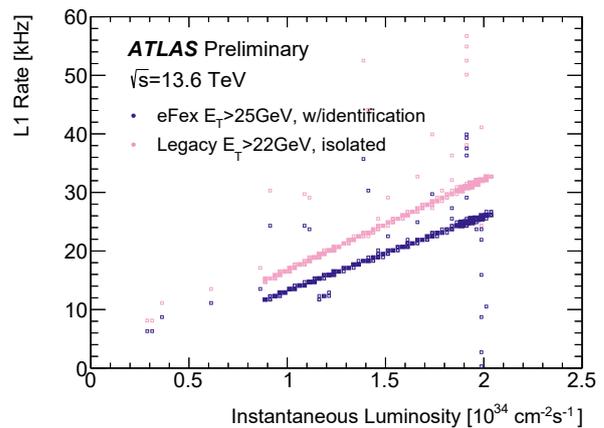
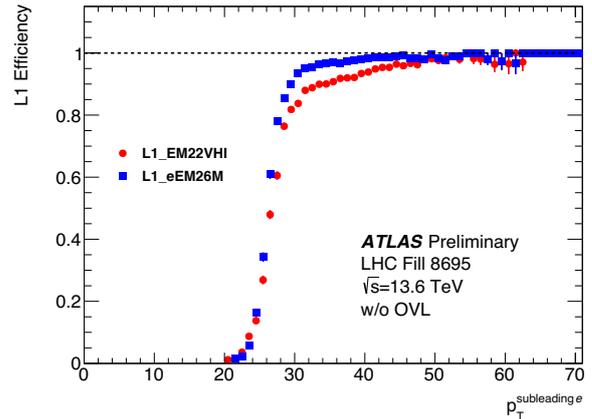


図 4: 新デジタルカロリメータトリガーシステムの性能。上: L1 トリガー効率の横運動量依存性。新システムが青■、従来が赤●で示している。下: そのときの L1 トリガー頻度 (新システムが青、従来がピンクで表示)。新システムの方が従来トリガーより高い効率を持ちつつ、トリガー頻度を 25% ほど抑制している [5]。

## 4 新型検出器と新電子回路による L1 ミューオントリガーの改善

### 4.1 新型検出器 New Small Wheel

加速器の高輝度化に伴い、放射線量の高いトロイド磁場内側の前方ミューオン検出器の効率が落ちることが、シミュレーションの結果から判明していた。またミューオン検出器にあるドリフトチューブの hit occupancy が高くなってくると、正しい飛跡を引けなくなってしまふ。これらの問題を解決するため、高レートに対応したミューオン検出器として、新しい検出器 New Small Wheel (NSW) に置き換えるアップグレードが 2013 年より計画された。この検出器は、二つのテクノロジーをそれぞれ 8 層、計 16 層備えた検出器である。一つ目はワイヤー・ストリップの 2 次元読み出し検出器である Thin-Gap Chamber (TGC) を改良した small-strip

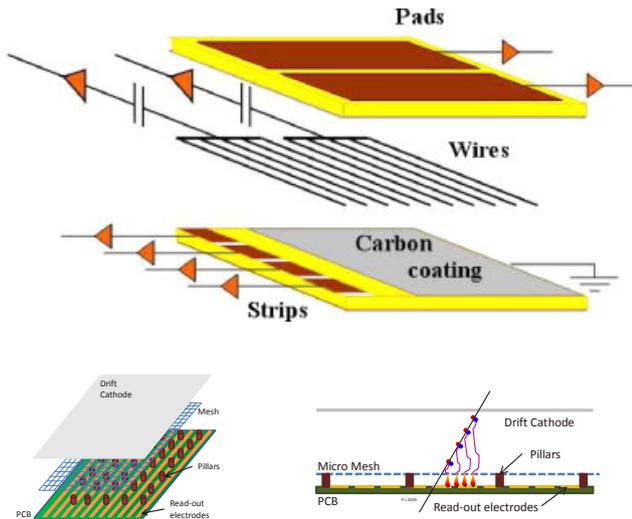


図 5: NSW に用いられている各検出器の内部構造 [2]。上が sTGC で下が MicroMegas である。

TGC (sTGC) であり、名前通りより細いストリップをもつ。またリードアウトするデータ量を削減するために、読み出すストリップを判断するパッドも存在する。もう一つのテクノロジーは Micro Pattern Gas Detector (MPGD) の一つである MicroMegas 検出器であり、位置分解能に優れている。それぞれの内部構造を図 5 に示す。

このアップグレードは Run-3 に向けた ATLAS 実験アップグレードの一丁目一番地とされていたが、大規模かつ複雑なシステムであることに起因する技術的な困難により開発・製造が遅れ、Run 3 開始までにインストールを完了させることが大きな懸念事項であった。コロナ禍でも最優先事項として感染対策を取りつつ現地での建設を止めなかったことに加え、Run 3 の開始も 1 年遅らせたことにより、2021 年終わりに地下へと下ろすことが出来た (図 6)<sup>9</sup>。

検出器自体が LHC のビーム開始直前にインストールされたこともあり、2022 年の Run 3 開始直後から ATLAS 実験としては NSW の状況に左右されない形でデータ取得を行ってきた。その裏で NSW のコミショニングを平行に走らせ、準備が出来た部分から段階的に ATLAS のデータ取得に参入させていく形を取った。検出器安定運転のための改良は日々導入されており、2022 年 11 月時点における、ミュオンに対して sTGC もしくは MicroMegas のどちらかで 4 層以上のヒットを検出できた効率を図 7 に示す。効率の低い部分が特定の領域で見受けられるが、これはチェンバー自体や前段回路の不具合などによるもので、現時点でも多くの研究者が改善に向けて動いている。

<sup>9</sup>インストールを別の時期に延期する案や、片側一台のみインストールする案なども議論されていた。



図 6: 完成した 2 枚目の NSW が ATLAS 検出器のあるサイトまで運ばれたときの写真。大変良く晴れた日であった [6]。

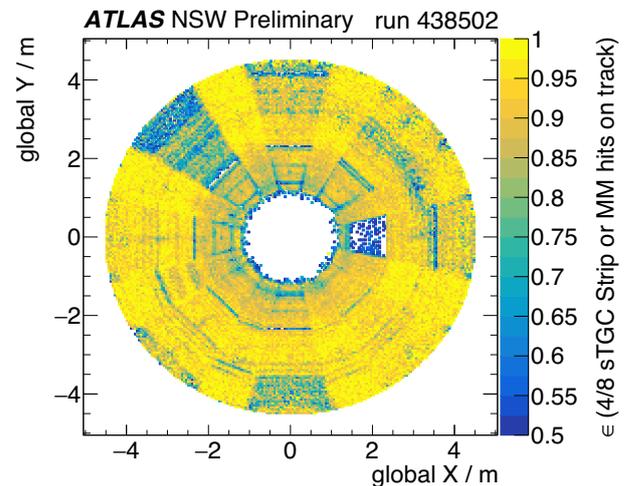


図 7: NSW のミュオンに対する効率 [7]。

## 4.2 L1 ミュオントリガーの改良

L1 ミュオンシステムでは、基本的にトロイド磁場によって曲げられたミュオンを測定してトリガーの判断を行う。Run 1 から L1 ミュオンとしての最大の問題は、 $1.05 < |\eta| < 2.4$  領域のエンドキャップ部におけるミュオン以外の大量のバックグラウンド事象 (フェイクミュオン) であった。このフェイクミュオン事象は、エンドキャップトロイド磁石の構成物と原子核反応を起こして生成される低運動量の荷電粒子<sup>10</sup>であると知られている。この荷電粒子が、トロイド磁場の外にあるミュオン検出器にとっては衝突点から高運動量で来ているように見えてしまうものがある。この外側にあるビッグホイールと呼ばれる TGC 検出器だけではこの

<sup>10</sup>正電荷の粒子が多い。

違いが判断できないため、トロイド磁場よりも内側の検出器とコインシデンスをとることでフェイク事象を認識し、排除する必要がある。このエンドキャップ部分の L1 ミューオンシステムは、日本がほぼ 100% 運転からシステムの保守・アップグレードまで担当しているシステムである。高効率で安定した運転は達成しているが、バックグラウンドも多いという評判であり、この対処が至上命題であった。

問題の対処はすでに Run 2 の頃から行われており、トロイド磁石より内側に設置された TGC 検出器やタイルカロリメータとのコインシデンスを取ることで対処されてきた [8]。これは一定の成功を収めたが、検出器の位置分解能の限界や  $|\eta| > 1.9$  の領域をカバーしていなかったことから、バックグラウンドを十分に排除できていなかった。Run 3 に向けて NSW が導入されたことにより、L1 ミューオンシステムもそれを利用する形にアップグレードすることとなった。大きな変更は NSW からの大量のデータを処理するためにセクターロジックと呼ばれるミューオン候補を計算する電子回路 (図 8) を刷新することである。このプロジェクトは多くの大学院生が活躍し、学会発表や修士論文として形になっている<sup>11</sup>。ひとりで「刷新した」と書いているが、2013 年秋の TDR の発表後、一からセクターロジックの設計、それに伴い必要となった周辺の電子回路、トリガーデータを読み出す新しいソフトウェア読み出しシステムの開発、そしてそれらを認めさせる複数回の承認会議やテストビームでの実証など、多くのことが必要であった。他の ATLAS アップグレード計画が遅れた中、スケジュールに完全に乗った状態でレビューを通過、必要な数のモジュールの製作を 2018 年に完了した。

この新しいセクターロジックボードを始めとする必要なシステムの入れ替えと配線を、コロナ禍前の 2019 年に完了していた。これにより 2020 年のコロナ禍で現地に日本人研究者が滞在できない状況でも、リモートでソフトウェア的な開発やコミショニングを続けることができたことがその後の成功につながる。実際に CERN では研究活動が日常に戻っていき、ATLAS 実験全体でのコミショニング・ランなどが行われるなか、日本からはまだ海外出張が難しい時期も存在した。これまでのように現地に滞在出来ないことによる危機感もあったが、ごくわずかな現地研究者と、日本からリモート接続で参加できる状況を整備できたこともあり<sup>12</sup>、しっかりとした準備期間が確保できた。コロナ禍においても研究を止めずに活動できたこともあり、L1 ミューオンのエンドキャップ部では Run 3 開始時から安定したトリガーの供給に成功した。

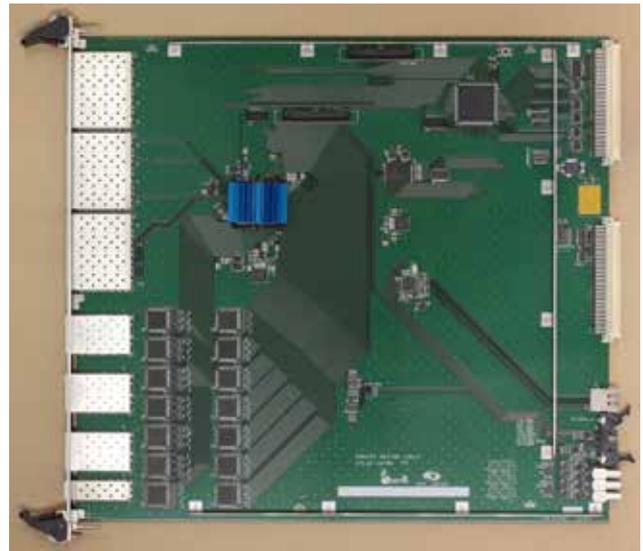


図 8: 新セクターロジックの写真。VME 9U サイズのボードに Xilinx 製 Kintex-7 の FPGA を搭載し、前面には光ファイバーを接続するための SFP+/SFP コネクタが敷き詰められている。ATLAS のミューオンエンドキャップ部をカバーするためには、このボードを 72 枚使用する。

Run 3 のコミショニングの大きなステップとしては、NSW などの内部ミューオン検出器をトリガーに組み込むことである。2021 年には NSW をトリガーとして一刻も早く使用するため、NSW とトリガー・DAQ のエキスパートを集めたタスクフォースが結成された。安定した飛跡検出が NSW でできなければ、決してトリガー検出器として使用することができない<sup>13</sup>。NSW の信号をセクターロジックまで伝える時間が伸びてしまっていること、複雑なシステムによる技術的な困難、コミショニングを続けるためのマンパワーとしての問題もあり、本来うたっていた「ベスト」でなくても、確実にできるオプションから始めることなどが決定された。実際には sTGC 検出器、それもパッドという粗い読み出し単位で信号を読み出し、この情報のみをトリガーに用いる、という話になった。sTGC のストリップ信号や MicroMegas の情報は、それが完了してから、順々に運用しようという話になった。タスクフォース結成時から優先順位を定義したことにより、必要な作業項目はシンプルになったが、長時間の口論も毎週することになった<sup>14</sup>。

NSW 導入に向けたコミショニングが前進してきた一方、LHC のルミノシティの供給も順調で瞬間ルミノシティはどんどん高くなっていく状況であった。2023 年初頭には L1 トリガーレートの上限である 100 kHz の壁

<sup>11</sup> 数えると計 17 篇の修士論文が各大学から出版されている。

<sup>12</sup> 日本では運転に携わる数名が KEK 等に集まり、ZOOM 接続によるリモートコントロールルームとして活動した。

<sup>13</sup> 今のトリガー効率を維持してバックグラウンドだけを落とすことが大事であり、ミューオン信号も落とす意味はない。

<sup>14</sup> 各国担当している検出器・システムが違うため、予算状況やマンパワーを始めとするリソースや、検出器自体とトリガーを運用する者の立場の違いなど、様々な観点で全員が賛同することは難しかった。

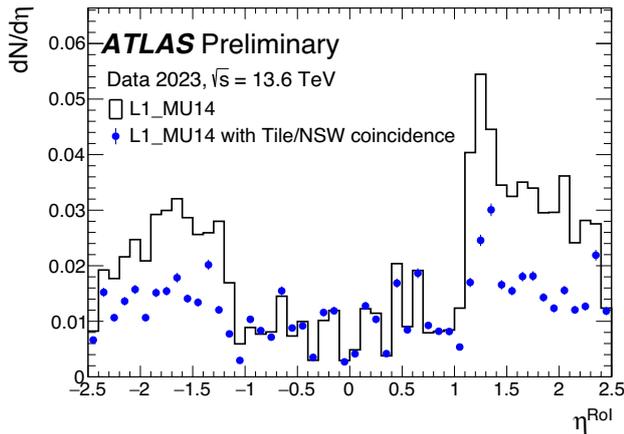


図 9: Single-muon トリガーが発行した際のミュオン候補 (Region-of-Interest) の  $\eta$  分布 [9]。面積がレートに比例する。本来、真のミュオンはほぼフラットに分布するが、ヒストグラムに示すように  $|\eta| > 1.0$  の領域に多くのフェイクミュオン事象があった。タイルカロリメータと NSW とのコインシデンスで半分近くに落とすことに成功した。 $|\eta| < 1.0$  の統計的なギザギザは検出器の構造による影響である。

により、いよいよ ATLAS 実験は CMS 実験よりも低い ( $\mu$ )、つまり低い瞬間ルミノシティでしかデータ取得できないことがわかってきた。トリガーとして運動量の閾値を上げるか、デッドタイムを許容せざるを得ないのかなどの議論と共に、NSW も早急に入れる必要に迫られた。一部の妥協も伴う様々な改良、そして素早いパフォーマンスチェックにより、2023 年 6 月には一部分を、そして 7 月には 3 分の 2 ほどの領域で NSW とのコインシデンスを稼働することに成功した。

NSW を要求することによるパフォーマンスの改善は図 9 の通りである。タイルカロリメータと NSW の信号との同期をとることにより、効率の低下を 5% に抑えつつ、トリガーレートを 8 kHz 削減することに成功した<sup>15</sup>。ほぼ想定通りのレート削減量を達成できたこと、2023 年初頭に期待されたより早く導入できたことで、ATLAS のデータ取得運転に貢献できたことは素晴らしい。一方で、コインシデンスを要求できていない領域や 5% ほどの効率低下は、NSW 検出器自身の効率が低いためである。この改善のための NSW 検出器側での調整作業も鋭意進行中である。

また、今回のアップグレードでは、フレーバー物理の感度を改良するための工夫が多く組み込まれている。たとえば  $B$  メソンの崩壊からのミュオンの統計を稼ぐためには、低い運動量のミュオンを捕まえる必要がある。これらは単純に運動量の閾値を下げるわけにはいかないため、ミュオンの電荷識別や、ブーストされた  $B$

<sup>15</sup> タイルカロリメータで約 2 kHz、NSW は 3 分の 2 の領域を有効化して約 6 kHz の削減であった。

メソンの崩壊による二つのミュオンでは距離が近いことなどを要求に加える必要があり、これら「トポロジカルな情報」をハードウェア上で利用するためのロジックも実装しており、今後の物理解析の一助になると期待している。

## 5 Run 3 での物理成果

前述の通り、Run 3 から陽子・陽子衝突のエネルギーを 13.6 TeV に上げて実験を行っている。重心系エネルギーは Run 2 実験の 13.0 TeV から 4.6% 上げたことになるが、重い粒子の生成断面積ほどその効果は大きい。例えばトップクォークの対生成の場合 11%、質量 5 TeV の新粒子（または 9.5 TeV のブラックホール）においては 1.5 (2.5) 倍になる。このような直接探索の解析は進行中であり、後のニュースに任せる。今回は LHC 実験において基準プロセスとなっている  $Z$  ボソンと、 $t\bar{t}$  の生成過程の生成断面積の測定、そしてヒッグス粒子の解析結果について紹介する。

### 5.1 $Z$ ボソンと $t\bar{t}$ 生成断面積測定

$Z$  ボソンは LEP 実験において不変質量が精度よく測られているので、様々な較正に使う基準球の役割を持つ。二つのレプトンに崩壊する過程を用い、電子、ミュオン、そして  $\tau$  のエネルギーや運動量測定の補正、トリガーやオブジェクト再構成効率の測定を行っている。トップクォークの対生成も同様で、ジェットのフレーバー ( $b$  または  $c$  クォーク由来) 識別の性能測定に不可欠である。物理の観点からも QCD や QED の PDF や生成断面積に対する高次補正 (NNLO+NNLL) がどれだけ正しいかを検証できる。 $t\bar{t}$  の生成断面積は、真空安定性の議論に不可欠なトップクォークの質量にアクセスできる重要なパラメータであり、この測定精度の向上は重要課題のひとつである。

$Z$  ボソンの解析は電子対とミュオン対を再構成し、その電荷が反対の事象を使う。 $t\bar{t}$  の解析には、 $t \rightarrow W+b$  と  $\bar{t} \rightarrow W-\bar{b}$  を再構成する。これらの  $W$  ボソンが反対の電荷をもった電子とミュオンに崩壊した事象のみを用いることにより、背景事象を抑制した。そして  $b$  クォークの再構成はジェットとして再構成されたオブジェクトを選び、しかもそれが深層学習を用いた識別器により  $b$  クォーク由来であることを要求する。ちなみにトリガーは single-EM または single-muon を使っている。 $t\bar{t}$  生成断面積の測定値は  $\sigma_{t\bar{t}} = 859 \pm 4(\text{stat.}) \pm 22(\text{syst.}) \pm 19(\text{lumi.}) \text{ pb}$  が得られた。図 10 に  $t\bar{t}$  生成断面積の  $pp$  衝突エネルギー依存性を示している。 $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$  の測定点から最新の  $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  の結果まで理論計算値と誤差の範囲でよく一致

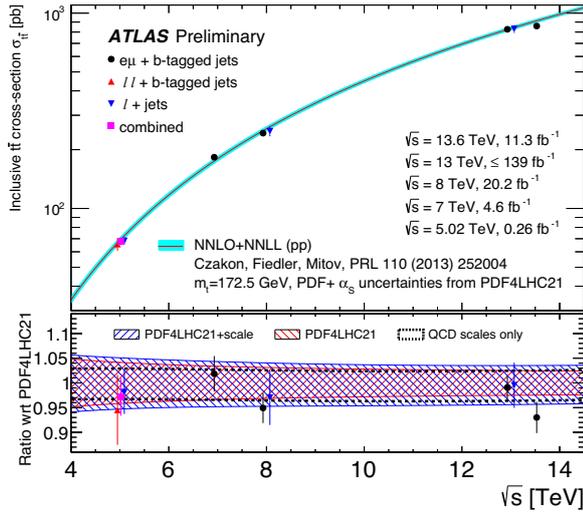


図 10:  $t\bar{t}$  生成断面積測定結果 [10]。

する結果となっている。 $Z$  ボソン生成断面積の測定値は  $\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell}^{\text{fid.}} = 751 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 15(\text{syst.}) \pm 17(\text{lumi.})$  pb と得られた。測定誤差に注目すると、統計誤差は小さく、ルミノシティ測定起因の影響が大きく、その他の系統誤差と同程度になっている。 $\sqrt{s} = 13.6$  TeV におけるこれらの断面積の比  $\mathcal{R}_{t\bar{t}/Z} = \sigma_{t\bar{t}}/\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell}^{\text{fid.}}$  を取ると、このような共通の系統誤差が相殺することができる。この比に対する理論予想は  $\mathcal{R}_{t\bar{t}/Z}^{\text{theory}} = 1.245 \pm 0.076$  (scale + PDF) に対し、測定結果は  $\mathcal{R}_{t\bar{t}/Z}^{\text{obs}} = 1.144 \pm 0.006(\text{stat.}) \pm 0.022(\text{syst.}) \pm 0.003(\text{lumi.})$  となり、誤差の範囲でよく一致する結果であった。

## 5.2 $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ^*$ の生成断面積測定

もう一つの 13.6 TeV データの解析は、ヒッグス粒子発見チャンネルである 2 光子と  $ZZ^*$  に崩壊する過程を用いた生成断面積測定である [11]。使用したデータセットは積分ルミノシティにして  $31.4 \text{ fb}^{-1}$  ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) と  $29.0 \text{ fb}^{-1}$  ( $H \rightarrow ZZ^*$ ) に相当する。 $H \rightarrow \gamma\gamma$  はカロリメータの有感領域内で再構成された 25 GeV 以上の光子を用いる。これらの事象は single-EM(single-MU) だけでなく、2つの電子(ミュオン)が事象に含まれる場合には、それらを閾値のより低いエネルギー(運動量)閾値を課すことにより、高いトリガー効率<sup>16</sup>を実現している。 $H \rightarrow ZZ^*$  は反対の電荷をもつ電子対またはミュオン対を 2 組から再構成し、一つの  $Z$  ボソンはその不変質量が  $Z$  辺り、もう一つはそれ以下であることを要求した。ヒッグス粒子の質量は測定値である  $125.09 \pm 0.24$  GeV を仮定している。重心系エネルギー 13.6 TeV におけるヒッグスボソンの全断面積の理論予

<sup>16</sup>Offline 解析での事象選択条件で 99%以上の効率を達成。

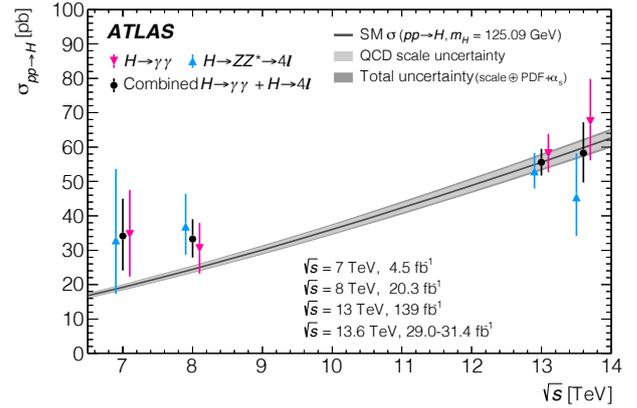


図 11:  $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ^*$  チャンネルを用いたヒッグス粒子の生成断面積測定結果 [11]

想値は  $\sigma(pp \rightarrow H)_{\text{SM}} = 59.9 \pm 2.6$  pb である。これは少なくとも 1 次ループまで考慮に入れた NLO, 最大 3 次ループ ( $ggF$  プロセス) までの高次計算の結果である。

これら解析はヒッグス生成プロセスによらず、ヒッグス粒子からの崩壊モードのみに注目して生成断面積を測定している。2 光子モードは一つのカテゴリで 2 光子の不変質量分布から再構成されたヒッグス粒子の数を抽出した。 $ZZ^*$  モードについては四つ ( $4e, 4\mu, 2e2\mu, 2\mu2e$ )<sup>17</sup> の終状態によるカテゴリを定義し、再構成した不変質量分布から再構成されたヒッグス粒子の数を抽出している。これから再構成効率や検出器の不感領域などを考慮し、全断面積を導出した。測定結果としては  $\sigma(pp \rightarrow H)_{\text{obs}}^{H \rightarrow \gamma\gamma} = 67_{-11}^{+12}$  pb, そして  $\sigma(pp \rightarrow H)_{\text{obs}}^{H \rightarrow ZZ^*} = 46 \pm 12$  pb が得られた<sup>18</sup>。これらの結果から全断面積に変換および統合し、 $\sigma(pp \rightarrow H)_{\text{obs}} = 58.2 \pm 8.7 = 58.2 \pm 7.5(\text{stat.}) \pm 4.5(\text{syst.})$  pb を得た。上記の高次効果を含めた理論予想値と良い一致が見られる。図 11 は 2010 年から現在までの重心系エネルギー 7 TeV から 13.6 TeV の測定点を重心系エネルギーの関数として示す。これら一連の結果を出したことは、ATLAS 検出器を使った解析の準備がすべて整ったことを意味する。検出器の正常稼働によるデータ取得, MC 事象生成, オブジェクトの再構成およびその補正など、様々な過程の集大成である。今後、これらを使った様々な解析結果が楽しみである。

## 6 今後の展望

2022 年 7 月に Run 3 実験が始まってから今までに  $66 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得済みである<sup>19</sup>。このデータセッ

<sup>17</sup>それぞれのカテゴリの中でのレプトンの順番は横運動量の大きさの順を示す。これら 4 つで崩壊分岐比が異なることもあり、別々に解析している。

<sup>18</sup>このそれぞれの結果と統合結果を比較した  $p$  値は 20% である。

<sup>19</sup>順調な運転をしていたが、7 月 17 日に LHC の 1 区間で真空漏れが起きてしまった。この復旧には最短でも 40 日ほどかかることにな

トで新粒子探索や lepton universality を破るような物理の解析など、数多く進められている。Run 3 実験は 2025 年末までで、 $200 \text{ fb}^{-1}$  程度のデータ取得を見込んでいる。Run 1 実験から合計では  $400 \text{ fb}^{-1}$  程のデータセットとなり、 $H \rightarrow \mu\mu$  の発見による第二世代のヒッグス湯川結合が明らかにできる。これだけの高統計になると、ヒッグスセクターの CP 非保存など、ヒッグスセクターで標準模型を超える物理が見えてくるかもしれない。もちろん、有効場理論に基づいた Dimension 6 のウィルソン係数に新物理の兆候が見えてくる可能性も大にある。HL-LHC 実験にむけたアップグレードの佳境を迎える時期でもあるが、そこに向けた様々な新しいアイデアを次々と試す非常に良い機会である。現在は Run 3 の検出器運転、HL-LHC に向けた準備と並行して、時間を見つけて解析にいそしむ日々である。エキサイティングなニュースがいつなのかは約束できないが、今後も ATLAS 実験の結果にご期待いただきたい。

## 参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, “LAr Calorimeter Phase-1 upgrade Technical Design Report”, CERN-LHCC-2013-017 (2013).
- [2] ATLAS Collaboration, “New Small Wheel Technical Design Report”, CERN-LHCC-2013-006 (2013).
- [3] G. Aad *et al.*, “The Phase-I Trigger Readout Electronics Upgrade of the ATLAS Liquid Argon Calorimeters”, JINST **17** P05024 (2022).
- [4] ATLAS Collaboration, “LAr Digital trigger performance plot”, PLOT-LARG-2023-01 (2023), <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LArCaloPublicStableBeam2022DT>.
- [5] ATLAS Collaboration, “L1Calo performance plots in early 2023”, PLOT-TDAQ-2023-02 (2023), <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1CaloTriggerPublicResults>.
- [6] CERN, “Movement of ATLAS small Wheel C”, CERN-PHOTO-202110-154 (2021), <https://cds.cern.ch/record/2784119>.
- [7] ATLAS Collaboration, “New Small Wheel performance plots”, MDET-2023-02 (2023), <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/ApprovedPlotsMuon>.
- [8] 青木雅人, 高エネルギーニュース「LHC ATLAS 実験の最新状況」 **37-1**, 30 (2018).
- [9] ATLAS Collaboration, “Performance plots of the Tile and NSW inner-coincidence for the L1Muon Endcap trigger”, PLOT-TRIG-2023-08, (2023).
- [10] ATLAS Collaboration, “Measurement of  $t\bar{t}$  and  $Z$ -boson cross sections and their ratio using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2023-006 (2023).
- [11] ATLAS Collaboration, “Measurement of the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  cross-sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2023-032, arXiv: 2306.11379 (2023).

---

り、2023 年内には  $pp$  衝突での本格的な運転はできない見込みとなった。復旧後は重イオンのデータ取得を行う予定である。