

## ■ 研究紹介

# LHC ATLAS 実験の最新状況

KEK 素粒子原子核研究所

青木 雅人

[masato.aoki@kek.jp](mailto:masato.aoki@kek.jp)

2018 年 (平成 30 年) 5 月 7 日

## 1 はじめに

2012 年のヒッグス粒子発見により素粒子物理に大きな貢献をした LHC 実験は、さらなる発見に向けて実験を続けている [1]。2015 年からは陽子ビームの衝突エネルギーを 13 TeV にした Run 2 実験が進められている [2]。Run 2 実験は 2018 年いっぱいまで行ない、翌 2019 年と 2020 年は加速器と検出器のアップグレードのため、運転を一時中断し、2021 年から再開する予定である。

本稿ではまず 2 節で 2017 年の LHC の運転状況について述べ、3 節で ATLAS 実験の運転状況について述べる。物理解析の最新状況については次の記事で紹介することにする。

## 2 LHC の運転状況

LHC (Large Hadron Collider) はスイス・ジュネーブ郊外の CERN に設置された、周長 27 km の巨大加速器で、世界最高エネルギーの陽子ビームを正面衝突させる。LHC 運転初期 (2010 年～2011 年) は 7 TeV の重心系エネルギーで運転していたが、2012 年には 8 TeV、そして 2015 年からの Run 2 実験では 13 TeV で運転を行っており、2021 年からの Run 3 実験ではいよいよ設計値である 14 TeV での運転が予定されている。瞬間ルミノシティについても徐々にランプアップを行なっており、2017 年で期待される最高瞬間ルミノシティは  $1.4 \sim 1.9 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  で、ゴールとする積分ルミノシティは  $45 \text{ fb}^{-1}$  であった。

### 2.1 2016 年からの改良点

LHC はより多くの積分ルミノシティを実現するために様々なアップデートを行なった。ハードウェアの改善として、前段加速器である SPS (Super Proton Synchrotron) を改良し、より長いバンチトレインを入射できるようにした。また、入射キッカーも新しくし、ビームロスを引

き起こす熱負荷の低減を行なった。そして LHC 加速器では、セクター 12 においてマグネットの交換を行なった。LHC の運転パラメータも変更し、 $\beta^*$  を昨年の 40 cm から 30 cm と小さくすることにより、高い瞬間ルミノシティを実現する。また、ATS (Achromatic Telescopic Squeeze) optics と Combined Ramp and Squeeze により Fill と Fill の間の時間を短縮し、物理ビームの供給時間を長く取れるようにした。Crossing angle anti-leveling は Fill 中にビームの交差角を調整することによって瞬間ルミノシティを 3 ~ 4 % 上昇させることができる。RF に対しては、必要な電力を低減するような改良を行ない、より多くのビーム電流を流すことができるようとした。

### 2.2 2017 年コミッショニング

LHC がフルパフォーマンスで運転するまでは通常約 1 ヶ月のランプアップ期間が必要である。2017 年は 35 日間をこれに要した。毎年恒例の冬のシャットダウン後、4 月 29 日には LHC リング内に 2017 年はじめてのビームが周り、5 月 1 日には  $\beta^*$  を昨年同様の 40 cm で運転を行うことができた。ビームは BCMS (Batch Compression, Merging and Splitting) スキームを使用し、これによりエミッタанс、電子雲、熱負荷、ビームロス、パイルアップを抑えることができ、より効率よくルミノシティを上げることができる。物理ランとして、はじめて安定したビーム提供を開始したのは 5 月 23 日であった。LHC に入射する陽子バンチ数を徐々に増やしていく、2 週間ほどで 600 バンチに到達した。冬に交換したマグネットがある LHC セクター 12 の電子雲を安定させるため、その後一週間の scrubbing を行なった。Scrubbing とは、high intensity のビームを short bunch spacing で加速器に回すことによって<sup>1</sup> ビームパイプ内表面を綺麗にし、ビームパイプ内表面から放出される 2 次電子を低減させ、陽子ビームが電子雲から受ける影響を抑制するため

<sup>1</sup> 設計値最大である 2820 のバンチを LHC に入射。Total intensity は  $3.4 \times 10^{14} \text{ protons/beam}$ 。

のテクニックである。この scrubbing によって、LHC セクター 12 のビームパイプ内の電子雲を基準値までに抑え、その後さらにバンチ数を増やしてより高い瞬間ルミノシティを目指した。6月末までには目標の 2556 バンチに達し、8月9日にはこれまで最高の瞬間ルミノシティである  $1.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を記録した。

瞬間ルミノシティの記録更新と、非常に順調に見えた LHC の運転であったが、途中からビームロスにより Fill が途中でダンプしてしまうという問題に頭を悩まされていた。どんなに瞬間ルミノシティが高くても、安定してビーム供給が出来なくては意味がない。以下に、この問題、“16L2”問題について述べていく。

### 2.3 “16L2”でのビームロス

2017 年の LHC の運転において、何度か決まったパターンでビームがダンプしてしまう現象がおきた。LHC リングの Point-7 という場所の primary collimator でビームロスが急激に大きくなり、ビームがダンプしてしまっていた。このビームロスは遠く離れた Point-2 のセル 16L2 でのビームロスを起点としていることが分かった。しかし、この 16L2 でのビームロスの振る舞いが、過去のどの例とも合致せず、どう対処してよいか分からなかった。この問題をより理解するために、一度その場所の温度を 80 K に上げることを試した。この手法は過去よく行なわれてきたもので、温度を上げることによってビームパイプ内表面に凍結し付着したガスを解かし、ポンプによって吸い出す事によってガスを取り除く。8月10日にこの warm-up をおこなった結果、予想していた圧力上昇 ( $\sim 10^{-7} \text{ mbar}$ ) を遥かに超えた大きな上昇 ( $\sim 10^{-3} \text{ mbar}$ ) が観測された。この warm-up の後、開放されたガスがさらに予期しない場所へ移動し固着してしまったため、ビームロスの問題はさらに悪い事態になってしまった。入射できる陽子バンチ数も最高でも 1700 バンチ程度となり、瞬間ルミノシティも  $\sim 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度と、先述のピークパフォーマンスの 60 % 程度にとどまってしまった。しかし、これ以上の調査には、再び warm-up が必要となり、さらに問題が悪化するリスクがあるため、2017 年ランニング中の warm-up はこれ以上行なわず、冬のシャットダウン時に再調査を行うことに決めた。ただし、この状況下で高いルミノシティを安定に供給するためにはビームパイプ内の電子雲の影響を受けづらい特殊なコンフィグレーションでの運転をする必要があった。

### 2.4 8b4e スキームでの運転

電子雲の影響を極力減らしながらルミノシティを得る方法として、LHC は 8b4e のスキームを選択した。8b4e とは “8 bunches and 4 empty buckets” のことで、つまり、陽子バンチを 8 個連続した後、4 つは空のままにすることで、熱負荷を減らしビームロスも抑えることができる。このスキームでの運転は 9 月 4 日から行なわれ、実際に熱負荷とビームロスが抑えられることが確認された。9月22日からは  $\beta^*$  を 40 cm から 30 cm に変更し、またビームダンプが起きないようにバンチ数の調整を行ない、最終的には 1868 バンチの陽子ビームを LHC に入れて衝突を行ない、結果、ようやく 8 月当初と同等のルミノシティを出すことができた。しかし、バンチの数が 2556 から 1868 と少ないながらも同等のルミノシティを実現するため、パイルアップ（陽子ビームが一度に交差するときに衝突する事象数）がより多い状態での運転になる。図 1 には 2017 年に LHC の運転時に加速器に入射された陽子バンチ数の推移を示している。

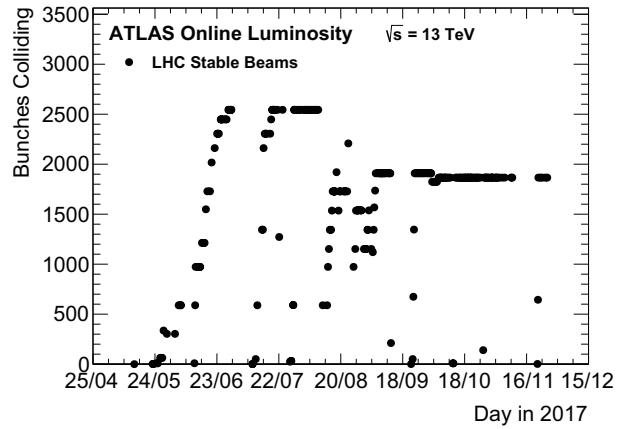


図 1: LHC に入射されたバンチ数と時間を示した図 [4]。8 月まで順調にランプアップが行なわれ、最終的にバンチ数は 2556 に達しているが、それ以降は 16L2 でのビームロスの問題により、バンチ数 1868 での運転となった。

2556 バンチで運転していた当初はパイルアップのピークが 40 程度であったのに対して、1868 バンチの 8b4e スキームではピーク時に約 80 のパイルアップが起きる。このレベルのパイルアップでは検出器側でデータ取得システムに多大な負担がかかってしまい、特にソフトウェア・ベースのトリガーである HLT (High Level Trigger) で使用しているコンピューティングリソースが限界に達してしまい、データを効率よく取得することができなくなる。そのため、LHC ではルミノシティをレベリングする手法によりパイルアップ数(瞬間ルミノシティ)をコントロールして、ある一定の値以上にならないようにする。ここでは、Separation Leveling という手法を導入

した。2つの陽子ビームに対し、衝突時にそれらの軸をずらすことによって衝突の有効面積を減らし、ルミノシティをコントロールする。図2ではLHCにおける典型的なFillの瞬間ルミノシティの時間発展を示している。Separation Levelingによって、Fill開始直後はしばらく一定の瞬間ルミノシティを保っていることが分かる。検出器側からの要請によりパイルアップは60以下に抑える必要があるため、このSeparation Levelingによって瞬間ルミノシティの上限を $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行なった。このスキームによって、LHCはようやく安定した運転を行うことが出来た。図3にはLHCに4つある衝突点のひとつであるATLASにおける、パイルアップのピーク値を示し、図4にはFill開始時の瞬間ルミノシティを示している。

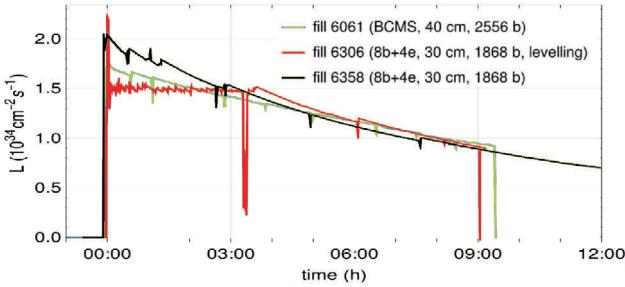


図2: LHCにおける典型的なFillの瞬間ルミノシティの時間発展を示した図[3]。10月以降、Separation Levelingによって瞬間ルミノシティの上限を $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に制限して運転した。

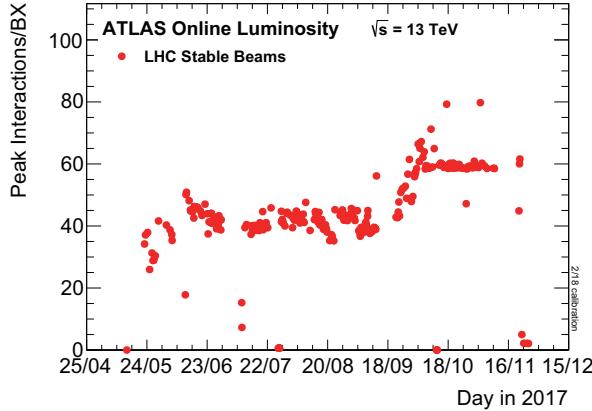


図3: ATLASにおけるパイルアップのピーク値と時間を示した図[4]。8b4eスキームが適用される9月までは、パイルアップ数40程度で運転していたが、それ以降はSeparation Levelingによりルミノシティが抑制され、60程度のパイルアップで運転をした。

Separation Levelingが始まる直前の瞬間ルミノシティは、11月2日にレコードとなる $2.09 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録し、また2017年の積分ルミノシティは $50.2 \text{ fb}^{-1}$

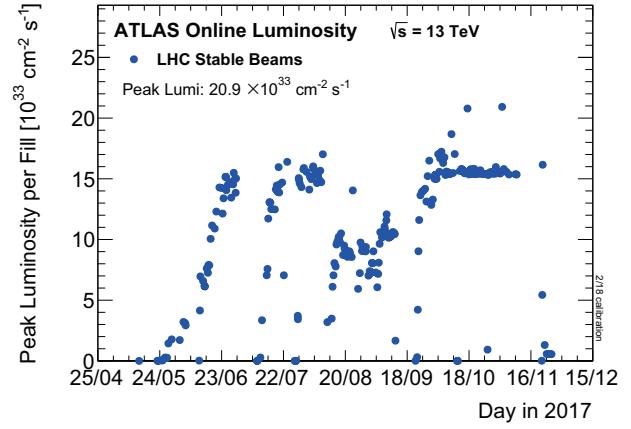


図4: ATLASにおけるFill開始時の瞬間ルミノシティと時間[4]。16L2でのビームロスの問題により、ビーム設定を調整している8月～9月では $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下の運転を余儀なくされていたが、その他の期間ではほぼ一定して $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転した。

となり、当初目標としていた $45 \text{ fb}^{-1}$ を超えることができた。図5はATLASにおける積分瞬間ルミノシティと時間を年別で表示した図である。

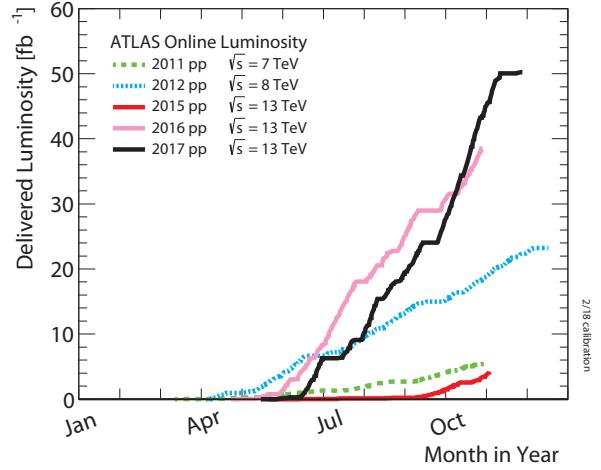


図5: ATLASにおける積分ルミノシティと時間を年別で表示した図[4]。16L2でのビームロスの問題があったにもかかわらず、2017年の積分ルミノシティは2016年のそれを上回ることができた。

### 3 ATLAS検出器の運転状況

ATLASはLHCの4つある衝突点のひとつに設置された汎用型粒子検出器である。ATLASへ参加している研究者はおよそ3千人で、日本からは約百人の研究者が参加している。

2017年の運転状況は非常に安定しており、特に大きな問題もなくLHCのデータを順調に記録してきた。2017

年を通したデータ取得効率は 93%で、そこから物理解析に使用できる割合は約 93%の  $43.8 \text{ fb}^{-1}$  であった。

以下では、主に日本グループが深く関与しているシステムについての運転状況を述べていく。

### 3.1 Pixel 検出器

ATLAS に設置されている Pixel 検出器は計 4 層あり、ビーム衝突点に一番近い場所には 2014 年にインストールされた IBL が設置されており、その外側には B-Layer、そして Layer-1 と Layer-2 が設置されている [5]。また、エンドキャップ部には disc の Pixel 検出器が設置されている。LHC が供給する設計値以上のルミノシティとパイルアップに対応するために、これら Pixel 検出器に対して順次読み出しシステムのアップグレードを行なっている。2015 年 12 月には Layer-2 に対して、2016 年 12 月には Layer-1 に対してこのアップグレードを行なった。B-Layer と disc については 2017 年の 12 月にアップグレードを行ない、これによってすべての Pixel 検出器に対して読み出しシステムのアップグレードが完了する。図 6 には各 Pixel 検出器で読み出しシステムの同期エラーが出た割合を時間の関数で示している。2016 年が  $O(0.01)$  であったのに対して、2017 年では  $O(0.001)$  と、およそ一桁落ちのエラーレートにすることができた。

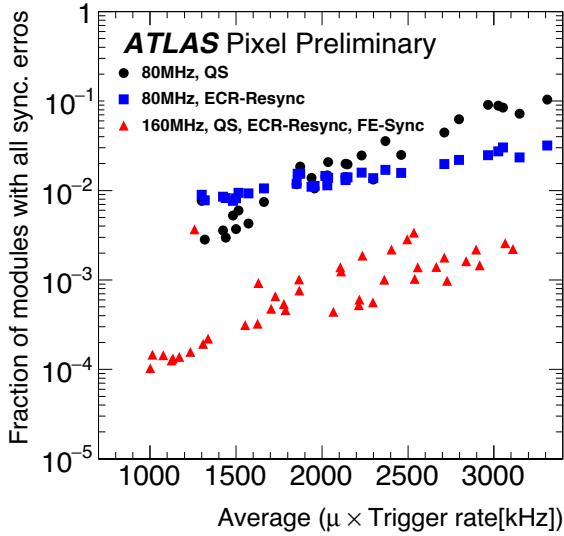


図 6: ATLAS Pixel 検出器での読み出しシステムの同期エラーの割合を示した図 [6]。ドット（黒）と四角（青）のデータポイントは 2016 年での運転状況を示し、三角（赤）のデータポイントは 2017 年の運転状況を示している。2017 年では大幅に同期エラーを抑えることに成功したことが分かる。

そのほか、放射線による影響が観測されるようになっ

た。特に最内層の IBL については、放射線によってフロントエンドチップのレジスタ情報が書き換わってしまう Single Event Upset が観測され始め、その影響で閾値設定が書き換わり、IBL におけるヒットの占有率が上昇した。ただし、このレベルのノイズは物理解析に対して無視できるレベルの影響であると分かっている。また、センサーの放射線損傷により収集電荷量の減少も観測され始めている。これもまた現時点では物理解析に影響はない。図 7 は IBL における電荷収集効率を積分ルミノシティの関数で示したものである。

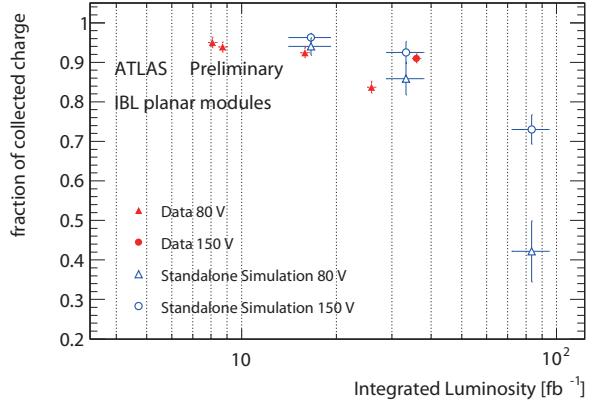


図 7: ATLAS IBL Pixel 検出器における電荷収集効率と積分ルミノシティの相関を示した図 [6]。80 V と 150 V の 2 つの逆バイアス電圧のケースについて、実データを測定した結果とシミュレーションで予想される結果を比較している。

### 3.2 SCT 検出器

SCT (SemiConductor Tracker) はストリップ型のシリコン飛跡検出器で Pixel 検出器の外部を覆うように設置されている [2, 7]。2017 年の SCT 運転は非常に安定しており、ビジー等によるデッドタイムは 0.1%に抑えられている。SCT も LHC の高いルミノシティとパイルアップに対応するために、大きく 3 つの改良が行なわれた。

高いパイルアップ時に読み出しの負荷を下げるため、読み出すチップの数をパイルアップの環境に合わせてダイナミックに変化させる Chip Masking を導入した。Fill 後半になりパイルアップの環境が穏やかになるに連れて読み出すチップの数を増やしていく。図 8 ではこの Chip Masking の効果でエラーの割合が大きく抑えられていることが分かる。

また、Chip Masking と共に読み出しデータのフォーマットを高压縮することによって、さらに許容値を高くする。図 9 ではこの Chip Masking とデータフォーマッ

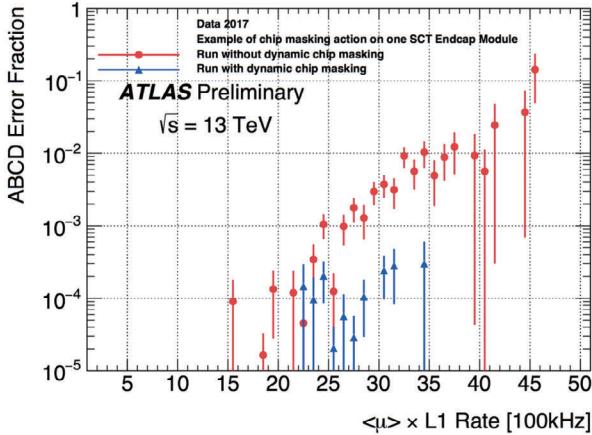


図 8: ATLAS SCT 検出器での読み出しシステムの同期エラーの割合を示した図 [8]。Chip Masking を使うことによって、読み出しシステムの同期エラーを約 10 分の 1 以下に低減できる。

ト変更により、高いパイルアップ環境下でもエラーの割合が大きく抑えられていることを示している。

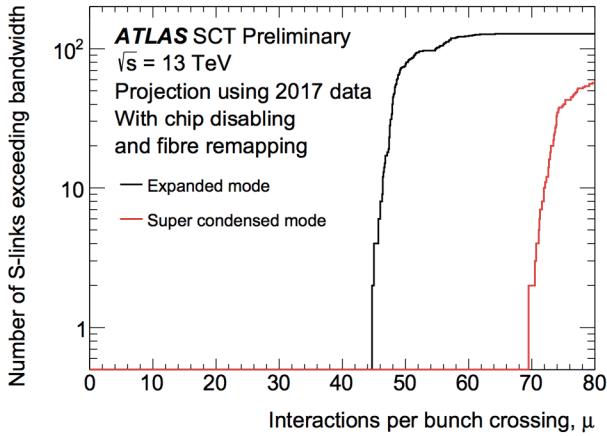


図 9: ATLAS SCT 検出器における読み出しバンド幅を超えるフロントエンド読み出しの数とパイルアップの相関を示した図 [8]。データフォーマットを高压縮することにより、パイルアップに対する耐性を大幅に上げることができる。

SCT フロントエンドの読み出しモジュールは一つに対し 12 個のチップが搭載されており、読み出しは 2 系統で行なわれ、それぞれ 6 個のチップに対して読み出しを行なう。もしひとつつの読み出しラインに不具合があると、そこから 6 つチップが読み出せなくなるので、もう片方の読み出しラインでもそれらのチップを読み出せるようにする redundancy (Rx Redundancy と呼ぶ) をもたせた。この場合、12 個のチップがひとつのラインで読み出される。図 10 では ATLAS SCT 検出器における読み出しバンド幅を超えるフロントエンド読み出しの数とパイルアップの相関を示している。ひとつのラインで

多くのチップを読み出すため、パイルアップからの制約がより厳しくなるが、それでも 60 のパイルアップ数までは問題なく運転できることが分かる。

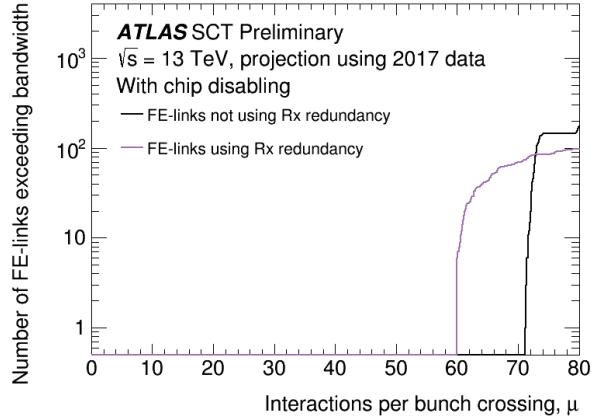


図 10: ATLAS SCT 検出器における読み出しバンド幅を超えるフロントエンド読み出しの数とパイルアップの相関を示した図 [8]。Rx Redundancy によりパイルアップに対する耐性は減るが、それでもパイルアップ数が 60 までは問題ないことが分かる。

### 3.3 TGC 検出器

TGC (Thin Gap Chamber) は ATLAS エンドキャップ部のミューオンをトリガーするための検出器である [9]。エンドキャップのトロイド磁石の後方に Big Wheel と呼ばれる直径 25 メートルほどの円盤にガスチェンバーを計 7 層設置しており、ヒットのコインシデンスをとることにより飛跡を再構成し、高速で運動量測定を行ないミューオンをトリガーする。また、エンドキャップトロイド磁石の前方に Small Wheel と呼ばれる同様のガスチェンバーが計 2 層設置されており、Big Wheel と Small Wheel のコインシデンスをとることにより多くの背景事象を落とすことができる。高速での運動量判定を実現するために、あらかじめ運動量とヒットパターンの対応表である Lookup Table を用意して、トリガー判定回路のメモリにダウンロードしておく。ヒット情報がトリガー判定回路に入力された瞬間、その Lookup Table を用いて対応する運動量を出力する。ATLAS のトリガーで許容されているバンド幅はトータルで 100 kHz までであるため、高ルミノシティでもそのバンド幅に収めるためには厳しいトリガー効率の最適化が必須である。

2017 年、TGC ではこの要求に答るためにコインシデンスに使用する Lookup Table の最適化を行なった。最適化には 2016 年の実データを用い、アライメントなどの実データにしかない効果も自動的に考慮することになる。図 11 では、TGC で取得されたミューオントラッ

クのトリガー効率をミューオンの横方向運動量  $p_T$  の関数で表示している。閾値 20 GeV のトリガーに対して、2017 年トリガーの立ち上がりが、設定値の 20 GeV により近づいていることが分かる。また、図 12 では、2016 年とのトリガーレートの比較を行なっている。前年に比べて 10% のレート削減が実現できていることが分かる。

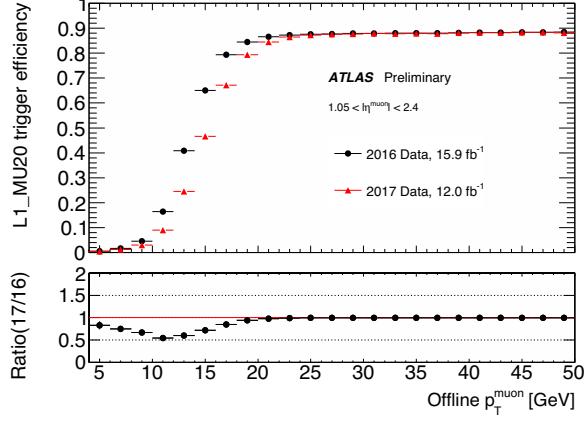


図 11: TGC で取得された 20 GeV 閾値のトリガーの効率をミューオンの横方向運動量  $p_T$  の関数で表示した図 [10]。2016 年と比較をすると、より閾値に近いところで効率が上がっており、閾値以下のミューオンを効率よく落とすことができる。

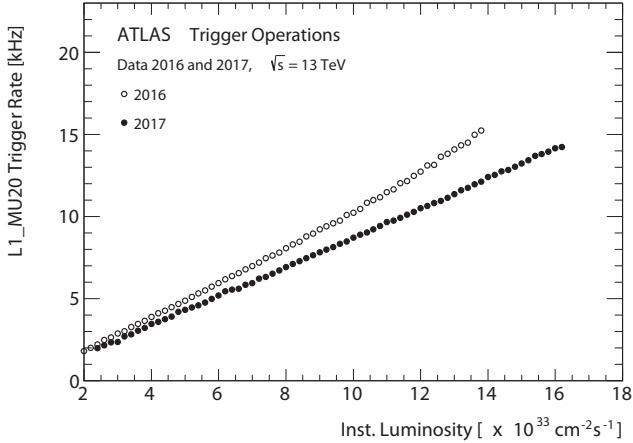


図 12: 20 GeV 閾値のミューオントリガーのレートを瞬間ルミノシティの関数で表示した図 [10]。約 10% のレート削減が確認できた。

TGC は Tile カロリメータとのコインシデンスをとることにより、さらにレートを削減すること計画している [1, 11]。図 13 に ATLAS 検出器の断面図を示す。Tile カロリメータと Big Wheel TGC のコインシデンスは  $1.05 < |\eta| < 1.3$ <sup>2</sup> の領域に対して行われる。色々な問

<sup>2</sup>ビーム軸からの極角を  $\theta$  とした時、擬ラピディティ、 $\eta$ 、は  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$  で定義される。

題を抱えての開発であったが、2017 年ついにこのコインシデンスをオンにしたランをひとつ取得することができた。パフォーマンスは期待通りのものであり、コミッショニングも最終段階になったと言える。翌 2018 年に最終的な実装を目指す。

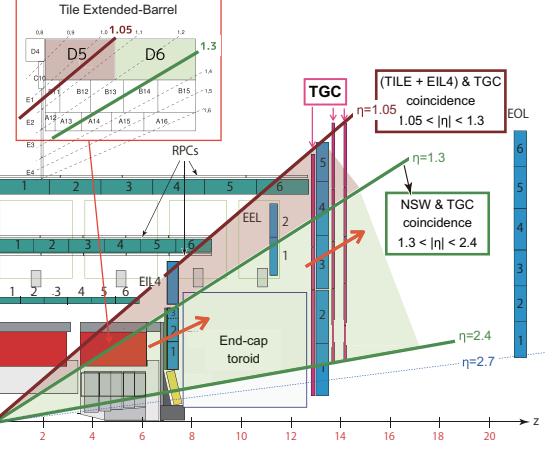


図 13: ATLAS 検出器の断面図 [11]。エンドキャップトロイド磁石をはさんで、Big Wheel TGC と Small Wheel TGC および Tile カロリメータが配置されている。それぞれのコインシデンスをとることにより、広範囲で背景事象を落とすことができる。

## 4 まとめ

2017 年の LHC はビームロスという深刻な問題を抱えていたにもかかわらず、これまで記録してきた中で最高の瞬間ルミノシティ  $2.09 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成し、積分ルミノシティも目標としていた  $45 \text{ fb}^{-1}$  を超える  $50 \text{ fb}^{-1}$  を記録することができ、Run 2 全体の積算は  $90 \text{ fb}^{-1}$  に達する。2018 年ではさらに高いルミノシティでの運転が期待され、Run 2 のトータルの積分ルミノシティは  $150 \text{ fb}^{-1}$  になるとみこまれている。ATLAS 検出器も非常に安定してデータを取得しており、また、高ルミノシティ・高パイルアップ環境下でも効率よくデータ取得できるよう準備を整えている。クオリティの高いこの大統計のデータから一体どのような物理結果がでてくるか、とても楽しみである。

## 参考文献

- [1] 隅田土詞, 高エネルギーニュース, 34, 259 (2016);  
中山隆志, 高エネルギーニュース, 34, 267 (2016);  
寺師弘仁, 高エネルギーニュース, 34, 274 (2016).

- [2] 音野瑛俊, 斎藤智之, 高エネルギーニュース, **36**, 1 (2017).
- [3] 129th LHCC Meeting,  
<https://indico.cern.ch/event/609813/>;  
 130th LHCC Meeting,  
<https://indico.cern.ch/event/632309/>;  
 131st LHCC Meeting,  
<https://indico.cern.ch/event/658856/>;  
 132nd LHCC Meeting,  
<https://indico.cern.ch/event/679087/>.
- [4] ATLAS Luminosity Public Results Run 2,  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2>.
- [5] 生出秀行, 田窪洋介, 高エネルギーニュース, **33**, 61 (2014).
- [6] ATLAS Pixel Public Results,  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/PixelPublicResults>;  
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2017-004/>;  
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2017-007/>.
- [7] 高力孝, 高エネルギーニュース, **26**, 61 (2008).
- [8] ATLAS SCT Public Results,  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/SCTPublicResults>;  
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/SCT-2017-002/>;  
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/SCT-2017-001/>.
- [9] 杉本拓也, 戸本誠, 高エネルギーニュース, **22**, 78 (2008);  
 石野雅也, 高エネルギーニュース, **22**, 304 (2008);  
 佐々木修, 池野正弘, 高エネルギーニュース, **26**, 242 (2007);  
 田中秀治, 高エネルギーニュース, **25**, 37 (2006).
- [10] ATLAS L1 Muon Trigger Public Results,  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults>.
- [11] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System, CERN-LHCC-2013-018.