

# LHC/ATLAS Run2 の現状

京都大学 理学研究科

隅田 土 詞

Toshi.Sumida@cern.ch

2016 年 (平成 28 年) 2 月 15 日

## 1 はじめに

LHC は 2010 年から 2012 年末までの Run1 期間において、ヒッグス粒子の発見という大きな成果を得た [1]。その後約 2 年のシャットダウン期間 (Long Shutdown1, LS1) を経て、LHC は陽子衝突の重心系エネルギーを 8 TeV から 13 TeV に大きく向上させ、いよいよ 2015 年 4 月から運転を再開した。

今回は特集として、Run2 初年となる 2015 年のランの状況と ATLAS 実験で取得されたデータ解析の現状について 3 つの記事で報告する。物理解析結果については次の 2 つの記事で紹介することとし、ここではまず Run2 における LHC 加速器と ATLAS 検出器の現状について述べる。

## 2 LHC 加速器

LHC (Large Hadron Collider) はスイス・ジュネーブ郊外の CERN に建設された、世界最大、最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器である。周長 27 km のリングが地下 100 m のトンネルに設置されており、設計上の最大重心系エネルギー ( $\sqrt{s}$ ) は 14 TeV になる。

LHC では運転開始直後の 2008 年 9 月、超伝導磁石の結合部分における接続不良により冷却用ヘリウムの流出事故 [2, 3] があったため、本格的な補修を行うまではビームエネルギーを下げた状態で運転を行うことにした。2010 年と 2011 年は  $\sqrt{s} = 7$  TeV での実験を行い、2012 年には  $\sqrt{s} = 8$  TeV までエネルギーを上げた。

その後の LS1 期間で、超伝導線材の改修と補強、抵抗測定などを行った上で、2015 年 4 月に LHC は Run2 として稼働を再開した。その後 2 ヶ月のコミッショニングを経て、6 月 3 日に初めて重心系エネルギー 13 TeV の陽子衝突に成功した。その後から年末までの期間に少しずつ入射バンチ数を増加させ、最終的にバンチ数は 2244 バンチ、ピークルミノシティは  $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に達し、提供した積分ルミノシティは  $4 \text{ fb}^{-1}$  を超えた。

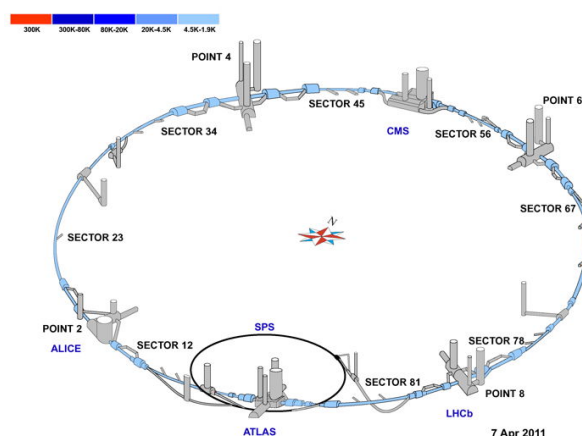


図 1: 2015 年 4 月 7 日における LHC の各セクターの温度。4 月 3 日に全セクターで冷却が完了した [4]。

このように、LHC は再稼働後の大きな一歩を踏み出したが、2015 年中の LHC 加速器の運転効率は、様々な困難により予定通りには上がらなかった。以下ではコミッショニングを含めた運転の経緯を述べ、発見されたそれぞれの問題について説明する。また現在の状況についても報告する。

### 2.1 超伝導磁石のトレーニングクエンチ

図 1 のように、LHC は 8 つのセクターに分かれており、それぞれのセクターの境界に検出器が置かれている。例えば ATLAS 検出器があるのはポイント 1、CMS 検出器はちょうどリングの反対側のポイント 5 である。各セクターは両端のポイント番号を用いて、セクター 12、セクター 67 などと呼称する。

ビームを曲げるための双極電磁石を運転状態にするには、超伝導状態にするための冷却と磁場に必要電流が流れるかどうかのパワーテストが必要である。一度の試行でその電流値に到達できるわけではなく、ある電流量に達すると電磁石は何らかの原因でクエンチを起し、

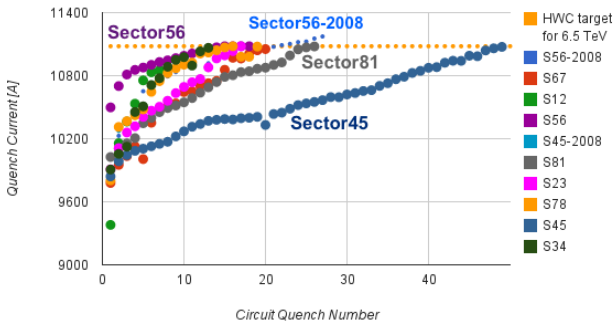


図 2: LHC の各セクターで 6.5 TeV ビームに必要な電流 (点線) に達するまでのクエンチ回数。セクター 45 で約 50 回のトレーニングを必要とした [4]。

超伝導状態が破れる。電流が保護回路を通して逃げる際に発熱して温度も少し上昇するので、再度冷却を行って電流を流すテストを繰り返す。そうすると、前回よりもクエンチが起こる電流量が高くなる。このような現象をトレーニングと呼び、LHC では基本的に 7 TeV ビームに必要な電流量 (11.85 kA, 8.3 T) まで地上でトレーニングを完了しておく。

実際に地下でテストを開始してみると、トレーニングが完了したはずの磁石も再度多数のクエンチを起こした (記憶を失う、と表現される)。特にセクター 45 では、6.5 TeV の電流に達するまでに予想を大きく超える約 50 回のクエンチを必要とした。1 度クエンチが起こると再冷却には 8 時間ほどかかる。またセクター 34 と 78 の回路において誤ってグラウンドに導通している箇所が発見されるなどしたため、その修理、チェックなどを含めて、コミッショニングには約 1ヶ月余分に時間がかかることとなった<sup>1</sup>。

## 2.2 2015 年ラン

LHC の研究者、技術者はイースター休暇を返上して作業を進め、最終的には 4 月 5 日に 450 GeV, 4 月 10 日に 6.5 TeV のビーム周回 (1 本ずつ) に成功した。

その後約 2ヶ月の間はビームのコミッショニングを継続し、6 月 3 日、ついに LHC は最初の 13 TeV 陽子陽子衝突に成功した。我々全員が大きな興奮と共にこの "first stable beam" を迎えた (図 3)。ここで LHC は一つの節目を迎えたが、もちろんただ衝突が起こっただけでは物理結果は得られないので、引き続き LHC は輝度向上のために作業を継続した。

7 月 14 日には、50 ns のバンチ間隔で 2015 年の最大となる 476 バンチの入射が行われ、このときの瞬間ルミノシティーは  $1.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。

<sup>1</sup>7 TeV に達するにはさらに多数のクエンチが起こる (ここからの勾配がなまる) と予想されているので、このトレーニング期間をいかに短くするかは今後の課題である。



図 3: 13 TeV 陽子衝突に成功した瞬間の LHC コントロールルームの様子 [5]。

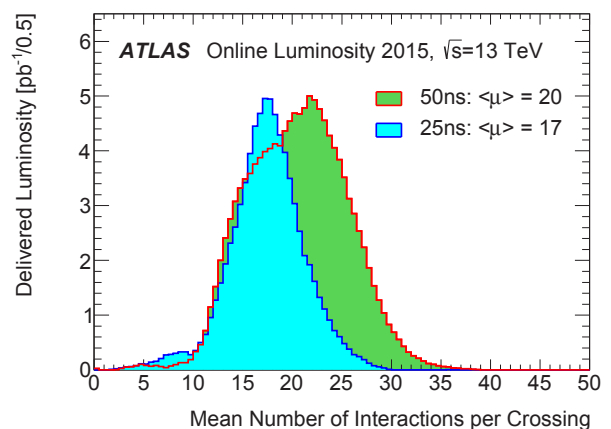


図 4: 50 ns と 25 ns バンチ間隔それぞれのランにおける平均パイルアップ数の分布 [6]。

8 月から LHC は次の段階へと進んだ。50 ns から 25 ns バンチ間隔への移行である。50 ns 間隔、つまり半分のバンチ数で最大限のルミノシティーを得ようとする、どうしても 1 バンチに詰める陽子の数を多くする必要がある。しかしその場合、1 バンチが交差したときに起こる同時衝突数 (パイルアップ) が増大し、興味のある物理事象が起こったハードな反応に対して数十ものソフトな反応からの寄与がそこに加わってしまう。というわけで、25 ns での実験はそれ自体で物理測定の感度を上げることになる。図 4 は ATLAS 検出器で測定された、50 ns と 25 ns それぞれのバンチ間隔ランでのパイルアップ分布である。後述のように 25 ns の方がルミノシティーが高いにもかかわらず、パイルアップはやや低く抑えられていることがわかる。

以下で述べる色々な問題に突き当たりながらも、LHC は着実にバンチ数を増やし、最終的には総バンチ数 2244 での運転を行った。またこのときの瞬間ルミノシティーは  $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。

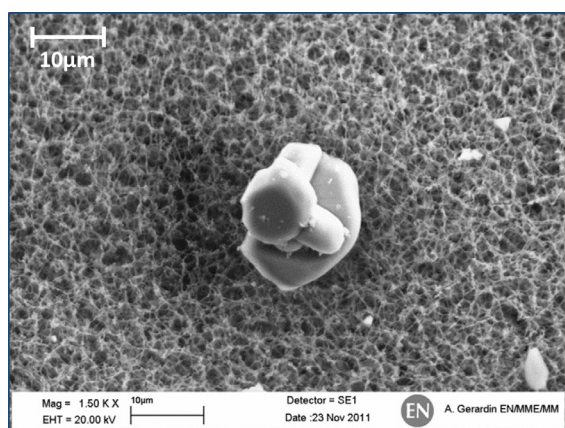


図 5: LHC 内で発見された塵の拡大写真 [7]。

## 2.3 2015 年に起こった問題と今後の対策

以下では、Run2 開始後または開始前のコミッションング時に発覚した加速器運転における諸問題について説明する。

### 2.3.1 UFO

13 TeV でのビーム衝突が始まってすぐに見つかった問題の一つが Unidentified Falling Objects (UFOs) である [7]。LHC ビームシールド上部から塵 (図 5) のようなものがビーム中に落ちてきて、それがビームと非弾性衝突を起こし、結果として陽電荷を持った UFO がさらにビームに弾かれる、という現象が起きていることがわかった。UFO とビームが衝突している間は急速にビームが失われ、それがビームロスモニターで検知されるとビームダンプが起こる。また散乱した粒子によってクエンチも引き起こされてしまう。

これについては特に有効な対策が打てておらず、実験初期に計 17 回のビームダンプと 2 回の超伝導磁石のクエンチを引き起こした。しかし、実験開始時に最大で 1 時間に 40 個も検知されていた UFO は 25 ns を継続した最後の方のランでは 10 個程度まで減少したので、2016 年はこのまま経過を見守る予定である。

### 2.3.2 ULO

UFO とは別のビーム中に存在する「何か」が Run2 のビームコミッションング中に発見された。これを Unidentified Lying Object (ULO) [8] と呼び、これも同じく実験当初のビームロスを引き起こした。対策として、ビーム軌道を水平方向に 3 mm、鉛直方向に 1 mm ずらしてこれを避けることにより、ビームの強度が上がった場合でも問題ないということがわかったので、2016 年もこの対処を継続する。

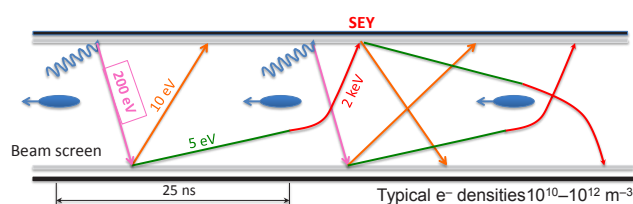


図 6: ビームパイプ内での 2 次電子の発生機構 [9]。

### 2.3.3 電子雲

継続的な問題となったのが、ビーム中の電子雲 (electron cloud) であった。電子雲の発生する原理を図 6 で説明している。まず、ビームが曲げられるときにシンクロトロン放射が起こり、それがパイプ内壁のビームスクリーンに当たって、光電子を発生させる。発生した電子は陽子バンチに引っ張られて加速され、それがビーム内壁で 2 次電子を出す。あとは雪崩機構によって大量の電子がビーム中に発生してしまう。

この結果として、ビームのエミッタンスがすぐ悪くなる、ビームの軌道が不安定になる、熱負荷 (Heat-Load) が上昇する、また真空が悪化する、などの多くの悪影響が出る。しかも、出てきた光電子はすぐ次のバンチで加速される確率が高く、25 ns ランではさらに雲の発生速度が上がってしまう。

この問題へ対処としては、物理ランとは別に、シンクロトロン放射を内壁に当てることそのものを目的とした運転を行い、仕事関数の小さい電子をあらかじめ出せるだけだしておく、という方法が有効である。この作業を “scrubbing” と呼ぶ。まさに内壁を前もって磨いておくわけである。さらに、ある陽子バンチに対して 5 ns などの短い間隔 (RF の 2 波長分に相当する) で付属したバンチを加えてやることによって、より光電子を効果的に出せることがわかっている。2016 年はこのような scrubbing ランを物理ランの間にもできるだけ長く取ることによってデータ収集の効率を向上させる予定である。

### 2.3.4 QPS

少し上で述べたクエンチ保護機構 (Quench Protection System, QPS) については、再びヘリウム流出事故のようなことを起こさないよう、より確実な動作を保証するために LS1 中にシステムを全交換を行っていた。しかし、このときに使用したチップの放射線耐性が低く、Single Event Upset によって誤動作が起き、ビームをダンプしてしまうという問題が起こっていた。これについては、8 月末のテクニカルシャットダウンで 1140 個のボード全てを交換し、QPS 起因のビームダンプは全体の 43% から 7% まで低減した。

表 1: 2012 年と 2015 年での LHC の最高性能の比較。デザイン時の値も同時に記載している。

パラメータ	2012	2015	(設計値)
ビームエネルギー [TeV]	4	6.5	7
バンチ間隔 [ns]	50	25	25
$\beta^*$ [m]	0.60	0.80	0.55
陽子数/バンチ [ $10^{11}$ ]	1.6	1.15	1.15
エミッタンス [ $\mu\text{m}$ ]	2.5	3.5	3.75
総バンチ数	1374	2244	2808
衝突バンチ数	1368	2232	2808
瞬間ルミノシティー [ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$> 0.7$	$\sim 0.5$	1.0
パイルアップ	35	15	30
蓄積エネルギー [MJ]	140	270	362

### 2.3.5 TDI

前段の SPS 加速器から LHC への陽子のインジェクションを行う際、キッカーが正常に動作しないなどの場合に備えて入射ビームを受け止める役割を果たすのが Injection Protection Device (フランス語名の頭文字から TDI) である [10]。これは窒化ホウ素のブロックであり、高い熱伝導率と低い膨張率を持つが、 $450^\circ\text{C}$  以上の温度には耐えられず、入射バンチ数の設計限界値である 288 バンチを仮にこれで受けとめると、この温度を超えてしまう、という問題があった。このため 2015 年中には入射バンチを最大 144 にして運転を行わざるをえなかった。また、アウトガスにより TDI の真空が悪化し、またこれによって scrubbing の効率も低下してしまう。

このため、TDI については 2015-2016 年の実験休止期間にグラフィイト製のものととの交換が行われた。これで 2016 年ランでは 288 バンチ入射による最大 2800 バンチでの衝突実験が行えることになる。

## 2.4 ルミノシティー

以上のような 2015 年における LHC の状況をふまえて、加速器の性能を Run1 と比較してみたい。運転パラメータを表 1 に載せた。LHC はビームエネルギーの向上と 25 ns バンチ間隔での運転を果たしたが、ルミノシティーに関わるパラメータについてはまだ最適化が進んでいないことがわかる。特にビームの長さ方向のパラメータである  $\beta^*$  については、ルミノシティーがその逆数に比例するので重要である。しかし、2015 年中には諸問題の解決を優先したため、予定していた 60 cm までの改善を行うことができなかった。2016 年にはこれ

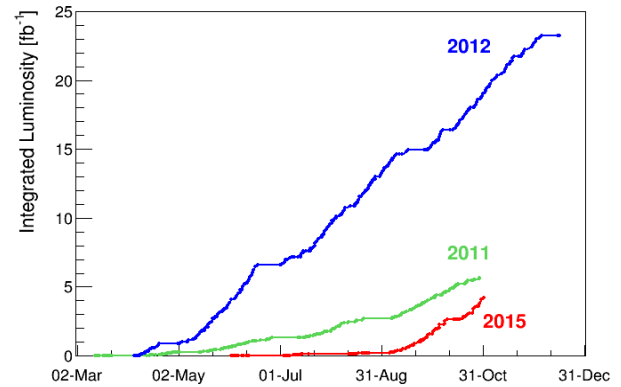


図 7: Run1 と Run2 での積分ルミノシティーの比較 [4]。

を 40 cm まで下げ、2 倍のルミノシティーでのランを目指していく。

図 7 は、年間に LHC が提供した積分ルミノシティーの比較である。トータルでは 2011 年に及ばないが、長期の休止直後でエネルギーは 13 TeV、かつ初の 25 ns ラン、さらに様々な問題に対処しながらの運転であることを考えると、むしろ驚くべき性能を出したと言えるだろう。LHC メンバーの頑張りに感謝したい。

## 3 ATLAS 検出器

ATLAS は LHC の衝突点の 1 つに設置された汎用検出器であり、その建設と運転に日本の研究機関が多く参加している。図 8 に ATLAS 検出器の全体図を載せた。内側から順に、内部飛跡検出器、カロリメータ、ミュオン検出器で構成されている。各部分の詳細については [11] をご参照頂きたい。

### 3.1 検出器の運転状況

ここからは ATLAS 実験の 2015 の状況について述べていく。ATLAS では LS1 期間中、初期不良などに対する故障箇所の修理を精力的に行った。その結果、チャン

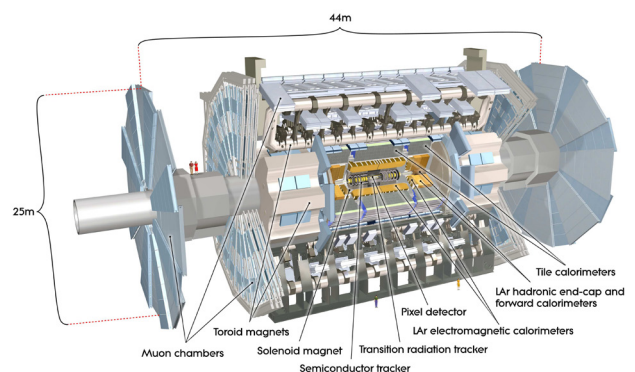


図 8: ATLAS 検出器の全体図。

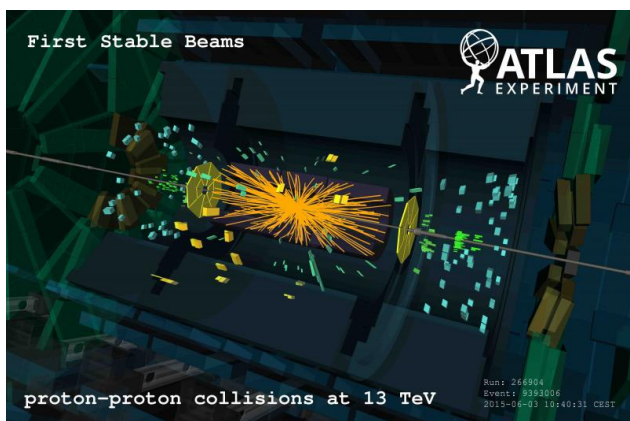


図 9: 最初の 13 TeV 衝突事象のイベントディスプレイ [12]。

ネル数としての 2015 年ランにおける検出器の稼働割合は、最も悪い部分でも約 97%と非常に高かった。

検出器再稼働に際して細かい問題はあったものの、ATLAS 検出器全体としては問題なく最初のビーム衝突を迎えることができた。図 9 は、最初の定常ランがあった 2015 年 6 月 3 日に得られた事象の一つである。

またビーム運転中におけるデータ取得効率は約 92%で、図 10 のように LHC の提供した  $4.2 \text{ fb}^{-1}$  に対して  $3.9 \text{ fb}^{-1}$  を陽子陽子衝突データとして保存した。2012 年にはこの数字が 93.5%であったことを考えると、Run2 としてデータ取得を再開してすぐの数字としては悪くないと言える。しかし今後さらにルミノシティーが上がった場合にもデータ取得システムとしての稼働率を高く保つことは大きなチャレンジである。さらにこの  $3.9 \text{ fb}^{-1}$  について検出器の状況を確認し、物理解析に使えるデータとして最終的に残ったのは  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  であった。このときに、後述する IBL の問題などでデータクオリティーがやや下がってしまった。これについては来年のランでの課題である。

## 3.2 Run2 におけるアップグレード

ATLAS では LS1 期間に検出器、トリガー、ソフトウェアなどについて多くのアップグレードを行った。ここでその全てを紹介するのは不可能なので、そのうちのいくつかについて取り上げる。

### 3.2.1 IBL

ATLAS にとって LS1 最大のアップグレード項目は Insertable B-Layer (IBL) の導入である。ビームパイプごと 1 つのパッケージとしてシリコンピクセル検出器を作成し、それを内部飛跡検出器の最内層である既存のピクセル検出器のさらに内側に設置する。これによって高

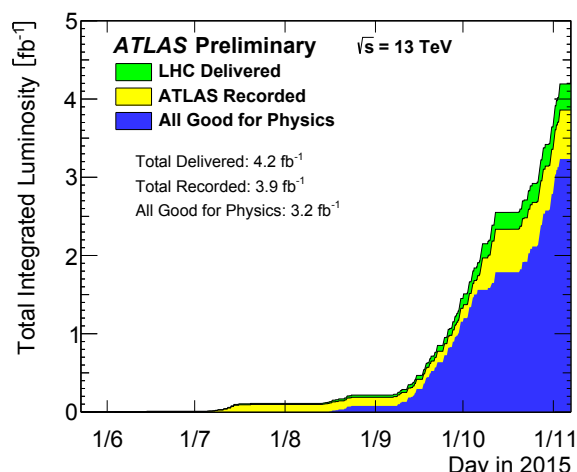


図 10: 2015 年に ATLAS 検出器で得られた積分ルミノシティーの推移 [6]。

ルミノシティー環境においてもトラッキング能力が維持されることが期待される。

IBL の製作とインストールについては以前に高エネルギーニュースで報告した [13]。ここでは 2015 年中のコミッショニングの状況と得られた性能について報告する。

IBL は、ステーブと呼ばれるセンサーモジュールが搭載された長方形の板を円筒上に配置することで構成される。またそれぞれのステーブにはフレックスと呼ばれる電源と信号線のためのフレキシブル基盤が装着されている。

さて、Run2 が始まってすぐのコミッショニング中に IBL のアラインメントを行う際に、ステーブが曲がってしまっていることが判明した。原因を調査した結果、IBL のフロントエンドチップにおいて TID (Total Ionization Dose) の効果での電流が上昇し、消費電力が増加するという現象が起きていることがわかった。これによって温度が変化し、ステーブとフレックスの素材の違いによ

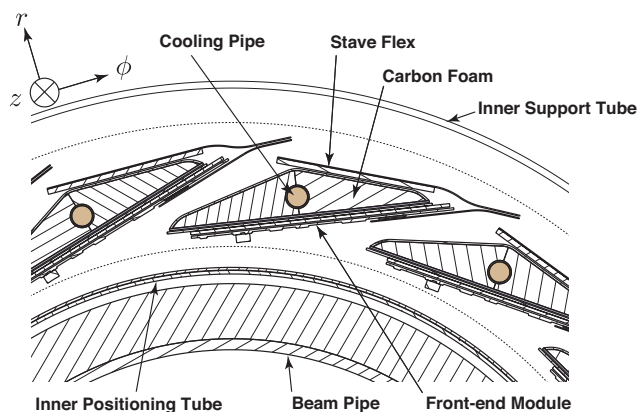


図 11: IBL のビームと垂直な方向での断面図 [14]。 $\phi$  方向に並んでいる 1 つ 1 つのモジュールがステーブである。

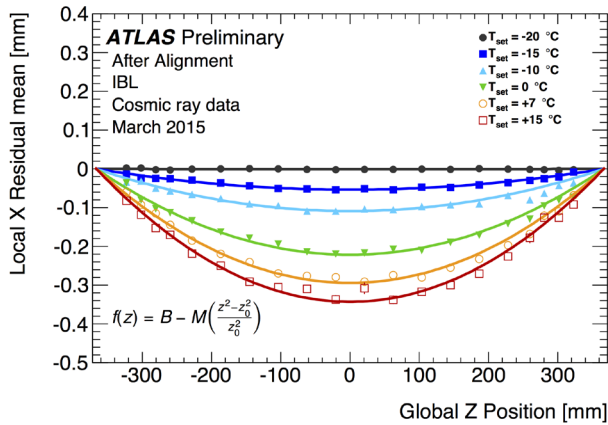


図 12: 温度ごとに測定した IBL ステープの湾曲 [14]。

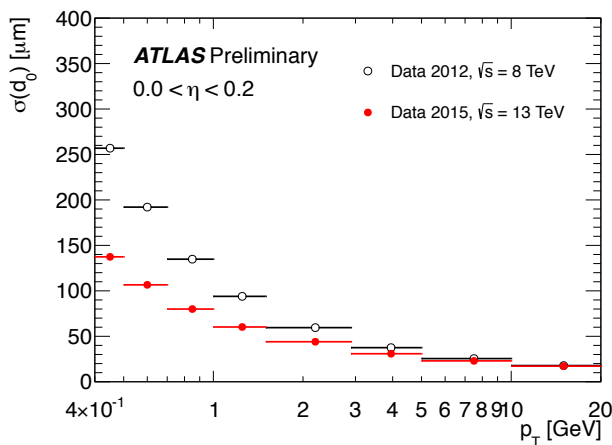


図 13: トラック  $p_T$  の関数として得られた impact parameter の精度 [15]。

る熱膨張率の差により、ステープの湾曲が起こると理解された。

この問題に対処するため、図 12 のように温度ごとの湾曲を測定し、さらに温度のモニタリングによる較正の頻度を増やした。これにより IBL の精密なアラインメントが可能になった。

この結果、図 13 に見られるように、特に低い  $p_T$  領域でのトラッキング性能において、Run2 で大きな改善が得られた。今後は 2015 年ランで見られた信号読み出しの不具合などを修正していく予定である。

### 3.2.2 ミューオン検出器とトリガー

ATLAS 実験のトリガーはレベル 1 トリガー (L1) とハイレベルトリガー (HLT) から構成される。L1 トリガーはカロリメータとミューオンシステムからの信号を用いて最大 40 MHz の頻度で起こる陽子のパンチ交差で発生した衝突事象のレートを約 100 kHz まで落とす。HLT では L1 を通過した事象に対して CPU 用いた精密なトリガー判定を行い、最終的なデータ取得レートは約 1 kHz

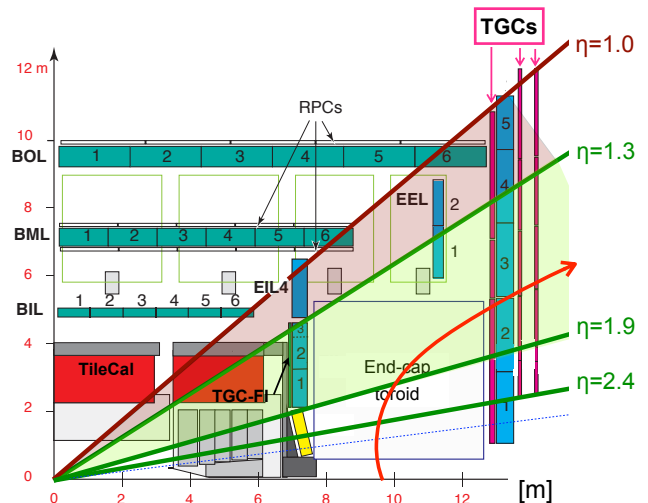


図 14: ATLAS 検出器のミューオンシステム。直線はそれぞれの  $\eta$  領域を示す。赤い曲線の矢印は、 $z \sim 10$  m 付近で生成された遅い粒子によるフェイクトリガーの一例。

となる。

L1 での判断に使用できるレイテンシーは  $2 \mu\text{s}$  と非常に短いため、このロジックは FPGA や ASIC を用いたハードウェア上で構築する。この L1 トリガー検出器のうち、Thin Gap Chamber (TGC) と呼ばれるエンドキャップ部ミューオントリガー検出器については、ATLAS 日本グループがその開発、製作、インストール、システム構築まで責任を持って行ってきた [16]。Run1 後半からの検出器運転、LS1 期間での準備と Run2 におけるアップグレードについては筆者が主導してこれを行ったので、この機会に少し紹介させて顶きたい。

図 14 は ATLAS 検出器の 1/4 図である。エンドキャップトロイド磁石の外側に、TGC が 3 層設置されており、これらをミューオンが突き抜けたという条件を課すことで L1 ミューオントリガーを発行する。

ミューオンを終状態に含む重要な物理事象の測定のためには特に高い横方向運動量 ( $p_T$ ) を持ったミューオンを含む事象を選択するトリガーが必須である。Run1 における LHC のルミノシティ  $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  での衝突において、 $p_T$  閾値が 20 GeV の L1 ミューオントリガー (L1.MU20) のレートは約 7 kHz であった。Run2 中にルミノシティは  $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度まで増強される予定であり、また重心系エネルギーが 13 TeV に上がったことで W ボソンの生成断面積も増え、最終的に L1.MU20 のトリガーレートはこのままだと 30 kHz 程度まで増加することが見込まれている。しかし L1 ミューオントリガーレートは、システム全体としての要求により、20 kHz 以下程度に抑える必要がある。これを満たさないと、閾値を上げてミューオンに対するトリガー効率を悪化させるか、トリガーをプリス

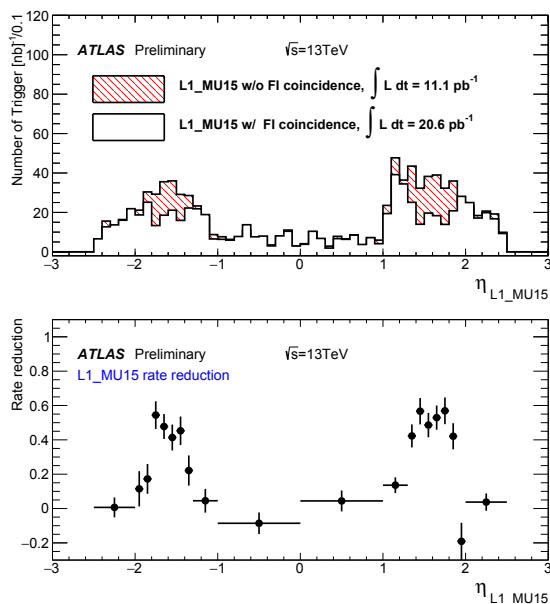


図 15:  $\eta$  の関数として得られた閾値 15 GeV の L1 ミューオントリガー数 (上図) とトリガーの削減率 (下図) [17]。FI コインシデンスがある場合にトリガーレートの削減が見られる。

ケールすることになり、いずれにしても LHC 加速器の性能が活かせない。

ところで、Run1 でのデータ解析において、L1\_MU20 で取得した事象の偽ラビディティ (" $\eta$ ") 分布は本来は平坦であるはずが、実際には  $|\eta| > 1$  のエンドキャップ領域でのみ不自然にトリガーレートが高いことがわかった。TGC で発行される L1 トリガーは、それが衝突点から来たミューオンであることを仮定して測定した粒子の角度に基づいて発行されているが、詳細な調査の結果、図 14 中の赤い矢印で示したように、この余分な寄与はミニマムバイアスなどのソフトな反応で散乱または生成した粒子がトロイド磁石周辺のビームパイプで低速の粒子を生成し、それらが磁場で曲げられて、たまたま高い  $p_T$  のミューオンと同じ角度で検出器に飛び込み、トリガーを発行してしまうという事象である、と理解された。つまり、衝突点からのミューオンのみを選択してこの背景事象を排除するためには磁場よりも内側の検出器と TGC に同時に信号があることを要求すればよい。

そこで我々は、トロイド磁石のすぐ内側に設置された "TGC-FI" と外層 TGC とのコインシデンスロジックを Run2 でのアップグレードとして導入した。この実装には、信号処理ボードなどのハードウェア上の修正が必要であったためやや時間がかかったが、最終的には 2015 年の 9 月初めにコミショニングが完了し、内部コインシデンスを稼働させることができた。図 15 はその後取得したデータにおける L1 ミューオントリガーの  $\eta$  分布である。FI 検出器のある  $1.3 < \eta < 1.9$  の領域で大きなレート削減が得られたことがわかる。この改善によっ

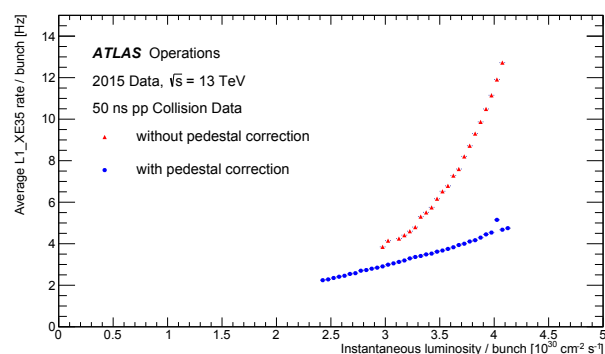


図 16: L1Calo トリガーのレートをルミノシティーの関数として示す [18]。ベDESTAL補正を入れる事によりレートが削減され、またルミノシティーに対して線型に近い関係になっている。

て、2016 年以降のランにおいて LHC の強度がさらに増大した場合においても、高い  $p_T$  のミューオンを含むイベントを、閾値を保ったまま効率と落とさず取得することができる。

現在はさらに  $1.0 < \eta < 1.3$  に存在する EIL4 という部分とタイルハドロンカロリメータ (TileCal) の信号を利用したロジックについてコミショニングを進めている。こちらは 2016 年中に実際に導入される予定である。

### 3.2.3 L1Calo トリガー

L1 トリガーにはミューオンの他にカロリメータからの信号によるトリガーも存在し、ハードウェア上での処理で、電磁シャワー、ジェットなどのトリガーを発行する。このとき、消失横方向エネルギー (Missing ET, MET) トリガーについてはレートがルミノシティーに比例せず、指数関数的に増大してしまう、という問題が Run1 で見つかった。これは、ある事象が連続するバンチ中のどの位置に属するかで信号のベースライン (ベDESTAL) に対するパイルアップの効果が大きく変化することが原因だった。これに対して、バンチ位置を考慮したベDESTALの補正を Run2 で導入した結果、図 16 のようにパイルアップによる効果は大きく削減し、MET トリガーはほぼルミノシティーに比例するところまで改善した。これによって今後ルミノシティーがさらに向上した場合においても精度の高い L1Calo トリガーを提供することが可能になったと言える。

## 4 おわりに

2016年, LHC は重心系エネルギーを 13 TeV に保ったまま, 総バンチ数はほぼ最大の 2748,  $\beta^*$  は 40 cm を目指した改良を行う。2015 年に見られた問題についてはほぼ解決したので, 例えば scrubbing の期間を十分に取ることで早期にルミノシティを上げていき, 2016 年中には  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成することを目指す。これによって得られるデータ量は  $25 \text{ fb}^{-1}$  程度になる予定である。これはもはや非常に楽観的な予測, というわけでもないで, 2016 年のデータで物理測定の感度も大きく上がることが期待される。

ATLAS 側としては TileCal を用いた内部コインシデンスのコミッショニングを進め, ミューオントリガーの効率を落とさないよう, 増大するルミノシティに対応する。また他のトリガーに関するアップグレードとして L1 で複数のオブジェクト同時のトポロジーを考慮したトリガー ("L1Topo") を導入し, さらなるレート削減と重要な物理事象に対する感度向上を目指していく。

LHC, ATLAS 実験に関する最新情報は, ATLAS 日本グループのサイト [19], オフィシャルブログ [20], ツイッター [21] などで発信していきますのでそちらも是非ご覧下さい。

## 参考文献

- [1] 田中純一, 高エネルギーニュース, **33**, 245 (2015)
- [2] 小林富雄, 高エネルギーニュース, **28**, 270 (2010)
- [3] 近藤敬比古, 高エネルギーニュース, **27**, 163 (2010)
- [4] <http://lhc-commissioning.web.cern.ch>
- [5] "Start of run2 physics at the Large Hadron Collider (LHC)", <https://cds.cern.ch/record/2020852>
- [6] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2>
- [7] T. Baer et al., "Very Fast Losses of the Circulating LHC Beam, their Mitigation and Machine Protection", CERN-THESIS-2013-233
- [8] D. Mirarchi et al., "LHC aperture and ULO restrictions: are they a possible limitation in 2016?", 6th Evian Workshop, Evian, December 2015 (2015).
- [9] G. Iadarola et al., "Electron Cloud Effects", These Proceedings, LHC Performance Workshop, Chamonix, France (2016).
- [10] D. Jacquet et al., "Injection", 6th Evian Workshop, Evian, France (2015).
- [11] G. Aad et al., "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider.", J. Instrum., **3**, 437 (2008)
- [12] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/EventDisplayRun2Physics>
- [13] 生田秀行, 田窪洋介, 高エネルギーニュース, **33**, 61 (2014)
- [14] "Study of the mechanical stability of the ATLAS Insertable B-Layer", ATL-INDET-PUB-2015-001
- [15] ATL-PHYS-PUB-2015-018
- [16] 石野雅也, 高エネルギーニュース, **26**, 304 (2008)
- [17] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults>
- [18] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1CaloTriggerPublicResults>
- [19] <http://atlas.kek.jp>, <https://sites.google.com/site/lhcpr2011>
- [20] <http://d.hatena.ne.jp/lhcatlasjapan>
- [21] <https://twitter.com/lhcatlasjapan>