

ATLAS・TRT 検出器と LHC-Run2 運転回顧録

東京大学 (執筆時: ペンシルバニア大学)

陳 詩 遠

shion.chen@cern.ch

2022 年 (令和 4 年) 2 月 10 日

1 あらまし

CERN の Large Hadron Collider (LHC) で行われている ATLAS 実験に Transition Radiation Tracker (TRT) という検出器がある。ATLAS の最内層にある飛跡検出器群の一番外側に位置しており (図 1), 超高レート環境なのにガスドリフトチェンバー, かつ遷移放射を使って粒子識別も同時に行うという欲張りファンキー検出器であるが, 比較的小さなチーム規模とやや特殊なテクノロジーゆえ他の検出器コミュニティとの交流が薄く, あまり実態が知られていない。私は 2017 年にペンシルバニア大学のポスドクとして着任してから TRT の DAQ に参加し, 2019 年から責任者として運転・アップグレードに携わってきた。この度お勤めが終了し CERN から撤退するにあたり感傷に浸っていたところ紹介記事の執筆のお誘いをいただいた。日本の研究機関が参加していないため日本では特に馴染みの薄い検出器であるがゆえ, せっかくなのでこの機会に皆様にこの謎の検出器とその運転の顛末を審らかにしようと思う。お付き合いいただければ幸いである。

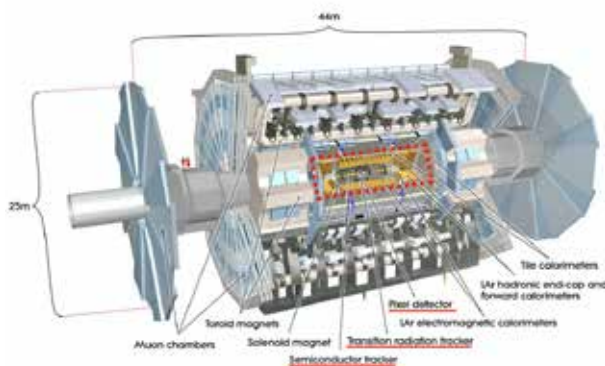


図 1: ATLAS 検出器の概観。TRT を含む飛跡検出器群は赤点線および赤下線で示されている。

2 TRT とは

2.1 検出原理

最小の検出器ユニットは直径 4 mm のストローである (図 2 左)。中央に高電圧 (1530 V) がかったアノードワイヤーが張っており, アースしたストロー壁との間にドリフト電場を作る。荷電粒子が通過するとストロー内に封入したガスの分子を電離し, 電離電子のドリフトで生じた二次電子のなだれをアノードが吸い取った際に生じる電圧変化を信号として読み取っている。ドリフト速度はおよそ $50 \mu\text{m}/\text{ns}$ でドリフト時間は最大で 70 ns 程度である。電子なだれがアノードに吸い込まれた時刻からドリフト時間は測定できる。これにより最初の電離が起こった位置候補の集合を表した同時刻円 (ドリフトサークル) が書け, これが一つの “ヒット” となる。

このストローが連なって巨大な筐体を形成する。検出器はバレル部分 [1] とエンドキャップ部分 [2] の二種類で構成される。バレルはビーム軸方向に走る 1 本の長いストローが 73 層, エンドキャップはビーム軸の内側から外側に向かって走るストロー 8 層からなるディスクを片側あたり 20 枚重ねた構造となっている。ストローは合計バレルで 106496 本, エンドキャップで 245760 本となっている。図 3 と図 4 にそれぞれの概観を示す。ストローの間にはさらにポリプロピレン繊維をシート状にした素材 (図 2 右) が挟まっていて, この表面を荷電粒子が通過した際に例の遷移放射 (Transition radiation; TR) が生じる。TR で生じる光子は典型的に 5–7 keV の X 線領域である。Xe や Ar といった希ガスでこれらは光電吸収でき, 代わりに弾き出された電子がまた二次電子のなだれを起こす。通常の TR を伴わない電離も同時に起こるので読み出される信号が重畳するが, こちらのエネルギー損失は 1–2 keV なので信号の大きさで TR の有無は判定できる。

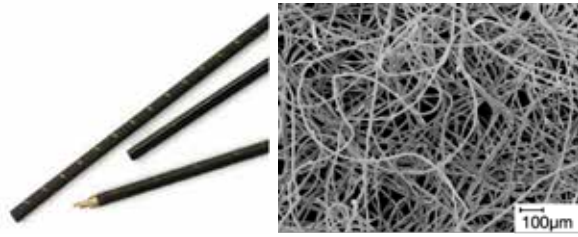


図 2: (左図) TRT ストローの概観。 (右図) 放射体として使われるポリプロピレン繊維 (19 $\mu\text{m}\phi$) の顕微鏡写真。

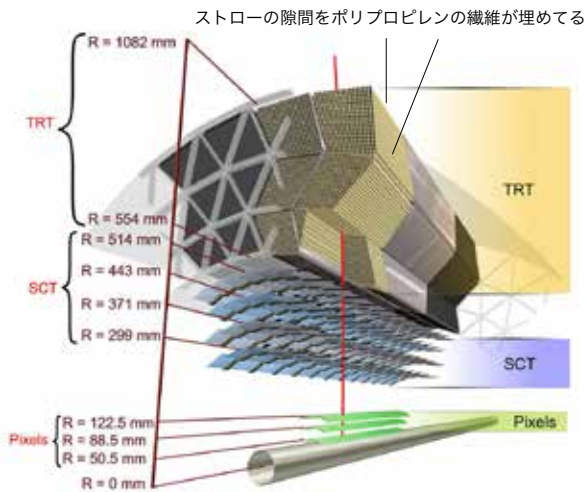


図 3: 飛跡検出器のバレル領域の概観。シリンダー状になっている ATLAS 検出器を中央で輪切りにしたときの断面の一部を表している。ポリプロピレン繊維はマットみたいに整形したものをストローが串刺しにしたような格好で配置されている。多分よくわからないので文献 [1] の図 4 を参照をされたい。

2.2 遷移放射

遷移放射 (TR) にまつわる効果についてもう少し言及しておく。放射の原理や境界配置による効果の平易な解説は [3], 高エネルギー実験への応用については [4] が詳しい。

TR は屈折率の異なる物質間の境界に入射した荷電粒子によって境界部分で生じる放射であり, 古典的には荷電粒子の電場によって媒体表面に誘導された鏡面電荷の時間変化による双極子放射として理解できる。プラズマ周波数 ω_1 と ω_2 を持つ 2 つの媒質境界にローレンツ因子 $\gamma (= E/m)$ を持つ荷電粒子が垂直に入射した際に発生する放射のエネルギーは:

$$S = \frac{\alpha (\omega_1 - \omega_2)^2}{3 (\omega_1 + \omega_2)} \gamma$$

であり, γ に比例する。これはエネルギー測定と組み合わせることによって荷電粒子の質量情報にアクセスがで

ストローをしき詰めた列を8層重ねたもの = ディスク
ビームパイプに沿って20ディスク
各モジュール間にポリプロピレンのフィルム

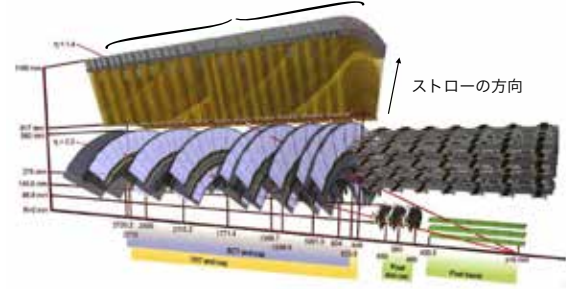


図 4: 飛跡検出器のエンドキャップ領域の概観。

きることを意味し, 高エネルギー実験では粒子識別に特に重宝されている。

一方単一境界通過あたりで生じる光子の数は, 典型的な TR 光子が X 線領域であることを考慮すると $\gamma = 1000$ でも平均 0.1 個かそこらである¹ [5]。そのため層数を重ねて境界通過の回数を増やすというのが通常の手口となる。層が十分厚い時は放出される平均光子数は通過する境界の数にそのまま比例する。ところが薄すぎる場合は各境界で生じた TR の間で負の干渉が発生し増幅効果が消えることが知られている [6]。これは formation zone と呼ばれる γ 因子・媒体の屈折率・TR 光子のエネルギー (ω) によって決まる長さが基準になっており:

$$z_i = \frac{1}{1/\gamma^2 + \omega_i^2} \frac{2\beta c}{\omega} \quad (i = 1, 2)$$

これにより γ が大きい極限では多層増幅が飽和すること, 対象とする γ の範囲に対する TR 信号を増幅するのに最適な層の厚さなどがわかる。TRT ではポリプロピレンのファイバー繊維層と CO_2 層が 3 mm おきに交互に配置されており, 典型的なエネルギーの電子が通過した場合ストローあたり平均 20% くらいの確率で TR 光子が発生している。

2.3 検出ガス

ストローに入れるガスには様々な要求がある。電離効率, 電離されたイオンの内殻転移で出る紫外線の吸収効率 (クエンチ能), TR の X 線吸収効率, なだれの増幅度, ドリフト速度, ストロー方向へのなだれの拡散度, 放電しやすさ, 放射化してヤバイ物質を出さないこと... などである。こっちを解決するとあっちがダメになるみたいな関係の要素が多く, まさにタコス噛みの苦悩というやつである²。そんなパズルみたいな作業の後

¹つまり本質的には量子力学的な確率過程であり, 輻射確率は $\alpha \sim 1/137$ に比例している。

²タコス片側から勢よく噛むと反対側に具が逃げていき, やがて地面に落ちる現象。

Xe:CF₄:CO₂=70%:20%:10%という適切と思しき配合が黎明期に見つかり、これに基づいて検出器の設計がなされた [7]。XeはX線吸収、CO₂はクエンチ能、CF₄はクエンチ能に加えワイヤーの放射化の影響を抑える効果などが評価されての抜擢だった。ところが建設段階でCF₄は放射化によってHF、F、F₂などといったガラスを腐食する物質を発生させることが判明する [8]。バレルのストローはワイヤーの接合部にガラスを使用しているの、そのまま気づかないで運転していたらそれらが溶けてメカニカルに崩壊していたので非常に危なかった。CF₄は諦めることとなったが、CO₂だけではクエンチ能が足りない。かといってこの段階で取れる選択肢も限られており、苦難の末O₂を少し加えたXe:CO₂:O₂=70%:27%:3%という配合にたどり着いた [7]。O₂を加えたことでストローの放電電圧も上昇し万事うまくいくかと思われたが、このO₂が後に慷慨憤激の沙汰を引き起こすことになる。

2.4 読み出し

読み出しは検出器のストローと直接電氣的に接続したフロントエンド回路 (FE) とそれらから受け取ったデジタル信号を処理するバックエンド回路からなる。図5に概要を示す。FEはアナログ信号を捌くASDBLR (Amplifier, Shaper, Discriminator and Baseline Restorer) と、そこから渡されるデジタル信号を処理するDTMROC (Drift Time Measurement/Read Out Chips) の2種類のカスタムメイドASIC [9] からなり、ストロー束の終端に取り付けたPCBに載っている。ASDBLRは8本のストローから信号を受け取り、その名の通り増幅・シェイピング・閾値をかけてデジタル情報を後段のDTMROCに渡している。シェイピングでは電離された遅いイオンによる長い残留信号をキャンセルする機構³、およびそのオーバーシュートによるベースラインのシフトを解消する回路が実装されており、これらが超高レート環境での読み出しを可能にしている最大の肝である。閾値はそれぞれ電離信号に対応したlow-threshold (LT) と電離+TR信号に対応したhigh-threshold (HT) の二段階になっており、LTはノイズ環境におけるストロー占有率 (LTが鳴っているストローの割合) が常に2%になるように動的に校正、HTはLHCの物理で興味のある電子の典型的な横運動量領域⁴ (5–100GeV) において e/π 分離が最適になるように設定している。図6はエンドキャップに

おける例で、最適化後の e/π のHTヒットの確率を表している。

DTMROCは2つのASDBLRから送られてくる信号を3.125 nsおきにサンプルし結果をバッファメモリに保持する。ATLASからLevel-1 (L1) トリガーの信号を受け取ると、衝突時刻からその75 ns後までのデータ27ビット分 (3.125 nsごとのLT情報24ビット+25 nsごとのHT情報3ビット) を読み出し、中継ボードを経て100 m先にある地下計算機室のバックエンド回路に送っている。この時間幅はドリフト時間からの要請である。

バックエンドは、FEの制御またはATLASからの信号を送るTRT Trigger and Timing Control (TRT-TTC) と、FEからデータを受け取るTRT Read Out Driver (ROD) から構成される。RODは120個のDTMROCからストロー1920本分のデータを受け取り、FPGAでデータの圧縮・検証・パッケージングを行っている。圧縮にはHuffman符号 [10] を使っており、図7に表すように最頻出のパターンが最も短くなるような符号化をする。これによって後段に送るビットの量を実効的に1/4まで減らしている。ビットパターン頻度の評価には実データを用い、運転環境の変化に合わせて更新している。RODの後段はATLAS共通のバックエンドシステムがあり、そこで初めて全検出器のイベント情報が一堂に介し、ソフトウェアトリガーにかけられ、パスした暁には地上のストレージに送り出されて衝突事象として日の目を見るというわけである。

通常の運転ではTRTはATLASからトリガーを受け取るだけだが、宇宙線測定のような低レート環境では自前でトリガーを発行できる。DTMROCがTRT-TTCと通信するために用意したラインに信号を打ち込み、全TRT-TTCから集めた信号をNIMロジックで強引にORを取ってATLASに送るだけという野性味のある実装だが、開発が常に行われているトリガー専門の検出器と違って変更することがめったにないので、コミッショニング期ではしばしばATLASの宇宙線データ取得のためのトリガー源として重宝されている。

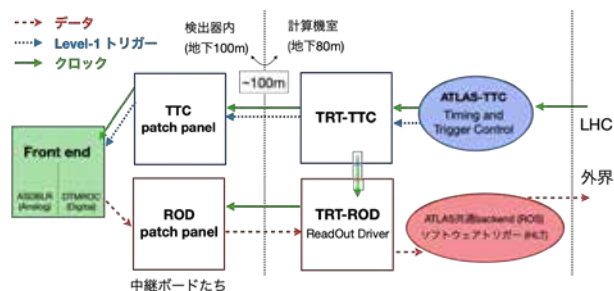


図 5: TRT の DAQ システムの概要。

³これはガスがわかっており tail の波形が既知であることが条件である。Xe ベースと Ar ベースのガスに対応した 2 つのモードが実装されている。

⁴運動量のビーム軸に垂直な成分の大きさを横運動量と呼ぶ。素過程の始状態のビーム軸方向の運動量が定まらないハドロンコライダーにおいては横運動量が実験室系での反応のスケールを反映する。

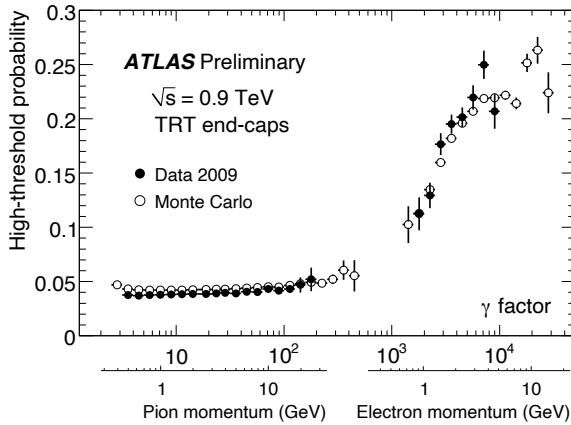


図 6: e/π の飛跡を構成するヒットの HT ヒットの平均の割合 [12]。これを使って 90% の効率で $\pi^\pm$ の 70–90% を棄却することができる。 $\pi^\pm$ は TR を出さないが電離信号の長い Landau tail のため 5% ほどが HT ヒットになる。

3 物理解析への TRT 情報の貢献

ATLAS の飛跡検出またはオフラインの物理解析における TRT 情報の主な貢献は以下の通りである。いずれの項目において LHC のヒッグスの発見に大きく貢献したことは特筆に値する。

荷電粒子の運動量決定 シリコン検出器はセルが細かく単一ヒットの位置分解能に優れる ($O(10 \mu\text{m})$)。そのため衝突点由来の荷電粒子の大半はシリコン検出器で飛跡が見つかるが、半径が小さく磁場をかけた際の曲率測定が難しいため運動量の決定精度が悪い。TRT は個々のヒットの位置分解能は悪い ($\sim 130 \mu\text{m}$) もののヒットの数が多く (20–40 個) 間隔も広いため、TRT に外挿することで運動量分解能を大幅に改善できる。例えば図 8 は低横運動量領域における性能評価であるが、TRT への外挿によって 30–40% の分解能改善がある。高横運動量領域においてはこの傾向がより顕著になる。これらは $h \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ や $h \rightarrow \mu\mu$ といった分解能が直撃するような解析では特に重要である。

衝突点から離れて生じた荷電粒子の飛跡再構成 こういった粒子はシリコン検出器にヒットをあまり残さないため TRT の情報から飛跡を作る必要がある。特に ATLAS では生成する光子の 1/4–1/2 が飛跡検出器物質との相互作用で e^+e^- 転換を起こすので意外に大きな必要がある。シリコン検出器のヒットのみで再構成された飛跡由来の TRT ヒットを除去した後、残った TRT ヒットで種となる飛跡を再構成する [11]。このままでは 2 次元の飛跡になってしまうが、シリコン検出器に内挿してヒット 1 つ以上見つけてマッチすることで 3 次元目

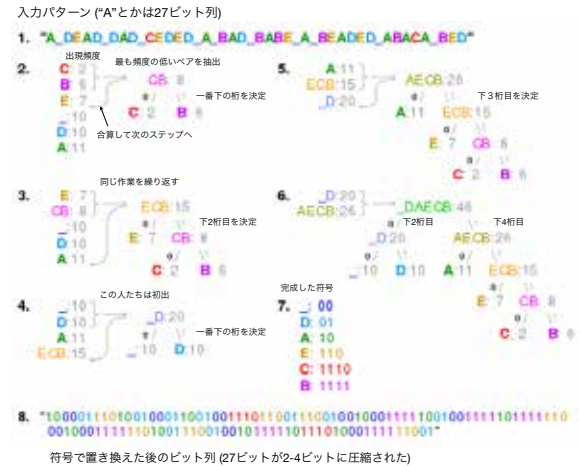


図 7: Huffman 符号アルゴリズム [10] の模式図。A-E や “.” は我々の場合イベントあたりのストローヒットのビット列である。ここでは 1. で与えられる文字列がどういう変換をされるかを例示している。

を決定している。これによって再構成される e^+e^- 転換光子の効率は横運動量によるが典型的に 60%–95% であり [13], $h \rightarrow \gamma\gamma$ のような光子を複数要求する解析では特に重要である。

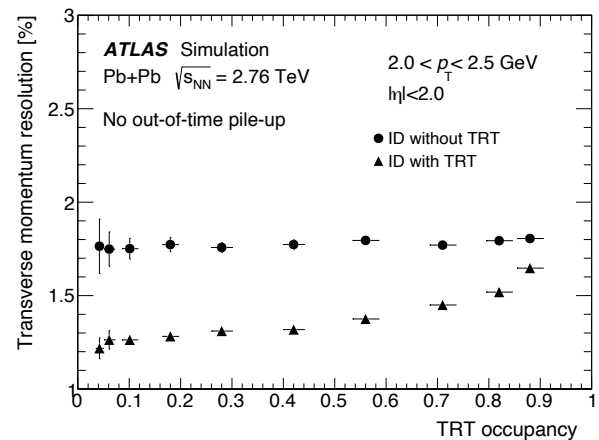


図 8: 衝突点から生じた荷電粒子飛跡の、TRT のヒットを使った場合と使わなかった場合の運動量分解能 [12]。

TR を使った粒子識別 e/π 識別においては HT の情報単体で S/N を 5–50 倍改善し [12], ATLAS の電子およびタウレプトンの同定能力に強力に貢献している。これは CMS⁵ の検出器にもないユニークな機能であり、TRT の最大の売りである。また転じて磁気モノポールなどの電荷-質量比の大きい未知粒子探索にも使われている [14, 15]。

⁵Compact Muon Solenoid. LHC にて ATLAS と対をなす汎用検出器を持った実験。

4 LHC Run2 運転 - 高ルミノシティとの闘い

LHC は Run1 (7–8 TeV, 2010–2012) と Run2 (13 TeV, 2015–2018) を経て、その後の長期シャットダウンも終えようとしており、2022 年春から Run3 (13.6 TeV) が開始予定である。Run2 の中盤までは後述べるガスリークを除けば穏やかだったと聞いているが、2016 年に LHC が当初予定していたビームルミノシティ ($10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を達成し、2017 年秋以降さらにその倍で運転しようとしたため状況が一変した。高い輝度は基本的に陽子衝突のパイルアップ⁶が増えることを意味する。例えば図 9 は Run1 (左) と Run2 後半 (右) の典型的な衝突事象における TRT バレルのストローヒットマップであるが、Run1 の牧歌的なイベントディスプレイに対して Run2 後半のそれは刃傷沙汰ともいえるべき有様である。パイルアップは 50 前後、LT を鳴らしているストローは一番苛烈な領域では 70% にものぼり、時間情報による分解とシリコン検出器ヒットからの外挿が強力ではあるものの普通に運用ができているということには純粋な驚きがある。とはいえこの状態でデータを取れるようになるまでには多大な努力があり、自分が TRT の DAQ に参加し始めたのもまさにその準備の真っ只中であつた。

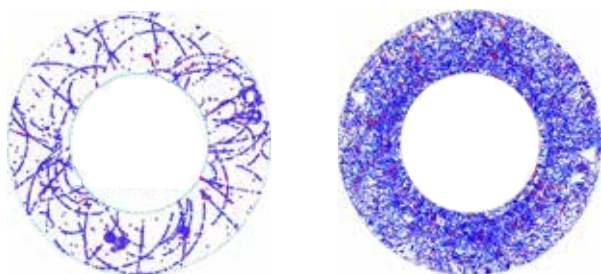


図 9: Run1 (左) と Run2 後半 (右) の典型的な衝突事象における TRT バレルの片側のストローヒットマップ。青い点は LT、赤い点は HT を超えたストローヒットを表している。

4.1 DAQ アップグレード

最大の困難は読み出しの bandwidth であり、複数の段階で逼迫することが明らかだった。特にヒット数が上昇し、1 イベントあたりのビットパターンが多様性が増え ROD における Huffman 圧縮の効率が悪くなったことによって、ROD の後段への転送 (S-Link) がネックとなった。これを受けて ROD のファームウェアは Run2

開始前から中盤にかけて様々な改造が実行された。例えばパイルアップ由来のヒットのみで構成されている確率の高いビットパターンマスク、ROD で修飾するエラー情報に関するビット数の削減、圧縮のルックアップテーブルに登録できるパターンの数の増加、それに伴うファームウェアの不安定性を取り除くための多岐にわたる微調整が行われた。また根本的な解決として ROD の S-Link ドライバカード (HOLA) のアップグレードも行われた。新しい FPGA と 50% 早くなったクロックを積んだカードを新調し、マステストの後 2017 年の運転が始まる前の 5 月に総取り替えが行われた。VME クレーンにギチギチに詰まった ROD を引っ張り出して搭載している HOLA を交換するわけだが、元々のスペースのなさに加え経年劣化によるボードやレールの歪みで隣のボードとも干渉して非常に苦労した。結局米粒みたいなキャパシタが吹き飛んで何枚かの ROD が破損したが、それ以外は目立ったミスもなく約 8 日間チーム総員でフル稼働し HOLA カード 192 枚を交換。抜いた 3000 本近くのケーブルを繋ぎ直した後一発でシステムが復旧したときは猛烈な感動が巻き起こった。

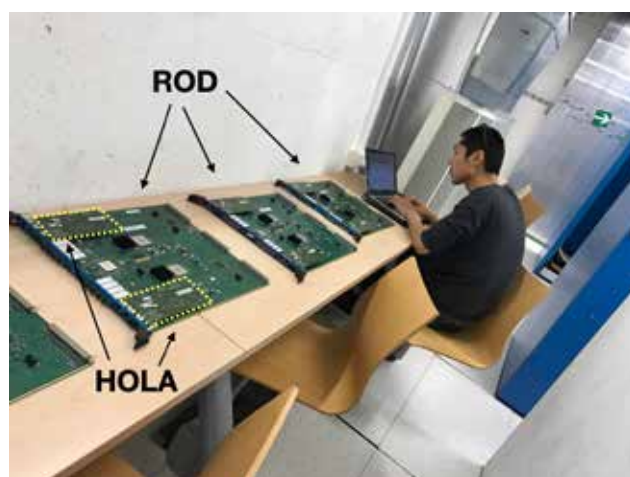


図 10: HOLA 交換キャンペーン。右の人物は 2019 年まで同じくペンシルバニア大学で TRT の DAQ 責任者を担当した吉原圭介氏 (現名古屋大学)。

また Run2 では L1 トリガーのレートが Run1 の 75 kHz から本来のデザインゴールである 100 kHz を目指すことが決まっていた。この単純な読み出しレート上昇によって ROD のインプットの bandwidth も問題となり、FE から送る LT のデータの最後の 3 ビット (9.375 ns 分) を削って対応せざるを得なくなった。ドリフト時間の長いヒットが取りこぼされることになるため慎重に検討されたが、長寿命荷電粒子の検出に多少の影響が見られたものの、通常の飛跡検出性能にはほぼ変化を及ぼさないことがわかった。

これら一連の変更によって達成した読み出し性能改善が図 11 にまとめられている。100 kHz の読み出しに対

⁶陽子の束同士が衝突するので多数の衝突が同時に起こる。

して以前はストロー占有率 (LT が鳴ってるストローの割合) 50%ほどで限界だったのが 85%まで許容できるようになった。これはパイルアップの数にして 65-75 に相当する。

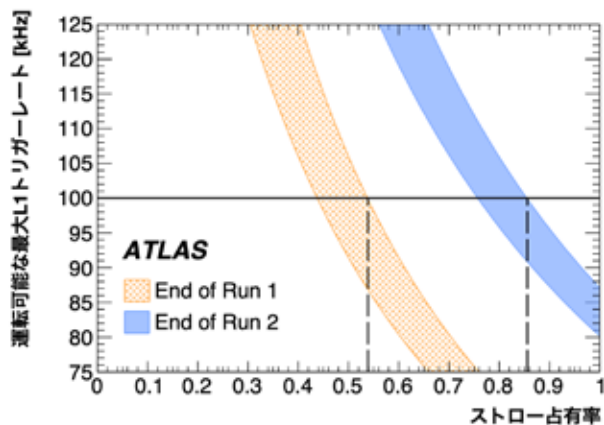


図 11: DAQ アップグレード前後での読み出し性能の比較。横軸は TRT のストロー占有率 (LT が鳴ってるストローの割合), 縦軸はそこに S-Link の bandwidth を逼迫させずに読み出しが行える最大レート (L1 トリガーの発行レート) を表している。ATLAS のデザインゴールは 100kHz である。色つきの帯は各イベントのデータに付随する可変長の error block (データに異常が検知された際に ROD で修飾されるビット列) による不定性だが, 実際の運転ではほぼ最小の状態を取り続けるので上の縁を見れば十分である。

4.2 多発する同期エラー

2017 年 9 月 LHC はピークルミノシティ $1.65 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成し⁷ [16], ATLAS に最大パイルアップ数 62, TRT に最大ストロー占有率 81% という空前絶後の爆裂状態をもたらした。アップグレードによる DAQ の性能改善が概ね予想通りだったのはよかったが, この運転環境になって以降 30 分から 1 時間くらいに一回の頻度で DAQ システム内 (主に ROD を流れるデータと LHC のクロック) の同期が外れる現象が見られるようになった。ほとんどの場合自動で再同期のコマンドが走り 15 秒ほどで回復するが 時々直らないこともあり, 再起動 (一回あたり 3 分ほど ATLAS のデータ取得を止める) や, 最悪問題の ROD やそれに繋がる中継ボード (図 5 参照) の交換が必要になるケースもあった。タチの悪いことにこのエラーは実際の物理ラン以外では一切再現ができずデバッグは困難を極めた。それまで主に物理解析ばかりやってきたケツ青き若造だった自分

は, working hypothesis が何もなくともとりあえず何か試すという発想に乏しく, 当時相棒であった Ian も納得しないと手を動かさないタイプのやつだったので輪にかけて何も進まなくなった。対処療法で耐え続ける中, 2017 年 10 月 31 日最もエラーを起こしていた ROD を含む VME クレーンが運転中にトリップしラックごと落ちた。ハロウィーンの日にふさわしい大災害だったが, 死んだ電源を交換するとなぜか以降その ROD のエラーは治ってしまった。その後試行錯誤した結果, モニタリングにかからないほどの短い back-pressure⁸ を ATLAS のバックエンドから ROD に送るとエラーが再現されることがわかった。どうもこういうことであつたようである: (1) 短い back-pressure によるデータ取得の停止と再開によって ROD に流れるデータのパターンが急激に変わる (2) ROD を保持しているクレーンが供給する電流も急変する (3) 調子の悪い電源だとさらに激しい変化になる (4) ROD のクロック同期を保証する PLL 回路を流れる電流が変わり, 定格ギリギリだった場合機能しなくなり同期を失う。こんなんわかるかよという感想しかないが, working hypothesis なんていうものは後からついてくるというハードウェアデバッグの流儀を叩きつけられた感じであつた。2017 年末の ATLAS ソフトウェアトリガーの計算機増強によって ROD への back-pressure の問題は解消され, 2018 年の運転では同期エラーの頻度がそれまでの 2 割程度に減少した。この残り 2 割は違うメカニズムで起こっており, 今だに原因究明が続いている。



図 12: 2017 年の高ルミノシティ運転を乗り切り浮かれる DAQ チーム (一番右が筆者)。

ちなみに TRTDAQ システムの中継ボードは ATLAS 検出器の内部, ミューオン検出器の層間のスペースにあり, アクセスするには文字通り ATLAS の中に潜ることになる⁹。ケーブルや冷却パイプの間をすり抜け, 時

⁷2017 年 11 月にあった special run においては宣言通り $2.09 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成した。

⁸データを受け取る側の処理が飽和したときに上流からのデータの流入を止める行為およびそのために発するビジー信号。

⁹中継ボードを交換する様子 (動画): <https://www.youtube.com/>

にはハイハイしたりジャングルジムみたいな物体を超えていくわけだが、ハイテク感と猥雑さが共存した空間は独特の雰囲気がある。運転中はさらに暗闇に加え磁場もかかっているためさらにファンキーさが増す¹⁰。その辺の構造物は基本角が立っていて剥き出しの突起物も多いため、服は破けるわ足や腕はぶついたり擦りむいたり、毎回多かれ少なかれ獣に襲われた後みたいな状態になって外に戻ってくることになる。



図 13: 中継ボードの取り替え。ケーブルの海をかき分け 10 年以上刺さって周りと融合したボードを叫びながら引き抜く。

5 ガスにまつわる乱痴気騒ぎ

Run1 も含めて TRT の運転史上最凶の災難はこれから述べるガスリークで議論の余地がない。自分は直接対応する立場にはなかったが、傍目から見てもメンタルがやられそうになるものがあった。ちなみに一般的にガスを漏らしている検出器は「なんだこの体たらくは」みたいな印象を持たれがちであるが、これは人の体型から自己管理できてないと判断するような邪悪な誤謬であることは強調しておきたい。予見しようがない要素があまりにも多く、基本的に明日は我が身である。現場では最も技術に長けガッツを持った人間が事態に当たっていた。彼ら/彼女らの奮闘に敬意を表しここに一連の展開を簡潔に記録しようと思う。

5.1 O_3 によるパイプの破壊と Xe 高騰の恐怖

検出器ガスに含まれる O_2 は放射線を受けて O_3 を生じる。ガスは循環しているものの運転中絶えず生成されているので、 O_3 は 100-200 ppm 程度の濃度でガスパイ

プやストローの中をプカプカ漂っている。ガスパイプはポリエーテル・エーテルケトン樹脂 (PEEK) でできているが、曲がって力がかかっている部分を O_3 が攻撃し割れ目ができてリークが発生した。PEEK の放射線耐性や O_3 に対する耐性は入念に調べられていたが、力学的なストレスがかかっている PEEK が O_3 に殊更弱いというのは完全な想定外であった。リークは Run1 終盤から始まり、最もひどい時には Xe が毎日およそ 240 ℓ 失われる事態となった。害はないと言われているが Xe は高いので実質金を漏らしている状態である。Run1 と Run2 の間にリークの探索が行われ (ここで初めて PEEK の破損と原因が判明した)、エンドキャップ部分のリークは概ね修理できたが、バレルの損傷は検出器内部のアクセスできない場所にあり修理は断念された。仕方がないのでバレルはリークのひどい部分を Xe から Ar に逐次置き換えていくことになり、Run2 開始以降もこれが基本戦略となった。この問題が困るのはダメージが蓄積していくため今大丈夫なパイプも将来破損する公算が高いことである。事実 Run2 は LHC のルミノシティが上がるにつれさらに新たなリークが次々に発生し¹¹、Run2 の終わりにはバレルの半数のストローが Ar に置き換わるようになった。Run3 ではバレルは完全に Ar ベースのガス配合に置き換わる予定である (図 14)。Ar は安価な一方で X 線の吸収率が 5-15 keV 領域では Xe の半分程度しかない。飛跡検出や運動量測定には影響はないが、TR による粒子識別能力が猛烈に損なわれるので痛手である¹²。またガス変更の度にオフラインの較正や粒子識別のアルゴリズムを新調することになったため下流もてんやわんやとなった。

PEEK が O_3 に蹂躪される一方で、リーク緩和のための措置も多方面にわたって講じられた。リークを最小化するための動的な流量調整や、それによる圧力変化の影響を高電圧の調節で打ち消してガス増幅度を一定に保つシステムが開発された [17]。これらとバレルの全 Ar 化により Run3 開始時の Xe リークは Run2 終盤の 200 ℓ /日から 120 ℓ /日程度まで抑えられる見立てである。ガス流量計の較正も新たに行われ、リークの検出精度が 10 倍改善された。また現在生きているパイプのための予防措置として、検出器ガスに含まれる O_2 の割合を 3% から 1.2-1.5% まで落とした。これによって生成される O_3 の量を 40% 減少させている。さらに根本的な解決としてパイプ内の O_3 を吸収する炭素化合物を投入する可能性が現在検討されている。

watch?v=2vYtRLJdFRc

¹⁰ヘッドライトの磁性で頭がうっすら磁場の方向に引っ張られる、磁性を持ったネジは締めるとき真っ直ぐ穴に入ってくれない... などの異変を感じることができる。

¹¹特に 2015 年の秋頃は毎週のように新しいリークが報告され、ミーティングの資料からはえも言えぬ悲壮感が読み取れる。

¹²オフラインの電子識別アルゴリズムも日々進化しているため最終的な性能ではいくらか挽回されている。例えば Run2 は Run1 に比べ全体として電子識別の性能はむしろよくなった。

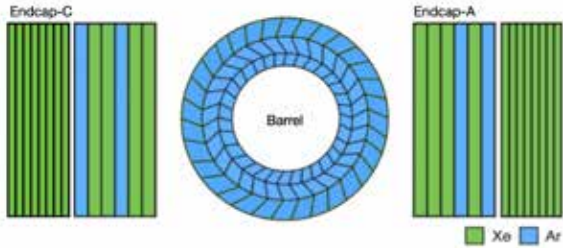


図 14: Run3 開始時予定ガス構成。運転中新たにリークがひどくなった Xe モジュールは逐次 Ar に置き換わっていくカメレオンのような検出器になる。

5.2 フロントエンド回路冷媒のリーク

FE 回路のチップから生じる熱を吸収するため、 C_6F_{14} の液体冷媒が検出器内を循環している。2017 年 12 月バレルの最内層の 3 箇所からリークが発生。タンクレベルの時間変化から毎時数 ℓ 漏れていることが確認された。Xe と違ってコスト面での打撃は小さい一方で、 C_6F_{14} は CO_2 の 1 万倍ほど強力な温室効果ガスで知られており、大勢にインパクトをもたらすレベルには程遠いとはいえず色々心象が悪い。原因もまだはっきりわかっておらず、Run2 が終わった 2019 年 4 月に探索が行われたが、残念ながらまたしてもバレル検出器の内部で漏れているということを確認しただけに終わった。(我々のバレルの中は一体何が起きているんだ?!) リーク量も完全にコントロールできているとはいえず、停電やタンクの充填などに合わせて増えたり減ったりする挙動が観測されており、Run3 での運転における目下最大のリスクとなっている。より地球に優しい代替冷媒として NOVEC ($C_4F_9OC_2H_5$) が検討されたが、放射線耐性や放射生成物などに不安があり、また新たなプラントを製作する必要があることから見送られた。Run3 では最もリークが不安定な箇所の冷媒循環、および該当する FE 回路を停止させて運転する予定である。

6 Run3, その後へ

TRT は他の内部検出器とともに Run3 いっぱいで引退し¹³、その後の HL-LHC では全シリコン検出器である ITk (Inner Tracker) [18] が取って替わる予定である。去りゆく検出器の戦略は通常のそれとは大きく異なる。人員面での制約が特に大きいため、必然的に影響の小さい故障は許容しスペア交換などの対処療法で凌ぎつつ、ポロポロになりながら軟着陸を目指すことになる (図 15)。これは重要な問題にリソースを絞るということでもあ

る。幸い LHC-Run3 は Run2 とほぼ同じ条件で稼働する予定で TRT の性能面での要求に不安はなかったため、このシャットダウン期間では運転安定性を上げるための作業に集中することができた。例えば DAQ では 2019 年からの (1) 2018 年の運転で観測された同期エラーの究明 (4.2 章最後を参照) (2) 新しい ATLAS-TTC モジュールへの移行 (3) それに伴うタイミング設定のオーバーホール (4) ROD の FIFO 処理最適化による高レート運転能力の改善などを行っている。その他にも Linux OS や C++コンパイラのアップグレードといった痛みを伴うソフトウェアのアップデートや、ハードウェアの様々なデバッグに現場は常に追われている¹⁴。特に後者は微妙で準静的な経年劣化によって壊れ方が年々珍妙になってきており、ケーブルを抜いて挿したら直るといったレベルの理不尽に遭うことが徐々に多くなってきている¹⁵。複雑すぎる人工物はもはや自然の一部である。機械が精神を獲得することがあるとしたらこういうのから始まるのかもしれない。

ATLAS の方でも Run3 を見据えて 2020 年春以降 1–2ヶ月おきに全検出器を同時に運転させる milestone week という期間を定期的に設け、常に全員で運転できることを確かめながら準備を進めている。昨年の 10 月には LHC からビームが到着、およそ 3 年ぶりに陽子衝突がまた観測された。今年の 3 月には地下の検出器ホールを閉じ、ビーム調整を経た後 6 月から本格的に Run3 が始まる予定である。CERN がまた賑やかになるのはもうじきである。



図 15: 近年の TRT workshop で散見される絵 [19]。敗北主義の極北であるが終末期の検出器の宿命である。

参考文献

- [1] The ATLAS TRT collaboration, JINST **3** P02014 (2008).
- [2] The ATLAS TRT collaboration, JINST **3** P10003 (2008).

¹³ ヒッグス発見の主要チャネルの一つであった $h \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ 過程の電子を捕らえた“傑物ストロー”を特定して撤去時に密かに持ち去る計画が進行している。

¹⁴ 運転してなくても物は壊れる。

¹⁵ 愛着があると許せるようになってくる。

- [3] 日本物理学会誌 作田誠, **48-2** 87 (1993); RADIOISOTOPES 作田誠, **47-4** 383 (1998).
- [4] A. Andronic *et al.*, NIM A **666** 130 (2012).
- [5] G. M. Garibyan, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **33** 1403 (1958).
- [6] X. Artru *et al.* Phys. Rev. D **12** 1289 (1975).
- [7] The ATLAS TRT collaboration, JINST **3** P02013 (2013).
- [8] T. Akesson *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **515** 166 (2003).
- [9] The ATLAS TRT collaboration, JINST **3** P06007 (2008).
- [10] D. Huffman, Proc. of the IRE **40** 1098 (1952).
- [11] T. Cornelissen *et al.* J. Phys.: Conf. Ser. **119** 032014 (2008).
- [12] ATLAS Collaboration, “ATLAS TRT Public Result”, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/TRTPublicResults>.
- [13] ATLAS Collaboration, JINST **14** P12006 (2019).
- [14] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **722** 305-323 (2013).
- [15] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett **109** 261803 (2012).
- [16] 高エネルギーニュース 青木雅人 **18-1** 30 (2018).
- [17] B. Mindur *et al.*, JINST **11** P04027 (2016).
- [18] 高エネルギーニュース 中村浩二, 堀井泰之 **18-2** 101 (2018).
- [19] “This Is Fine”, KC Green (2013).