



Introduction to the LHC-ATLAS experiment

Toshi SUMIDA

26th April 2016

Kyoto HEP group meeting



LHC @ CERN

- **世界最大、最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器**

- CERN 付近(ジュネーブ)のスイスとフランスの国境に建設された。
- 全周27 km、 地下100mのトンネルに設置。

- **最大衝突エネルギー**

- $7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$
 - ▶ 2012年は $4+4 = 8 \text{ TeV}$ 。
 - ▶ 2015年から 13 TeV で運転している。

- **4つの実験**

- **ATLAS**, **CMS**, ALICE, LHCb



LHC トンネル内部

B~8.3[T]

A long, narrow tunnel with a curved concrete wall. On the left side, a series of large, blue, cylindrical superconducting magnets are mounted on a track, extending into the distance. The ceiling is supported by a complex metal structure with various pipes and conduits. A series of bright lights are mounted on the ceiling, illuminating the tunnel. On the right wall, there are some yellow lights and a red fire extinguisher. The floor is a smooth, light-colored surface.

コライダー実験

• 陽子は素粒子ではない

- 陽子は、クォーク3個の他にも、グルーオンや生まれては消える沢山の「海クォーク」のかたまり。
 - ▶ 衝突させても陽子の全てのエネルギーが反応に使われるわけではない。

• 加速器の種類

- 電子・陽電子 衝突型加速器

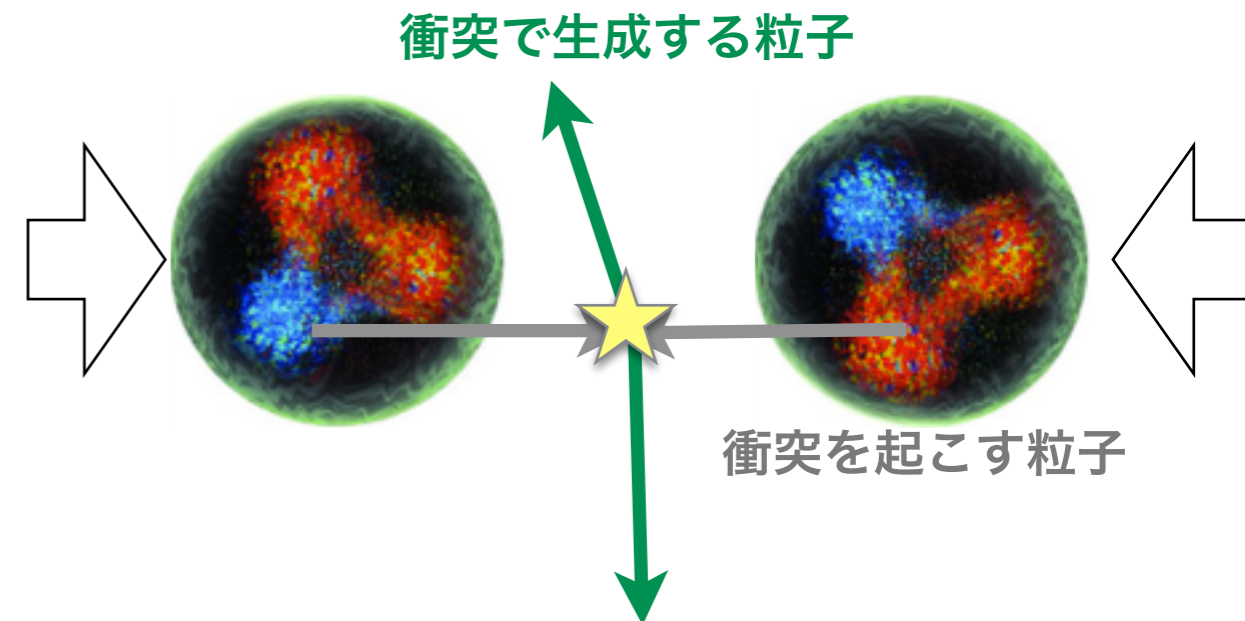
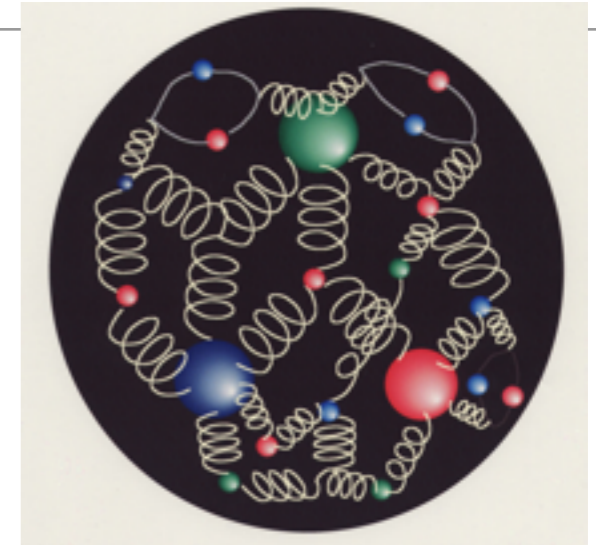
- ▶ メリット
 - 素粒子同士の衝突なのでエネルギーがわかっている。
 - 反応がきれい。
- ▶ デメリット
 - 加速器に沿って曲げるときにエネルギーを失う(シンクロトロン放射)ので、エネルギーを上げるのが難しい。
 - ✓ 線型加速器が計画されている (ILC @ 北上山地)

▶ 精密測定向き

- 陽子・(反)陽子 衝突型加速器

- ▶ メリット
 - 最大エネルギーを高くできる→色々な未知の反応が起こる
- ▶ “発見” 向き。

陽子の構成



検出器と粒子の識別

- 衝突で生成した「全ての」粒子を捕えたい。

 - 複数の検出器を組み合わせる。

- 検出器の種類

 - 飛跡検出器

 - 荷電粒子の飛跡をとらえる。

 - カロリメータ

 - 粒子のエネルギーを測定する。

 - 電磁カロリメータ

 - ハドロンカロリメータ

 - がある。

 - ミューオン検出器

- 粒子の識別

 - 例) 電子(e) \leftrightarrow 光子(γ)

 - カロリメータでは似た反応を起こす。

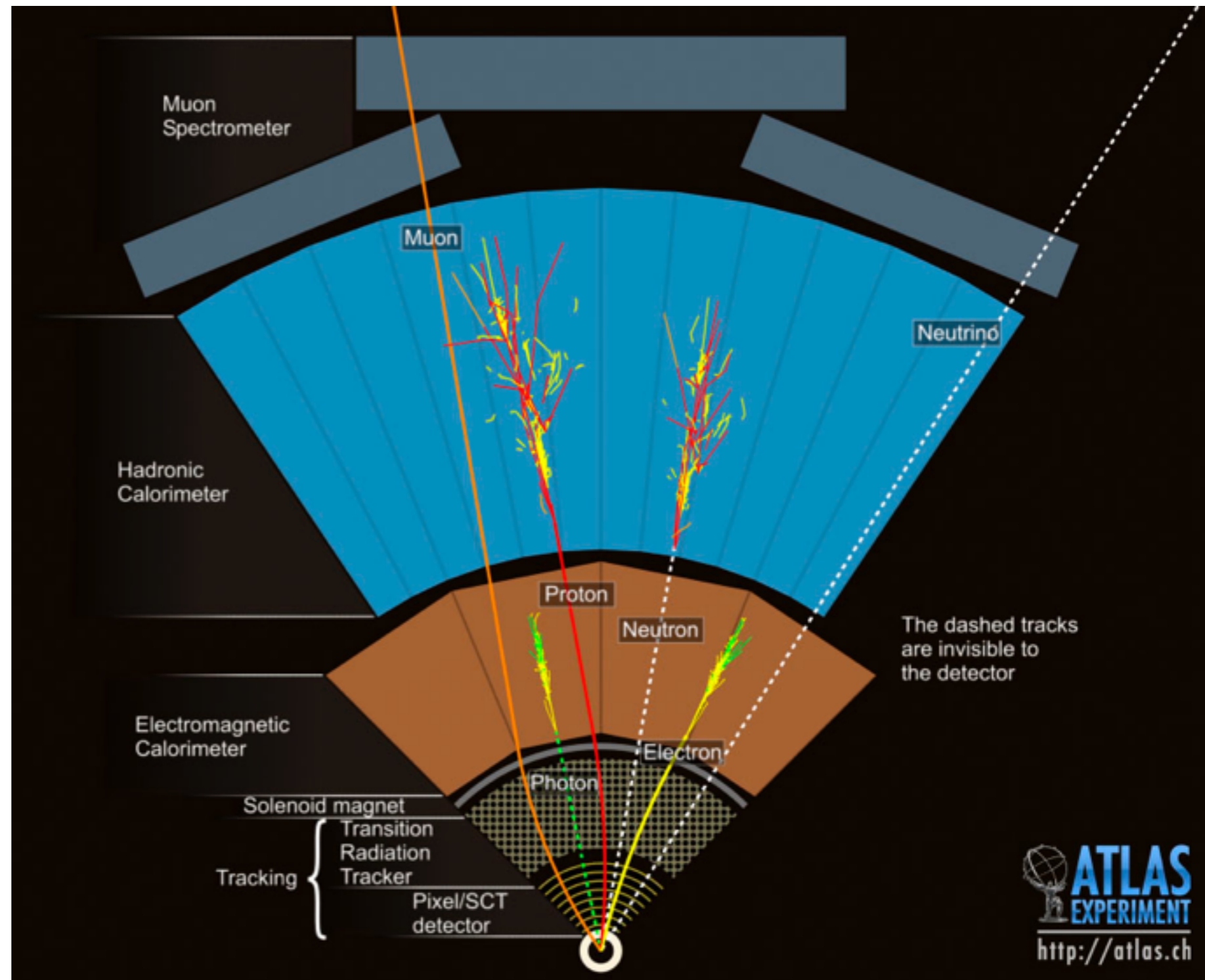
 - 飛跡の有無で判断。

 - 例) 電子 \leftrightarrow 荷電パイ中間子(π)/陽子

 - カロリメータの層で識別。

 - ミューオン (μ)

 - 飛跡+ミューオン検出器。



ATLAS 実験

- A Toroidal LHC ApparatuS

- 100GeV~TeVスケールでの様々な物理に対応した汎用検出器

- コラボレーション

- ~ 3000人の研究者

- ▶ 1000人以上の
PhD students

- 39ヶ国

- ~180機関

- ▶ 日本も参加

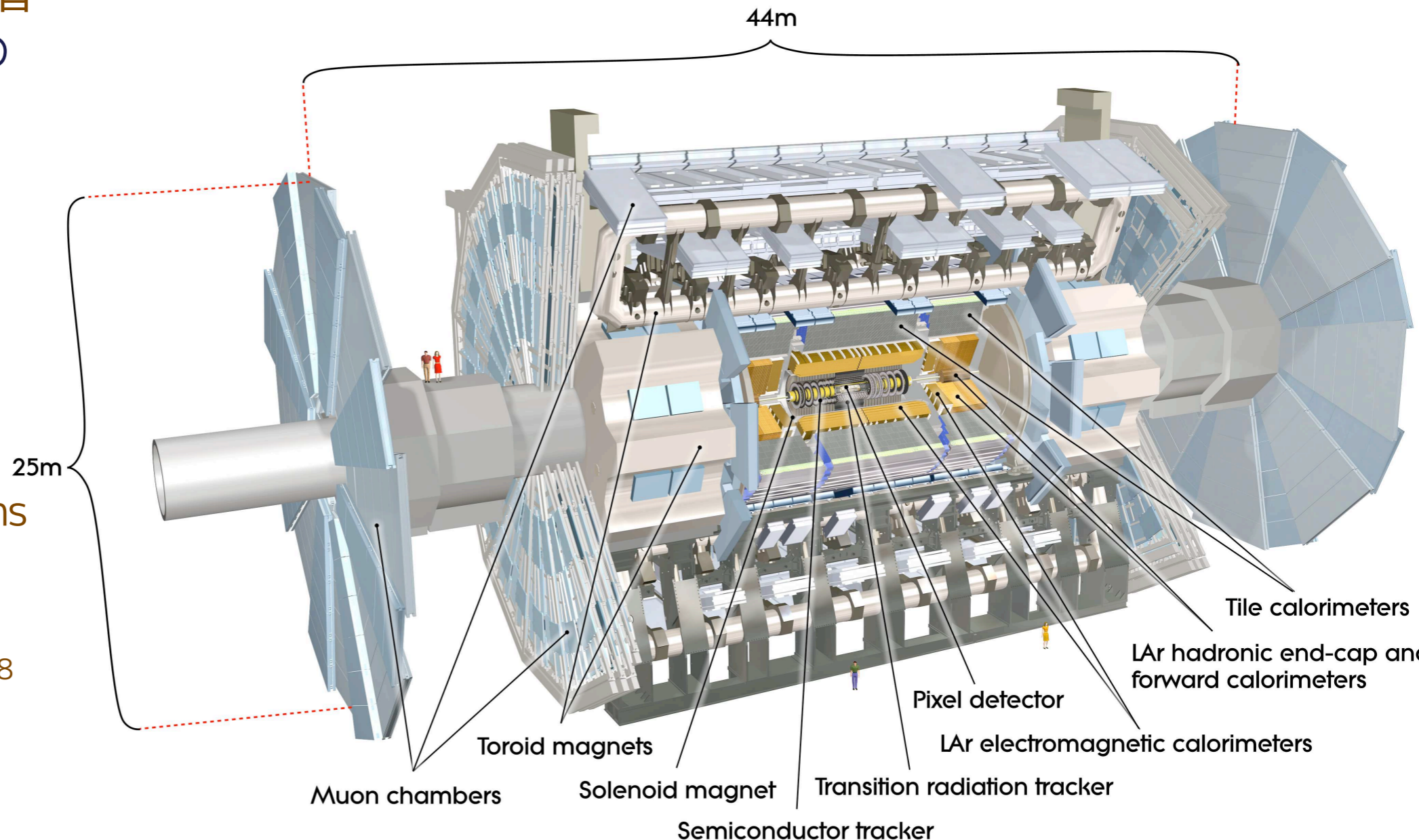
- ATLAS検出器

- 重量: ~ 7000 tons

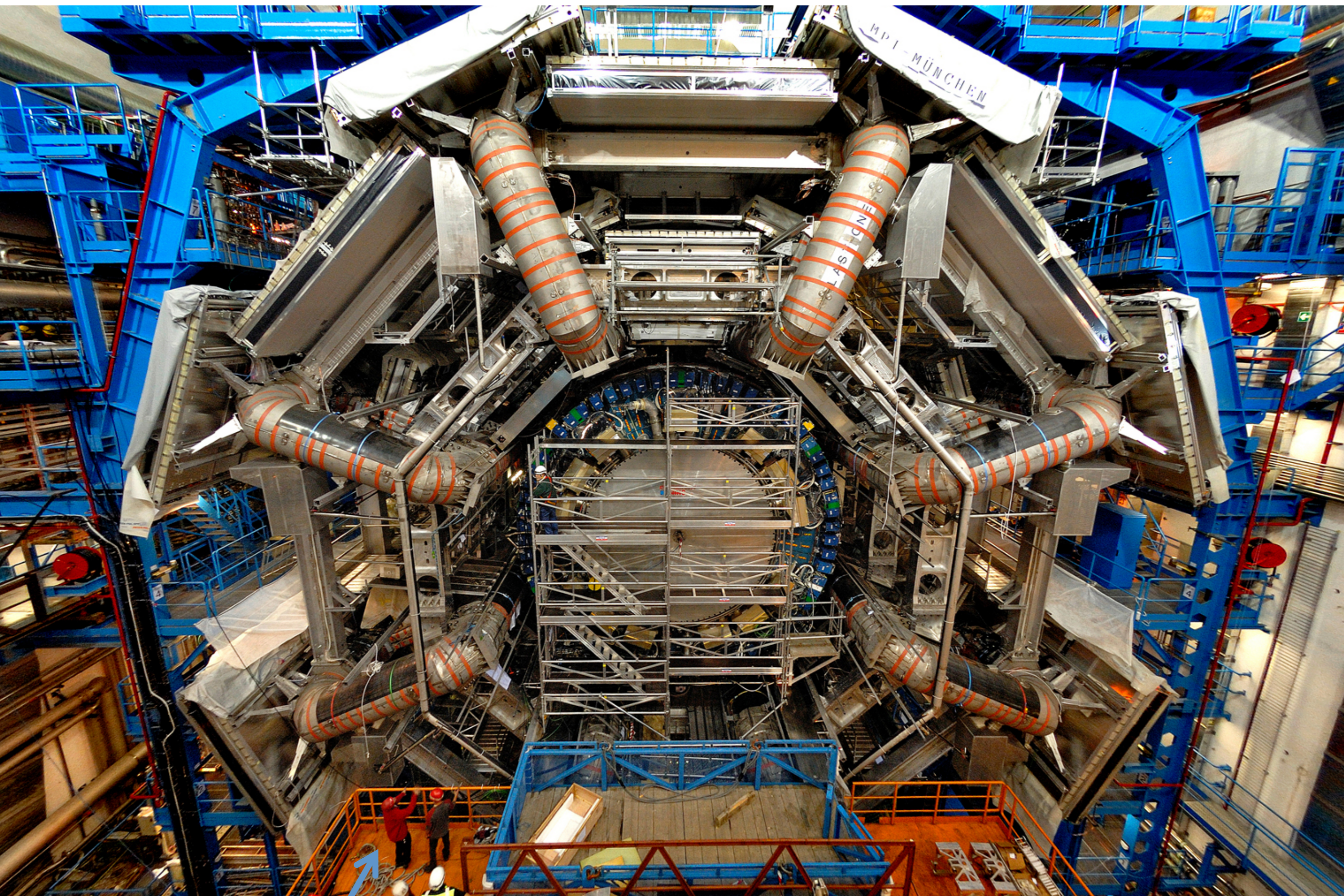
- 高さ: 25m

- 全長: 44m

- センサー数: ~ 10^8



ATLAS 検出器



ヒッグス粒子発見

• ヒッグスの生成 @ LHC

- gluon-gluon fusion がメイン

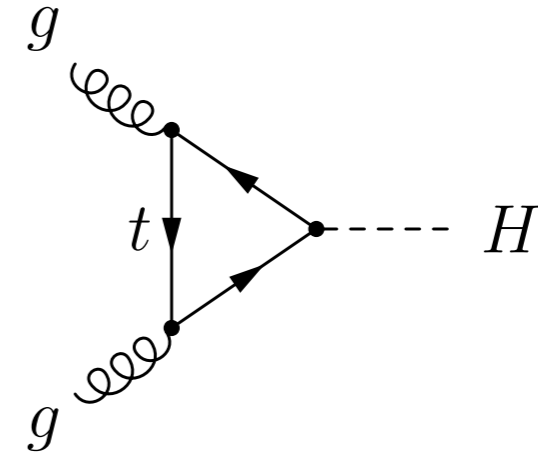
• 崩壊

- $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ$

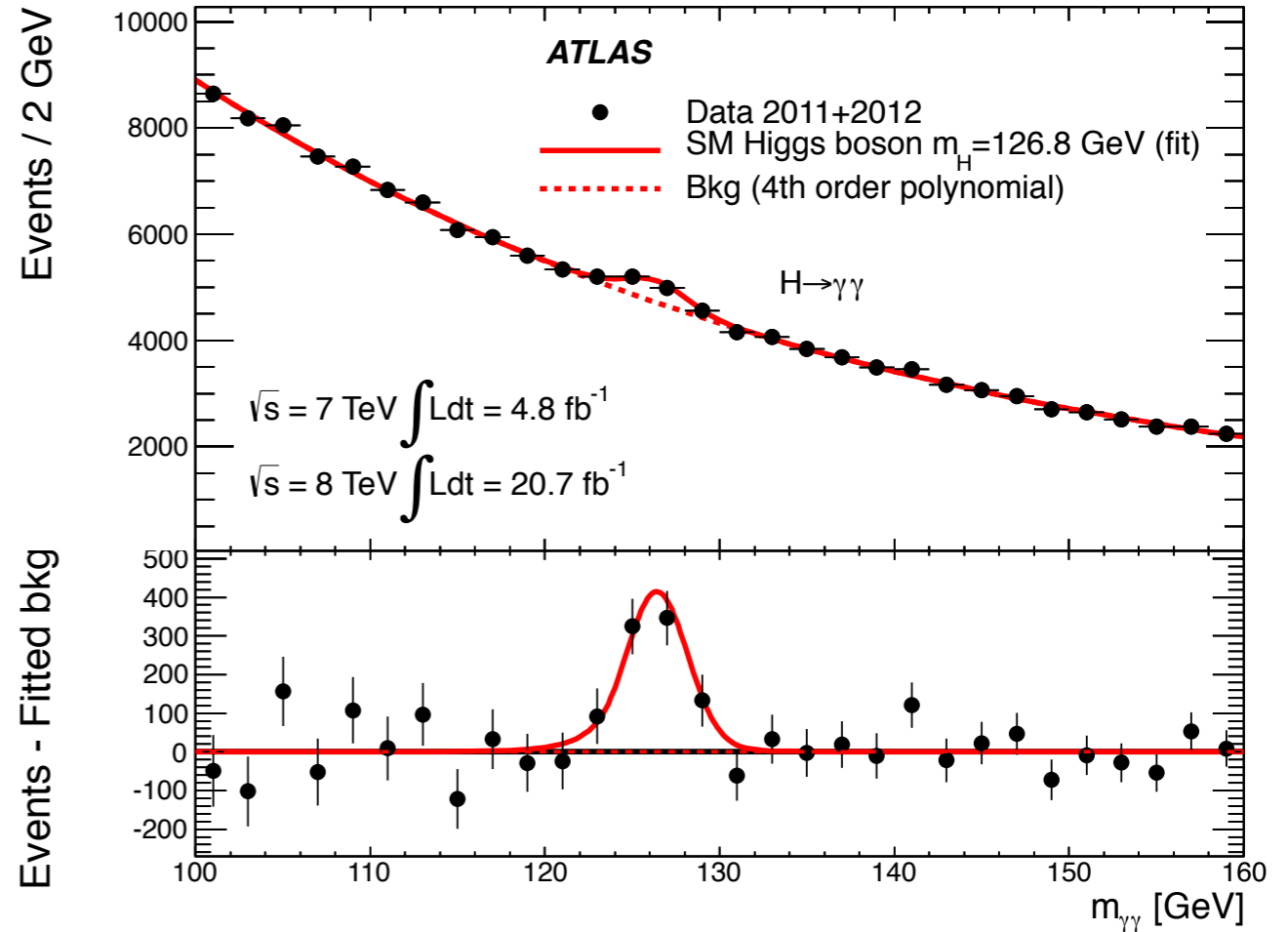
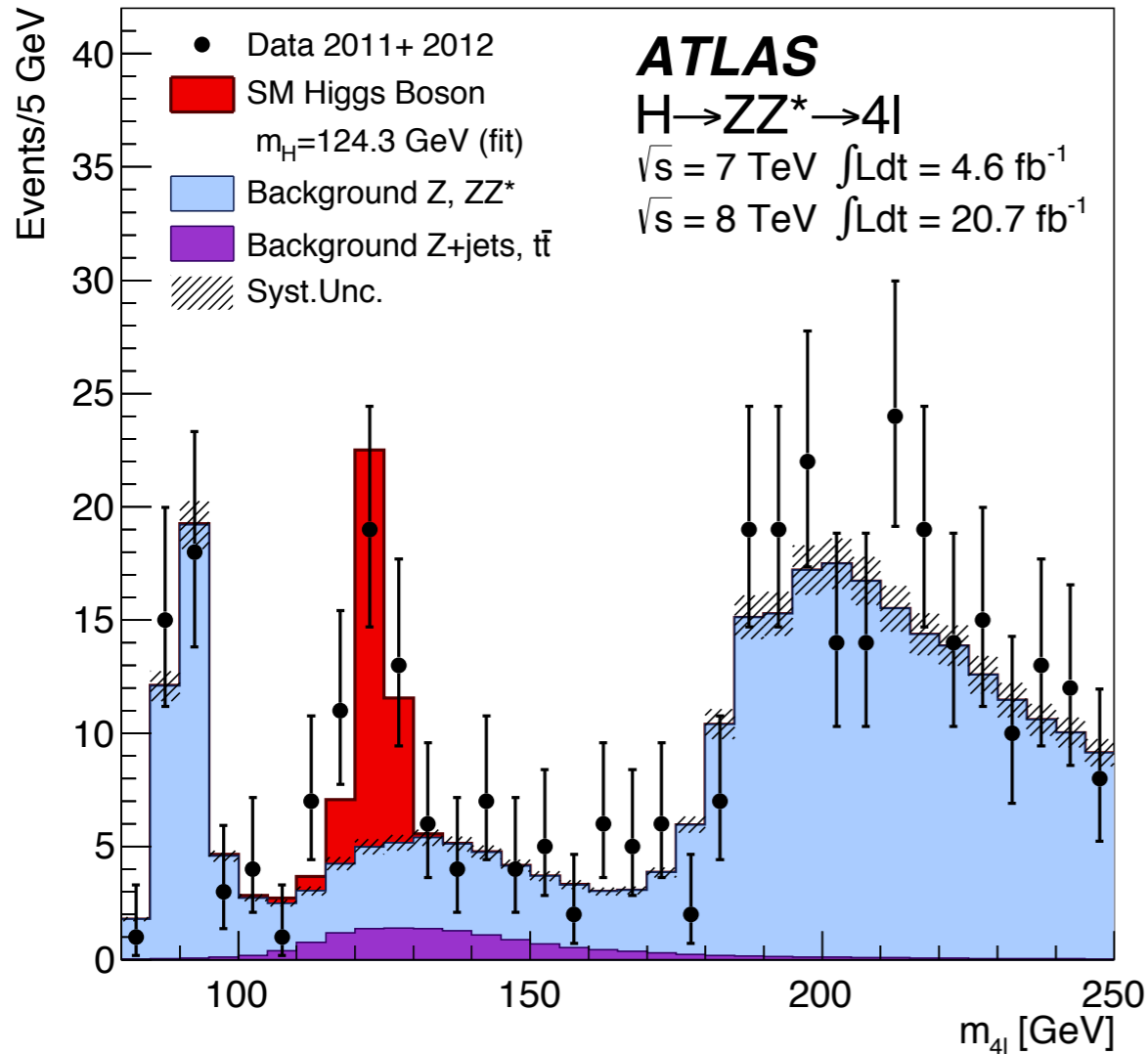
▶ 不変質量分布にピークを観測 → 新粒子発見!

- $m_H = 126 \text{ GeV}$

▶ スピン0、パリティ+を確認 → ヒッグス!!



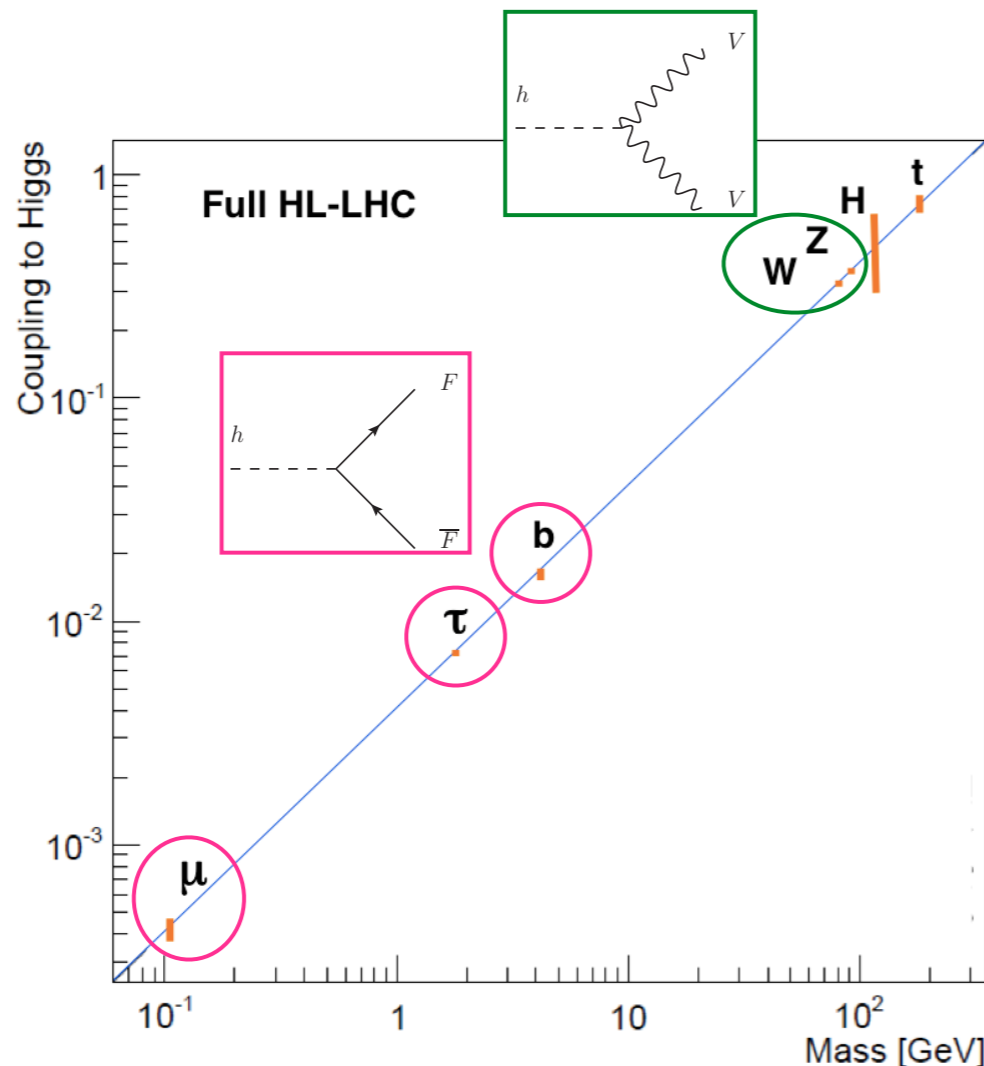
✓ 2012年ノーベル賞!!!



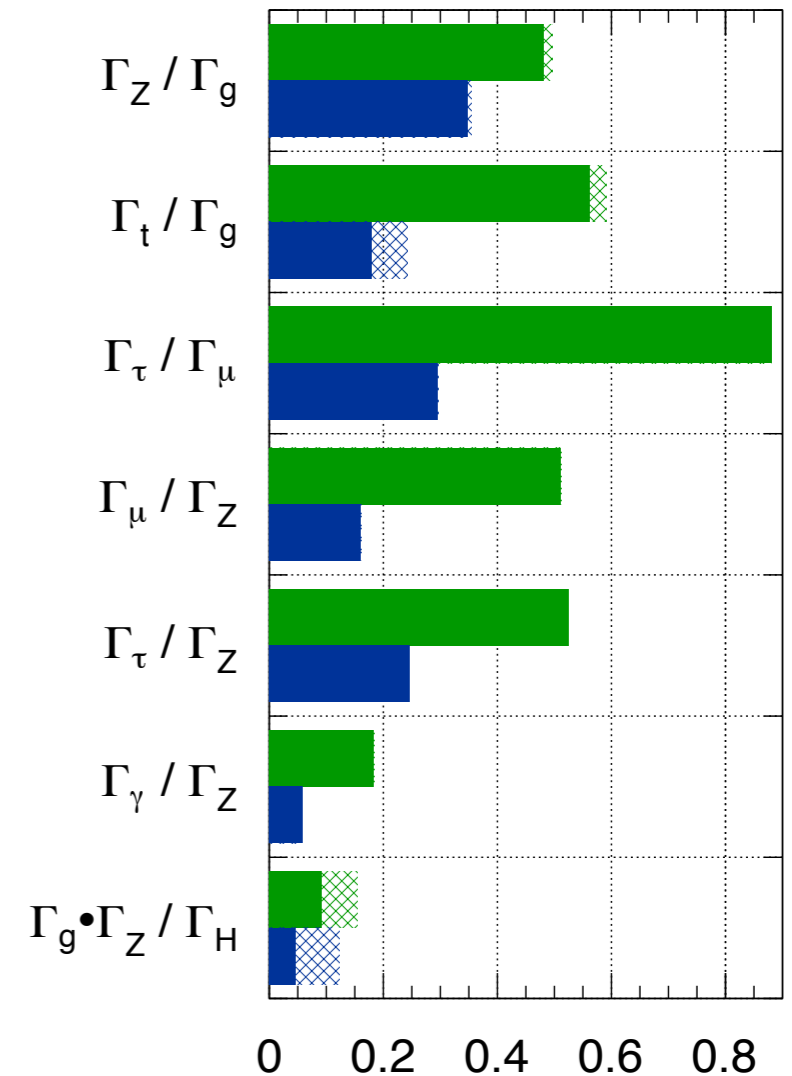
ヒッグス粒子発見

標準模型の完成とその後

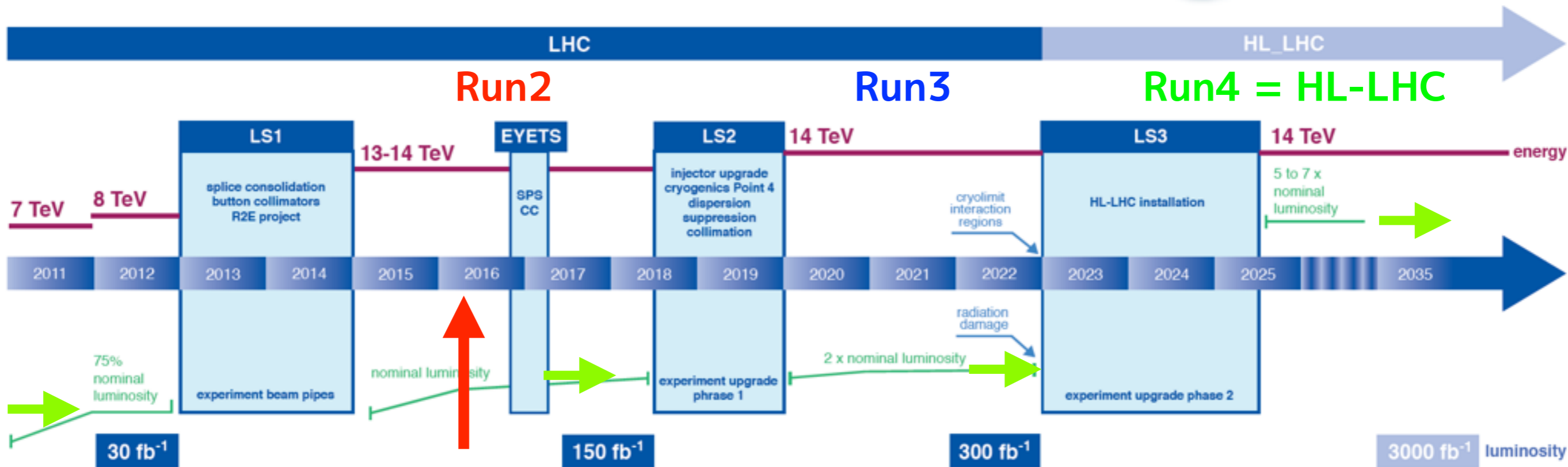
- まだ、素粒子物理に謎は多い
 - ▶ 階層性問題、ダークマター、ニュートリノ質量 etc. etc...
 - 最初の2つを解決してくれそうだった超対称性は、LHC で一向に見つからない…。
 - ▶ 新しいアプローチでの新物理探索が必要
 - モデルに依らない新粒子探索。
 - ヒッグスの結合定数の精密測定。
- ✓ これらをするためにはもっと多くのデータが必要



$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$



LHC アップグレード



• LHC 加速器の強度増大計画

- (Run1: 2010 - 2012)

▶ 7-8 TeV, $L \sim 0.7e34$, $\int L \sim 25$ /fb

- Run2: 2015 - 2018

▶ 13-14 TeV, $L \sim 1.5e34$, $\int L \sim 150$ /fb

- Run3: 2020 - 2022

▶ 14 TeV, $L \sim 2e34$, $\int L \sim 300$ /fb

- Run4 (HighLumi-LHC) : 2025 -

▶ 14 TeV, $L \sim 5-7e34$, $\int L \sim 3000$ /fb

▶ 加速器が増強されたら
それに合わせて検出器の
アップグレードも必要。

物理事象とトリガー

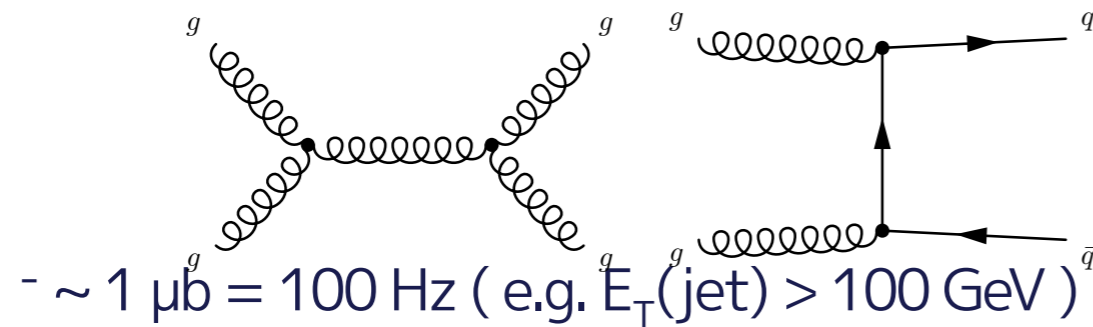
• 反応断面積

- QCD 反応

▶ 総断面積

- $\sim 100 \text{ mb} = 10^9 \text{ Hz}$ @ $7e33$

▶ Hard process (Jet):



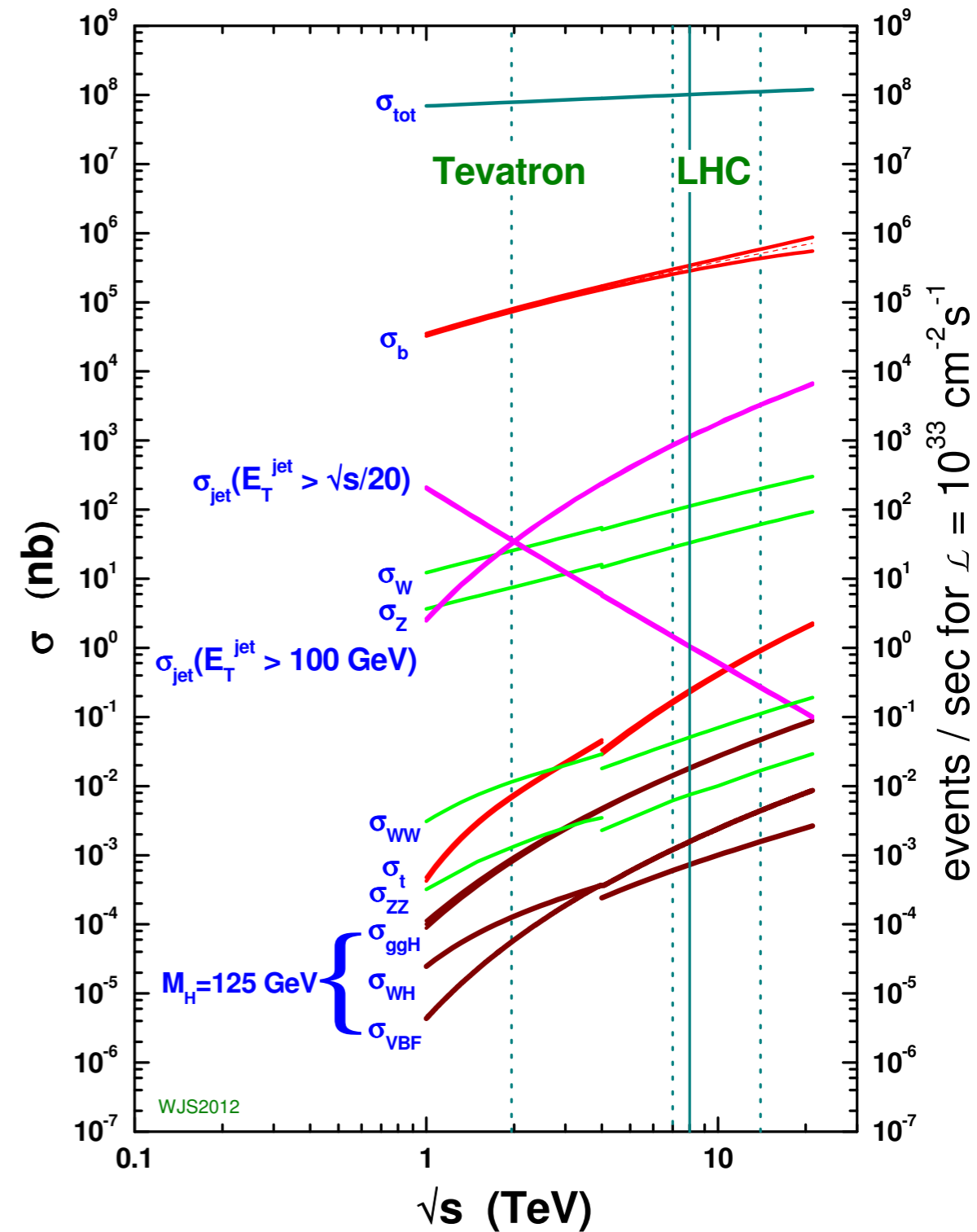
▶ ヒッグス粒子生成 (ex. 125 GeV):

- $\sim 30 \text{ pb} = 0.3 \text{ Hz}$

✓ $\sigma(H)/\sigma(\text{total}) \sim 10$ 桁!!

• トリガー(どういうデータを取るか)が非常に重要

proton - (anti)proton cross sections



Level-1 muon trigger

• ミューオントリガー検出器

- バレル ($|\eta| < 1.0$)

▶ Resistive Plate Chamber (RPC)

- Roma-I, etc.

- エンドキャップ ($1.0 < |\eta| < 2.4$)

▶ Thin Gap Chamber (TGC)

- 日本が

✓ 検出器建設、

✓ エレクトロニクス開発

✓ 実験オペレーション

✓ アップグレード

に関して大きな貢献をしている。

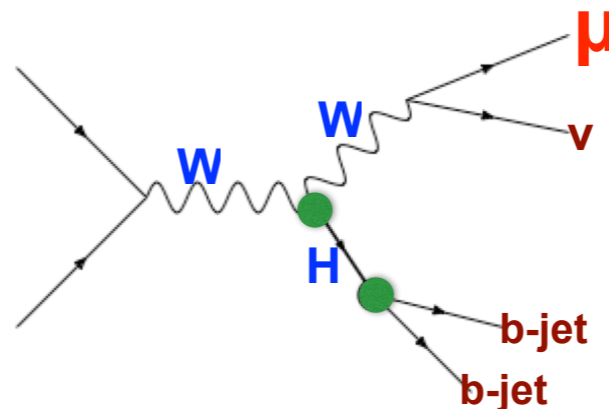
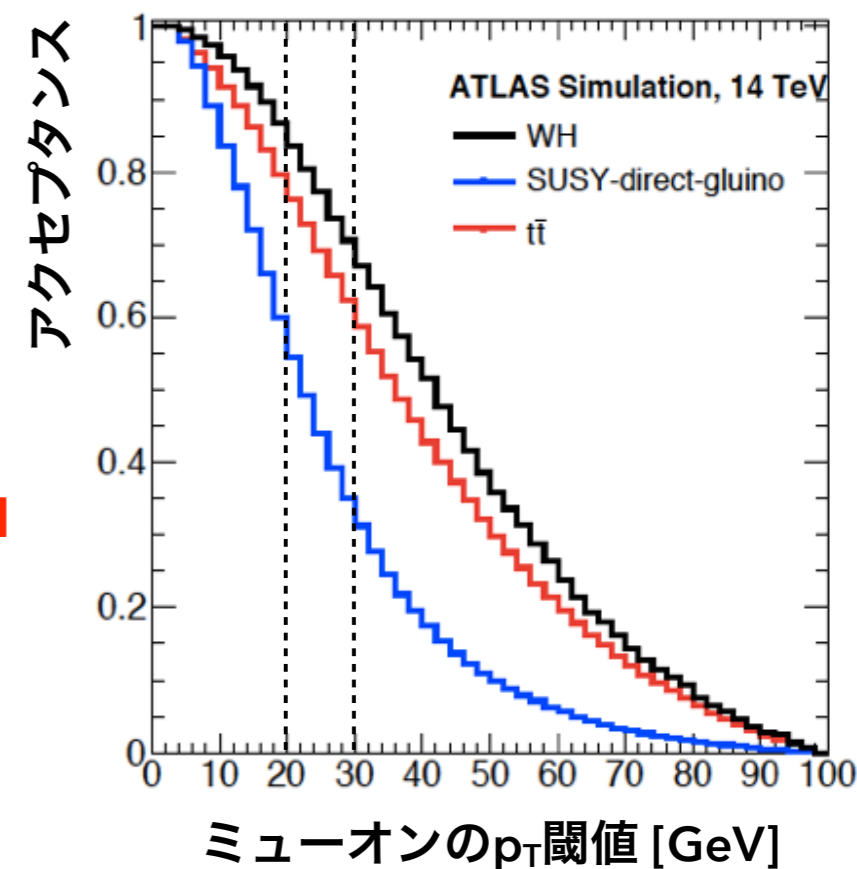
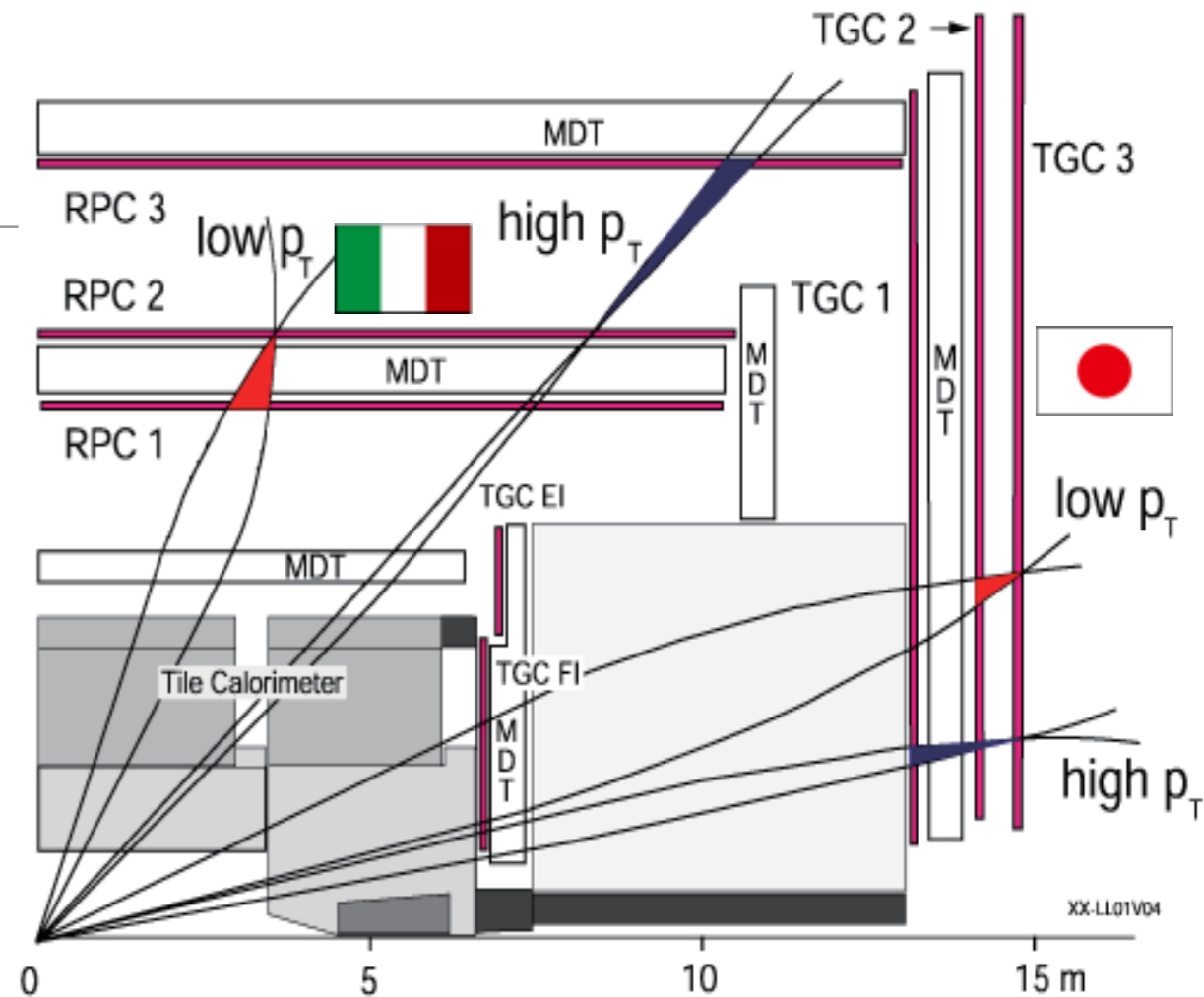
• 手法

- トロイド磁石による磁場で

「どれだけ曲がったか」を測定し、

横方向運動量(p_T)に対する閾値に応じたトリガーを発行する。

▶ この閾値を低くすれば物理に対するアクセプタンスが大きくなるが、レートも増大する。



京都 ATLAS グループ

• スタッフ

- 石野 → 2016.4 から東大 ICEPP へ。CERN滞在率 ~60%?
 - ✓ 京都メンバーとしてグループに残っている。
 - ▶ TileMuon プロジェクトリーダー、Phase2 アップグレード。
- 隅田 : 2016.2 まで、TGC グループリーダーとして CERN 滞在、2016.4 に帰国。
 - ▶ HL-LHC のためのバレル部ミュオントリガーの改良、TGC ソフトウェア開発、jet/etmiss グループデータマネジャー、ダイボソン解析(予定)、etc.

• 学生

- 田代(D4)
 - ▶ L1-Muon-EC への InnerCoincidenceの導入、Vector-Like Quark 探索。
- 救仁郷(D2)
 - ▶ TileMuon トリガー、BurstStopper、boosted boson のための large-R ジェットの測定。
- 赤塚(M2)
 - ▶ エンドキャップ部L1ミュオントリガー用新基盤の開発とトリガーロジックの構築、BurstStopper
- 野口(M2)
 - ▶ フォワード部ミュオン検出器(CSC)のハイレベルトリガーへの導入。

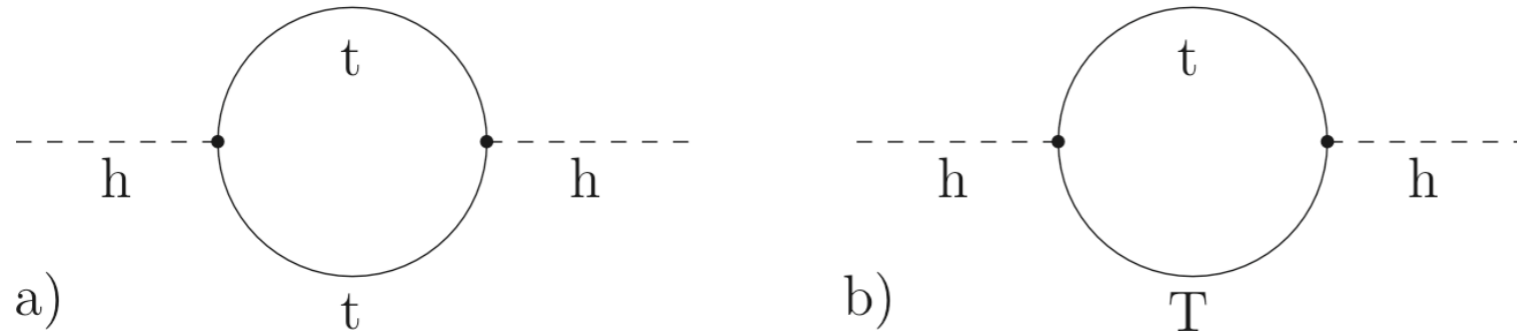
• 卒業生

- 加茂(2015.3)
 - ▶ b-ジェット エネルギー較正の不定性測定。
- 門田(2016.3)
 - ▶ di-muon トリガーのバックグラウンド排除のための研究。

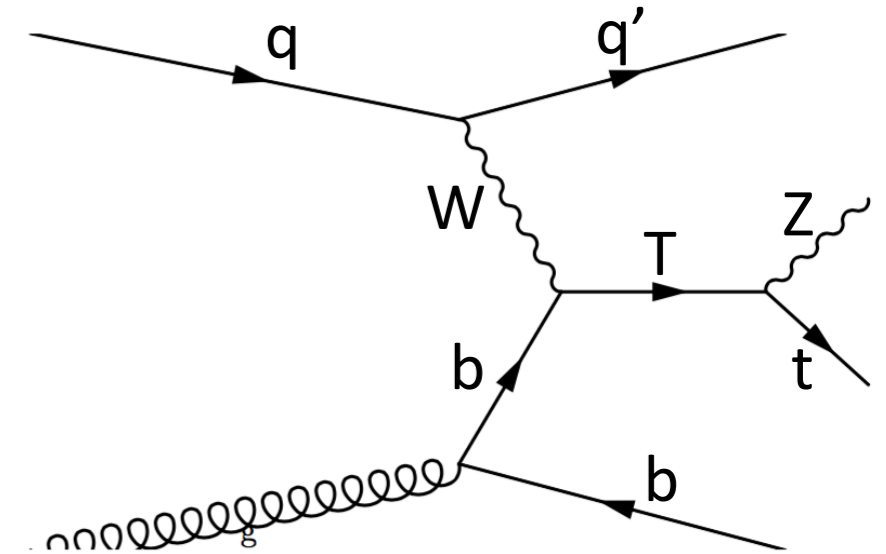
Vector-Like Quark 探索

田代

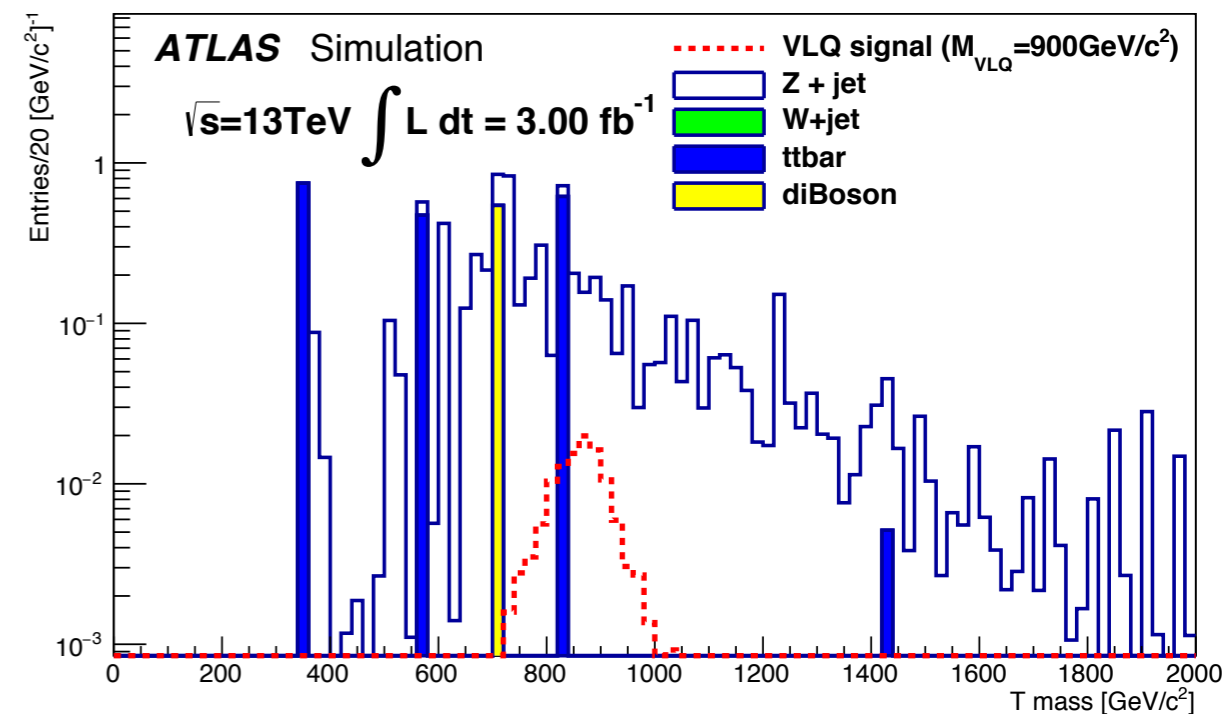
階層性問題の解決?



✓ ヒッグス質量の量子補正(a)における発散を T のループ(b)でキャンセルできる。



- 13 TeV データを使った解析が進行中。



Resonances from a new particle ?

• 2 γ 共鳴探索

- 750 GeV にピーク

▶ p-value: local 3.6 σ , global 2.0 σ

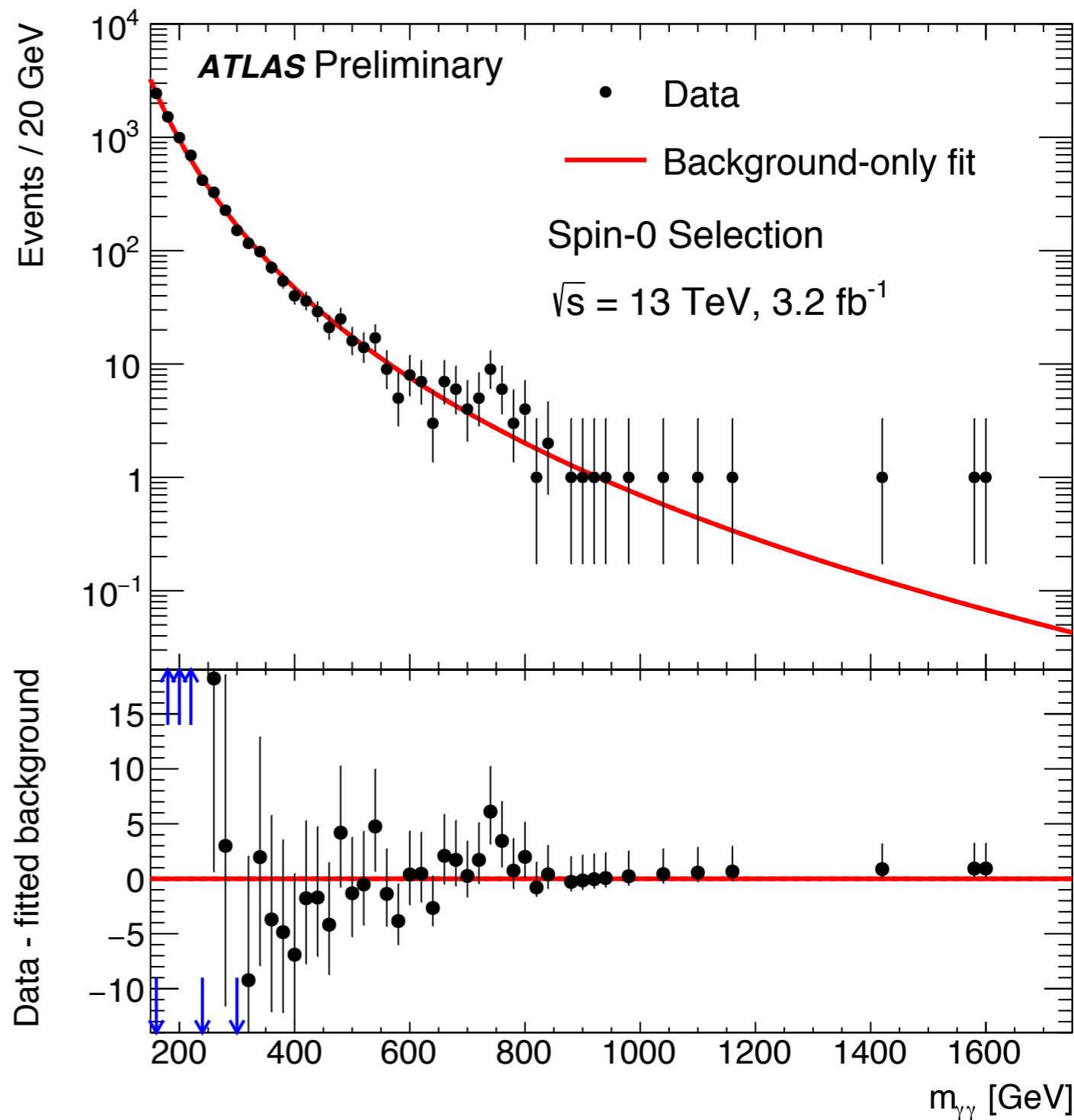
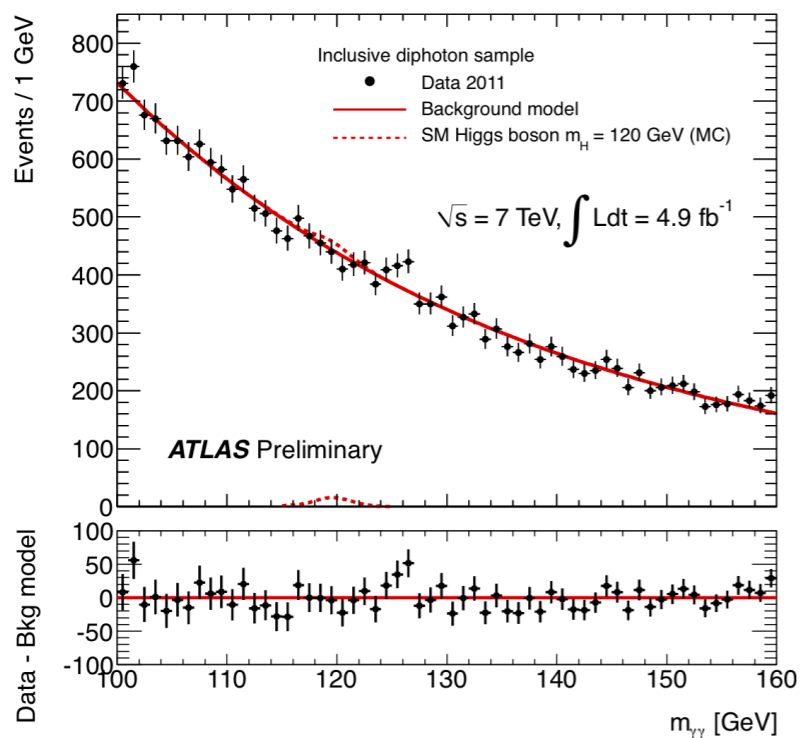
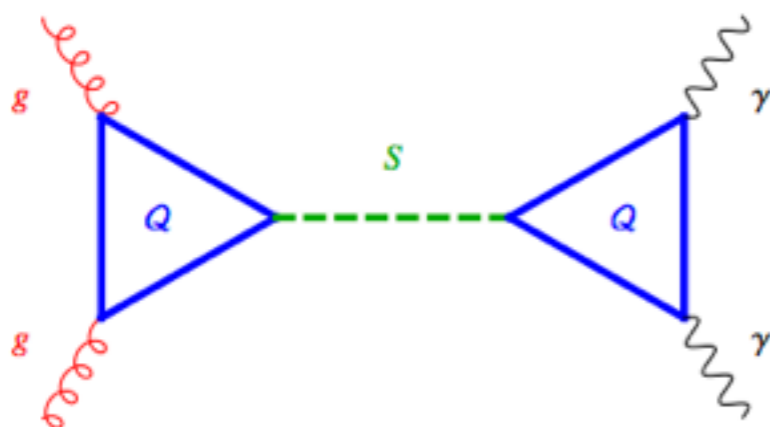
- CMS でも微かに兆候?

▶ 本物? 眉唾?

✓ c.f.) 2011年末の $H \rightarrow \gamma\gamma$: local 2.8 σ

- もっと沢山のデータで早急な確認が必要。

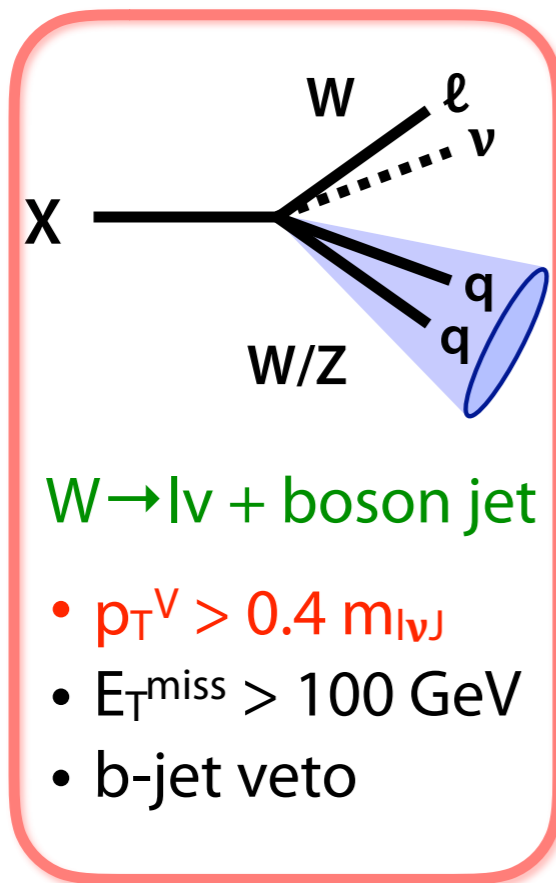
隅田、救仁郷



Resonances from a new particle ?

- 750 GeV 新粒子(?)の崩壊モード
 - ✓ width 40 GeV ?
 - **WW, ZZ**, ttbar, gg, HH, tautau

WW/WZ \rightarrow lvJ



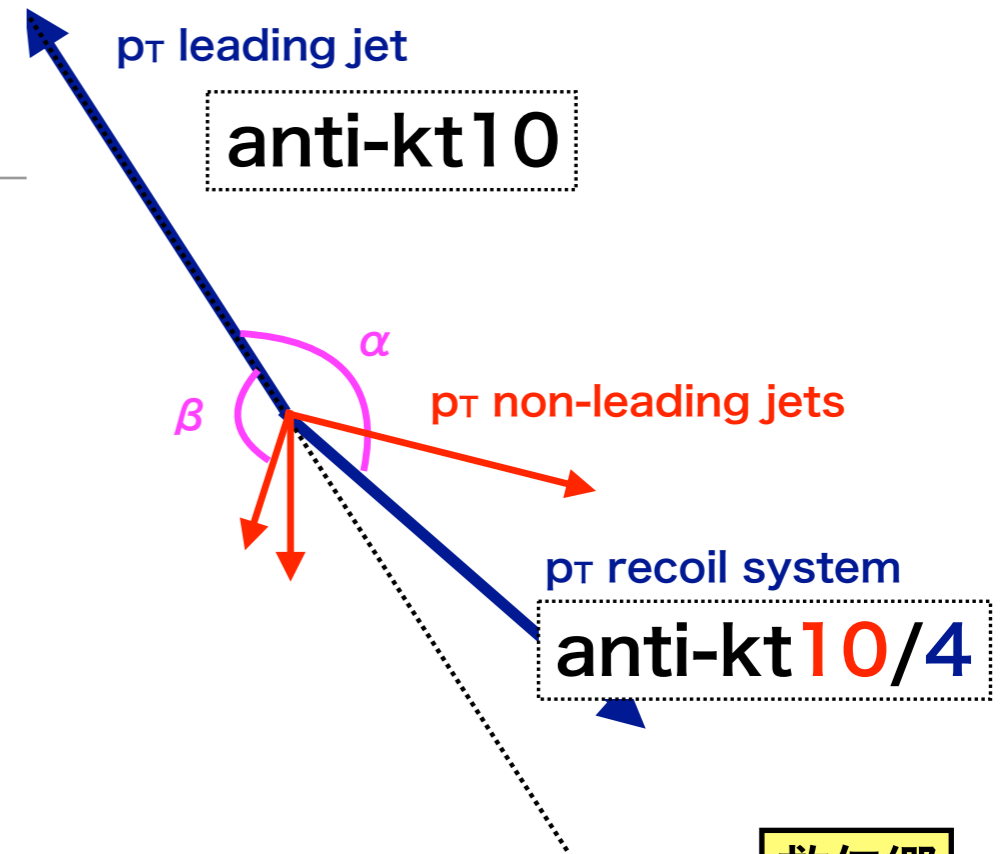
W \rightarrow lv + boson jet

- $p_T^{\nu} > 0.4 m_{lvj}$
- $E_T^{\text{miss}} > 100 \text{ GeV}$
- b-jet veto

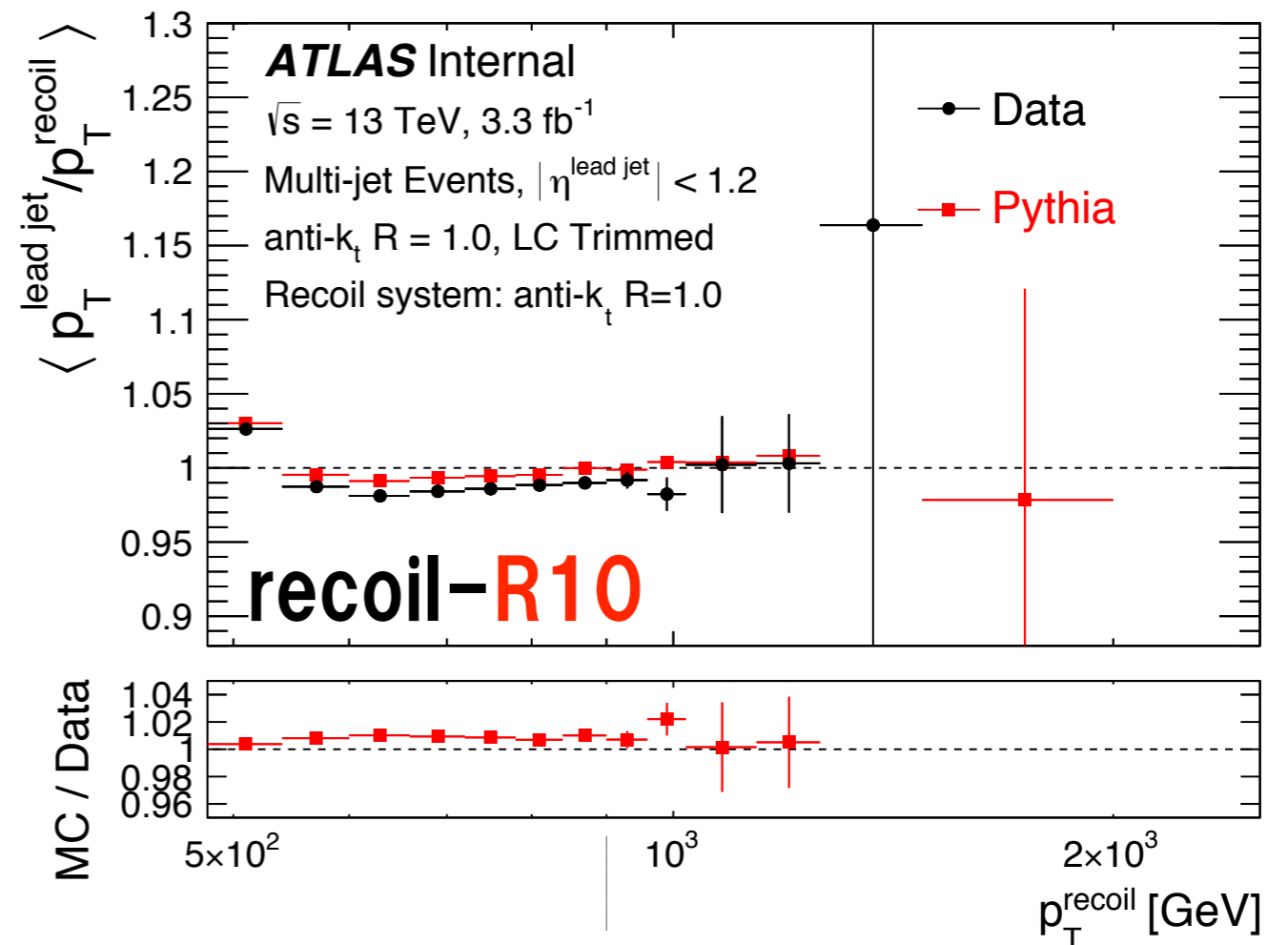
Internal plot

Large-R jet calibration

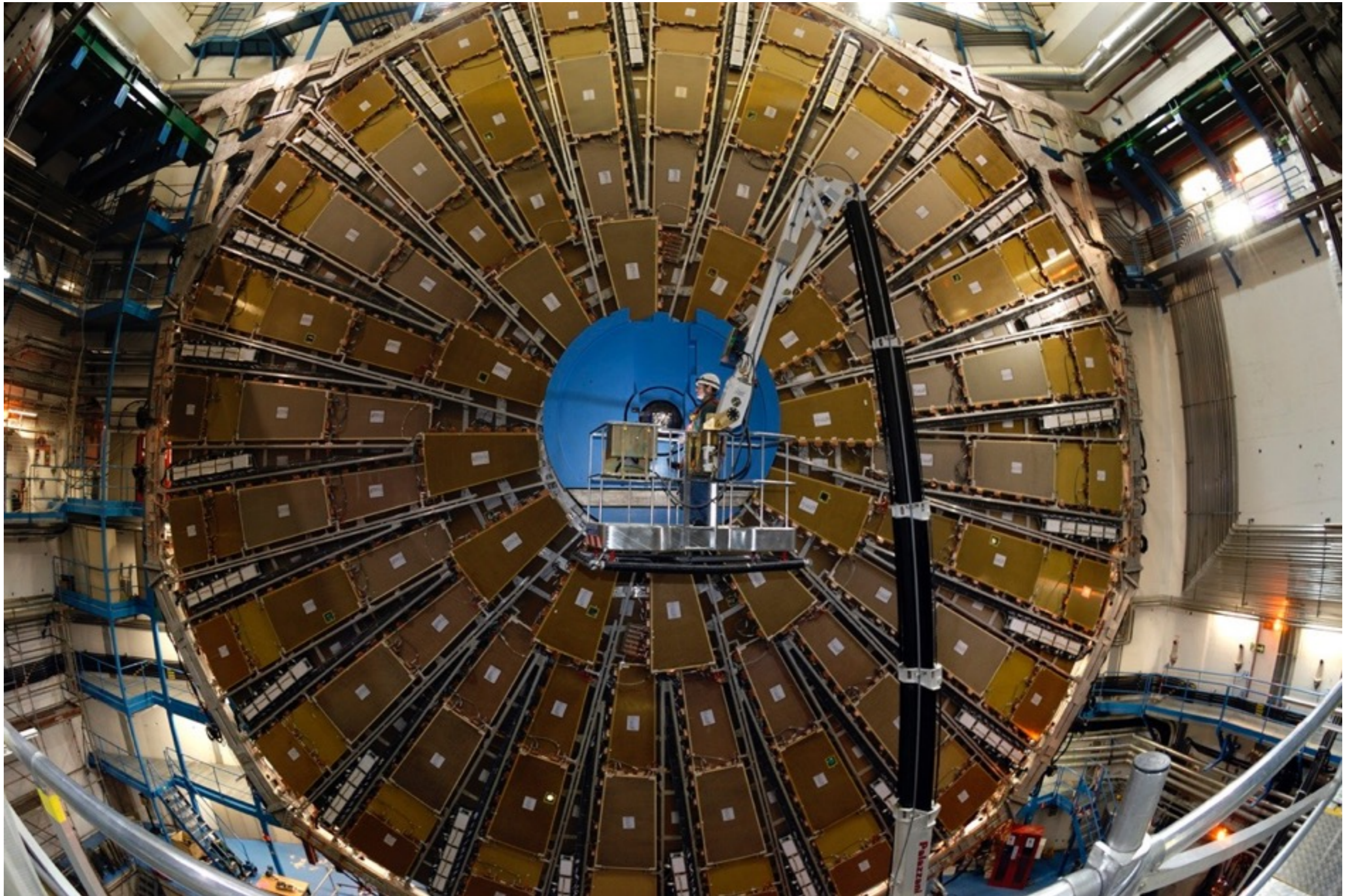
- 重い新粒子が崩壊してできたボソンによる「大きな」ジェット
 - エネルギーの精密な校正
 - 系統誤差の見積り
 - ▶ データを使ってやる
 - di-jet
 - Z/gamma + jet
 - **multi-jet**
 - ✓ ここを頑張って、一番高い p_T までエネルギーを精密に測定。



救仁郷



Level1 Muon Endcap trigger



Level1 Muon Endcap trigger

• 歴史

- 開発

▶ 南條, 石野, et al.

- 製作, 建設, 試験

▶ 石野, et al.

- 運転 (代表者)

▶ Run1 : 石野

▶ Run2 : 隅田

- 検出器の修理などのメンテナンスを行う。

- 実験中の様々な問題に対応する。

• 現在と今後

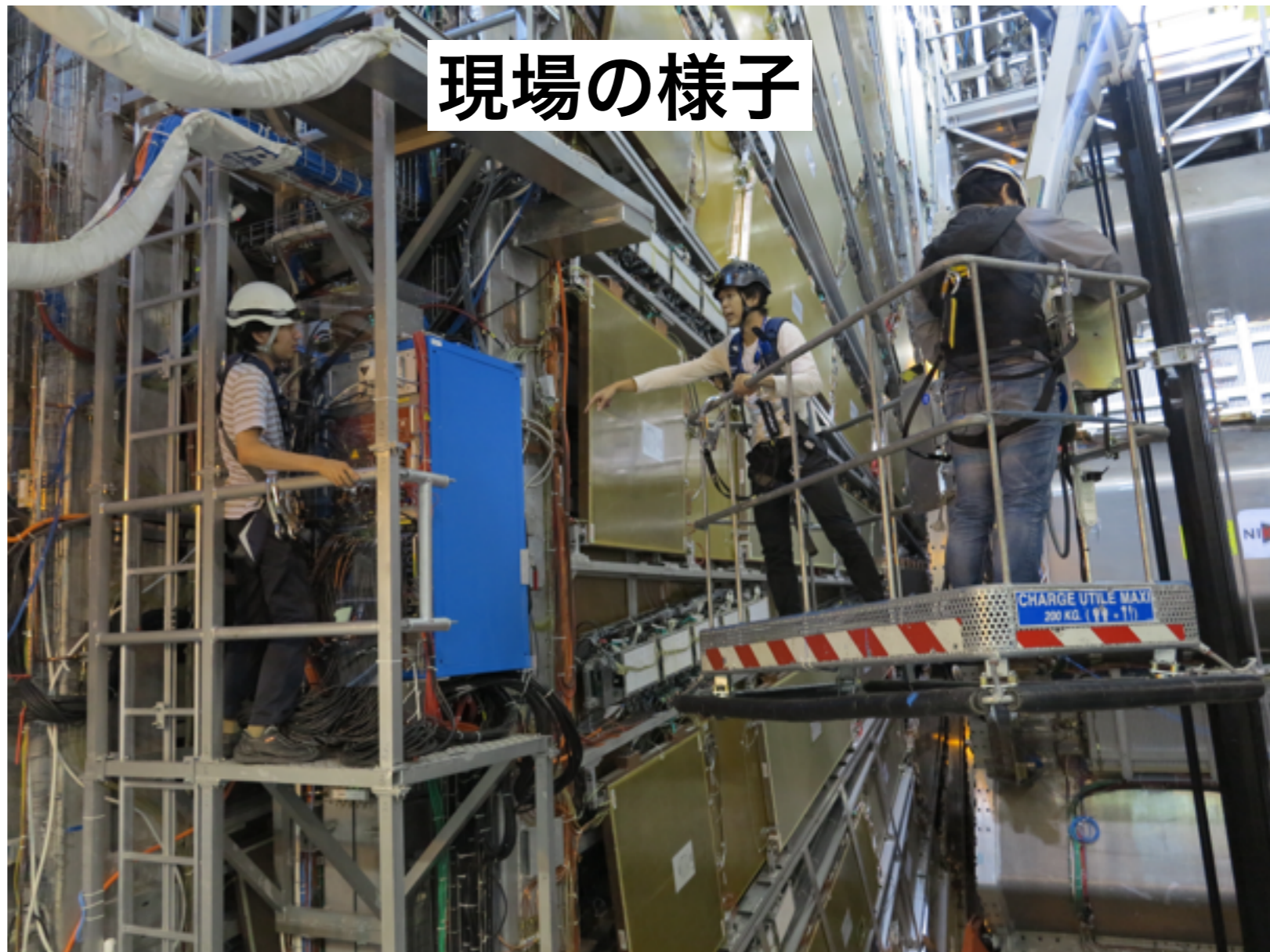
- トリガー性能の評価

- Run2 での改良

▶ TileMuon coincidence

▶ BurstStopper

- Run3 以降のアップグレード



L1-MU-EC upgrade

問題

- $|\eta| > 1.0$ のエンドキャップ部だけに、想定外に多くのミュオントリガーがあった。

▶ 原因: 衝突点起源でない(遅い)粒子

対策

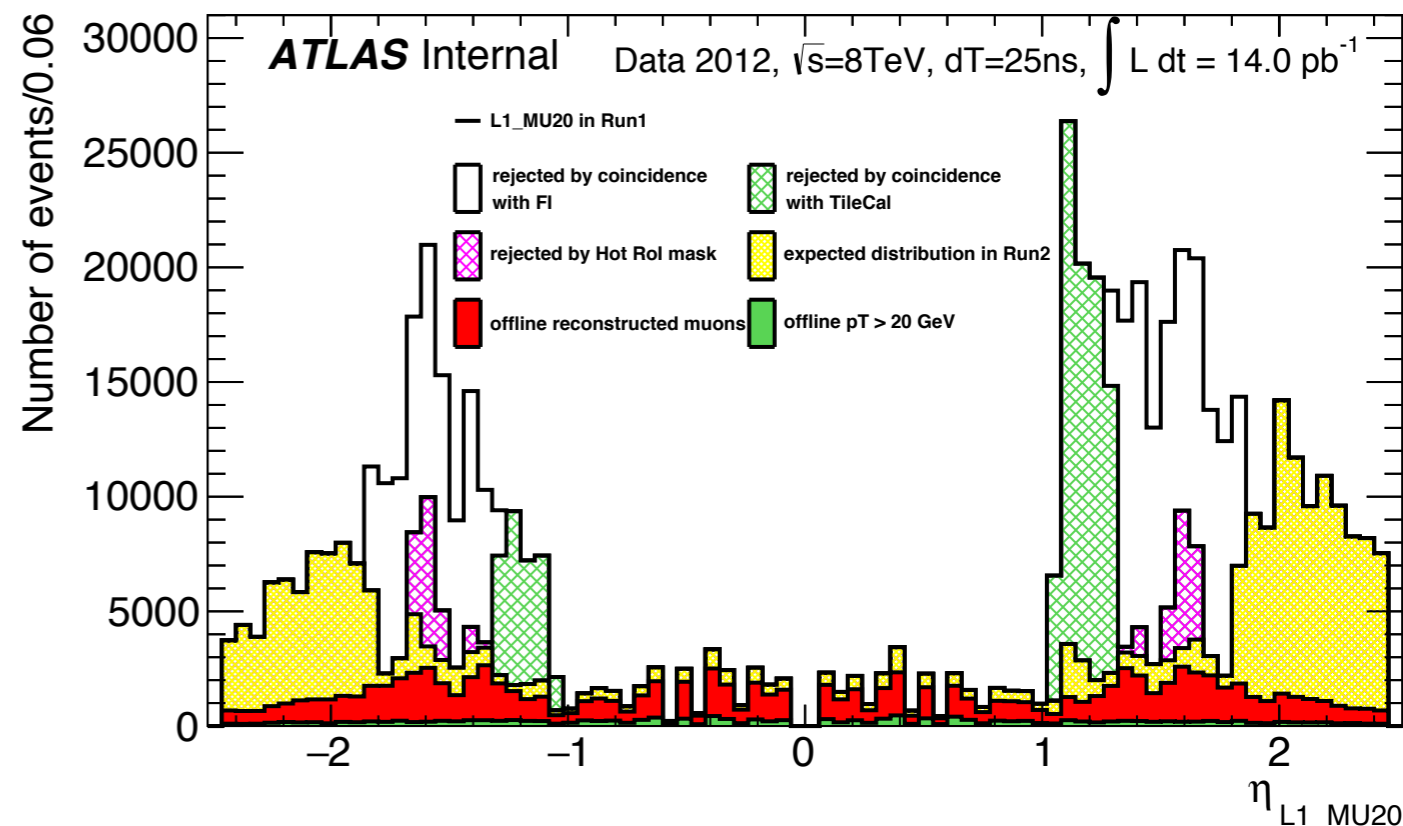
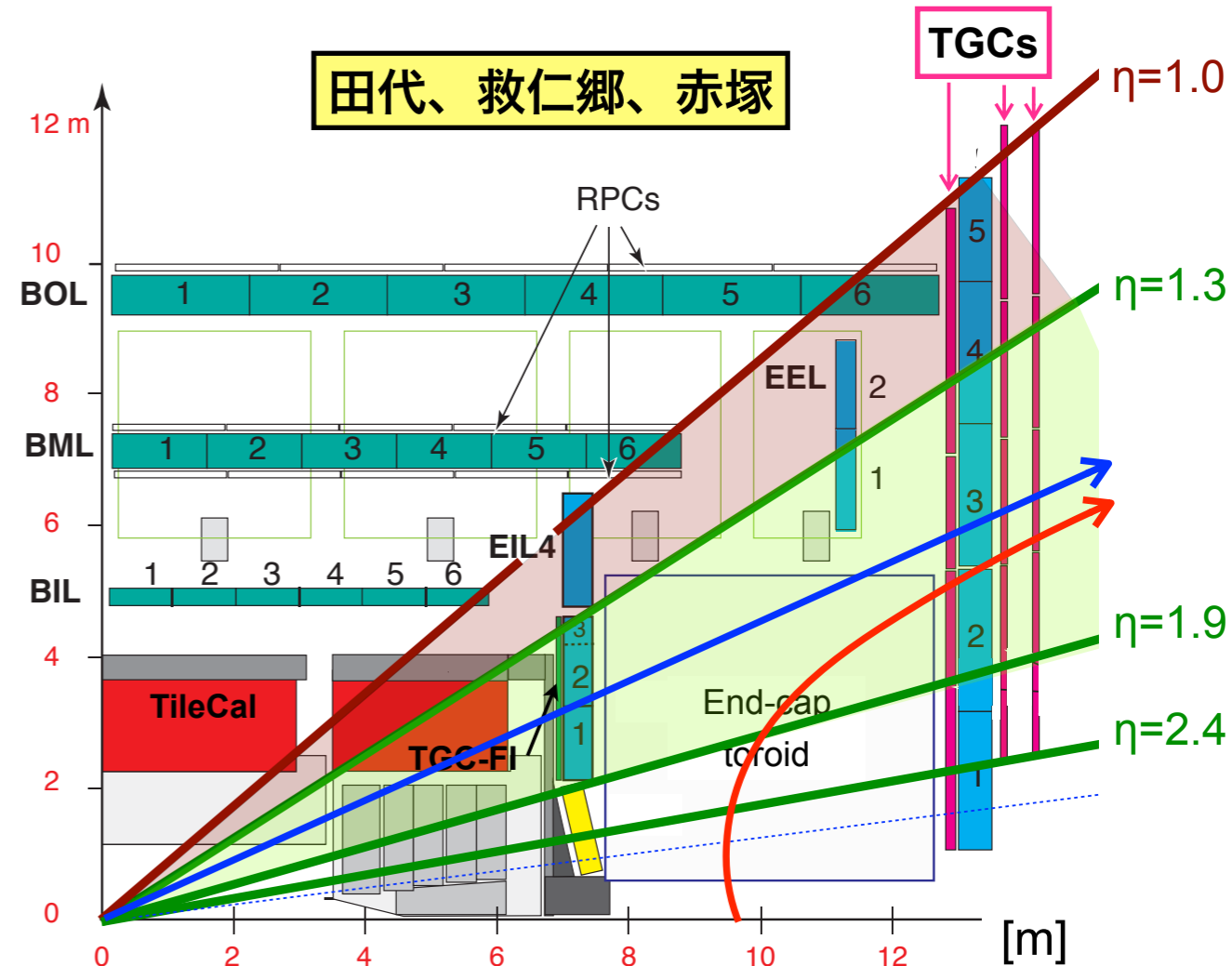
- 磁場よりも内側の検出器と TGC とのコインシデンスを取って、バックグラウンドを取り除く。

▶ Run2

- TGC-FI (田代)
- TileCal (救仁郷)

▶ Run3



- FI を New Small Whell という、方向情報も持った検出器で置き換える。
- ✓ トリガーボードも交換(赤塚)

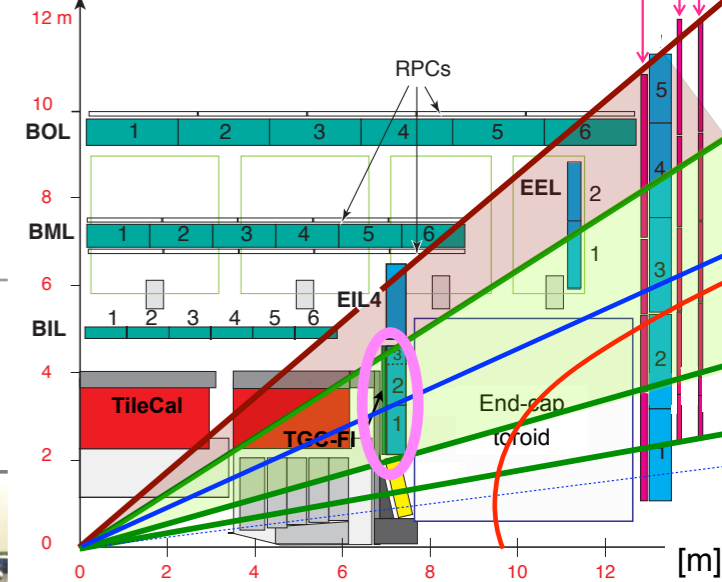
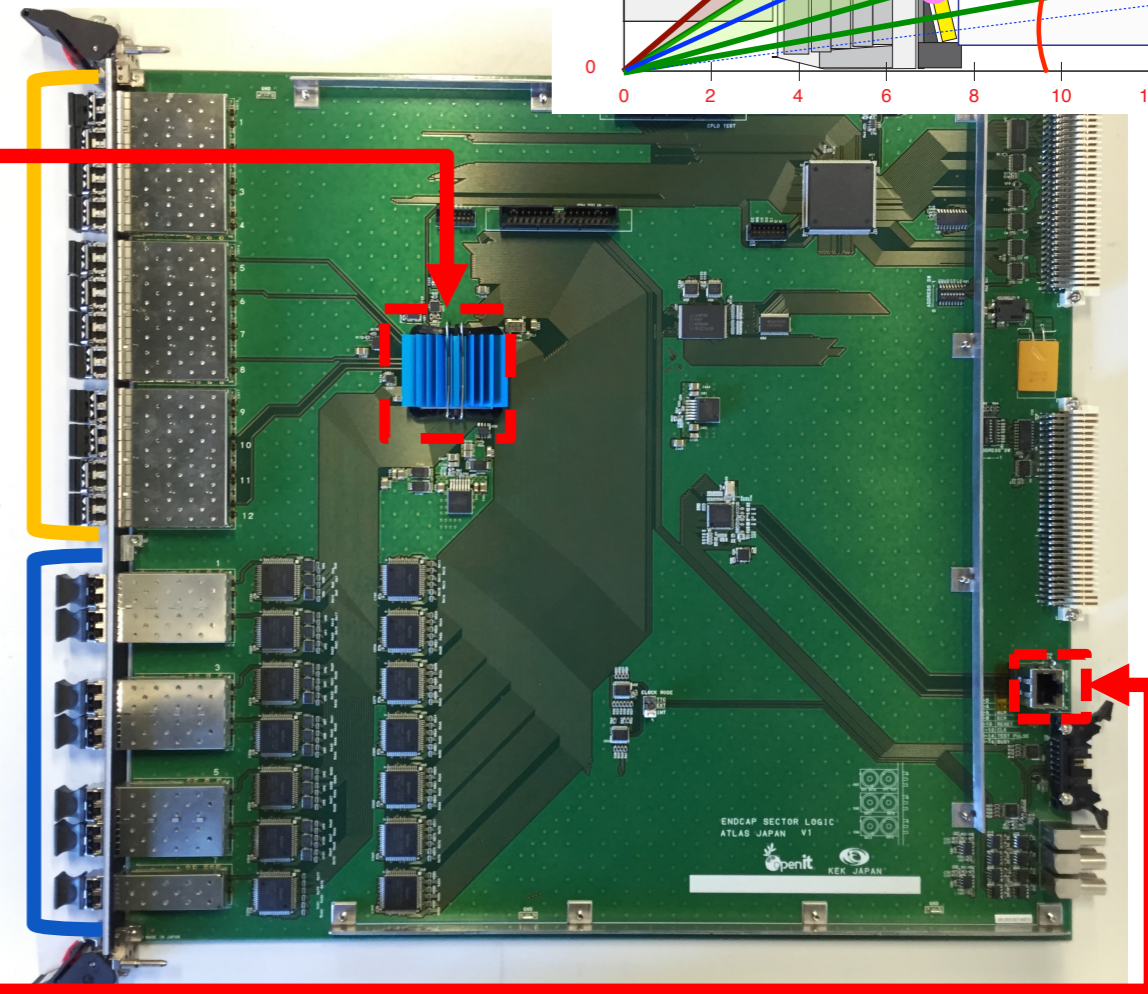


Run3 に向けた新しいトリガーボードの作成

New Sector Logic Board

機能

- **FPGA:** Xilinx社製 Kintex-7
 - メインのロジック処理を行う
- **GTX トランシーバー** 
 - FPGA に搭載されている
 - 6.4 Gbps、12 RX/ TX
 - NSWからの入力、MUCTPI への出力
- **G-Link レシーバー** 
 - 14 のRXポート、BW/ EI からの情報
- **SiTCP**
 - TCP プロトコルに変換し、Ethernet 経由でデータ送信

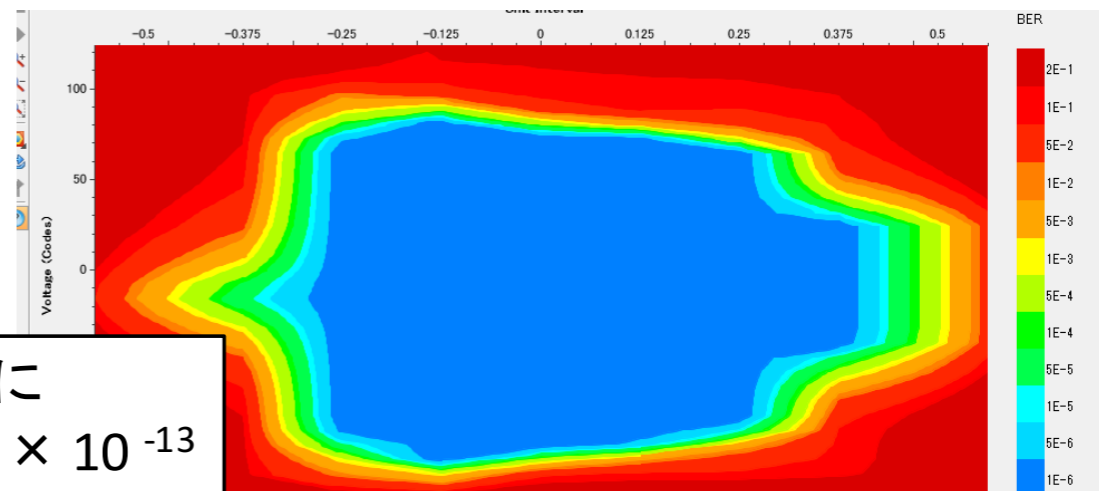


I/O 試験

- **すべてのI/O 試験完了、動作確認！！**
- -> 水上の発表 [19aCA-8]

赤塚

6.4 Gbps での通信に
Bit Error Rate $< 2.5 \times 10^{-13}$
で成功！

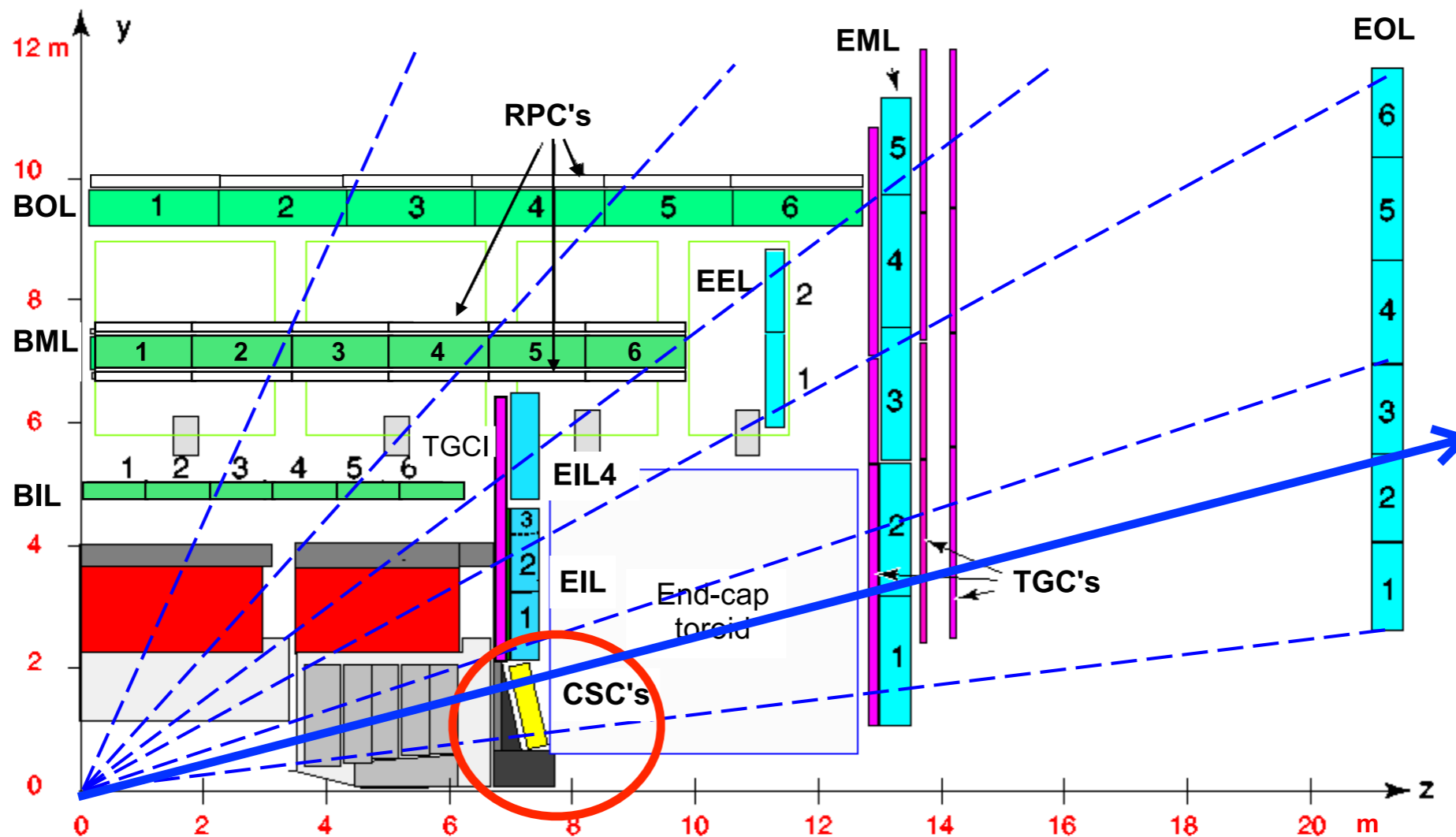


GTX 試験の結果

ミュオンオンハイレベルトリガー

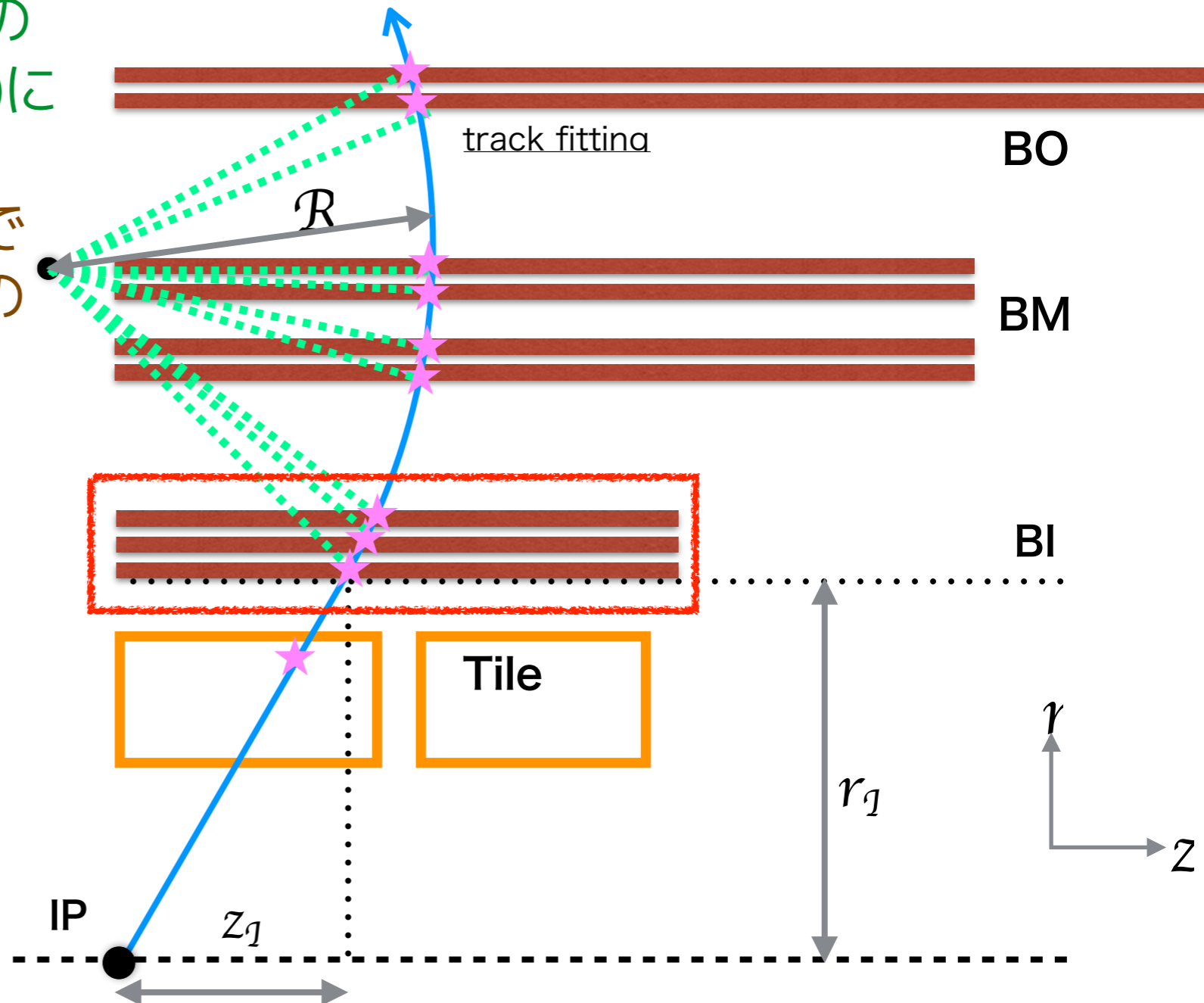
野口

- L1をパスしたミュオンに対してMDT(水色、黄緑)の情報を使ってpTを計算し、次段のトリガーを発行する。
 - ここに今まで使われていなかったCSCを導入する。



その他の新しいアイデア

- HL-LHC (Run4) では、バレル部の
ミュオントリガー検出器(RPC)に
新しい層(BI) 加わる予定。
 - これを使ってトリガーの時点で
トラッキングを行い、レートの
削減ができるか？
 - ▶ ローマ大学との共同研究

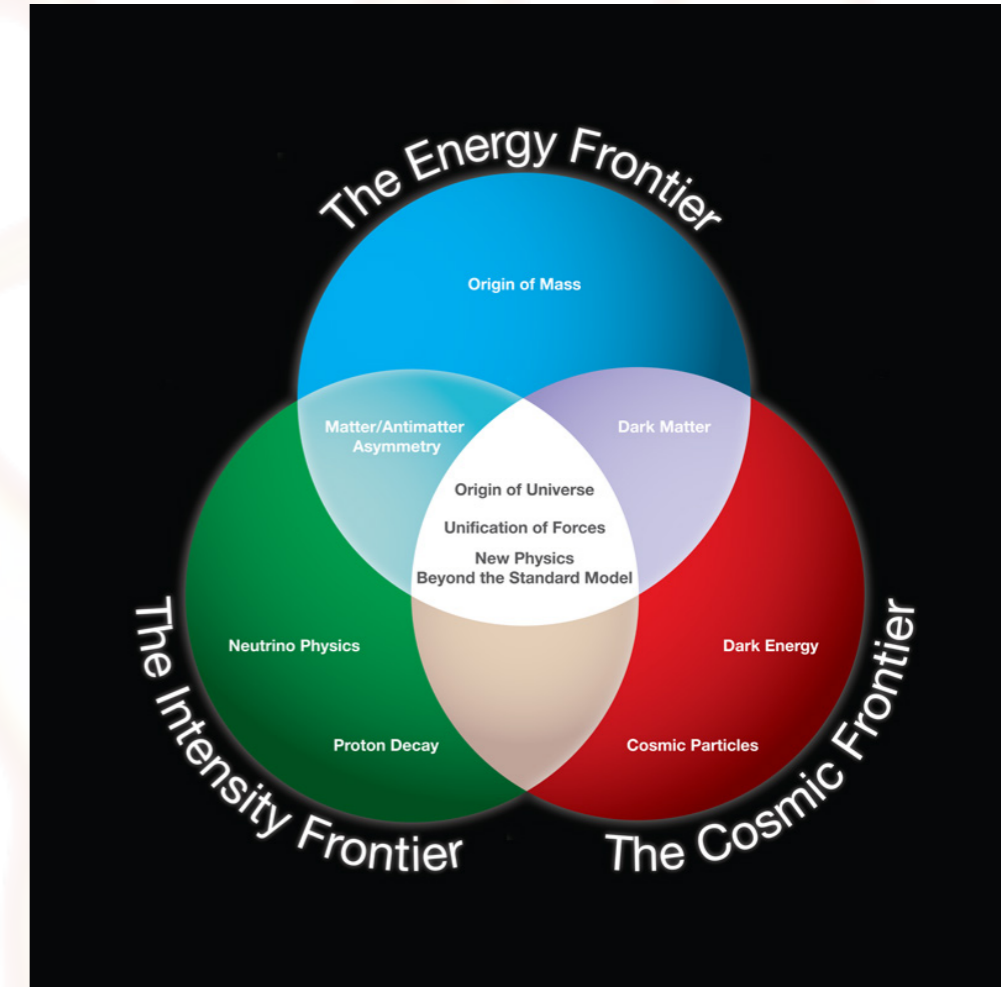


まとめ

- CERN の LHC 加速器は(少なくとも2030年まで)世界の高エネルギーフロンティア。
 - 唯一のヒッグスファクトリー。
 - 新粒子の直接発見を行える場所。
- 京都 ATLAS グループ
 - LHC での新物理の発見を目指して
 - ▶ ヒッグスの精密測定のためのミュオントリガーの改良
 - ▶ 新粒子の探索
 - ✓ を精力的に行っている。
 - 具体的な研究項目
 - ▶ Run3 での L1ミュオンエンドキャップトリガーアップグレード
 - NewSmallWheel のための New SectorLogic の開発
 - ▶ Run4 での L1ミュオンバレルトリガーアップグレード
 - RPCトラッキングトリガーの開発
 - ▶ Run2 での研究アイテム
 - ミュオンハイレベルトリガー
 - ジェットのエネルギー不定性測定

これらの仕事をきっちりやって、博士過程で物理解析に移行する、というのが理想。

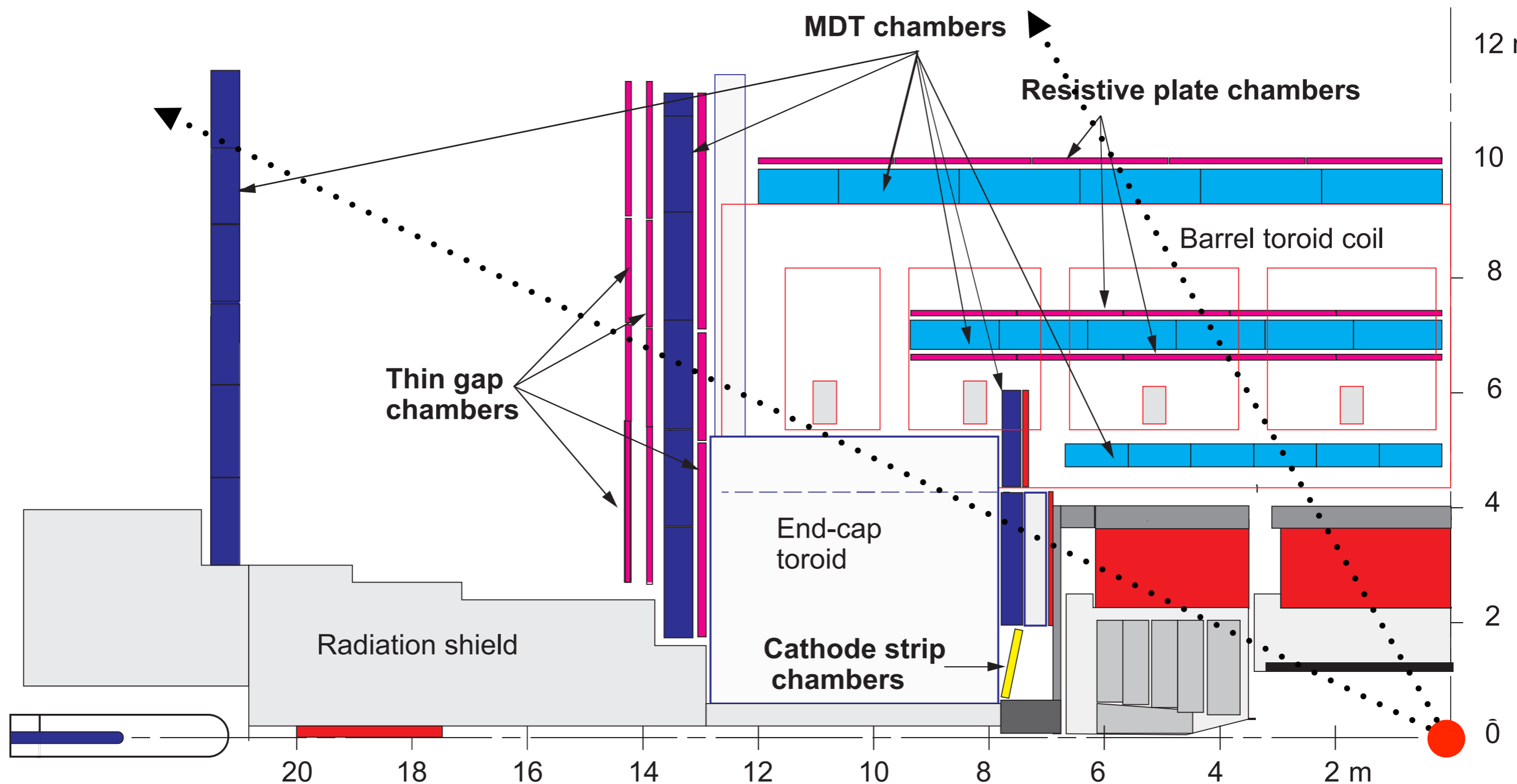
- ✓ Run2 の全データが D1 のときに出揃う。
完璧なタイミング。(ちょっと良すぎる)



Backup

ミュオン検出器

- 各検出器の全層の情報からミュオンの位置と運動量を測定する。



Trigger system in ATLAS (Run1)

- 陽子バンチの交差頻度: 40 MHz

- 衝突を全部見てどれを残すか判断するのは不可能。

- ▶ 多段トリガーを用いる。
- ✓ 効率よくレートを落とし次のレベルに渡すことが必要。

- レベル1トリガー (L1)

- $\sim 1\mu\text{sec}$ でトリガー判定を行う必要がある。

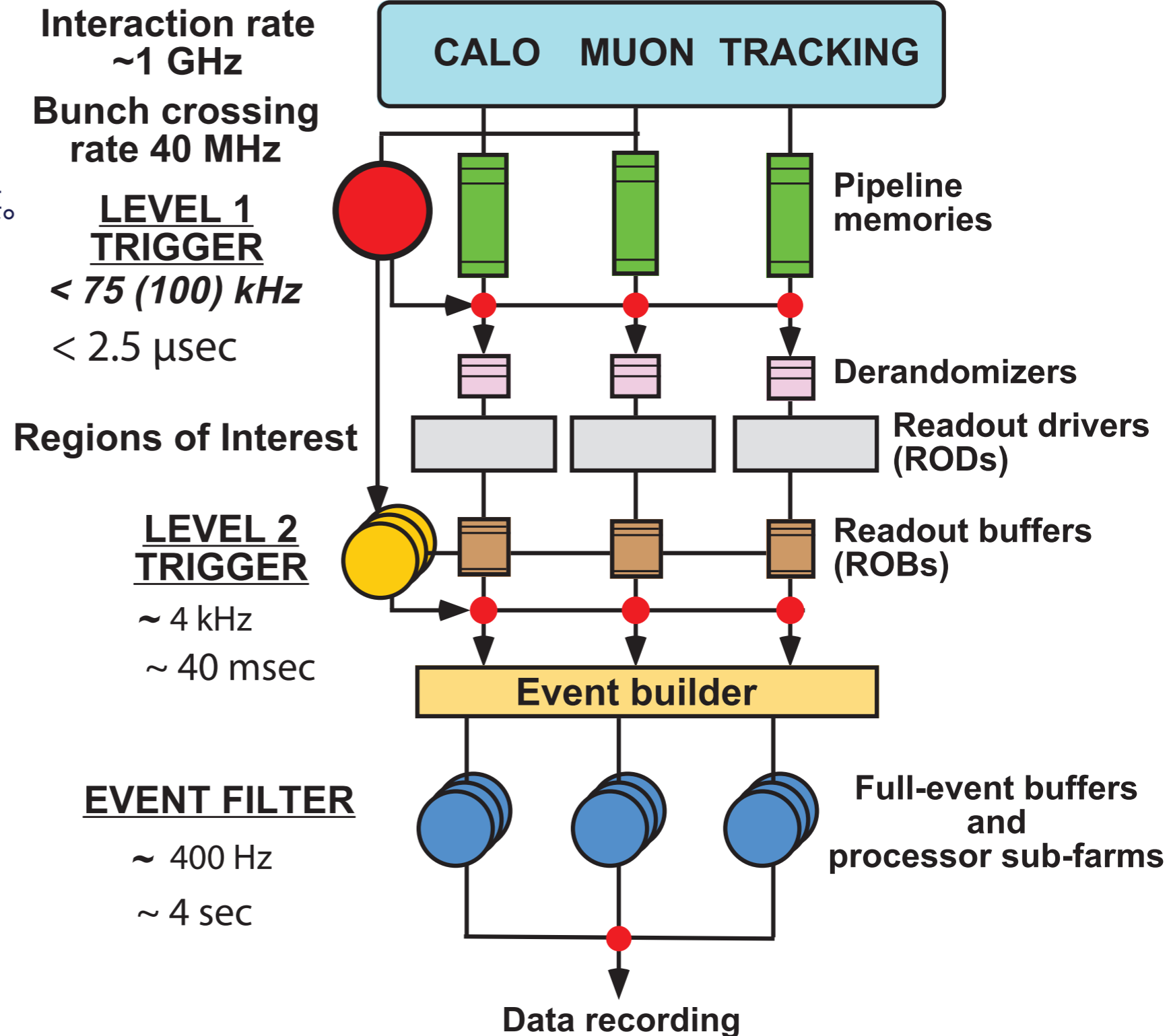
- 専用ハードウェアを用いる。

- ▶ Full bandwidth :
100 kHz in Run2

- 高レベルトリガー

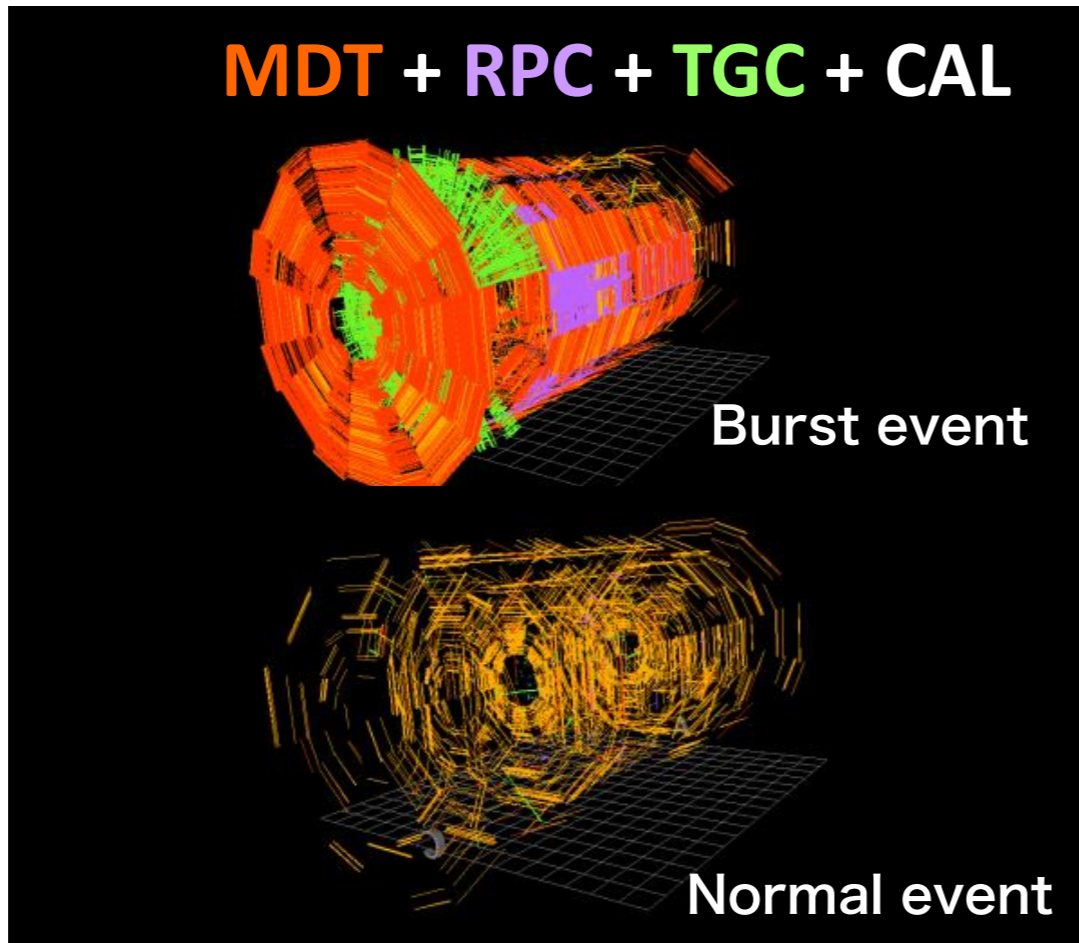
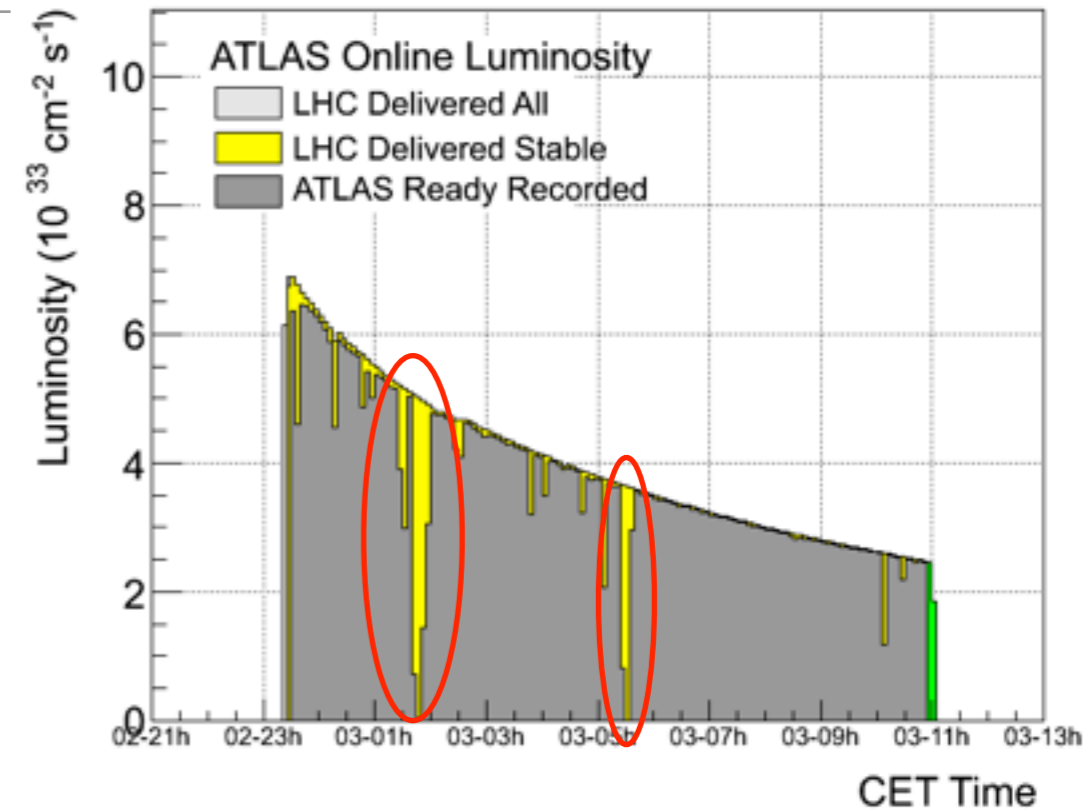
- CPU (PC)でのトリガー判定。

- ▶ レベル2 (L2) : $\sim \text{kHz}$
- ▶ イベントフィルタ (EF): $\sim 100 \text{ Hz}$
 - ✓ Run2 では "HLT" として統合された。

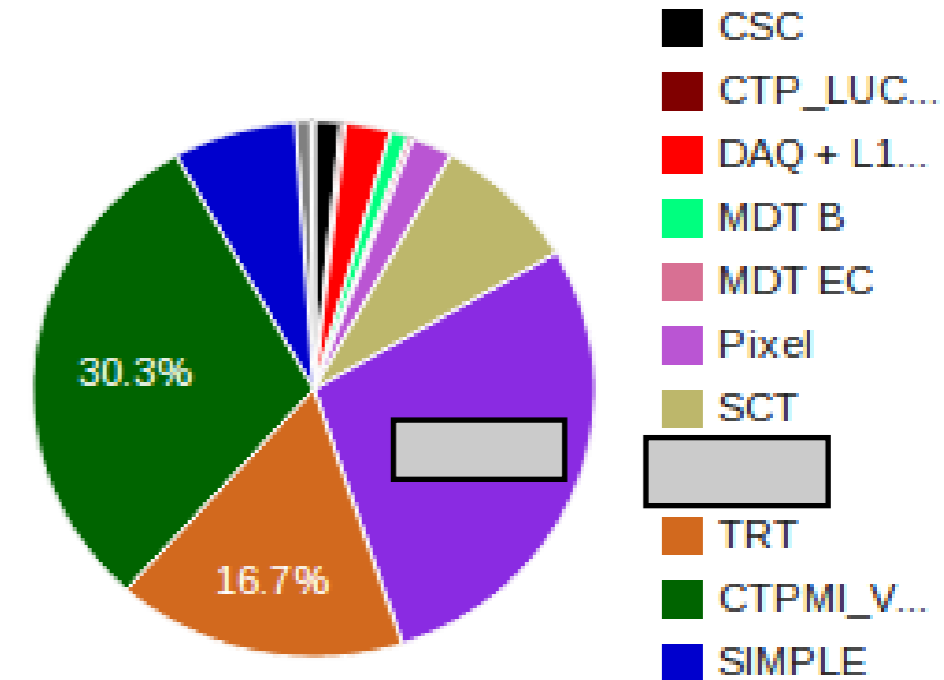


バースト事象

- Run1 での ATLAS data taking における大きな dead time を作った原因
 - ~ μsec にわたってミュオン全検出器に多量のヒット。
 - システムの自動復旧が不可能な程の大規模なエラーが起こる。
 - ATLAS が 100% busy 状態に。
 - TGC の完全リスタート: ~4分。
- 2012年データに 4イベント発見。
 - 物理事象ではなく、大きな電氣的なノイズであるようだ。
 - ✓ “Burst event” と呼ぶ。しかし原因は不明。
 - 何故か LHC の lumi が上がると頻度が増える??
 - ▶ もっと沢山のデータが必要 → 専用トリガーの開発。
 - 長時間トリガーを出し続けるのを止めないといけない。
 - ▶ → L1 veto 機能の追加。



Dead time sources (seconds)



Burst stopper

- New features in Run2

- SL にバースト判定ロジック

- ▶ バースト状態ではトリガーを出さないようセクター毎に設定する。

- “Burst Merger” board

- ✓ 72 NIM inputs, 4 outputs : 開発、インストール完了。

- ▶ 全 SL からの信号を統合して TGC レベルでのバースト判定を行う。

- ▶ バースト信号 → CTP に直接入力

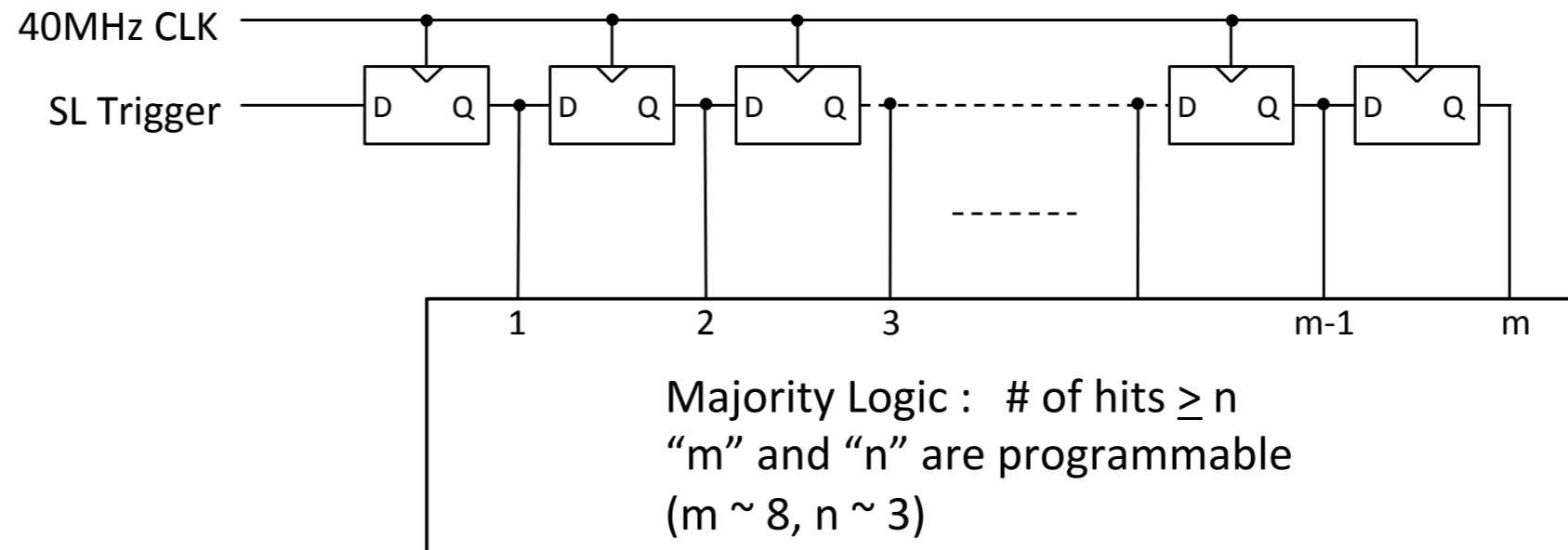
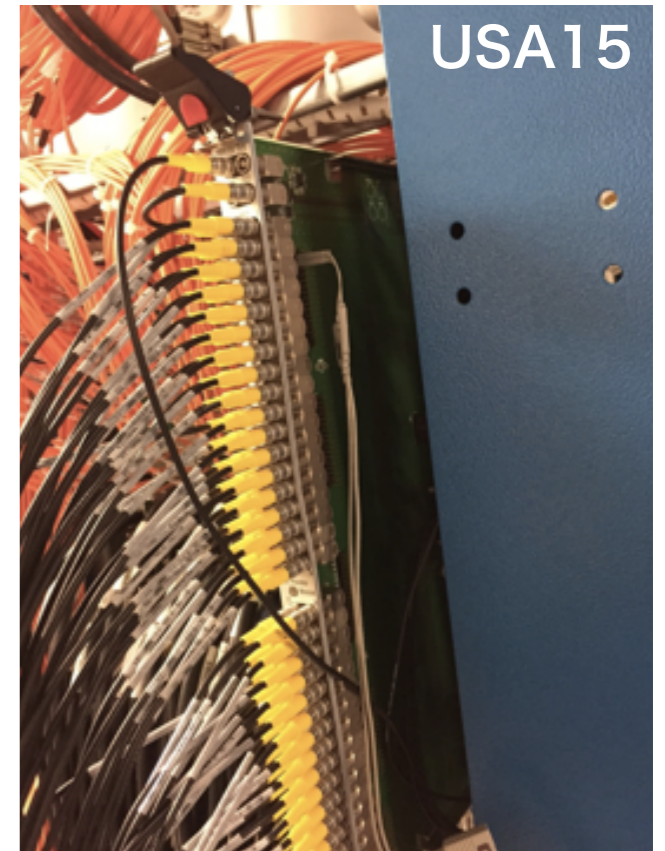
- トリガー

- ✓ 専用 menu: L1_TGC_BURST, 専用 data stream: calibration_TgcNoiseBurst

- ✓ **2015年ランで導入。**

- L1 veto

- ✓ 別信号で送っているがまだ monitoring mode 。



↓ Trigger output VETO
(duration of veto : programmable)

Burst event 2015

- 約 200 事象を取得。
- 2016年ランに向けて
 - L1 veto を稼働させるためのバースト判定条件の最適化。
 - ✓ これがないとまともに ATLAS を運転できなくなる可能性もあるので Lumi が上がる前 ($<1e34$) にやってしまう。

