



# LHC-ATLAS実験Run-3 に向けた トリガー判定回路と 新トリガーロジックの開発

## 0. Introduction

1. トリガー判定回路の開発
2. トリガーロジックの研究  
まとめ

---

京都大学 高エネルギー物理学研究室 修士2年  
赤塚 駿一

## 0. Introduction

1. トリガー判定回路の開発
2. トリガーロジックの研究  
まとめ

# Introduction

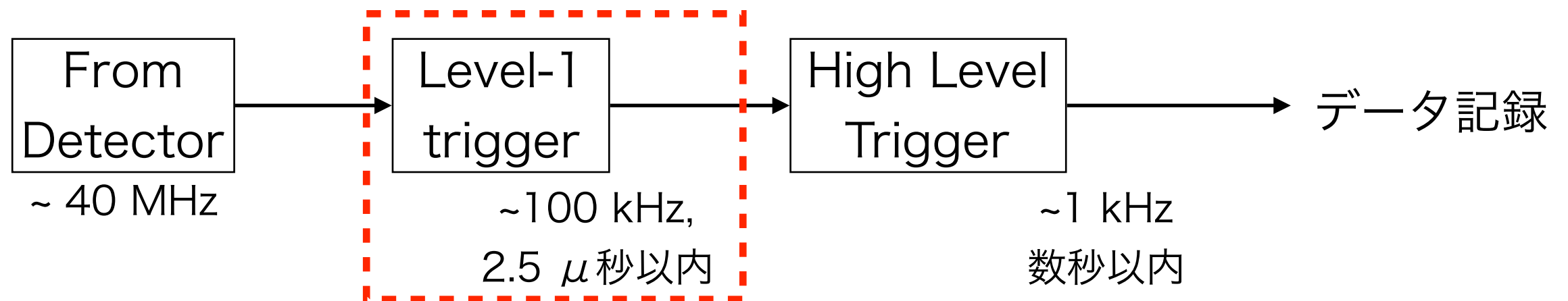
---

## ◆ トリガーの必要性

- ▶ LHC の陽子バンチ交差は40 MHz, 記録できるイベントは~1 kHz  
→ 興味のあるイベントを判別し, 選択的に取得したい.
- ▶ 例: W ボソンから崩壊したミュオンは比較的高い横運動量 ( $p_T$ ) をもつ  
→  $p_T$  の高いミュオンがあるイベントは, データを取ることにする
- ▶ Run-3 では**ルミノシティは現在の2倍** → **トリガーの性能は非常に重要**

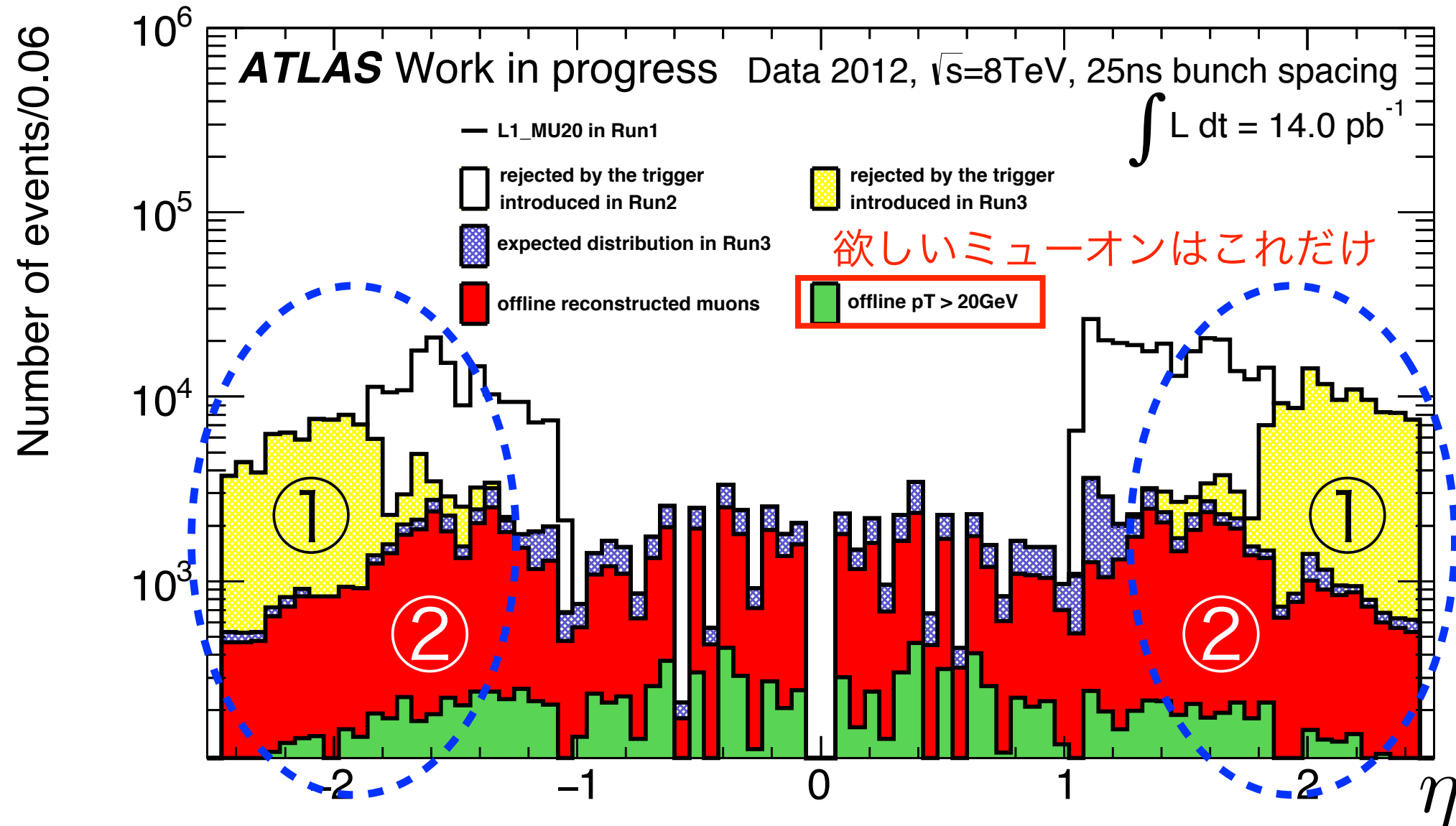
## ◆ ATLAS 実験のトリガーシステム

- ▶ 2段階に分けてトリガー判定を行っている。
- ▶ Level-1 で高速ハードウェアトリガー, High Level で精密なソフトウェアトリガー



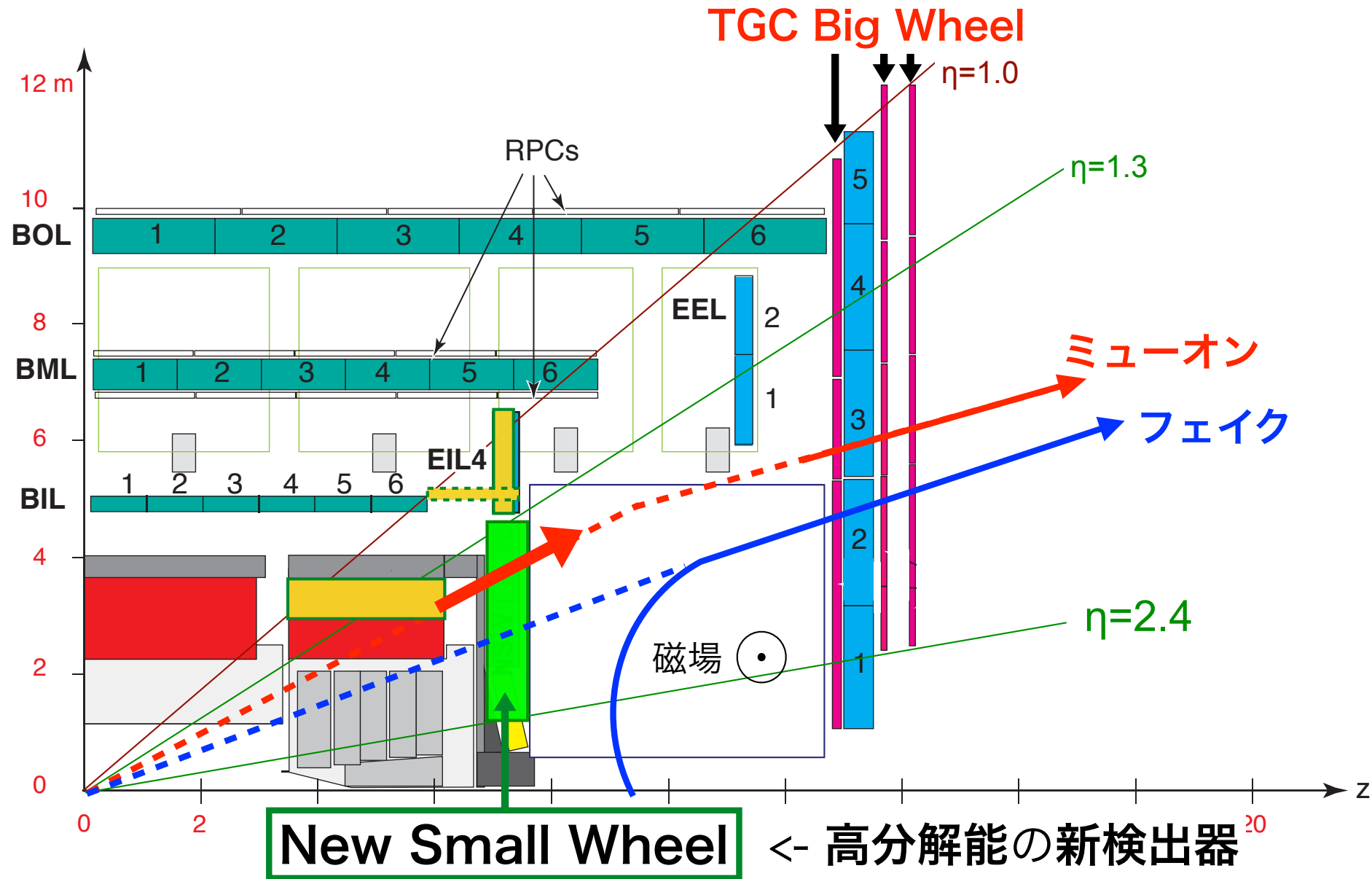
# Level-1 ミューオントリガー

- ◆ ミューオントリガーでは,  $p_T$  の大きいミューオンが存在する事象を選別して取得する
  - ▶ 20 GeV の  $p_T$  閾値のLevel-1トリガーで取得したミューオンの  $\eta$  分布



- \* 衝突点由来でない粒子による **フェイクトリガー** (①に多い)
  - \* 閾値より **低い  $p_T$  のミューオンによるトリガー** (②に多い)
- が大きな割合を占める

- ◆ TGC Big Wheel での曲がり具合 による  $p_T$  計算  
+ 磁場内側の検出器との コインシデンス



- ▶ **New Small Wheel (NSW) の情報を用いてフェイクを削減し**, Run-3 での要求値、Level-1ミュオントリガーレート **15 kHz** を達成する
- ▶ **低い $p_T$  のミュオンに対してもNSW の情報を用いて削減** → 後述

0. Introduction

1. トリガー判定回路の開発

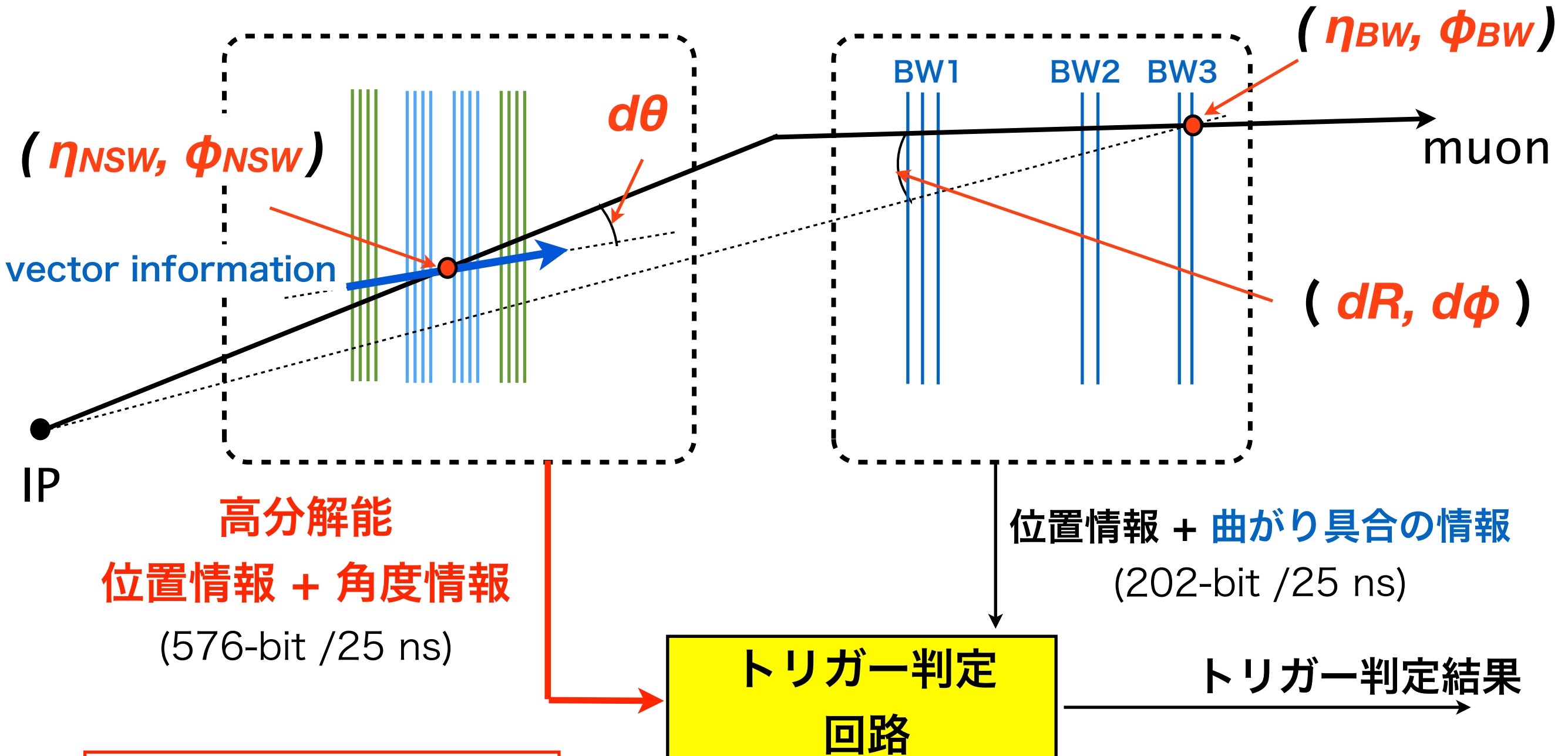
2. トリガーロジックの研究  
まとめ

# NewSL ボードの開発

---

## New Small Wheel

## TGC Big Wheel



高分解能  
位置情報 + 角度情報  
(576-bit / 25 ns)

位置情報 + 曲がり具合の情報  
(202-bit / 25 ns)

高速データ通信

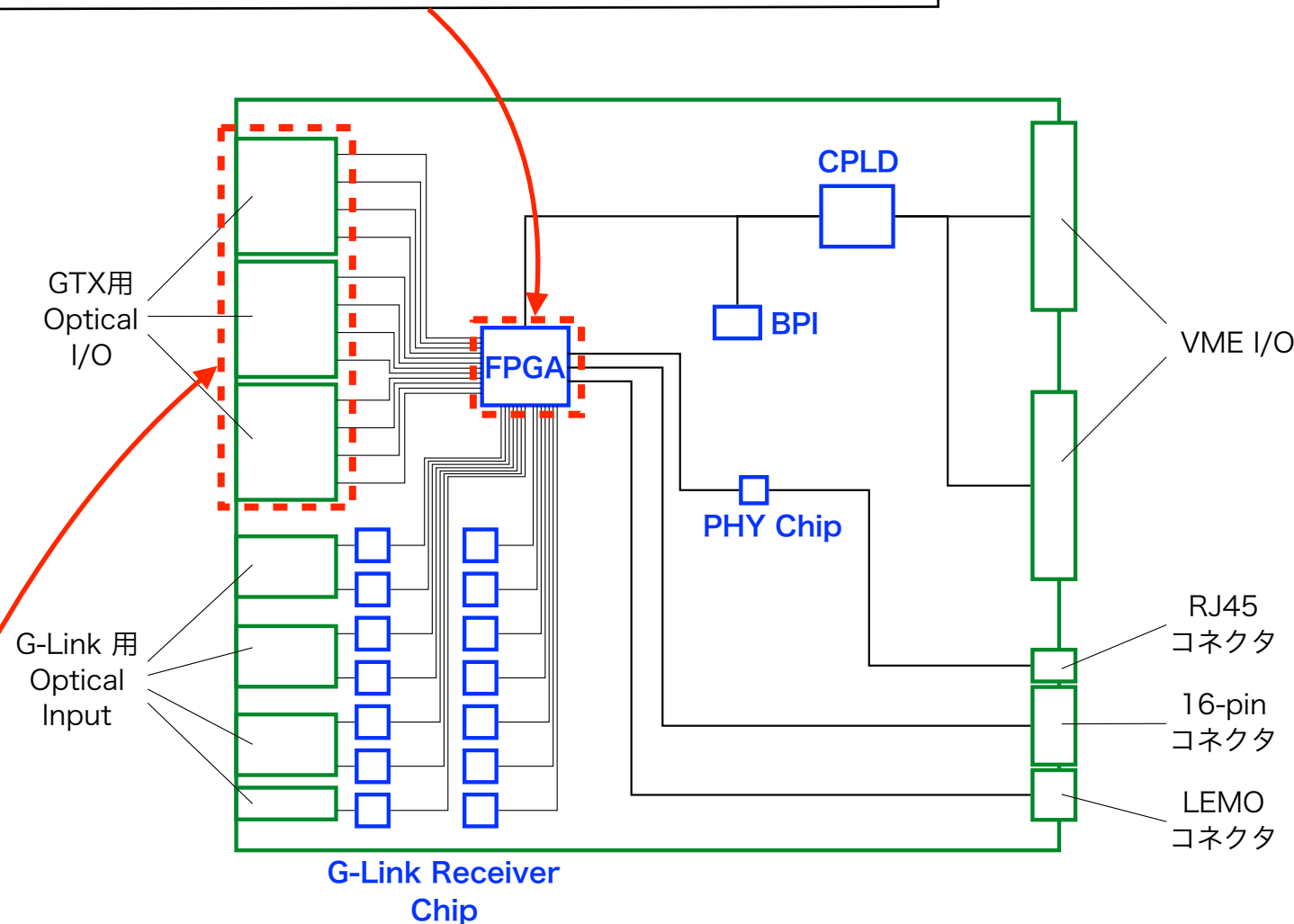
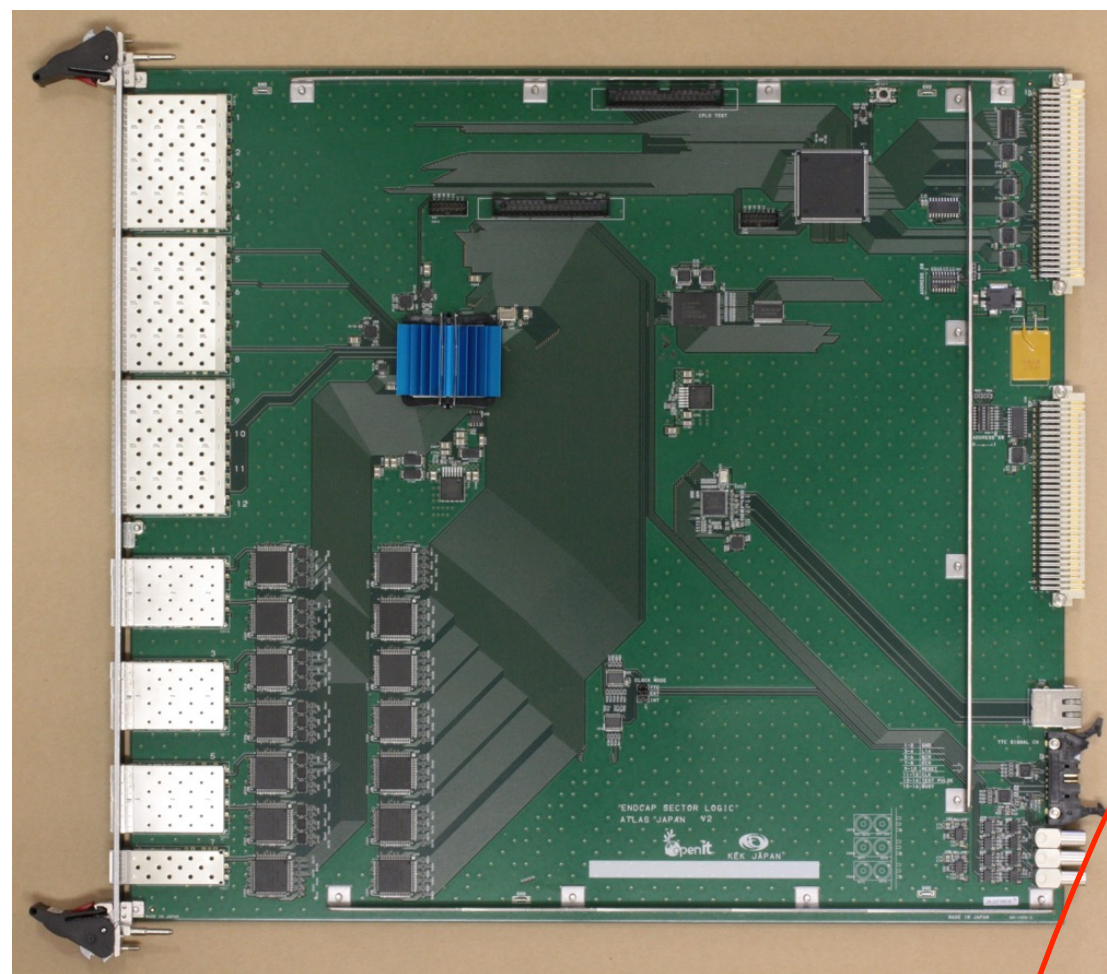
大規模トリガーロジック



# トリガー判定回路：NewSL

- ◆ 2016年3月：新トリガー判定ボード“NewSL”のプロトタイプボード5枚が完成

Xilinx社のFPGA（書き換え可能な集積回路）を用いて大規模トリガーロジックを実装



高速トランシーバ GTX を用いた  
光通信 I/O を12 本実装  
最大 **10 Gbps** × 12 = **120 Gbps**  
での通信が可能

テストを行い、高速通信の確立、  
及びその他チップ・入出力の  
動作を確認した



0. Introduction

1. トリガー判定回路の開発

2. トリガーロジックの研究

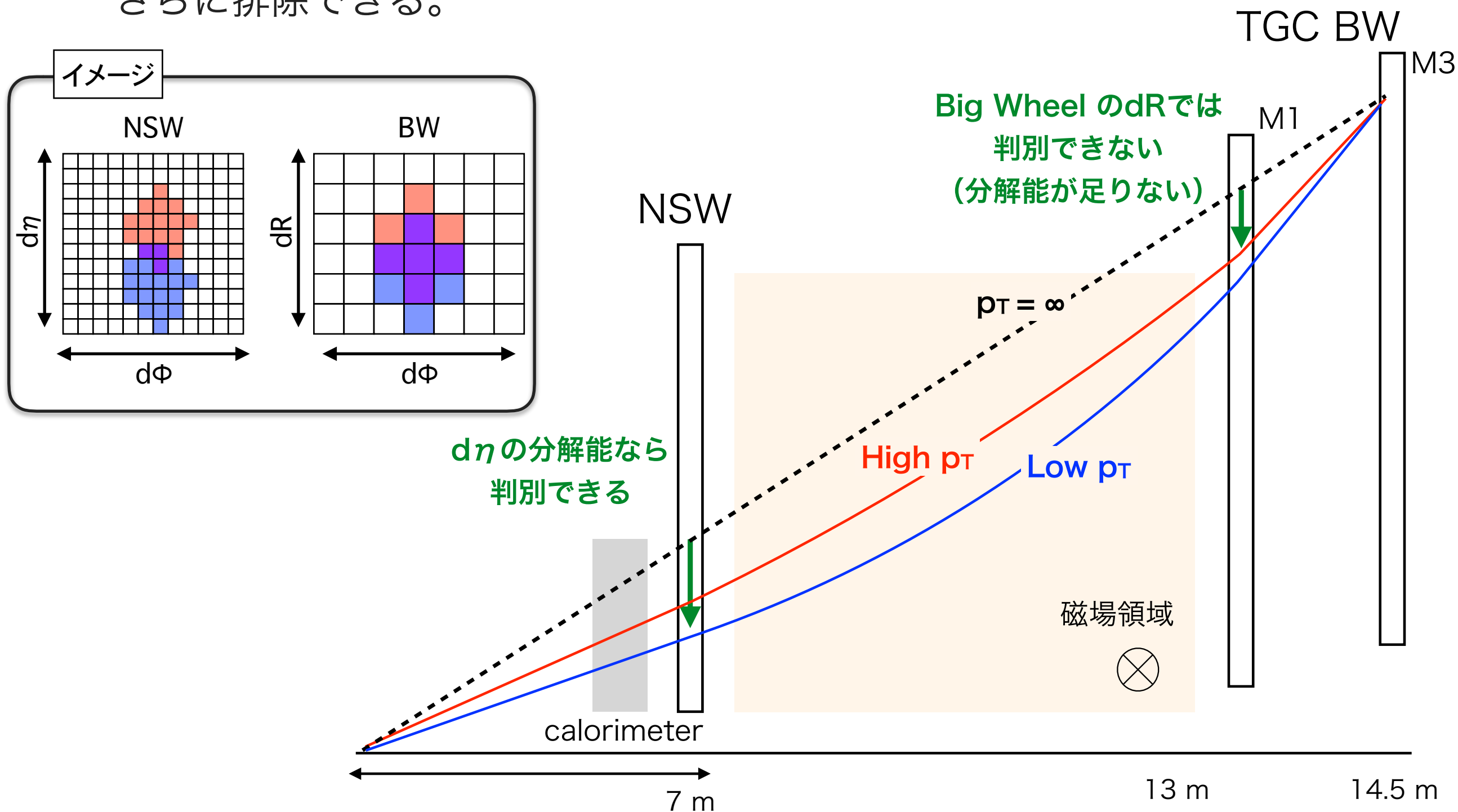
まとめ

# トリガーロジックの研究

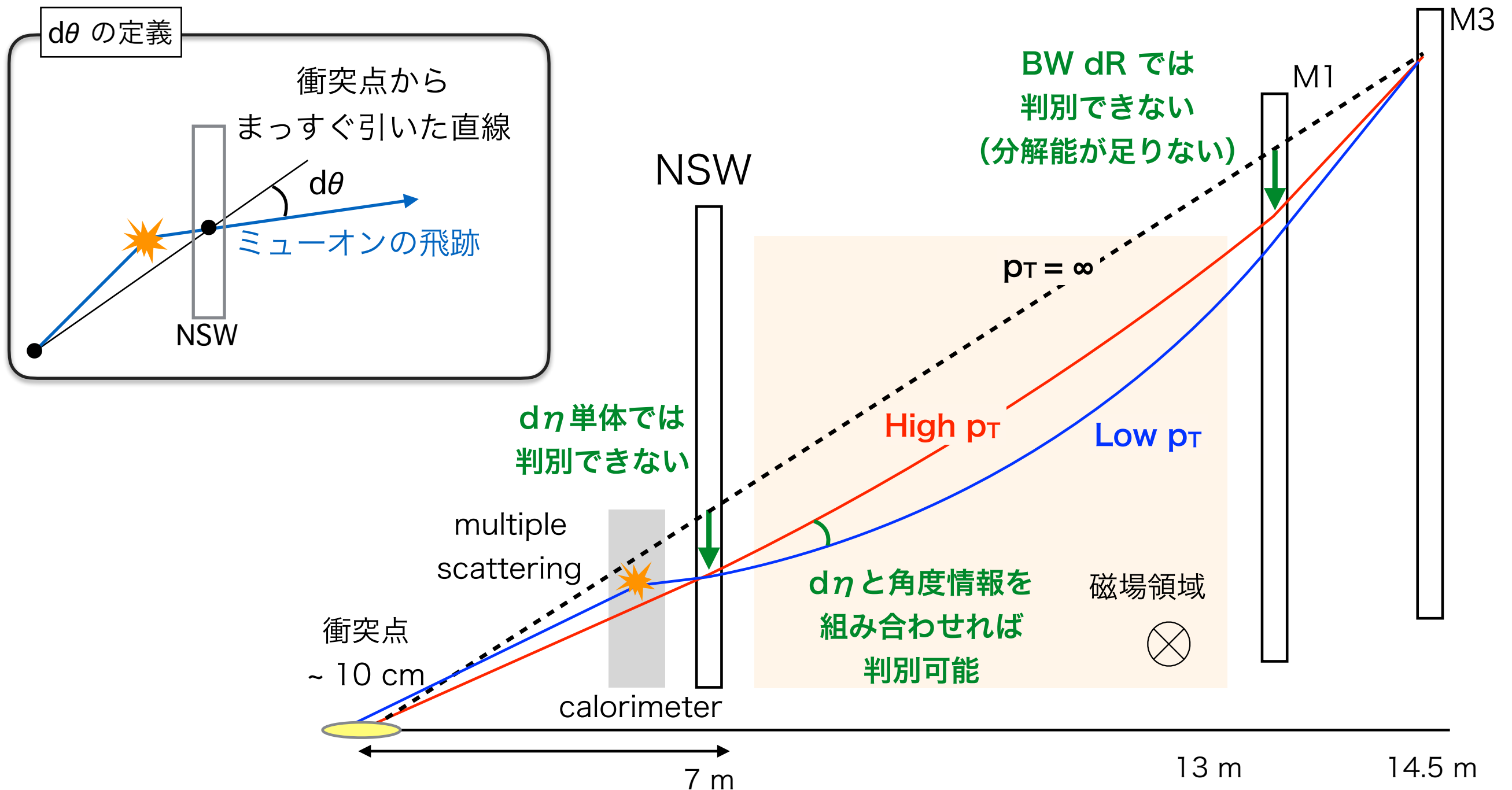
---

## ◆ NSW のヒット位置の情報は横運動量の判定能力を持つ

- ▶ BW の曲がり具合の指標,  $dR$  は分解能が高くない (典型的に  $d\eta \sim 0.02$ )
- NSW の高い分解能 ( $d\eta \sim 0.005$ ) を用いれば, 低い  $p_T$  のイベントをさらに排除できる。



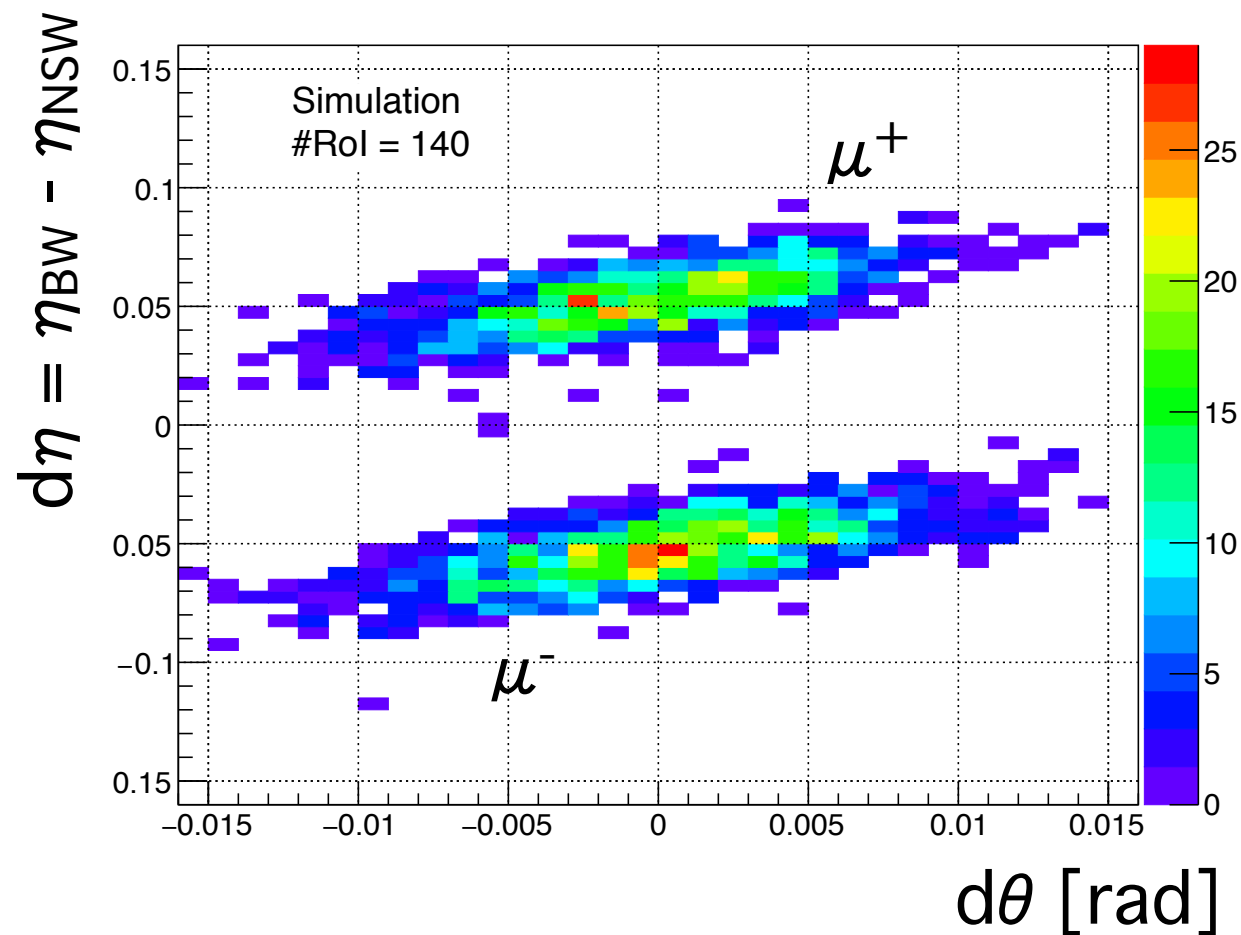
- ◆ 角度情報を用いれば, 低い $p_T$ の事象を削減できる
  - ▶ 下の図に示すように, 角度情報 $d\theta$ は磁場の内部の情報を持つ
  - ▶ 位置のみでは区別できない低い $p_T$ のイベントを判別できる  
-> 角度情報を用いた新しいロジックの開発



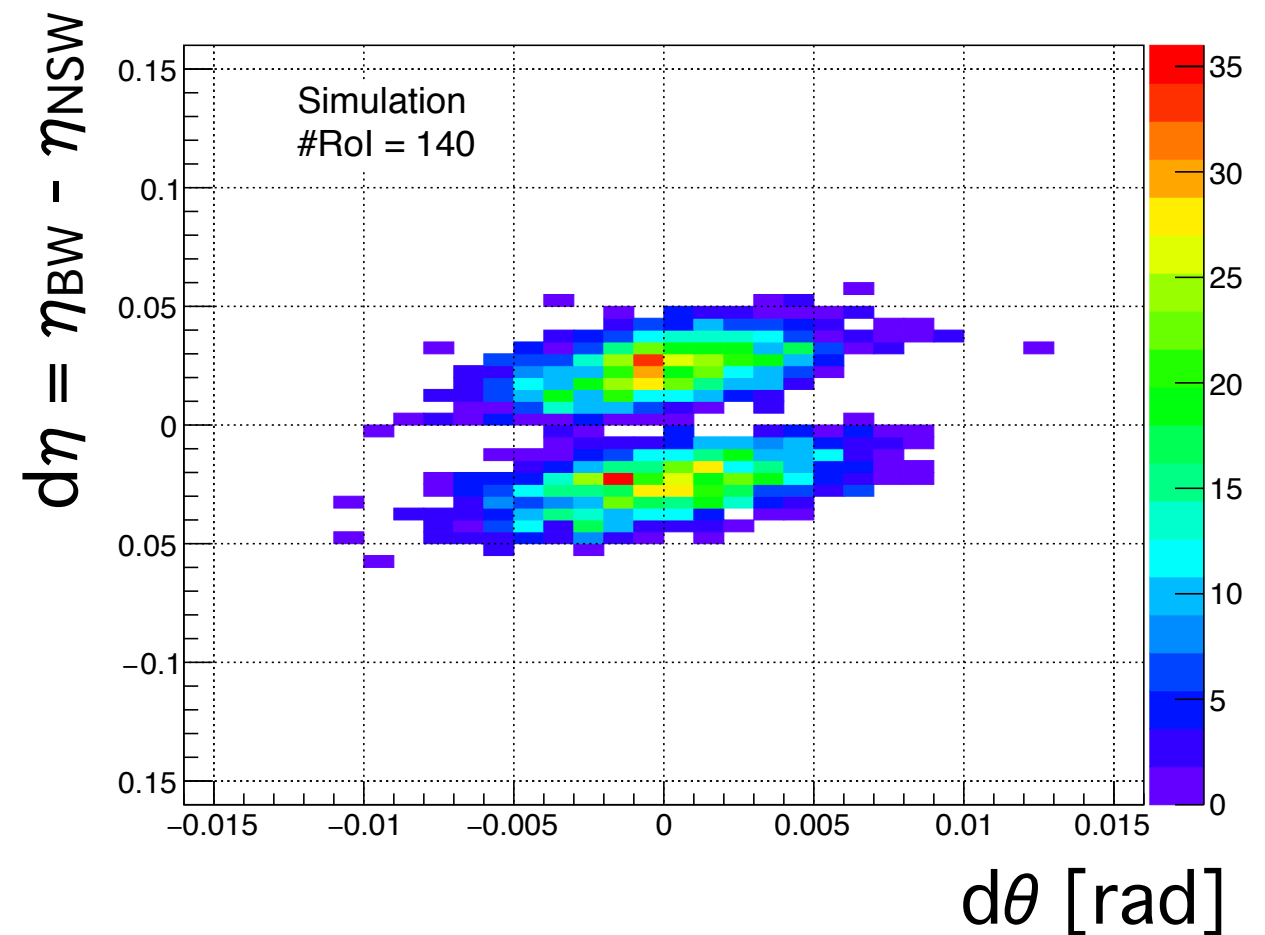
## ◆ $d\theta$ と $d\eta$ の相関

- ▶ Big Wheel 上のある位置 ( $\eta \sim 1.93$ ) にヒットがあった時の  $d\eta$  と  $d\theta$  の相関を,  $p_T$  ごとに見ると:

10 GeV



20 GeV



- ▶  $d\eta$  と  $d\theta$  には,  $p_T$  毎に違った相関が見える.  
2つの情報を組み合わせることで  $p_T$  判定能力を向上できる

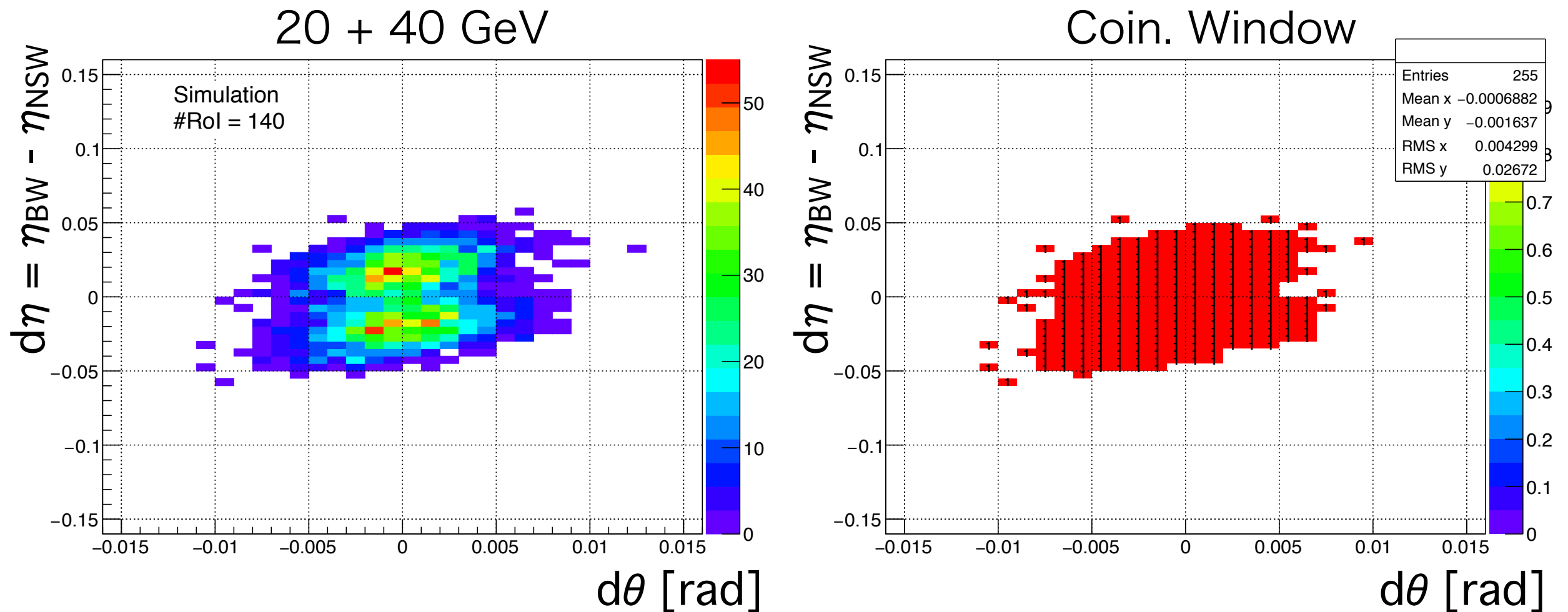
- ◆ “Coincidence Window” を用いてロジックを実装

- ▶ トリガーを発行する条件を規定したCoincidence Window を定める.

例えば, 横運動量 20 GeV以上のミュオンに対するC.W. の場合:

- ▶ 20 GeV と40 GeV のミュオンのヒット分布を作成 (左の図)

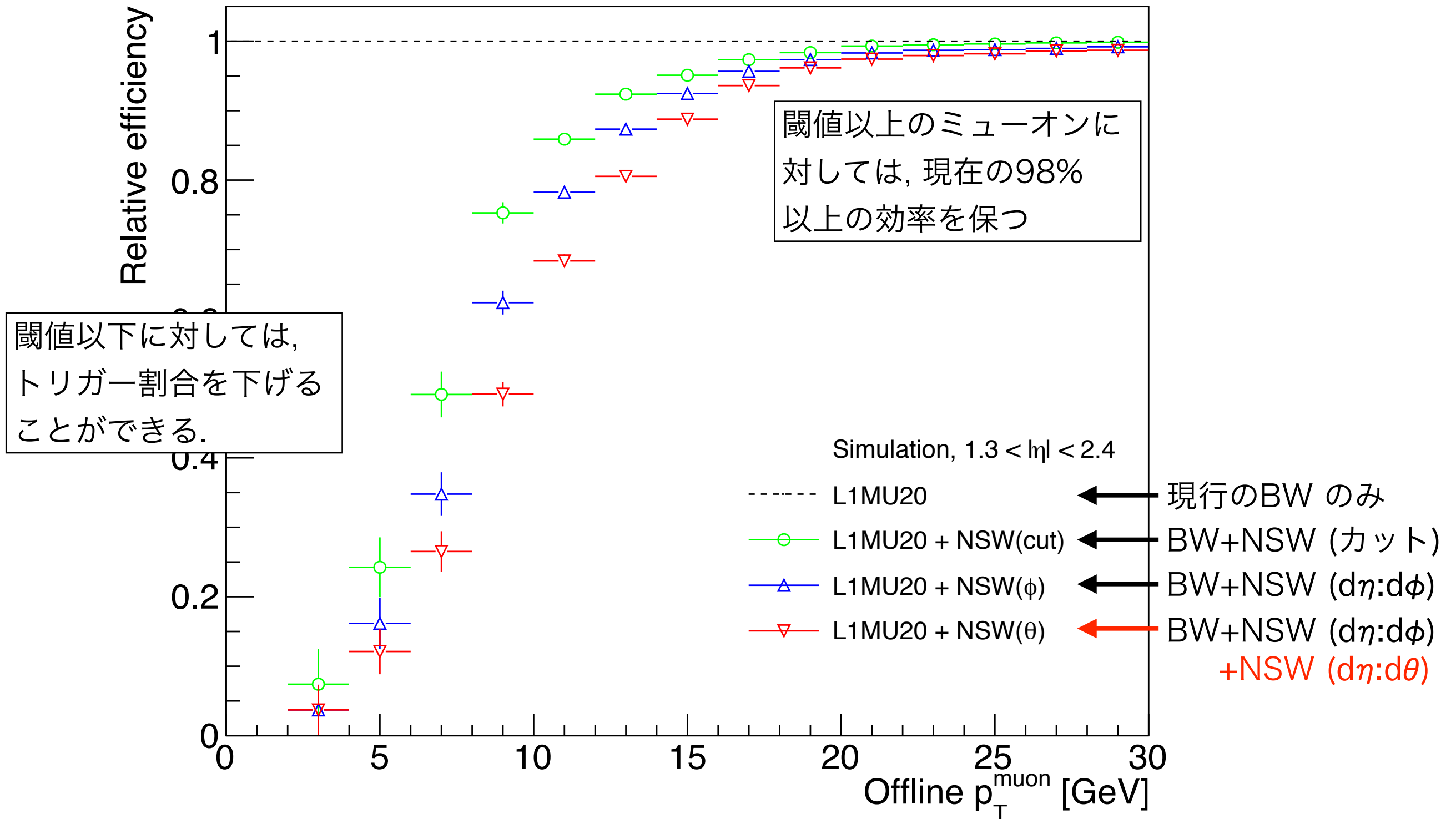
- ▶ ヒットの99% を含む, 右の図のような「マス」を定義 ← **Coincidence Window**



- ▶ Coincidence Window 内の条件を満たす場合のみ, コインシデンスが取れたと判断し, トリガー判定を行う. ( $d\eta:d\phi$  Coincidence も同じように実装)

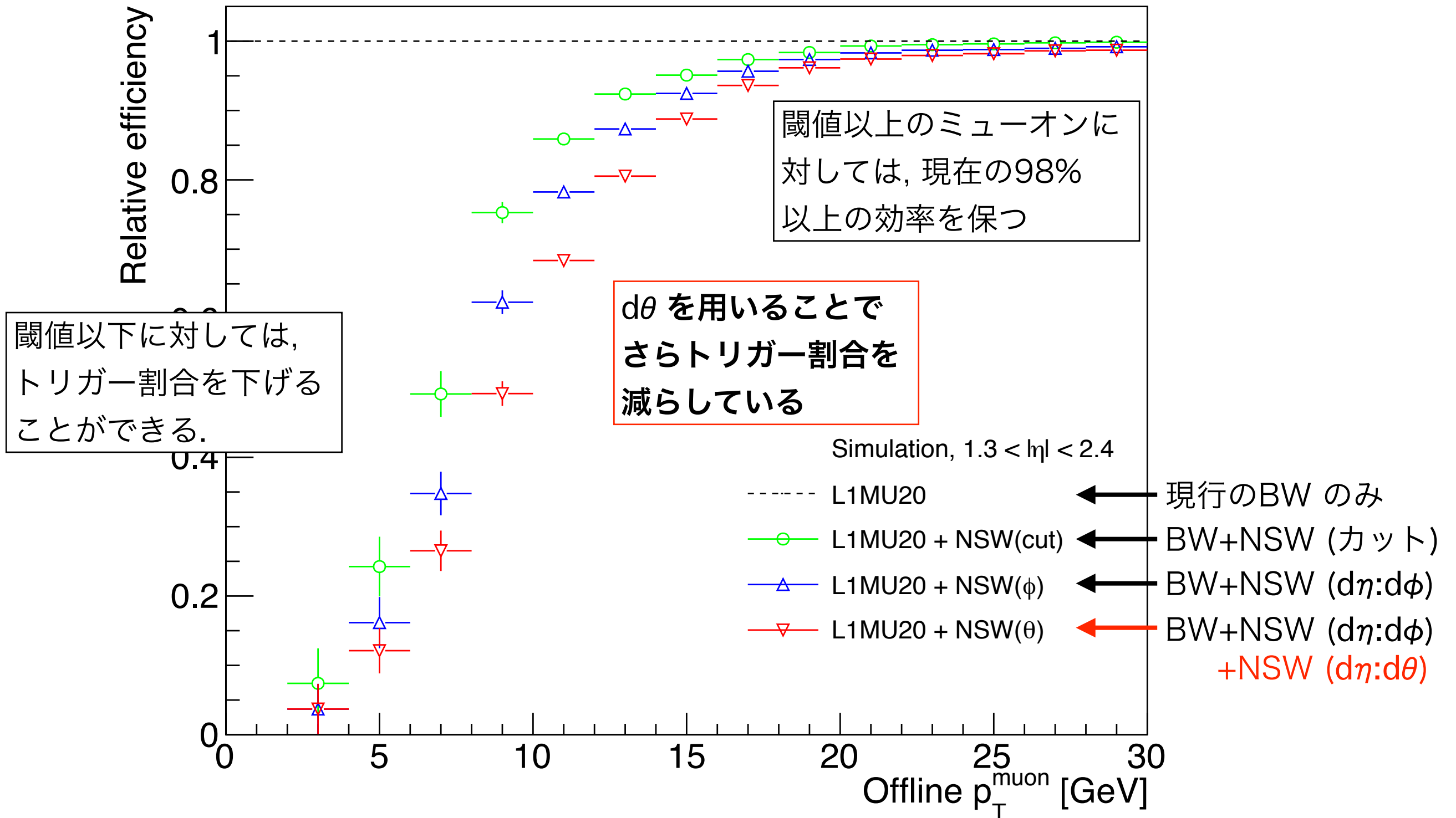
# 角度情報を用いたトリガーの性能

- ◆ 各  $p_T$  のミュオンに対する, トリガー発行の割合
  - ▶ 下の例は, 閾値20 GeVのトリガーに対して適用した場合.



# 角度情報を用いたトリガーの性能

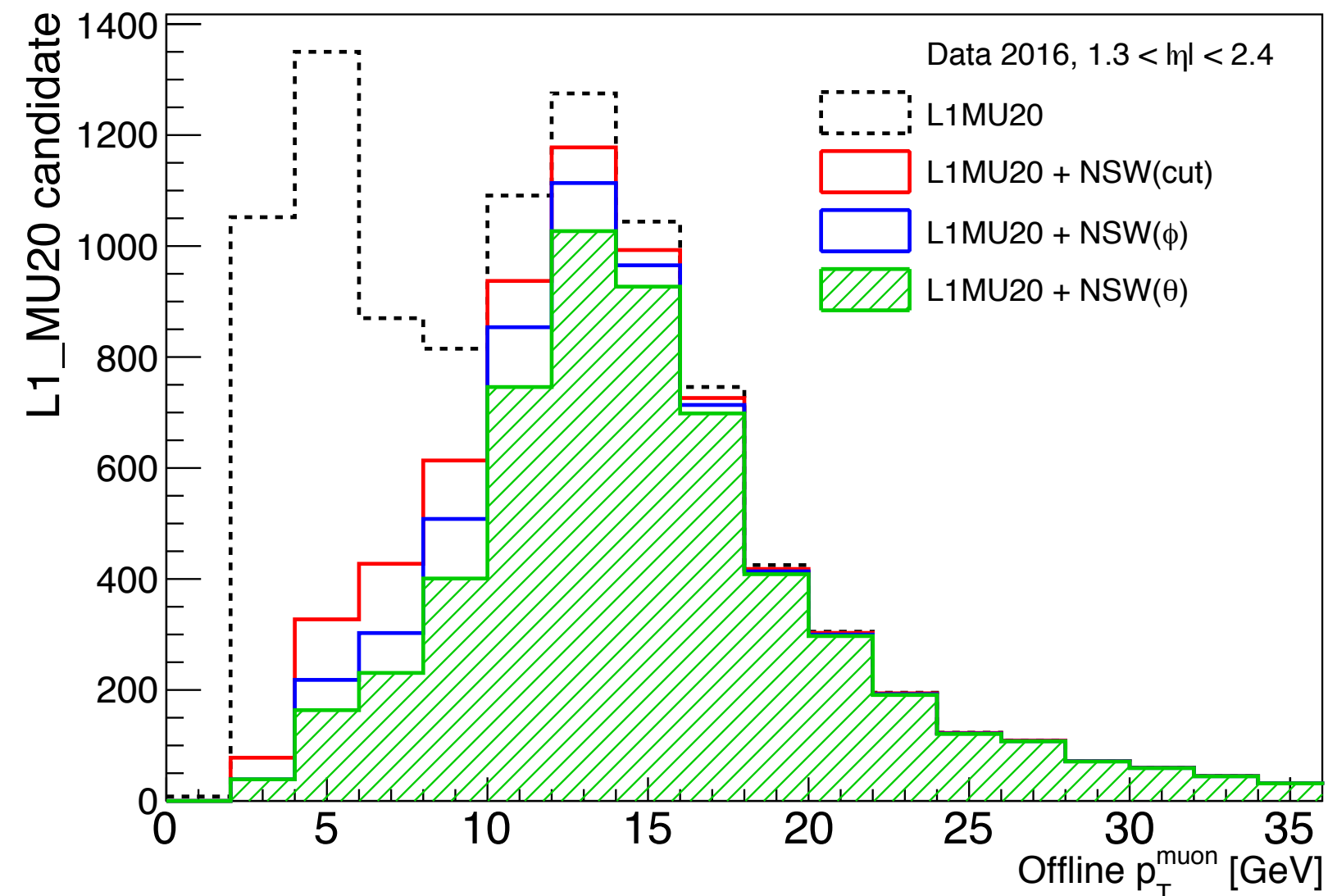
- ◆ 各  $p_T$  のミュオンに対する, トリガー発行の割合
  - ▶ 下の例は, 閾値20 GeVのトリガーに対して適用した場合.





## ◆ 2016年のデータを用いたトリガーレートの評価

- ▶ 下の例は, 閾値 20 GeV のトリガーで取得されたイベントの $p_T$  分布に対して前ページのトリガー判定の割合を掛けたもの.



TGC BWのみ  
トリガーレートは**30 kHz**  
以上になってしまう。

フェイクの排除

BW + NSW ( $\eta:\phi$ )  
レートは**13 kHz**になると  
見積もられている

低い $p_T$ の事象をさらに排除。  
NSW カバー領域で **-15%**

BW + NSW ( $\eta:\phi$ ) + ( $\eta:\theta$ )  
全体でのレートは **-7.5%**,  
**12 kHz**になる

- ▶ 閾値 10 GeV のトリガーに対しでも同じように見積もった結果, **-16%** (NSW 領域), **-8%** (全体) のレート削減が達成された.

- ◆ LHC Run-3 ではさらなる高エネルギー・高統計で新物理に迫る
  - ▶ 高いルミノシティにおいてトリガー性能の向上は必須.
  - ▶ ミューオントリガーにおいてはフェイクと、低い $p_T$ のイベントの排除が鍵.
- ◆ 新しいトリガー判定回路“NewSL”の開発
  - ▶ 大容量FPGA と高速トランシーバGTX を搭載したボードを作成した.
  - ▶ これにより, BW と NSW の情報を合わせたトリガーが可能となる.
- ◆ トリガーロジックの研究
  - ▶ NSW の高い位置分解能を利用したコインシデンスロジックで、フェイクの削減, 及び低い $p_T$ のミュオン事象を削減する.
  - ▶ 位置のコインシデンスに加え,  
角度情報を用いた新しいトリガーロジックを開発した.
  - ▶ 新トリガーロジックを導入することで, トリガーレートを  
7.5% (NSW 領域では15%) 削減できることを示した.  
これにより, Run-3 において予想されるレベル1ミュオントリガーレートは,  
13 kHz  $\rightarrow$  12 kHz となる.

**backup slides**

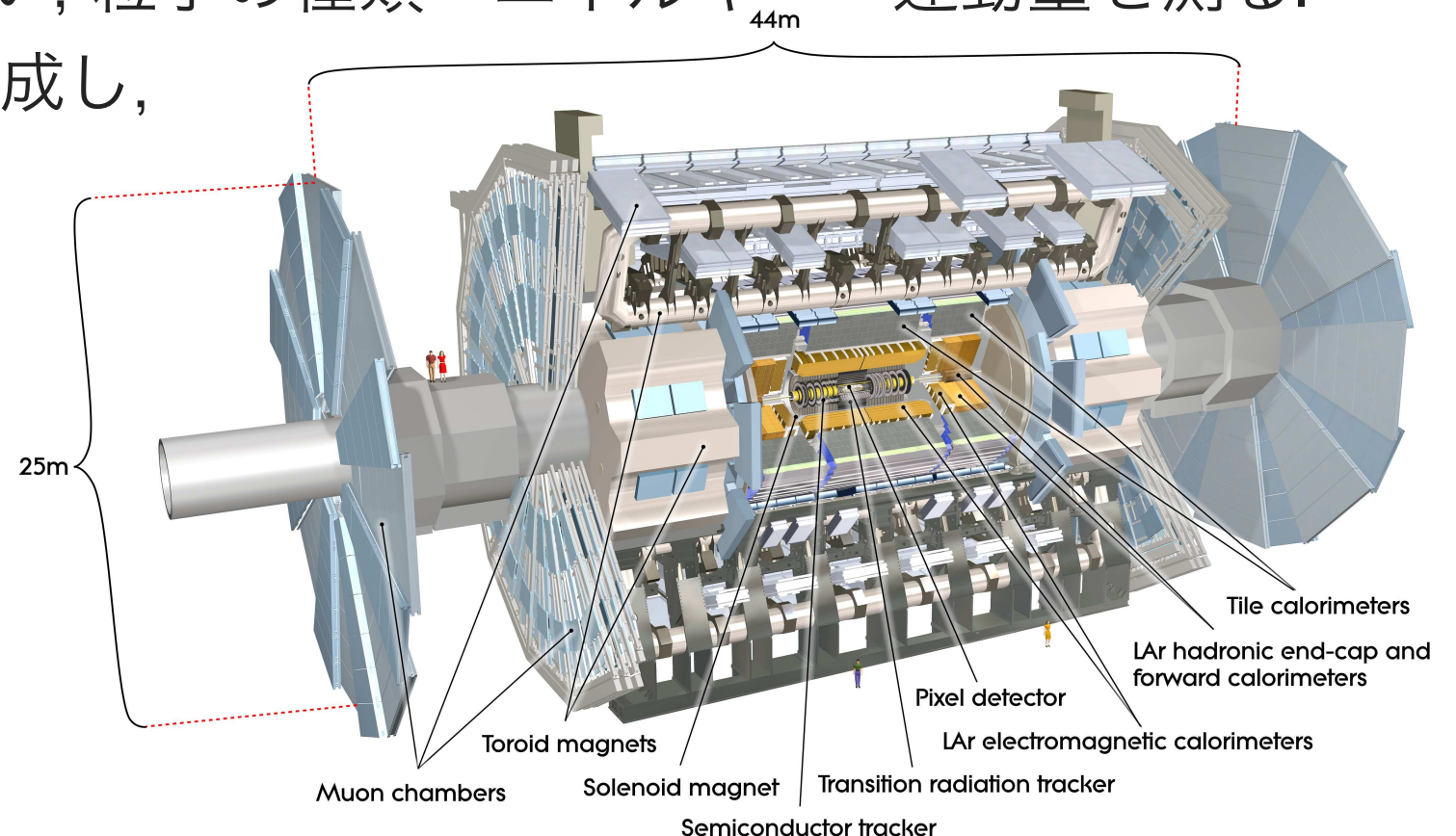
---

## ◆ Large Hadron Collider (LHC)

- ▶ CERN に設置された陽子-陽子衝突型加速器
- ▶ 40 MHzで陽子の「バンチ」を衝突させる
- ▶ 2021年に開始する Run-3 では重心系エネルギー  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$  に、瞬間ルミノシティ  $L = 2\sim 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  になる予定 ← **現在の2倍**  
高エネルギー・高統計のデータで新物理に迫る

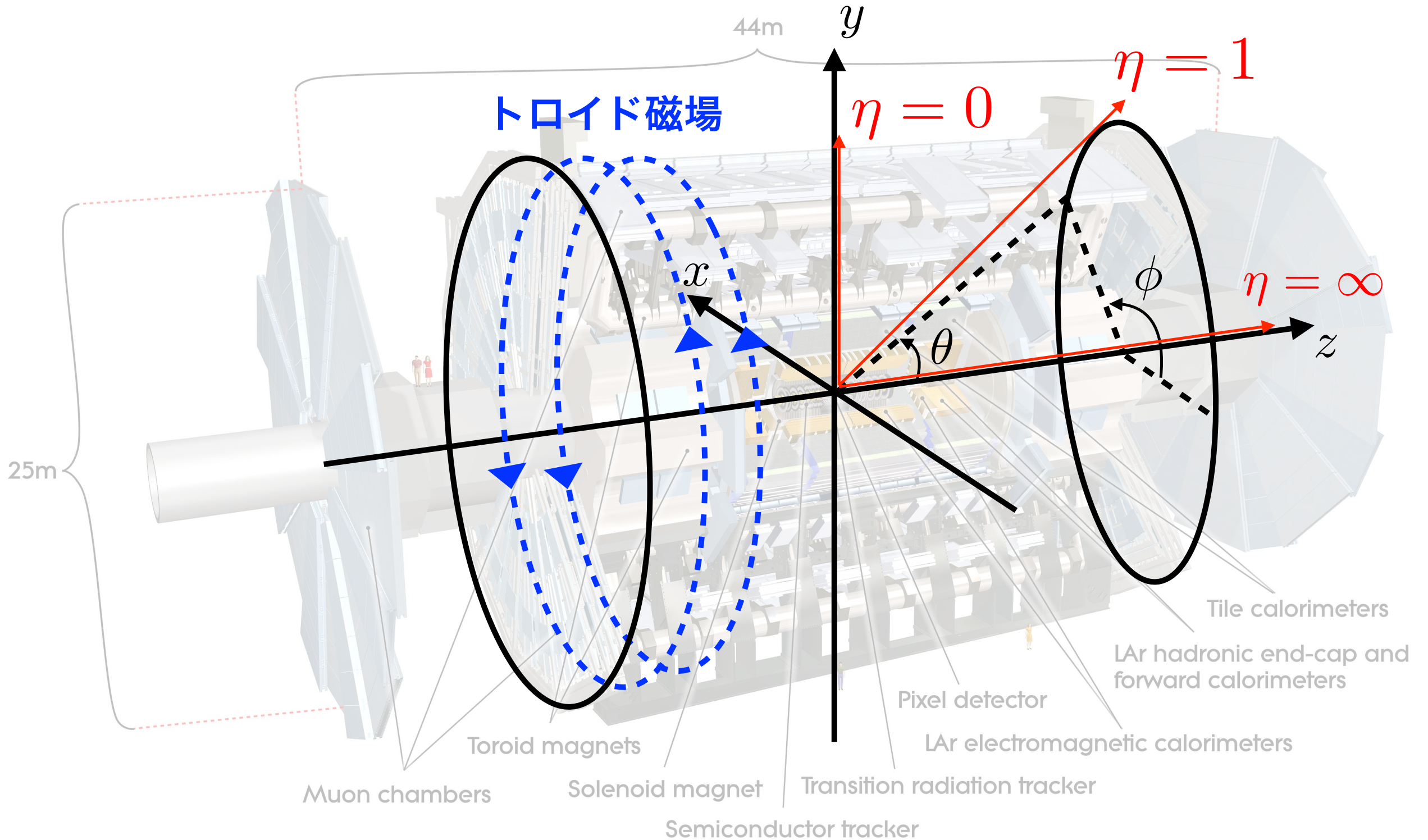
## ◆ ATLAS実験

- ▶ LHC の衝突点に設置された大型汎用検出器 ATLAS を用いた実験
- ▶ 全立体角を様々な検出器で覆い、粒子の種類・エネルギー・運動量を測る。  
-> 衝突点での物理過程を再構成し、  
新物理を探索する。



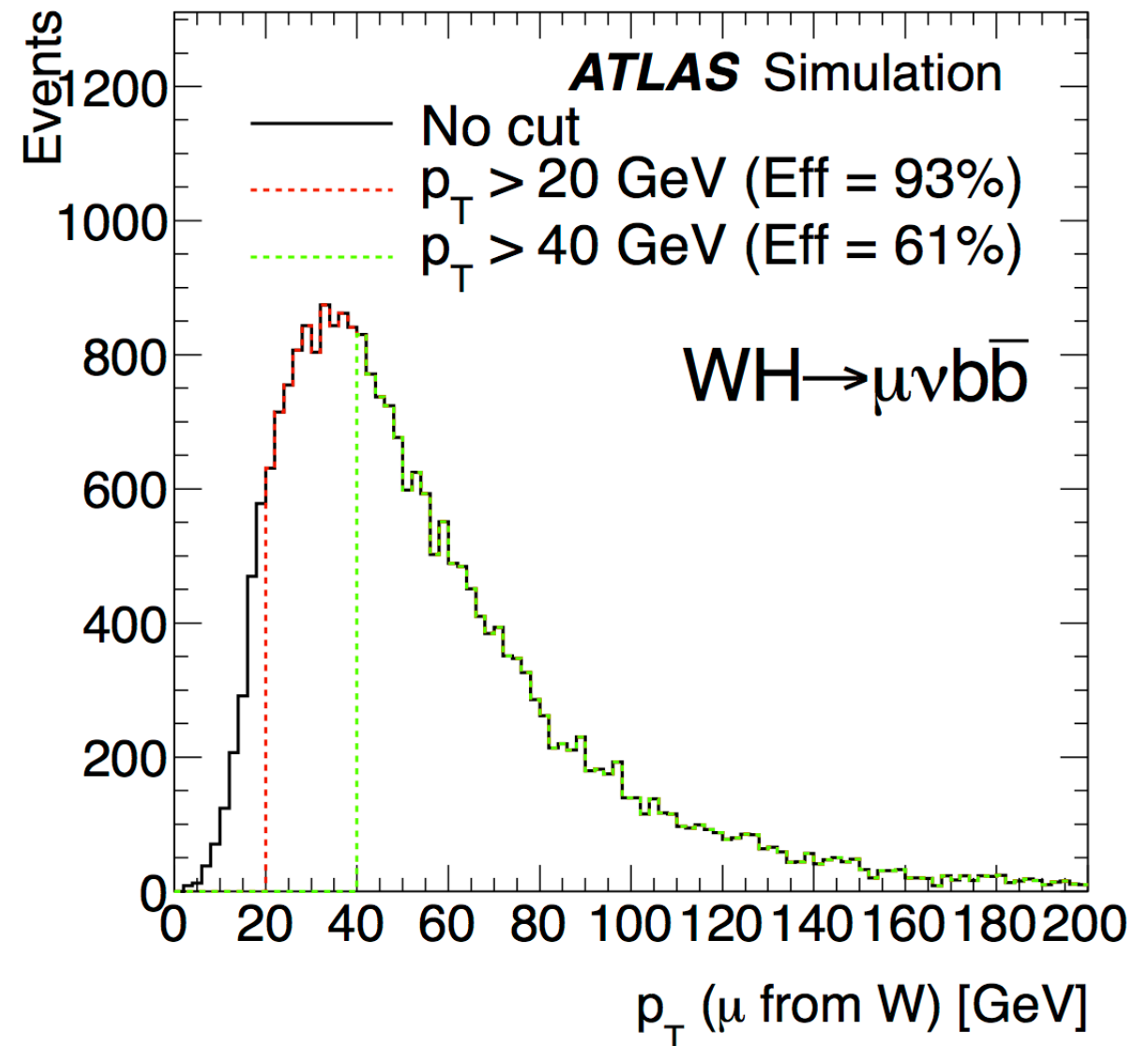
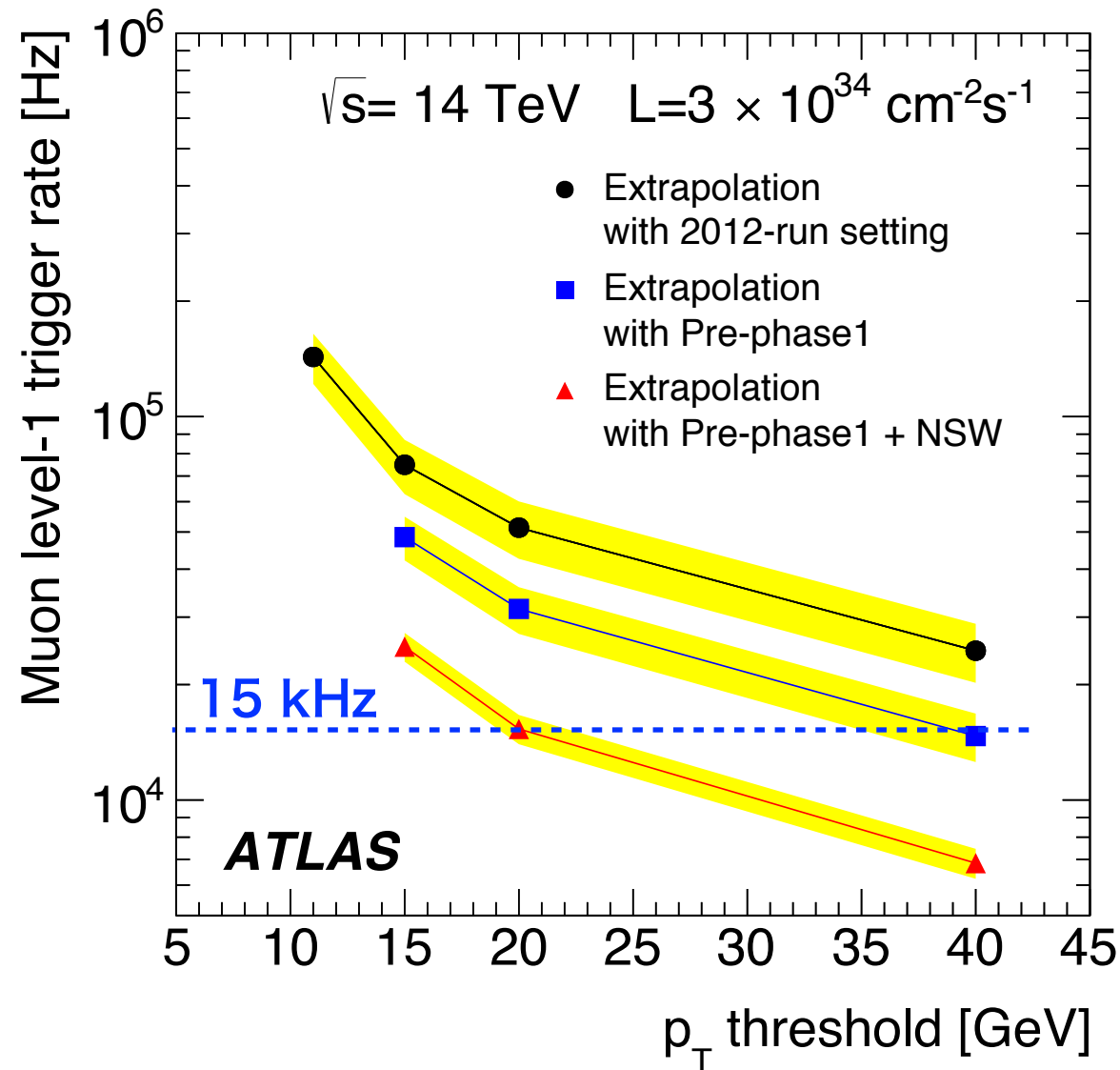


$$\eta = -\ln(\tan\theta/2)$$



◆ Run-3 におけるトリガーレート

◆ 仮に閾値を40 GeV にした場合



▶ 改良無しでトリガーレートを15 kHzにするには、閾値を40 GeV程度まで上げなければいけない

▶ 閾値を40 GeVにすると、例えばヒッグスがWと同時に生成されたとき、そのWからのミュオンの取得効率は61%となってしまふ。

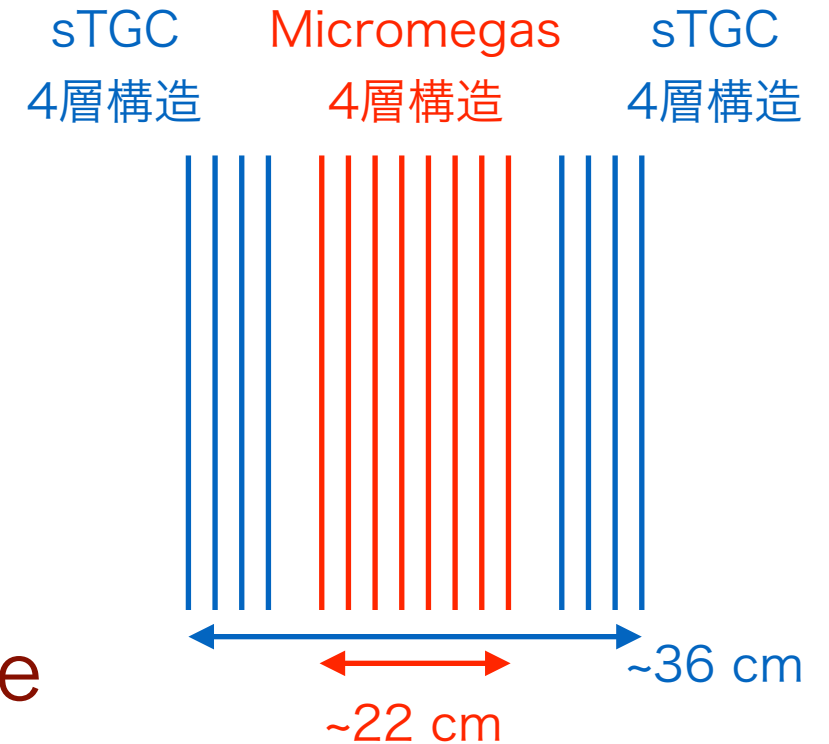
## ◆ sTGC と Micromegas からなる検出器

### ▶ sTGC- small strip TGC

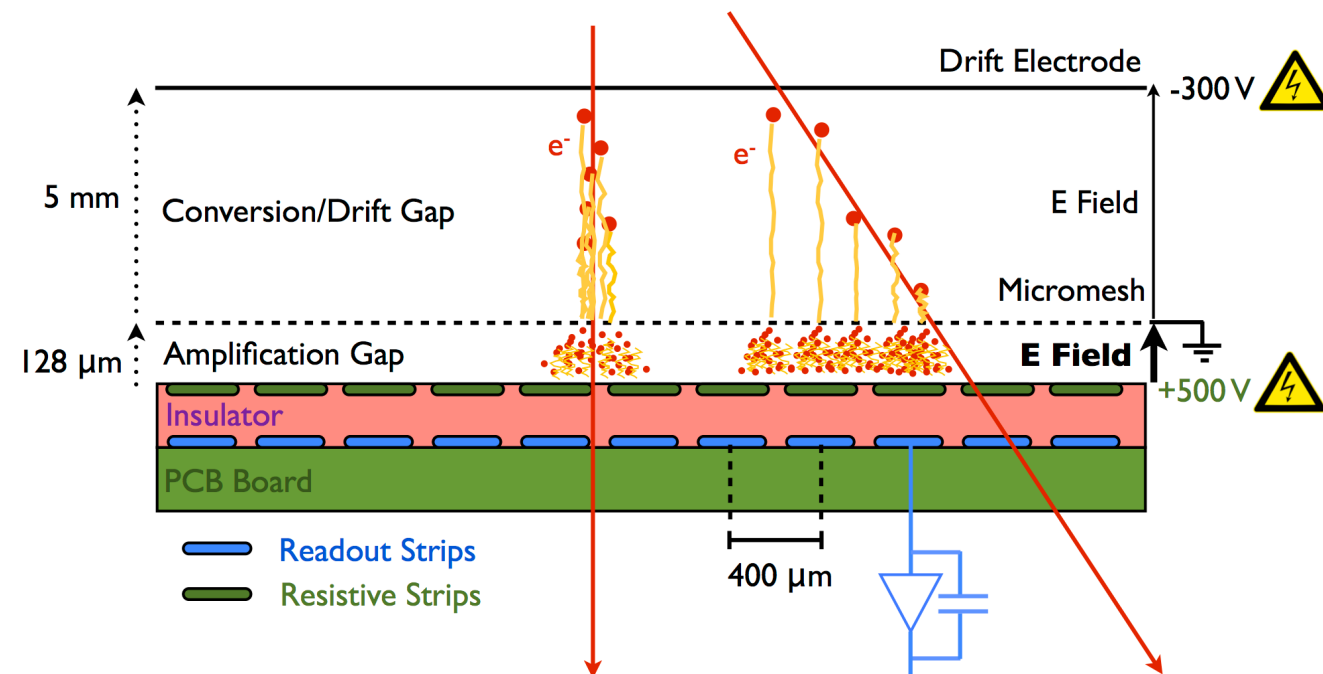
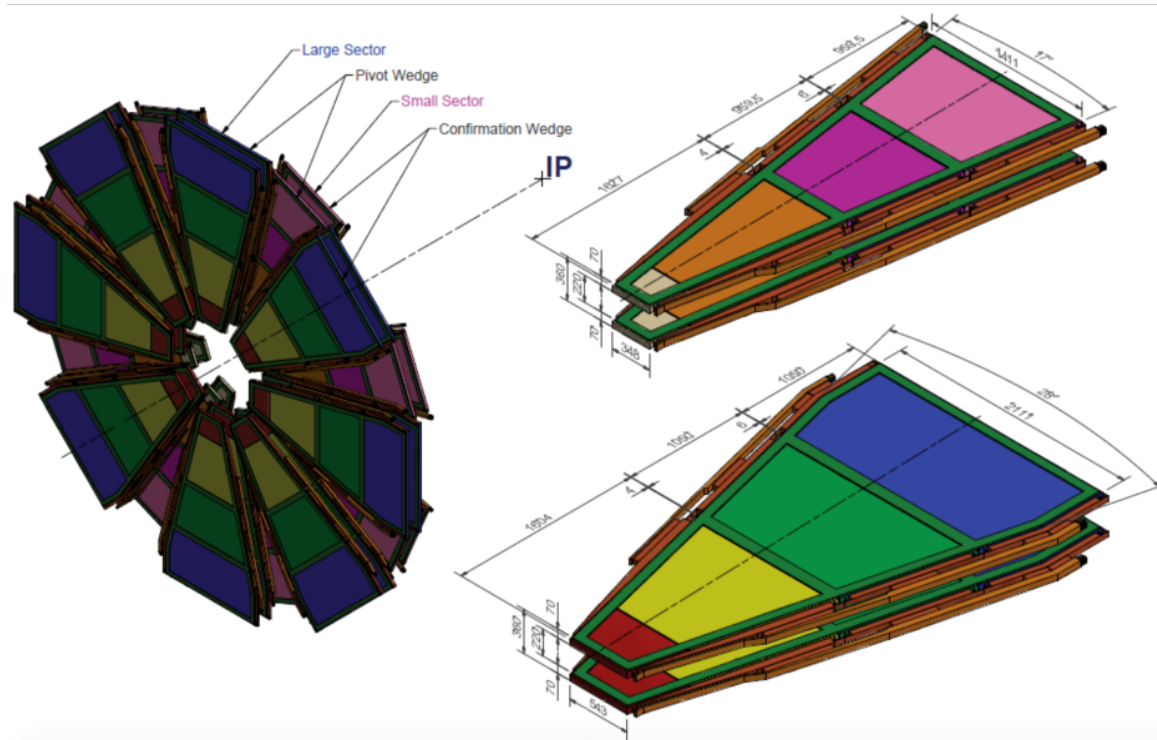
- ▶ strip 間隔が 3.2mm で, TGC (15 mm 以上) より小さい
- ▶ wire-strip のペアからなる. 4層で 1 module を構成
- ▶ strip の電荷重心を用いて  $\eta$  方向を測っており, 位置分解能 60~150  $\mu\text{m}$  (ミュオンの入射角度に依る)

### ▶ Micromegas- micro mesh gaseous structure

- ▶ 位置分解能  $\sim 90 \mu\text{m}$  の, 右下図のような検出器
- ▶ メッシュ~ strip 間の短い区間で増幅が行われるため, レート耐性が高い.
- ▶ 8層構造で sTGC 4枚組の間に設置され, New Small Wheel を構成する



分解能 : 位置  $\sim 30 \mu\text{m}$   
 角度  $\sim 0.3 \text{ mrad}$ .



NSW [TDR](#) より

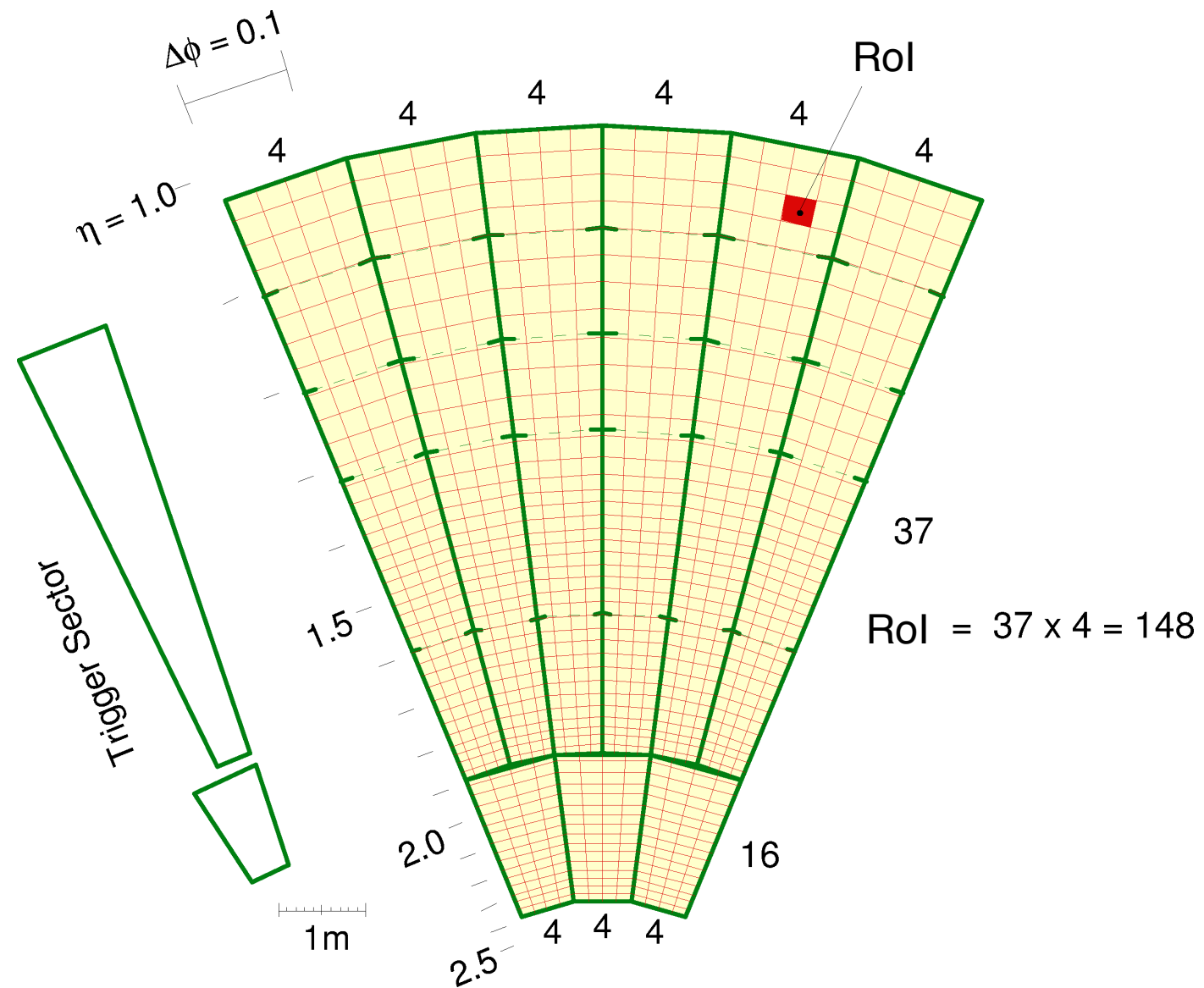


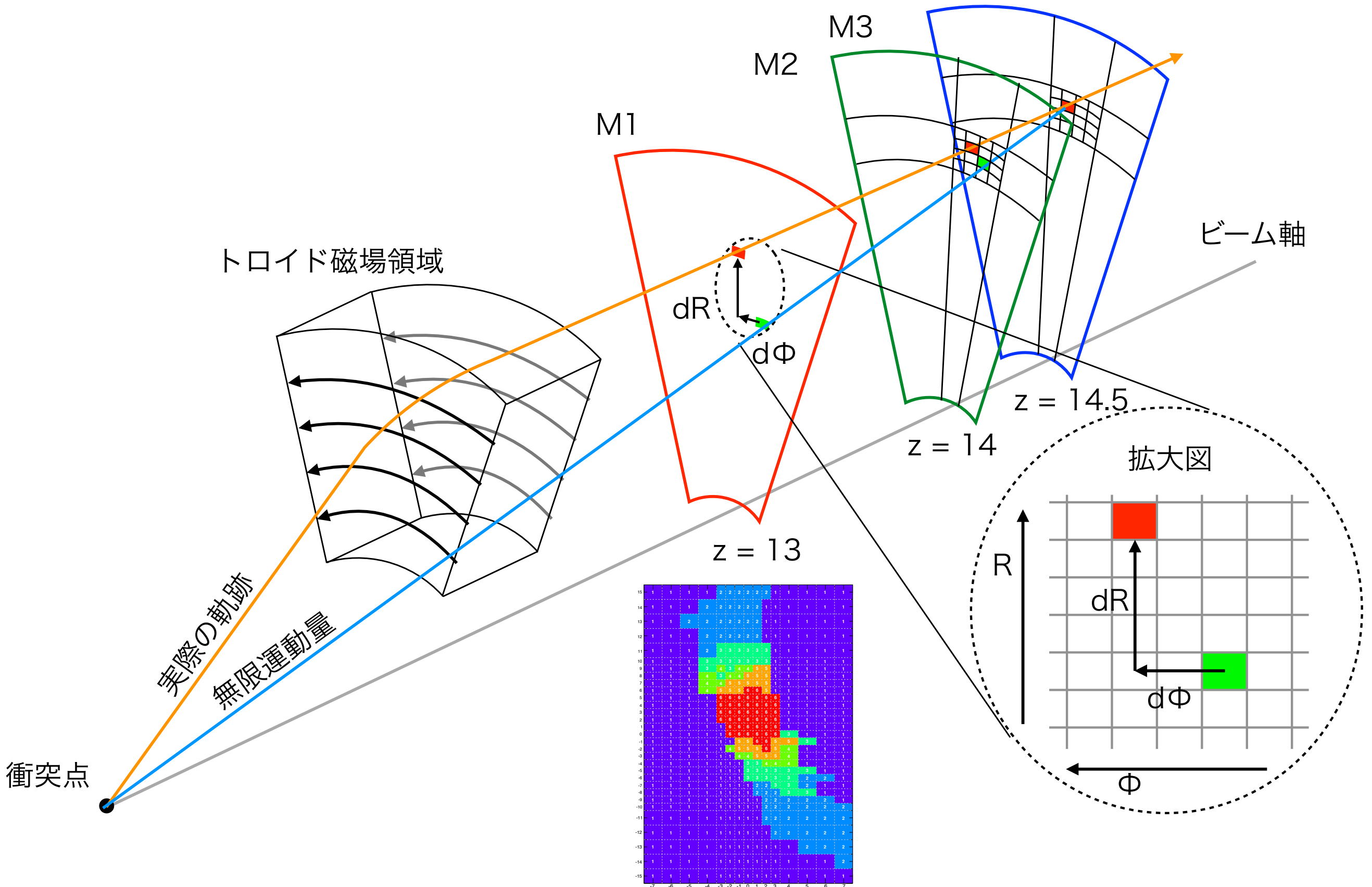
- ◆ TGC BW でのトリガー単位.

- ▶ NewSL で用いることができるBW の読み出し単位.

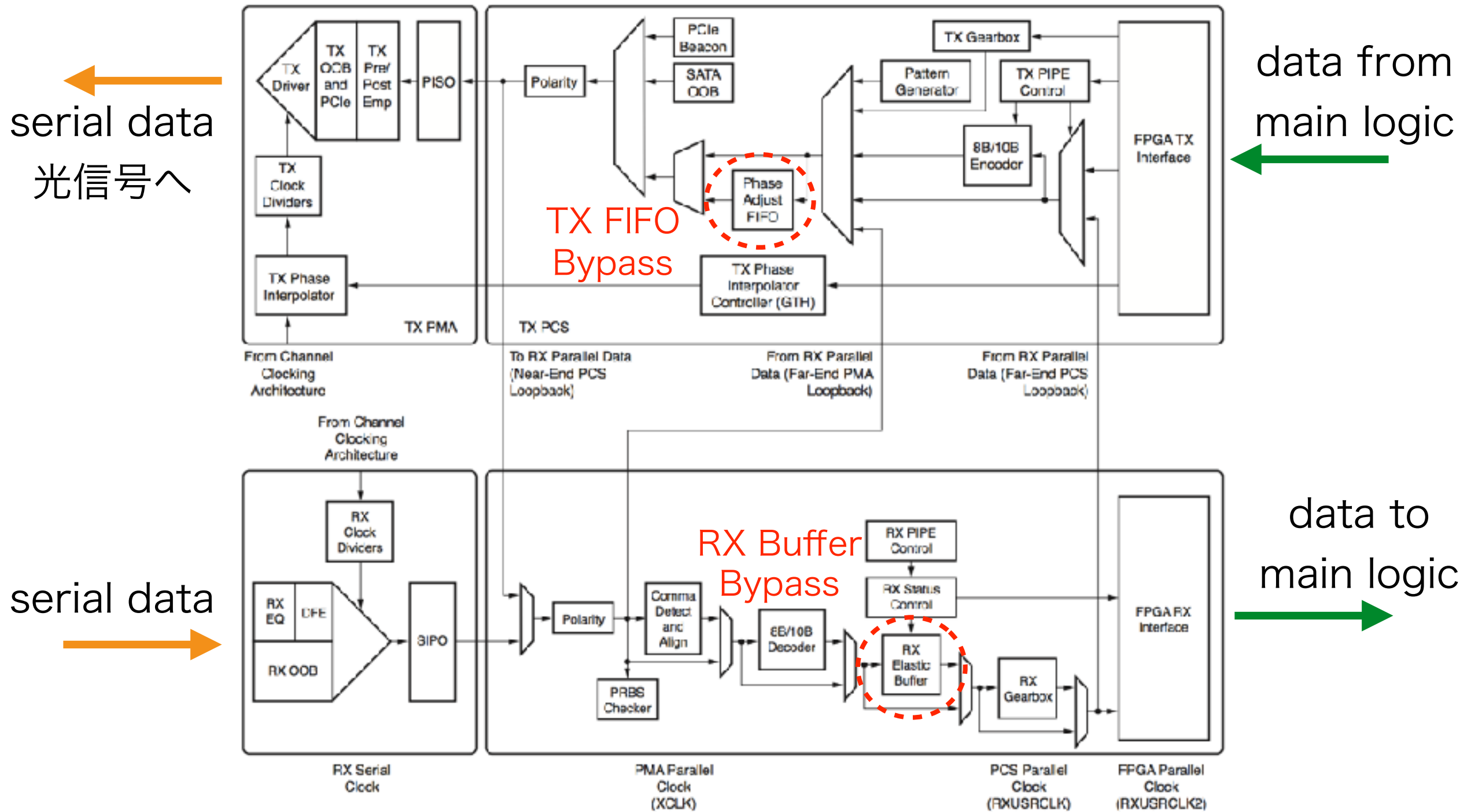
- ▶ NSW を用いた各種ロジックは,  
「BW のヒット位置ごとに」  
C.W. を用意しているが,  
これは「RoI ごとに」と  
言い換えることができる.

- ▶ Endcap (大きい方)では148個,  
Forward (小さい方)では64個の  
RoI で「トリガーセクター」を  
構成する.





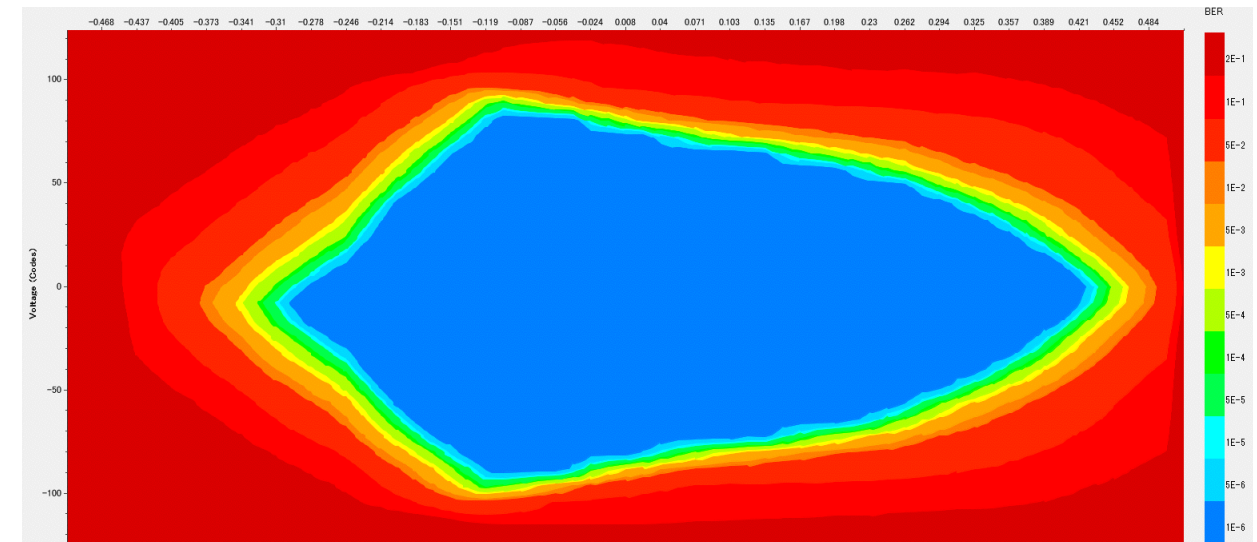
- ◆ FPGA に搭載された, 通信速度 約10 Gbps 対応の高速トランシーバ
  - ▶ 通信を行うためには, 各機能のパラメータを正しく設定する必要がある  
例えば、送信・受信時の遅延を一定, かつ最小にするためには, 送受信 Buffer のバイパス設定をする必要がある



## ◆ GTX ループバックによるエラーレート測定

- ▶ 送信・受信でのデータが合致しているかを監視することでエラーレートを計測。  
エラーレート  $< 3 \times 10^{-15}$  を確認. (6.4 Gbps)
- ▶ Eye Pattern (右図) も正常.

ボード番号	試験時間 [s]	転送ビット [Gbit]	ビットエラー数	Bit Error Ratio [ $s^{-1}$ ]
NewSL ver.2-1	41500	335000	0	$< 2.98 \times 10^{-15}$
NewSL ver.2-2	51800	414000	0	$< 2.42 \times 10^{-15}$
NewSL ver.2-3	44600	357000	0	$< 2.80 \times 10^{-15}$
NewSL ver.2-4	44700	357000	0	$< 2.80 \times 10^{-15}$
NewSL ver.2-5	46600	373000	0	$< 2.68 \times 10^{-15}$



- ▶ その他, のI/O についても試験を行い, 正常に動作することを確認.  
NewSL ボードが Run-3 で要求される性能を満たすことを示した.

SiTCP Utility

Version. 0.9.2  
Copyright(C) Bee Beans Technologies, Inc.

受信サイズ=12,288 Bytes      受信時間=0.61 sec      受信開始

受信レート=161.32 kbps

ファイルに保存      ...      開く

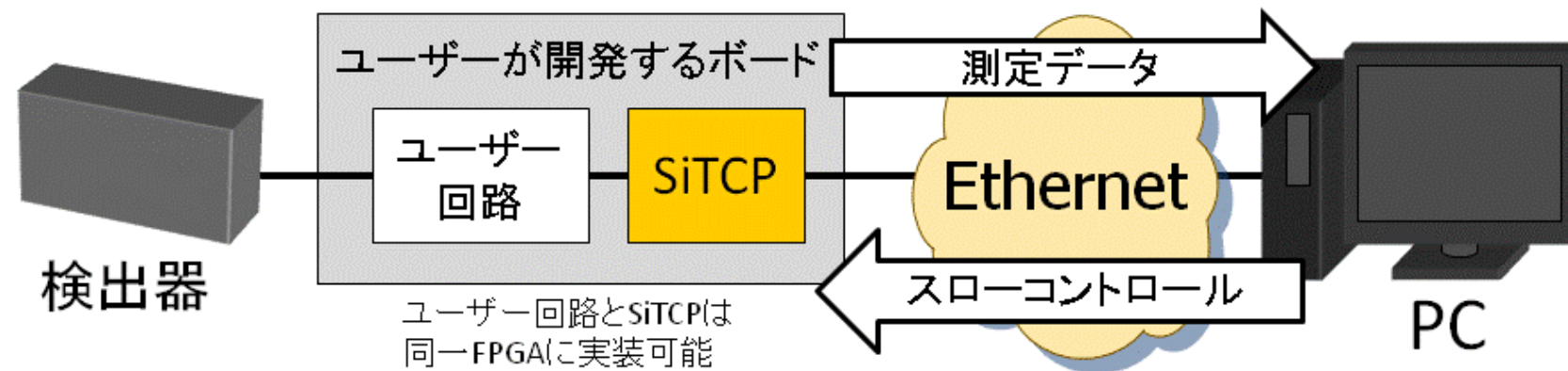
ファイルのテキスト変換

データ表示(65535byteまで)      フォーマット 1111111111111111

```
11 12 13 14 15 16 17 18 19 1A 1B 1C 1D 1E 1F 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 2A 2B 2C 2D 2E 2F 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 3A 3B 3C 3D 3E 3F 40
01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 1A 1B 1C 1D 1E 1F 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 2A 2B 2C 2D 2E 2F 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 3A 3B 3C 3D 3E 3F 40
01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 1A 1B 1C 1D 1E 1F 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 2A 2B 2C 2D 2E 2F 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 3A 3B 3C 3D 3E 3F 40
```

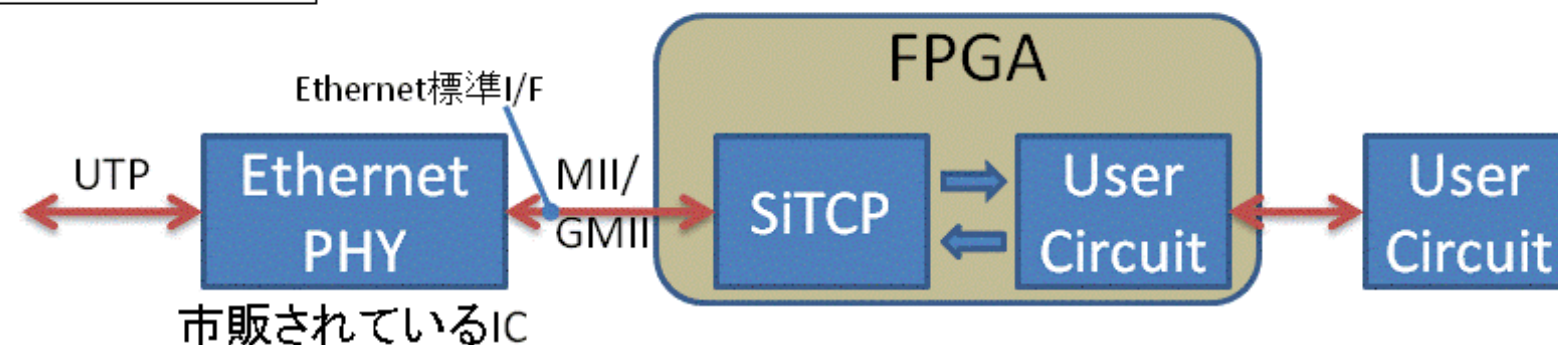
## ◆ FPGA をEthernet に接続する技術

- ▶ FPGA 常にSiTCP を実装することで, TCP/IP でのデータ通信を実現.
- ▶ 1つのFPGAチップ上に, ユーザー回路と共に実現可能な回路規模で実装できる点が特徴.



- ▶ 必要な外付けチップは市販のEthernet PHY チップと, MAC アドレス格納用のEEPROM のみと, 少ない.

UTPを使用する場合





◆ 1トラックあたりの情報

Field:	sTGC type	MM type	$\Delta\theta$ (mrad)	$\Phi$ index	R index	Spare
Num of bits:	2	2	5	6	8	1

**= 24 bits**

sTGC/MM Type

No segments: **00**  
 Low quality: **01**  
 Medium quality: **10**  
 High quality: **11**

$\Phi$ : 10 mrad/bit

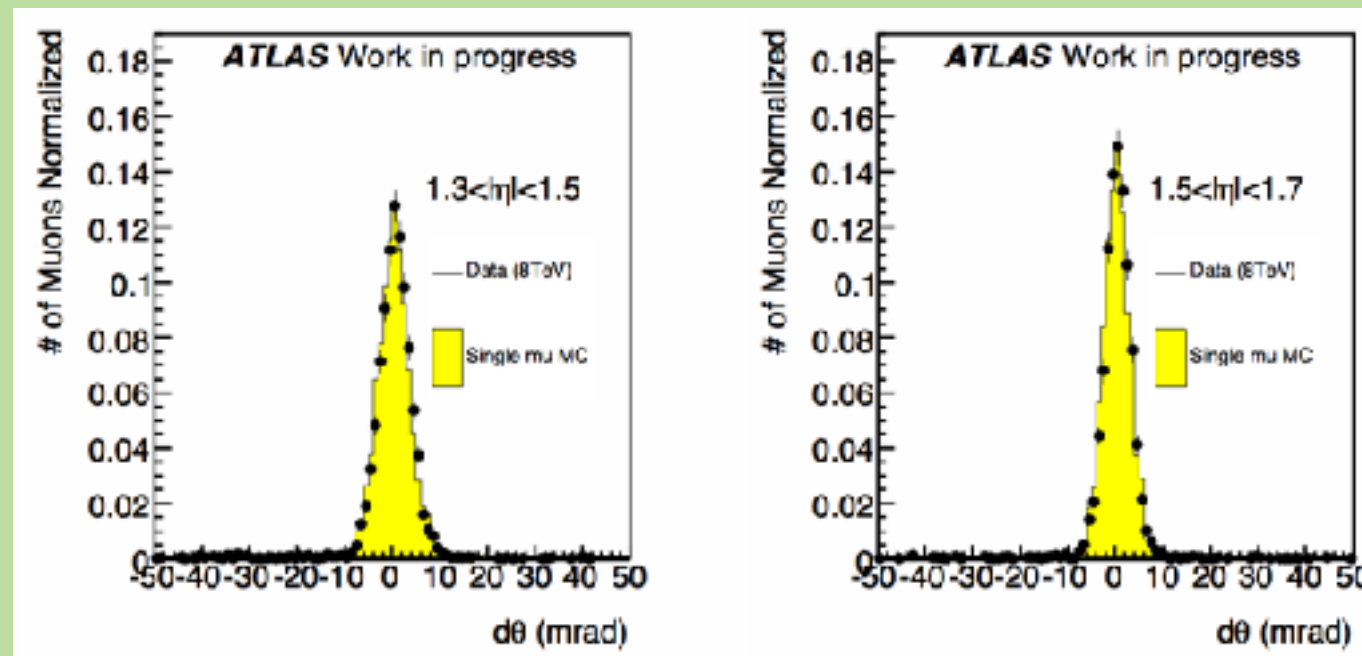
$$2\pi \text{ rad} / 12 \text{ (or 24)} / 10 \text{ mrad} = 52.3 \rightarrow 6 \text{ bits}$$

$\eta$  : 0.005/bit

$$(2.4 - 1.3) / 0.005 = 220 \rightarrow 8 \text{ bits}$$

$\Delta\theta$ : 1 mrad/bit

$\pm 15$  mrad is enough to select muons from IP  $\rightarrow$  5 bits

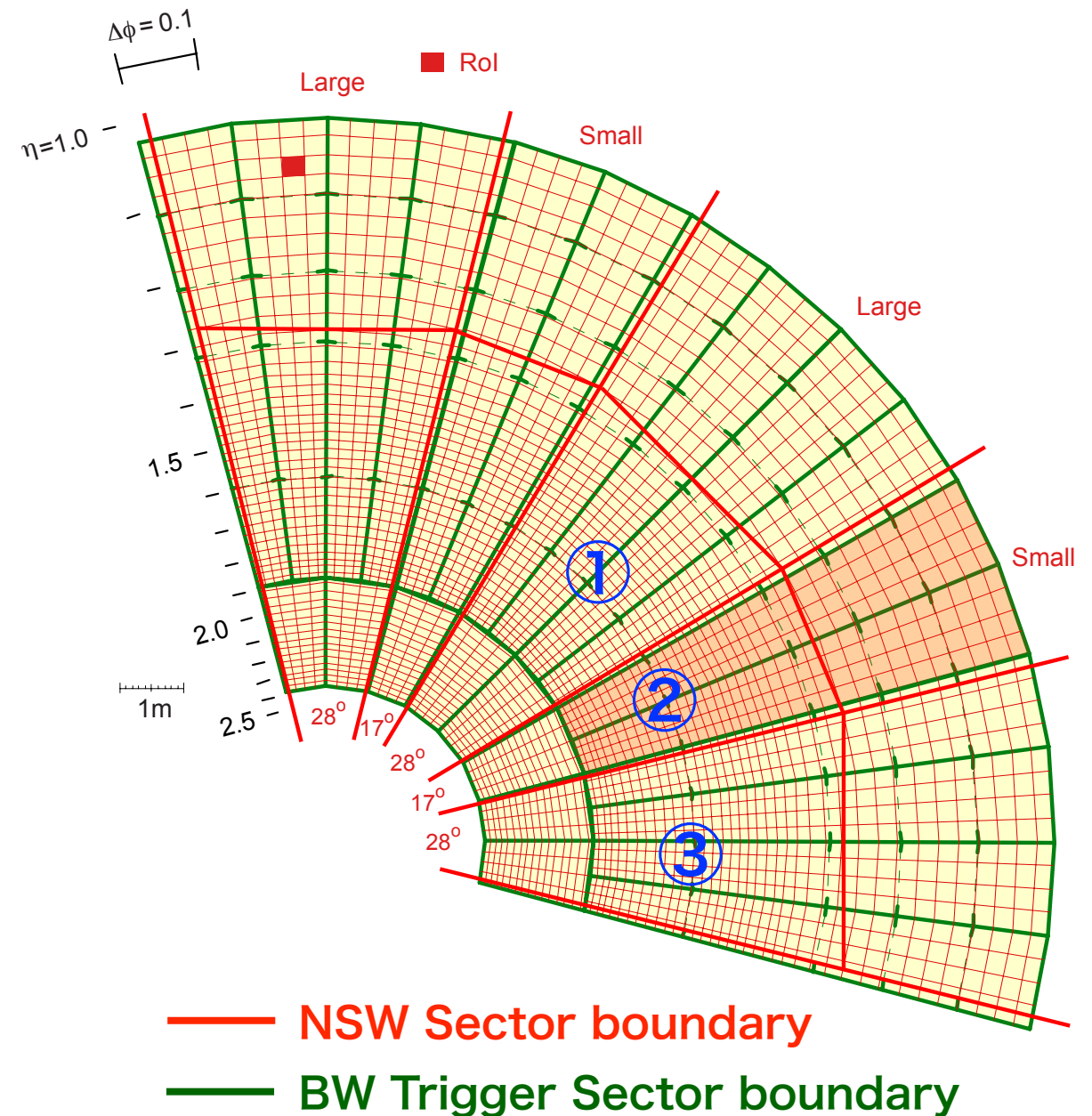


## ◆ 1枚の NewSLが受け取る情報

- ▶ 1枚のNewSL は最大3つのNSW セクターから情報を受けとる.
- ▶ 各 NSW セクターからは8本のトラック情報を, 2本のファイバーで受信する.

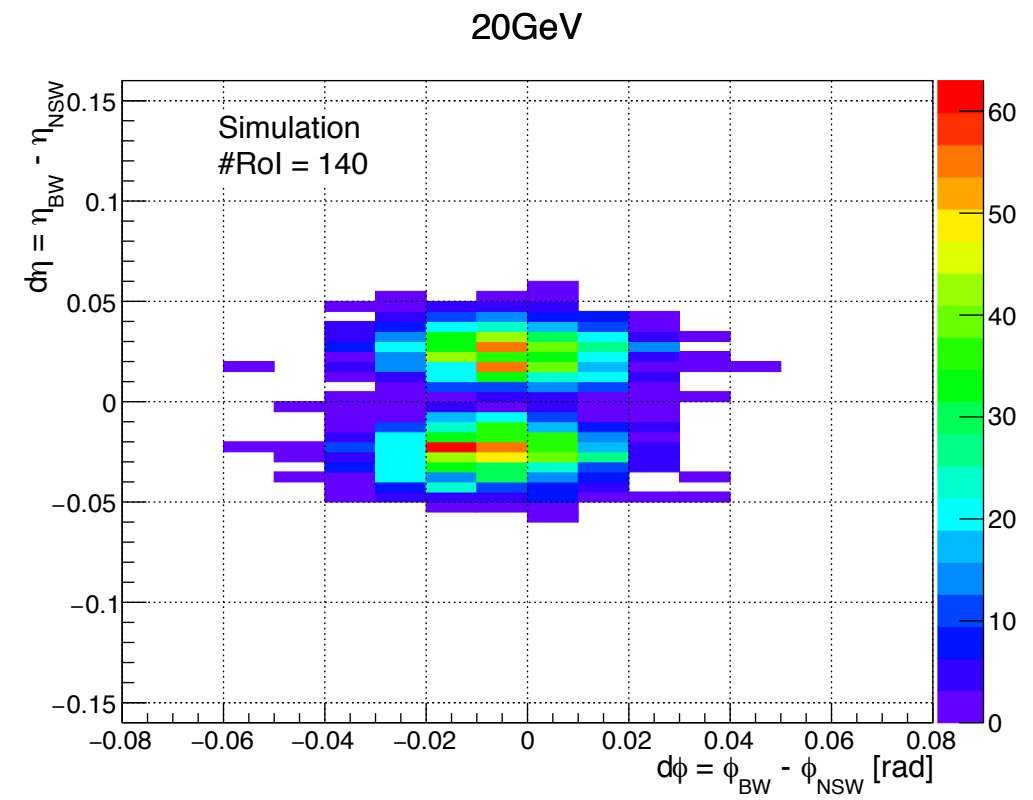
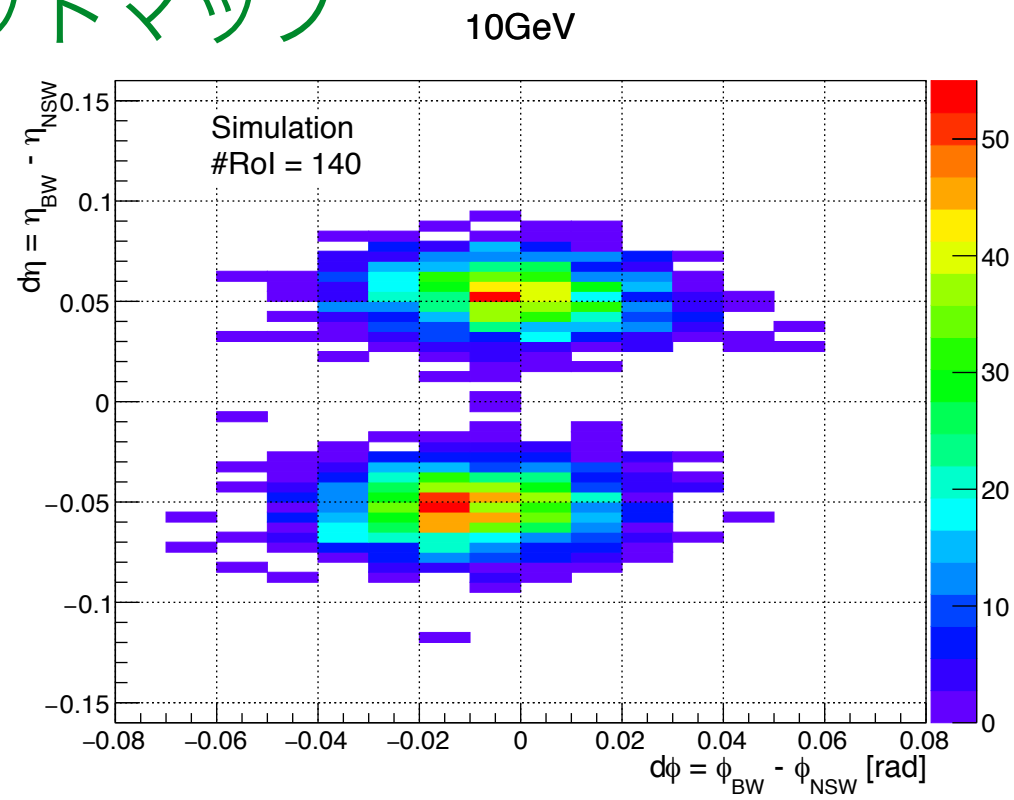
Words	first byte	second byte
Word-0	comma	comma
Word-1	track-0	
Word-2		
Word-3	track-1	
Word-4	track-2	
Word-5		
Word-6	track-3	
Word-7	ID (4-bit)	BCID (12-bit)

- ▶ NewSL は最終的に最大6トラックを選択してトリガーを発行する.
- ▶ 従って、6本以上のトラック情報を NSW セクターから受け取る必要がある.





## ◆ ヒットマップ



## ◆ Coincidence Window

20GeV + 40GeV

