

ATLAS 実験アップグレードに向けた MM と sTGC を組み合わせたレベル1トリガの開発と性能評価

信州大学 高エネルギー物理学研究室
修士1年 日比 宏明

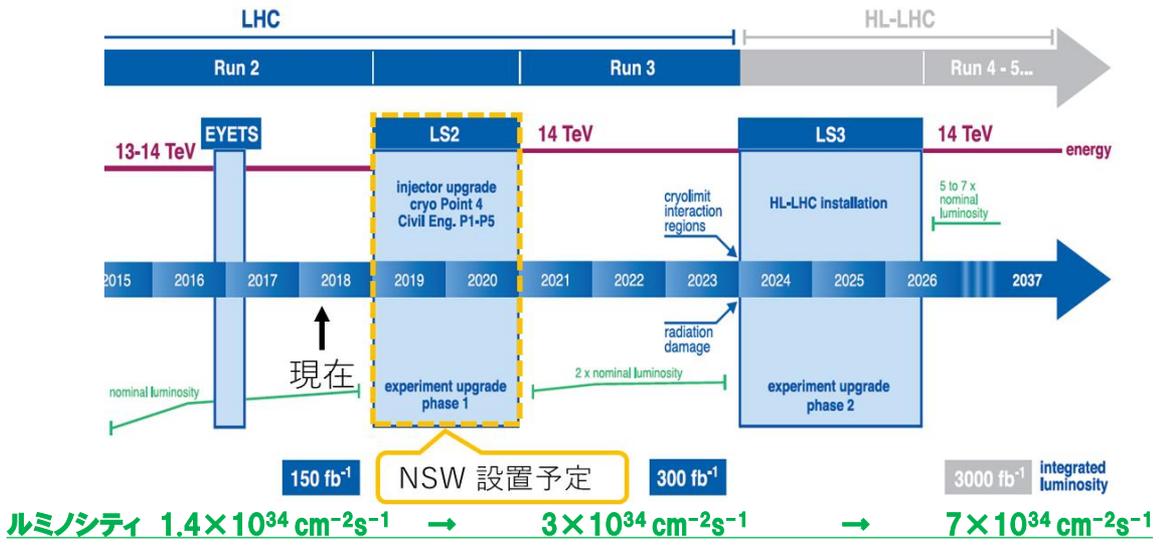
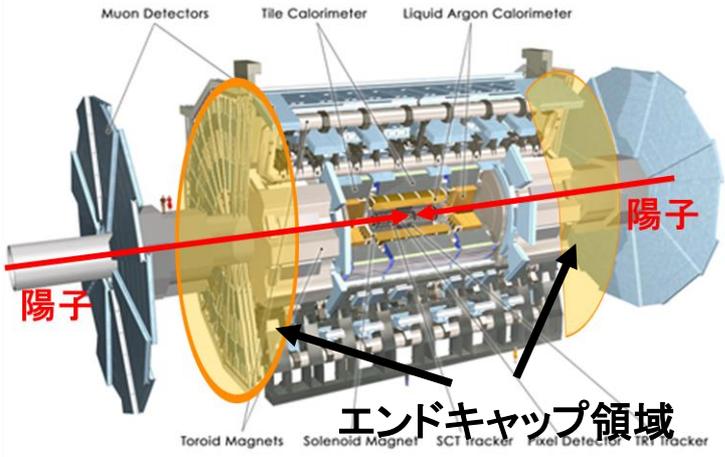
竹下徹 長谷川庸司 石野雅也^A 川本辰男^A 奥村恭幸^A 増淵達也^A
齋藤智之^A 前川光貴^B 他ATLAS日本トリガーグループ

信州大学 東大素セ^A 東大理^B



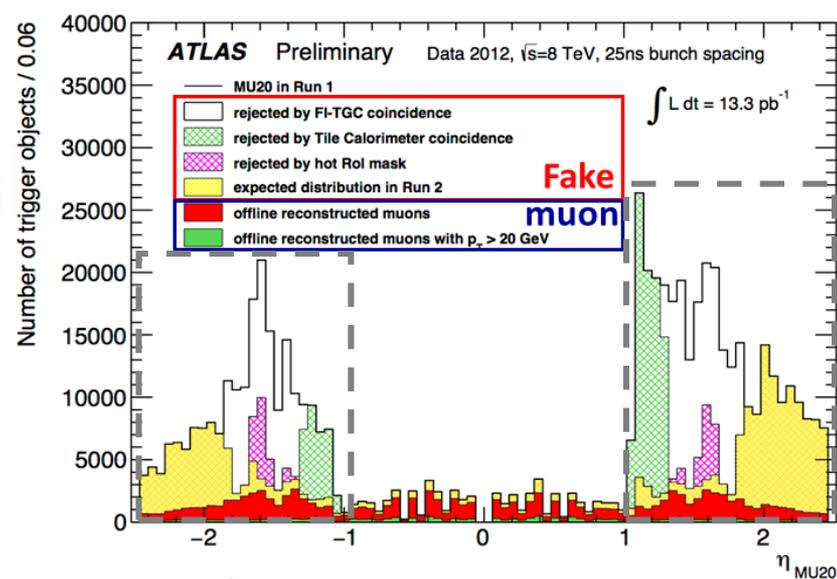
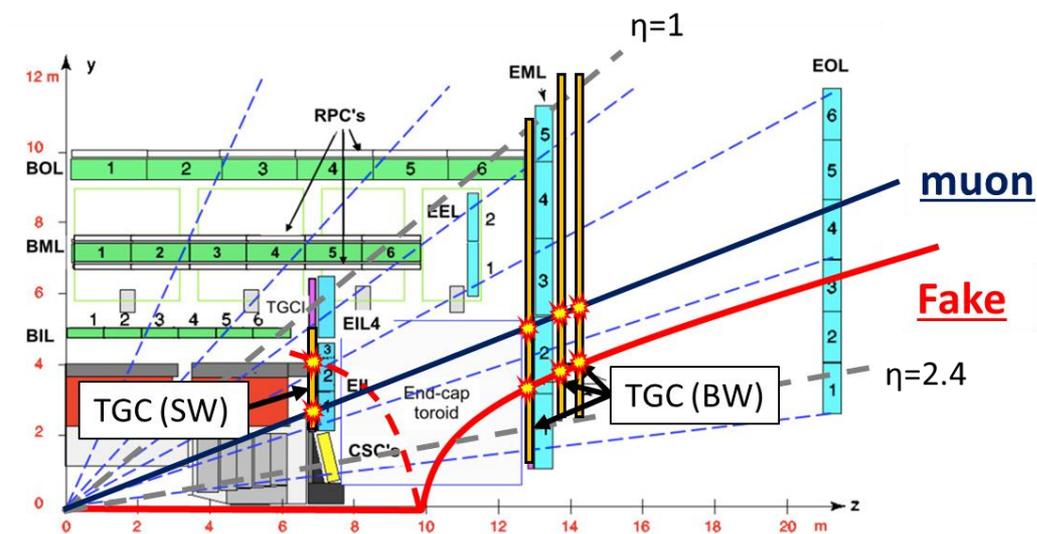
LHC-ATLAS実験とアップグレード計画

ATLAS 検出器



- 世界最高エネルギーの陽子-陽子衝突(エネルギーフロンティア)で新物理に迫る。
- Run-2 から Run-4 にかけて **ルミノシティがおよそ5倍以上**に増加。
→ 今までよりも短い時間で多くのデータを取得。新物理の早期発見。
- バックグラウンドが増加。新物理に対する感度を維持するため **トリガーシステムのアップグレードが必須**。
- エンドキャップミュオントリガーでは **New Small Wheel** を設置することでルミノシティ増加に備える。

エンドキャップミュオントリガーにおける Fake Trigger

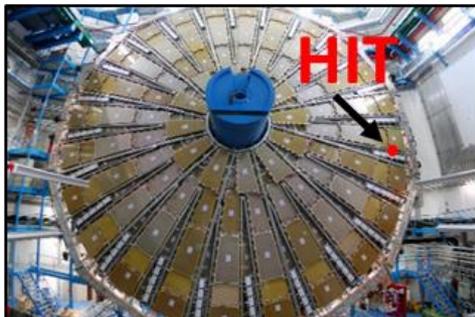


- エンドキャップミュオントリガー ($1.05 < |\eta| < 2.4$) ではほとんどが Fake
- Fake Trigger は Inner coincidence を要求することで抑えられる。(ただし、現在は左図のように非常に大まか)
- より細かくヒット位置を見て coincidence 条件を課すことでさらに Fake Trigger を減らす。
- SW をより高ヒットレート下でも高い精度で測定が可能な NSW と交換する

Small Wheel (SW)

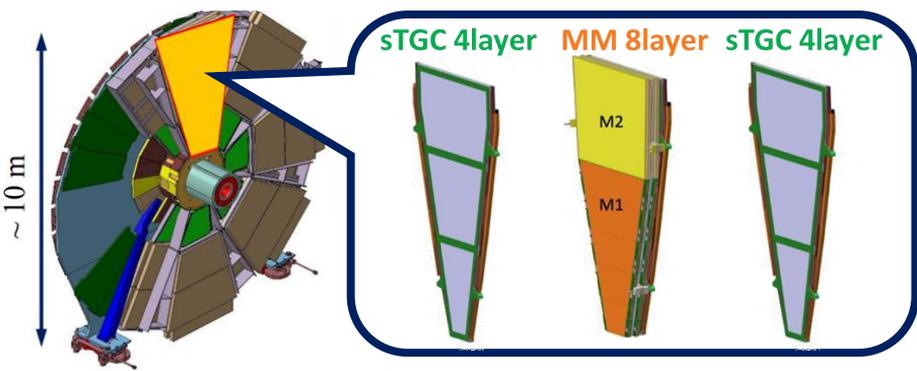


Big Wheel (BW)



BW 単体 51 kHz → BW + Upgrade with NSW ~15kHz : Run3 での要求 (15kHz 以下) を満たす。

BW – NSW トリガーシステム



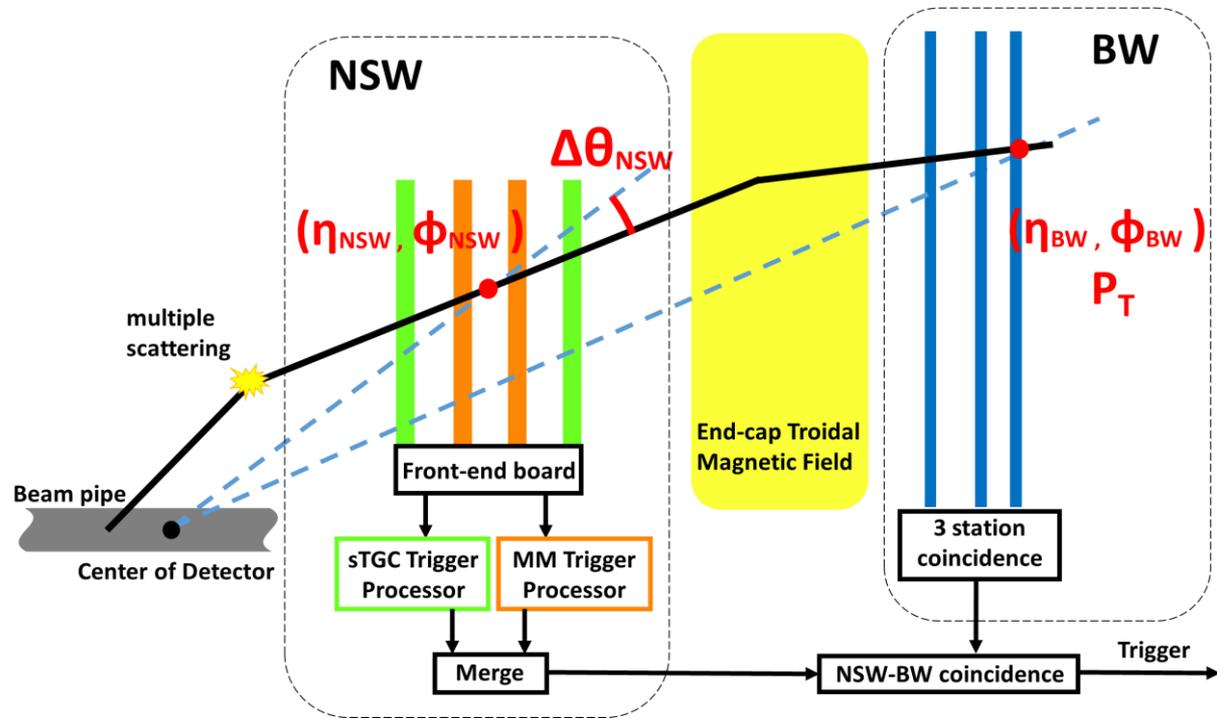
- NSW は8層の **small-strip TGC (sTGC)** と8層の **Micromegas (MM)** で構成されている。
- sTGC と MM が別々に track を再構成する。
- $\Delta\theta$ Cut (NSW の Fake Track を削減)
中心方向を向いていない Track は Fake

BW-NSW Inner coincidence

1. $\eta - \phi$ coincidence (Fake Trigger を削減)
2. $\eta - \Delta\theta$ coincidence (p_T 判定をより正確に)

NSW 要求性能

η	ϕ	$\Delta\theta$
0.005	20mrad	1mrad



本研究の目的

NSW において精度の高い muon の track を後段に送ることで、より高性能なエンドキャップレベル1ミューオントリガーを実現する。

• Run-3 (MM と sTGC がそれぞれ別に muon track candidate を作る)

- 後段に送る track 数を抑えるため、“近い” track ($\Delta \eta \leq 0.005, \Delta \phi \leq 50\text{mrad}$) が来た時に1つ選ぶ。
- 最も精度の良い track を後段に送る方法を開発。
- track を選ぶ際に使える情報は以下の5つのみ。track の精度を表す **quality** を効率よく定義。

情報	sTGC quality	MM quality	$\Delta\theta$	ϕ	η
ビット幅	2	2	5	6	8

↑ (NULL, Low, Medium, High)

• Run-4 (MM と sTGC を組み合わせた Algorithm が使える)

- MM & sTGC Merge Algorithm の開発(主に $\Delta \theta$)

• シミュレーションでシングルミューオンイベントを作成し開発及び性能評価を行った。

Micromegas トリガーアルゴリズム

1 最速のstripのみを選び出す

- $\sim 450 \mu\text{m}$ の細かい pitch
- 全ての信号は処理しきれない
- 64ch(ASIC) ごとに最速のstripのみをTrigger用に使用

2 3X3UV のコインシデンス条件でtrackを見つける

- 傾きごとにMMの領域を分割(slope load)。
- MM は 3種類のlayer (X, U, V) で構成されている。
- Slope load内で X layer が3つ以上、UとV layer が合わせて3つ以上を要求。

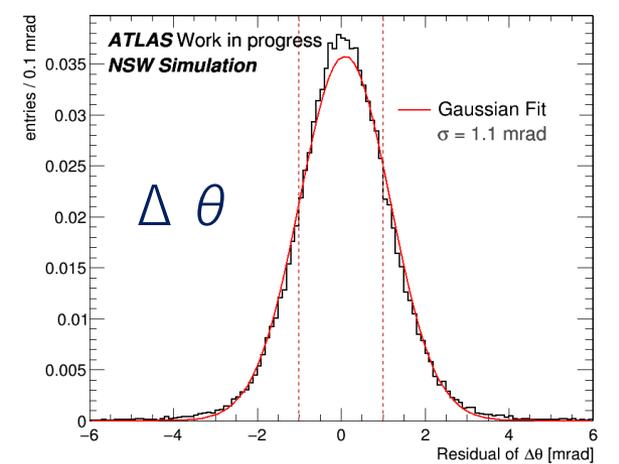
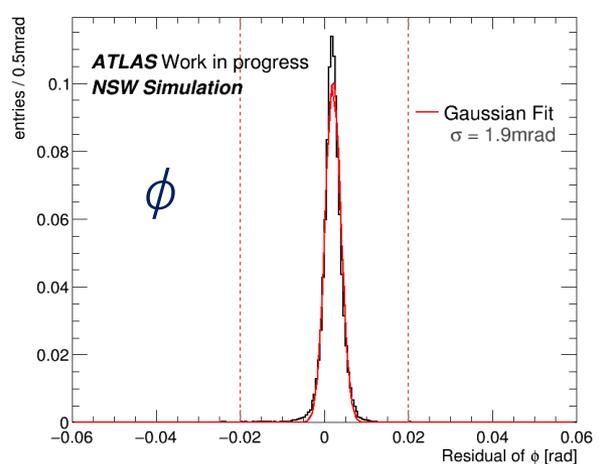
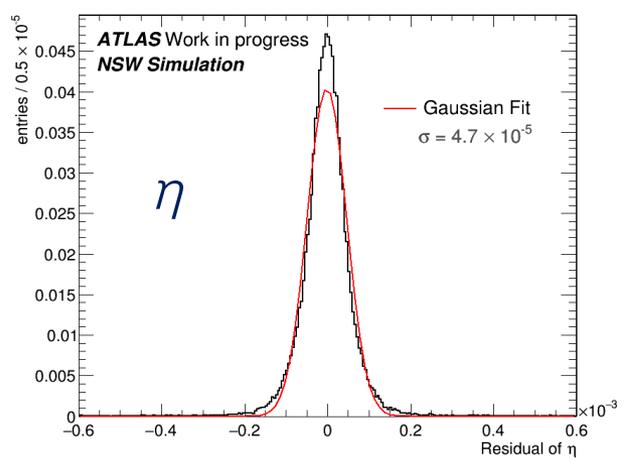
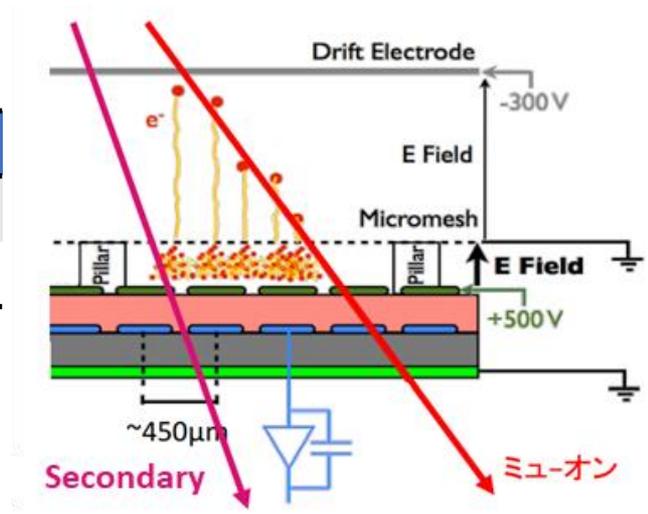
3 X layer で η と $\Delta \theta$ UV layer で ϕ を算出

- X layer から η と $\Delta \theta$ を算出
- UV layer はそれぞれ 1.5° 傾いている。
- UV layer から ϕ を算出

Micromegas トリガー性能

- ✓ 要求性能 を満たしている。
- ✓ 精度の悪いtrackの主な原因は Secondary粒子の Hit の混入によるもの。

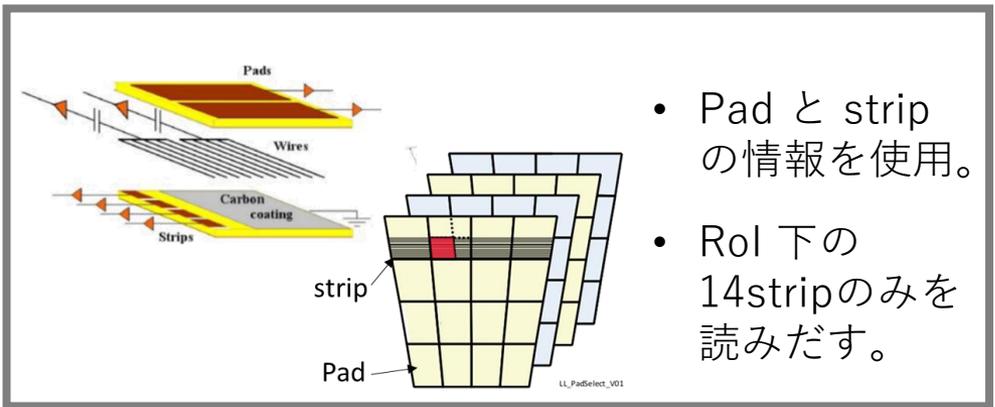
MM	η	ϕ [mrad]	$\Delta\theta$ [mrad]
Resolution(Gaussian Fit)	4.7×10^{-5}	1.9	1.1
Requirement	5×10^{-3}	20	1



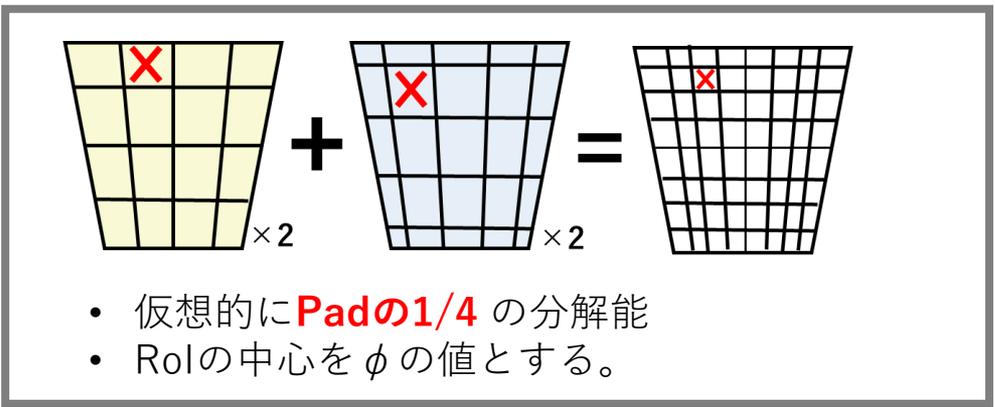
small-strip TGC トリガーアルゴリズム

全てのstripは処理しきれないためPadを用いて処理するstripを選び出す。

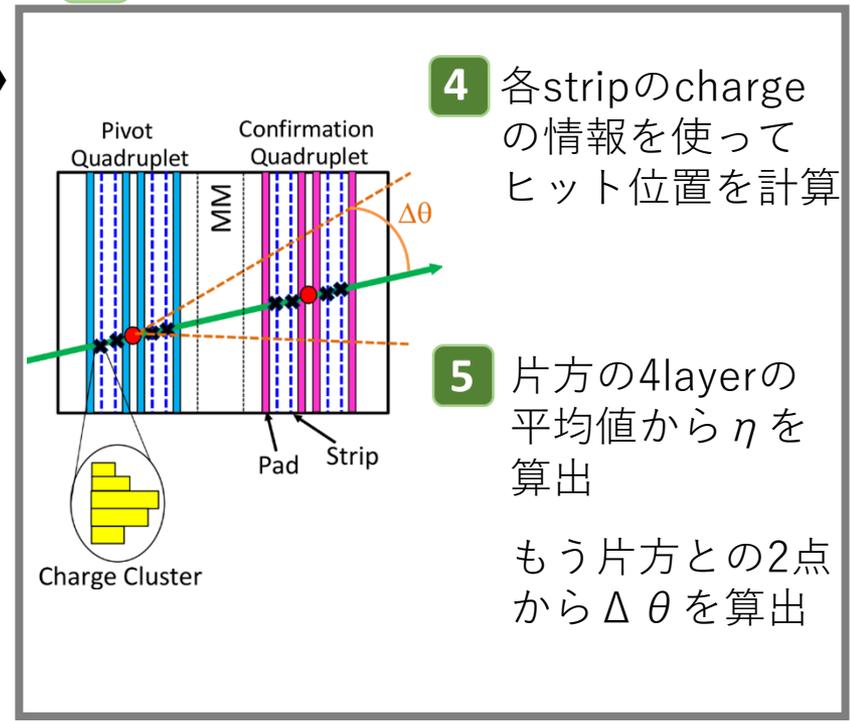
- 1 Padのみを先に処理
- 3 Rol 下の strip のみ読みだし



- 2 3 out of 4 コインシデンス × 2 でトラックを見つける。Rol を決定 → ϕ



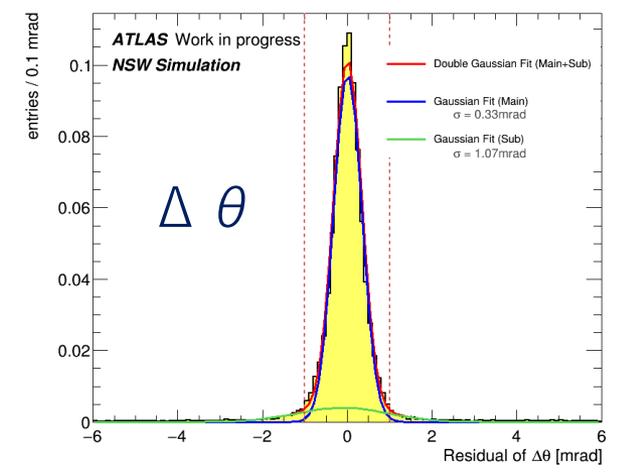
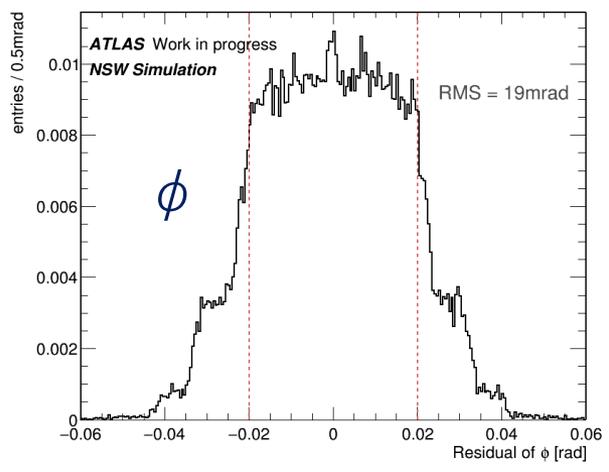
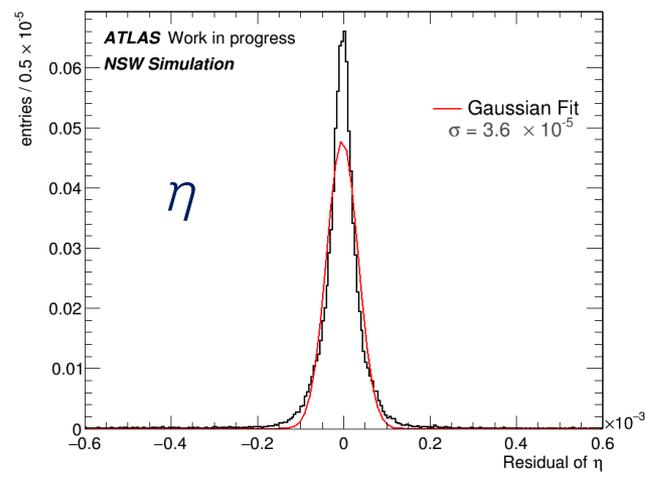
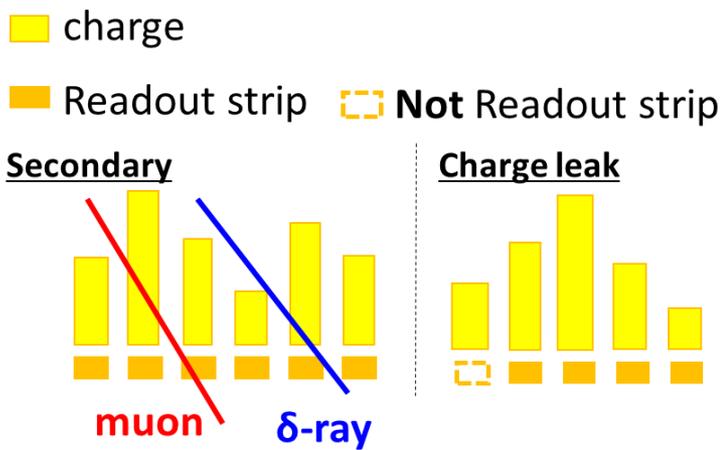
- 4 各layerでヒット位置を算出
- 5 4layerの平均値から η と $\Delta\theta$ を算出



small-strip TGC トリガー性能

- ✓ 要求性能を満たしている。
- ✓ ϕ は各RoIの大きさに対応した幅の一様分布の和になっている。
- ✓ $\Delta\theta$ は二つのガウシアンから構成される。
- ✓ 精度の悪いトラックはSecondary粒子またはCharge leak によるもの。

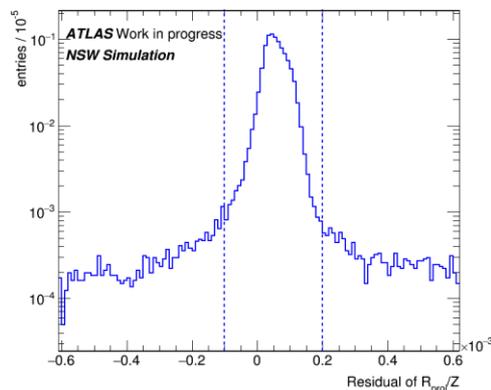
sTGC	η	ϕ [mrad]	$\Delta\theta$ [mrad]
Resolution(Gaussian Fit)	3.6×10^{-5}	19(RMS)	0.33 1.07
Requirement	5×10^{-3}	20	1



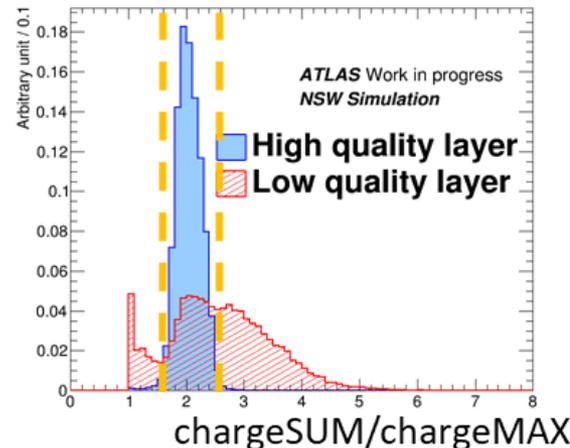
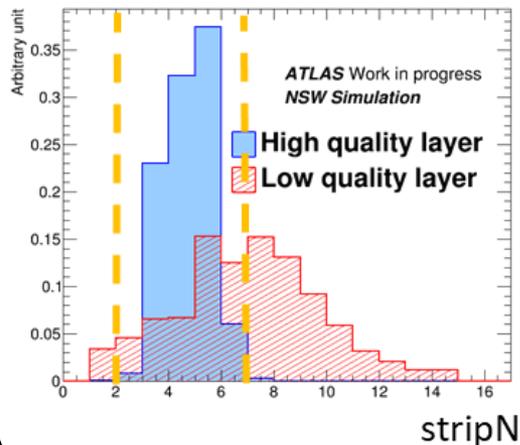
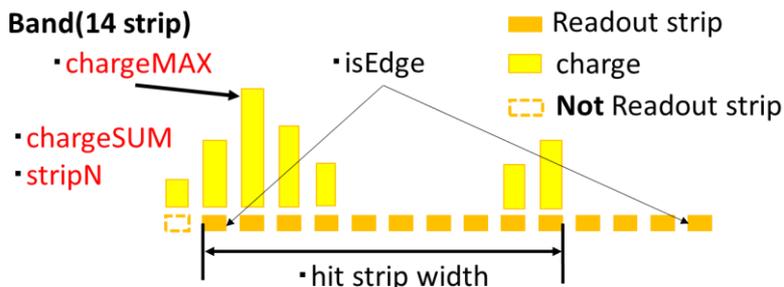
sTGC におけるトラックオリティ

- 8layerの内、いくつかのlayerが精度よくヒット位置を算出できたかが重要。
→始めにlayerが精度よくヒット位置を算出できているか判断できる変数を探す。

各layerでTruthとの差分を見た時、
点線の内側を精度の良い層と定義



下図5つの変数について精度よく算出できた時とできなかった時の違いを確認。



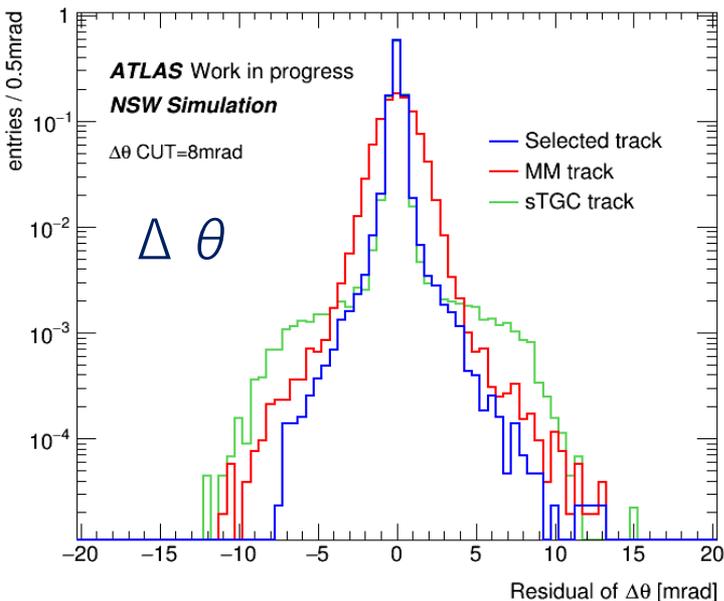
- stripN および chargeSUM/chargeMAX から各層の精度の良し悪しが判断可能。

- sTGC layer quality = $\begin{cases} +1 & \text{(High quality layer)} \\ -1 & \text{(Low quality layer)} \end{cases}$

- sTGC track quality = $(\sum \text{sTGC layer quality}) / \text{Num of layer}$

MM と sTGC 트랙의 선택手法(Run-3)

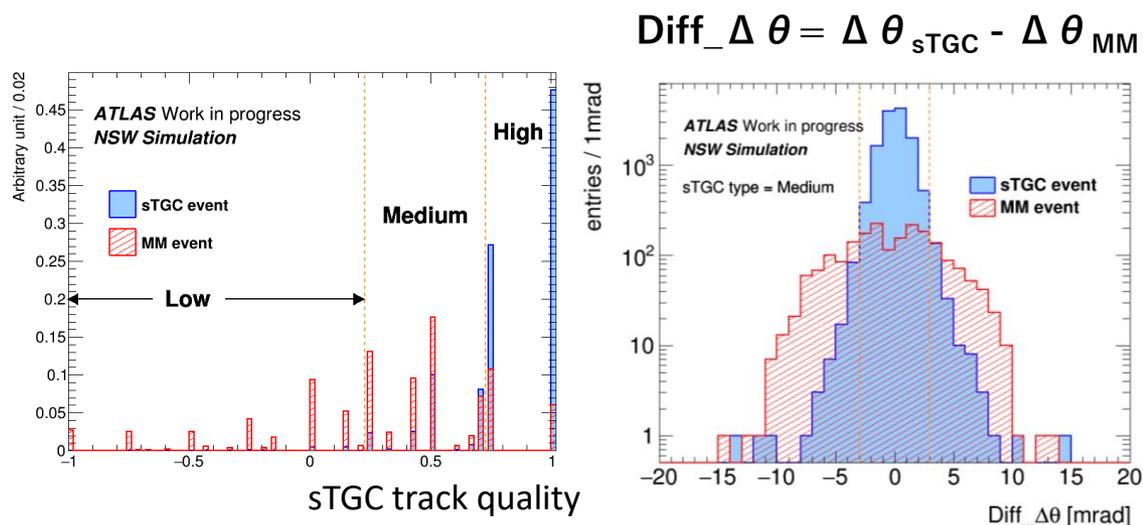
sTGC → 主な性能はMMより良いが大きく外れた値を出しやすい。
 MM → 主な性能はsTGCには劣るが大きく外れた値は出しにくい。



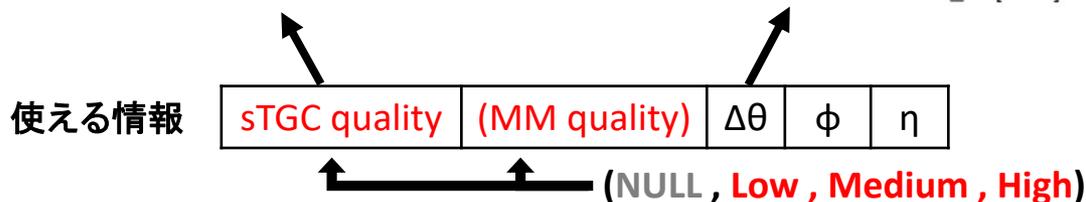
$d(\Delta\theta)$ が 1mrad を超える割合

MM track	sTGC track	Selected track
36.63%	6.54%	5.11%

sTGC のtrack candidate を選ぶべきイベントと
 MMのtrack candidate を選ぶべきイベントの違いを見る。



$$\text{Diff_}\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{sTGC}} - \Delta\theta_{\text{MM}}$$

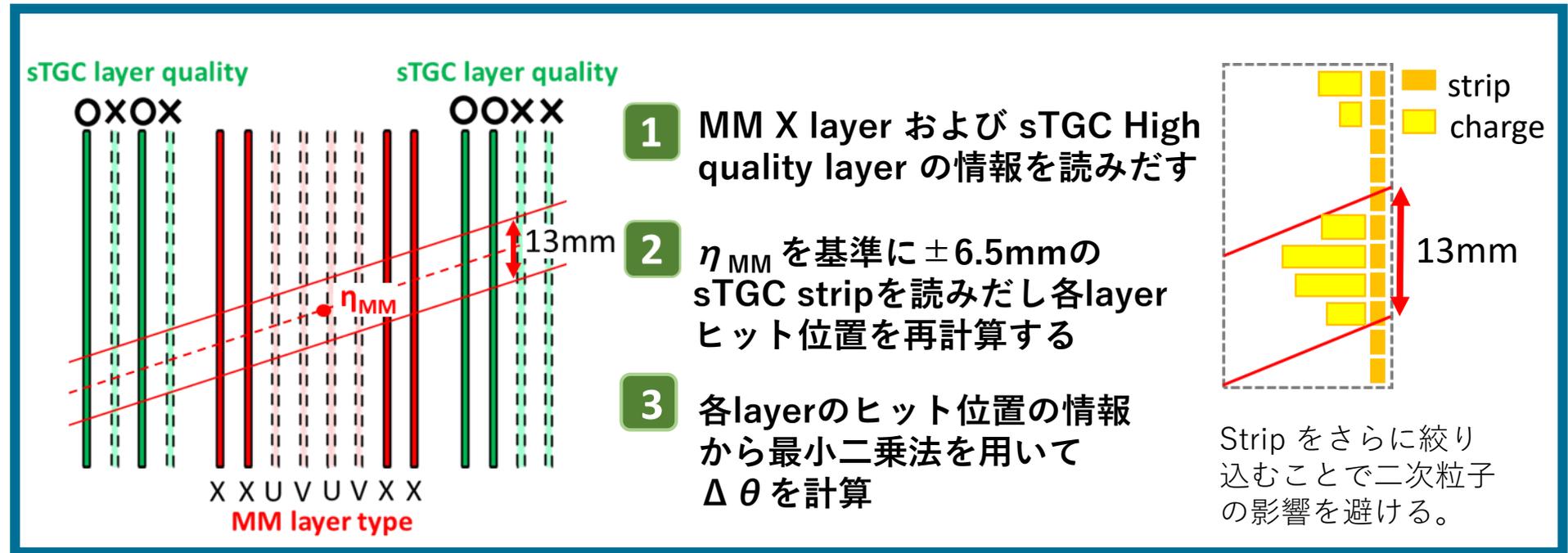
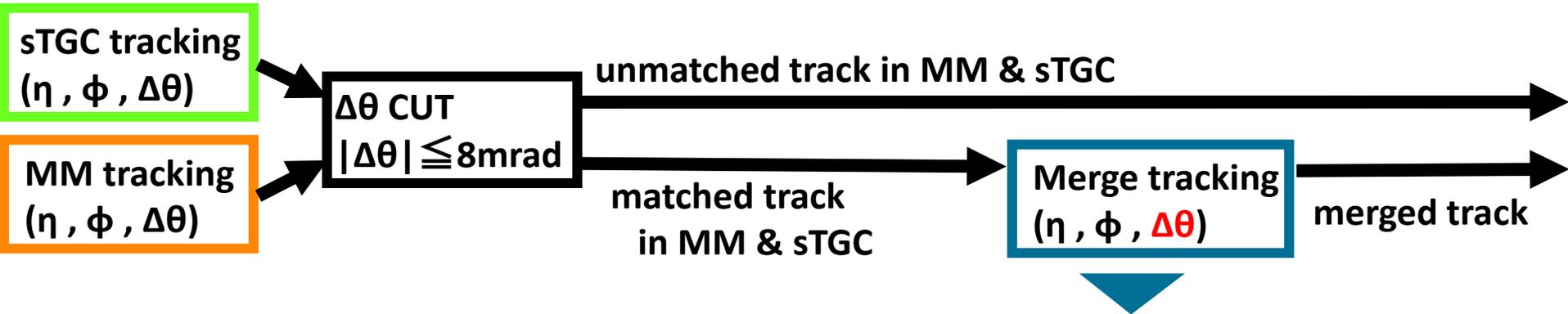


sTGC track を選ぶ基準

sTGC quality	High	Medium	Low
$ \text{Diff_}\Delta\theta $	$\leq 6\text{mrad}$	$\leq 3\text{mrad}$	$\leq 2\text{mrad}$

MM & sTGC マージアルゴリズム (Run-4)

・ MM , sTGC 別々だったものを合わせて tracking すれば更に精度が上がるはず。

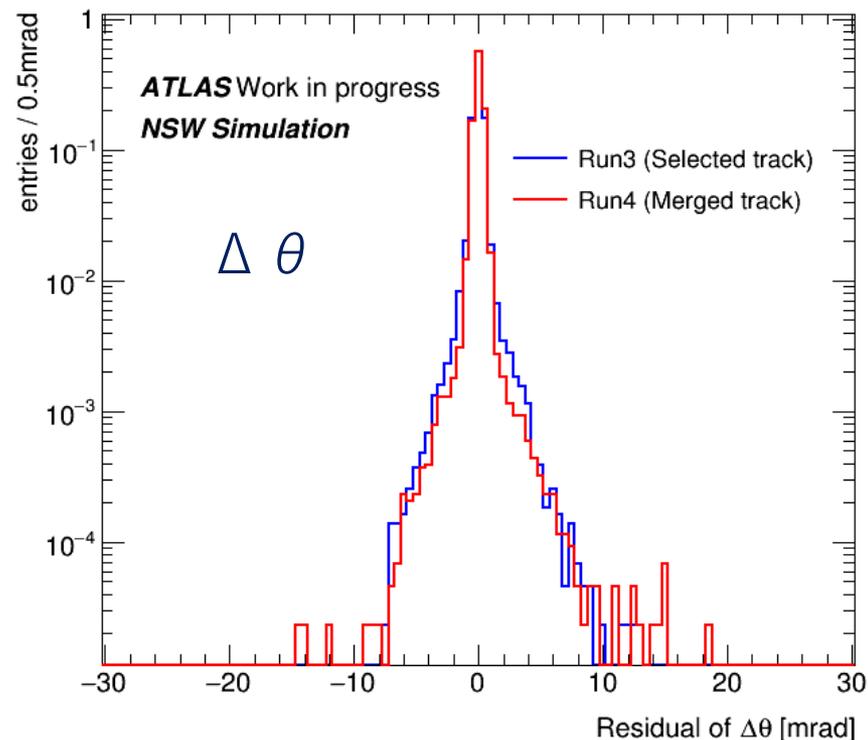


MM & sTGC マージアルゴリズム トリガー性能

$d(\Delta\theta)$ が 1mrad を超える割合

Run3 (Selected track)	Run4 (Merged track)
5.15 %	2.67%

Selected track と Merged track を比べると、 $d(\Delta\theta)$ が1mrad を超える track candidate の数を **48.2%** 削減。



• まとめ

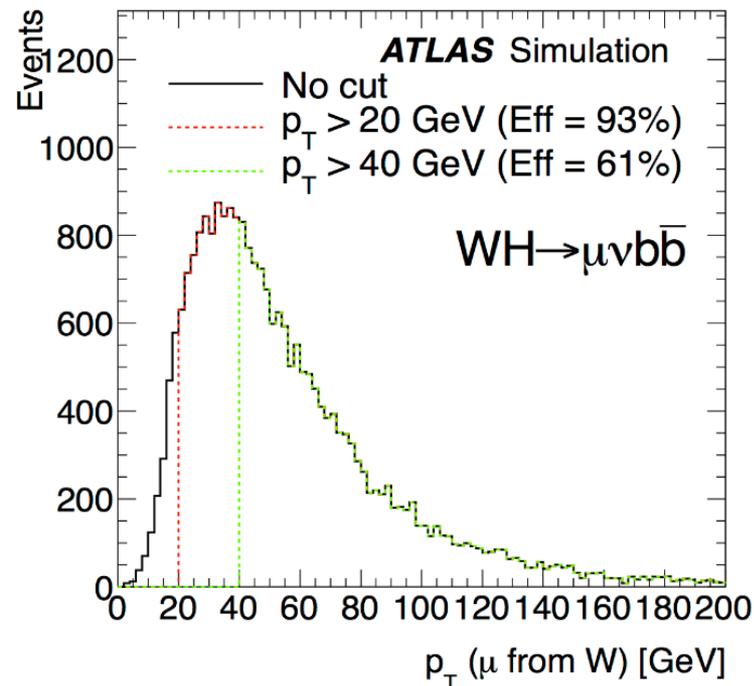
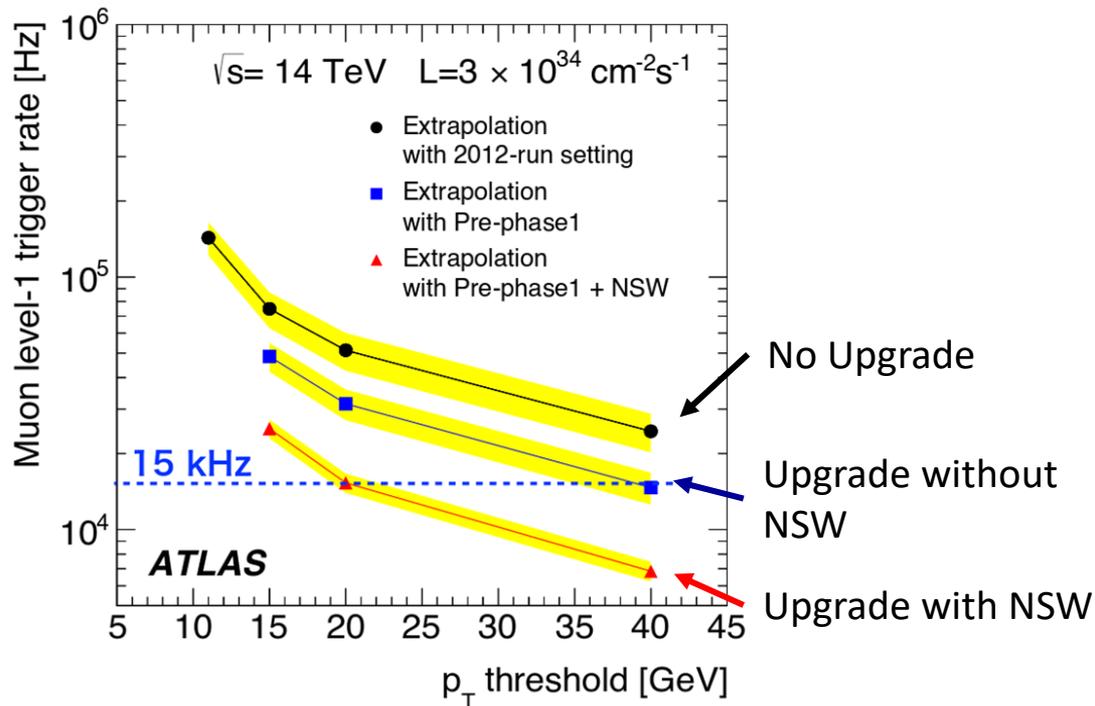
- ATLAS 実験ではルミノシティの増加に備えて新たにNSWを設置予定。
- 精度の良いtrackを後段に送るAlgorithmの開発が必要。
- sTGC において track の精度を判定する指標として、各層での stripN および chargeSUM/chargeMAX の値が有用であることを明らかにした。
- sTGC quality を定義し、Diff_ $\Delta \theta$ との情報から精度の良いtrackを選び出すことができることを示した。
- MM & sTGC Merge Algorithm を提案しtrackの精度を向上できることを示した。

• 今後の展望

- 各種パラメータの最適化によりさらに精度を上げることを目指す。
- バックグラウンドを含めた状態でどの程度精度の良い track を算出できるかを確かめる。

Back up

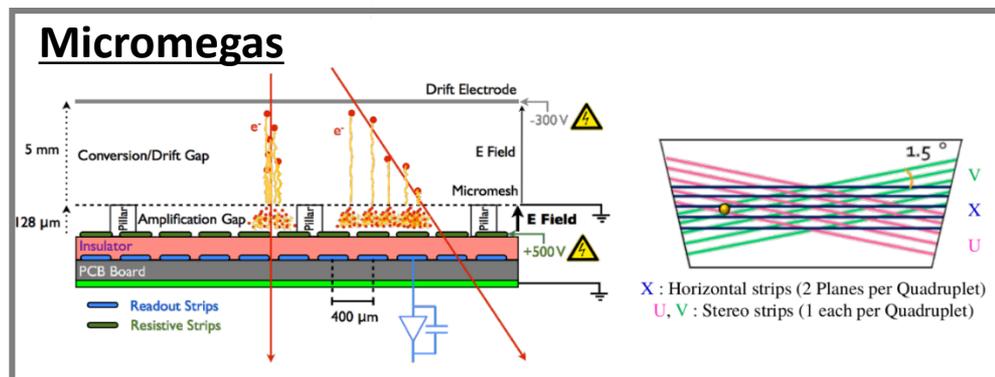
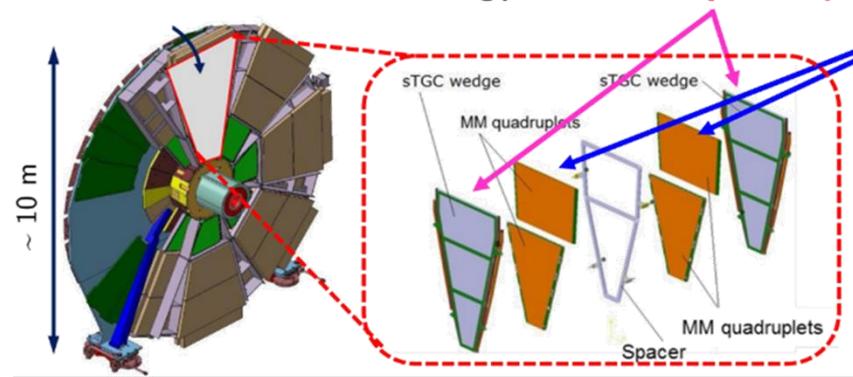
レベル1ミューオントリガーの p_T 閾値と物理への感度



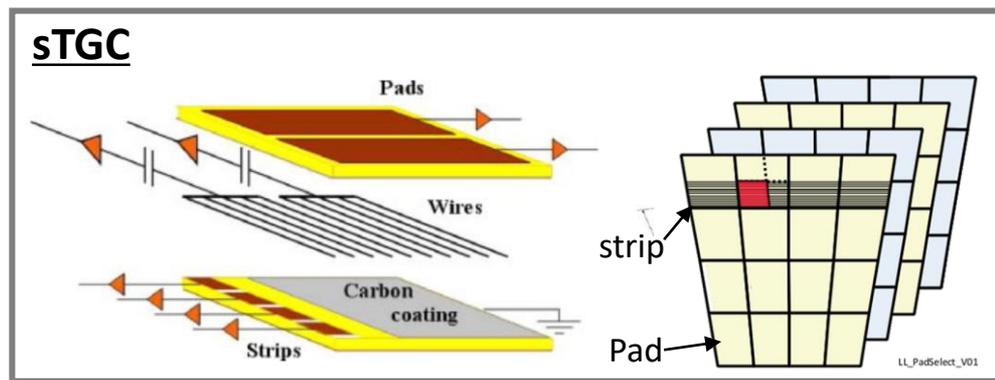
- ✓ レベル1ミューオントリガーではミューオンの横方向運動量を算出し、閾値として使用。
- ✓ トリガーレートの要求は **15kHz** 以下(Run-3 : 2021年~)。
- ✓ p_T 閾値を設けることでTrigger rate は下がるが background と ミューオン 両方減る。
→物理への感度が下がる
- ✓ Trigger の精度を上げてbackground だけを減らしたい。
- ✓ **New Small Wheel (NSW)** により閾値を上げることなくトリガーレートの要求を満たすことができる。

New Small Wheel 全体像

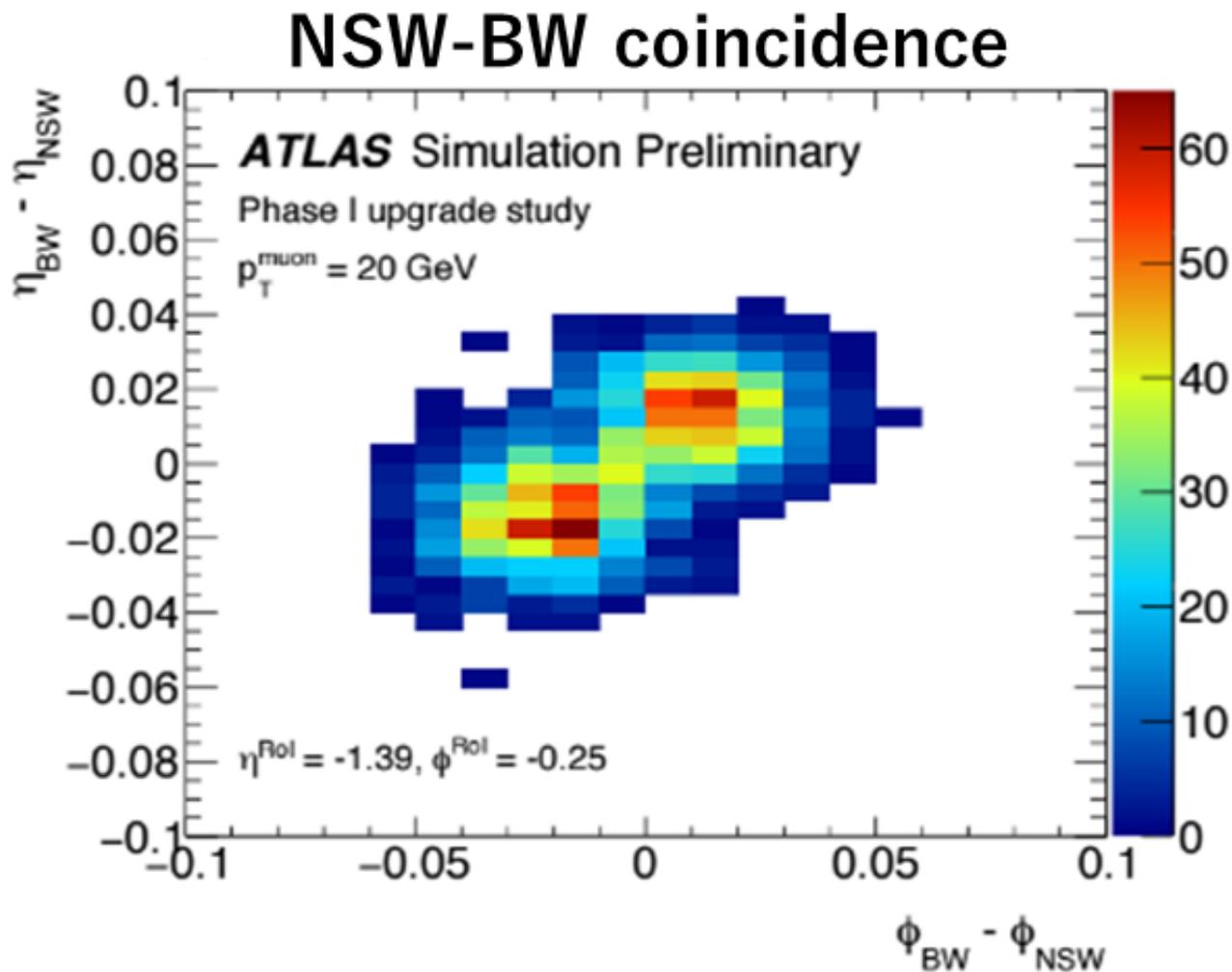
▶ NSW Detector technology: **Small-strip TGC (sTGC), Micromegas(MM)**



- ✓ 全 16 層 = sTGC 8層 + MM 8層。
- ✓ sTGC , MM , MM , sTGC の順で4層ずつ。
- ✓ Run-3のレベル1トリガーでは sTGC , MM が個々に muon の track を再構成
- ✓ Run-4 では組み合わせる事が可能



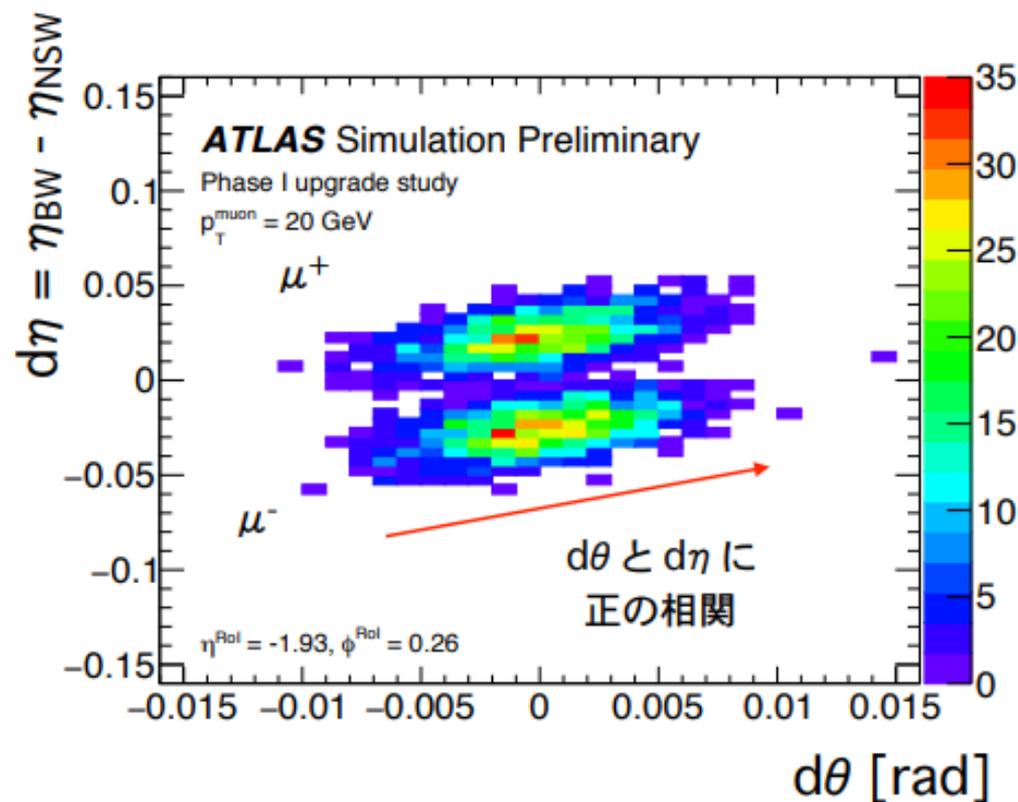
NSW-BW coincidence window



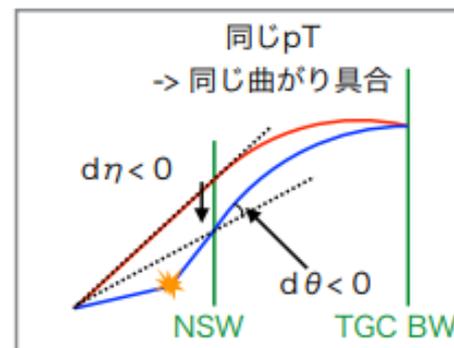
角度情報による p_T 分解能の改善

◆ 分布の解釈：

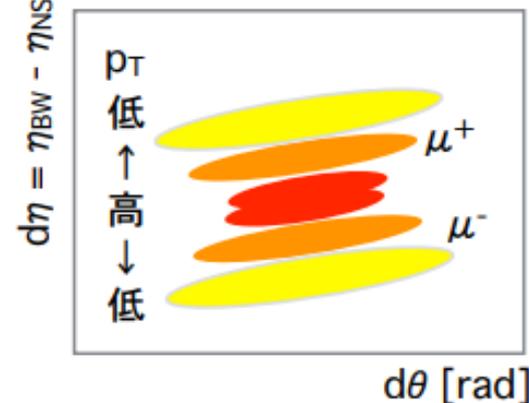
- ある p_T , ある電荷のミュオンに対して, NSW のヒット位置が中心から外れる
 → $d\theta$ も大きくなる



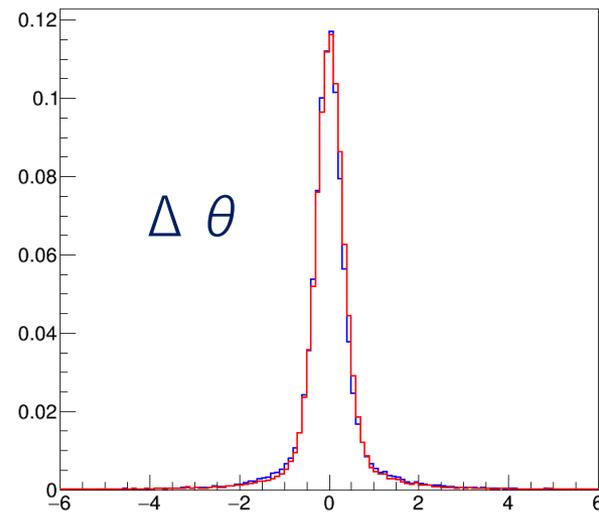
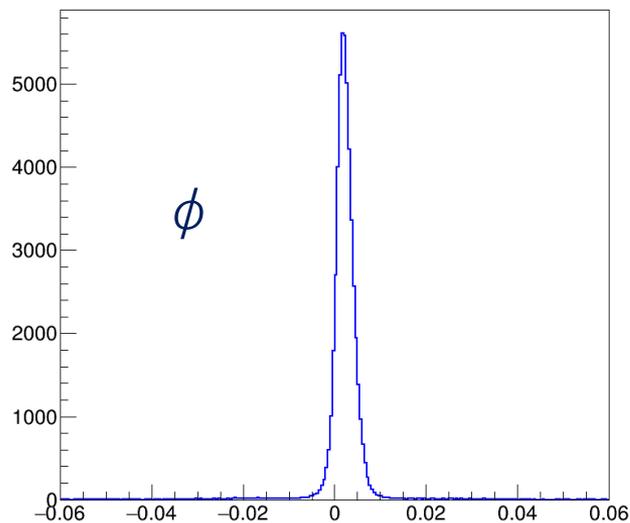
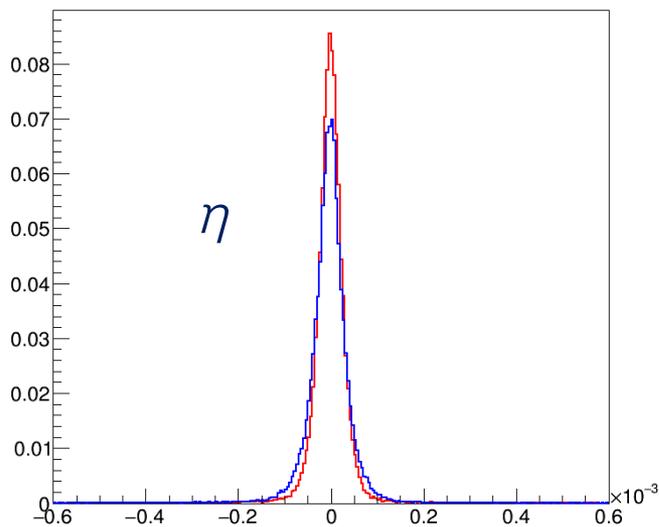
イメージ1



イメージ2



New Small Wheel Trigger 性能



Out of requirement track

0.68 %

4.0%

8.1%

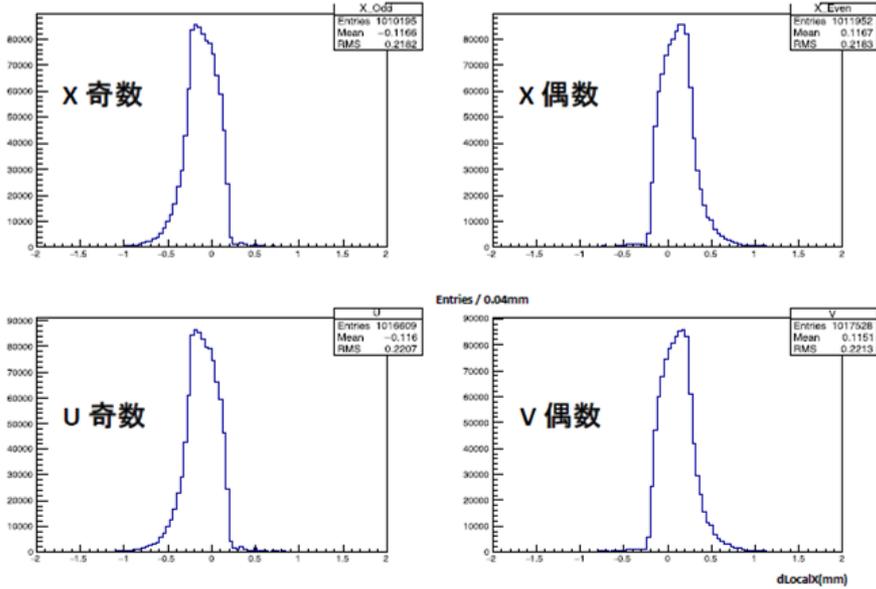
Out of requirement event

0.18%

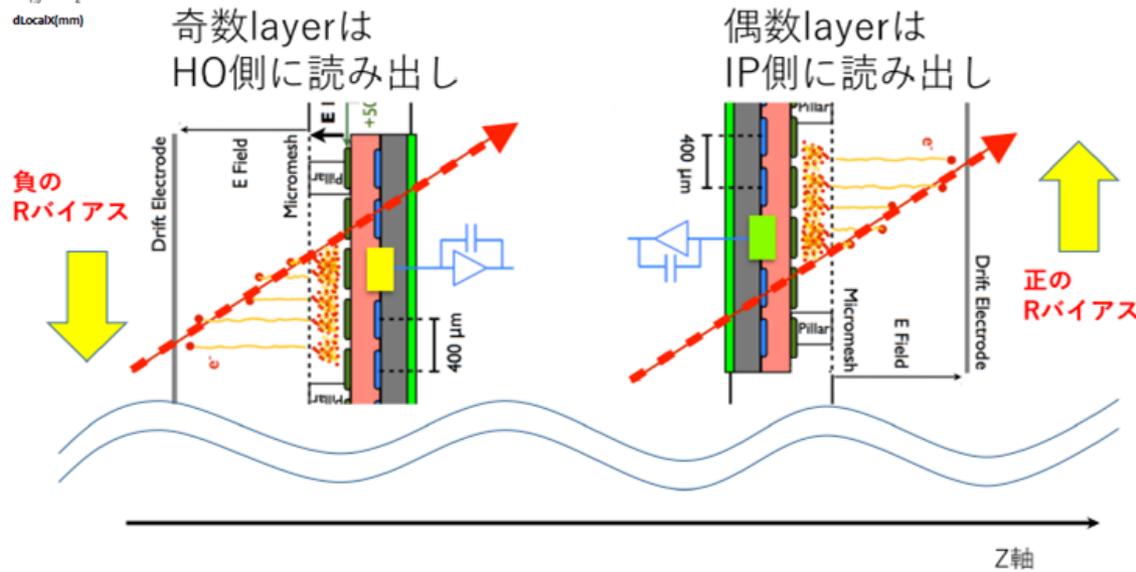
3.7%

7.0%(2.3%)

MM layer bias



横軸の目盛りは全て同一

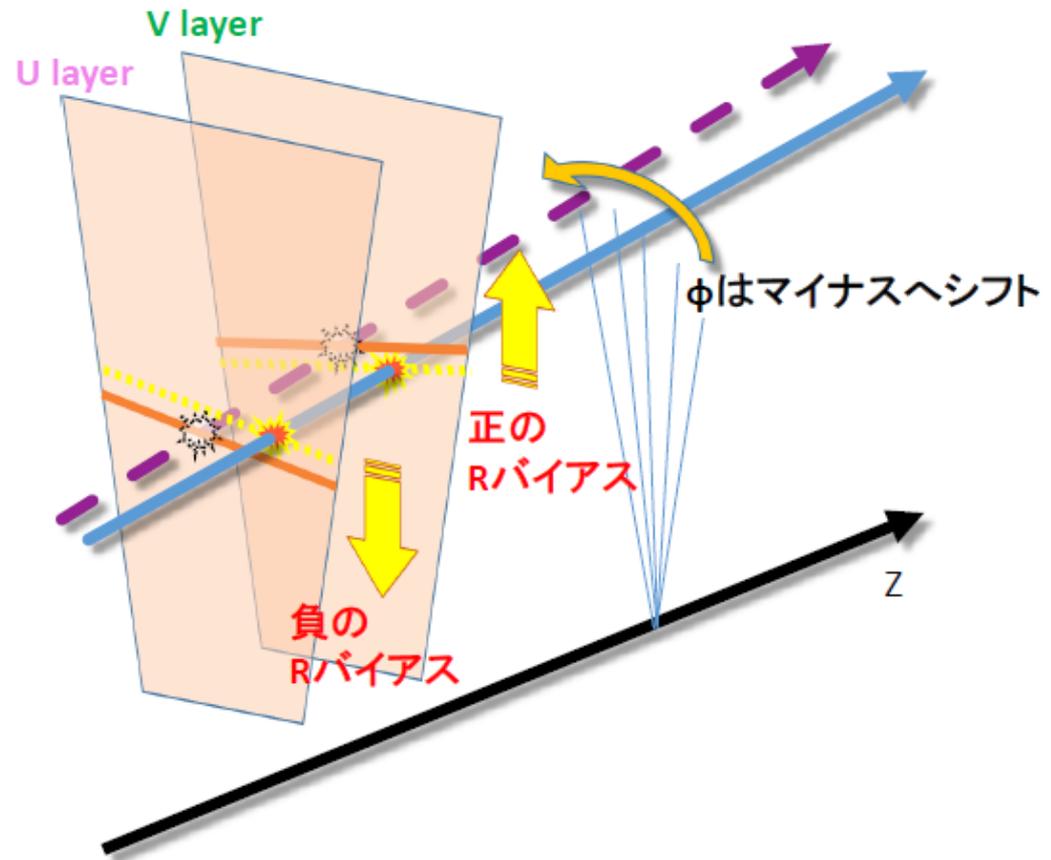


MM phi

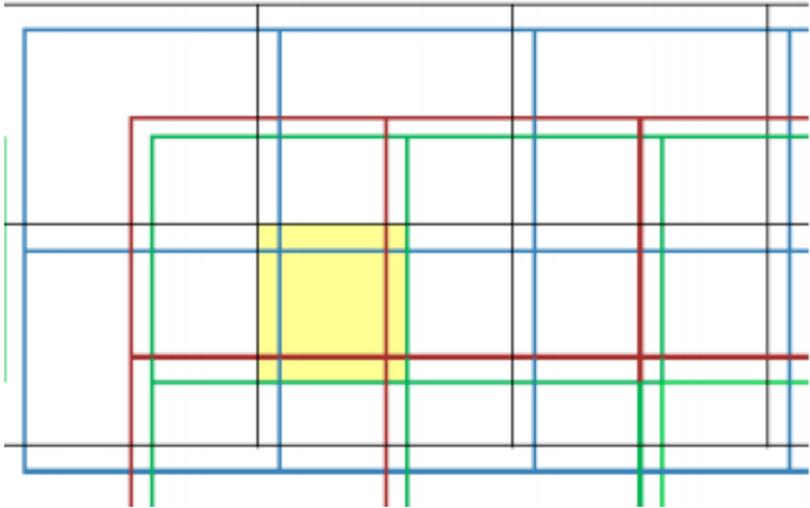
MMの構成では、

3層目は +1.5度 傾き、負のRバイアス
4層目は -1.5度 傾き、正のRバイアス
5層目は +1.5度 傾き、負のRバイアス
6層目は -1.5度 傾き、正のRバイアス

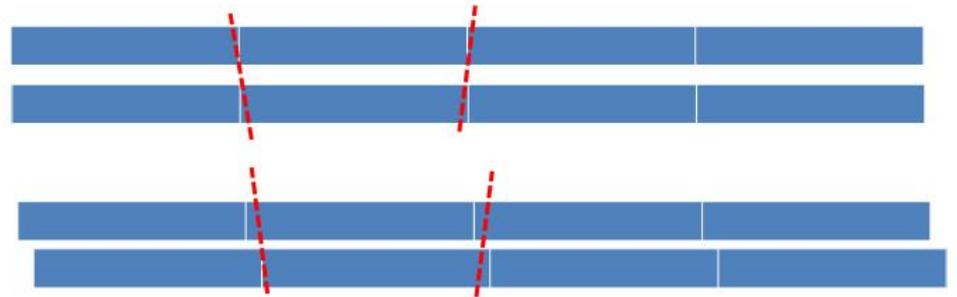
バイアスはキャンセルされない。



sTGC Pad structure



Why Fuzziness?



- Reduces the number of patterns
 - From 3 to 2 in 1-d
 - From 9 to 4 in 2-d
- The displacement has to be larger than the typical $\Delta\eta$ or $\Delta\phi$

Effect of 14 strip selection

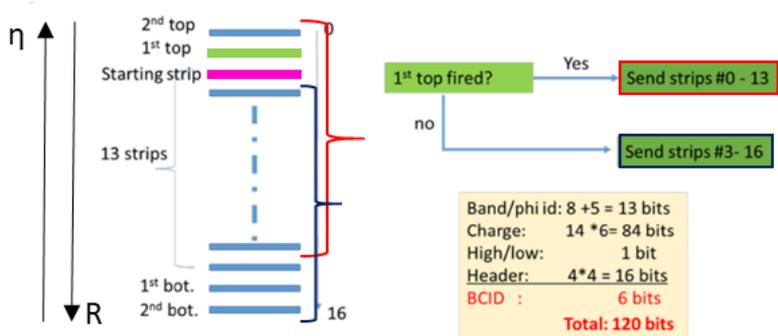
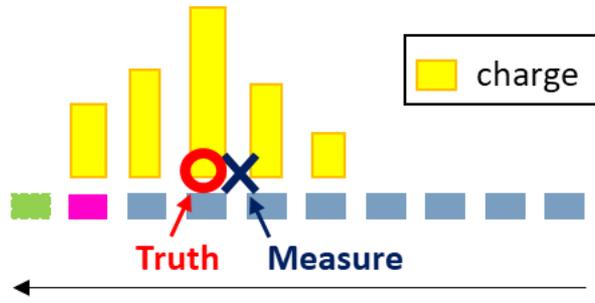
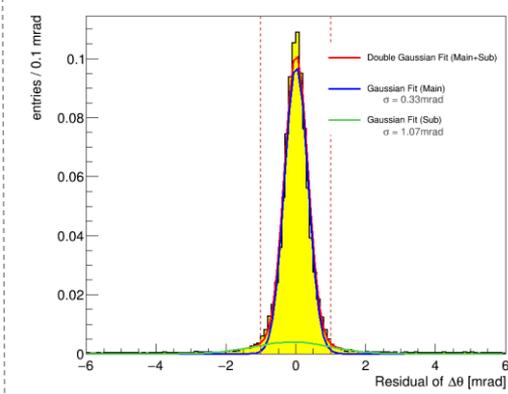
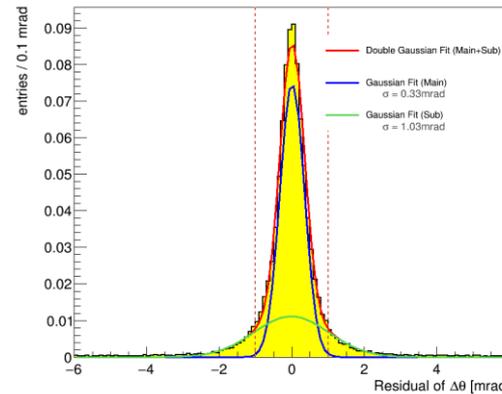
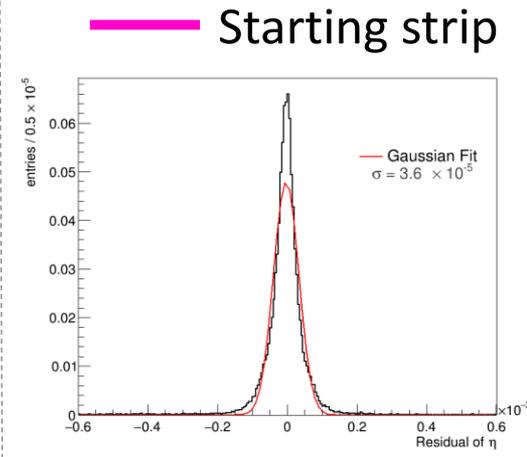
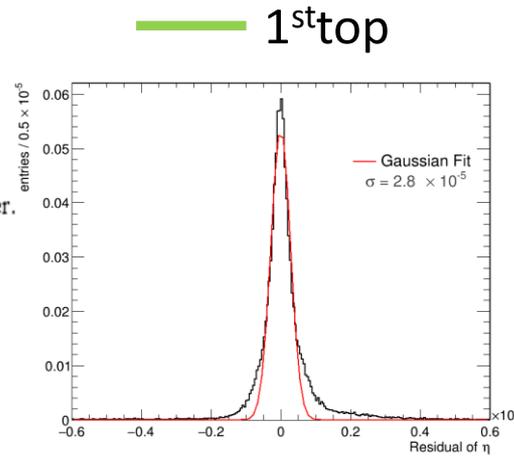


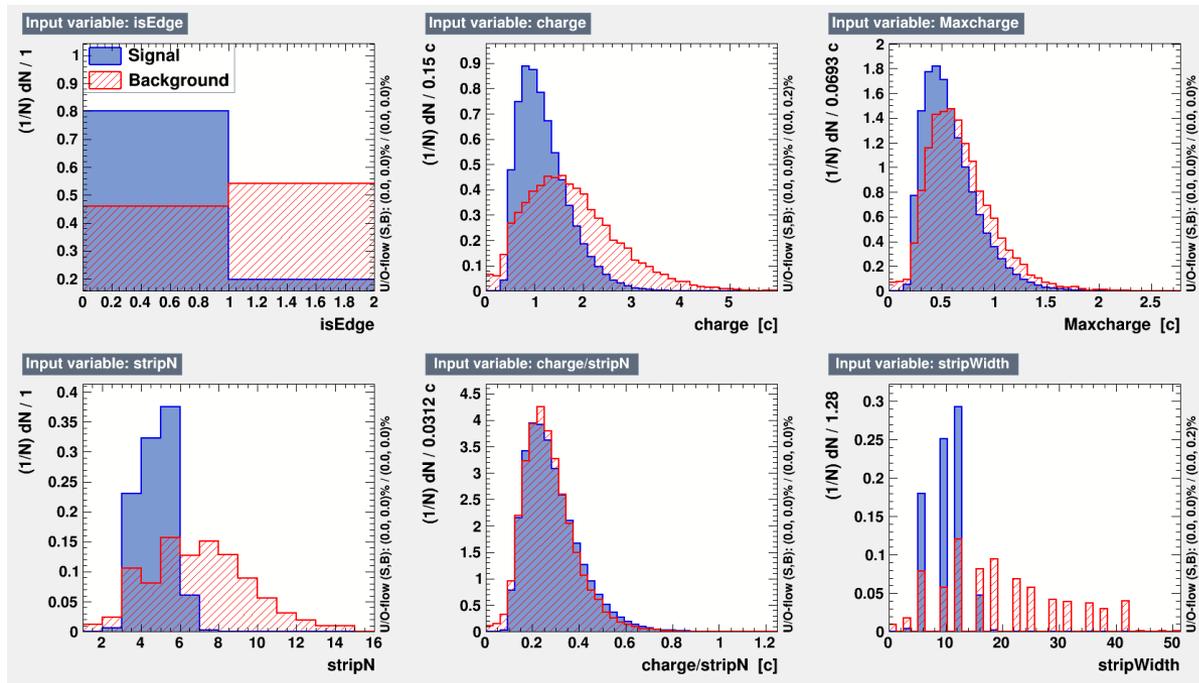
Figure 13. Algorithm for selection of 14 strips out of a total of 17 strips in a trigger.



- ✓ 14strip を選び出す時に、電荷をとり逃がしてしまう。
- ✓ η が小さな方に偏る。



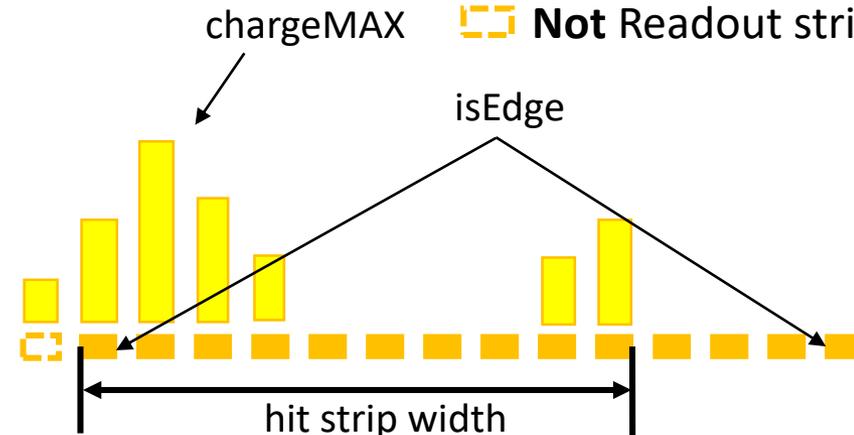
searching of sensitive variables for resolution quality



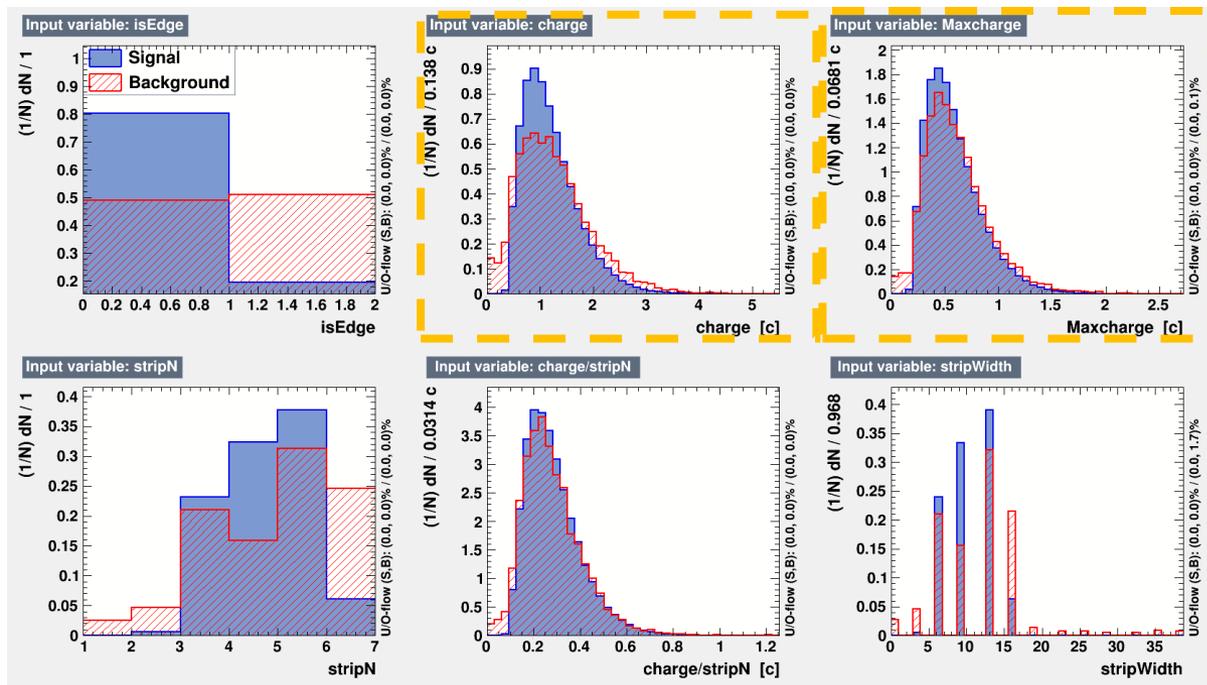
- Readout strip
- charge
- Not Readout strip

- ✓ 精度の悪いlayerの主な原因は **Secondary** と **Charge leak**。
- ✓ 明らかにstrip数が7以上のlayerは精度が悪い。
- ✓ はじめにstrip数6以内の制限をかける。

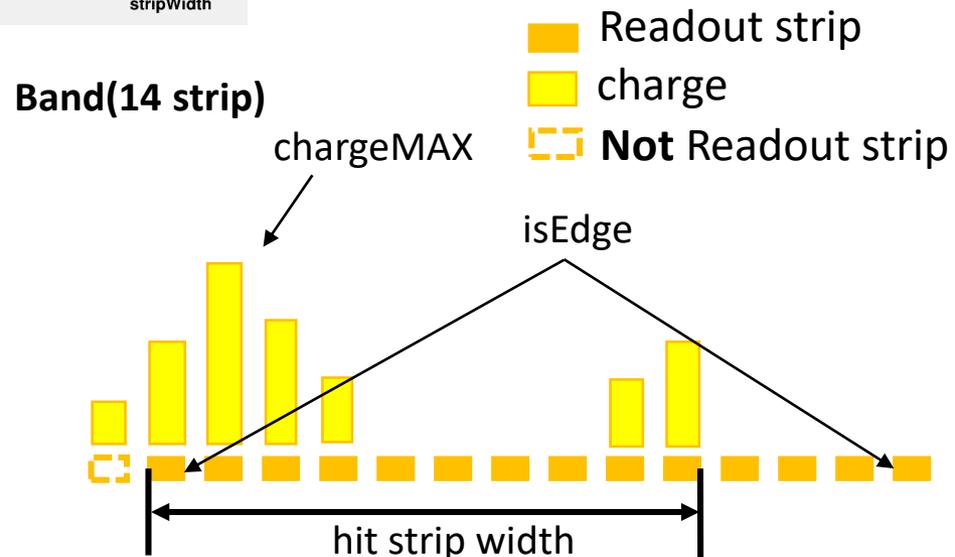
Band(14 strip)



searching of sensitive variables for resolution quality

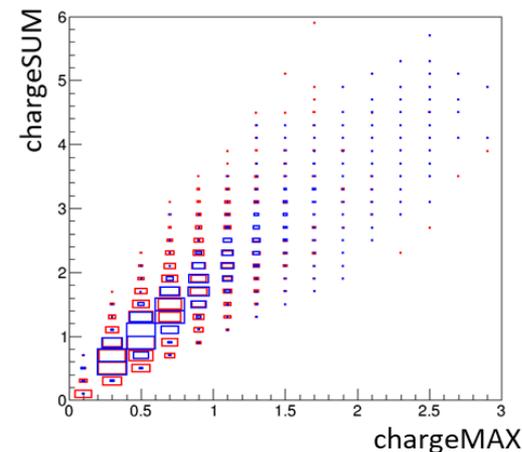


- ✓ どの変数を用いて、どのようにカットをかけるべきか把握するのは難しい...
- ✓ 機械学習(BDT)を用いて最適化を行った。
- ✓ chargeSUM と chargeMAX を用いるのが良いことが分かった。

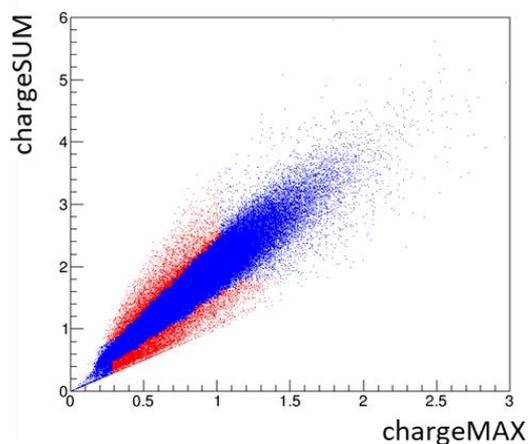


searching of sensitive variables for resolution quality

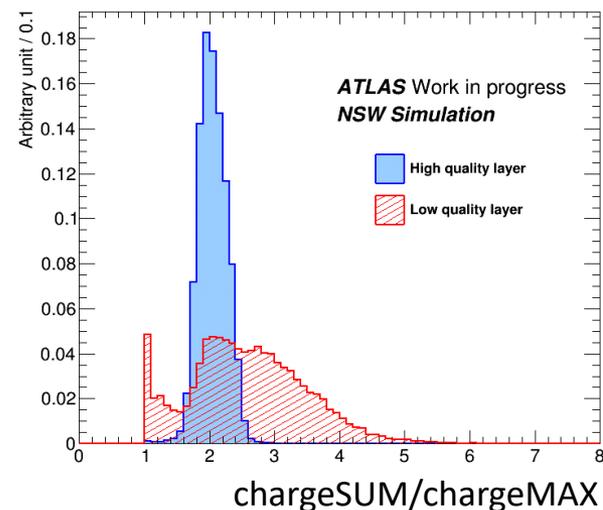
実際の分布(Signal : Background)



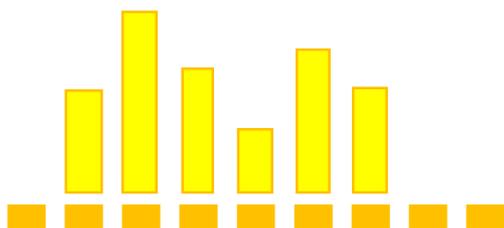
BDT Cut(Signal : Background)



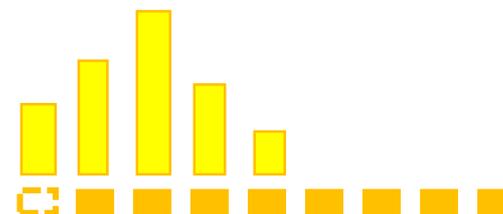
chargeSUM と chargeMAX
の比を見ればよい



Secondary $\text{chargeSUM} > \text{chargeSUM}_{\text{muon}}$

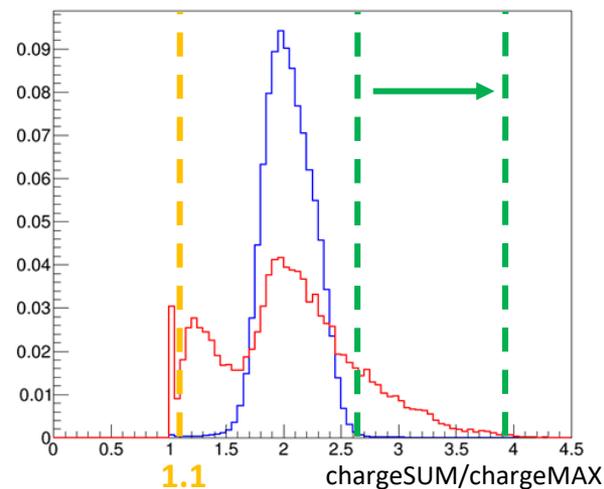
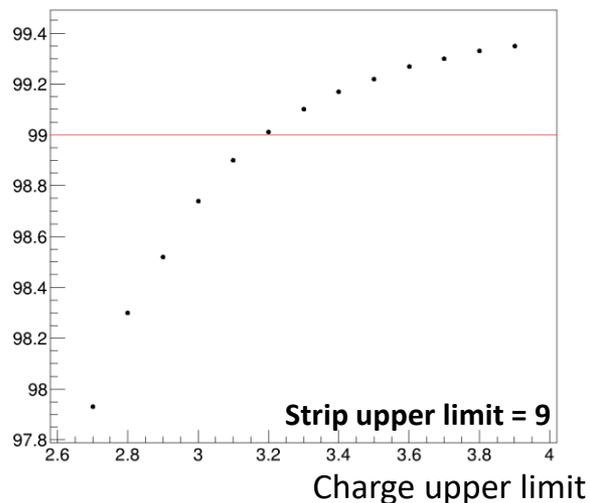
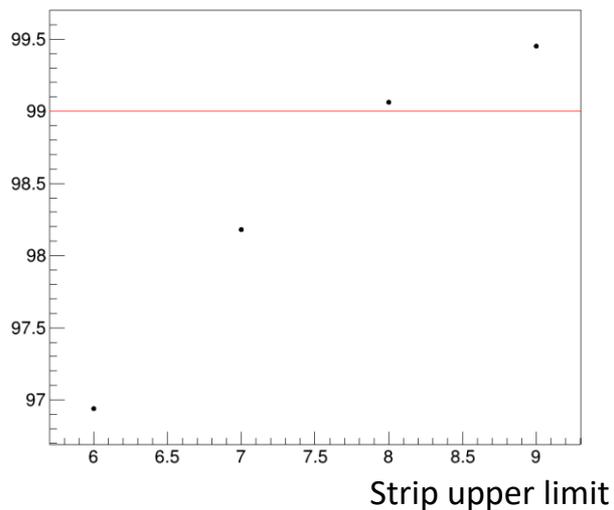


Charge leak $\text{chargeSUM} < \text{chargeSUM}_{\text{muon}}$



sTGC efficiency

4 layer すべてが精度の悪い layer として排除されてしまうと η 、 $\Delta\theta$ が計算できなくなってしまう。

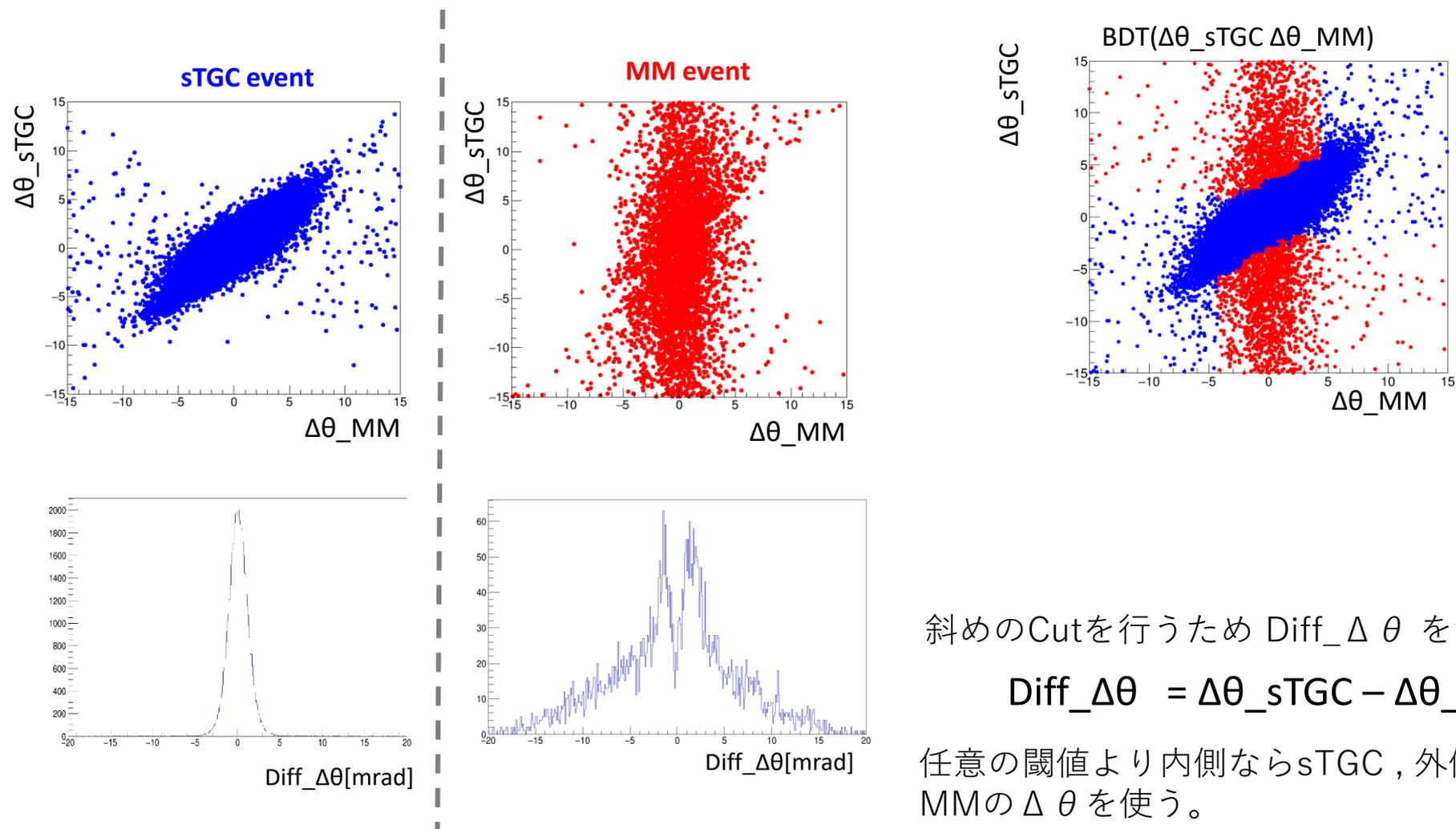


- ✓ Background を入れた時のefficiency の低下も考慮して 9strip は必要か。
- ✓ chargeSUM/chargeMAX は background を見てupper limit と lower limit どちらをきつく制限すべきか判断する。

$\Delta \theta_{\text{sTGC}}$ & $\Delta \theta_{\text{MM}}$

sTGC event : sTGC の $d(\Delta\theta)$ が最小または 1mrad に収まっている。

MM event : MM の $d(\Delta\theta)$ が最小かつ sTGC の $d(\Delta\theta)$ が 1mrad に収まっていない。

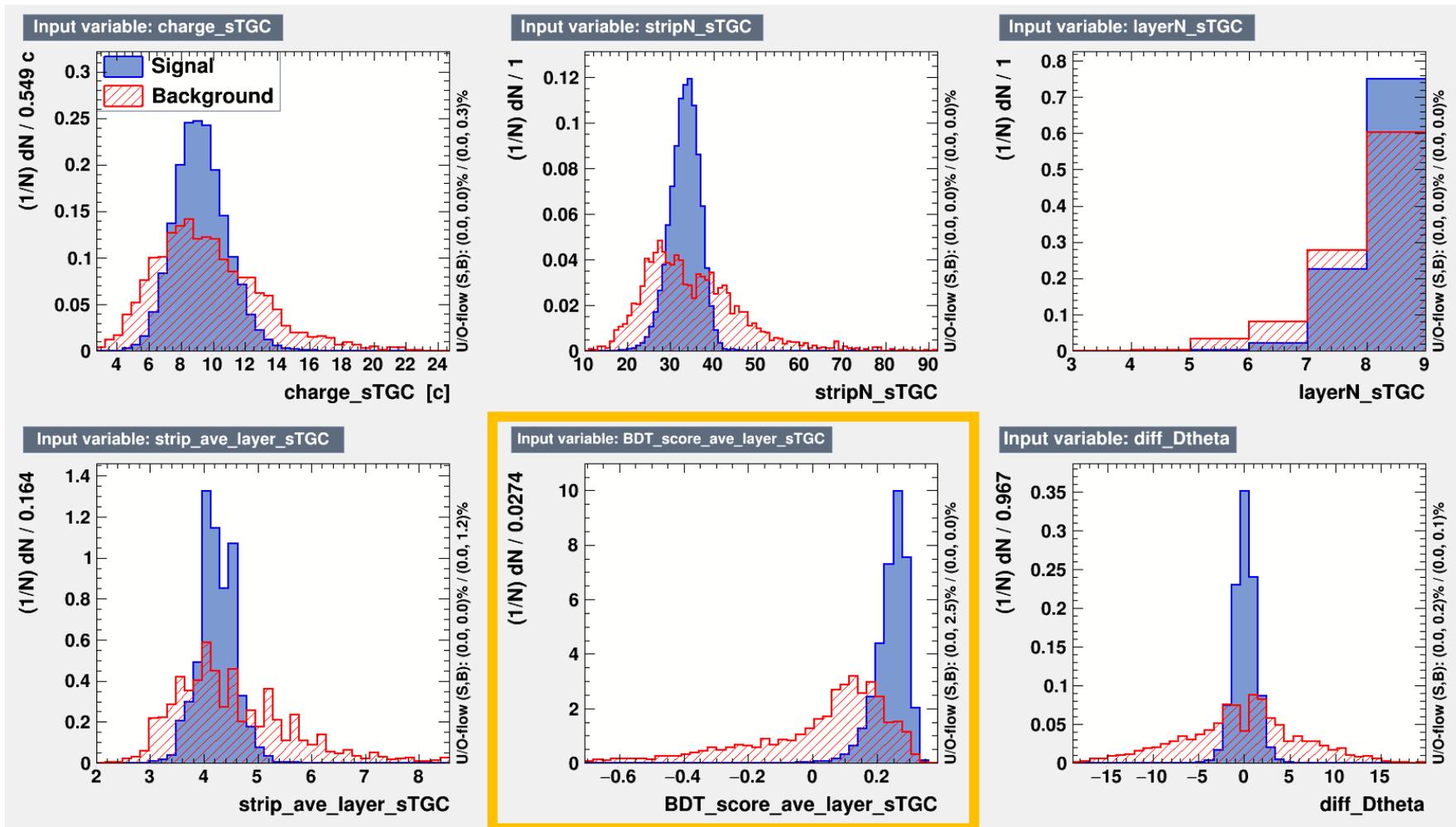


斜めのCutを行うため $\text{Diff_}\Delta\theta$ を導入

$$\text{Diff_}\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{sTGC}} - \Delta\theta_{\text{MM}}$$

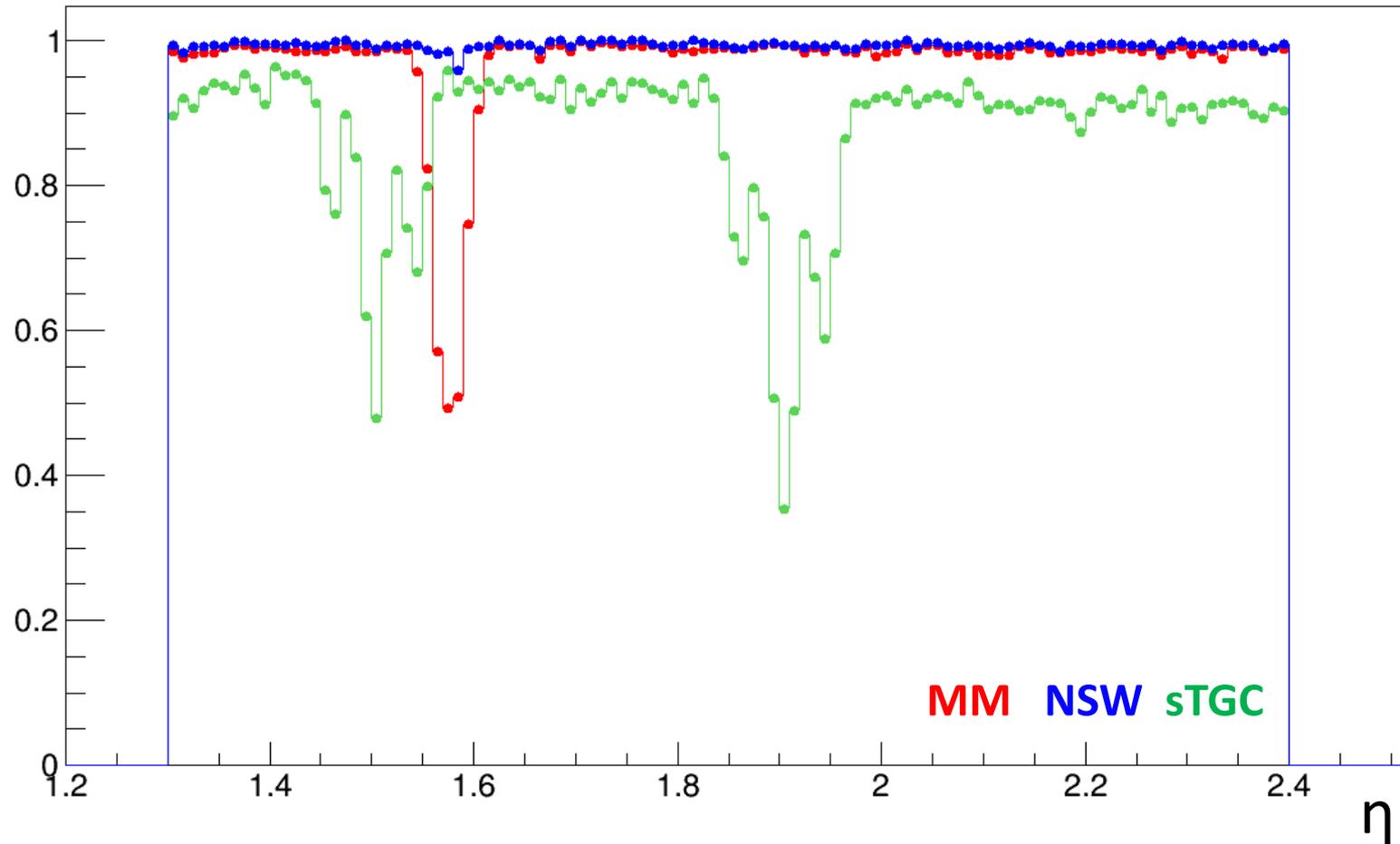
任意の閾値より内側ならsTGC，外側ならMMの $\Delta\theta$ を使う。

sTGC track quality

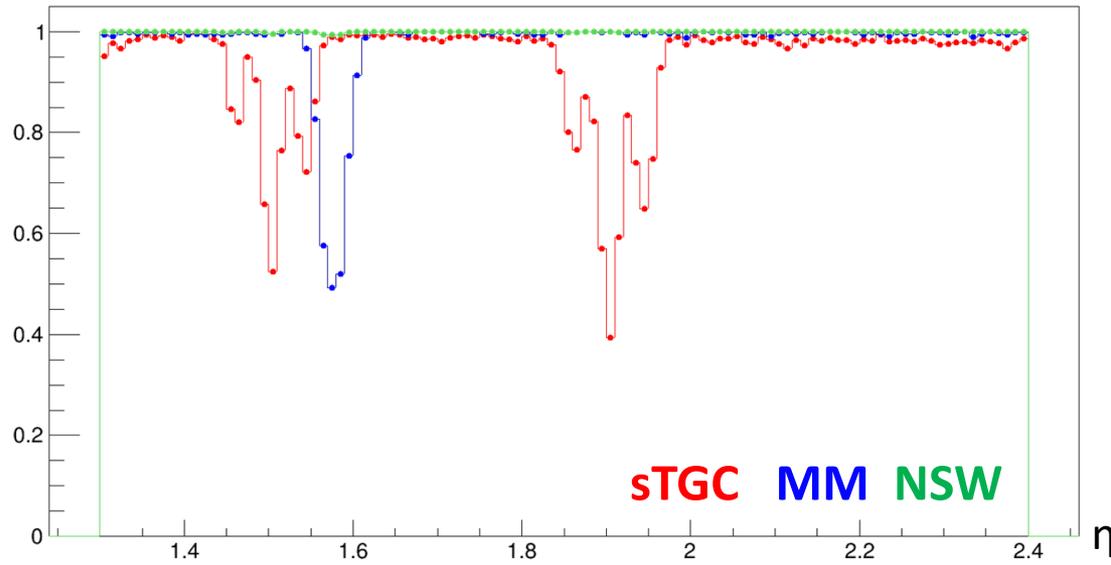


$\Delta\theta$ CUT = 8mrad

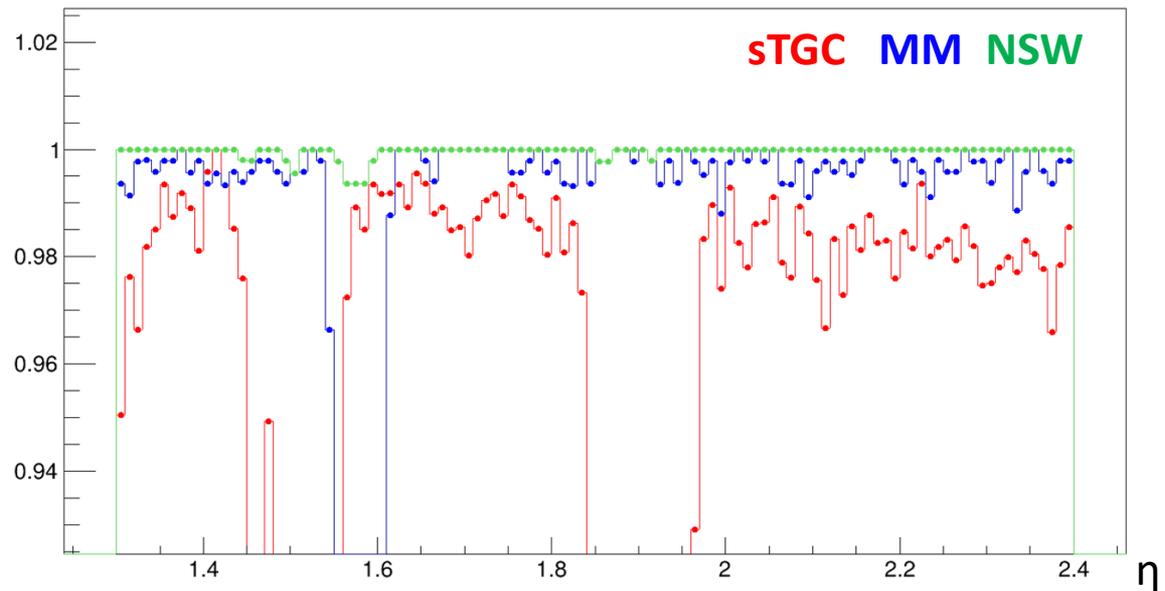
efficiency : 99.3%



efficiency

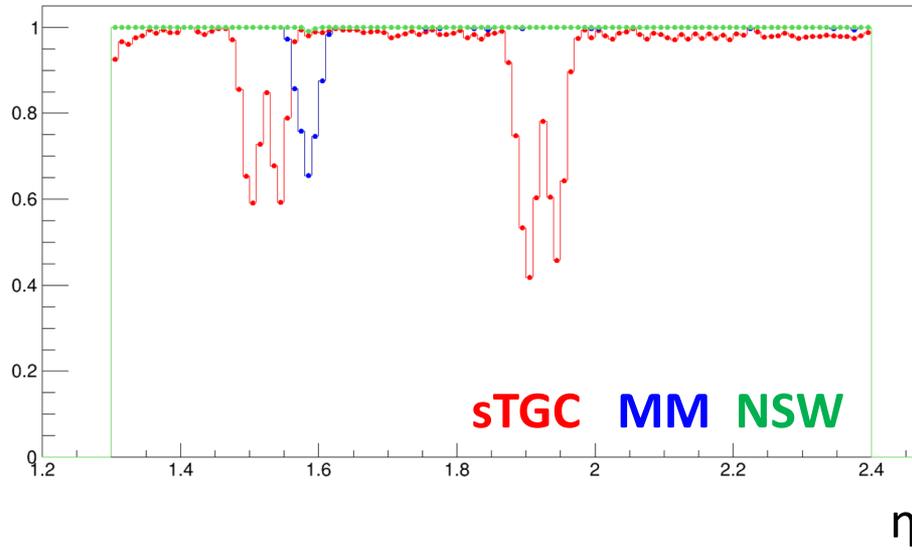


$\Delta\theta$ CUT なし

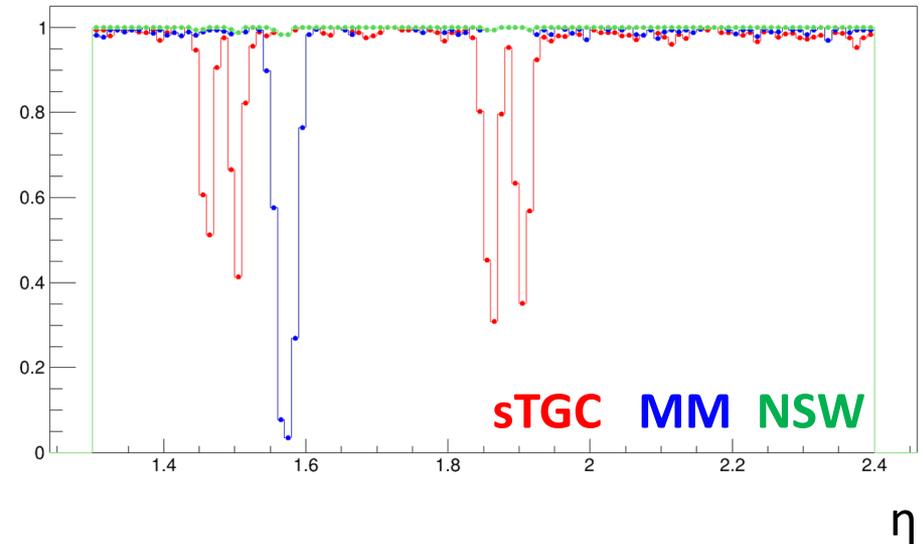


efficiency

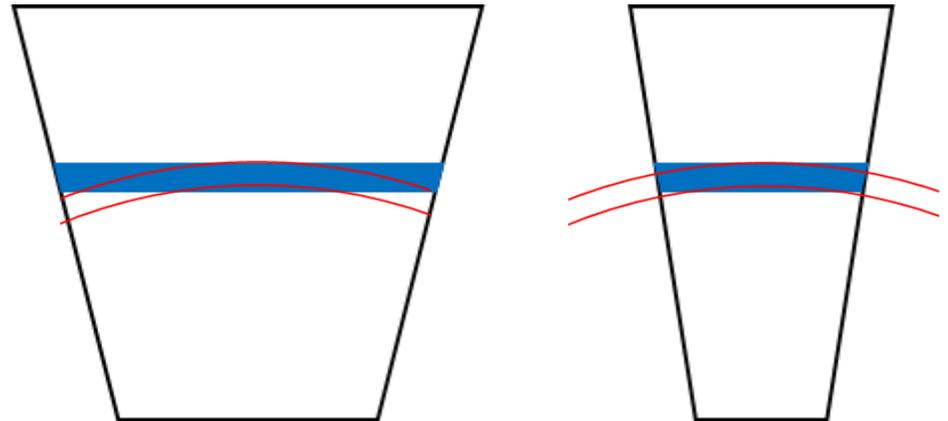
Large Sector



Small Sector

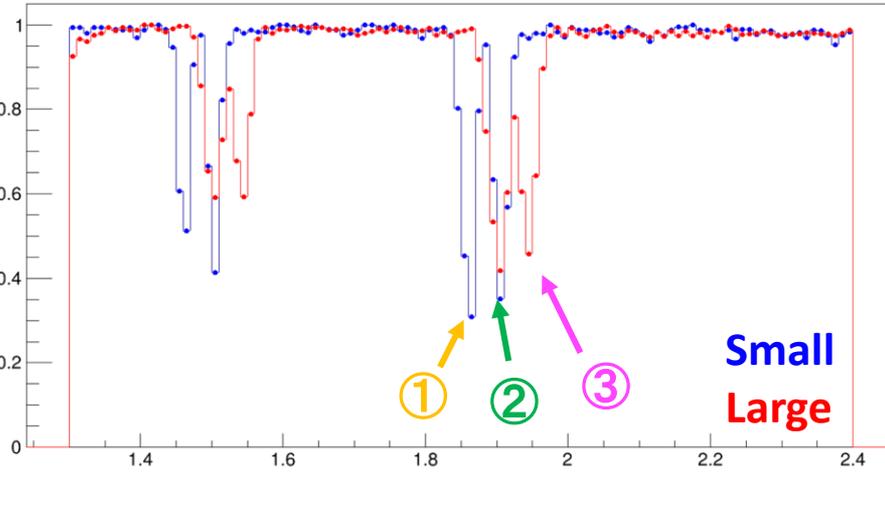


Small Sectorの方が不感領域での
efficiencyの下がり方が大きい →

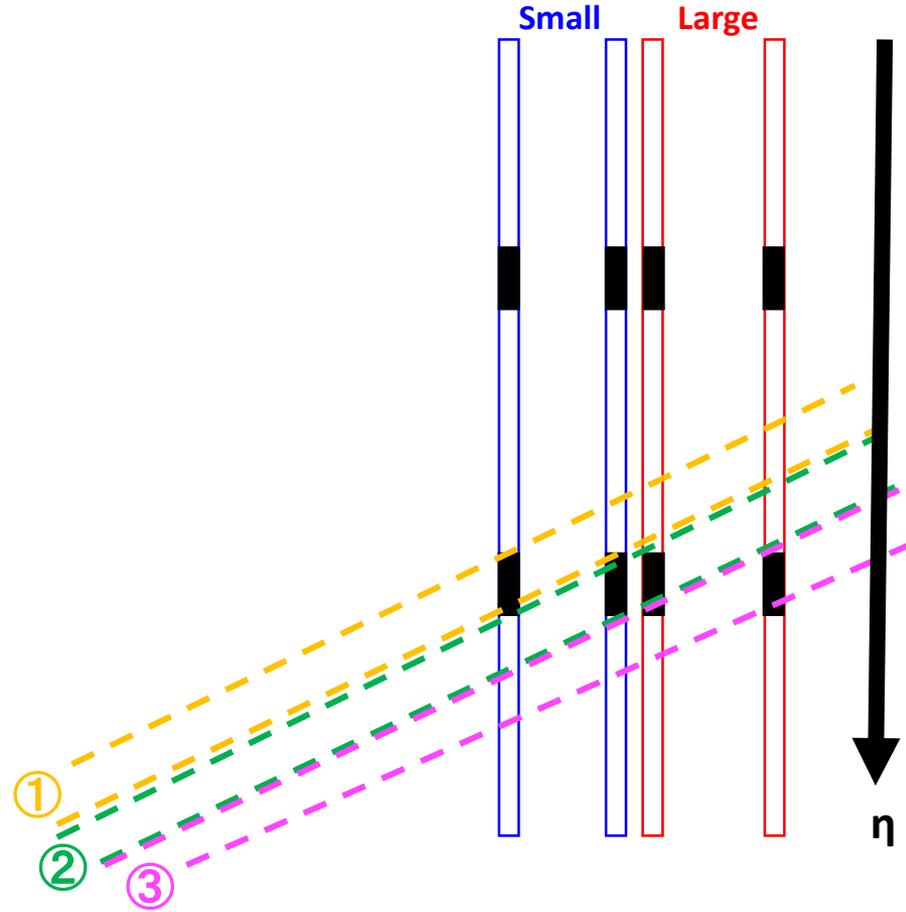
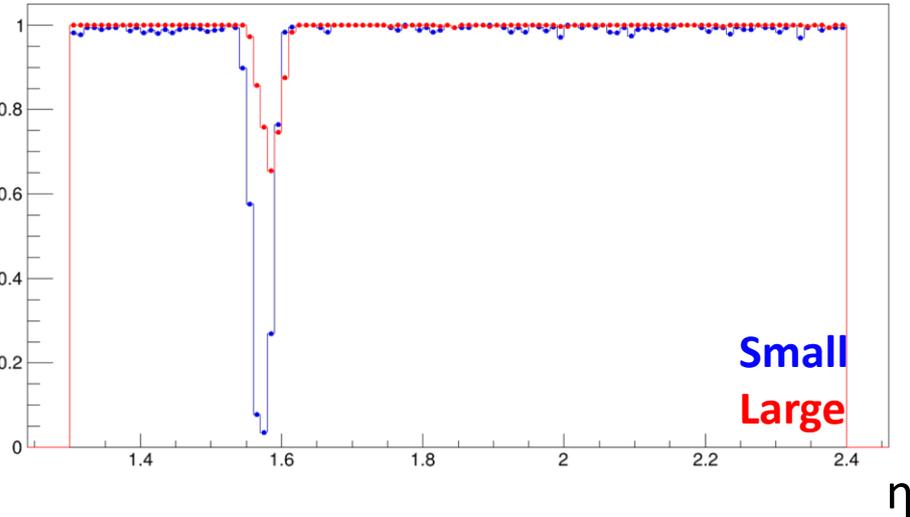


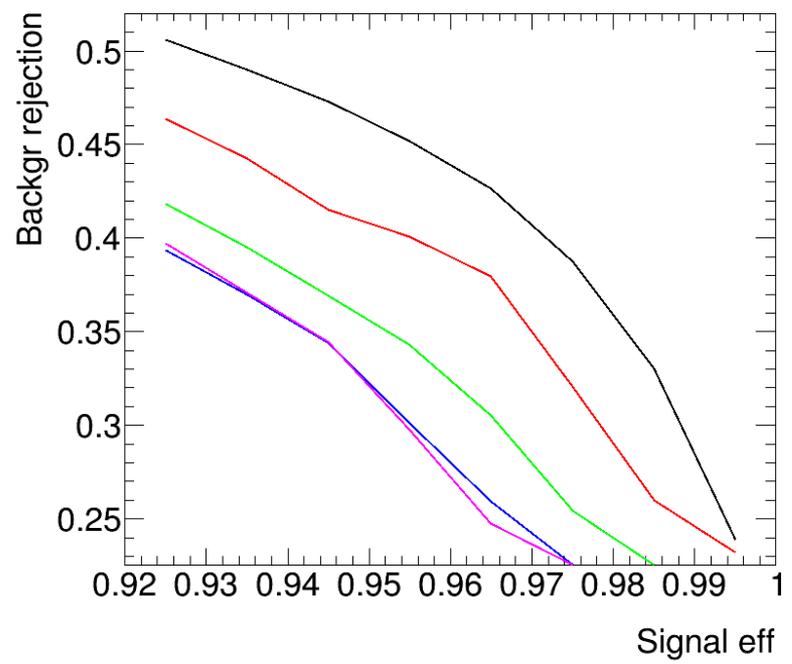
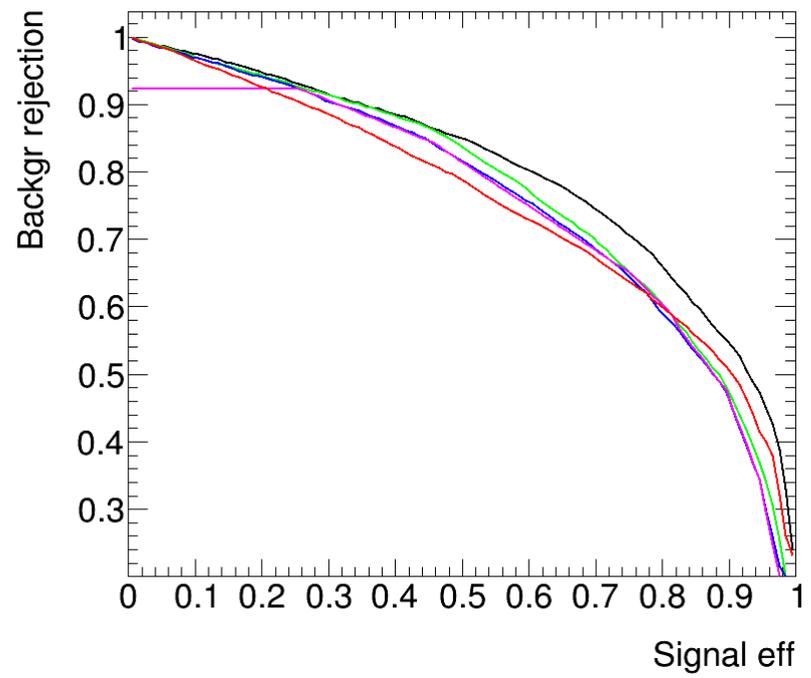
efficiency

sTGC

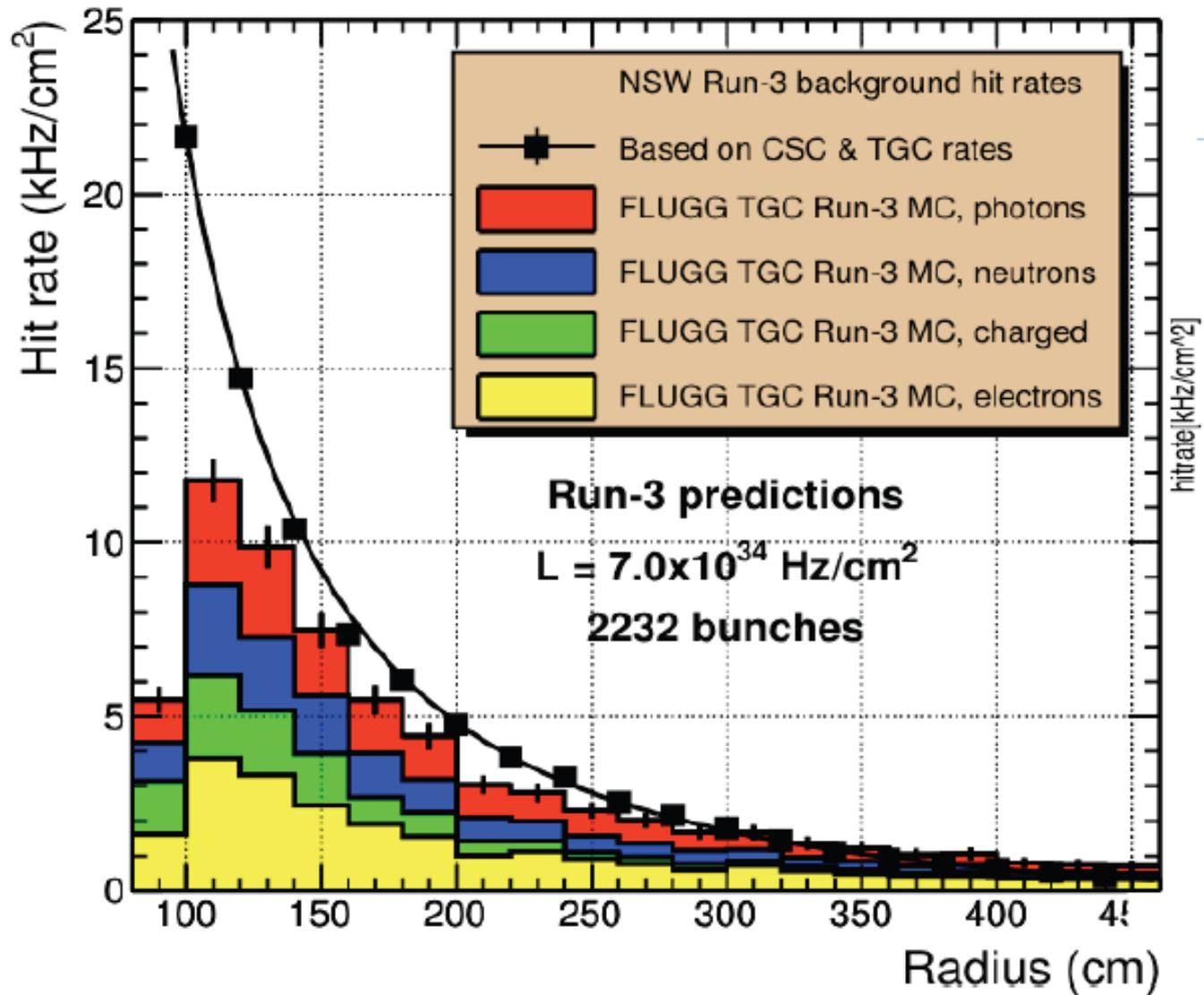


MM



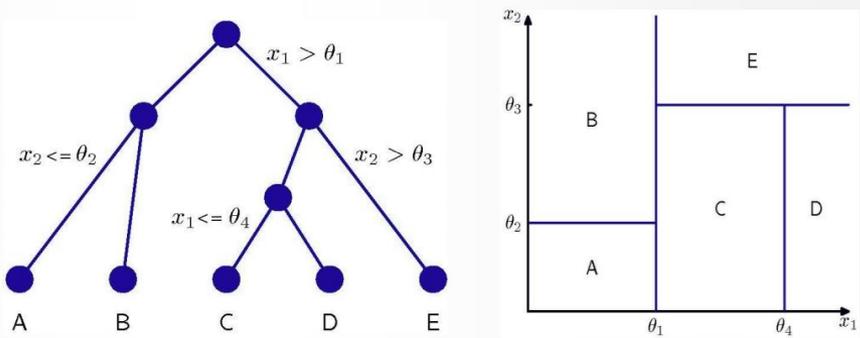


background



Boosted Decision Tree

Decision Tree (決定木)

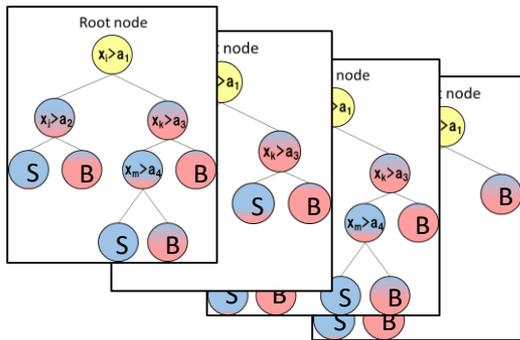


直線的なカットを複数回行う

各最終ノードで評価関数(GINI係数、交差エントロピー、...)を計算。

GINI 係数: $P(P - 1)$ [P :ノードに含まれるsignalの割合]

Boosting (Ada Boost) 弱い学習器を組合して強い学習器を作る!!



Treeを作る → 間違えたイベントに α の重みをつける → もう1つTreeを作る → 間違えたイベントにさらに重みをつける → もう1つTreeを作る → ...

作った Tree 全てで(重みをつけて)多数決 → BDT score

$$\alpha = \frac{1 - \text{err}}{\text{err}} \quad y_{\text{Boost}}(x) = \frac{1}{N_{\text{collection}}} \sum_i^{N_{\text{collection}}} \ln(\alpha_i) \cdot h_i(x)$$