

# RHIC-sPHENIX実験における 中間飛跡検出器INTT用シリコンセンサー でのエネルギー損失測定の評価

2022.3.4 卒業研究発表会

奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室

B4 杉山由佳

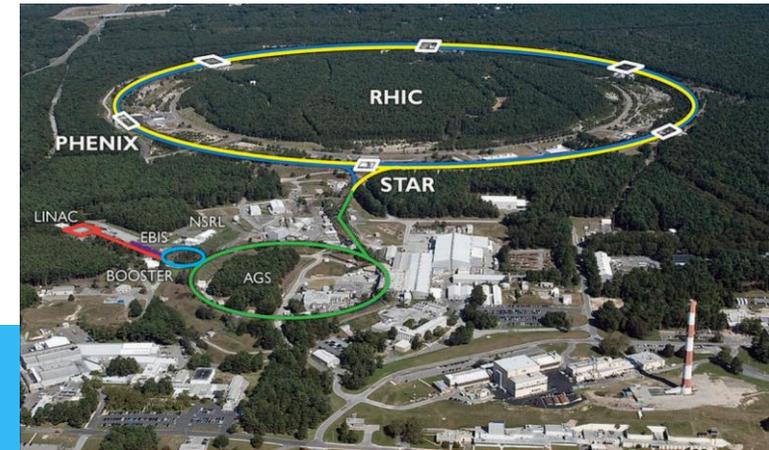
# 目次

1. 研究背景と目的
2. テストビーム実験で得られたデータの解析方法
3. 解析結果
4. まとめ
5. 今後の課題

# 1. 研究背景と目的

- ・sPHENIX実験
- ・中間飛跡検出器INTT
- ・INTT用シリコンセンサー
- ・卒業研究概要

# sPHENIX実験



- ・ 米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

2000-2016年に行われたPHENIX実験を高度化。2023年より稼働予定。

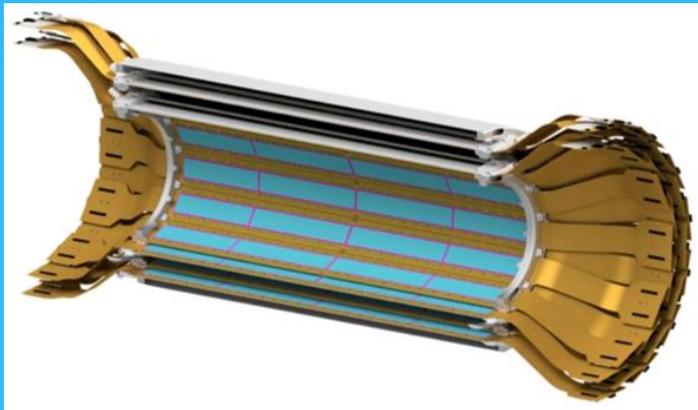
- ・ QGPにおける輸送係数の温度依存性や色電荷のデバイ遮蔽長を決定することを目的に、ジェット、ジェット相関、ウプシロン粒子を測定する計画である。
- ・ 金原子核対 (200GeV)、陽子対 (510GeV) の衝突

クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)とは

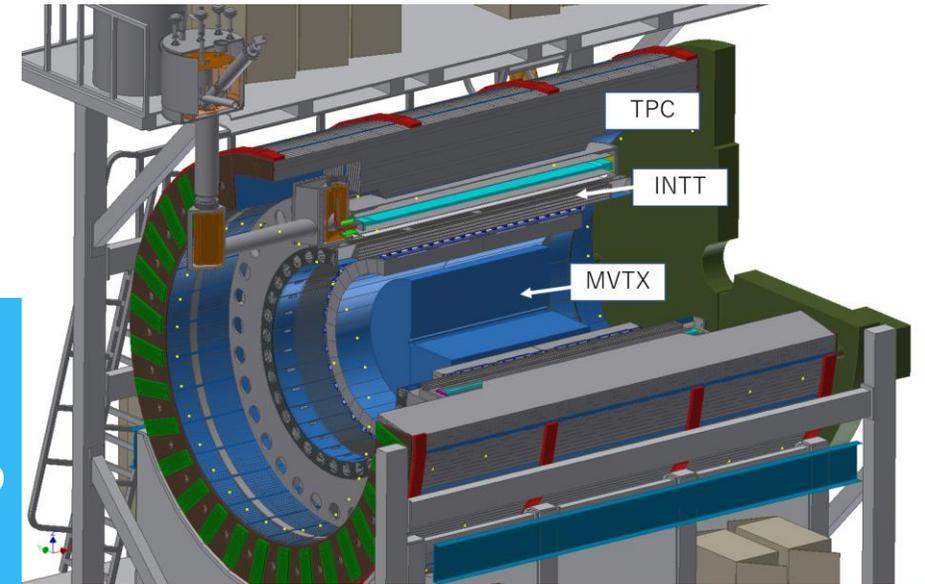
- ・ 高温・高密度下で、クォークやグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放されたプラズマ状態のこと。ビッグバンから数 $10\mu$ 秒間の初期宇宙で実現していたと考えられる。

# 中間飛跡検出器INTT

- ・ INTT (INtermediate Tracker)
- ・ sPHENIX実験で用いられる3つの飛跡検出器のうちの1つ
- ・ ビームパイプから6-12cmに位置する
- ・ 樽状の2層構造のストリップ型シリコン検出器
- ・ 時間分解能が高く、飛跡再構成において重要な役割を果たす

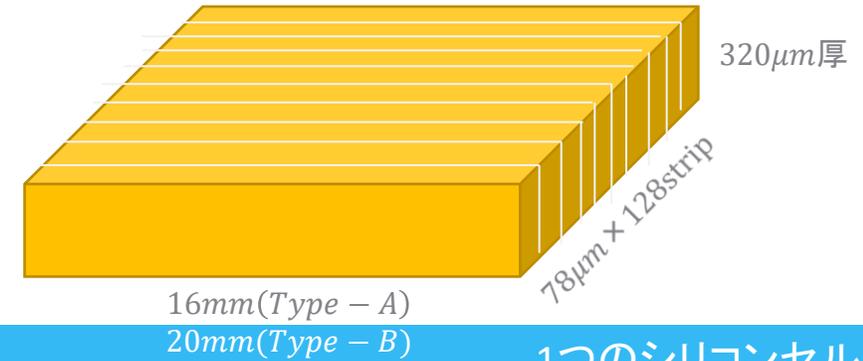


2層構造のストリップ型シリコン検出器



3つの飛跡検出器

# INTT用シリコンセンサー

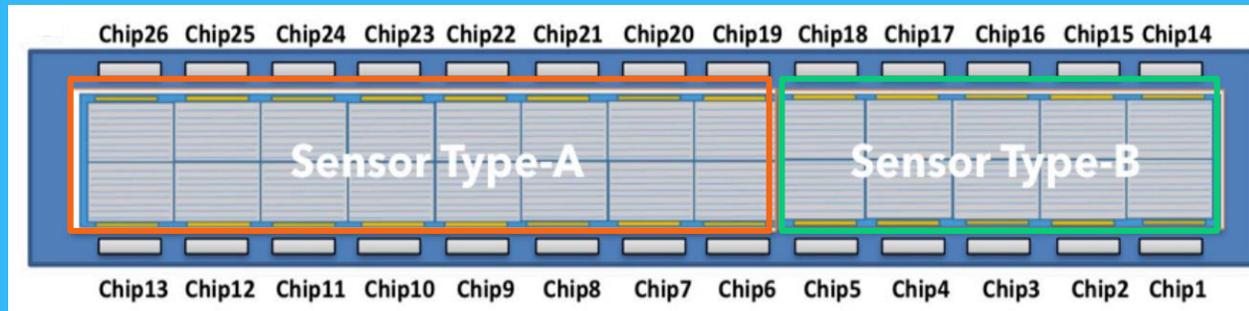


- ・ 78μmピッチ、320μm厚のストリップ128個で、1つのシリコンセルが構成されている。
- ・ シリコンセンサーは 8 × 2 の Type-A シリコンセルと 5 × 2 の Type-B シリコンセルに分けられる。

1つのシリコンセルの模式図

## INTTシリコンモジュール

- ・ 計26個のシリコンセンサーとFPHXチップ、HDI、Conversion Cable (+Bus Extender) で構成されている。
- ・ FPHXチップは、1チップあたり1シリコンセンサー(128channel)分の信号を読み出す働きをする。



26個のシリコンセンサーの全体図

以降、シリコンモジュールをmodule、セルをchip、ストリップをchannelと呼ぶ。

# 卒業研究概要

## 研究目的

- ・ 様々なセットアップにおけるエネルギー損失を評価する。
  - ・ DACスキャン
  - ・ 通常のDAC設定値
  - ・ 縦/横方向に回転

## 方法

- ・ テストビーム実験で得られたデータの解析を行い、エネルギー損失分布を評価する。

## 2. テストビーム実験で得られたデータの解析方法

- ・テストビーム実験
- ・データ読み出し回路
  - ・DAC値設定
  - ・解析手順
- ・イベント選定
- ・クラスター化

# テストビーム実験

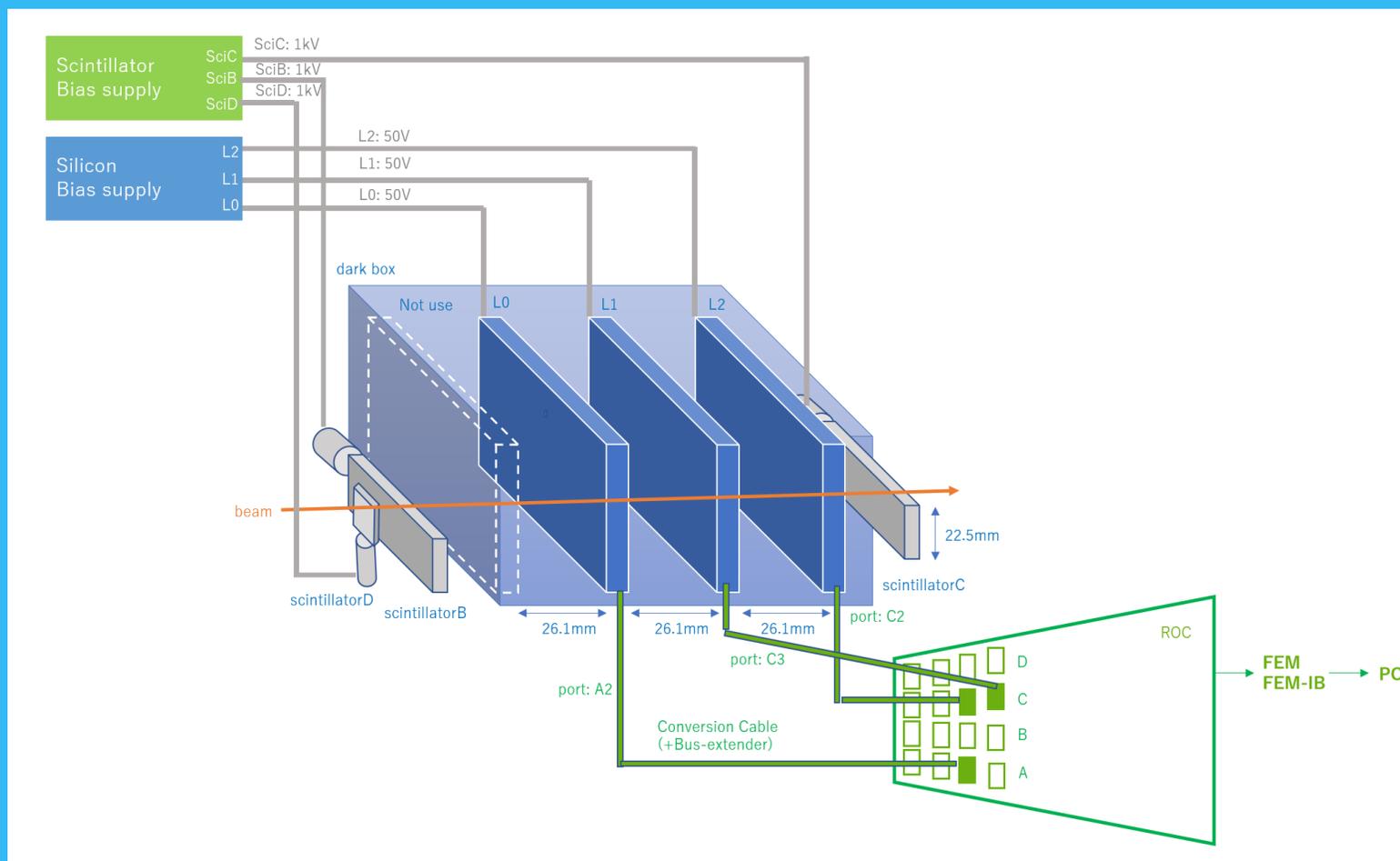


2021年12月に東北大学ELPHで、INTTシリコンモジュールの性能評価を行うために、1GeVの陽電子ビームを用いた実験を行った。

Beam

- 1GeV陽電子ビーム
- chip10,11,23,24に照射

# データ読み出し回路



シリコンセンサー:  
荷電粒子を検出するとFPHXチップ  
にアナログ信号を送る。

シンチレーションカウンター:  
シリコンセンサーとのコインシデ  
ンスをとることで、ノイズを減らしビ  
ーム由来の信号を検出する。

FPHXチップ: シリコンセンサーから  
信号を読み出す。

ROC: 複数のFPHXチップから送られ  
てきたデータの同期と結合を行い、  
次の読み出し回路に転送する。

# DAC値設定

- ・ FPHXチップにおいてエネルギー損失の波形整形によりADCが出力される。  
この時のADCの閾値を、DAC値で設定する。

→ADC,DAC値は、損失エネルギーに対応する。

- ・ PCにおいて任意のDAC値に変更可能である。

下図: デフォルトのDAC値設定

ADC	DAC設定値
0	15
1	30
2	60
3	90
4	120
5	150
6	180
7	210

# 解析手順

本研究では、以下の手順で解析を行った。

1. イベント選定
2. クラスタ化
3. エネルギー損失分布の評価

詳しくは次ページ以降で述べる。

# イベント選定

## 不要なイベントの除去

- ・ 存在しないモジュール (amplitude=0, chip1-26, channel 0-127, adc0-7, module1or6or5以外)
- ・ ビームとは無関係と考えられるhot channelでのヒット
- ・ double saving event

## double saving event

- ・  $|\Delta bco\_full| \leq 5$ で、同chip\_id,chan\_id,adc,moduleが同一のヒットをdouble saving eventとして考え、2イベント目を除去した。

bco_full	chip_id	chan_id	adc	module
48678	9	30	6	6
<del>48679</del>	<del>9</del>	<del>30</del>	<del>6</del>	<del>6</del>

除去

図:double saving event除去の例

# クラスター化

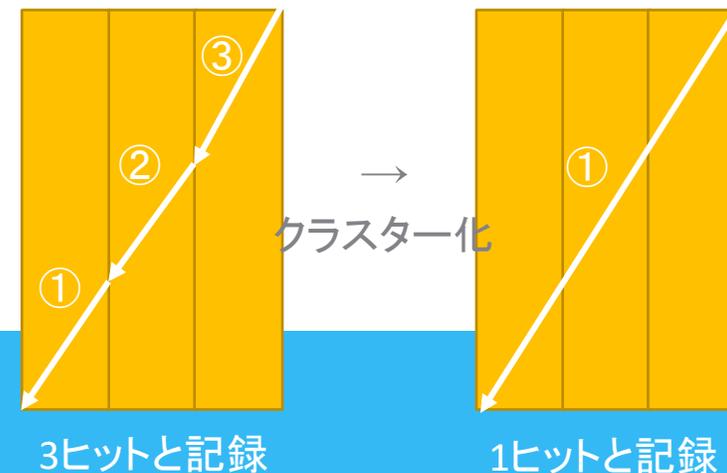
荷電粒子がシリコンセンサー内を斜めに通過した場合を考える。

- ・ 斜めに通過した各channelにおいて、別々のヒットとして記録される。

↓ クラスター化

- ・ 1粒子が斜めに通過したと考え、まとめて1ヒットとして扱う。

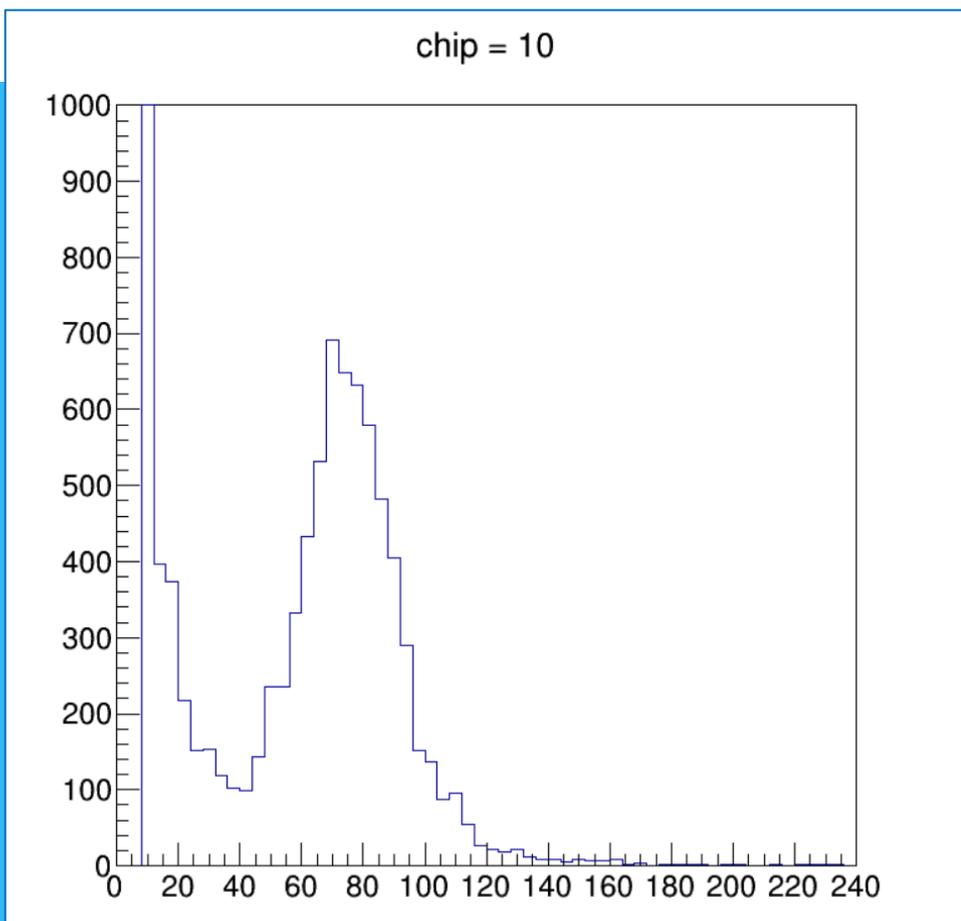
本解析では、同時に、同chip、隣り合ったchannelを通過したヒットにクラスター化を行うこととする。



## 3. 解析結果

- ・エネルギー損失分布の見方
  - ・通常のDAC設定
  - ・DACスキャン
- ・通常のDAC設定とDACスキャンの比較
- ・クラスター化前後の比較(垂直時,縦回転時,横回転時)
  - ・縦回転と垂直時の比較
  - ・横回転と垂直時の比較

# エネルギー損失分布の見方



エネルギー損失 小 ← → 大

本研究ではエネルギー損失に対応する量としてDAC値を用いている。

エネルギー損失分布の横軸はこのDAC値とする。縦軸はそのDAC値におけるヒット数である。

DAC値が大きいほどエネルギー損失が大きいということである。

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)  
縦軸: カウント数

# 通常のDAC設定

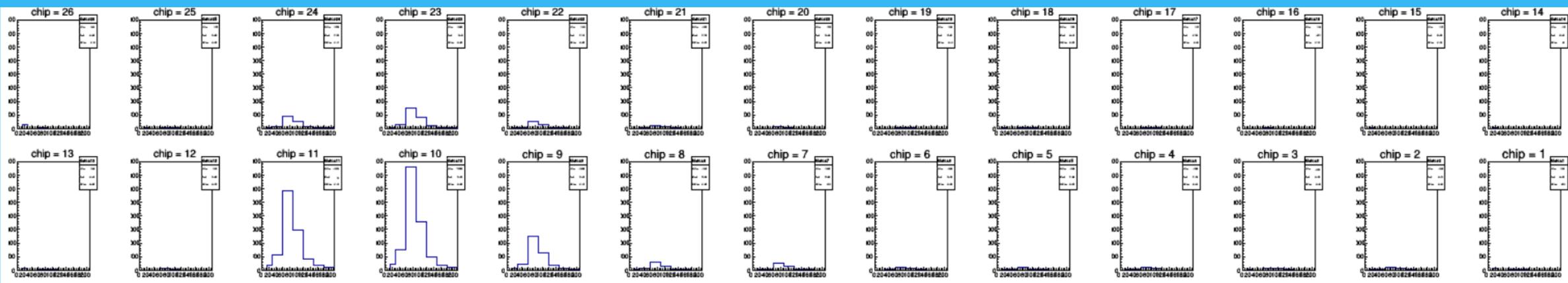
## 目的

- ・ 基準として通常のDAC設定におけるエネルギー損失分布を求めることである。
- ・ 後ほどDACスキャンにおけるエネルギー損失分布と比較する。

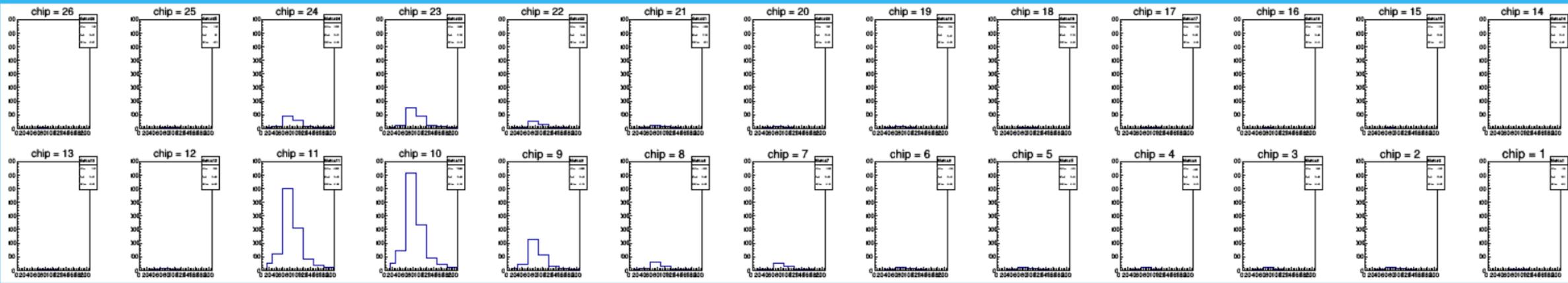
## 方法

- ・ DAC設定のデフォルトは、{15,30,60,90,120,150,180,210}である。
- ・ Run-089では、このDAC設定のもと測定を行い、解析によってエネルギー損失分布を求めた。

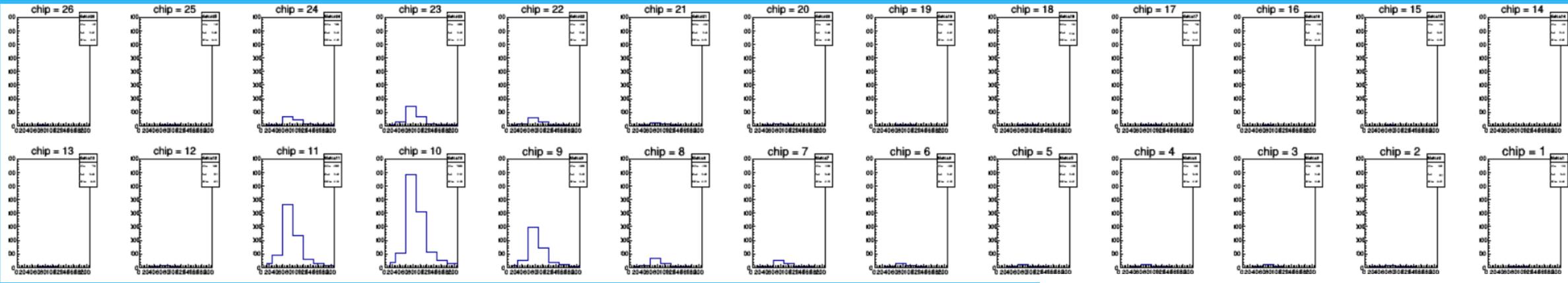
L0



L1



L2



→ビームがラダーに対して垂直に入射している。

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)

# DACスキャン

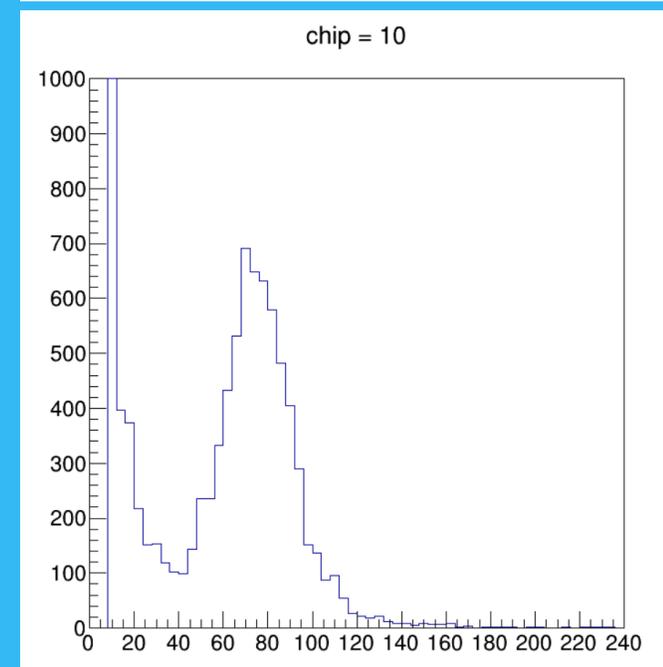
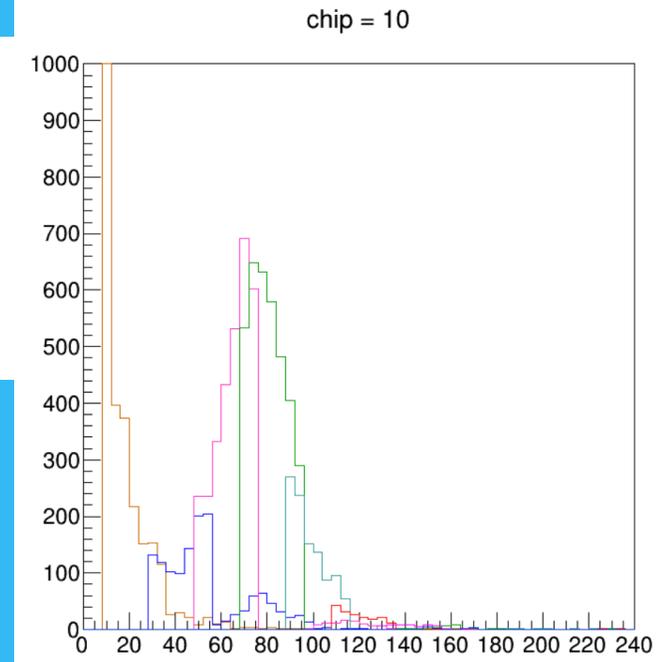
## 目的

- ・ 精密なMIP (Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子) ピークを求めることである。

## 方法

Run-071~078では、計8パターンのDAC設定のもと、それぞれ測定を行った。

1. 各DACスキャンにおいて、8個のエネルギー損失分布を求める(※)
2. これらのADC分布を重ね合わせて、1つの分布にする。



# DACスキャン

※ADC7について閾値以上の電圧パルス信号を拾うため、ADC0-6よりもADC7のヒット数をはるかに多い。

→クラスター化前にADC7を除去している。

各DACスキャンにおけるDAC設定値

## DAC設定値

DAC scan1 : {8,12,16,20,24,28,32,36}

DAC scan2: {28,32,36,40,44,48,52,56}

DAC scan3: {48,52,56,60,64,68,72,76}

DAC scan4: {68,72,76,80,84,88,92,96}

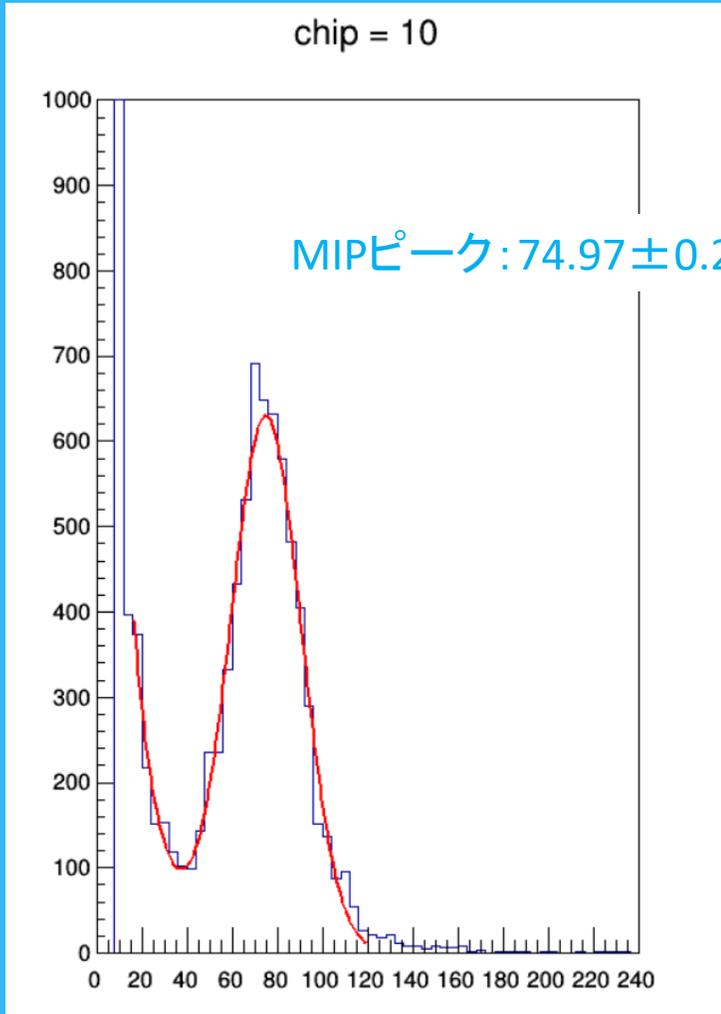
DAC scan5: {88,92,96,100,104,108,112,116}

DAC scan6: {108,112,116,120,124,128,132,136}

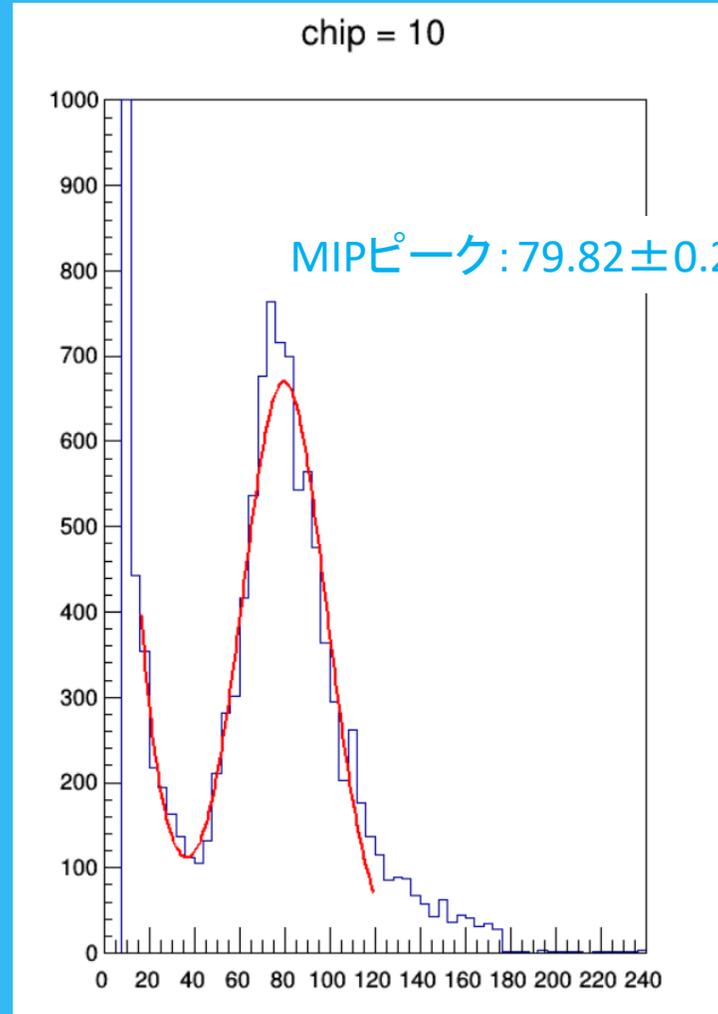
DAC scan7: {128,132,136,140,144,148,152,156}

DAC scan8: {148,152,156,160,164,168,172,176}

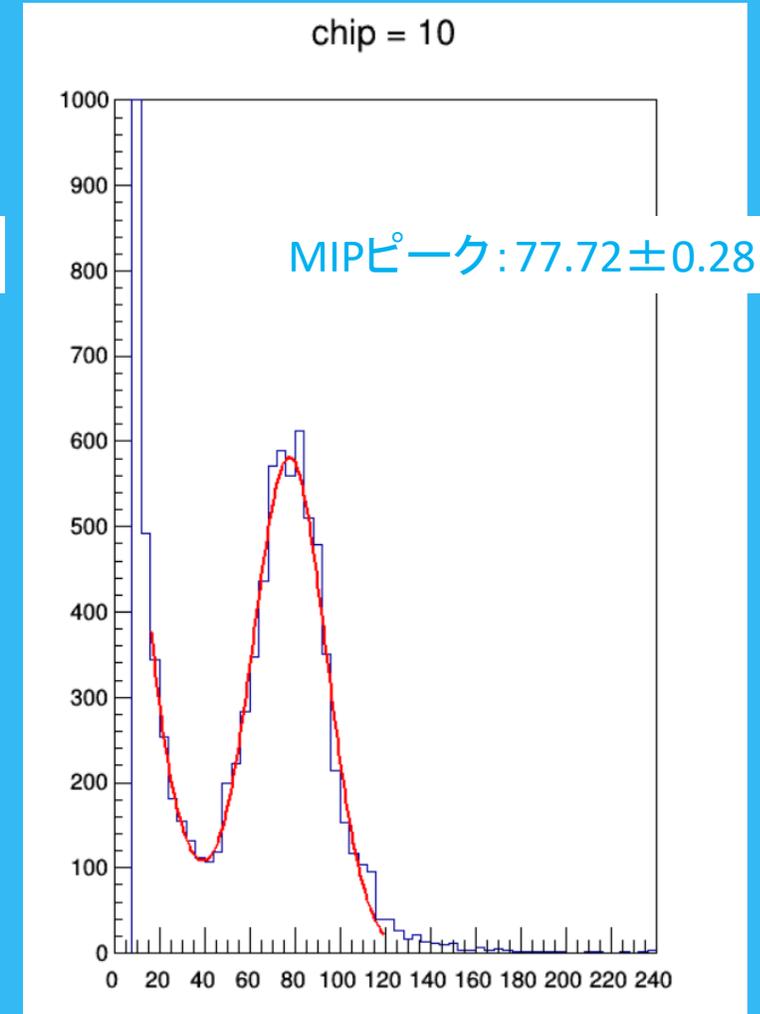
L0



L1



L2



MIPピークを調べるために関数 $\text{gaus} + \text{expo}$ でフィッティングを行った。  
 →全てのラダーにおいて、MIPピークはDAC値75前後である。

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)

# 通常のDAC設定とDACスキャンの比較

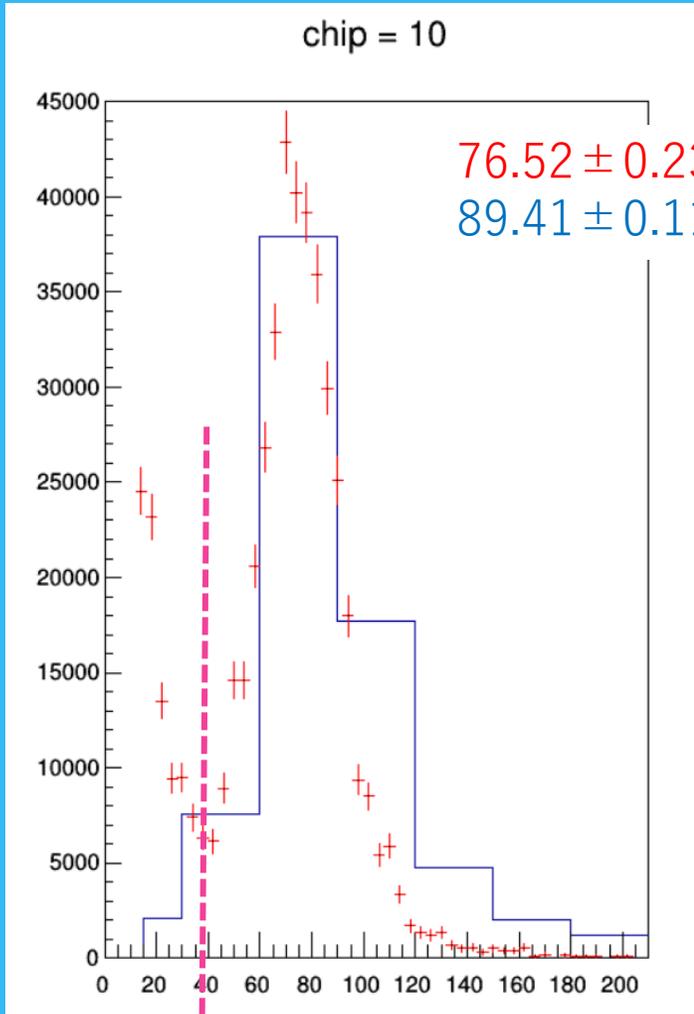
## 目的

- ・ 通常のDAC設定とDACスキャンにおけるエネルギー損失分布の違いやMIPピークを比較することである。

## 方法

- ・ 通常のDAC設定とDACスキャンにおけるエネルギー損失分布を求め、比較した。
- ・ ピーク1binとそれと隣り合う2binの計3binの面積の違いにより規格化を行った。
- ・ ピークの位置は、ヒストグラムの平均値とする。

L0

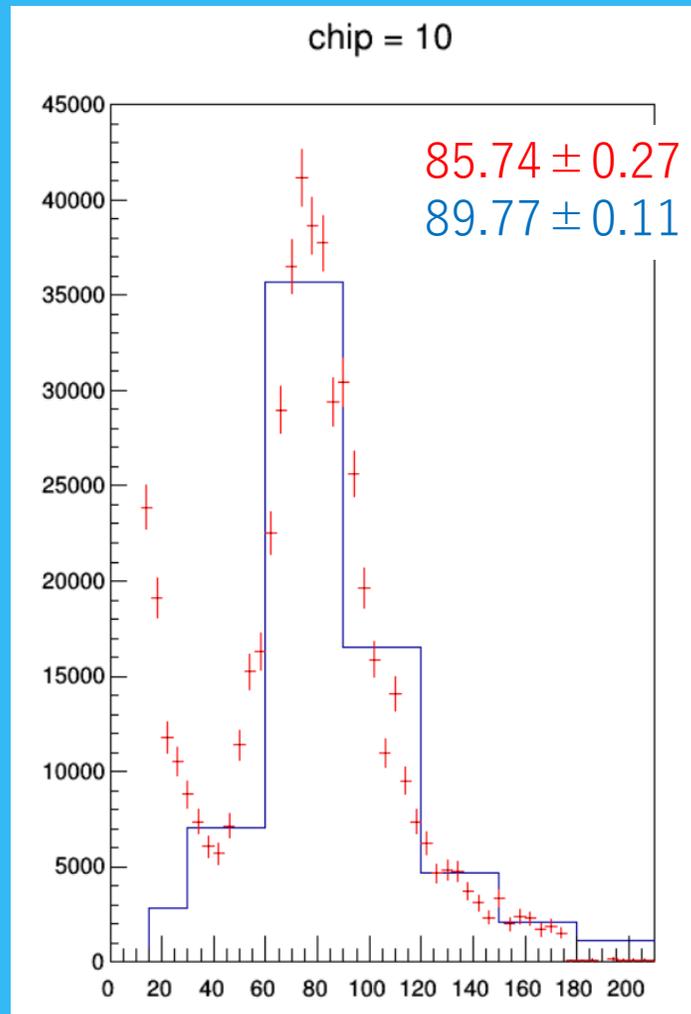


ノイズ 信号

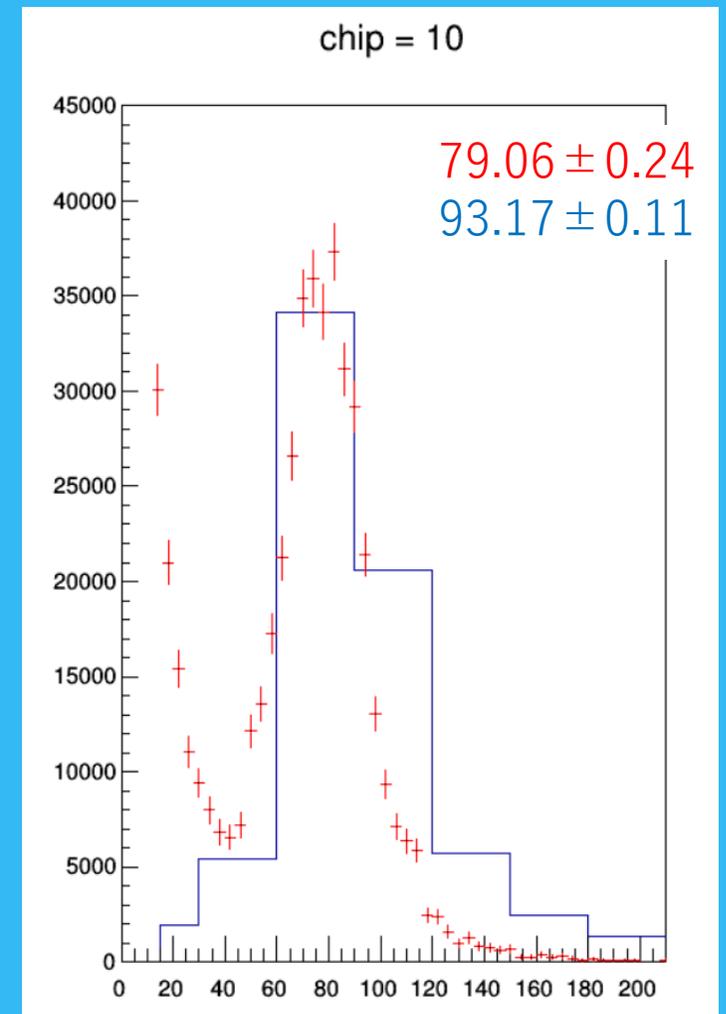
→DACスキャンを行うことで、精密なMIP エネルギーの導出やノイズと信号の判別ができた。

2022/3/4

L1



L2



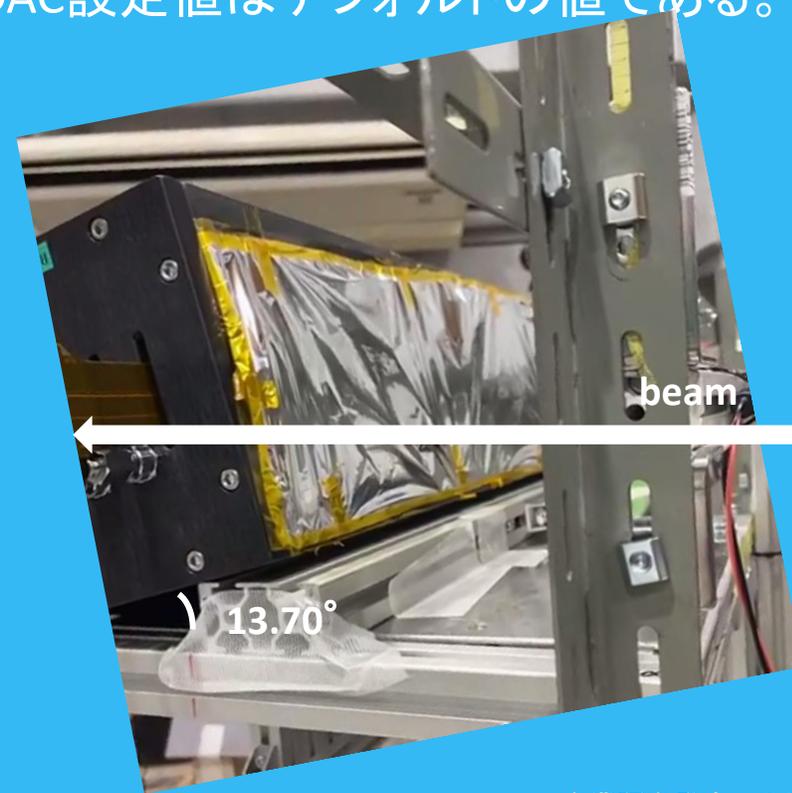
赤: DACスキャンのMIPピーク  
青: 通常のDAC設定のMIPピーク

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)

# 縦方向に回転させた場合

Run-061では、シリコンモジュールが入った暗箱を縦方向に $13.70^\circ$  回転させた。  
解析により、この時のエネルギー損失分布を求めた。DAC設定値はデフォルトの値である。

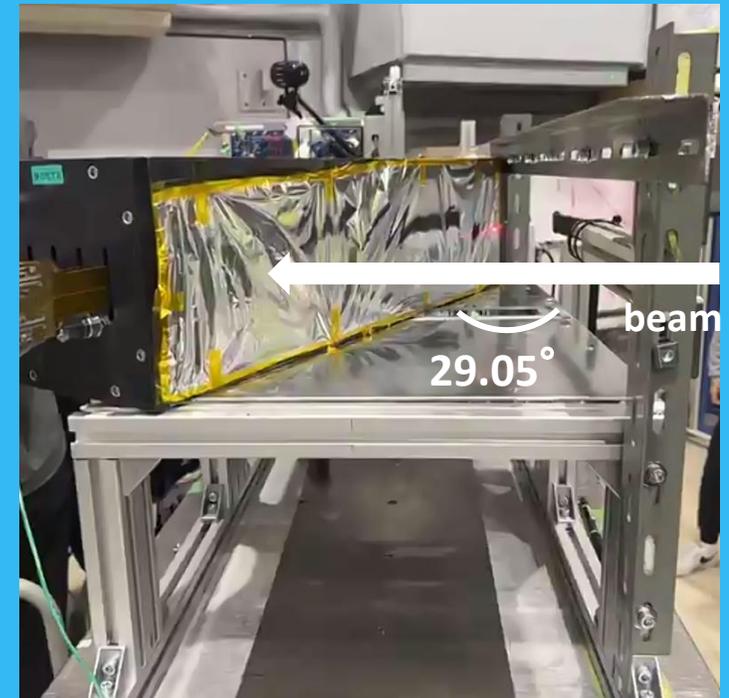
1. クラスタ化前後の比較
  2. 縦回転と垂直時の比較
- について行った。



# 横方向に回転させた場合

Run-063では、シリコンモジュールが入った暗箱を横方向に $29.05^\circ$  回転させた。  
解析により、この時のエネルギー損失分布を求めた。DAC設定値はデフォルトの値である。

1. クラスタ化前後の比較
  2. 横回転と垂直時の比較
- について行った。



# クラスター化前後の比較(垂直時,縦回転時,横回転時)

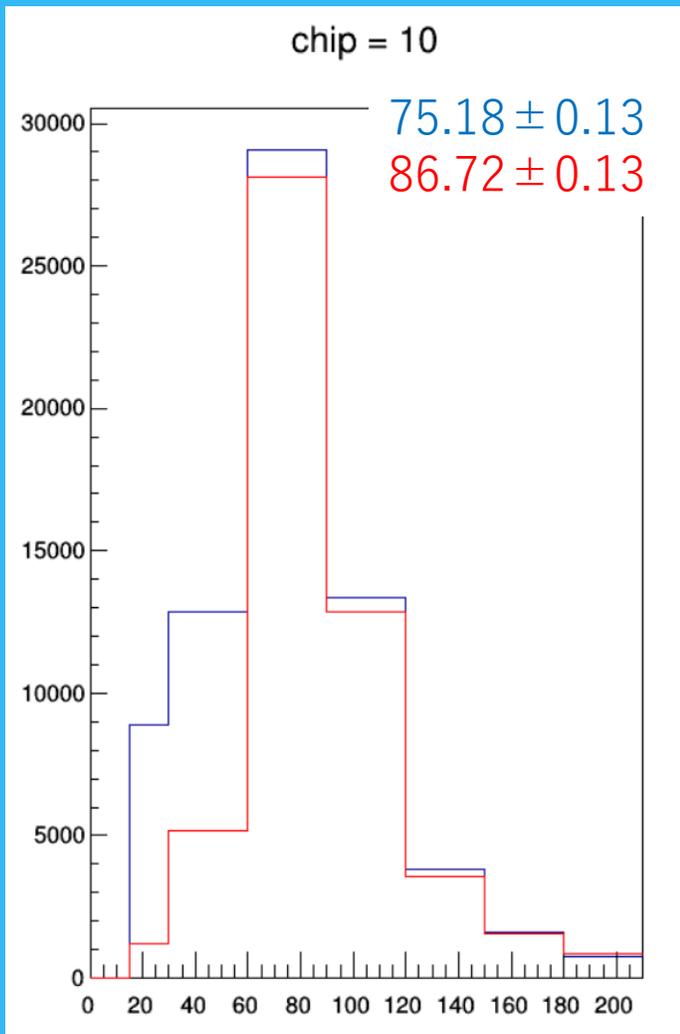
## 目的

- ・ 垂直時と縦/横回転時において、クラスター化の影響について調べることである。

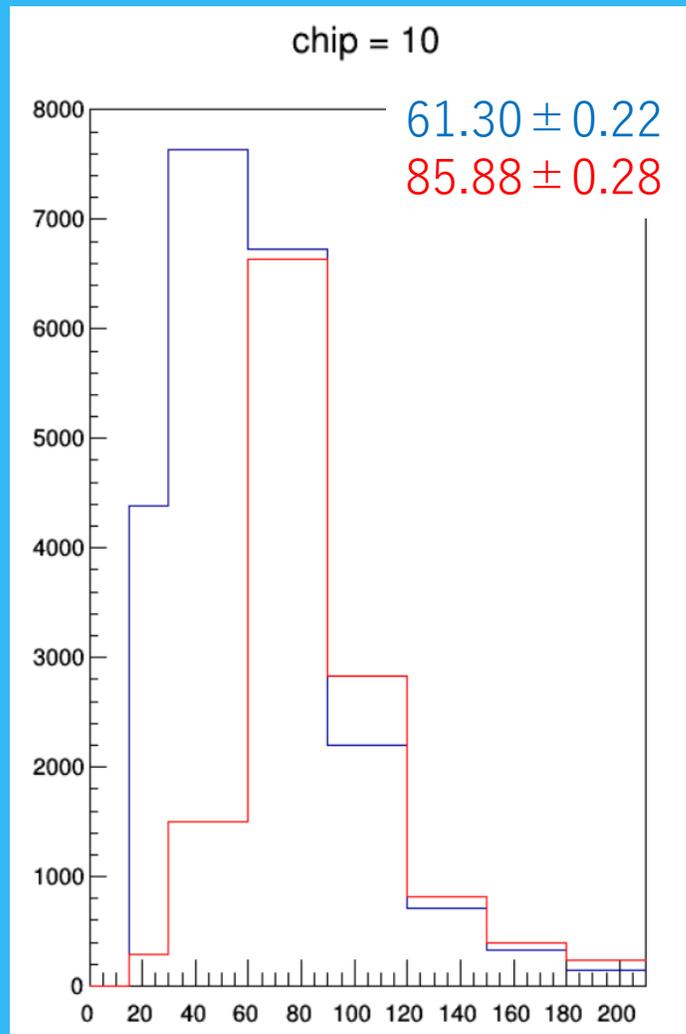
## 方法

- ・ クラスター化を行う前と後におけるエネルギー損失分布を求め、比較する。

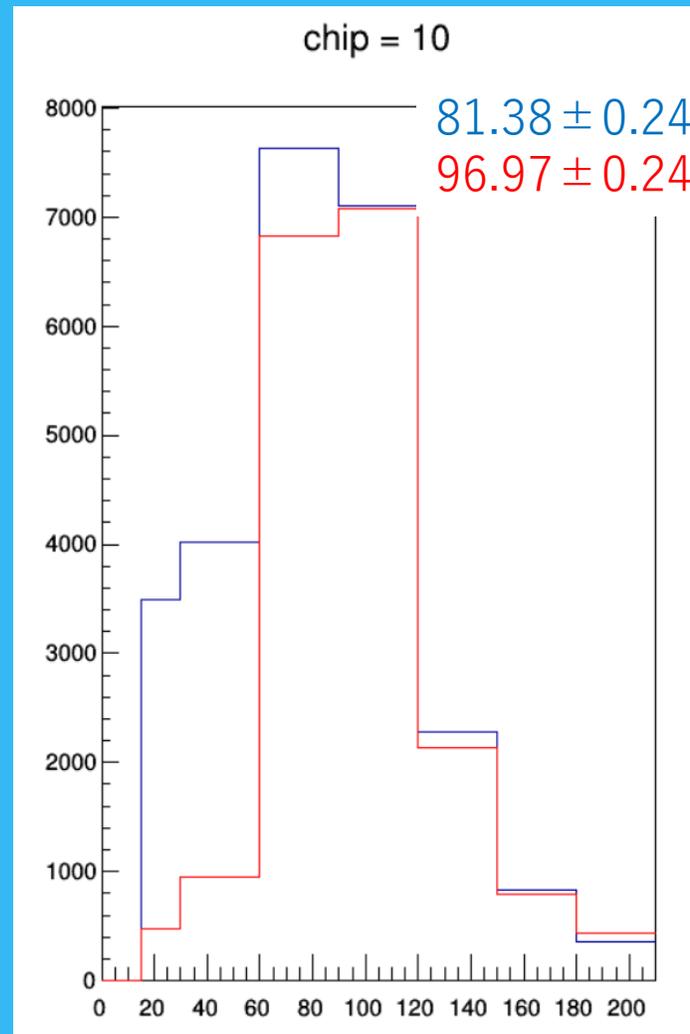
## 垂直時のL0



## 縦回転時のL0



## 横回転時のL0



縦回転時ではクラスター化前後でMIPピークの変化が大きく、ヒットストリップ数の増加を表している。

→縦回転させた場合、荷電粒子が複数のchannelをまたがって斜めに通過したと考えられる。

2022/3/4

青: クラスター化前のMIPピーク  
赤: クラスター化後のMIPピーク

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)

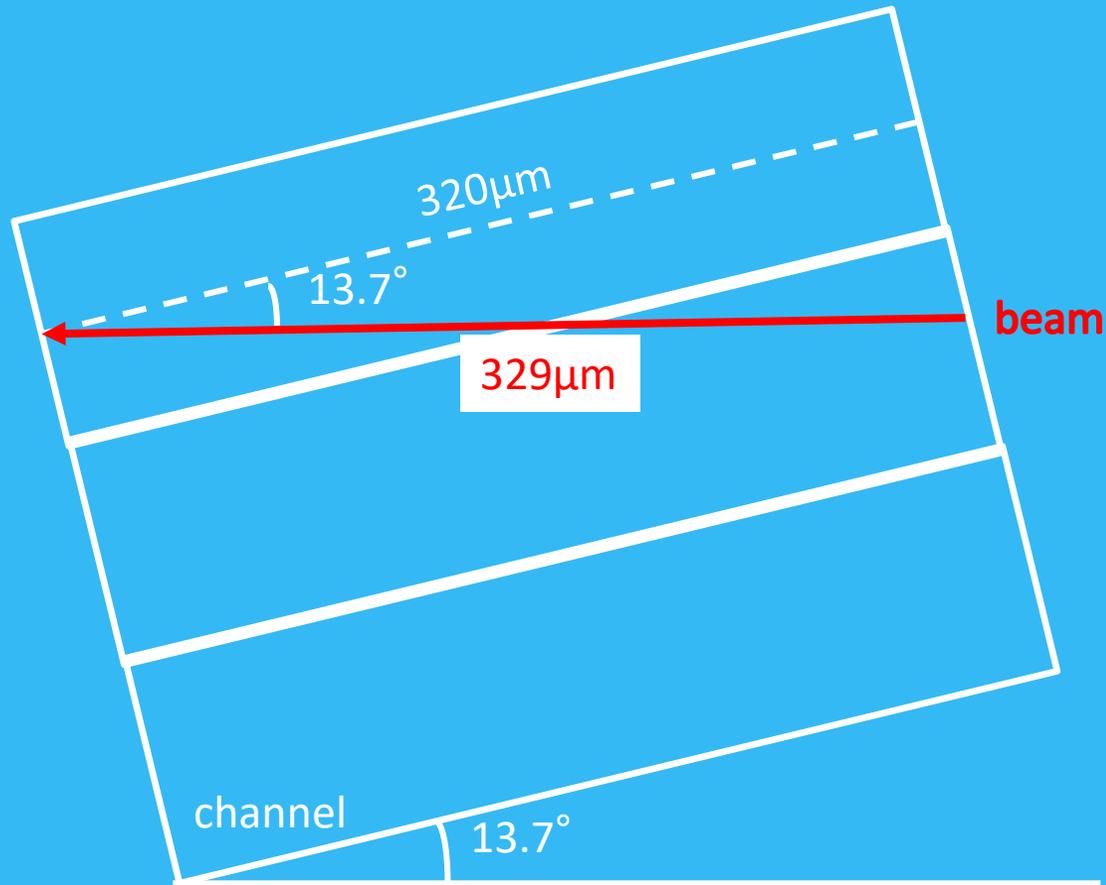
# 縦回転と垂直時の比較

## 目的

- ・ ラダーに対して斜めに入射する粒子についても検出し、そのエネルギー損失量を求める。
- ・ エネルギー損失の大きさは、荷電粒子がセンサーを通過する距離に対応しているのか確認する。

## 方法

- ・ 元のセットアップ(垂直時)と、縦回転時のエネルギー損失分布を比較した。
- ・ データはRun-059、Run-061を用いた。
- ・ 測定時間はそれぞれ30分、15分で、この違いにより規格化を行った。
- ・ ピークの位置は、ヒストグラムの平均値とする。



ラダー内通過距離

垂直時:  $320\mu\text{m}$

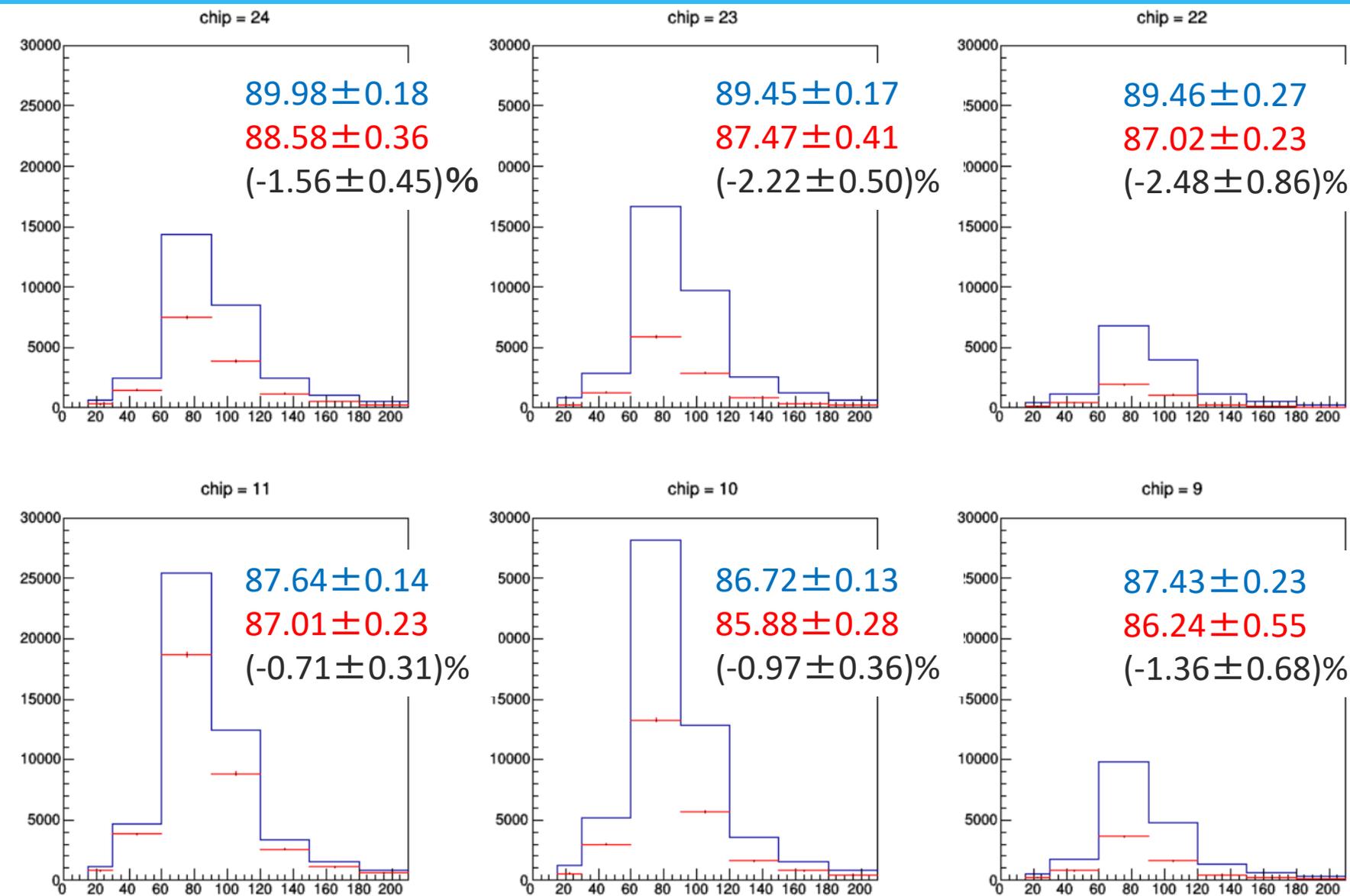
縦回転時:  $329\mu\text{m}$



約3%増

→ビームがラダーを通過する距離が長いほどエネルギー損失が大きくなる。

→縦回転では垂直時よりも、ビームがラダーを通過した時に約3%多くエネルギーを失うと考えられる。



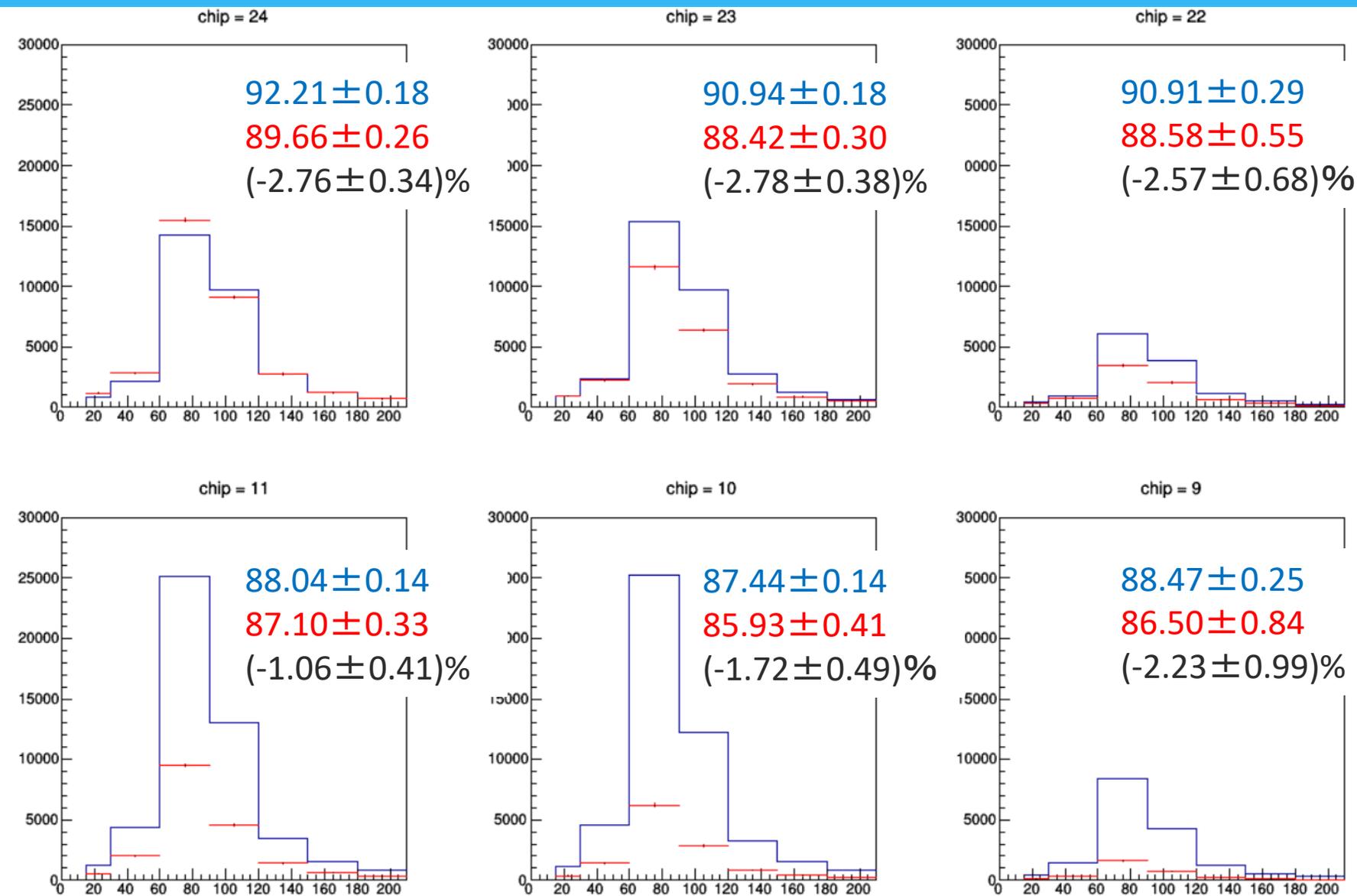
・縦回転の時、下段のchipの方がヒット数が多い。

→縦回転により、L0では下段のchipにビームが入射したと考えられる。

・MIPピークの変化率が減少している。

青: 垂直時のMIPピーク  
赤: 縦回転時のMIPピーク  
黒: MIPピークの変化率

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)



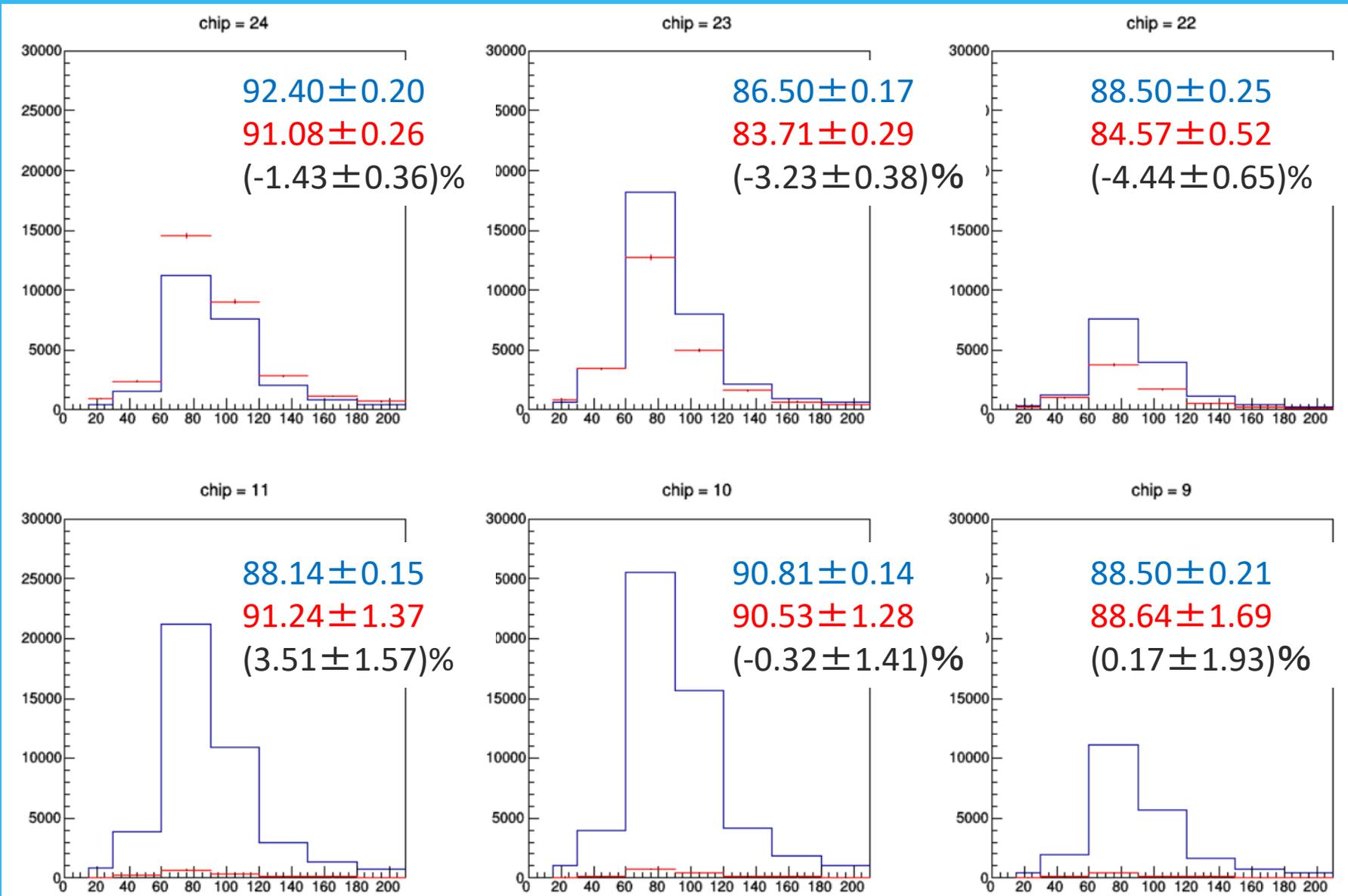
・縦回転の時、上段のchipの方が若干ヒットが多い。

→縦回転により、L1では上段または下段のchipにビームが入射したと考えられる。

・MIPピークの変化率が減少している。

青: 垂直時のMIPピーク  
赤: 縦回転時のMIPピーク  
黒: MIPピークの変化率

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)



・縦回転の時、上段のchipの方がヒットが多い。

→縦回転により、L2では上段のchipにビームが入射したと考えられる。

・MIPピークの変化率が減少しているchipが多い。

青: 垂直時のMIPピーク  
赤: 縦回転時のMIPピーク  
黒: MIPピークの変化率

横軸: エネルギー損失に比例する量(DAC値)

# 考察

- ・ L0 からL2 にかけて下側のchip から上側のchip に順に入射していることから、ラダーに対して斜め方向に入射する粒子を検出できたことが分かる。
- ・ 原理ではMIP ピークが約3% 上昇する予想であったが、実際は殆どのchip において予想とは異なる値になった。

この原因として、以下の仮説が挙げられ、今後検証する必要がある。

- ① 予想では約3% というわずかな上昇率のため、測定分解能が劣り約3% という値は得られない。
- ② chip 別にクラスター化を行っており、chip の端に位置するchannel0、127 に荷電粒子が斜めに通過した場合のエネルギー損失量を過小評価してしまった。

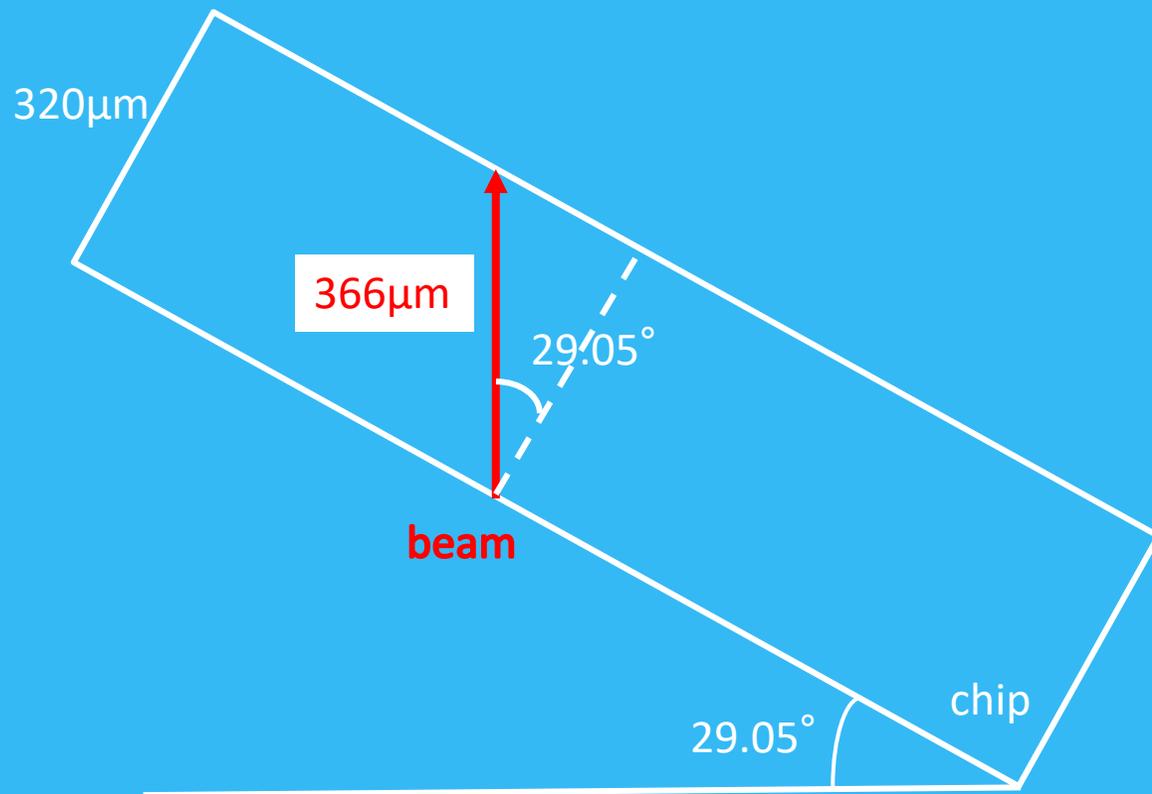
# 横回転と垂直時の比較

## 目的

- ・ ラダーに対して斜めに入射する粒子についても検出し、そのエネルギー損失量を求める。
- ・ エネルギー損失の大きさは、荷電粒子がセンサーを通過する距離に対応しているのか確認する。

## 方法

- ・ 元のセットアップ(垂直時)と、横回転時のエネルギー損失分布を比較した。
- ・ データはRun-059、Run-063を用いた。
- ・ 測定時間はそれぞれ30分、15分で、この違いにより規格化を行った。
- ・ ピークの位置はヒストグラムの平均値とする。



ラダー内通過距離

垂直時: 320 $\mu\text{m}$

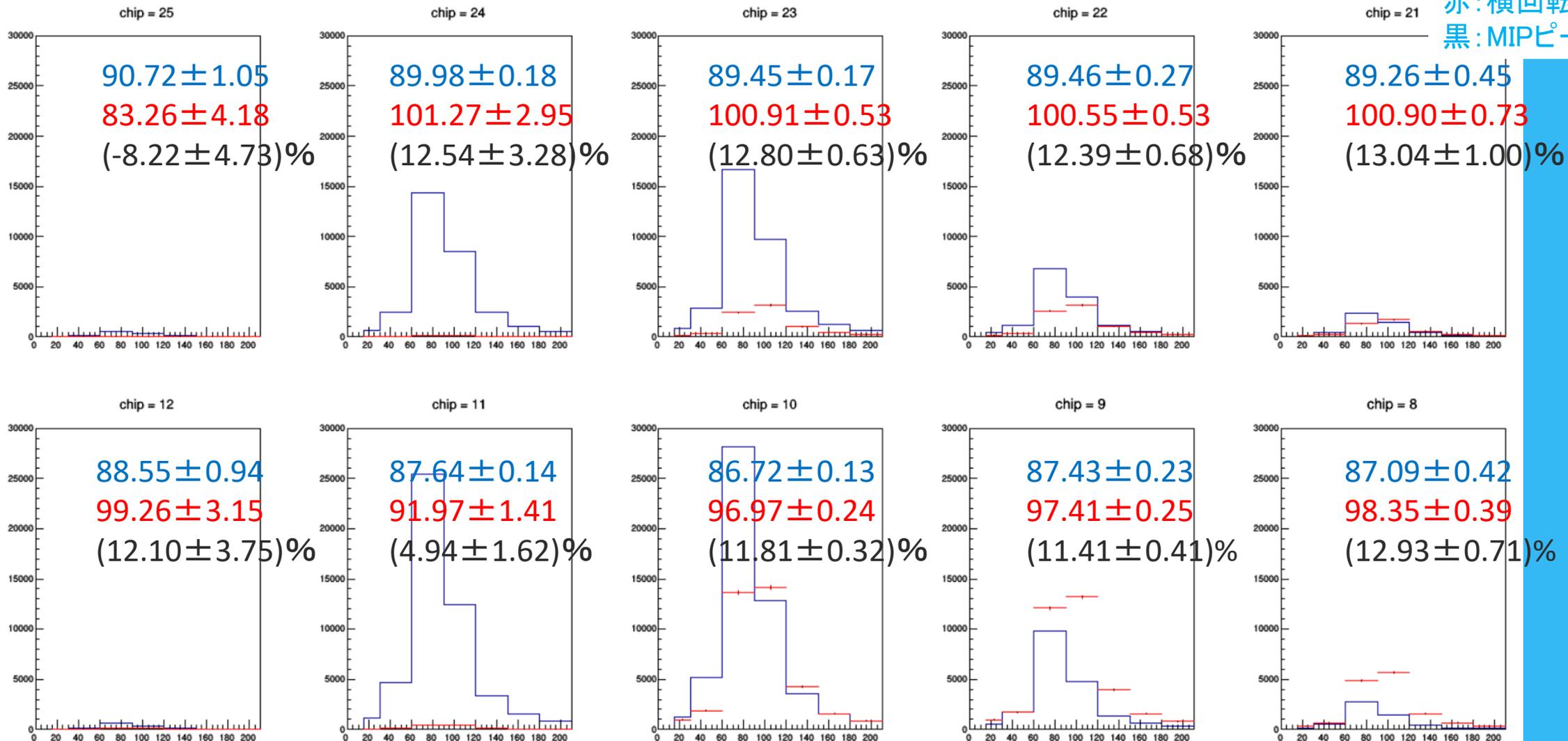
横回転時: 366 $\mu\text{m}$



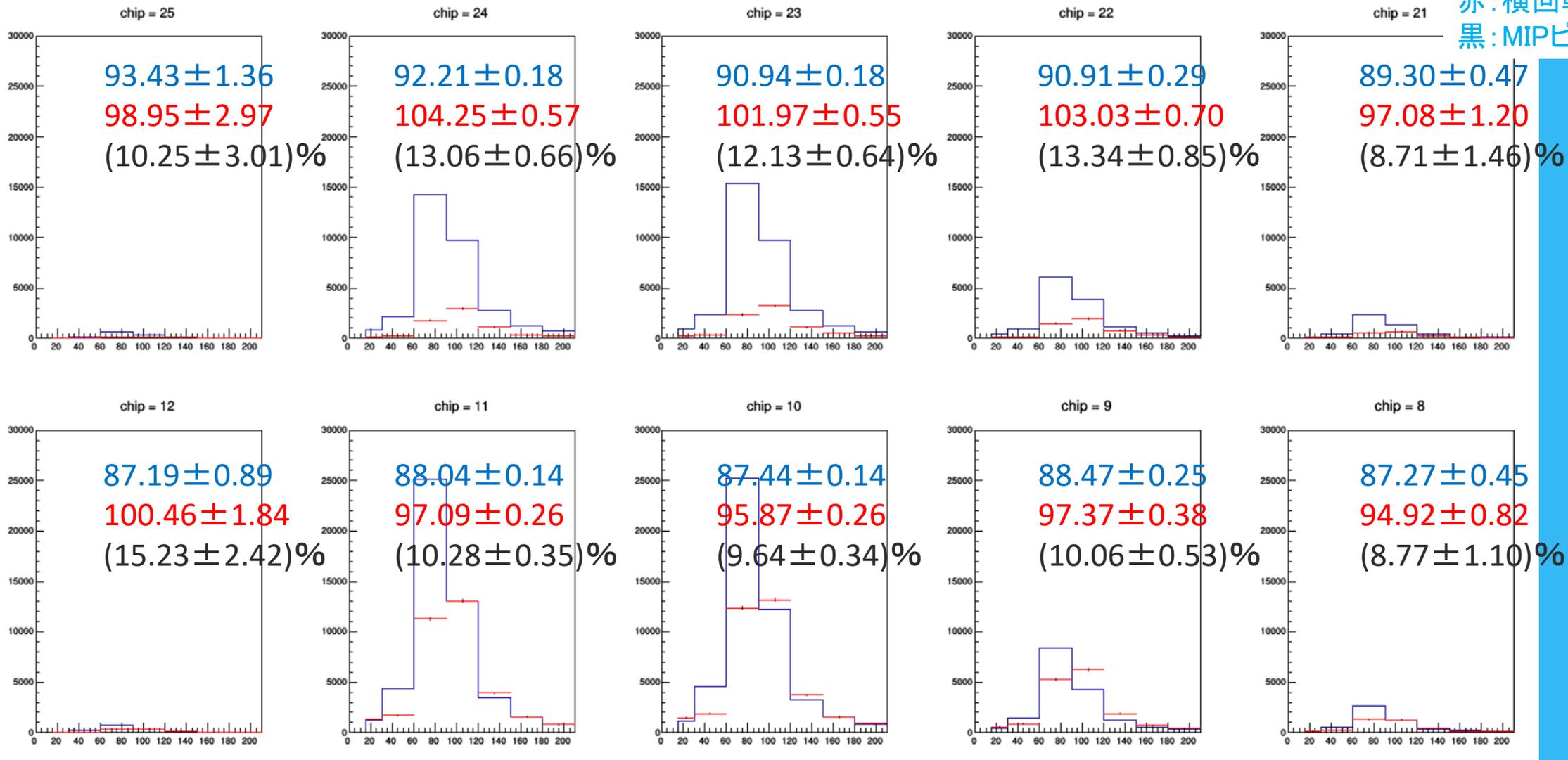
約14%増

→ビームがラダーを通過する距離が長いほどエネルギー損失が大きくなる。

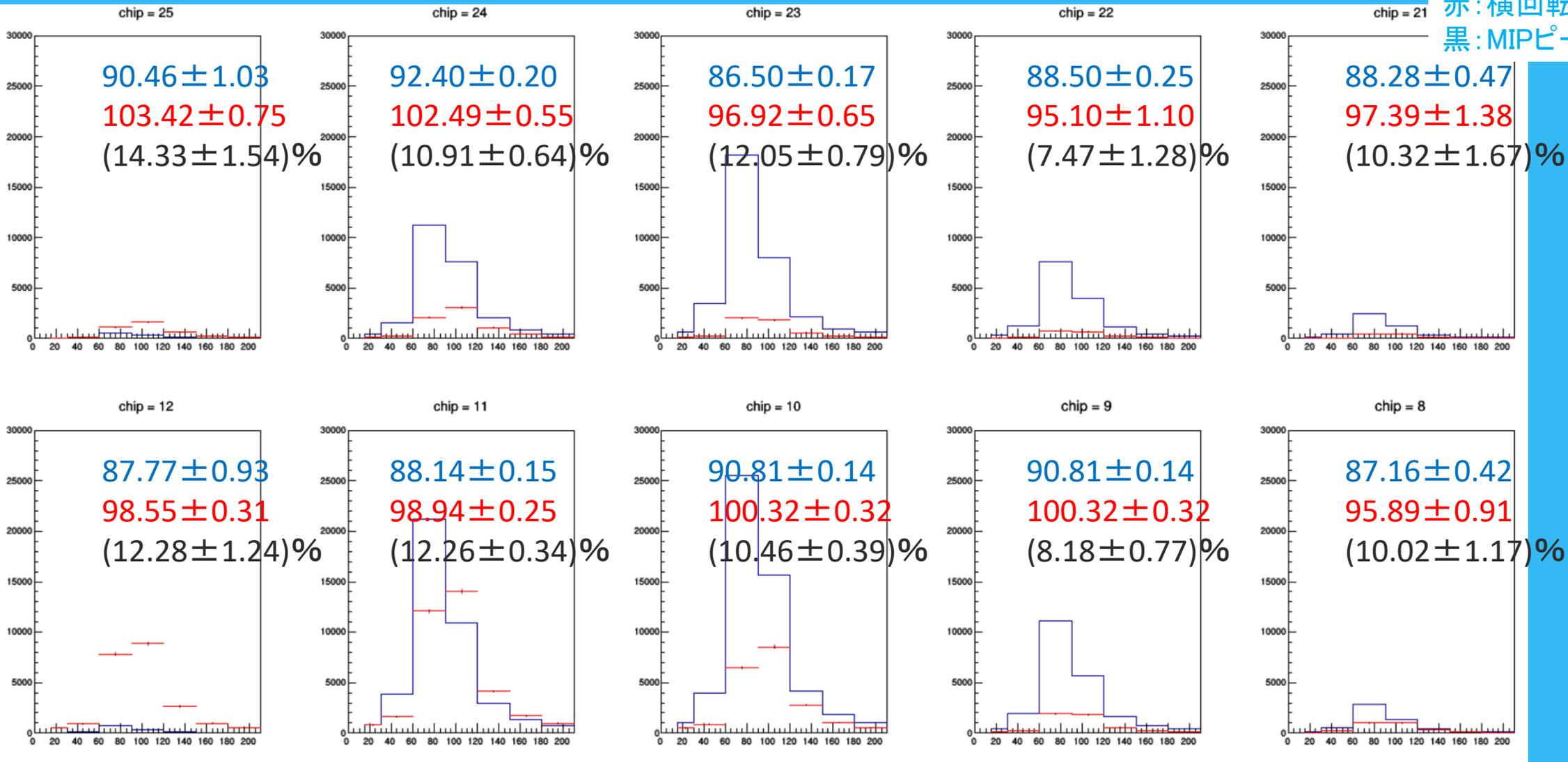
→横回転では垂直時よりも、ビームがラダーを通過した時に約14%多くエネルギーを失うと考えられる。



- ・本来のビーム照射より右側のchip(chip8,9,10,21,22,23)でヒットが多い。  
→横回転により、L0では比較的右側のchipにビームが入射したと考えられる。
- ・MIPピークの変化率が14%に満たないchipが多い。



- 本来のビーム照射付近のchip(chip9,10,11,22,23,24)でヒットが多い。  
→横回転により、L1では比較的中央のchipにビームが入射したと考えられる。
- MIPピークの変化率が14%に満たないchipが多い。



- ・本来のビーム照射より左側のchip(chip8,9,10,21,22,23)でヒットが多い。  
→横回転により、L2では比較的左側のchipにビームが入射したと考えられる。
- ・MIPピークの変化率が14%に満たないchipが多い。

# 考察

- ・ L0 からL2 にかけて右側のchip から左側のchip に順に入射していることから、ラダーに対して斜め方向に入射する粒子を検出できたことが分かる。
- ・ 原理ではMIP ピークが約14% 上昇する予想であったが、実際は殆どのchip において予想とは異なる値になった。

この原因として、以下の仮説が挙げられ、今後検証する必要がある。

- ・ chip 別にクラスター化を行っており、chip の端に位置するchannel0、127 に荷電粒子が斜めに通過した場合のエネルギー損失量を過小評価してしまった。

## 4. まとめ

# まとめ

テストビーム実験において、中間飛跡検出器 INTT の実機の一部を用いた性能評価を行った。

## DACスキャンと通常のDAC設定の比較

- ・ DACスキャンを行うことで、精密なMIPピークを導出し、ノイズと信号を見分けることができた。

## 垂直時と縦 / 横回転の比較

- ・ ラダーに対して斜めに入射する粒子を検出することができた。
- ・ 縦回転ではビームがラダーに対して斜めに入射し、複数のchannelをまたがって通過するため、クラスター化の影響が大きいことが分かった。
- ・ 荷電粒子のシリコンラダー内通過距離が長いほど、エネルギー損失が大きくなることが分かった。

## 5. 今後の課題

# 今後の課題

- ・ 垂直時と縦/横回転時の比較において原理から予想される値と解析結果が異なっていたが、その原因を以下の方法で調べる。
  - ① クラスタ化の対象となるヒット数に制限をかけて、エネルギー損失分布を再評価する。
  - ② 上下に位置するchipのchannelを0-255とひとまとめにしてクラスタ化を行う。

# Backup

# MIP(Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子)

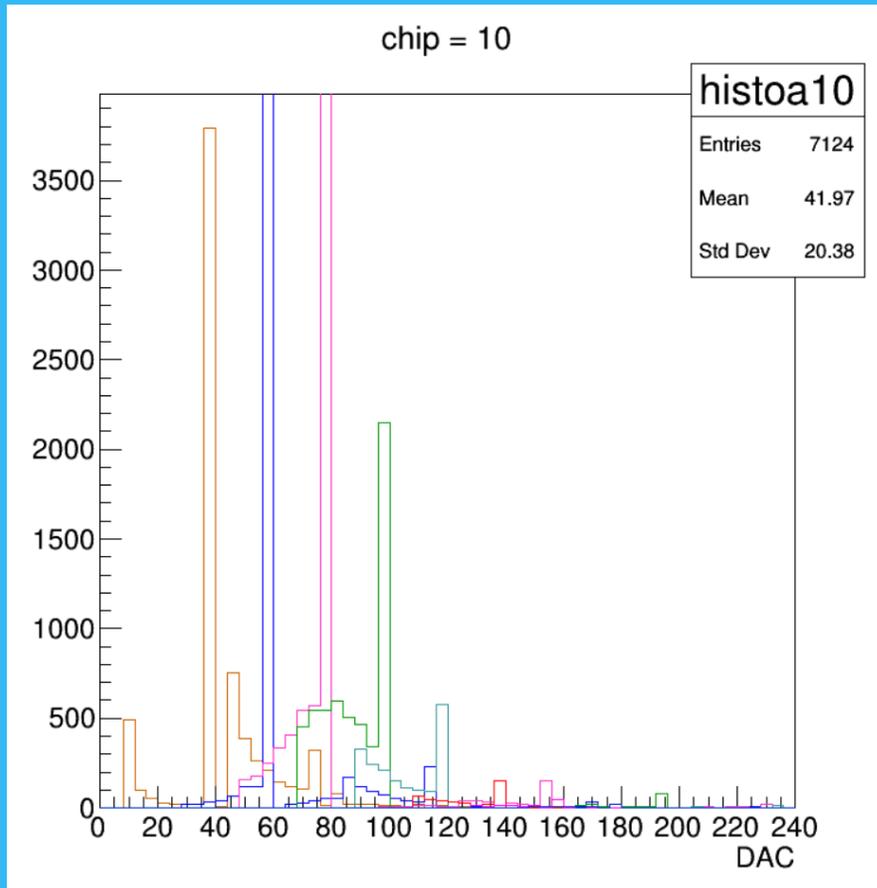
- ・ 一般的に、物質中を通過するエネルギー損失はBethe-Blochの式で表される。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

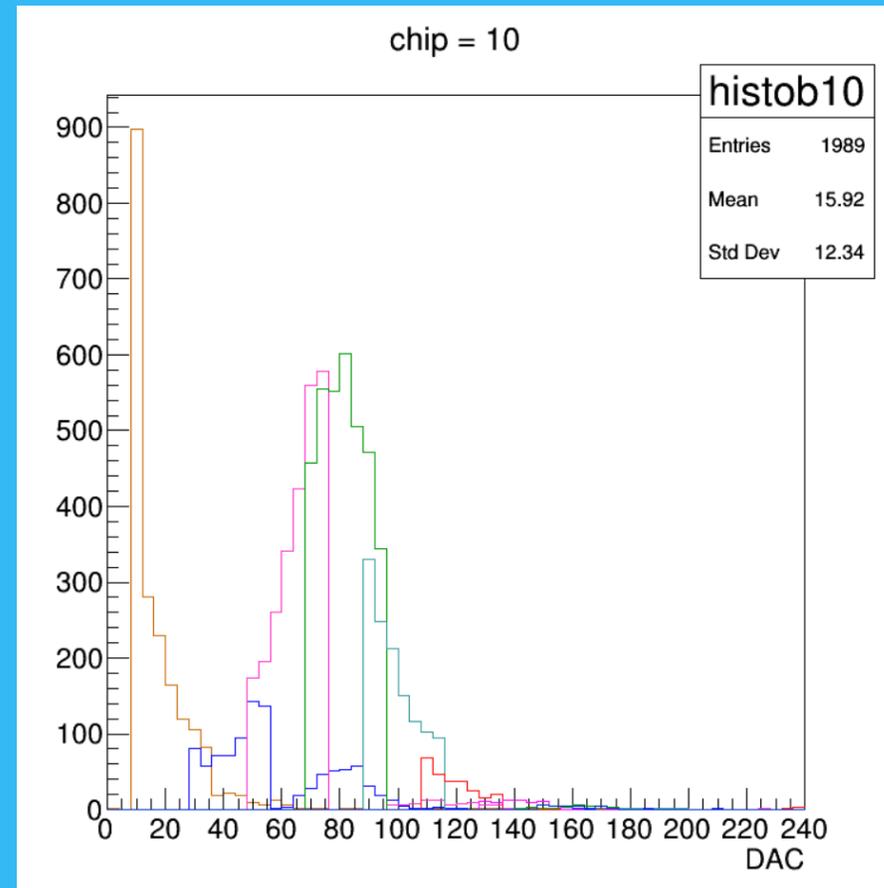
- ・ 入射粒子の速度 $\beta$ が小さい時は速度の2乗に反比例する一方、速度 $\beta$ が大きくなるとやがてエネルギー損失はほぼ一定の値をとる。

→エネルギー損失がほぼ一定となる場合の粒子を、MIP(Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子) という。

# ADC7除去前と後



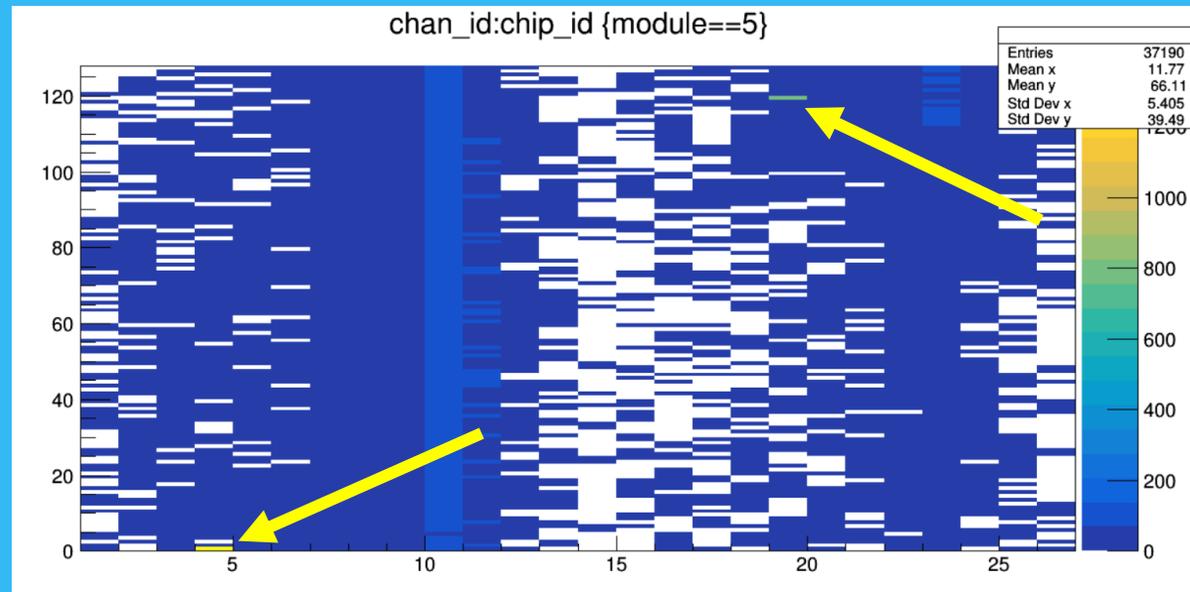
ADC7除去前



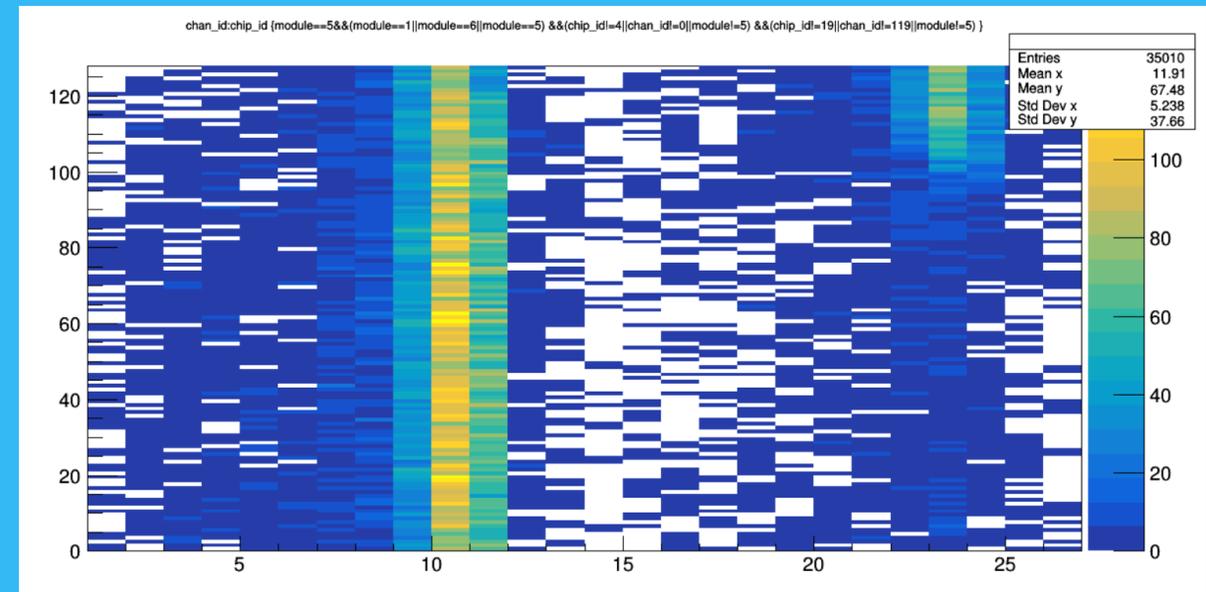
ADC7除去後

# Hot Channelでのヒットの除去前と後

除去前



除去後

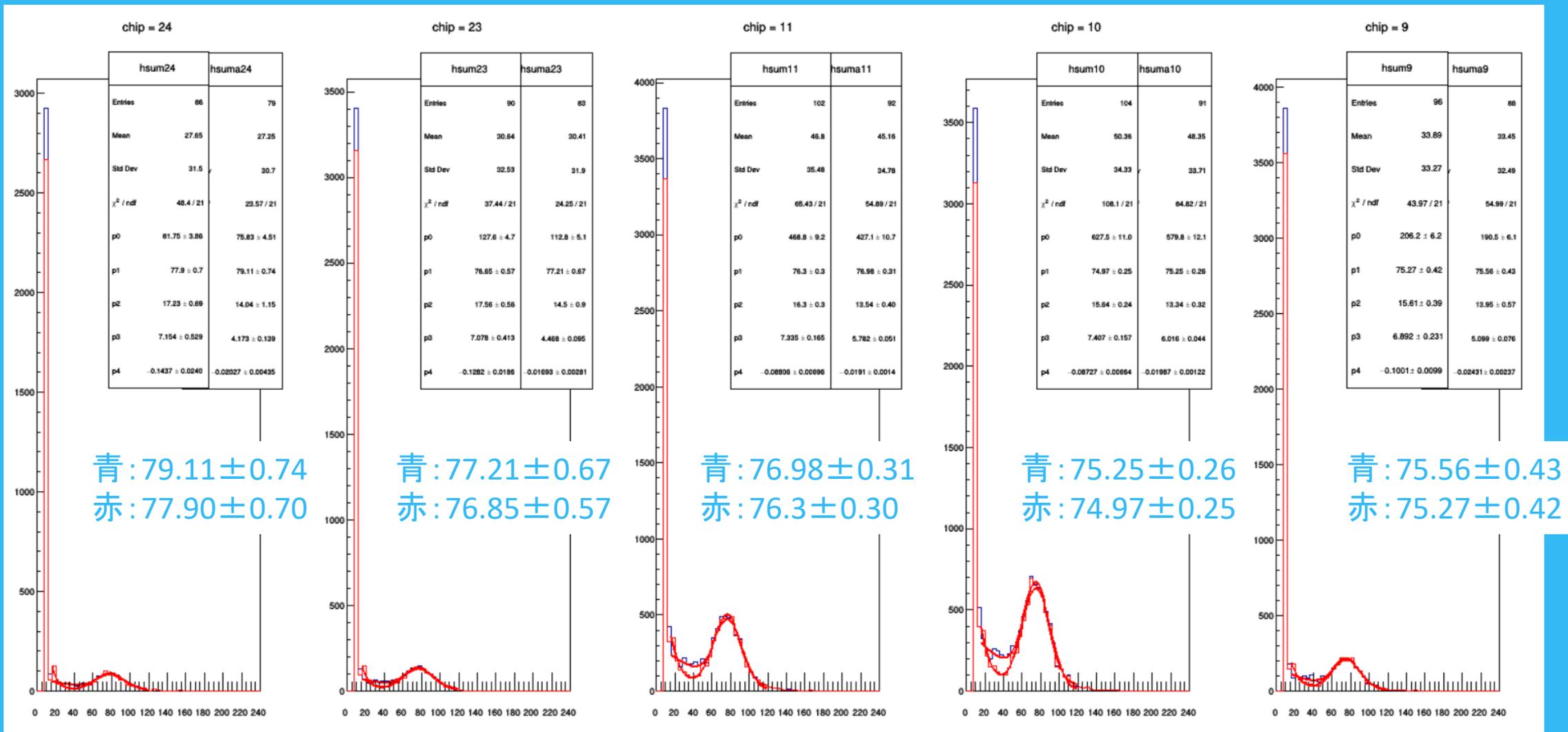


# クラスター化手順

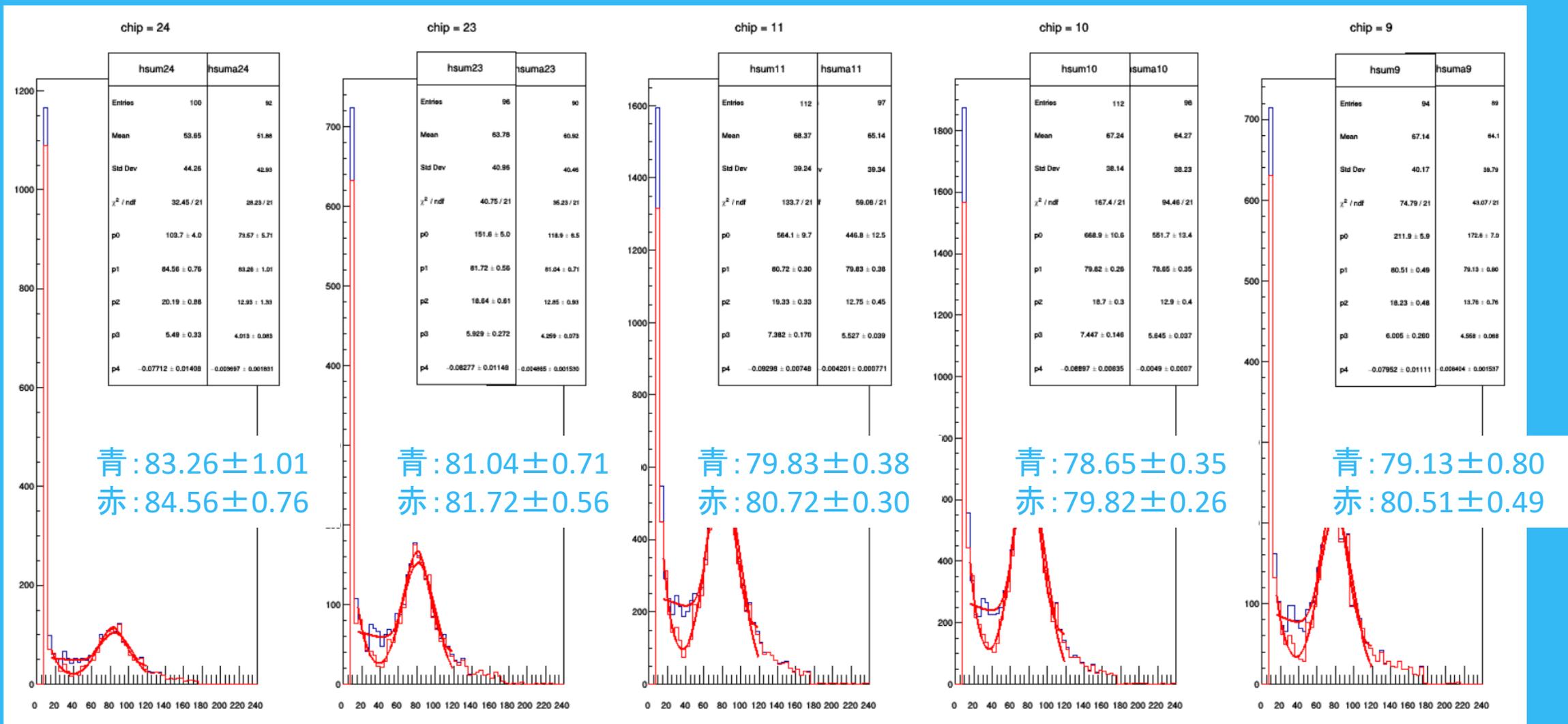
1. 同時刻におけるイベントをvectorに入れる。
2. channel, ADC が格納された2種類のvectorをpairに入れる。
3. chip 番号ごとにchannel 番号でpairのデータを並び替える。
4. 不要なイベント(double saving event 起因)を除去する。
5. ADCをDAC設定値に変換する。
6. クラスター数が1以上のchip番号のデータをクラスター化する。
  - (a) channel が隣り合うとき、1粒子のイベントとし、DAC値を足し合わせる。
  - (b) channel が隣り合わないとき、それぞれ別のヒットにおけるDAC値とする。

# クラスター化の影響 (DACスキャン)

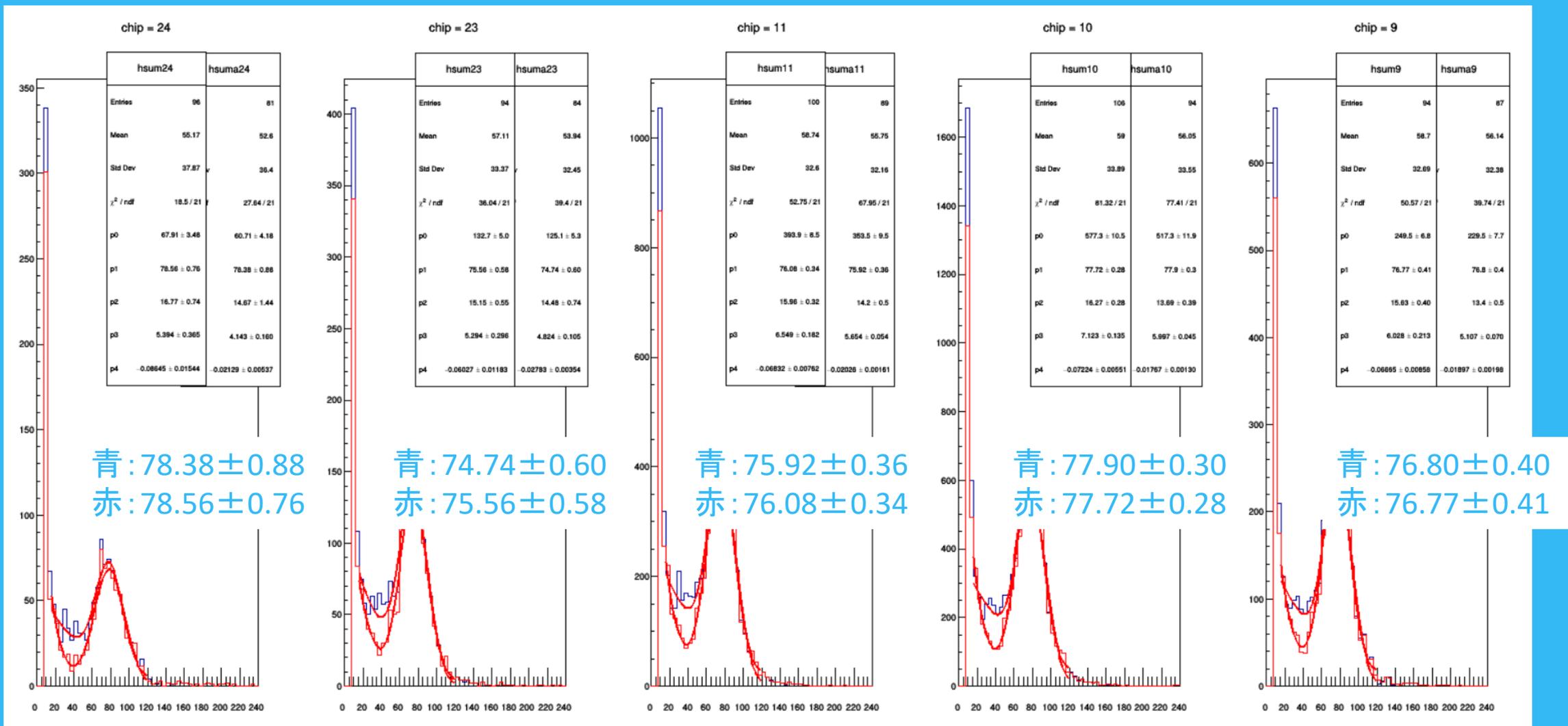
- ・ DACスキャンにおいてクラスター化の影響を調べるために、クラスタリングの有無によりエネルギー損失分布を比較し、Gaus+Expoでフィッティングを行った。



青: クラスタリングなし  
赤: クラスタリングあり



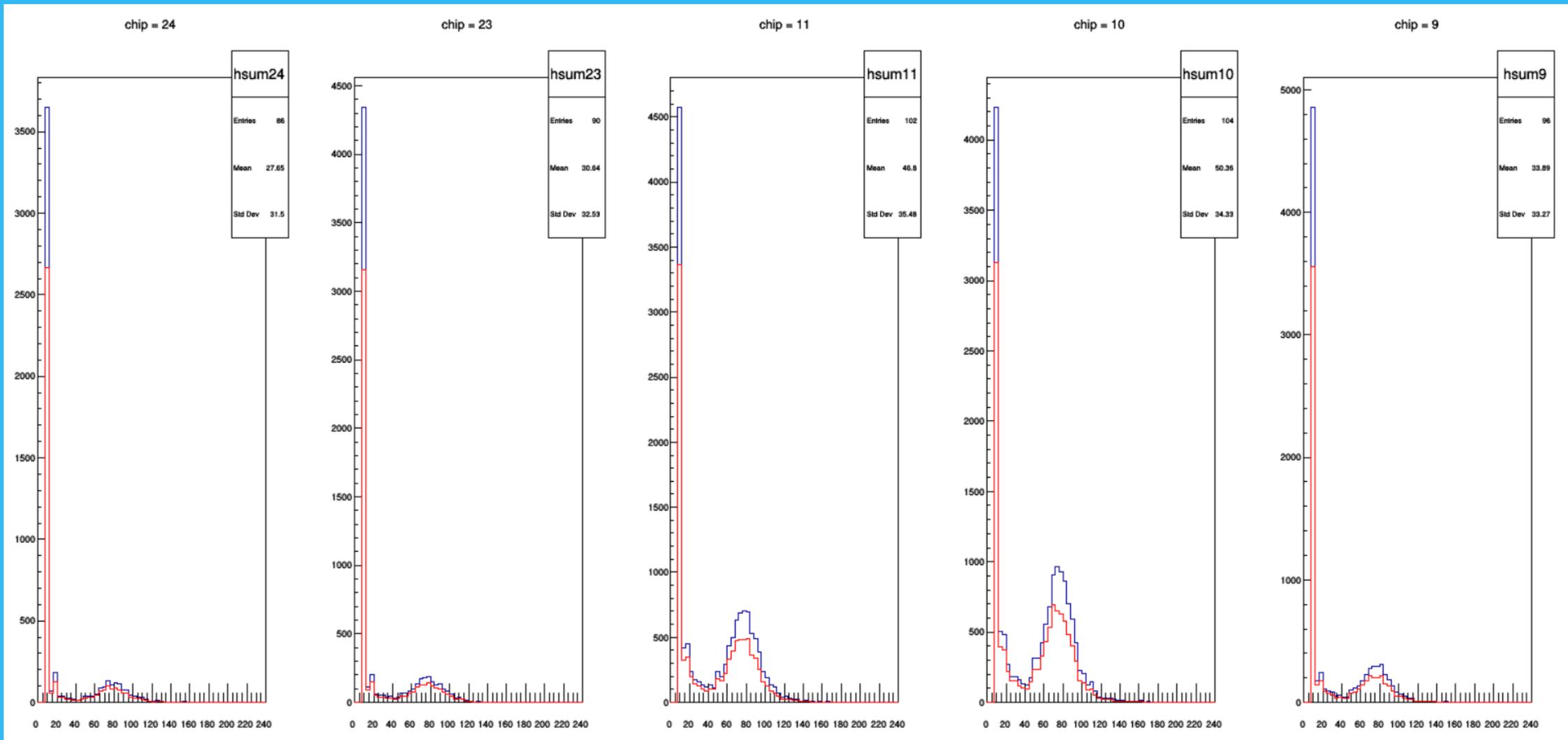
青: クラスタリングなし  
赤: クラスタリングあり



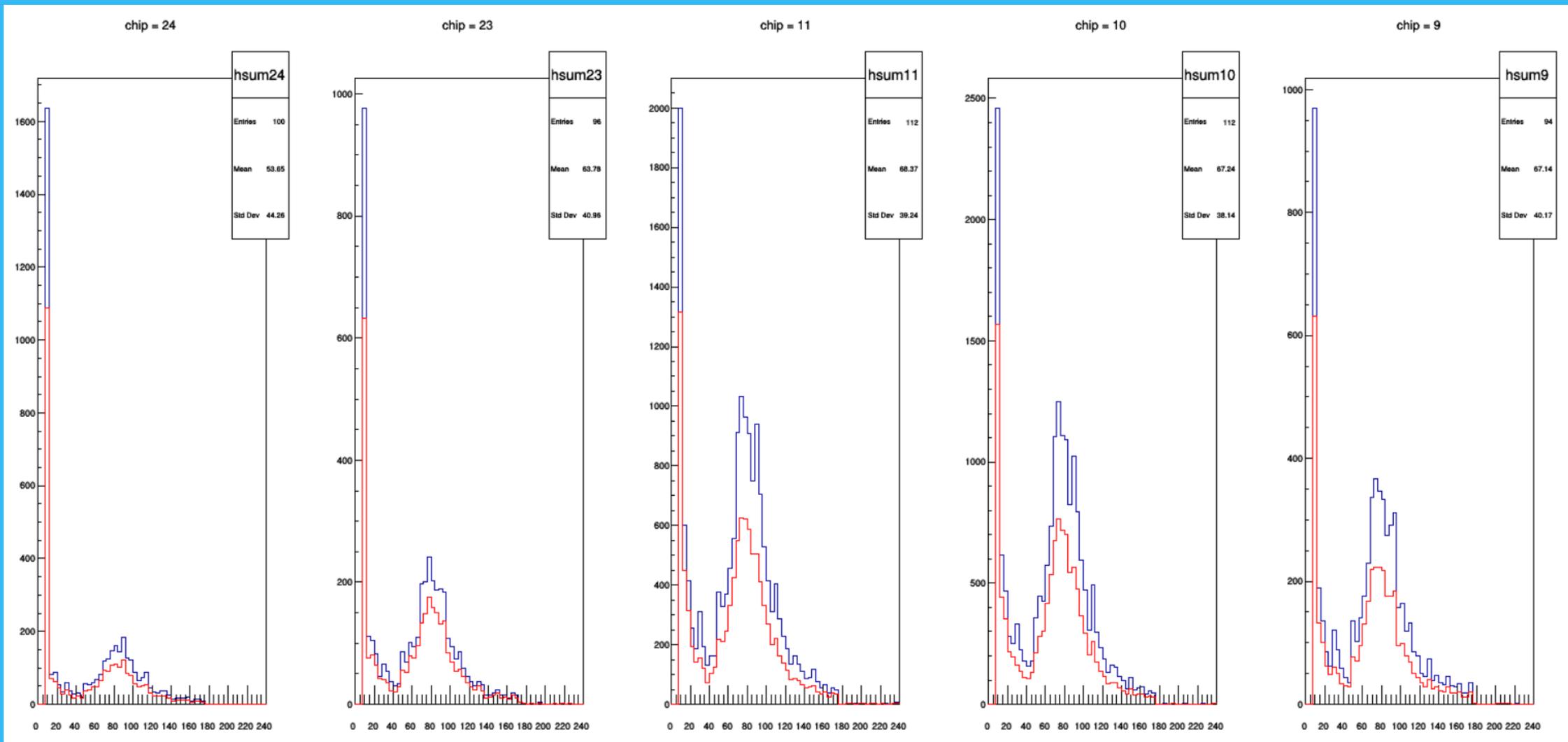
青: クラスタリングなし  
赤: クラスタリングあり

# double saving eventの影響 (DACスキャン)

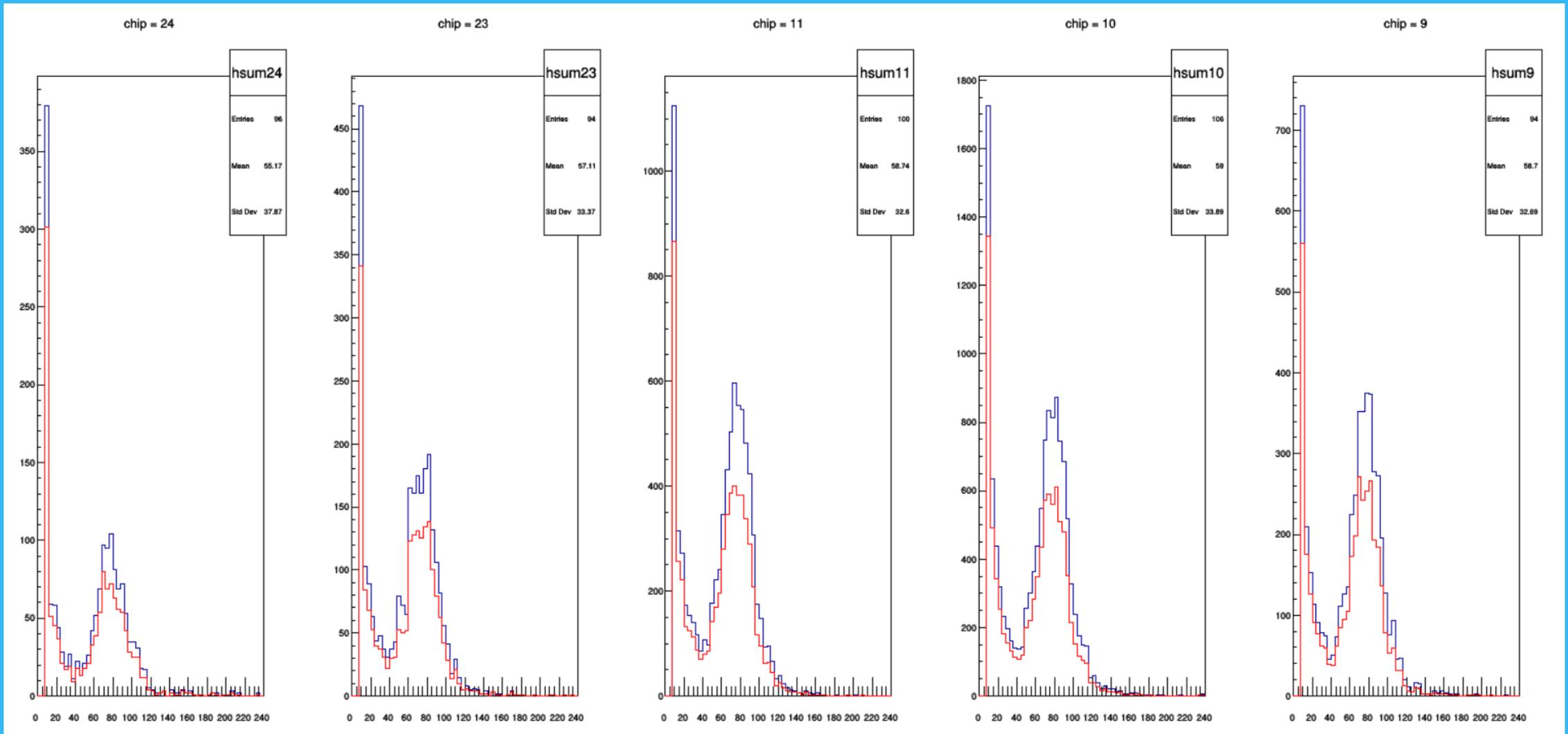
- ・ DACスキャンにおいてdouble saving eventの影響を調べるために、double saving eventを除去と未除去におけるエネルギー損失分布を比較した。



青 : double saving event 除去なし  
赤 : double saving event 除去あり



青 : double saving event 除去なし  
 赤 : double saving event 除去あり



青 : double saving event 除去なし  
赤 : double saving event 除去あり