

# RHIC-sPHENIX 実験の 初年度のデータを用いた 中間飛跡検出器INTTの動作検証

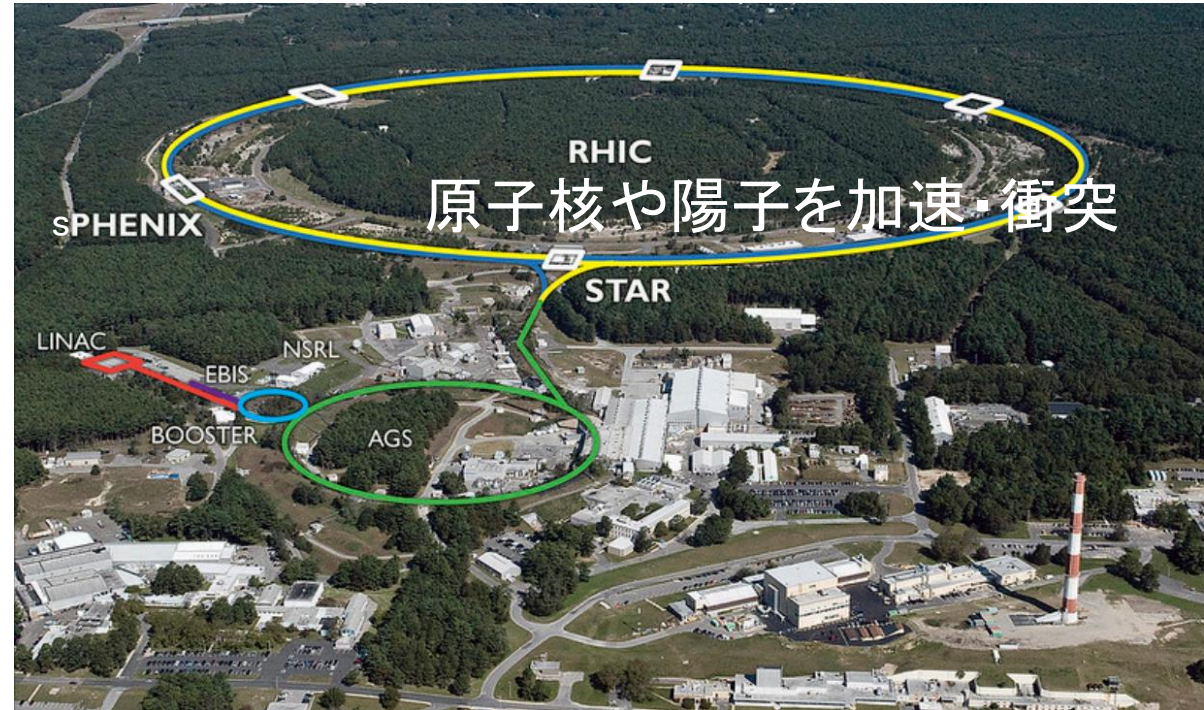
博士前期課程 数物科学専攻  
高エネルギー物理学研究室  
杉山由佳

# 目次

- 研究背景
- 研究目的
- 不良ストリップの自動検出アルゴリズムの開発
  - 開発手法
  - 評価
- sPHENIX 実験におけるエネルギー損失の評価
  - 解析手法
  - 結果
  - 考察と課題
- まとめと今後

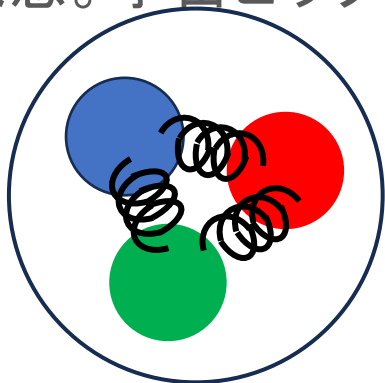
# 研究背景：sPHENIX実験

- 米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)にある重イオン衝突型加速器RHICを用いた実験
- 2023年5月より開始
- ジェットやウプシロン粒子の測定により、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の性質の解明を目指す

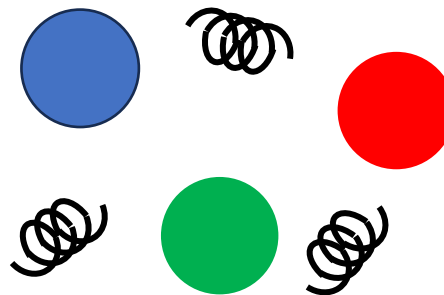


QGP: 高温・高密度下でクォークとグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放されたプラズマ状態。宇宙ビッグバンから数 $10\mu\text{s}$ 後の初期宇宙で実現していたと考えられる。

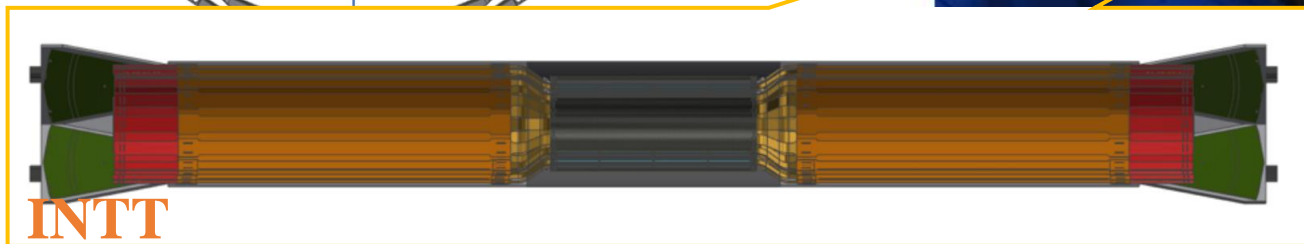
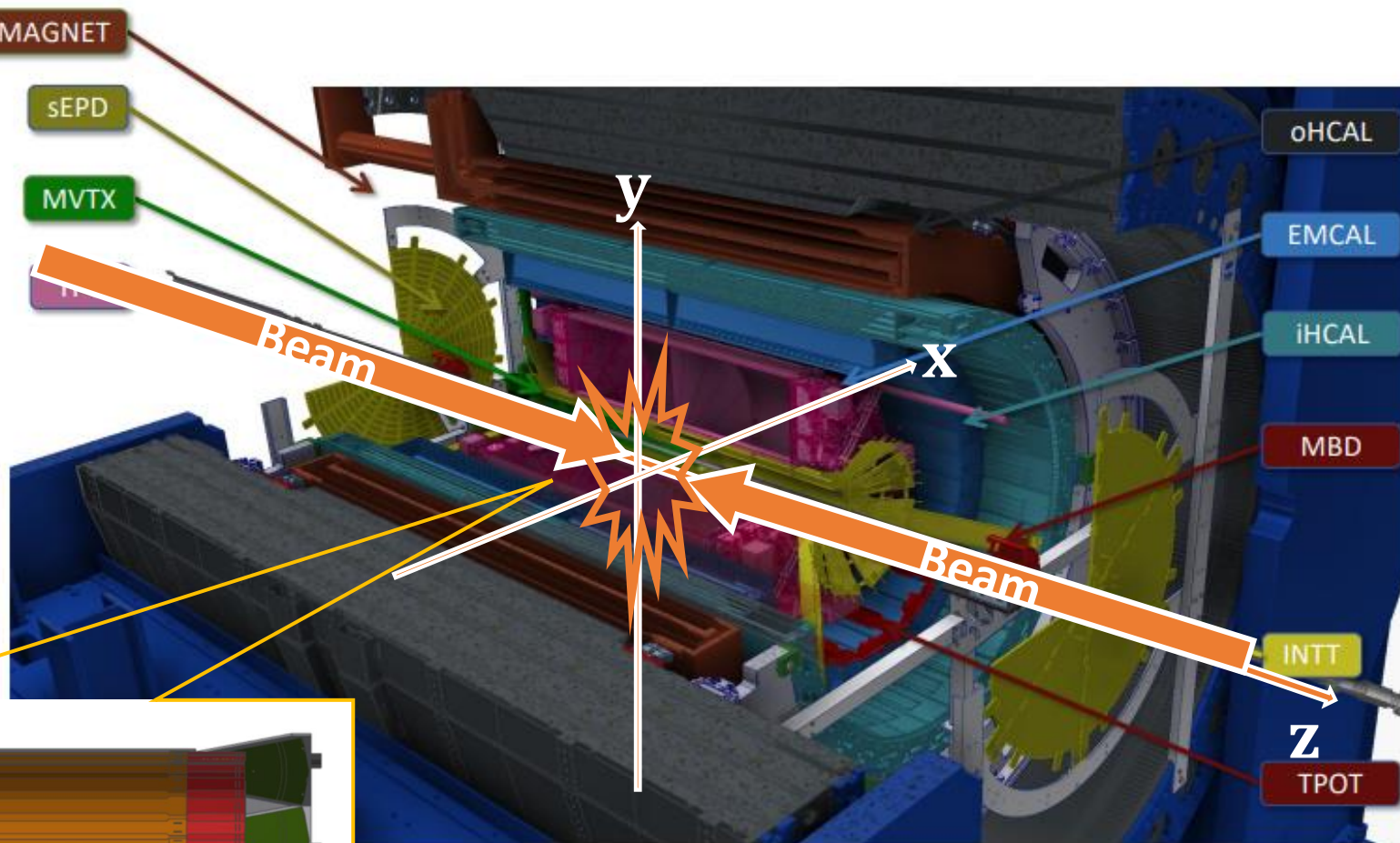
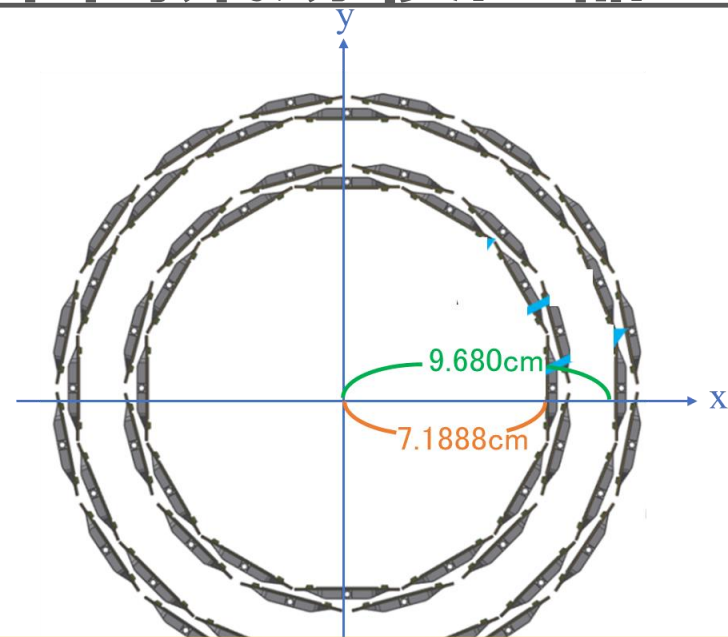
ハドロン



QGP



# 中間飛跡検出器INTT

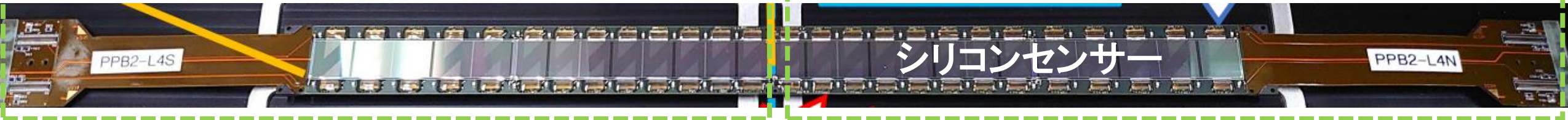


- 2層のバレル構造をもつストリップ型シリコン検出器
- ビーム軸から6-12cmに位置し、衝突点からビーム軸方向に $\pm 23\text{cm}$ 、全方位角を覆う
- 高い時間分解能により飛跡に対してビーム交差以下の時間情報(106ns)を与える

# INTTラダー

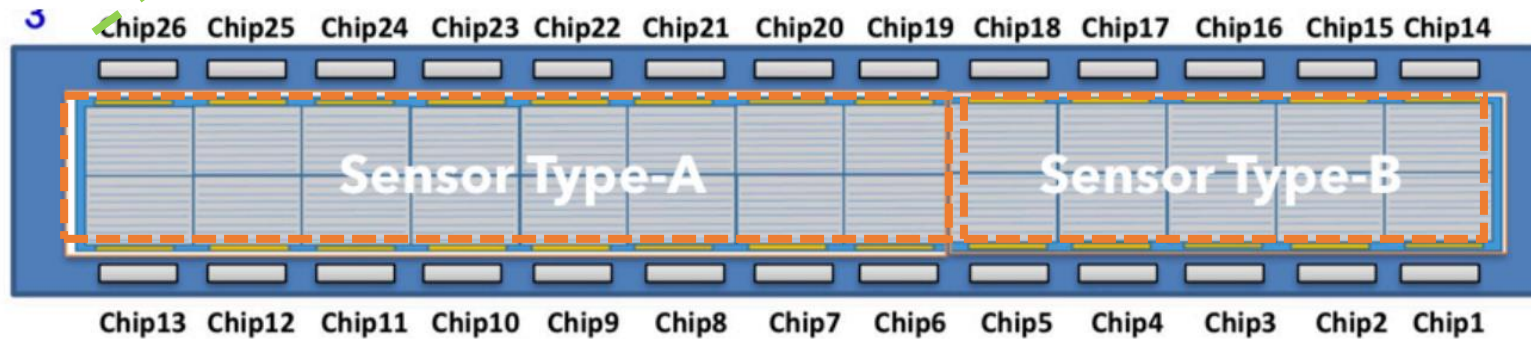
- INTTラダー1個は、ハーフラダー2個で構成

ハーフラダー



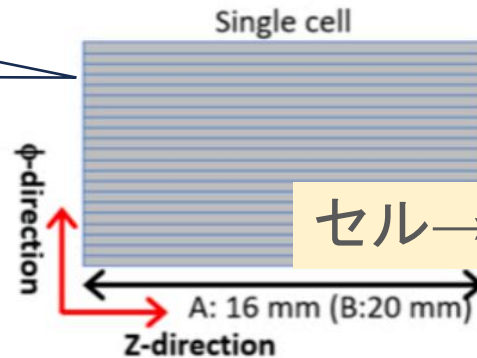
シリコンセンサー

- ストリップ長の異なる2種類の読み出しセル26個で構成



読み出しセルは、128ストリップから構成

1ストリップ  
320 $\mu$ m 厚、幅78 $\mu$ m、長さ16 mm (20 mm)



Type A: Single sensor = 8 x 2 cells  
Type B: Single sensor = 5 x 2 cells

セル→Chip、ストリップ→Channelと呼ぶ。

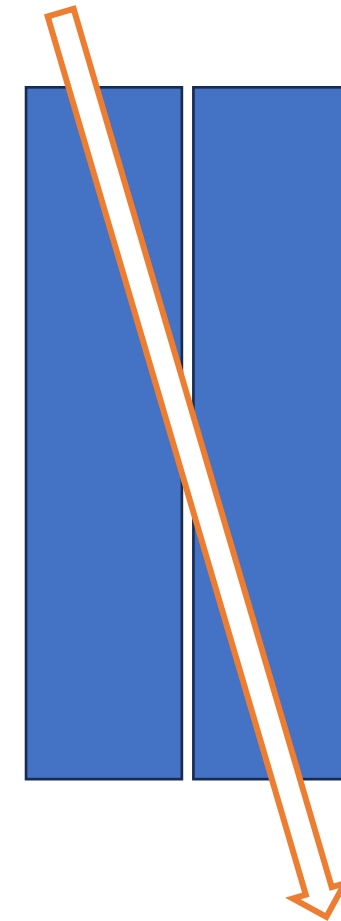
# 最小電離粒子(MIP)

高エネルギーをもつ荷電粒子が物質中を通過する際に失うエネルギーは小さく、ほぼ一定の値である。

- 粒子→**MIP**(Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子)
- このエネルギー損失量→**MIPピーク**

INTTでは、荷電粒子が損失するエネルギーを測定することで、粒子を検出する。

荷電粒子



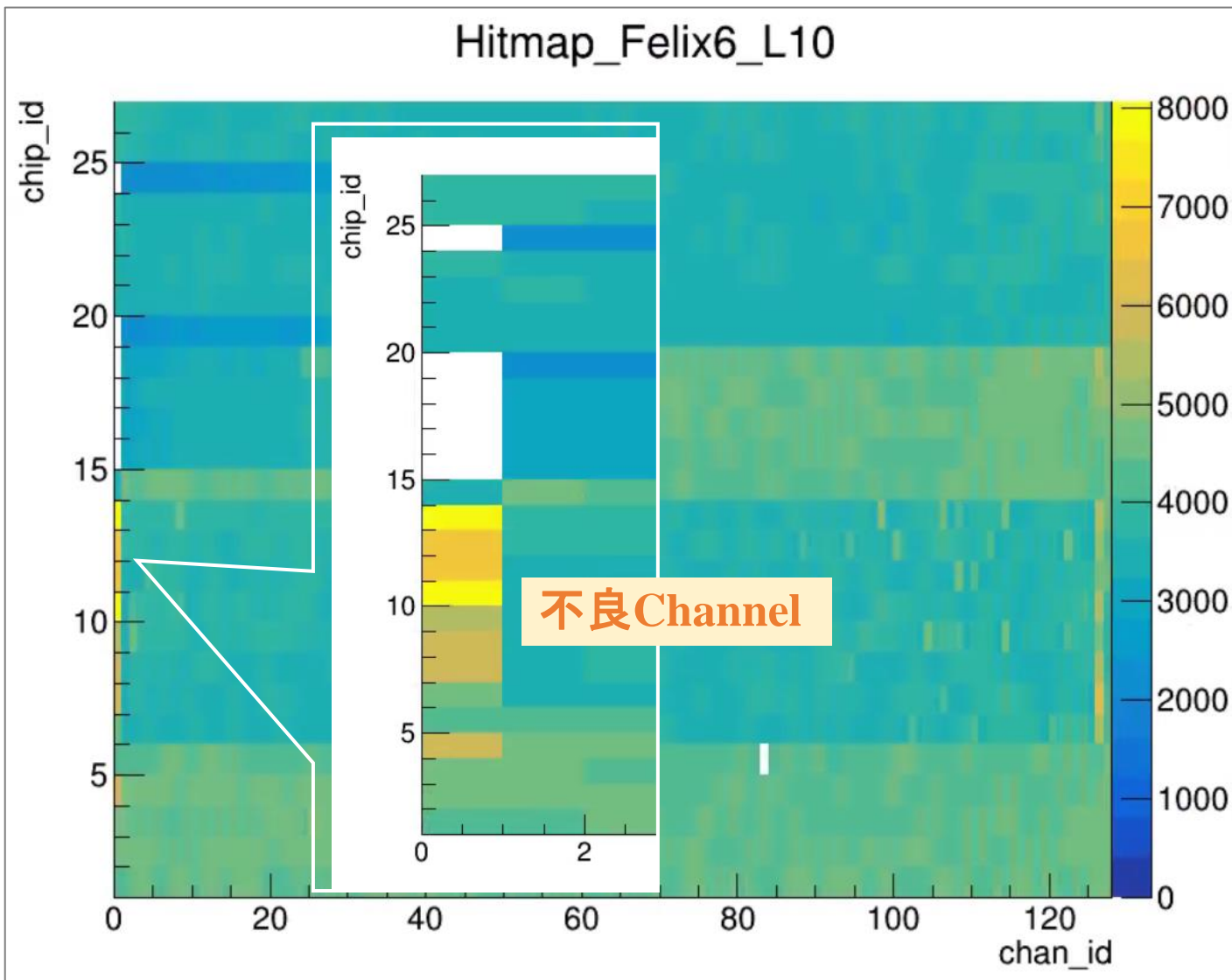
INTT用  
シリコンセンサー

# 研究目的

sPHENIX実験で2023年に収集したAu-Au衝突のデータを用いて、INTT検出器の動作検証を行う。

1. 不良Channel自動検出アルゴリズムの開発
2. MIPのエネルギー損失量の評価

# 不良Channel



Au-Au衝突(磁場なし)では、  
INTTに入射する粒子は一様分布になる

⇔ ヒット数は一様であるはず

しかし、

平均的なヒット数よりも極端に多い(少ない)  
Channelがあることが分かった。

不良Channelを解析から取り除く

⇒不良Channel自動検出アルゴリズム開発



# ヒットレート

検出したヒットの総数は、衝突事象数や検出感度によって異なるため、規格化する必要がある。

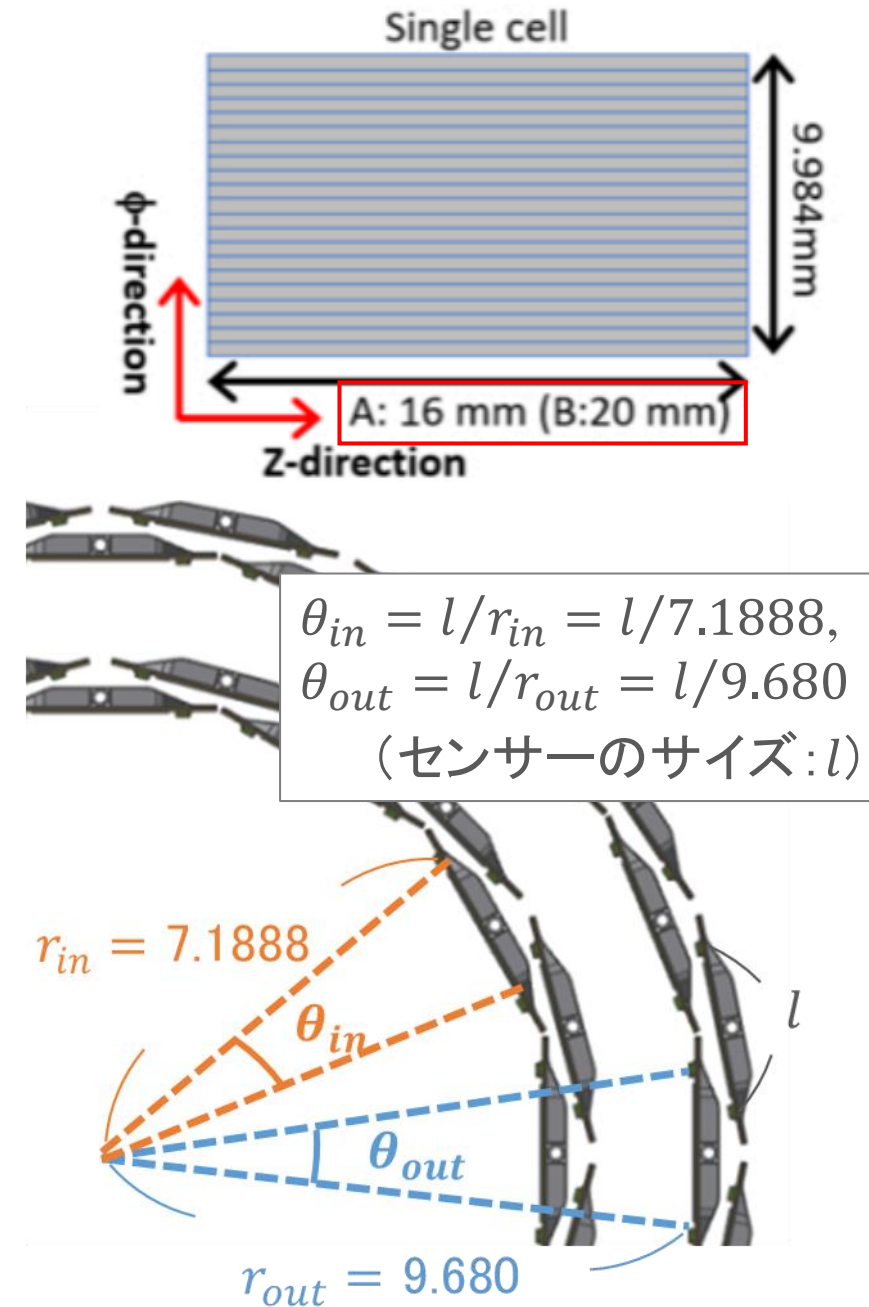
$$\text{ヒットレート } R_{hit} = \frac{1}{\epsilon_{acc} N_{evt}} N_{hit}$$

- $N_{hit}$ : あるChannelでのヒット数
- $N_{evt}$ : 解析したAu-Au衝突事象数
- $\epsilon_{acc}$ : 検出感度の違いを補正する係数

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{size} = \frac{20\text{mm}}{16\text{mm}} \end{array} \right. \quad (\because \text{センサーサイズの違い})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{theta} = \frac{\theta_{in}}{\theta_{out}} \end{array} \right. \quad (\because \text{検出角度の違い})$$

$$\epsilon_{acc} = \text{size} * \text{theta}$$



# 不良検出アルゴリズム

ノイズを除去した上で、  
Channel ごとのヒットレートのばらつきにより不良チャンネルを決定した。

1. Au-Au衝突による信号を抽出(ノイズ除去)
  - データ収集によるノイズ (クローンヒット)
  - センサーのランダムノイズ
2. ヒットレート分布作成とFitting
3. Channel分類

磁場なしRunデータのうち1万イベント(=衝突事象)分を解析した。

# ノイズ除去①

## 1. データ収集によるノイズ (クローンヒット)

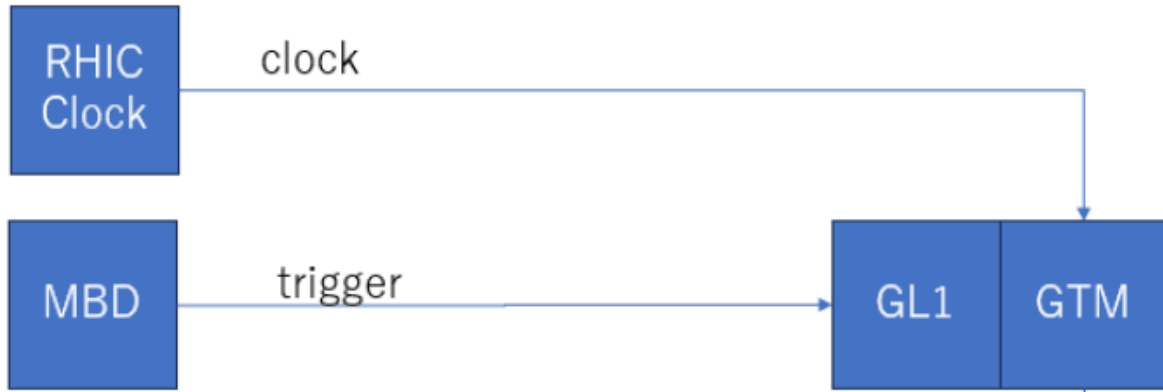
検出されたヒット情報 (Chip, Channel番号など) が同一であるクローンヒットが確認された。実際は1ヒットだが、データ収集系の問題で同じヒットが読み出されたと考えられる。

	ラダー番号	Chip番号	Channel番号
Hit 1	1	10	68
Hit 2	1	10	68
Hit 3	1	10	68

同一のヒットのうち  
2番目以降のヒット(偽ヒット)を除去した。

# ノイズ除去②

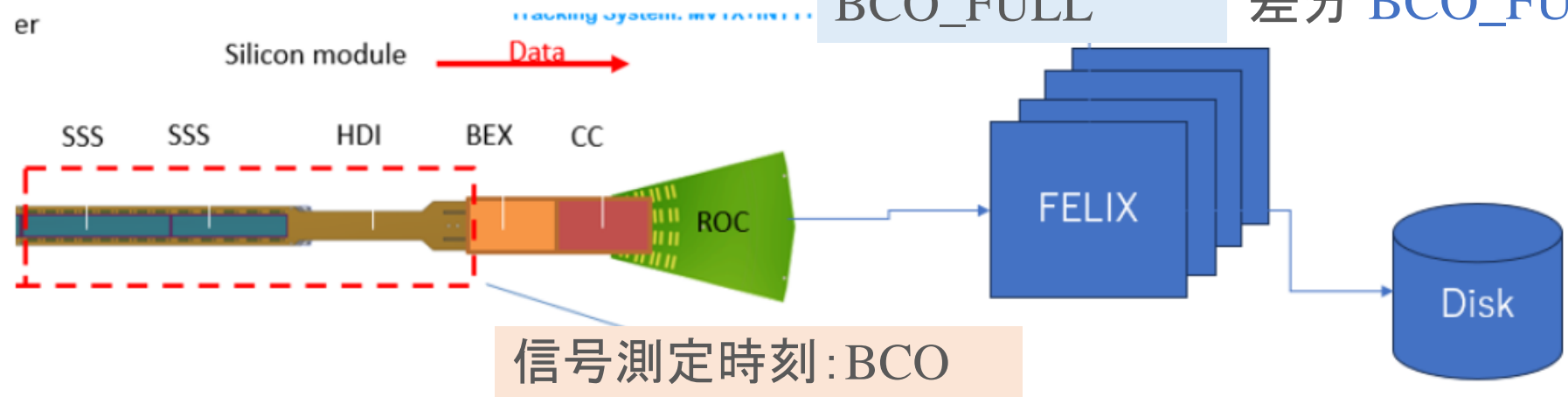
## 2. センサーのランダムノイズの除去



ビーム衝突時刻=信号測定時刻のとき  
Au-Au衝突を測定する。  
⇒一致しないときの信号はノイズ

ただし、

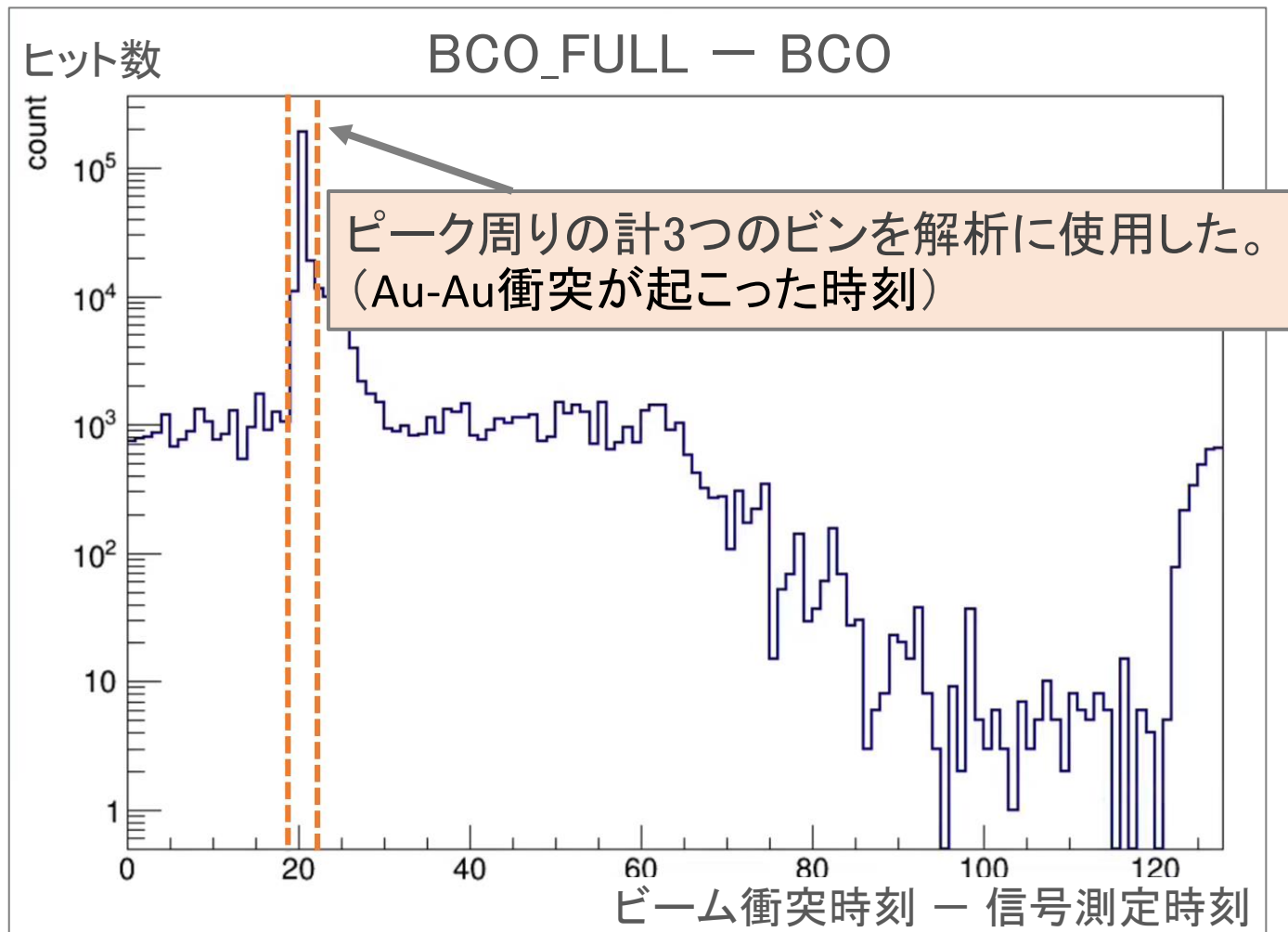
- 実際はBCO\_FULL ≠ BCO  
(測定開始時刻が異なるため)  
差分 BCO\_FULL - BCO は一定の値



ビーム衝突時刻:  
BCO\_FULL

# ノイズ除去②

## 2. センサーのランダムノイズの除去



Au-Au衝突時刻に検出した粒子はノイズに比べて非常に多い。

ピーク位置

⇔Au-Au 衝突時刻に検出したヒット  
⇒解析に使用

# ヒットレート分布

ヒットレート分布を用いて不良チャンネルを決定

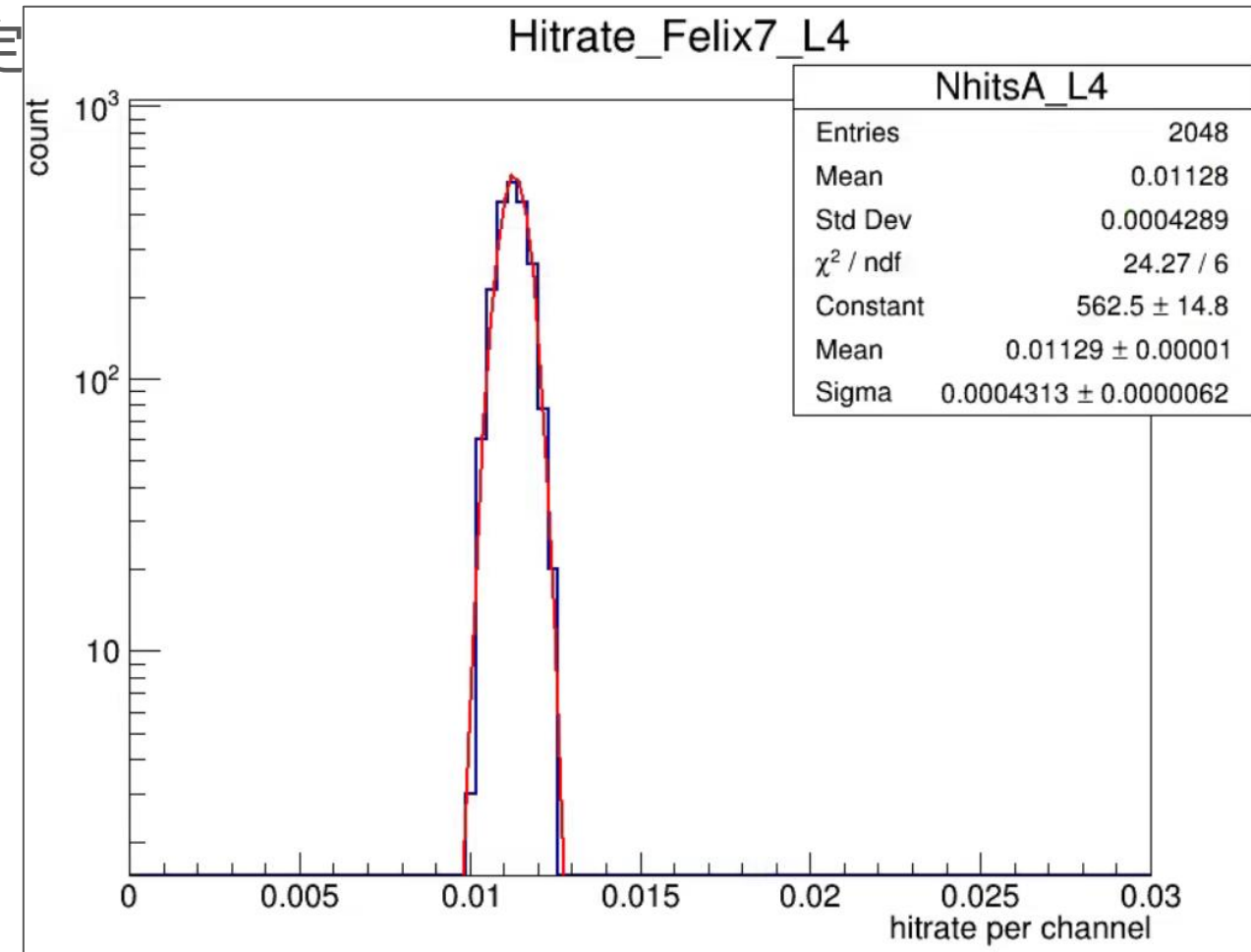
$$\text{ヒットレート } R_{hit} = \frac{1}{\epsilon_{acc}} \frac{N_{hit}}{N_{evt}}$$

- $N_{hit}$ : あるストリップのヒット数
- $N_{evt}$ : 解析したAu-Au衝突事象数
- $\epsilon_{acc}$ : 検出感度の違いを補正する係数

INTT の各方向に同じ割合で粒子が検出されると仮定すると、

ヒットレート分布→ガウス分布

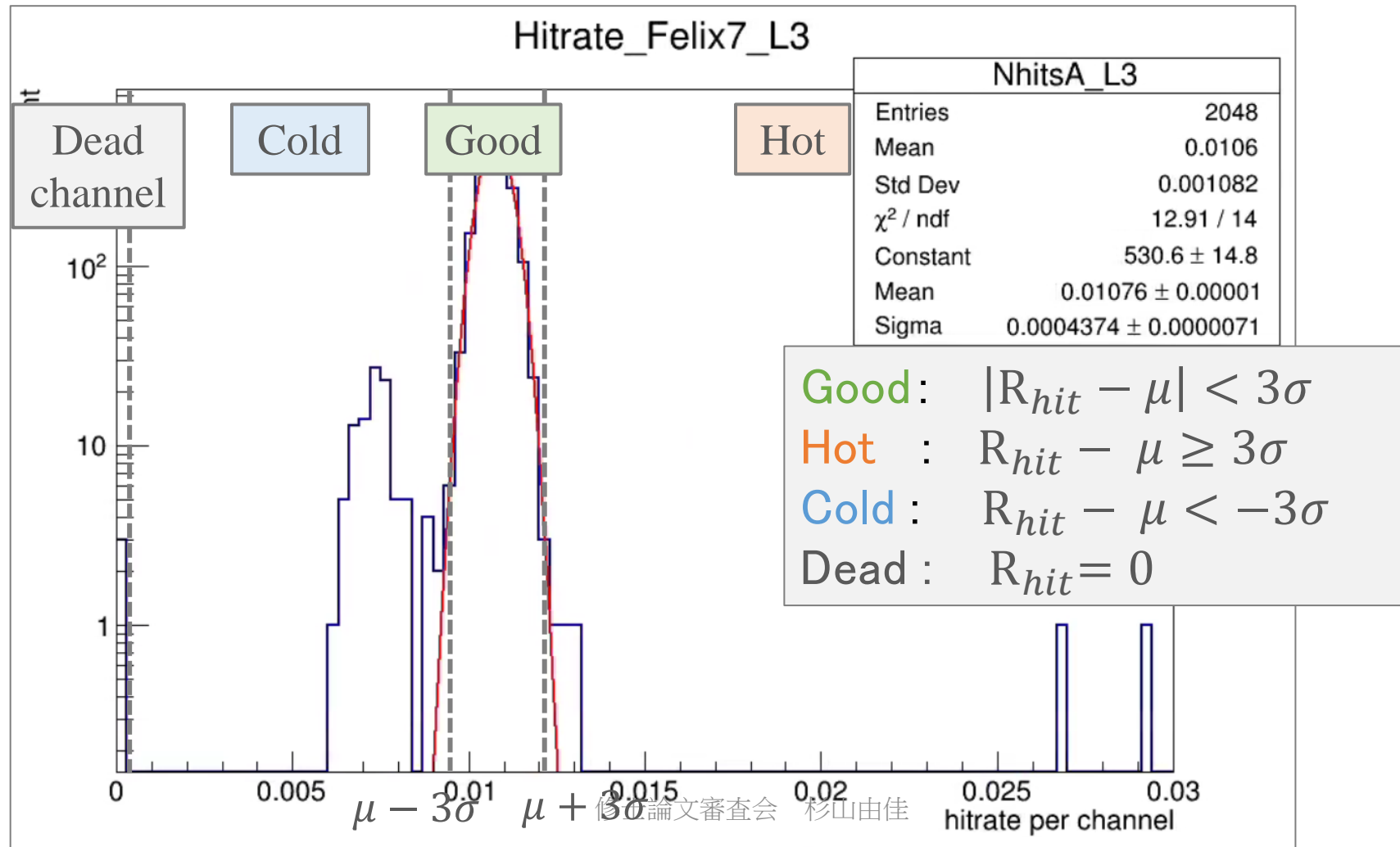
Gaussianでフィットし、 $\pm 3\sigma$ 以上を不良チャンネルとした。



# Channel分類

ヒットレート  $R_{hit}$  のばらつきによって不良Channelを決定

⇒Fittingパラメータ(平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$ )によってChannelの状態を分類した。

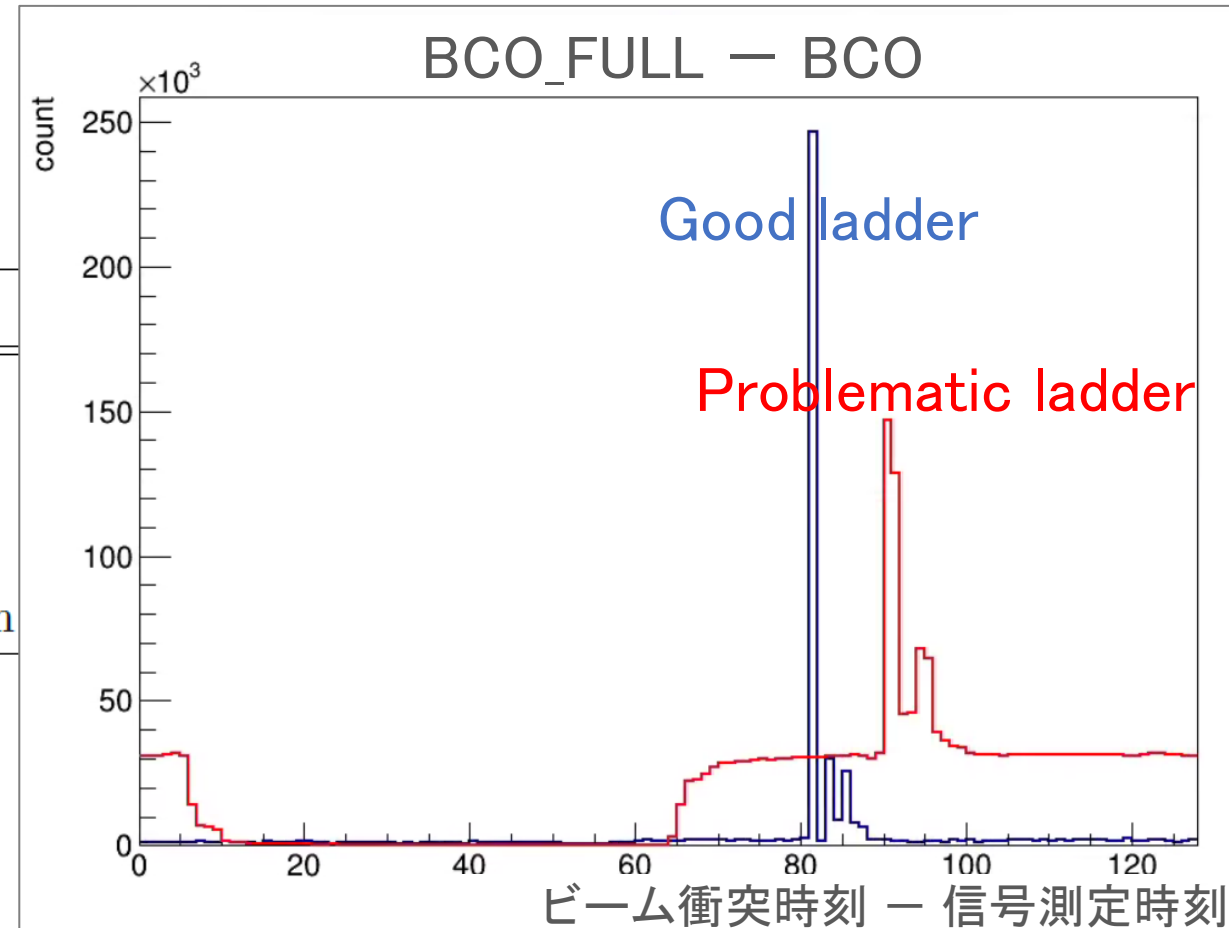


# 既知の問題

分類した4種類のChannelの他に、問題のあるハーフラダーが確認された。  
既知の問題があるハーフラダー→ Problematic ladderと定義

表 3.1 問題のあるセンサーの一覧とその原因

problematic sensor	原因
Felix 0 Ladder 6 Type A,B	due to the no-timed in
Felix 3 Ladder 13 Type B	Masked due to no bias
Felix 5 Ladder 8 Type A	Masked due to no bias
Felix 2 Ladder 11,12 Type A,B	due to the BCO distribution





# 不良Channelの自動検出

Runデータ(磁場なし)を用いて、INTT全体で占める各ChannelやProblematic ladderの割合を求めた。

Channel状態	INTT全体で占める割合
Good	93.1 %
Dead	0.2 %
Cold	2.9 %
Hot	0.3 %
Problematic ladder	3.6 %

} 不良Channel

→解析に使用できるGood Channelは約93.1%

→開発アルゴリズムによって不良Channelを自動検出することができた。

# エネルギー損失量の評価

## INTT の飛跡再構成

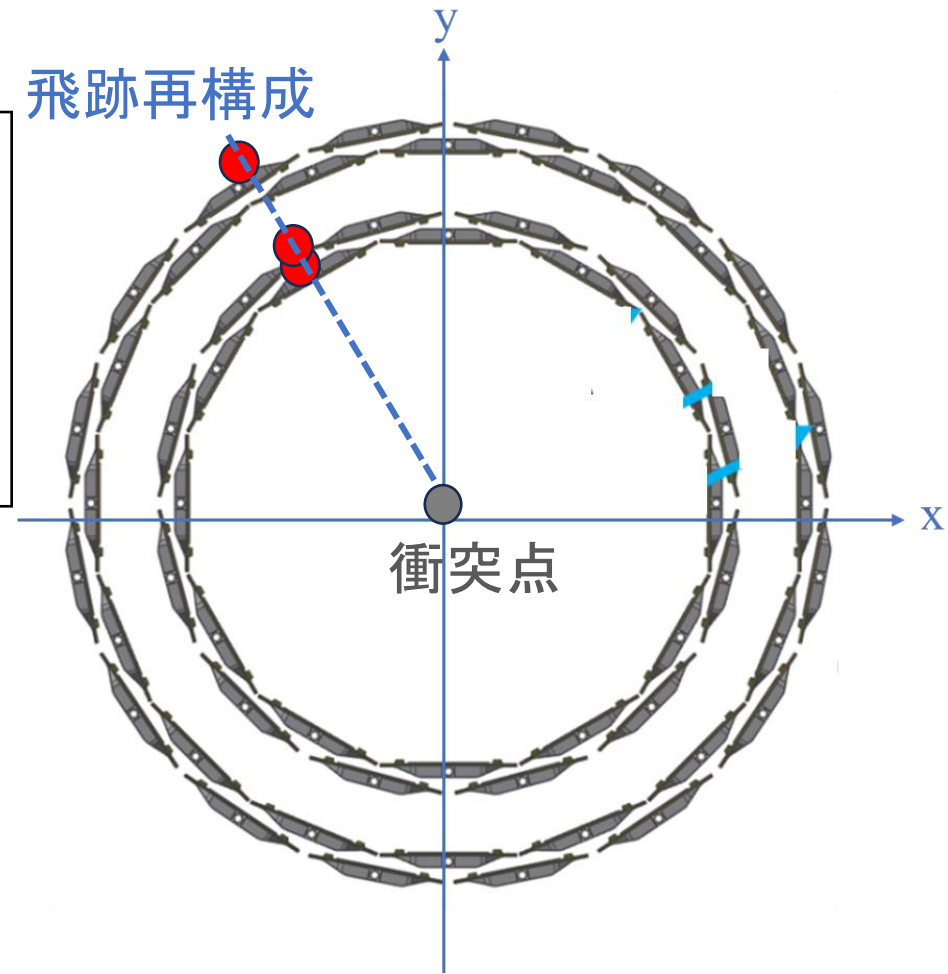
1. 荷電粒子が通過した場所をヒット位置として測定  
センサー通過時の  
エネルギー損失量を検出
2. これらのヒットをつなぎ合わせる

## エネルギー損失分布の理解

⇒ INTT のヒット測定の精度を決定

## sPHENIX実験におけるINTTの動作検証

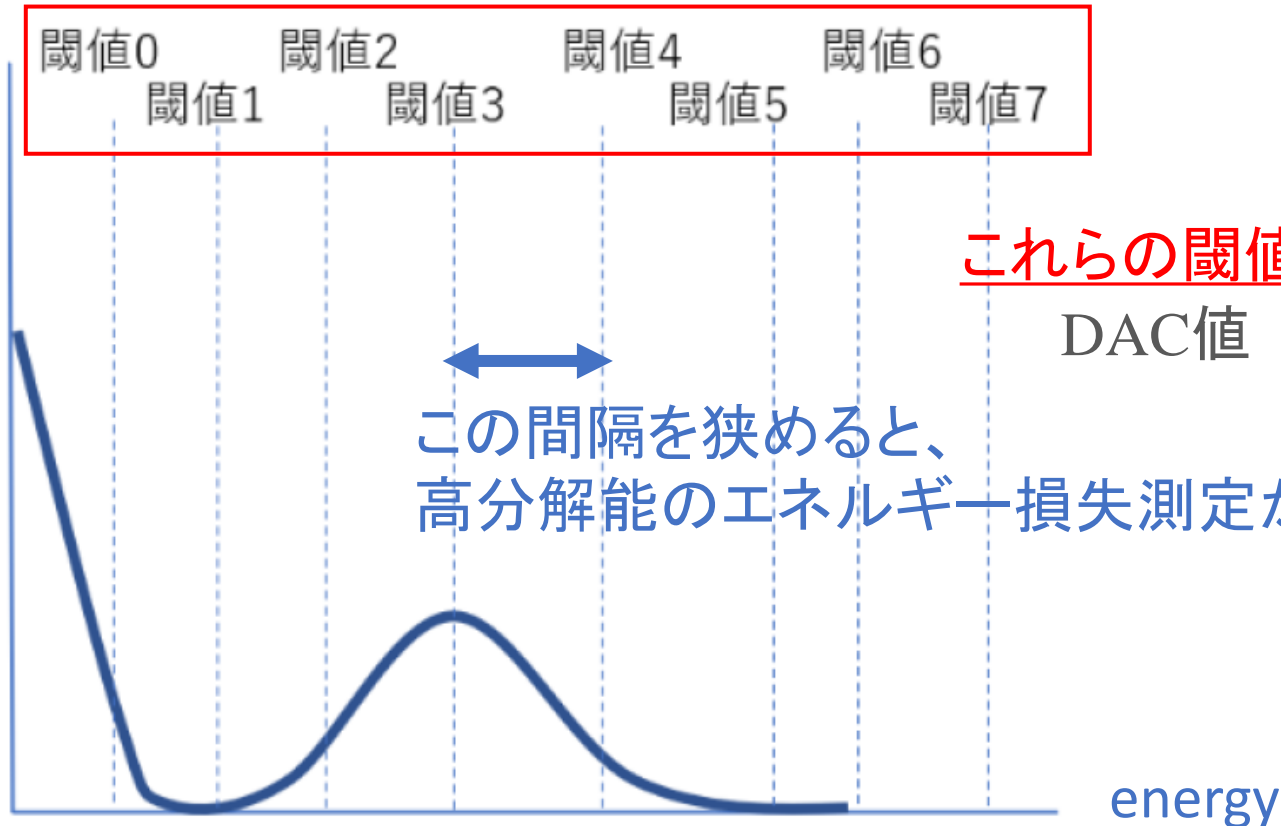
⇒エネルギー損失量の分布を作成し、評価を行った。



# 通過粒子の損失エネルギー測定

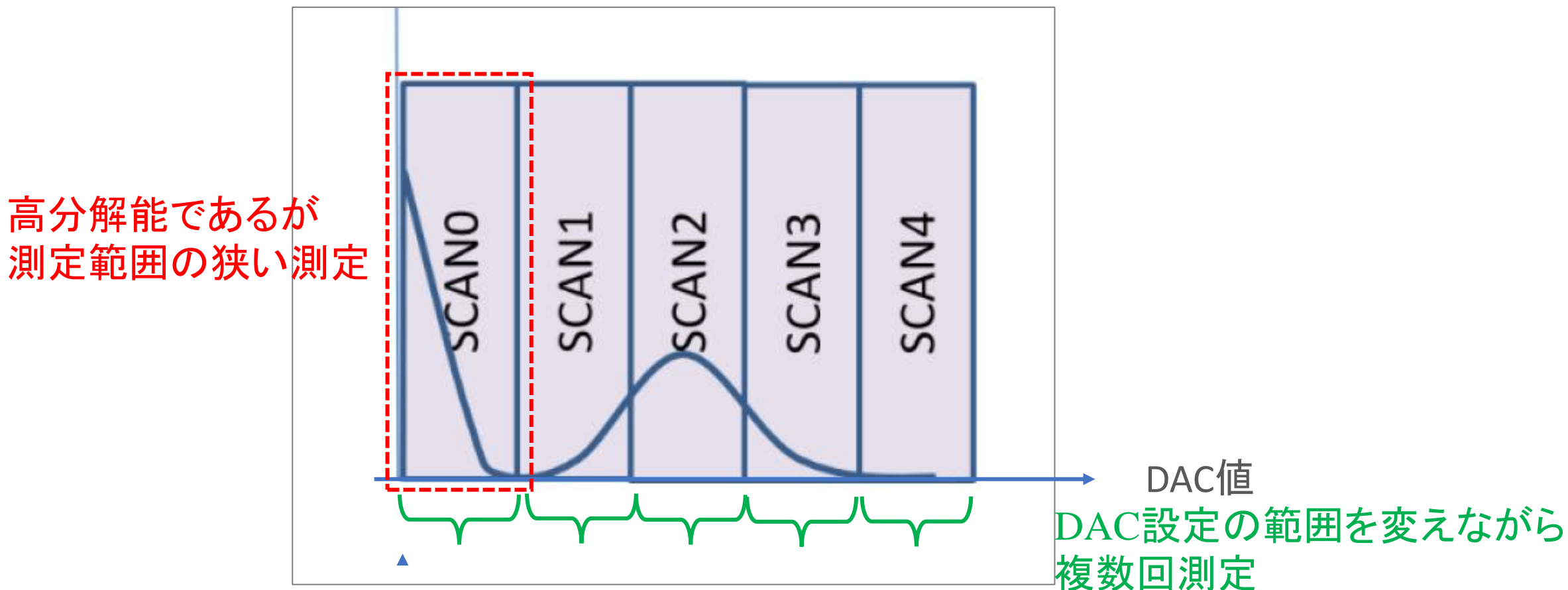
INTTでは、3ビットのADCによってエネルギーを測定する。

- ヒット有無の検出: 十分
- エネルギー損失測定: 分解能が低い



# DACスキャン

INTTのエネルギー損失の測定1回では、高分解能と広範囲を両立できない。



⇒高分解能と広範囲を両立した測定を実現 (DACスキャン)  
本研究では、DAC値68~176の範囲で計5回測定した。

# 予想されるエネルギー損失

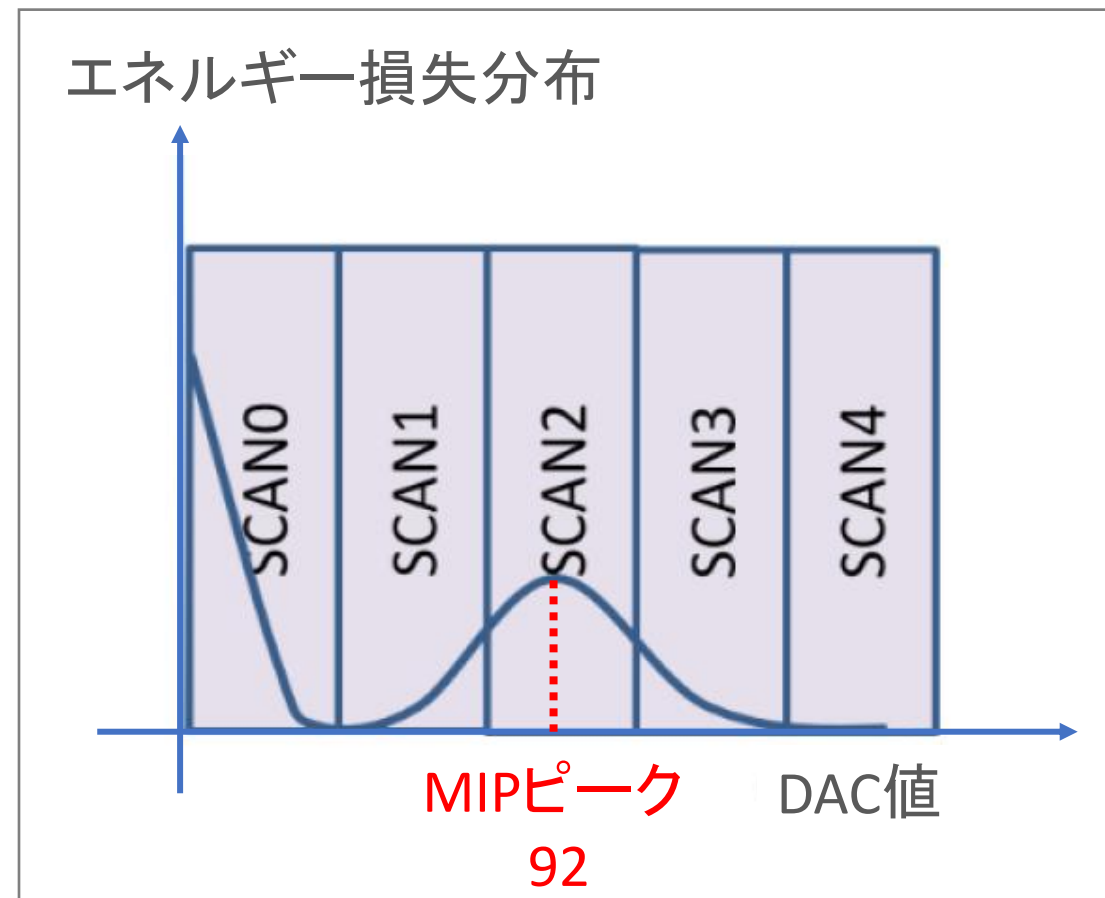
$\mu$ 粒子(1GeV)が320 $\mu$ m厚シリコンセンサー通過時のエネルギー損失

$\approx 85.7$  [keV] (:: Bethe - Blochの式)

$\approx 589$  [mV] (:: keV  $\rightarrow$  mV変換)

$\approx$  DAC値92

電圧値[mV]	DAC値
562	88
578	92
594	96
610	100
626	104
642	108
658	112
674	116



# 解析手法

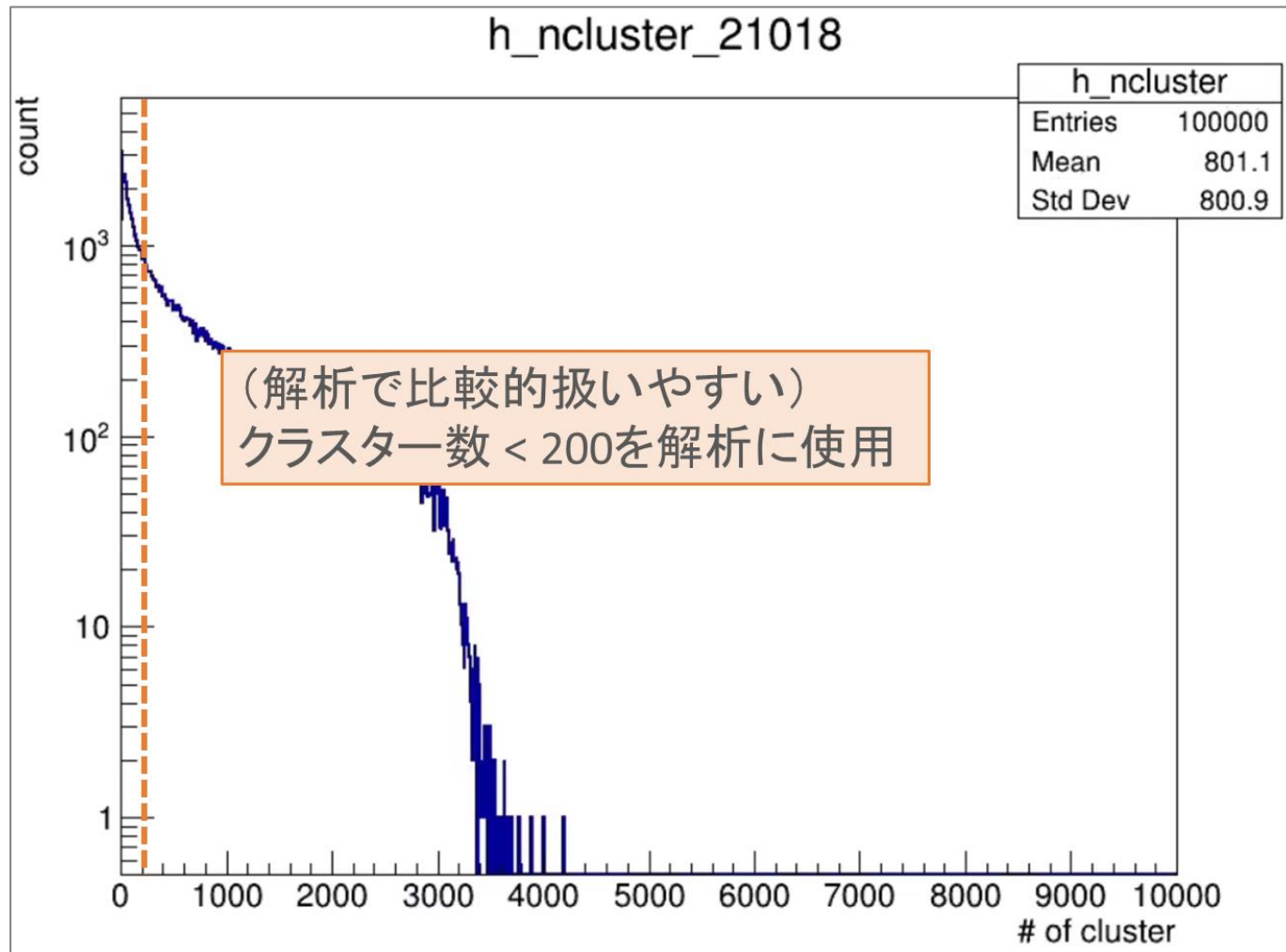
DACスキンのRunデータのうち10万イベント(衝突事象)分を解析した。

イベント・Tracking(飛跡)の選別を行った上で、MIPがシリコンセンサーに垂直に入射する場合のエネルギー損失分布を評価した。

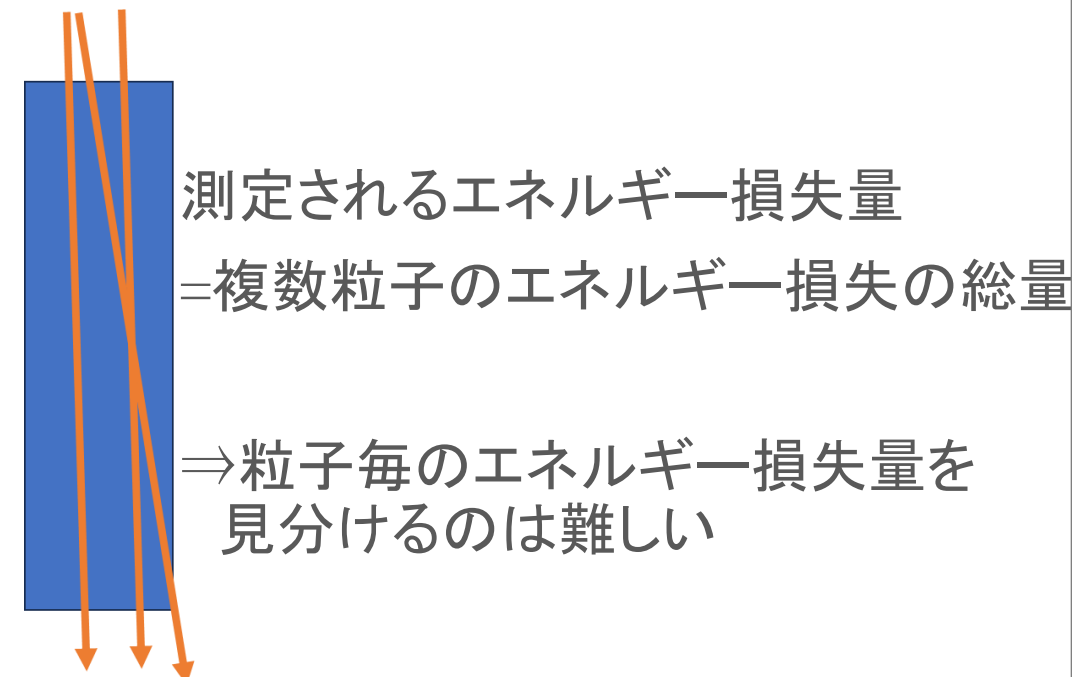
1. イベント選定
  - クラスター数の選択
  - ノイズ除去(センサーのランダムノイズ, 不良Chip)
2. Tracking選定
  - 粒子の入射角度 $\theta$ , クラスターサイズ, Z-vertex, 検出角度 $\varphi$
3. クラスタリング(ヒットをつなぎ合わせる)
4. ADC分布の導出・評価

# イベント選定

- クラスタ数の選択



クラスタ数(生成粒子数)が多い  
=同一Channelに複数の粒子が入っている可能性



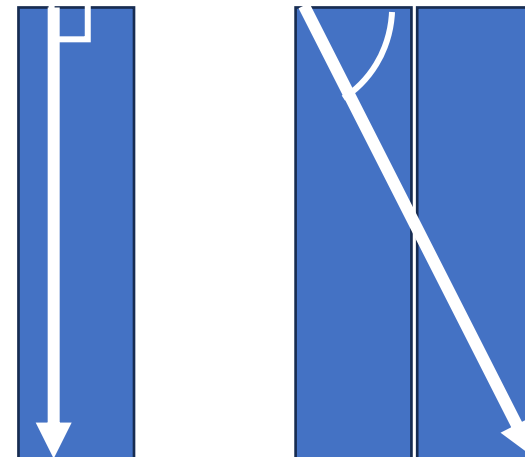
クラスタ数 < 200 のイベントを解析に使用した。

# Tracking選定

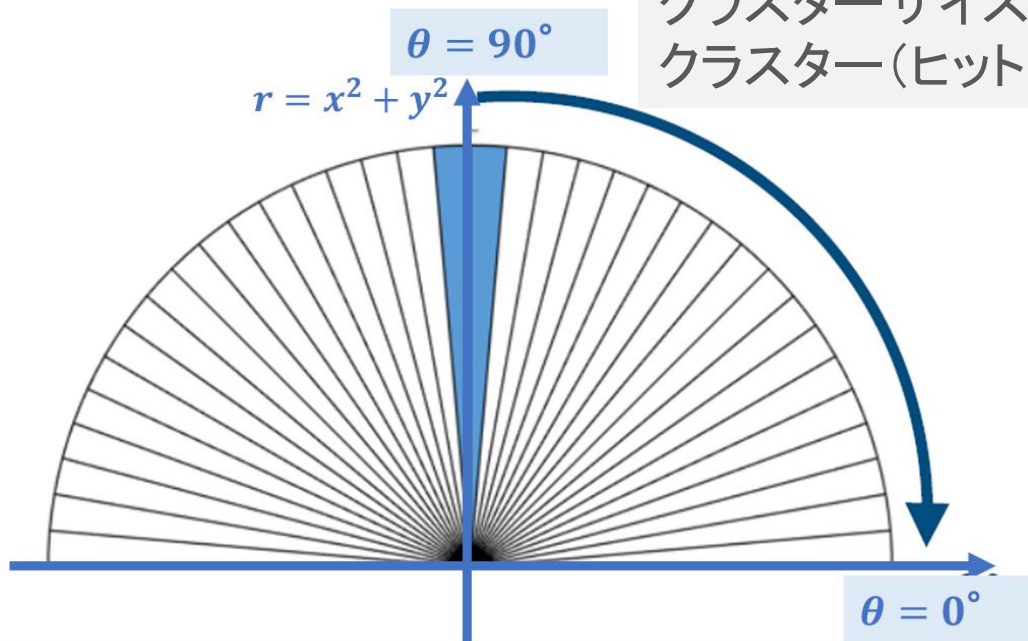
1Channel通過時 589 mV  
2Channel通過時 631 mV

荷電粒子の通過距離とエネルギー損失量は対応

⇒通過Channel数に応じて Tracking (飛跡) 選定する必要がある。



1. 荷電粒子のシリコンセンサー入射角度 $\theta$  の選定
2. クラスターサイズの選定



クラスターサイズ:  
クラスター(ヒットをつなぎ合わせた飛跡)に含まれるヒットの総数

1 Channel を垂直に通過したMIPの  
エネルギー損失量を評価⇒

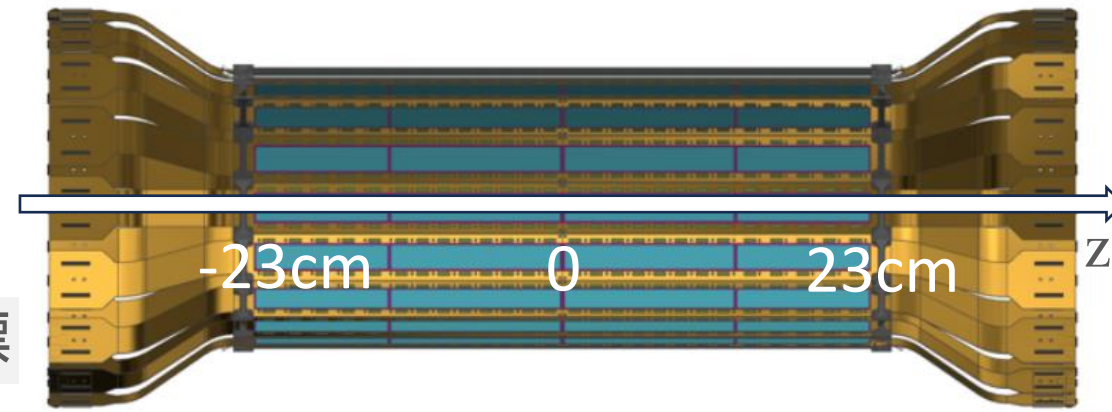
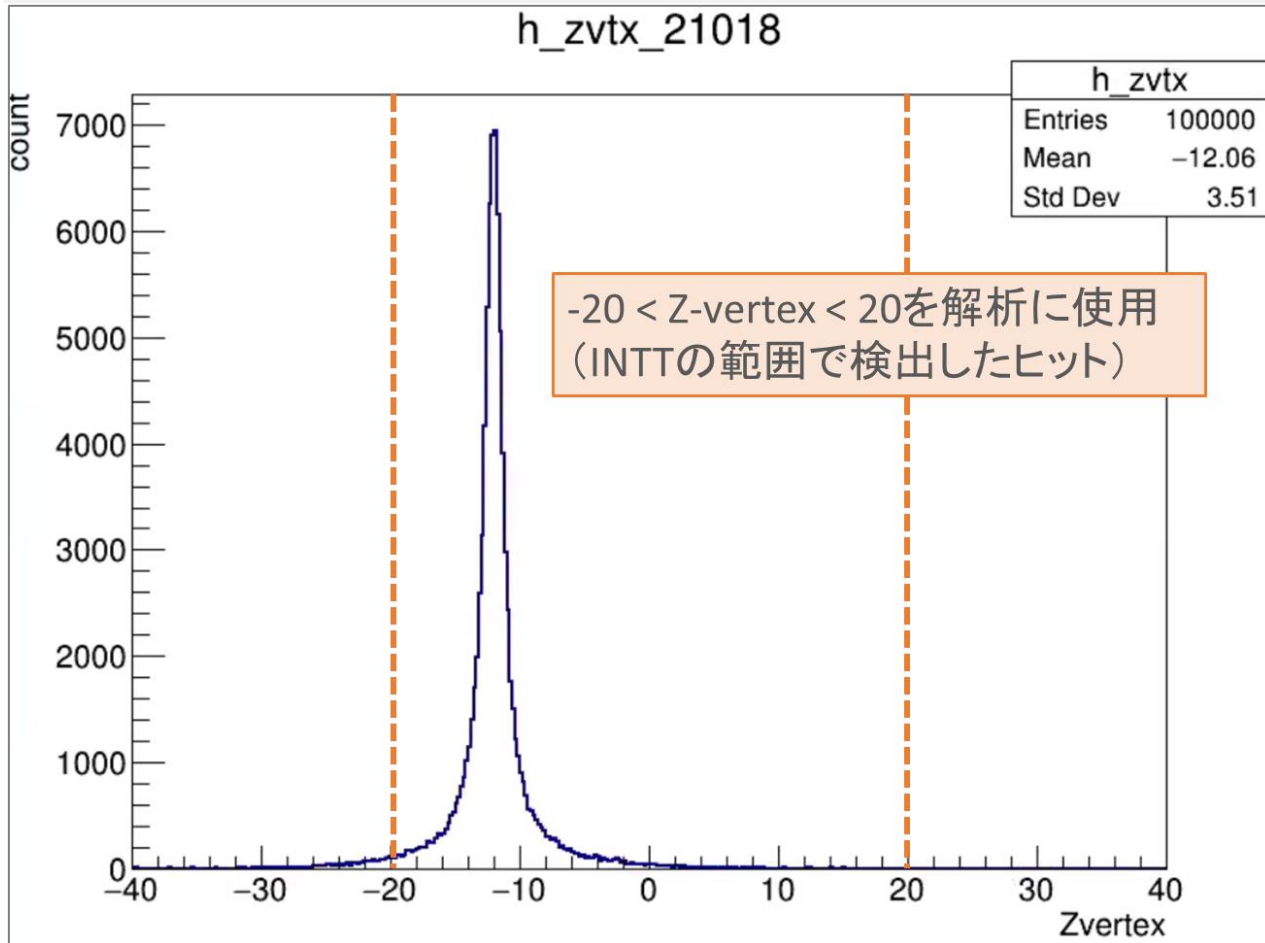
- $85^\circ < \theta < 95^\circ$  (= 垂直入射)
- クラスターサイズが1 (=1Channel通過) を選択した。



# Tracking選定

## 3. Z-vertexの選定

Z-vertex: 飛跡を再構成した時に得た衝突点のz座標



INTTから非常に離れた位置でヒットが測定されることがあり、取り除く必要がある。

本解析では、

-20 cm < Z-vertex < 20 cm  
(INTTの検出範囲で測定したヒット)

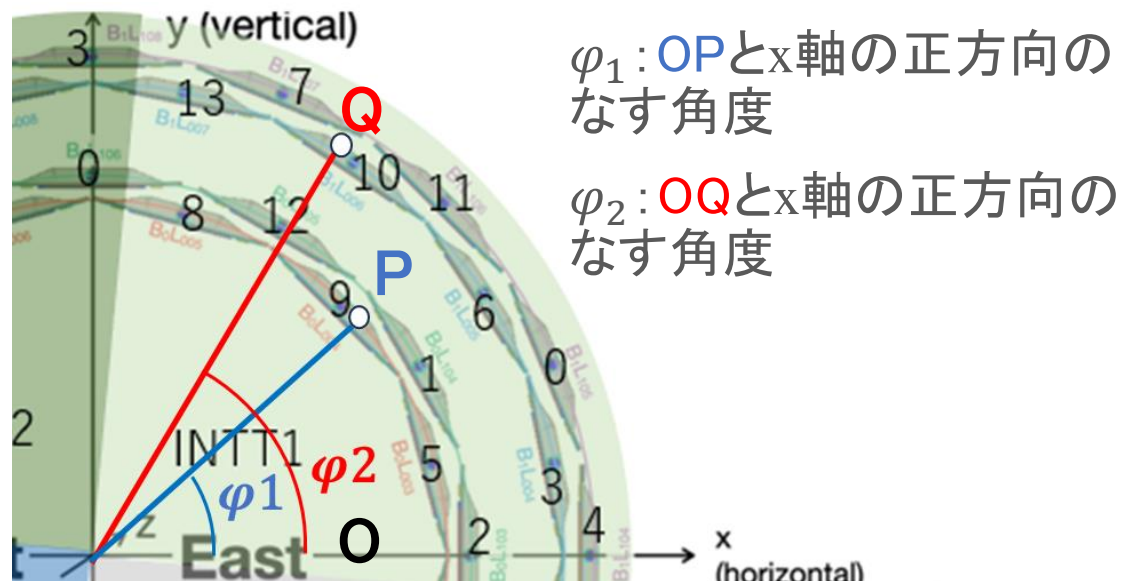
を選択した。

# Tracking選定

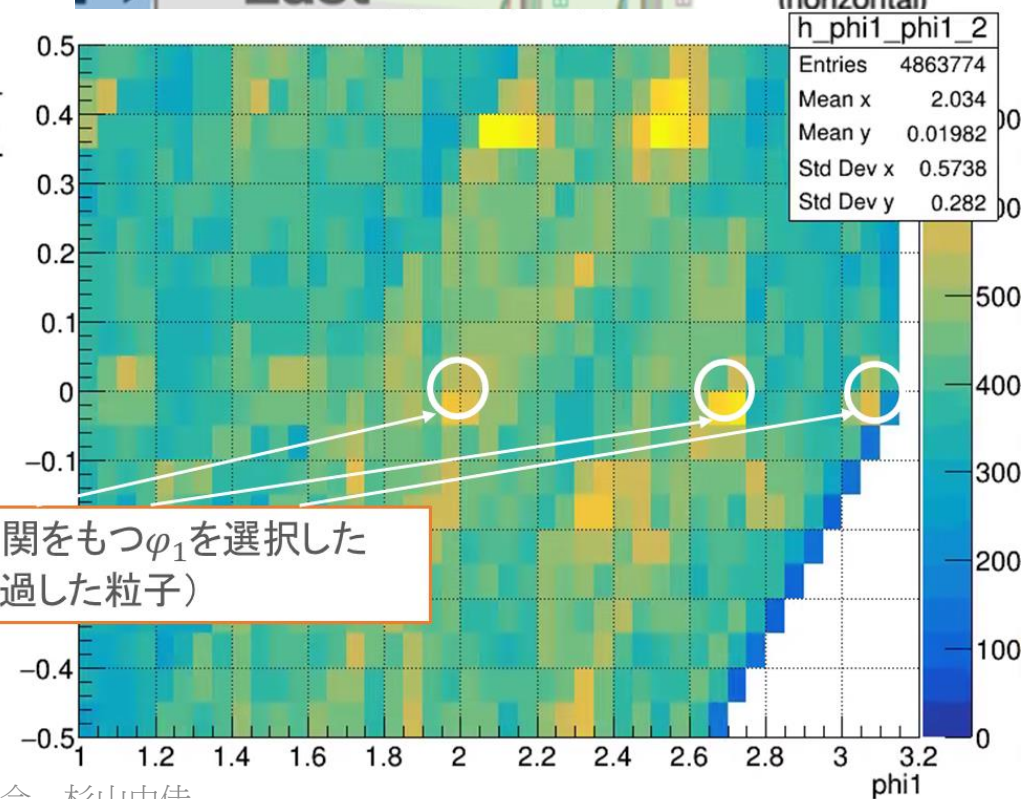
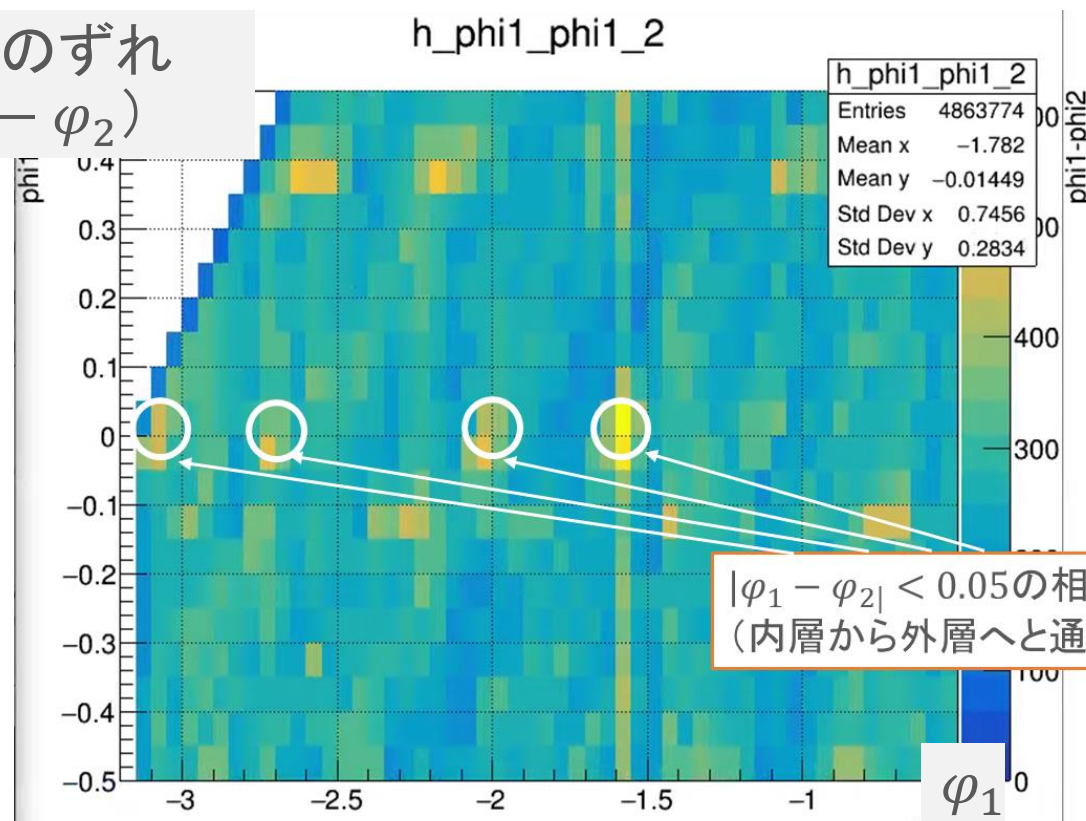
## 4. 角度 $\varphi$ の選定

粒子がINTTの内層→外層へ通過

$$\Leftrightarrow \varphi_1 = \varphi_2 \quad (\varphi_1 - \varphi_2 = 0)$$

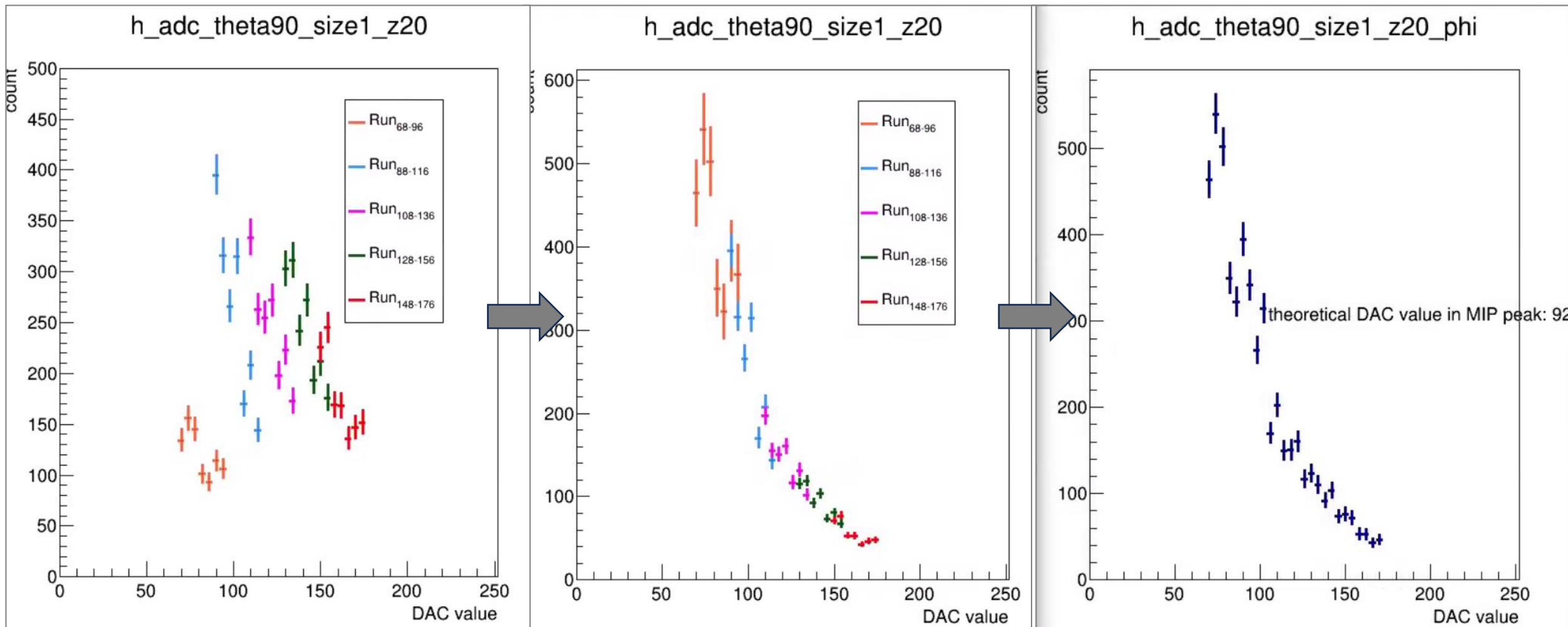


$\varphi_2$ とのずれ  
( $\varphi_1 - \varphi_2$ )



$|\varphi_1 - \varphi_2| < 0.05$ の相関をもつ $\varphi_1$ を選択した  
(内層から外層へと通過した粒子)

# エネルギー損失の分布



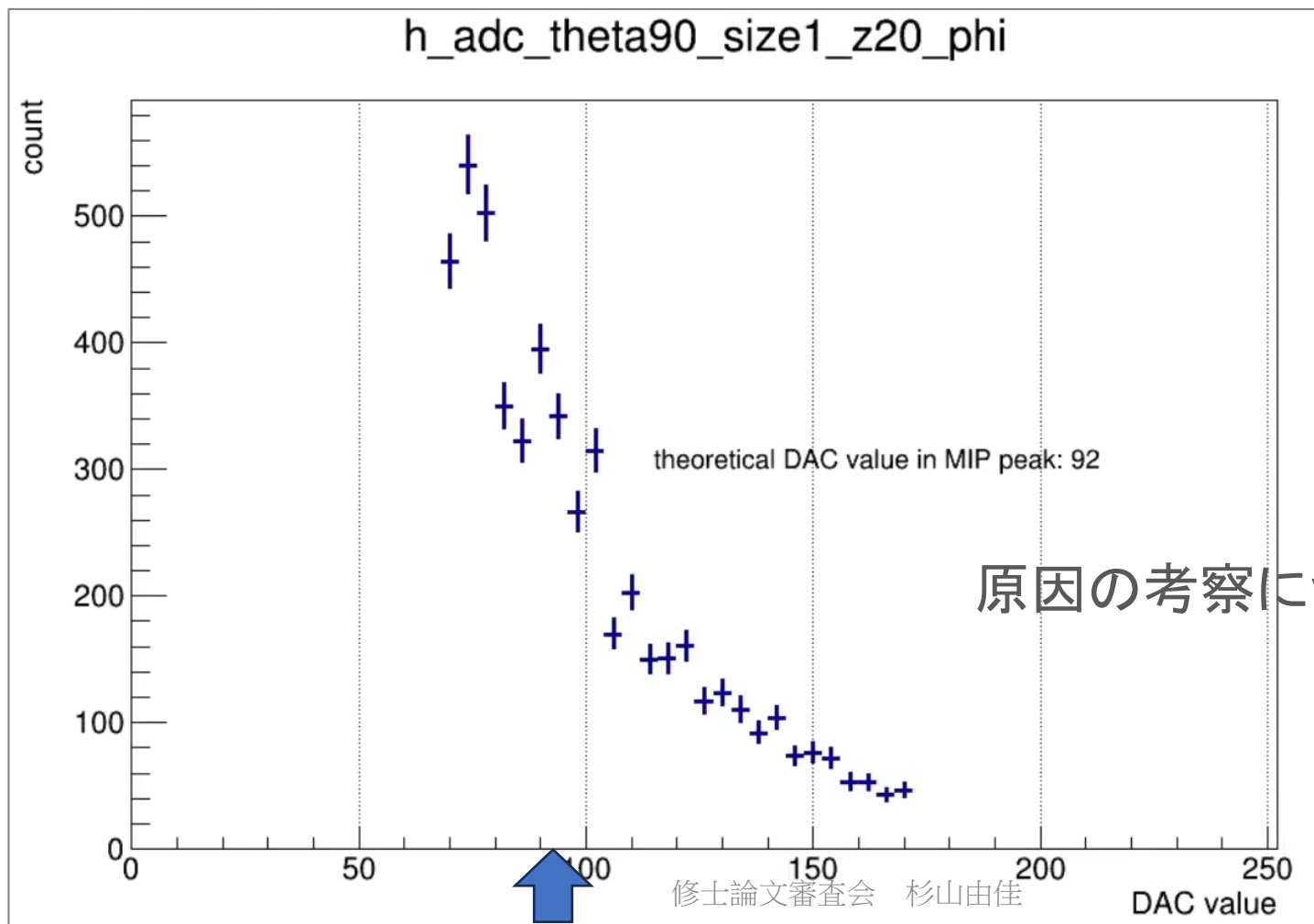
5個のRunデータを用いてADC分布を作成し、重ね書き

重複する2ビンのカウント数で規格化 (滑らかに接続するため)

重複する各ビンの平均補正で1つのADC分布にした

# MIPピークの評価

Bethe-Blochの式より、DAC値92にMIPピークがあると予想される。  
しかし、単調に減少する分布であり、MIPピークを確認できなかった。



原因の考察については次ページで述べる。

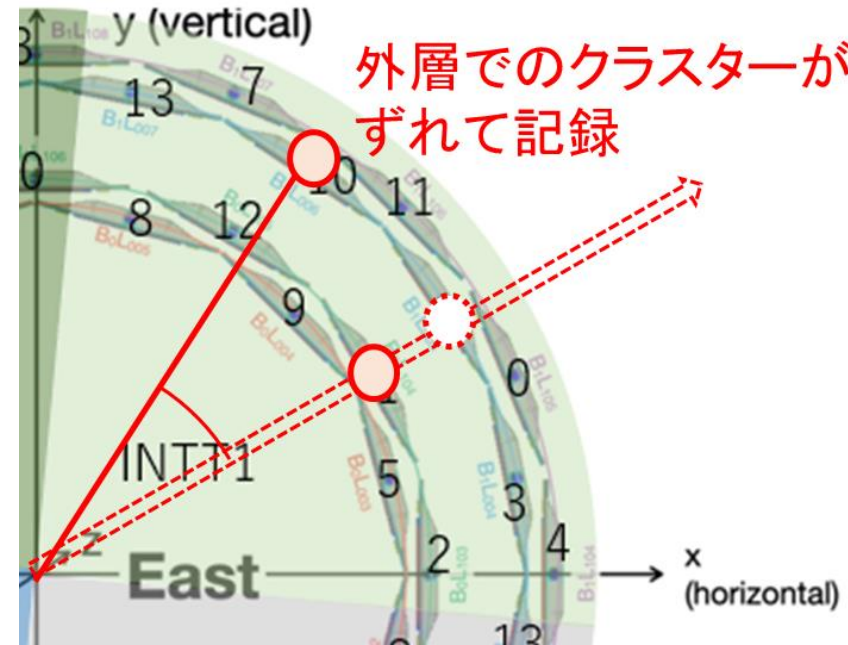
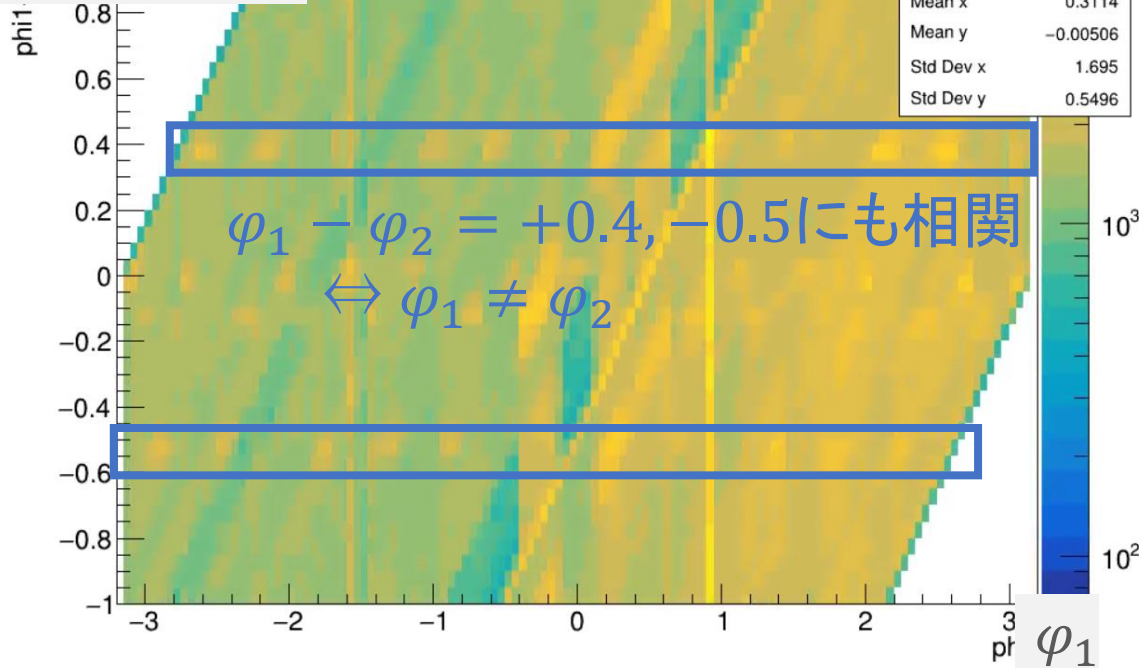
# 考察①

内層→外層に通過する飛跡 ( $\varphi_1 = \varphi_2$ が成り立つ $\varphi_1$ ) を選んで解析した。  
しかし、その選定が上手く行われていない可能性がある。

$\varphi_2$ とのずれ  
( $\varphi_1 - \varphi_2$ )

h\_phi1\_phi1\_2

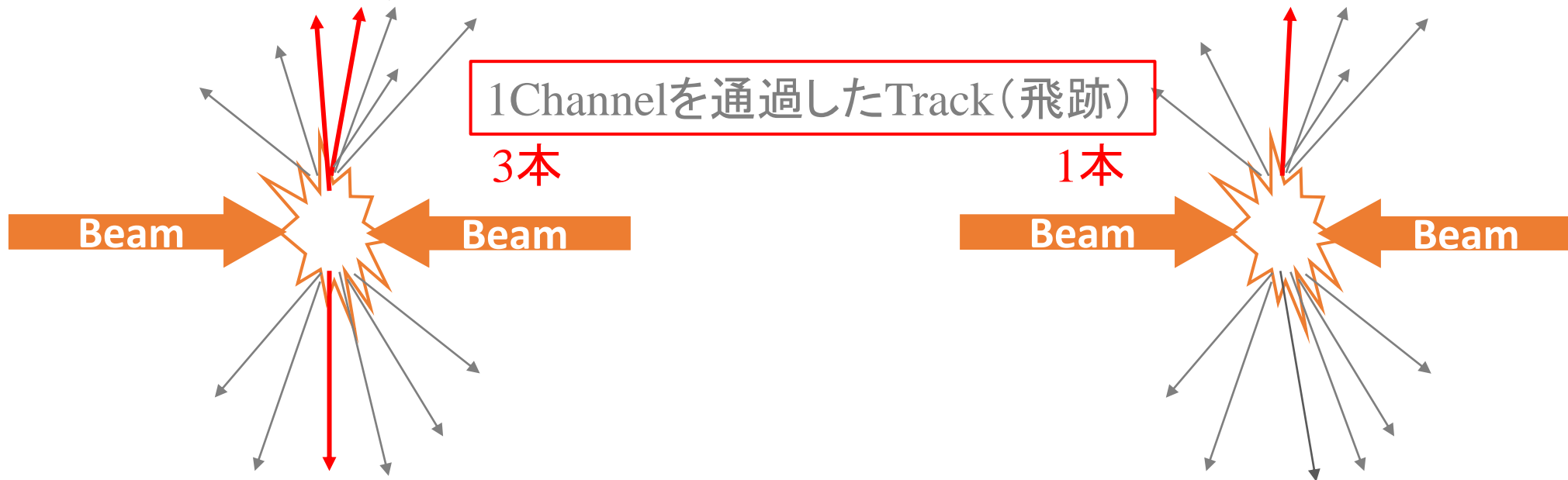
h_phi1_phi1_2	
Entries	2.546236e+07
Mean x	0.3114
Mean y	-0.00506
Std Dev x	1.695
Std Dev y	0.5496



ヒット位置情報→クラスター位置情報の変換に何らかの問題

## 考察②

ADC分布を滑らかに接続するために、重複ビンのカウント数によって規格化を行った。  
しかし、より適切な規格化方法がある可能性が出てきた。



Track数はイベント(衝突事象)毎に異なる  
⇒“解析に用いたTrackの総数による規格化”

今後も原因の調査を行い、MIPピークとエネルギー損失測定能力の確認を目指す。

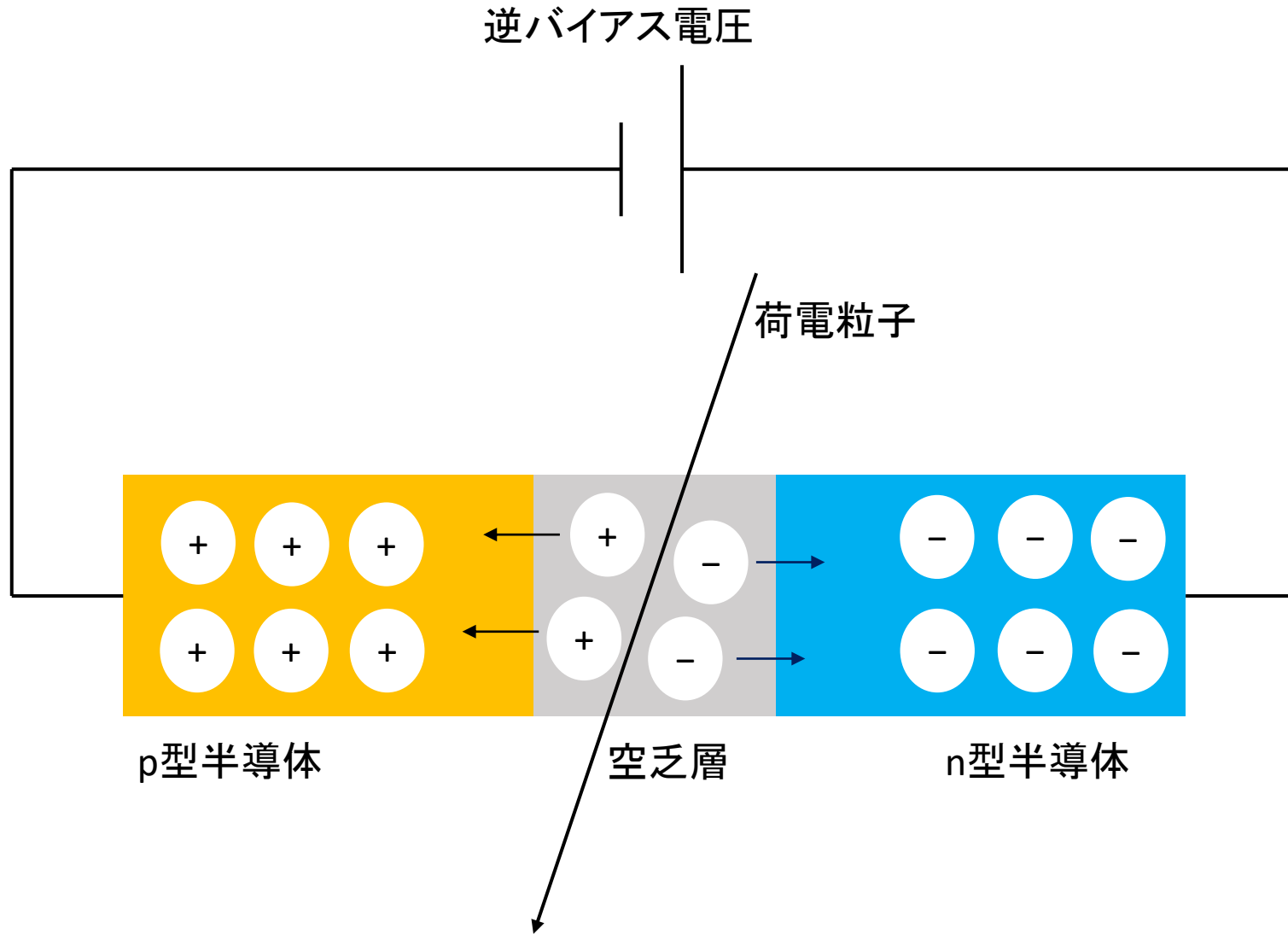
# まとめ

- 不良Channelを解析から取り除くために、不良Channel自動検出アルゴリズムを開発した。  
→良好なChannelの割合は約93.1%
- INTTの動作検証のために、MIPのエネルギー損失量を評価した。  
→DACスキャン(高分解能・広範囲を両立した測定)によってADC分布を求めた。  
→単調減少の分布であり、MIPピークを確認できなかった。  
→今後も原因の究明とMIPピークの確認を急ぐ。

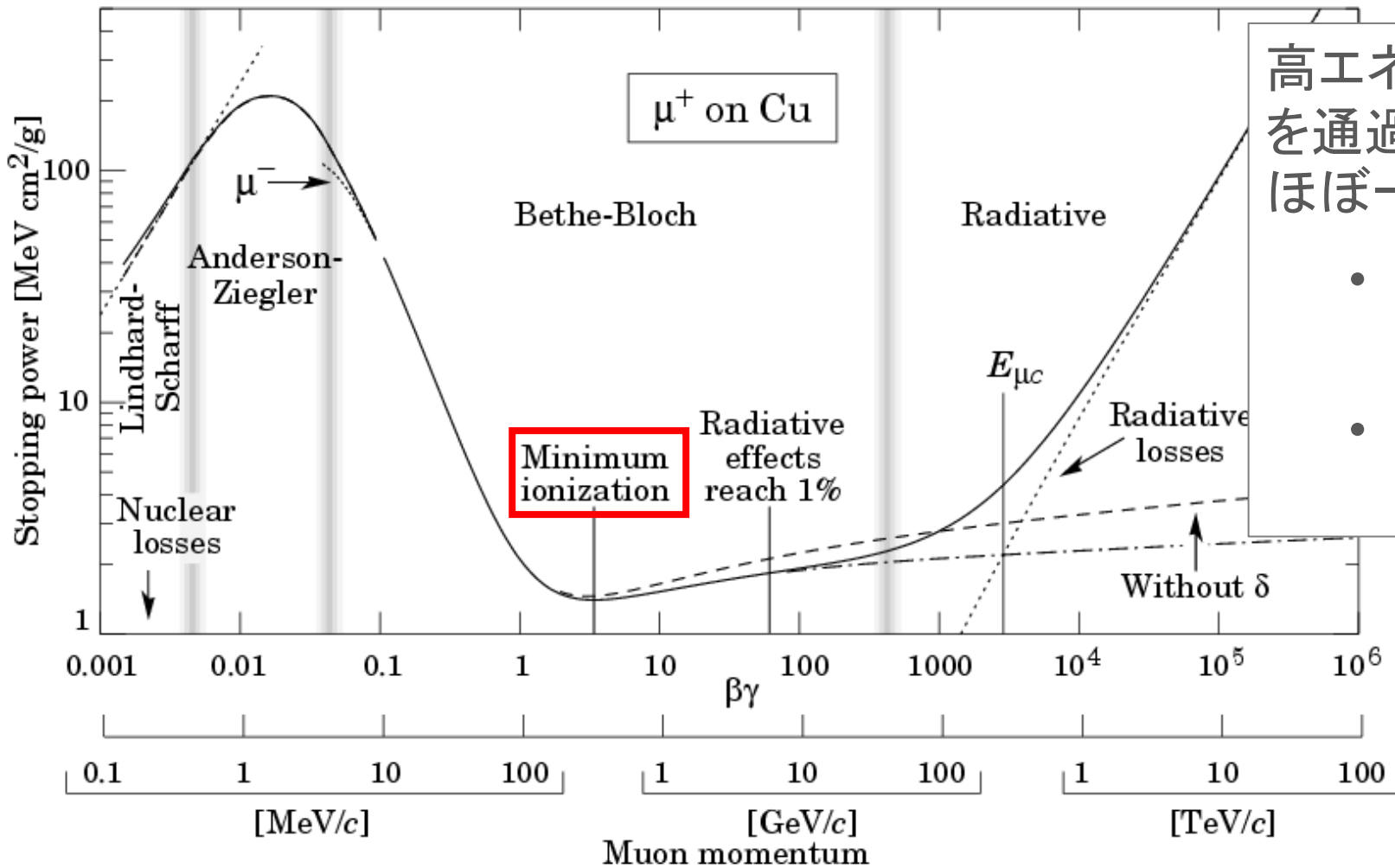
# Back up



# 半導体における荷電粒子の検出原理



# 最小電離粒子 (MIP)



高エネルギーをもつ荷電粒子が物質中を通過する際に失うエネルギーは小さく、ほぼ一定の値である。

- 粒子→**MIP** (Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子)
- このエネルギー損失量 → **MIPピーク**

# sPHENIX実験の稼働予定

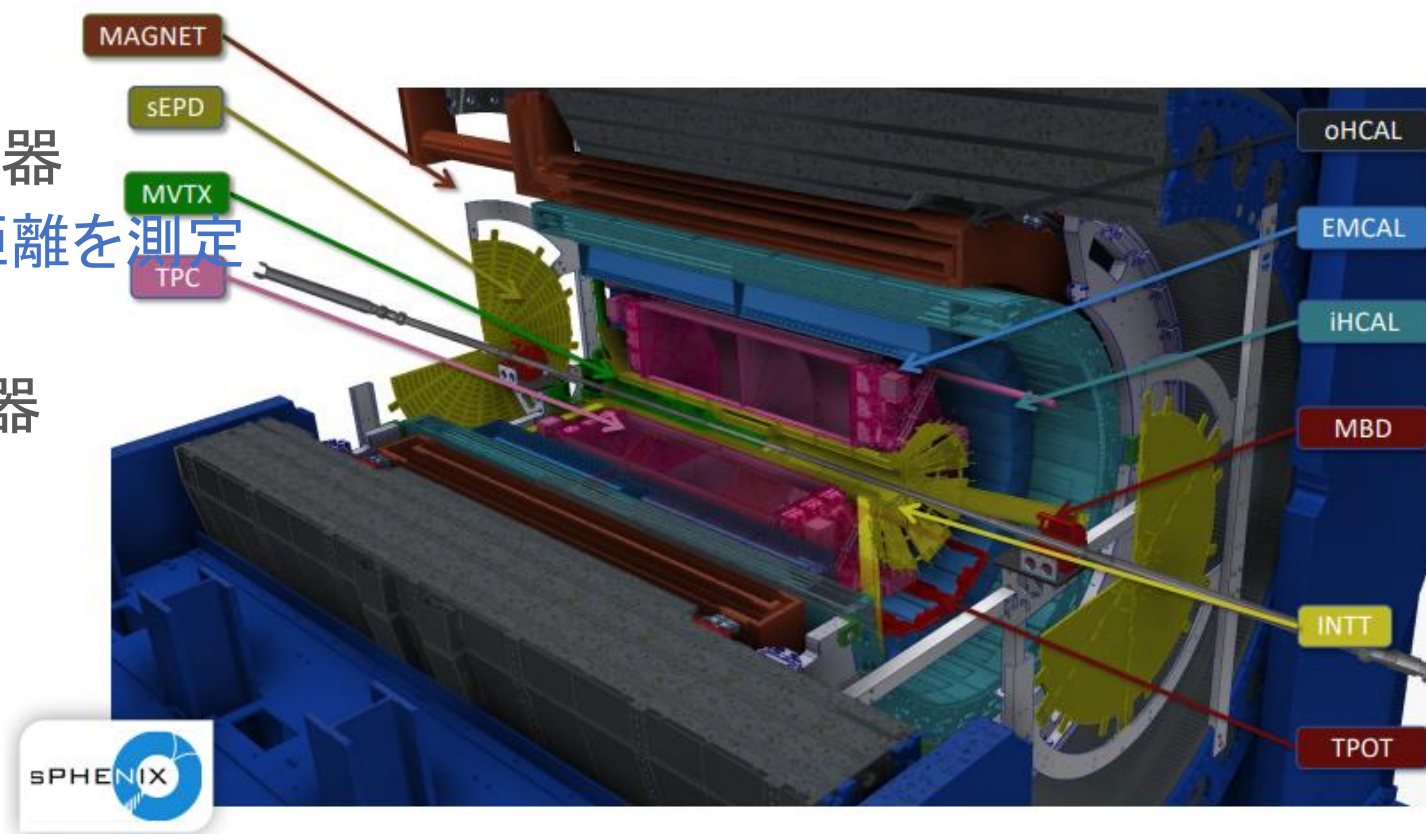
Species	$\sqrt{s_{NN}}$ [GeV]	Physics Weeks	Min. Bias Rec. Lum. $ z  < 10$ cm	Calo. Trigger Lum. $ z  < 10$ cm
Run-2024, Scenario A, 6 cryo-weeks Au+Au + 20/24/28 cryo-weeks $p+p$				
Au+Au	200	n/a	n/a (Commissioning running)	
$p+p$	200	13/17/21	0.34/0.44/0.54 pb <sup>-1</sup> [@ 5kHz] 2.3/3.1/3.9 pb <sup>-1</sup> [10%-str]	23/31/39 pb <sup>-1</sup>
Run-2024, Scenario B, 20/24/28 cryo-weeks $p+p$ + 6 cryo-weeks Au+Au				
$p+p$	200	9/13/17	0.23/0.34/0.44 pb <sup>-1</sup> [@ 5kHz] 1.5/2.3/3.1 pb <sup>-1</sup> [10%-str]	15/23/31 pb <sup>-1</sup>
Au+Au	200	3	0.4 nb <sup>-1</sup> (3B events)	not needed
Run-2025, 24/28 cryo-weeks				
Au+Au	200	20.5/24.5	5.2/6.3 nb <sup>-1</sup> (35B/43B events)	not needed

# sPHENIX検出器

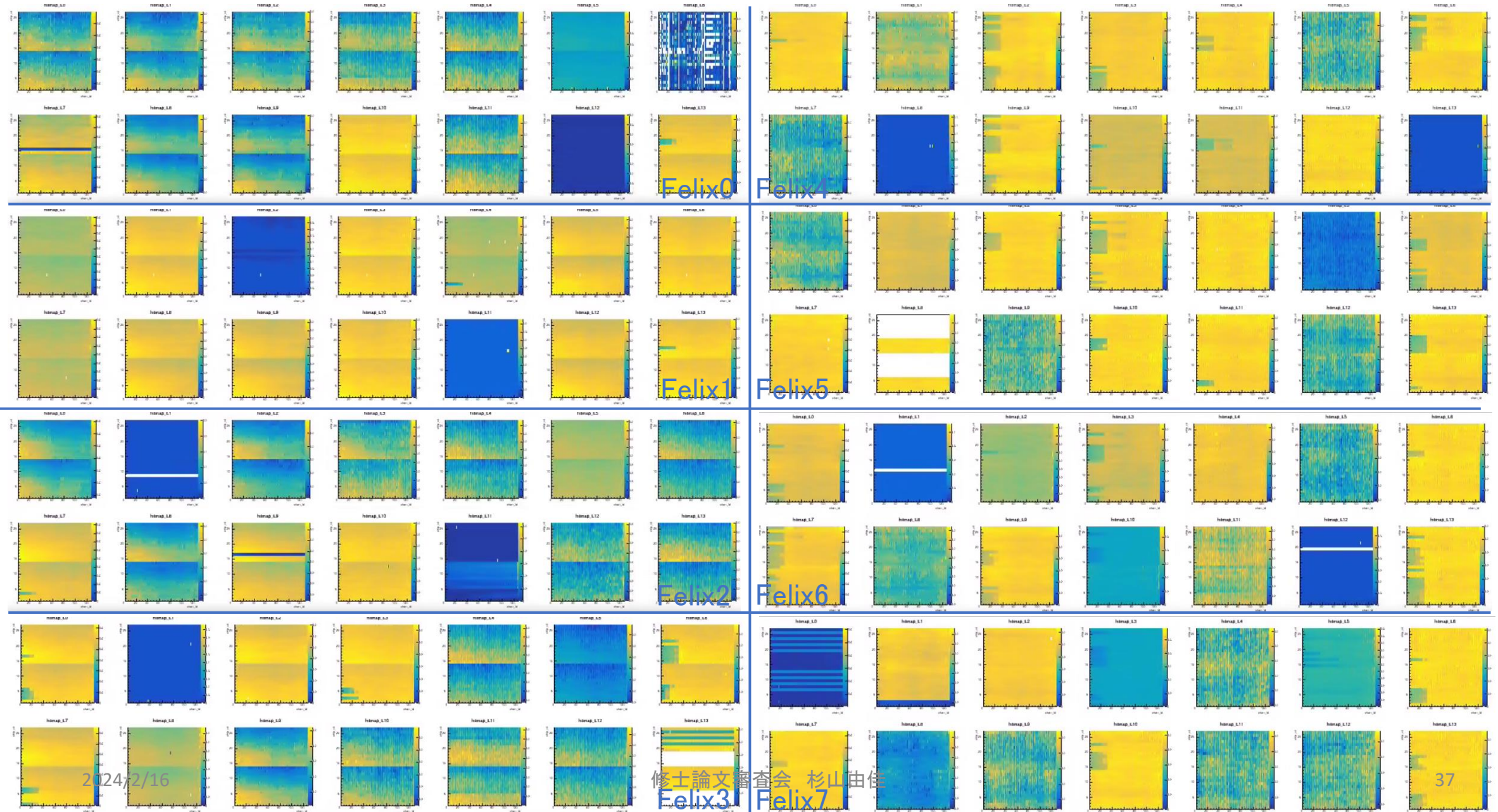
ハドロンカロリメータや電磁カロリメータ、飛跡検出器群、MBD(外部トリガー)、ソレノイド磁石が導入された。

## 飛跡検出器群

1. MVTX: ピクセル型シリコン検出器
  - 衝突点と生成粒子の最近接距離を測定
  - 重いクォーク・ジェット測定
2. INTT: ストリップ型シリコン検出器
  - 高い時間分解能
  - MVTXとTPCの飛跡を繋ぐ
3. TPC: ガス検出器
  - 36枚の読み出しパッドによる高い位置分解能
  - 荷電粒子の運動量測定



# 全Felix分のヒットレートをマップ(縦軸:Channel番号, 横軸:Chip番号)



Felix0

Felix4

Felix1

Felix5

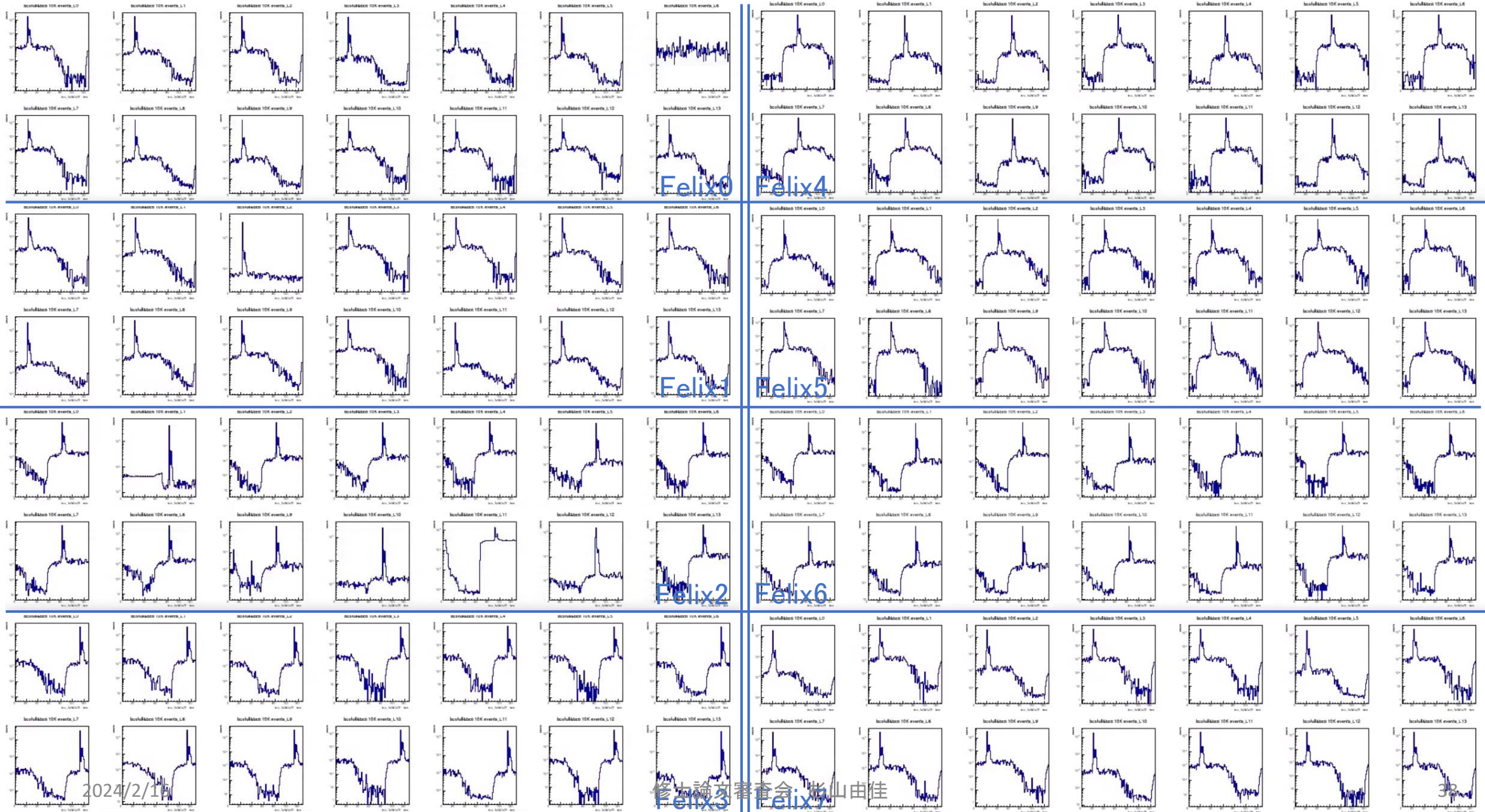
Felix2

Felix6

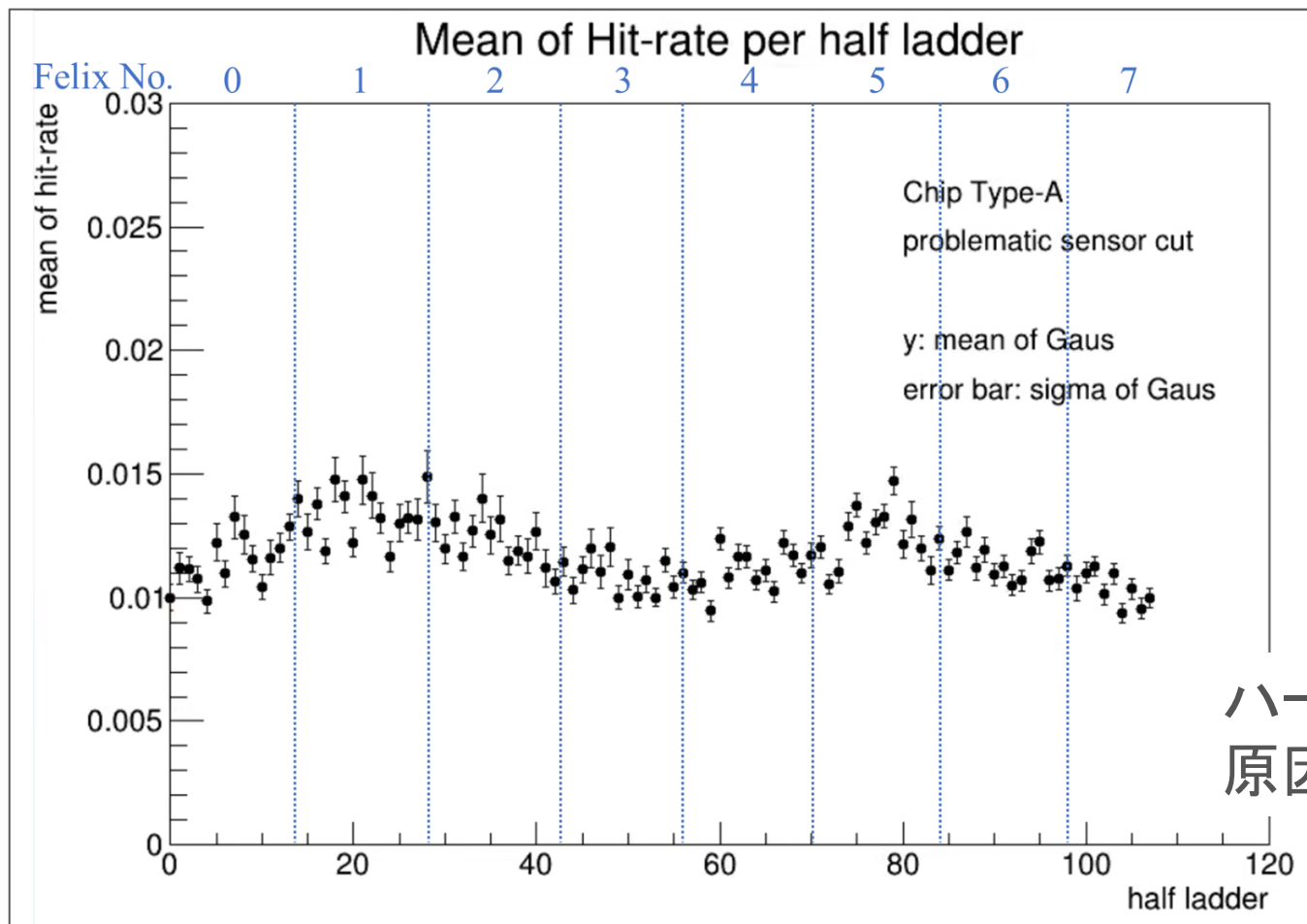
Felix3

Felix7

# 全Felix分のBCO FULL-BCO分布



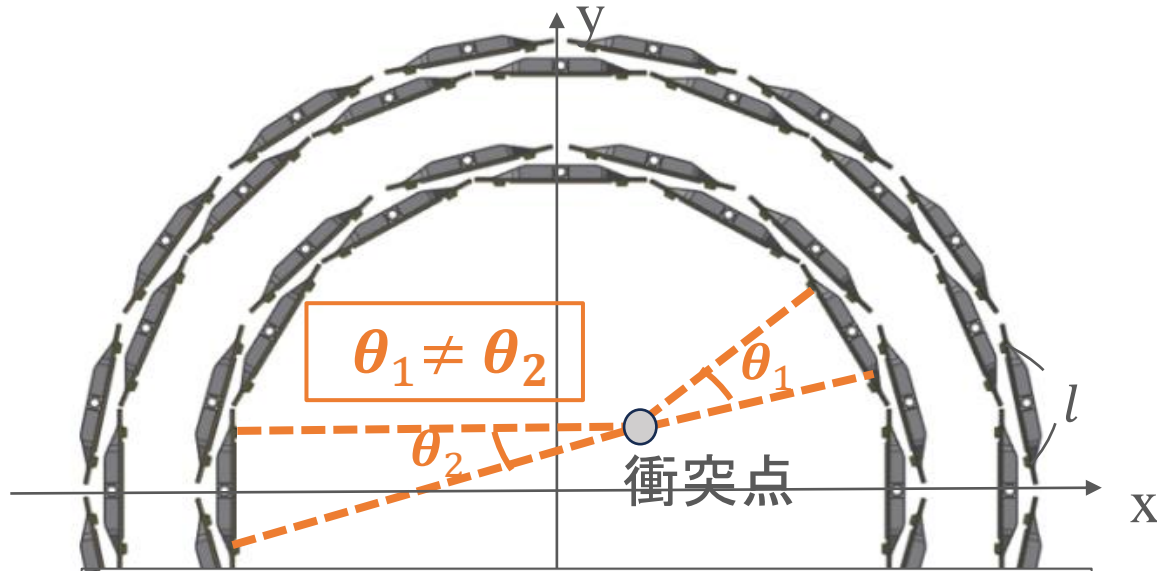
# ハーフラダー毎のヒットレート分布



ハーフラダー毎にMeanと $\sigma$ にばらつきがある。  
原因については次頁

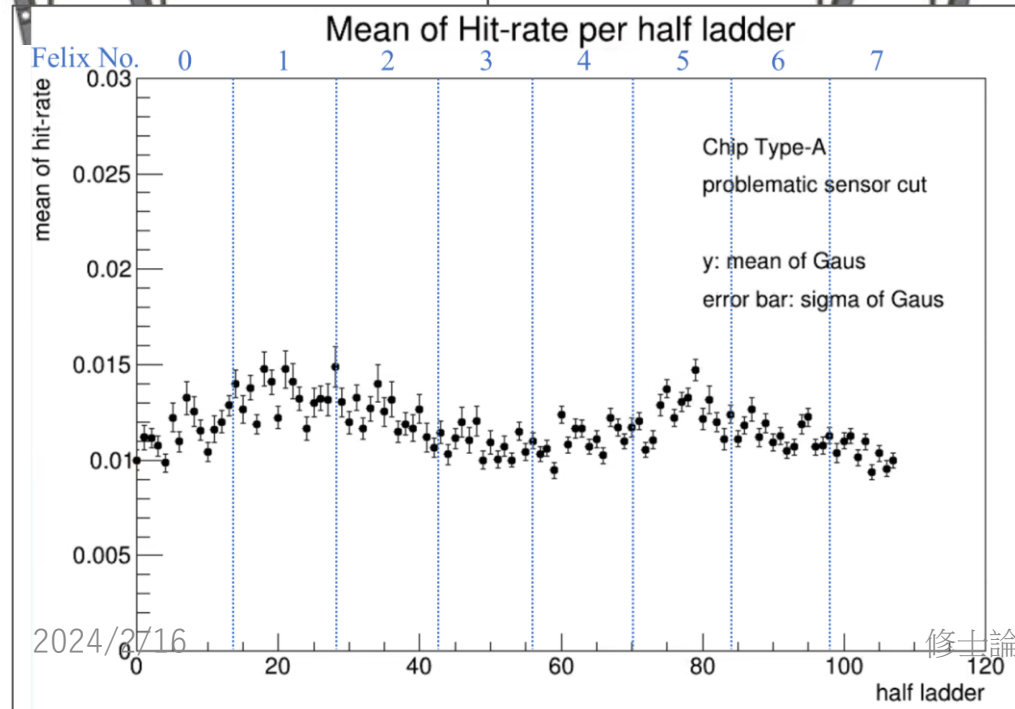
ハーフラダー毎のヒットレート分布の  
Fittingパラメータ(Mean, $\sigma$ )を示したグラフ

# ハーフラダー毎のヒットレート分布



衝突点が $(x,y)=(0,0)$ からずれた場合、  
ハーフラダーの位置によってヒットレート  
が異なる。

⇒ヒットレート分布のFittingパラメータ  
(Mean, $\sigma$ )もハーフラダーによって異なると  
考えられる。

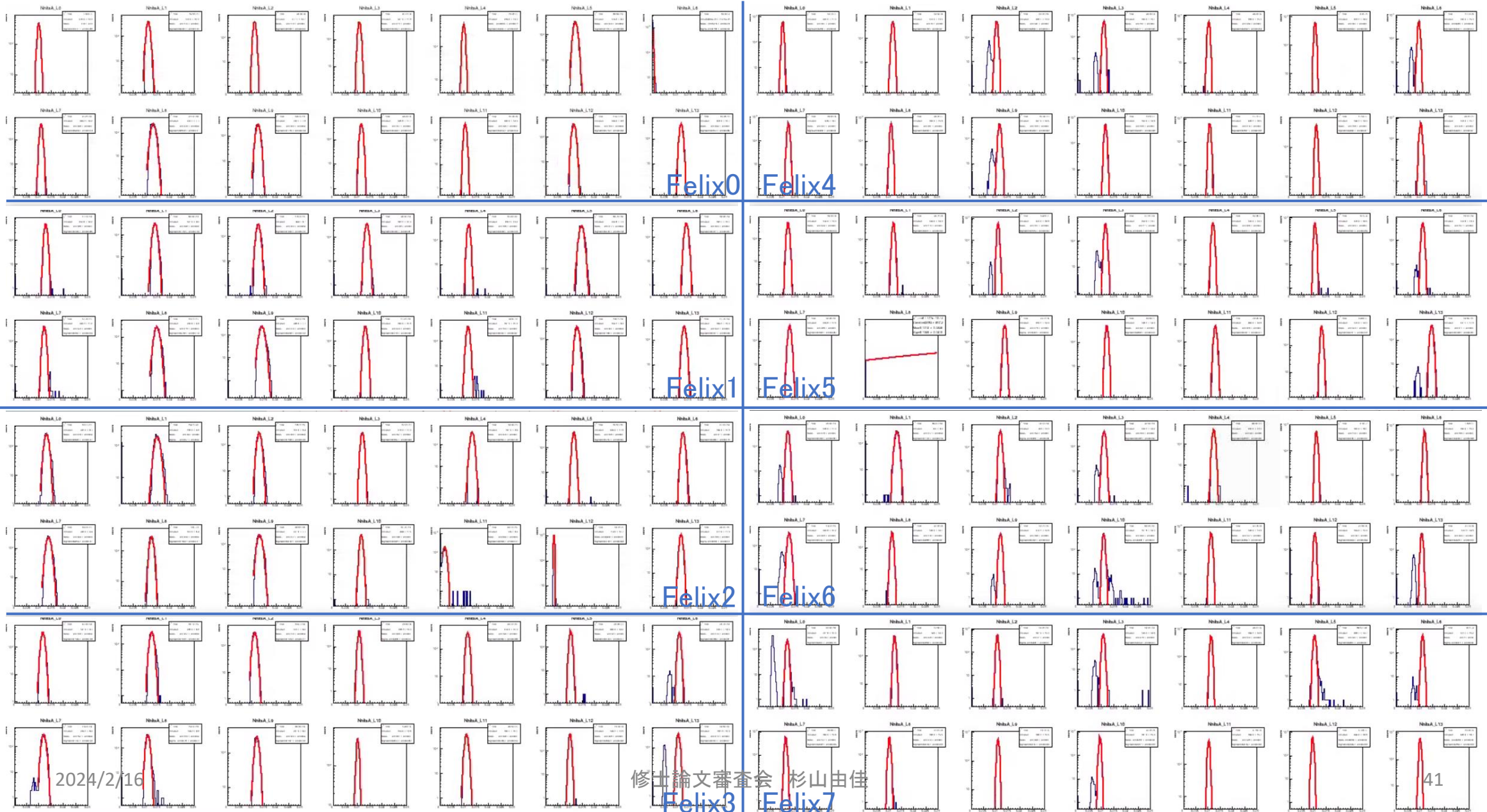


これを考慮すればMean, $\sigma$ に大差はない。

⇒ハーフラダー毎のヒットレート分布をも  
とに、Channelを分類しても問題ない。



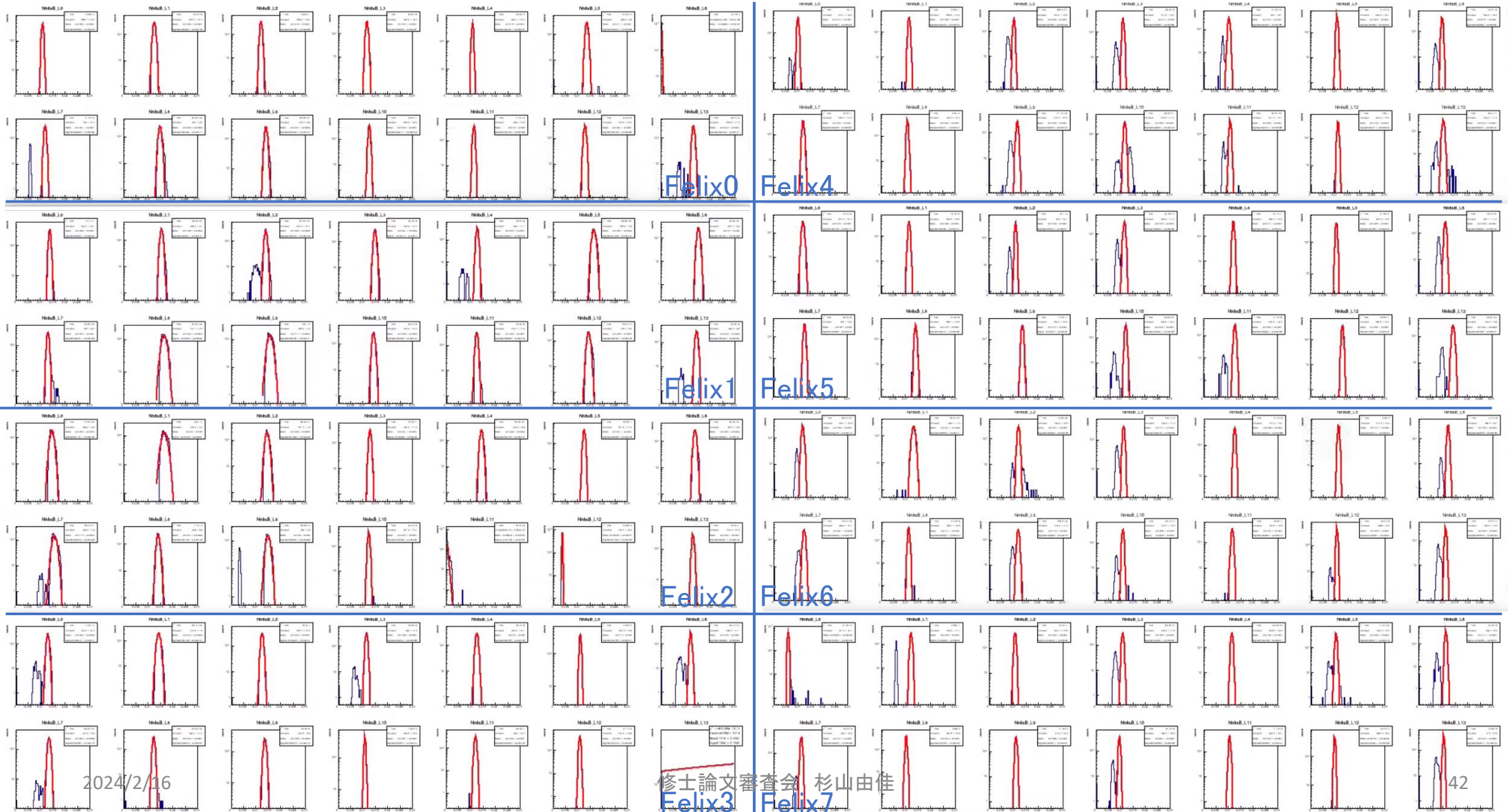
# 全Felix分のchip Type-Aのヒットレート分布



2024/2/16

修士論文審査会 杉山由佳

# 全Felix分のchip Type-Bのヒットレート分布



# 全Felix分のHot channelの位置を示した図(縦軸:chip番号、横軸:channel番号)



# 全Felix分のCold channelの位置を示した図(縦軸:chip番号、横軸:channel番号)



2024/2/16

修士論文審査会 杉山由佳

Felix3 Felix7

# 全Felix分のDead channelの位置を示した図(縦軸:chip番号、横軸:channel番号)



# 予想されるエネルギー損失

1.  $\mu$ 粒子(1GeV) が320 $\mu\text{m}$ 厚シリコンセンサー通過時のエネルギー損失
  - 単位密度単位長さあたりの損失エネルギー: 約1.15 [ $\text{MeV}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
  - Si の密度: 2.329 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$$\text{損失エネルギー} = 1.15 [\text{MeV}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}] \times 2.329[\text{g}/\text{cm}^3] \times 0.032[\text{cm}] \cong 85.7[\text{keV}]$$

2. エネルギー損失量を eV $\rightarrow$ mV に変換
  - 1電子正孔対生成に必要なエネルギー: 3.62 [eV], 電子1個の電荷:  $1.6 \times 10^{-19}$  [C]

$$\frac{85.7 \text{ keV}}{3.62 \text{ eV}} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \cong 3.79[\text{fC}]$$

- FPHXチップでの増幅率: 100[mV/fC], オフセット: 210[mV]

$$\text{エネルギー損失時の出力波高の電圧値} = 3.79[\text{fC}] \times 100[\text{mV}/\text{fC}] + 210 = 589[\text{mV}]$$

# 予想されるエネルギー損失

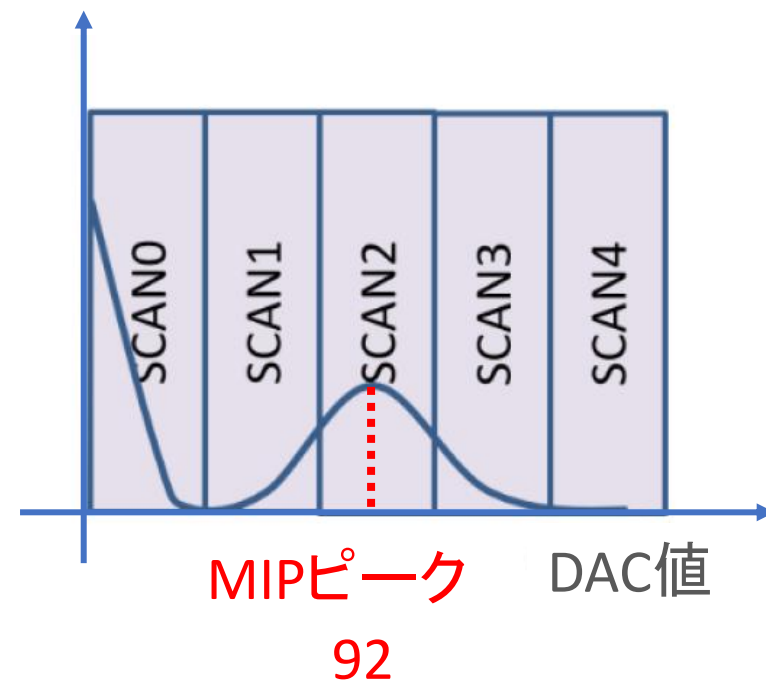
## 3. エネルギー損失量を mV→DAC値 に変換

- エネルギー損失時の出力波高の電圧値とDAC値の関係式は、

$$V [mV] = 210 + 4 \times \text{DAC 値}$$

電圧値[mV]	DAC値
562	88
578	92
594	96
610	100
626	104
642	108
658	112
674	116

予想されるエネルギー損失量  
≈ 85.7 [keV]  
≈ 589 [mV]  
≈ **DAC値92**



ADC分布(エネルギー損失分布)

# 通常時のDAC設定

以下は通常時のINTT運転時のDAC設定である。

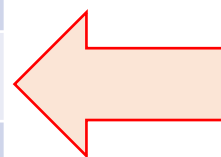
DAC値	出力波高の 電圧値[mV]
15	270
30	330
60	450
90	570
120	690
150	810
180	930
210	1050

予想されるMIPピーク

≒ 85.7 [keV]

≒ 589 [mV]

≒ DAC値90

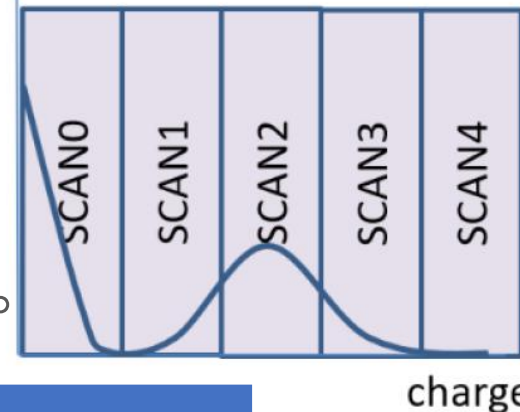


しかし、MIPピークを明確に求めるには分解能が低い。  
⇒DACスキャン測定を行った。



# DACスキャン

DAC設定範囲を変えながら以下の計5回の測定を行い、DAC値68～176の広範囲にわたったエネルギー損失の分布を求めた。



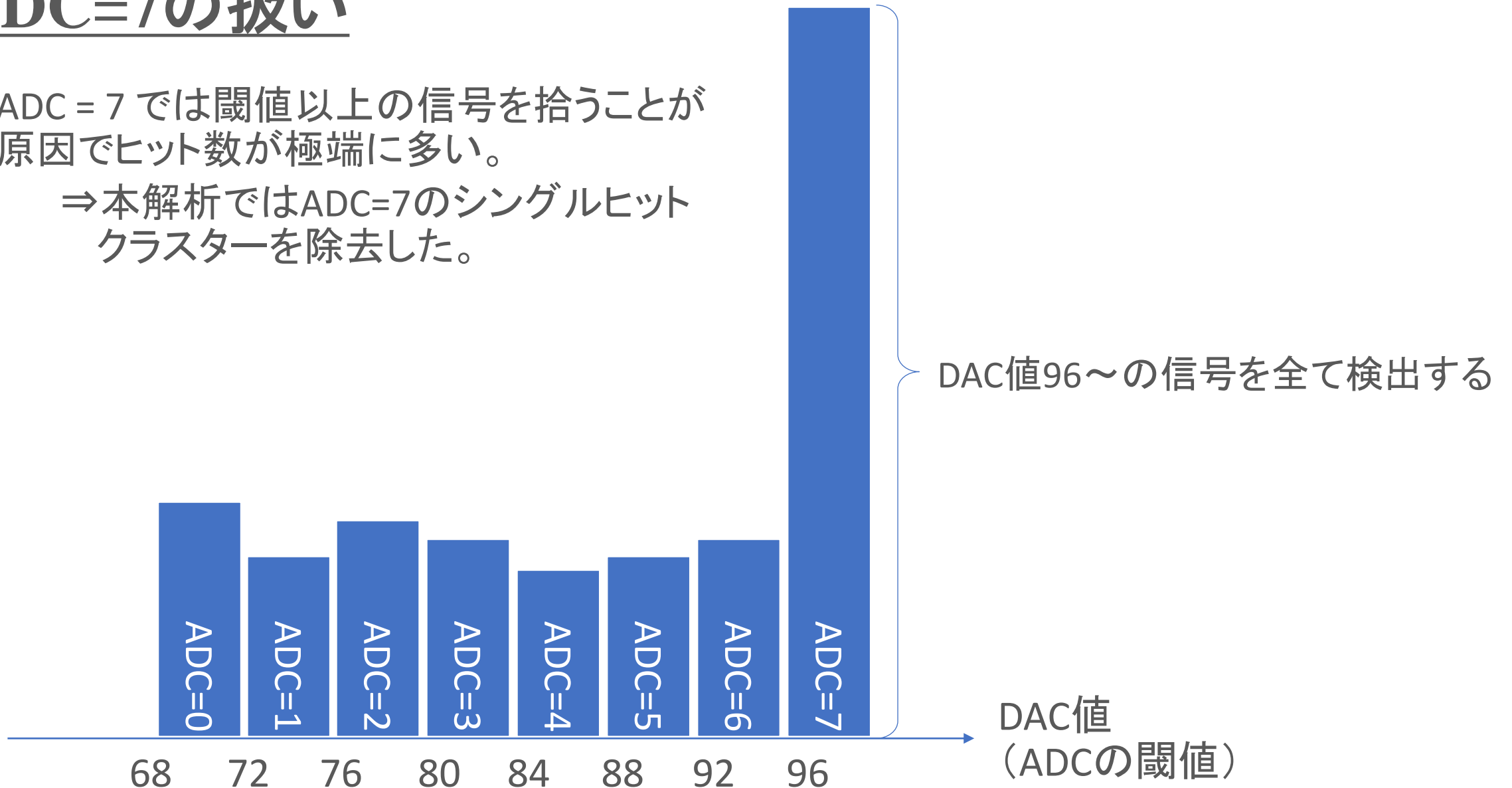
	DAC値設定							
	DAC0 (ADC=0)	DAC1 (ADC=1)	DAC2 (ADC=2)	DAC3 (ADC=3)	DAC4 (ADC=4)	DAC5 (ADC=5)	DAC6 (ADC=6)	DAC7 (ADC=7)
Scan4	68	72	76	80	84	88	92	96
Scan5	88	92	96	100	104	108	112	116
Scan6	108	112	116	120	124	128	132	136
Scan7	128	132	136	140	144	148	152	156
Scan8	148	152	156	160	164	168	172	176

一部のDAC値で  
範囲が被るように設定

# ADC=7の扱い

ADC = 7 では閾値以上の信号を拾うことが原因でヒット数が極端に多い。

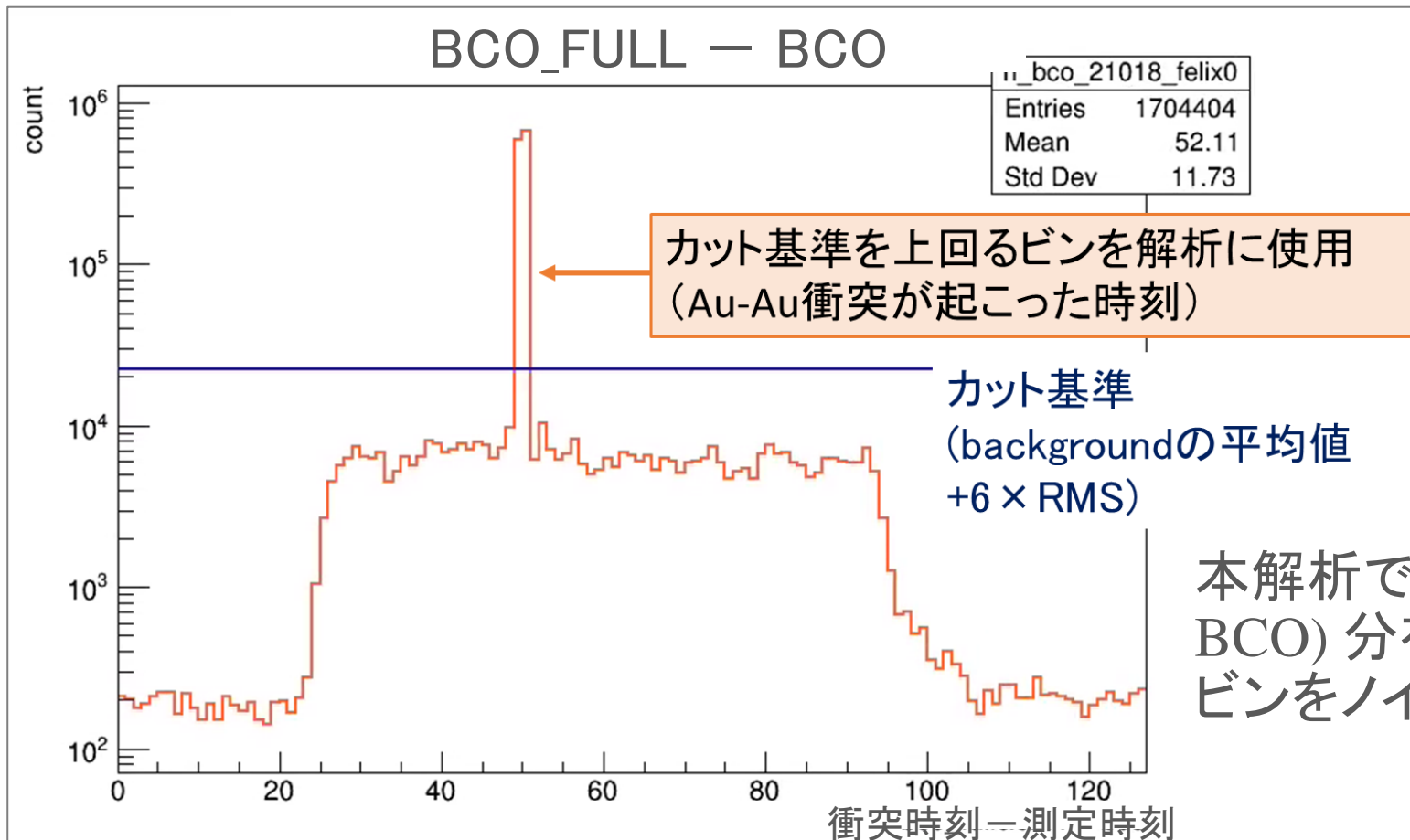
⇒本解析ではADC=7のシングルヒットクラスターを除去した。



# ノイズ除去

## 1. センサーのランダムノイズ除去

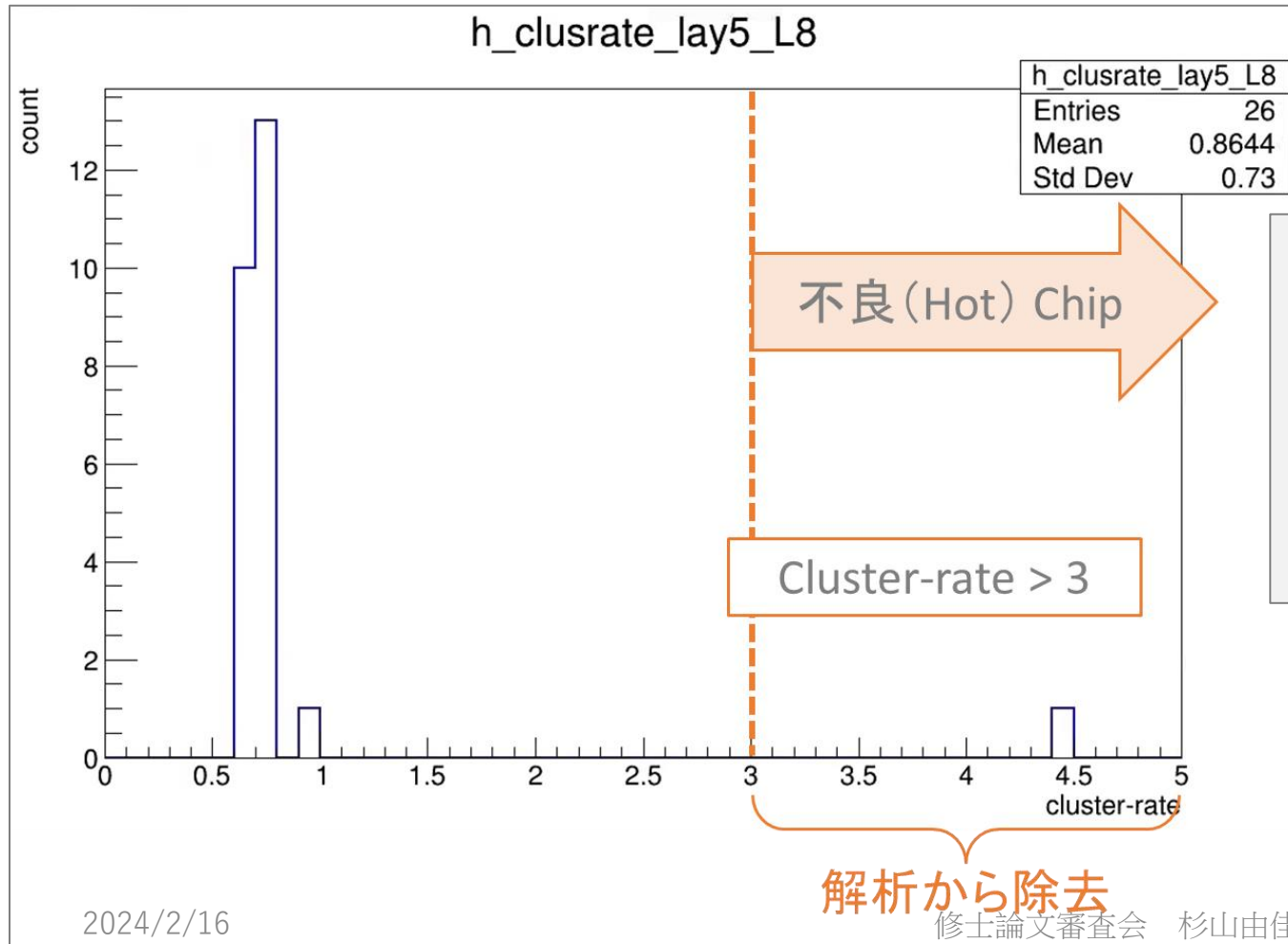
ただし、ヒット除去の基準が以下のように異なる。



# ノイズ除去

## 2. 不良Chipの除去

クラスターレート分布を用いて不良Chipを決定



クラスター: ヒットをつなぎ合わせた集団

$$\text{クラスターレート } R_{cls} = \frac{1}{\epsilon_{acc}} \frac{N_{cls}}{N_{evt}}$$

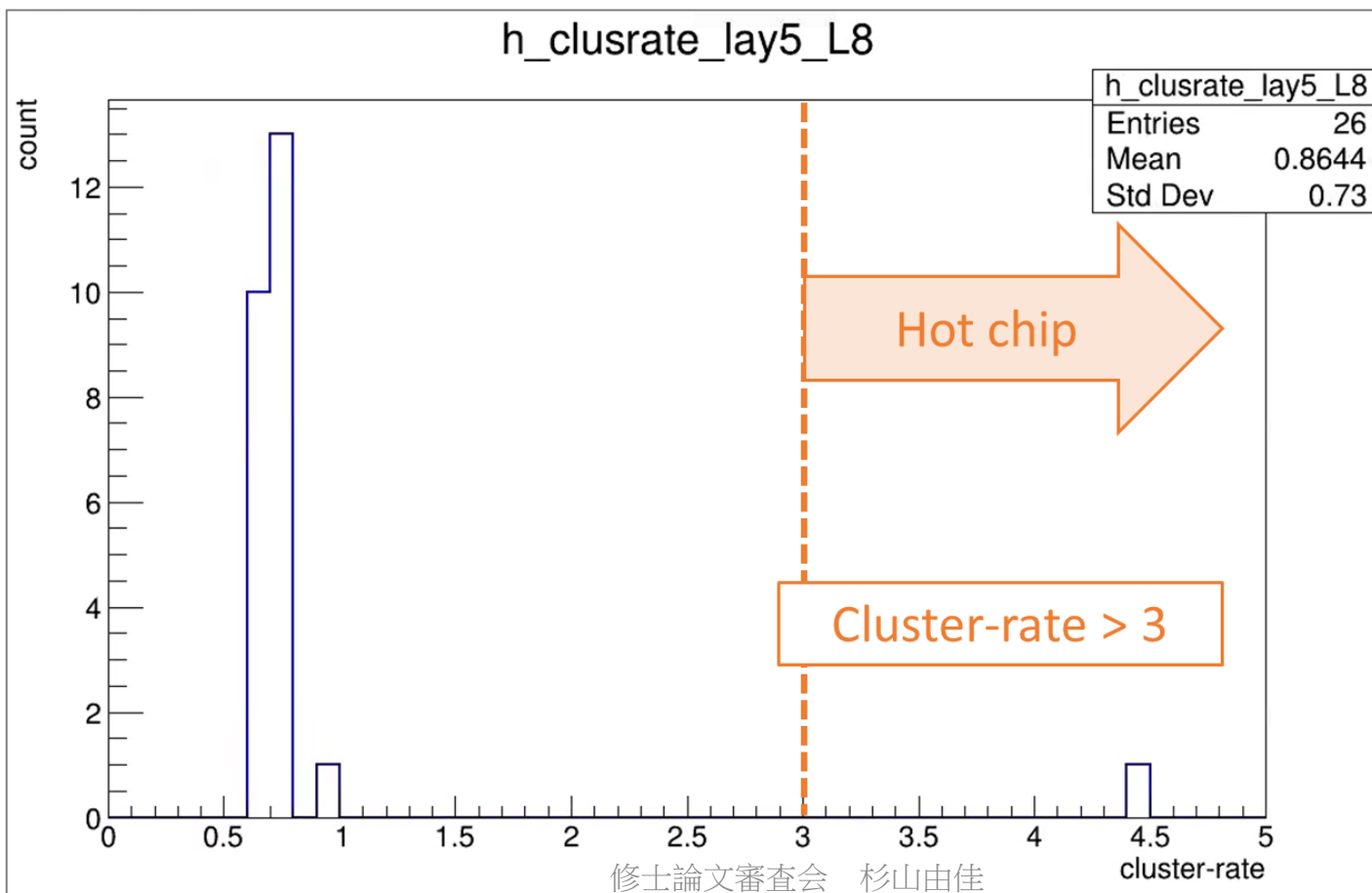
- $N_{cls}$ : あるChipでのクラスター数
- $N_{evt}$ : 解析したAu-Au衝突事象数
- $\epsilon_{acc}$ : 検出感度の違いを補正する係数

# ノイズ除去

イベント数の少ないDAC スキャンでは、

Channel 毎のクラスターレートではばらつきを大きく見積もり、ガウス分布にならない。

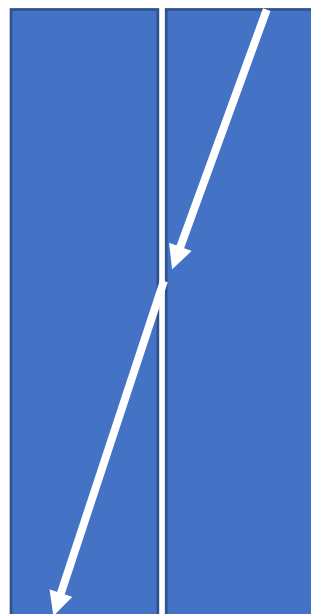
⇒Channel をまとめたChip単位でクラスターレート分布を求め、不良Chip を除去した。



# クラスタリング

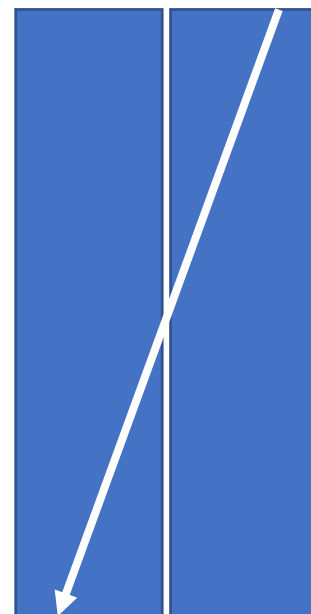
荷電粒子がシリコンセンサーに対して斜めに入射した際、  
複数のChannelに跨がって通過する。

ここで、(隣り合うストリップを通過する)ヒットをつなぎ合わせる⇒クラスタリング



DAC値

76 84



160 (= 76 + 84)

# Z-vertex

