

日本物理学会2024年春季大会

RHIC-sPHENIX実験の 中間飛跡検出器INTTの動作検証

奈良女子大, 理研^A, 理研BNL^B, 立教大^C, 都立産技研^D, JAEA^E

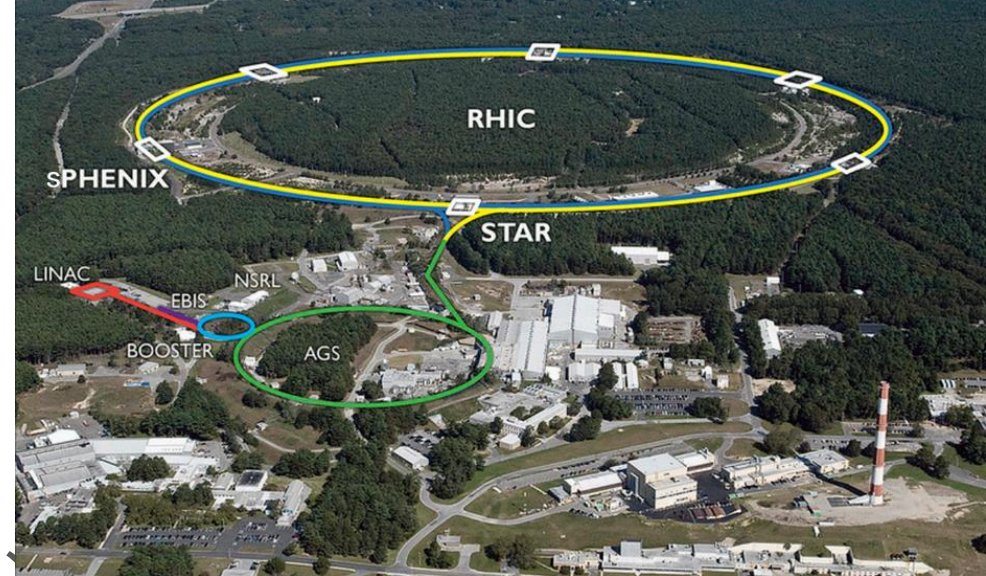
杉山由佳, 秋葉康之^A, 池本真尋, 榎園昭智^A, 加藤智也^C, 加納麻衣,
甘林, 菊池陸大^C, 近藤崇^D, 宍倉遼太^C, 下村真弥, 辻端日菜子, 寺坂優里,
中川格^A, 糠塚元気^A, 長谷川勝一^E, 波多美咲, 蜂谷崇^A, 藤木一真^C,
藤原愛実, 森本菜央, 渡部舞

研究背景：sPHENIX実験

- 2023年5月より、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)でRHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)加速器を用いた実験

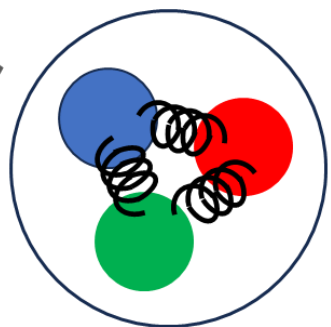
実験目的

- 粒子衝突により発生したジェットやウプシロン粒子を測定し、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の性質を決定する

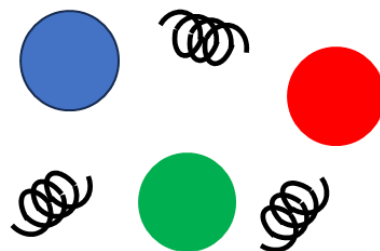


QGP: 高温・高密度下でクォークとグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放されたプラズマ状態。宇宙ビッグバンから数 $10\mu s$ 後の初期宇宙で実現していたと考えられる。

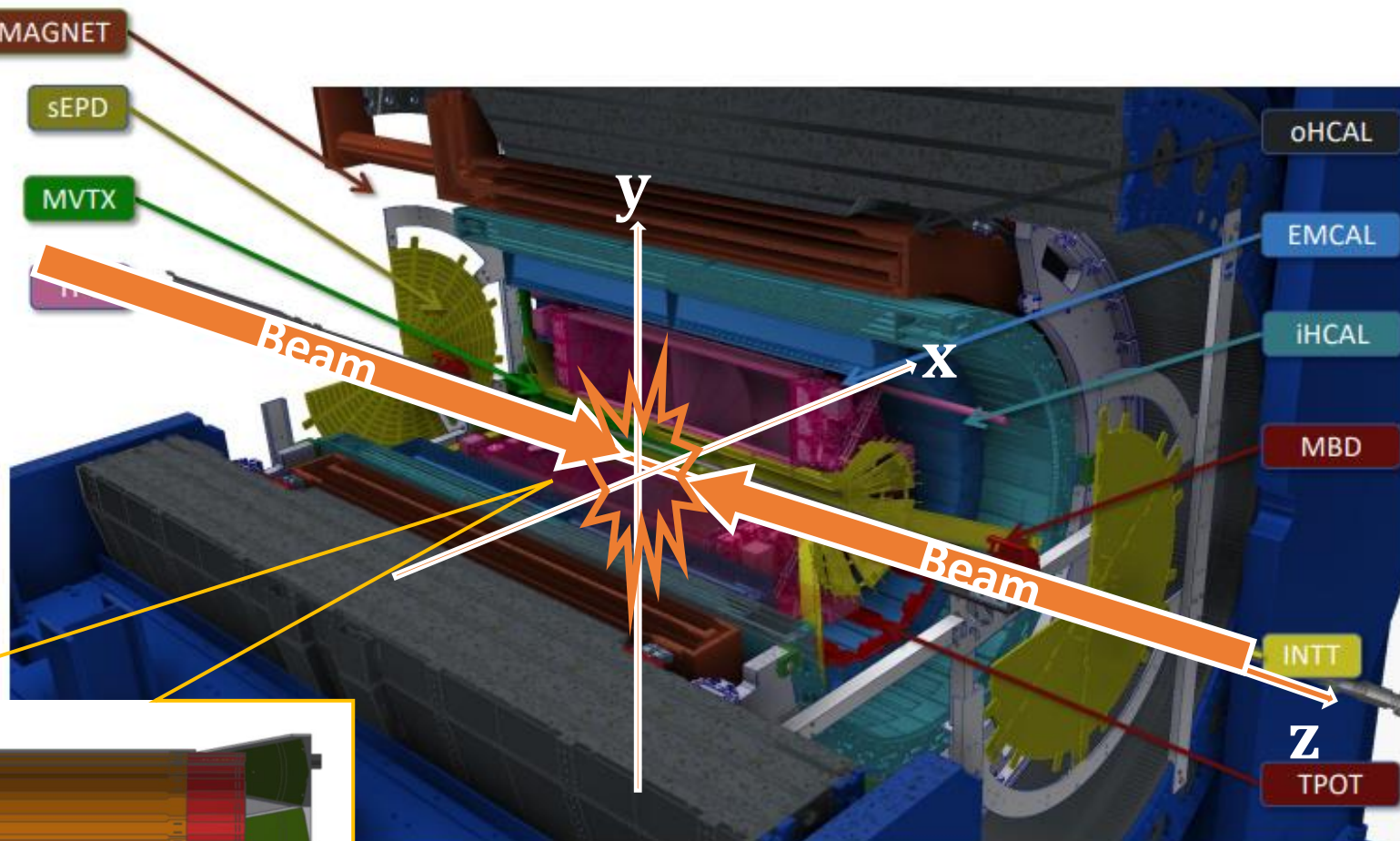
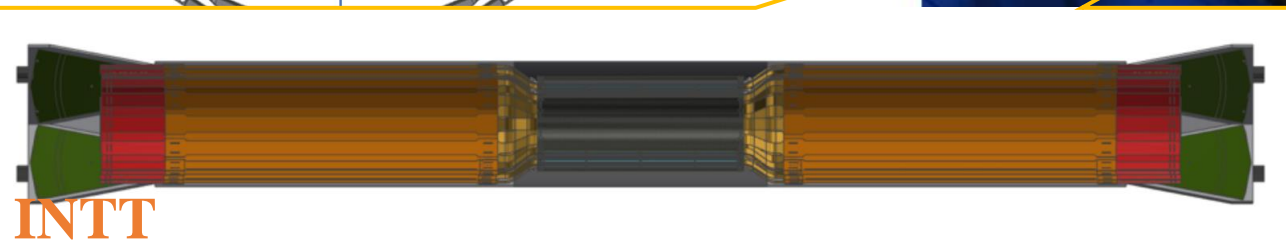
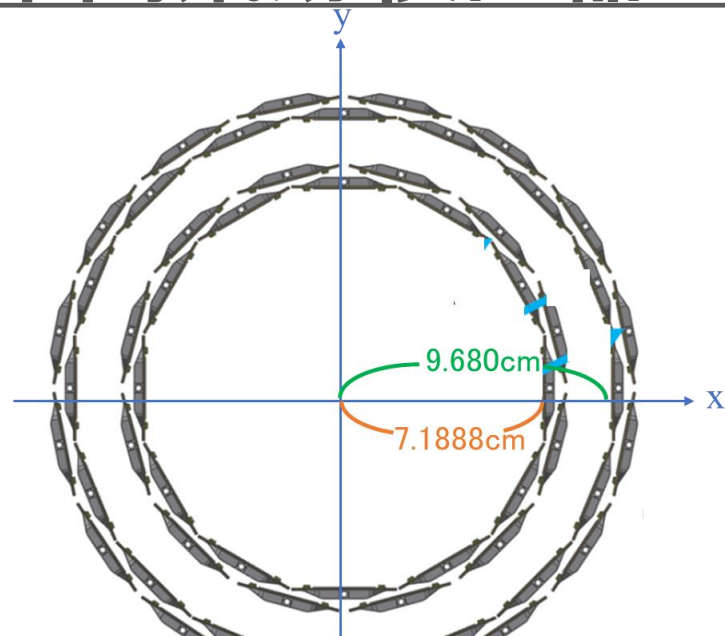
ハドロン



QGP



中間飛跡検出器INTT

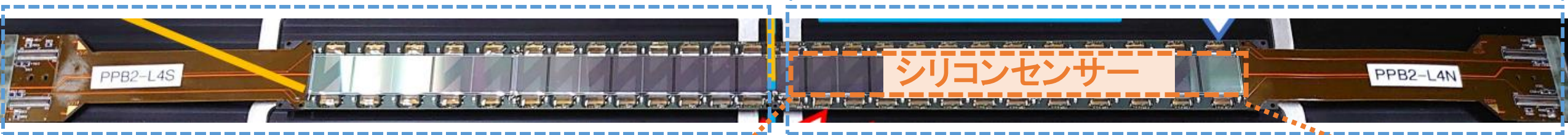


- 2層のバレル構造をもつストリップ型シリコン検出器
- ビーム軸から6-12cmに位置し、衝突点からビーム軸方向に±23cm, 全方位角を覆う
- ビーム交差以下の時間分解能(106ns)を有し、どのビーム交差で衝突が起きたのか区別可能。

INTTラダー

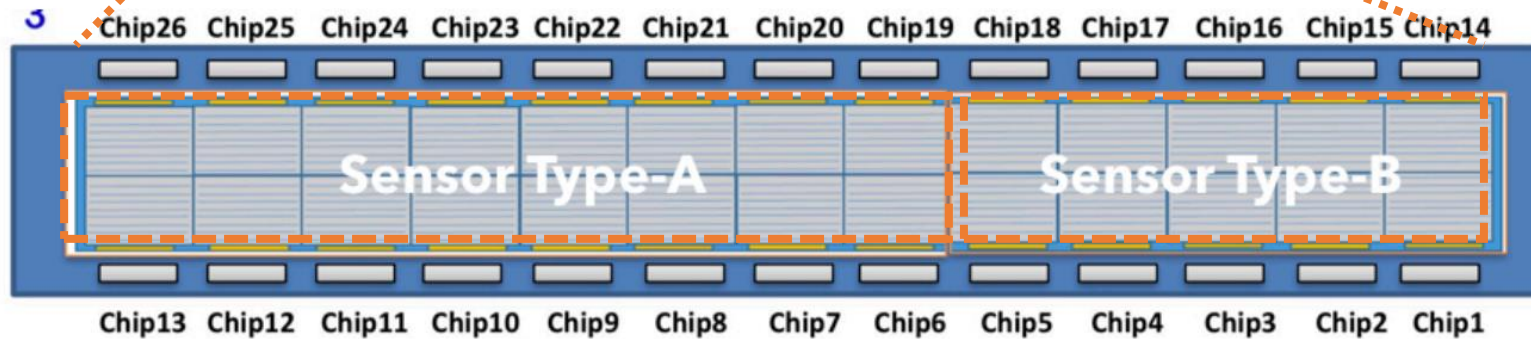
- INTTラダー1個は、ハーフラダー2個で構成

ハーフラダー



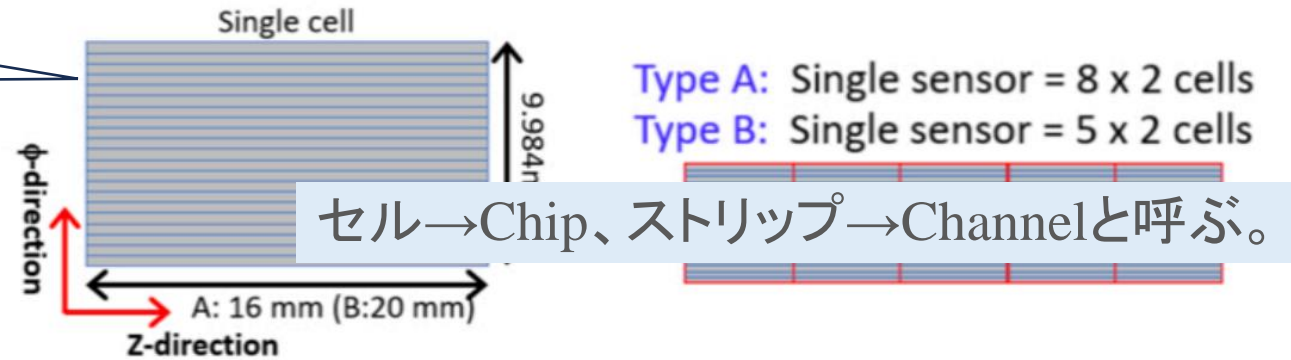
シリコンセンサー

- 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 μ m 厚、幅78 μ m、長さ16 mm (20 mm)



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
 - データ解析で、ヒットレートが極端に高い不良Channelが確認された。
⇒解析から取り除く必要がある。
2. MIP (Minimum Ionization Particle) のエネルギー損失量の評価
 - INTTは、粒子通過時のエネルギー損失量を検出することで、ヒット位置を測定する。
⇒エネルギー損失分布の理解が、ヒット測定の精度の決定に繋がる。

1. 不良Channel自動検出アルゴリズムの開発

ヒットレート

粒子を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。

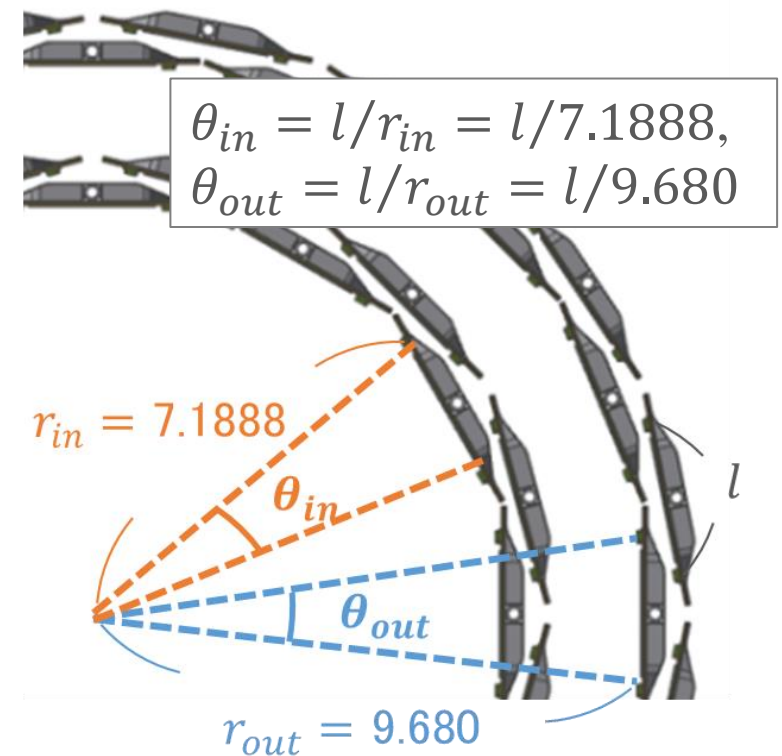
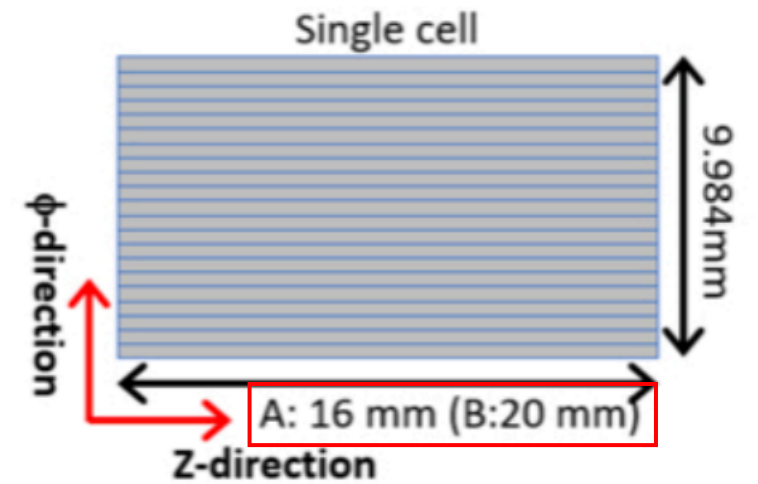
$$\text{ヒットレート } R_{hit} = \frac{1}{\epsilon_{acc} N_{evt}} N_{hit}$$

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

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

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

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



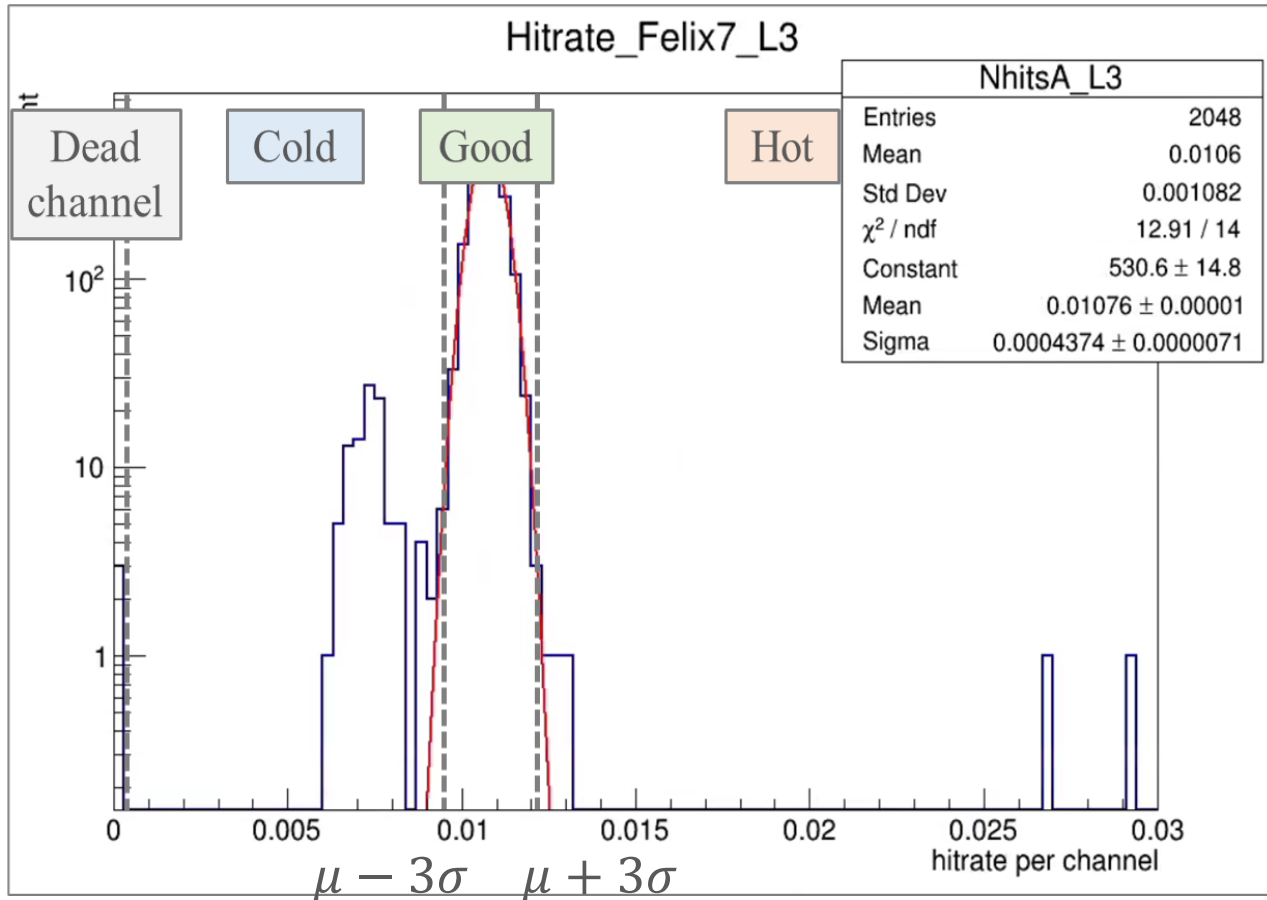
不良Channel検出アルゴリズム

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Channel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。

Channel分類



- 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、ヒットレート分布はガウス分布になる
⇒GaussianでFitを行った。
- Fitパラメータ(平均値 μ と標準偏差 σ)により、Channelの状態を分類した。

Good:	$ R_{hit} - \mu < 3\sigma$
Hot :	$R_{hit} - \mu \geq 3\sigma$
Cold :	$R_{hit} - \mu < -3\sigma$
Dead :	$R_{hit} = 0$

不良Channelの自動検出

- 分類した4種類のChannelの他に、既知の問題のあるハーフラダーが確認された。
⇒Problematic ladderと定義
- Runデータを用いて、INTT全体に占める各ChannelやProblematic ladderの割合を求めた。

表 3.1 問題のあるハーフラダーの一覧とその原因

problematic ladder	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

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

不良Channel

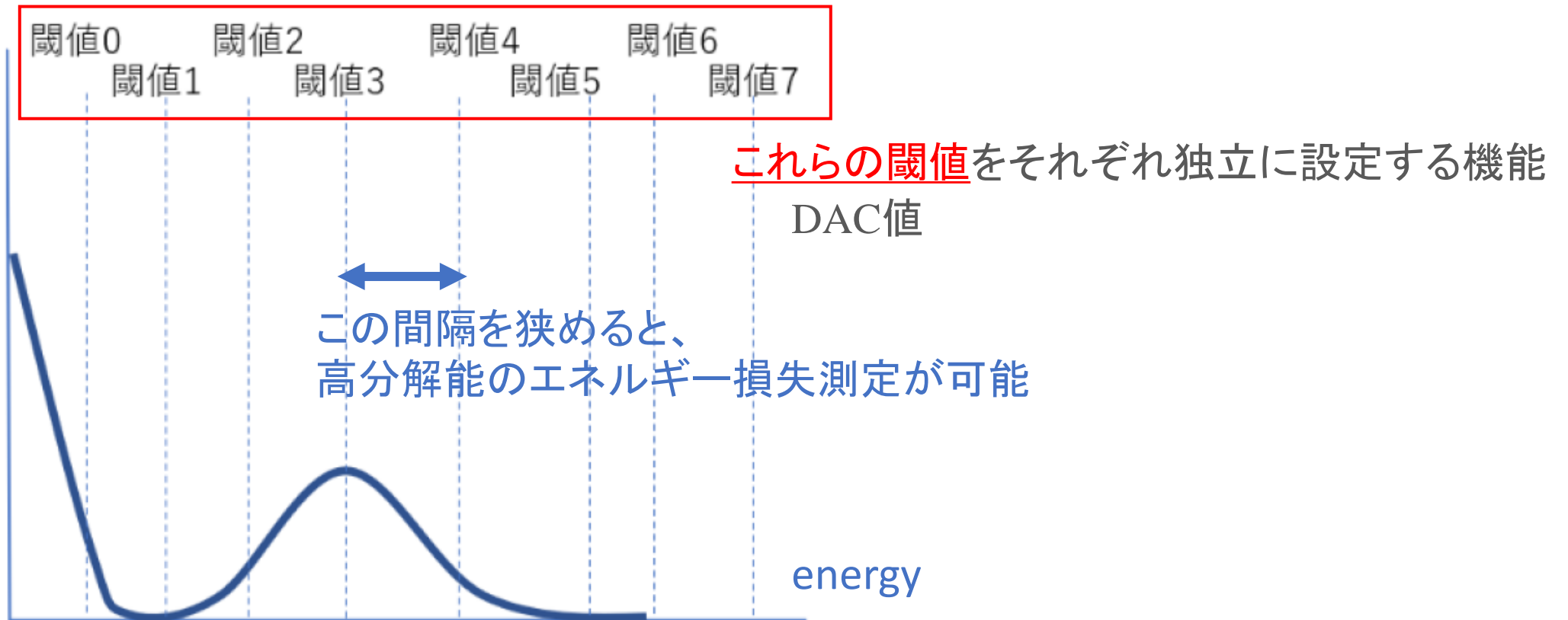
解析に使用できるGood Channelは約93.1%
開発アルゴリズムによって不良Channelを自動検出することができた。

2. MIPのエネルギー損失量の評価

通過粒子の損失エネルギー測定

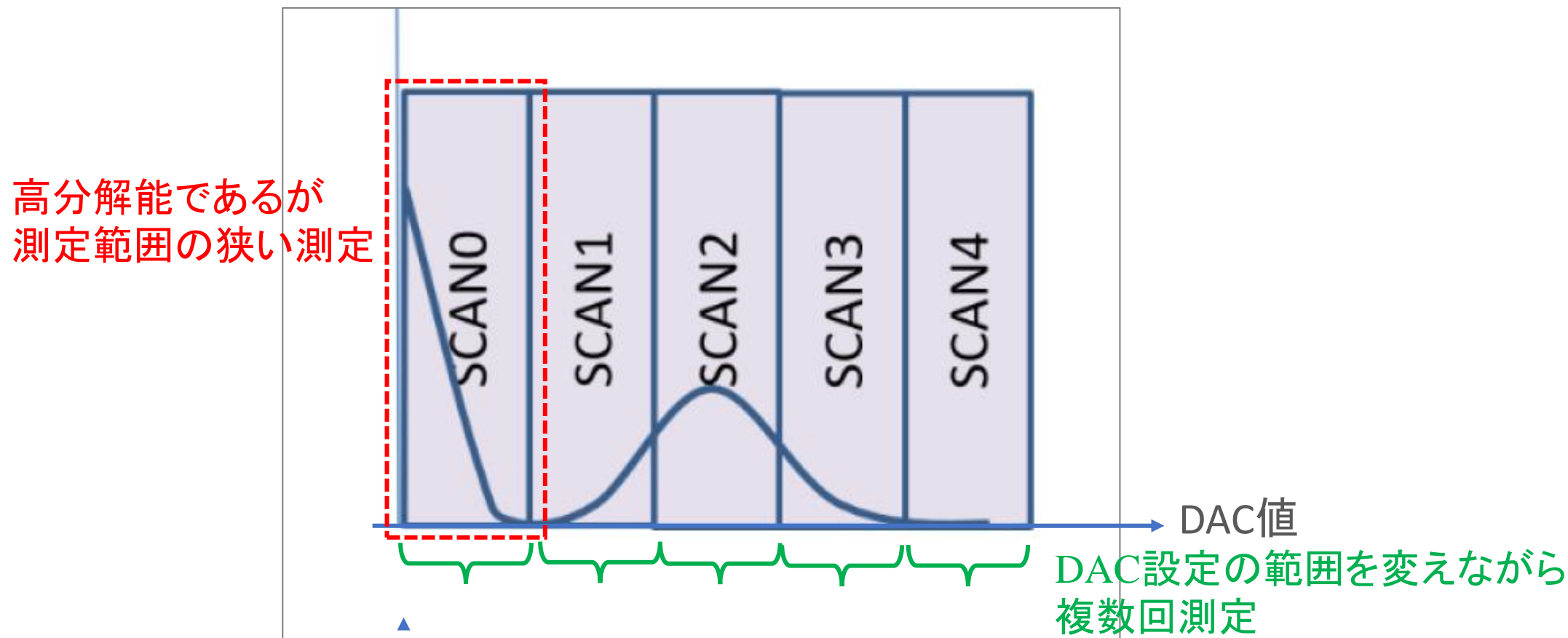
INTTでは、3ビットのADCによってエネルギーを測定する。

- 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。

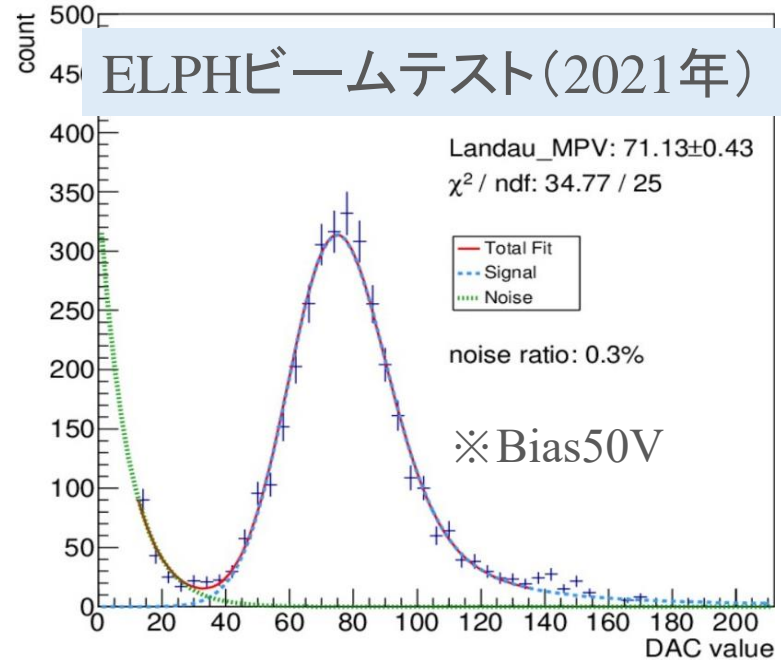
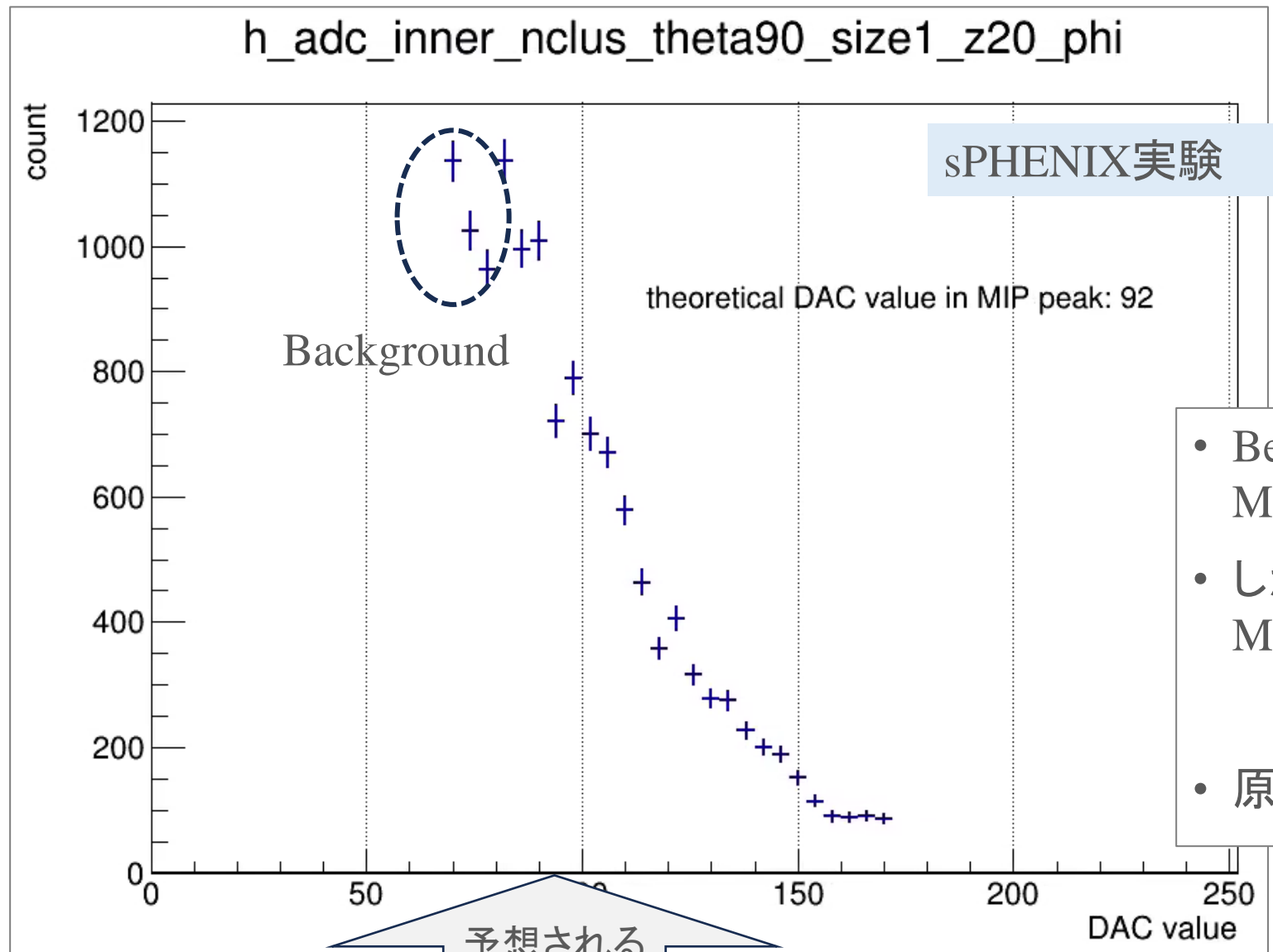
解析手法

DACスキャンのRunデータのうち1万イベント(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
 - クラスタ数を選択
 - 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 θ , クラスタサイズ, Z-vertex, 検出角度 φ
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

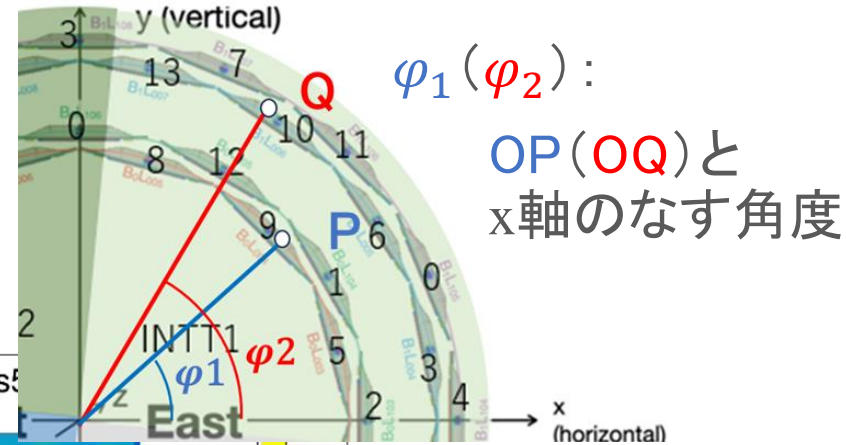
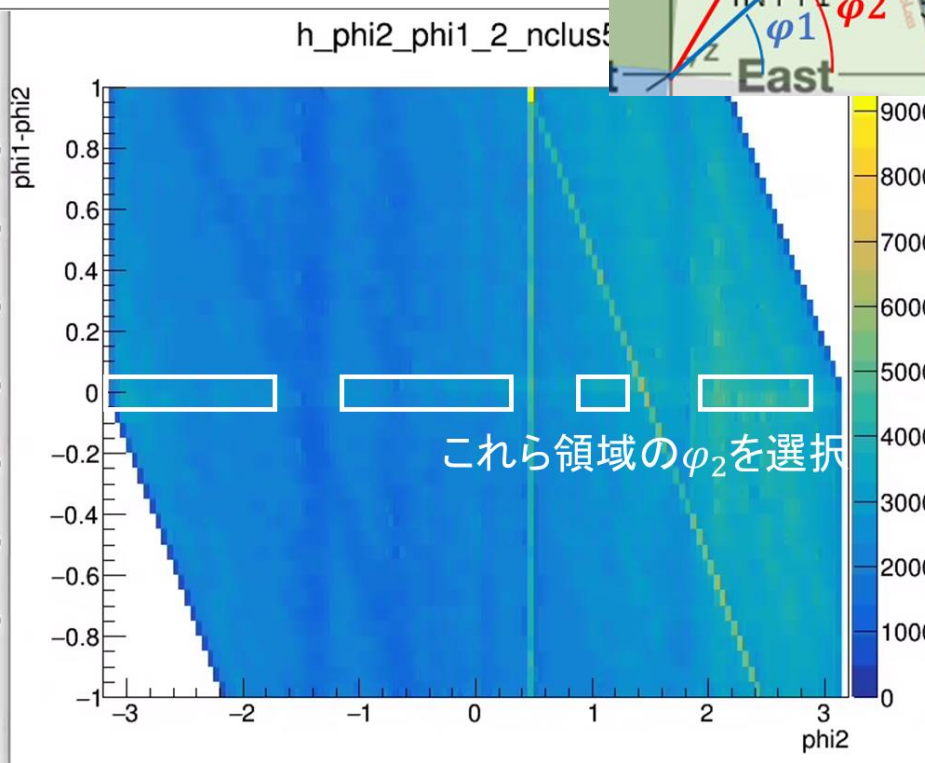
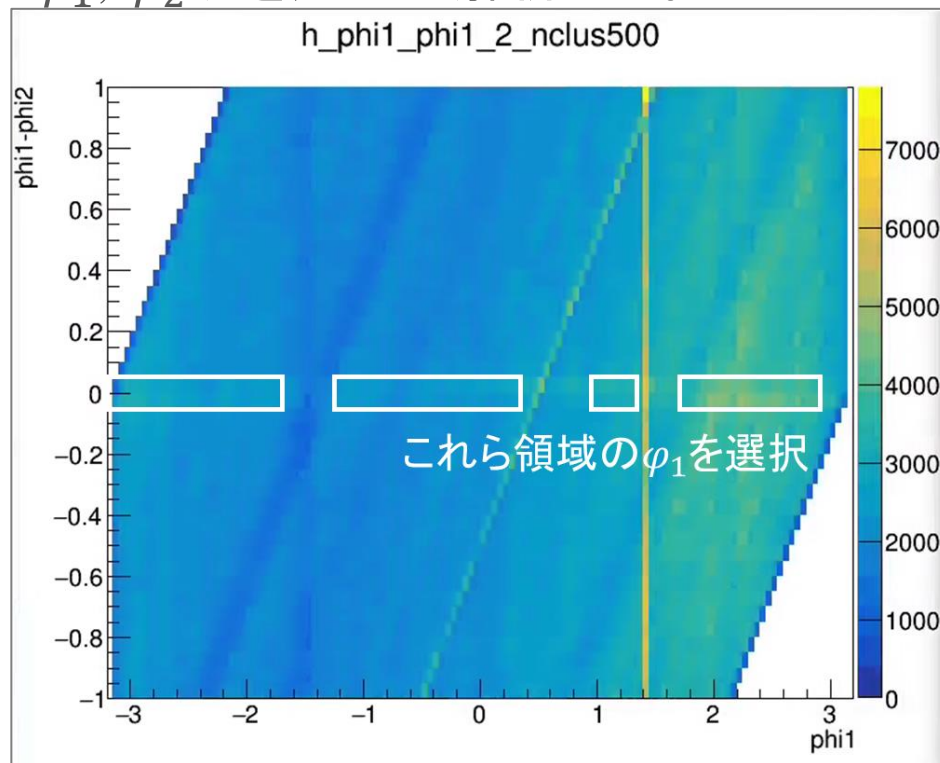
MIPピークの評価



- 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、Backgroundが非常に多く、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

内層→外層に通過するTrack ($|\varphi_1 - \varphi_2| < 0.05$ が成り立つ φ_1, φ_2) を選んで解析した。



しかし、信号のみのADC分布は得られなかった。

Tracking選定が不十分であるため、信号以外にもノイズが測定されたと考えられる。

⇒Backgroundを取り除くために、Tracking選定について再考する必要がある。

まとめ

2023年のsPHENIX実験のAu-Au衝突データ解析によって、INTTの動作検証を行った。

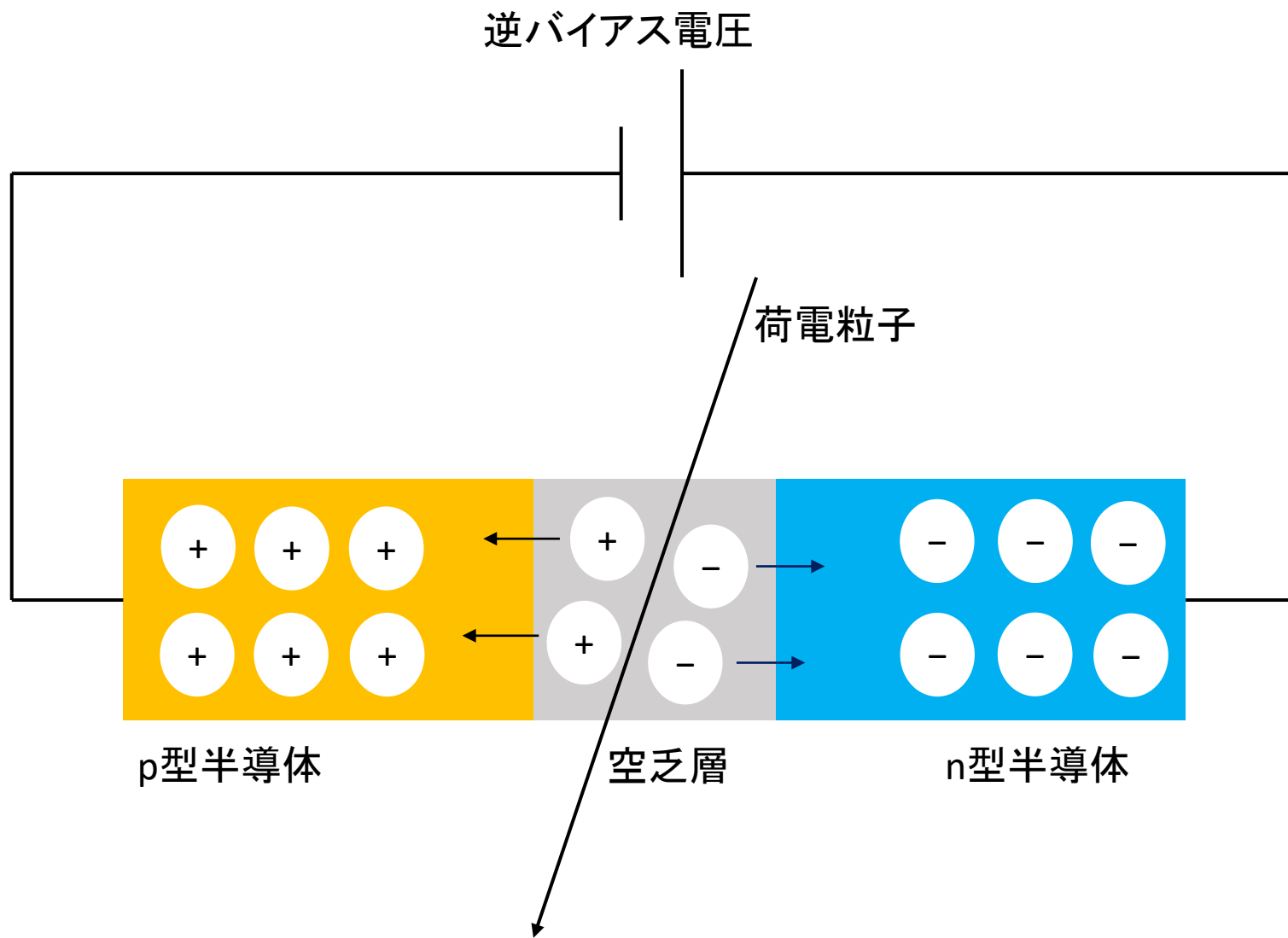
- 不良Channelを解析から取り除くために、不良Channel自動検出アルゴリズムを開発した。
 - 良好なChannelの割合は約93.1%
- INTTのエネルギー損失測定的能力を確認するために、MIPのエネルギー損失量を評価した。
 - DACスキャン(高分解能・広範囲を両立した測定)によってADC分布を求めた。
 - Backgroundが非常に多く、MIPピークを確認できなかった。
⇒Backgroundの原因を特定し、MIPピークを確認する必要がある。

Back up

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

半導体における荷電粒子の検出原理

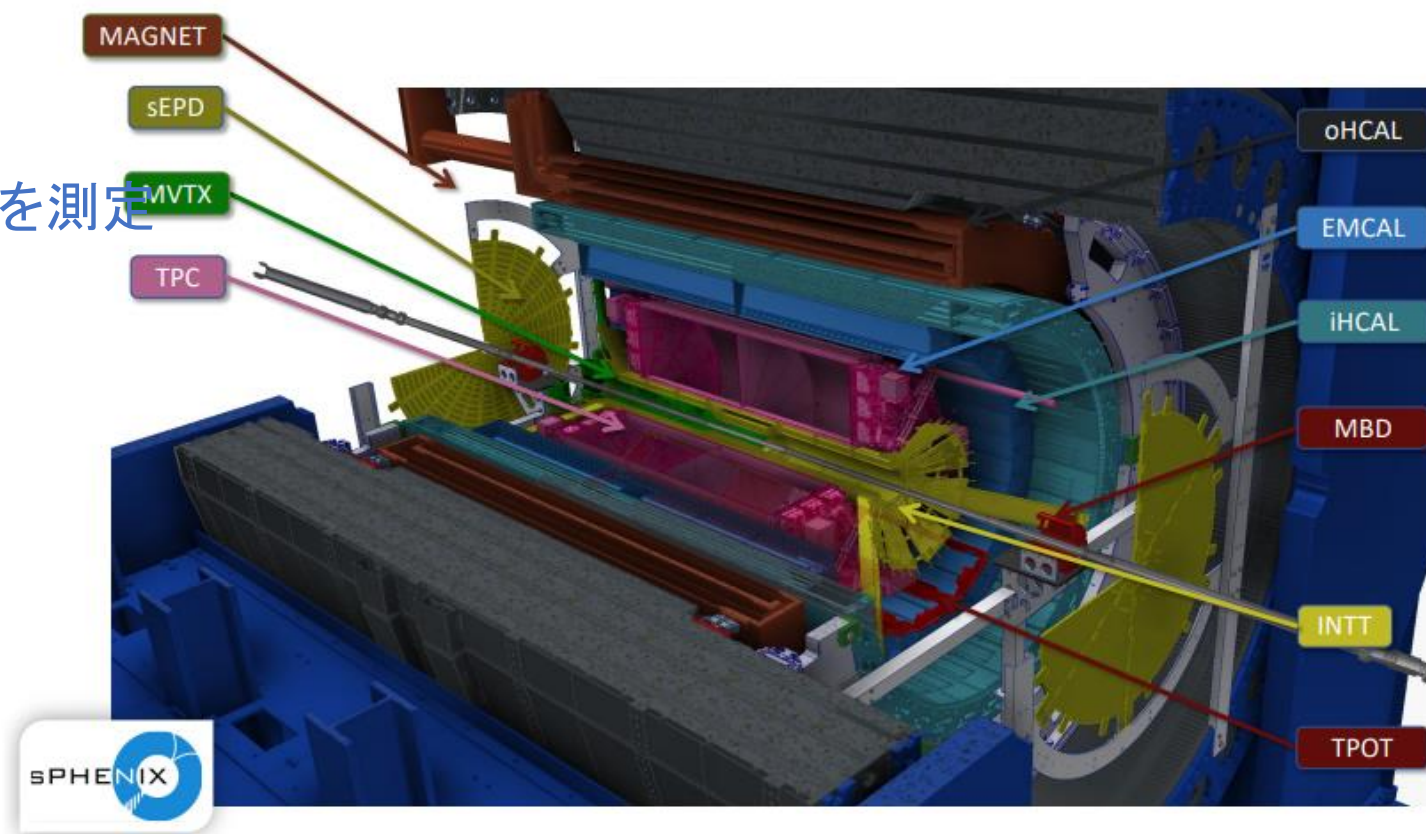


sPHENIX検出器

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

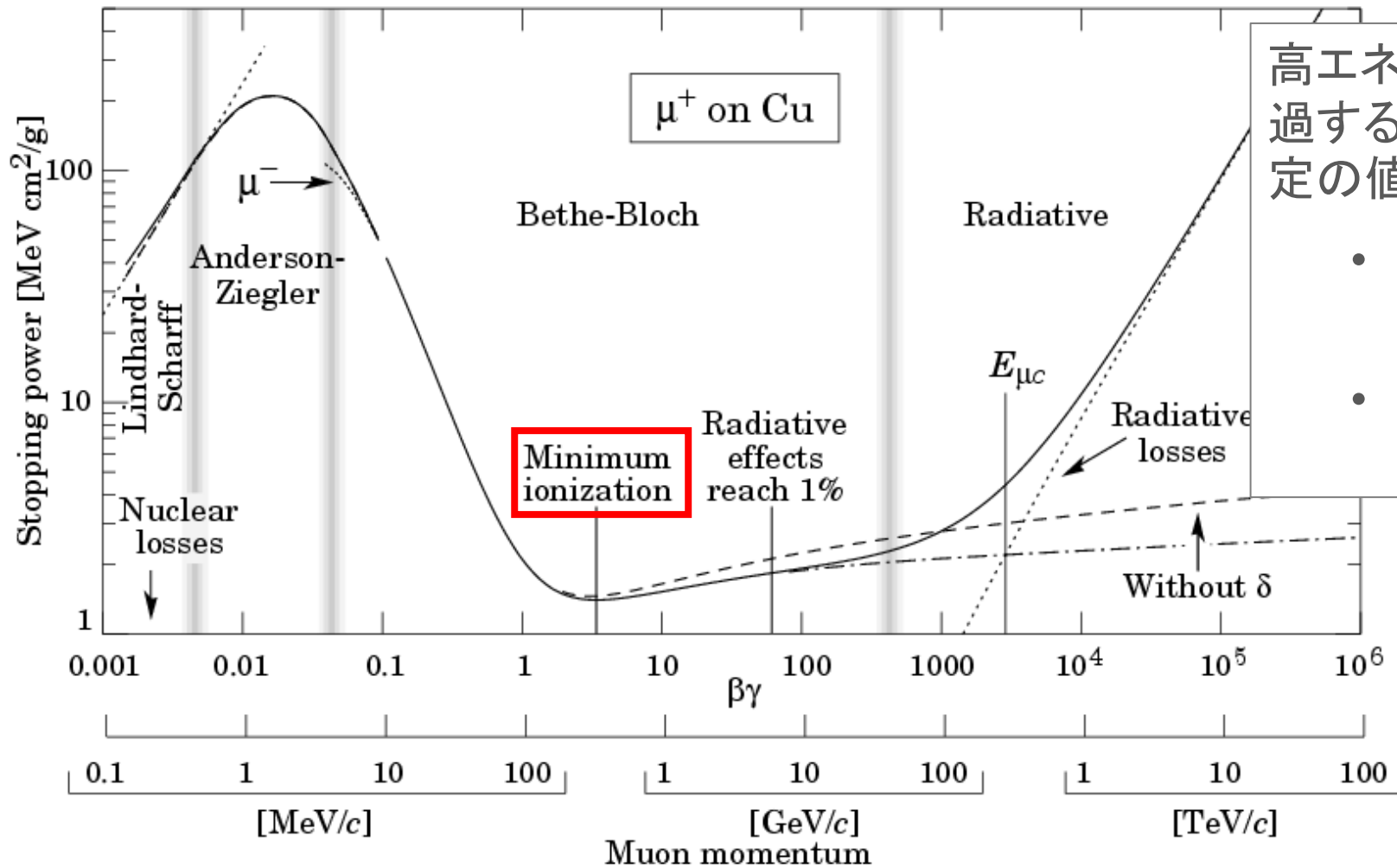
1. MVTX: ピクセル型シリコン検出器
 - 衝突点と生成粒子の最近接距離を測定
 - 重いクォーク・ジェット測定
2. INTT: ストリップ型シリコン検出器
 - 高い時間分解能
 - MVTXとTPCの飛跡を繋ぐ
3. TPC: ガス検出器
 - 36枚の読み出しパッドによる高い位置分解能
 - 荷電粒子の運動量測定



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 ⁻¹ [@ 5kHz] 2.3/3.1/3.9 pb ⁻¹ [10%-str]	23/31/39 pb ⁻¹
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 ⁻¹ [@ 5kHz] 1.5/2.3/3.1 pb ⁻¹ [10%-str]	15/23/31 pb ⁻¹
Au+Au	200	3	0.4 nb ⁻¹ (3B events)	not needed
Run-2025, 24/28 cryo-weeks				
Au+Au	200	20.5/24.5	5.2/6.3 nb ⁻¹ (35B/43B events)	not needed

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

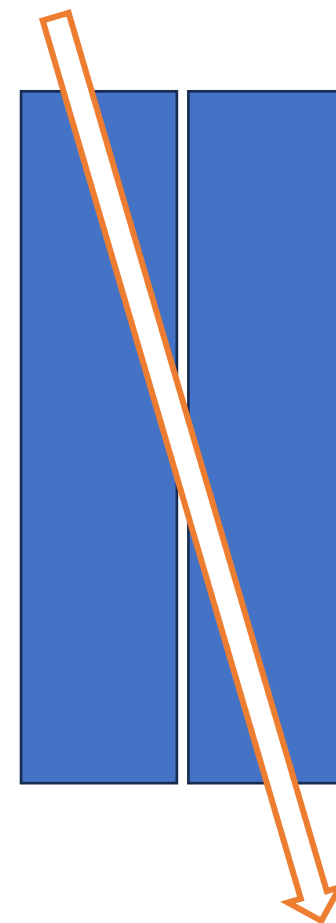
最小電離粒子(MIP)

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**

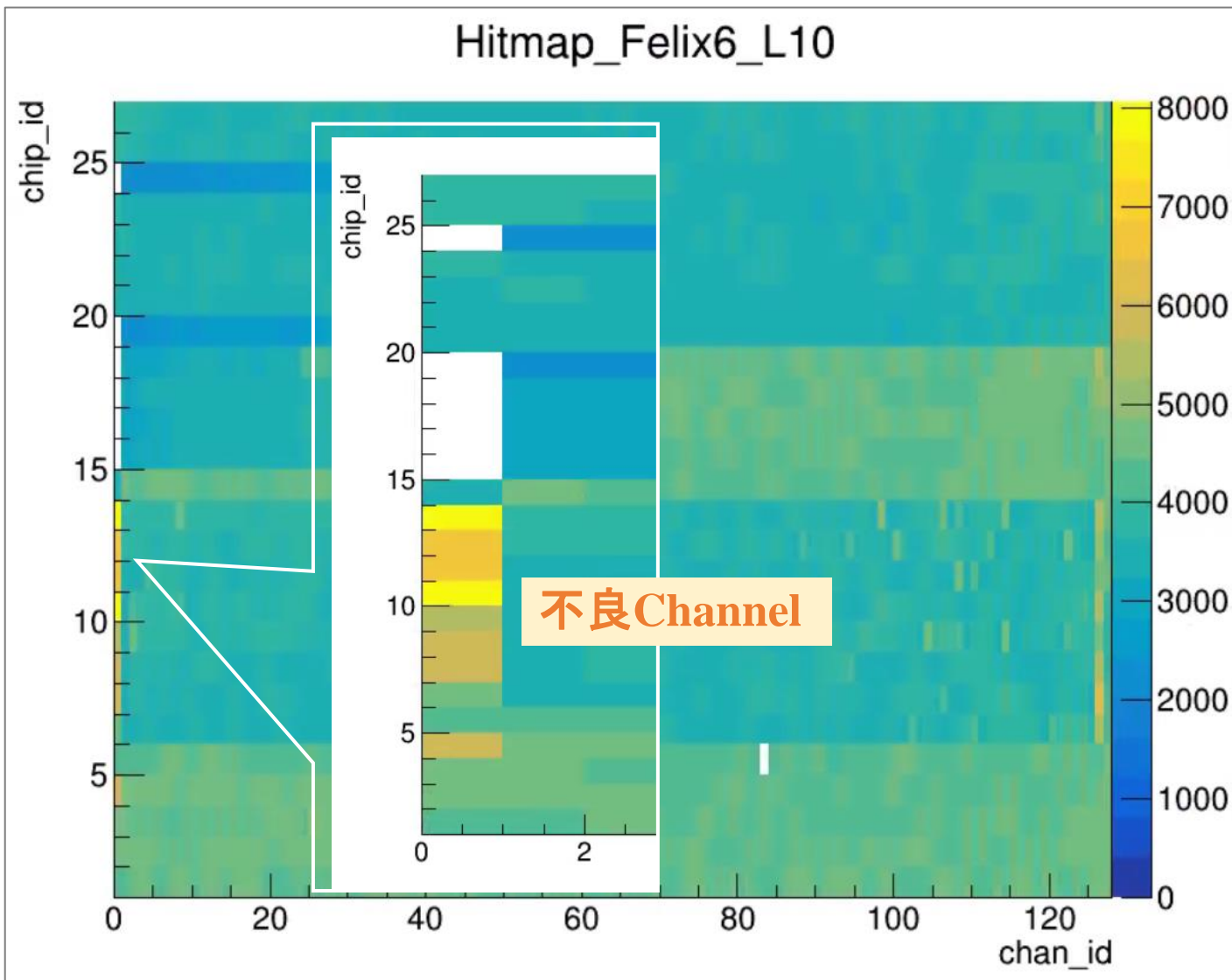
INTTでは、荷電粒子が損失するエネルギーを測定することで、粒子を検出する。

荷電粒子



INTT用
シリコンセンサー

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

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)

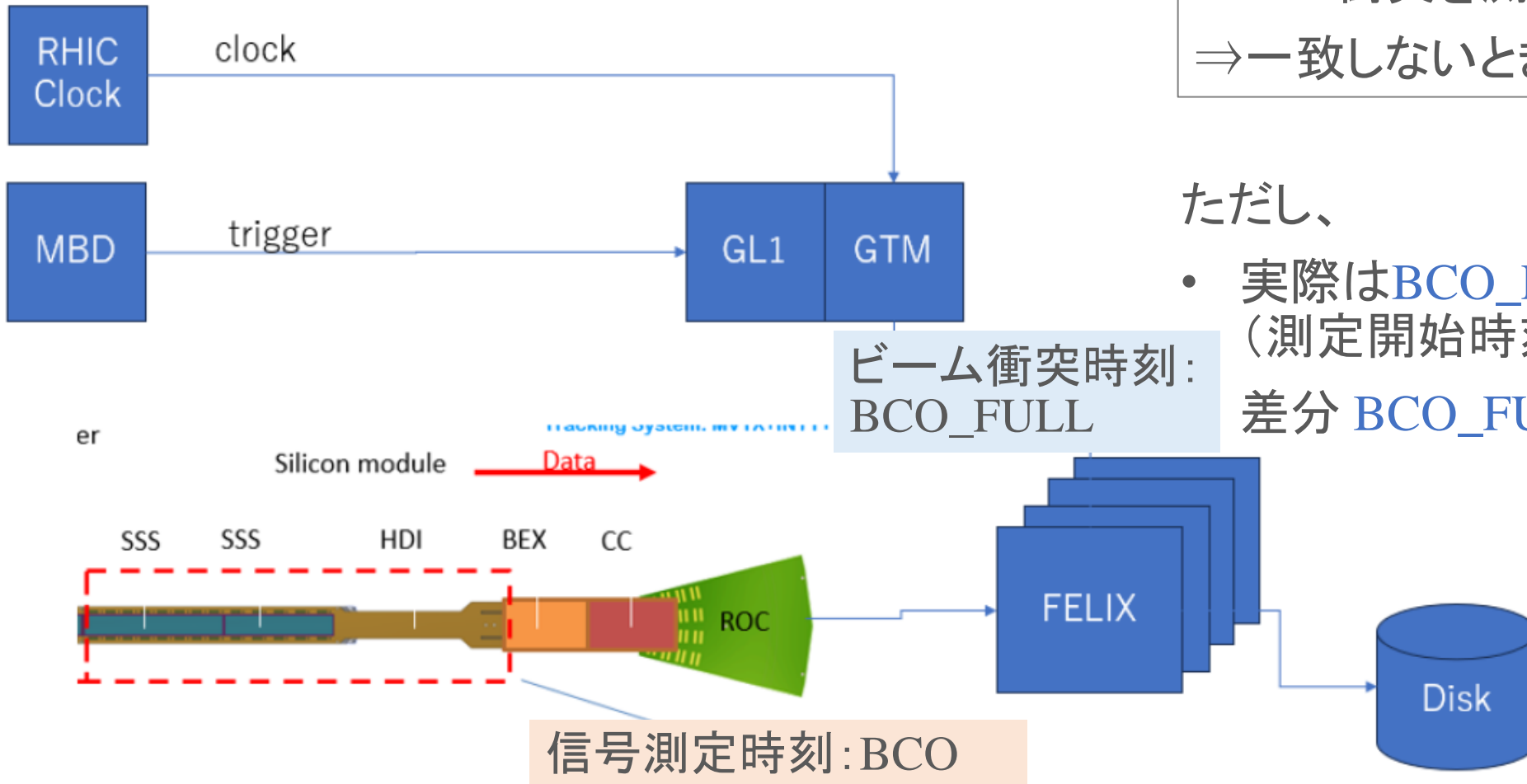
検出されたヒット情報 (Chip, Channel番号など) が同一であるクローンヒットが確認された。実際は1ヒットだが、データ収集系の問題で同じヒットが読み出されたと考えられる。

	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

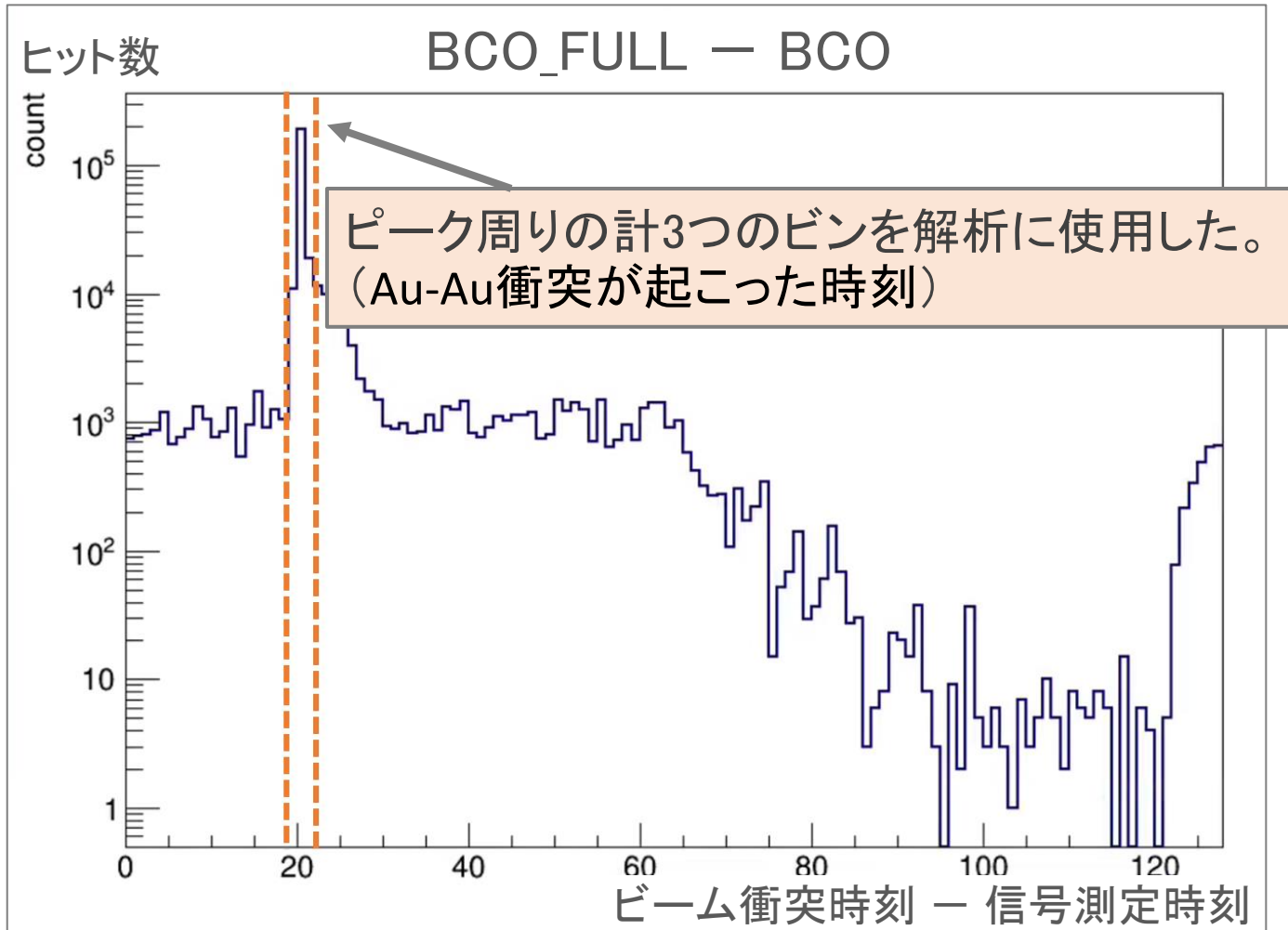
ただし、

- 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

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

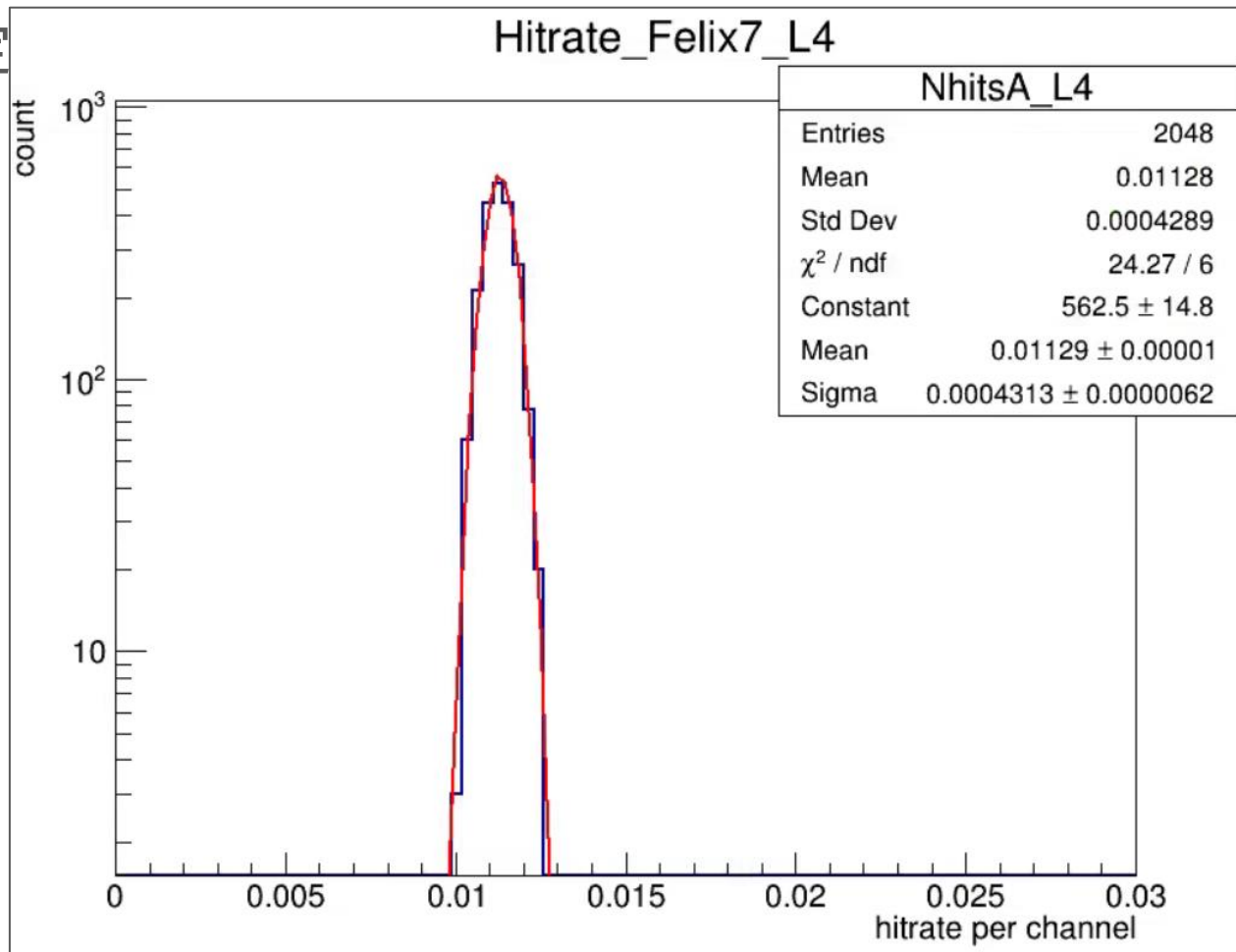
$$\text{ヒットレート } R_{hit} = \frac{1}{\epsilon_{acc}} \frac{N_{hit}}{N_{evt}}$$

- 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
- ϵ_{acc} : 検出感度の違いを補正する係数

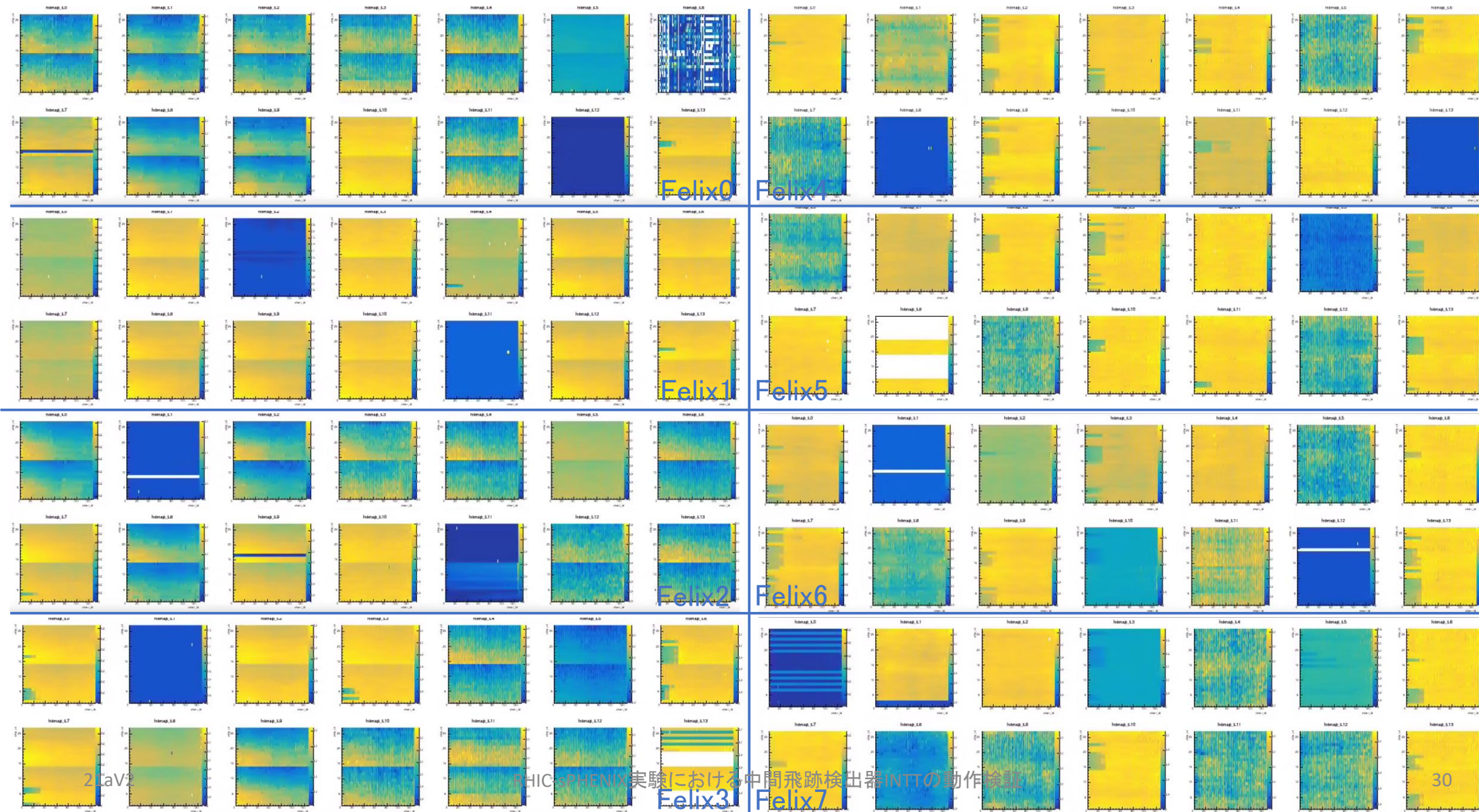
INTT の各方向に同じ割合で粒子が検出されると仮定すると、

ヒットレート分布→ガウス分布

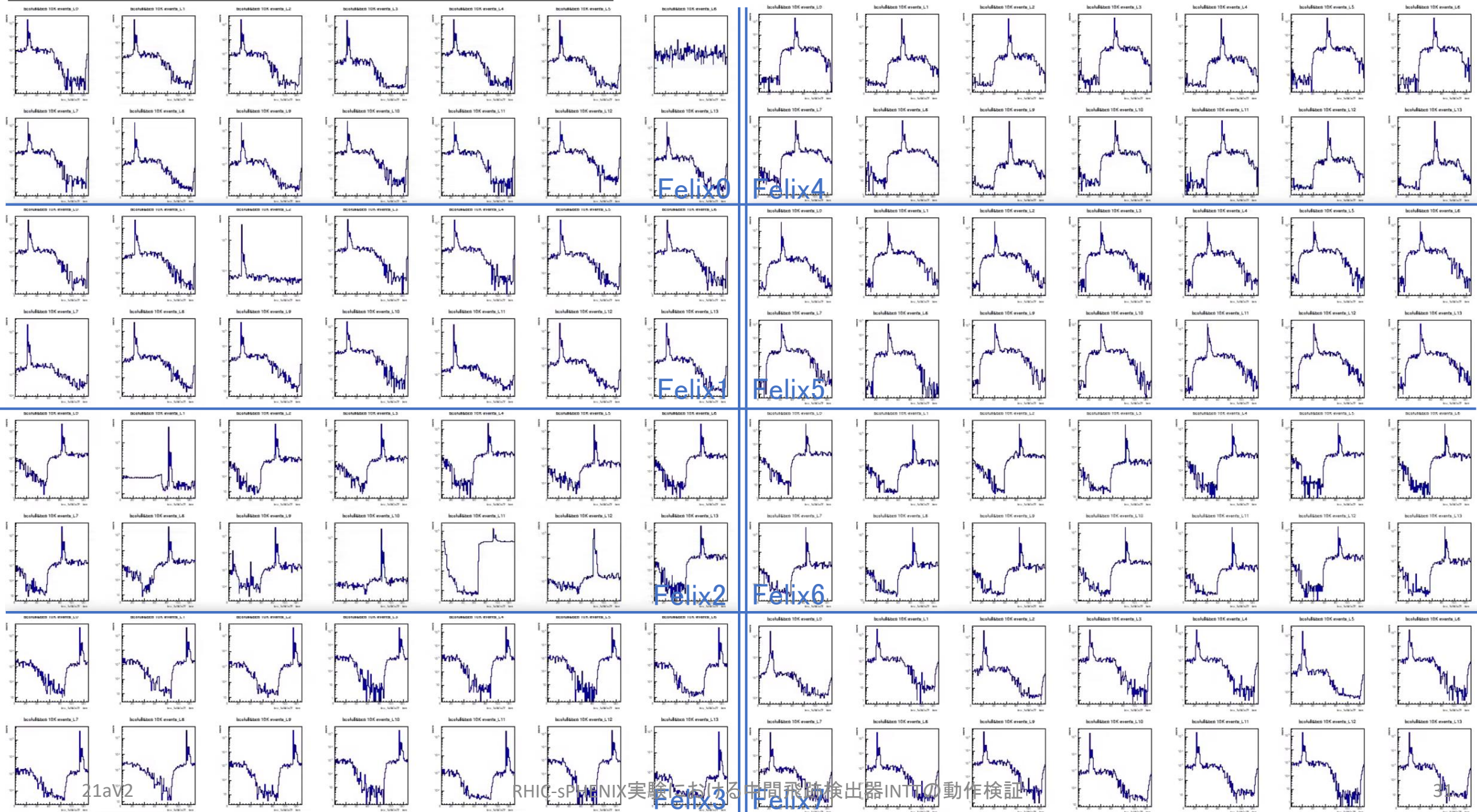
Gaussianでフィットし、 $\pm 3\sigma$ 以上を不良チャンネルとした。



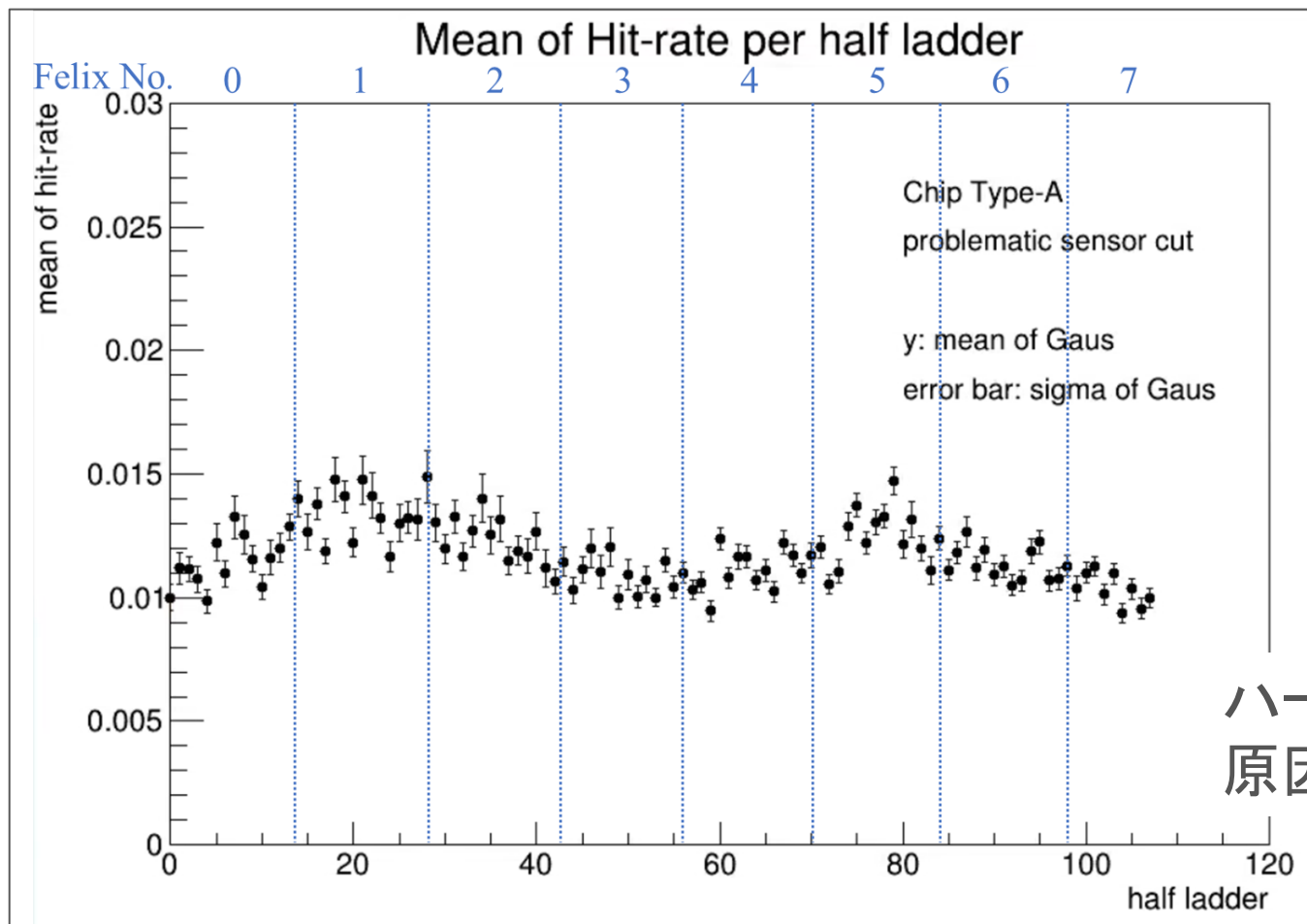
全Felix分のヒットレイトマップ(縦軸:Channel番号, 横軸:Chip番号)



全Felix分のBCO FULL-BCO分布



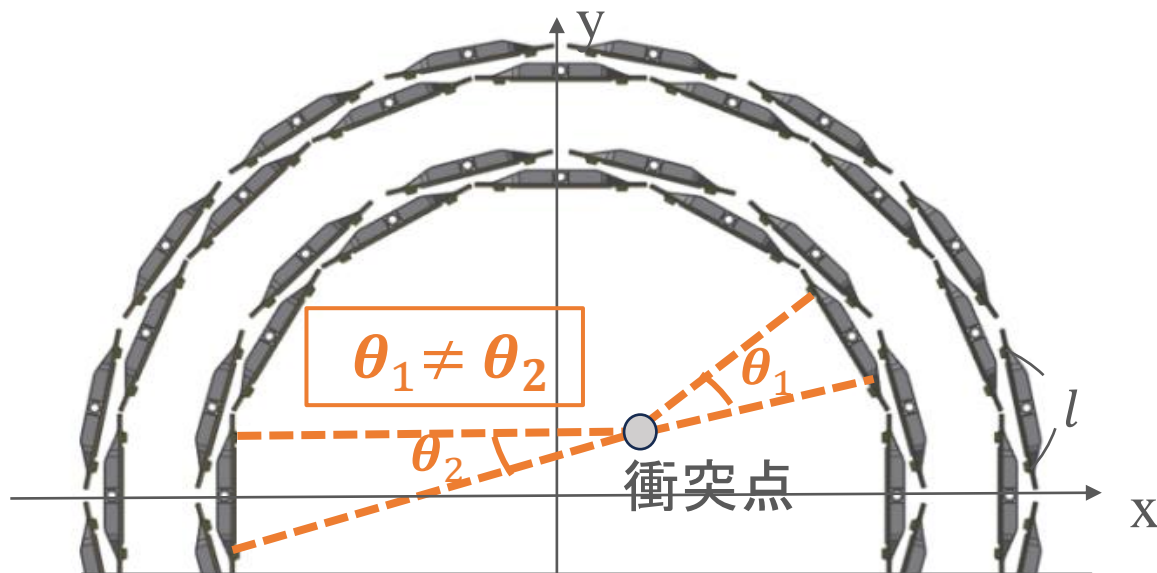
ハーフラダー毎のヒットレート分布



ハーフラダー毎にMeanと σ にばらつきがある。
原因については次頁

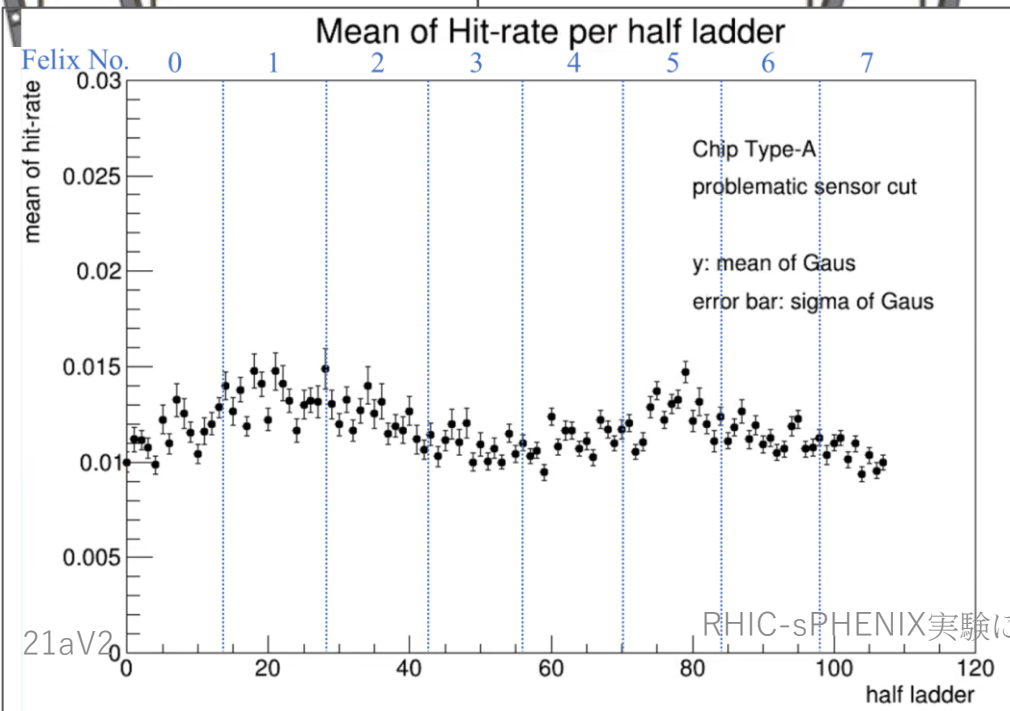
ハーフラダー毎のヒットレート分布の
Fittingパラメータ(Mean, σ)を示したグラフ

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。

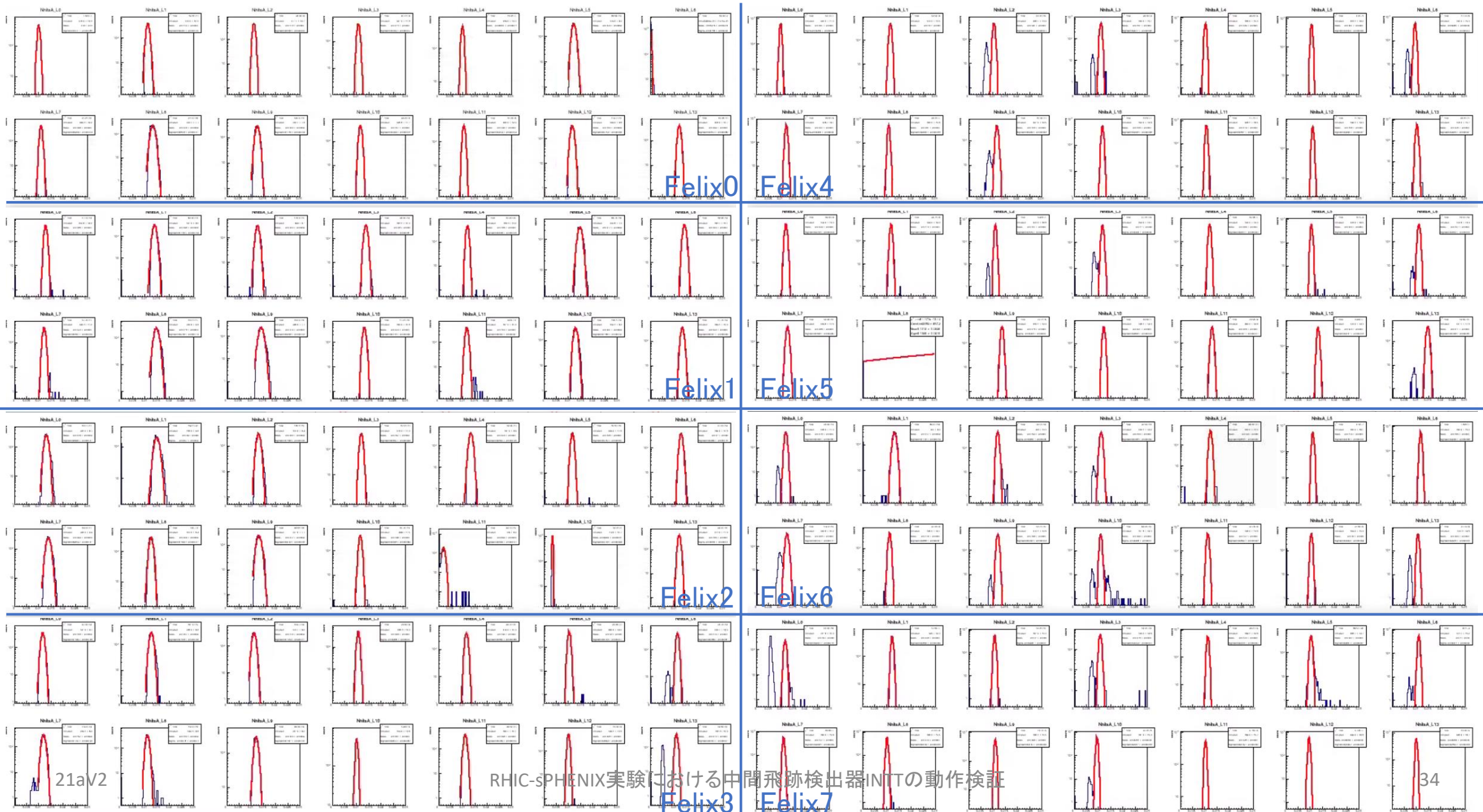
⇒ヒットレート分布のFittingパラメータ
(Mean, σ)もハーフラダーによって異なると
考えられる。



これを考慮すればMean, σ 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



Felix0 Felix4

Felix1 Felix5

Felix2 Felix6

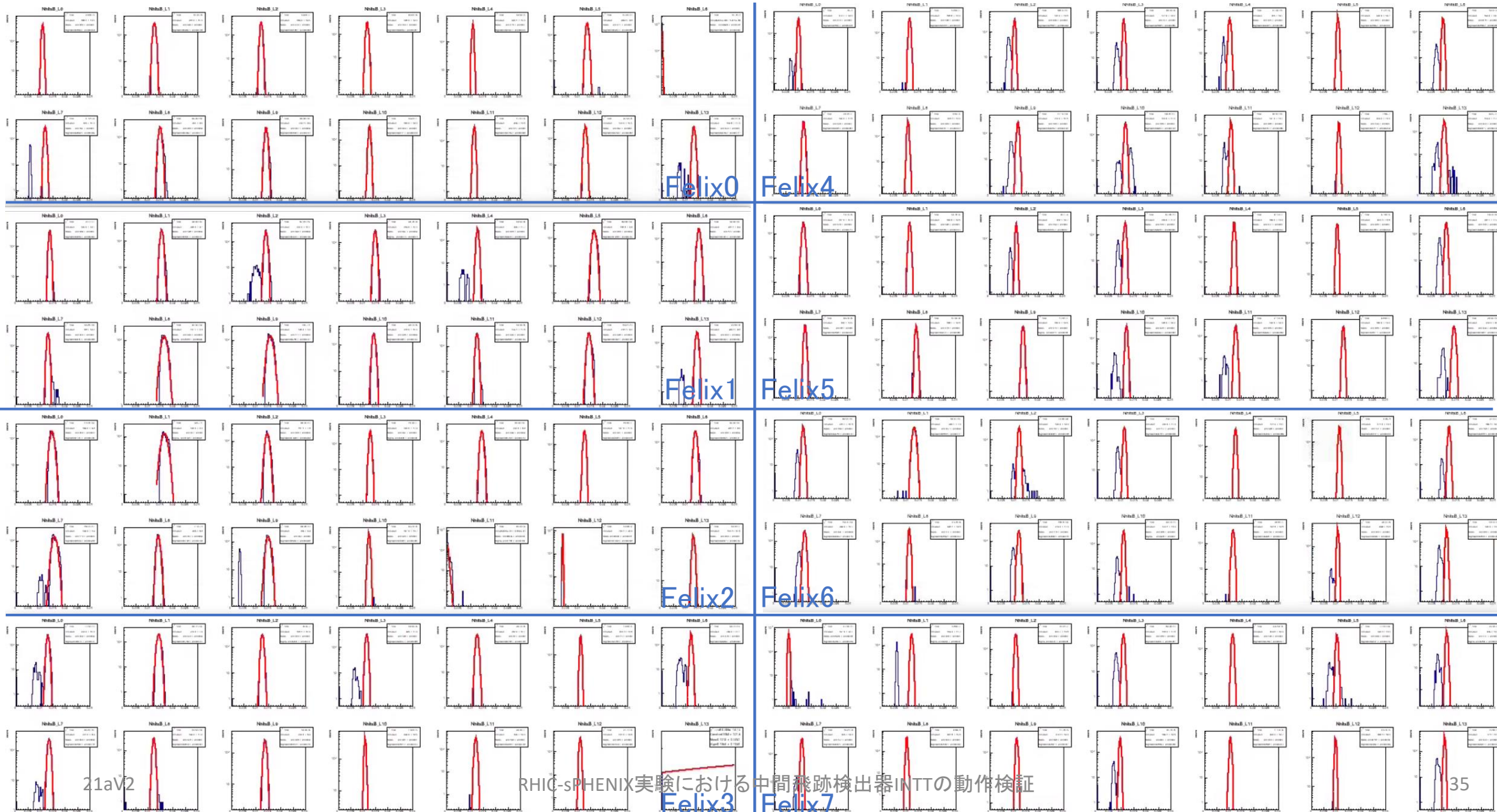
Felix3 Felix7

21aV2

RHIC-SPHENIX実験における中間飛跡検出器INTTの動作検証

34

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)



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

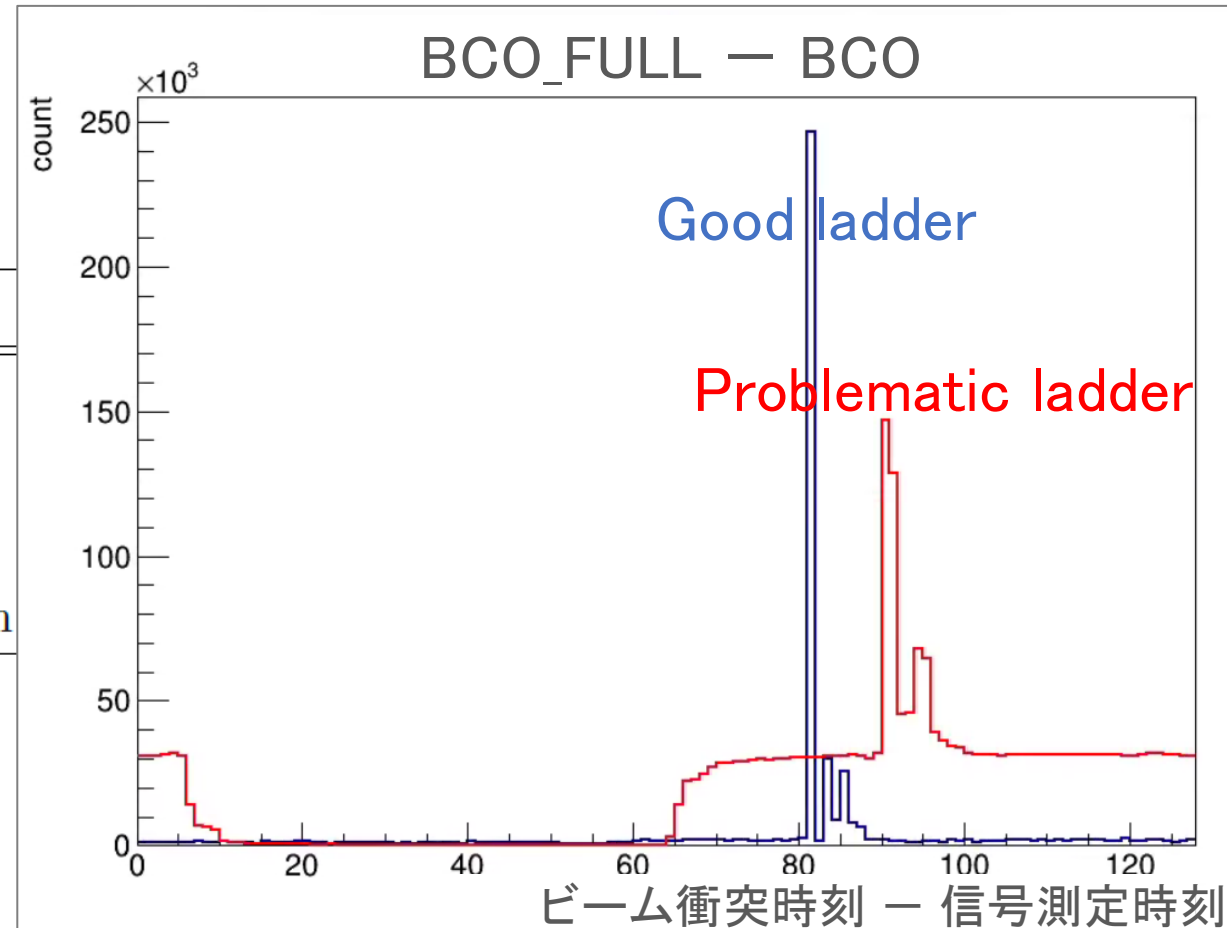


既知の問題

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



エネルギー損失量の評価

INTT の飛跡再構成

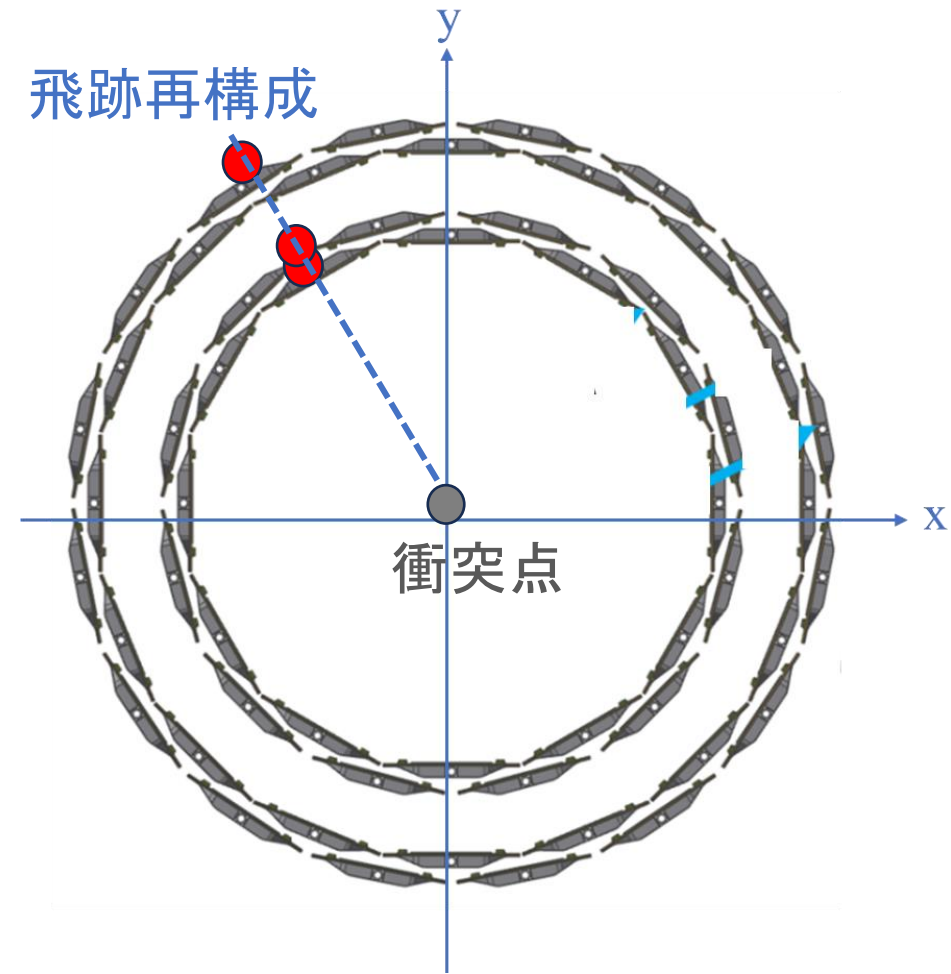
1. 荷電粒子が通過した場所をヒット位置として測定
センサー通過時の
エネルギー損失量を検出
2. これらのヒットをつなぎ合わせる

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。



予想されるエネルギー損失

1. μ 粒子(1GeV) が320 μm 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 [g/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: 1.6×10^{-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、

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

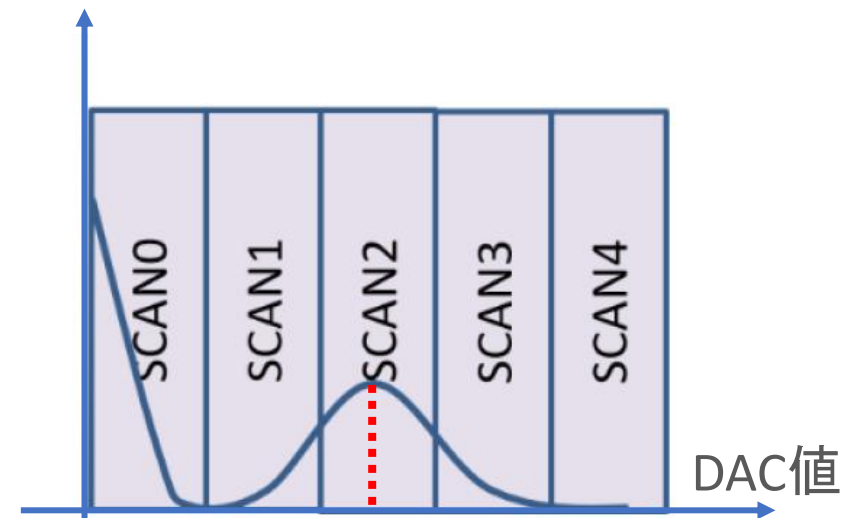
電圧値[mV]	DAC値
562	88
578	92
594	96
610	100
626	104
642	108
658	112
674	116

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。

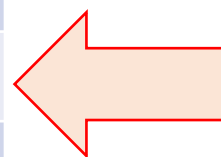
DAC値	出力波高の 電圧値[mV]
15	270
30	330
60	450
90	570
120	690
150	810
180	930
210	1050

予想されるMIPピーク

≒ 85.7 [keV]

≒ 589 [mV]

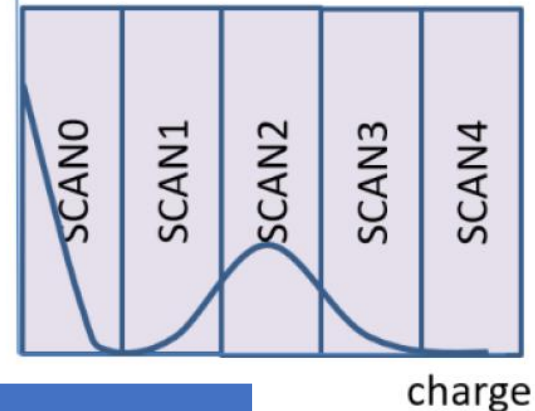
≒ DAC値90



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。



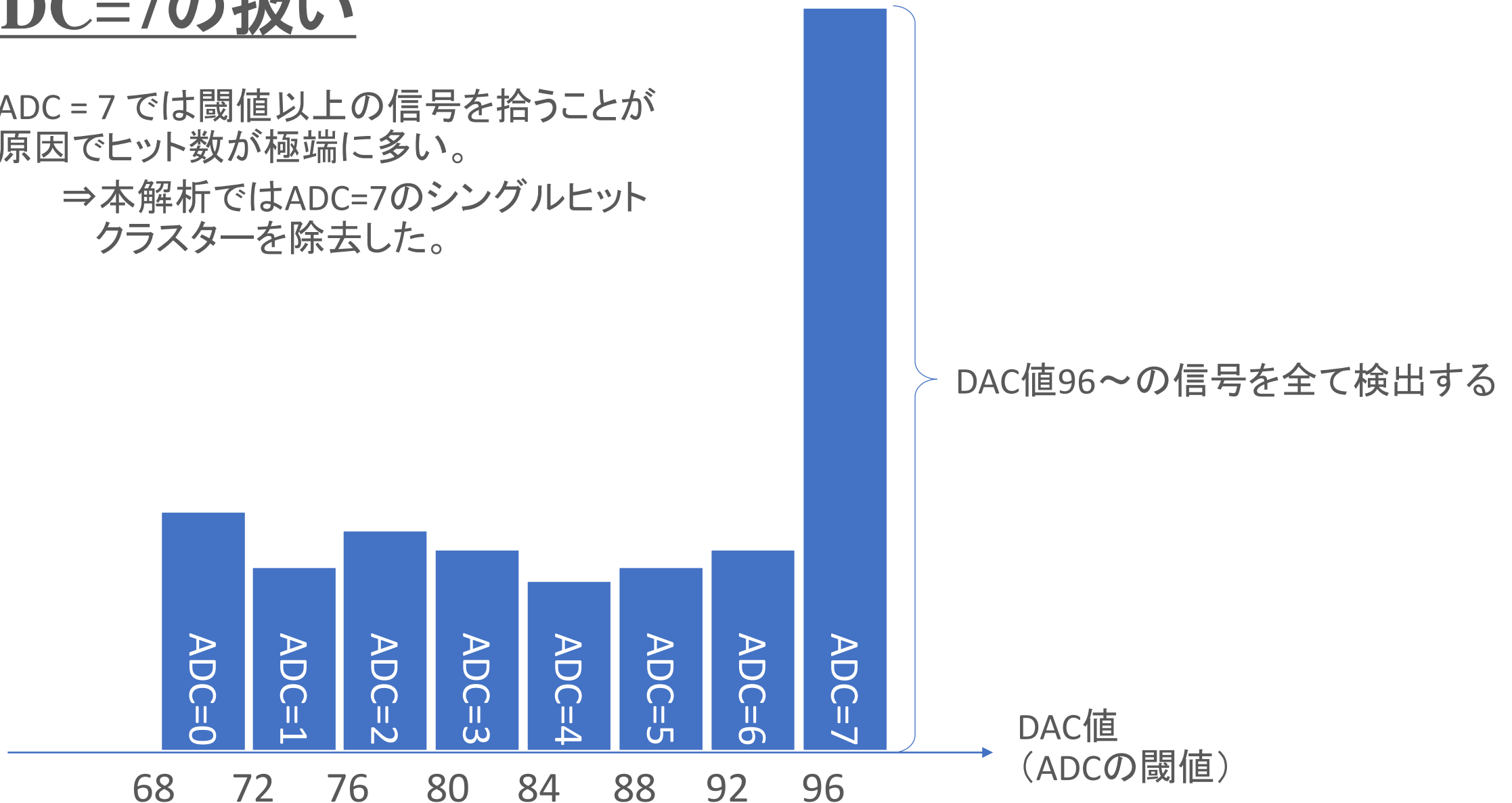
	DAC値設定							
	DAC0 (ADC=0)	DAC1 (ADC=1)	DAC2 (ADC=2)	DAC3 (ADC=3)	DAC4 (ADC=4)	DAC5 (ADC=5)	DAC6 (ADC=6)	DAC7 (ADC=7)
Scan4	68	72	76	80	84	88	92	96
Scan5	88	92	96	100	104	108	112	116
Scan6	108	112	116	120	124	128	132	136
Scan7	128	132	136	140	144	148	152	156
Scan8	148	152	156	160	164	168	172	176

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。

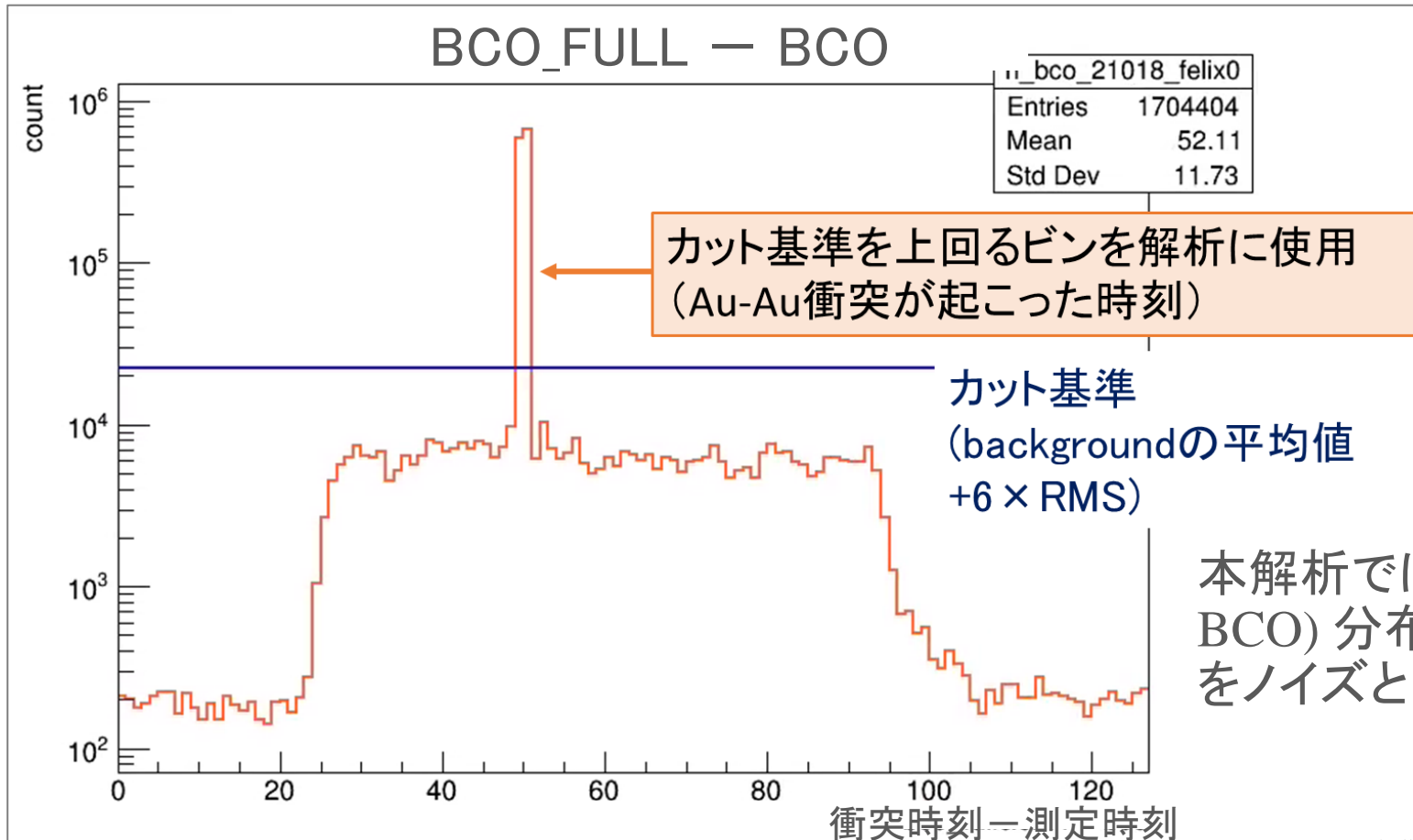
⇒本解析ではADC=7のシングルヒットクラスターを除去した。



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。

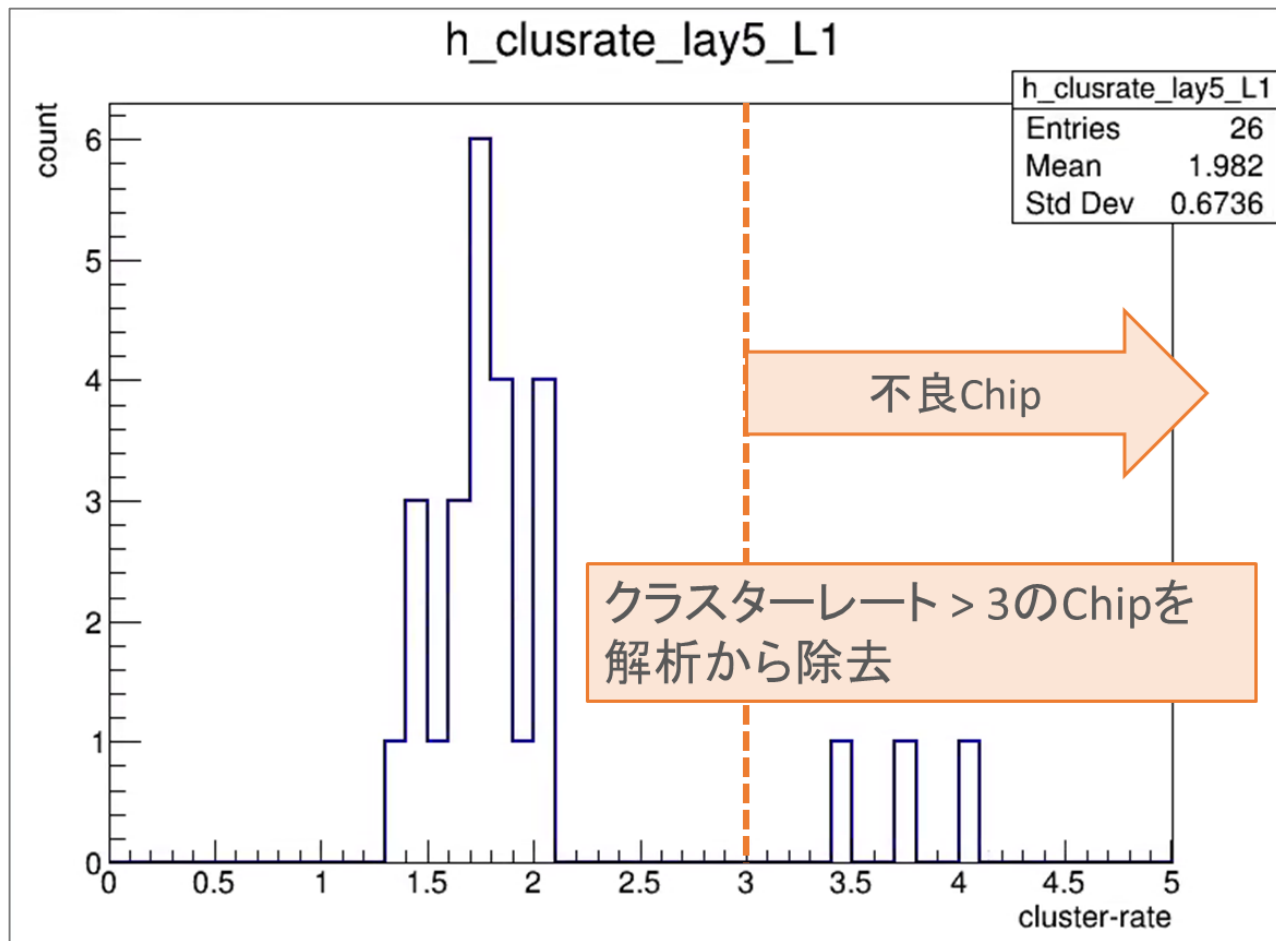


本解析では、差分 (BCO_FULL - BCO) 分布を作成し、カット基準を下回る BIN をノイズとして除去した。

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

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

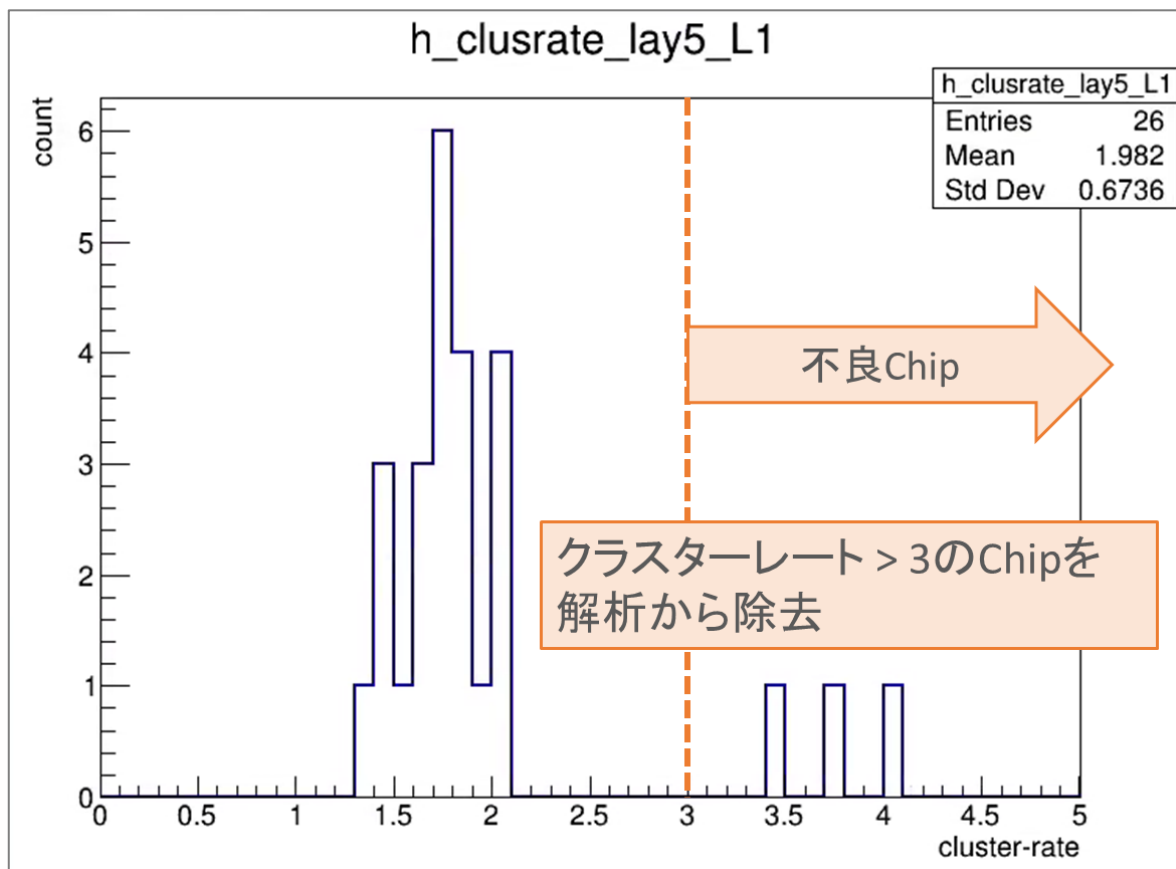
- N_{cls} : あるChipでのクラスター数
- N_{evt} : 解析したAu-Au衝突事象数
- ϵ_{acc} : 検出感度の違いを補正する係数

ノイズ除去

イベント数の少ないDAC スキャンでは、

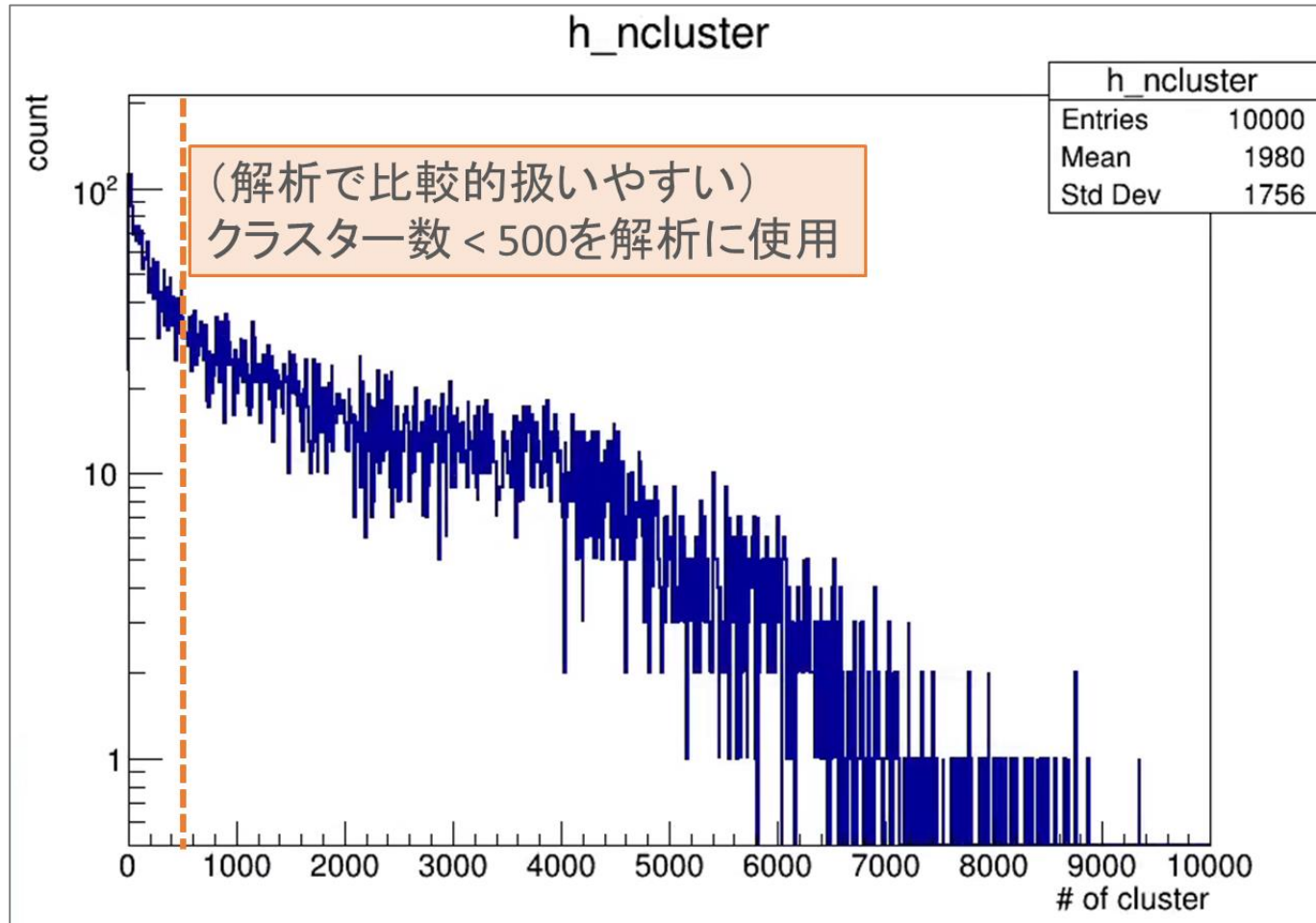
Channel 毎のクラスターレートではばらつきを大きく見積もり、ガウス分布にならない。

⇒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。

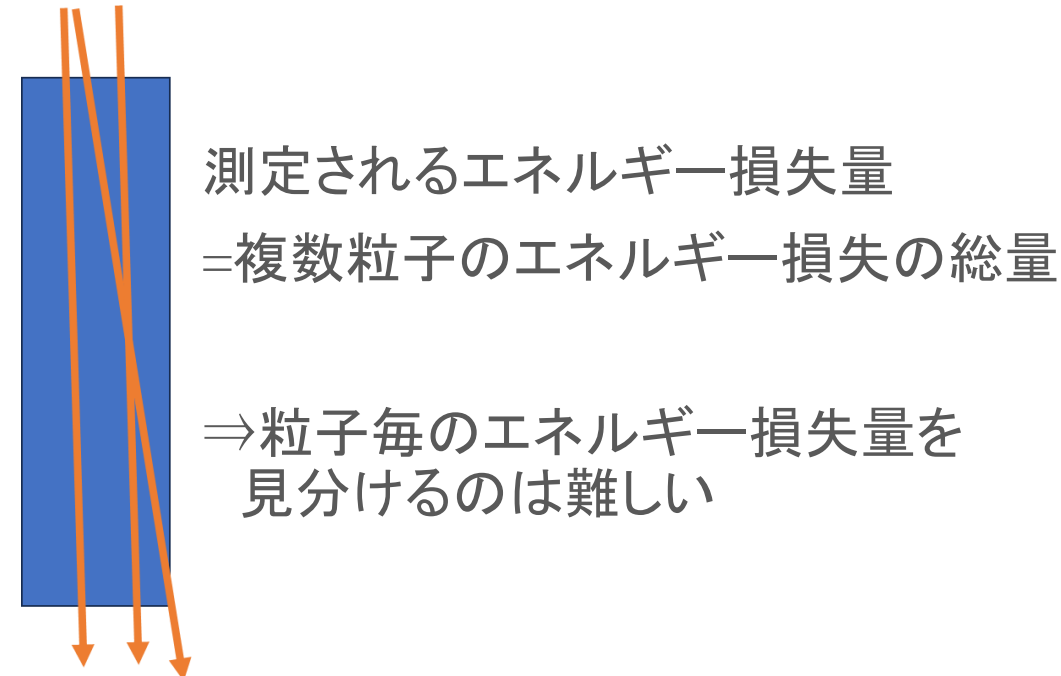


イベント選定

- クラスタ数(生成粒子数)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 < 500 のイベントを解析に使用した。

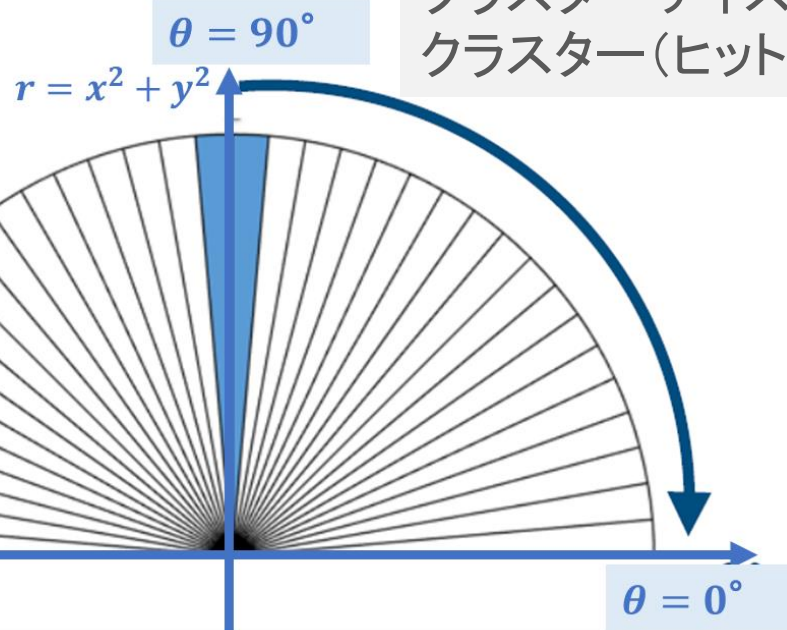
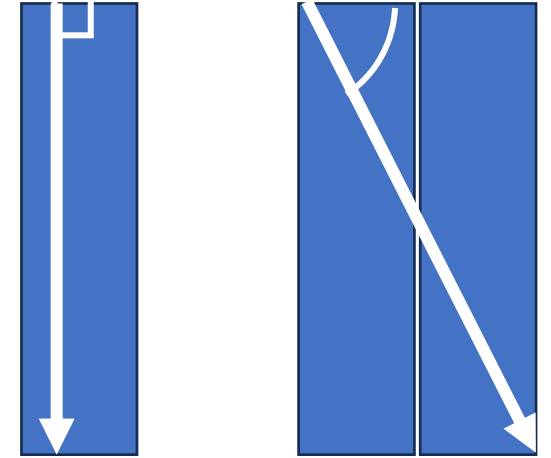
Tracking選定

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 θ 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⇒

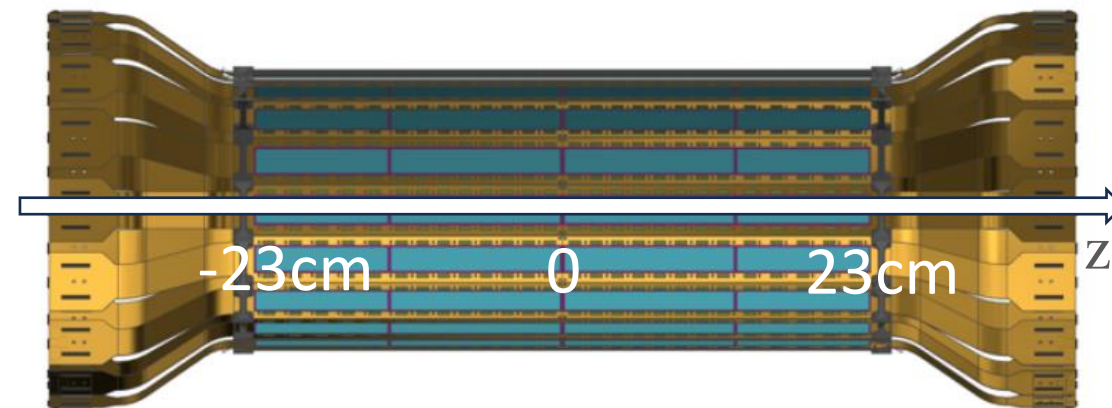
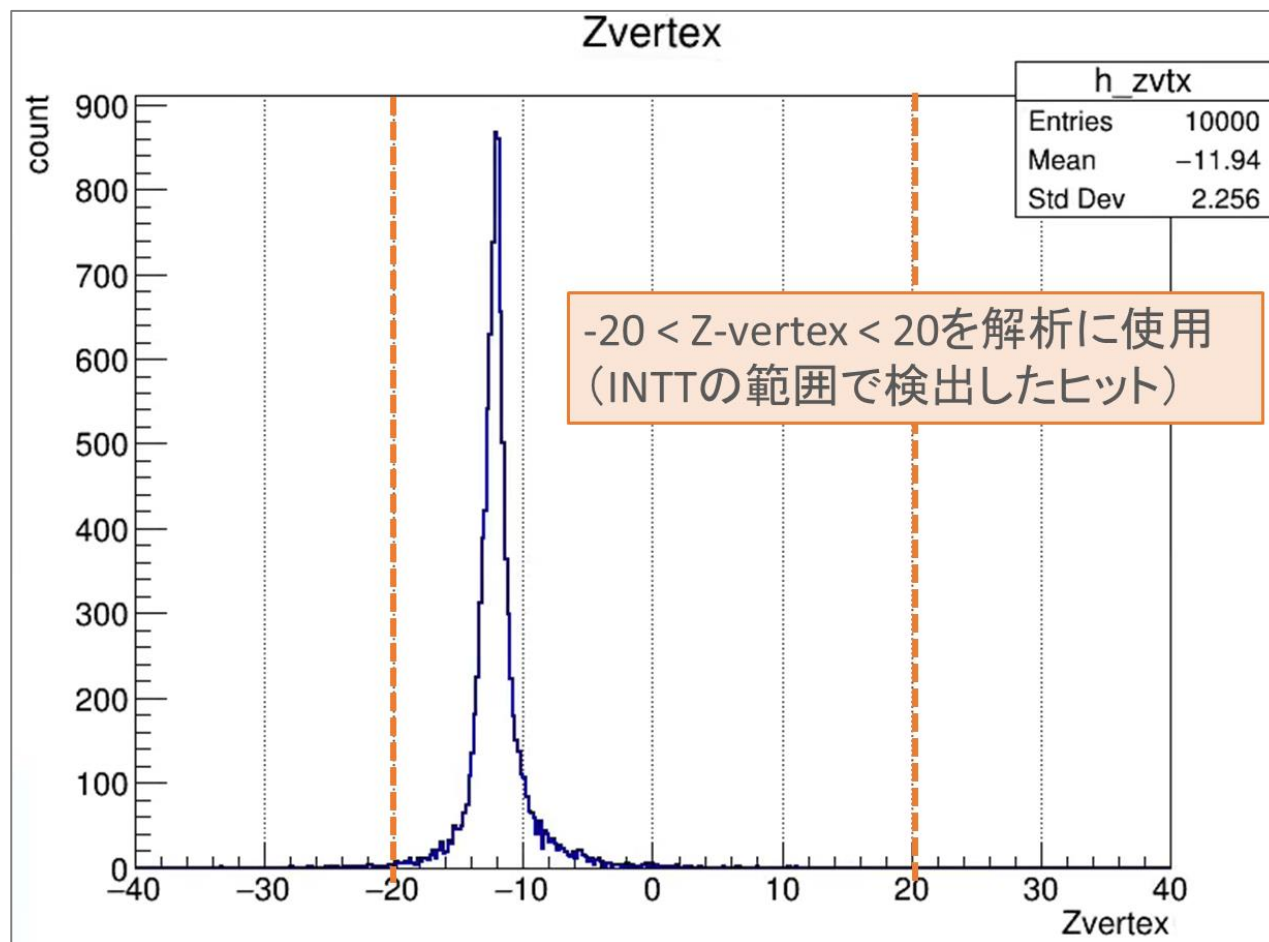
- $85^\circ < \theta < 95^\circ$ (= 垂直入射)
- クラスターサイズが1 (=1Channel通過)

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



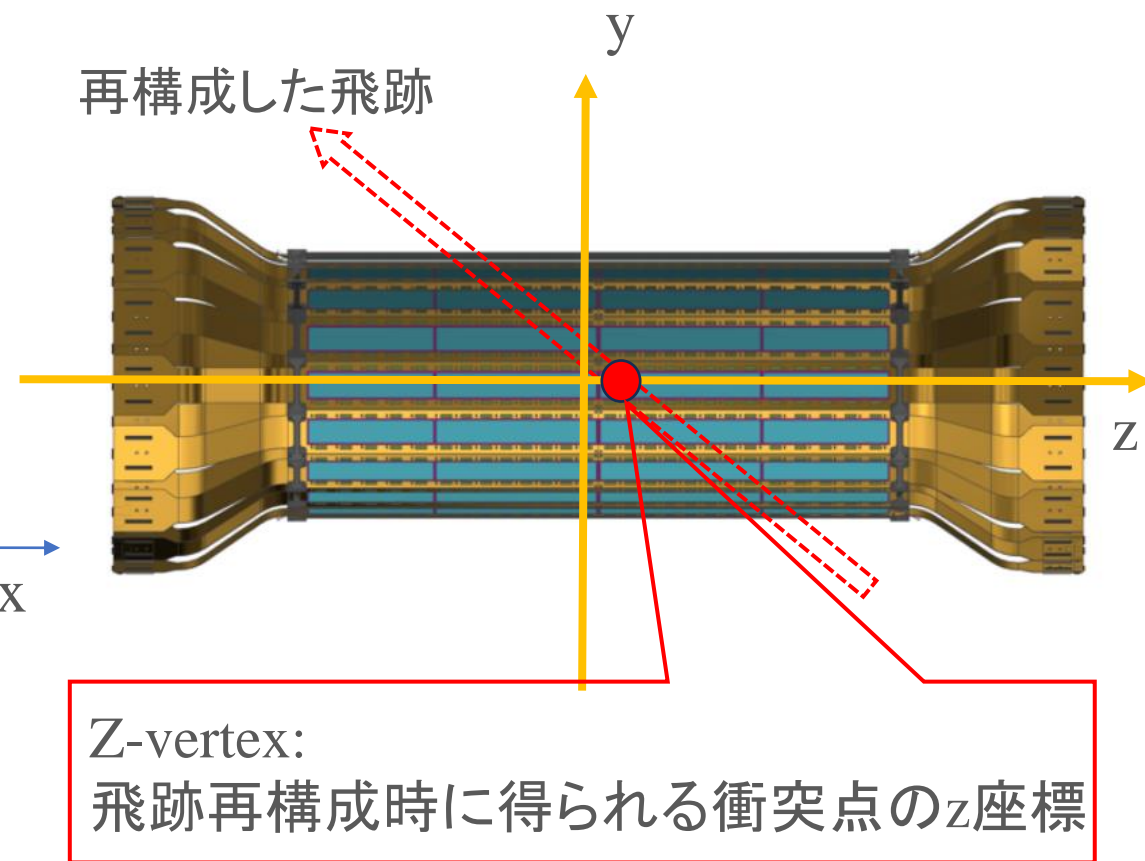
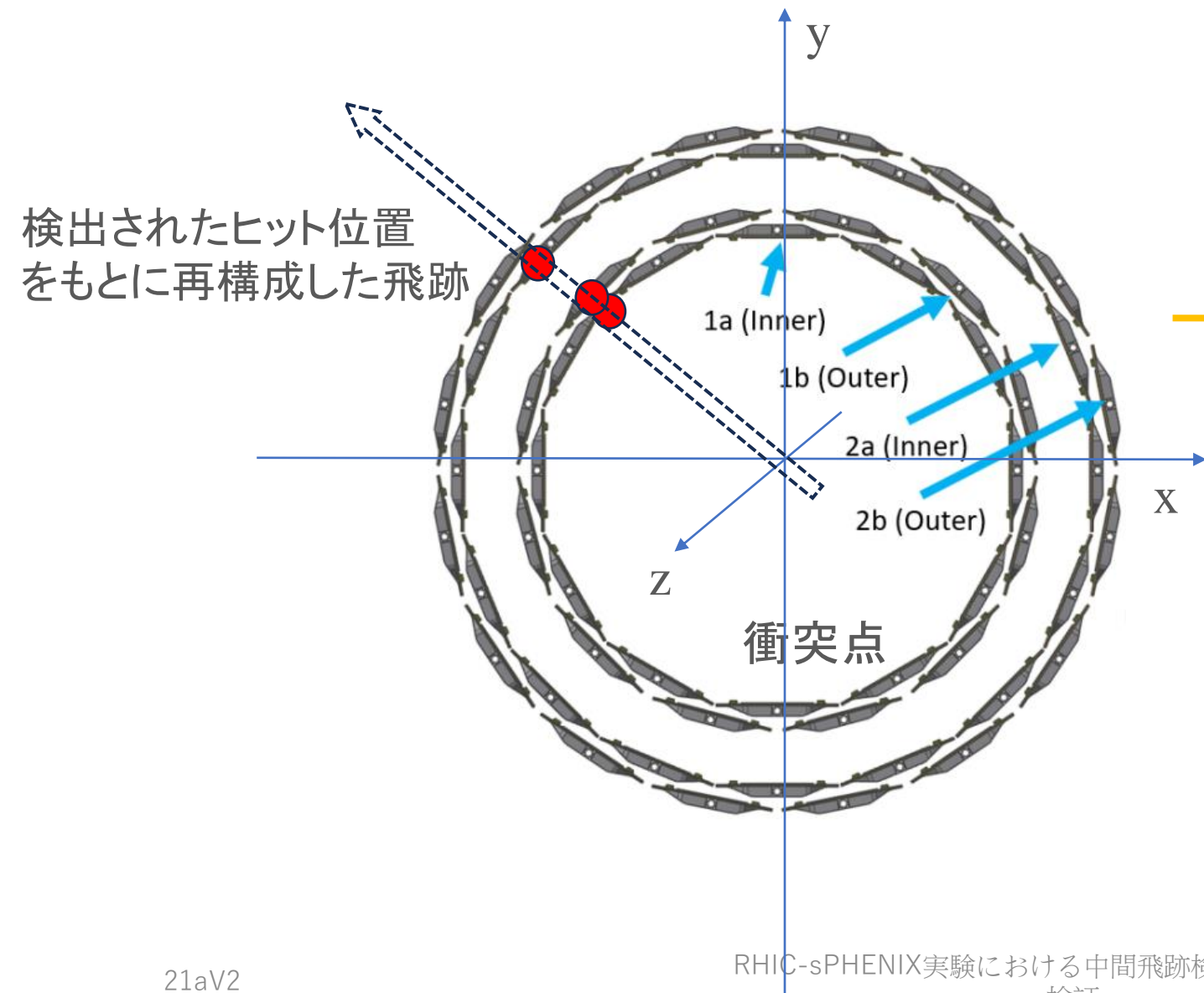
INTTから非常に離れた位置でヒットが測定されることがあり、取り除く必要がある。

本解析では、

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

を選択した。

Z-vertex

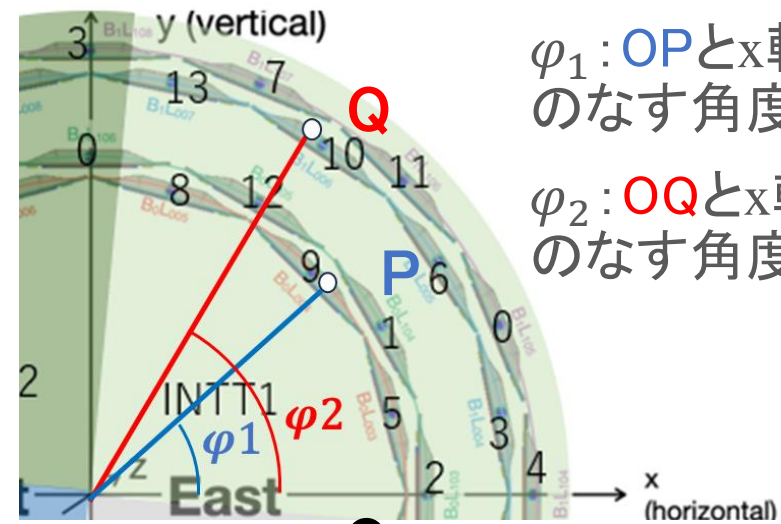


Tracking選定

4. 角度 φ の選定

粒子がINTTの内層→外層へ通過

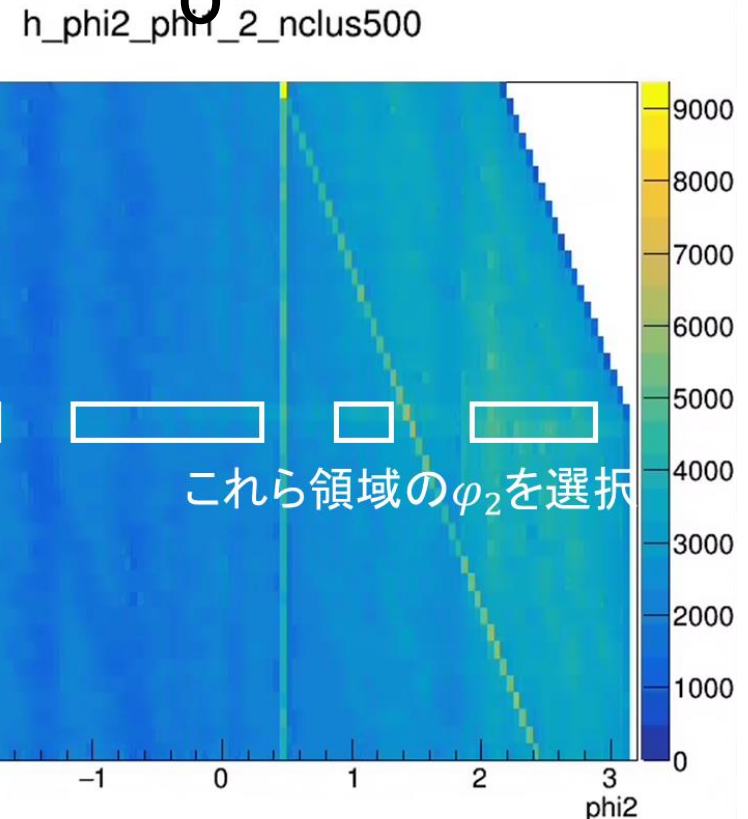
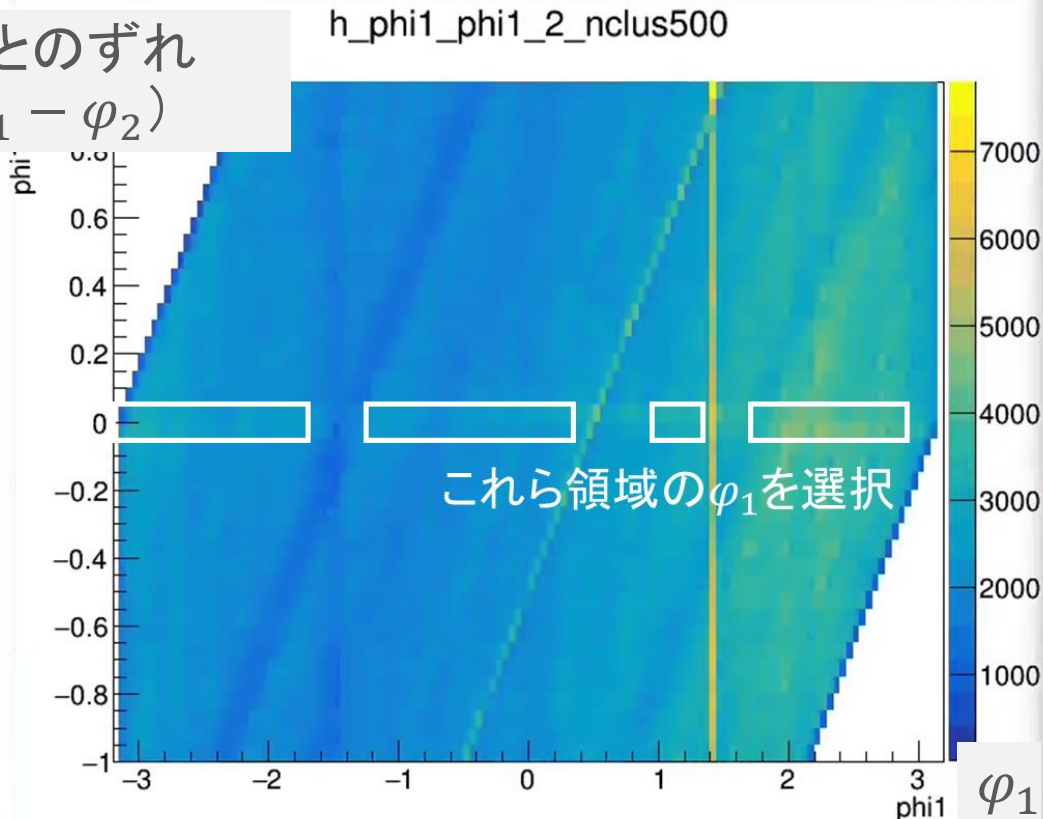
$$\Leftrightarrow \varphi_1 = \varphi_2 \quad (\varphi_1 - \varphi_2 = 0)$$



φ_1 : OPとx軸の正方向のなす角度

φ_2 : OQとx軸の正方向のなす角度

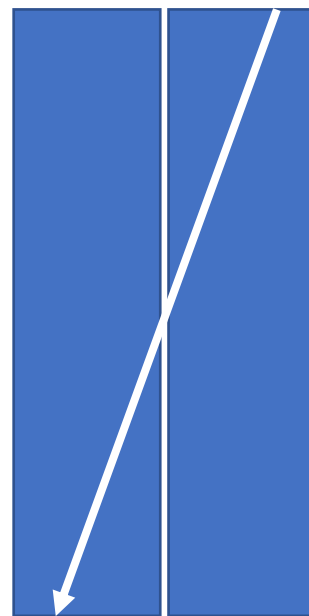
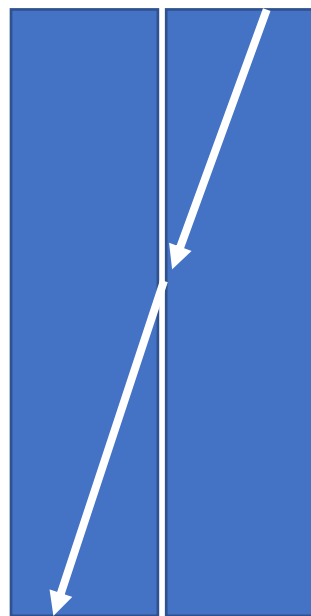
φ_2 とのずれ
($\varphi_1 - \varphi_2$)



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



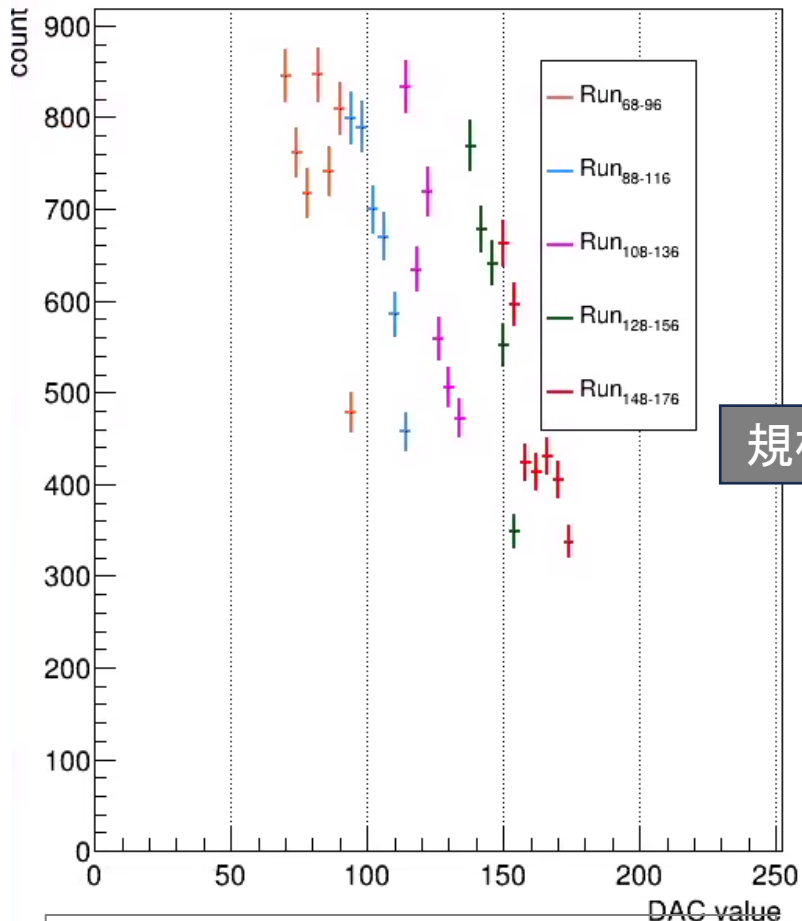
DAC値

76 84

160 (= 76 + 84)

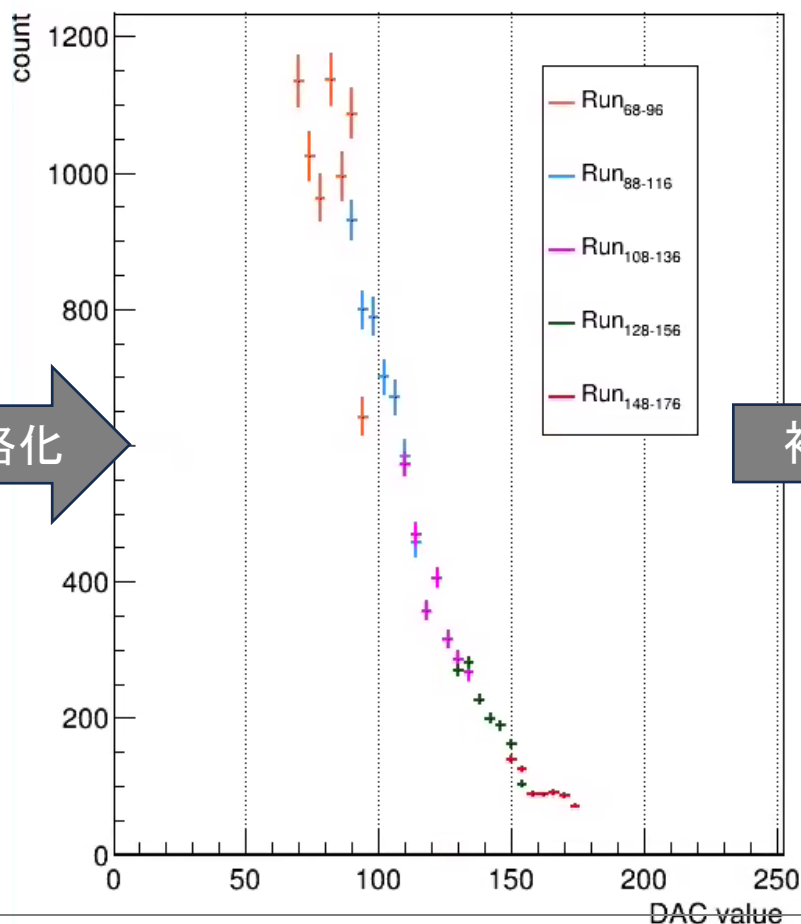
ADC分布の導出

h_adc_inner_nclus500_theta90_size1_z20_phi



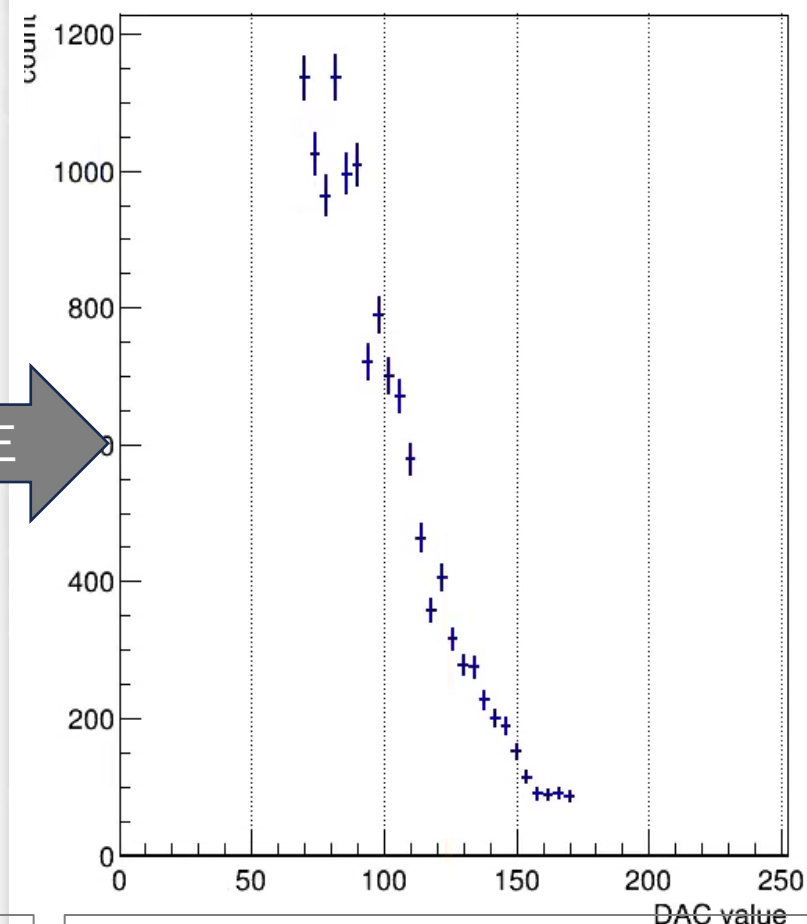
規格化

h_adc_inner_nclus500_theta90_size1_z20_phi



補正

h_adc_inner_nclus_theta90_size1_z20_phi



5個のRunデータを用いて
ADC分布を作成し、重ね書き

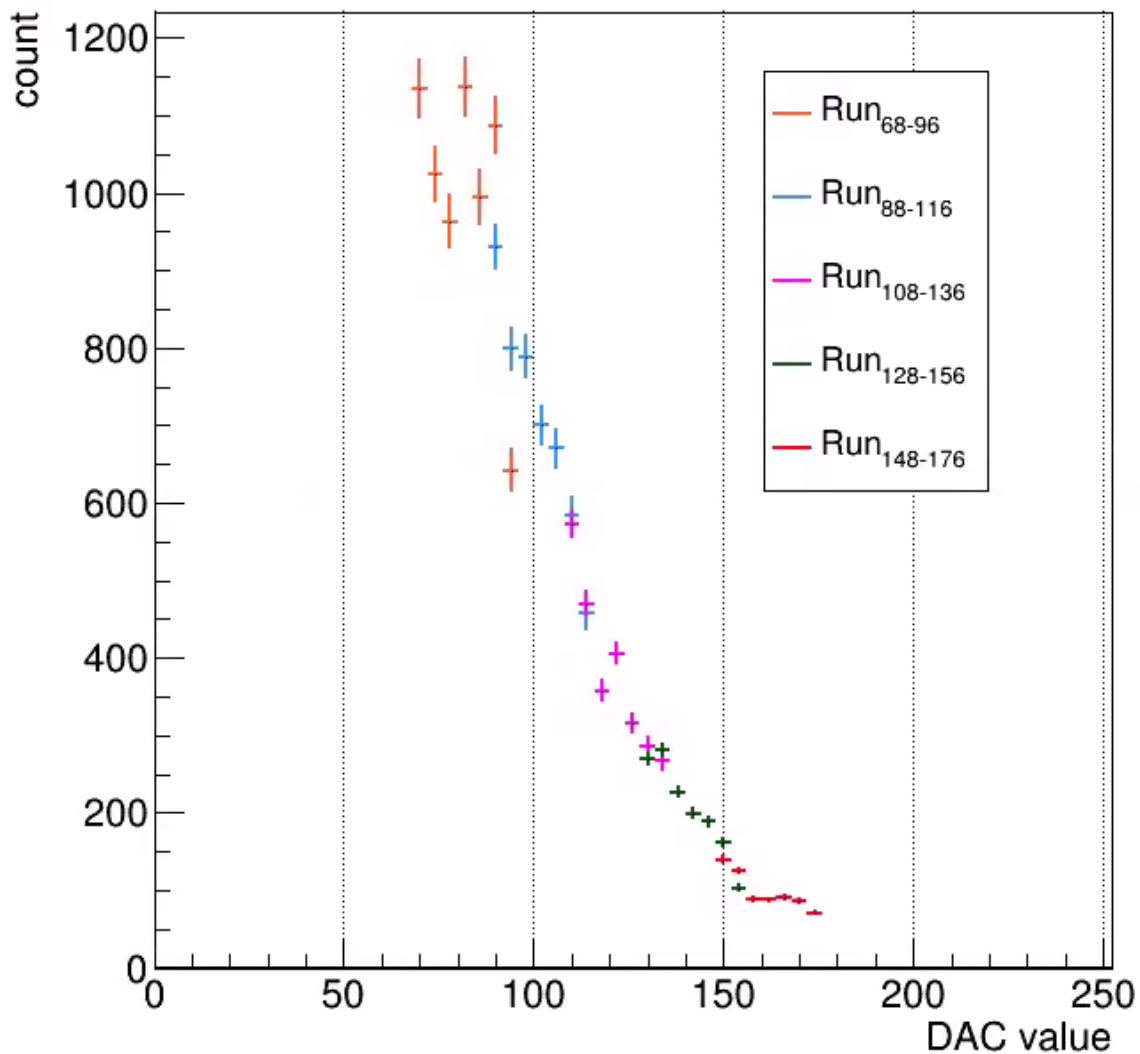
重複する2ビンのカウント数で規格化
(滑らかに接続するため)

重複する各ビンの平均補正で
1つのADC分布にした

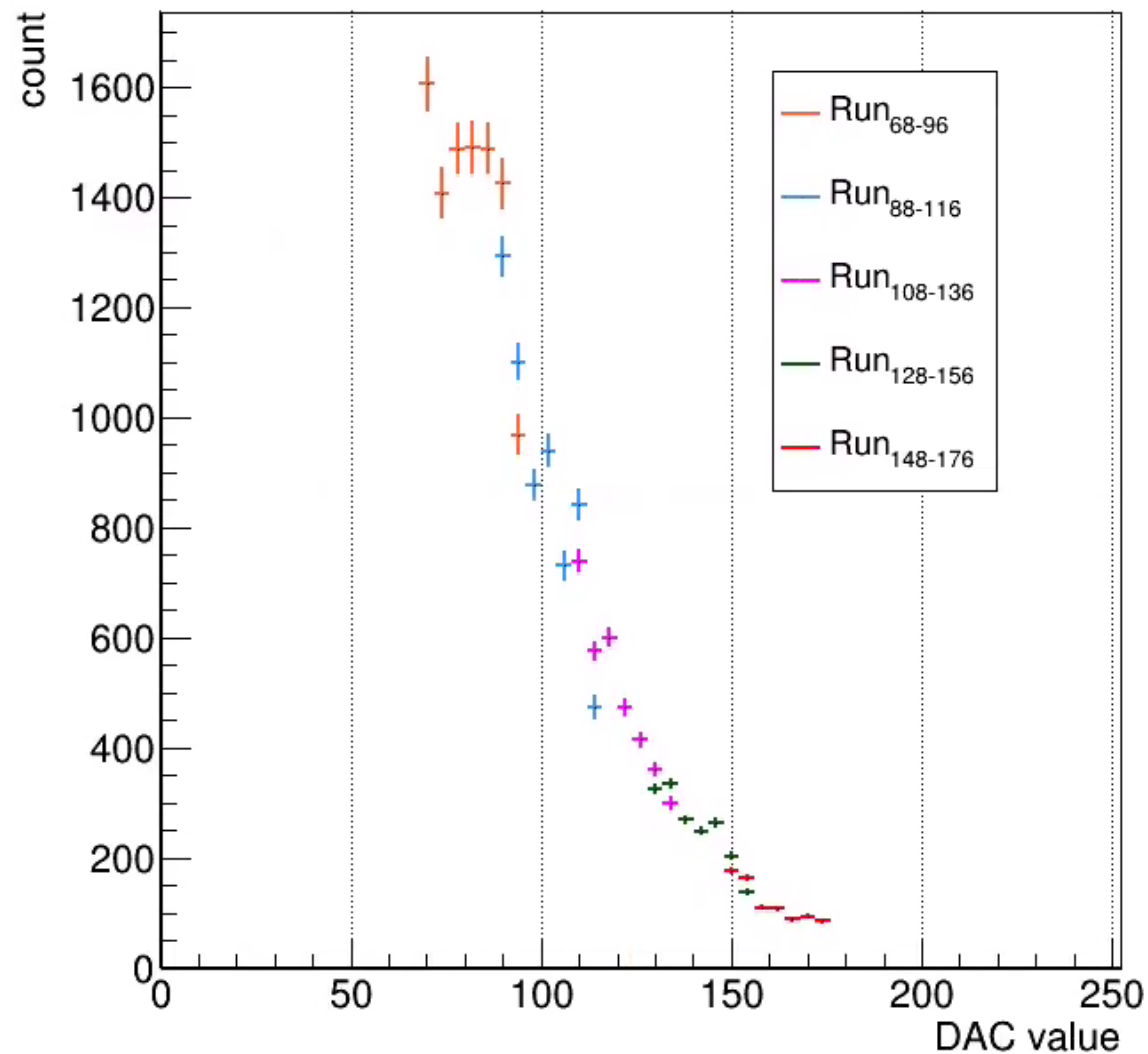
内層/外層における、非Hot領域のADC分布

merged_file/0205/AnaTutorial_run%d.root (10K event)
規格化(重複ビンのエントリー数)

h_adc_inner_nclus500_theta90_size1_z20_phi



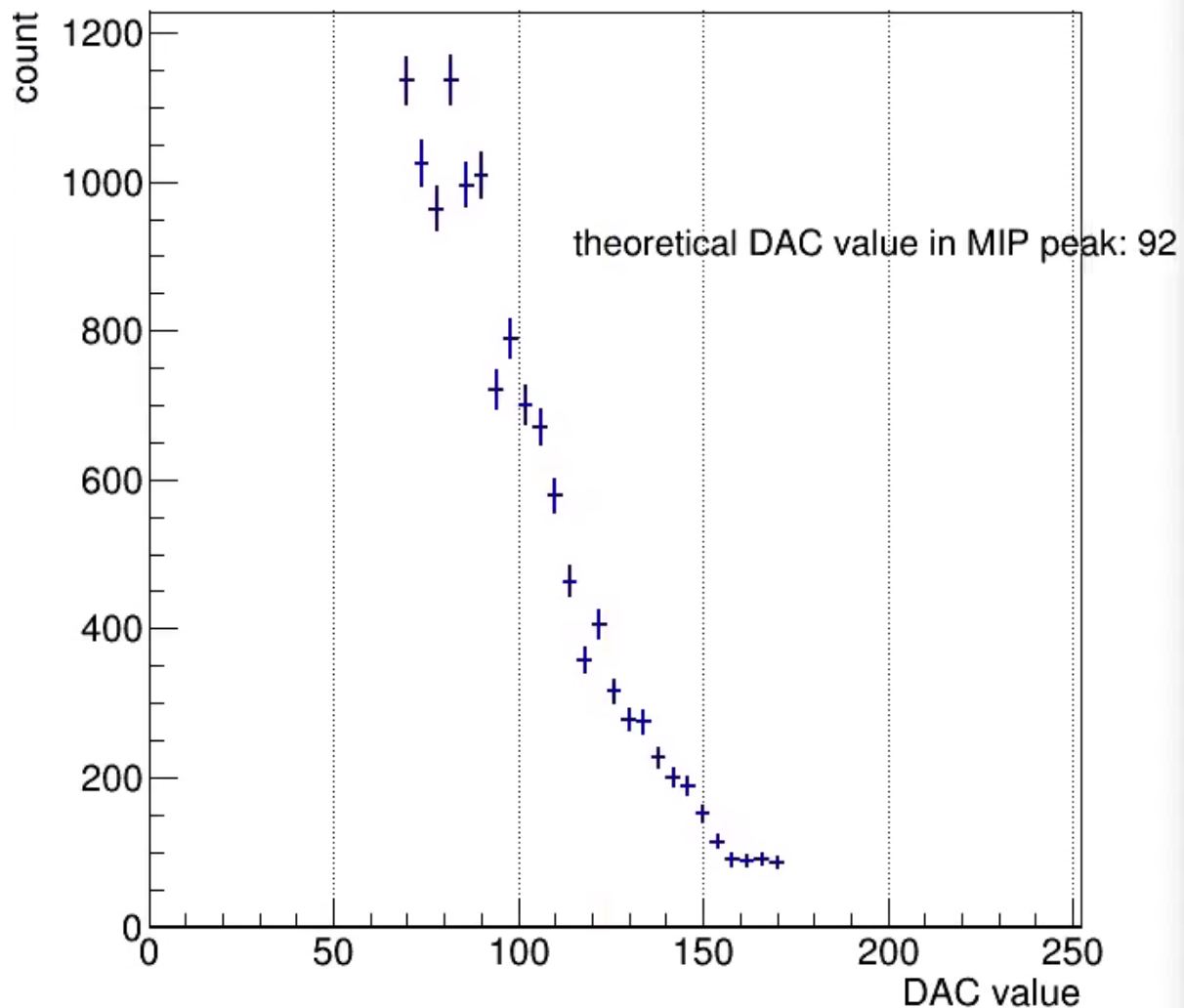
h_adc_outer_nclus500_theta90_size1_z20_phi



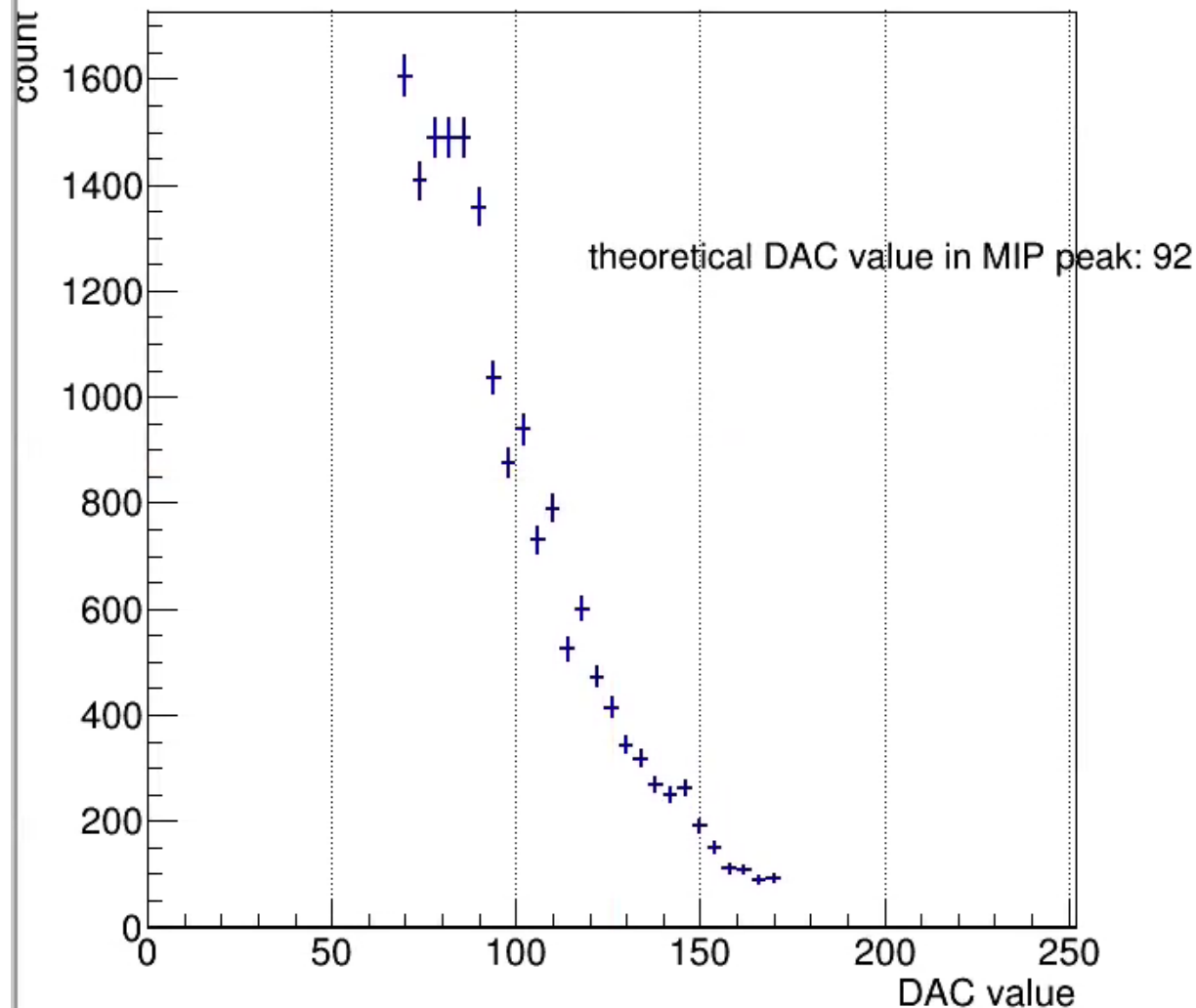
内層/外層における、非Hot領域のADC分布

merged_file/0205/AnaTutorial_run%d.root (10K event)
規格化(重複ビンのエントリー数)

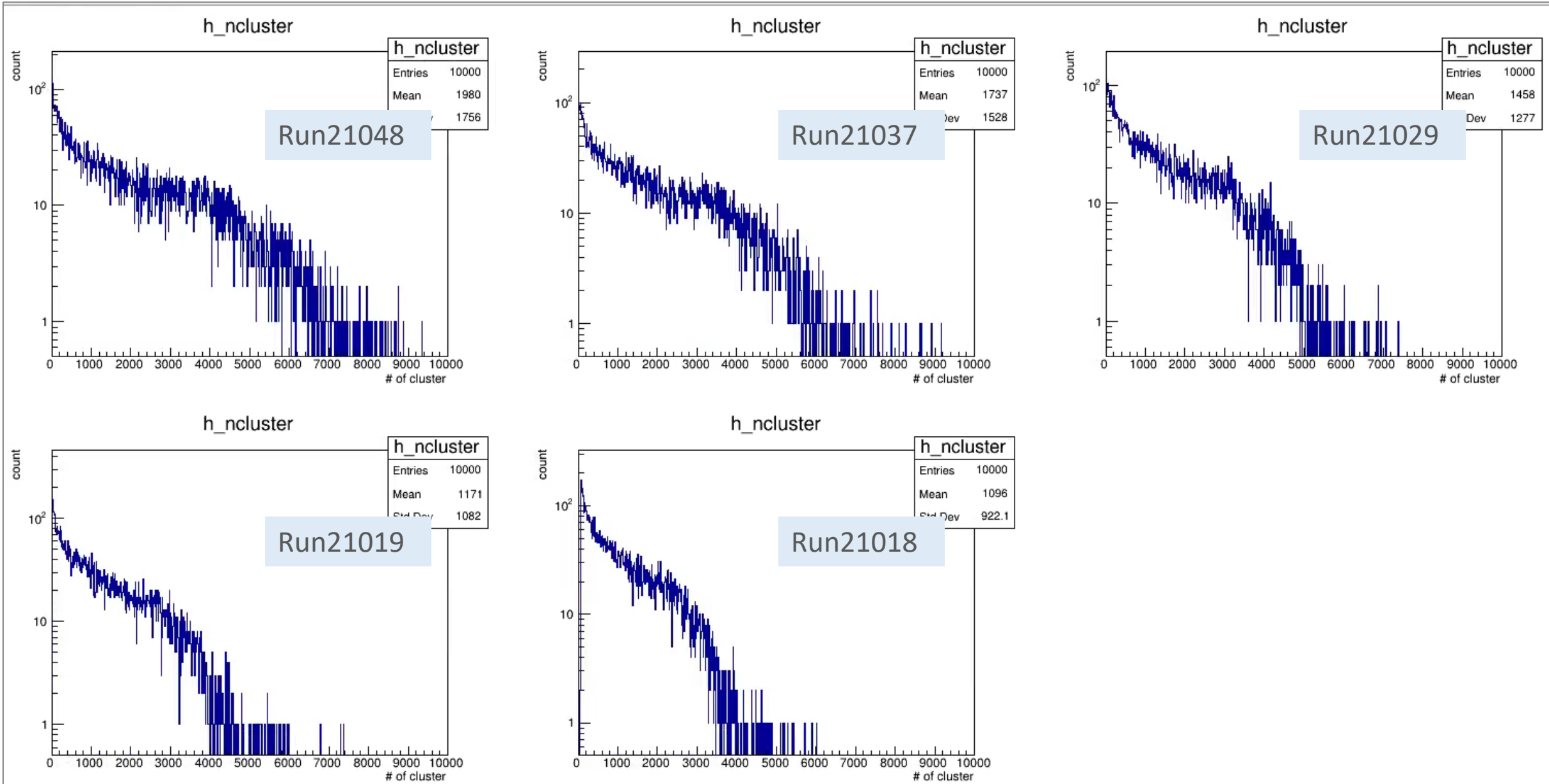
h_adc_inner_nclus_theta90_size1_z20_phi



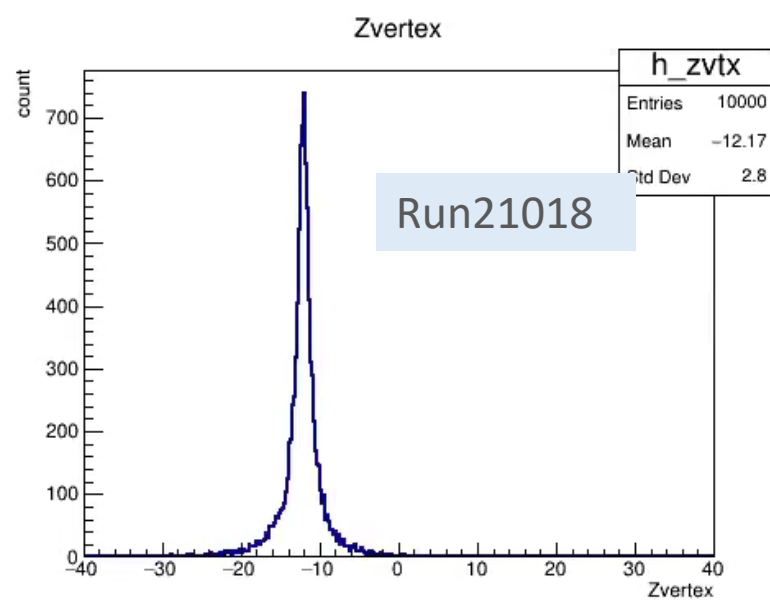
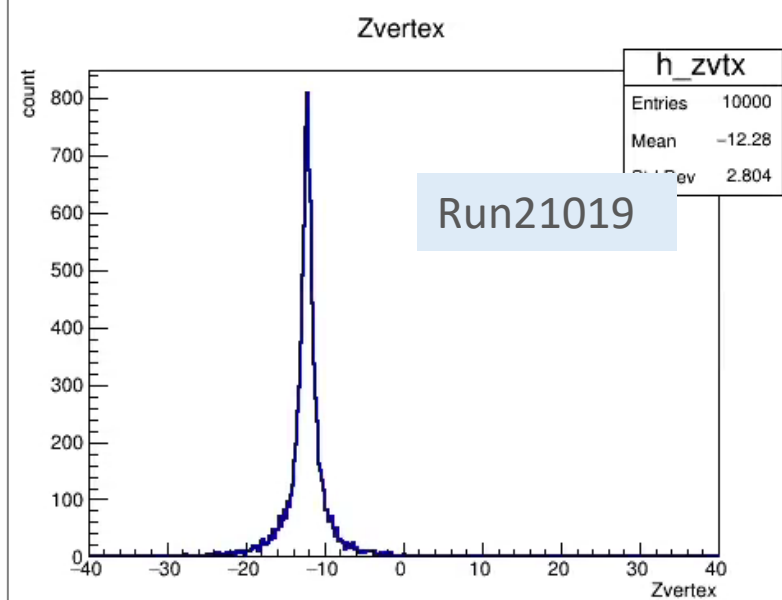
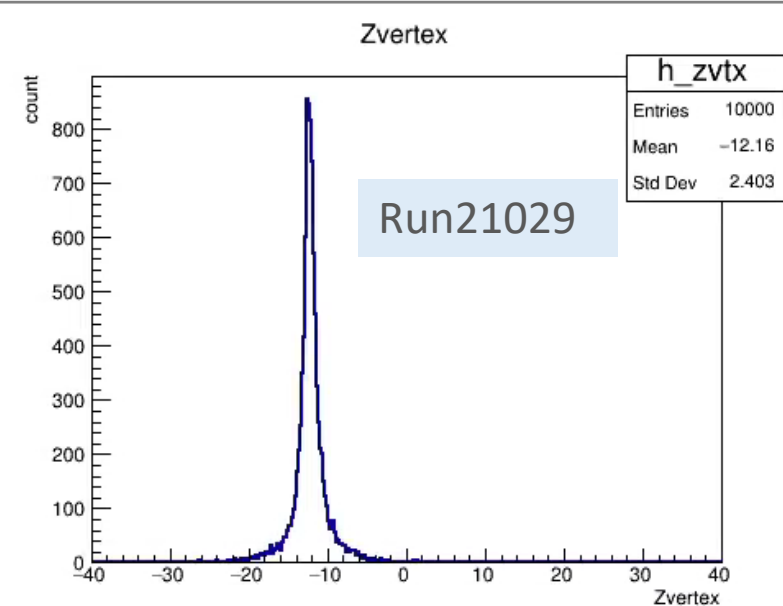
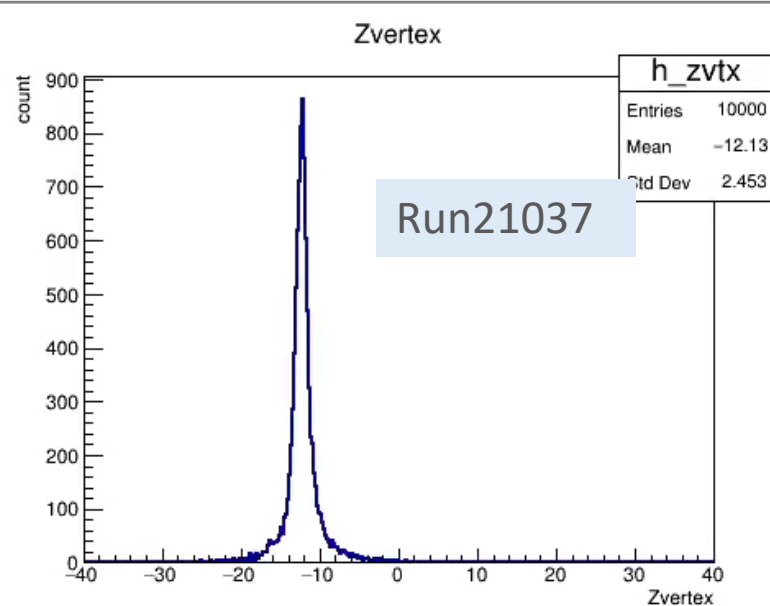
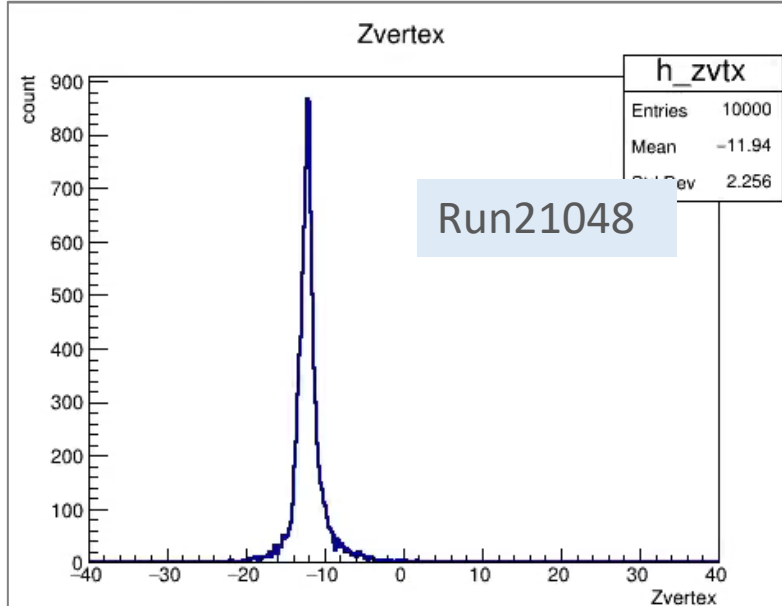
h_adc_outer_nclus_theta90_size1_z20_phi



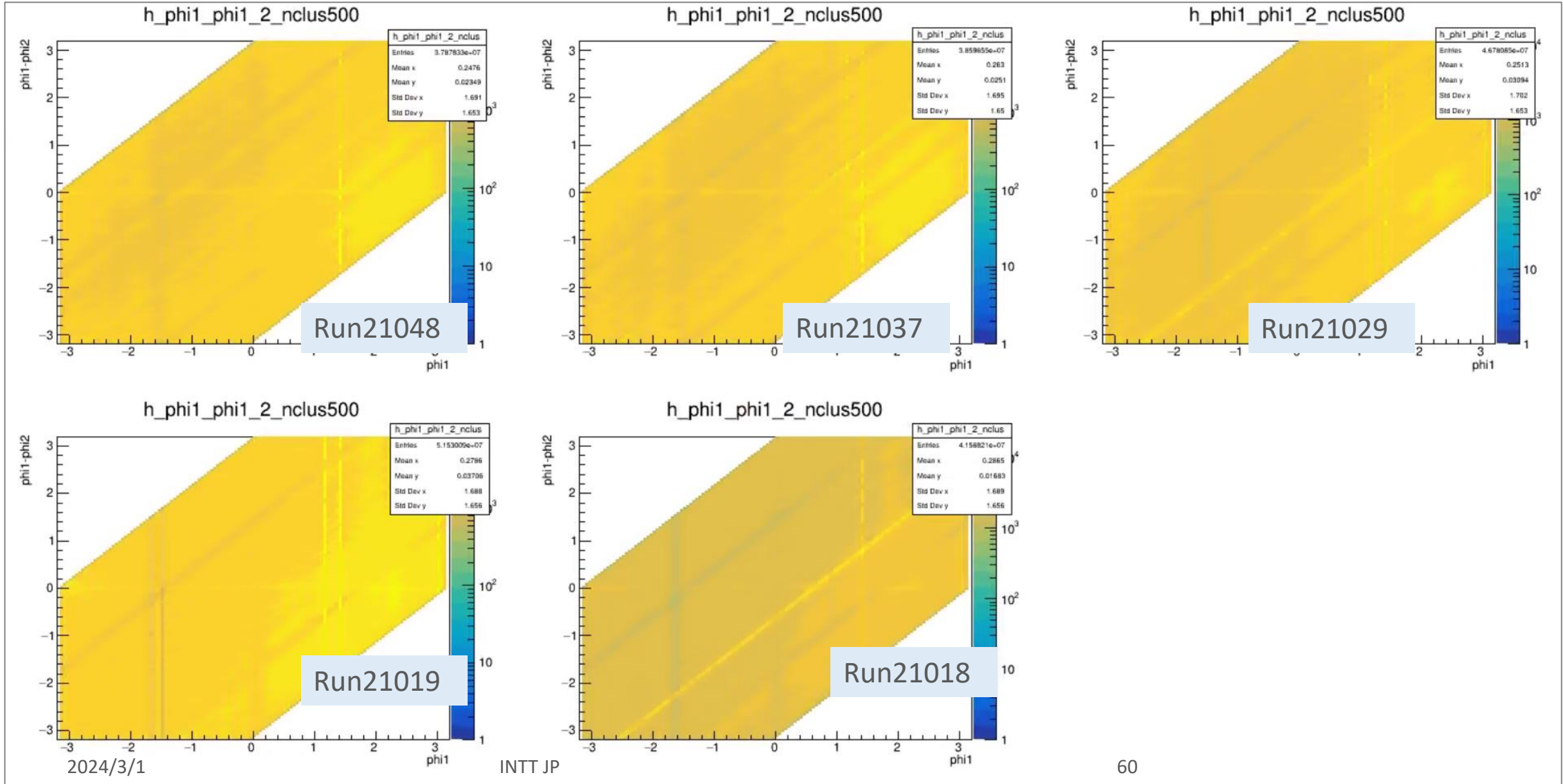
クラスター数分布



Z-vertex分布



$\varphi_1: \varphi_1 - \varphi_2$ 相関



$\varphi_2: \varphi_1 - \varphi_2$ 相関

