

宇宙線を用いたsPHENIX-IN TT検出器の エネルギー損失測定

奈良女子大学
理学部
高エネルギー物理学研究室
B4 甘林
2024/03/11

2024年卒業研究発表会



目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 測定と解析方法
4. 測定結果
5. まとめと今後の課題

1. 研究背景

研究背景：RHIC-sPHENIX実験

sPHENIX実験

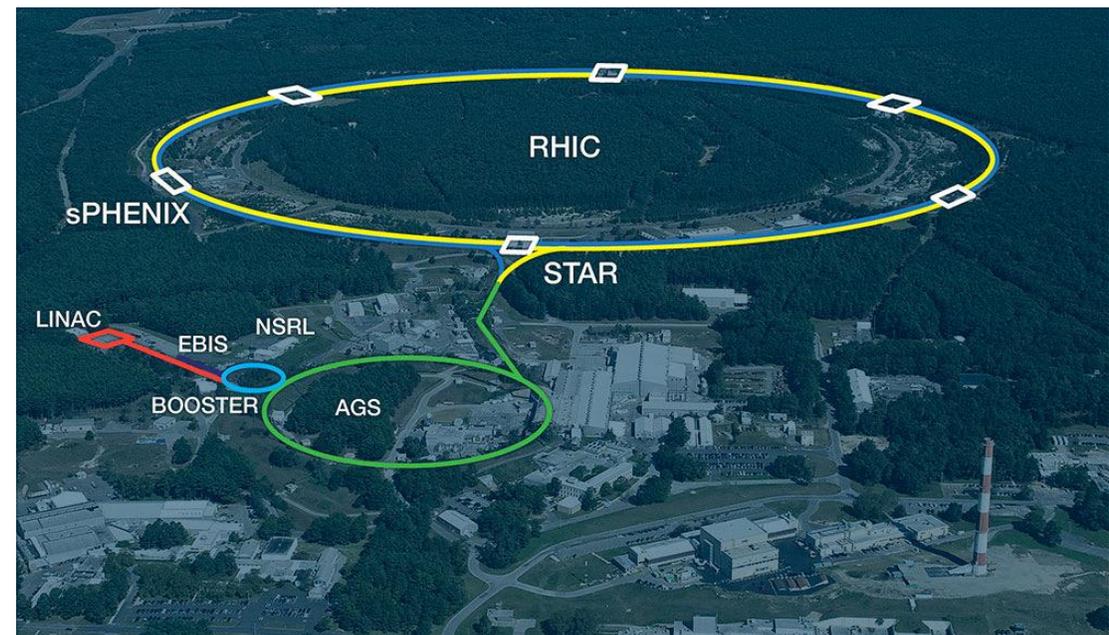
- 米国ブルックヘブン国立研究所BNL
- 重イオン衝突型加速器RHICを用いた実験
- 2023年からQGP、スピン物理の実験を行い、PHENIXの後継実験

実験目的:

- 衝突で生じるJet現象やUpsilon粒子を測定し、QGPの性質を解明する

衝突原子核種

- 金原子核対 (200GeV)、陽子対 (200GeV)



研究背景 中間飛跡検出器INTT

INTT: Intermediate Silicon Strip Track detector of the Tracking system

- sPHENIX実験の3つの飛跡検出器のうちの1つ
- INTTが56個のラダーで構成され、樽状の2層構造です
- 位置分解能と時間分解能が高く、飛跡再構成において重要な役割を果たす

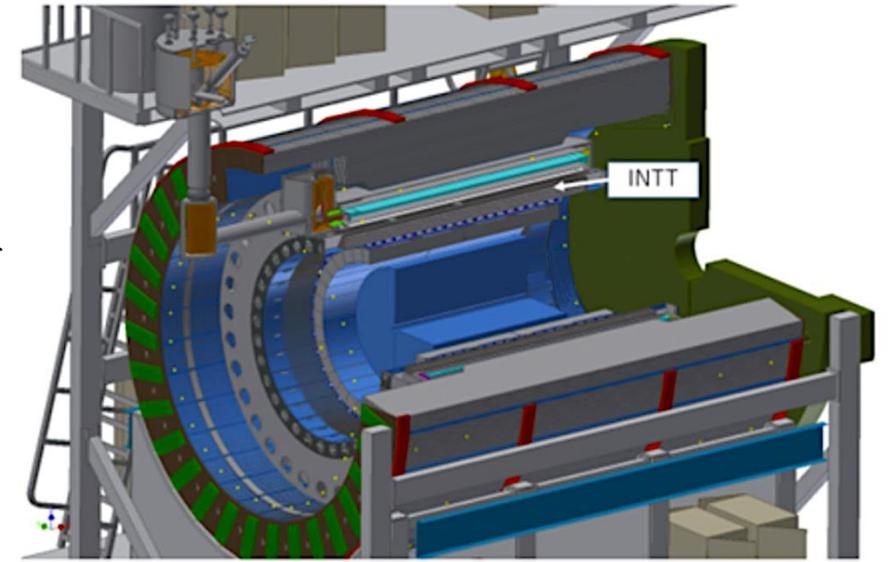


図1. sPHENIX 実験で用いられる飛跡検出器

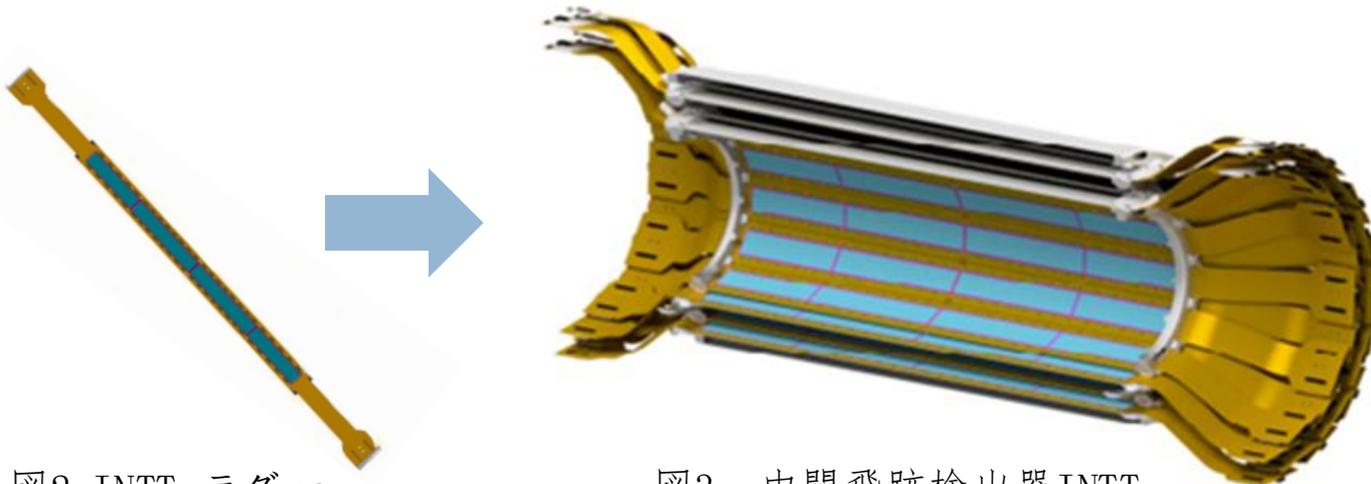


図2. INTT ラダー

図3. 中間飛跡検出器INTT

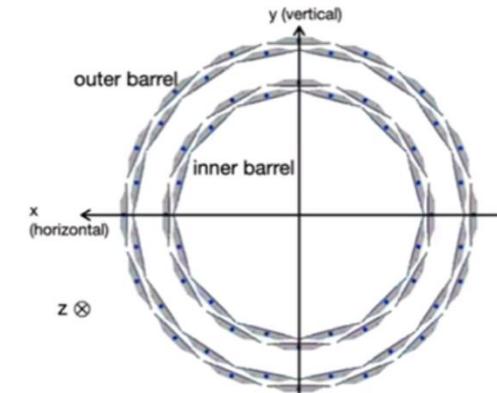


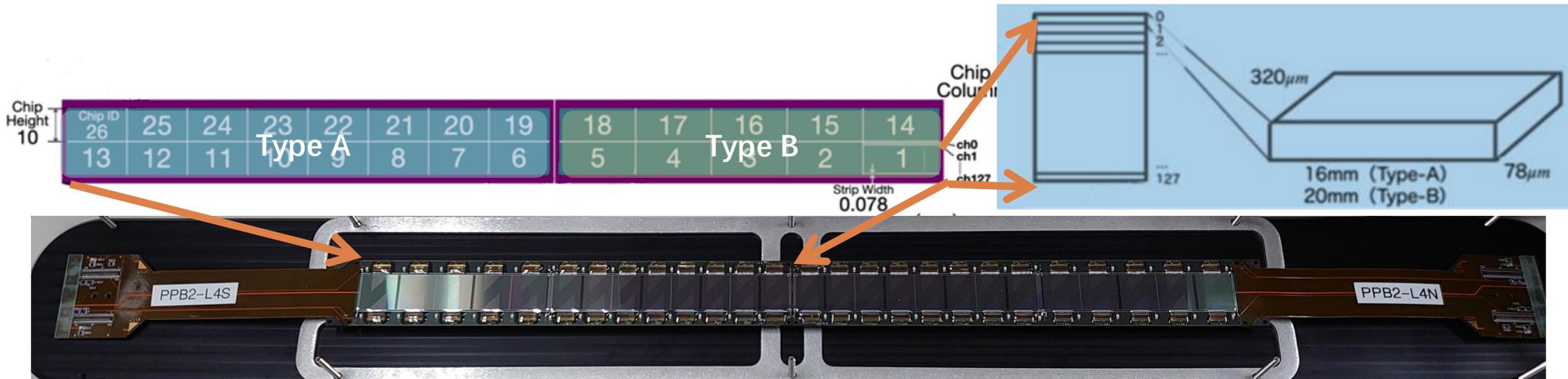
図4. INTT のビーム軸方向からの図

研究背景 INTT用シリコンセンサー

- INTTには、内層に2組(12)と外層2組(16)、合わせて56個のラダーがある
- 一つのラダーに二つのシリコンセンサーモジュールがある
- シリコンセンサーモジュールは26個のシリコンセンサーがあり、Type-A(16個), Type-B(10個)に分かれている
- 一つのシリコンセンサーが128個シリコンストリップで構成されている

センサーの厚み: $320\mu\text{m}$

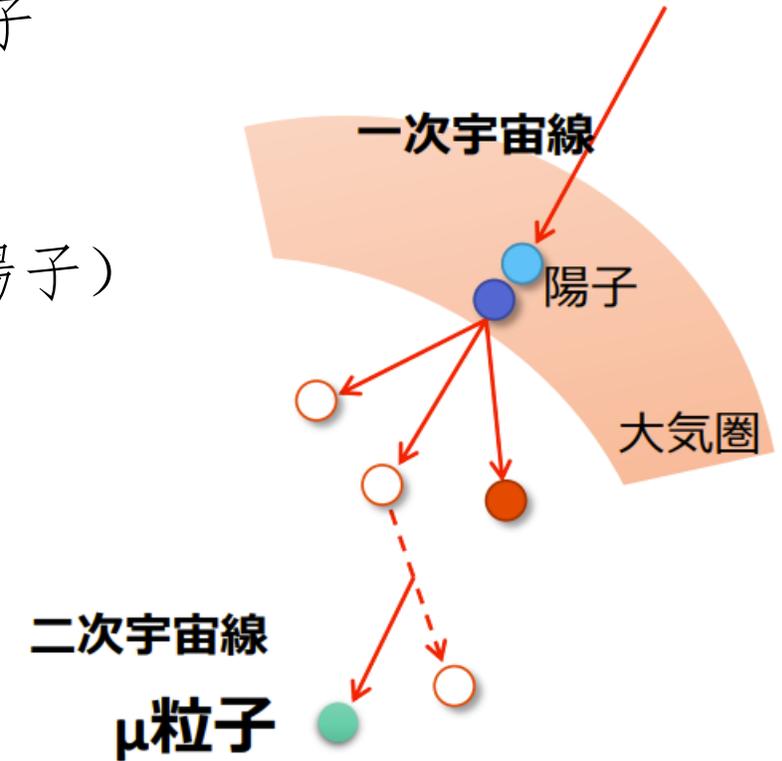
(1ストリップの大きさ: 16mm (Type-A), 20mm (Type-B) \times $78\mu\text{m}$ \times $320\mu\text{m}$)



研究背景 宇宙線について

- ・宇宙線とは宇宙空間を高エネルギーで飛び回る小さな粒子
- ・地球の大気に突入する前の宇宙線：一次宇宙線（90%が陽子）
- ・地表：二次宇宙線（75%が μ 粒子（ミューオン））
- ・ μ 粒子

地上で測定できる最大エネルギーを持つ粒子



なぜ宇宙線を使いますか？

- 宇宙線は高エネルギーの荷電粒子や光子などの粒子から成り、地上でも測定できる
- これらの粒子が物質と相互作用すると、荷電粒子は電離や励起を引き起こし、光子は電磁相互作用を介して粒子を生成する
- これらの相互作用は検出器によって記録され、その情報を用いて原始粒子の飛跡を再構成することが可能です
- 加速器実験や宇宙観測などの手段によって生成された高エネルギー粒子の性質や振る舞いを理解するために、その飛跡を正確に再構成する必要がある

2. 研究目的

研究目的

宇宙線がINTT検出器を通過する時、入射角度によって、通過距離が変わる

通過距離によって、エネルギー損失量も変わる



ADCの値と通過距離の関係を調べる

3. 測定と解析方法

三、測定と解析方法

本研究ではINTTが磁場なしで2023年8月-9月の間に収集した宇宙線データを用いて解析する

1) INTTを直線的に通り抜ける宇宙線の飛跡を再構成する

- ADCの値
- ヒットをクラスタリングする
- 宇宙線飛跡の再構成
- ホットチャンネルを見つけて、カットする
- 飛跡の選定

2) 宇宙線がINTTセンサーを通過する距離LABを計算する

- 入射角度 α と ω を求める ($\cos(\omega)$ 、 $\sin(\alpha)$)
- センサー方向ベクトルを求める方法

3) 通過距離とADCの値の関係を調べる

- 全体のADCの値と通過距離のヒストグラム
- 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを見る

測定方法 ADCの値について

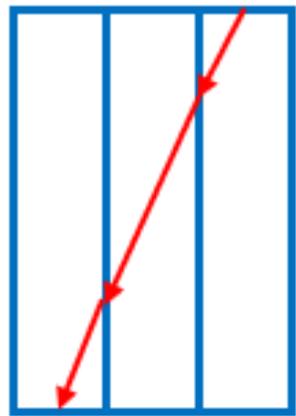
本研究ではエネルギー損失量に対応する量としてADCの値を記録し、解析に使う

- ADCは、アナログ信号をデジタル信号に変換する電子回路のこと
- ADCの値とは、アナログ信号の強度を一定のビット数で表現する値のこと
- ADCの値が大きいほど、エネルギー損失量が大きい

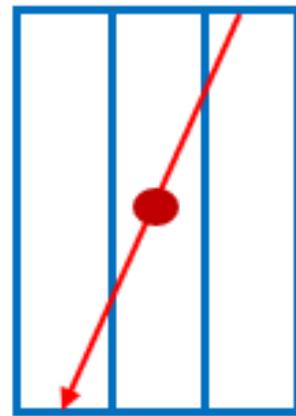
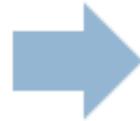
測定方法 ヒットをクラスタリングする

・クラスタリング

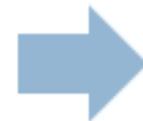
宇宙線が同じタイミングで、同じラダー内の複数シリコンストリップ(チャンネル)を通過したヒットを一つのクラスタとして扱っている



3hit



1クラスタ



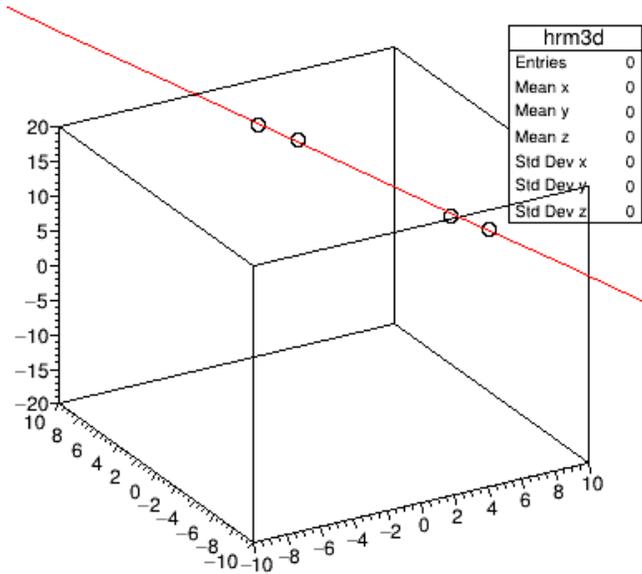
- ・通過したhitの数をクラスタのサイズと呼ばれる

- ・通過したヒットのADCを足し合わせて、ADCの値を記録する

【センサー断面図】

測定方法 宇宙線飛跡の再構成

良い実行例



• 左の図の飛跡を再構成したクラスタの座標(x , y , z)

• ADCの値

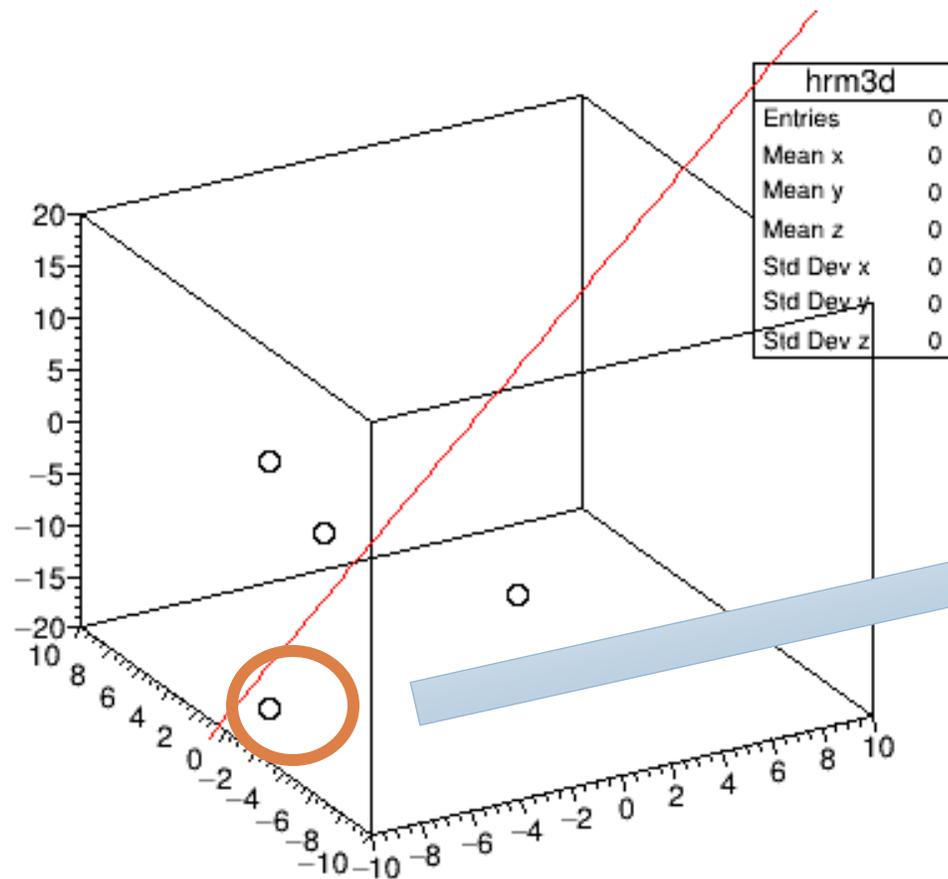
そのように知ることができる

```
intt: 250 0 4
0 xyz: 2.41322 6.79122 14.1      adc : 60
1 xyz: 3.66493 -6.80804 16.1     adc : 60
2 xyz: 1.59324 9.54906 14.1     adc : 90
3 xyz: 4.5923 -9.20142 16.1     adc : 60
```

• INTTは二層の樽状の検出器なので、宇宙線が突き抜けた場合、4クラスタがあるような宇宙線を選んで、解析に使う

• 本研究では**3~5クラスタ**のヒットを持つデータに対して、直線を仮定して飛跡を再構成する

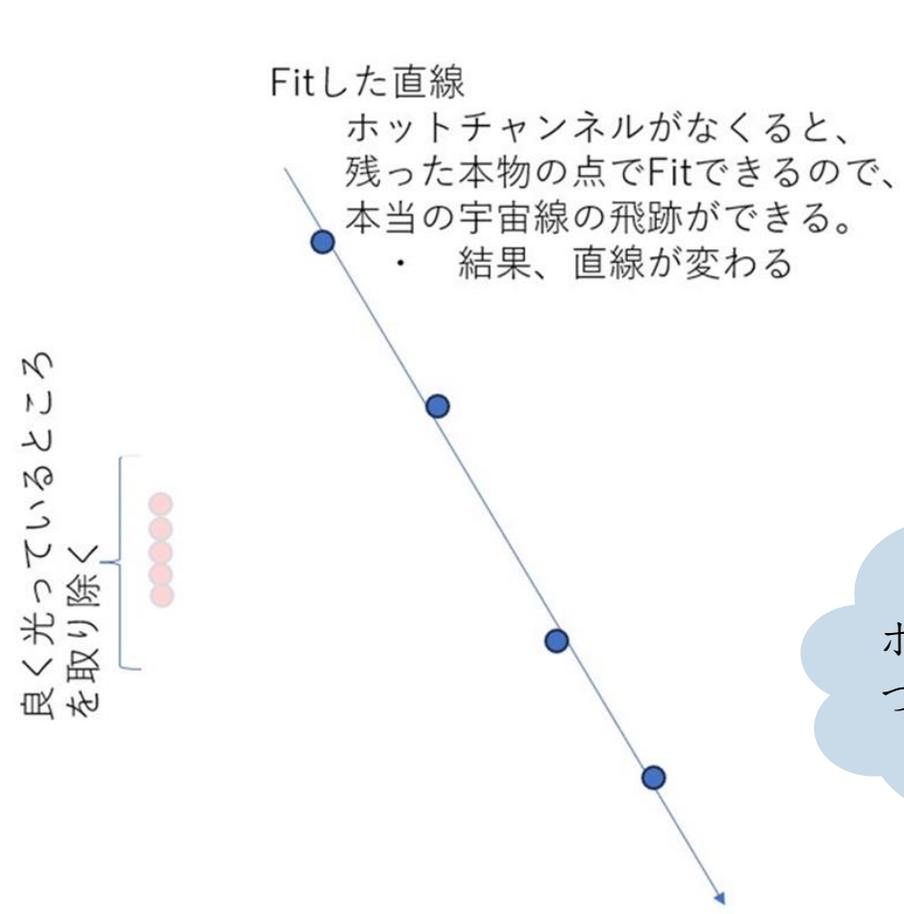
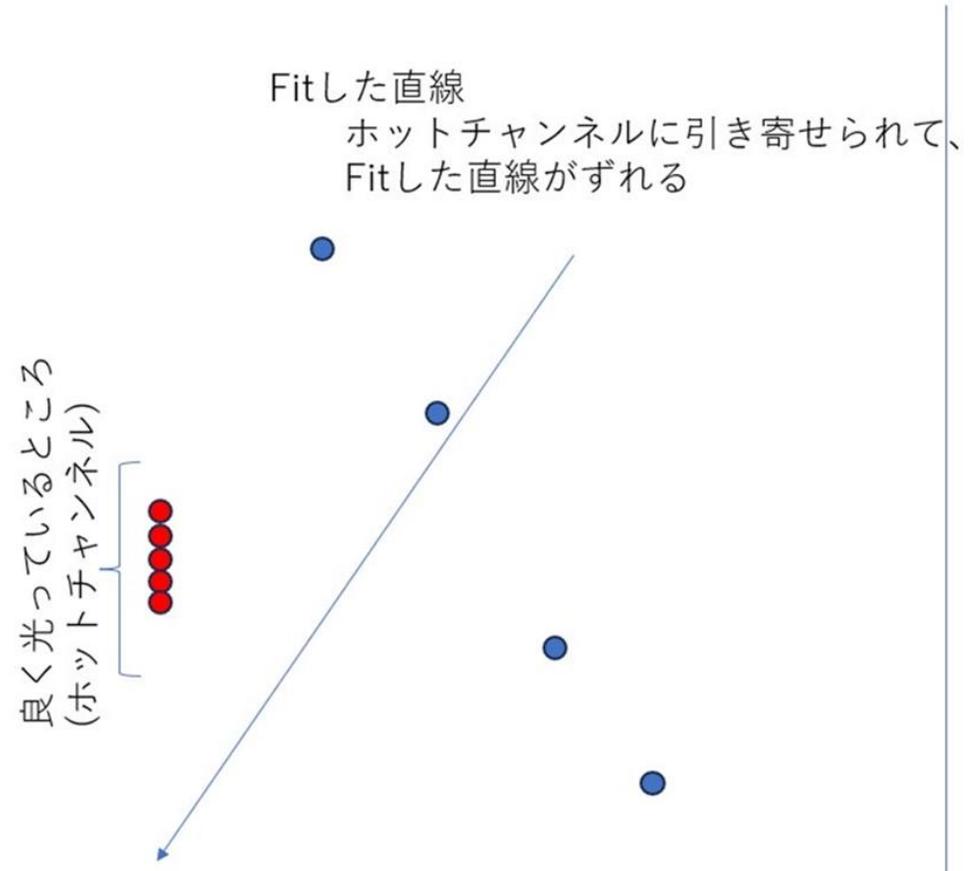
良くない実行例



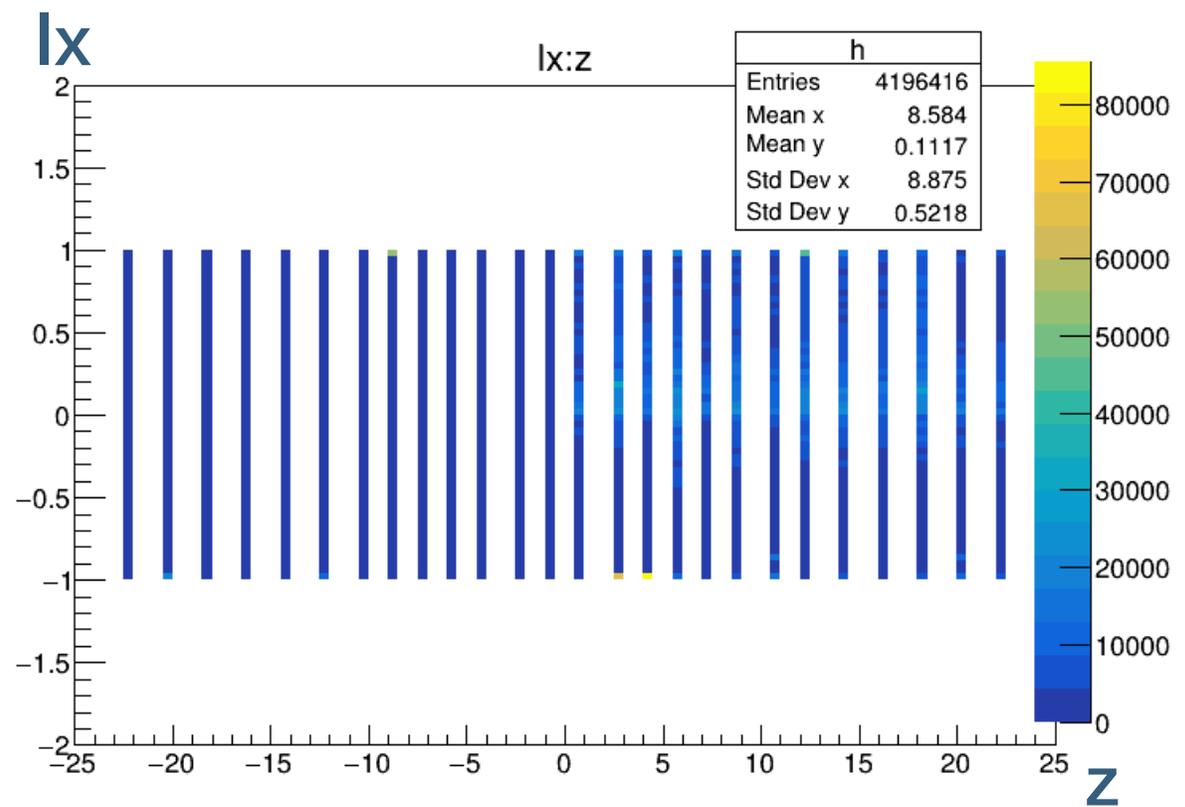
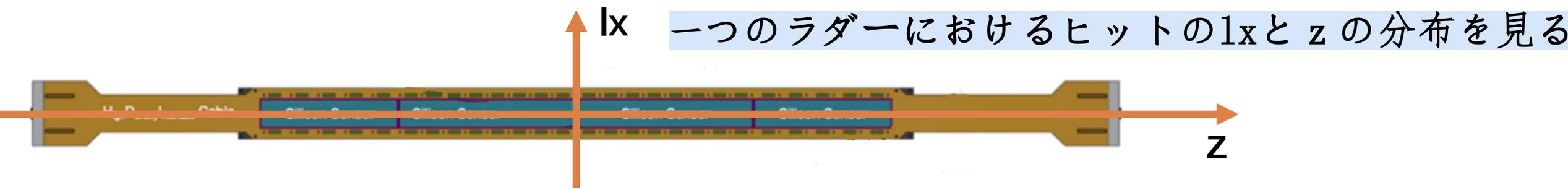
左の図から見ると、再構成した飛跡がその一つのクラスタに引き寄せられた

測定方法 宇宙線飛跡の再構成

引き寄せられた原因:



ホットチャンネルを見つけて取り除く！！

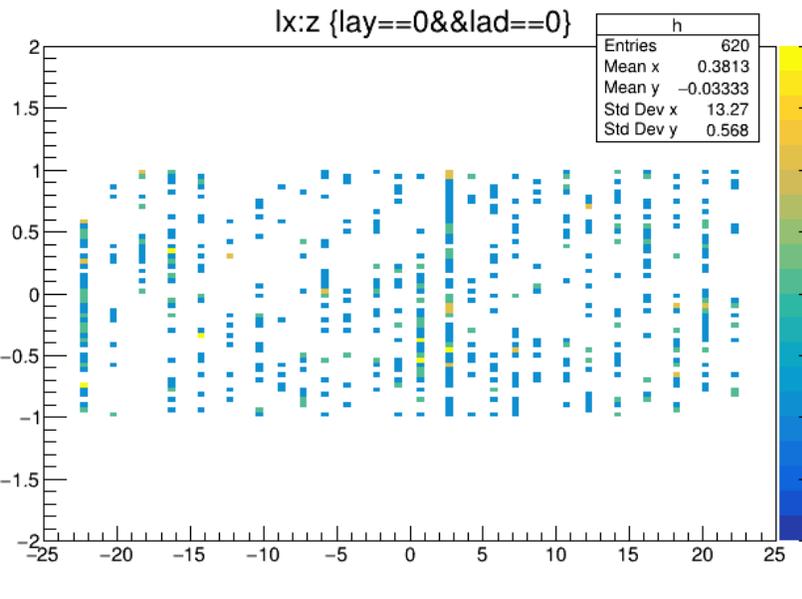


・左の図：縦軸は lx で、横軸は z で、56個のラダーにあるヒットを合わせた分布図

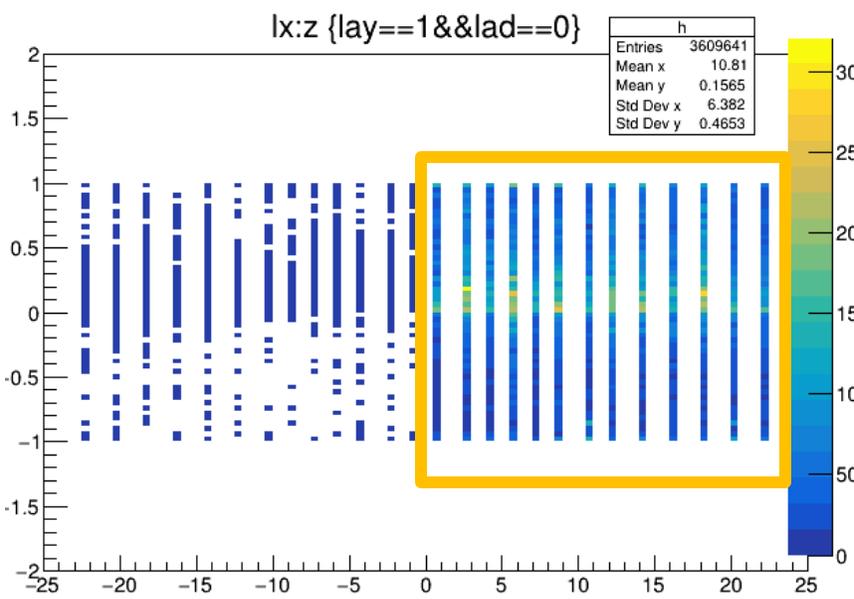
・ラダー毎に分けて、ヒット数の分布図を作れば、ホットチャンネルを見つけ出すことが可能

測定方法 ホットチャンネルをカットする方法

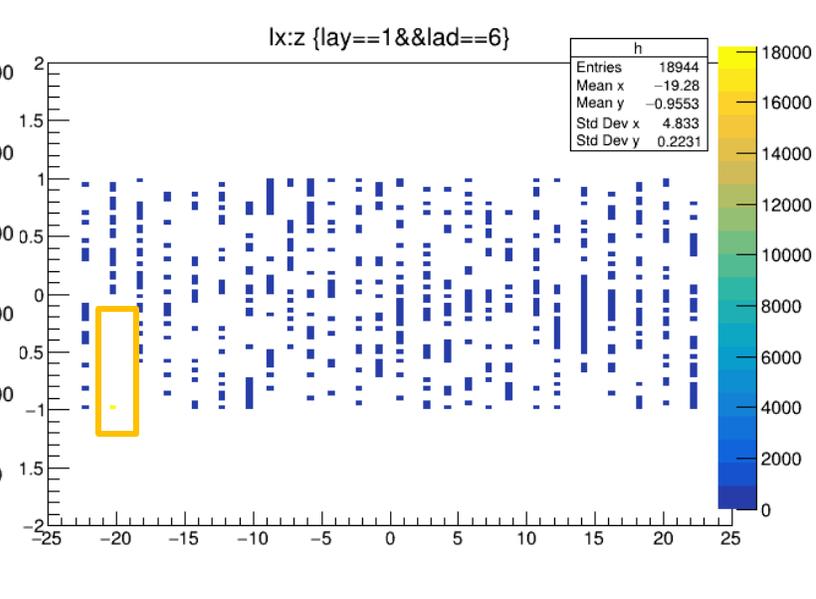
例、ホットチャンネルがない



例、異常: ホットチャンネルがあり



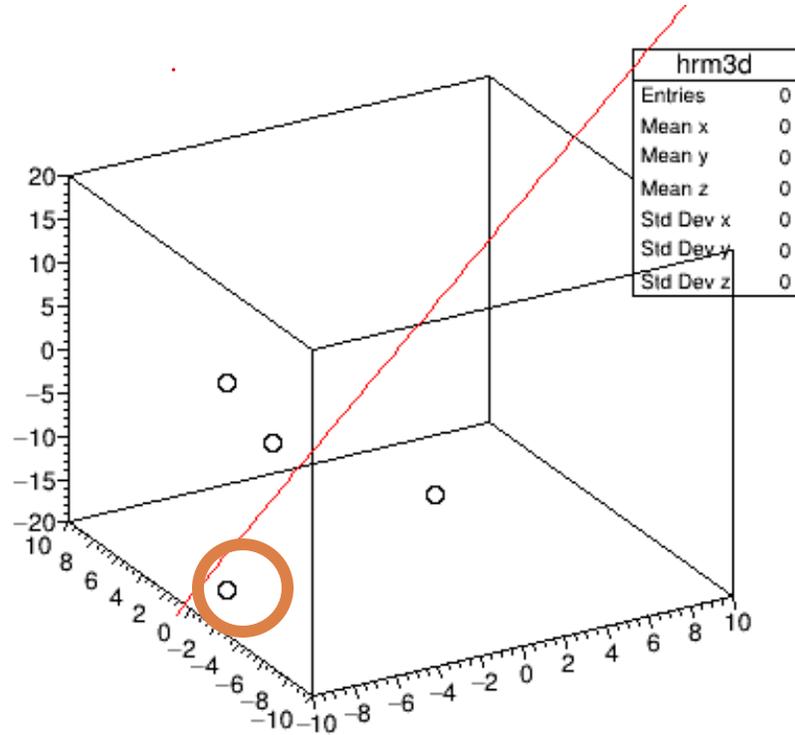
例、ホットチャンネルがあり



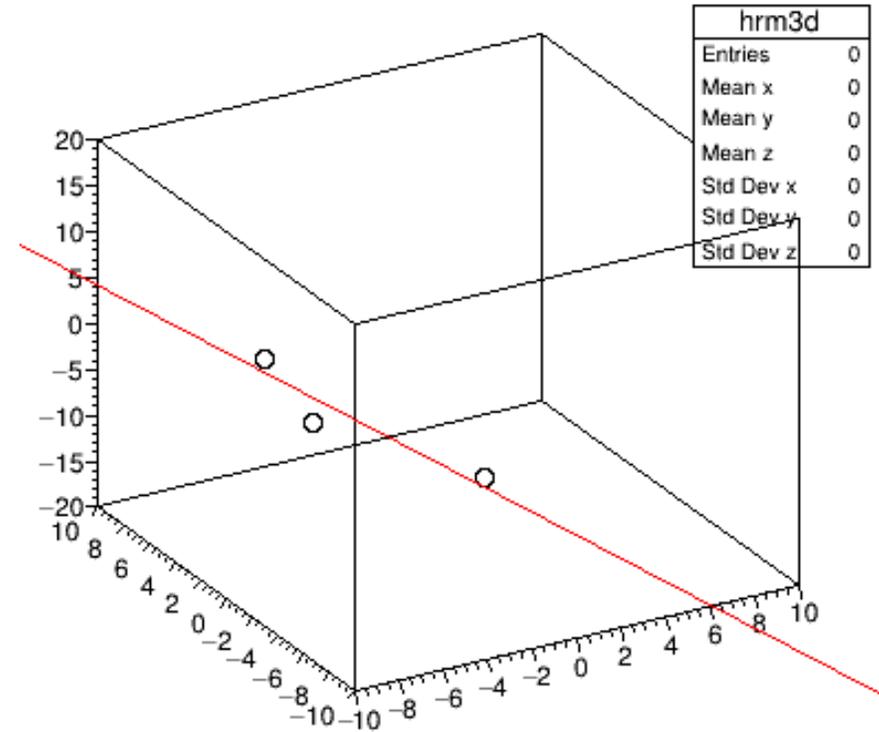
- 各ラダーのヒット分布図を作った
- エントリ数に占める割合が比較的が多い部分はホットチャンネル
- 枠に囲まれたホットチャンネル部分をカットした

測定方法 カットした結果

カットする前



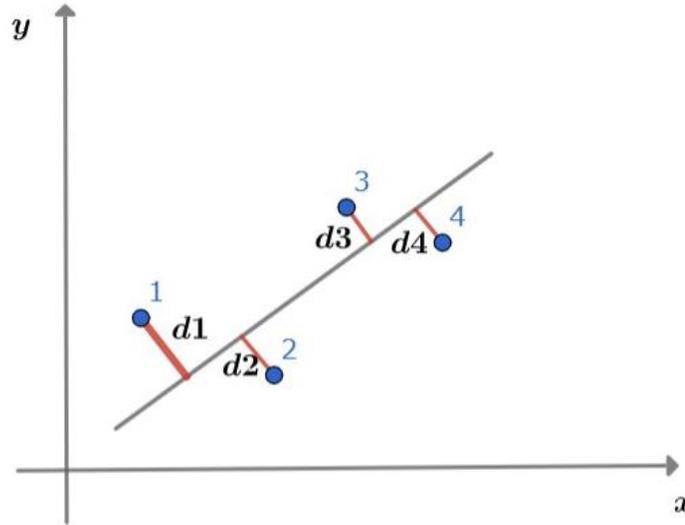
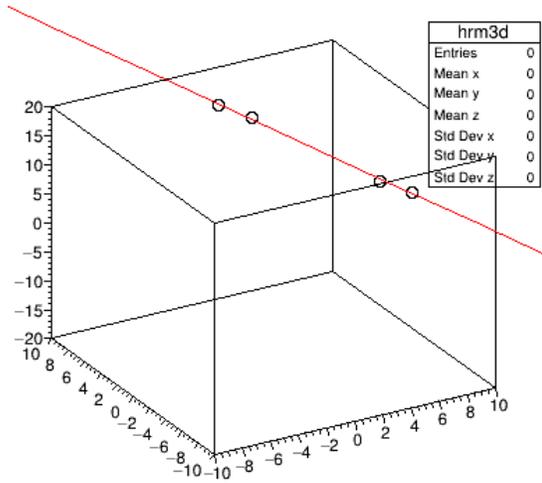
カットした後



ホットチャンネルをカットした後、飛跡が変わりました

測定方法 飛跡の選定

- 各クラスタとのズレが小さい飛跡

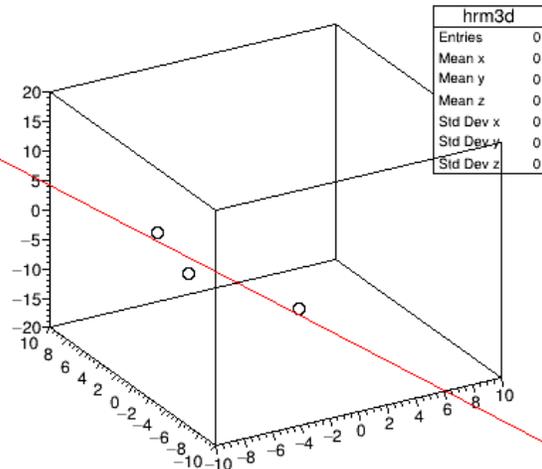


• $d = (y - f(x))$: クラスタの位置から飛跡までの距離(±)

• カイ二乗 = $d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + \dots + d_n^2$
全体のズレを表す

カイ二乗/N: 平均のズレを表す
(N: クラスタの数)

- 各クラスタとのズレが大きい飛跡



• カイ二乗/Nが小さければ、クラスタと飛跡のズレもより小さいので、できるだけそのような飛跡を選択する

• 本研究では、平均ズレが1より小さい場合の飛跡を選択した

三、測定と解析方法

本研究ではINTTが磁場なしで2023年8月-9月の間に収集した宇宙線データを用いて解析する

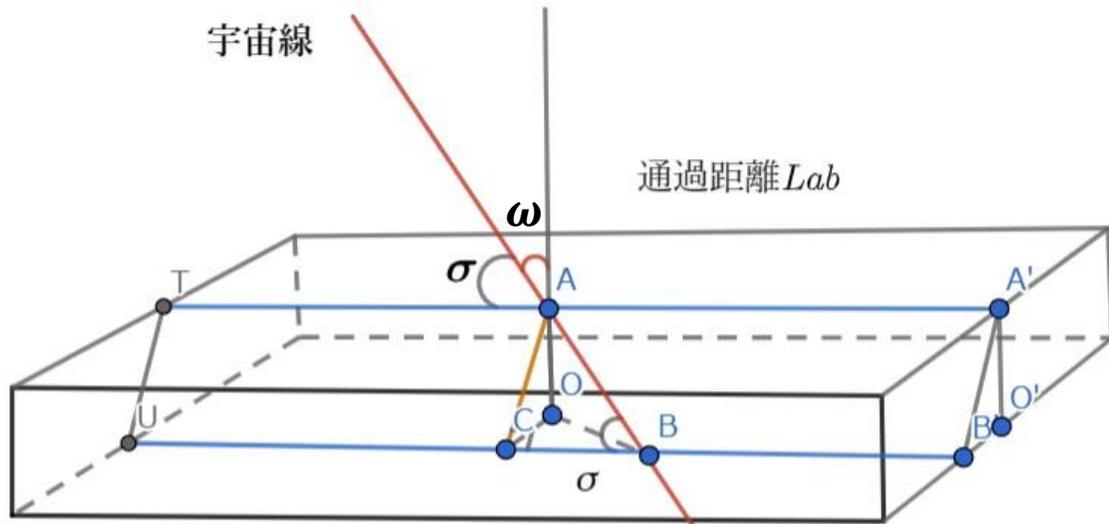
- 1) INTTを直線的に通り抜ける宇宙線の飛跡を再構成する
 - データの取り扱い（ヒットをクラスタリングする、ADCの値）
 - 宇宙線飛跡の再構成
 - ホットチャンネルを見つけて、カットする
 - 飛跡の選定

- 2) 宇宙線がINTTセンサーを通過する距離LABを計算する
 - 入射角度 α と ω を求める（ $\cos(\omega)$ 、 $\sin(\alpha)$ ）
 - センサー方向ベクトルを求める方法

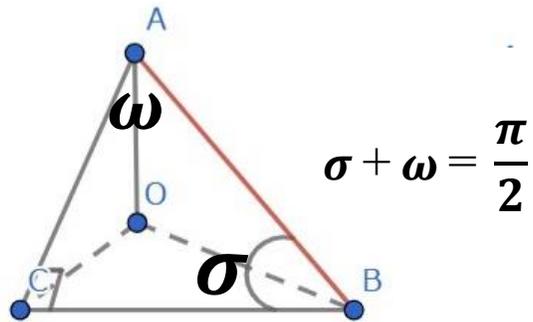
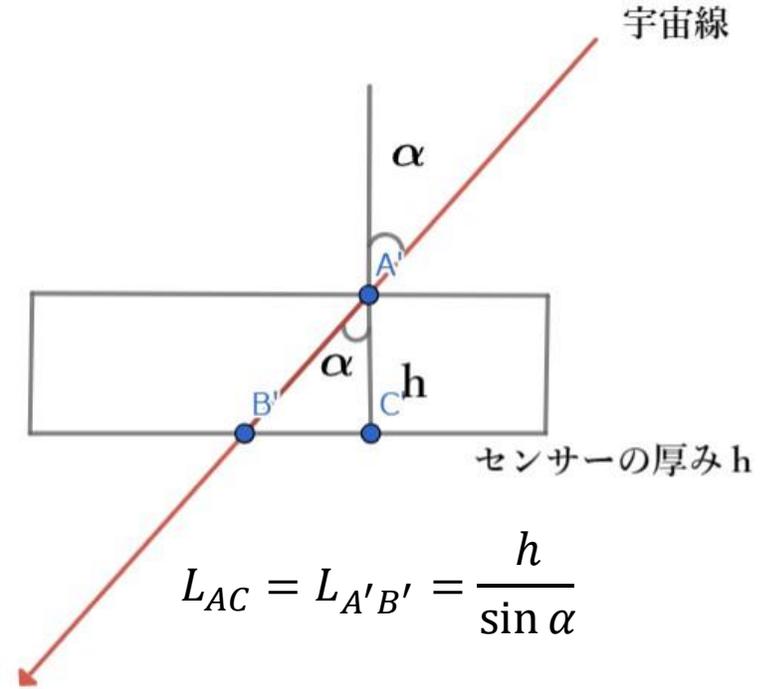
- 3) 通過距離とADCの値の関係を調べる
 - 全体のADCの値と通過距離のヒストグラム
 - 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを見る

測定方法 宇宙線がセンサーを通過する距離 L_{AB} を求める

三次元



二次元平面

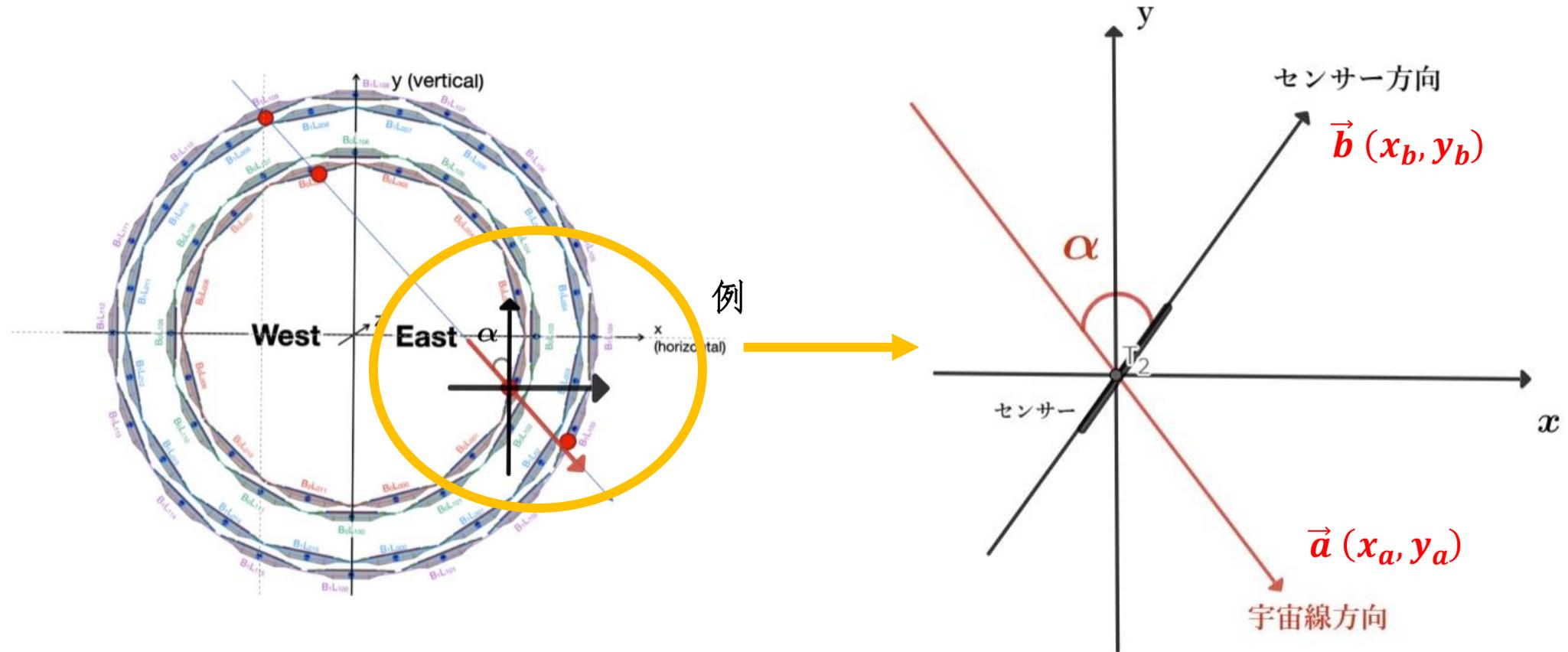


$$L_{AB} = \frac{L_{AC}}{\sin(\sigma)} = \frac{h}{\sin(\alpha) \sin(\sigma)} = \frac{h}{\sin(\sigma) \sin(\alpha)}$$

$$= \frac{h}{\cos(\omega) \sin(\alpha)}$$

角度 ω と角度 α がまだ未知なので、求める

測定方法 $\sin(\alpha)$ の求め方



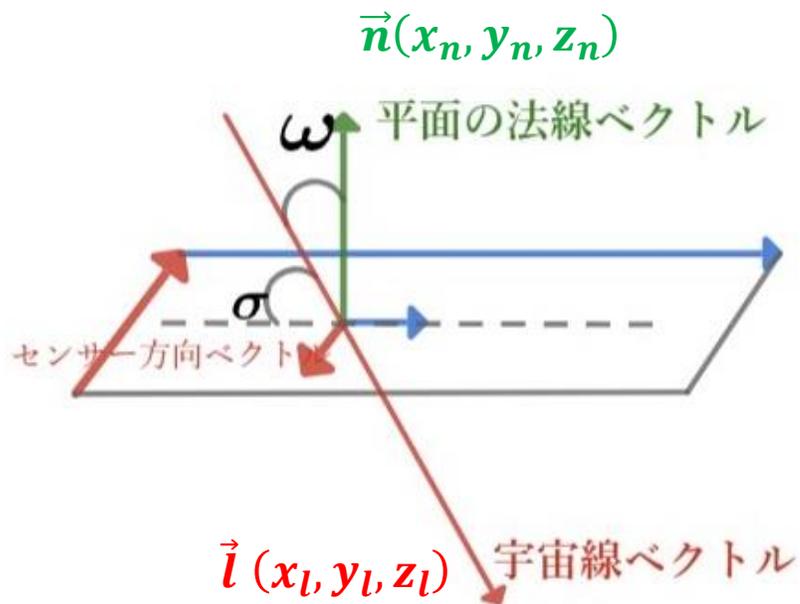
$$\cos \alpha = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} = \frac{x_a x_b + y_a y_b}{\sqrt{x_a^2 + y_b^2} \sqrt{x_a^2 + y_b^2}}$$

$$(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2 = 1$$

- 各センサーのxy平面の方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$ と xy平面の宇宙線の方向ベクトル $\vec{a}(x_a, y_a)$ を用いて $\sin(\alpha)$ を求める

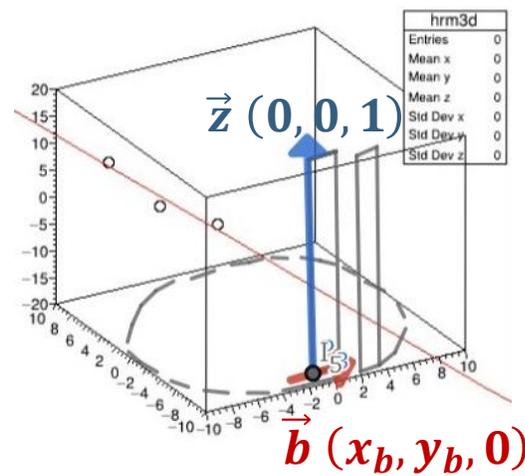
測定方法 $\cos(\omega)$ の求め方

- ・ センサーの平面法線ベクトル $\vec{n}(x_n, y_n, z_n)$ と宇宙線方向ベクトル $\vec{l}(x_l, y_l, z_l)$ を用いて $\cos(\omega)$ を求める



$$\cos \omega = \frac{\vec{n} \cdot \vec{l}}{|\vec{n}| |\vec{l}|} = \frac{x_l x_n + y_l y_n + z_l z_n}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2} \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}}$$

- ・ 平面の法線ベクトル $\vec{n}(x_n, y_n, z_n)$ は、センサー方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b, 0)$ と $\vec{z}(0, 0, 1)$ から求める



$$\begin{aligned} x_n &= y_b z_z - z_b y_z = y_b \cdot 1 - 0 \cdot 0 = y_b \\ y_n &= z_b x_z - x_b z_z = 0 \cdot 0 - x_b \cdot 1 = -x_b \\ z_n &= x_b y_z - y_b x_z = x_b \cdot 0 - y_b \cdot 0 = 0 \end{aligned}$$

$$\therefore \vec{n}(x_n, y_n, z_n) = (y_b, -x_b, 0)$$

以上の計算により、センサーの方向ベクトルが知れば、平面法線ベクトルを知ることができる

測定方法 通過距離 L_{AB} の求め方

$$L_{AB} = \frac{h}{\cos(\omega)\sin(\alpha)}$$

$\cos \alpha = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}||\vec{b}|}$ \Rightarrow

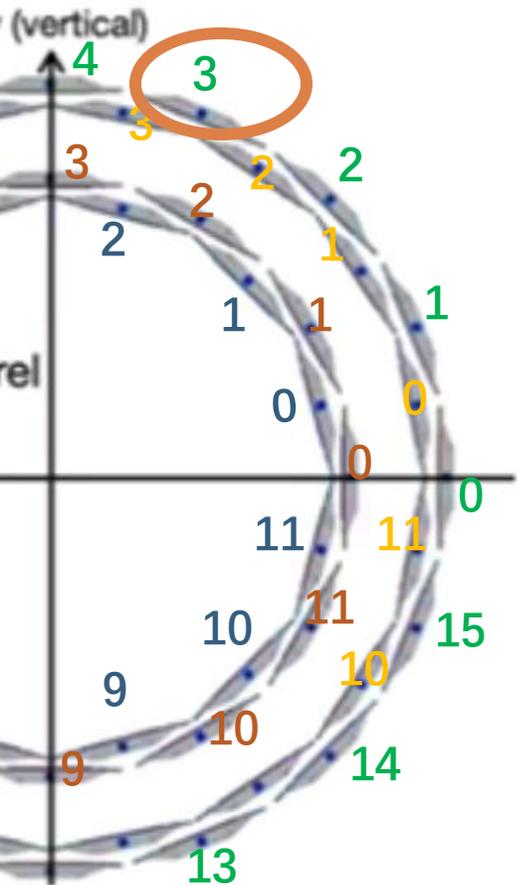
- xy平面の飛跡の方向ベクトル \vec{a}
- センサーの方向ベクトル \vec{b}

$\cos \omega = \frac{\vec{n} \cdot \vec{l}}{|\vec{n}||\vec{l}|}$ $\vec{n}(x_n, y_n, z_n) = (y_b, x_b, 0)$ \Rightarrow

- 三次元の飛跡の方向ベクトル \vec{l}
- センサーの方向ベクトル \vec{b}

- 飛跡の方向ベクトル \vec{a} と \vec{l} は飛跡にある二つの点の座標から求められる
- 次はセンサーの方向ベクトル \vec{b} の求め方について

例：第4層3番
Lay=0, lad=3

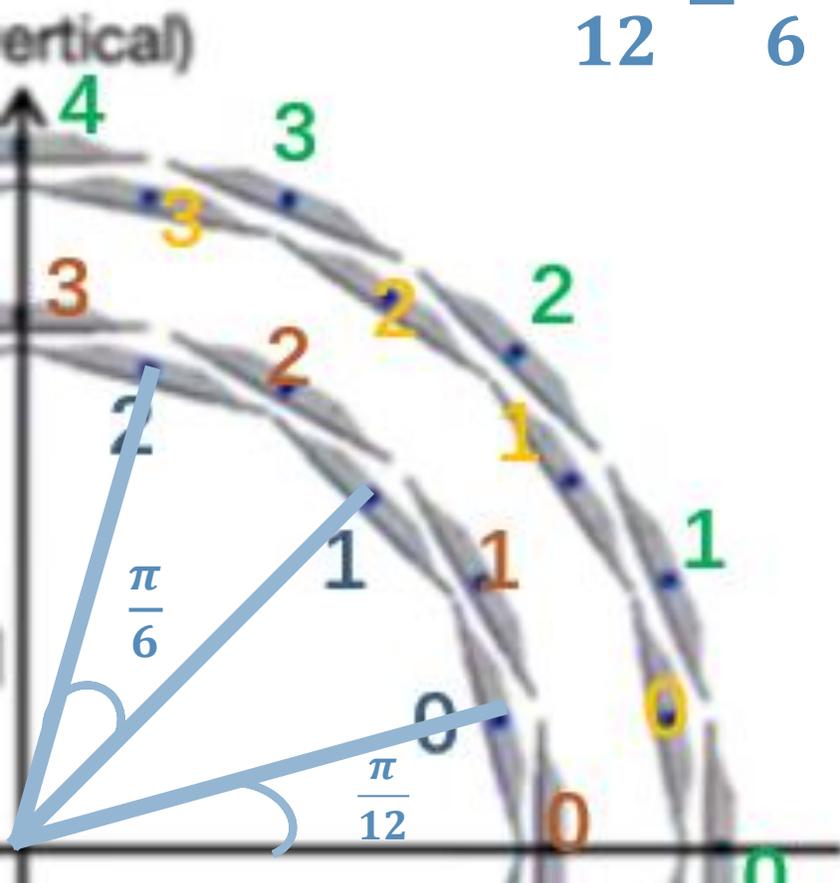


- INTTが内層に2組と外層2組でラダーで構成されている
- layer 0, 1, 2, 3を用いて層に番号をつける（内側から 0
- lad 0~11 / 0~15 を用いて内層12本、外層16本のラダーに番号をつける
- layとladの組み合わせにより、各ラダーの位置が確定できる

xy平面のセンサー方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$ の求め方

例、第一層: layer=0

$$\frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$$



$(layer, ladder)$	センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$
$(0,0)$	$(\cos \frac{\pi}{12}, \sin \frac{\pi}{12})$
$(0,1)$	$(\cos(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6}), \sin(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6}))$
$(0,2)$	$(\cos(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} * 2), \sin(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} * 2))$
$(0,n)$	$(\cos(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} * n), \sin(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} * n))$

layer ladderというセンサーの位置情報を用いて、センサーの方向ベクトルを計算した

例 90° で入射した場合:

計算値 $L_{AB}=320$

xy平面のセンサー方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b): (1,0)$
 3次元の宇宙線方向ベクトル $\vec{l}(x_l, y_l, z_l): (0,1,0)$

```
root [0] .x /home/rinkan/root/macros/ROOT_SotsuRon/Angle_distance.C
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 320
```

例 45° で入射した場合:

計算値 $L_{AB} = \frac{h}{\cos(\omega) \sin(\alpha)} = 320 * 2 = 640$

xy平面のセンサー方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b): (1,0)$
 3次元の宇宙線方向ベクトル $\vec{l}(x_l, y_l, z_l): (-1,1,0)$

```
root [0] .x /home/rinkan/root/macros/ROOT_SotsuRon/Angle_distance.C
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 640
```

計算値と実行結果と一致なので、計算コードが正しい

三、測定と解析方法

本研究ではINTTが磁場なしで2023年8月-9月の間に収集した宇宙線データを用いて解析する

1) INTTを直線的に通る抜ける宇宙線の飛跡を再構成する

- データの取り扱い（ヒットをクラスタリングする、ADCの値）
- 宇宙線飛跡の再構成
- ホットチャンネルを見つけて、カットする
- 飛跡の選定

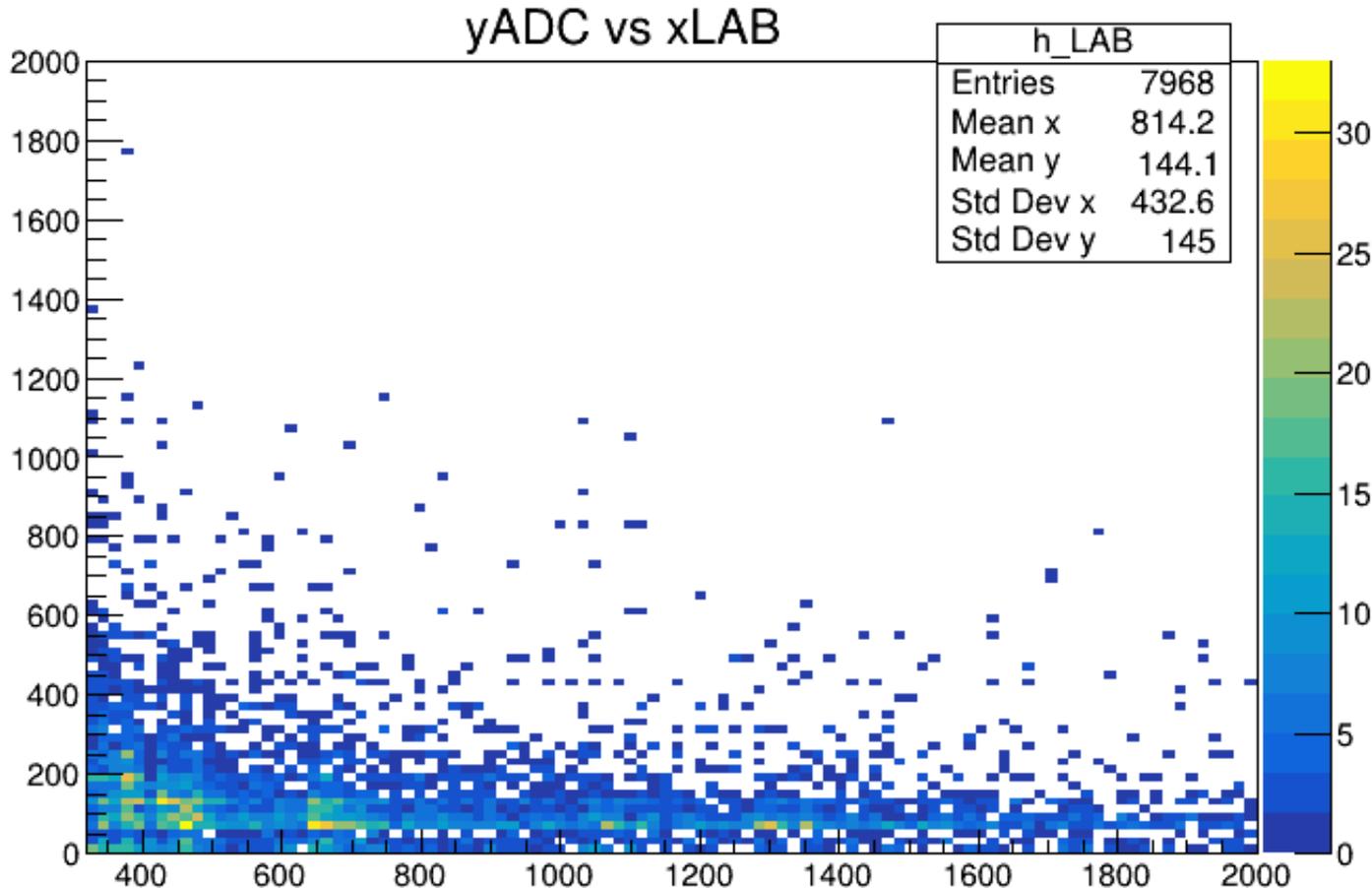
2) 宇宙線がINTT検出器を通過する距離LABを計算する

- 入射角度 α と ω を求める（ $\cos(\omega)$ 、 $\sin(\alpha)$ ）
- センサー方向ベクトルを求める方法

3) 通過距離とADCの値の関係を調べる

- 全体のADCの値と通過距離のヒストグラム
- 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを見る

解析方法 ADCの値と通過距離のヒストグラム



・通過距離が長くなると、宇宙線のエネルギー損失が大きくなるので、LABが長くなれば、大きいADCの値の数も増えるはず

・ADCとLABの正の相関が見れるはずですが、今の分布でははっきり見えなかった



解析方法1：通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較する

解析方法2：通過距離が長くなりつつ、平均値の変化を見る

ホットチャンネルをカットした
クラスタの数3~5
平均ズレ<1の飛跡

解析方法1 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較する

- ・通過距離が近い所を選んでADCの値のヒストグラムを見ても、変化がはっきり見えないと思い、なるべく、エントリ数の差が小さく、通過距離が離れているところを選んで比較した

第①組

- ・ $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$ エントリ数362
- ・ $650\mu\text{m} < \text{LAB} < 700\mu\text{m}$ エントリ数464

通過距離が離れている二つのところ
・ エントリ数の差が102

第②組

- ・ $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 600\mu\text{m}$ エントリ数 679
- ・ $700\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$ エントリ数 660

通過距離が離れている二つのところ
・ エントリ数の差が19でわりと小さい

第③組

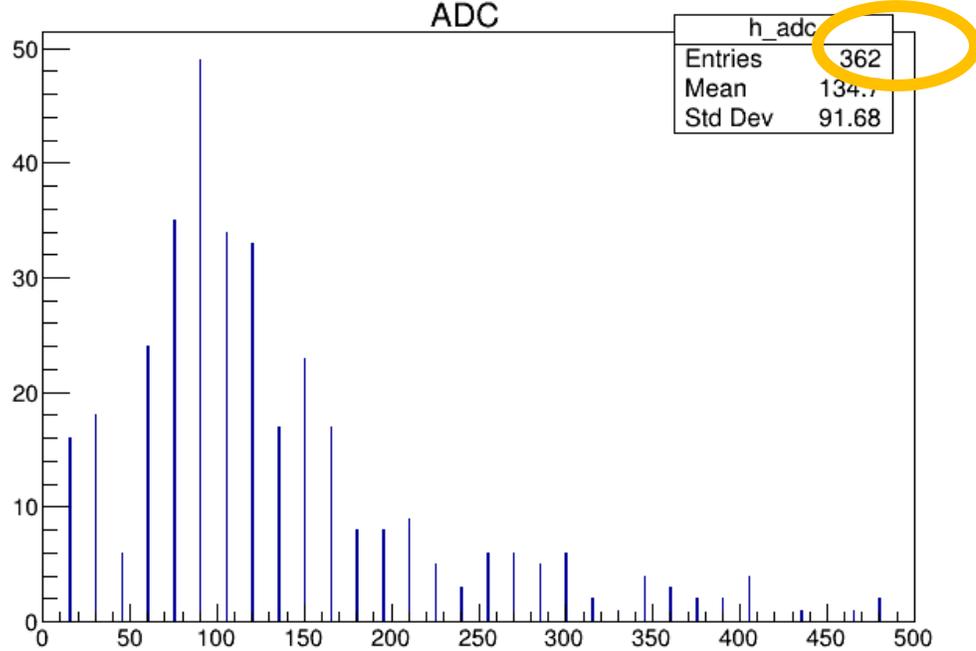
- ・ $700\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$ エントリ数660
- ・ $350\mu\text{m} < \text{LAB} < 400\mu\text{m}$ エントリ数500

通過距離がさらに離れている二つのところ
・ エントリ数の差が160

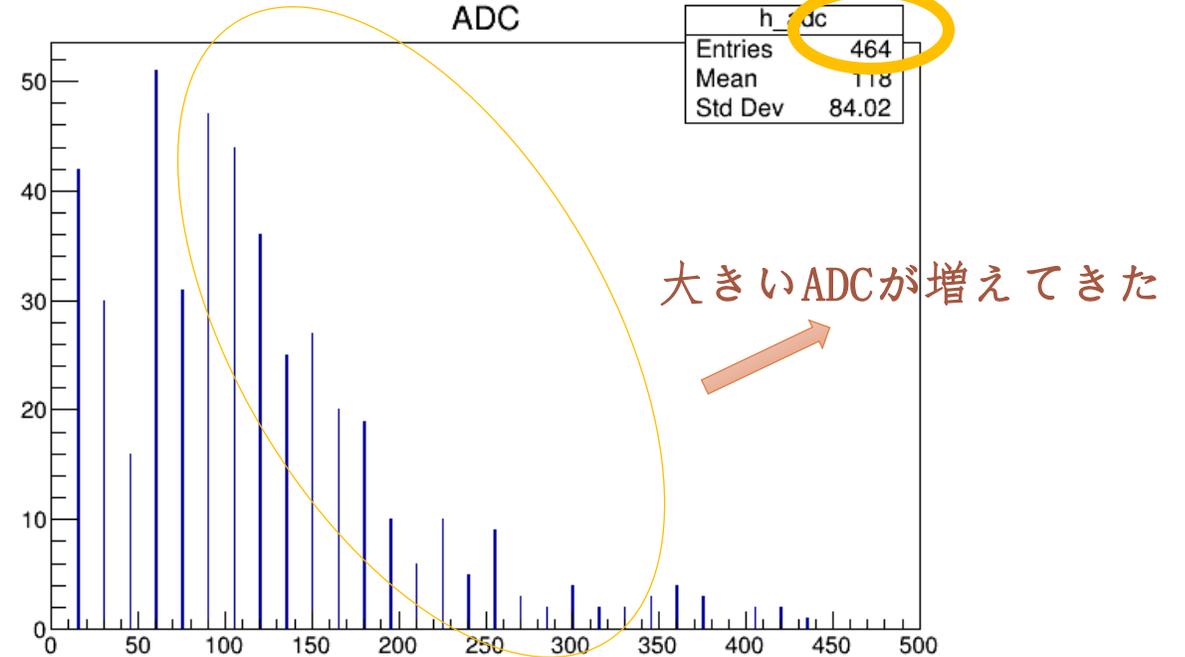
解析方法1 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



• $650\mu\text{m} < \text{LAB} < 700\mu\text{m}$

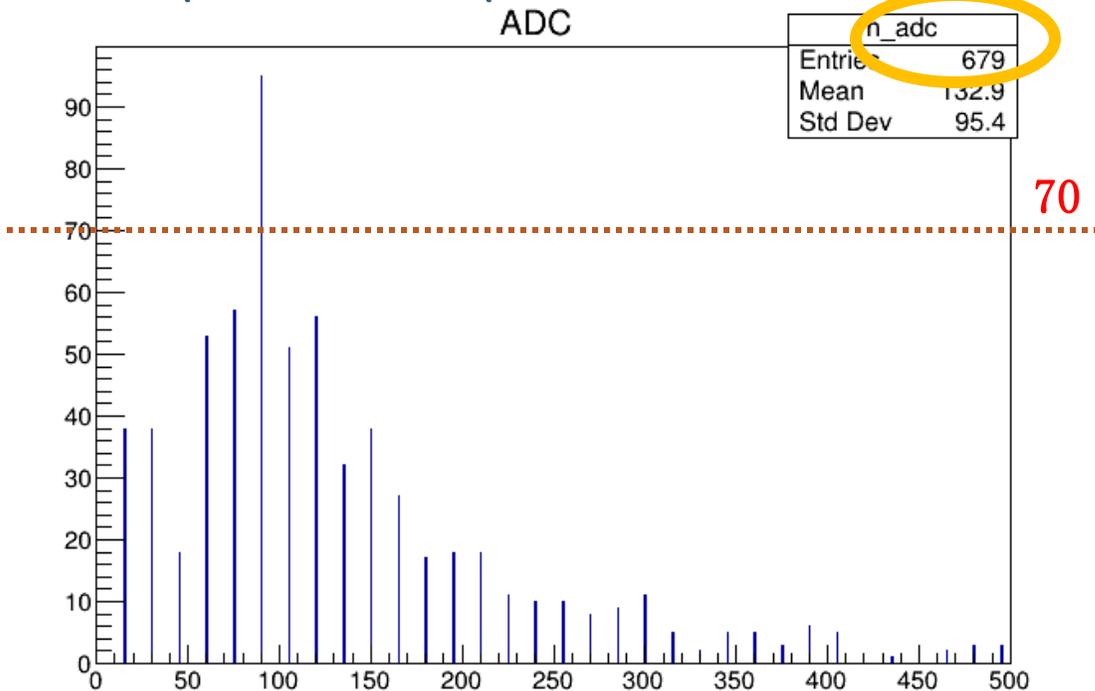


- それぞれのエントリ数が少し違うが、通過距離650~700の間、ADCの値の大きい方は比較的になくなっている
- この二つの図から見ると、通過距離が長い方、90より大きいADCの値の数がより多い

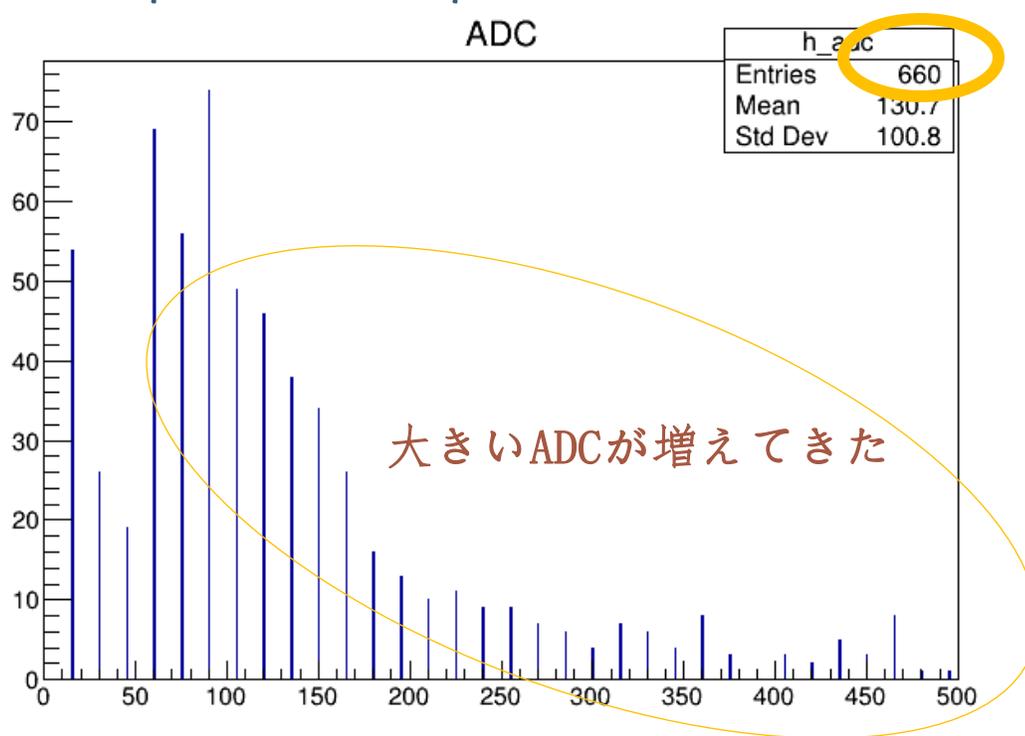
測定方法1 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを見る

第②組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 600\mu\text{m}$



• $700\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$

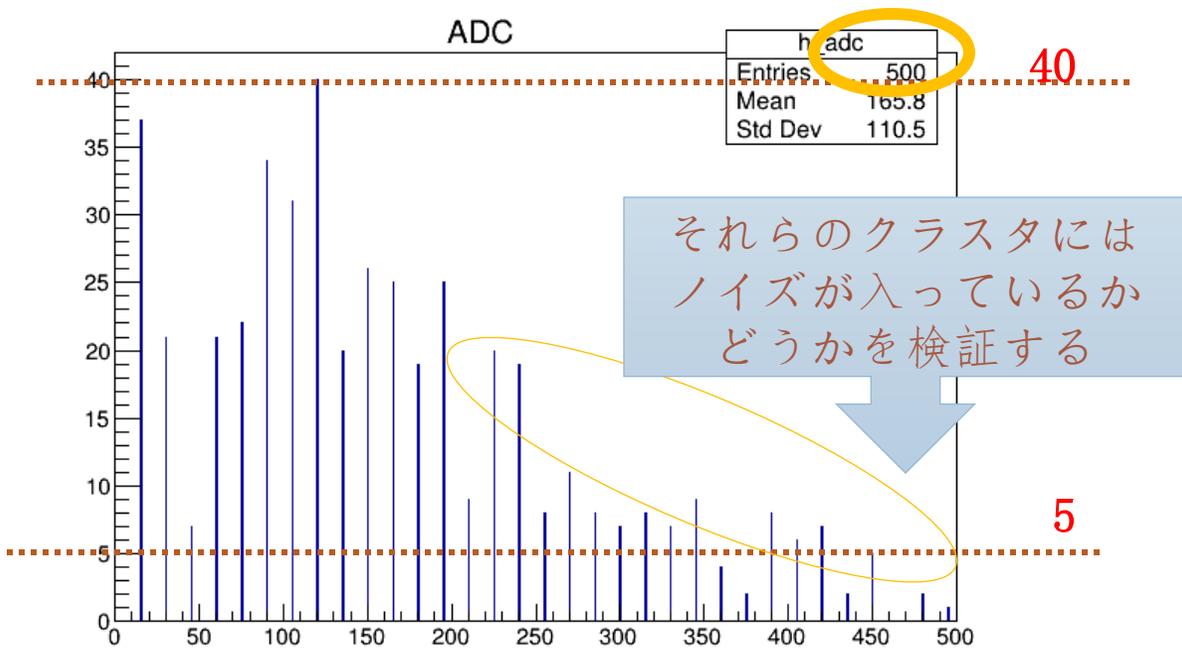


- エントリ数を近づいて、それぞれ679と660で、通過距離700~900 μm の間のADCの値の大きい方は比較的に多くなっていることが分かる
- この二つの図から見ると、通過距離が長い方、90より大きいADCの値の数がより多い

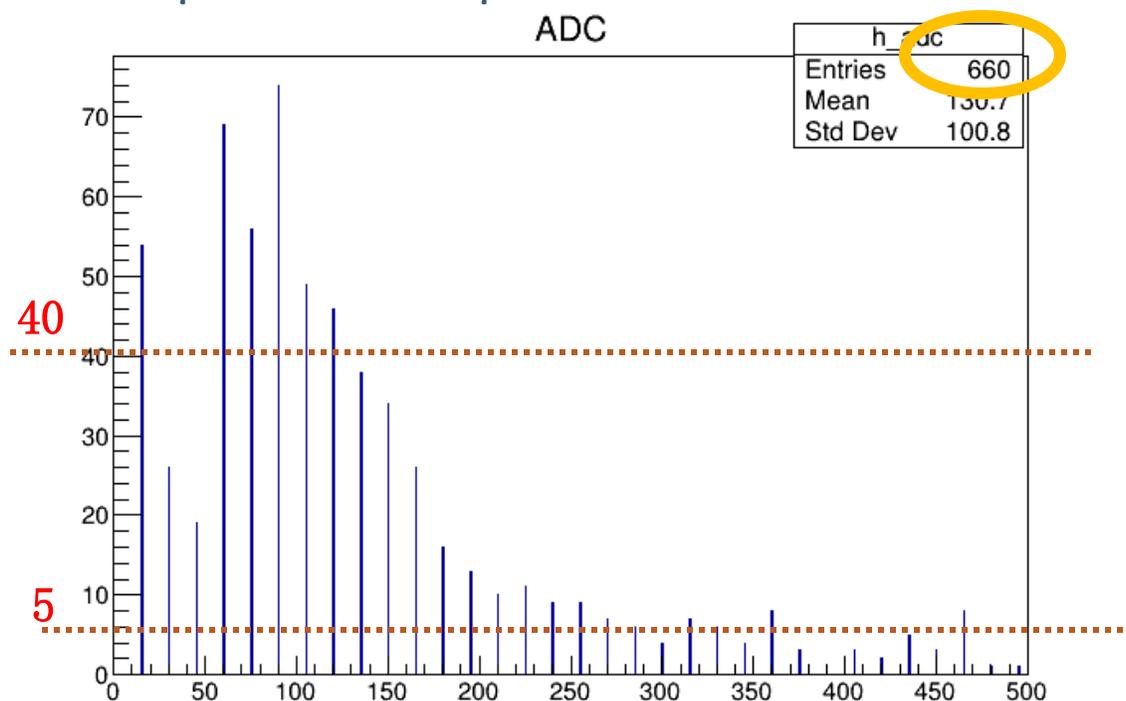
解析方法1 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを見る

第③組

• $350\mu\text{m} < \text{LAB} < 400\mu\text{m}$

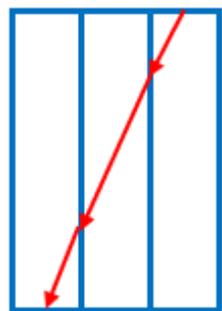


• $700\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$

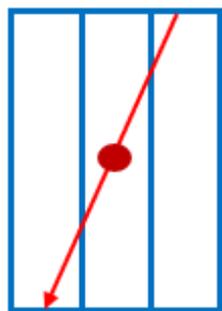


- その二つの図、全体的にみると、通過距離の長い方 $700\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$ に、90より大きいADCの値の数が多
- しかし、 $350\mu\text{m} < \text{LAB} < 400\mu\text{m}$ には、ADCの値の250と400ぐらいに、数が比較的が多いことが分かった
- それらはノイズか、信号かを確認する

解析方法1 ノイズの検証： クラスタサイズを絞る



3hit



1クラスタ



- ・通過したhitの数をクラスタのサイズと呼ばれる

- ・通過したヒットのADCを足し合わせて、ADCの値を記録する

【センサー断面図】

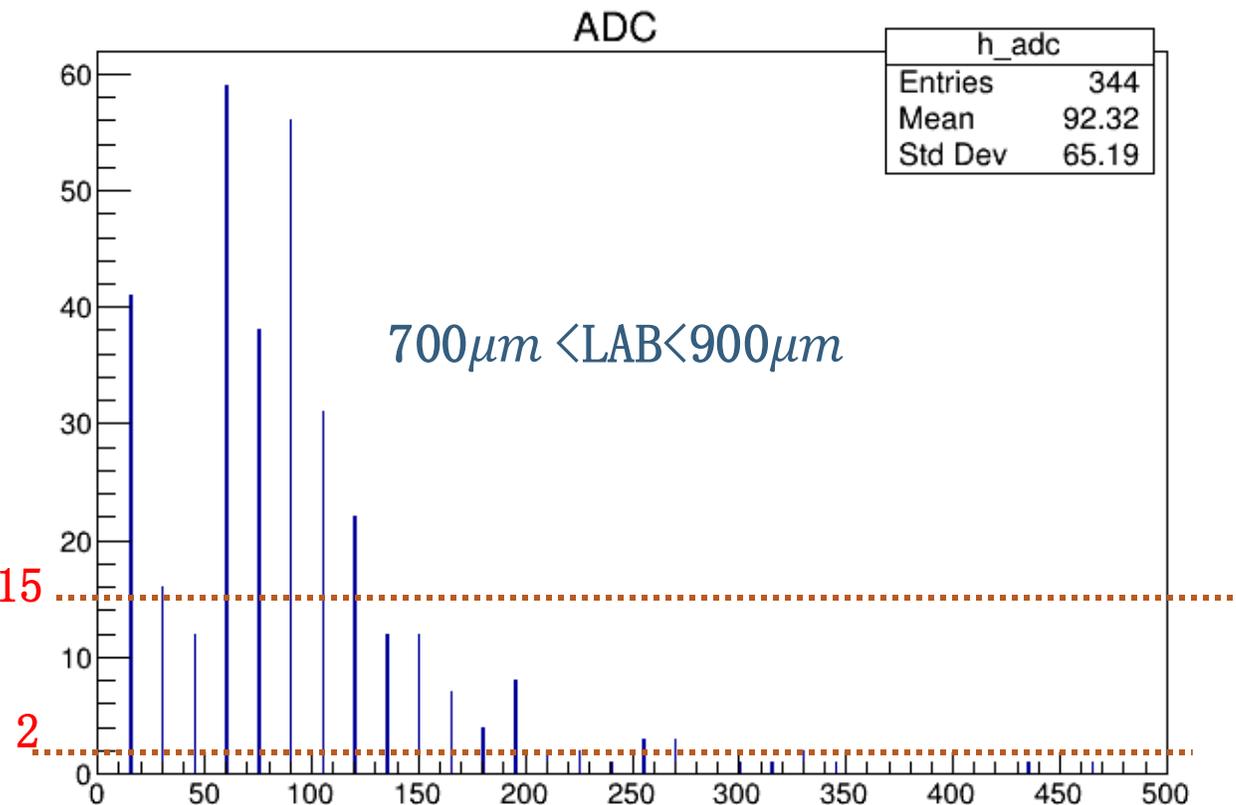
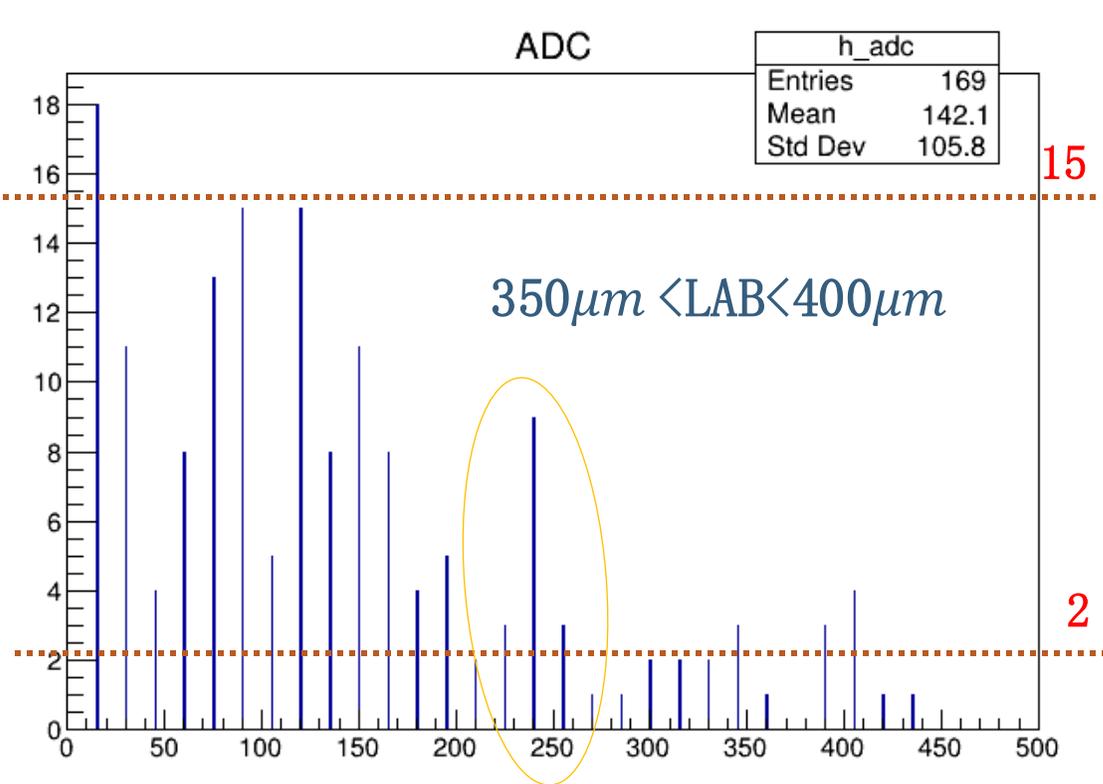
- ・ヒットをクラスタリングする時、**宇宙線信号+ノイズ**を1クラスタとしてまとめてしまう場合もある

- ・クラスタサイズの大きい方は、ノイズのADCの値が小さくても、たくさん入って足し合わせたら、ADCの値も大きくなるので、結果に影響する

- ・クラスタサイズを小さく絞ると、ADCの値の大きい時のクラスタは信号か、ノイズの塊かを検証できる

解析方法1 ノイズの検証: クラスタサイズを絞る

- クラスタサイズを1, 2, 3に絞って比較してみた

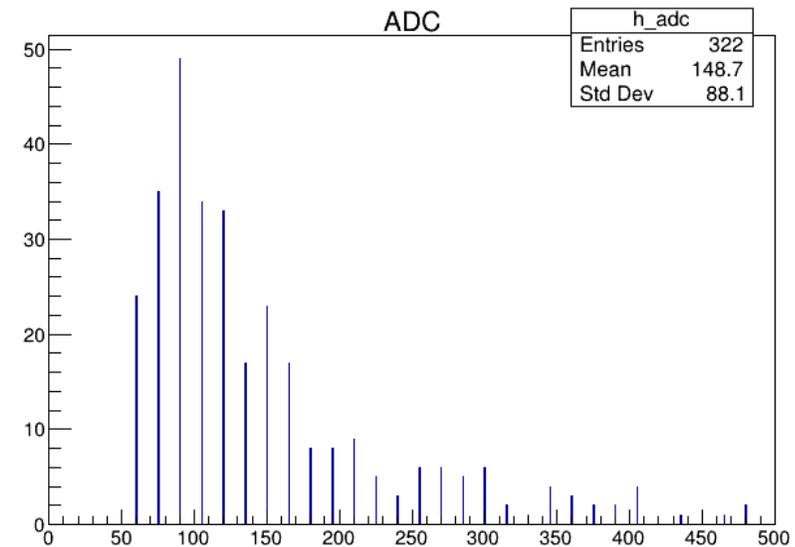
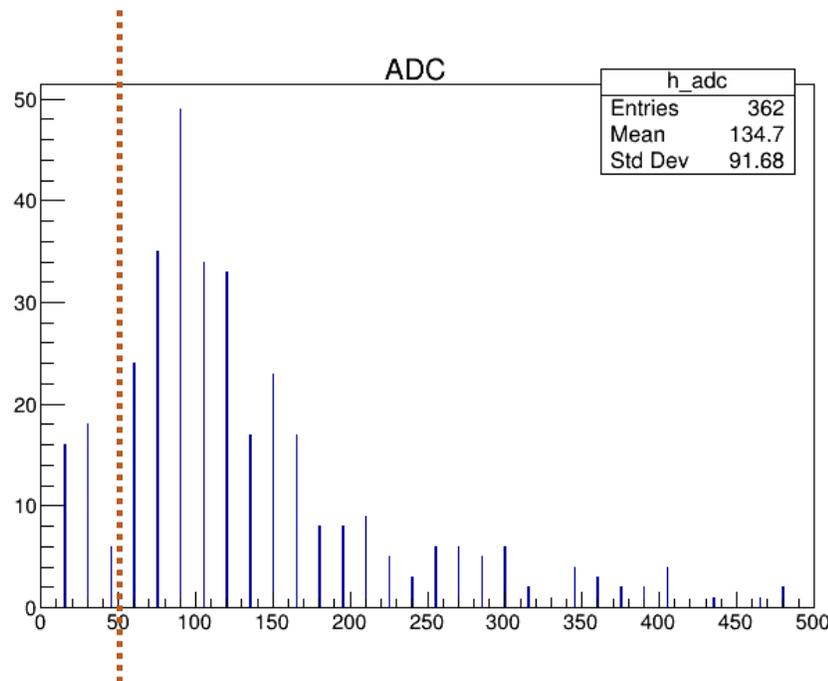


• 先と同じ、その二つの図、全体的にみると、通過距離の長い方 $700\mu m < LAB < 900\mu m$ に、100より大きいADCの値の数が多く、通過距離とADCの値の正の相関が見える

- $350\mu m < LAB < 400\mu m$ の間、250、400のADCの値はノイズの可能性が低いということが分かった

解析方法2 通過距離が長くなりつつ、平均値の変化を見る

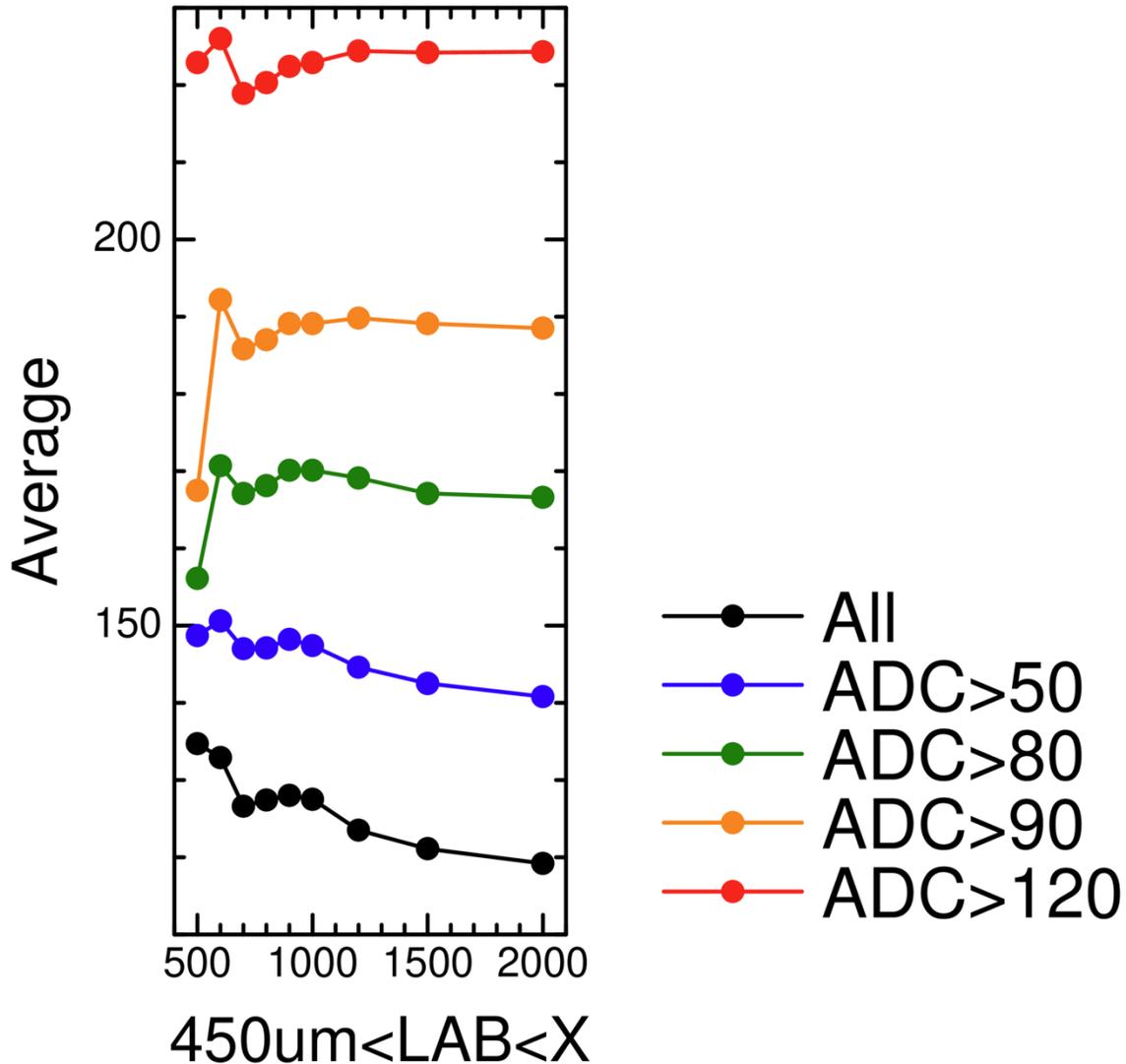
- ADCとLABが正の相関であれば、通過距離が長くなると、大きいADCの値の数が比較的になり、ADCの値の分布の平均値も上がると予想できる
- 通過距離の範囲を増加しつつ、ADCの値の平均値を比較する
- また、50以下は信号+ノイズのものなので、取り除いてから比較する



測定方法2 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

ADCの値と通過距離の範囲	450 μ m <LAB< 500 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 600 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 700 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 800 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 900 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1000 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1200 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1500 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 2000 μ m peak: 90
ADC > 50の 平均値	148.7	150.6	147	147.1	148.2	147.4	144.6	142.5	140.8
ADC > 80の 平均値	156.1	170.7	167.1	168.1	170.1	170.1	169.1	167.1	166.6
ADC > 90の 平均値(ピーク 超えの部分)	167.5	192.2	185.8	187	189.1	189.1	189.8	189.1	188.5
ADC > 120の 平均値	222.9	226	218.9	220.3	222.4	222.9	224.4	224.2	224.3

解析方法2 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較



・ADC > 50の場合、平均値から通過距離とADCの値の正の相関が見えなかったです。

・また、ADC分布の図を比較してみると、通過距離が長くなりつつ、ADC全体の数が増えてきているが、ADC < 100の数の増加は、ADC > 100の増加より速くて多いので、平均値が予想と違って小さくなった

・それで、ADC > 90、ADC > 120の分布の平均値を見てみた。その結果、平均値が上がってきた。ADCの値が通過距離によって大きくなっている傾向が見える

4. 測定結果

測定結果

- ・ ADCの値とLABの全体ヒストグラムから、はっきり正の相関性が見れなかった
 - ・ 通過距離の長さが離れているところを、3組分けて比較してみた結果、3組とも通過距離が長い方、90より大きいADCの値の数がより多い
 - ・ 平均値から見た結果、通過距離が長くなると、 $ADC > 100$ の分布では、ADCの値が通過距離によって大きくなっている傾向が見えた
- また、 $ADC < 100$ の分布では、小さいADCの増加が緩めていなく、 $ADC > 100$ の増加より速くて数多いということが分かった

5. まとめと今後の課題

まとめ

- ホットチャンネルをカットすることができた
- 各角度で入射した飛跡の通過距離を計算できた
- ADCの値とLABの全体ヒストグラムから、はっきり正の相関性が見れなかった
- 解析方法1と2によって、通過距離が長くなると、大きいADCの値の数が多くなっている傾向が見えた
- また、通過距離が長くなると、 $ADC < 100$ の分布では、小さいADCの増加が緩めていなく、 $ADC > 100$ の増加より速くて数多いということが分かった

今後の課題

- 比較しやすい方法を考える
- また、通過距離が短い所をもっと調べる
- 通過距離の長い宇宙線のエントリ数が少ないと思い、使えるデータを増やし、正の相関がはっきりと見えるかどうかを確認する

BACK UP



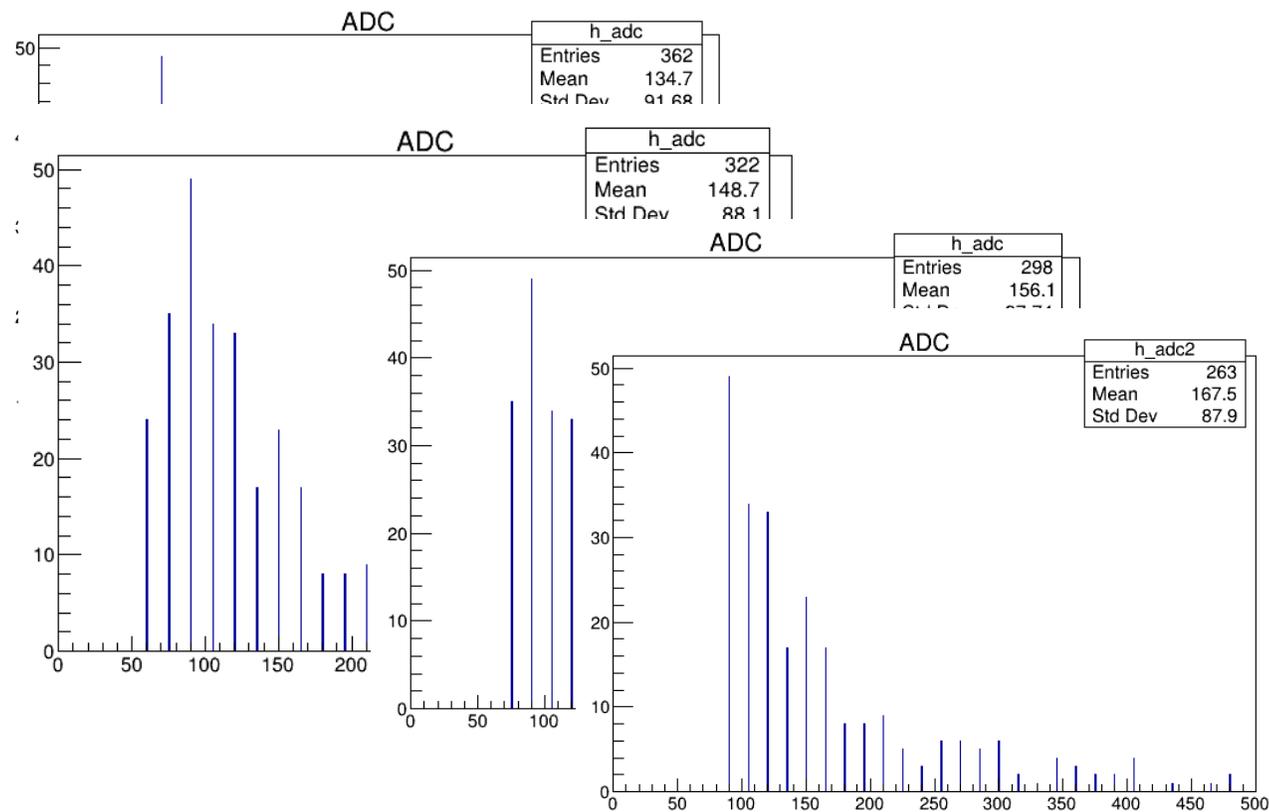
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

ADCの値と通過距離の範囲	450 μ m <LAB< 500 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 600 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 700 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 800 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 900 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1000 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1200 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 1500 μ m peak: 90	450 μ m <LAB< 2000 μ m peak: 90
ADC全部の 平均値	134.7	132.9	126.6	127.4	128	127.5	123.5	121.1	119.2
ADC > 50の 平均値	148.7	150.6	147	147.1	148.2	147.4	144.6	142.5	140.8
ADC > 80の 平均値	156.1	170.7	167.1	168.1	170.1	170.1	169.1	167.1	166.6
ADC > 90の 平均値(ピーク 超えの部分)	167.5	192.2	185.8	187	189.1	189.1	189.8	189.1	188.5
ADC > 120の 平均値	222.9	226	218.9	220.3	222.4	222.9	224.4	224.2	224.3

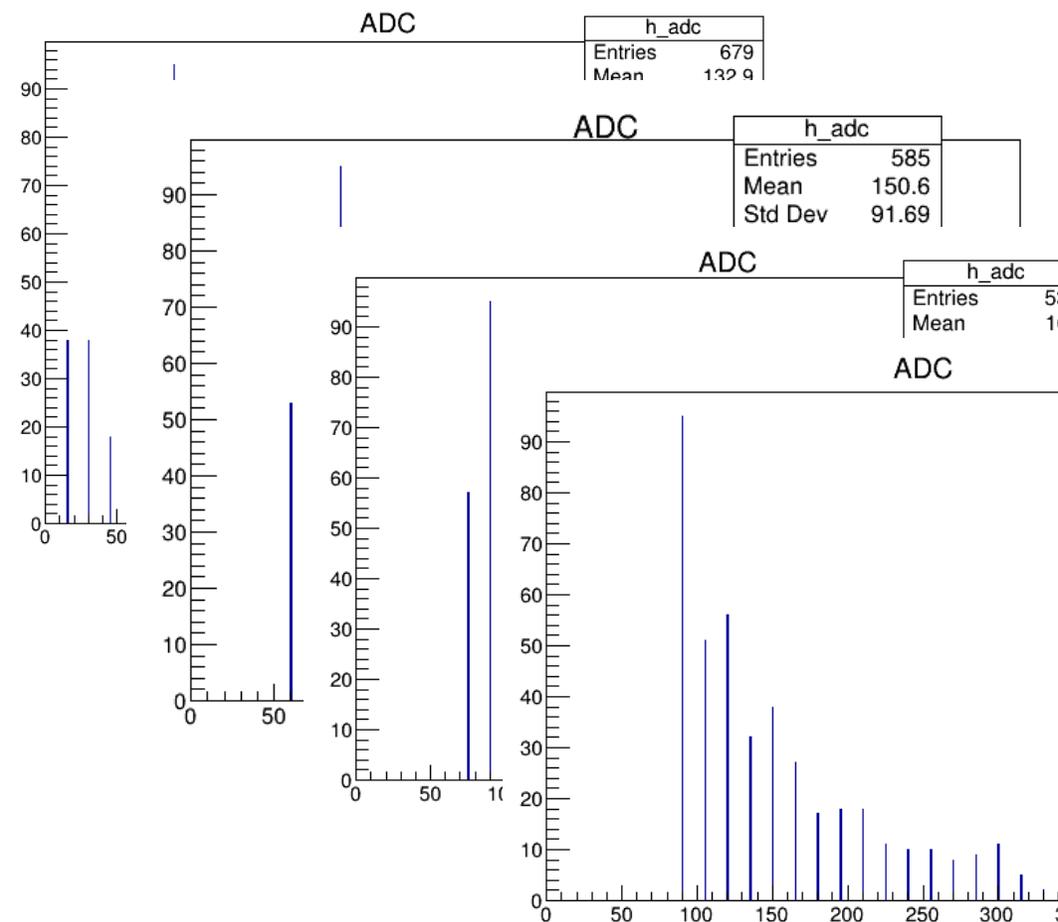
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



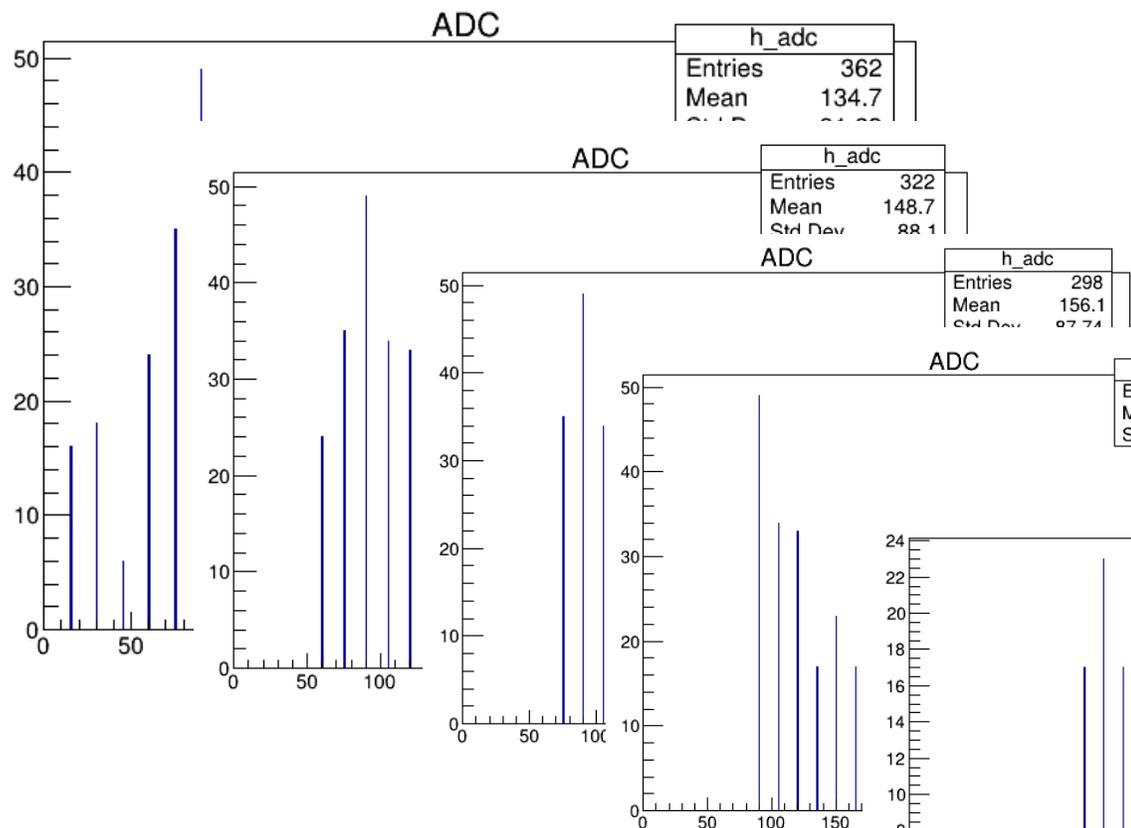
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 600\mu\text{m}$



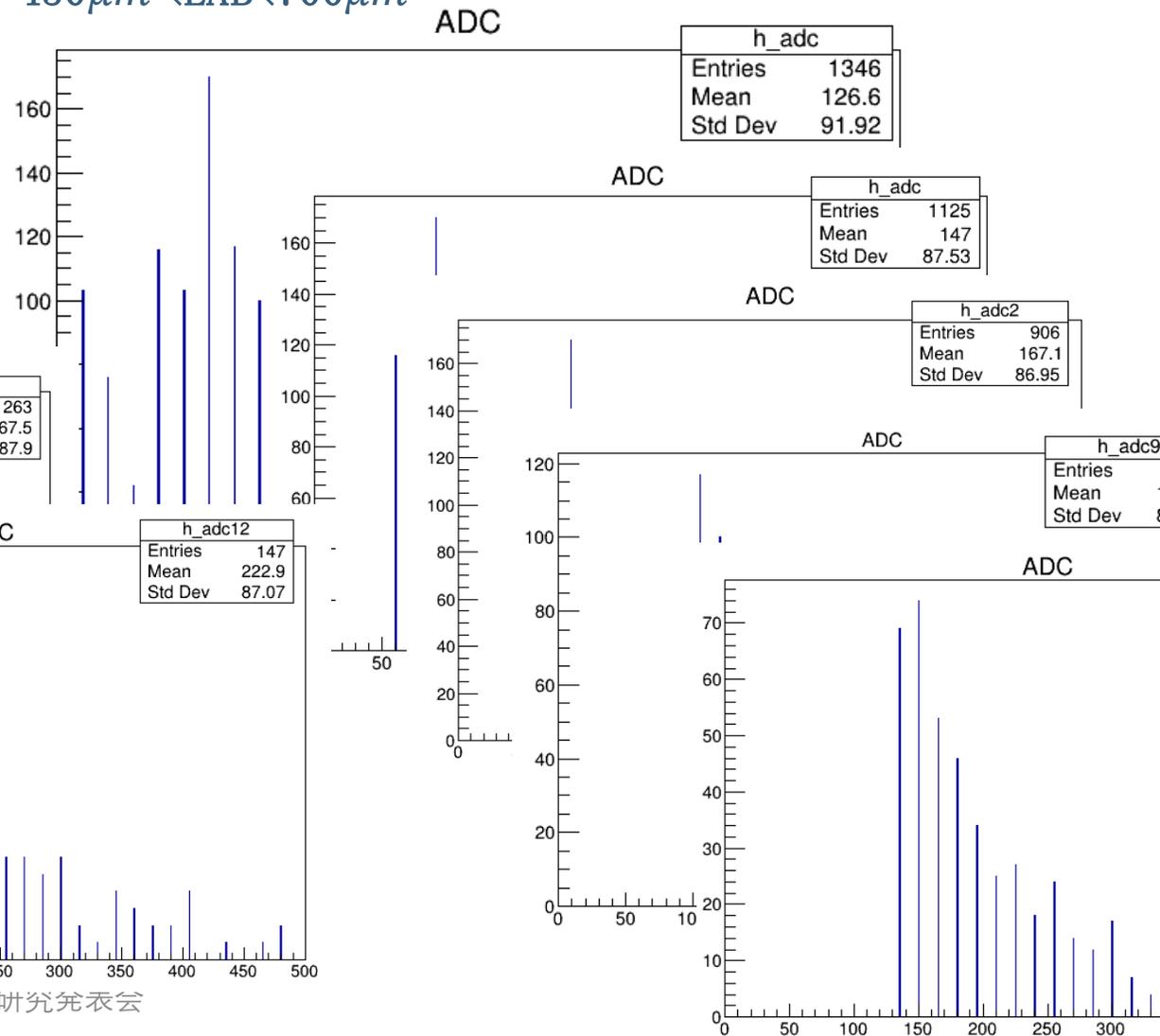
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



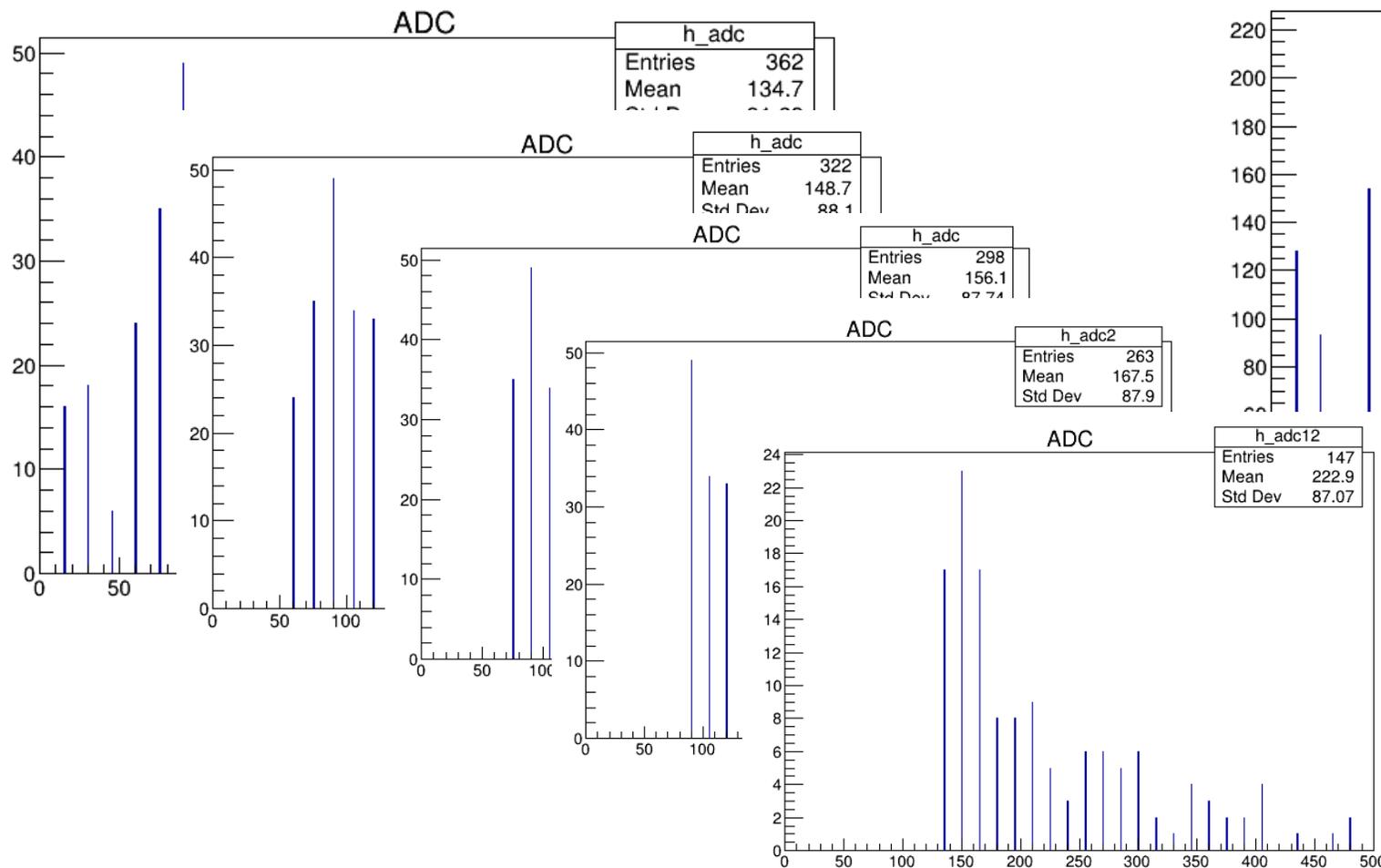
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 700\mu\text{m}$



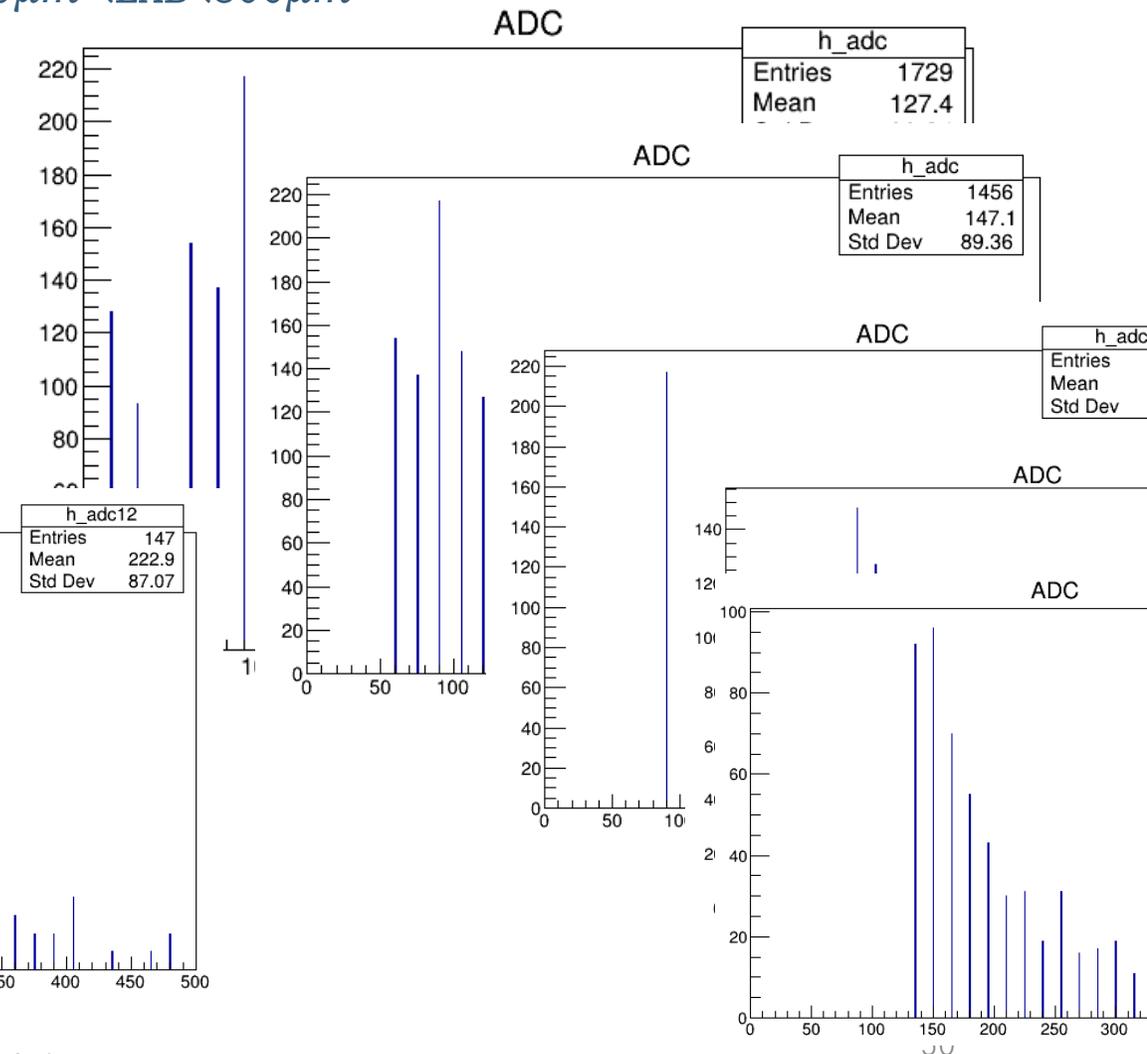
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



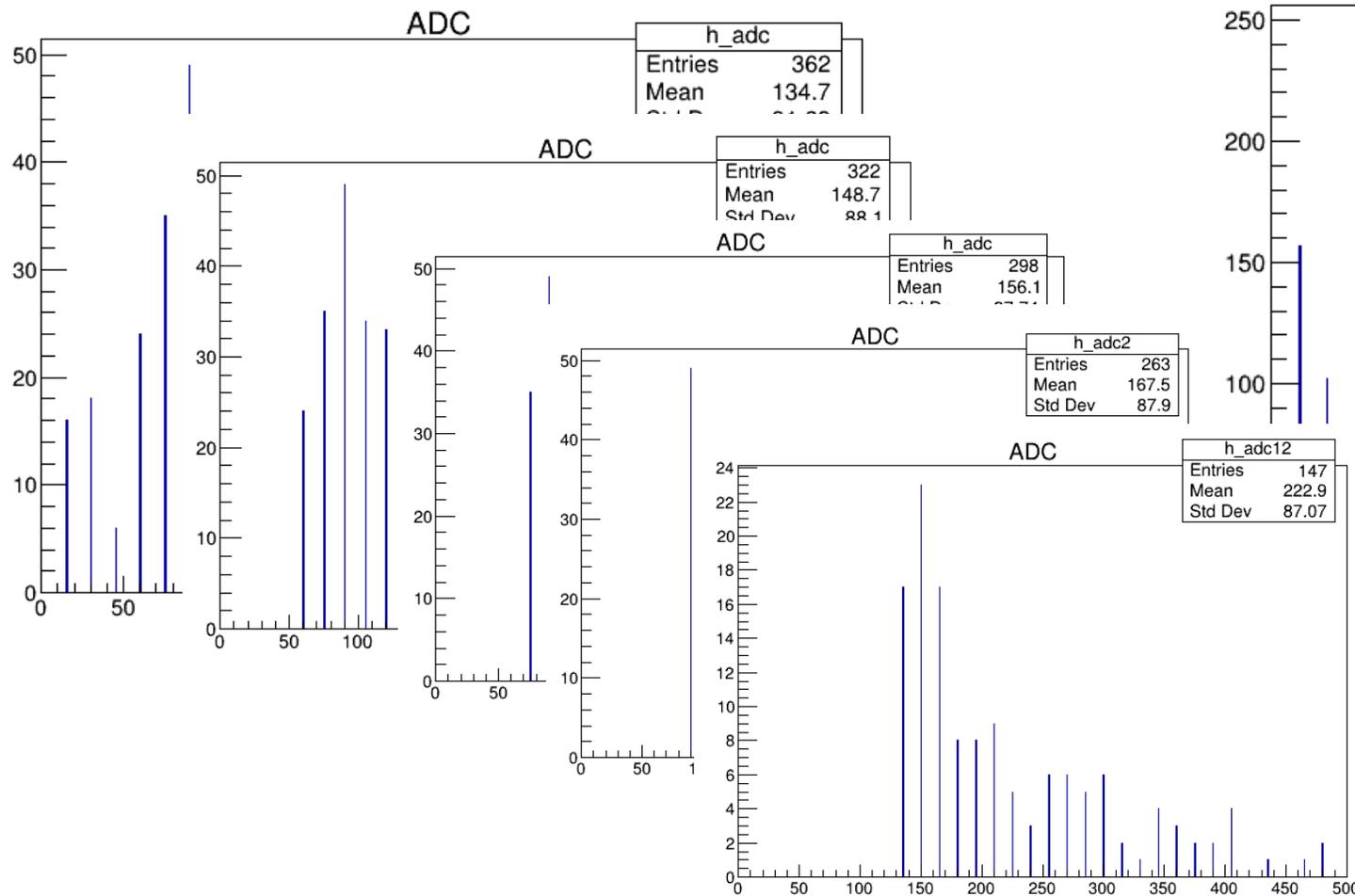
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 800\mu\text{m}$



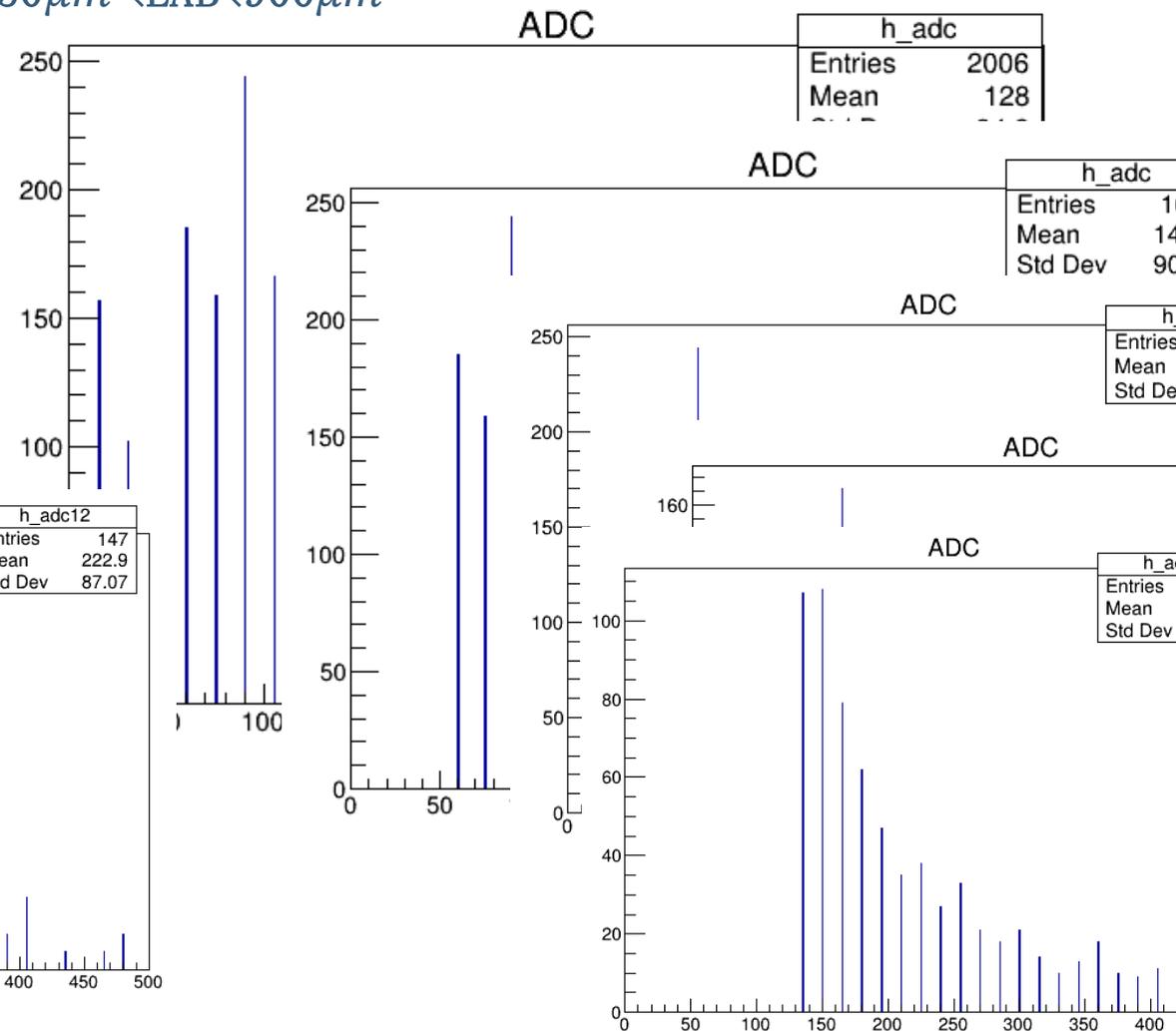
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



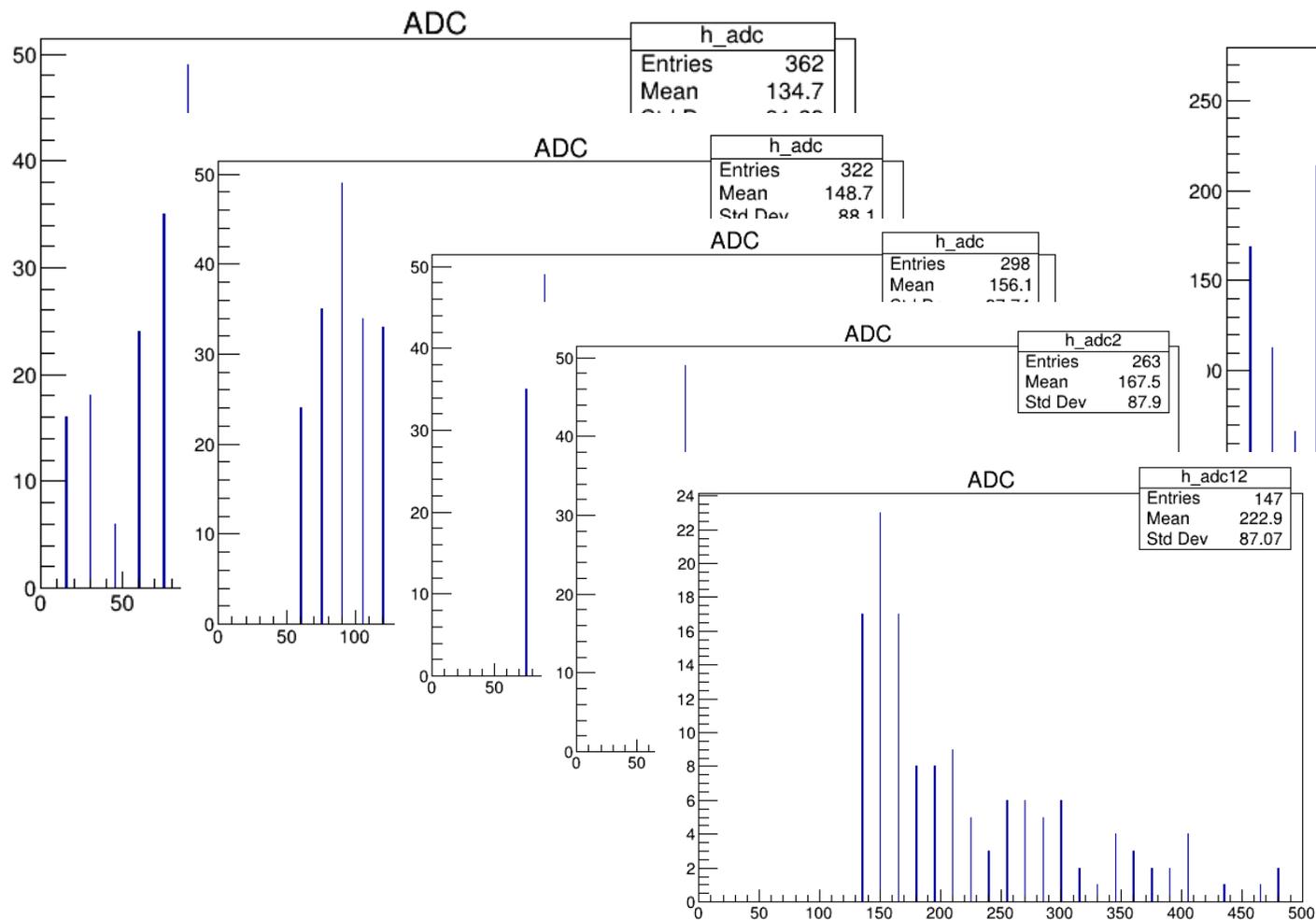
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 900\mu\text{m}$



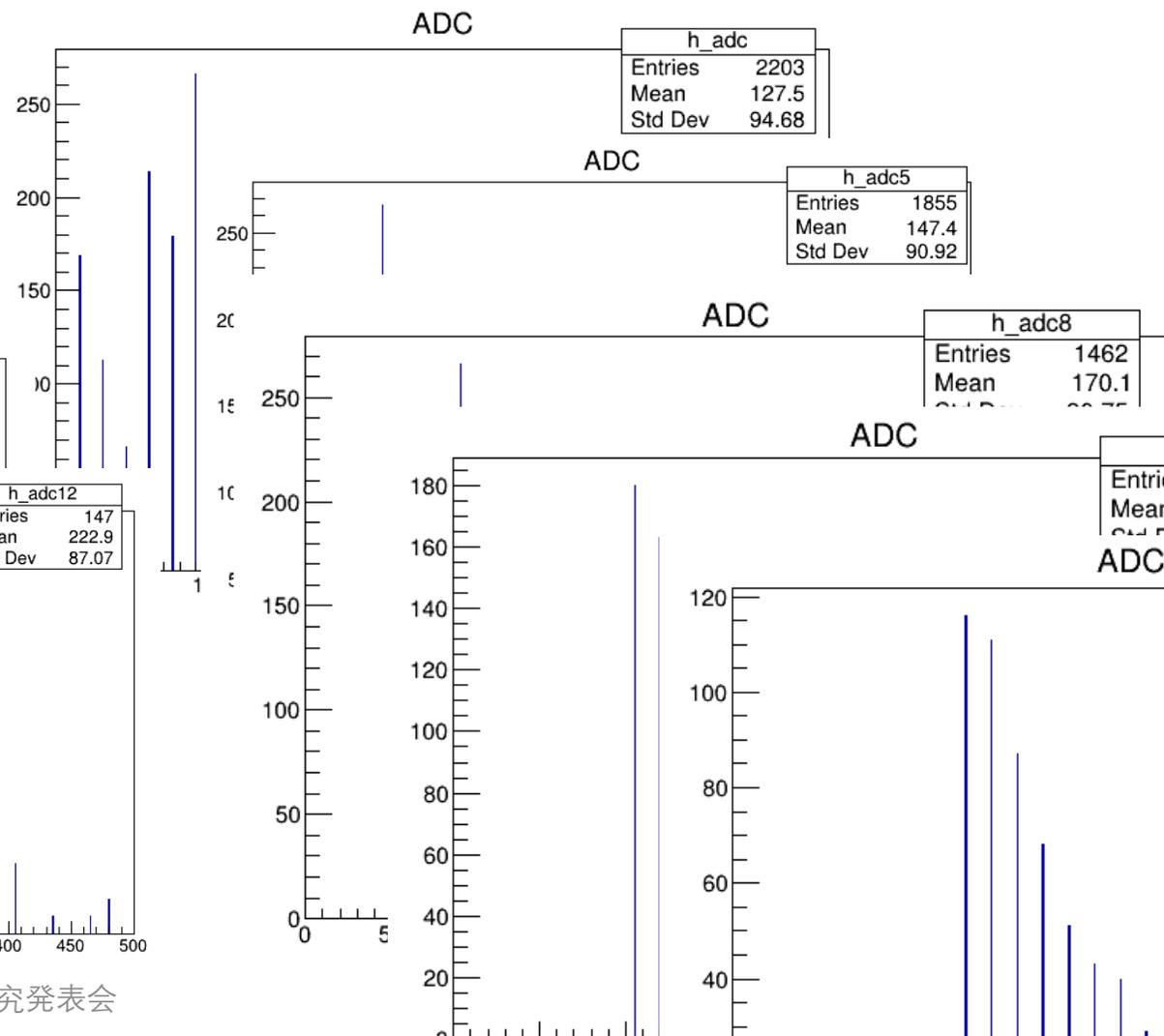
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



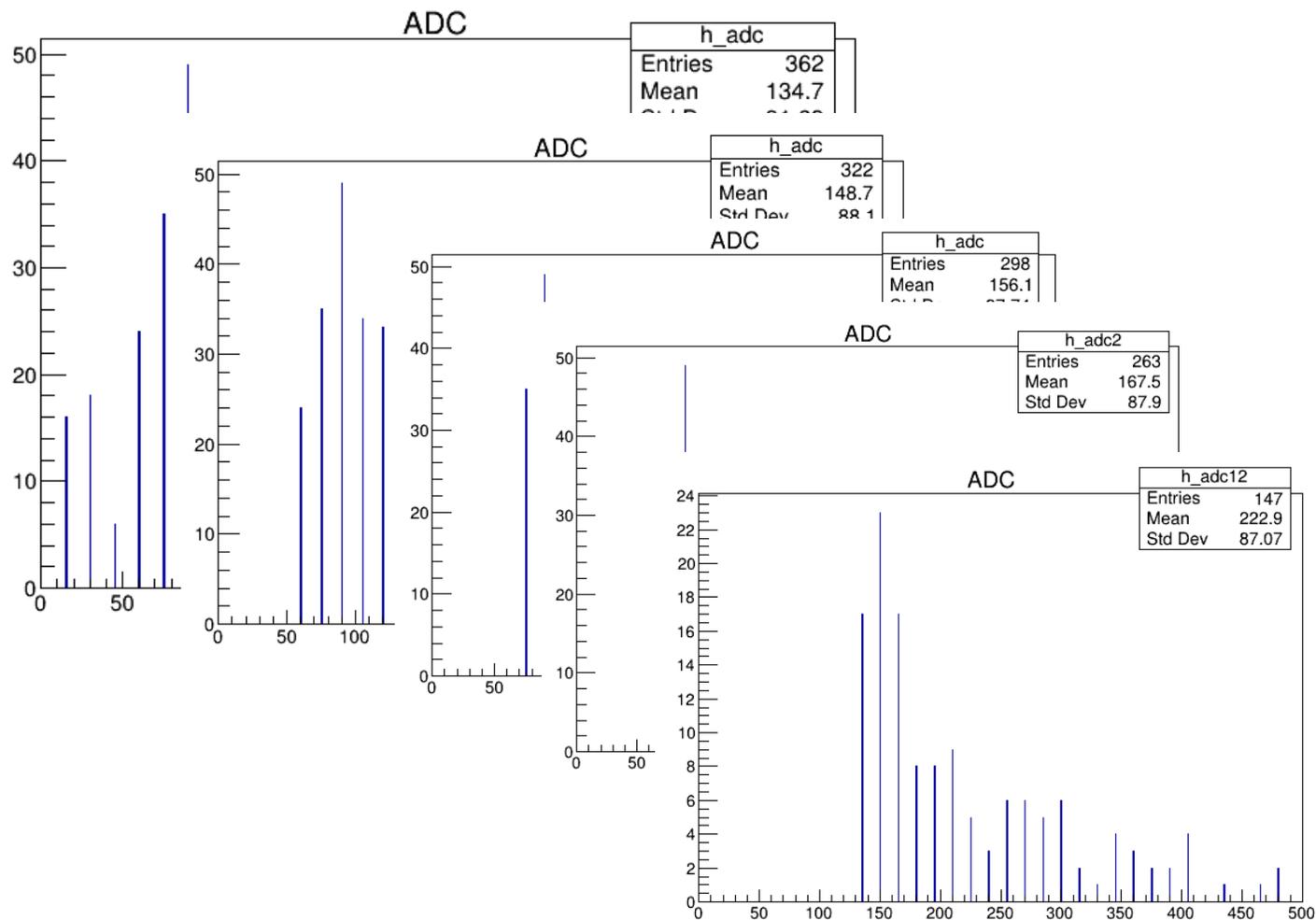
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 1000\mu\text{m}$



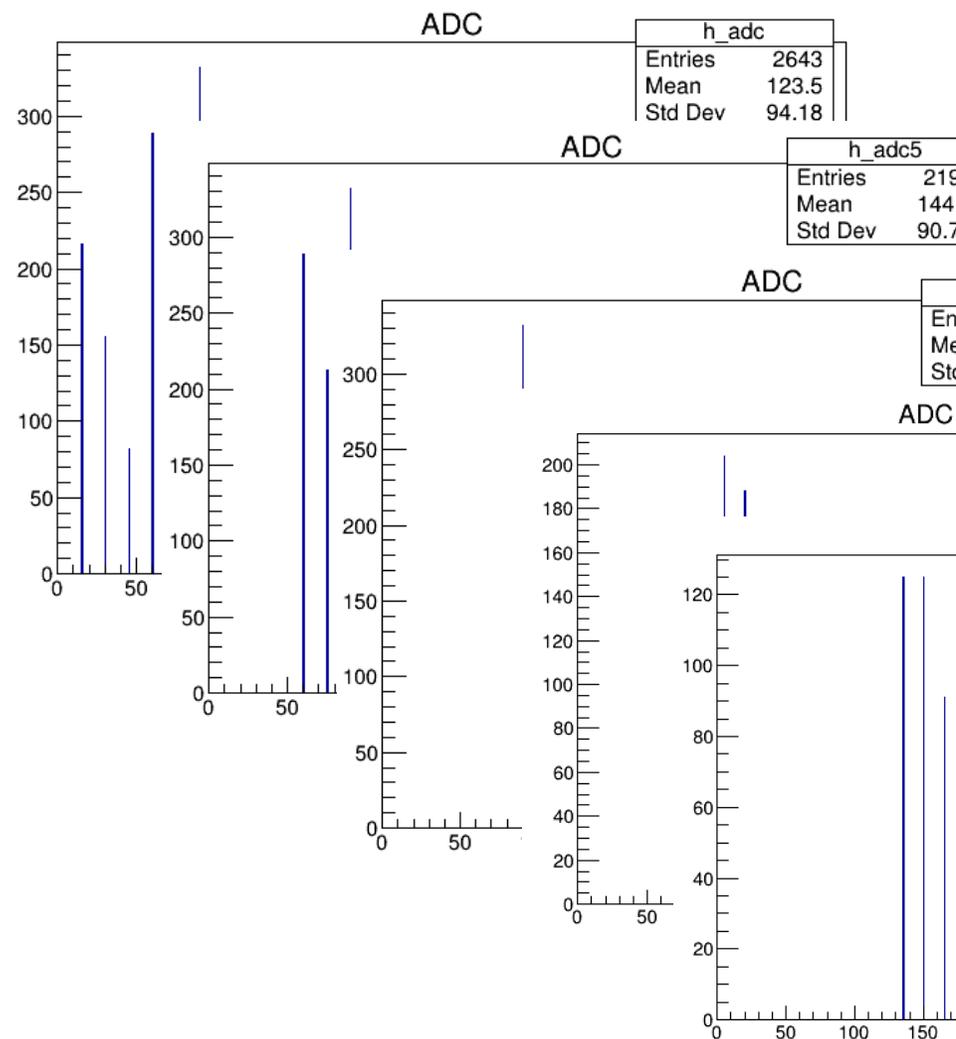
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



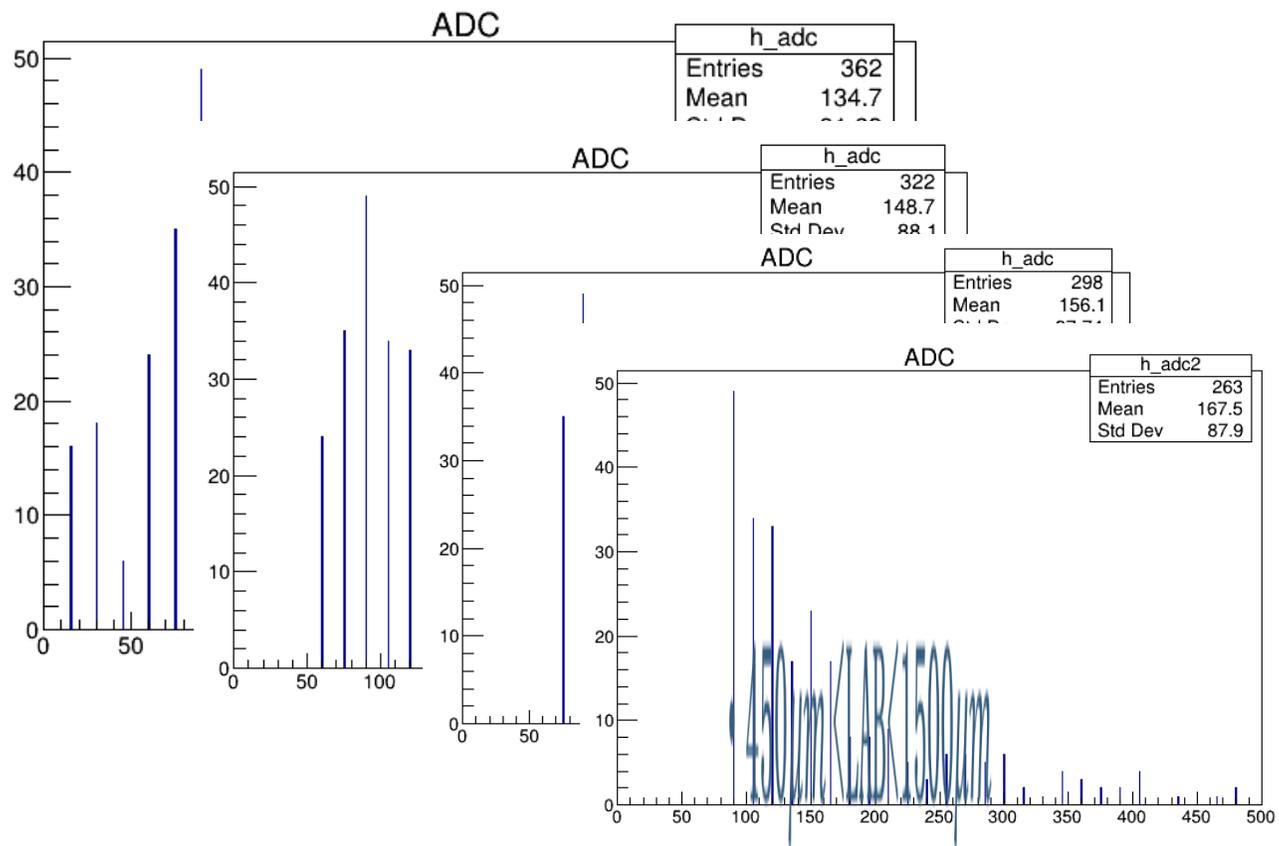
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 1200\mu\text{m}$



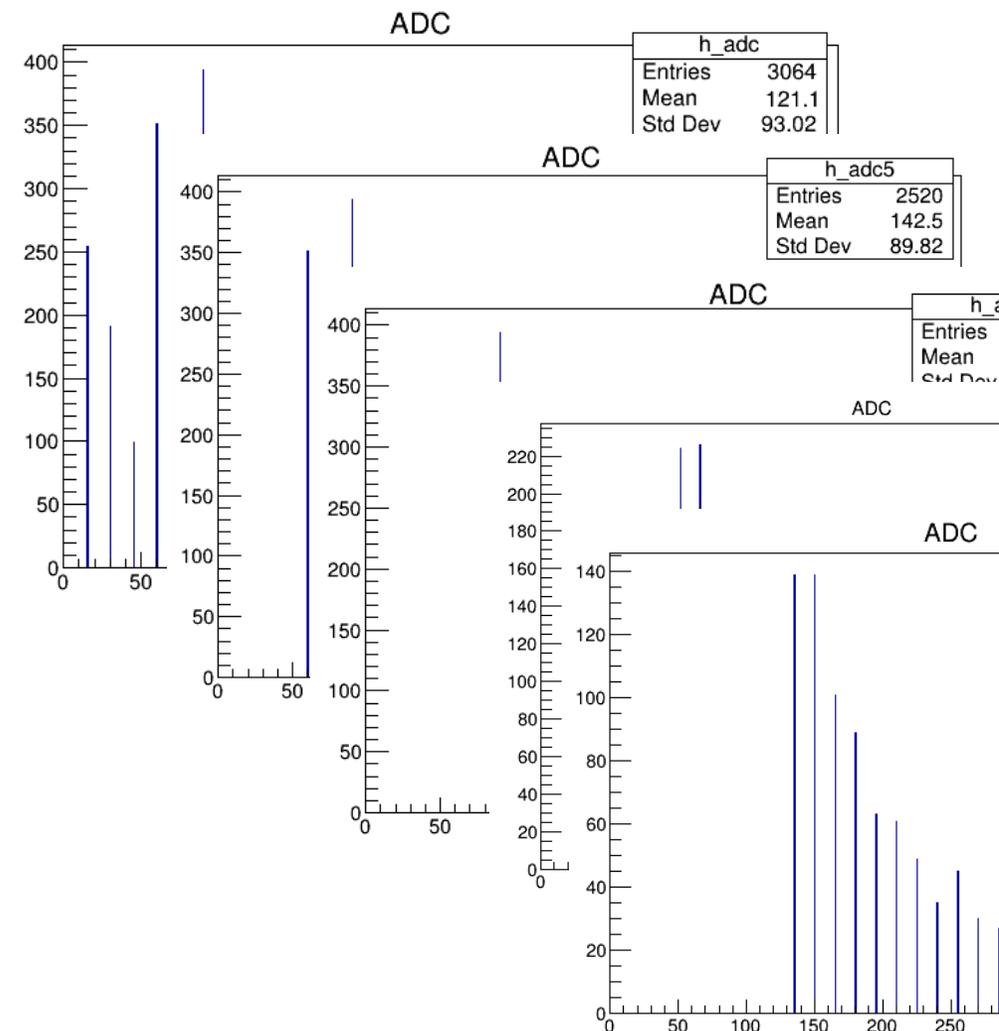
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



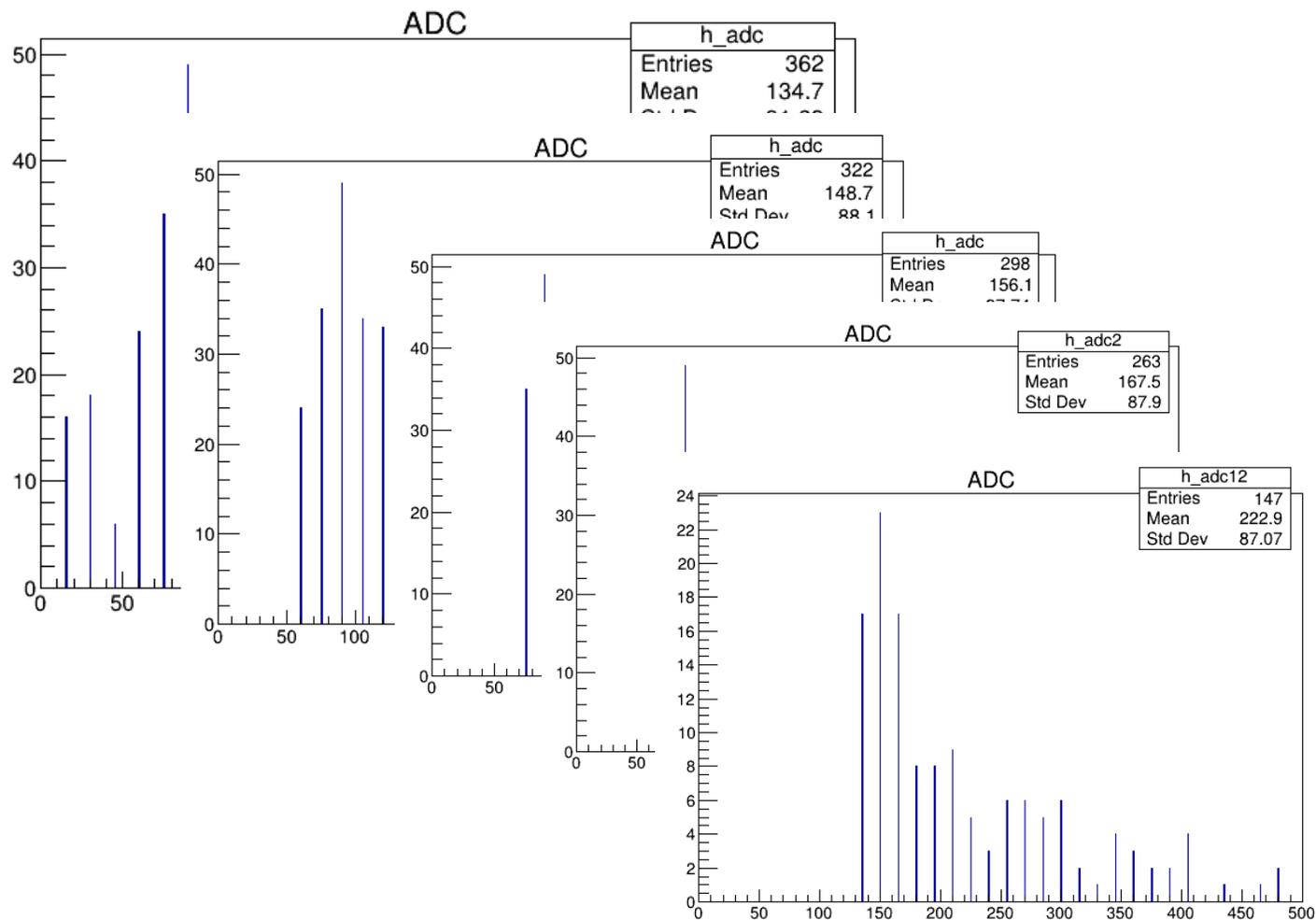
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 1500\mu\text{m}$



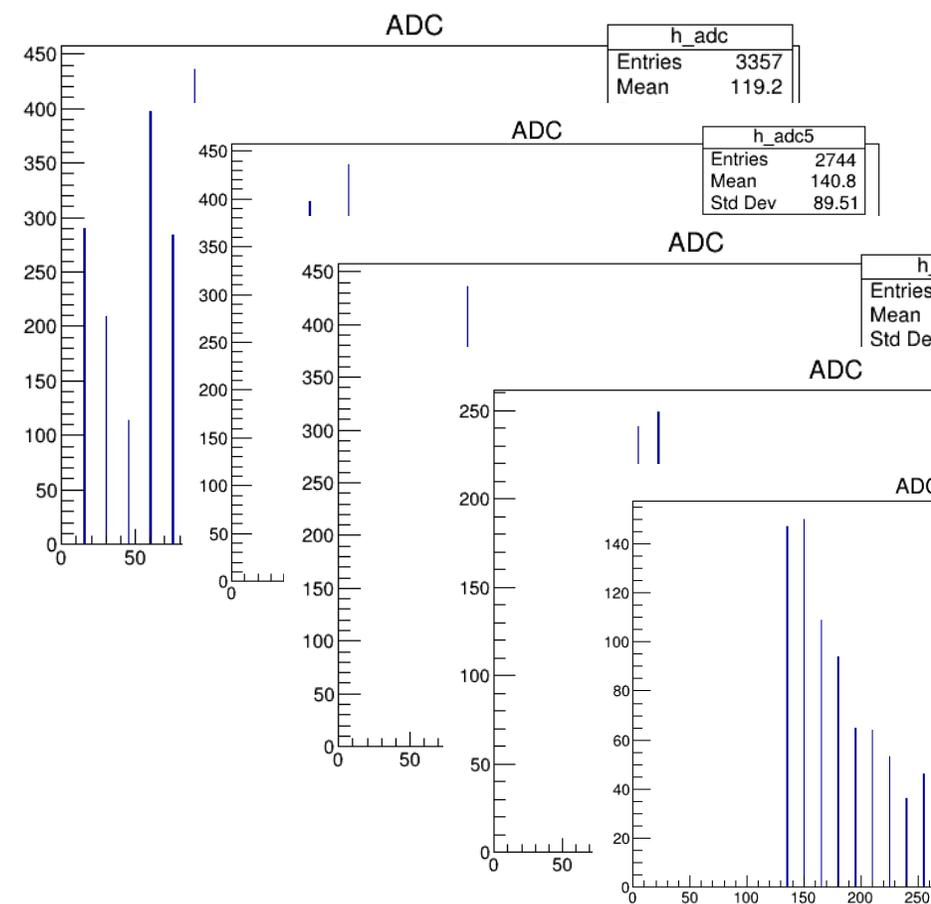
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



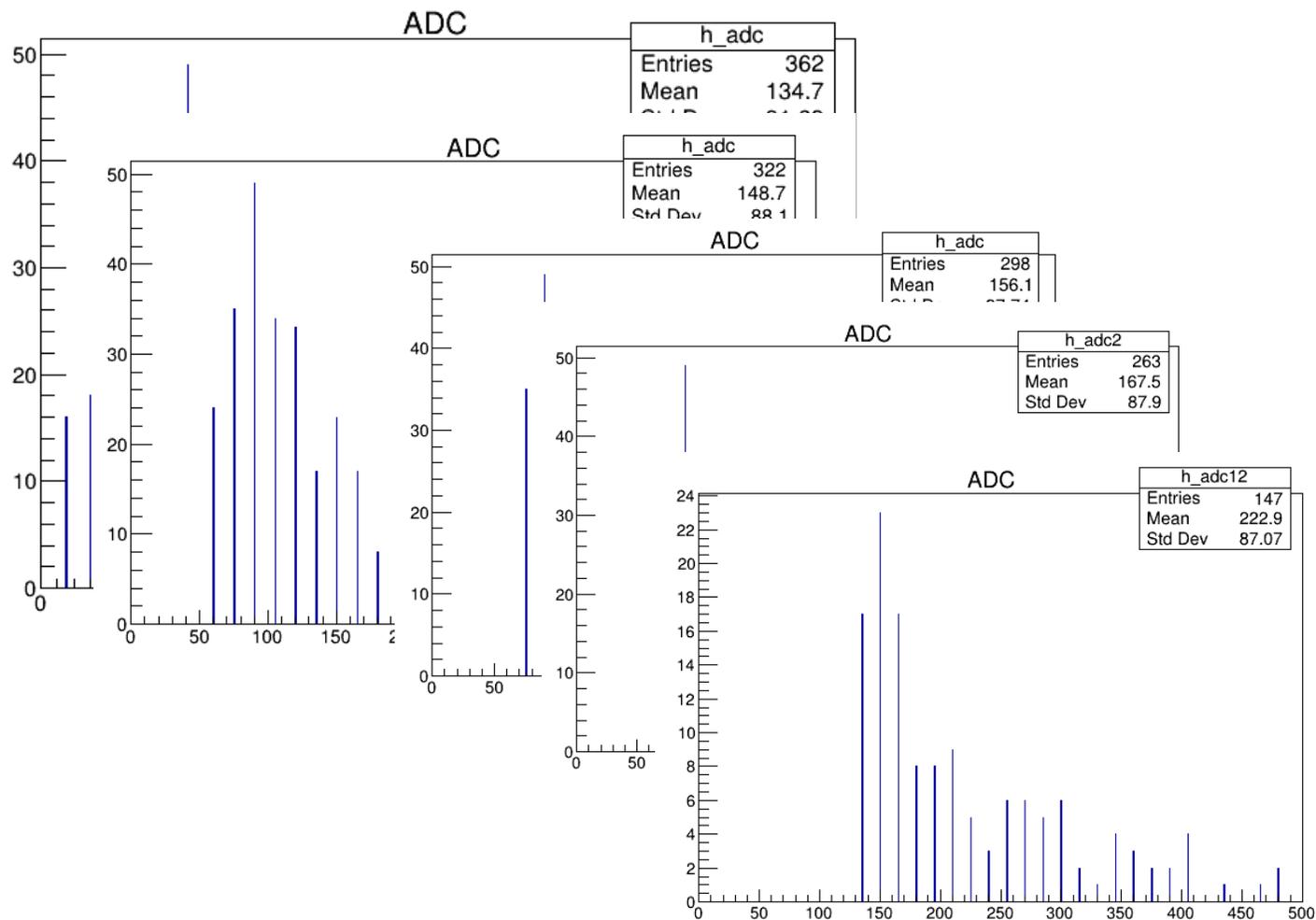
• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 2000\mu\text{m}$



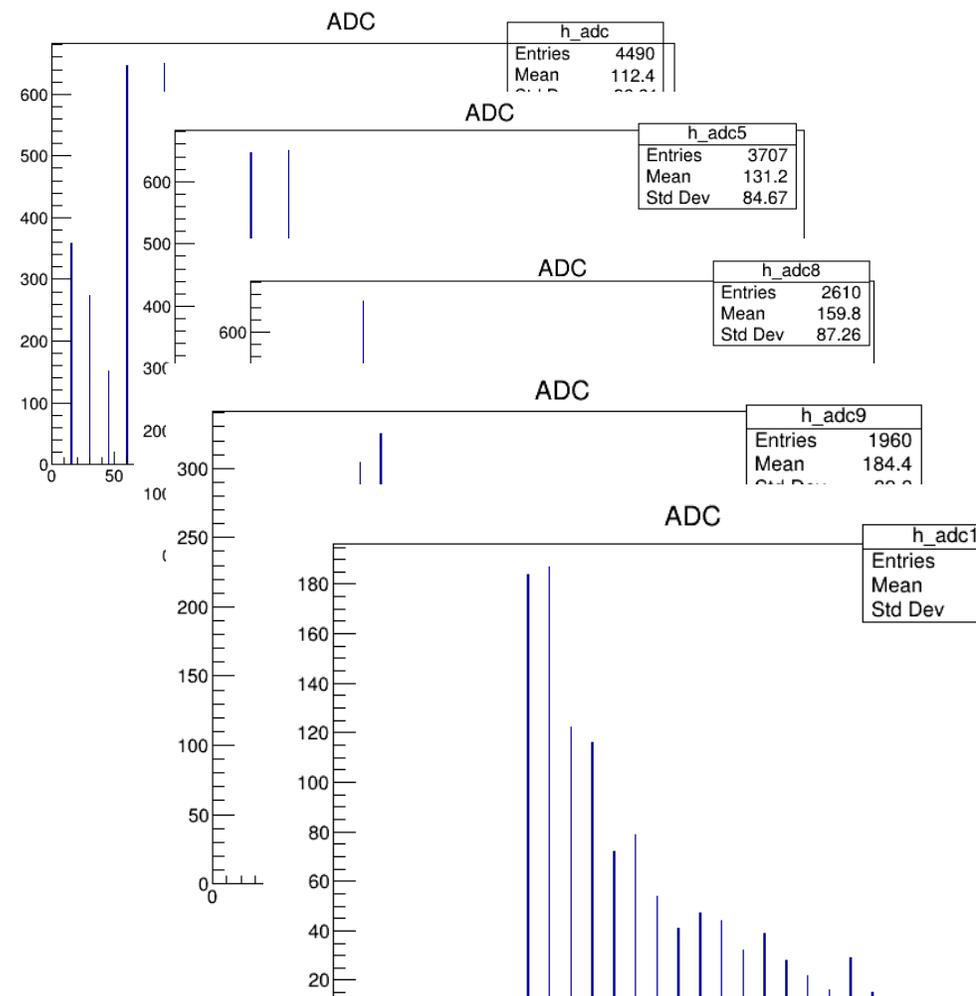
測定方法 通過距離を分けて、ADCの値のヒストグラムを比較

第①組

• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 500\mu\text{m}$



• $450\mu\text{m} < \text{LAB} < 3000\mu\text{m}$



測定方法 宇宙線飛跡の再構成

使用データと解析コード

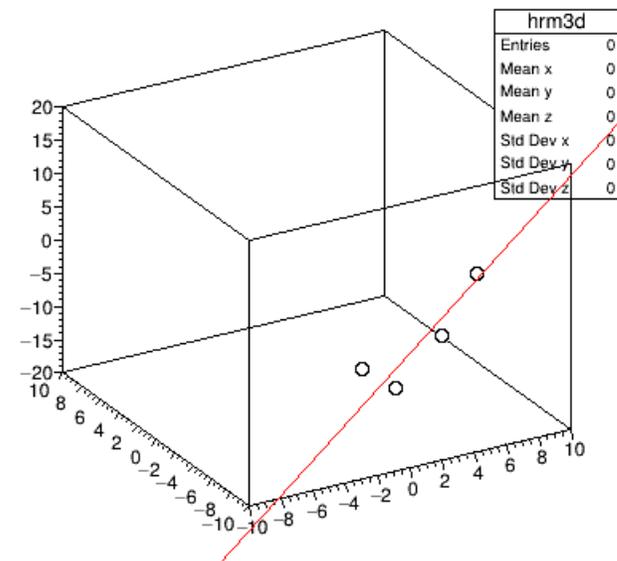
• 宇宙線データ AnaTutoeial_run26960.root

- INTTが2023年8月-9月の間に収集した宇宙線データ
- ヒット位置などの情報はそのrootファイルに入っている

• 解析用コード analyze_cosmic.C inttcls.C inttcls.h

- Rootで実行すると、3クラスタ以上のヒットを持つデータに対して、直線を仮定して飛跡を再構成する

実行例、



```
intt: 49 0 4
0 xyz: -1.24542 -7.10413 -7.3
1 xyz: 4.59754 -5.56274 -7.3
2 xyz: 10.2584 0.5109 -7.3
3 xyz: -0.975 -10.2584 -7.3
```

(x , y , z)

飛跡を再構成するヒット位置

```
531
532 /////// hotchannelをカットためのコード
533 bool isHotArea(int lay, int lad, double z, double lx){
534
535     if(
536         (lay==1&& lad==0&&0<z &&-1.2<lx&&lx<1.2) ||
537         (lay==0&& lad==2&&0<z&&z<6&&-1.2<lx&&lx<0 ) ||
538         (lay==0&& lad==2&&-10<z&&z<-8&&0<lx&&lx<1.2 ) ||
539         (lay==0&& lad==10&&-25<z&&z<-21&&0<lx&&lx<1.2 ) ||
540         (lay==1&& lad==6&&-24<z&&z<-18&& -1.2<lx&&lx<0)||
541         (lay==1&& lad==8&&z<0&& -1.2<lx&&lx<1.2)||
542         (lay==1&& lad==10&&z<0&& -1.2<lx&& lx<1.2)||
543         (lay==2&& lad==12&&-13<z&&z<-11&& -1.2<lx&&lx<0)||
544         (lay==2&& lad==14&&-7<z&&z<-4&& -1.2<lx&&lx<1.2)||
545         ( lay==3&& lad==1&&12<z&& z<13&& 0<lx&&lx<1.2)||
546         ( lay==3&& lad==5&&z<0&& -1.2<lx&&lx<1.2)||
547         ( lay==3&& lad==6&&z<0&& -1.2<lx&&lx<1.2)
548     ) {
549         //cout<<" removed   : "<<z<<" : "<< lx<<" "<< lay<<" "<< lad<<endl;
550         return true;
551     }
552 }
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
```

- ・カットしたい部分を解析コードに書き込む

測定方法

ホットチャンネルをカットする方法

例、334番

・カットする前の実行結果

```
intt: 325 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 326 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 328 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 329 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 330 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 331 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 332 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 333 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4

intt: 334 0 7
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 -2.4
1 : -6.87298 2.10809 18.1 : -0.2574 0
2 : -5.69235 -4.46793 18.1 : -0.8658 0
3 : -7.7284 -0.7215 16.1 : 0.7215 -2
4 : -8.33814 4.93815 16.1 : 0.5265 -2
5 : -9.49504 -1.86482 16.1 : -0.0234 -2
6 : 0.3315 -10.2584 18.1 : 0.3315 0
```

カットされた



・カットした後の実行結果

```
removed : 22.1 : 0.9165 1 0
intt: 328 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 329 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 330 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
removed : 10.5 : -0.8541 1 0
intt: 331 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 332 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
removed : 18.1 : 0.0117 1 0
intt: 333 0 0

removed : 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 334 0 6
0 : -6.87298 2.10809 18.1 : -0.2574 0 6
1 : -5.69235 -4.46793 18.1 : -0.8658 0 8
2 : -7.7284 -0.7215 16.1 : 0.7215 1 6
3 : -8.33814 4.93815 16.1 : 0.5265 2 7
4 : -9.49504 -1.86482 16.1 : -0.0234 2 9
5 : 0.3315 -10.2584 18.1 : 0.3315 3 12
```

(5.78336, 4.37692, 4.1)

をカットされた

飛跡を再構成するヒット位置

飛跡を再構成するヒット位置

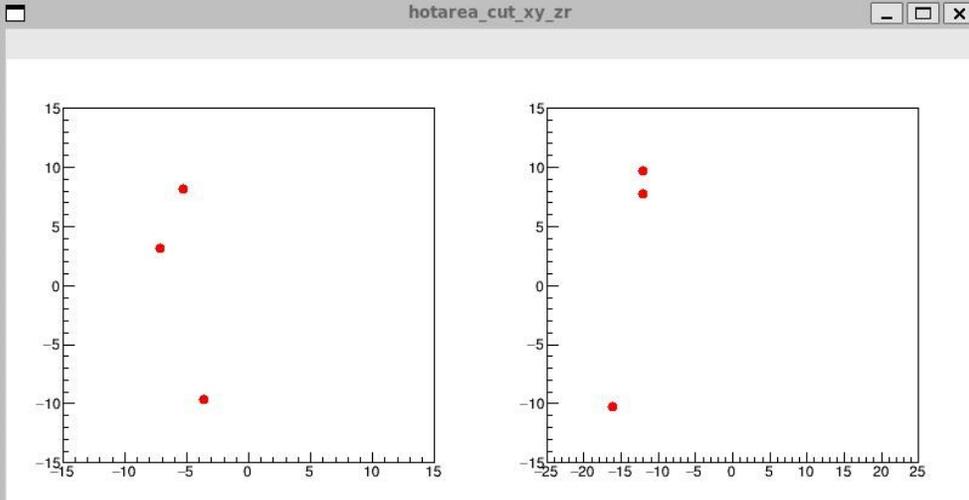
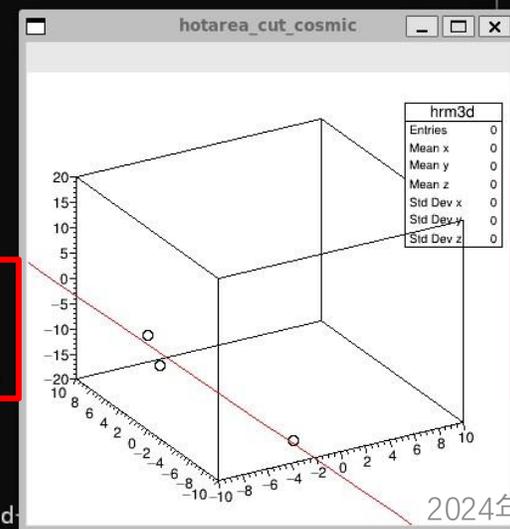
例、386番:再構成した飛跡を比較する

・カットした後の実行結果

・カットしていない時の実行結果

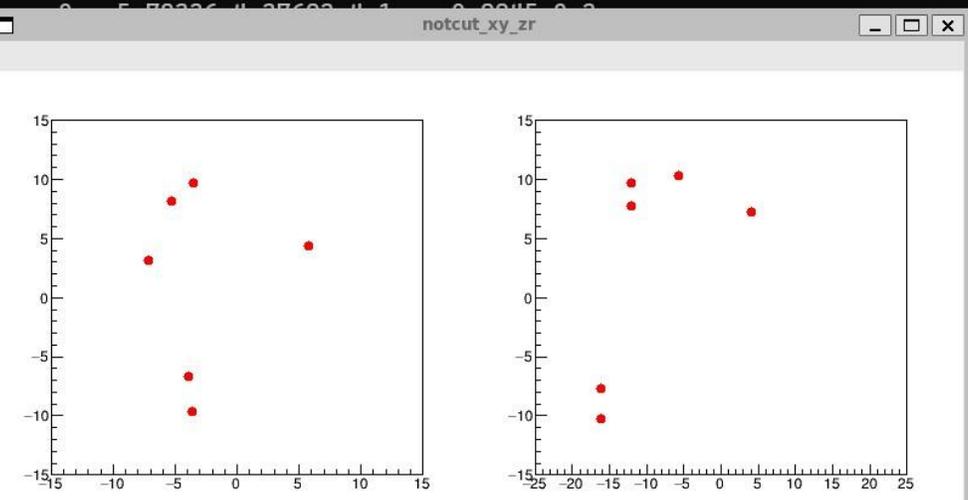
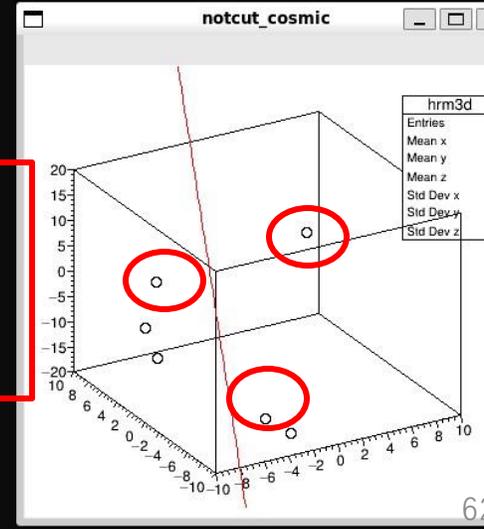
```

removed : 4.1 : 0.2145 1 0
hotarea_cut_xy_zr
removed : 4.1 : -0.9945 0 2
removed : 10.5 : -0.8541 1 0
removed : 16.1 : -0.1677 1 0
intt: 384 0 0
removed : 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 385 0 0
removed : 4.1 : -0.9945 0 2
removed : -16.1 : -0.0975 1 8
removed : -5.7 : -0.4407 3 5
intt: 386 0 3
0 : -7.13174 3.10426 -12.1 : 0.8775 1 5
1 : -5.24621 8.1323 -12.1 : -0.156 2 6
2 : -3.64828 -9.59245 -16.1 : 0.3003 3 11
0 : -7.13174 3.10426 -12.1
1 : -5.24621 8.1323 -12.1
2 : -3.64828 -9.59245 -16.1
Info in <TCanvas::Print>: pdf file cosmic-1.pdf
    
```

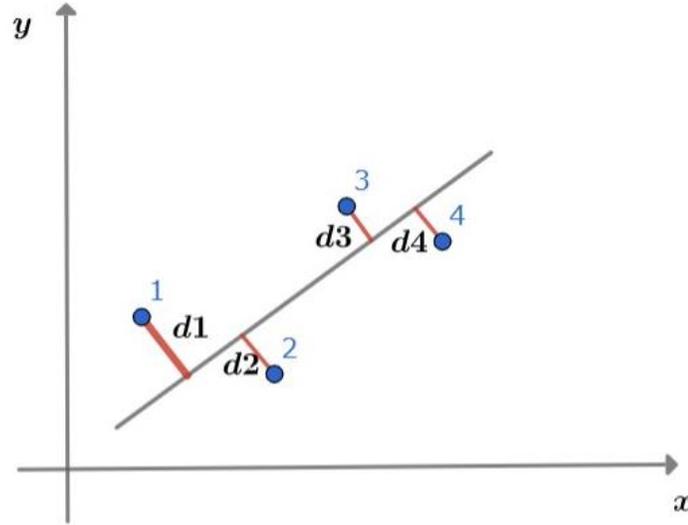
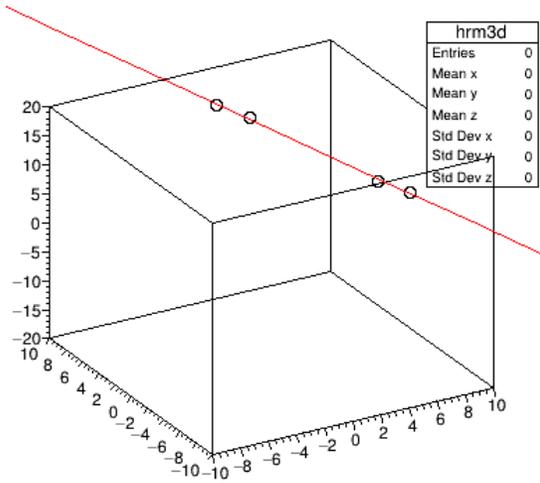
```

intt: 377 0 1
notcut_xy_zr
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 384 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 385 0 1
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 0 2
intt: 386 0 6
0 : 5.78336 4.37692 4.1 : -0.9945 0 2
1 : -7.13174 3.10426 -12.1 : 0.8775 1 5
2 : -3.94864 -6.64424 -16.1 : -0.0975 1 8
3 : -5.24621 8.1323 -12.1 : -0.156 2 6
4 : -3.51857 9.64617 -5.7 : -0.4407 3 5
5 : -3.64828 -9.59245 -16.1 : 0.3003 3 11
0 : 5.78336 4.37692 4.1
1 : -7.13174 3.10426 -12.1
2 : -3.94864 -6.64424 -16.1
3 : -5.24621 8.1323 -12.1
    
```

測定方法 飛跡の選定

- 各クラスタとのズレが小さい飛跡



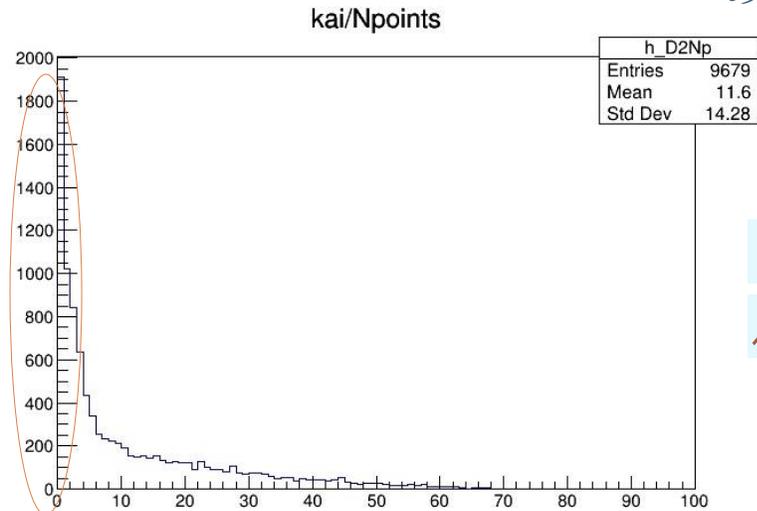
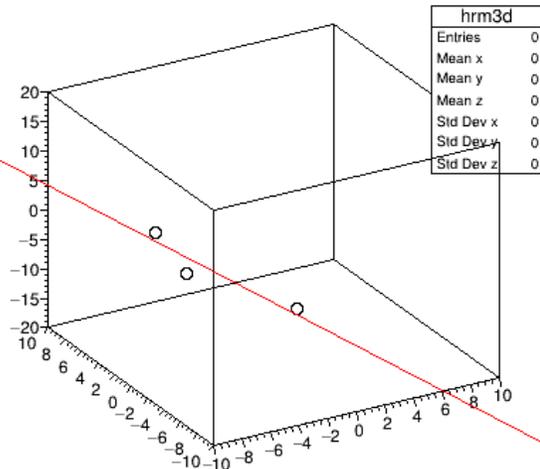
• $d=(y-f(x))$: ヒット位置から飛跡までの距離(±)

• カイ二乗 $=d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + \dots + d_n^2$
全体のズレを表す

• カイ二乗/N: 平均のズレを表す

• カイ二乗/Nが小さければ、クラスタと飛跡のズレもより小さいので、できるだけそのような飛跡を選択する

- 各クラスタとのズレが大きい飛跡



ここで、平均ズレが1より小さい場合の飛跡を選択した

実行した結果

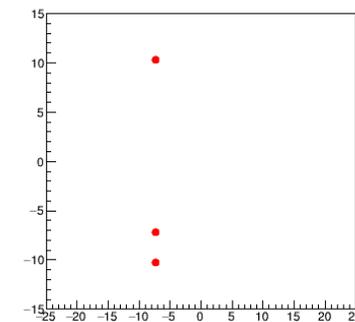
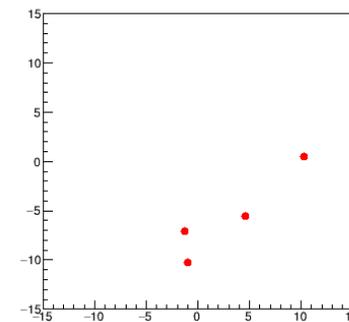
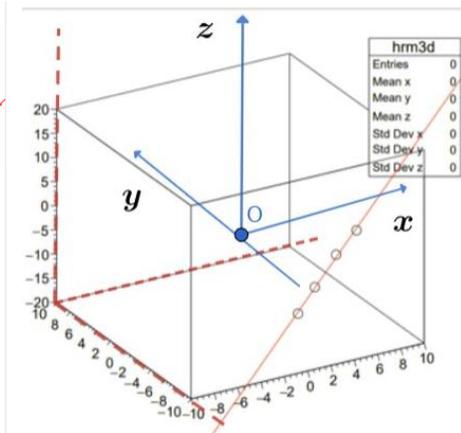
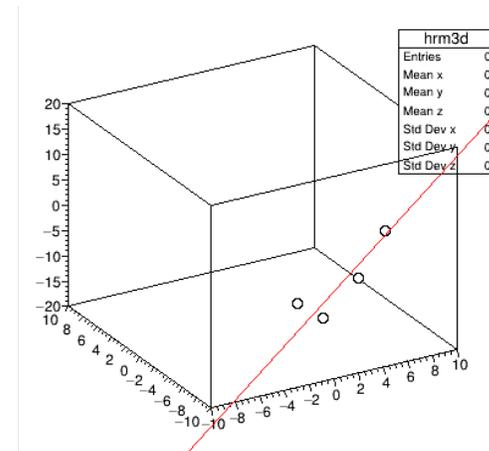
例、

```
0 xyz: -1.24542 -7.10413 -7.3 layer lad adc: 0 9 255
xb yb : 0.258819 -0.965926
xl yl zl : 214260 176370 100
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 604.793
```

```
1 xyz: 4.59754 -5.56274 -7.3 layer lad adc: 0 11 60
xb yb : 0.965926 -0.258819
xl yl zl : 214260 176370 100
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 949.785
```

```
2 xyz: 10.2584 0.5109 -7.3 layer lad adc: 3 0 90
xb yb : 1 0
xl yl zl : 214260 176370 100
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 792.264
```

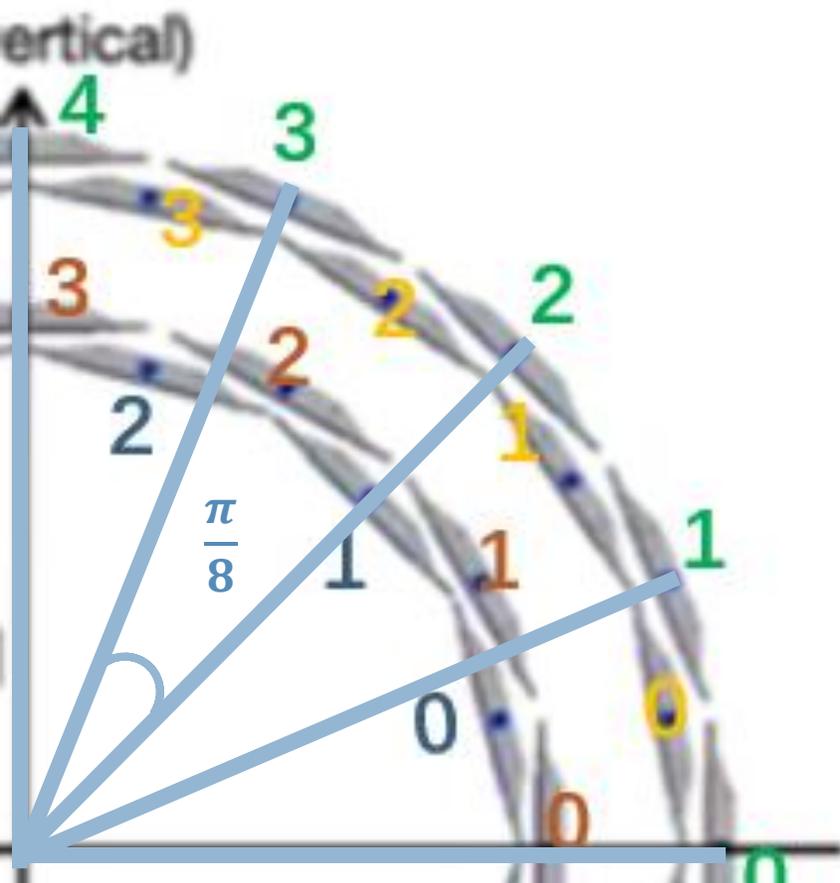
```
3 xyz: -0.975 -10.2584 -7.3 layer lad adc: 3 12 75
xb yb : -1.83697e-16 -1
xl yl zl : 214260 176370 100
宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: 536.828
```



xy平面センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$ の求め方

例、第四層: layer=3

$$\frac{2\pi}{16} = \frac{\pi}{8}$$



(layer, ladder)

センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$

$$(\cos 0, \sin 0)$$

(3,0)

$$\left(\cos\left(\frac{\pi}{8}\right), \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)\right)$$

(3,1)

$$\left(\cos\left(\frac{\pi}{8} * 2\right), \sin\left(\frac{\pi}{8} * 2\right)\right)$$

(3,2)

(3,n)

$$\left(\cos\left(\frac{\pi}{8} * n\right), \sin\left(\frac{\pi}{8} * n\right)\right)$$

それで、センサーのlayer, ladderを使って、コードを書いて方向ベクトルが求められる

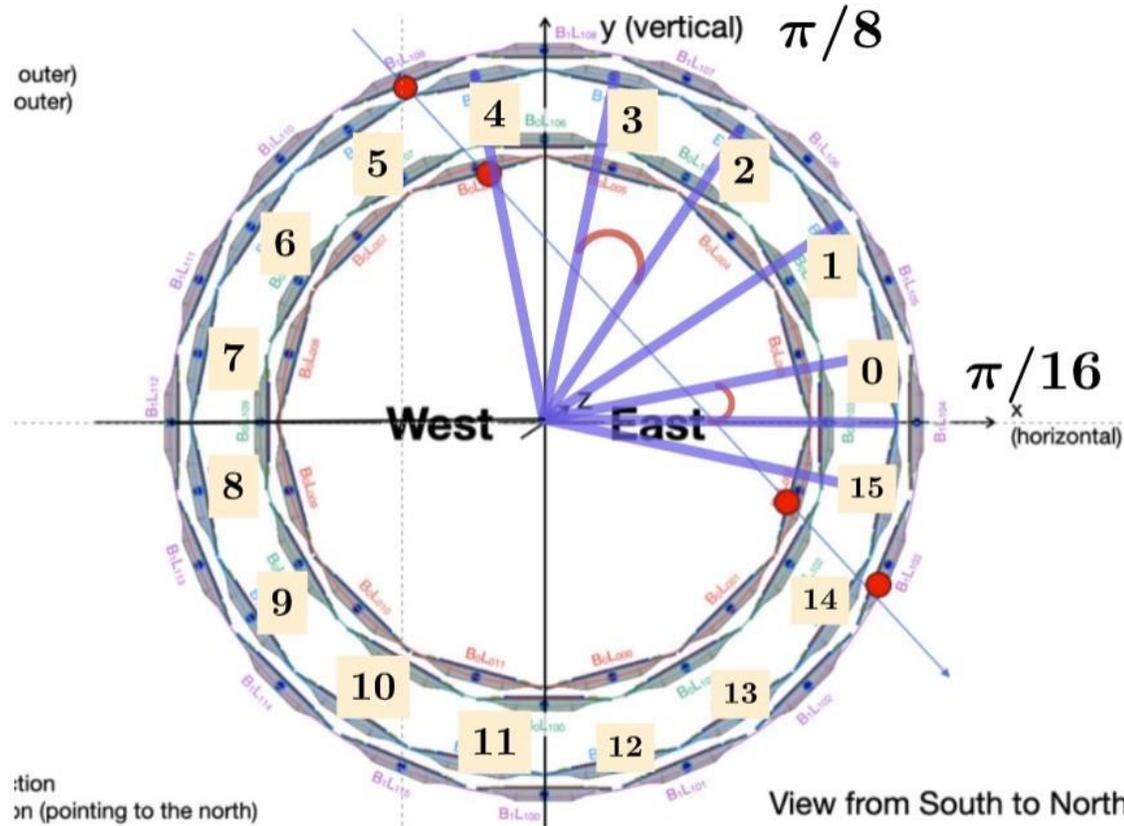
各センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$ の求め方について

第三層: layer=2

$$\frac{2\pi}{16} = \frac{\pi}{8}$$

(layer, ladder)

センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$



(2,0)

$$\left(\cos \frac{\pi}{16}, \sin \frac{\pi}{16} \right)$$

(2,1)

$$\left(\cos \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} \right), \sin \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} \right) \right)$$

(2,2)

$$\left(\cos \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} * 2 \right), \sin \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} * 2 \right) \right)$$

(2,n)

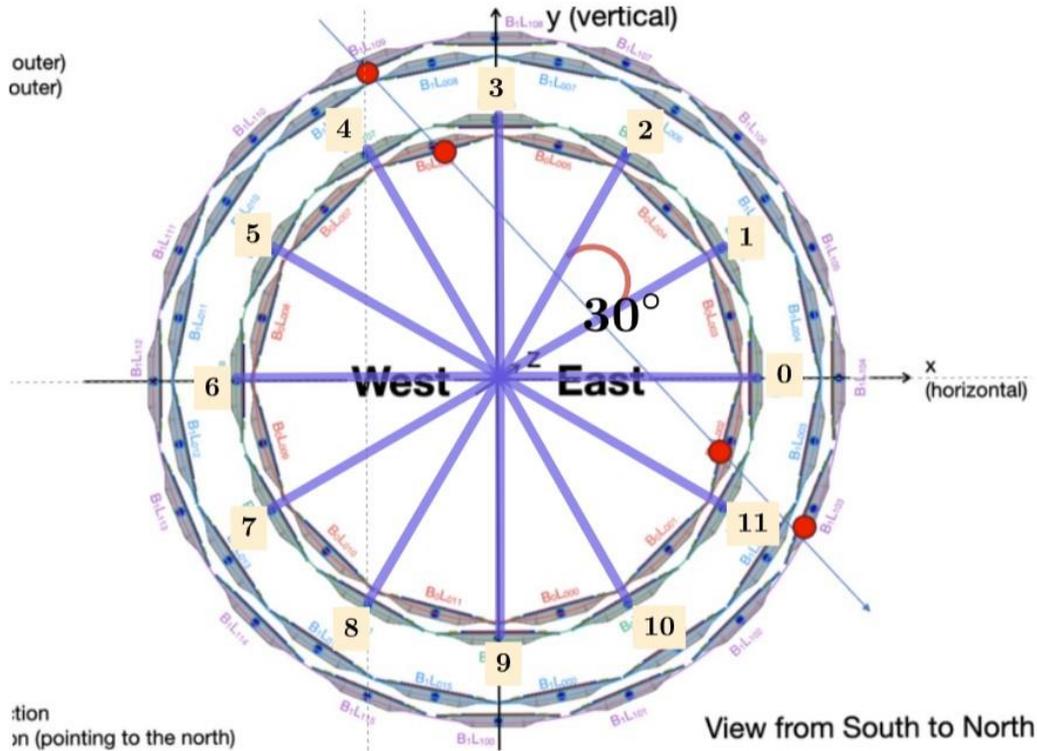
$$\left(\cos \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} * n \right), \sin \left(\frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{8} * n \right) \right)$$

第三層

各センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$ の求め方について

第二層: layer=1 $\frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$

(layer, ladder) センサーの方向ベクトル $\vec{b}(x_b, y_b)$



第二層

(1,0) $(\cos 0, \sin 0)$

(1,1)

$(\cos(\frac{\pi}{6}), \sin(\frac{\pi}{6}))$

(1,2)

$(\cos(\frac{\pi}{6} * 2), \sin(\frac{\pi}{6} * 2))$

(1,n)

$(\cos(\frac{\pi}{6} * n), \sin(\frac{\pi}{6} * n))$

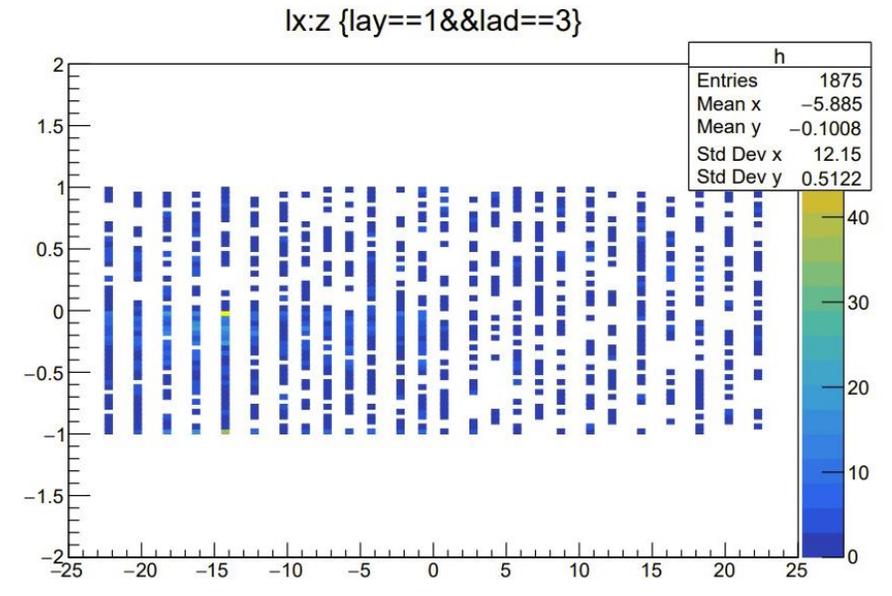
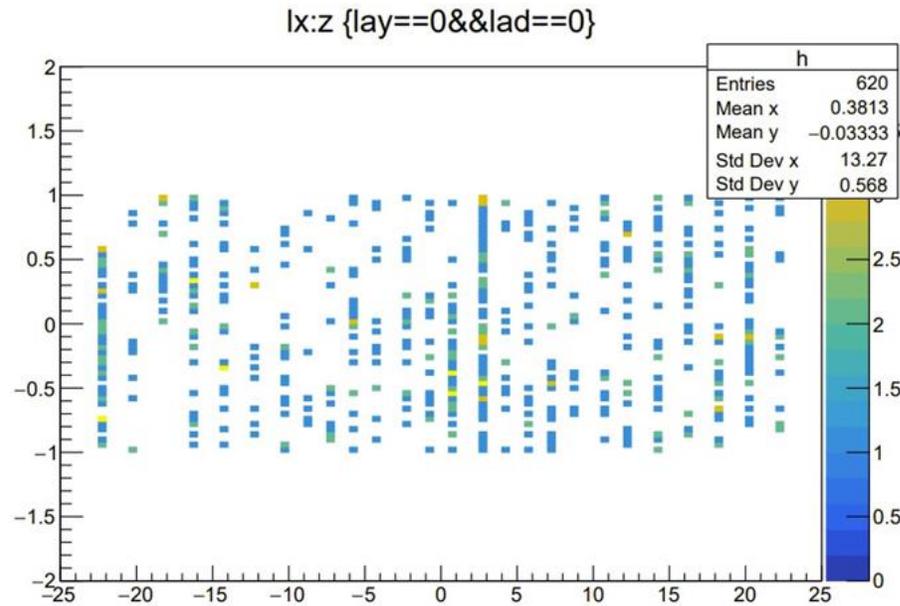
(1,n)

ラダー毎に、作った分布図 (56枚あり)

56枚の図を見て、3種類に分けた

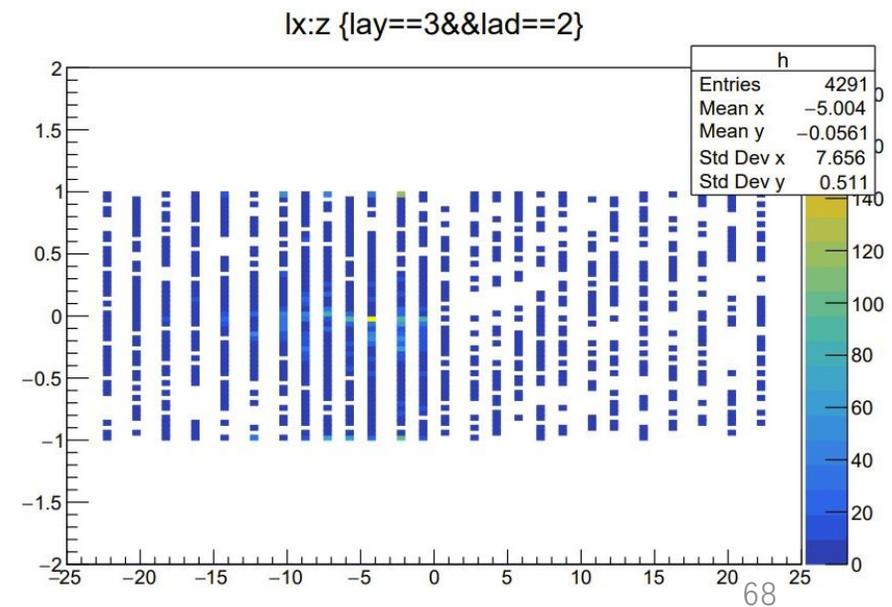
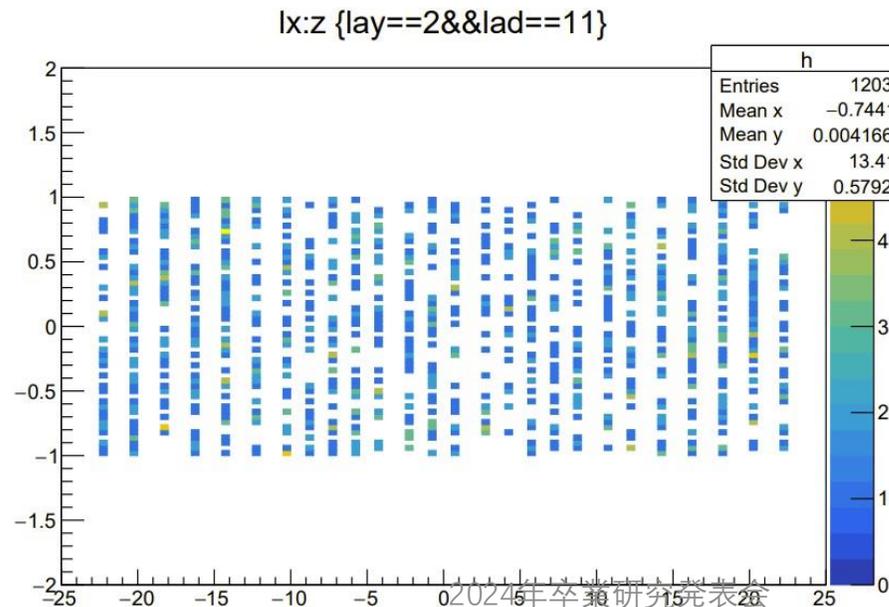
種類① 普遍的な分布状況

- 47枚があり
- ヒット数620~4291の間

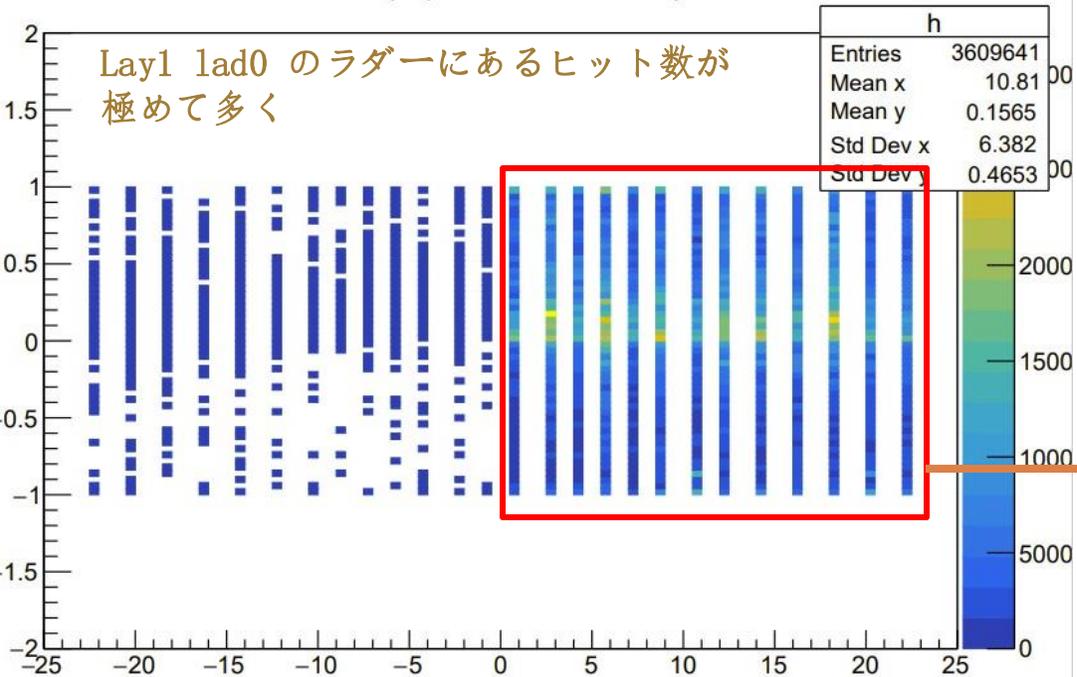


それらのヒット数の分布図には、ヒット数が極めて集中に分布している部分がないので、

それらは **正常な状態** だと判断



ix:z {lay==1&&lad==0}

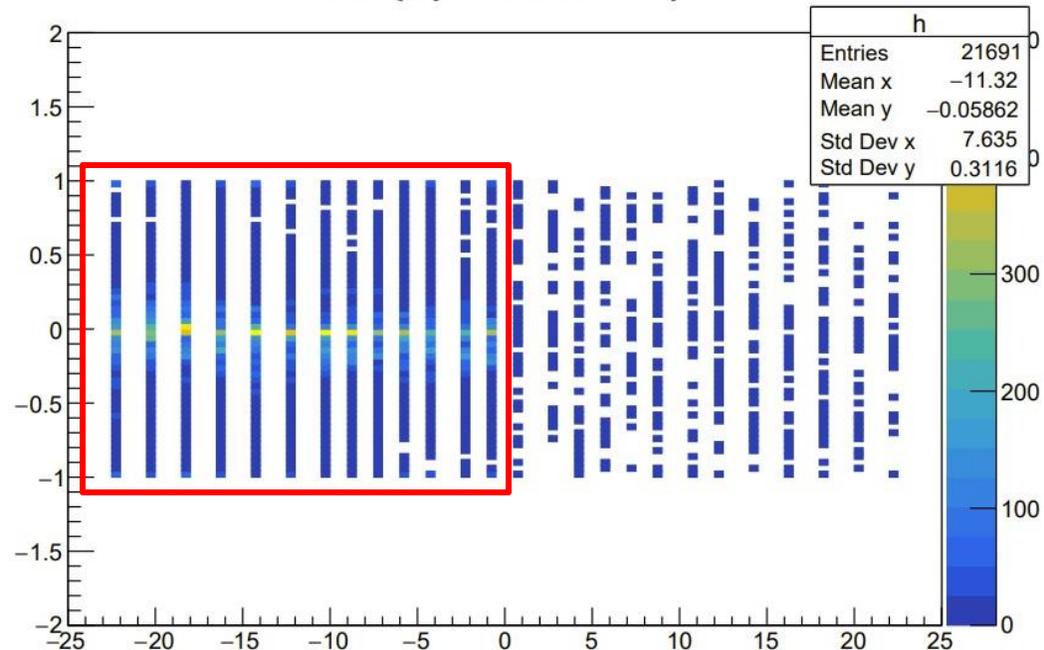


種類② ヒット数がラダーの右・左辺に集中に分布している場合

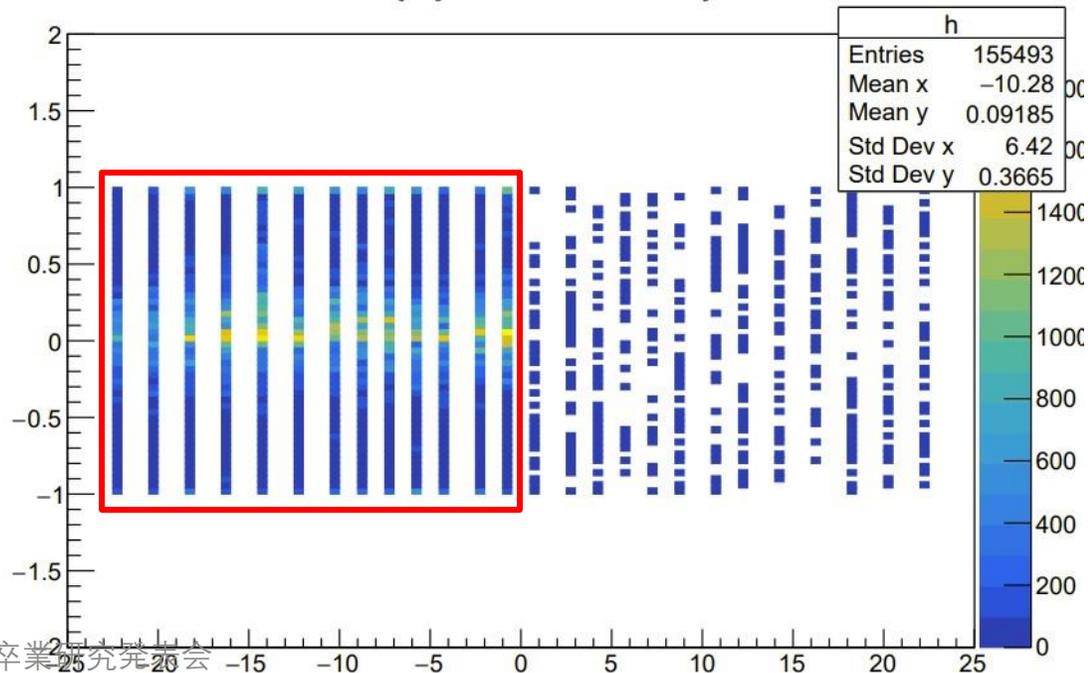
- 5枚があり
- ヒット数が多く、2万1691~360万9641の間
それらはよく光っている部分だと判断

赤枠に囲まれた部分をカットすれば、飛跡の再構成に影響を与えないと思う

ix:z {lay==1&&lad==8}

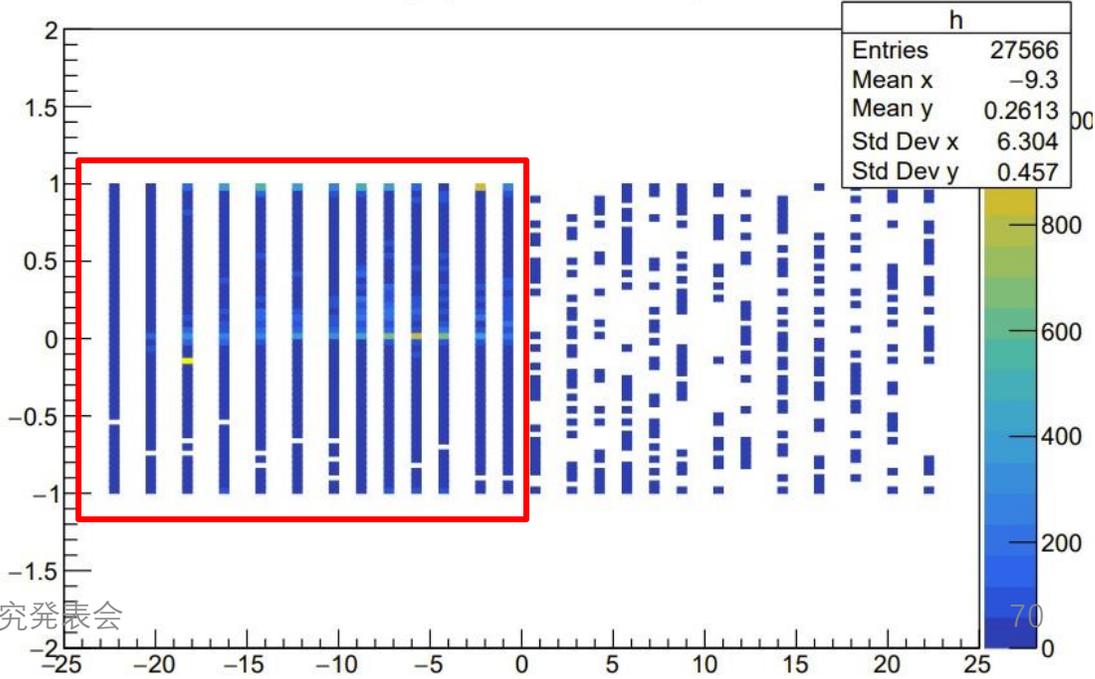
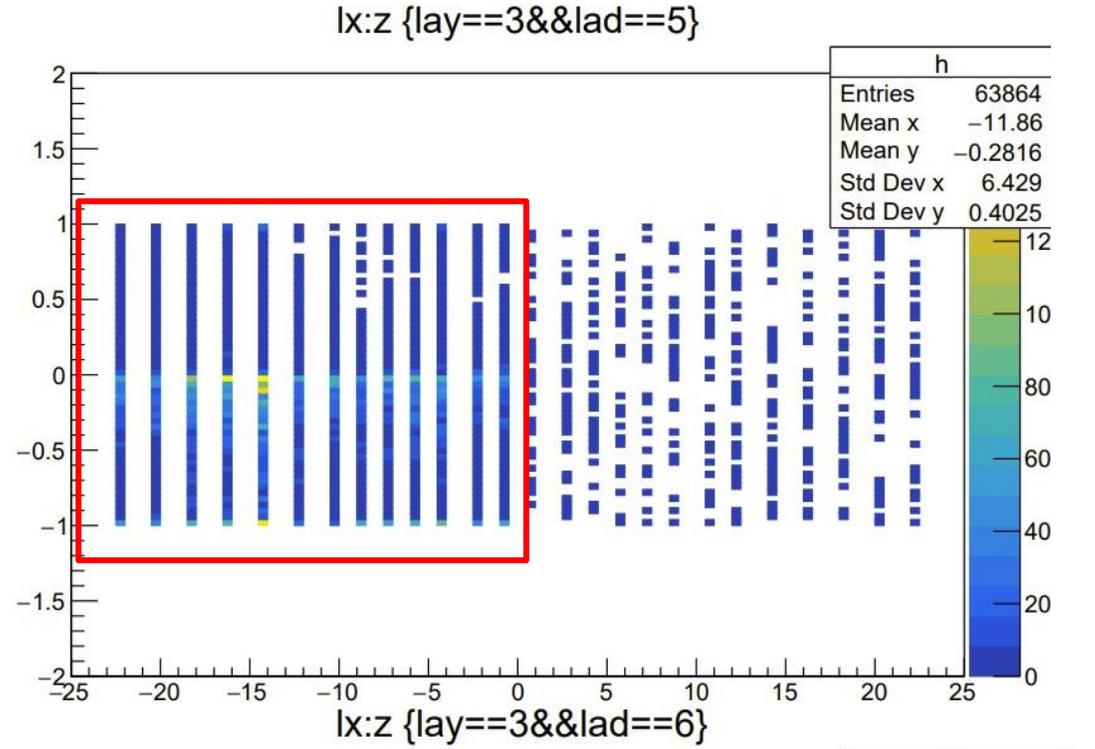


ix:z {lay==1&&lad==10}



種類② ラダーの右・左辺に集中に分布する
 場合 5枚あり

カットしたい部分に関する			
ラダーの番号	ヒット数	カットしたい lxの範囲	カットしたい zの範囲
① $lay = 1$ $lad = 0$	360万9641	-1.2~1.2	0~25
② $lay = 1$ $lad = 8$	2万1691	-1.2~1.2	-25~0
③ $lay = 1$ $lad = 10$	15万5493	-1.2~1.2	-25~0
④ $lay = 3$ $lad = 5$	6万3864	-1.2~1.2	-25~0
⑤ $lay = 3$ $lad = 6$	2万7566	-1.2~1.2	-25~0

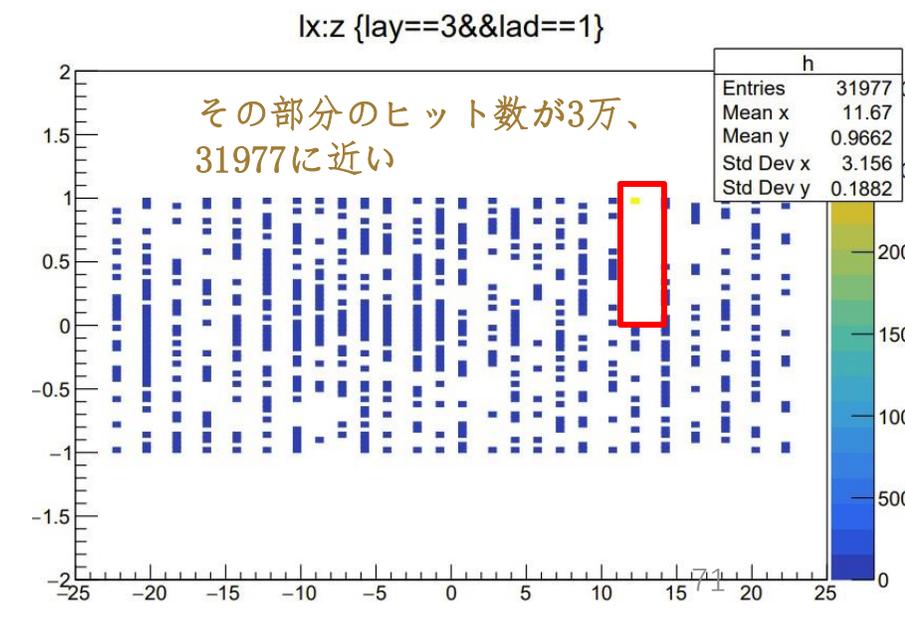
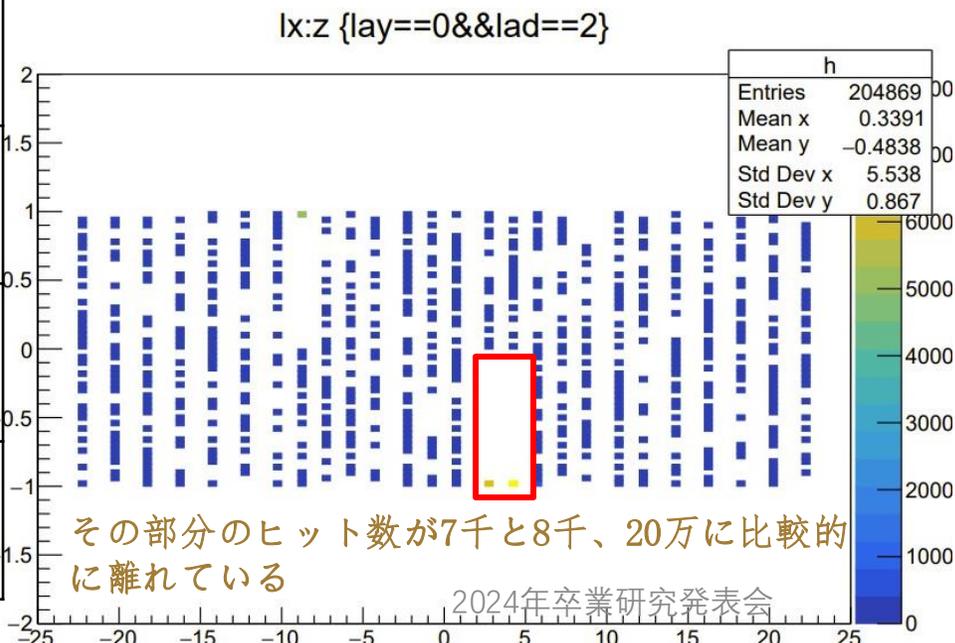
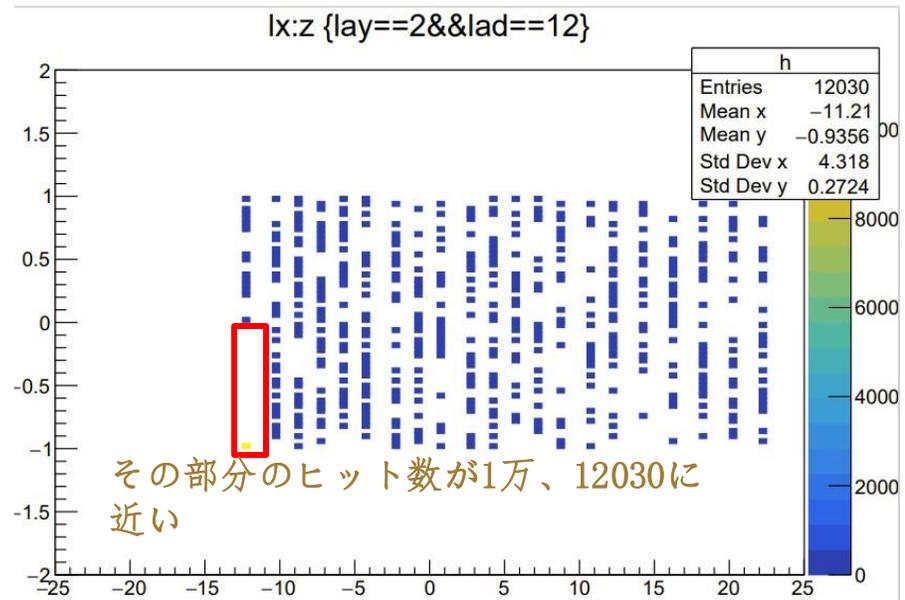
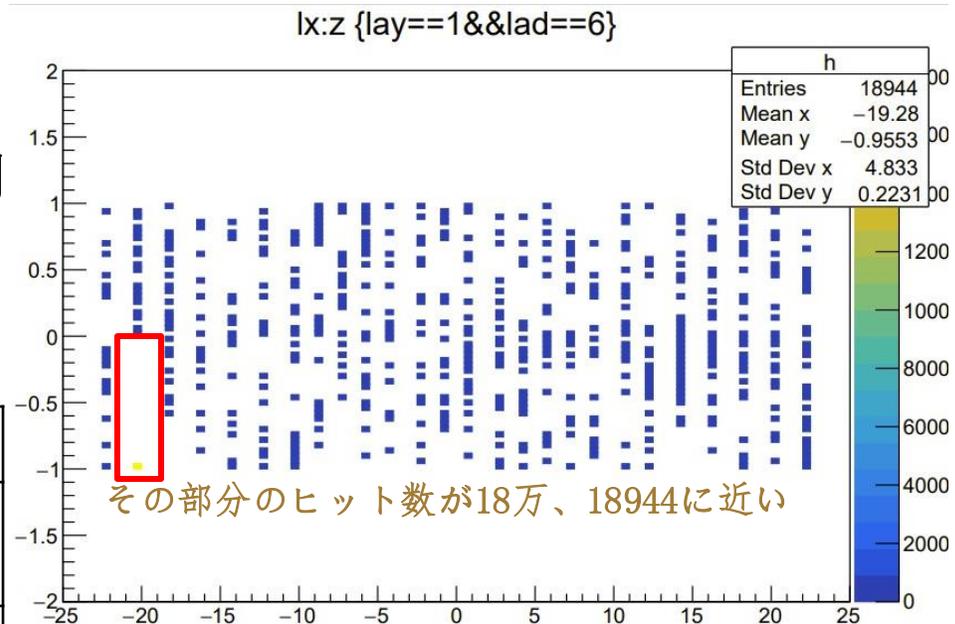


種類③一つのチップに集中している分布状況

- 4枚があり
- ヒット数12030~20万4869の間

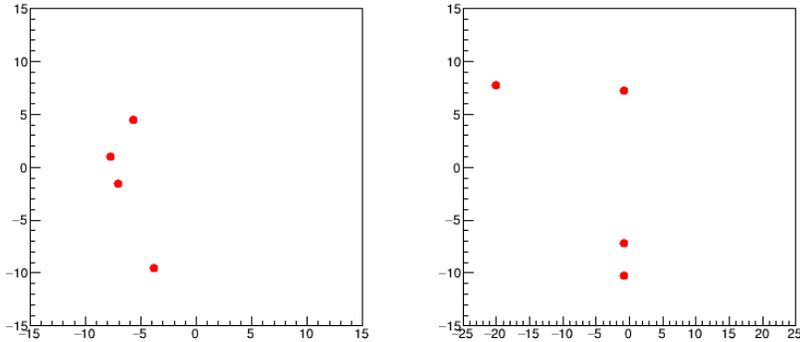
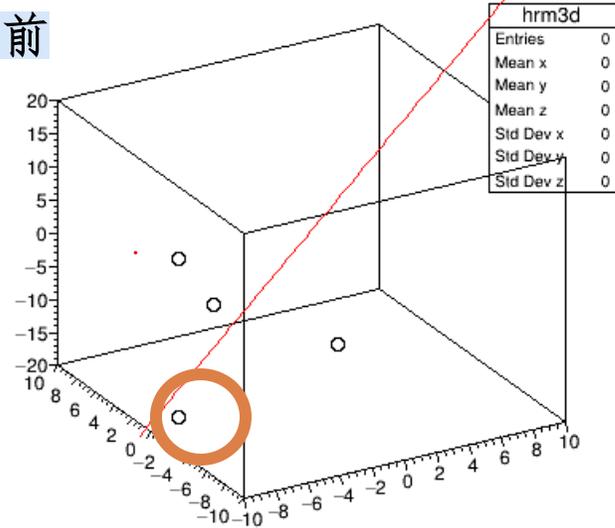
それらもよく光っている部分だと判断

カットしたい部分に関する			
ラダーの番号	ヒット数	カットしたいlxの範囲	カットしたいzの範囲
①lay = 0 lad = 2	204869	-1.2~0	0~5
②lay = 1 lad = 6	2万 1691	-1.2~0	-22~-20
③lay = 2 lad = 12	15万 5493	-1.2~0	-13~-11
④lay = 3 lad = 1	6万 3864	0~1.2	12~13



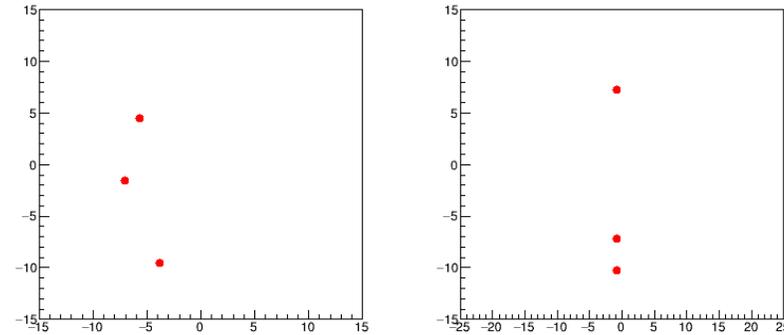
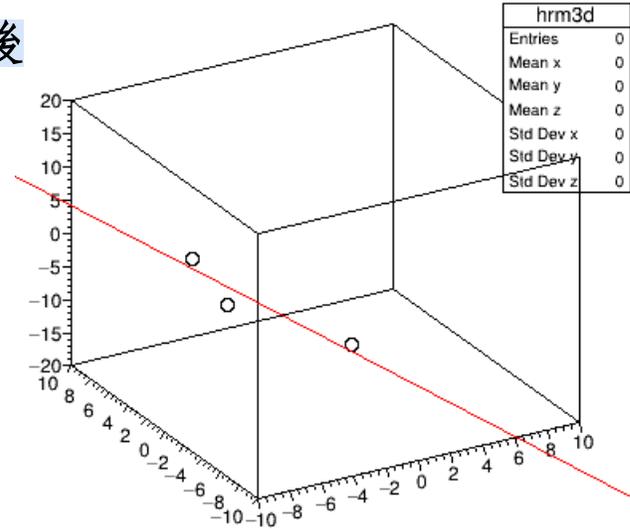
測定方法 宇宙線の選定

カットする前



```
intt: 172 0 4
0 xyz: -5.68684 4.47344 -0.9
1 xyz: -7.01126 -1.59199 -0.9
2 xyz: -7.7284 0.9945 -20.1
3 xyz: -3.85726 -9.50588 -0.9
```

カットした後



```
intt: 172 0 3
0 xyz: -5.68684 4.47344 -0.9
1 xyz: -7.01126 -1.59199 -0.9
2 xyz: -3.85726 -9.50588 -0.9
```

- コードを解析ファイルanalyze_cosmic.Cに書き込む

```
410 double x1,y1,z1;
411     x1=CX2-CX1;
412     y1=CY2-CY1;
413     z1=CZ2-CZ1;
414
415 cout << "x1 y1 z1 : " << x1<< " "<<y1<< " "<<z1<<endl;
416
417 double h = 320.0;
418
419 //二次元宇宙線ベクトル(xa,ya)の成分を設定
420 double xa = x1, ya = y1; // 二次元宇宙線ベクトルaの成分
421
422 //double xb = -0.32199, yb = 0; // 例、二次元センサー方向ベクトルbの成分
423
424 // cos(aru)を計算
425 double cos_aru = (xa * xb + ya * yb) / (sqrt(xa * xa + ya * ya) * sqrt(xb * xb + yb * yb));
426
427 // sin(aru)を計算
428 | double sin_aru = sqrt(1 - cos_aru * cos_aru);
429
430 //三次元 ベクトルlとnの成分を設定
431
432 | double xn = yb, yn = xb,zn=0; // 例、平面の法線ベクトルnの成分
433
434 // cos(ome)を計算
435 double cos_ome = (x1 * xn + y1 * yn + z1 * zn) / (sqrt(x1 * x1 + y1 * y1 + z1 * z1) * sqrt(xn * xn + yn * yn+ zn * zn));
436
437
438 // 宇宙線がセンサーを通過する距離LABを計算
439
440 LAB =fabs(h / (cos_ome * sin_aru)) ;
441
442 cout << "宇宙線がセンサーを通過する距離 LAB: " << LAB <<endl; }
```

- 宇宙線方向ベクトル

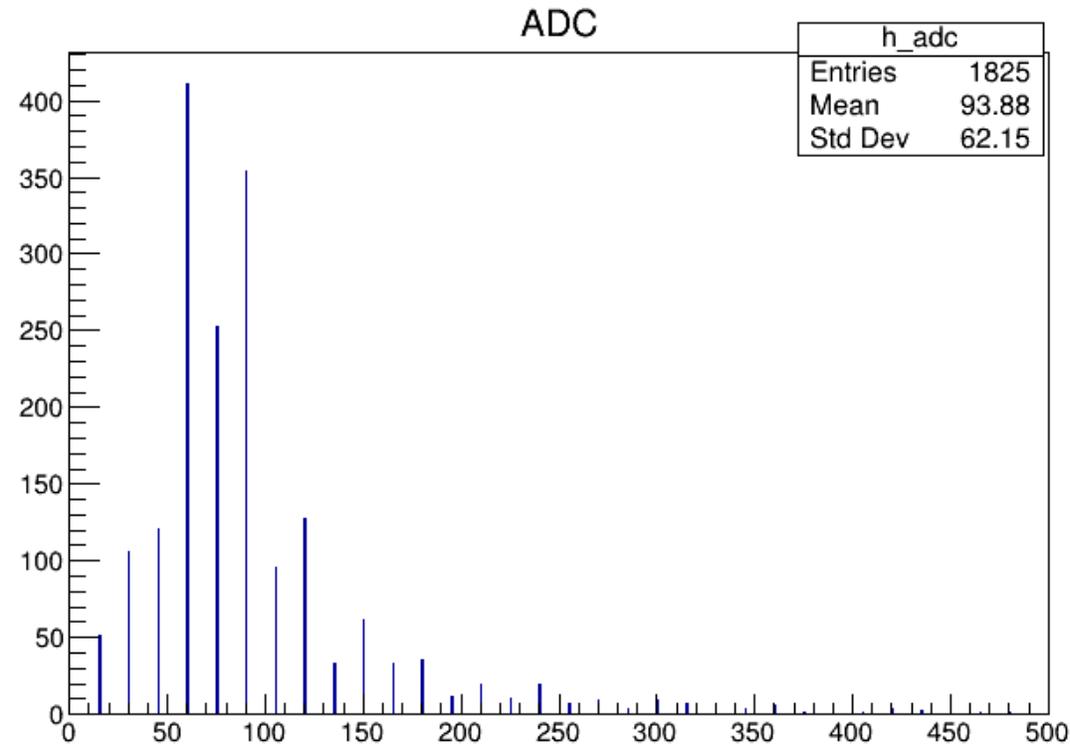
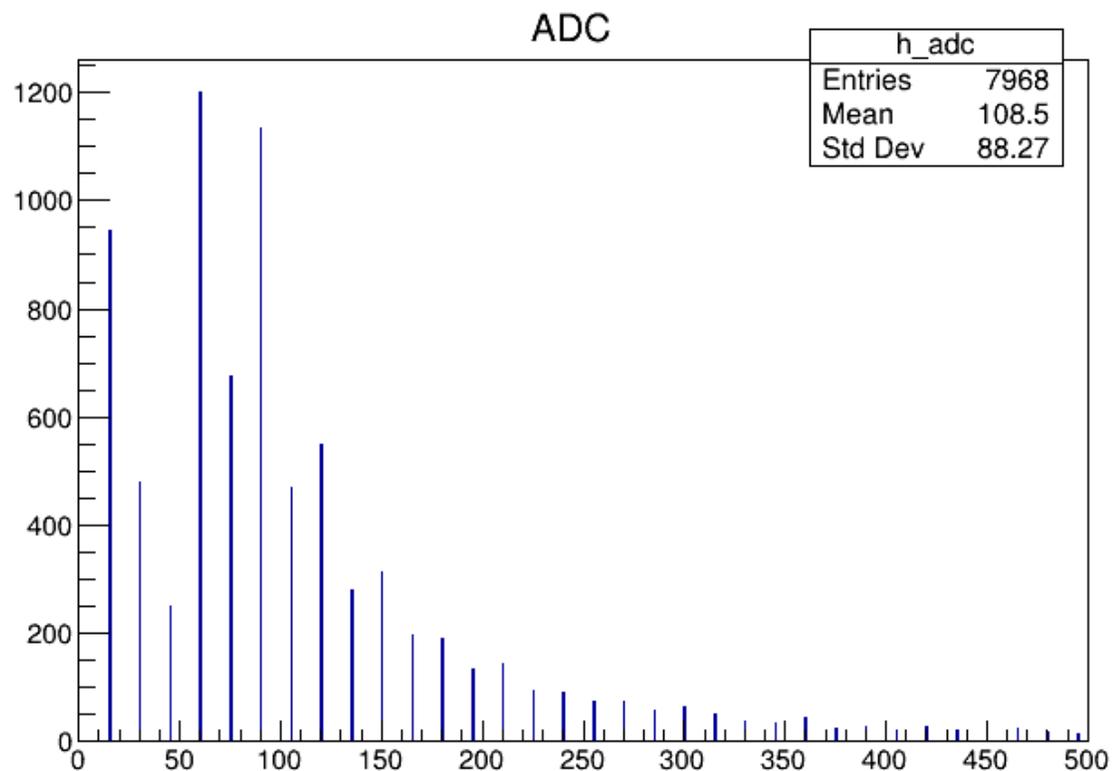
再構成した飛跡から二つの点の座標を得て計算できる

- コードを解析ファイルanalyze_cosmic.Cに書き込む

```
380 for(unsigned int ihit=0; ihit<vCluster->vclus.size(); ihit++){
381     | cluster& cc =vCluster->vclus[ihit];
382
383     cout<<"    "<<ihit<<" xyz: "<<cc.x<<" "<<cc.y<<" "<<cc.z<<"    "<<" layer lad adc: "<<cc.layer<<" "<<cc.lad<<" "<<cc.adc<<endl;
384     int n=0;
385     int s=cc.layer;
386     double xb=0,yb=0,LAB=0;
387     if(s==0){
388         n=cc.lad;
389         xb=cos(M_PI / 12.0 + (M_PI / 6.0)*n);
390         yb=sin(M_PI / 12.0 + (M_PI / 6.0)*n); }
391
392     if(s==1){
393         n=cc.lad;
394         xb=cos((M_PI / 6.0)*n);
395         yb=sin((M_PI / 6.0)*n); }
396
397     if(s==2){
398         n=cc.lad;
399         xb=cos(M_PI / 16.0 + (M_PI / 8.0)*n);
400         yb=sin(M_PI / 16.0 + (M_PI / 8.0)*n); }
401
402     if(s==3){
403         n=cc.lad;
404         xb=cos((M_PI / 8.0)*n);
405         yb=sin((M_PI / 8.0)*n); }
406
407     cout << "xb yb : " << xb<<" "<<yb <<endl; //二次元センサー方向ベクトルbの成分(xb,yb)
408
```

- 二次元センサー方向ベクトル

測定方法 ADCの値と通過距離のヒストグラム



ホットチャンネルをカットした
クラスタの数 3 ~ 5
平均ズレ < 1 の飛跡
ADCの値の分布

ホットチャンネルをカットした
クラスタの数 3 ~ 5
平均ズレ < 1 の飛跡
クラスタサイズ 2
ADCの値の分布