sPHENIX-INTT検出器の性能評価のための GEANT4によるCoulomb Scattering効果の見積もり

高エネルギー物理学研究室B4 辻端日菜子

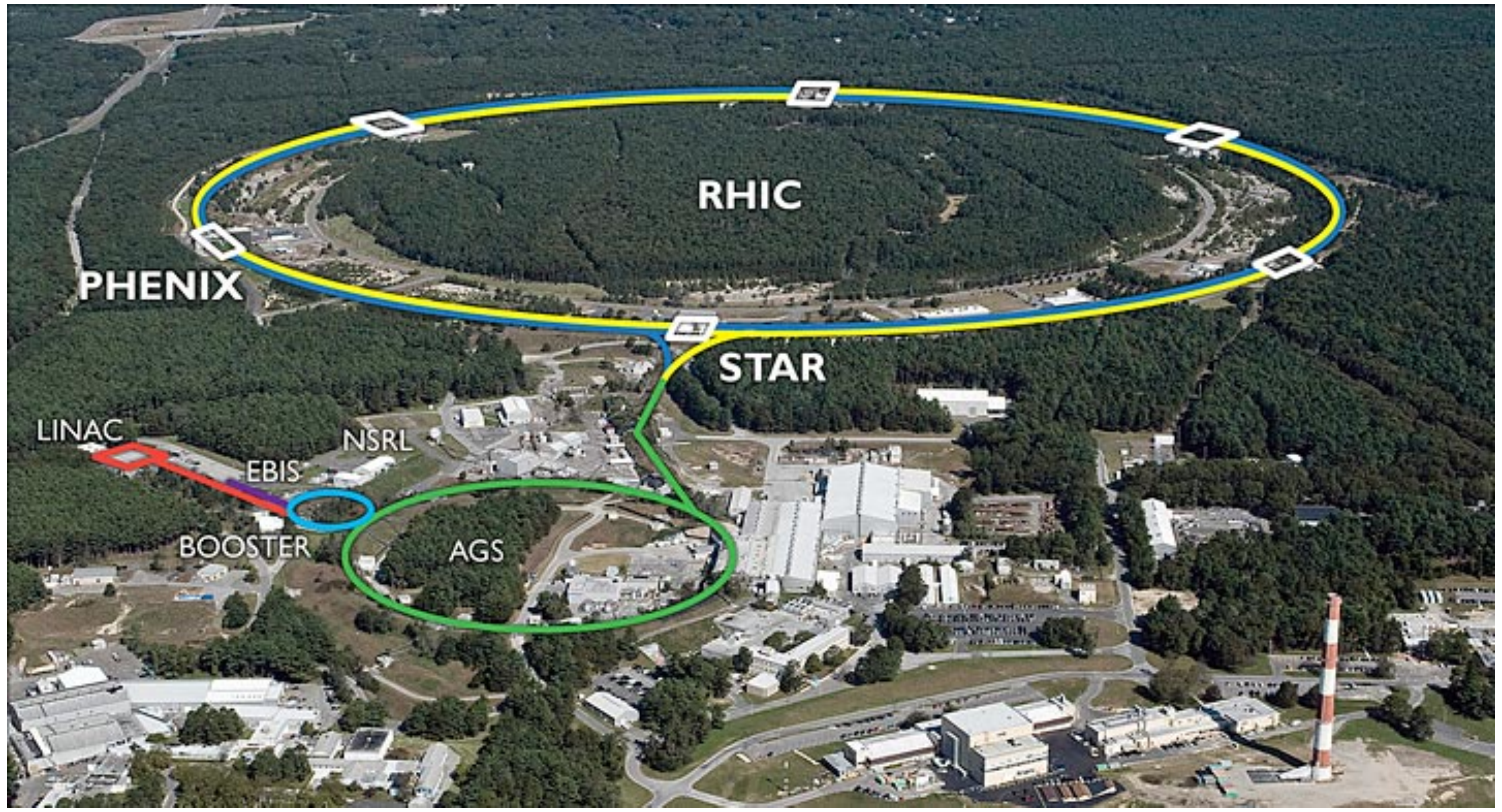
卒業研究発表会 2023.03.03

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 研究方法
4. 研究結果
5. まとめ・今後の課題

1.研究背景

研究背景：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年より稼働予定。

＜実験目的＞

衝突で生じるJet現象やUpsilon粒子を測定し、QGPの性質を決定する。

＜衝突核子・エネルギー＞

金原子核対（200GeV）、陽子対（510GeV）

＜QGP（Quark-Gluon Plasma）＞

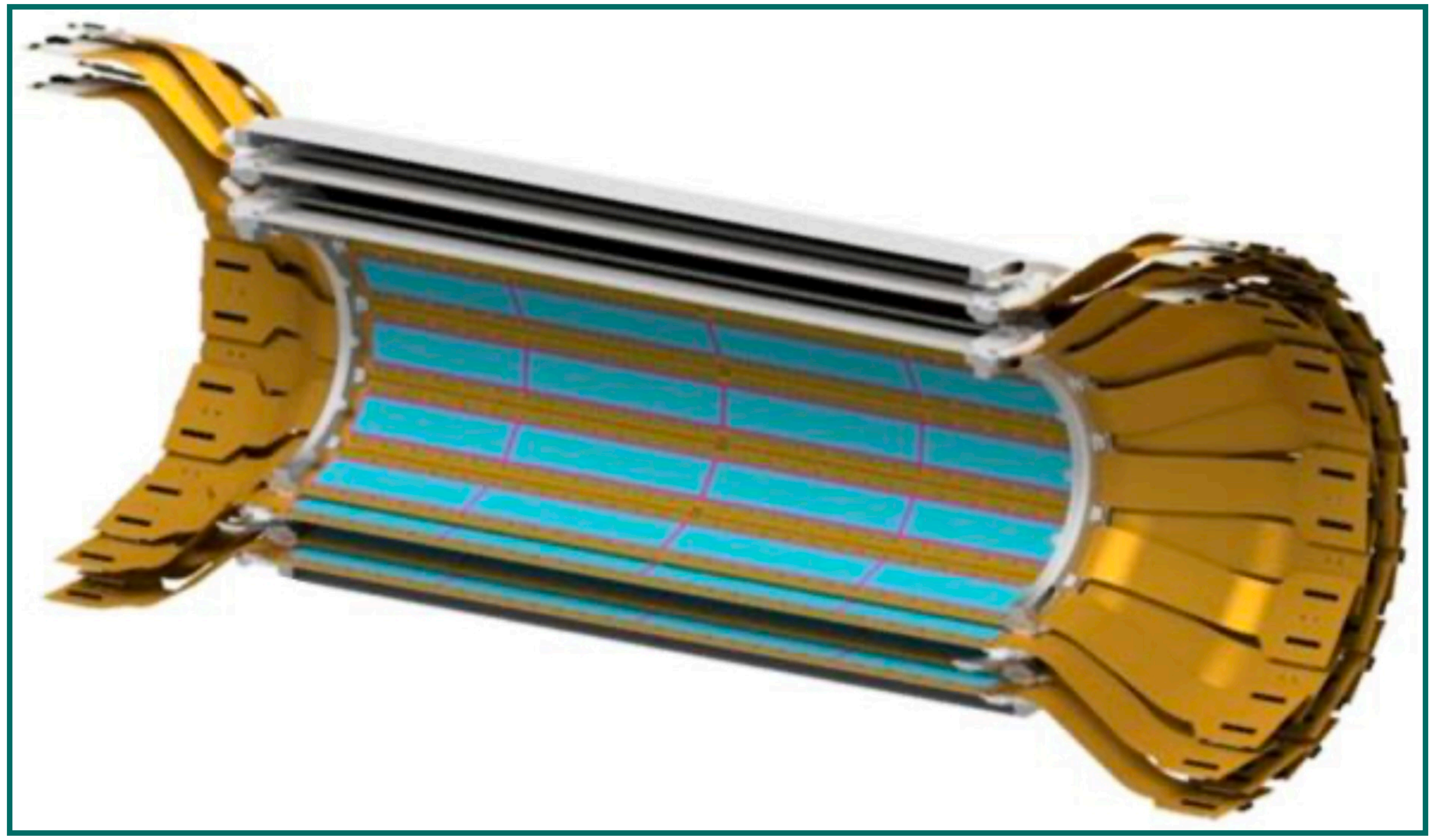
高温・高密度で、クォークとグルーオンがハドロンの閉じ込めから解放された

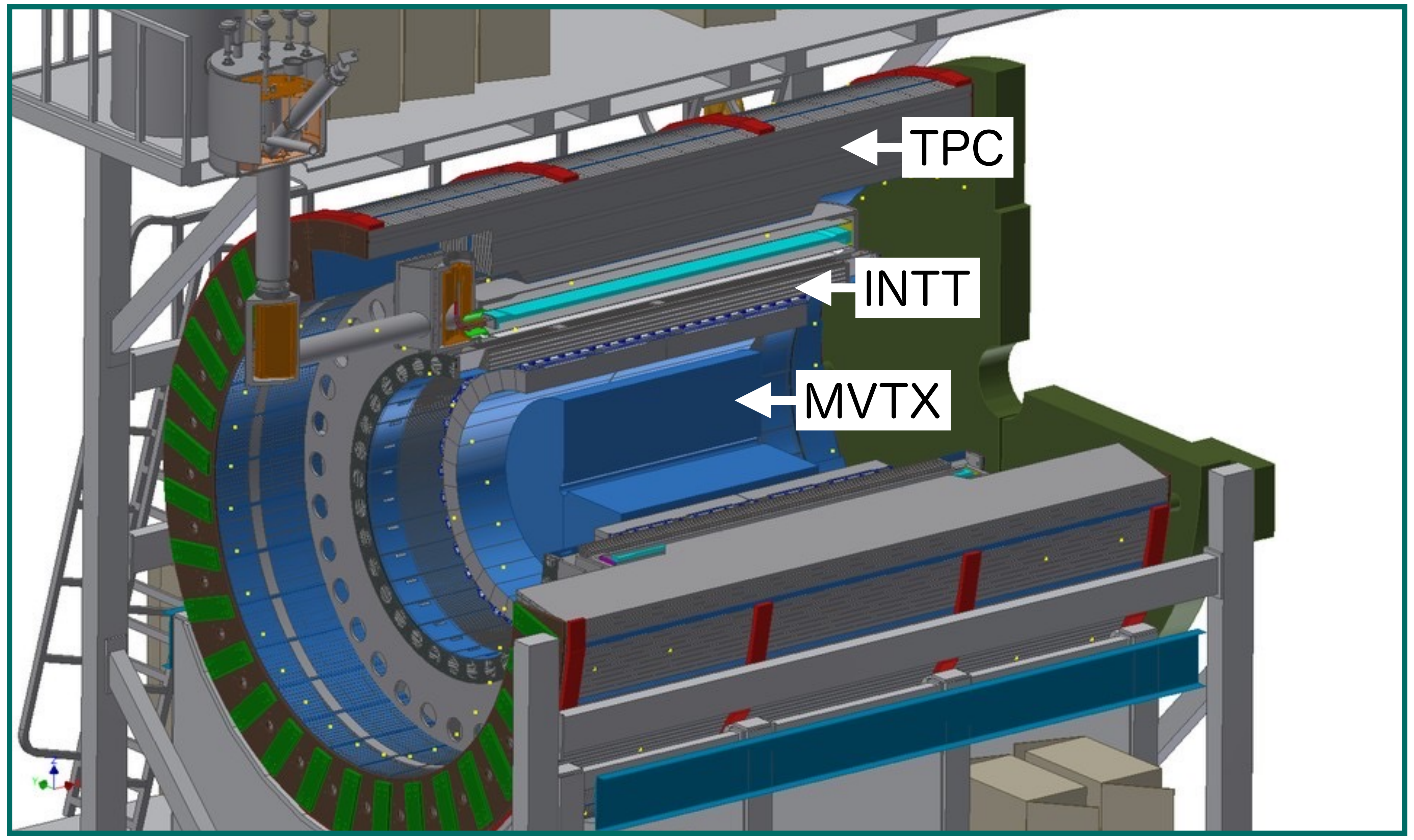
プラズマ相のこと。ビッグバンから約$10^{-5}[s]$後に実現していたとされる。

研究背景：INTT

<u>中間飛跡検出器 INTT（INTermediate Tracker）</u>

- sPHENIX実験で用いられる、衝突点付近に存在する3つの飛跡検出器のうちの1つ
- 樽状の2層構造のストリップセンサー
- ビームパイプから6~12cmに位置
- 時間分解能・位置分解能が高く、飛跡再構成において重要な役割を担う





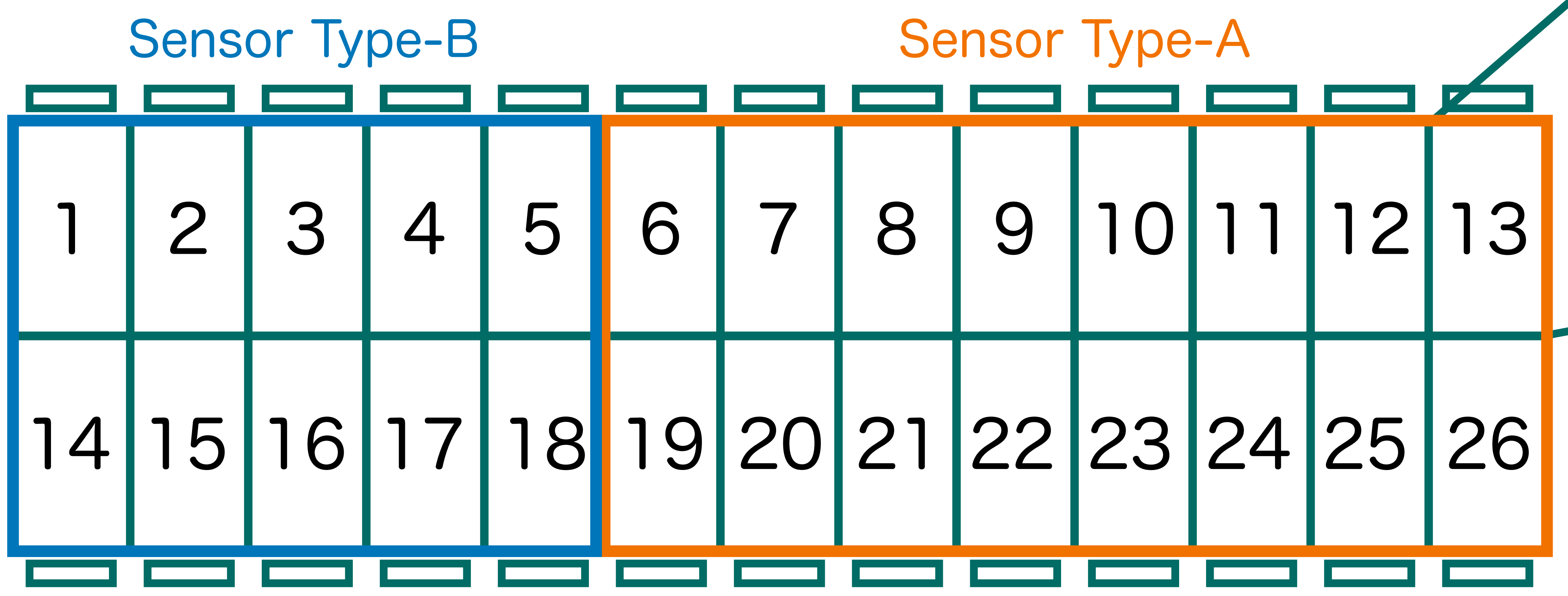
研究背景：INTTシリコンセンサー

シリコンセンサー

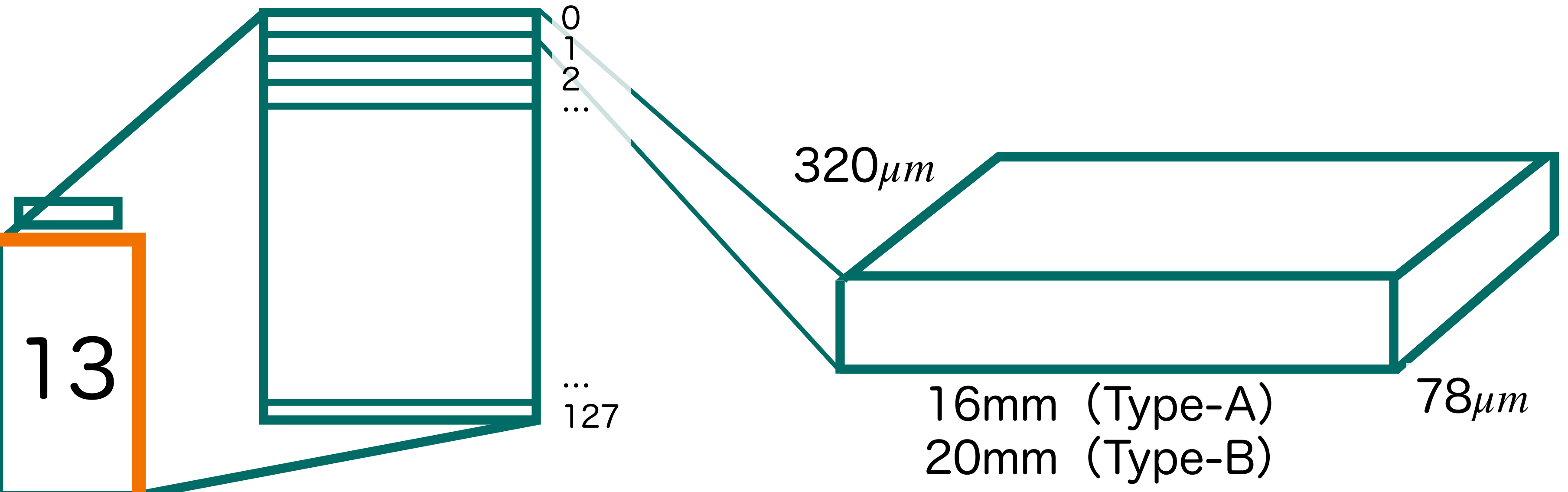
78μmピッチ、320μm厚のストリップ128個で1つのセンサーを構成。

シリコンセンサーモジュール

- 26個のシリコンセンサー
  - Type-Aシリコンストリップセンサー（$8 \times 2 = 16$個）
  - Type-Bシリコンストリップセンサー（$5 \times 2 = 10$個）
- 26個の読み出しチップ（FPHXチップ）
  - 1チップあたり1センサー（128channel）分の信号を読み出す。



↑シリコンセンサーモジュール



↑シリコンセンサー

↑シリコンストリップ

以降、シリコンセンサーモジュールをラダー、チップ番号をchip、ストリップ番号をchannelと呼ぶ。

2.研究目的

前提：多重散乱

<u>多重散乱</u>
入射粒子が物質に侵入していく過程で物質の構成原子と次々に衝突し、進行方向が変わっていく現象。

多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布は0を中心としたガウス分布で与えられる。

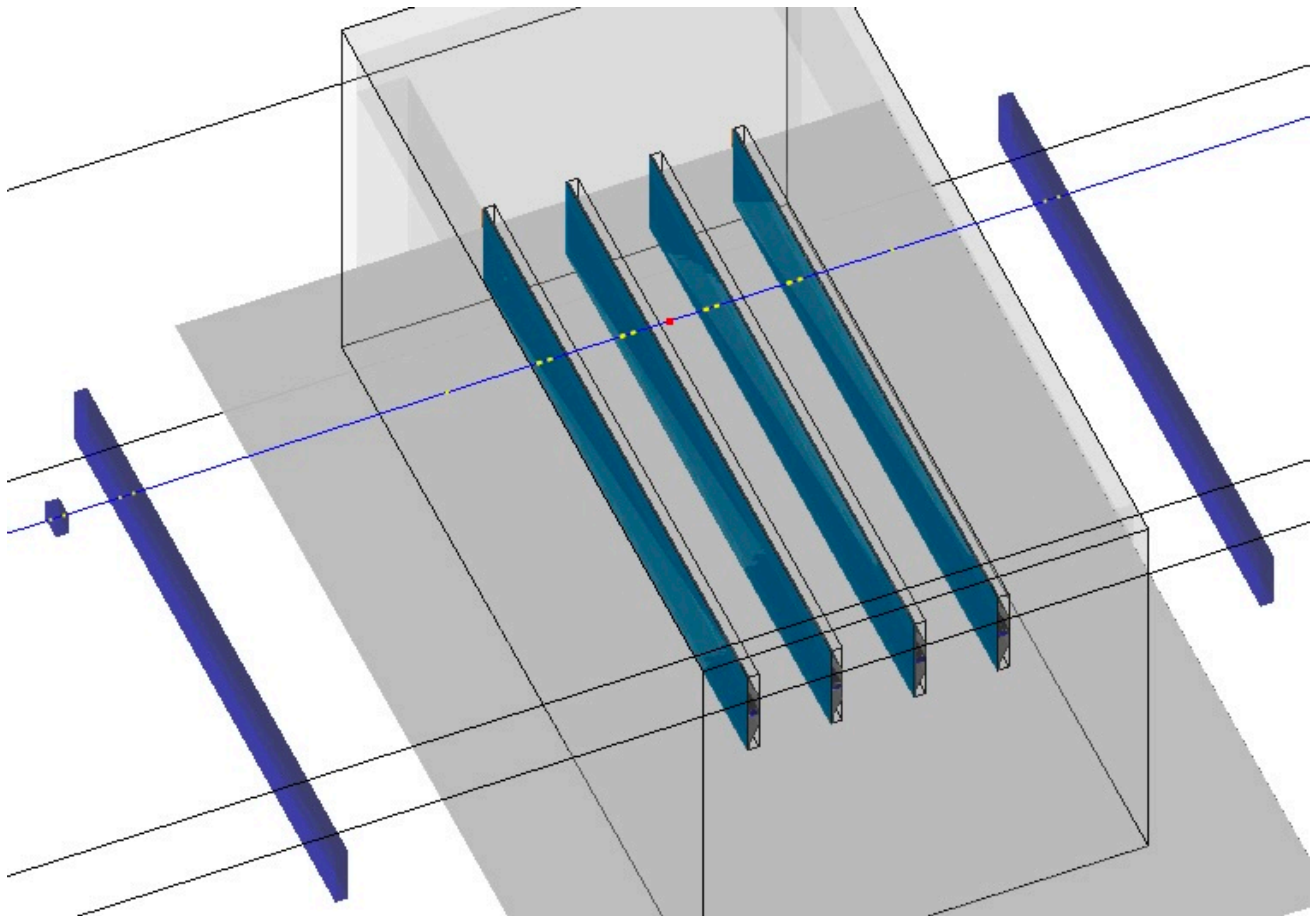
前提：Coulomb Scattering

<u>多重散乱</u>
入射粒子が物質に侵入していく過程で物質の構成原子と次々に衝突し、進行方向が変わっていく現象。

多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布は0を中心としたガウス分布で与えられる。

しかし、稀にガウス分布に従わない大角度散乱が起こる。
今回は、この大角度散乱をCoulomb Scatteringと呼ぶ。

前提：ELPHビームテスト



ELPHビームテスト

2021年12月に東北大学電子光理学研究センター（ELPH）で行われた実験。

<目的>

INTTラダーの性能評価、検出効率の決定など

<ビーム>

e^+（934MeV）

<ビーム照射箇所>

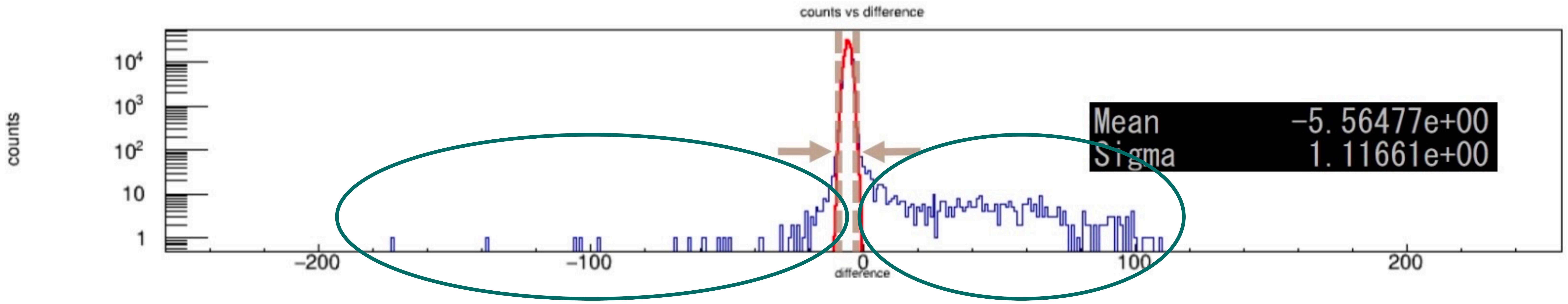
chip10,11,23,24

研究目的

ELPHビームテストの結果を用いた解析（先行研究）において、真ん中ラダーのhit期待位置と実際のhit位置を比較したところ、ガウス分布を外れた部分（テール）が左右に見られることが分かった。

まずはこの左右のテールがシミュレーションでも見られるかを確認する。

また今回は、この左側のテールがCoulomb Scatteringによるものであるという仮説を立ててそれを検証する。



2.研究方法

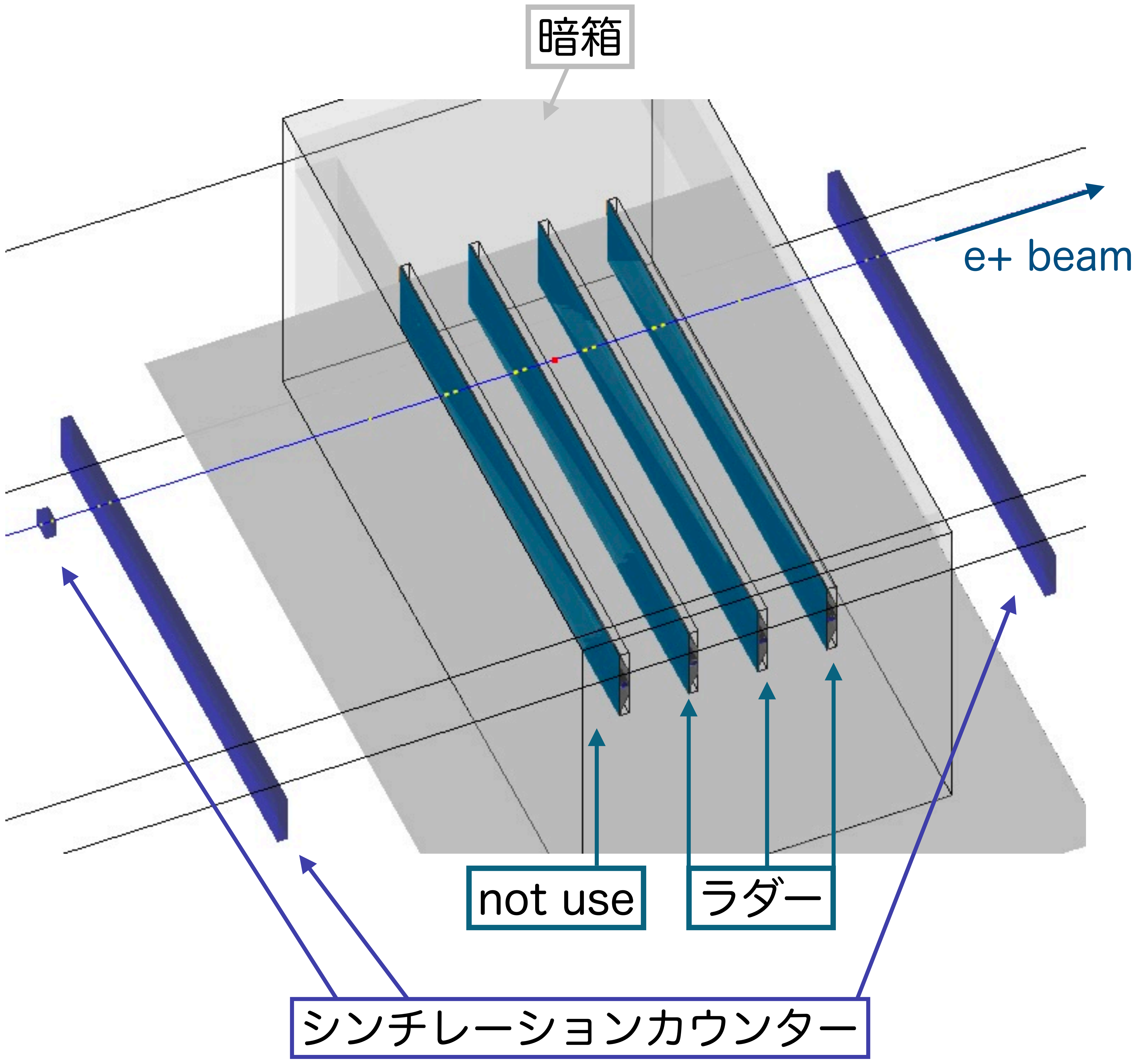
研究方法

GEANT4を用いてELPHビームテストのセットアップに粒子を打ち込むシミュレーションを行い、そのデータを解析する。

①Coulomb Scatteringのみの効果を見積もるために、セットアップをシンプルな状態へと改造する。同時にセットアップによる散乱の影響を見積もる。
②Coulomb Scatteringを作用させてその影響を見積もる。

＜GEANT4＞
粒子が物質中を通過するときの相互作用や過程をシミュレーションするソフトウェア。

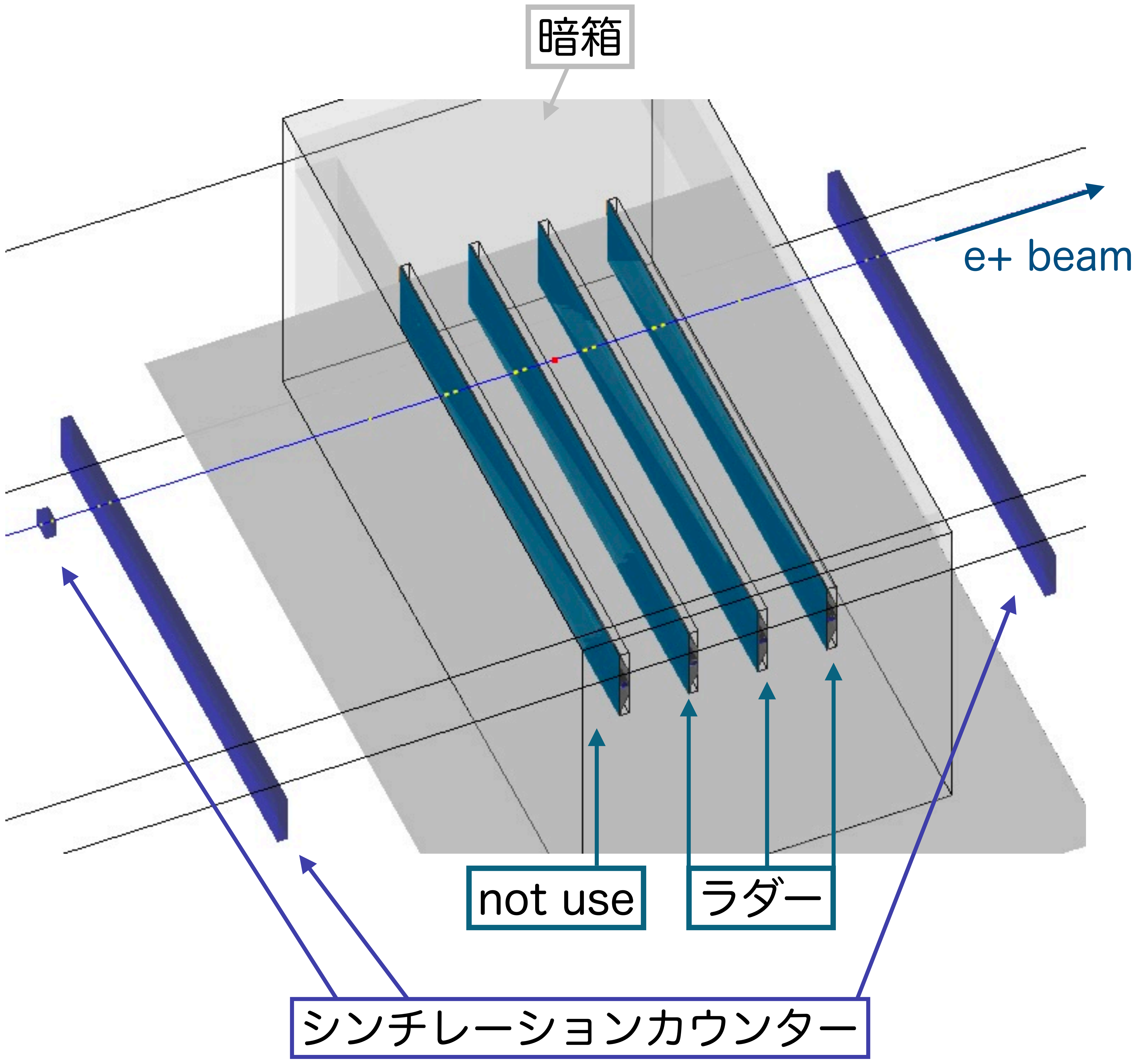
研究方法：シミュレーションのセットアップ



- ELPHビームテストのセットアップを使用。
  - 4本のラダー、3つのシンチレーションカウンター、暗箱で構成。
  - 実際と同じく最上流のラダーは測定に使用しない。

セットアップの上流1mから934MeVのe^+を入射。簡単のため、ラダーに垂直な方向にまっすぐ入射。

研究方法：セットアップの変更



空気や物質による散乱などの影響を見積もるため、セットアップを変更してシミュレーションを行った

<シミュレーションしたセットアップ>

① 3本のラダー（真空）

② 3本のラダー（空気）

③ 4本のラダー（空気）

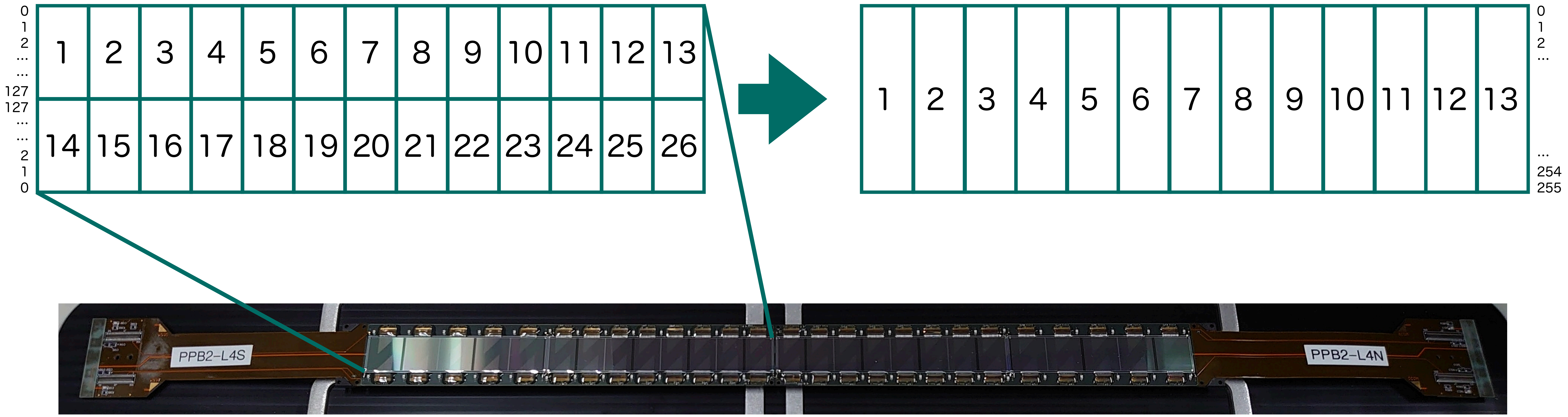
④ 4本のラダーとシンチレーター、暗箱（空気）

以降、測定に用いるラダー3本を上流から最上段ラダー、真ん中ラダー、最下段ラダーと呼ぶ

研究方法：データの取り扱い

INTTラダーのセンサーは$2 \times 13 = 26$個のチップからなる

今回は上下のチップを1つのチップとみなし、channel番号を0~255とする



研究方法：データの取り扱い2（クラスタリング）

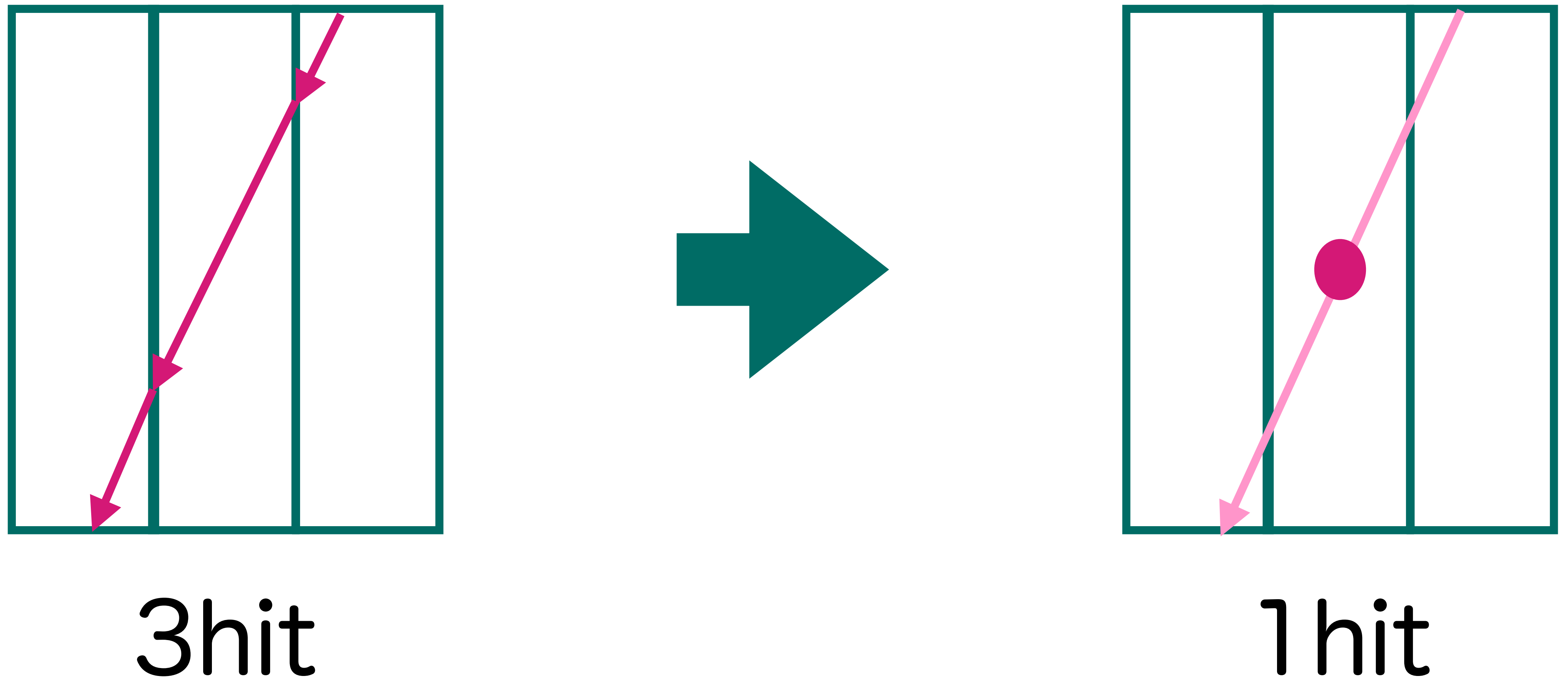
クラスタリング

同一タイミング、同一ラダー内の複数channelにまたがったhitを1つにまとめること

→損失エネルギーに対応するADC値で重みをつけ、クラスターの重心位置を求める

$$\mathrm{average_channel} = \frac{\sum (\mathrm{ADC_i} \times \mathrm{chan_id_i})}{\sum \mathrm{ADC_i}}$$

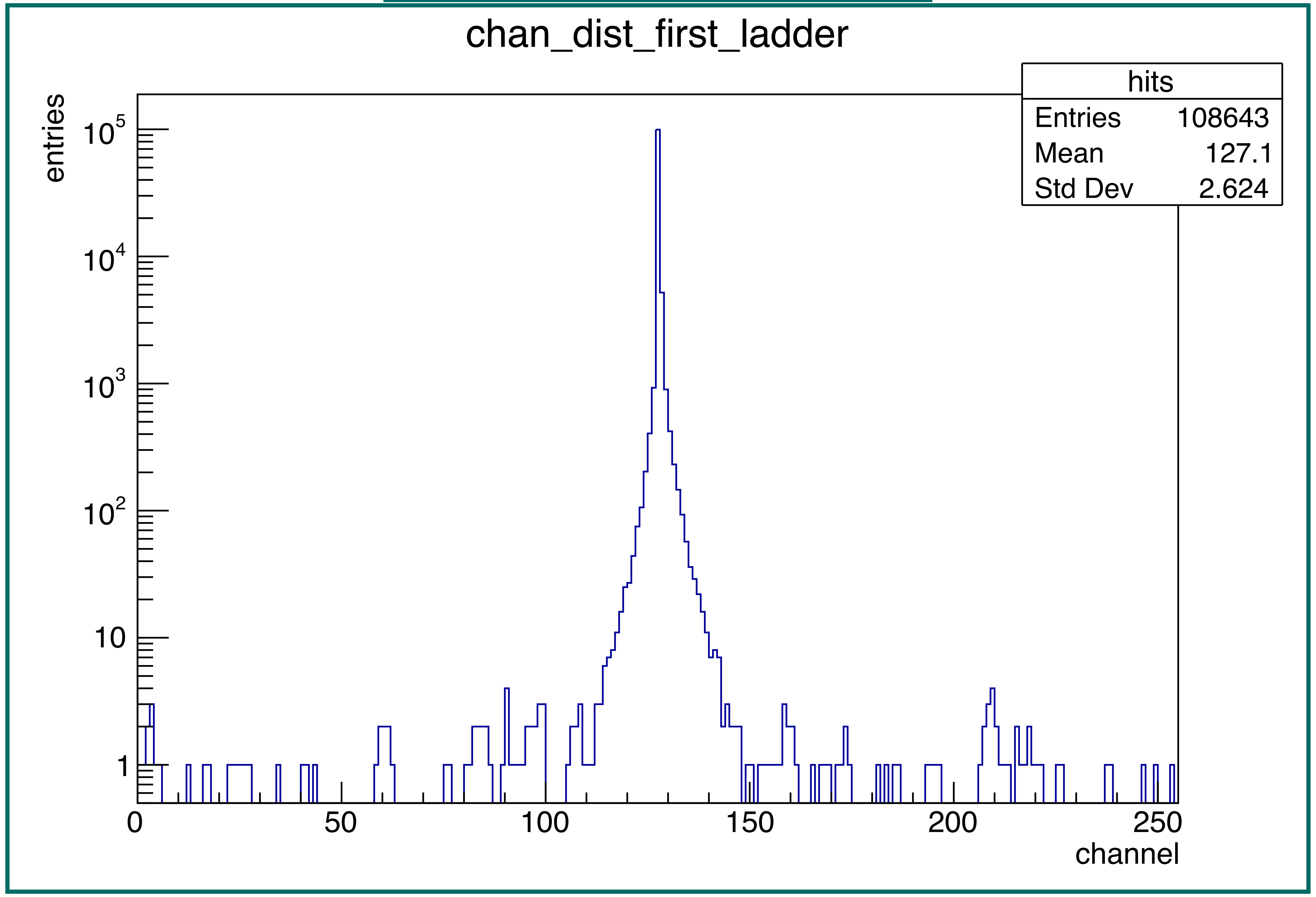
【センサー断面図】



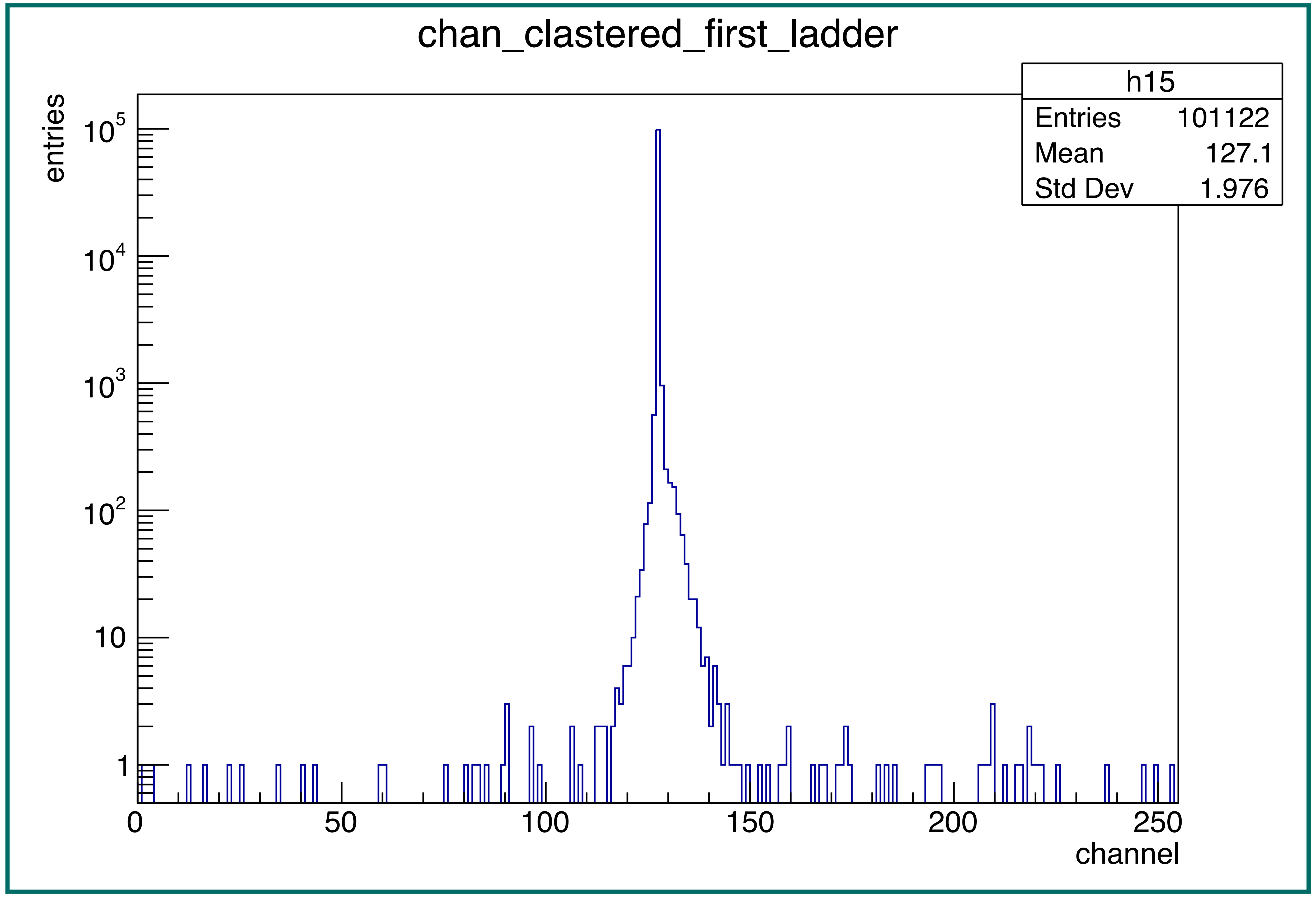
研究方法：クラスタリングによる分布の変化

下図：クラスタリング前後のchannel分布

クラスタリング前

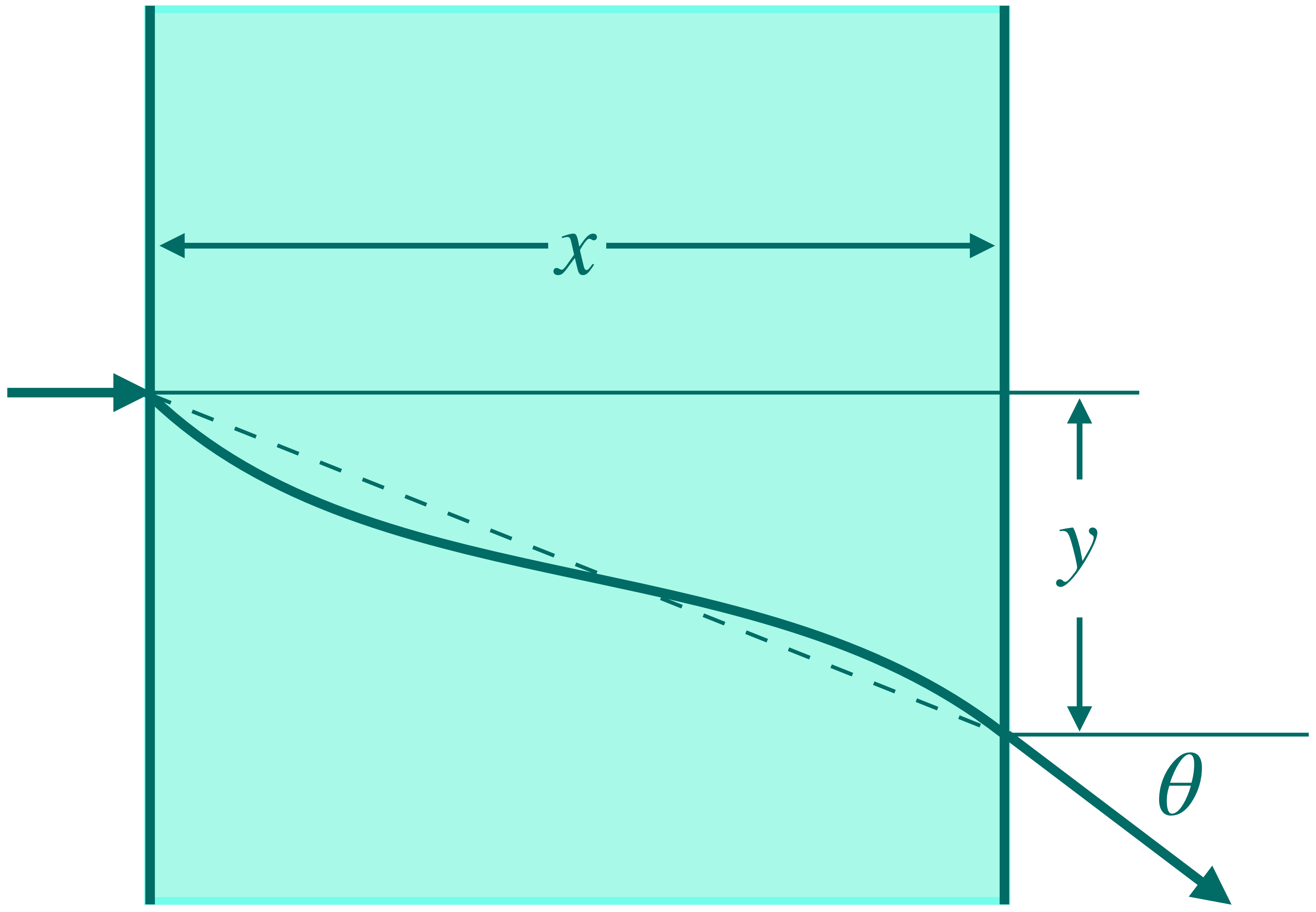


クラスタリング後



クラスタリングしたことによってエントリー数が減少し、ピーク幅が細くなっている。

研究方法：結果の検証方法



多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布は0を中心としたガウス分布で与えられる。
その標準偏差は次式。

$$\theta = \frac{13.6\mathrm{MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \log_{10} \left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right) \right]$$

βc：入射粒子の速度[m/s]　p：入射粒子の運動量[MeV]
z：入射粒子の電荷[C]　x：対象の厚み[m]
X_0：対象の放射長[m]

また入射ビーム軸からのずれyは、

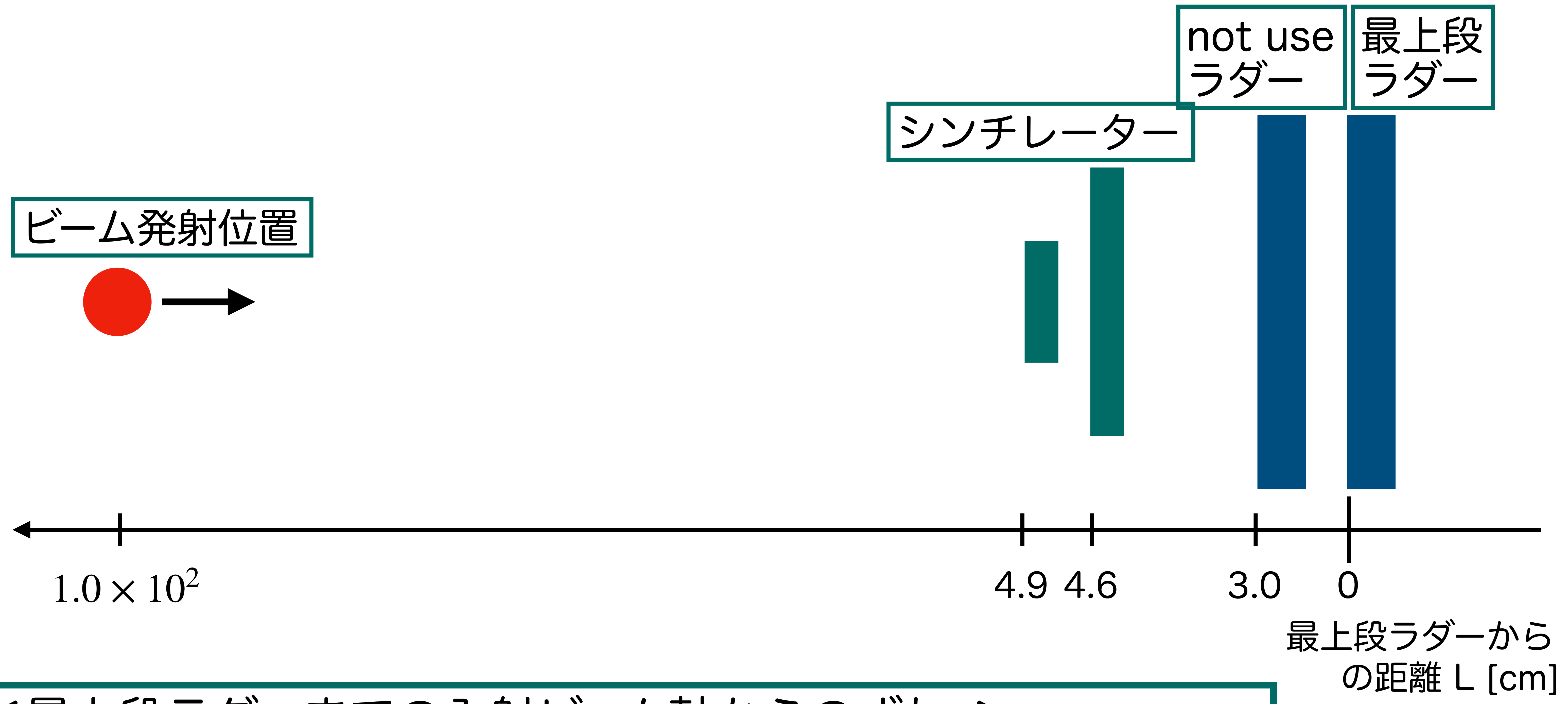
$$y = x \tan\theta \approx x\theta$$

と近似できる。

→入射ビーム軸からのずれyはhit分布の広がり（標準偏差）に対応している

研究方法：結果の検証方法（セットアップの位置関係）

セットアップの位置関係およびその放射長を簡単に示す。



セットアップの材質	x/X_0[%]
空気（1m）	0.3
ラダー（0.5cm）	1.2
CFRP	0.2
水	0.08
カプトン	0.1
銅	0.3
接着剤	0.2
シリコンセンサー	0.3
シンチレーター（0.5cm）	0.1

（暗箱はビームの入射窓が開いているため考えない）

＜最上段ラダーまでの入射ビーム軸からのずれy＞

今回の条件（$\beta c = 1,\ p = 934,\ z = 1$）を代入したのが次式。

$$y = 0.014L\sqrt{\frac{x}{X_0}}\left[1 + 0.088\log_{10}\left(\frac{x}{X_0}\right)\right]$$

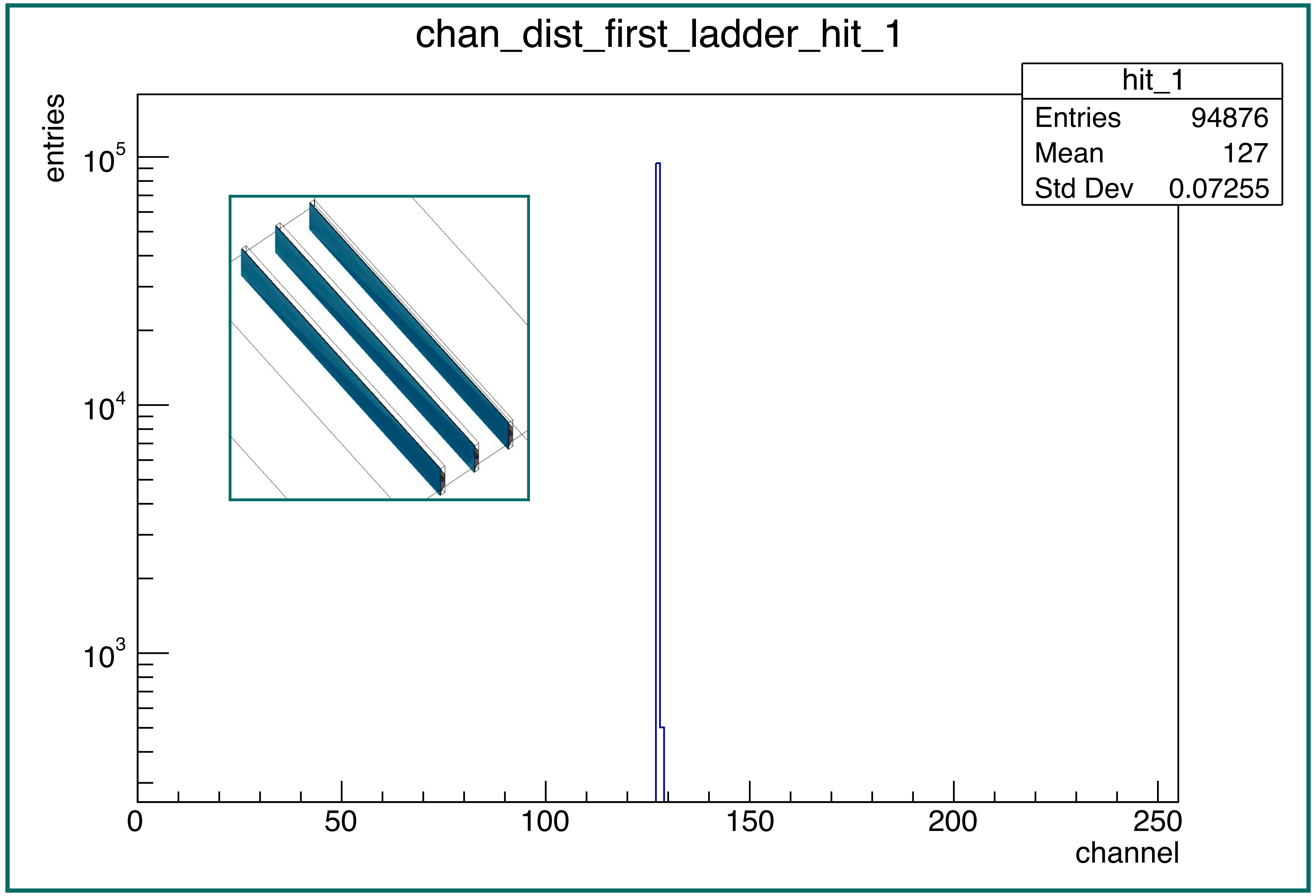
それぞれの材質でyを算出し、その二乗和の平方根をとることでセットアップごとの入射ビーム軸からのずれを求める。

↓最上段ラダーまでの入射ビームからのずれy[cm]

	ずれ[cm]	ずれ[ch]
①3本ラダー（真空）	0	0
②3本ラダー（空気）	0.0636	8.15
③4本ラダー（空気）	0.0672	8.61
③4本ラダー＋暗箱＋シンチレーター（空気）	0.0707	9.06

3.研究結果

研究結果：散乱させる物質がない場合のchannel分布

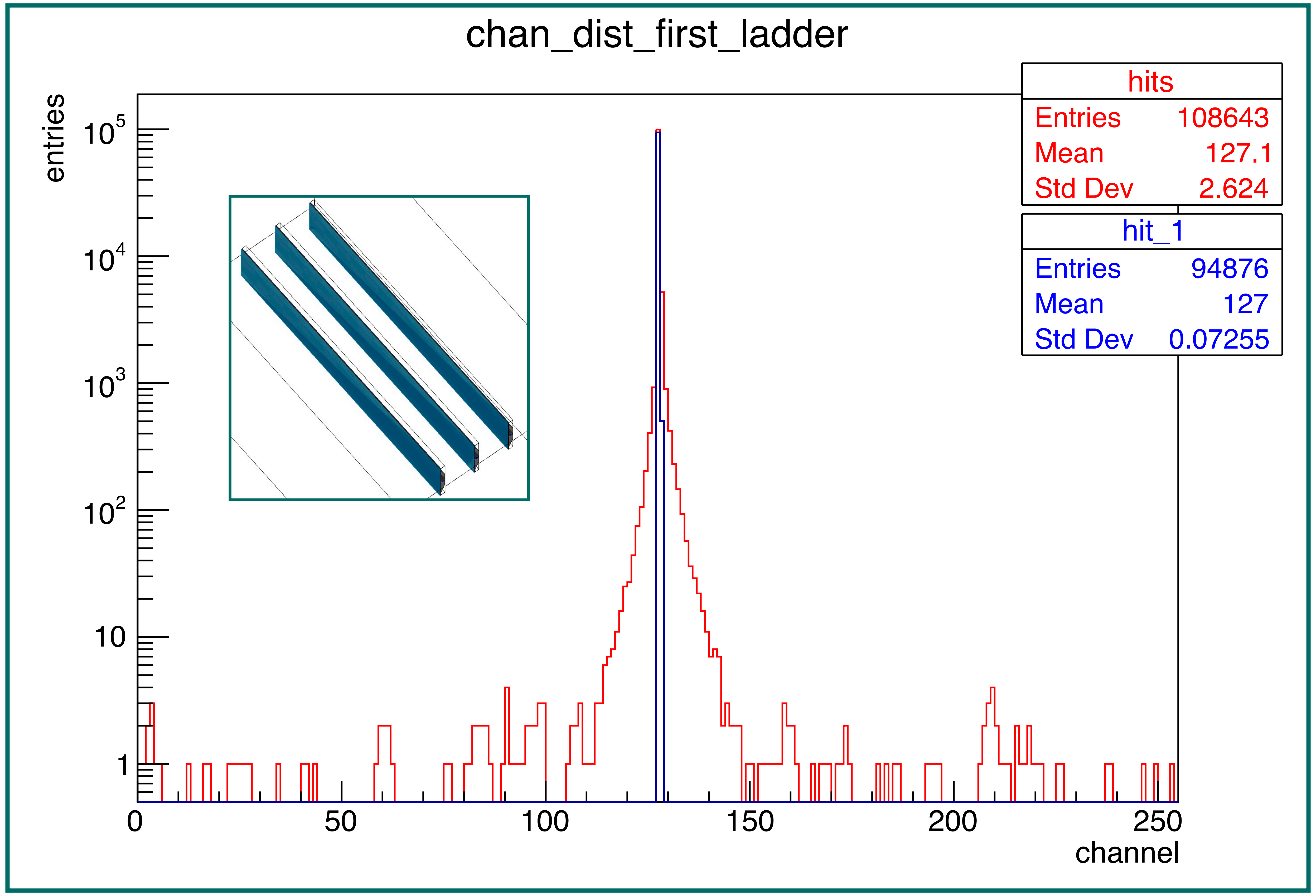


①3本ラダー（真空）

左図：最上段ラダーにおけるhit位置のchannel分布
hit数を1に制限。

最上段ラダーの前にビームを散乱させる物質が何もないため、広がりのないグラフになっている。

研究結果：散乱させる物質がない場合のchannel分布（複数hit）



①3本ラダー（真空）

左図：最上段ラダーにおけるchannel分布

青：hit数を1に制限

赤：hit数の制限なし

最上段ラダーの前にビームを散乱させる物質が何もないため広がりのないグラフになるはずが、hit数の制限なしの場合は広がりが見られる。

→複数hitの原因を調査する必要がある。

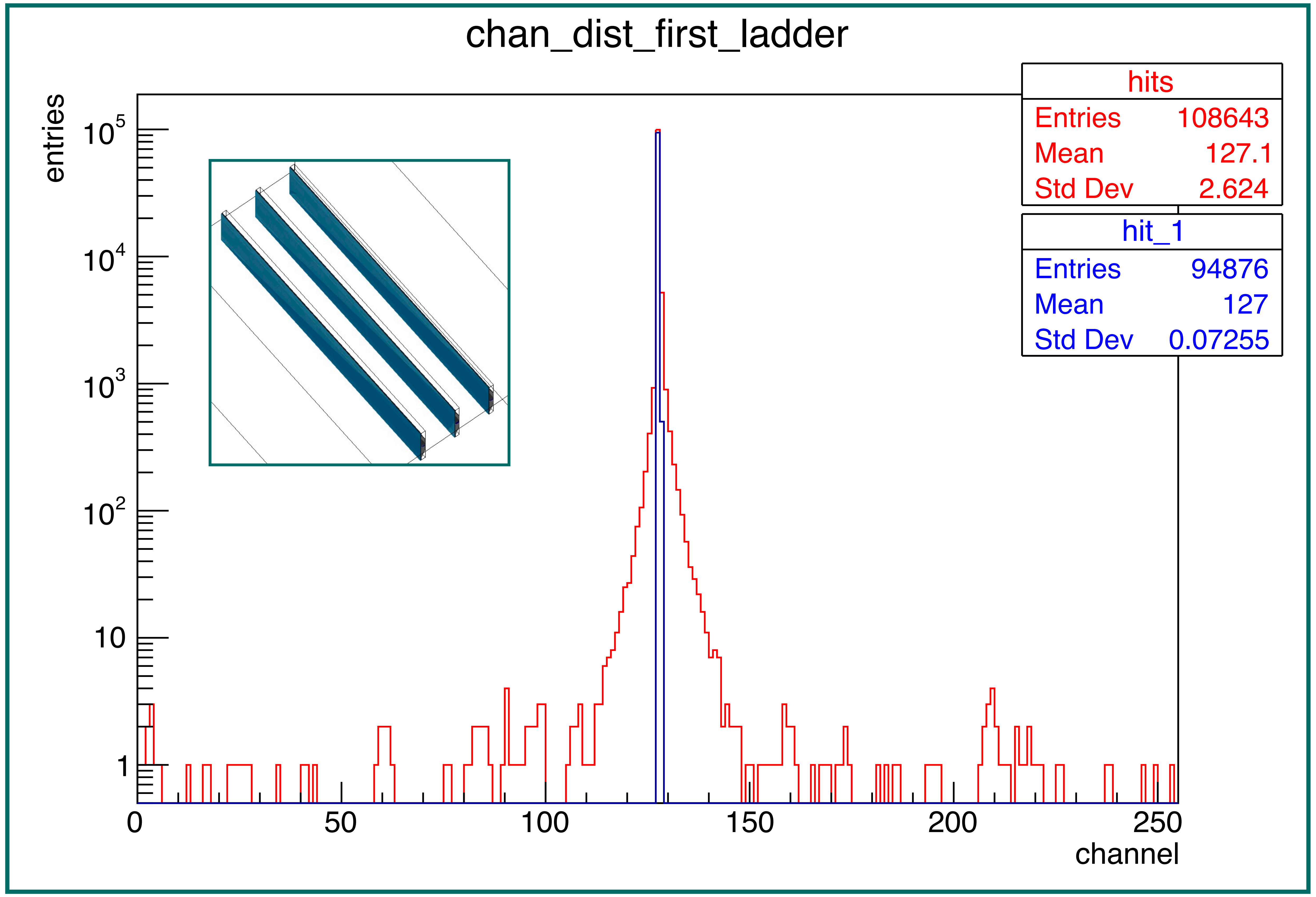
研究結果：セットアップごとのchannel分布の比較1

下図：最上段ラダーにおけるhit位置のchannel分布

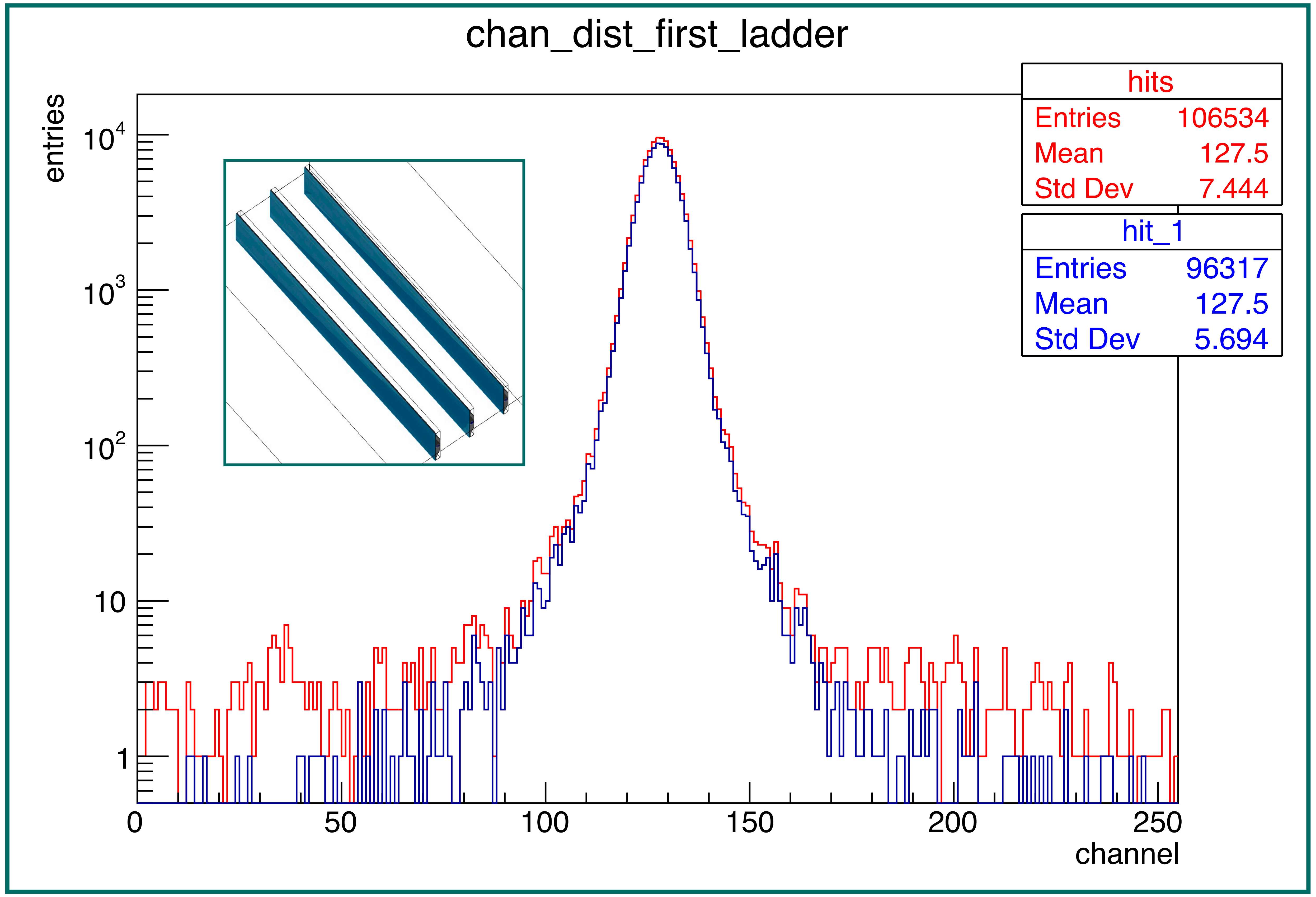
青：hit数を1に制限

赤：hit数の制限なし

①3本ラダー（真空）



②3本ラダー（空気）



・空気の分、ピーク幅が太くなっている。

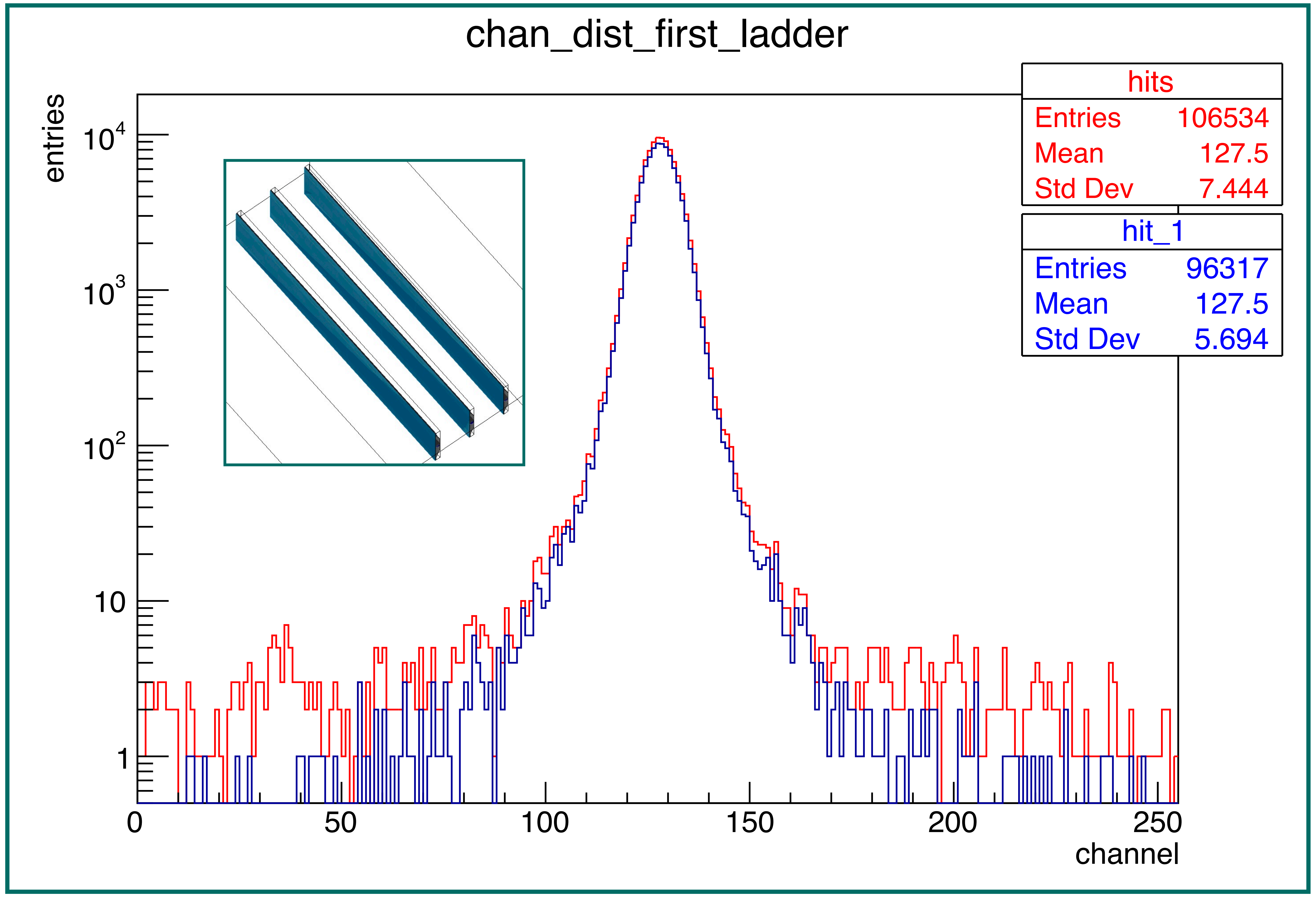
研究結果：セットアップごとのchannel分布の比較2

下図：最上段ラダーにおけるhit位置のchannel分布

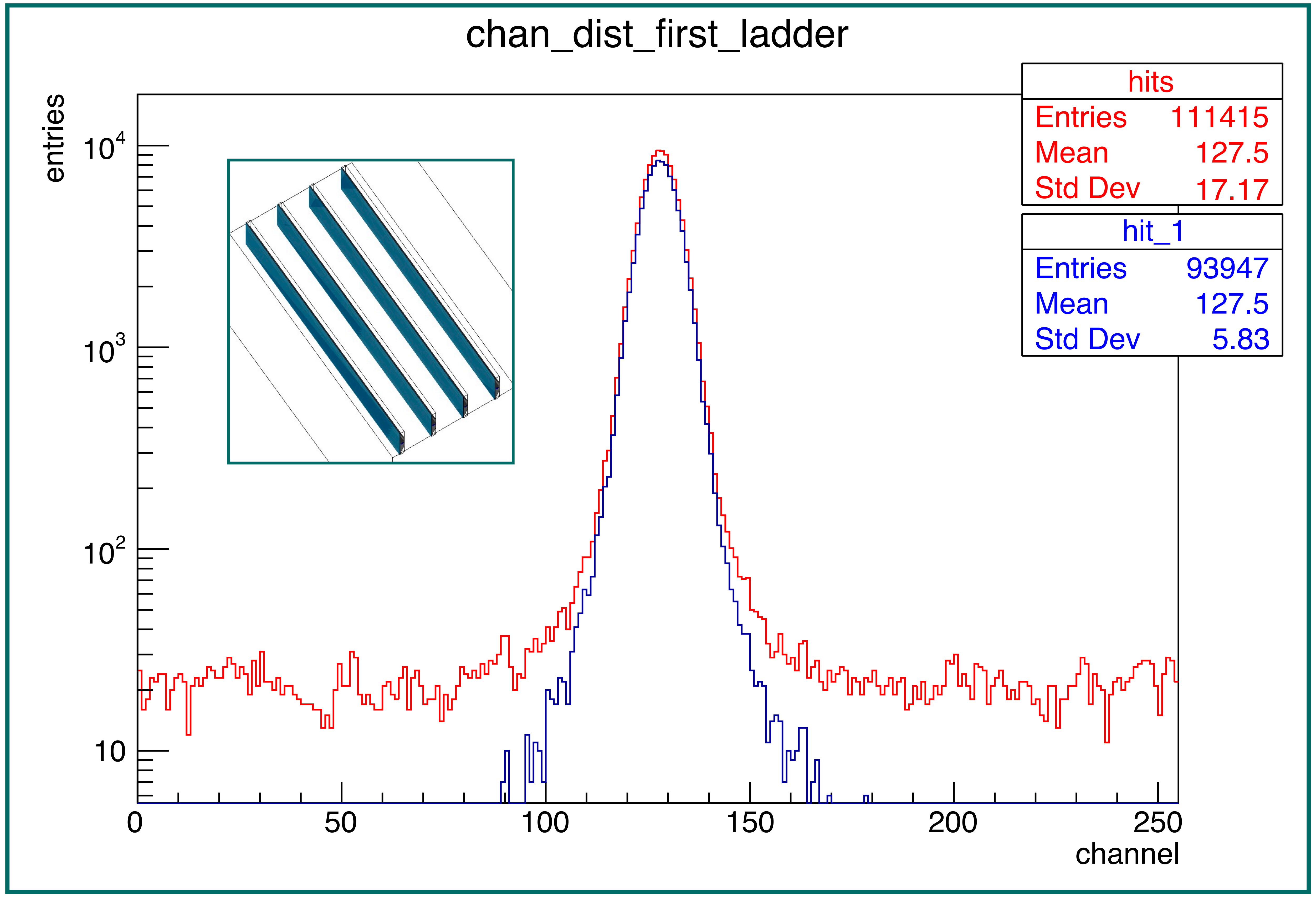
青：hit数を1に制限

赤：hit数の制限なし

②3本ラダー（空気）



③4本ラダー（空気）



・ラダーの分、ピーク幅が太くなっている。

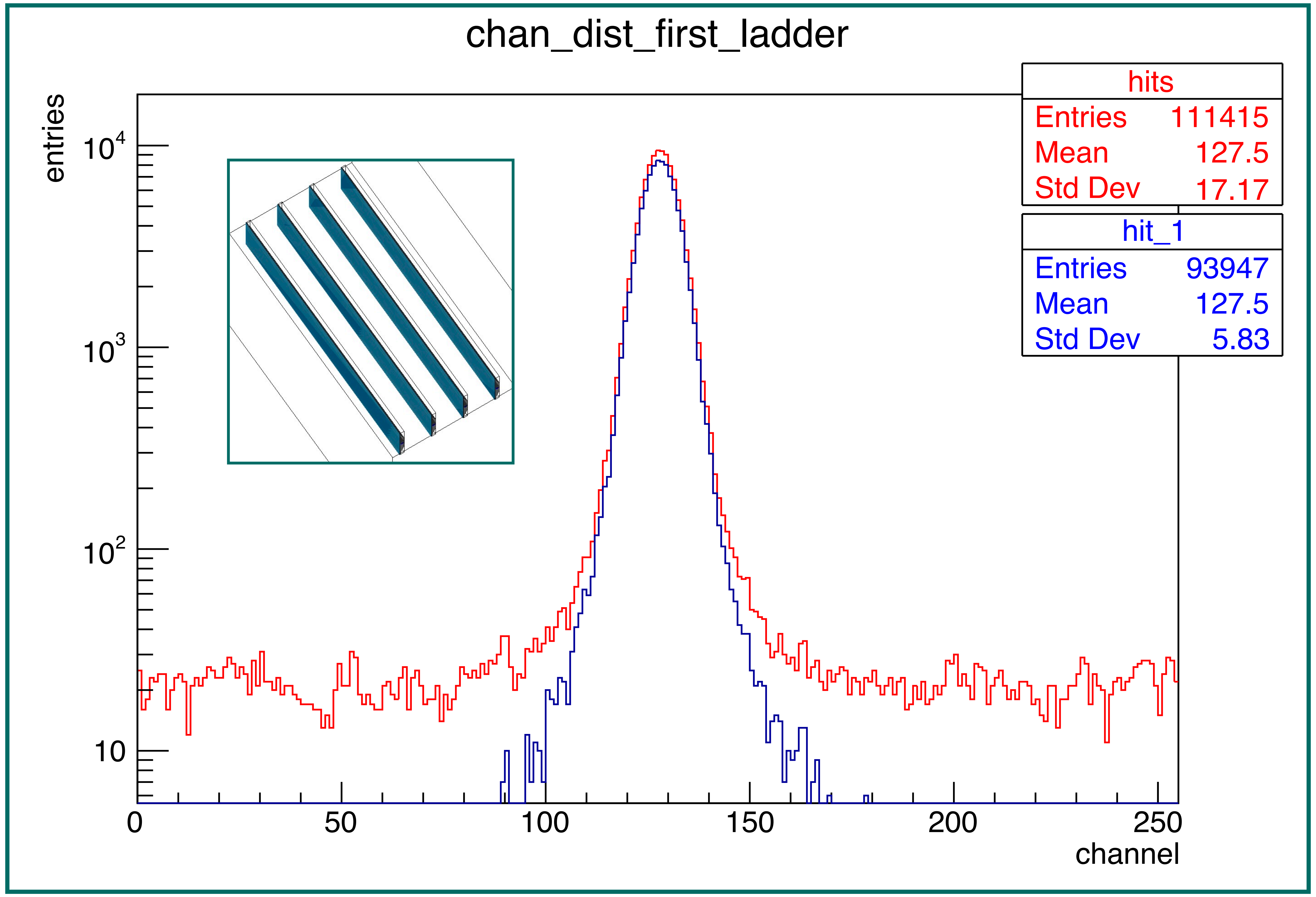
研究結果：セットアップごとのchannel分布の比較3

下図：最上段ラダーにおけるhit位置のchannel分布

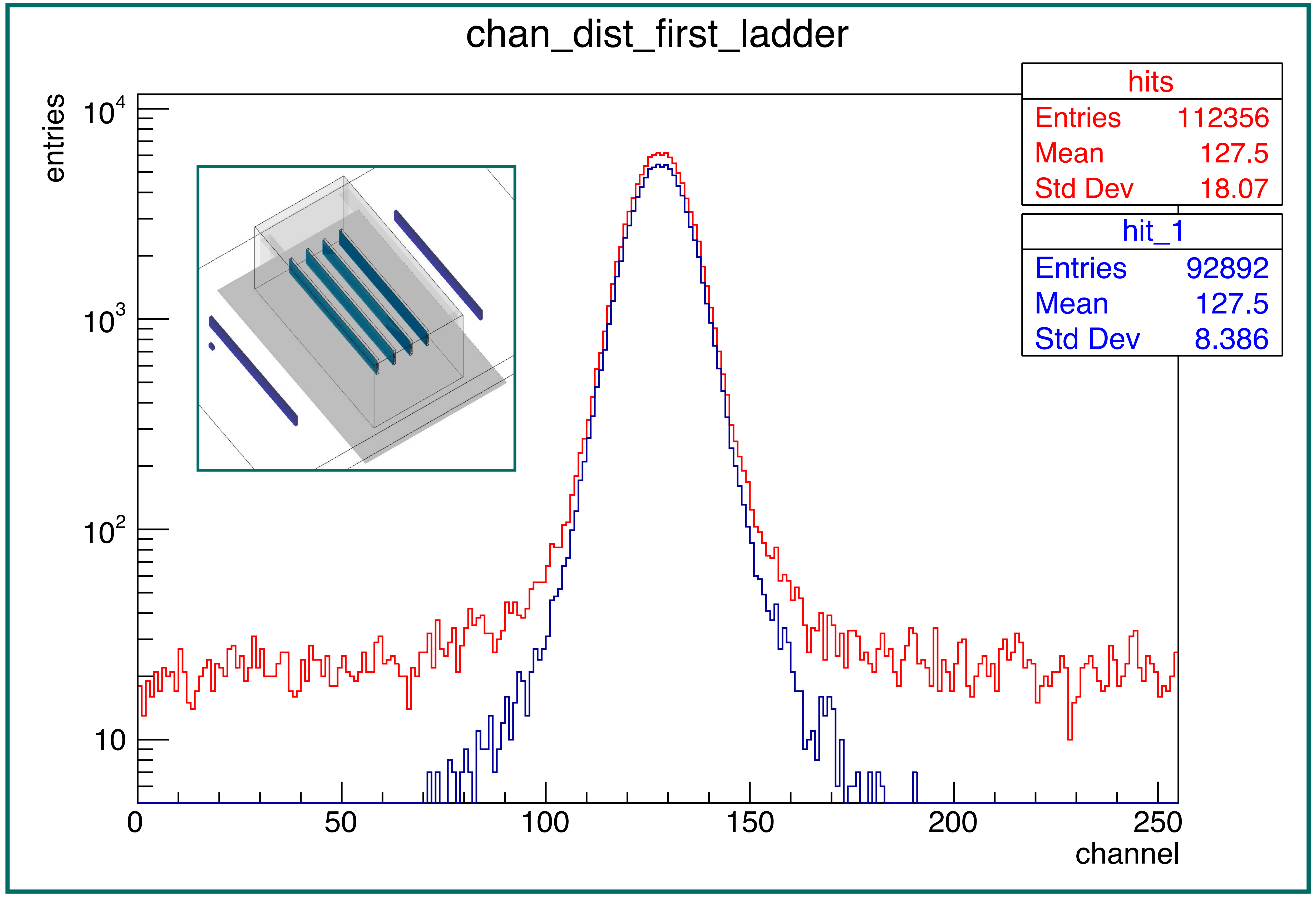
青：hit数を1に制限

赤：hit数の制限なし

③4本ラダー（空気）

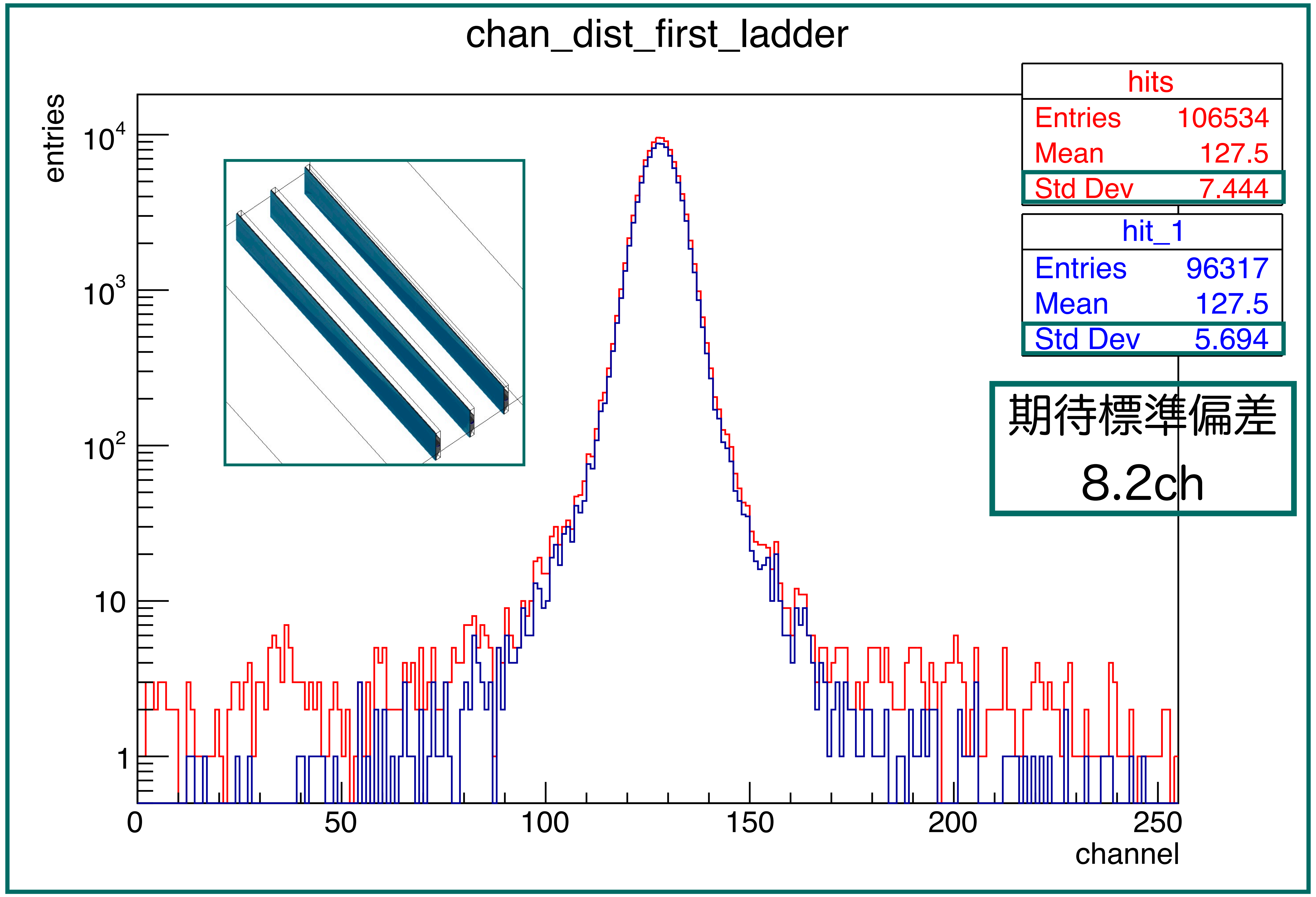


④4本ラダー＋暗箱＋シンチレーター（空気）



・シンチレーターの分、ピーク幅が太くなっている。

研究結果：結果の検証（ピーク幅の理論値との比較）



②3本ラダー（空気）

channel分布のピーク幅（標準偏差）を理論値と比較すると、誤差は

ヒット数制限なしの場合：-0.76

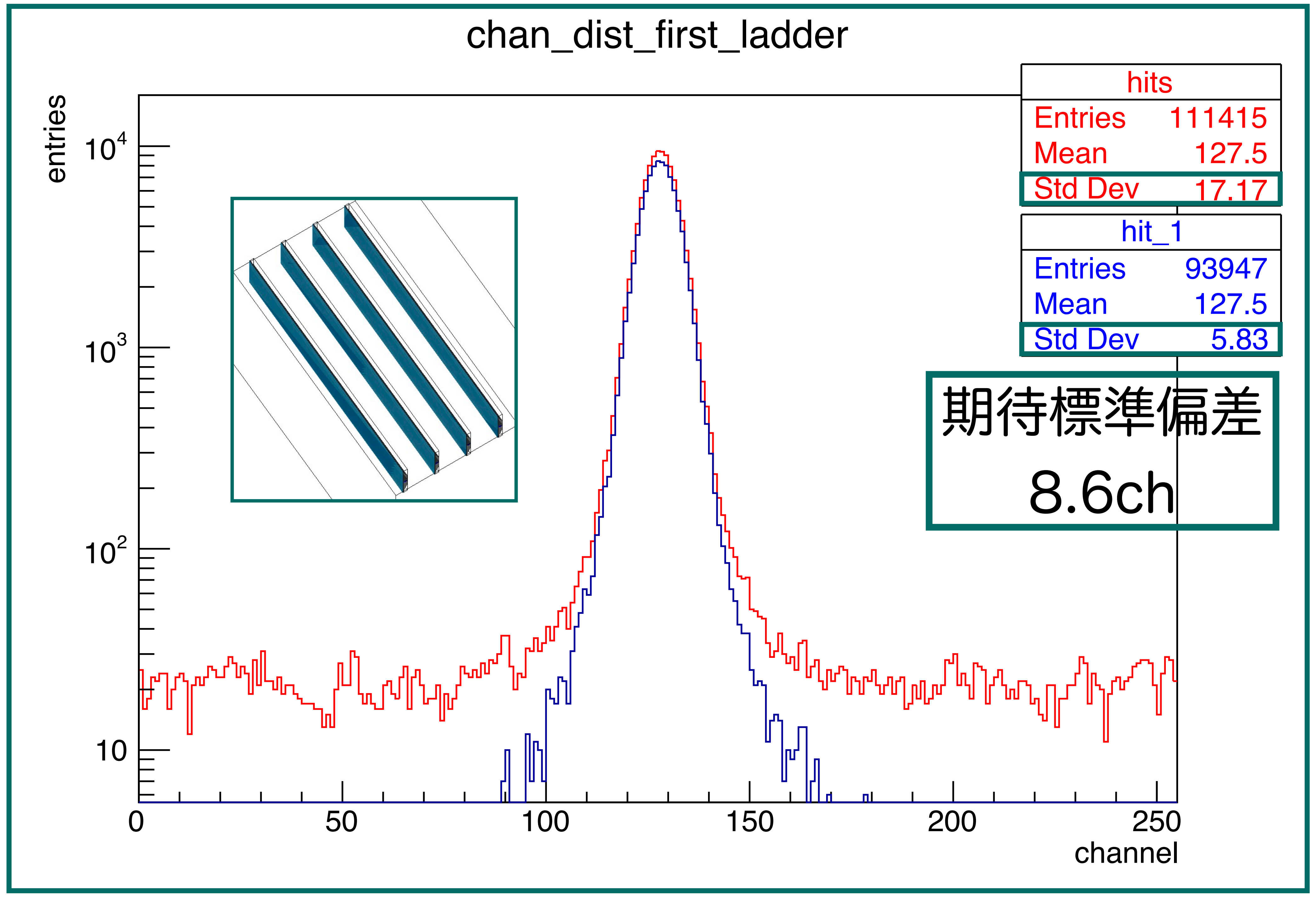
ヒット数1に制限した場合：-2.51

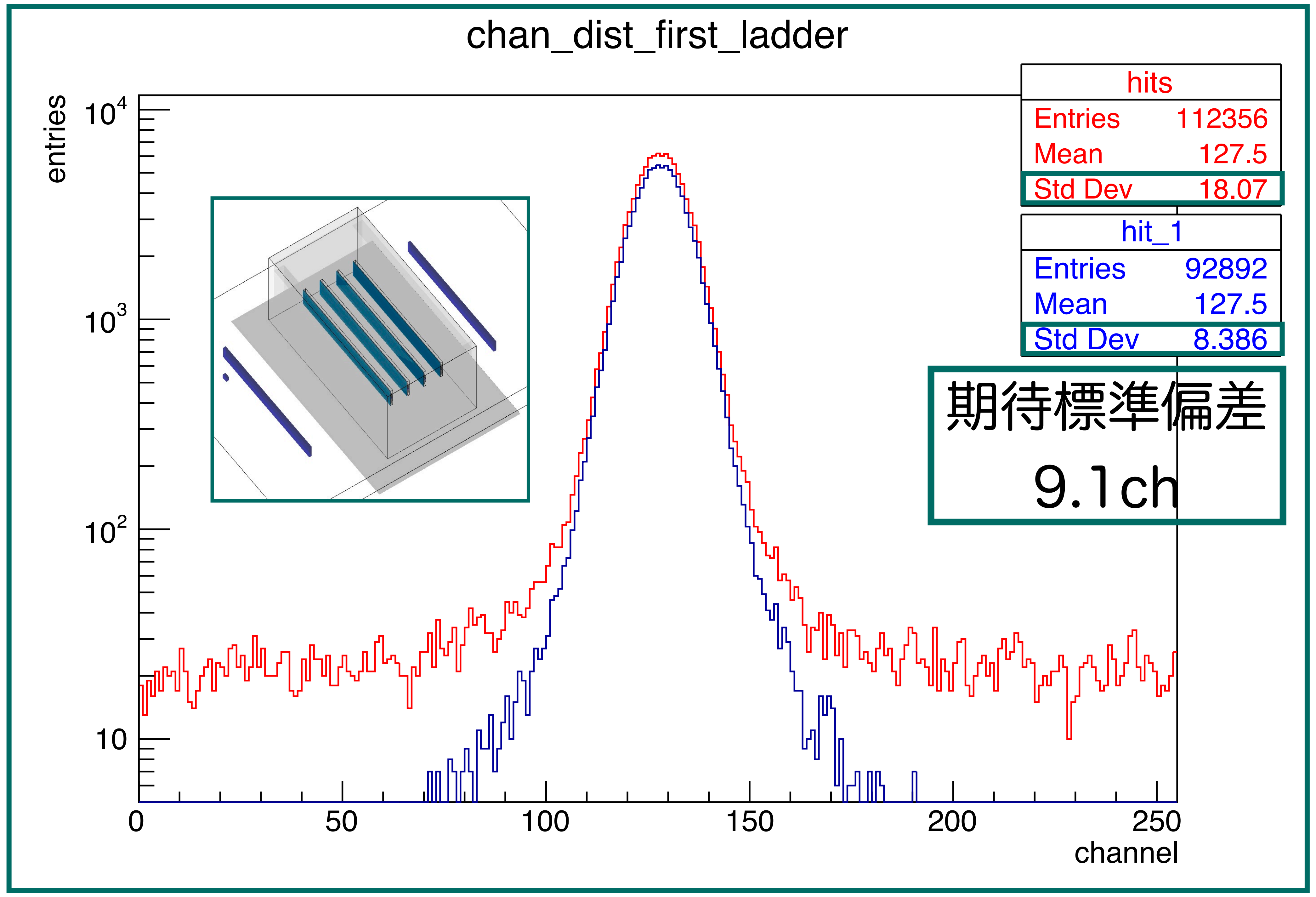
となった。

・ピーク幅は理論値と同程度

→シミュレーションはうまく動いている。

研究結果：ピーク幅の期待値の比較2





③4本ラダー（空気）

④4本ラダー＋暗箱＋シンチレーター（空気）

・hit数1の場合、Simで得られたピーク幅は期待値と同程度

・hit数制限なしの場合、テールの影響により理論値とのずれが ②3本ラダー（空気）のときより大きくなっている。

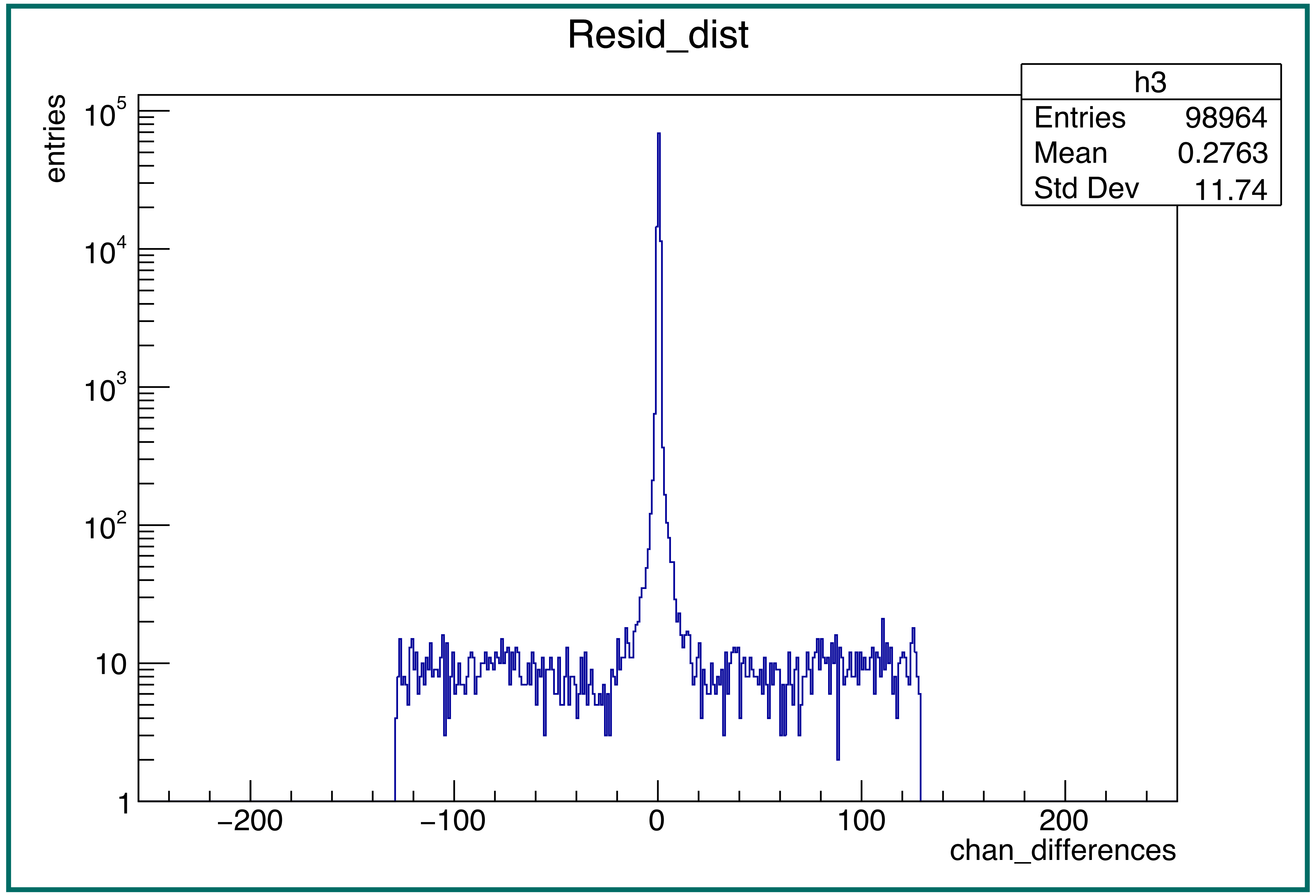
→テールは多重散乱以外の影響で作られている可能性が高い。

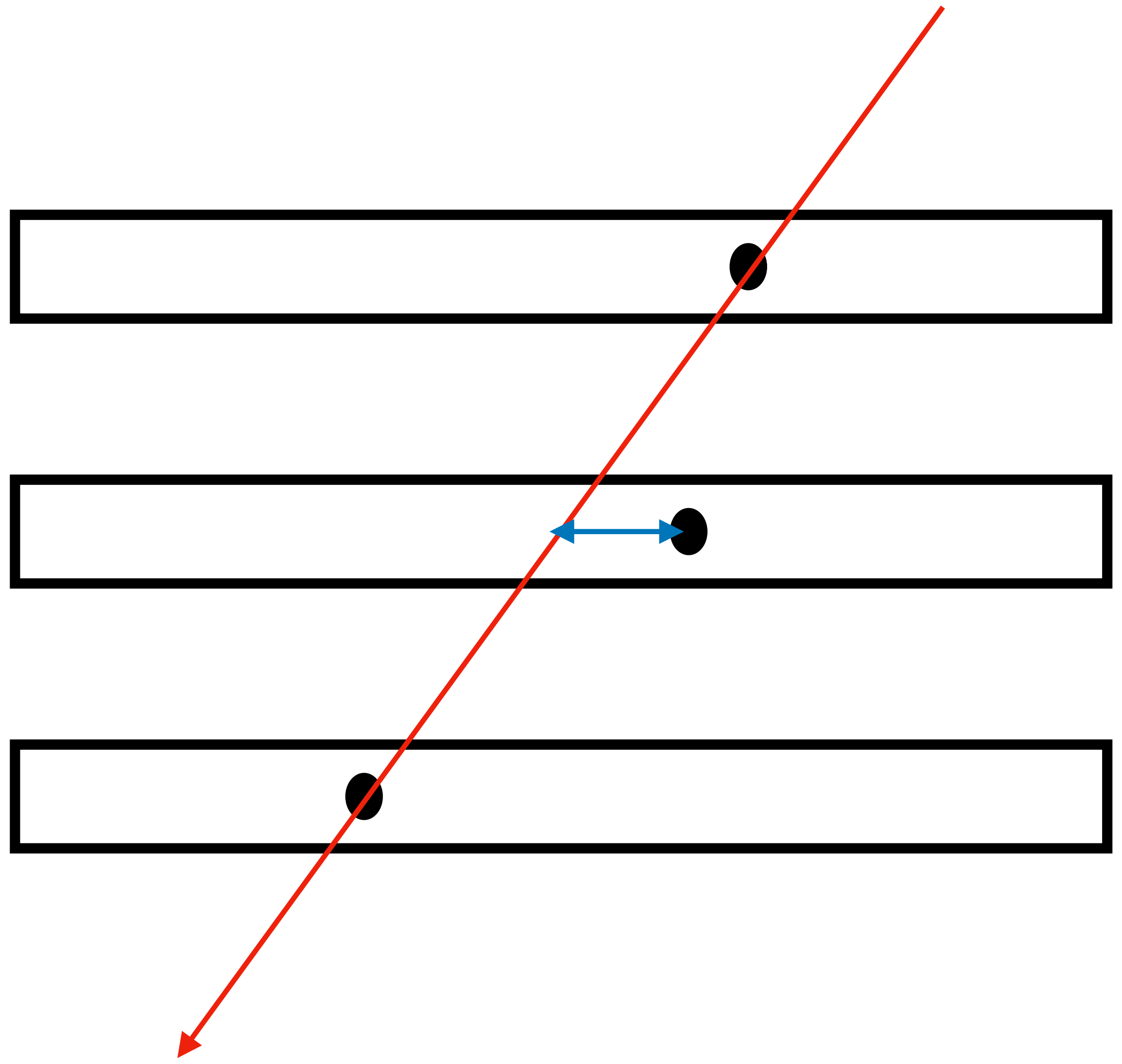
研究結果：Residual分布の作成

- 実験ではビームの入射角度がラダーに垂直とは限らない。

　→上下ラダーから予想される真ん中ラダーのhit位置と実際のhit位置のchannel差の分布を作成することによって、ラダーに垂直に打ったビームのchannel分布と同じように見ることができる。

（上下ラダーのhit数1、真ん中ラダーのhit数は1以上）





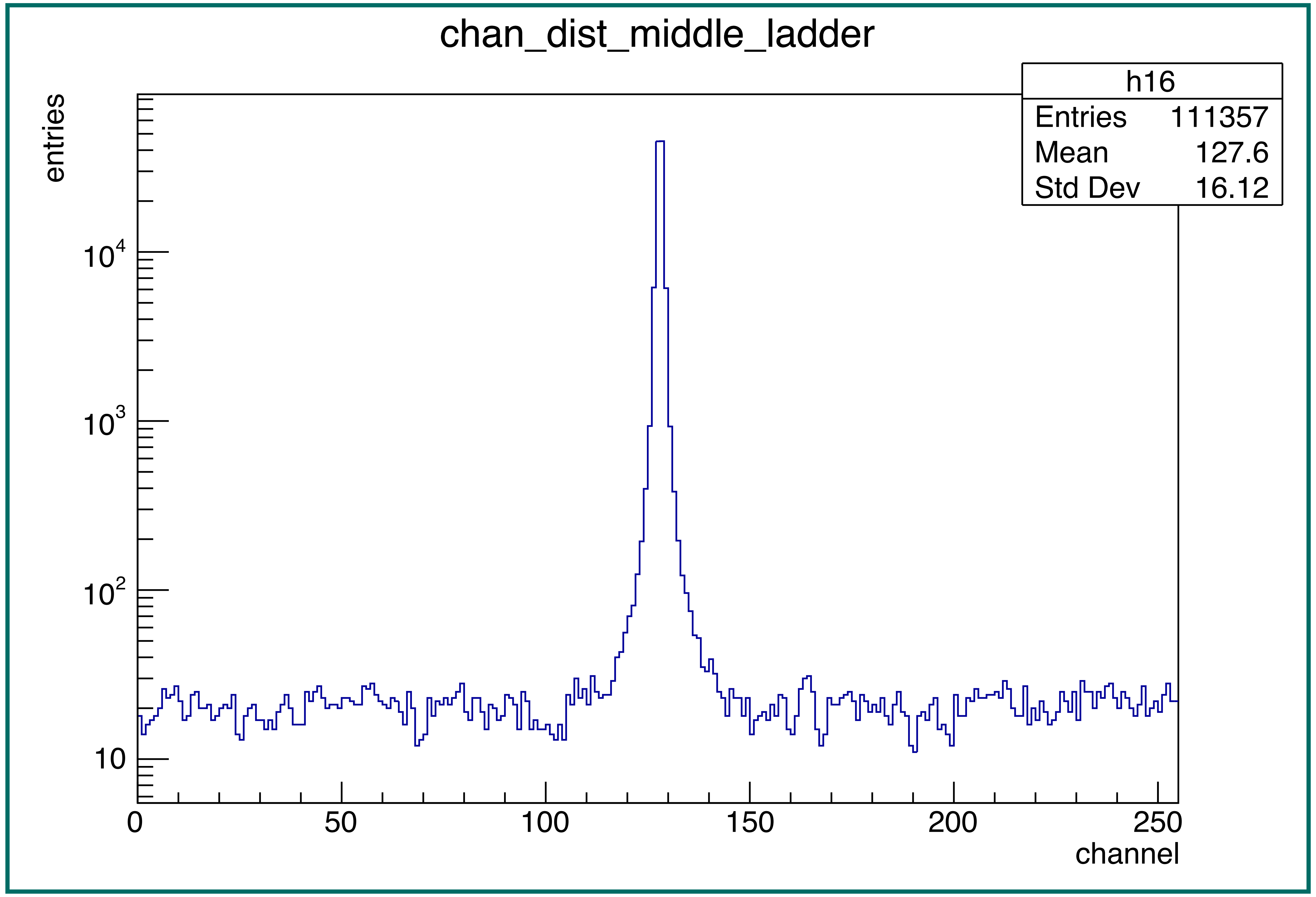
- 今回のシミュレーションでもResidual分布を作成した。

→実験データと比較できるようになった。

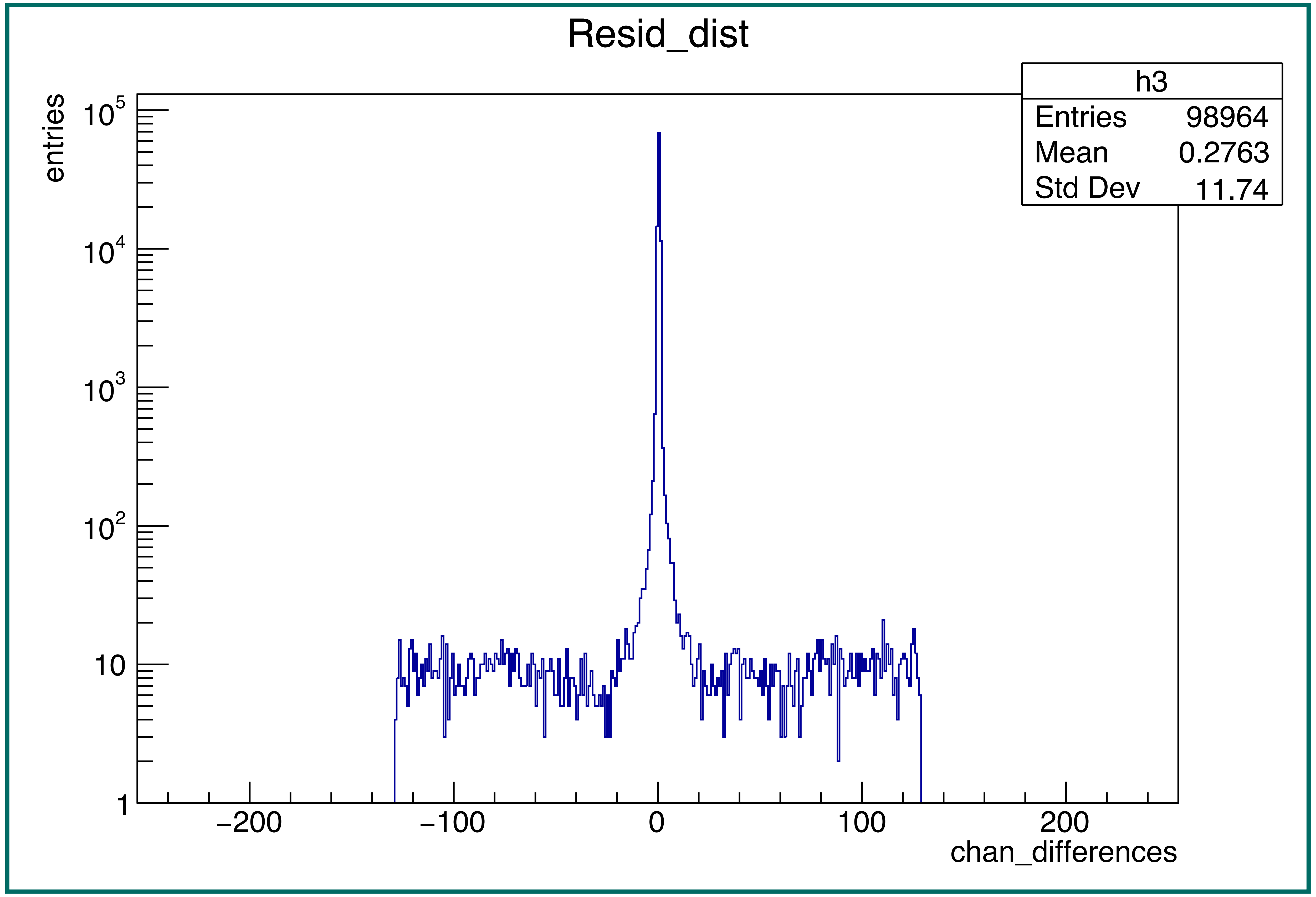
研究結果：channel分布とResidual分布の比較

- 今回、ビームは角度のふれなく垂直に入射している。
  →channel分布とResidual分布は同じように見ることができる。

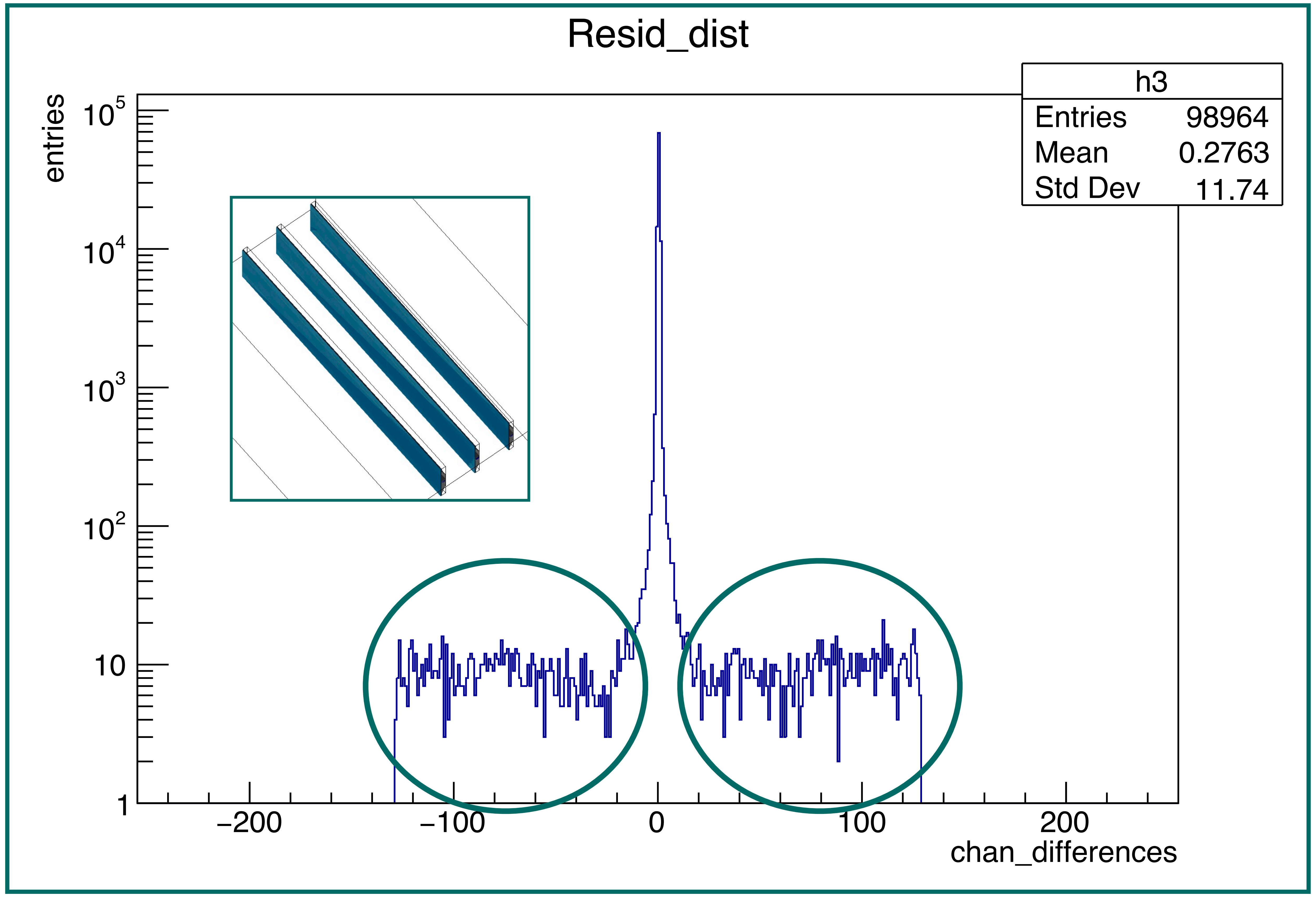
channel分布



Residual分布



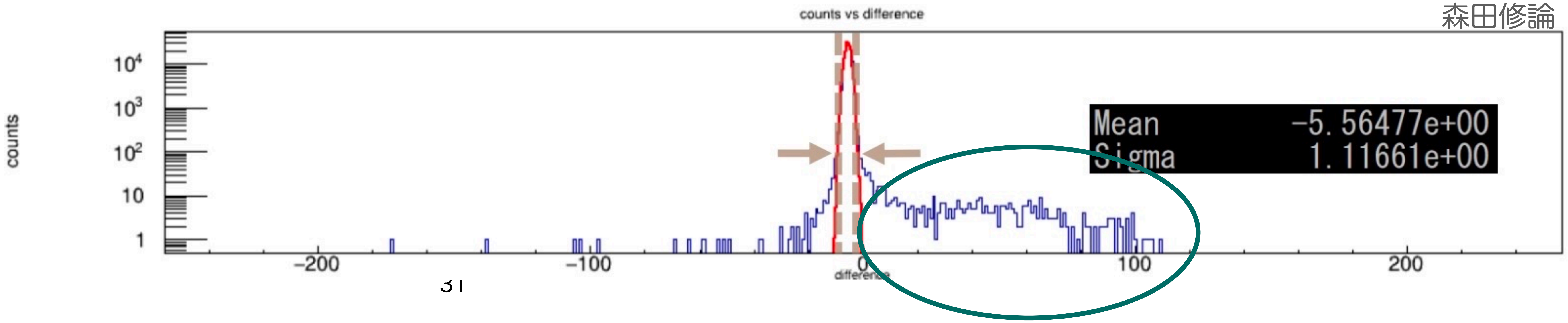
研究結果：先行研究の右側のテール



セットアップ：①3本ラダー（真空）

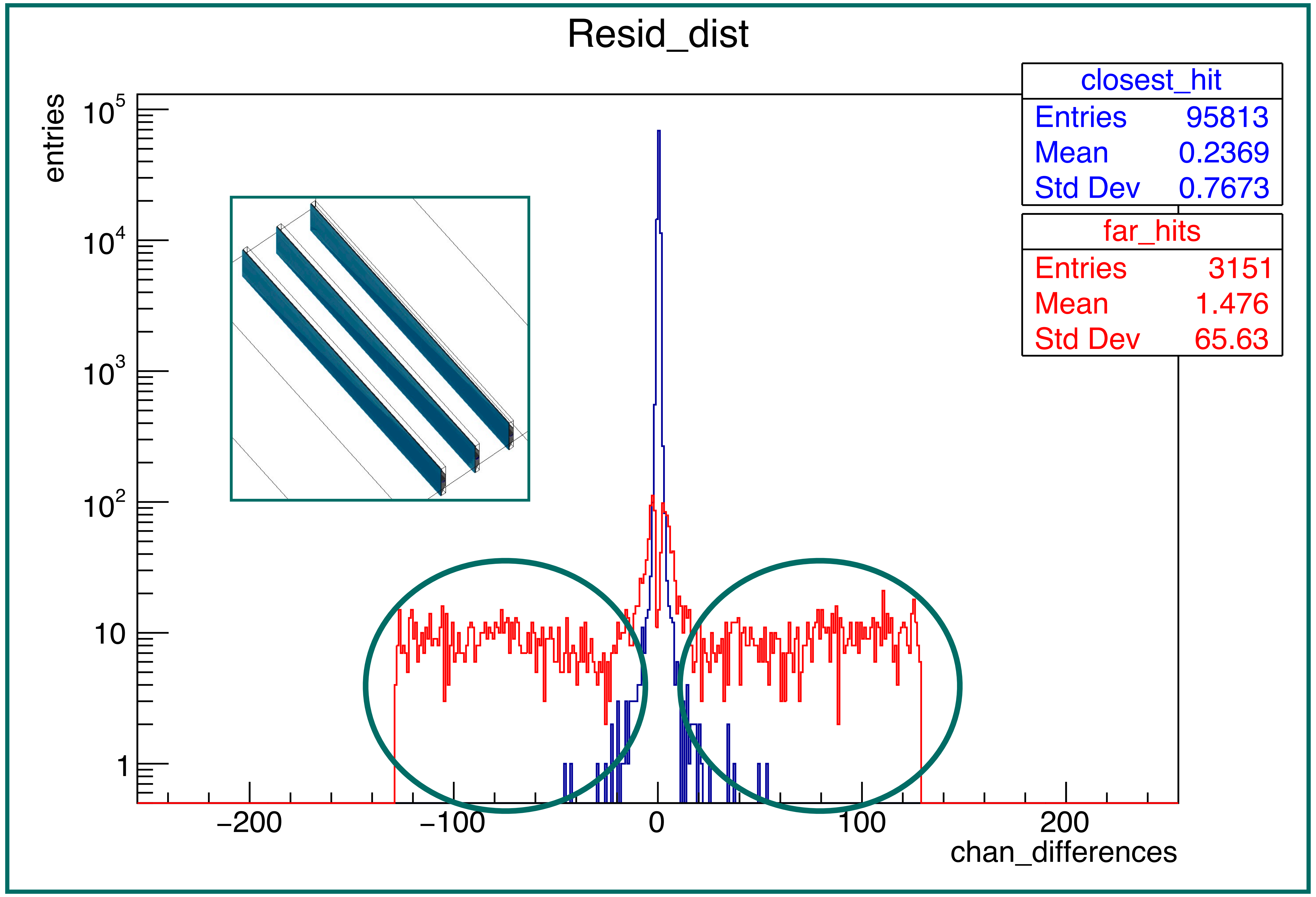
左図：Residual分布
（上下ラダーのhit数1、真ん中ラダーのhit数は1以上）
先行研究における右側のテールと同じ、広く平らなテールをシミュレーションでも確認できた。

森田修論



研究結果：先行研究の右側のテール（複数hit）

セットアップ：①3本ラダー（真空）

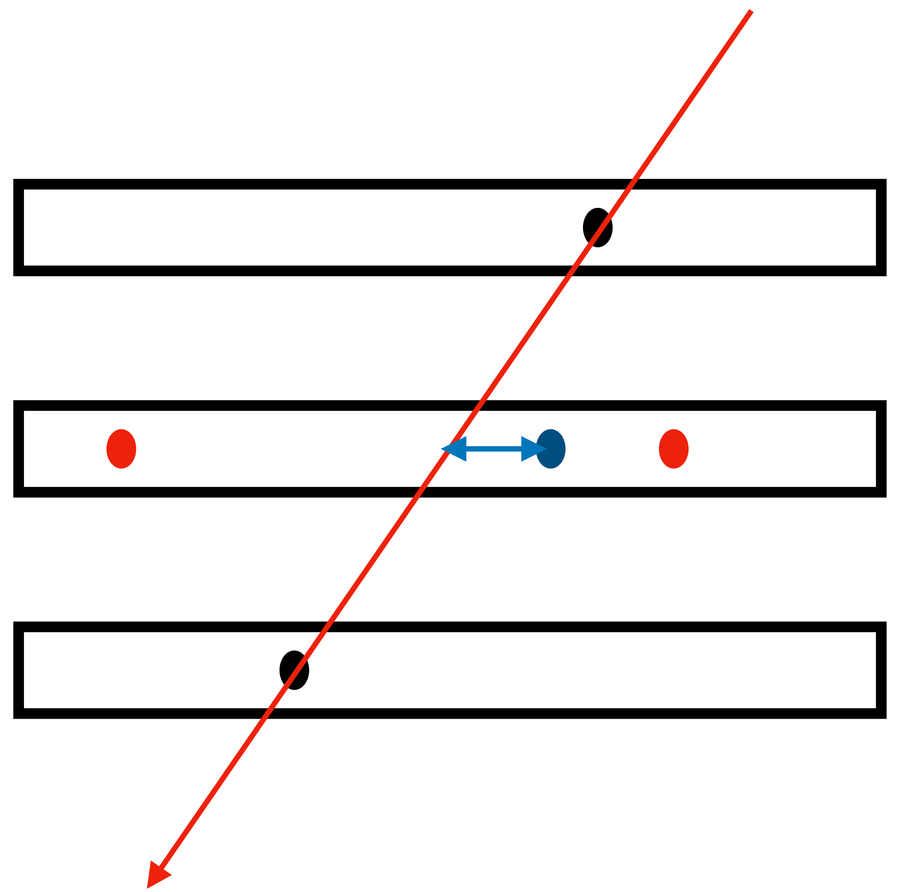


複数hitについて考慮する。

青：hit期待位置に最も近い点

赤：それ以外の点

・広く平らなテールは、複数hitした場合のhit期待位置から遠いhitによって作られている。



セットアップの変更　まとめ

- 散乱の原因となる物体を取り除くことで、hit数1に制限すると広がりのないhit分布になった。
  →広がりの原因となっている複数hitが何に由来しているか調べる。
- セットアップごとのhit分布のピーク幅の広がりを確認した。
- セットアップごとのhit分布を理論値と比較し、シミュレーションがうまく動いていることを確認した。
- Residual分布を作成したため、実験データと比較できるようになった。
- 先行研究と同じ、Residual分布の広く平らなテールをシミュレーションでも確認できた。

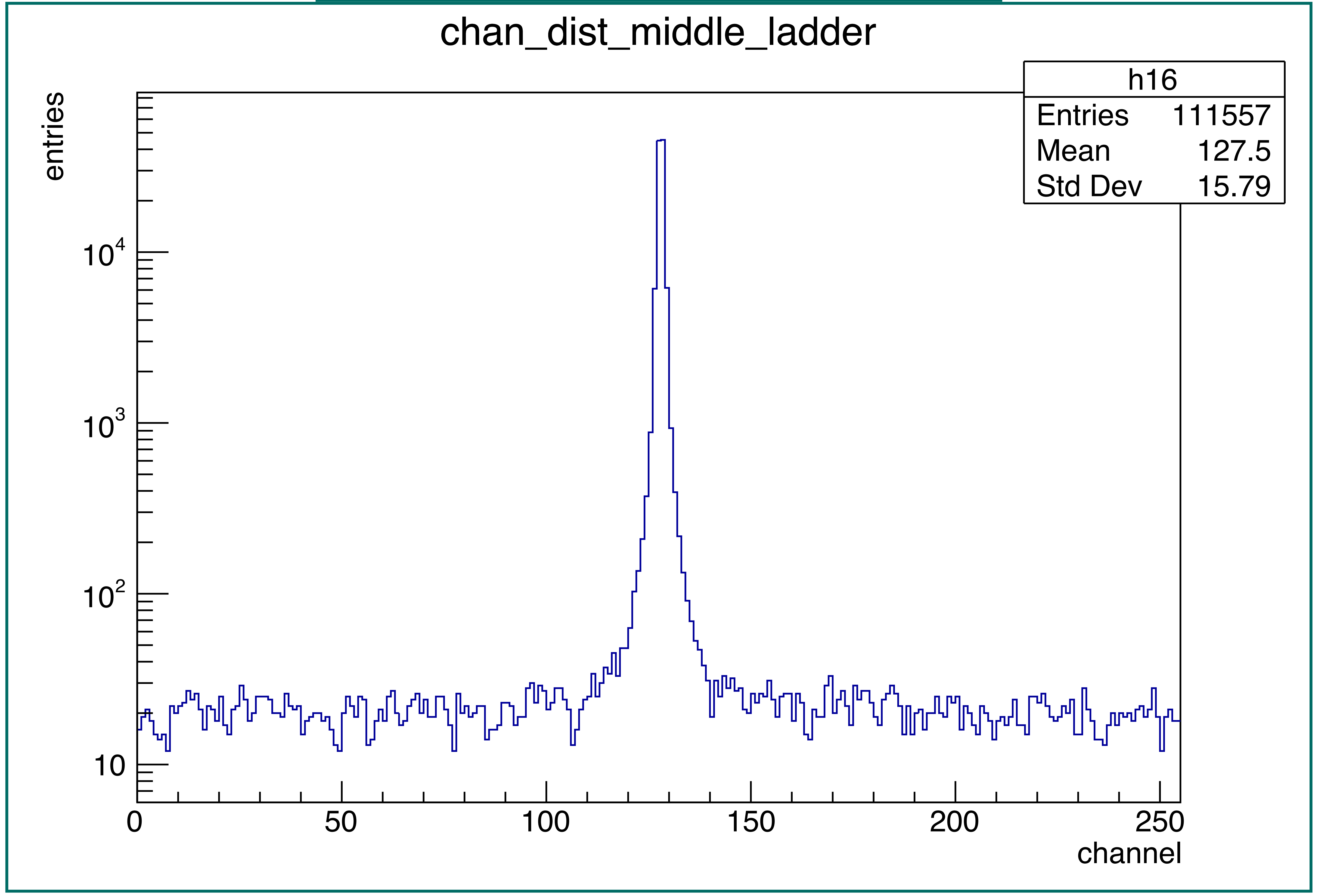
研究結果：Coulomb Scatteringによる分布の変化

Coulomb Scatteringを作用させて10万イベント生成。

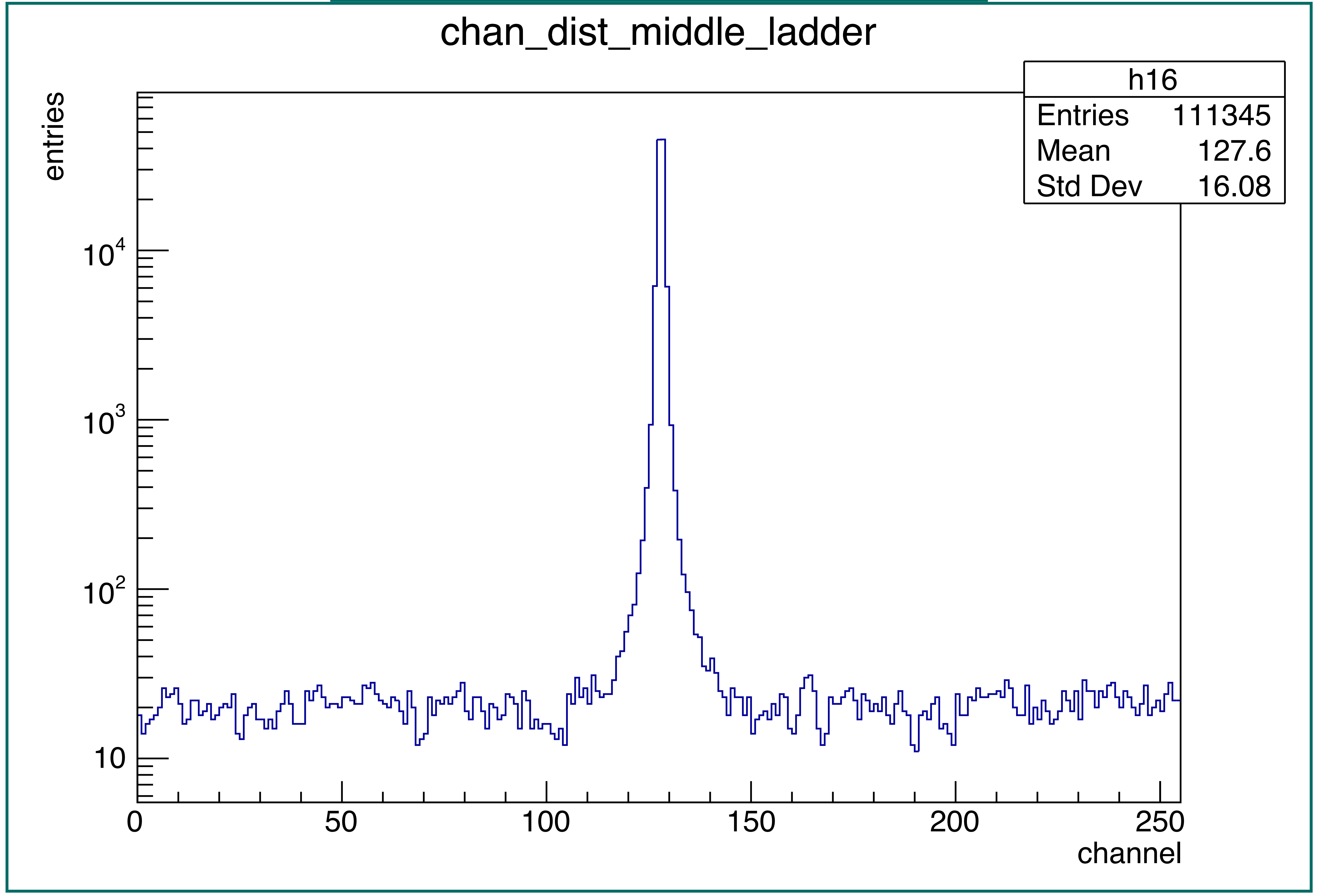
①3本ラダー（真空）

下図：真ん中ラダーのchannel分布

Coulomb Scattering OFF



Coulomb Scattering ON



Coulomb Scatteringを作用させる前後で大きな違いはみられない。

研究結果：Coulomb Scatteringによる分布の変化2

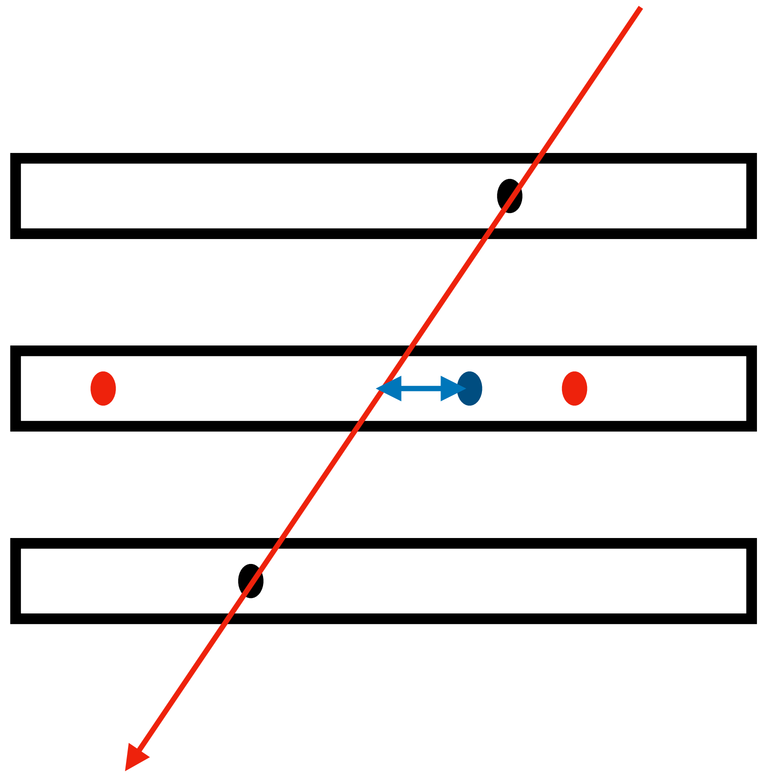
Coulomb Scatteringを作用させて10万イベント生成。

①3本ラダー（真空）

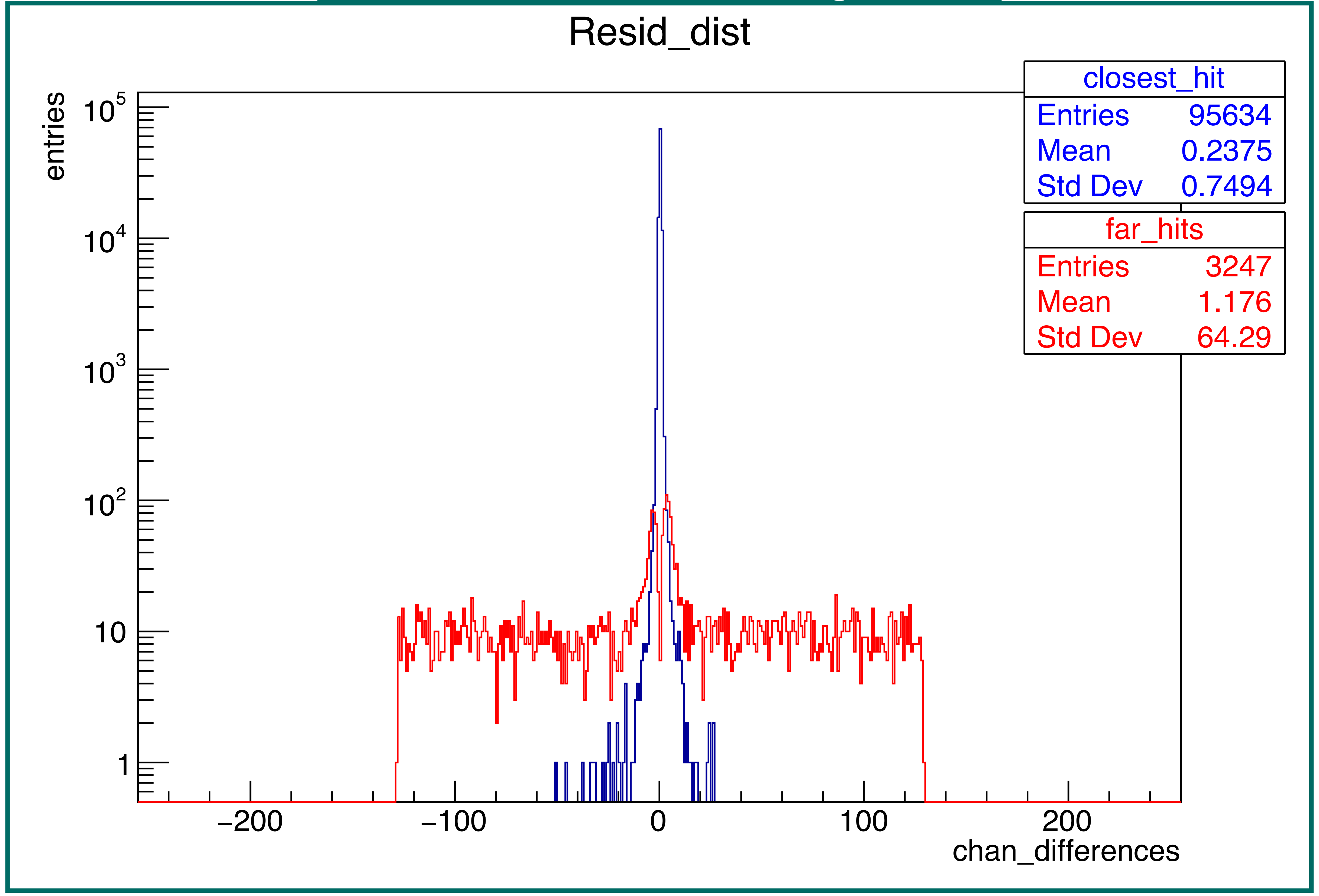
下図：Residual分布

（上下ラダーのhit数1、真ん中ラダーのhit数は1以上）

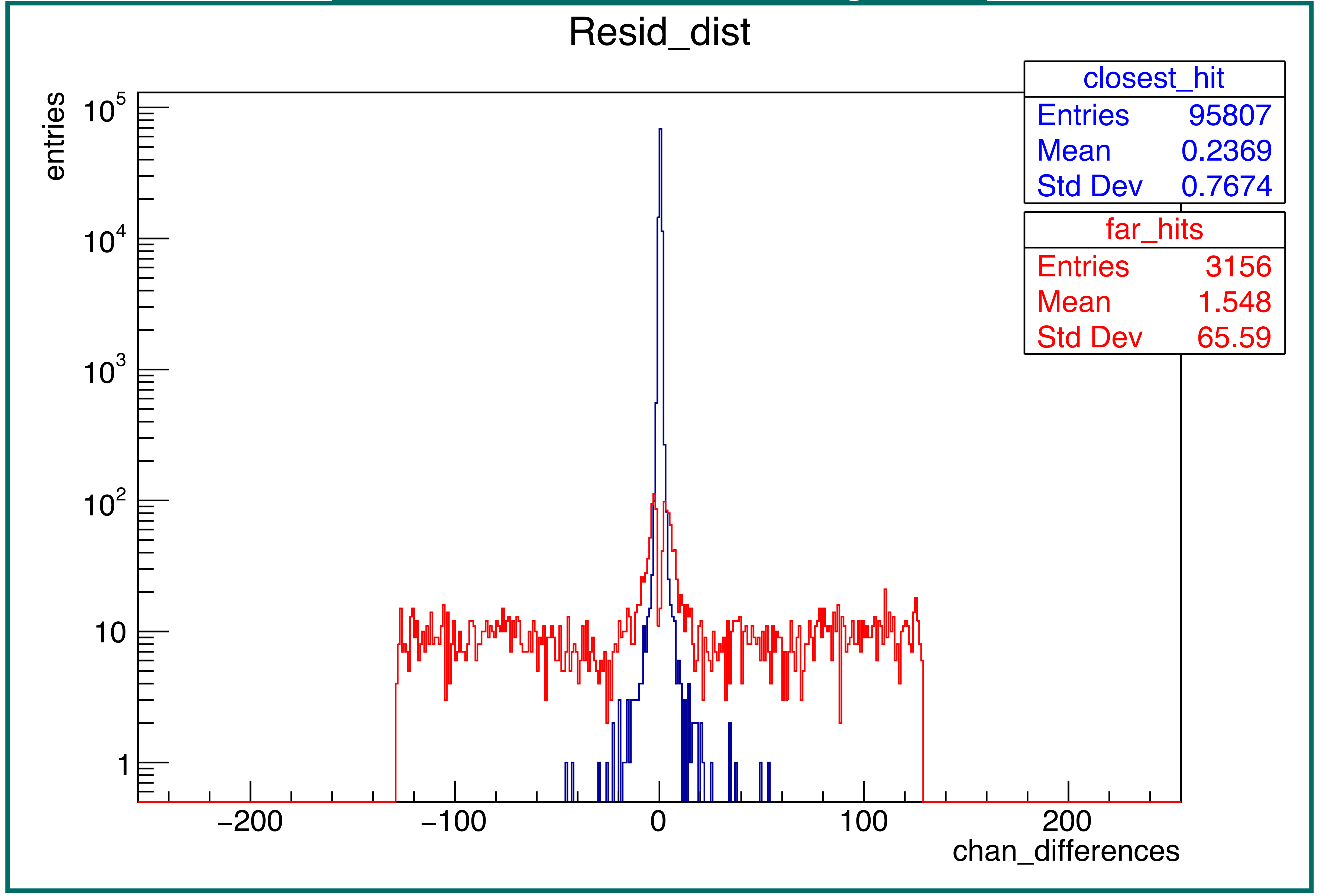
青：hit期待位置に最も近い点
赤：それ以外の点



Coulomb Scattering OFF



Coulomb Scattering ON



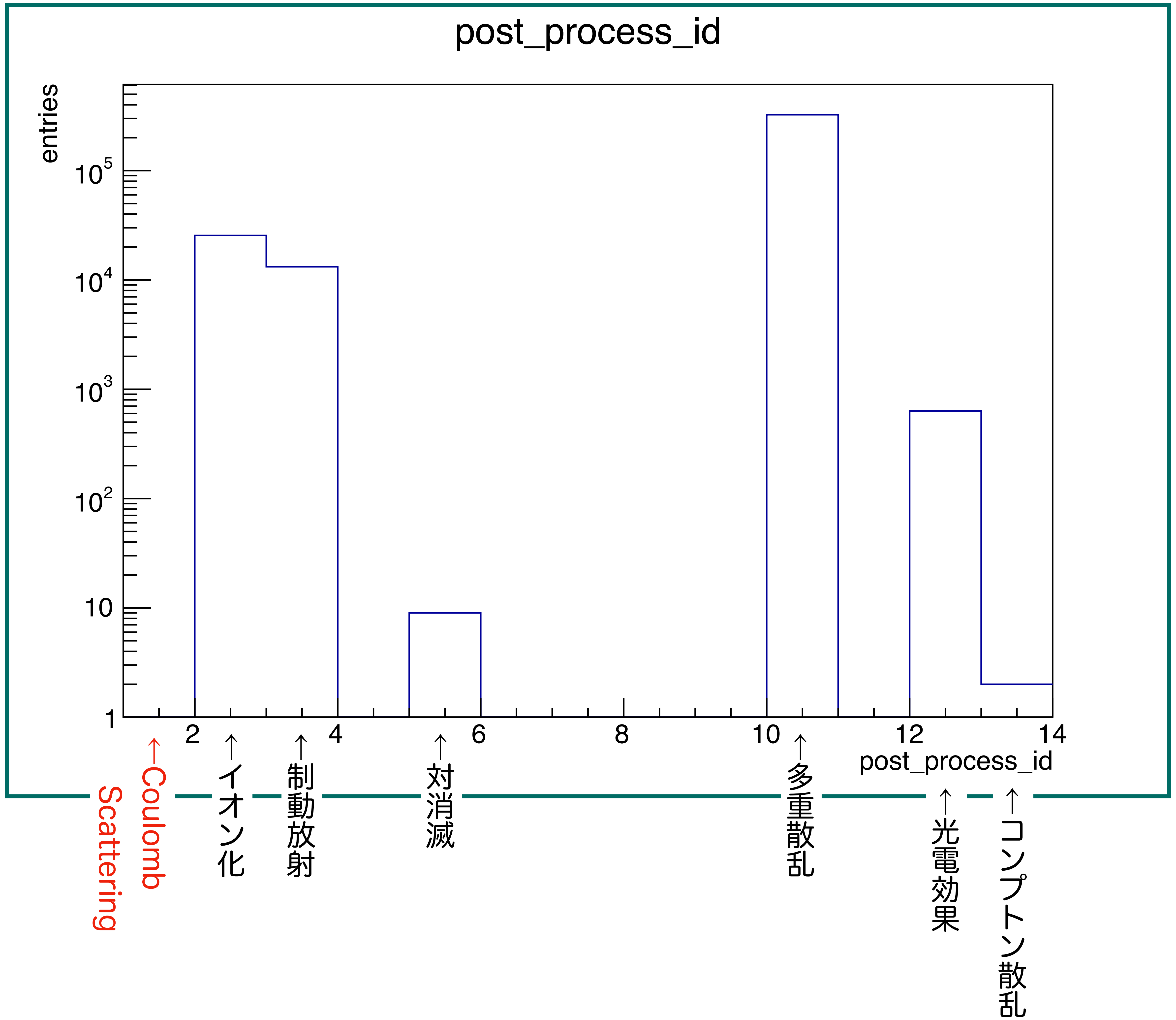
Coulomb Scatteringを作用させる前後で大きな違いはみられない。

研究結果：Coulomb Scatteringが起こる回数

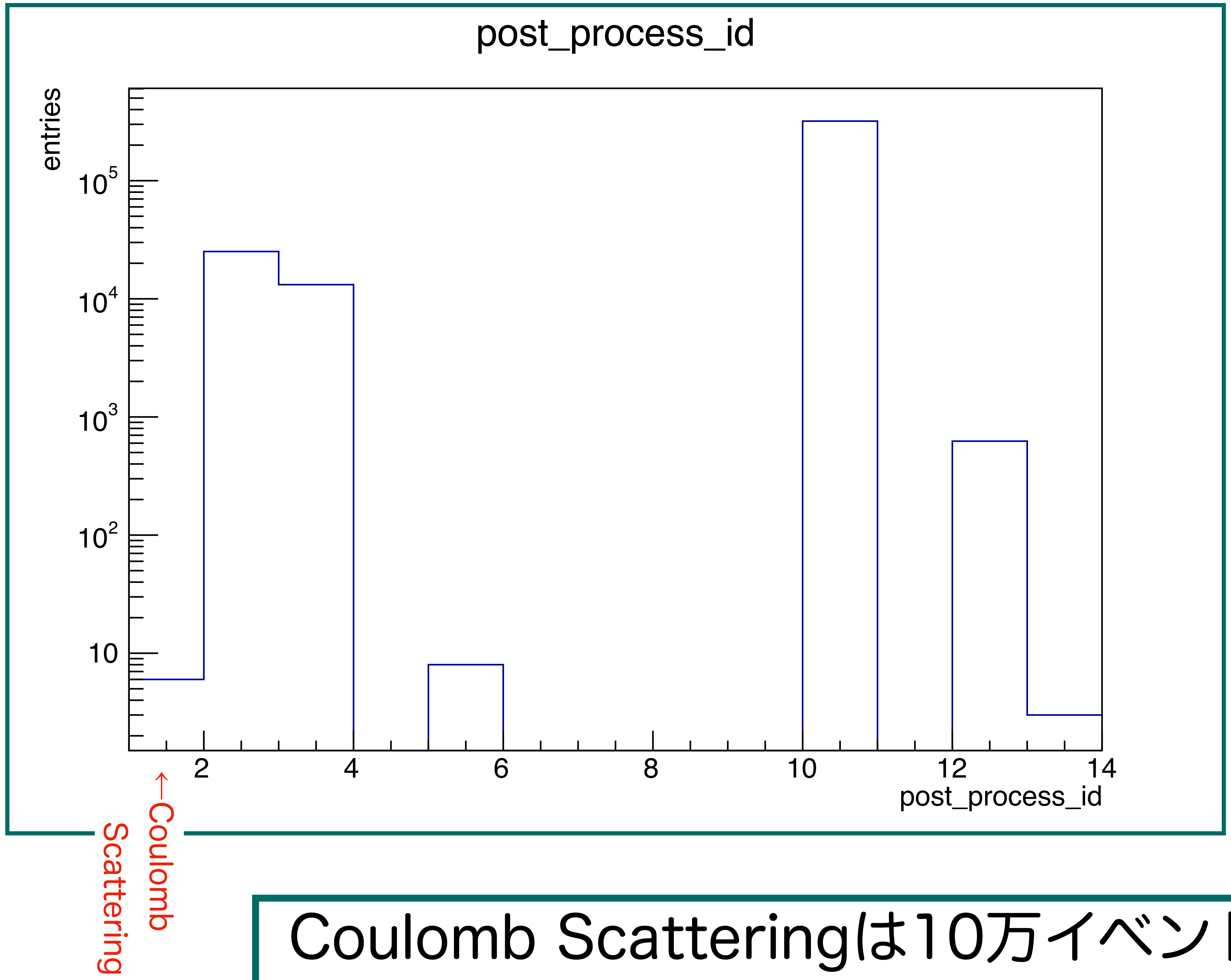
下図：センサーとの相互作用の種類ごとのエントリー数。

セットアップはどちらも3本ラダー（真空）。

Coulomb Scattering OFF



Coulomb Scattering ON



Coulomb Scatteringは10万イベントに5回の割合で起こっている

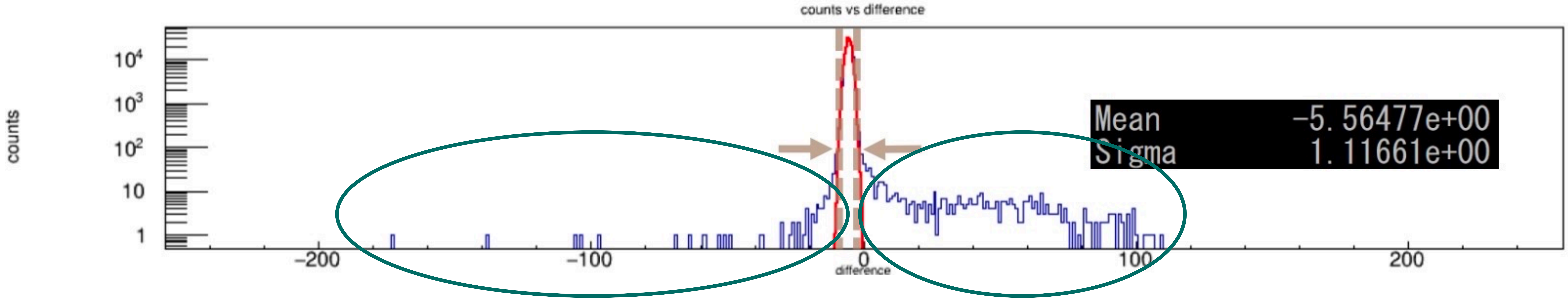
Coulomb Scattering まとめ

- Coulomb Scatteringは10万イベント中5回の割合で起こっていることが分かった。
  →Coulomb Scatteringした粒子だけを抜き出し、どのような角度で散乱するか調べる。

5.まとめ・今後の課題

まとめ・今後の課題：先行研究の理解

- 右側の広くて平らなテールはシミュレーションでも再現できた。複数hitしている粒子が作り出している。
  →複数hitした粒子について詳しく調べる。
- 左側のテールがCoulomb Scatteringによるものかどうかは現在調査中。
  →Coulomb Scatteringした粒子がどのような角度で散乱するか調べる。



森田修論

まとめ・今後の課題

＜セットアップの変更＞

- 散乱の原因となる物体を取り除くことで、hit数1に制限すると広がりのないhit分布になった。
  →広がりの原因となっている複数hitが何に由来しているか調べる。
- セットアップごとのhit分布のピーク幅の広がりを確認した。
- セットアップごとのchannel分布を理論値と比較したことでシミュレーションがうまく動いていることが確認できた。
- Residual分布を作成したことで実験データと比較できるようになった。

＜Coulomb Scattering効果の見積もり＞

- Coulomb Scatteringは10万イベント中5回の割合で起こっていることが分かった。
  →Coulomb Scatteringした粒子だけを抜き出し、どのような角度で散乱するか調べる。

BACK UP

DAC値設定

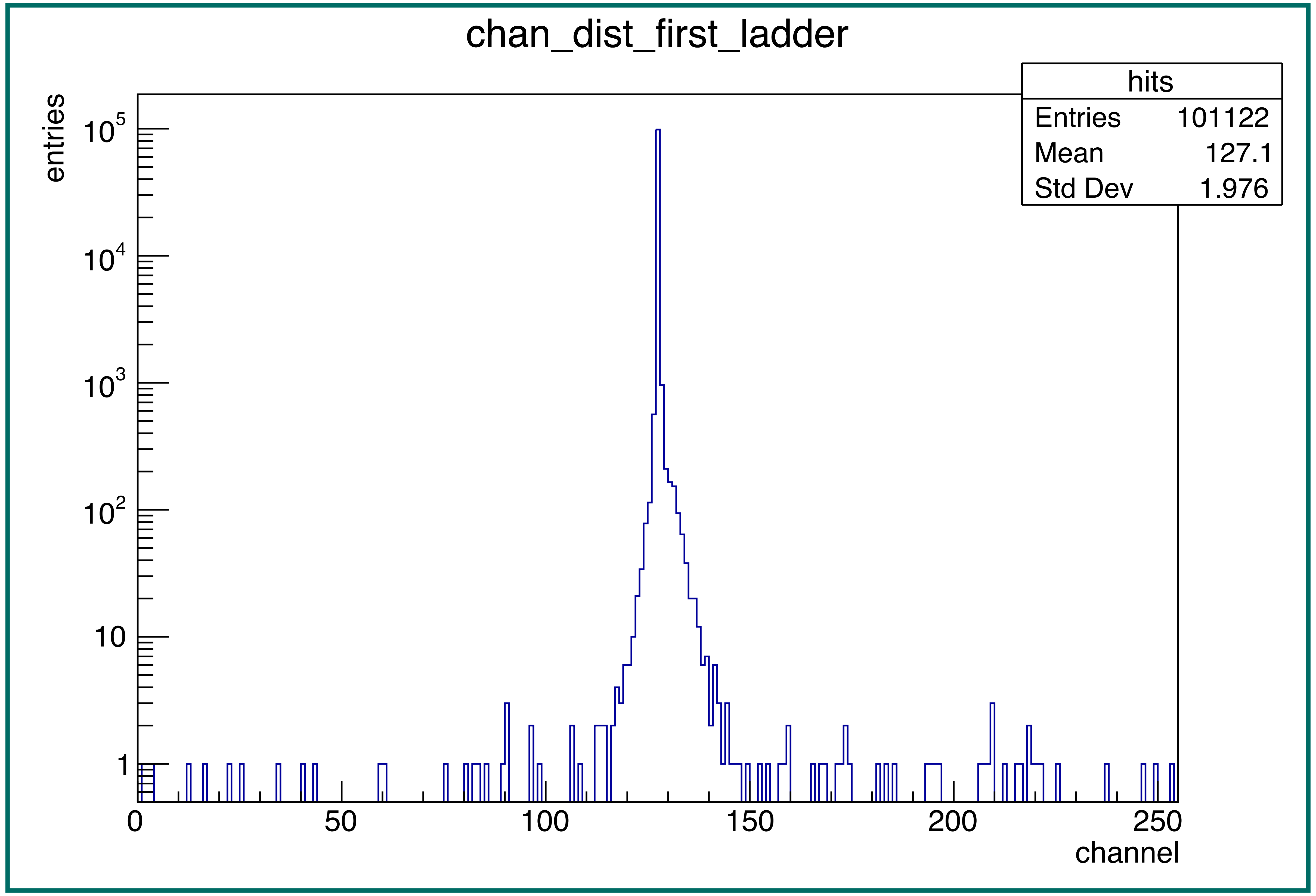
- シリコンセンサーを通過した荷電粒子がセンサーに落とした信号の大きさをADCによって8段階で分類する。
- このときADCの閾値はDAC値により任意に設定可能。
- 右図：今回のDAC設定

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

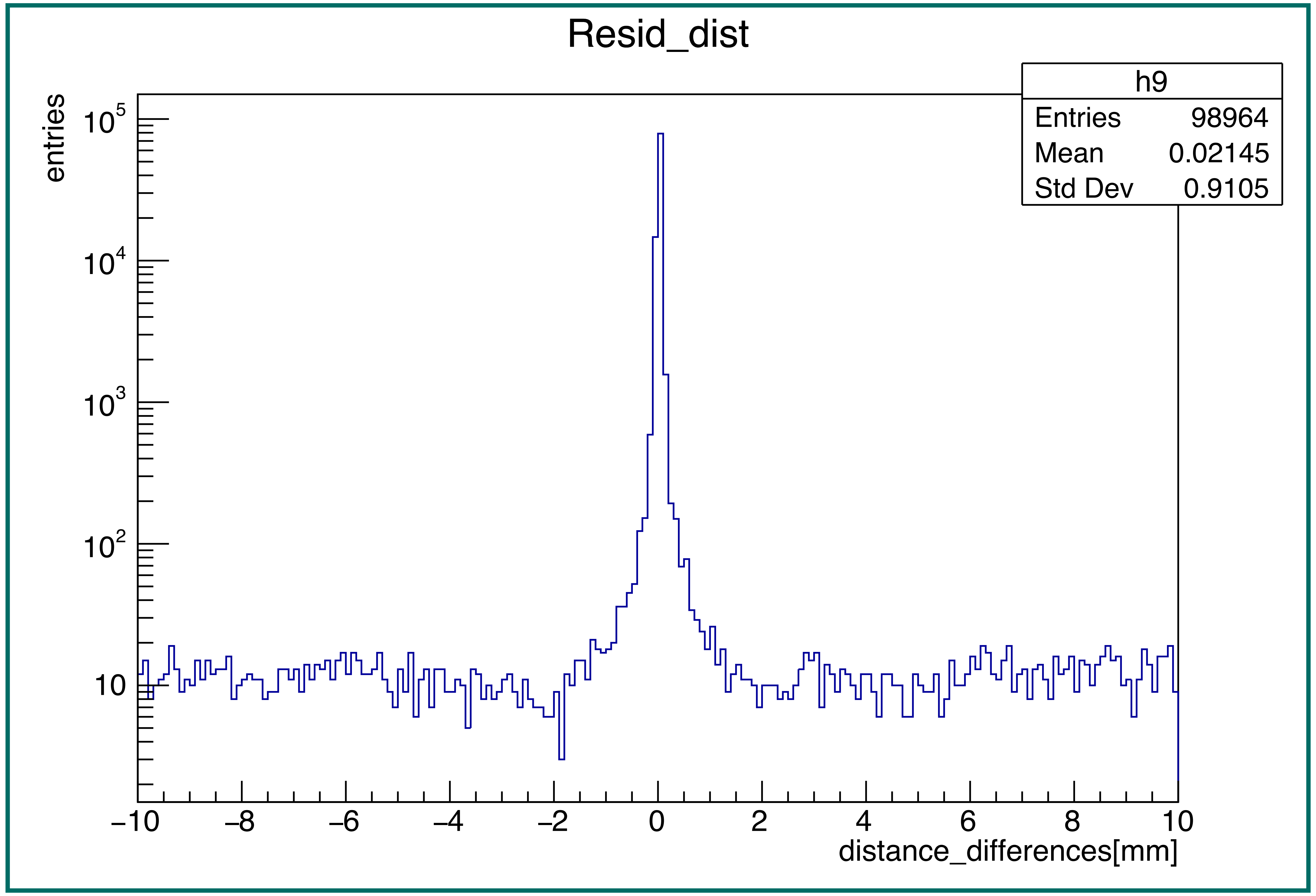
channel分布[mm]ver.

1channel=78ミクロンなので、0~255channelまでの全長はおよそ19.7mmである。そこで右図は横軸：hit位置の差[mm]、縦軸：エントリー（log scale）、1bin=1mmで表したもの。

channel分布 1bin=1channel

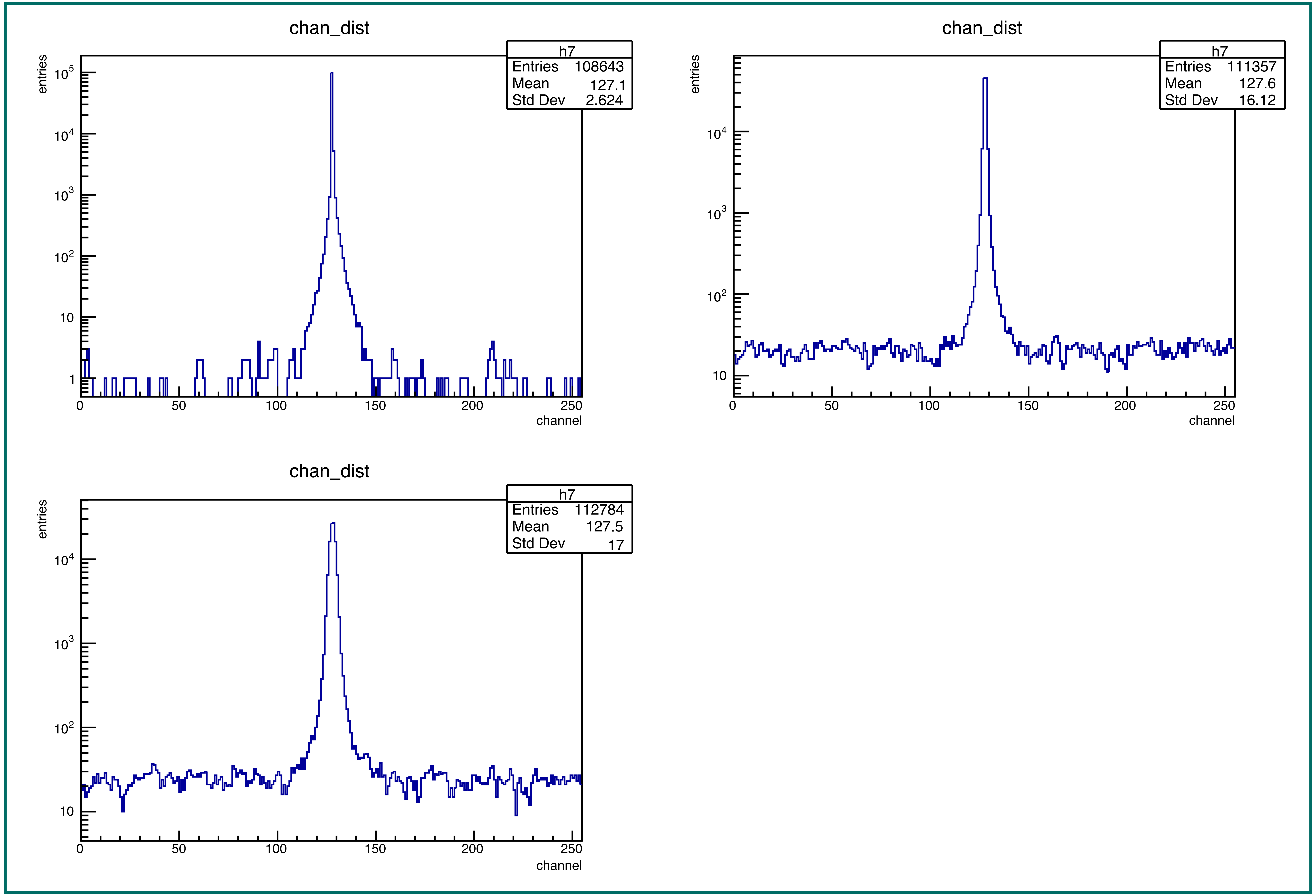


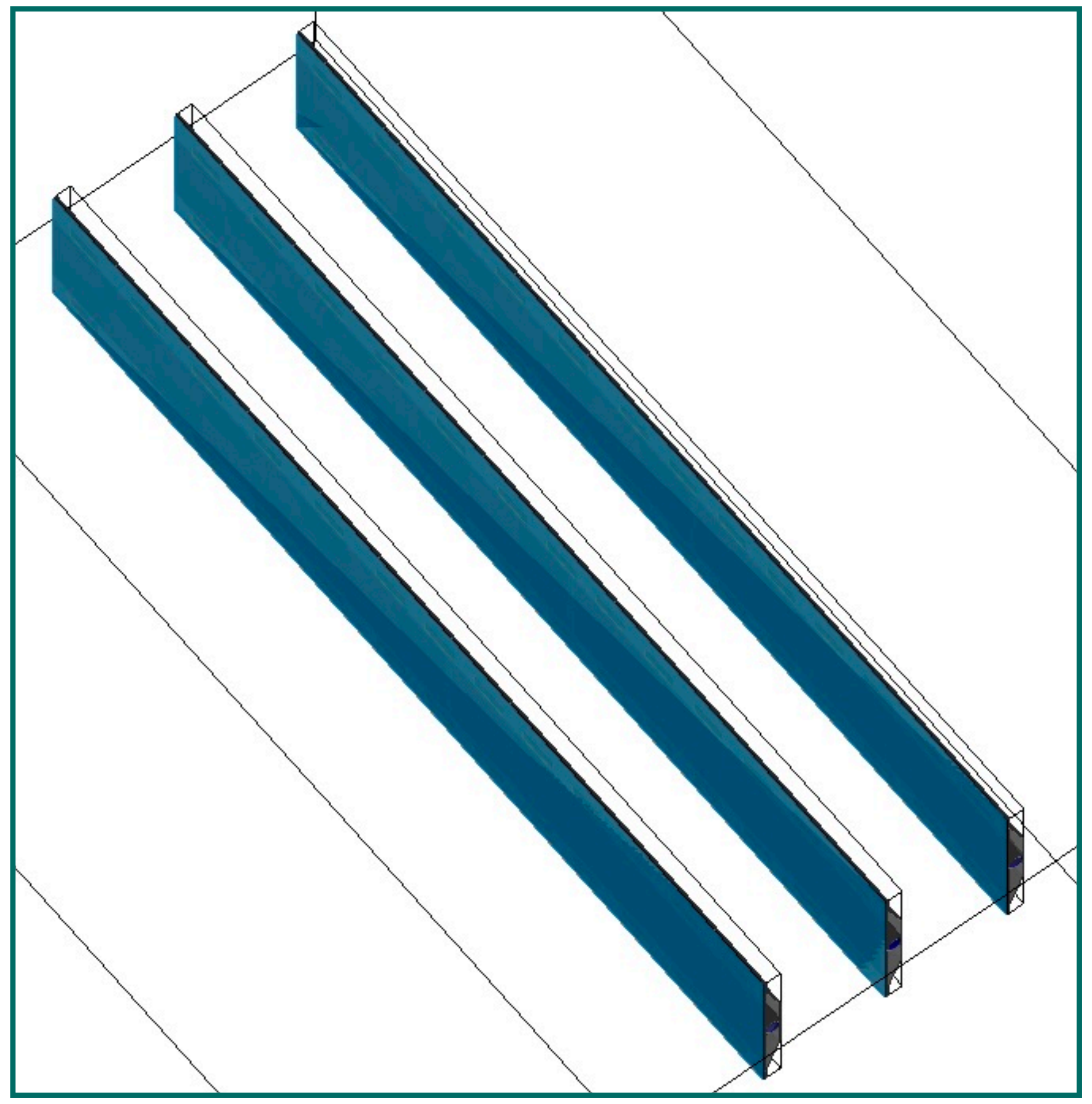
Residual分布 1bin=1mm



ラダーごとのchannel分布

3本ラダー（真空）

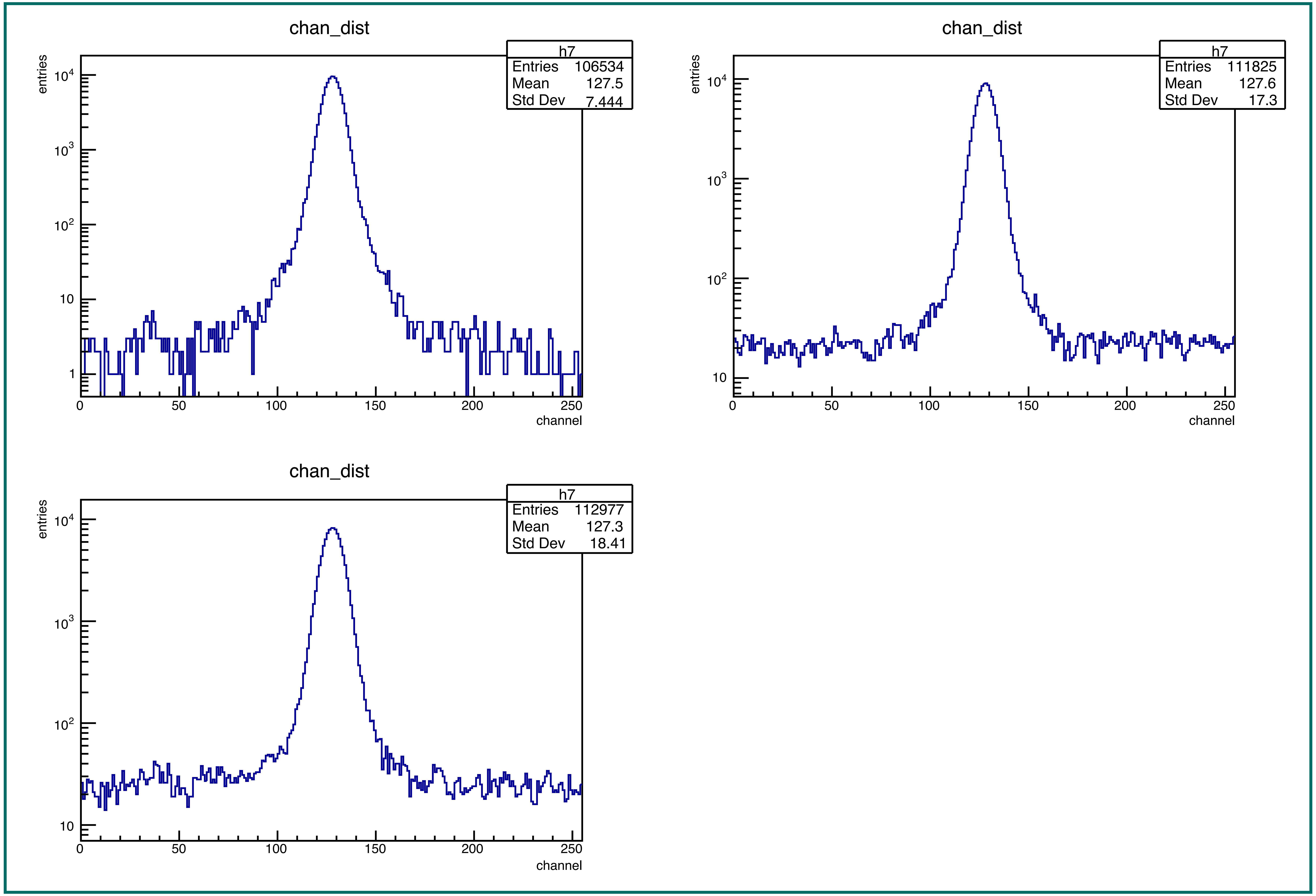


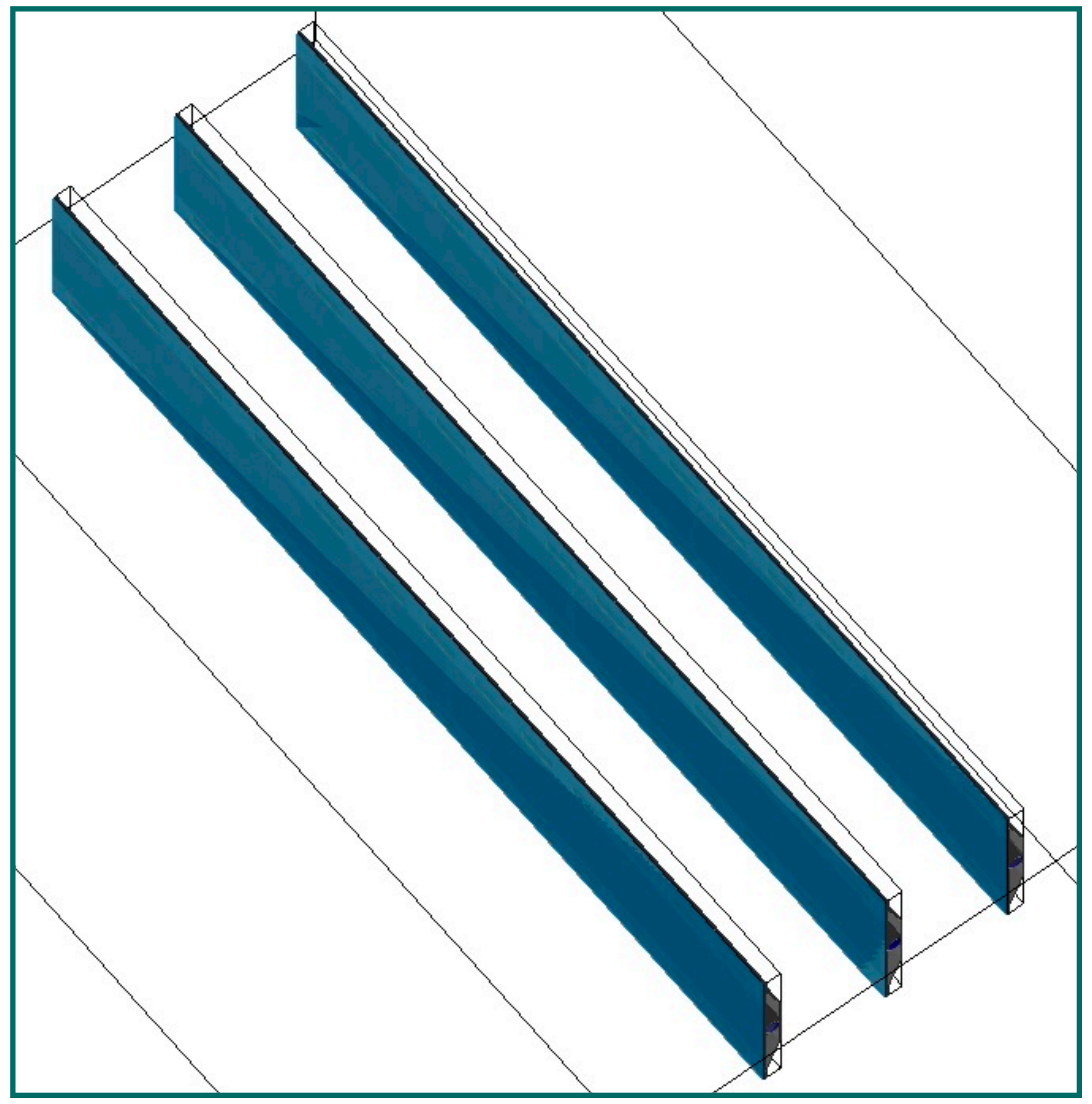


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

ラダーごとのchannel分布

3本ラダー（空気）

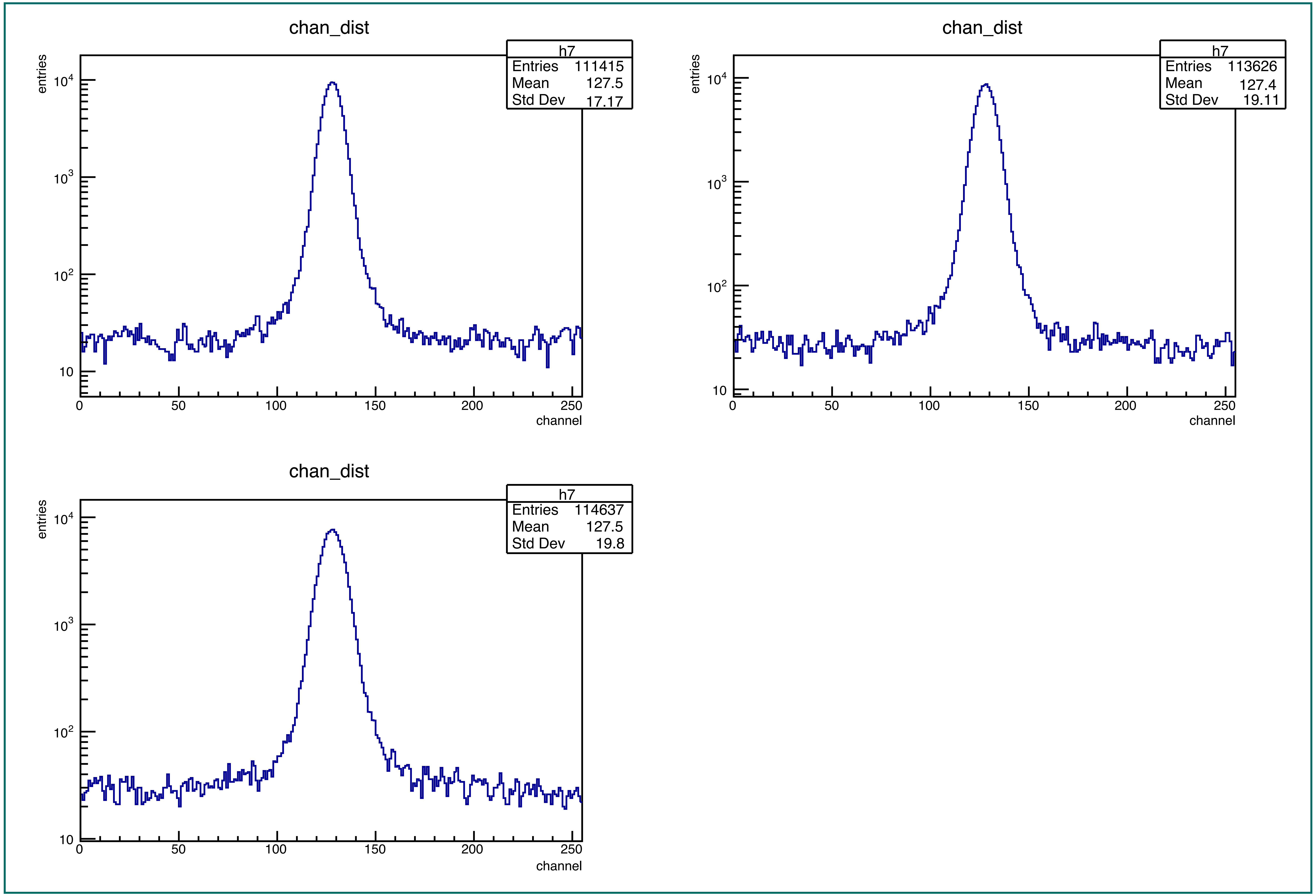


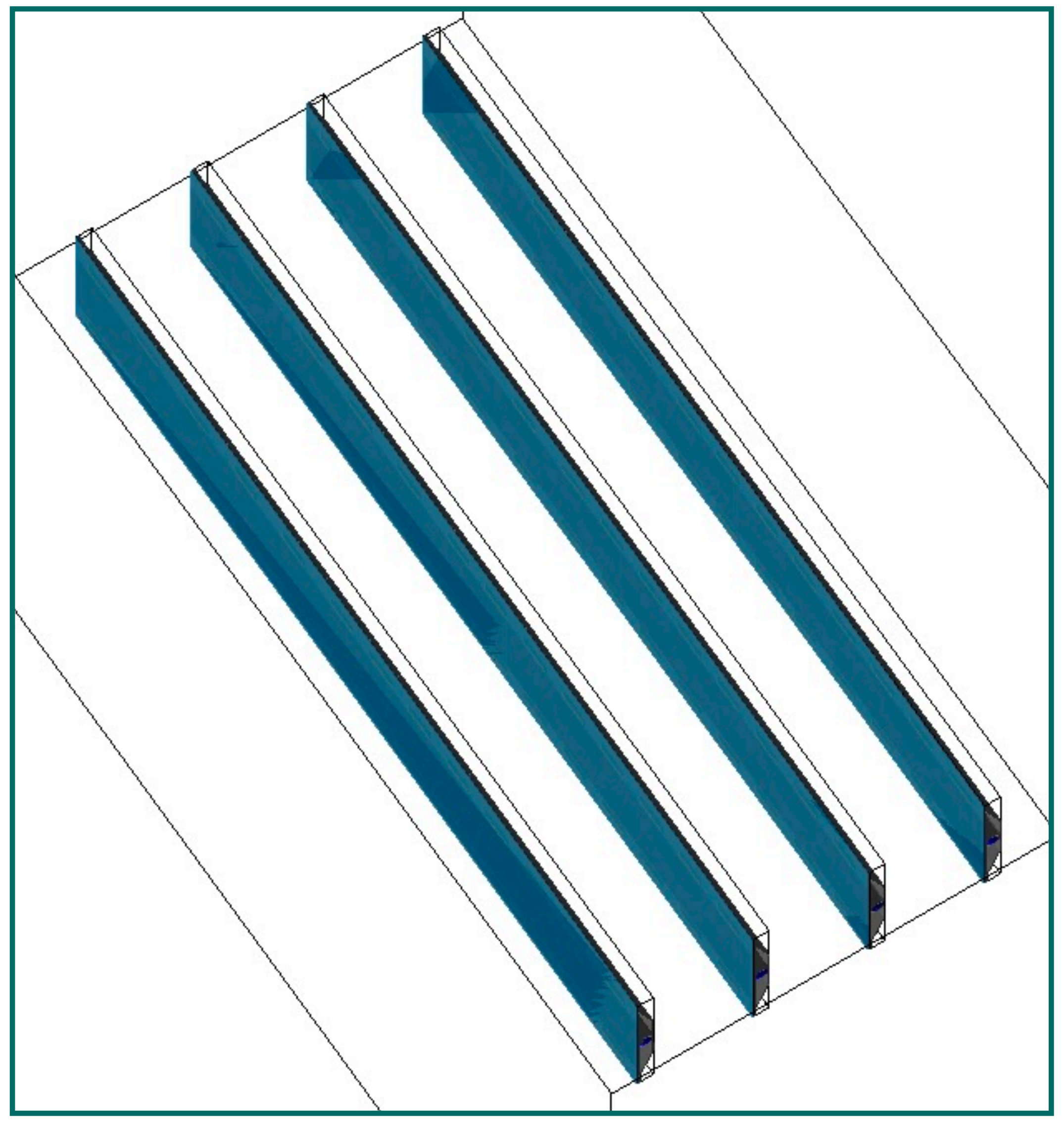


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

ラダーごとのchannel分布

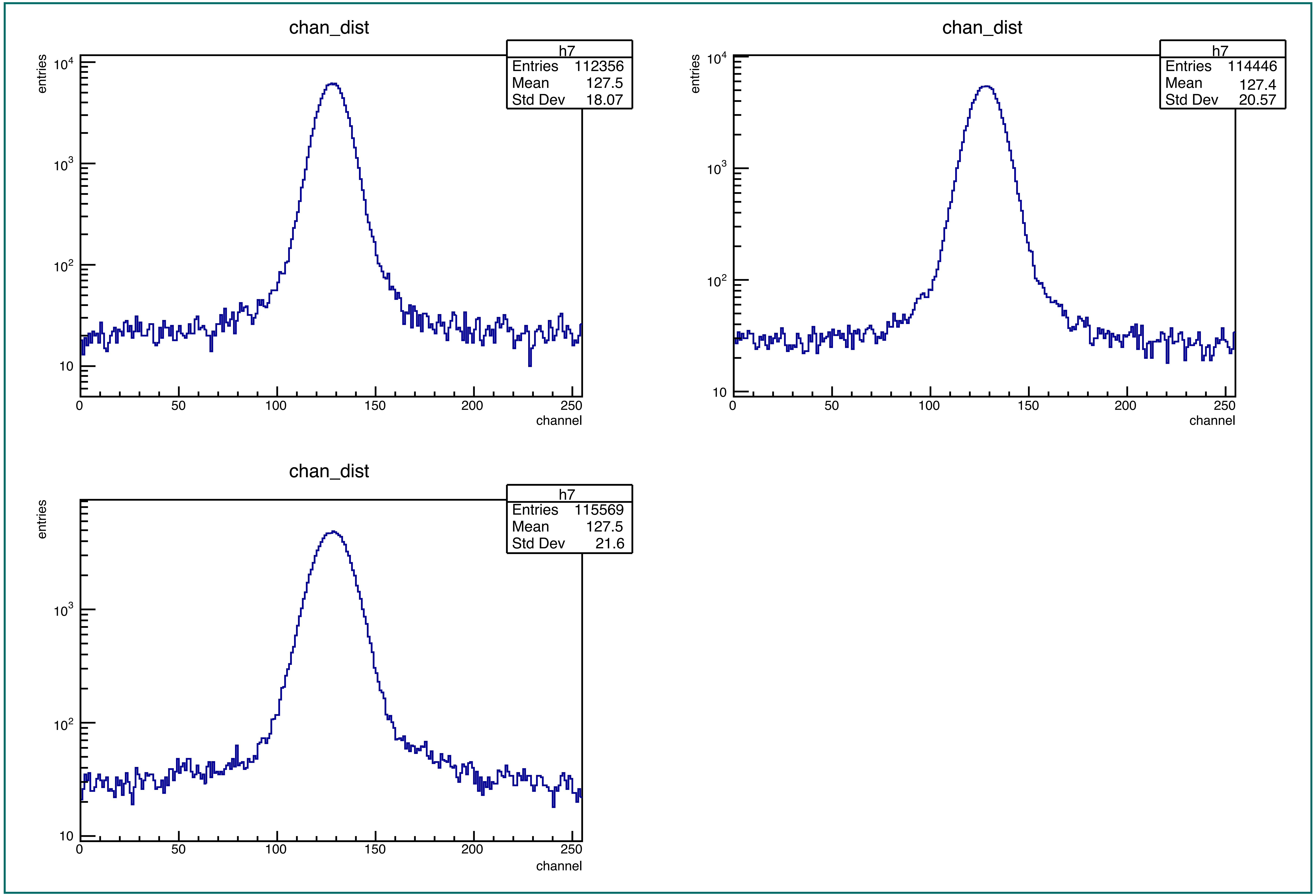
4本ラダー（空気）



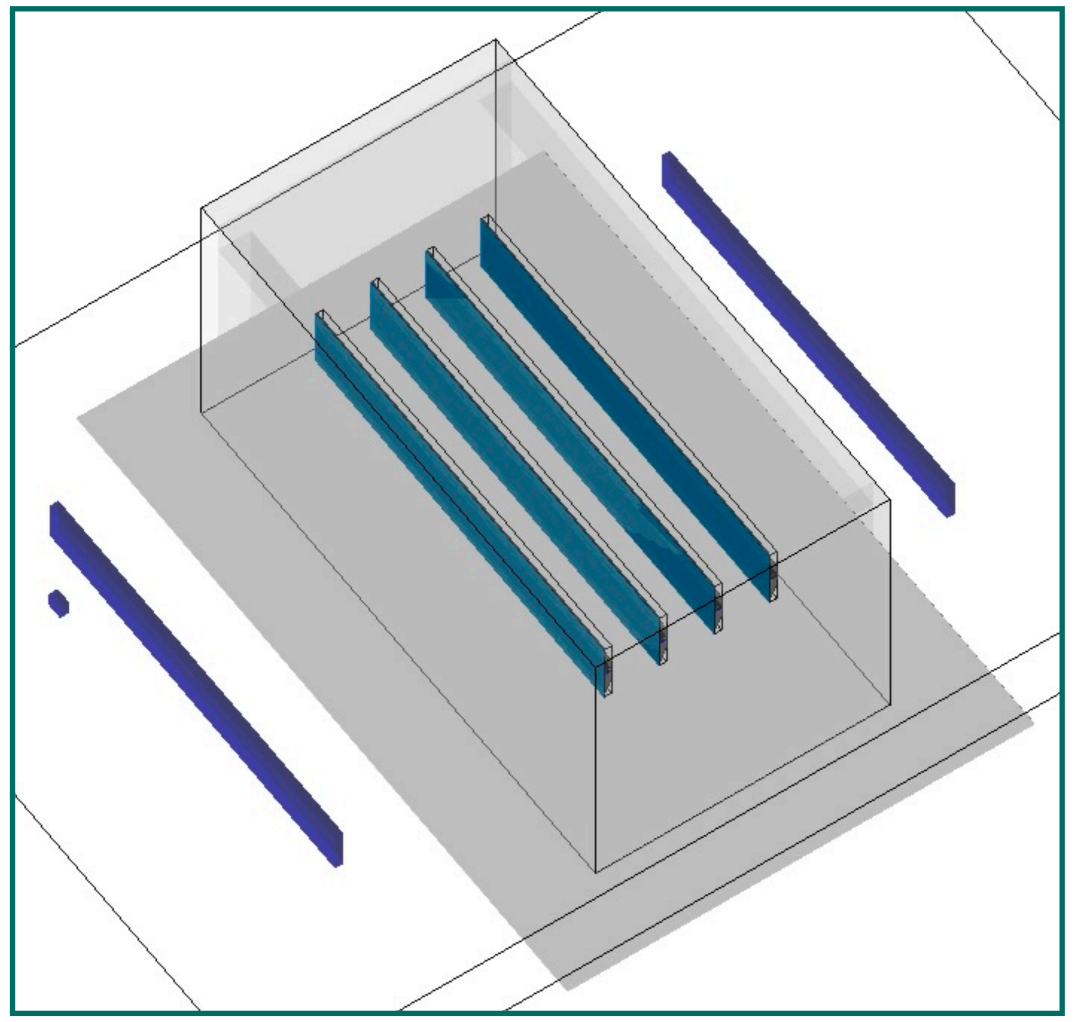


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

ラダーごとのchannel分布

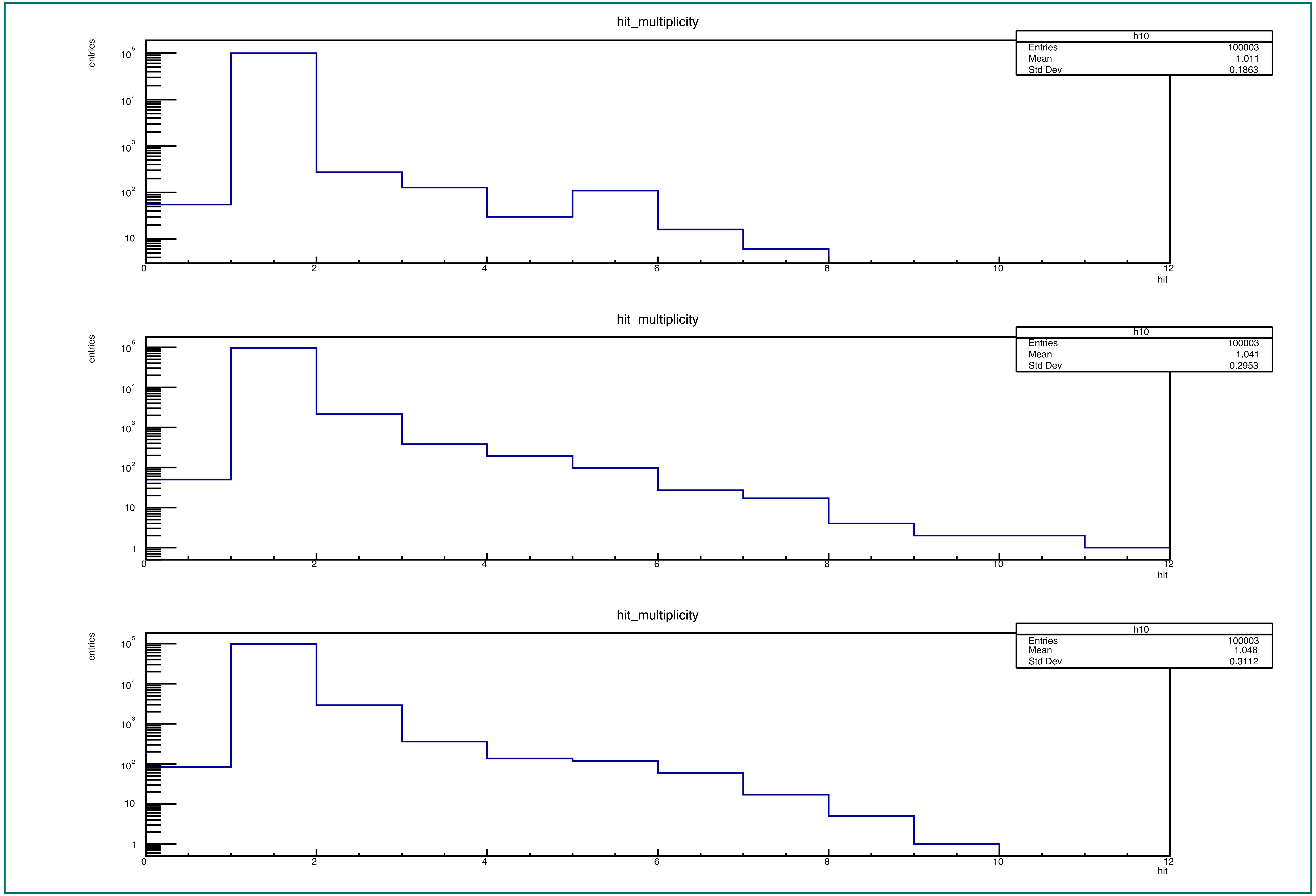


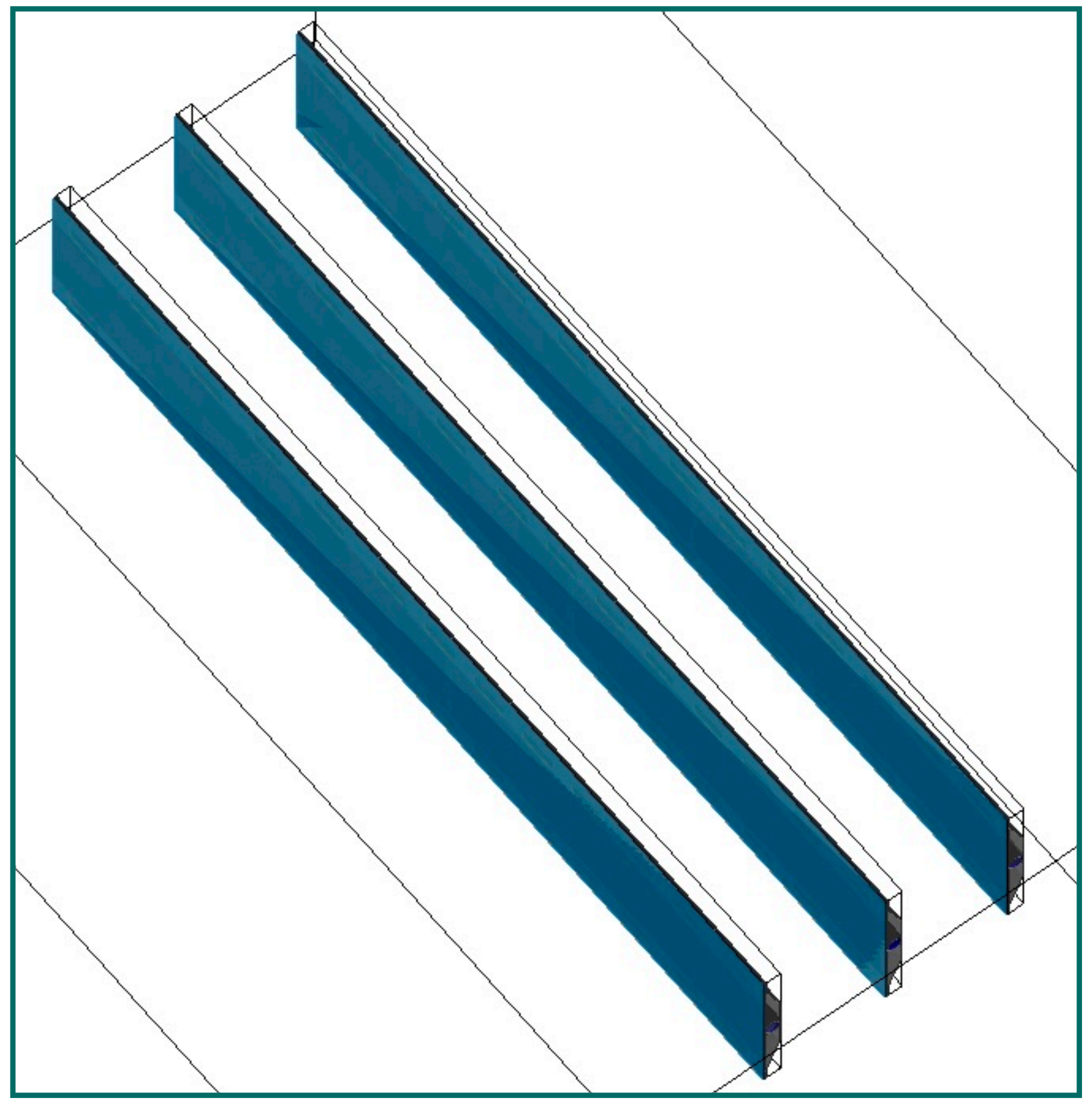
4本ラダー+暗箱
+シンチレーター
（空気）



左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

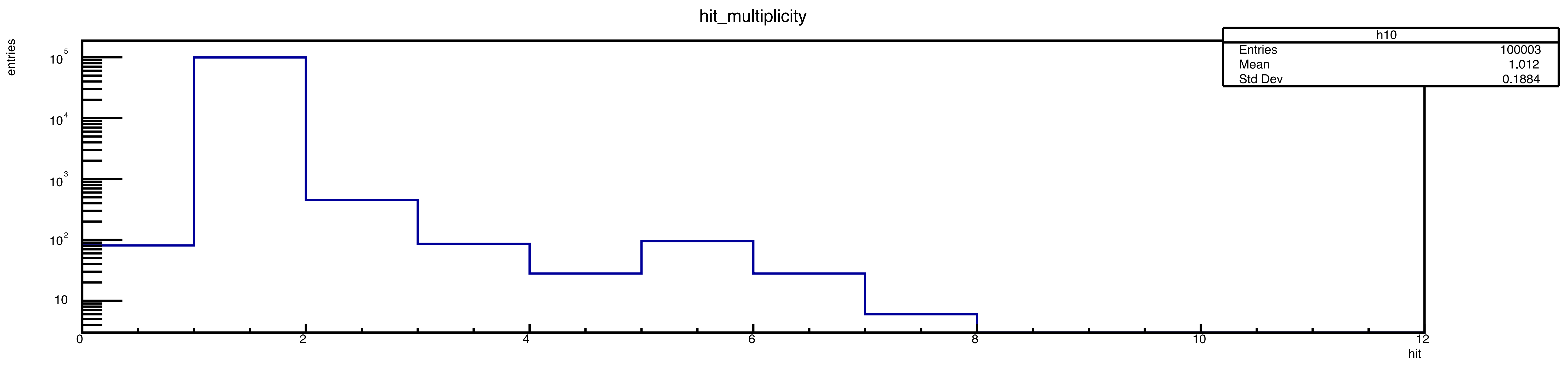
セットアップごとのラダー別のhit多重度分布 3本ラダー（真空）

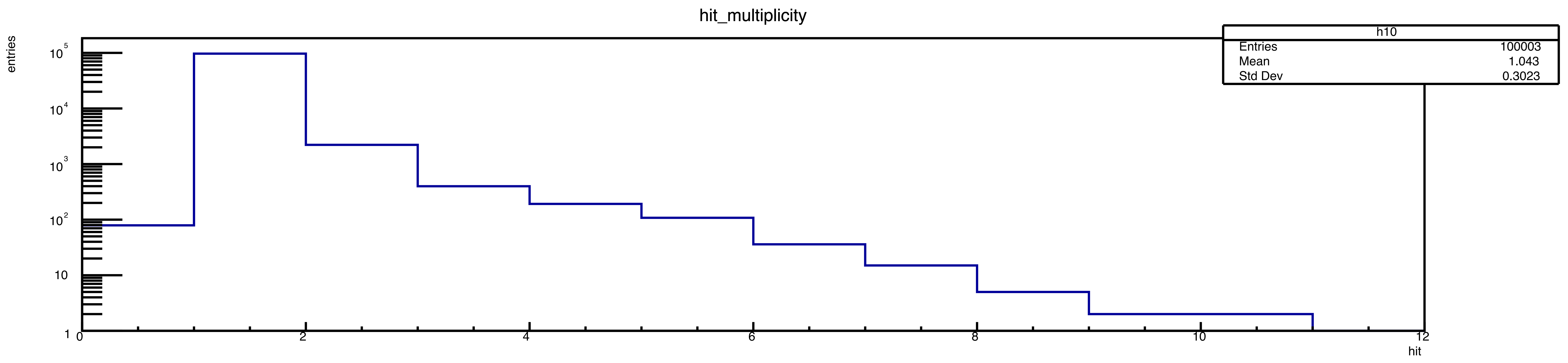


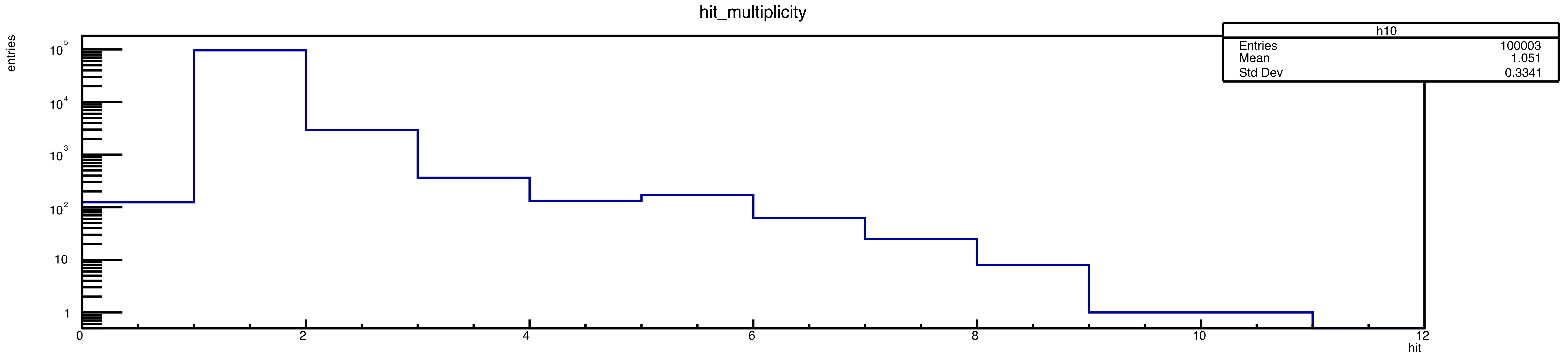


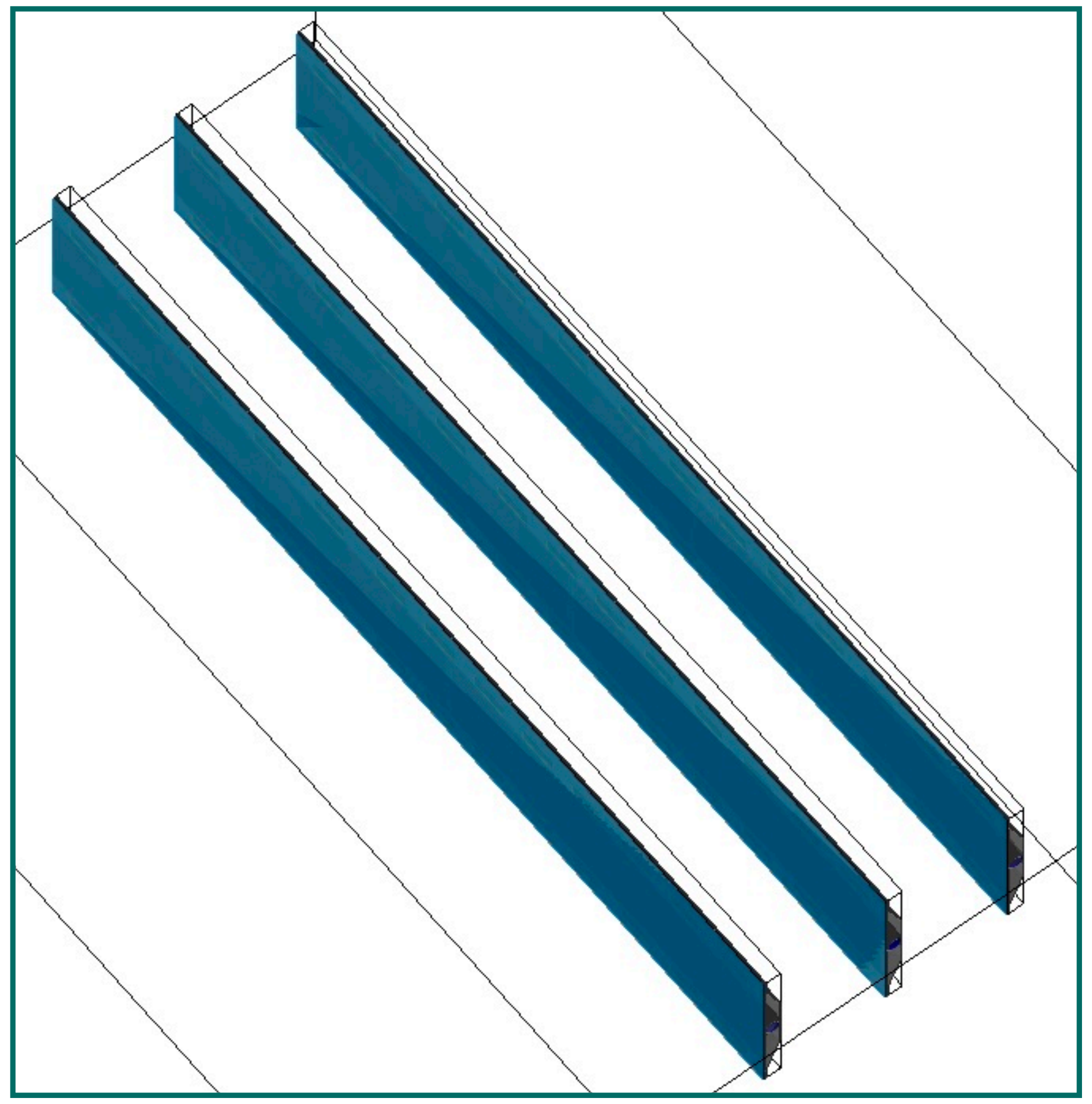
左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

セットアップごとのラダー別のhit多重度分布 3本ラダー（空気）



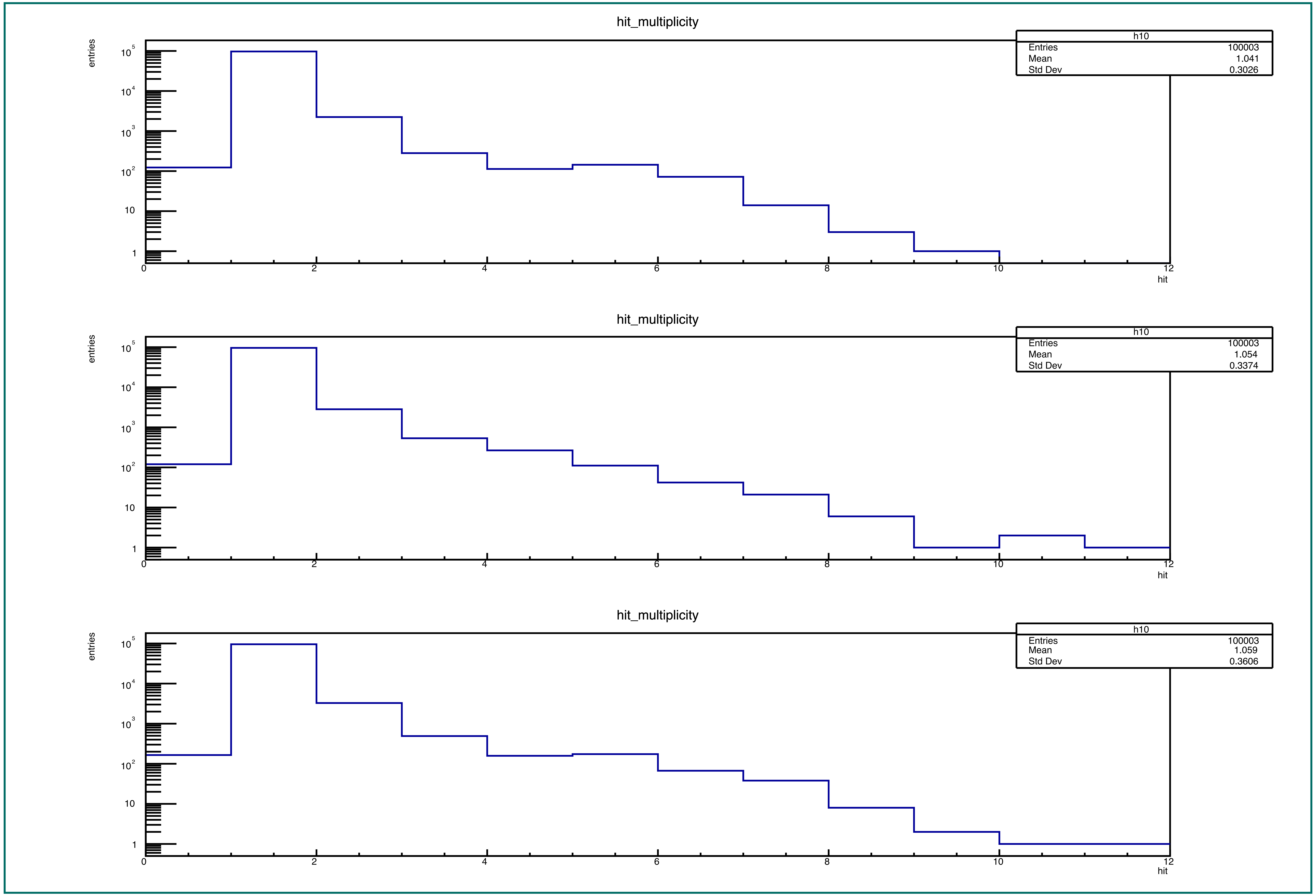


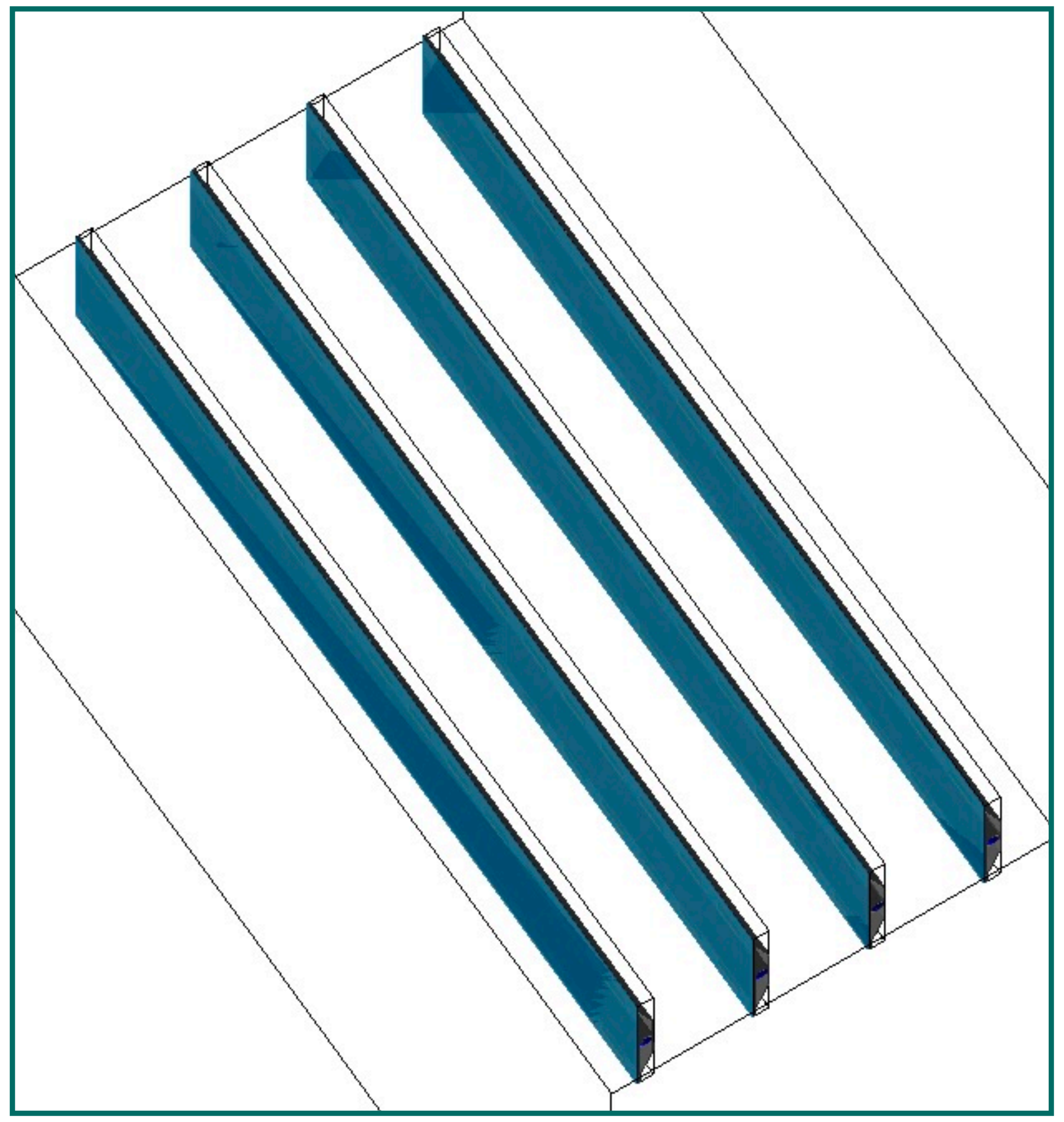




左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

セットアップごとのラダー別のhit多重度分布 4本ラダー（空気）

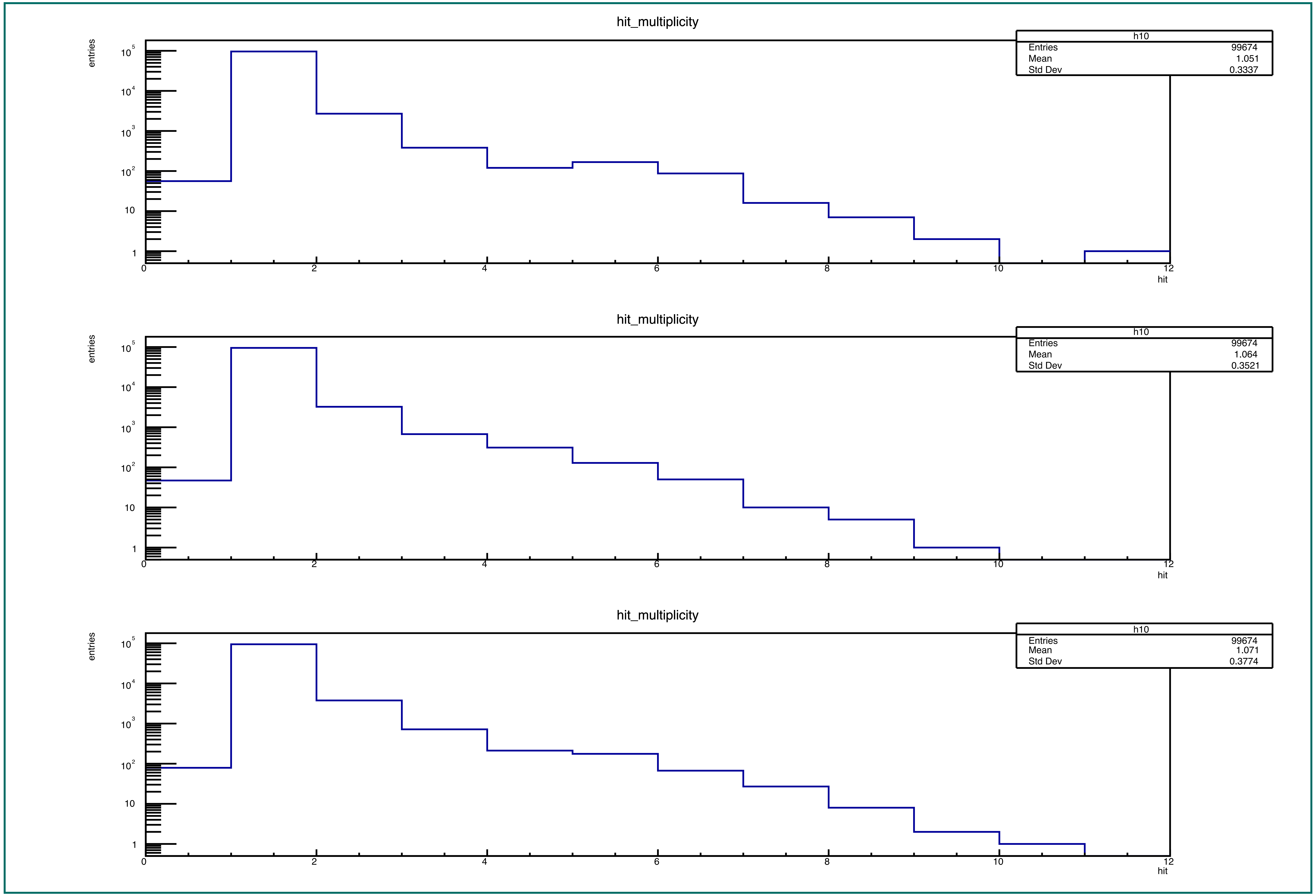


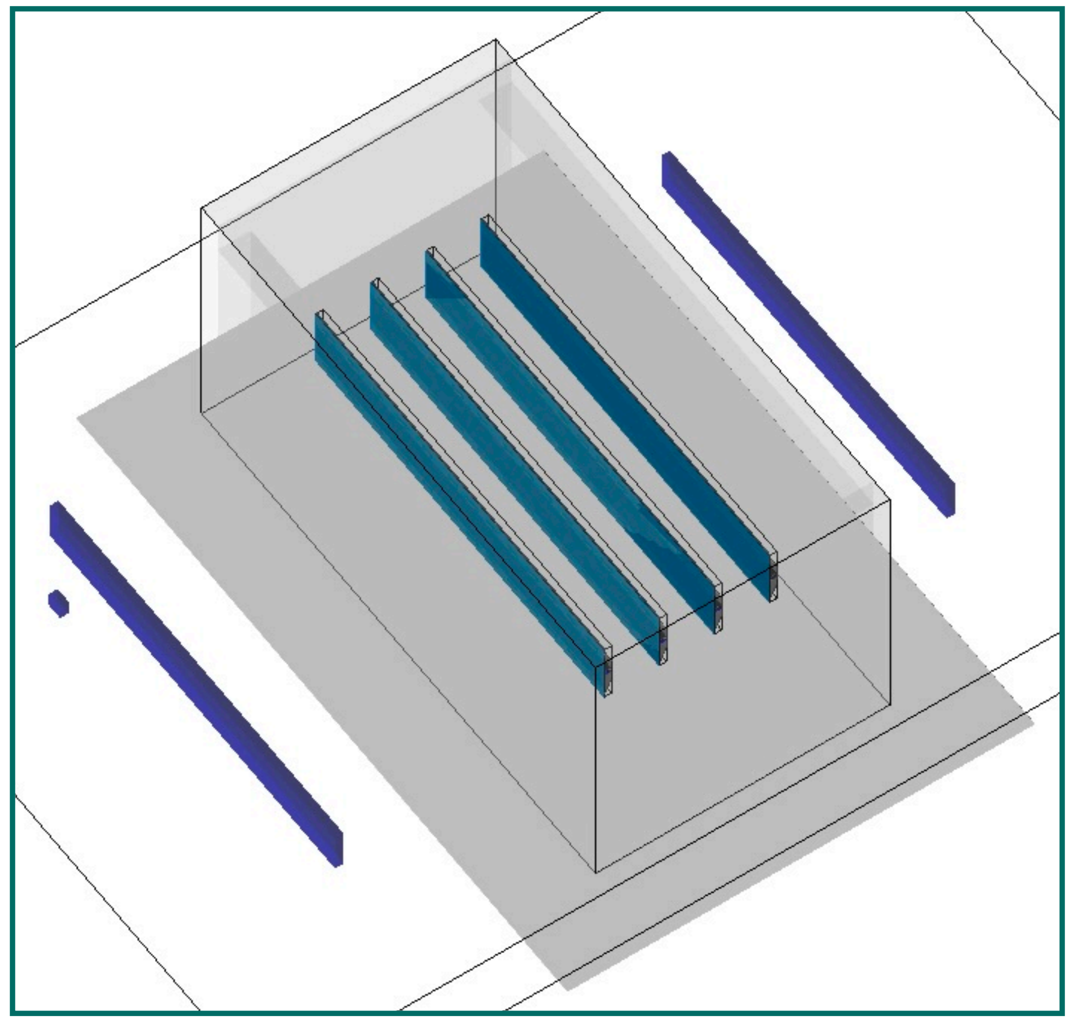


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

セットアップごとのラダー別のhit多重度分布

4本ラダー＋暗箱
＋シンチレーター
（空気）

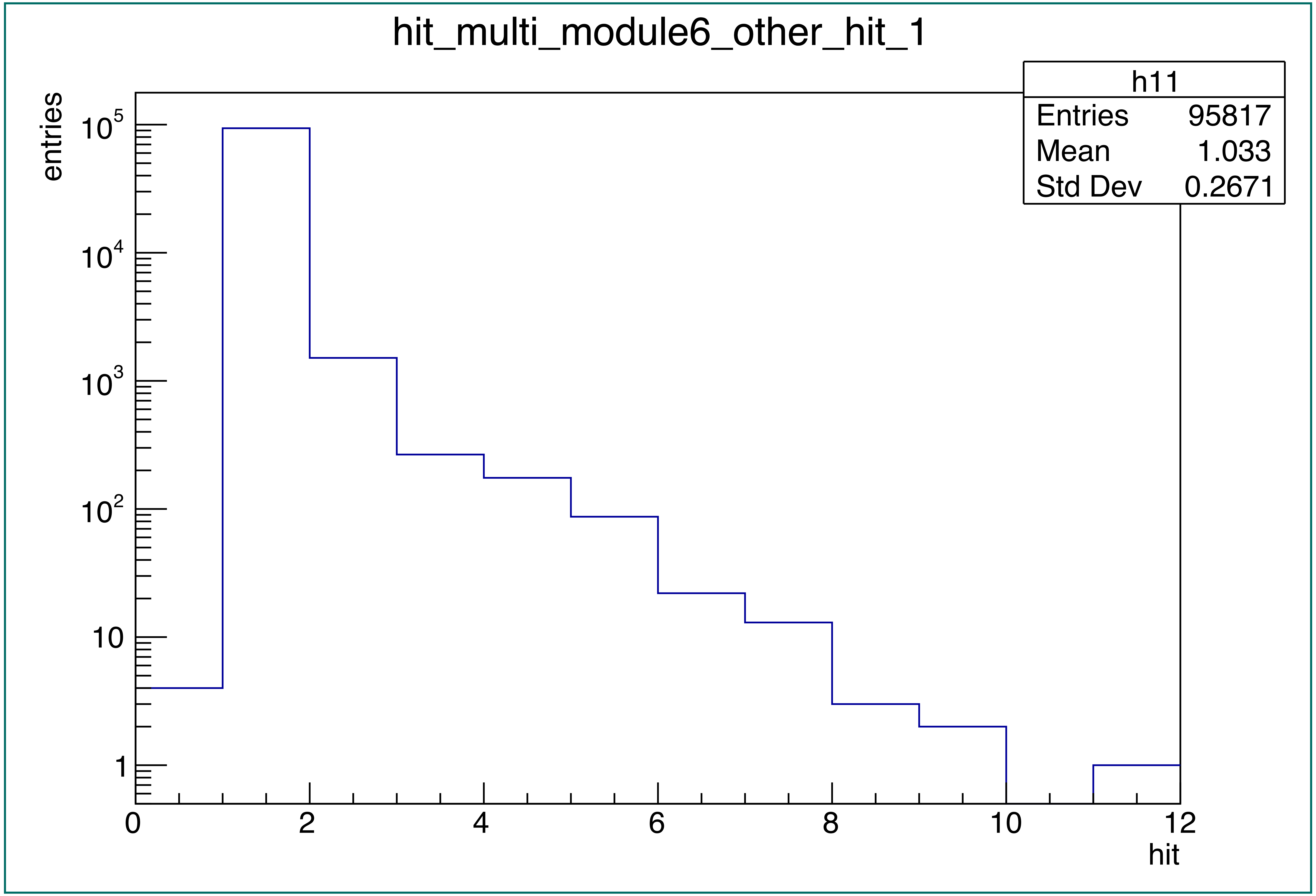


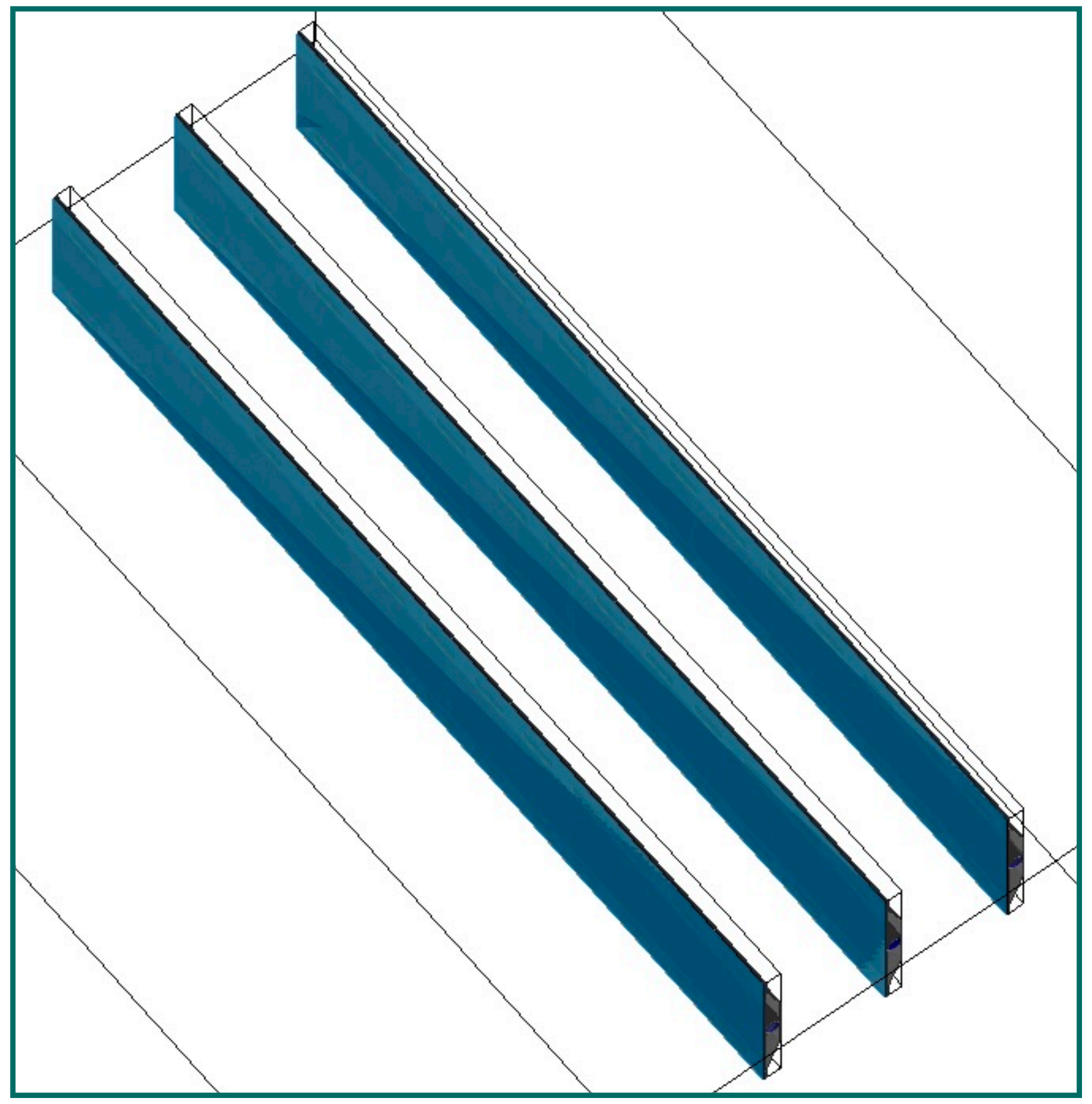


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

上下ラダーのhit数1の場合のセットアップごとの真ん中ラダーのhit多重度分布

3本ラダー（真空）

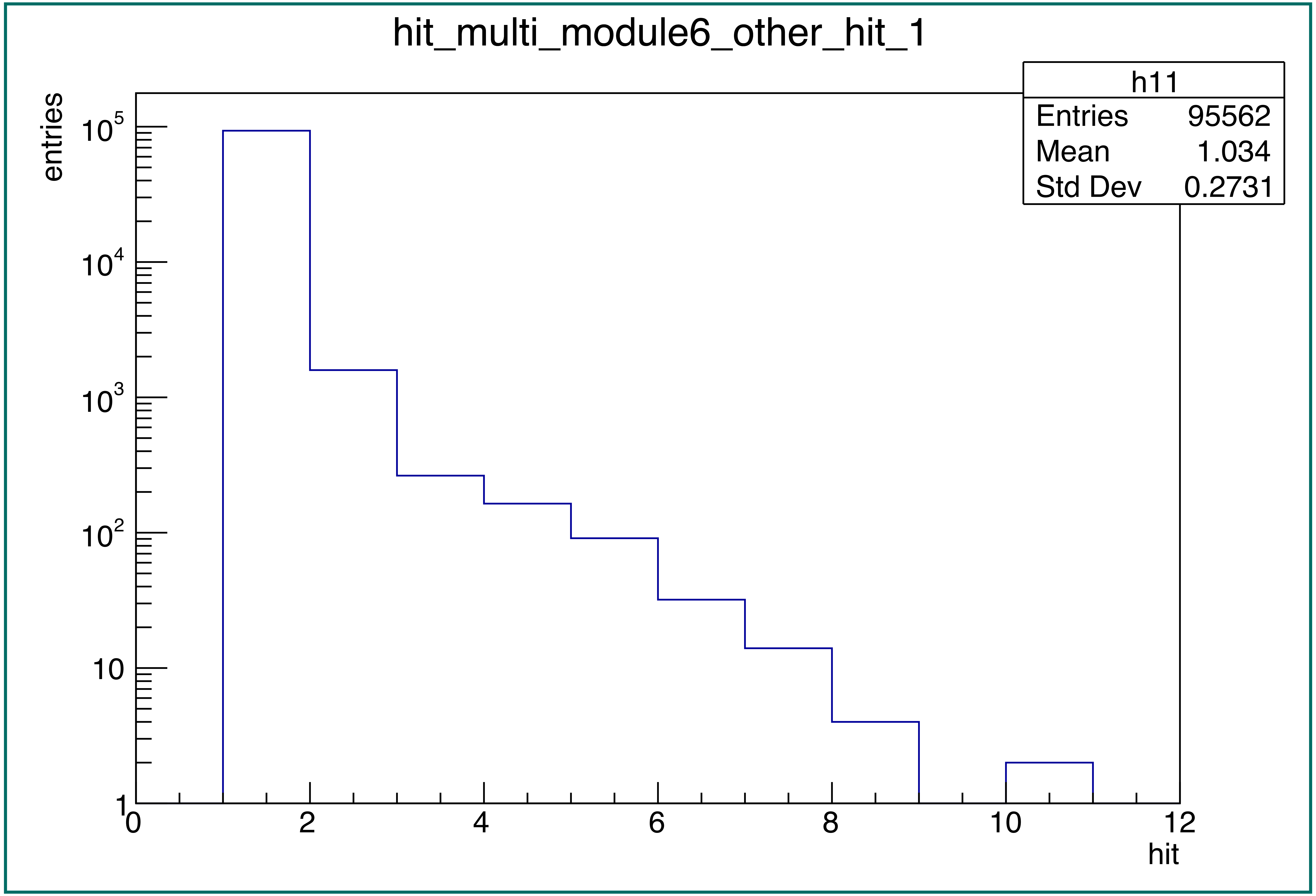


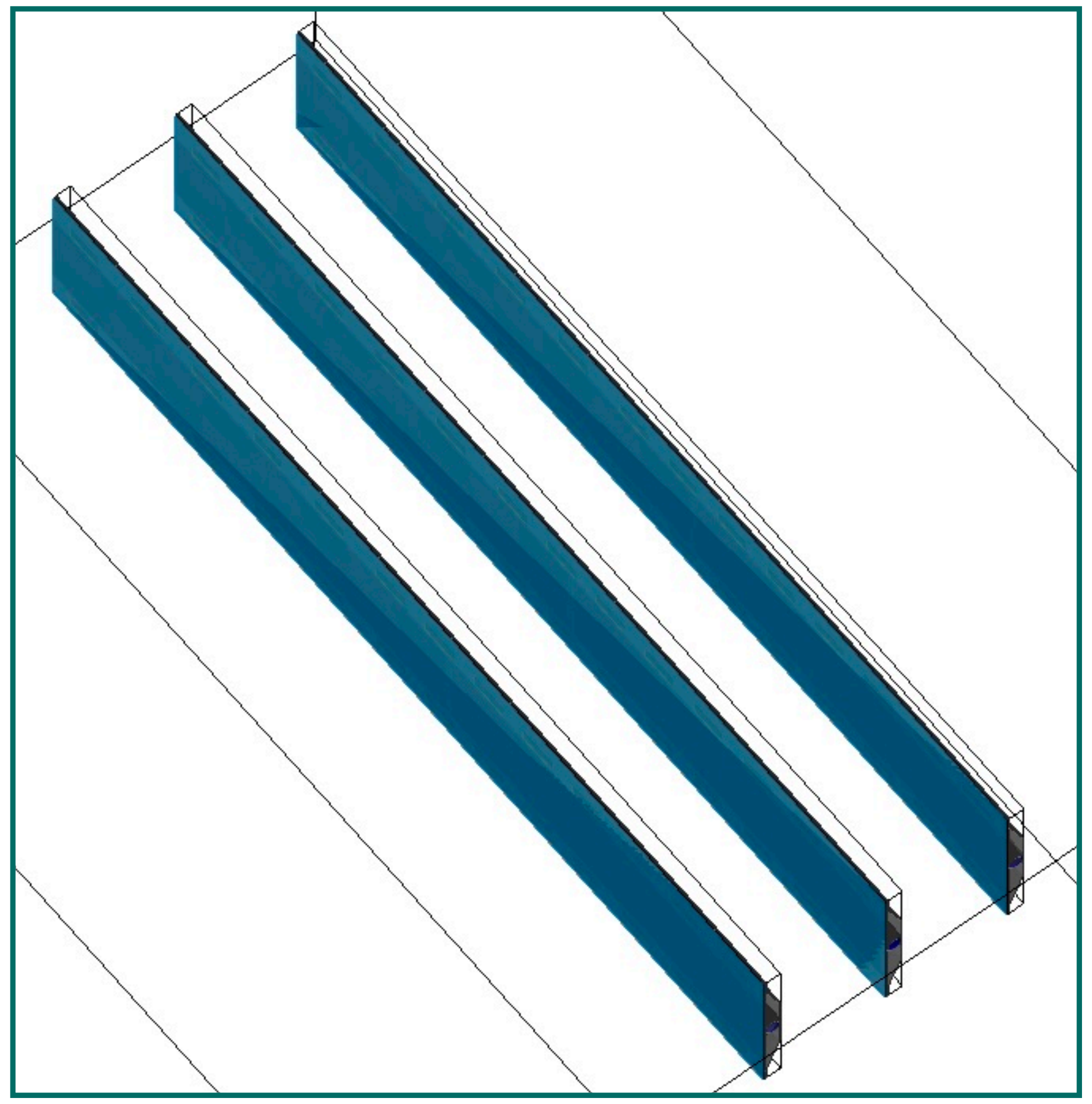


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

上下ラダーのhit数1の場合のセットアップごとの真ん中ラダーのhit多重度分布

3本ラダー（空気）

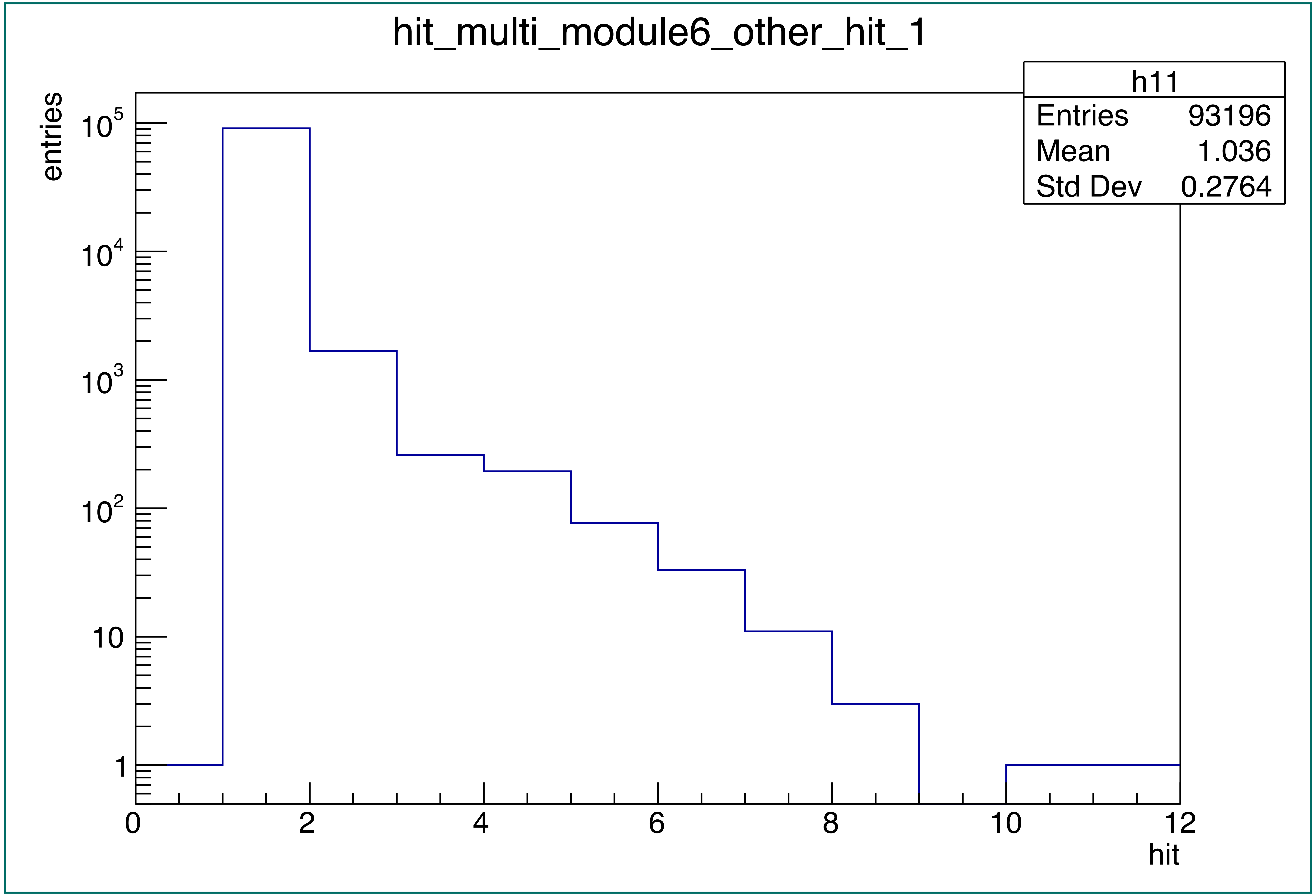


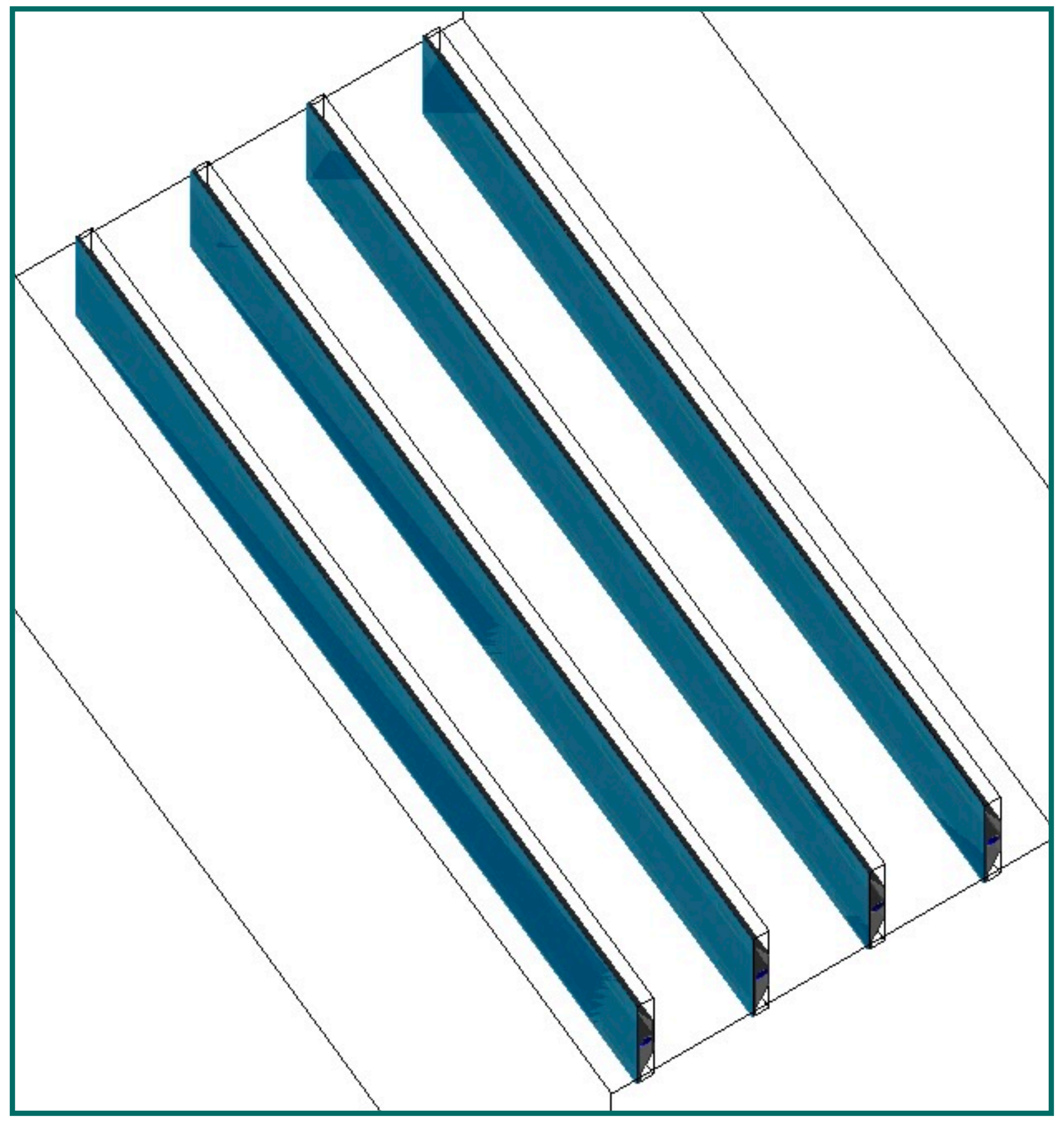


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

上下ラダーのhit数1の場合のセットアップごとの真ん中ラダーのhit多重度分布

4本ラダー（空気）

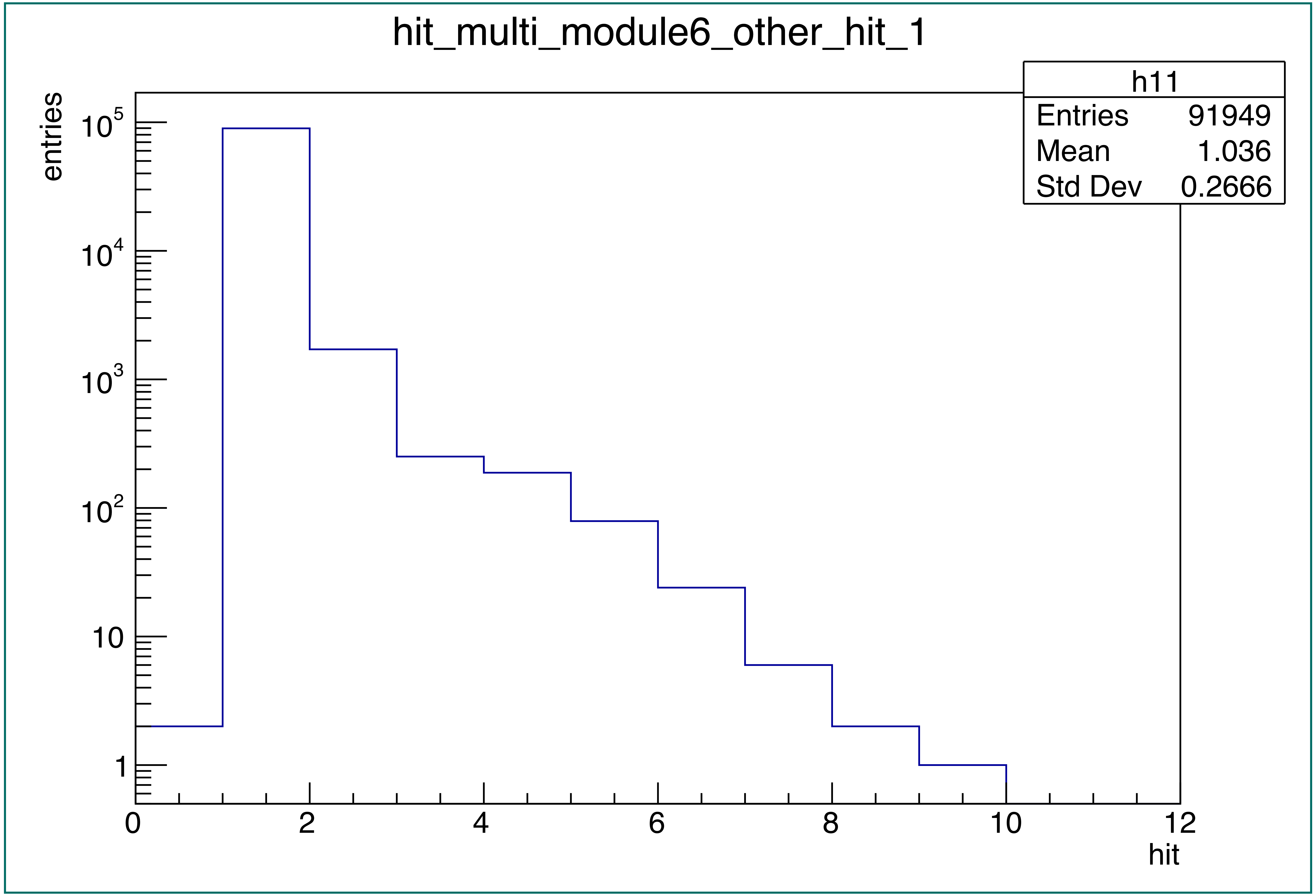


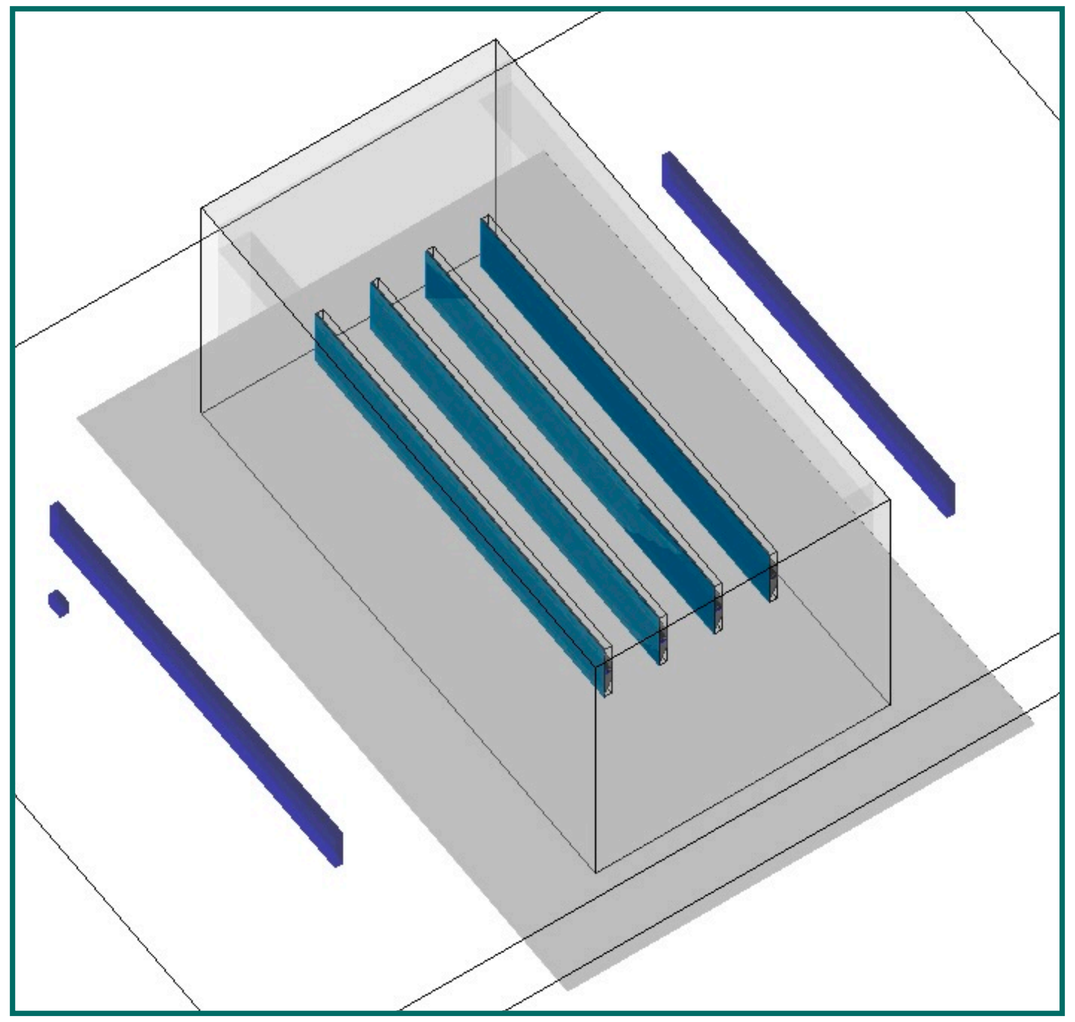


左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

上下ラダーのhit数1の場合のセットアップごとの真ん中ラダーのhit多重度分布

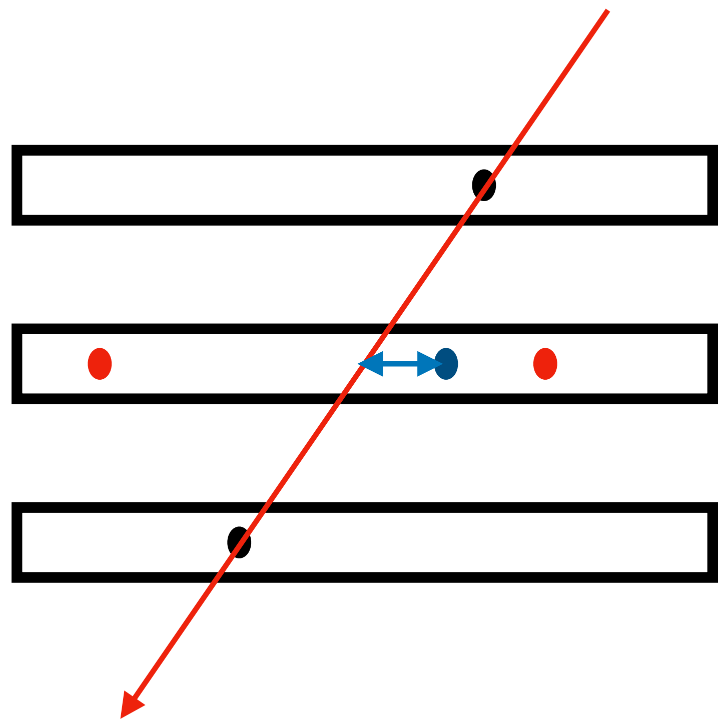
4本ラダー＋暗箱
＋シンチレーター
（空気）





左上：最上段ラダー
右上：真ん中ラダー
左下：最下段ラダー

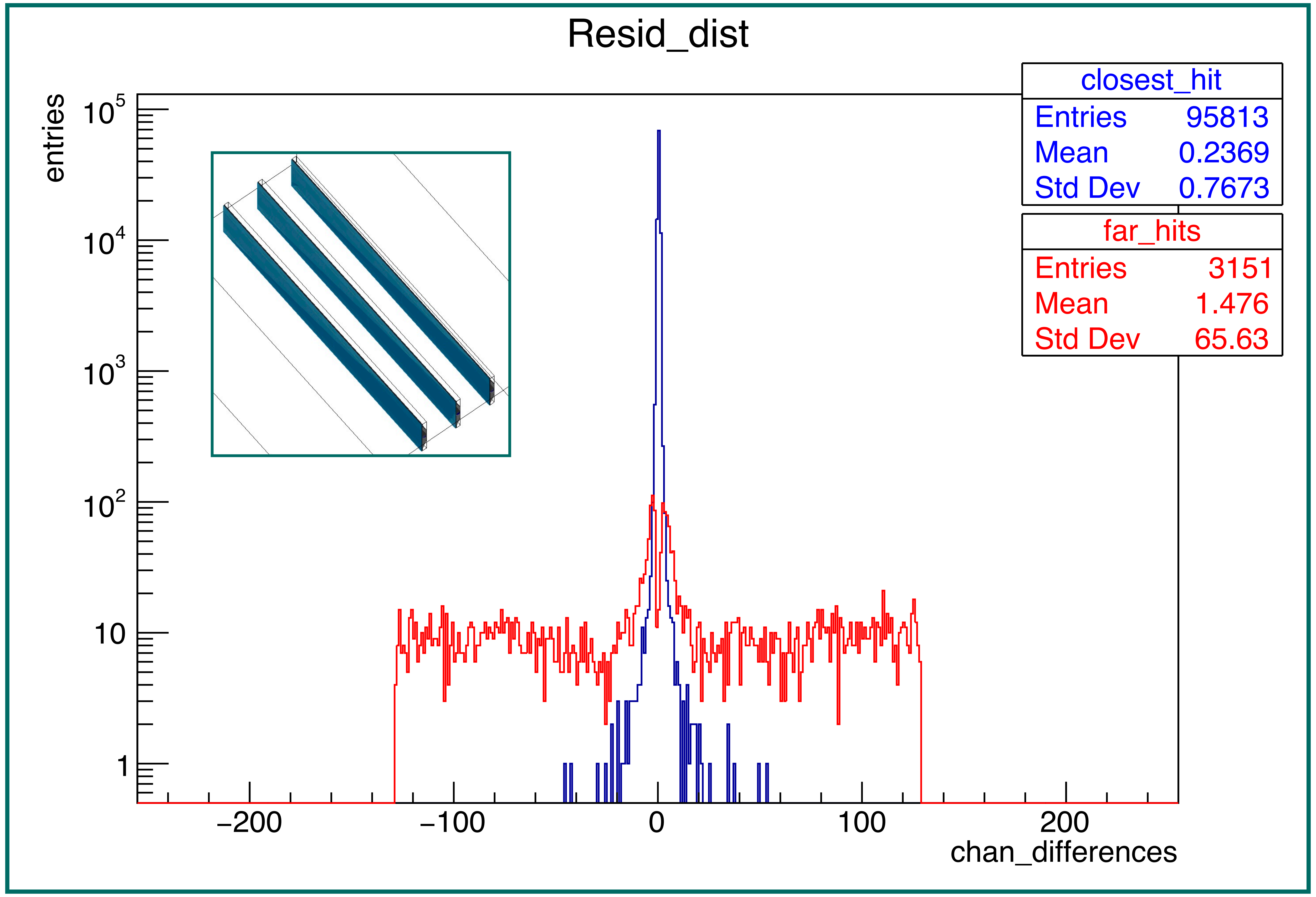
セットアップごとのResidual分布の比較



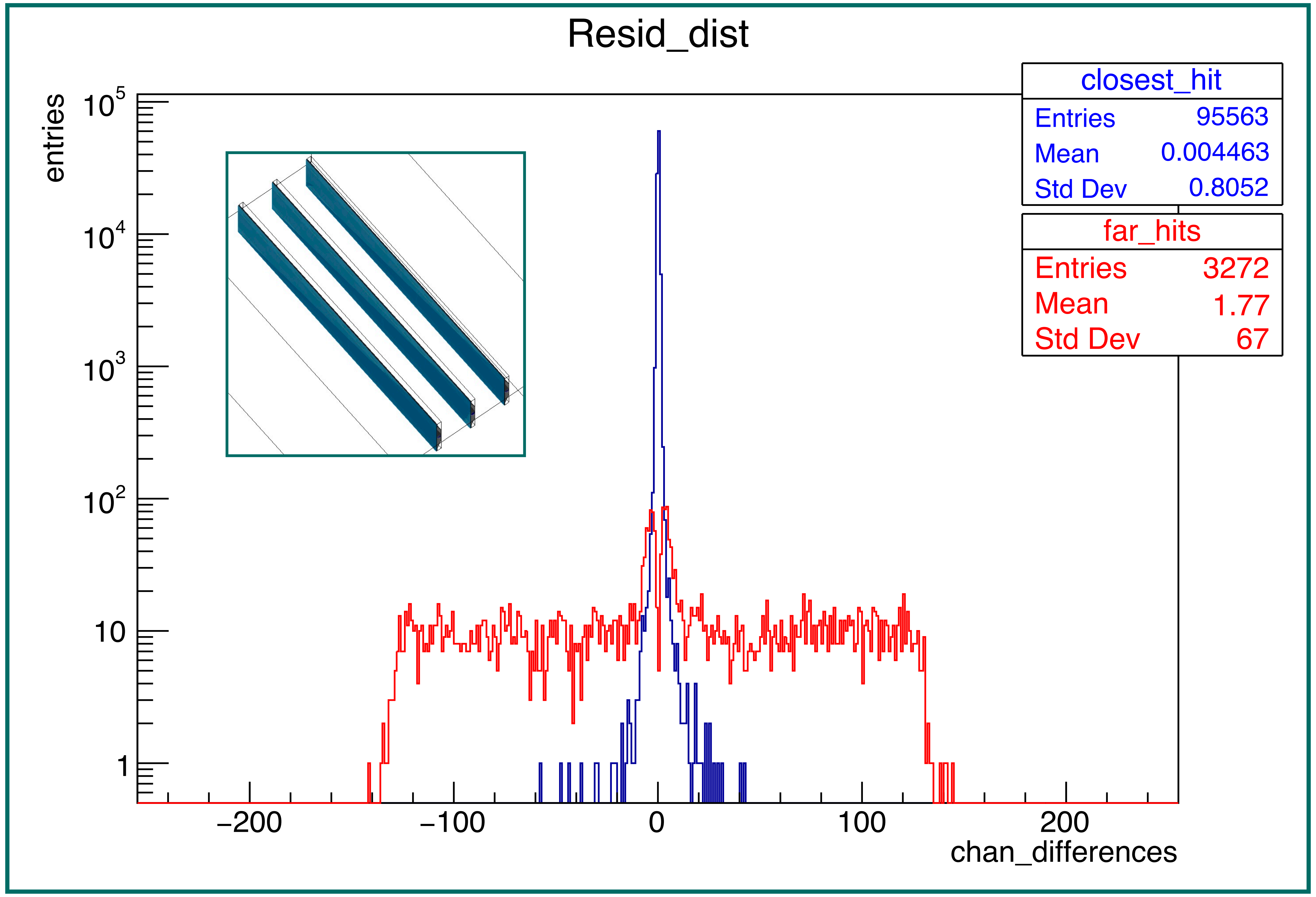
同一タイミング、同一ラダーで複数のhitを検出することがある。
そのときの上下ラダーから予想される真ん中ラダーのhit位置と最も近い点と、それ以外の点でのResidual分布を比較した。

（上下ラダーのhit数1、真ん中ラダーのhit数は1以上）

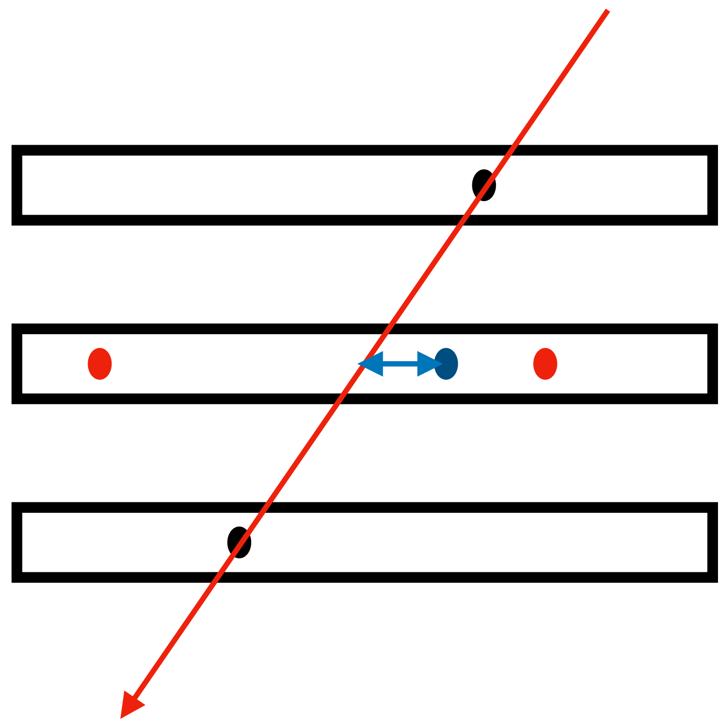
3本ラダー（真空）



3本ラダー（空気）



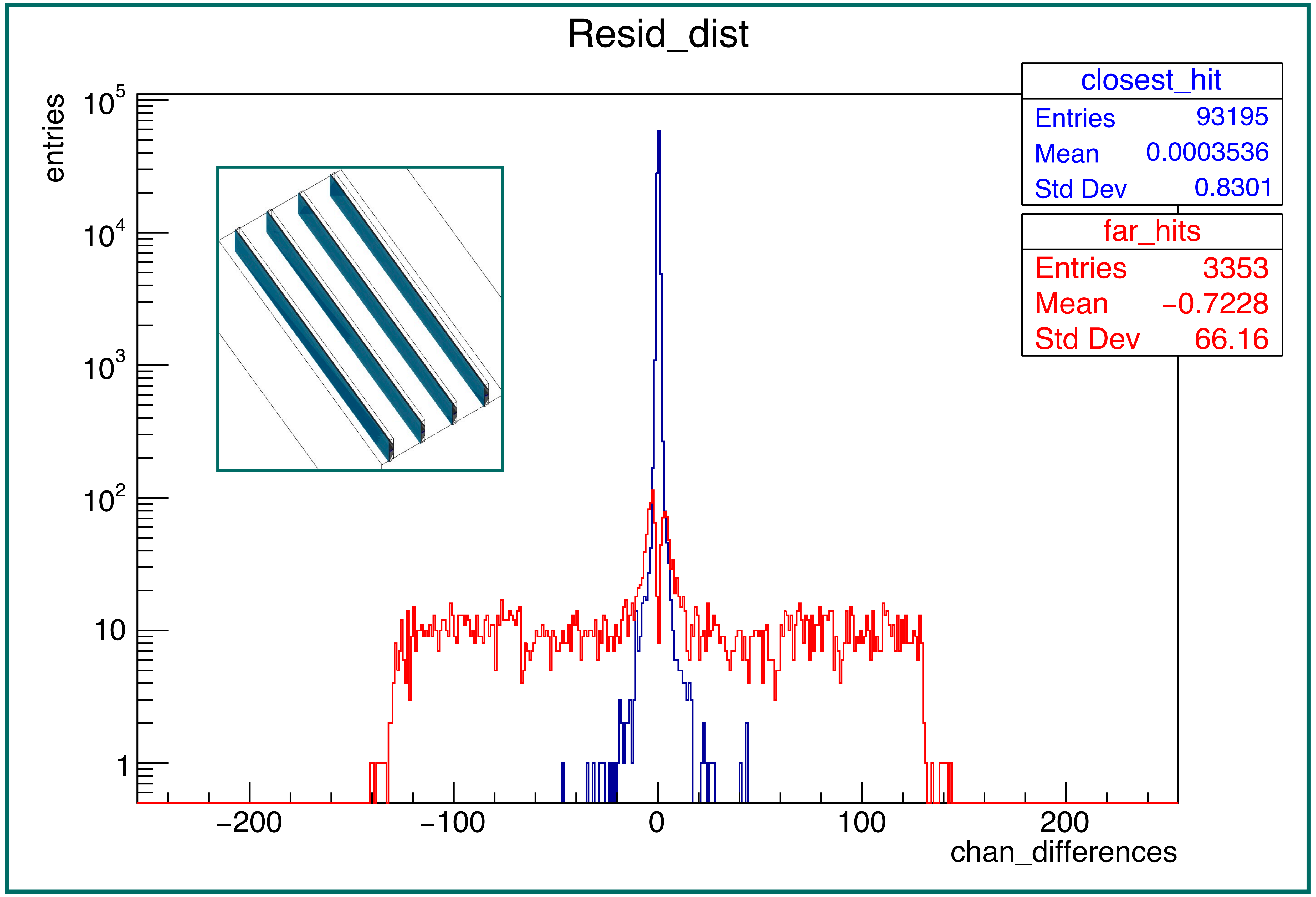
セットアップごとのResidual分布の比較



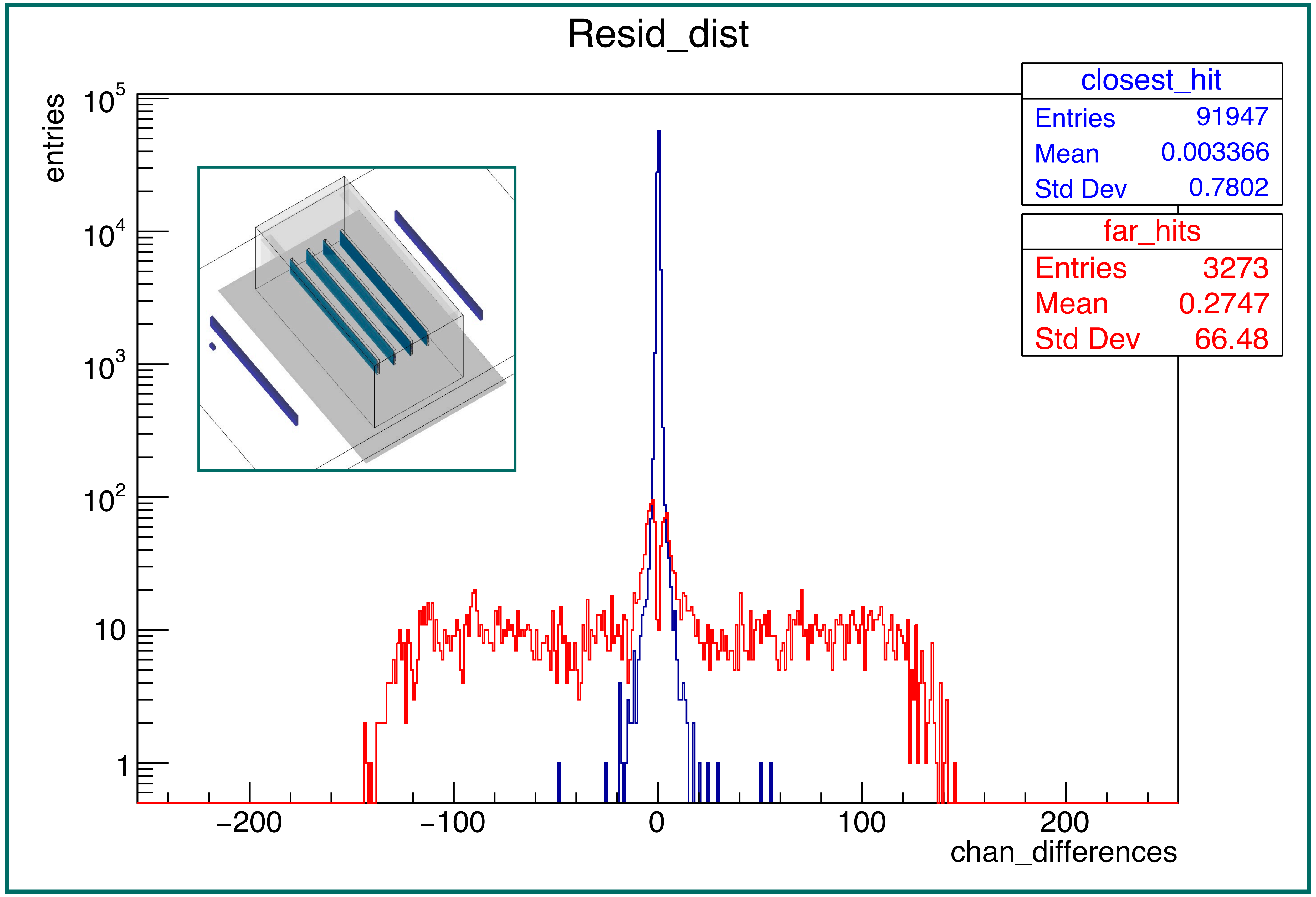
同一タイミング、同一ラダーで複数のhitを検出することがある。
そのときの上下ラダーから予想される真ん中ラダーのhit位置と最も近い点と、それ以外の点でのResidual分布を比較した。

（上下ラダーのhit数1、真ん中ラダーのhit数は1以上）

4本ラダー（空気）



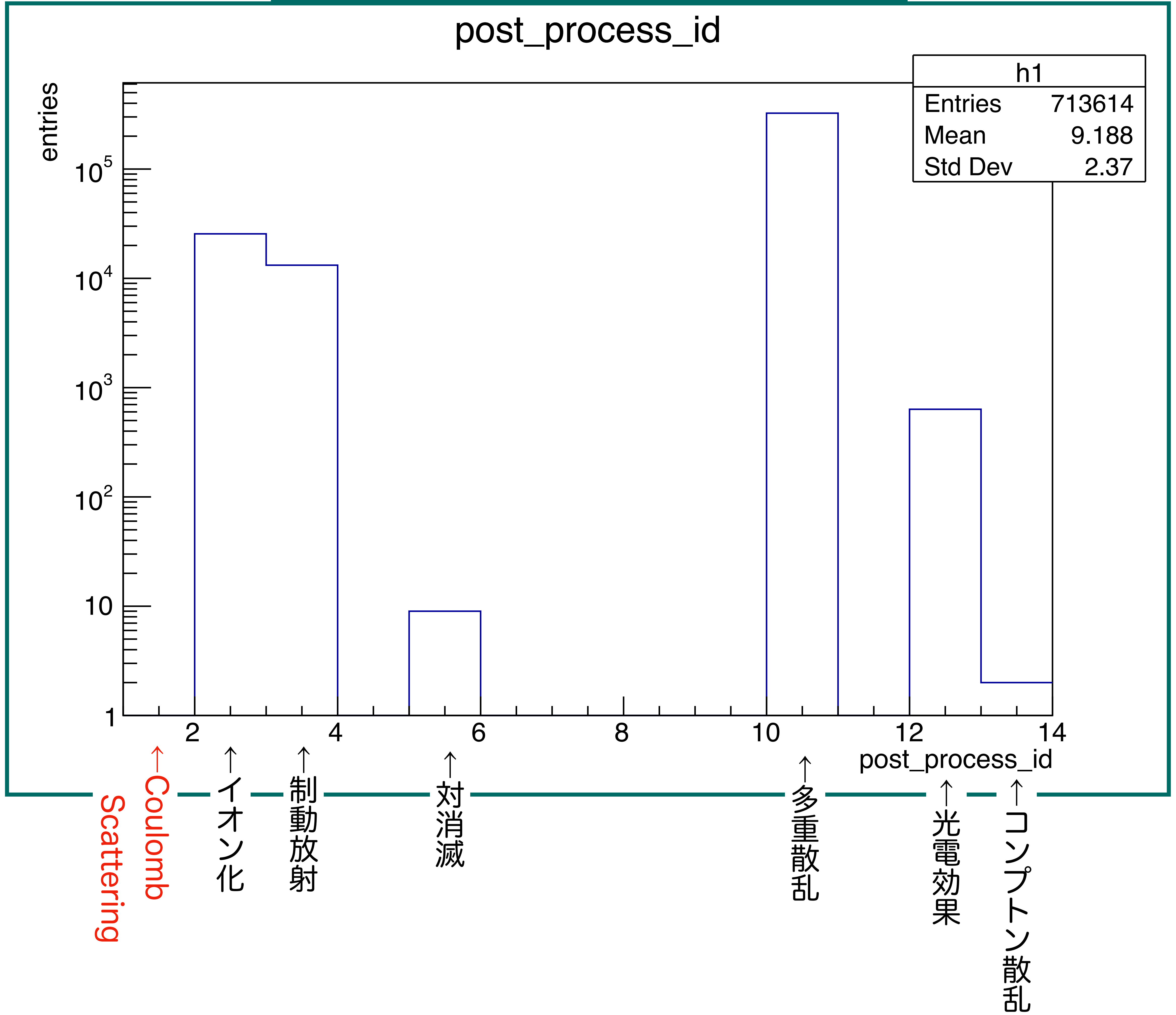
4本ラダー＋暗箱＋シンチレーター（空気）



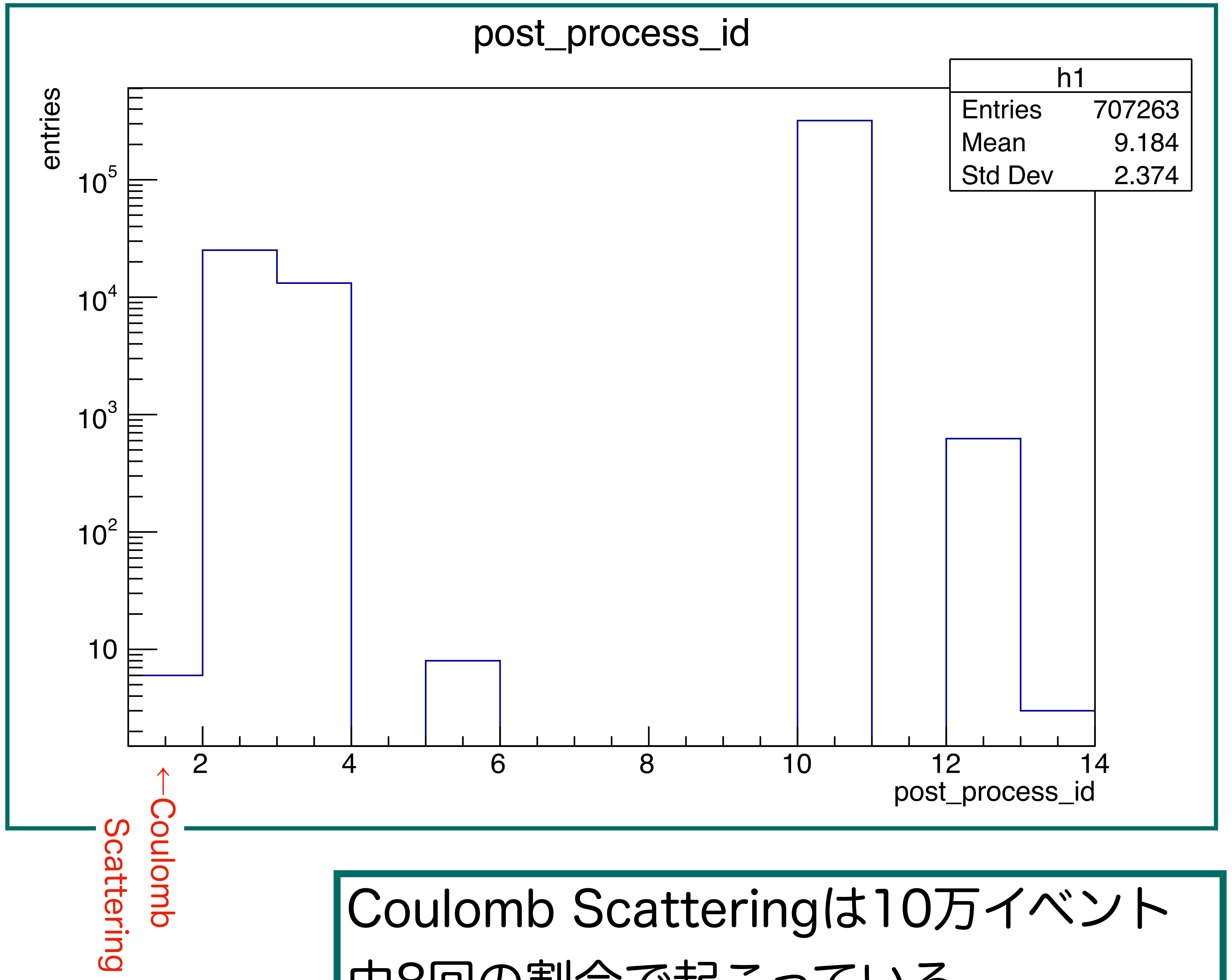
Coulomb Scatteringは何回起こっているのか？

event_particleというTTreeを使ってシリコンとの相互作用の種類ごとのエントリー数を見てみた。
以下は横軸をpost_process_id（相互作用の種類のID）、縦軸をエントリー数としてプロットした図。
セットアップはどちらも3本ラダー（真空）。

Coulomb Scattering OFF



Coulomb Scattering ON



Coulomb Scatteringは10万イベント中8回の割合で起こっている

DAC値とエネルギーデポジットの関係

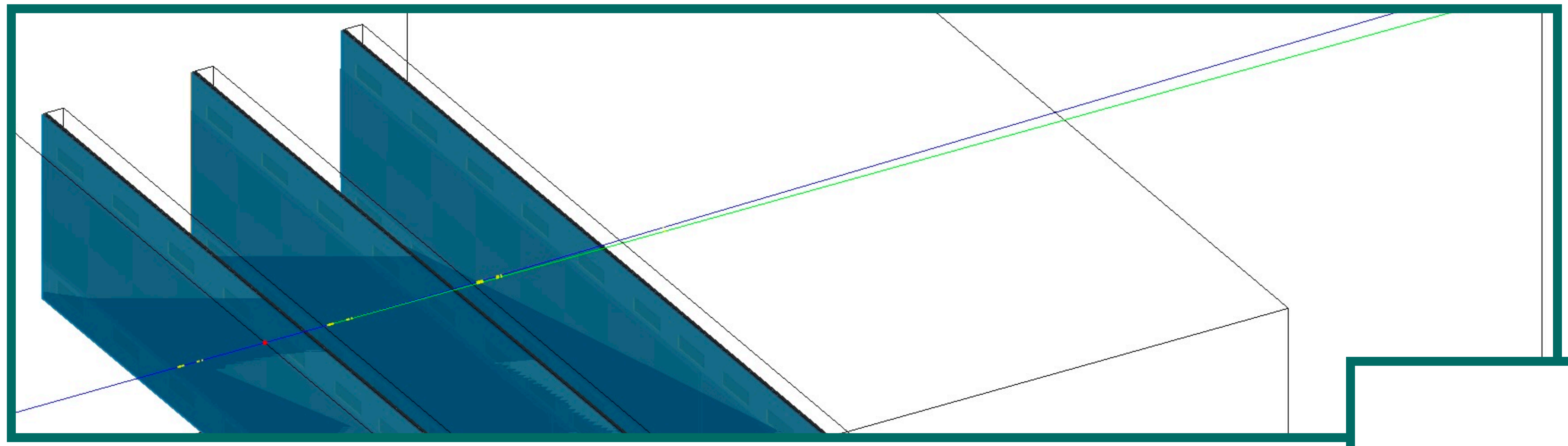
EDEventAction.ccより

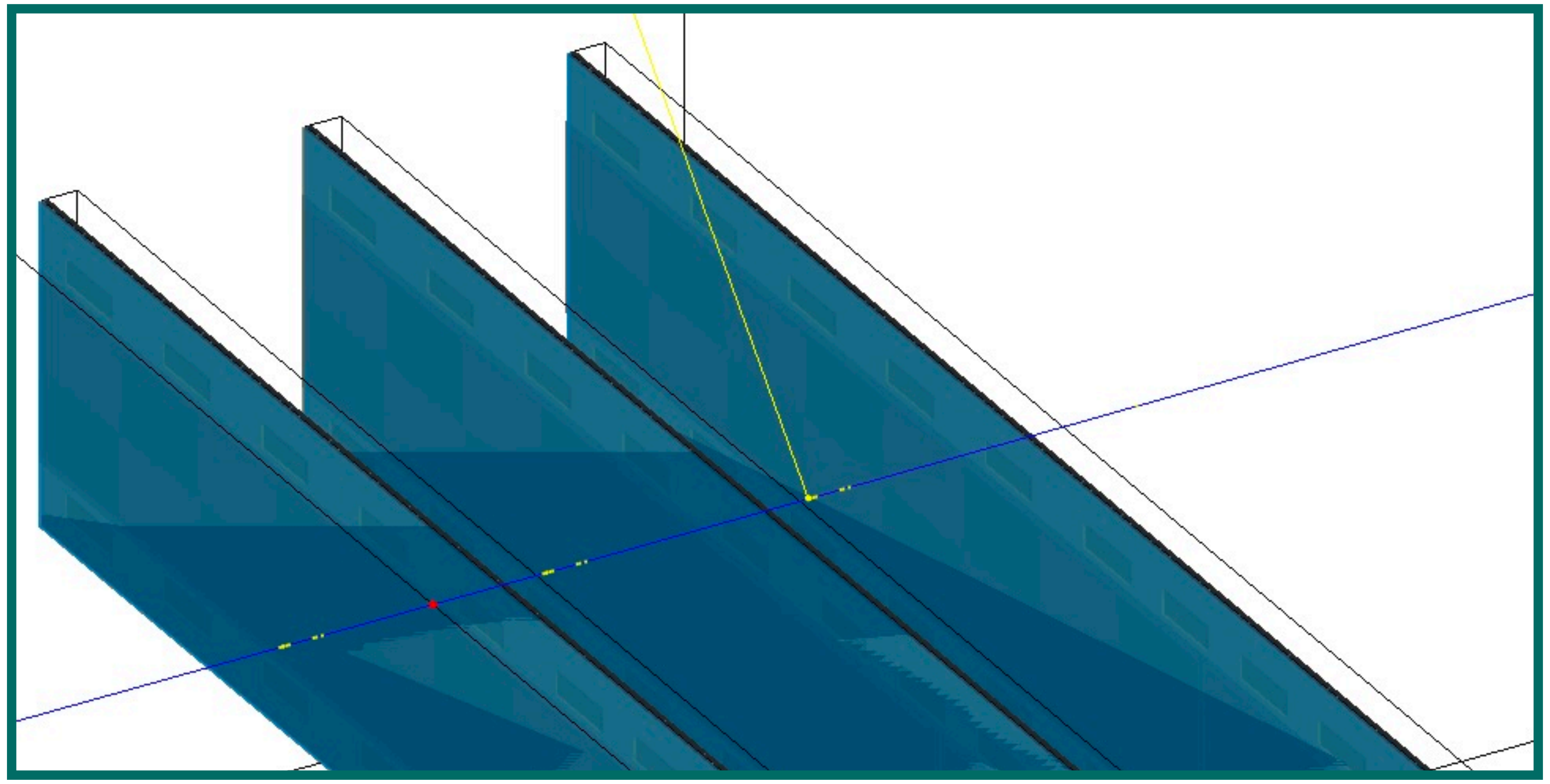
dac = 0.65 * (energy * 100 * 1.6 * gain / 3.6 + offset - 210.)/4.

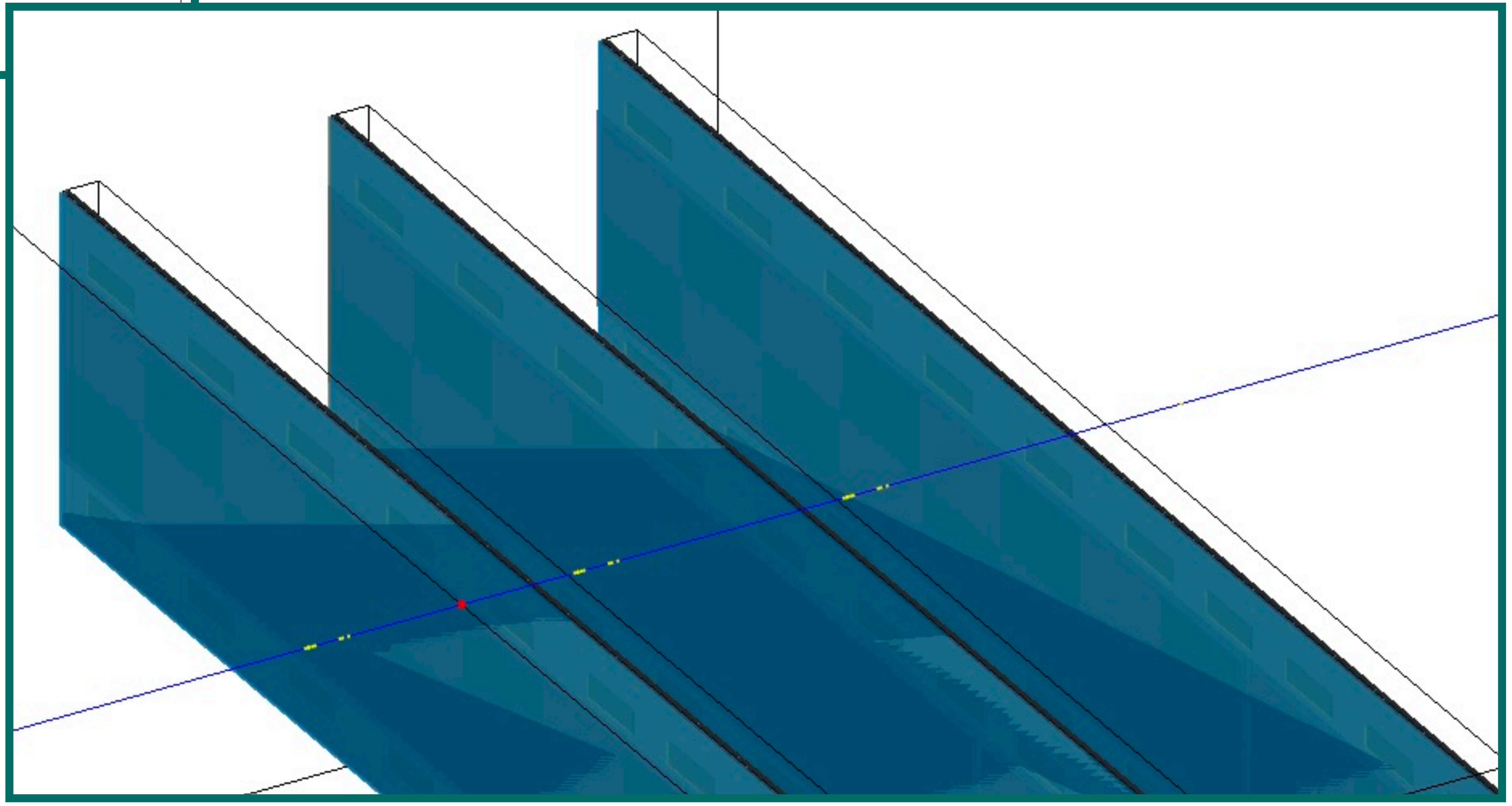
gain=100.0, offset=200.0

係数0.65 ：バイアス電圧 100 V に対する 50 V 時の補正項

GUI







線の色の意味

黄：e-

青：e+

緑：γ