

宇宙線を用いた sPHENIX実験-中間飛跡検出器INTT用 シリコンセンサーの検出効率測定

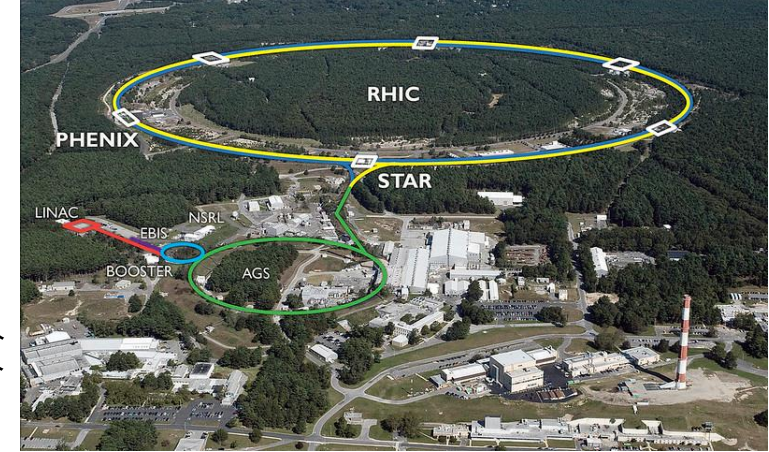
高エネルギー物理学研究室

並本ゆみか

目次

- 研究背景
- 研究目的
- 測定セットアップ
- 測定結果
- 検出効率の定義
- クラスターの取り扱い
- 各条件下での検出効率の計算
- まとめ
- 今後

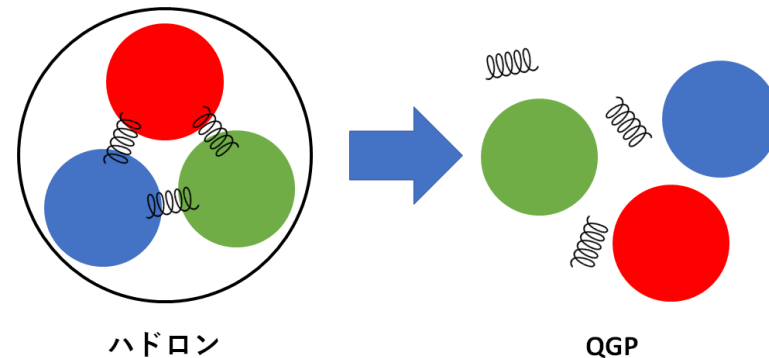
研究背景:sPHENIX実験



- 2023年4月より、アメリカブルックヘブン国立研究所(BNL) RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)加速器で行われる加速器実験

実験目的

- 粒子衝突によって発生したJet現象やUpsilon粒子を測定し、QGPの性質を決定すること
 - QGP: 高温、高密度状態でハドロン内の閉じ込めから解放されたクォーク、グルーオンからなるプラズマ状態の物質。ビッグバン直後の 10^{-5} 秒後に実現していたとされる

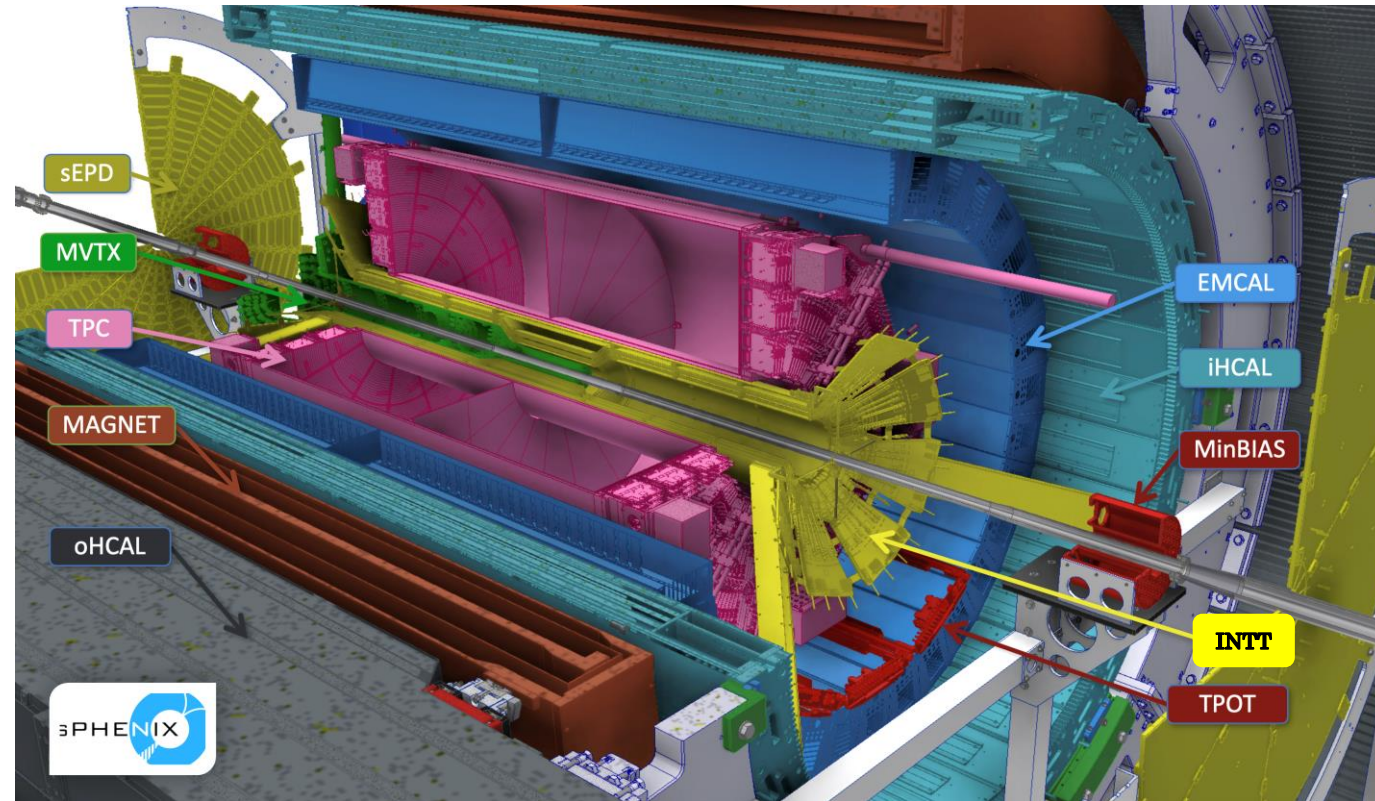


衝突核子、エネルギー

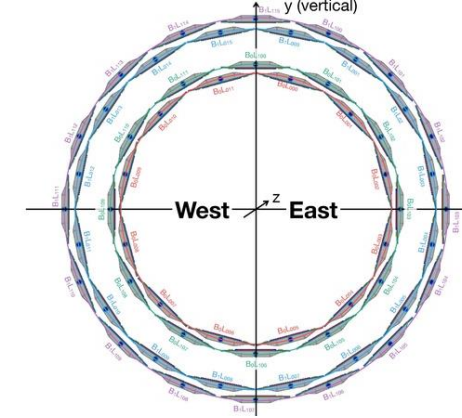
- 金原子核+金原子核(200GeV)、偏極陽子+偏極陽子(510GeV)

sPHENIX検出器

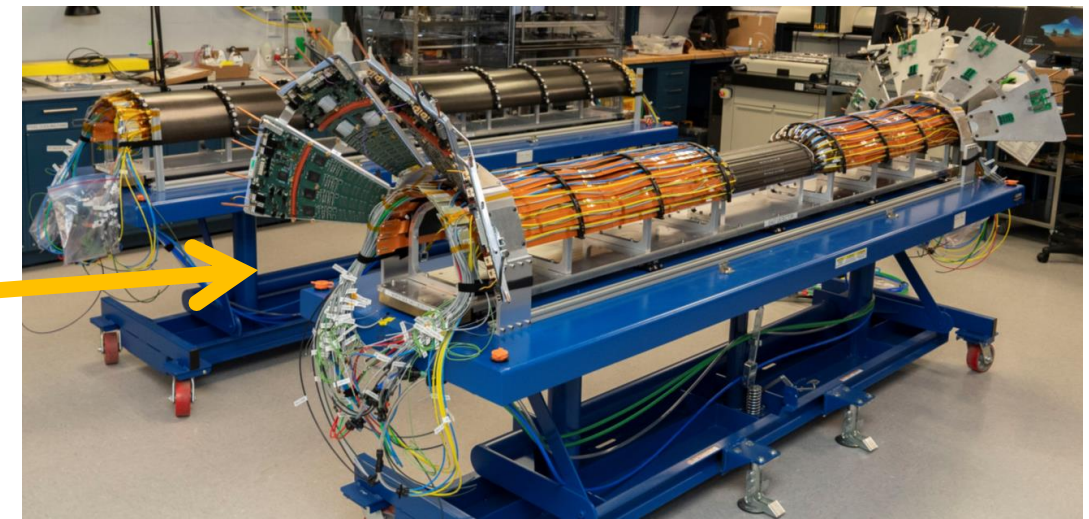
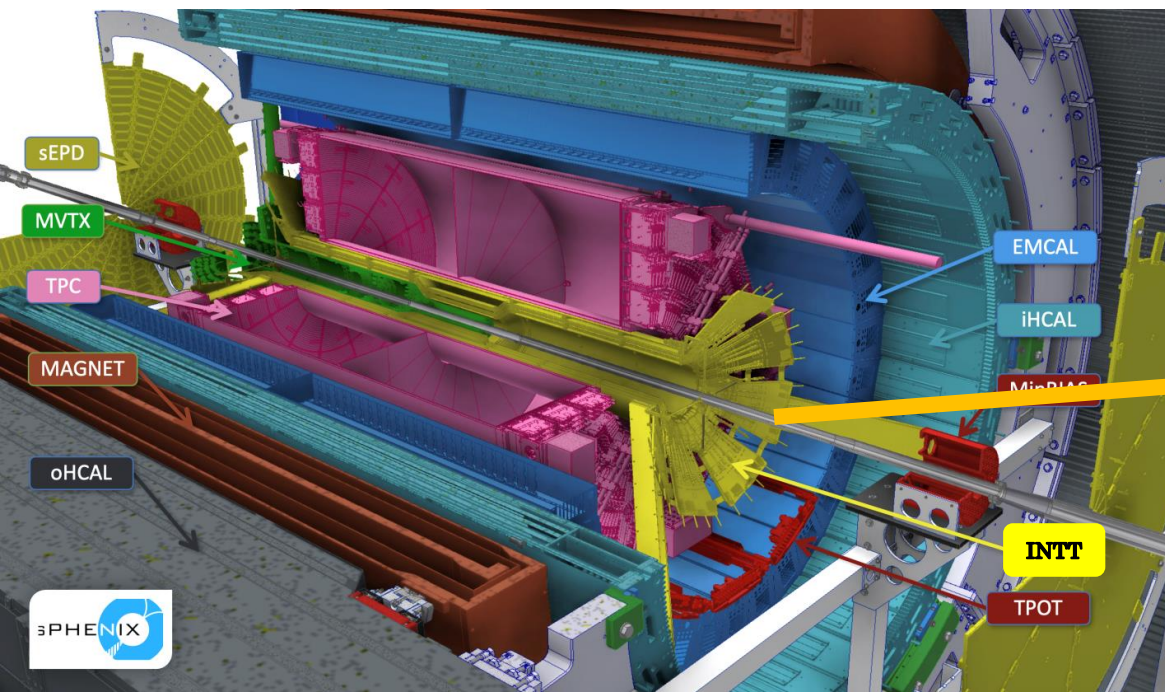
- sPHENIX実験には3つの飛跡検出器が導入される
- 最内層: MVTX – シリコンピクセル検出器、高精度の飛跡再構成が可能
- 中間層: INTT – シリコンストリップ検出器、高い時間分解能を持つ
- 最外層: TPC – ガス検出器、高い位置分解能を持ち、運動量を測定する
- 飛跡検出器群の外側にはハドロンカロリメータ、電磁カロリメータが配置される



中間飛跡検出器INTT



- INTTはストリップ型シリコン検出器であり、2層構造のバレル型である
- 計56本のセンサーラダーで構成される
- ビームパイプから6-12cmに位置し、ビーム方向 $\pm 23\text{cm}$ 、方位角方向 2π を覆う
- INTTはビーム周波数以下の時間分解能を持ち、どのビーム交差で衝突事象が起こったのかの区別が可能である



INTT用シリコンセンサーラダー

- 厚み $320\mu\text{m}$ 、幅 $78\mu\text{m}$ 、長さ 16mm (20mm)のストリップが256本で1つの読み出しセルが構成される
- ラダー全体では6656本のストリップを持つ
- 2種類のストリップセンサーから構成される
 - 衝突点に近いラダー中央: 長さ 16mm のType-A
 - ラダー外側: 長さ 20mm のType-B



- INTTラダーは左右独立であり、それぞれをハーフラダーと呼ぶ
 - ハーフラダーごとに信号を読み出す

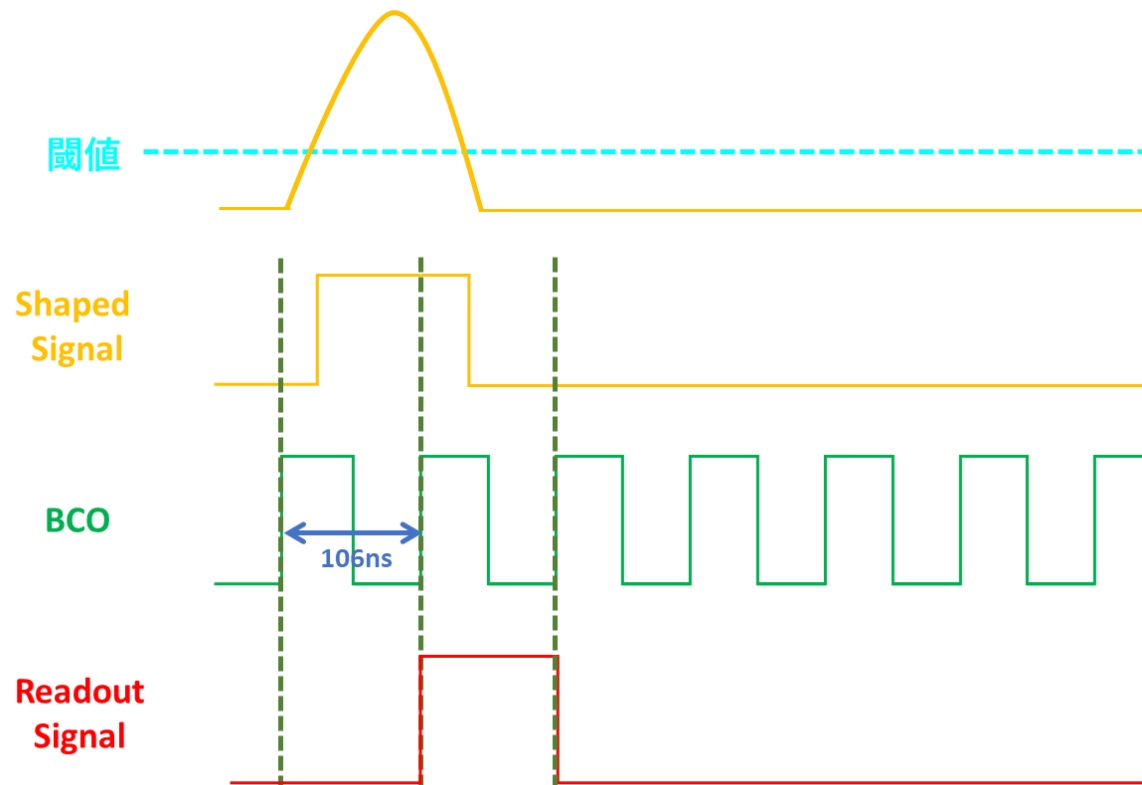
研究目的

- ノイズの少ない宇宙線測定から
 1. 検出効率測定
 2. 検出効率のタイミング依存性の検証を行うことを目的としている

- INTTの検出効率測定を目的として、3度ビームテストが行われた
 - 検出効率: $96.0 \pm 0.5\%$ 、 $99.56 \pm 0.02\%$
- 一貫した検出効率を得られない理由として、タイミング依存性仮説が立てられた
 - タイミング依存性仮説: センサーが信号を検出したタイミングと、クロック信号BCOとの相対位相によっては信号を取りこぼしてしまうことがある

INTTとビーム周波数

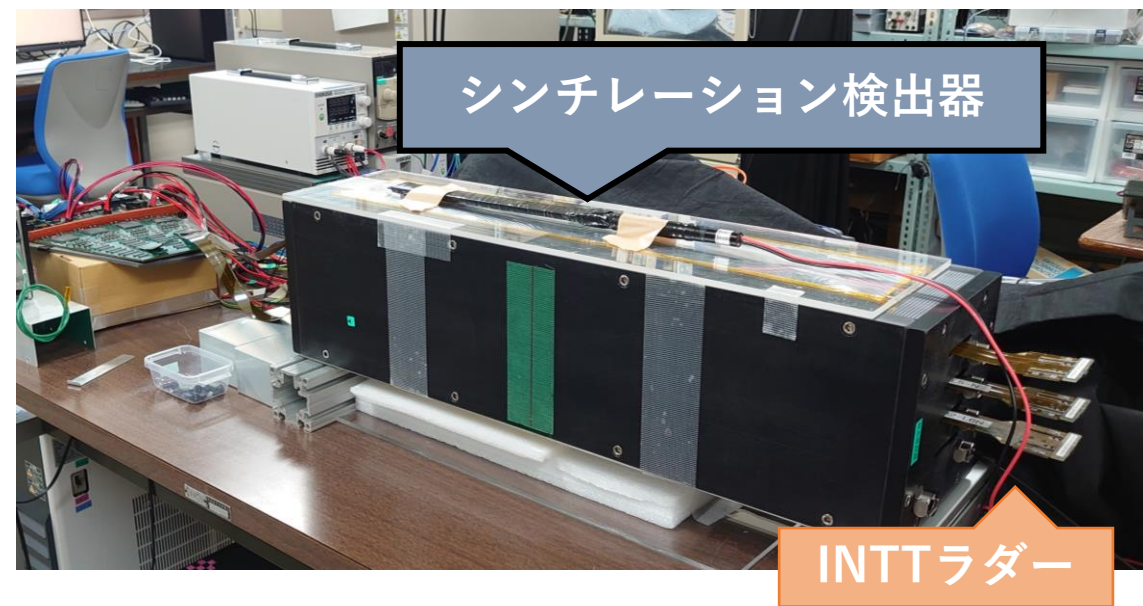
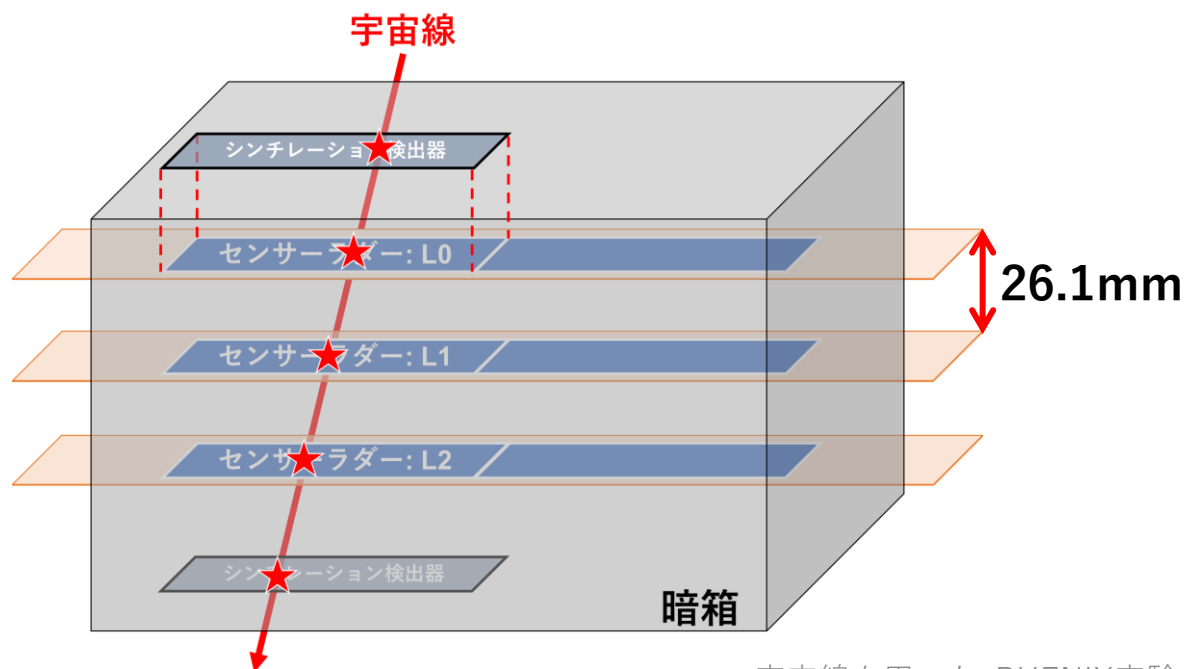
- INTTはRHIC加速器のビームクロック信号(Beam Clock: BCO)と同期して動作する
 - BCO: 9.4MHz (1周期およそ106nsec)、ビーム周波数と同じ
- INTTはBCOの立ち上がりのタイミングで信号を読み出す
- BCOの立ち上がりと一致させるため、どの信号も時間幅およそ80nsに波形整形される



宇宙線を用いたsPHENIX実験-中間飛跡検出器INTT用
シリコンセンサーの検出効率測定: 並本ゆみか

宇宙線測定セットアップ

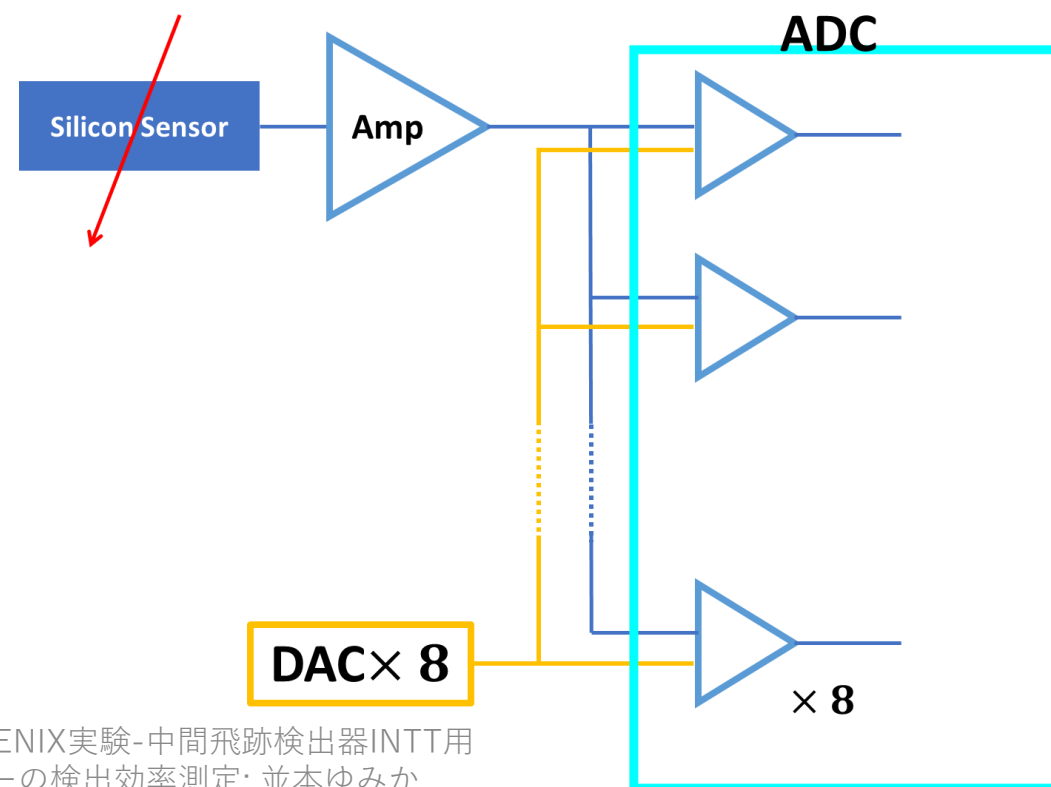
- センサーラダーを3本平行に配置(ラダー間距離: 26.1mm)
 - 上流のラダーからそれぞれL0、L1、L2と呼ぶ
- 暗箱の上下にシンチレーション検出器を配置
 - 2本のシンチレーション検出器のcoincidence信号が測定のトリガー
 - シンチレータの面積とセンサーの面積は同じ
 - CAMACを用いてシンチレーション検出器のADCとタイミングを測定している



INTTによる宇宙線のエネルギー損失測定

- INTTは通過した荷電粒子の損失エネルギーをADCにより測定可能である
 - 8段階の閾値を持ち、DACによって設定する
- 宇宙線のMIPがシリコンストリップ1本を通過したときの信号波高は、Bethe-Blochの公式から約580mVと計算される
- 宇宙線のMIPピークを測定できるように、宇宙線測定時のDAC値は以下のように設定した

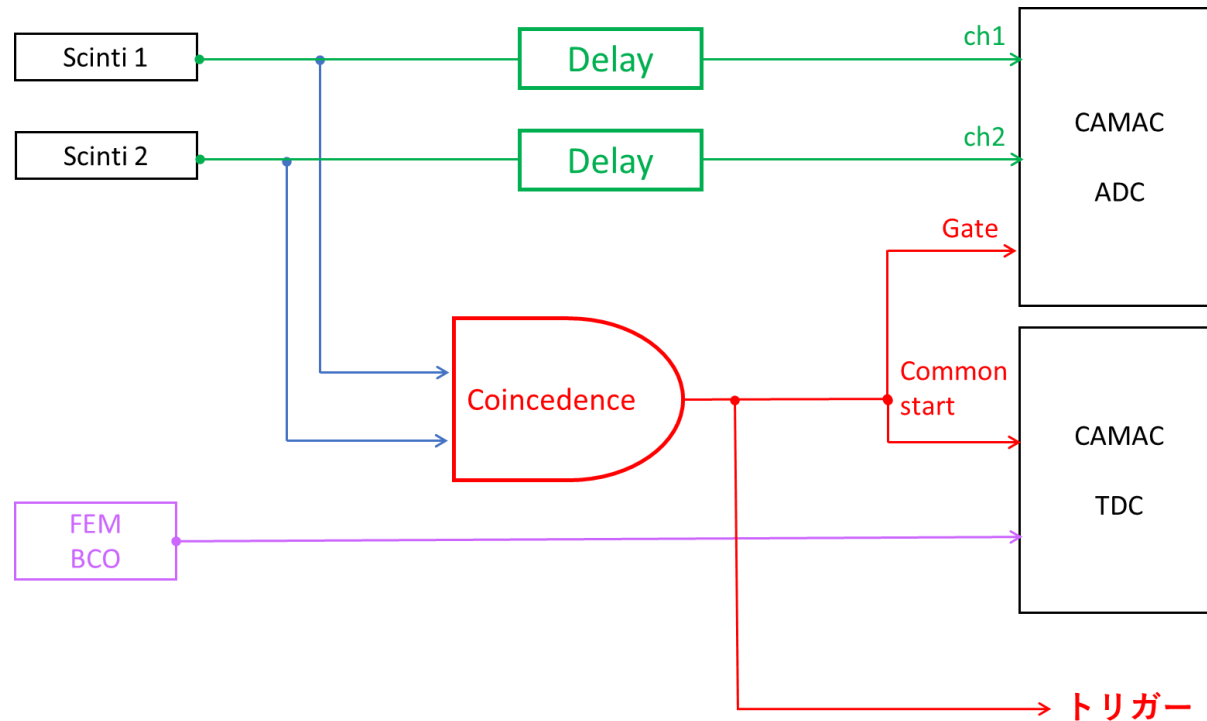
	設定値	電圧値 (mV)
DAC 0	15	270
DAC 1	30	330
DAC 2	60	450
DAC 3	90	570
DAC 4	120	690
DAC 5	150	810
DAC 6	180	930
DAC 7	210	1050



宇宙線を用いたsPHENIX実験-中間飛跡検出器INTT用
シリコンセンサーの検出効率測定: 並本ゆみか

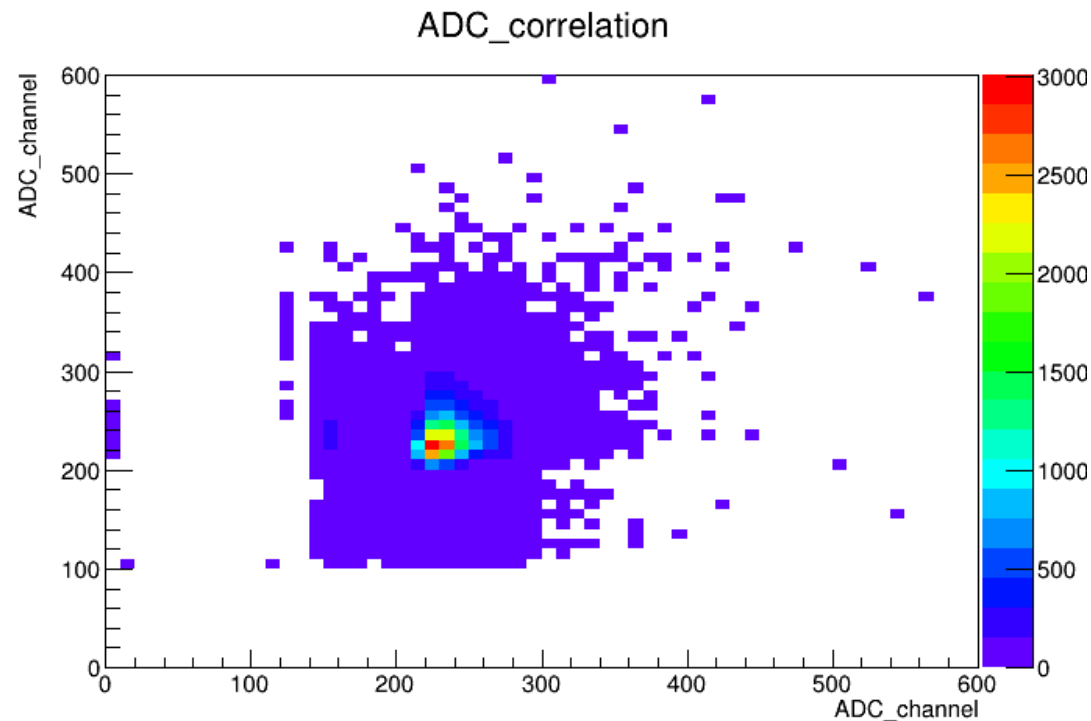
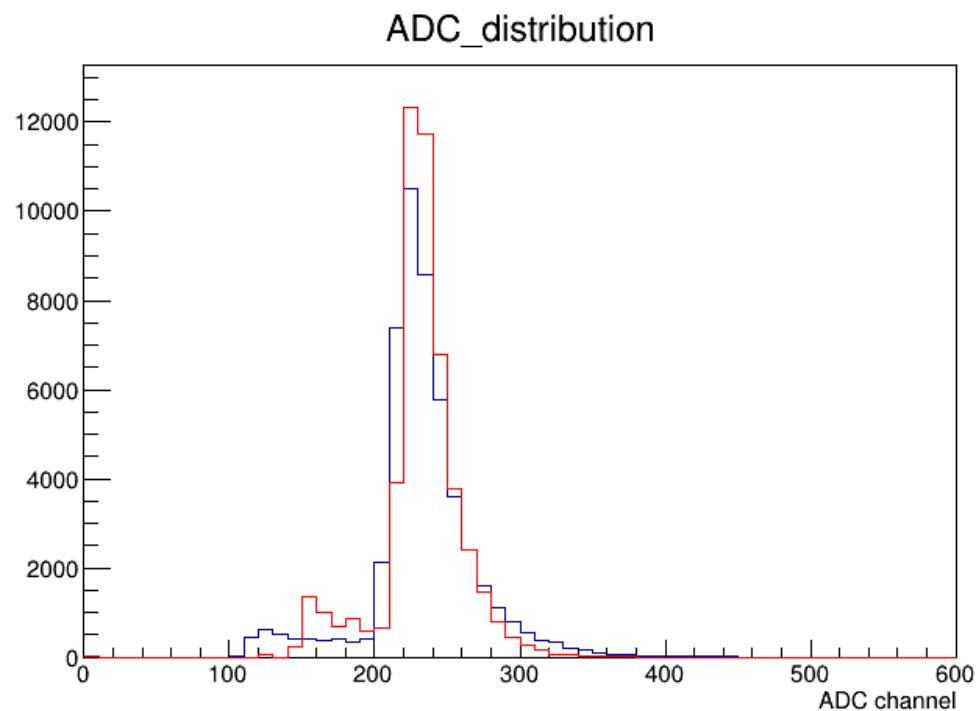
トリガー信号の測定回路

- トリガーシンチレーション検出器の信号電荷、信号を検出したタイミングとBCOの時間差をそれぞれ測定している
- トリガー信号が電荷測定のためのGate、タイミング測定のCommon startとなっている



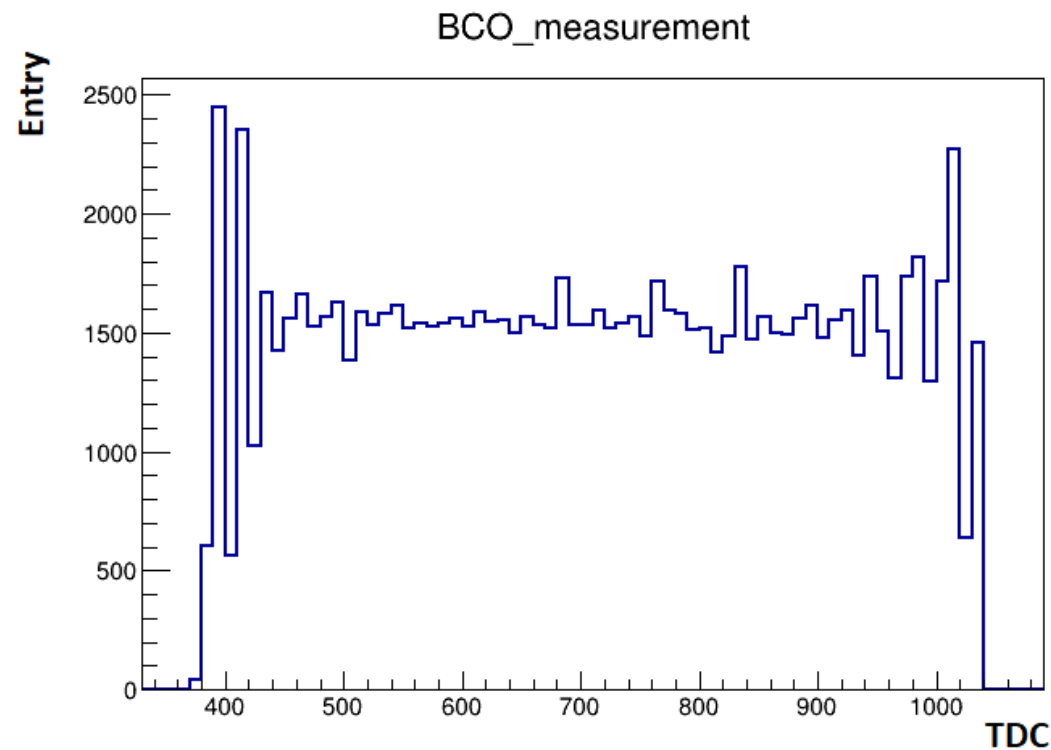
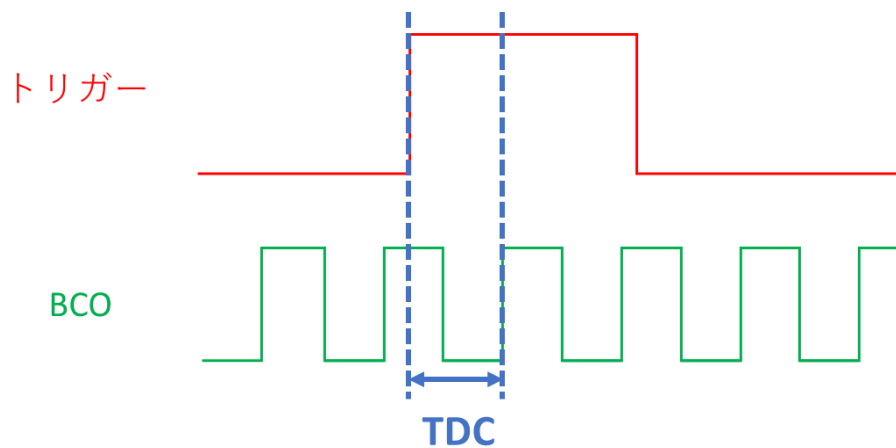
宇宙線測定結果: 宇宙線の信号電荷

- 宇宙線測定は約36日間行った
- シンチレーション検出器で測定された宇宙線の電荷分布は以下のようになった
 - 青: 暗箱上のシンチレーション検出器 赤: 暗箱下のシンチレーション検出器
 - ピーク値が同じ値になっていることがわかる
 - それぞれの測定結果に相関があり、2つのシンチレーション検出器を同時に通過した宇宙線を測定できている



結果: トリガー信号とBCOのタイミング差

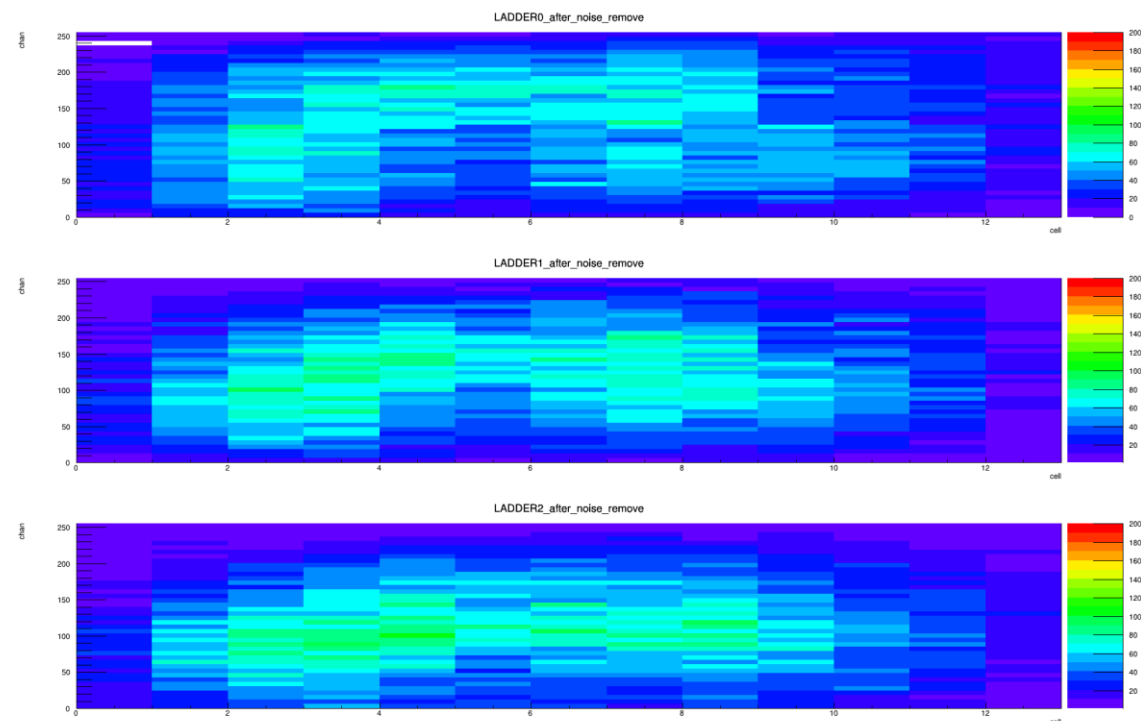
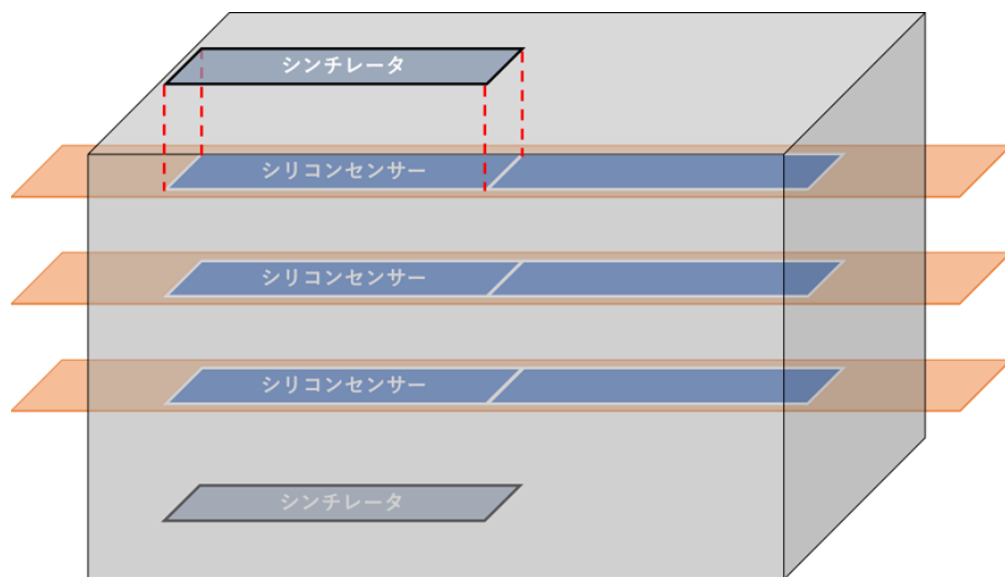
- トリガーシンチレーション検出器が宇宙線を検出したタイミングと、BCOの時間差を測定している。結果を以下に示す
 - TDC値450-1000はほとんど平らになっており、宇宙線がどのタイミングでも一様に来ていることがわかる
 - TDC値400、1000付近のピークは読み出し回路の不具合による



結果: ラダーごとのヒット分布



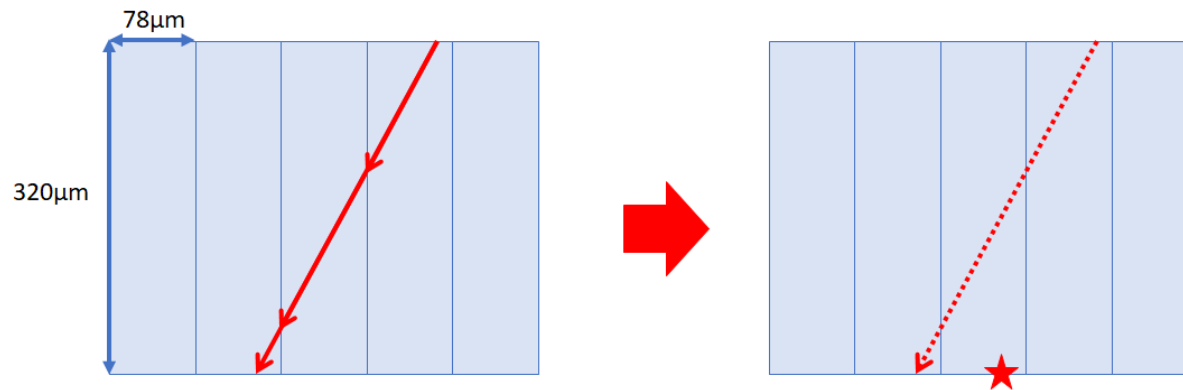
- 宇宙線測定結果から、全ラダーのヒット分布を作成した
 - 垂直に入射する宇宙線により、全ラダーの同じ位置にヒットがあることがわかる
 - 読み出しセルの面積が大きいCell1-5ではより多くのヒットが見られる
- ヒットが集中している部分が弓形になっているのは、暗箱下に配置したシンチレーション検出器がセンサーとずれていたからだと考えられる



クラスタリング

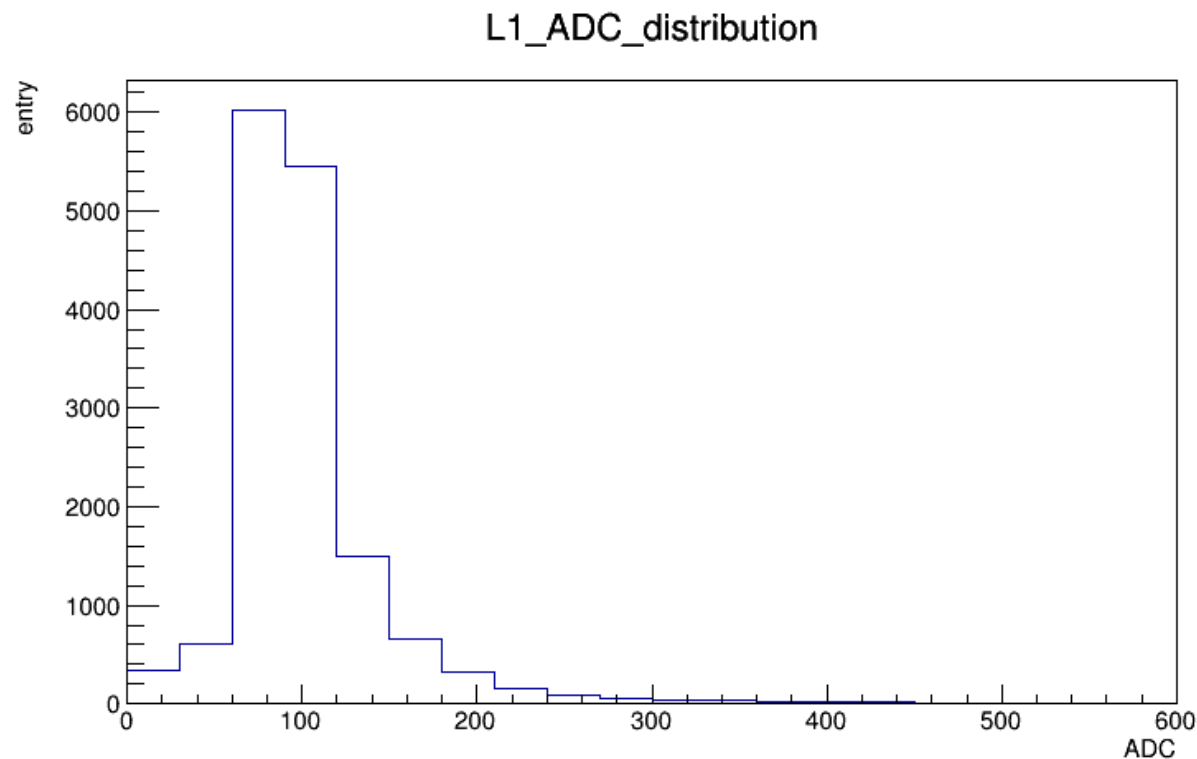
- 宇宙線 hit は同一ラダー中の複数ストリップにまたがることもあるので、それらの hit を一つのクラスターにまとめるクラスタリングを行った
1. 1イベント中の Hit をラダー、セルごとにわけ
 2. 同一ラダー、同一セルのHitで、ストリップ番号が隣同士であれば、ADC 値(宇宙線の損失エネルギーに相当)を用いて平均ストリップ位置(★)を求める

$$\text{Cluster position} = \frac{\sum(\text{Strip No.} \times \text{ADC})}{\sum \text{ADC}}$$



結果: クラスターの信号電荷分布

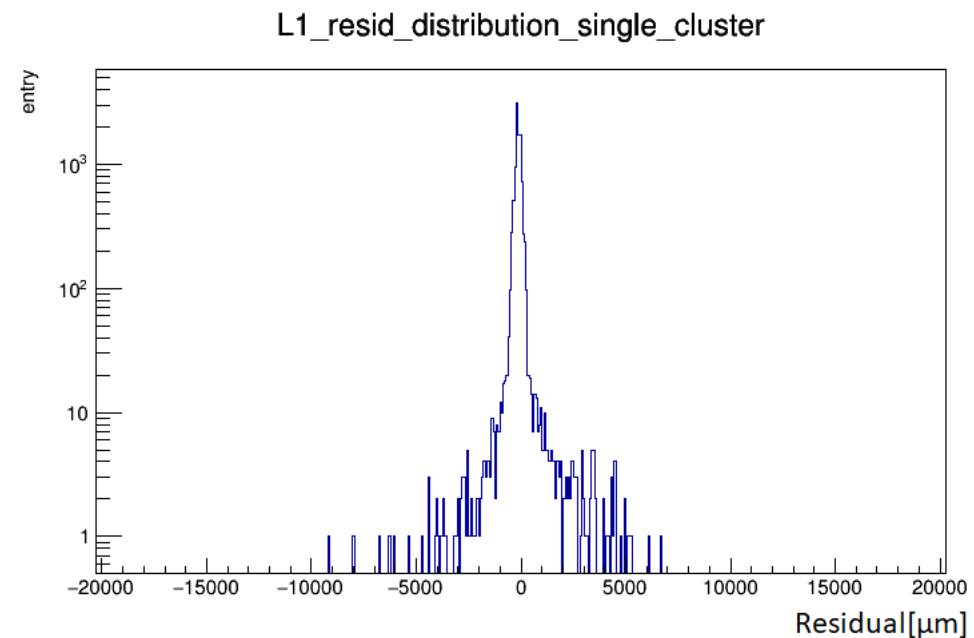
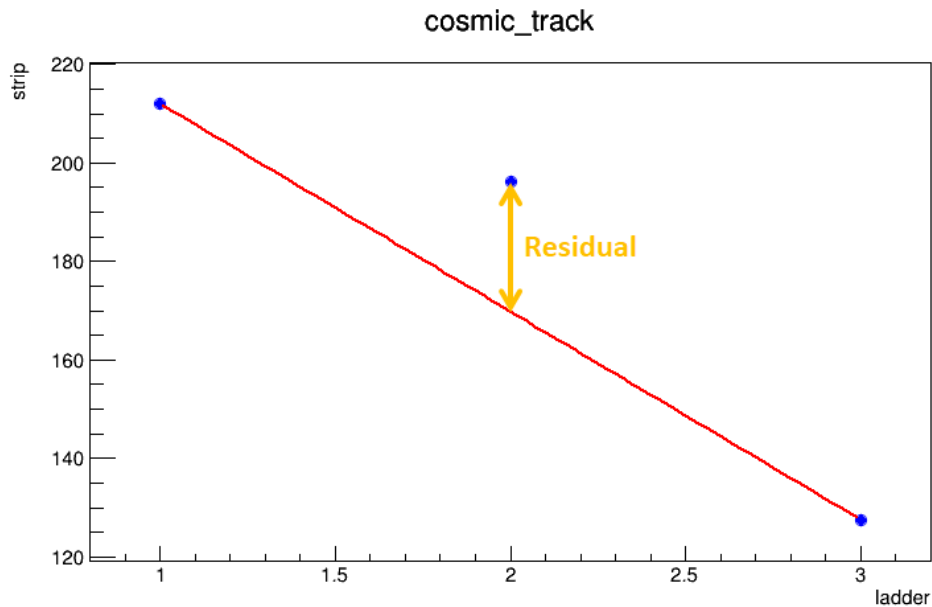
- L1 が検出したクラスターの電荷分布は以下ようになった
- ADC値60-120 (450mV – 690mV)にピークを持つ
 - これは宇宙線がストリップ1本を通過したときの電荷約580mVという予想と一致している
 - 宇宙線が測定できており、その電荷分布が見えている



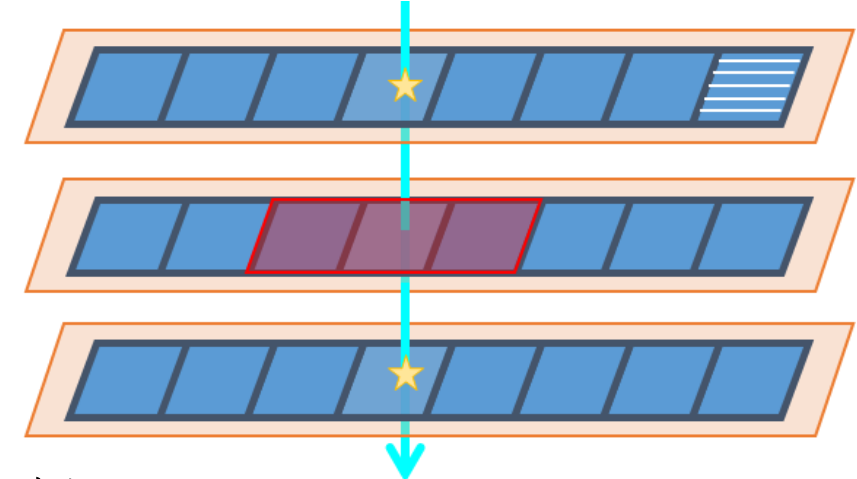
	設定値	電圧値 (mV)
DAC 0	15	270
DAC 1	30	330
DAC 2	60	450
DAC 3	90	570
DAC 4	120	690
DAC 5	150	810
DAC 6	180	930
DAC 7	210	1050

トラッキング

- 2本のラダーが検出したクラスターの位置から、残る1本のラダーにおけるクラスターの位置が予想できる
 - 予想される位置と、実際のクラスター位置の差をResidualと呼ぶ
- 全ラダーがクラスターを1つ検出したときのL1のResidual分布図を示した
 - 横軸: 実距離[μm]、縦軸: エントリー数
 - ピークは0付近に立っており、予想される位置でクラスターが検出されている



検出効率の定義



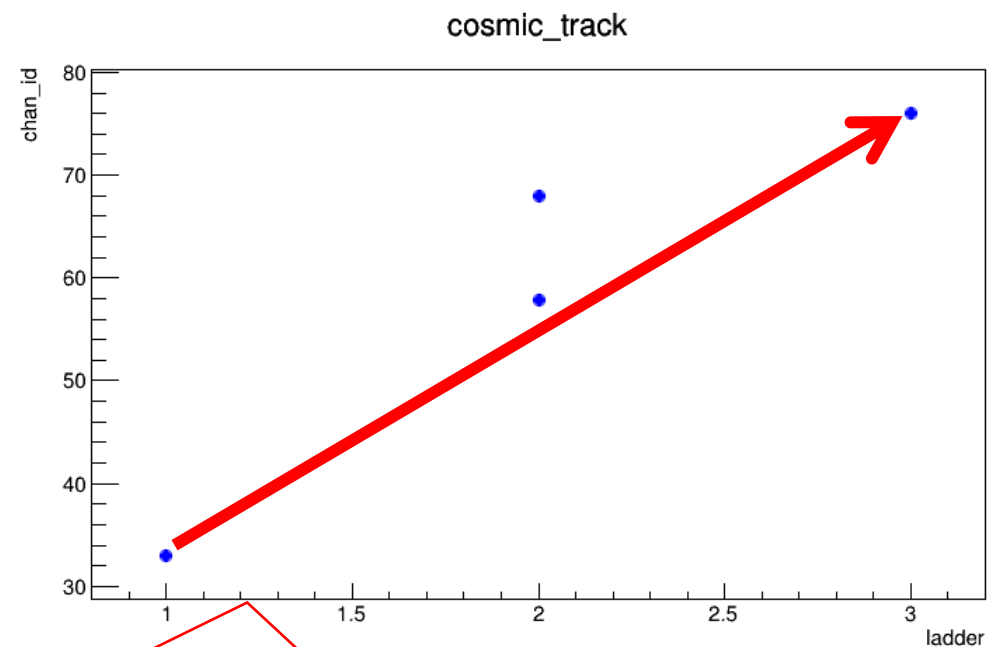
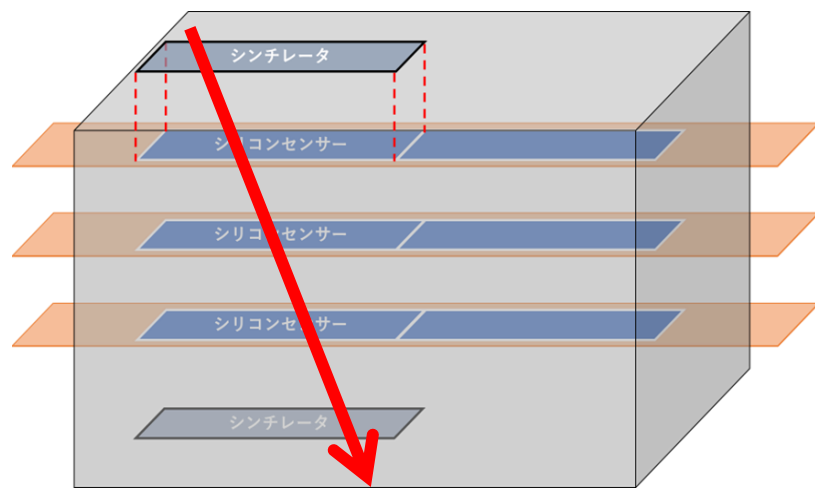
- L1 の検出効率を求める場合、より確からしい宇宙線を選ぶために
 - 上下のラダーL0, L2 は同じ番号のセルに1つのクラスターを持つ
 - L1 は $-1 \leq L0, L2 \text{ cell No.} \leq 1$ にクラスターを持つ
 - L1 のクラスター予想位置は $0 \leq \text{Strip No.} \leq 255$ に制限する
- という条件を課す。これはノイズを除去するためである

$$\epsilon_{\text{Ladder 1}} = \frac{N(\text{Ladder 0 hit} \cap \text{Ladder 1 hit} \cap \text{Ladder 2 hit})}{N(\text{Ladder 0 hit} \cap \text{Ladder 2 hit})}$$

- 誤差は二項分布の統計誤差を用いた

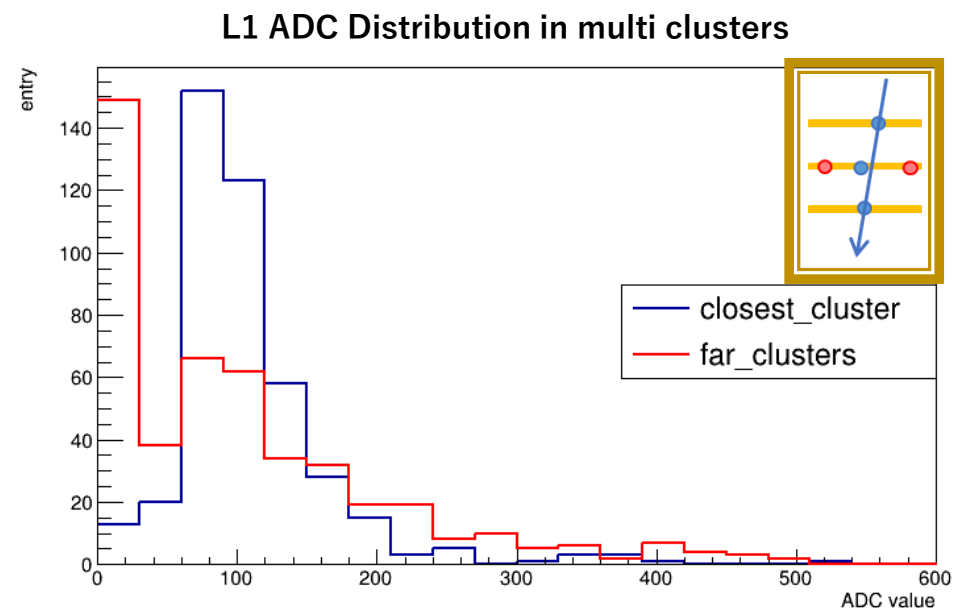
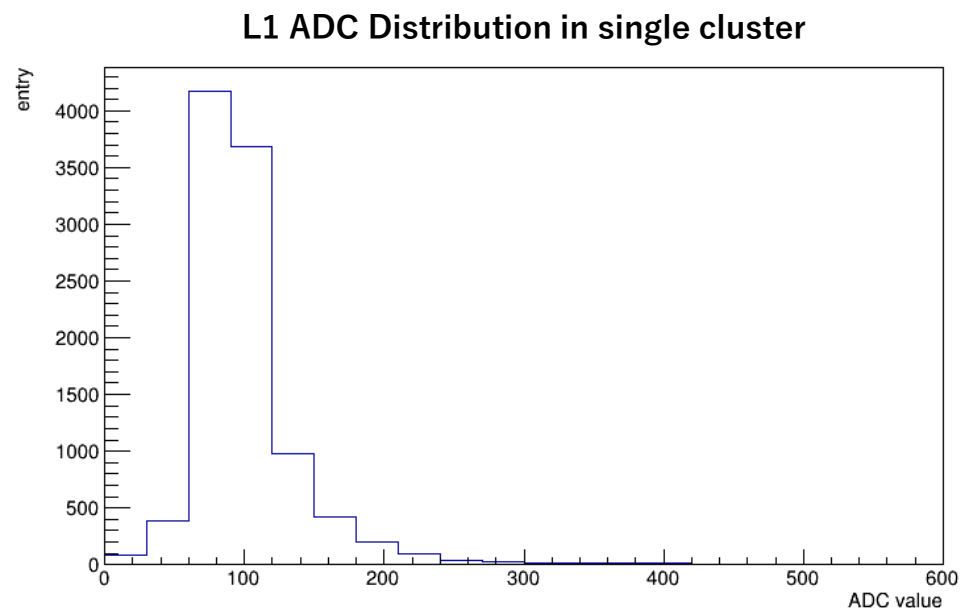
複数クラスターの検出

- 宇宙線測定では、同一タイミングに複数個のクラスターを検出することがある
 - 2個以上のクラスターが検出される割合は約4%
 - これらすべてをカットすると、検出効率が4%下がる
 - 検出効率計算に使えるかどうか確認する必要がある
- 複数クラスターの中に宇宙線クラスターが含まれているかどうか、解析を行った



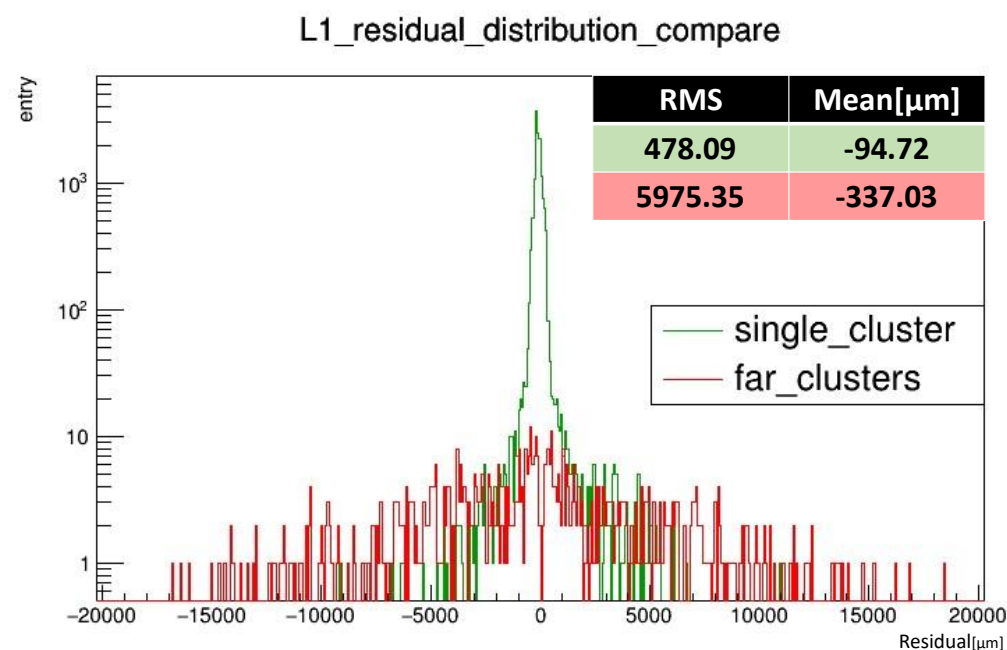
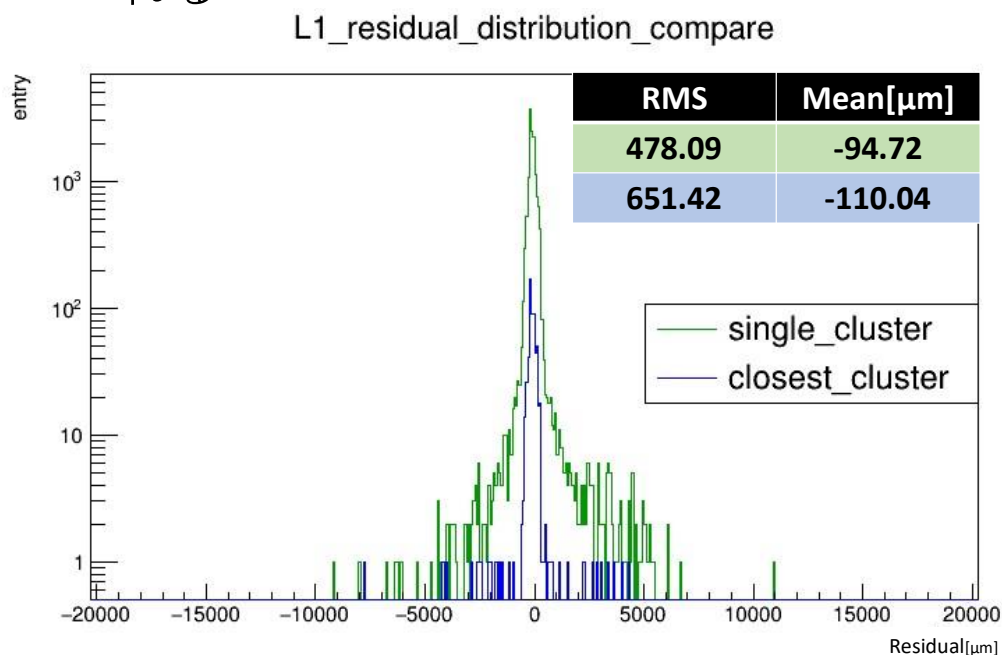
複数クラスタの解析: 信号電荷分布図

- L1が測定した電荷分布図を以下に示した
- 左: 宇宙線をINTTで測定したときの
- 右: L1が複数個クラスタを検出したとき
 - 青: 予想位置に最も近いクラスタ 赤: それ以外のクラスタ
 - 左の分布図と右の青線分布図が似ていることから、予想位置に最も近いクラスタは宇宙線であると考えられる



複数クラスターの解析: Residual分布図

- L0, L2がクラスターを1つだけ検出したとき、L1のResidualを以下の条件で調べた
 - 緑: L1が1つだけクラスターを検出したとき
 - 青: L1が複数クラスターを検出したときの、予想位置に最も近いクラスター
 - 赤: L1が複数クラスターを検出したときの、予想位置から遠いクラスター
- 緑と青は似た分布をしているため、予想位置に近いクラスターは宇宙線であると考えられる



複数クラスター中の予想位置に最も近いクラスターは宇宙線である

検出効率の計算結果

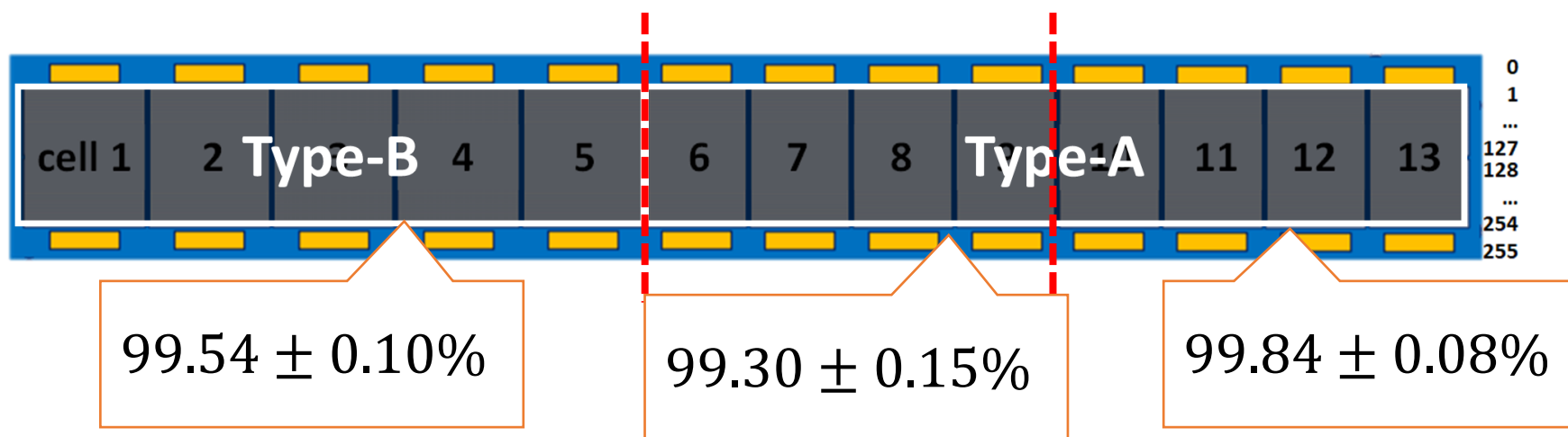
宇宙線測定から求めた検出効率	
ラダー	検出効率[%]
L0	98.98 ± 0.07
L1	99.51 ± 0.06
L2	96.20 ± 0.12

2021年ビームテストの結果(森田修論)	
ラダー	検出効率[%]
L0	99.53 ± 0.02
L1	99.39 ± 0.03
L2	99.56 ± 0.02

- L1の結果は2021年ビームテストで得られた検出効率と一致した
 - INTTの検出効率は99%以上であることが明らかになった
- L0、L2はビームテスト時の結果を下回った
 - 宇宙線は3層のラダーを通過するうちに多重散乱を起こし、3層目まで届く前にセンサーの外側に飛び出してしまう、あるいは遠く離れたセルに飛ばされてしまう可能性がある
 - このためL2自身、そしてL1とL2のクラスター位置を計算の基準としているL0の結果が悪化したと考えられる

検出効率のセル位置依存性確認

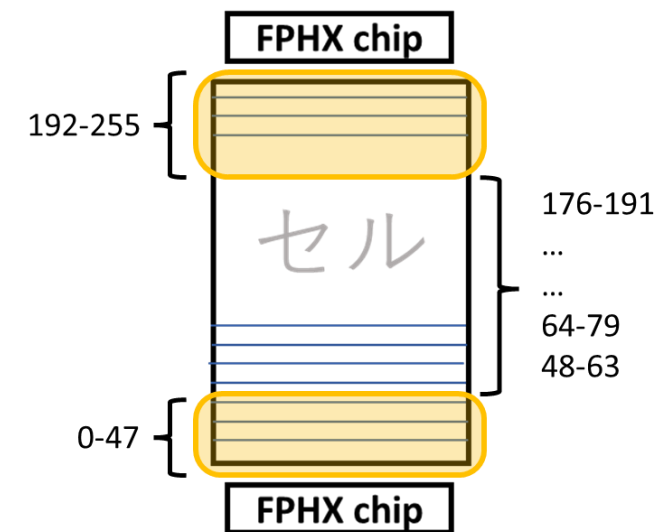
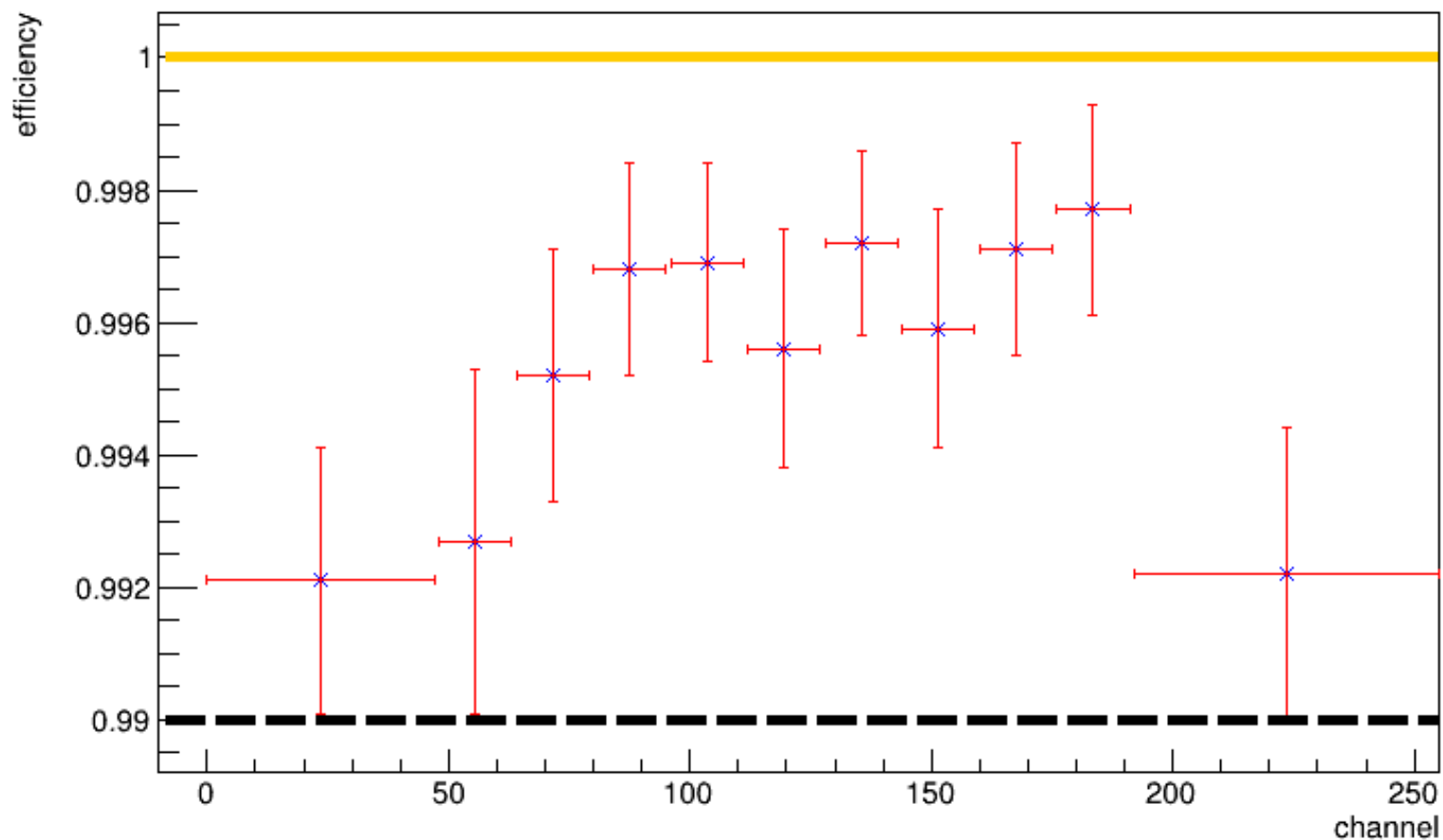
- センサーラダーには長さの異なる2種類のセンサーが用いられている
- センサーの種類によって検出効率に変化がないか確認するため、L1 についてセル番号別に3つのグループに分けて検出効率の計算を行った



- センサーの種類やセルの位置によらず、検出効率は99%以上であることがわかる

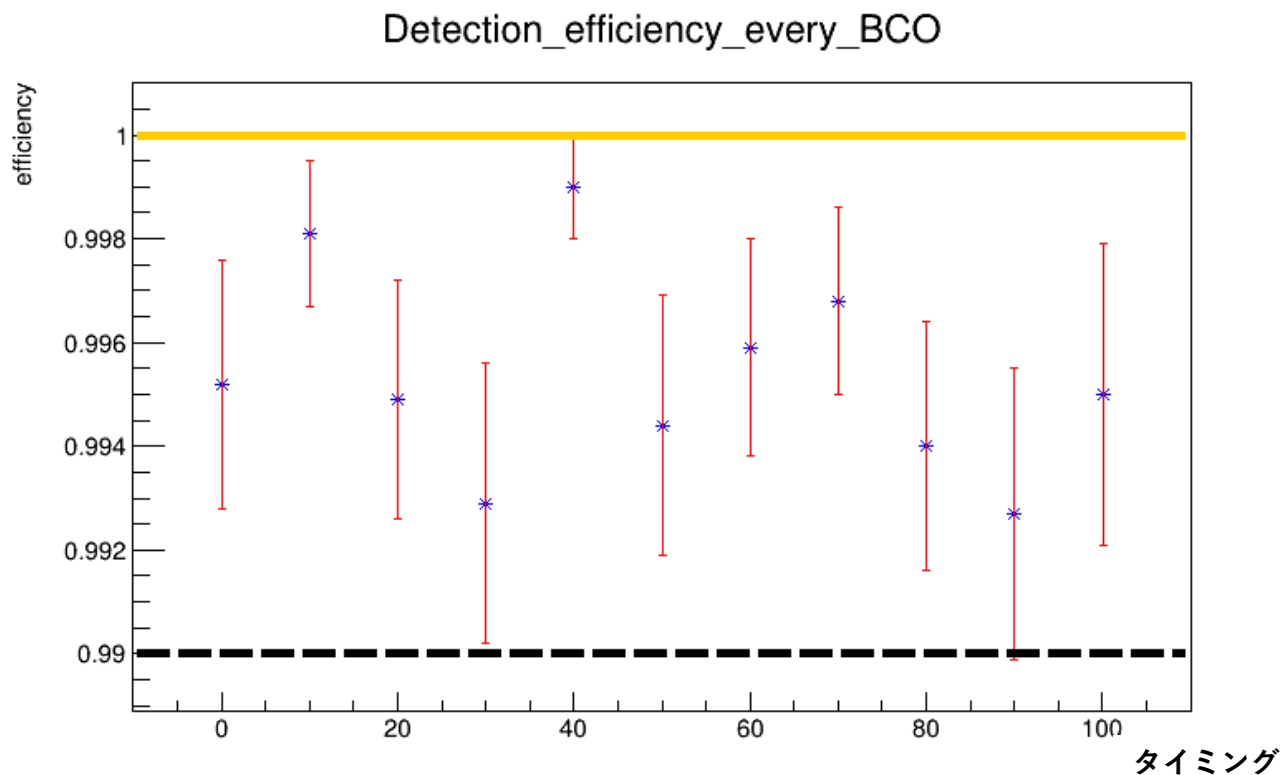
検出効率のストリップ位置依存性

- ストリップ位置でグループ分けし、それぞれで検出効率を求めた
- ストリップの位置によらず、検出効率99%以上であった
- 検出効率は両端が少し低く、中央付近が高い



検出効率のタイミング依存性検証

- BCO 1周期 = 106nsecを10nsecごとのタイミングに分け、それぞれでL1 の検出効率を計算した
- 全グループ検出効率99%以上である
- 検出効率はタイミングに依存しないことがわかった

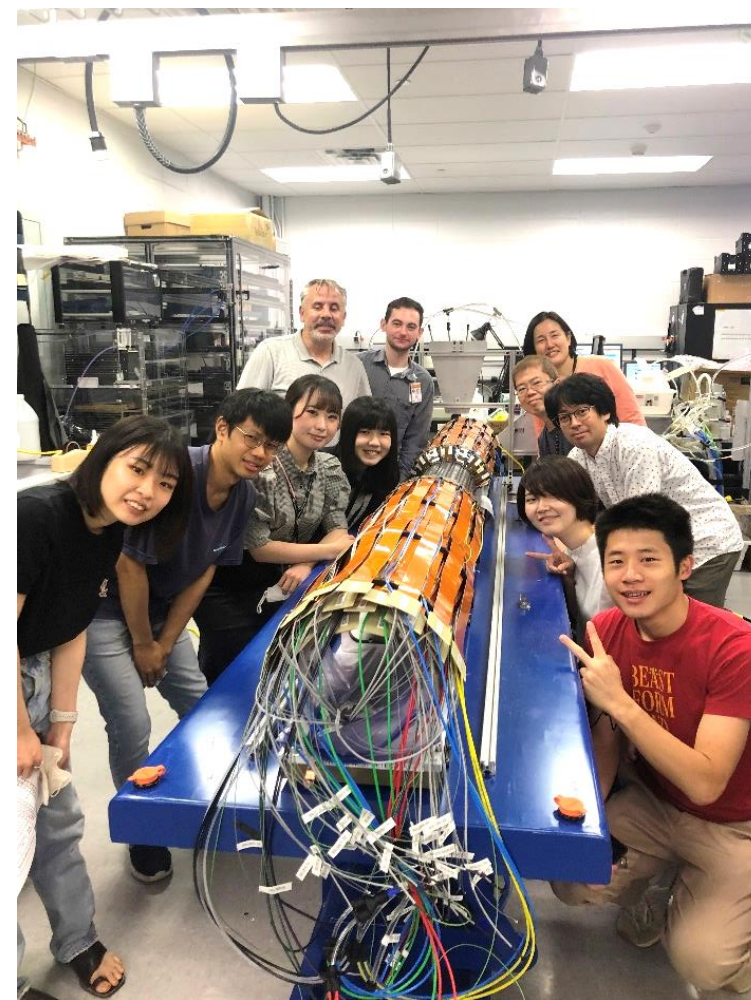
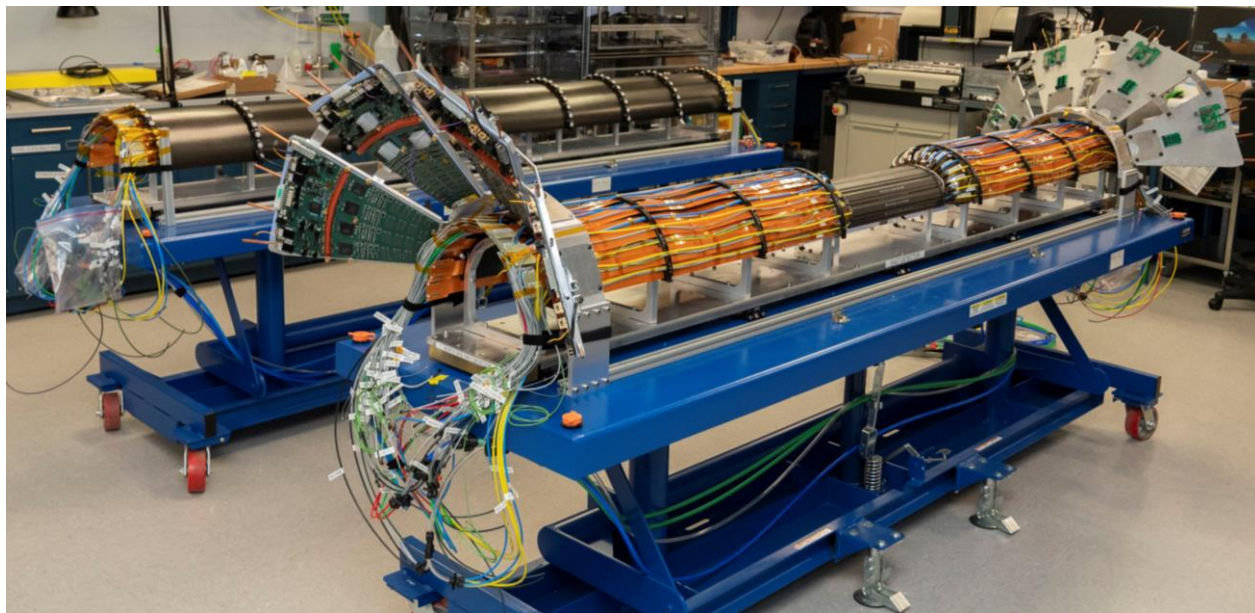


まとめ

- 宇宙線測定、解析を行い、INTTの検出効率の計算を行った
 - L1 の検出効率は $99.51 \pm 0.06\%$ となり、期待されていた99%以上を達成した
 - センサーのセル番号別、ストリップ番号別に検出効率の計算を行い、それぞれ99%以上であることを確認した
 - 検出効率のタイミング依存性は確認されなかった
 - センサーラダーおよび読み出し回路は要求されている性能を満たしており、本実験に用いることができると確認された
- L0、L1の検出効率に比べ、L2は96%と低かった
- 多重散乱がどのような影響をおよぼすのか確認する必要がある

今後

- 現在、INTT検出器は建設が終わり、インストールを待つ段階にある
- sPHENIX実験開始に向けて準備が進んでいる

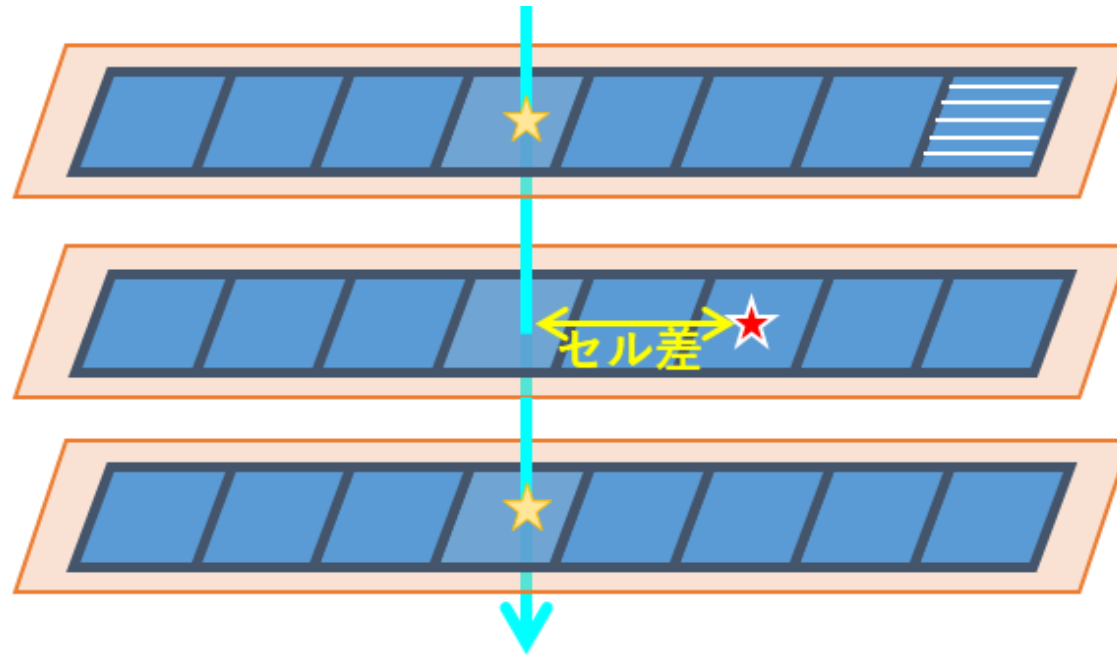


宇宙線を用いたsPHENIX実験-中間飛跡検出器INTT用
シリコンセンサーの検出効率測定: 並本ゆみか

BACK UP

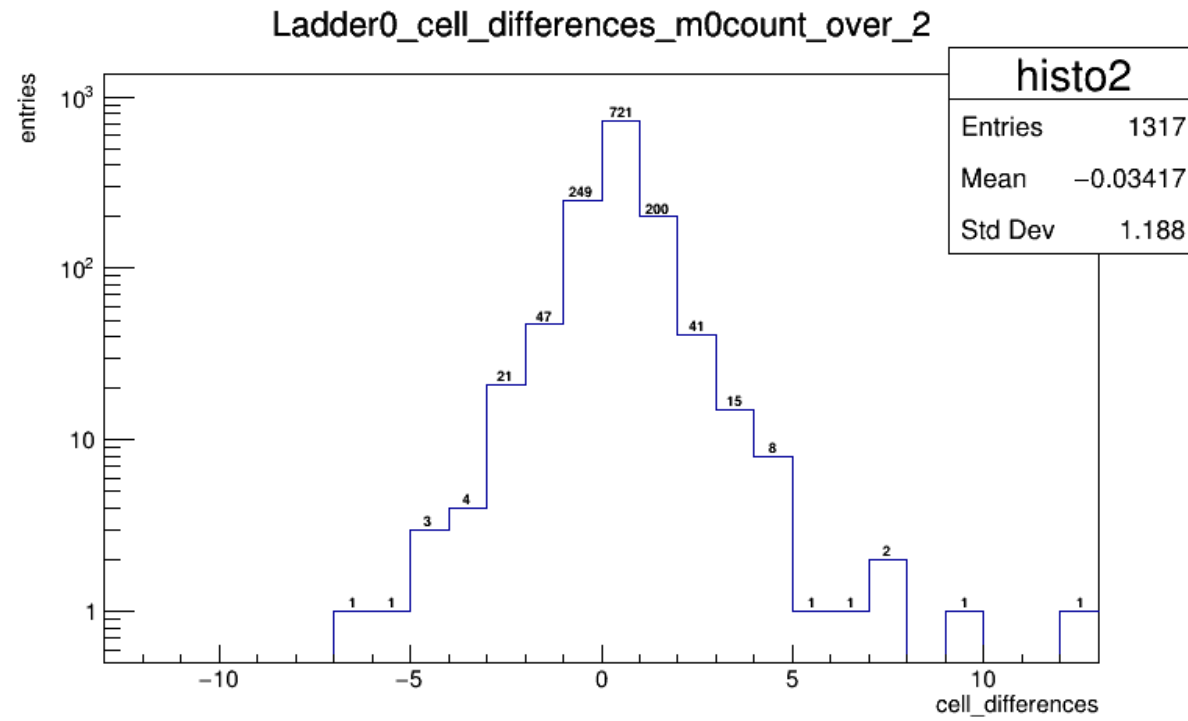
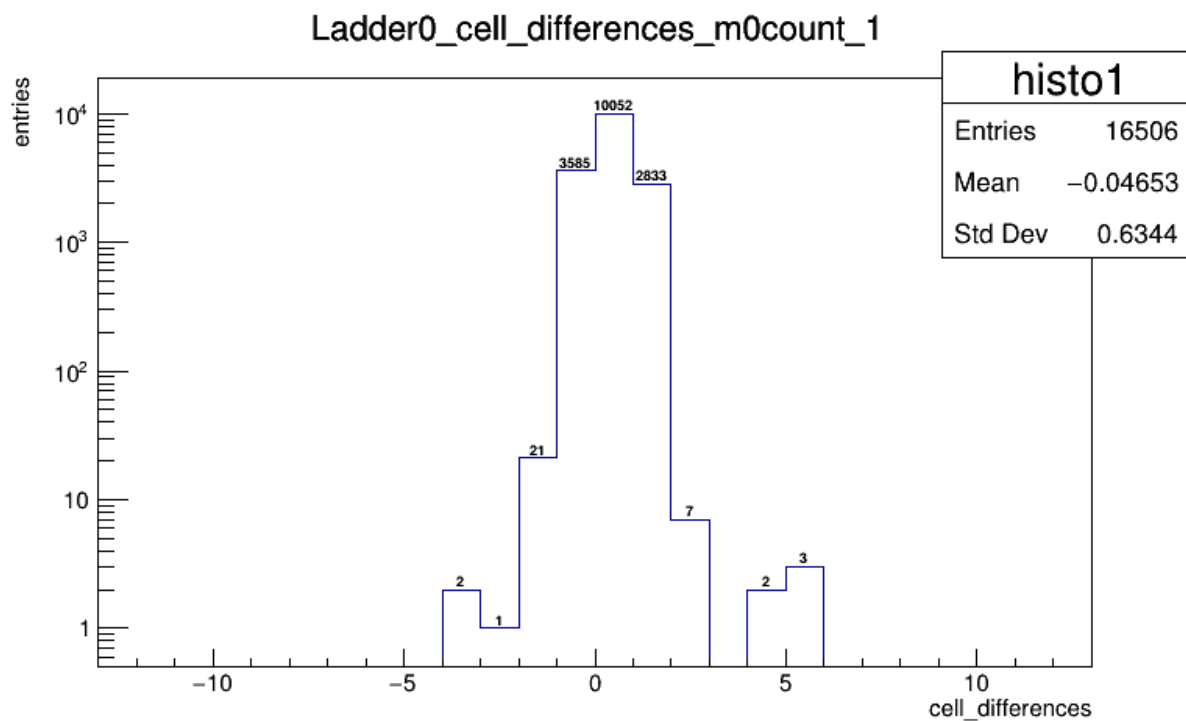
セル差

- 2本のラダーが同じセルにクラスターを1つ持つと仮定したとき、残る1本のラダーがクラスターを持つセルとのセル番号の差をセル差と呼ぶ



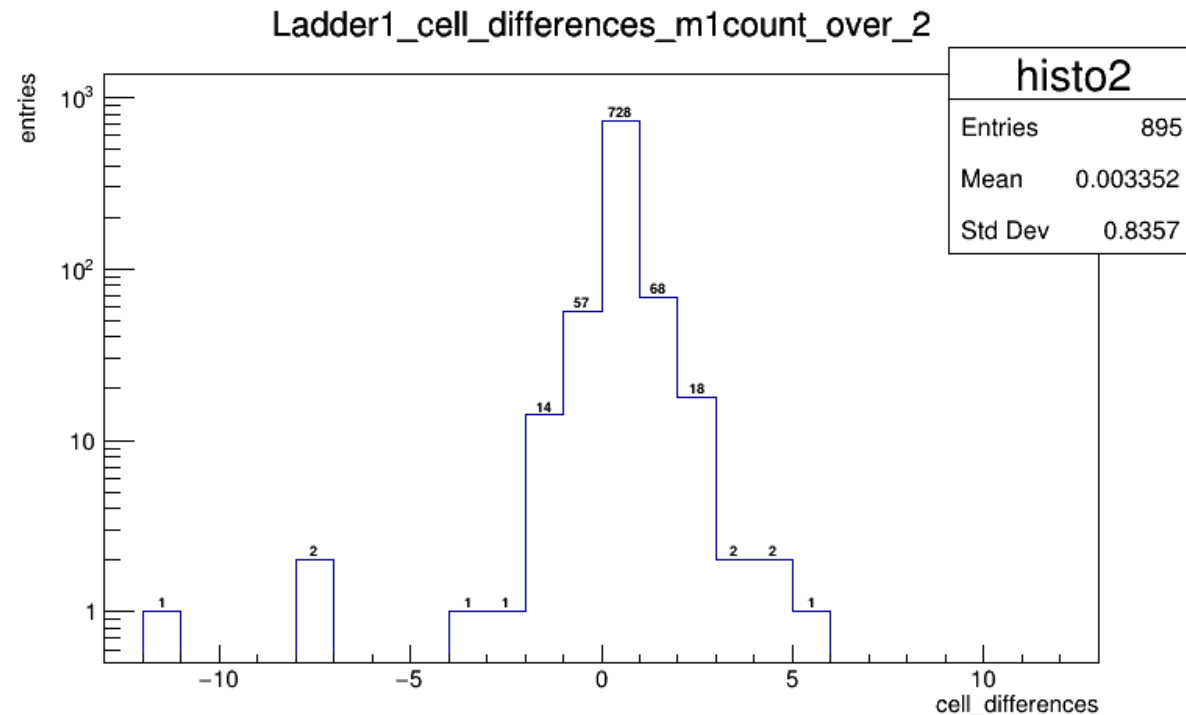
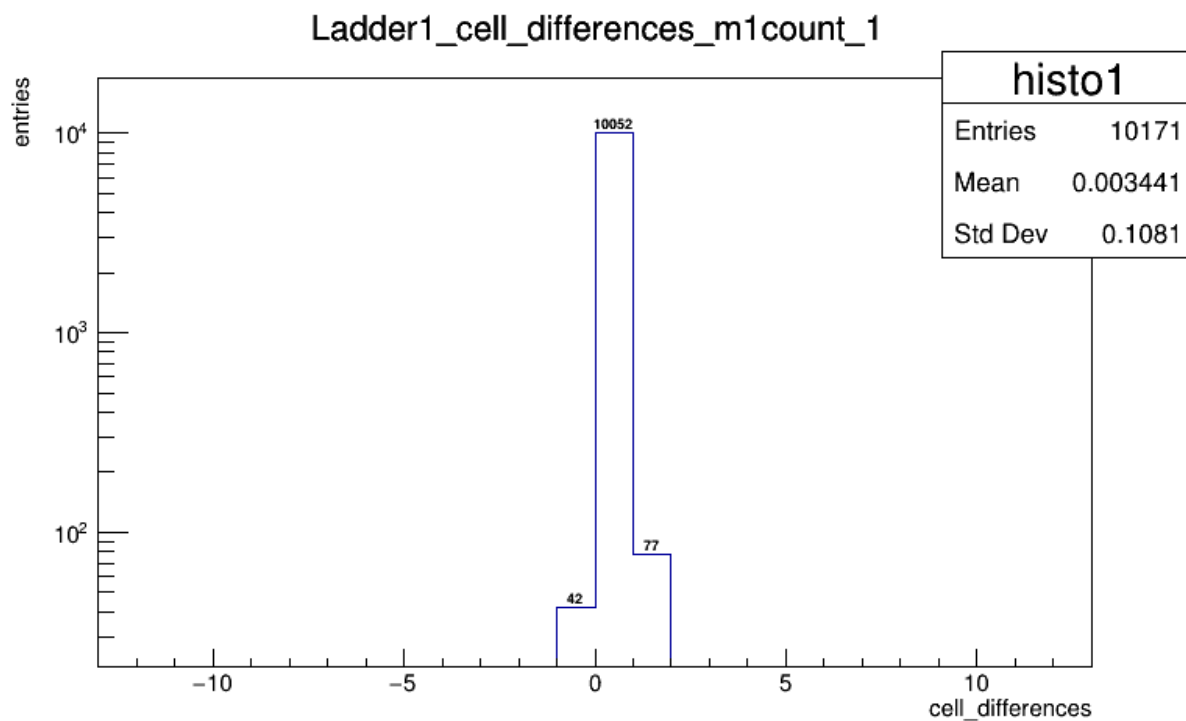
セル差分布図: L0

- 左: シングルクラスター
- 右: 複数クラスター



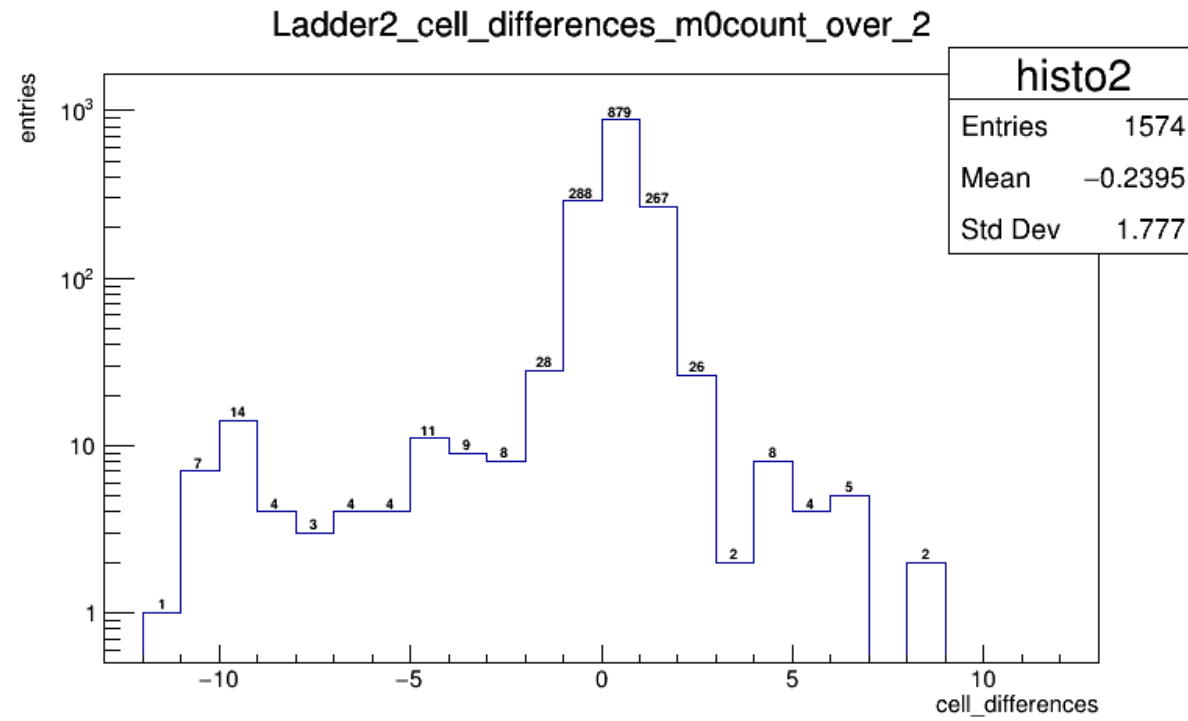
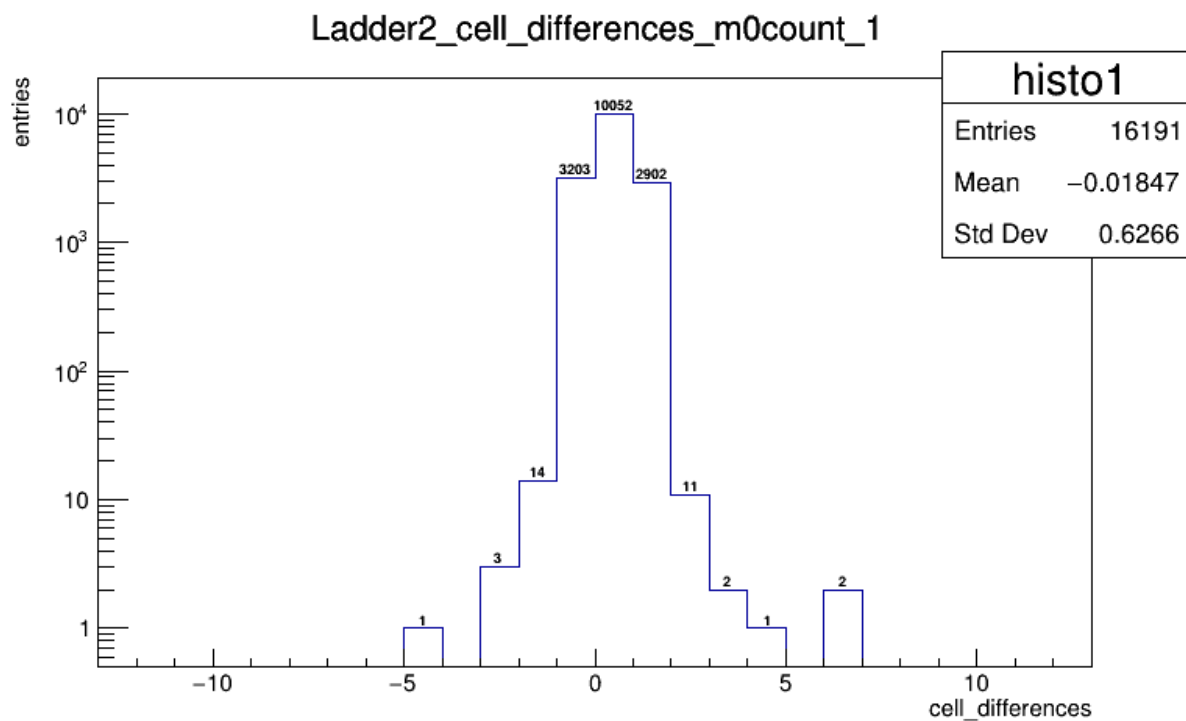
セル差分分布図: L1

- 左: シングルクラスター
- 右: 複数クラスター



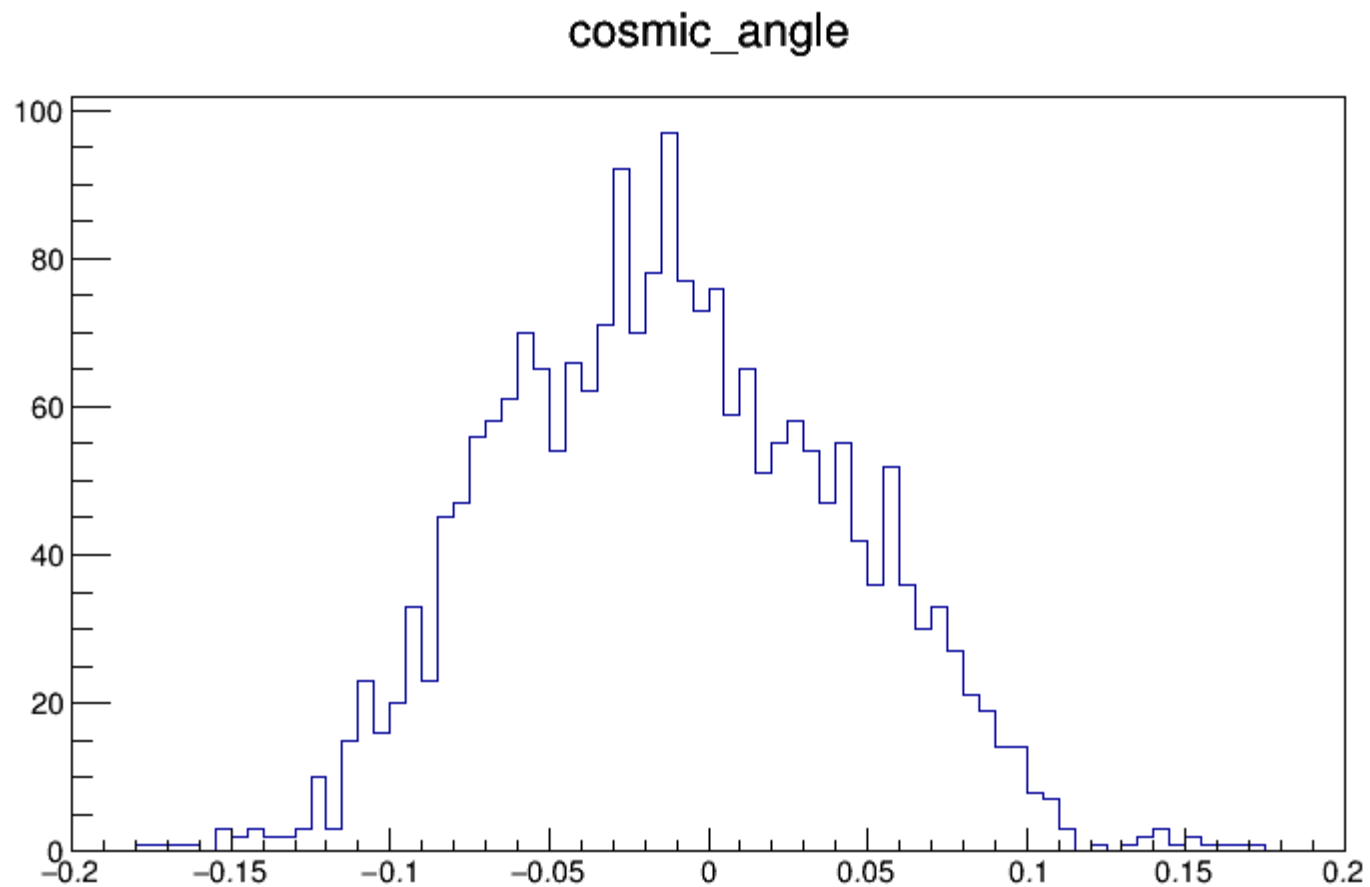
セル差分布図: L2

- 左: シングルクラスター
- 右: 複数クラスター



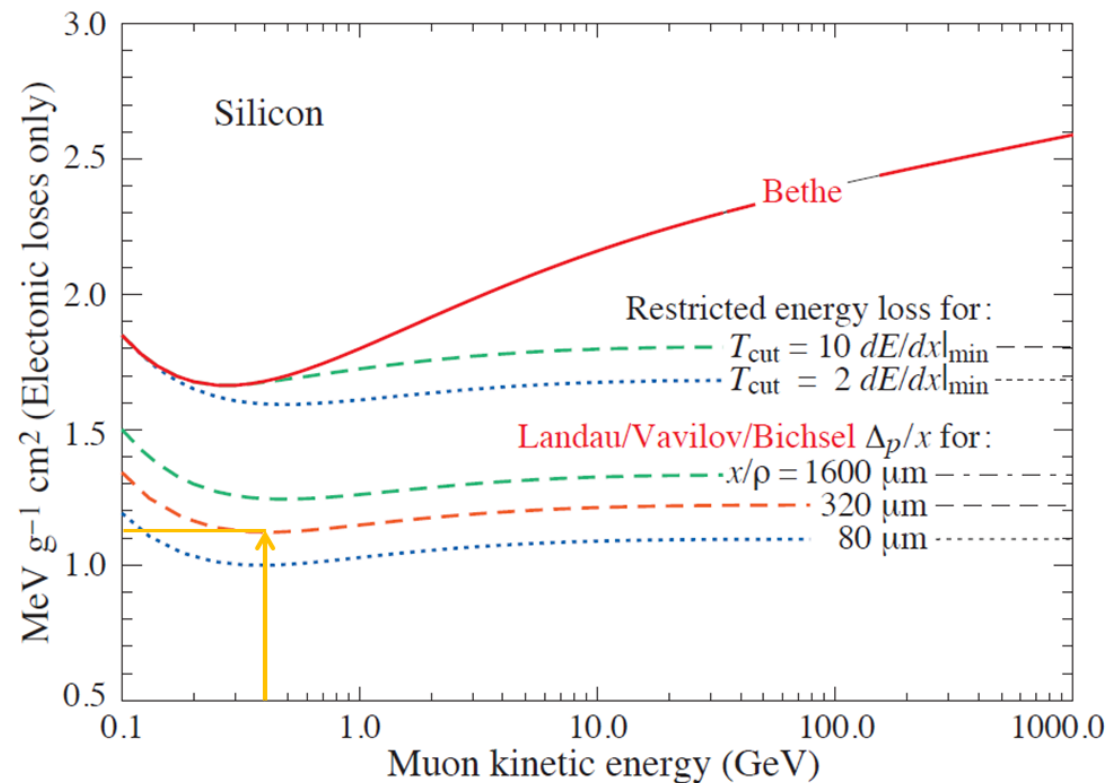
宇宙線の角度分布

- 全ラダーがクラスターを1つ検出したときのtrackingから求めた



宇宙線電荷計算

- Bethe-Blochの公式から、0.4GeVの μ 粒子のエネルギー損失は1.13 [MeV \cdot cm²/g]である



宇宙線信号電荷計算

- Bethe-Blochの公式から、0.4GeVの μ 粒子のエネルギー損失は1.13 [MeV \cdot cm²/g]である
- シリコンストリップの厚み320 [μ m]と、シリコンの密度2.33[g/cm³]から、単位体積あたりのシリコン中で宇宙線が失うエネルギーは
- $1.13[\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}] \times 0.032[\text{cm}] \times 2.33[\text{g}/\text{cm}^3] = 0.0843[\text{MeV}]$
- また、1電子正孔対を生成するために必要なエネルギー3.44 [eV]から、宇宙線が1シリコンストリップを通過した際に生成する電子正孔対の数は、
- $\frac{0.0843 \times 10^6[\text{eV}]}{3.55[\text{eV}]} = 23746[\text{個}]$
- 電気素量 $1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$ より、この電子正孔対を電荷量に直すと、
- $23746 \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] = 3.80[\text{fC}]$
- 読み出しchipの増幅率100[mV/fC]およびオフセット200 [mV]から、宇宙線の信号電荷は、
- $3.80[\text{fC}] \times 100[\text{mV}/\text{fC}] + 200[\text{mV}] = 580 [\text{mV}]$

クラスター中のヒット数分布

