

RHIC-sPHENIX 実験での 宇宙線を用いた中間飛跡検出器 INTT の検出効率の測定

博士前期課程 数物科学専攻

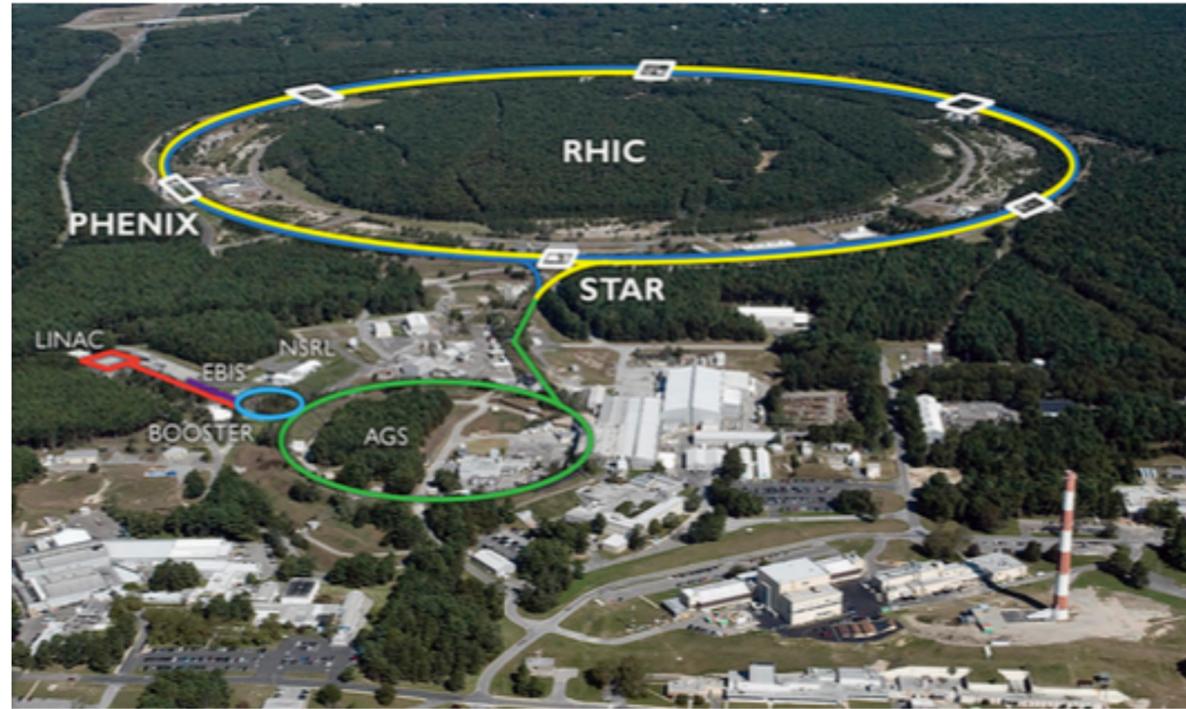
高エネルギー物理学研究室

森本菜央

目次

- 研究背景
- 研究目的
- 宇宙線解析手順・手法
 - 結果
 - まとめ
- 今後の展望

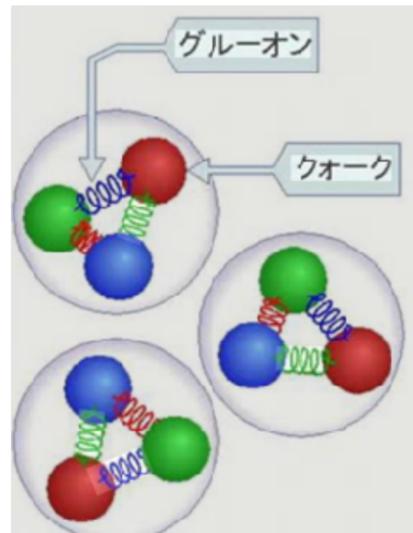
研究背景：sPHENIX実験



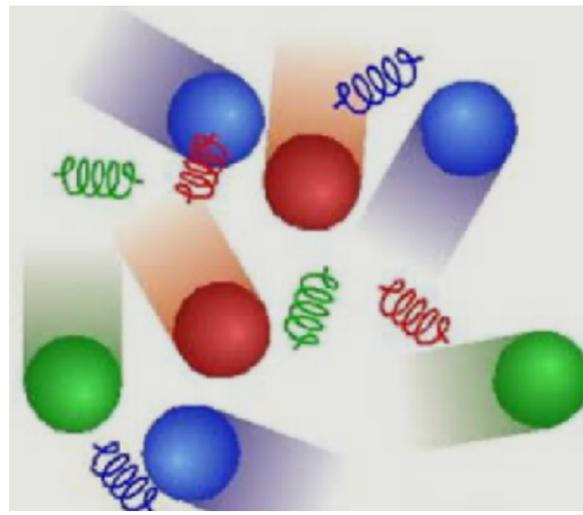
- ・ 米国ブルックヘブン国立研究所にある重イオン衝突型加速器を用いた実験
- ・ 2023年5月から開始、2026年2月に終了
- ・ 金金、陽子陽子衝突の実験 ($\sqrt{s_{NN}} = 200\text{Gev}$)
により、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) の性質の解明を目指す

QGP

- ・ 高温・高密度下でクォークとグルーオンが核子内の閉じ込めから解放される
- ・ ビックバンから数 $10 \mu\text{s}$ 後の初期宇宙で存在していたと考えられる

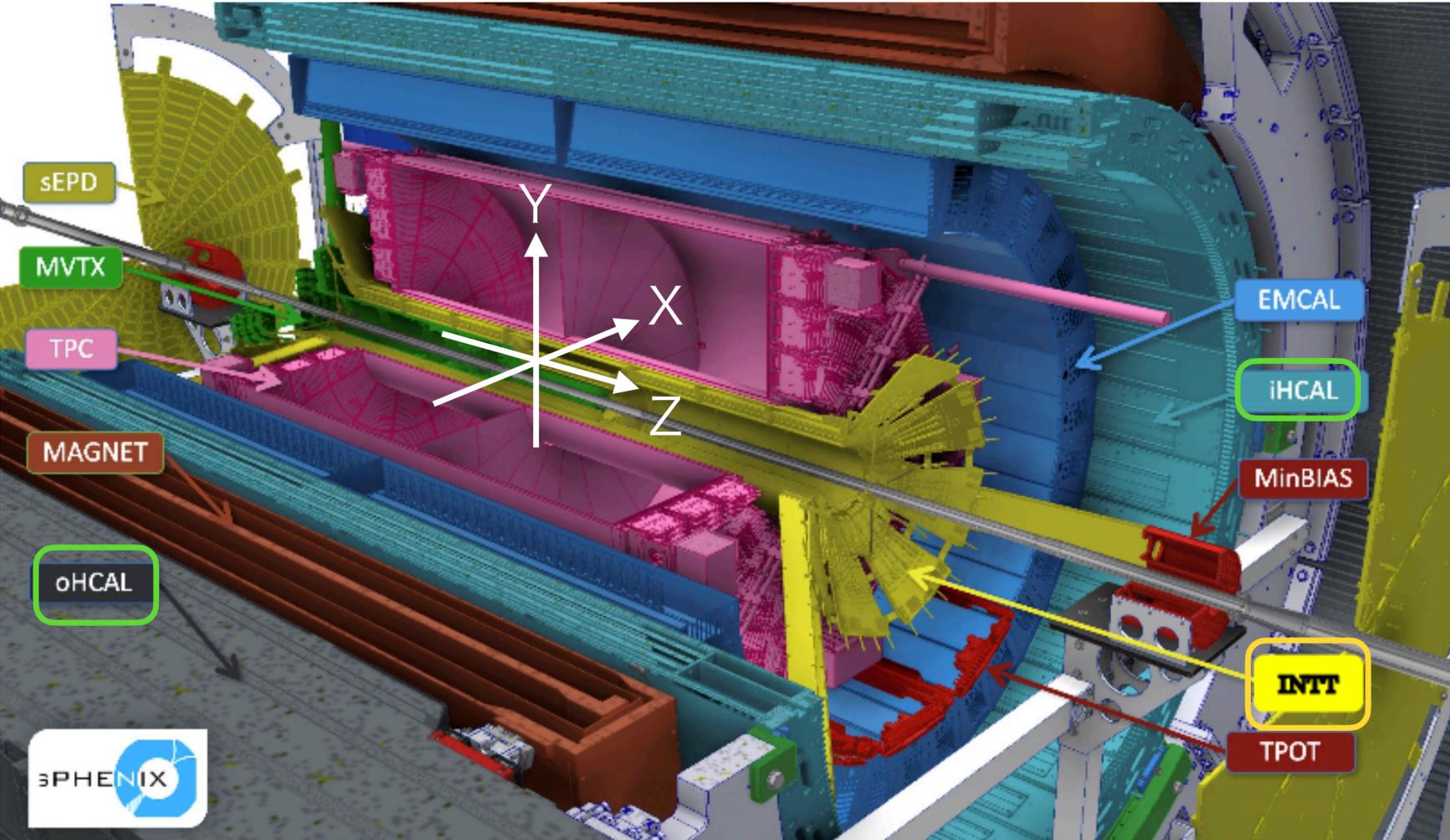


高温
➔
高密度

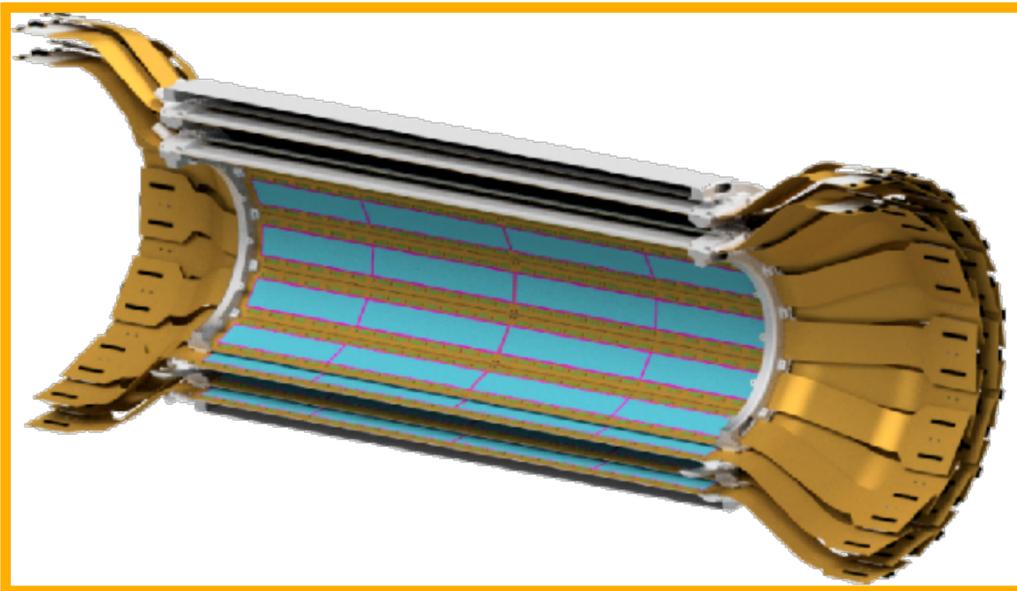


sPHENIX検出器

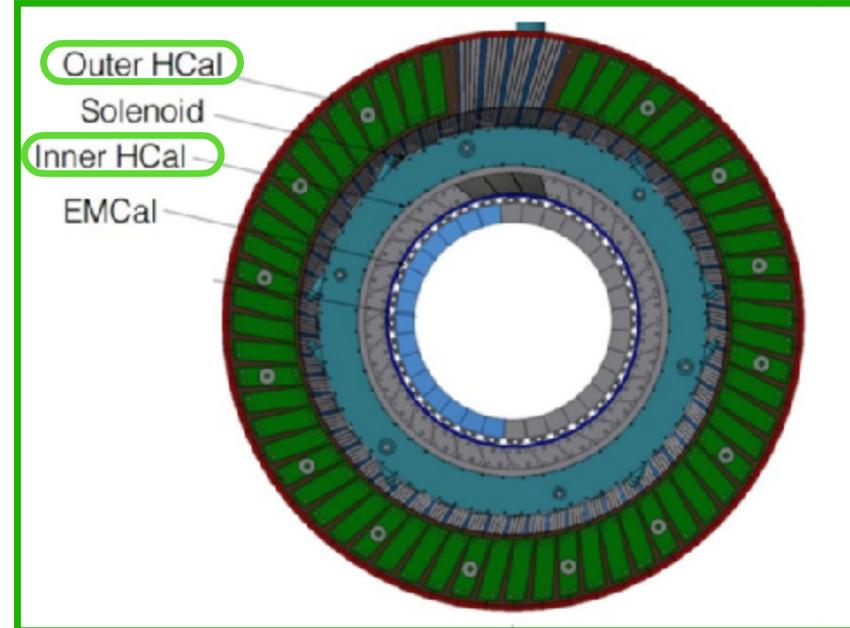
- sPHENIX 検出器は複数の検出器から構成される
- 中間飛跡検出器INTT : 2層のバレル構造を持つシリコンストリップ検出器
- ハドロニックカロリメータ (HCal) : sPHENIX検出器でもっとも外側にある検出器
ハドロンの位置とエネルギーを測定する



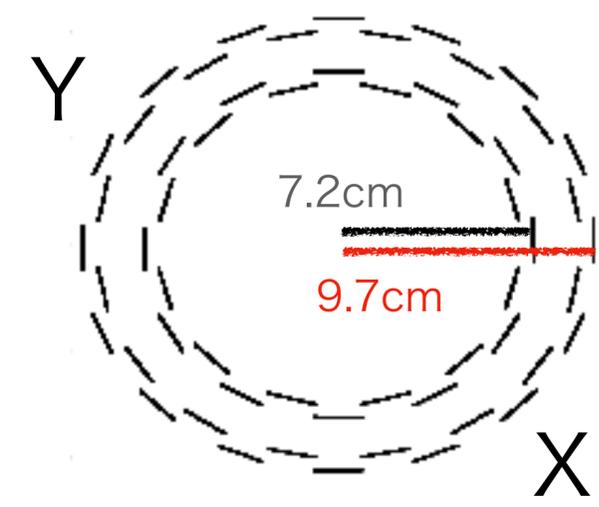
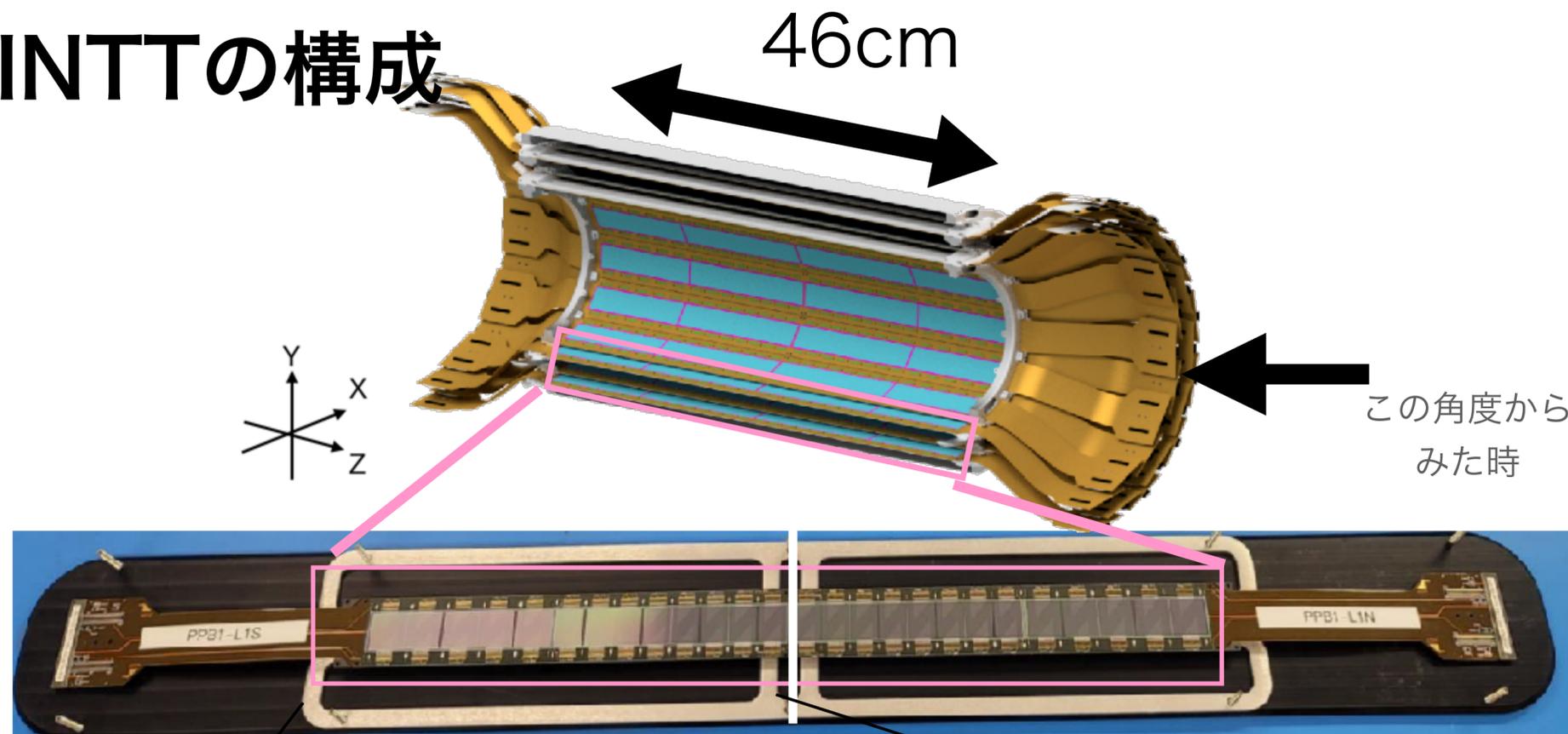
INTT



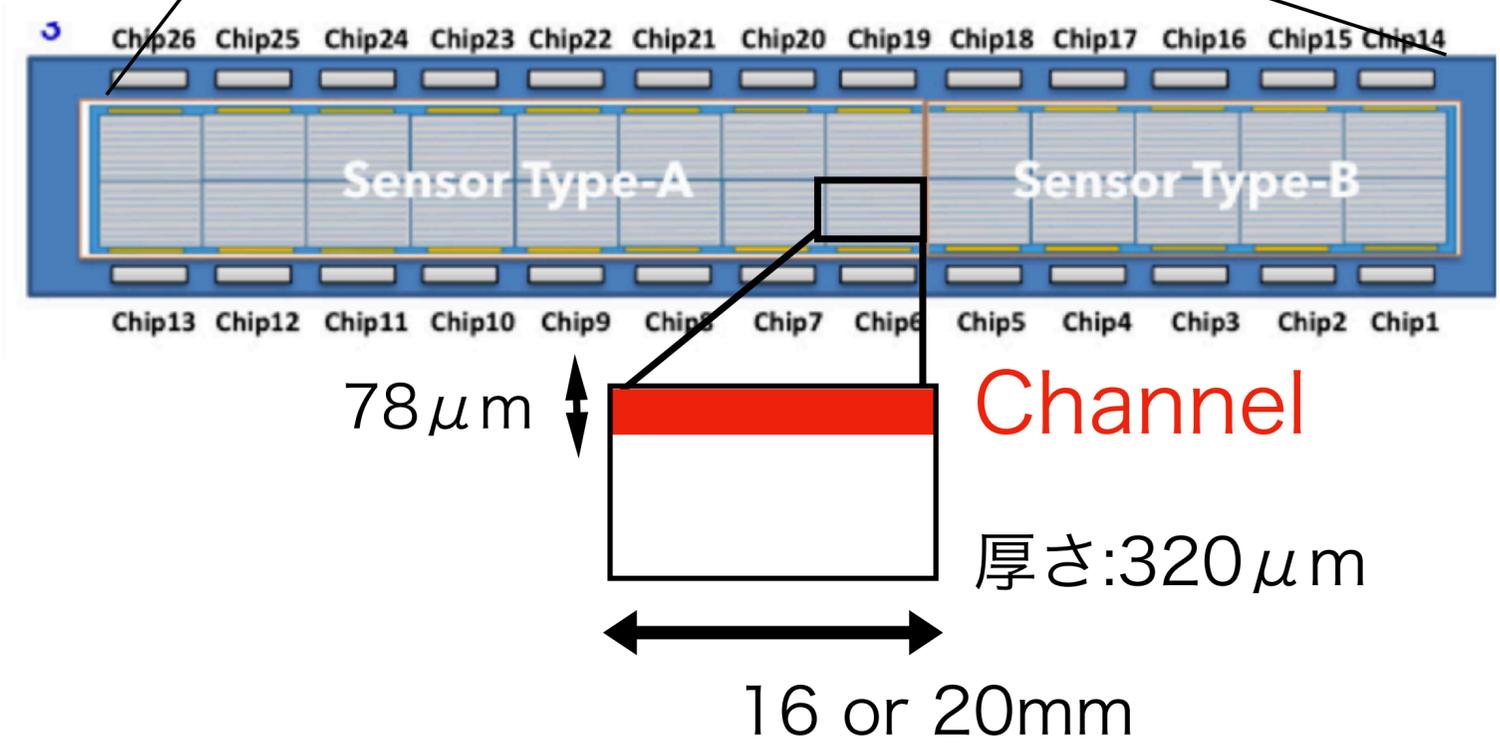
Hcal



INTTの構成

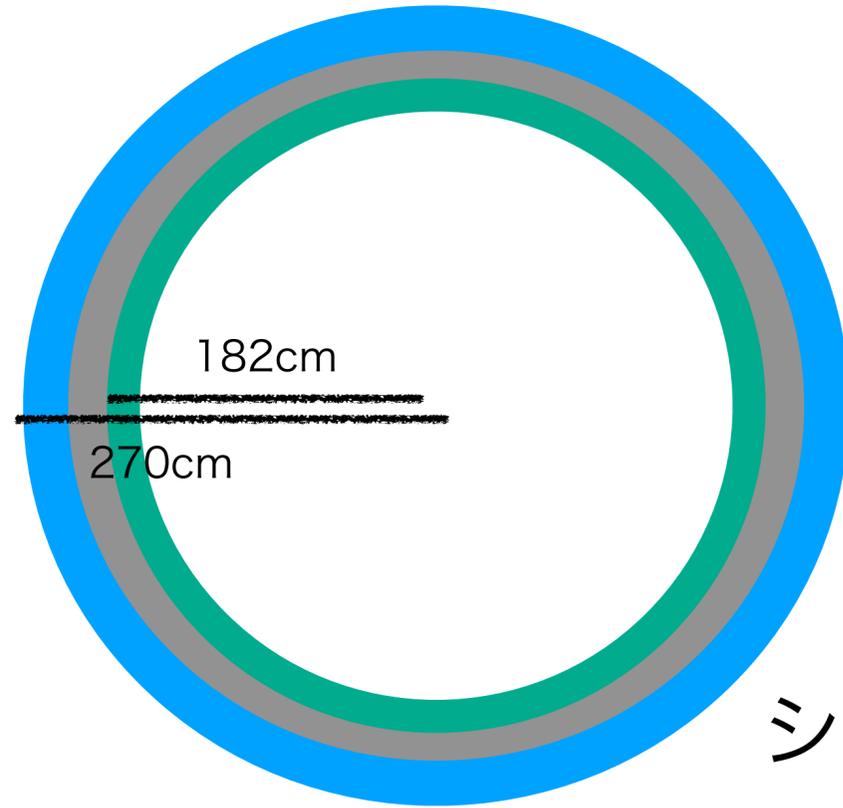
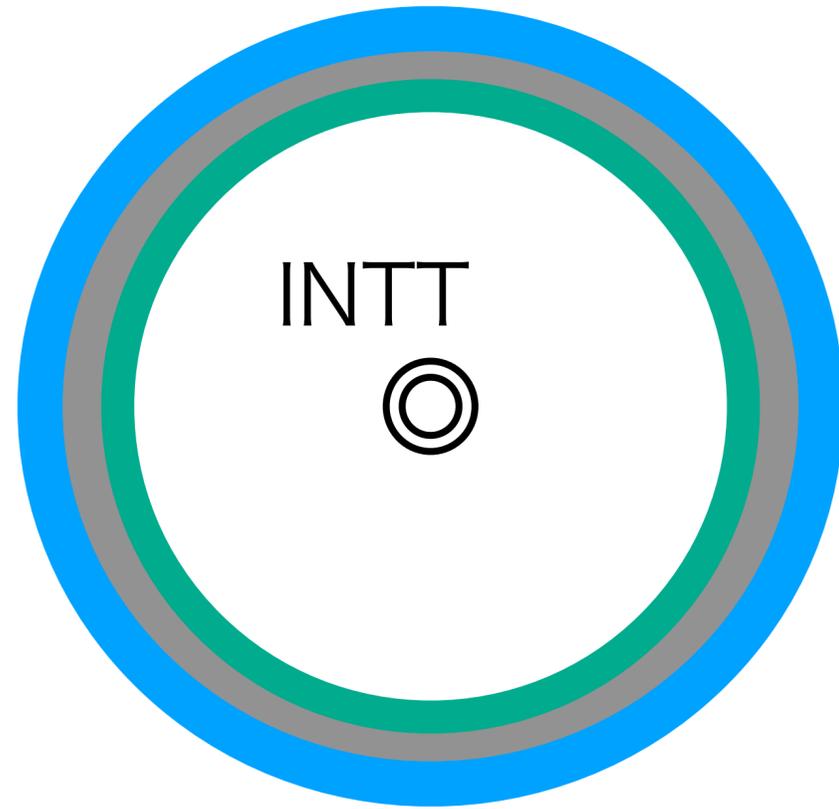


この角度から
みた時



- ビームパイプから
半径 約7-10 cmに位置
- ビーム方向 ± 23 cm、
方位角方向 2π を覆う

Hcalの構成



oHcal : ステンレス+シンチレーター
Magnet

iHcal : アルミ+シンチレーター

シャワー : 入射粒子が物質中で連鎖的に2次粒子を生成しながら増殖する現象

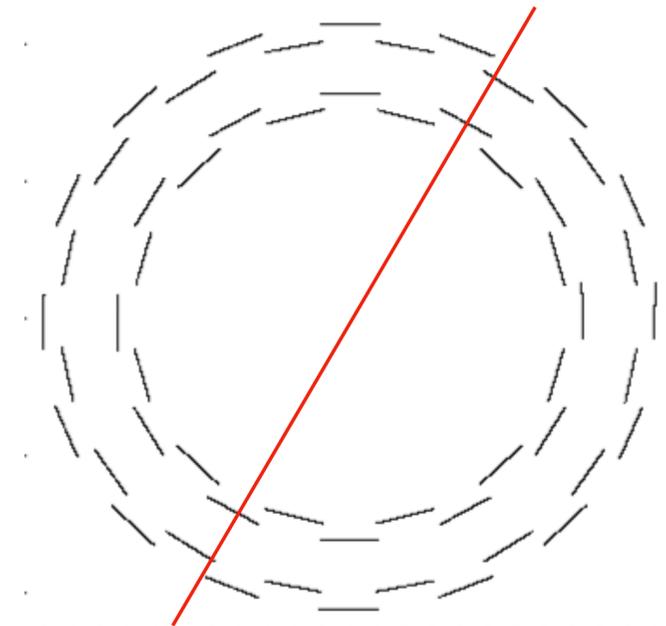
oHcal



- ①鉄でシャワーを起こす
- ②2次粒子が通過する時にシンチレーターで光を発する
- ③発した光 → エネルギー測定 → トリガー
本研究ではoHcal をトリガーとして用いる

研究目的

- 検出効率は検出器の信頼性を表す重要な指標
- 宇宙線解析はsPHENIX でのビーム・ビーム衝突よりシンプルな解析が行える
- 先行研究で理想的な環境下での検出効率は $99.53 \pm 0.05\%$ であった
- 本研究では実験環境下で宇宙線を用いた検出効率解析を行った



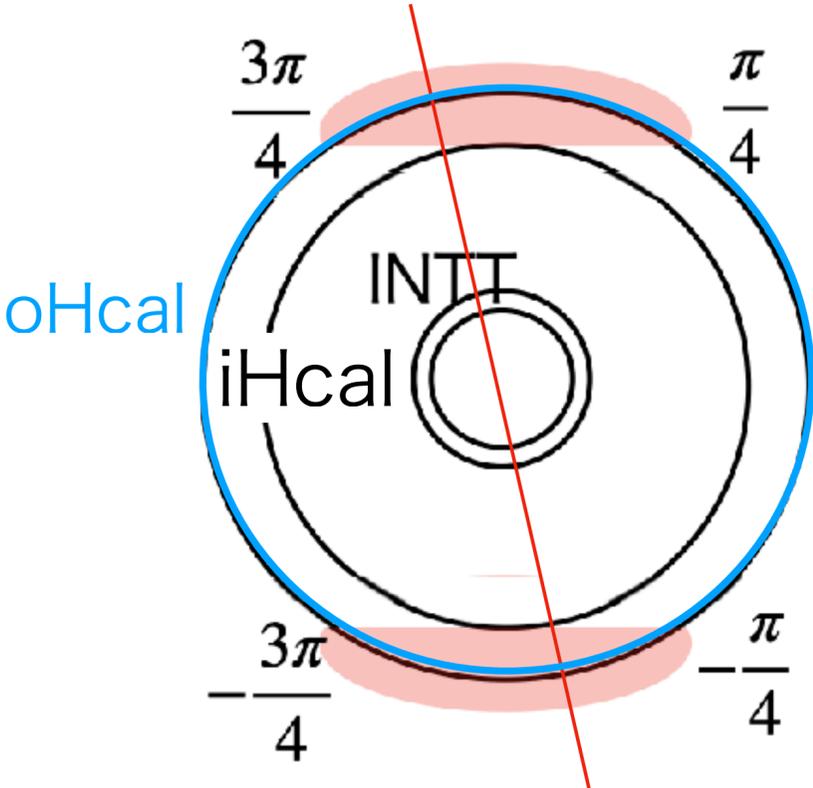
使用データ

実データ

磁場なし

oHcalの使ったトリガー範囲

同時計測



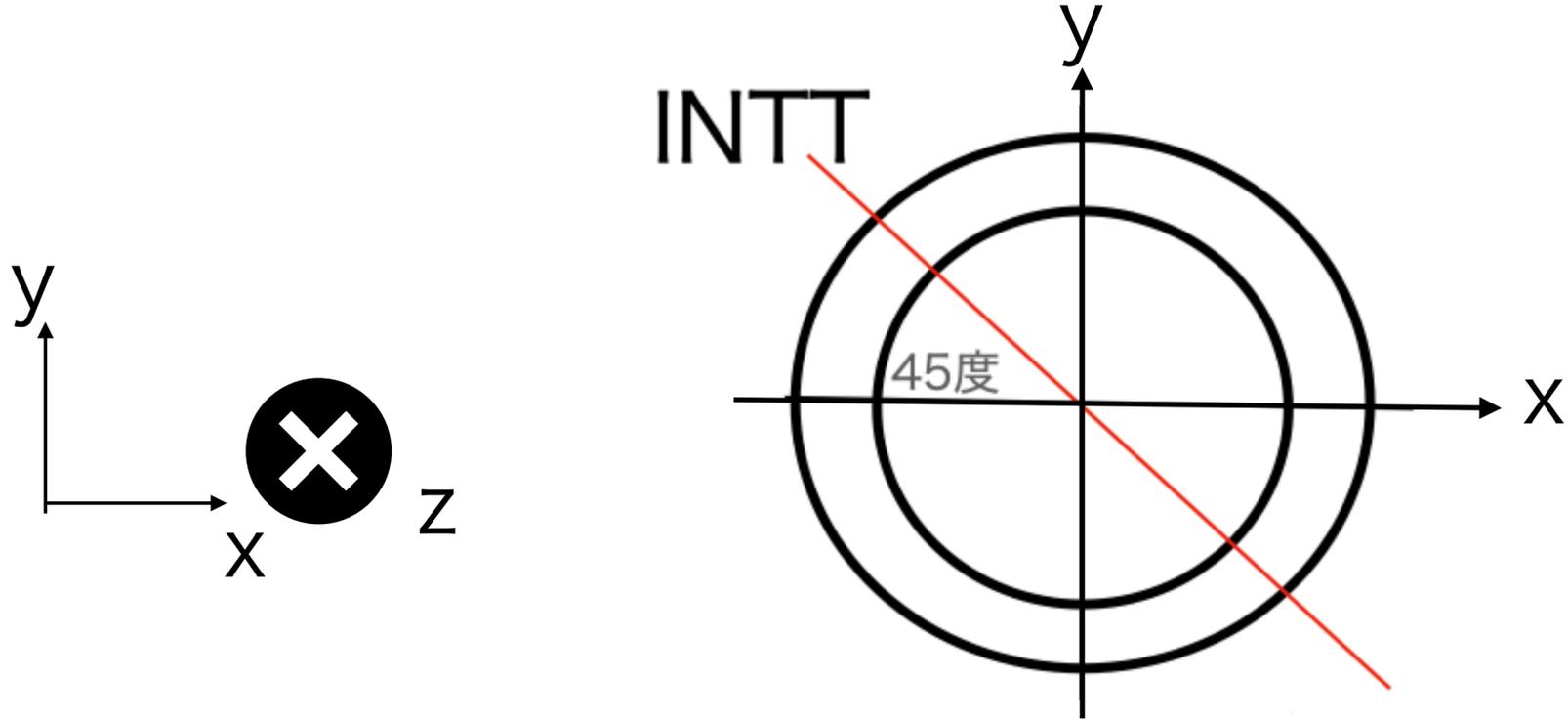
300万イベント

シミュレーションデータ

Geant4を用いたモンテカルロシミュレーション

磁場なし

45度にミュー粒子を打った



10万イベント

解析の流れ

1. ヒット選定

ヒット

クラスタリング

2. クラスタ選定

クラスタ

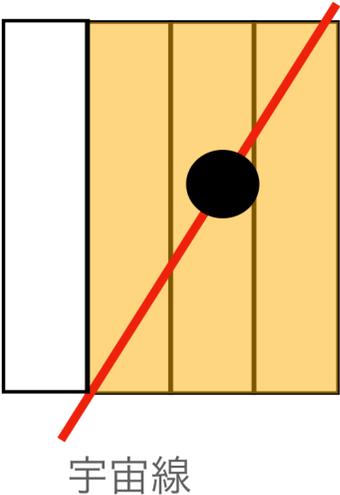
トラックリング

3. トラック選定

トラック

ヒット 閾値を超えたチャンネルの信号

クラスタリング

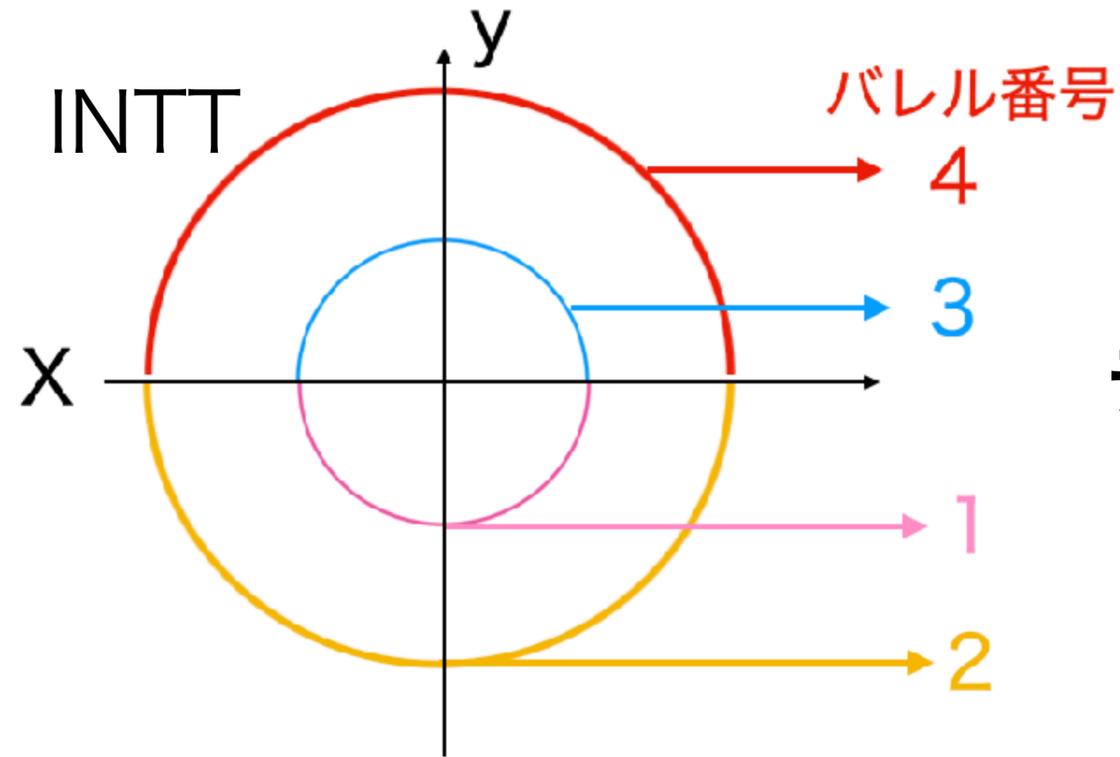


- 宇宙線が複数のチャンネルを通過することがある
- 隣接したヒットを一つのクラスタにまとめる
- ヒットの平均位置をクラスタの位置に割り当てる

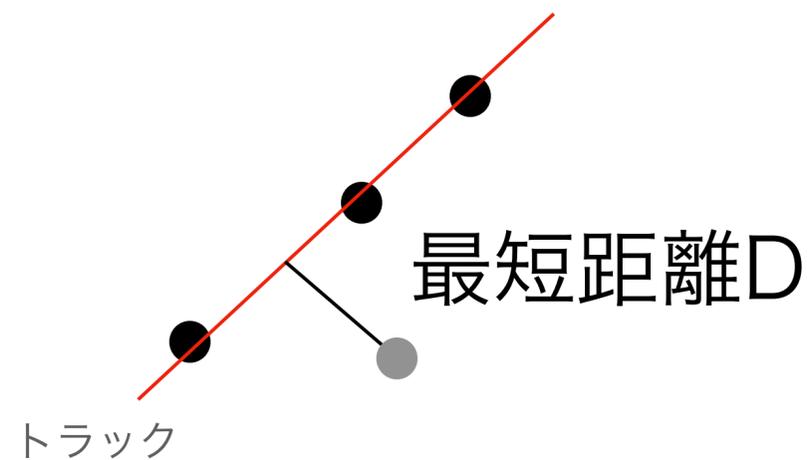
トラックキング

3つのクラスタを直線でフィットする

宇宙線解析方法



テストバレル：検出効率を算出するバレル



D：クラスターとトラックの最短距離

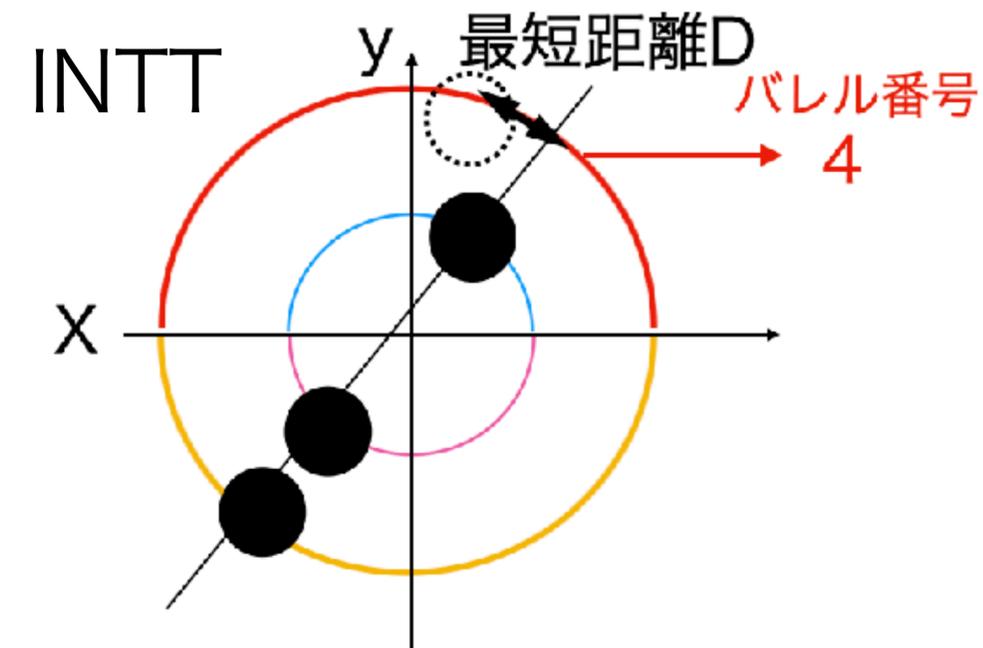
D_{xy}：最短距離Dのxy成分

D_z：最短距離Dのz成分

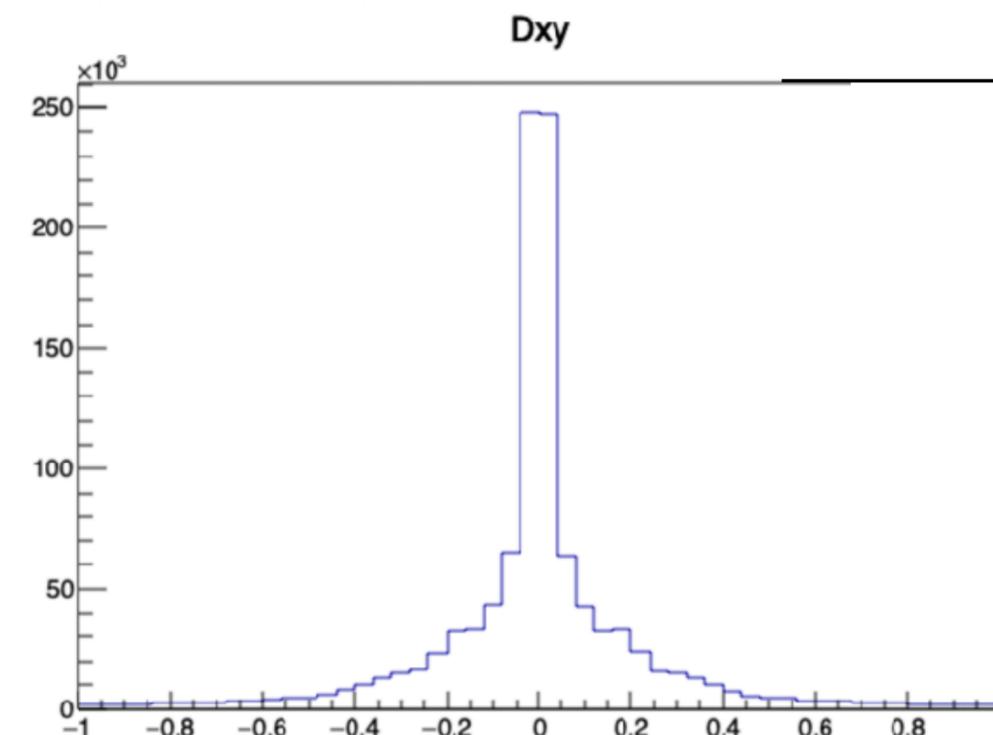
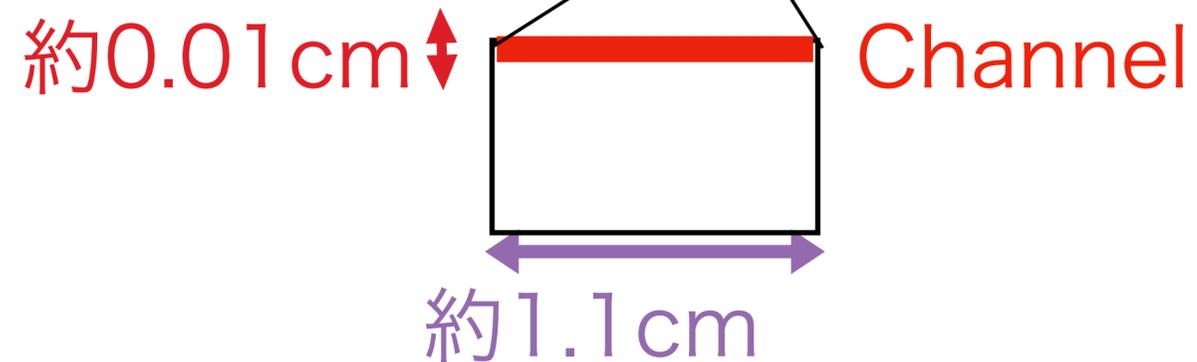
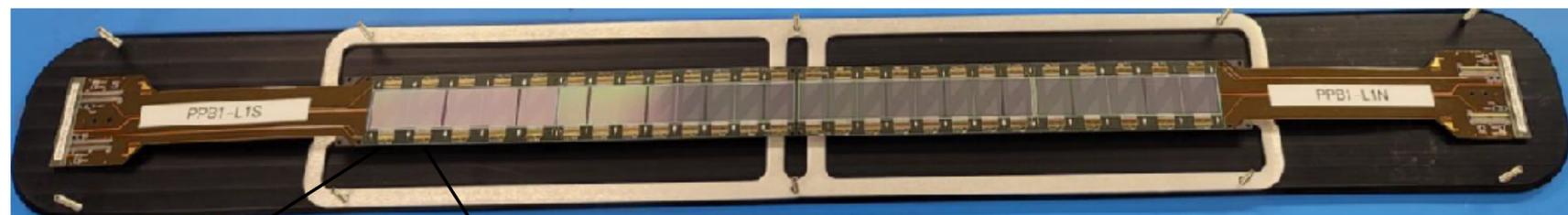
宇宙線解析方法

テストバレルごとの検出効率を求めた

$$\text{検出効率 } \varepsilon = \frac{\text{条件1を満たすクラスタートラックの数}}{\text{クラスタートラックの数}}$$

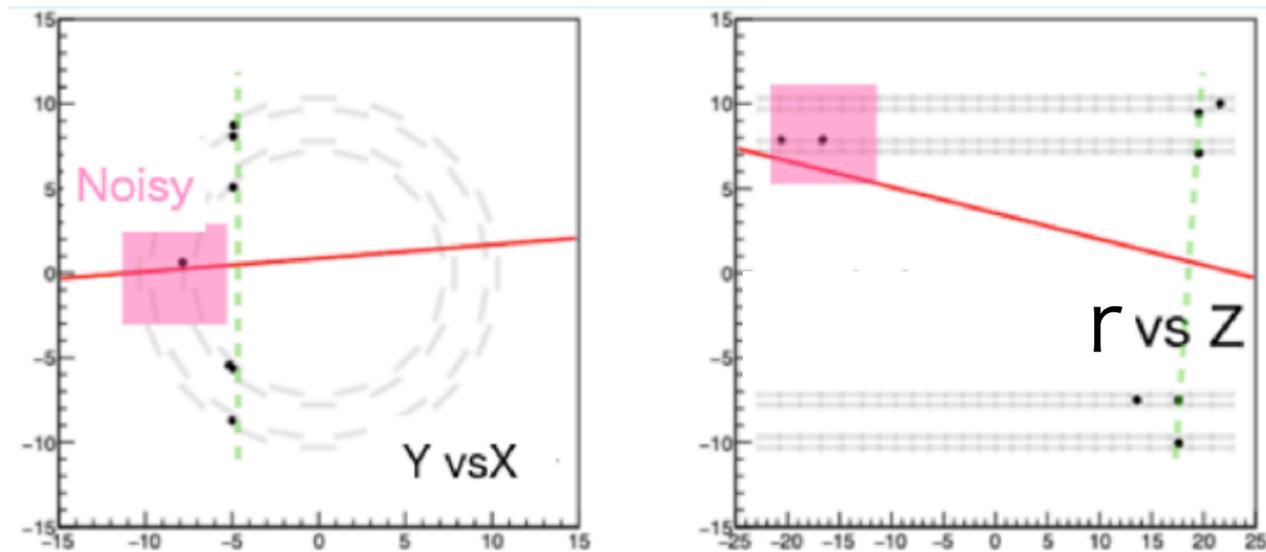


条件1: クラスタートラックの最短距離 $D_{xy} < 0.1(cm)$ かつ $D_z < 1.1(cm)$



1. ヒット選択 ノイズチャンネル

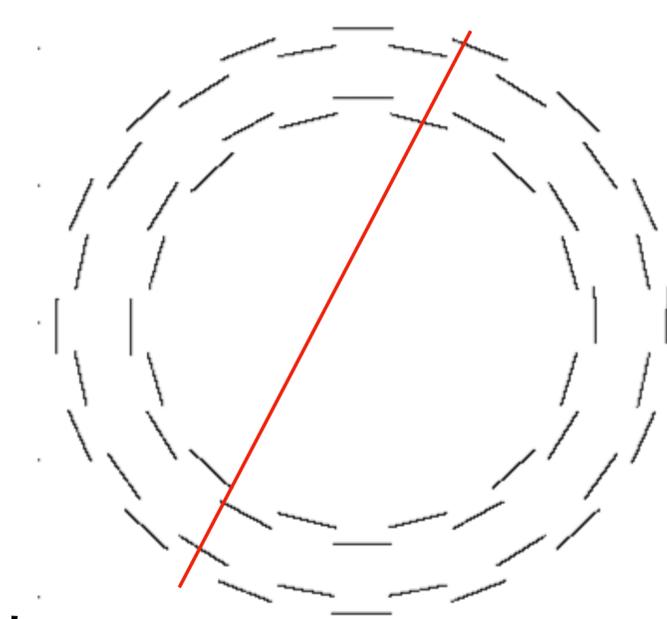
宇宙線のクラスターをxy平面、 r (半径の大きさ) z 平面で示した



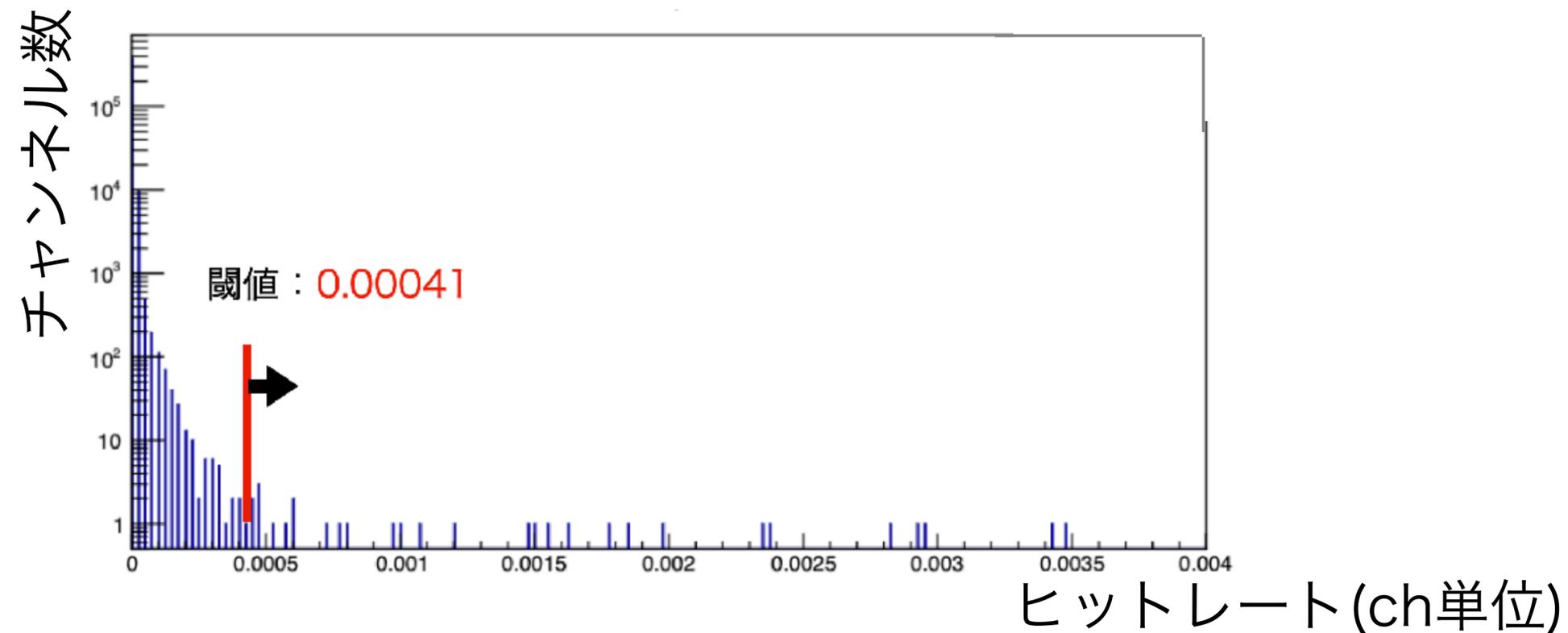
- 宇宙線トラックから外れた1点のクラスターがあることで、トラック線が正しく引けないイベントがあった
- ピンクのクラスターを構成するヒットをノイズチャンネルと呼ぶ

1. ヒット選択 ノイズチャンネルの除去

- チャンネルあたりのヒット数を求めた
- クラスタが約1つのヒットで構成される
- 宇宙線が2層のバレルを突き抜けると、4ヒットが期待される



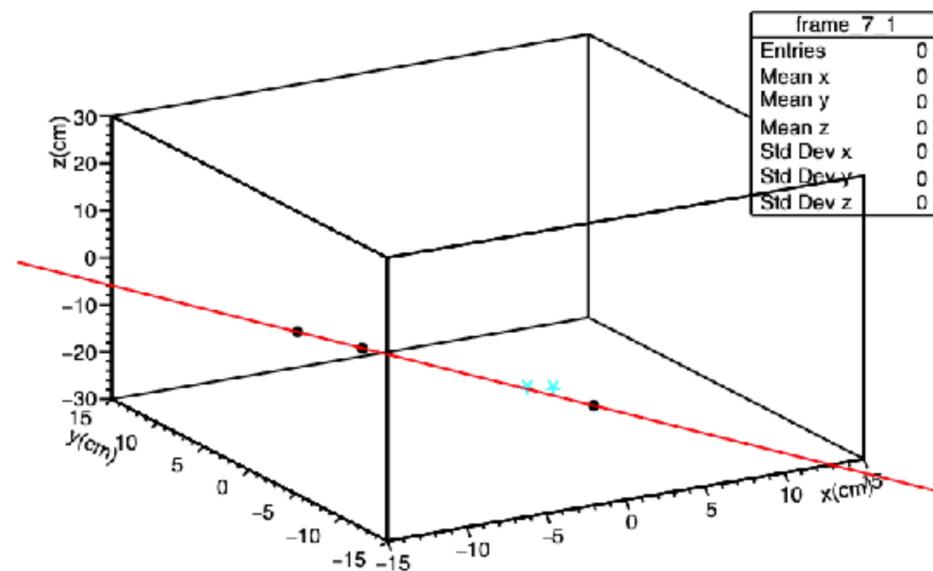
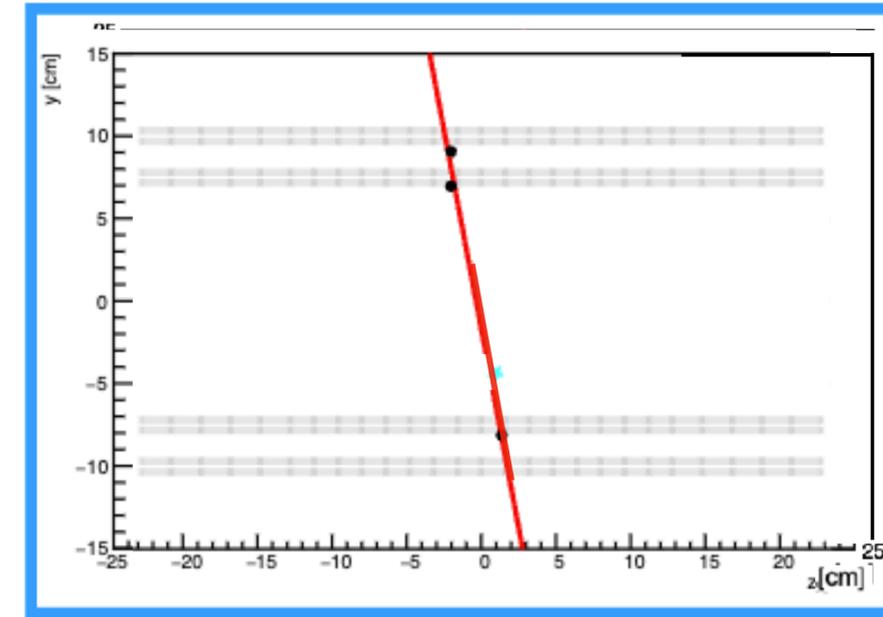
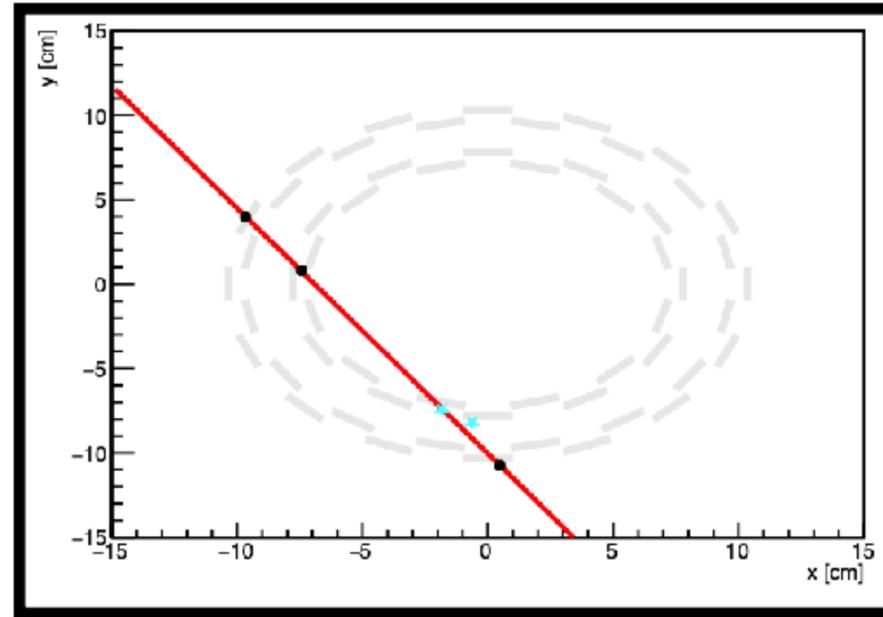
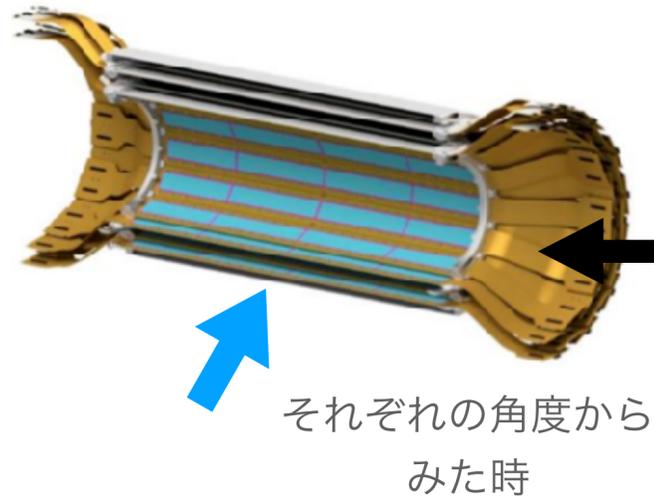
- チャンネルあたりのヒット数期待値は、 $\frac{4}{4 \times 10^5} = 0.00001$ である



- 約4倍の0.00041以上のチャンネルをノイズチャンネルとして除去した

2. イベント選択 多重テストクラスターイベントの除去

テストバレル上のクラスターを水色、その他のクラスターを黒点で示す



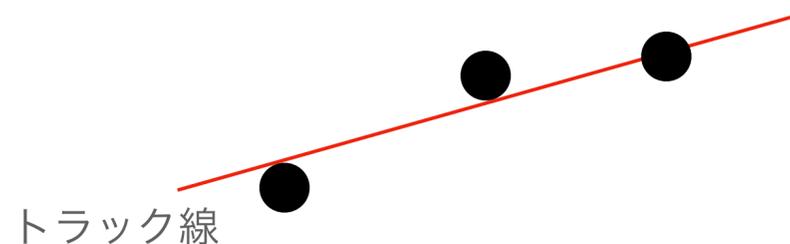
Run: 39493

EventID: 3333

- 多重テストクラスターイベント：テストバレルに2点以上クラスターを持つイベントがあった
- 多重テストクラスターイベントはデータから除去した

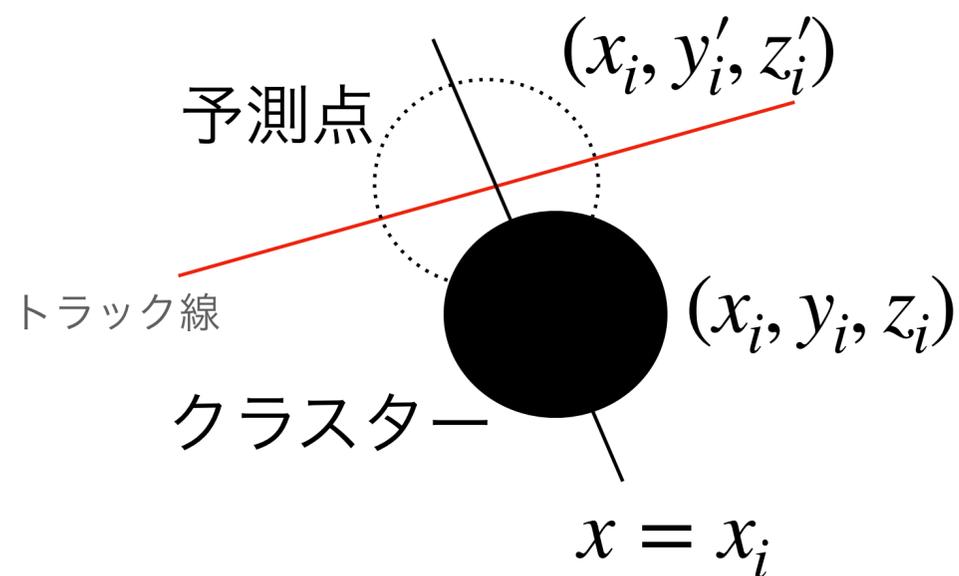
3.トラック選定

フィット：トラックと実測点の距離が最短になるようにパラメータを設定



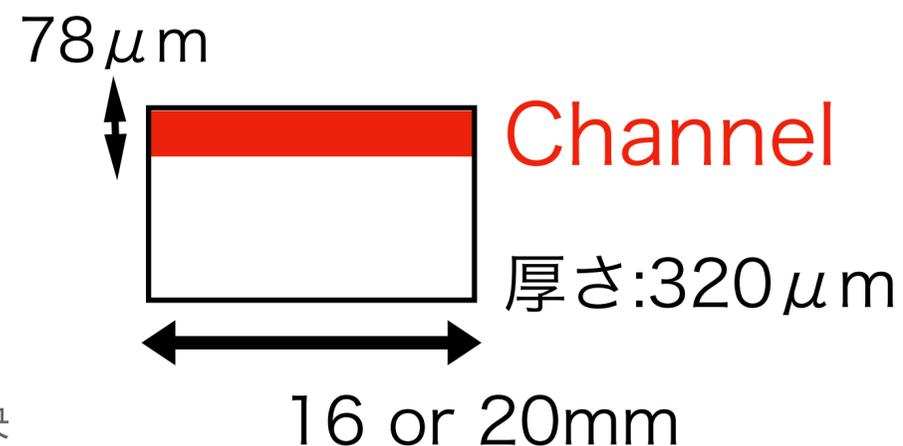
$$y = ax + b, \quad z = cx + d$$

χ^2 ：予測点とクラスターの測定誤差で重みを付けた距離差の総和



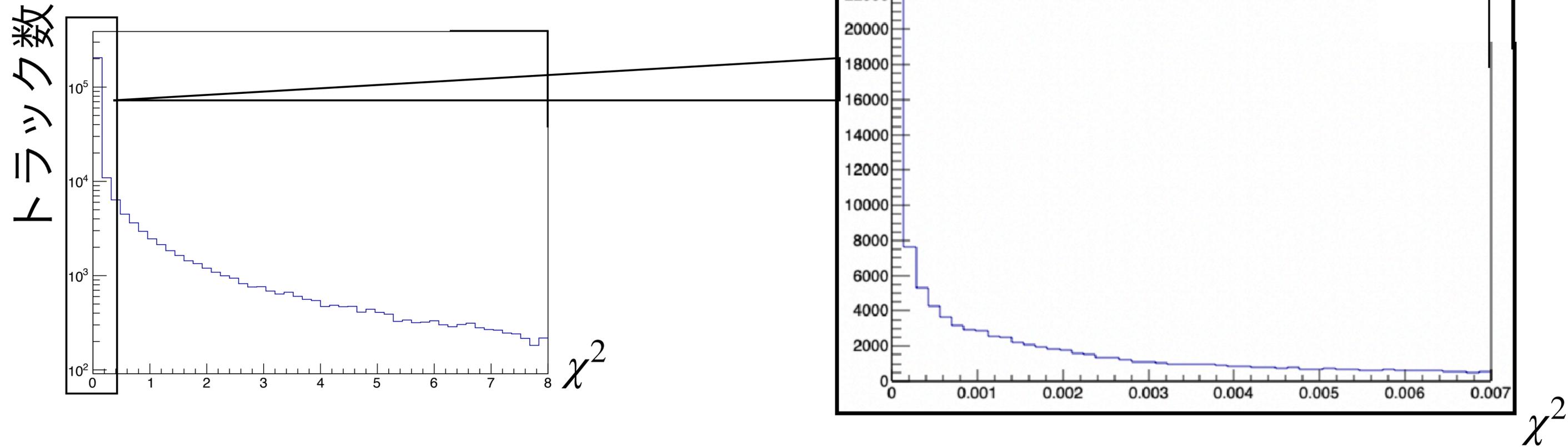
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y'_i)^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(z_i - z'_i)^2}{(\delta z_i)^2}$$

$$\delta y_i = 0.032cm \quad \delta z_i = 1.6cm$$



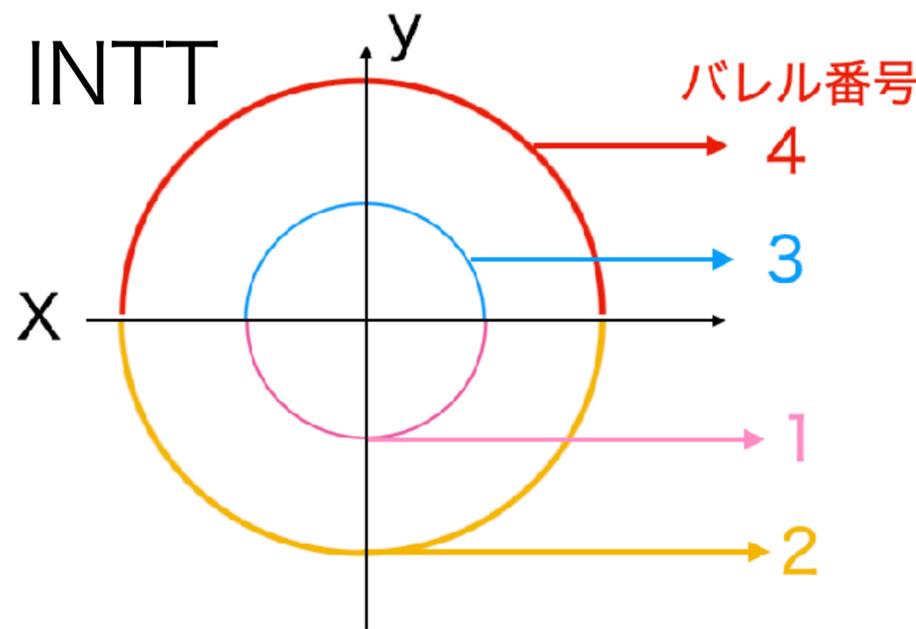
3.トラック選定 フィット判定閾値の決定

トラックごとに χ^2 を求めた



- $\chi^2 \approx 0$ 付近にピークが確認された
- 外れた事象を除去するため $\chi^2 < 0.005$ をフィット判定閾値とした

バレル別の検出効率算出結果



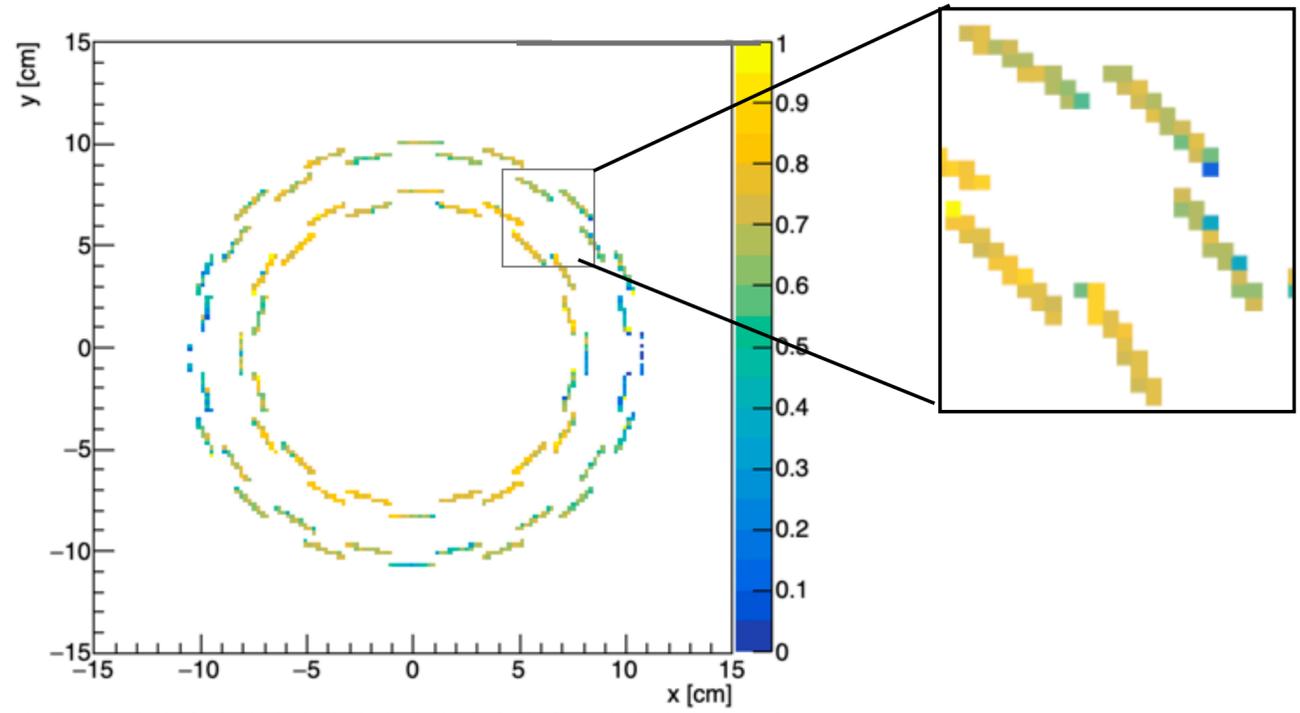
テストバレルごとに実データとシミュレーションの検出効率を計算した

	実データ				シミュレーション			
χ^2	0.05				1.0			
テストバレ	1	2	3	4	1	2	3	4
検出効率	71.4±0.3%	58.8±0.2%	72.8±0.3%	63.3±0.3%	96.78±0.004%	96.94±0.004%	98.20±0.004%	97.74±0.004%

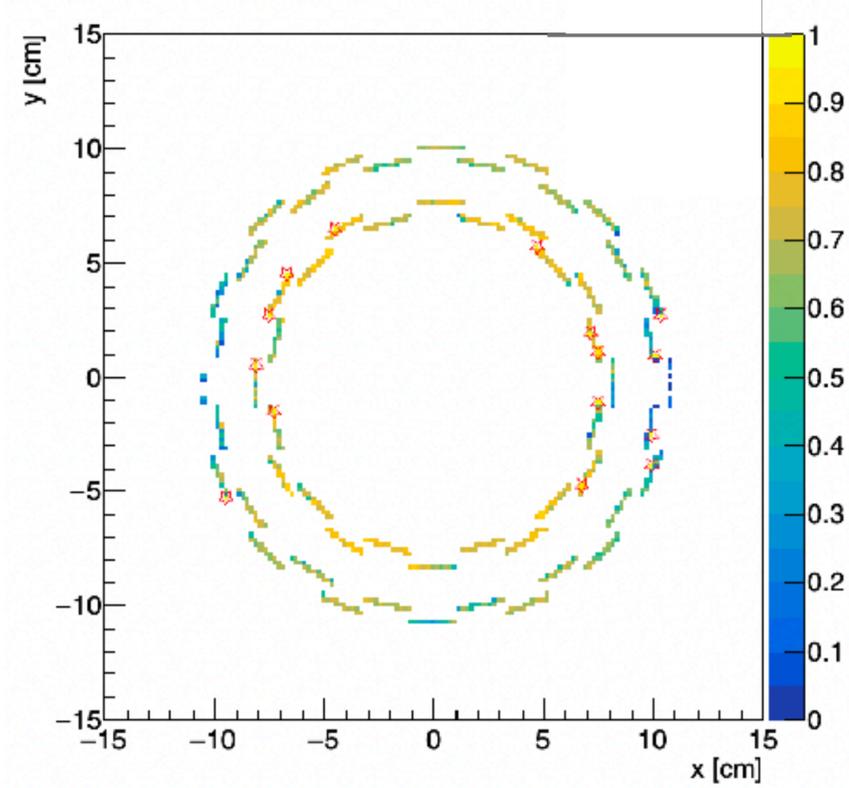
- シミュレーションデータでは98%であるのに対し、実データでの検出効率は58~72%で低い

検出効率算出結果のxy分布

- 誤差を含めた検出効率の場所依存について調べた

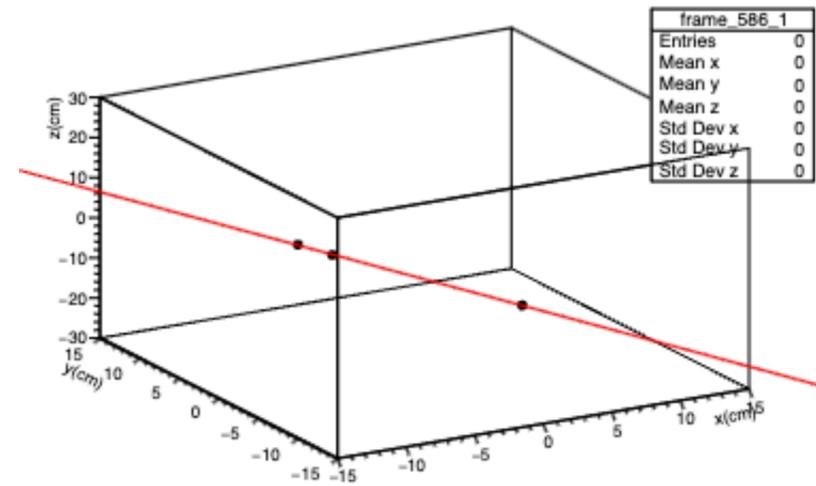
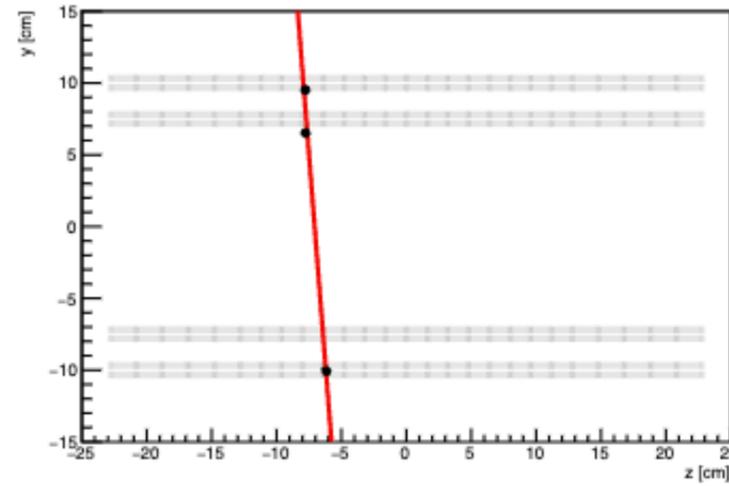
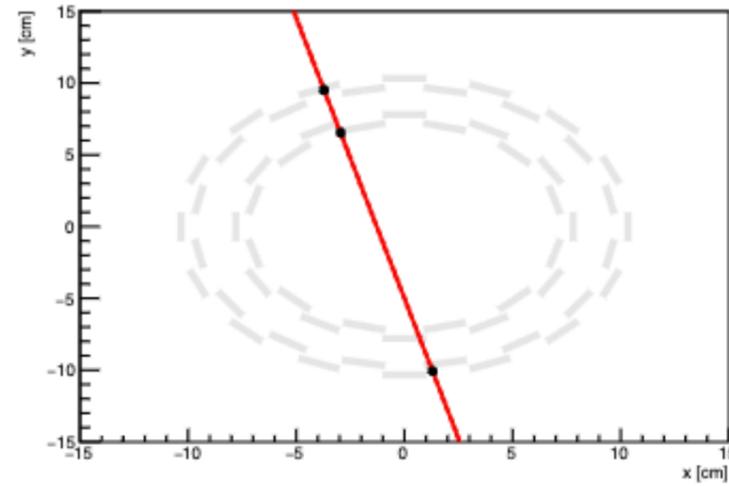


- 90%以上の検出効率をもつ点を赤い星で表した



- ラダー間の検出効率は低い
- 検出効率は位置に依存し、30%~90% が分布

非検出クラスターイベント：テストバレルにクラスターを持たないイベント



Run: 39495

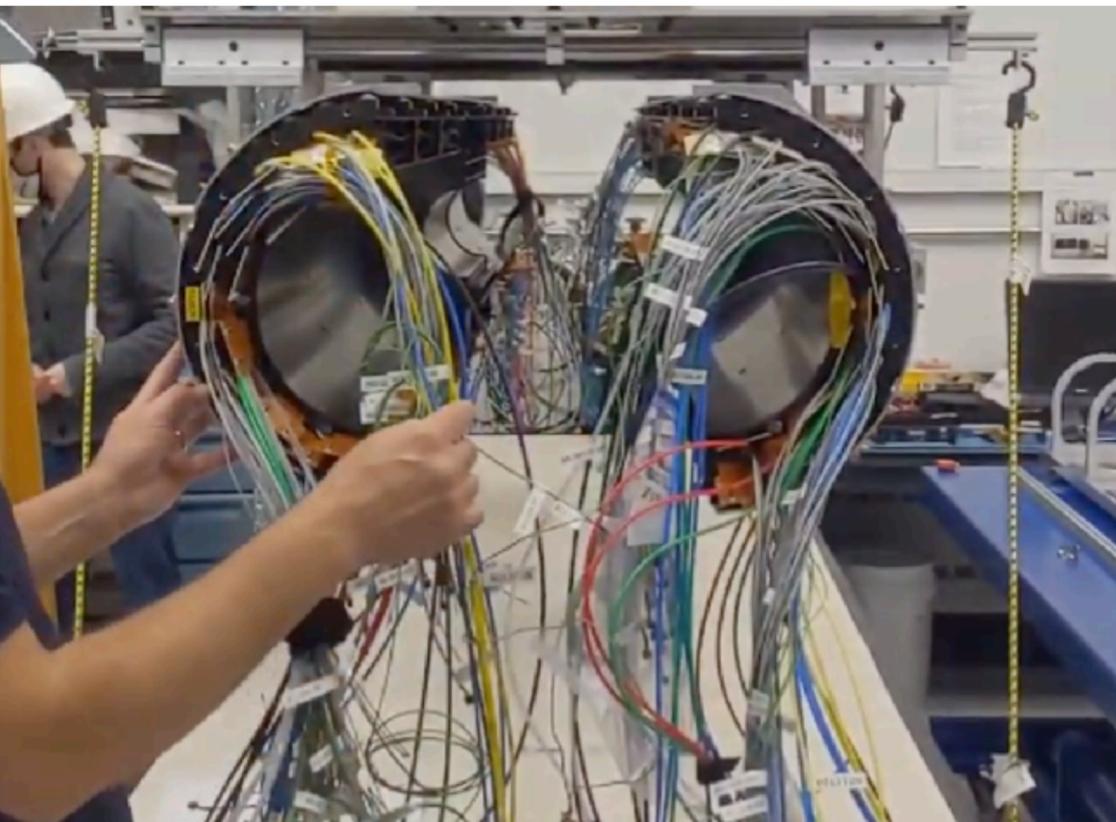
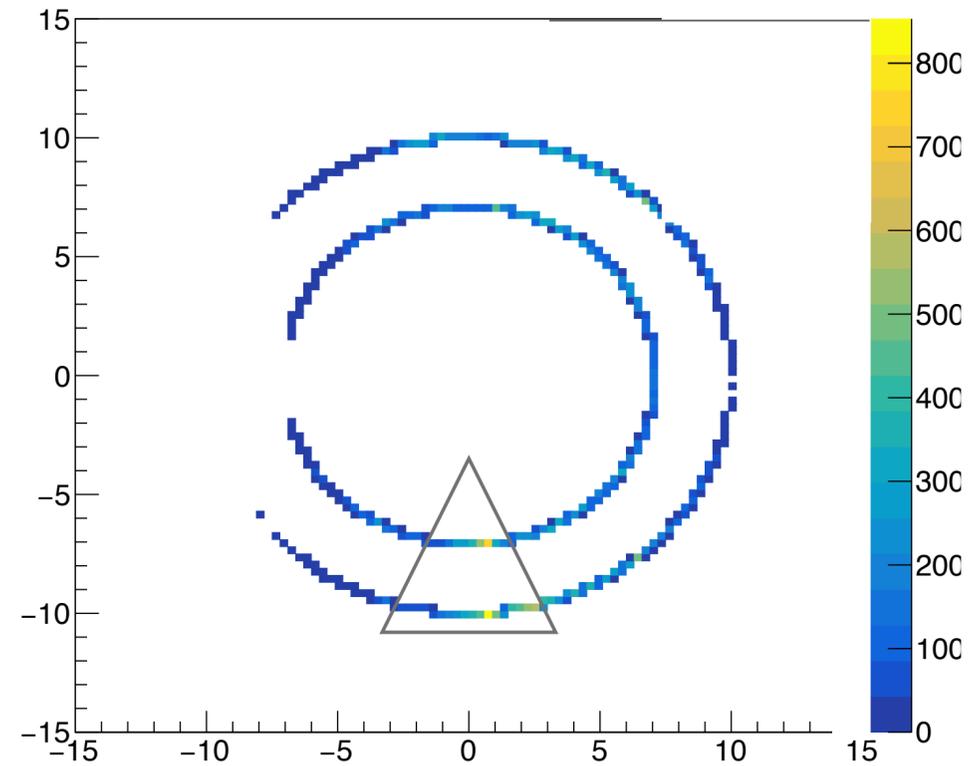
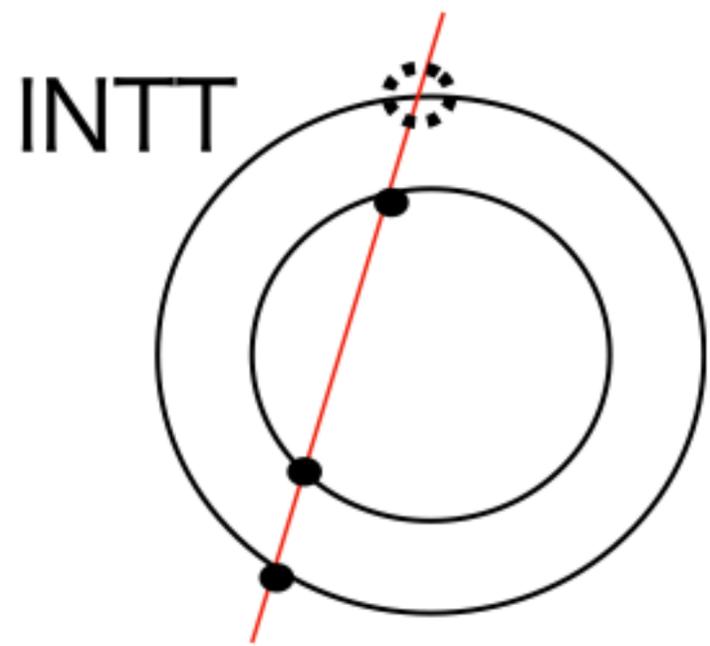
EventID: 3655

テストバレル	1	2	3	4
$\frac{\text{非検出クラスターイベントの数}}{\text{全トラック数}}$	$10.93 \pm 0.02\%$	$13.43 \pm 0.02\%$	$11.27 \pm 0.02\%$	$13.46 \pm 0.02\%$

この事象が検出効率を下げる要因の1つと考えられる

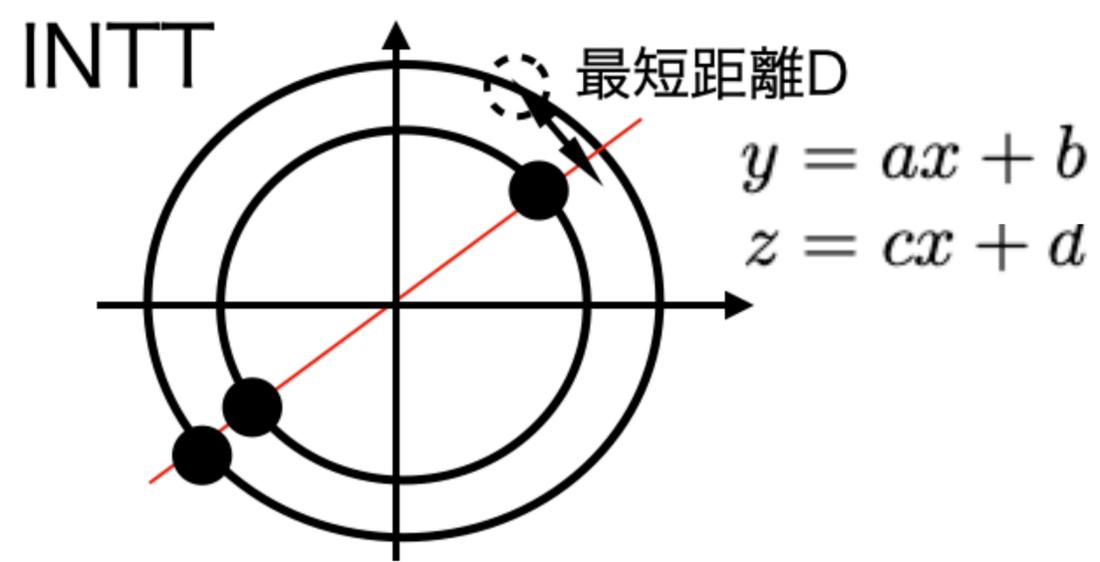
非検出クラスターイベントの予測点xy分布図

- 非検出クラスターイベントの予測点をフィットの式と円の式を使って求めた

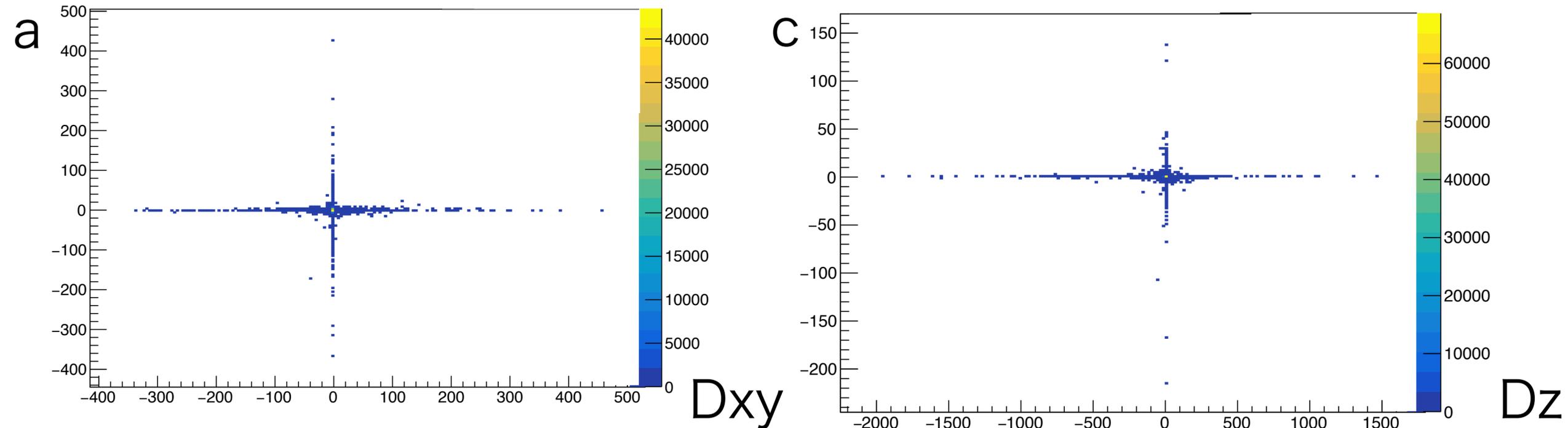


- ハーフバレル接合箇所にあたる部分で予測点が多く見つかった

傾きと最短距離Dの相関



フィット式で求めたパラメータ（傾きa,c）と最短距離D_{xy},D_zの相関図をそれぞれ表す



- 明らかに大きいD_{xy},D_zが存在した
- D_{xy}、D_zが大きくなる傾向として傾きa,cが小さいことがわかった

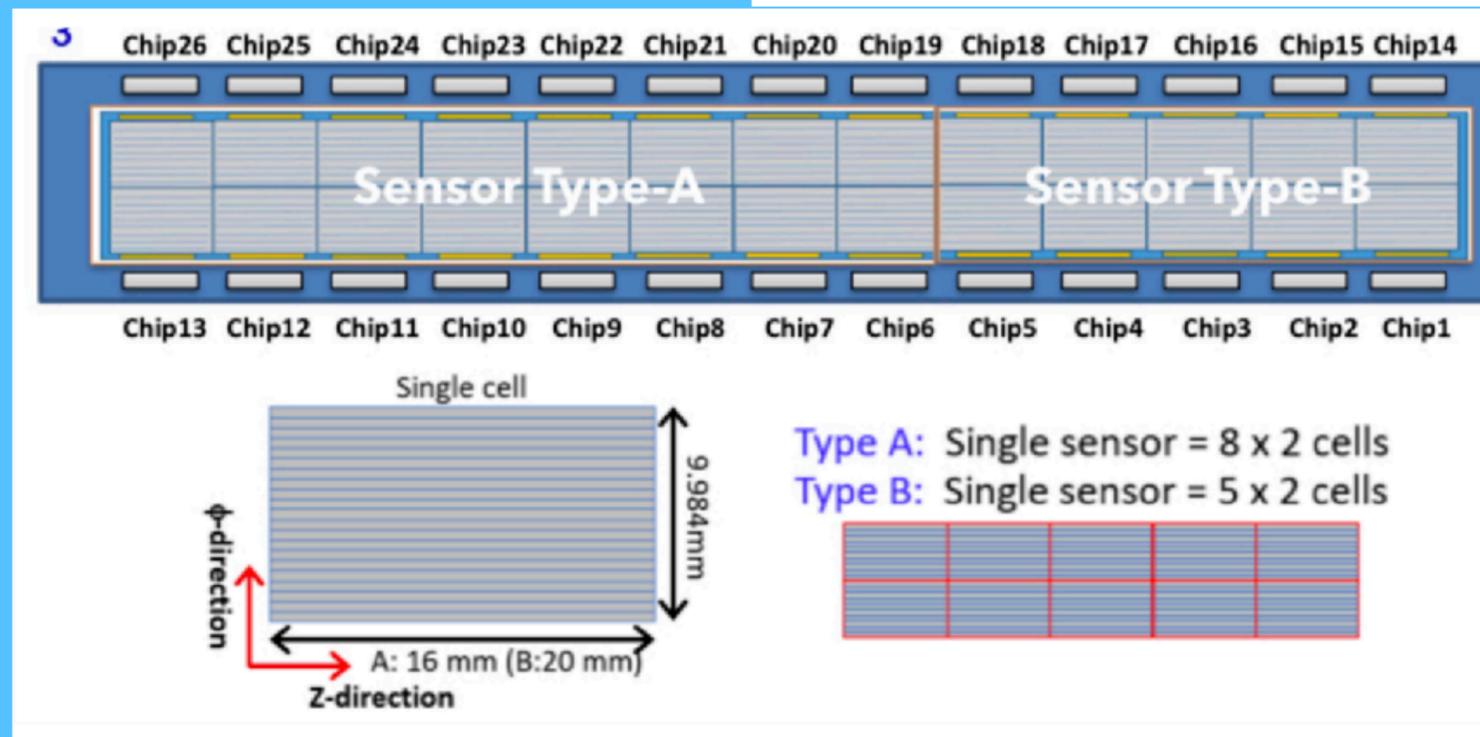
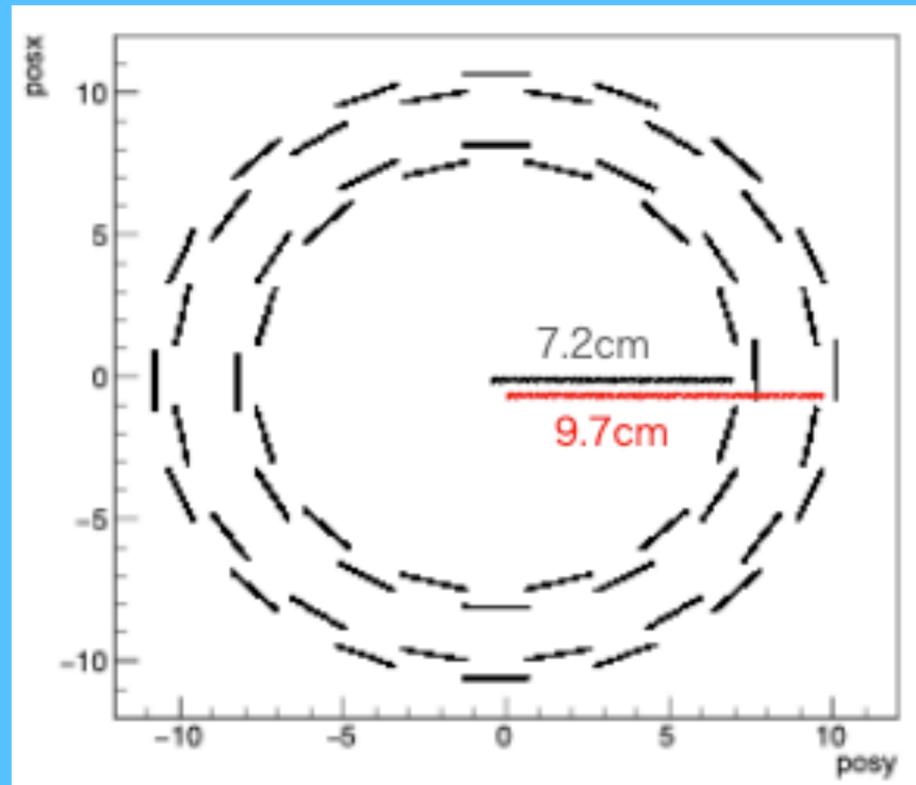
まとめ

- sPHENIX実験に組み込んだ状態でINTT検出効率を宇宙線を用いて求めた
- 実データで求めたバレル別の検出効率は58~72%だった
 - シミュレーションでのバレル別検出効率は96~98%
 - 先行研究でのビームテストでは $99.53 \pm 0.05\%$ であった
 - 場所によっては最小30%、最高90%の検出効率
- ラダー間の検出効率は低い傾向
 - 非検出クラスターイベントが全体の10%見つかった
 - 値の大きい最短距離Dが見つかり、それらは傾きが小さい傾向にあった

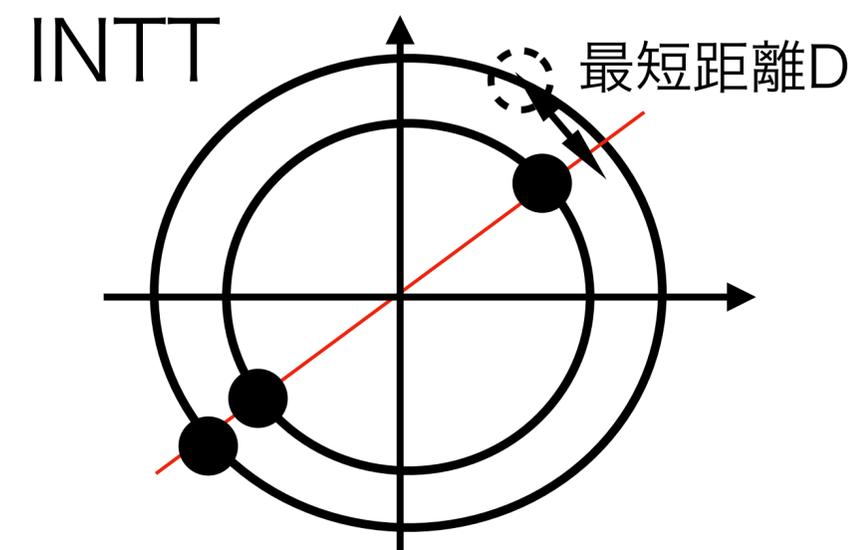
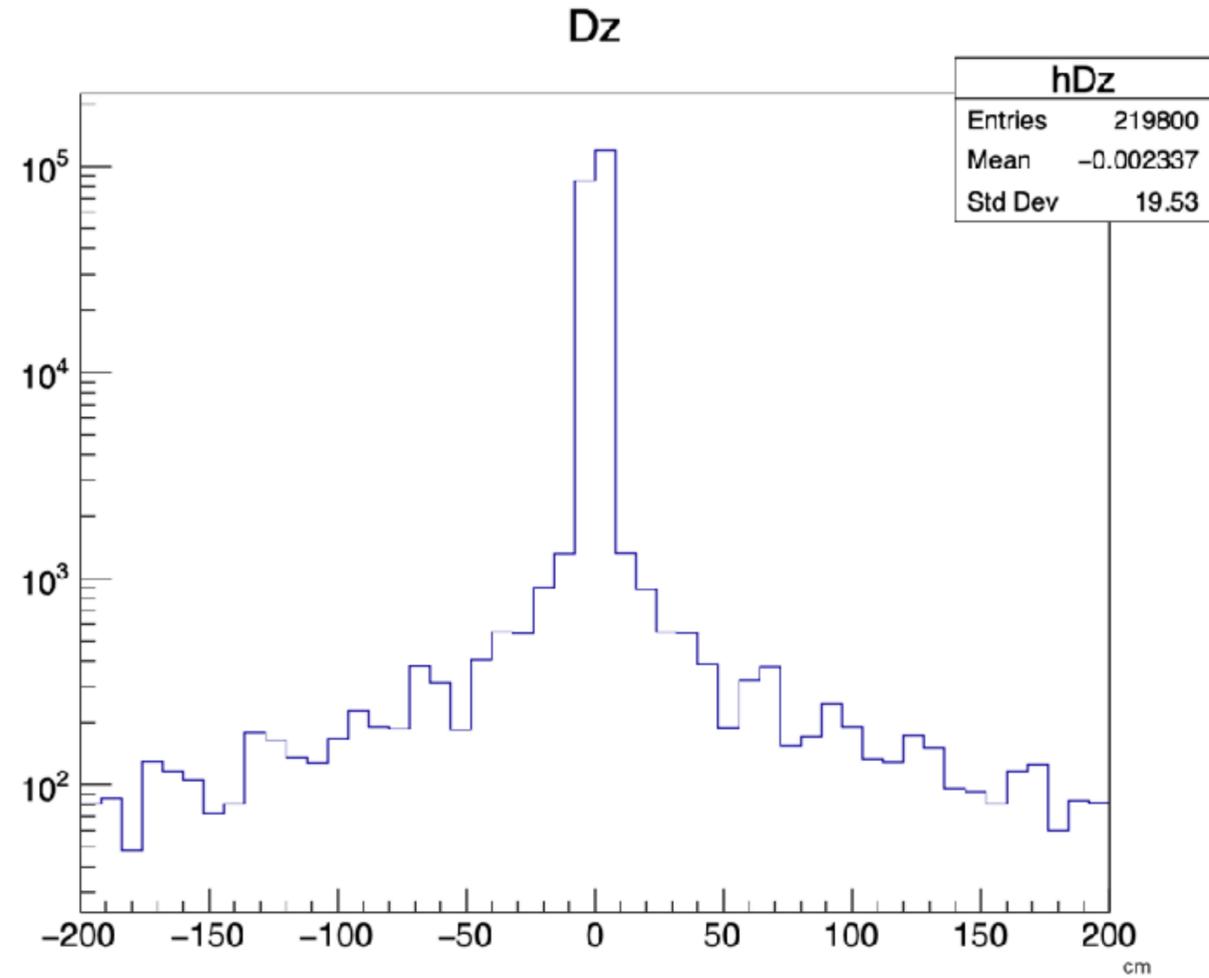
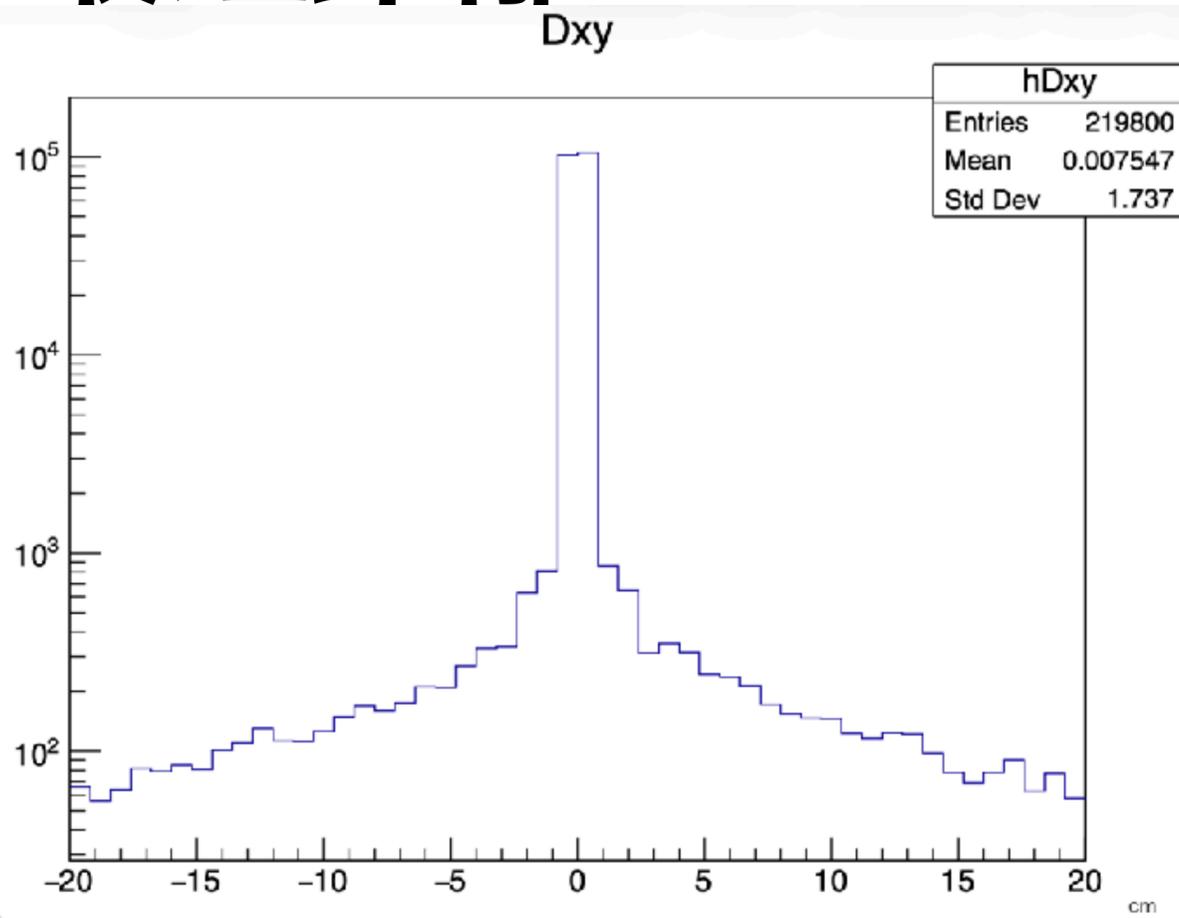
考察と今後の展望

- 検出効率の低さはラダー間の検出効率の低さと関係している
 - 宇宙線がラダー間をすり抜ける事象が考えられる
- D_{xy} 、 D_z の大きい値の原因
- 予測点がバレル上にはない事象の除去

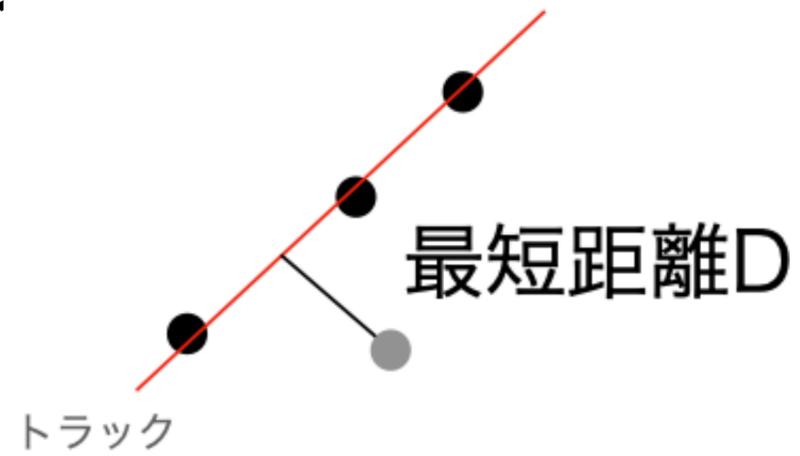
Back up



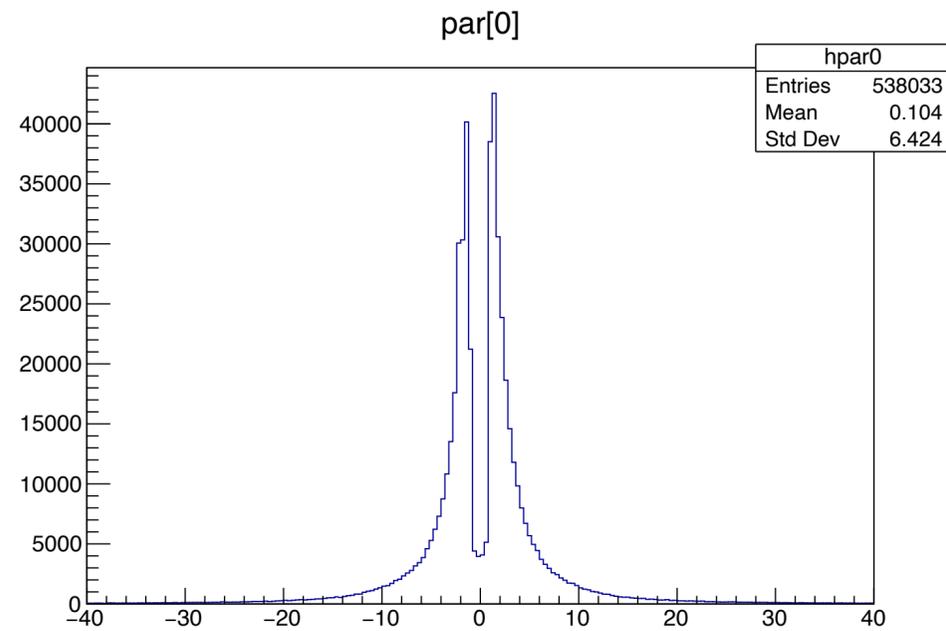
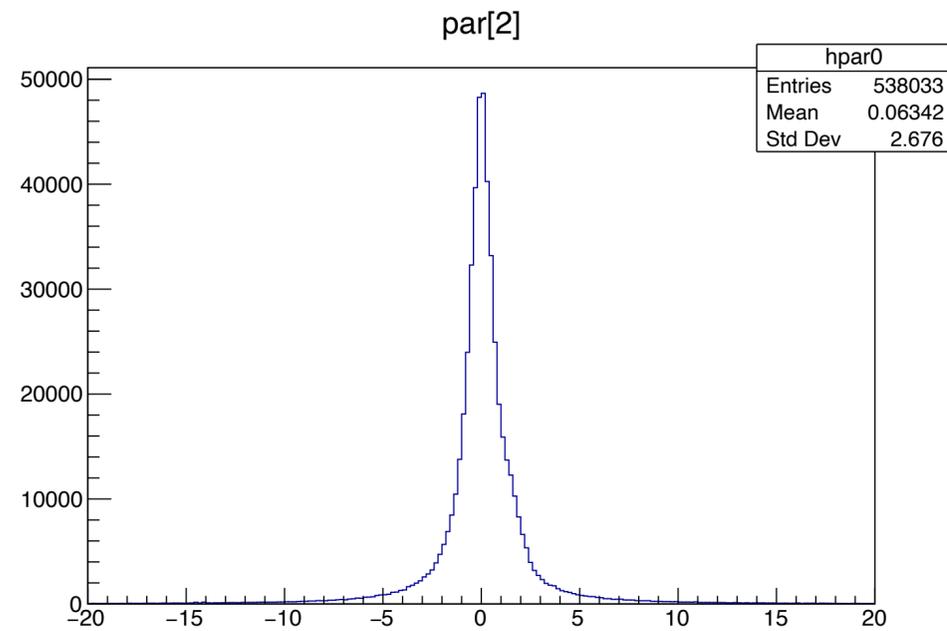
最短距離D



傾き a, c

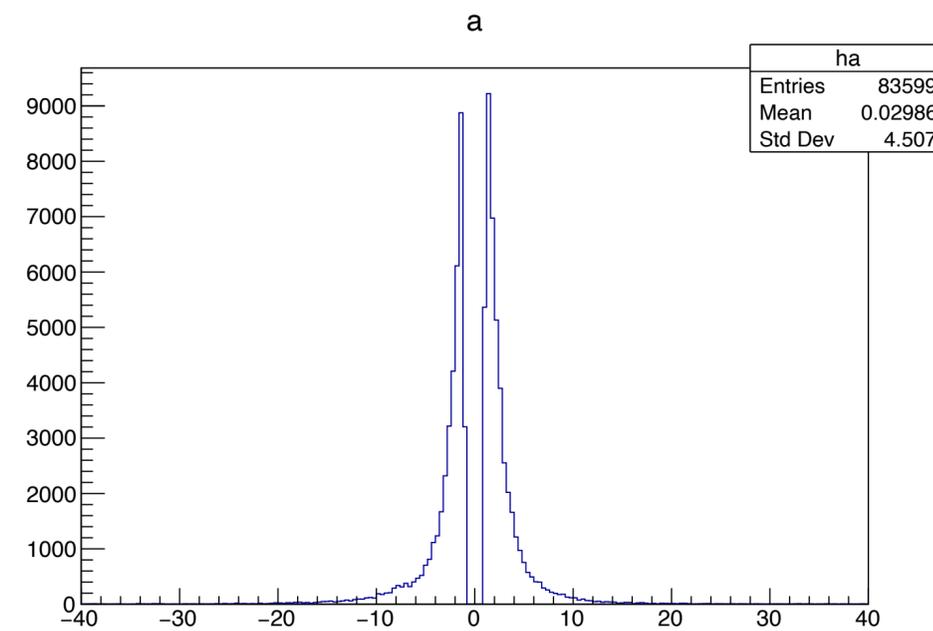
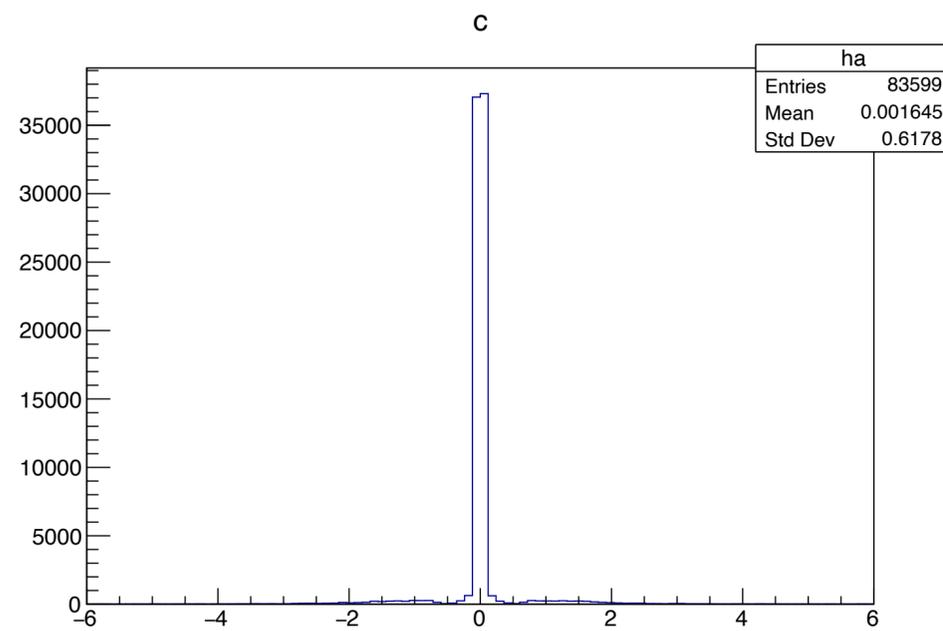


フィット判定閾値導入前



傾き a,c

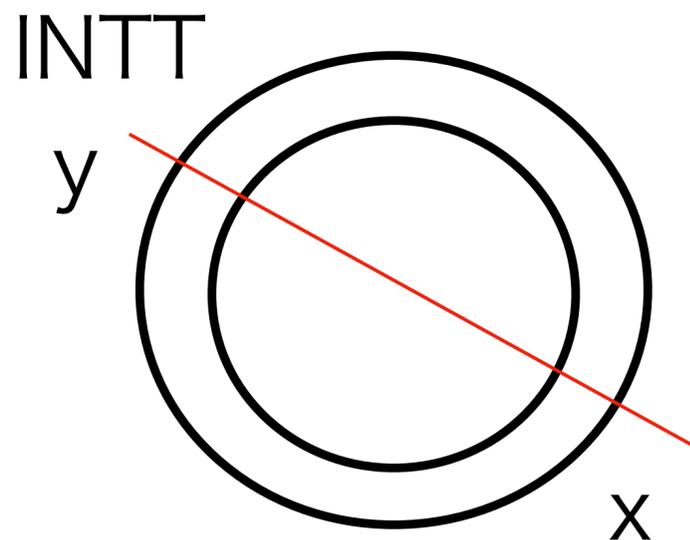
フィット判定閾値導入後



使用データ

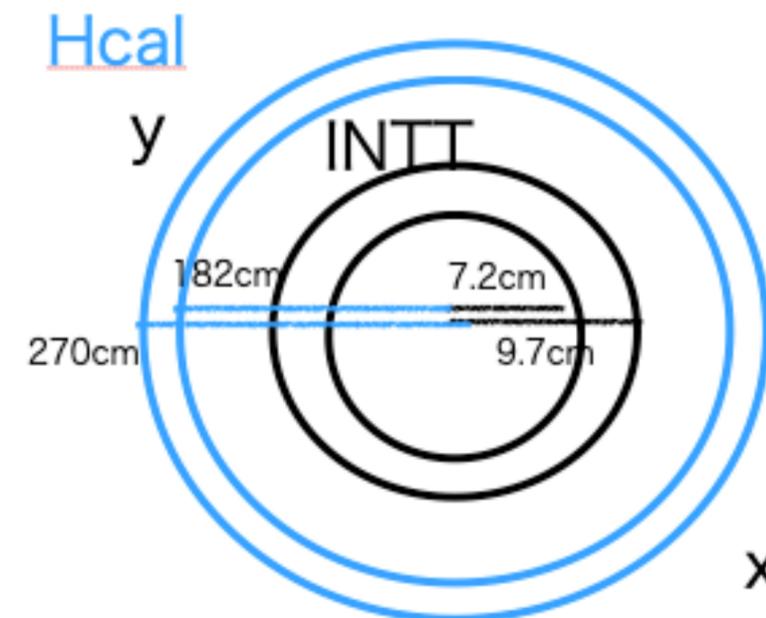
シミュレーションデータ

- 磁場なし
- 発生点 $\vec{r} = (-20, 20, 10)\text{cm}$
- 運動量 $\vec{p} = (1, -1.0, 5)\text{Gev}/c$
- ビームパイプ/カロリメータ無し



実データ

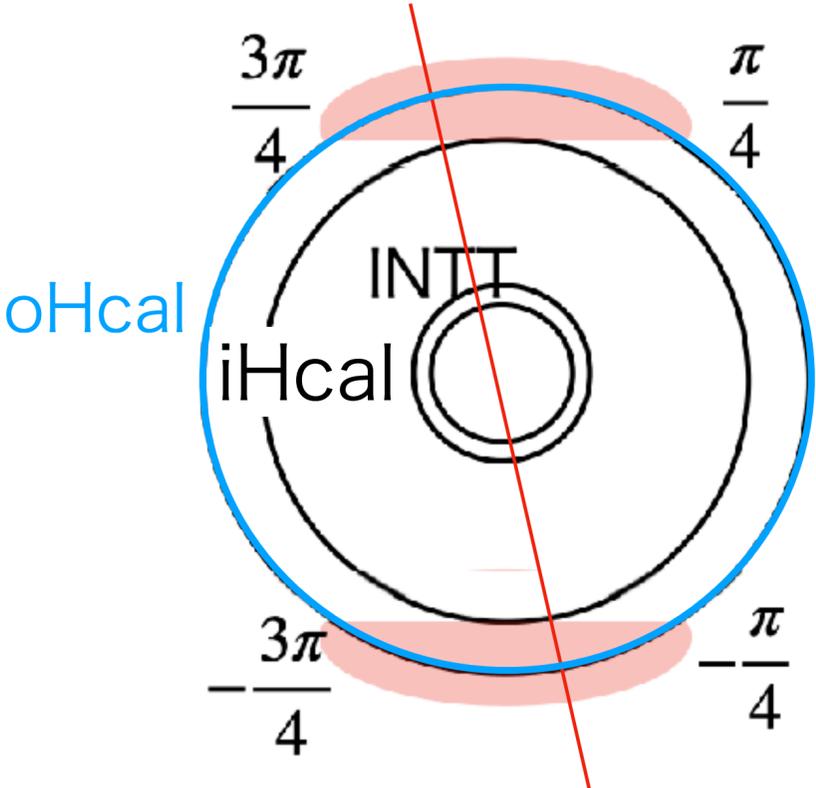
- 磁場なし
- 171run
- Hcalの外層をトリガーとして使用
- HCal のxy 平面においてトリガーは $\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \leq \phi \leq -\frac{\pi}{4}$ を使用



使用データ

実データ

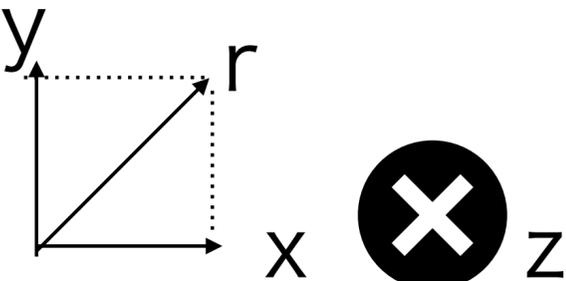
oHcalを使ったトリガー範囲



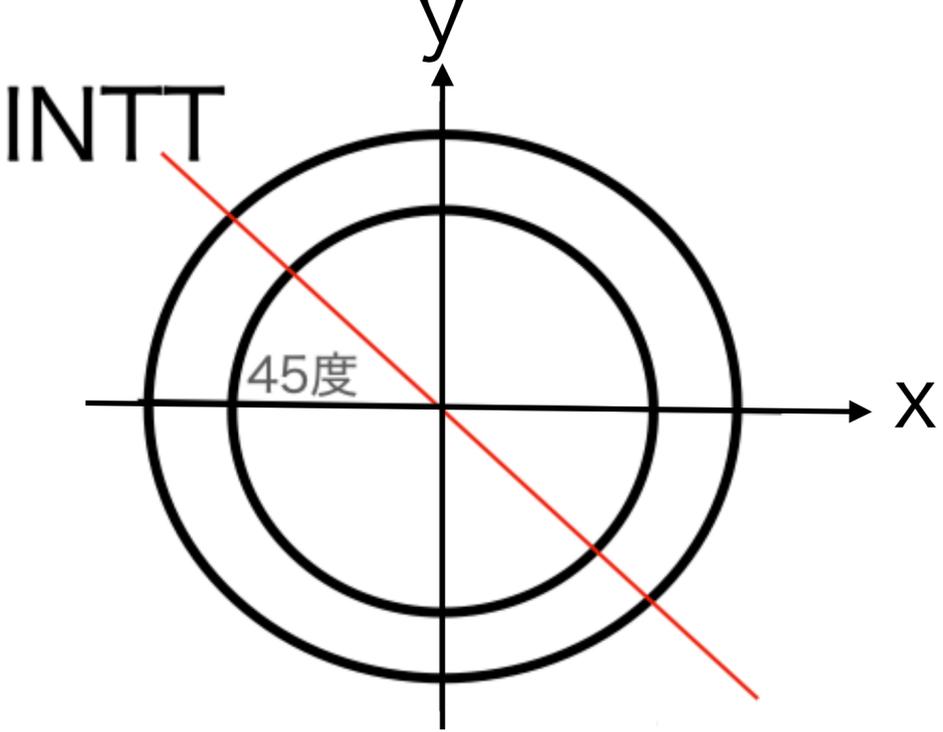
300万イベント

シミュレーションデータ

Geant4を用いたモンテカルロシミュレーション
45度にミュー粒子を打った

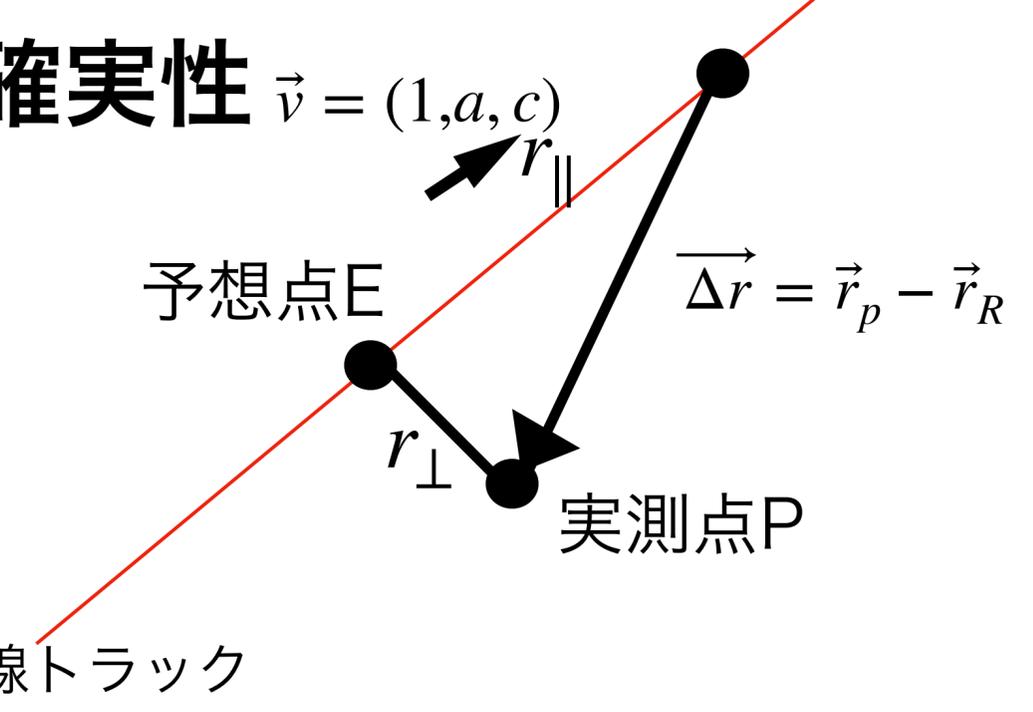


$$x = r \cos \phi$$
$$y = r \sin \phi$$



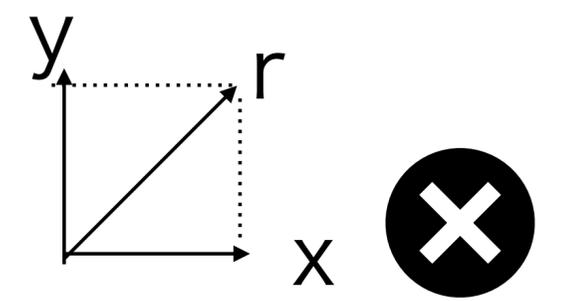
10万イベント

式の不確実性

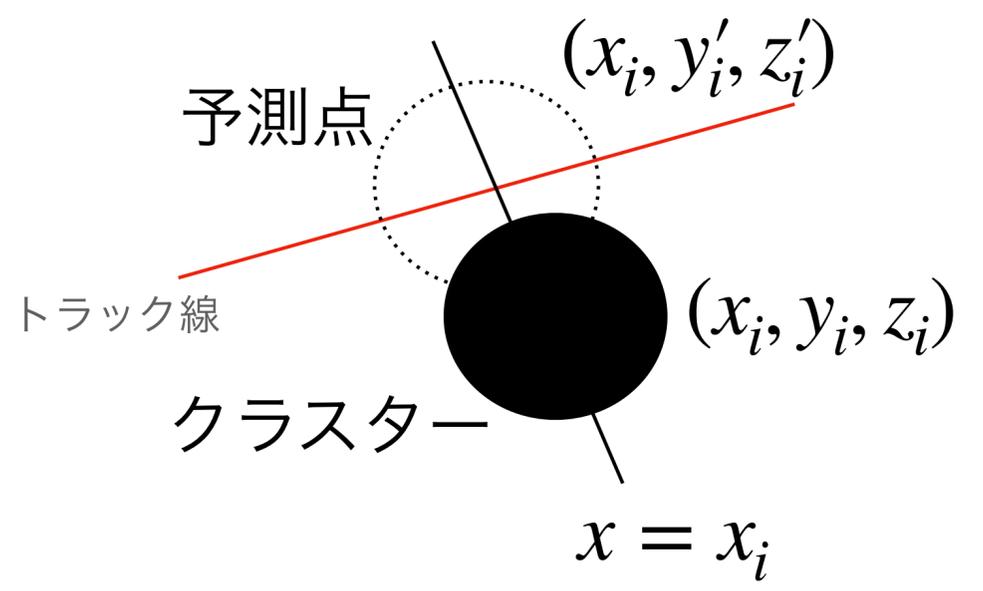


xを含む

$$r_{\perp} = \Delta r - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v}$$



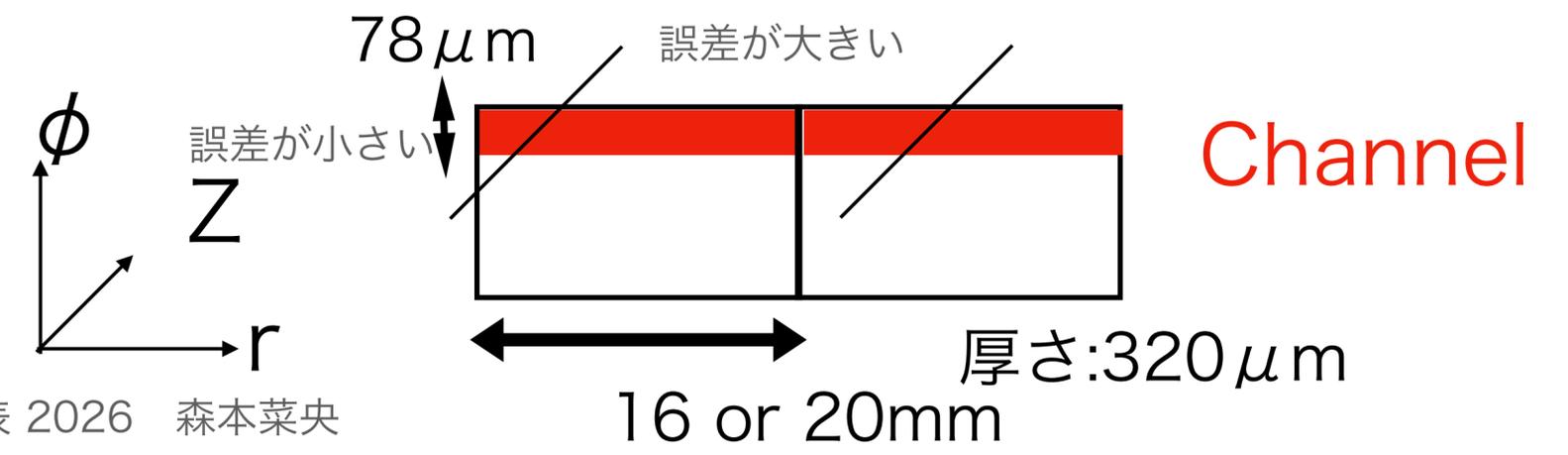
χ^2 : 予測点とクラスターの測定誤差で重みを付けた距離差の総和

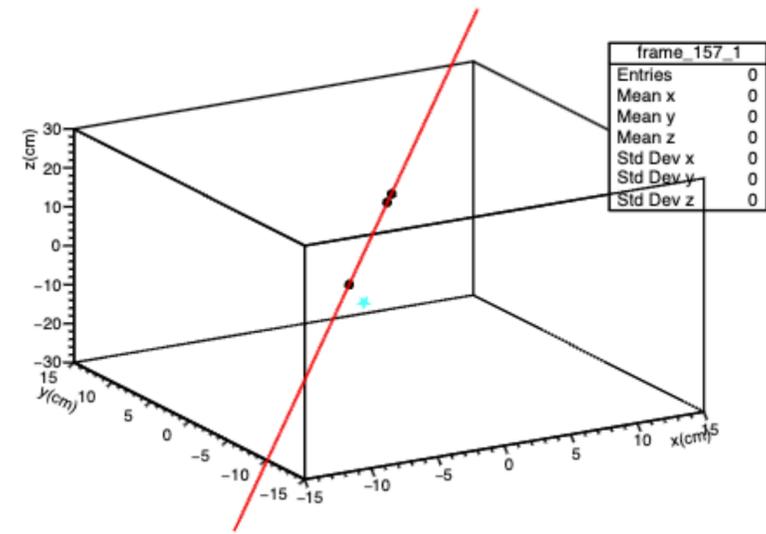
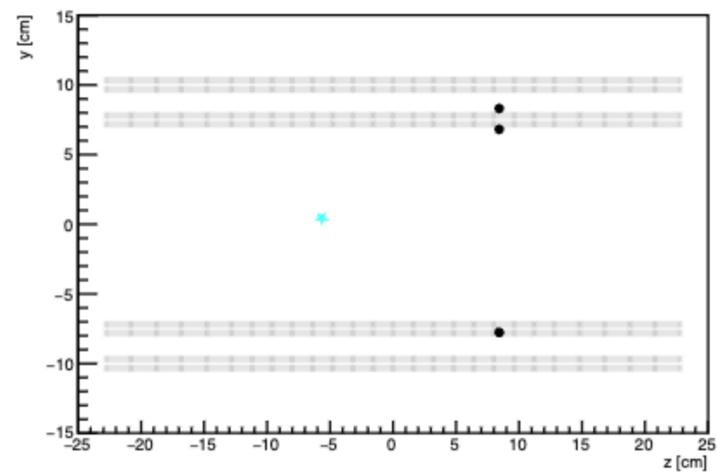
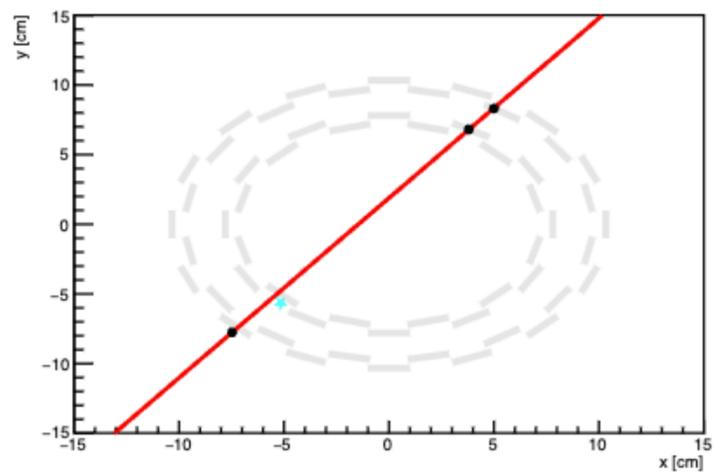


$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y'_i)^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(z_i - z'_i)^2}{(\delta z_i)^2} \quad \text{xを含まない}$$

$$\delta y_i = 0.032 \text{ cm} \quad \delta z_i = 1.6 \text{ cm}$$

Φ : xyの角度?





Run: 39515
EventID: 4797
Dxy: 0.0672175
Dz: 63.999
a: 1.290728
c: 0.000002

宇宙空間で陽子などが大気に衝突
大気中でハドロンシャワー発生
その中でミューオンが生まれ、そのミューオン
が地面まで届く

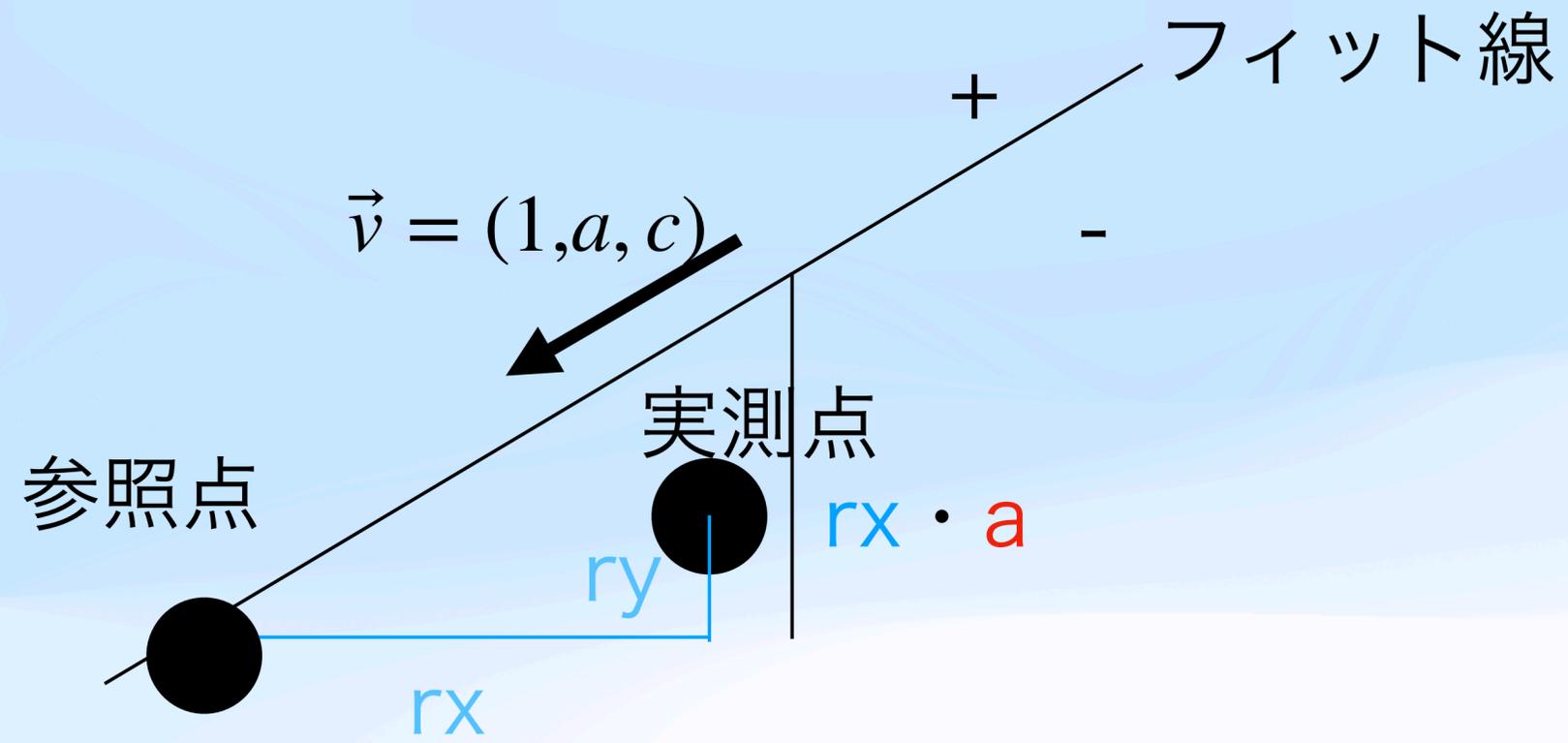
ハドロンシャワー

Hcalは1粒子のエネルギーを測るのでは
なく、シャワー全体のエネルギーを
測る

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y'_i)^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(z_i - z'_i)^2}{(\delta z_i)^2}$$

統計誤差の求め方

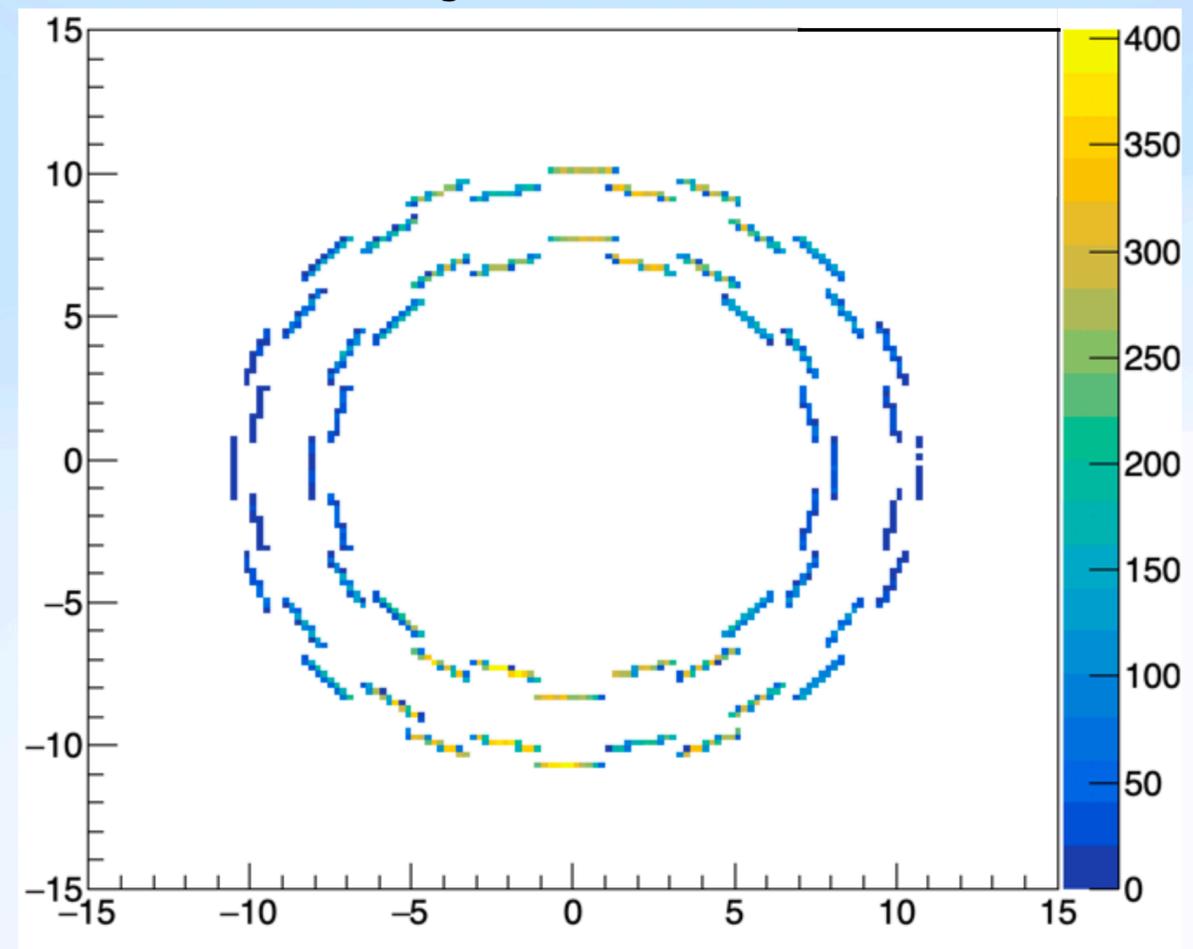
フィット線とトラック線の説明



$$rx \cdot a - ry > 0 \rightarrow +$$

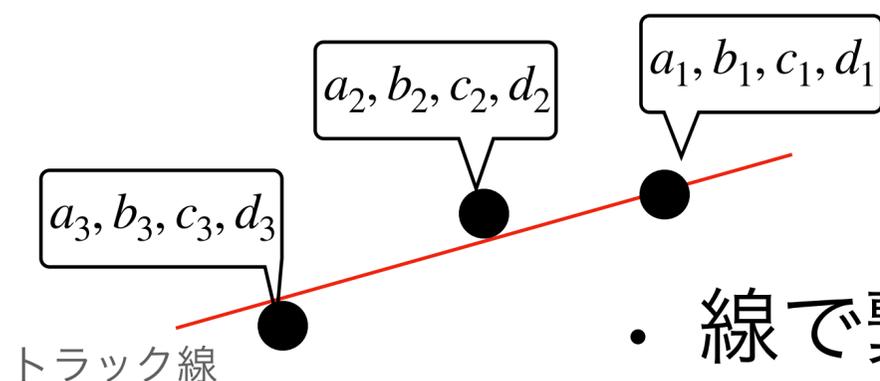
$$rx \cdot a - ry < 0 \rightarrow -$$

実測点のxy分布



3.トラック選定

フィット



$$y = ax + b, \quad z = cx + d$$

- 線で繋いだクラスターから最小のパラメーターを求めて式を出す

χ^2 の定義

- δ : 位置の測定誤差
- i : クラスタ番号
- (x_i, y_i, z_i) : クラスタの測定位置
- (x_i, y'_i, z'_i) : トラック上の予測位置
- $\delta y_i = 0.032 \text{ cm}$
- $\delta z_i = 1.6 \text{ cm}$

$$f_1(x_i) = y'_i = ax_i + b,$$
$$f_2(x_i) = z'_i = cx_i + d$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y'_i)^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(z_i - z'_i)^2}{(\delta z_i)^2}$$

- 予測点とクラスターの総距離差を測定誤差で重みづけする

1 宇宙線の流れ

宇宙空間から来るのは主に：

- 陽子 (約90%)
- ヘリウム核
- 重い原子核

める信号

γ-範囲

これらが大気に衝突すると...

② 大気中で何が起きる？

陽子が空気の原子核に衝突
→ ハドロンシャワー発生

そこで

- π^+
- π^-
- π^0

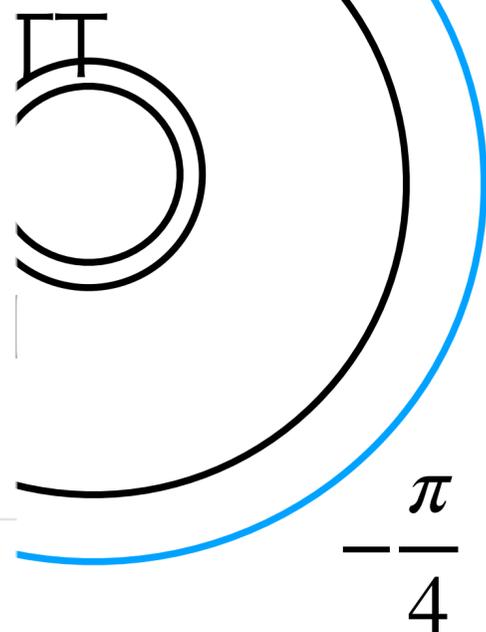
などが大量にできる。

③ その後

- $\pi^0 \rightarrow$ 光子 \rightarrow 電磁シャワー
- $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$

そして

☞ μ (ミュオン) が地面まで届く



イベント

ミュオン (μ) の寿命

- 静止系での平均寿命は

(約 2.2 マイクロ秒)

まず流れ (大気中)

1. 宇宙から来た 陽子 が大気に衝突
2. 大気中で ハドロンシャワー 発生
3. その中で π^\pm ができる
4. $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ に崩壊
5. μ (ミュオン) が地上まで到達

ミュオンの静止寿命は約2.2 μ sであるが、相対論的時間伸長により地上まで到達可能である。

修士論文発表 2026 森本菜央

ーションデータ

じゃあ、どうして地上まで届くの？

$\tau_0 \approx$

大気上空 (~10-15 km) で生まれた μ が、
そのまま 2.2 μ s しか生きないなら地面に届かないはず。



でも実際は届く。理由は：

相対論的時間の遅れ (時間伸長)

高速で飛ぶ μ は、地上から見ると寿命が伸びる。

例

エネルギーが数 GeV の μ だと

- ローレンツ因子 $\gamma \sim 10-100$
- 有効寿命

$$\tau = \gamma\tau_0$$

→ 数十~数百 μ s

光速に近い速度 (ほぼ c) で

$$d \sim \tau$$

なので、数 km~数十 km 進める。

宇宙線の解析 (MIPの宇宙線解析)

- μ は**最小電離粒子 (MIP)**に近い振る舞い
- 少しずつエネルギーを失いながら直線で通過
- 大きなシャワーは作らない

だから：

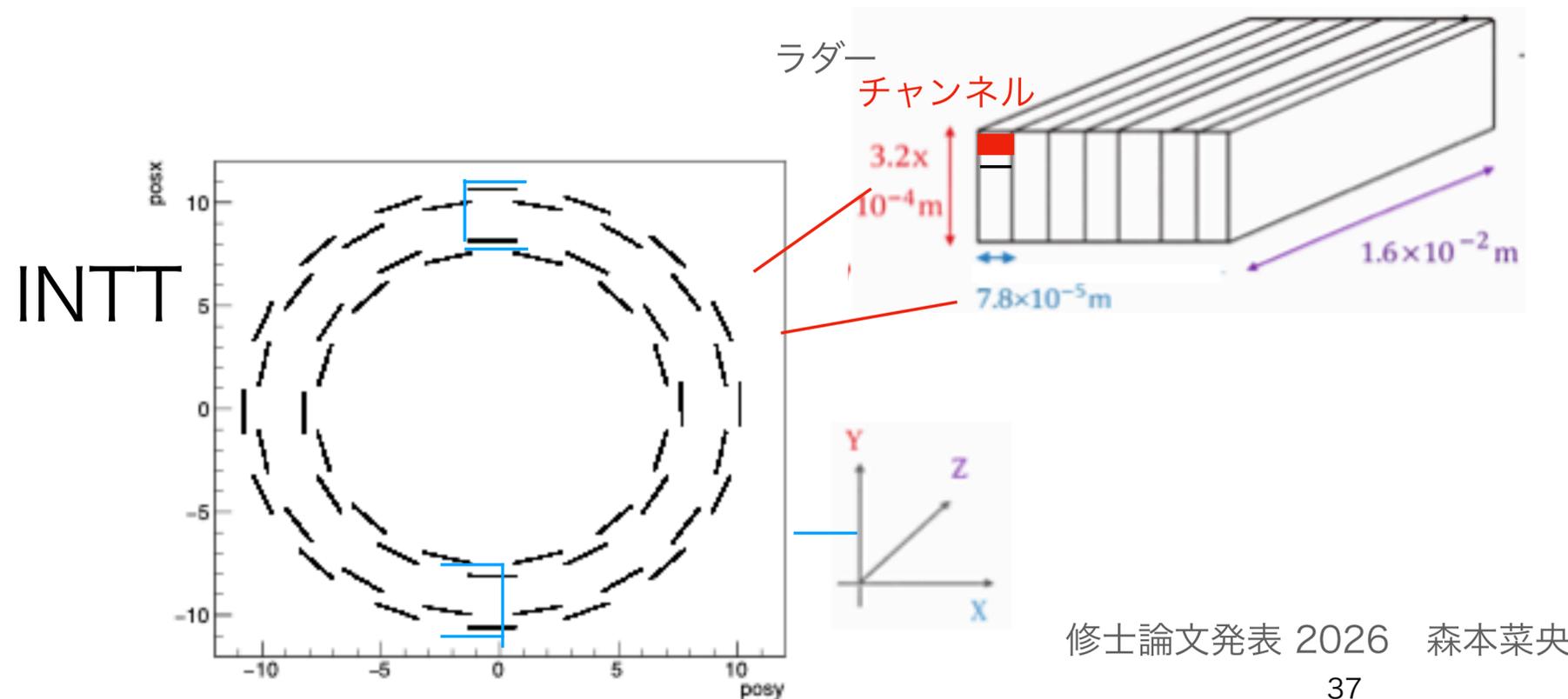
宇宙線=ほぼ直線1本のトラック

イベント選択

重複クラスター

★誤差とは？

```
TH2D* hist_e = new TH2D( "hist_e", "title", bin, -15, 15, bin, -15, 15 );
```



$$\hat{v} = \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \quad (\text{向き})$$

$$|\vec{r}|_{\parallel} = \vec{r} \cdot \hat{v} \quad (\text{大きさ})$$

$$\vec{r}_{\parallel} = (\vec{r} \cdot \hat{v})\hat{v}$$

$$r_{\perp} = \Delta r - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v}$$

$$\vec{r}_{\parallel} = \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v} \quad \left(\vec{r}_{\parallel y} = \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} a \quad \vec{r}_{\parallel z} = \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} c \right) \quad \vec{r}_{\perp} \cdot \vec{v} = -1$$

$$r_{\perp} = \Delta r - r_{\parallel} \quad (r_{\perp y} = \Delta y - r_{\parallel y} \quad r_{\perp z} = \Delta z - r_{\parallel z})$$

$$r_{\perp} = \Delta r - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v} \quad \left(r_{\perp y} = \Delta y - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} a \quad r_{\perp z} = \Delta z - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} c \right)$$

