

J-PARC T98実験： LArTPCによる反粒子同定手法検証実験の 概要と解析状況

MPGD&Active媒質TPC2025研究会@岩手大学

2025/12/20

早稲田大学 矢野 裕太郎

GRAMS実験

GRAMS (Gamma-Ray and Anti-Matter Survey)

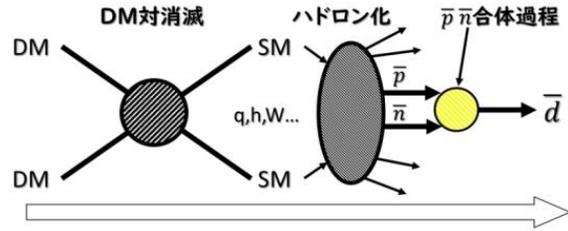
- 気球搭載の液体ArTPCを用いたMeV γ 線と宇宙線反粒子探索

宇宙線反粒子探索

- 宇宙線中のAntiDeuteron, AntiHelium \rightarrow 暗黒物質間接探索

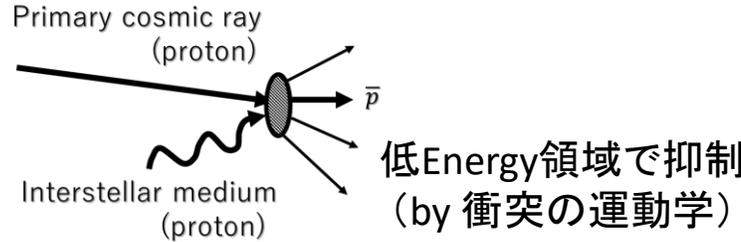
Signal Event

DMの対消滅/崩壊由来事象



BG Event

1次宇宙線と星間物質の相互作用



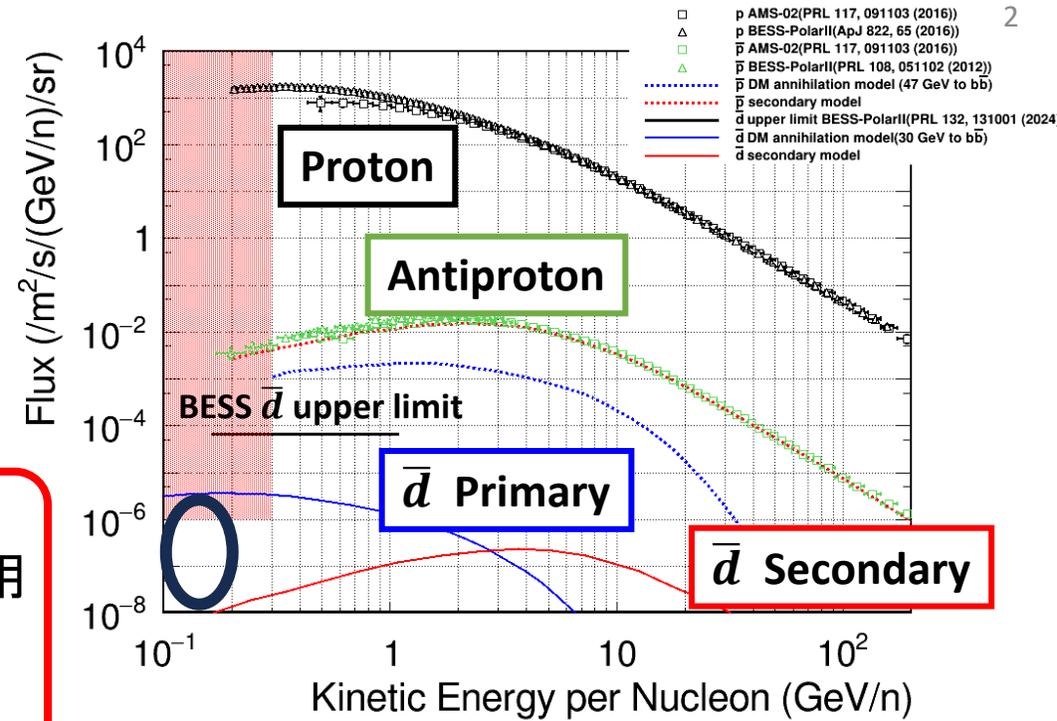
Sub GeV領域で背景事象がほとんどゼロの探索が可能
 \rightarrow \bar{d} を1 Eventでも観測できれば新物理の強い示唆となる

PID手法

- 磁場を用いない粒子・反粒子識別
- 一反粒子のみ捕獲・原子核との対消滅を起こす

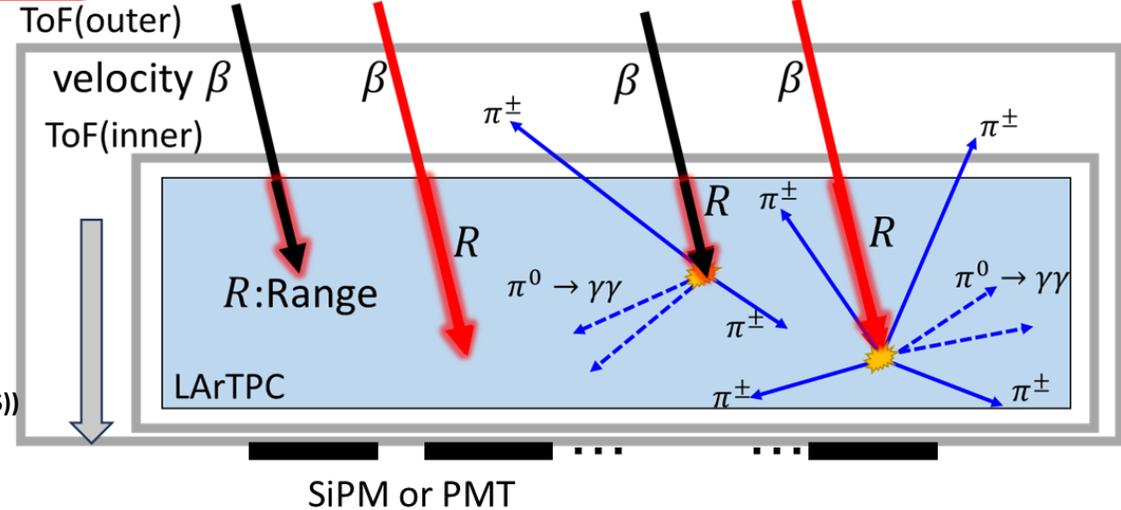
液体ArTPC中の捕獲事象はLArIAT実験でのみ観測 (PRD 111 094031 (2025))

\rightarrow 識別能力の検証 + Ar-反粒子反応の理解が重要



Particle(Mass) ID Anti-particle ID Particle(Mass) ID

$p \leftrightarrow d \leftrightarrow \bar{p} \leftrightarrow \bar{d}$



GRAMS実験

GRAMS(Gamma-Ray and Anti-Matter Survey)

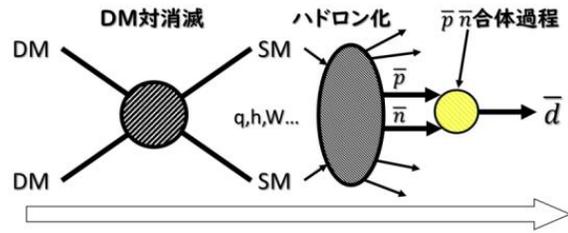
- 気球搭載の液体ArTPCを用いたMeV γ 線と宇宙線反粒子探索

宇宙線反粒子探索

- 宇宙線中のAntiDeuteron, AntiHelium \rightarrow 暗黒物質間接探索

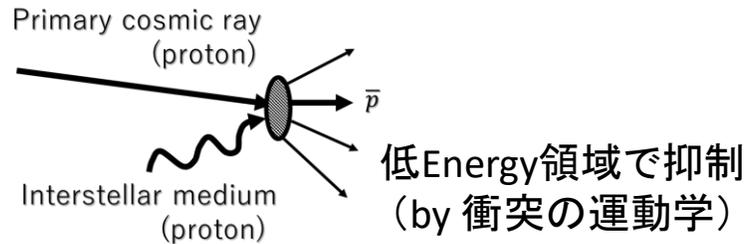
Signal Event

DMの対消滅/崩壊由来事象



BG Event

1次宇宙線と星間物質の相互作用



低Energy領域で抑制 (by 衝突の運動学)

Sub GeV領域で背景事象がほとんどゼロの探索が可能
 \rightarrow \bar{d} を1 Eventでも観測できれば新物理の強い示唆となる

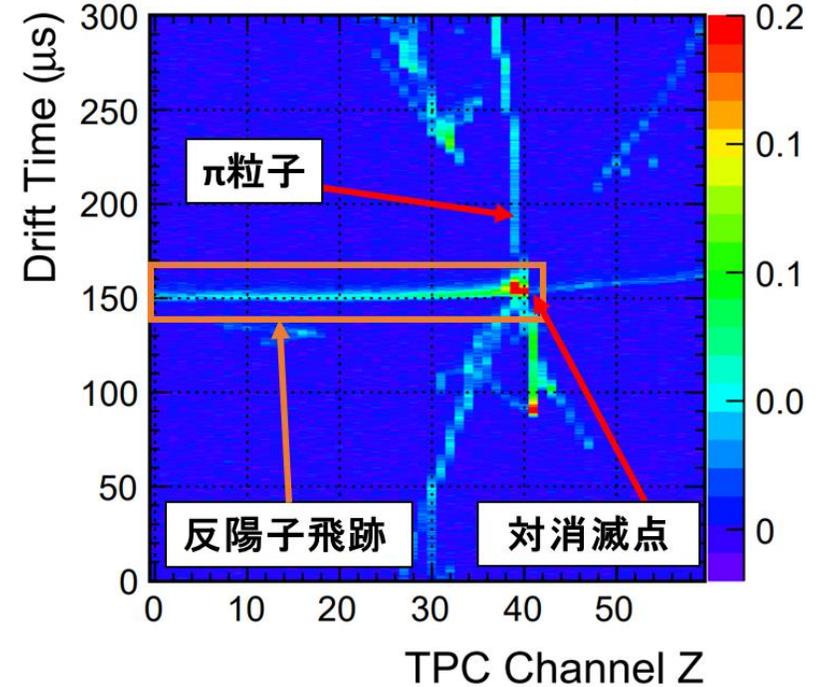
PID手法

- 磁場を用いない粒子・反粒子識別
- 一反粒子のみ捕獲・原子核との対消滅を起こす

液体ArTPC中の捕獲事象はLArIAT実験でのみ観測 (PRD 111 094031 (2025))

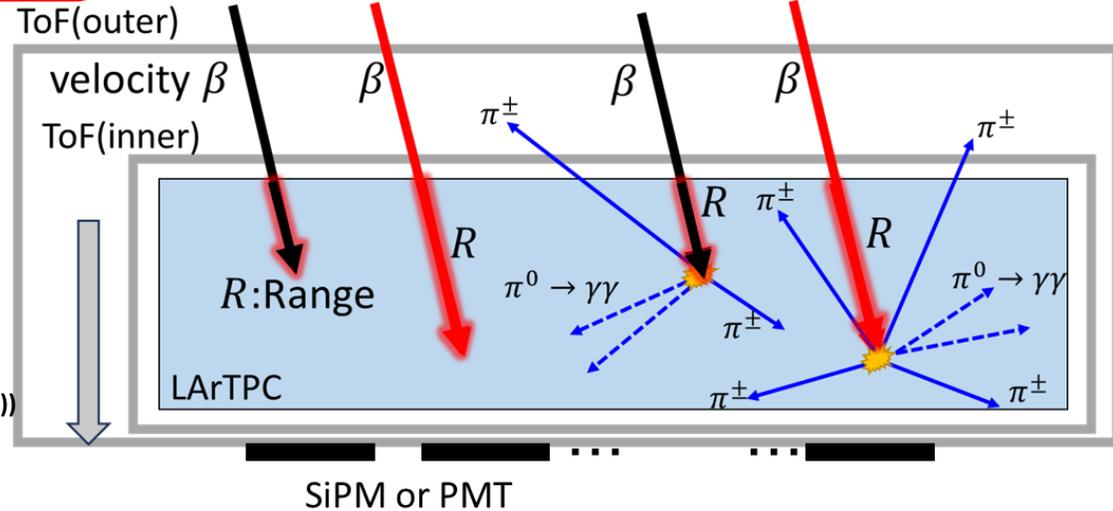
\rightarrow 識別能力の検証 + Ar-反粒子反応の理解が重要

Geant4 シミュレーション



Particle(Mass) ID Anti-particle ID Particle(Mass) ID

$p \leftrightarrow d$ $\bar{p} \leftrightarrow \bar{d}$



SiPM or PMT

J-PARC K1.8BR T98実験

■ 目的

- 液体ArTPCによる反粒子同定手法の検証
- 反陽子捕獲事象を高統計 $> 10^5$ で収集
- 主要なBG事象の理解 / Ar-反粒子の反応の理解

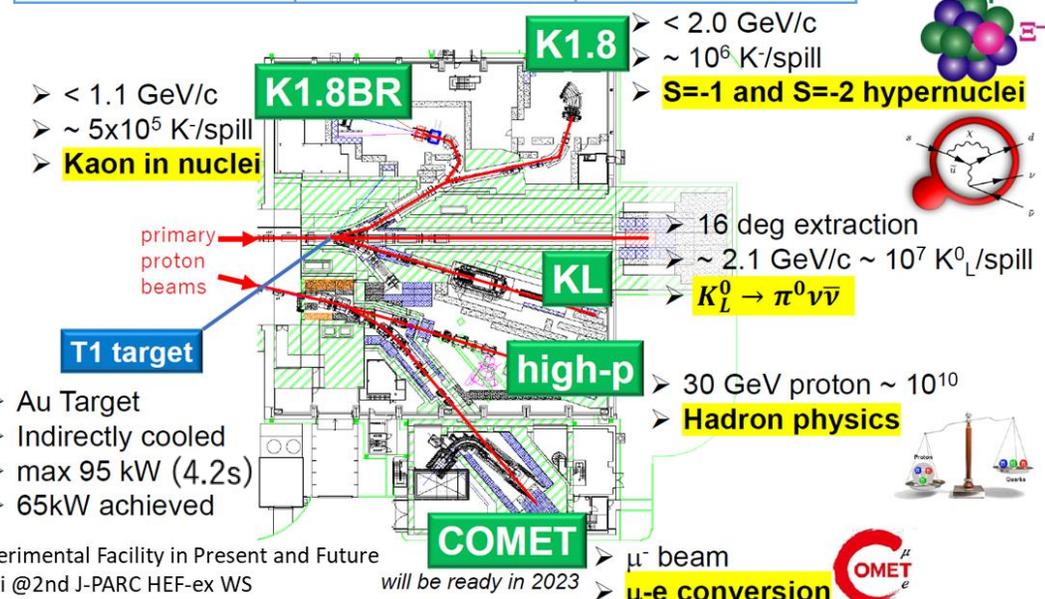
■ T98実験

- 液体ArTPCへの反陽子ビーム照射試験
- 2025/2/19~21にかけて24h(\bar{p} : 17h)のビームタイムを実施

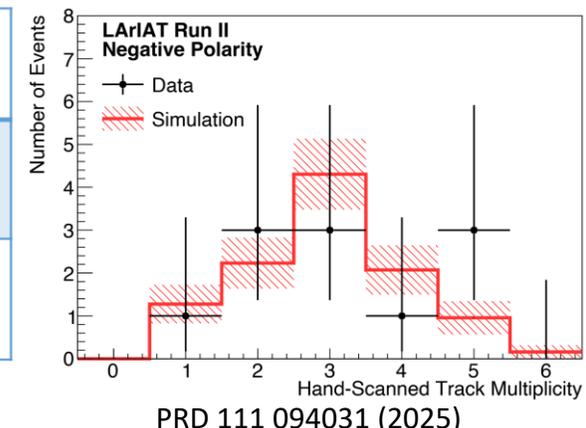
粒子種	運動量 (GeV/c)	全粒子数 (/spill)	DAQレート (/spill)	イベント数
反陽子	-0.7	1.2kHz	300Hz	3.6M
反陽子	-1.0	1.1kHz	200Hz	660k
陽子	0.7	500Hz	400Hz	160k
重陽子	1.0	500Hz	300Hz	160k
K中間子	-1.0	1.0kHz	300Hz	160k

反重陽子は十分な強度のビームが未確立@K1.8BR
 → 反陽子の実データでsimulationをtuning
 simulationによる \bar{p}/\bar{d} 識別の実証

Particle	Flux(m ² /sr/s/(GeV/n))	BG Reduction
Antiproton (BESS/AMS-02)	10 ⁻²	10 ⁴
Antideuteron (GRAMS target)	10 ⁻⁶	1(Signal)



	LArIAT (PRD 111 094031 (2025))	T98 静電分離機
粒子選別	×	
停止事象候補	11	$> 10^5$



J-PARC K1.8BR T98実験

Particle	Flux(m ² /sr/s/(GeV/n))	BG Reduction
Antiproton (BESS/AMS-02)	10 ⁻²	10 ⁴
Antideuteron (GRAMS target)	10 ⁻⁶	1(Signal)

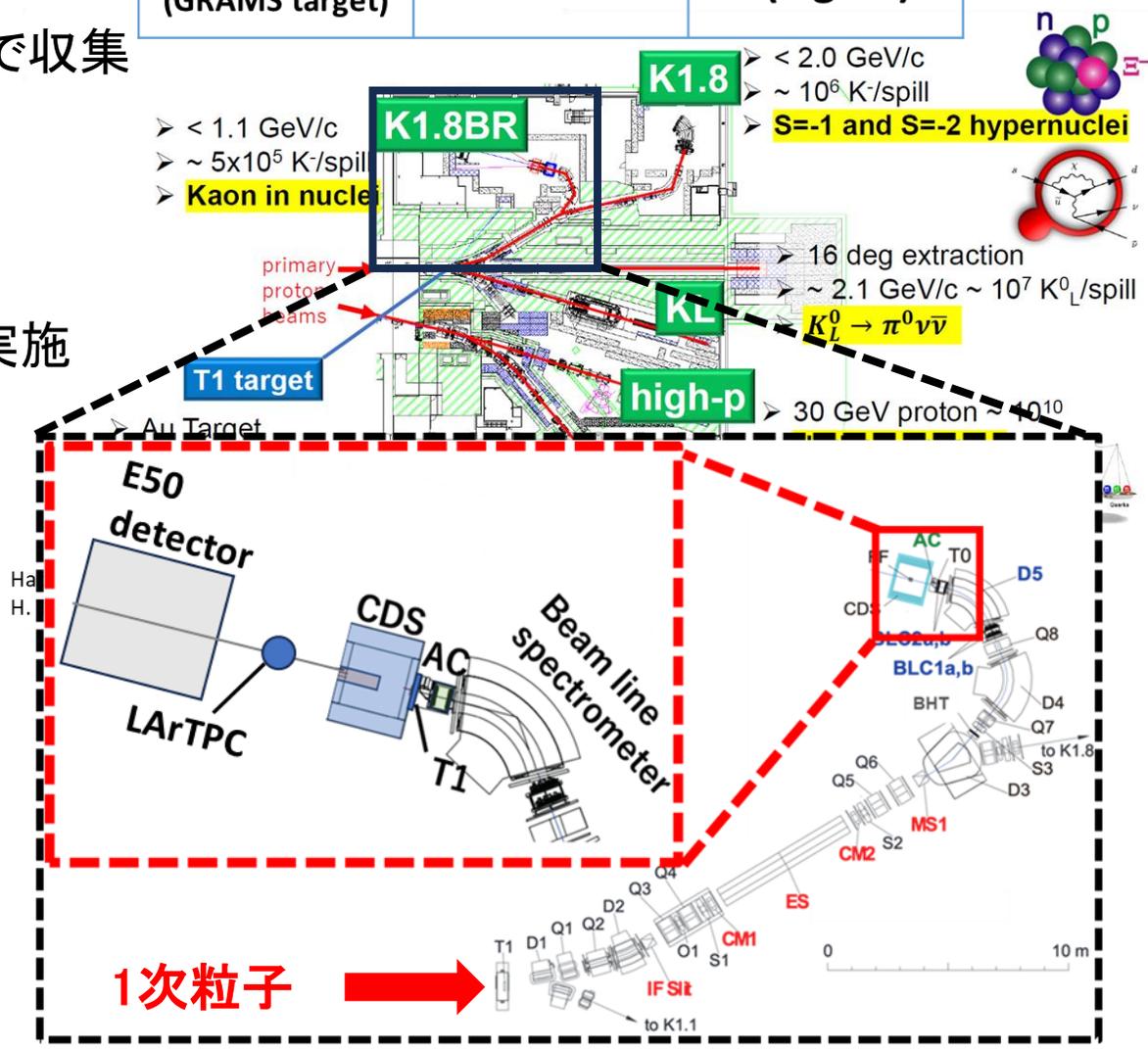
■ 目的

- 液体ArTPCによる反粒子同定手法の検証
- 主要なBG事象である反陽子捕獲事象を高統計 > 10⁵で収集
→Ar-反粒子の反応の理解

■ T98実験

- 液体ArTPCへの反陽子ビーム照射試験
- 2025/2/19~21にかけて24h(\bar{p} : 17h)のビームタイムを実施

粒子種	運動量 (GeV/c)	全粒子数 (/spill)	DAQレート (/spill)	イベント数
反陽子	-0.7	1.2kHz	300Hz	3.6M
反陽子	-1.0	1.1kHz	200Hz	660k
陽子	0.7	500Hz	400Hz	160k
重陽子	1.0	500Hz	300Hz	160k
K中間子	-1.0	1.0kHz	300Hz	160k



反重陽子は十分な強度のビームが未確立@K1.8BR
→反陽子の実データでsimulationをtuning
simulationによる \bar{p}/\bar{d} 識別の実証

J-PARC K1.8BR T98実験

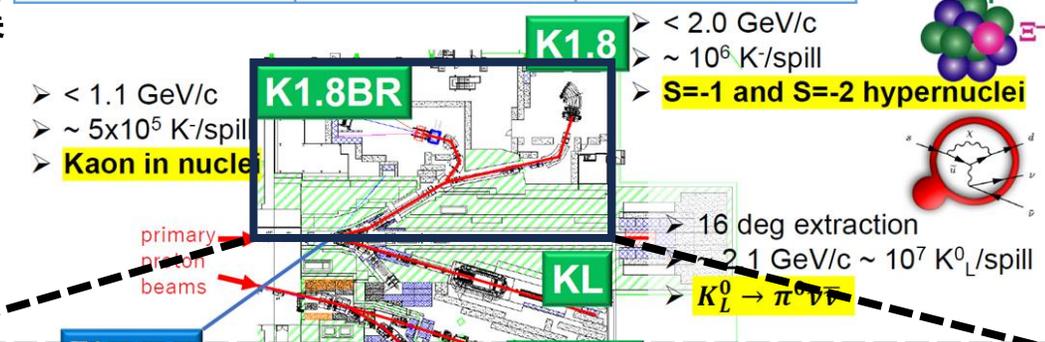
Particle	Flux(m ² /sr/s/(GeV/n))	BG Reduction
Antiproton (BESS/AMS-02)	10 ⁻²	10 ⁴
Antideuteron (GRAMS target)	10 ⁻⁶	1(Signal)

■ 目的

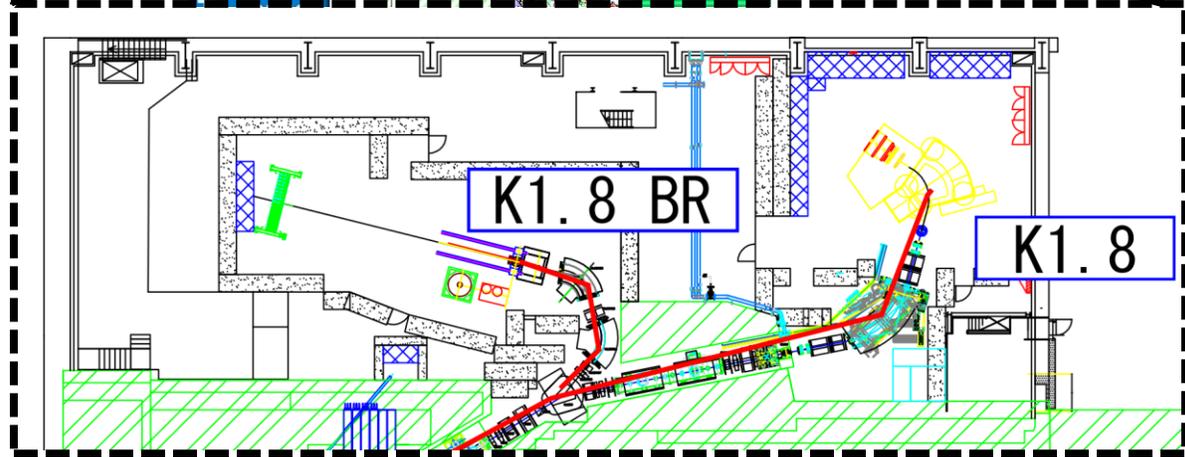
- 液体ArTPCによる反粒子同定手法の検証
- 主要なBG事象である反陽子捕獲事象を高統計 > 10⁵で収集
→Ar-反粒子の反応の理解

■ T98実験

- 液体ArTPCへの反陽子ビーム照射試験
- 2025/2/19~21にかけて24h(\bar{p} : 17h)のビームタイムを実施



粒子種	運動量 (GeV/c)	全粒子数 (/spill)	DAQレート (/spill)	イベント数
反陽子	-0.7	1.2kHz	300Hz	3.6M
反陽子	-1.0	1.1kHz	200Hz	660k
陽子	0.7	500Hz	400Hz	160k
重陽子	1.0	500Hz	300Hz	160k
K中間子	-1.0	1.0kHz	300Hz	160k

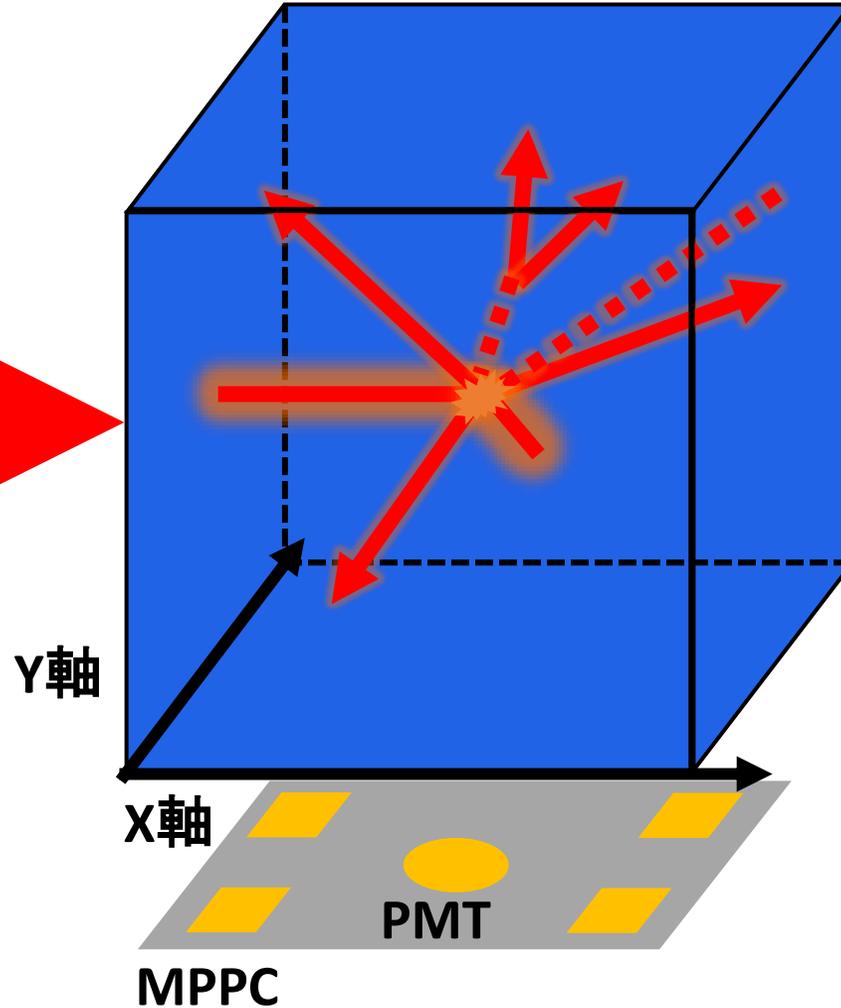
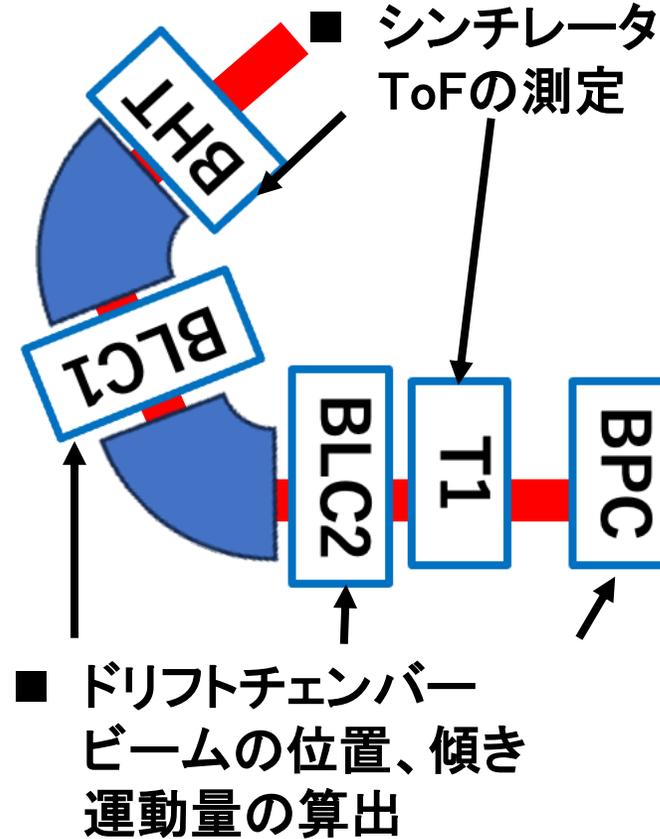


反重陽子は十分な強度のビームが未確立@K1.8BR
 →反陽子の実データでsimulationをtuning
 simulationによる \bar{p}/\bar{d} 識別の実証

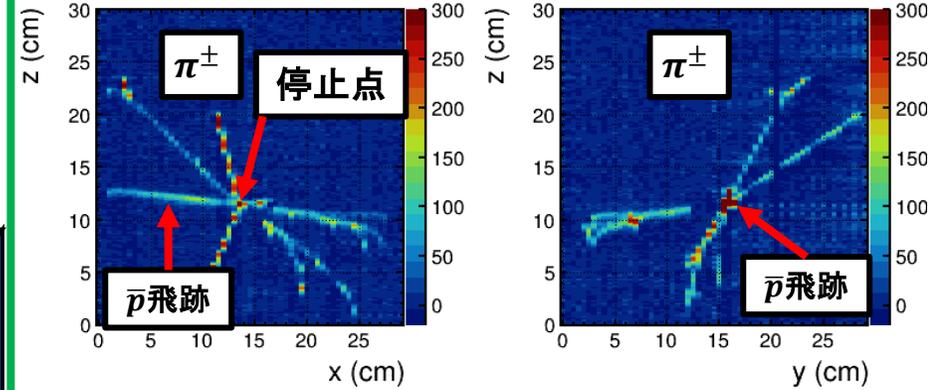
高運動量(<2 GeV/c)のK1.8では反重陽子が観測されている
 →高運動量だとほとんどLAr中で停止しない

T98検出器構成・データ概要

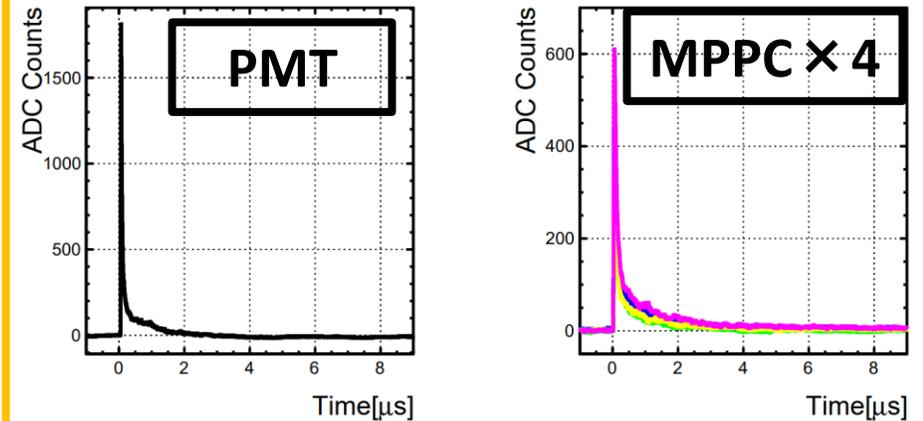
ビームライン情報



TPC電子信号

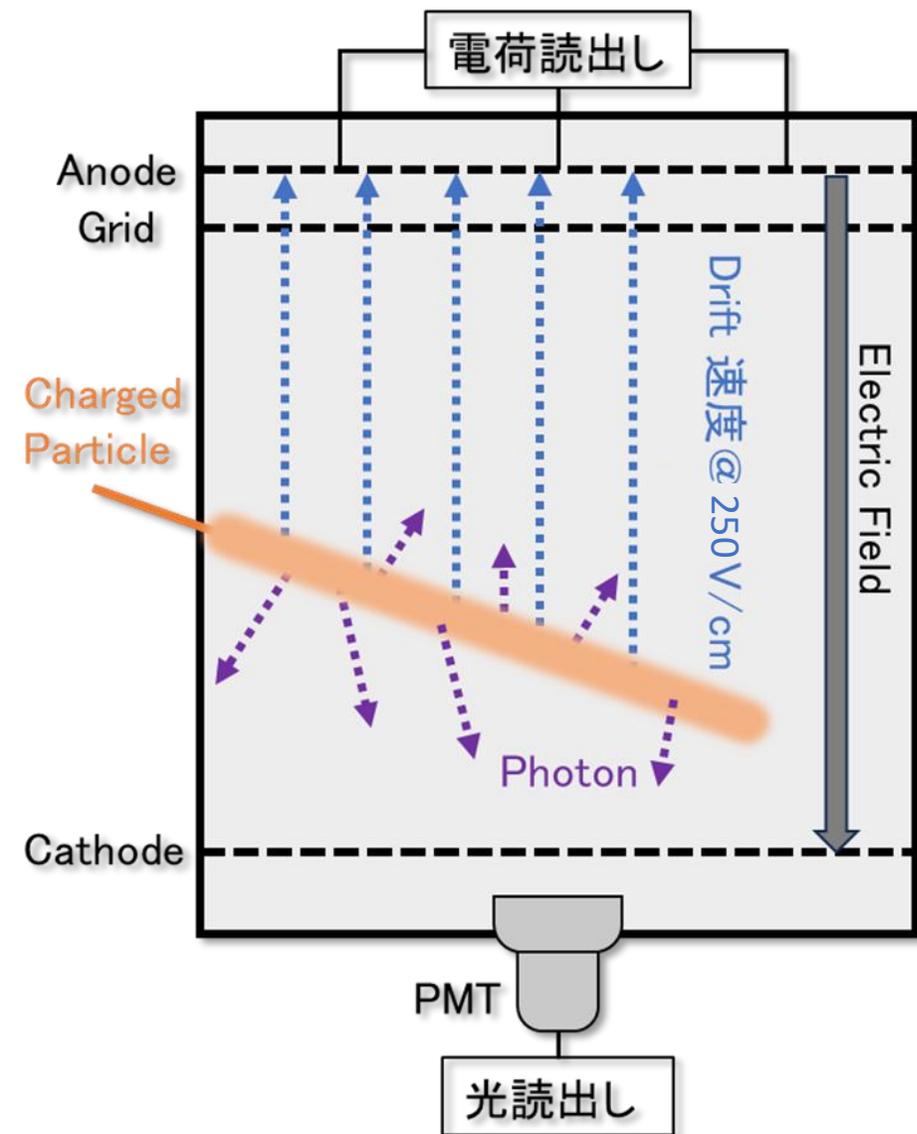


光信号



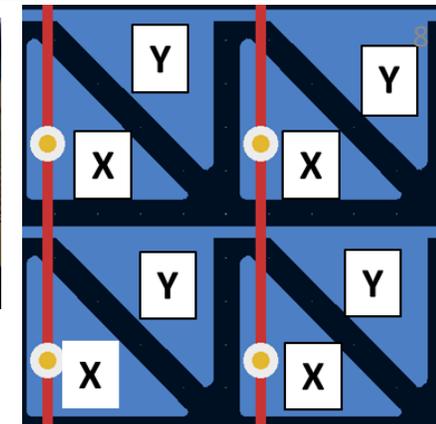
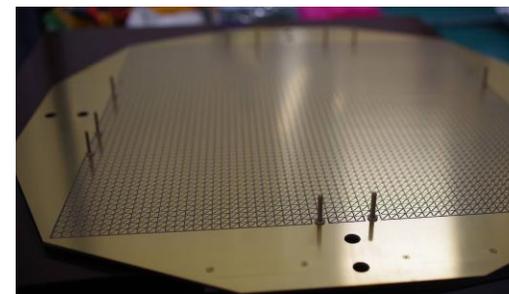
- 入射粒子数の同定
宇宙線トリガーに使用

GRAMS(T98)検出器



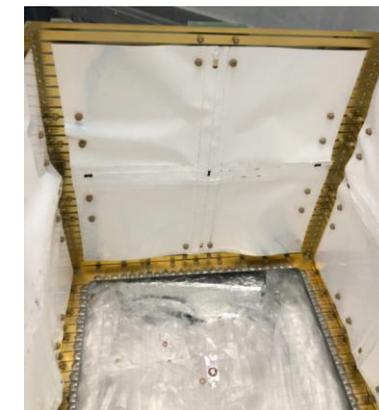
Anode

- 5 mm ピッチ
- 5mmを三角形に分割
- 120 ch(X:60ch+Y:60ch)



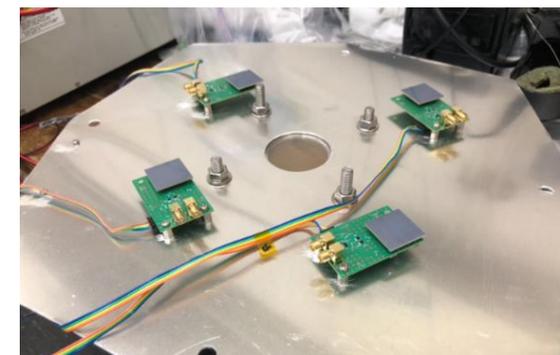
LArTPC

- 30cm × 30cm × 30cmサイズのTPC
- サイドプレート: 100 MΩ × 30(抵抗分割)
- Cathode: -9.0 kV, Anode Grid: -1.5 kV
- 250 V/cmの電場形成
- 壁面: ESR w/ TPB

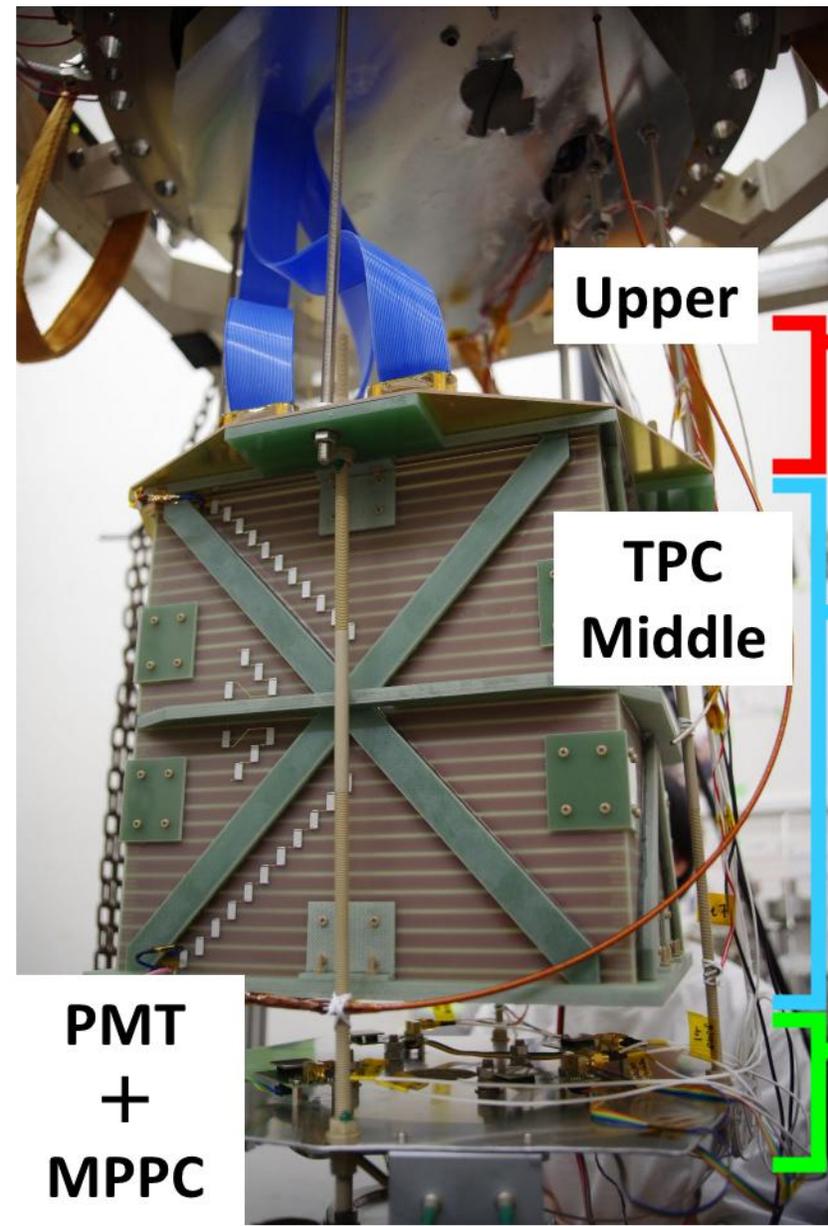


PMT+MPPC × 4ch

- PMT: R6041-506
- MPPC: S13361-6050AE-04
- Cosmicトリガーに使用
- TPBを窓面に蒸着

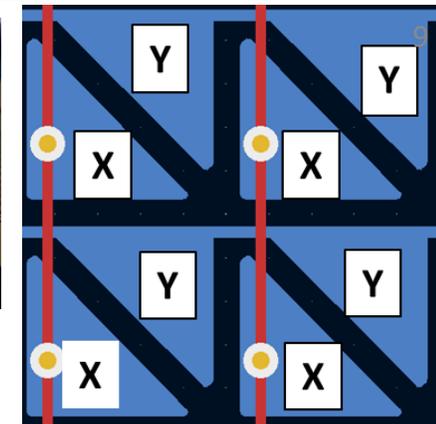
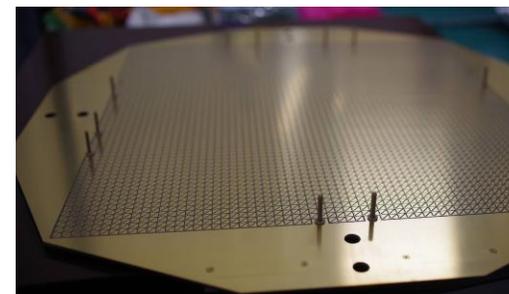


GRAMS(T98)検出器



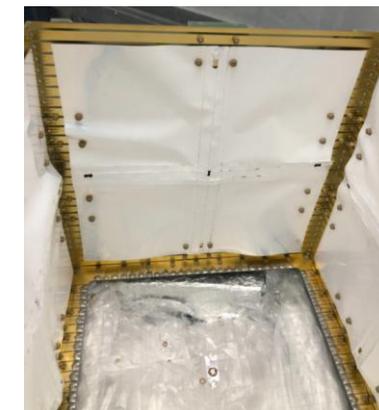
Anode

- 5 mm ピッチ
- 5mmを三角形に分割
- 120 ch(X:60ch+Y:60ch)



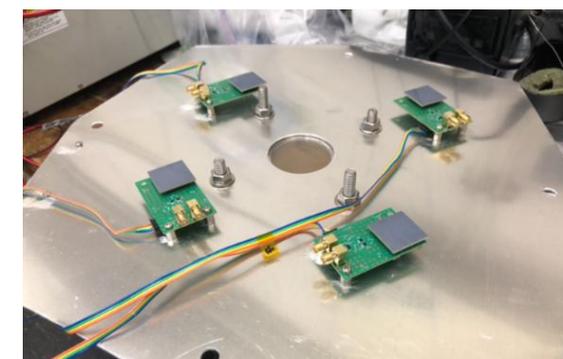
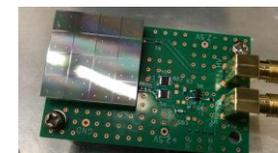
LArTPC

- 30cm × 30cm × 30cmサイズのTPC
- サイドプレート: 100 MΩ × 30(抵抗分割)
- Cathode: -9.0 kV, Anode Grid: -1.5 kV
→ 250 V/cmの電場形成
- 壁面: ESR w/ TPB



PMT+MPPC × 4ch

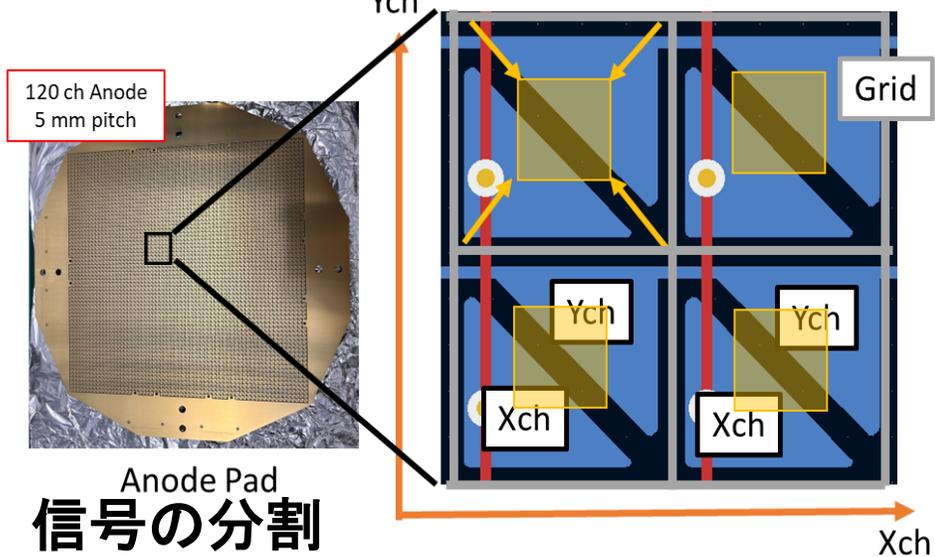
- PMT: R6041-506
- MPPC: S13361-6050AE-04
- Cosmicトリガーに使用
- TPBを窓面に蒸着



Anode構造と信号波形

■ Anode構造

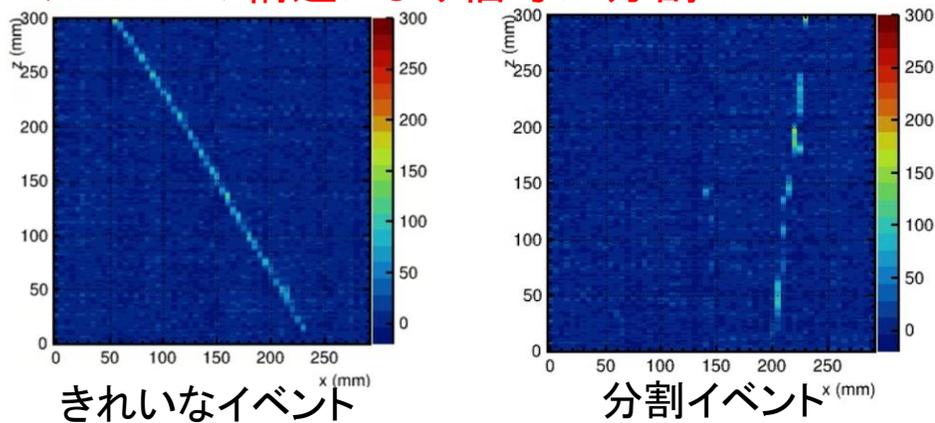
5mm角の領域を2つの直角三角形で構成
下部に設置したGridで領域の中心に電離電子を収束



■ 信号の分割

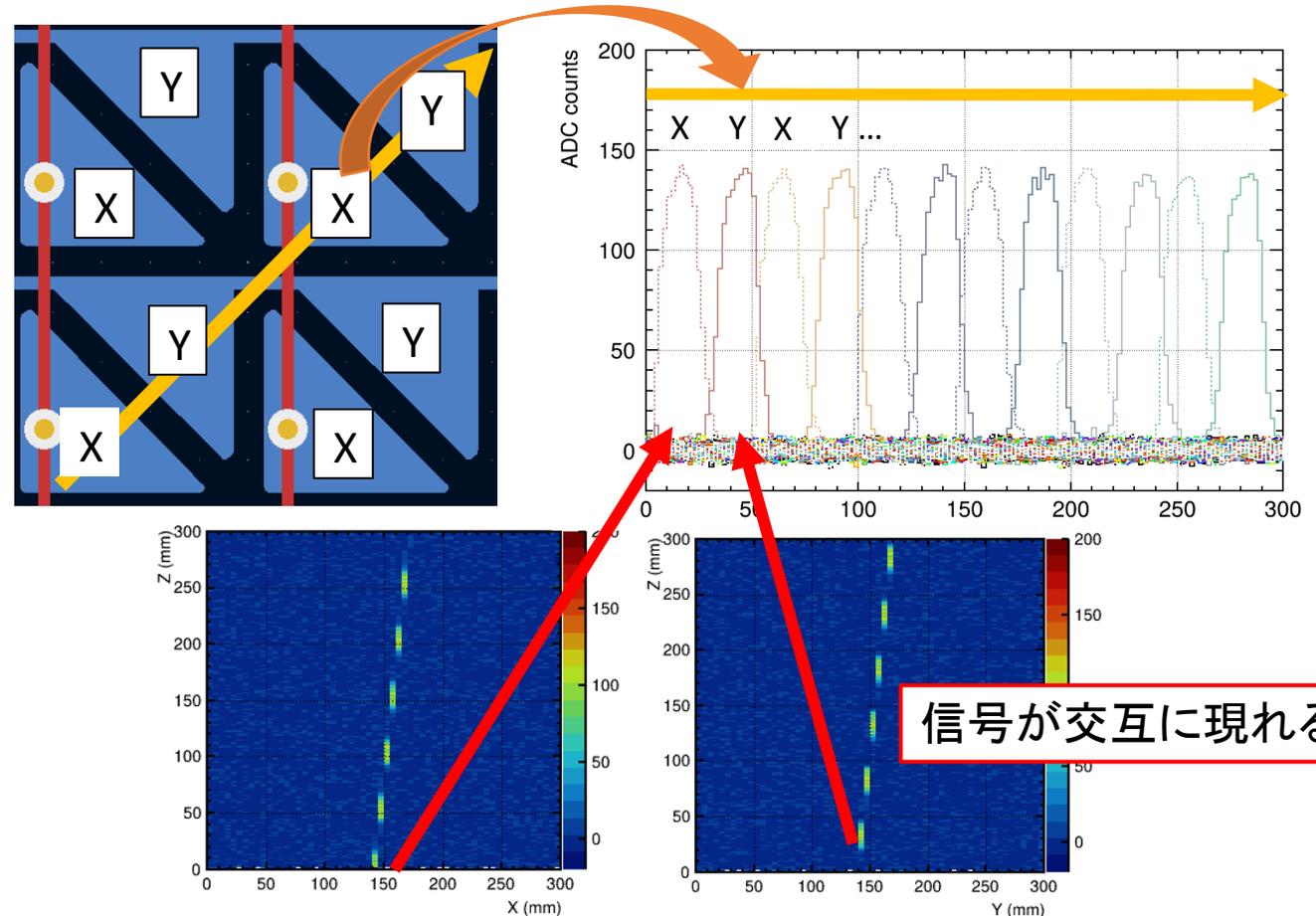
飛跡が不連続なevent多数

→Anodeの構造により信号が分割



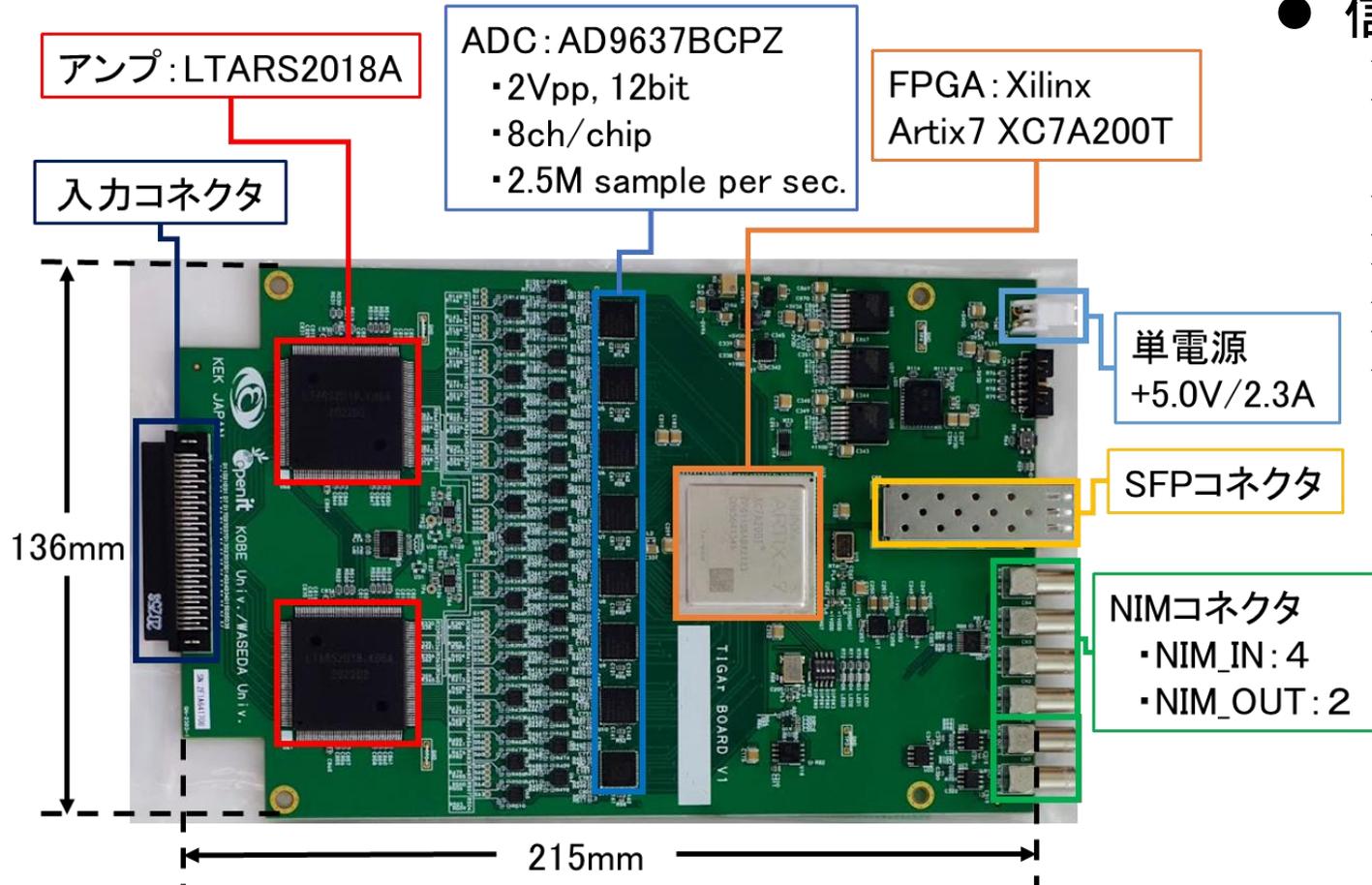
■ Anode構造の実装による信号分割の再現

Anodeへの信号誘起のsimulationに対してAnode構造を実装
→粒子の通過位置や角度を変化させシミュレーションを行う



- Anode構造を実装することで信号分割を再現

- “TPC electronics for Ionized signal in Gas and liquid Argon”
 - KEK坂下氏, KEK岸本氏, 神戸大, 早稲田大の共同での開発 (Open-it project)
 - LArTPC, ガスTPCで使用される想定し, 低ノイズ・ダイナミックレンジ・多チャンネルを要求



● 信号処理システム

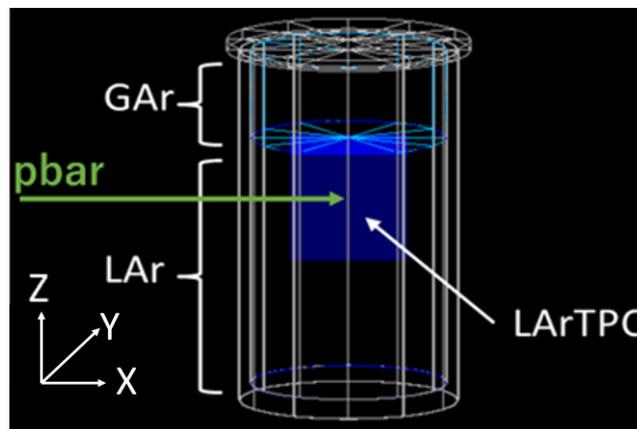
- 32 ch分の検出器信号をFTを介して取得
→4枚で128 chを読み出し可能
- LTARS: 信号増幅・波形整形
- ADC: 2 V-12 bitのデジタル
- FPGA: ファームウェアでの処理
 - ✓ 外部トリガーをNIMから入力してデータを伝送
 - ✓ 通信にはSiTCP通信を使用

LTARS2018A 設計値	
Chip size	2.5 mm × 5 mm
チャンネル数	16 ch
ゲイン	HG: 10 mV/fC
ENC(検出器容量: 100 pF)	2000e-(3.2mV)
動作温度	室温

T98 Simulation

実装した物質

- LArTPC : 30 × 30 × 30 cm³
- LAr容器直径 : 50 cm
- 容器(6mmSUS)

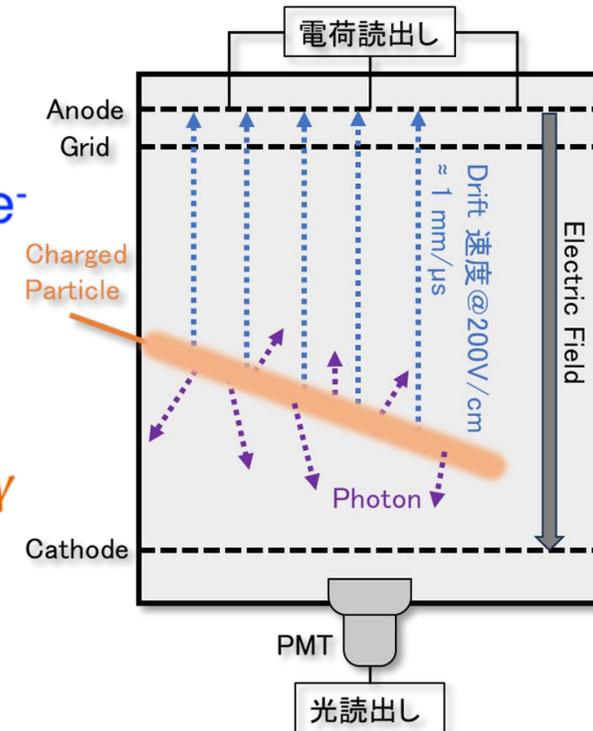
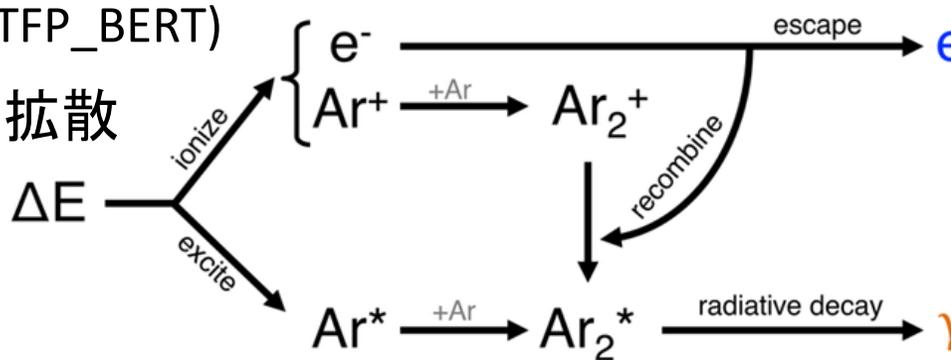


■ 入射粒子

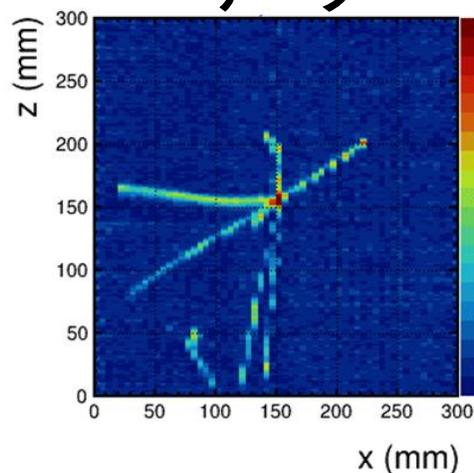
- ビームカウンターで測定した運動量・入射方向

■ LArTPC応答

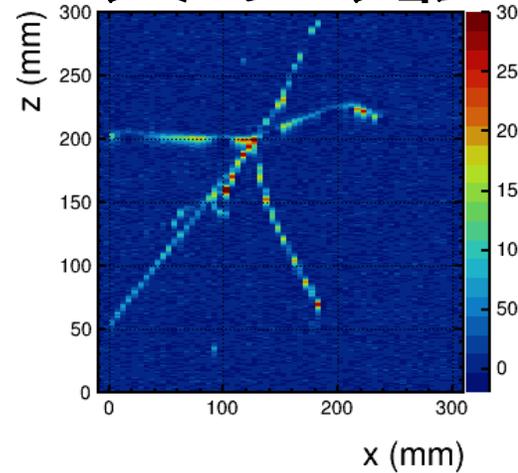
- エネルギー損失: GEANT4 (v11.1.3, FTFP_BERT)
- 電離電子の生成・再結合・ドリフト・拡散 (純度による減衰)
- Anodeへの信号誘起
- 読出しエレキの応答
- 波形応答関数 + ADC変換 + Noiseの再現



データ



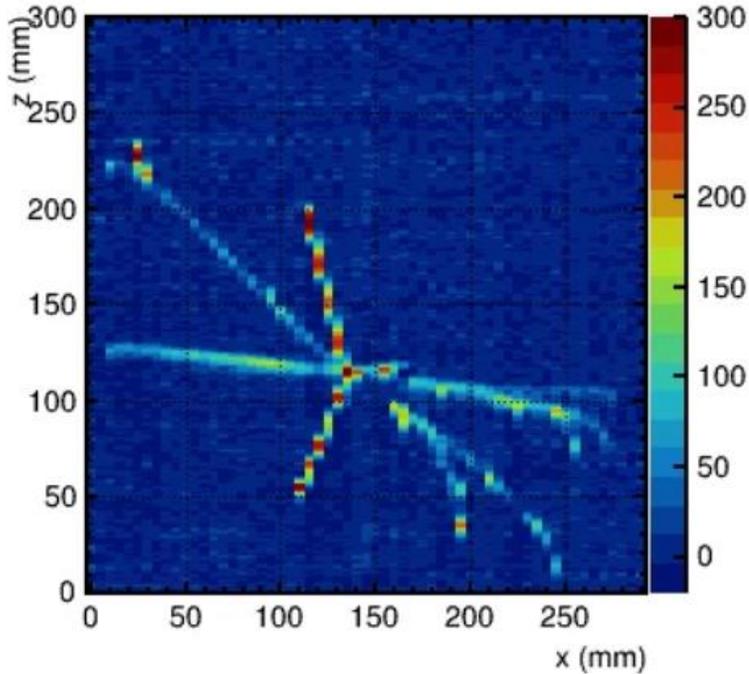
シミュレーション



T98データ解析の方針

解析目標: \bar{p} -Ar反応の理解

■ \bar{p} 事象の理解



- ① 検出器応答の理解
- ② 停止後の2次粒子の理解

① 検出器応答の理解

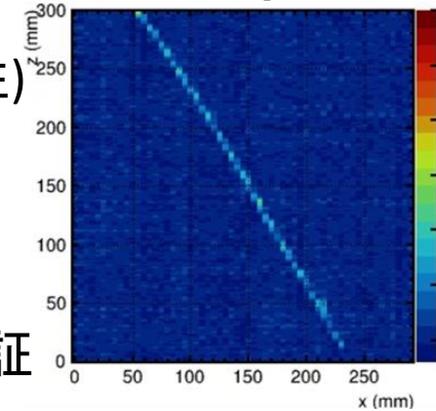
(1) 宇宙線 μ データ

検出器応答(ch/位置依存性)についての較正

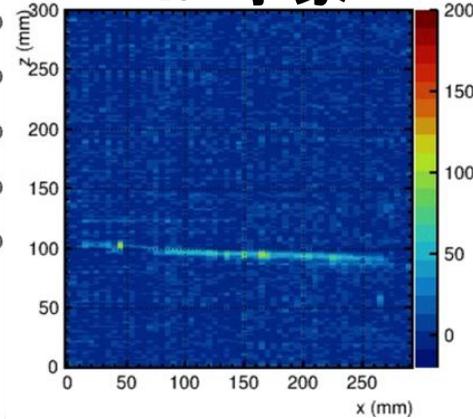
(2) π^- データ

ビームデータを用いて
検出器応答の較正結果検証

宇宙線 μ 事象



π^- 事象



② \bar{p} 事象-2次粒子の物理量の抽出

• 物理量

飛跡の本数, 運動量(飛跡の長さ), エネルギー損失, etc

• 解析手法

- (1) オーソドックスな解析
- (2) 深層学習(CNN)を用いた解析

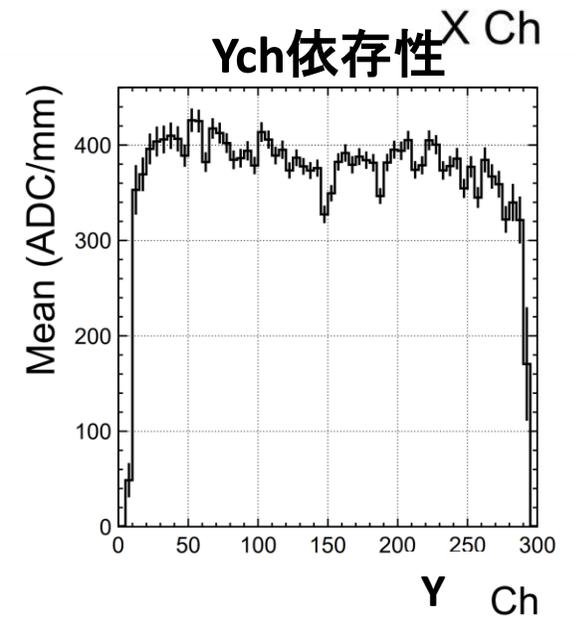
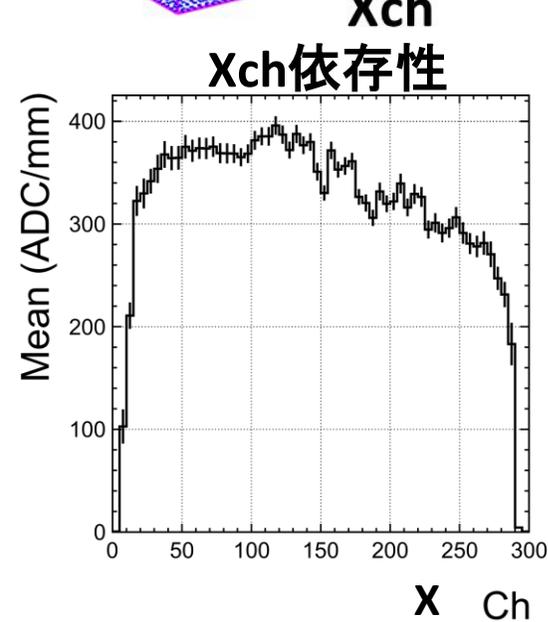
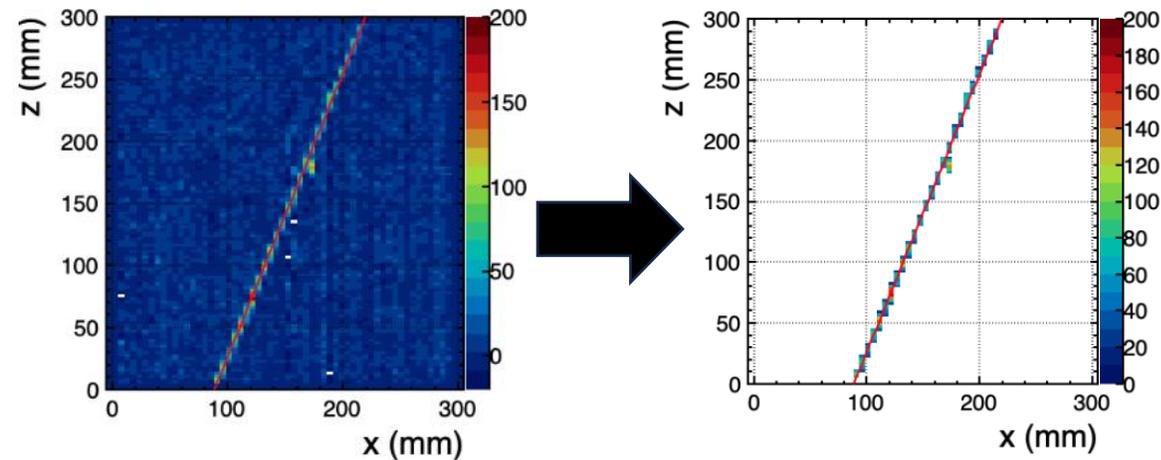
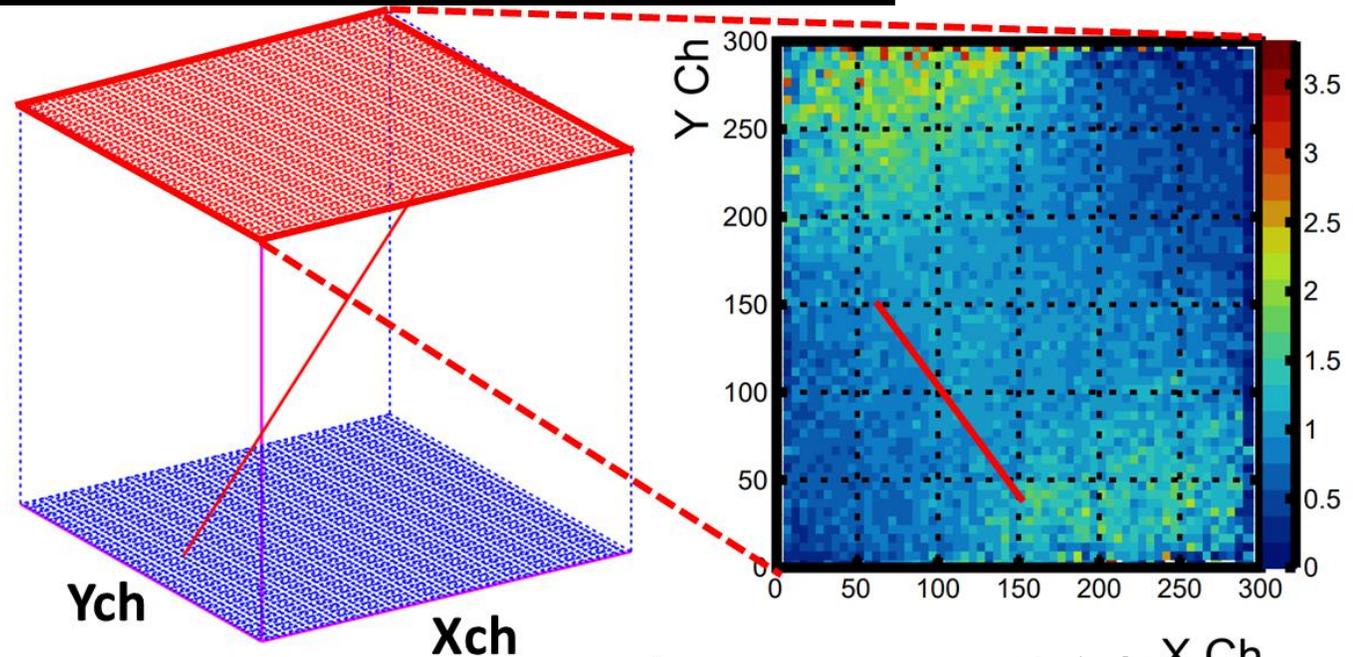
➡ 検出器較正 → 反陽子事象解析/Simulationとの比較

①-(1) 宇宙線 μ を用いた検出器応答較正

■ 位置・Ch依存性

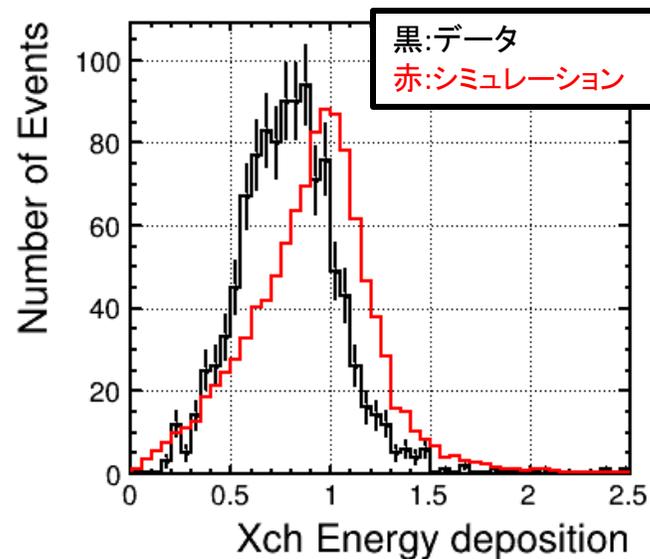
- 一様に入射する宇宙線データで確認
 - X, Y, Zを $60 \times 60 \times 5$ 分割
 - 各領域/Chでの信号を計算
- Hough変換で飛跡再構成
—単位飛跡長あたりの信号量の平均を求める

ピクセル毎の依存性をX/Yに射影
→各Chの平均値でデータを較正

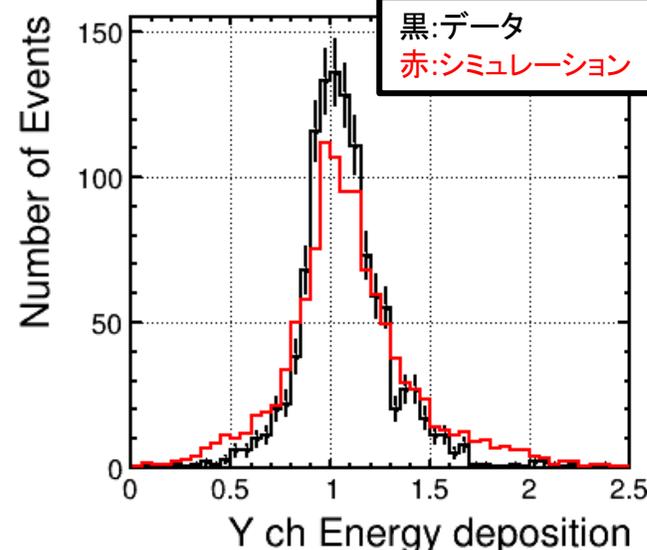
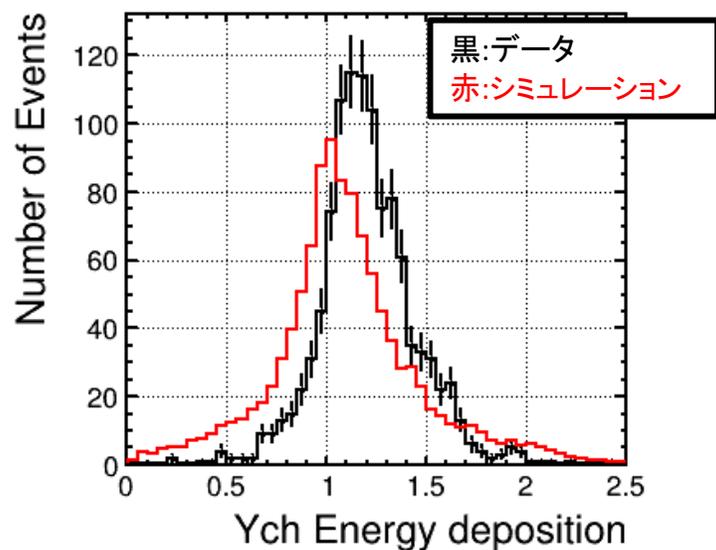
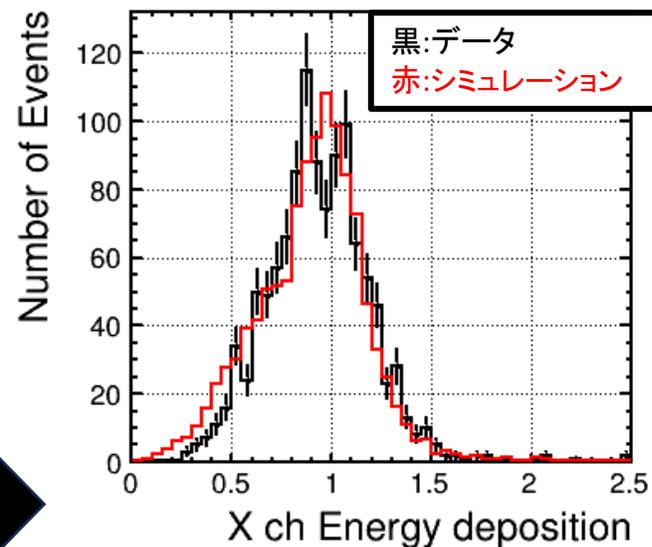


①-(2) π^- を用いた検出器応答の較正結果検証

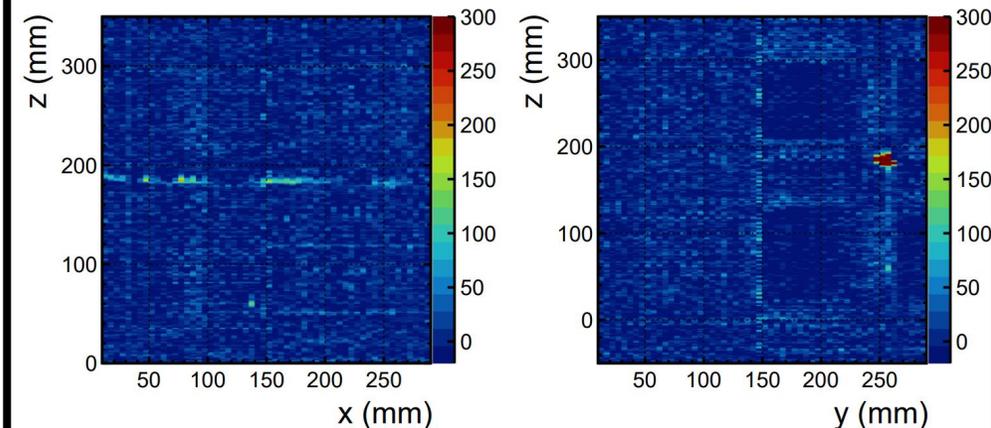
エネルギー損失分布(較正前)



エネルギー損失分布(較正後)



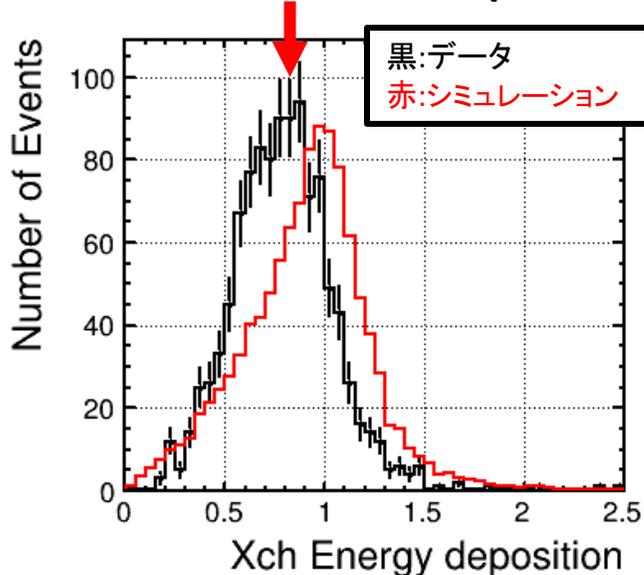
π^- 事象例



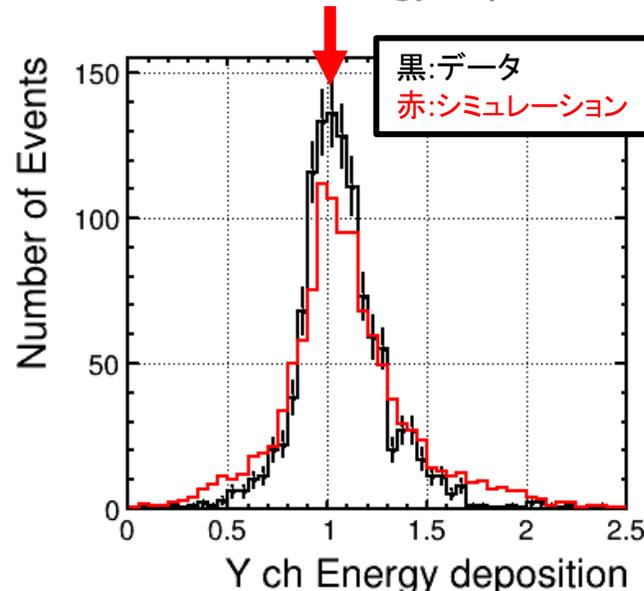
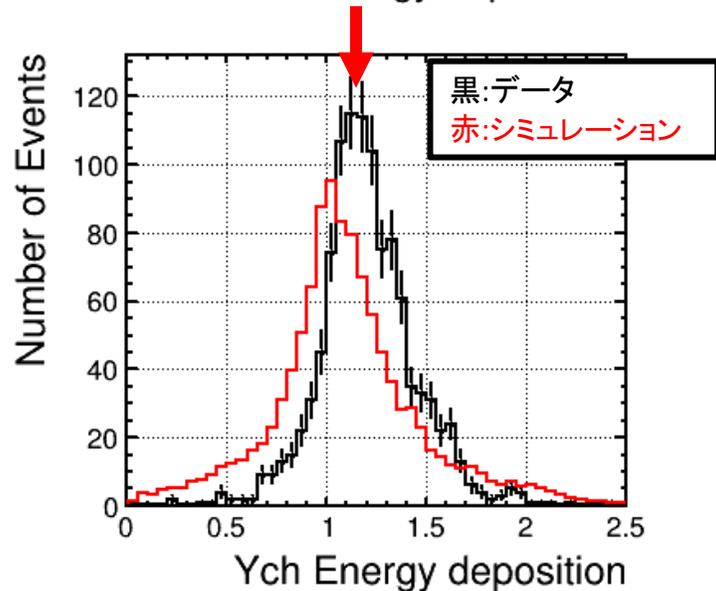
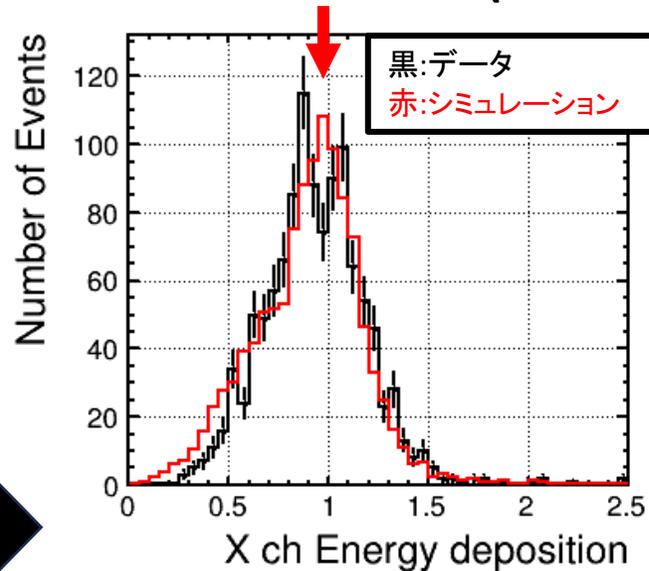
→ 較正後のデータが
シミュレーションによって再現

①-(2) π^- を用いた検出器応答の較正結果検証

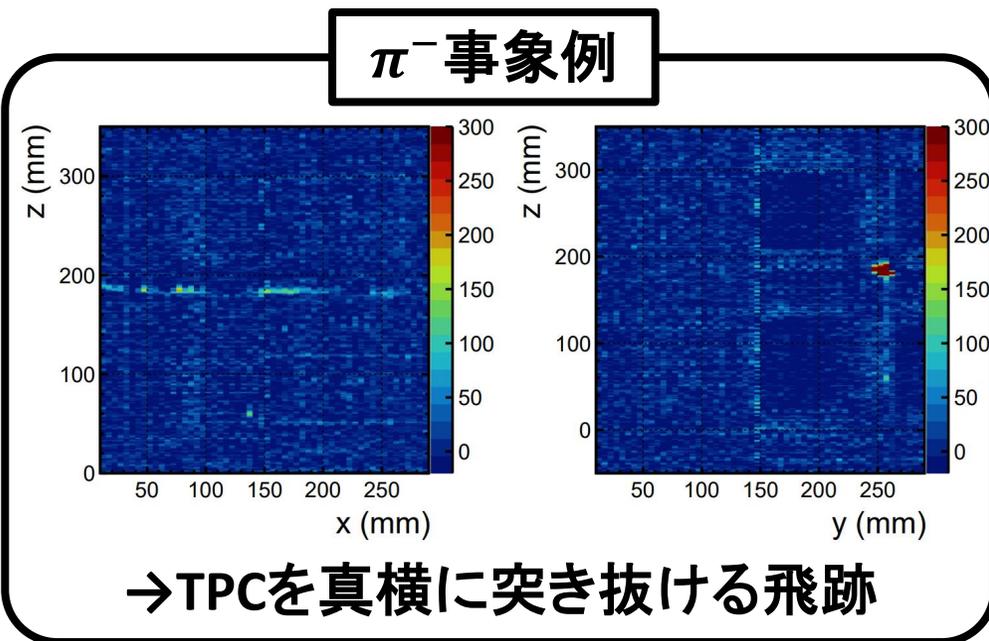
エネルギー損失分布(較正前)



エネルギー損失分布(較正後)



π^- 事象例



→ 較正後のデータが
シミュレーションによって再現

② \bar{p} 事象-2次粒子の特徴量の抽出

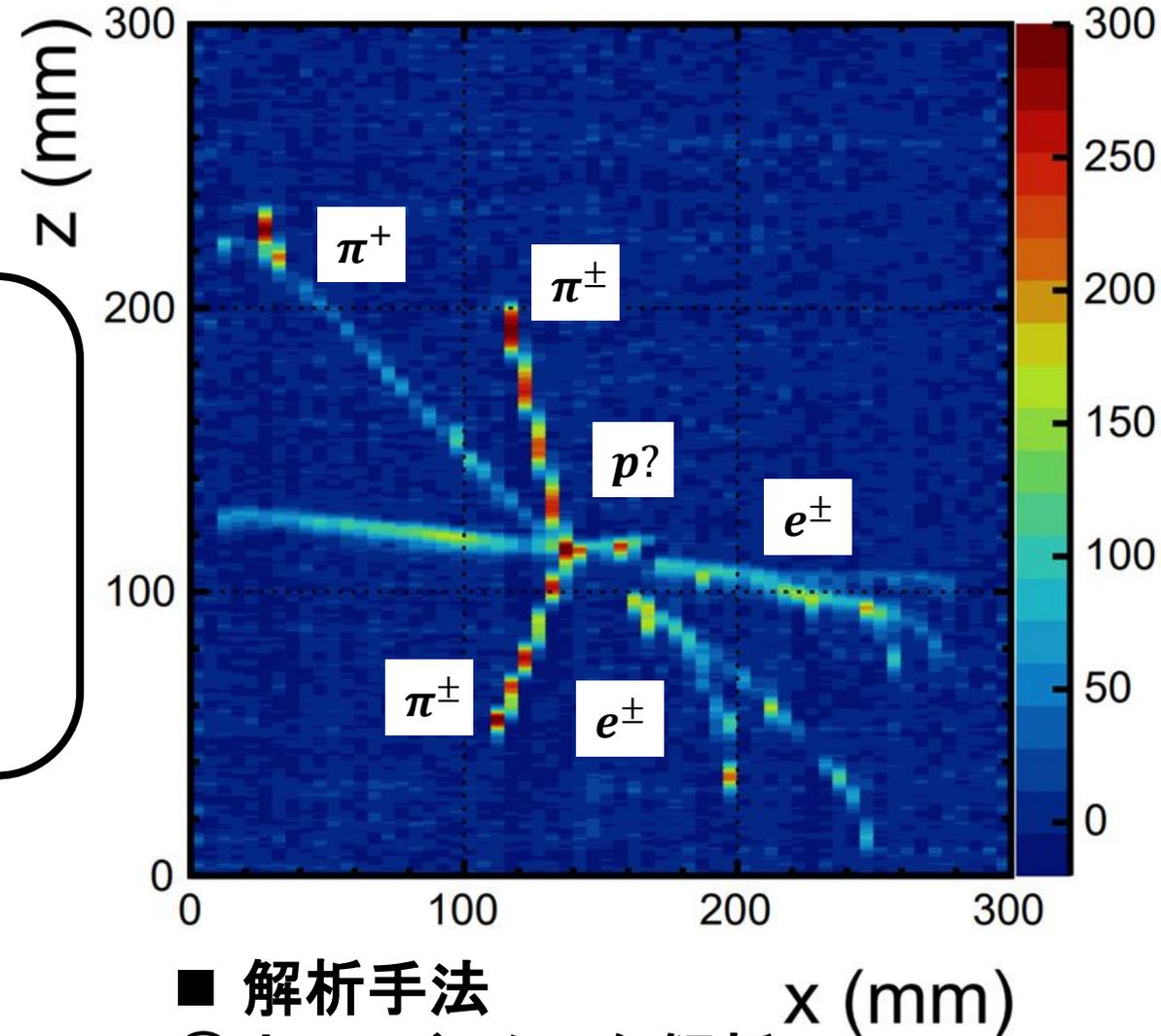
画像データから2次粒子の物理量(運動量, 飛程)に相当する特徴量を抽出

■ 主な2次粒子・飛跡の特徴

- π^\pm : 基本的にMIPでTPCを突き抜ける
一部 π^+ が $\mu^+ \rightarrow e^+$ を出す反応
- p : 飛跡が短い, dE/dx が大きい
- π^0 : $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ となりEMシャワーとして観測
停止点から離れたところから広がった飛跡



- 突き抜ける, 途中で停止, 途中から現れる飛跡
 - 飛跡のエネルギー損失の大小
 - 湾曲した飛跡, 途中で屈折した飛跡
- このような飛跡の特徴を抽出



■ 解析手法

- ①オーソドックスな解析
- ②深層学習(CNN)を用いた解析

② \bar{p} 事象-2次粒子の特徴量の抽出

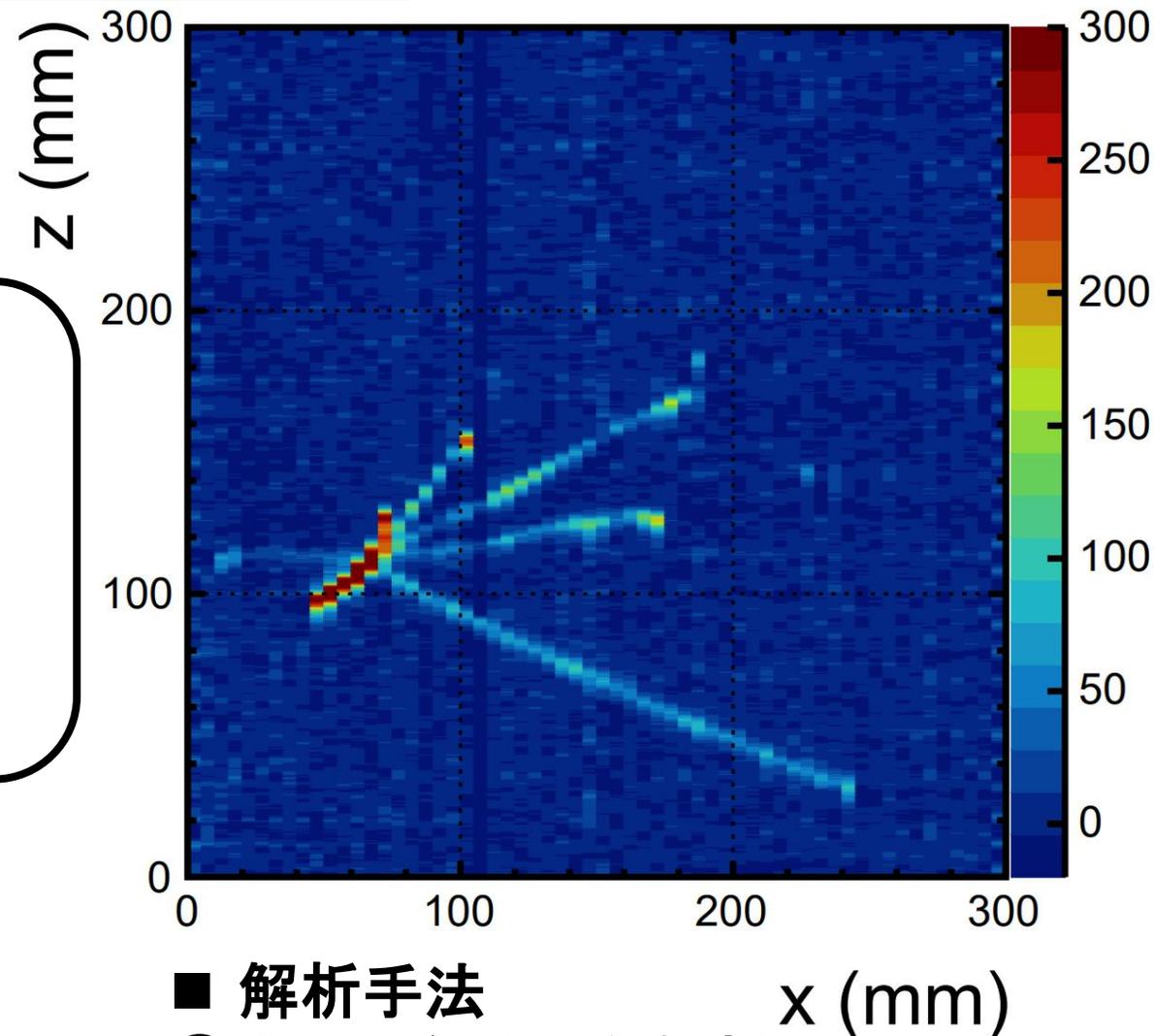
画像データから2次粒子の物理量(運動量, 飛程)に相当する特徴量を抽出

■ 主な2次粒子・飛跡の特徴

- π^\pm : 基本的にMIPでTPCを突き抜ける
一部 π^+ が $\mu^+ \rightarrow e^+$ を出す反応
- p : 飛跡が短い, dE/dx が大きい
- π^0 : $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ となりEMシャワーとして観測
停止点から離れたところから広がった飛跡



- 突き抜ける, 途中で停止, 途中から現れる飛跡
 - 飛跡のエネルギー損失の大小
 - 湾曲した飛跡, 途中で屈折した飛跡
- このような飛跡の特徴を抽出



■ 解析手法

- ①オーソドックスな解析
- ②深層学習(CNN)を用いた解析

② \bar{p} 事象-2次粒子の特徴量の抽出

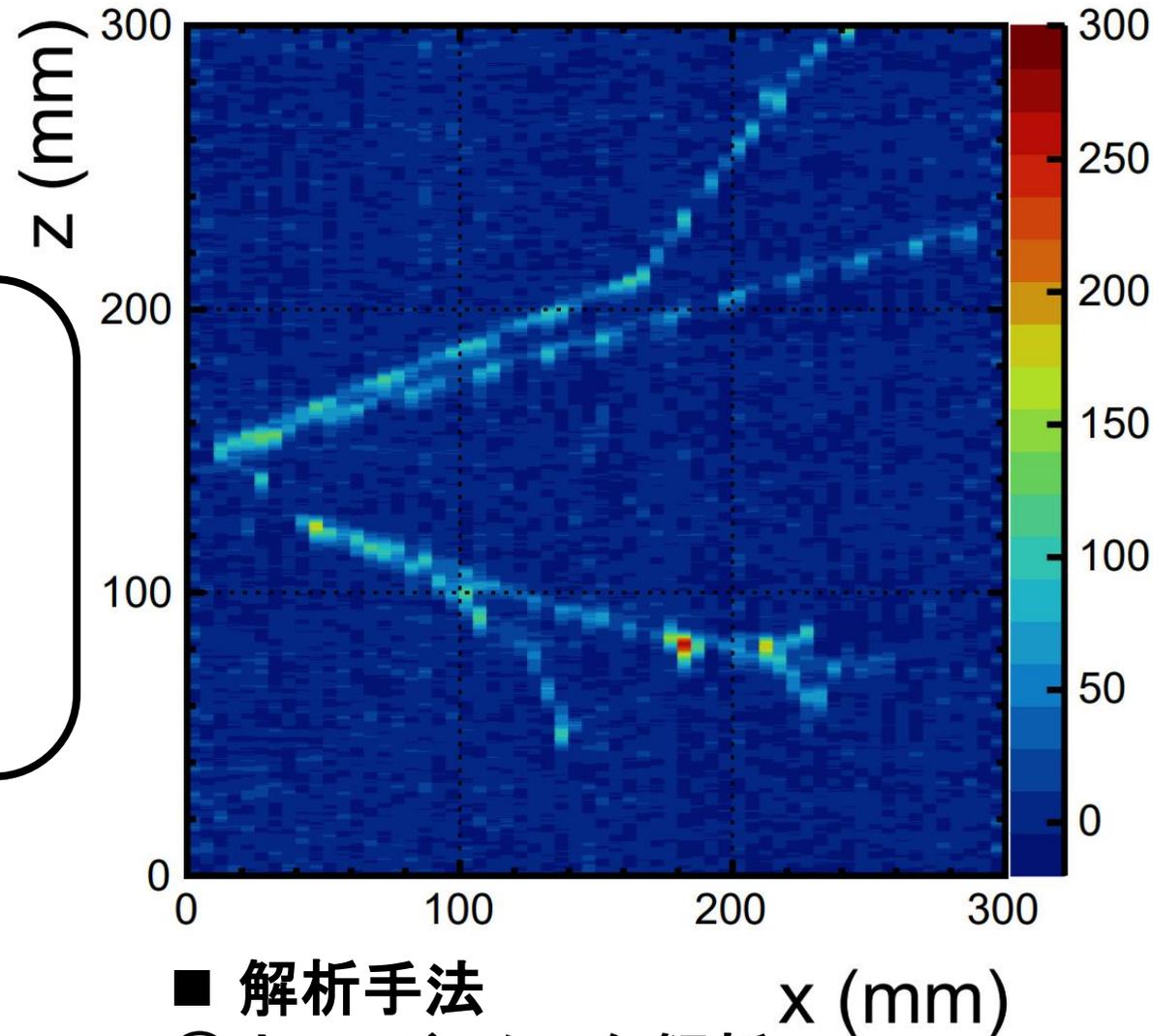
画像データから2次粒子の物理量(運動量, 飛程)に相当する特徴量を抽出

■ 主な2次粒子・飛跡の特徴

- π^\pm : 基本的にMIPでTPCを突き抜ける
一部 π^+ が $\mu^+ \rightarrow e^+$ を出す反応
- p : 飛跡が短い, dE/dx が大きい
- π^0 : $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ となりEMシャワーとして観測
停止点から離れたところから広がった飛跡



- 突き抜ける, 途中で停止, 途中から現れる飛跡
 - 飛跡のエネルギー損失の大小
 - 湾曲した飛跡, 途中で屈折した飛跡
- このような飛跡の特徴を抽出



■ 解析手法

- ①オーソドックスな解析
- ②深層学習(CNN)を用いた解析

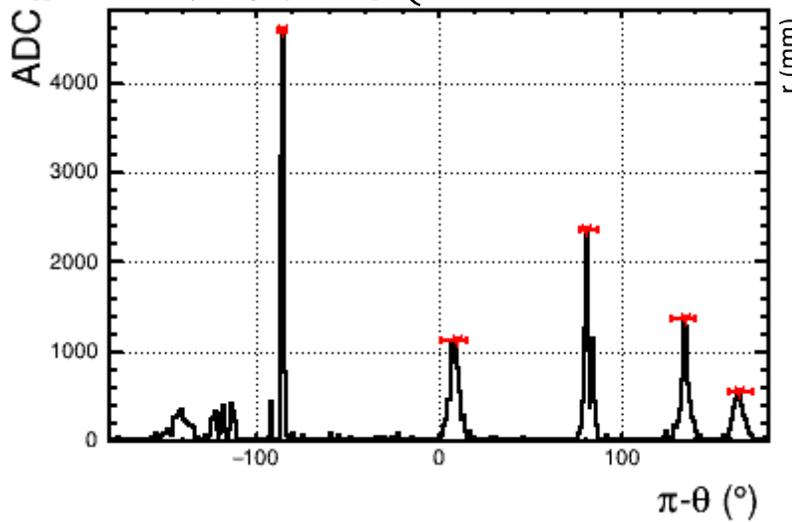
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

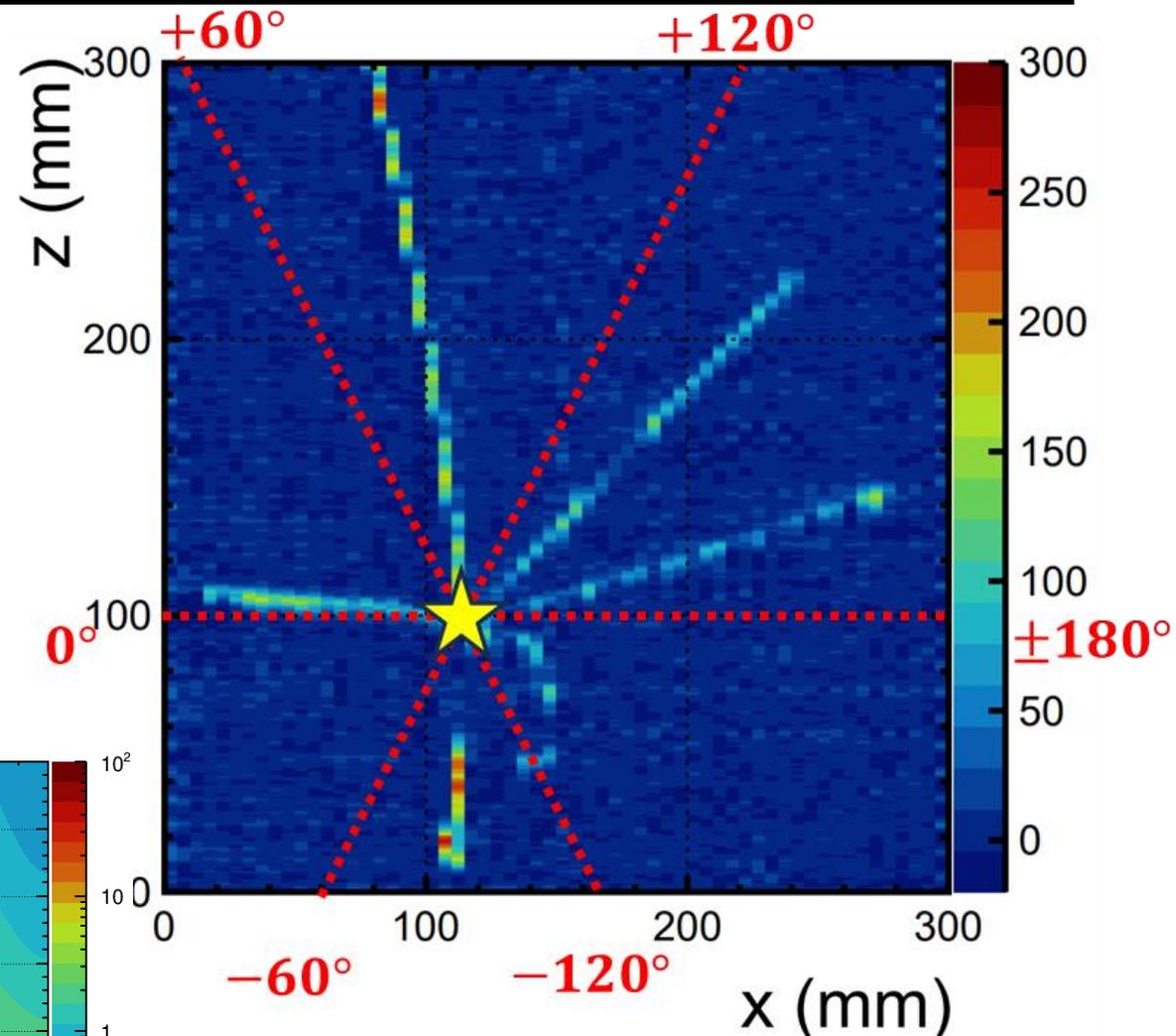
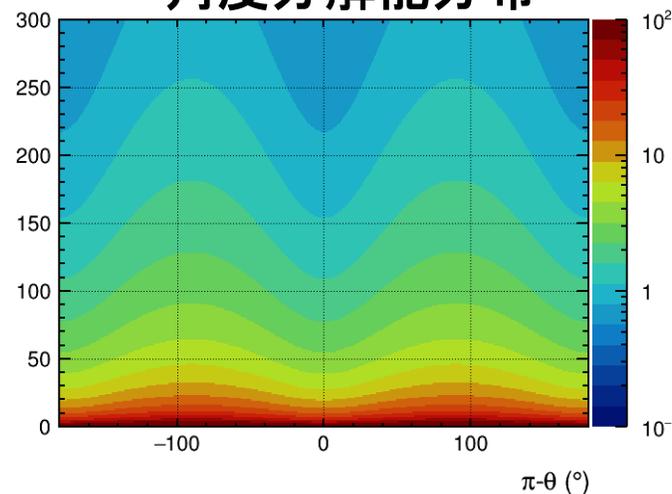
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 4.5 \sim 7.5 \text{cm}$)



角度分解能分布



分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

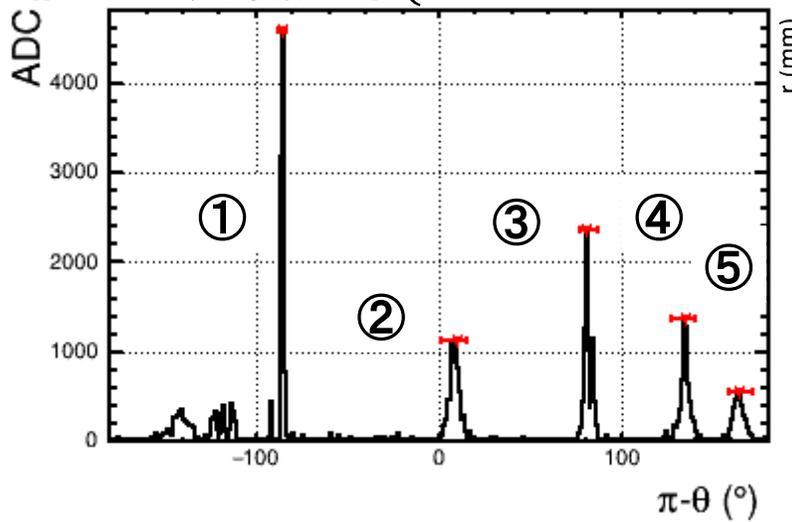
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

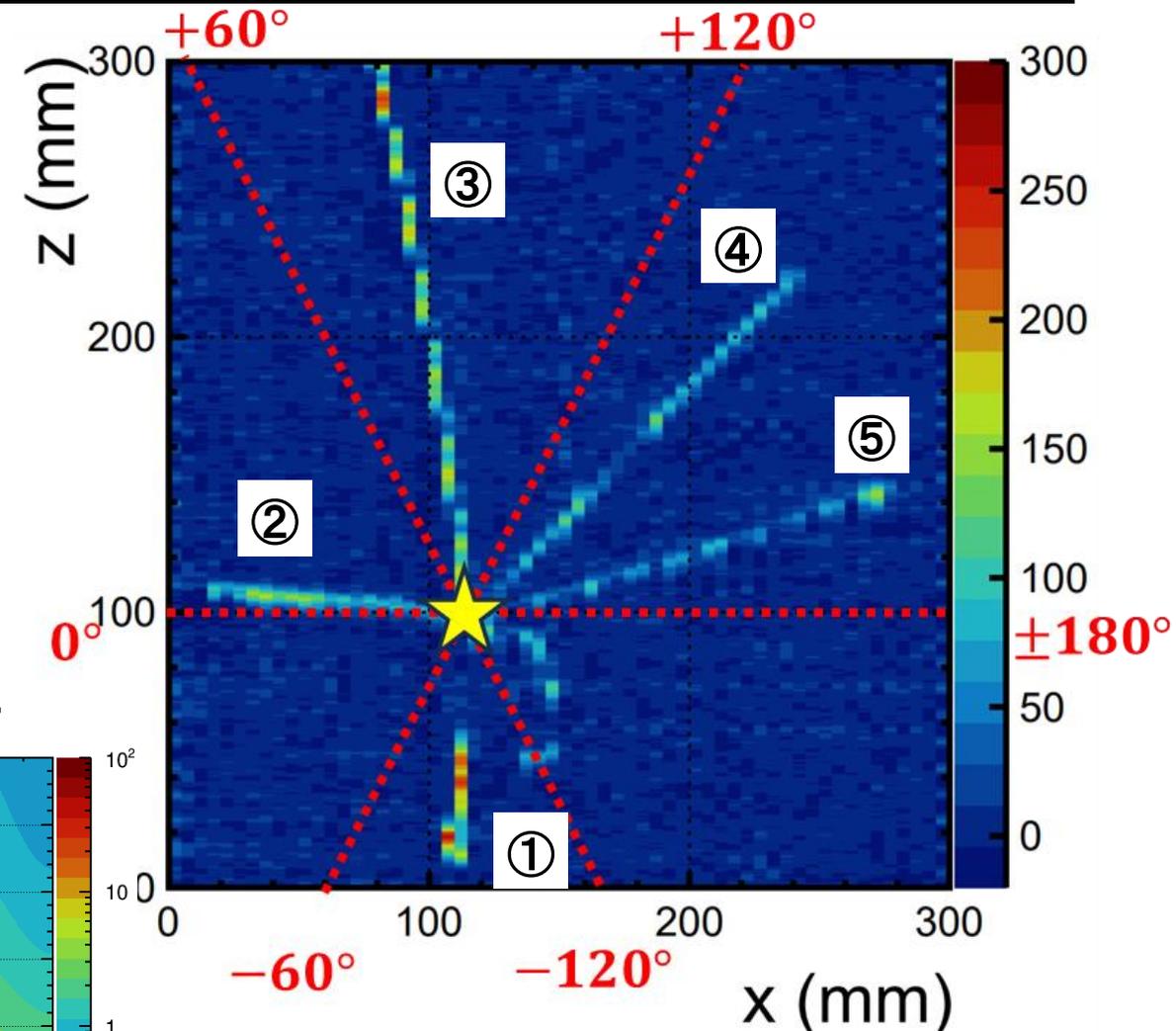
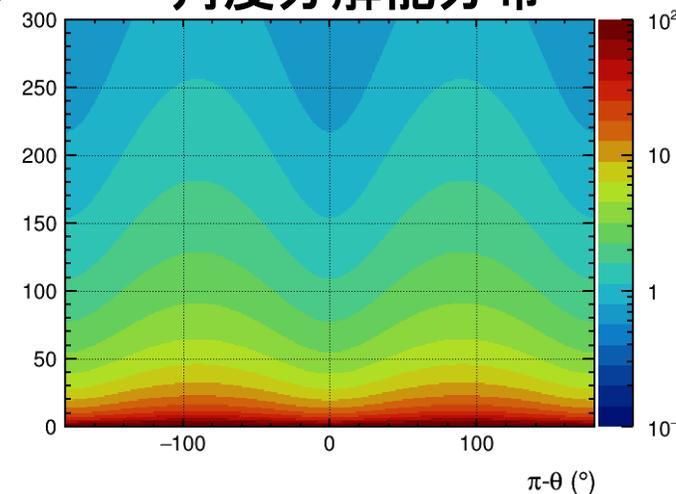
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 4.5 \sim 7.5 \text{cm}$)

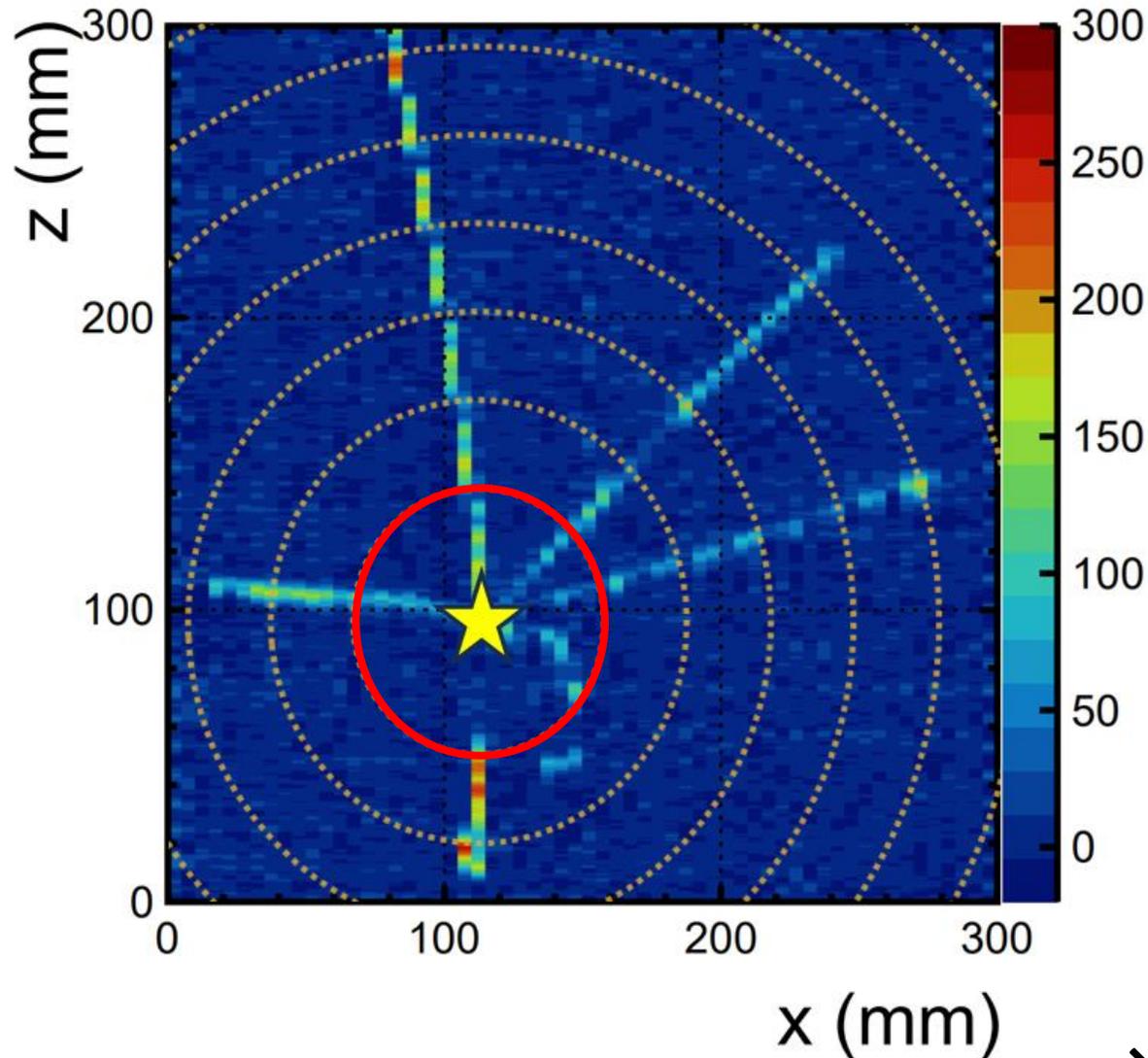


角度分解能分布



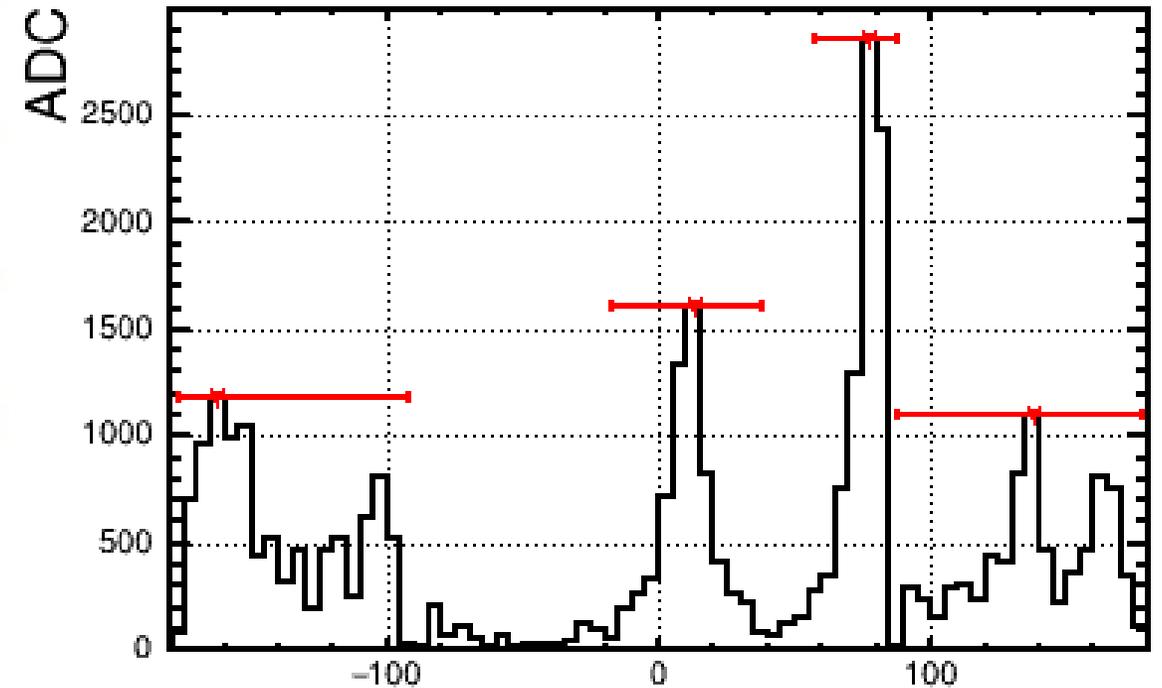
分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



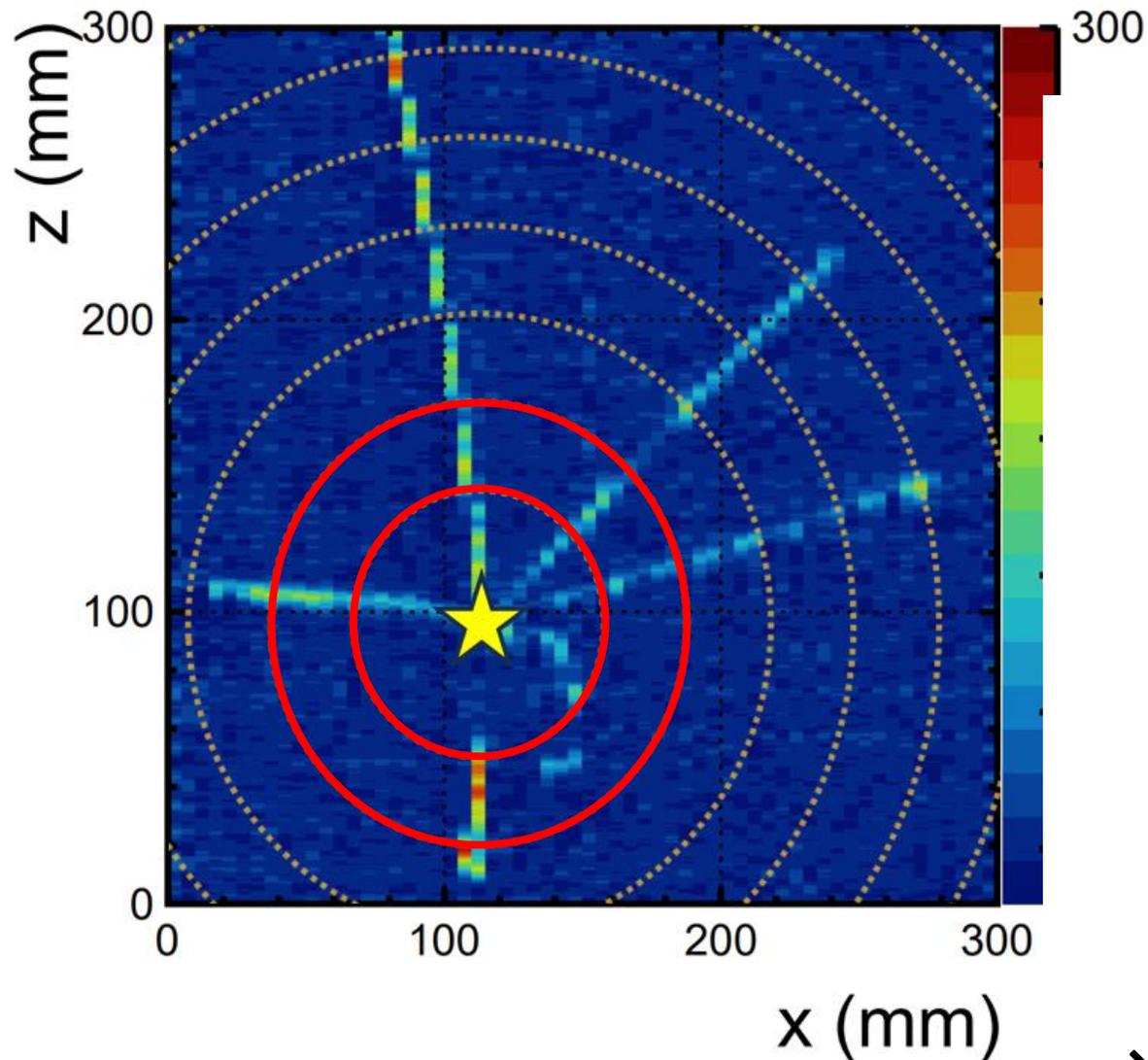
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 1.5 \sim 4.5\text{cm}$ の角度分布



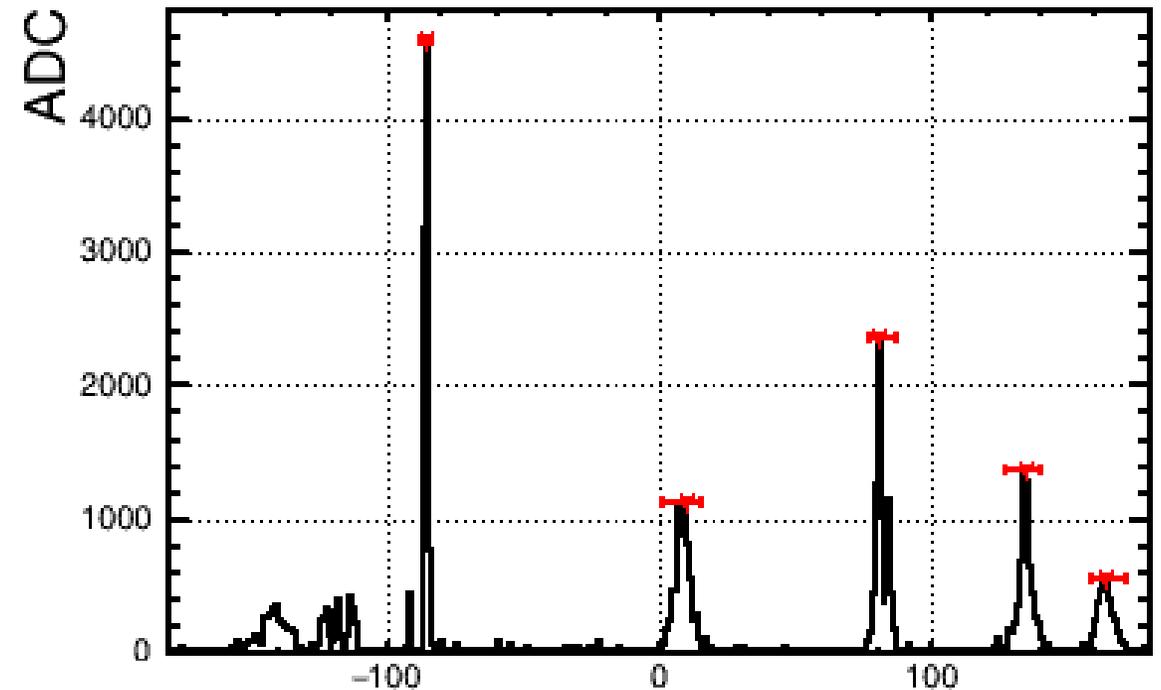
- 飛跡の長さに対応して検出される π - θ ($^\circ$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



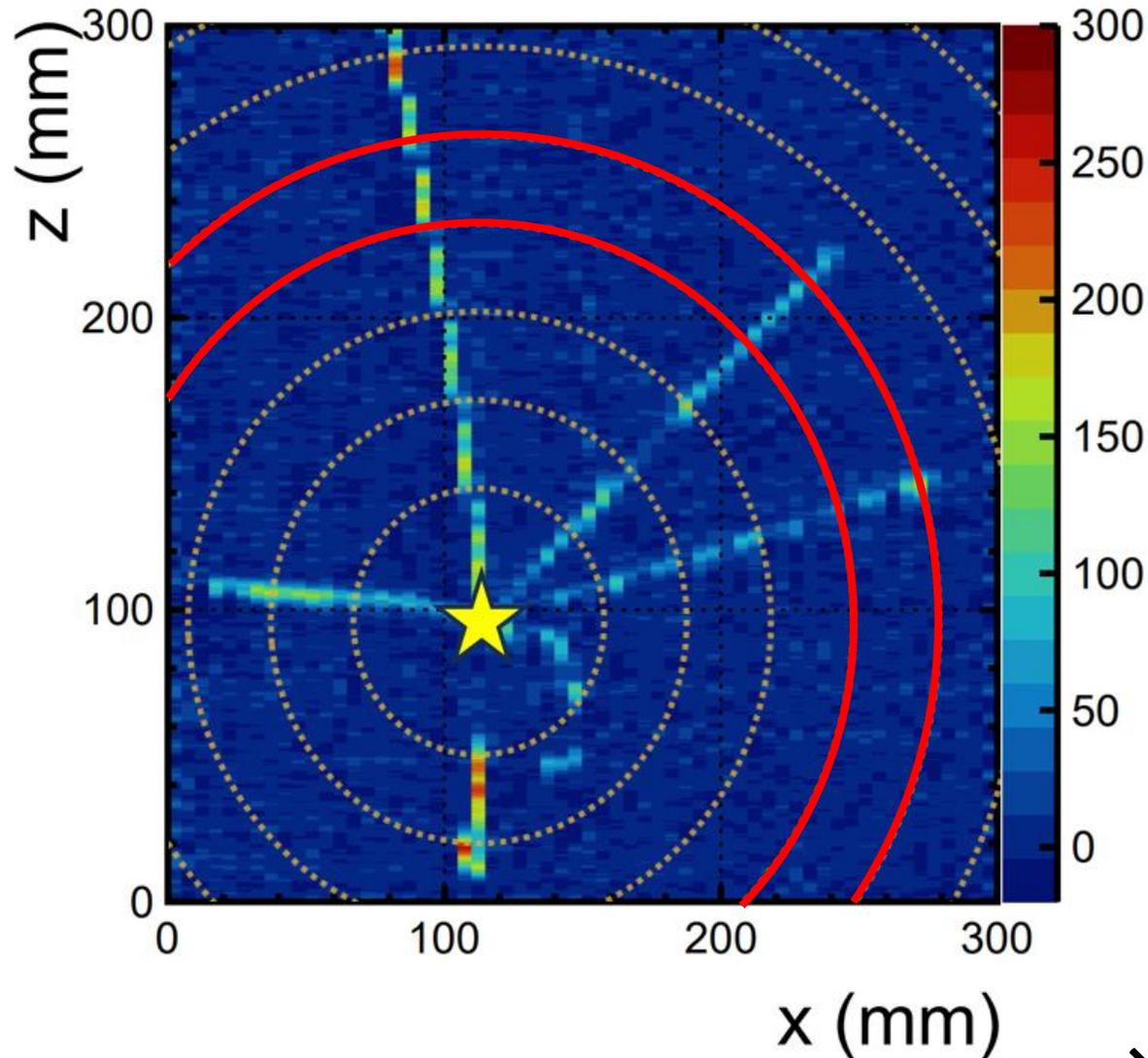
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 7.5 \sim 10.5\text{cm}$ の角度分布



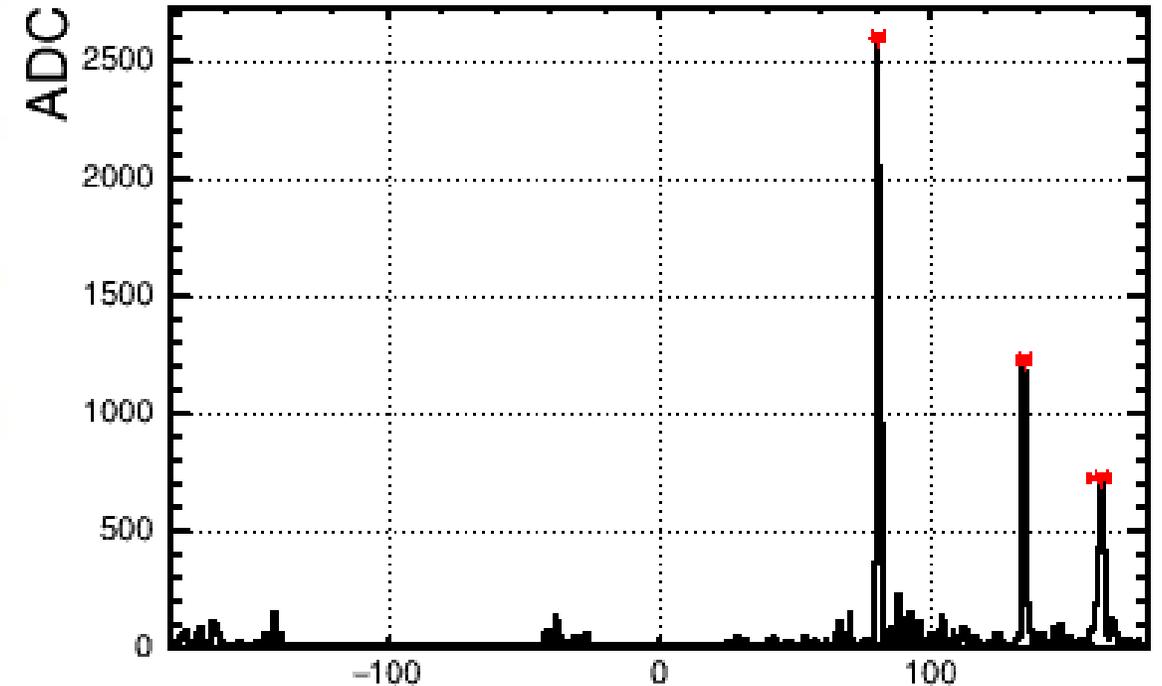
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi-\theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

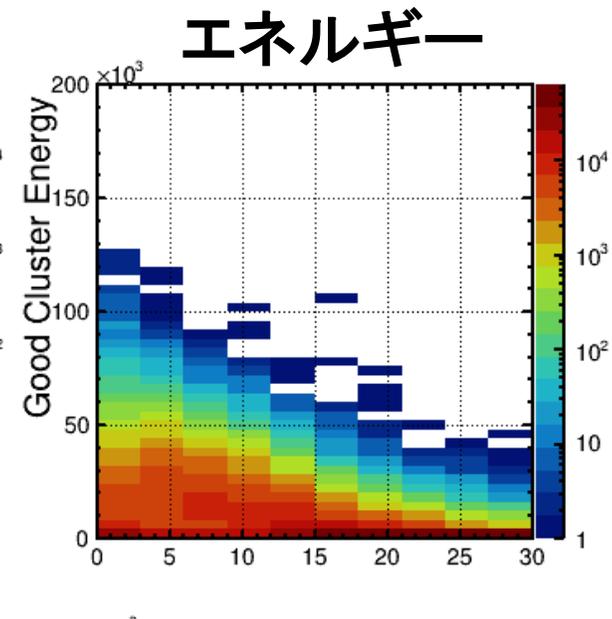
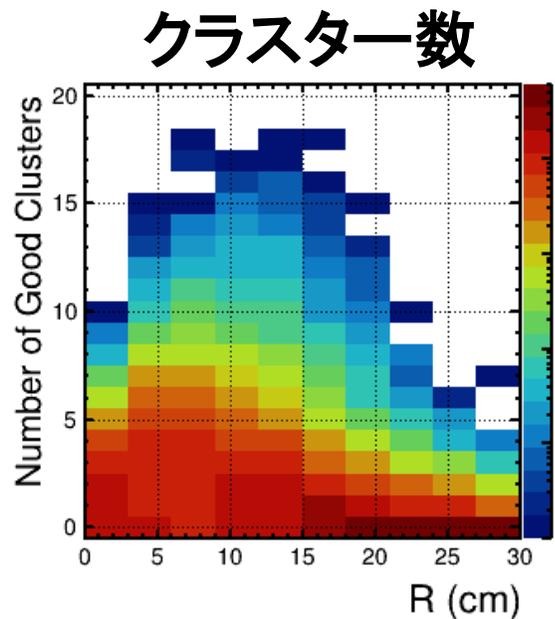
$R = 10.5 \sim 13.5\text{cm}$ の角度分布



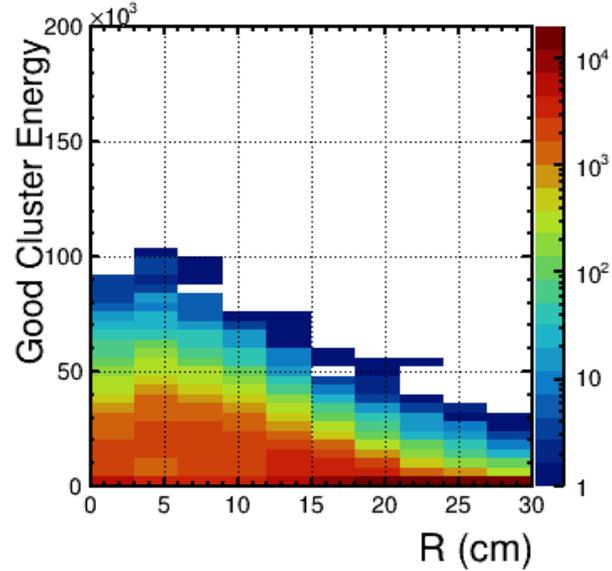
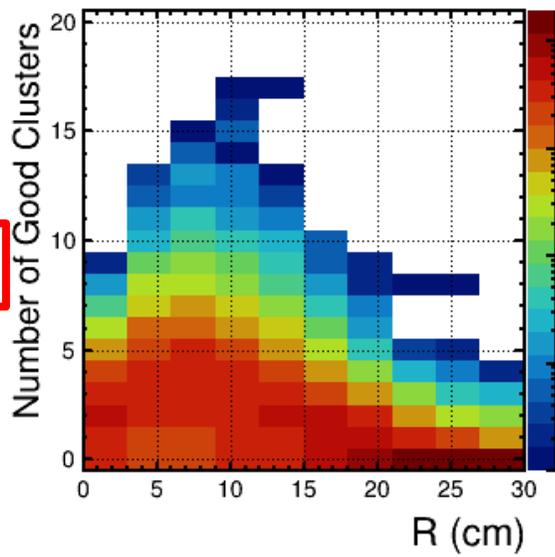
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi\text{-}\theta$ ($^\circ$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量抽出結果

データ



シミュレーション



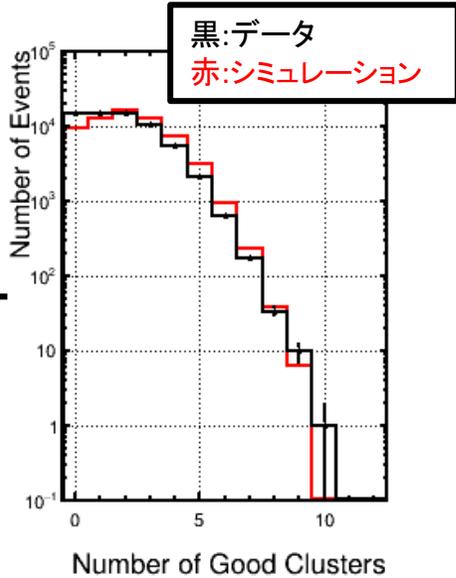
使用データ

- イベントセレクション
 - ① \bar{p} イベント
 - ② PileUpなし(入射粒子数=1)
- イベント数
データ : 64450 イベント
シミュレーション : 20000 イベント
(データにイベント数をスケール)
- クラスタ選別
— 予測RMSに近い飛跡を選択
→ $0.2 < \frac{RMS_{data}}{RMS_{pre}} < 1.2$
- データとシミュレーションで分布は概ね一致
→ Rの値ごとで比較

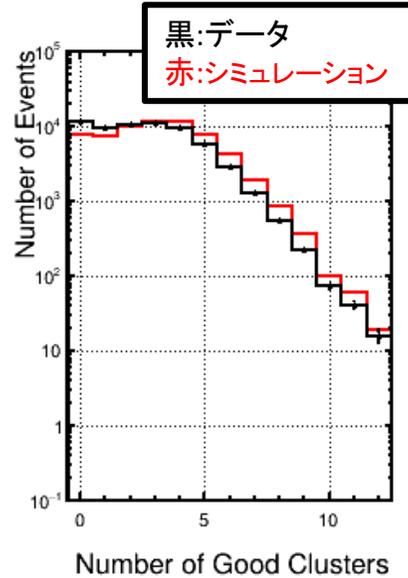
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量抽出結果

クラスター

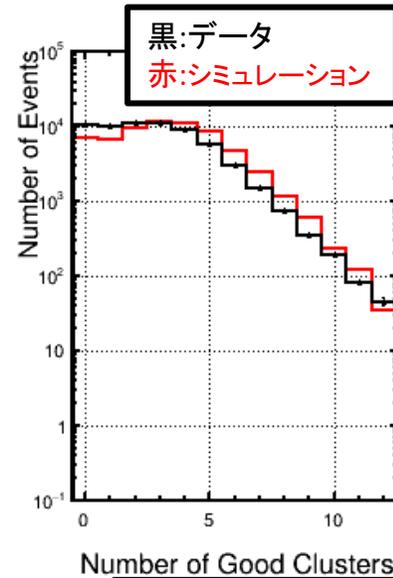
$R = 0 \sim 3\text{cm}$



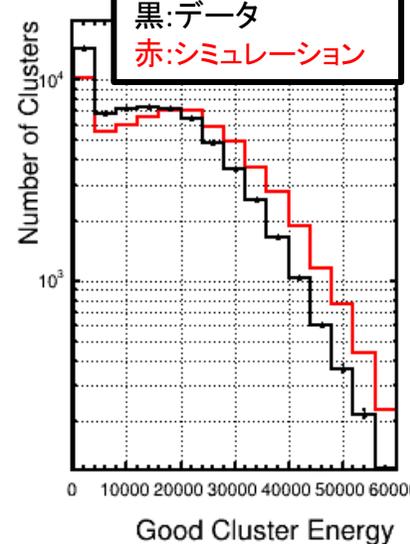
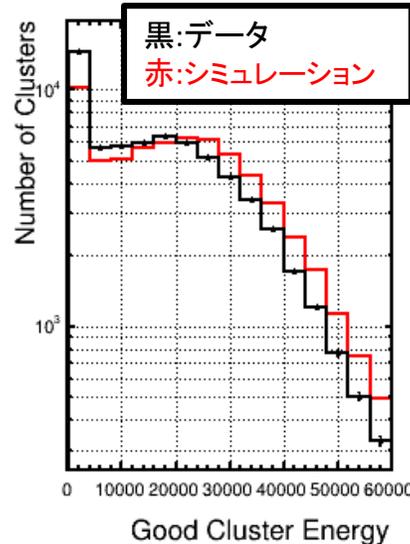
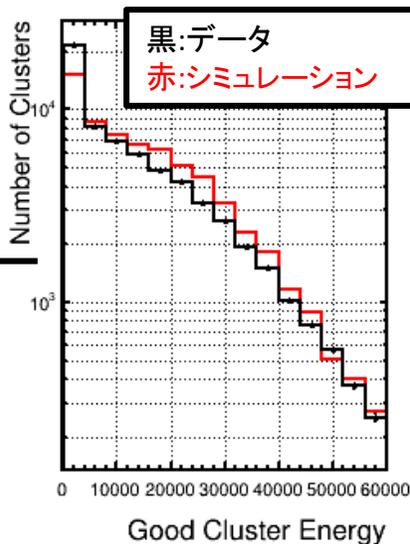
$R = 3 \sim 6\text{cm}$



$R = 6 \sim 9\text{cm}$



エネルギー



使用データ

- イベントセレクション
 - ① \bar{p} イベント
 - ② PileUpなし(入射粒子数=1)
- イベント数
 データ : 64450 イベント
 シミュレーション : 20000 イベント
 (データにイベント数をスケール)
- クラスタ選別
 一予測RMSに近い飛跡を選択

$$\rightarrow 0.2 < \frac{RMS_{data}}{RMS_{pre}} < 1.2$$
- データとシミュレーション
 で分布は概ね一致

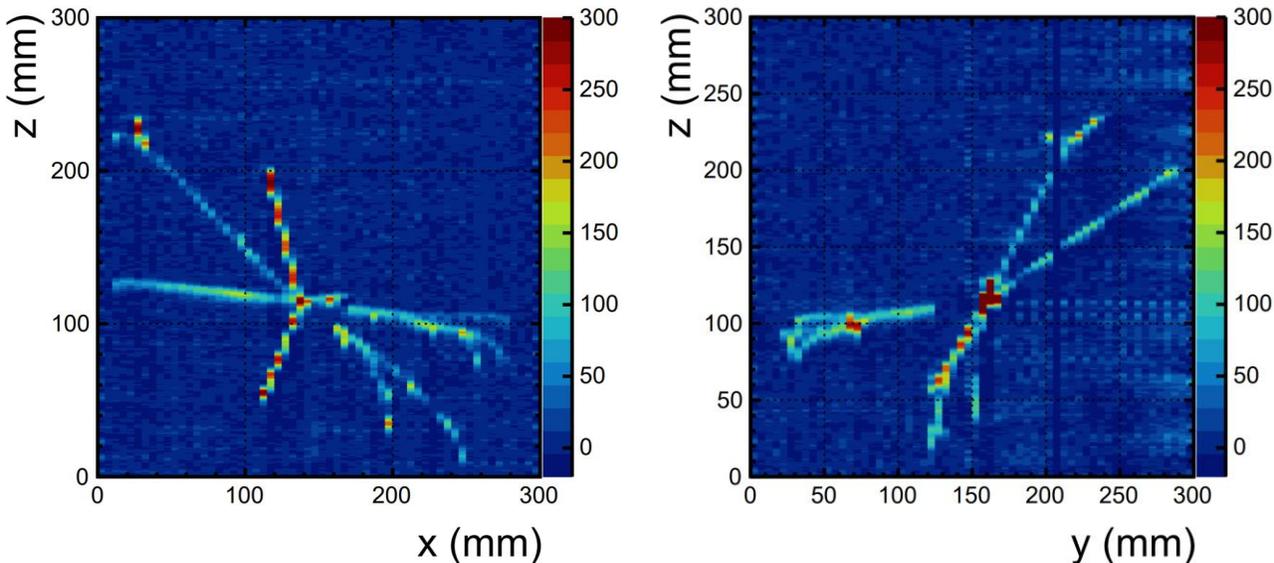
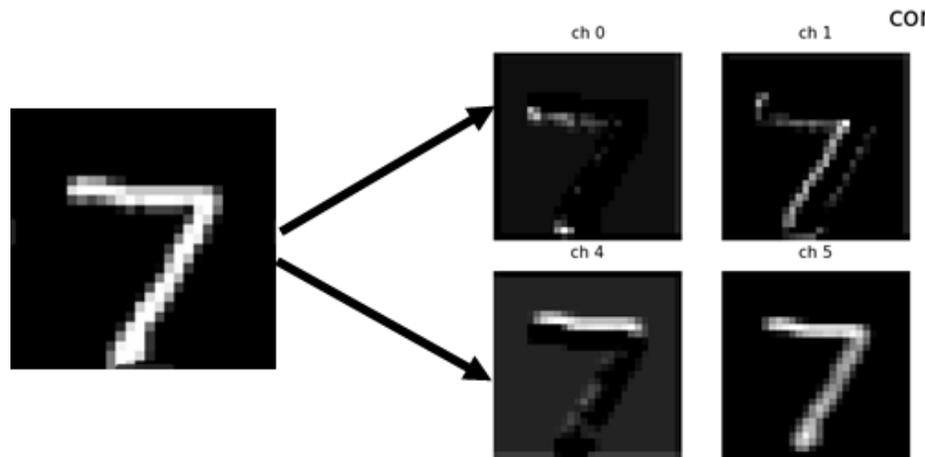
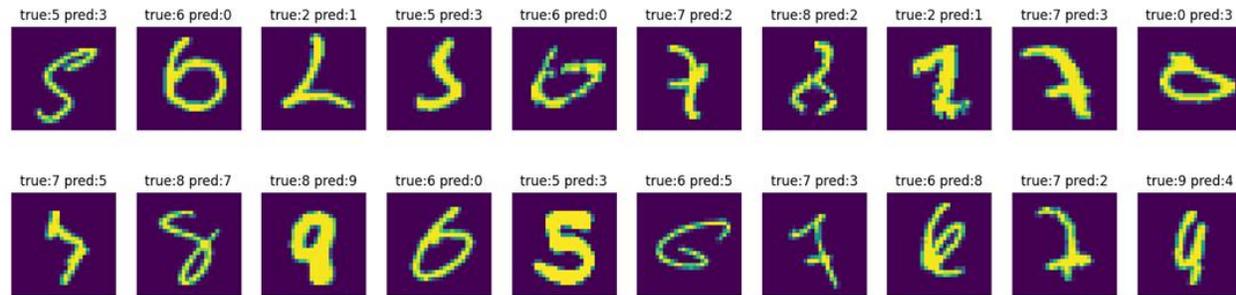
$$\rightarrow \text{CNNで詳細に解析(ongoing)}$$

②-(2)CNNによる解析

■ CNNの概要

- CNN・・・畳み込みニューラルネットワーク
→画像や映像の認識・分析に強い深層学習のモデル
手書き数字のデータセットであるMNISTを用いたものが有名

- 畳み込み・・・入力データにフィルターをスライドさせながら演算
→画像から局所的な特徴(角やカーブなど)を抽出



➡ LArTPCの飛跡(画像)から特徴量を抽出

②-(2)CNNによる解析

目標: CNNを用いて画像データから
物理量(特徴量)を抽出する

■ 方針

① 反応過程

捕獲事象 or 非弾性散乱事象の識別

② 2次粒子の本数

陽子, π^+ , π^- , π^0 の粒子種ごとに本数を数える

→現在はGeant4のみで教師データを作成し学習させる

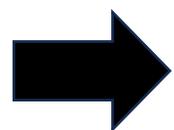
■ 現在までの結果

① 反応過程

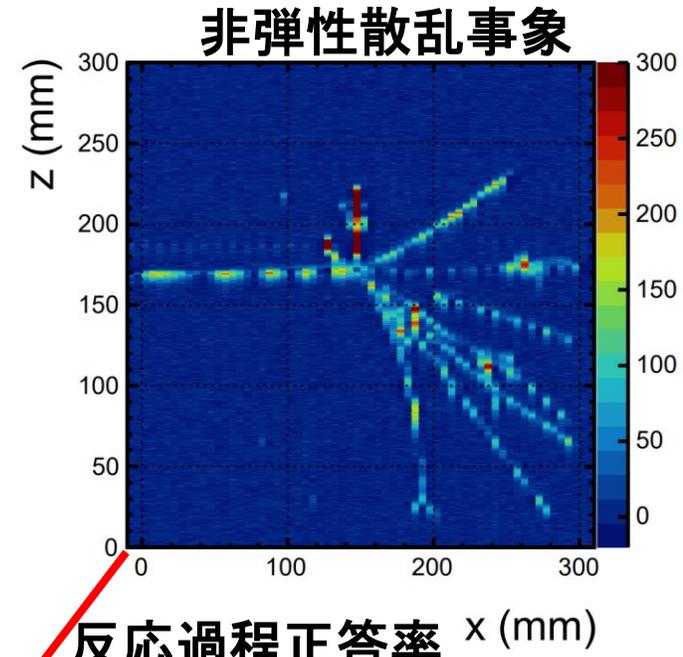
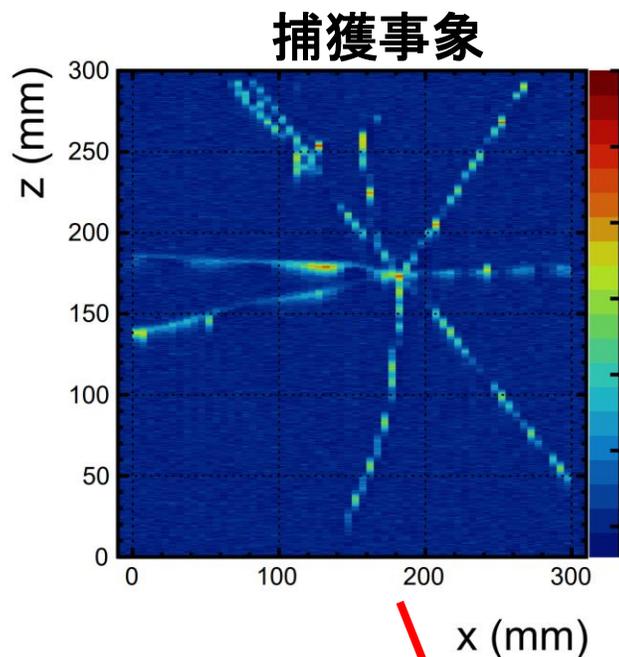
• Capture(0) or それ以外(1)の分類
→9割以上の精度で求められている

② 2次粒子の個数

• 0,1,2,3個以上の4分類
→ongoingで開発中



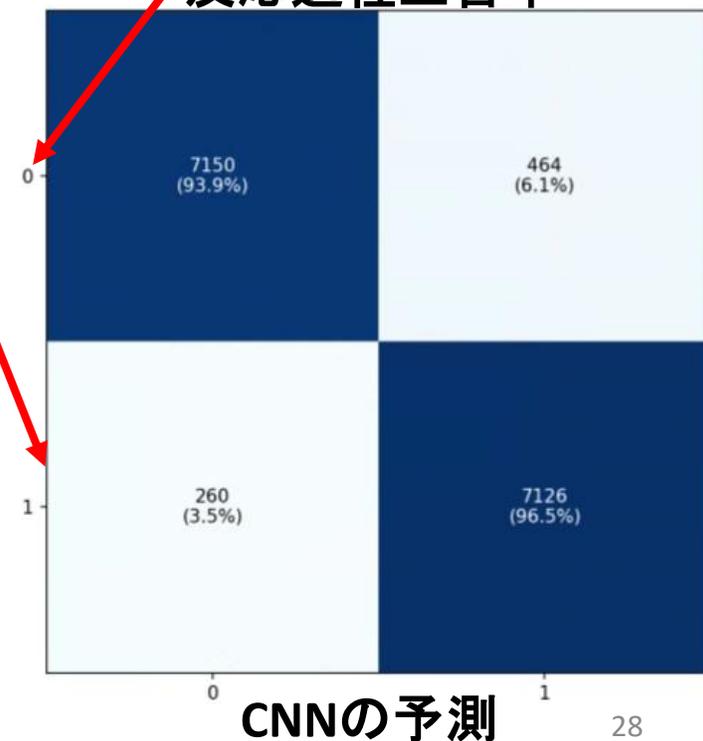
現在入力データ, 学習モデル, 特徴量を調整し
改善を行っている最中



x (mm)

反応過程正答率 x (mm)

Truth



まとめと今後の展望

■ GRAMS・T98実験

- GRAMS実験は気球搭載LArTPC検出器を用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験
- LArTPCとToFを用いた粒子・反粒子識別手法の検証としてT98実験を実施
 - ・反陽子捕獲事象を $>10^5$ で観測

■ Simulationの構築・検出器較正

- ・LArTPC検出器の応答を再現したシミュレーションを作成
- ・宇宙線 μ 事象を用いて検出器較正を実施
- π^- のエネルギー損失比較でデータとSimulationの比較で検出器較正結果を確認

■ 反陽子データ解析

- ・オーソドックスな解析とCNNを用いた特徴量の抽出
- オーソドックスな解析ではシミュレーションとデータの大まかな一致を確認
- CNNの改善は現在行っている最中

■ 今後の展望

- ・シミュレーションのパラメータを最適化することでよりデータに近いシミュレーションの作成
- ・CNNを改善することで反陽子-Arの反応をより詳細に理解する

Backup

ビームライン上流

● 概要

30 GeV/c 陽子ビームを金標的へ入射し、二次ビームを利用

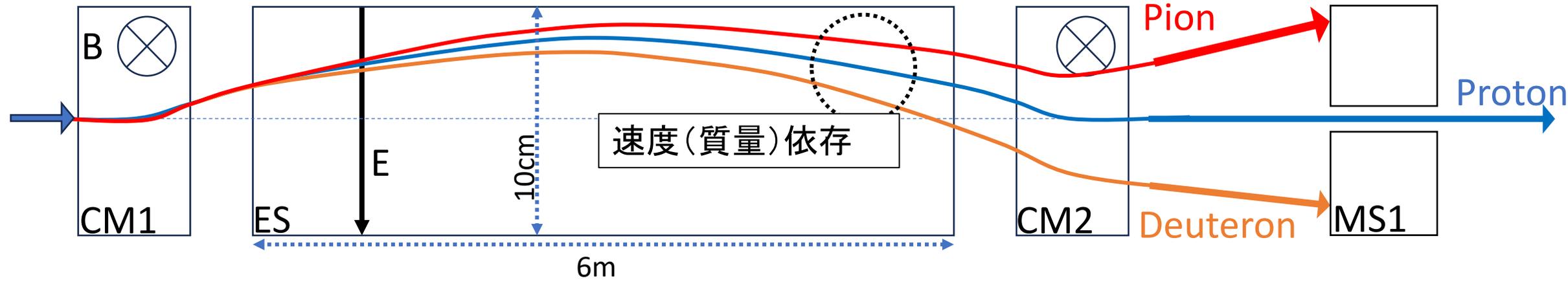
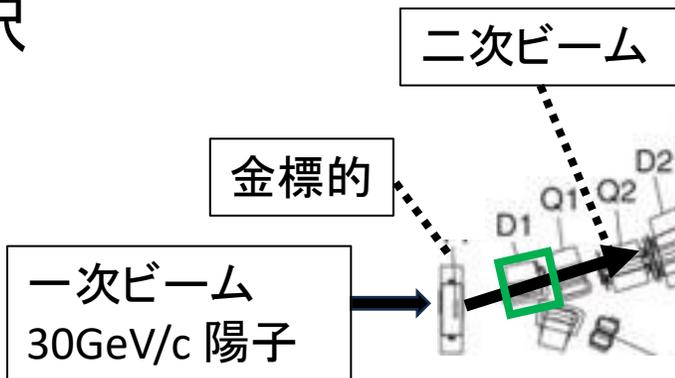
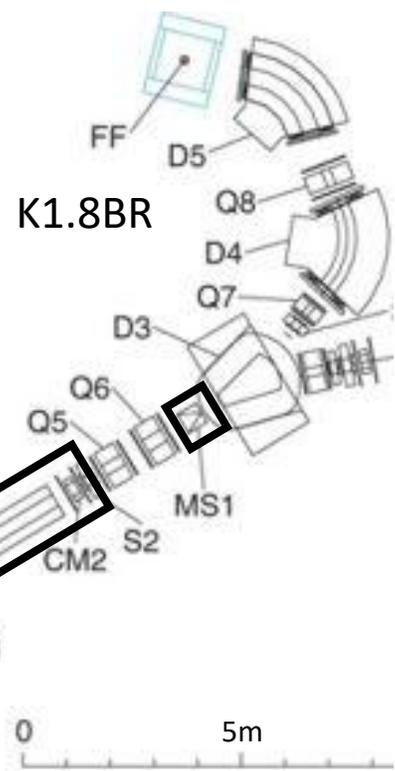
D1(Dipole magnet1): 電荷・運動量を決定

- Slit { **IF** : 運動量による粒子選択
MS1 : 質量による粒子選択

• **Electrostatic Separator(ES)**

Correction Magnet(CM)
: 質量による粒子選択

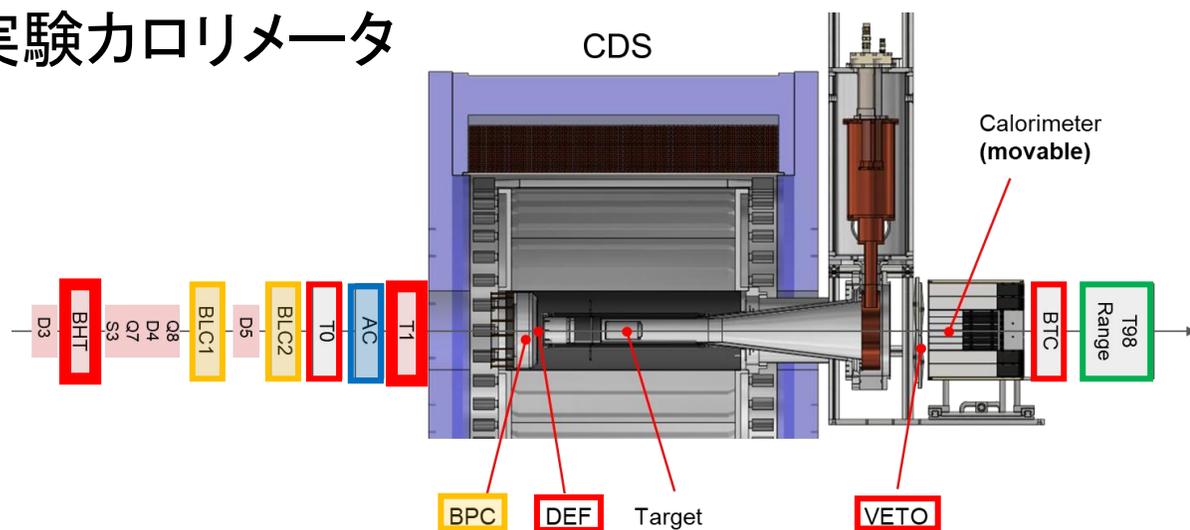
● 質量による粒子選択



ビームライン下流: K1.8BR

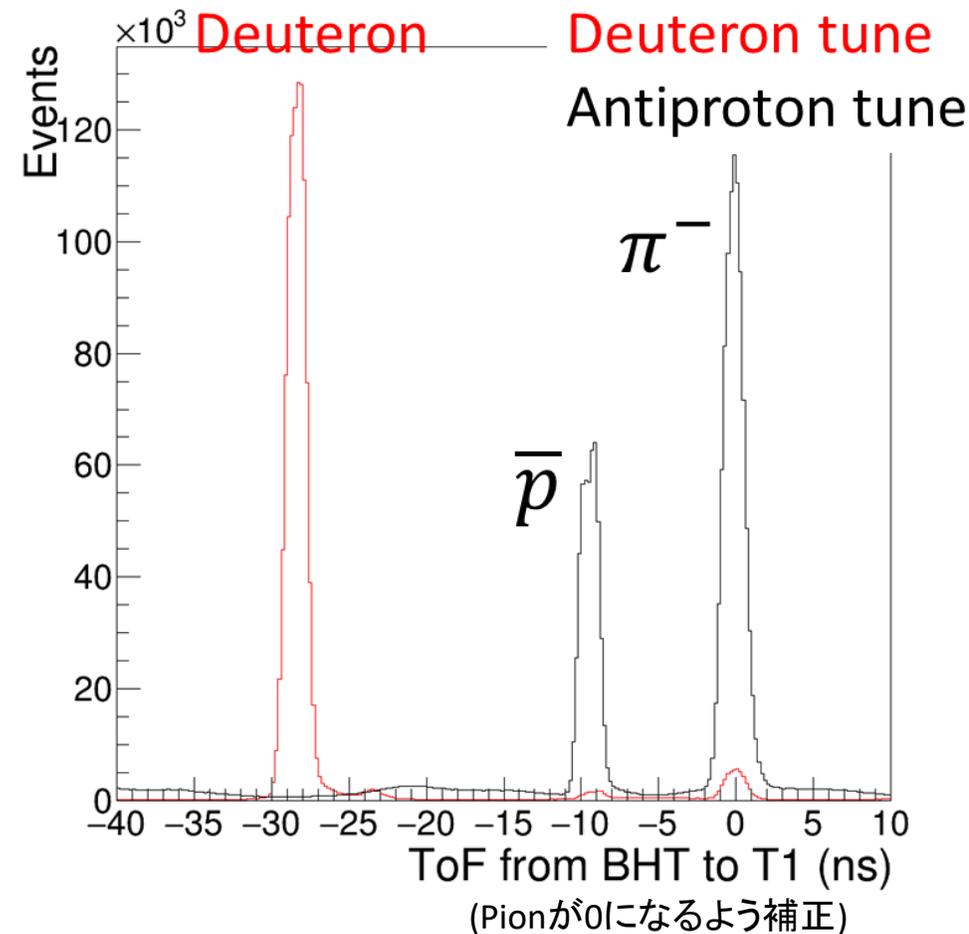
● 検出器

- プラシン+PMT, MPPC: TOF・カロリメータ
- Drift Chamber : 飛跡を測定
BLC(Beam Line Chamber)
電磁石D5前後に設置、運動量の算出
- BPC(Beam Profile Chamber)
CDS内に設置
- Aerogel Cherenkov : Pionの特定
- Range Counter : T98-Phase1 target
- E73実験カロリメータ

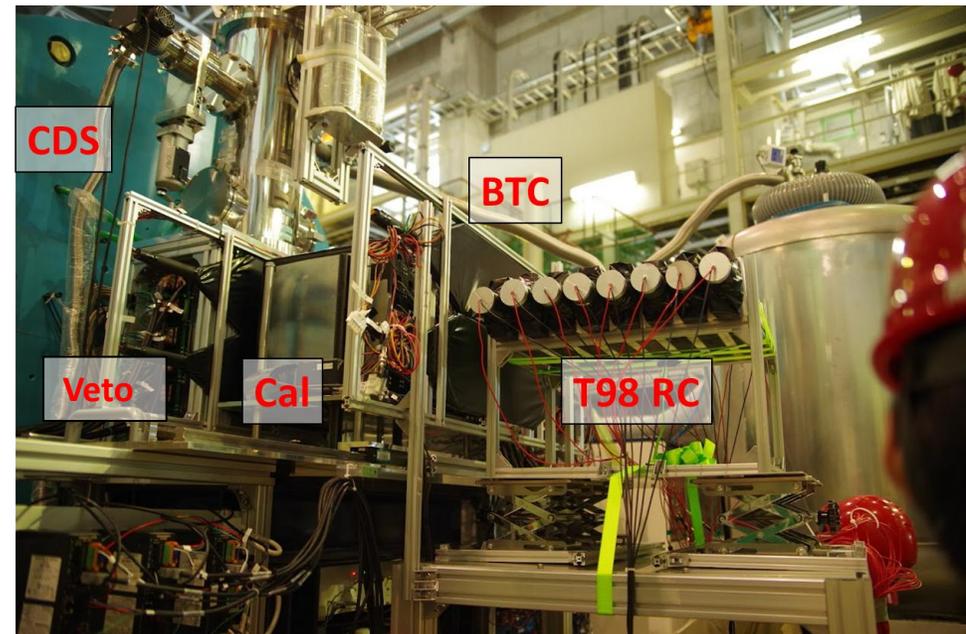
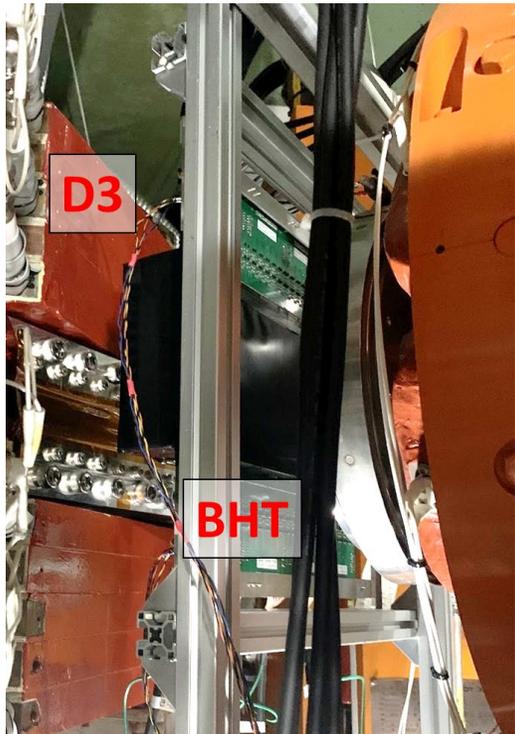
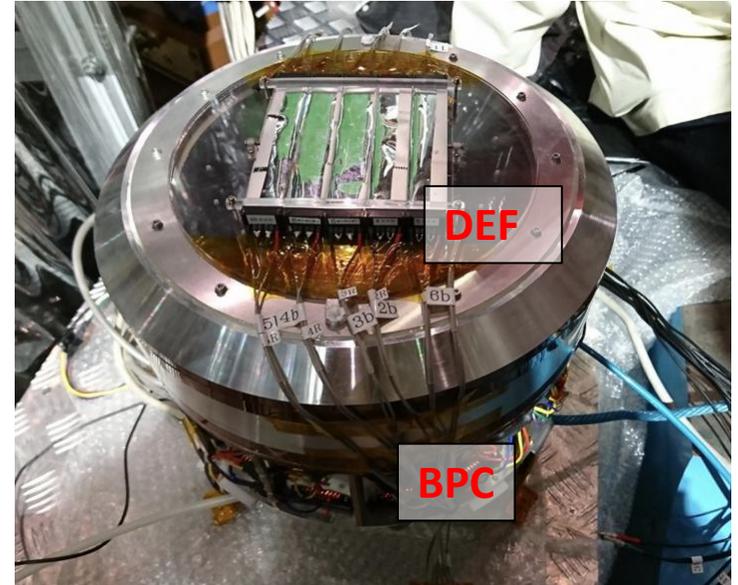
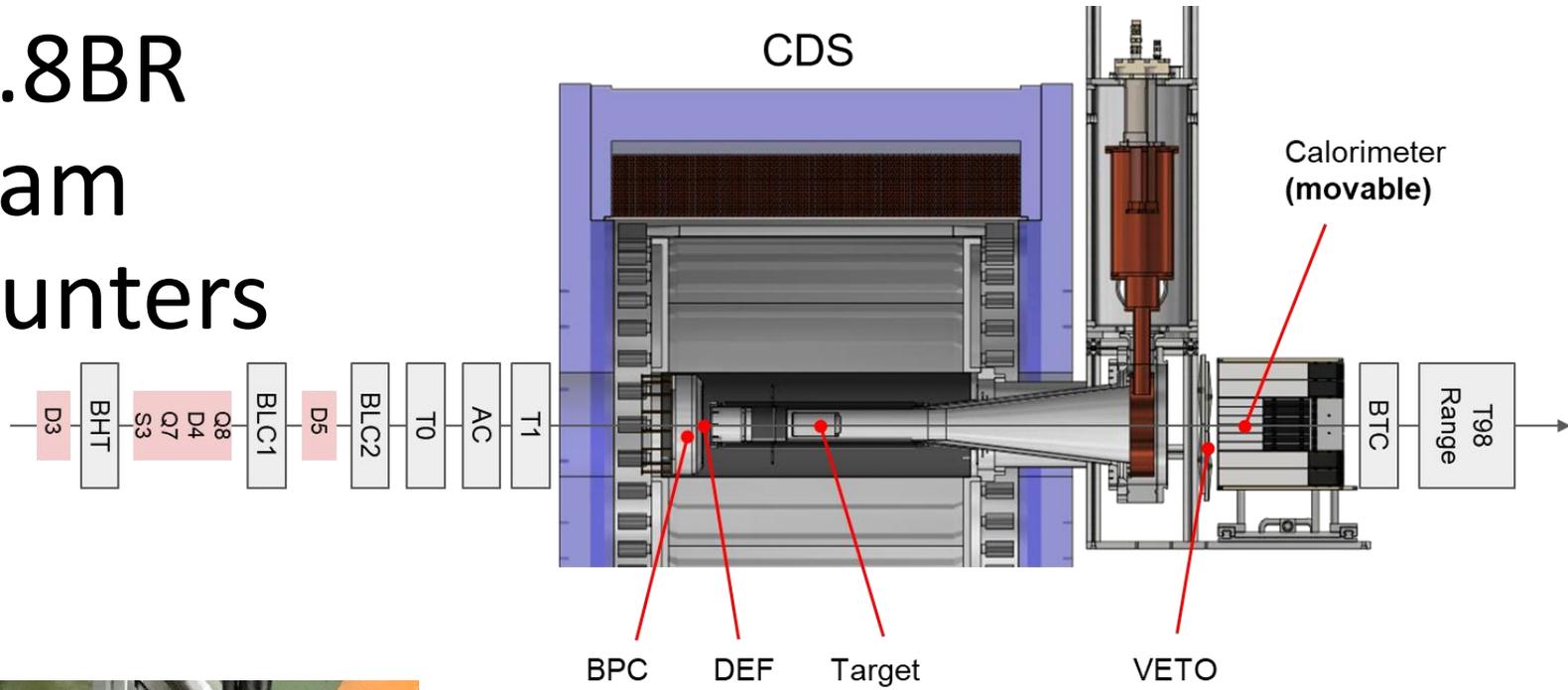


● 供給ビーム

K^{\pm} ・陽子・反陽子・重陽子は確立済み。 $(\sim 10^5/\text{spill})$



K1.8BR Beam Counters



GRAMS: Gamma-Ray and AntiMatter Survey

気球搭載LArTPCを用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験 @南極上空40 km, 30 days

反粒子 ← Focus

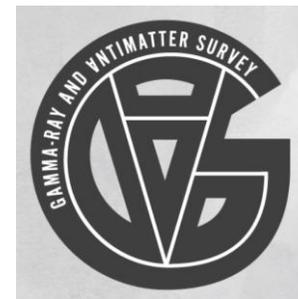
AntiProton/Deuteron/Helium観測

➡ 暗黒物質間接探索

MeV- γ 線

from SNR/BH/中性子星/銀河中心

➡ 重元素合成プロセスの解明
暗黒物質間接探索



Collaborator (22 institute, 73 collaborators)

Japan

- Hiroshima University
- Kanagawa University
- Osaka University
- RIKEN
- Rikkyo University
- University of Tokyo
- JAXA
- University of Toyama
- **Waseda University**
- Nagoya University
- Tokyo University of Science
- NDMC

International

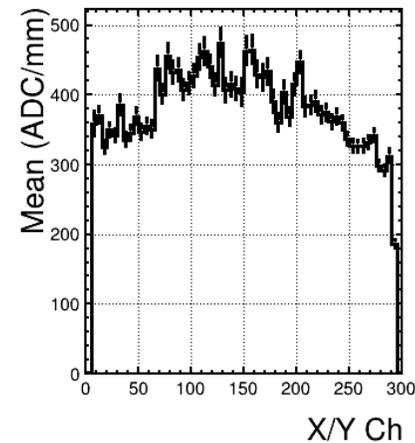
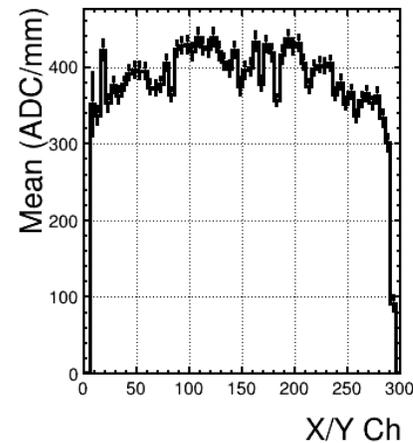
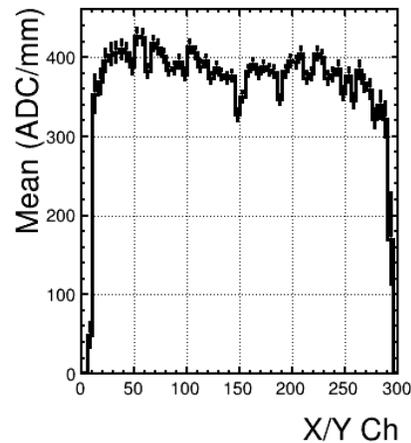
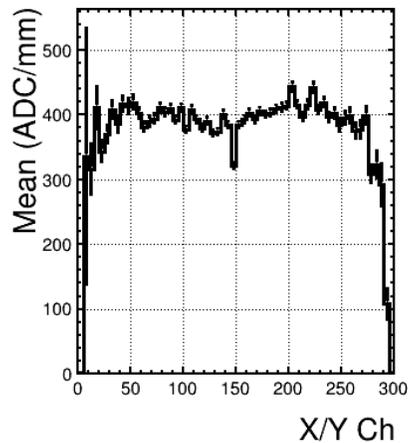
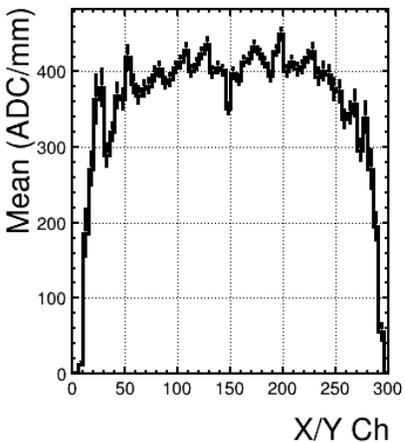
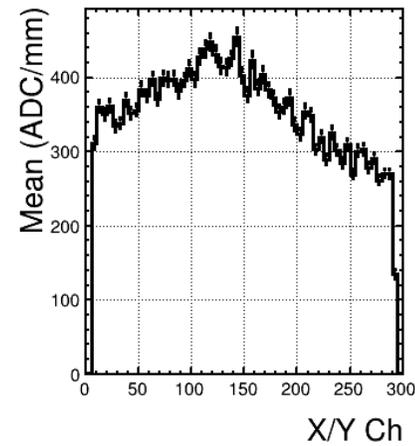
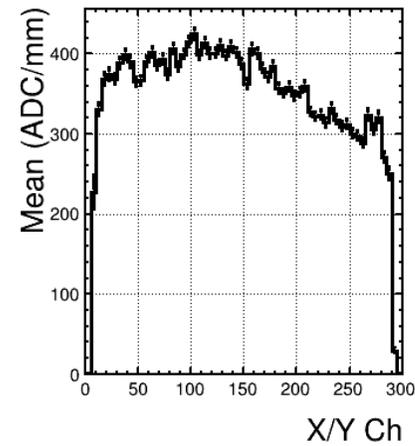
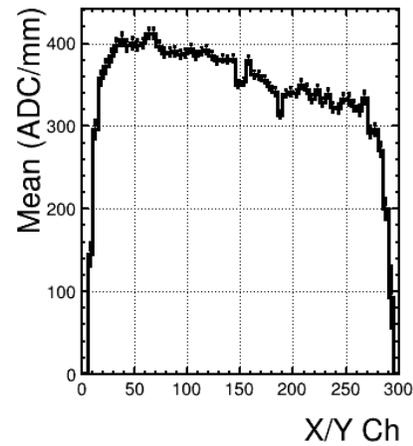
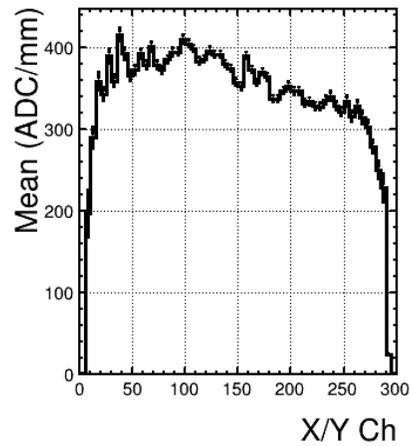
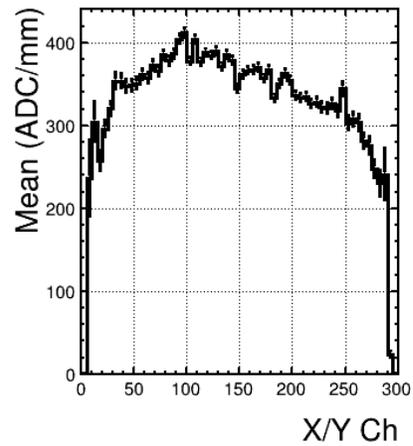
- Barnard College
- Columbia University
- Howard University
- NASA GSFC
- Northeastern University
- Oak Ridge National Lab
- Universität Würzburg
- California Berkley
- UT Arlington
- Washington University at St. Louis

7th collaboration meeting, May 2024 @ Boston



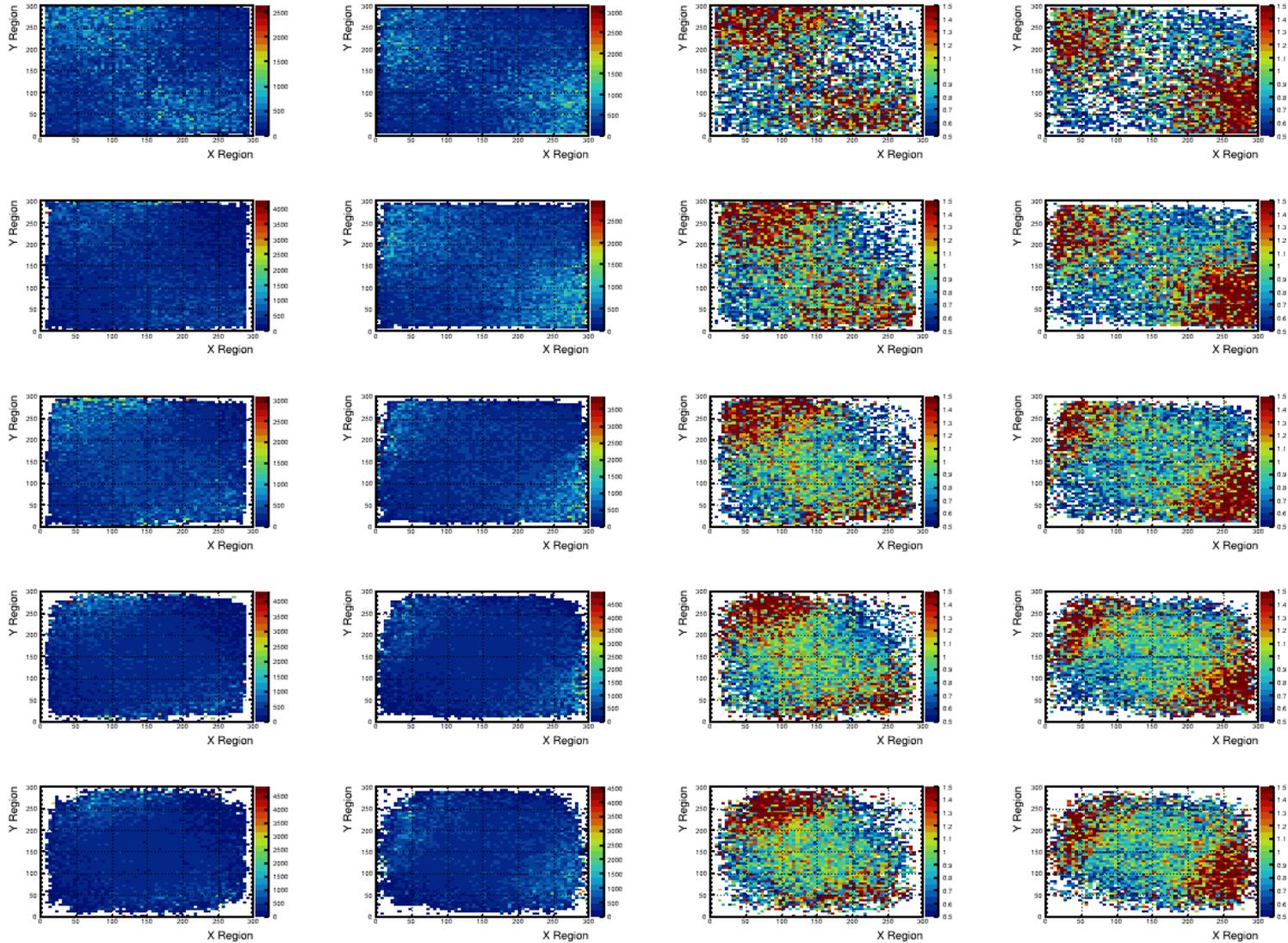
First face-to-face collaboration meeting since COVID-19

位置依存性・z方向依存性



位置依存性・z方向依存性

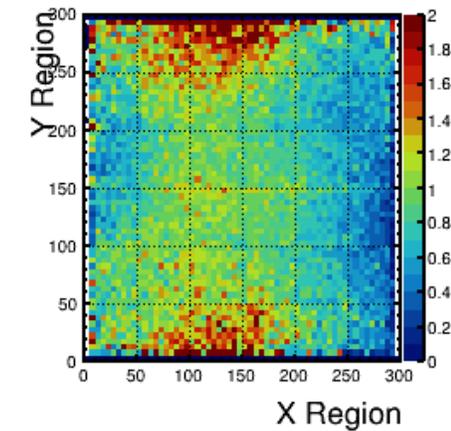
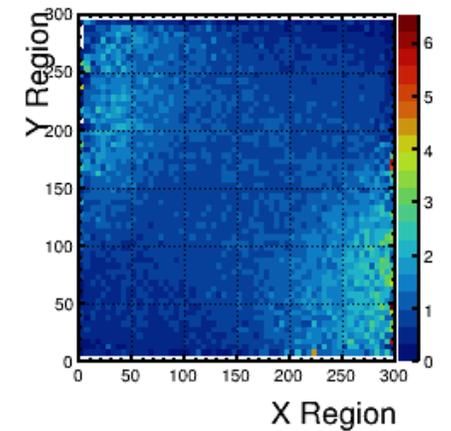
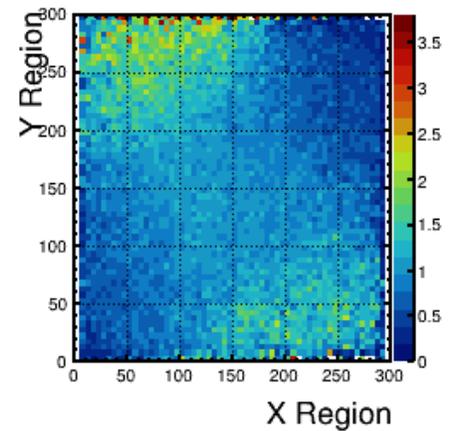
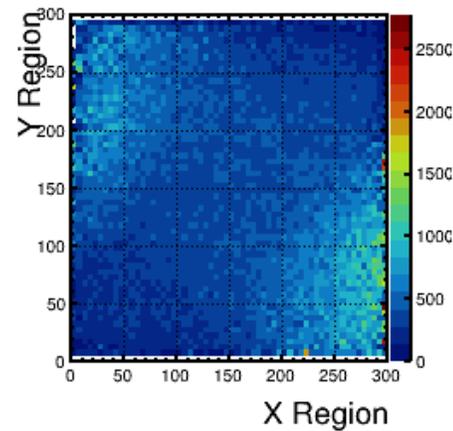
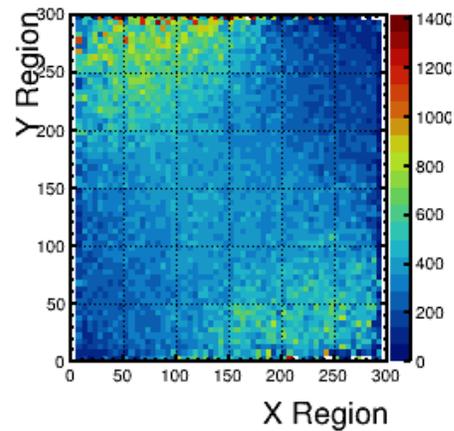
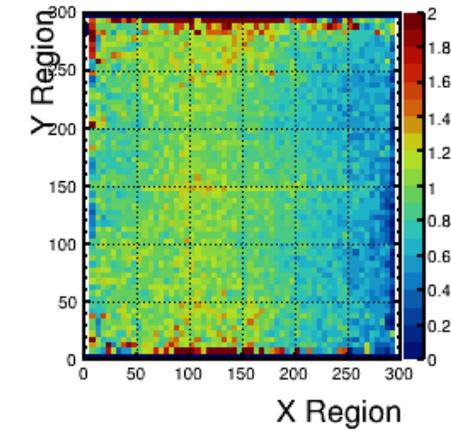
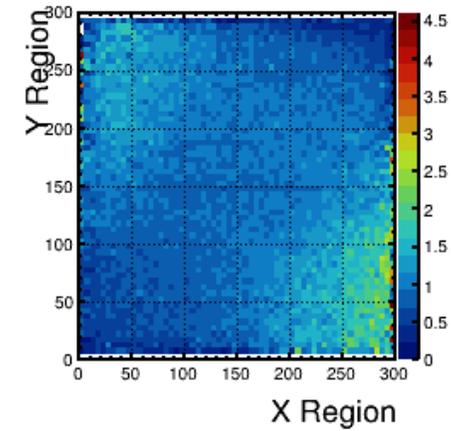
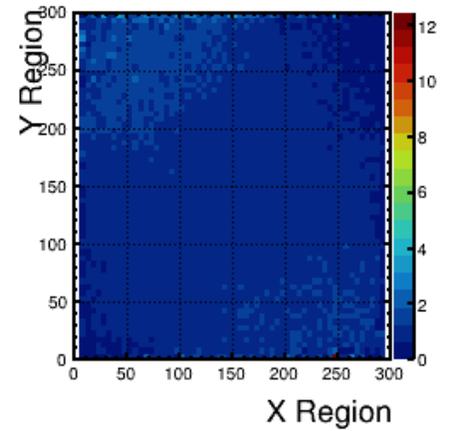
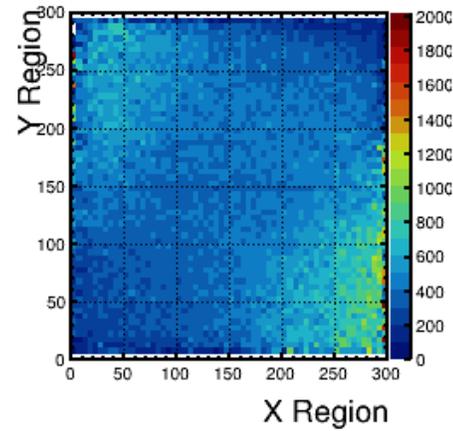
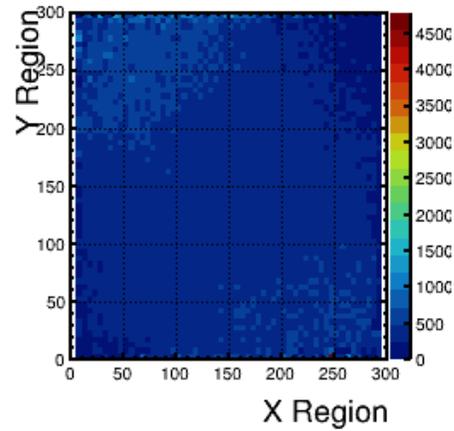
平均で規格化



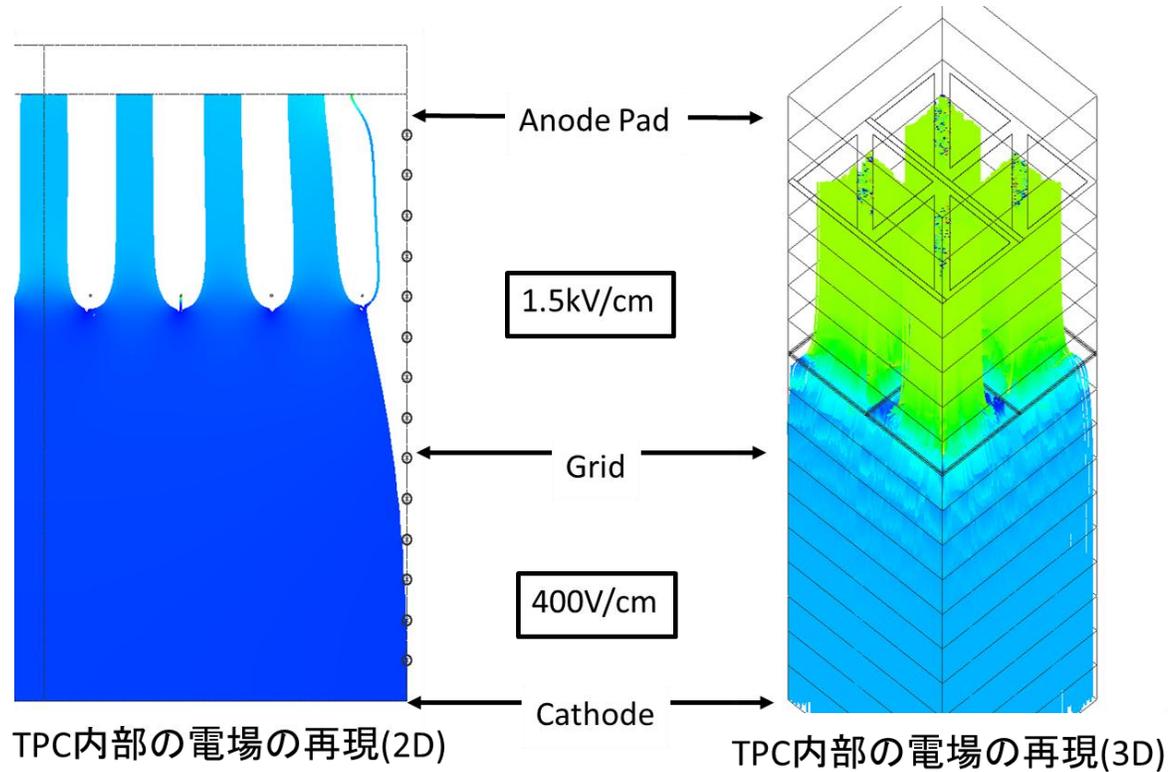
位置依存性

平均で規格化

Ratio

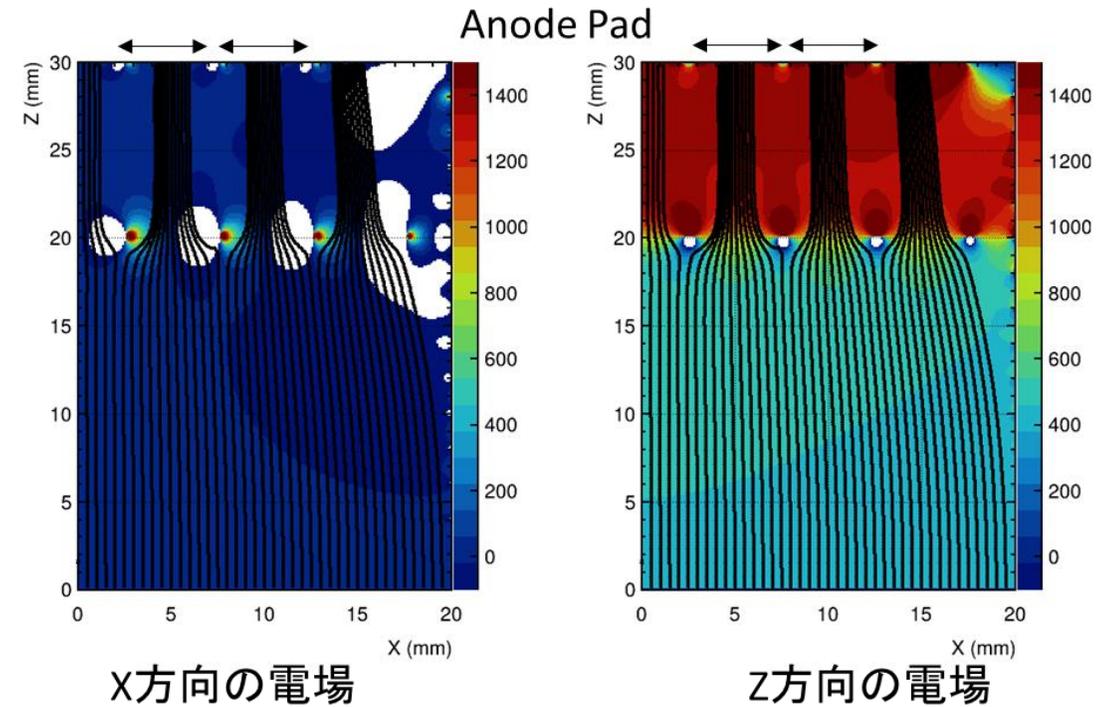


電場シミュレーション



ステップシミュレーション@Run24.2

Cathode:13.5KV,Grid:1.5KV



J-PARC T98実験 Phase-1概要 (Backup用 Slide)

□ T98実験: LArTPCへの反粒子ビーム照射試験

● Phase-1 Quick Results

AntiDeuteron候補: 1/1093 spills (2時間)

→ AntiDeuteron **1 event観測にO(100)時間必要** in Phase-2



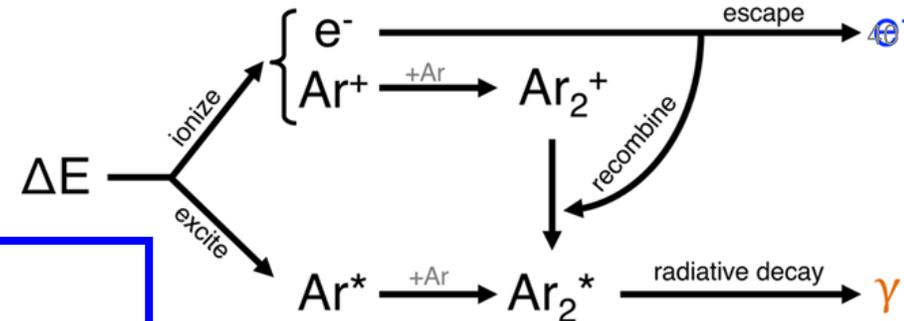
Event Pile-upの制限: フルドリフトO(100 usec) → Rate: < 数 kHz

DAQ rateの制限 by 読み出しエレクトロニクス

	All Particle Rate	Trigger Rate	Signal Rate	event数
AntiDeuteron (Phase-1 Results)	1.5 MHz ↓ 150分の1	8 kHz ↓ 80分の1	$<10^{-3} / \text{spill}$	1 Candidate (2時間の データ取得)
LArTPC Limitation	10 kHz (Event pile-up)	100 Hz (DAQ)		1 Candidate (300時間の データ取得)

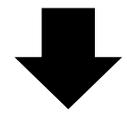
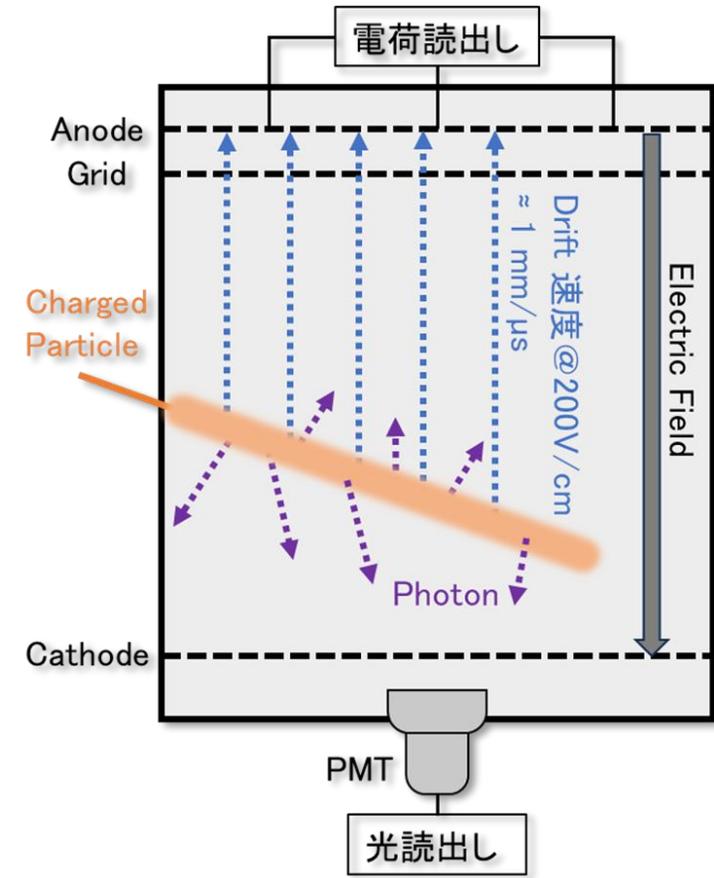
- All particle Rateの方が制限として強い
- Phase-2において150分の1にスケーリング
- 1 eventのCandidate観測にO(100)時間を要する

液体ArTPC信号

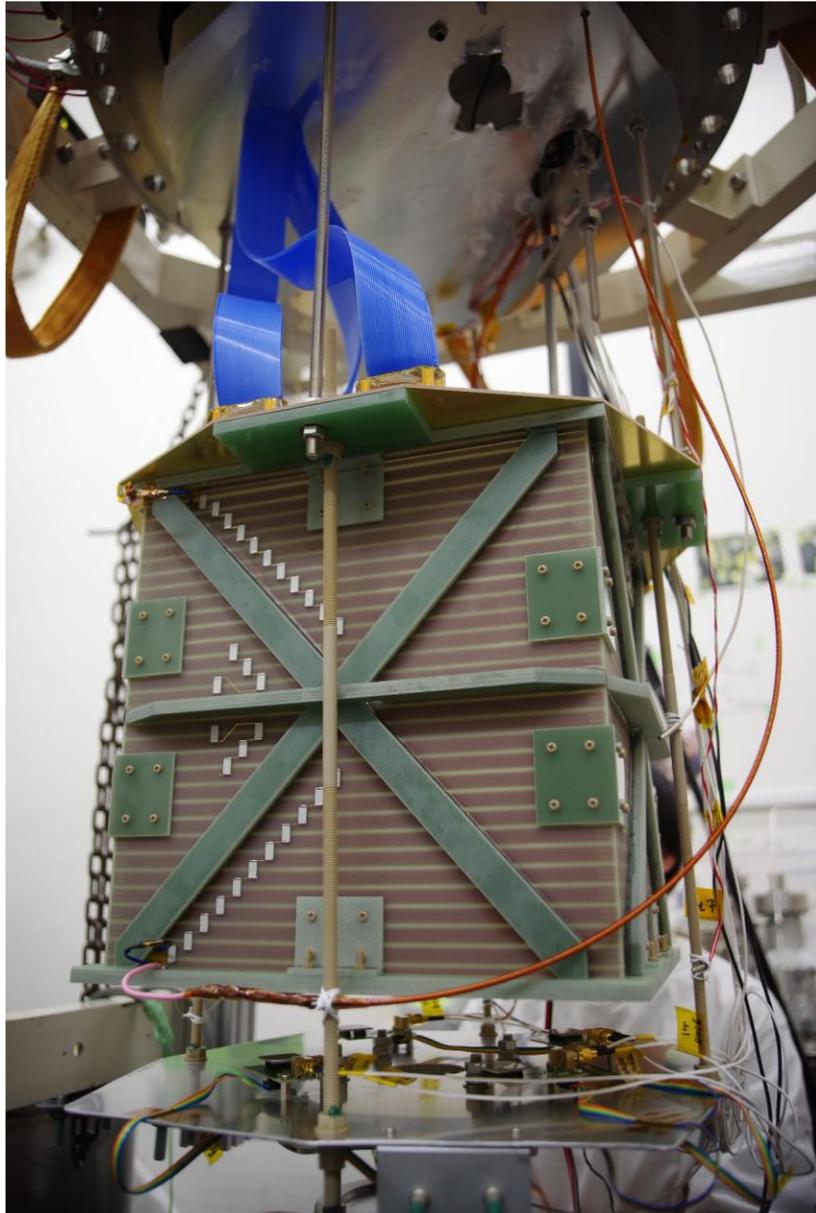


- 液体Ar中の電子信号
 - ・電離電子を電場でドリフト (1 [mm/us]@200 V/cm)
 - ・不純物によって $\exp(-t/\tau)$ で減衰
 - ・Anodeの2次元構造で読み出し

- 液体Ar中の光信号
 - ・PMT+MPPCで信号を測定
 - ・電子信号に比べて速い信号($\sim ns$)
 - ・粒子の入射時間の決定 (ドリフト時間の測定)



3次元飛跡再構成+エネルギー損失の測定



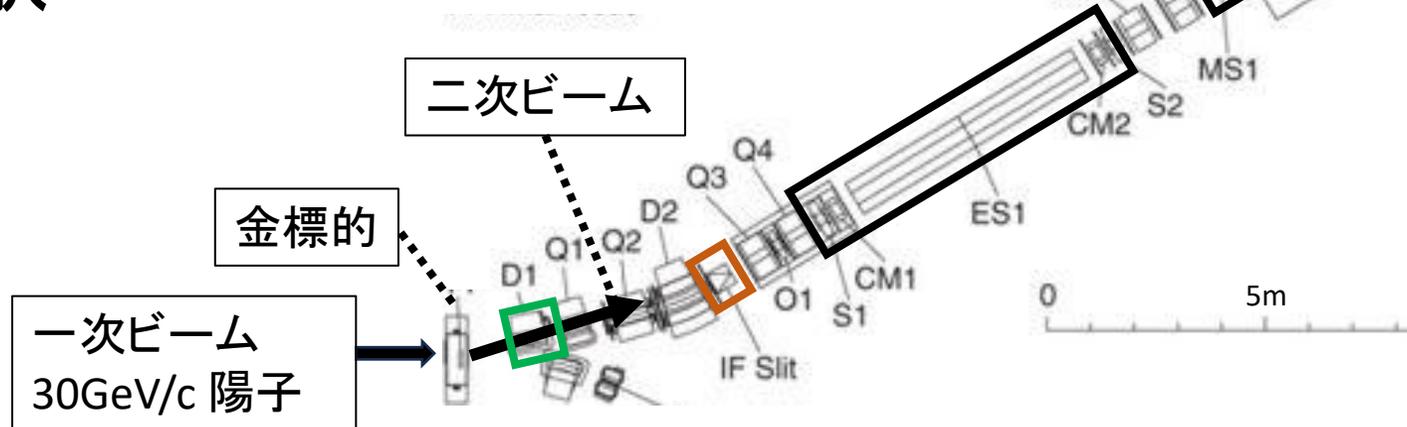
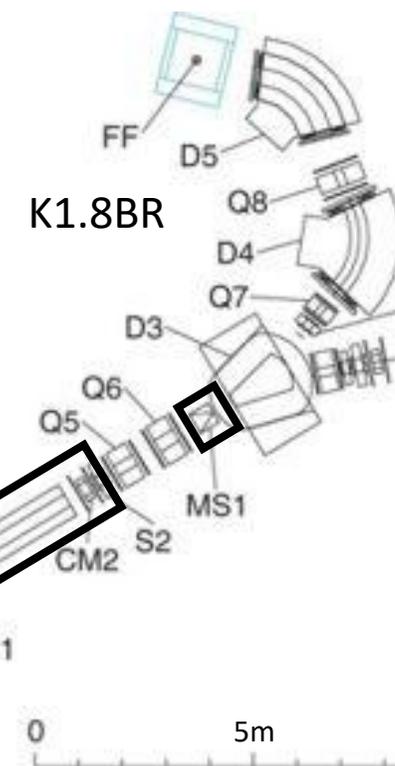
J-PARC K1.8BRビームライン

■ 概要

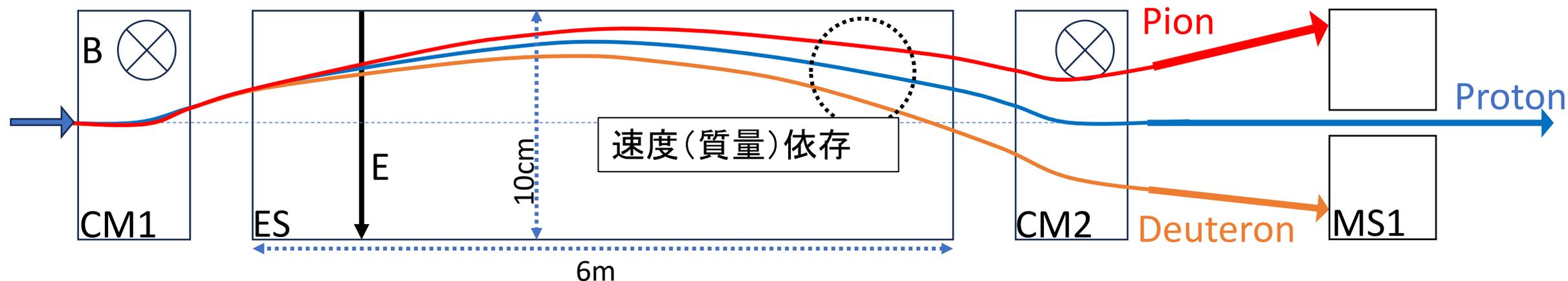
30 GeV/c 陽子ビームを金標的へ入射し、二次ビームを利用

D1(Dipole magnet1): 電荷・運動量を決定

- Slit { **IF** : 運動量による粒子選択
MS1: 質量による粒子選択
- Electrostatic Separator(ES)
Correction Magnet(CM)
: 質量による粒子選択



■ 質量による粒子選択



ビームライン情報

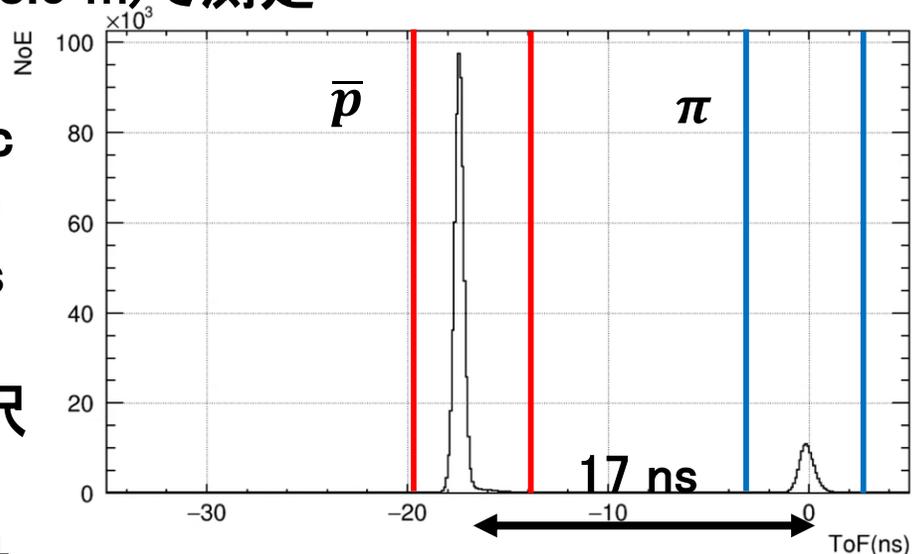
◆ ToF
BHTとT1(8.0 m)で測定

0.7 GeV/c
 \bar{p} :44.6 ns
 π :27.2 ns

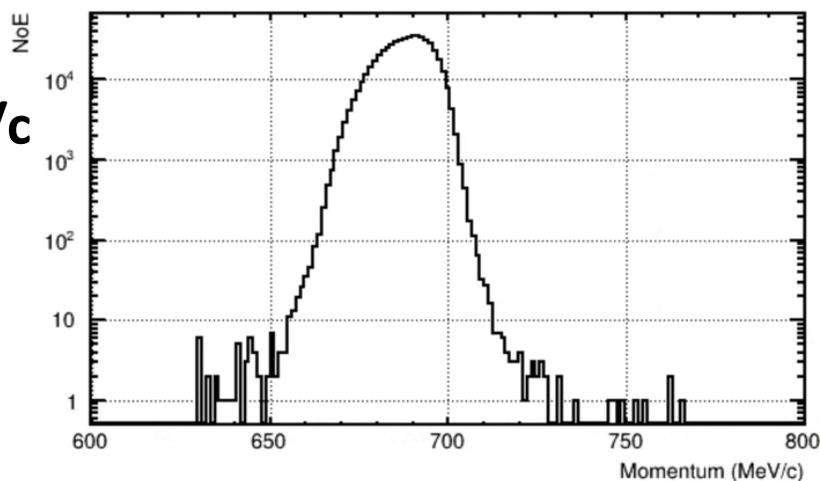
ToFで選択

◆ 運動量

650~750 MeV/c
幅を持たせて
データ取得

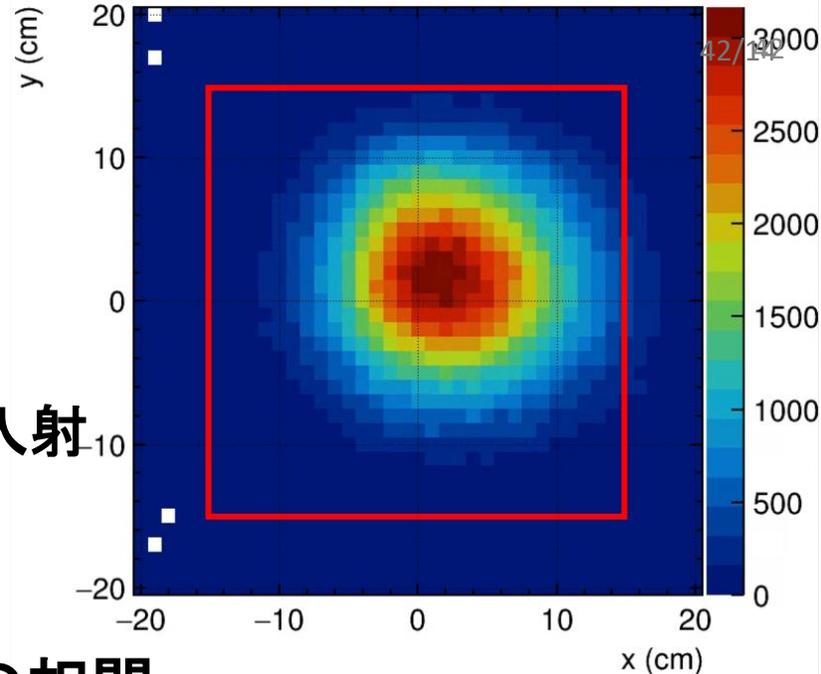


\bar{p} Run(-0.7 GeV/c)の運動量分布



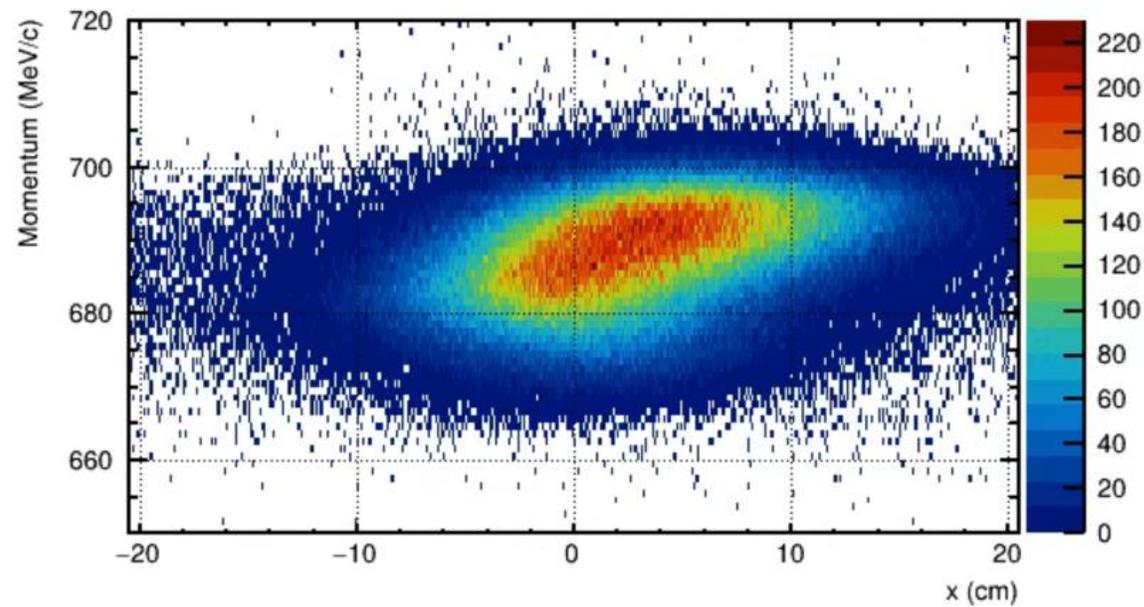
◆ 入射位置
ビームの位置情報

赤枠がTPCの範囲
約9割がTPC内に入射



◆ 運動量と位置の相関

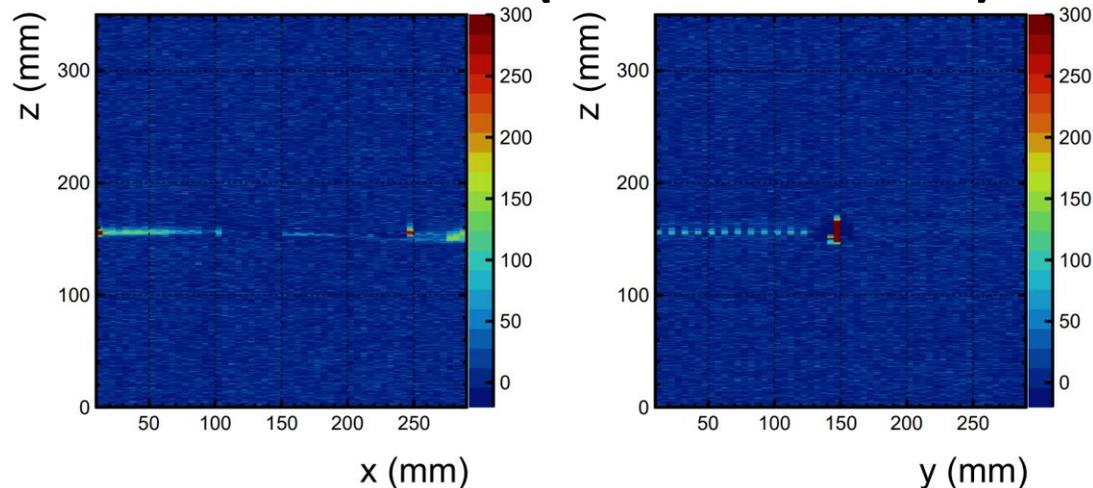
水平方向の入射位置と運動量



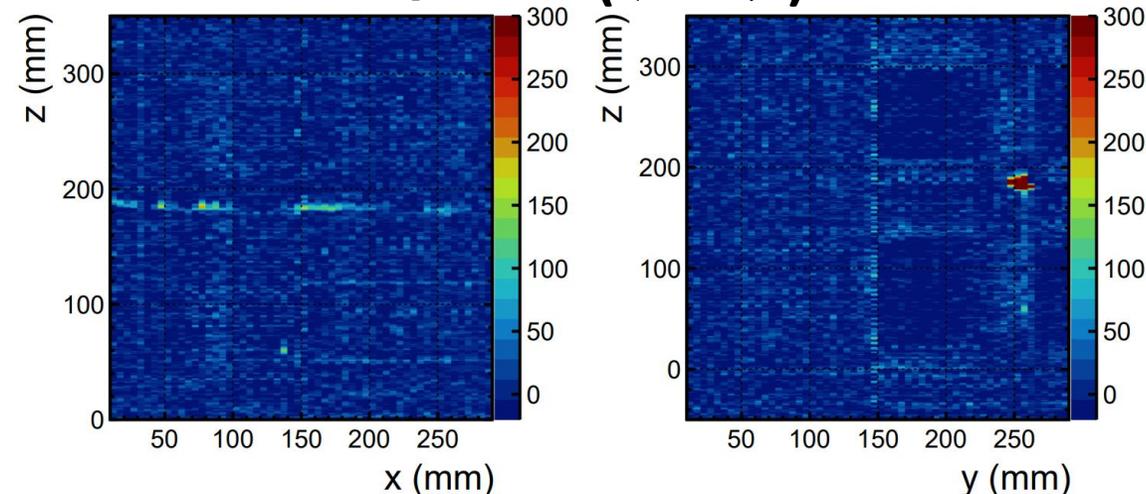
シミュレーション作成結果

- $\pi^- \cdot \mu$ のイベント比較
- X-Yの分割の構造を再現

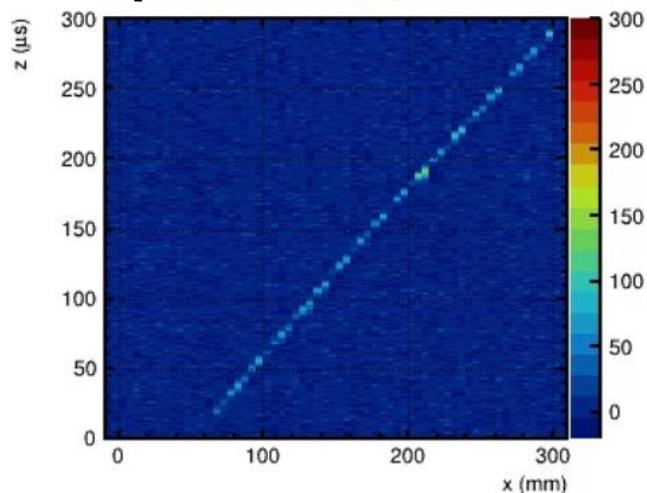
π^- イベント(シミュレーション)



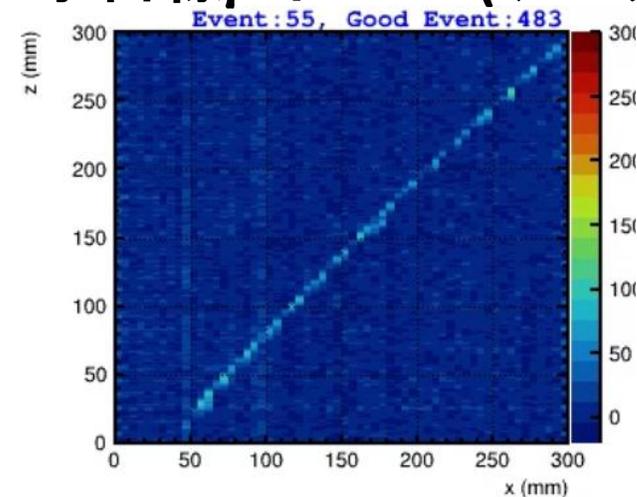
π^- イベント(データ)



宇宙線 μ イベント(シミュレーション)



宇宙線 μ イベント(データ)



宇宙線 μ データでchのゲイン較正 \rightarrow π^- でエネルギー較正の検証

GRAMS検出器・PID手法

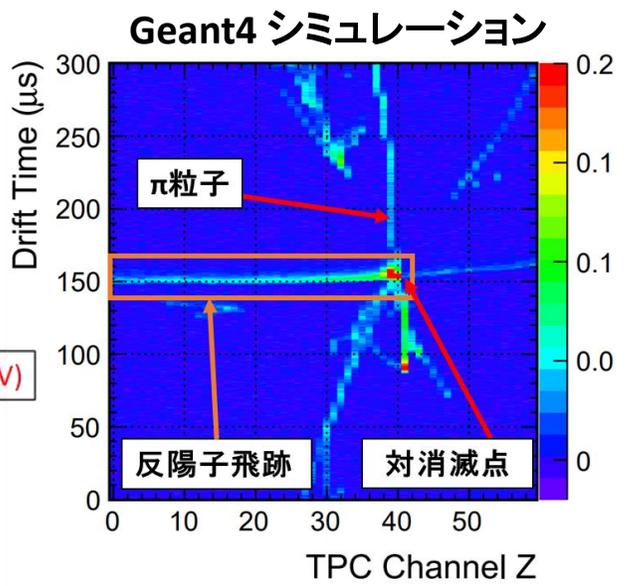
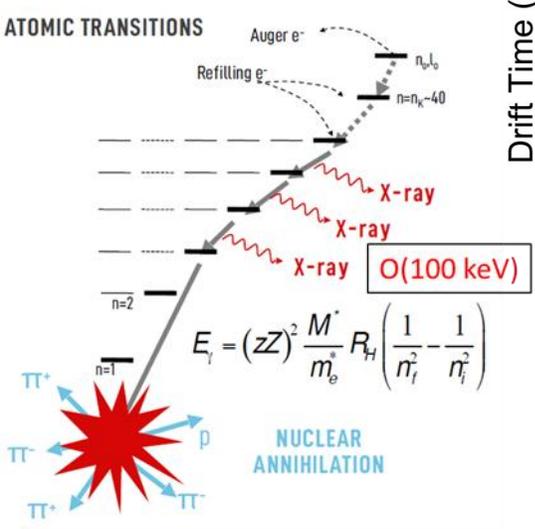
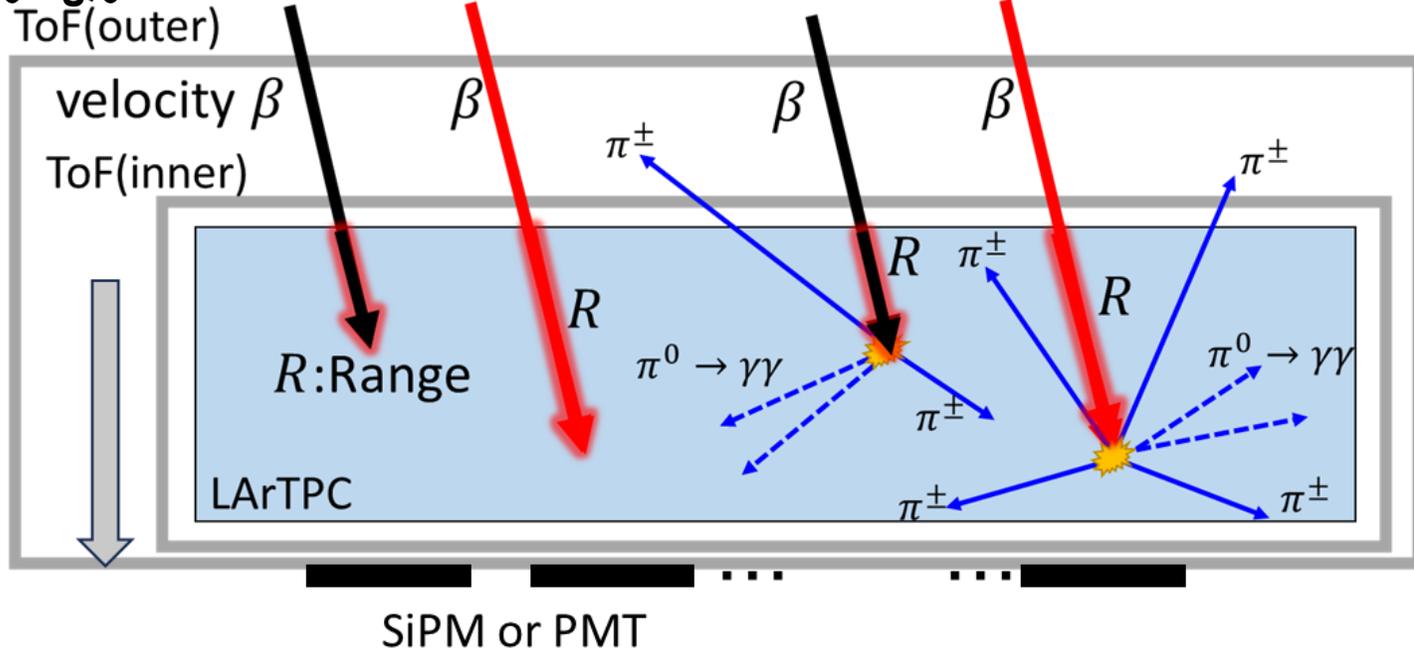
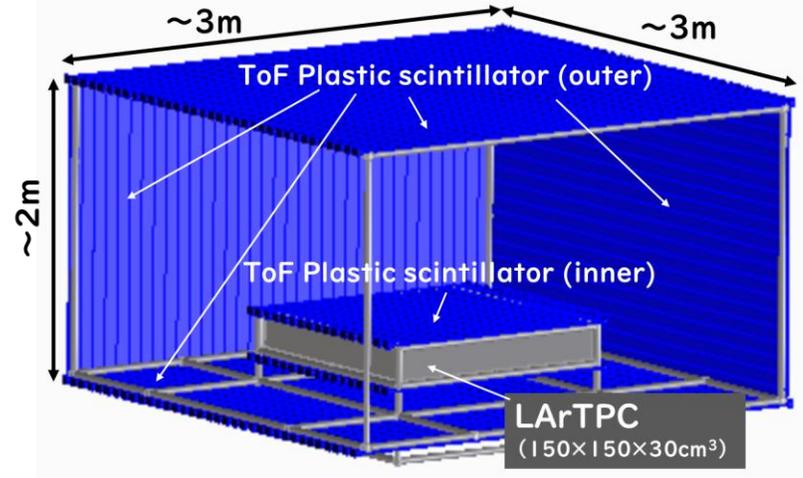
GRAMS検出器構成

- 2層のToF: β の測定
- 液体ArTPC: 飛程 + dE/dxを測定

PID手法

- 磁場を用いない粒子・反粒子識別
- 反粒子のみ捕獲・原子核との対消滅を起こす

液体ArTPC中の捕獲事象はほとんど観測されていない
 → 識別能力の検証が重要

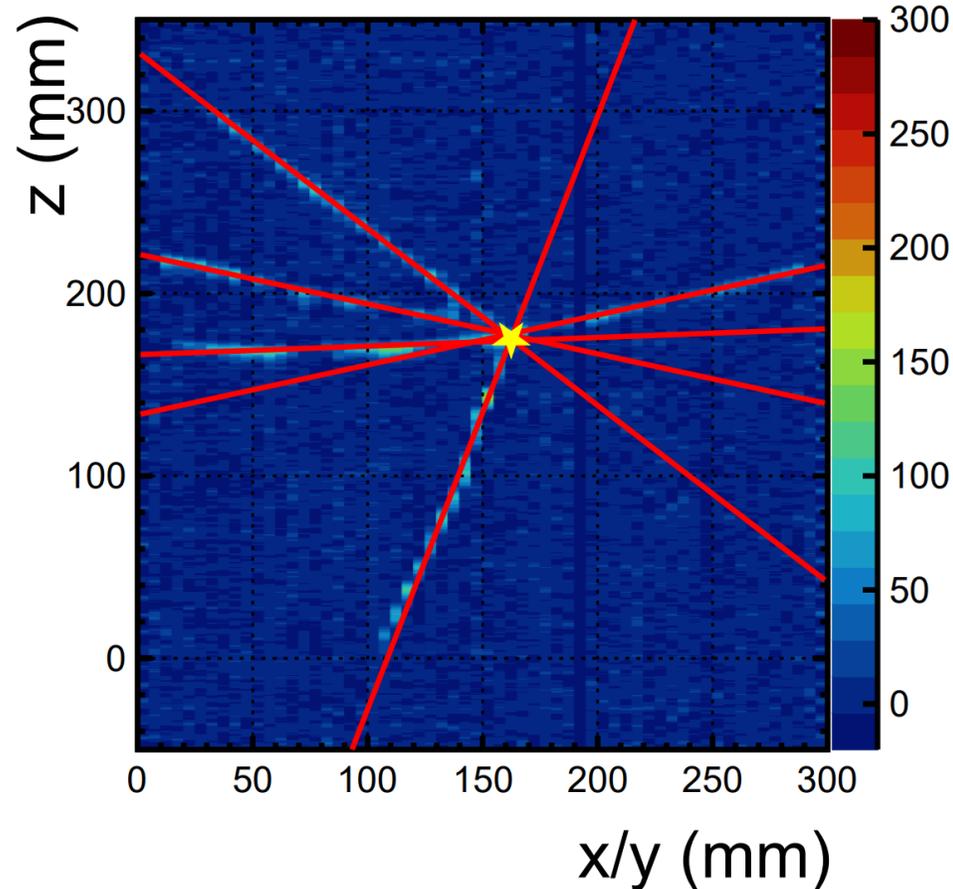


→ 多数のハドロンを生成

崩壊点の再構成

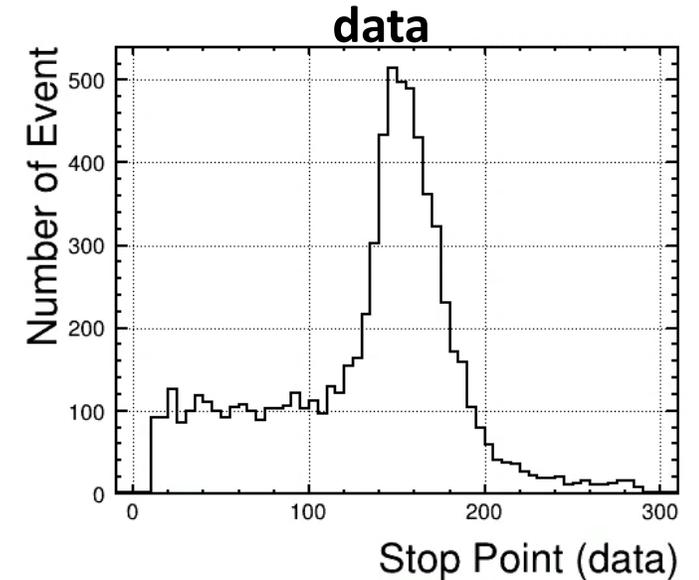
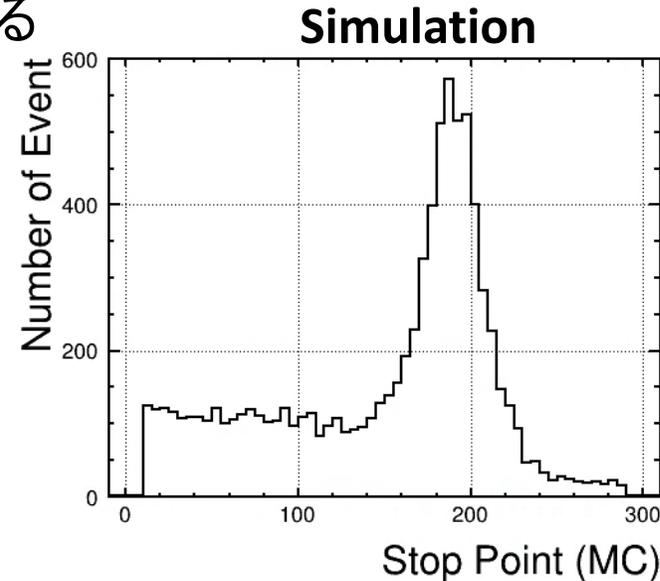
■ 位置・Ch依存性

- Hough変換で飛跡を再構成
- 再構成した飛跡の交点となる点を求める
- 一直線群からの距離が最小となるようにFitする



■ 再構成結果

- シミュレーションサンプルとデータの比較
- おおよそのイベントの再構成はできている



TPC前方のシンチレータが実際よりも少ないため停止位置が後方になっている

飛跡再構成手法(π^\pm, μ^\pm)

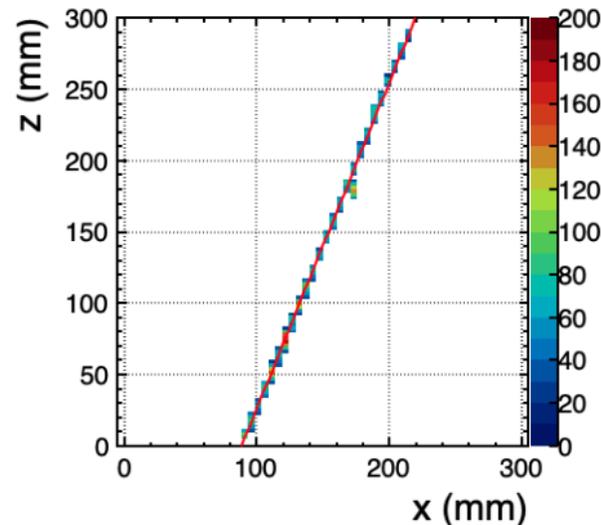
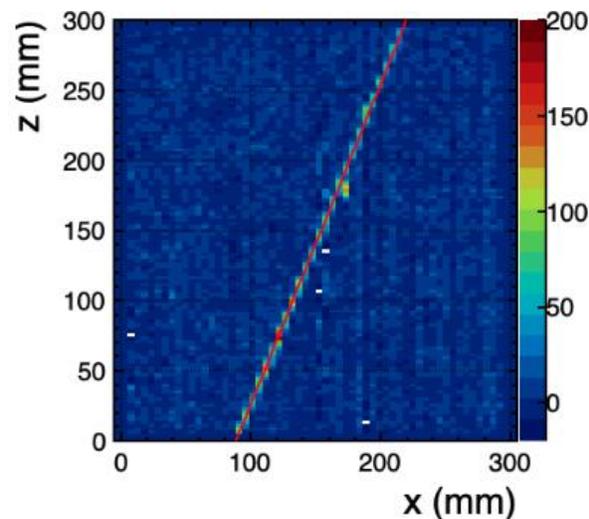
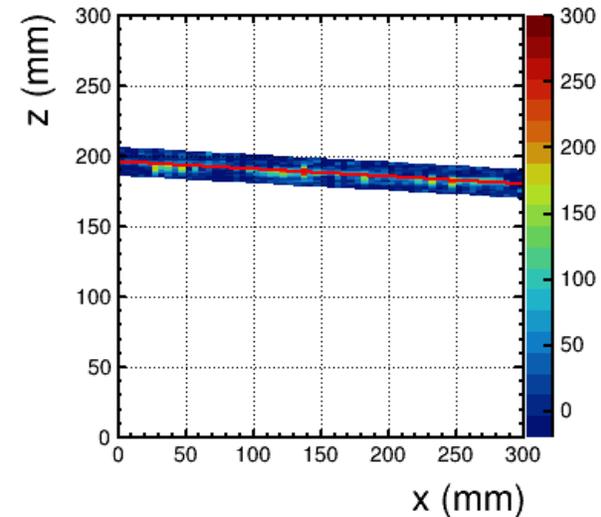
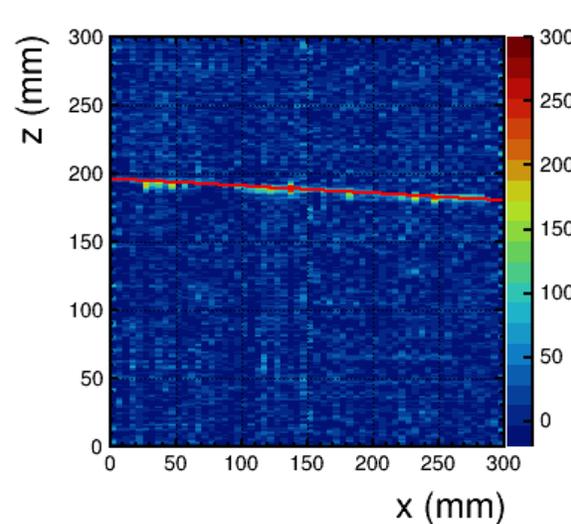
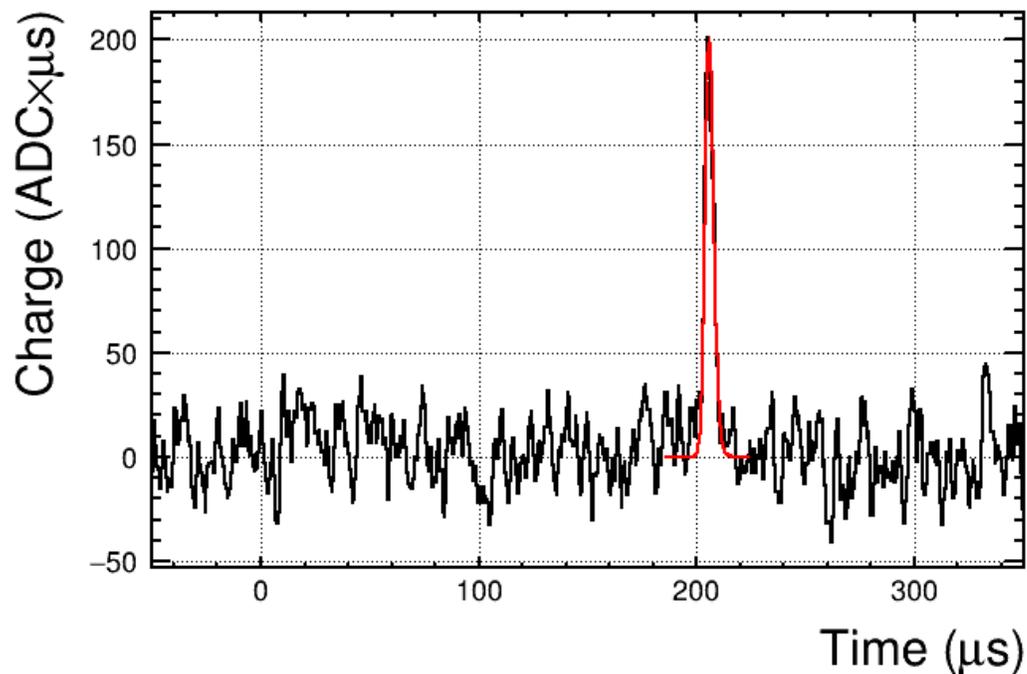
1. Hough変換による飛跡の選択

- 粒子の入射方向の特定
- 横突き抜けイベントの選択(Pionデータ)

2. 信号量の計算

π : 飛跡の周辺で閾値を越えた時間付近に対して gaussian-exp関数でFitを行い信号量を求める

μ : 飛跡の周辺で閾値を越えたBinを足し上げる



θ分解能

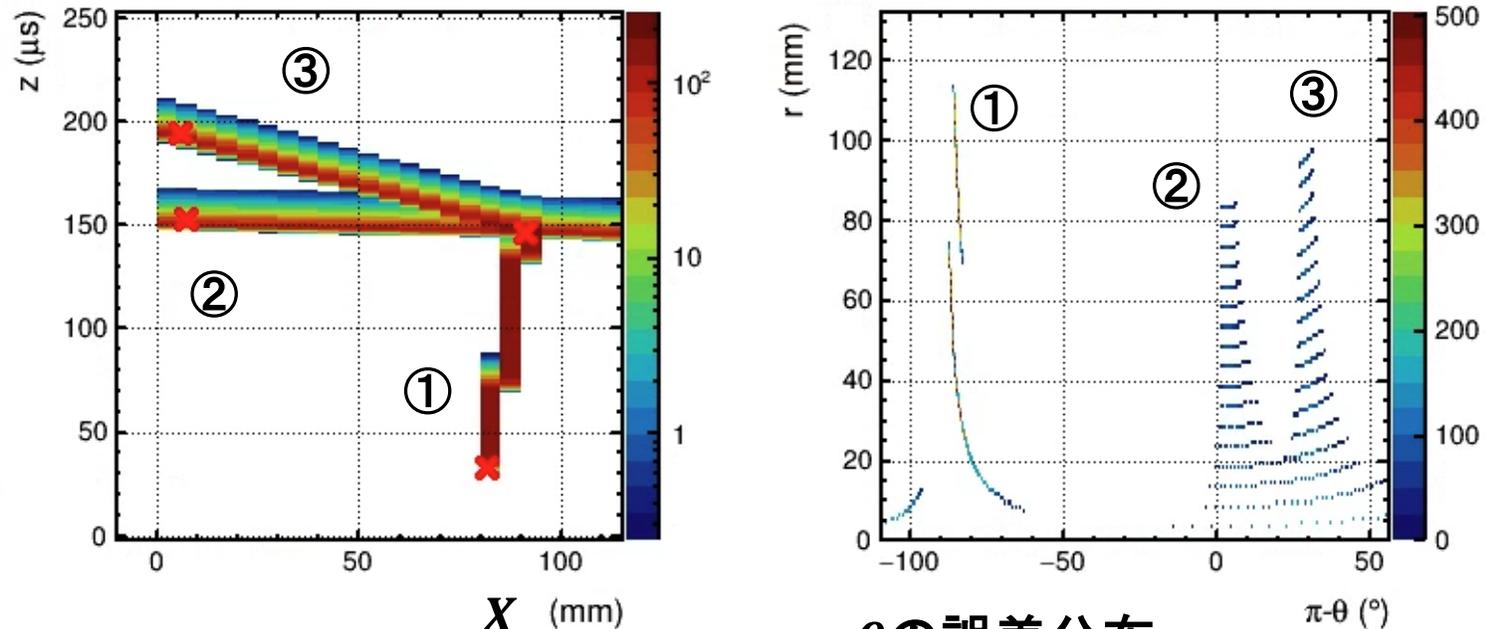
- X, Zの分解能からθの精度を評価

$$d\theta = d\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z}{X}\right)\right) = \frac{\frac{X}{Z}}{1 + \frac{X^2}{Z^2}} \left[\frac{dZ}{Z} \oplus \frac{dX}{X} \right]$$

$$dX = \frac{5}{\sqrt{12}} \text{ mm}, dZ = 3 \text{ mm}$$

- θ = ±90°付近 → Xの誤差が支配的
- δx = 0 付近 → Zの誤差が支配的

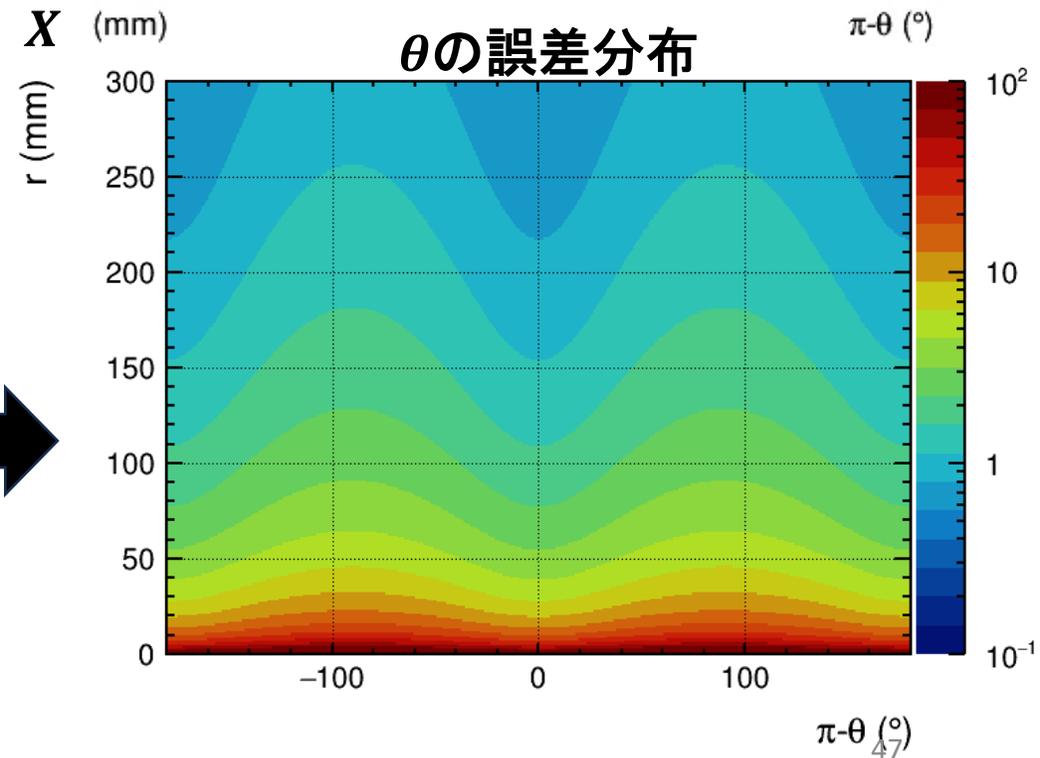
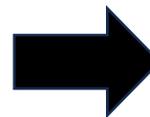
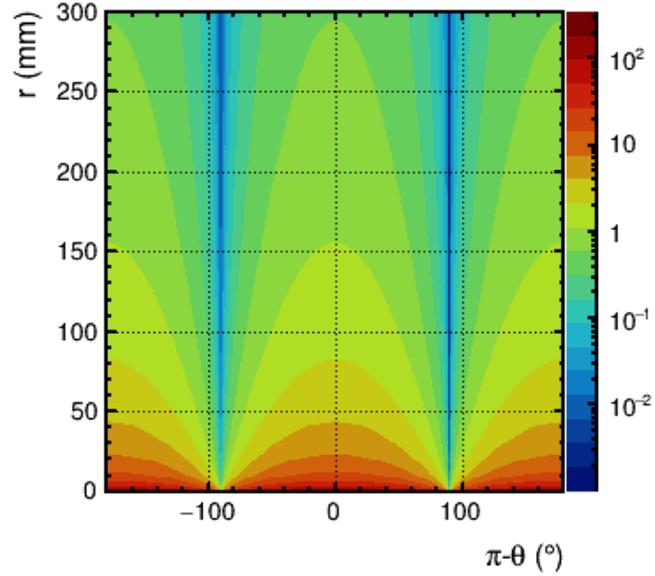
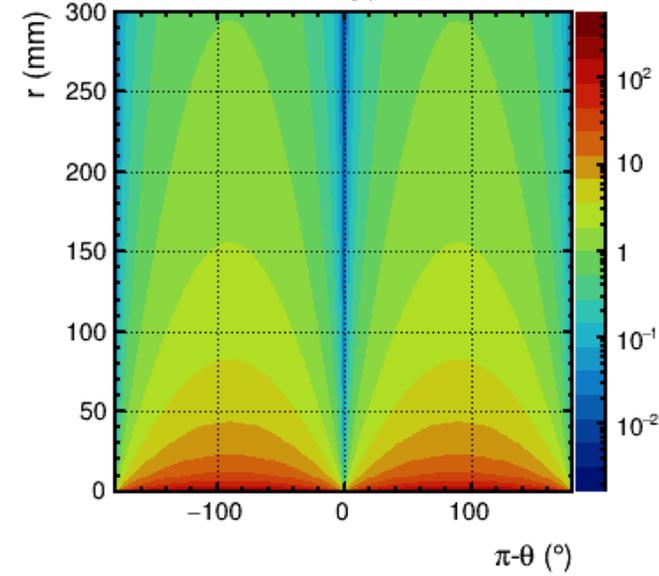
Simulation 飛跡/θ – R分布



X起因の誤差分布

Z起因の誤差分布

θの誤差分布

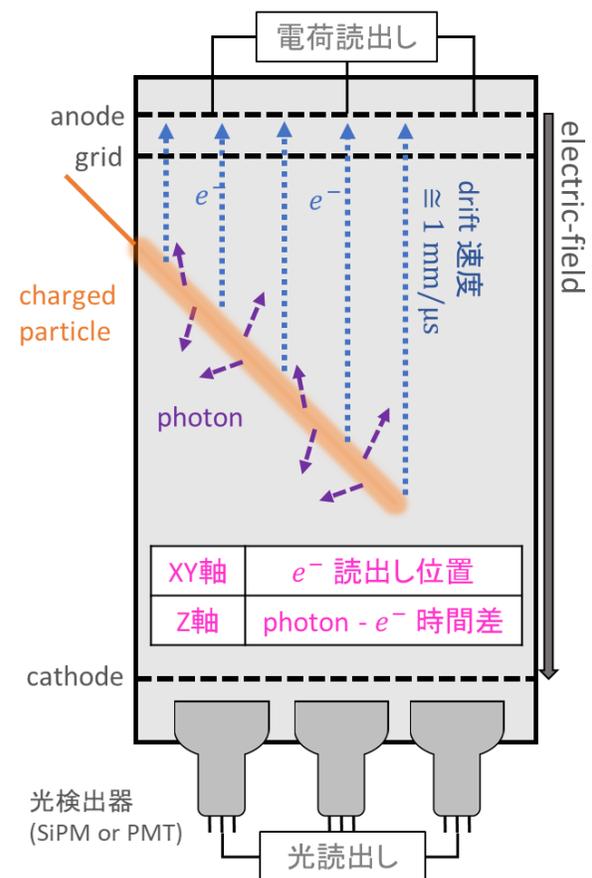
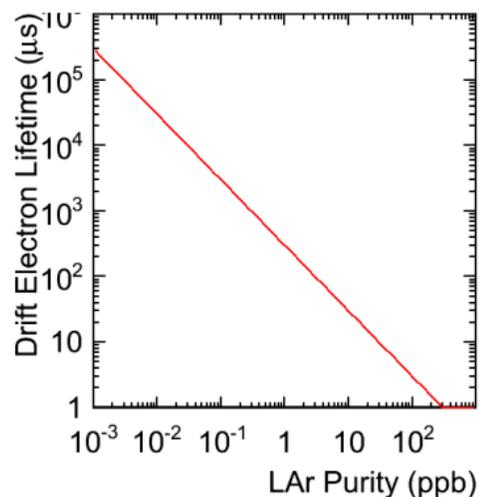
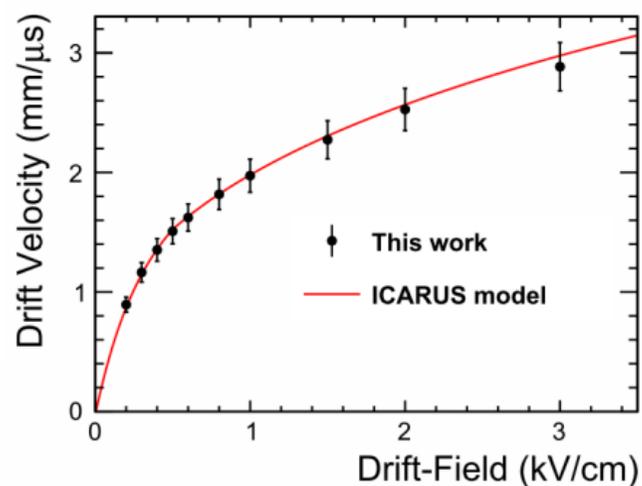


液体アルゴンTPC

沸点(@1atm)	密度	大気中の割合	W値(蛍光)	W値(電離)	蛍光波長	蛍光時定数
-186°C	1.4 g/cm ³	0.93%	19.5 eV ≅40 photon/keV	23.3 eV ≅40 e-/keV	128 nm	6 ns (singlet) 1.5 μs (triplet)

□ LArTPC

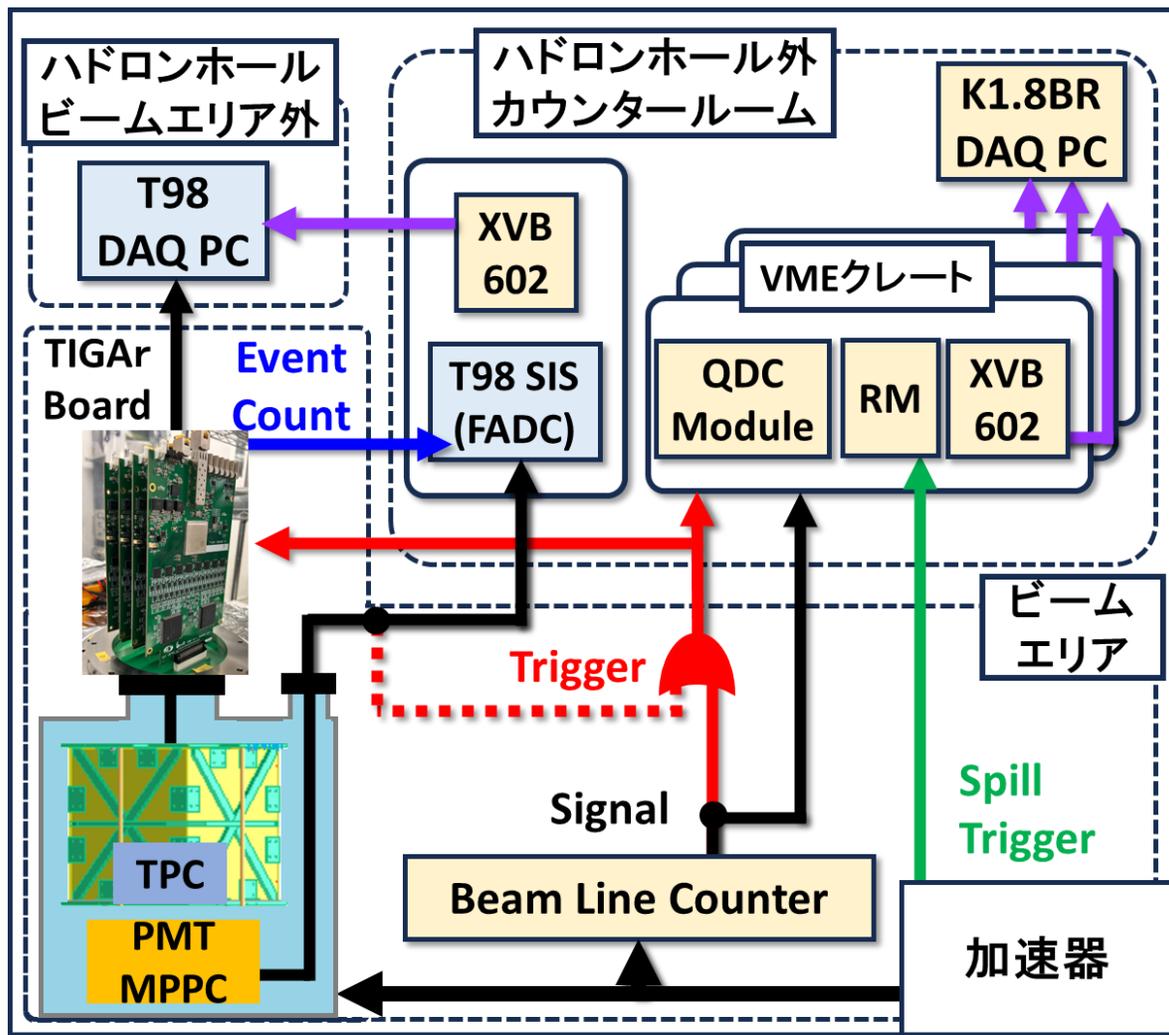
- ドリフト電場 + 電荷&光信号読出し
- 要 高純度アルゴン
 - 主に窒素がシンチ光を抑制 (1 ppm以上で問題)
 - 電気陰性度不純物がドリフト電子を抑制
1 kV/cmで30 cm drift = 150 μs → < 2 ppb



T98 Phase-2 DAQシステム

※K1.8BR DAQシステムは確立済み

● DAQシステム概略図



● DAQシステムの動作

- ・LArTPC信号取得
 - ・トリガー: ビームトリガー, PMT(off-spill)
 - ・電荷信号: TIGAr Board × 4 → T98 DAQ PC
 - ・光信号: FADC → T98 DAQ PC

● >100Hzでのデータ取得

- ・TIGAr単体でのDAQレートの保証
- ・FADCのDAQレートの保証
- ・データ転送速度の保証

→早稲田,K1.8BRでのLAr試験にて検証

● イベント同期

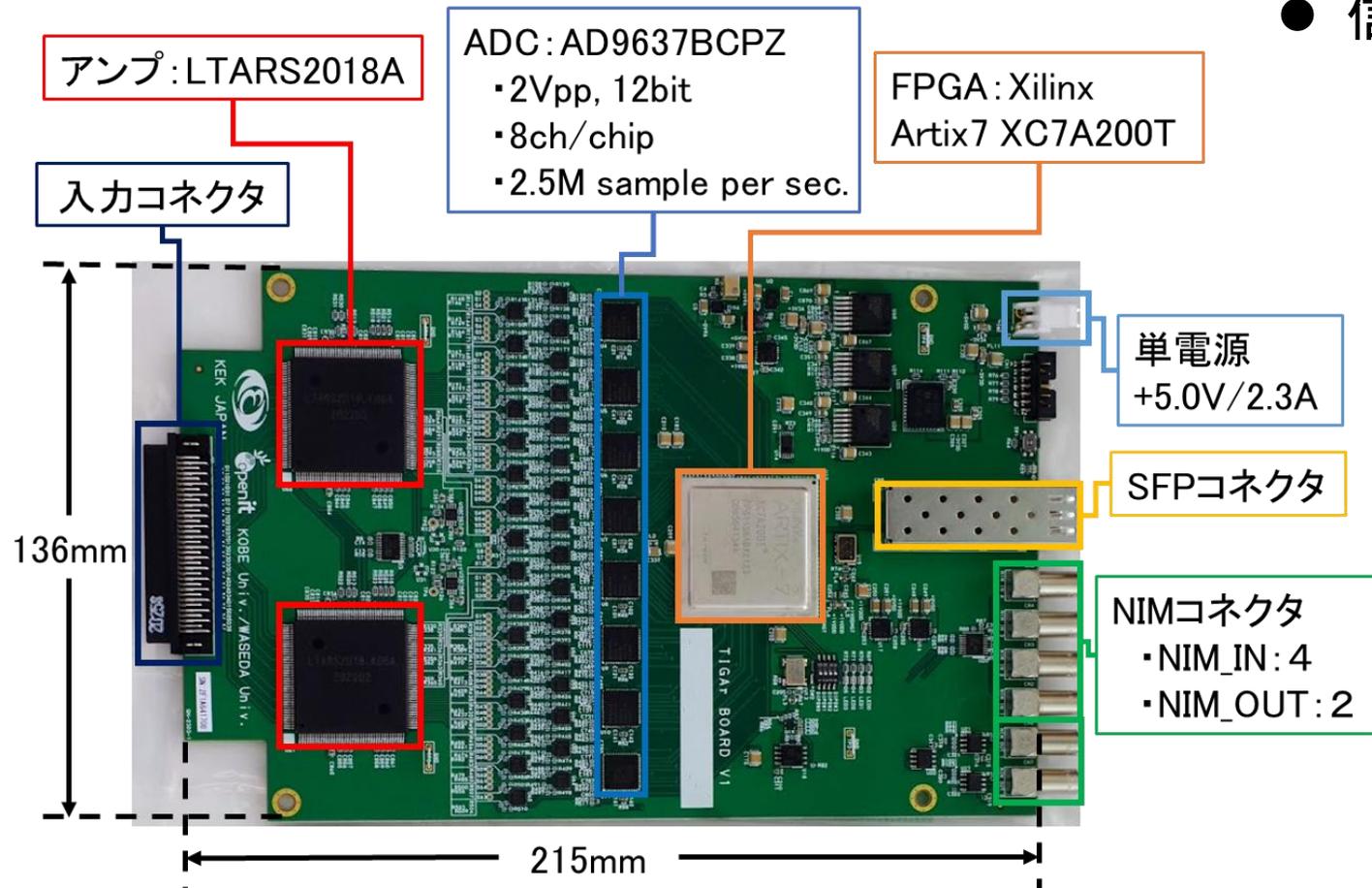
- ・K1.8BR DAQとの統合
 - ・TIGAr Board 内部クロック
 - ・K1.8BR Scalerのクロック情報 で同期

結果

- ・ビームタイム中の安定したデータ取得の達成
- ・瞬間レート100~200Hz程度でのデータ取得に成功

TIGAr Board

- “TPC electronics for Ionized signal in Gas and liquid Argon”
 - KEK坂下氏, KEK岸本氏, 神戸大, 早稲田大の共同での開発 (Open-it project)
 - LArTPC, ガスTPCで使用される想定し, 低ノイズ・ダイナミックレンジ・多チャンネルを要求



● 信号処理システム

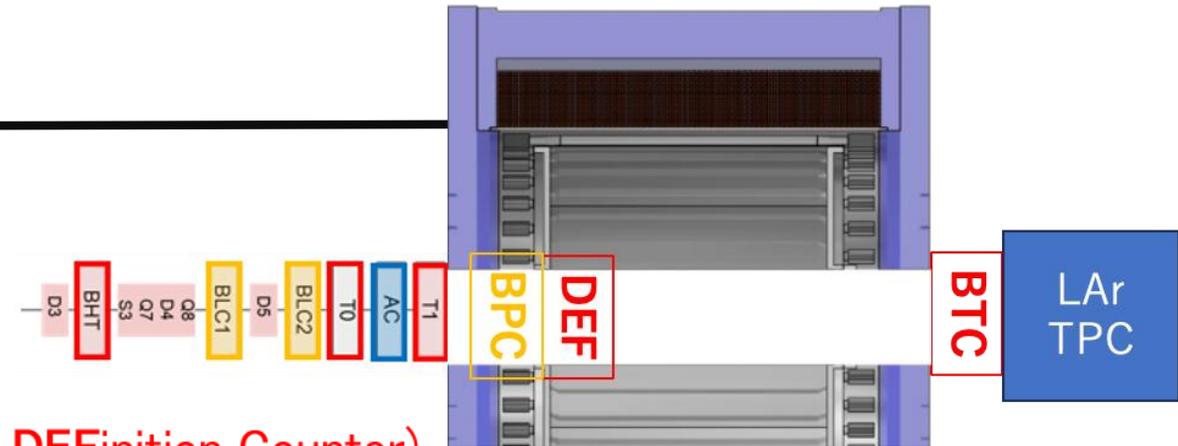
- 32 ch分の検出器信号をFTを介して取得 → 4枚で128 chを読み出し可能
- LTARS: 信号増幅・波形整形
- ADC: 2 Vpp, 12 bitのデジタル
- FPGA: ファームウェアでの処理
 - ✓ 外部トリガーをNIMから入力してデータを伝送
 - ✓ 通信にはSiTCP通信を使用

LTARS2018A 設計値	
Chip size	2.5 mm × 5 mm
チャンネル数	16 ch
ゲイン	HG: 10 mV/fC
ENC(検出器容量: 100 pF)	2000e-(3.2mV)
動作温度	室温

T98 Phase-2 Trigger

● K1.8BR 検出器(T98での運用)

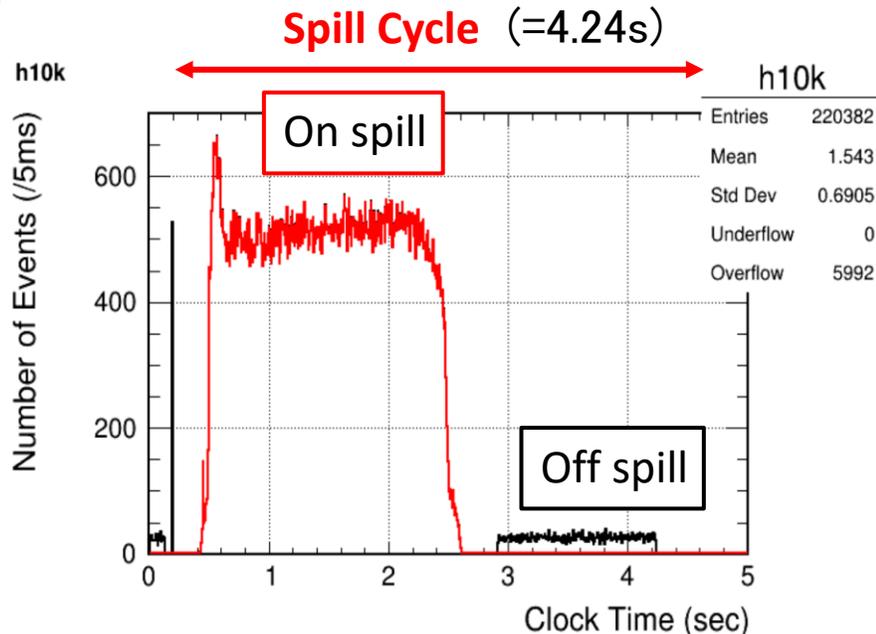
- **BHT, T0, T1** : 8m(7.7m) ToF, Beam Triggerの作成
BHT-T1の Δt でprotonとdeuteronを識別
- **BLC(Beam Line Chamber)** : 運動量の算出
- **AC(Aerogel Cherenkov)** : Pionの特定
- **BPC(Beam Profile Chamber)** :
Beamの広がりや中心位置の特定



K1.8BR 検出器

- **DEF(Beam DEFINITION Counter)**
Triggerに用いる最下流のToF
- **BTC(Beam Through Counter)**
容器直前に設置したToF

● Spill構造



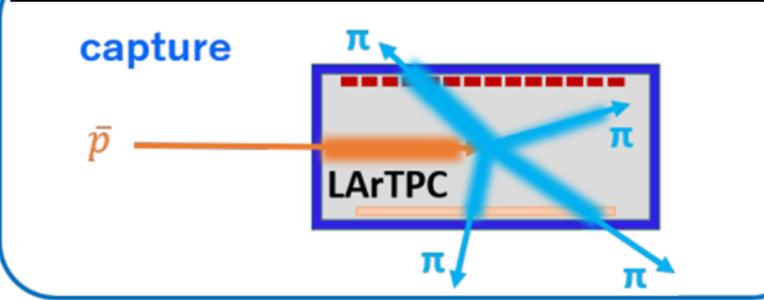
● Triggerの種類

- **On spill trigger**
 - Beam Trigger : beamが下流まで到達することを要求
 - prescaled pion(1/40) : Beam trigger + AC (calibration)
 - Cherenkov veto trigger : Beam trigger + ACが鳴っていない
- Off spill trigger
 - off spill cosmic : off spill時にcosmicを検出 with PMT

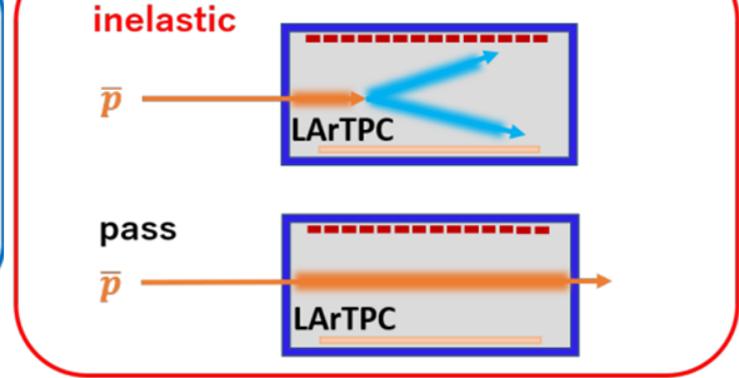
T98 Phase-2 Simulation

● 粒子のエネルギーと信号事象

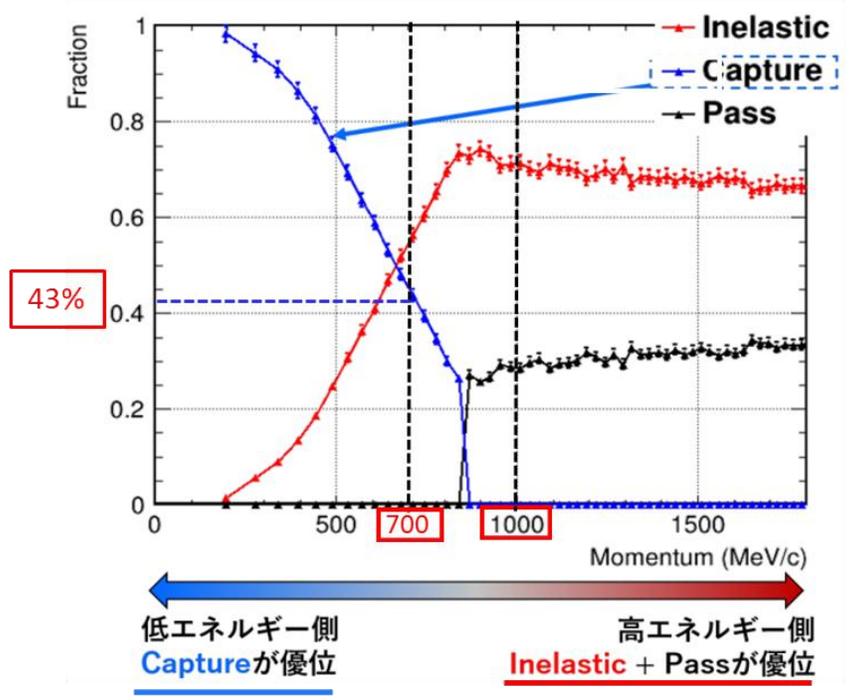
低エネルギー側で起こる信号事象



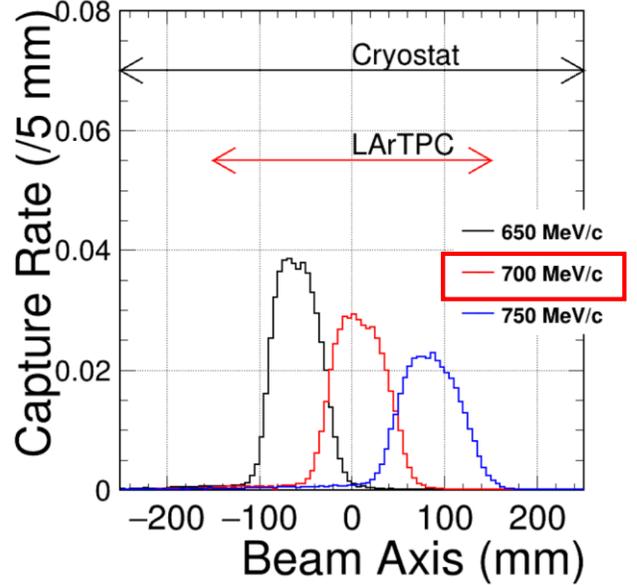
高エネルギー側で起こる信号事象



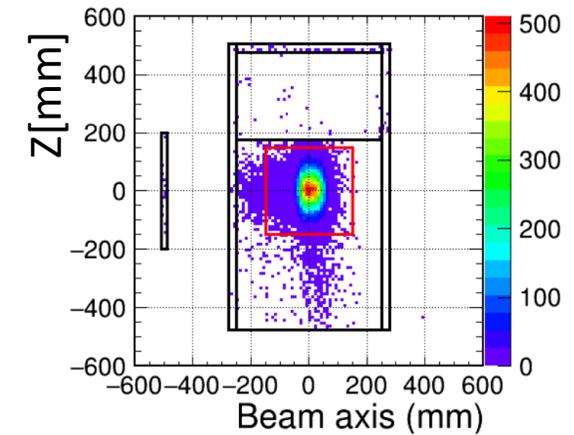
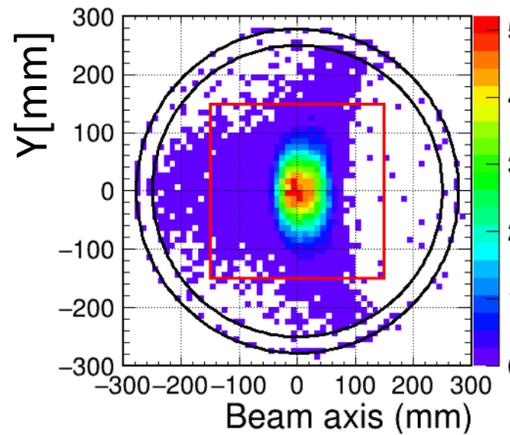
● LAr(30 × 30 × 60)に反陽子を入射した時の反応確率



● 運動量変化による原子核捕獲地点の分布

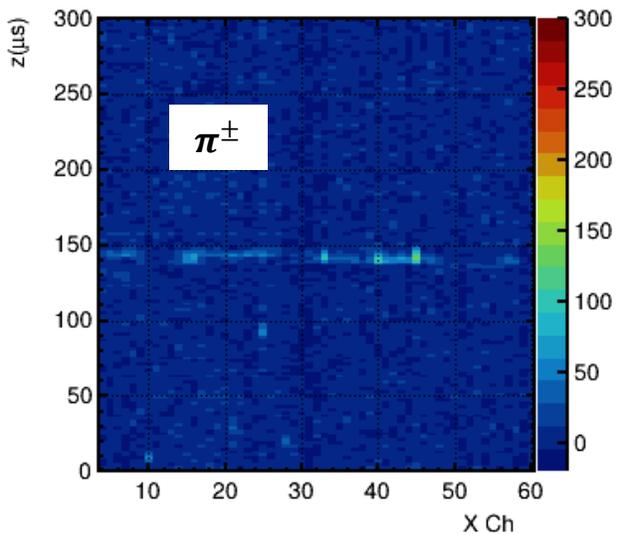


● 700 MeV/c 反陽子原子核捕獲地点の分布(100K events) 入射反陽子の43%がTPC内で捕獲

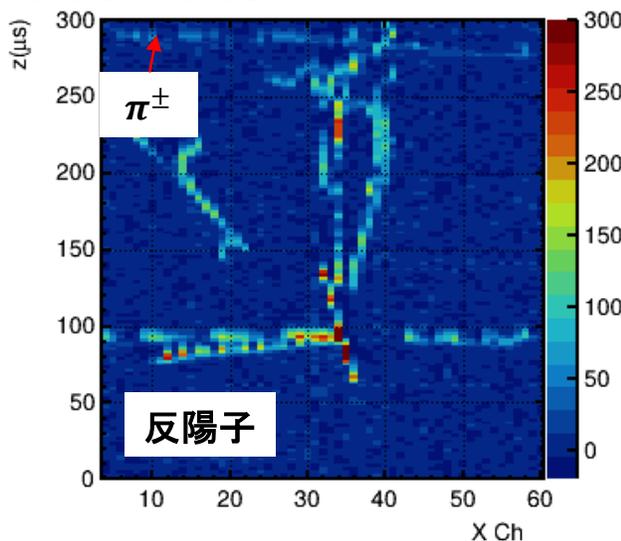


最初の8イベント(0.7GeV/c 反陽子)

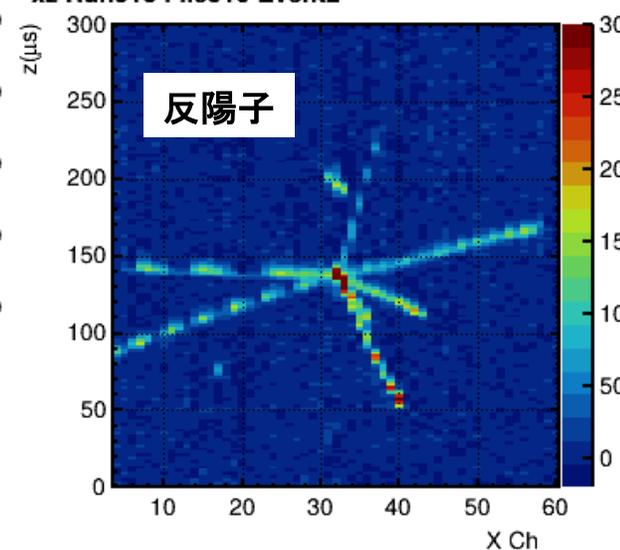
xz Run518 File510 Event0



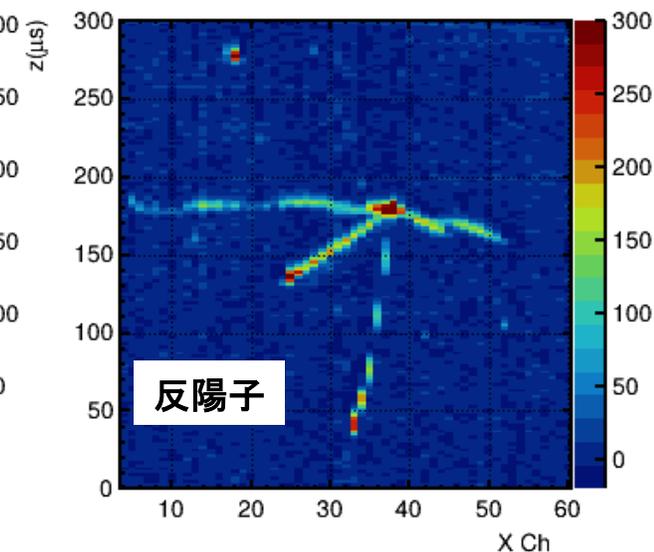
xz Run518 File510 Event1



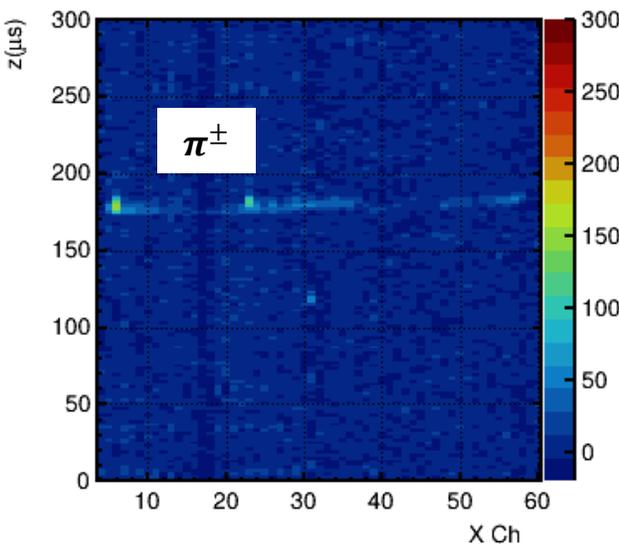
xz Run518 File510 Event2



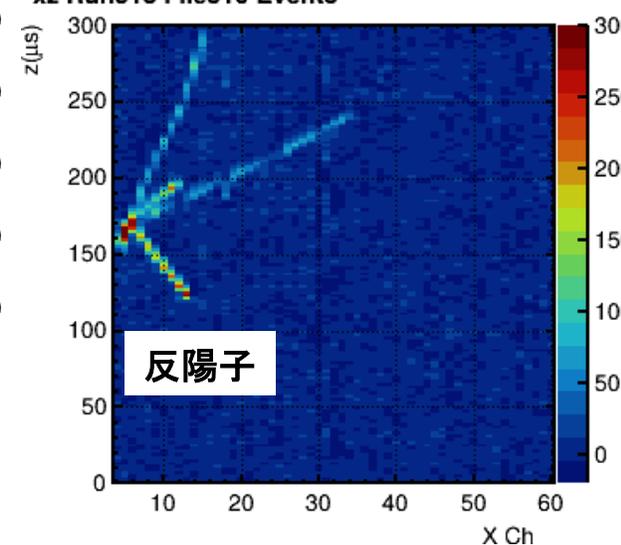
xz Run518 File510 Event3



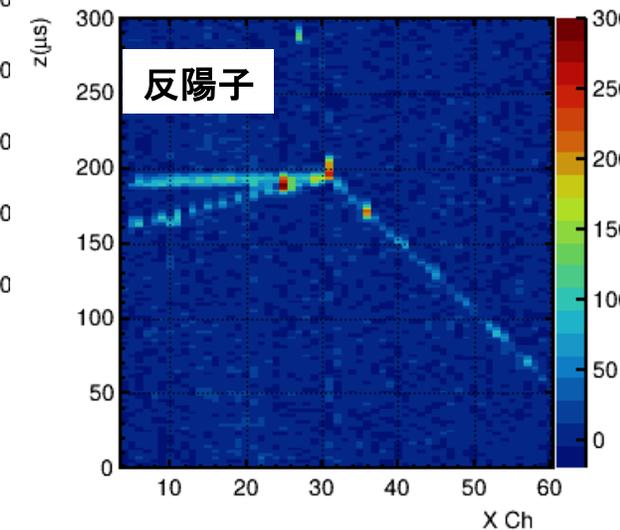
xz Run518 File510 Event4



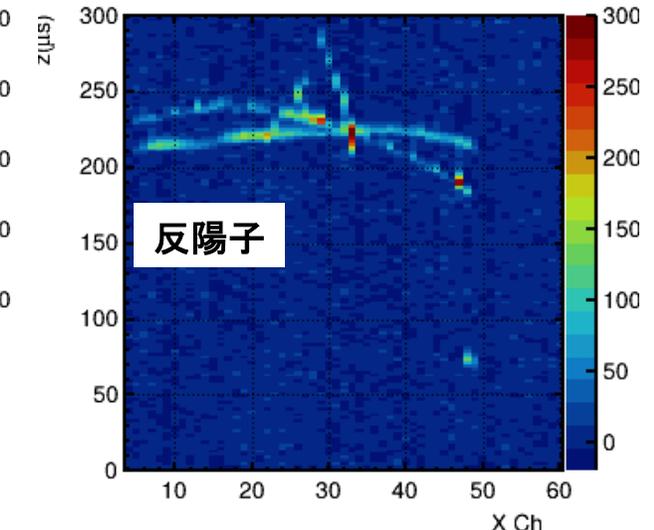
xz Run518 File510 Event5



xz Run518 File510 Event6



xz Run518 File510 Event7



Backup

CNN

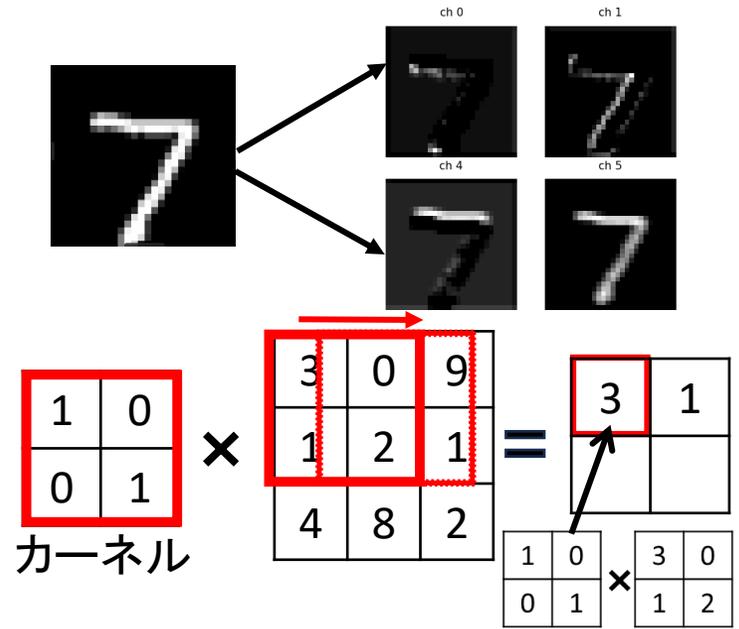
■ CNNの概要

CNN・・・畳み込みニューラルネットワーク

→画像や映像の認識・分析に強いAI(ディープラーニング)のモデル
手書き数字のデータセットであるMNISTを用いたものが有名

■ CNNの構成

- **畳み込み層**・・・入力データにカーネル(フィルター)をスライドさせながら演算
→画像から局所的な特徴(角やカーブなど)を抽出
- **全結合**・・・畳み込み層などで得られた全ての特徴量を1箇所を集め、
学習済みの重みwとバイアスbを使って結合・計算
→バラバラな特徴をまとめ、最終的に目的のクラス数の確率として出力



CNN

・CNNの学習...畳み込みや全結合で用いる重みをデータから自動取得するのが目的

適切な重みの獲得=データを正しく分類

・学習の流れ

- ① 入力画像の処理(batchという塊で扱う)
- ② 各重みに関する損失関数の勾配を求める
- ③ 重みパラメータを勾配方向に微小量だけ更新 以下、繰り返し(これを1epochという)

・損失関数..入力データに対する正解ラベルとモデルの予測との誤差を数値化する関数

この損失をもとに出力層から入力層に向かって勾配を伝播させ、重みを更新(=誤差逆伝播)

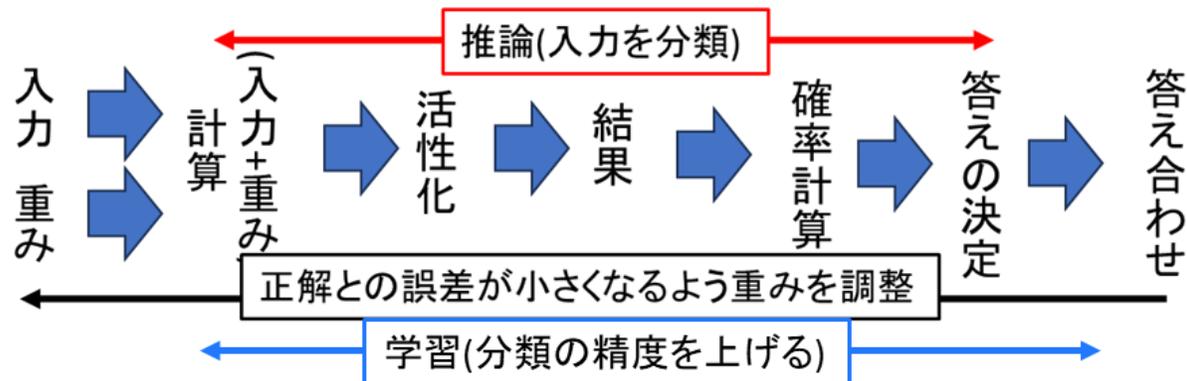
ex)クロスエントロピー誤差...モデルの出力のlogと正解の値を乗算したものの総和を損失とする

誤った答えを出すほど損失が大きくなる

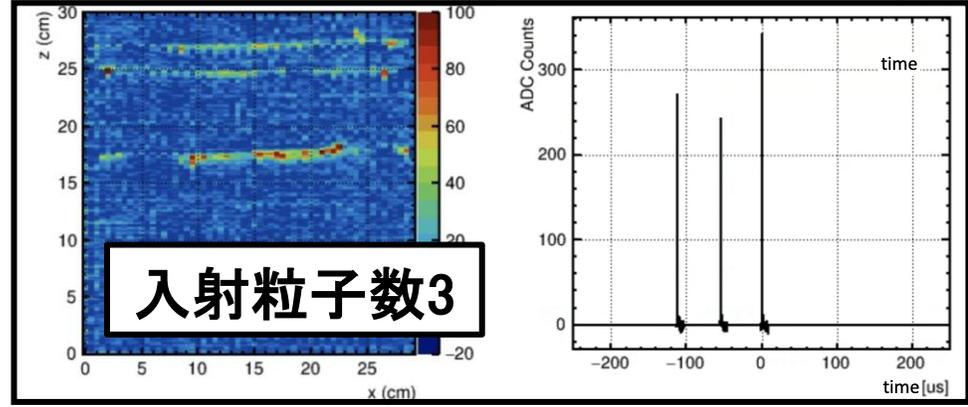
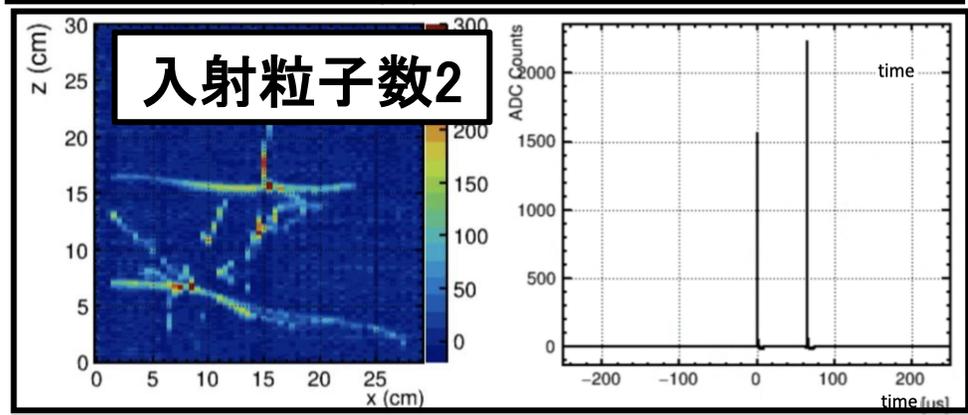
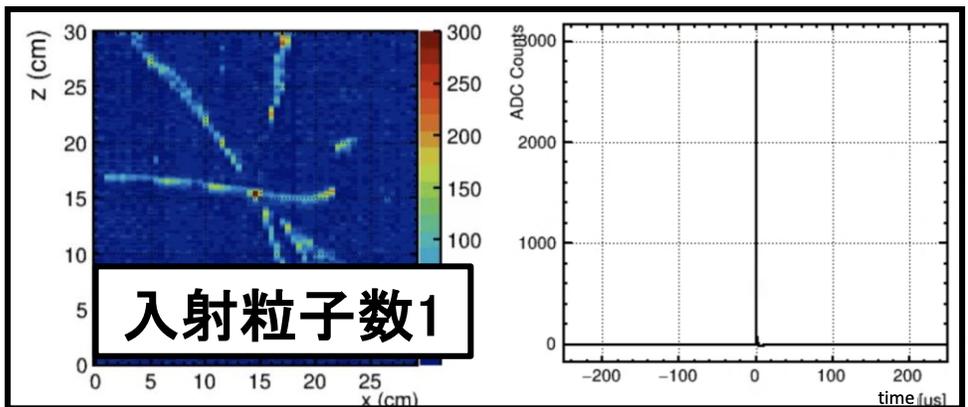
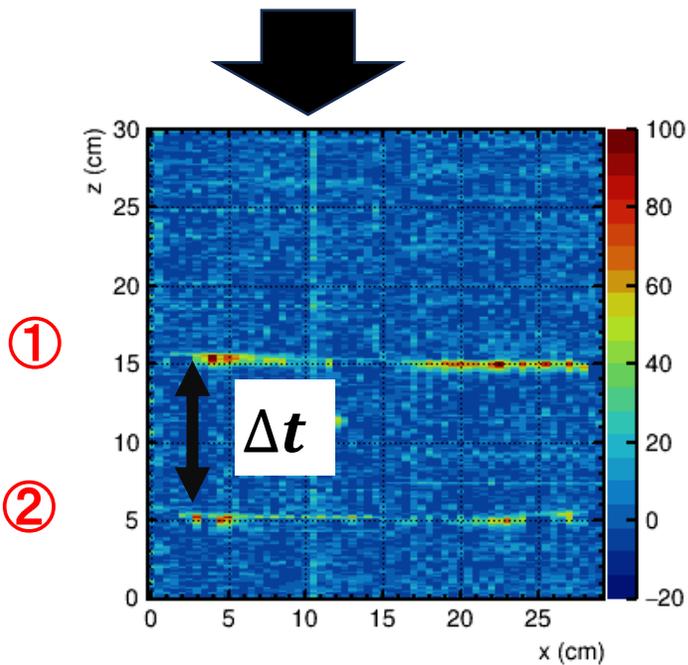
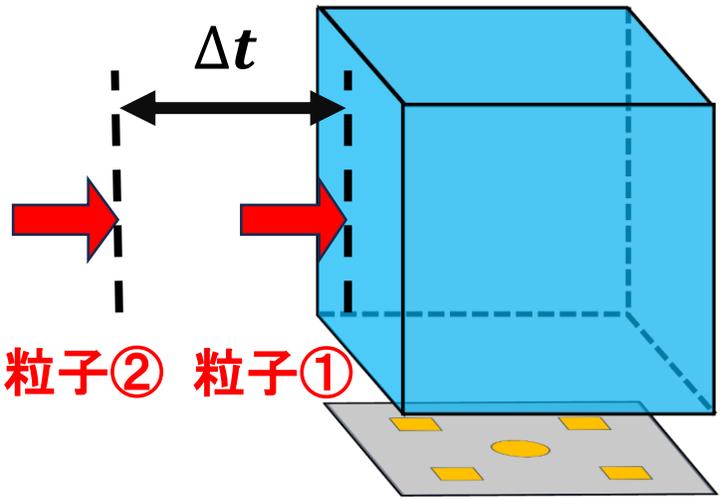
$$E = - \sum t_k \log_y K$$

・重みの更新...一気に更新すると結果が大きく反映するのでBatch単位で徐々に更新する

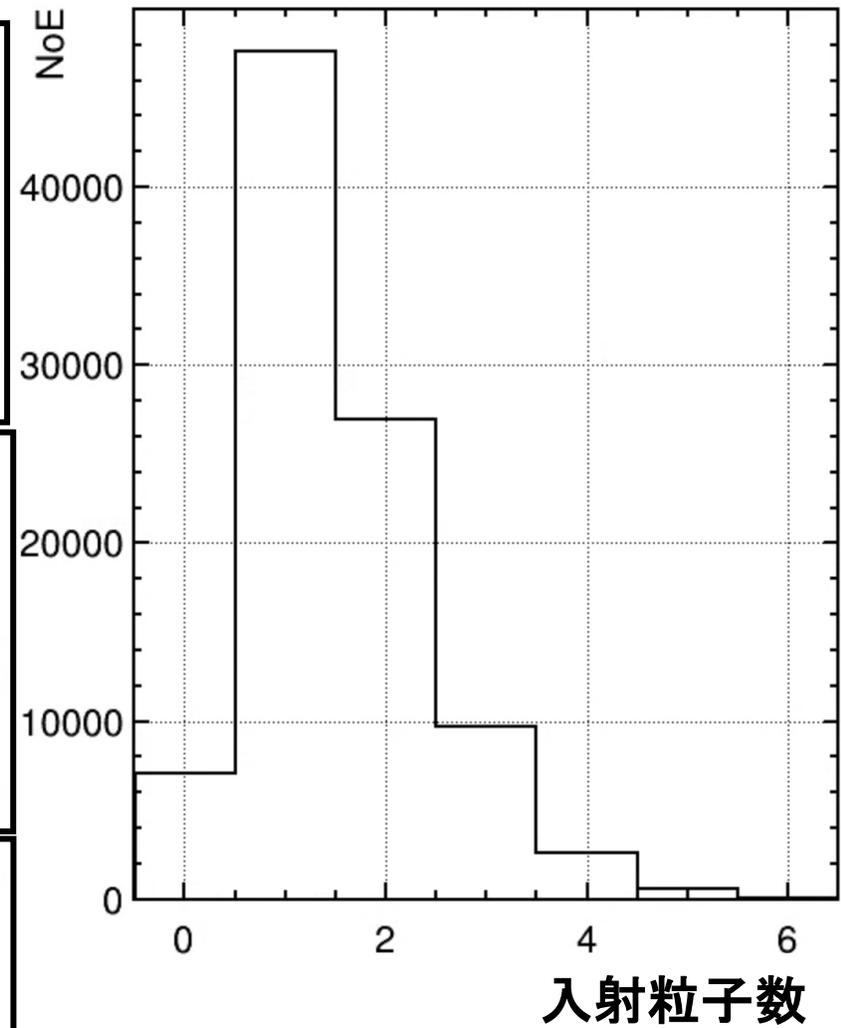
ex)SGD(確率的勾配降下法), Adam:学習率を自動で調整し、収束が早く安定



光信号：入射粒子数

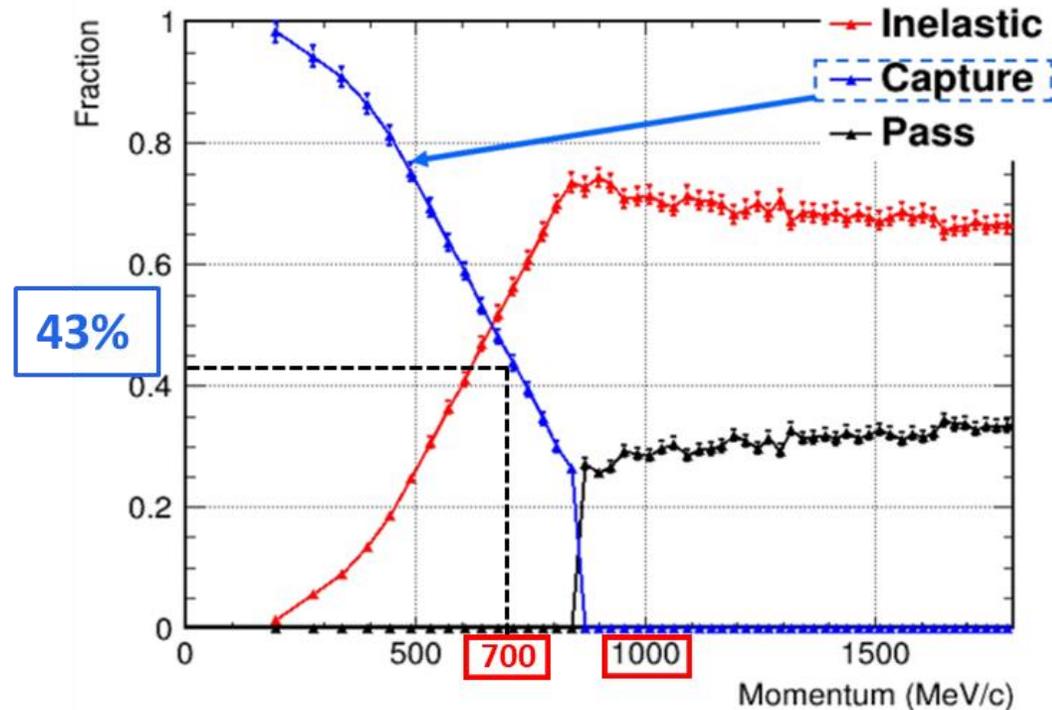
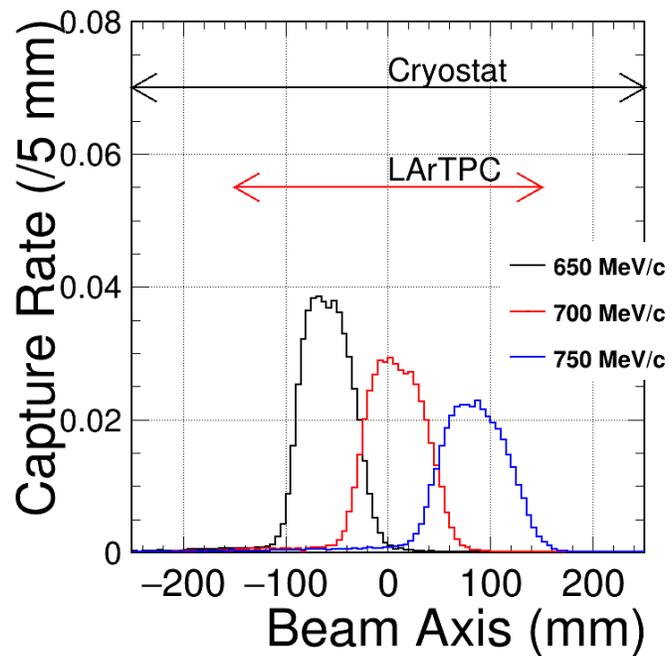
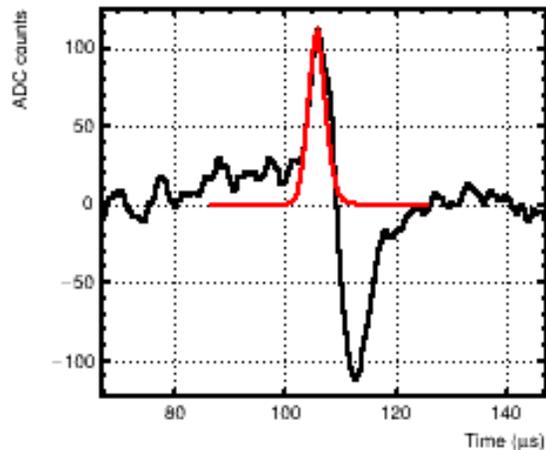
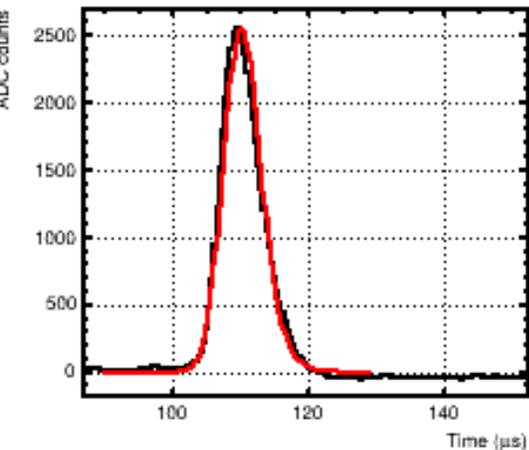


\bar{p} Runにおける
t=0の入射粒子数の分布(10^5 event)



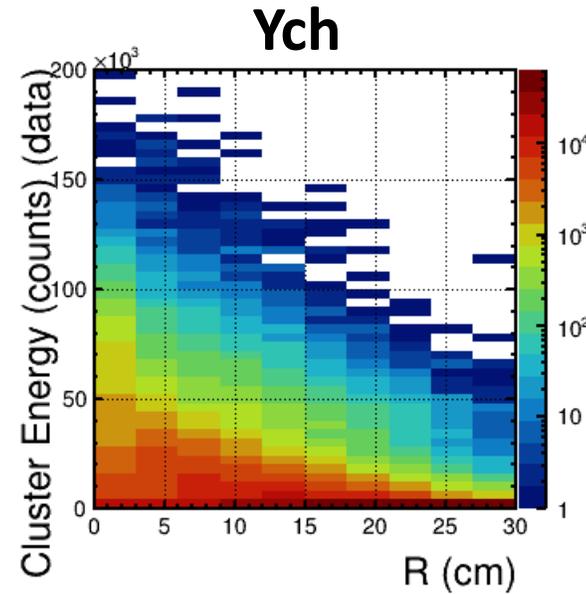
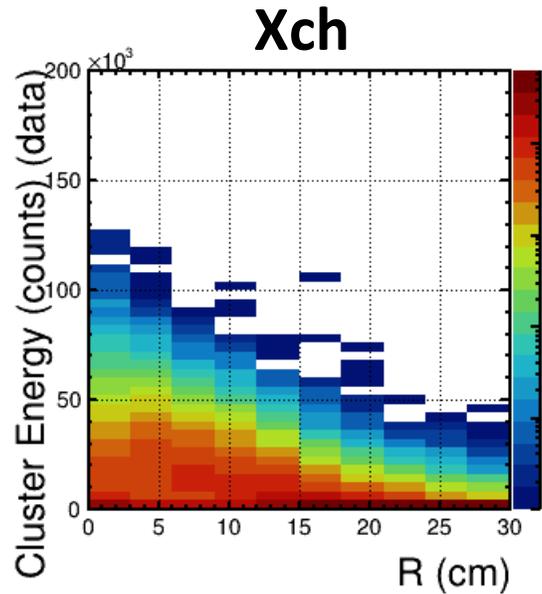
➡ 入射粒子数=1のevent
を解析する

■ 信号の誘起

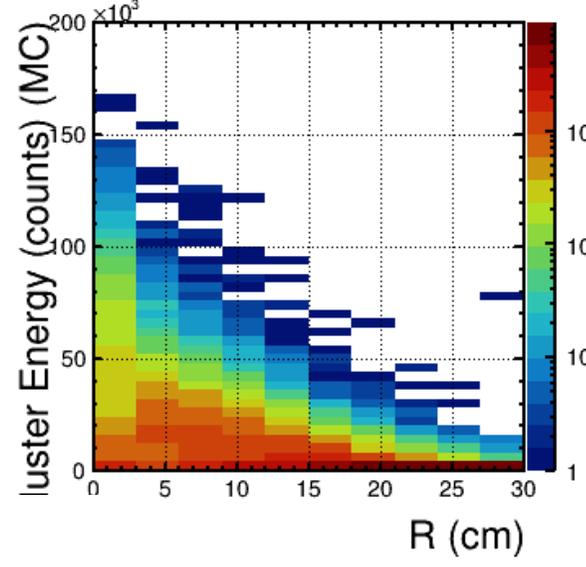
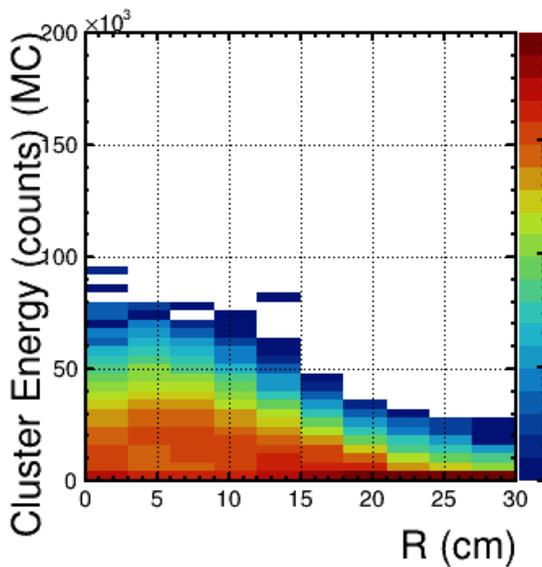


2次粒子エネルギー分布

Data



Simulation



■ 使用データ

• イベント数

\bar{p} Run : 64450イベント

MC : 9000イベント

• PreCut条件

① \bar{p} フラグ

② $-26\text{ns} < \text{ToF} < -12\text{ns}$

③ PileUpなし(入射粒子数=1)

• Good Cluster条件

予測されるRMSに近い飛跡

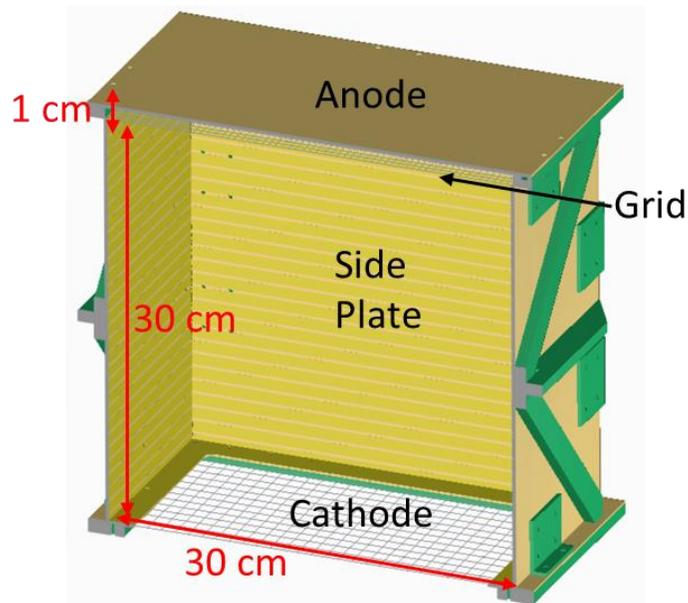
$$\rightarrow 0.2 < \frac{RMS_{data}}{RMS_{pre}} < 1.2$$

Clusterの本数では

Data>MCとなっている

液体アルゴンTPC

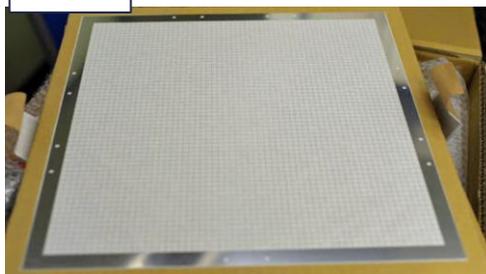
電場形成



Grid

- ステンレス
- 線φ100μm
- 5mmピッチ

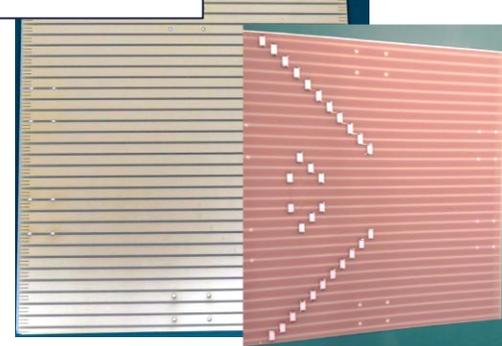
Grid



Side Plate

- 1cm間隔で8mm幅の電極
- 1枚に抵抗チップをはんだ付け
→100MΩ×30個で抵抗分割

Side Plate



Cathode

- PCB Plateに
ステンレスワイヤーをはんだ付け
(線φ100μm, 1cmピッチ)

Cathode

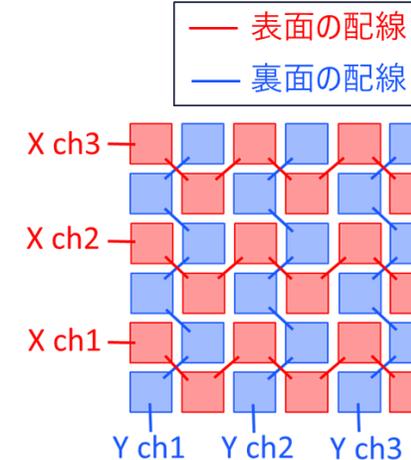
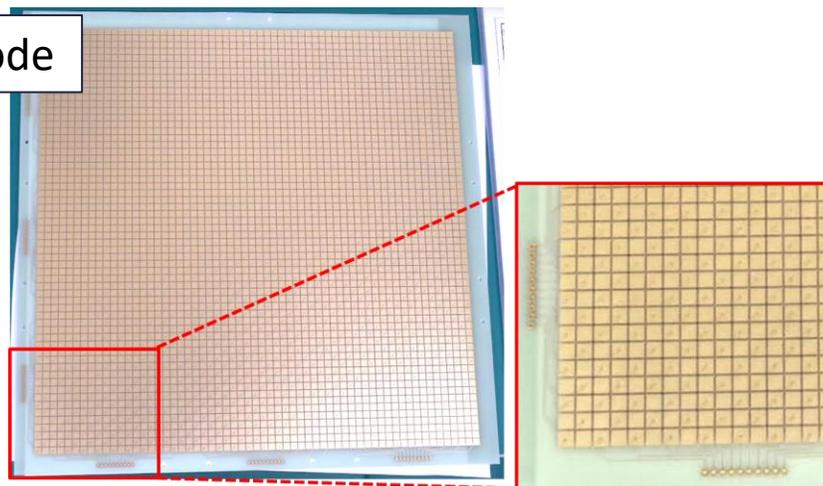


信号読み出し構造

Anode

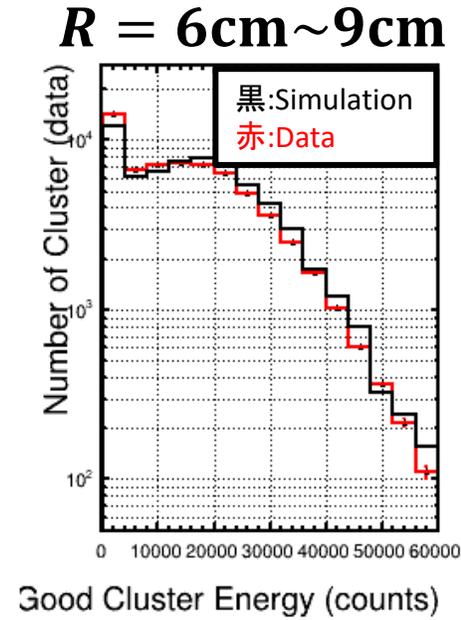
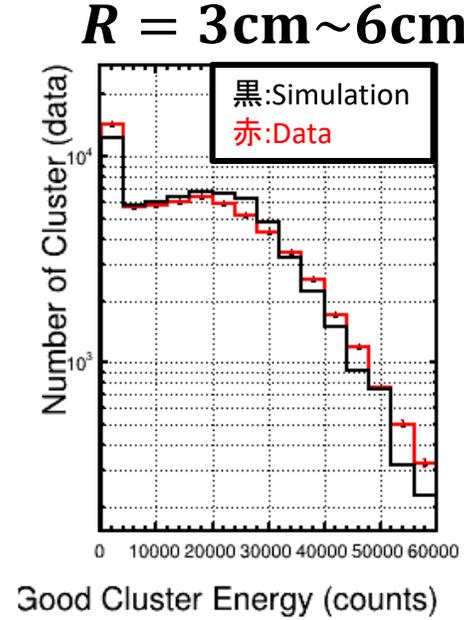
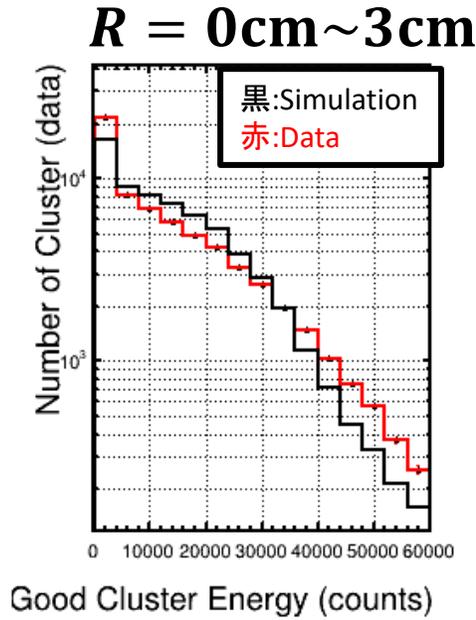
- 5mm角のpadを配置
- 裏表でジグザグに配線(千鳥読み出し)
→1cmピッチの2次元読み出し
- X : 30 ch , Y : 30 chの計60 ch

Anode



2次粒子エネルギー分布

Xch



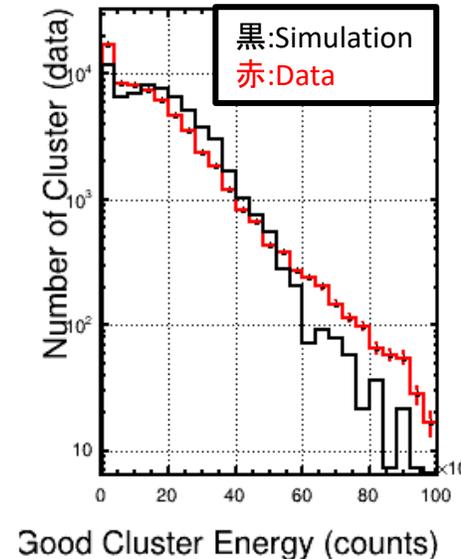
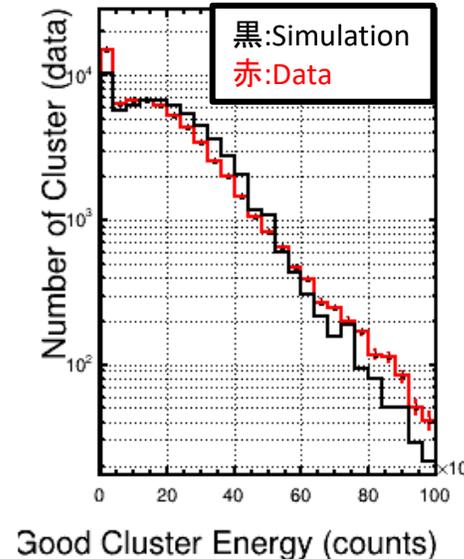
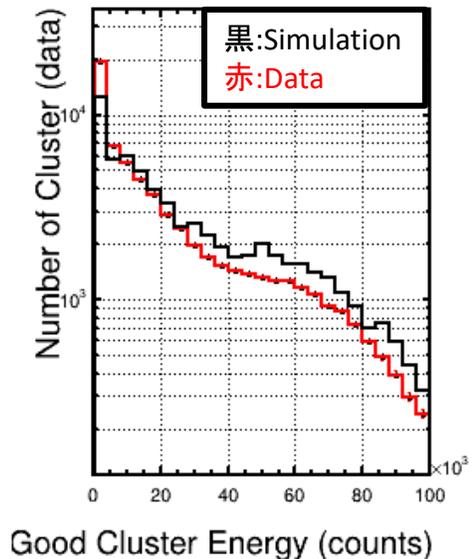
- 使用データ
 - イベント数
 \bar{p} Run : 64450イベント
 MC : 9000イベント
 Dataにスケール
 - PreCut条件
 - ① \bar{p} フラグ
 - ② $-26\text{ns} < \text{ToF} < -12\text{ns}$
 - ③ PileUpなし(入射粒子数=1)
 - Good Cluster条件
 予測されるRMSに近い飛跡

$$\rightarrow 0.2 < \frac{RMS_{data}}{RMS_{pre}} < 1.2$$

Clusterのエネルギー分布でも
Data>MCとなっている

- 今後の方針
 - \bar{p} についてのエネルギー較正

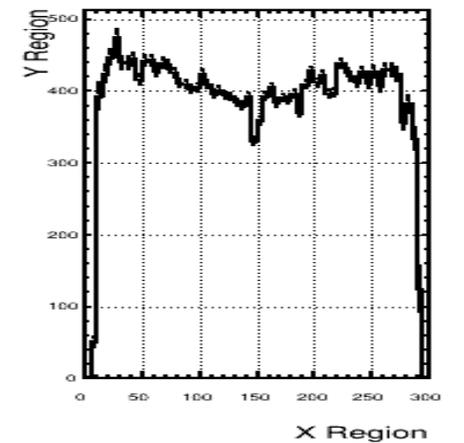
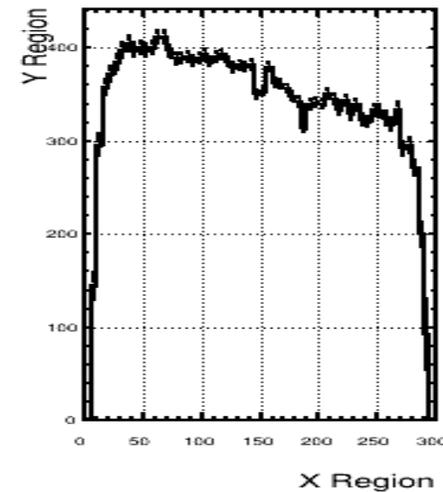
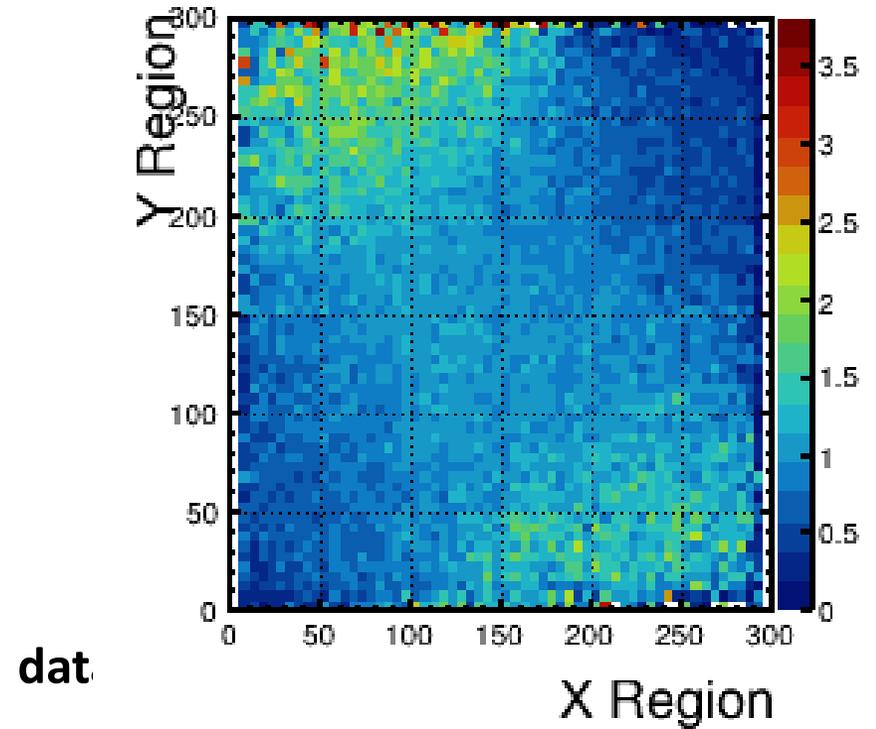
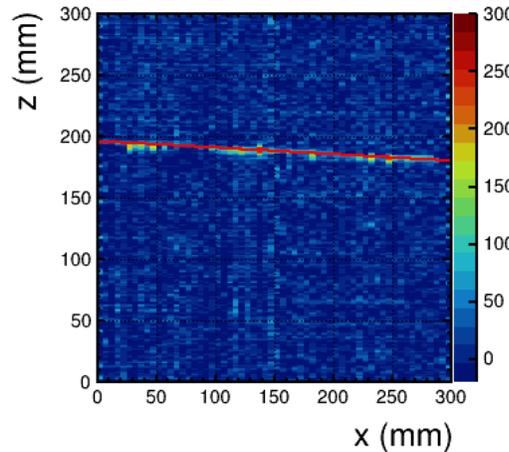
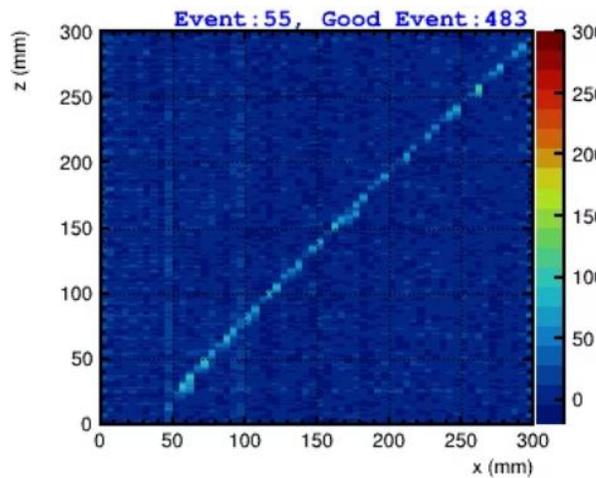
Ych



ノイズ解析・除去

■ 位置・Ch依存性

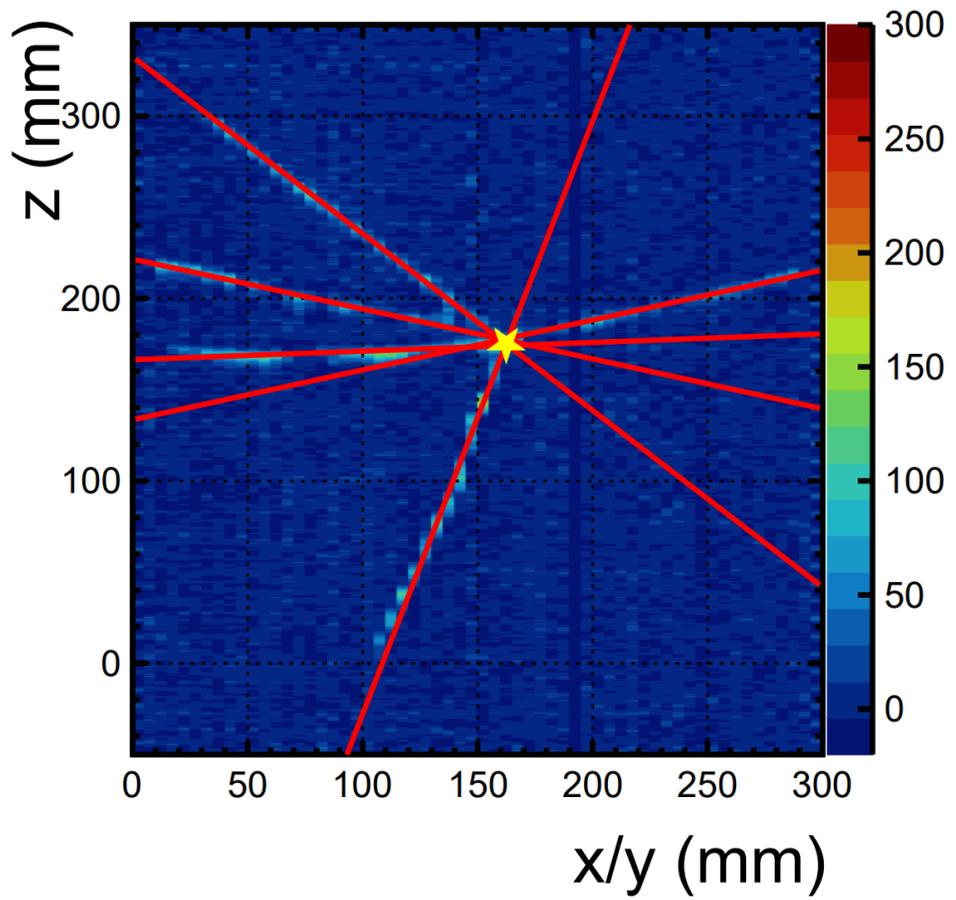
- 一様に入射するCosmicデータで確認



崩壊点の再構成

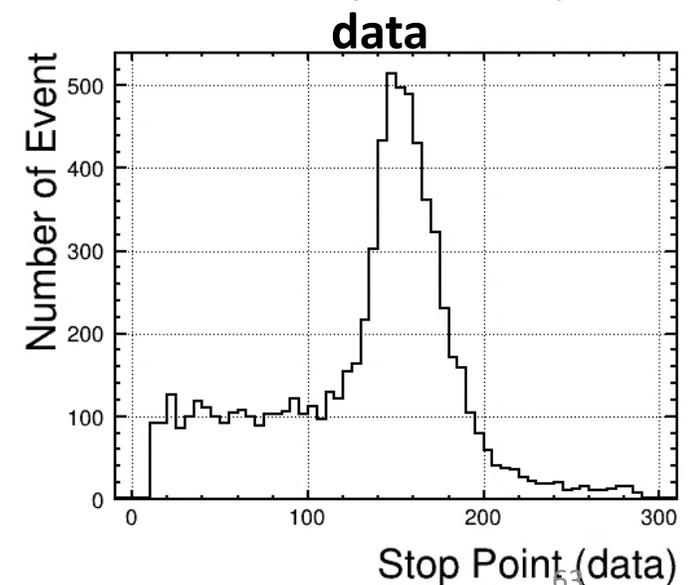
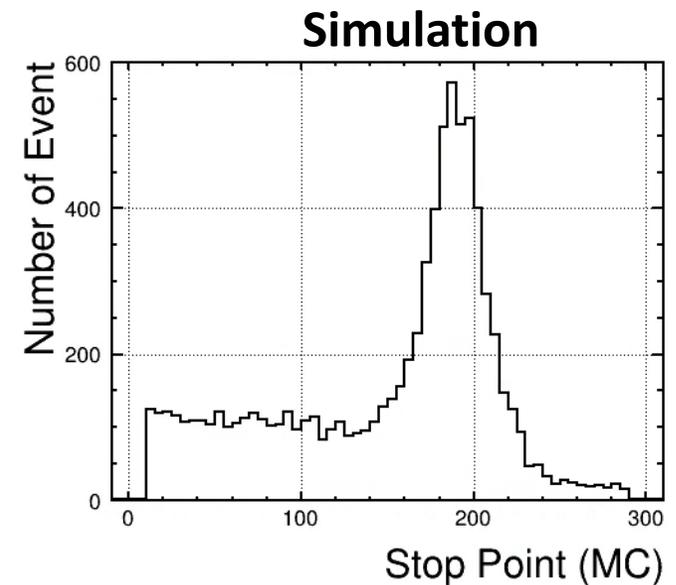
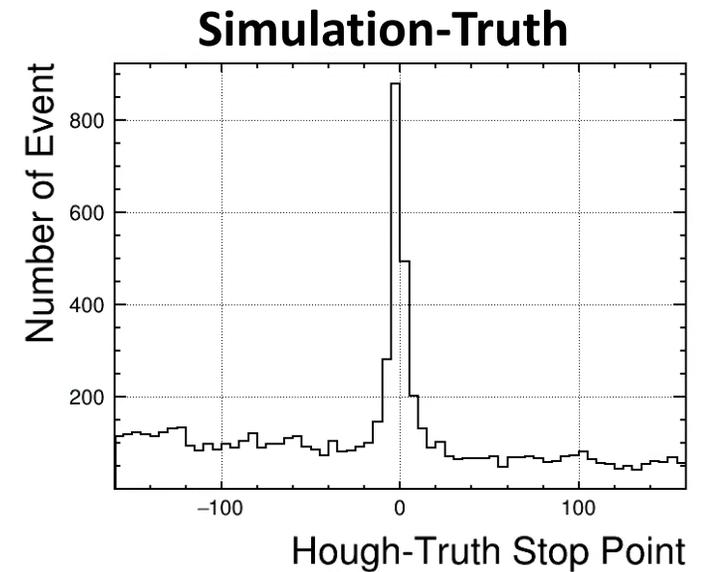
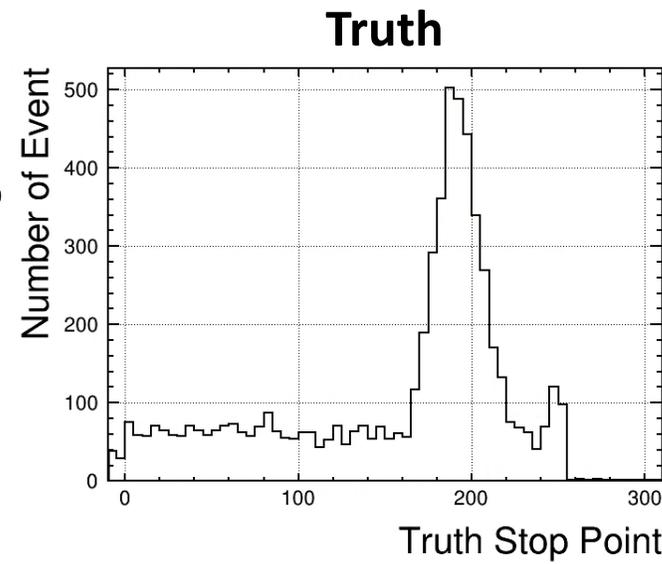
■ 位置・Ch依存性

- Hough変換で飛跡を再構成
- 再構成した飛跡の交点となる点を求める
- 一直線群からの距離が最小となるようにFitする

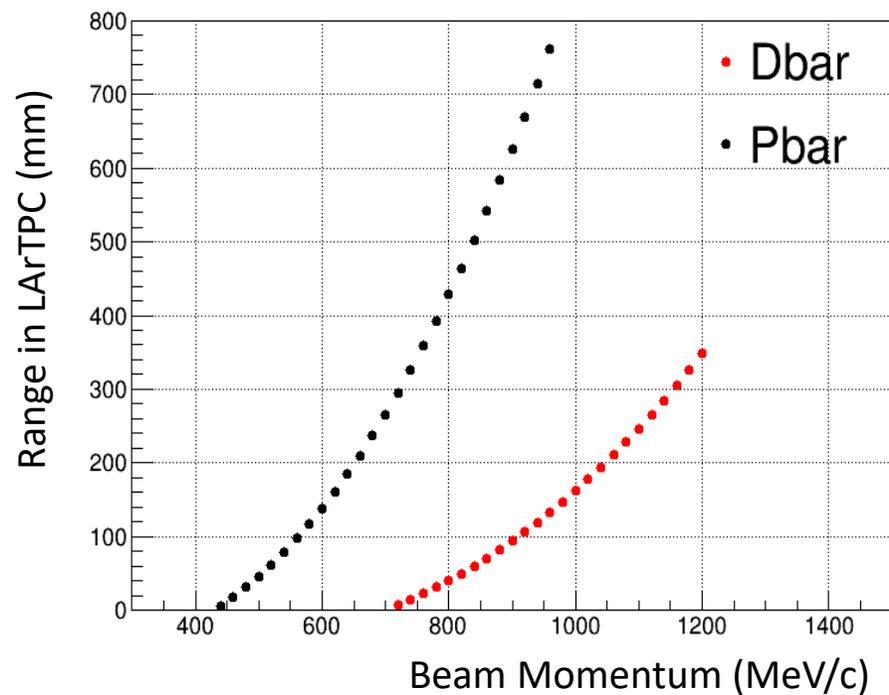


■ 再構成結果

- シミュレーションサンプルとデータの比較
- おおよそのイベントの再構成はできている



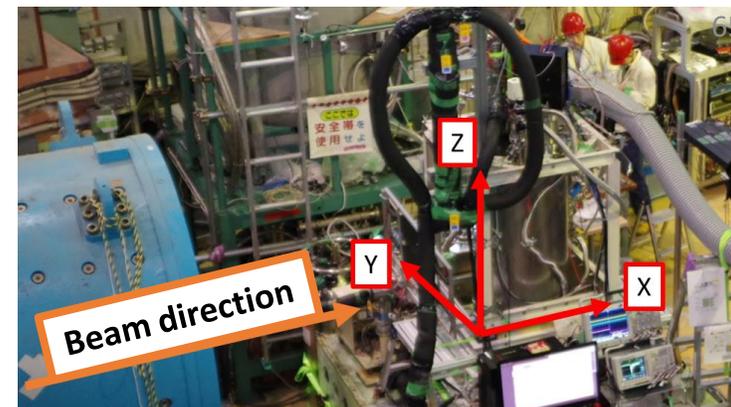
dE/dx解析



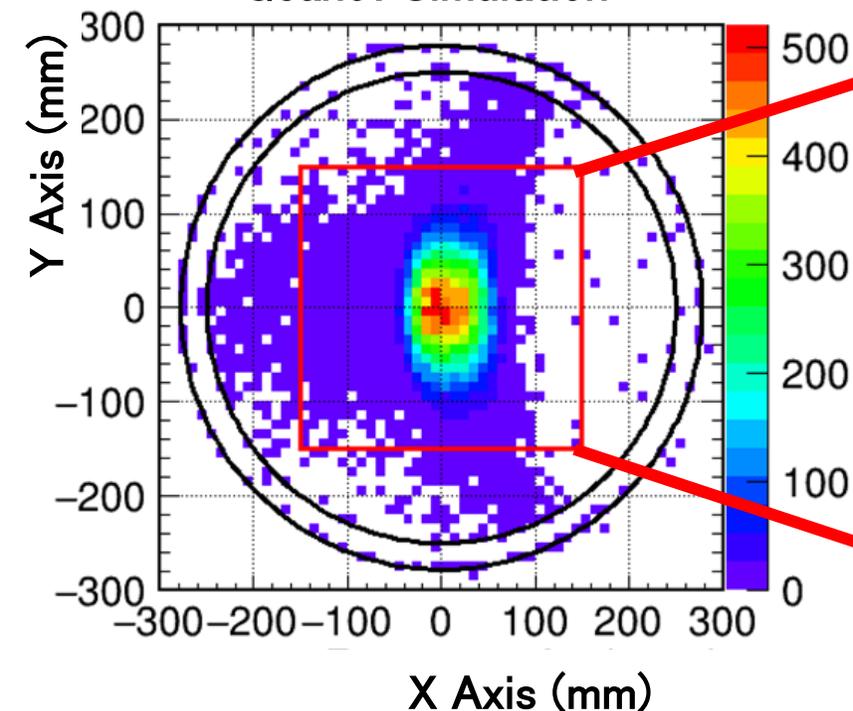
Particle	β	Rigidity (MeV/n)	Momentum (MeV/c)	LArTPC Range (cm)
Proton	0.5	150	600	12
Deuteron	0.5	150	1100	25

Individual Analysis

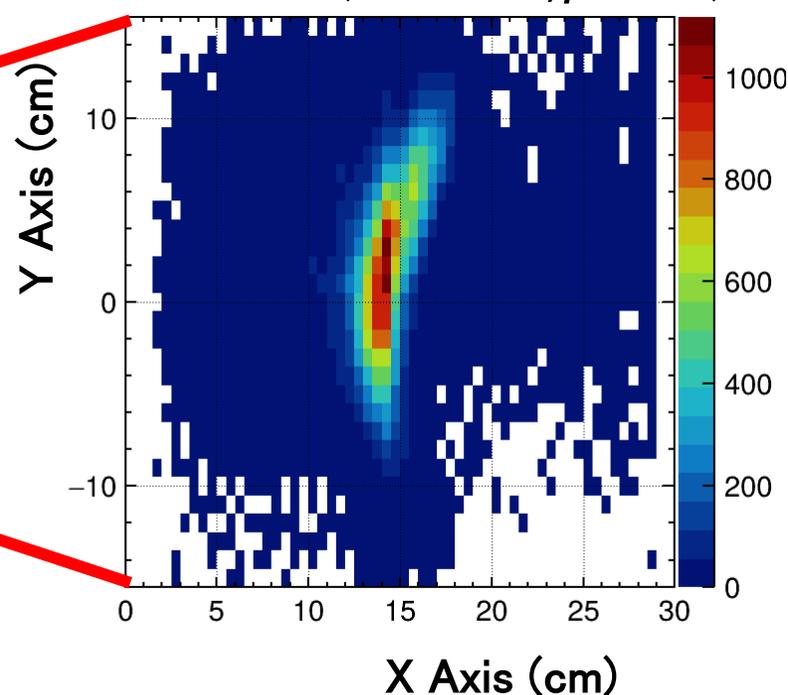
- Calculated the distribution by calculating the stopping point from the flight path.
- The flight path length varies between the left and right sides depending on the shape of the vessel.



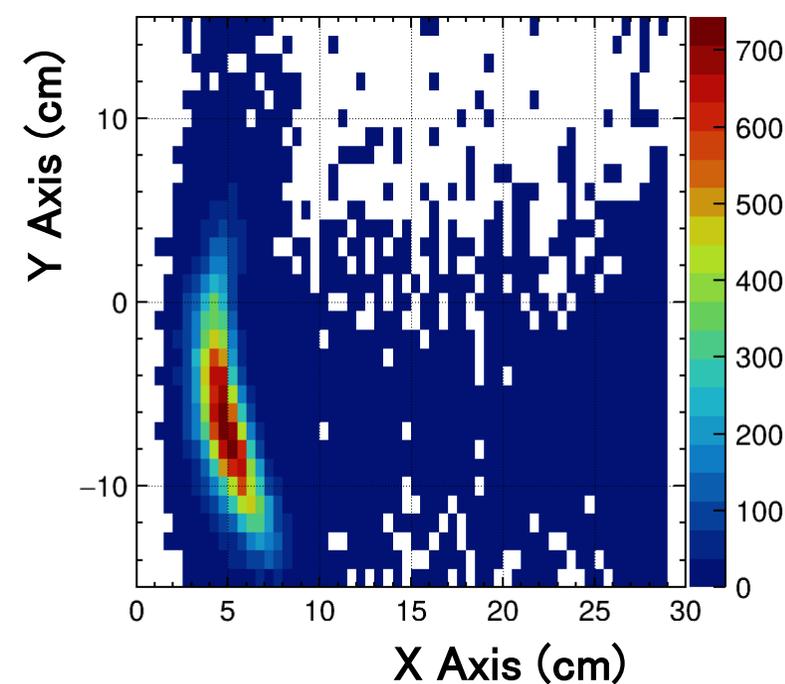
Pbar Stopping Point
Geant4 Simulation



Proton Stopping Point
Actual Data($0.7\text{GeV}/c, \beta = 0.60$)



Deuteron Stopping Point
Actual Data($1\text{GeV}/c, \beta = 0.47$)



Figure

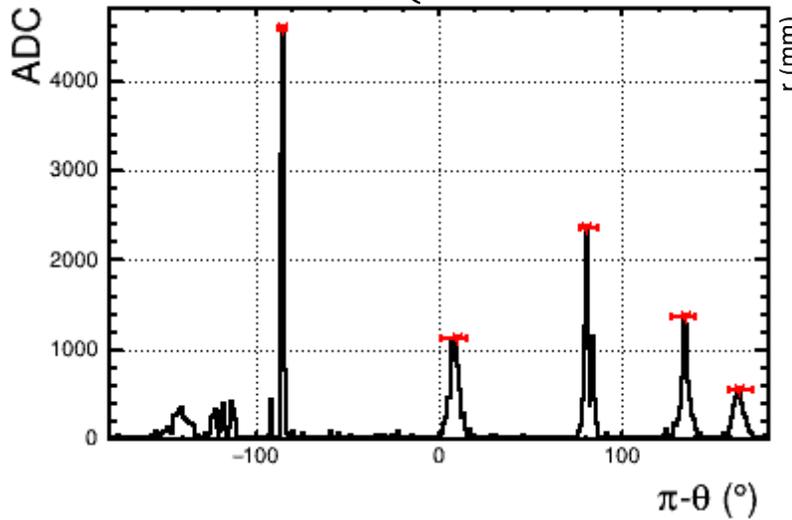
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

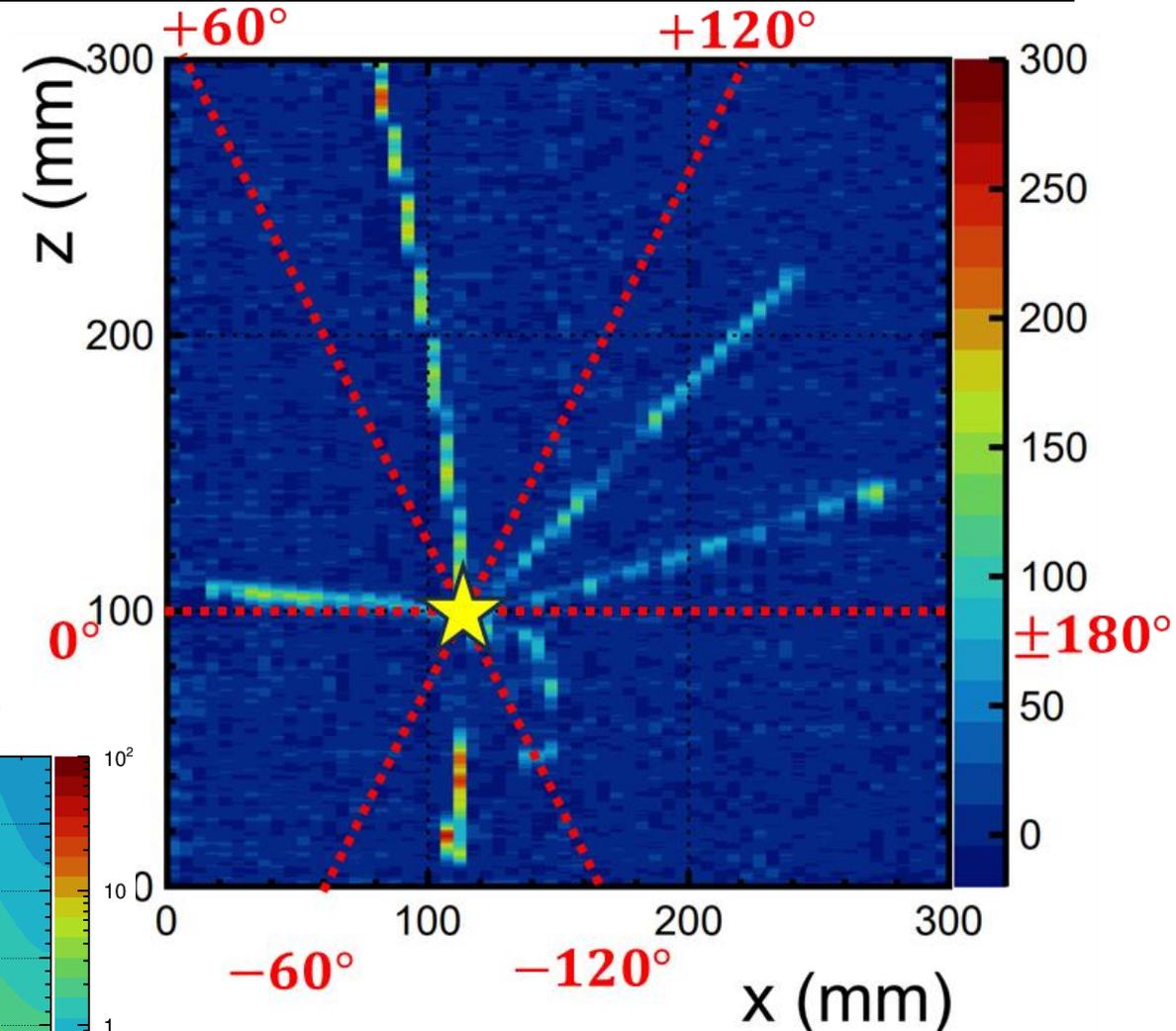
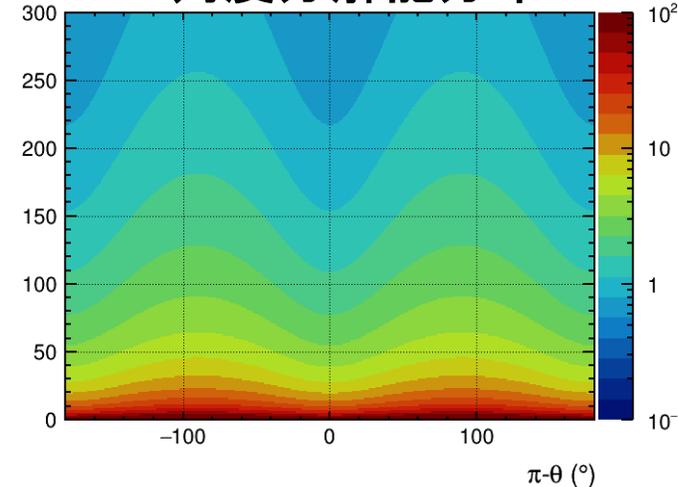
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 4.5 \sim 7.5 \text{cm}$)



角度分解能分布



分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

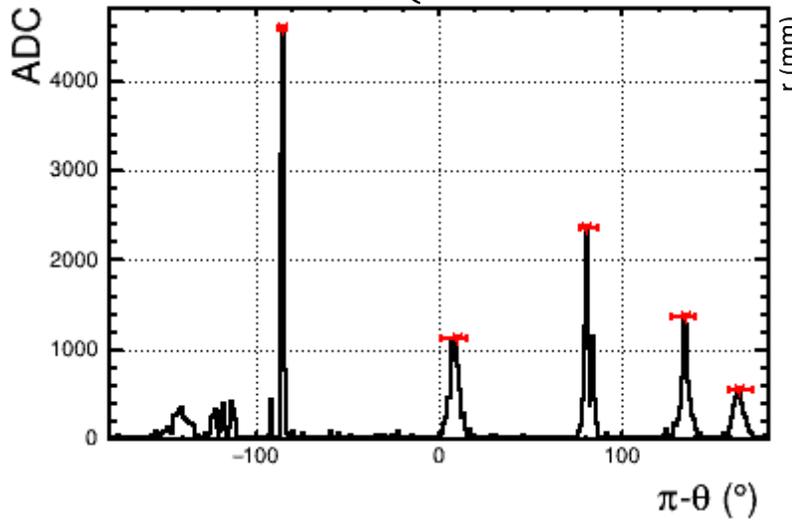
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

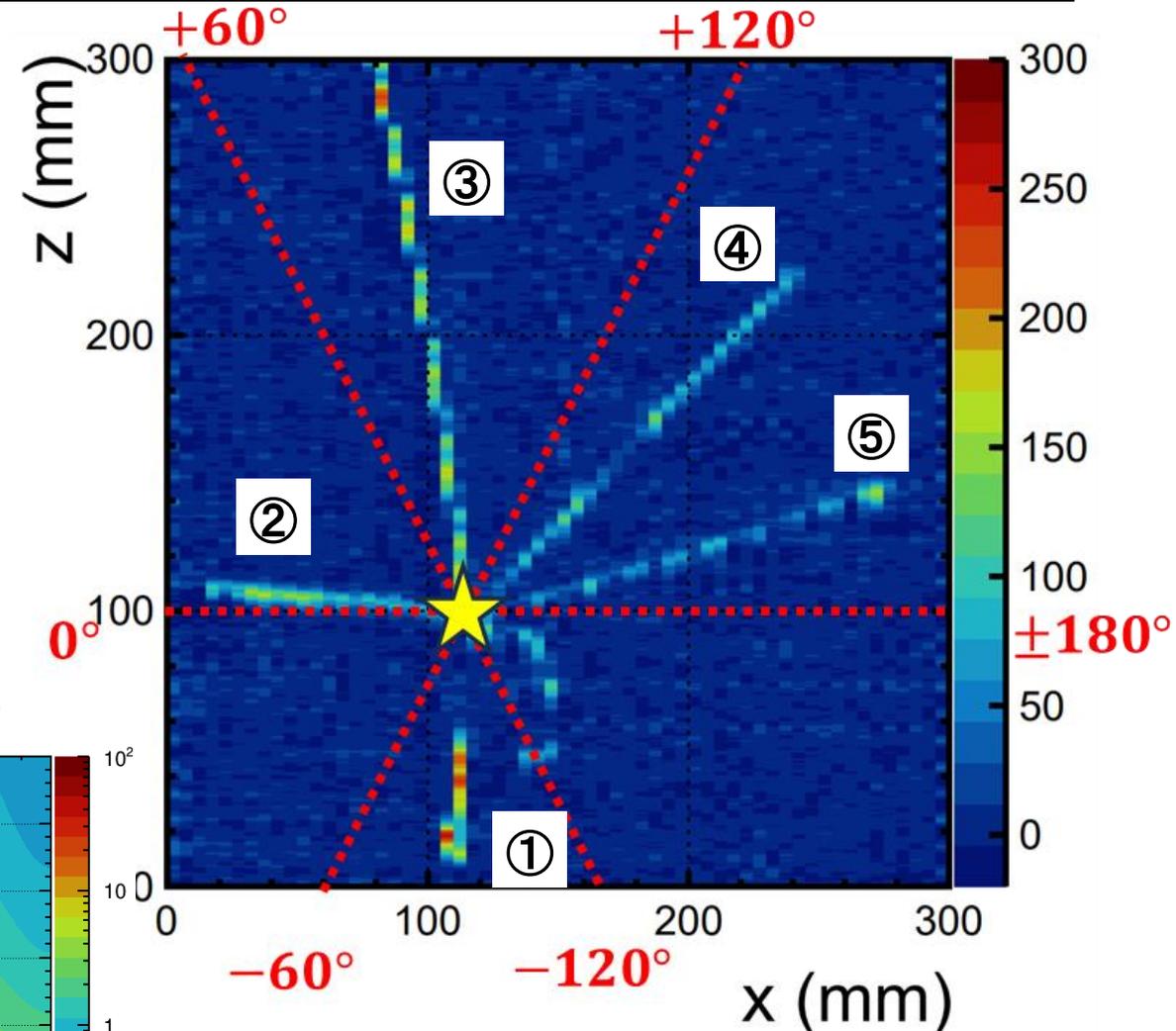
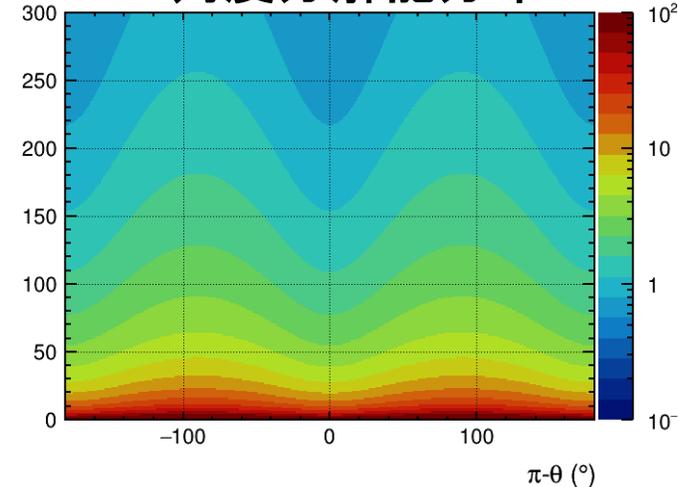
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 4.5 \sim 7.5 \text{cm}$)

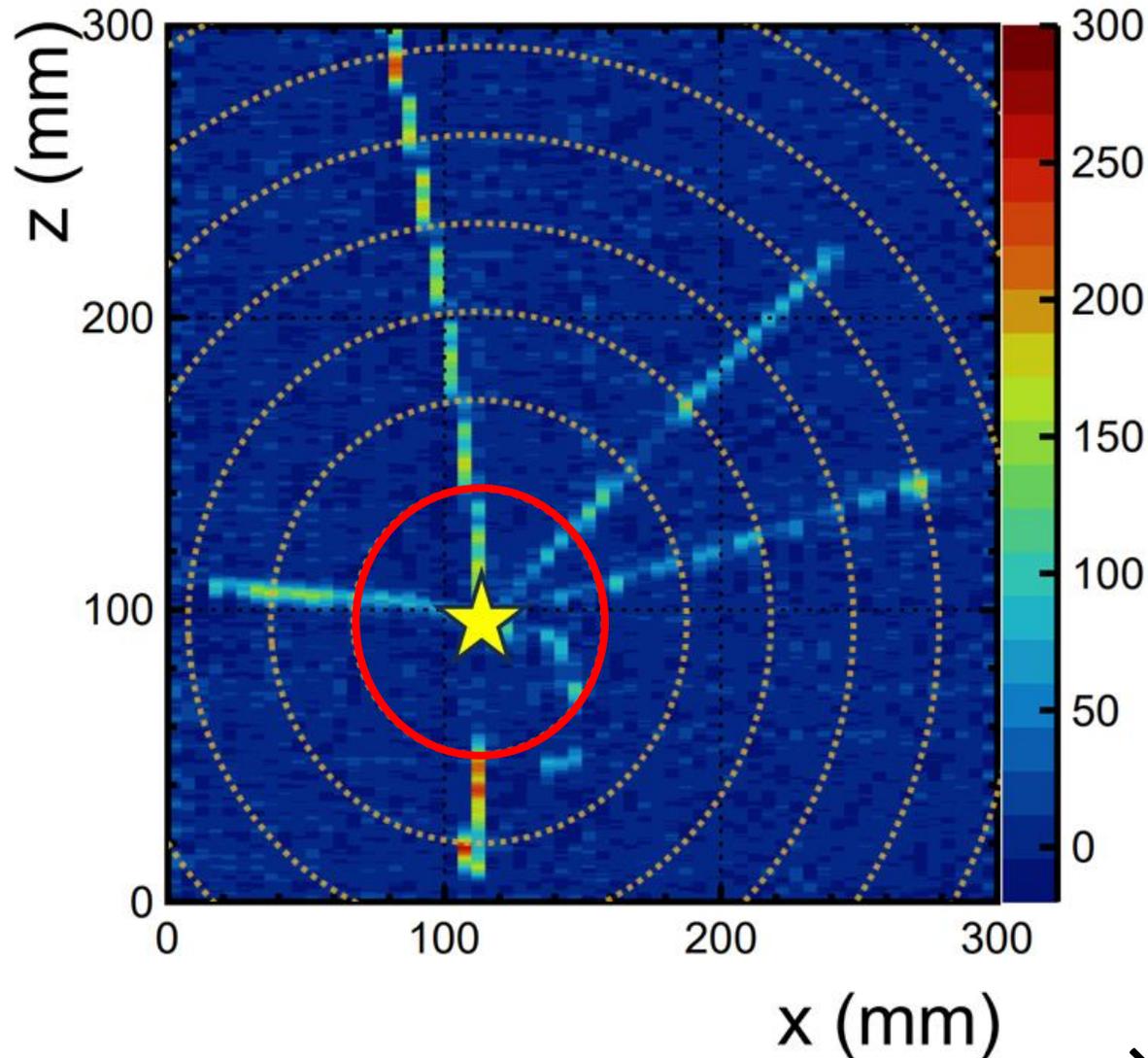


角度分解能分布



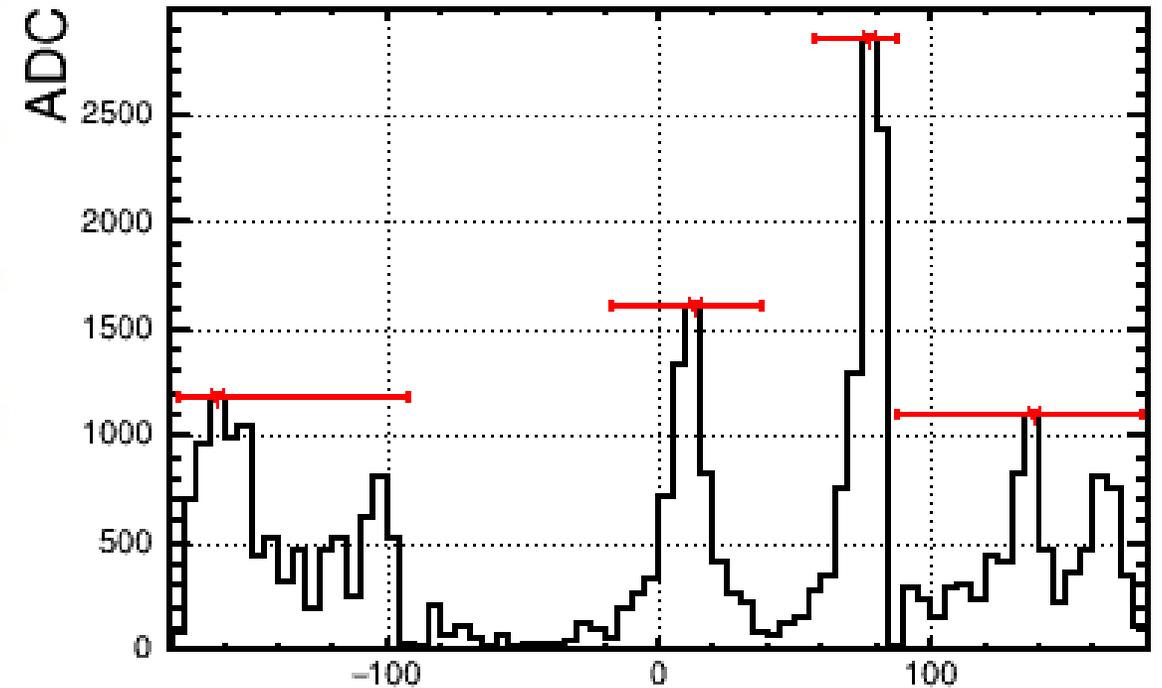
分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



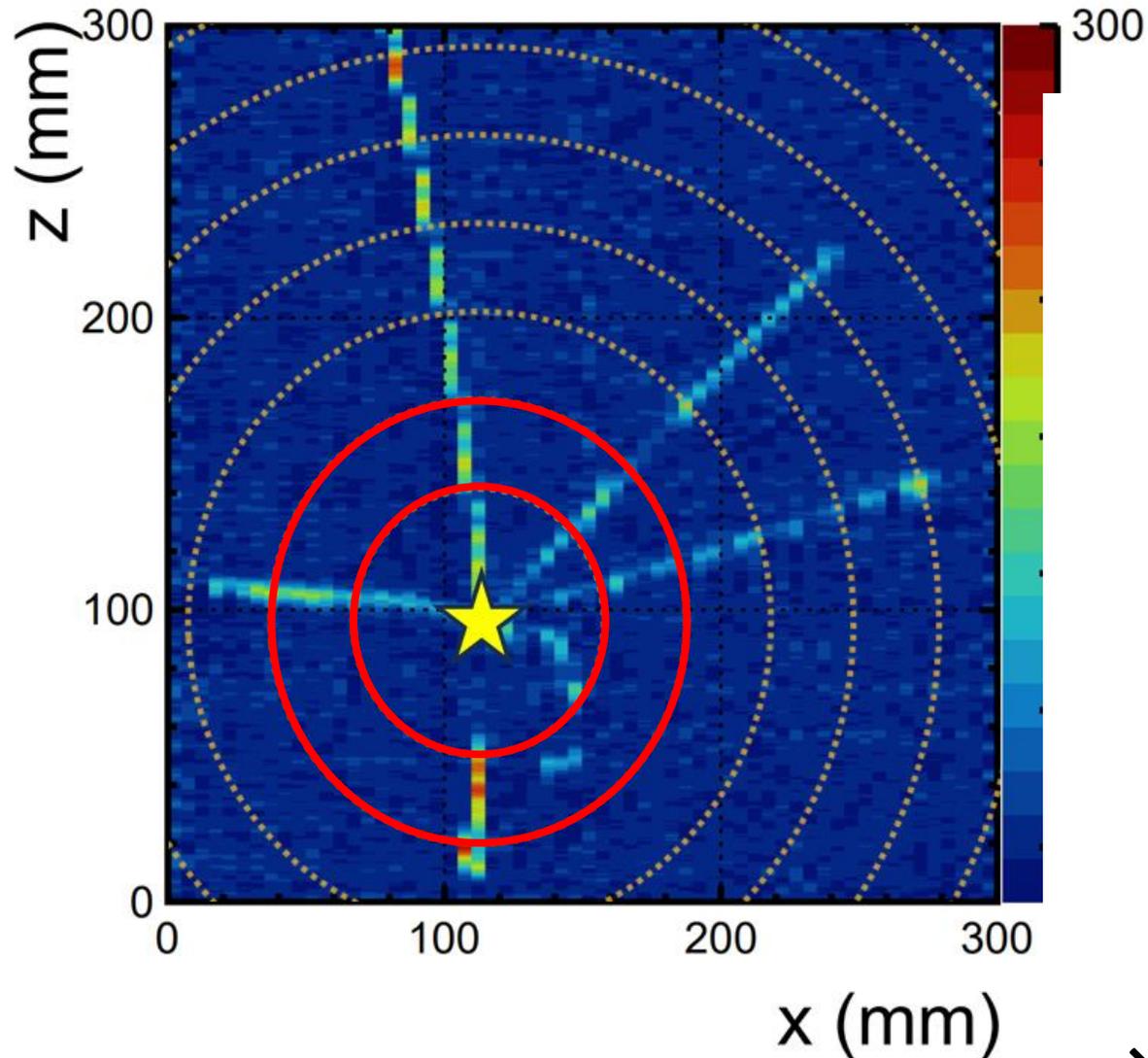
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 1.5 \sim 4.5\text{cm}$ の角度分布



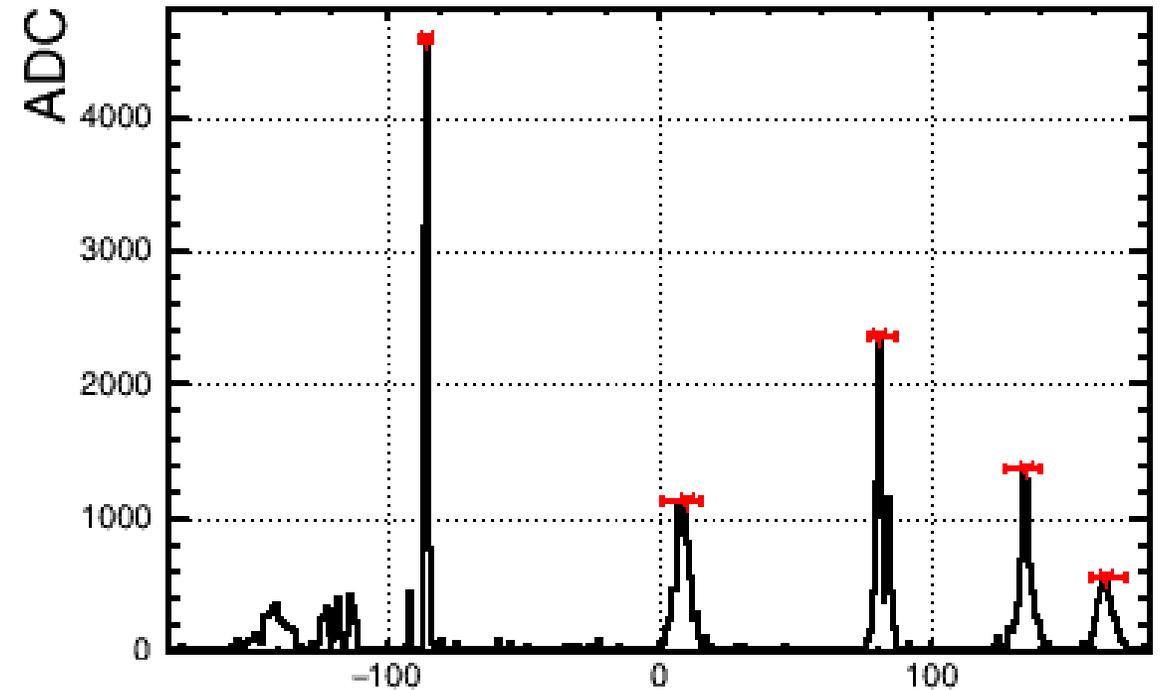
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



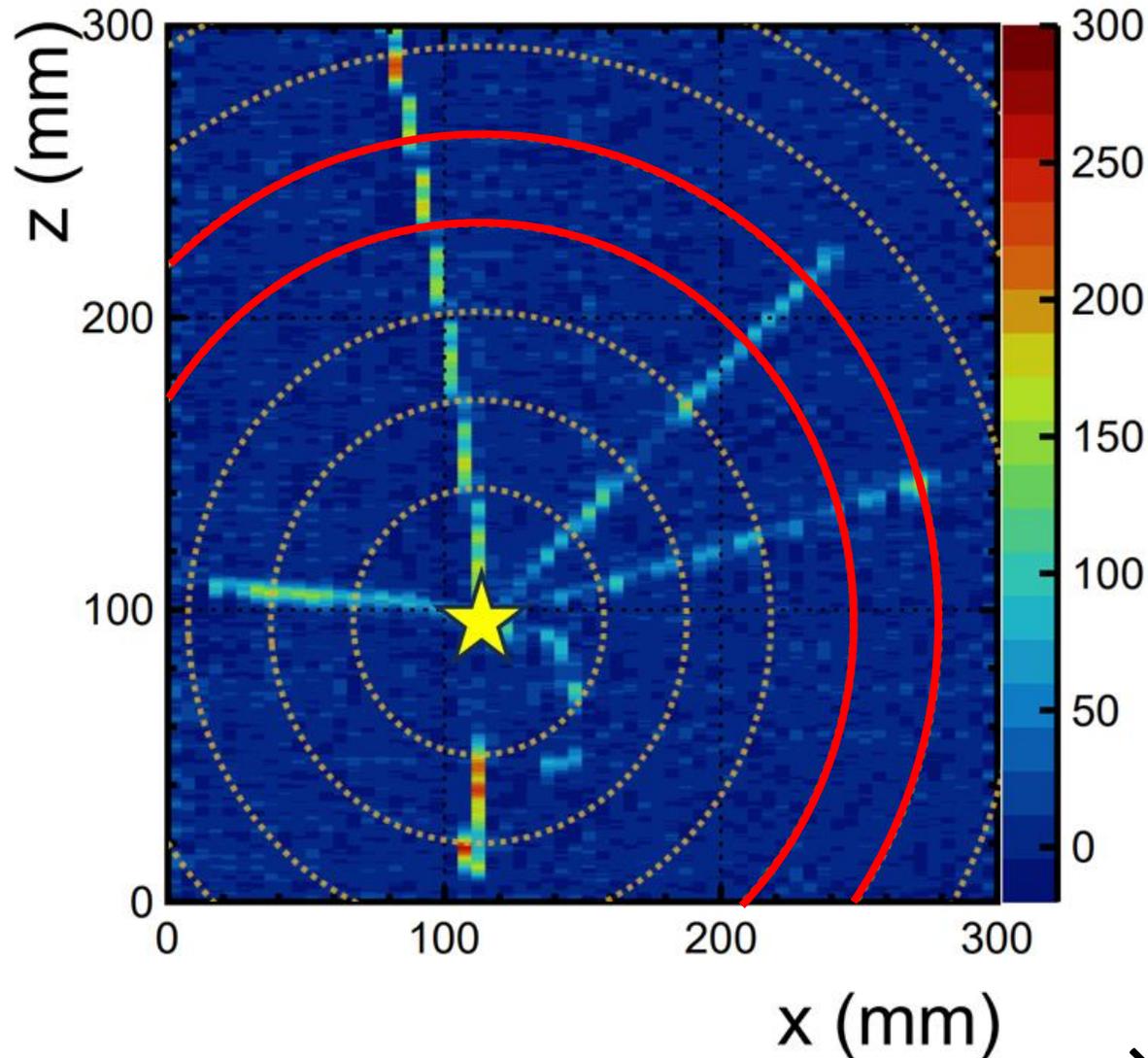
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 7.5\sim 10.5\text{cm}$ の角度分布



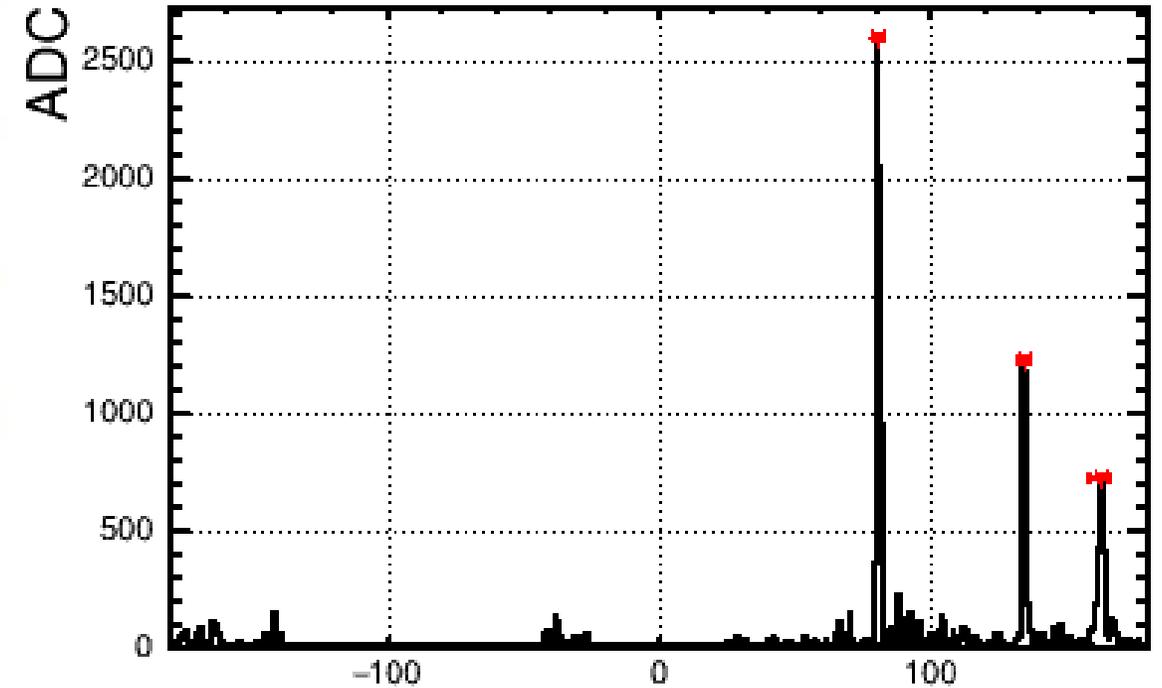
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 10.5\sim 13.5\text{cm}$ の角度分布



- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

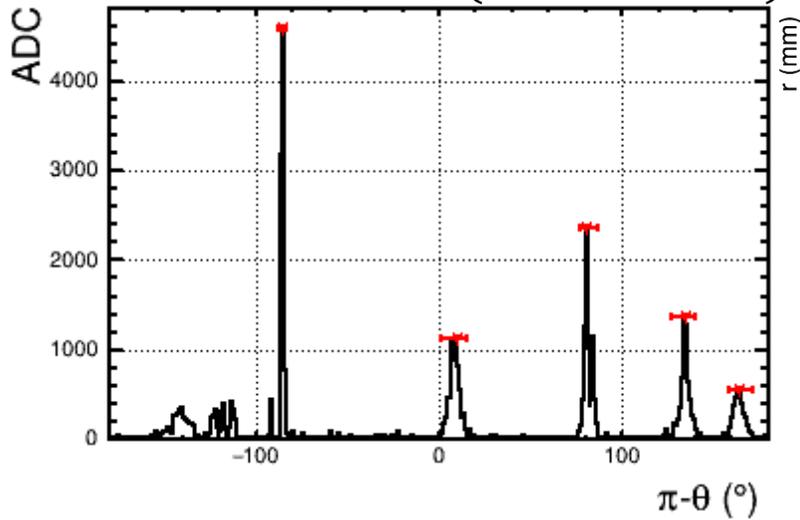
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

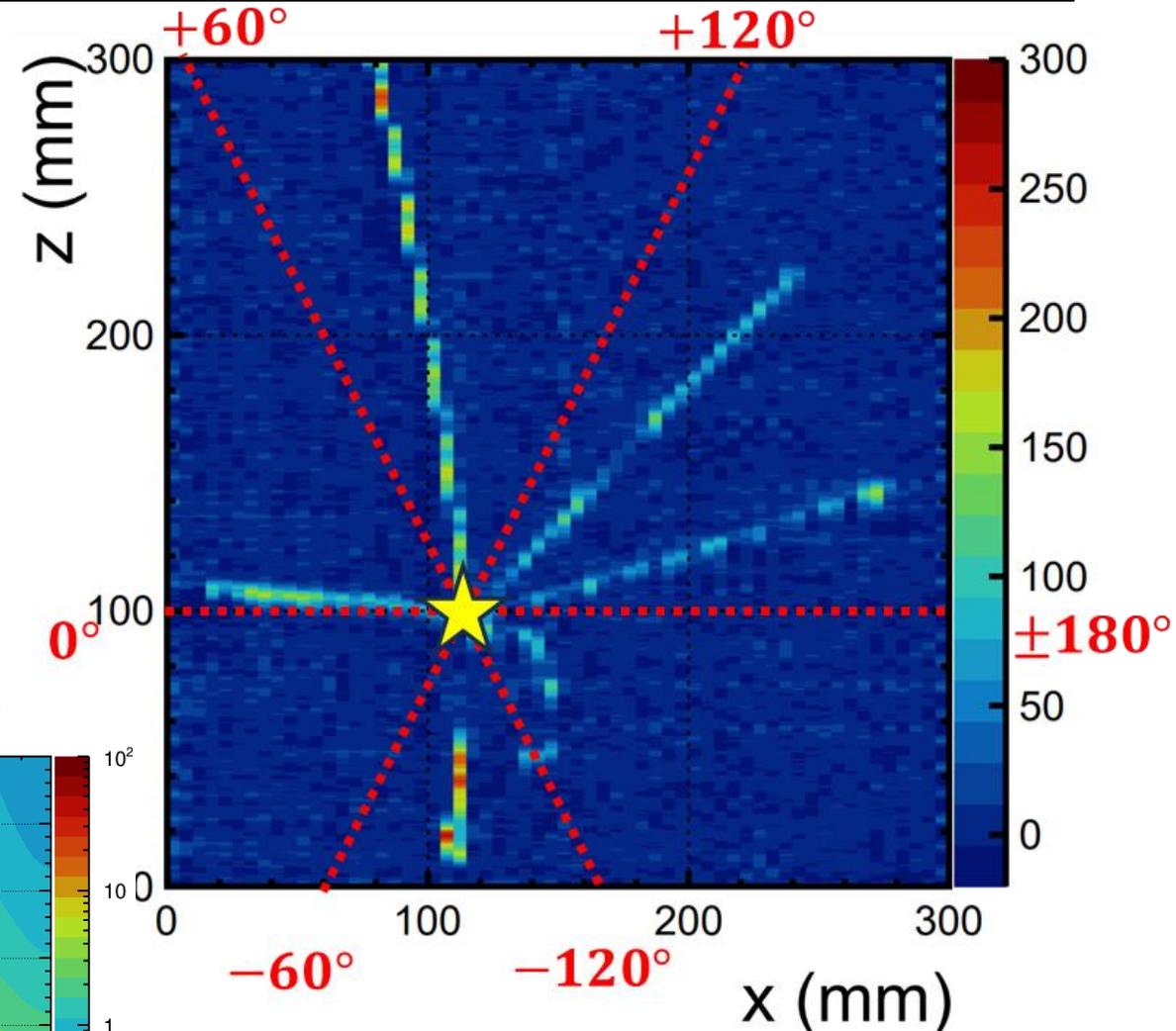
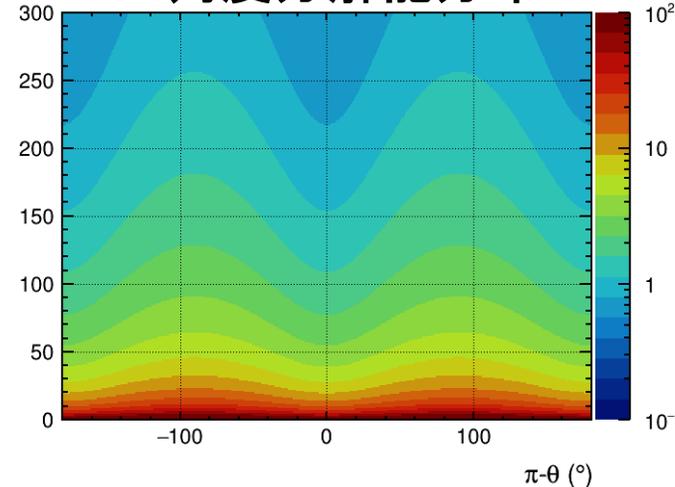
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 3 \sim 6\text{cm}$)



角度分解能分布



分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

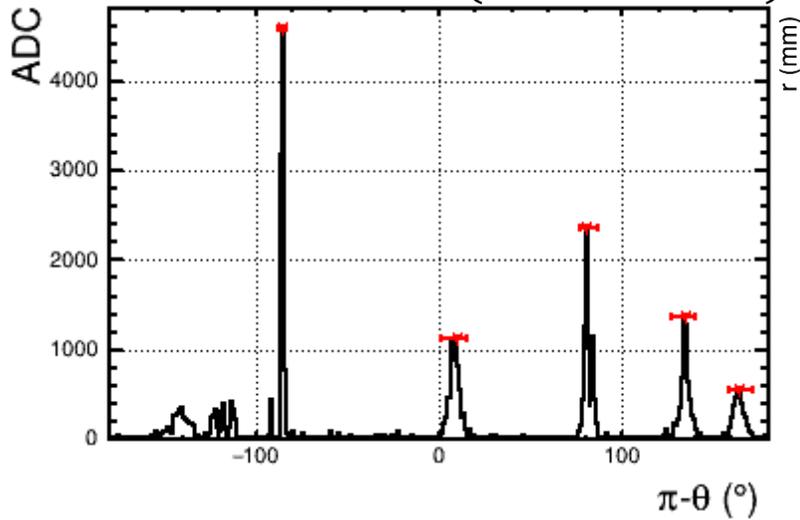
②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

■ 基本方針

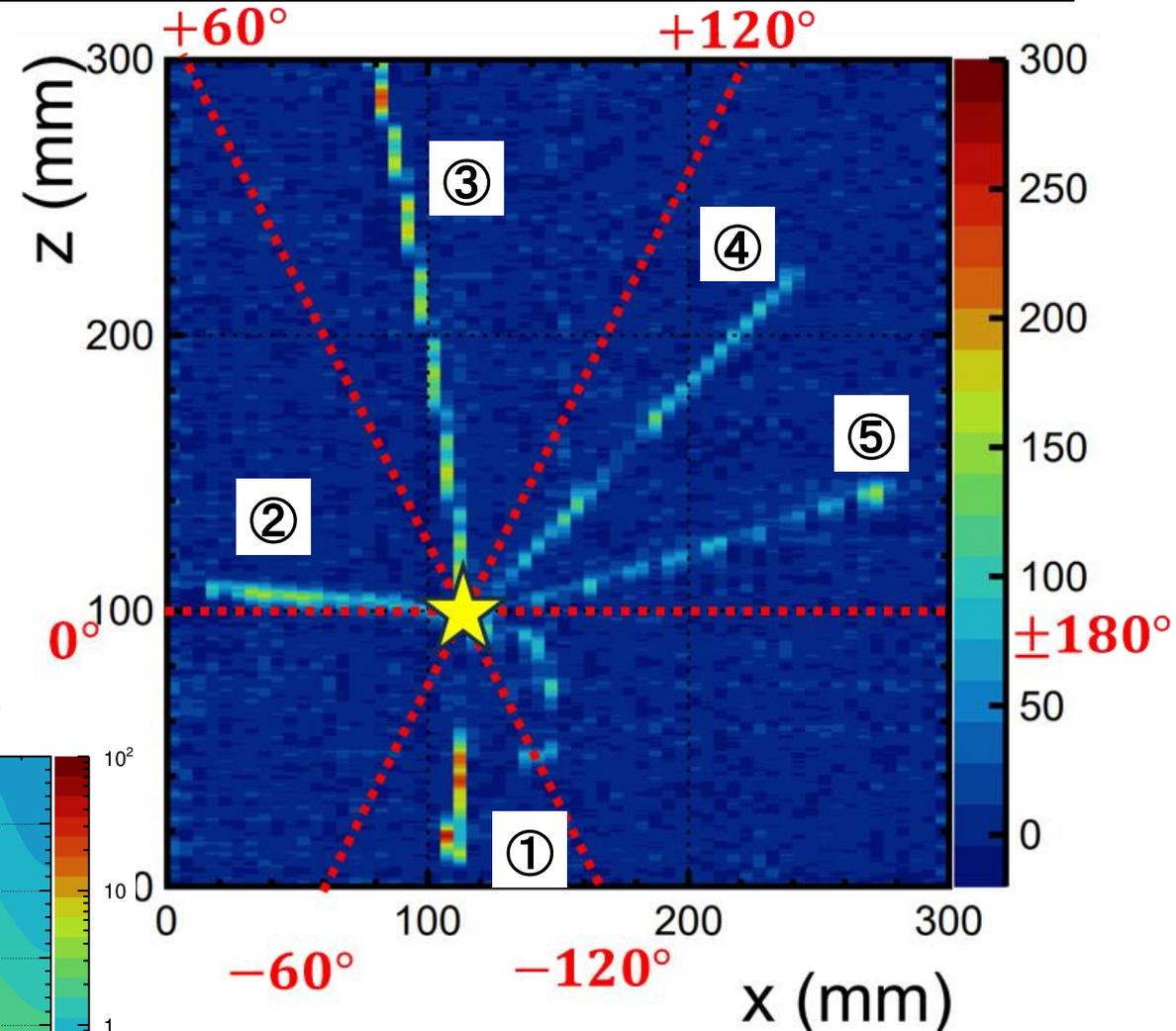
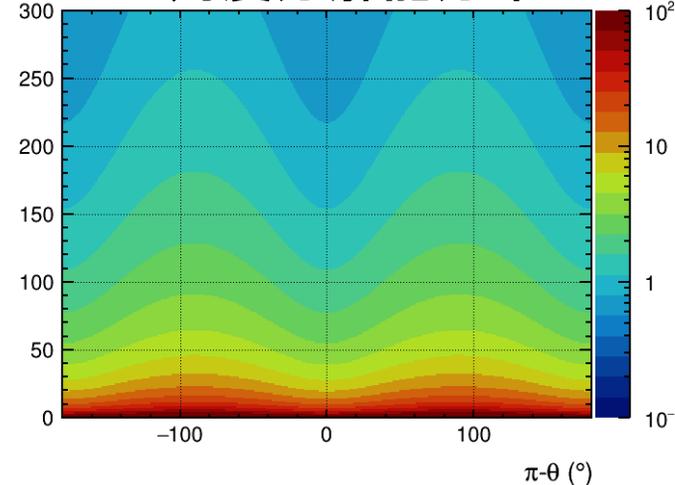
- 崩壊点を中心に停止点からの距離ごと(3cm)に信号量の角度分布作成
- ピークに対してクラスタリング+特徴量を抽出
 - ①本数: 2次粒子の本数
 - ②RMS: 飛跡の形状, 停止点からの広がり
 - ③積分値: エネルギー損失量

停止点距離ごとに分布を作成することで
飛跡長の情報も抽出

信号の角度分布($R = 3 \sim 6\text{cm}$)

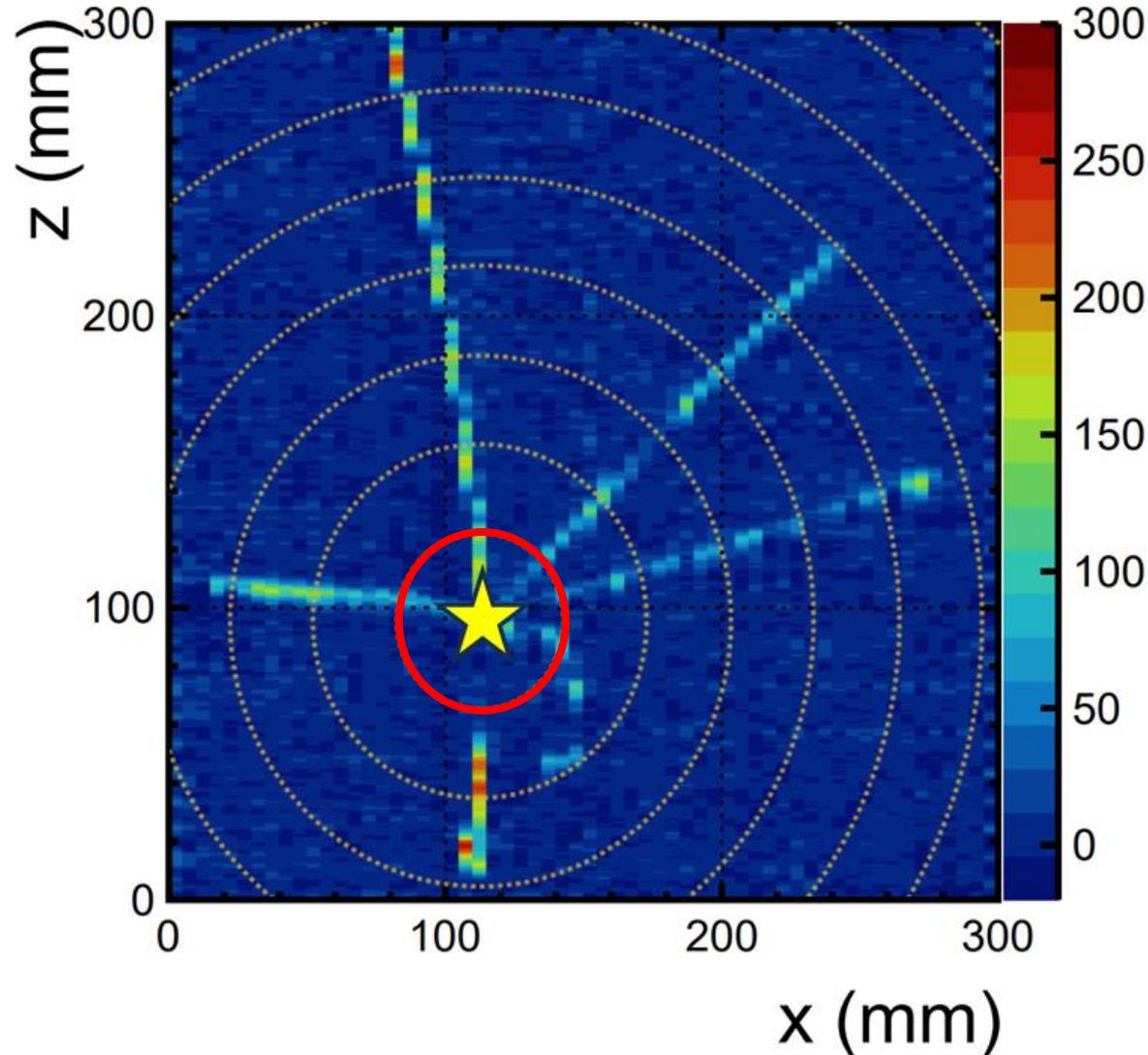


角度分解能分布



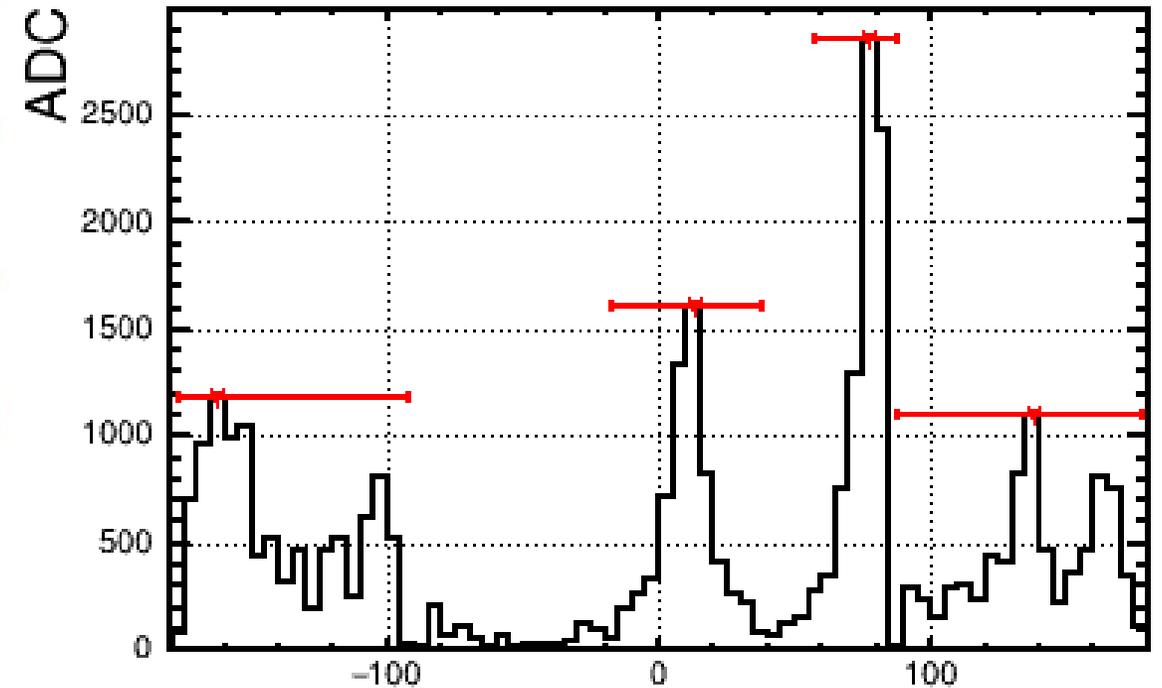
分解能とRMSから直線の飛跡を選択
→Goodクラスターについての
特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



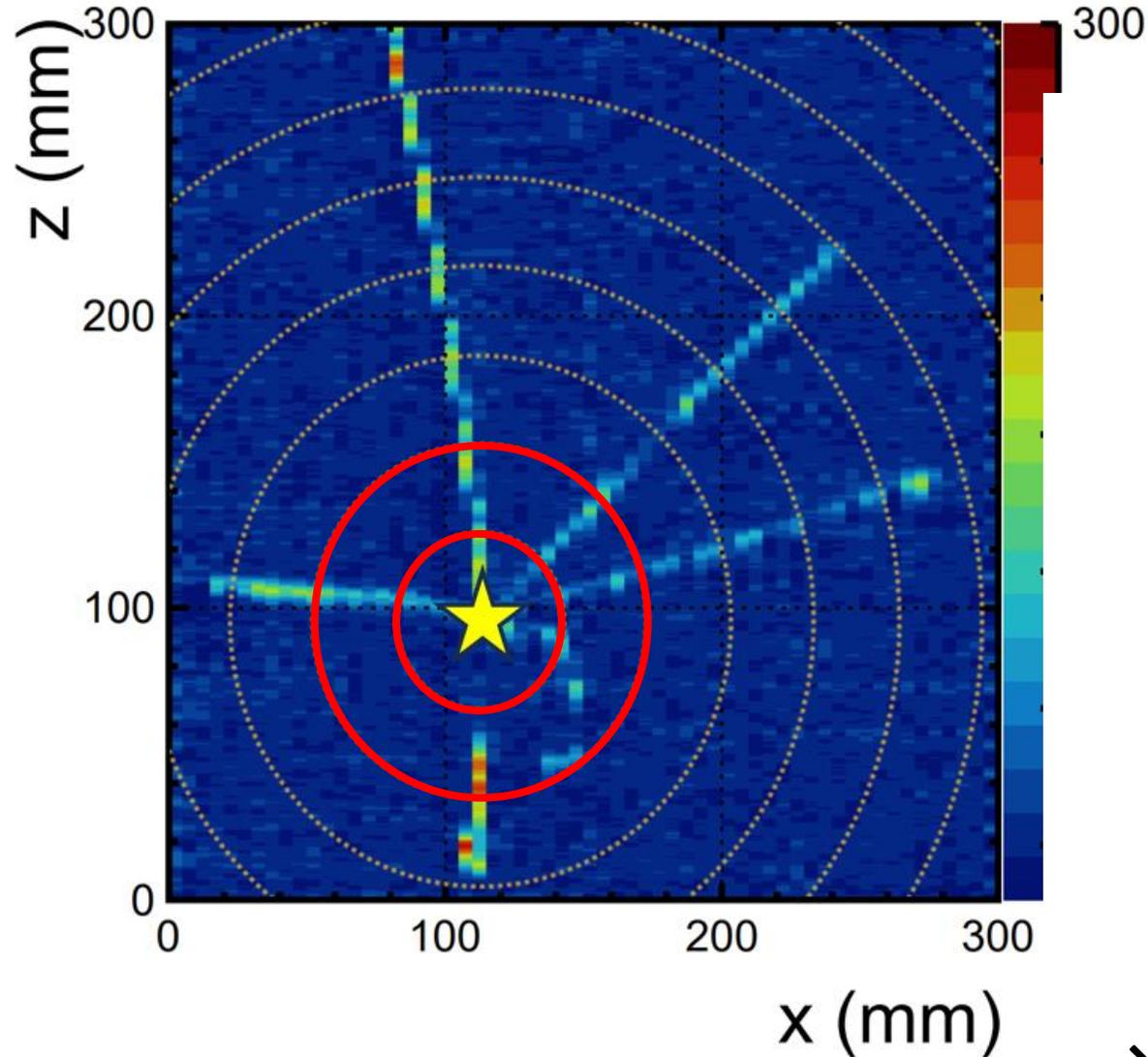
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 0\text{cm} \sim 3\text{cm}$ の角度分布



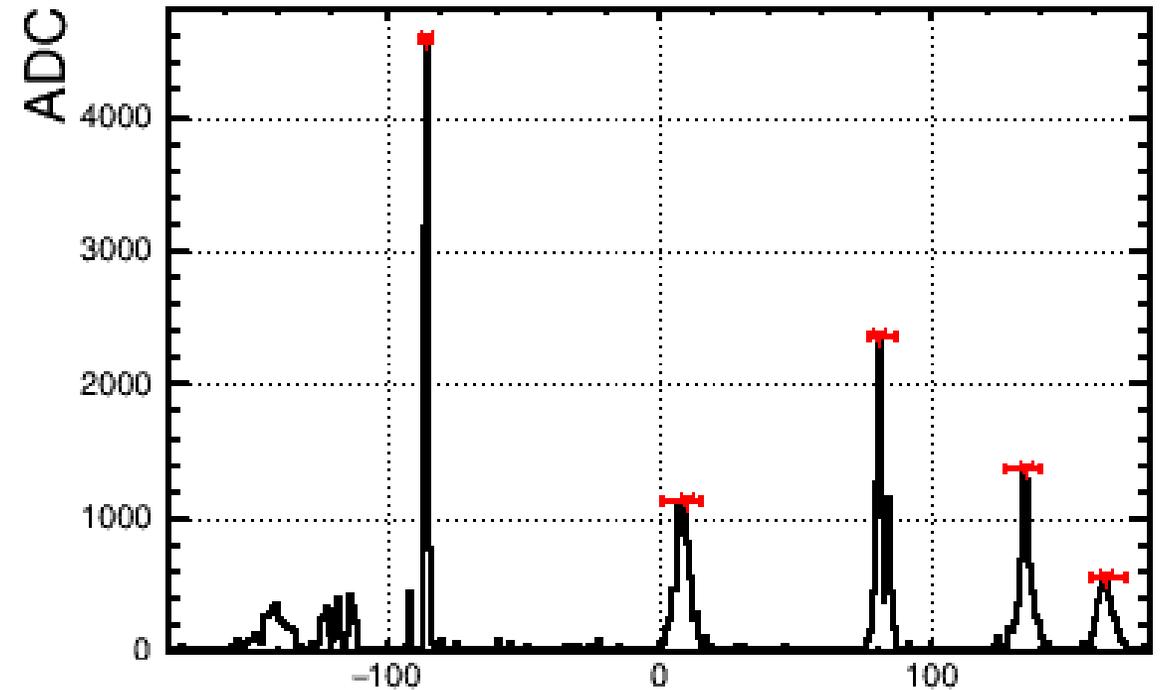
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出



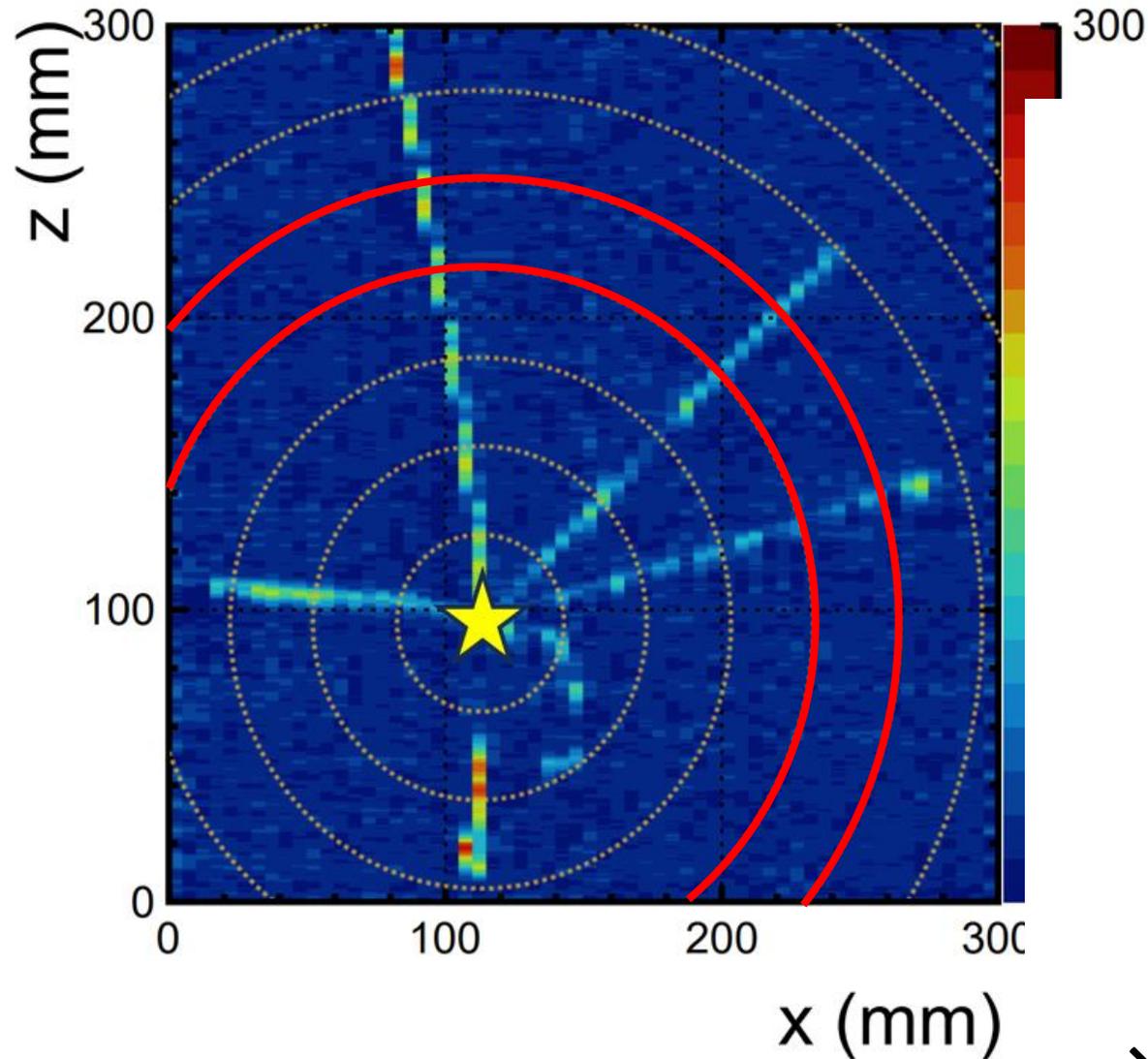
- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

$R = 6\text{cm} \sim 9\text{cm}$ の角度分布



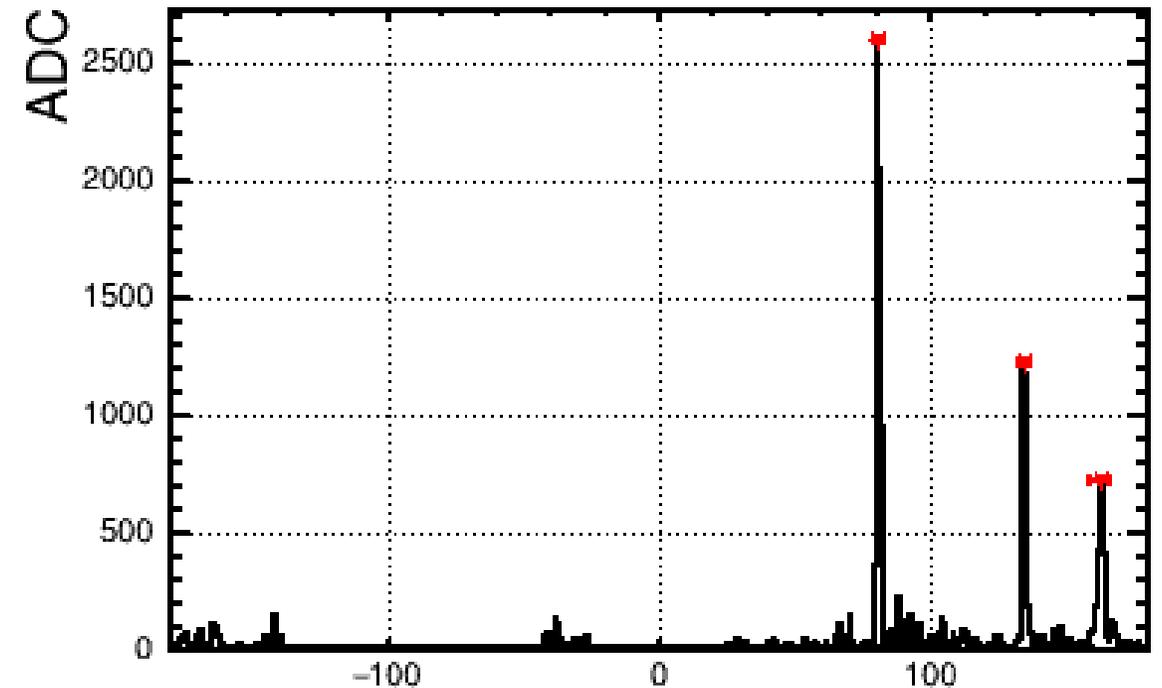
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

②-(1) オーソドックスな解析による2次粒子の特徴量の抽出

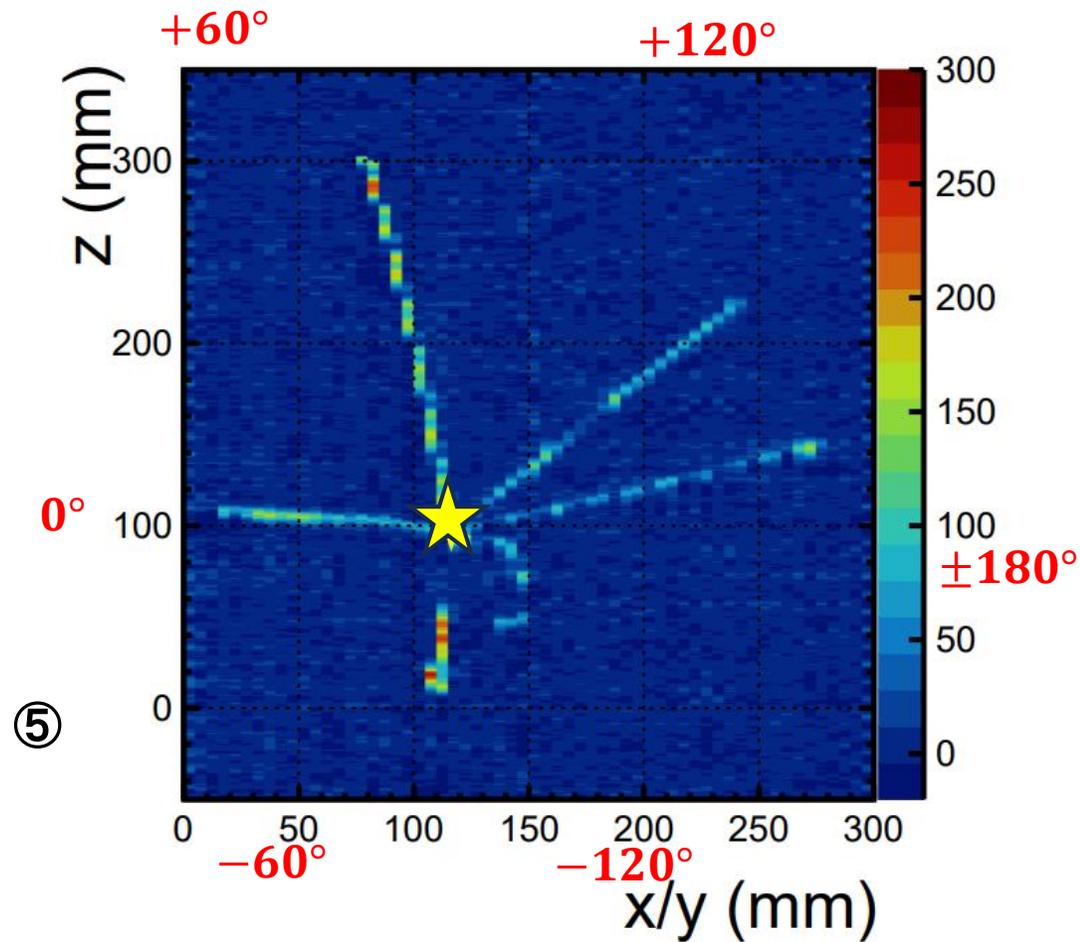
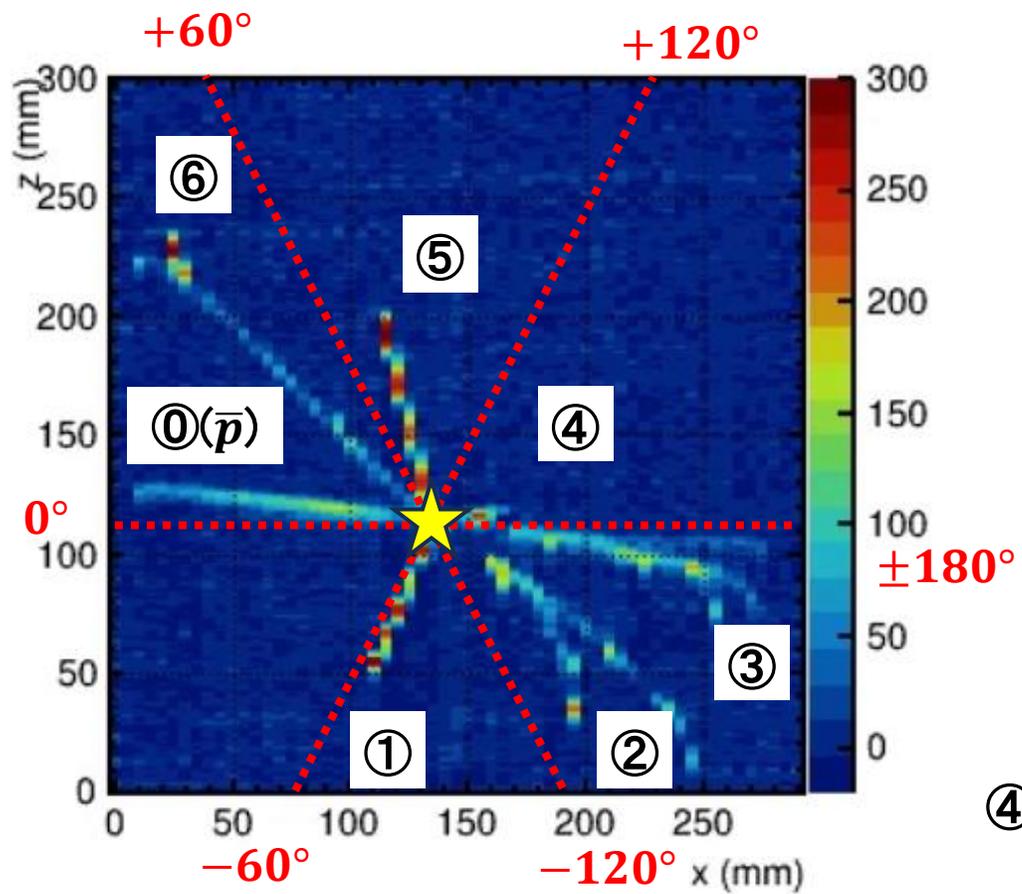


- $R = 3\text{cm}$ で分割して円環ごとにADCの角度分布を作成

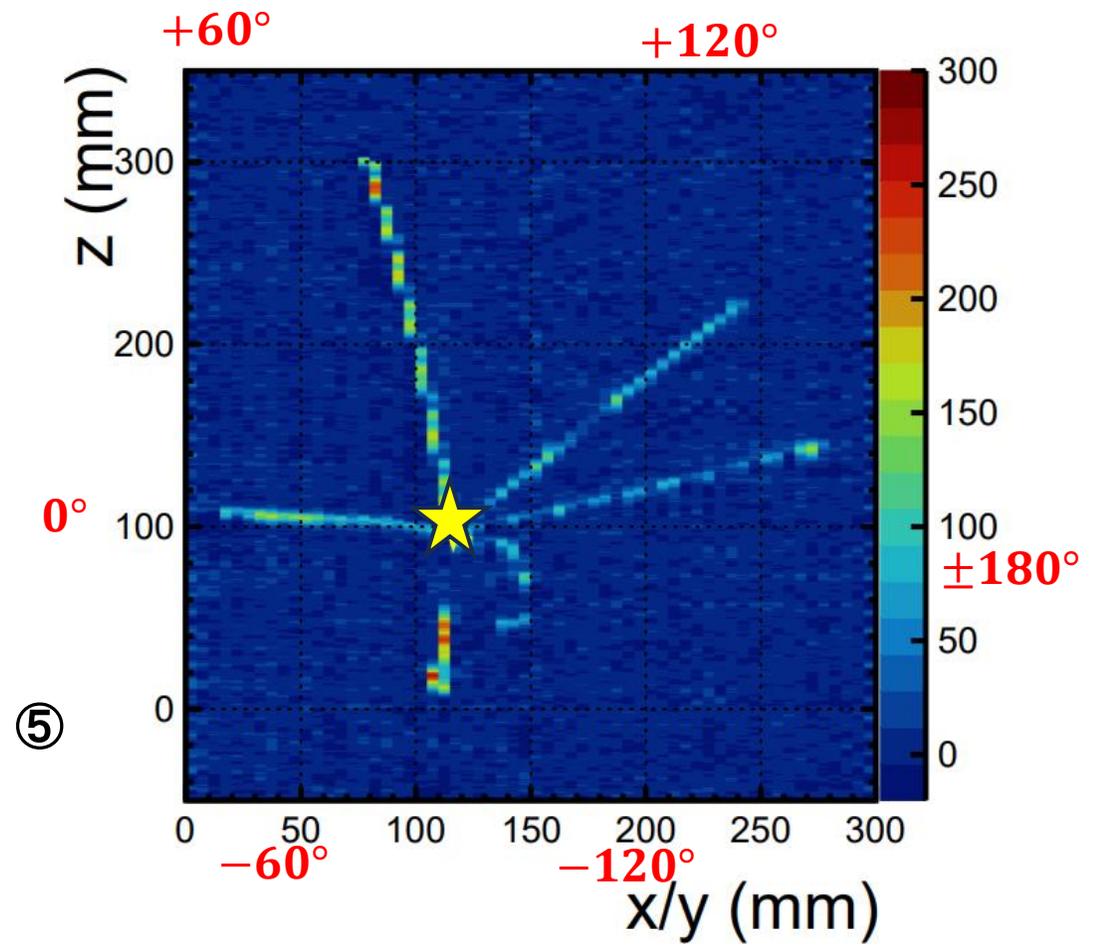
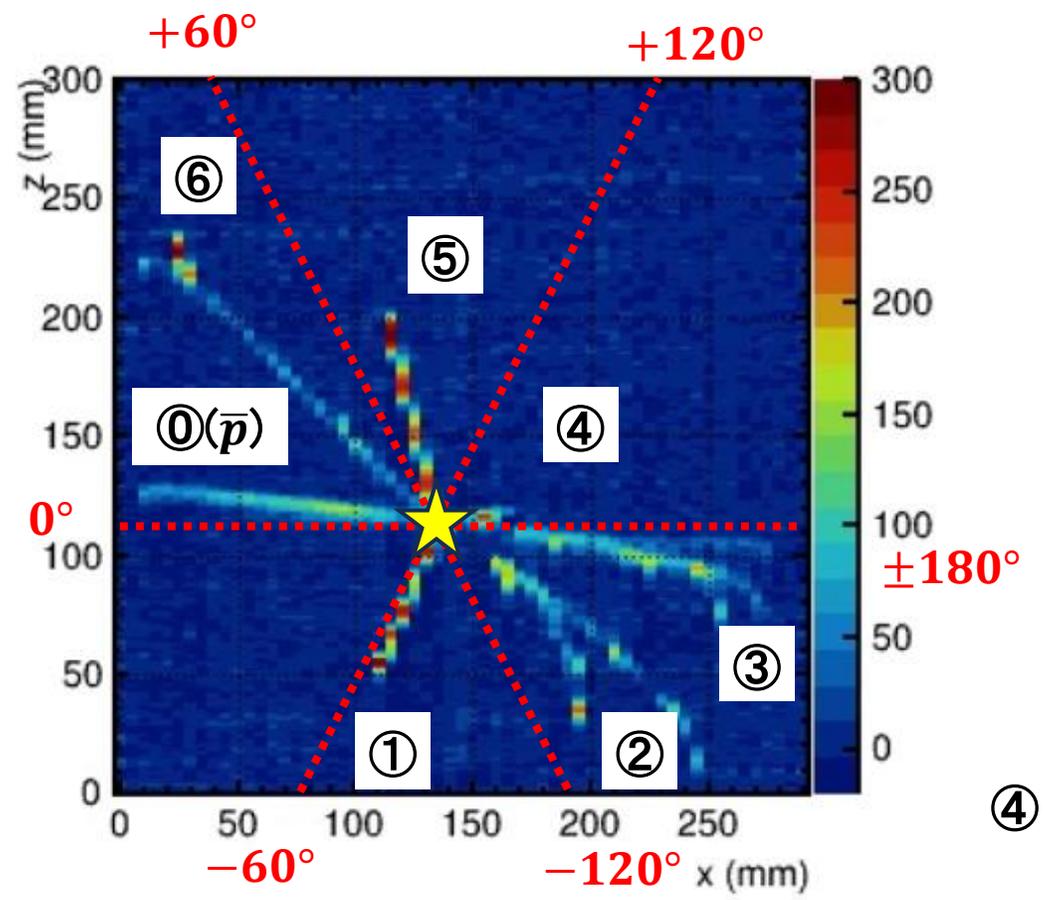
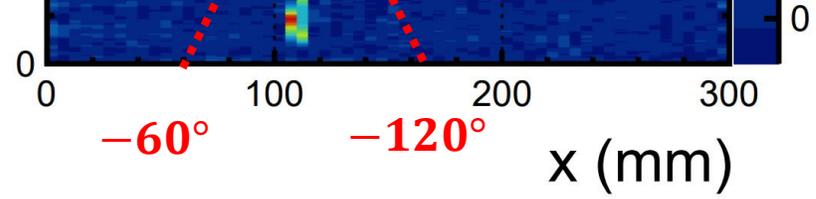
$R = 9\text{cm} \sim 12\text{cm}$ の角度分布



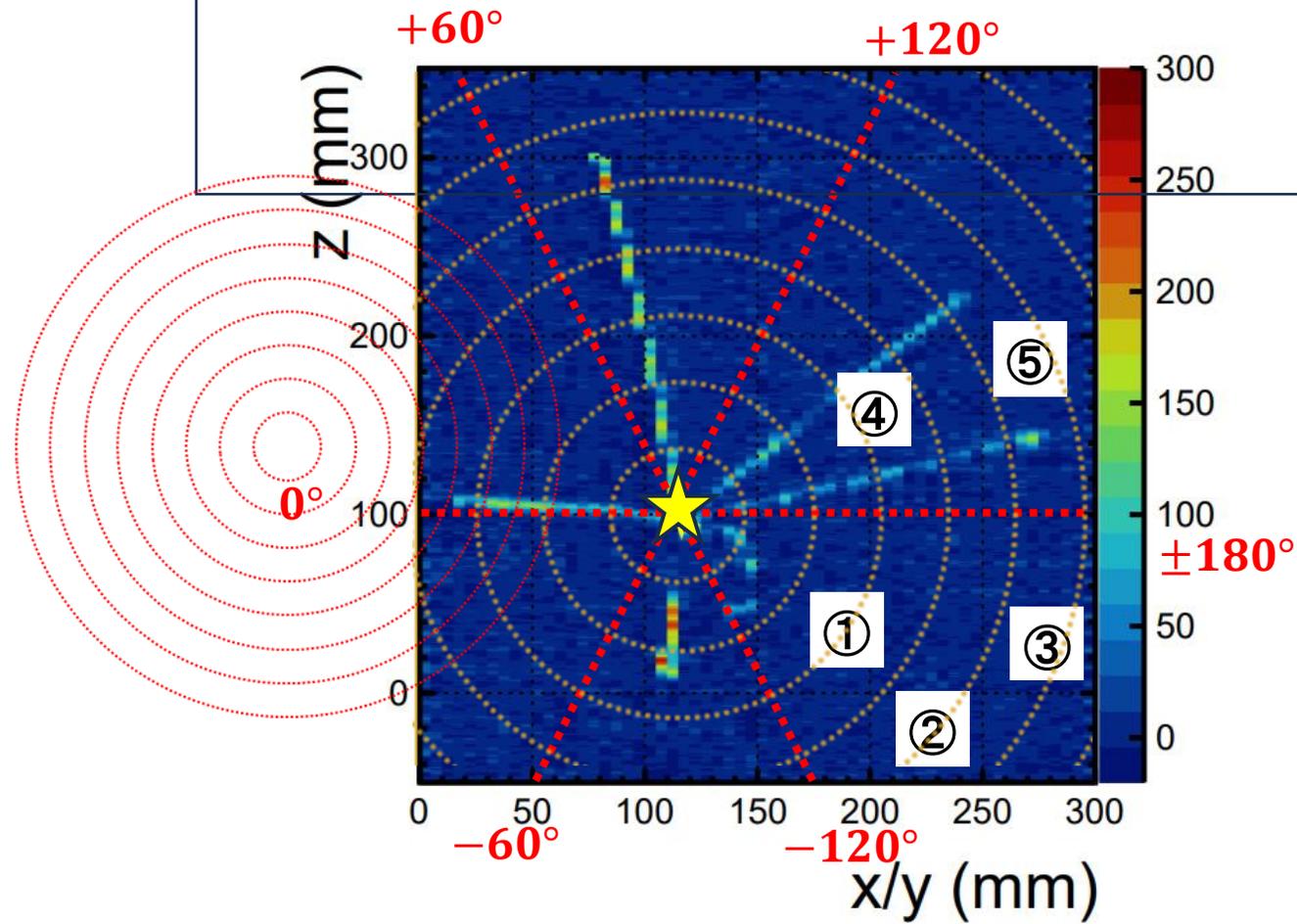
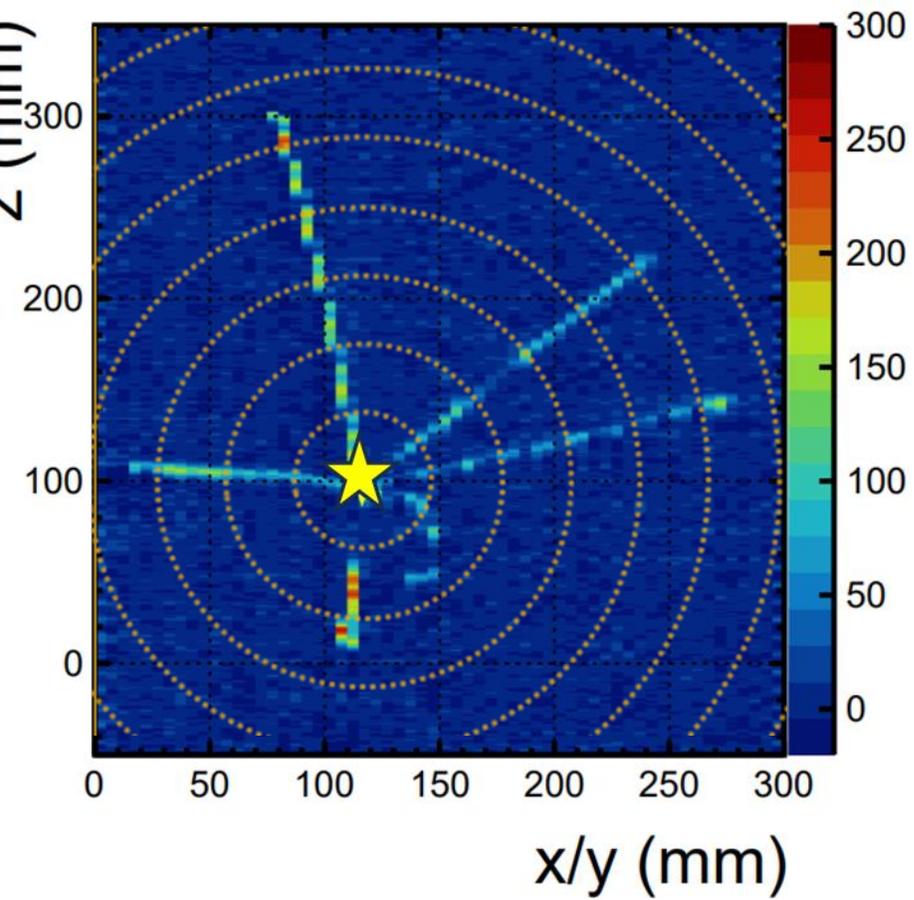
- 飛跡の長さに対応して検出される $\pi - \theta$ ($^{\circ}$)
 - 分解能を基準にしてRMSでピークを評価する
- Goodクラスターについての特徴量の分布を作成

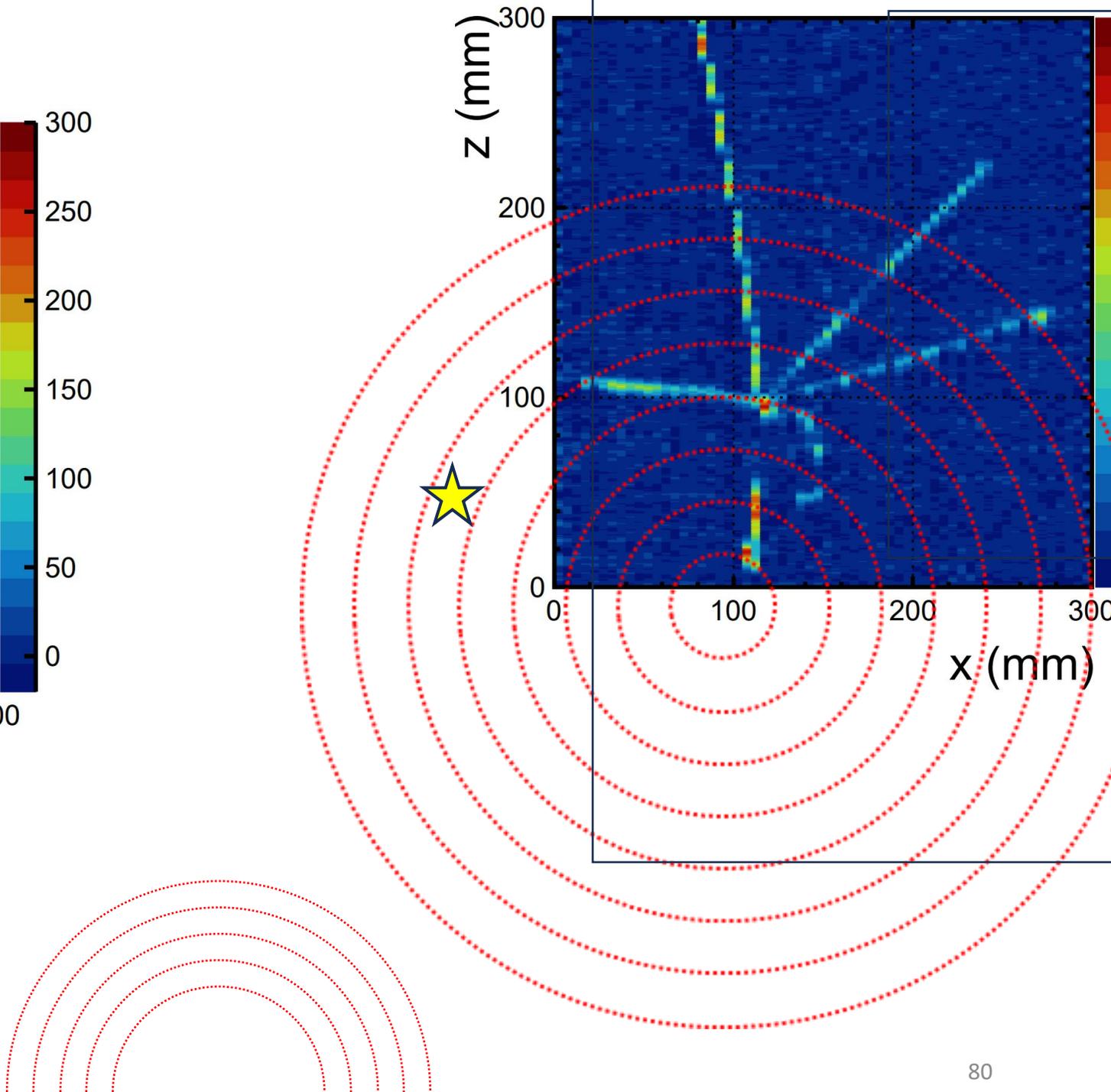
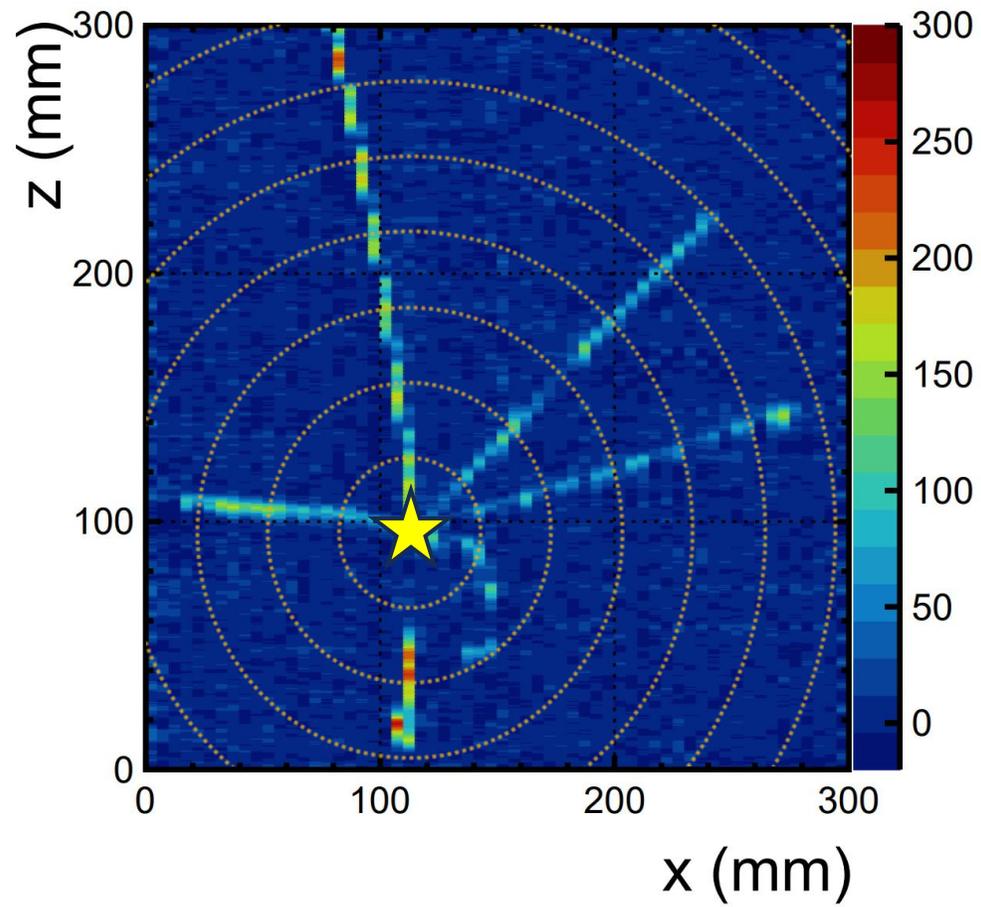


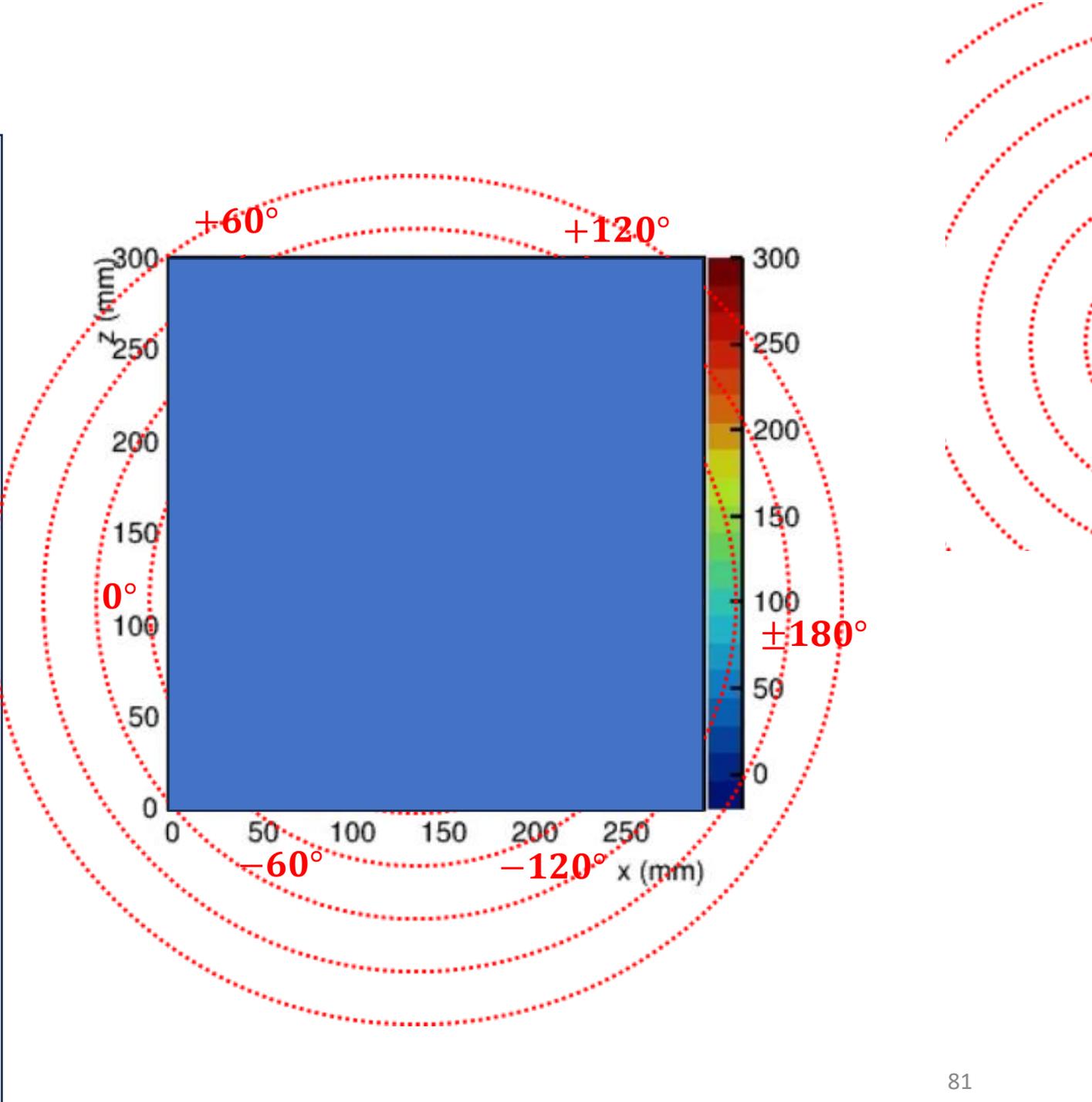
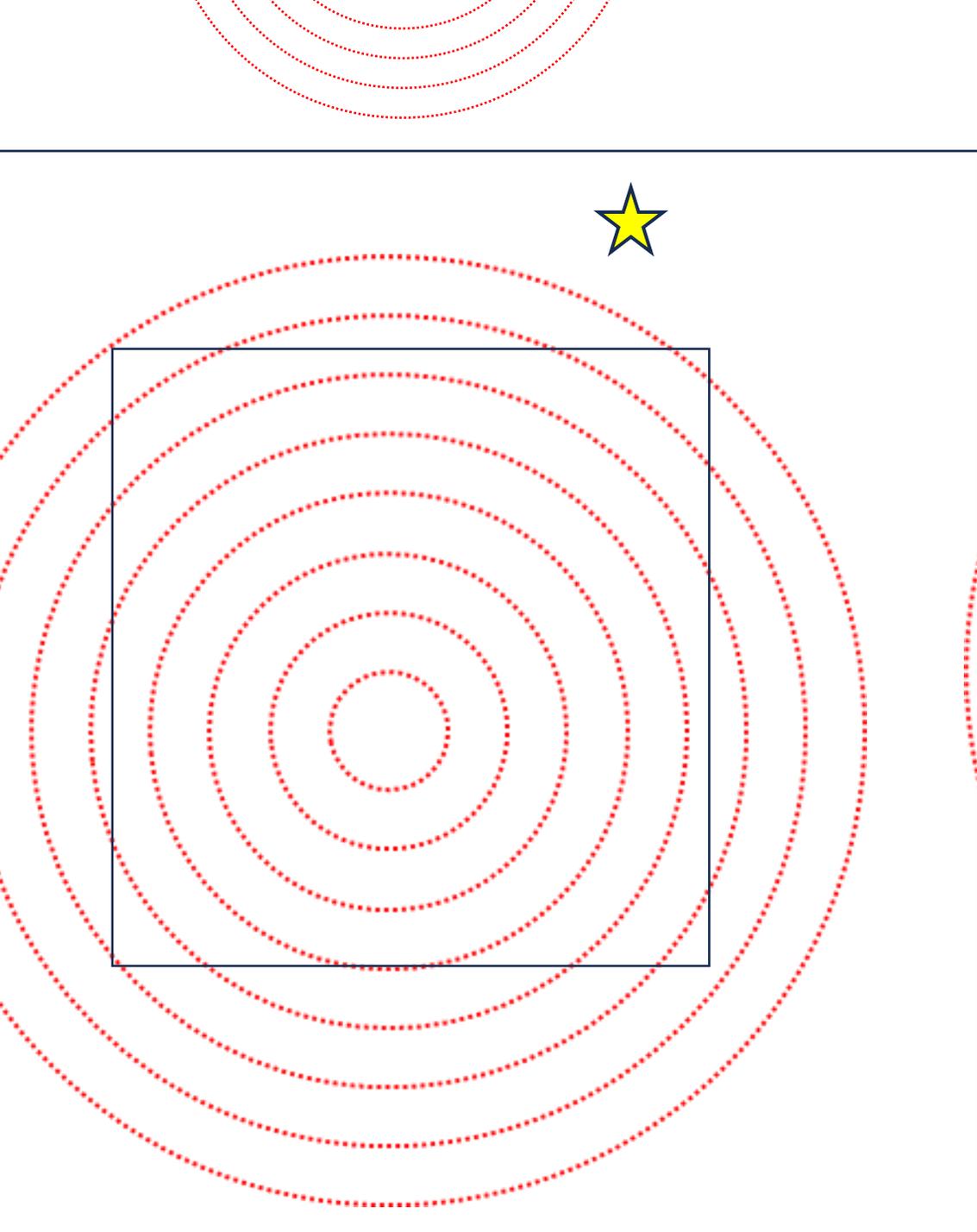
- ④
- ⑤
- ①
- ③
- ②

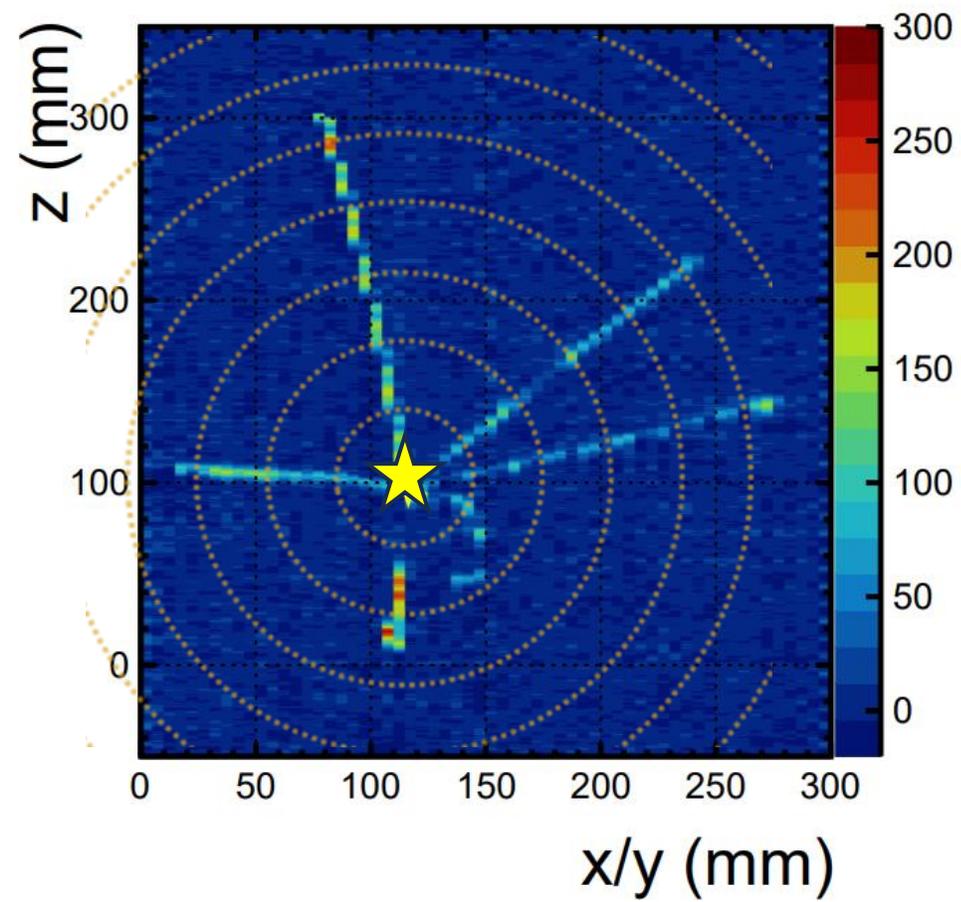
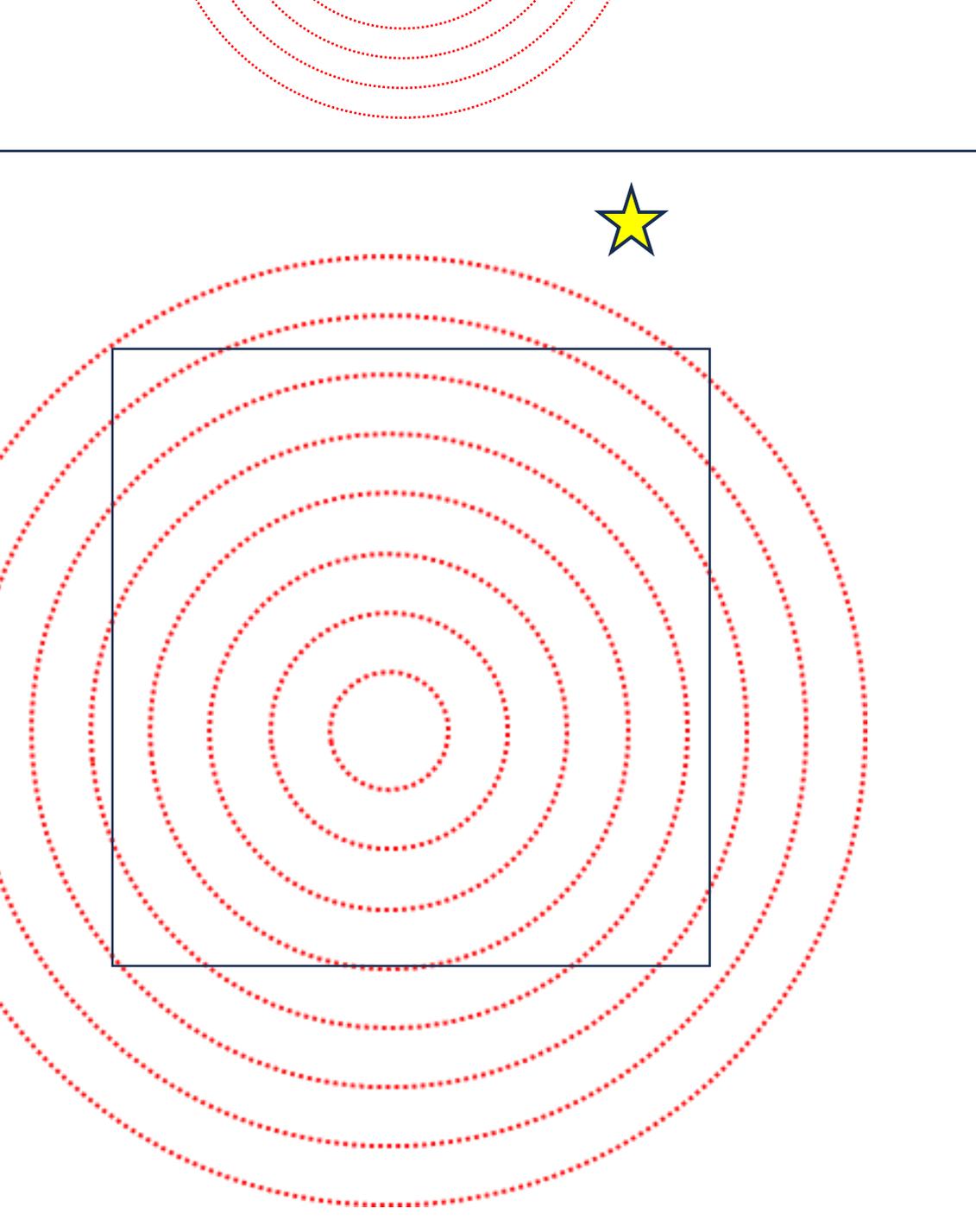


- ④
- ⑤
- ①
- ③
- ②

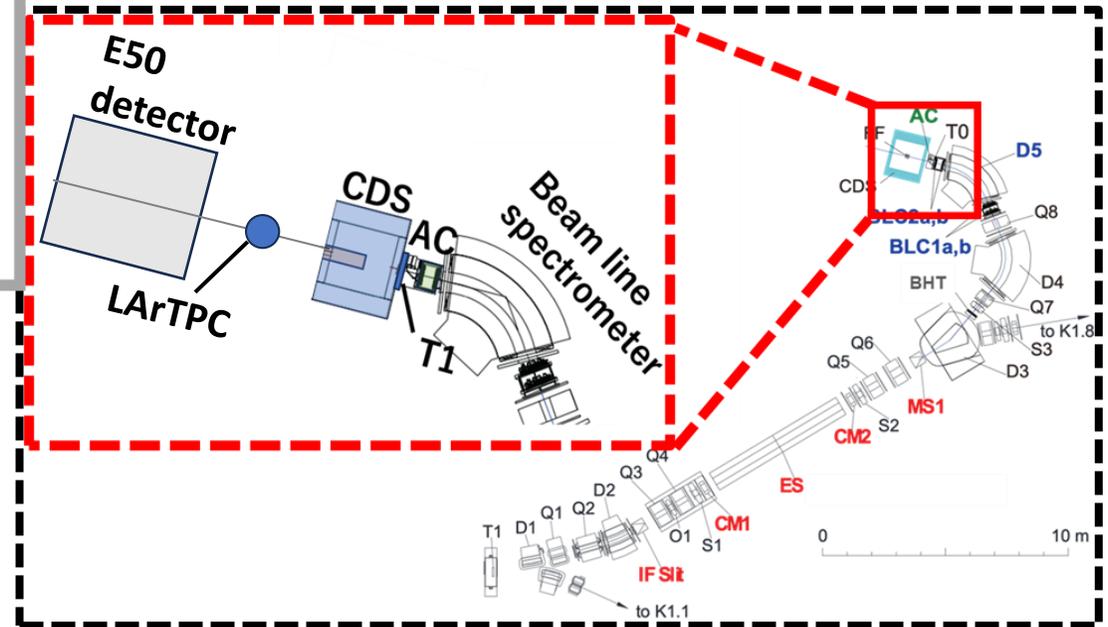
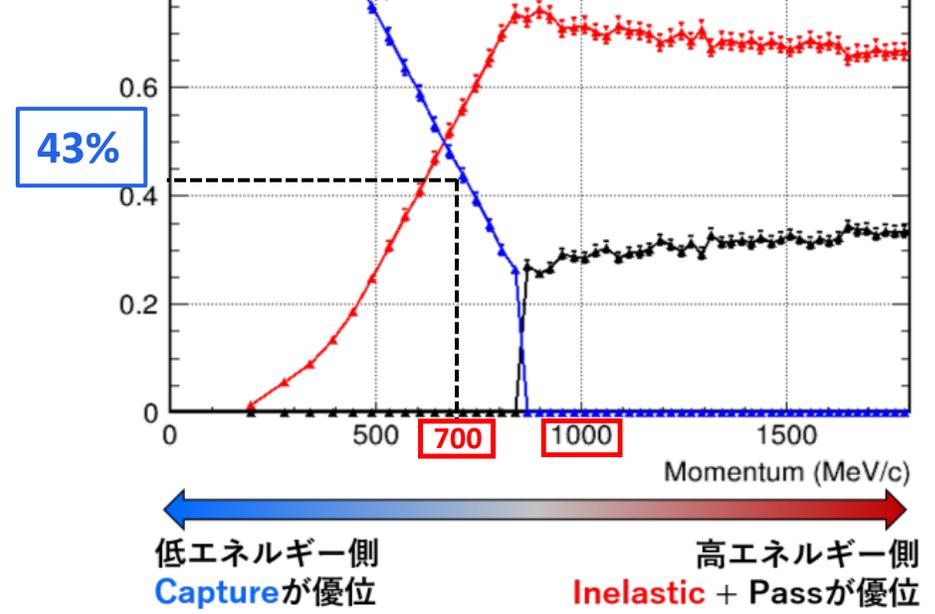
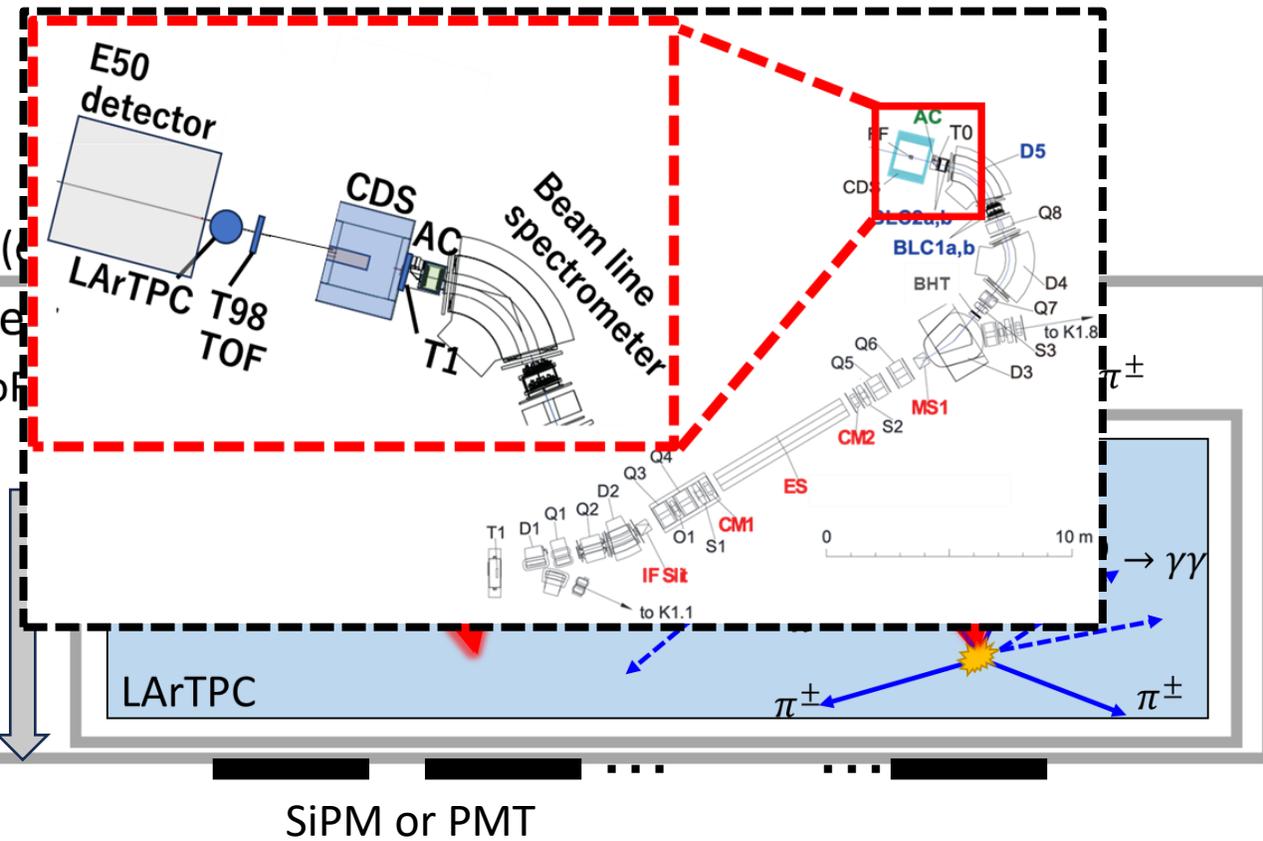








dE/dx解析

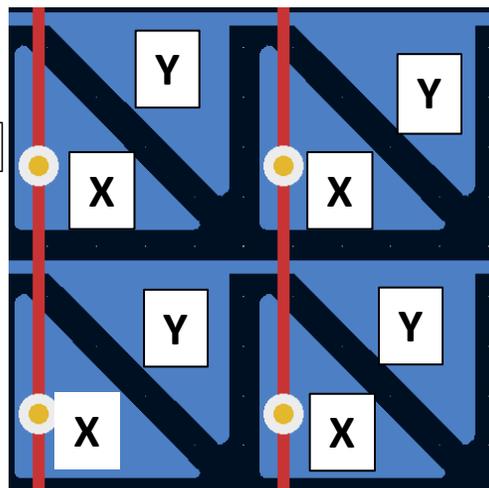
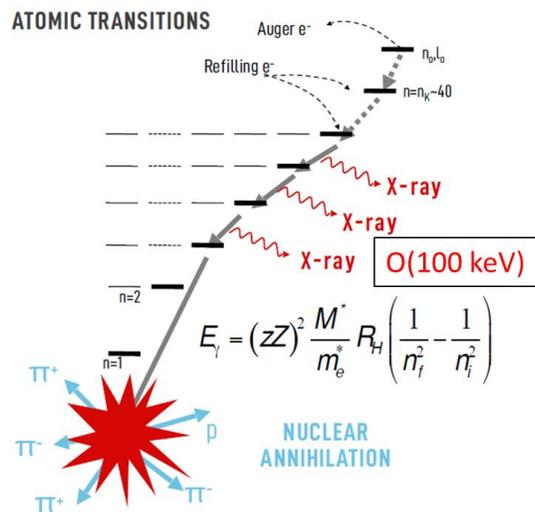


dE/dx解析

Mass ID $\left(\beta + \frac{dE}{dx} + Range\right)$	particle	Anti particle
Nucleons=1	p	\bar{p}
Nucleons=2	d	\bar{d}

Particle	Flux $(m^2/sr/s/(GeV/n))$	BG Reduction
Proton/deuteron (Primary)	10^3	10^9
Antiproton (BESS/AMS-02)	10^{-2}	10^4
Antideuteron (GRAMS target)	10^{-6}	1(signal)

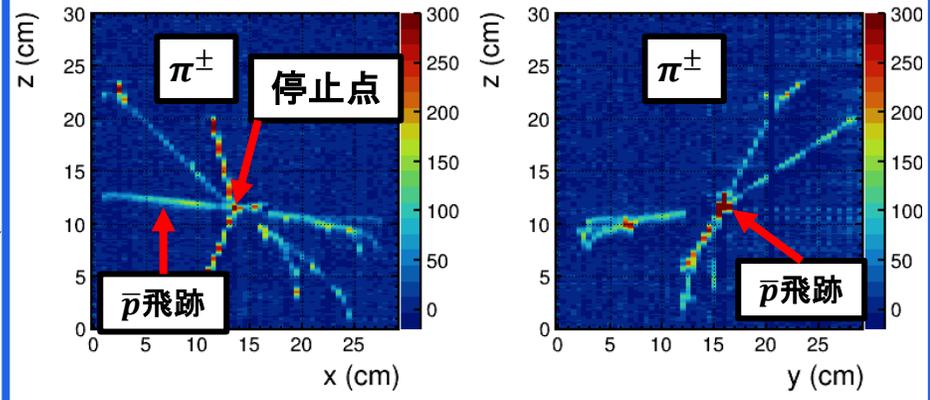
Particle	Flux $(m^2/sr/s/(GeV/n))$	BG Reduction
Antiproton (BESS/AMS-02)	10^{-2}	10^4
Antideuteron (GRAMS target)	10^{-6}	1(Signal)



	LArIAT (PRD 111 094031 (2025))	T98
粒子選別	×	静電分離機
停止事象候補	11	$> 10^5$

解析の方針

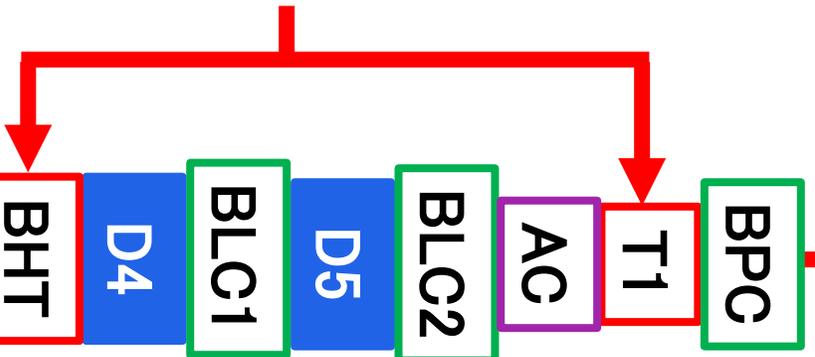
TPC電子信号



ビームラインデータ

シンチレータ(BHT,T1)

- ToFの測定



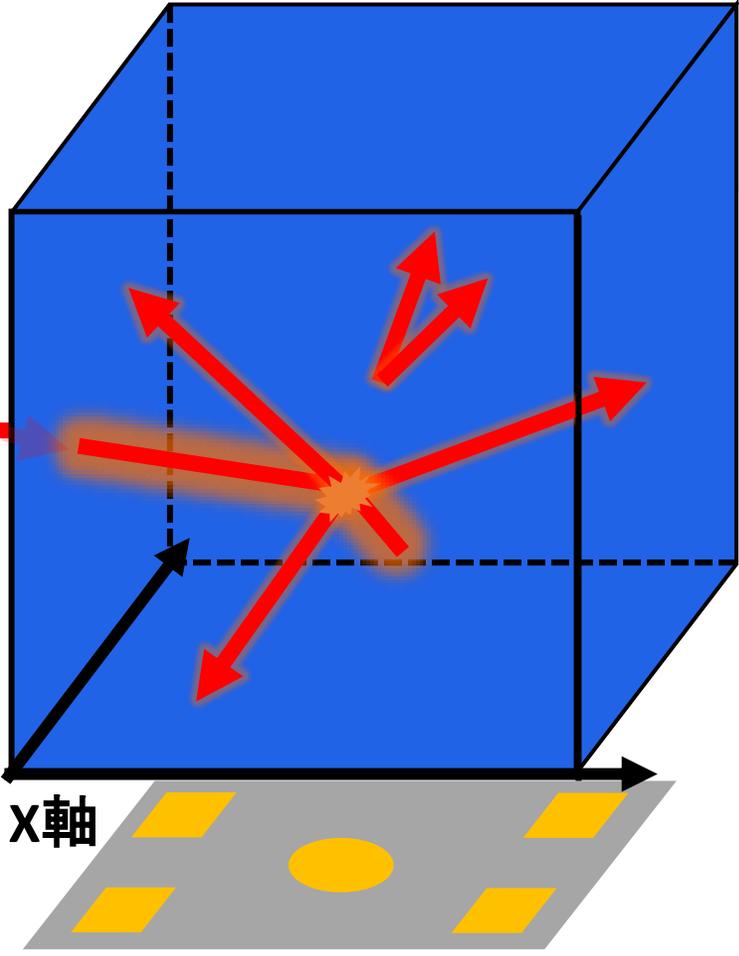
ドリフトチェンバー

(BLC1,2,BPC)

- ビームの位置,傾き
運動量の算出

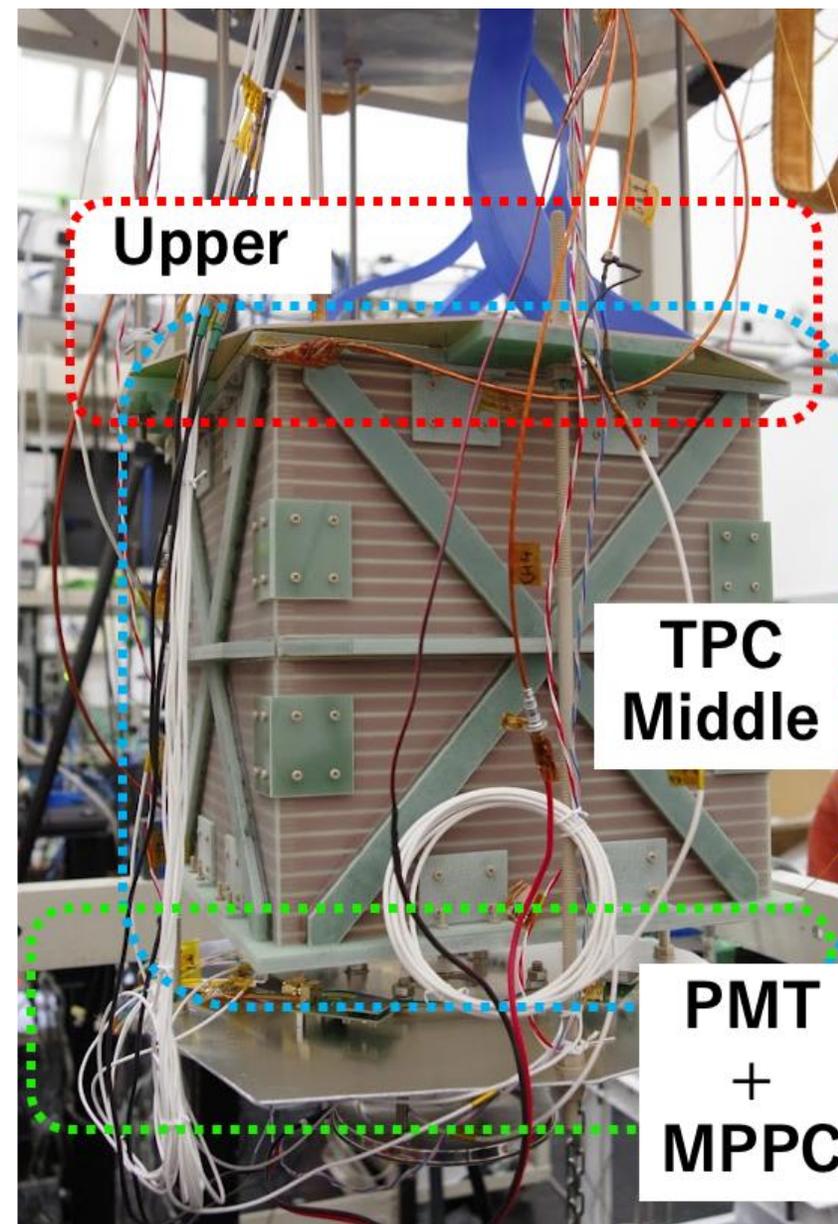
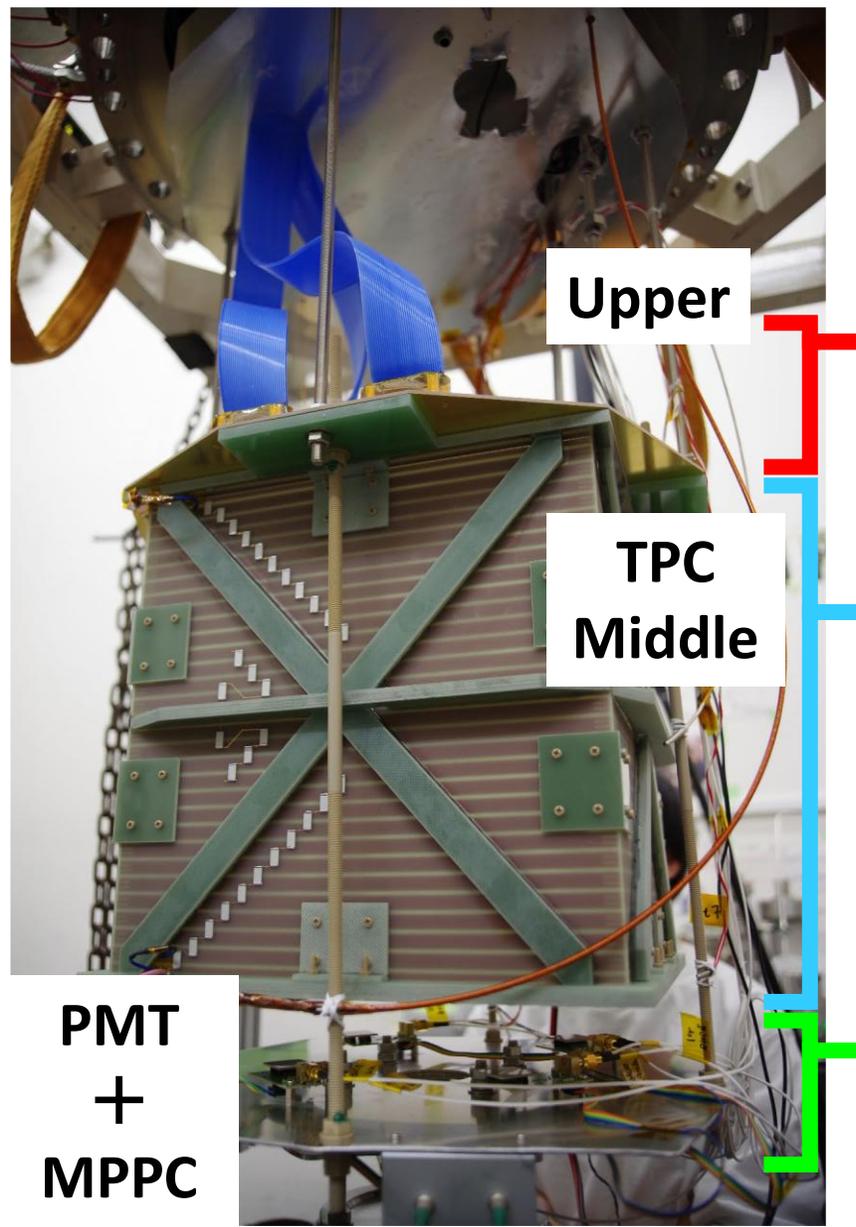
AC(Aerogel Cherenkov)

- Pionの同定に使用



光信号

- 入射粒子数の同定



dE/dx解析

- 停止点から遡って信号を計算 (停止点はClusterの一番右のch, bin center)
- 停止点より左のchのClusterを足し合わせている

