



(MPGD) & アクティブ媒質TPC研究会  
京大理 佐藤 太陽

2025/12/20

# 本講演の流れ



- MeVガンマ線 ( $> 1 \text{ MeV}$ ) の観測
- 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡における対生成事象
- UVSORビームラインによる高エネルギー光子照射実験
- 対生成の弁別・再構成手法の開発と評価
- まとめ

# MeVガンマ線 (>1 MeV) 観測



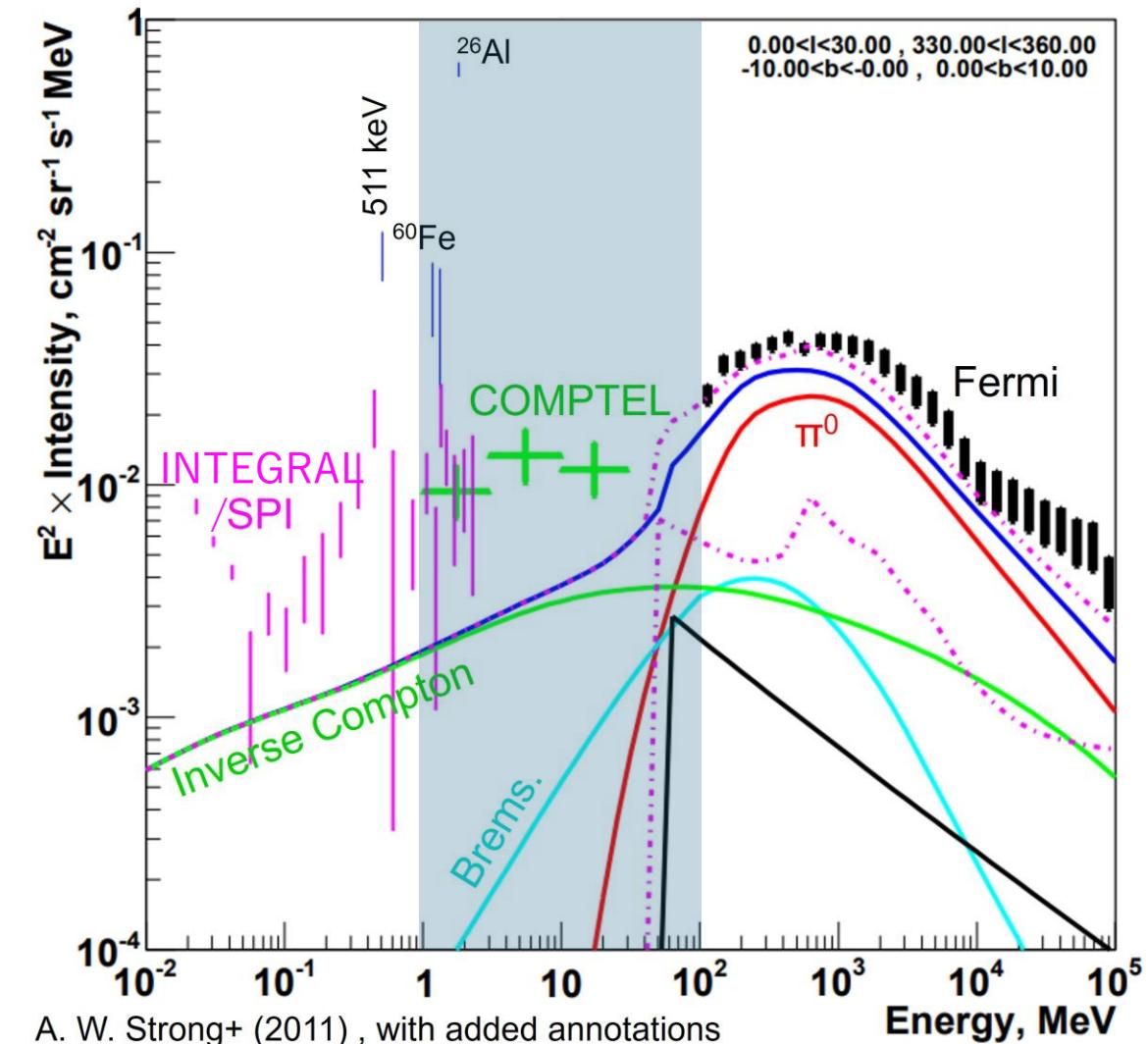
## ➤ 銀河中心のガンマ線超過 (1 – 30 MeV)

- ICで予想される量よりも強い
  - 未知の天体集合? [N. Tsuji+, ApJ (2023)]
  - WIMP? [B.J. Carr, Phys. Rev. D (2010)]
  - PBH? [K.K. Boddy+, Phys. Rev. D (2015)]

## ➤ 低エネルギーCRの起源・加速源

- 原子核の脱励起線 (3 – 10 MeV) [H. B. Mezhoud+, ApJ (2013)]
- $\pi^0$ 放射のカットオフ構造 (50 – 70 MeV) [C.D. Dermer, A&A (1986)]

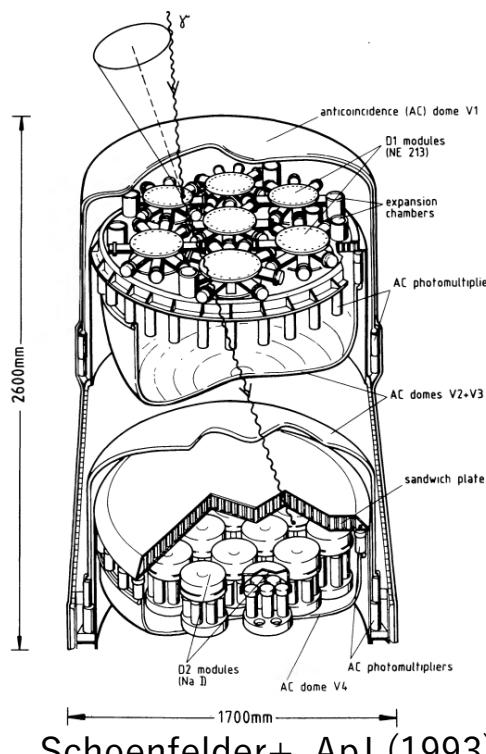
## ➤ 最良感度の観測はCGRO衛星 COMPTEL (1991 ~ 2000)



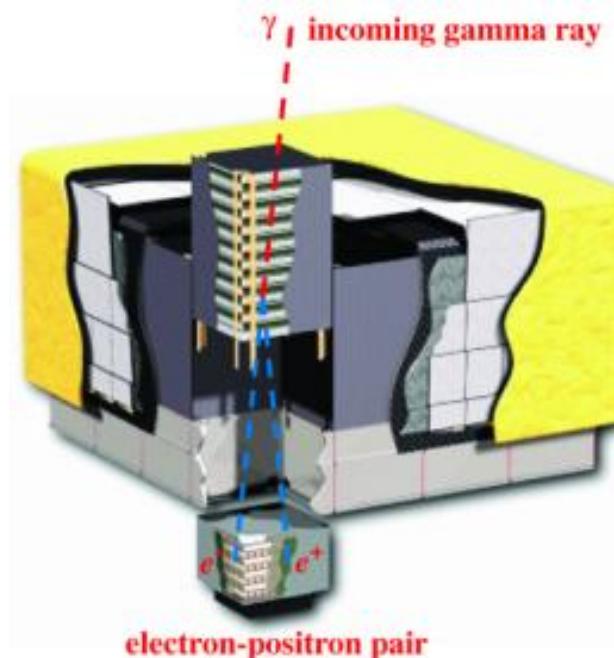
# MeV ガンマ線 (>1 MeV) 観測



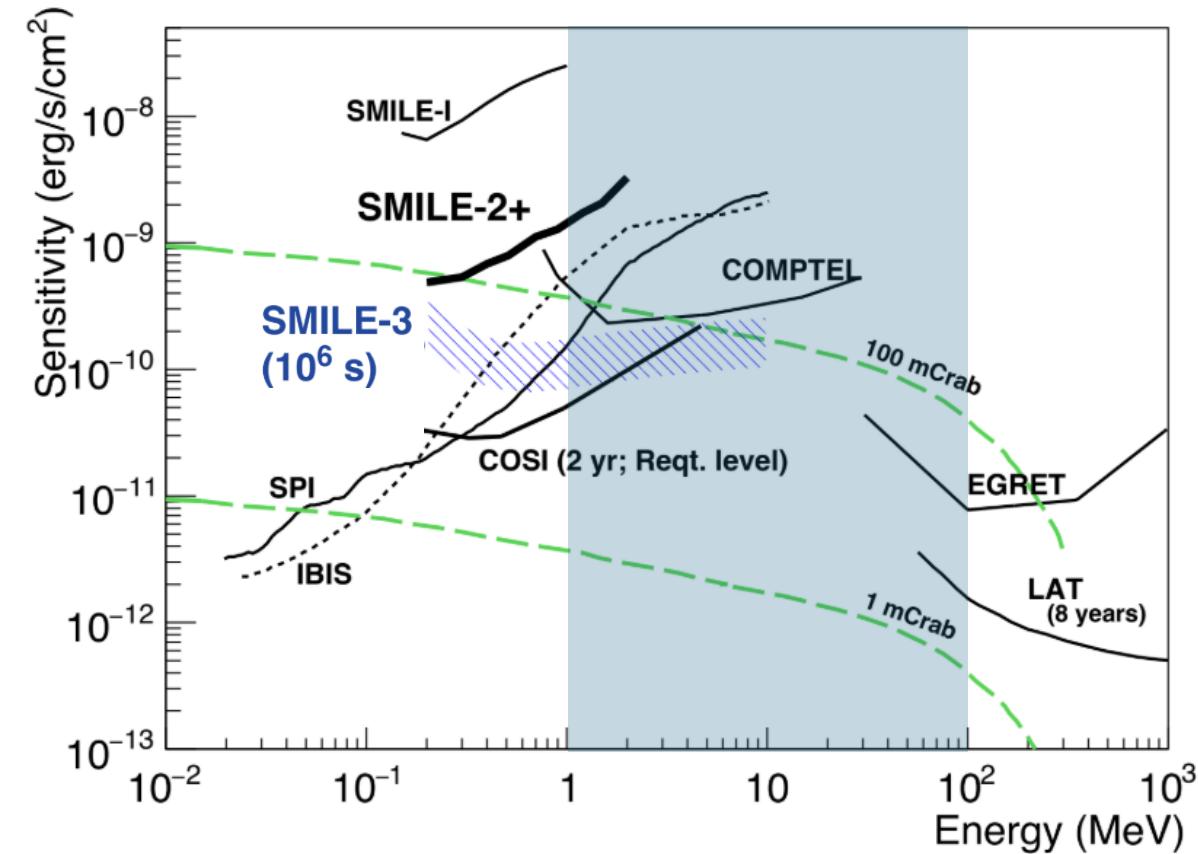
- 1 – 100 MeV: コンプトン散乱優位～対生成優位に移り変わる領域
  - コンプトンカメラ……相互作用確率の減少
  - 対生成トラッカー……対生成粒子の多重散乱による角分解能の低下



コンプトンカメラ  
(COMPTEL)



対生成トラッカー  
(Fermi LAT)



# 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



ガス飛跡検出器 (TPC + GEM +  $\mu$ -PIC)

反跳電子エネルギー + 反跳飛跡

+

GSOシンチレータアレイ

散乱ガンマ線 エネルギー + 吸収点

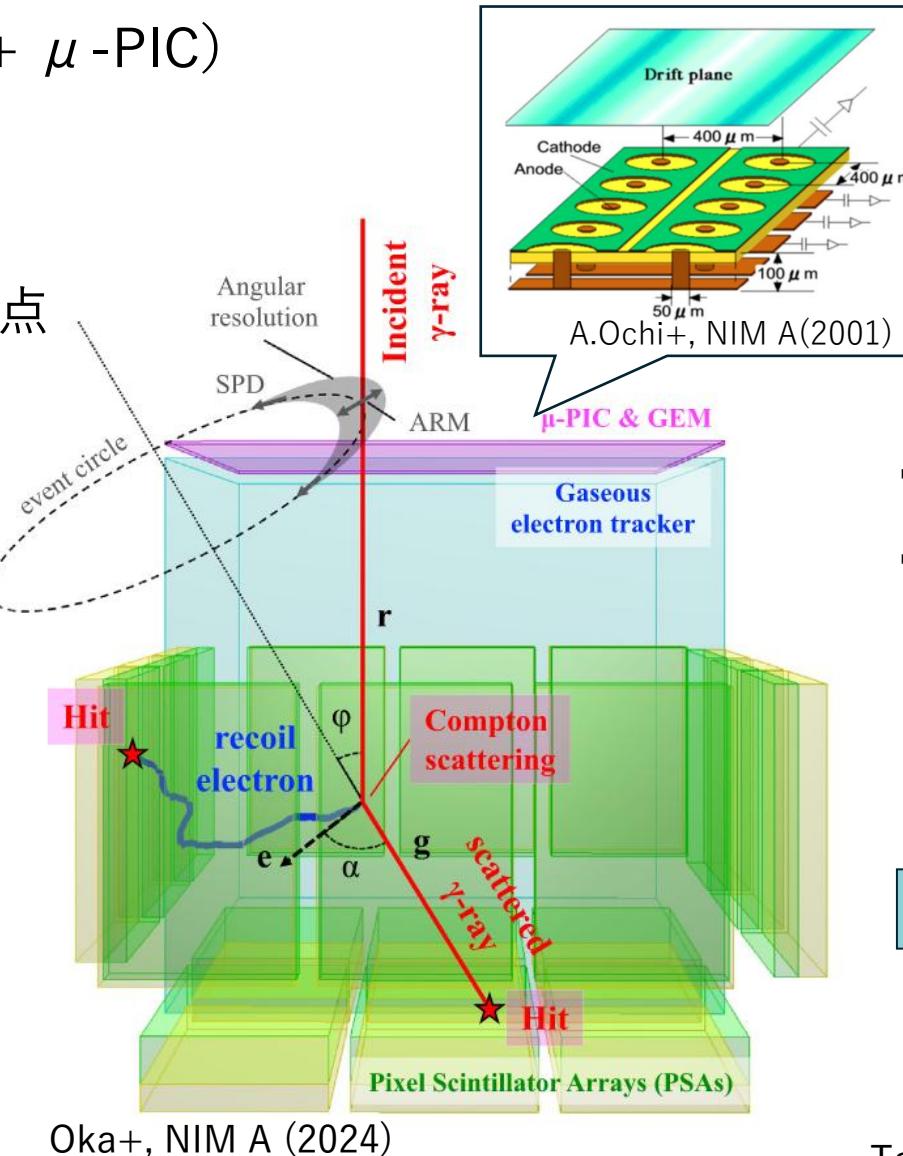


- 到来方向は天球上の1点に
- 飛跡情報による粒子識別

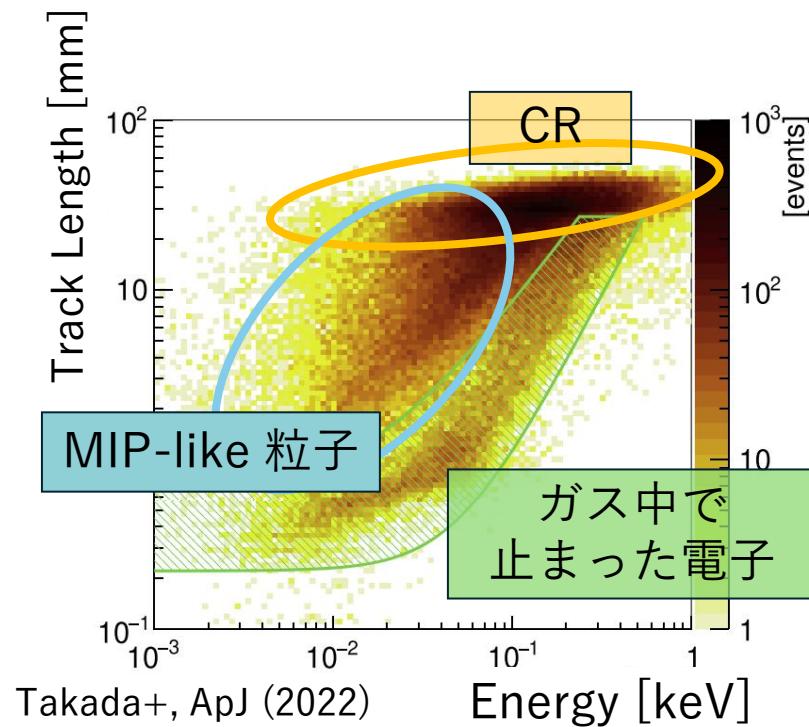
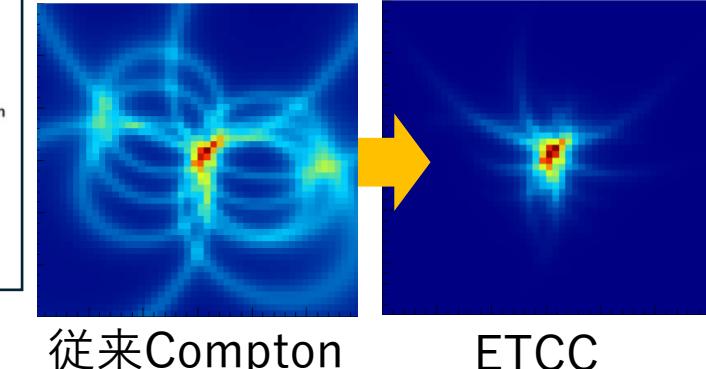
## ● 高エネルギー解析手法

[Oka+, NIM A (2024)]

- コンプトン反跳電子がTPC内で止まらず、シンチで吸収



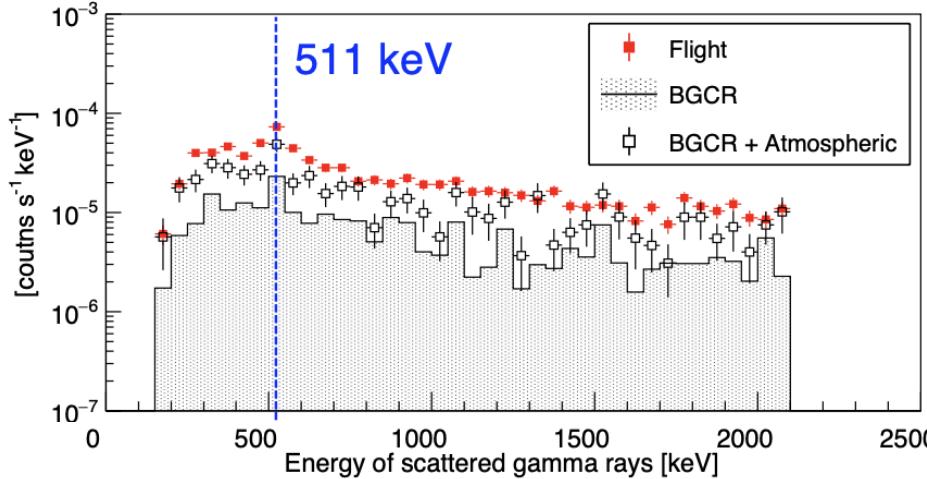
Mizumura+, JINST (2014)



# ETCCでの>1 MeV ガンマ線観測



散乱ガンマ線（シンチレータ）スペクトル



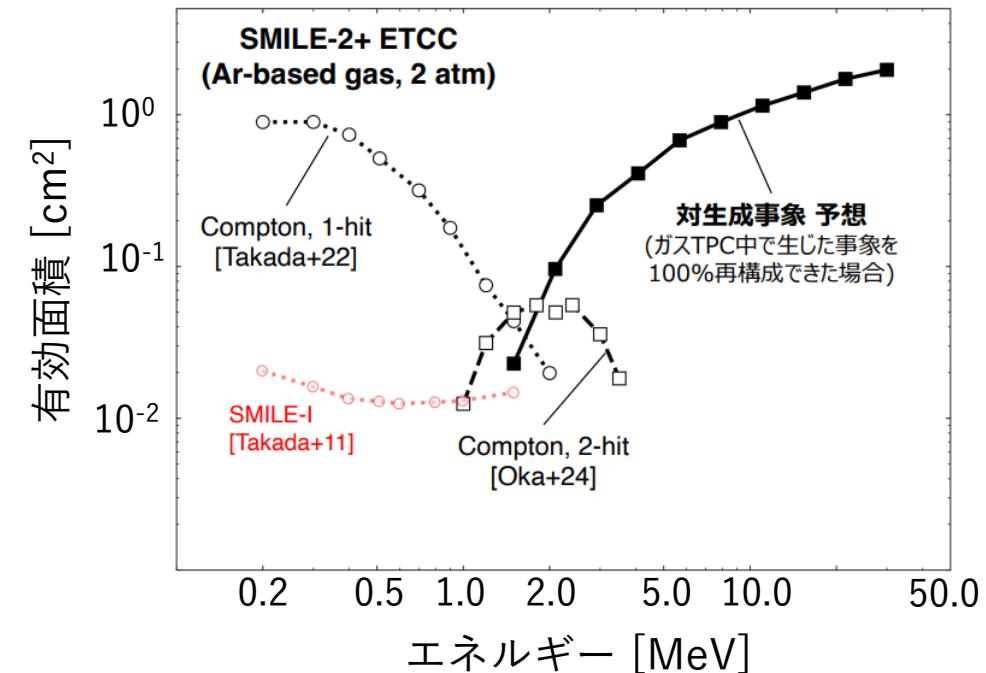
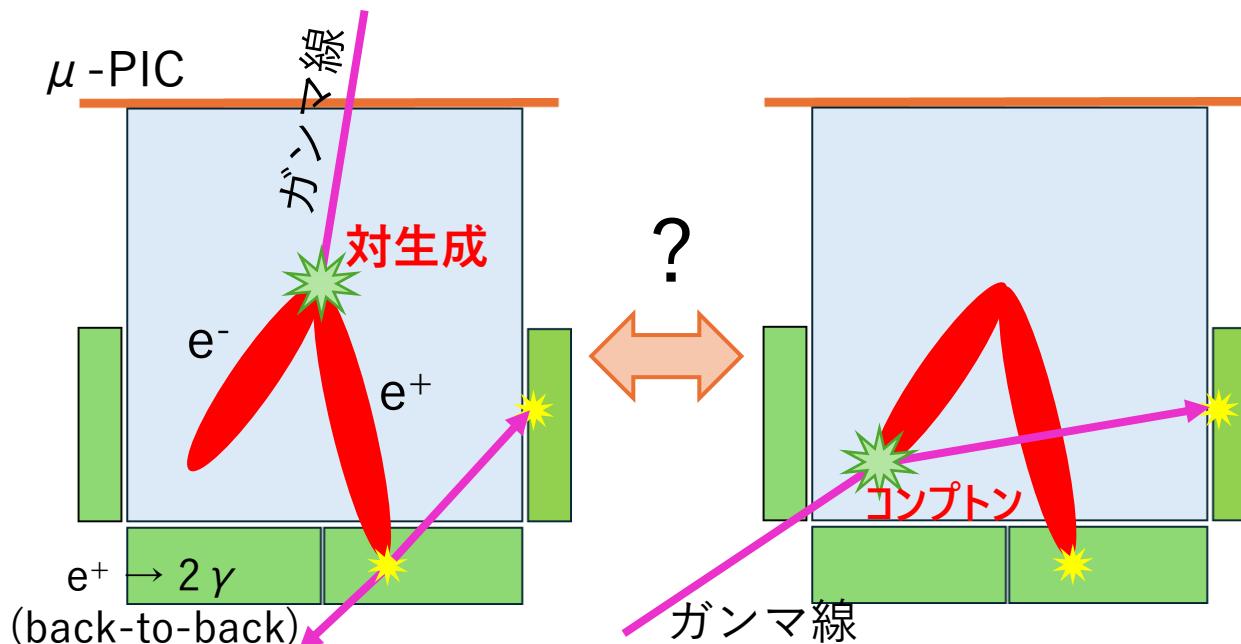
➤ > 1 MeV .....  $e^\pm$ 対生成事象の混雜が課題

- コンプトン反跳電子（高エネルギー）  
⇒ MIP-like × 1
- ガス内の $e^\pm$ 対生成  
⇒ MIP-like × 2

$dE/dx$ では  
弁別困難

➤ 対生成事象のガンマ線再構成の可能性

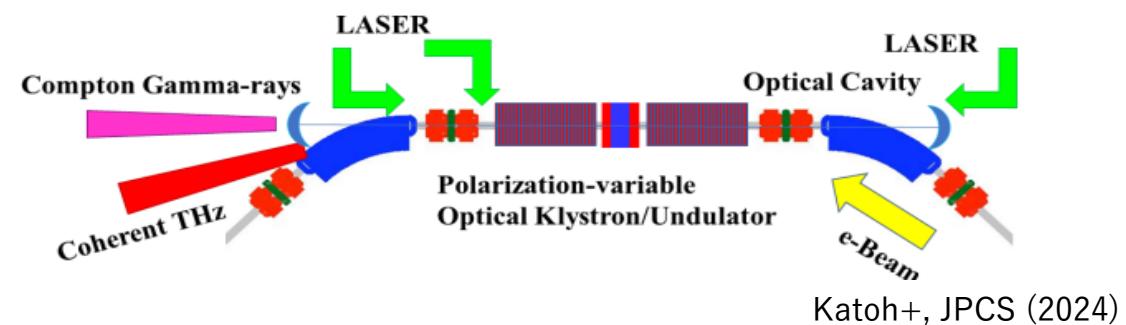
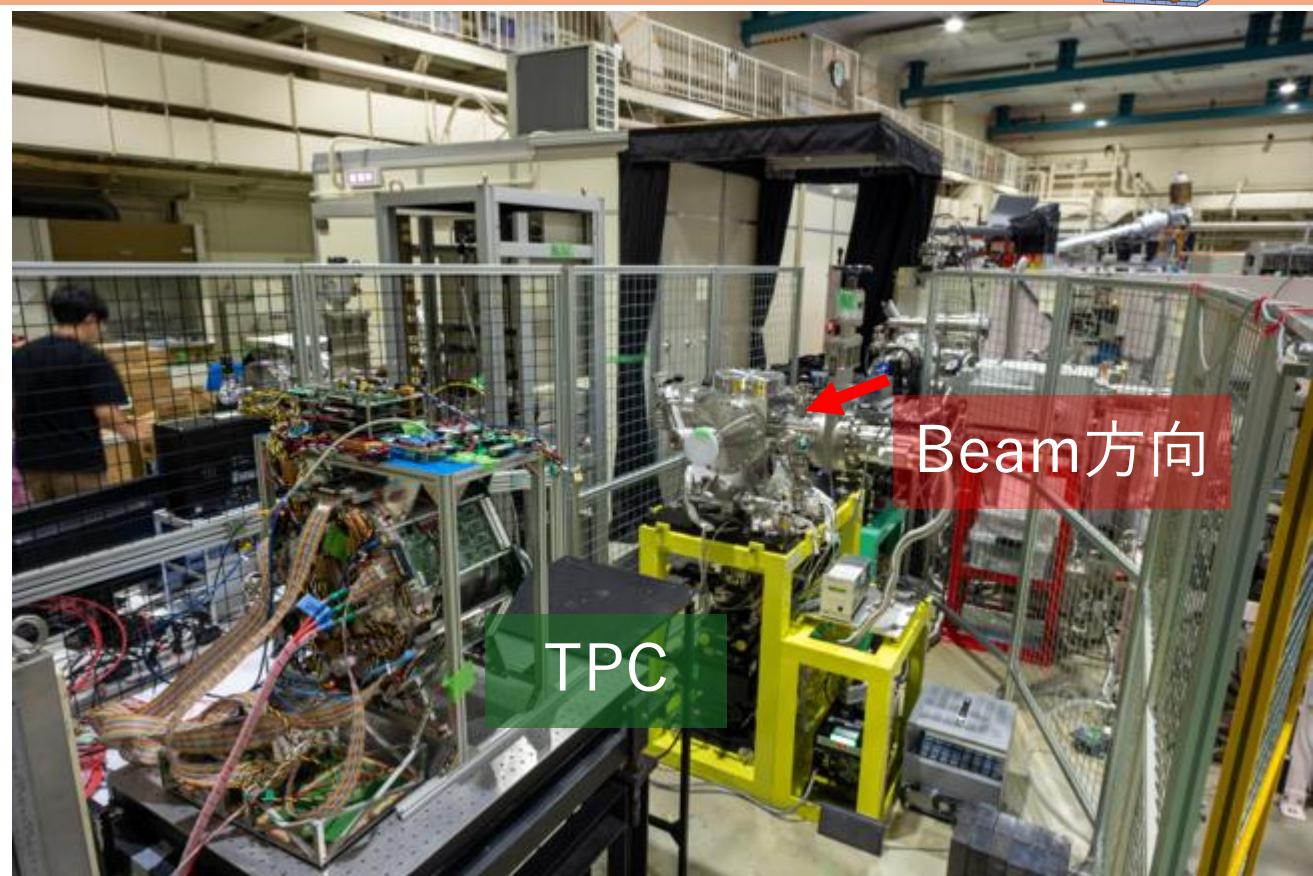
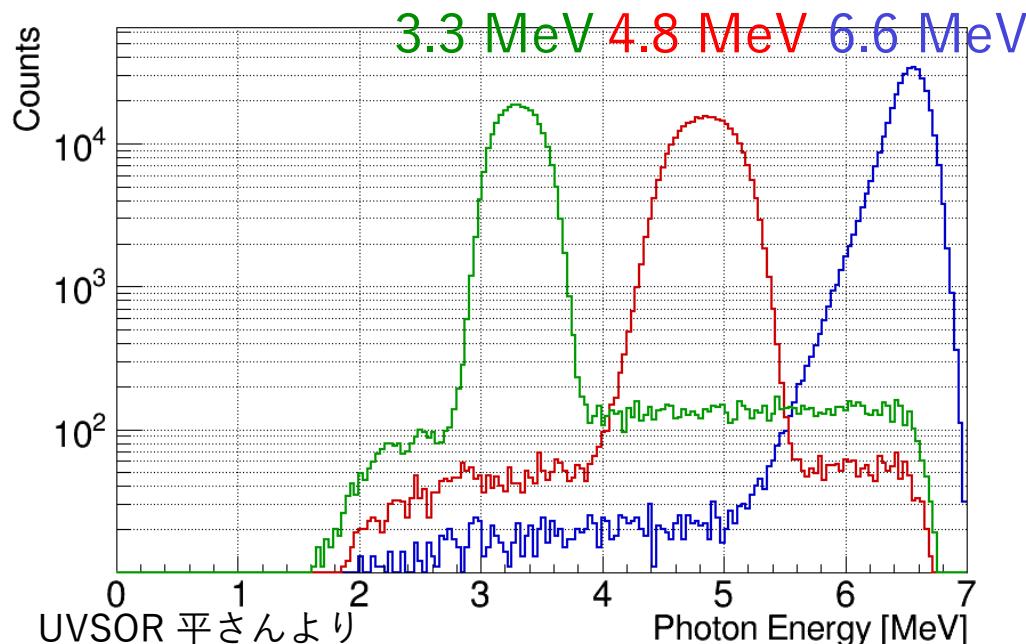
- より高エネルギーでも有効面積を確保できる



# ビームライン実験 @UVSOR BL1U



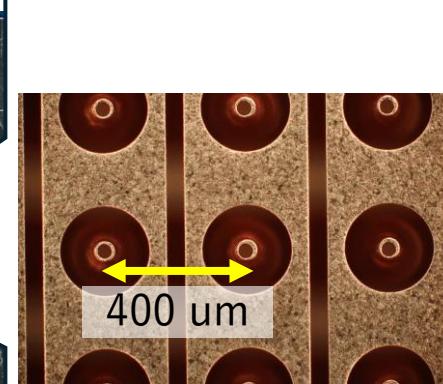
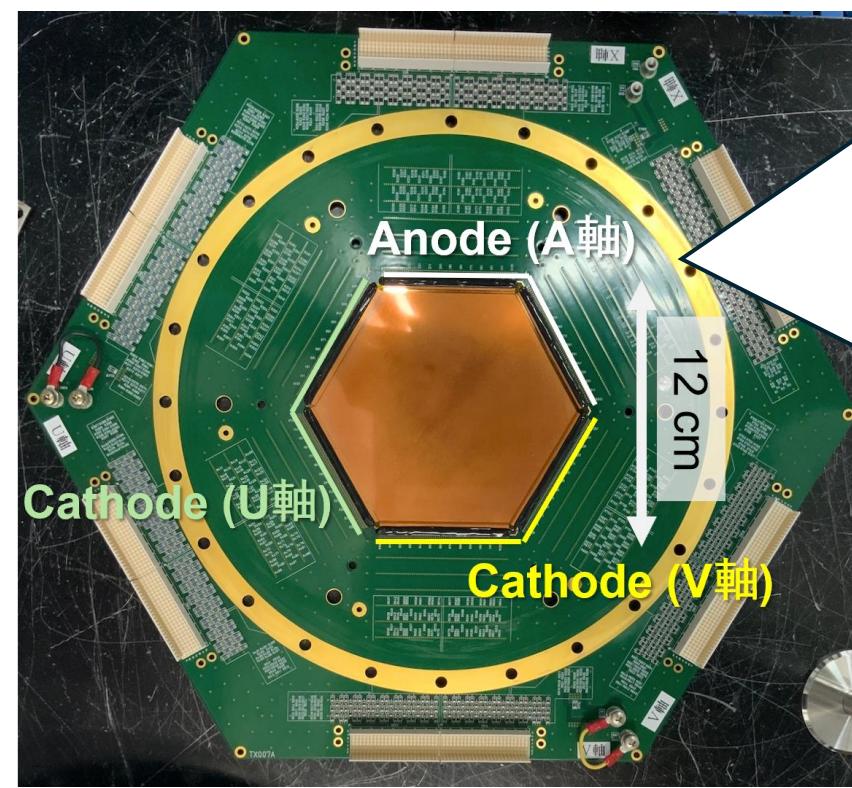
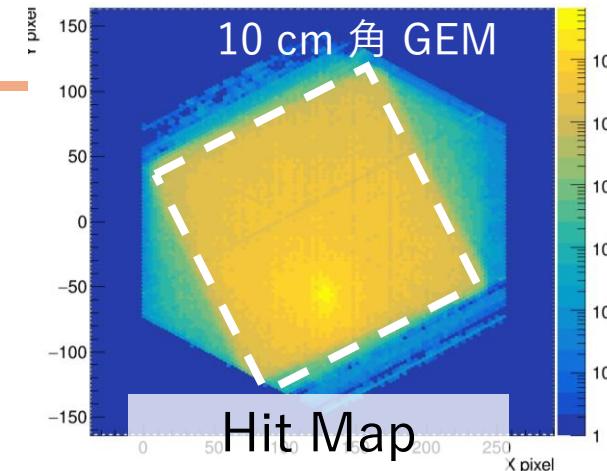
- ▶ 愛知県岡崎市 分子科学研究所  
UVSOR BL1Uでビームライン実験を実施
- ▶ 電子蓄積リングに1 kHzのレーザー照射  
→逆コンプトン散乱でガンマ線生成
  - 3.3/4.8/6.6 MeV の偏光ガンマ線
    - 周期 1 ms, バンチ幅 ~ 100 ps
  - 数十 MeVの制動放射 BGが常時入射



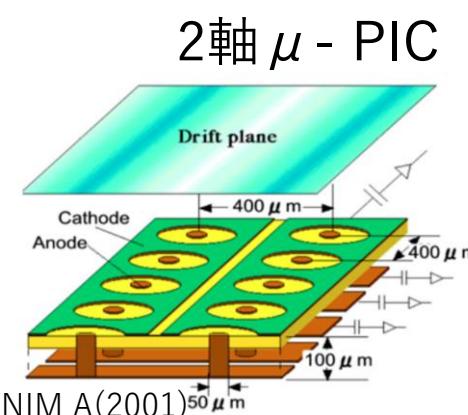
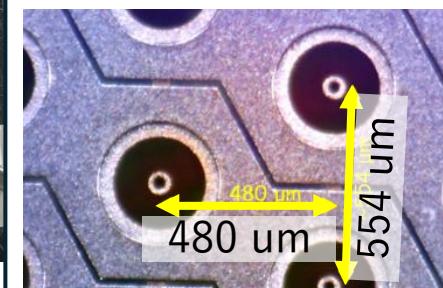
# 3軸 TPC

## ➤ 12 cm 角 3軸 256 ch TGV $\mu$ -PIC + GEM

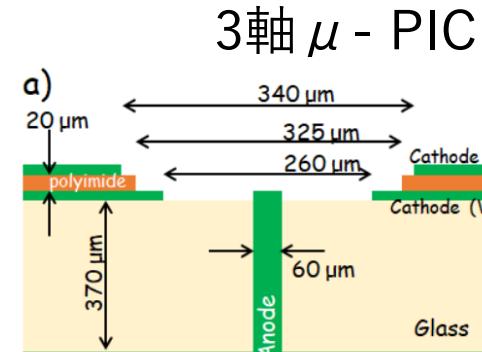
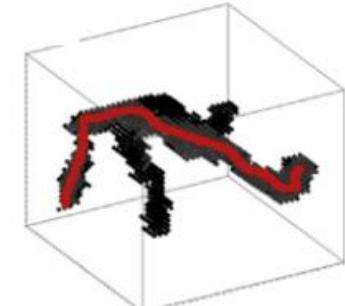
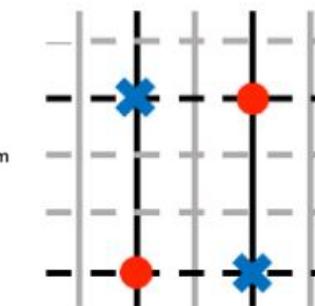
- 冗長軸を追加 ⇒ 複雑な飛跡の不定性が解ける
- 有効面積 : 100 cm<sup>2</sup> (GEMサイズが制限)
- ガス: Ar/CF<sub>4</sub>/iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (分圧比95 : 3 : 2) 2気圧



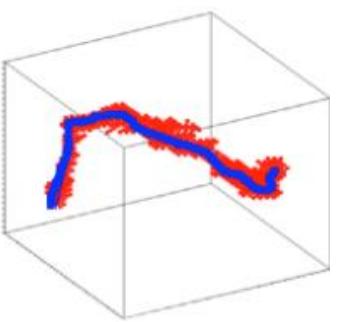
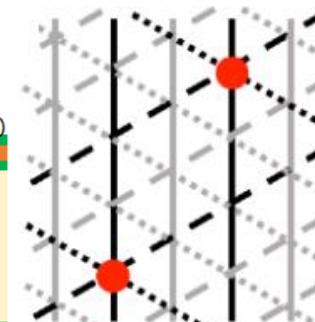
A.Ochi+, NIM A(2001)



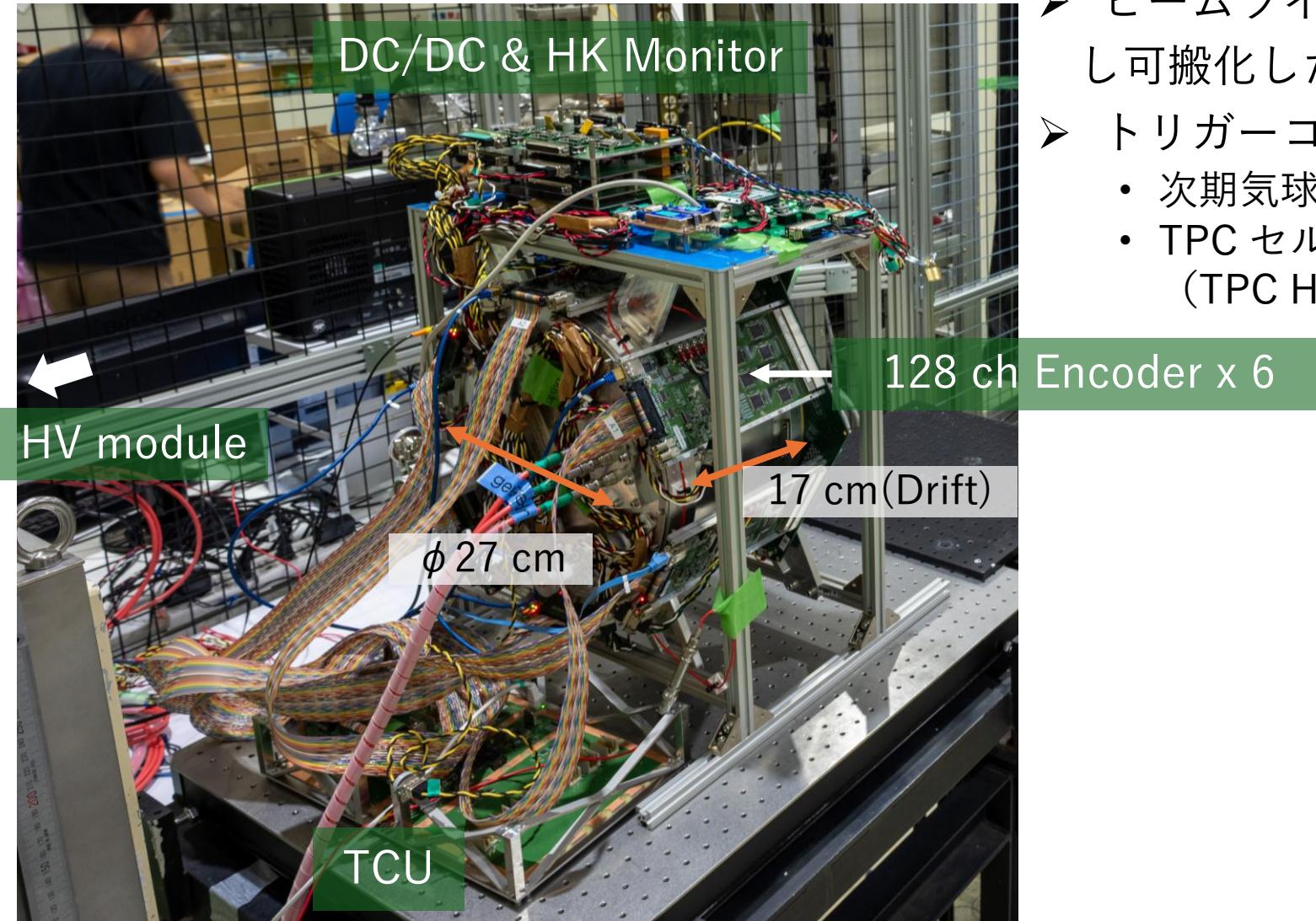
2軸  $\mu$ -PIC



3軸  $\mu$ -PIC

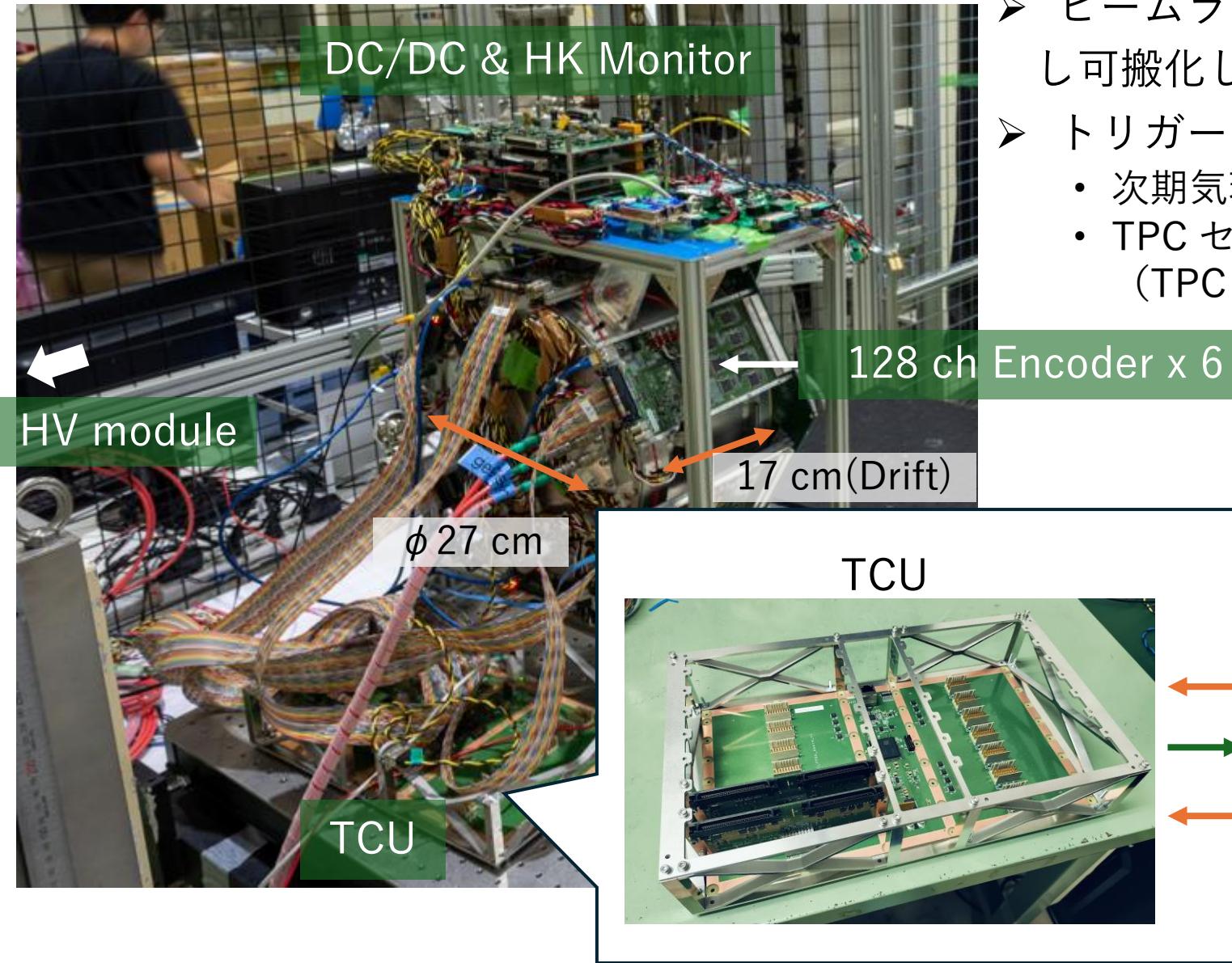


# 3軸 TPC

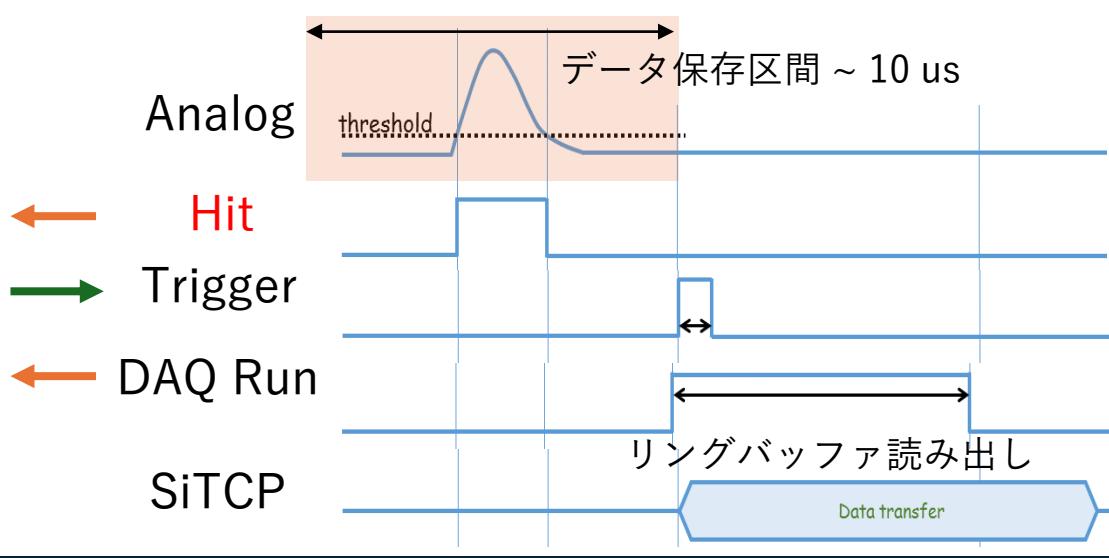
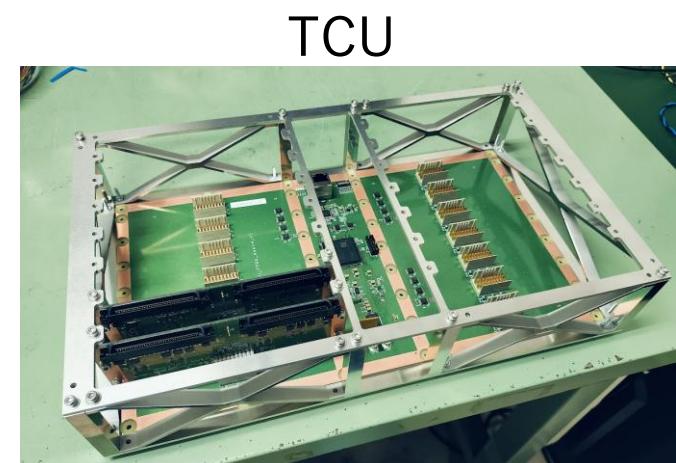


- ビームライン試験に向け、3軸TPCを横向きに固定し可搬化したセットアップを作成
- トリガーコントロールユニット (TCU)
  - ・次期気球実験SMILE-3用プロトタイプを使用
  - ・TPCセルフトリガーモードで運用  
(TPC Hit後 9 us 後にトリガー発行)

# 3軸 TPC



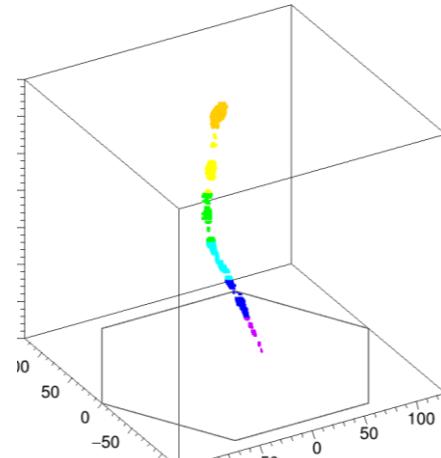
- ビームライン試験に向け、3軸TPCを横向きに固定し可搬化したセットアップを作成
- トリガーコントロールユニット (TCU)
  - 次期気球実験SMILE-3用プロトタイプを使用
  - TPCセルフトリガーモードで運用 (TPC Hit後 9 us 後にトリガー発行)



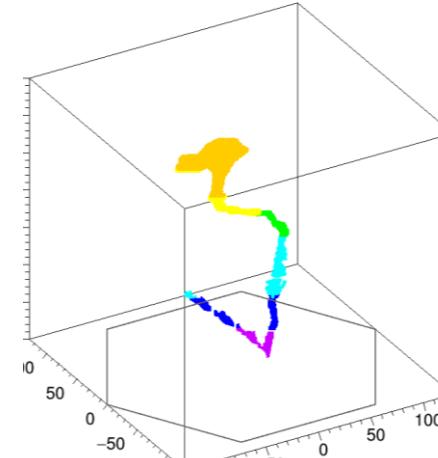
# ビームライン実験 @UVSOR BL1U



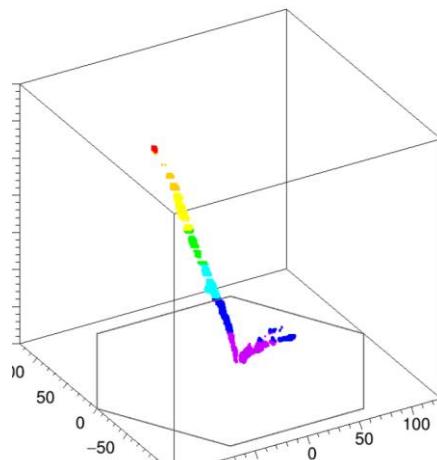
## ● 取得できた飛跡例



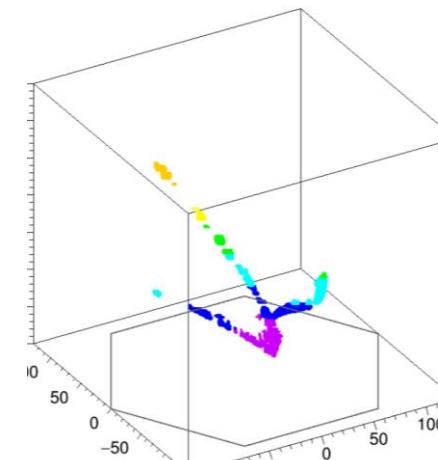
コンプトン反跳電子



対生成 (原子核電場)



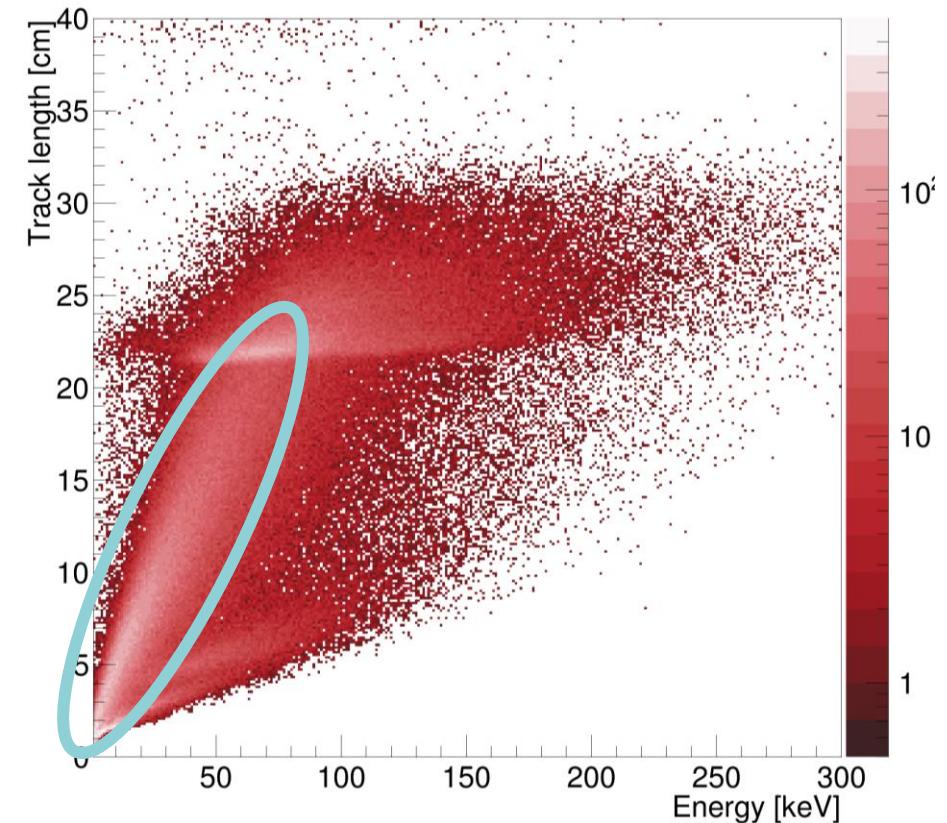
対生成 (電子電場)



対生成 (テルタ電子)

## ● $dE/dx$

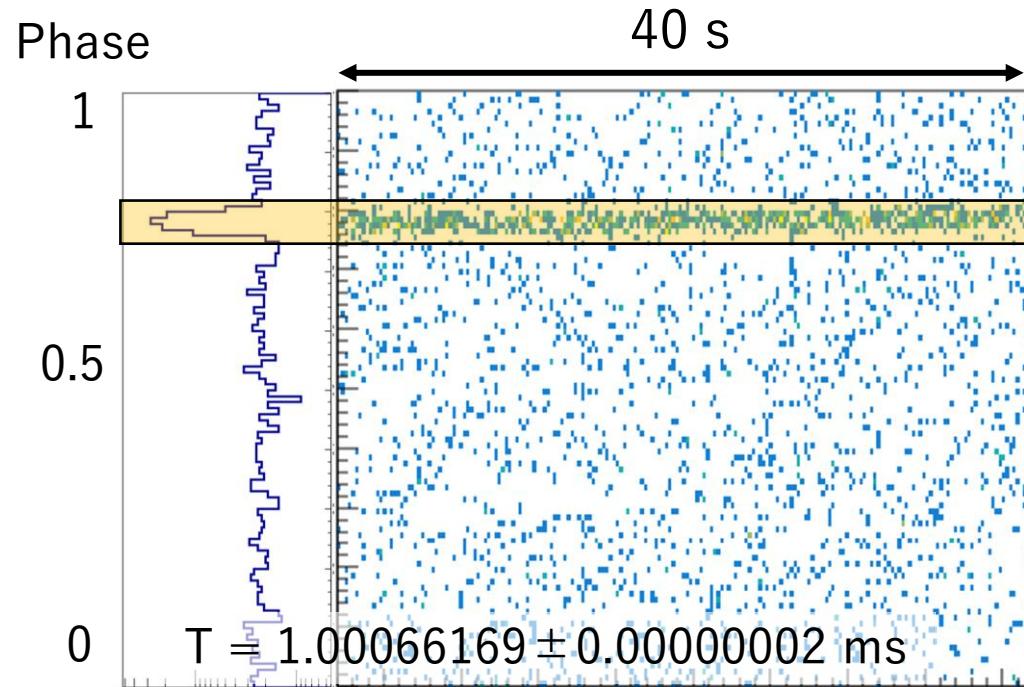
- MIP x1 (コンプトン反跳) と MIP x2 (対生成) は分離せず  
⇒ 画像解析による弁別が必要



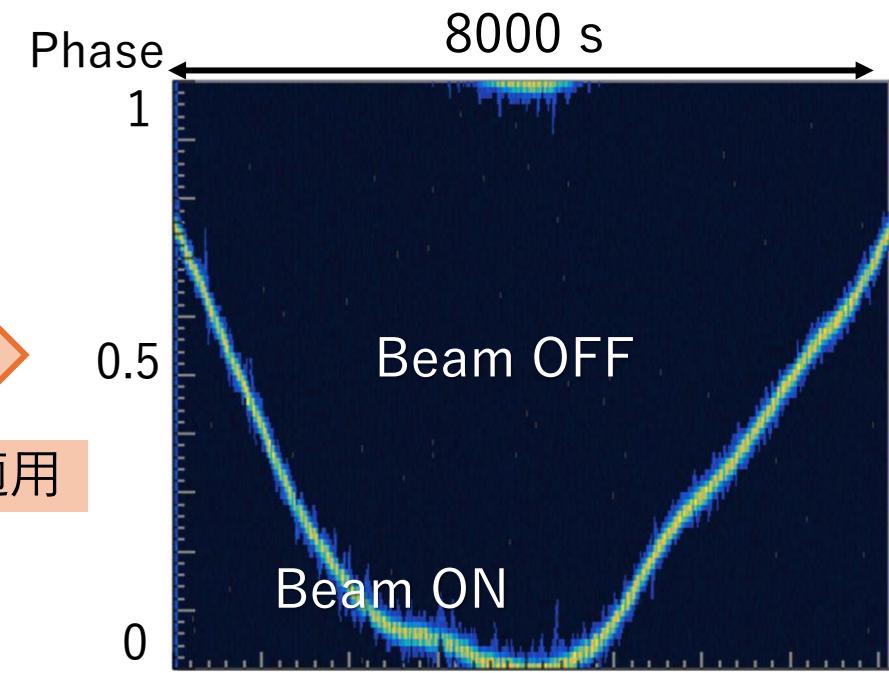
# ビームタイミング補正+イベントカット



- 逆コンプトンガンマ線 (1 kHz) + 制動放射BG (常時) → イベント時刻で切り分け
- 短時間(~ 1 min) でイベントを区切り、それぞれで周期探索
  - 特定位相にイベントが集中するような周期を探索・補正
- 数十分規模で周期ゆらぎ ~  $10^{-6}$  ms
- Beam ON : OFF =  
1.4 : 1 (6.6 MeV) / 0.4 : 1 (3.3 MeV)



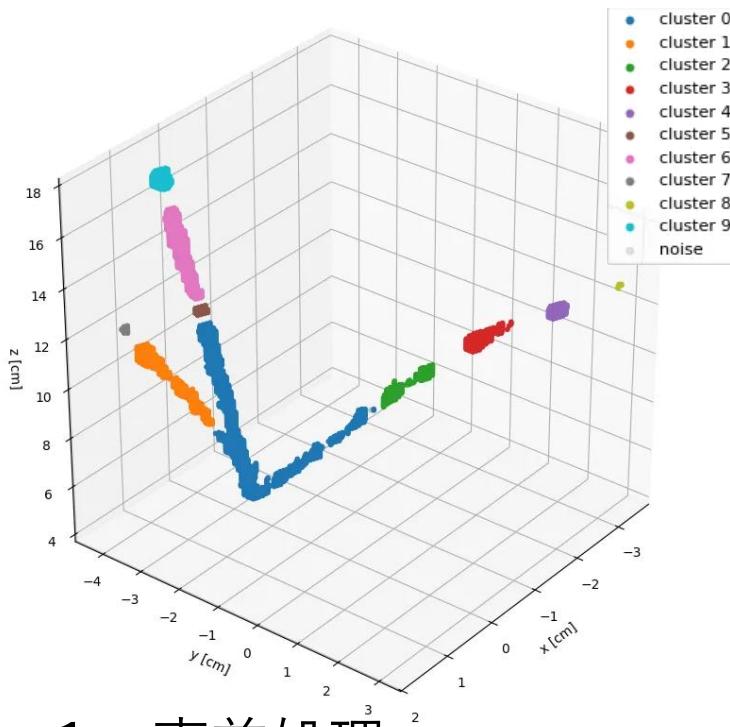
全区間に適用



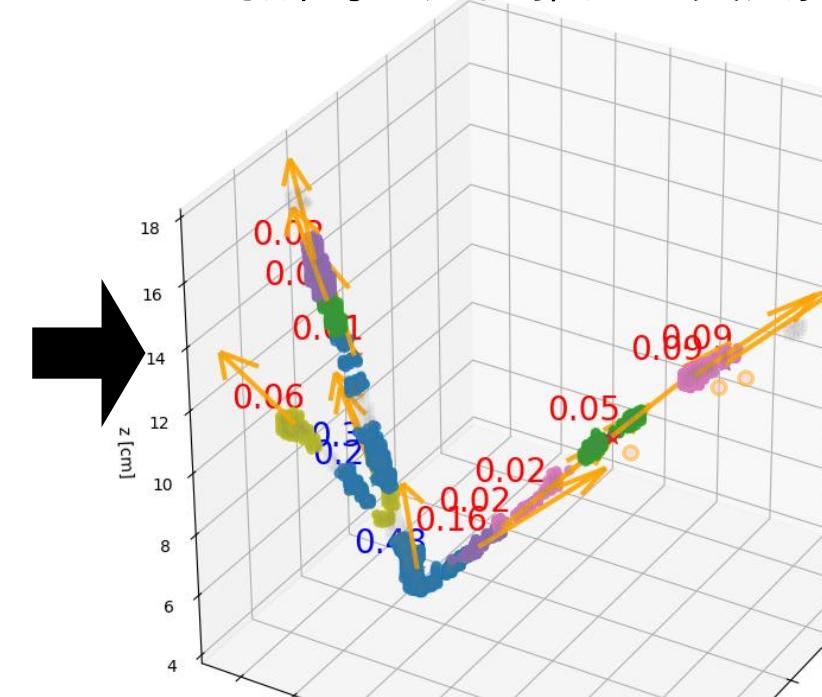
# 対生成検出アルゴリズムの流れ



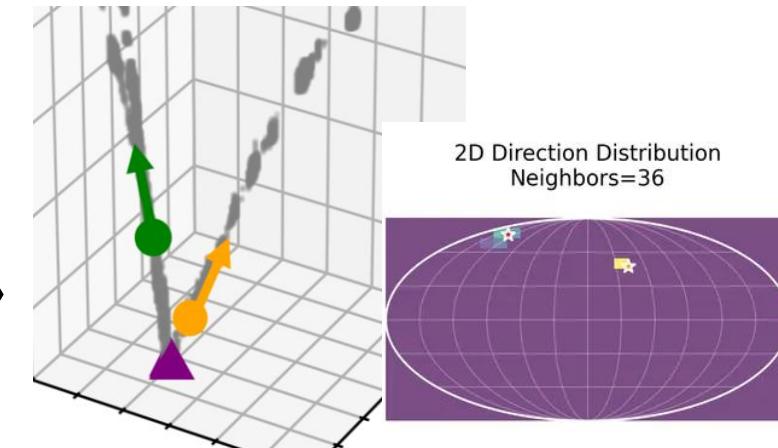
## 1. 事前処理



## 2. 局所的に方向推定・交点探索



### 3. 角度分布から尤度評価



## 1. 事前処理

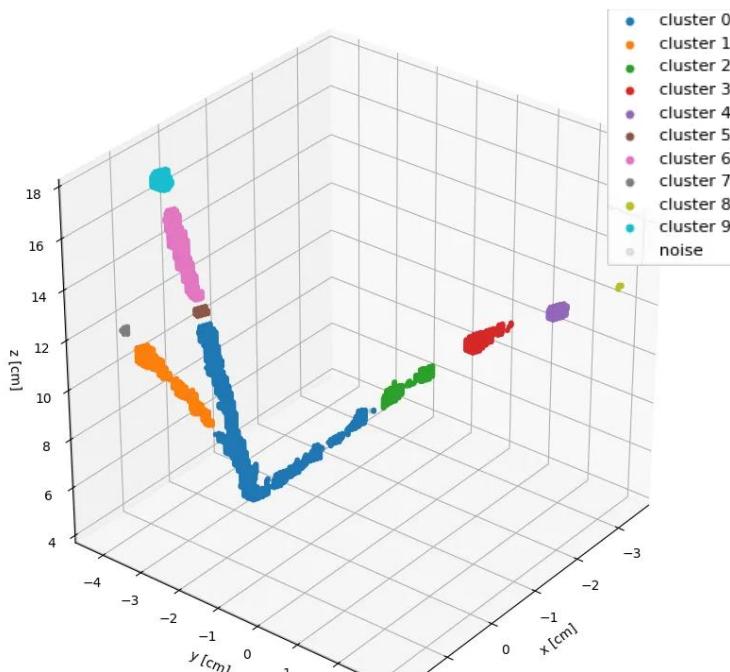
飛跡データは多くの場合途切れ途切れ（電離電子数、ストリップごとのゲインのゆらぎ）

- ダウンサンプリングで影響を均一化
  - 1つに纏まっているグループごとに解析を行う
    - DBSCAN: 密接に詰まっている点群を1つのクラスタとして扱う

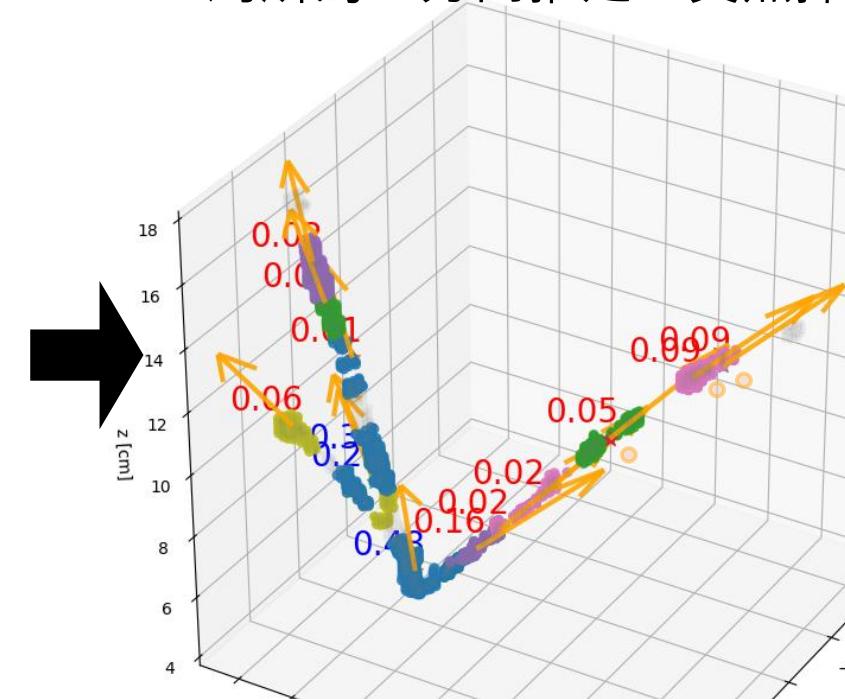
# 対生成検出アルゴリズムの流れ



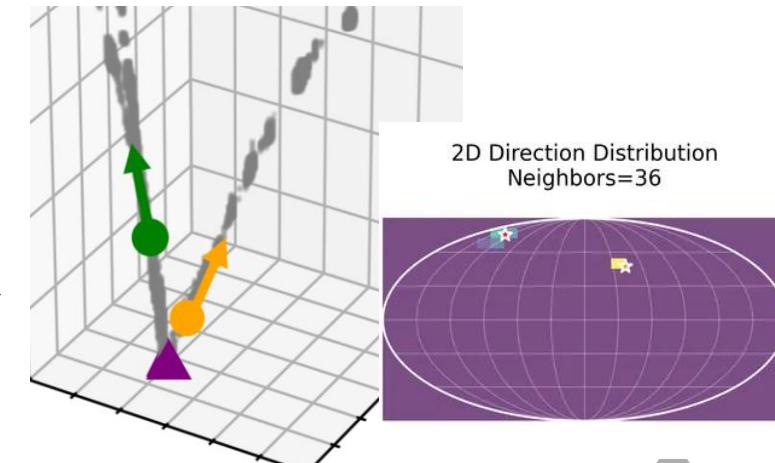
## 1. 事前処理



## 2. 局所的に方向推定・交点探索

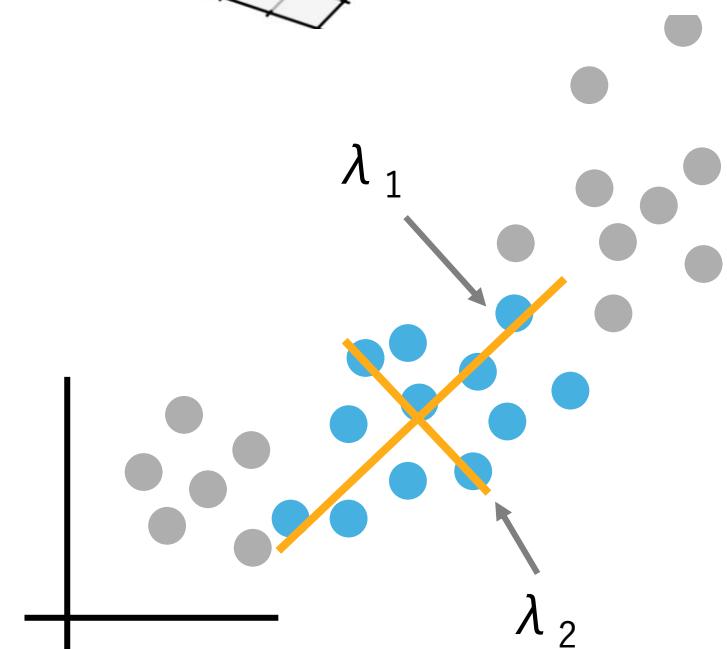


### 3. 角度分布から尤度評価



## 2. 方向推定・交点探索

- 飛跡の一部を切り出して、局所的な方向を調べる
    - 主成分分析の  $\lambda_1$  ベクトルを方向とする
    - $\lambda_2 / \lambda_1$  が小さい（飛跡方向をよく表す）ベクトルのみ残す
  - ベクトル間の交点が対生成点候補



# 対生成検出アルゴリズムの流れ



## 3. 角度分布から尤度検定

- 反応点候補周辺の点群を集め、相対角度を計算

- H1: 各点は2本のベクトル軸どちらかに集中

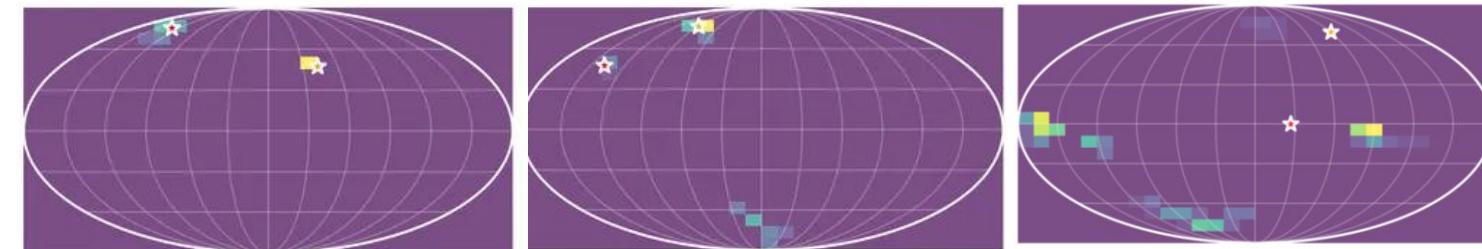
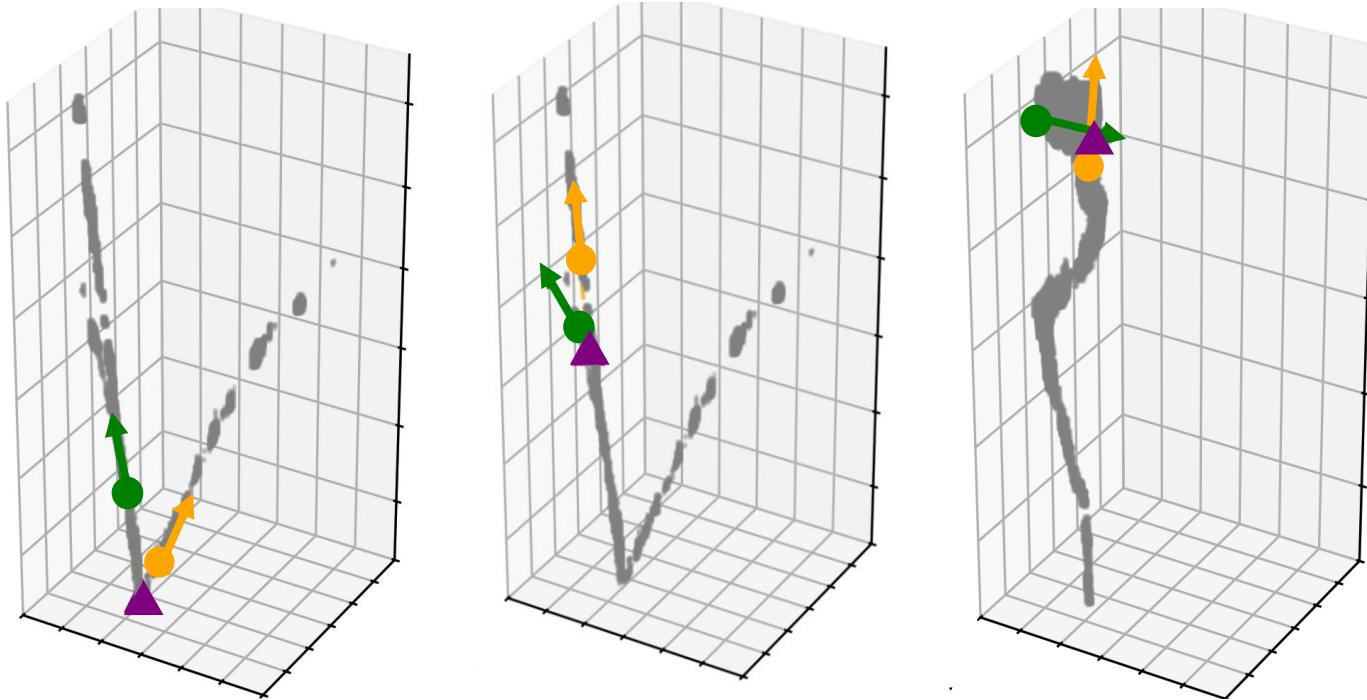
$$\varphi_{\sigma_\theta}(\theta) = \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right).$$

$$p(x_i | H_1, v, \mathbf{d}_{1,2}) = \frac{1}{2} \varphi_{\sigma_\theta}(\theta_{i1}) + \frac{1}{2} \varphi_{\sigma_\theta}(\theta_{i2}).$$

- H0: 各点は一様分布

$$p(x_i | H_0) = c, \quad c = \frac{1}{4\pi}.$$

- 対数尤度比 (LLR) で「対生成らしさ」を評価



LLR : 102

LLR : -399

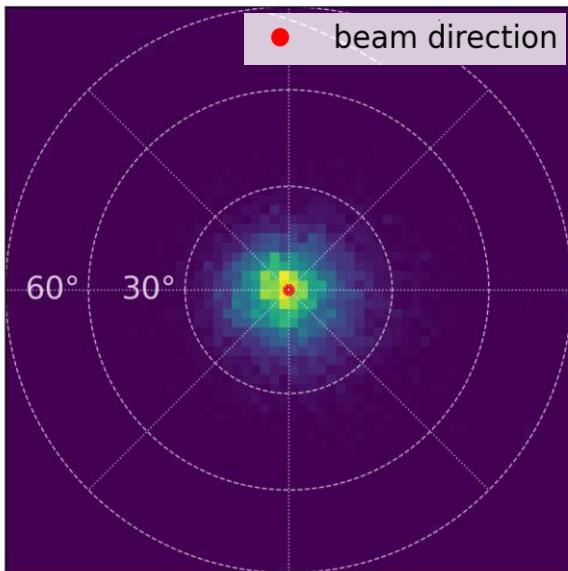
LLR : -2893

# 対生成事象の再構成結果

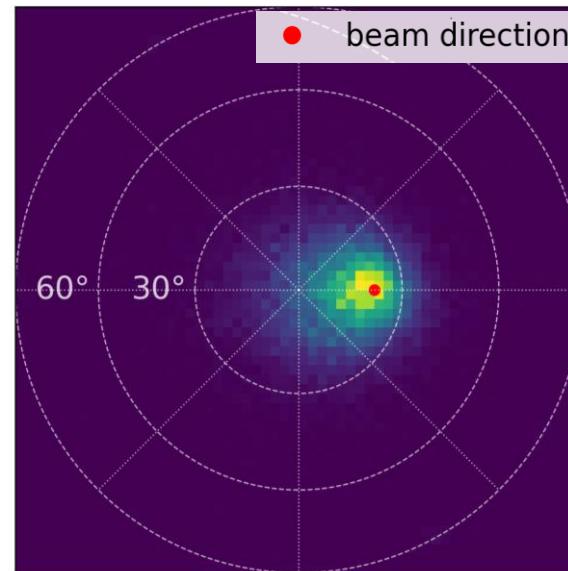


## ● 到来方向の再構成

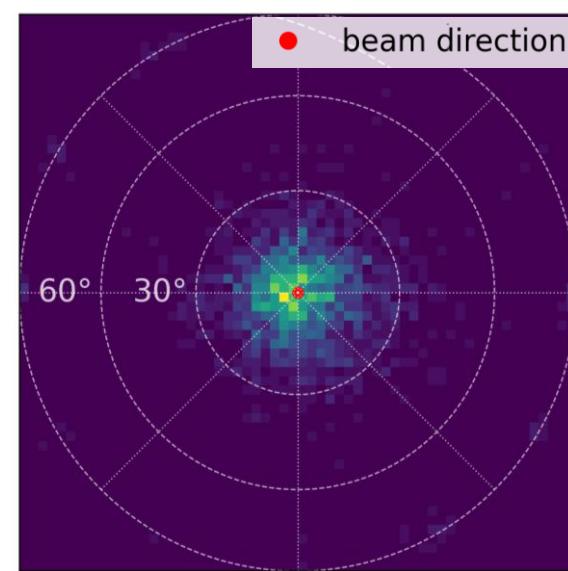
- 運動量は均等に分配されると仮定して、対生成粒子の方向ベクトルを合成
- ビーム軸方向に方向集中……ビーム由来の対生成事象を再構成できている



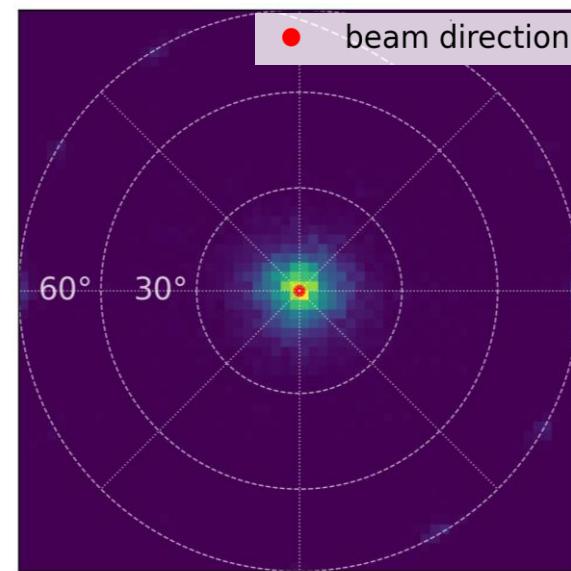
6.6 MeV  
正面入射



6.6 MeV  
ななめ (24°) 入射



3.3 MeV  
正面入射



ビーム非同期イベント  
(数十 MeV)

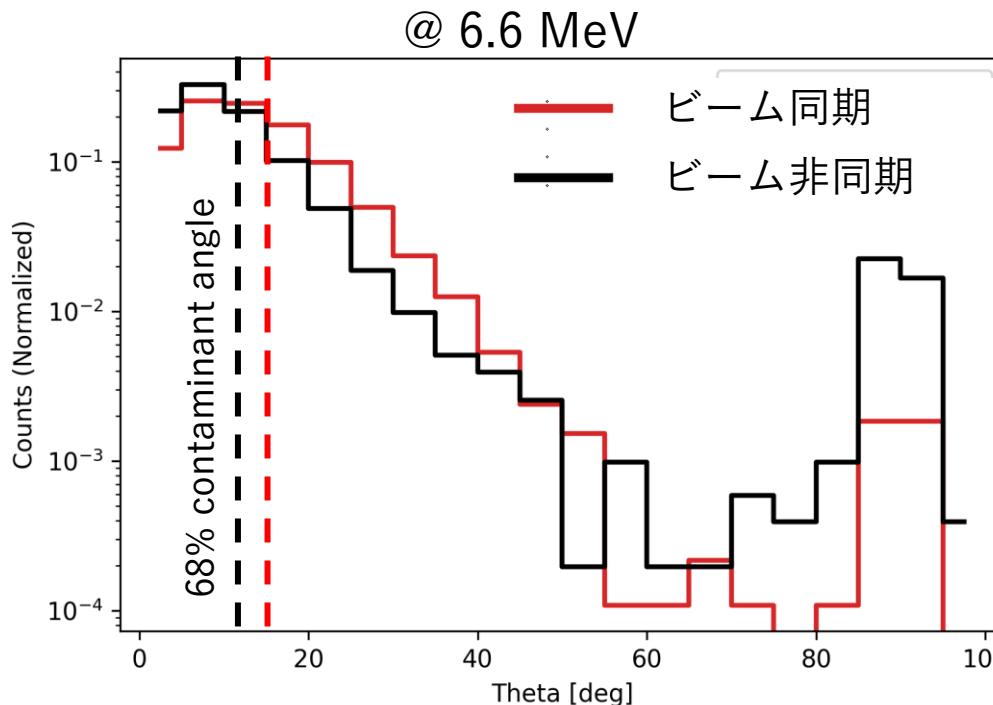
# 対生成事象の再構成結果



## ● ビーム軸からの残差分布

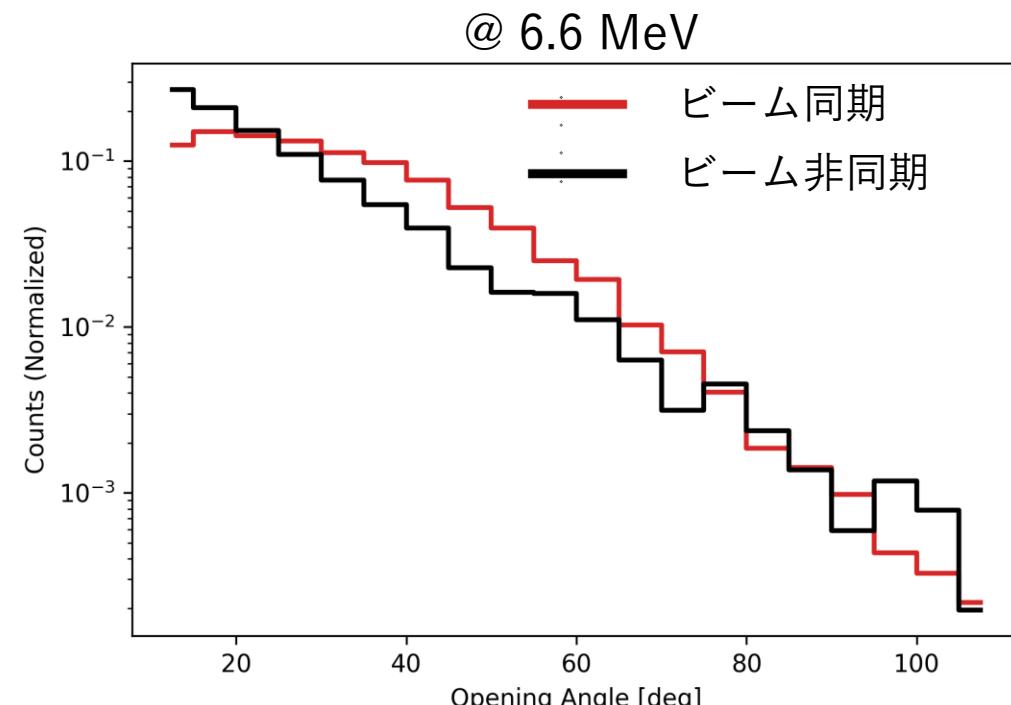
➤ 同期イベントは制動放射BGより残差が大きい

- 68 % contaminant angle :  
ビーム 同期 : 16.25°  
ビーム 非同期 : 11.96°



## ● 開き角分布

➤ ビーム同期イベントは制動放射BGより開き角が大きい

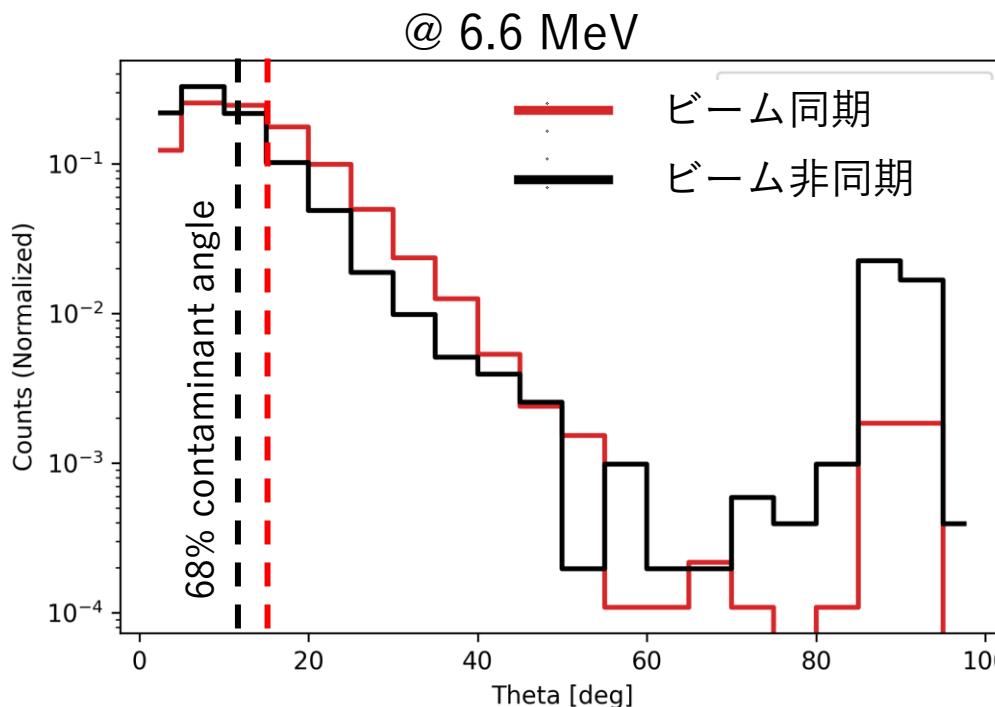


# 対生成事象の再構成結果

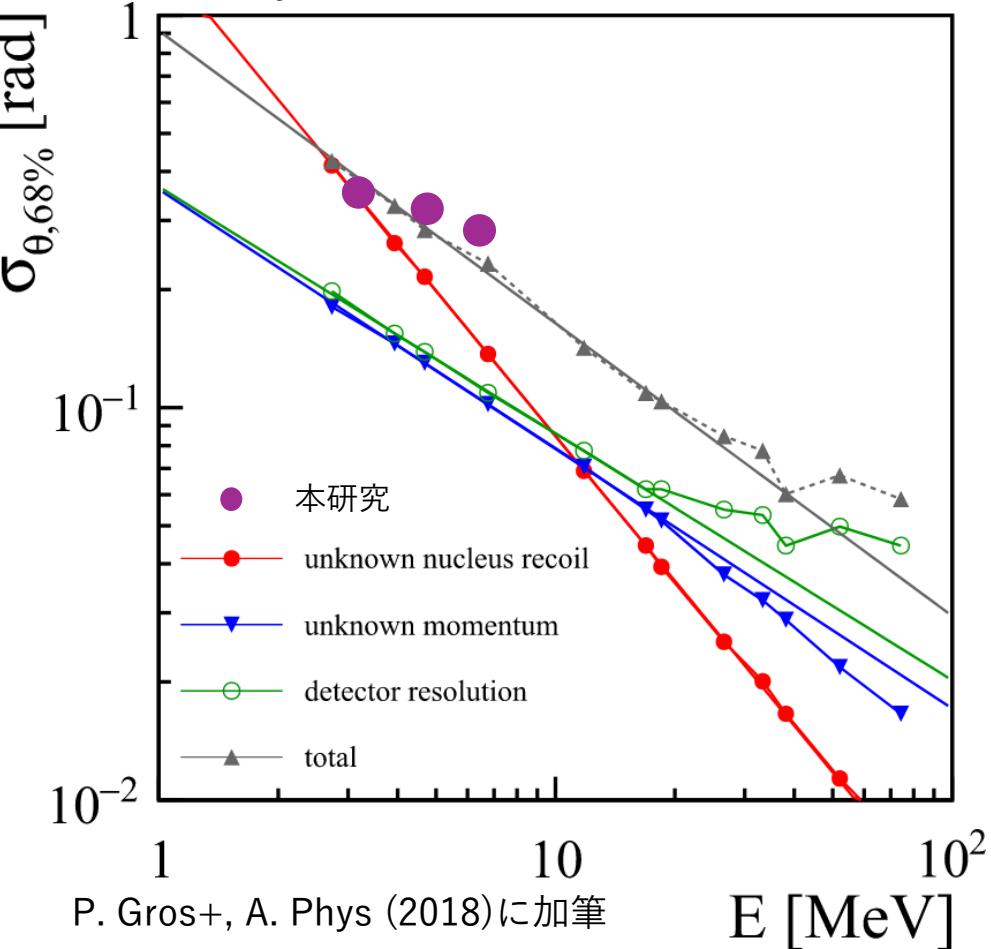


## ● ビーム軸からの残差分布

- 同期イベントは制動放射BGより残差が大きい
  - 68 % contaminant angle :  
ビーム 同期 : 16.25°  
ビーム非同期 : 11.96°



- 1 ~ 10 MeVでは原子核反跳の影響が支配的  
[P. Gros+, A. Phys (2018)]



- Triplet事象（電子反跳）ならLimitを無視できる



- ETCC ガスTPC内のコンプトン散乱・対生成事象を画像から弁別
  - 1 MeV以上の雑音事象を排除
  - 対生成事象からガンマ線再構成 ⇒ より高エネルギーで有効面積確保
- 対生成検出アルゴリズムをビームライン実験データに適用し、検出に成功
  - 局所的な飛跡方向の推定→交点探索→角度分布から尤度評価
- 今後
  - 3軸TPC・セットアップを再現したシミュレータの構築・整合性評価
  - 機械学習による弁別法の開発

# backup

---

