

NEWAGE実験36: 反跳原子核の前後判定

矢ヶ部遼太, 身内賢太郎, 橋本隆
池田智法, 帝釋 稜介、中村輝石^A
他NEWAGEグループ

日本物理学会 2015年秋季大会

■ 目次

- 飛跡の前後判定とその手法
- 検出器
- FADC波形の解析
- 前後判定の結果
- パラメータの優位度
- まとめ

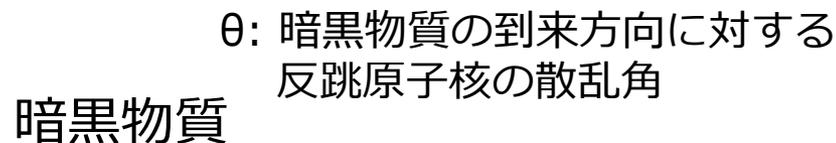
■ 飛跡の前後判定

現行の解析：

- 飛跡に向きの情報は無し
- $|\cos\theta|$ 分布が得られる

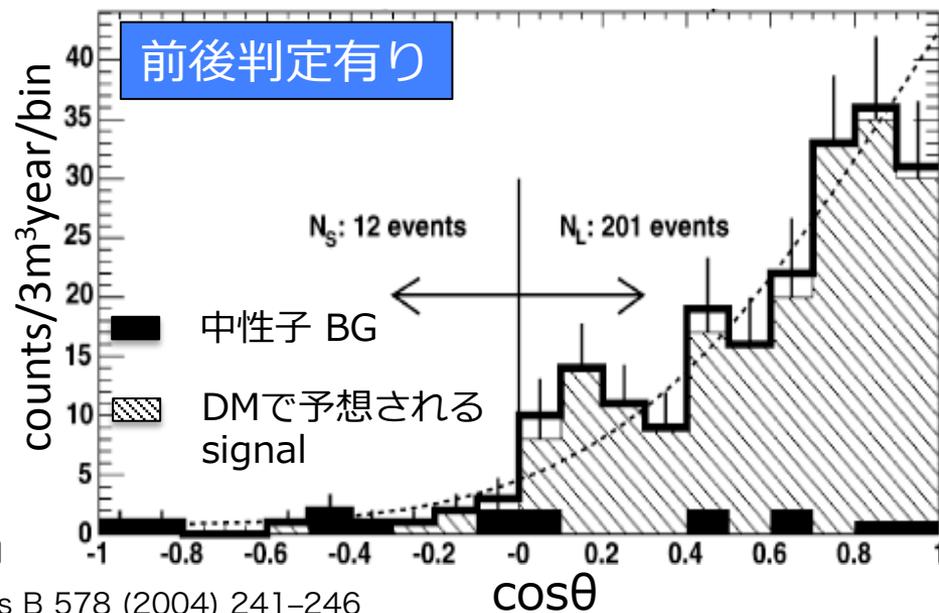
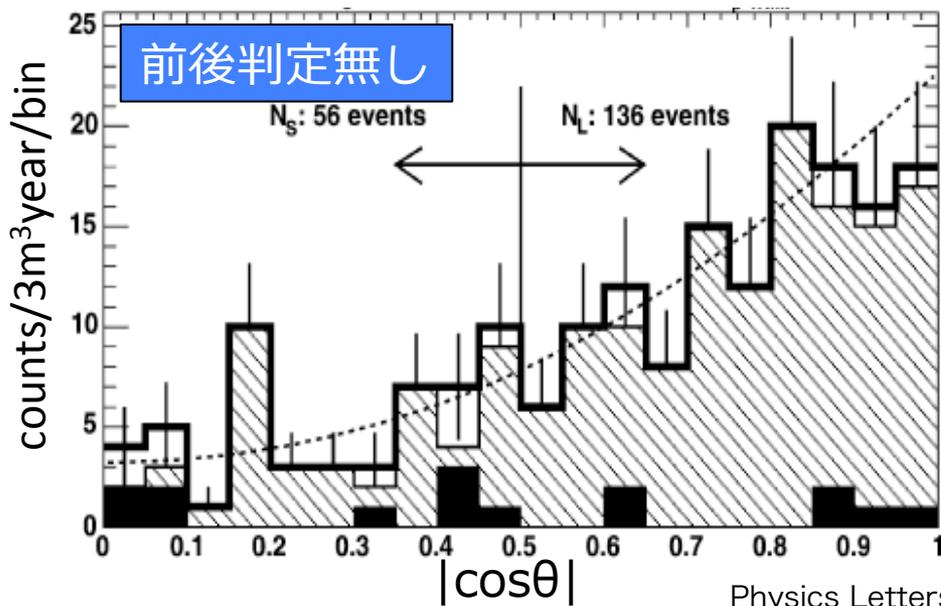
前後判定を含めた解析：

- $\cos\theta$ 分布が得られる
- 前方散乱がより明確、感度はおよそ3倍



$M_{DM}=80\text{GeV}$ $\sigma_{p-DM}=0.1\text{pb}$

予想される $\cos\theta$ 分布



Physics Letters B 578 (2004) 241-246

■ 前後判定の手法

* 低エネルギー領域でのブラッグ曲線

飛跡に沿ってエネルギー損失は減少する。

始点：エネルギー損失(大)、終点：エネルギー損失(小)

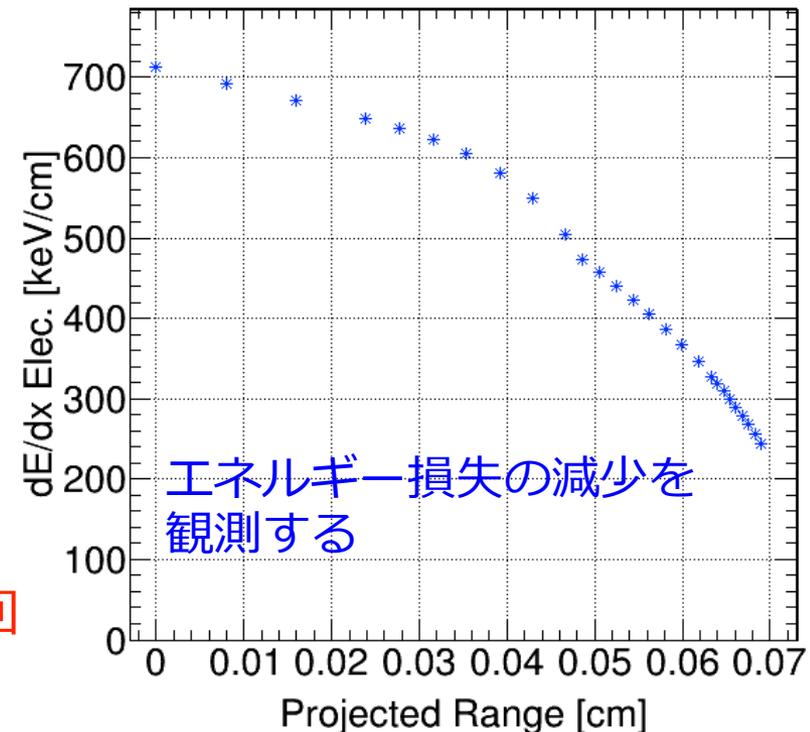


飛跡に沿ったエネルギー損失の
詳細な情報が必要。

* エネルギー損失の情報源

- 読み出し面に対して水平方向
2次元の読み出し位置での電荷情報
- 読み出し面に対して垂直方向
各時刻での電荷(FADCの波形)情報 ← 今回

CF₄ 0.2気圧、F原子核：100keV



■ 先行研究

* DM-TPC

- 飛跡の2次元的な前後判定を初観測
- エネルギー500keV以上

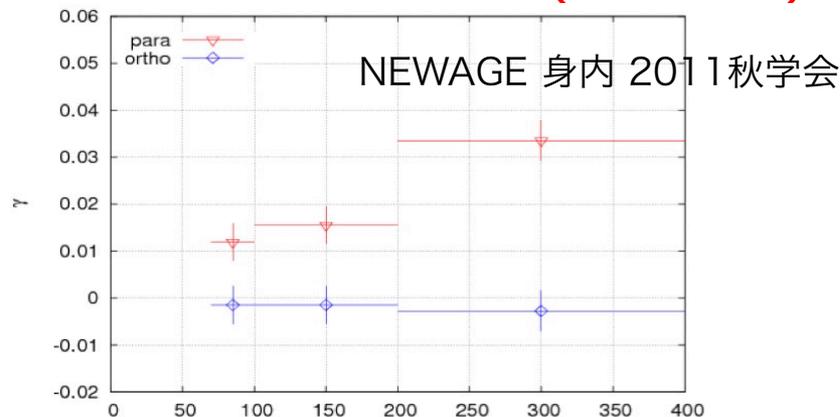
* DRIFT

- 飛跡の1次元的な前後判定を観測
- エネルギー50keV以上

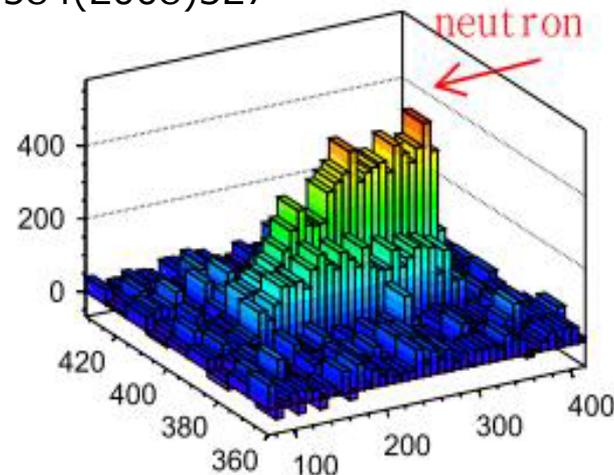
* NEWAGE(JPN)

- 飛跡の2次元的な前後判定を観測
- エネルギー70keV以上

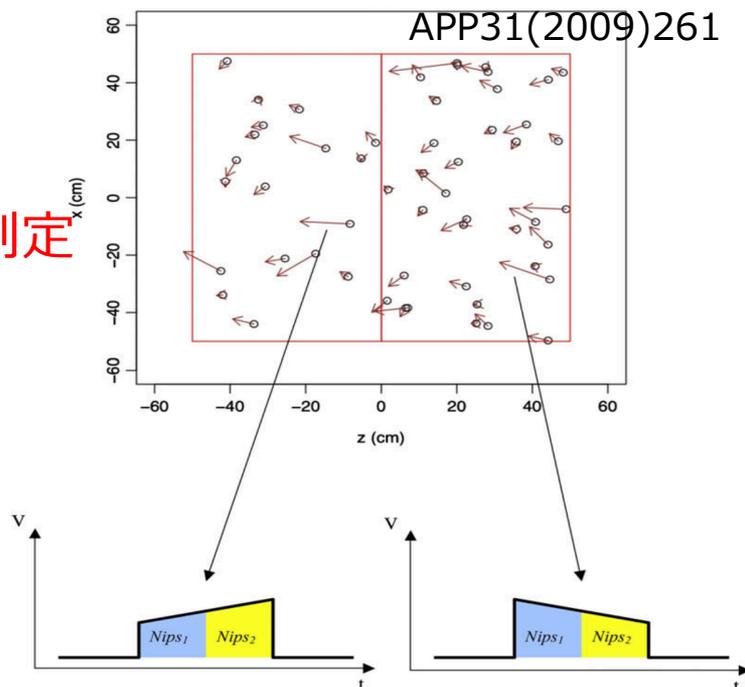
→ 本研究では残り1次元(垂直方向)の前後判定



NIM584(2008)327



APP31(2009)261



■ NEWAGE-0.1a

地上での基礎開発用の小型検出器

* 検出器の仕様

μ -TPC : $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$

μ -PIC : $10 \times 10 \text{cm}^2$ 、 $400 \mu\text{m}$ ピッチ

GEM : LCP $100 \mu\text{m}$ 、 $\phi 70 \mu\text{m}$ 、 $140 \mu\text{m}$ ピッチ

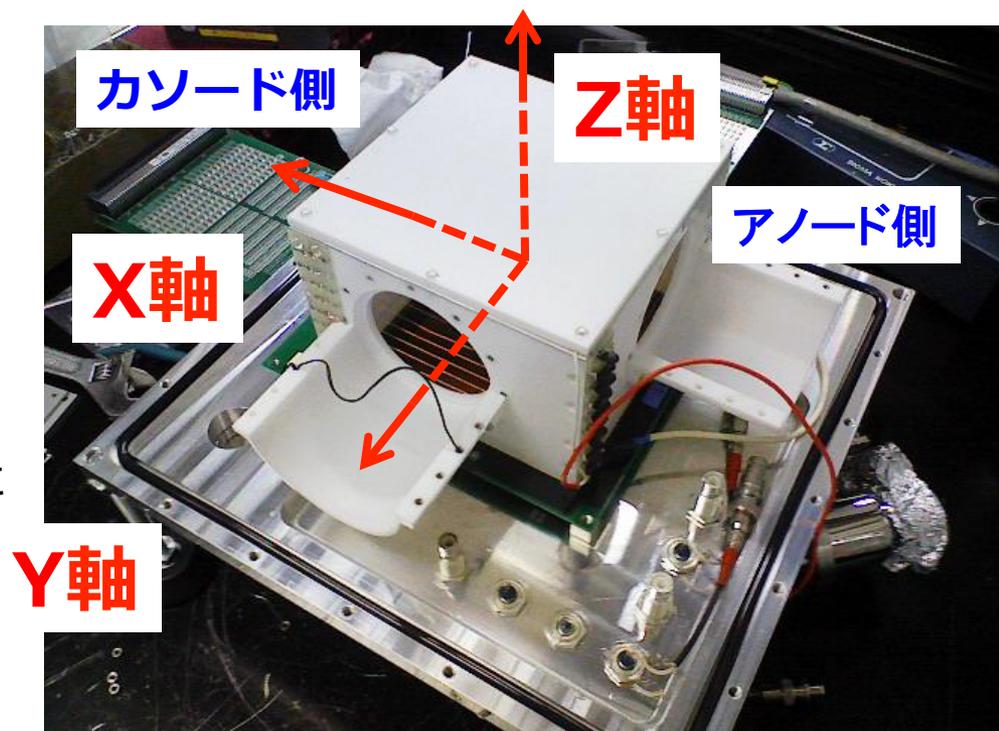
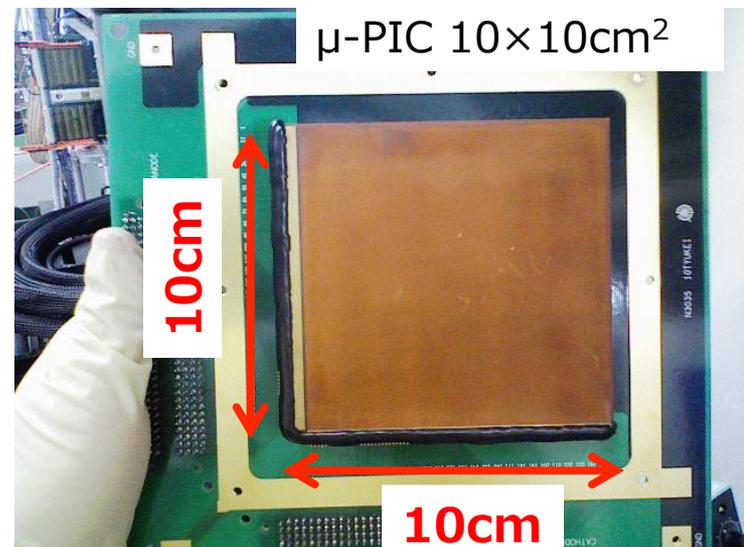
GAS : CF_4 0.2気圧、ゲイン 約3000

* 位置情報 :

アノード、カソードの
ストリップのヒット情報

* 電荷情報 :

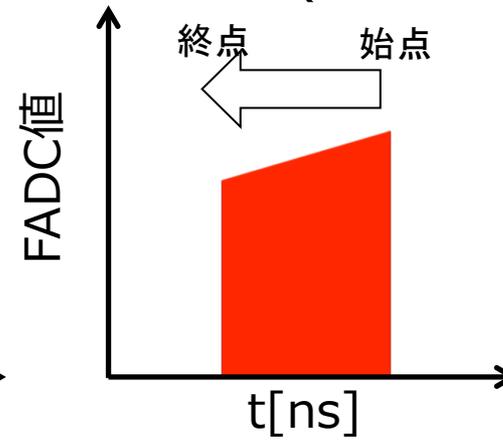
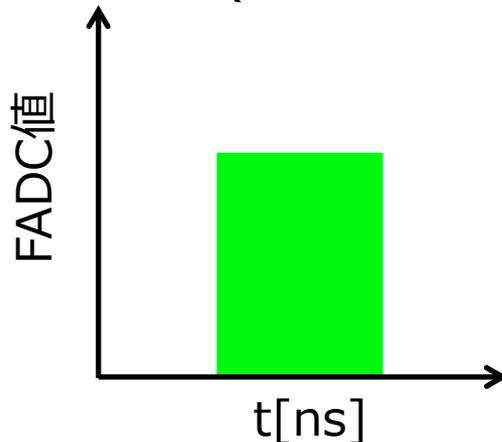
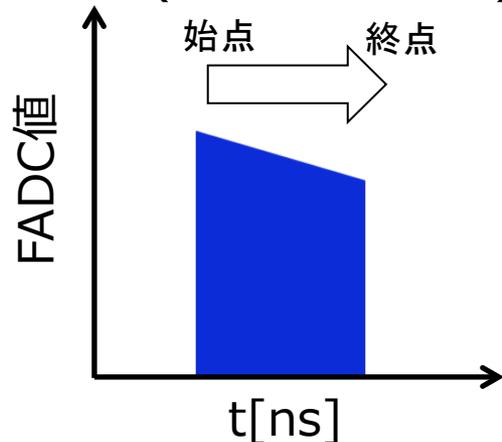
FADC(Flash ADC)のsumされた
波形情報



■ FADC波形解析

*FADC波形に期待される傾向

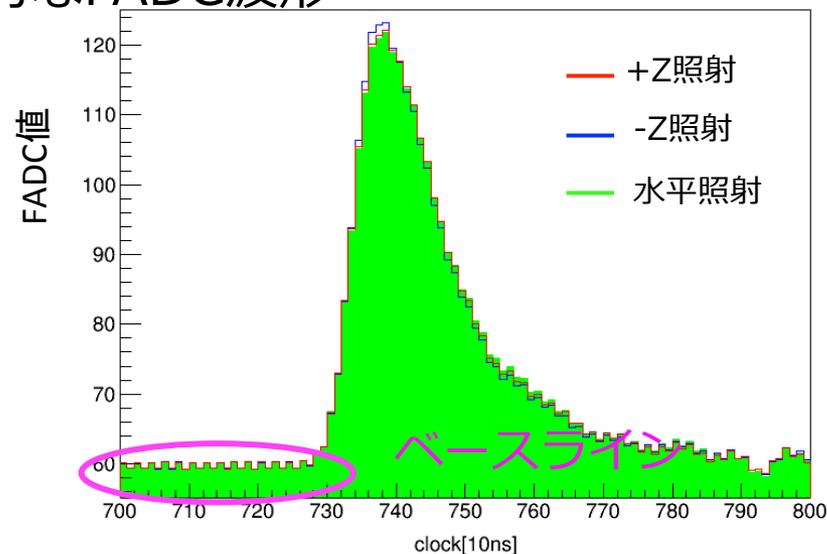
-Z照射(上向きの飛跡) 水平照射(横向き飛跡) +Z照射(下向きの飛跡)



典型的なFADC波形

*典型的な波形の作成

- 各照射ごとに波形を足し合わせる
- 事象数で規格化
- ベースラインの補正



- ±Z照射と水平照射の波形の比較

$$\text{ratio}_{\pm} = \frac{\text{FADC}_{\pm}(t)}{\text{FADC}_{\text{horizontal}}(t)}$$

ピーク位置で大小関係が逆転
→ ピーク付近のイベントを使う

*波形のピーク付近の選択

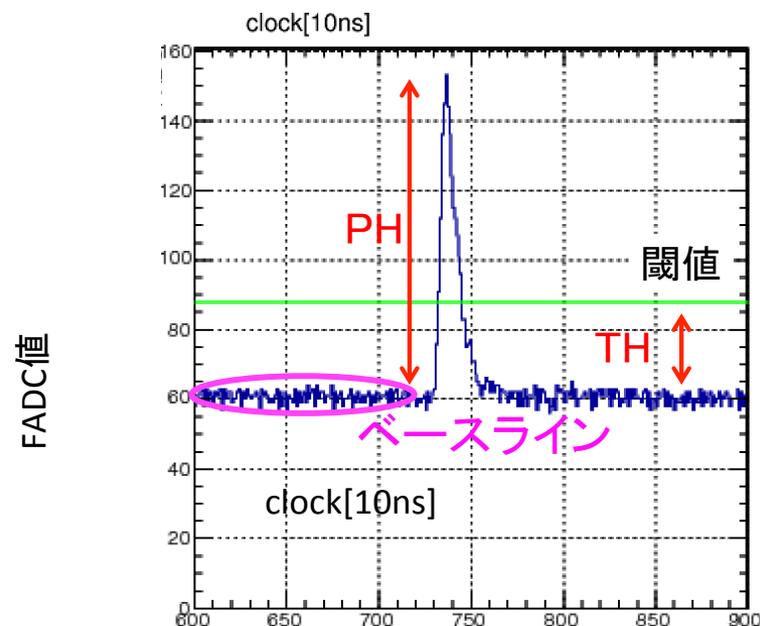
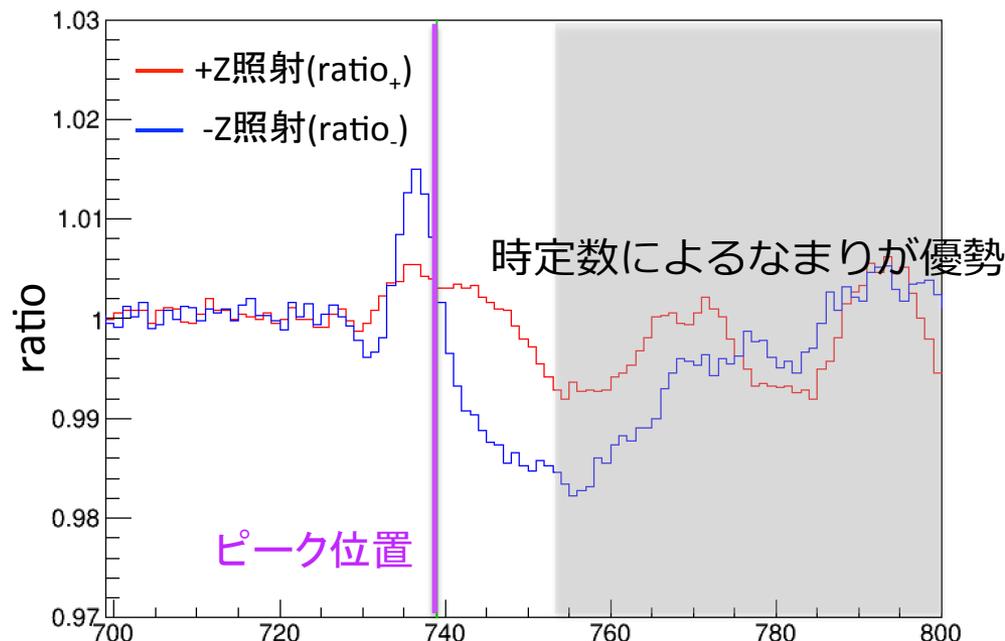
- 解析上で相対的な閾値を定義

$$\text{rTH}(\text{relative THreshold}) = \frac{\text{TH}}{\text{PH}}$$

- PH(Pulse Height) :
ベースラインからピークまでの高さ
- TH(Threshold) :
ベースラインからの閾値

rTHを大きくする

→ よりピーク付近に絞った解析を行える



■ Z方向の前後判定

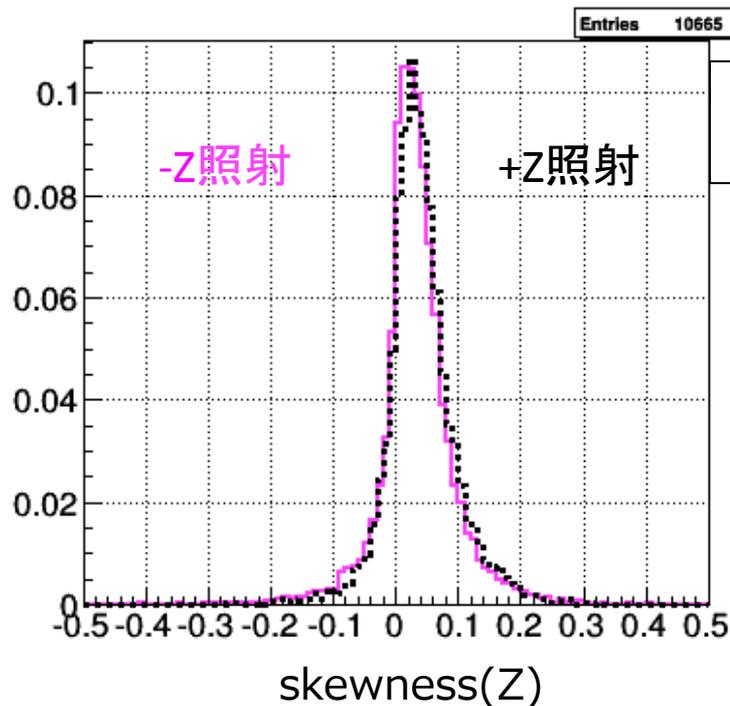
- FADC波形の非対称性を表すパラメータを定義

$$\text{skewness}(Z) = \frac{S_3}{S_2^{3/2}}$$

t: FADCのclock
 FADC(t): tにおけるFADC値
 N : bin 数

$$S_3 = \frac{\sum^N \text{FADC}(t) * (t - \langle t \rangle)^3}{N}$$

$$S_2^{3/2} = \frac{(\sum^N \text{FADC}(t) * (t - \langle t \rangle)^2)^{3/2}}{N}$$

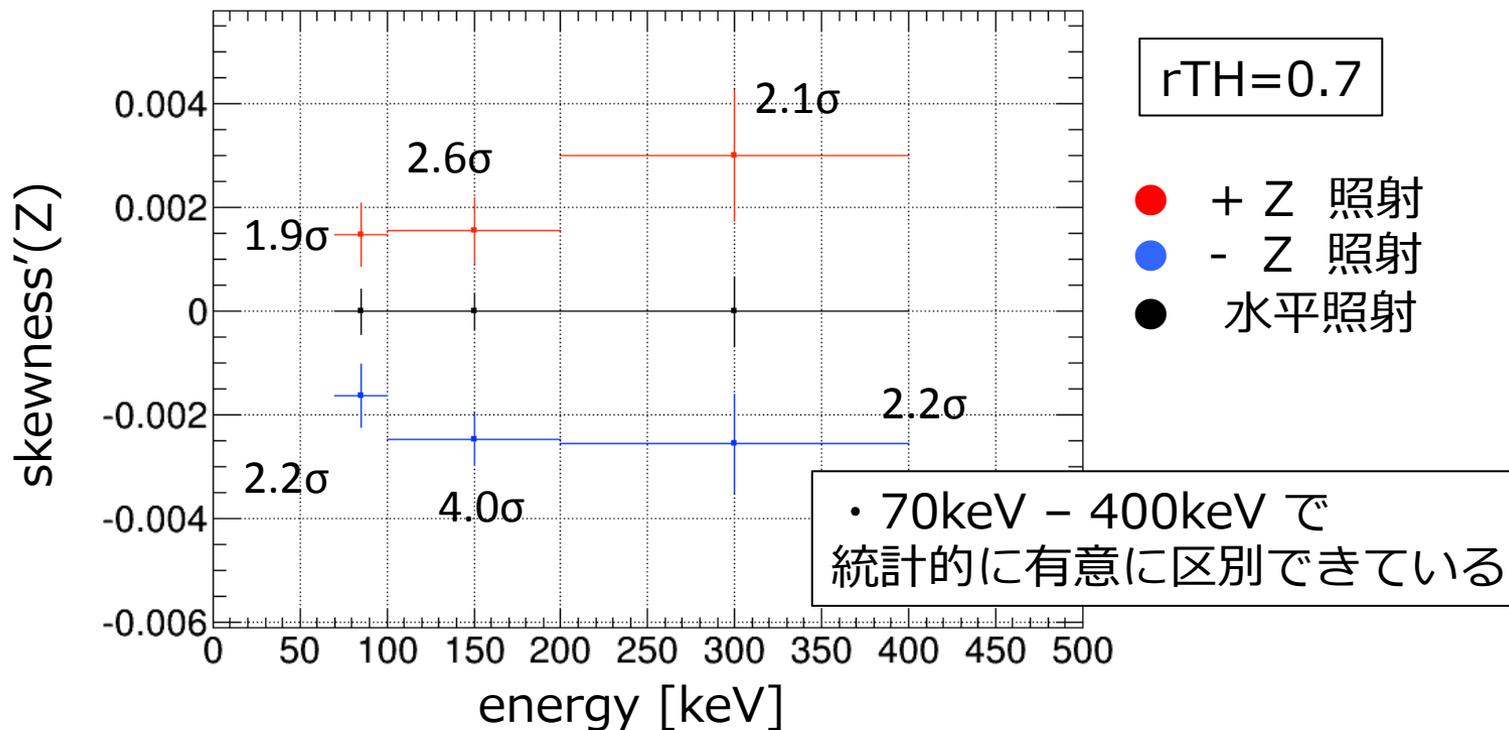


- ピークの1/10までのエントリー数を持つ bin で Fit
- 平均と標準誤差を、70-100 keV、100-200keV、200-400 keV の範囲で出す(次ページのグラフ)

■ 水平照射との比較

$$\text{skewness}'(Z) = \text{skewness}(Z) - \text{skH}$$

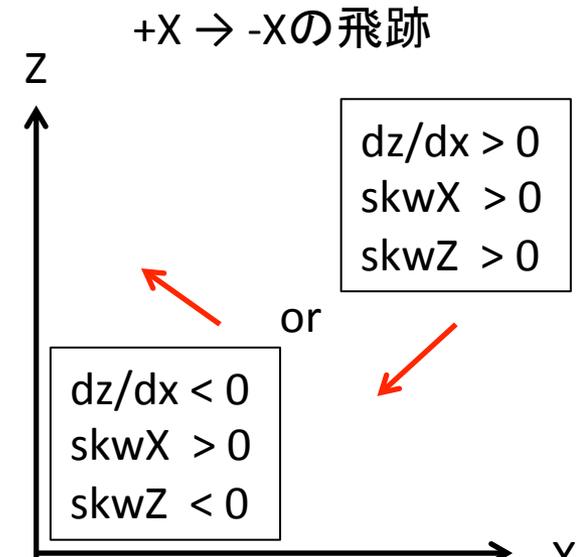
skH : 水平方向からの照射によるskewness(Z)の中心値



	全イベント数	70-100keV	100-200keV	200-400keV
+ Z 照射	14588	6219	7109	1260
- Z 照射	24771	12923	10726	1122
水平照射	86727	39079	40834	6814

■ 飛跡の3次元的な前後判定に向けて

- 原理的には方向を表す dz/dx 、 dz/dy + 前後判定パラメータ2つで判定可能
- 飛跡の向きに依存するため、全方向の飛跡について前後判定を行うには、3つの前後判定パラメータを組み合わせて使う
- 現時点では、統計的にのみ前後判定ができていただけなので、使用するパラメータの優位度を考える必要がある



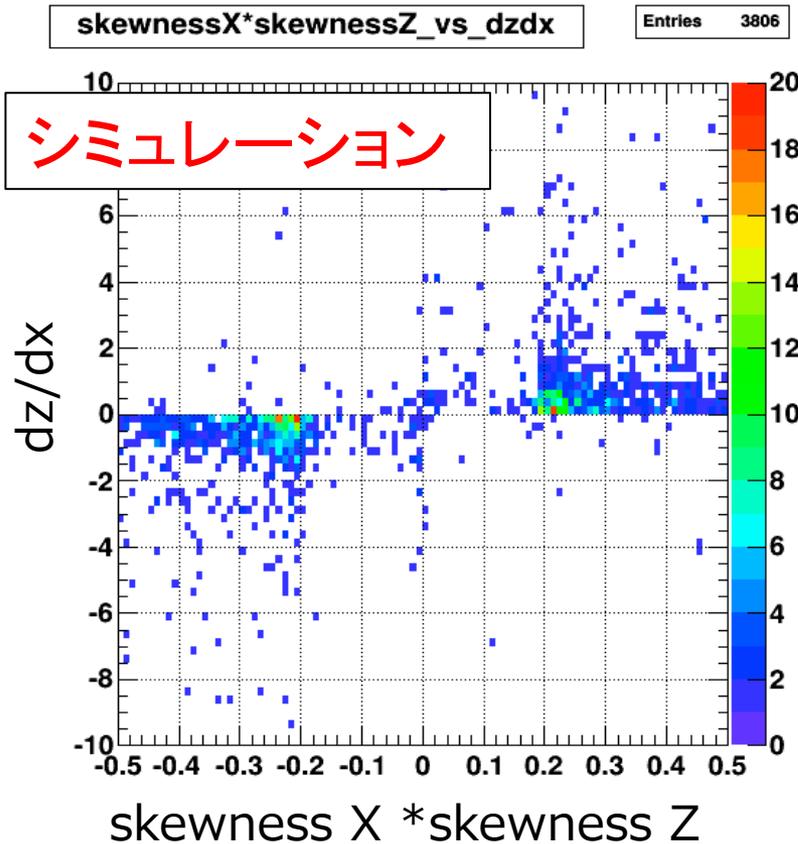
- * 3次元飛跡に対する観測量
- 飛跡長: L
 - 方向を表す: dz/dx 、 dz/dy
 - 前後判定パラメータ: skewness(X)、(Y)、(Z)

dz/dx、skewness(X)、skewness(Z)の符号関係例

例えば、+X方向からの照射を考えた場合に、 dz/dx と、 $skewness X * skewness Z$ の符号が一致することに注目する

	dz/dx	skewness(X)	skewness(Z)
+X照射	+	+	+
	-	+	-
-X照射	+	-	-
	-	-	+

■ 前後判定パラメータの優位度



* シミュレーションによる評価

- 検出器の特性は入れていない
 - 252Cfからの中性子をCF4 0.2 気圧に +X 方向から照射したもの
 - dz/dxと、skewness(X)*skewness(Z)の符号が一致
- 前後判定パラメータの優位度を定義可能

- 期待される関係を持つ事象を選ぶことで、前後判定の判別度の向上の可能性あり
- 今後は、検出器の特性を考慮に入れてより現実的な条件の下でのシミュレーションによる評価を行う必要がある

まとめ

- FADCの波形情報からZ方向に対する反跳原子核飛跡の前後判定を行った。
- 前後判定パラメータ skewness Z' を用いることにより、70 - 400 keV 領域で統計的に判定可能という結果が得られた
- ~10000 イベントでやっと分離出来る程度
- 飛跡の3次元的な前後判定に対しては、 $l, dz/dx, dz/dy, skewness X, Y, Z'$ 間に予想される関係を用いて、前後判定パラメータの有意度が定義可能であることが示唆された

今後

- 検出器の応答を入れたより現実的なシミュレーション
- イベント毎に前後判定ができるようなパラメータの考察

backup

■ Z方向の前後判定

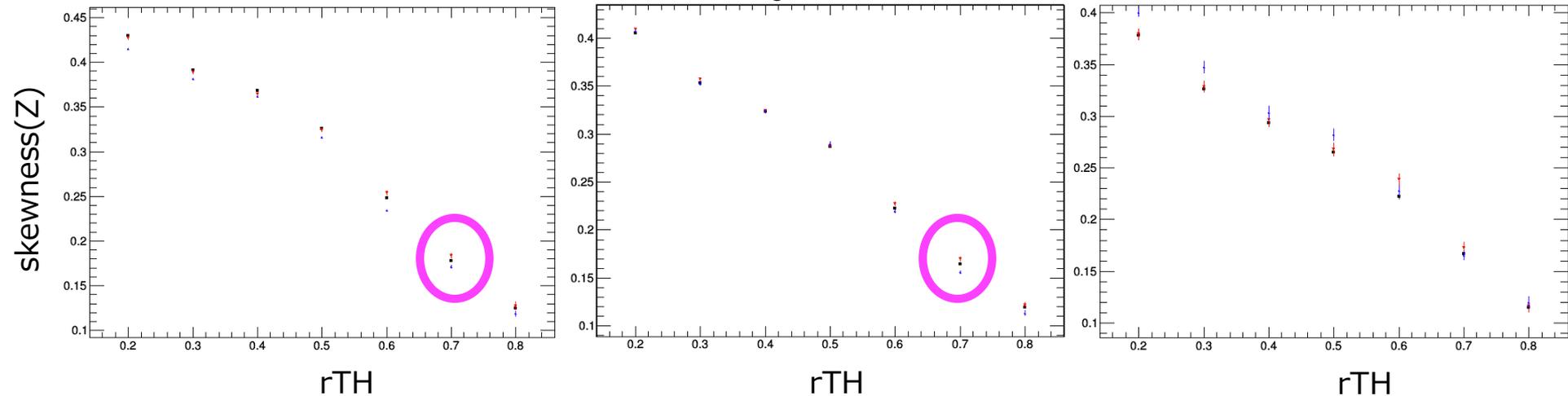
- FADC波形の非対称性を表すパラメータを定義

$$\text{skewness}(Z) = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$$

$$m_n \equiv E[(t - \langle t \rangle)^n] = \int_{-\infty}^{\infty} dt (t - \langle t \rangle)^n \cdot \frac{FADC(t)}{\int FADC(t) dt}$$

- + Z 照射
- - Z 照射
- 水平照射

$$\langle t \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{t \cdot FADC(t)}{\int FADC(t) dt}$$

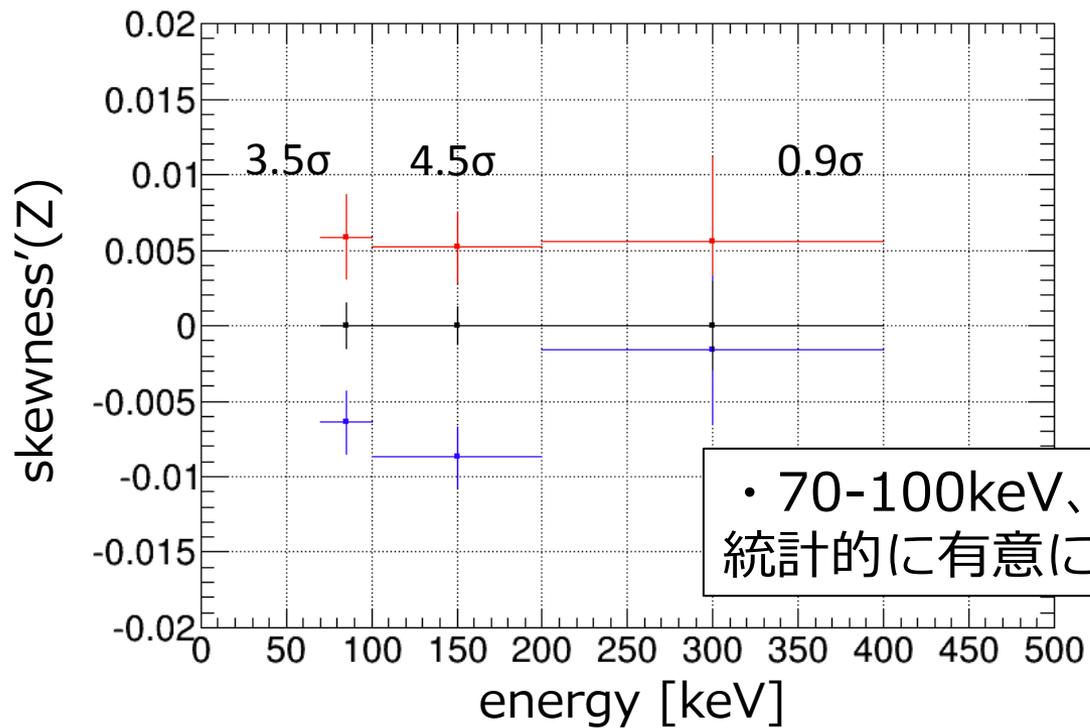


- rTH=0.7 で最も区別できる

■ 水平照射との比較

$$\text{skewness}'(Z) = \text{skewness}(Z) - \text{skH}$$

skH : 水平方向からの照射によるskewness(Z)の中心値



rTH=0.7

・ 70-100keV、100-200keV で統計的に有意に区別できている

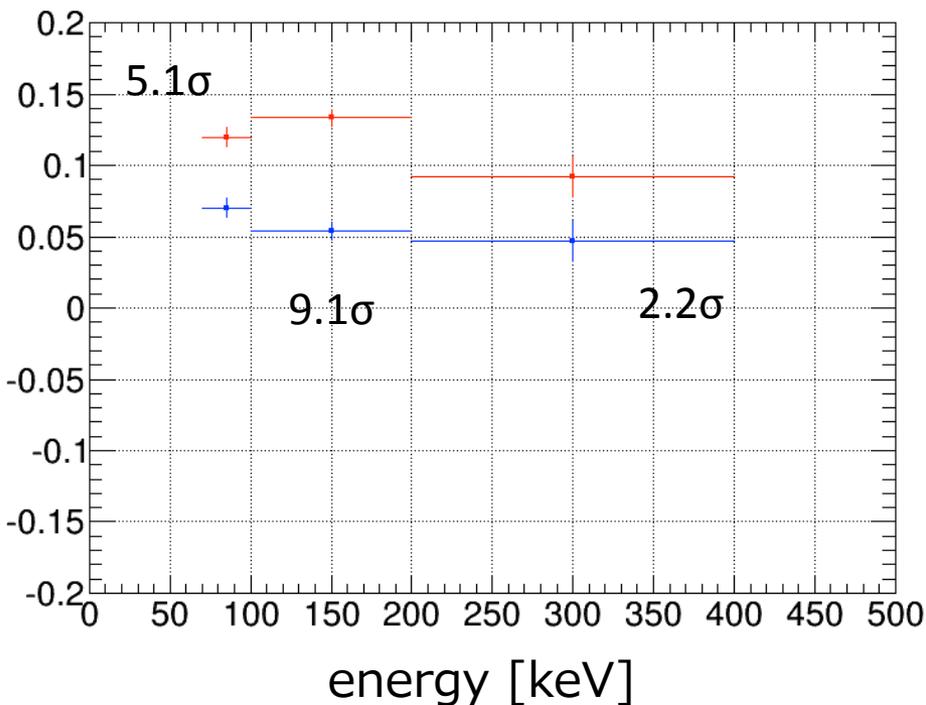
■ X, Y 方向の前後判定

$$\text{skewness}(X),(Y) = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$$

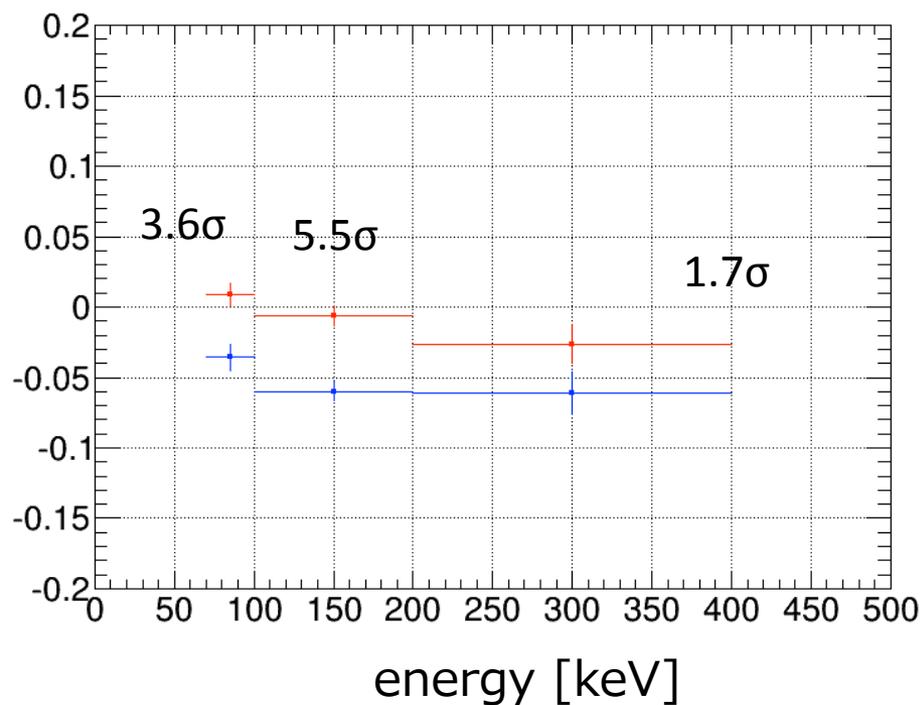
ストリップの重心に対する
 m_3 : 3次のモーメント
 m_2 : 2次のモーメント

rTH=0.7

skewness(X)



skewness(Y)

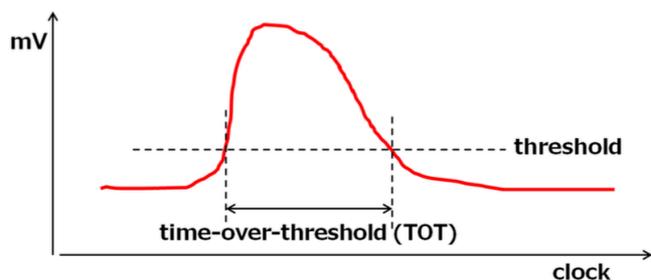


- 70-100keV、100-200keV で統計的に有意に区別できている

イベント例

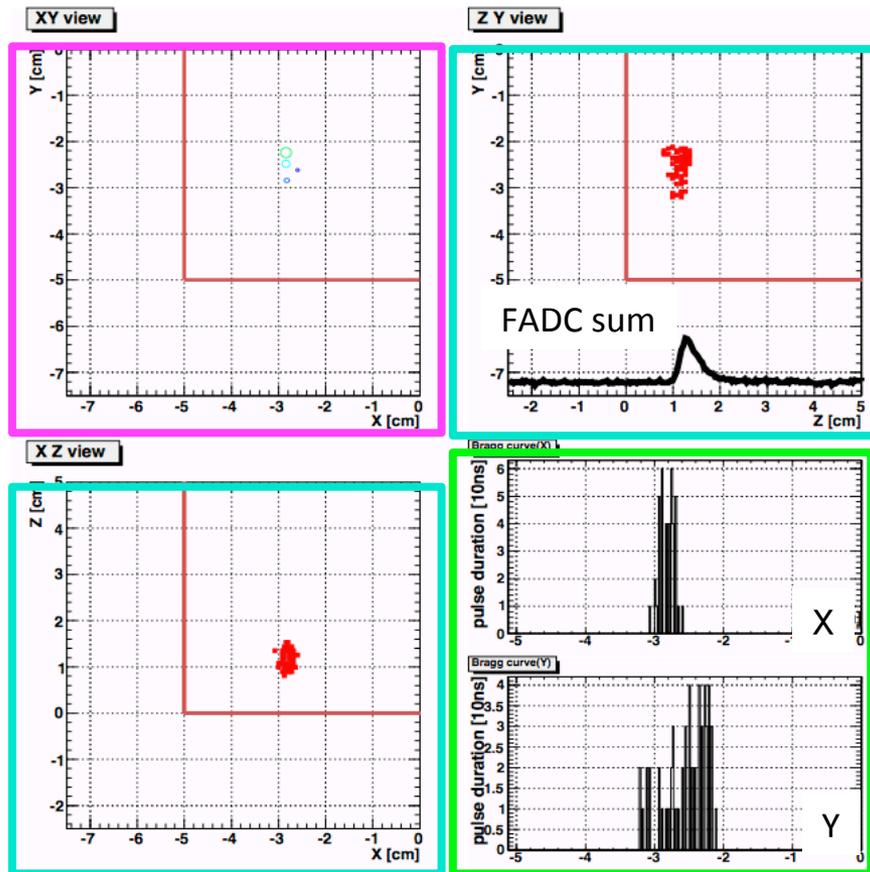
+Y方向から中性子を照射
反跳エネルギー130keVの原子核事象

- ヒット情報の生データ
→ ストリップとTOT (Time-Over-Threshold)



TOTは各ストリップでの電荷情報に対応
→ 水平方向の前後判定に使用可能

- 生データと相対的な立ち上がり時刻
FADCのsumされた波形



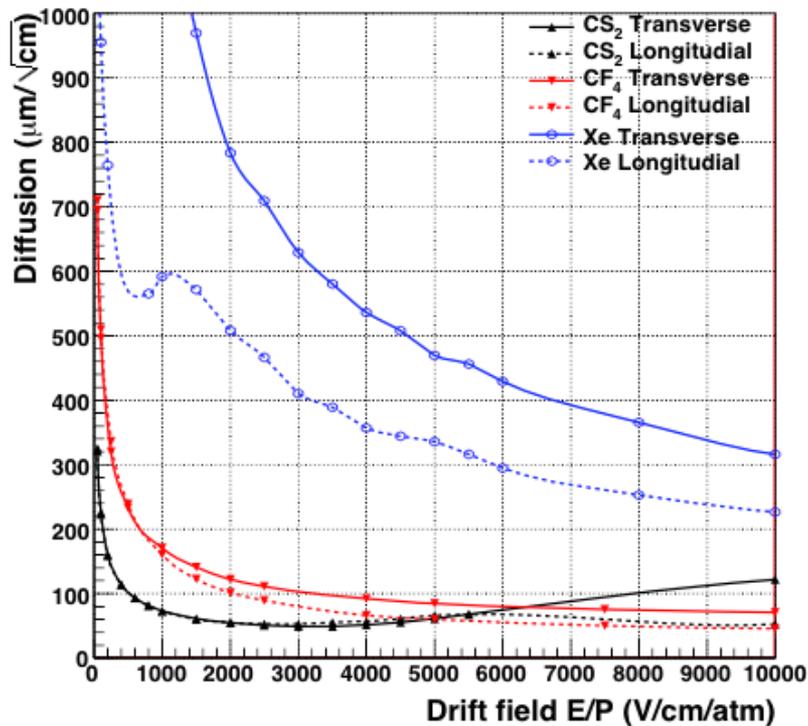
※ 赤線で囲まれた領域は μ -TPCの有効領域を示す

- アノード、カソードのコインシデンスヒット

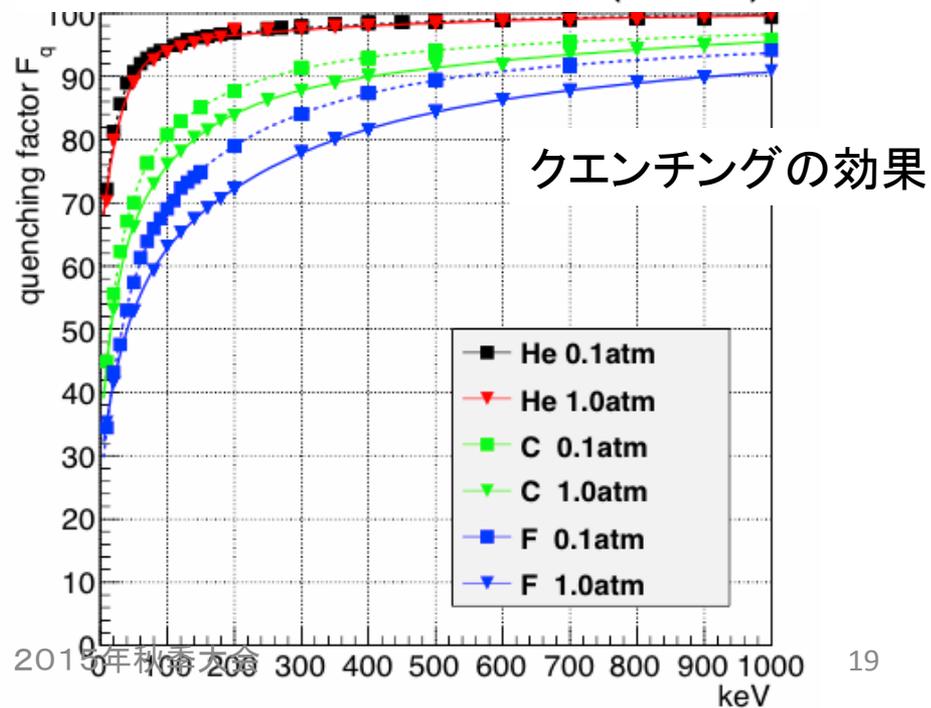
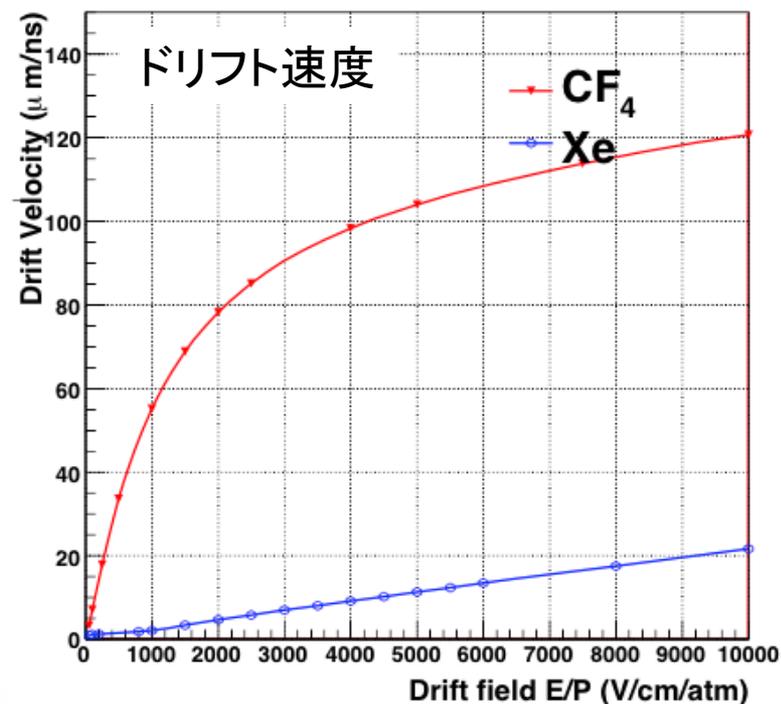


垂直方向の前後判定にはFADCの波形情報を用いる

CF₄ガスについて



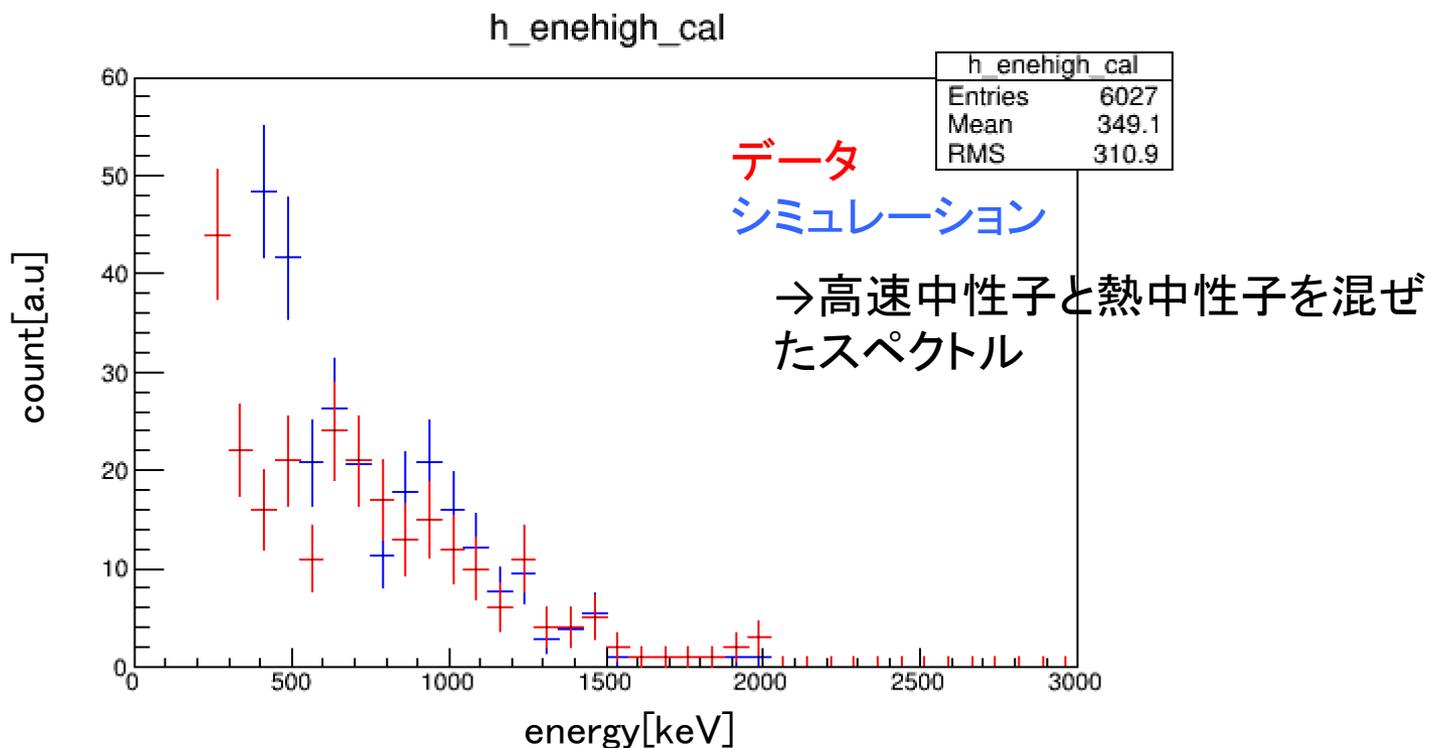
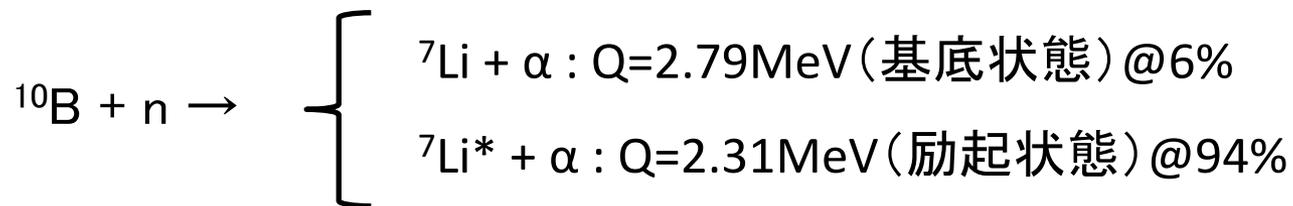
- ドリフト速度が速い
- 電子拡散が少ない
- 有毒でなく、取り扱いやすい



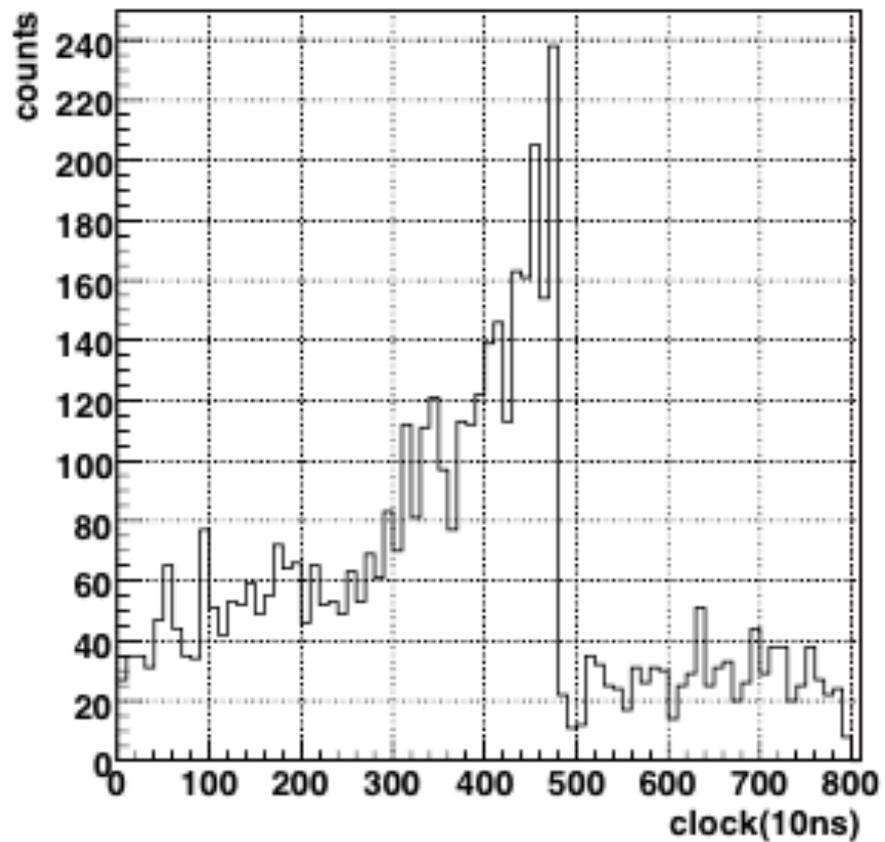
クエンチングの効果

キャリブレーション

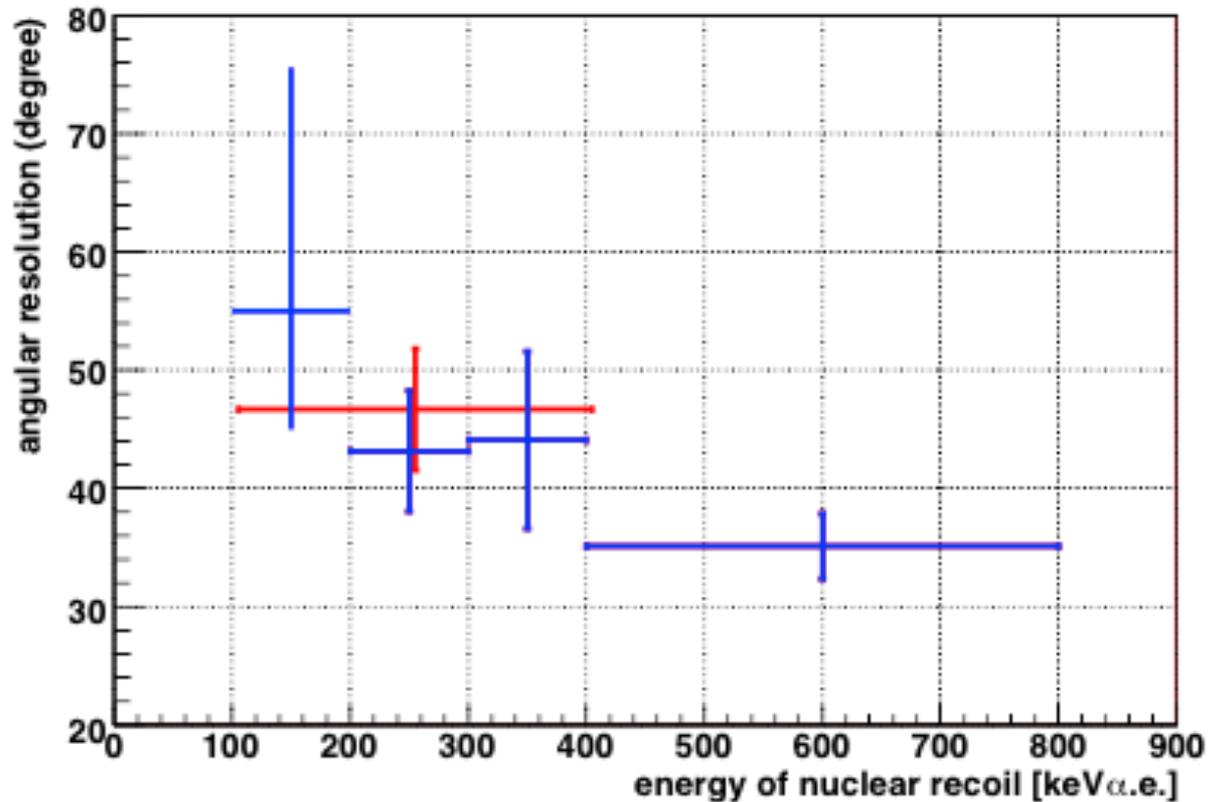
熱中性子の ^{10}B による吸収反応によって生じる α 線を用いたエネルギー校正



ドリフト速度

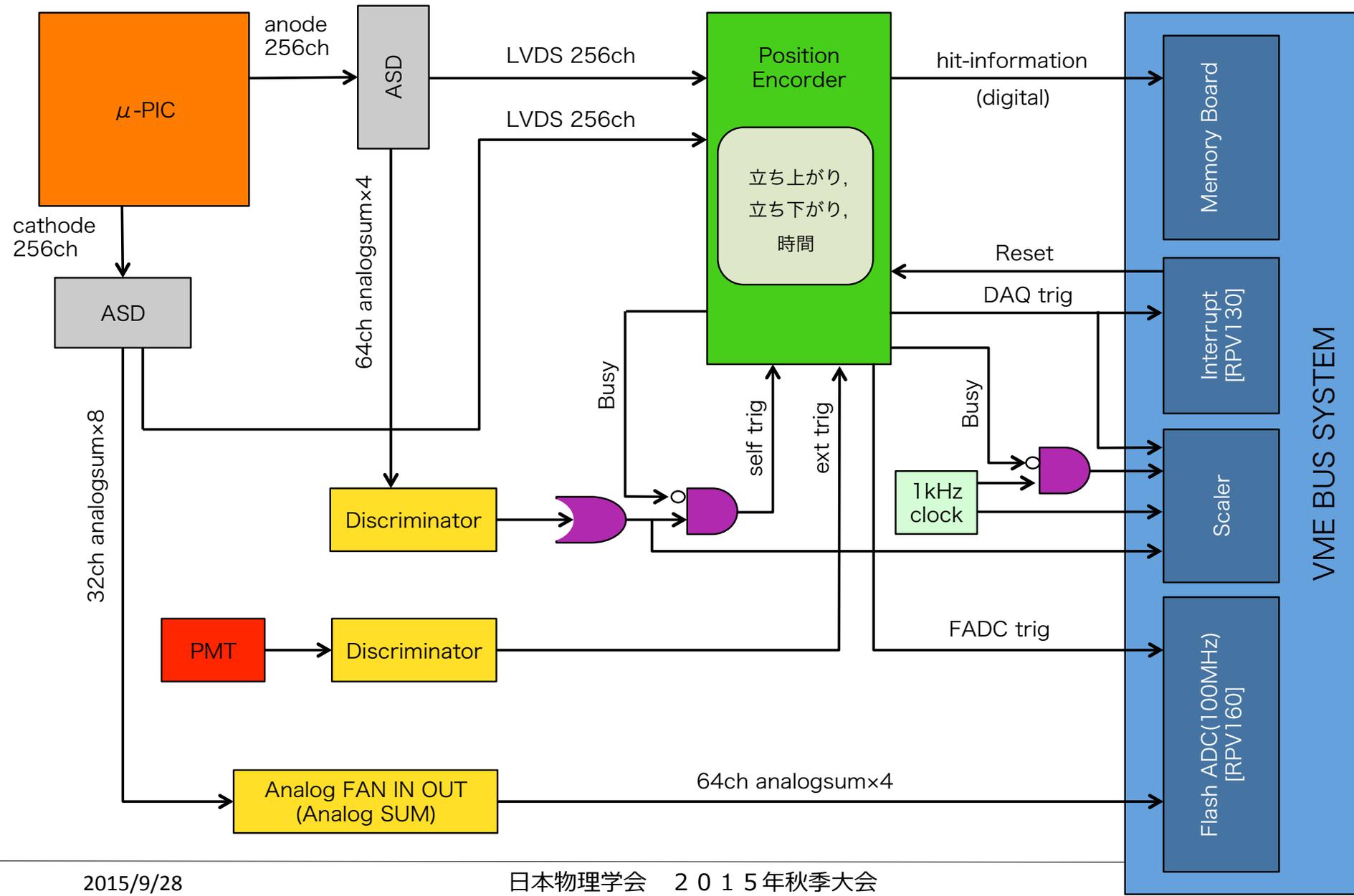


角度分解能



先行研究より100-400keVにおいて、角度分解能は $46 \pm 3\sigma$ と求められた

データ収集フローチャート



パラメータの得意・不得意

■ 前後判定パラメータ1つの場合

dz/dx 、 dz/dy + skewness(X)

- X方向 ⊙
- Y方向、Z方向 △

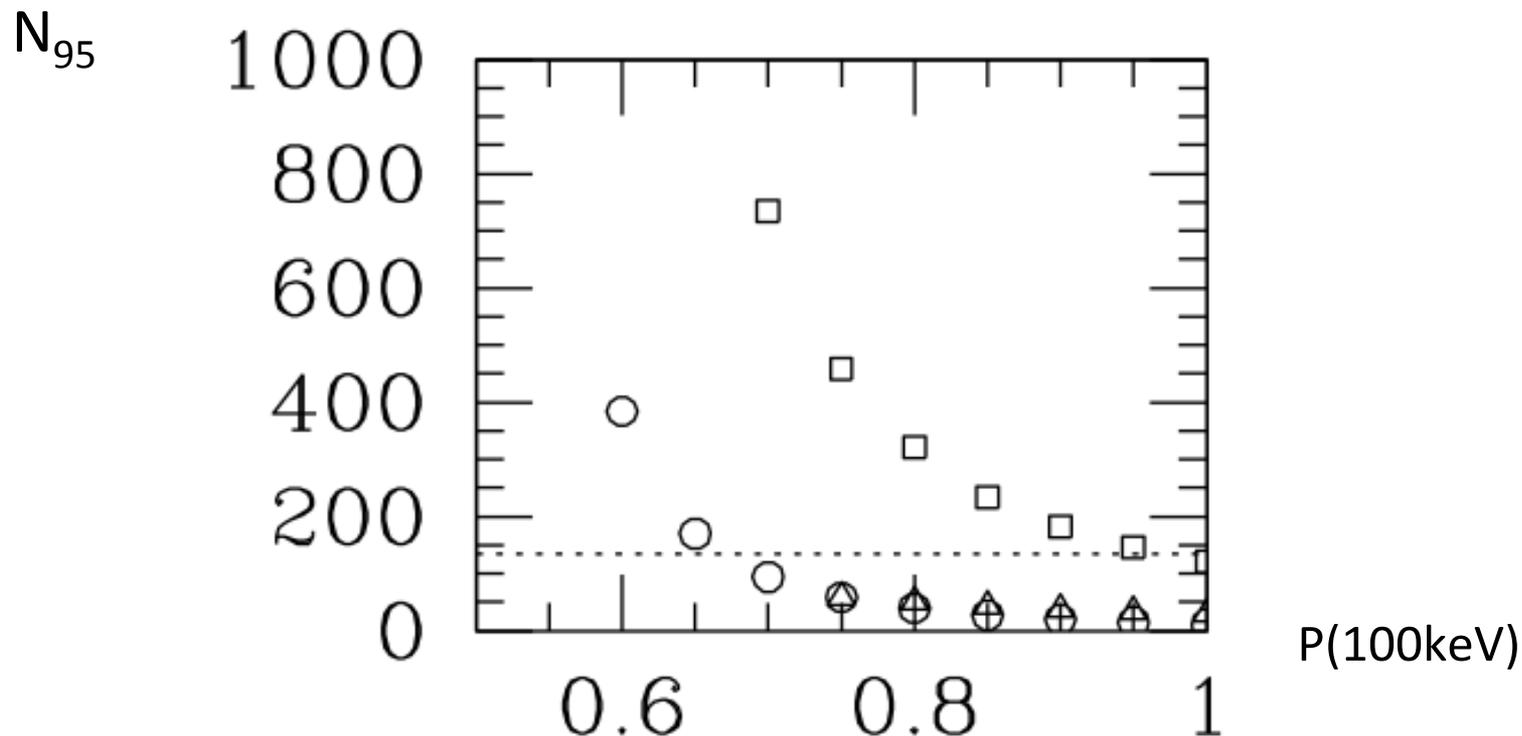
■ 前後判定パラメータ2つの場合

dz/dx 、 dz/dy + skewness(X)、skewness(Y)

- XZ平面 ⊙
- YZ平面 △
- + α : 前後判定の優位度が定義可能

どのくらいの判定率が必要か

‘Consequences of statistical sense determination for WIMP directional detection’,
PRD ‘08, arXiv:0711.2234



- : $P(E)=\text{const}=P(100 \text{ keV})$ (判定率100%)
- △: $P(20 \text{ keV})=0.75$ (判定率75%)
- : $P(20 \text{ keV})=0.5$ (判定出来ない場合)