

NEWAGE実験57

2020年地下実験経過報告

16aSK-1 9:15-

島田 拓弥

身内賢太郎 石浦宏尚 窪田諒

神戸大学粒子物理研究室 **NEWAGE**

2020年09月16日 日本物理学会 2020 秋季大会

INDEX

◎ INTRODUCTION

- ▶ NEWAGE実験・実験背景

◎ MY WORK

- ▶ ガンマ線除去
 - 多変量解析
- ▶ 飛跡の前後判定
- ▶ RUN23-24データの物理解析
 - WIMP-proton SD散乱断面積 制限曲線

INTRODUCTION -NEWAGE実験-

◎ NEWAGE : 方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験

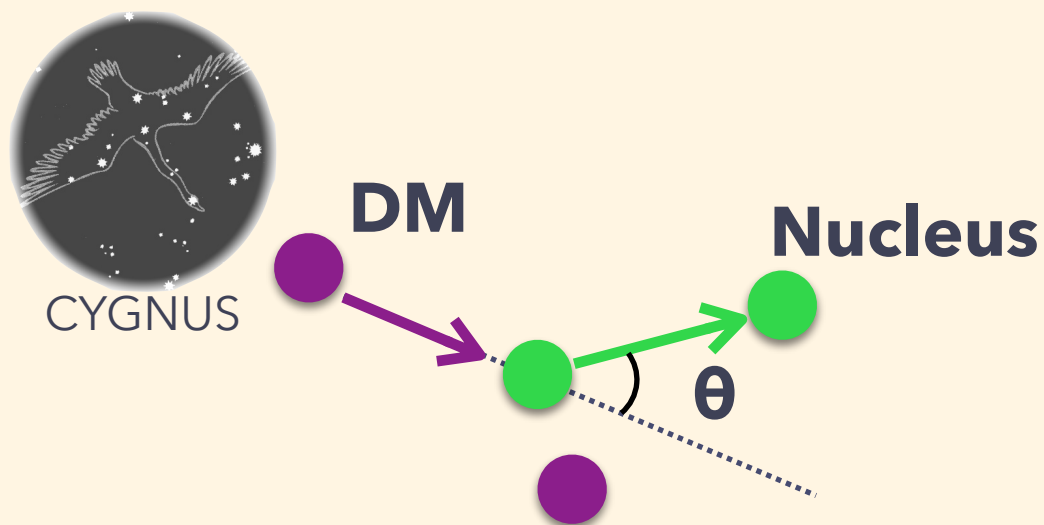
▶ μ -PICと μ -TPCを用いて

暗黒物質の到来方向異方性の観測を目指す

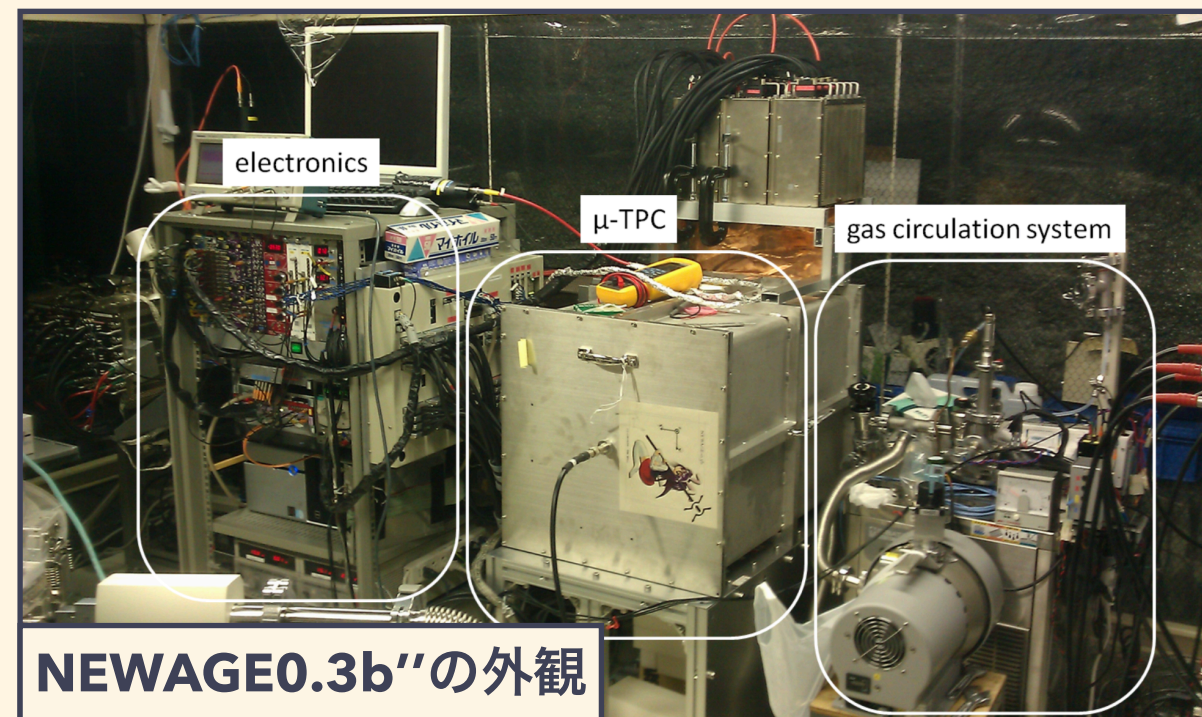
場所 : 神岡地下研究施設

検出容量 : $31 \times 31 \times 41 \text{ cm}^3$

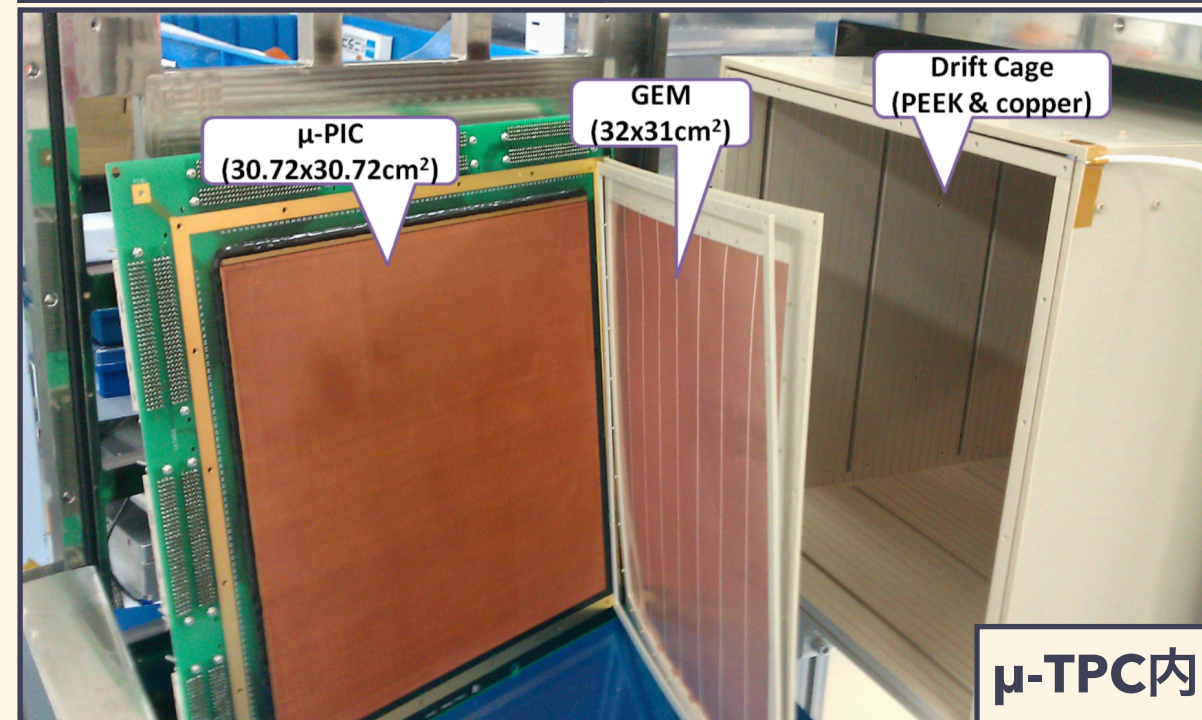
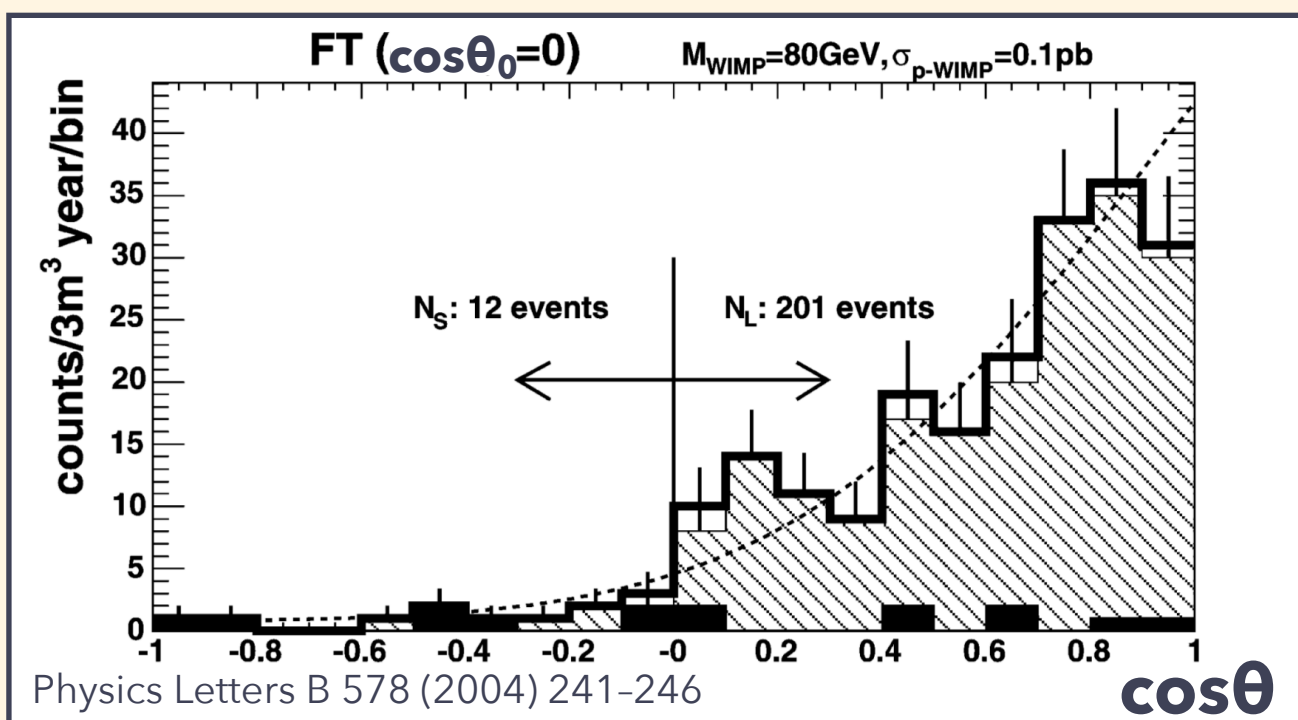
ガス : CF_4 76Torr



到来方向異方性は暗黒物質の強い証拠



NEWAGE0.3b''の外観



μ-TPC内

NEWAGEの現在の制限

- ◎ WIMP-proton SD散乱断面積への制限

- ◎ RUN14-18

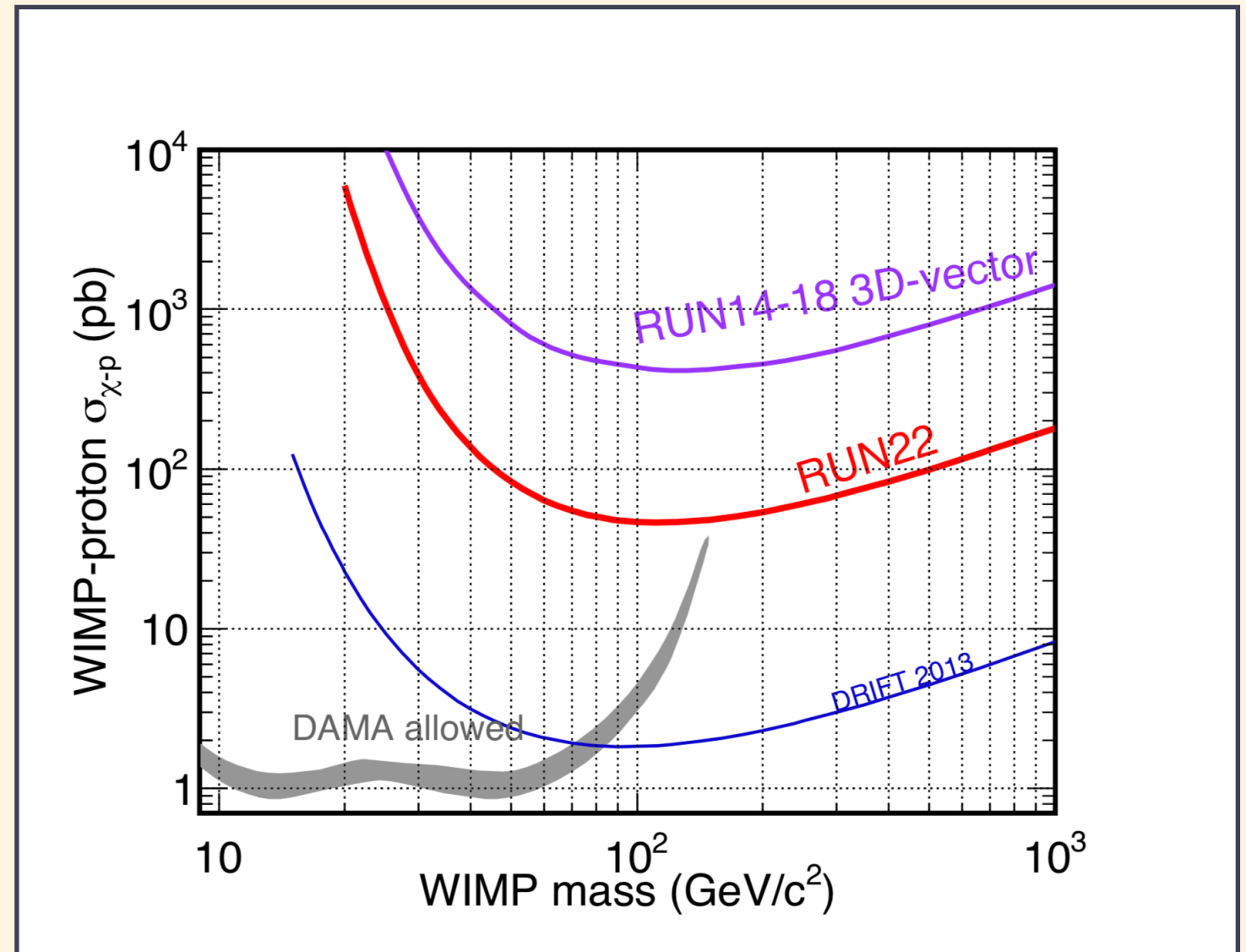
- ▶ 前後判定を用いた解析
- ▶ [arXiv:2005.05157](https://arxiv.org/abs/2005.05157)

- ◎ RUN22

- ▶ L μ -PICを用いた測定

- ◎ **MY WORK**

- ▶ ガンマ線除去
 - RUN22より**ゲインの高い測定**
- ▶ **前後判定**を用いた解析
- ▶ **2019年測定データ解析 (RUN23-24)**



ガンマ線除去

多変量解析

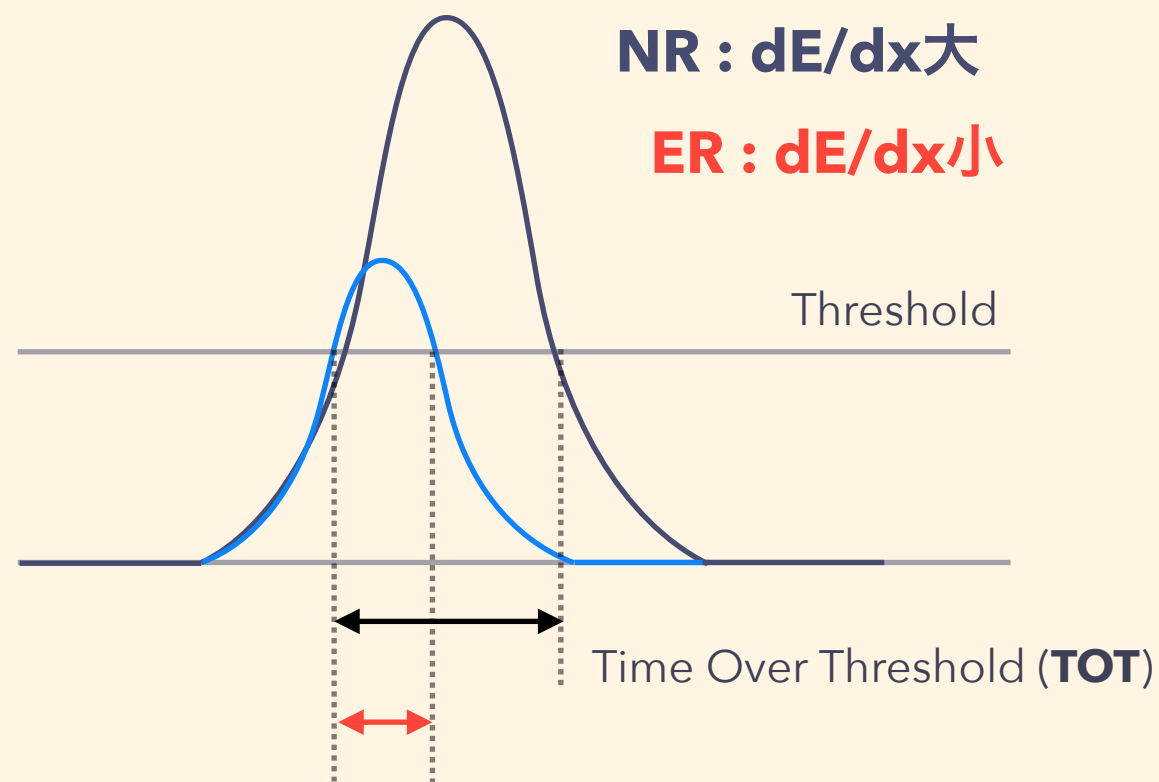
ガンマ線事象除去

- ◎ 暗黒物質(WIMP)探索 -> 原子核反跳(NR)を捉えたい
 - ▶ ガンマ線による**電子反跳(ER)**は見たくない (10^{-6} レベルの除去能力が必要)
- ◎ 現在のNEWAGE実験におけるガンマ線バックグラウンドカット条件
 - ▶ **Energy-Length cut** : 飛跡の長さの違い
 - ▶ **Energy-TOT cut** : dE/dx の違い



Energy-Length cut

1ストリップの波形

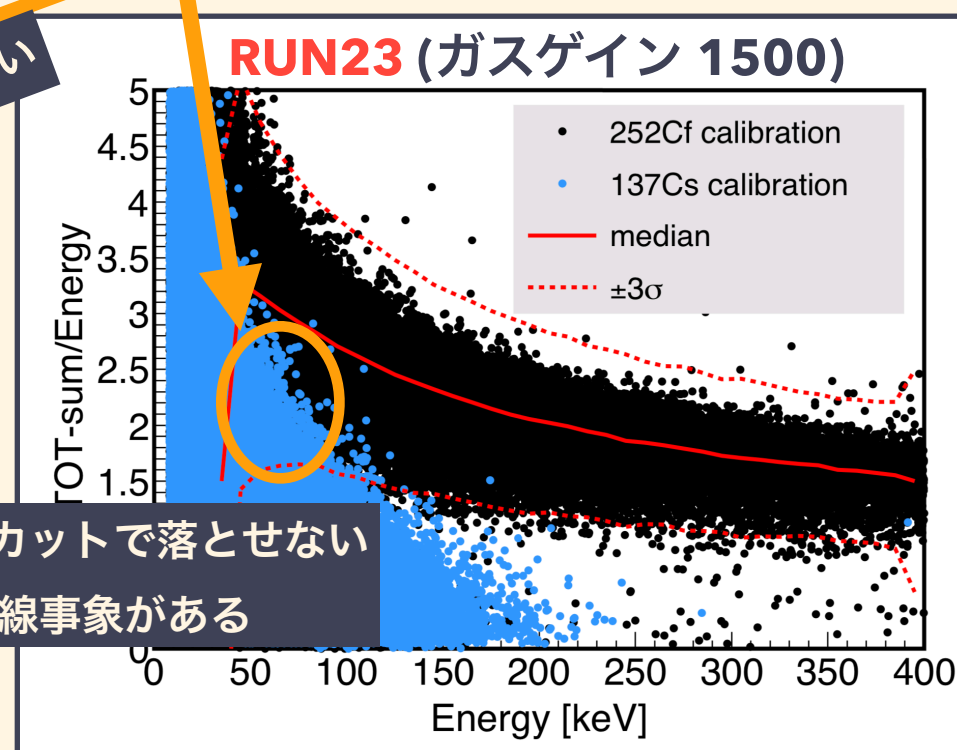
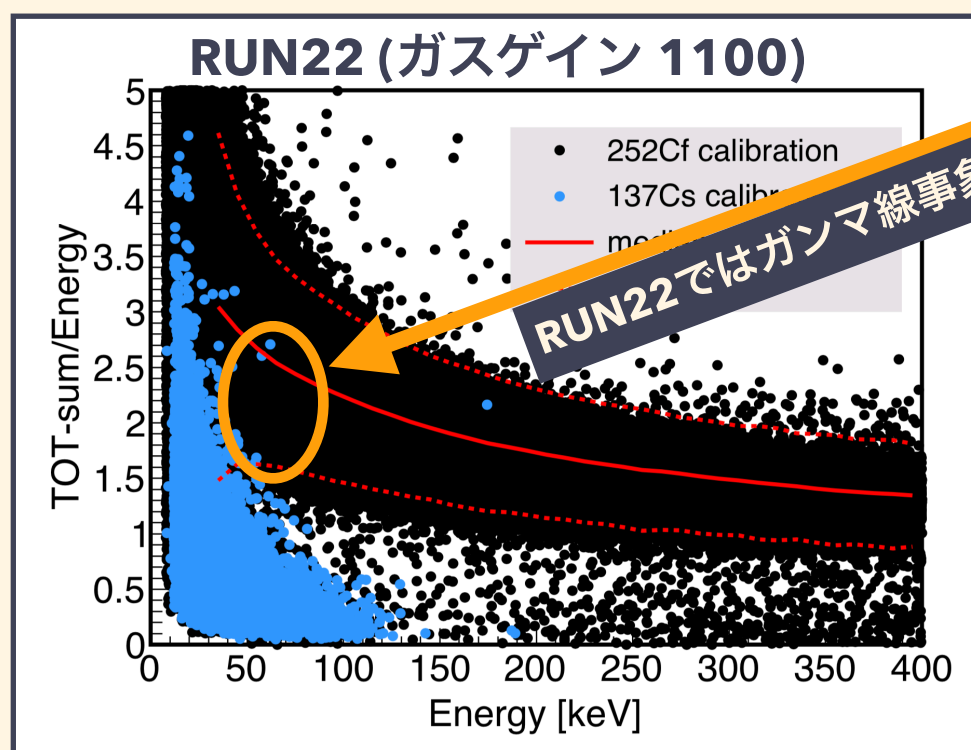


Energy-TOT cut

NEWAGE実験の現状(ER除去)

- 検出効率とER事象除去能力はトレードオフ
- TOT-sum/Energy v.s. Energy分布で比較 (・ER事象・NR事象)

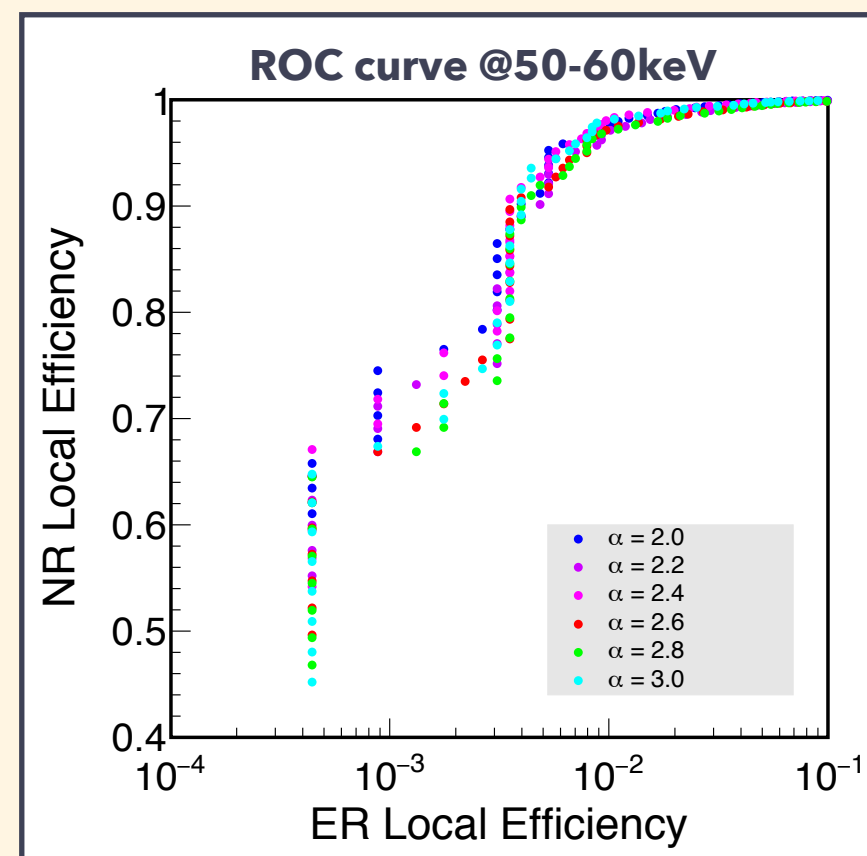
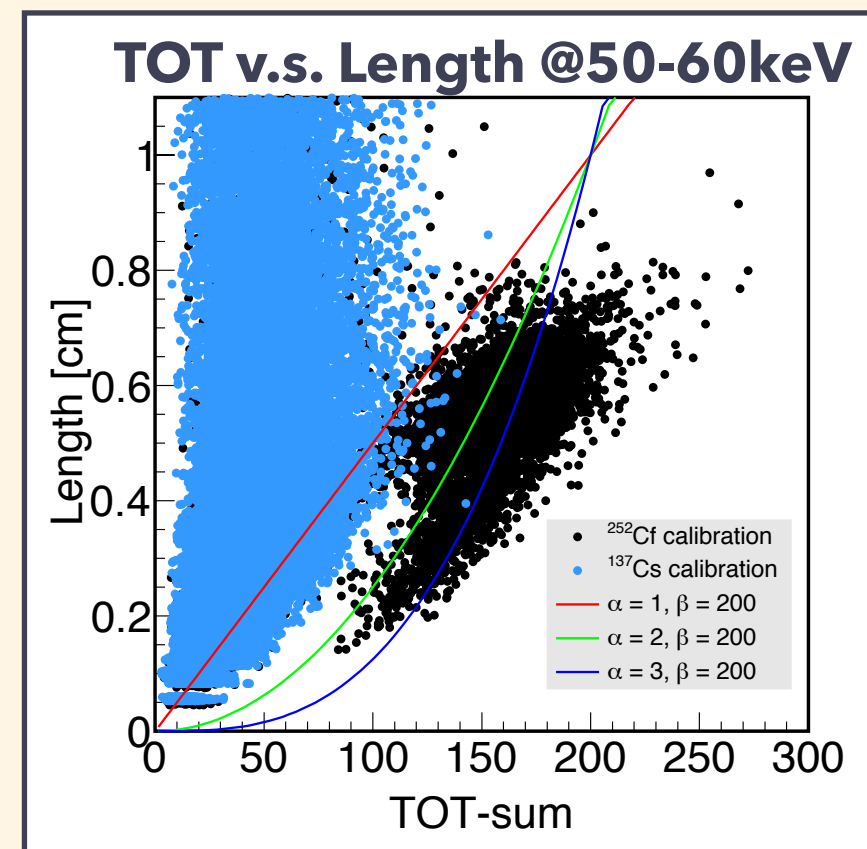
- ▶ 下図の赤の点線内でカットをかける
- ▶ **RUN23**では従来のカットでは50-60keV領域でERとNRを見分けられない



ガスゲイン	原子核反跳 検出効率	電子反跳 検出効率	ガンマ線事象 除去能力
1100 (RUN22)	低い(0.35)	低い($\sim 10^{-6}$)	高い
1500 (RUN23)	高い(~ 0.5)	高い($\sim 10^{-4}$)	低い <- 高くしたい

TOTとLengthの2変数を用いた解析

- 新しいカットパラメータの導入
 - ▶ ^{137}Cs 測定と ^{252}Cf 測定を用いてカットを決定する
 - ▶ **TOT**と**Length**の2つのパラメータを用いる
- 50-60keVの**TOT v.s. Length**の分布(右図)
 - ▶ **Length = (TOT/ β) $^\alpha$** 曲線でカット
- Figure Of Merit (FOM) の決定
 - ▶ **ROC curve**を用いる (ROC : Receiver Operating Characteristic)
 - NR Local Efficiency : (カットで残った中性子事象)/(全中性子事象)
 - ER Local Efficiency : (カットで残ったガンマ事象)/(全ガンマ事象)
 - ▶ 下図 : ある α での β を変化させたときのROC curve
 - ▶ **FOM : ROC curve**グラフでの**(0,1)**との近さ
 - 本測定では **$\alpha = 2.4$** に決定した (右下図より)
 - β に関しては次のスライドで決める



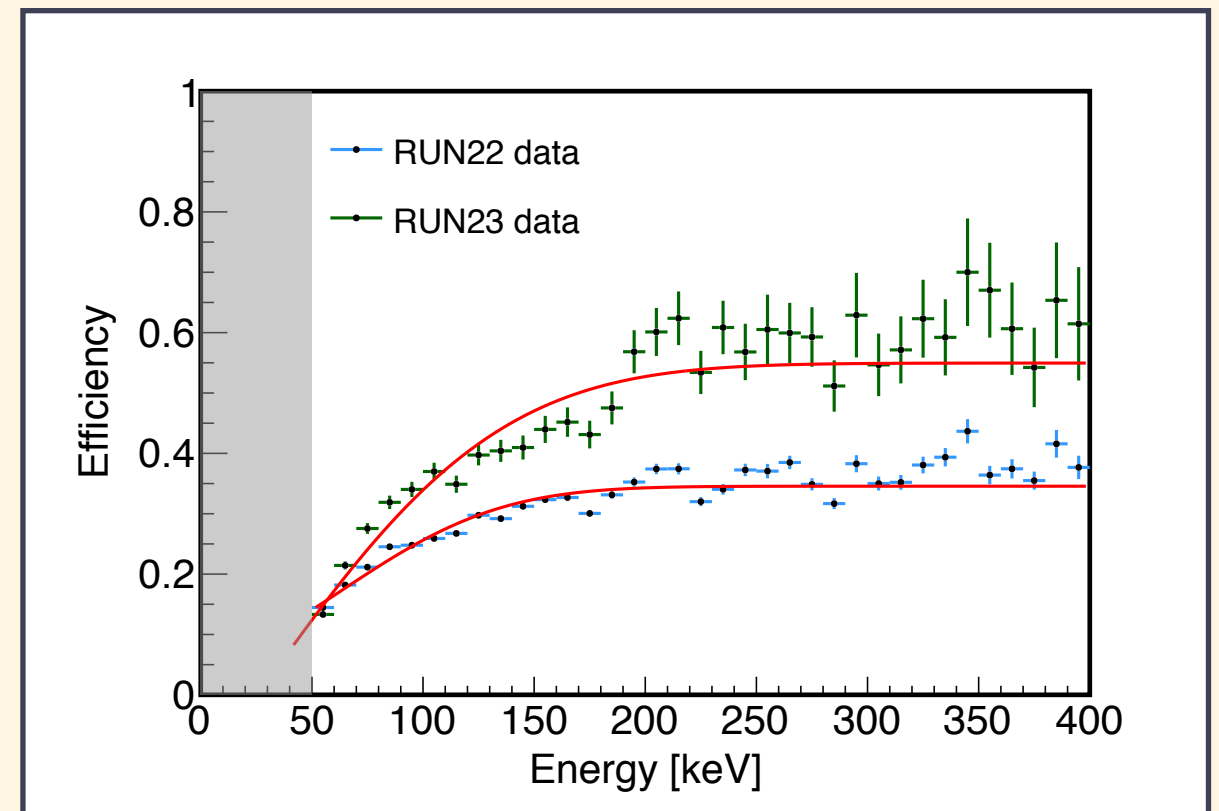
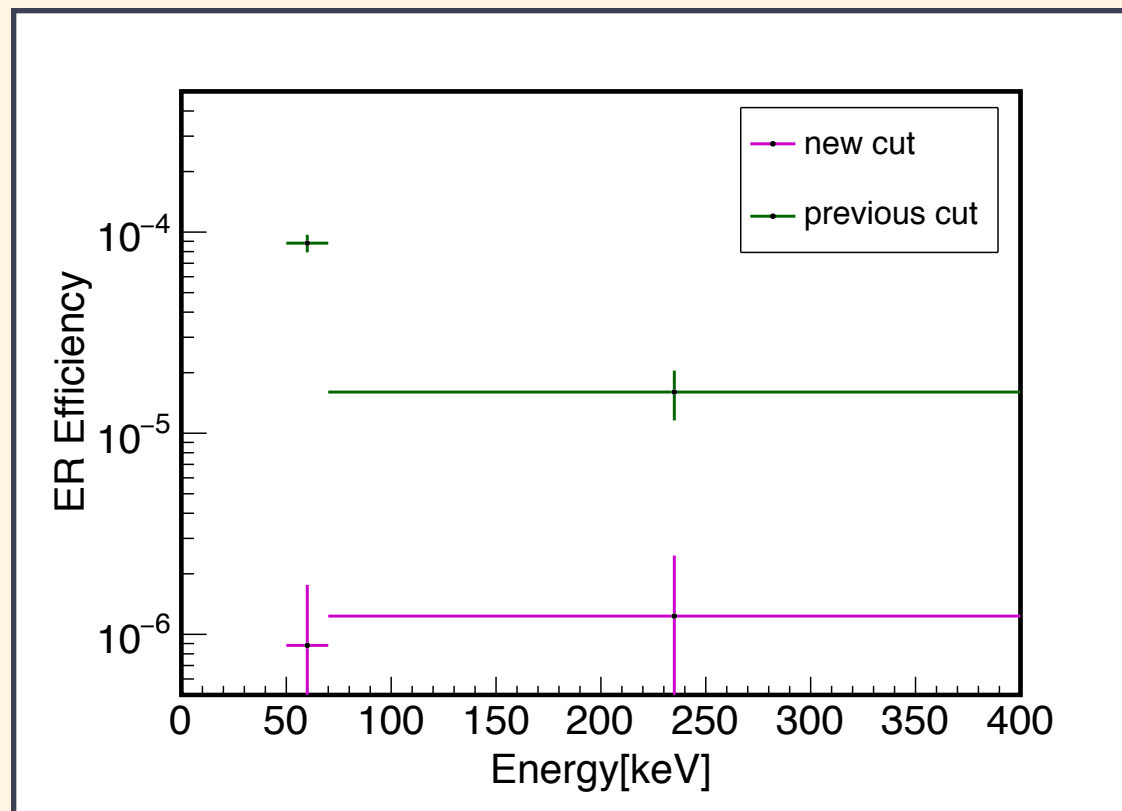
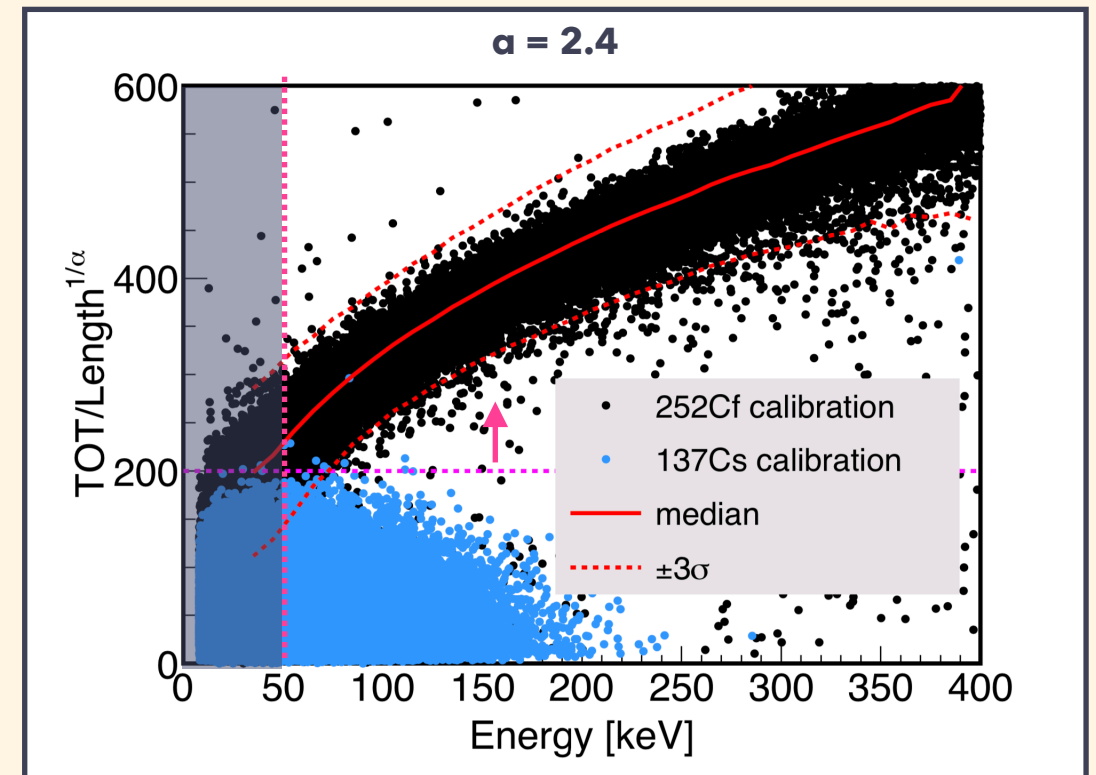
TOT/Length^{1/α}分布によるカット

◎ Energy v.s. TOT/Length^{1/α} (=β)分布

- ▶ p.8で決定した $\alpha = 2.4$ を使用する
- ▶ β をEnergyごとに決定 (図の点線内を選択)
- ▶ 以下 TOT/Length^{1/α}カットを追加する

◎ ²⁵²Cfと¹³⁷Csの測定から検出効率の見積もり

- ▶ ER Efficiency : **8.8×10^{-7}** @50-70keV
- ▶ NR Efficiency : **0.55**



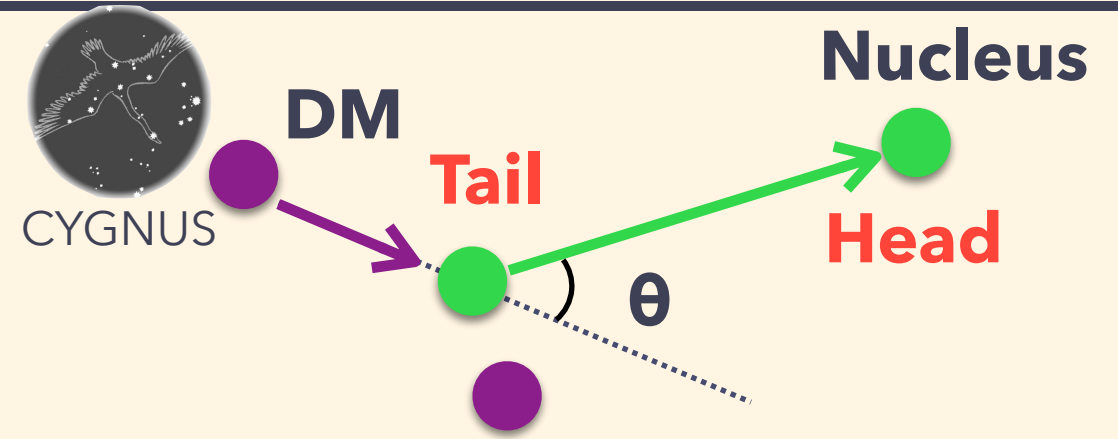
❖ 目標のガンマ除去能力(**8.8×10^{-7}** @50-70keV)とNR検出効率(~**0.5**)を達成

飛跡の前後判定

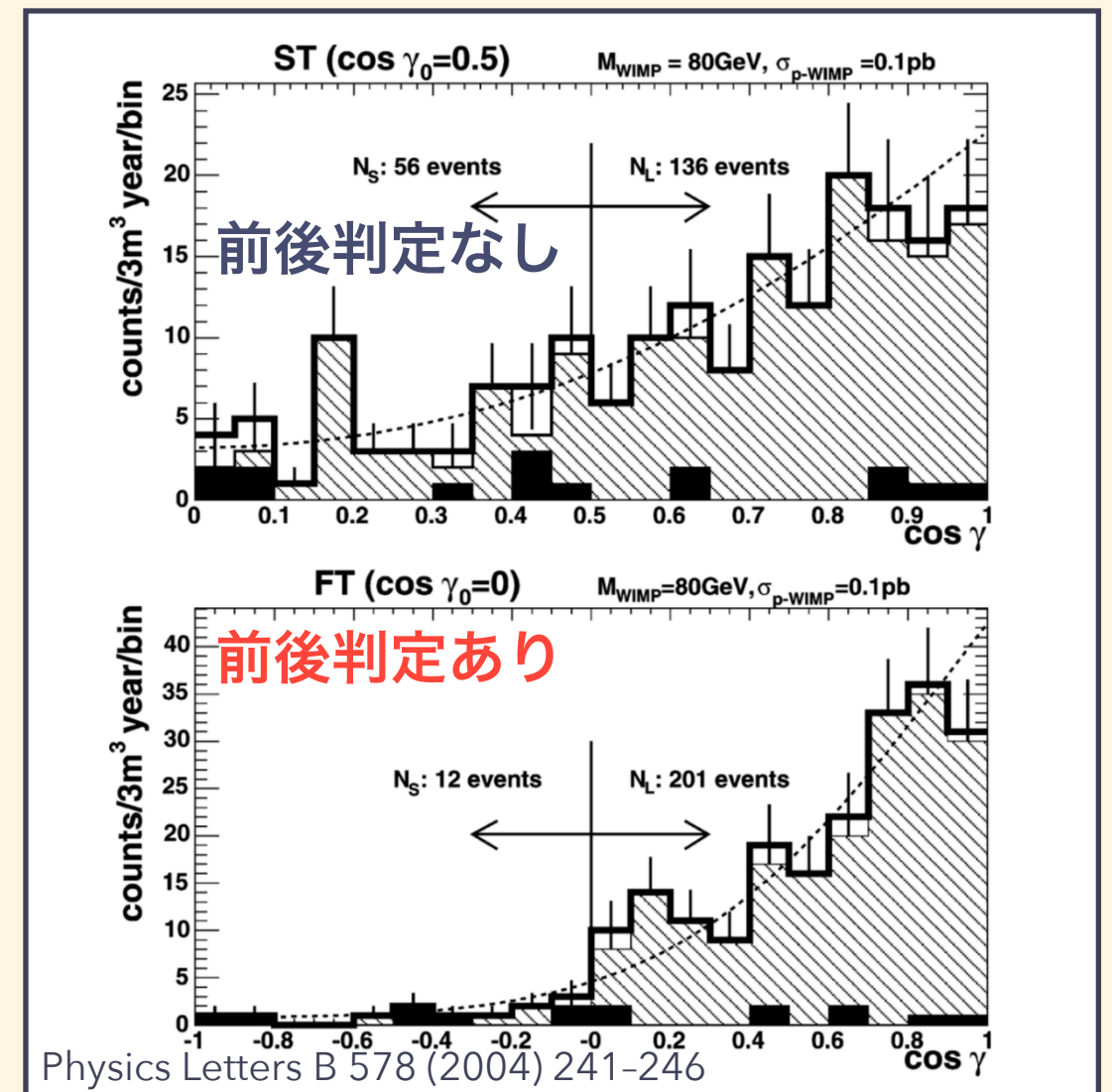
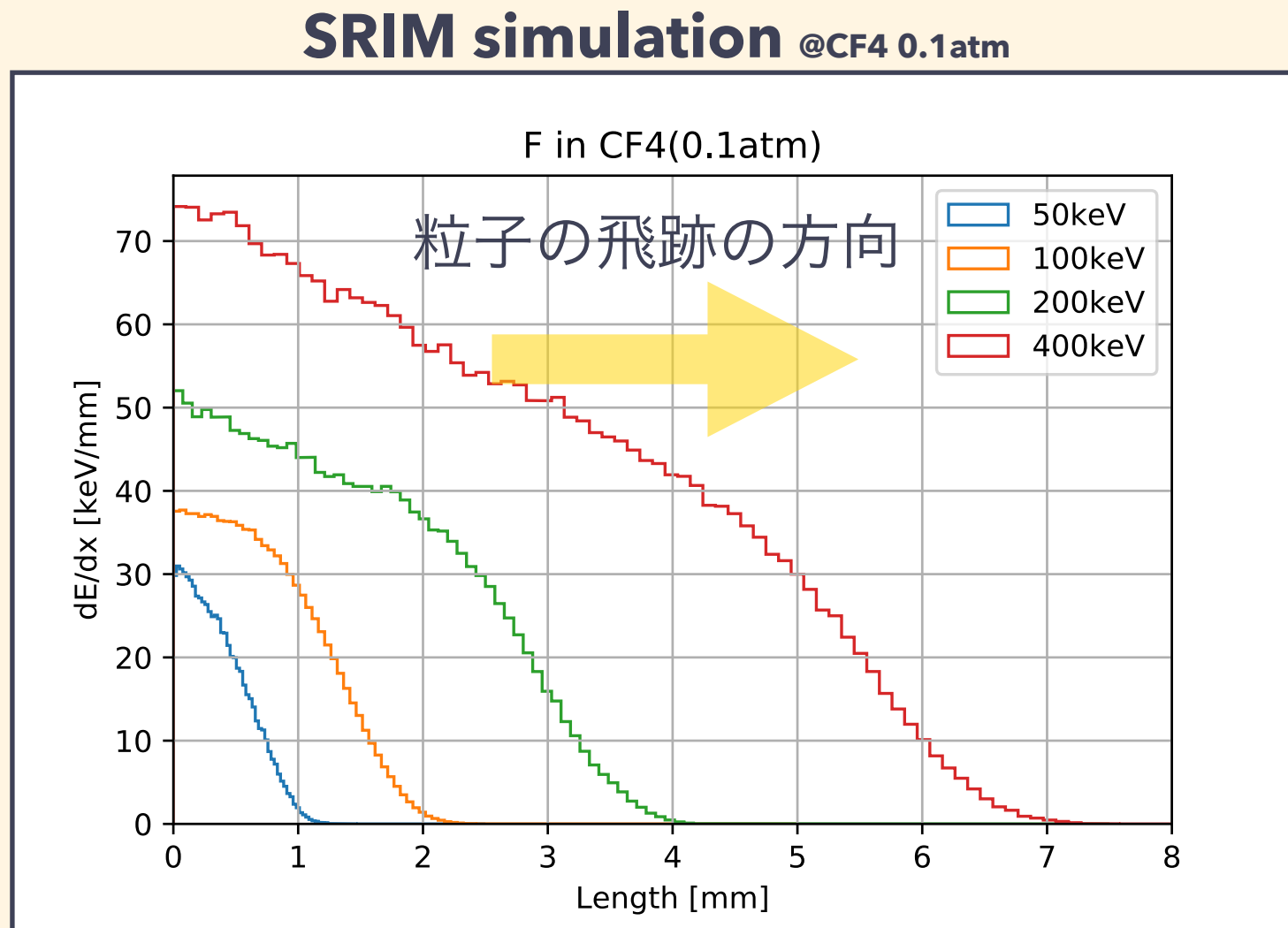
Head-tail

飛跡の前後判定 -Headtail-

- NEWAGEでは角度に分解能があるものの
原子核反跳の飛跡の向きへの感度はほぼない
 - ▶ 前後判定が可能な場合、感度は**3倍程度**
- 判定方法
 - ▶ Tail : エネルギー損失が大きい
 - ▶ Head : エネルギー損失が小さい



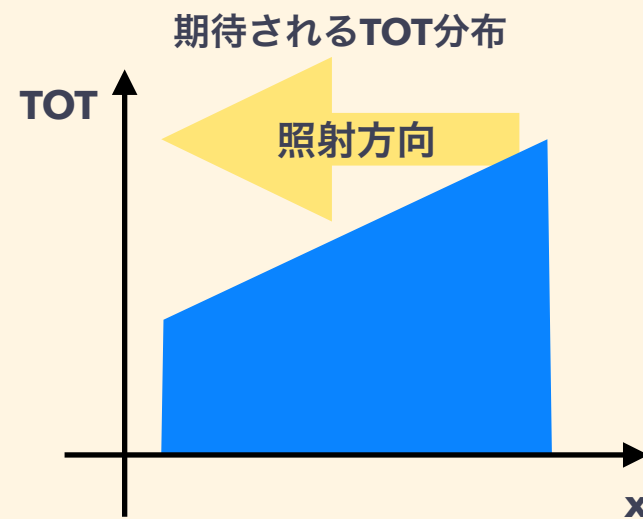
期待される反跳角度 $\cos\theta$ 分布



事象例 / 判定方法

◎ 事象例

- ▶ ^{252}Cf 測定 of データを用いる
- ▶ TOT: 1ストリップの波形に対して閾値を決めたとき、その閾値を超えているクロック数



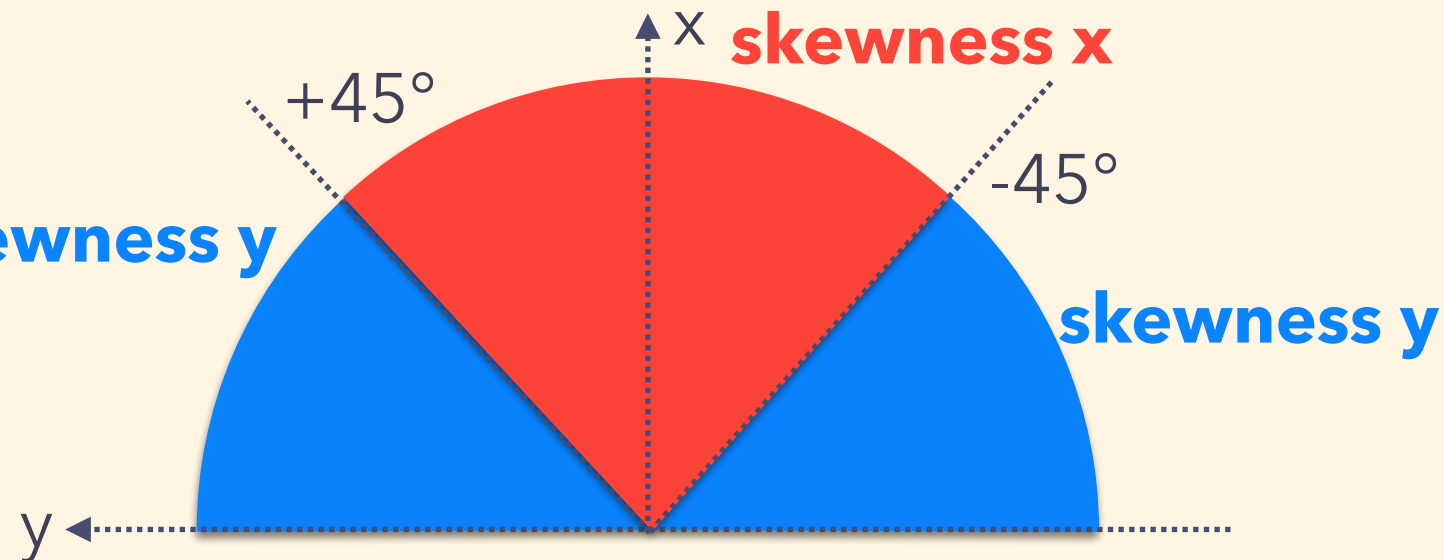
◎ 判定方法

- ▶ **skewness x** (anode) 及び **skewness y** (cathode) を用いる
- ▶ 再構成された方位角によって **skewness x** と **skewness y** を使い分ける

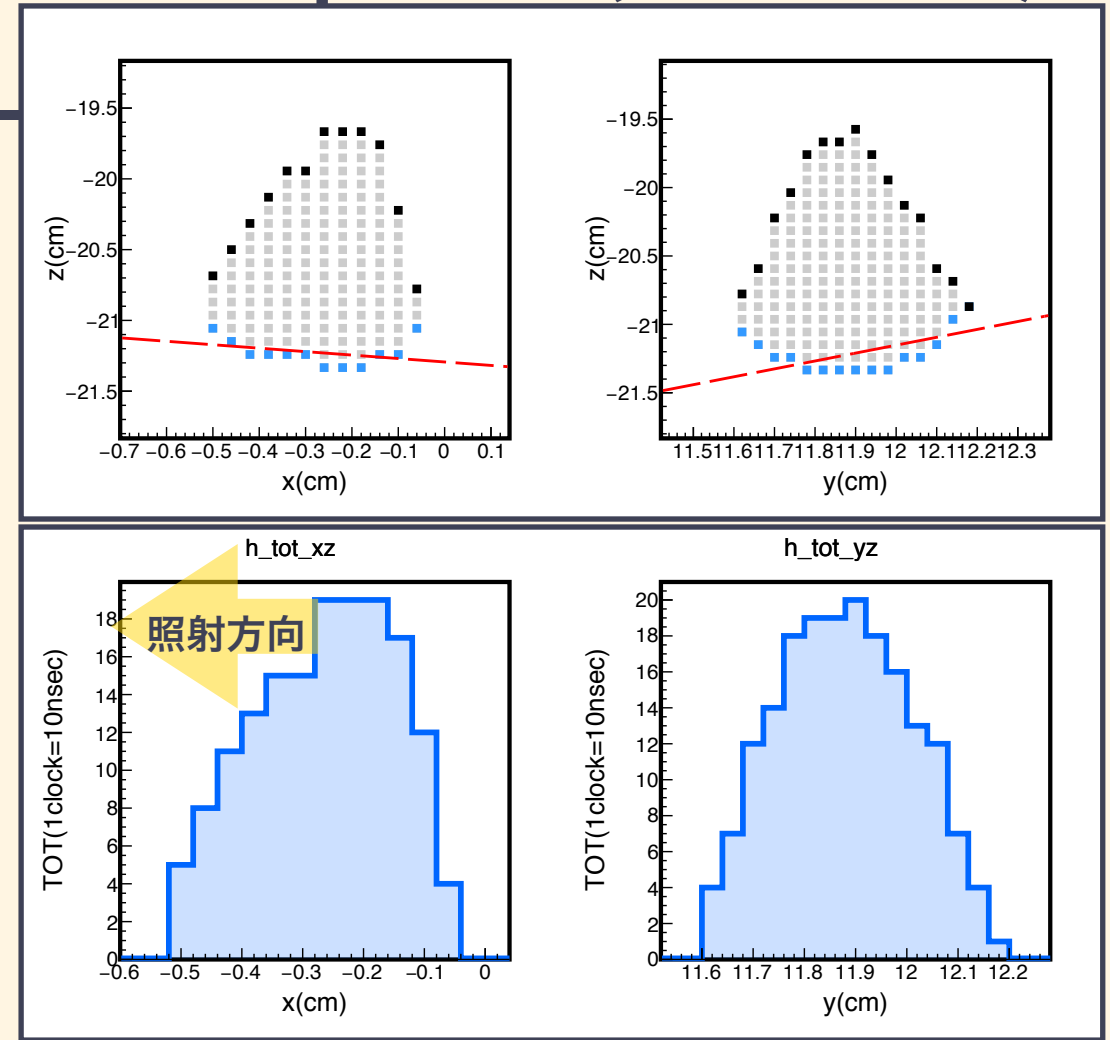
$$\text{skewness } x = \frac{\langle \text{TOT}(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^3 \rangle}{(\text{TOT}(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^2)^{3/2}}$$

$$\text{skewness } y = \frac{\langle \text{TOT}(y) \cdot (y - \langle y \rangle)^3 \rangle}{(\text{TOT}(y) \cdot (y - \langle y \rangle)^2)^{3/2}}$$

skewness y

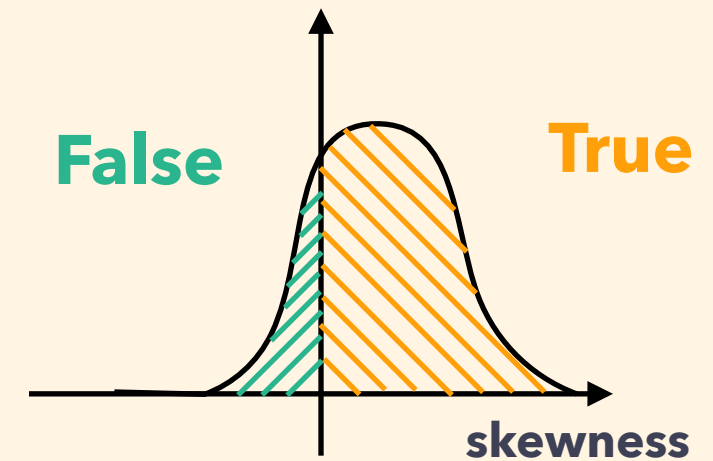


source position (25.5cm,0,0)



Head-tail Power

- 照射方向によって分布の違いが確認された
- Head-tail Power(HTP) : 正しく再構成される割合
 - ▶ $HTP = \text{True} / (\text{True} + \text{False})$



Red : +x方向への照射

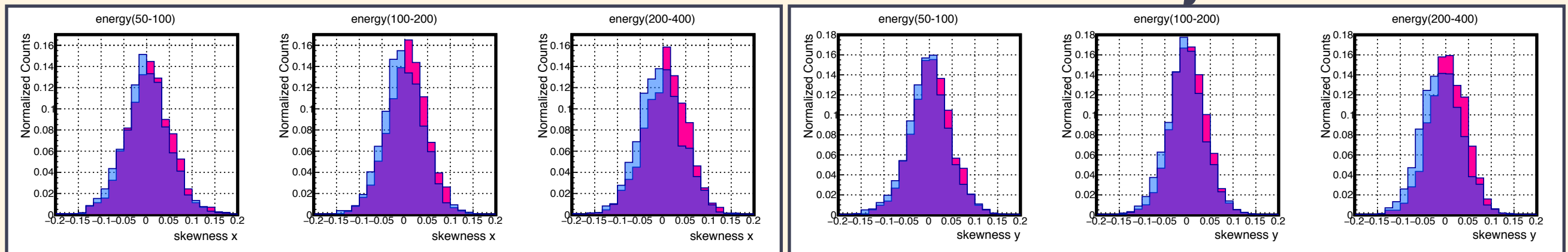
Blue : -x方向への照射

Red : +y方向への照射

Blue : -y方向への照射

skewness x

skewness y



	50-100keV	100-200keV	200-400keV
skewness x	53.8 ±1.8%	55.5 ±0.5%	54.5 ±2.5%
skewness y	53.5 ±1.3%	53.1 ±0.2%	54.8 ±1.6%

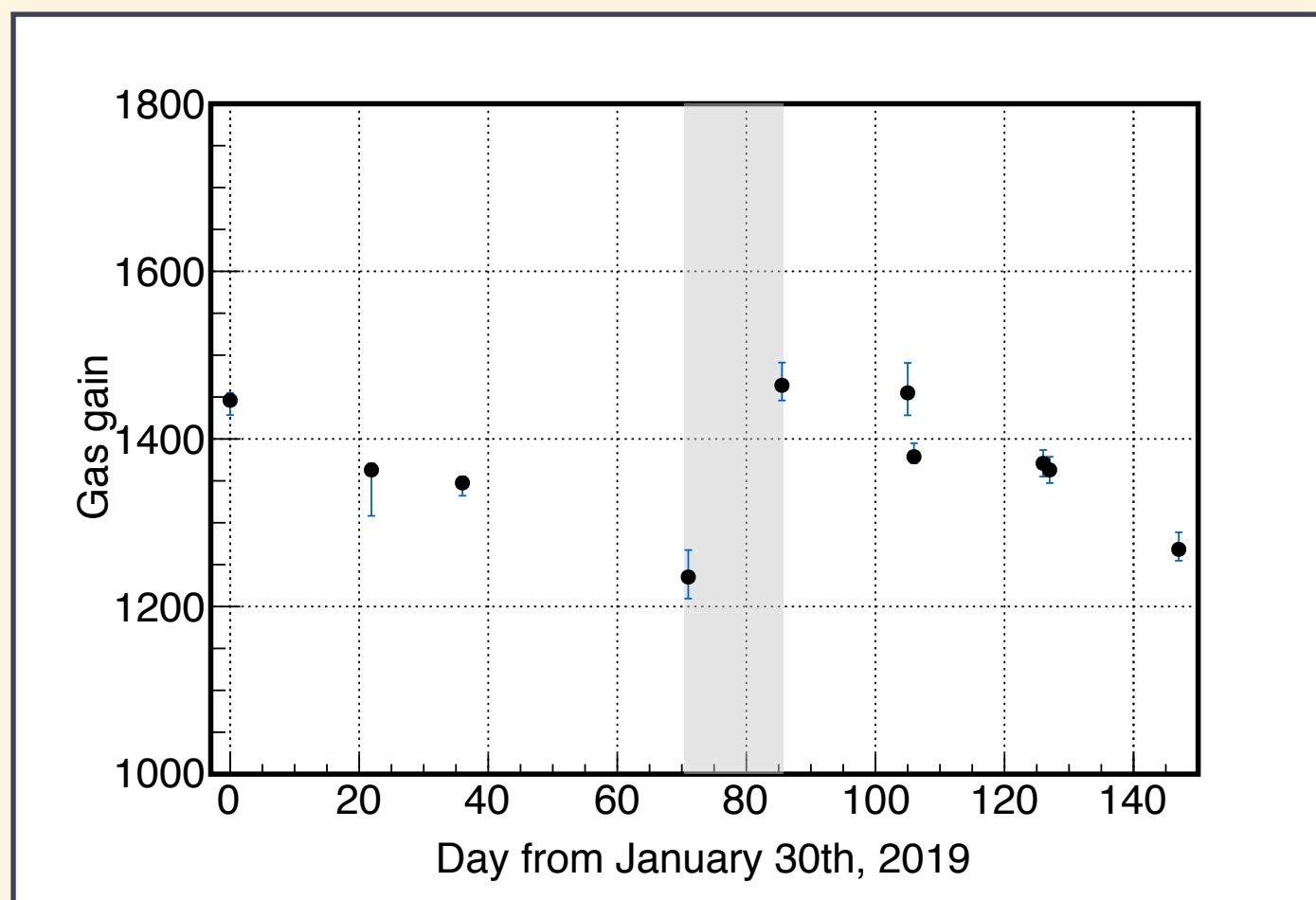
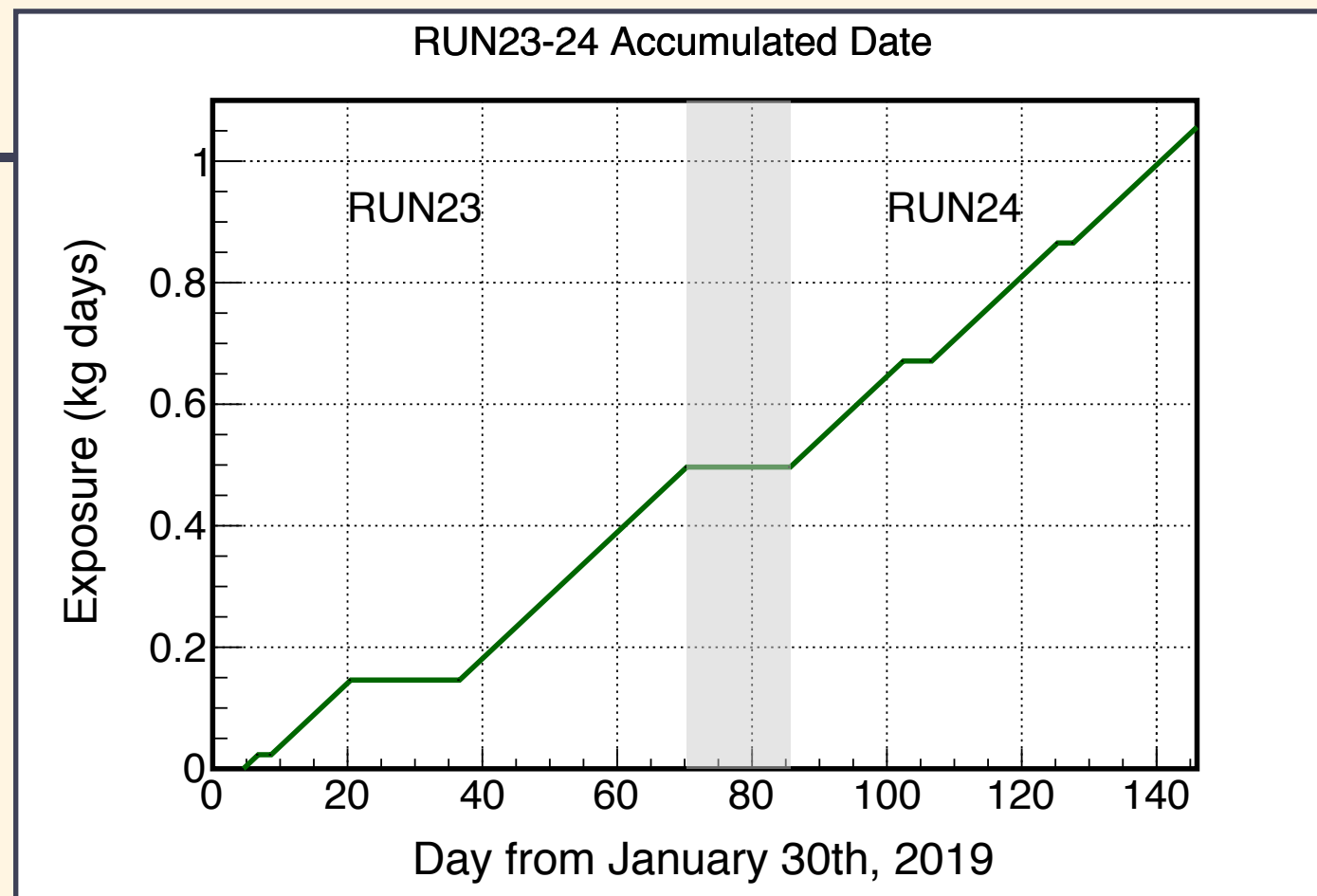
❖ 50-100keVに関するもHTP 53.6%を達成

解析結果

RUN23-24

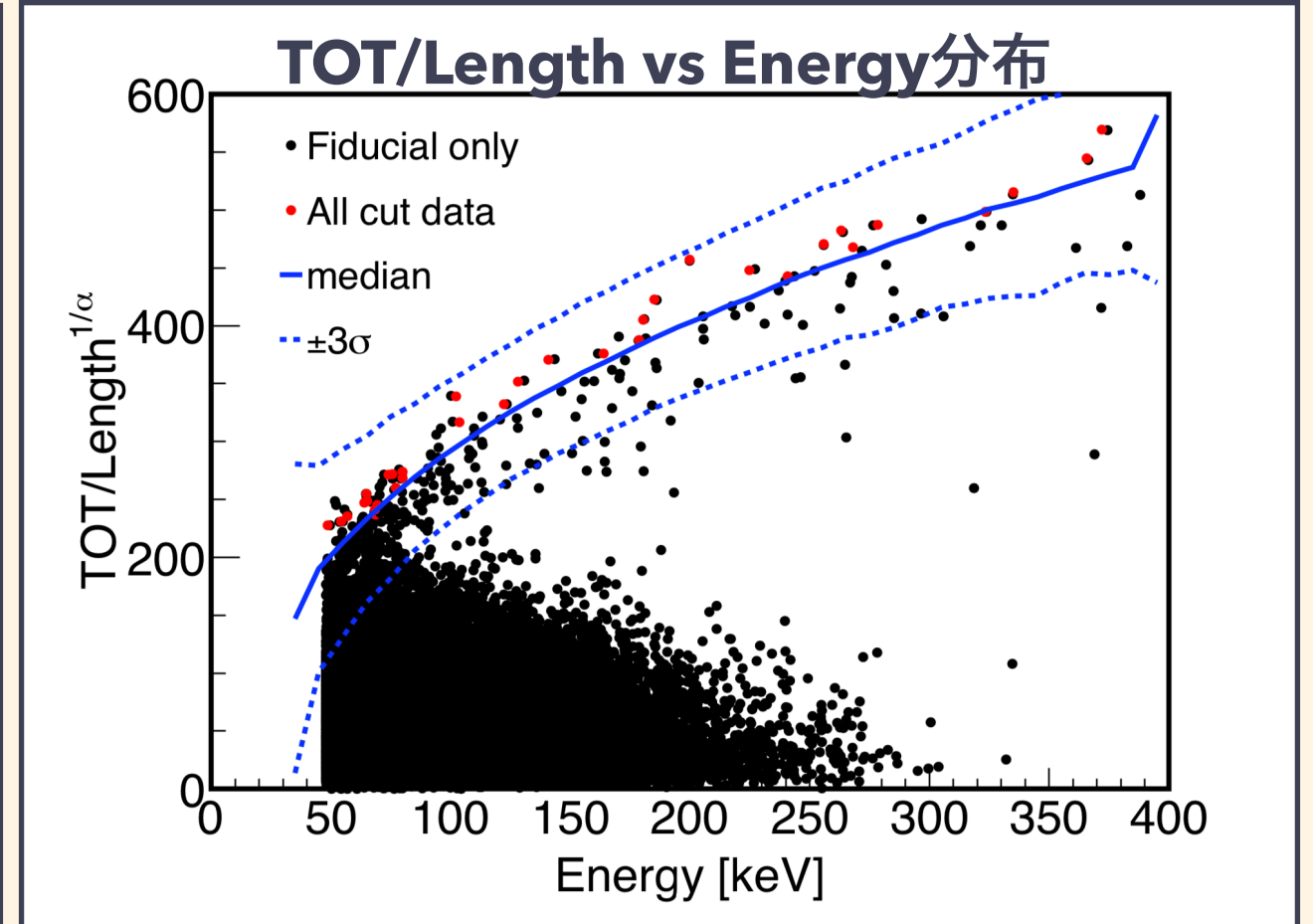
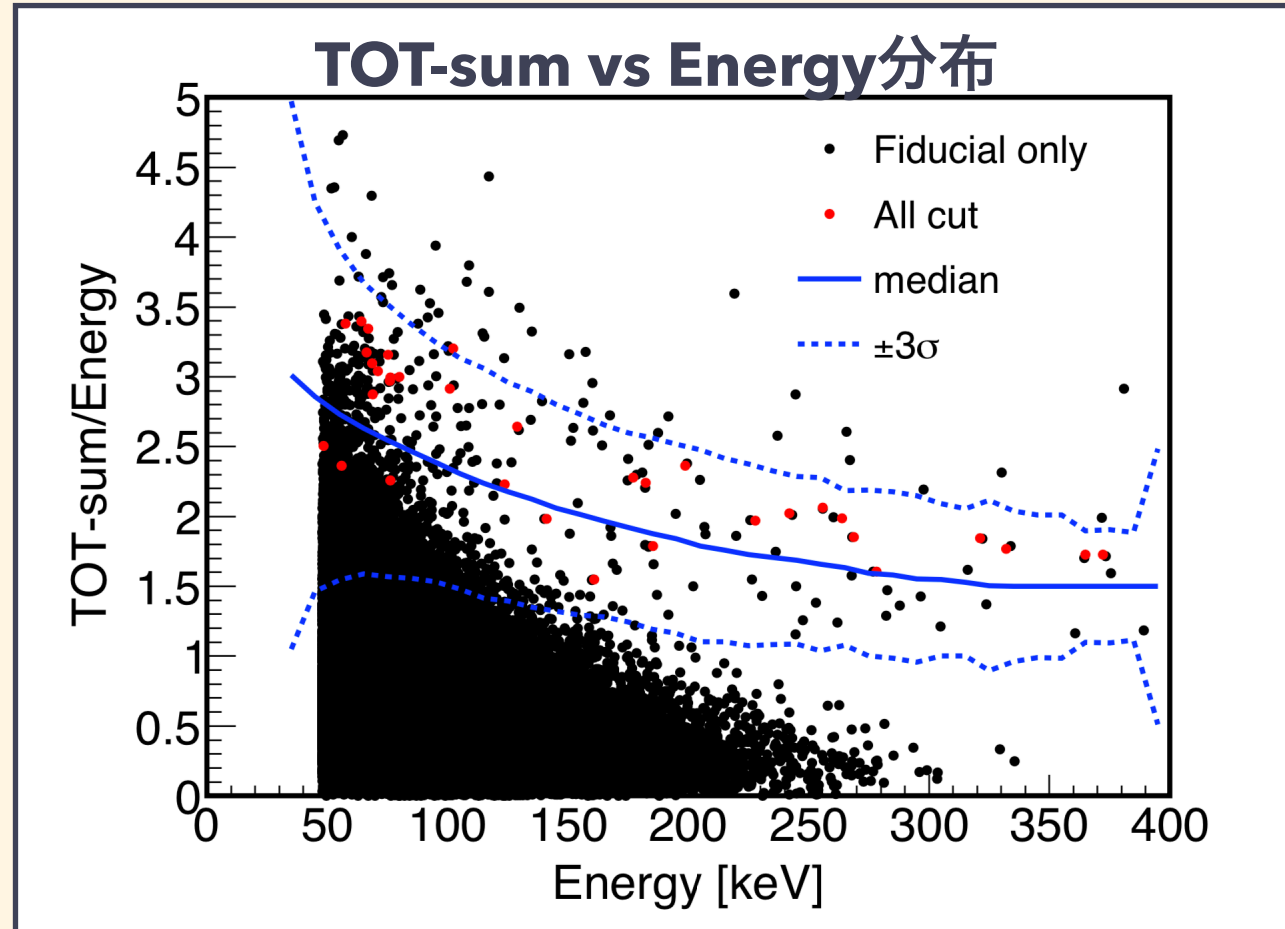
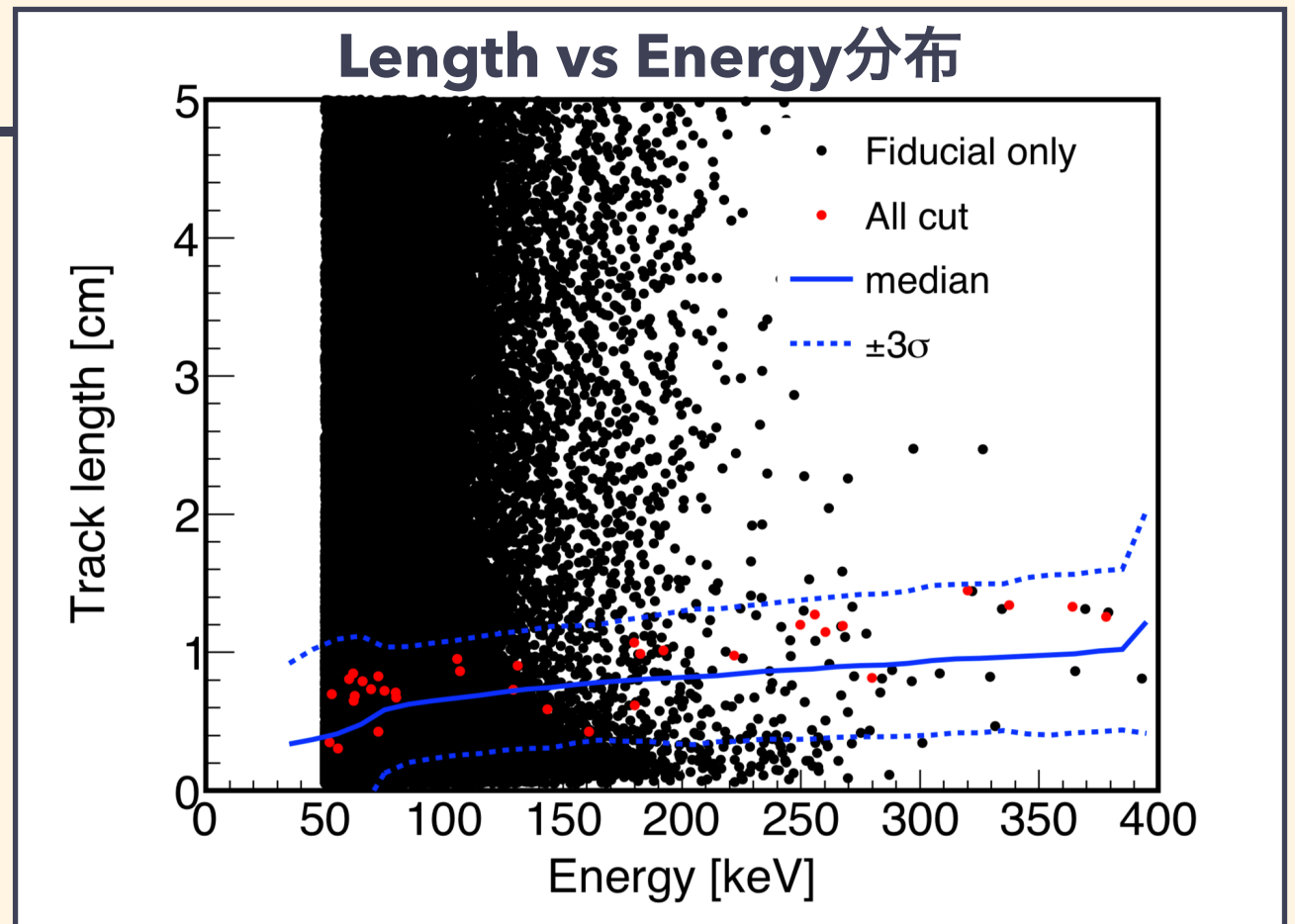
Physics Run Data

- RUN23-24のデータの解析
- Exposure
 - ▶ RUN23 : 0.48 days*kg
 - ▶ RUN24 : 0.53 days*kg
- 較正データ (およそ20日ごと)
 - ▶ ガスゲイン : ~1350
 - ▶ ドリフト速度 : ~9 cm/ μ sec
 - 上2つはLinear Fitによる線形補正
 - ▶ エネルギー分解能 : 15.5(\pm 1.0)%
 - ▶ **安定したガスゲインで動作**



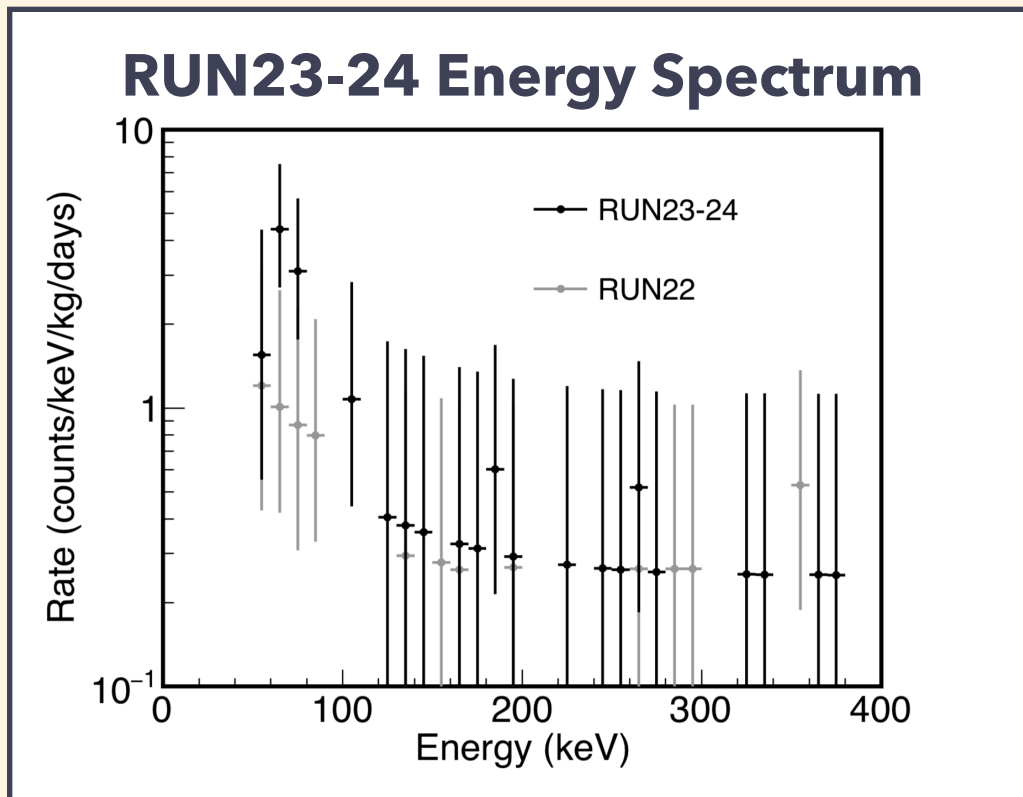
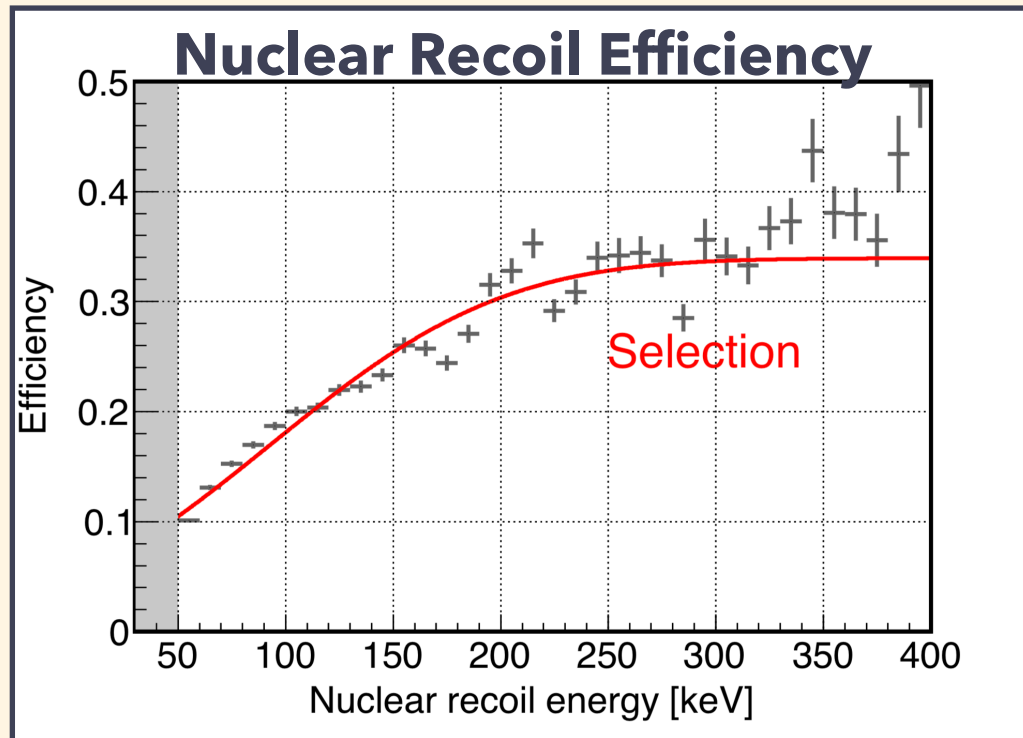
Event Selection

- Physics runの各パラメータの分布
 - 黒 : Fiducial&EnergyThreshold cut
 - 赤 : After all cut
- カットライン
 - Length vs Energy : **3sigma**
 - TOT-sum vs Energy : **3sigma**
 - TOT/Length vs Energy : **median**

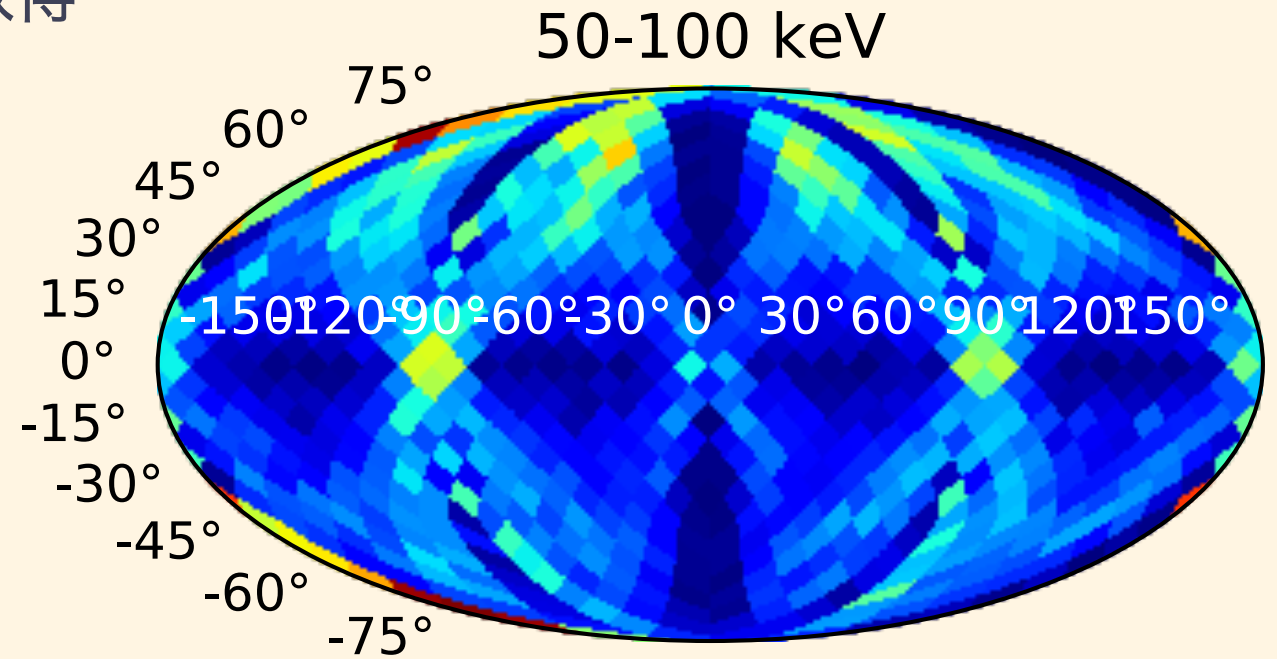


Energy spectrum & Skymap

- Energy Threshold : 50 keV
 - ER除去によりRUN22と同等のデータを取得



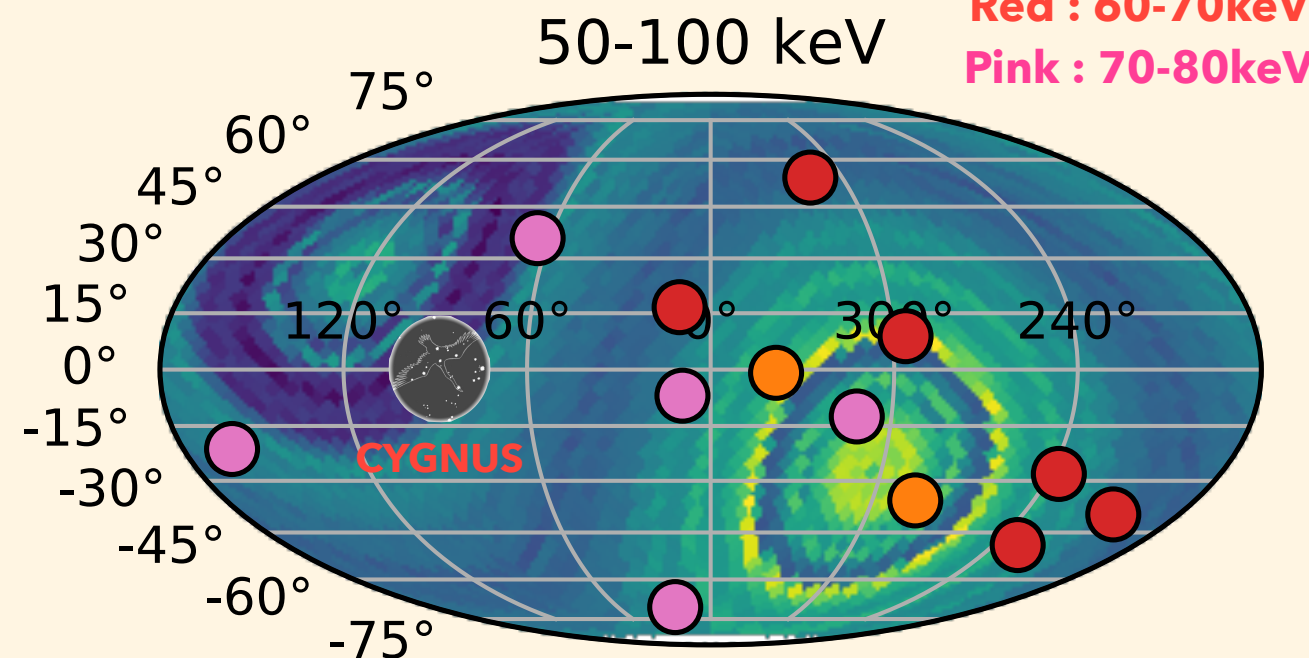
EfficiencyMap@検出器座標系
 Head-tailを考慮したもの:Tail(到来方向)を表示



Skymap@銀河座標系 (Color:Efficiency)

Tail方向(到来方向)を表示

Orange : 50-60keV
 Red : 60-70keV
 Pink : 70-80keV



方向解析

- CYGNUS座標系 $\cos\theta$ 分布による制限

- **Black** : 測定データ

- ▶ 50-60keV bin
- ▶ 2 events

- **Red** : 期待されるWIMPの $\cos\theta$ 分布

(以下を考慮)

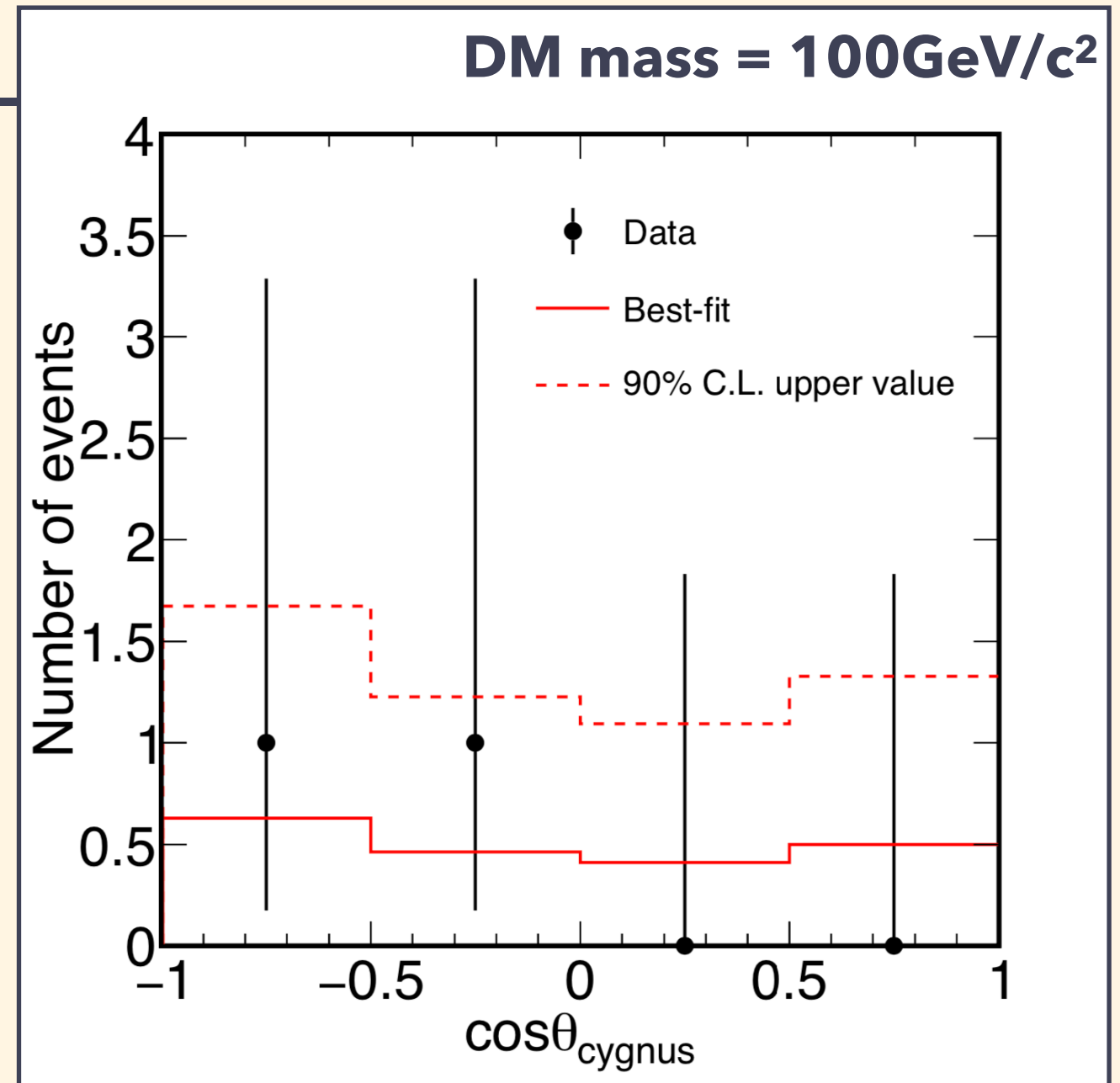
- ▶ Energy Efficiency (10%)
- ▶ Efficiency Map
- ▶ Head-tail Power (53.6%)

- SD散乱断面積への制限 (90% C.L.)

- ▶ **70 pb @100GeV** (RUN22 : 50pb @100GeV)
- ▶ ER除去のためEfficiencyが少し悪くなっている

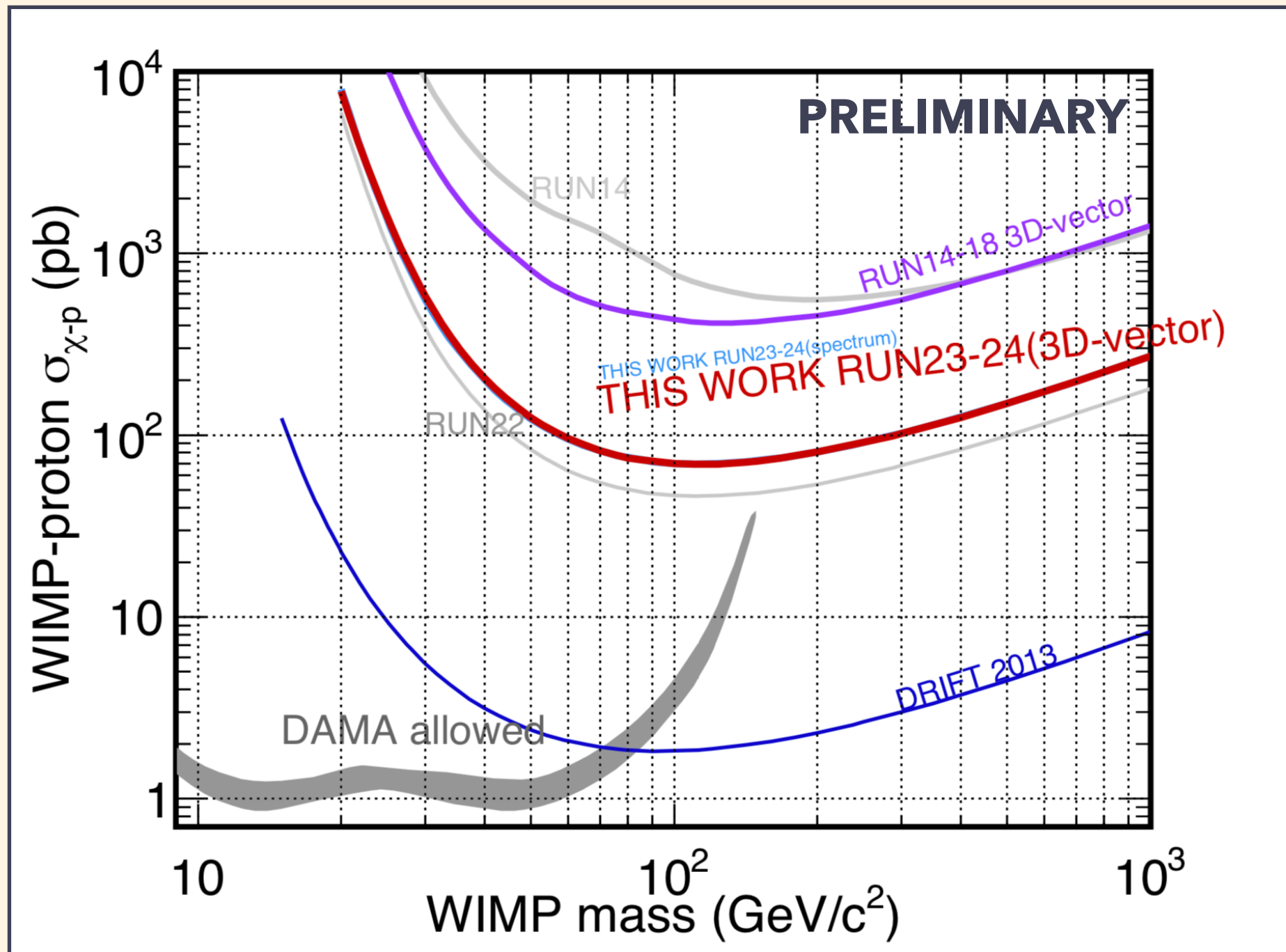
- RUN22:15%, RUN23:10% @50-60keV

❖ 上限値 **70pb @100GeV/c²** **RUN22と同等の感度を達成**



解析結果 - 3D-vector -

- 前後判定を用いて、SD散乱断面積に制限を与えた (90% C.L upper limit)
 - ▶ 前後判定を用いた解析：感度は**5倍**改善 (LA μ -PICでの測定のため)



❖ NEXT >> RUN22と合わせて200日間データの解析でLimitの更新を目指す

まとめ

- ◉ NEWAGE実験では方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行っている
- ◉ RUN23-24ではゲインは高いが、ERの除去能力は弱い
 - ▶ TOT/Lengthのパラメータを用いて**ER除去能力を2桁改善**
- ◉ 方向感度の向上へ向けた前後判定での解析
 - ▶ skewnessを用いた解析
 - ▶ Head-tail Power = **53.6%@50-100keV** を達成
- ◉ 2019年に取得された98日分の暗黒物質探索データの解析
 - ▶ RUN22と同等の感度を達成
 - ▶ WIMP-proton SD散乱断面積へ制限を与えた (90% C.L.): **70 pb @100GeV**
- ◉ NEXT >>
 - ▶ RUN22と合わせて約200日のデータの解析によるLimitの更新

BACK UP

興味を持ってくれた方へ

252Cf測定と137Cs測定

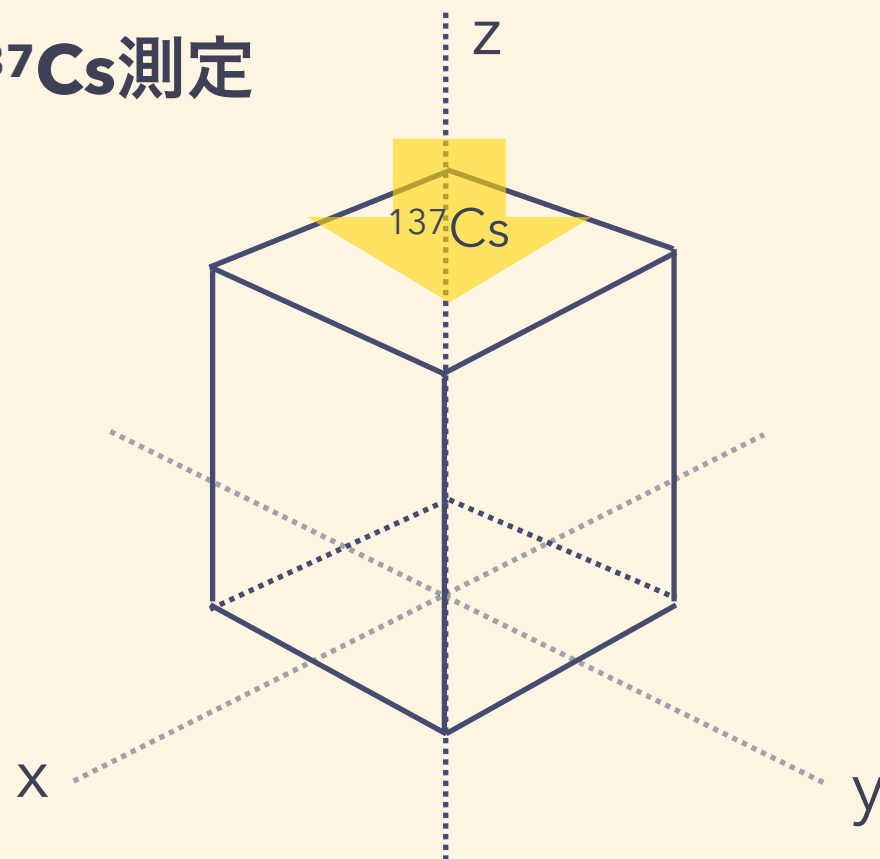
● 137Cs測定

- ▶ ガンマ線の見積もりのための測定(電子反跳)
- ▶ 検出器上部に137Csを置いて測定

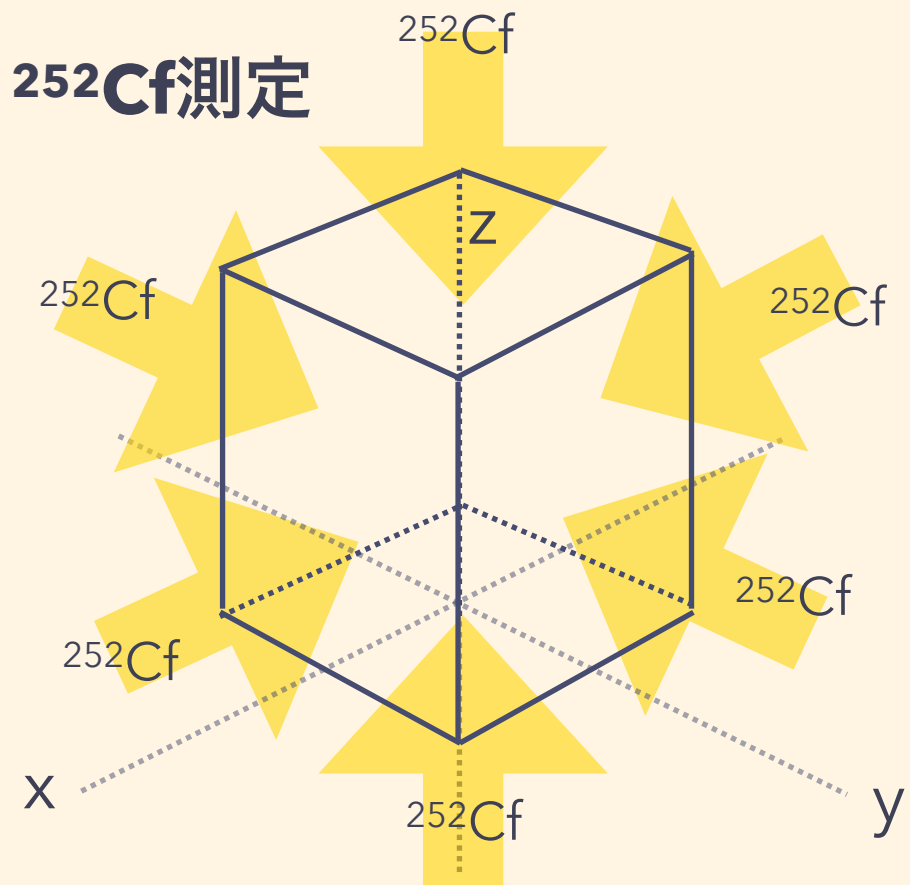
● 252Cf測定

- ▶ 中性子線の見積もりのための測定(原子核反跳)
- ▶ ガンマ線も放出する
- ▶ 検出器の6方向について線源を置く位置を変えて測定

137Cs測定



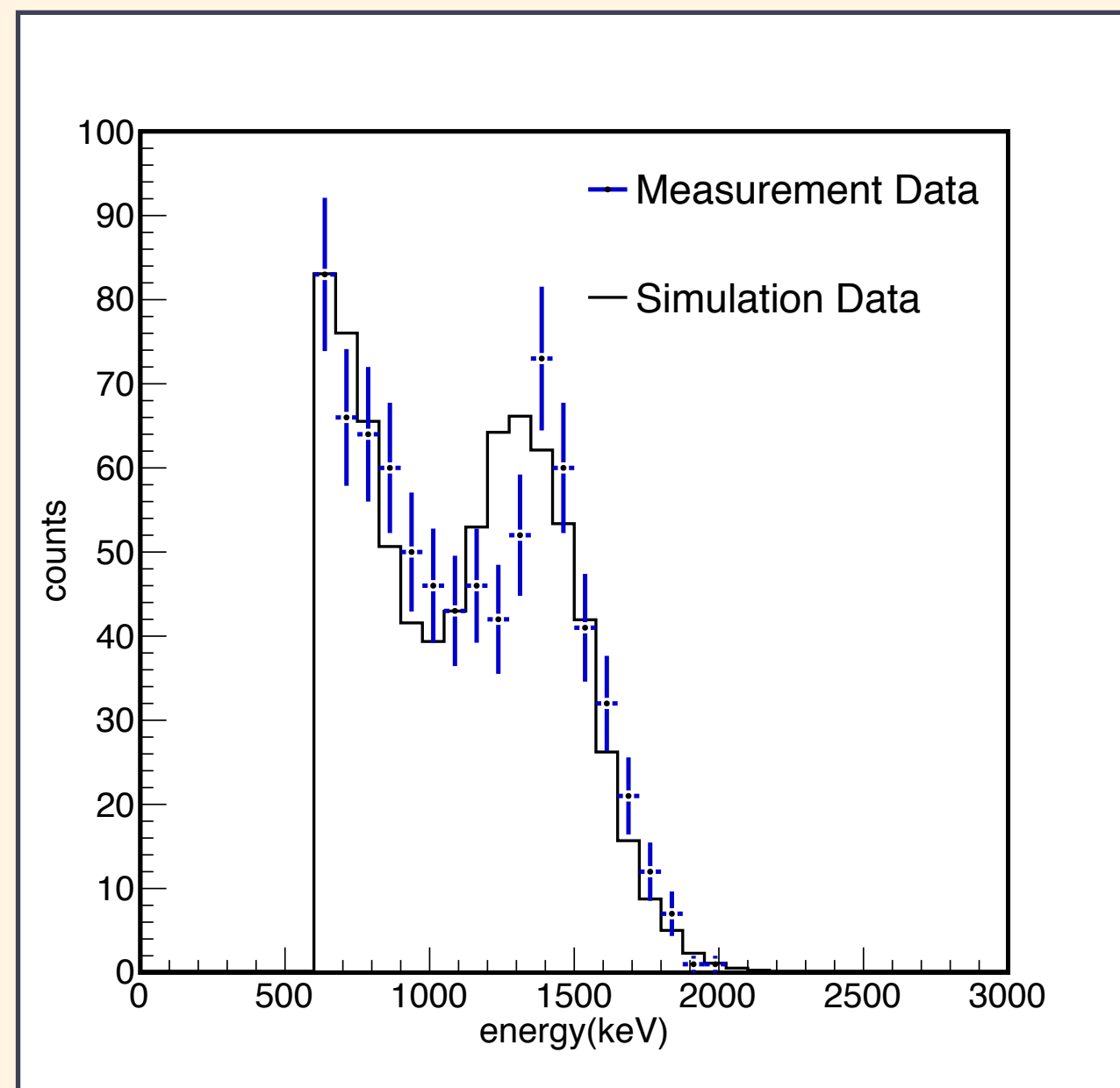
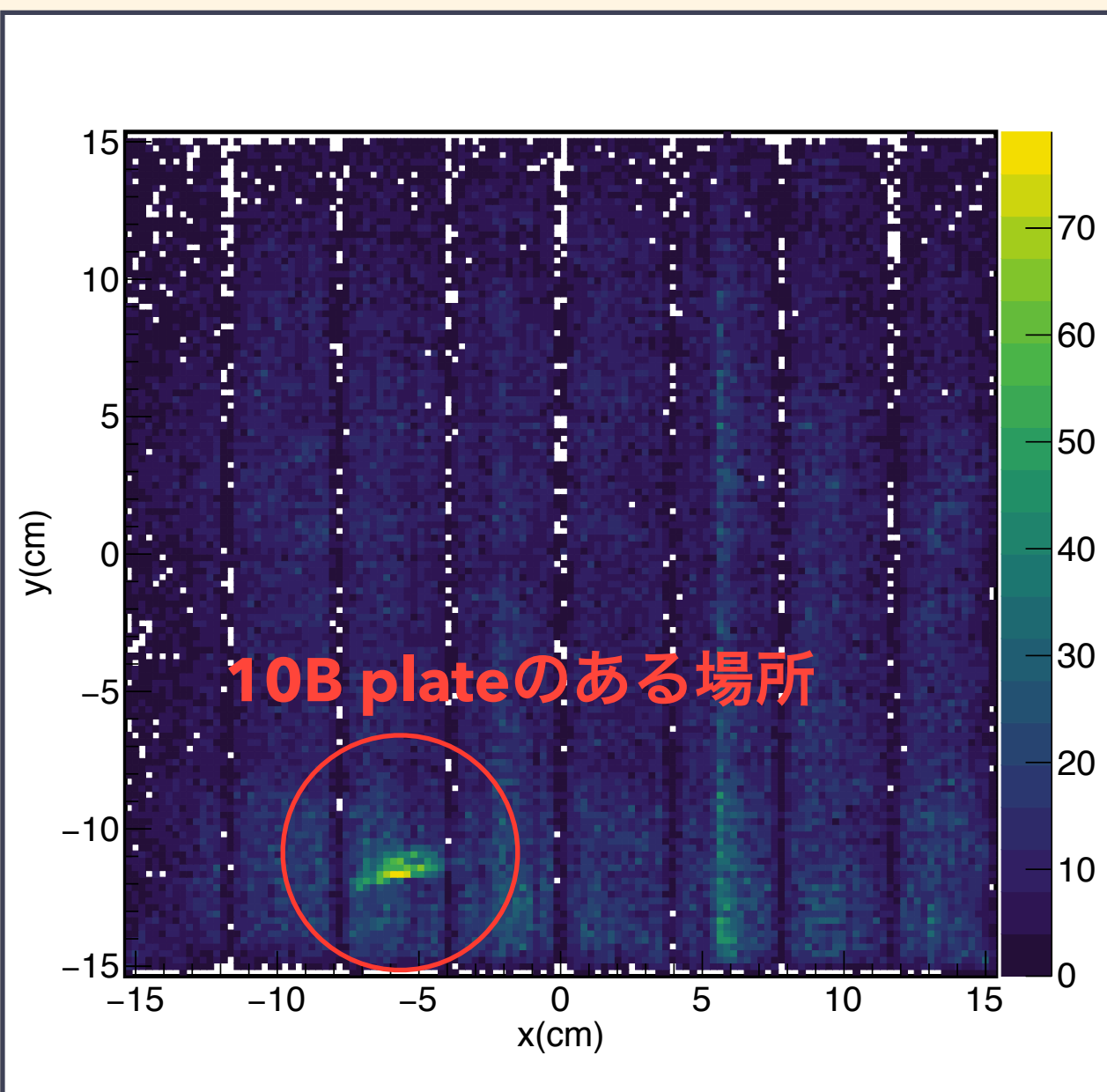
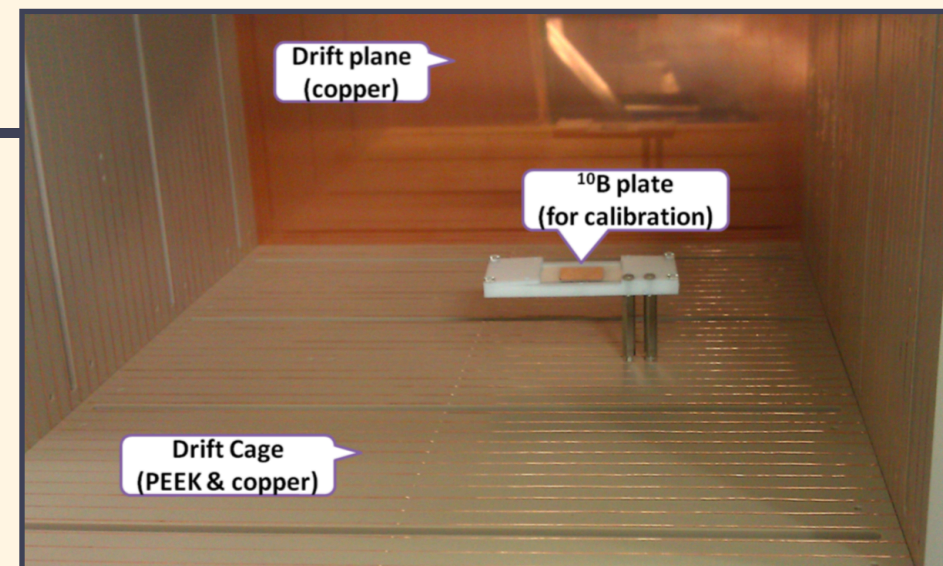
252Cf測定



エネルギー較正

◎ 10B calibration

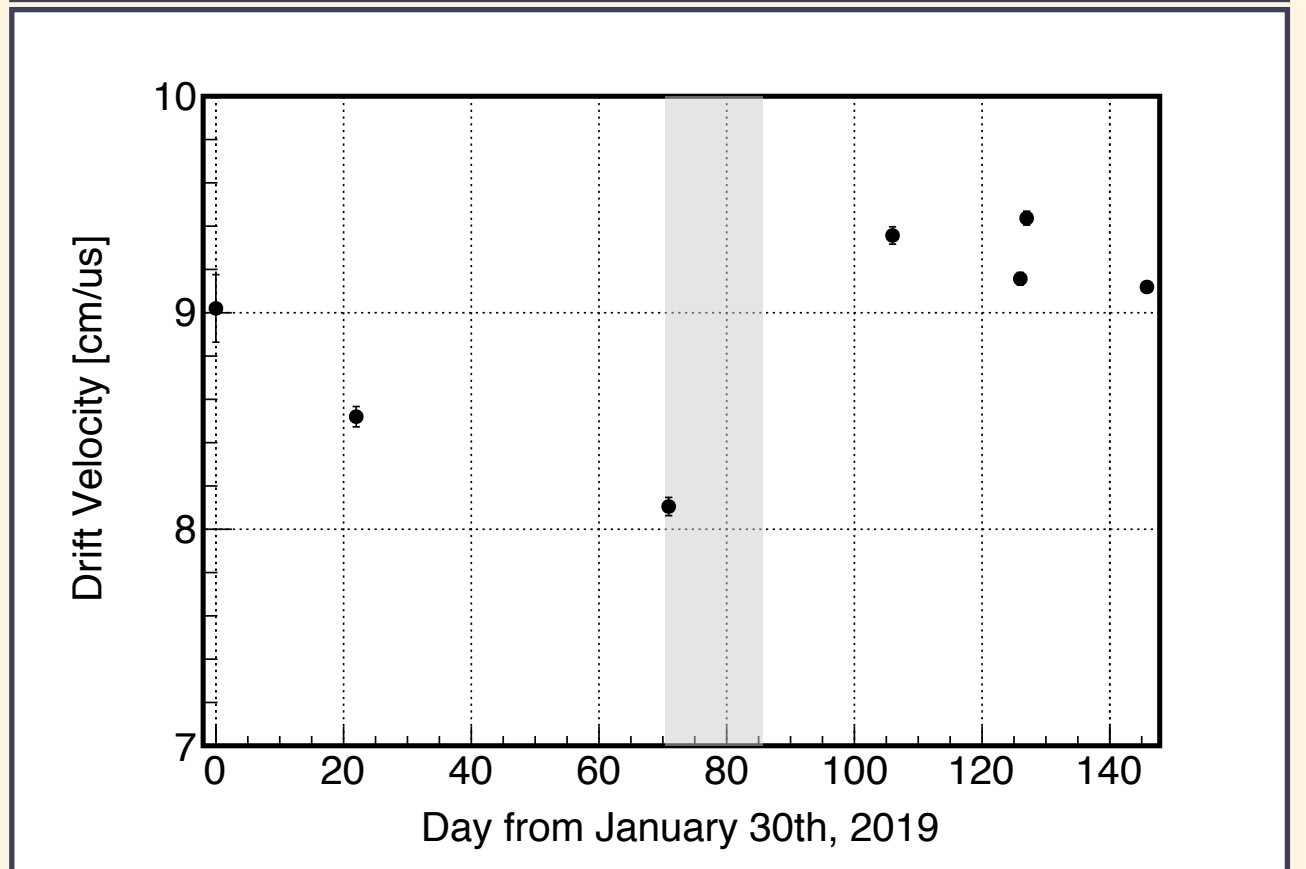
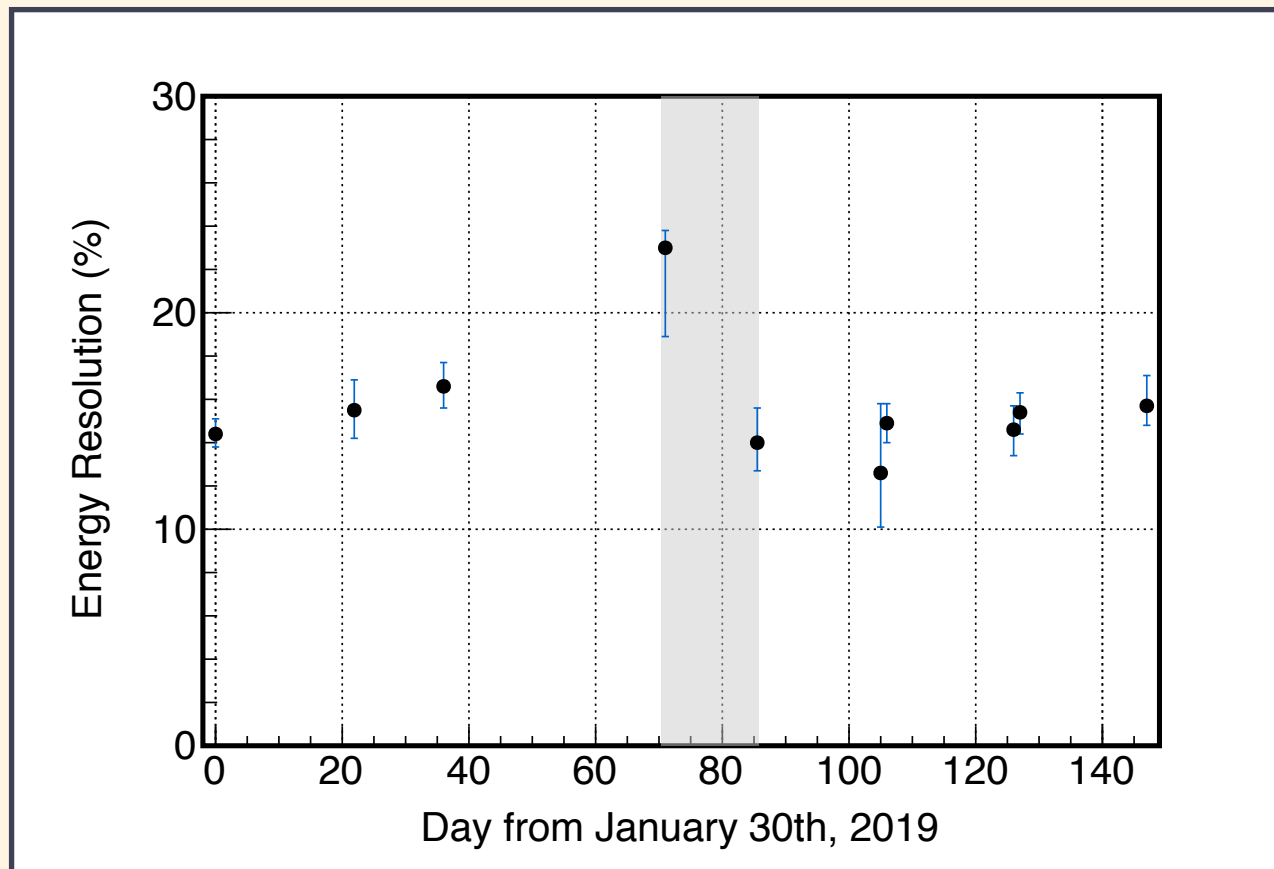
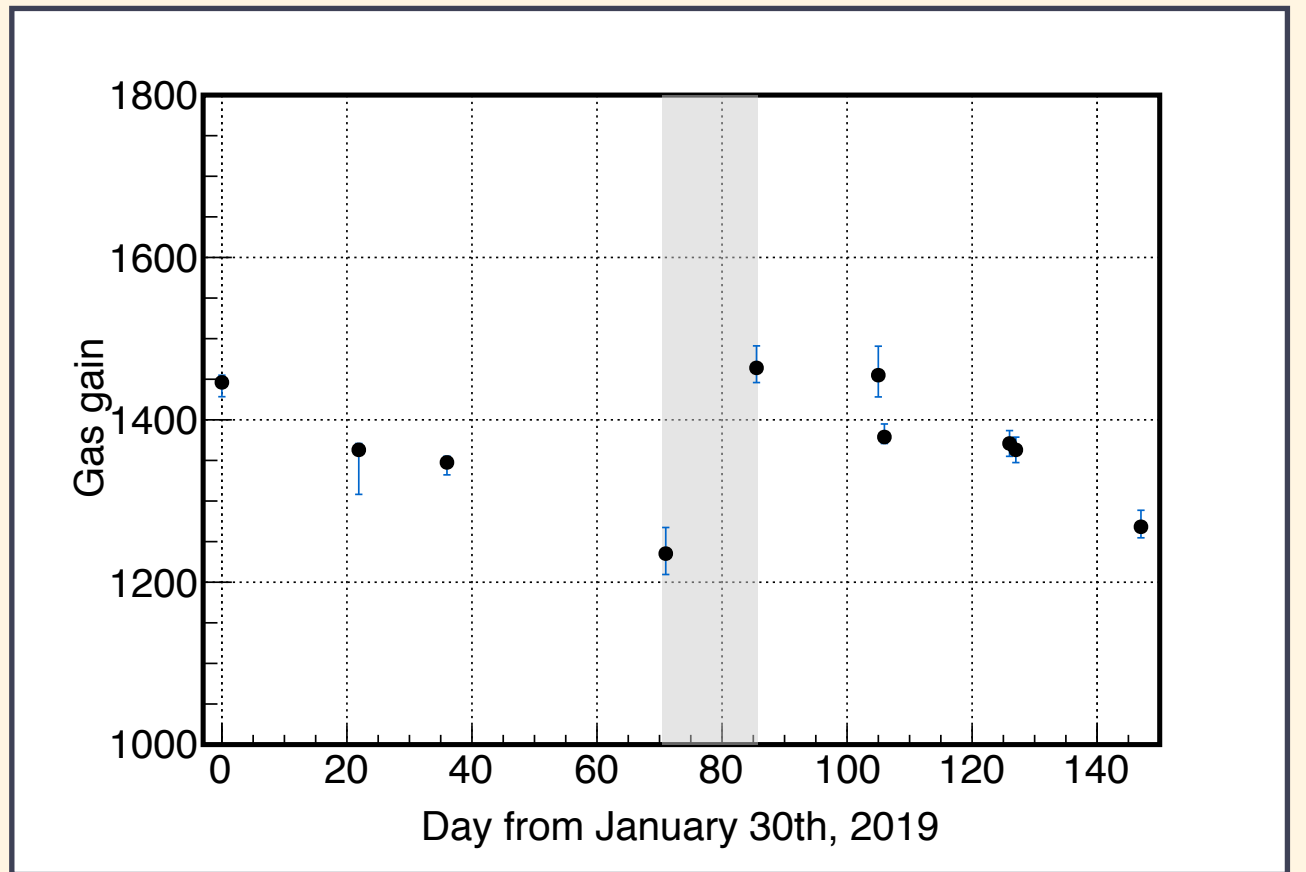
- ▶ 10B plate (-5cm,-12cm,0)
- ▶ 10B + n(熱中性子) → α (1.47MeV) + 7Li(0.84MeV)
- ▶ ガスゲインとエネルギー分解能を見積もる



各較正データ

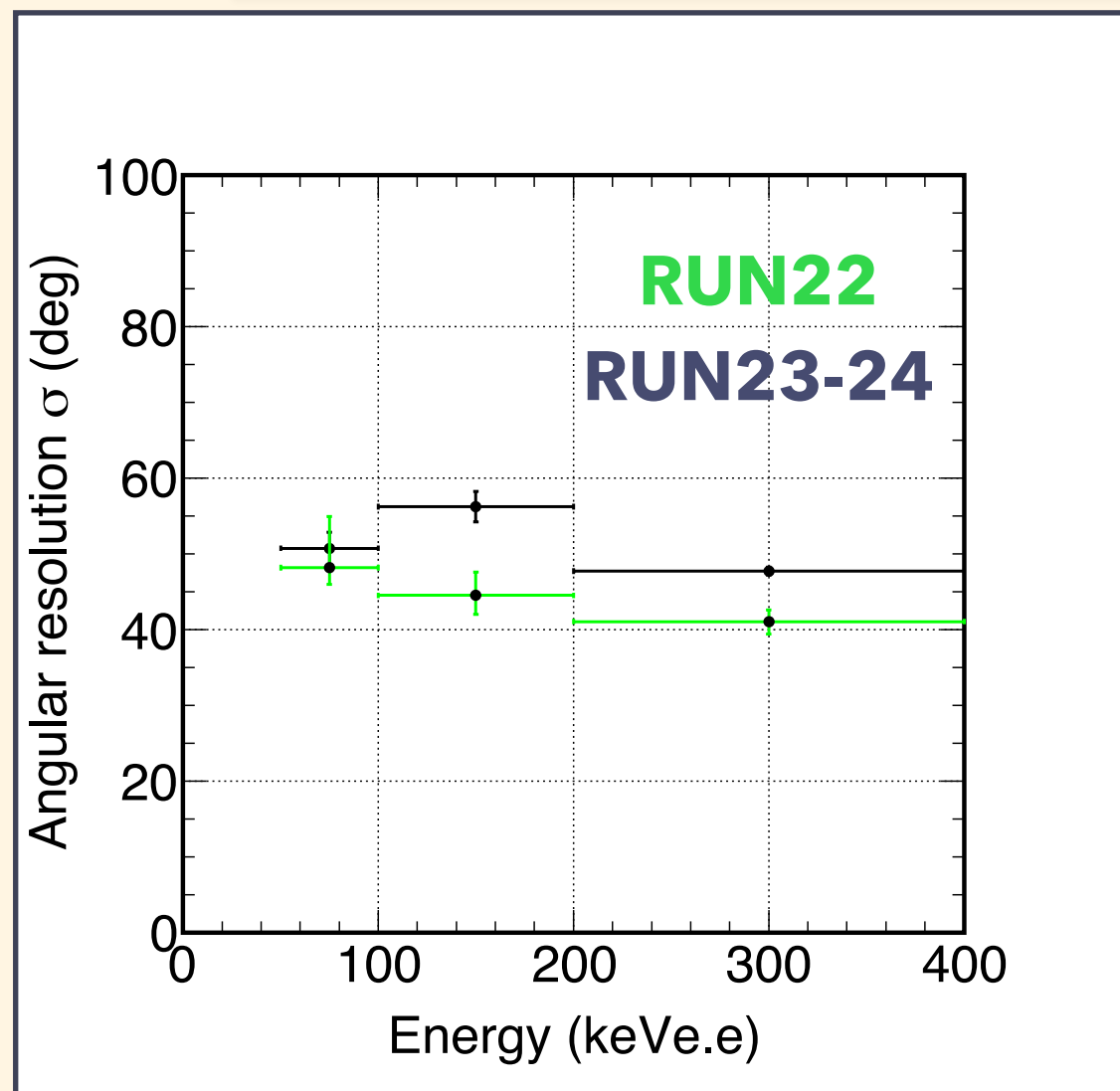
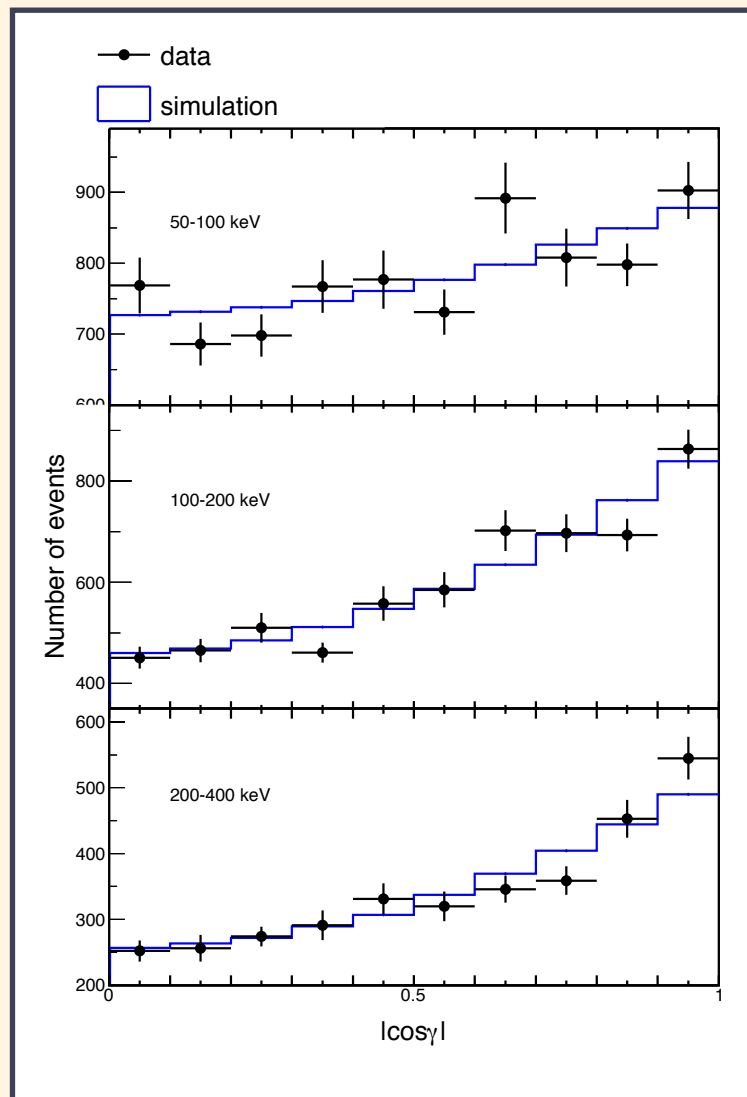
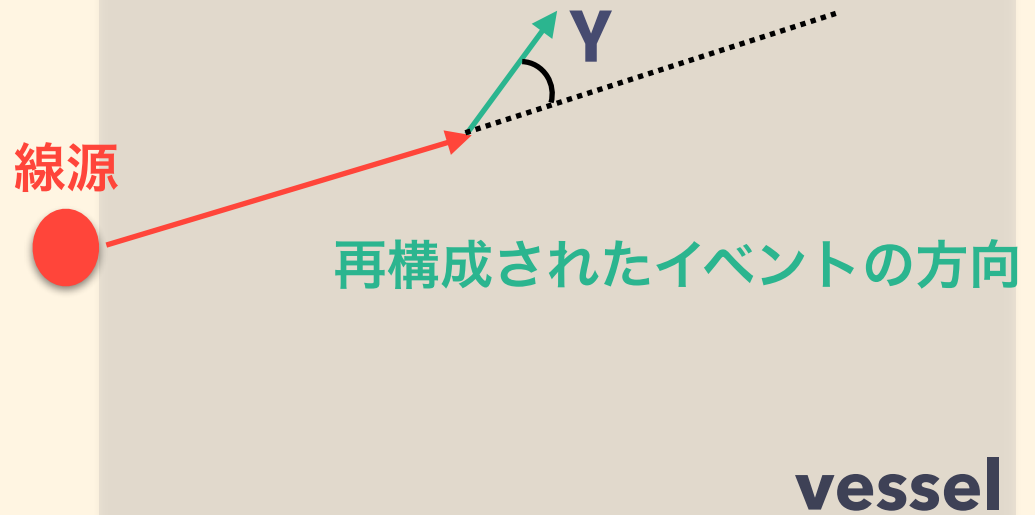
◎ RUN23-24

- ▶ ガスゲイン：~1350
- ▶ ドリフト速度：~9 cm/us
- ▶ エネルギー分解能：15.5 ±%



角度分解能

- 事象の位置から前方散乱性を見る
 - ▶ Zの絶対位置がわかる較正測定
 - ▶ 線源 : 252Cf
 - ▶ 角度 γ を図のように定義する
 - ▶ 角度分解能 : 50.2% @50-100keV



WIMP Expected (Head-tail)

- 期待されるWIMP事象の $\cos\theta$ 分布

- ▶ Head-tailを考慮したもの
- ▶ CYGNUS座標系
- ▶ Head-tail Powerが強くなれば、非対称性も大きくなる

Energy : **50-60keV**

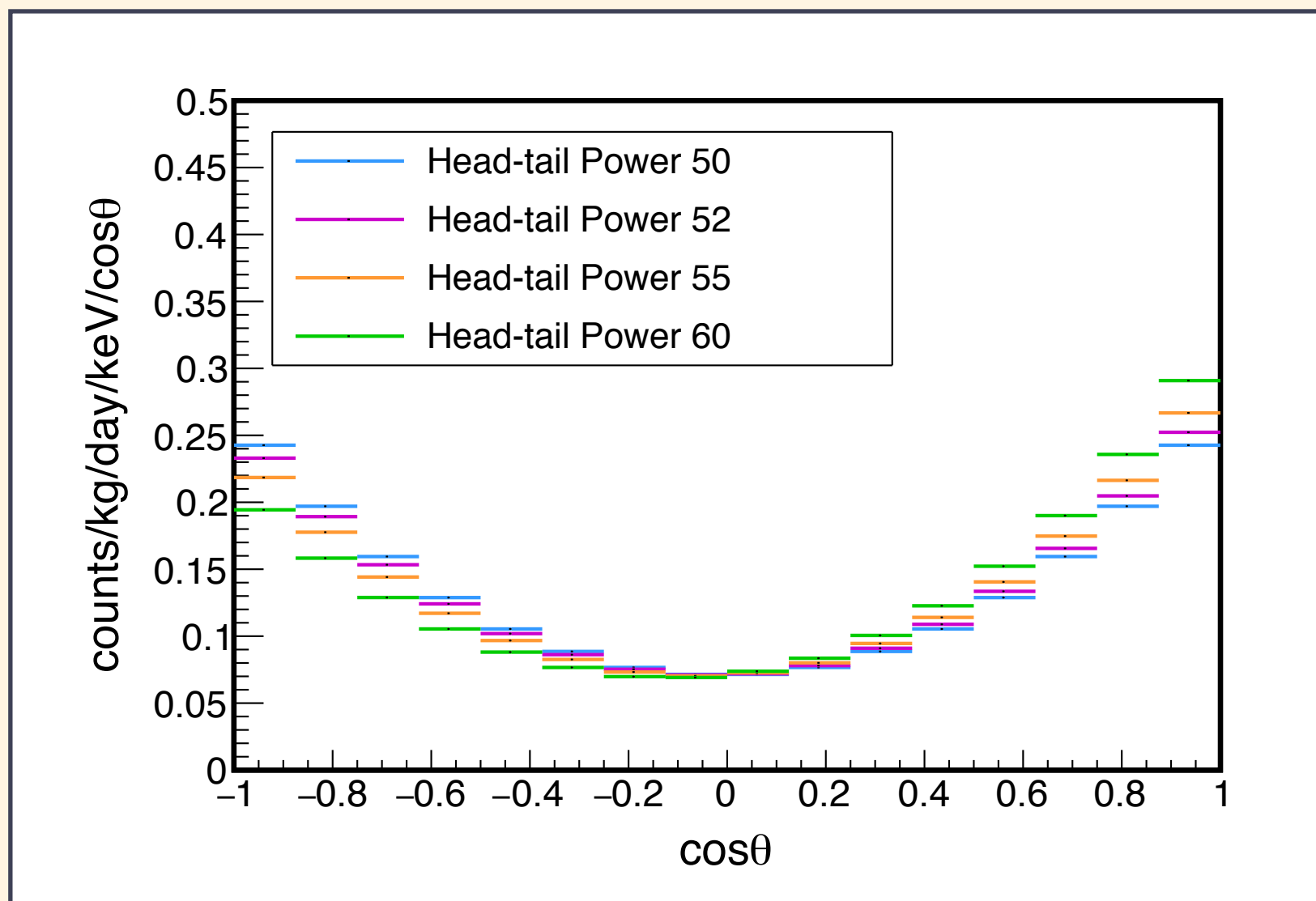
WIMP mass = **100GeV/c²**

cross-section(SD) = **1pb**

v_{DM} = **220 km/sec**

v_{esc} = **650 km/sec**

v_{Earth} ~ **240 km/sec**



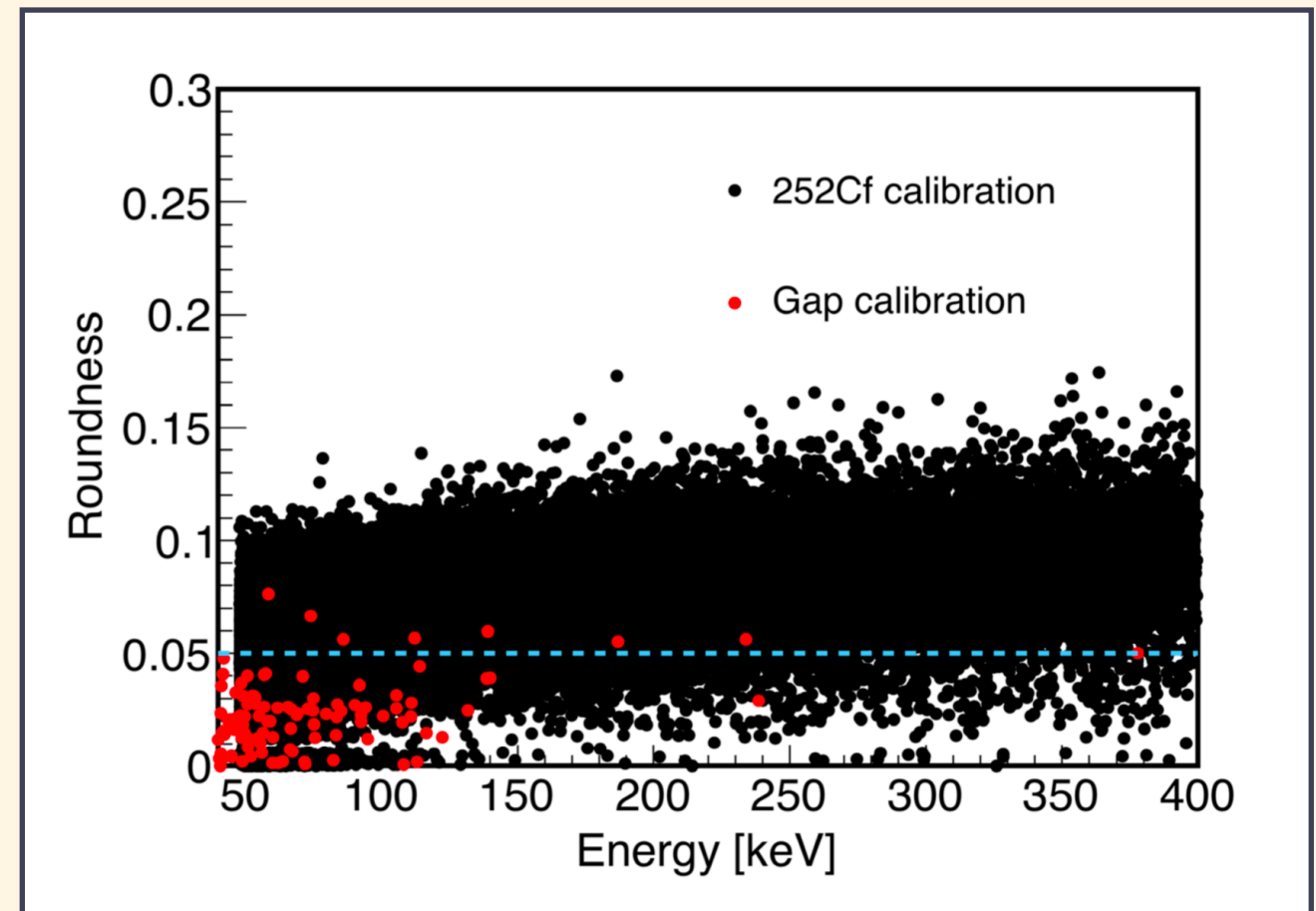
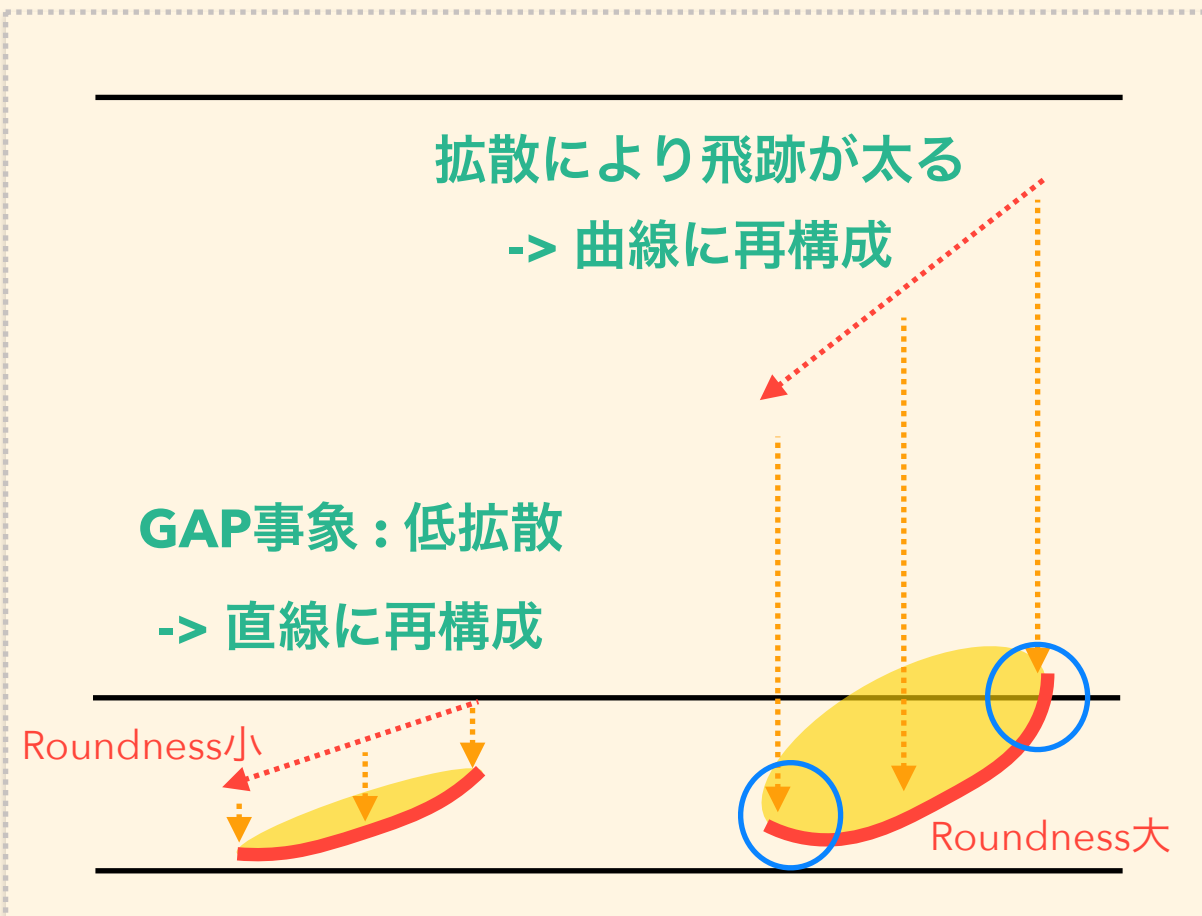
GAP事象選別 -Roundness cut-

- ◎ GAP事象： μ -PICとGEM間の事象

- ▶ μ -PICからの α 線バックグラウンドなどが含まれる

- ◎ Roundness (飛跡の非線形性)

- ▶ Zが小さい(**GAP事象**など)とドリフト距離が短く、低拡散となる
 - 飛跡がきれいに見える
 - 線形性が保たれるため、Roundnessが小さくなる



Background

- 現在の主な背景事象

- ▶ ガンマ線・ μ -PIC表面事象

- 次の一手

- ▶ 表面事象

- **Low-BG μ -PIC**

- **陰イオンガス**

神戸大学 窪田 発表

- ▶ ガンマ線

- **Cuシールド**

神戸大学 石浦 発表

- 機械学習

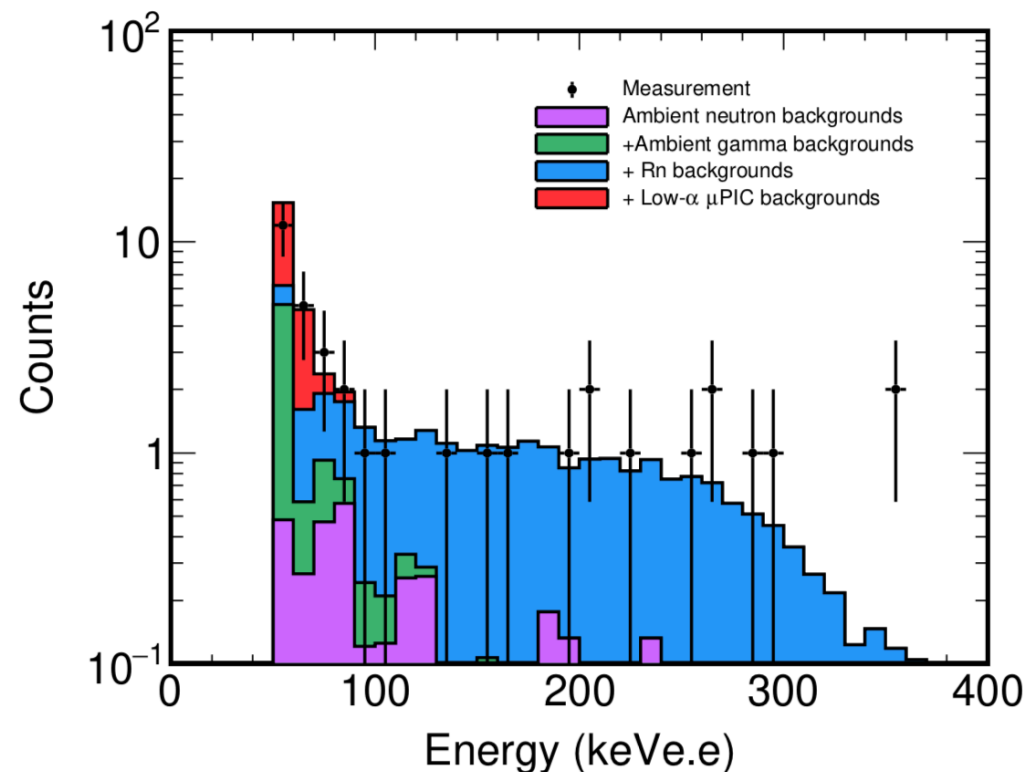


Figure 4.4.1: Predicted and measured spectra without roundness-cut. The violet histogram is contributed by the ambient neutrons. The green stacked histogram shows the ambient gamma-rays. The blue stacked histogram is contributed by the ^{222}Rn and ^{220}Rn backgrounds. The red stacked histogram is the LA μ -PIC surface backgrounds.

Table 4.4.1: Summary of the predicted numbers of background events and measured numbers in the energy region of 50-60 keV.

Source	w/o roundness	w/ roundness
Ambient gamma-rays	4.6 ± 2.7	1.5 ± 1.5
Ambient neutrons	$(4.8 \pm 1.2) \times 10^{-1}$	$(3.5 \pm 0.9) \times 10^{-1}$
^{222}Rn	$(8.6 \pm 3.5) \times 10^{-2}$	$(5.3 \pm 2.2) \times 10^{-2}$
^{220}Rn	1.1 ± 0.1	$(6.1 \pm 0.7) \times 10^{-1}$
LA μ -PIC surface	9.1 ± 2.3	$< 1.2 \times 10^{-1}$
Total background	15 ± 3.5	2.5 ± 1.5
Measurement	12 ± 3.5	2.0 ± 1.4

神戸大学 池田智法 博士論文より

新しい解析手法

- ◉ $\cos\theta$ vs Energy 分布を用いた上限値の決定 (各binの値Likelihood)

