

V-331-a 日本天文学会2024春季年会

宇宙MeVガンマ線観測に 向けた *XRPIX8.5* と CsI シンチレータで構成する コンプトンカメラの開発

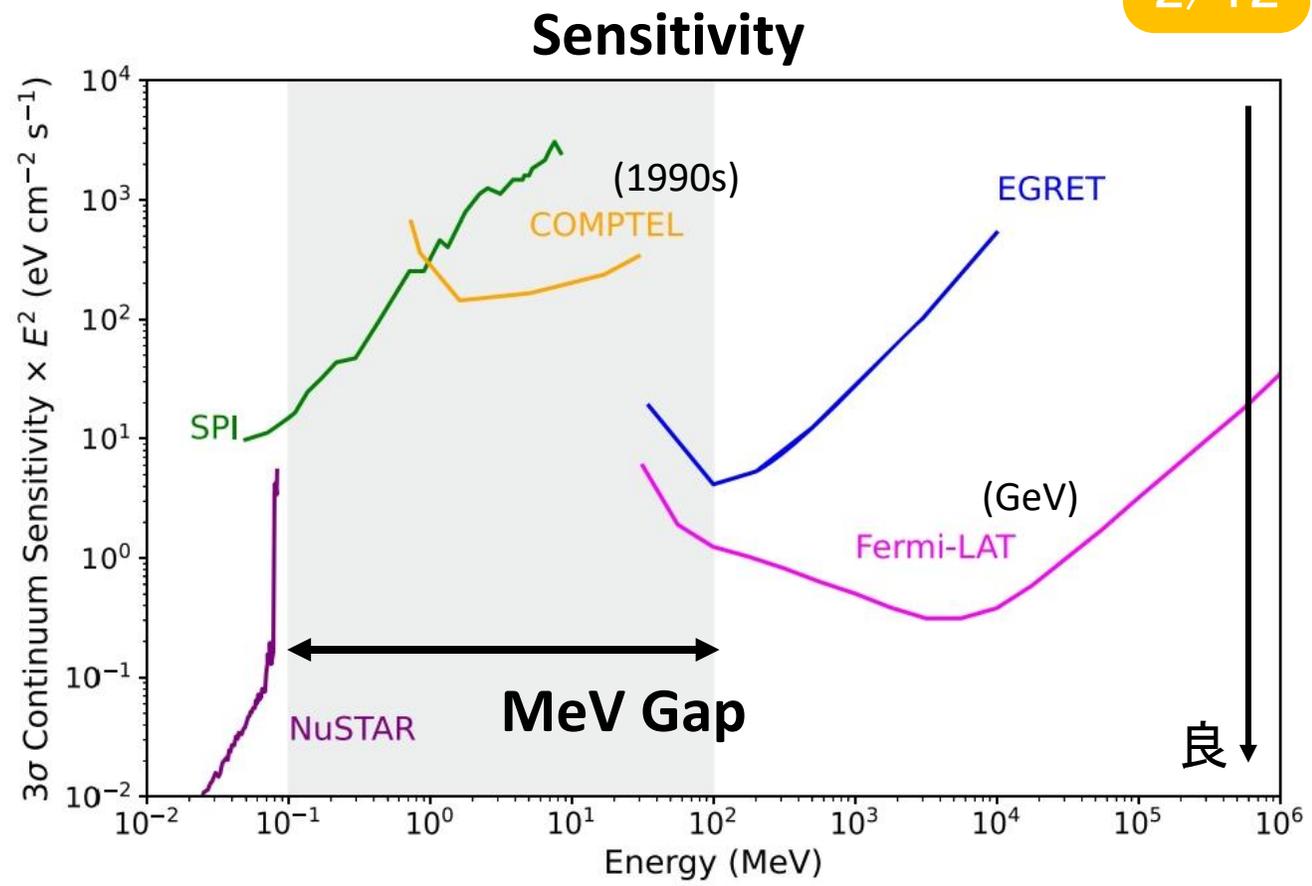
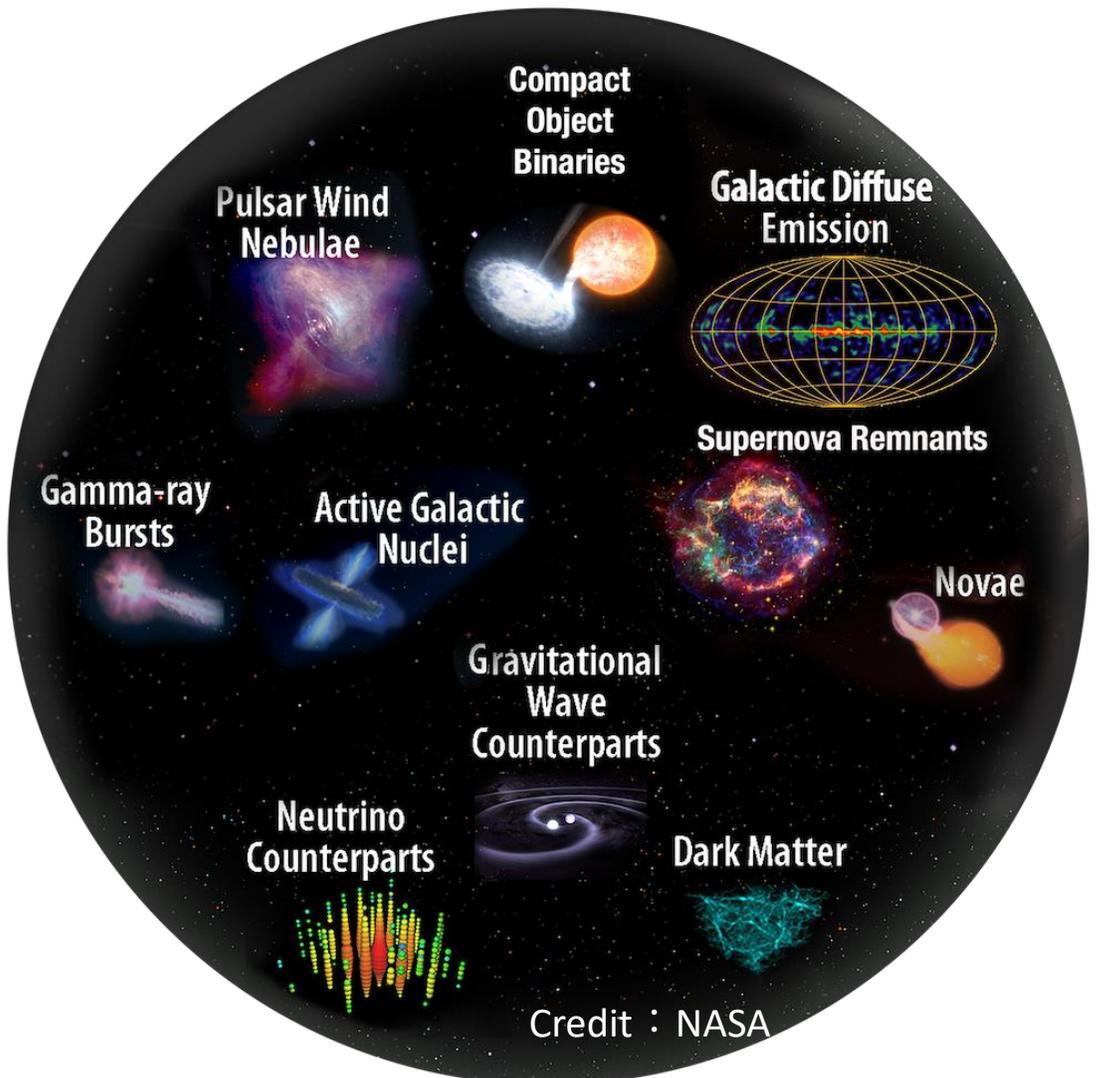
広島大学

先進理工学研究科 橋爪大樹

須田祐介 深澤泰司(広島大学) 鶴剛(京都大学) 武田彩希(宮崎大学)

イントロダクション

~MeVガンマ線天文学~



Credit : Negro_2022_ApJ_927_225.pdf

- 天体現象が豊富
- 他波長と比べ感度が悪い
- 高感度観測技術の確立が必要

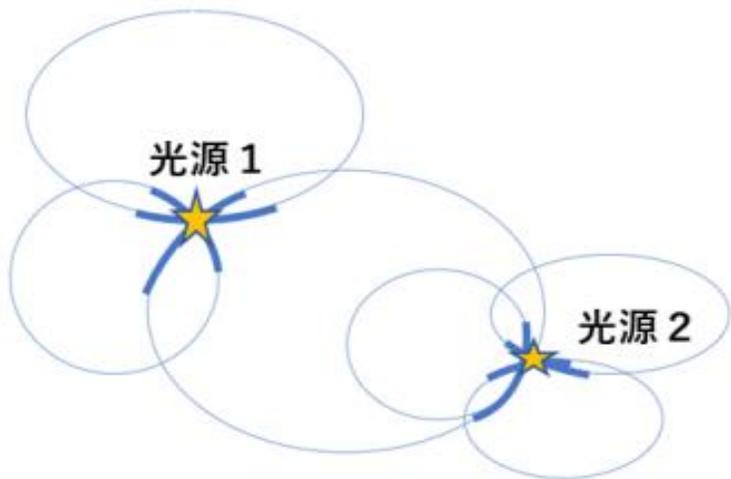
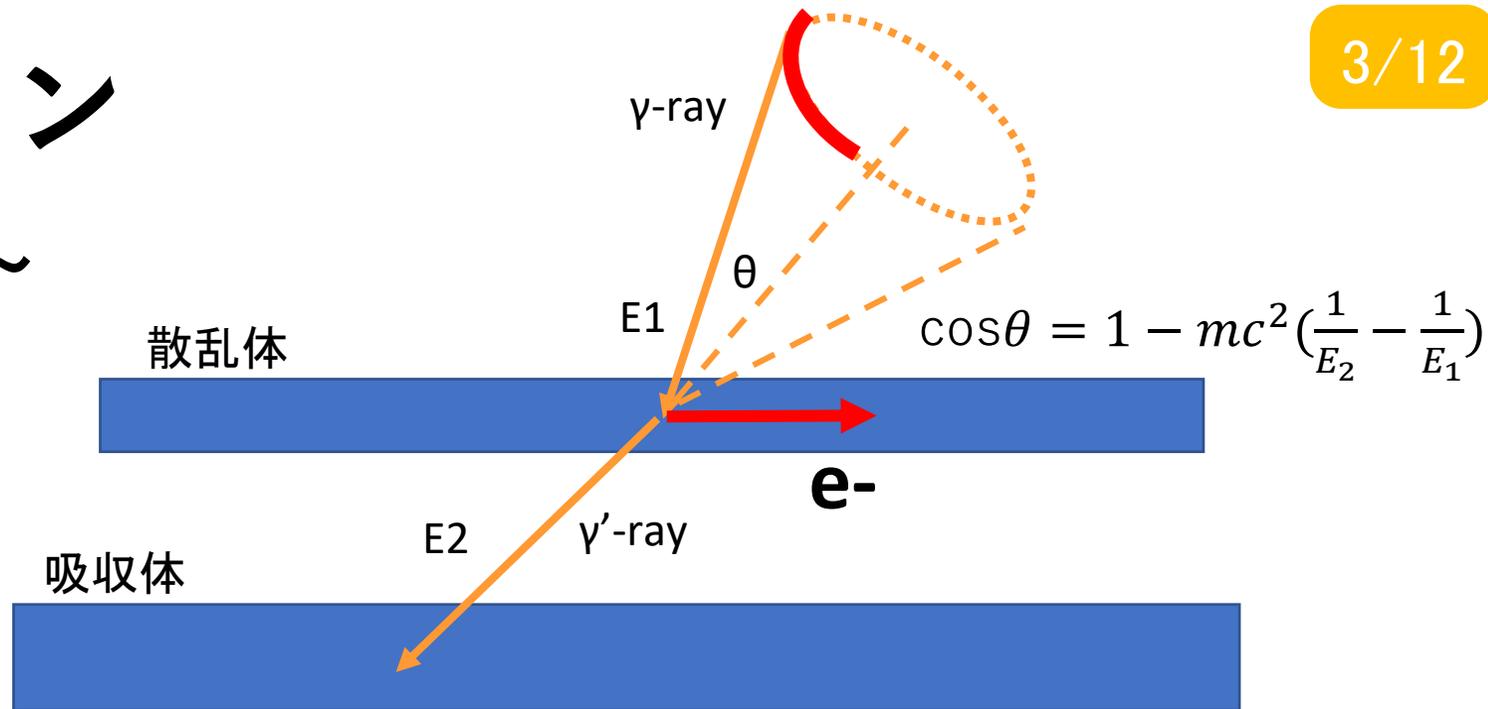
イントロダクション

～MeVガンマ線の検出原理～

(100 keV ～ 数 MeV)

- ・ エネルギーデポジット
- ・ 反応位置

→ コンプトン再構成

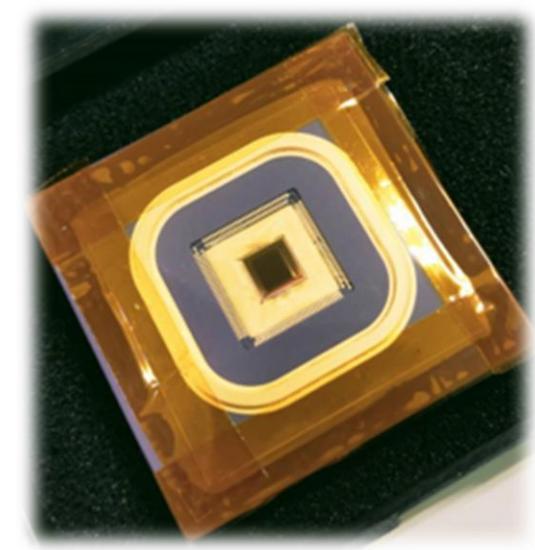


～電子飛跡型コンプトンカメラ～

- ・ 散乱体で電子飛跡を捉え、円環を円弧に
→ バックグラウンドを低減、
広視野を保ったまま**暗い天体も観測可能**
- ・ ピクセル検出器が有効

イントロダクション

～SOI ピクセル検出器“XRPIX8.5”～

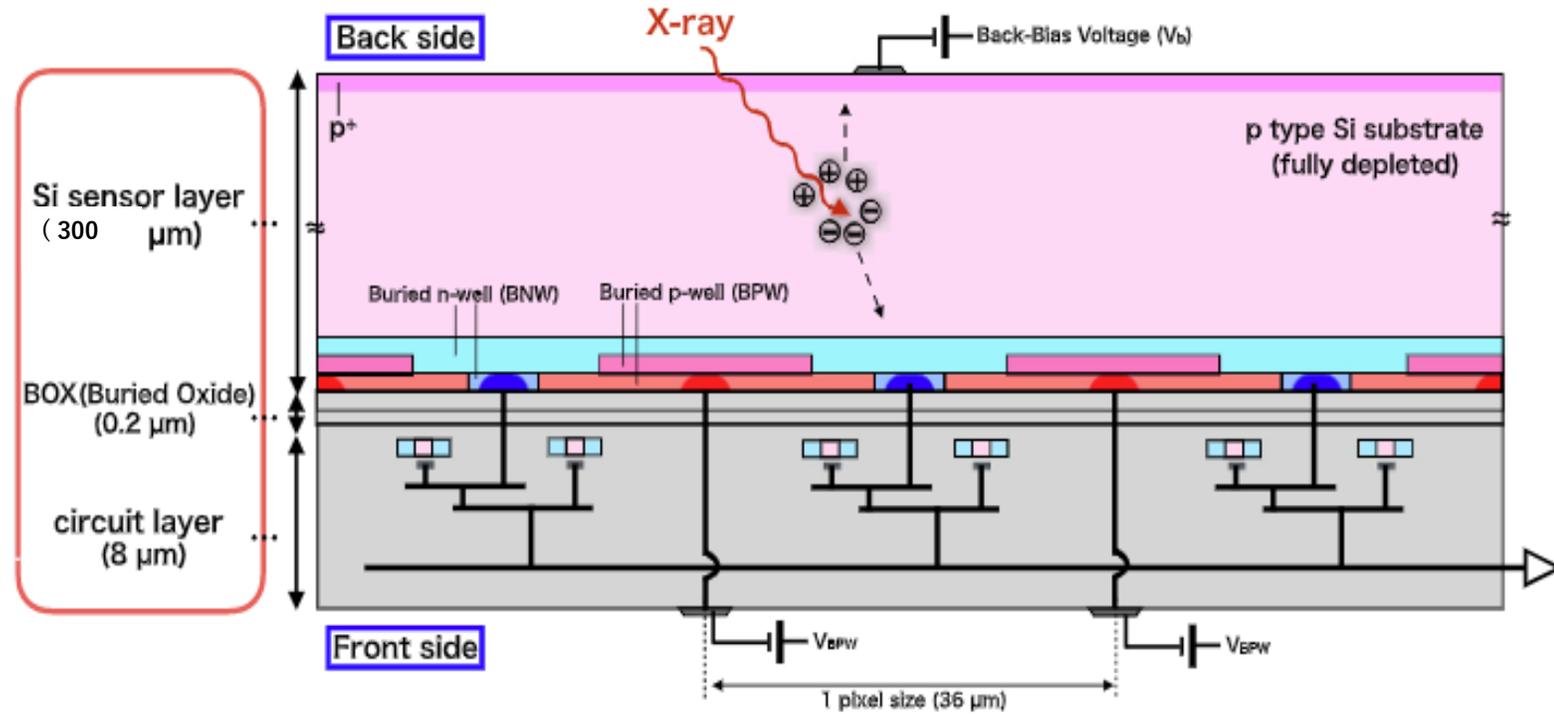


- ・ SOI技術 → 厚い空乏層とCMOS回路を一体化
- ・ イベント駆動読み出し
- ・ 常温で完全空乏化
- ・ センサー層: **300 μm** ピクセルサイズ: **36 μm 角**

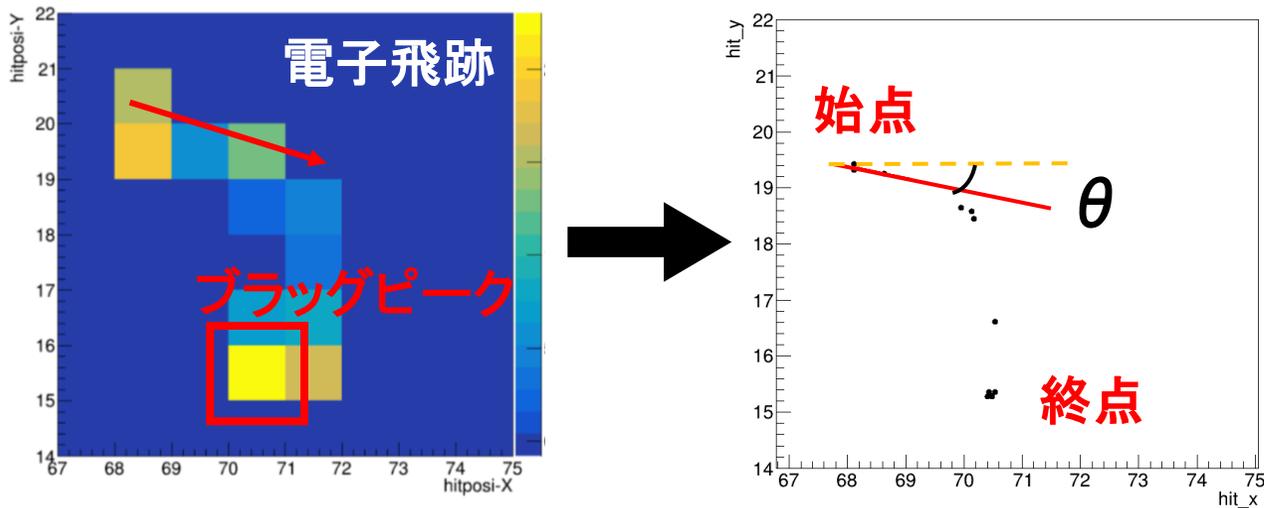
→ 数100 keVの散乱電子に対して感度を持ち、かつその飛跡を測定できると期待

研究目的

XRPIX8.5を用いた電子飛跡型
コンプトンカメラの原理実証



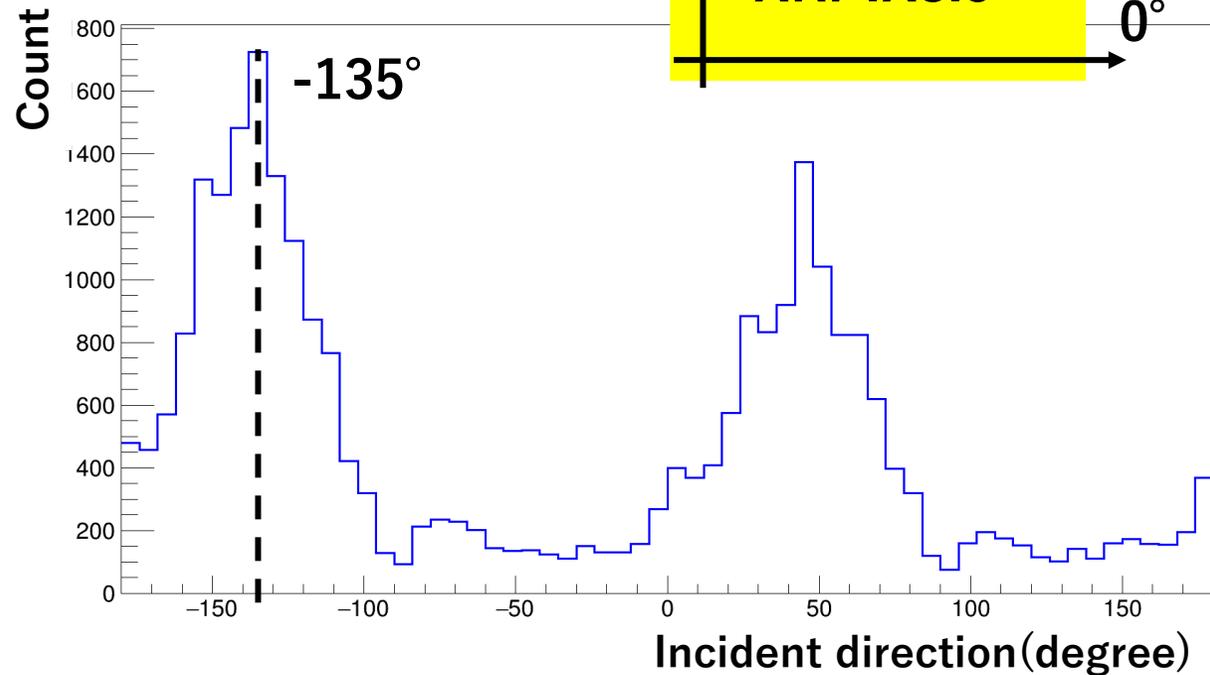
電子の初期運動量推定アルゴリズム (2023春季年会 V-321-a)



本講演内容

コンプトン再構成実験と
同期システムの開発

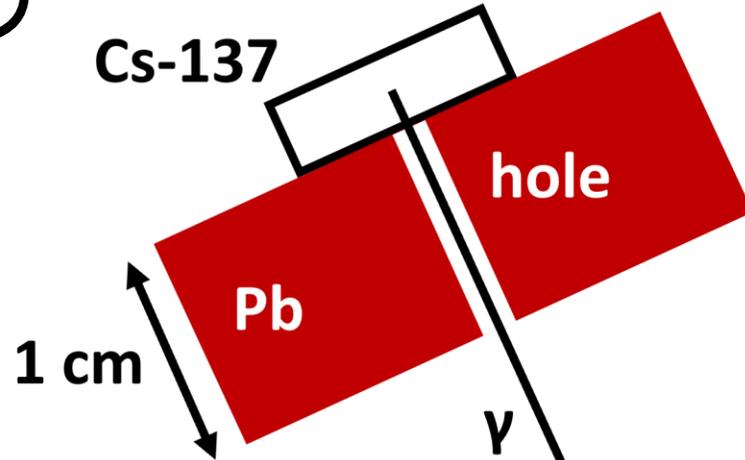
β 線源データの 入射方向分布



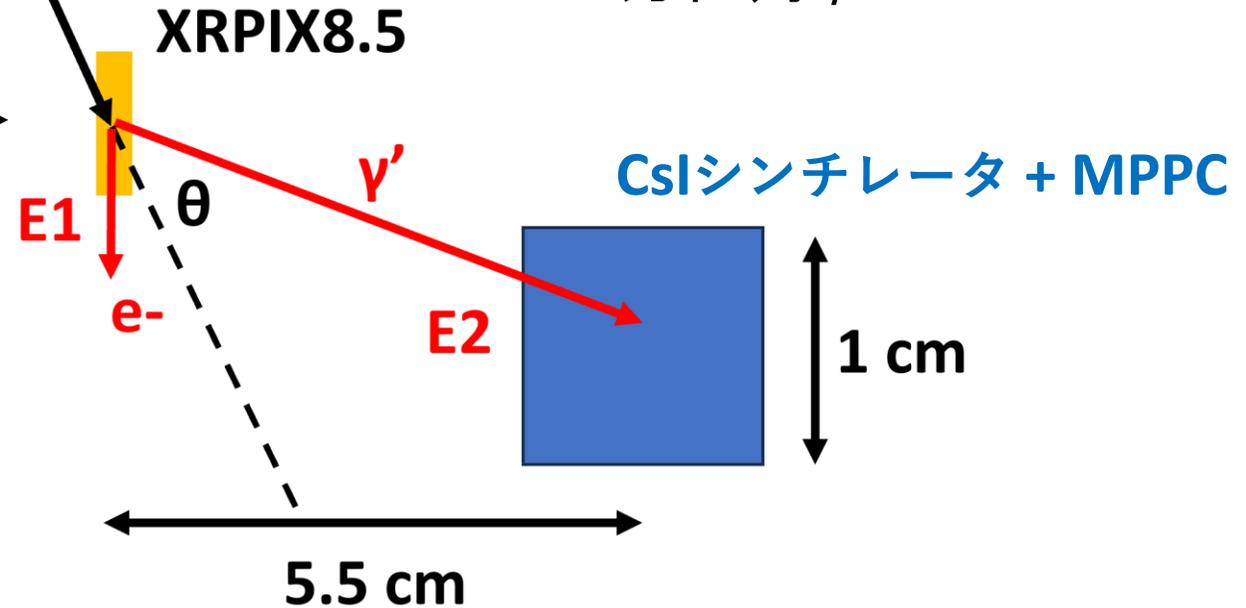
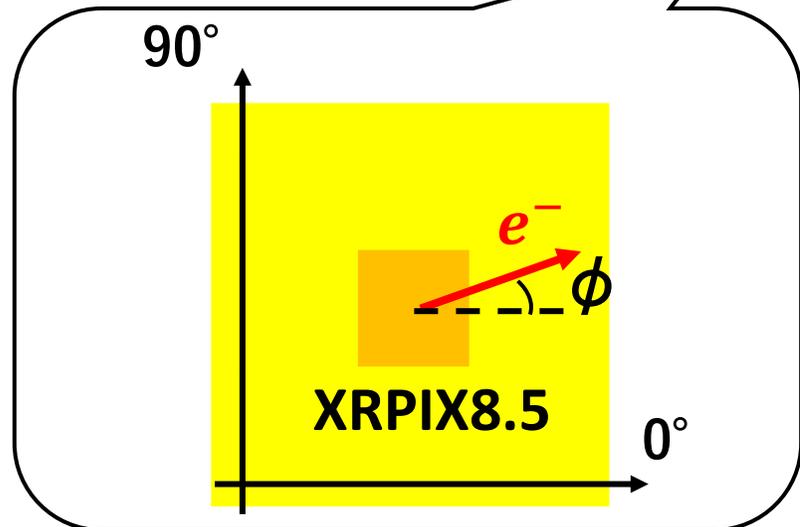
方向に対する感度を確認

コンプトン再構成

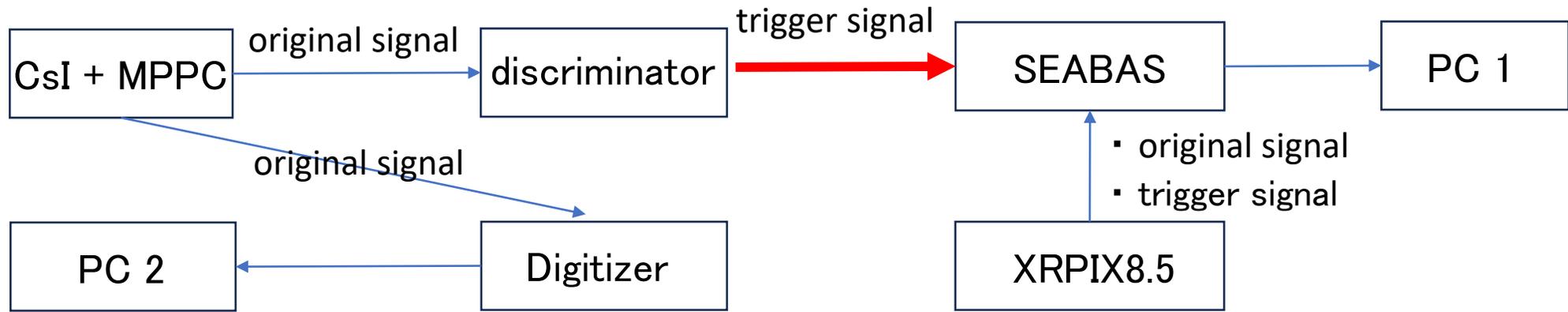
実験セットアップ



- ・ ガンマ線源 : Cs-137 (662 keV)
- ・ 室温 (~20°C)
- ・ 狙った角度
散乱角 θ : 30°, 60°
方位角 ϕ : 0°

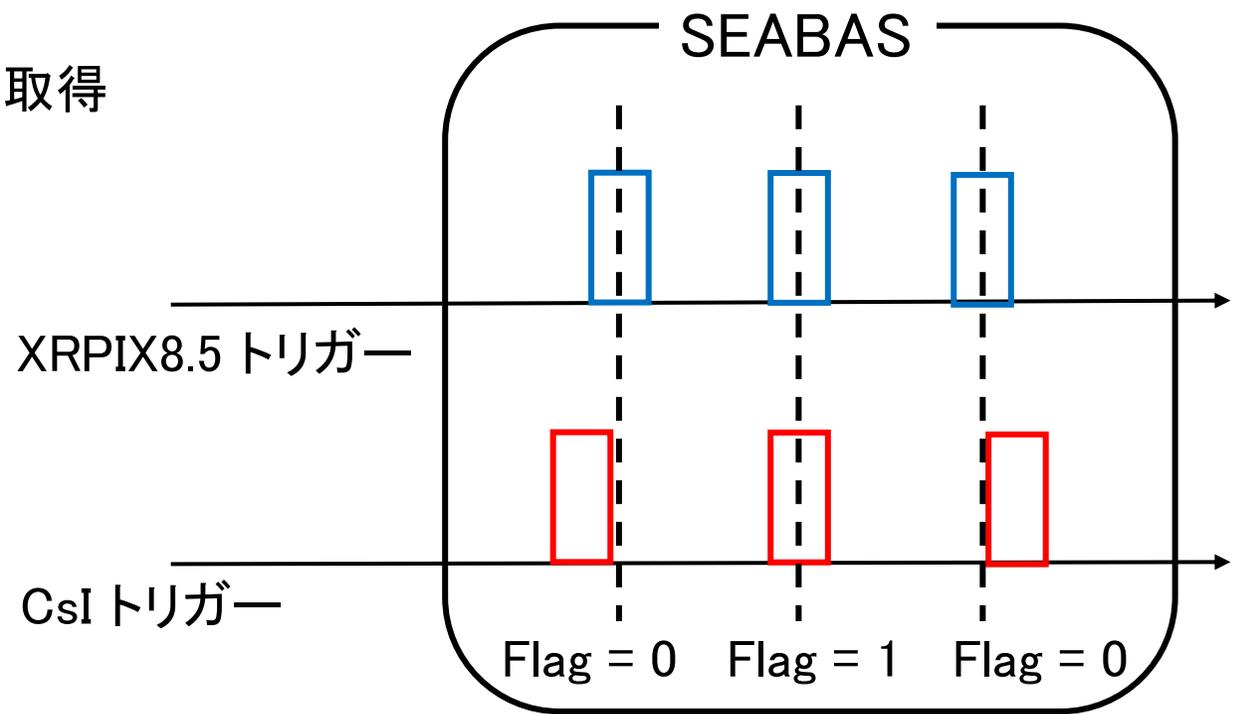


データ取得システム



- ・ 波高値
- ・ タイムスタンプ を取得

1. SEABASで同期イベントを選択する
→ FPGAを改造
2. 独立した2つのシステムの時刻を合わせる



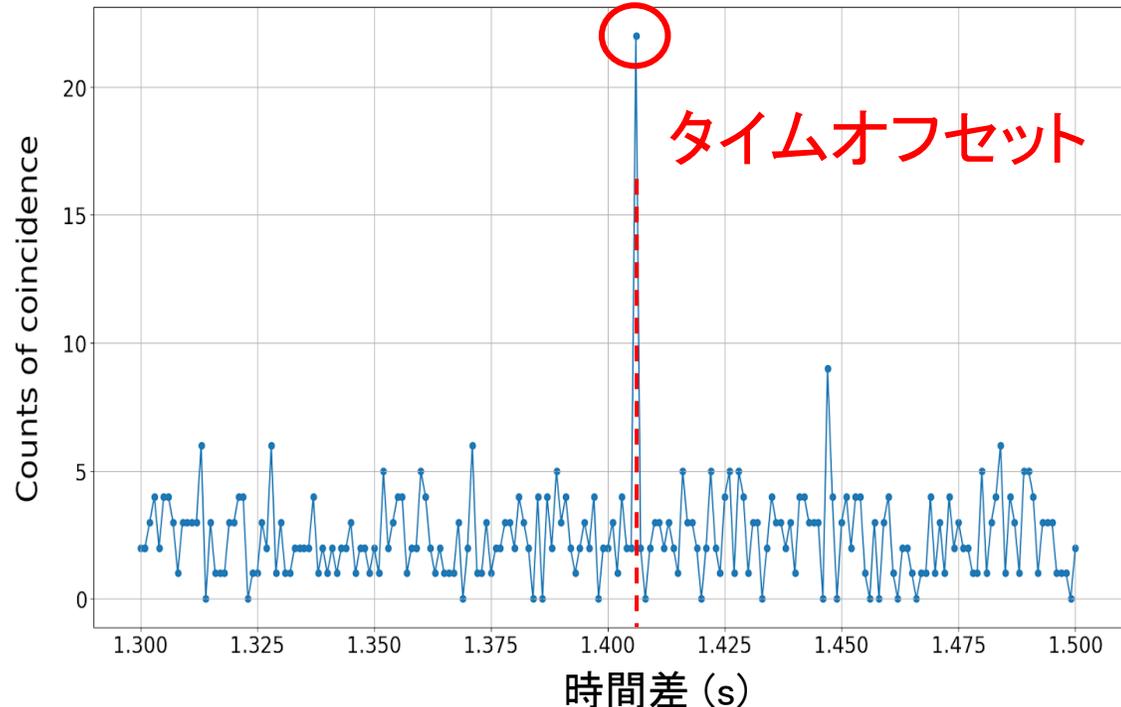
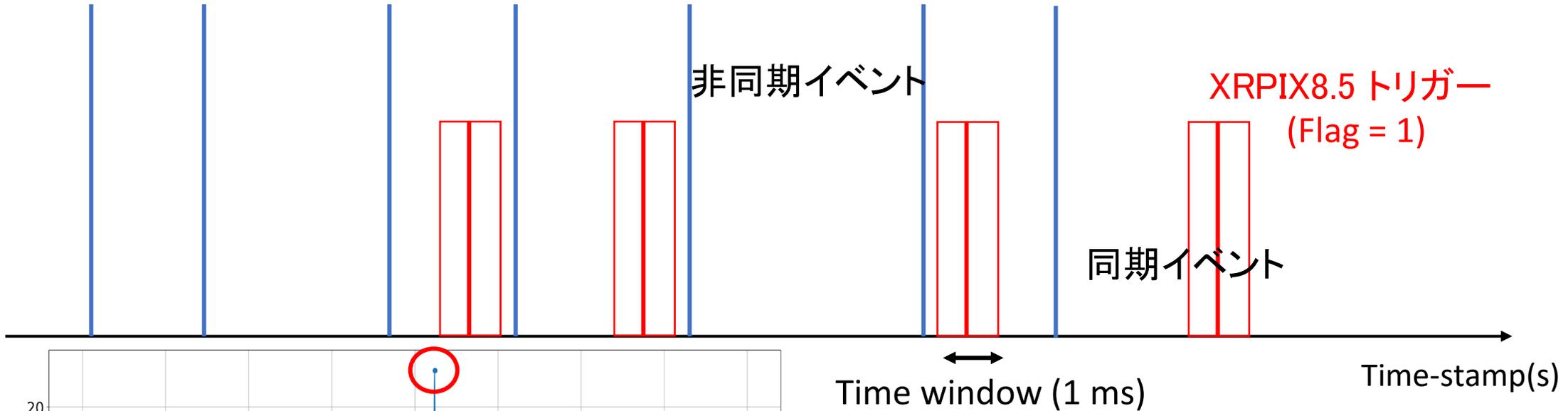
タイムスタンプを用いた同期システムの開発

CsI トリガー

非同期イベント

XRPIX8.5 トリガー
(Flag = 1)

同期イベント

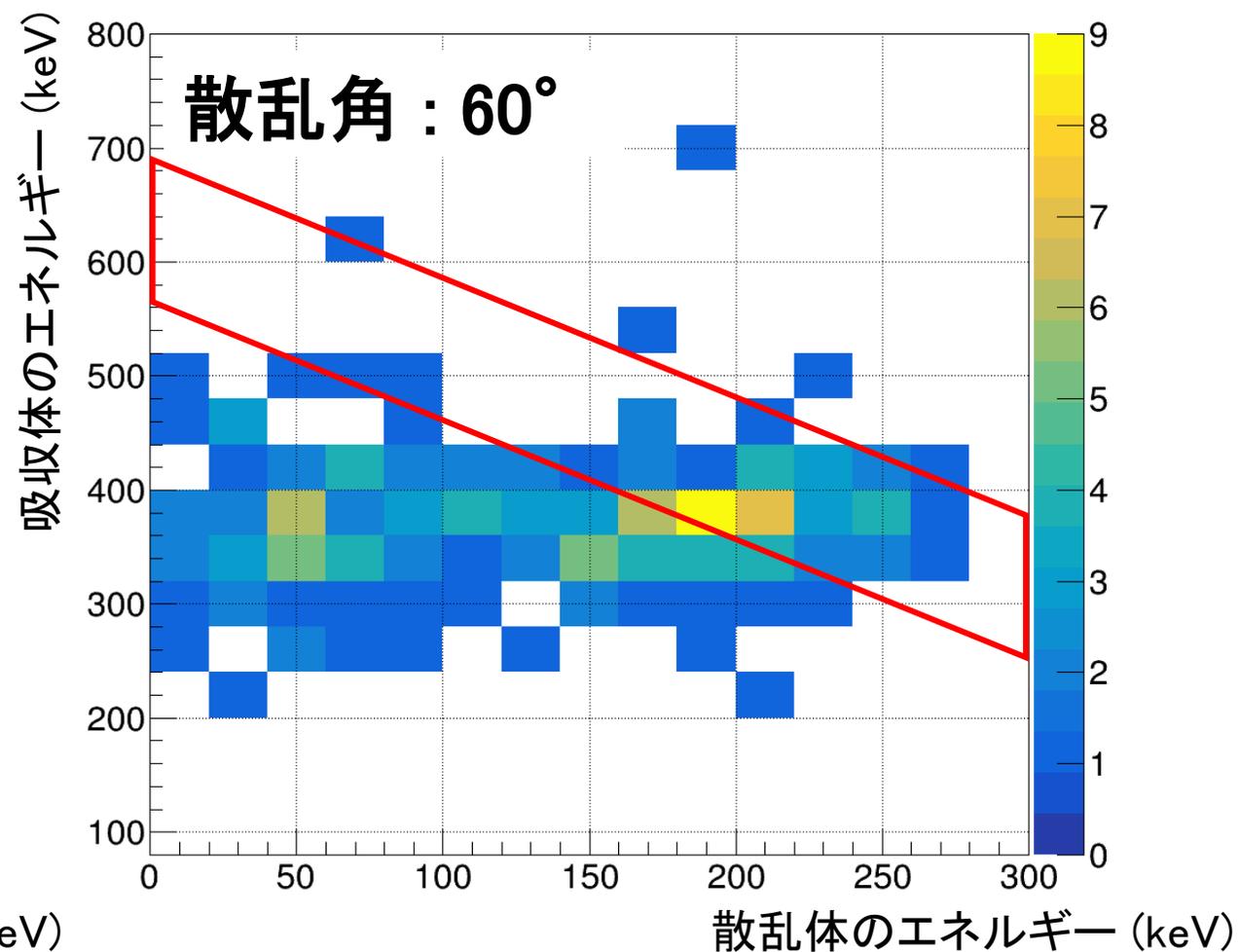
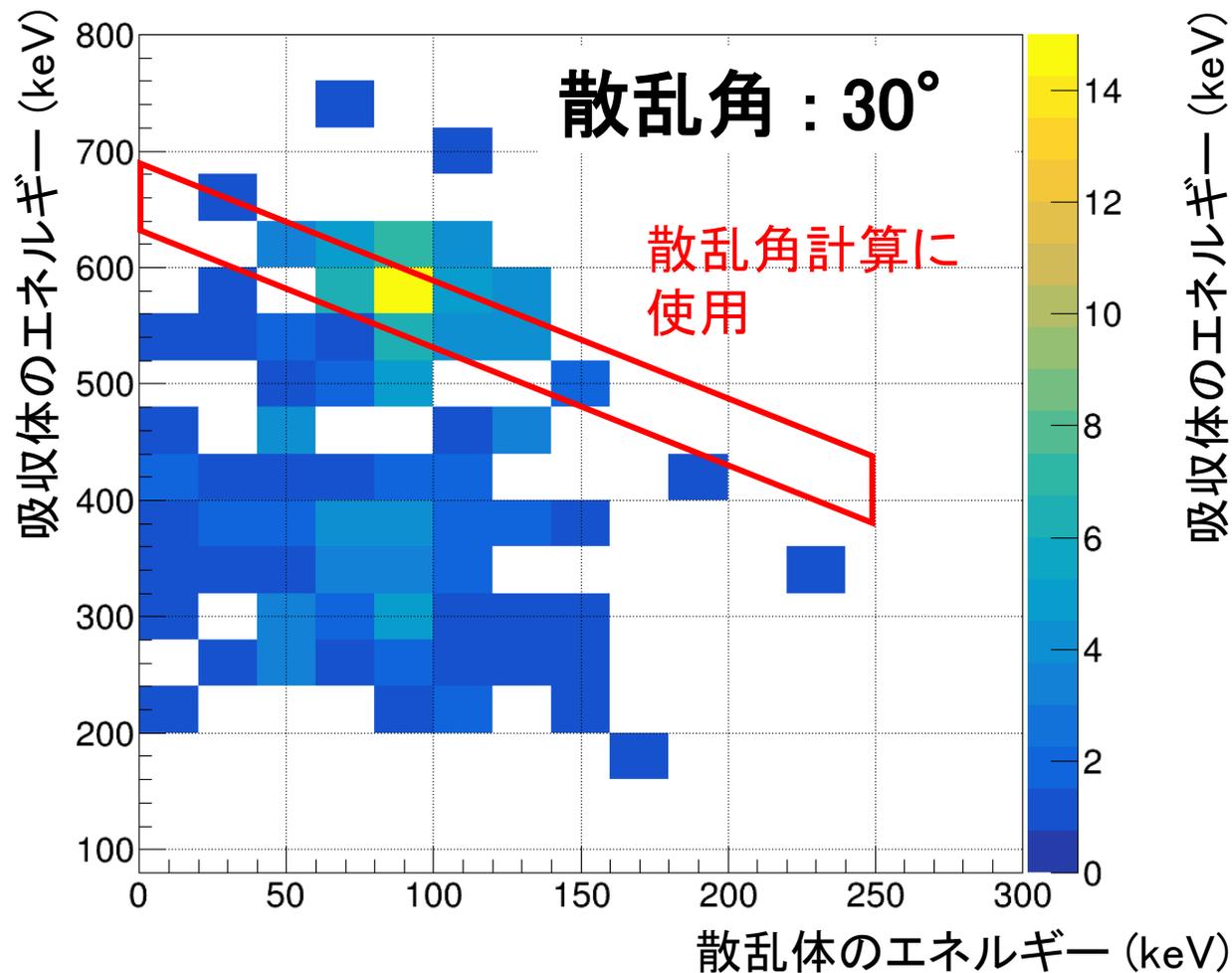


タイムスタンプを用いて信号を同期するシステムを開発

1. タイムウィンドウ
2. シフト
3. 同期イベントの数え上げ
4. タイムオフセットを決定

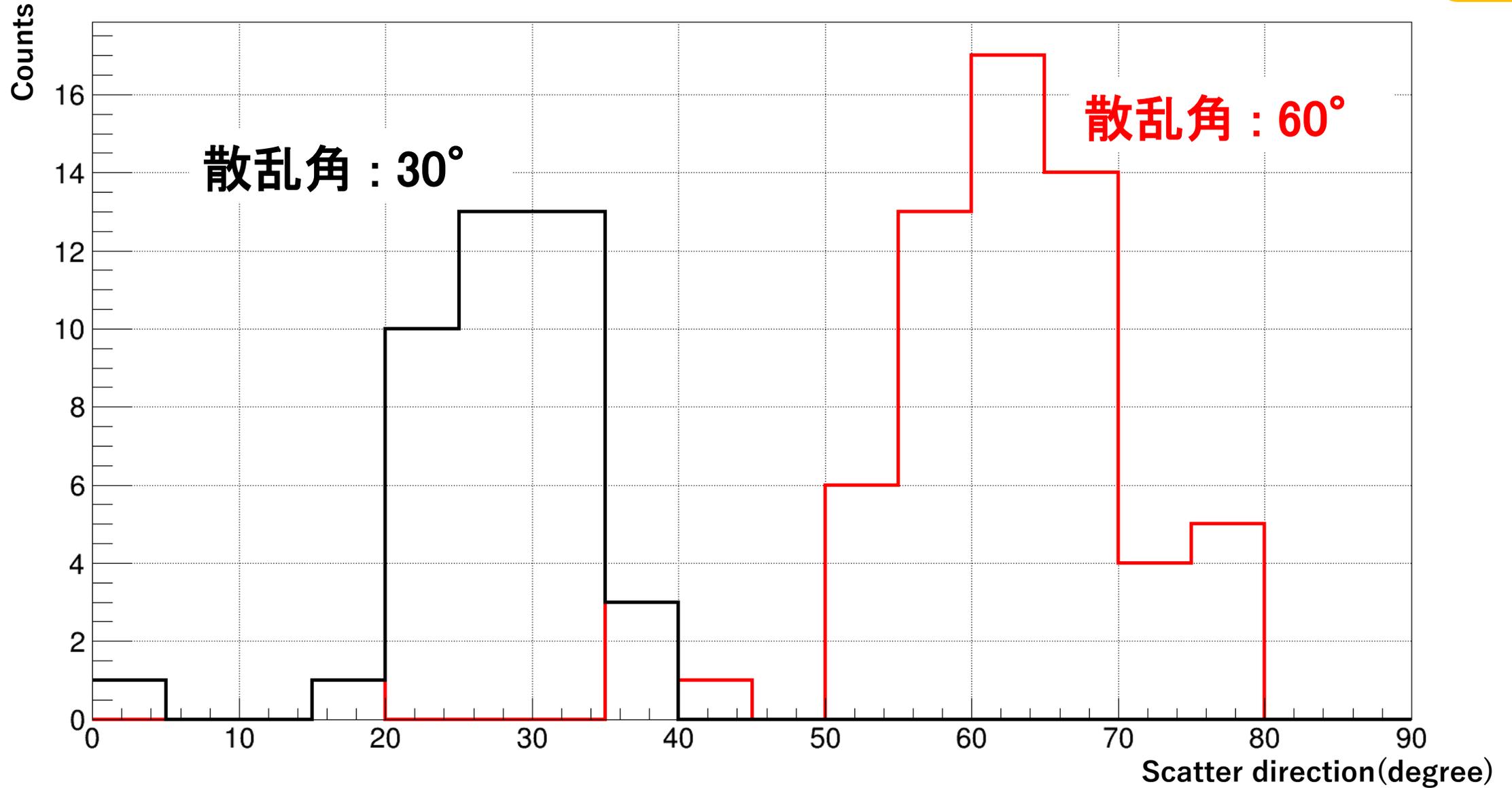
Result エネルギー散布図

9/12



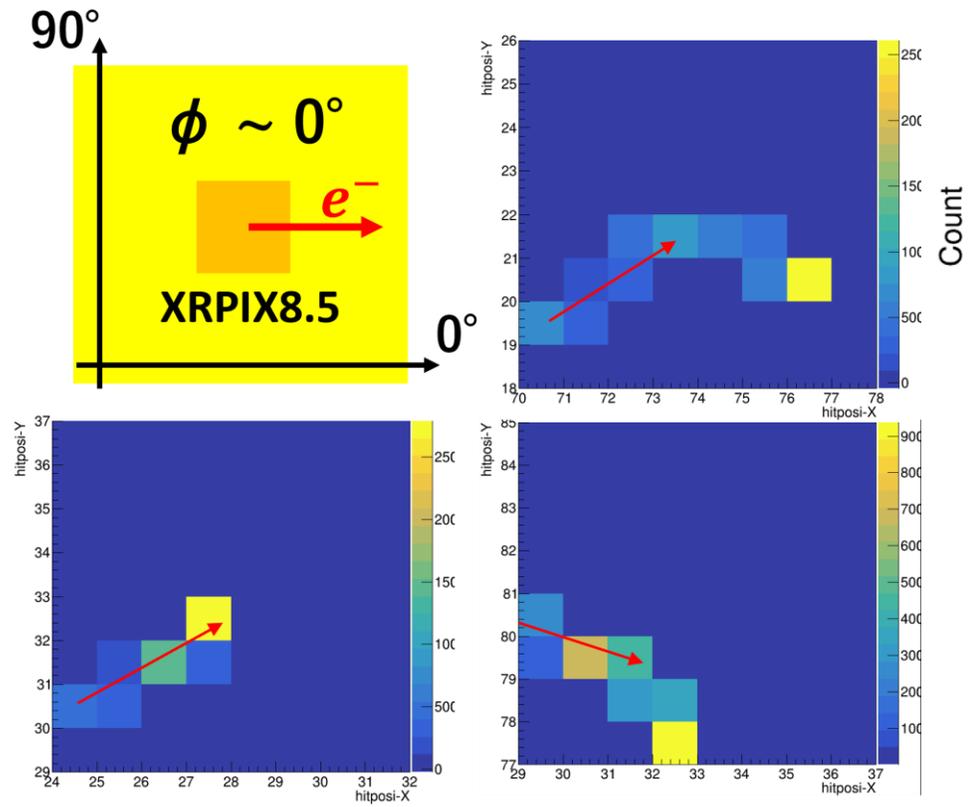
- イベントレート : ~ 1 event / hour
- 散乱電子のエネルギー : 大 → センサー層にエネルギーを落とし切れないイベントが増加(60° 散乱)

散乱角分布

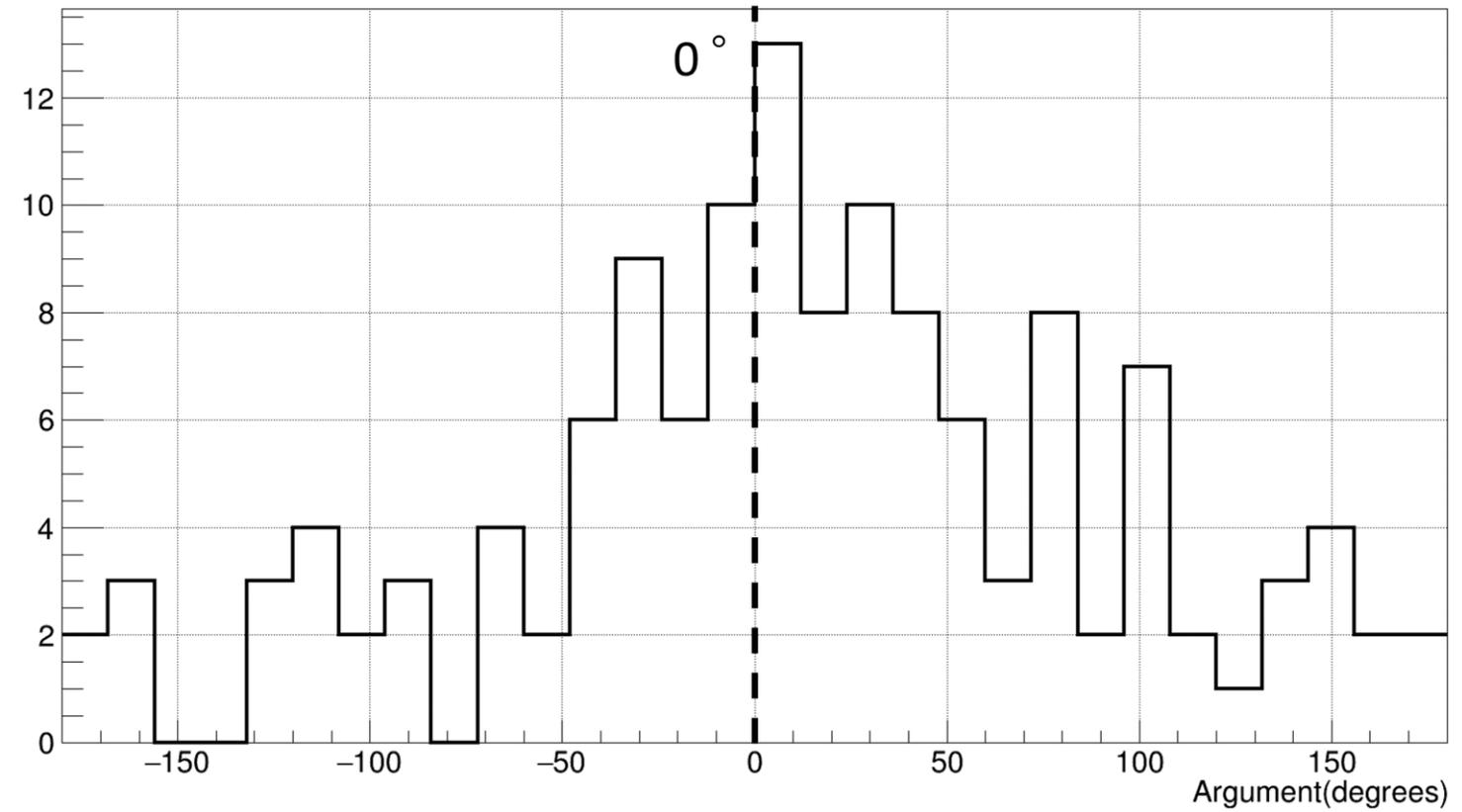


狙った角度周辺に分布 → **コンプトン再構成に成功**

コンプトン散乱事象の電子飛跡の例(60° 散乱)



方位角分布



- 狙った方向にピークを確認
- 抽出したコンプトンイベントの電子飛跡から初期運動量を決定

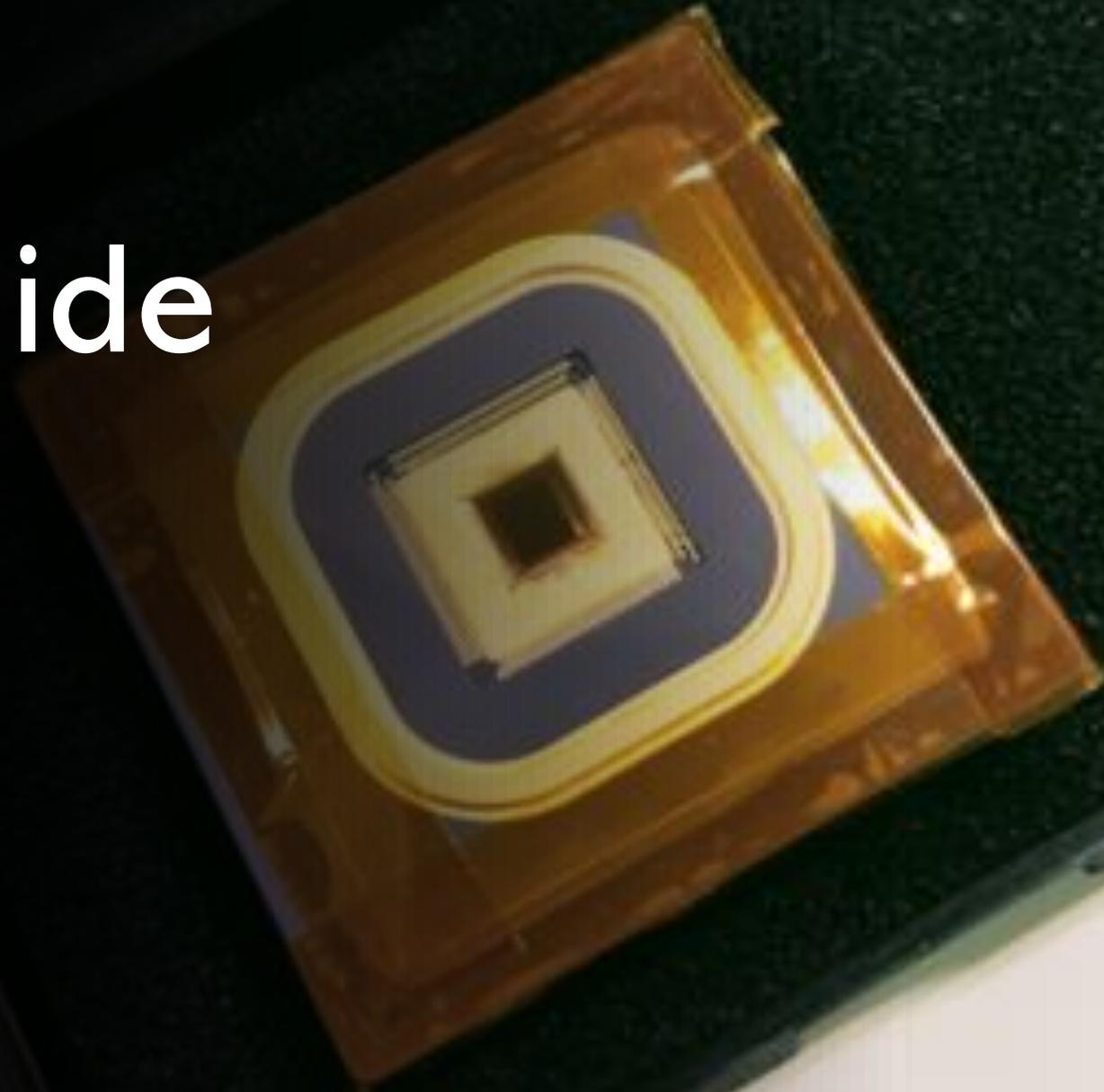
電子飛跡型コンプトンカメラの散乱体として有効

まとめ

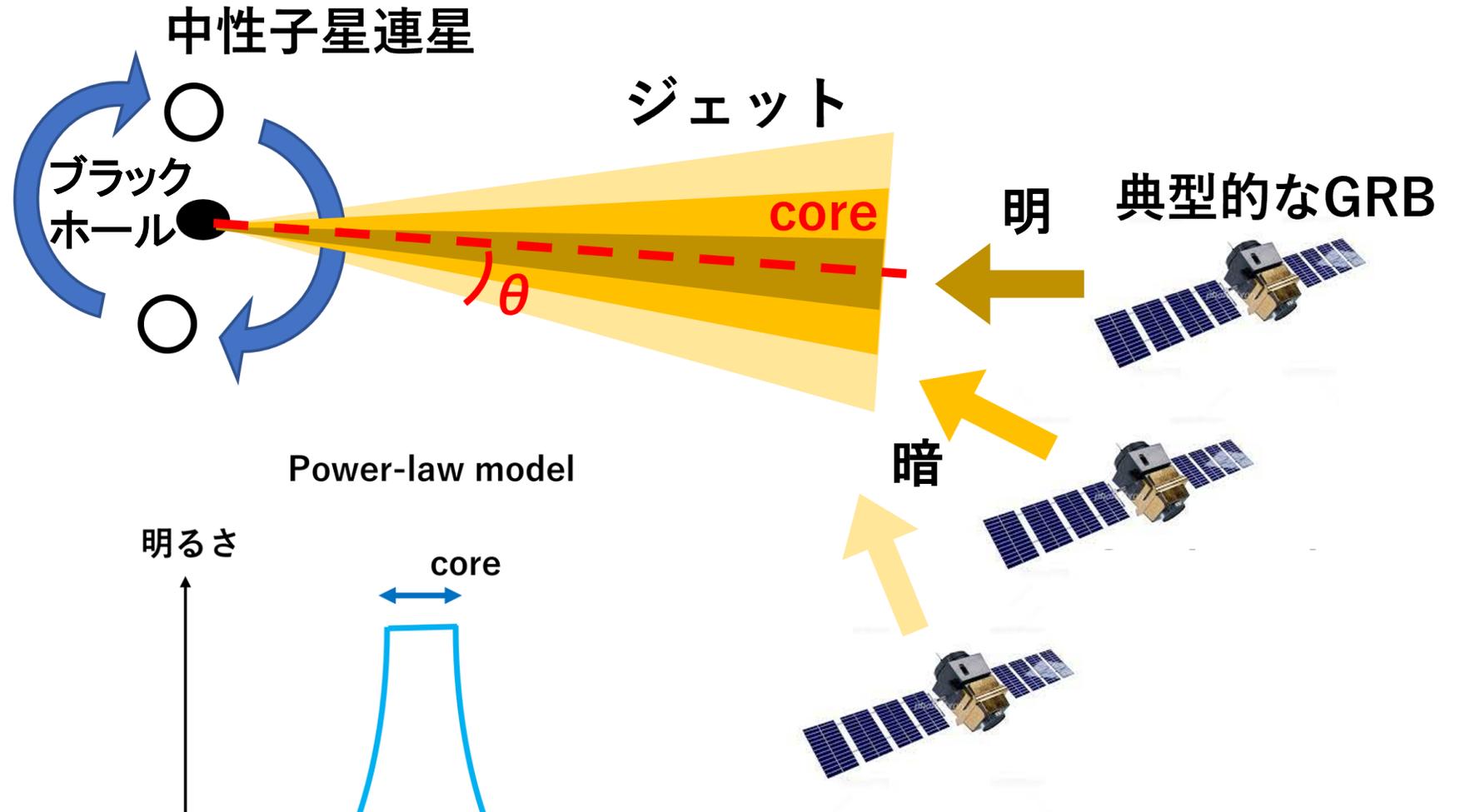
- XRPIX8.5を使った電子飛跡型コンプトンカメラの試作、原理実証
- 散乱電子の初期運動量を推定するアルゴリズムを開発
- XRPIX8.5とCsIシンチレータで簡易的なコンプトンカメラを試作
- コンプトン再構成に成功、狙った方向の電子飛跡を確認
- XRPIX8.5は電子飛跡型コンプトンカメラの散乱体として有効

—

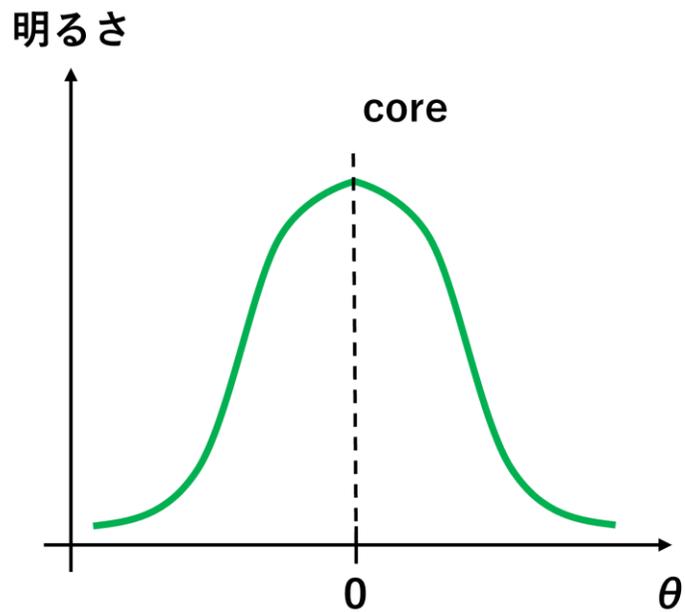
Back up slide



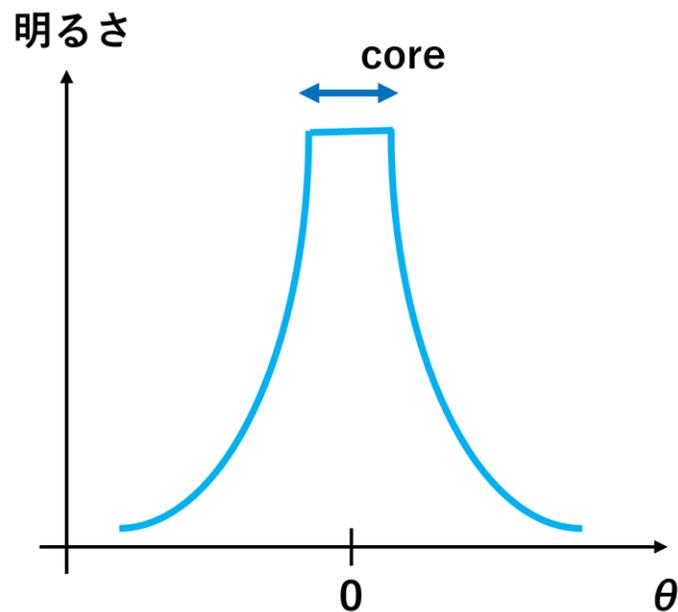
～ガンマ線バースト(GRB)～

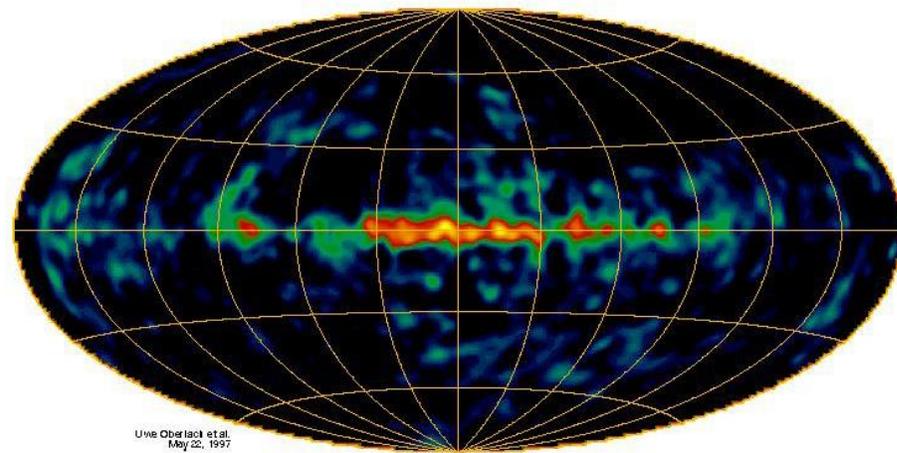
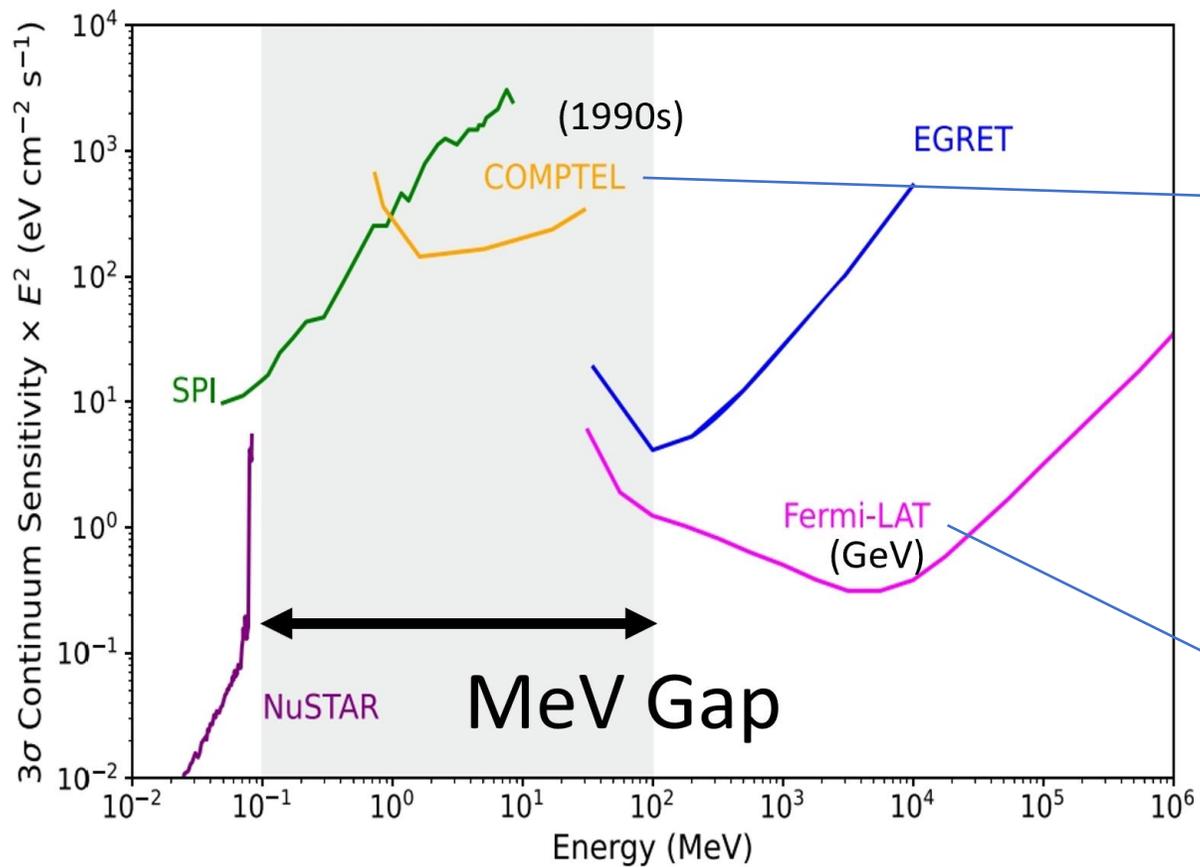


Gaussian model

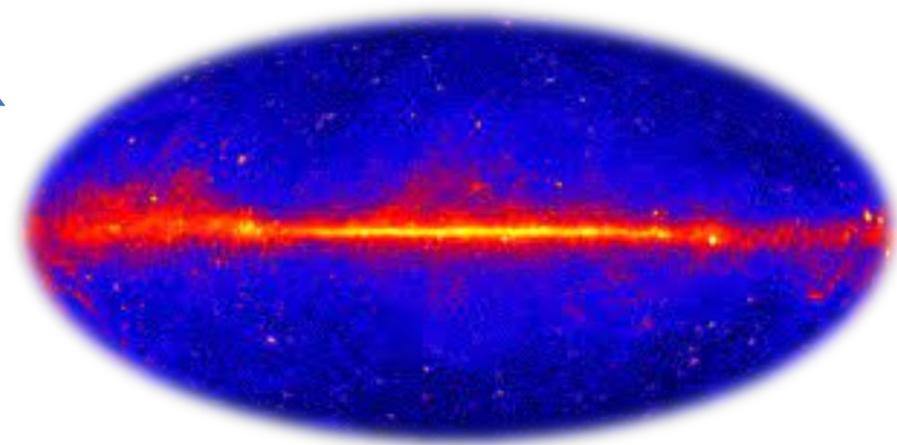


Power-law model



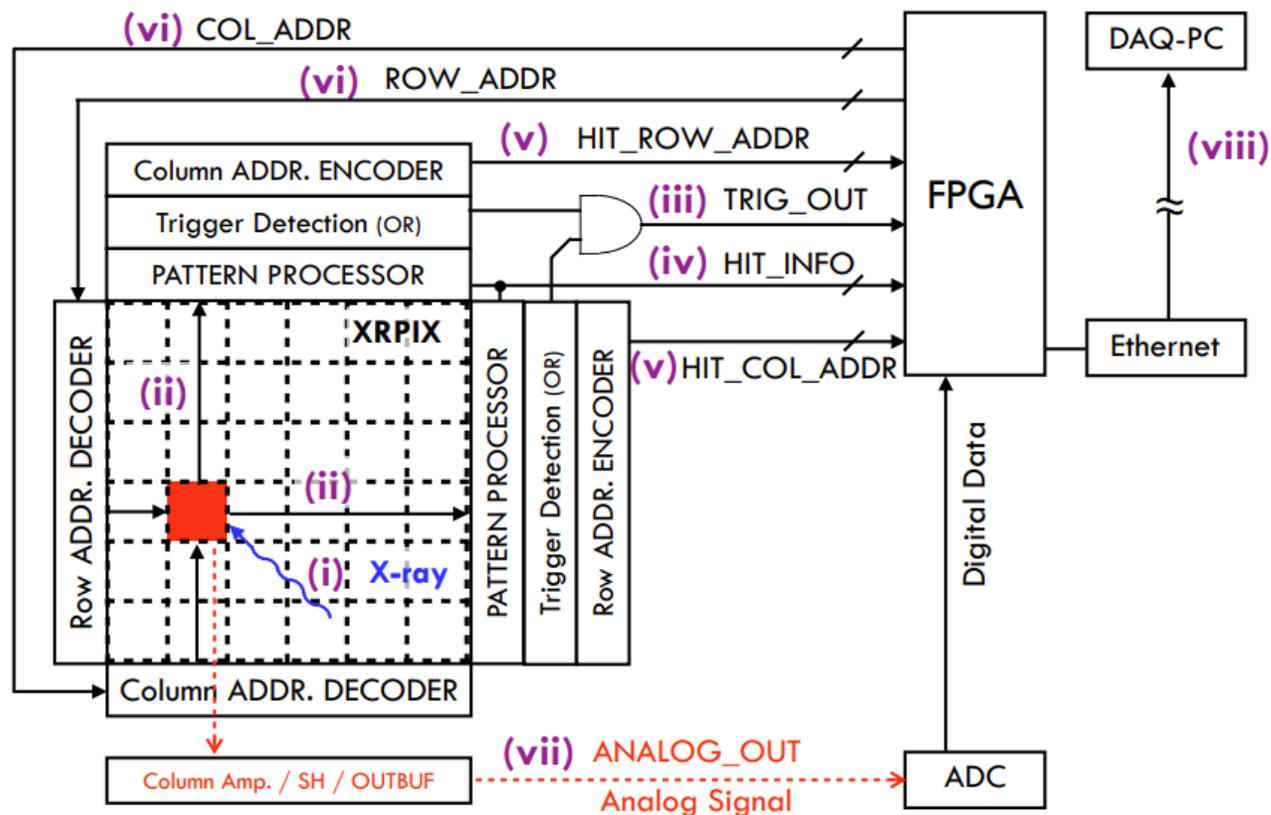


~ 30 天体

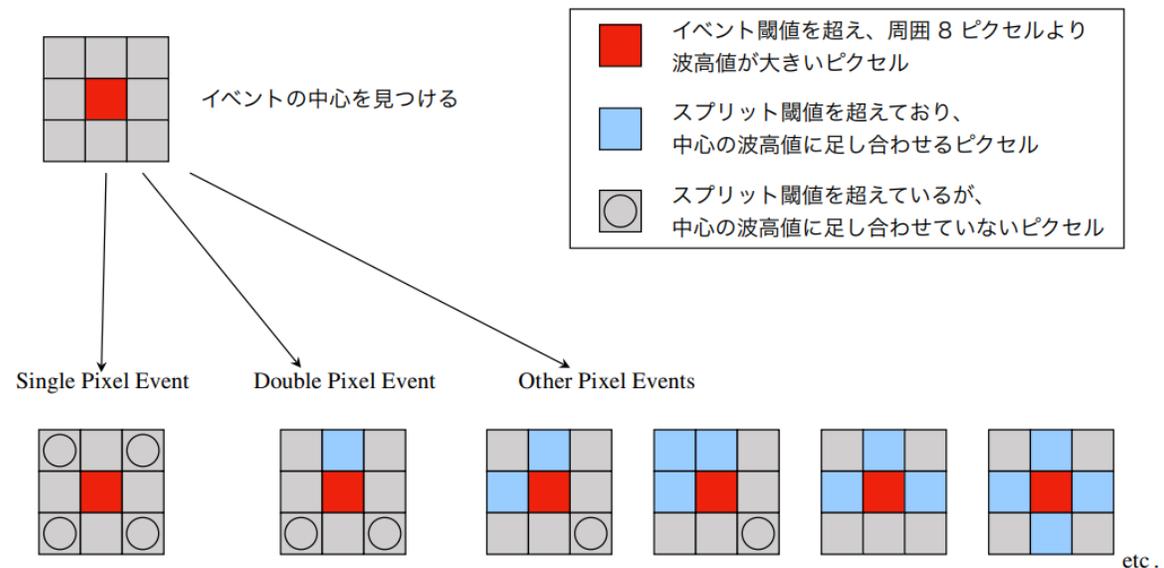


> 6000 天体

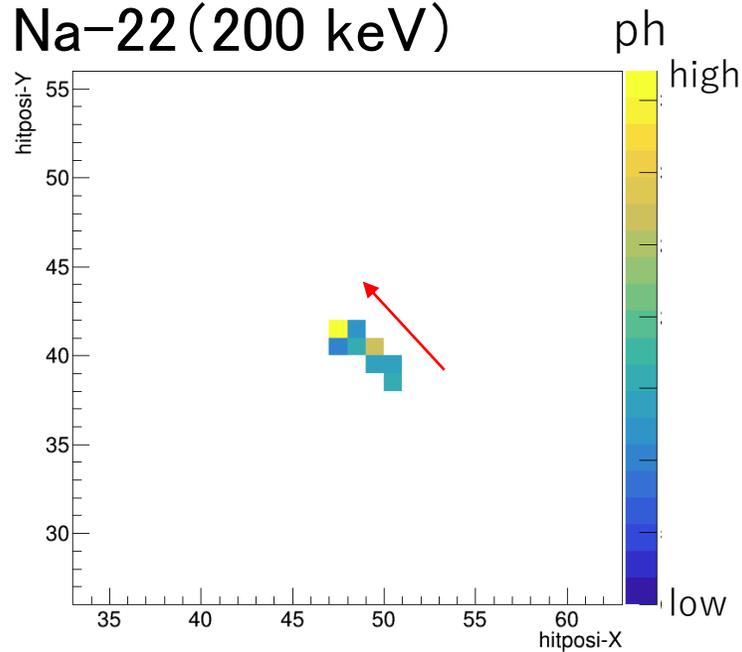
～イベント駆動読み出し～



～イベント判定～



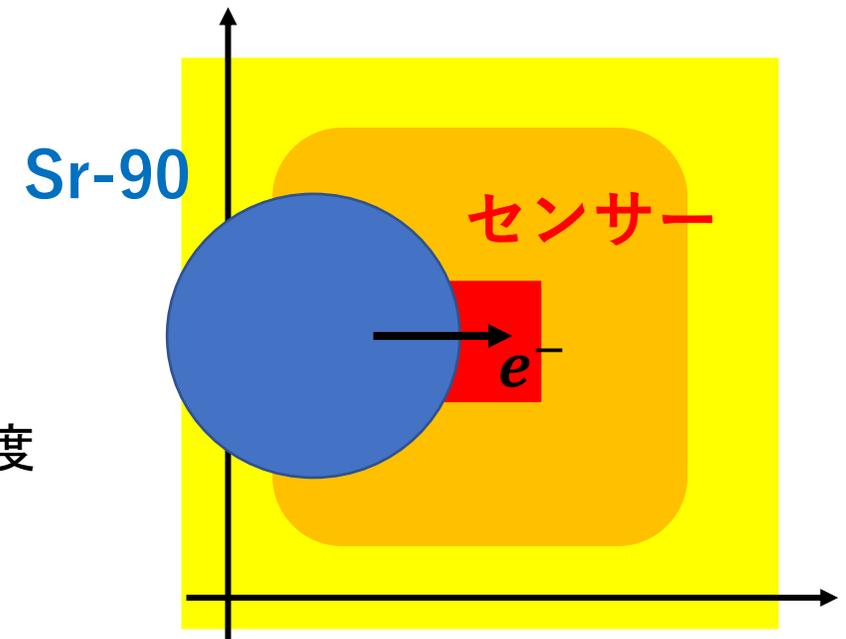
電子飛跡の方向推定



- 数100 keVの電子飛跡を検出 (ASJ 2022-09 V-335-a)
- 初期運動量方向の決定を自動化
→ 電子飛跡型コンプトンカメラの実現に大きく近づく
- Sr-90を用いて電子飛跡サンプルを取得、それをもとにアルゴリズムを開発

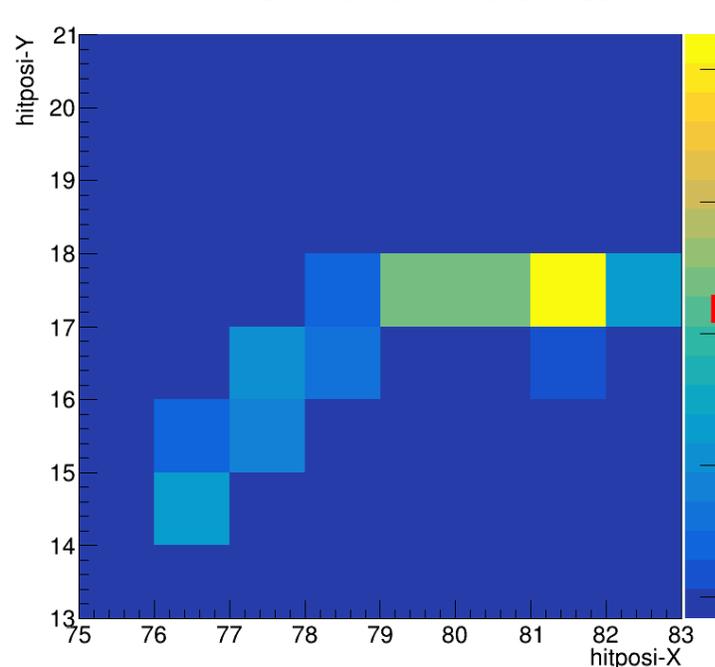
測定条件

- イベント駆動読み出し
- バックバイアス: 200 V
- 室温 (~25°C)
- 異方性が出ることを狙って、センサー真上からずらして配置
- 線源の窓の大きさがセンサーと同程度
- コリメートなし

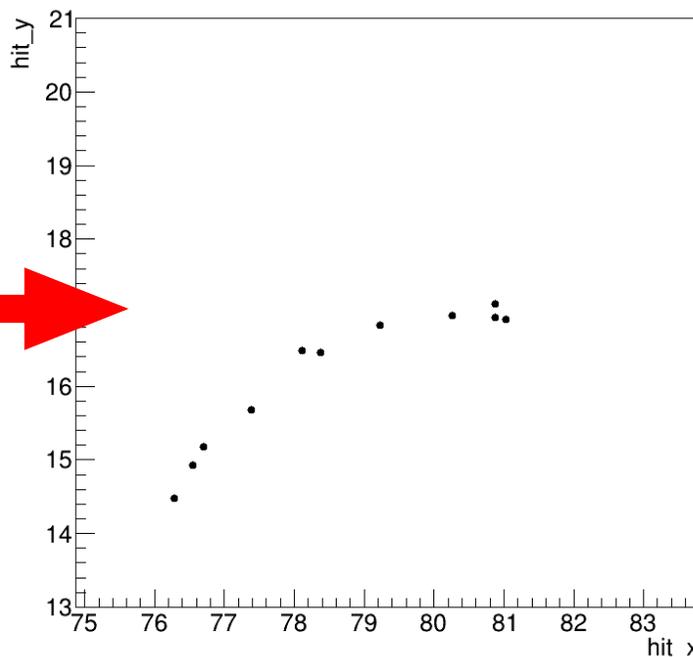


Algorithm 電荷重心法

hit-X-Y-Sr1129-200V-eletrack-35



Sr1129-200V-eletrack-35



先行研究(米田 浩基, 東京大学 修士論文 (2017))を参考に,
3×3ピクセルの範囲で重み付け平均

補正後の位置

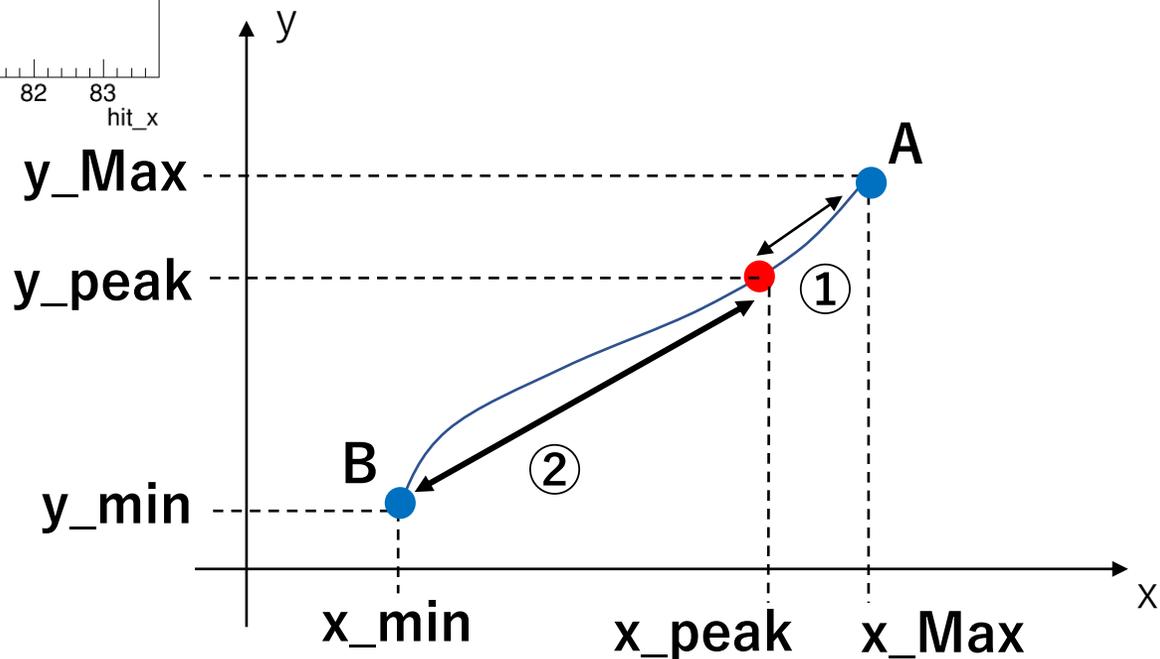
$$= \frac{\sum(\text{元の位置} \times \text{波高値})}{\sum(\text{波高値})}$$

始点・終点の決定を自動化

fit範囲を飛跡の始点周辺に絞ることが狙い

波高値が最大の位置をブラッグピークと見立て,
そこから離れた端を始点とする

- ① > ② なら始点はA
① < ② なら始点はB

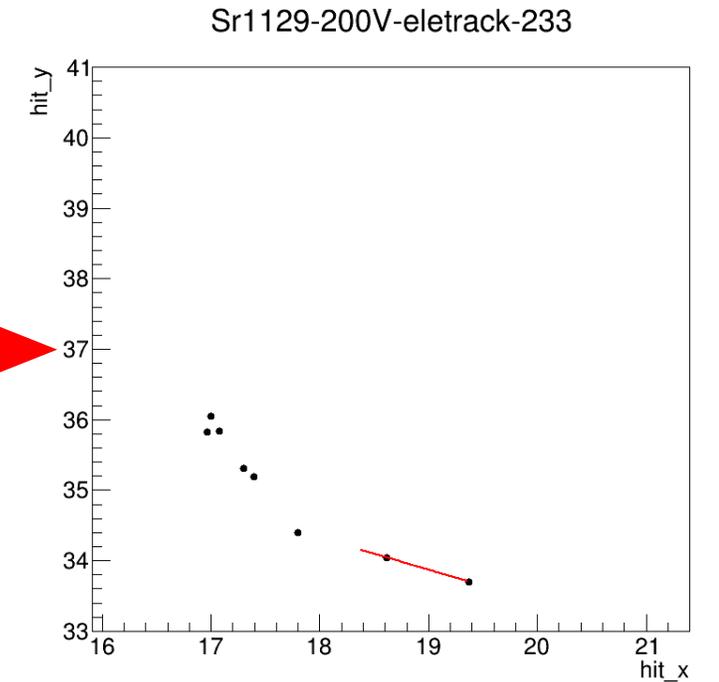
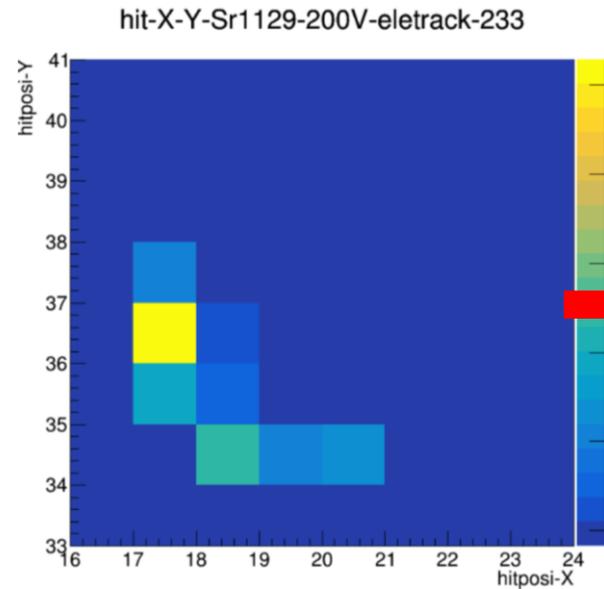
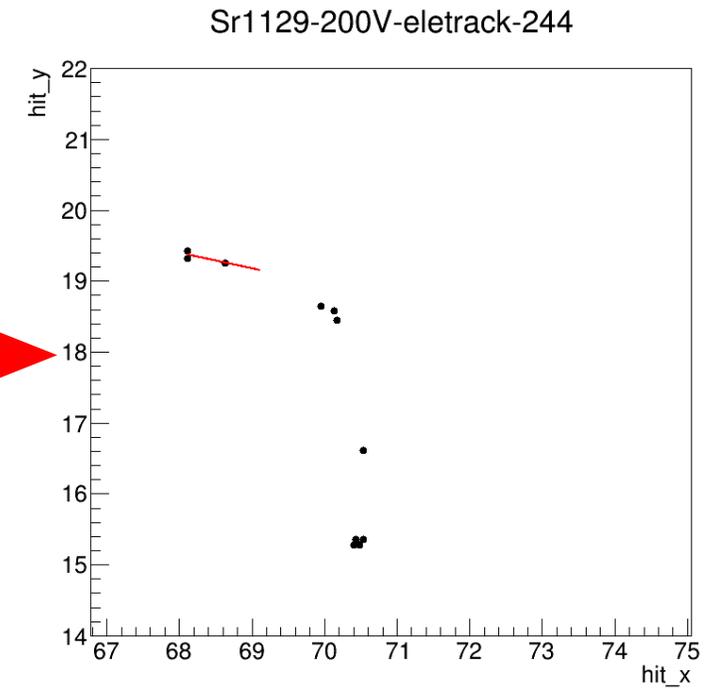
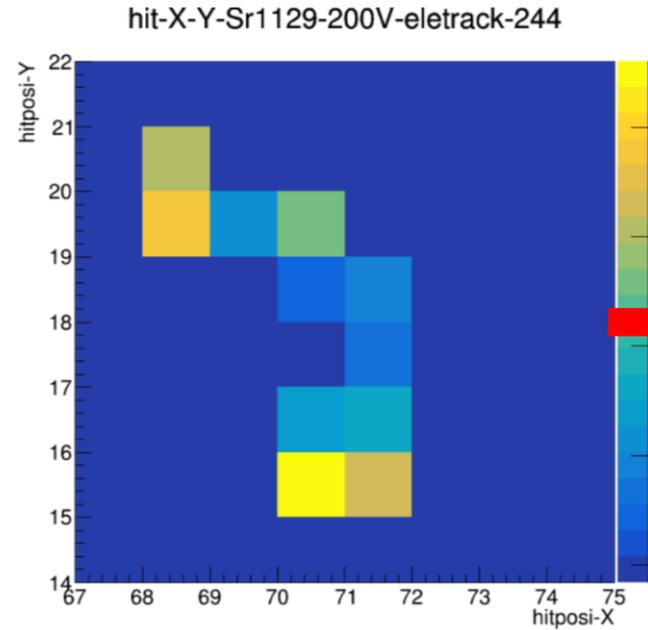


Result

飛跡の始点周辺のみにおいて

直線 $y = \tan \theta * x + a$ でフィット

→ θ を算出する



測定条件 (XRPIX8.5)

- ・ 使用素子: XRPIX8.5(220831K、穴あり)
- ・ 使用ウエハ: MX2220 FST30-006JA
(ウエハ番号05)
- ・ 比抵抗: 4.0 ~ 4.6 k Ω ·cm

- ・ イベント駆動読み出し

- ・ バックバイアス: 200 V
- ・ リーク電流: 3.44 μ A
- ・ BPW: -2.5 V
- ・ int_t : 100 us

para.txtのコピー

```
CDS_V 300 mV
TH_V 320 mV
PD_T 10 us
CDS_T 15 us
TH_T 10 us
COMP1_T 12 us
COMP2_T 16 us
INT_T 100 us
SET_T 1840 ns
SCAN_T 2000 ns
PHI_R_T 2000 ns
PHI_SS_T 1840 ns
PHI_SR_T 1840 ns
PHI_RR_T 2000 ns
SET_SIG_T 2 us
VCOM 600 mV
Vc 600 mV
VECA 1600 mV
SG 0 (0:x1/1:x4/2:--
/3:x19)
FIX_RA 3 raaddr
FIX_CA 3 caaddr
UFRM 500 frm/update
LOG_EN 1
(0:linear/1:log)
NBIN 2100.0
XMIN -600.0
XMAX 1300.0
SAVE_DIR ./data/
```

測定条件 (CsI(Tl) + MPPC)

MPPC(浜松ホトニクス製)

- ・ 印加電圧: 54 V
- ・ 電流: 0.06 mA

Discriminator

- ・ エネルギーしきい値: ~ 150 keV
- ・ トリガー信号幅: 2.5 μ s

Digitizer

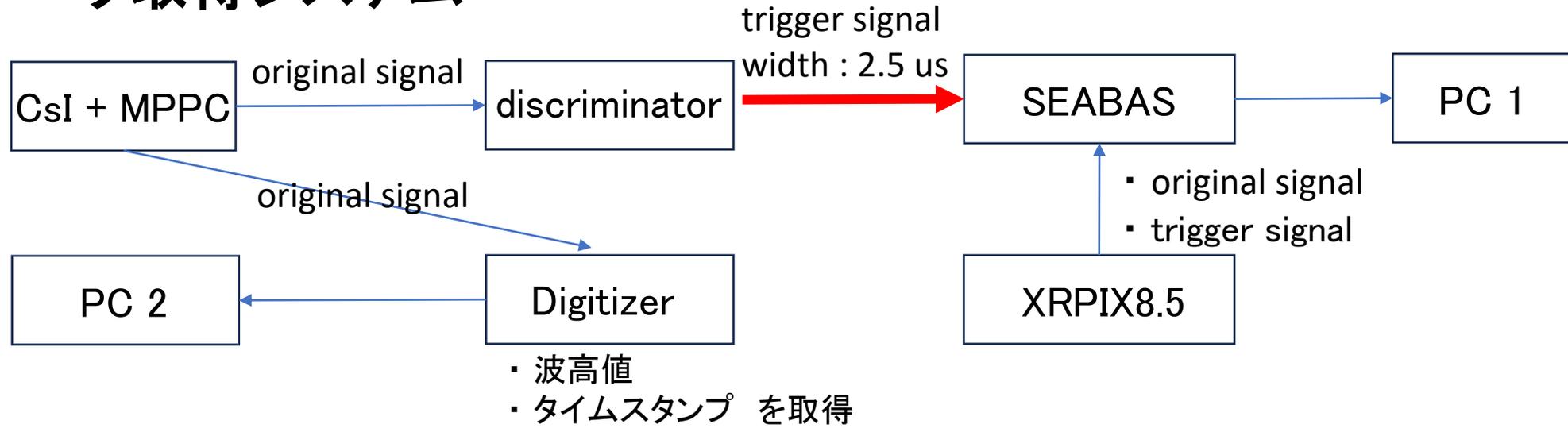
- ・ エネルギーしきい値: ~ 200 keV

CAEN Digitizer

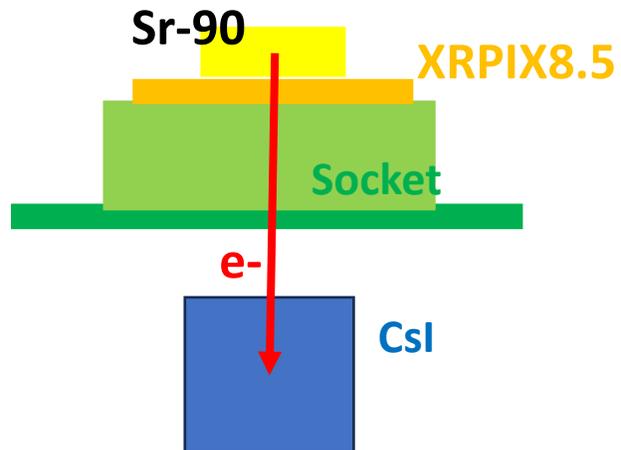


- ・ 時間分解能: 4 ns
- ・ 2 chを同時に独立に読み出し可
- ・ タイムスタンプと波高値を記録
- ・ 測定時間としきい値電圧を設定
- ・ 電荷積分、AD変換もする
(積分時間: 1000 ns, 12 bits ADC)
- ・ windowsPCで専用のソフトを使って読み出す

データ取得システム

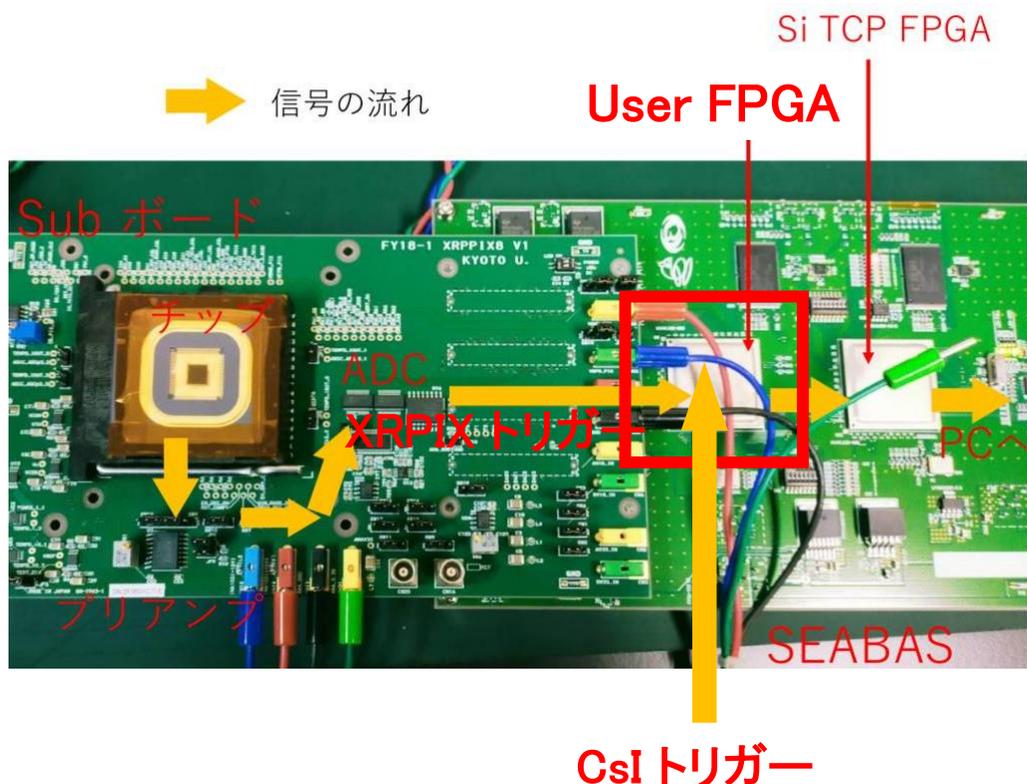


Sr-90でテスト

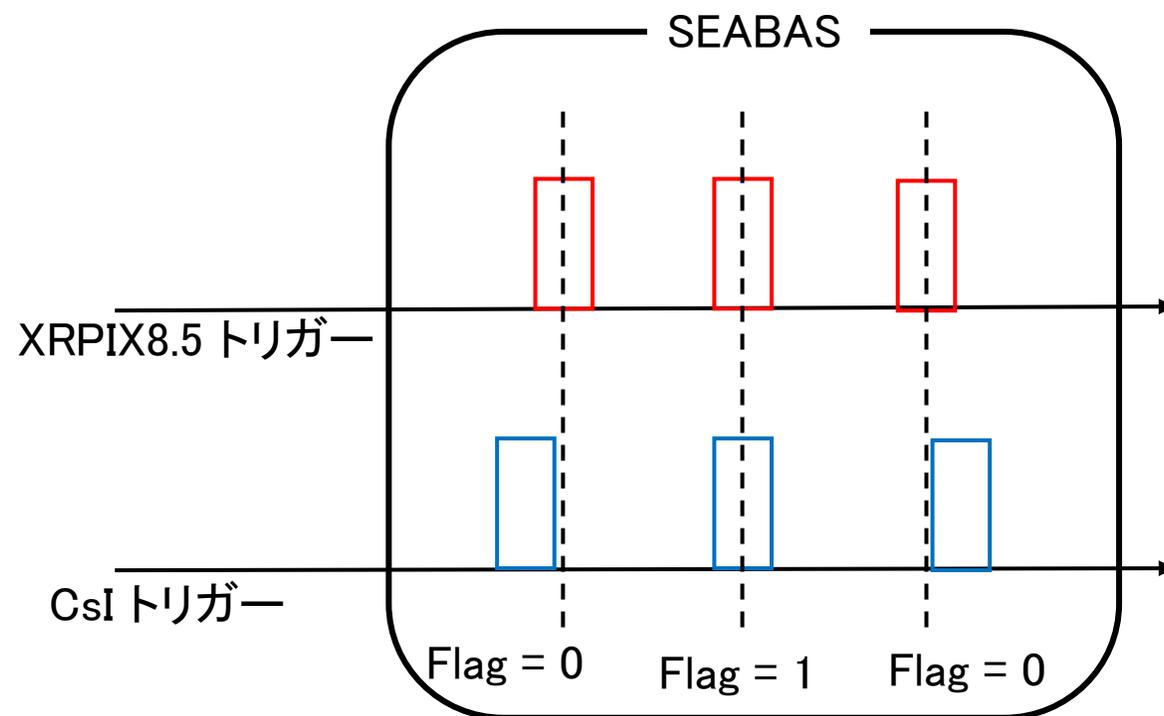


生信号
CsI トリガー
XRPIX トリガー

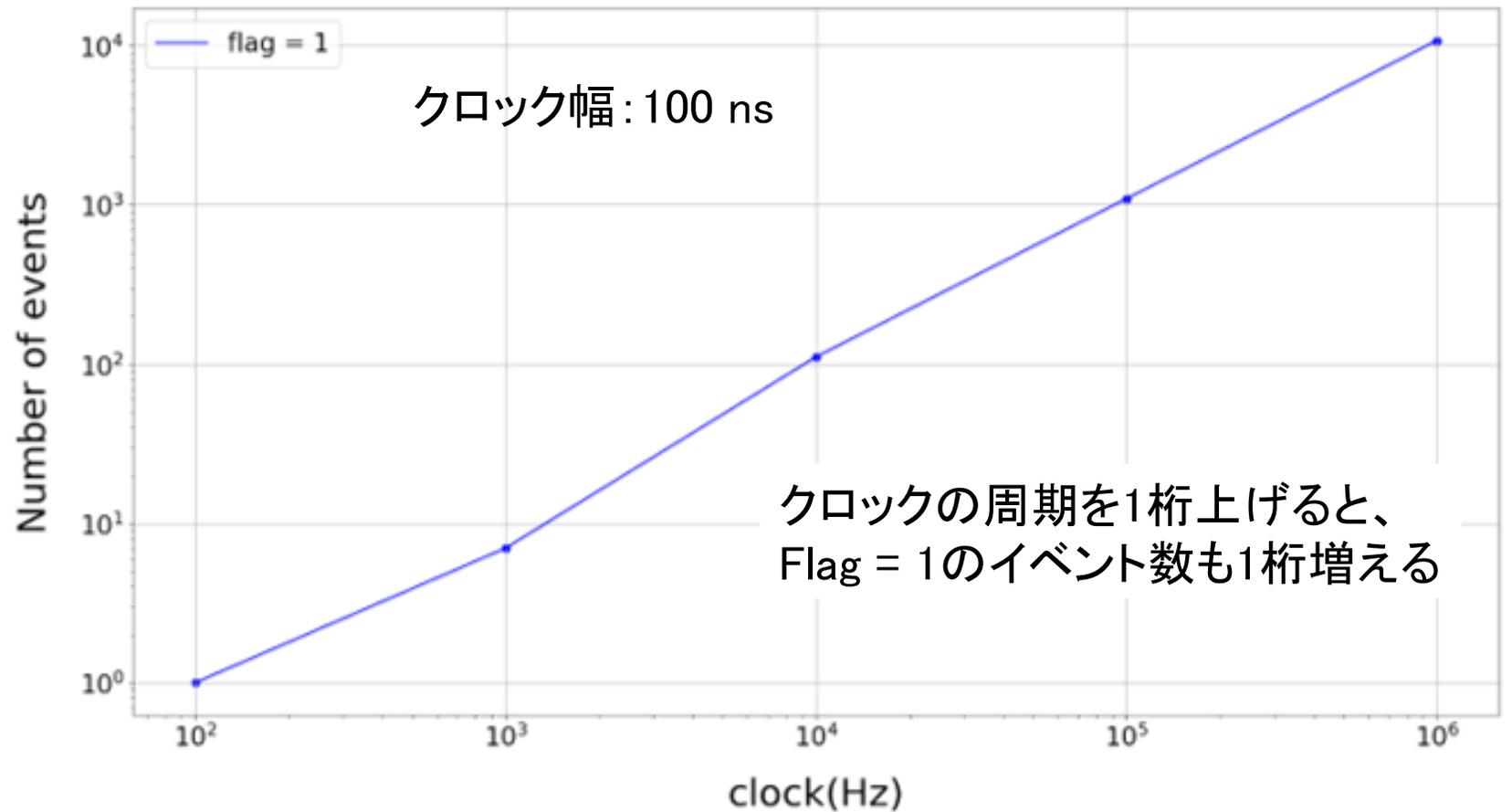
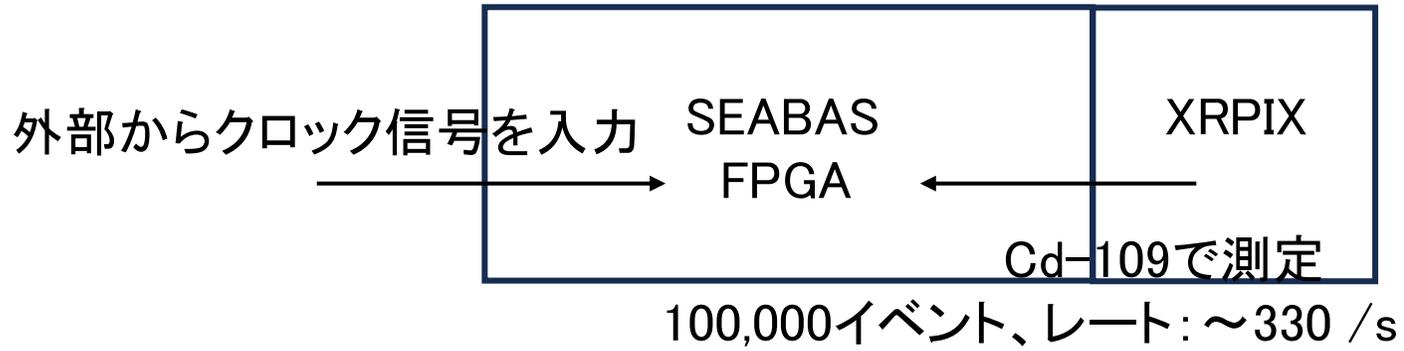
1. SEABASで同期イベントを選択



FPGA(Field Programmable Gate Array)
:書き換え可能なデジタル集積回路
→これを改造



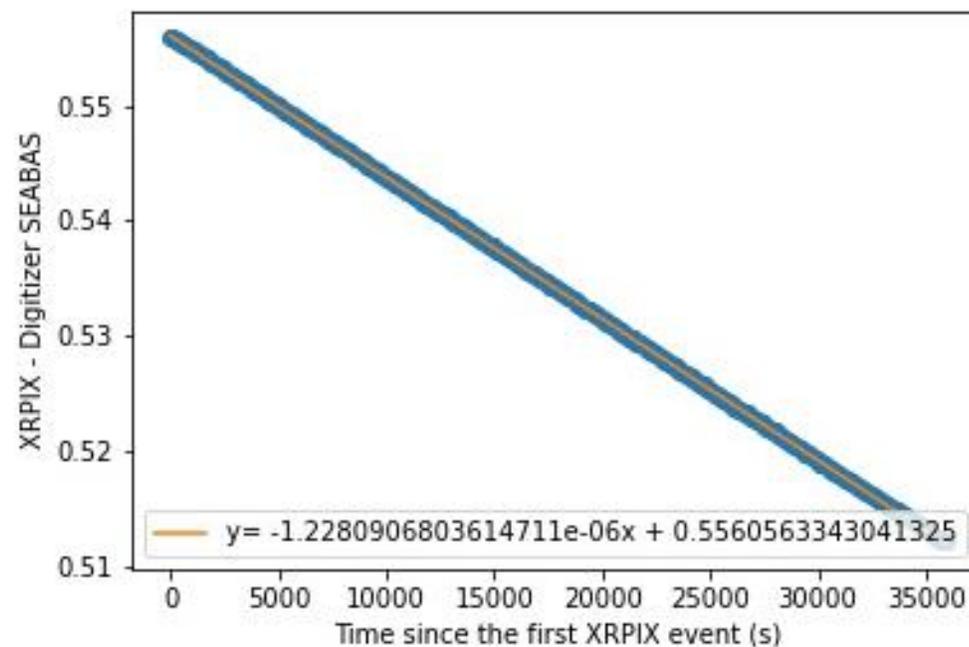
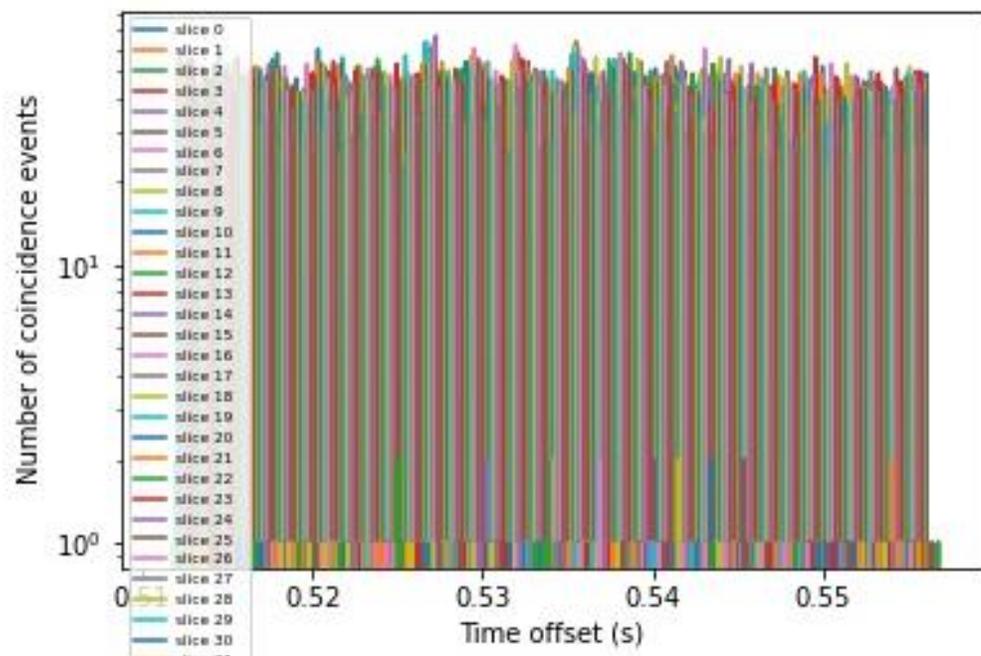
- 新たに、Flag信号を宣言
- 2つのトリガー信号のANDを取る
- 両者のトリガー信号がhighであれば、Flagを立てる



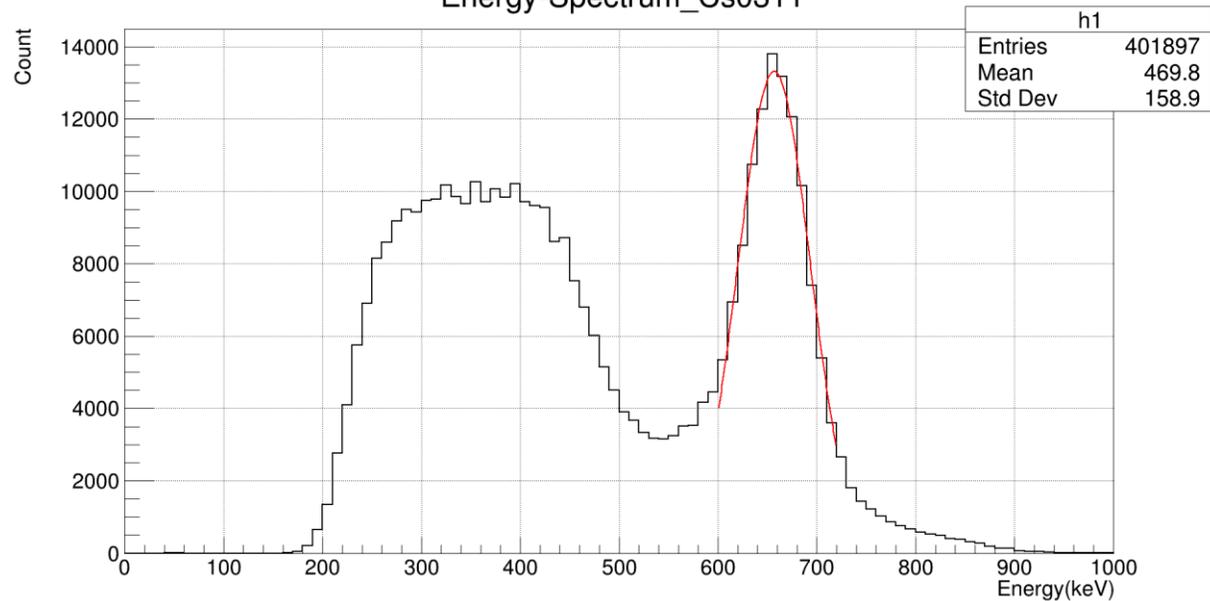
タイムオフセットのドリフト補正

オフセットが時間変化していた…

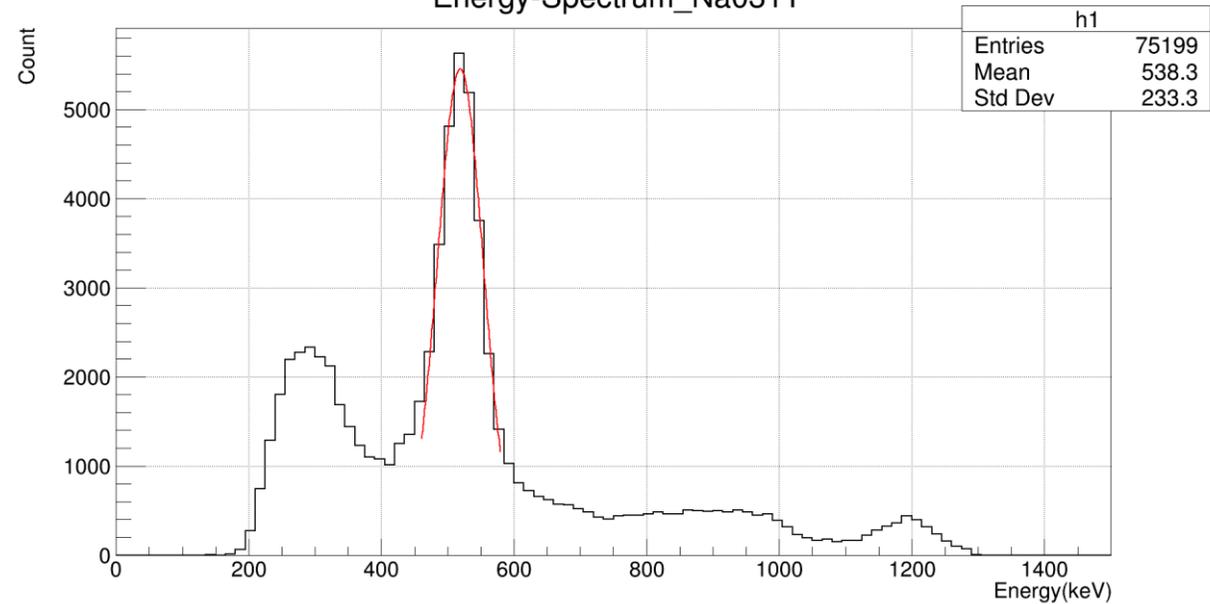
- ・ 10時間のデータを100秒ごとに区切る
- ・ それぞれの区間でタイムオフセットを出す
- ・ 時間とタイムオフセットをプロット、直線でフィット
- ・ 決定した一次関数でXRPIXの時刻を補正する



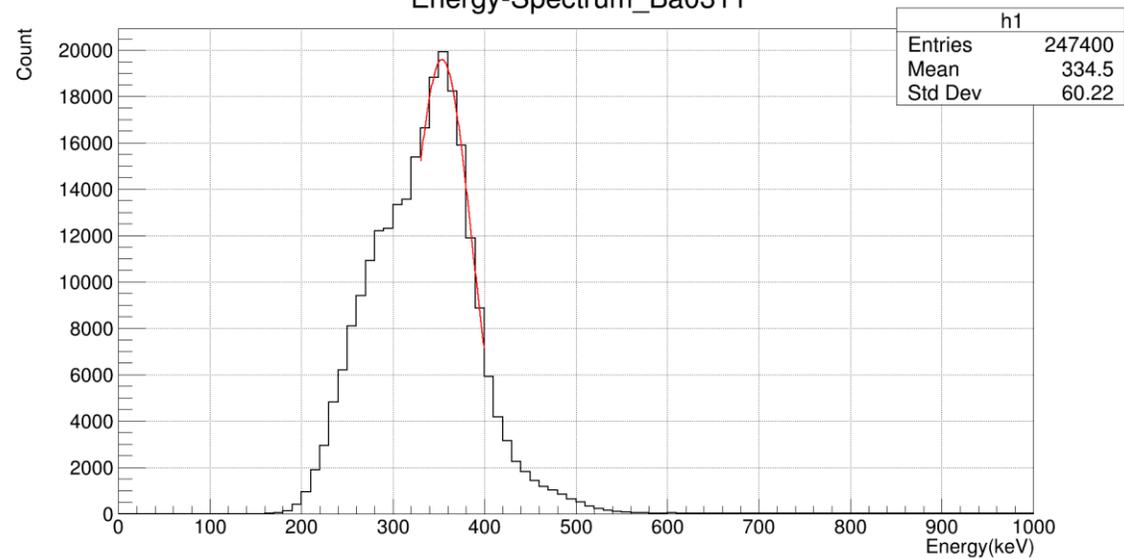
Energy-Spectrum_Cs0311



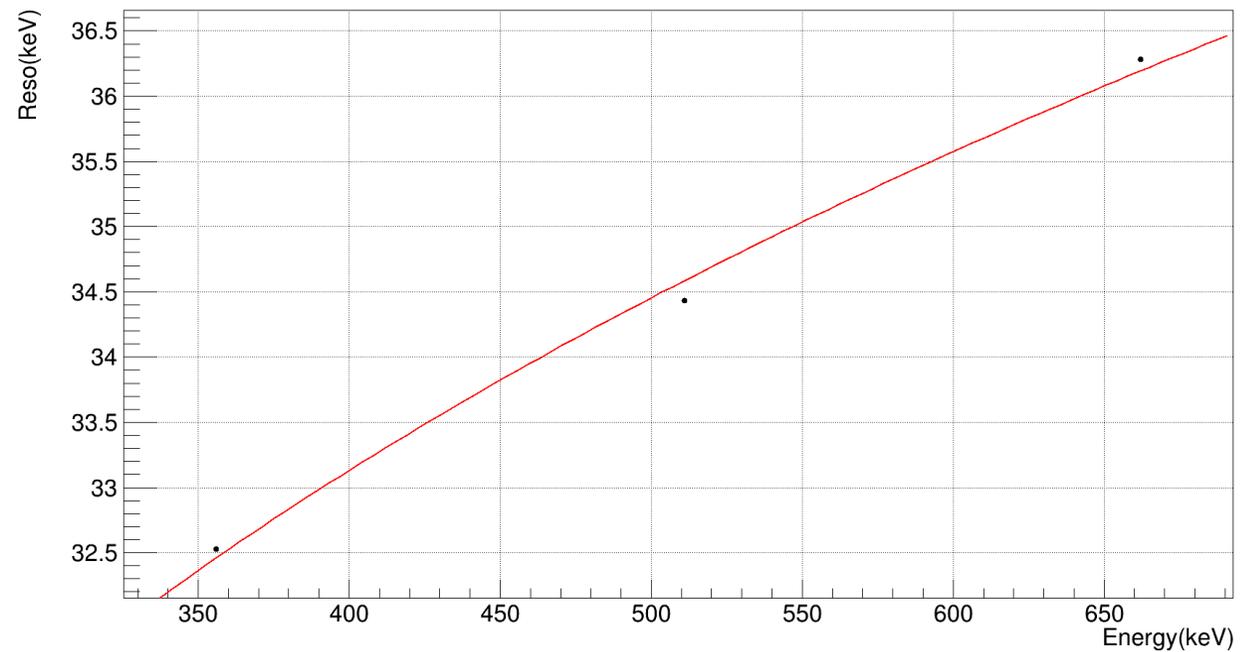
Energy-Spectrum_Na0311



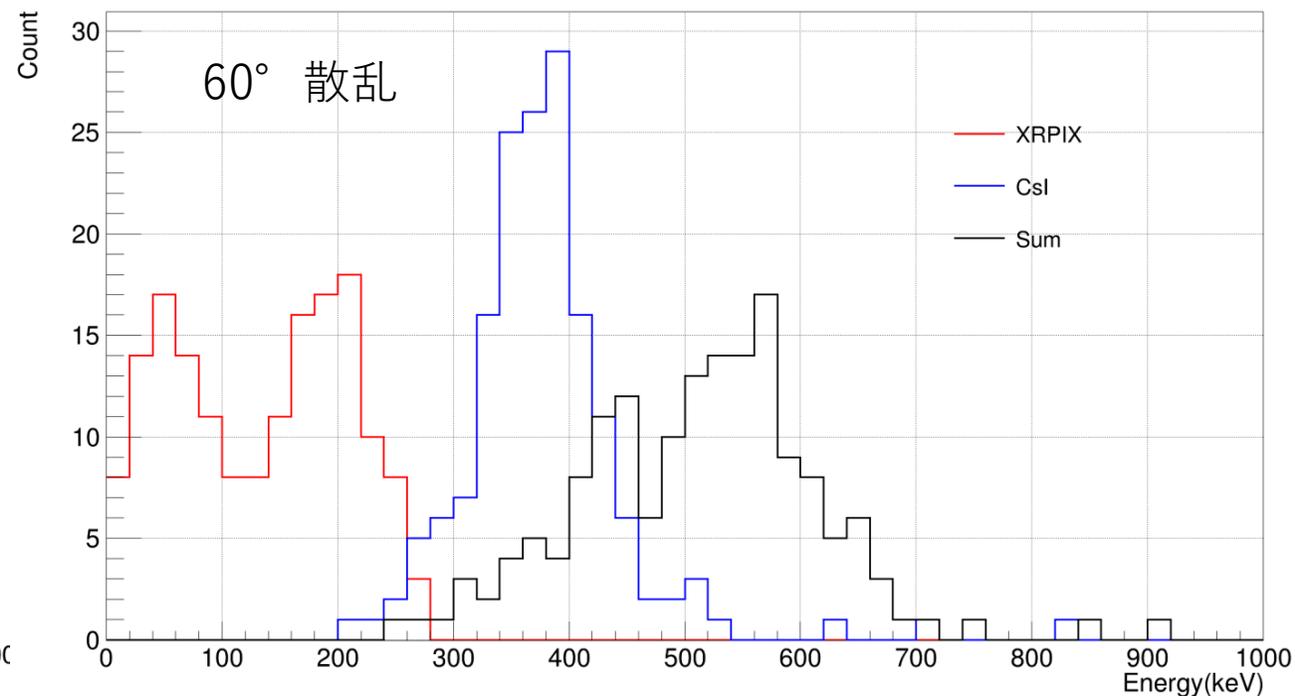
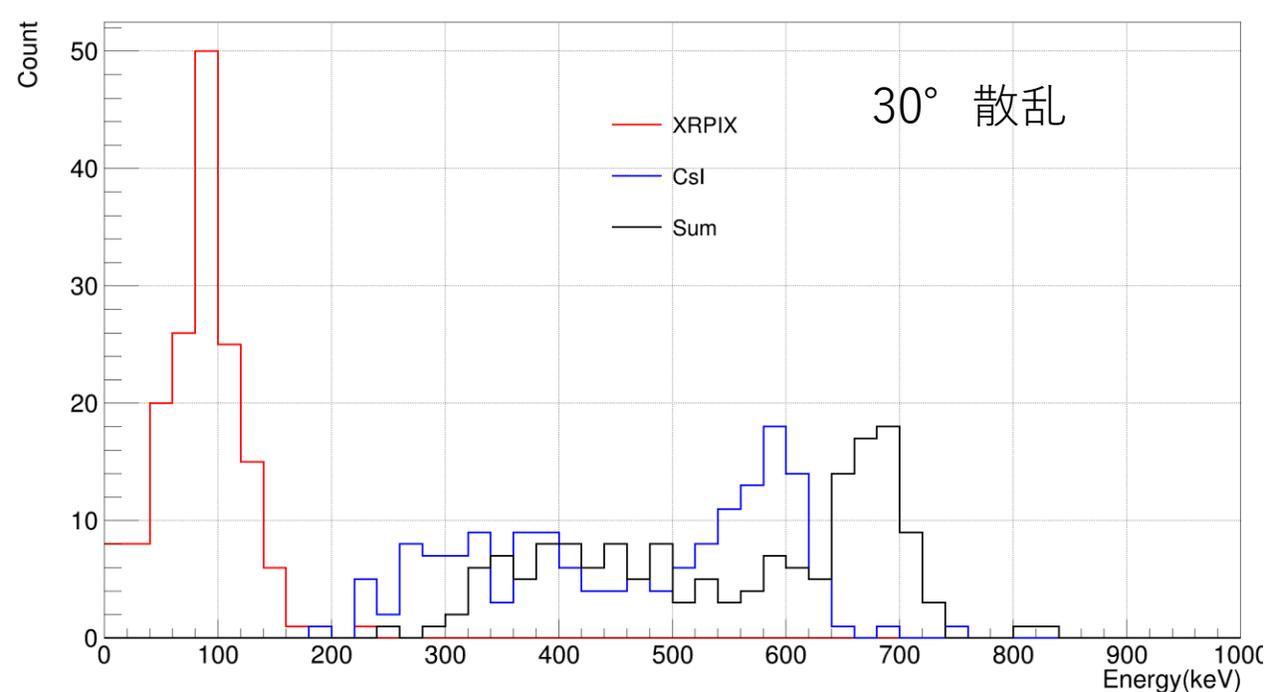
Energy-Spectrum_Ba0311



Resolution_0311



エネルギースペクトル

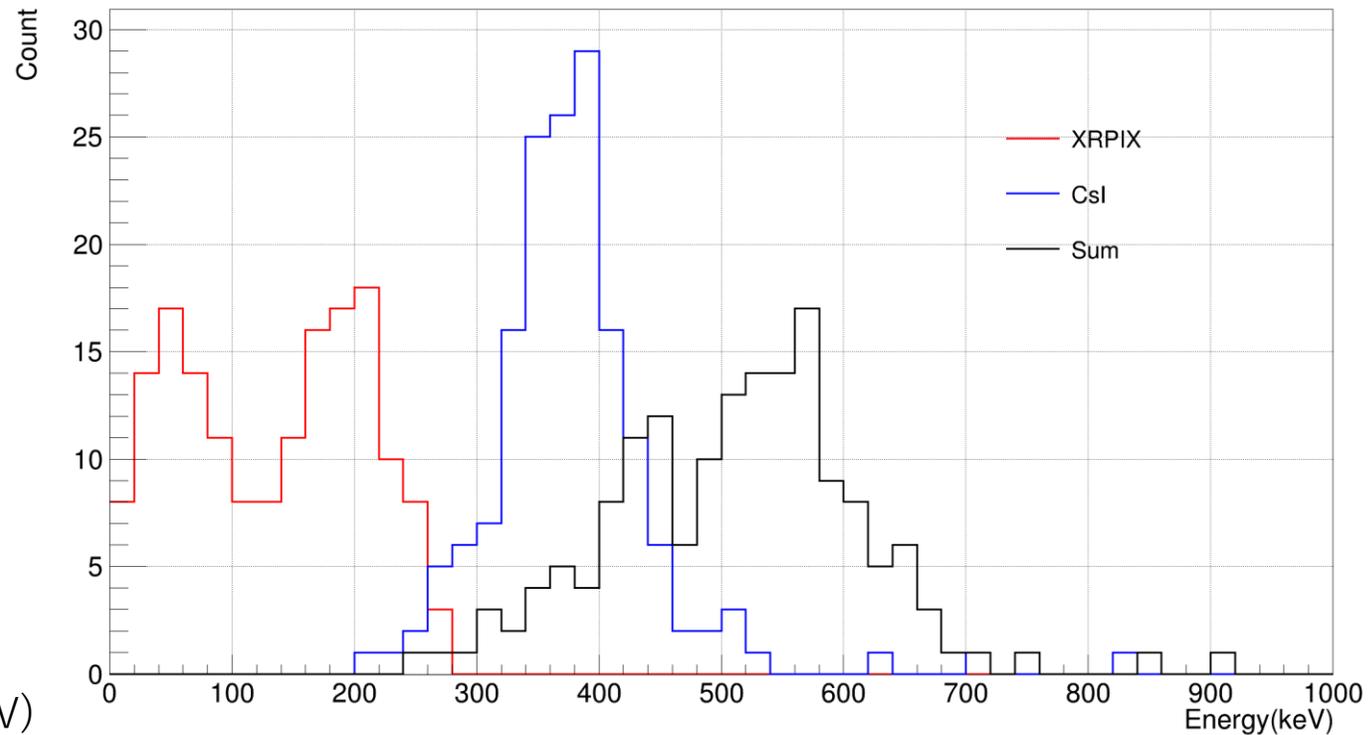
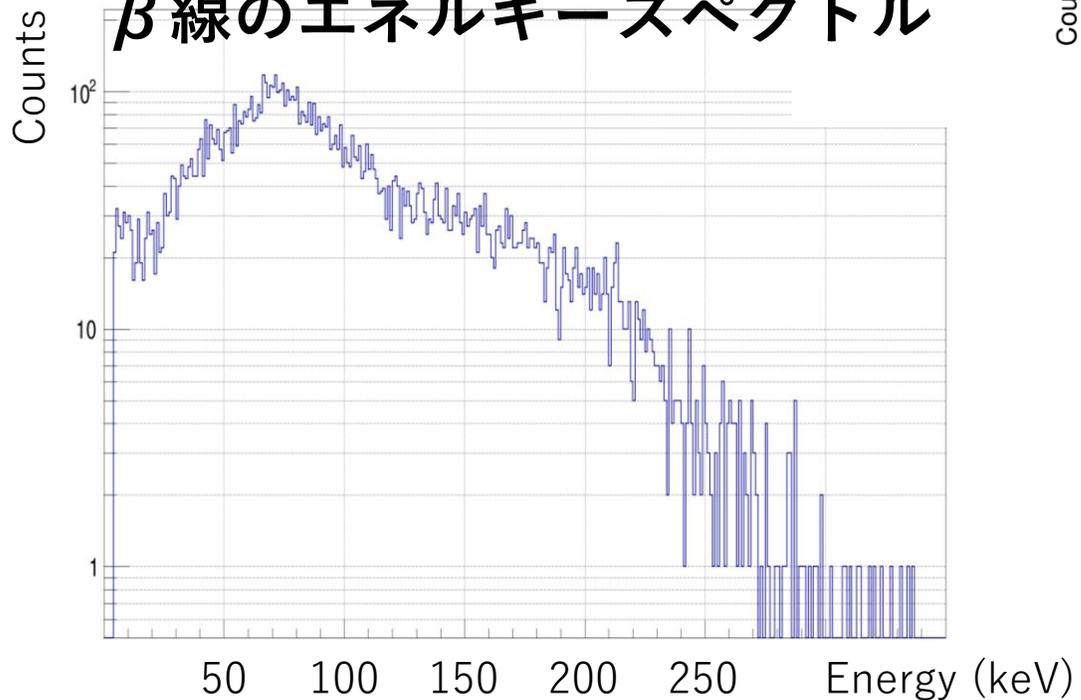


CsIシンチレータのスペクトル（青ヒストグラム）のピークをガウシアンでフィット
→エネルギー和が662 keV \pm 1 σ の範囲でイベント抽出、散乱角を計算

60° 散乱のイベント抽出の下限値は662 keV - 3 σ

$$\cos\theta = 1 - mc^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right)$$

β 線のエネルギースペクトル



散乱角	30 deg	60 deg
E1 (keV)	98	265
E2 (keV)	564	401

$$\gamma' = \frac{\gamma}{1 + \frac{\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \text{ keV}$$

