

コンプトン法・コーデッドマスク法を 組み合わせた γ 線イメージング

発表者

阿部光、阿部賢、山本竜二

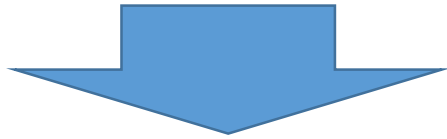
2018年2月22日

実験の背景と目的

MeV γ 線で観た宇宙

何がMeV γ 線を出すのか？

- 放射性同位体の壊変
- ガンマ線バースト
- ブラックホールの質量降着円盤
- π^0 中間子の崩壊
- シンクロトン放射
- 太陽フレア ...etc



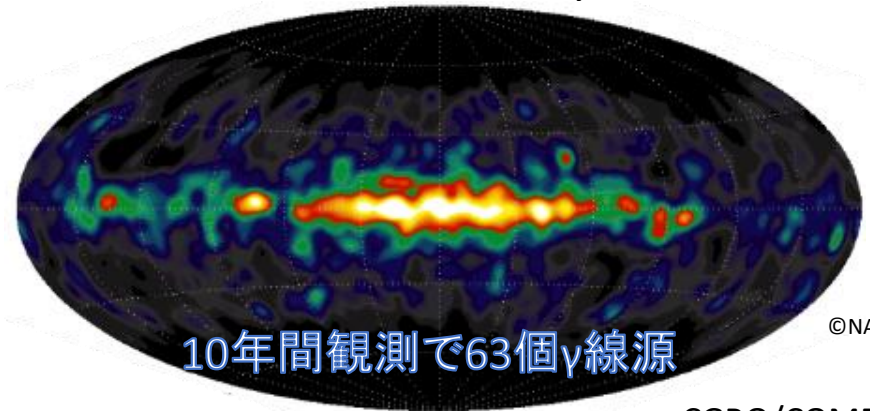
元素合成

宇宙の進化

他分野への応用

- ◆ 環境モニタリング
- ◆ 核放射線医学 など

1-30 MeV all sky



©NASA

CGRO/COMPTEL

MeV領域の望遠鏡

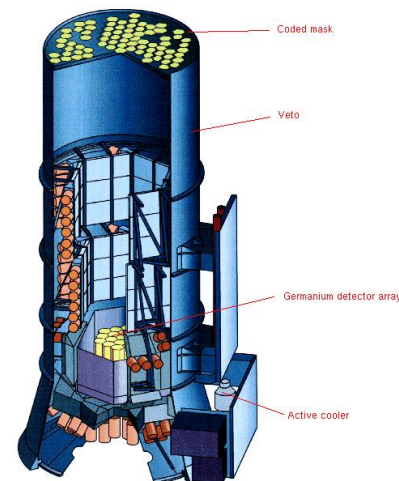
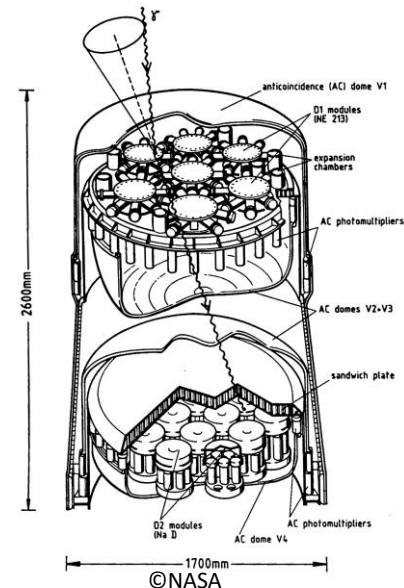
雑音除去能力が最も重要な課題

COMPTEL

(Schonfelder *et al.* 1993)

INTEGRAL-SPI

(Vedrenne 2003)

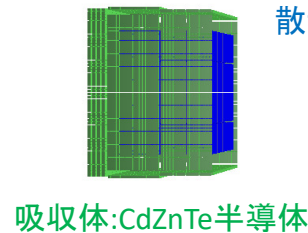


©ESA

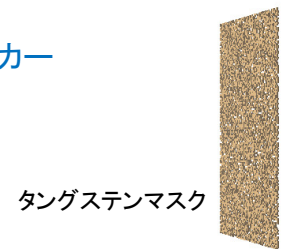
Combined Compton and Coded-aperture Telescope

狙い: マスクの解像度とコンプトンカメラのMeVでの感度

シミュレーション上での性能評価
(Galloway 2017)



散乱体: 多層シリコントラッカー



タングステンマスク

(イメージ: Galloway 2017より)

(eASTROGAM + CZT層 + swiftのBATのマスク)



角度分解能の向上、高感度化の
可能性が示された

今回の実験の目的:

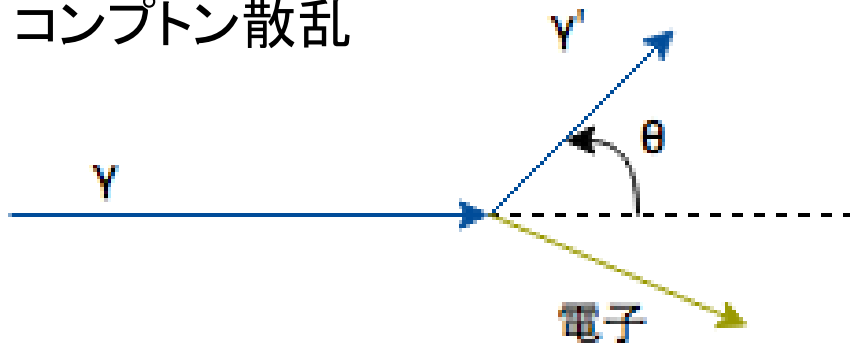
簡易的なCombined Compton and Coded-aperture Telescope(以下Combined)の実機を作成し、撮像を実行する上での問題点を調べる。

実験内容:

Compton,Coded-mask,Combinedの3つの種類のカメラを作成し、雑音除去能力を比較した。

実験原理(1) コンプトンイメージング法

コンプトン散乱



$$E_2 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$E_0 = E_1 + E_2$$

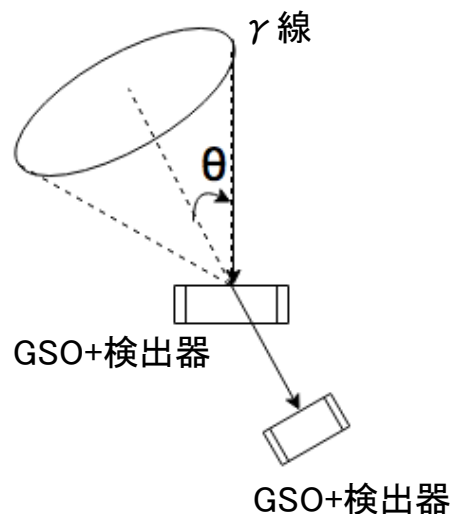
- E_0 : 入射 γ 線のエネルギー
- E_1 : 反跳電子のエネルギー
- E_2 : 散乱 γ 線のエネルギー
- θ : 散乱角

cosについて解くと

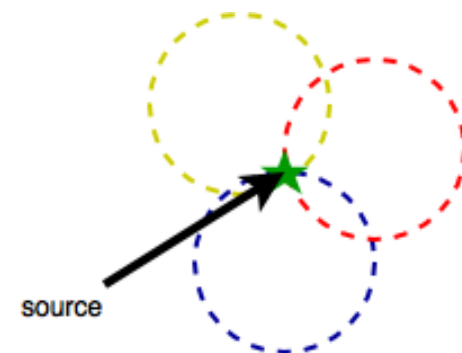
$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

実験原理(1) コンプトンイメージング法

この方法では電子の反跳方向は決定できないので、 γ 線の到来方向は円環上でしか制限できない

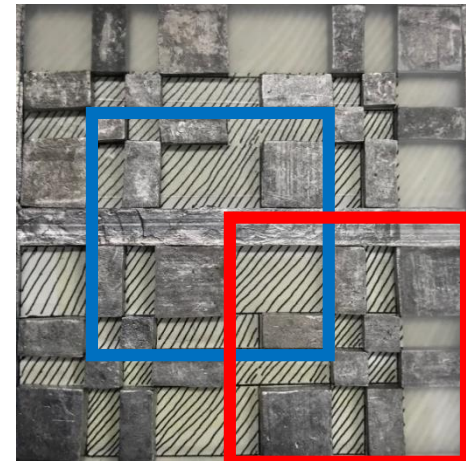
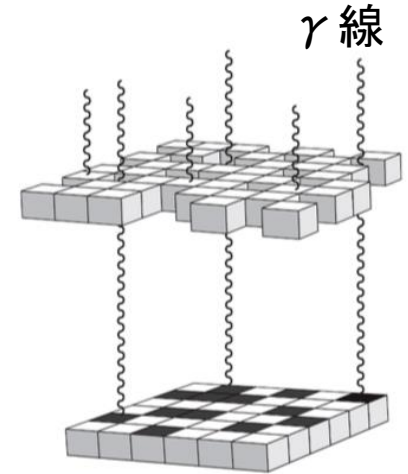


円環の重ね合わせで γ 線の到来方向を推定



実験原理(2) コーデッドマスク法

- 二次元位置分解能を持った検出器の前方にマスクを設置して測定
- 検出器の明暗のパターン
→ γ 線の到来方向を再構成
- 様々なマスクパターンが提案されているが、
今回はMURA(Modified Uniformly Redundant Arrays)
を使用



右上.コーデッドマスクのイメージ図

A. Zoglauer. First Light for the Next Generation of Compton and Pair Telescopes.. より

コーデッドマスク法(Encode)

視野内の線源はその方向に対応する明暗のパターンを受光面に作る

$$D_{i,j} = \sum_{k,l} A_{i+k,j+l} S_{k,l} + B_{i,j}$$

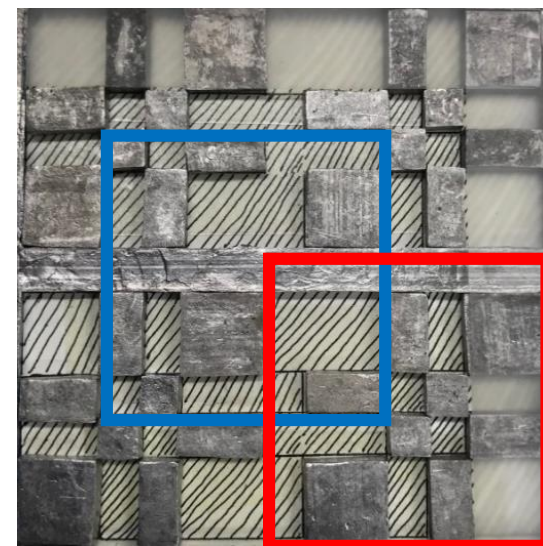
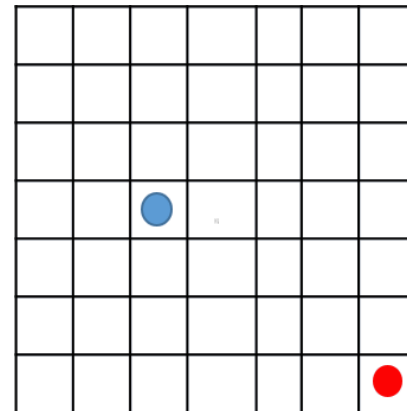
D :Detector Vector. 検出器の各Pixelのカウント

S :Sky vector. マスク面を通ってきた光のカウント

B :Back Ground. マスク面を無視したカウント

A :mask Array vector. OPEN→1、CLOSED→0

Sky Map

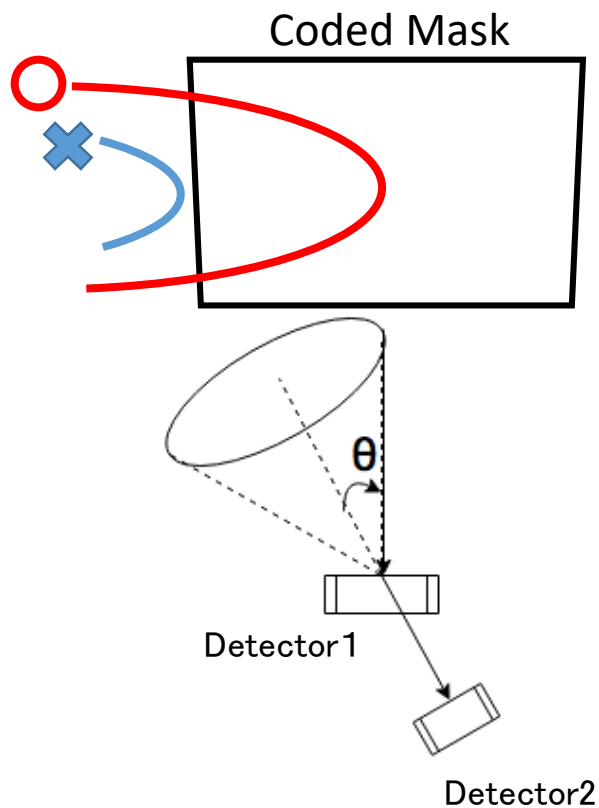


コーデッドマスク法(Decode)

$$\hat{S}_{i,j} = \sum_{k,l} M_{i+k,j+l} W_{k,l} D_{k,l}$$

- $\hat{S}$: 推定Sky Vector
- M : Decode関数. $M = (1 + p)A' - pU$ で定義
定数 p =マスクの構造から決定。
Back Groundの影響を打ち消す
- W : 重みづけ関数. 各Pixelの検出確率のばらつきを補正

実験原理(3) Combined Mode



- Compton Coneをマスク面に
back projection
→開口部を通るイベントのみ解析
→ノイズの除去を図る

コーデッドマスク法と同様に解析

使用した装置

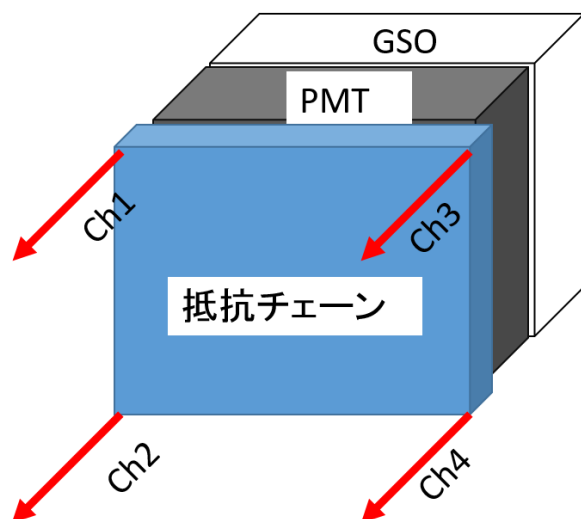


PMT H8500



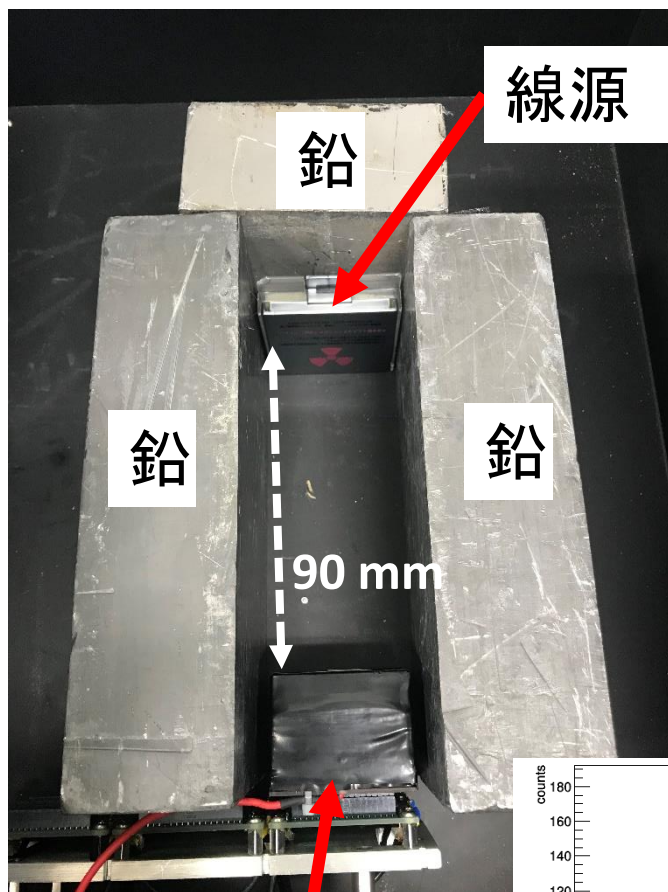
GSOシンチレータ

8 × 8のPixelに分割
→検出位置の判別可能

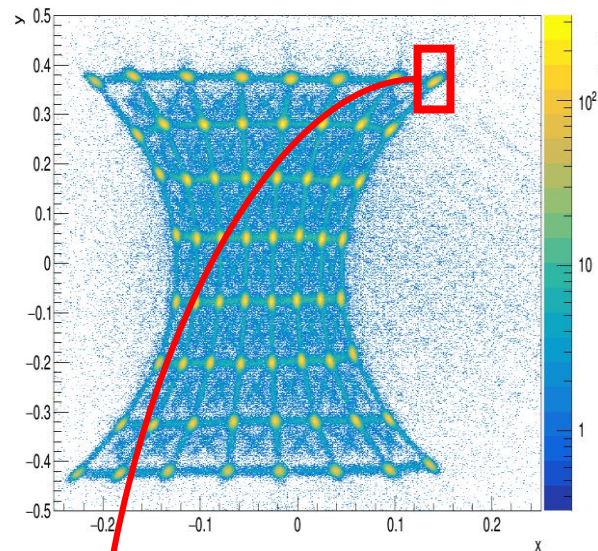


4CH信号
→重心演算
→検出位置

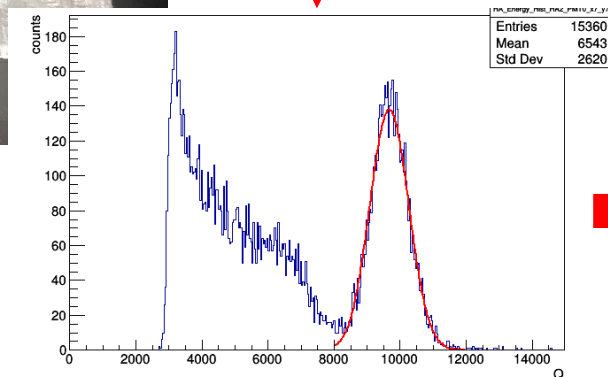
PMTのCalibration



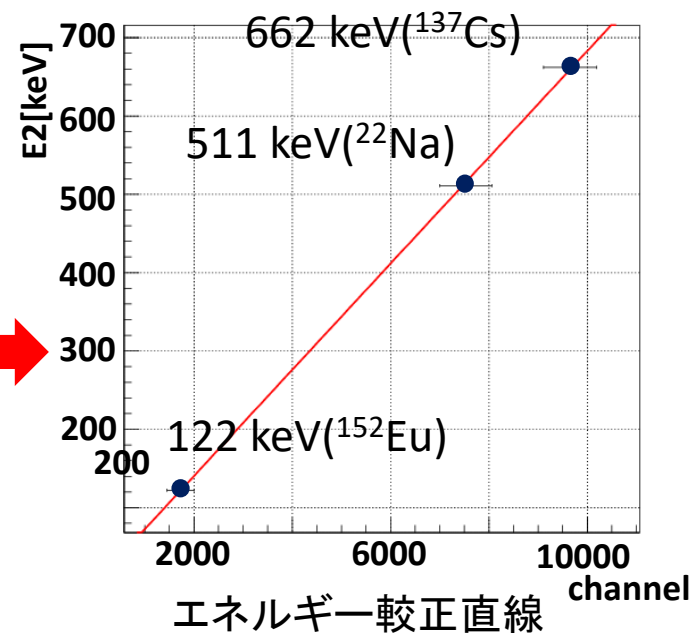
検出器



重心演算の結果

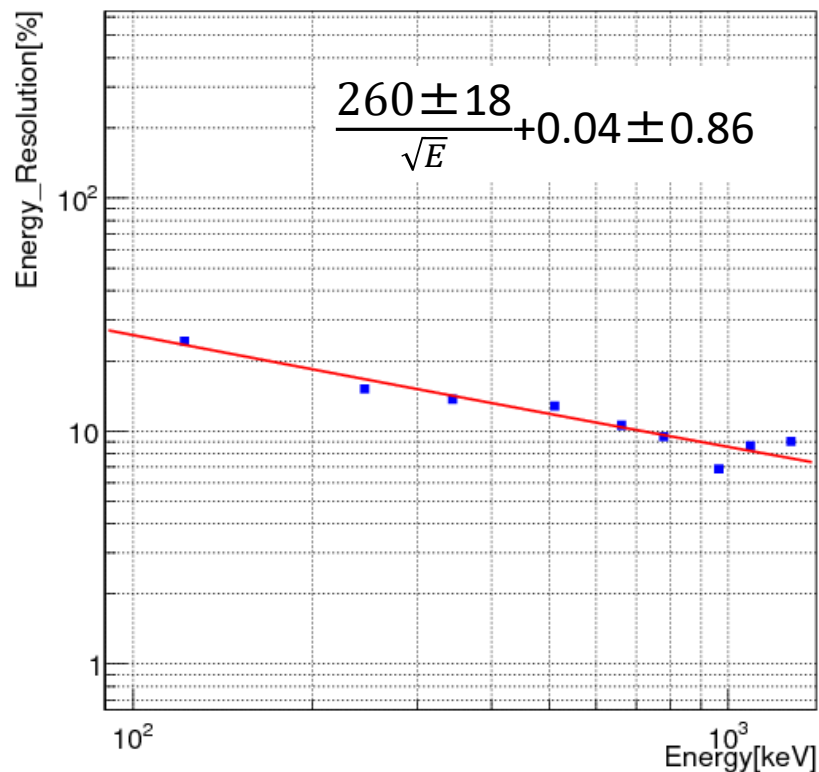


エネルギースペクトル
(^{137}Cs)

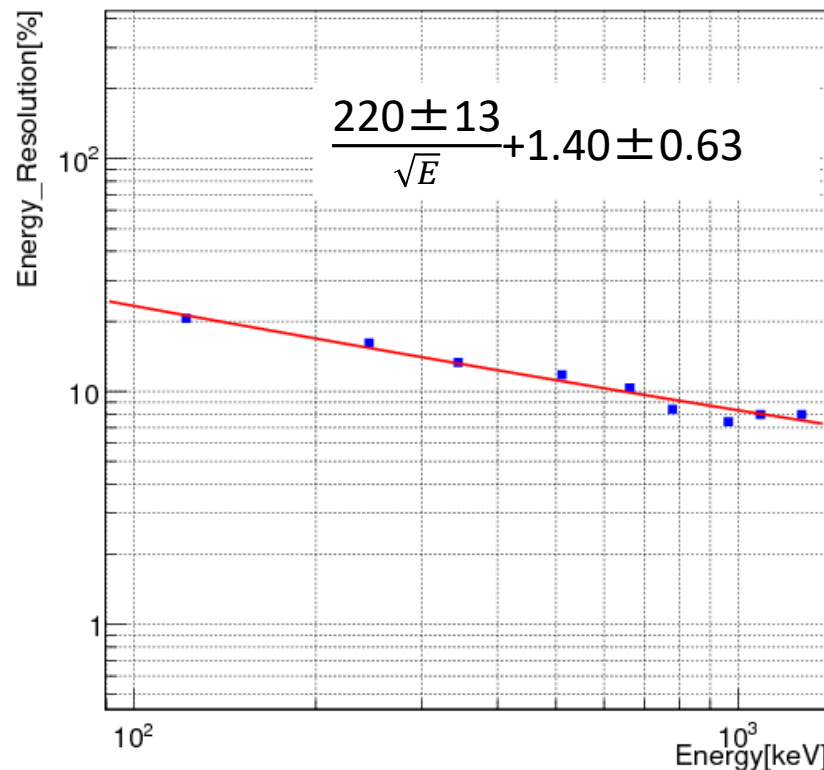


PMTのエネルギー分解能

Detector1



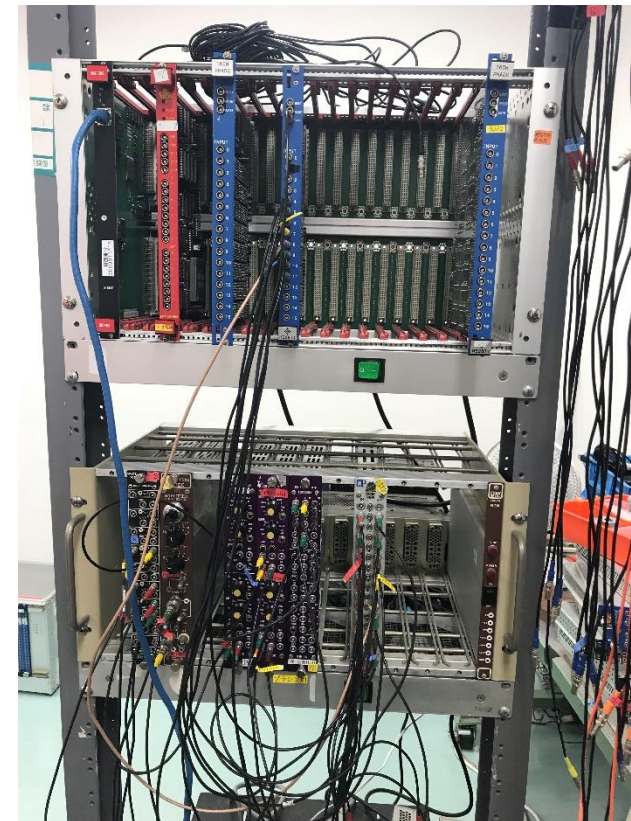
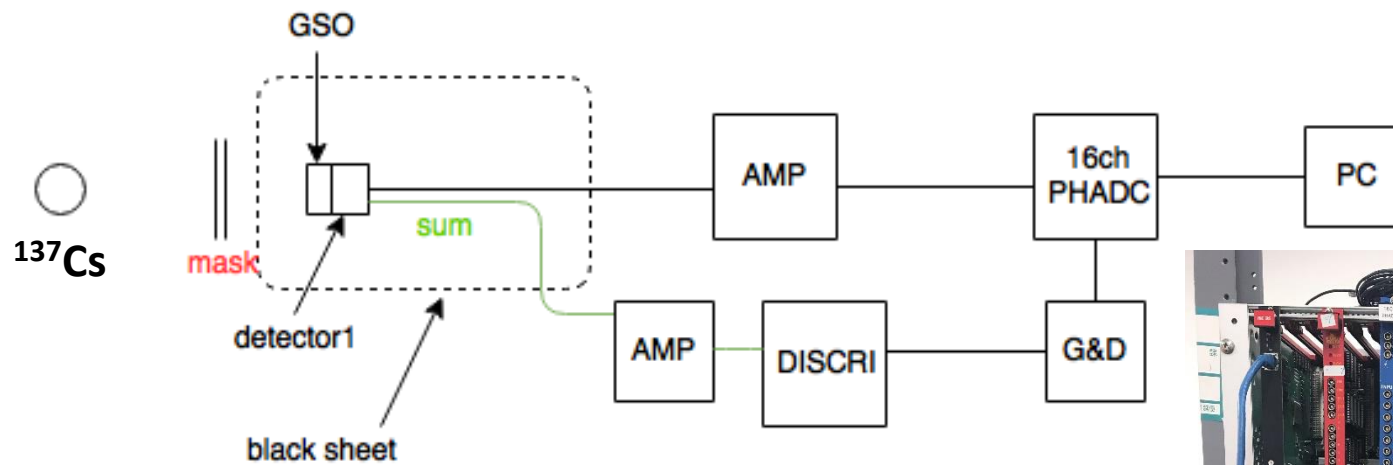
Detector2



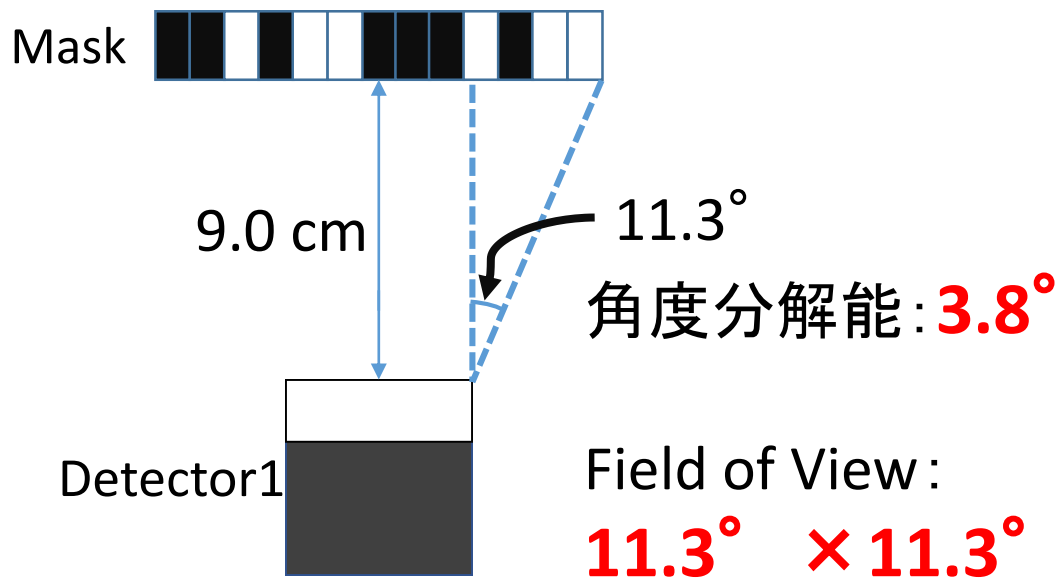
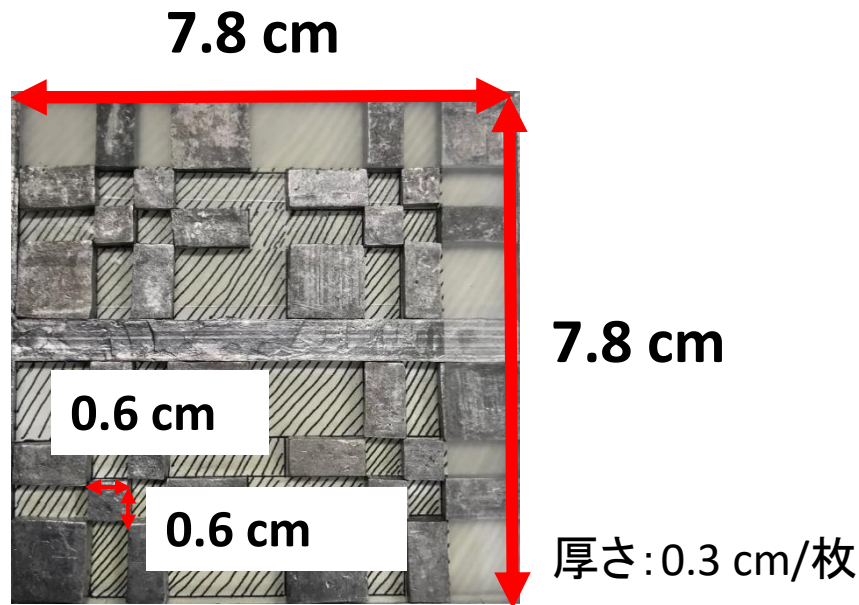
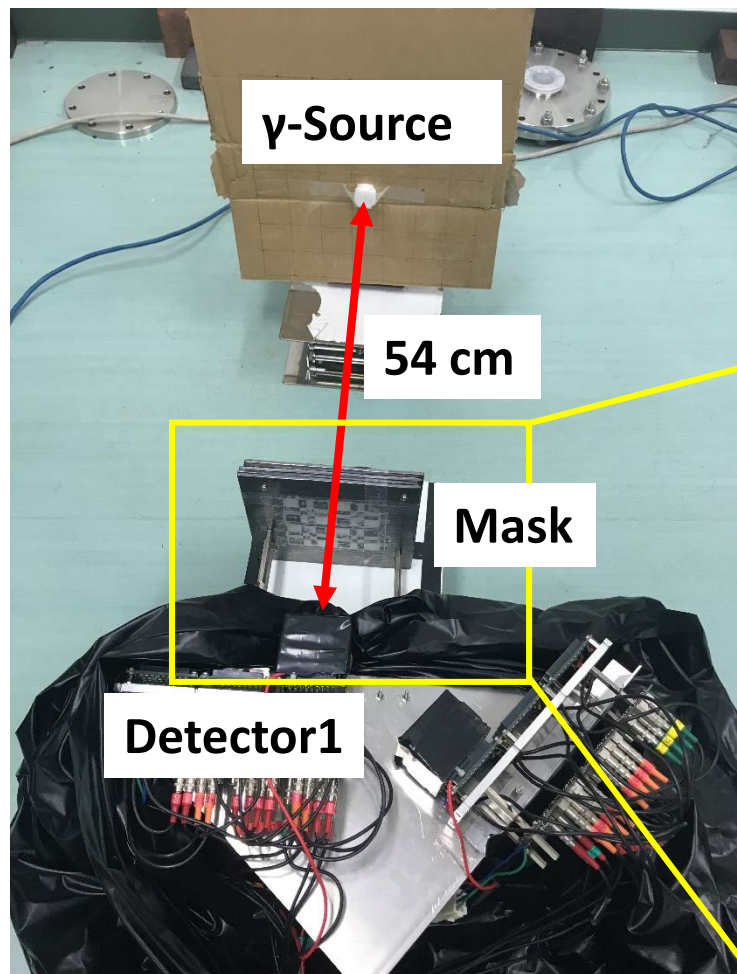
エネルギースペクトルのFit(一次関数+Gaussian)
→横軸: E[keV]、縦軸: エネルギー分解能 = $\Delta E/E$
(ΔE =GaussianのFWHM)

Coded Mask Modeの測定

装置のセットアップ(Coded Mask)

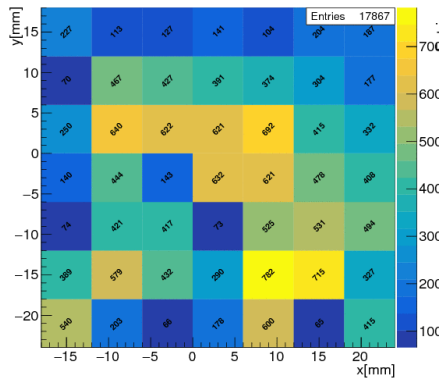
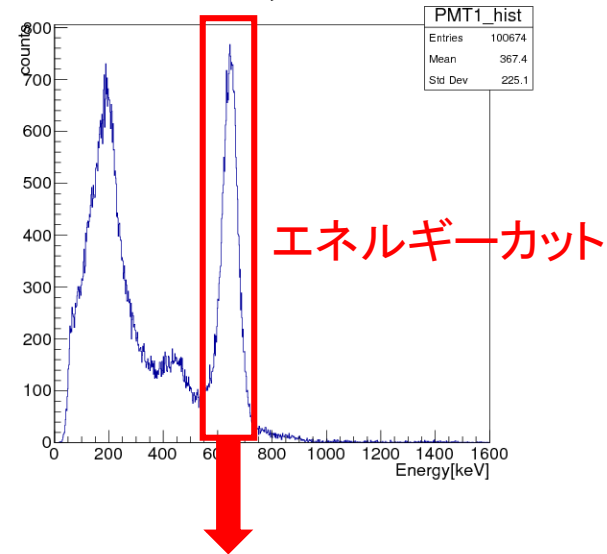


配置



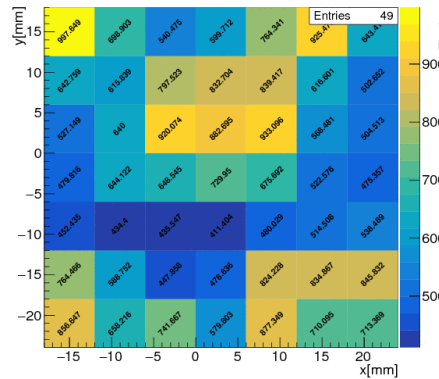
コーデッドマスク法での再構成①

^{137}Cs スペクトル



Detector Vector D

Wを
作用



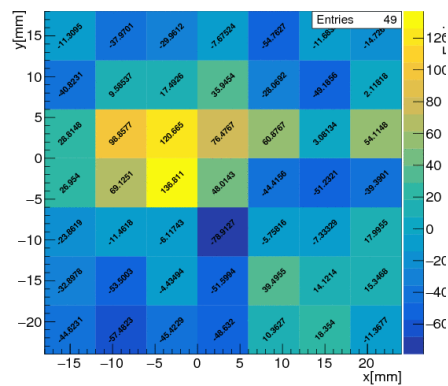
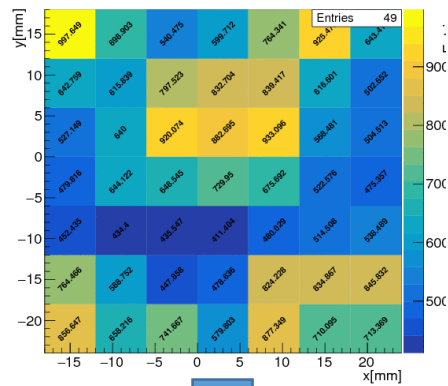
Detector Vector WD

- ピークをGaussianでFit

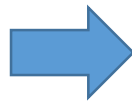
→ピーク $\pm$ FWHMの範囲で
Detector Vectorを作る

→マスクなしのデータを
重みづけWに用いて補正

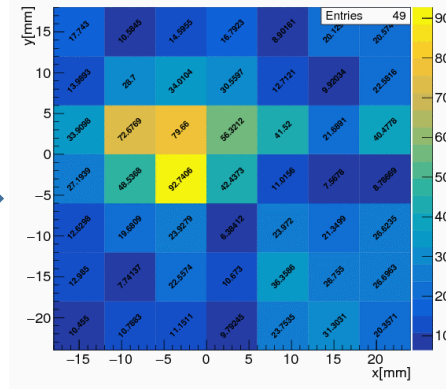
コーデッドマスク法での再構成②



Sky Vector
(補正前)



補正



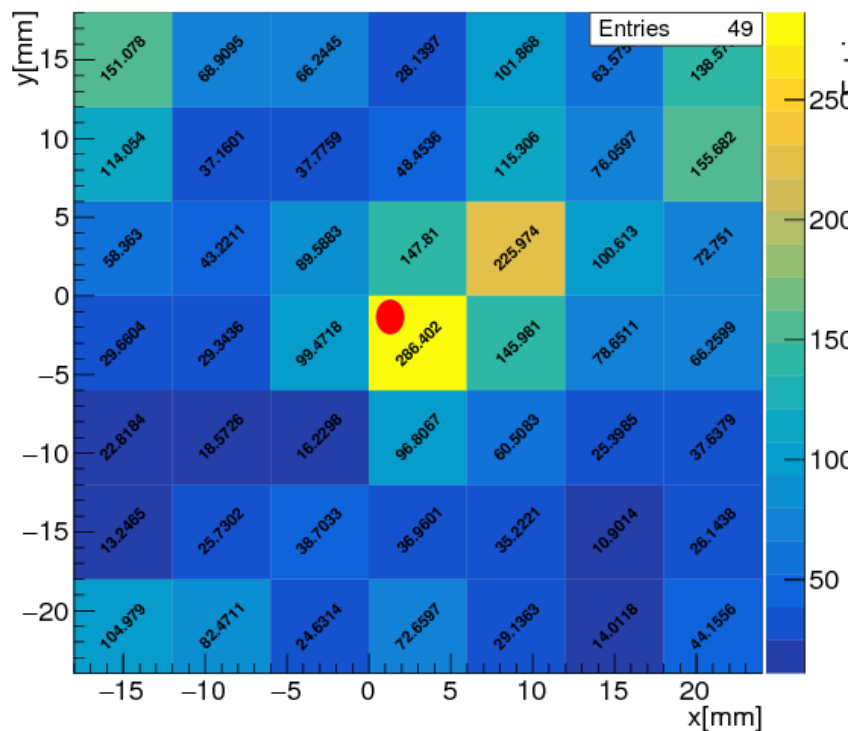
Sky Vector
(補正後)

- 補正後のDetector Vectorに
Decode関数 M を作用

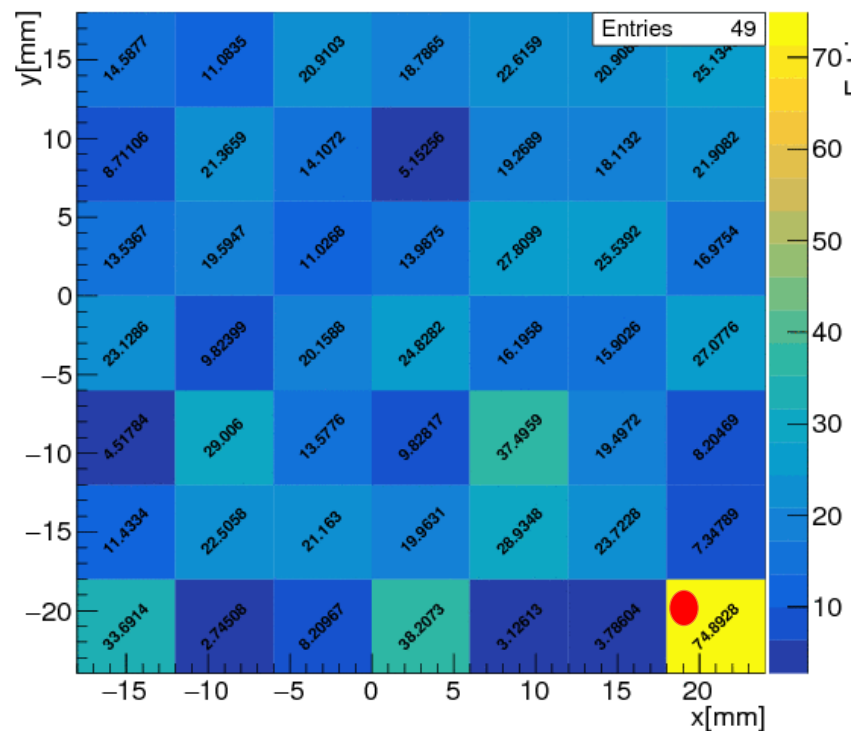
→Sky Vector

→Gradient Methodによる補正

Coded再構成結果(Mask0.6 cm)



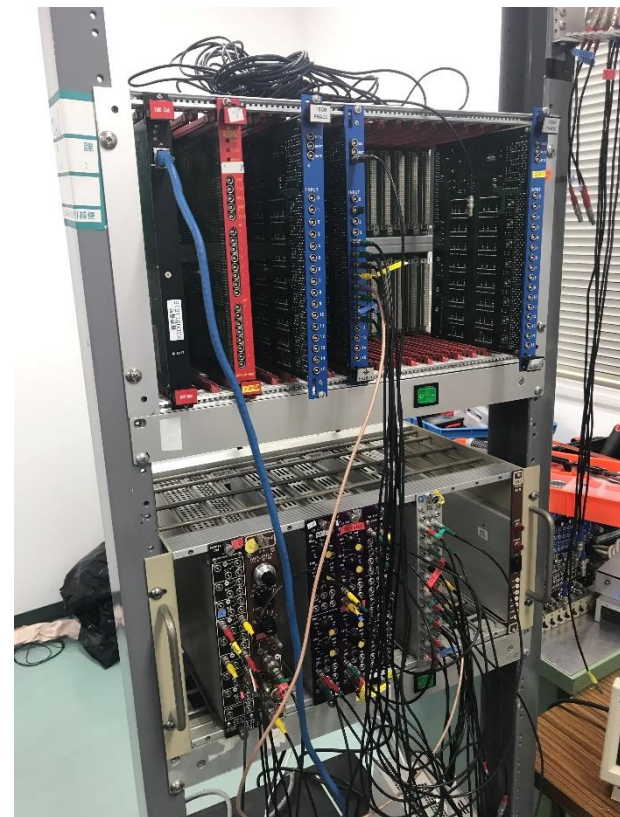
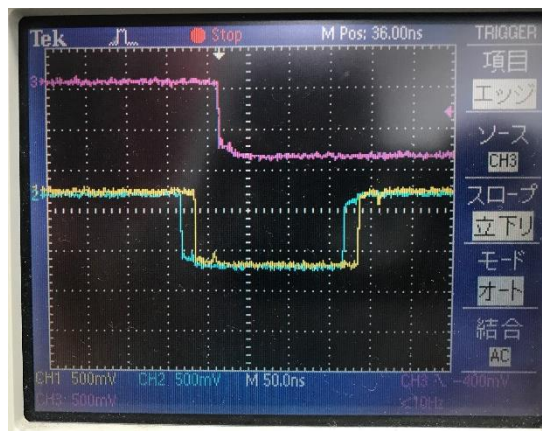
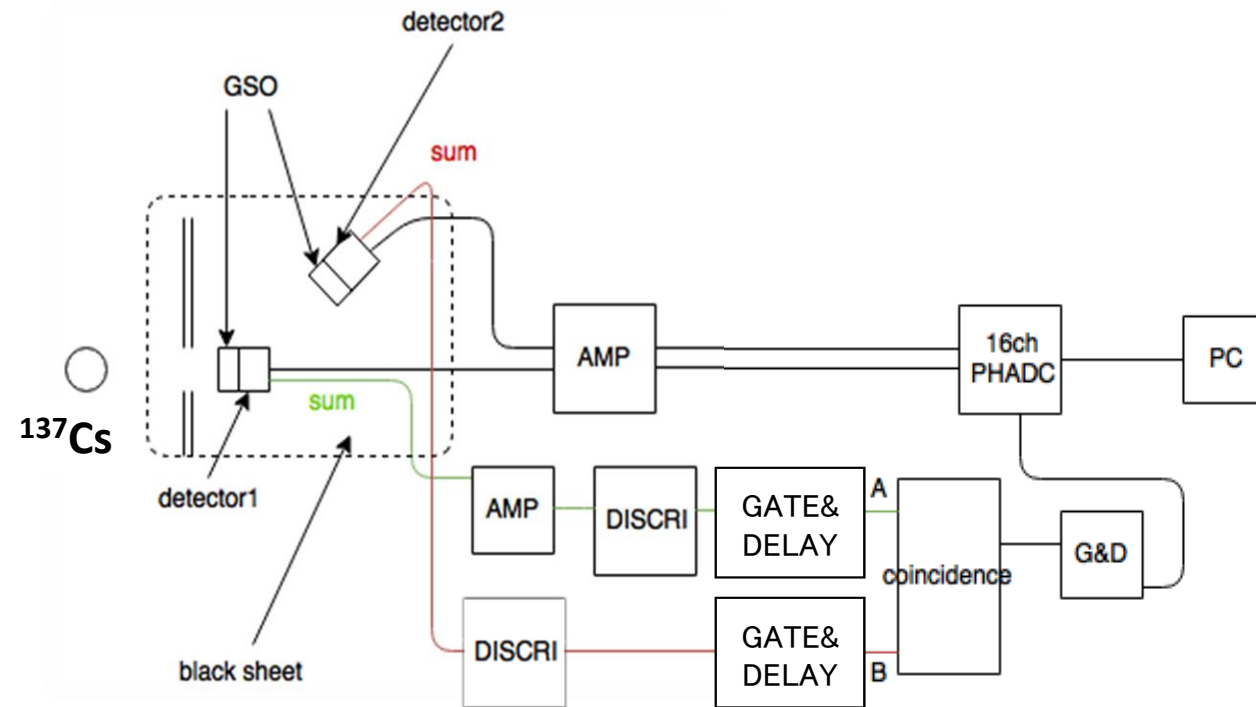
視野中央



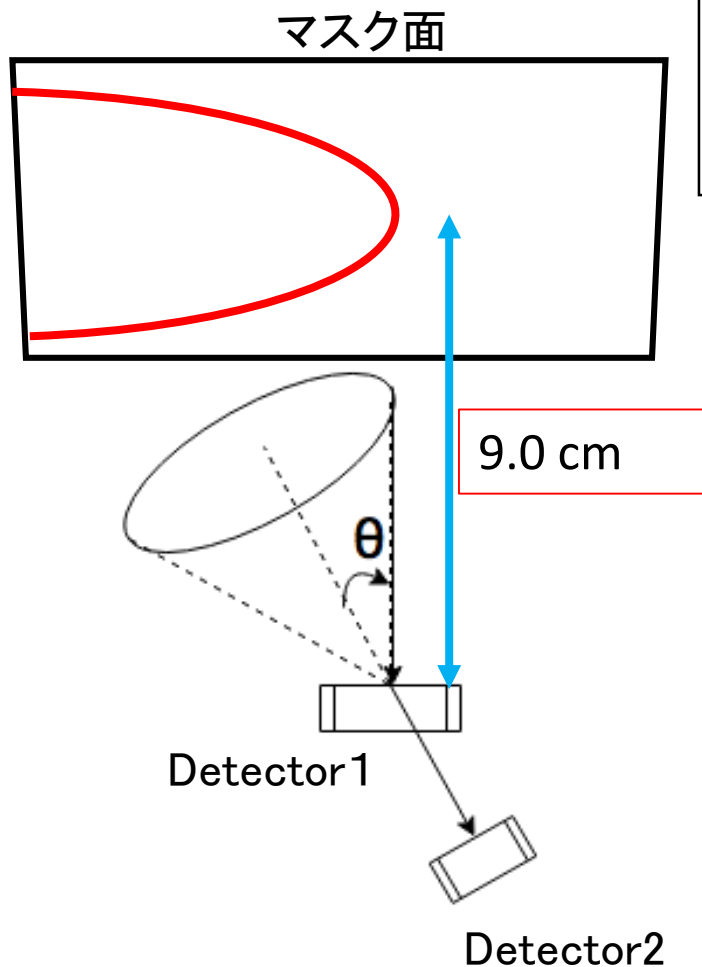
視野右下

Compton Modeの測定

装置のセットアップ(コンプトン法)



コンプトン法による再構成

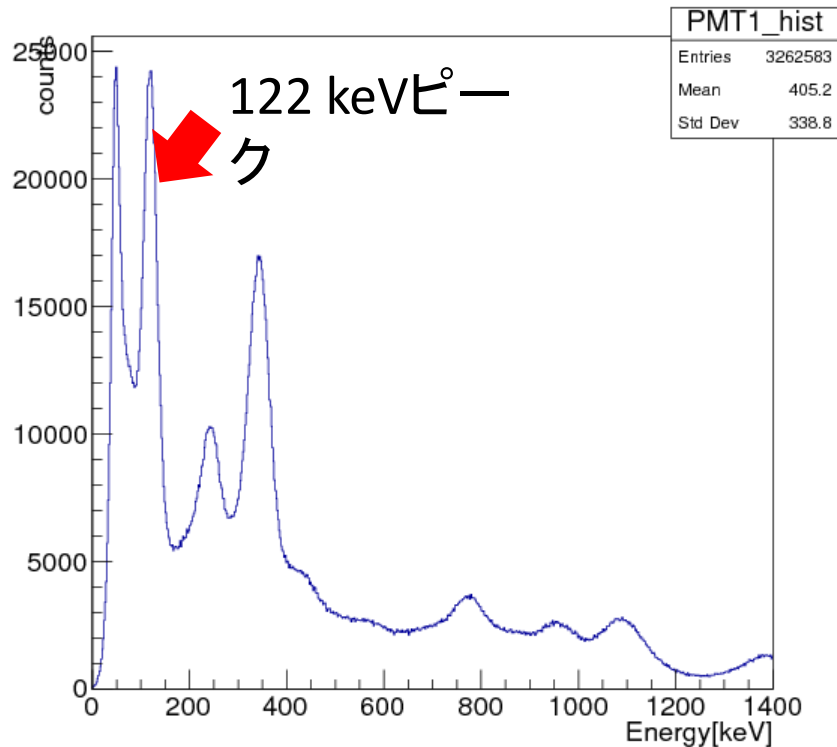


$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

→Compton Coneを描いて、
Detector1から9.0 cm離れた
平面(Coded-Maskがある面)に
back-projection

これを、得られたイベント数だ
け繰り返す

観測できるエネルギーの下限



^{152}Eu のスペクトル
(Detector1)

^{152}Eu の122 keV は観測可能

$E < 122 \text{ keV}$ の場合、
→ノイズ優位でcalが困難

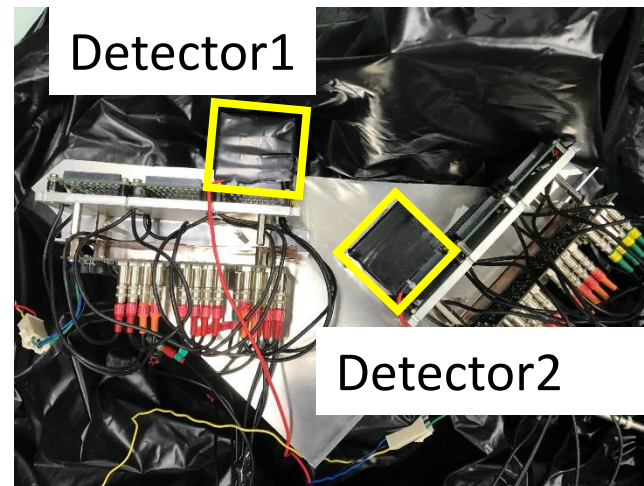
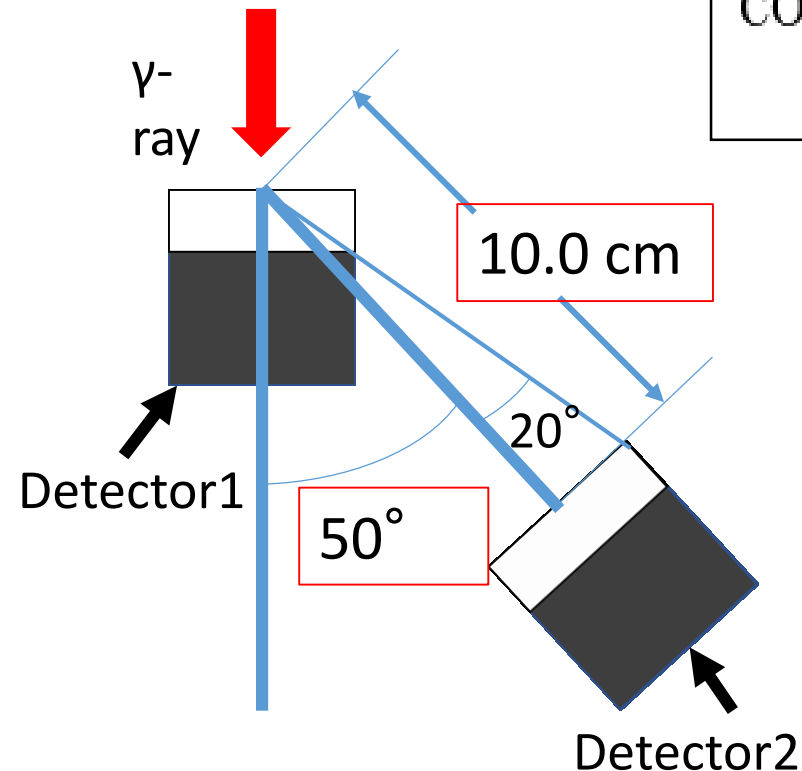
→ $122 \text{ keV} < E_1$
になるよう配置

検出器の配置

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

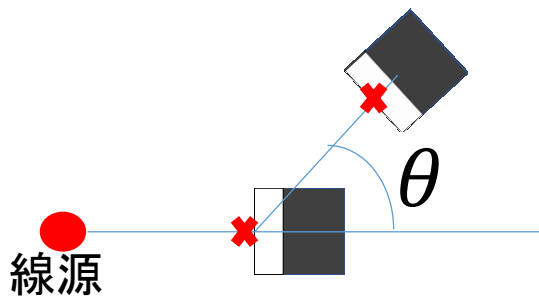
$$30^\circ < \theta < 70^\circ$$

$$\rightarrow 130 \text{ keV} < E_1 < 310 \text{ keV}$$

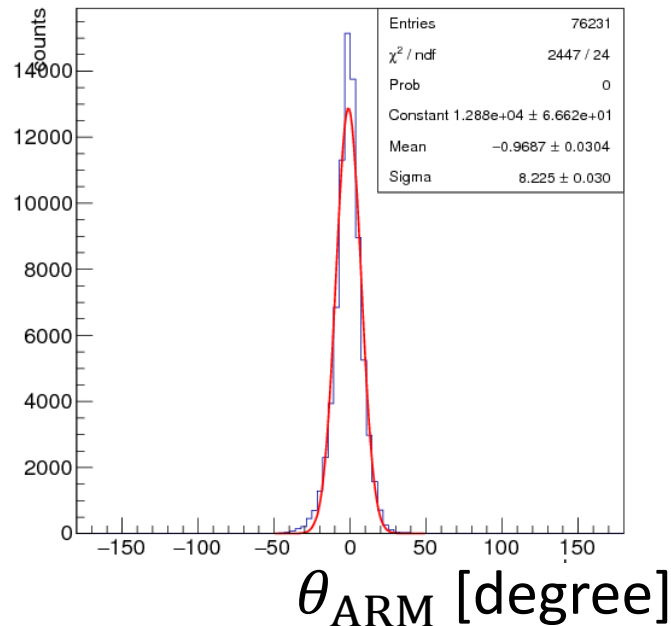
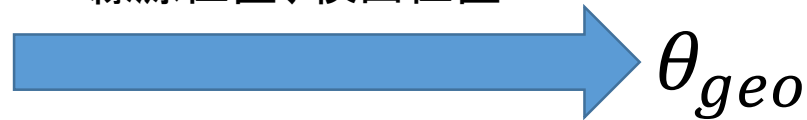


Angular Resolution Measure(ARM)

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \xrightarrow{E_1, E_2} \theta_{kin}$$



線源位置、検出位置

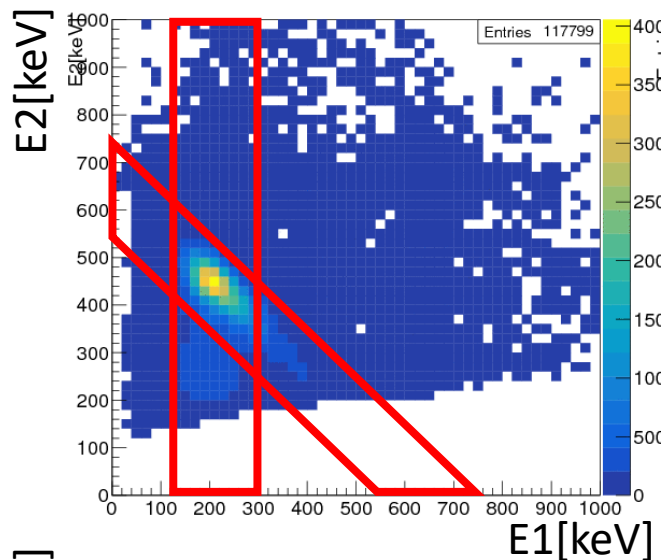
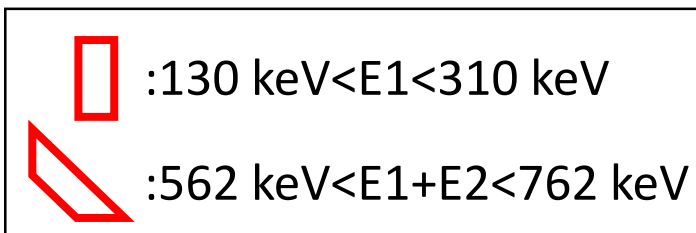


- $\theta_{ARM} = \theta_{kin} - \theta_{geo}$

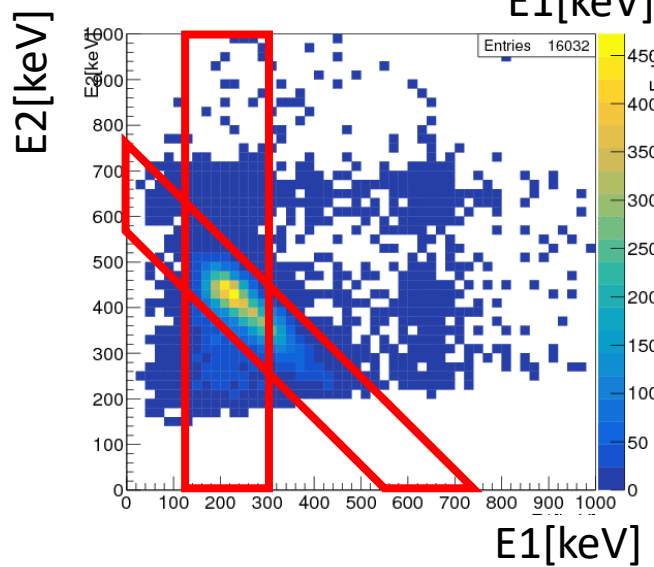
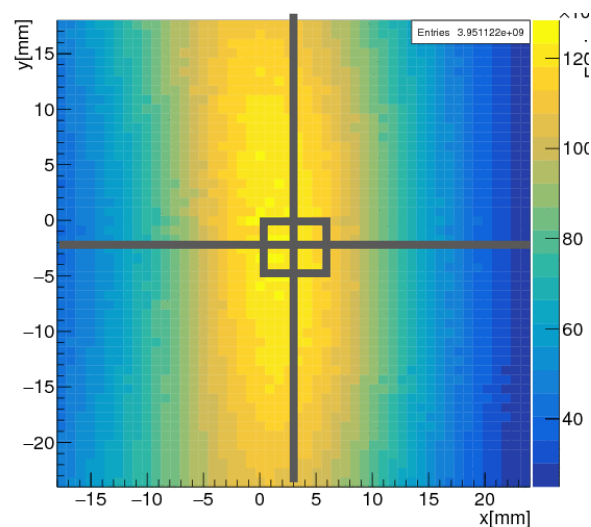
- FWHM=13.7[degree]

→Compton Coneの厚み

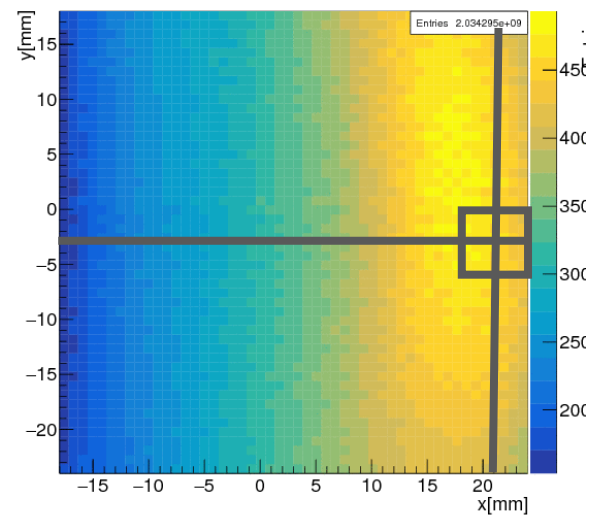
再構成



^{137}Cs
視野中央



^{137}Cs
視野右



Coded Mask ModeとCombined Modeの雑音除去能力の検証

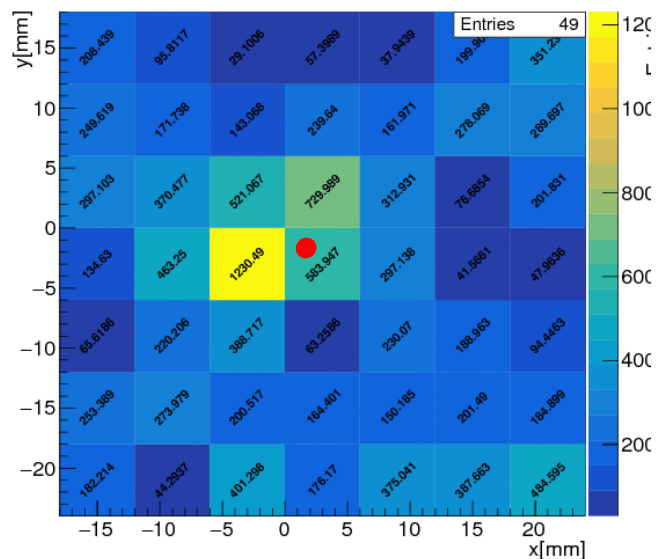
雑音除去能力測定①



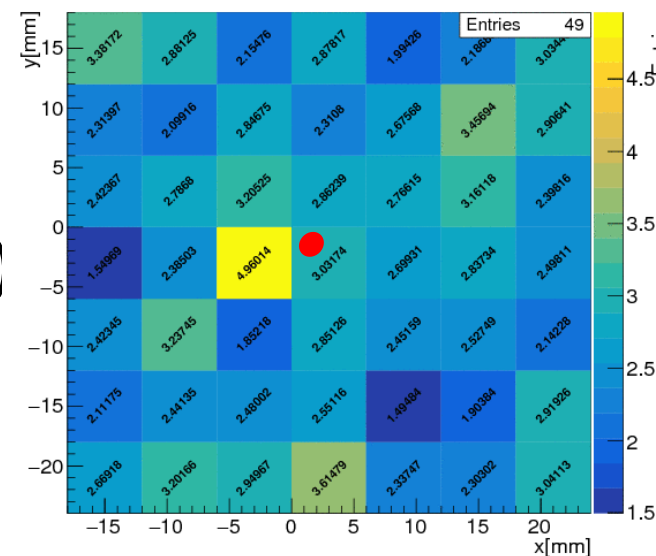
後方にノイズ源として
 ^{137}Cs (2.84 MBq)

視野中心に、
 ^{137}Cs (1.56 MBq)

視野外のノイズが一様
→Coded Mask Modeでも撮像できる



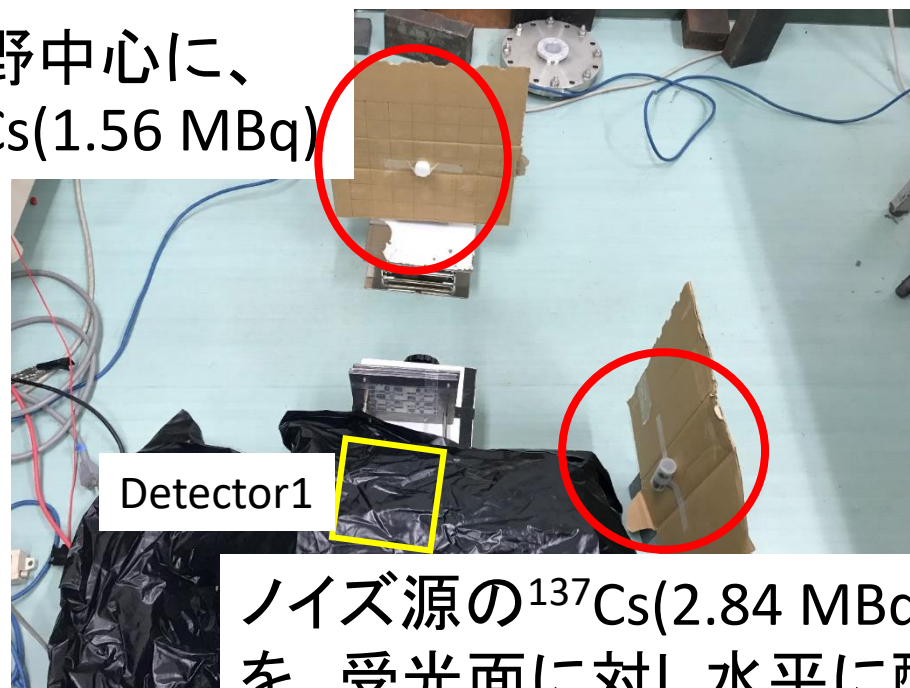
CodedMaskのみで解析



Combinedで解析

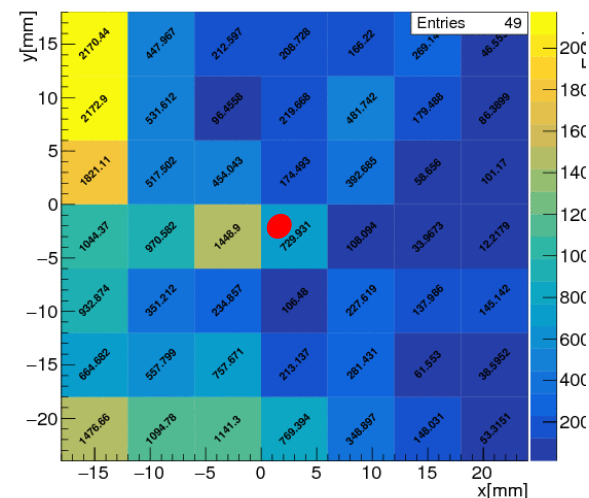
雑音除去能力測定②

視野中心に、
 ^{137}Cs (1.56 MBq)

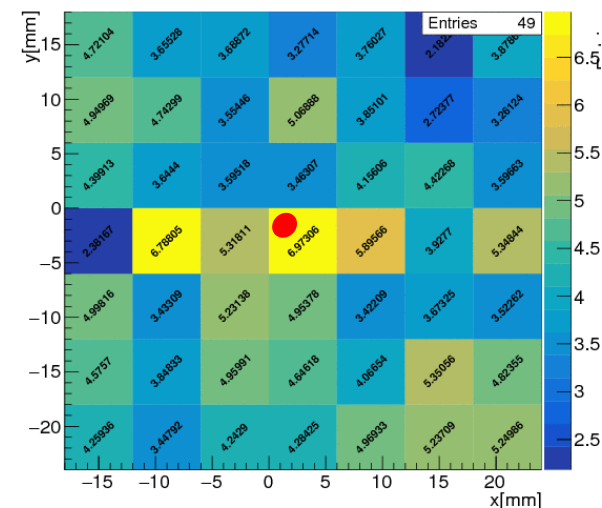


ノイズ源の ^{137}Cs (2.84 MBq)
を、受光面に対し水平に配置

ノイズが一様でない場合は、Coded
modeでは明らかに撮像に失敗

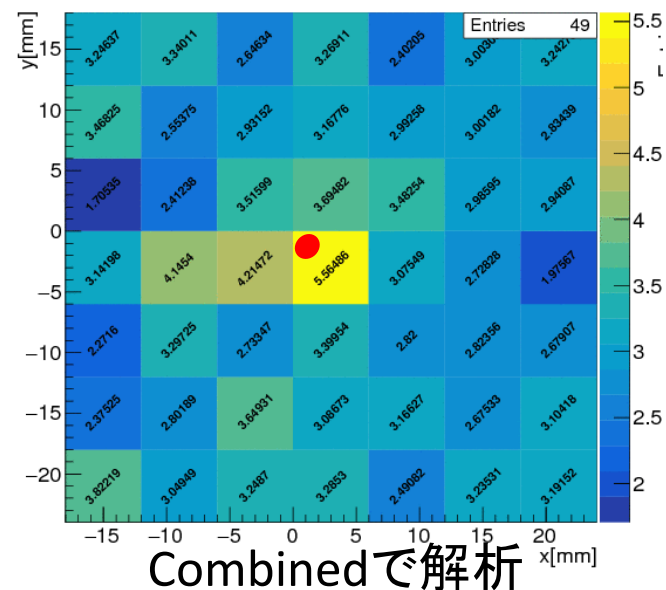
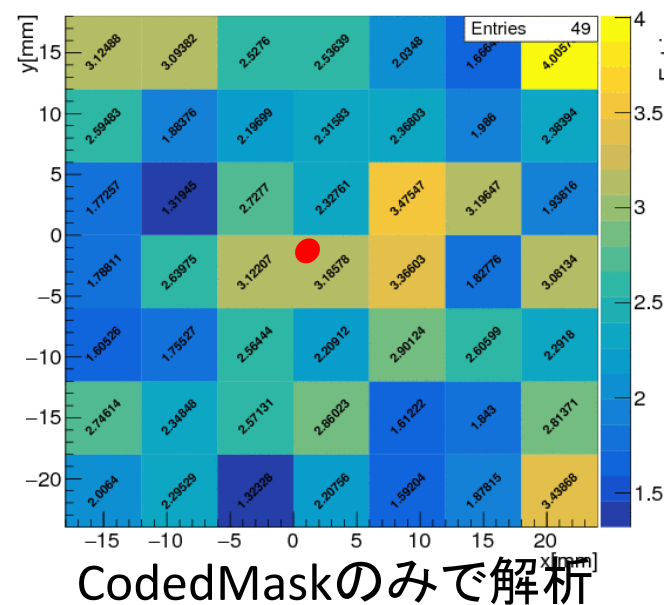


CodedMaskのみで解析

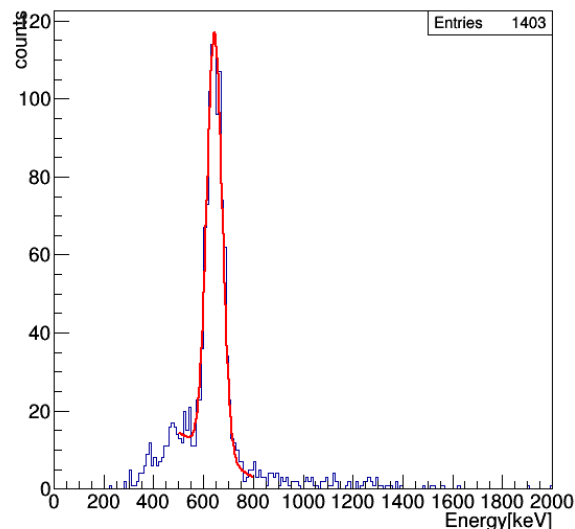


Combinedで解析

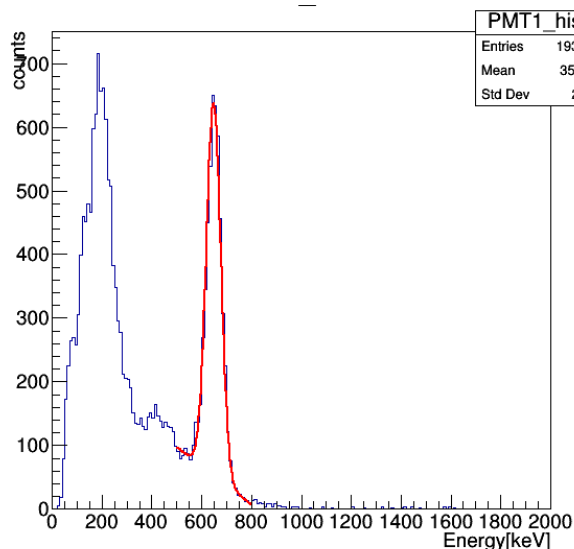
雑音除去能力測定③



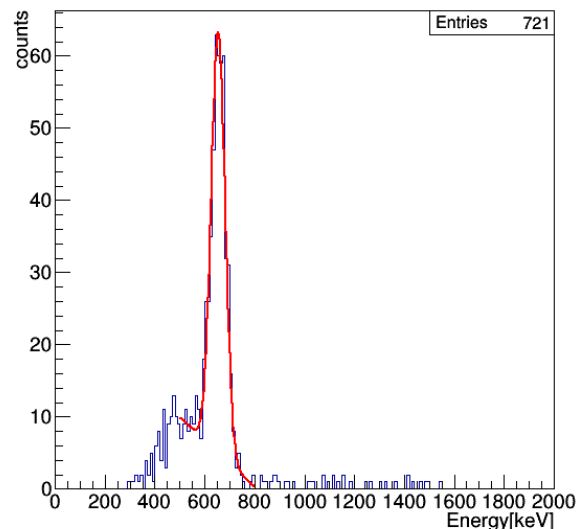
性能比較



Compton



Coded



Combined

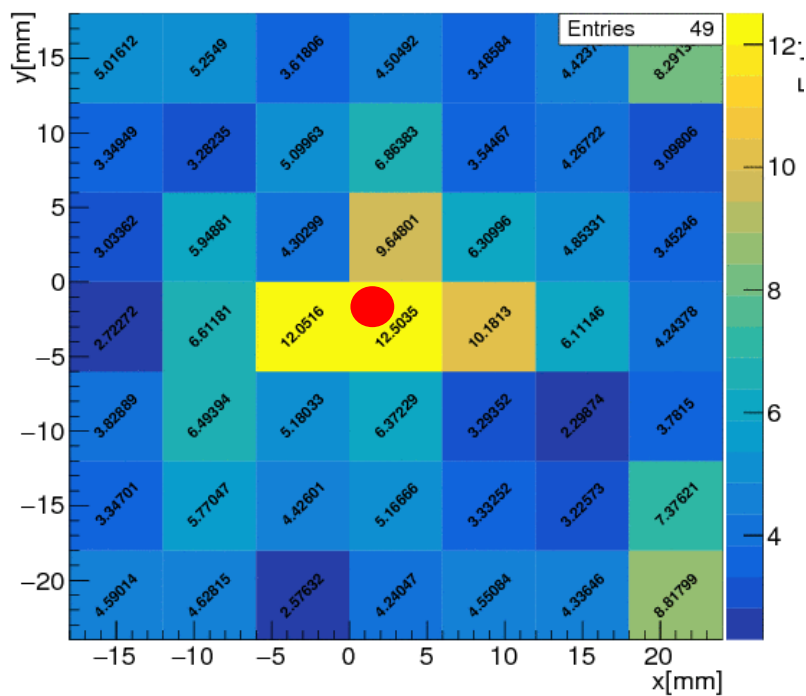
	Compton	Coded	Combined
エネルギー分解能 [%]	10.9	10.4	10.0
角度分解能 [degree]	12.2(ARM)	3.8	3.8
有効面積 [cm ²]	1.29×10^{-3}	6.66×10^{-3}	6.37×10^{-4}
Signal Noise Ratio	5.13	4.69	4.95

¹³⁷Cs(4.4MBq) 10分間測定

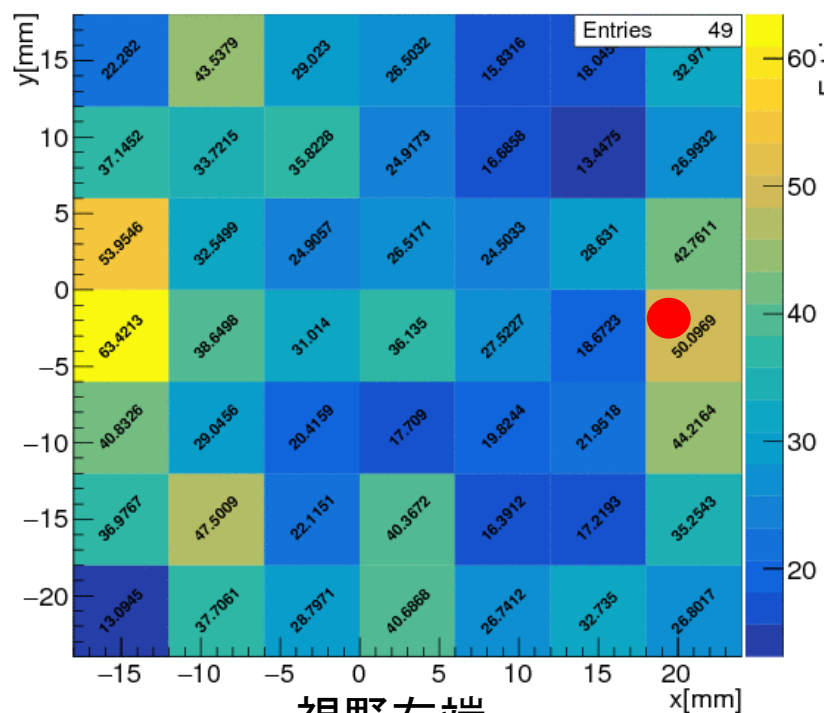
Combined modeの再構成における問題点

重みづけ関数 W が γ 線の入射角に依存する。

視野中央に線源をおいて作った $\mathbb{W}$ を用いてdecode



視野中央



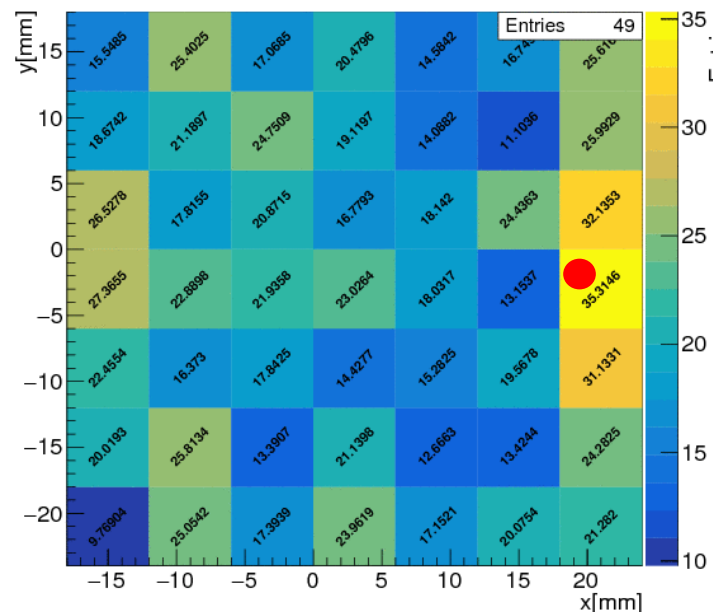
視野右端

視野右端の線源は撮像できなかった

同じデータに対して視野右端
に線源をおいてつくった W を
用いてdecode

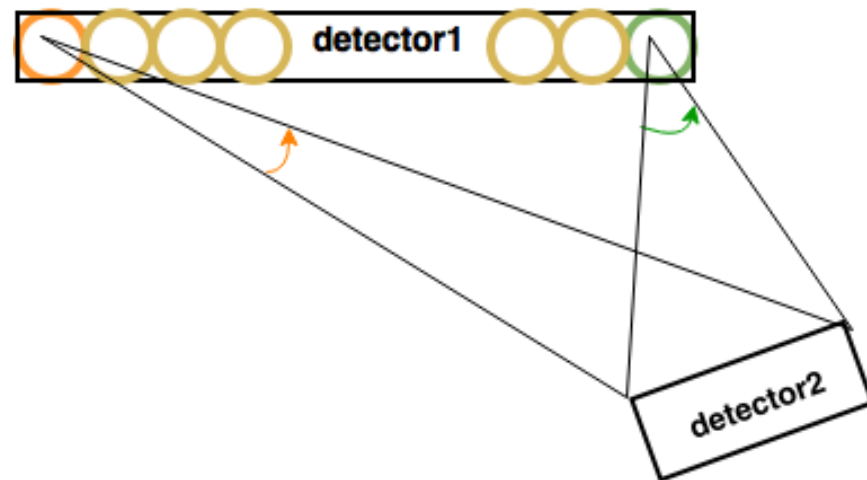


撮像に成功



散乱体の各pixelごとに吸収体で
観測可能な散乱角が異なる

→ γ 線の入射角で W の形が異なる。



感度補正のための重みづけ関数 W の依存性

$$\hat{S}_{i,j} = \sum_{k,l} M_{i+k,j+l} W_{k,l} D_{k,l}$$

- Coded mask mode

$$W_{k,l} = W_{k,l}(E)$$

- Combined mode

$$W_{k,l} = W_{k,l}(E, \theta, \phi)$$

入射方向を知るためには、
入射方向を知らなくてはならない

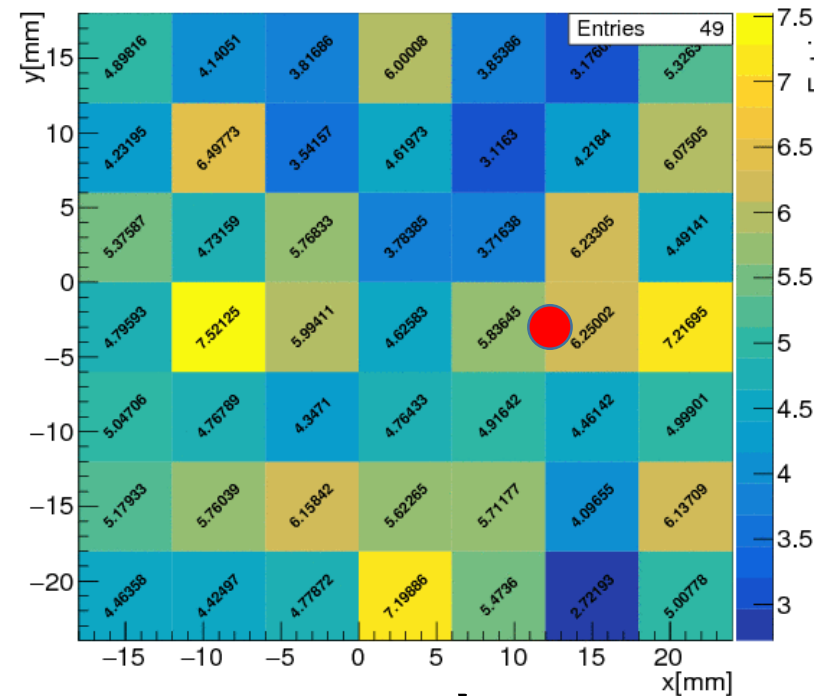
入射方向を知るためには、入射方向を知らなくてはいらない問題への対処法

- γ 線の入射角 (θ, ϕ) の違いによる $W_{k,l}$ の形の変化が無視できるほどに視野を狭める。
- decode前にCompton再構成からおおよその (θ, ϕ) を求めて、適切な $W_{k,l}(E, \theta, \phi)$ を選択する。



$W_{k,l}(E, \theta, \phi)$ の形の変化が無視できなくなる $(d\theta, d\phi)$ よりもComptonカメラの角度分解能が良くなくてはいらない

Sky Vector



撮像失敗

今回作成したカメラのCombined modeは
線源位置の事前知識なしに撮像する能力は
もたない

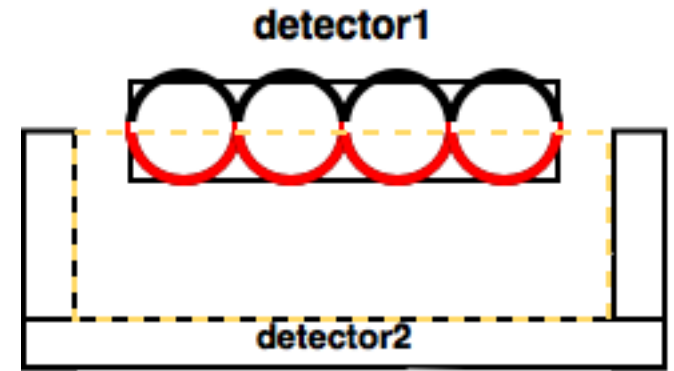
Comptonカメラの
角度分解能

入射角による
 $W_{k,l}$ の形の変化量

入射角による $W_{k,l}$ の形の変化を小さくするには

散乱体後ろの半球面 (2π の立体角) を覆うように
吸収体を配置する。

→ (吸収体に感度のバラツキ
がなければ) $W_{k,l}$ の形の変
化はなくなる。
感度のばらつきのない吸収
体の開発も必要



従来型のComptonカメラでは1イベント単独で重みづけ関数を選択することができない。

暗に γ 線源を点源と仮定したが、線源が空間的に連続分布で視野の大部分にわたり広がっている場合は今回の方法では撮像することはできない。

Combined mode まとめ

- さまざまな γ 線源の位置、エネルギーの重みづけ関数 $W_{k,l}$ をシミュレーション・実測で求める必要がある
- 重みづけ関数 $W_{k,l}$ を選択するのに十分なComptonカメラの角度分解能と、 $W_{k,l}$ の形が変わりにくい設計が重要
- 線源が連続分布している場合の撮像の方法についてはわからない

行ったこと

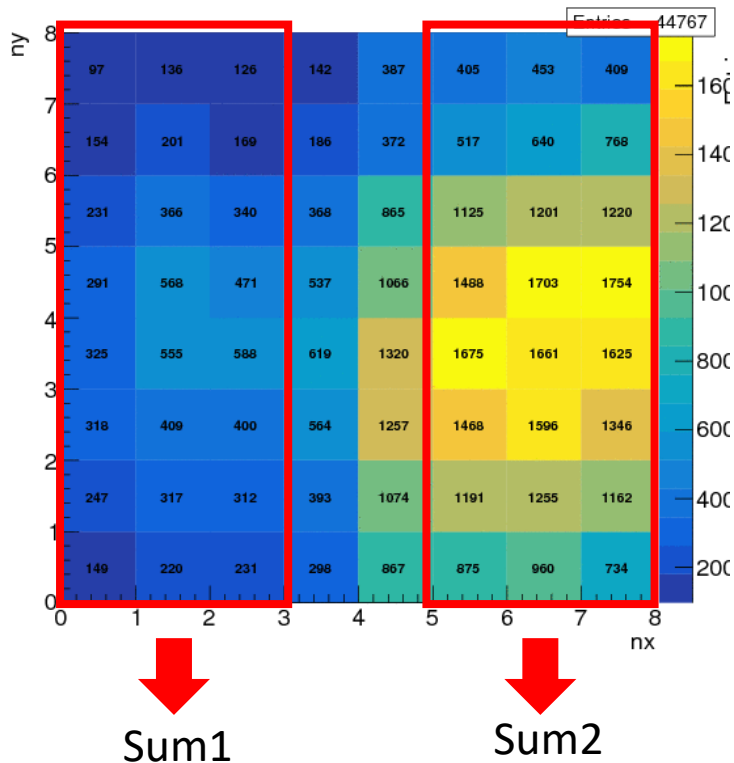
- 鉛のマスキの作成
- 鉛の遮蔽率測定
- Maskの厚さを変えて測定(Coded Mask)
- 同種の2線源の測定 (Coded Mask)
- 別種の2線源の測定 (Coded Mask)
- 視野左端の測定 (Compton)
- 時間別測定 (Compton,Coded,Combined)

ご清聴ありがとうございました。



鉛の遮蔽率の確認

鉛板12mmの測定結果



検出器の左側を鉛版で覆い、
検出器から90mmの位置に
2.84MBqの ^{137}Cs を置いて
測定

$(\text{遮蔽率}) = 1 - (\text{Sum1} / \text{Sum2})$
として計算

理論値との比較(鉛の遮蔽率)

鉛の厚さ[cm]	0.3	0.6	0.9	1.2
遮蔽率(実験)[%]	37.7	53.3	65.0	73.5
遮蔽率(理論)[%]	31.2	52.7	67.5	77.6

- 理論的には、遮蔽率は $1-\exp(-\sigma x)$ と書ける。

(ただし、 x は鉛の厚さ[cm]

吸収係数 σ は、

$$\sigma = (\text{全断面積}[\text{cm}^2/\text{g}])$$

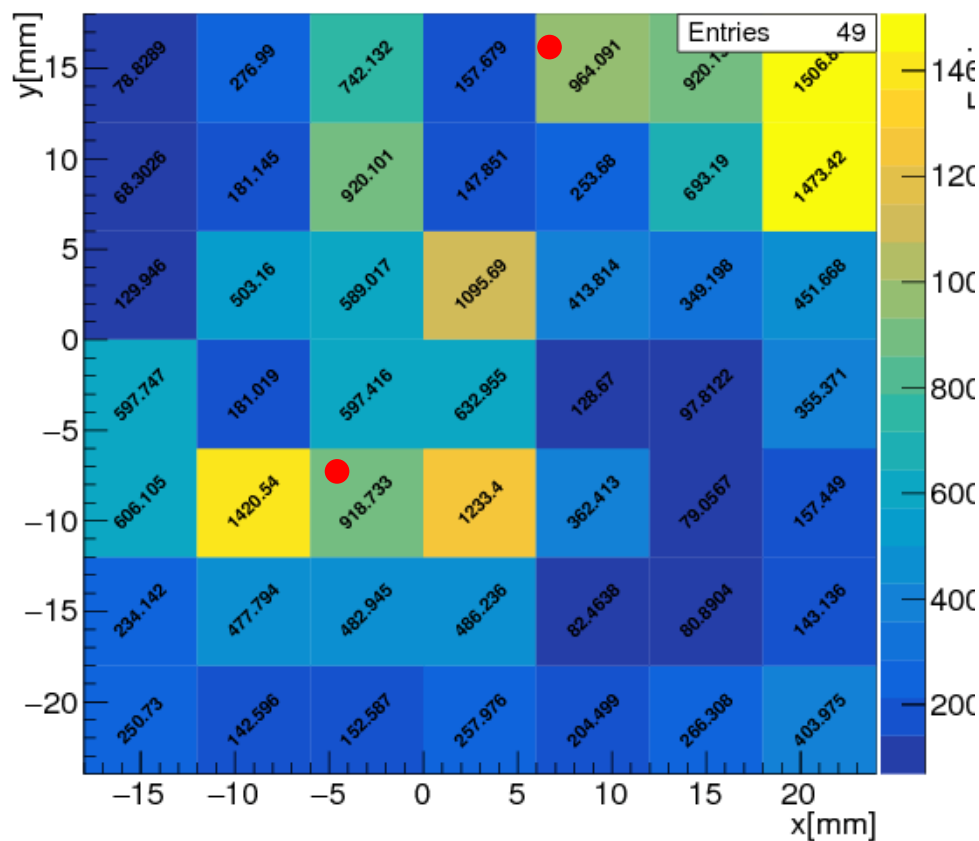
$$*(\text{密度}[\text{g}/\text{cm}^3])$$

$$=(0.1101)*(11.34)$$

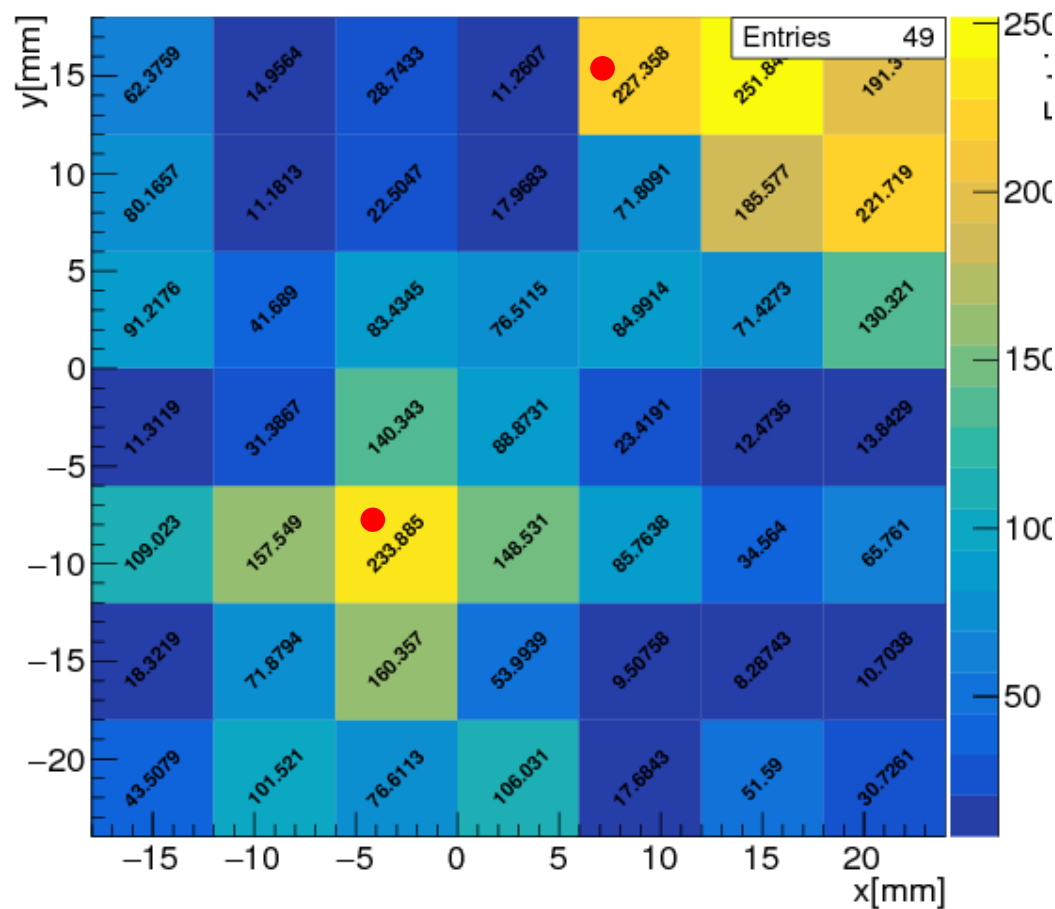
$$=1.249[1/\text{cm}]$$

とした。)

Coded再構成結果 (^{137}Cs 中心・左下,Mask0.6cm)

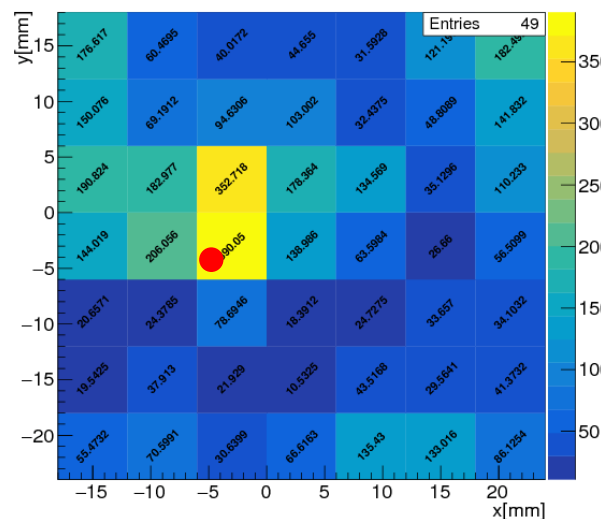


Coded再構成結果 (^{137}Cs 中心・左下, Mask1.2cm)

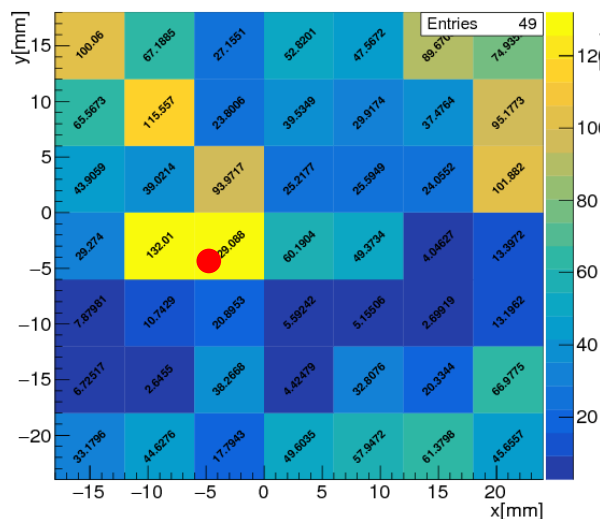


再構成

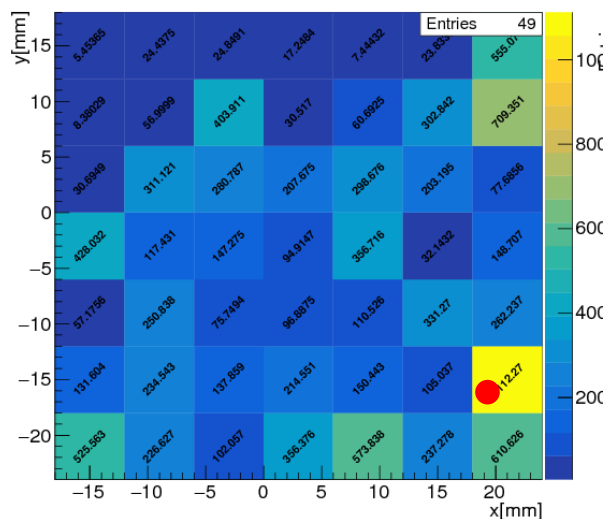
(^{60}Co 中央・ ^{137}Cs 左下, Mask1.2cm)



1173keV

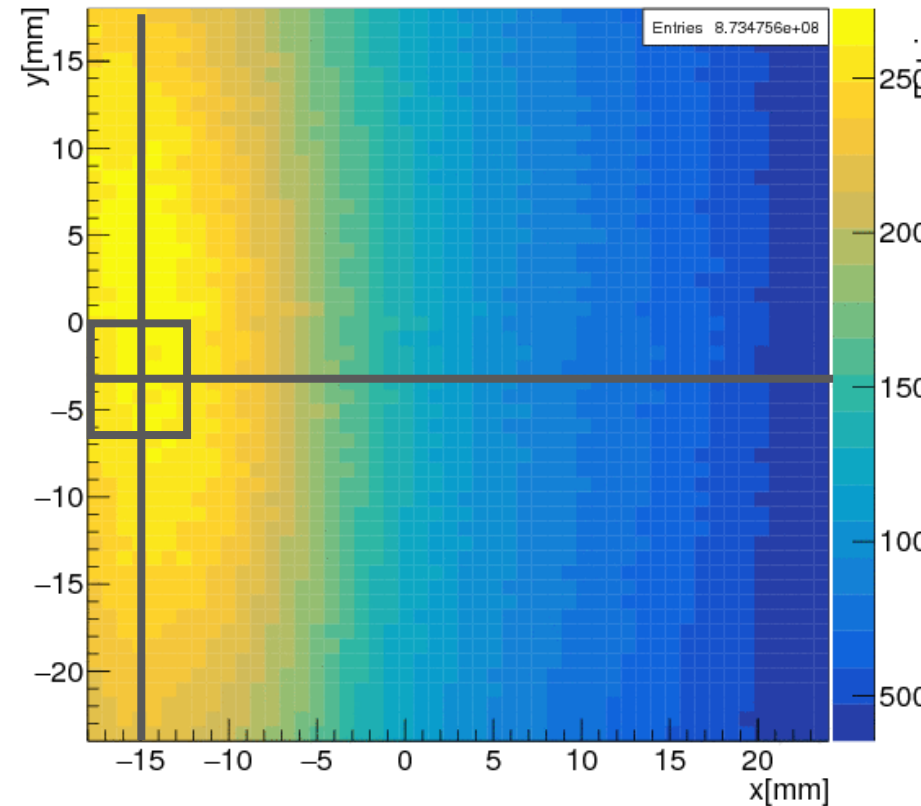
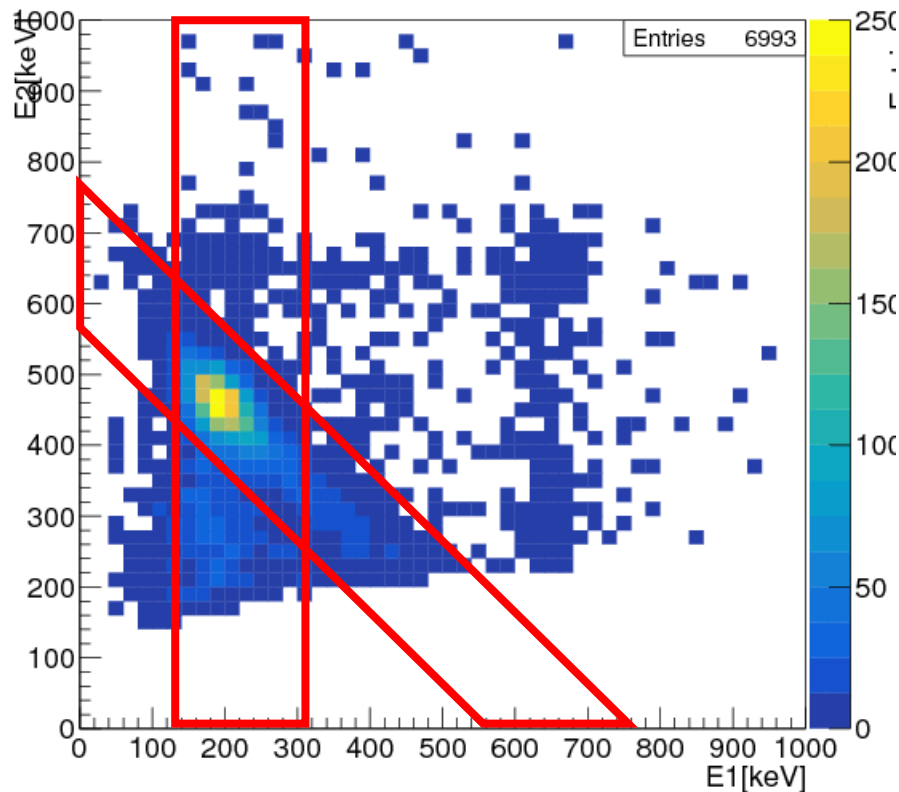


1333keV



662keV

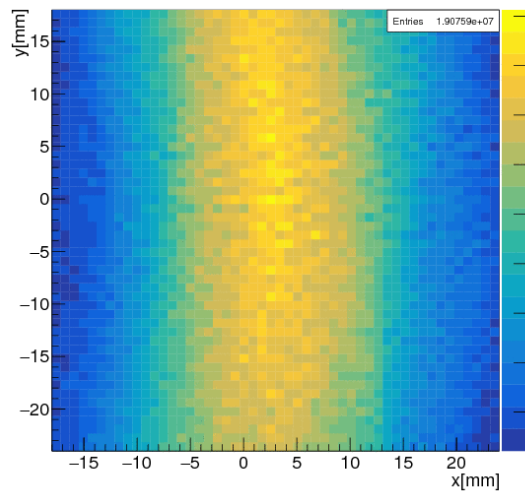
Compton再構成(視野左)



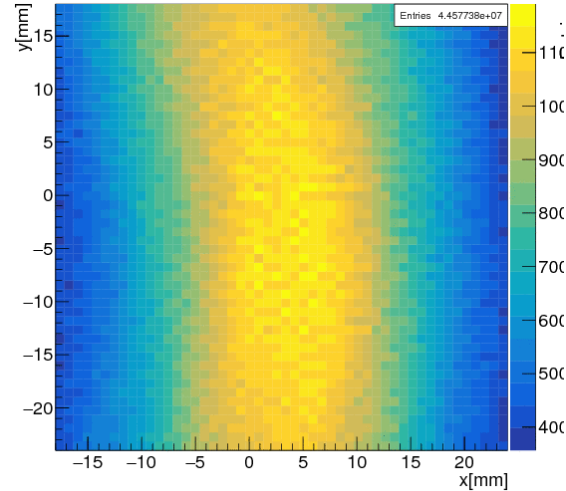
 : $130 \text{ keV} < E_1 < 310 \text{ keV}$

 : $562 \text{ keV} < E_1 + E_2 < 762 \text{ keV}$

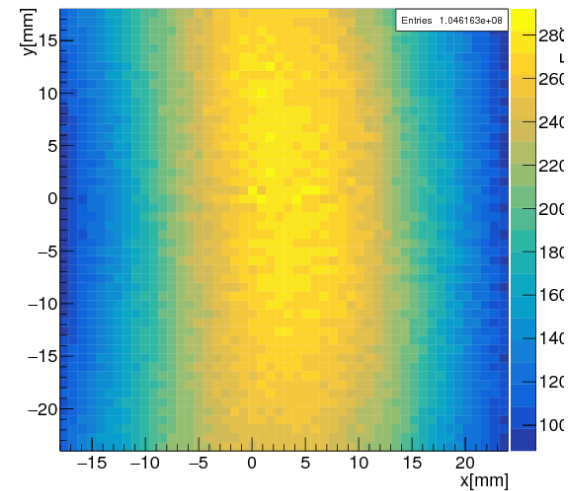
時間毎Compton再構成(^{137}Cs 中央、Mask1.2cm)



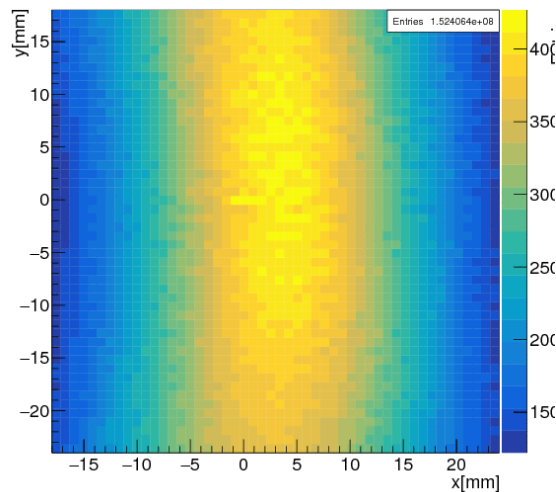
1.0min



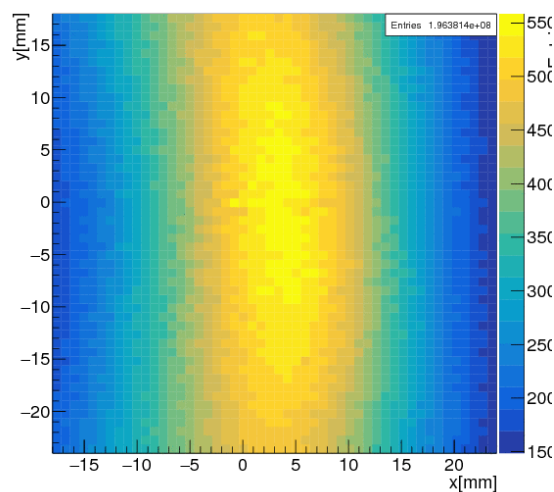
2.5min



5.0min

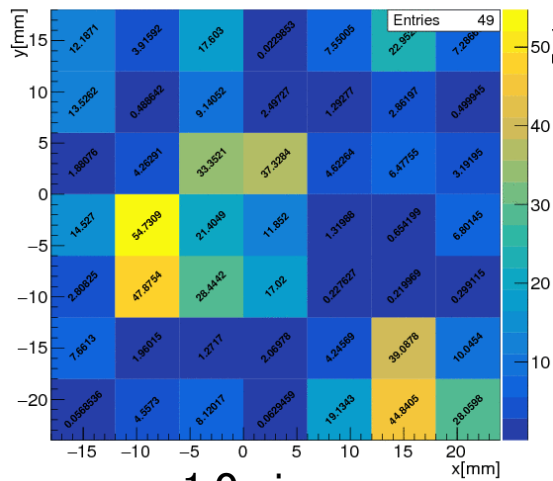


7.5min

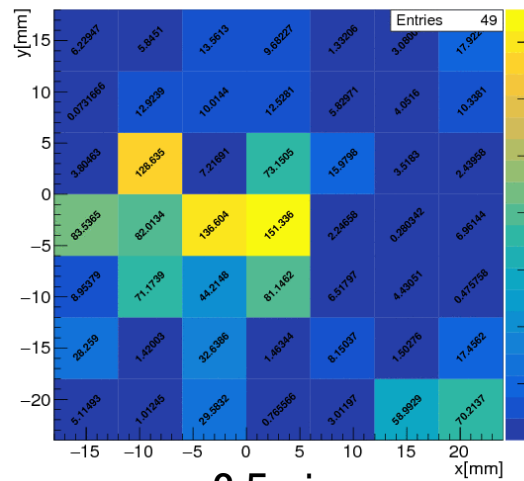


10min

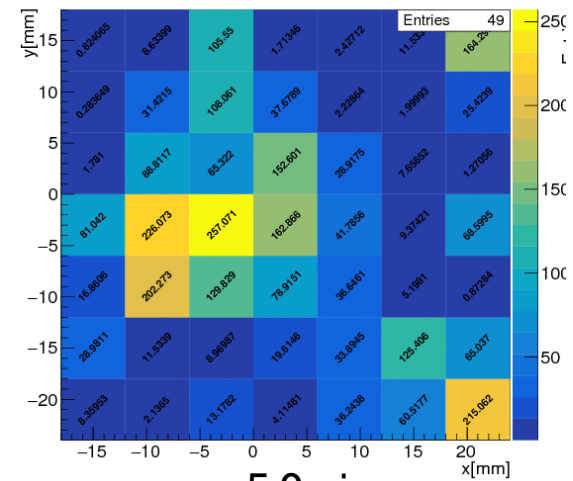
時間毎Coded再構成(^{137}Cs 中央、Mask1.2cm)



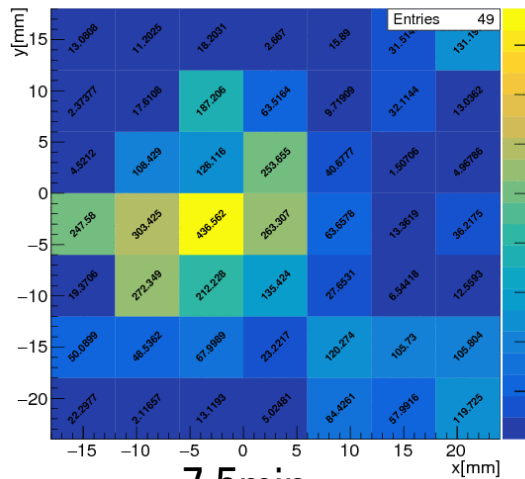
1.0min



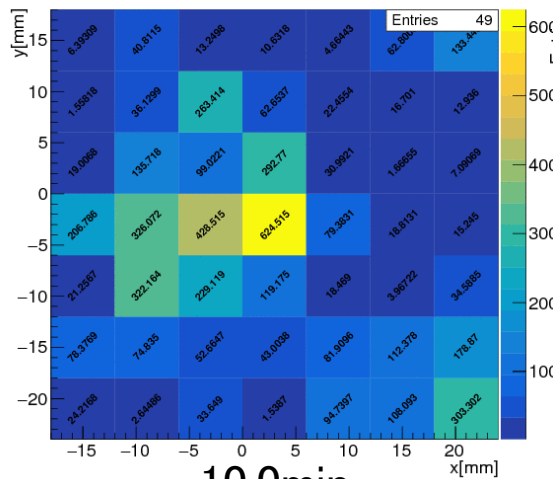
2.5min



5.0min

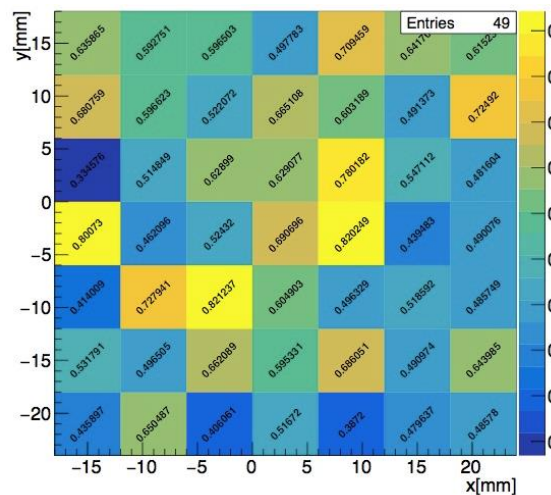


7.5min

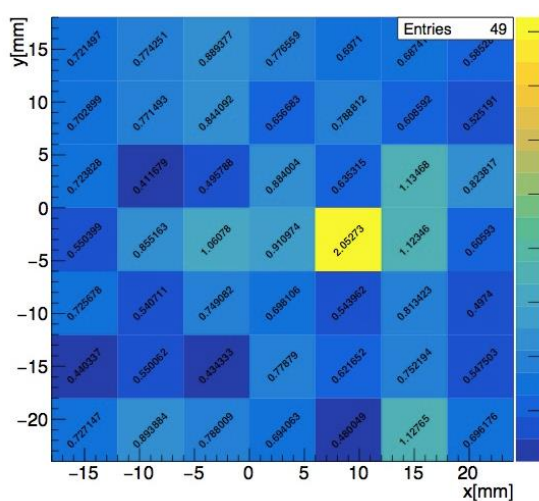


10.0min

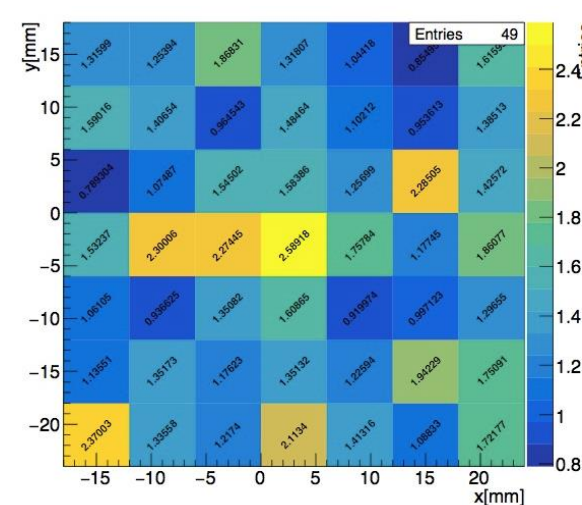
時間毎Combined再構成(^{137}Cs 中央、Mask1.2cm)



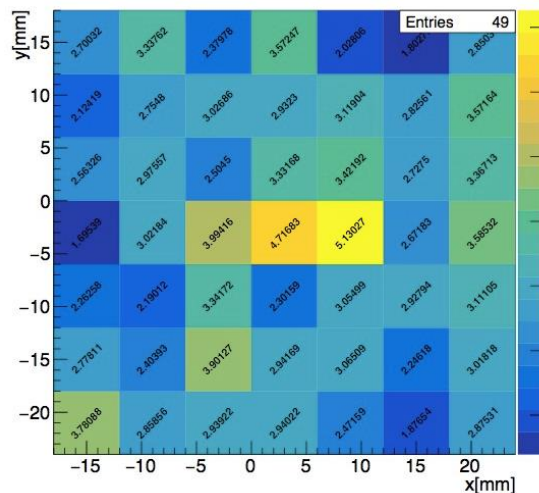
1.0min



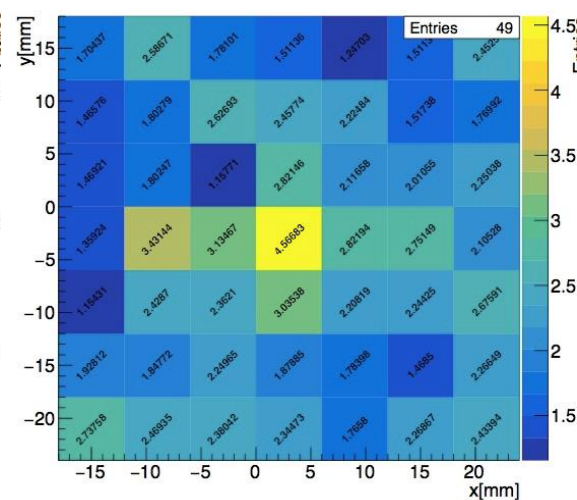
2.5min



5.0min

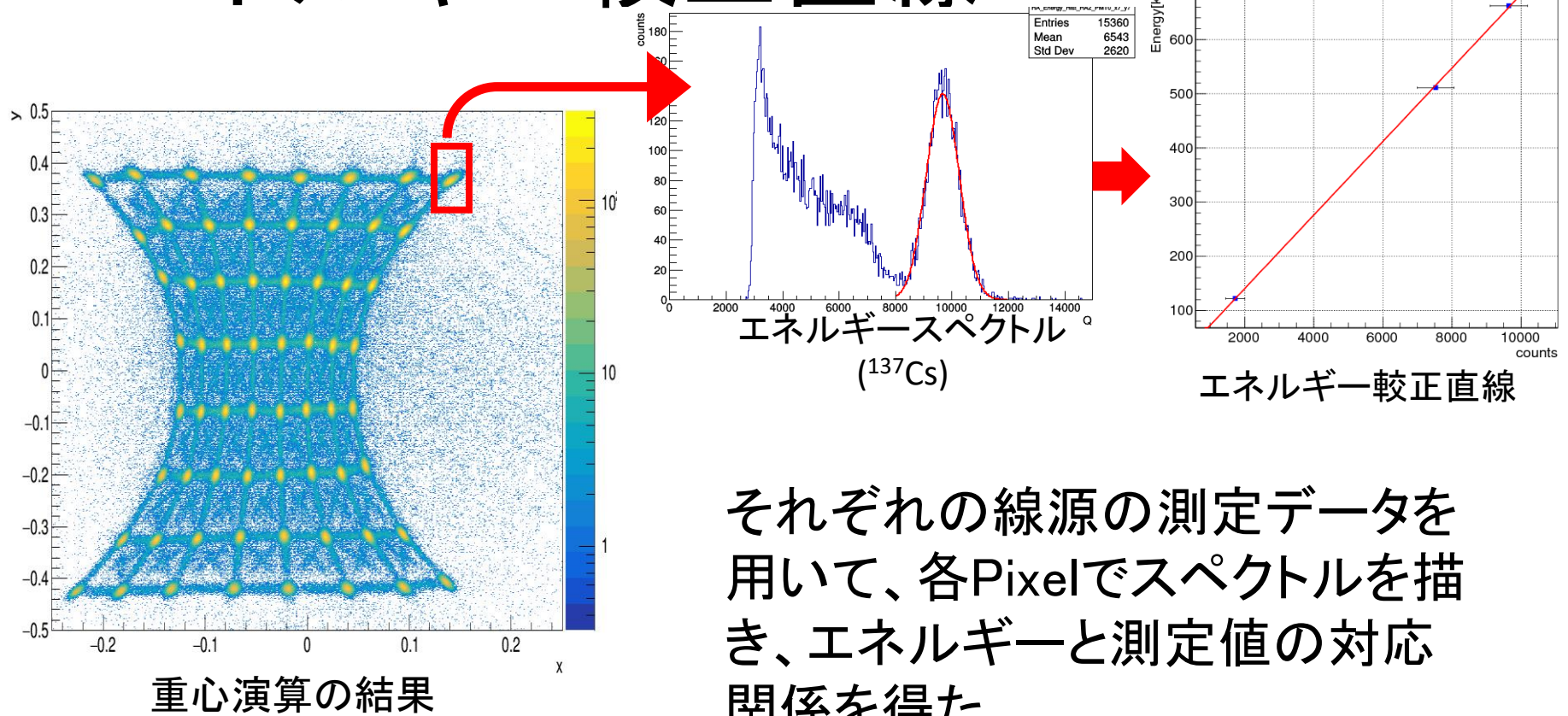


7.5min



10.0min

エネルギー較正直線

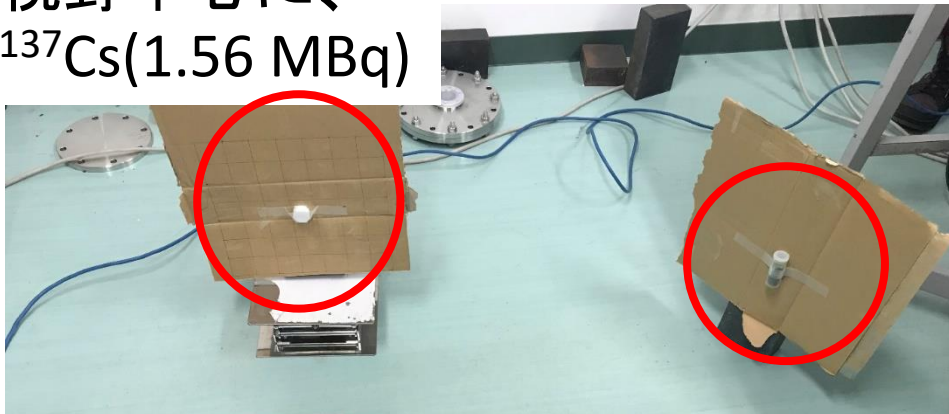


それぞれの線源の測定データを用いて、各Pixelでスペクトルを描き、エネルギーと測定値の対応関係を得た。

それらを直線でFitして、測定値からエネルギーを求める式を各Pixelごとに得た。

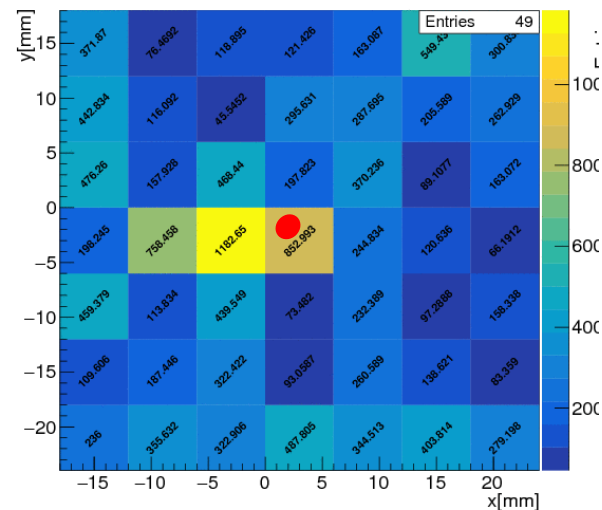
雑音除去能力測定

視野中心に、
 ^{137}Cs (1.56 MBq)

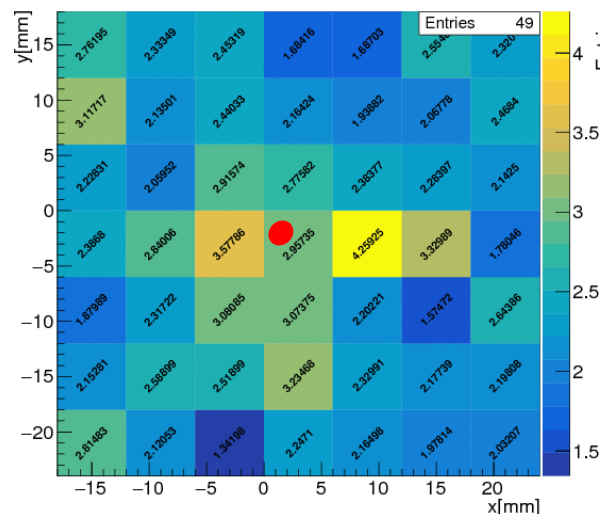


視野右外にノイズ源と
して ^{137}Cs (2.84 MBq)

→同測定①と同様にノイズが一様



CodedMaskのみで解析

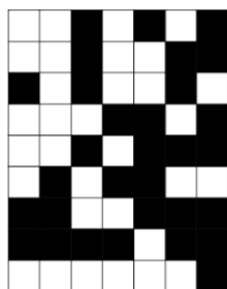


Combinedで解析

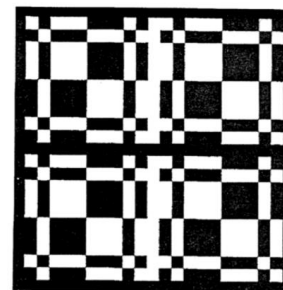
Appendix 1 MURA

Modified Uniformly Redundant Arrays の略称で
URA(Uniformly Redundant Arrays)を改良したもの

URAは長方形のパターンしか作れないのに対し、MURA
は正方形のパターンが作れる



(1) URA

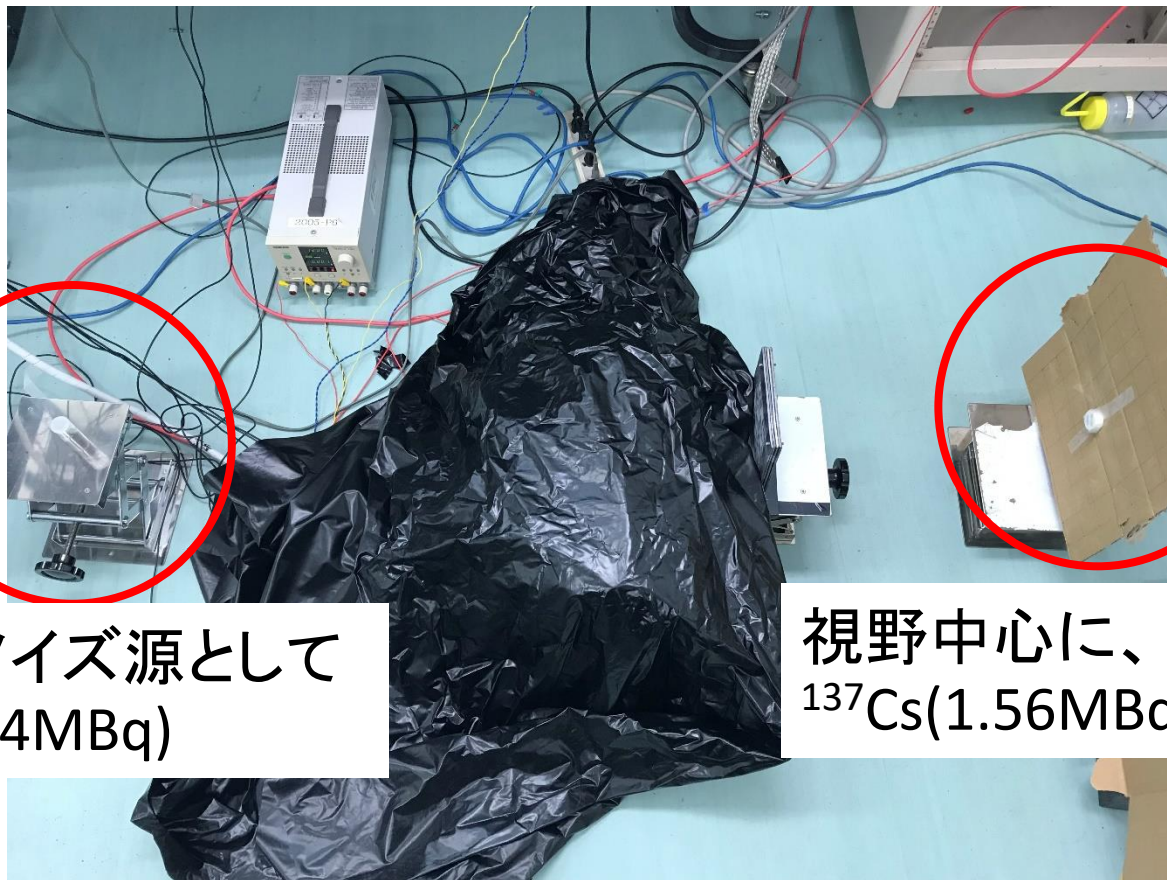


(2) MURA

(1)中嶋 大、高田 淳史 "Coded Aperture Imaging with Position-sensitive Photomultiplier Tube"

(2)Stephen R,Gottesman and E.E.Fenimore "New family of binary arrays for coded aperture imaging"

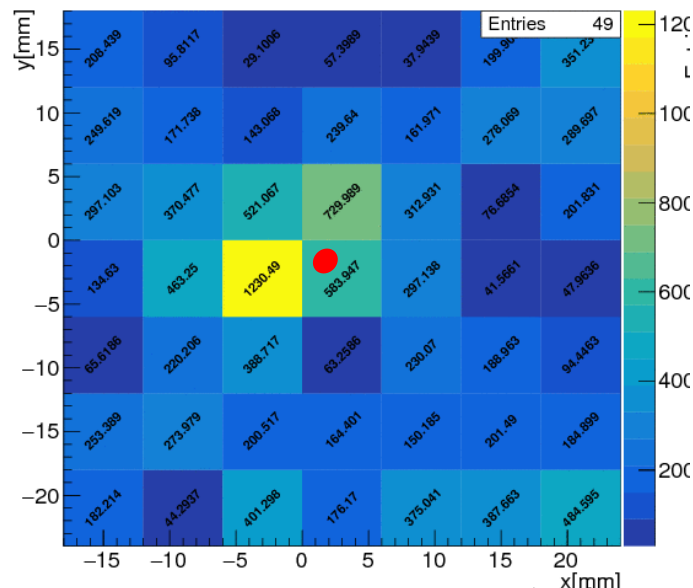
雑音除去能力測定①



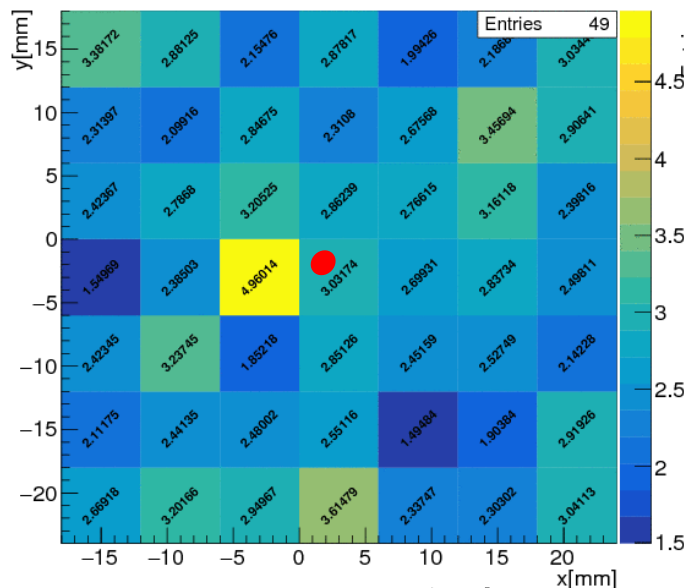
後方にノイズ源として
 $^{137}\text{Cs}(2.84\text{MBq})$

視野中心に、
 $^{137}\text{Cs}(1.56\text{MBq})$

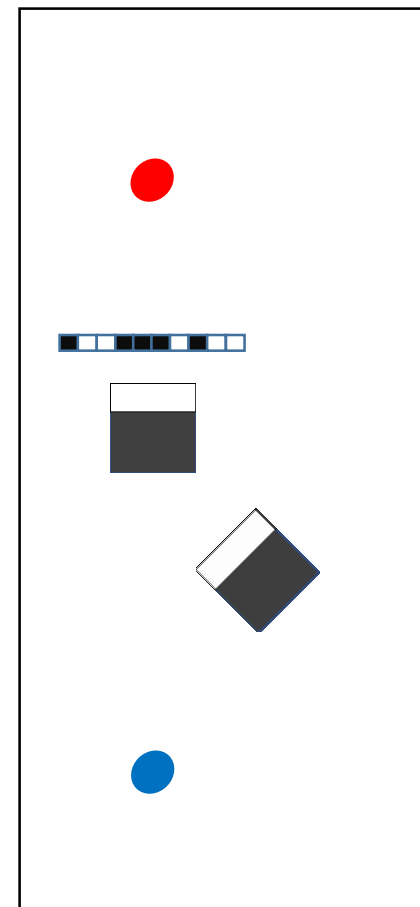
雑音除去能力測定①の結果



CodedMaskのみで解析



Combinedで解析



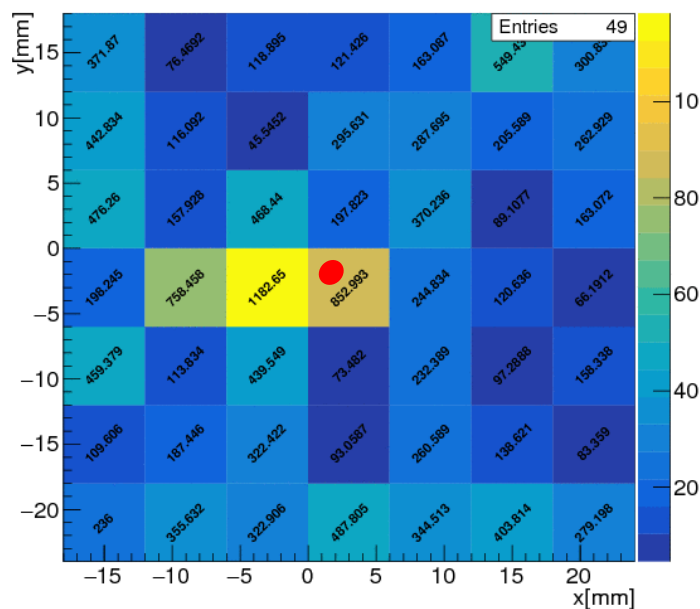
雑音除去能力測定②

視野中心に、
 ^{137}Cs (1.56MBq)

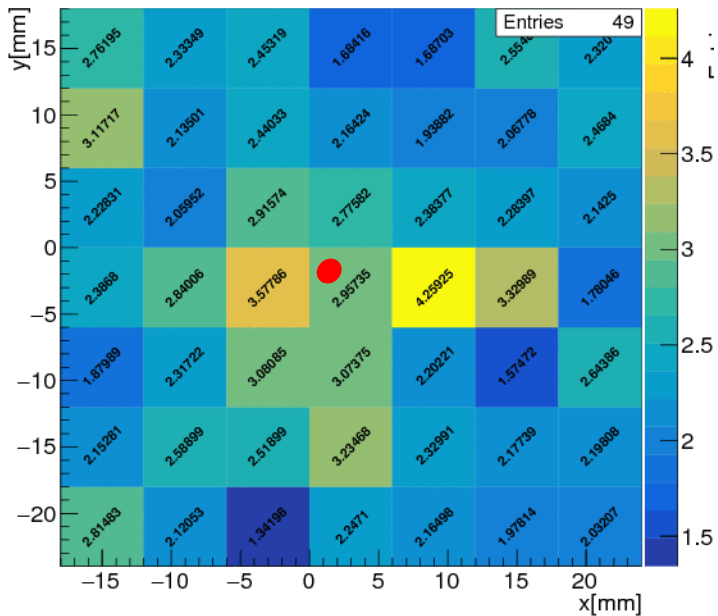


視野右外にノイズ源と
して ^{137}Cs (2.84MBq)

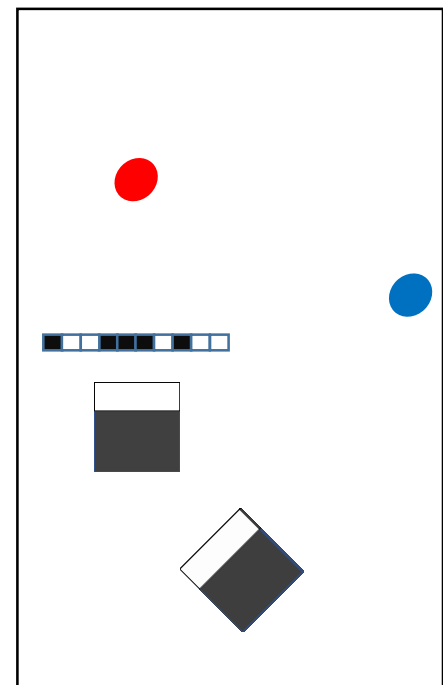
雑音除去能力測定②の結果



CodedMaskのみで解析



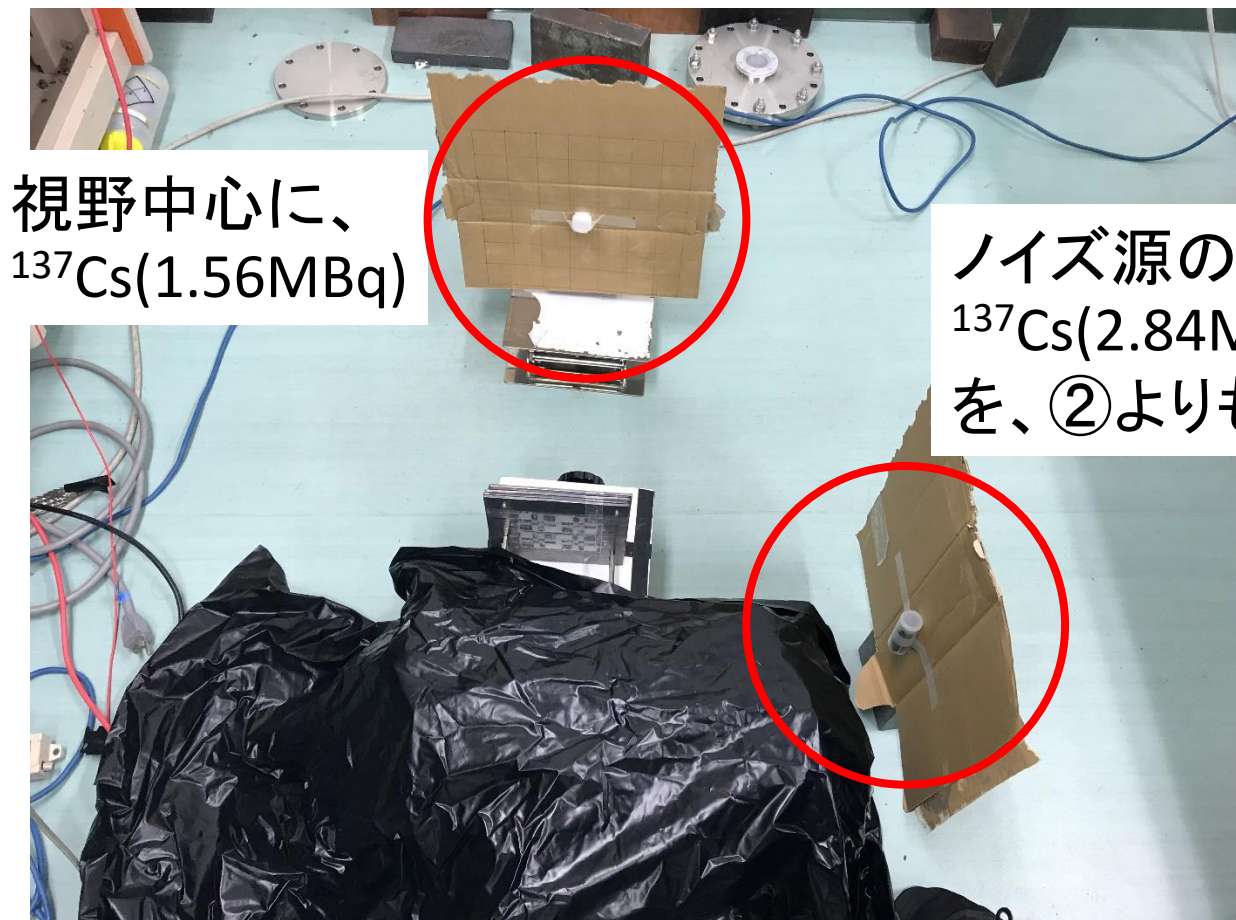
Combinedで解析



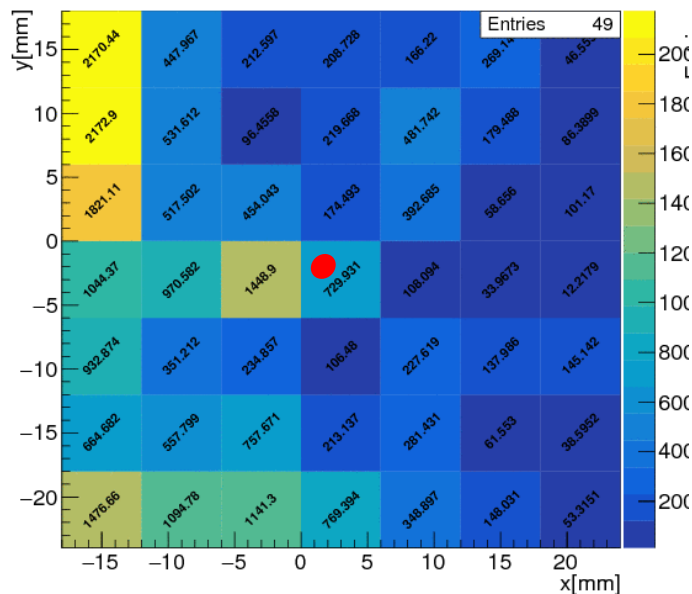
これ上と統合しよか

- 視野外に ^{137}Cs を置くだけでは、ノイズ源からの γ 線は受光面に一様にあたるので、構造をもったノイズとならず、Coded mask mode に対してノイズとならなかった。

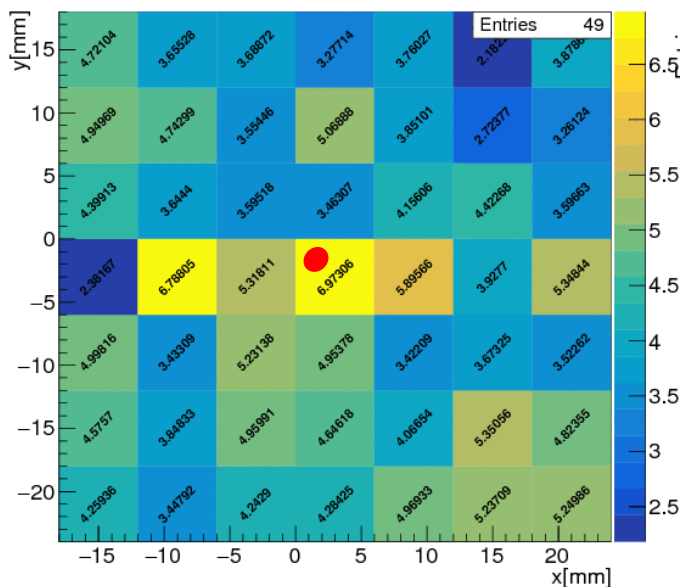
雑音除去能力測定③



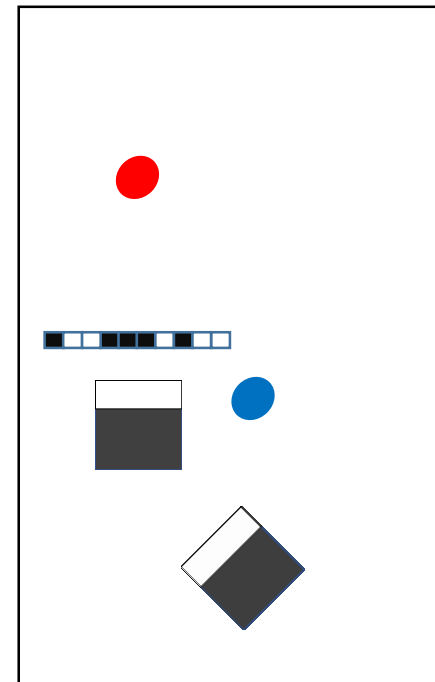
雑音除去能力測定③の結果



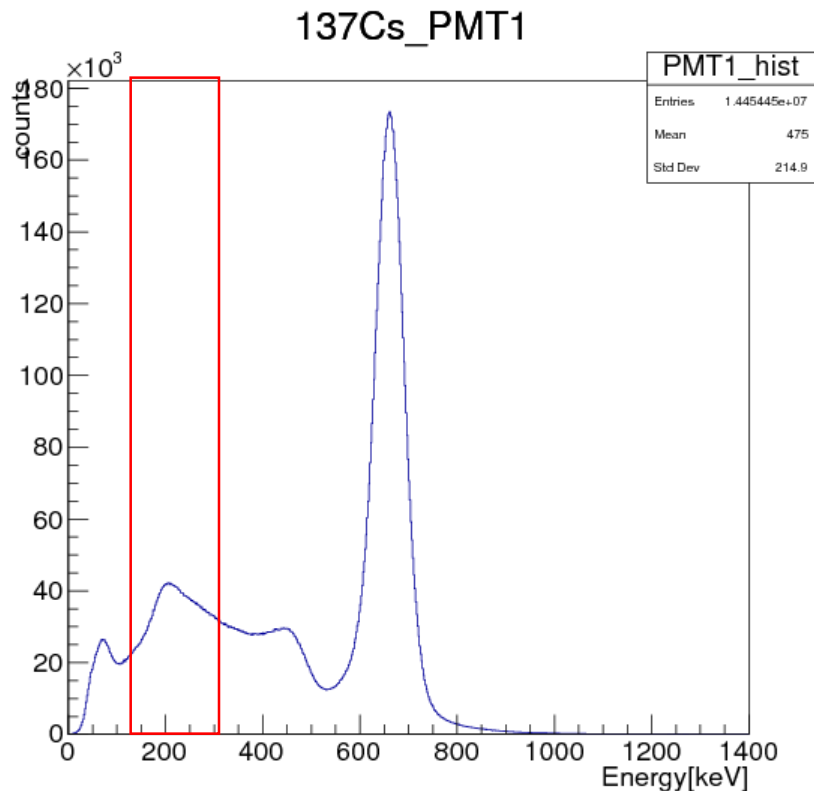
CodedMaskのみで解析



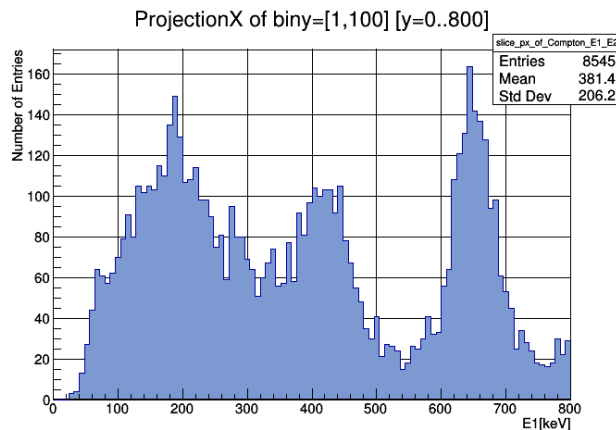
Combinedで解析



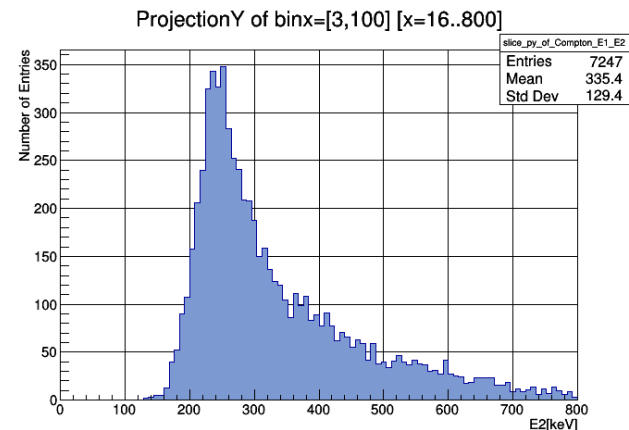
実験内容: Compton,Coded-mask,Combinedの3つの
種類のカメラを作成し、雑音除去能力を比較した。



- (PMT1calのスペクトル図):
130~310keV範囲の赤線
- 50° 散乱したガンマ線の
うち、Detector2で観測可
能なのは10%程度
→signalはとても少なくなる



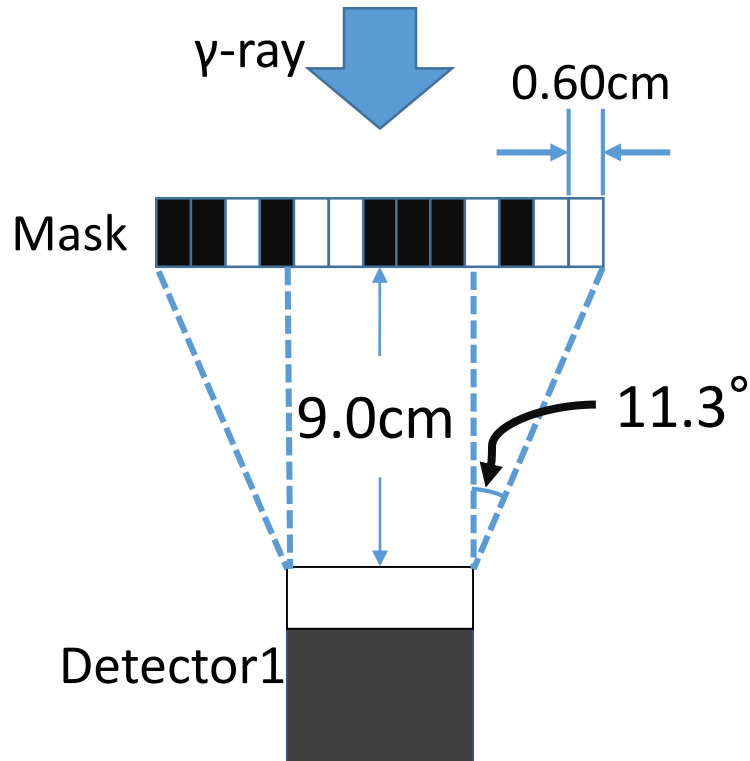
E1軸への射影



E2軸への射影

- 想定される散乱ガンマ線の光電吸収ピークなし
- バックグラウンドと類似
- Signal to Noise Ratioが非常に小さく、再構成できなかったと推測される

Geometry と性能



角度分解能は、

$$\text{Arctan}\left(\frac{\text{マスクと検出器の距離}}{\text{Pixel同士の間隔}}\right)$$

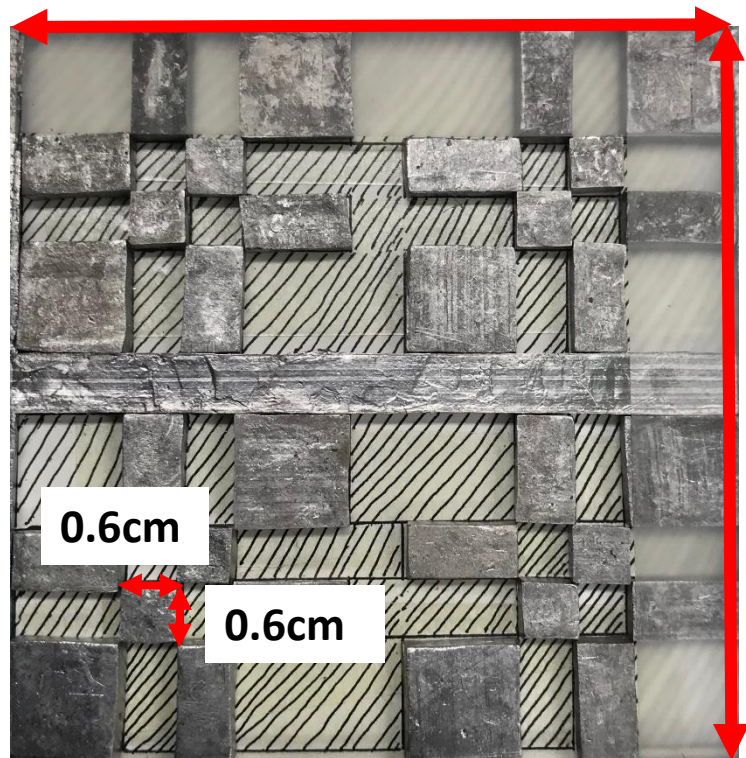
$$=\text{Arctan}\left(\frac{0.60}{9.0}\right)$$

$$=3.8[\text{deg}]$$

Full Coded Field Of View(検出器に入射するガンマ線が全てマスク部を通る視野)は、 $11.3^\circ \times 11.3^\circ$

マスクの設計

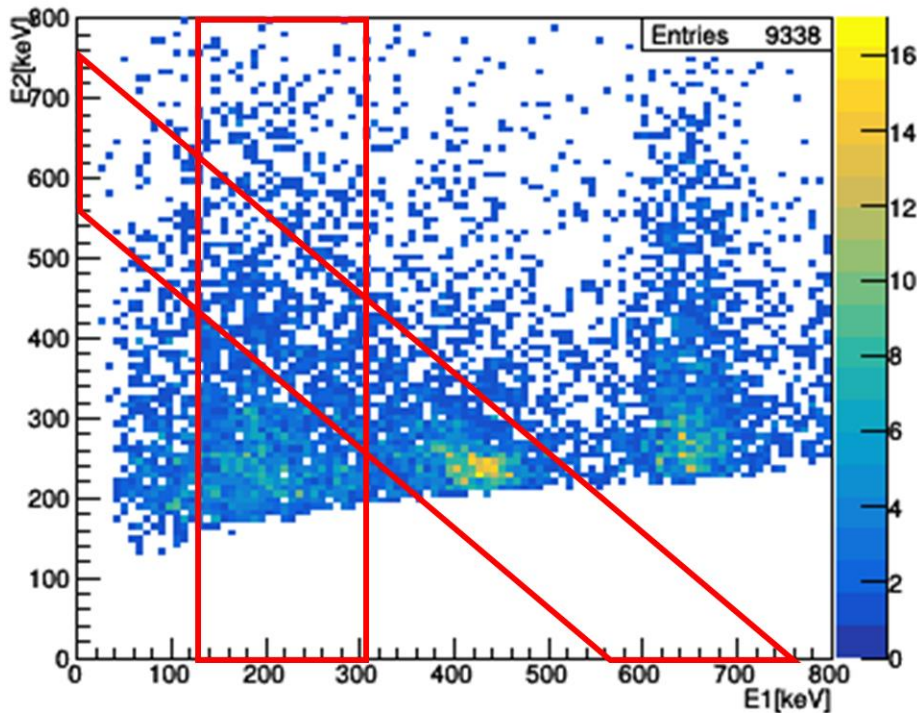
7.8cm



7.8cm

- 7×7 のModified Uniformly Redundant Arraysをベーシックパターンとして、 13×13 のpixelで構成。 $7 \times 7 = 49$ Pixelのパターンはいずれも異なる。
- マスクパターンに対応した行列演算を行うことで、検出器の明暗パターンからガンマ線の到来方向が分かる。
- 材料は厚さ0.30cmの鉛を使用し、4枚

コンプトン法



▪ $E_1 + E_2 = 662 \text{ keV}$ かつ

$130 \text{ keV} < E_1 < 310 \text{ keV}$

を満たすイベントが非常に少ない(552/9338)

→想定していた、「散乱体でコンプトン散乱を起こし、吸収体で光電吸収される」というイベントよりも、偶然の同時計測などのイベント数が優越

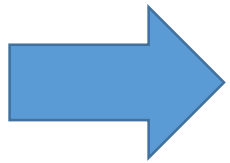
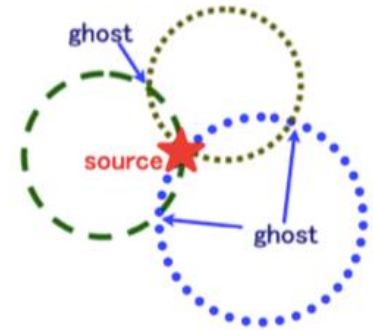
(→コンプトン再構成は困難)

実験目的

- コンプトンイメージング法とコーテッドマスク法を用いて γ 線の到来方向を再構成・評価する

実験原理(3) 再構成方法

コーデッドマスクの明暗のパターンとコンプトンイメージング法を組み合わせることで γ 線の到来方向を再構成



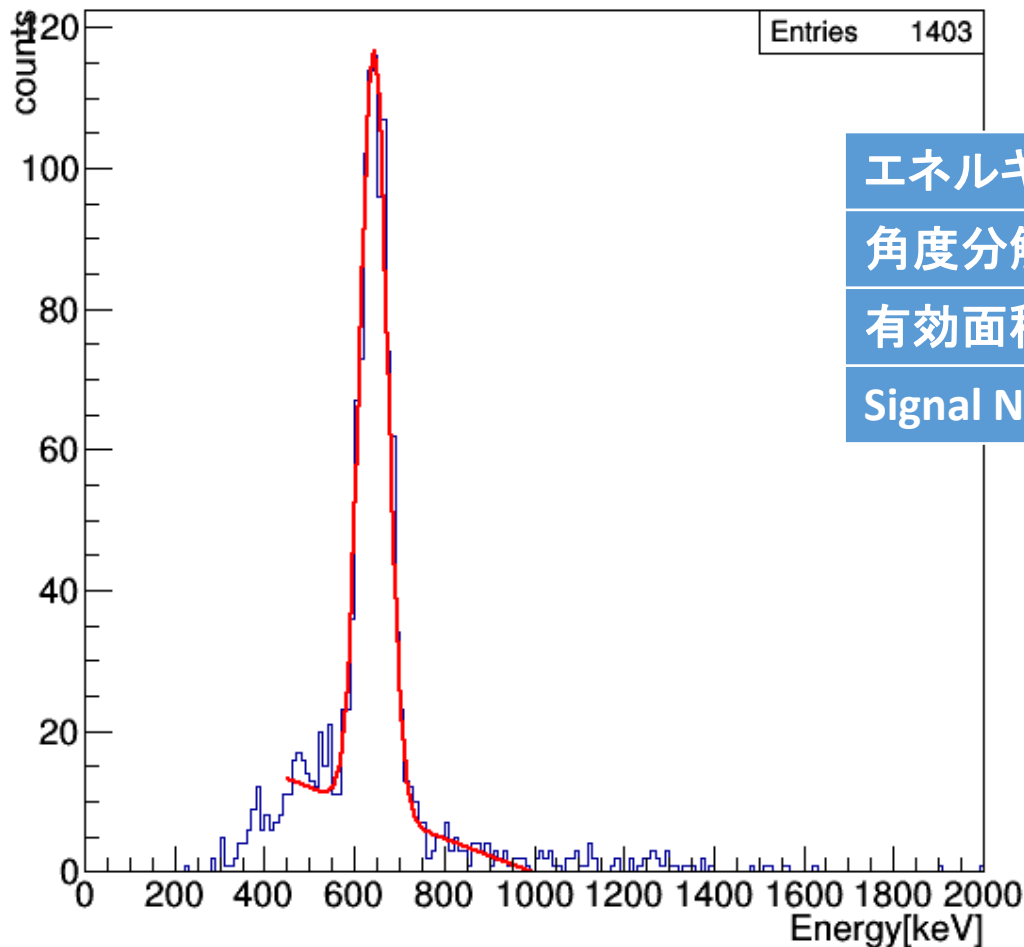
組み合わせることによって位置分解能向上

性能比較

それぞれの測定法で、4.4MBqの ^{137}Cs 線源を10分間測定した結果を用いて計算した。

Compton Mode Spectrum

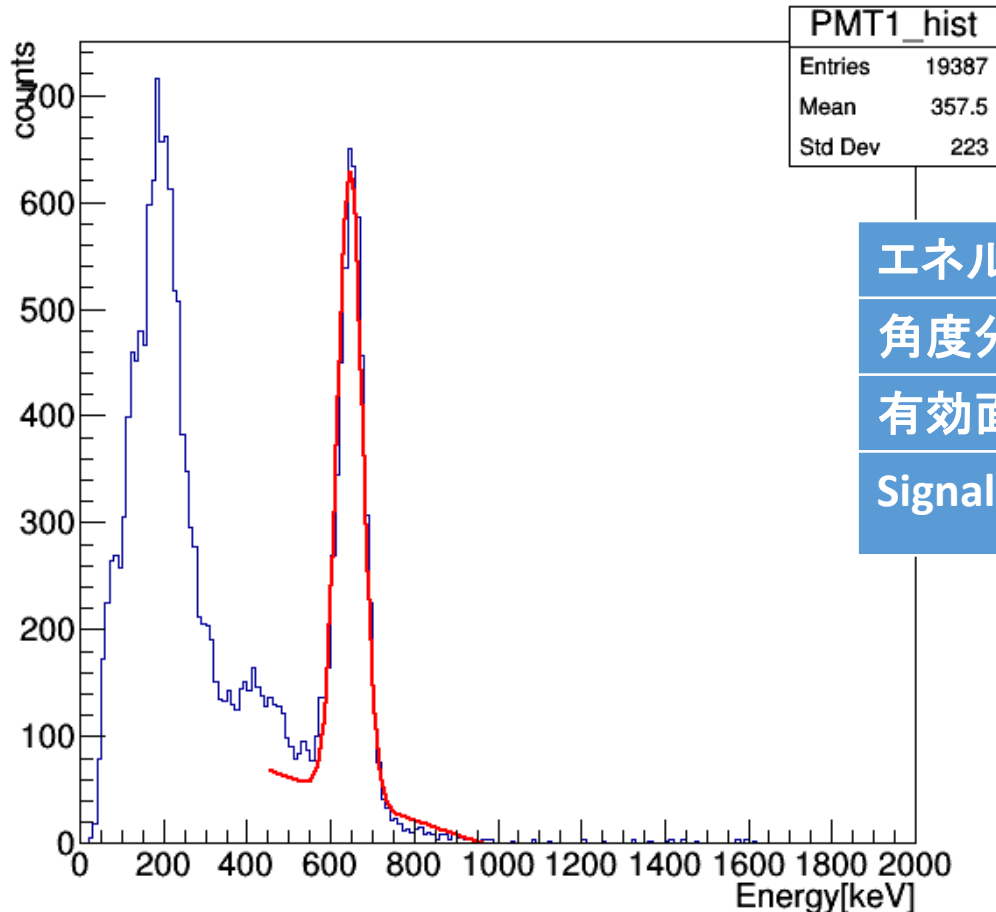
Compton Spectrum



エネルギー分解能 [%]	11.0
角度分解能 [degree]	7.38(ARM)
有効面積 [cm2]	1.37×10^{-3}
Signal Noise Ratio	3.75

Coded-mask Mode Spectrum

¹³⁷Cs_PMT1



エネルギー分解能 [%]

10.3

角度分解能 [degree]

3.81

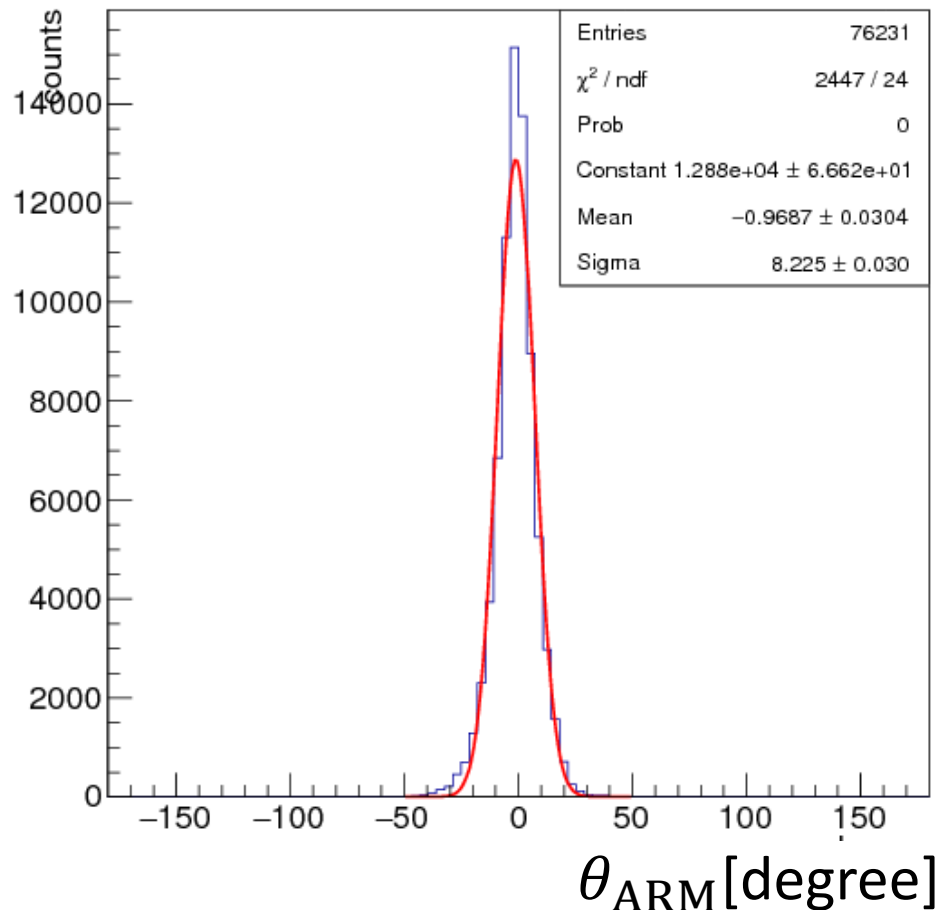
有効面積 [cm²]

7.06×10^{-3}

Signal Noise Ratio

4.00

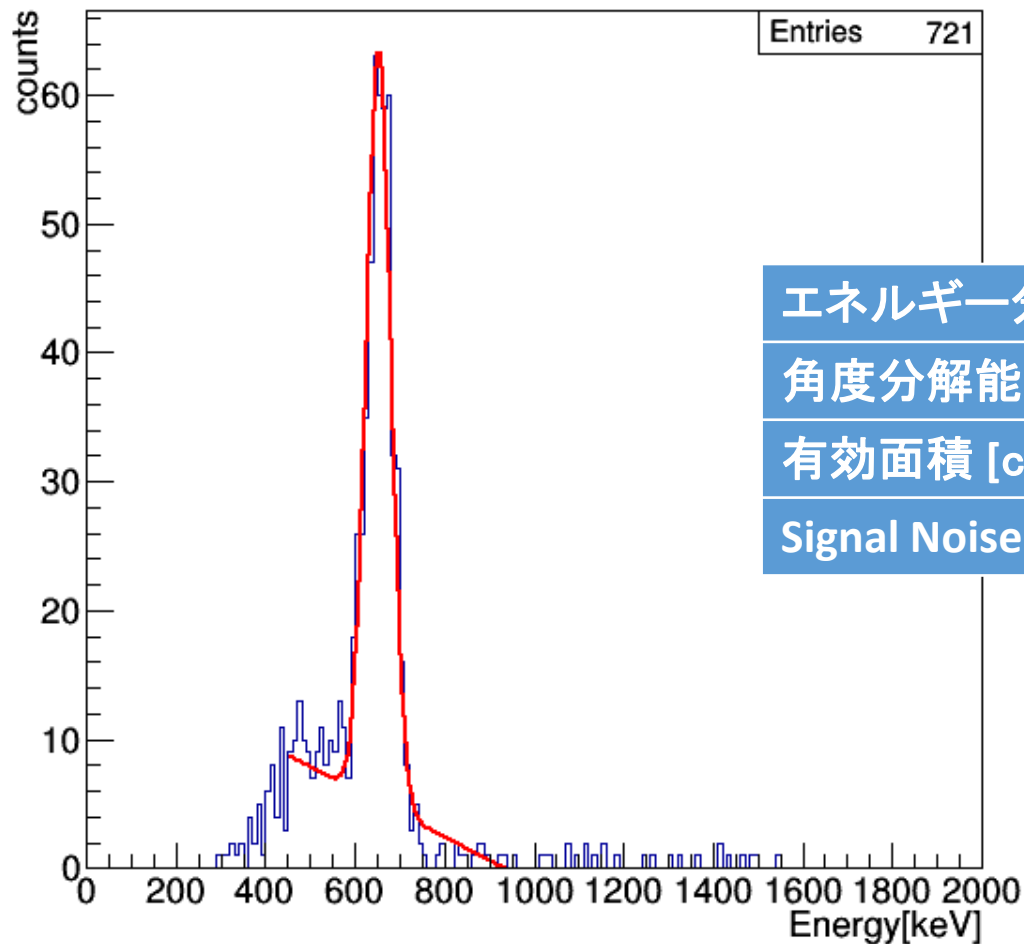
ARMの算出



- 視野中心に ^{137}Cs 線源を置いて測定したデータを用いて θ_{ARM} を算出した。
- 半値全幅 $= 2 \times \sqrt{\ln 2} \times 8.23 = 13.7[\text{degree}]$
- そこで、コンプトンコーンを描く際、
13.7° の厚みを持たせて射影した。

Combined Mode Spectrum

Compton Spectrum



エネルギー分解能 [%]

9.89

角度分解能 [degree]

3.81

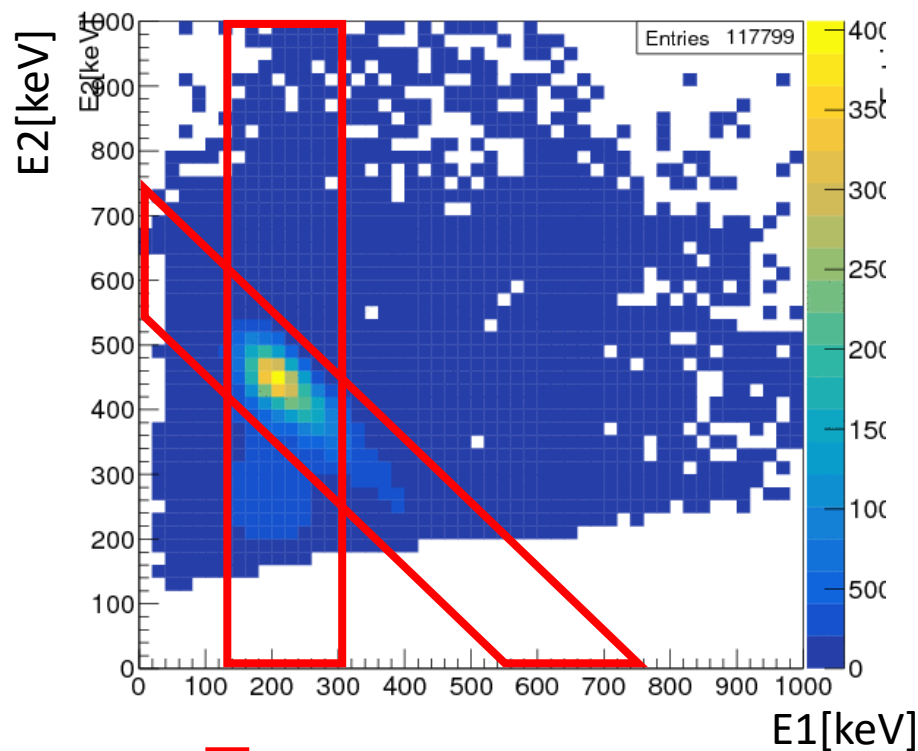
有効面積 [cm²]

6.63×10^{-4}

Signal Noise Ratio

3.41

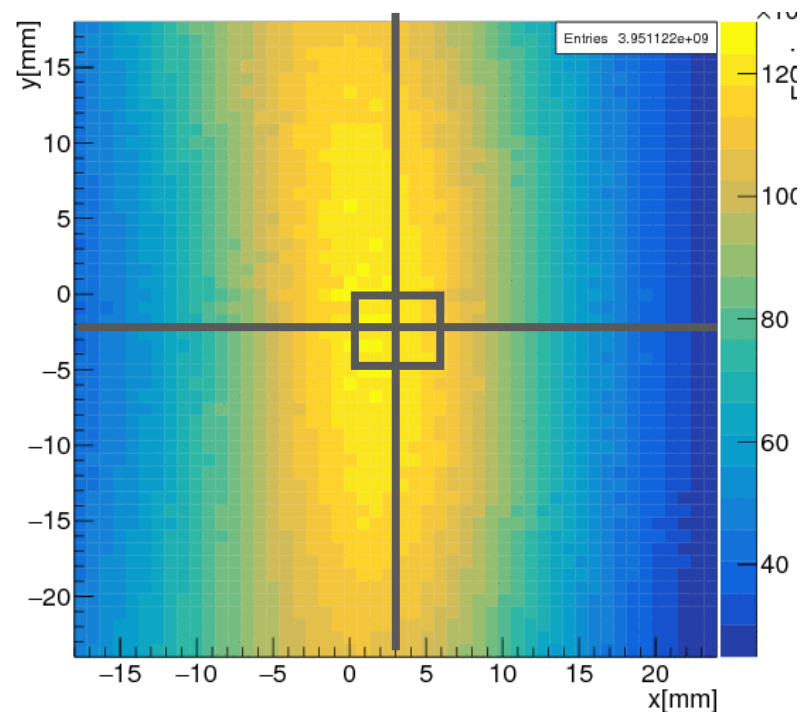
再構成 (^{137}Cs 、視野中心)



 : $130\text{keV} < E1 < 310\text{keV}$

 : $562\text{keV} < E1 + E2 < 762\text{keV}$

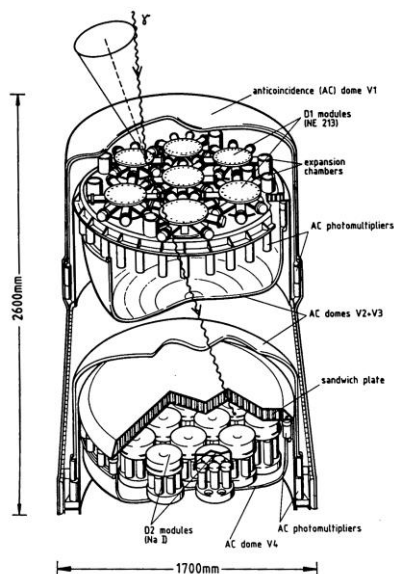
Comptonイベントが
検出できている。



射影結果

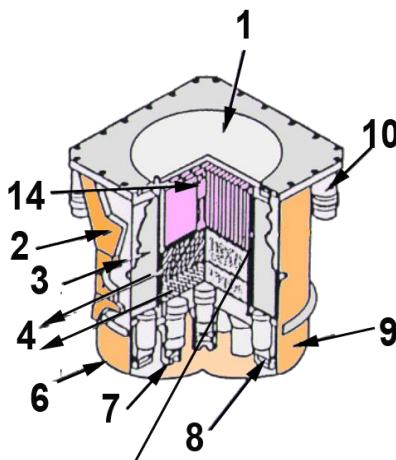
衛星軌道に投入されたMeV領域の望遠鏡

COMPTEL
(Schonfelder et al. 1993)



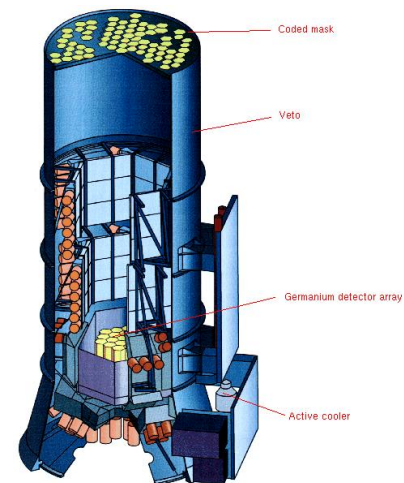
(イメージ:NASAより)

OSSE
(Kurfess 1991)



(イメージ:NASAより)

INTEGRAL-SPI
(Vedrenne 2003)



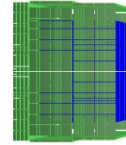
(イメージ:ESAより)

雑音除去能力が観測器の高感度化のための最も重要な課題

Combined Compton and Coded-aperture Telescope

シミュレーション上での
性能評価(Galloway 2017)

散乱体:多層シリコントラッカー



吸収体: CdZnTe 半導体



(イメージ: Galloway 2017 より)



角度分解能の著しい向上
の可能性が示された

今回の実験の目的:

簡易的な Combined Compton and Coded-aperture Telescope (以下 Combined) の実機を作成し、撮像を実行する上での問題点を調べる。

実験内容:

Compton, Coded-mask, Combined の3つの種類のカメラを作成し、雑音除去能力を比較した。

入射方向を知るためには、入射方向を知らなくてはいらない問題への対処法

- γ 線の入射角 (θ, ϕ) の違いによる $W_{k,l}$ の形の変化が無視できるほどに視野を狭める。
- decode前にCompton再構成からおおよその (θ, ϕ) を求めて、適切な $W_{k,l}(E, \theta, \phi)$ を選択する。



Comptonカメラの
角度分解能

>

$W_{k,l}$ の形の変化が
無視できなくなる $d\theta, d\phi$

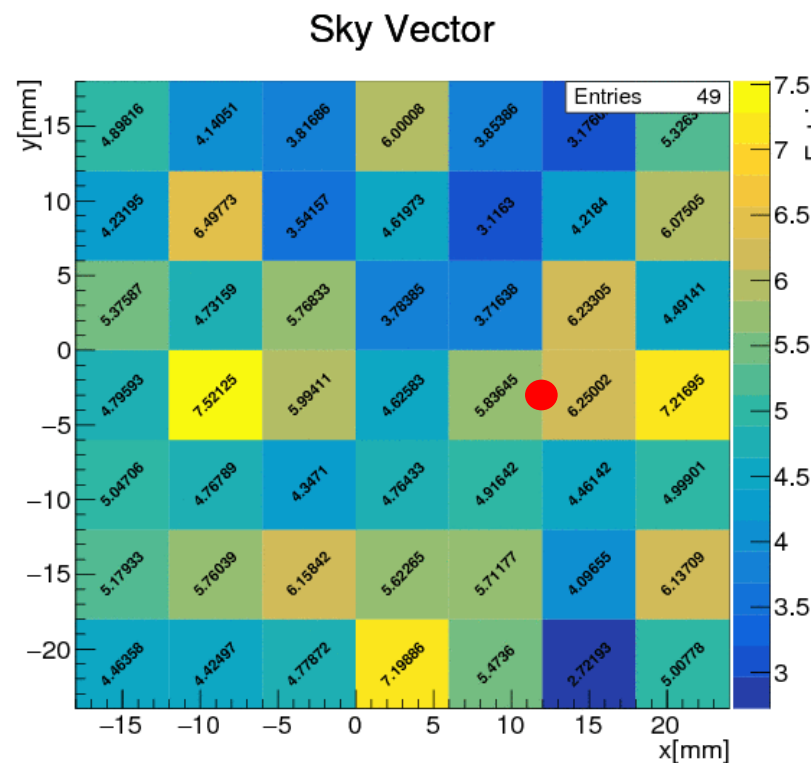
視野中央からARMだけ
右にずらして測定。

視野中央に線源をおい
て作った W をもちいて
decode

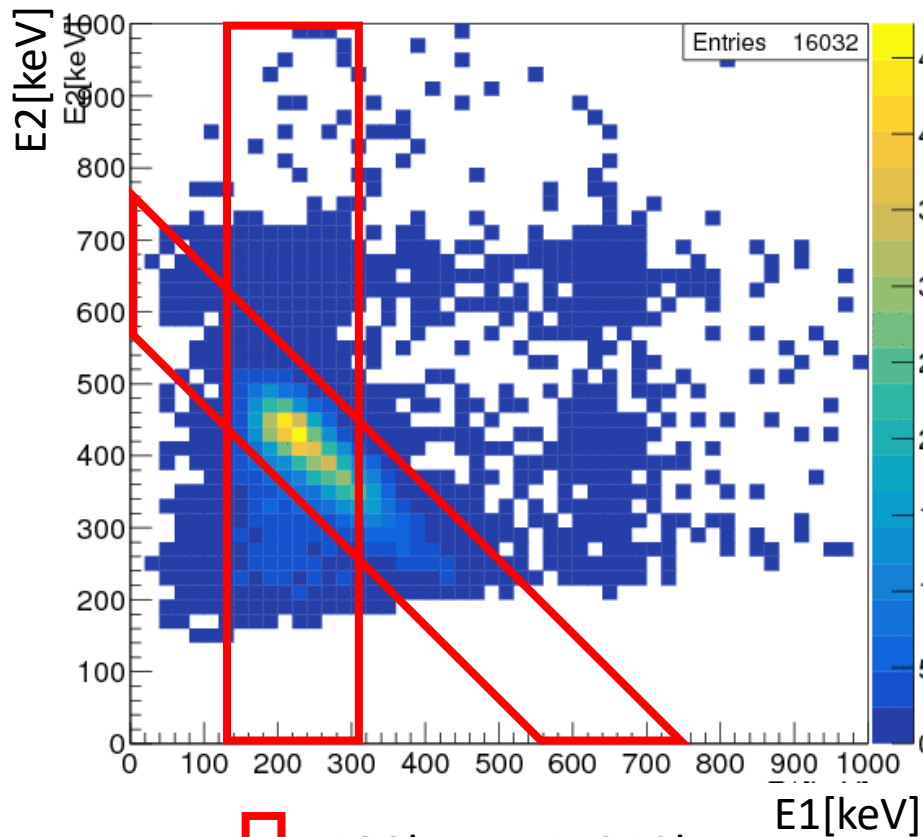


撮像失敗

今回作成したカメラのCombined modeは
線源位置の事前知識なしに撮像する能力は
もたない

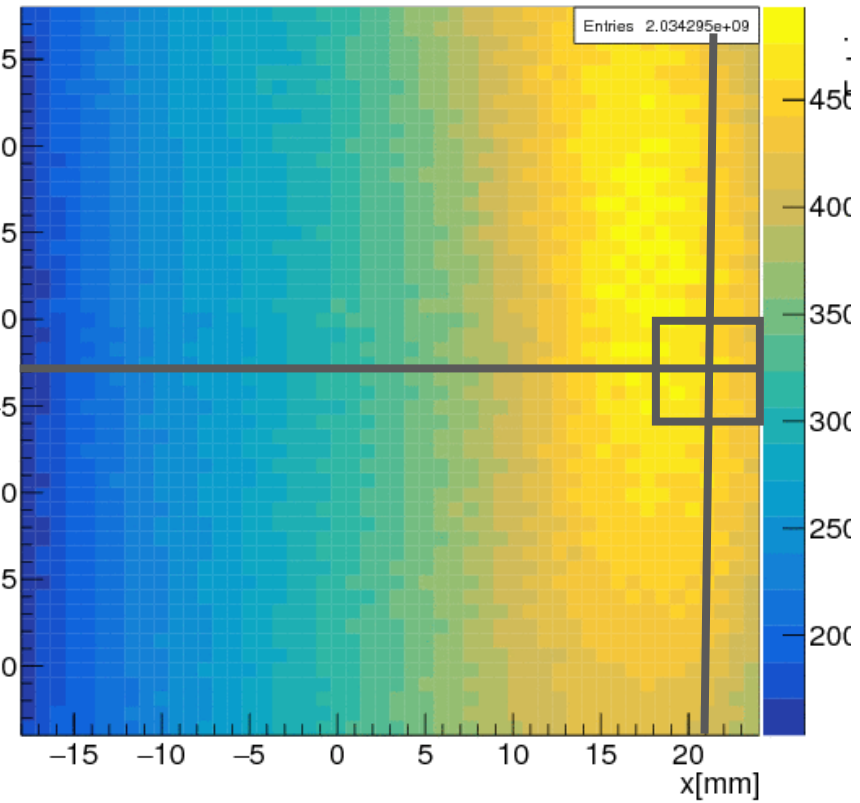


再構成 (^{137}Cs 、視野右)



 : $130\text{keV} < E1 < 310\text{keV}$

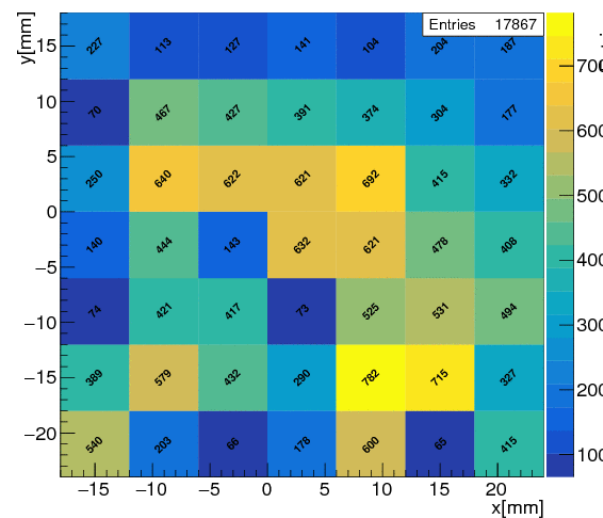
 : $562\text{keV} < E1 + E2 < 762\text{keV}$



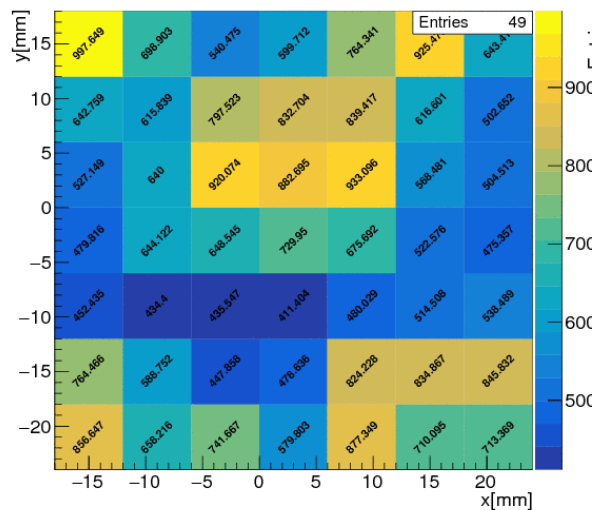
射影結果

線源の位置の変化に対して、
射影位置も変わっている。

コードッドマスク法での再構成②



Detector Vector
(補正前)



Detector Vector
(補正後)

- 各Pixelで検出確率が異なる。線源を十分離してマスクなしで測った detector vectorから重みづけ関数 W を作成。補正を行った。