

# MeV- $\gamma$ 線カメラの応用

岸本祐二

宇宙線研究室MeVガンマ線グループ(2000年～現在)

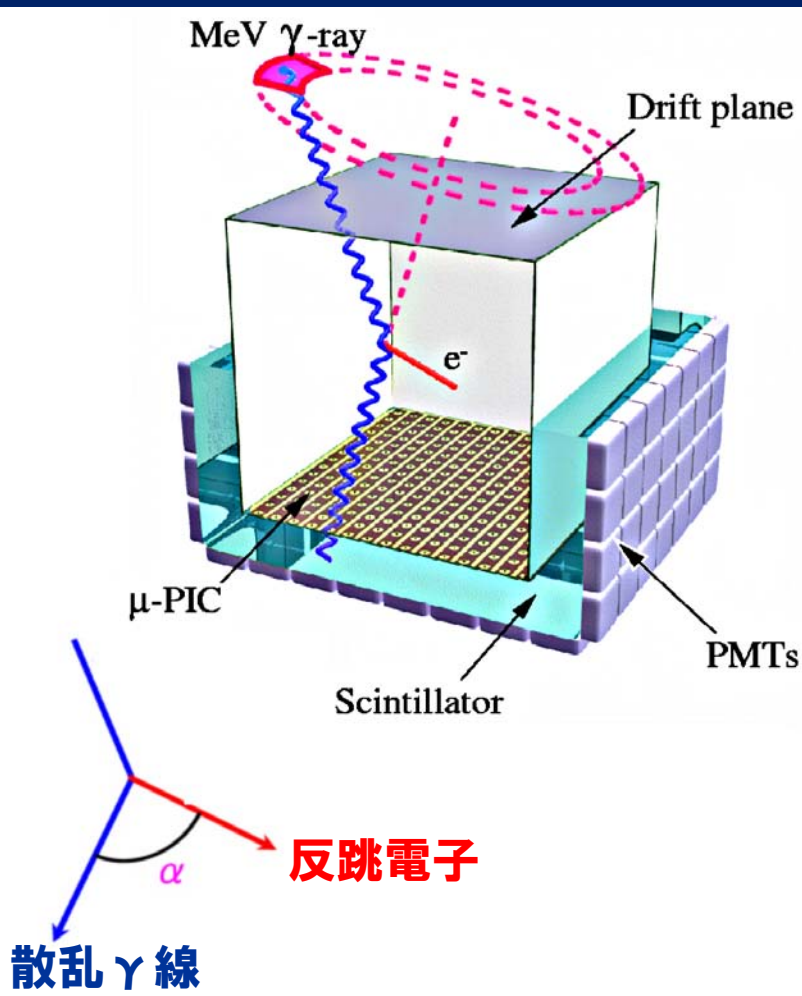
谷森達, 窪秀利, 身内賢太郎, 井田 知宏, 岩城智, 上野一樹,  
岡田葉子, 折戸玲子, 片岡淳, 株木重人, 黒澤俊介, 澤野達哉,  
関谷洋之, 高田淳史, 高橋慶在, 竹田敦, 谷上幸次郎, 土屋兼一,  
永吉勉, 中村輝石, 西村広展, 服部香里, Parker Joseph,  
東直樹, 松岡 佳大

# 概要

- 検出器の紹介
  - MeVガンマ線カメラ
  - Pixelアレイシンチレーター読み出しシステム
- 応用分野
  - ガンマ線天文学
  - 医療用ガンマ線カメラ
  - 陽子線治療用モニター
- まとめ

# MeVガンマ線カメラ(ETCC)

MeVガンマ線カメラの概念図



●micro-TPC (  $\mu$ -PICを用いたTPC)

⇒反跳電子のtrackとEnergy

●Scintillation camera (PSA)

⇒散乱ガンマ線の吸収点(位置)とEnergy



光子毎にCompton散乱を再現

■ 1光子 ⇒ 到来方向 + energy

■ 大きな視野 ( $\sim 3\text{str}$ )

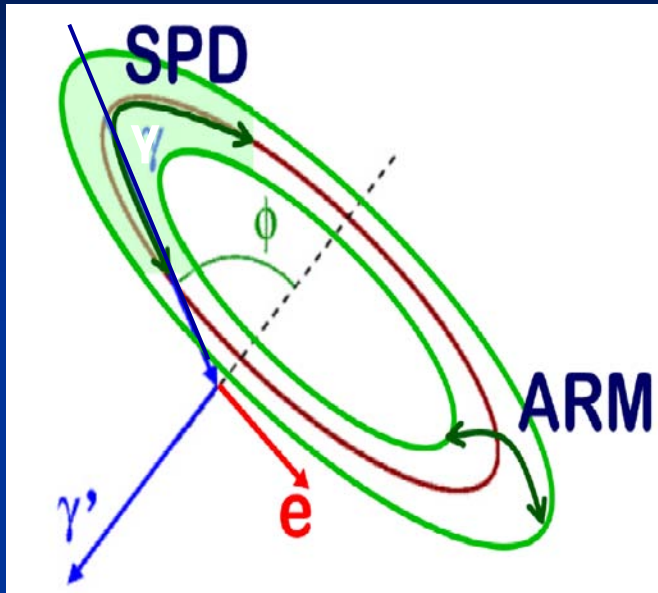
■ 強力なbackground除去能力

$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \vec{g} \cdot \vec{e}$$



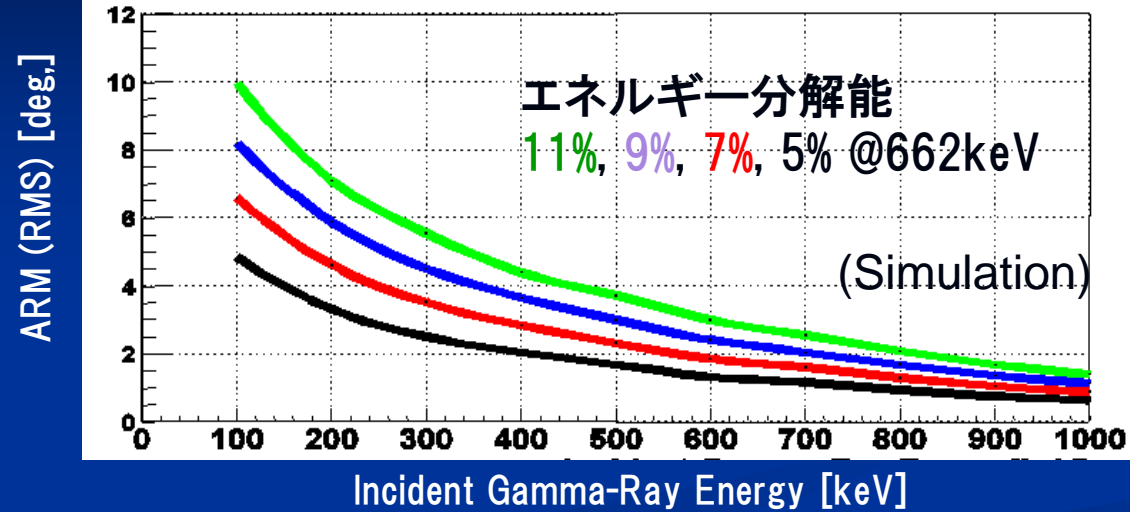
$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left( 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

# 吸収体に対する要求

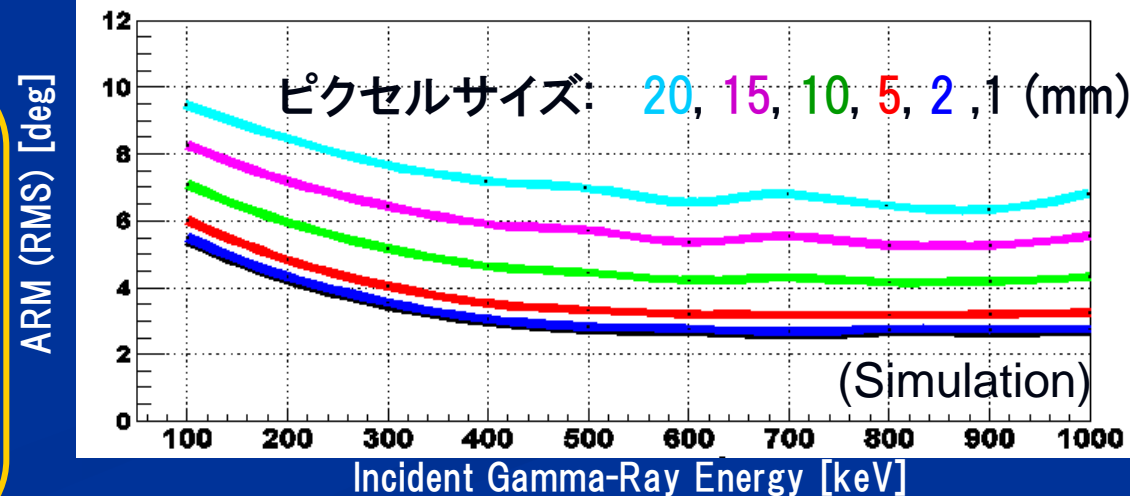


コンプトンカメラの角度分解能

## ARMのシンチカメラエネルギー分解能依存性



## ARMのシンチカメラ位置分解能依存性



### 吸収体に対する要求

- ◆ 高位置分解能
- ◆ 高Energy分解能
- ◆ 高阻止能
- ◆ 大面積

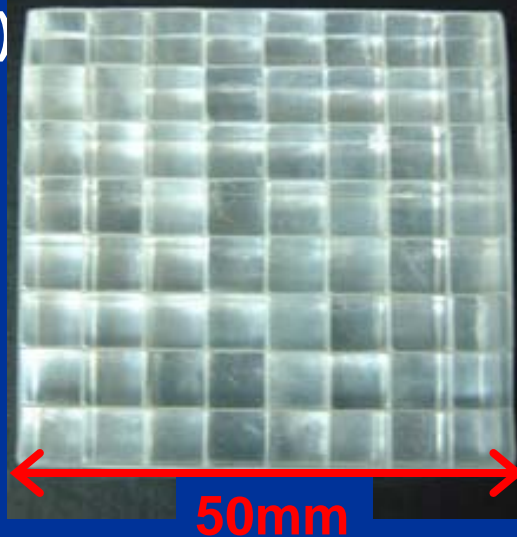
角度分解能

検出効率

# Scintillation Camera

## Pixel Scintillator Array (PSA)

- GSO(Ce) crystal
- array : 8 × 8
- Pixel size : 6 × 6 × 13mm<sup>3</sup>
- 各ピクセルはESR(3M) 65μm厚で光学的に分離

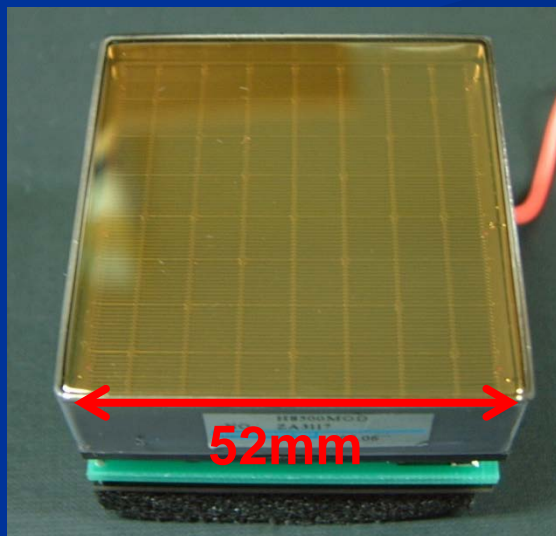


PSAとPMTは  
オプティカルグリス  
(OKEN-6262A)で接着



## Multi Anode PMT H8500 (浜松ホトニクス)

- anode : 8 × 8
- Size : 52 × 52 × 20mm<sup>3</sup>
- Effective area:  
49 × 49mm<sup>2</sup>(89%)
- Gain : ~10<sup>6</sup> @ -1000V
- Gain uniformity : ~1:3

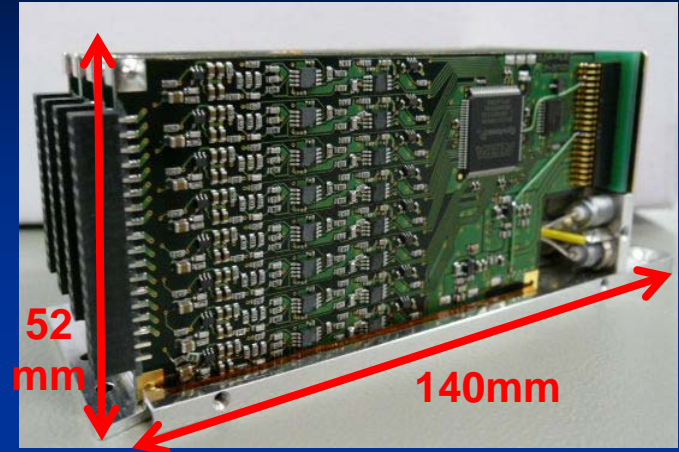


シンチレーションカメラ(底面)

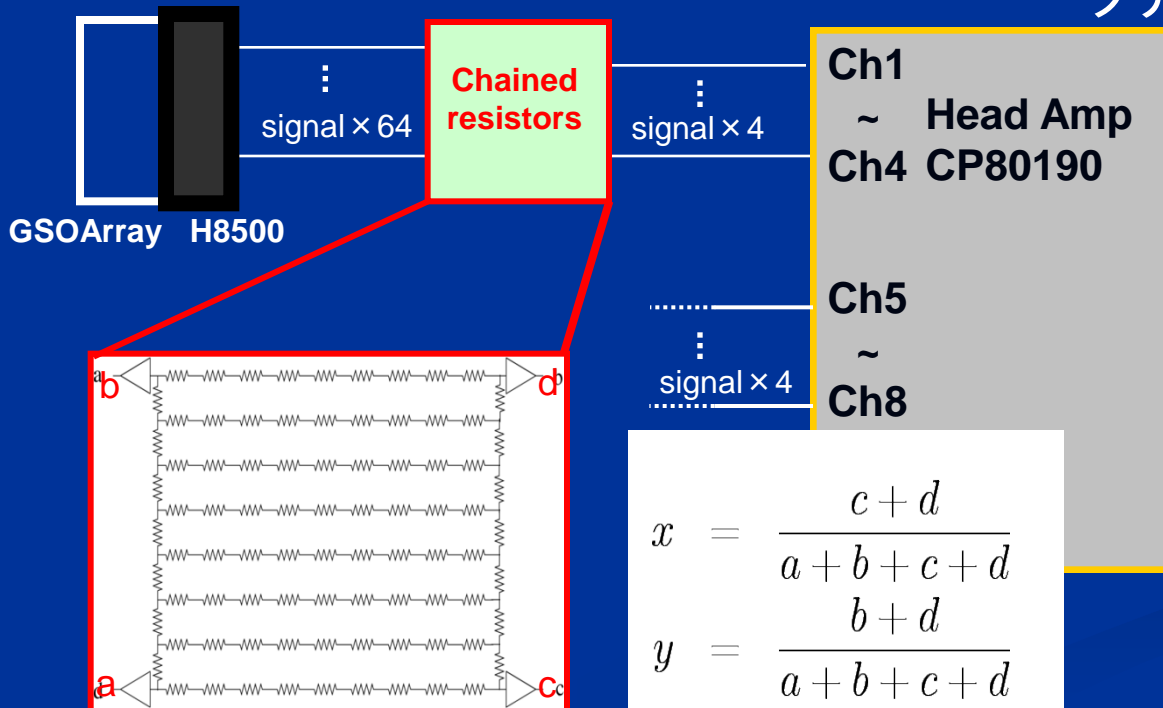
# H8500読み出し回路

## CP80190型ヘッドアンプユニット

- ・64ch 個別読出し
- ・ASICを使わず、汎用部品のみ使用
- ・PreAmpのコンデンサを容量を選ぶことで  
入力電荷のレンジを調節(今回は800pC)
- ・消費電力: 1.2W
- ・処理時間: 20 $\mu$ s/event
- ・Dynode trigger有



クリアパルスと共同開発

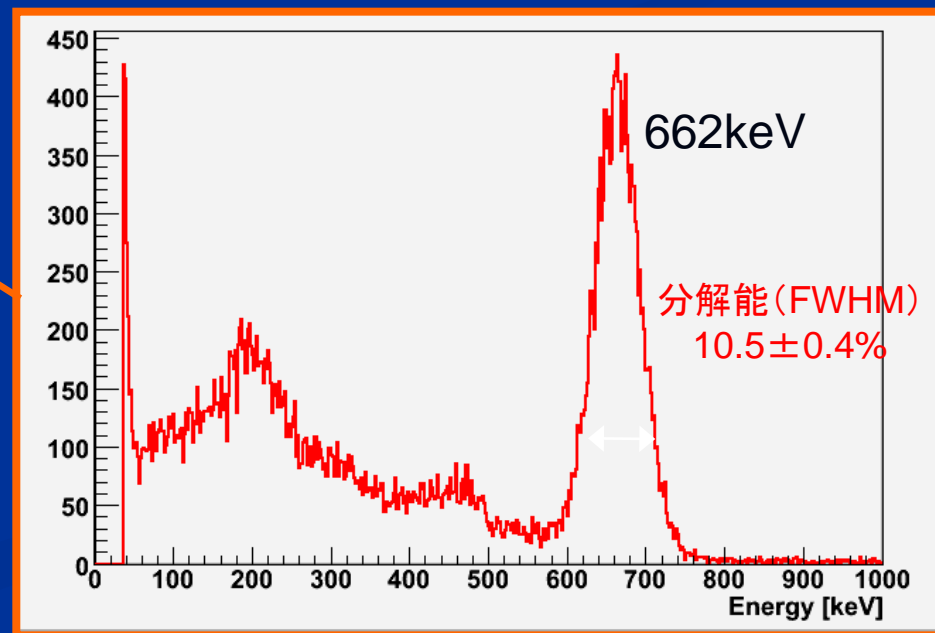
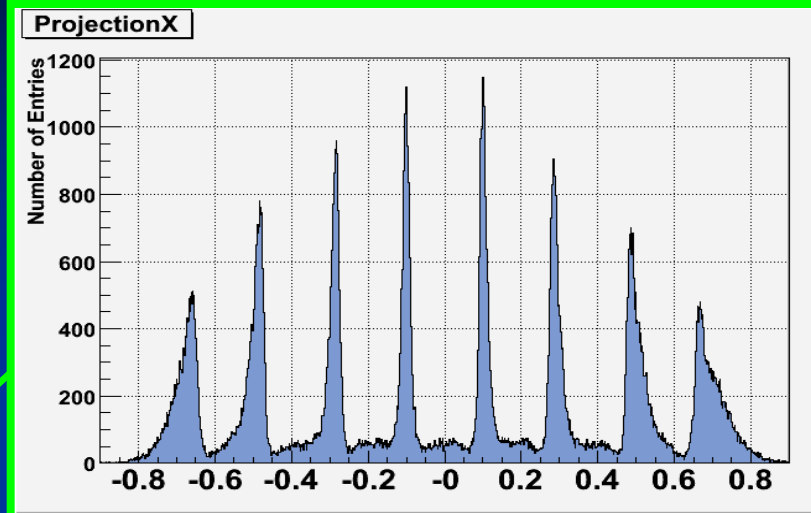
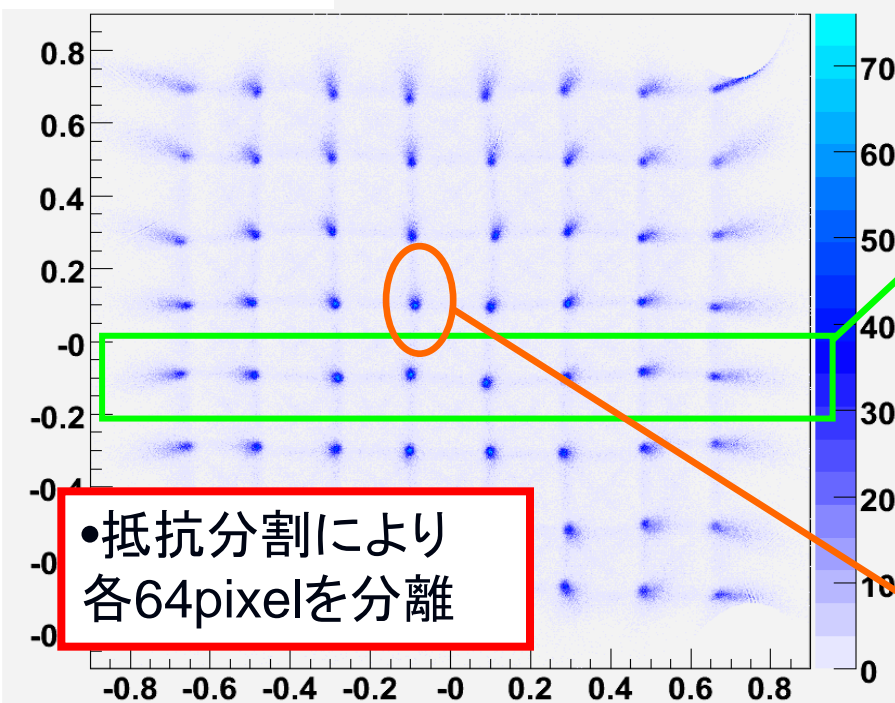


CP80190  
+  
抵抗チェーン

消費電力  
100mW/PMT

# 取得イメージとエネルギー分解能

$^{137}\text{Cs}$

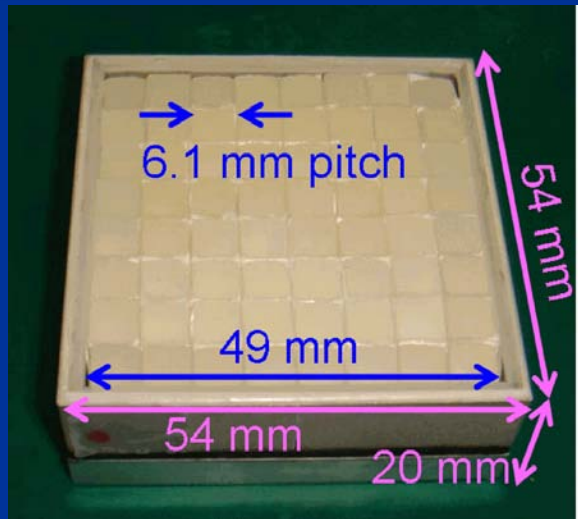


- Energy Resolution (64ch平均):  
 $10.5 \pm 0.4\%$  @662keV(FWHM)
- Dynamic Range:  $80\text{keV} \sim 1300\text{keV}$

# エネルギー分解能向上に対する試み

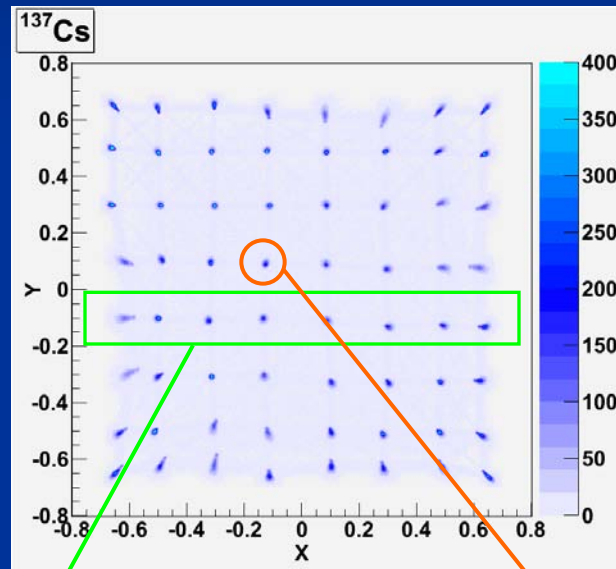
高エネルギー分解能 → 高角度分解能

## LaBr<sub>3</sub>(Ce) Scintillator Array

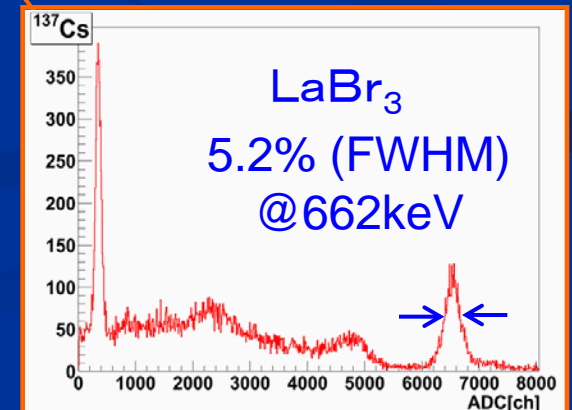
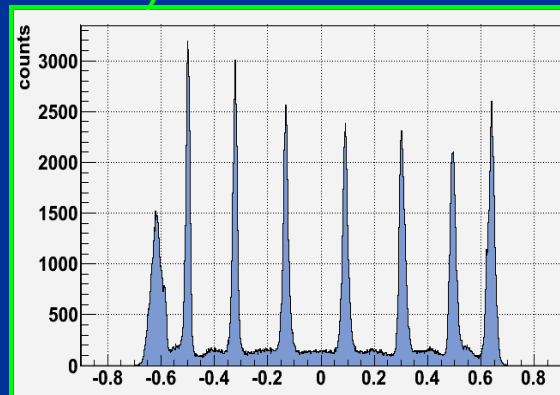


独自の製法でアレイ化

- Pixel size :  $5.9 \times 5.9 \times 20 \text{mm}^3$
- $8 \times 8$  array
- Glass window : 石英 (t 2.3 mm)
- Hermetic package : アルミパッケージ (t 0.5 mm)



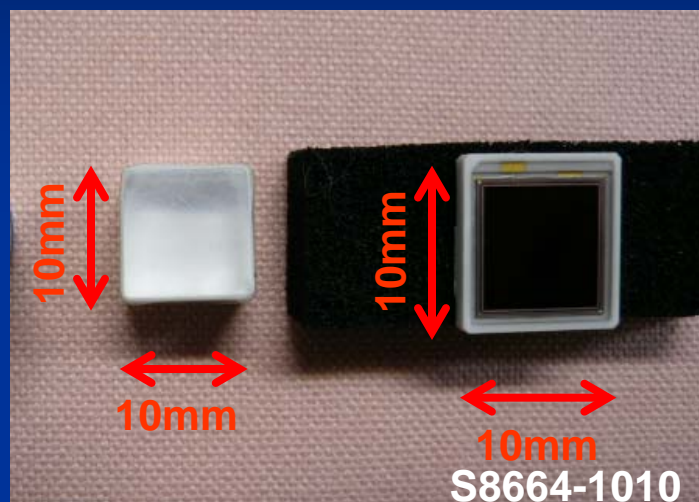
- 重心法によって位置を決定
- 各64pixel を分離



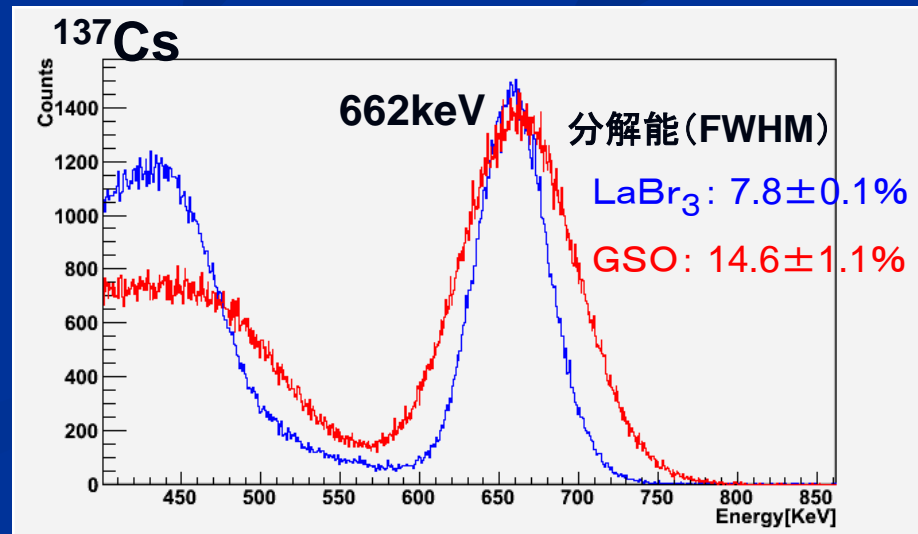
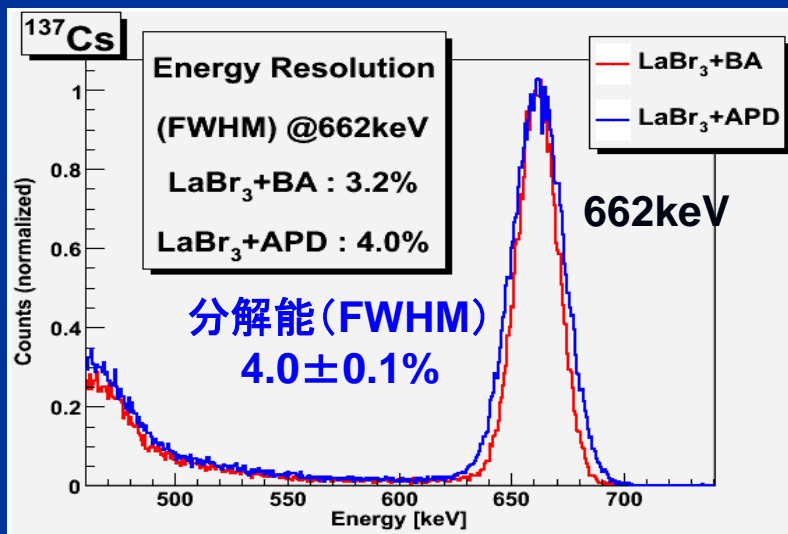
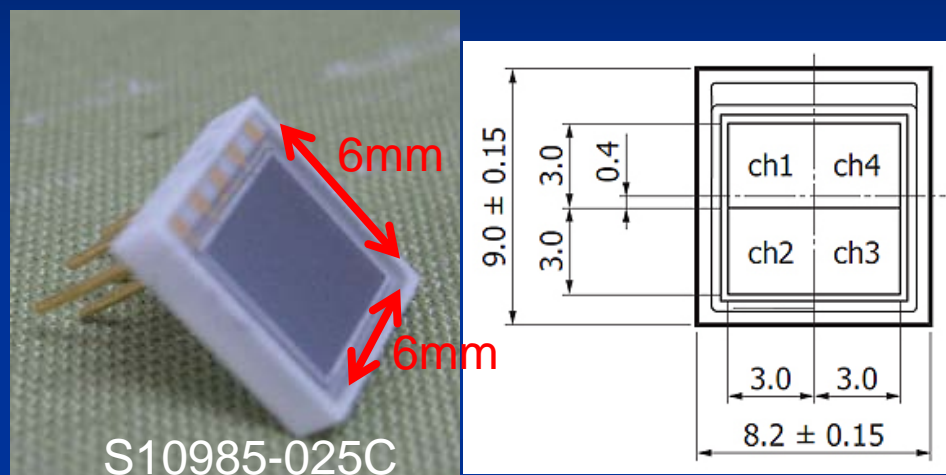


# 省スペース化、省電力化に対する試み

APD+シンチ

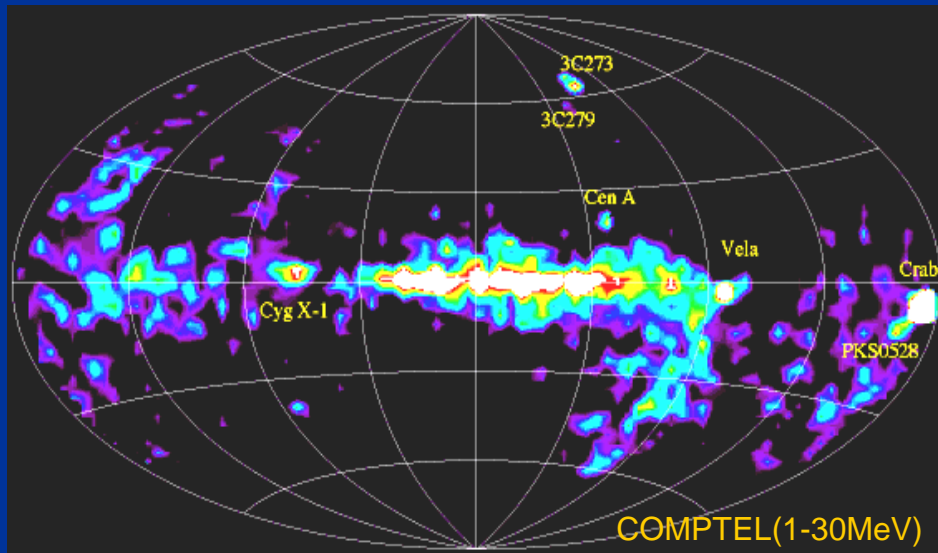


MPPCアレイ+シンチ



# 応用分野

## 天文



✓ ガンマ線天文学

## 医療



- ✓ 医療用ガンマ線カメラ
- ✓ 陽子線治療用モニター

# MeVガンマ線で見える宇宙

## ◆元素合成

超新星残骸: 放射性同位体からの核 $\gamma$ 線

銀河面: 長寿命の同位体  $^{26}\text{Al}$ ・ $^{60}\text{Fe}$

## ◆粒子加速

活動銀河核のジェット:

高エネルギー電子による

シンクロトロン放射・逆コンプトン散乱

## ◆強い重力場

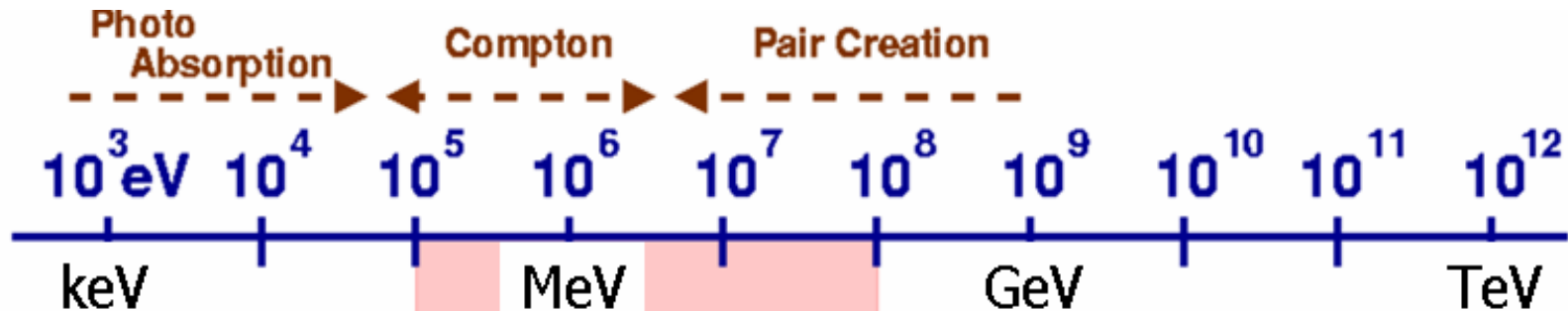
ブラックホール:

降着円盤由来の放射・ $\pi^0$ の崩壊に伴う放射

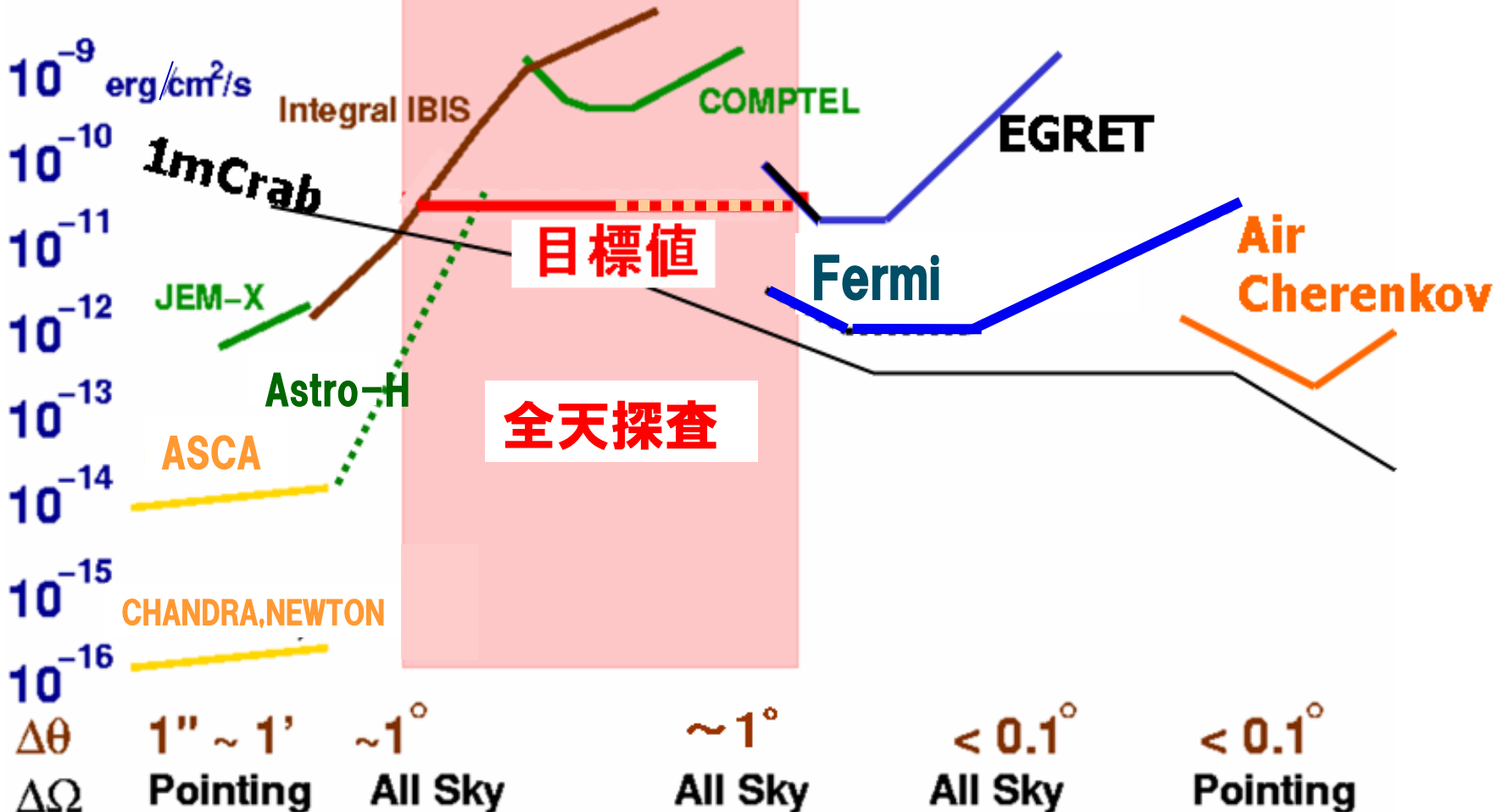
etc...

# これまでのX線・ガンマ線観測

MeV領域の観測



悪  
↑  
検出感度  
↓  
良

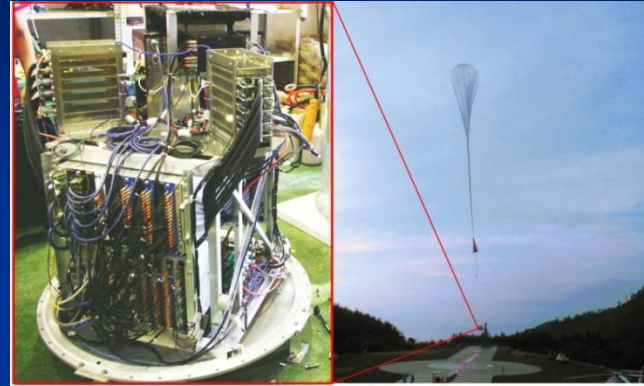


# SMILE計画

## Sub-MeV $\gamma$ -ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

### SMILE-I

(10cm)  $^3\text{MeV}$   $\gamma$ 線カメラ 0.1~1 MeV  
気球@三陸 4時間  
動作実証 宇宙拡散 $\gamma$ ・大気 $\gamma$ 線測定  
(2006年9月に実施)



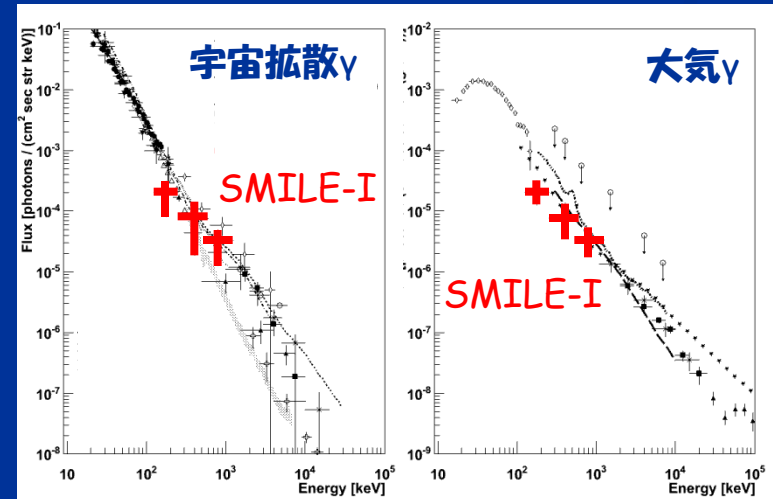
### SMILE-I

(30cm)  $^3\text{MeV}$   $\gamma$ 線カメラ 0.1~1 MeV  
気球 数時間~10時間  
明るい天体の観測  
(Crab, Cygnus X-1)

### SMILE-II

(40cm)  $^3\text{MeV}$   $\gamma$ 線カメラ 0.1~10 MeV  
長期観測気球 ~10日間  
銀河中心・銀河面サーベイ

(50cm)  $^3\text{MeV}$   $\gamma$ 線カメラ 0.1~30 MeV  
衛星 ~数年間  
全天サーベイ



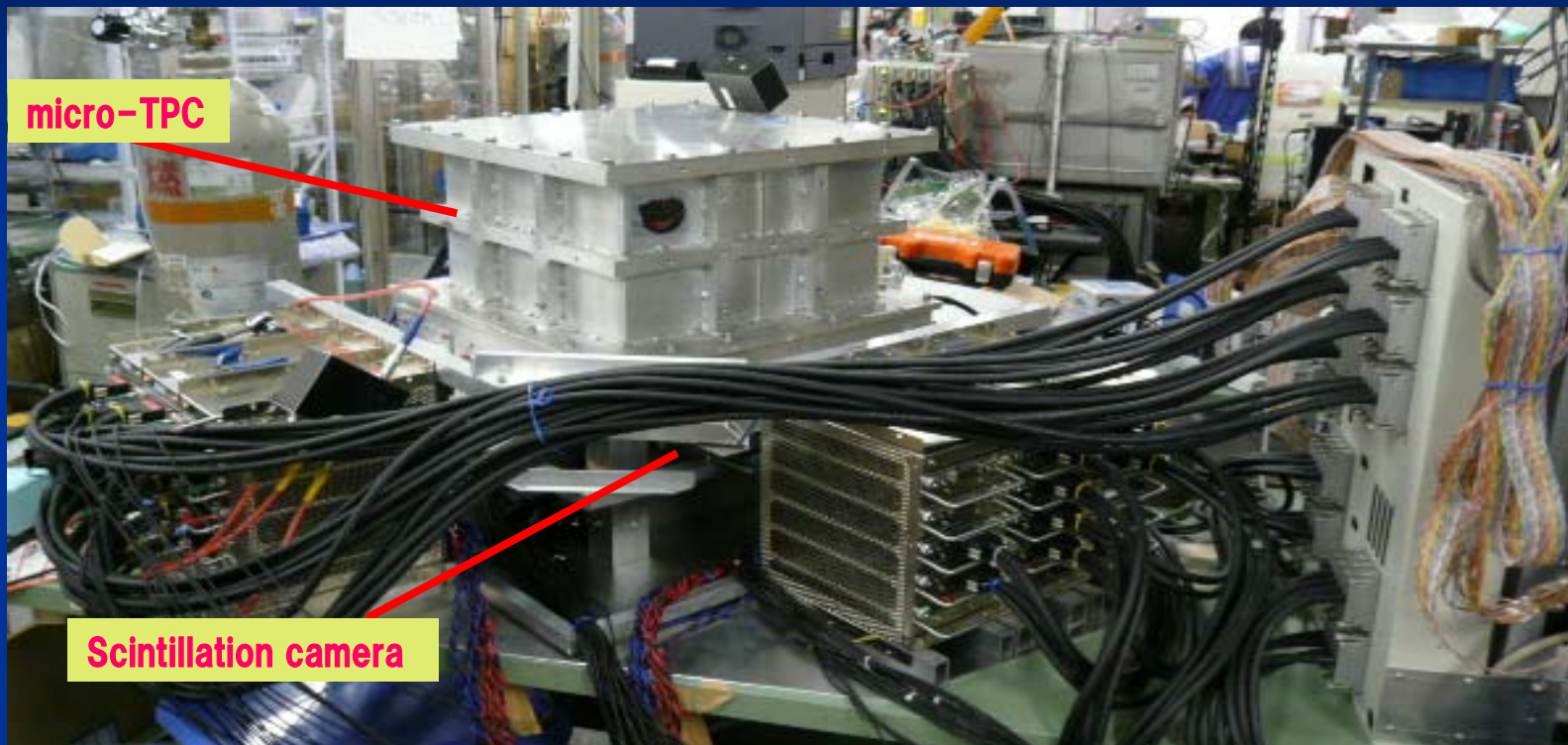
### SMILE-IIに向けて

MeVガンマ線カメラの大型化

(10cm)<sup>3</sup>  $\Rightarrow$  (30cm)<sup>3</sup>

# 気球搭載型(30cm)<sup>3</sup>ETCCの開発

## プロトタイプ(30cm)<sup>3</sup>ETCC



- $\mu$ PIC:  $30 \times 30 \text{cm}^2$   $\mu$ -PIC
- Fiducial volume  $28 \times 23 \times 28 \text{cm}^3$
- 使用ガス: Ar 90% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10% 1atm
- Gain:  $\sim 50000$
- GSOシンチ:  $8 \times 8 \times 36 = 2304$  pixel (底面のみ)  
1 pixel:  $6 \times 6 \times 13 \text{mm}^3$
- $6 \times 6 = 36$  PMT

シンチカメラ→216PMT(13824pixel)に拡張予定

### 今後の予定

- ・ 2012年 テストフライト(北海道大樹町)
- ・ 2013年以降 本観測(スウェーデン、キルナ)

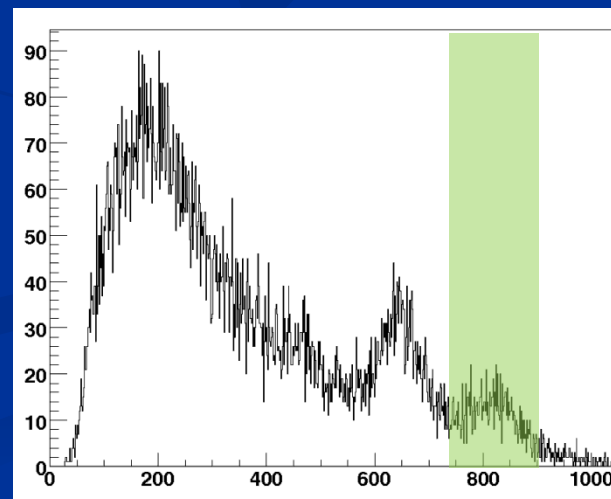
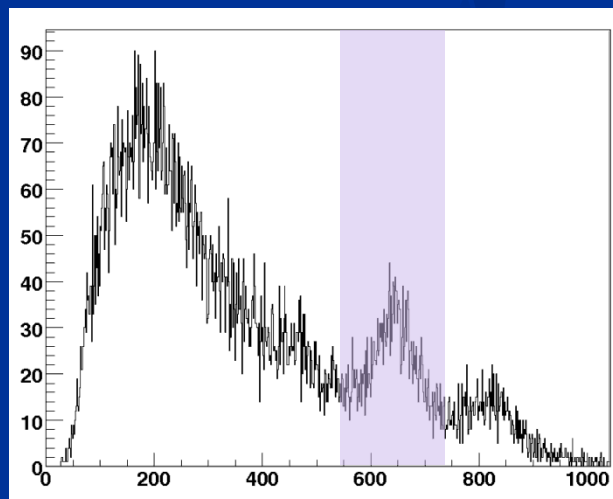
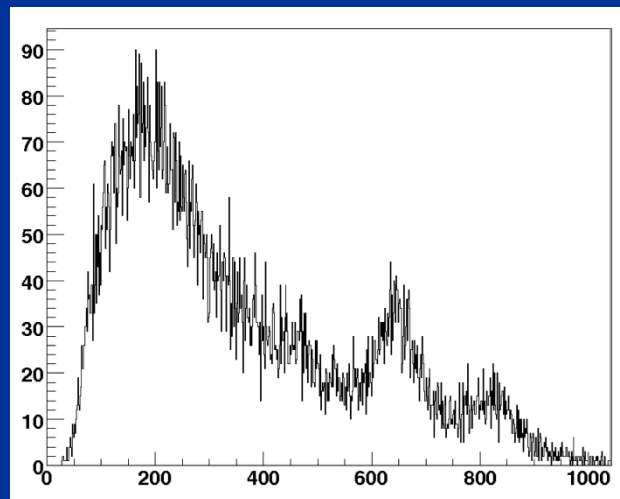
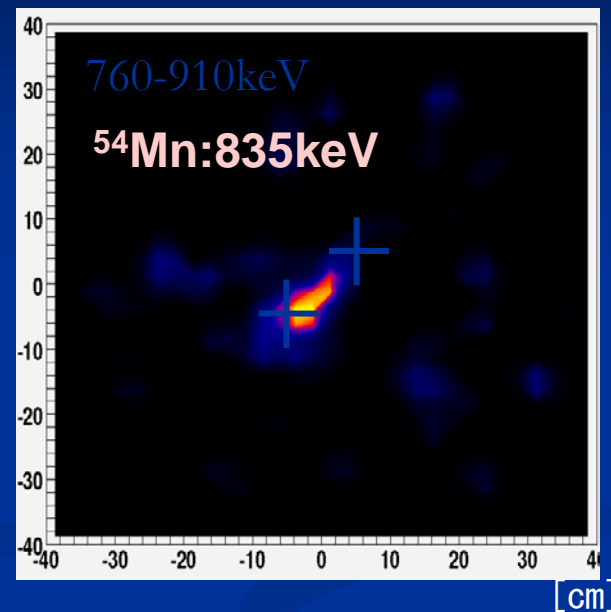
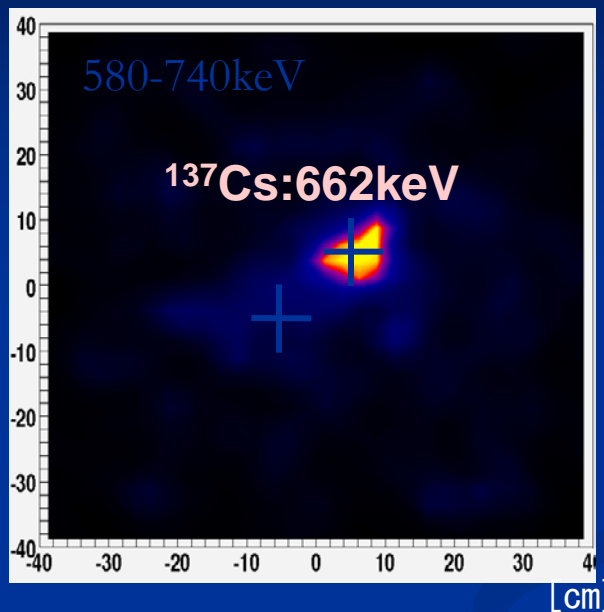
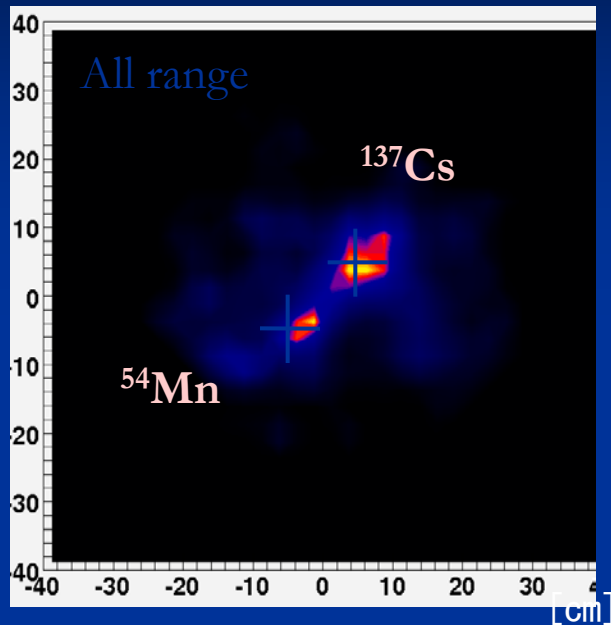
# 2線源イメージング (preliminary!)

$^{137}\text{Cs}$  : 662keV, 1MBq (X,Y,Z) = (-5,-5,-58)

$^{54}\text{Mn}$  : 835keV, 1MBq (X,Y,Z) = (5,5,-58)

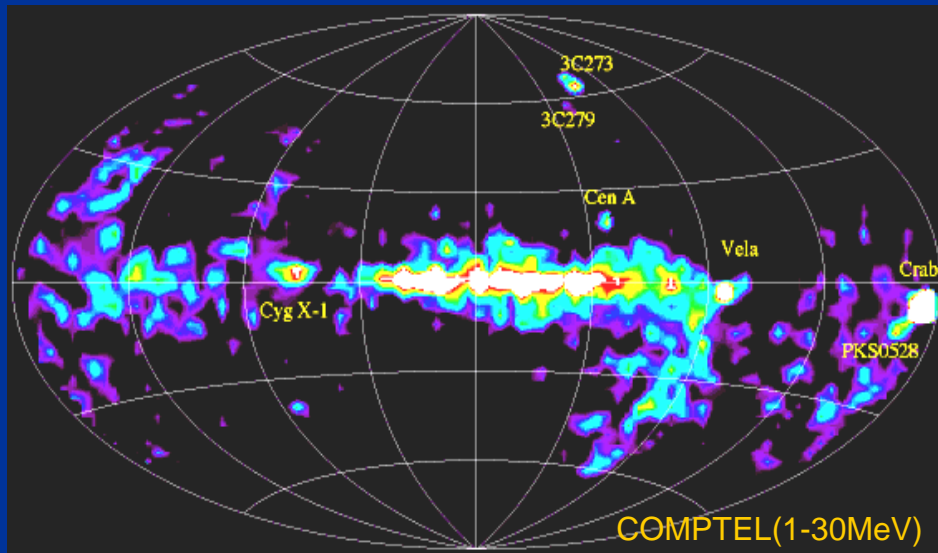
ノイズレベル改善

感度補正+ML-EM法を適用



# 応用分野

## 天文



✓ ガンマ線天文学

## 医療



- ✓ 医療用ガンマ線カメラ
- ✓ 陽子線治療用モニター



# 核医学・創薬用 ガンマ線カメラの医療応用について

薬学

核医学

理学・工学

臨床現場

可視化

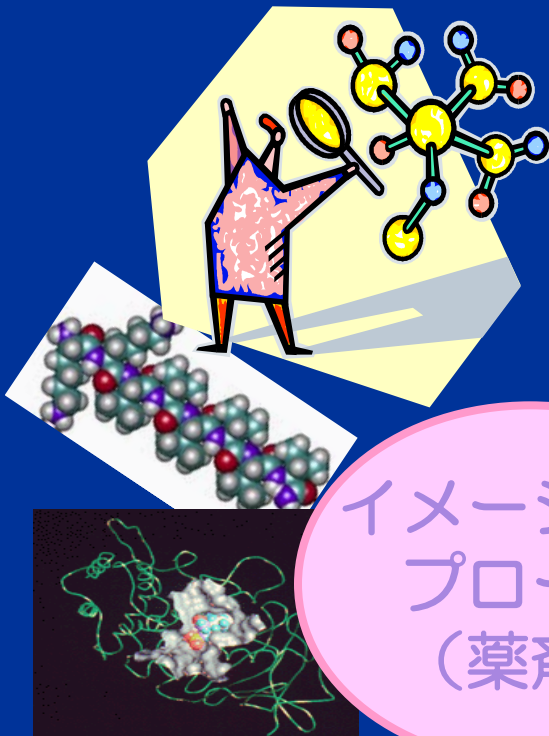
- PET : $E=511\text{keV}$
- SPECT : $E<300\text{keV}$
- New device

医療・福祉に貢献

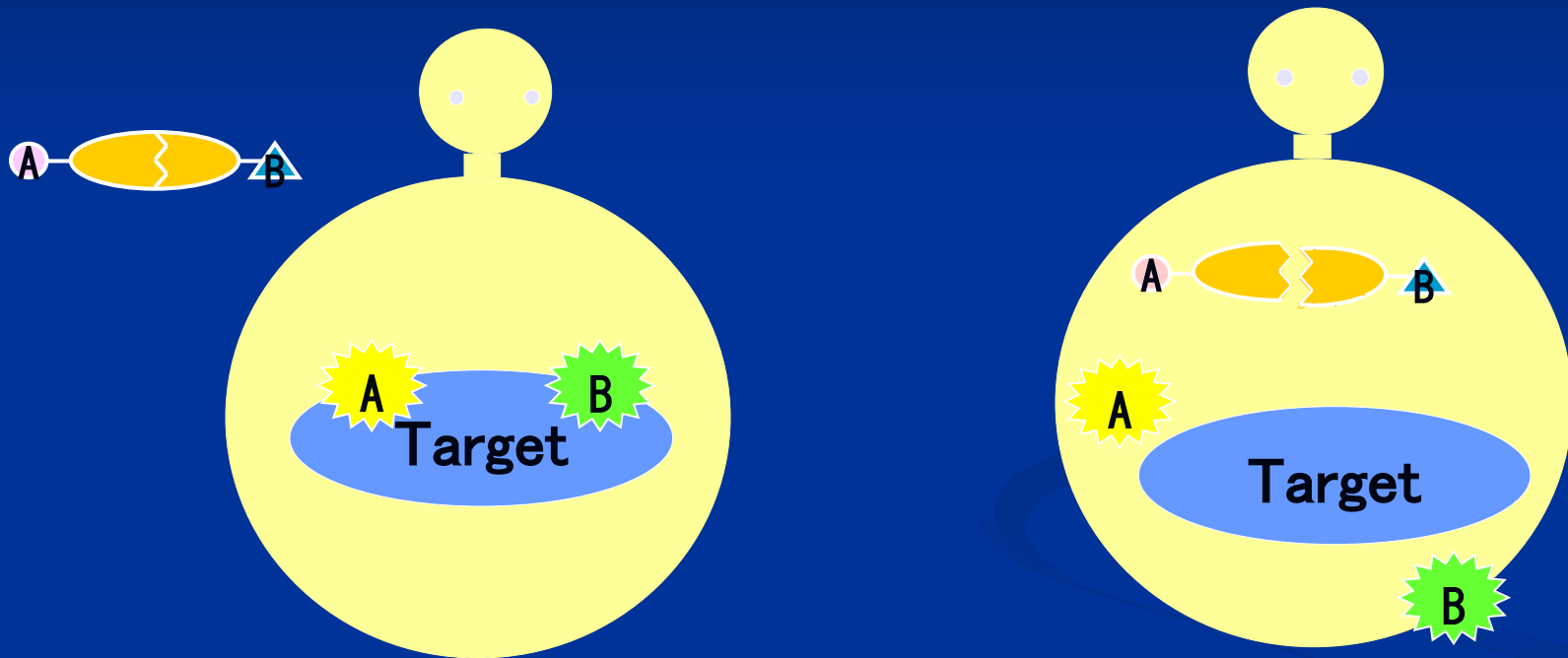
コンプトンカメラ

機器

イメージング  
プローブ  
(薬剤)



# ETCCを用いた放射性薬剤 イメージングのメリット

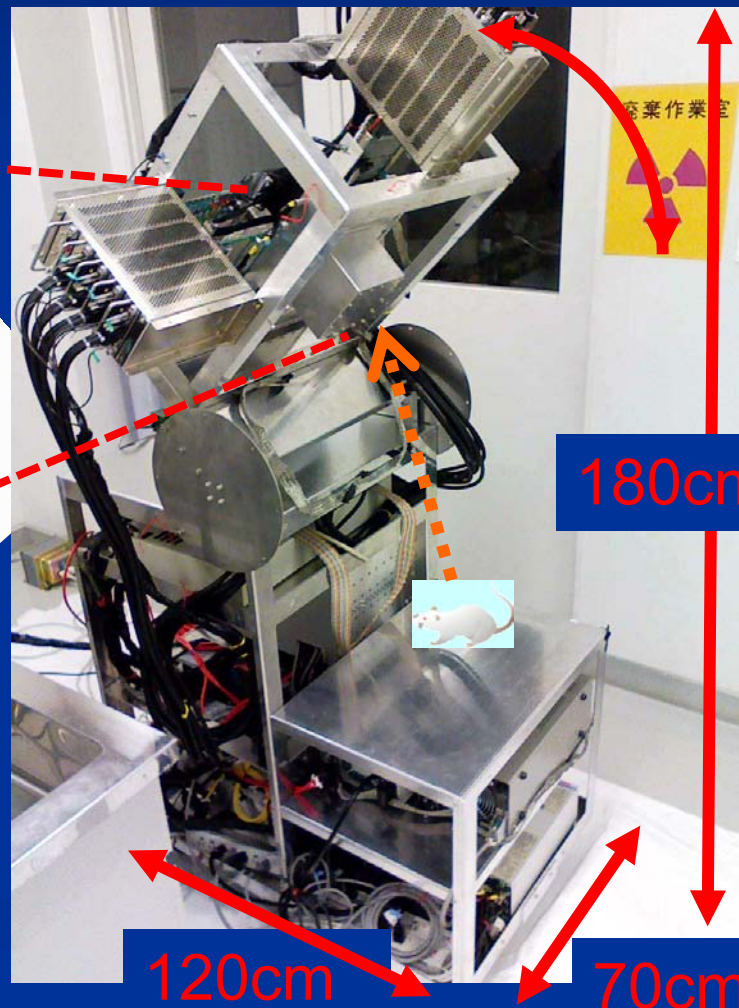
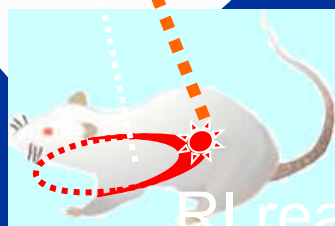
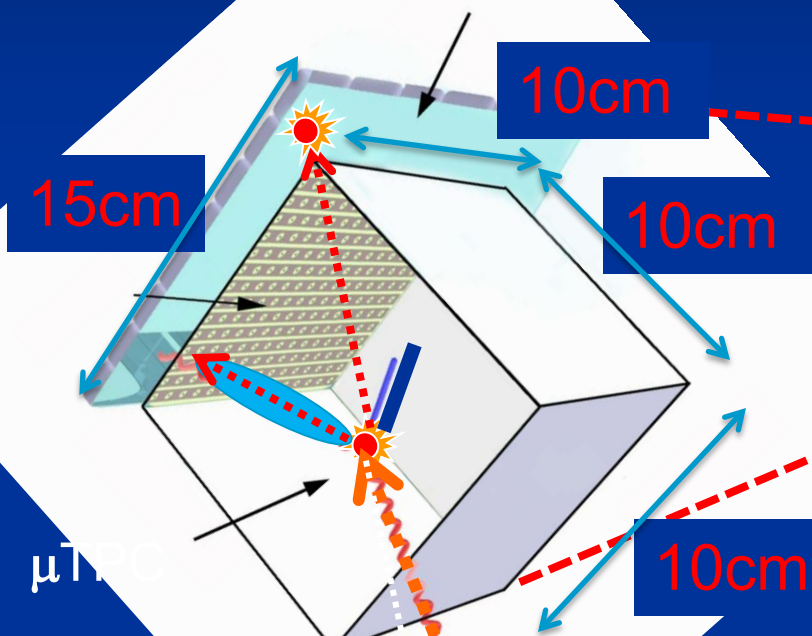


- 1、薬物の動態研究、スクリーニングにこれまでと異なるアプローチの仕方を提案できると期待
- 2、視野が広く一つの検出器で小動物から、中動物、人間まで撮像可能。

複数核種の同時計測、PET、SPECT薬剤以外の核種は、本研究で開発しているコンプトンカメラを用いることで可能

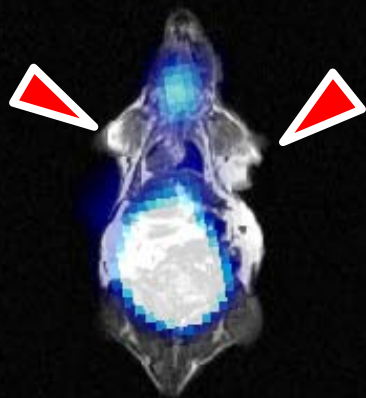
# 核医学・創薬用 電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発

Pixel Scintillator Arrays (PSA)

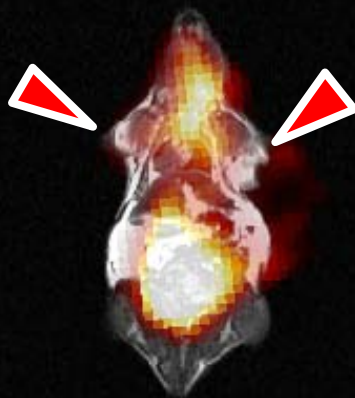


# 2核種同時イメージング 広エネルギー計測範囲

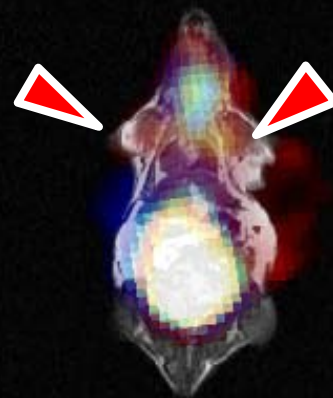
I-131 ion



F-18-FDG



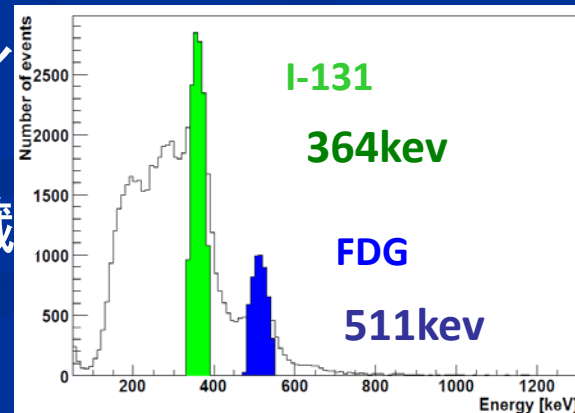
I-131 ion  
+FDG



F-18-FDG (511keV) と I-131 ion (365keV) の同時イメージングに成功

I-131 ionは甲状腺と膀胱に、F-18-FDGは頭、心臓膀胱への集積が認められる。

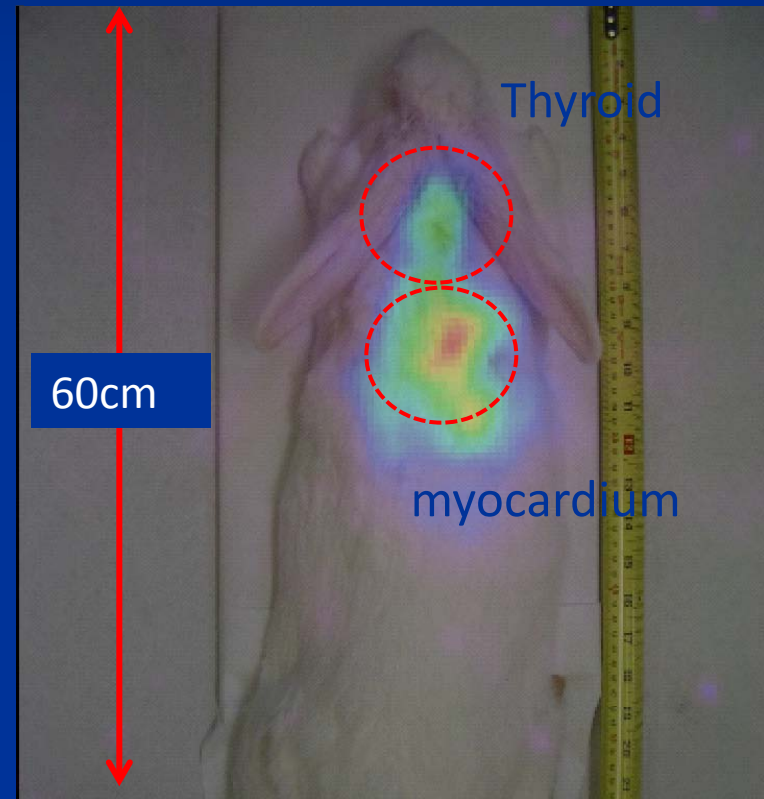
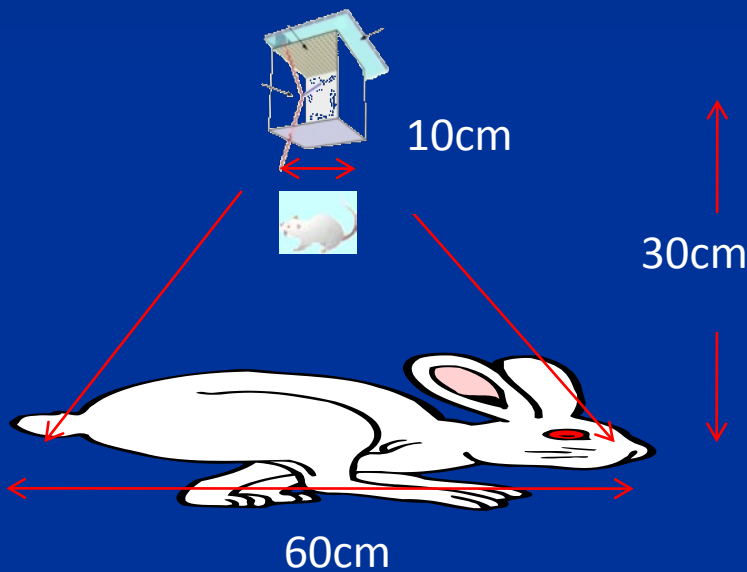
(F-18-FDG :5.7MBq、I-131 ion: 0.9MBq、Time:19.6h,)



# 中動物のイメージング (ウサギ)

## 広視野

京大薬: 木村寛之、天野博夫、佐治英郎



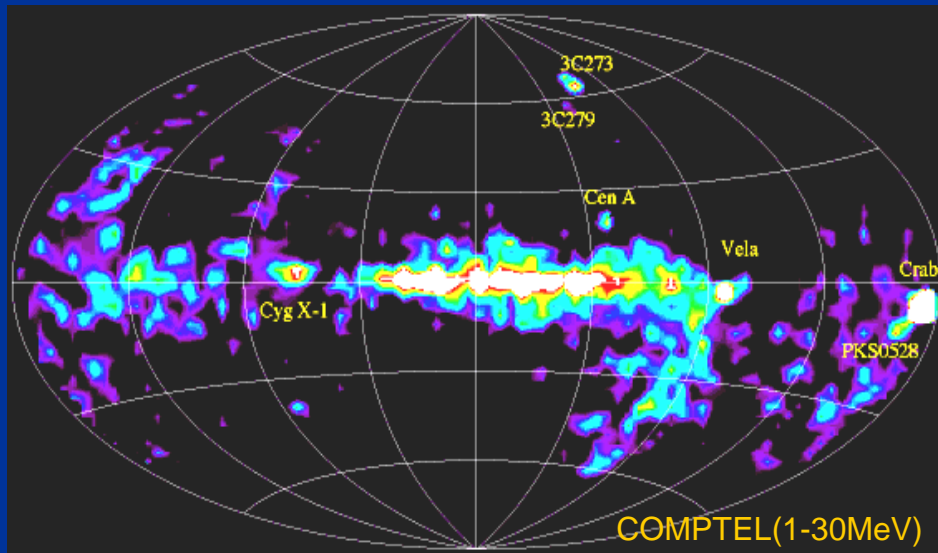
I-131-MIBGのイメージング

甲状腺、心筋、中動物サイズのイメージングに成功

(I-131-MIBG: 365keV, 24.7MBq, Time: 44.5h)

# 応用分野

## 天文



✓ ガンマ線天文学

## 医療

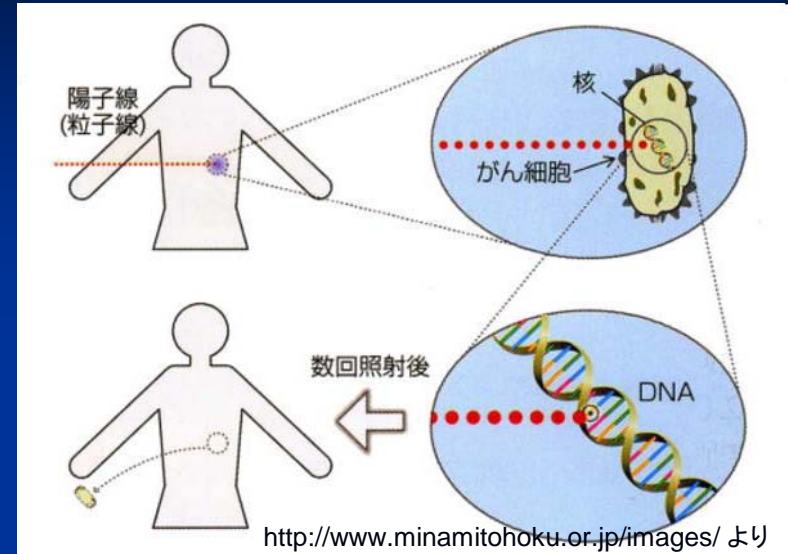


- ✓ 医療用ガンマ線カメラ
- ✓ 陽子線治療用モニター

# 陽子線治療

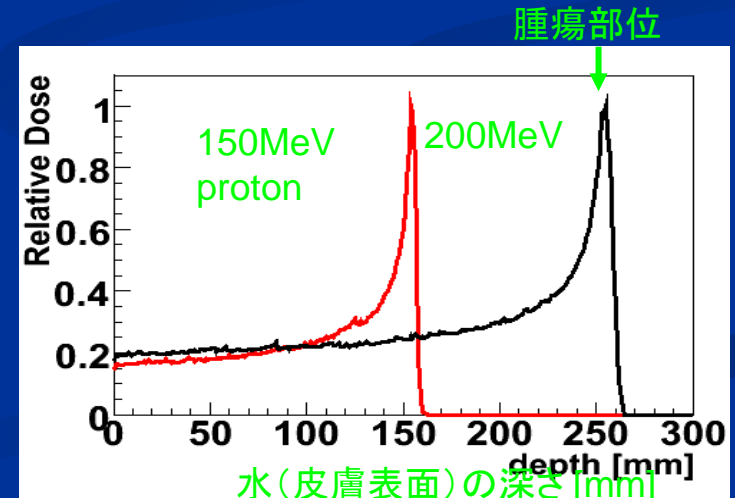
## ■ 陽子線治療

- 粒子線のブラッグピークを利用した腫瘍部位の治療
- 肝細胞、前立腺ガンなど多くのガン治療の実績あり
- ブラッグピーク位置はエネルギーによって調節



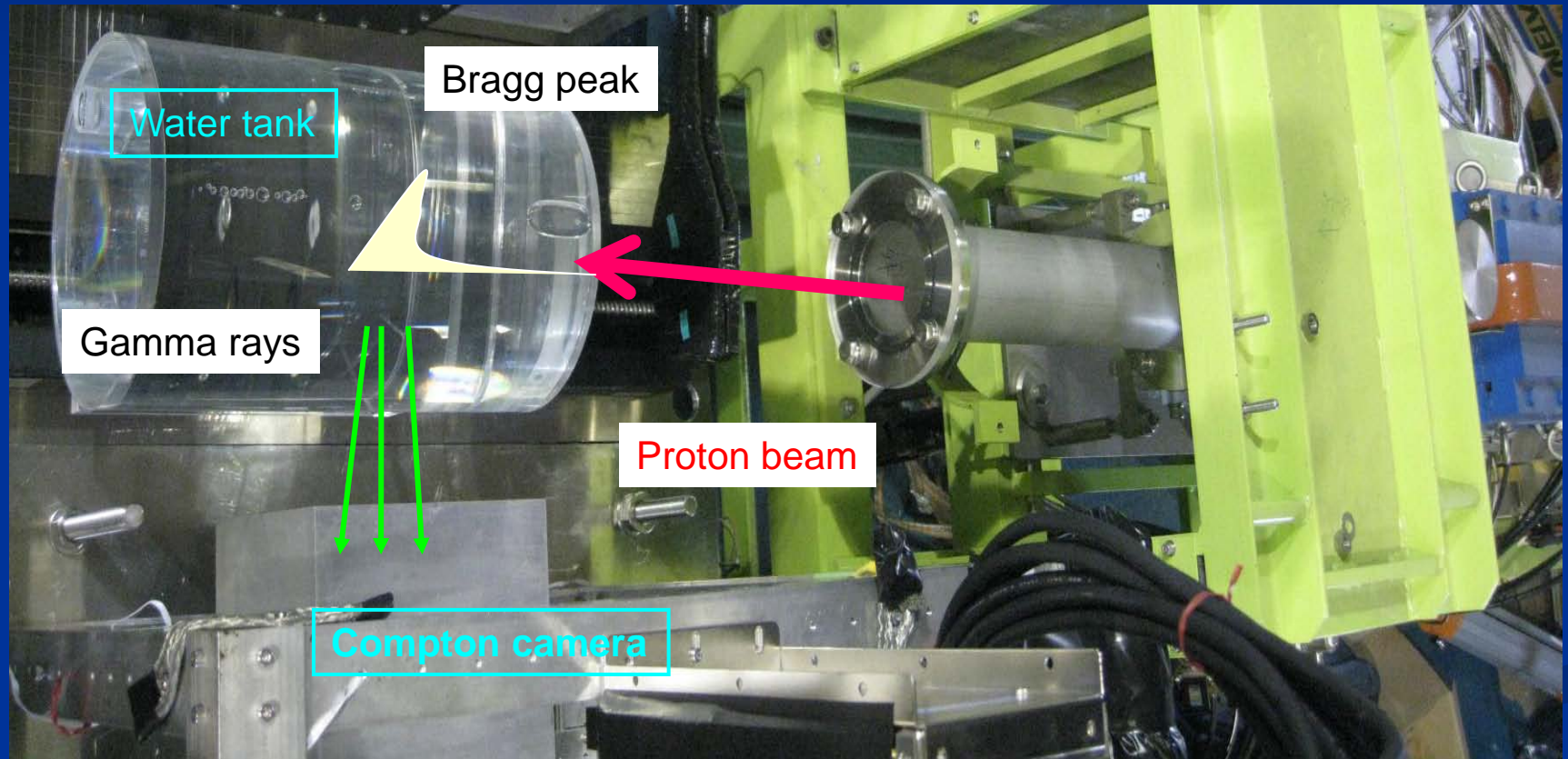
腫瘍部位にピークが来ているかリアルタイムにモニターしたい

- ・現状ではリアルタイムモニターが実現していない  
⇒511keVのみの計測  
他のエネルギーのガンマ線や中性子がバックグラウンド
- ⇒PET検出器の構造上、リングの形状で体を囲むので、  
ビーム入射の位置に制限
- ⇒ 511keVはブラッグピークをトレースしない



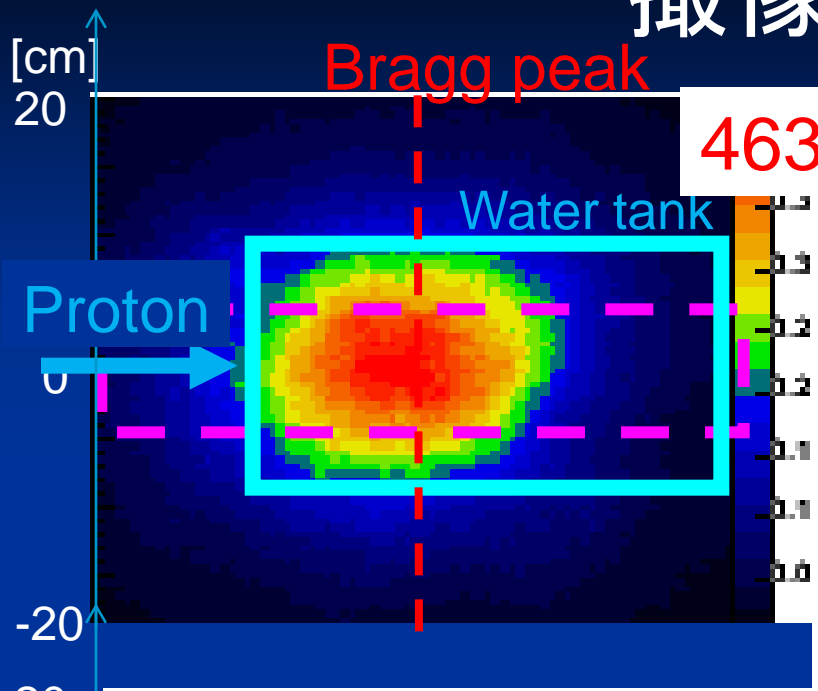
コンプトンカメラ: 広エネルギー領域(0.2 - ~2 MeV)・広視野(~3tsr)

# イメージング実験 @大阪大学核物理研究センター



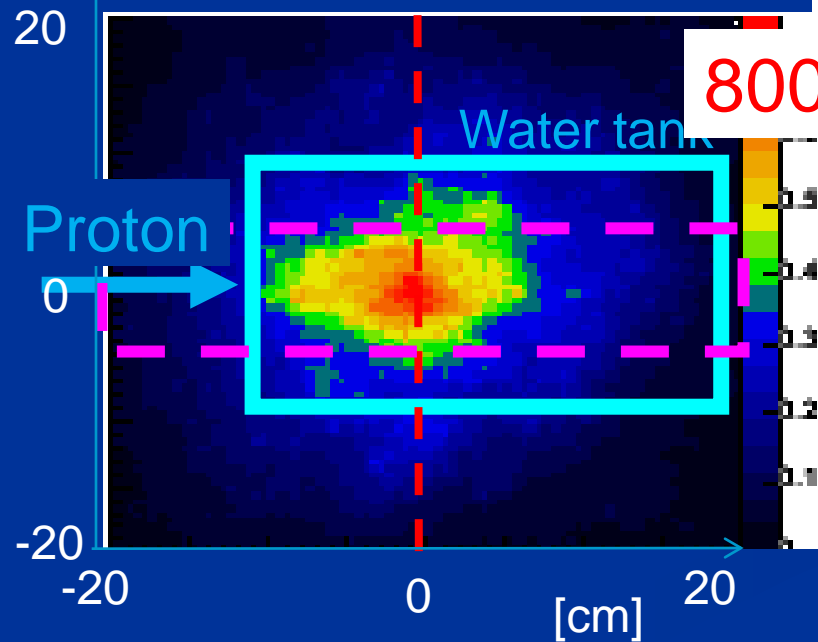
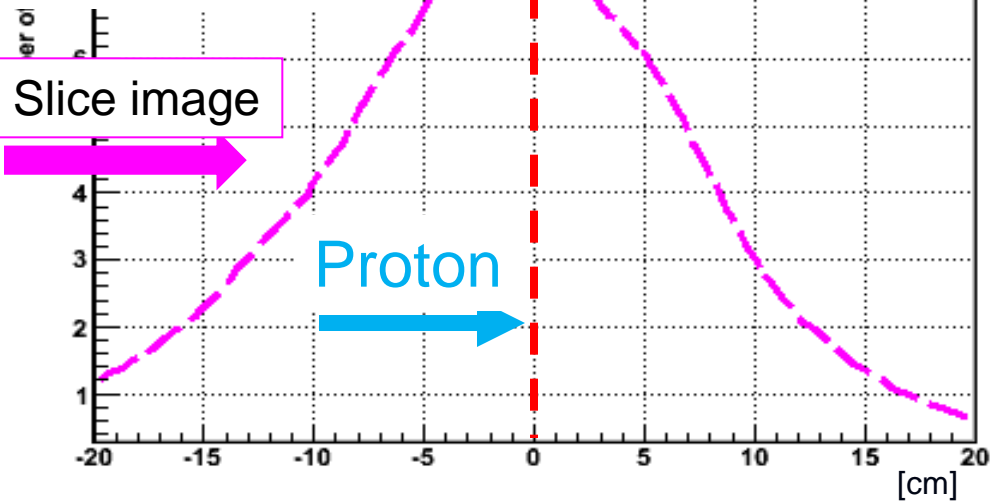


# 撮像結果



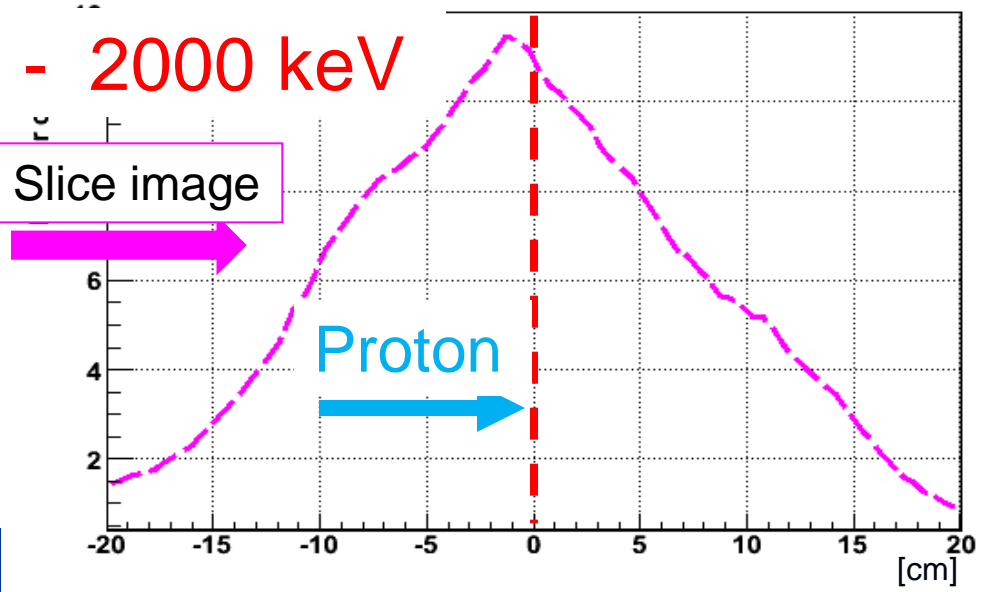
463-559 keV

Slice image



800 - 2000 keV

Slice image



# まとめ

## ◆MeVガンマ線イメージング検出器を開発している

- コンプトン反跳電子飛跡検出器(ガスTPC)と散乱ガンマ線吸収体を用いて光子毎に到来方向とエネルギーを決定できる
- 吸収体としてPixelアレイシンチレーターとフラットパネルPMTを利用
- フラットパネルPMTの省電力読み出しを実現(100mW/PMT)
- より省スペース、より省電力なシンチレーションカメラも模索

## ◆ 応用分野

- 天文 : ガンマ線天文学
- 医療 : 医療用ガンマ線カメラ、陽子線治療用モニター