

# ガスTPCとシンチレーションカメラ を用いたMeV $\gamma$ 線到来方向測定

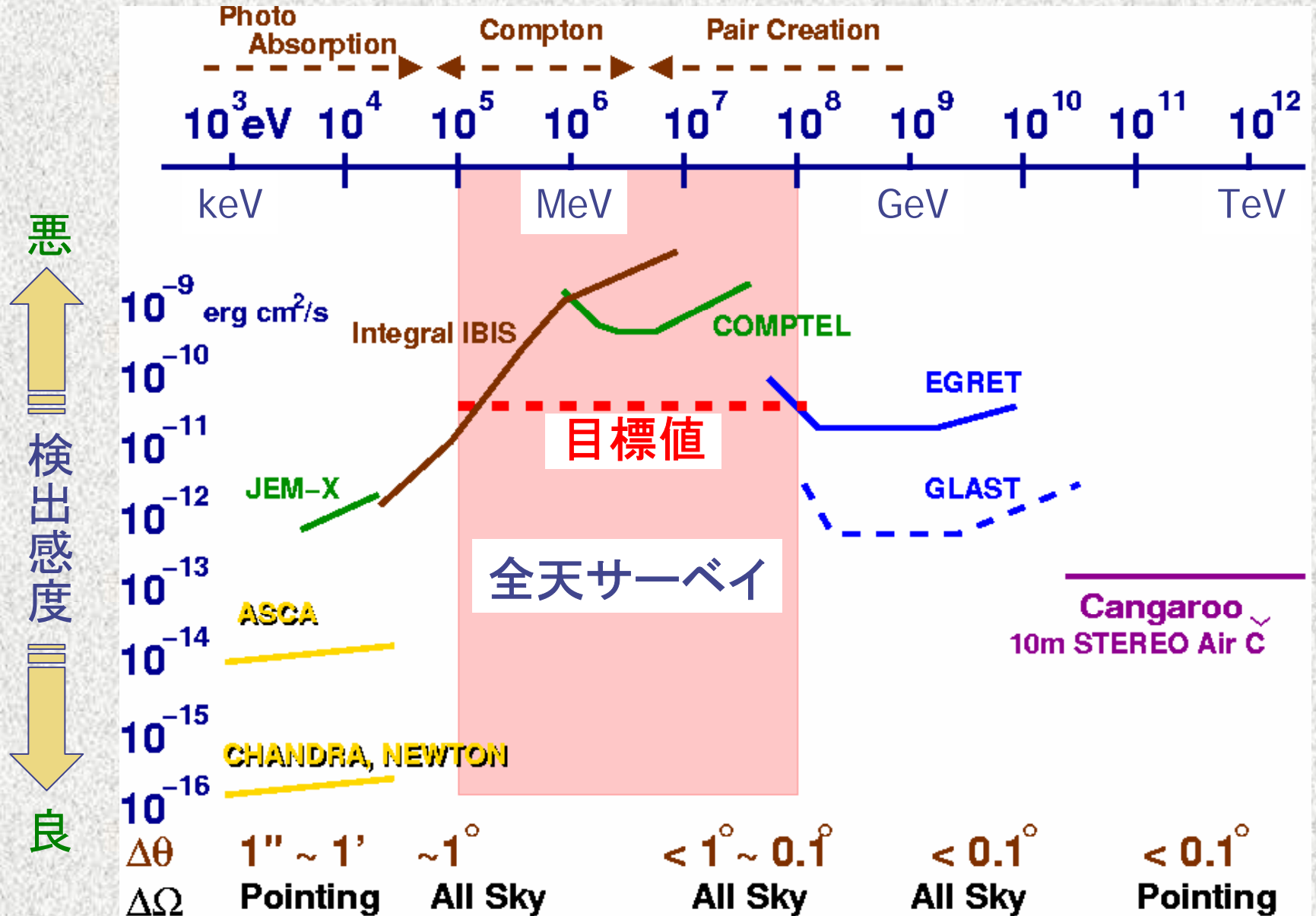
京大理・物理・宇宙線( $\gamma$ 線) 窪 秀利

谷森達、身内賢太郎、永吉勉、関谷洋之、  
折戸玲子、植野優、岡田葉子、高田淳史、  
服部香里、西村広展

- ◆ MeV  $\gamma$  線天体観測
- ◆ MeV  $\gamma$  線検出原理(従来 vs 開発)
- ◆ 1<sup>st</sup> プロトタイプの性能
- ◆ 2<sup>nd</sup> プロトタイプの開発現状
- ◆ まとめ



# これまでのX・γ線検出感度



# COMPTEL全天サーベイ(1~30MeV)

CGRO衛星搭載(1991~2000)

Schönfelder, et al.(2000)

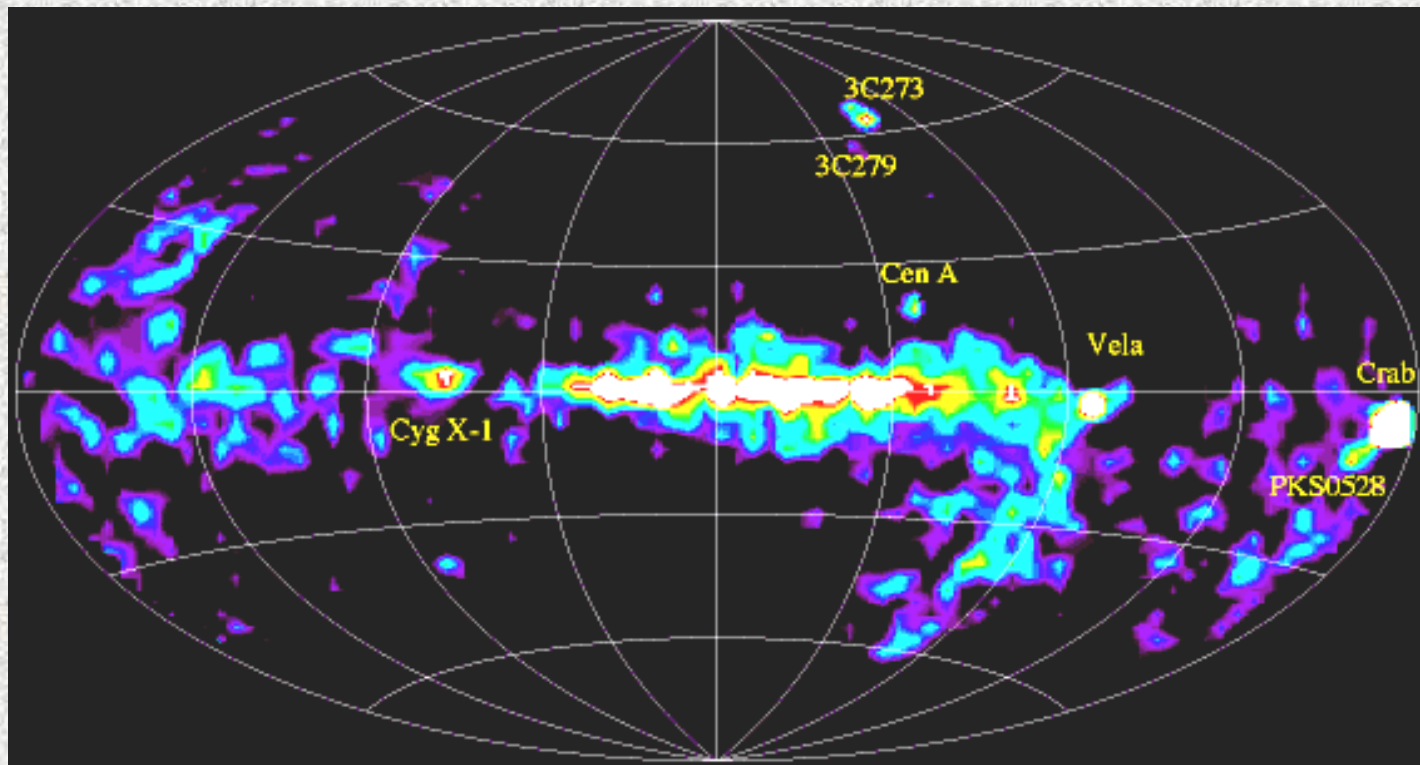
$\gamma$ 線源63(steady**32**個+GRB**31**個)+系内外diffuse+太陽フレア

AGN **10**

$\gamma$ -ray line source(SNR) **7** + SNR continuum–Crab

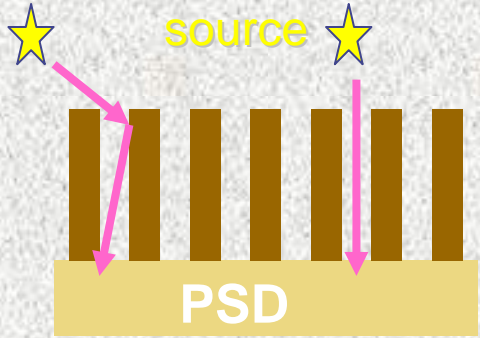
Spin-down pulsar **3**                      UnID  $|b| < 10^\circ$  **4**

Stellar Blackhole Candidate **2**                       $|b| > 10^\circ$  **5**



# 従来のサブMeV～MeVガンマ線イメージング法

## 1. コリメータ+位置検出器 (OSSE等)



狭視野, コリメータで散乱したガンマ線の混入

## 2. Coded Mask+位置検出器 (INTEGRAL等)

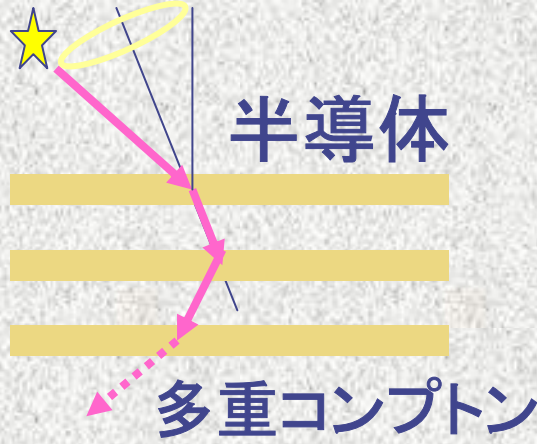
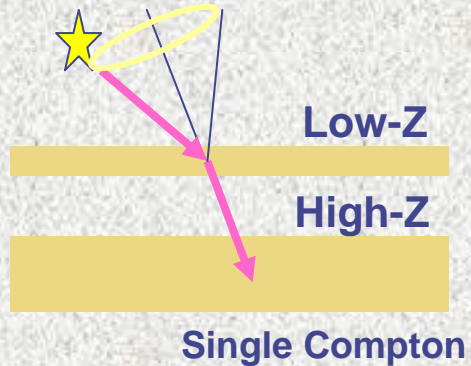
広がったガンマ線源に対する感度悪い

## 3. コンプトンカメラ (COMPTTELなど)

到来方向は円錐上、決定には3イベント必要

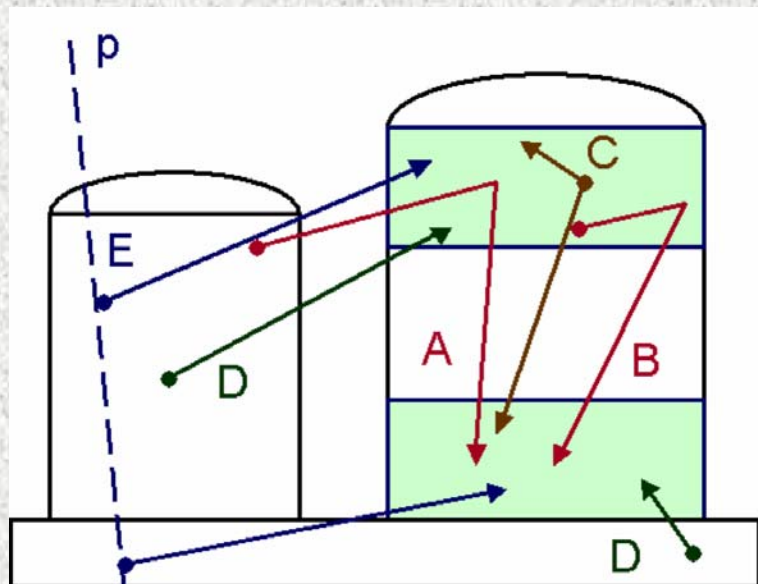
広がったガンマ線源に対する感度悪い

バックグラウンド除去能力が低い



# COMPTELのバックグラウンド源

G.Weidenspointner, et.al.,A&A ( 2001)



A: external  $\gamma$  } 取り除けない  
B: internal  $\gamma$  }  $\gamma$ 線background

C: two  $\gamma$

D: random coincidence

E: proton-induced  $\gamma$

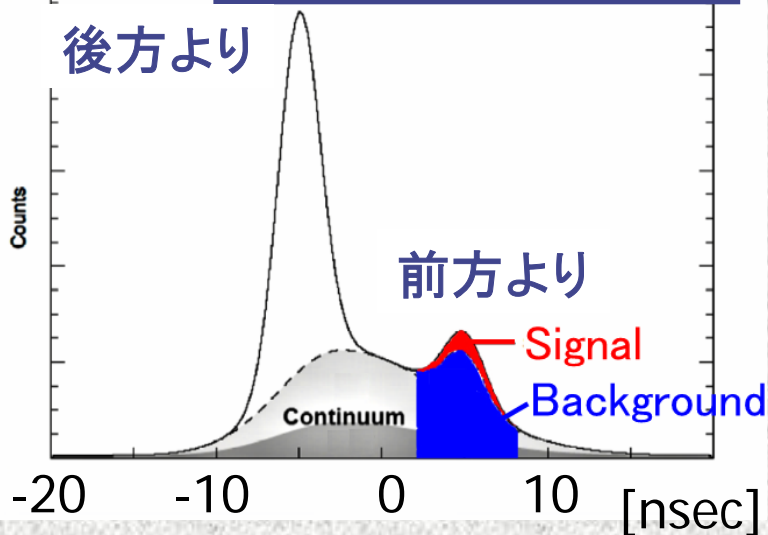
◆ Other background

- neutron

- electron

- 大気からの  $\gamma$  線

上下の検出器のTOF



COMPTELでは、上下の検出器のTOFを用いてある程度除去

⇒ S/N比悪い。

検出感度は有効面積より

バックグラウンドで決まっている

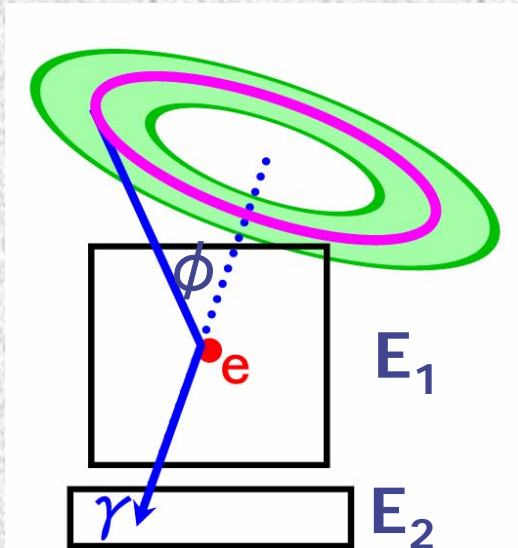
# 次世代Comptonイメージング検出器

COMPTELなど

従来のComptonイメージング法

電子の反跳方向を破棄

- $\gamma$  到来方向を円形に制限
- 誤差はドーナツ型

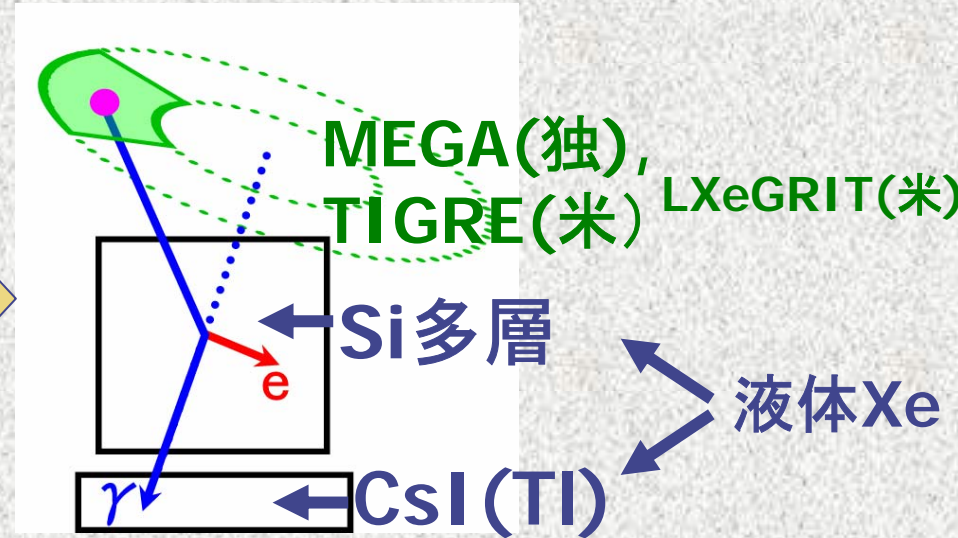


次世代検出器

Advanced Compton法

電子の反跳方向の測定

- $\gamma$  到来方向を一意に決定
- 誤差は扇型



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

Compton散乱体

反跳電子多重散乱

固体、液体 > ガス

# 新しいMeV $\gamma$ 線イメージング検出器

現在 10cm 角



年末 30cm



H18

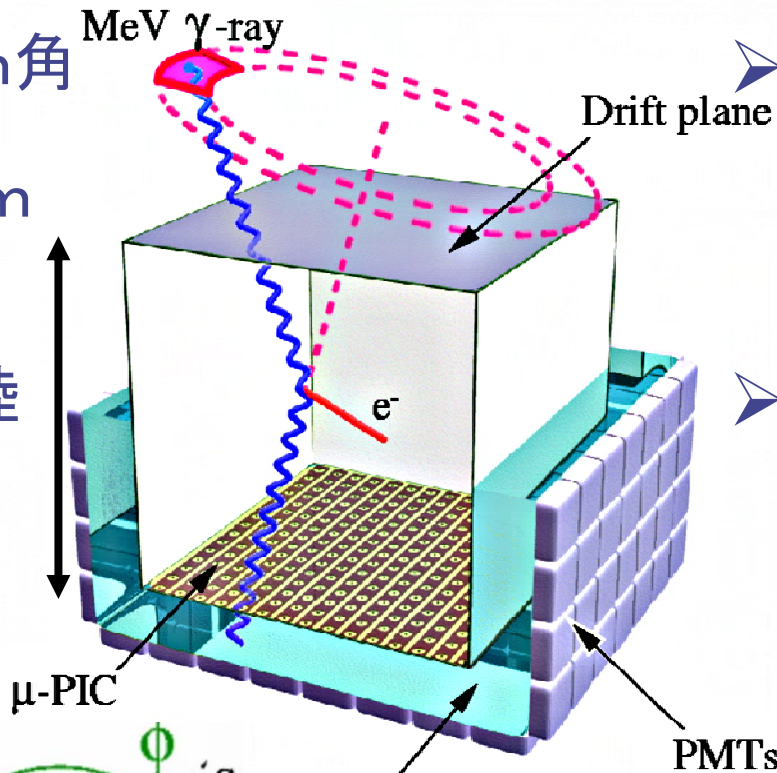
気球 @ 三陸



将来 50cm

@ 南極

/ 衛星



ガス Time Projection Chamber

Compton 散乱反跳電子  
3次元飛跡、エネルギー

シンチレーションカメラ

散乱  $\gamma$  線位置, エネルギー

Event 毎に



Compton 散乱を完全に再現

- ◆ 1  $\gamma$  毎に到来方向とエネルギー測定
- ◆ コリメータなし、大立体角 ( $\sim 3\text{str}$ )
- ◆  $\alpha$  角  $\Rightarrow$  強力なバックグラウンド除去

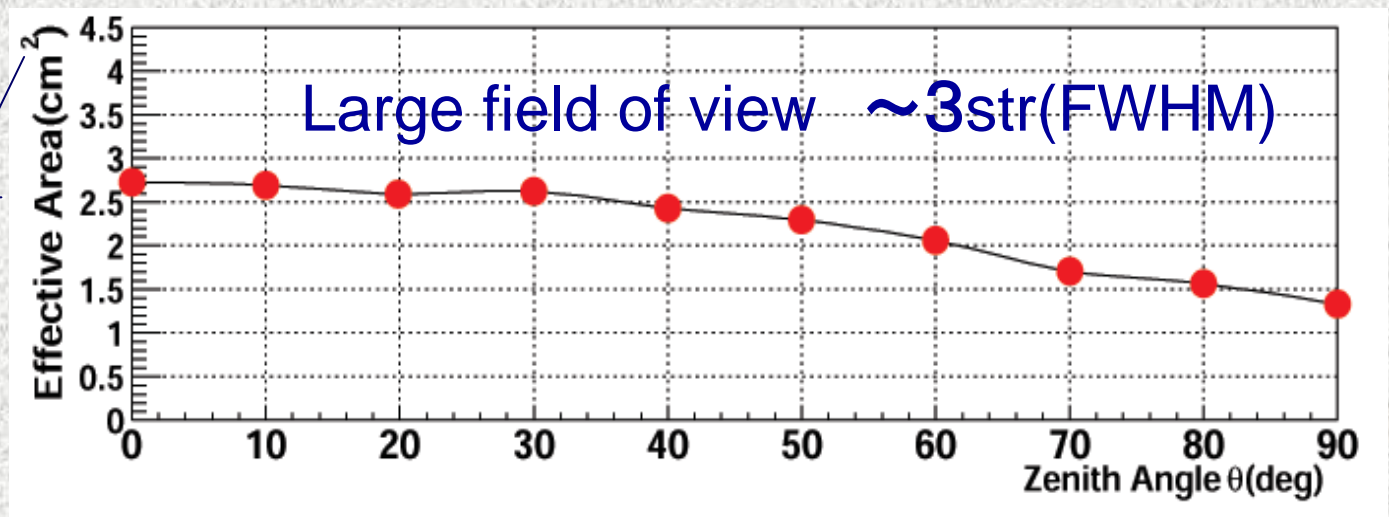
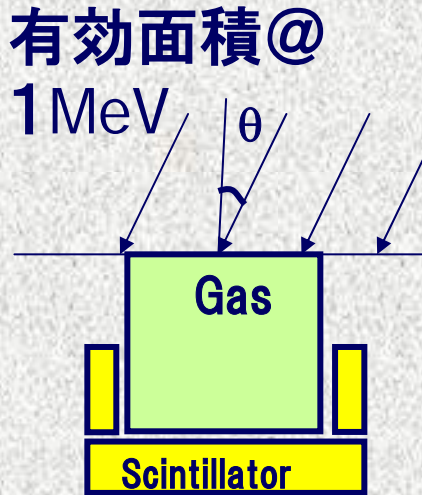
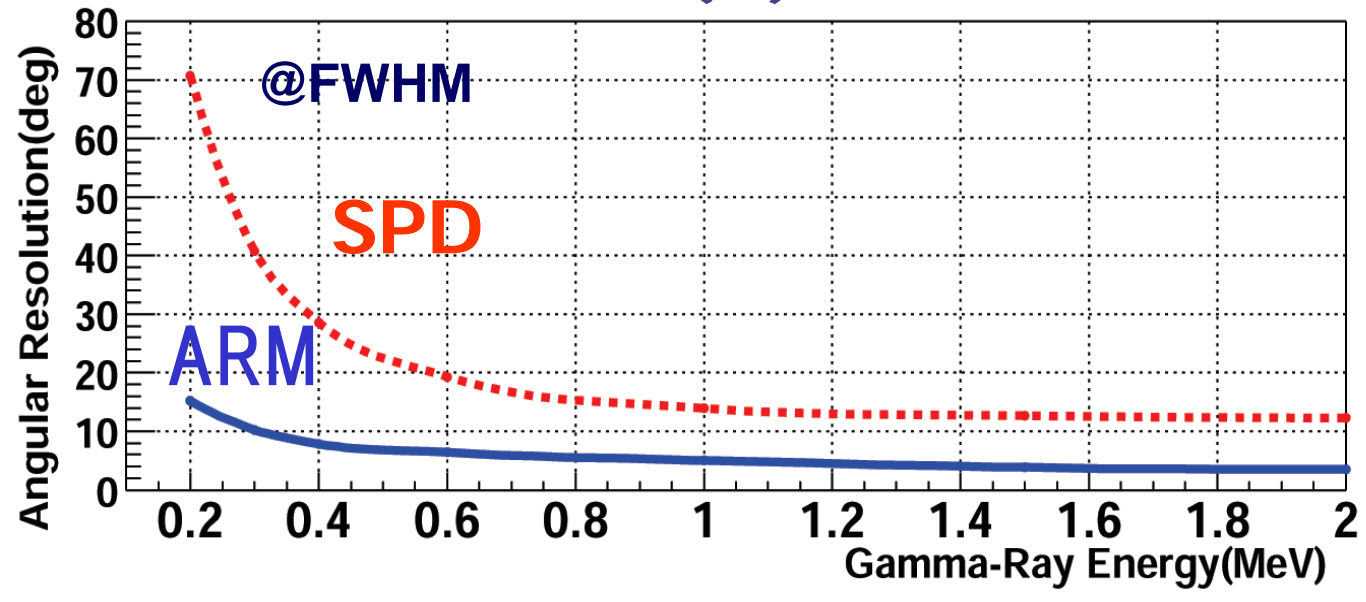
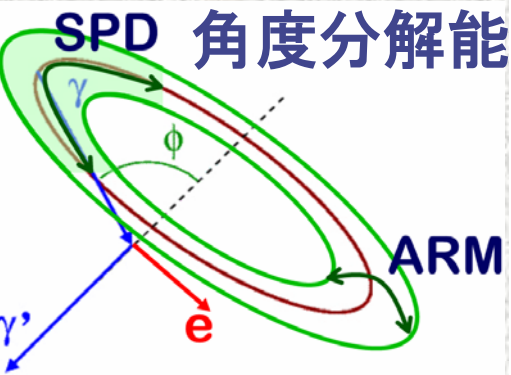
$$\cos \alpha = \left( 1 - \frac{m_e c^2}{E_g} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

運動学から求まる値と測定値を比較

シンチレータで全吸収しなかった事象やTPCとシンチの偶発同時事象などを除去

# 検出器の性能(シミュレーション)

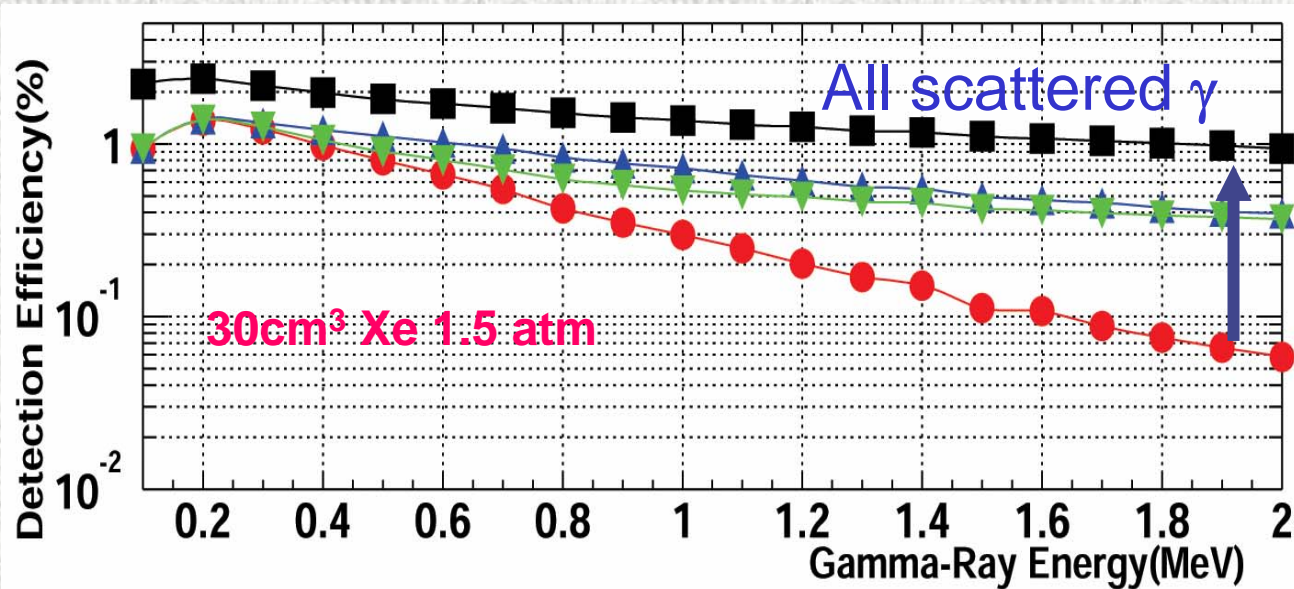
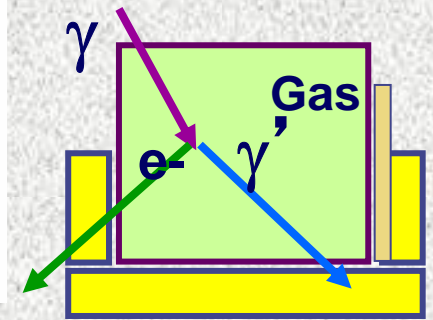
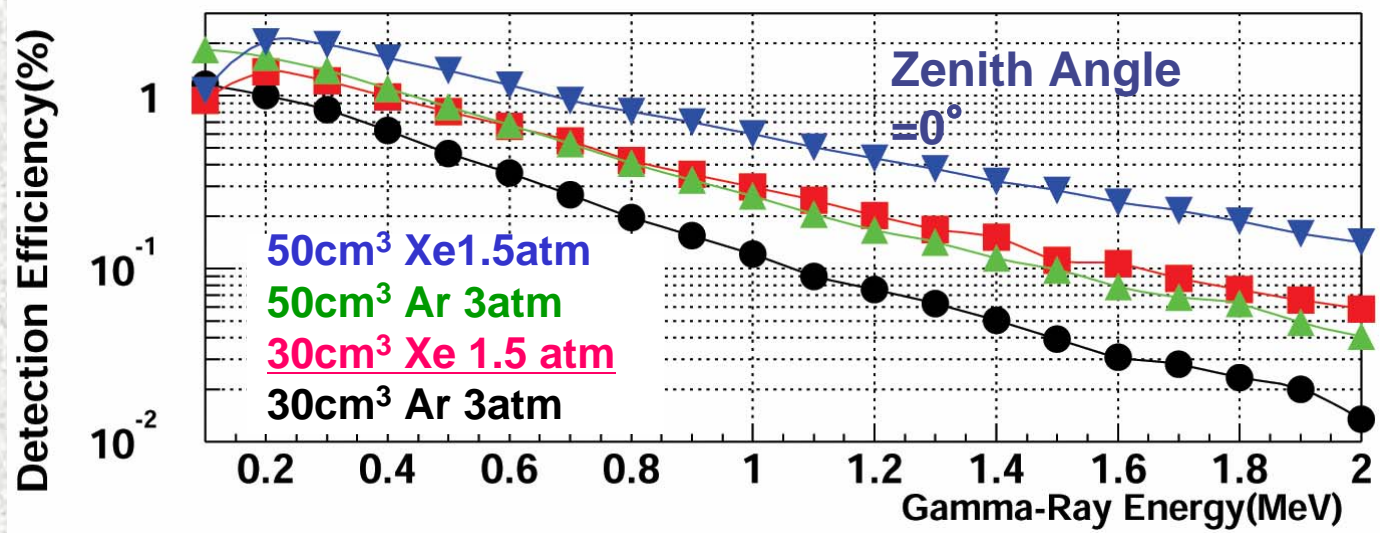
Xeガス1.5atm 30cm立方、2.5cm厚CsI(Tl) 多重散乱込、Geant4



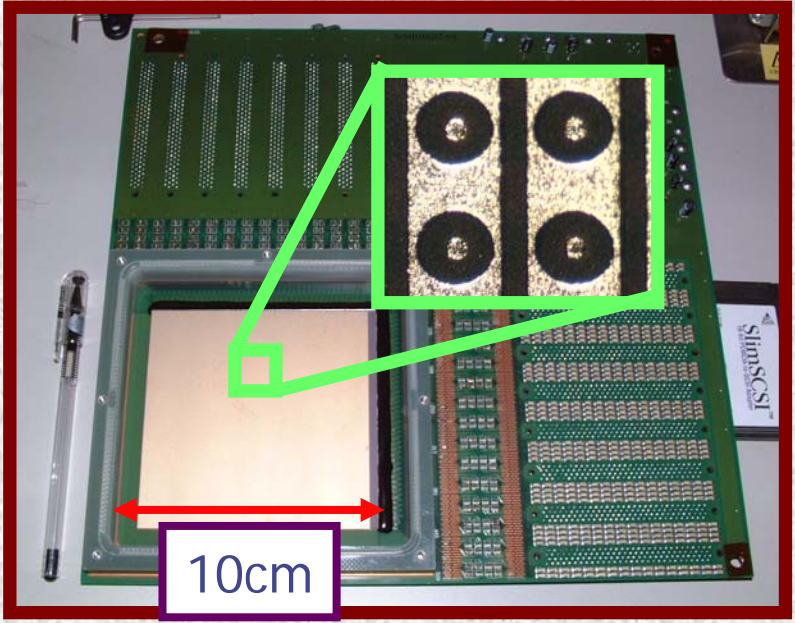
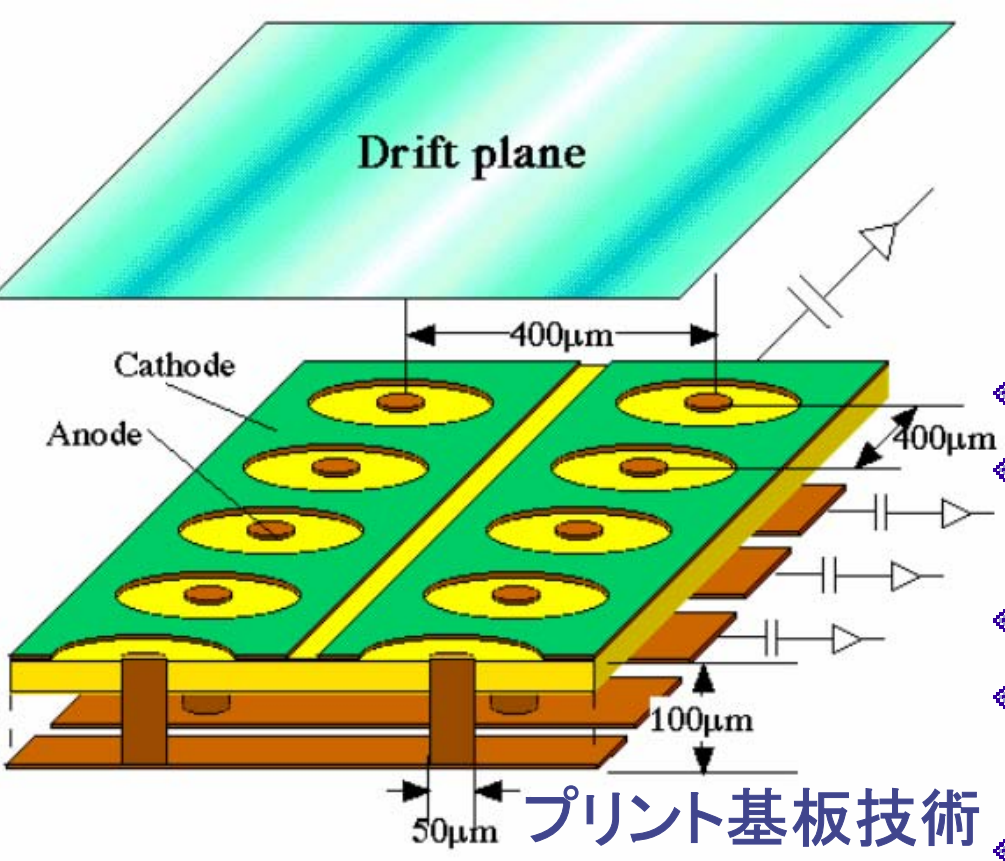


# 検出器の性能(シミュレーション)

## 検出効率



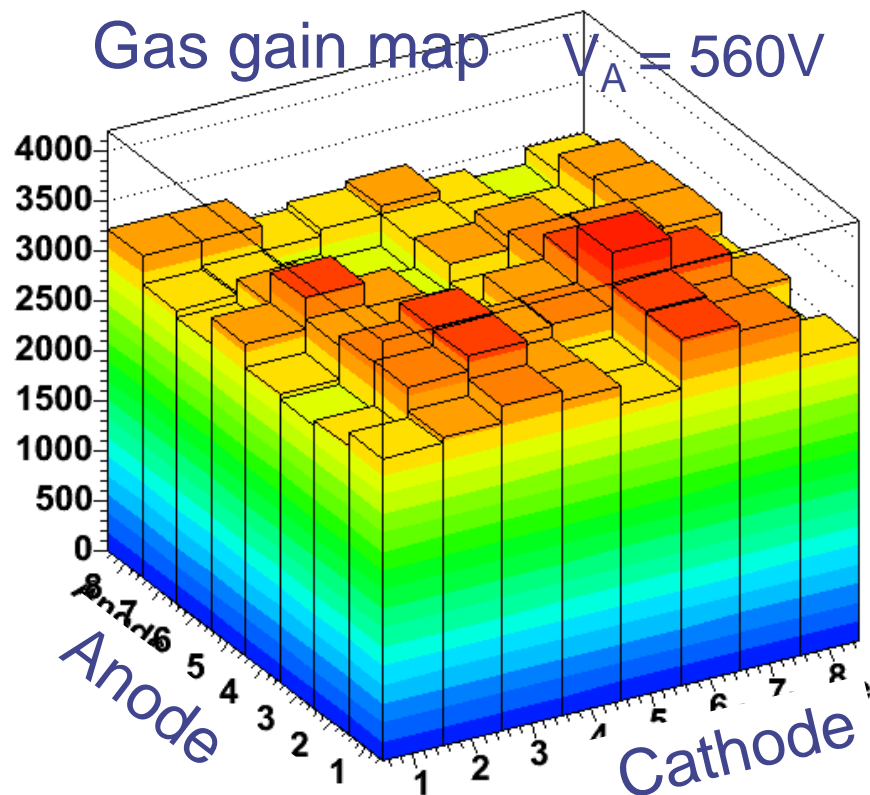
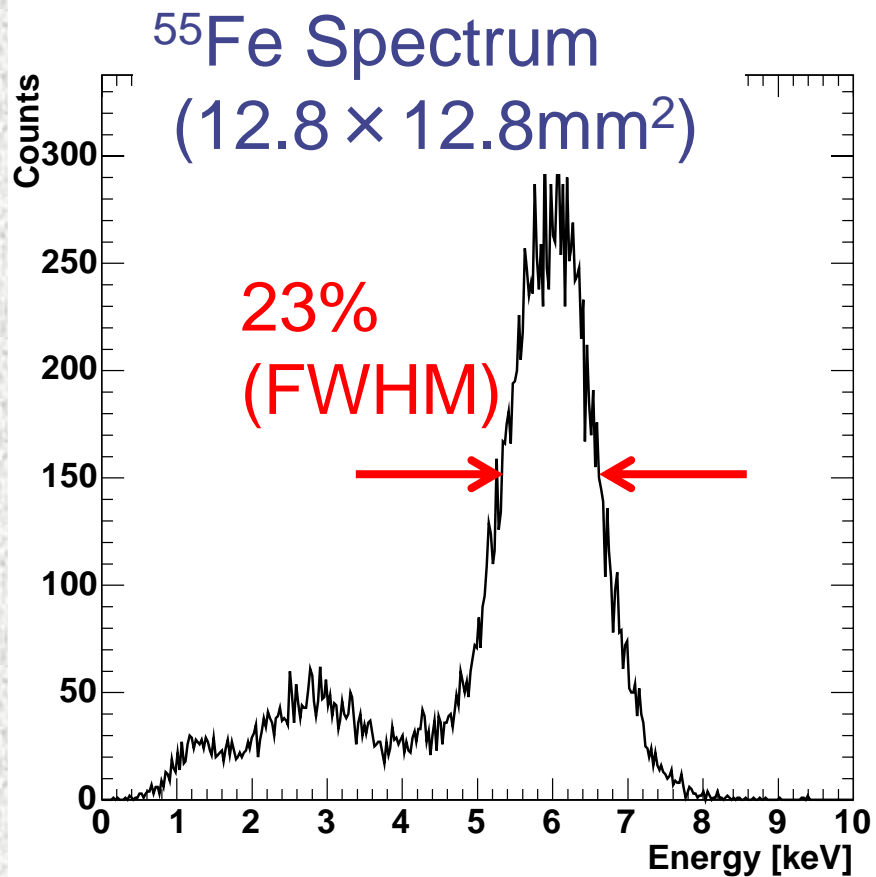
# $\mu$ -PICの構造と特徴 (Micro Pixel Gas Chamber)



- ◆ 2次元読み出し(~65000pixels)
- ◆ **大面積** (10cm角)  
⇒30cm角12月完成
- ◆ **Max gain ~15000**
- ◆ **Energy分解能**  
30% @ 5.9keV (100cm<sup>2</sup>)
- ◆ **Gas gain~6000**で  
1ヶ月以上の**安定動作**
- ◆ **高い位置分解能** (~120 μm)
- ◆ **大強度入射にも耐える**

構造設計←3Dシミュレーション  
 ・Maxwell 3D(電場計算)  
 ・Garfield(電子ドリフト+増幅)

# Performance of $\mu$ -PIC

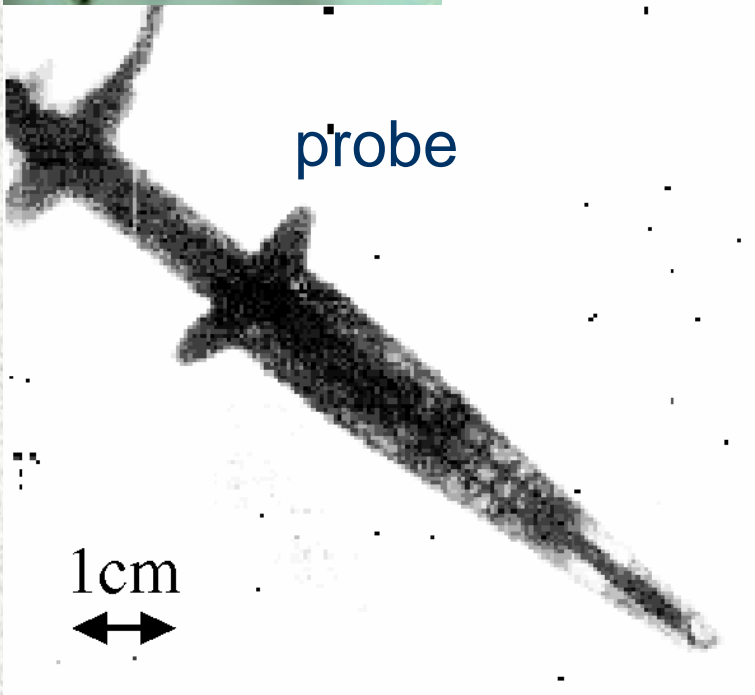
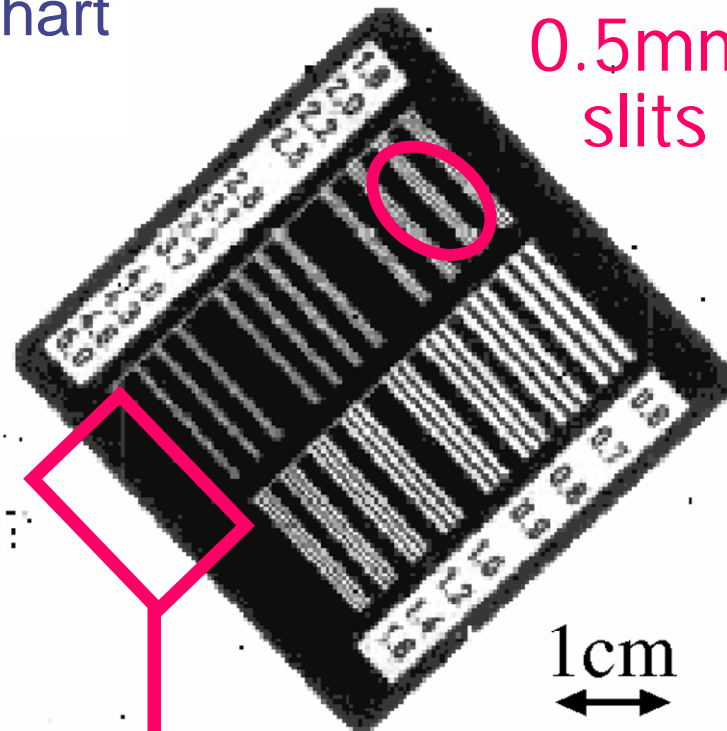
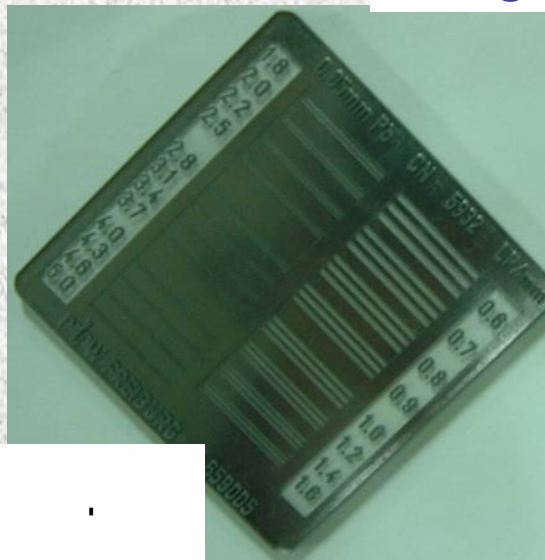


Uniformity ( $\sigma$ )  $\sim 7\%$

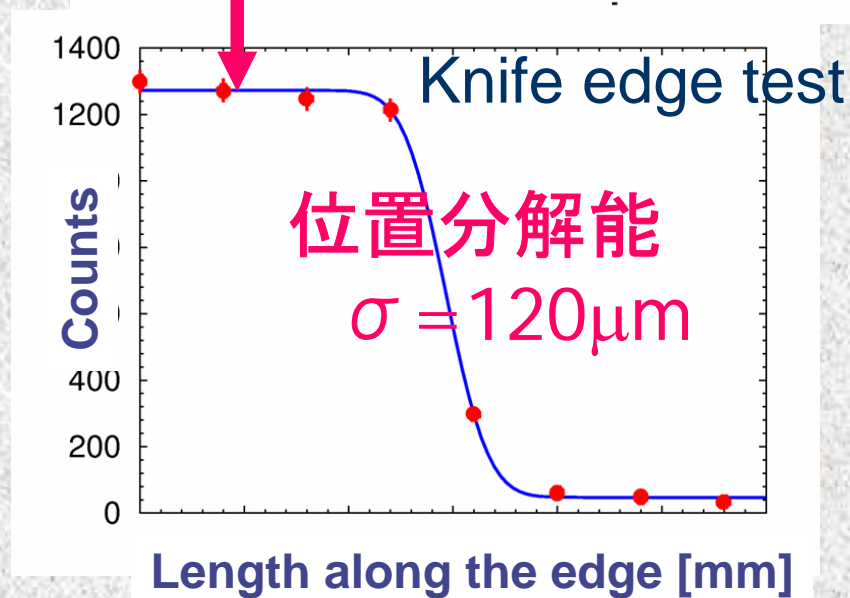
# X-ray imaging

Test chart image

0.5mm slits



probe



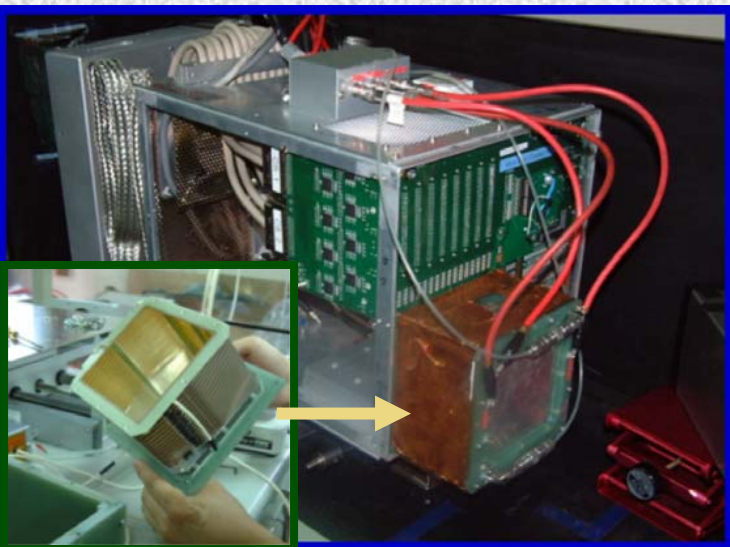
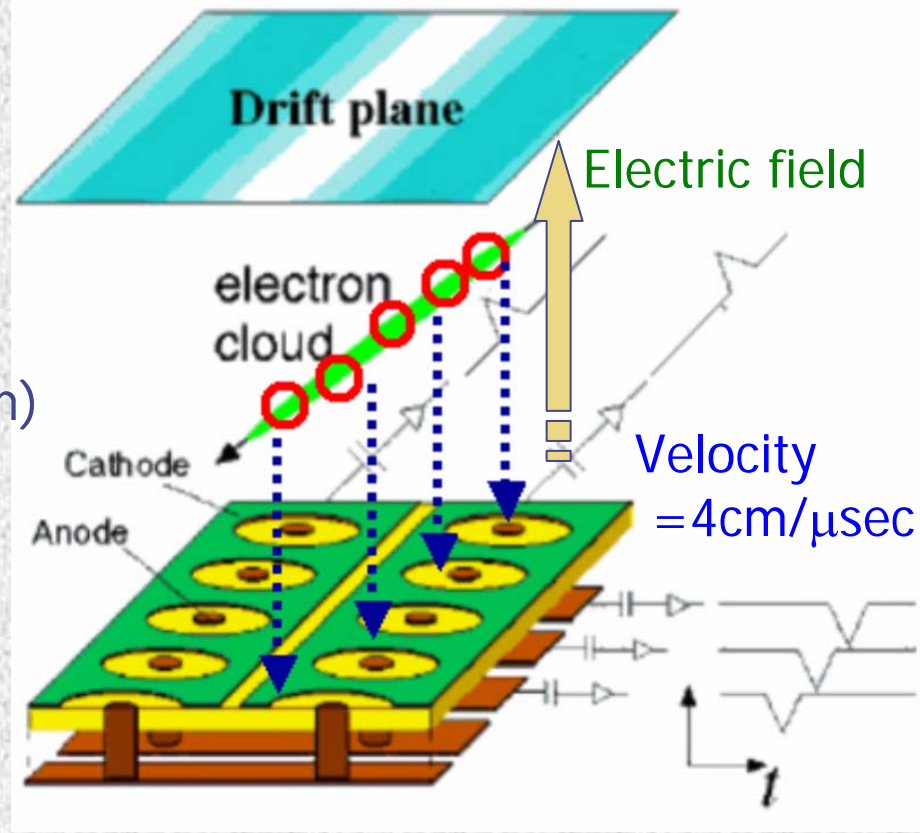
# $\mu$ -TPC

- ✓ 10cm×10cm  $\mu$ -PIC  
⇒ 2次元情報
- ✓ 8cm drift cage ( $E=0.4\text{kV/cm}$ )  
⇒ drift time



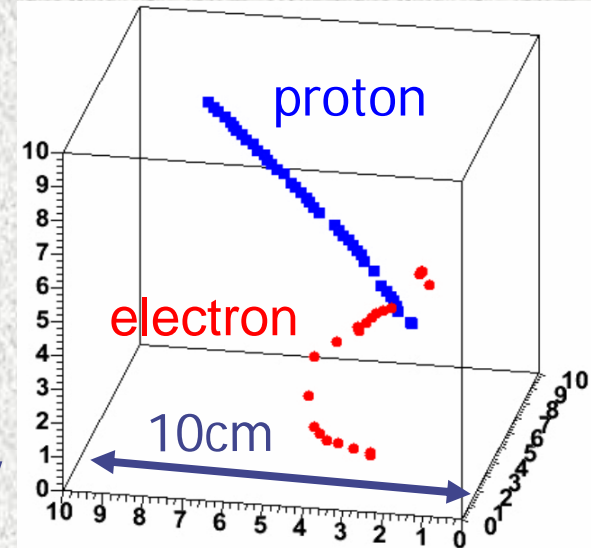
micro-TPC

⇒ 3次元位置情報



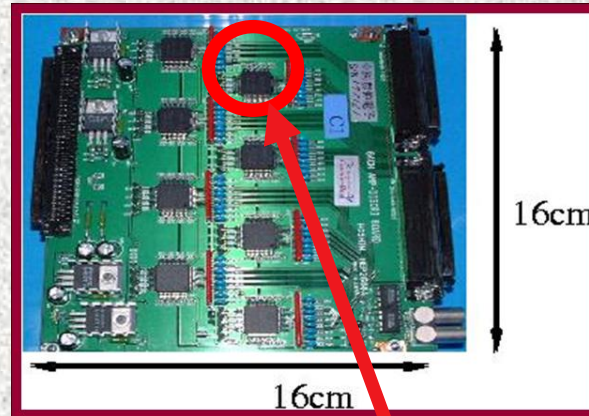
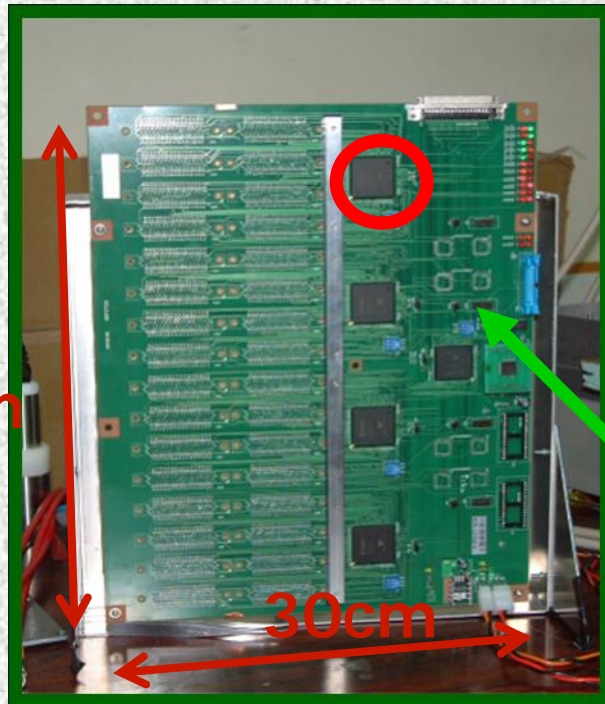
Typical tracks  
Ar 90% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10%  
gas gain ~5000

proton ~1MeV  
electron ~500keV

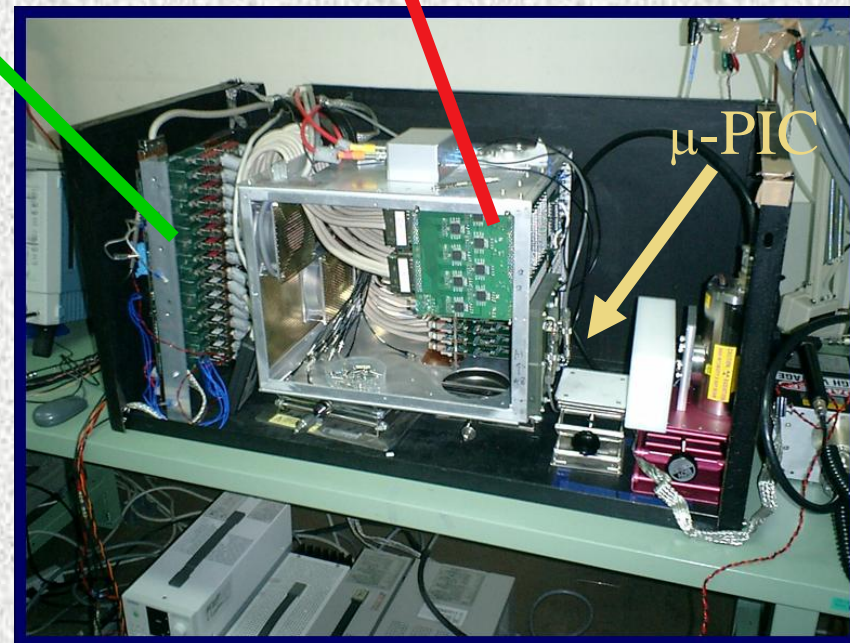


# Electronics

- ◆ Preamplifier + LVDS Discri.  
ATLAS ASD(4ch/chip) Bipolar ASIC  
 $\tau = 16 \rightarrow 80 \text{ nsec}$  にマスク変更



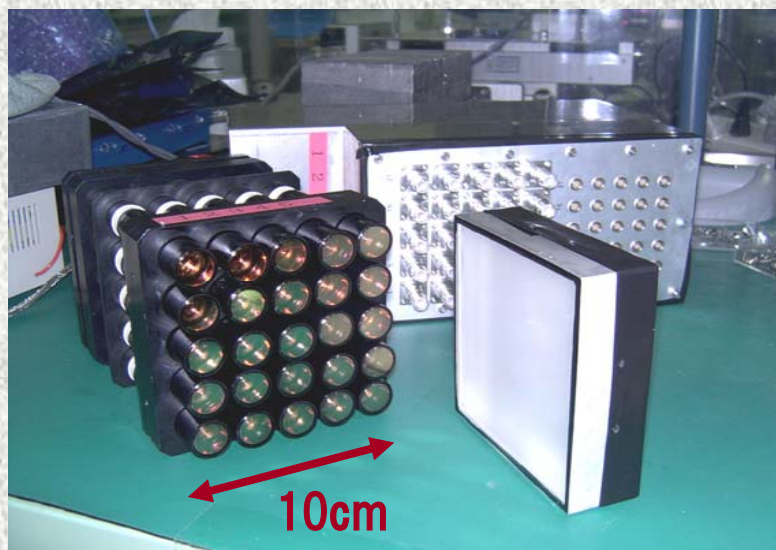
Analog sum  
 $\Rightarrow 100 \text{ MHz}$   
FADC



- ◆ Encoding board

- 5 FPGAs
- anode-cathode coincidence @ 50MHz

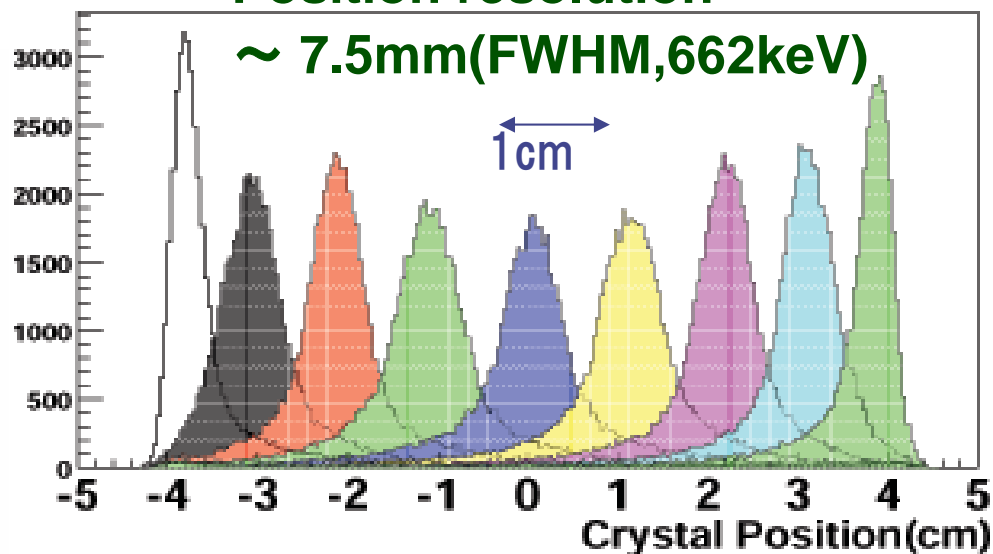
# Position Sensitive Scintillation camera



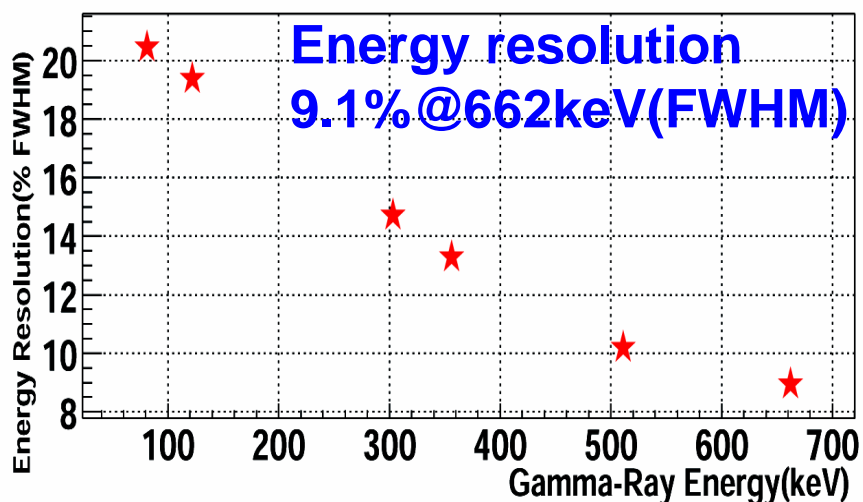
- ✓ 4" × 4" × 1" NaI(Tl) Scintillator
- ✓ 5 × 5 Hamamatsu 3/4" R1166 PMT
- ✓ PhotoCathode Cover rate 40%
- ✓ Dynamic Range 0.1 ~ 1MeV

## Position resolution

~ 7.5mm(FWHM,662keV)



Energy resolution  
9.1% @ 662keV (FWHM)



# Prototype detector

memory board

Anger camera

preamp

RI source

encoder

micro-TPC  
( $\mu$ -PIC)

$\mu$ -TPC

$10 \times 10 \times 8 \text{ cm}^3$

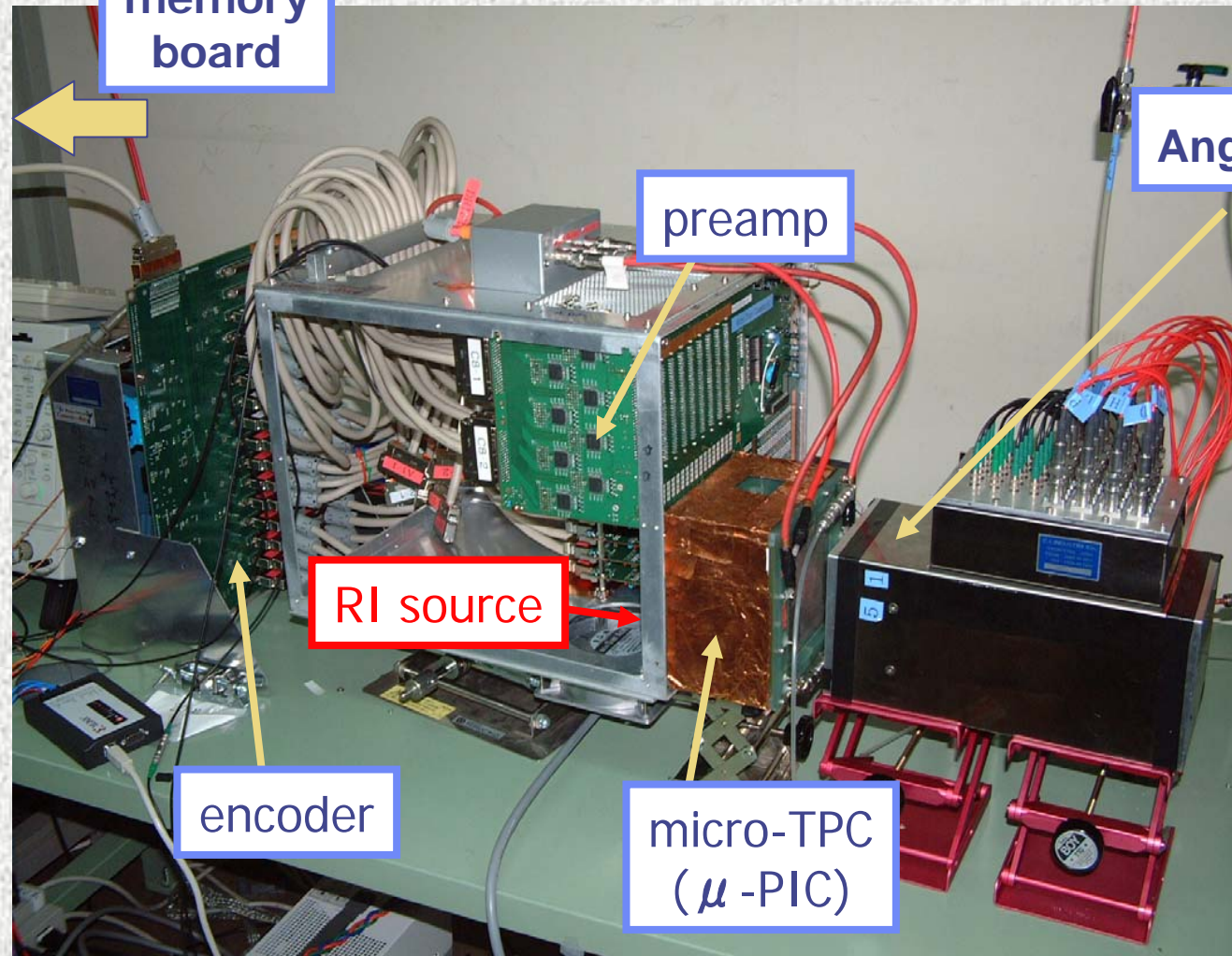
Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (9:1)

NaI (TI) Anger

4"  $\times$  4"  $\times$  1"

25 PMTs

**No Veto or Shield !**





# γ線イメージング

反跳電子の飛跡

散乱γ線の方向・エネルギー

入射γ線のエネルギー(既知)



入射方向の再構成

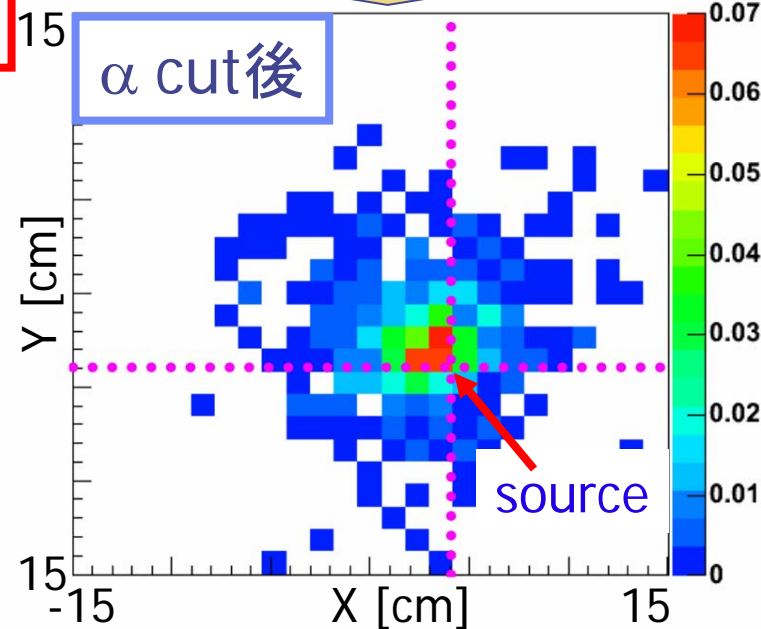
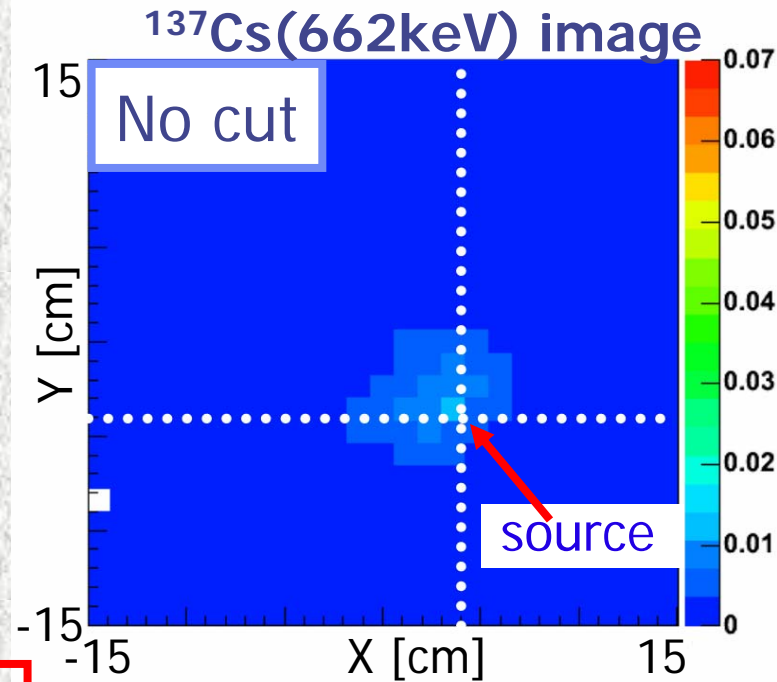
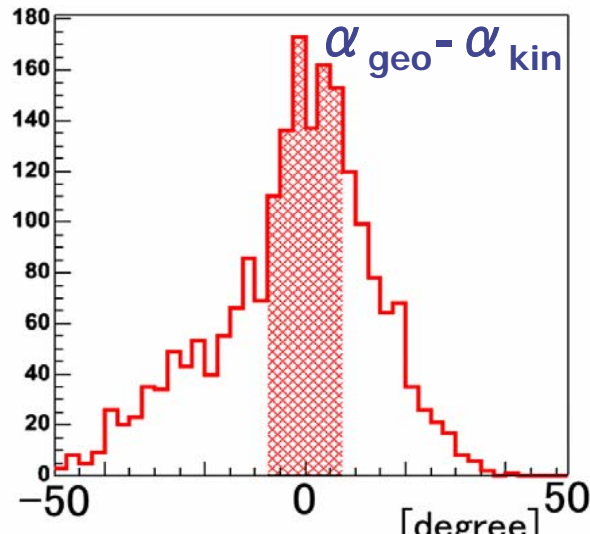
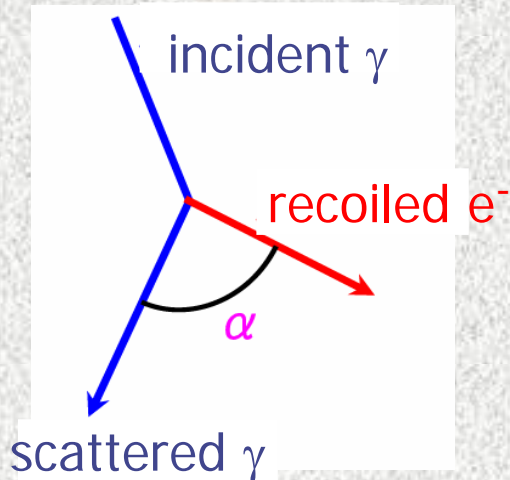
## ◆ Background除去

$\alpha_{\text{geo}}$  : 幾何的な測定による $\alpha$

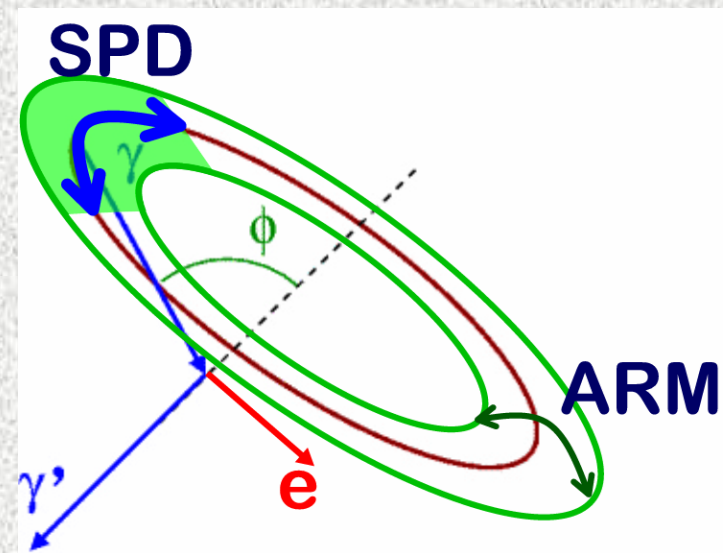
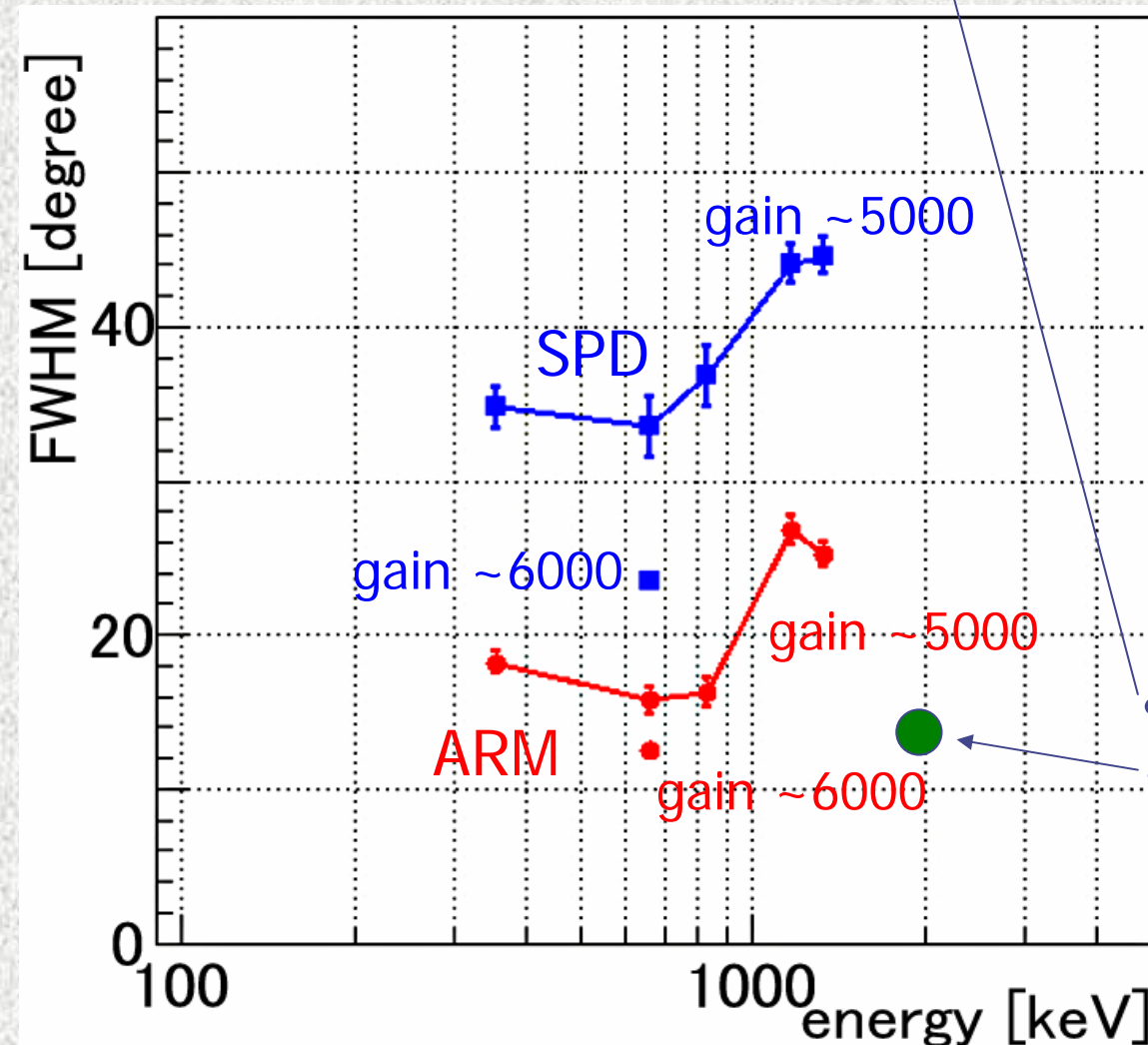
$\alpha_{\text{kin}}$  : 運動学的な計算による $\alpha$

$\alpha$  cut

$\alpha_{\text{geo}} \sim \alpha_{\text{kin}}$



# 角度分解能



## MEGA

Si tracker + CsIシンチ

- SPD 84° (1.8MeV, FWHM)
- ARM 13.4° (2MeV, FWHM)

A.Zoglauer, et. al.  
IEEE Trans. Nucl. Sci. in press

- ✓ ARM (Angular Resolution Measure)
- ✓ SPD (Scatter Plane Deviation)

16° @ 662keV FWHM  
34° @ 662keV FWHM  
for each gamma-ray

# COMPTELのimaging法との比較

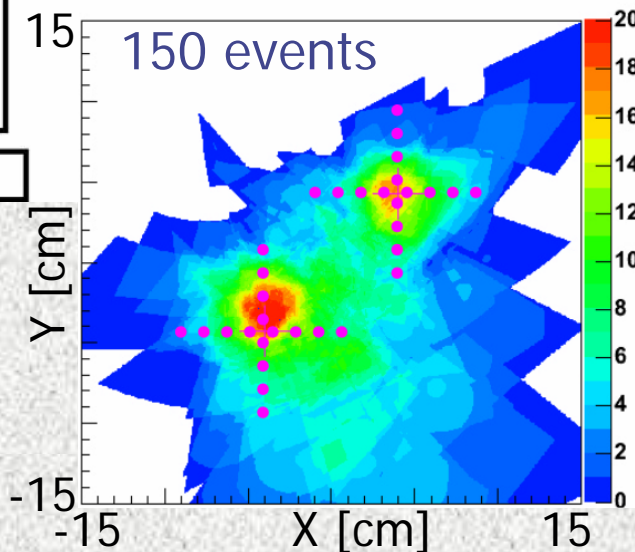
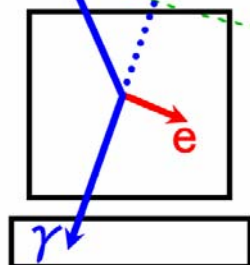
## Advanced Compton法

### 電子の反跳方向の測定

- 到来方向を一意に決定
- 誤差は扇型



少ないeventでも  
2つの線源を分離



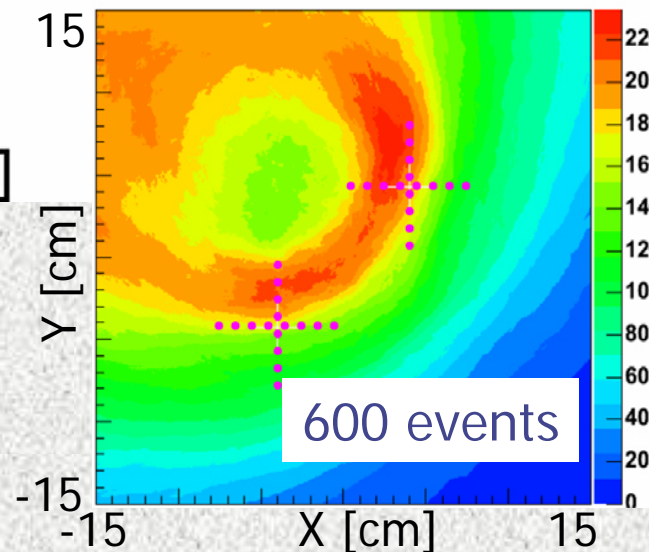
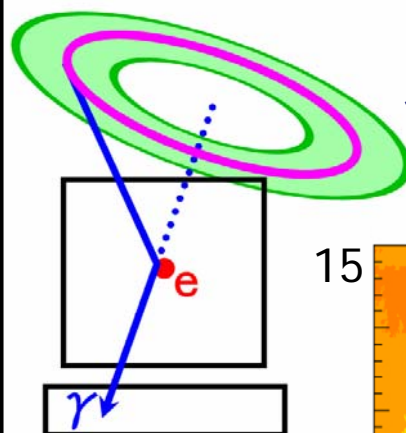
## Classical Compton法 (COMPTEL)

### 電子の反跳方向を破棄

- 到来方向を円形に制限
- 誤差はドーナツ型



全体的に広がった  
ぼけたimage



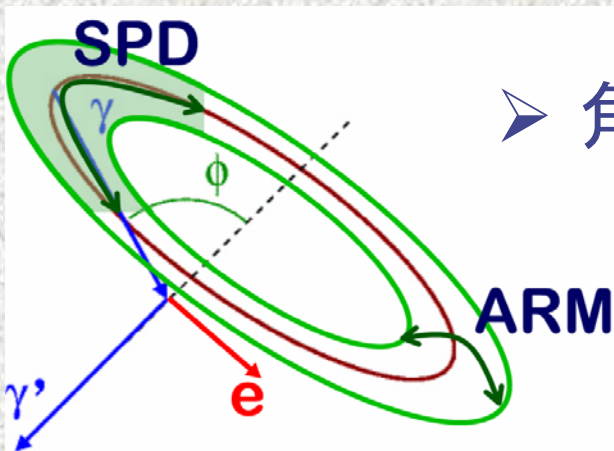
# 完全な再構成による ガンマ線イメージング

散乱  $\gamma$  線のenergy・散乱方向  
反跳電子のenergy・反跳方向

→ 入射  $\gamma$  線の  
energy・到来方向を再構成

試作機により

event毎の  $\gamma$  線の  
完全な再構成に成功!!

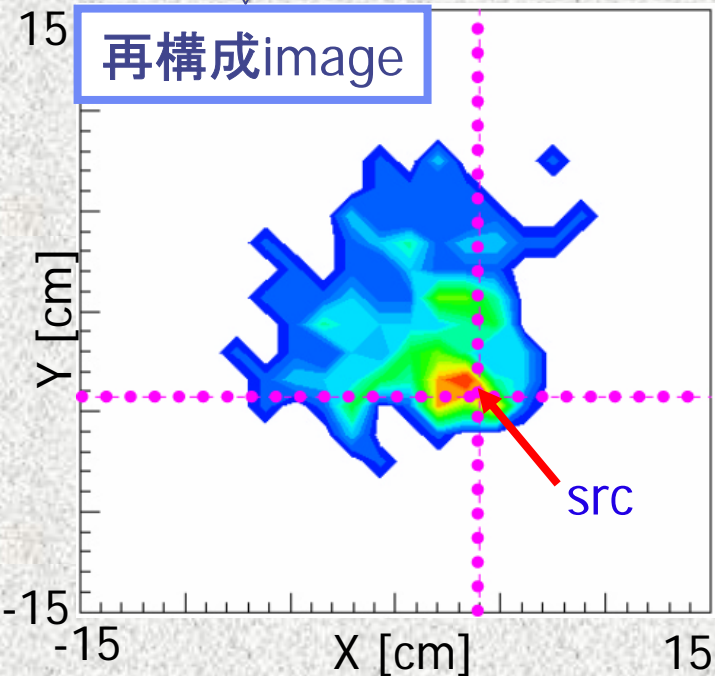
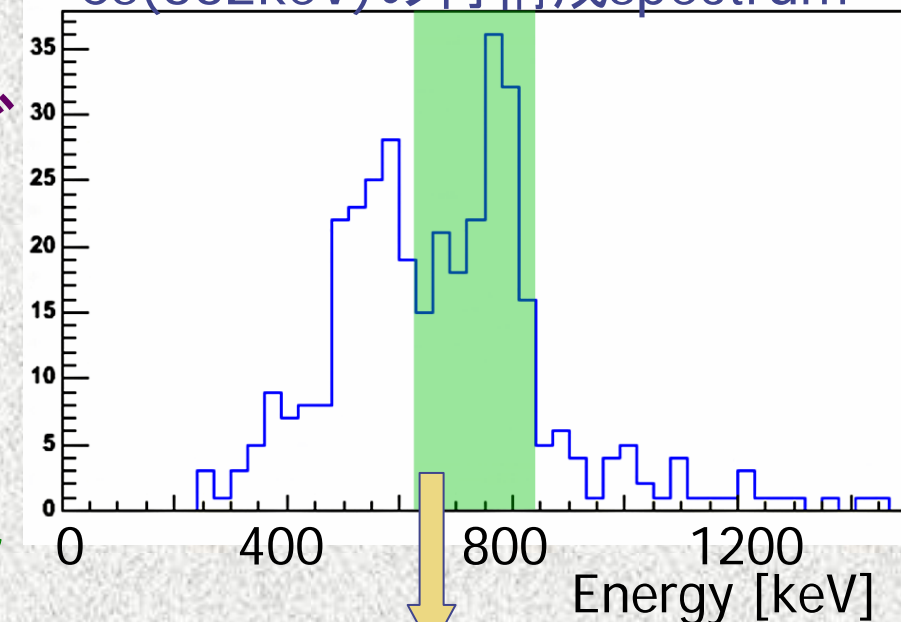


➤ 角度分解能(RMS)

ARM  $\sim 15^\circ$

SPD  $\sim 35^\circ$

$^{137}\text{Cs}$ (662keV)の再構成spectrum



# 2<sup>nd</sup> プロトタイプの開発現状

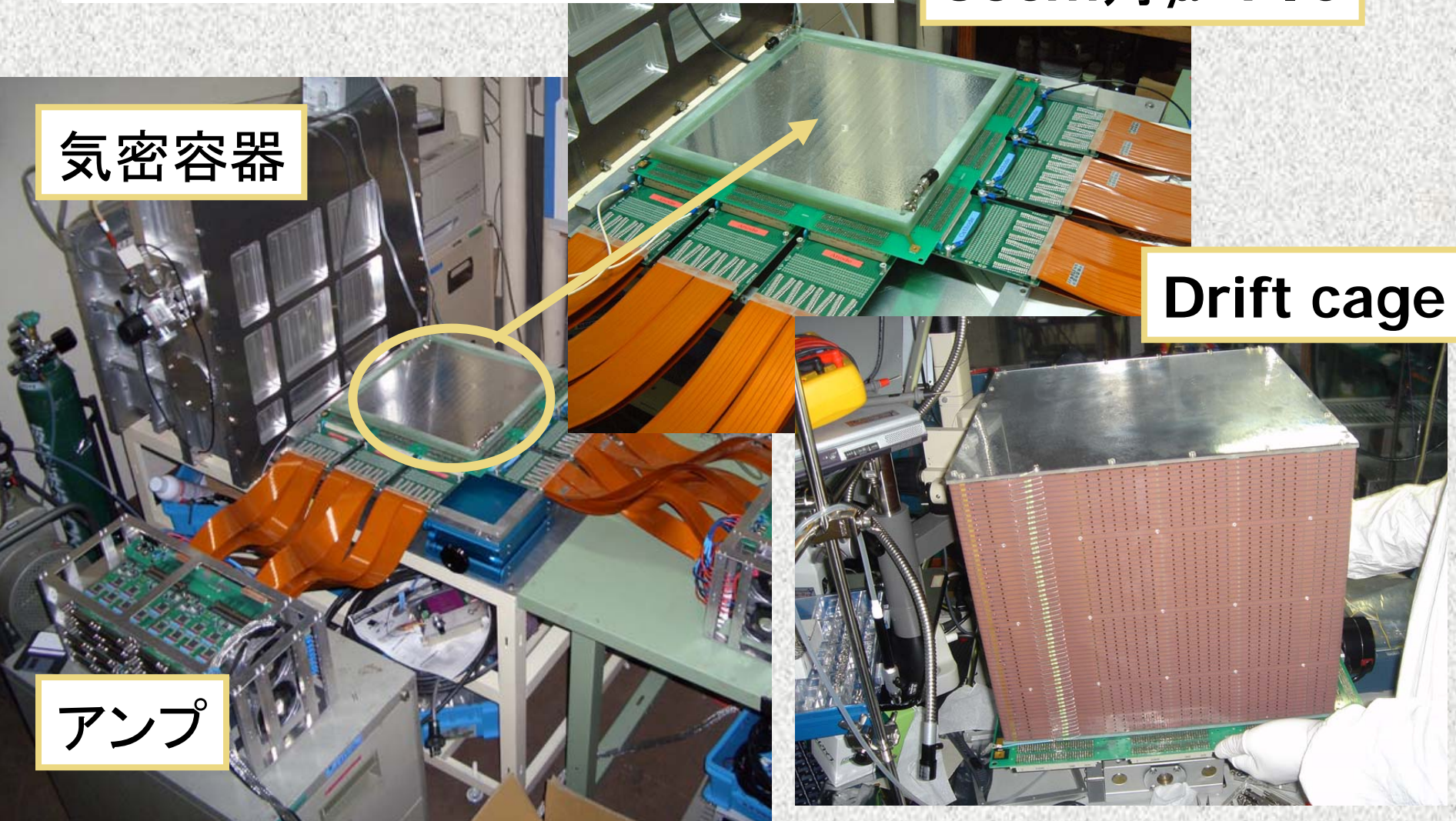
30cm角TPC組立中

30cm角  $\mu$ -PIC

気密容器

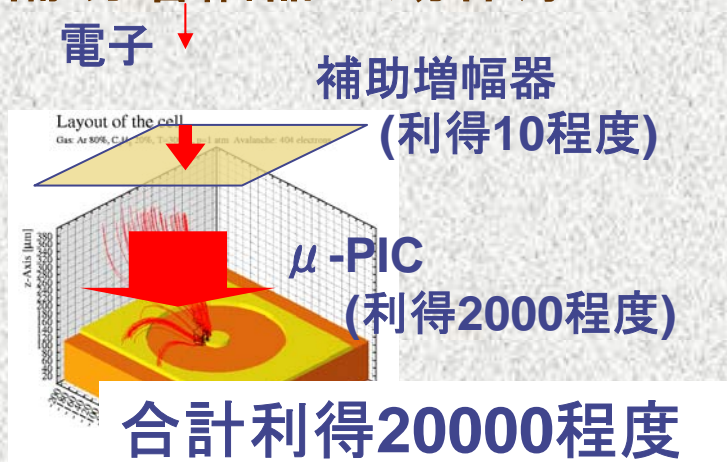
Drift cage

アンプ



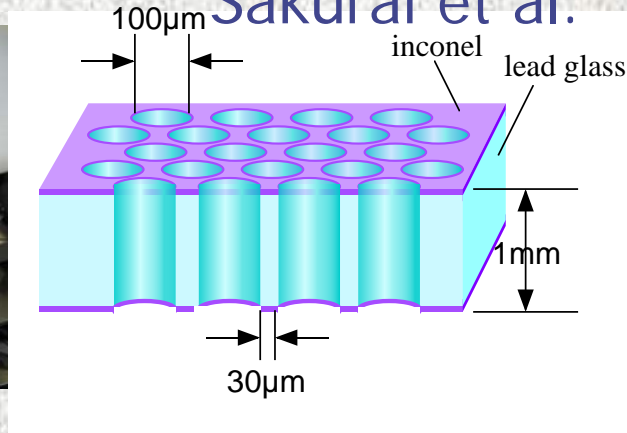
# 補助電子増幅器による利得の向上

## 補助増幅器の動作原理



## option1 キャピラリープレート

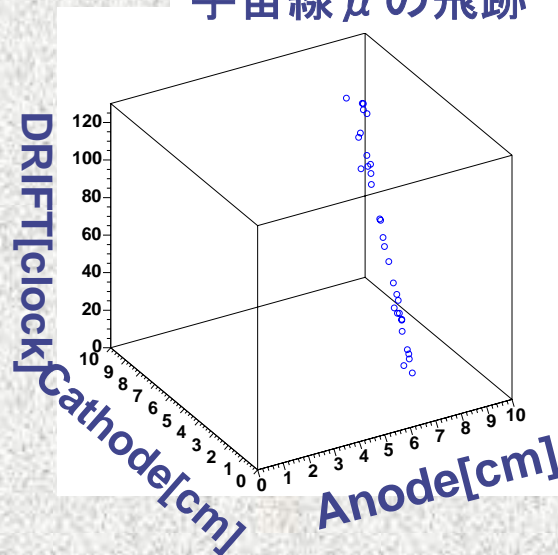
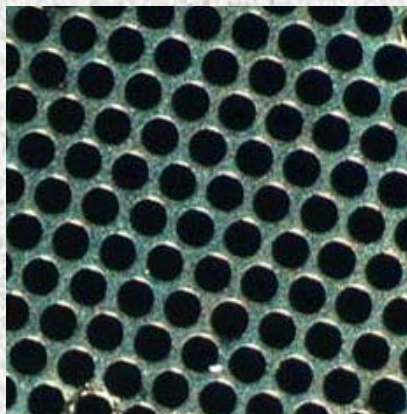
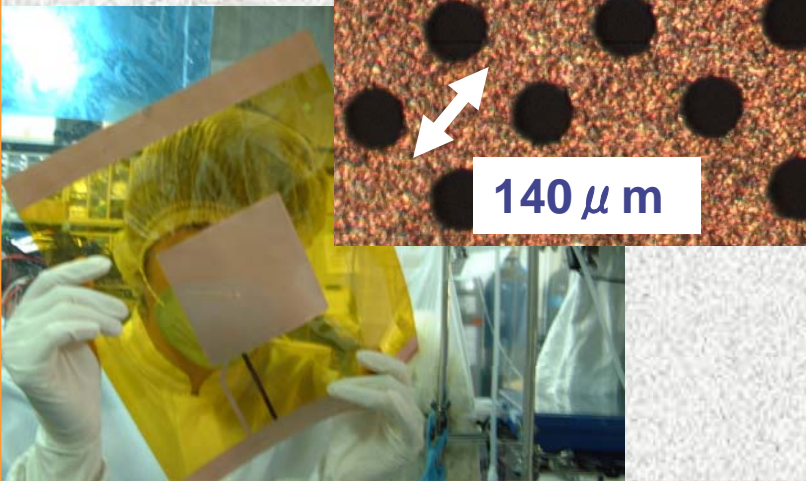
Sakurai et al.



宇宙線  $\mu$  の飛跡

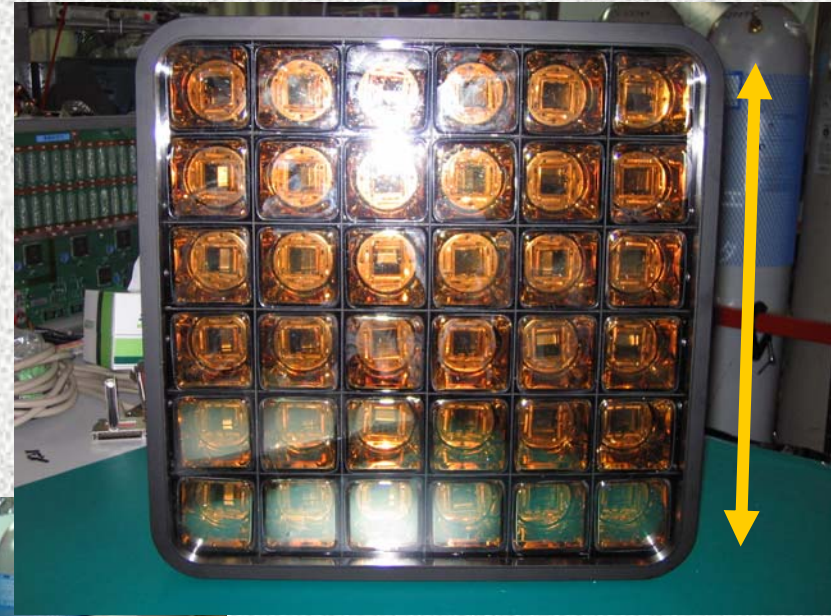
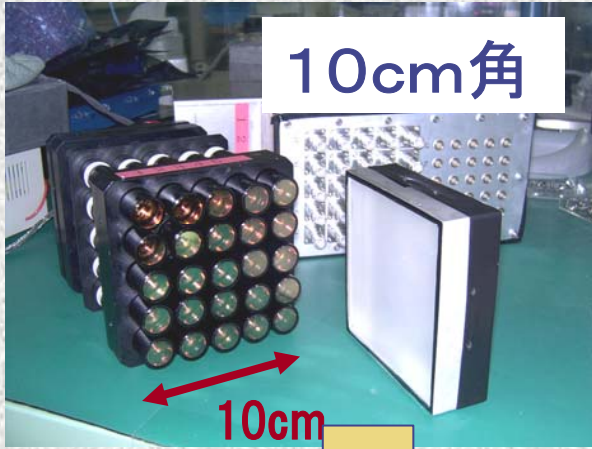
## option2 GEMファイル

Sauli et al.



$V_a = 480V$ ,  $V_c = 1800V$ ,  
uPIC10, 50MHz, P10 1atm

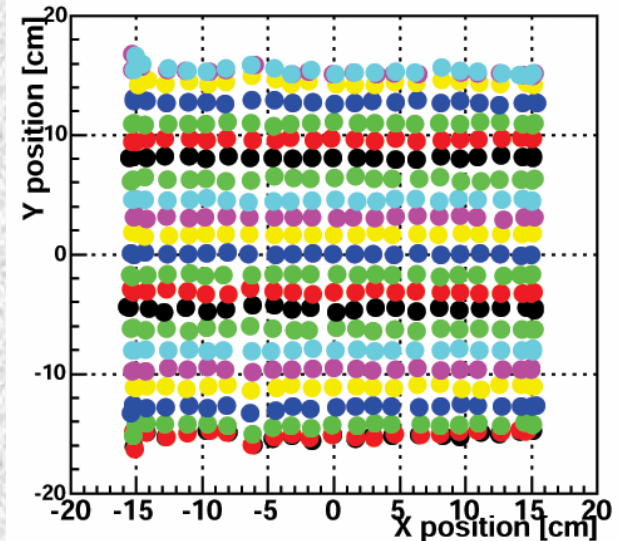
# アンダーカメラの大型化 2" PMT 6×6アレイ



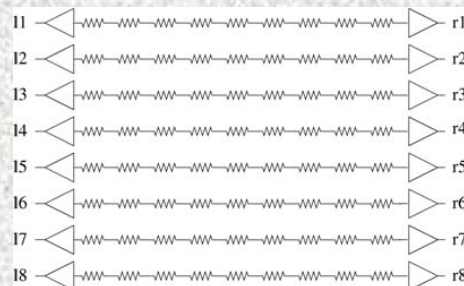
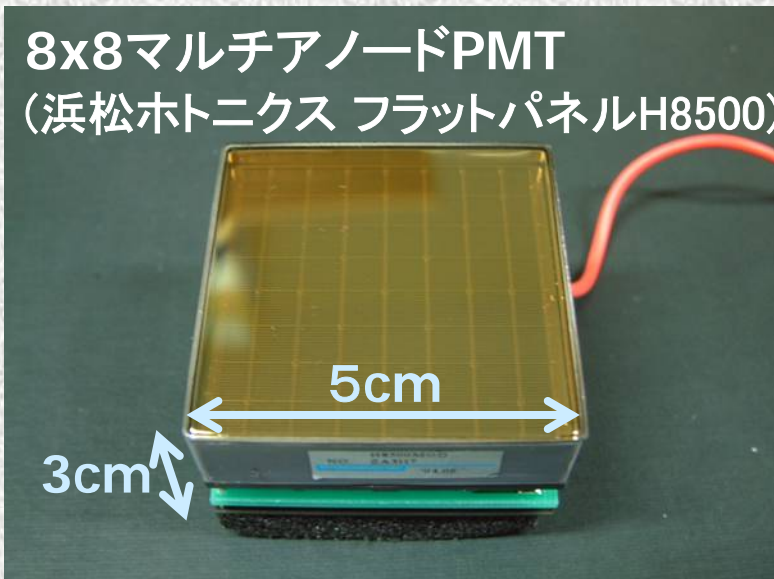
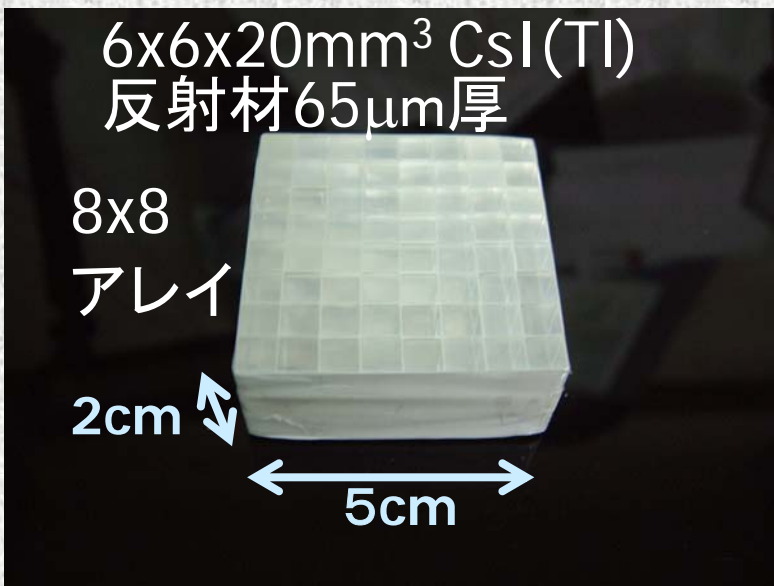
大型化



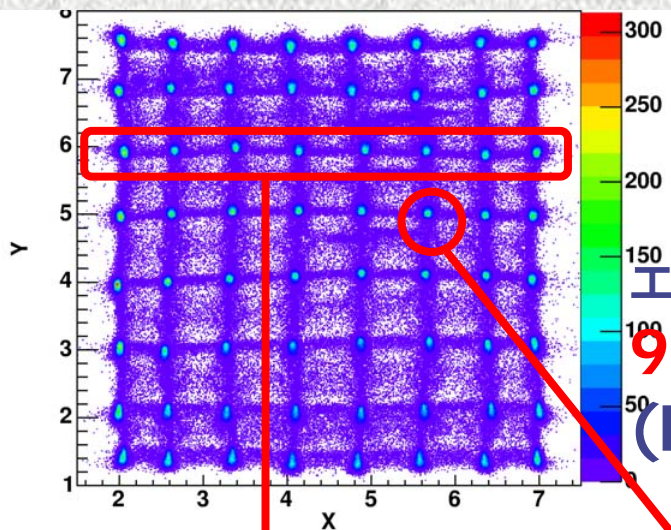
重心計算30cm角有効



# CsI(Tl)ピクセルアレイ+マルチアノードPMT

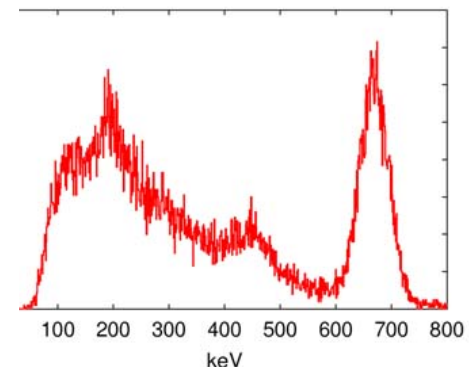
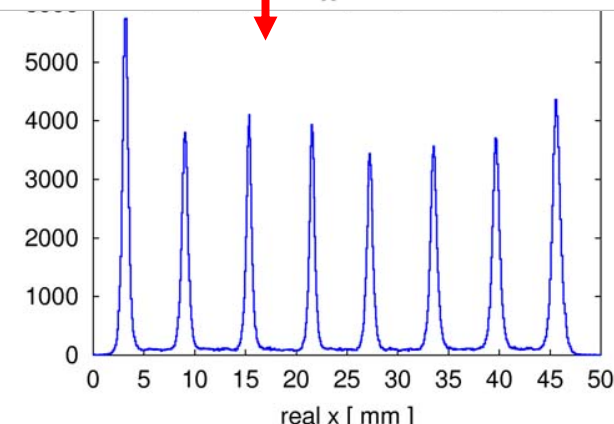


アノード64chを  
抵抗分割で  
16ch読出し



γ線全面照射  
再構成画像

エネルギー分解能  
**9.0% @ 662keV**  
(FWHM)



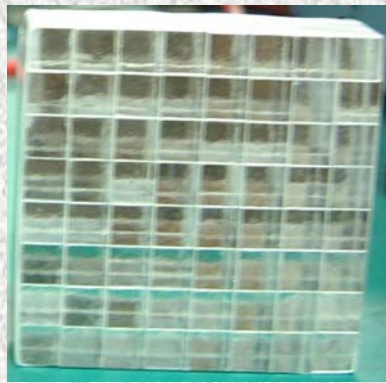


# GSO(Ce)ピクセルアレイ

GSO(Ce) Csl(Tl)

密度(g/cm <sup>3</sup> )	6.71	4.51
輻射長(cm)	<b>1.38</b>	<b>1.86</b>
潮解性	無	弱

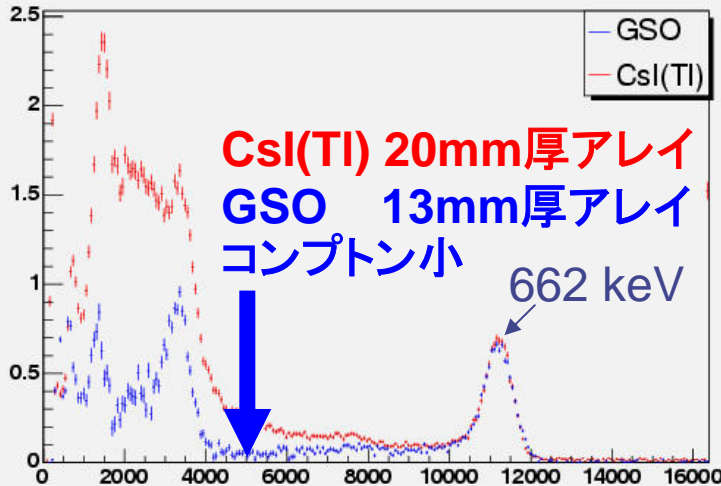
15cm



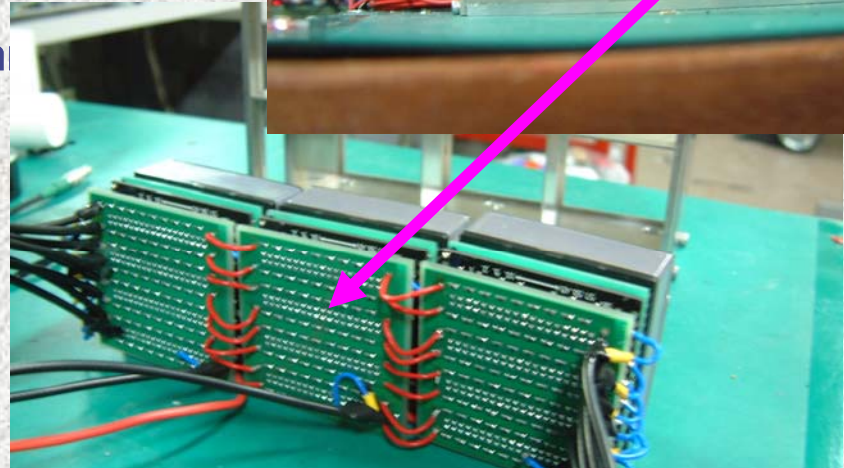
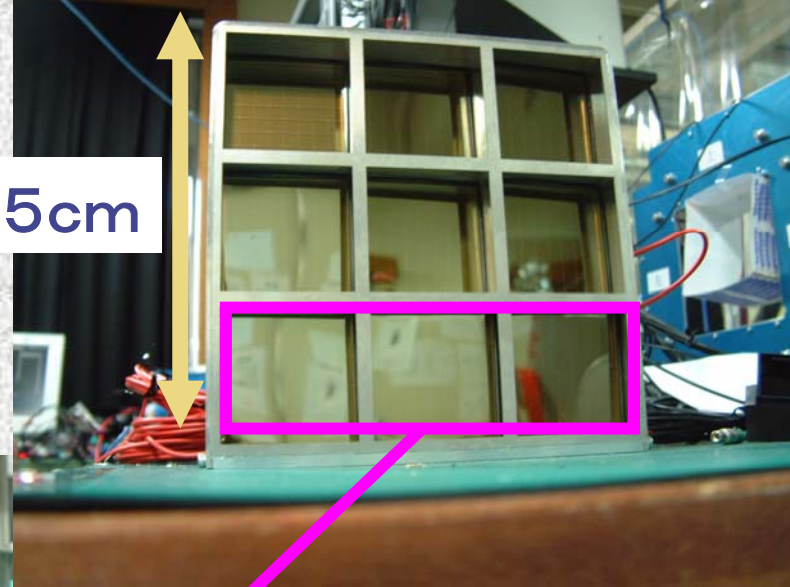
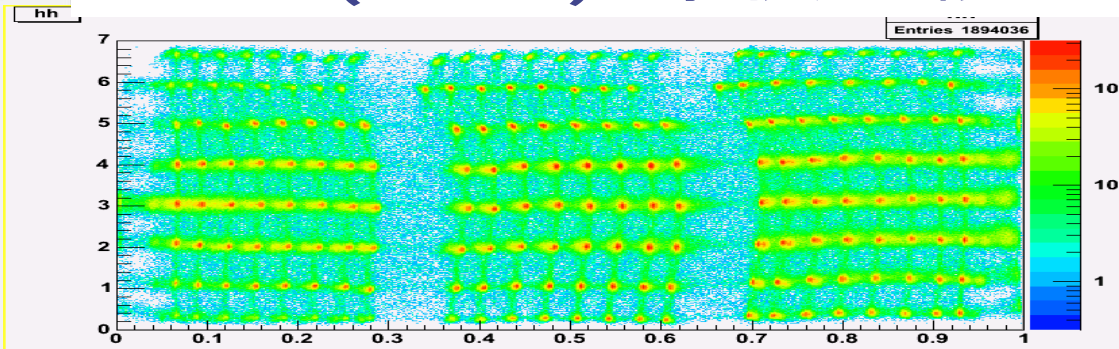
GSO(Ce) 6x6x13mm  
8x8アレイ

49mm

エネルギースペクトル

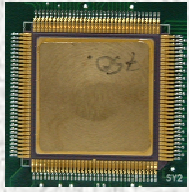


MAPMT(H8500)x3抵抗分割読出し



# ASICを用いたPMTアノード64ch独立読み出し

## 64chエネルギースペクトル



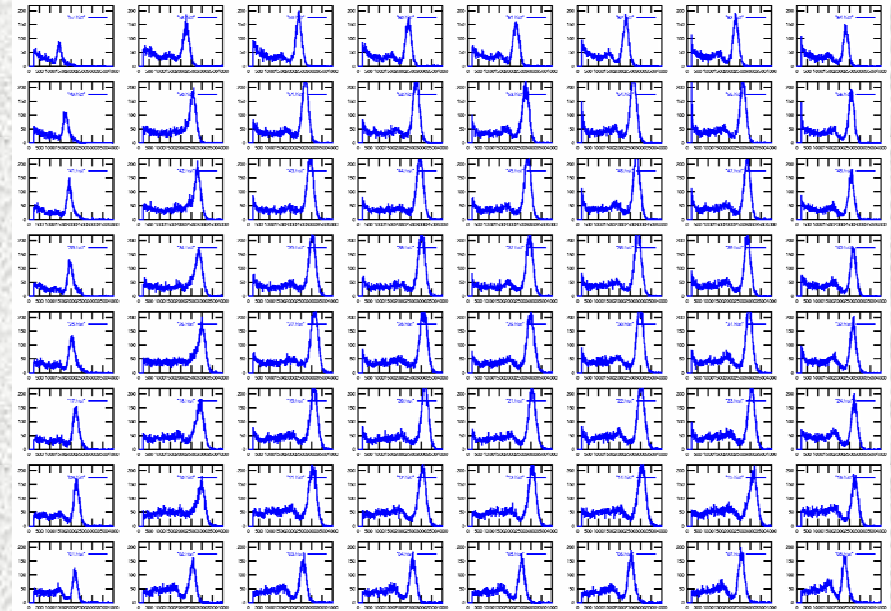
1チップで32ch処理

前置増幅器

波形整形器

ピークホールド

トリガー用コンパレータ



IDE社

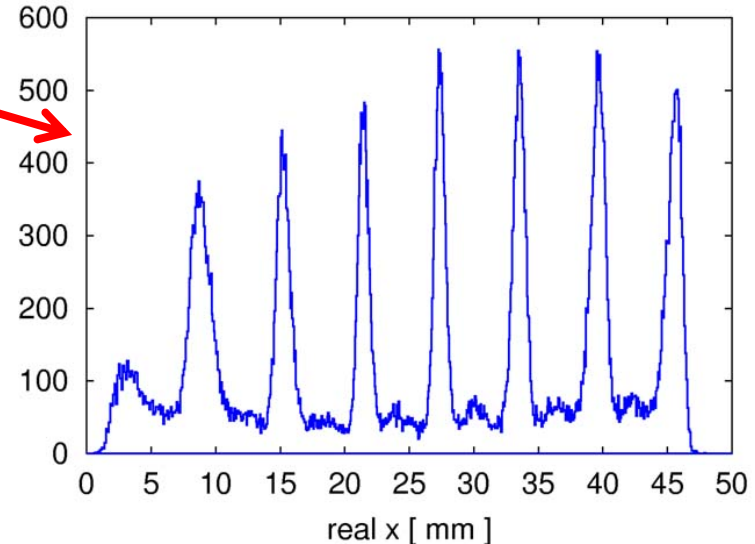
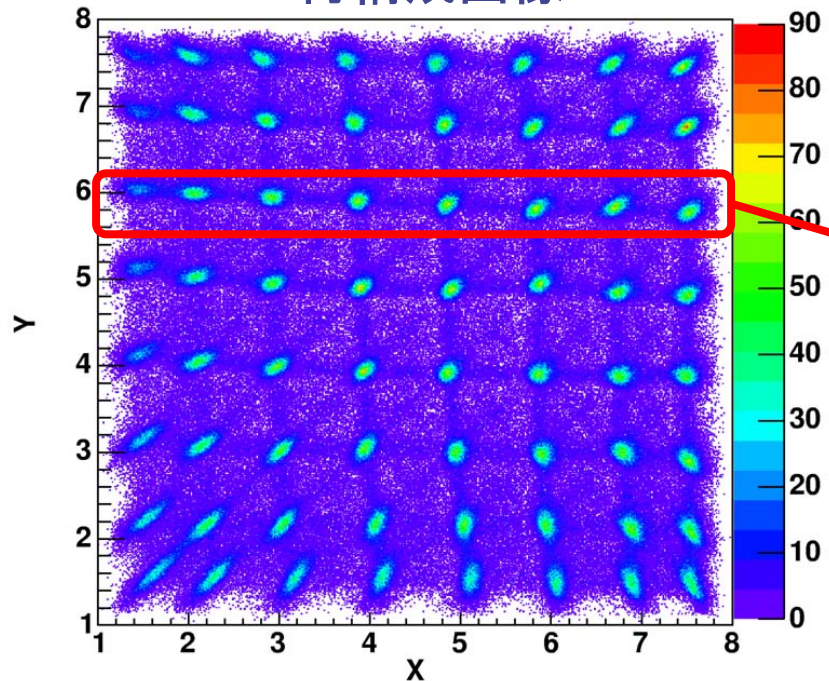
VA32+TA32

CsI(Tl) 6x6x20mm<sup>3</sup> 8x8アレイ

662keV  $\gamma$ 線 全面照射

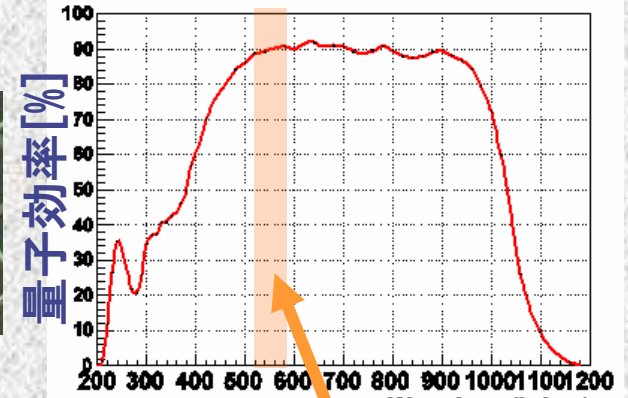
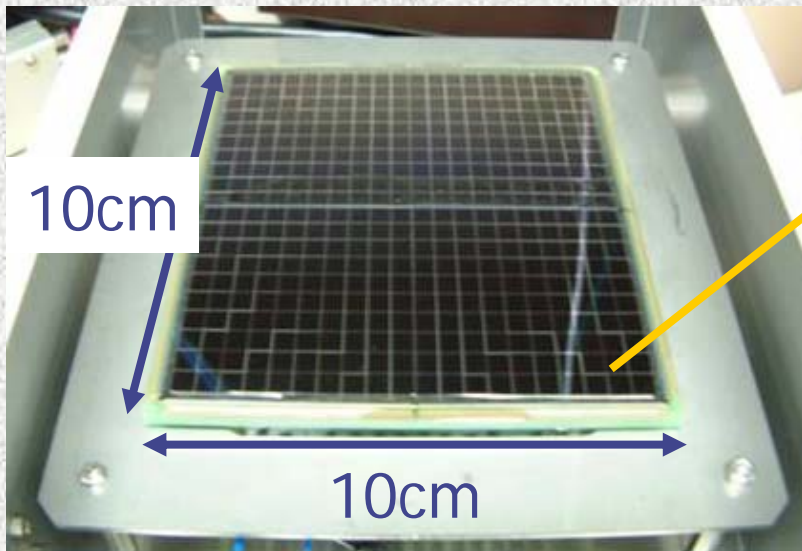
VA/TA read out

再構成画像



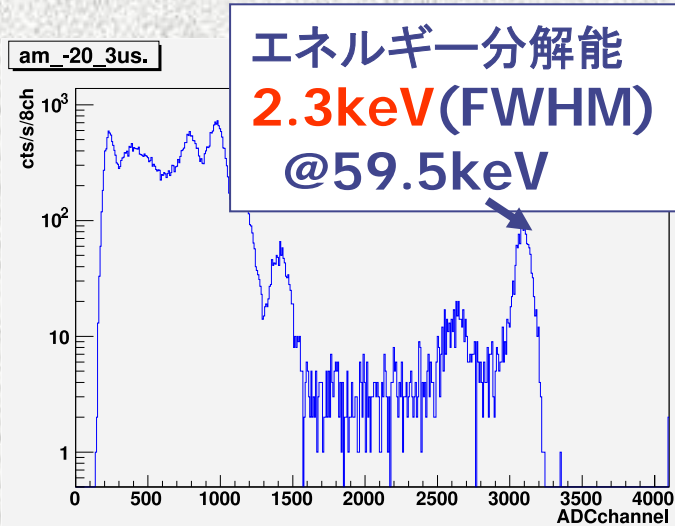
# シンチレータ読出し用のSi PINフォトダイオードアレイ

4.5x4.5mm<sup>2</sup> 20×20chアレイ

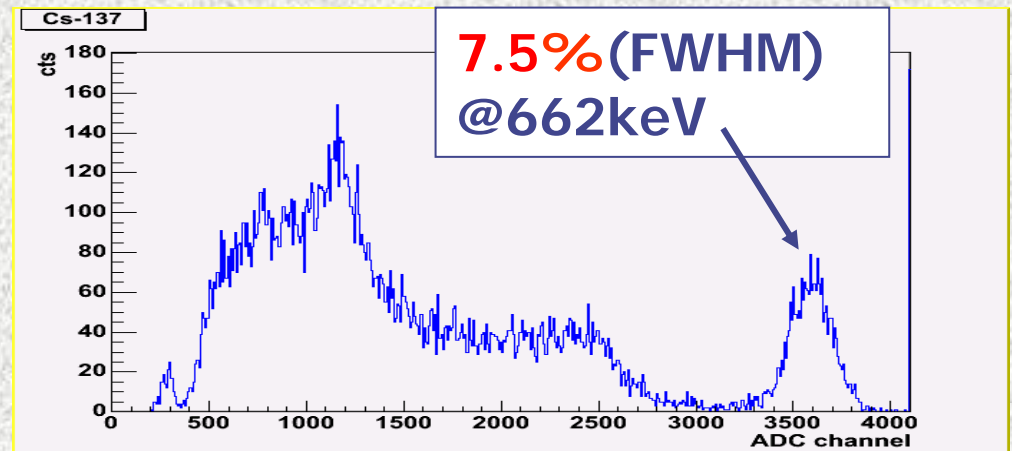


量子効率  
**89%**@540nm(CsI(Tl)  $\lambda$  max)  
端子間容量=**10~15pF**@70V  
暗電流=**0.2~1.1nA**@25°C

## X線直接照射スペクトル



## CsI(Tl)読出しのエネルギースペクトル



# 処理回路

$\mu$ -PIC プリアンプ  
(Bipolar ASIC)

ATLAS実験用変更

4ch/チップ

プリアンプ時定数80ns

Comparator(LVDS出力)

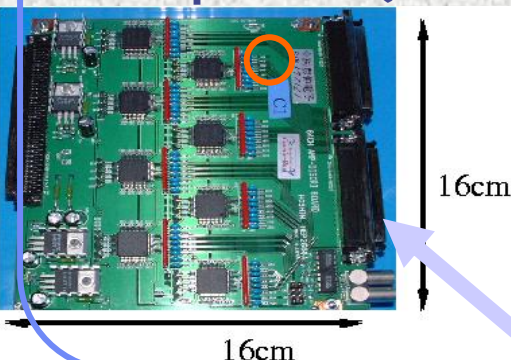
→ CMOS ASIC

高密度・  
消費電力(~1/10)

1次試作品

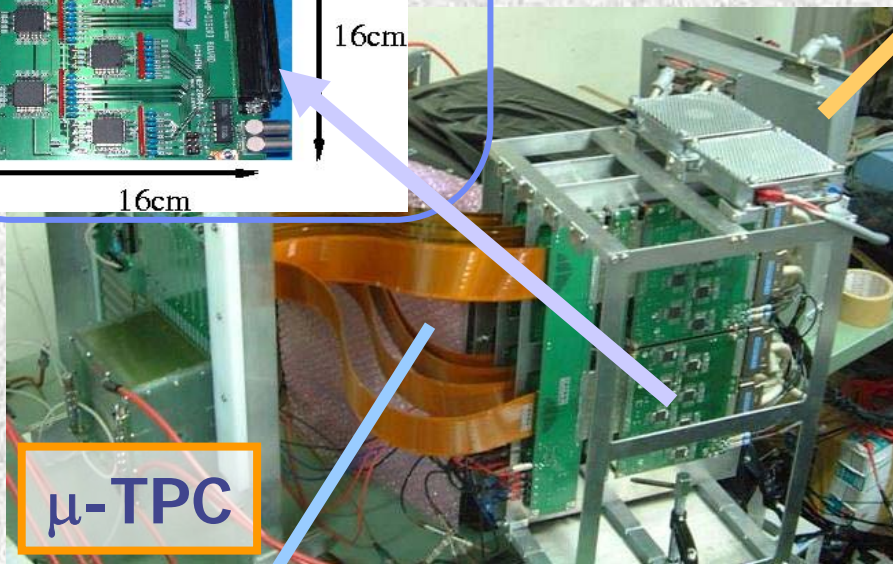
8ch/チップ

KEK共同開発中



16cm

16cm



$\mu$ -TPC

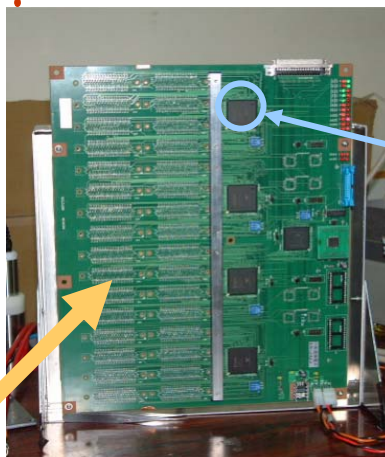
シンチレータ読出

ディスクリート部品  
市販CMOS ASIC

最適化

→ CMOS ASIC  
KEK共同開発

$\mu$ -TPC位置演算回路



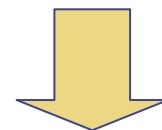
10cm角 $\mu$ -PIC用

1024ch入力

FPGA × 6

50MHz

Ar  $\Delta z=0.8\text{mm}$   
/CLK



30cm角 $\mu$ -PIC用

1536ch入力

FPGA × 8

100MHz

Ar  $\Delta z=0.4\text{mm}$   
/CLK

SDRAM 512MB

USB2.0

52cm



30cm

# まとめと今後

- ◆ ガスTPCと位置検出シンチレータを組み合わせた10cm立方プロトタイプを用いて、event毎のsub-MeVガンマ線の再構成に成功
  - ⇒ continuum成分の再構成も可能
- ◆ 気球実験搭載用+2<sup>nd</sup>プロトタイプ30cm立方検出器
  - 製作中: 30x30cm<sup>2</sup>  $\mu$ -PIC+CMOS ASIC, FPGA位置演算 @100MHz, GEM/キャピラリー, 37x37cm<sup>2</sup> Angerカメラ, 6x6mm<sup>2</sup> CsI(Tl), GSOピクセルアレイ+MAPMT, Si PDA
- ◆ 0.2~30MeVガンマ線全天サーベイ(+偏光測定)を行うため、衛星・ISS搭載用50cm立方検出器検討
  - ⇒ COMPTELより1桁以上良い感度達成