



2006/05/18

ガス飛跡検出器を用いた MeV- γ 線コンプトンカメラの開発

京都大学 理学研究科
宇宙線研究室
高田 淳史



Index

- ◆ MeV- γ 線でみる宇宙
- ◆ MeV gamma-ray Imaging
- ◆ μ -PIC & μ -TPC
- ◆ prototype性能評価
- ◆ SMILE

MeV Gamma-Ray Astronomy

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 γ 線

銀河面: 長寿命の同位体 ^{26}Al ・ ^{60}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・ π^0 の崩壊に伴う放射

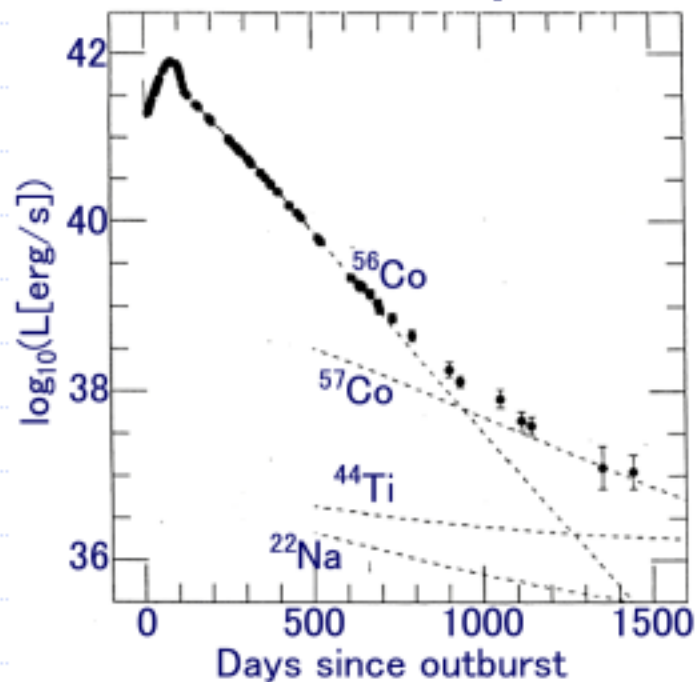
◆その他

γ 線パルサー, 太陽フレア

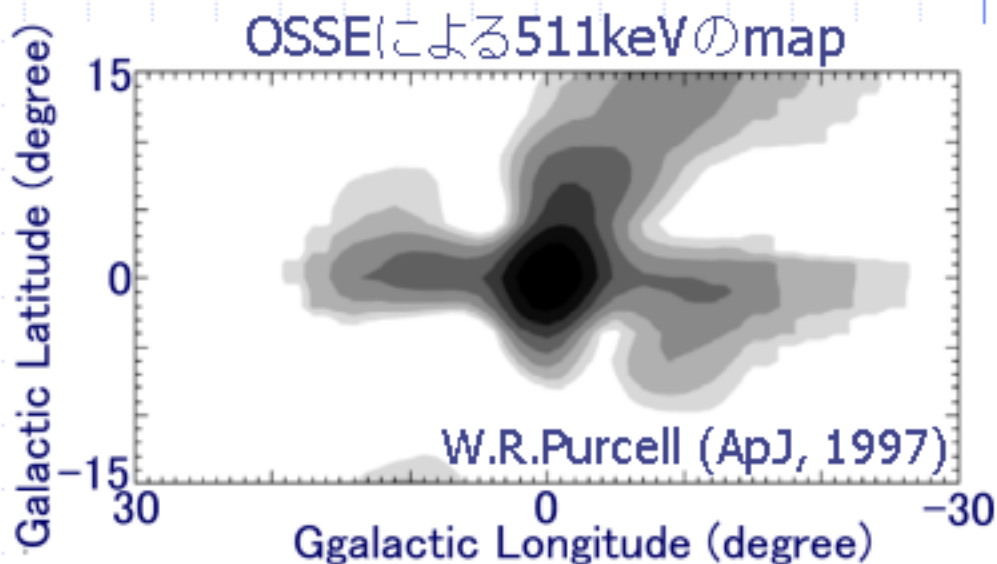
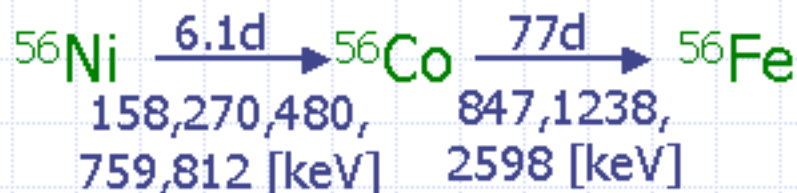
電子・陽電子対消滅線, 中性子捕獲, etc.

核 γ 線, 511keV

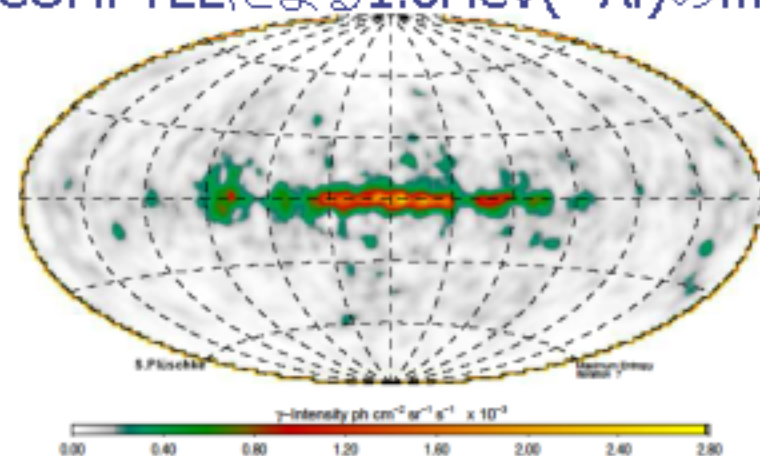
SN1987Aの光度曲線 (赤外～紫外)



R.A.Chevalier (Nature, 1992)

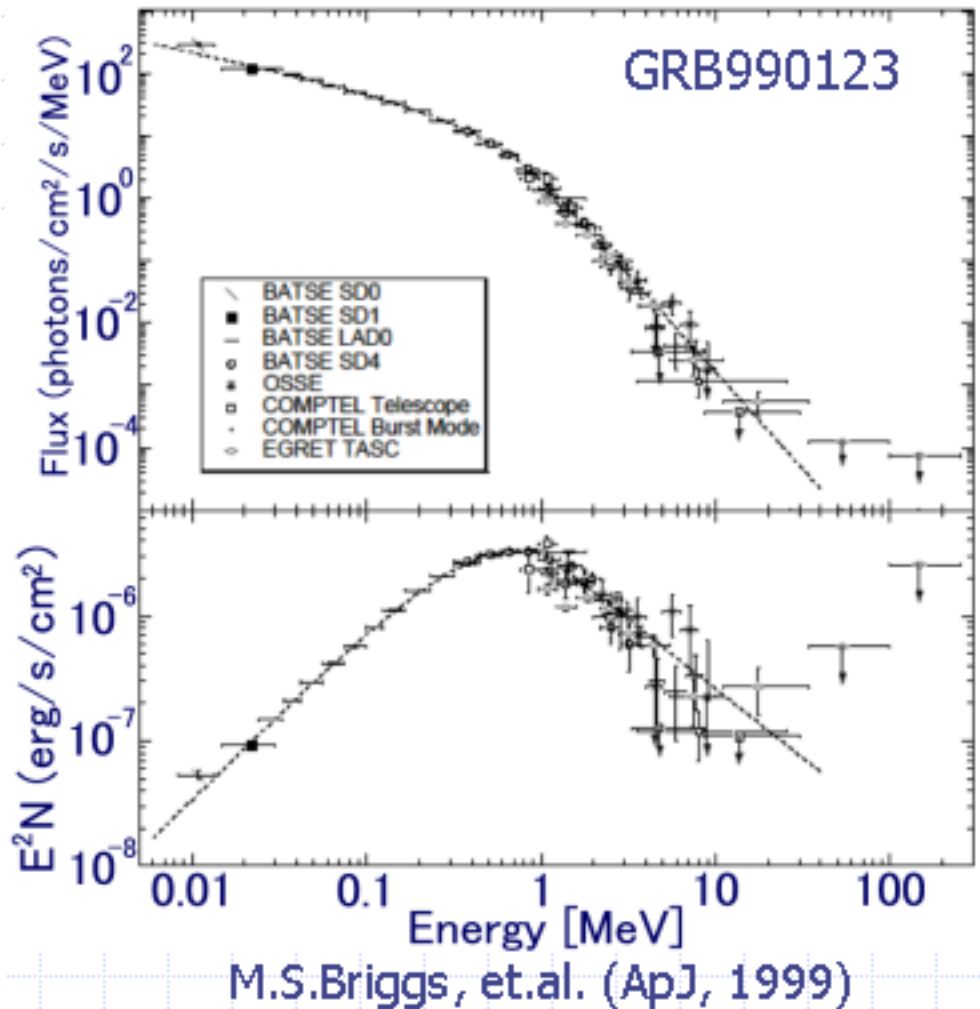
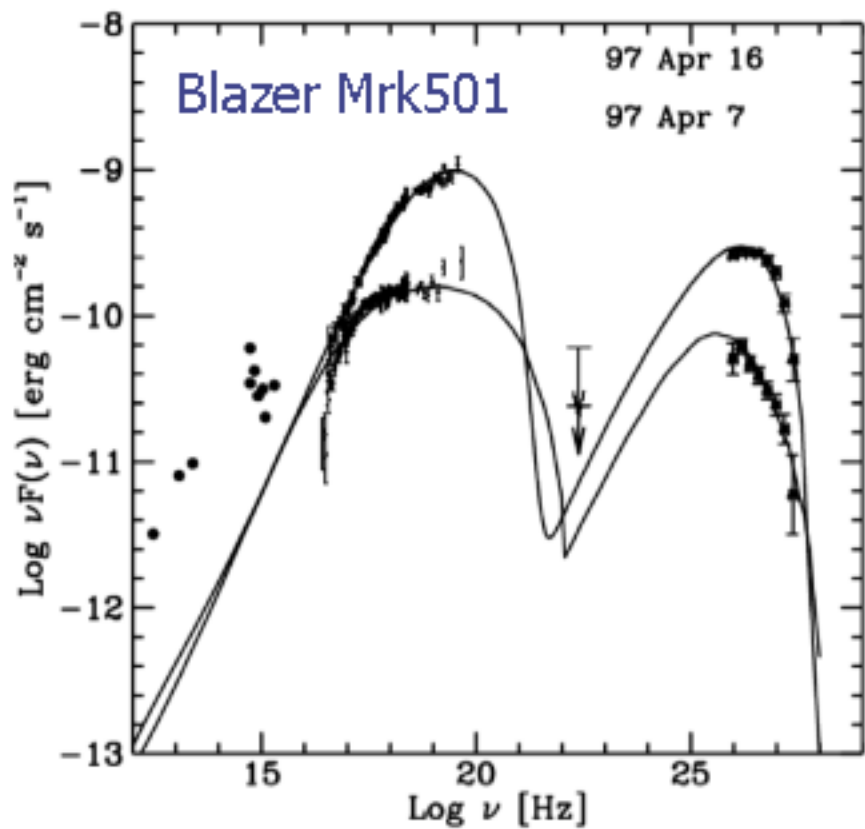


COMPTELによる1.8MeV(²⁶Al)のmap



S.Pluschke, et. al. (astro-ph/0104047)

粒子加速



L.Maraschi, F.Tavecchio (astro-ph/980391)

活動銀河核のジェット

⇒ シンクロトロン+逆コンプトン

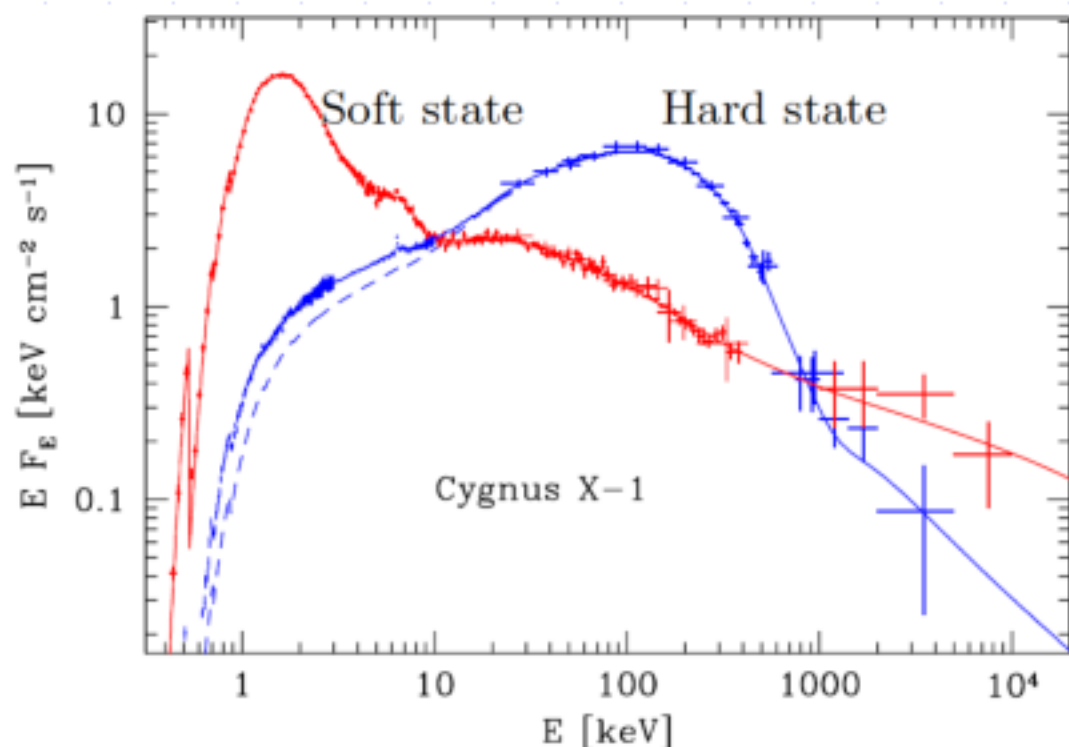
GRB

⇒ シンクロトロン放射

⇒ 強い偏光

W.Coburn, S.E.Boggs (Nature, 2003)

Black Hole



恒星質量BH

Soft state

黒体放射

+ 非熱的電子による散乱

Hard state

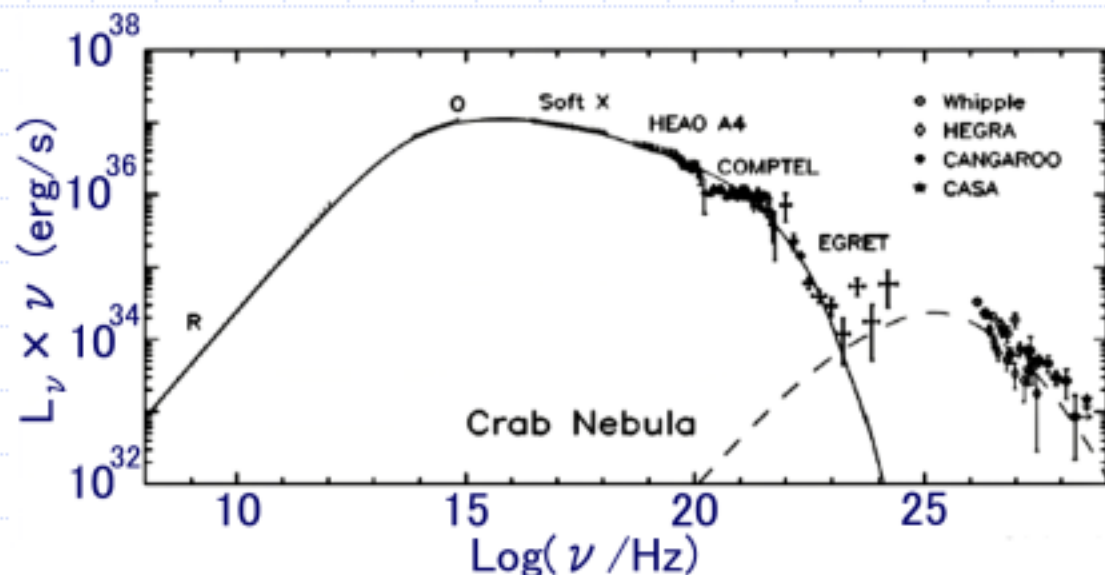
熱的電子による散乱

M.L.McConnel, et. al. (ApJ, 2002)

Primordial BH

$\sim 10^{15}$ gのPBH \Rightarrow ~ 100 MeVの熱的放射(Hawking放射)

γ線パルサー (Crab)



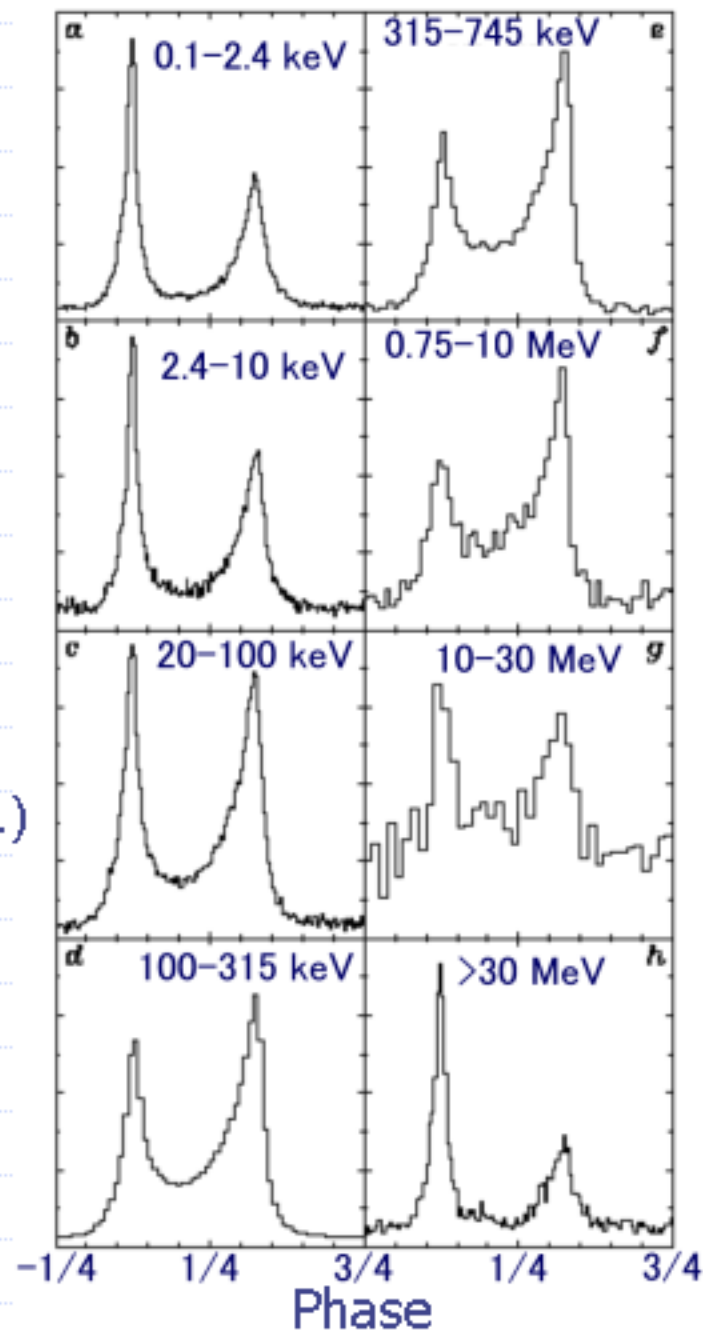
F.A.Aharonian, A.M.Atoyan (astro-ph/9803091)

Pulsar nebula

⇒ シンクロトロン + 逆コンプトン

Pulsar

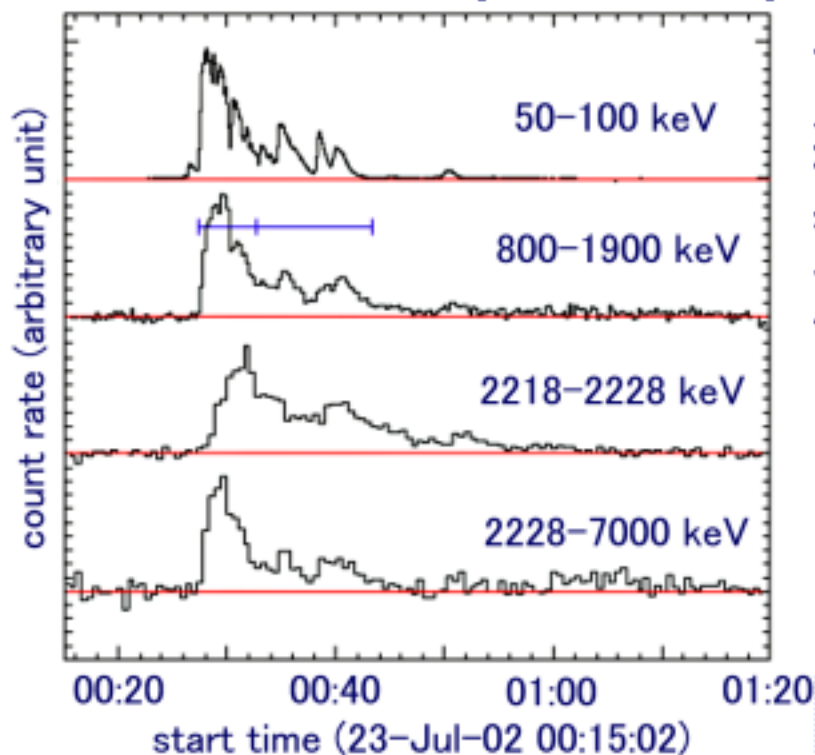
⇒ 100keV~10MeVでpeakの大小逆転
“bridge”の存在



L.Kuiper, et al (A&A 2001)

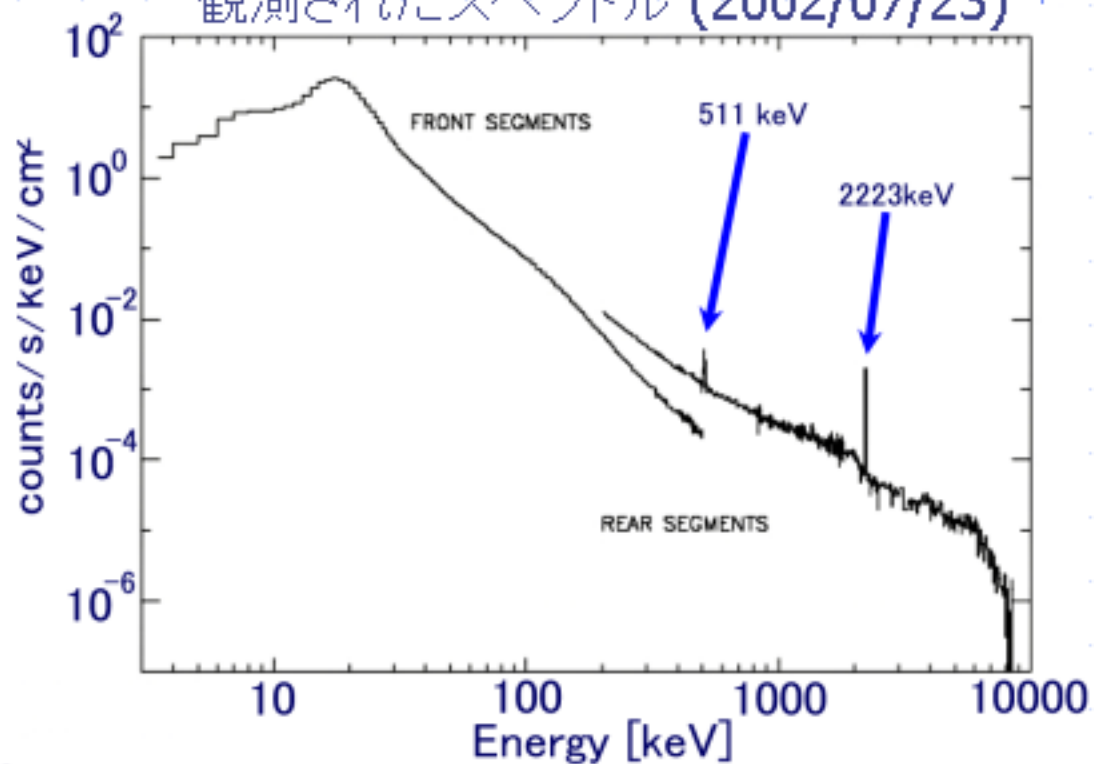
太陽フレア

フレアの光度曲線 (2002/07/23)



電子の加速 \Leftrightarrow hard X-ray
ionの加速 \Leftrightarrow 2.2MeV

観測されたスペクトル (2002/07/23)



D.M.Smith (astro-ph/0404594)

明るい場所は優位にズレあり

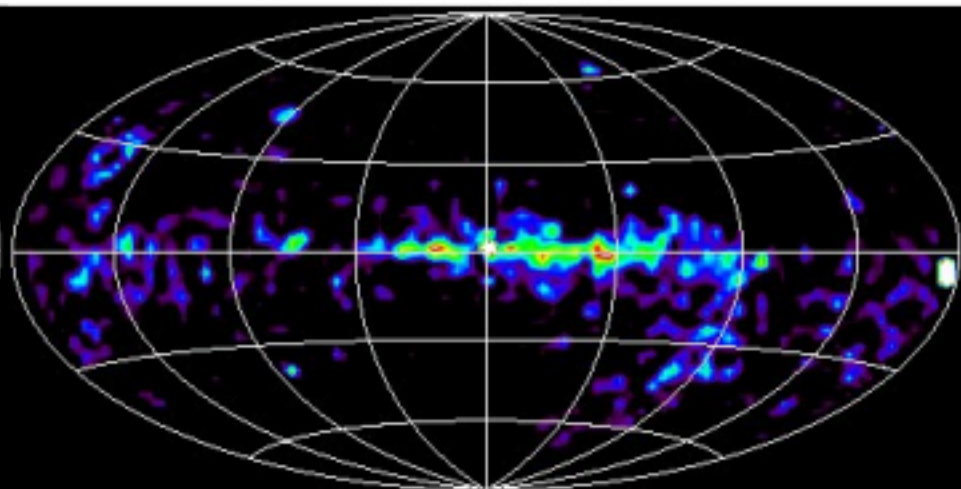
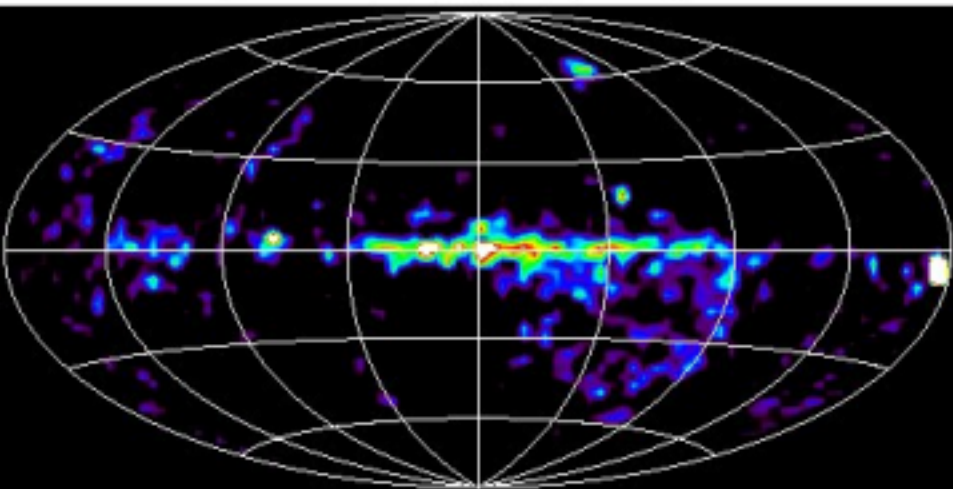
\Rightarrow パリティ 2004年5月号

COMPTELによる全天map

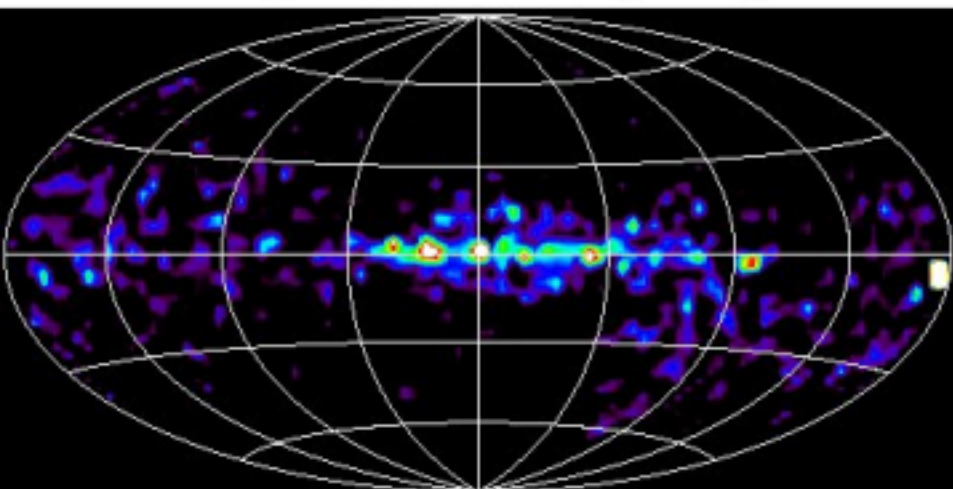
<http://wwwgro.unh.edu/comptel>

1-3 MeV Cycle 1-6 SKYMOS/Cray T3E

3-10 MeV Cycle 1-6 SKYMOS/Cray T3E

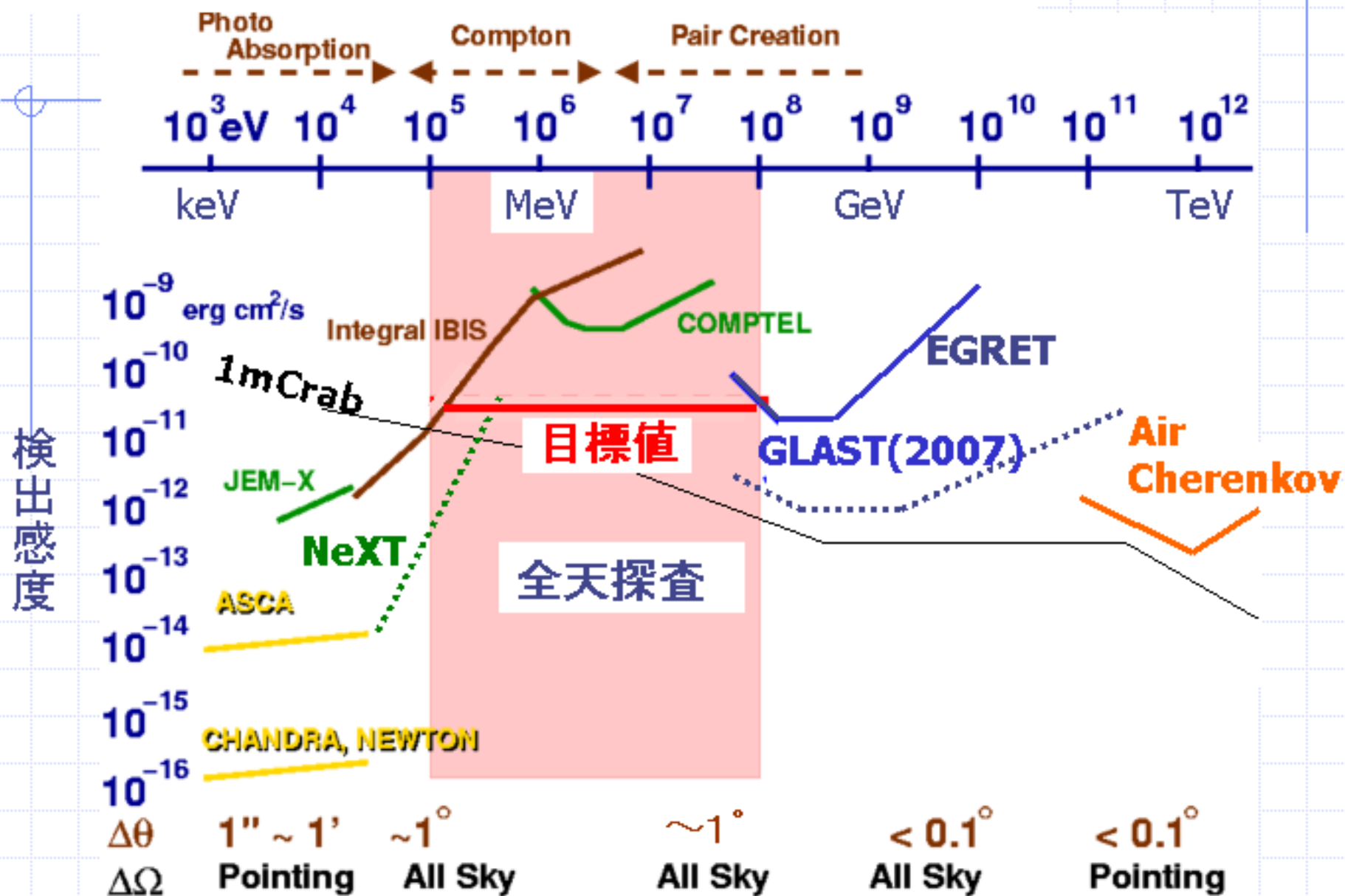


10-30 MeV Cycle 1-6 SKYMOS/Cray T3E



- COMPTEL (1-30MeV)
32 sources
Schönfelder, et al.(2000)
- EGRET (>100MeV)
271 sources
Hartman, et al.(1999)

これまでのX・γ線検出感度



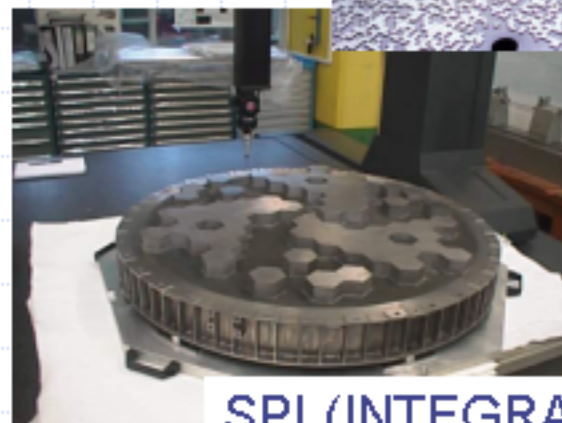
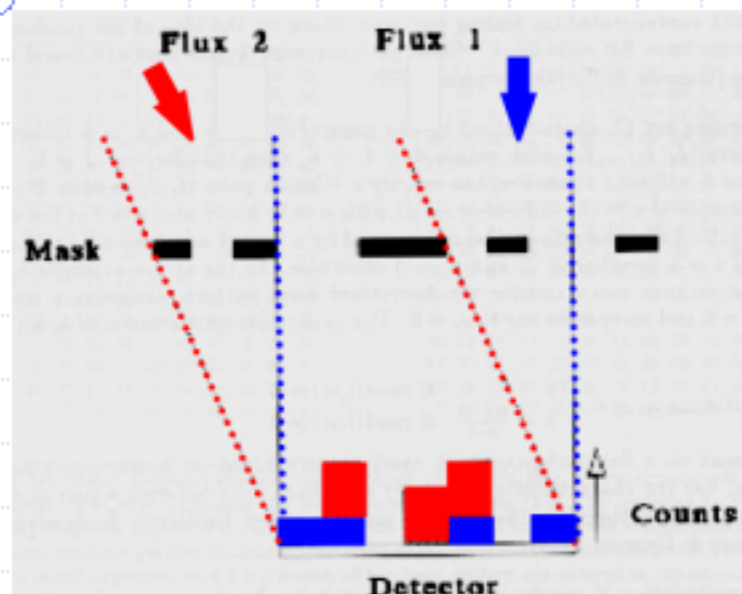
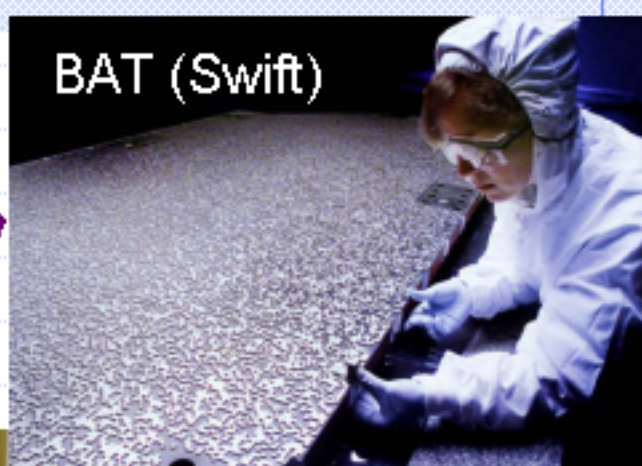
MeV Gamma-ray Imaging

MeV- γ imaging

- ◆ position-sensitive detector
+ collimator (OSSE)
- ◆ Compton Imaging (COMPTEL)
⇒ μ -PIC, MEGA, CdTe, ACT, TIGRE, LXeGRIT, ...
- ◆ Coded Aperture Imaging (INTEGRAL)
⇒ BAT/SWIFT, EXIST, ...
- ◆ Gamma-Ray Lens
⇒ Claire, ...

Coded aperture imaging

BAT (Swift)



SPI (INTEGRAL)

maskの影の絵から方向ごとのfluxを推定



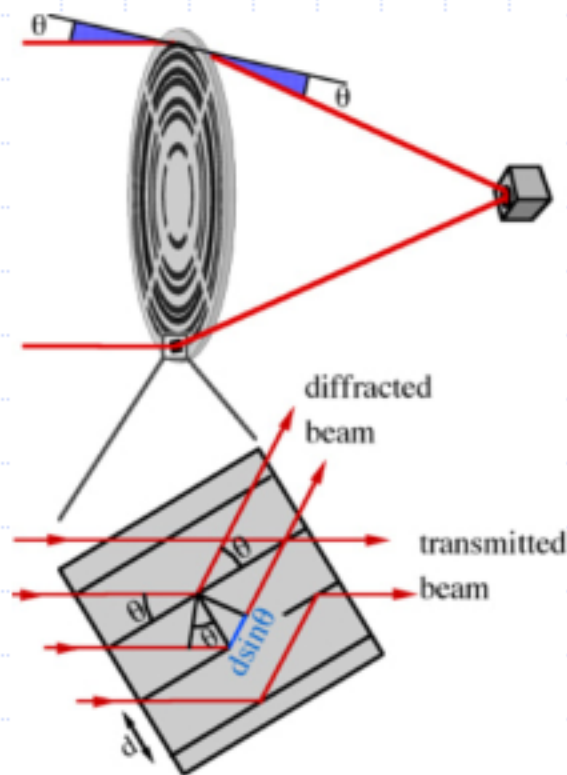
- maskを通過しているかどうかは知りえない
- backgroundの同定が難しい
- 影の形がわかる程度のphoton数が必要
(\sim maskの開口率 \times detectorの要素数)



よほど明るくないと難しい

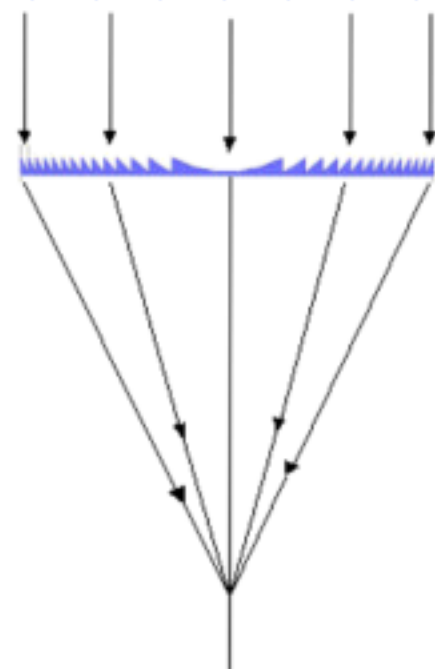
Gamma-Ray Lenses

Cliare : Bragg反射を利用



⇒ energyはほぼ固定
(460~520, 825~910keV)

Fresnel lens

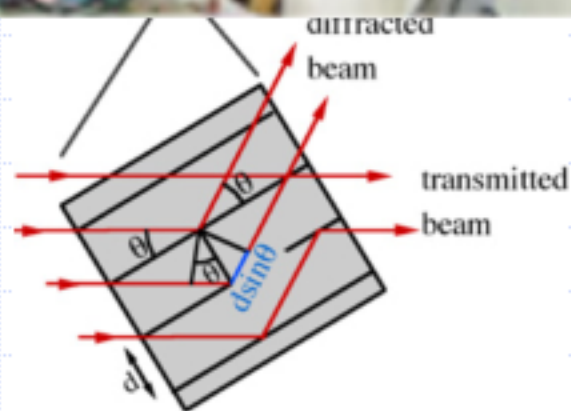


(astro-ph/0308445)

⇒ 焦点距離 $\sim 10^9$ m

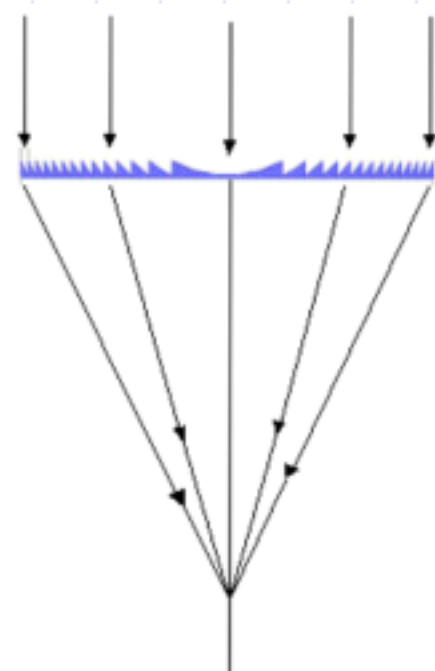
Gamma-Ray Lenses

Cliare : Bragg反射を利用



⇒ energyはほぼ固定
(460~520, 825~910keV)

Fresnel lens



(astro-ph/0308445)

⇒ 焦点距離~ 10^9 m

COMPTEL (GRO衛星:1991~2000)

コンプトン散乱を利用した検出器

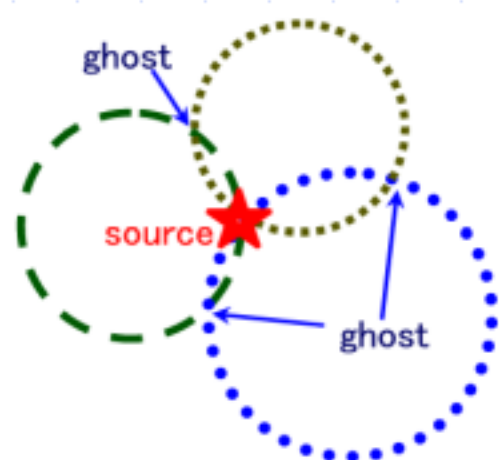
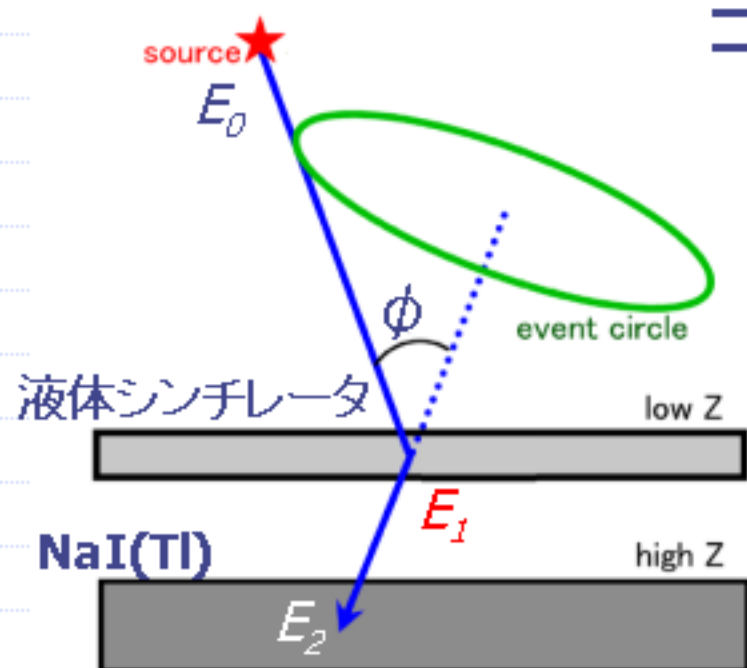
- ◆ 散乱 γ 線・反跳電子のエネルギー
⇒ 入射 γ 線のエネルギー
 γ 線の散乱角

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

- ◆ 散乱点・散乱 γ 線の吸収点
⇒ γ 線の散乱方向
- ◆ 電子の反跳方向(2自由度)は破棄

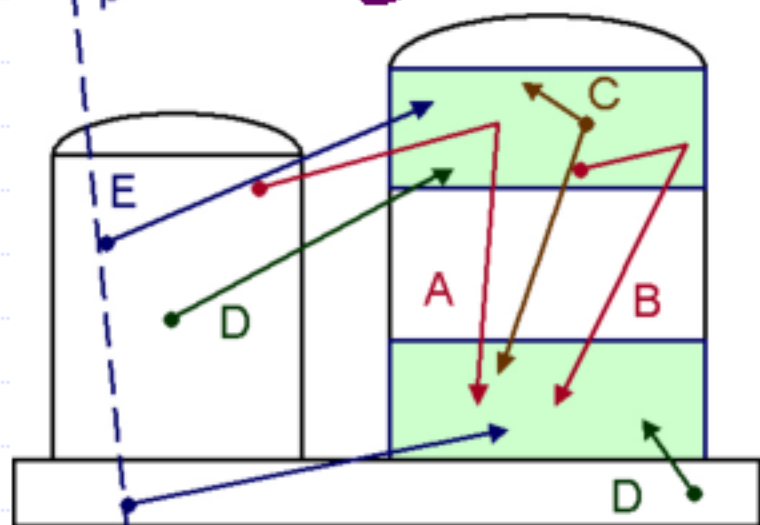


- 到来方向を円形(event circle)に制限
- 自由度が1つ足りないため
円上のどこから到来したかは不定



Background of COMPTON

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



A: external γ } 取り除けない
B: internal γ } γ 線background

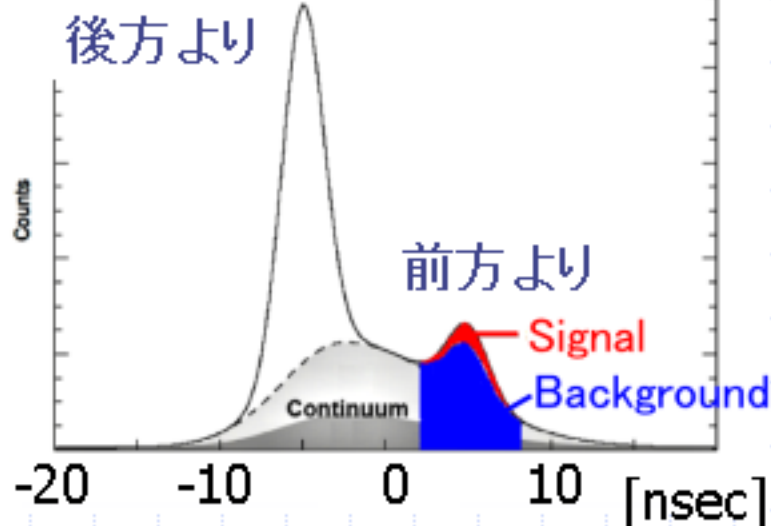
C: two γ

D: random coincidence

E: proton-induced γ

Other background
neutron
electron
大気からの γ 線

上下の検出器のTOF



COMPTONでは
上下の検出器のTOFを用いて
ある程度除去

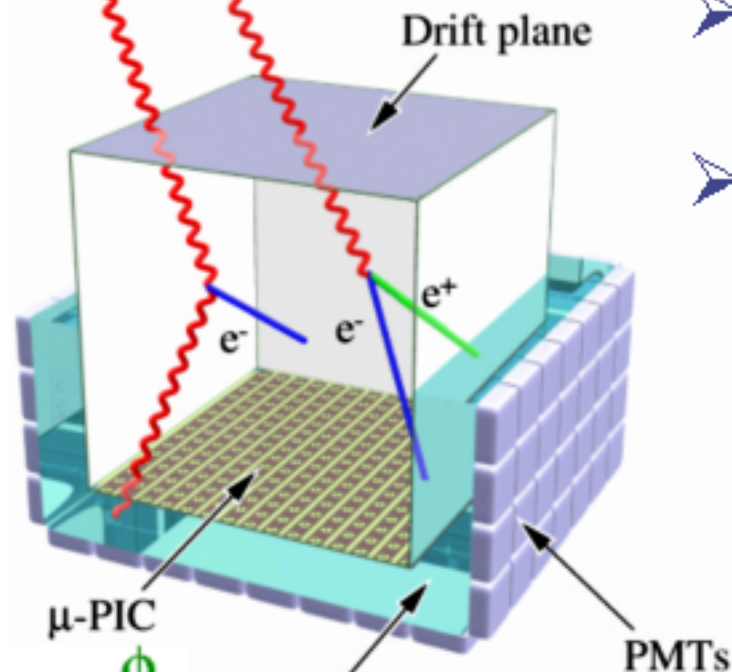


Backgroundは落としきれず
SNIは非常に悪い

μ -PIC, μ TPC & MeV camera

Advanced Compton Imaging

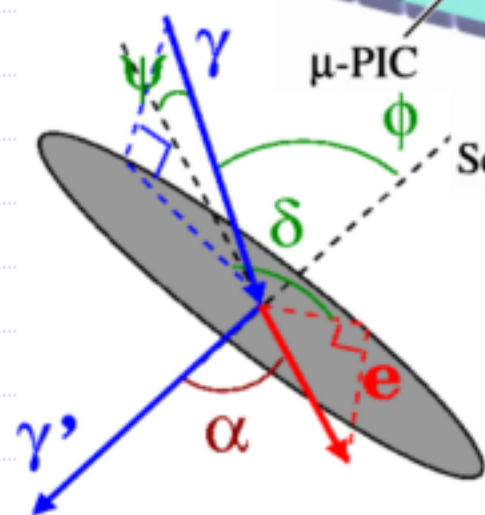
$\sim 1\text{MeV } \gamma$ $\sim 10\text{MeV } \gamma$



- **micro-TPC (μ -PIC)**
反跳電子のtrack, energy
- **Scintillator**
散乱 γ の位置, energy



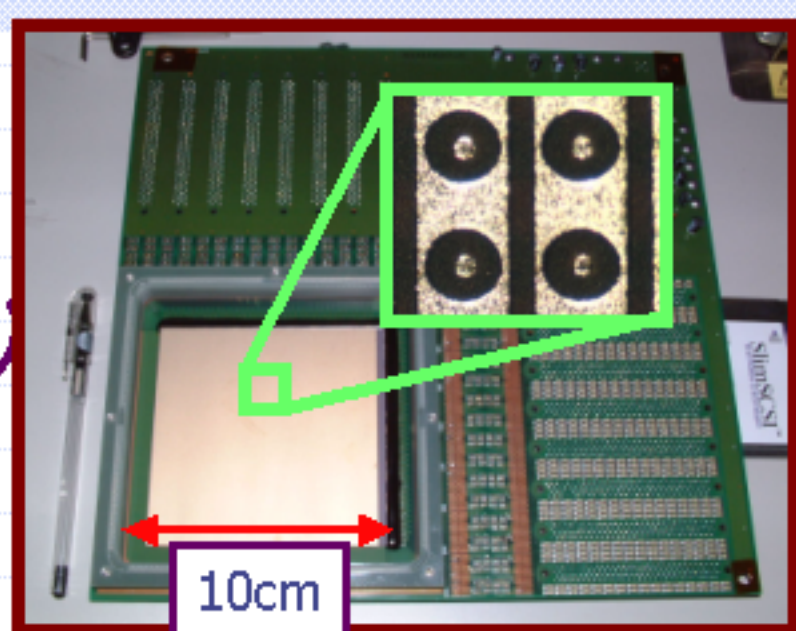
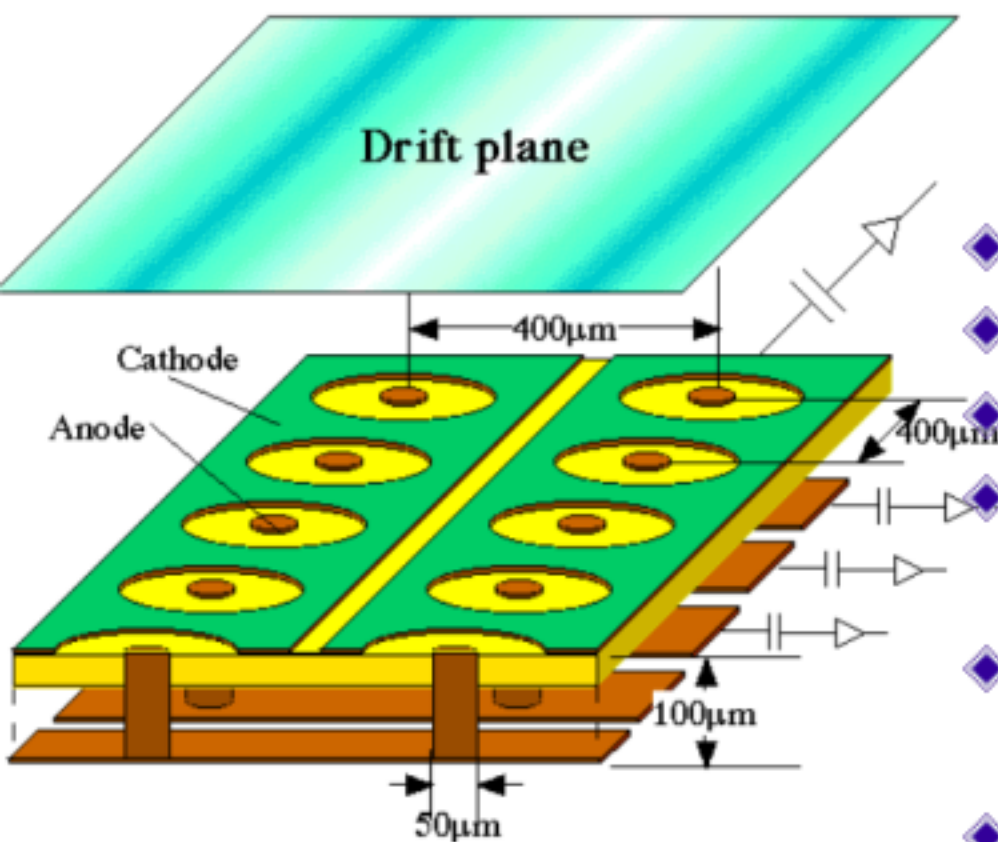
**Event毎に
Compton散乱を完全に再現**



- ◆ $1 \gamma \Rightarrow$ 到来方向 + energy
- ◆ 大立体角 ($\sim 2\text{str}$)
- ◆ $\alpha \Rightarrow$ 強力なbackground rejection

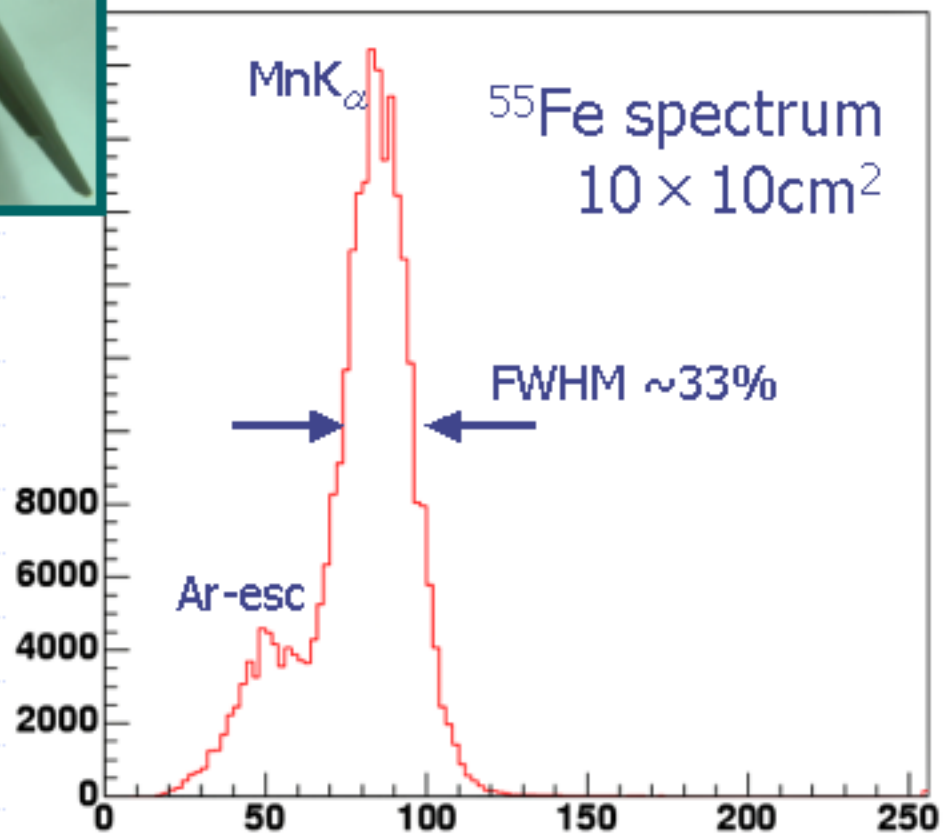
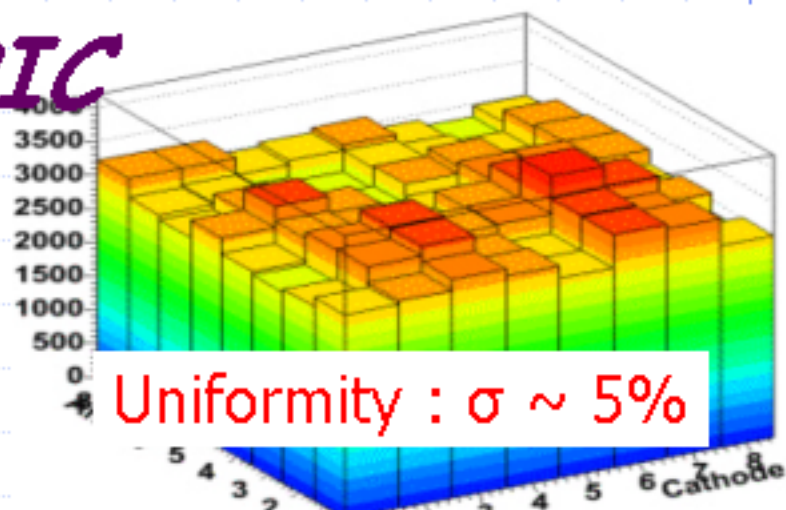
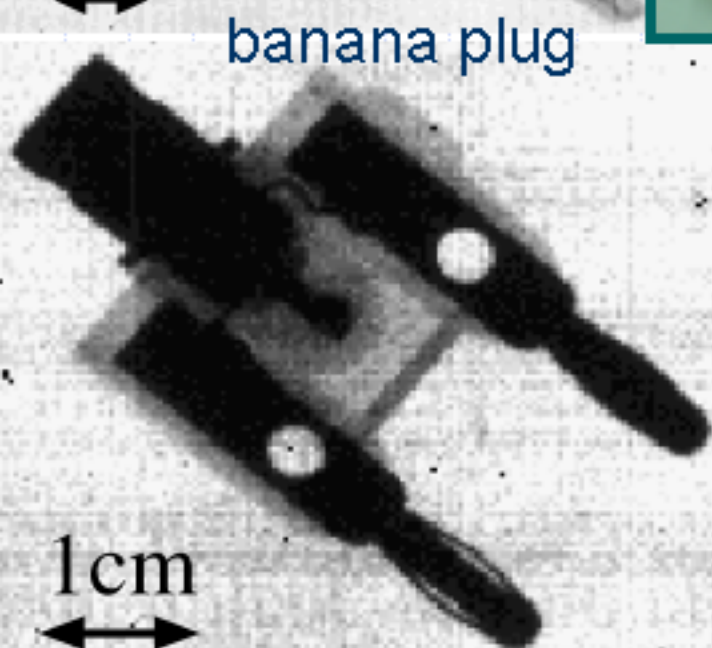
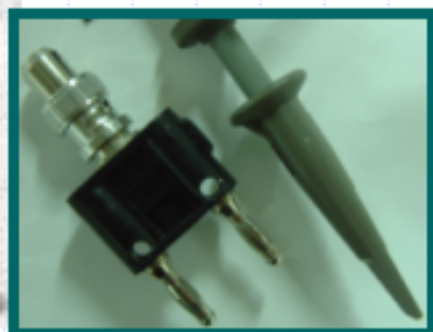
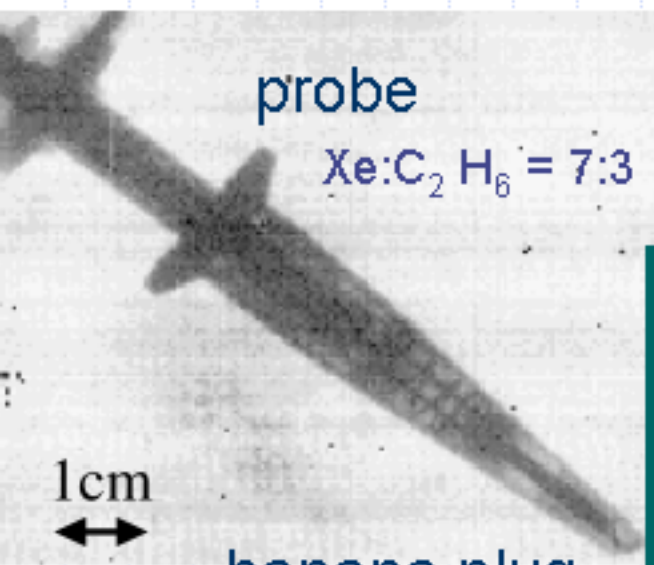
$$\cos \alpha = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_g} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

μ -PICの構造と特徴 (Micro Pixel Chamber)



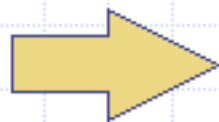
- ◆ 2次元読み出し(~65000pixels)
- ◆ 大面積 (10cm × 10cm)
- ◆ Max gain ~15000
- ◆ Energy分解能
30% @ 5.9keV (100cm²)
- ◆ Gas gain~6000で
1ヶ月以上の安定動作
- ◆ 高い位置分解能 (~120 μm)
- ◆ 大強度入射にも耐える

X線検出器としての μ -PIC



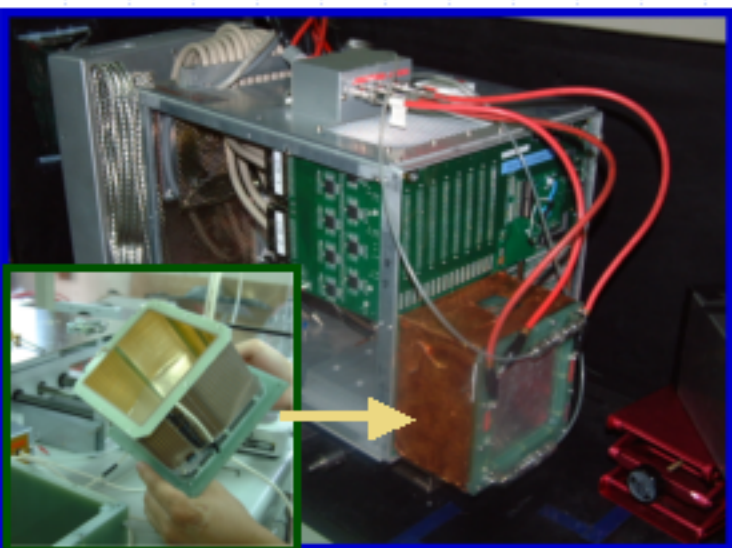
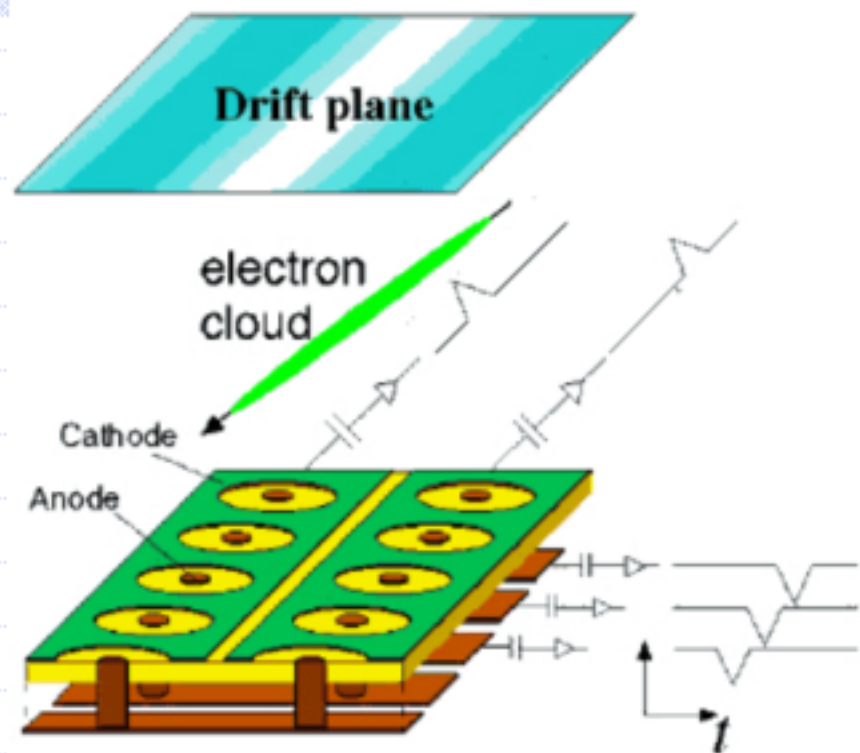
μ TPC (1)

- ✓ 10cm \times 10cm μ -PIC
 - ... 2次元位置情報
- ✓ 8cm drift cage ($E=0.4\text{kV/cm}$)
 - ... drift time



μ TPC

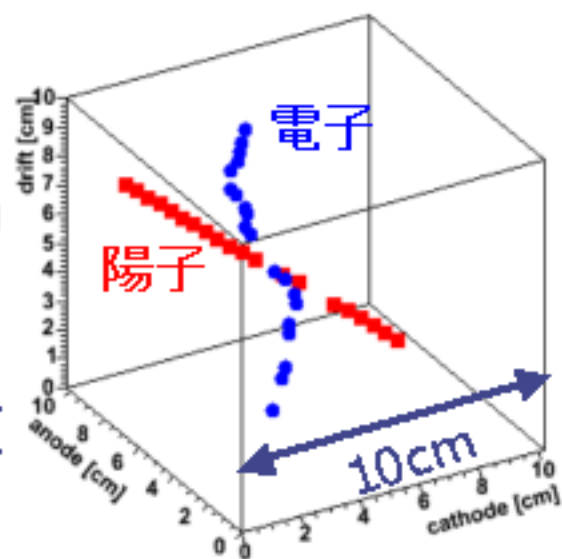
... 3次元情報



位置分解能

(Ar, 20MHz clock)

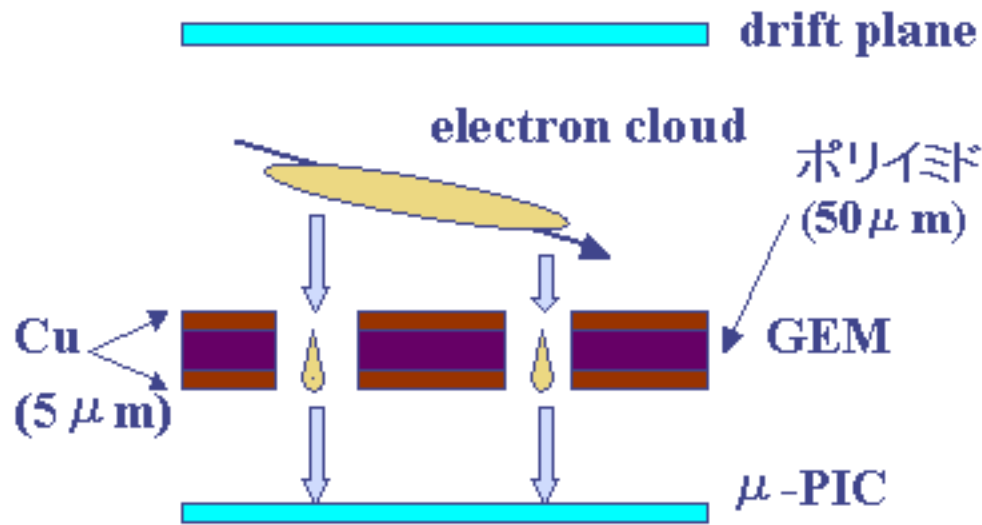
- drift方向
 $\sim 0.6\text{mm}$
- driftに垂直な方向
 $\sim 120\ \mu\text{m}$



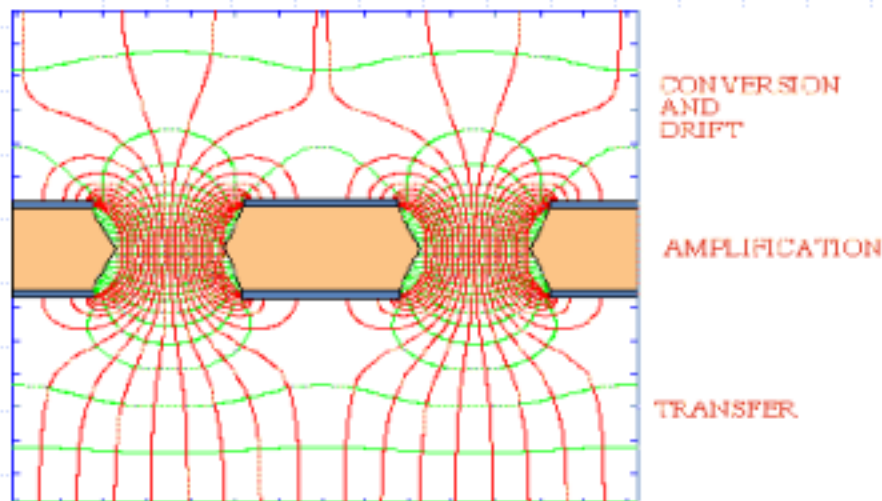
μ -TPC (2)

とは、言うものの...

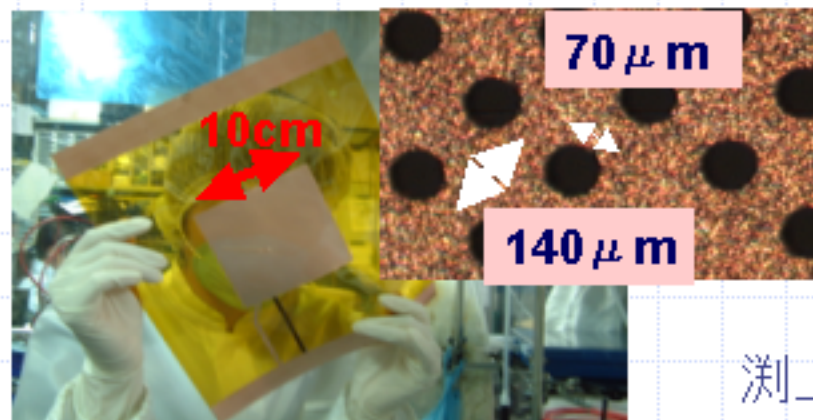
- μ -PICの安定gain : ~ 6000
- MIPを捕らえるのに必要なgain : $> 2 \times 10^4$



GEMでちょっと増幅
→ μ -PICでもっと増幅



GEM (Gas Electron Multiplier)
F. Sauli et.al (1997)



測上マイクロ製 (東大CNS浜垣研のコピー品)

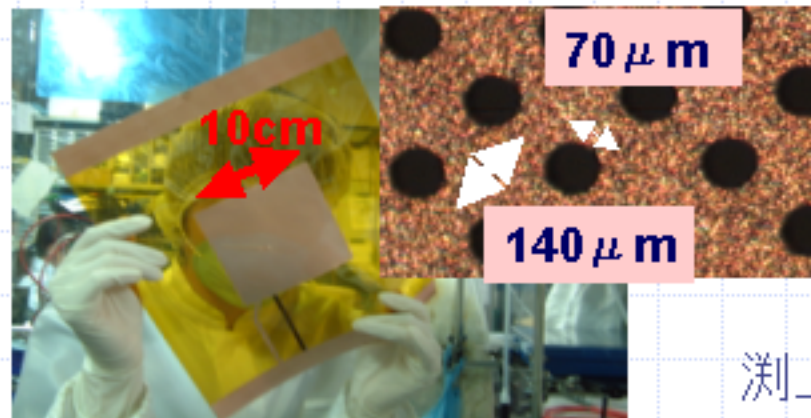
μ -TPC (2)

とは、言うものの...

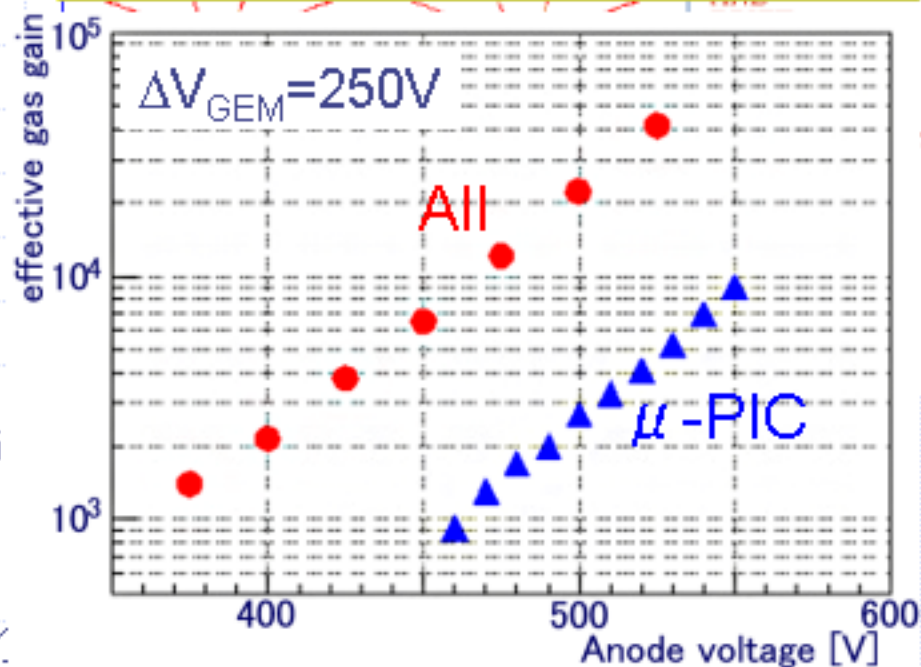
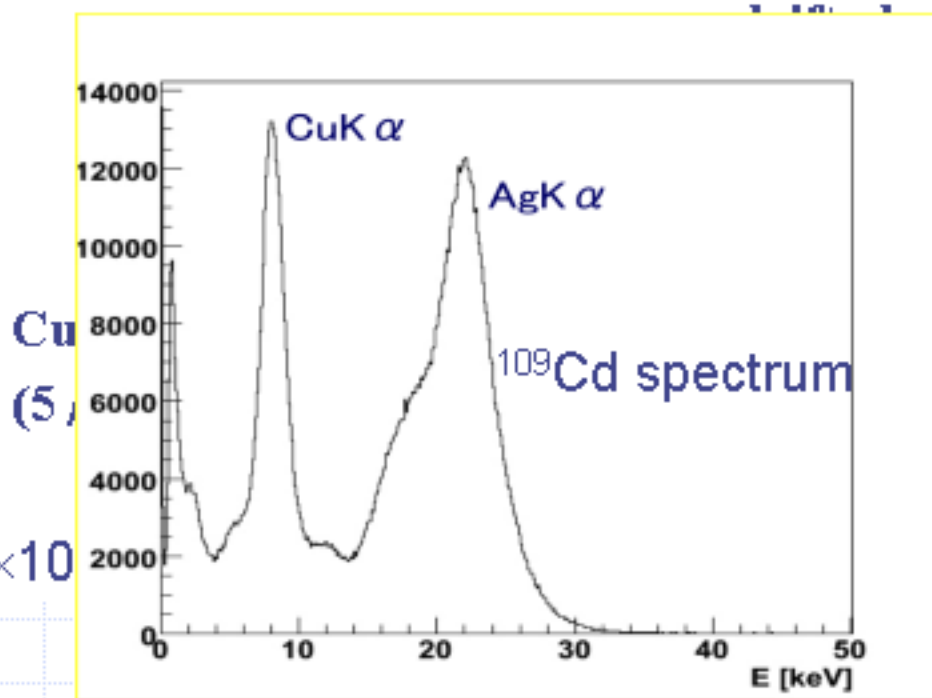
- μ -PICの安定gain : ~ 6000
- MIPを捕らえるのに必要なgain : $> 2 \times 10^4$

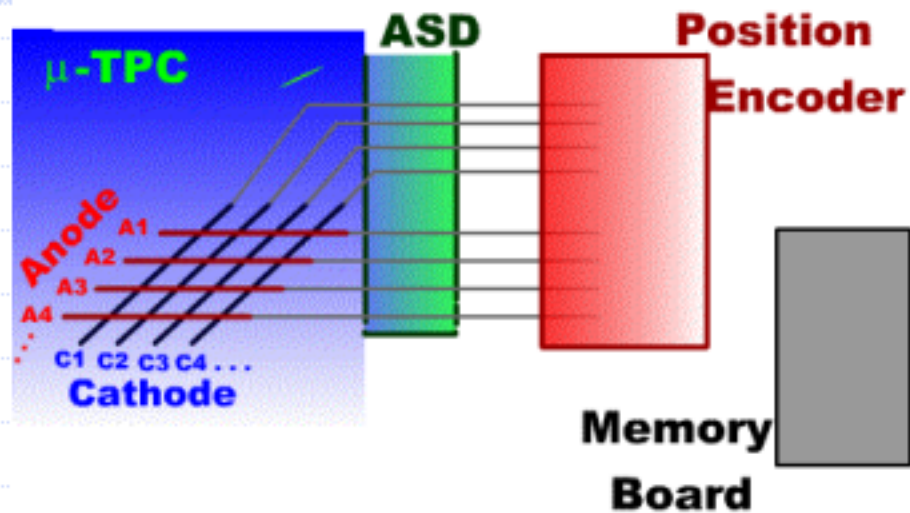
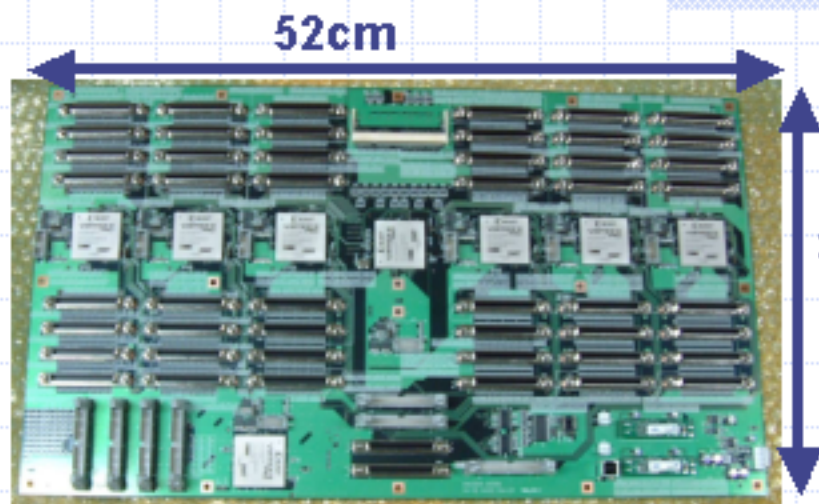


GEMでちょっと増幅
→ μ -PICでもっと増幅



測上





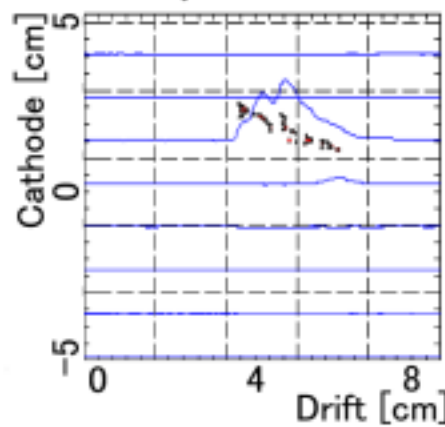
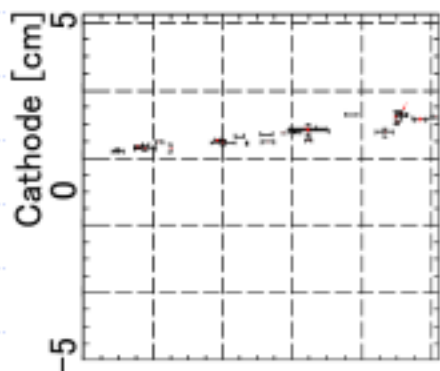
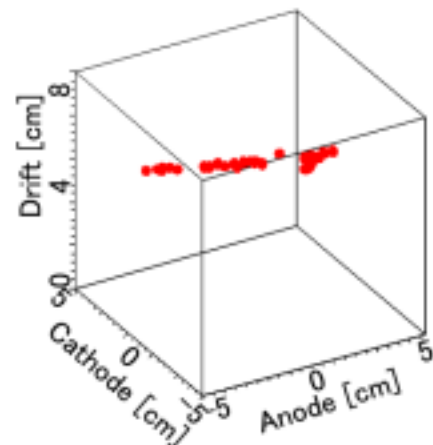
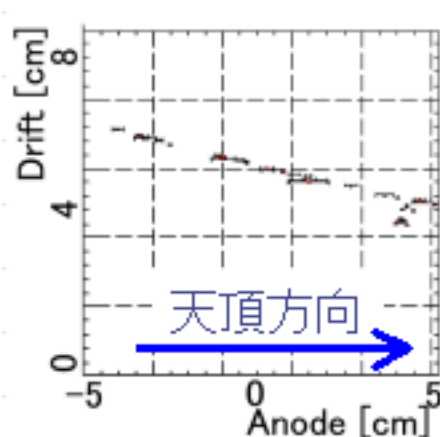
Position Encoder

- 100MHz clock
- 8 FPGAs
- 1536ch LVDS input

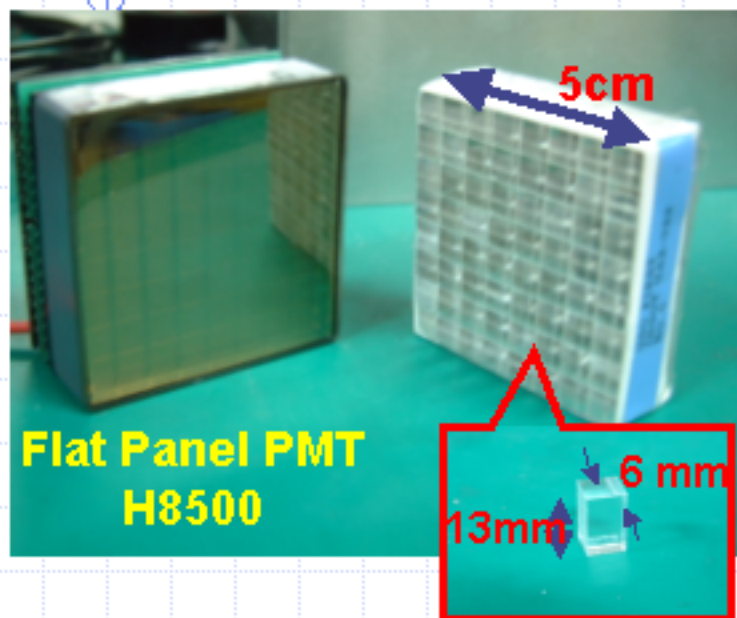
Cosmic muon track →

- ◆ (hit point > 3)/(trigger) ~97%
- ◆ position resolution $\sigma \sim 370 \mu\text{m}$

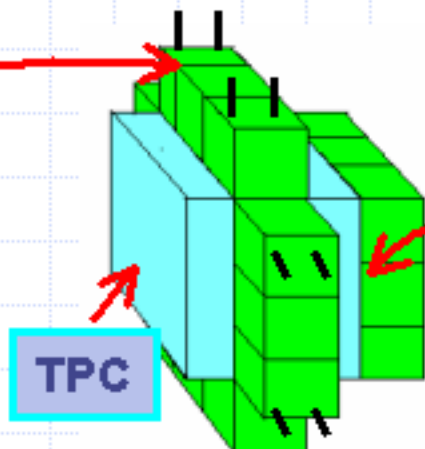
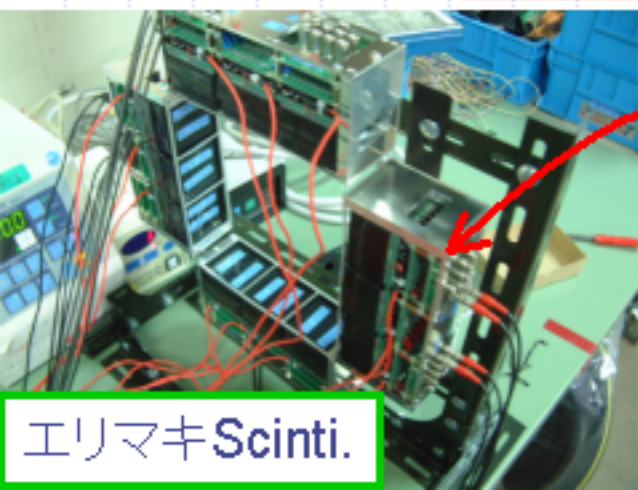
Ar 90% + C₂H₆ 10%, gas-flow
 $E_{\text{Drift}} = 400\text{V/cm}$



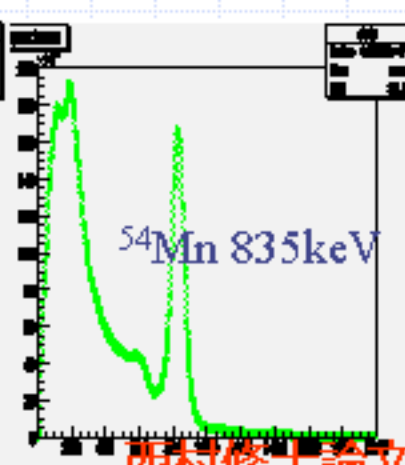
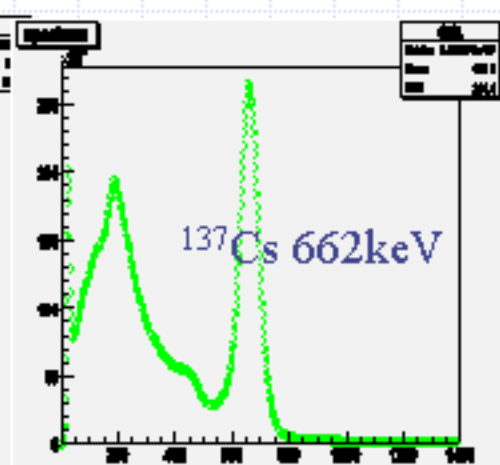
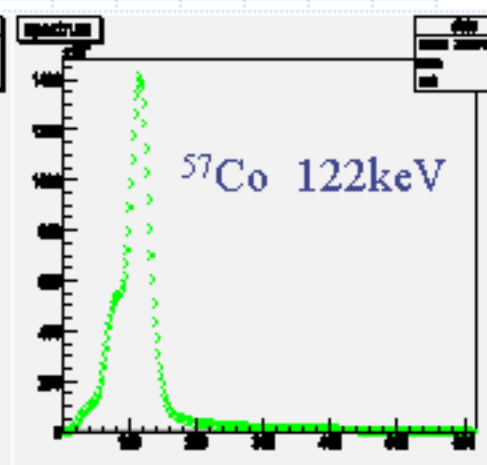
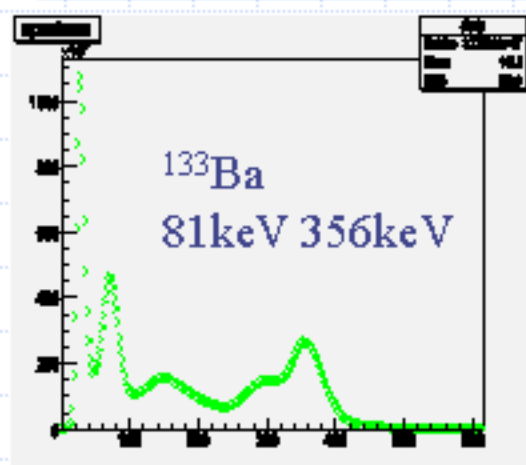
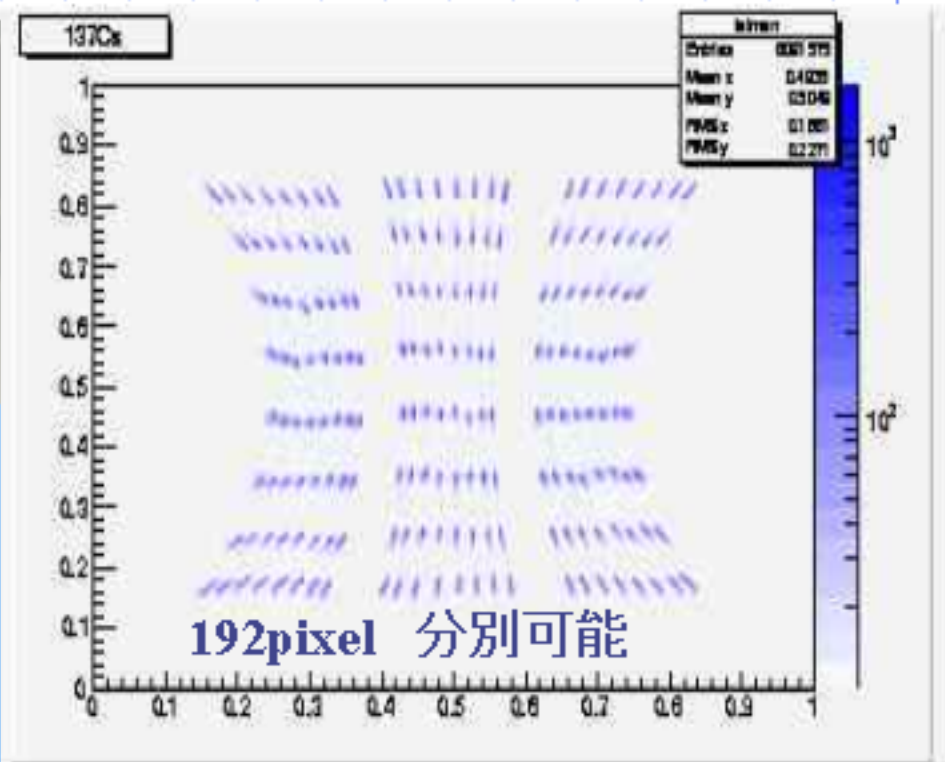
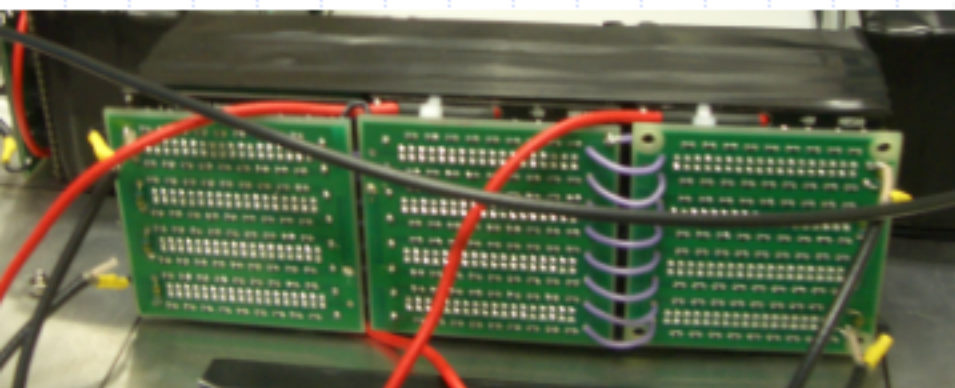
GSO Pixel Scinti. Array



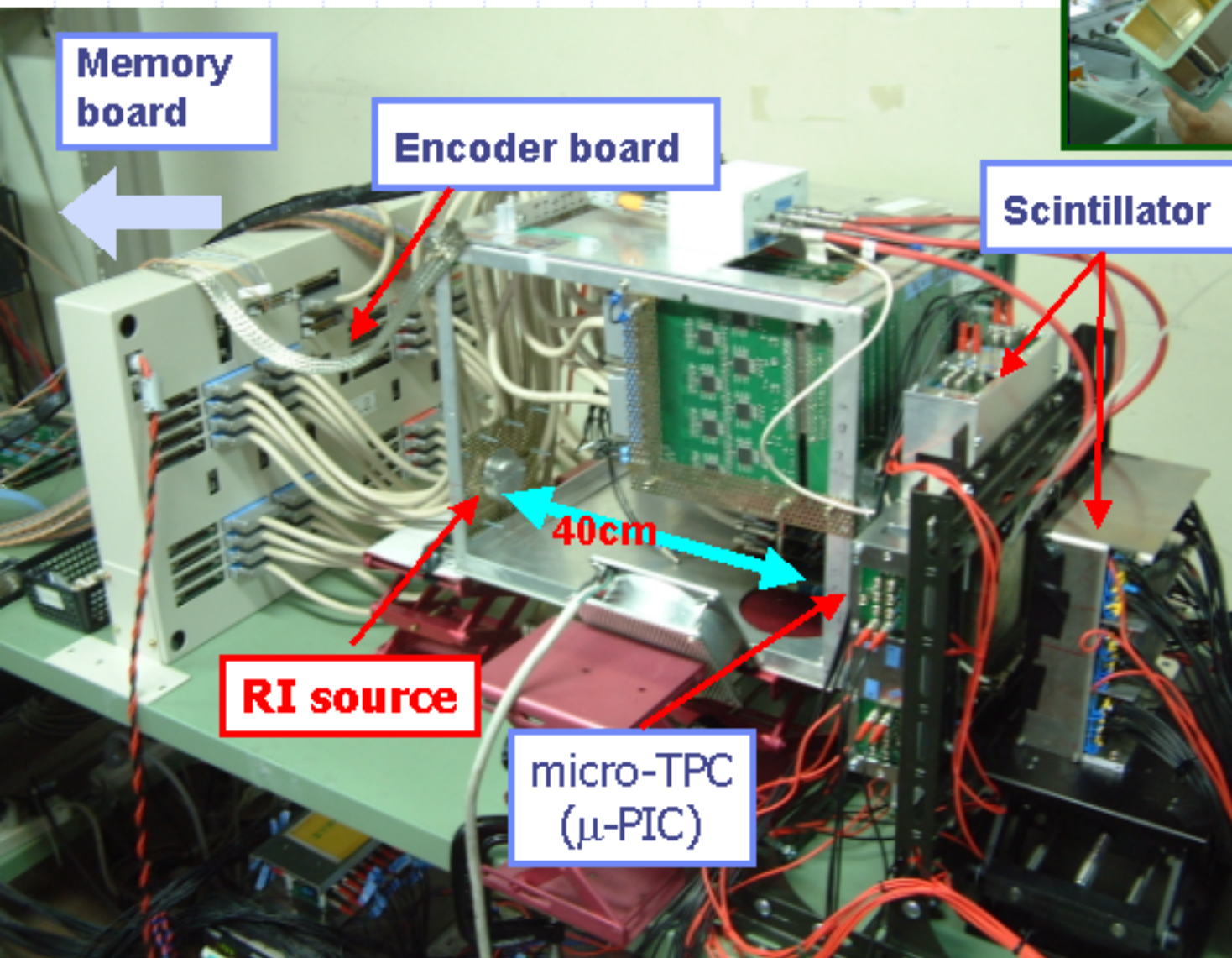
- Position res. : $\sim 6\text{mm}$
- Energy res. : $\sim 9\%$ (662keV, FWHM)
- Effective area : $\sim 82\%$
- Readout : 4ch/192pixels @ side
16ch/192pixels @ bottom



抵抗分割による読み出し



MeV- γ camera setup



microTPC
10×10×8 cm³
Ar+C₂H₆(9:1)
1atm, gas-flow

Scintillator
+ PMTs
位置分解能 ~6mm
(FWHM)
エネルギー分解能
~9%
(662keV, FWHM)

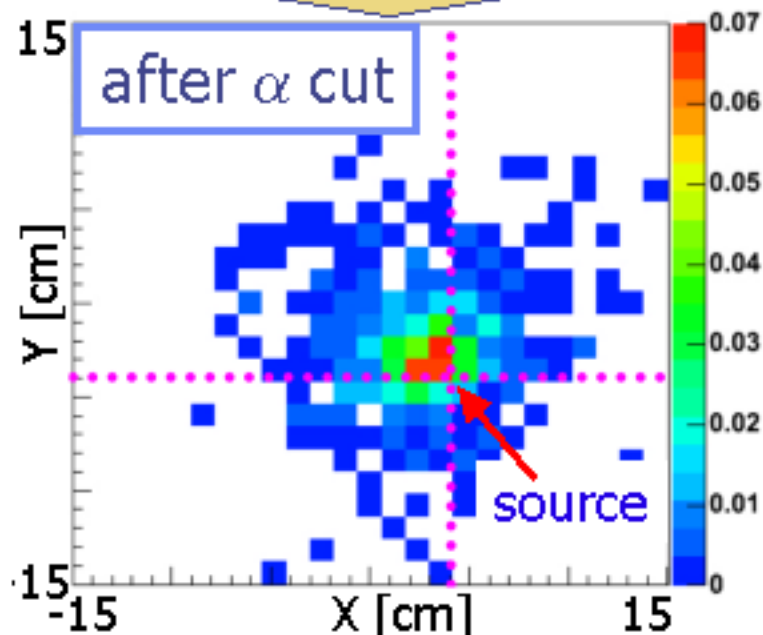
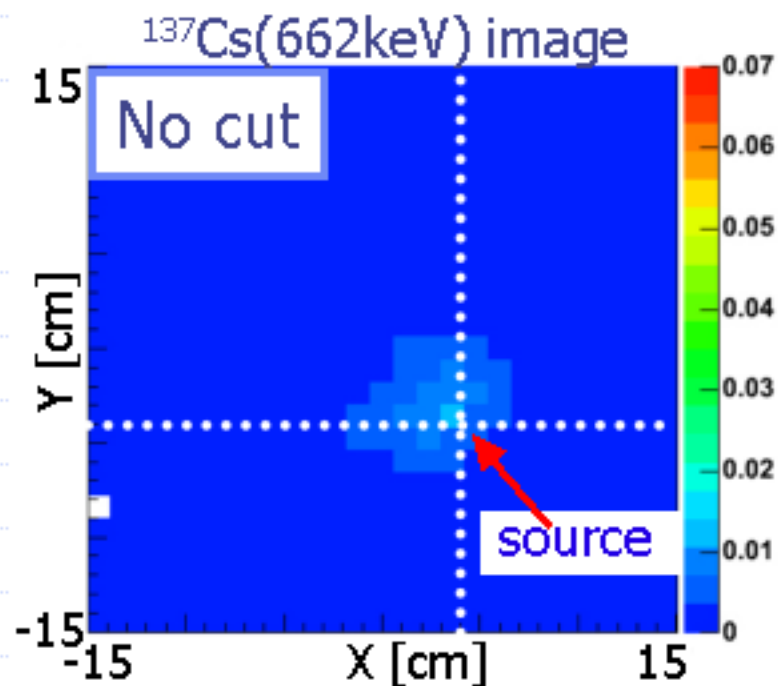
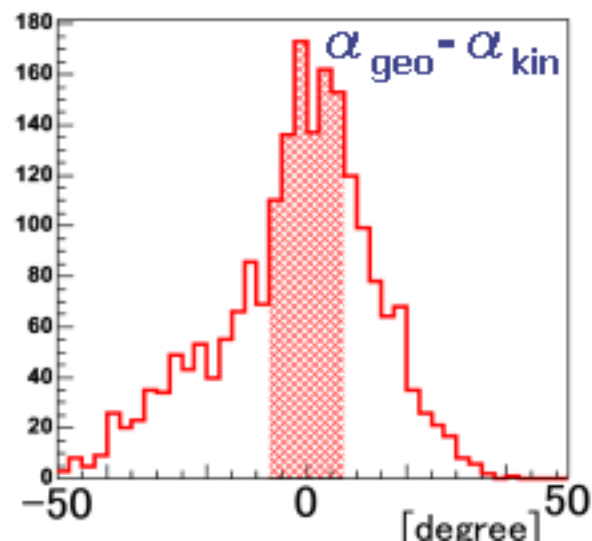
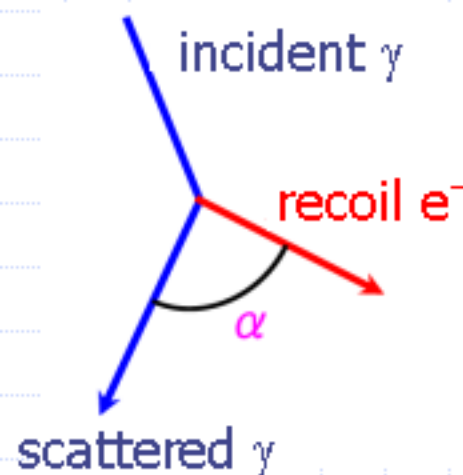
Background rejection

α_{geo} : 幾何学的な α

α_{kin} : 運動学からの α

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

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



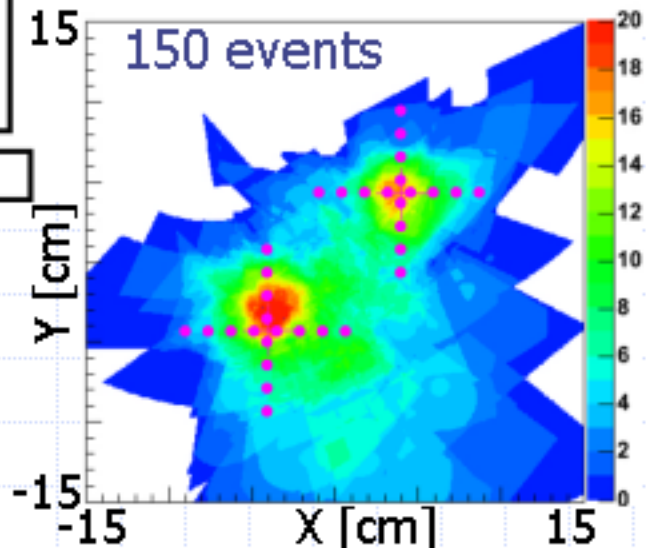
従来のCompton imagingとの比較

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

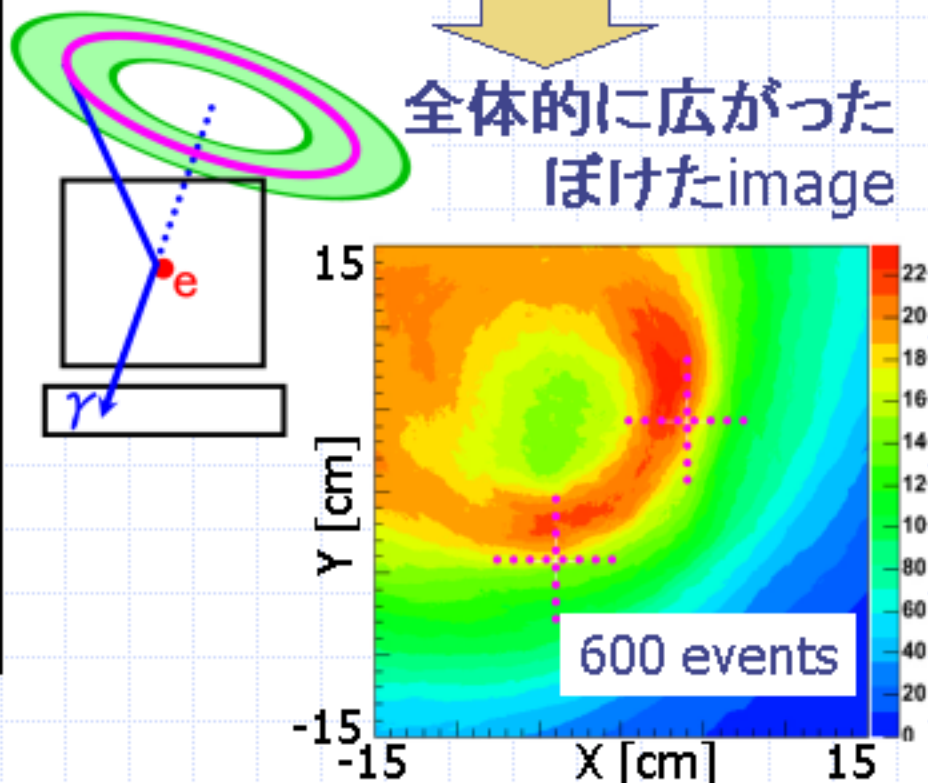


Classical Compton法 (COMPTTEL)

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

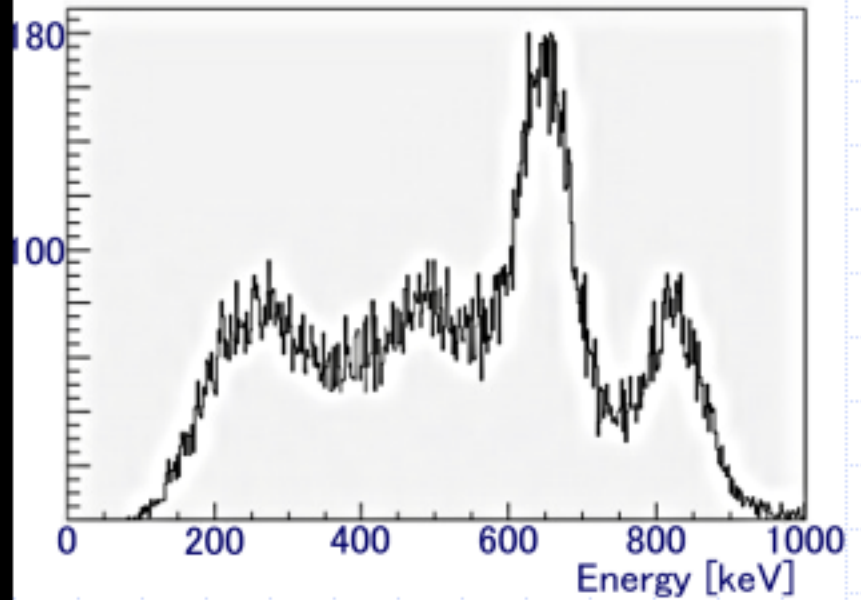
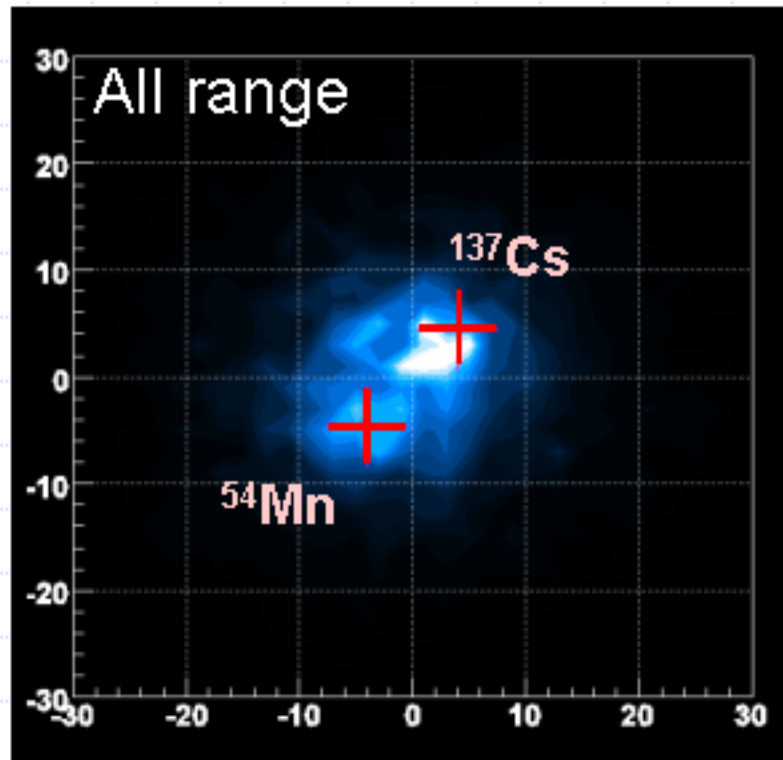
全体的に広がった
ぼけたimage



MeV- γ imaging

^{137}Cs : 662keV, 0.89MBq

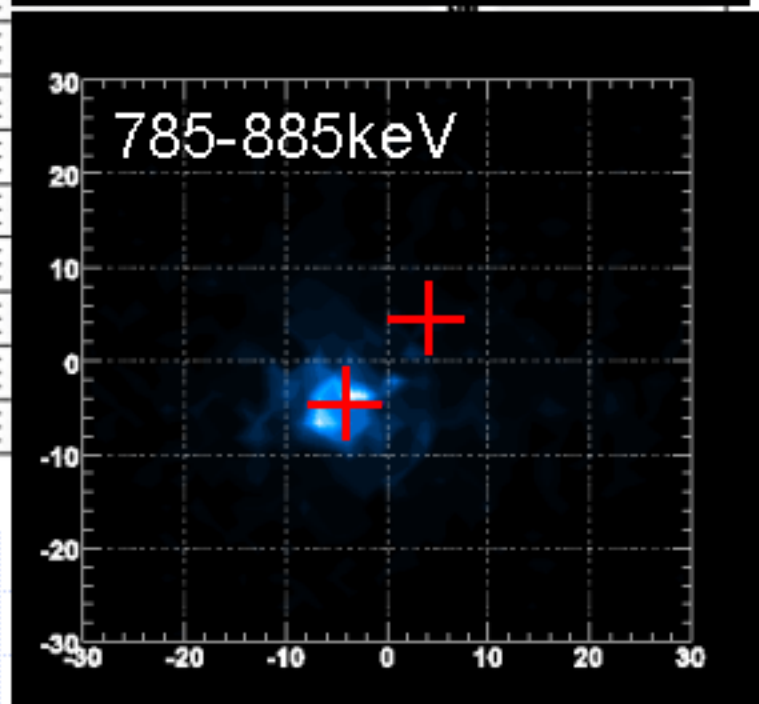
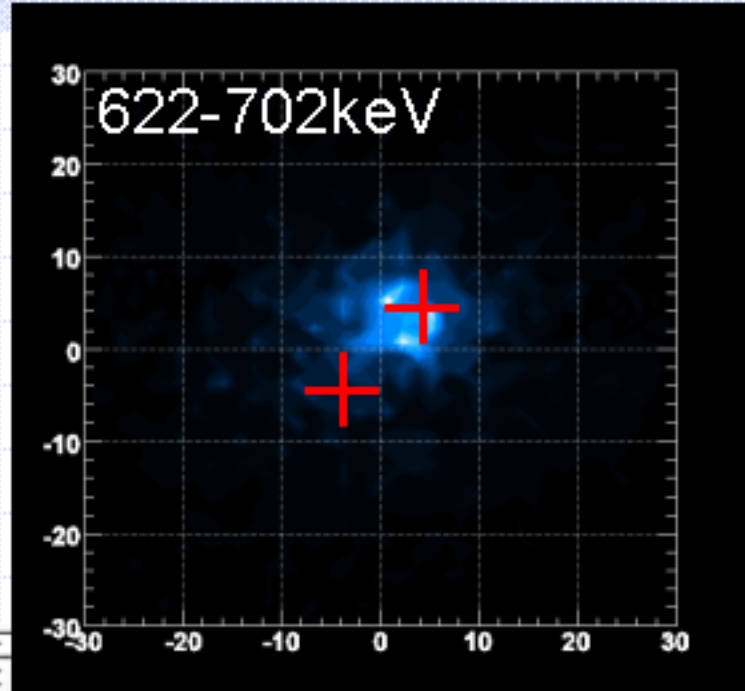
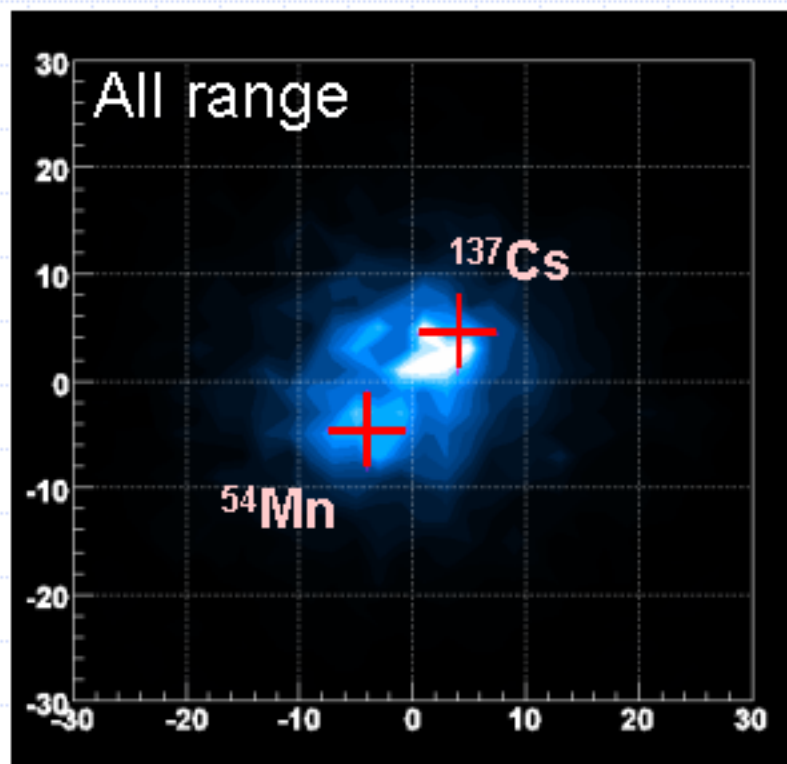
^{54}Mn : 835keV, 0.65MBq



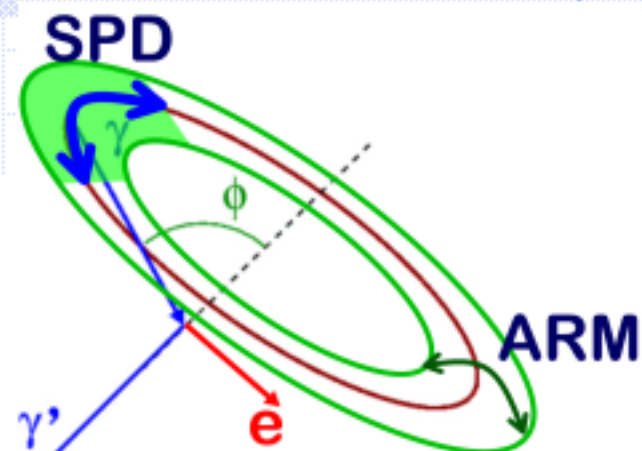
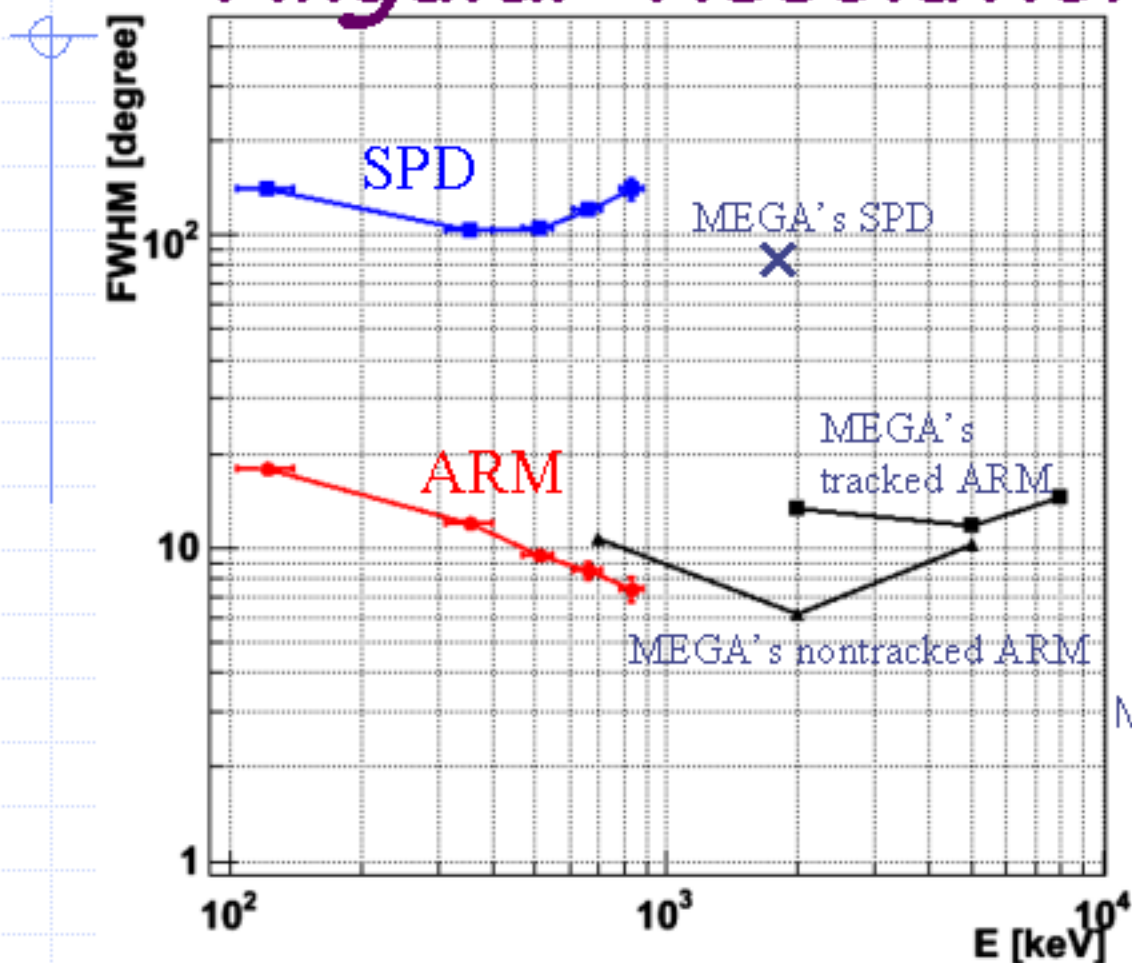
MeV- γ imaging

^{137}Cs : 662keV, 0.89MBq

^{54}Mn : 835keV, 0.65MBq



Angular Resolution



- Energy range
100~900 keV
- ARM
8.5° @ 662keV
- SPD
120° @ 662keV

MEGA's data :
A. Zolghauer, et al.,
IEEE Nucl. Sci. Sym. Conf. (2003)

ARM : Angular Resolution Measure (散乱角決定精度)
SPD : Scatter Plane Deviation (散乱平面決定精度)

Prototypeのperformance

- ◆ GEM + μ -PIC, 100MHz動作のTPC
- ◆ GSO + H8500 Pixel Scintillator Array
- ◆ photon毎の到来方向とエネルギーの再構成に成功
- ◆ α 角によるbackground除去を実証
- ◆ Energy range : 100~900 keV
- ◆ FOV : ~ 1 str
- ◆ ARM : 8.5° @ 662 keV
- ◆ SPD : 120° @ 662 keV
- ◆ Efficiency : 5×10^{-6} @ 662 keV
- ◆ Energy resolution : $\sim 15\%$ @ FWHM 662 keV

SMILE

Sub-MeV γ -ray Imaging
Loaded-on-balloon Experiment

気球実験

Sub-MeV γ -ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

我々のMeVコンプトンカメラ



COMPTONの10倍の感度を目指し、
最終的には衛星に搭載して全天探査

前段階として気球に載せて観測

今回は第一回目

10cm立方TPC + GSO pixel Scinti. Camera

2006年度秋に放球!

30~50cm立方TPC + Scinti. Camera

長期気球実験を次に目指す

気球搭載の検出器

現状の検出器は有効面積が小さい
兎にも角にもefficiencyを稼ぎたい!!
でも、電力・重量には制限が...

- TPC drift length : 10cm \Rightarrow 15cm

- Gas : Ar 1atm \Rightarrow Xe 1atm

- Scinti.読み出し数

 - 底面 : 4ch/192pixel

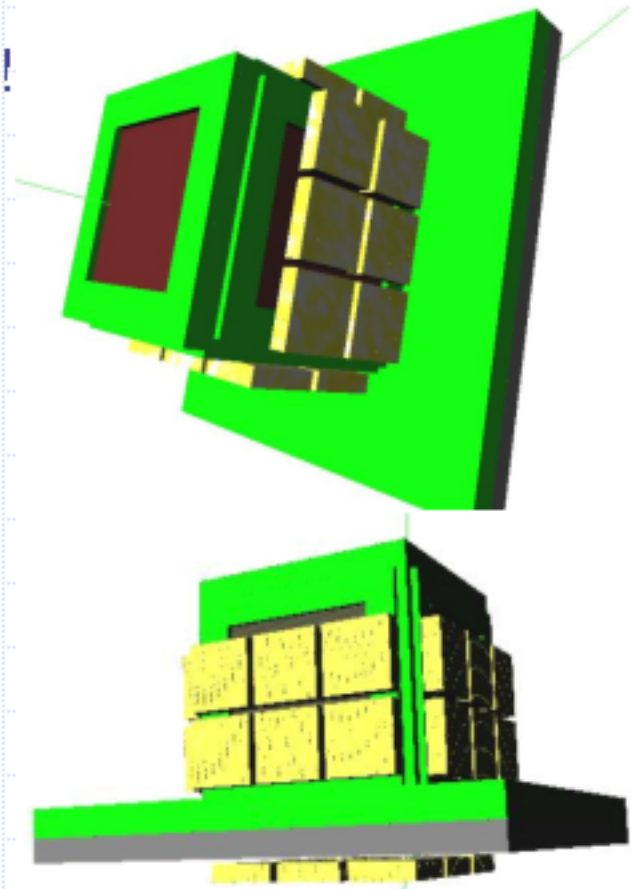
 - 側面 : 4ch/192pixel

- Scinti. Pixel数

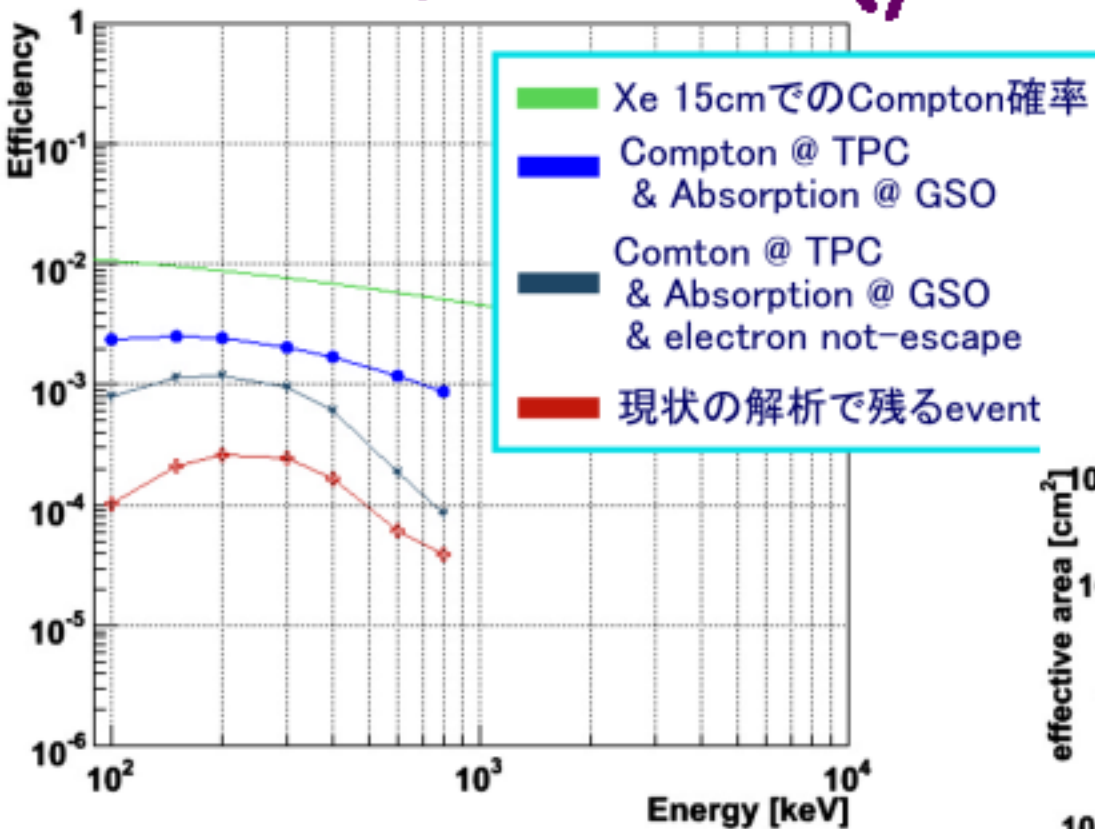
 - 底面 : $3 \times (3 \times 64)$ pixel

 - 側面 : $1 \times (3 \times 64)$ pixel

 - $\Rightarrow 2 \times (3 \times 64)$ pixel



FM simulation (preliminary)

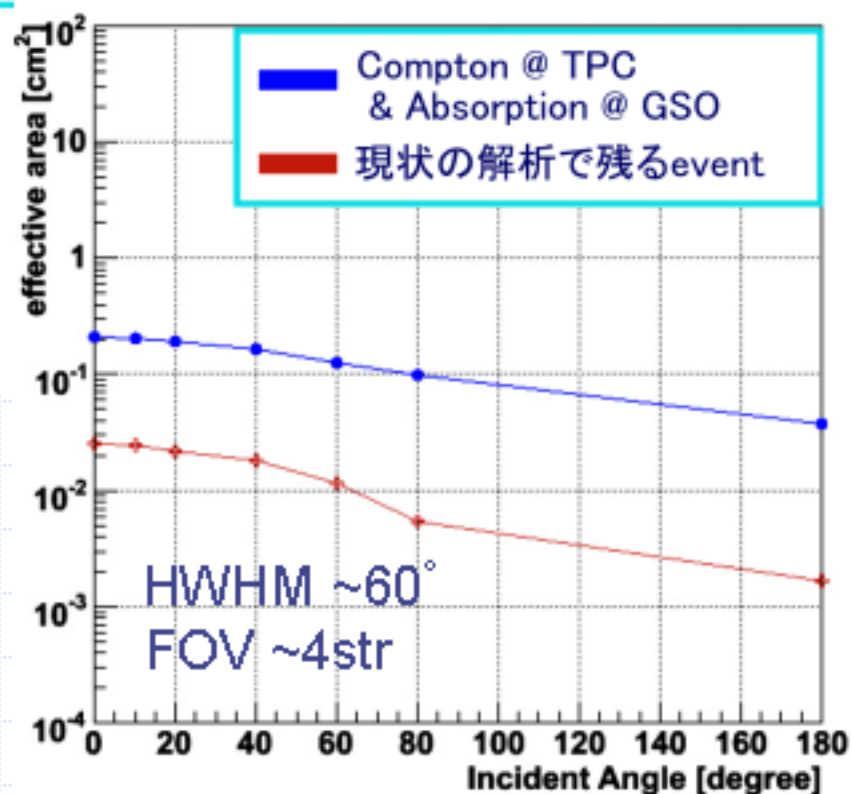


Efficiency

2.5×10^{-4} @ 300keV

6.1×10^{-5} @ 600keV

現状の~10倍

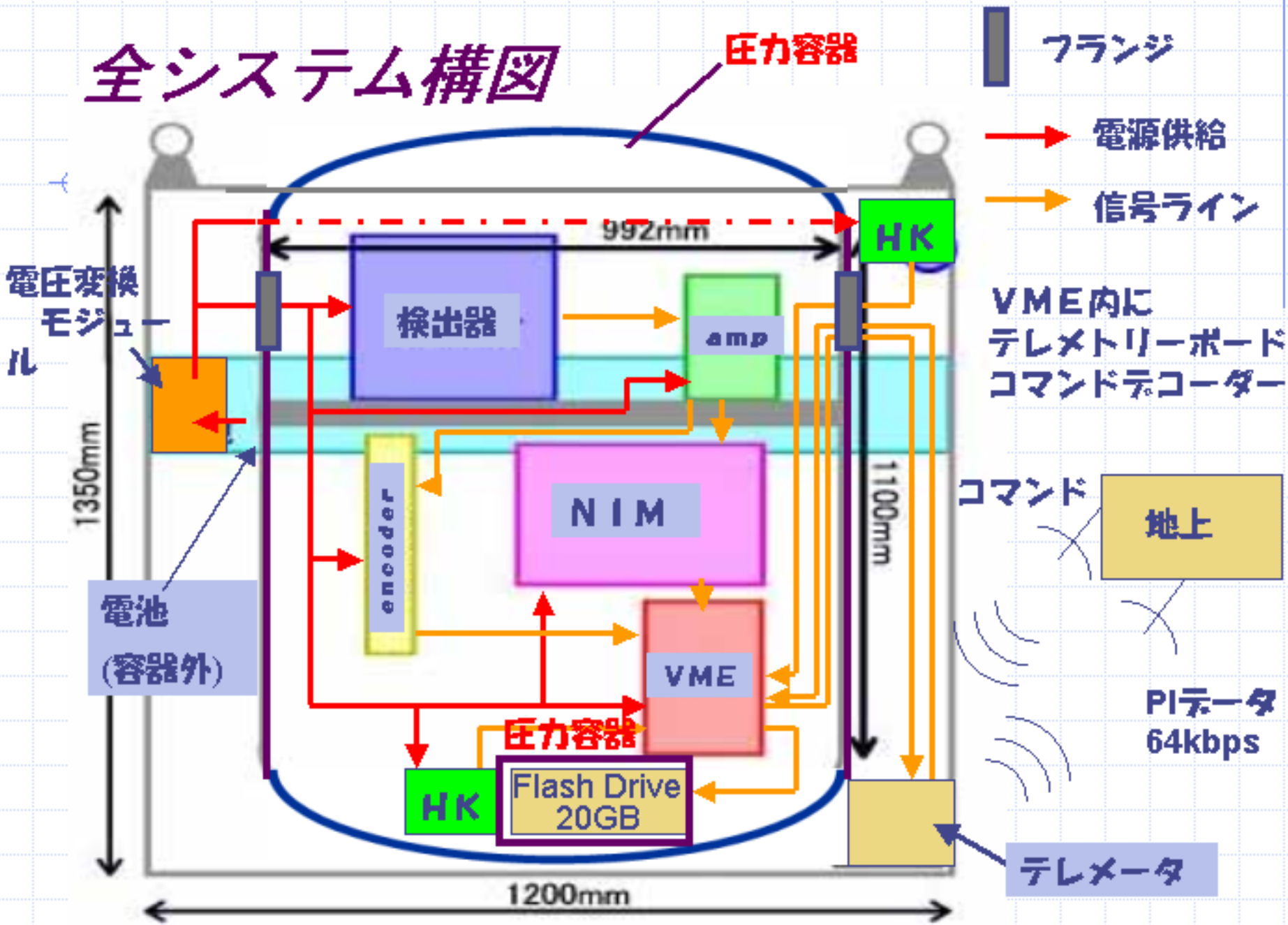


有効面積は小さいが視野は広い



Cosmic/Atmospheric diffuse γ

全システム構図



圧力容器

フランジ

電源供給

信号ライン

VME内に
テレメトリボード
コマンドデコーダー

地上

PIデータ
64kbps

テレメータ

電圧変換
モジュール

検出器

amp

1100mm

encoder

NIM

VME

圧力容器

HK

Flash Drive
20GB

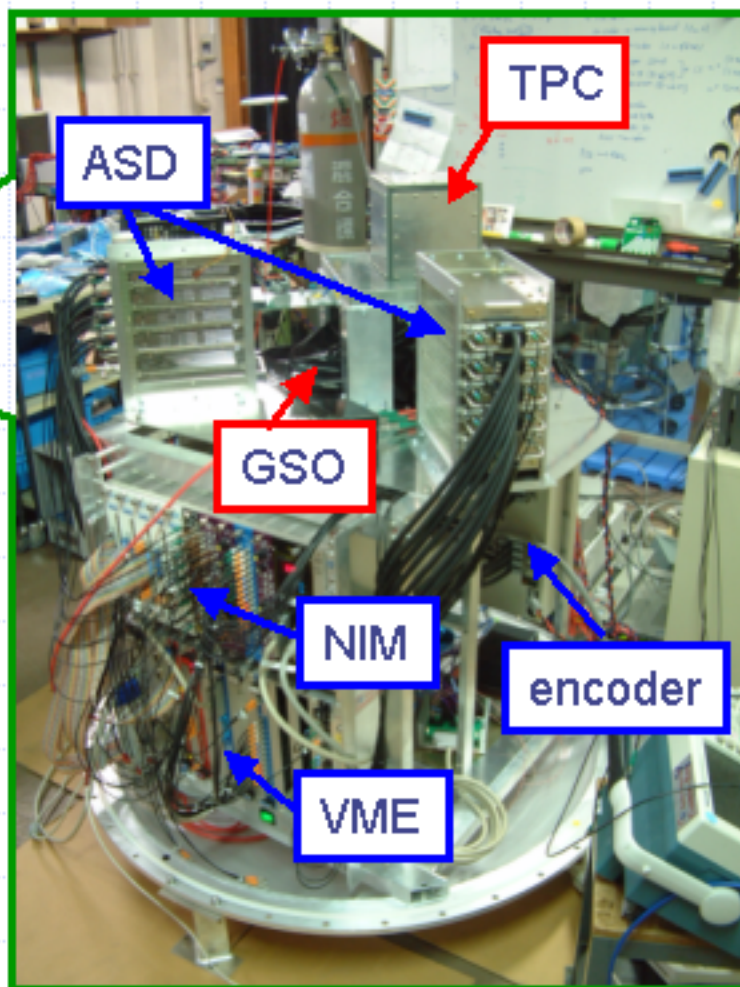
1350mm

992mm

1200mm

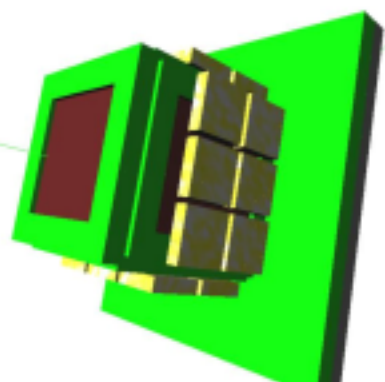
電池
(容器外)

Sub-MeV γ -ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment for cosmic diffuse gamma-ray

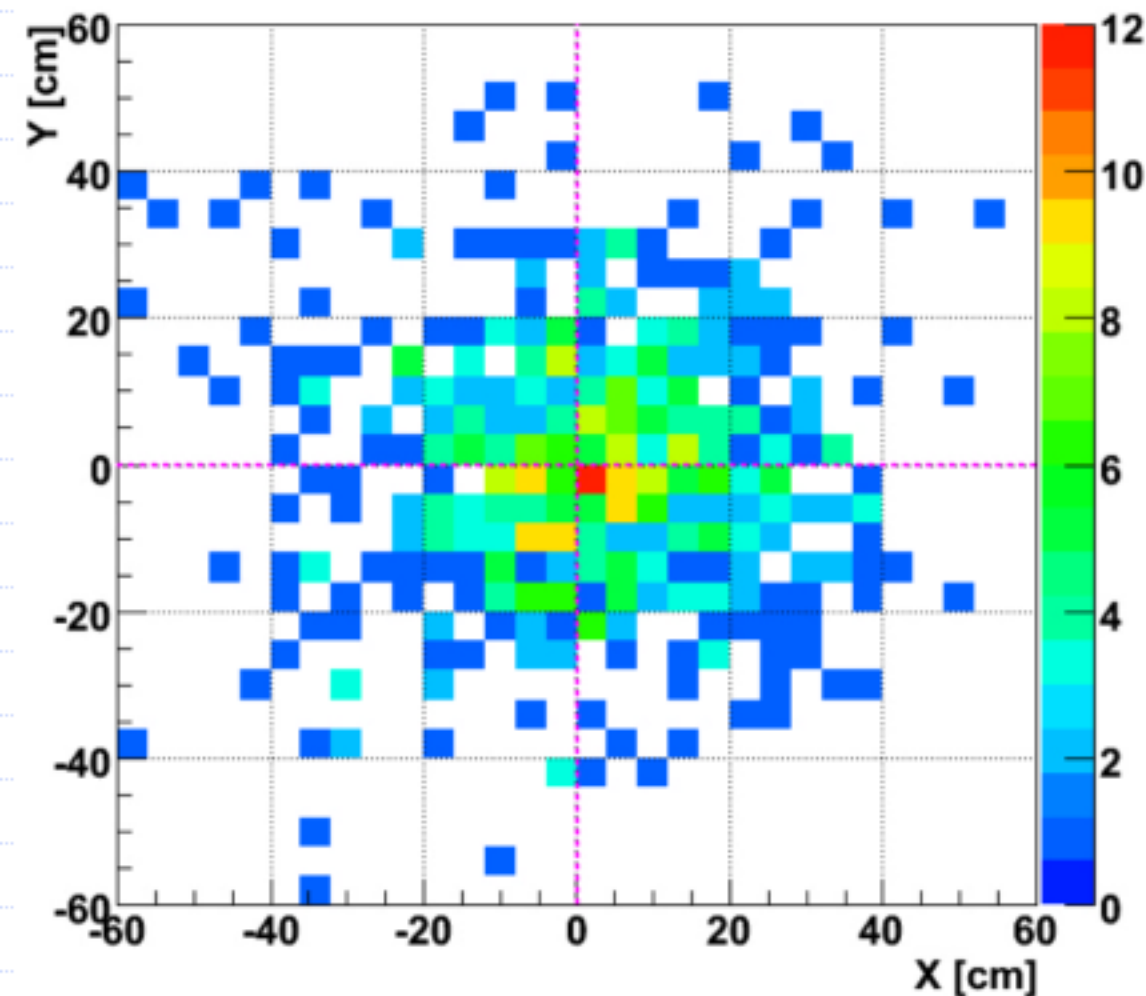


- Energy range :
100keV ~ 1MeV
- TPC : $10 \times 10 \times 15 \text{cm}^3$
Xe+Ar+C₂H₆ 1atm
- GSO : 3×3PMTs@bottom
4×(3×2)PMTs@side
33 PMTs
- Frame : $1.45 \times 1.2 \times 1.35 \text{m}^3$
- Vessel : $\phi 1m \times 1.4m$
- PI Mass : ~250kg
- Power : ~250W (system)

現在、性能評価中!!



MeV- γ Imaging



- Src : ^{137}Cs (662keV)
- window-src間 : $\sim 40\text{cm}$
- 580~700keVでimaging
- Xeを用いての初image

環境試験

高度35kmでは

気圧 $\sim 6.6 \times 10^{-3}$ atm

気温 $\sim -40^{\circ}\text{C}$



空気対流がない。

熱収支は輻射のみ。

内からの熱は大丈夫か。

挙動がおかしくならないか。



常温常圧にて温度試験 @ 京大

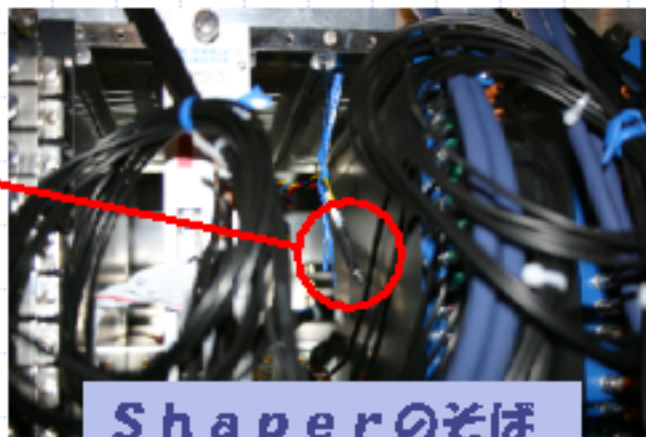
真空低温試験 @ 宇宙研



温度計



CPUのそば



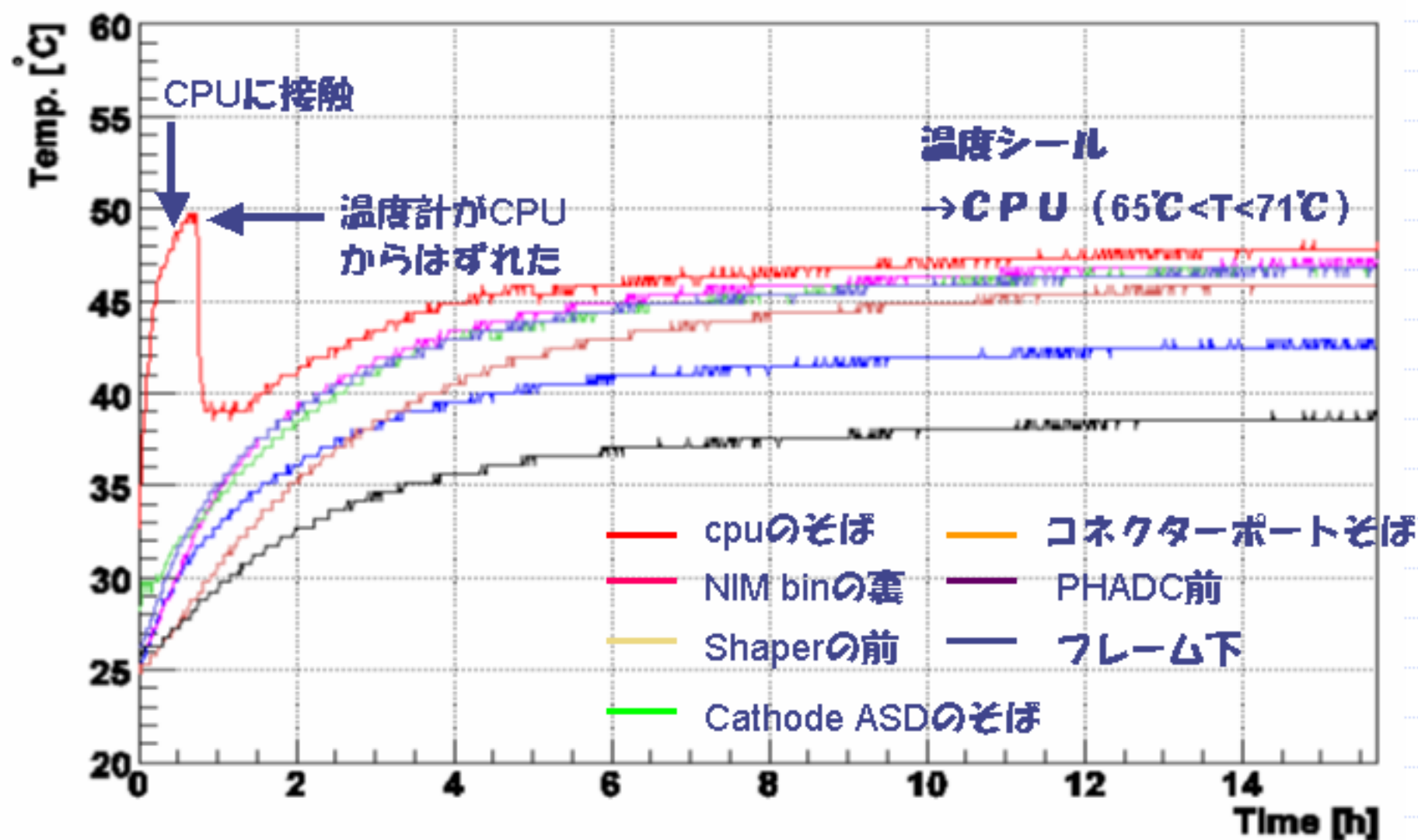
Shaperのそば

気圧計

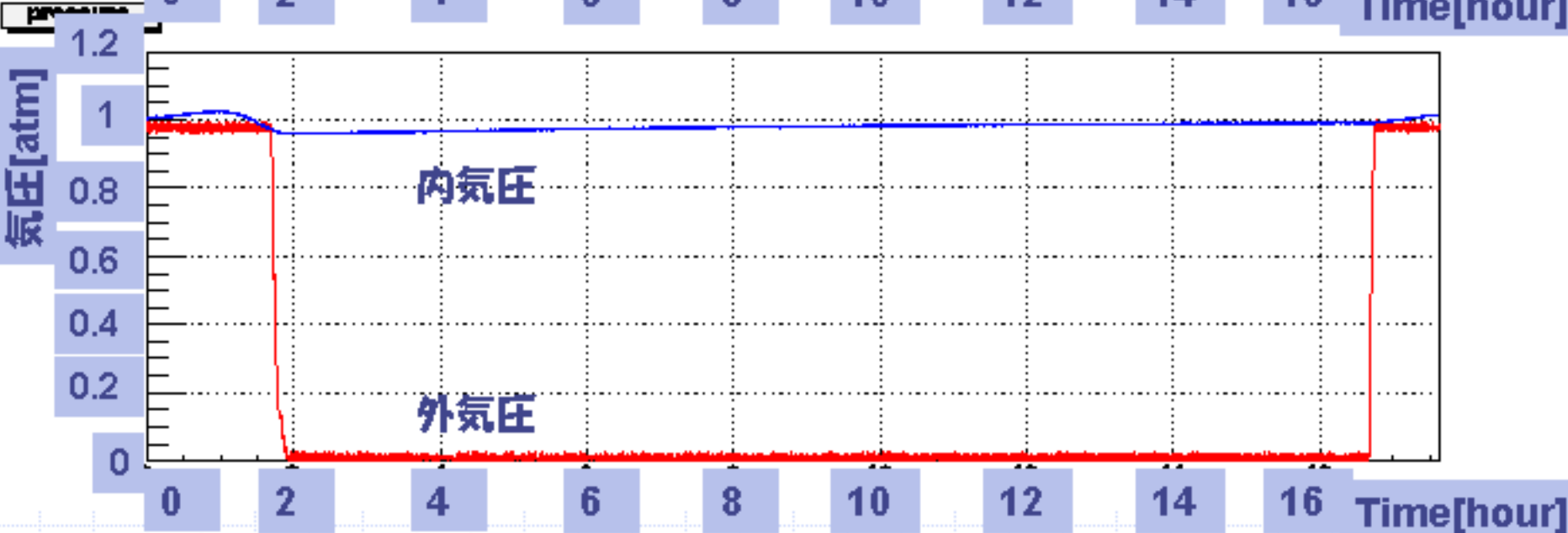
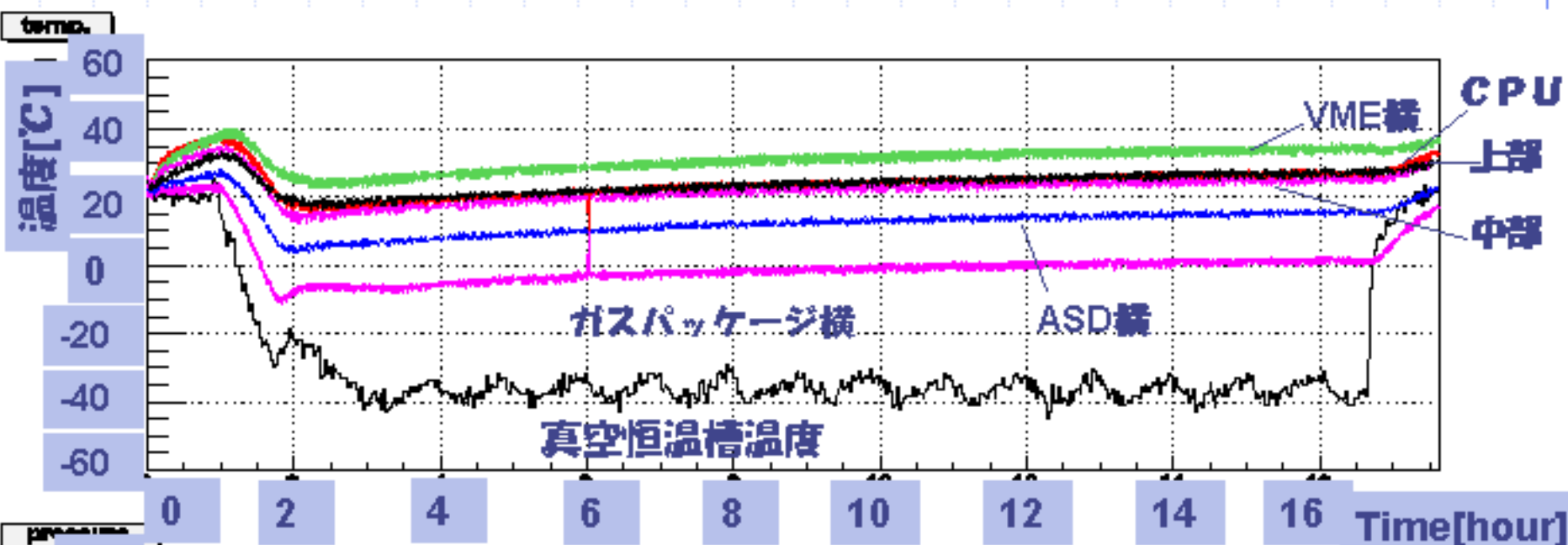


底面部

外気 25°C 1気圧下での温度試験



-40°C 6.6 × 10⁻³気圧下での環境試験@宇宙研



有効面積の拡大へ

大面積 μ -PICの必要性

これまで μ -PIC(10cm \times 10cm)が使われた実験

➤ MeVカメラ

- 60keV以上の電子はescape
⇒ energy unknownなsourceを
捕らえるのは非常に難しい
- 検出効率の向上

➤ X線結晶解析

- カバーする立体角を大きく
⇒ より精確に、より早く
- 継ぎ目は嬉しくない

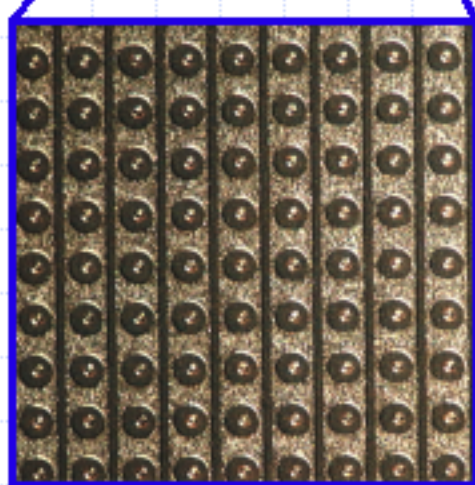
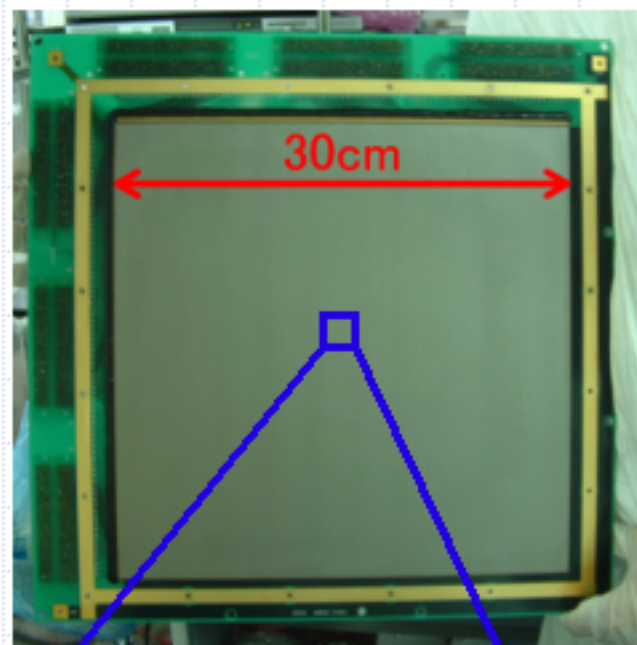
➤ DM search

- とにかく質量を稼ぎたい



もっと大きな μ -PICを!!!

30cm角大面積 μ -PIC



30cm角 μ -PIC

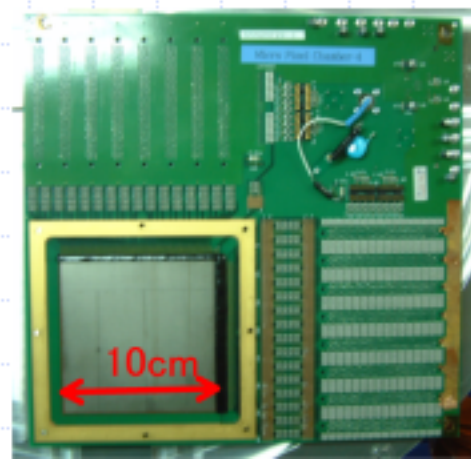
- 2004年12月初めに1号機完成
- pixel数 : 589,824(=768²)個
- pitch : 400 μ m
- strip readout
- 検出部面積 : $\sim 944\text{cm}^2$ ($\sim 30\text{cm}$ 角)
- 128極DIN connector 12個による出力

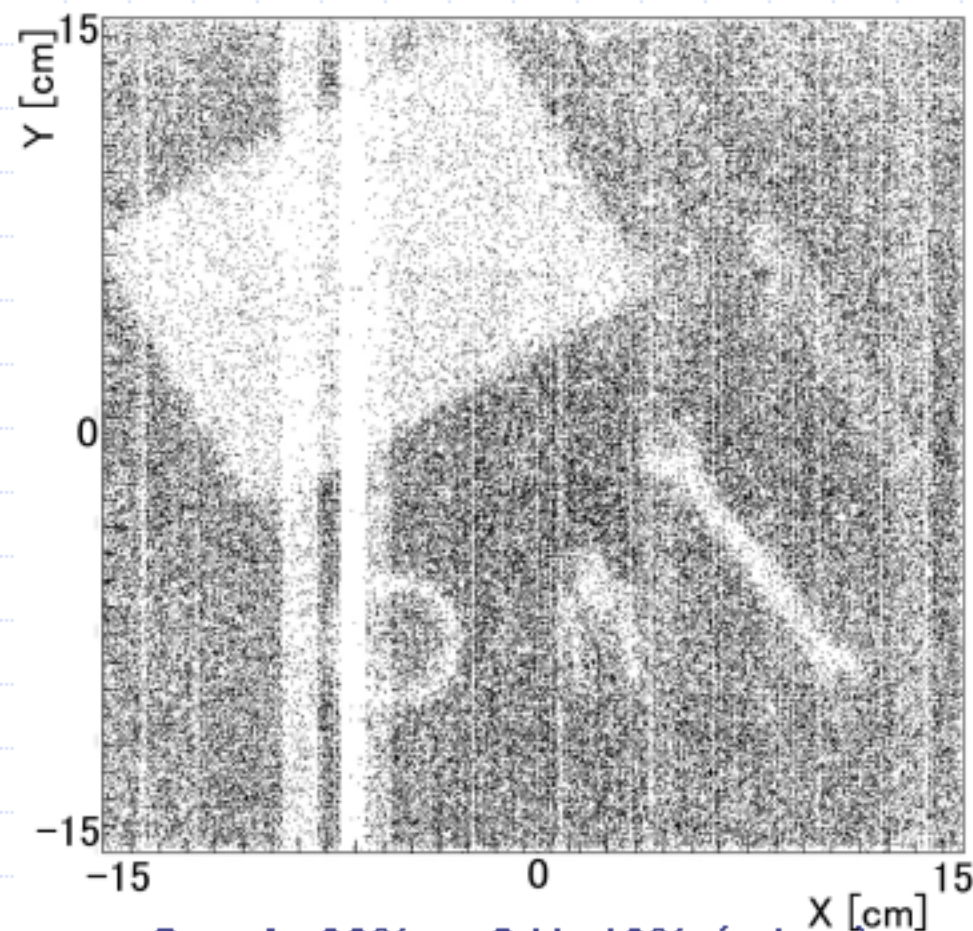


検出面積 9倍
Read out数 3倍

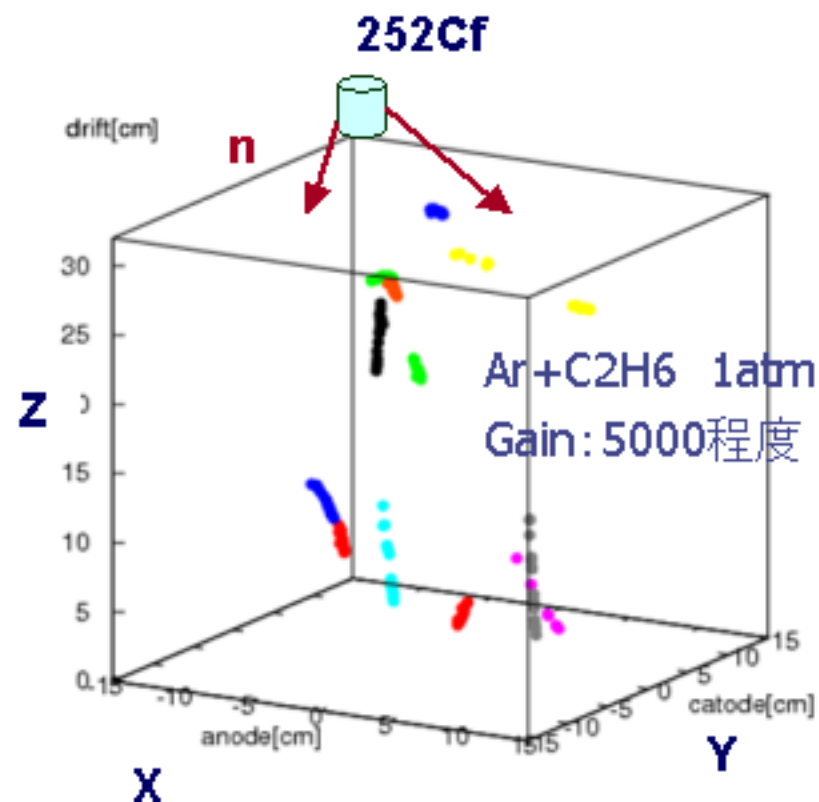
従来の μ -PIC

- pixel数 : 65,536(=256²)個
- pitch : 400 μ m
- 検出部面積 : $\sim 105\text{cm}^2$





Gas: Ar 90% + C₂H₆ 10% (~1cm)
 Src: ¹⁰⁹Cd(22keV) V_{anode}: 510V



30cm角 μ -PICも問題なく動作

近いうちに30cm角 μ -PICを使ったMeV- γ カメラを立ち上げる予定

summary

- ◆ COMPTTELでは30天体、EGRETでは300天体
- ◆ MeV- γ 線天文学の発展には新しい検出器が必須
- ◆ 反跳電子の飛跡も捕らえるAdvanced Compton Imagingに基づく検出器を開発中
- ◆ Sub-MeV領域で光子毎に到来方向を得てimagingしたのは世界初
- ◆ Compton散乱の運動学を用いることで従来のCompton Imagingよりも低いバックグラウンドを実現
- ◆ 原理実証用のprototypeの性能
Energy range : 100 keV ~ 1 MeV FOV : ~1str
for 662keV ARM : 8.5° SPD : 120°
Energy resolution : 15% Efficiency : 4.7×10^{-6}
- ◆ SMILE実験を進行中
- ◆ 10cm cubeのTPCを用いたMeV- γ 線カメラを気球に搭載し、 γ 線バックグラウンドの測定を行う
- ◆ 2006年秋に第1回目の放球を予定
- ◆ 将来にむけ、30cm角の μ -PICとGEMを作成、動作を確認



おわり。