

# MeV/GeV検出器の 過去、現在、未来

高橋忠幸

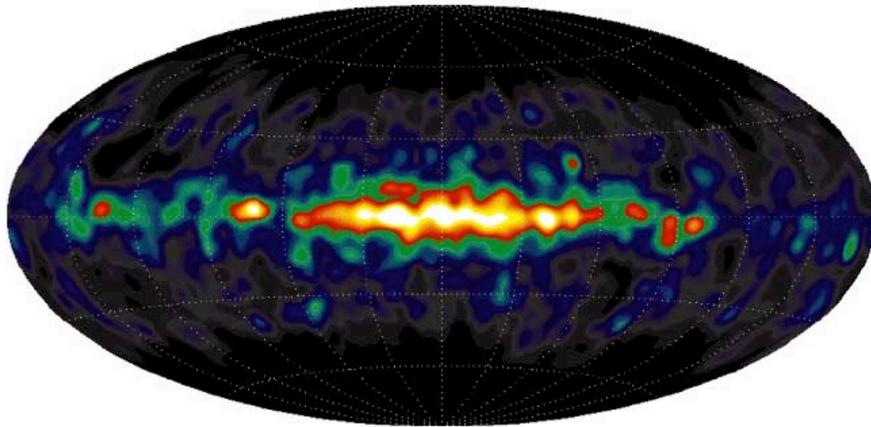
宇宙航空研究開発機構(JAXA)

宇宙科学研究本部(ISAS)

# ガンマ線観測

- 高いエネルギーに加速された電子や陽子などの「非熱的エネルギー」を探るためのプローブ

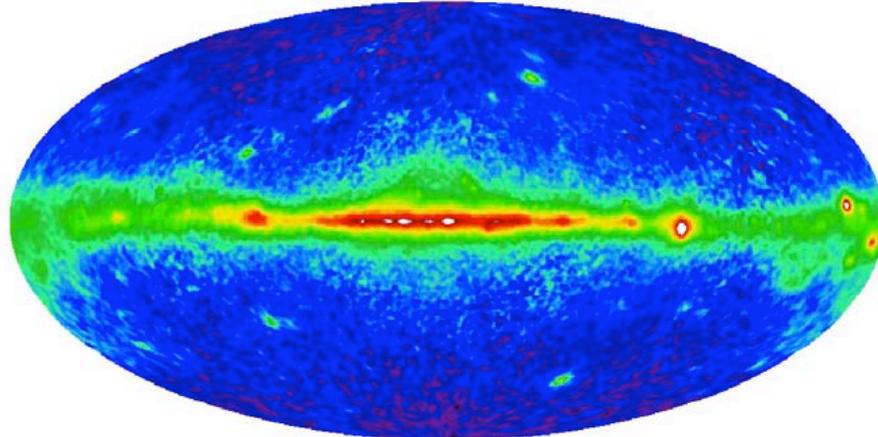
COMPTEL 1-30 MeV



銀河系からの広がった放射が何によるものなのか、まだ説明がついていない

銀河系の非熱的なエネルギーの大半を担うと考えられている MeV/GeV 陽子からの放射。

EGRET >100 MeV

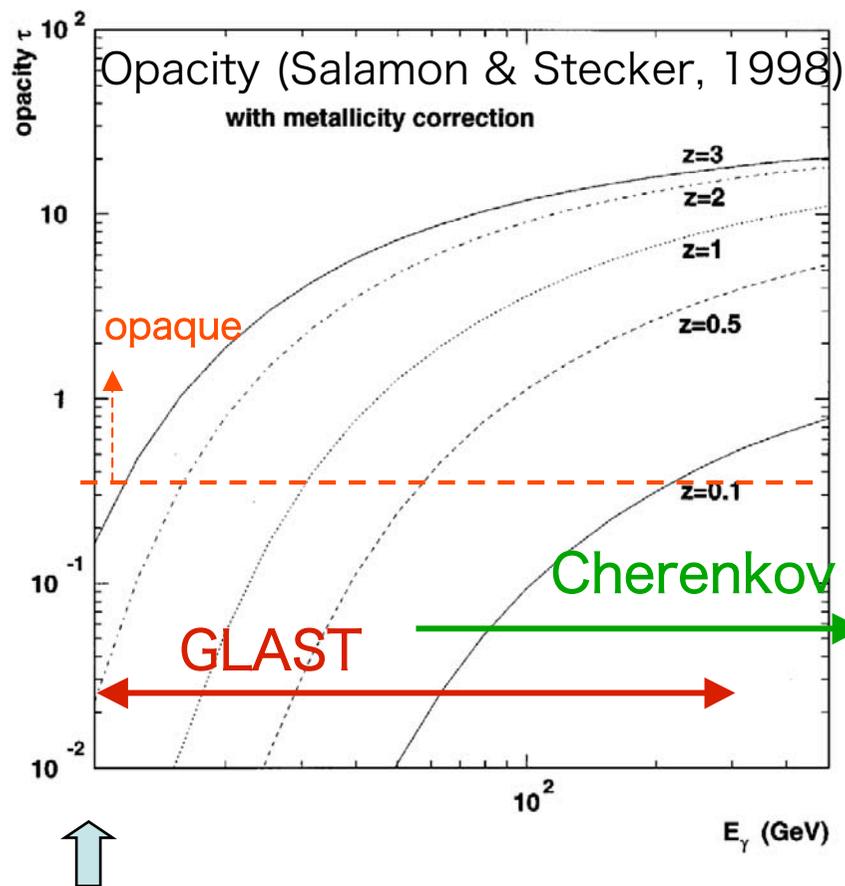


ブラックホールの直接的証拠？

未知の素粒子の崩壊ガンマ線？

マイクロブラックホールの蒸発？

# MeV/GeVガンマ線による宇宙物理



No significant attenuation below ~10 GeV.

$\gamma \gamma \rightarrow e+e^-$

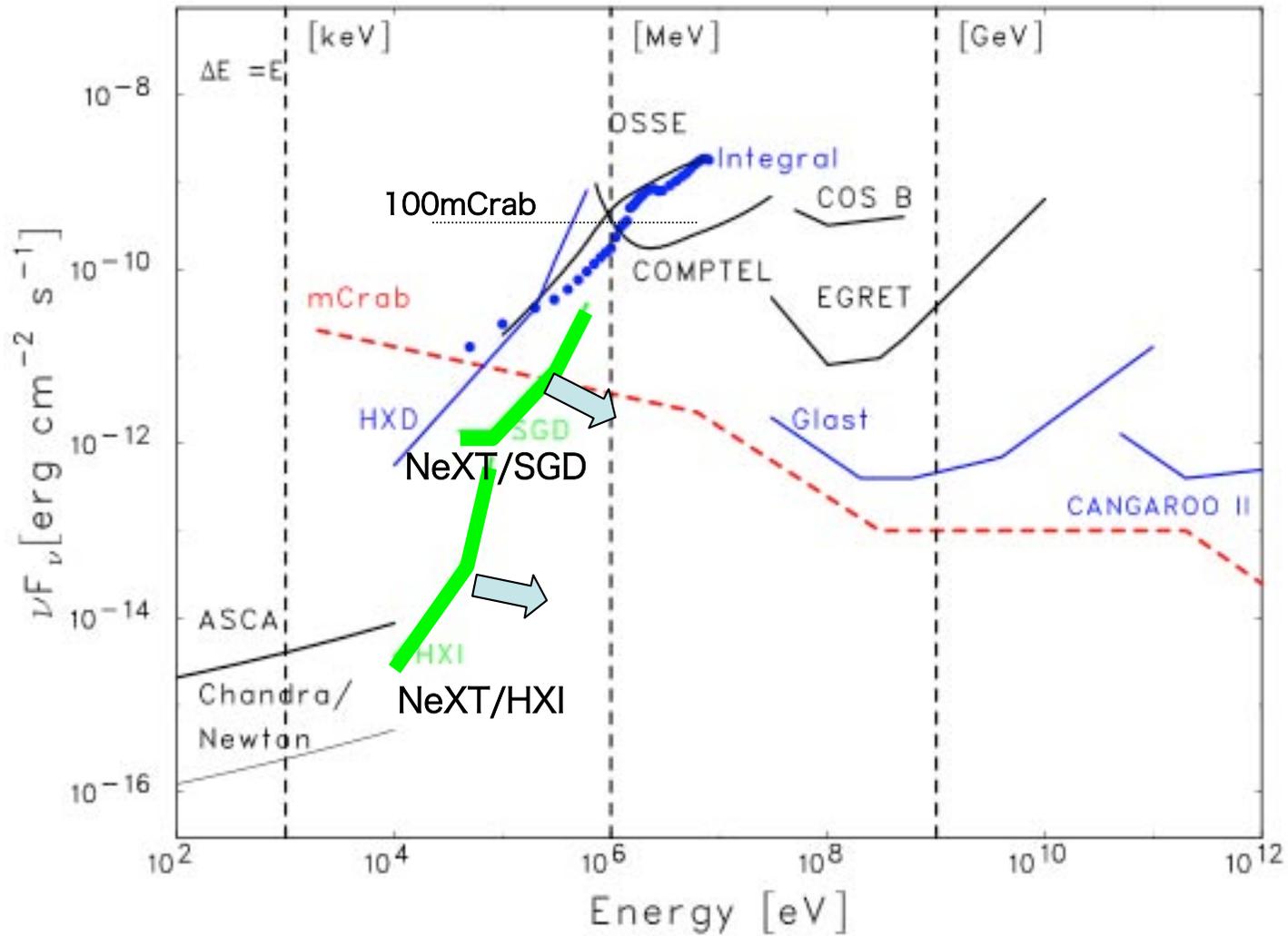
TeVガンマ線はIRに  
GeVガンマ線はUV/X-ray

にSensitive

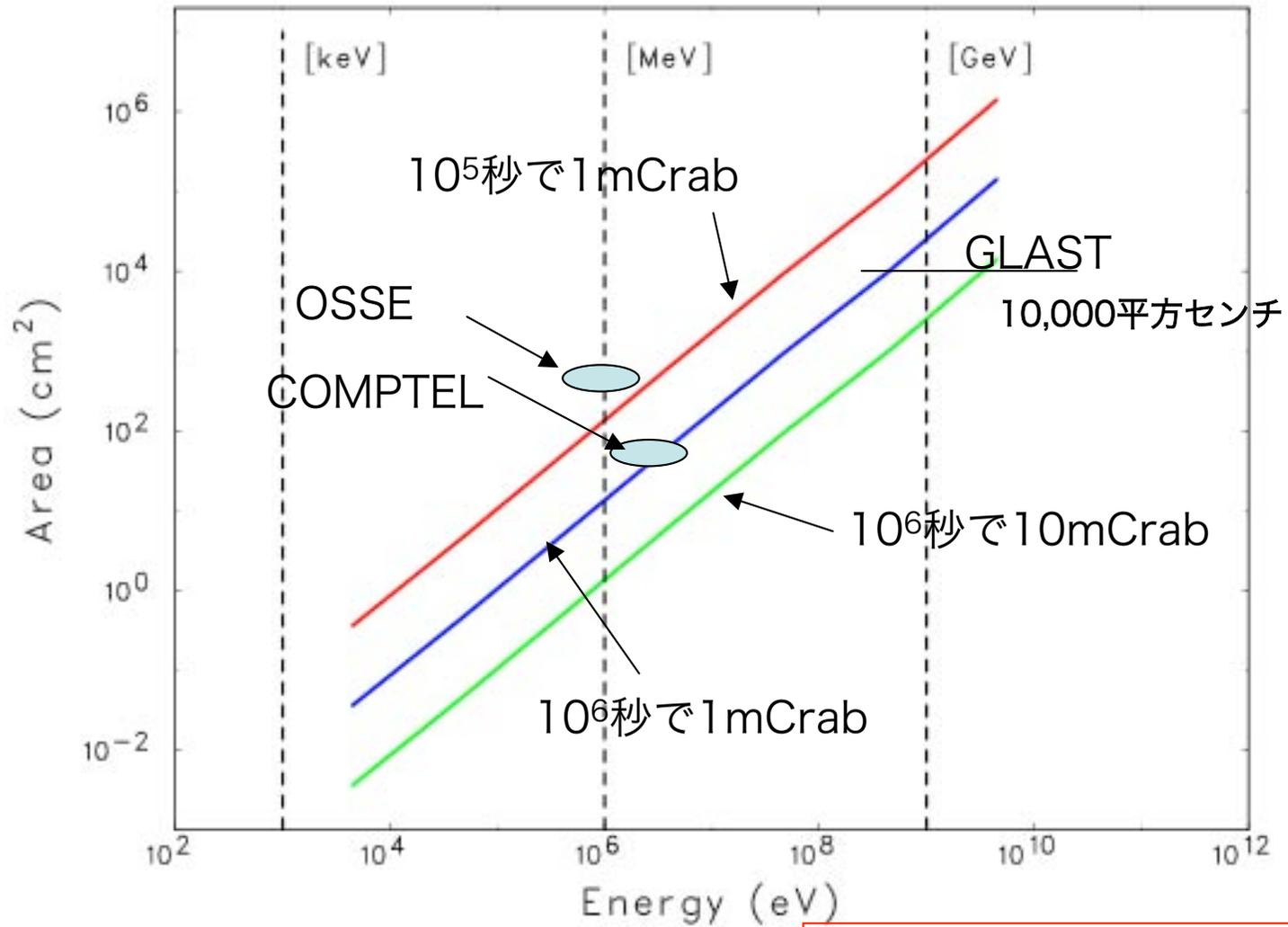
遠方の宇宙を吸収なしに  
観測できる。

# ガンマ線観測はmCrabの時代へ

- ただし、subMeV/MeVガンマ線領域をのぞいて -



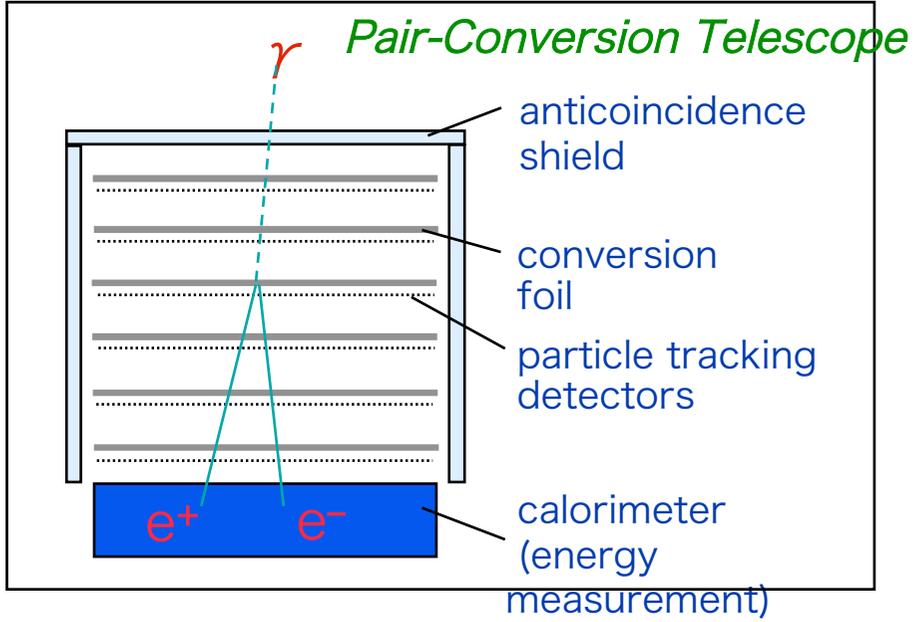
# Photonが足りないガンマ線



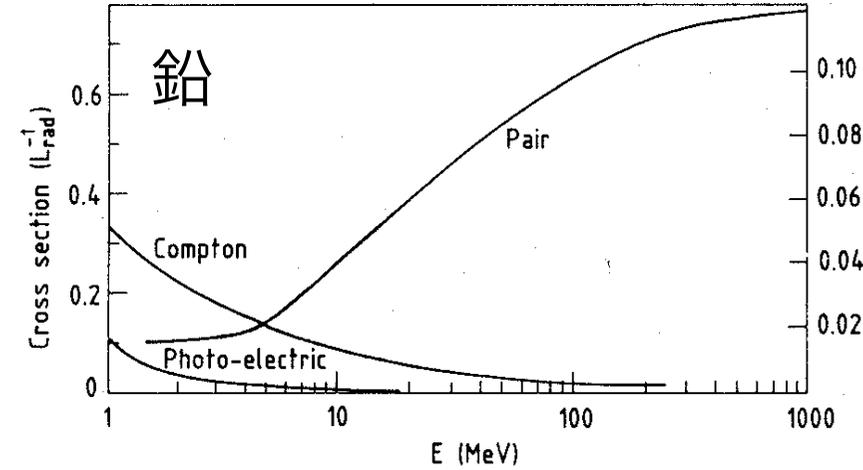
GeV領域はPhoton Limit  
MeV領域はバックグラウンドLimit

# GeVガンマ線の検出

対生成  
↓  
が主要な反応過程



## 反応断面積



Photonを電子陽電子対に変換するための  
コンバーター(1 r.l 以上)  
(鉛、タングステン等 ~5mm厚)

エネルギーを測定するための、カロリメター  
(NaI、CsI等 8r.l. ~20 cm厚)

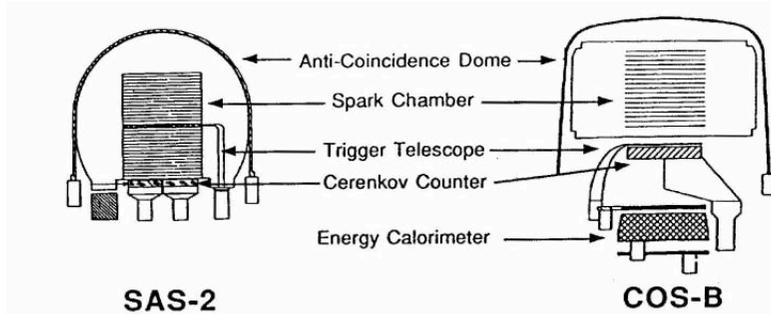
Fig. 2: Photon cross-section  $\sigma$  in lead as a function of photon energy. The intensity of photons can be expressed as  $I = I_0 \exp(-\sigma x)$ , where  $x$  is the path length in radiation lengths. (Review of Particle Properties, April 1980 edition).

これで10000平方センチの面積を。。。

## SAS2からEGRETまで

- ・ 面積と重量が勝負
- ・ スパークチェンバーの時代

1972 Nov -  
1973 June

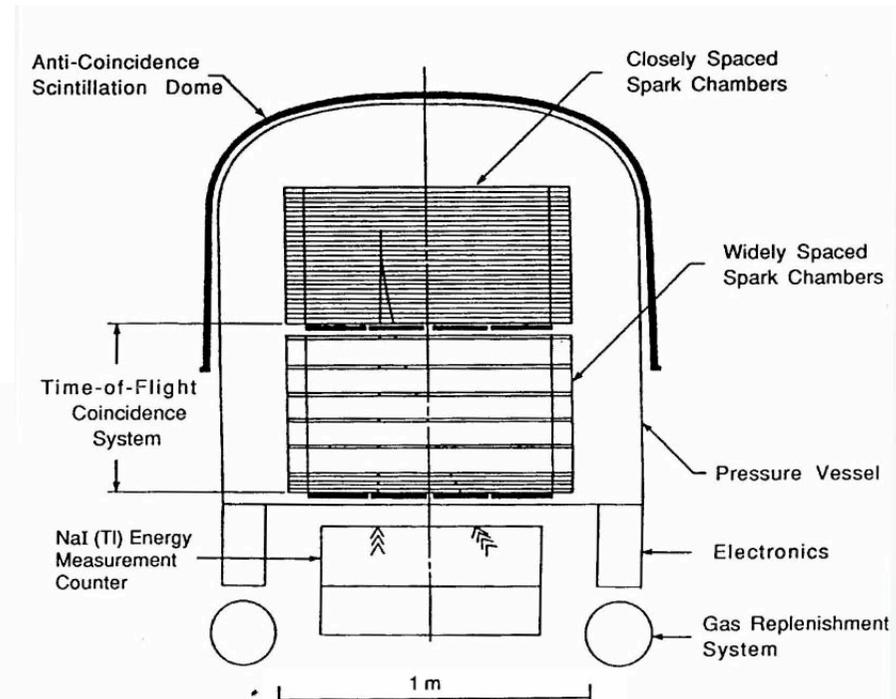


SAS-2

COS-B

SAS (Small Astronomical Sattelite)

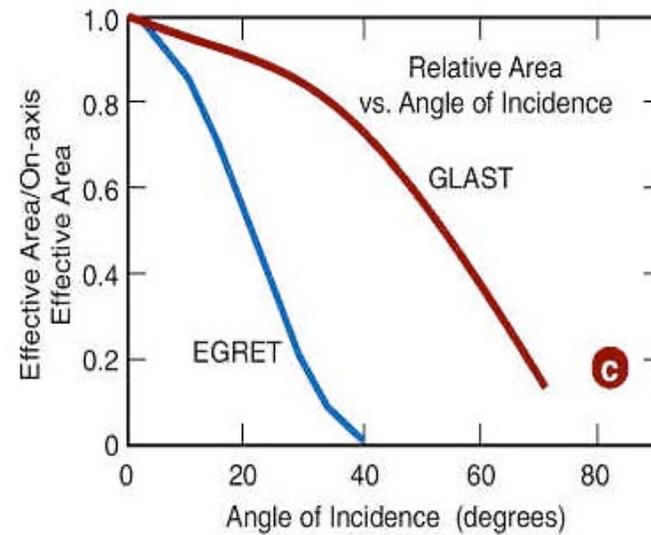
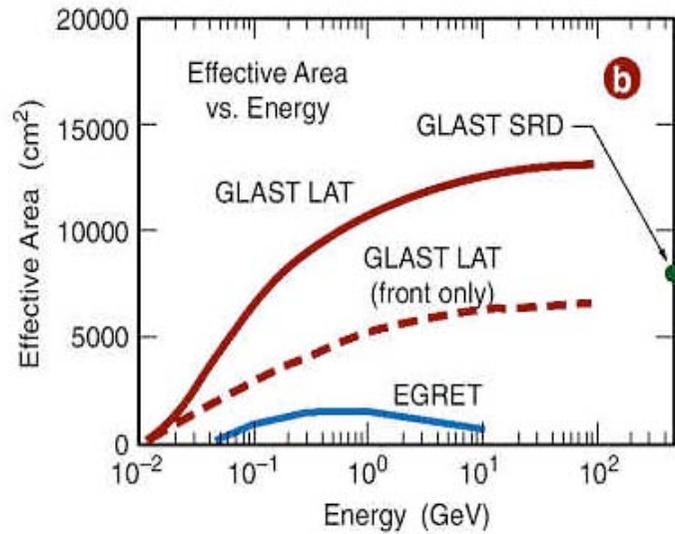
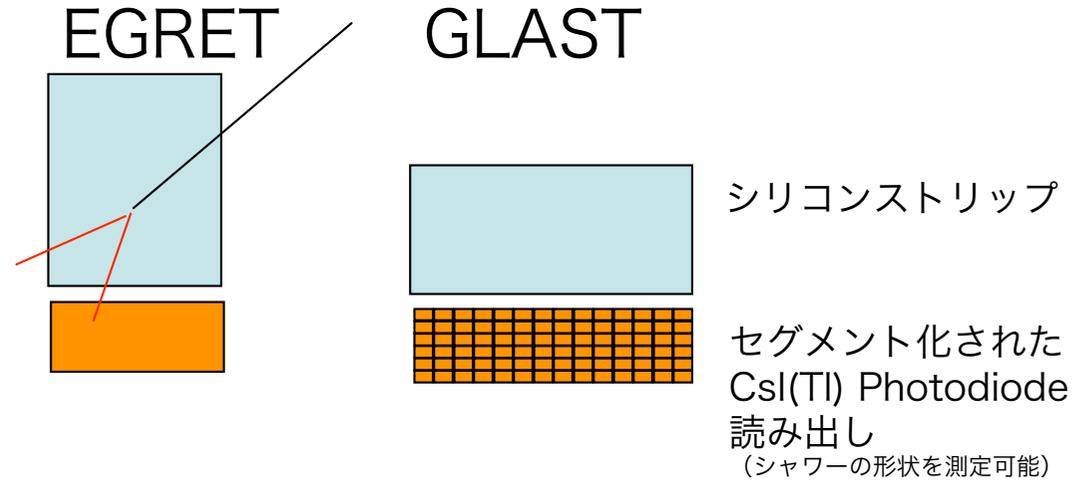
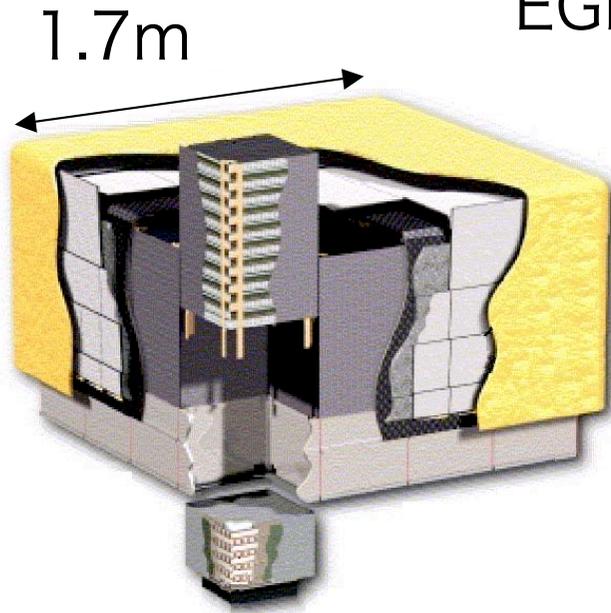
1991-2000



1 m

1.8 t

# EGRETからGLASTへ

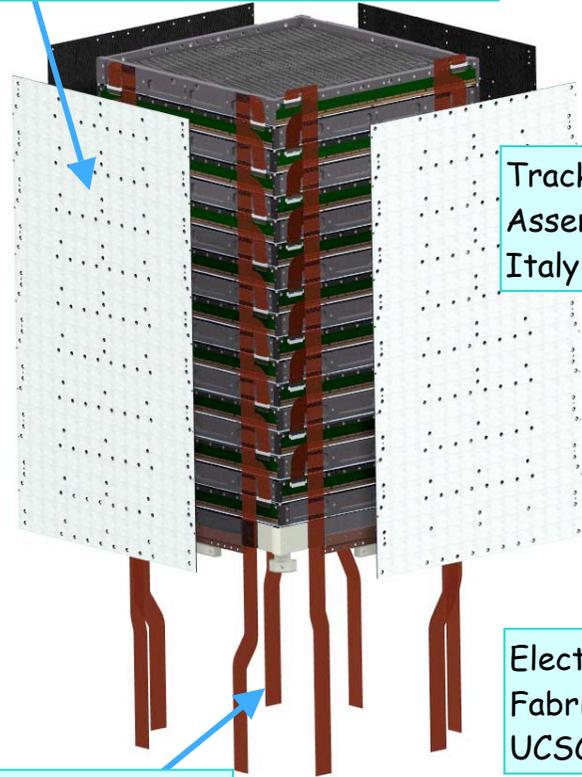


# GLAST -> シリコン時代

Module Structure (walls, flexures, thermal-gasket, fasteners)  
Engineering: SLAC, Italy (Hytec)  
Procurement: SLAC, Italy

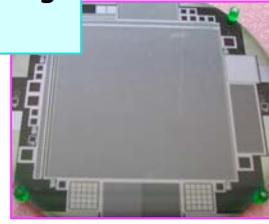
SSD Procurement, Testing  
Japan, Italy, SLAC

SSD Ladder Assembly  
Italy (G&A, Mipot)

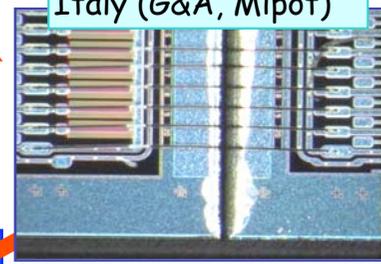


Tracker Module Assembly and Test  
Italy

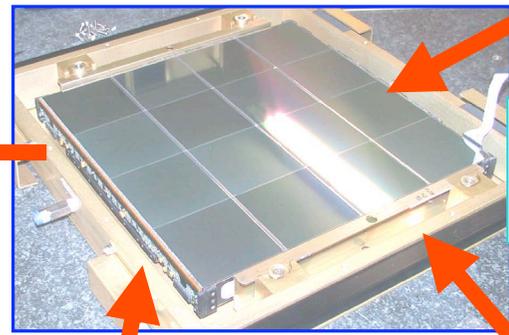
18



10,368

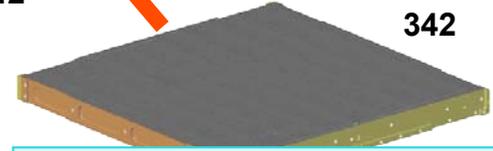


2592



Tray Assembly and Test  
Italy (G&A, Mipot)

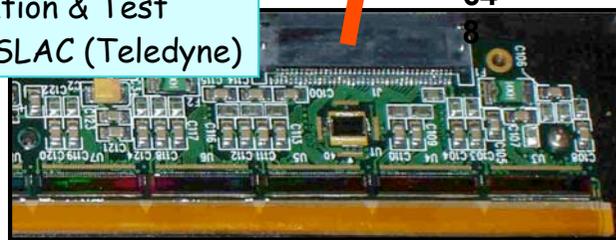
342



342

Electronics Design, Fabrication & Test  
UCSC, SLAC (Teledyne)

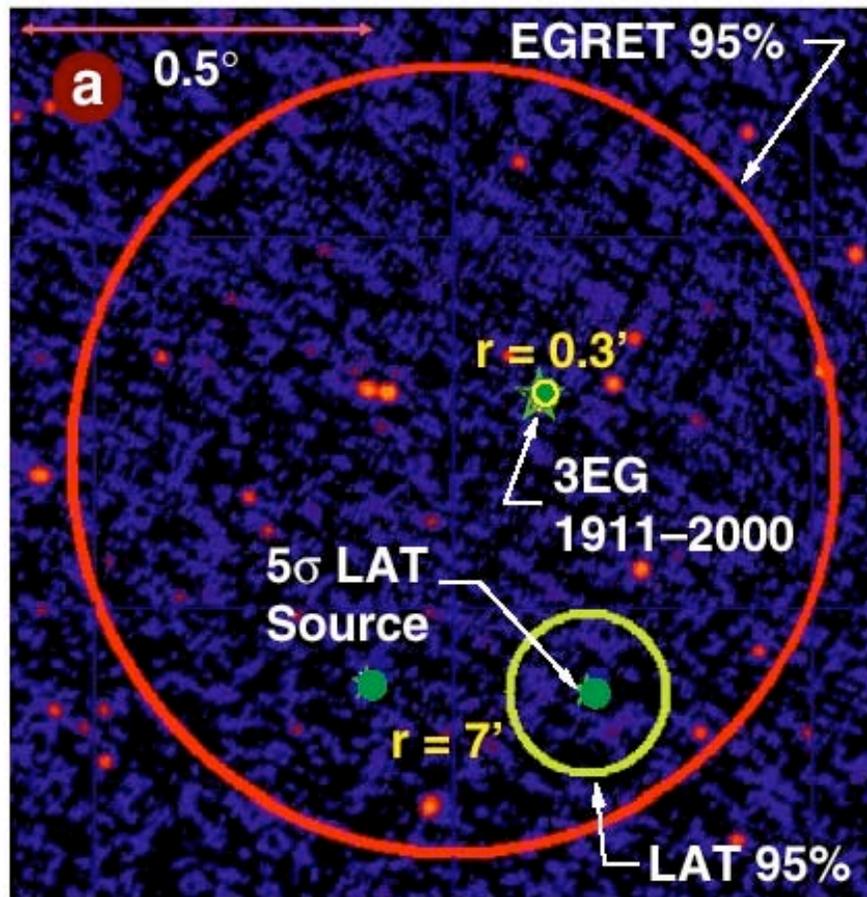
64



Readout Cables  
UCSC, SLAC

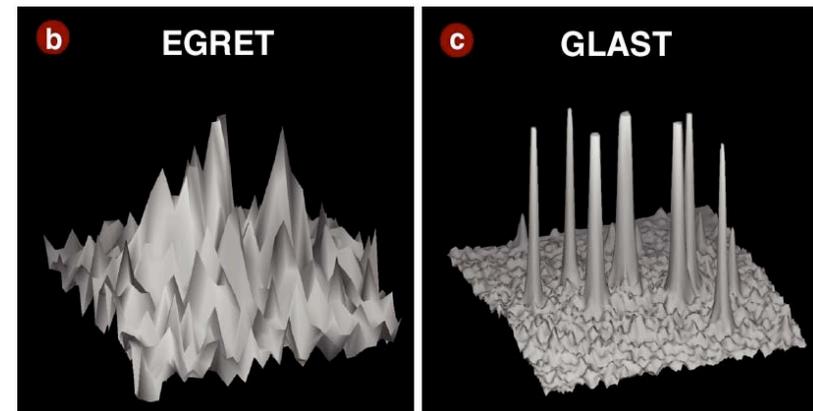
Composite Panel & Converters  
Engineering:  
SLAC, Italy (Hytec, COI)  
Procurement: Italy (Plyform)

## GeVガンマ線「天文学」

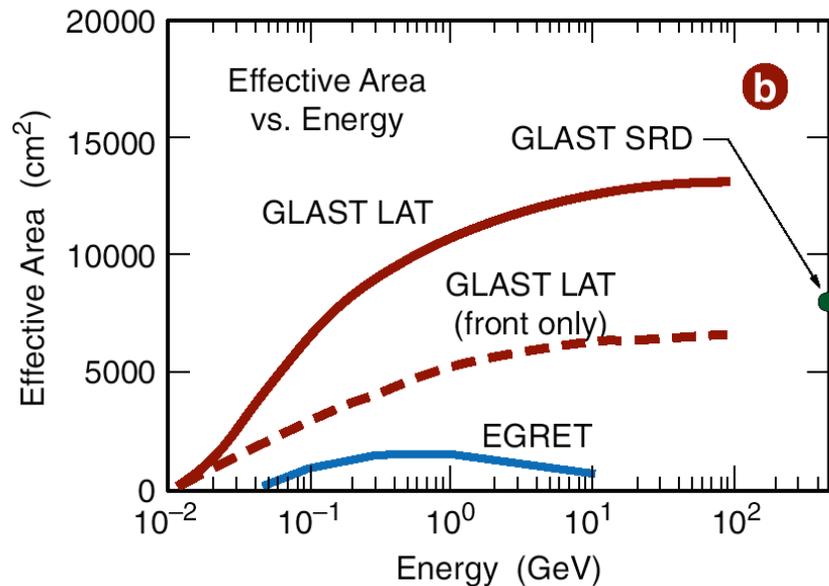
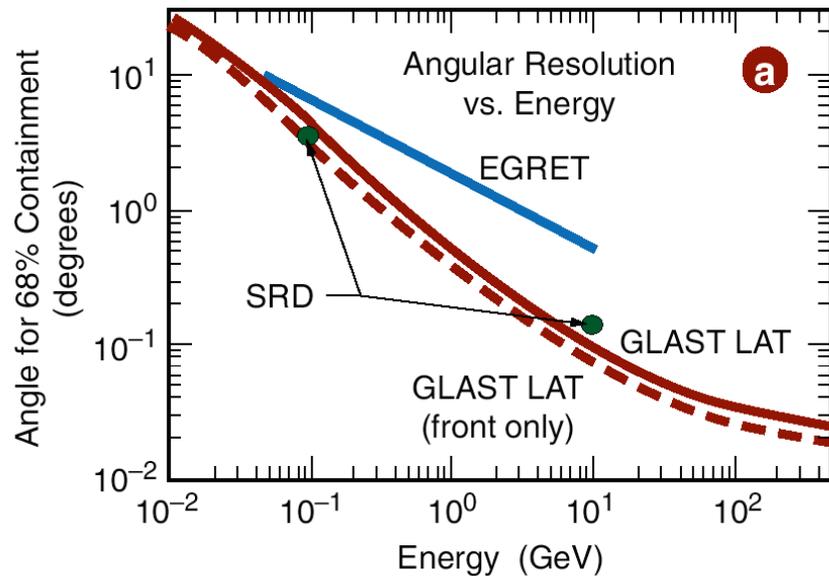


- Rosat or Einstein X-ray Source
- 1.4 GHz VLA Radio Source

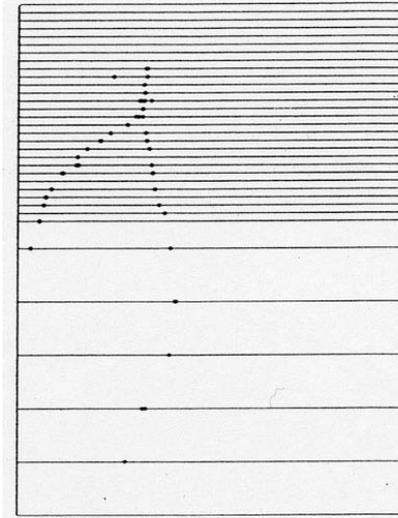
- GeVガンマ線の領域で1分角を上回る角度分解能
  - 光・X線による同定
  - 天文学へ



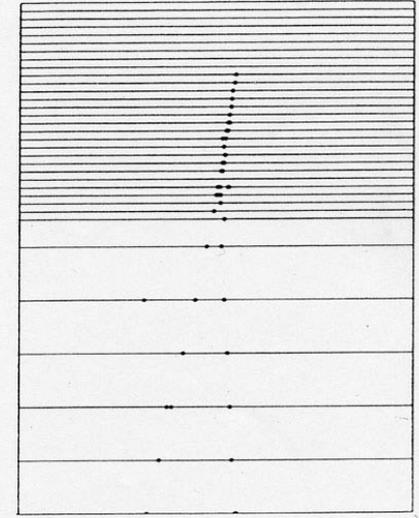
## 角度分解能：有効面積



35MeV



1GeV



Kanbach et al.

- 注意：1 GeV以下では角度分解能は1度から10度へ（多重散乱）
- GLASTは100 MeVで、数1000平方センチの有効面積！

# 次世代の高エネルギー天文学

## - MeVガンマ線天文学 -

- 目標：未開のMeVガンマ線領域で、高い撮像能力を持った、高感度検出器による新しい天文学を切り開く。
- 現状：激しい国際競争
  - 日本ばかりではなく、世界的にも重要なテーマになっている。  
(日本：宇宙開発における長期計画、アメリカ：宇宙科学における長期計画)
  - 検出器の独創的なアイデア、実際に検出器を作る技術力が必要。

# コンプトン望遠鏡

## コンプトン散乱

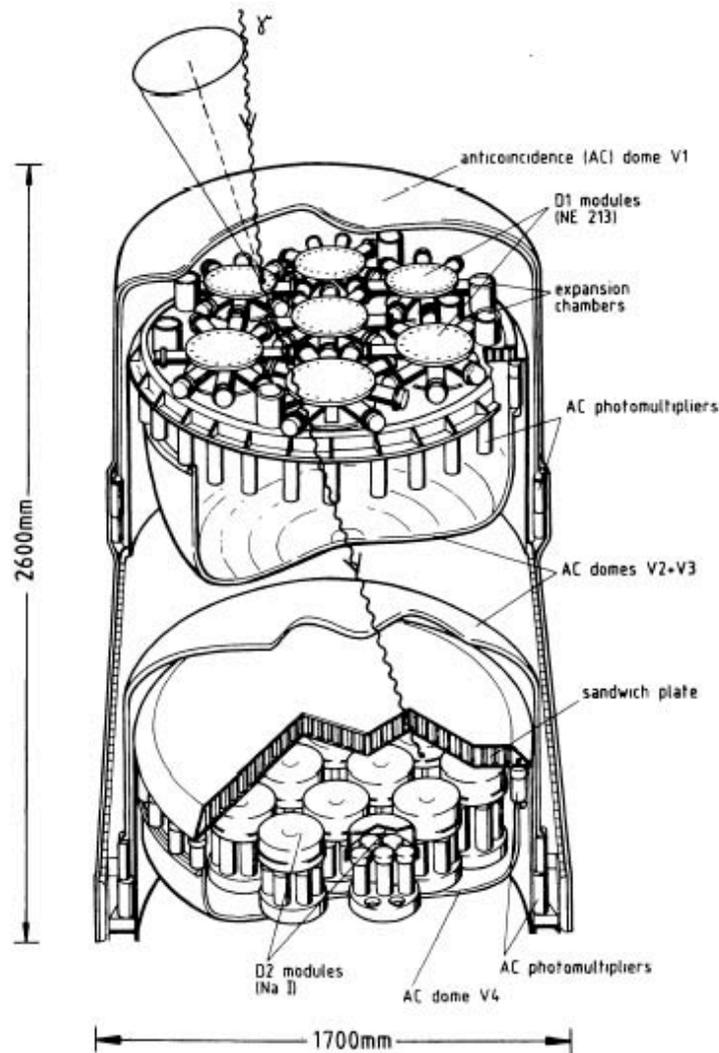
$$\cos \varphi = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right)$$

ガンマ線(E1)はD1で散乱した後、D2で完全に止まる(E2)とすると入射ガンマ線の方角を（リングで）得る事ができる（Classical Double Compton）。

コンプトン散乱のキネマティクスを用いてバックグラウンドを極限まで落とす。

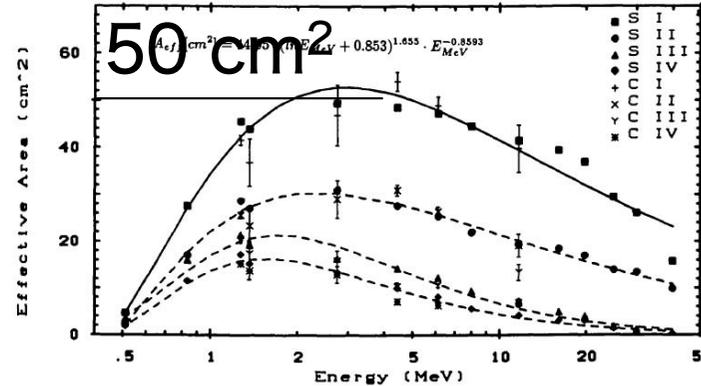
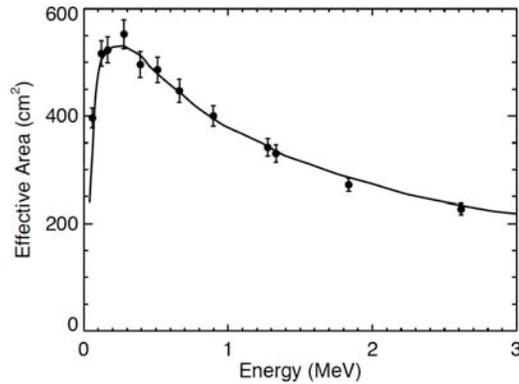
## 偏光

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \beta^2 \left[ \beta + \beta^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right]$$



1 トンの検出器でも有効面積 30~40 cm<sup>2</sup>

# MeVガンマ線検出器 OSSE vs COMPTTEL



数MeVでの感度は  
COMPTTELが圧倒的  
に高い

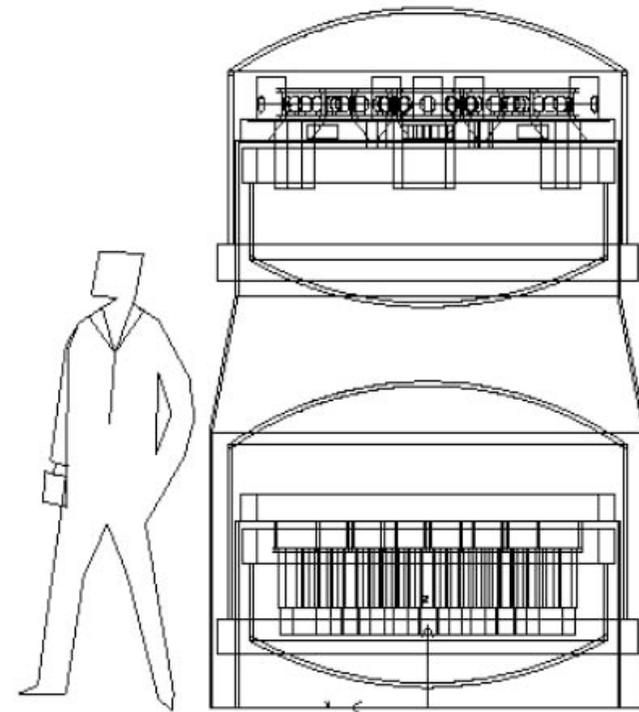
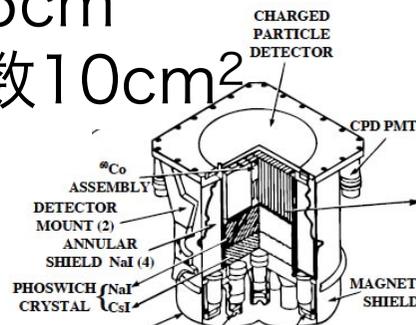
## OSSE

Nal(Tl) : 厚さ 10cm, 数100cm<sup>2</sup>

## COMPTTEL

Nal(Tl) : 厚さ 7.5cm

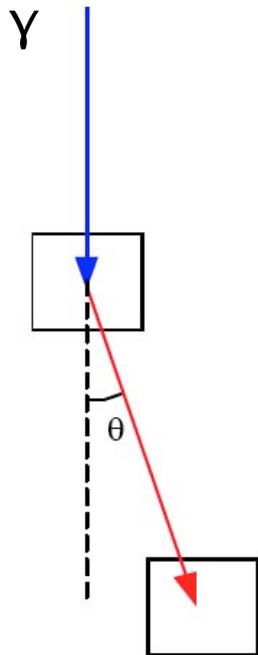
全体の有効面積, 数10cm<sup>2</sup>



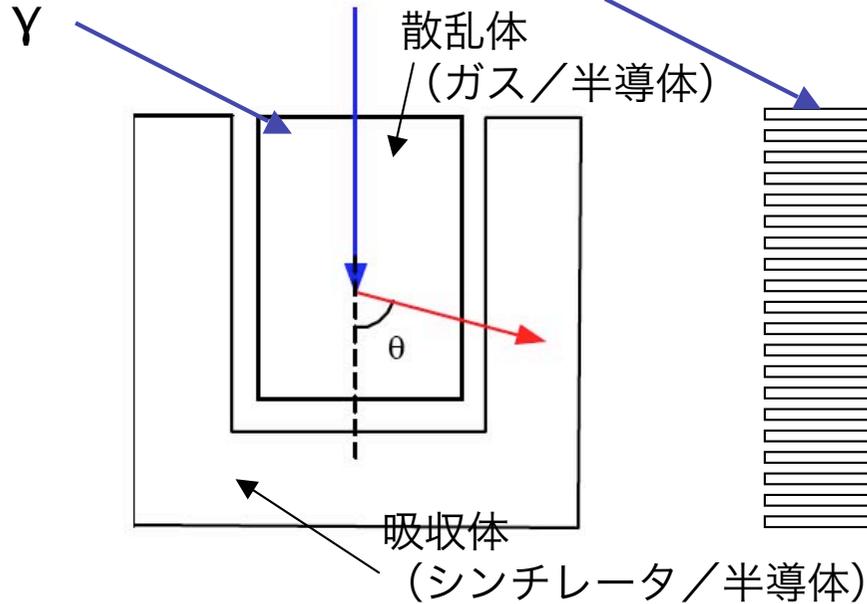
# COMPTELを超えるために

- ・ 低バックグラウンド
  - ・ コンプトン運動学の有効利用
    - ・ 電子の散乱方向の測定 (ガス/半導体)
    - ・ 多重コンプトン
  - ・ 角度分解能 (= エネルギー分解能) の向上 (半導体)
- ・ 広い視野

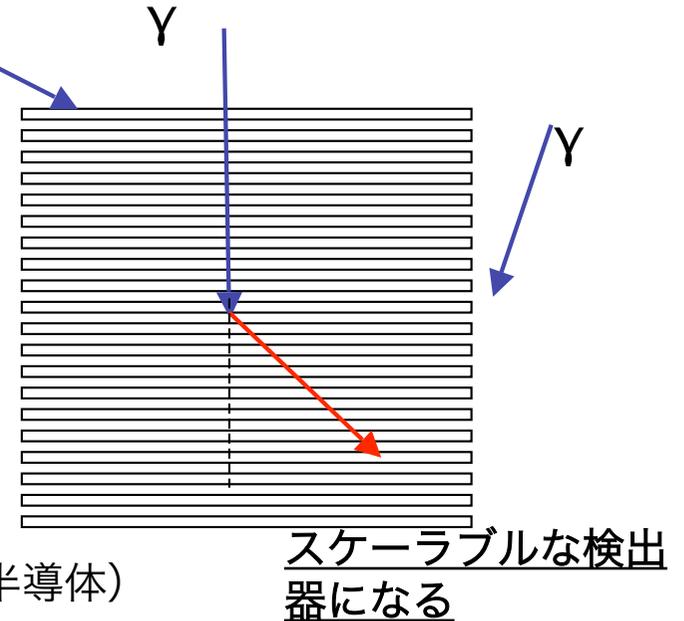
旧世代の  
コンプトン望遠鏡



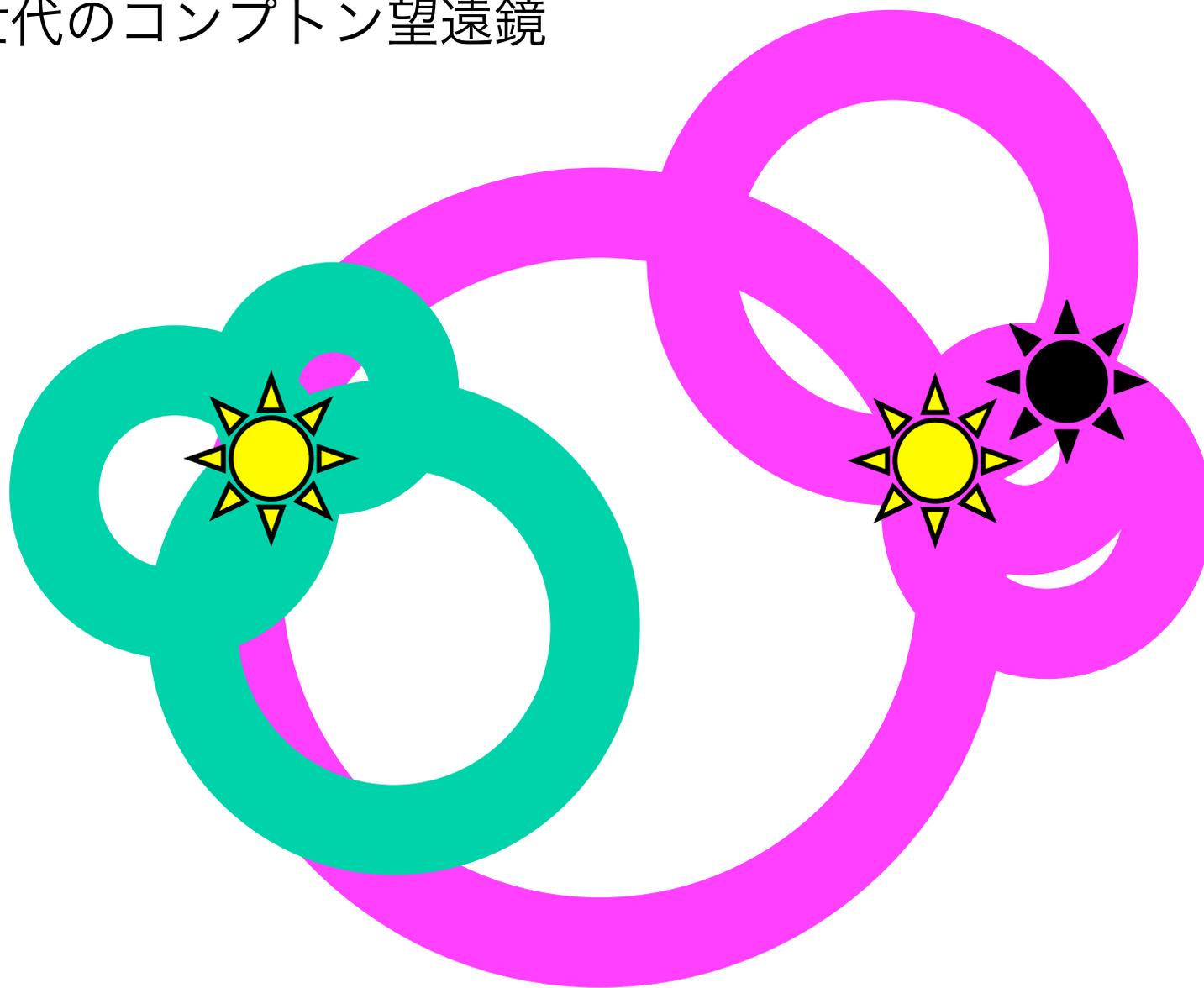
新世代の  
コンプトン望遠鏡



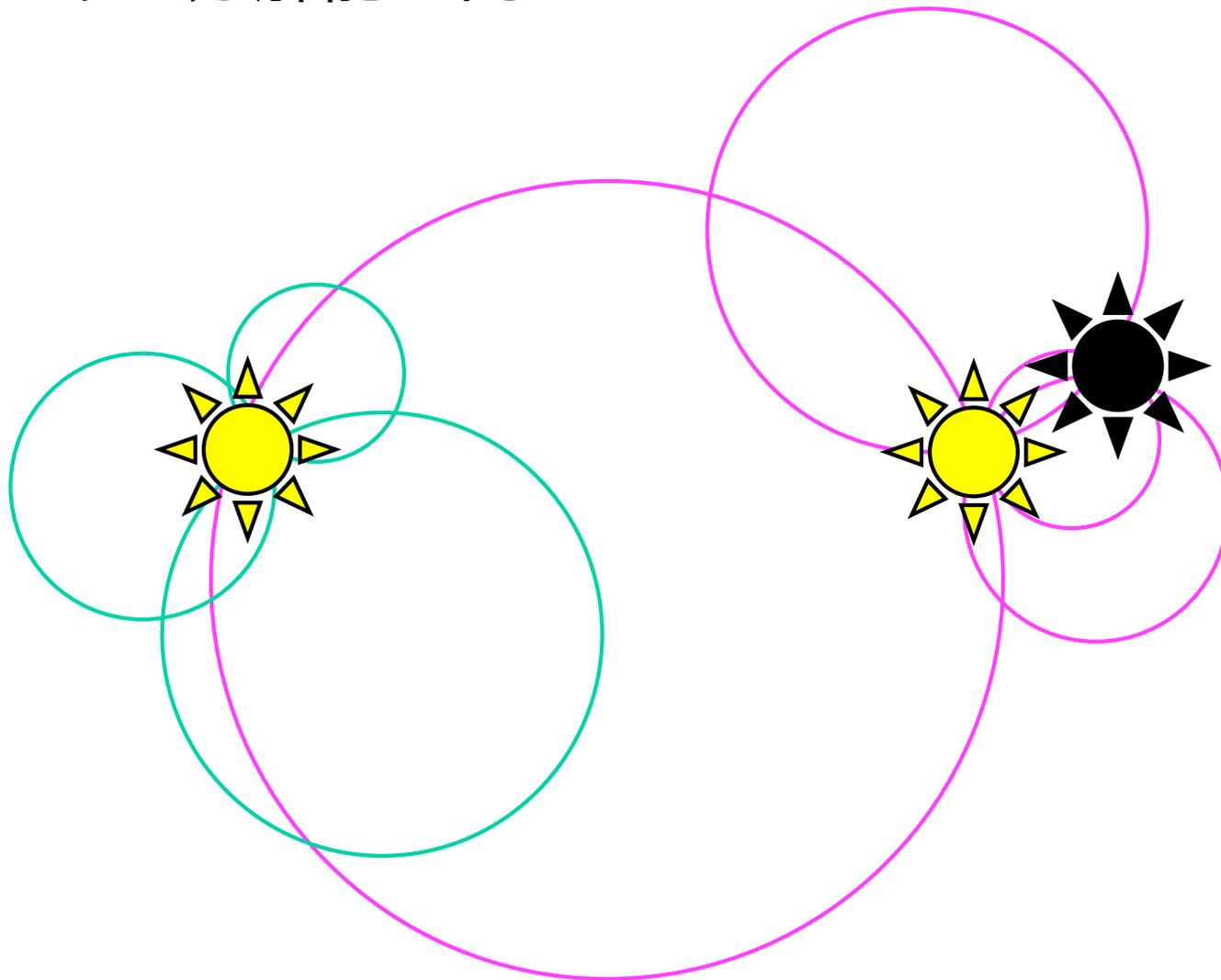
散乱体が吸収体を  
かねる (半導体)



# 旧世代のコンプトン望遠鏡



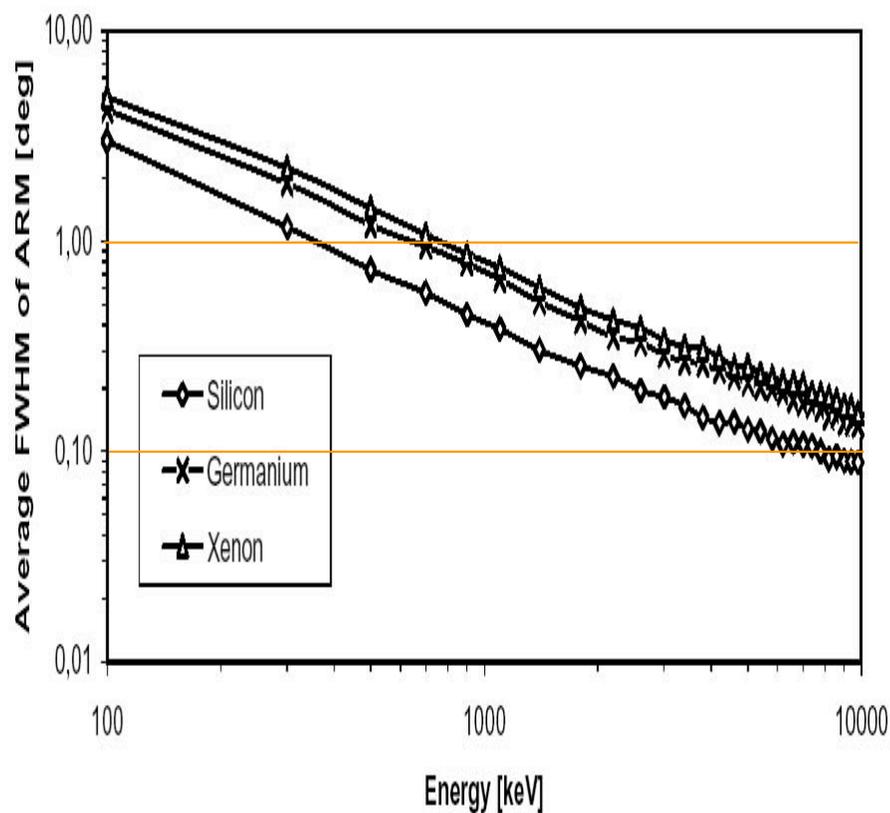
# エネルギー分解能の向上



最終的な角度分解能はドップラー効果で決まる

# Doppler限界

Zoglauer and Kanbach, SPIE, 2002

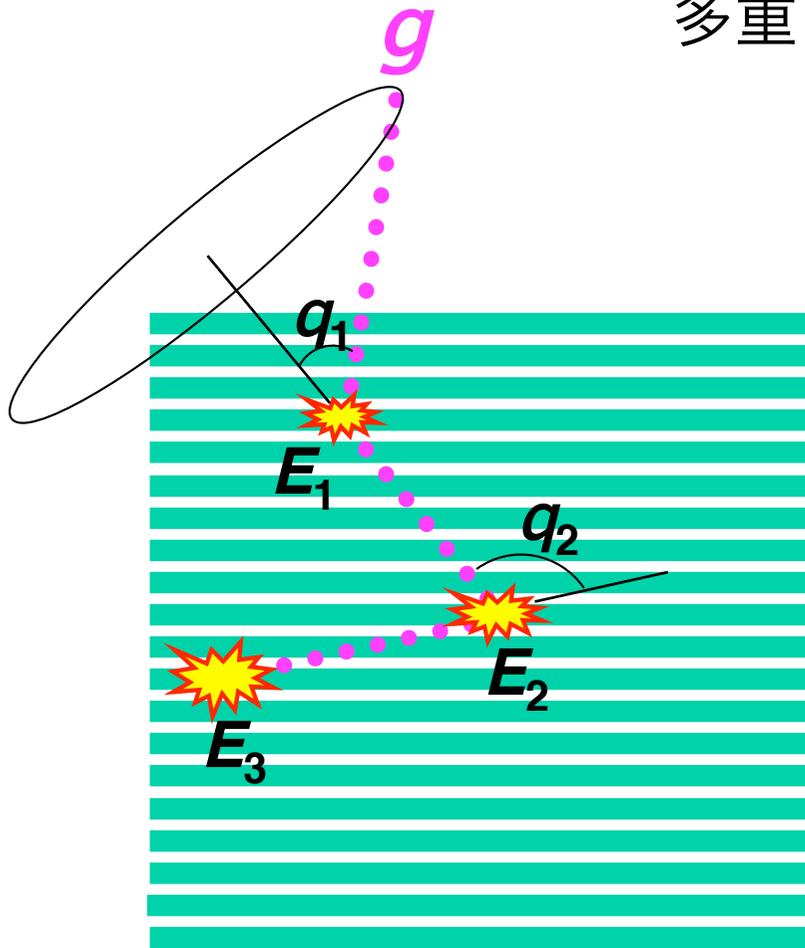


散乱される電子は、有限の運動量を持つ

(重い物質ほど大きい)。そのため、散乱体によって、理論的な角度分解能の限界があらわれる。

10 MeVで、0.2度程度まではいける (対生成では20度)

## 多重コンプトン法



$$\cos \theta_1 = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2 + E_3} - \frac{m_e c^2}{E_2 + E_3}$$

$$\cos \theta_2 = 1 + \frac{m_e c^2}{E_2 + E_3} - \frac{m_e c^2}{E_3}$$

$\cos \theta_2$  は、位置情報からも求まる  
(エネルギーから求めたものとコン  
システシー確認：バックグラウンド  
を落とす)

Proposed by T. Kamae *et al.* 1987

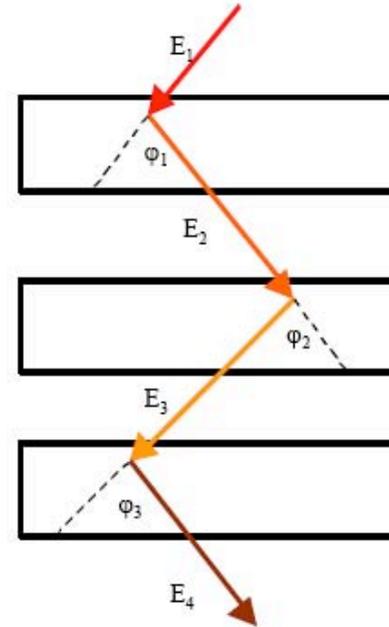
# 抜けてしまっても解ける (再発見)

$$\cos \varphi_1 = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad L_1 = E_1 - E_2$$

$$\cos \varphi_2 = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_2} \right) \quad L_2 = E_2 - E_3$$

$$\cos \varphi_3 = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_4} - \frac{1}{E_3} \right) \quad L_3 = E_3 - E_4$$

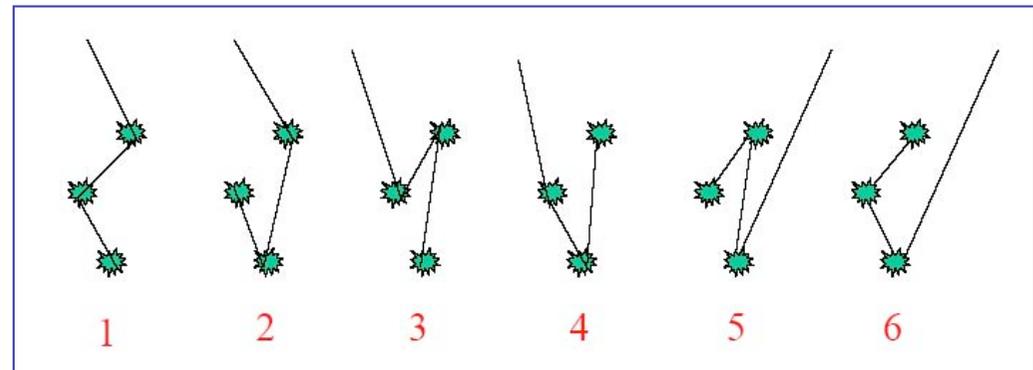
$$E_1 = L_1 + \frac{L_2 + \left[ L_2^2 + \frac{4m_e c^2 L_2}{1 - \cos \varphi_2} \right]^{\frac{1}{2}}}{2}$$



presentation by Kurfess

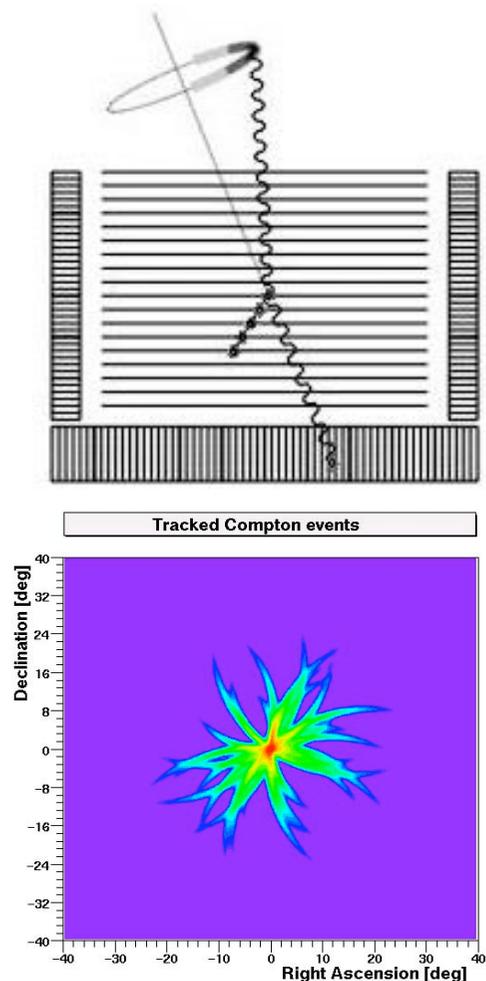
ACT (Advanced Compton Telescope) の考え

シーケンスを解く事が必要



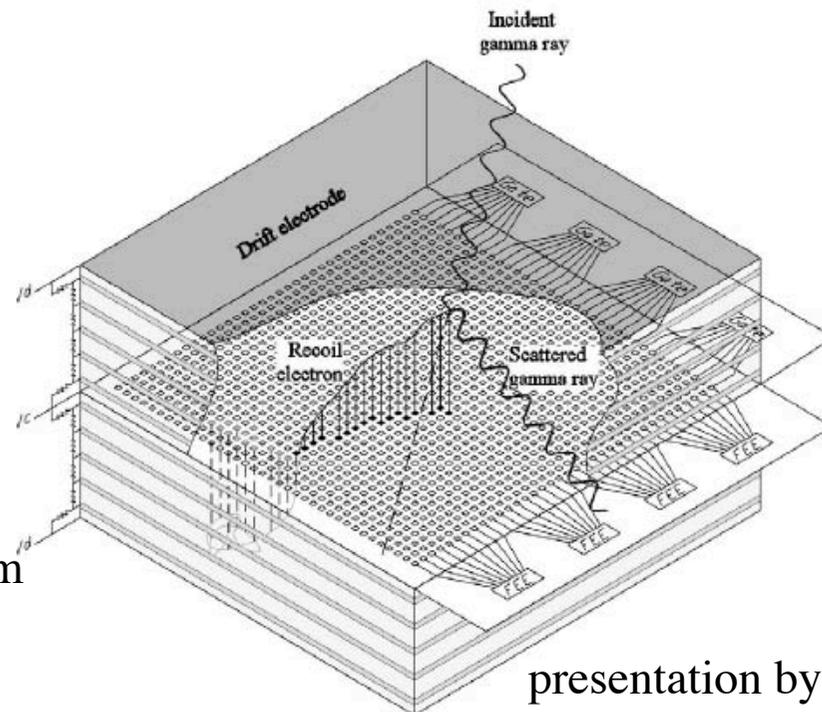
## 散乱電子の利用

- ・ 散乱電子の方向がわかると、散乱の順番がわかる
- ・ Compton リング → アーク → 点
- ・ 角度分解能（リングの幅、点の大きさ）は、エネルギー分解能で決まる



presentation by MEGA team

半導体はエネルギー分解能が高く、角度分解能があがる、反応確率も高い、ただし、電子のトラッキングに限界

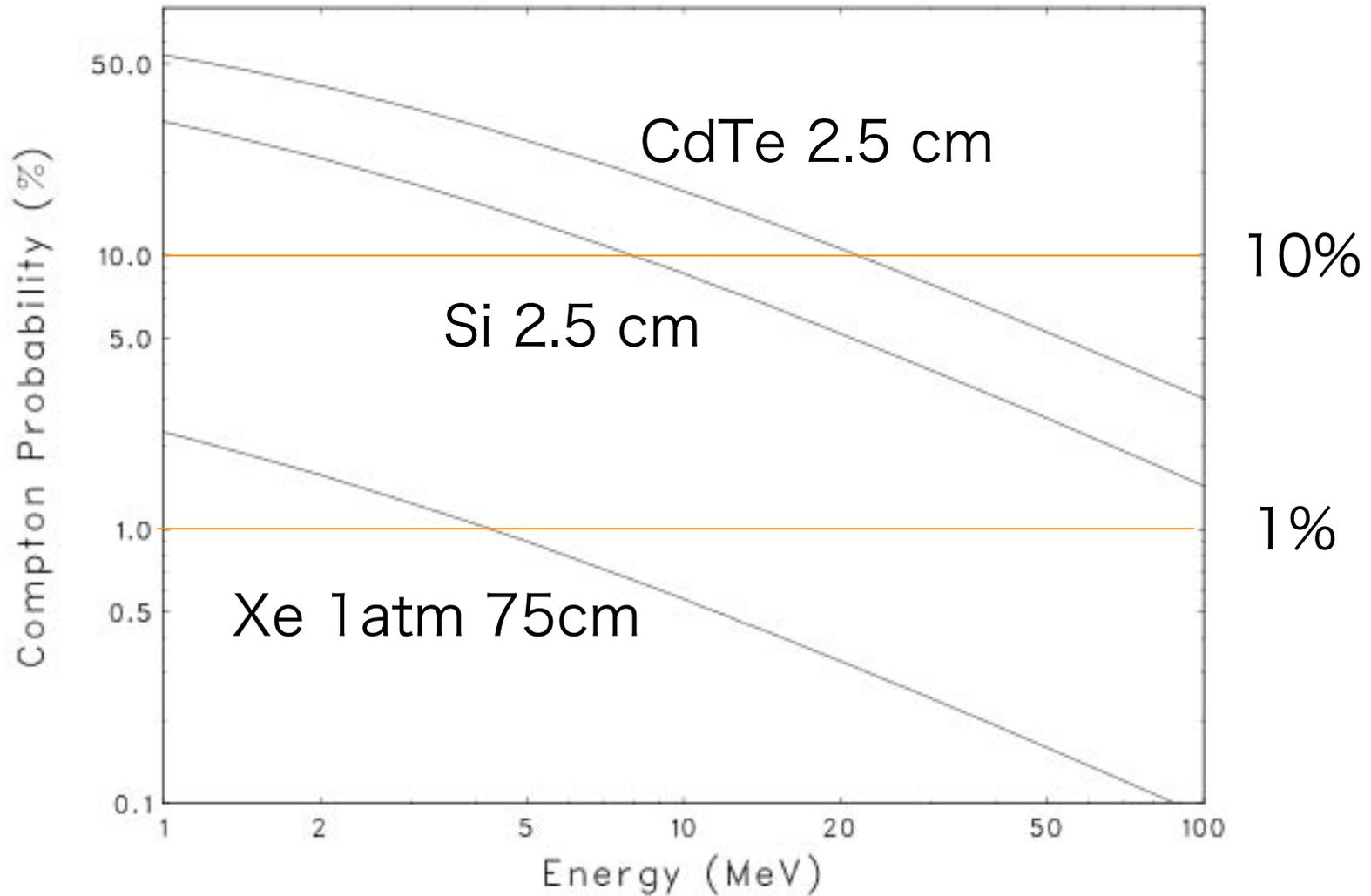


presentation by Apriel

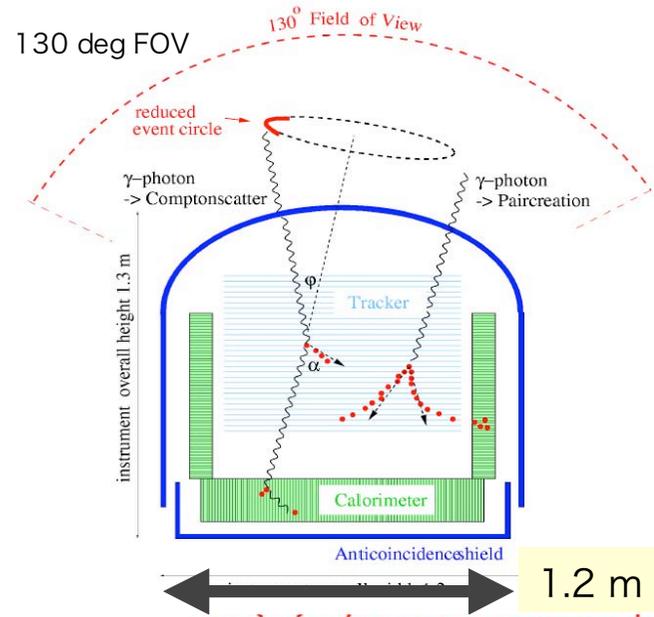
散乱電子のTrackingにはガスカウンタが有利、ただしエネルギー分解能と反応確率

## コンプトン断面積

コンプトン望遠鏡は、散乱させる事が必要



# COMPTELチームの次期計画 --MEGA--

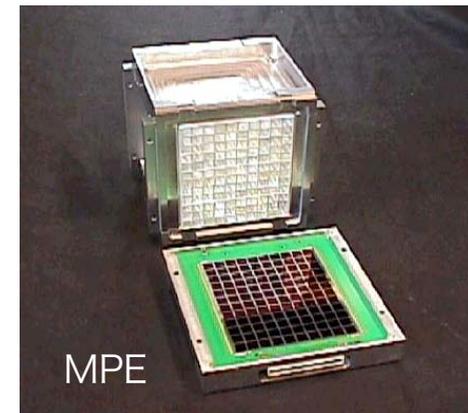
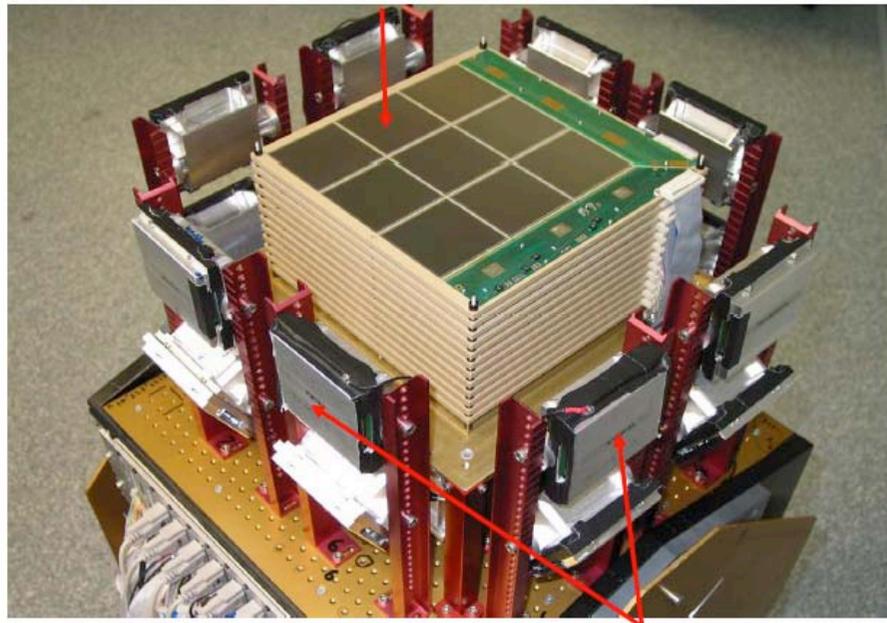


広視野 コンプトン・対生成 望遠鏡

	MEGA	COMPTEL	
A <sub>eff</sub>	100	25-30	cm <sup>2</sup>
E:	0.5-50	1-30	MeV
F.o.V.	4	1	sr
ang.res.	~2°	3.5°	FWHM
En.res.	~3%	8%	@ 1.8 MeV

コンプテルの10倍高い感度

シリコンストリップ  
+  
CsIカロリメータ  
Mass 680 kg  
Power 240 W

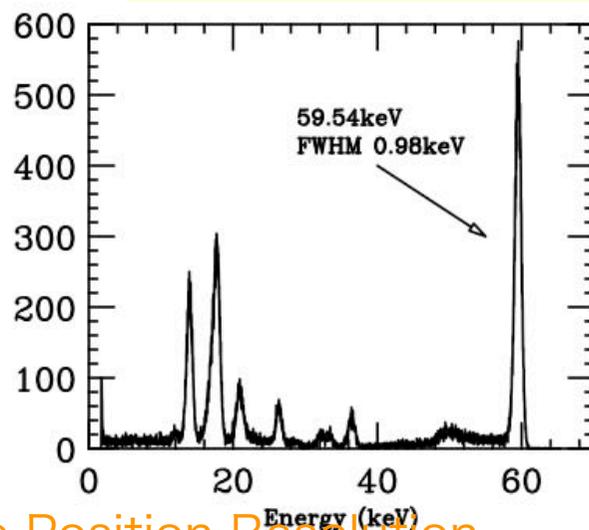
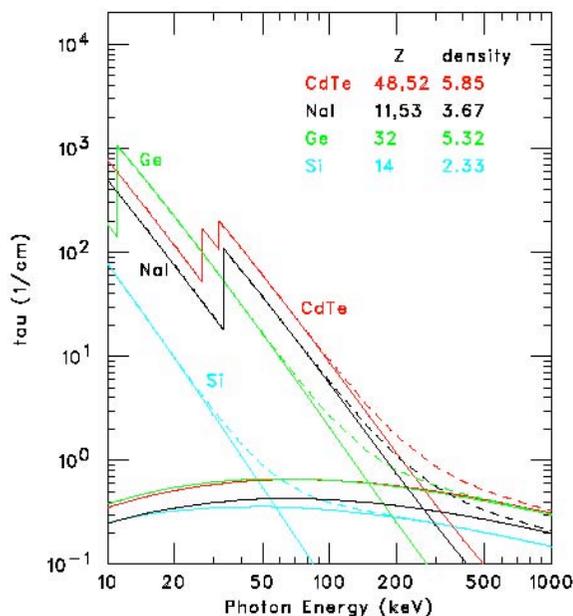


# 新しい半導体 -CdTe- のコンプトンカメラへの応用 (ISAS)

- High Z semiconductor ( $Z_{Cd} = 48$ ,  $Z_{Te} = 52$ )

Nalにまさる検出効率

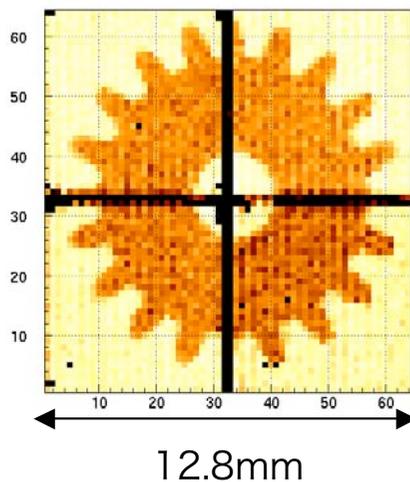
-> Significant Progress in 1990's  
(Takahashi et al. IEEE NS49, 3,2002等)



ISAS project

High Energy Resolution

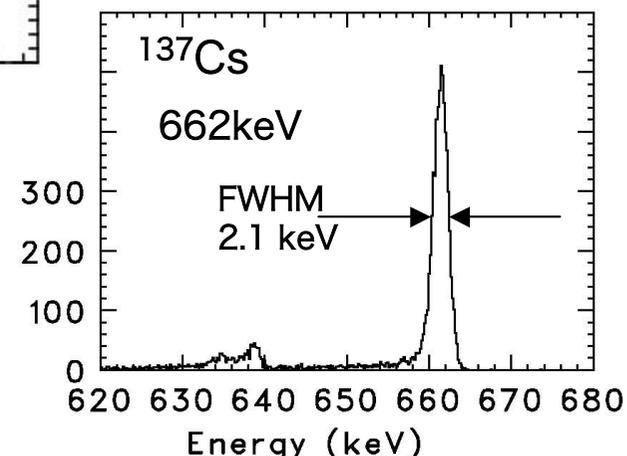
日本の鍵技術の一つ



Fine Position Resolution

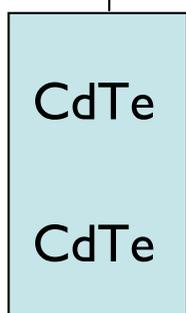
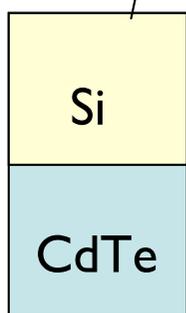
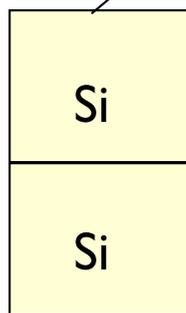
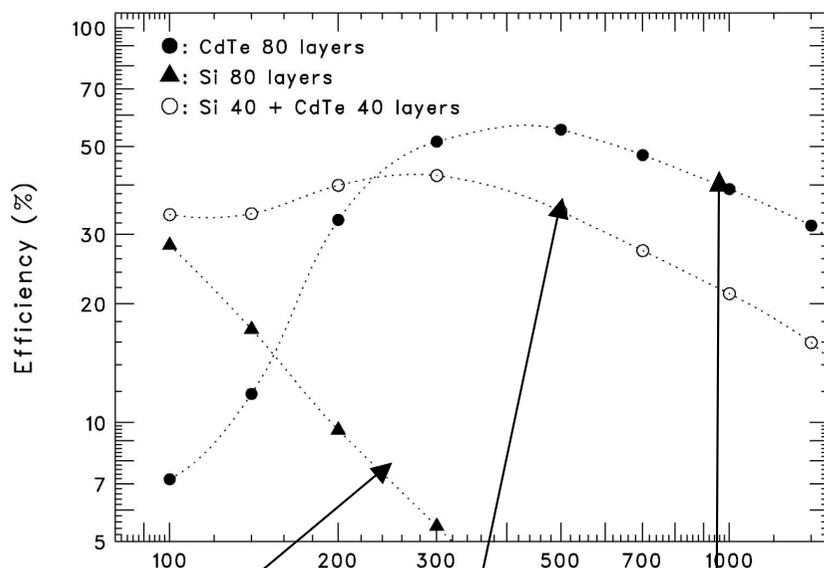
CdTe Gamma-ray Imager  
(pixel size 200  $\mu\text{m}$ )

ISAS & Bonn U.



# CdTe半導体による多重コンプトンカメラ (ISAS/SLAC/広島 他)

Eff. of MultiCompton



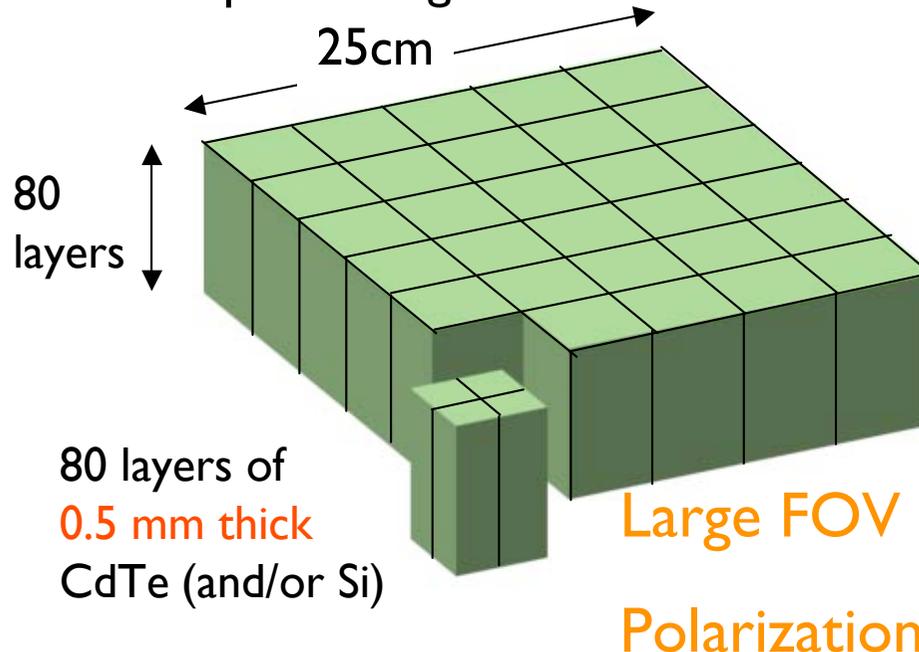
Note: Angular resolution

## 日本の鍵技術の一つ CdTe & 実装技術

- CdTe has a high Compton Efficiency for the energy above 300 keV (Eff. = 40% at 1 MeV for 80 layers, 250 cm<sup>2</sup>)



Conceptual design of CdTe SMCT



80 layers of  
0.5 mm thick  
CdTe (and/or Si)

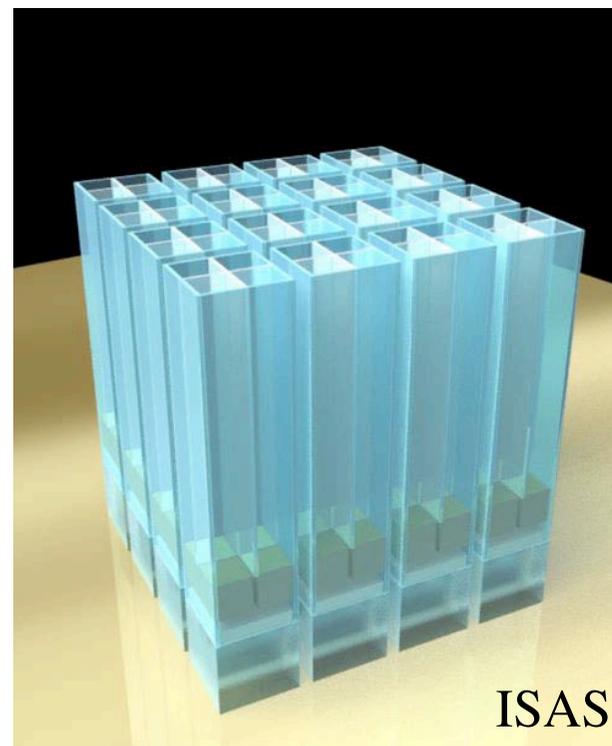
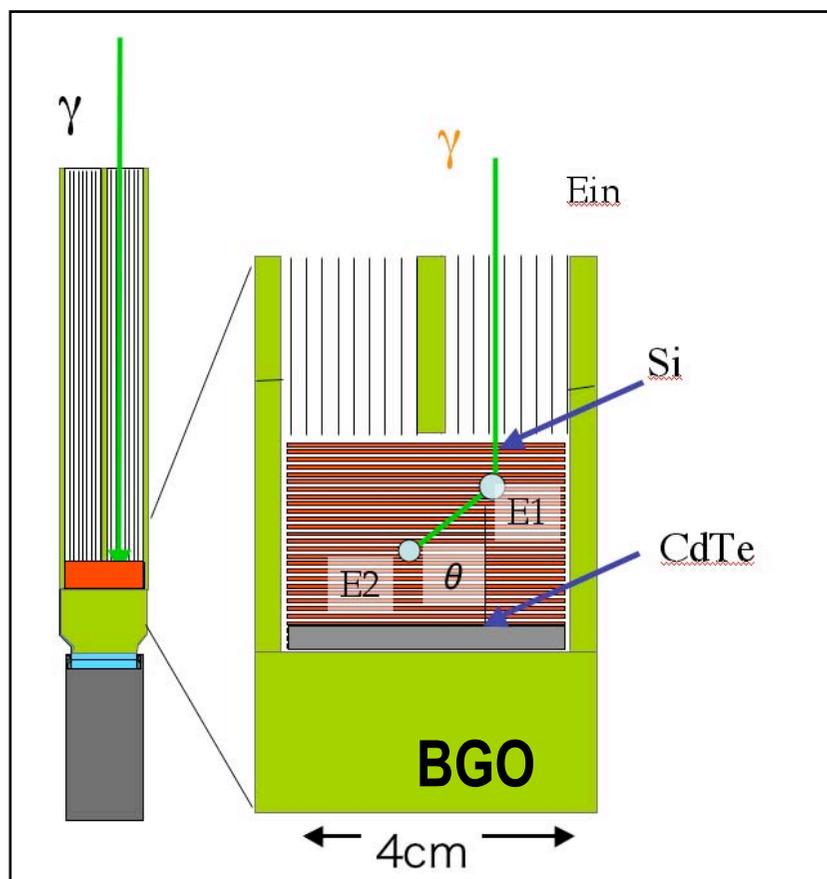
Large FOV

Polarization

# 新しい概念 サブMeVガンマ線のための狭視野コンプトンカメラ

## 明日の国分講演

- コンプトン散乱から求めた角度が視野内からやってくるガンマ線だけを選ぶ。

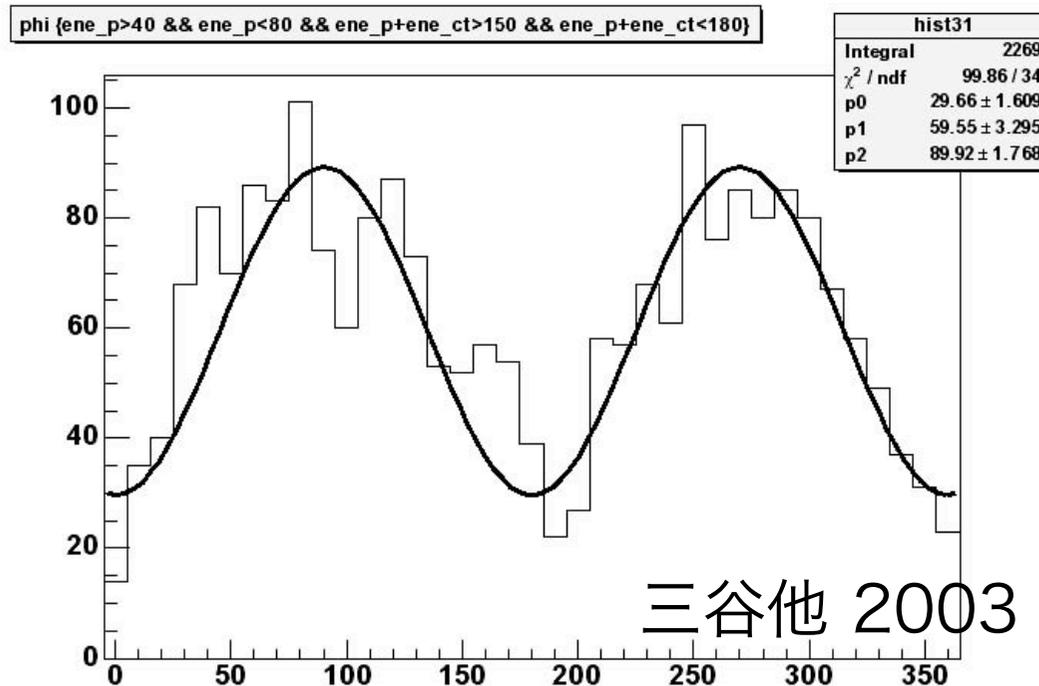
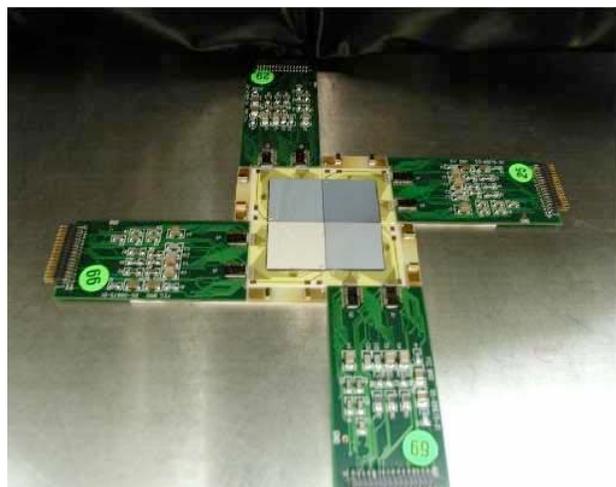
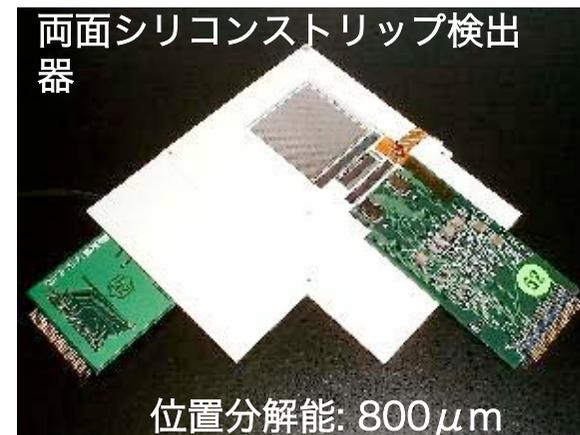
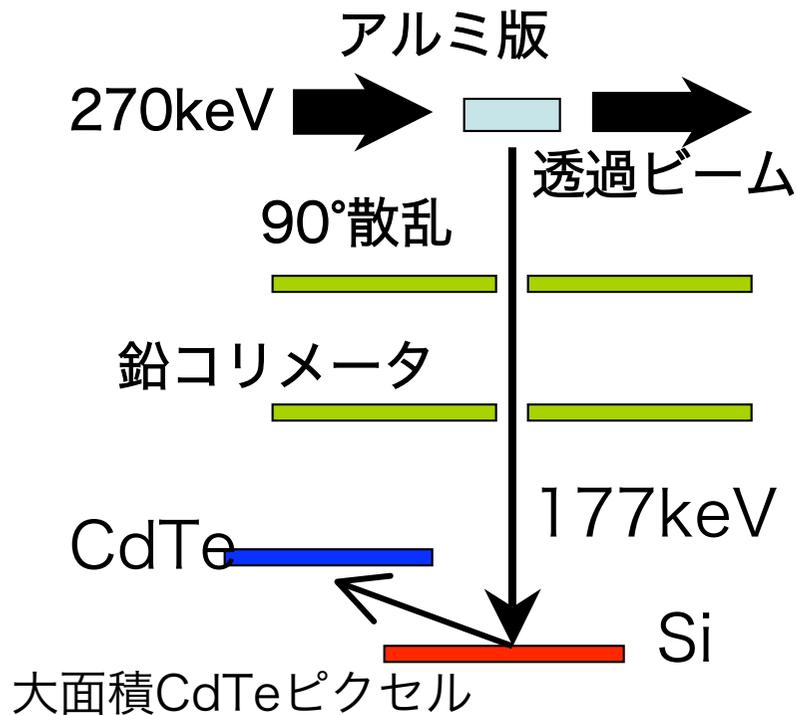


### -Stack Configuration

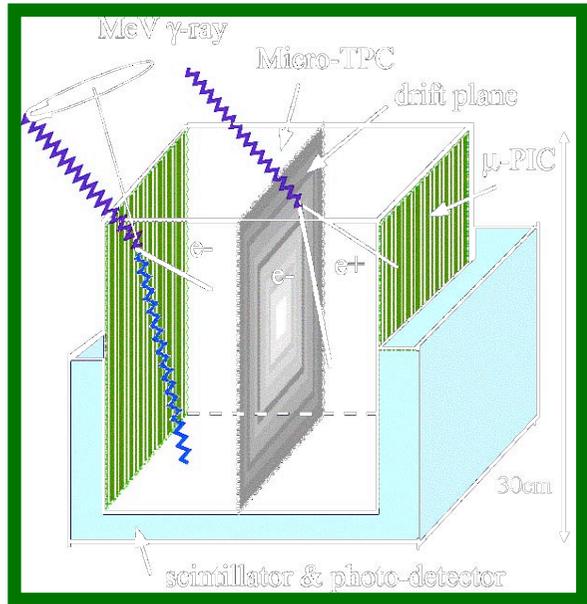
- Low Energy 24 layers of Strip Strip detectors (res. 400 $\mu$ m) and 6 mm thick CdTe Pixel (res. 1mm)

-High Energy Resolution of <1 - 3 keV

# Si/CdTe半導体コンプトンカメラによる偏光観測 (Si/CdTe半導体コンプトンカメラを初めて実証)



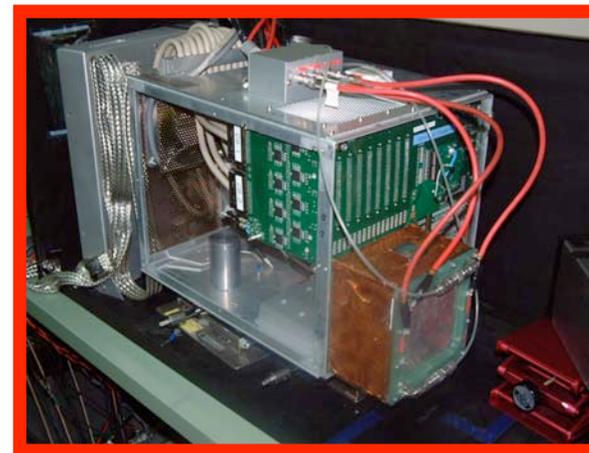
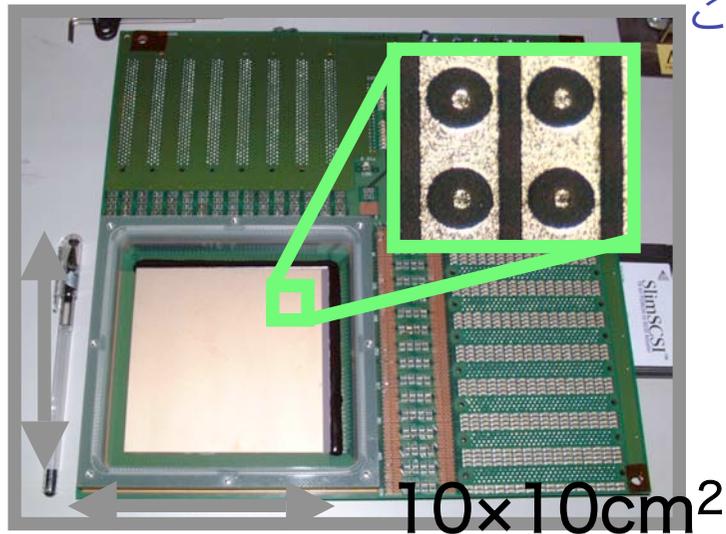
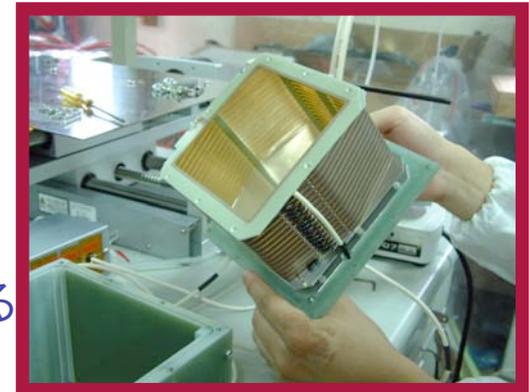
# マイクロTPC検出器によるコンプトンカメラ (京大)



独自の技術に基づいた大面積  
高精度ガスカウンタをTPCとして。

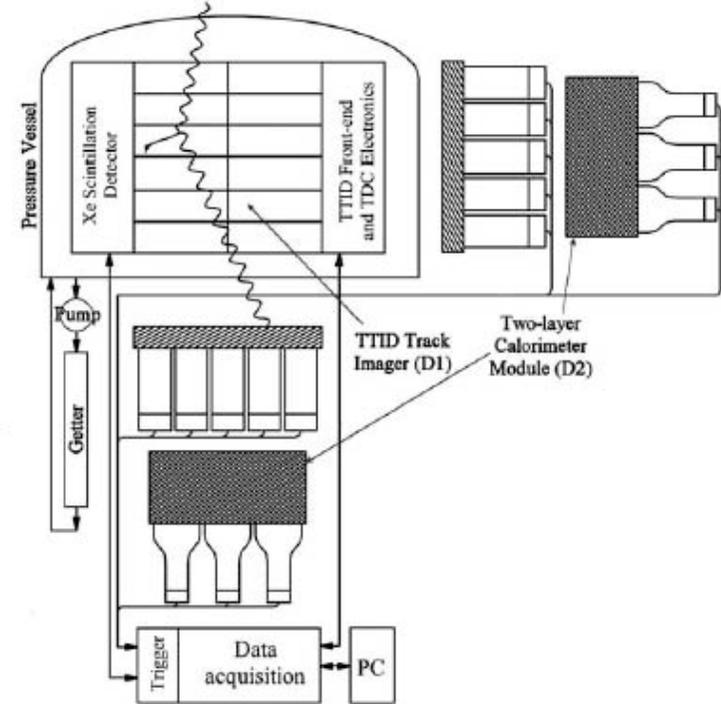
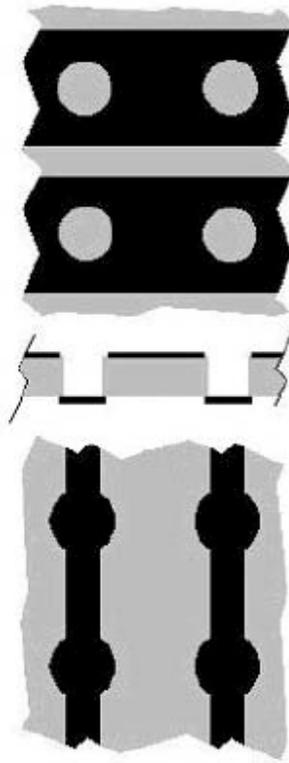
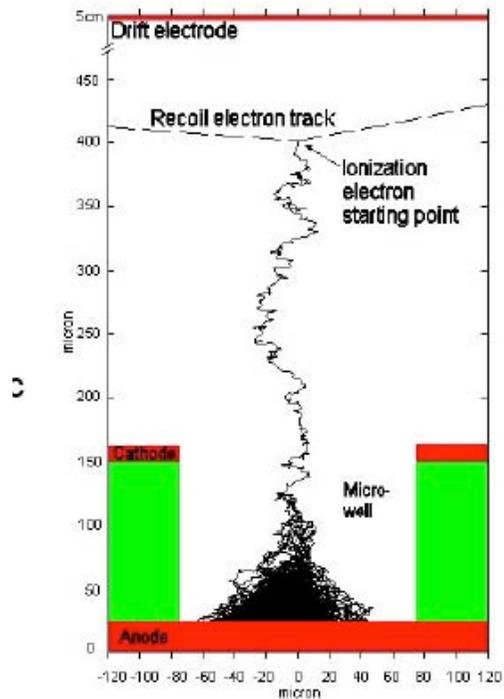
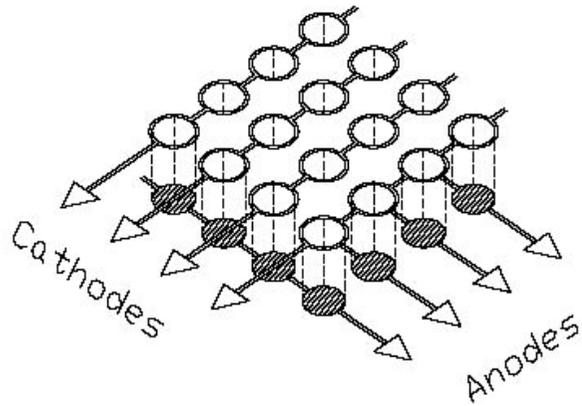
日本の鍵技術の一つ  
明日の窪講演

机上の案ではなくて  
きちんと実現されつつある  
ことに注目



# Gas Micro-Well Detectorによるコンプトンカメラ (GSFC他)

- Micro-Well 検出器の積層
- TFTアレイを用いた読み出し  
(大面積化)



# 100mCrabから、10mCrabへ、そしてmCrabまで

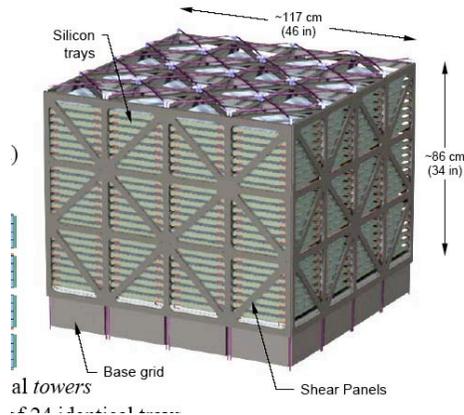
## First Step : 10 mCrab

アイデアと技術と「ある程度の」予算  
 気球、小型衛星などで、数年くらいで実現可能。  
 (以下に、本当にやるか)

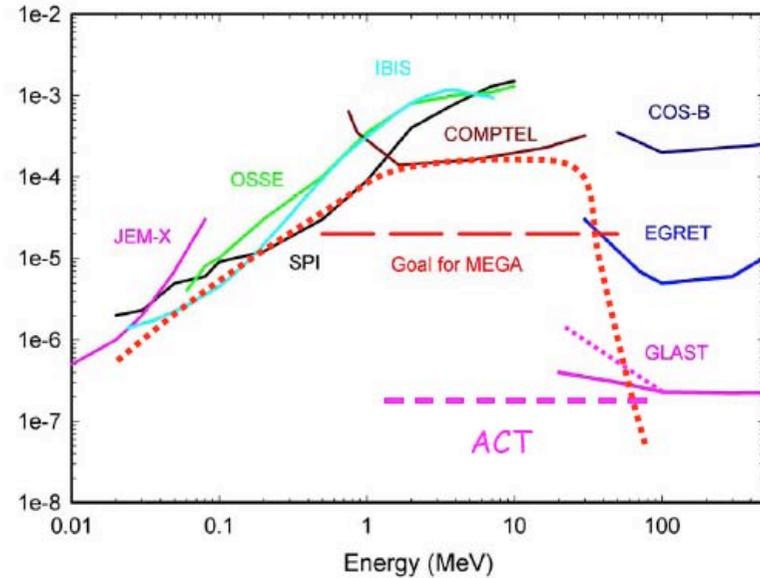
## Second Step: mCrab

アイデアと技術と  
 「大きな予算」とマンパワー？

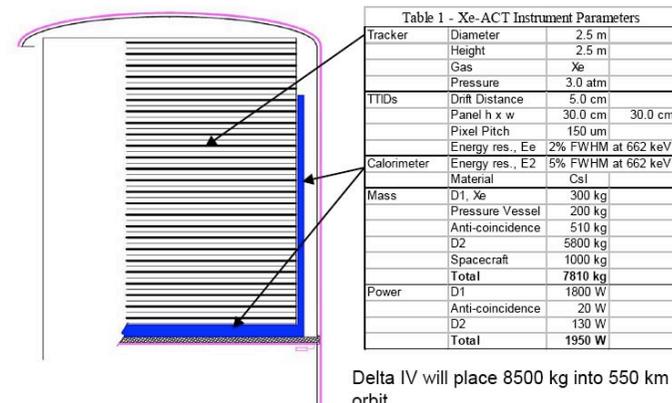
たとえば、1立方メートルの  
 半導体センサーの固まり？



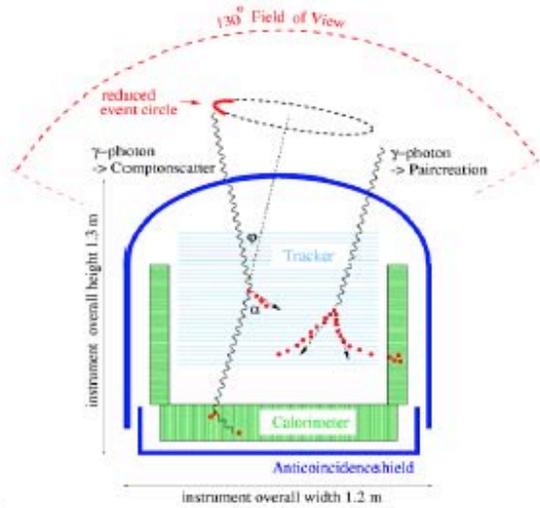
First Stepをへてから考える



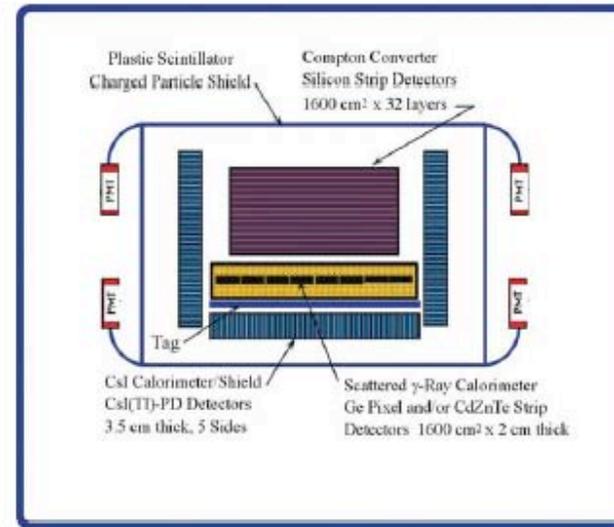
たとえば、12立方メートルの  
 3atm Xeガスカウンター？



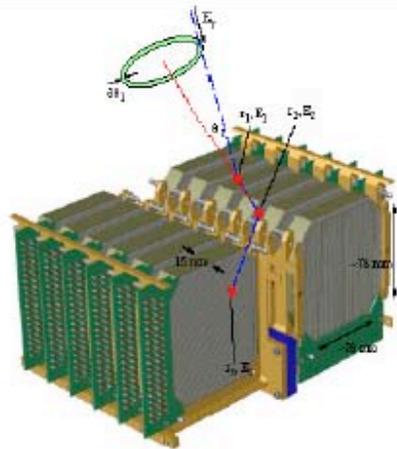
# Compton Telescopes



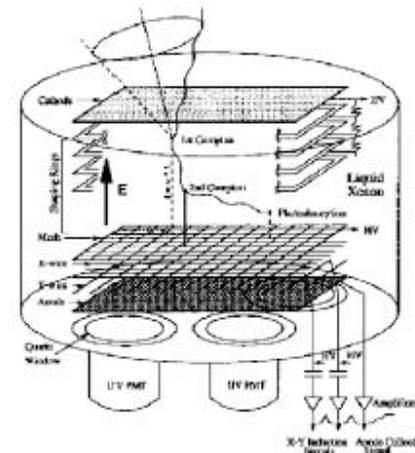
MEGA



TIGRE



Nuclear Compton Telescope (NCT)



LXeGRIT

FIGURE 1. Schematic of the liquid xenon time projection chamber



## まとめ

- MeV/GeVガンマ線の領域は、まだ未開の地。
- GeV領域は、「大プロジェクト」GLASTに大きな期待。
- MeV領域、サブMeV領域は、未開の領域として残されている。
- MeV領域、サブMeV領域は、独創的な技術を持ち込むことで、先導的な観測を行うことが可能。
- 日本は、自分のアイデアに基づき、自分の力で、技術開発を行っている。
  - 例：特定領域: ブラックホール天文学の新展開
    - AstroE2 HXD (東大 w ISAS/広大/埼大/金大/阪大)
    - GLAST 衛星 (広大 w ISAS/東工大/理研)
    - ガスマイクロTPCに基づいた、コンプトン望遠鏡 (京都大学)
    - 高いエネルギー分解能を持つ半導体検出器による  
半導体コンプトン望遠鏡 (宇宙研 w SLAC/東大/広大/阪大)