

天体ガンマ線検出技術

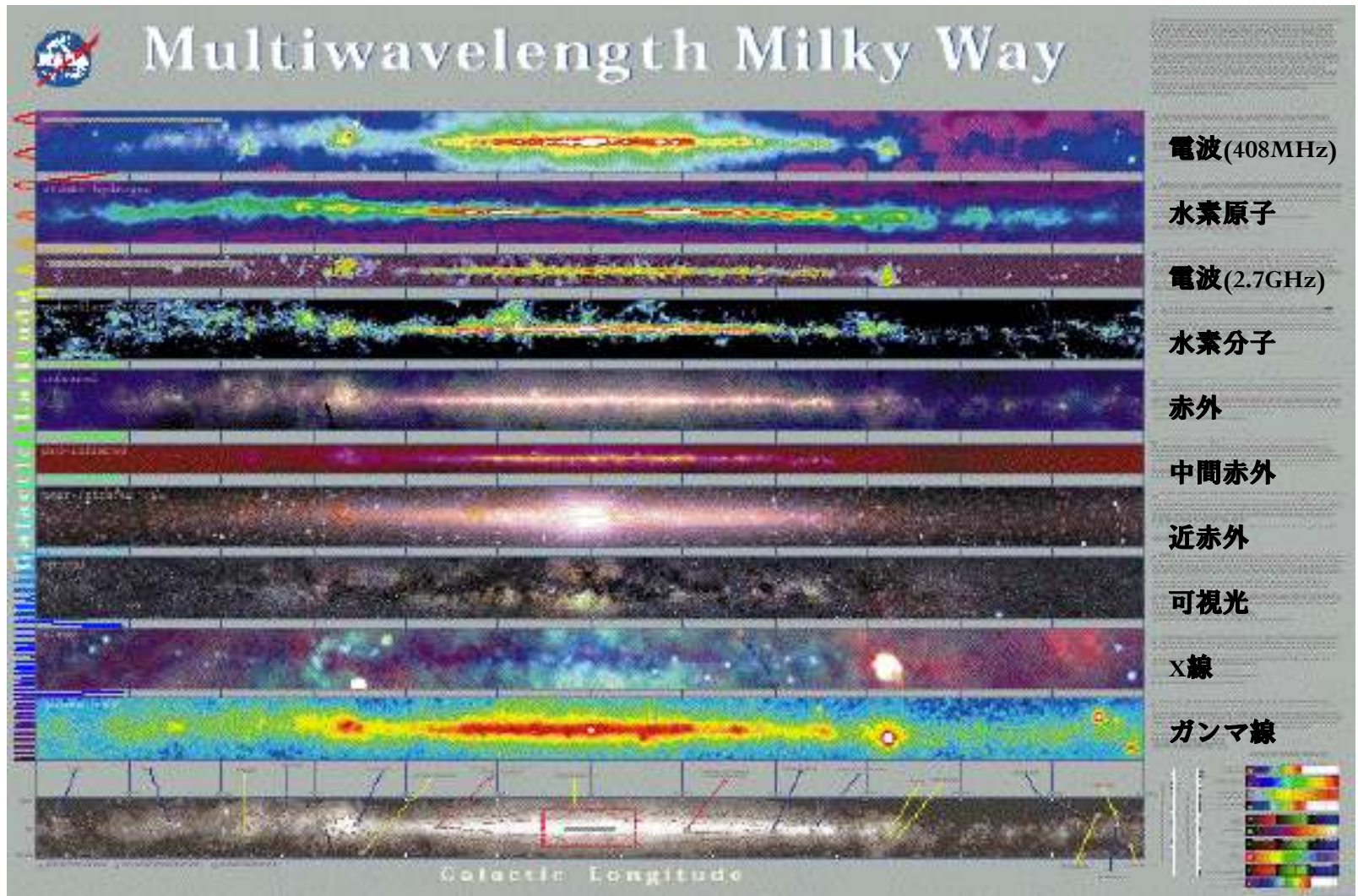
立命館大学工学部物理科学科

森 正樹

学術フロンティア「表面・界面ナノ構造の形成と制御」シンポジウム

2010年3月11日、立命館大学BKC

さまざまな波長で見た銀河

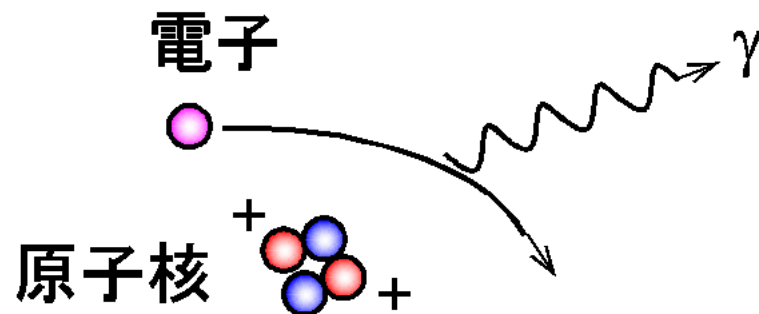


天体ガンマ線の発生機構：非熱的

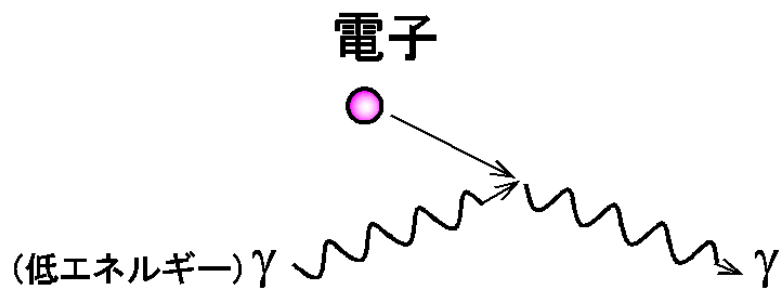
シンクロトロン放射



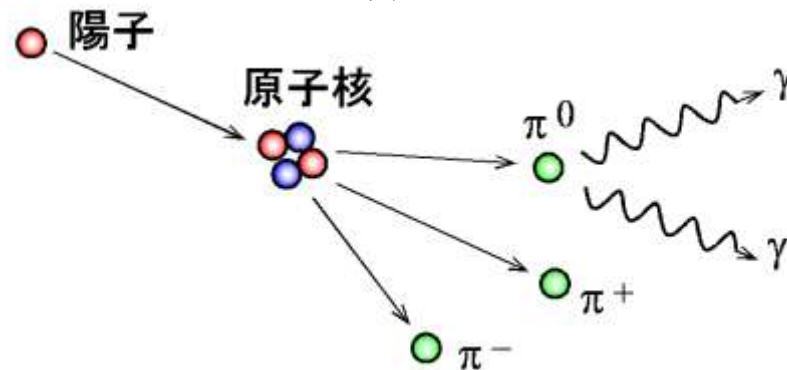
電子の制動放射



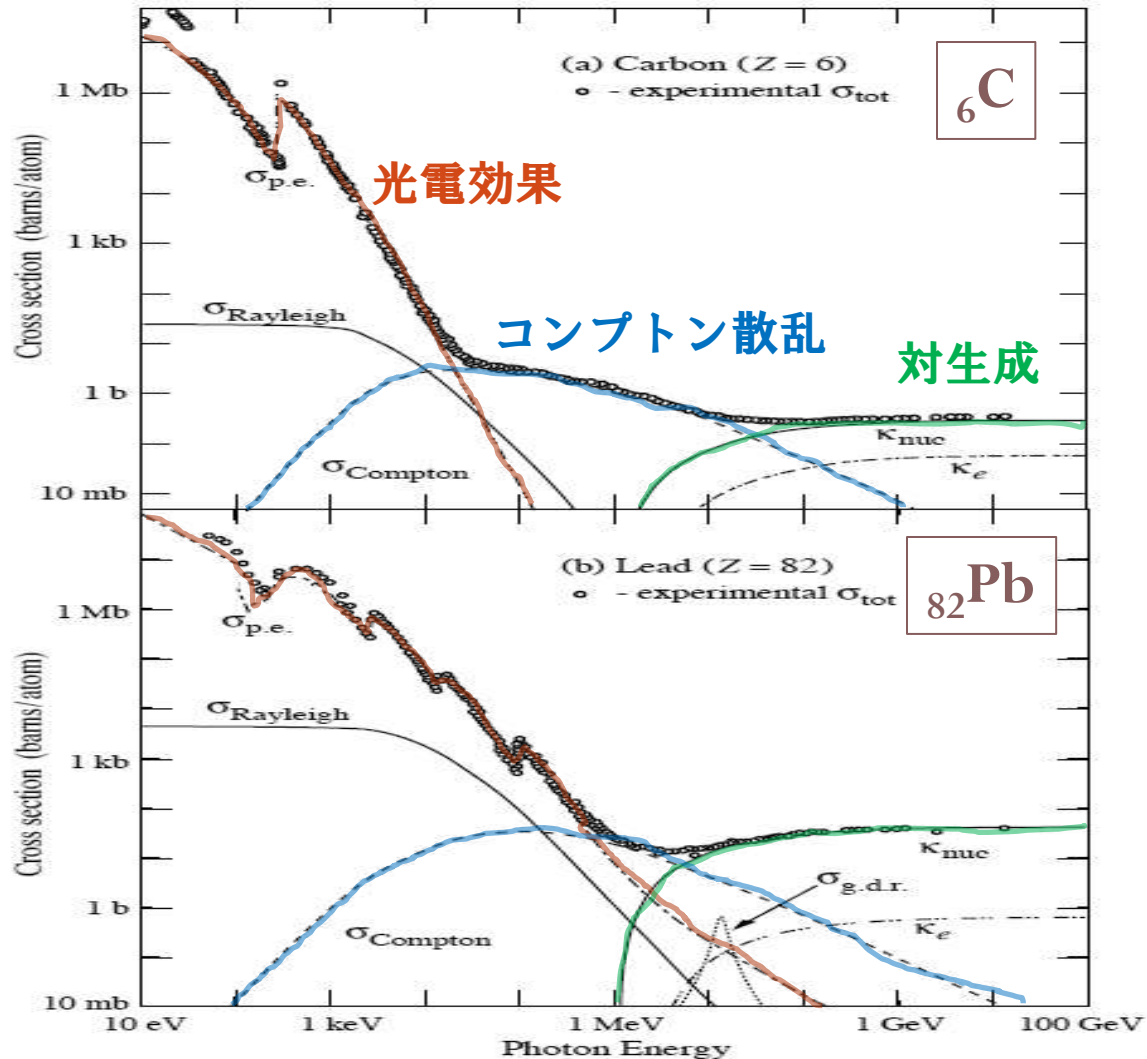
逆コンプトン放射



中性パイオンの崩壊



ガンマ線の物質との相互作用



ガンマ線の相互作用

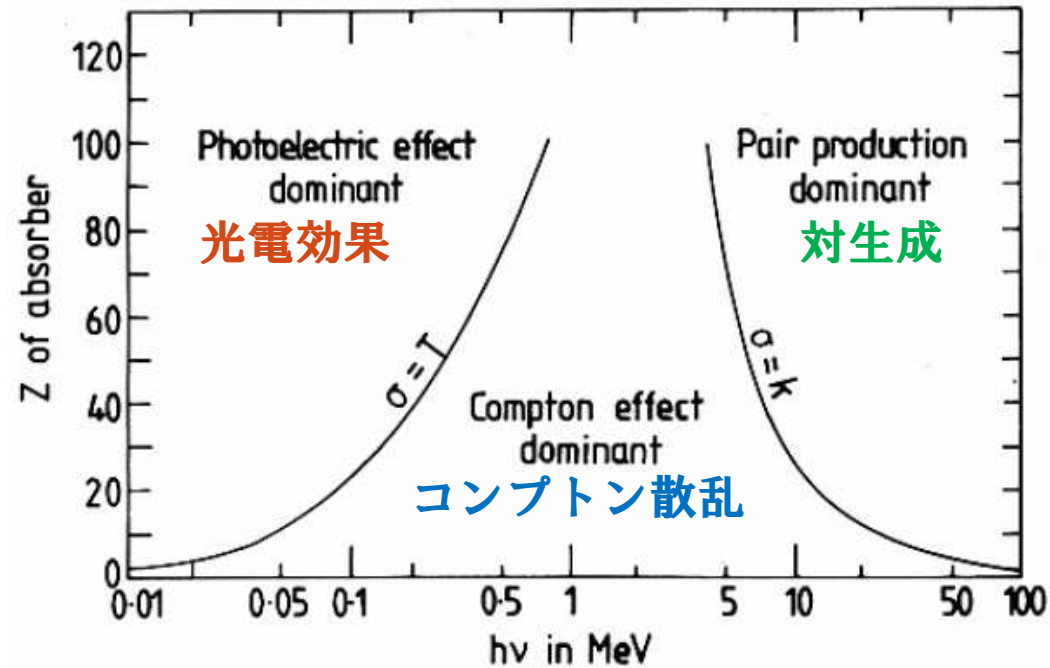


図 2.12 主要なガンマ線と物質の相互作用過程. 物質の原子番号 Z に依存するが, 数 10 MeV 以上では電子・陽電子対生成過程が主要になる (P.V. Ramana Murthy and A.W. Wolfendale 1993, *Gamma-ray astronomy*, Cambridge University Press).

ガンマの検出

- **ガンマ線観測に用いられる検出器**
 - 無機シンチレータ
 - 有機シンチレータ
 - 半導体検出器
- **ガンマ線のエネルギーと検出法**
 - Hard X – Soft gamma
 - コリメータ
 - コーデッドマスク
 - MeV
 - Compton telescope
 - GeV
 - Pair telescope
 - TeV
 - チェレンコフ望遠鏡

無機シンチレータ

	BGO	GSO(Ce)	NaI(Tl)	CsI(Tl)
化学組成	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	Gd_2SiO_5 (Ce)	NaI	CsI
有効原子番号	74	59	50	54
密度 (g cm^{-3})	7.1	6.7	3.7	4.5
輻射長 (cm)	1.2	1.4	2.6	1.9
屈折率	2.15	1.9	1.85	1.80
摂氏 20 度前後において				
蛍光減衰時定数 (ns)	~300	~60	~230	~1000
光量 (NaI を 100 とする)	~12	~28	100	~85
ピーク波長 (nm)	480	430	410	565

有機シンチレータ

- **プラスチックシンチレータ**

- **減衰時間**2-3ns
- ~100eV/photon ... **低エネルギー分解能**
- **荷電粒子検出器向き**

- **液体シンチレータ**

- **トルエン・キシレン + 蛍光物質 + 波長変換剤**
- **蛍光減衰時間の差により中性子とガンマ線の識別が可能**

	密度(g/cm ³)	最大発光波長 (nm)	減衰時間(ns)
プラスチックシンチレータ	1.06	350-450	2-5
液体シンチレータ	0.86	350-450	2-8

半導体とNaIシンチレータ

表 1.4 X線やガンマ線の検出に用いられるさまざまな半導体とNaIシンチレータの特性

半導体	密度 [g/cm ³]	原子番号	E_{gap} [eV]	ϵ [eV]	輻射長 (X_0) [cm]
Si	2.33	14	1.12	3.6	9.37
Ge	5.33	32	0.67	2.9	2.30
CdTe	5.85	48,52	1.44	4.43	1.52
CdZnTe	5.81		1.6	4.6	
HgI ₂	6.40	80,53	2.13	4.2	1.16
GaAs	5.32	31, 33	1.42	4.3	2.29
NaI (Tl)	3.67	11,53			2.59

半導体検出器のエネルギー分解能

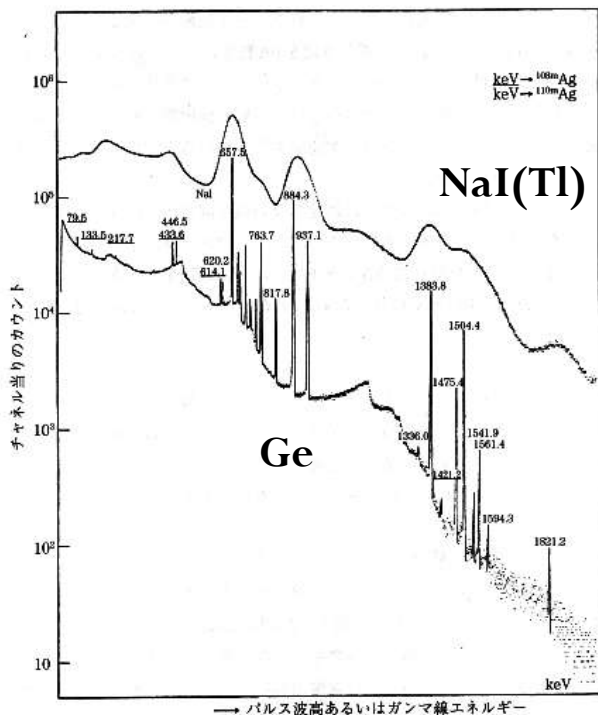


図 1.19 NaI シンチレータとゲルマニウム半導体とで取得したガンマ線波高分布 (Knoll 2001, 放射線計測ハンドブックから転載)。

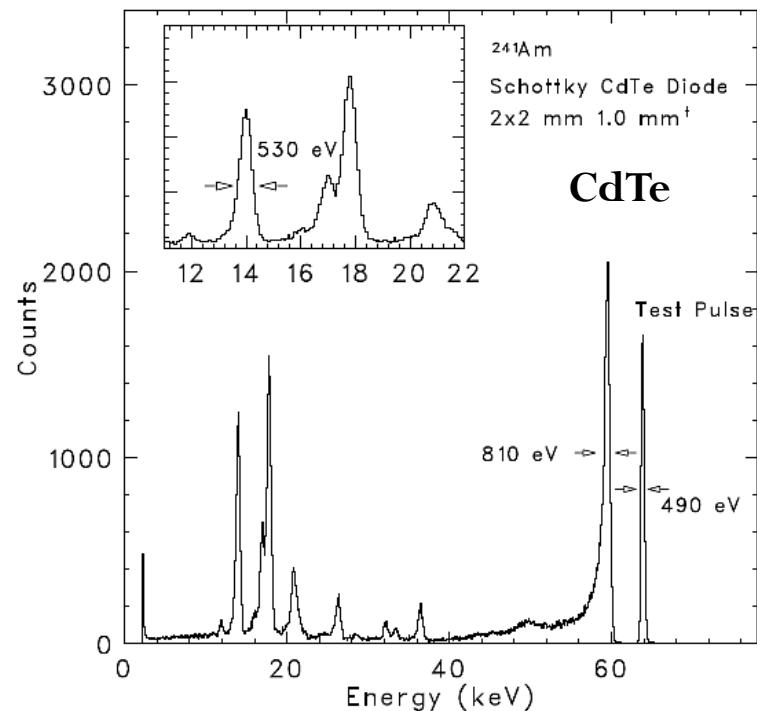
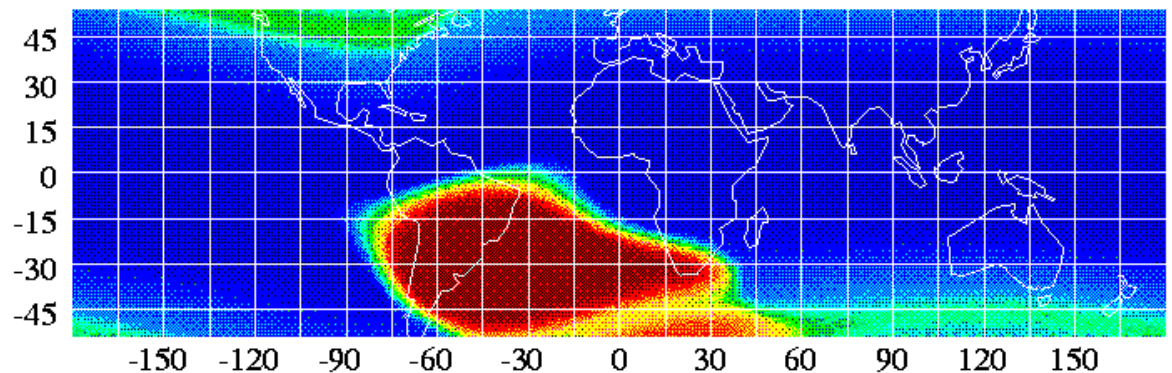
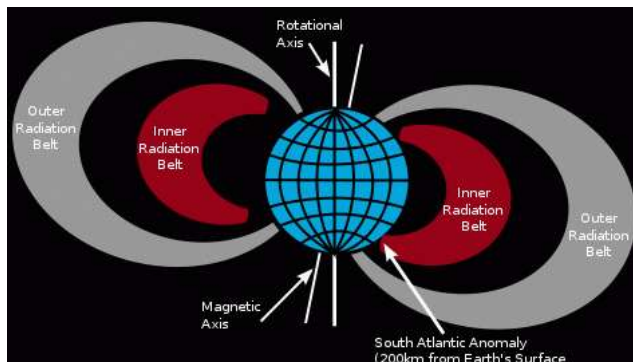


図 1.22 高いエネルギー分解能を持つショットキー型テルル化カドミウム検出器によるガンマ線スペクトル

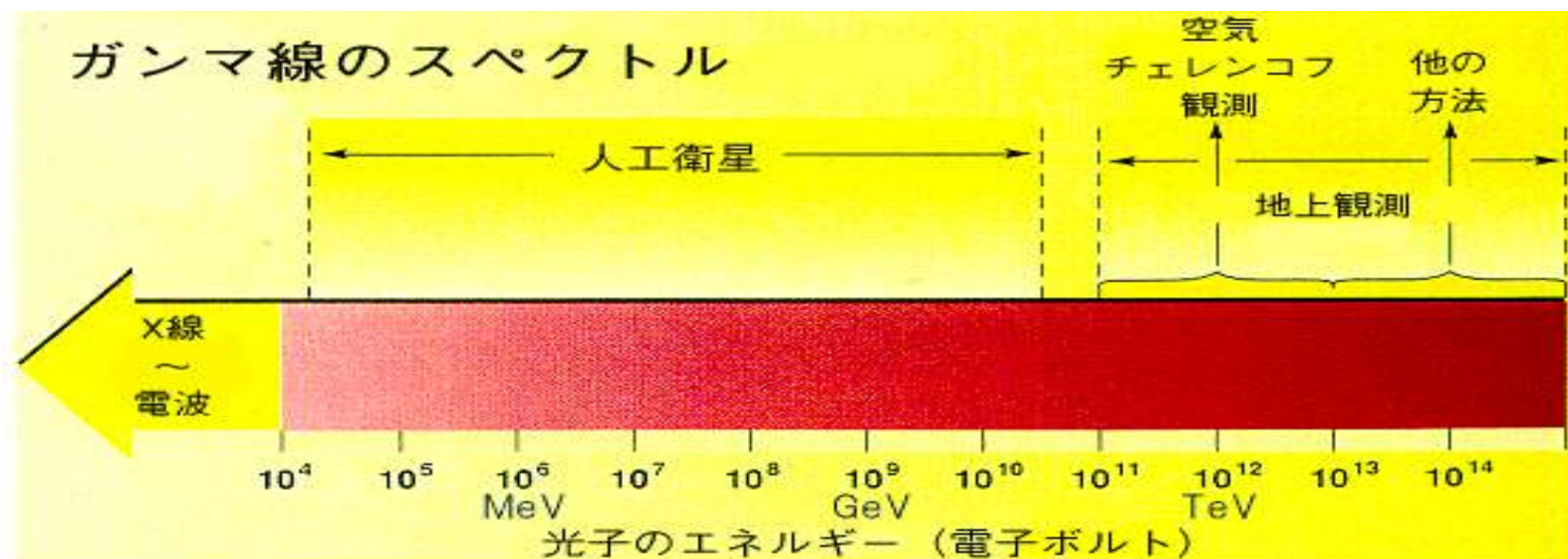
$Z_{Cd}=48, Z_{Te}=52$; 室温動作可能

放射化とSAA

- 軌道上で宇宙線との核反応により放射線同位元素が生成される（放射化）。
 - 軽い核では寿命の短い核種、重い核では長い核種
 - Cutoff rigidity ($=pc/Ze$)により宇宙線強度は変動
- South Atlantic Anomaly
 - Van Allen帯が地球表面に最も近づく場所
 - 検出器によっては観測は休止する



ガンマ線のスペクトルと検出方法



↔ Collimator/Coded mask telescope (100 keV-3 MeV)

↔ Compton telescope (1-30 MeV)

↔ Pair telescope (30MeV-100GeV)

コリメーターを用いた検出器

Suzaku HXD

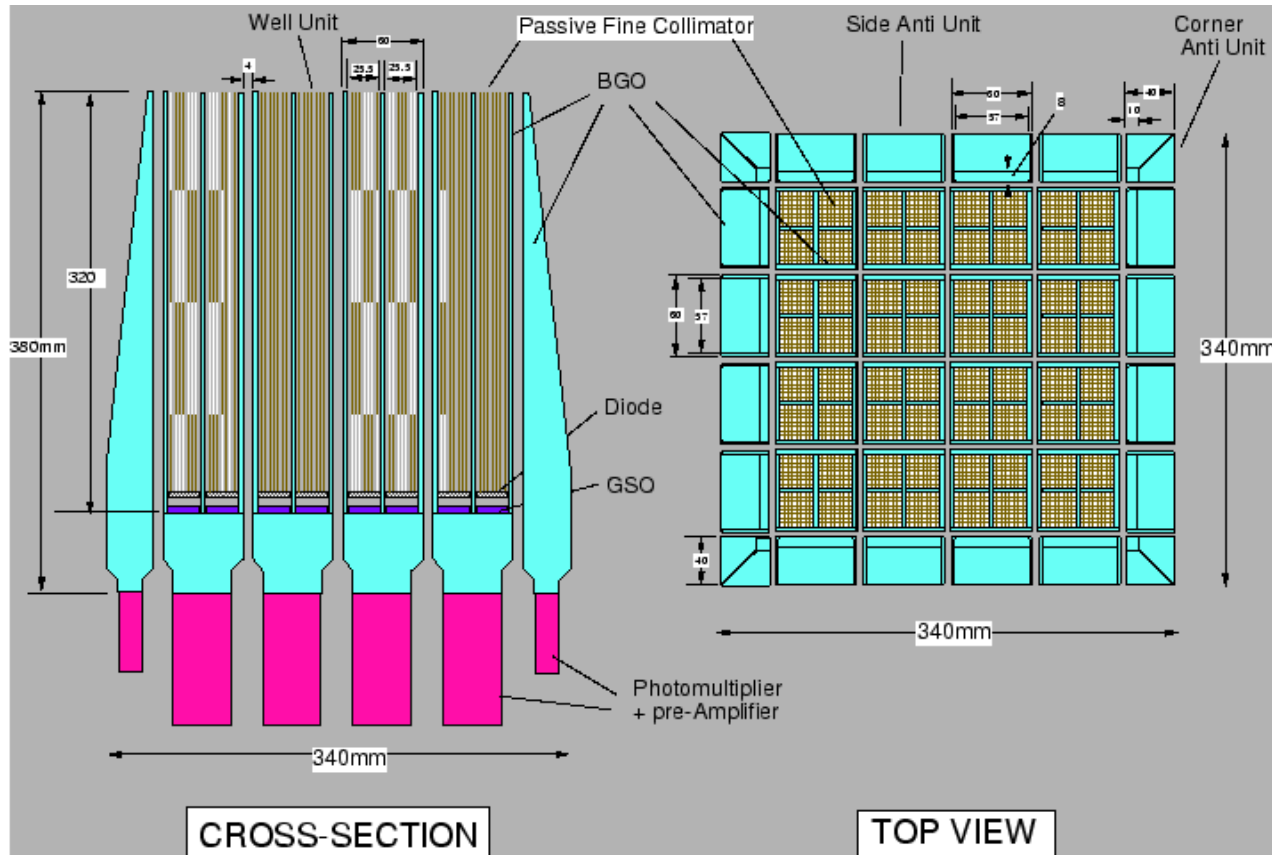


Figure 8.2: Schematic picture of the HXD instrument, which consists of two types of detectors: the PIN diodes located in the front of the GSO scintillator, and the scintillator itself.

Shield & collimator:
BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)

Inside the well:
GSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$)
2x2 matrix of 24x24x5mm
PIN-Si diode below GSO

Discrimination of X-ray
and shield signals by rise/
decay time (700ns for BGO,
120ns for GSO)

Energy range:
10-60 keV (PIN)
50-600 keV (GSO)

コーデッドマスク

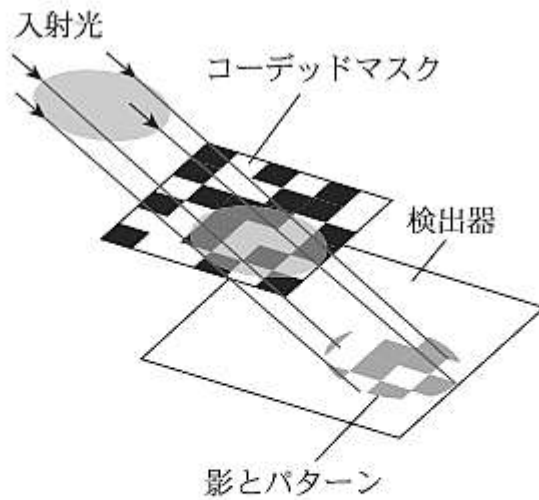
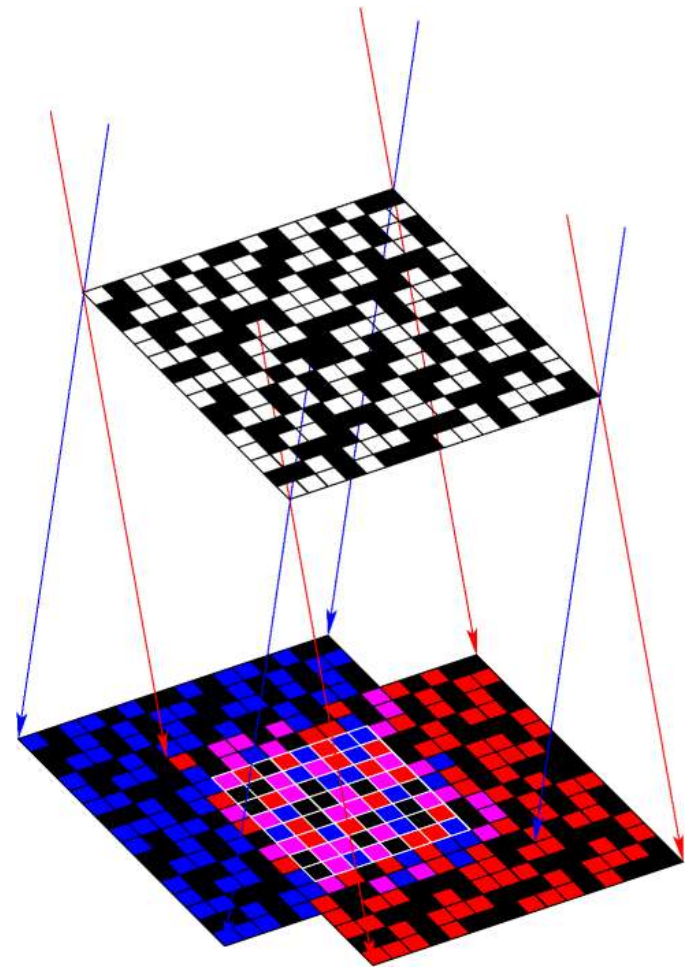
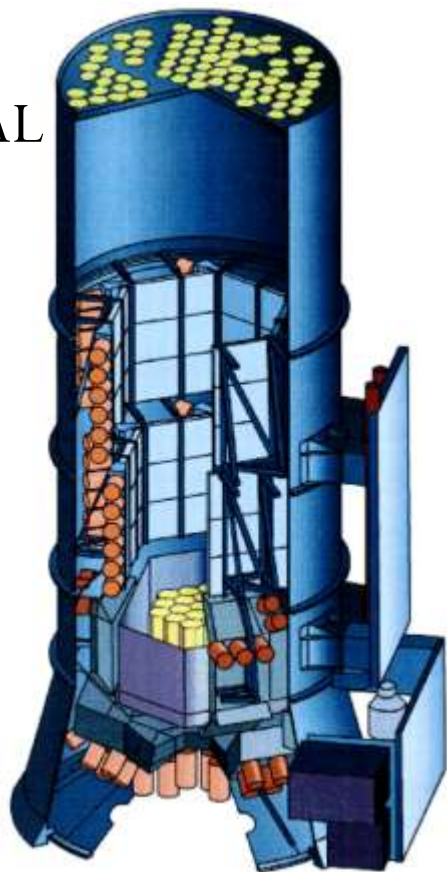


図 2.21 コーデッドマスクの概念図。天体からのガンマ線が決まったパターンのマスクで検出器に作る影を測定し、その影とパターンとから逆にガンマ線の到来方向を知る (White 2004, *Nature*, 428, 264).



コーデッドマスクを用いた検出器

INTEGRAL
SPI

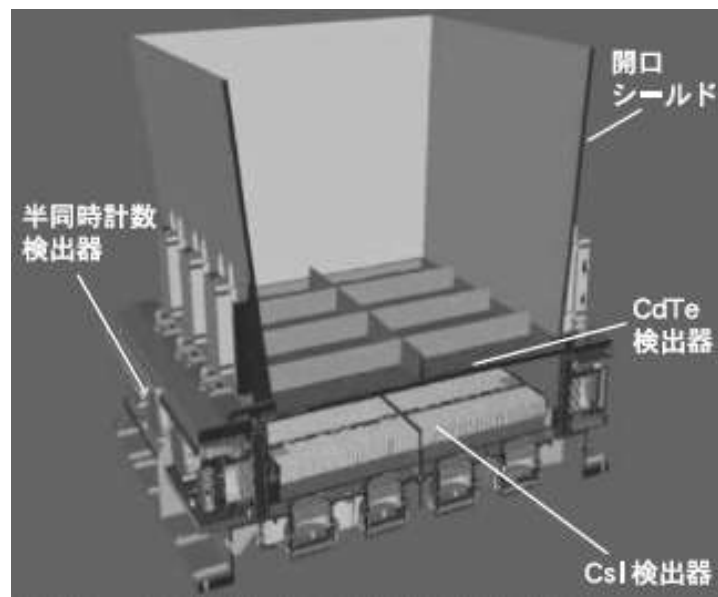


20 keV – 8 MeV, 500 cm²

FOV 16°, angular resolution 2.5°

Energy resolution 2.5keV@1.3MeV

INTEGRAL IBIS



15 keV – 10 MeV, 2600 cm² (CdTe)

FOV 9°(full)/19°(partial)

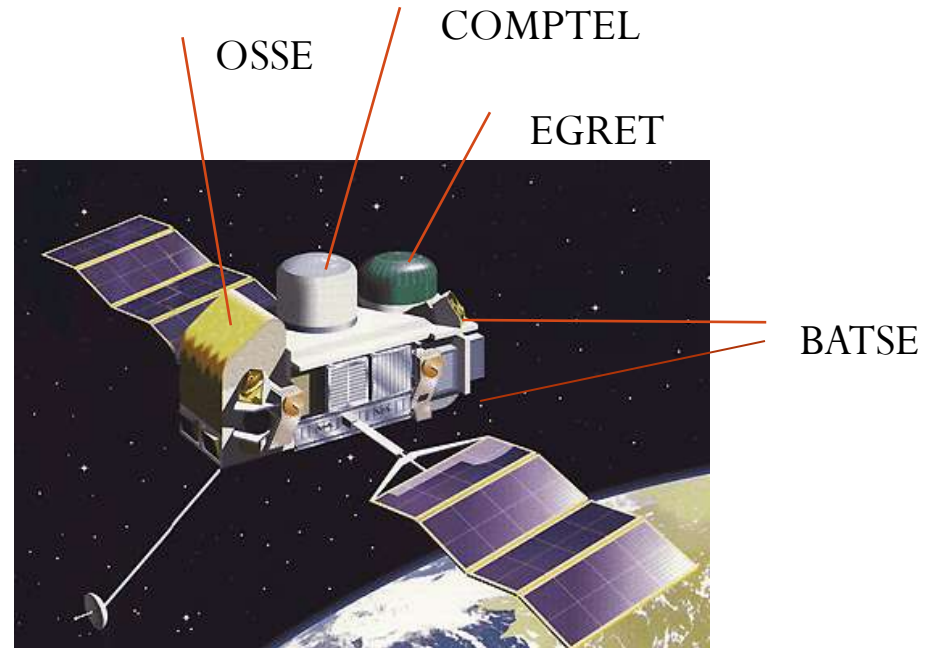
Angular resolution: 12arcmin

Energy resolution: 9%@100keV, 10% at 1MeV

Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO)



1991-2000



OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment): 0.05-10MeV

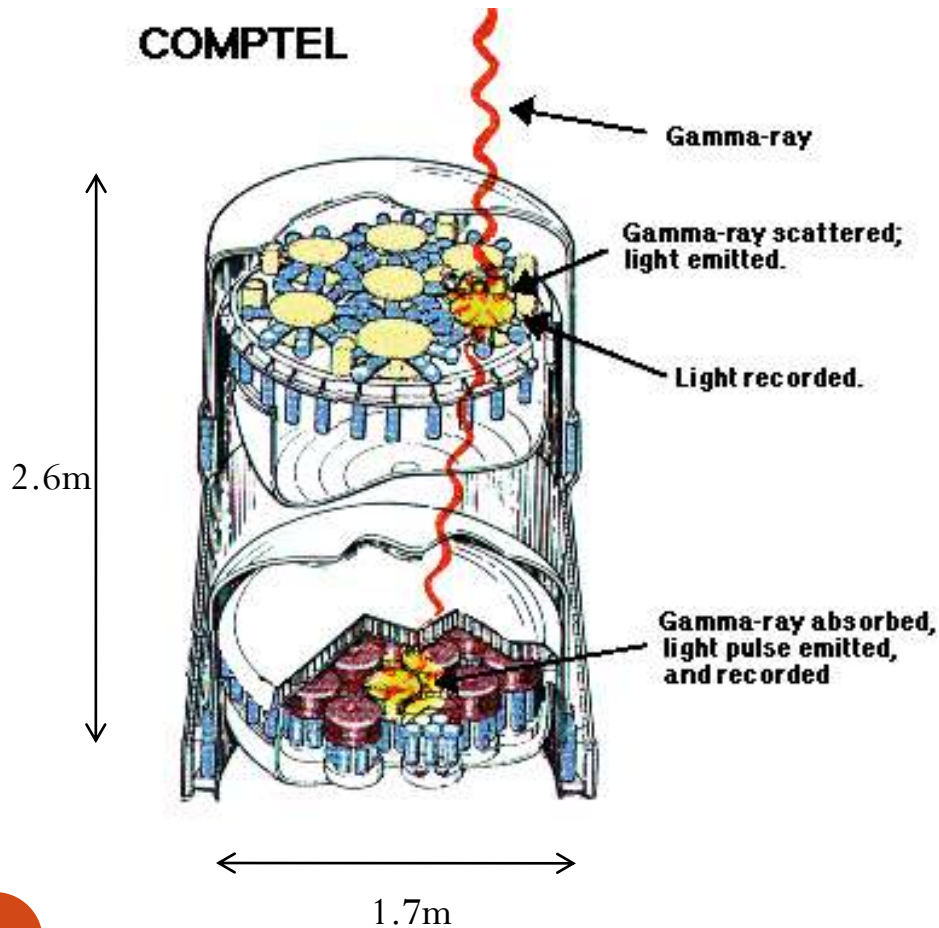
COMPTEL (COMPTon Telescope): 1-30MeV

EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope): 30MeV-10GeV

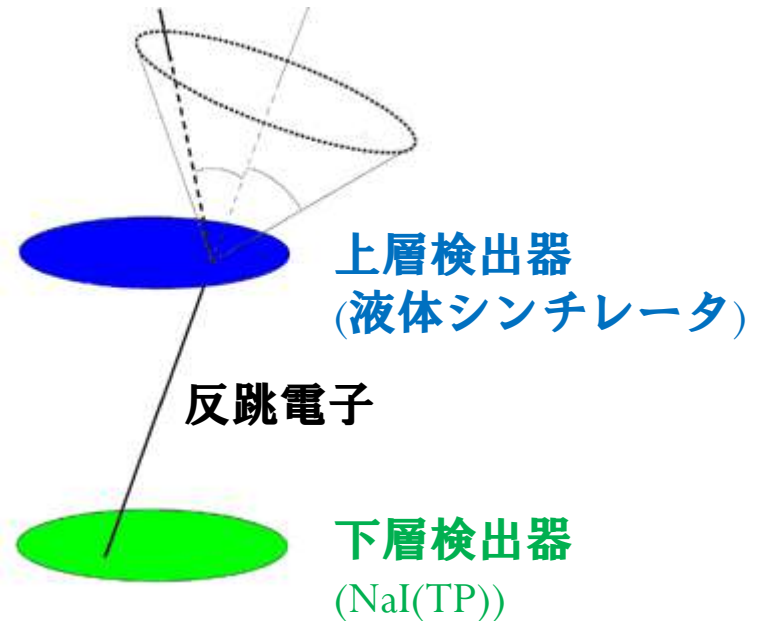
BATSE (Burst And Transient Source Experiment): 20-600keV

Compton telescope

CGRO/
COMPTTEL



入射ガンマ線



$$\lambda_s - \lambda_i = (h/mc)(1 - \cos \theta)$$

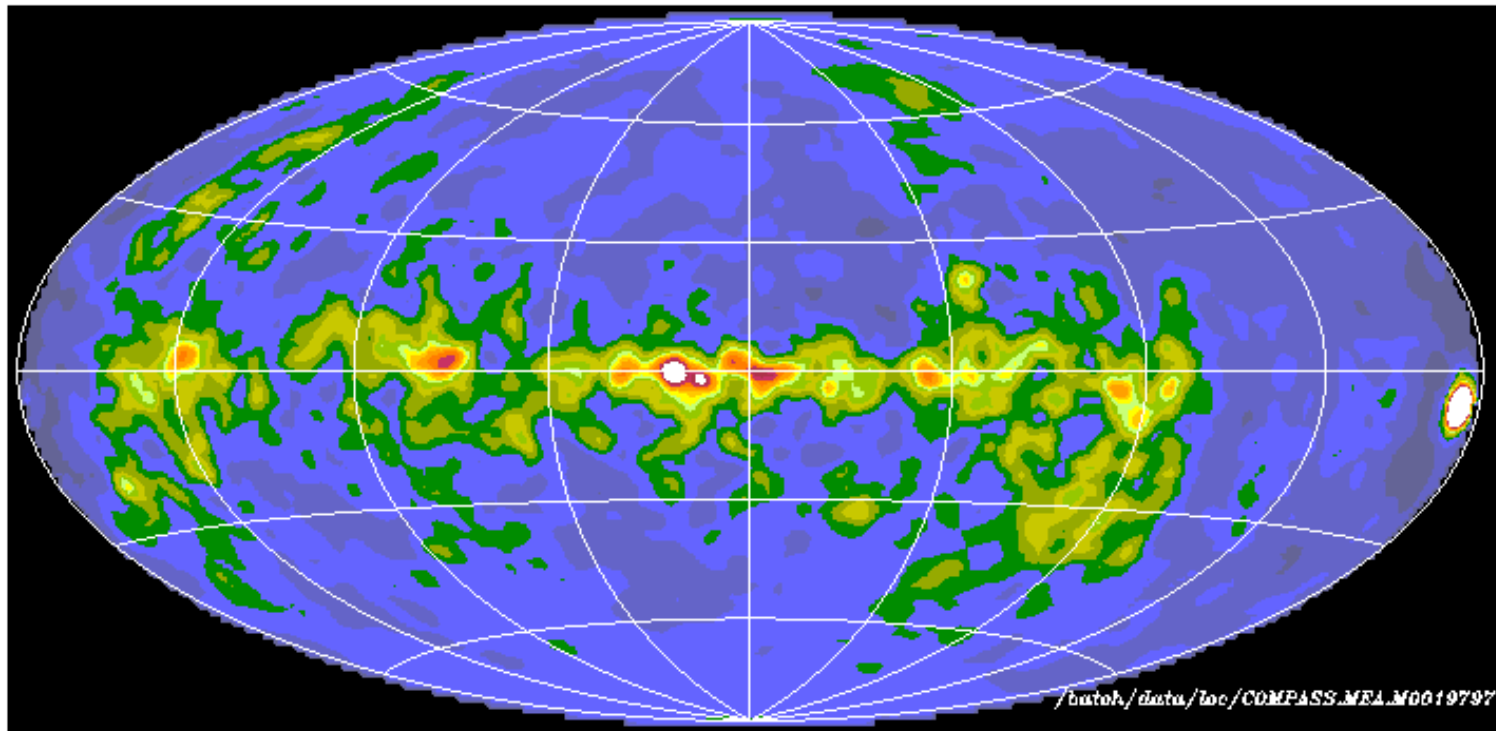
Energy range: 1-30 MeV

Energy resolution: 6-9% FWHM

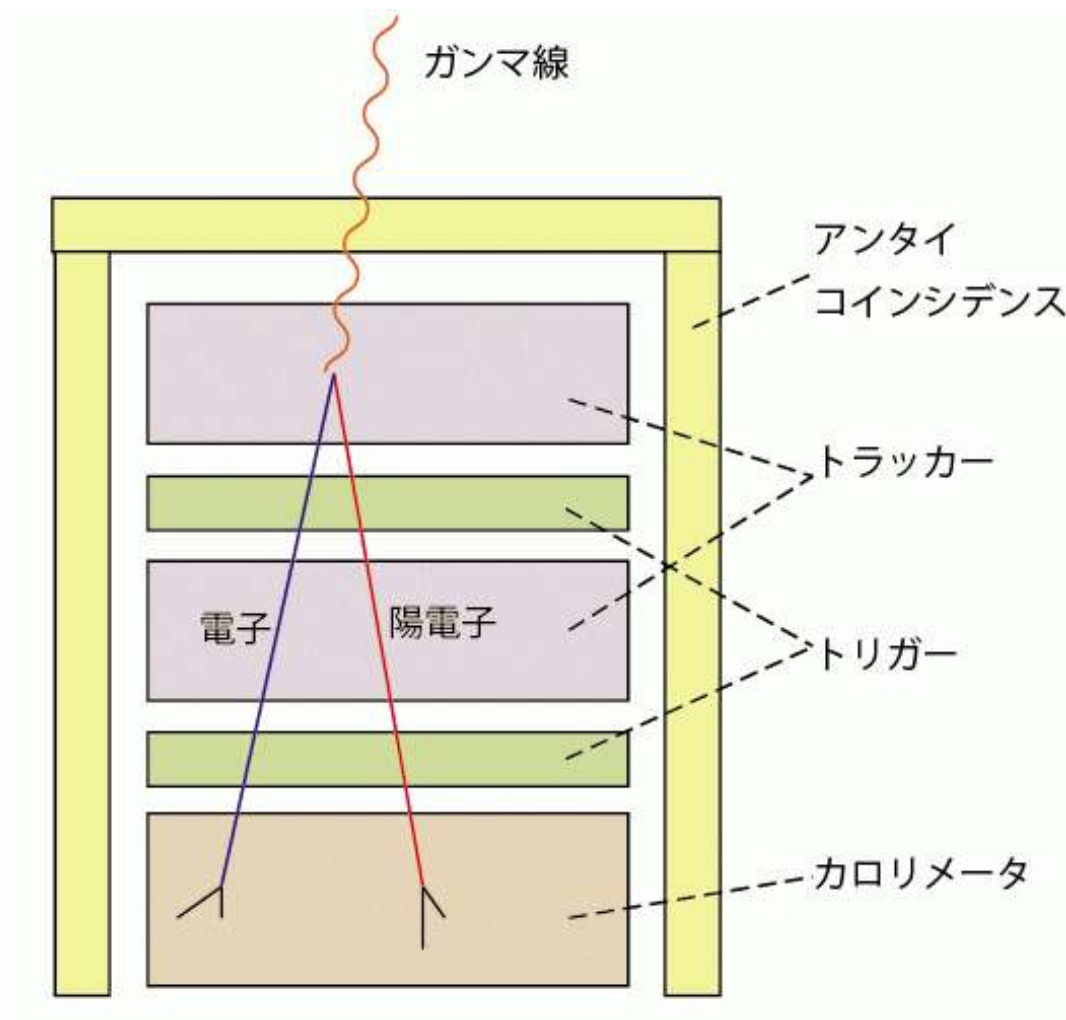
Angular resolution: 2.3-4.8° FWHM

Comptel allsky map

Phase 1+2+3 3-10 MeV



Pair telescope



Pair telescope

- エネルギー決定

$$E_p \simeq \sum_s E_s$$

(E_p : 入射ガンマ線のエネルギー、
 E_s : カロリメータ中の二次粒子の
エネルギー)

- 到来方向決定

$$\vec{p}_p \simeq \sum_s \vec{p}_s$$

電子陽電子のなす角度

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = g(E_p, E_s, Z) \left(\frac{mc^2}{E_p} \right) \ln \left(\frac{E_p}{mc^2} \right)$$

g : 1のオーダーの係数

Pair telescopeの到来方向決定精度

- 対生成の粒子放出角度の不定性
(標的原子核の反跳が測れないため)

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = q(E_p, E_s, Z) \frac{mc^2}{E_p} \ln \frac{E_p}{mc^2}$$

4° at 30 MeV, 1.5° at 100 MeV, 0.2° at 1 GeV

- トラックの精度
- 電子・陽電子のクーロン多重散乱

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = \left(\frac{21 \text{ MeV}}{\beta c p_s} \right)^2 \frac{x}{X_0} \quad (x \text{ は通過物質質量})$$

Pair telescopeのエネルギー分解能

- カロリメータにおけるエネルギー分解能

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2}$$

a : 統計揺らぎ (全吸収型カロリメータで数%)

b : 検出器の非一様性や較正に由来する系統誤差

c : 読み出しノイズなど

- カロリメータの前にある物質によるエネルギー損失や散乱 (およそ1GeV以下の場合に重要)

CGRO/EGRET

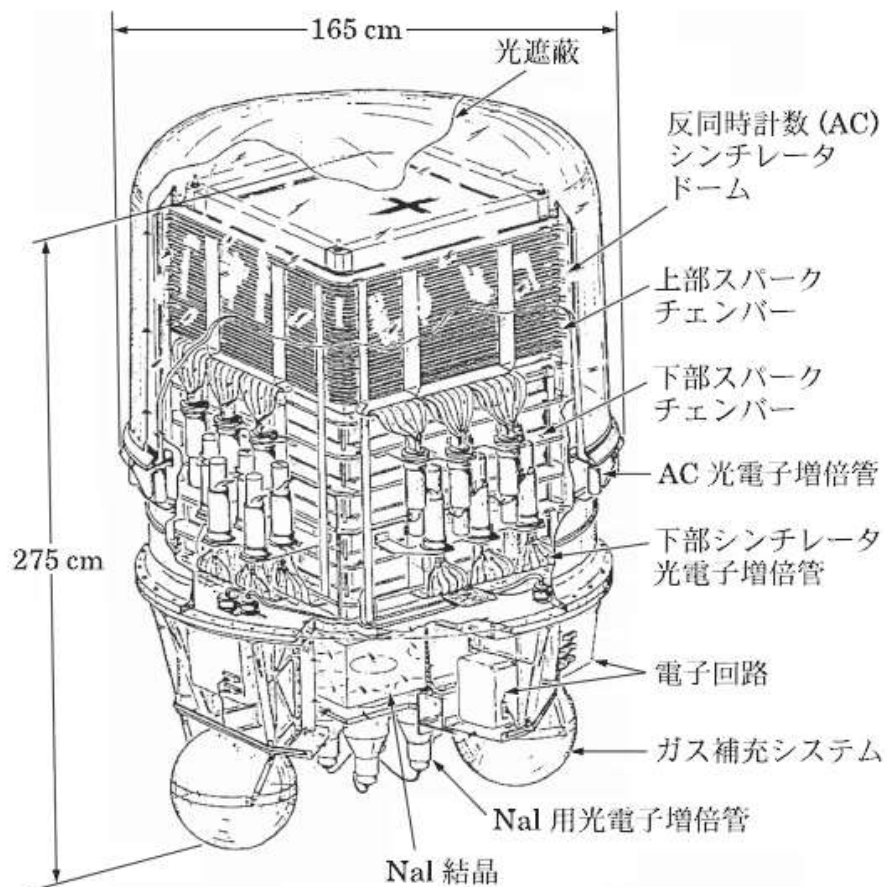


図 2.28 コンプトン衛星の EGRET 検出器 (NASA 提供).

LAT (Large Area Telescope) onboard the Fermi Gamma-ray Space Telescope



2008.6-present

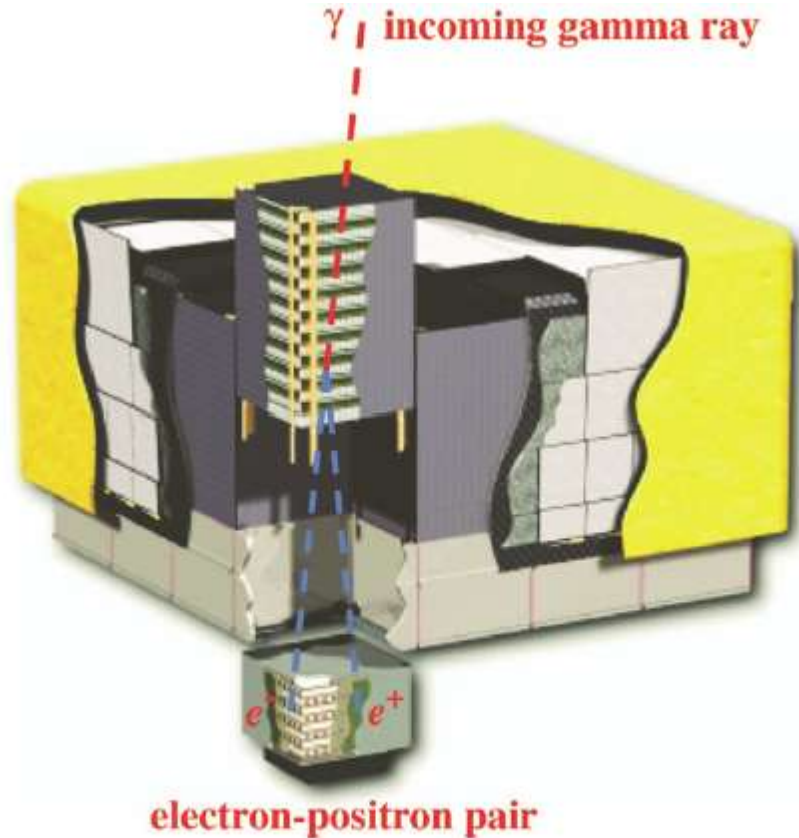


Figure 1. Schematic diagram of the LAT. The telescope's dimensions are $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.72 \text{ m}$. The power required and the mass are 650 W and 2789 kg, respectively.

LAT tracker

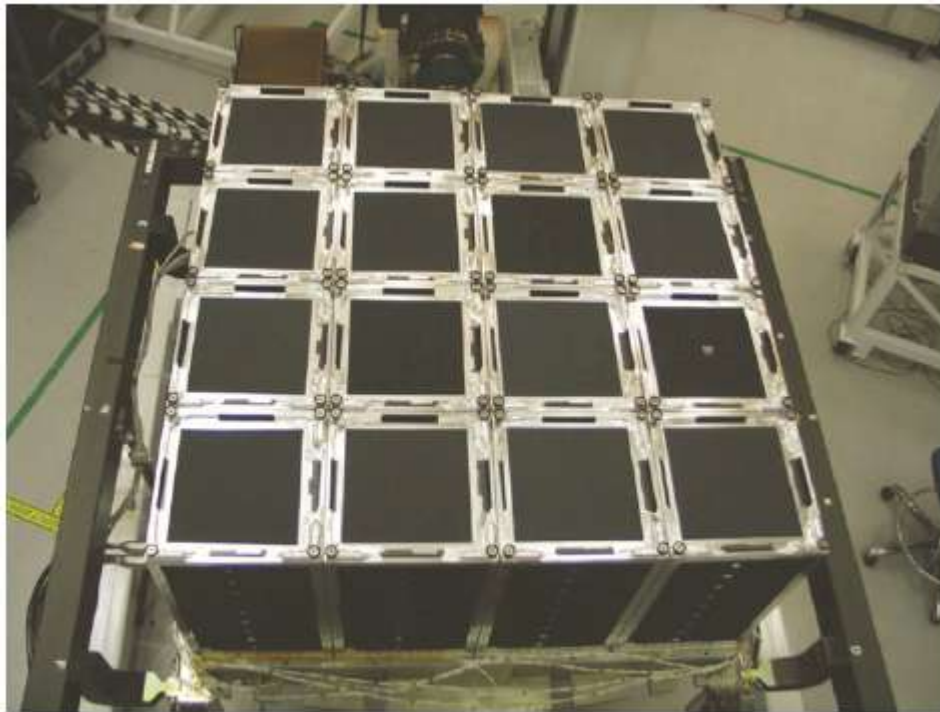


Figure 3. Completed tracker array before integration with the ACD.

4×4 modules

Single-sided Silicon strip detectors

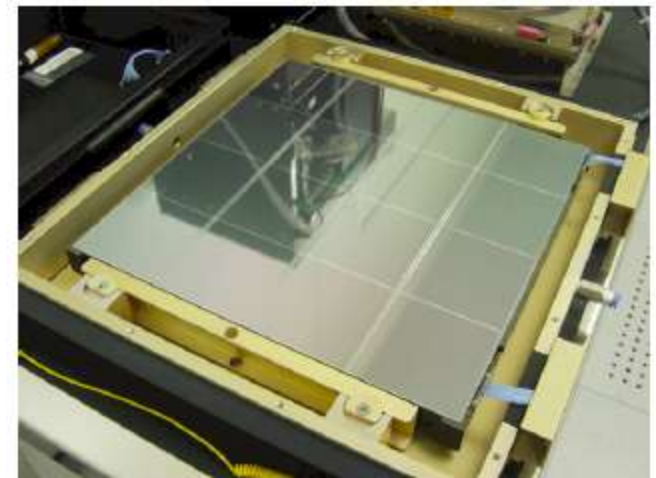
18 (x,y) tracking planes

228 μm -pitch readout strips

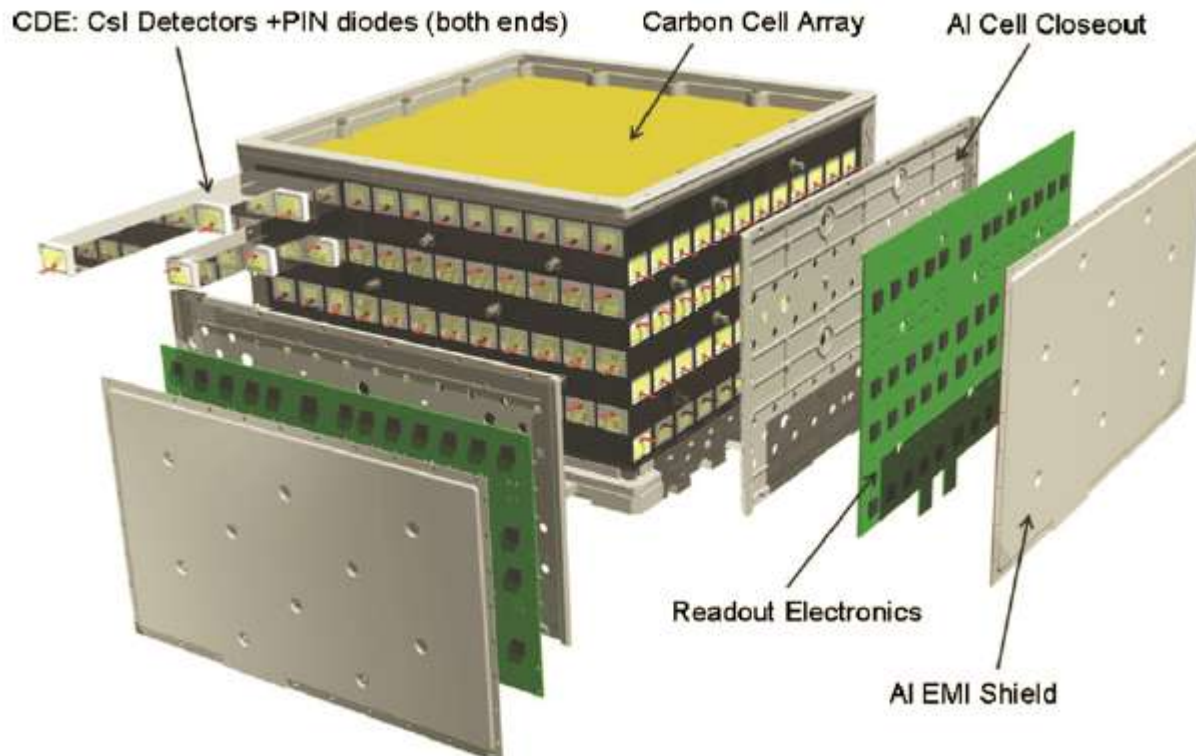
$8.95 \times 8.95 \text{ cm}^2$, $400 \mu\text{m}$ thick

$12 \times 0.010 \text{ cm}$ ($0.03X_0$) W foils (“Front”)

$4 \times 0.072 \text{ cm}$ ($0.18X_0$) W foils (“Back”)



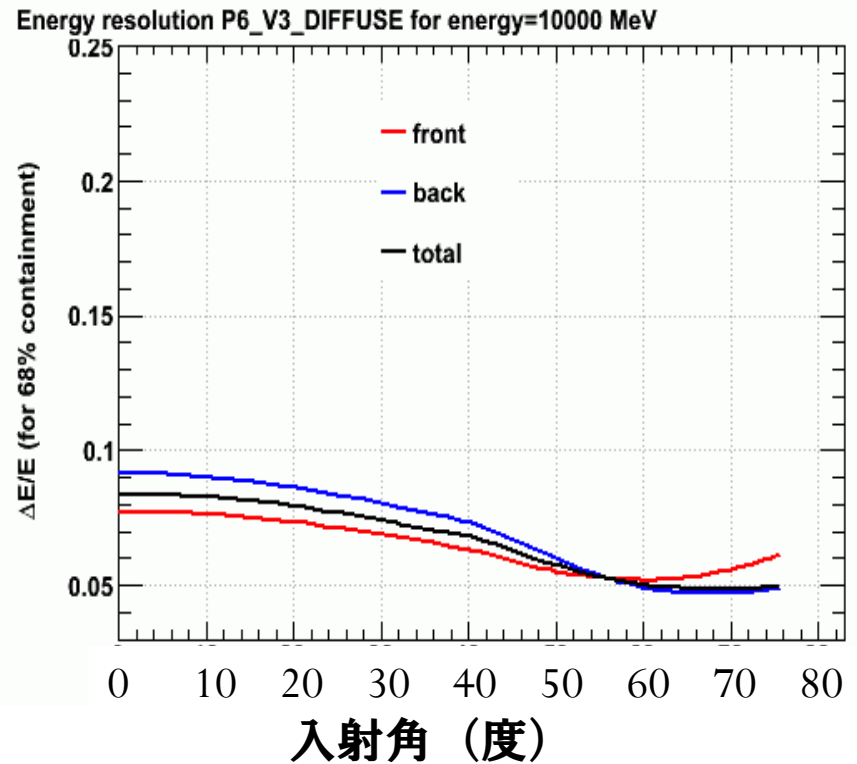
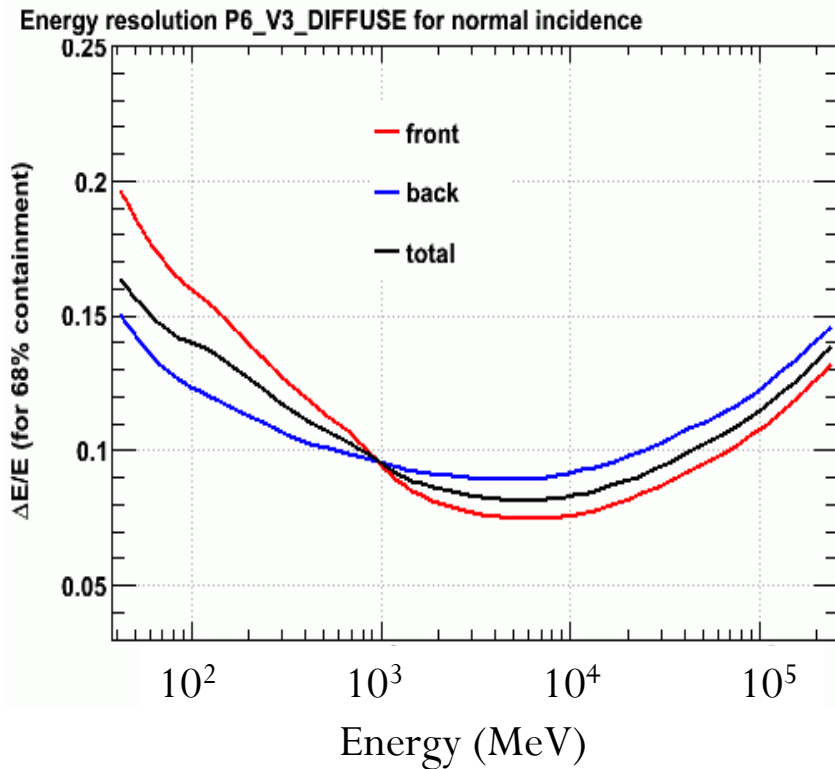
LAT calorimeter



96 CsI(Tl) crystals in 8 layers
(x,y) hodoscopic array
 $2.7 \times 2.0 \times 32.6 \text{ cm}^3$ each
 $8.6X_0$ ($10.1X_0$ for instrument)
Two PIN photodiodes at each end

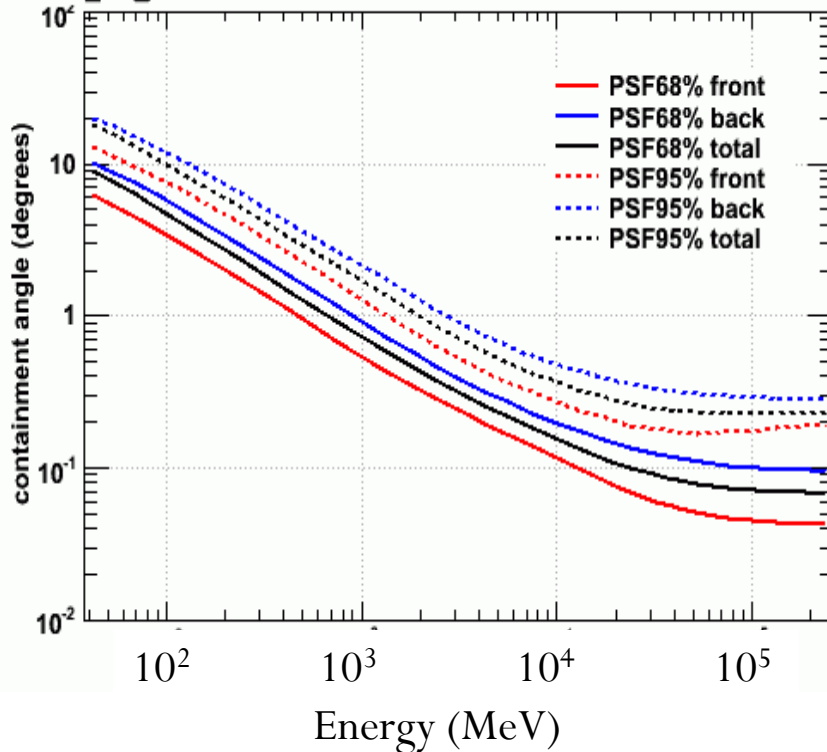
Figure 6. LAT calorimeter module. The 96 CsI(Tl) scintillator crystal detector elements are arranged in eight layers, with the orientation of the crystals in adjacent layers rotated by 90° . The total calorimeter depth (at normal incidence) is 8.6 radiation lengths.

LAT energy resolution

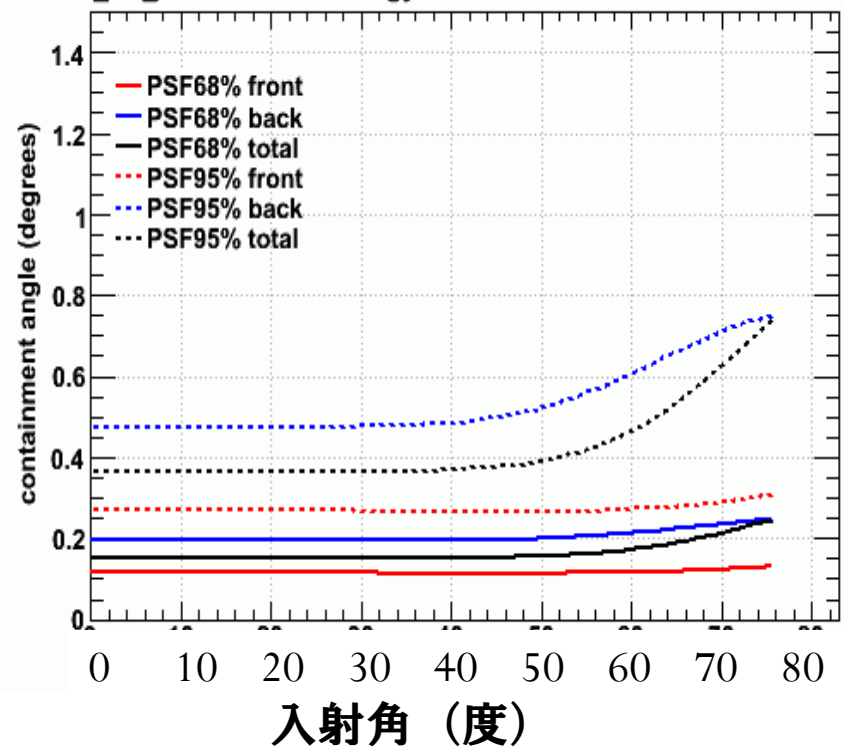


LAT angular resolution

PSF P6_V3_DIFFUSE for normal incidence

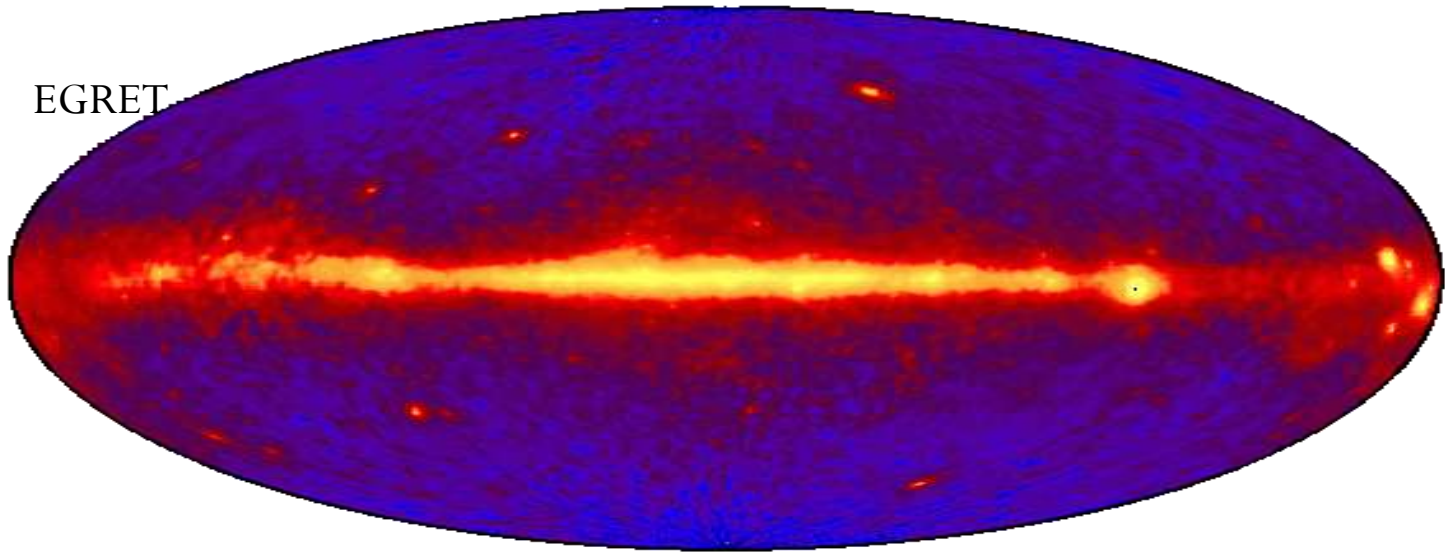


PSF P6_V3_DIFFUSE for energy =10000 MeV

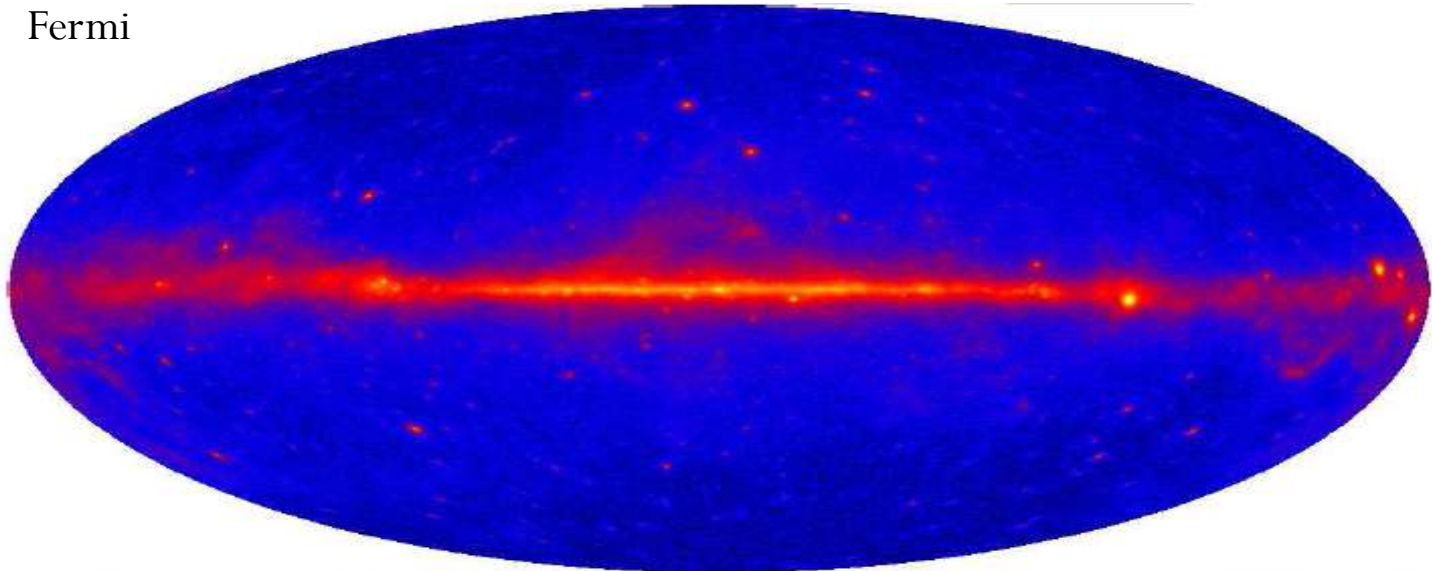


GeV Gamma-ray sky

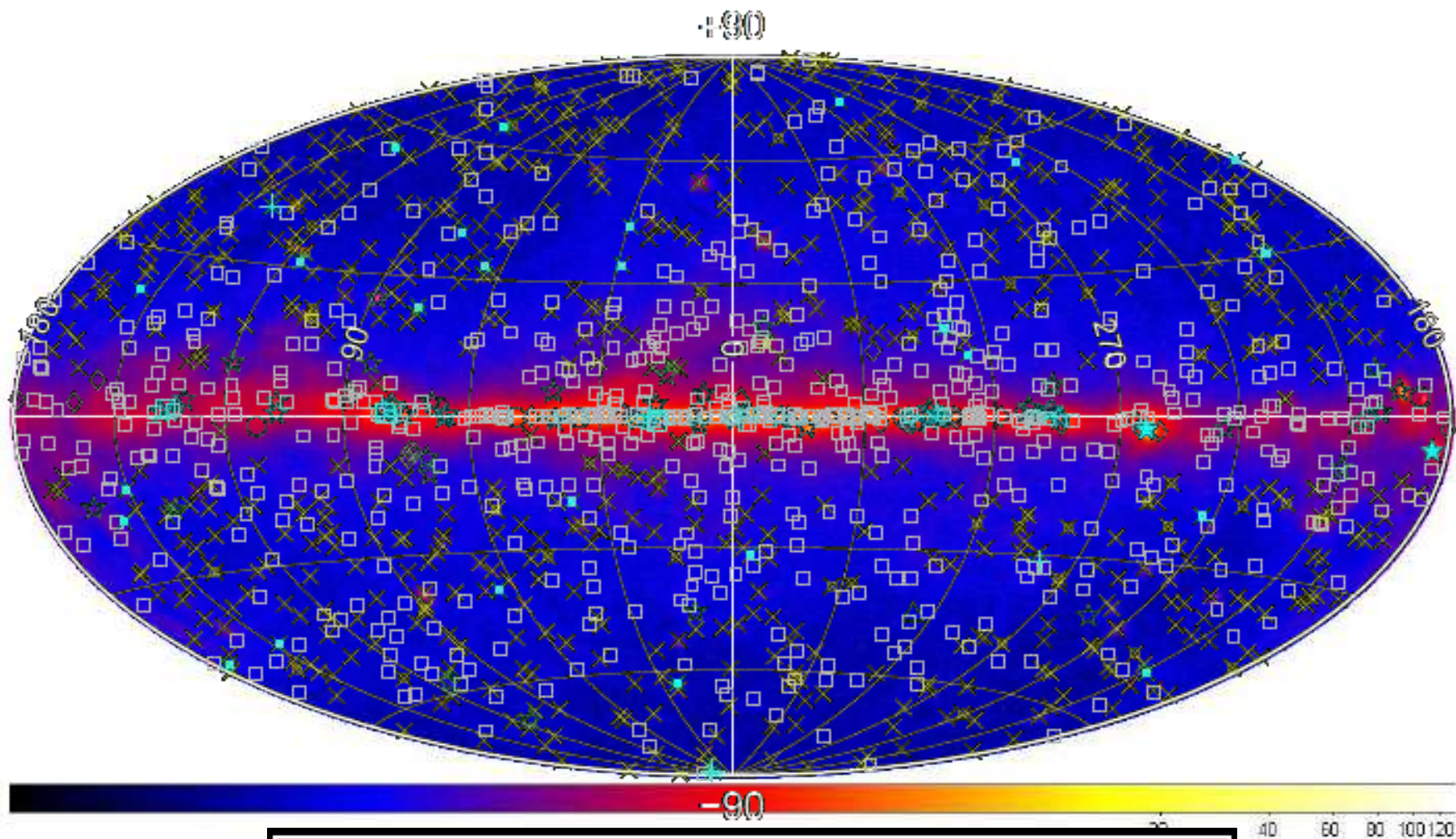
EGRET



Fermi



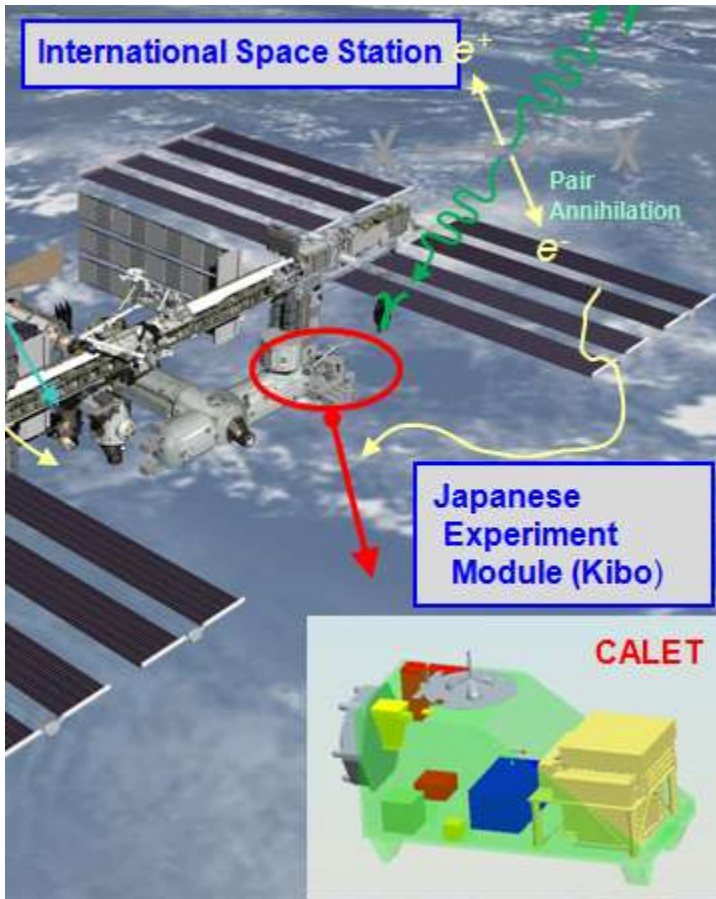
LAT 1-yr allsky map



□ Unassociated	× AGN - blazar	× AGN - unknown
◇ Potential SNR	✦ Starburst Gal	✦ AGN - non blazar
☆ Pulsar	★ Pulsar w/PWN	+ Galaxy
○ SNR	◻ XRB or MQO	△ Globular cluster

1451 sources

CALET (Calorimetric Electron Telescope)



電子・ガンマ線 (10-10,000 GeV)

Japan/USA/Italy/China

To be launched in 2013

□ Imaging Calorimeter

Total Thickness of Tungsten (W): 3 r.l.

Layer Number of SciFi Belts:

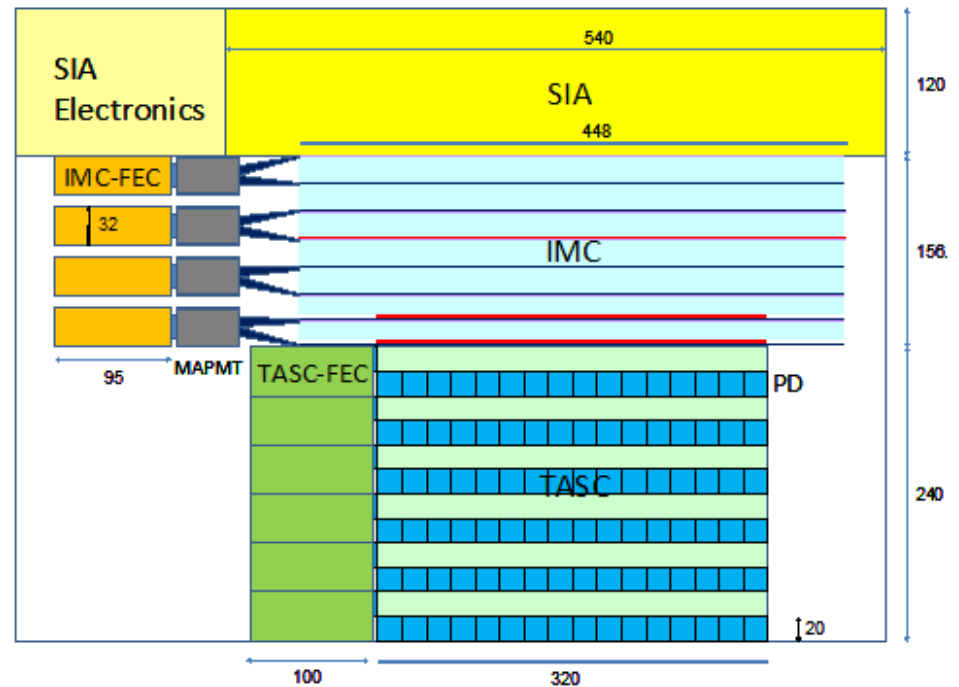
8 Layers × 2(X,Y)

□ Total Absorption Calorimeter

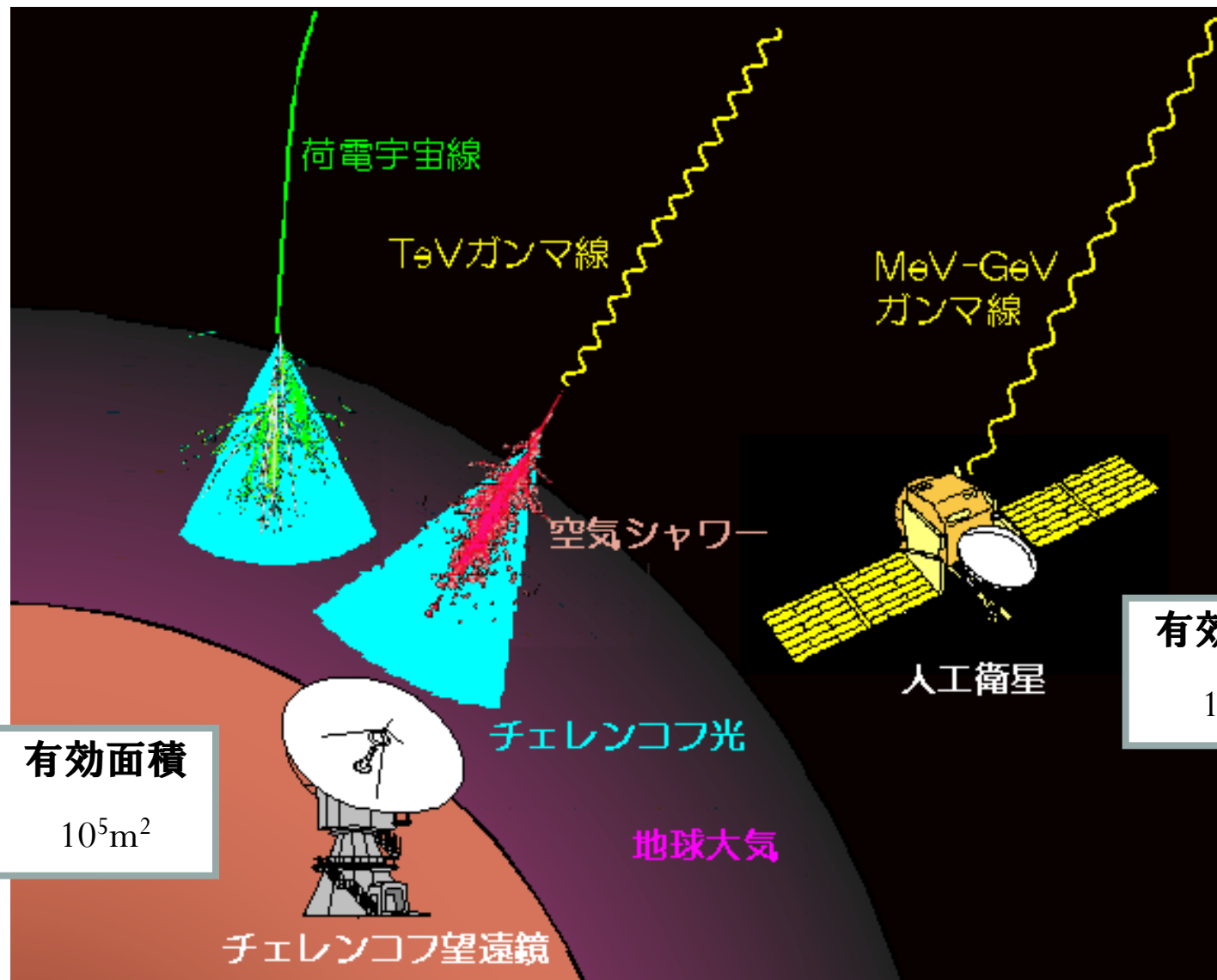
PWO 20mm × 20mm × 320mm

Total Depth of PWO: 27 r.l. (24cm)

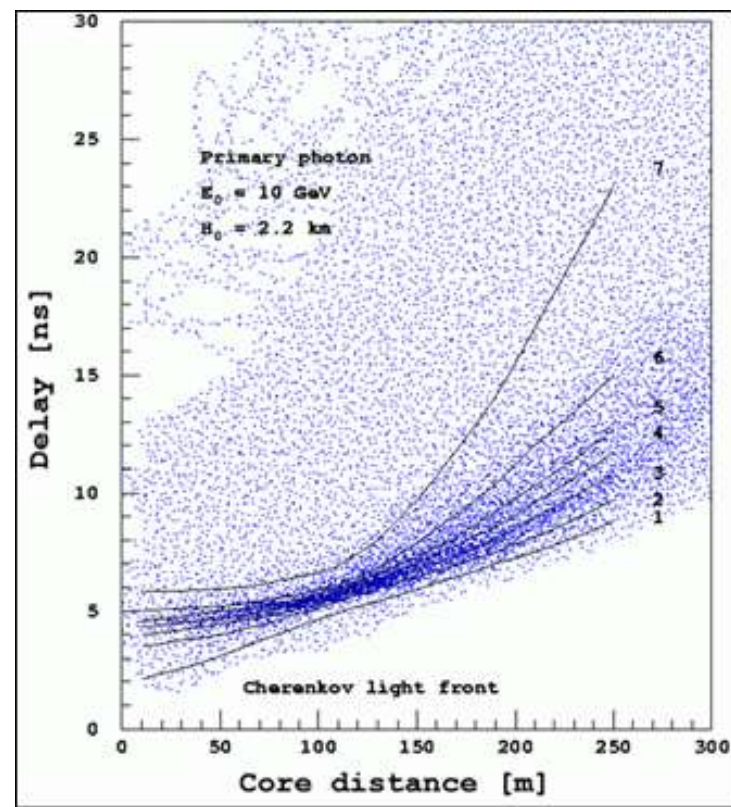
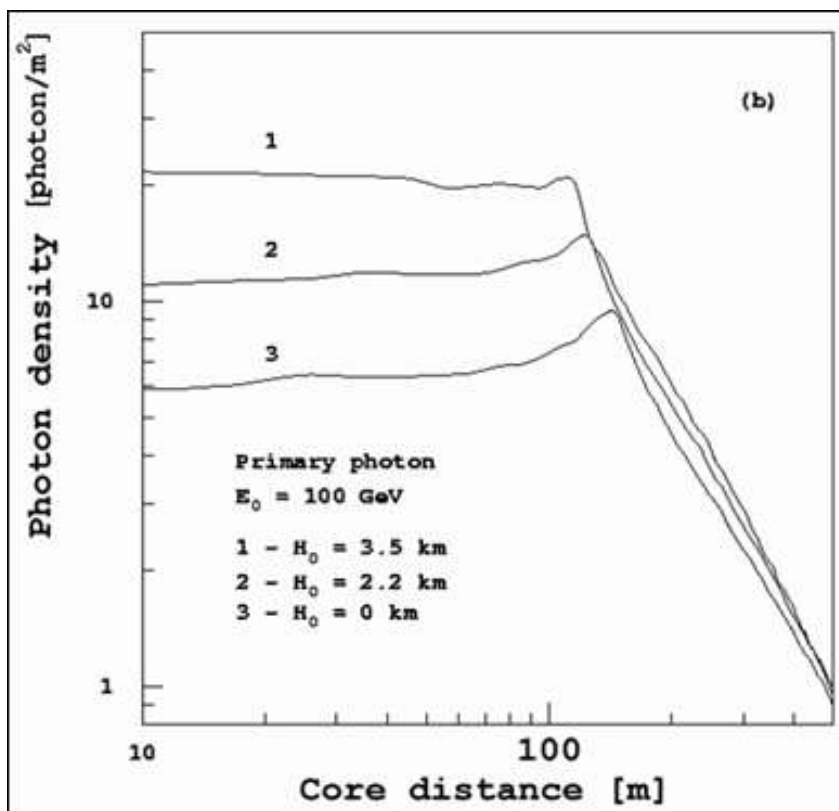
Spacer
Tungsten
SciFi



大気チェレンコフ望遠鏡

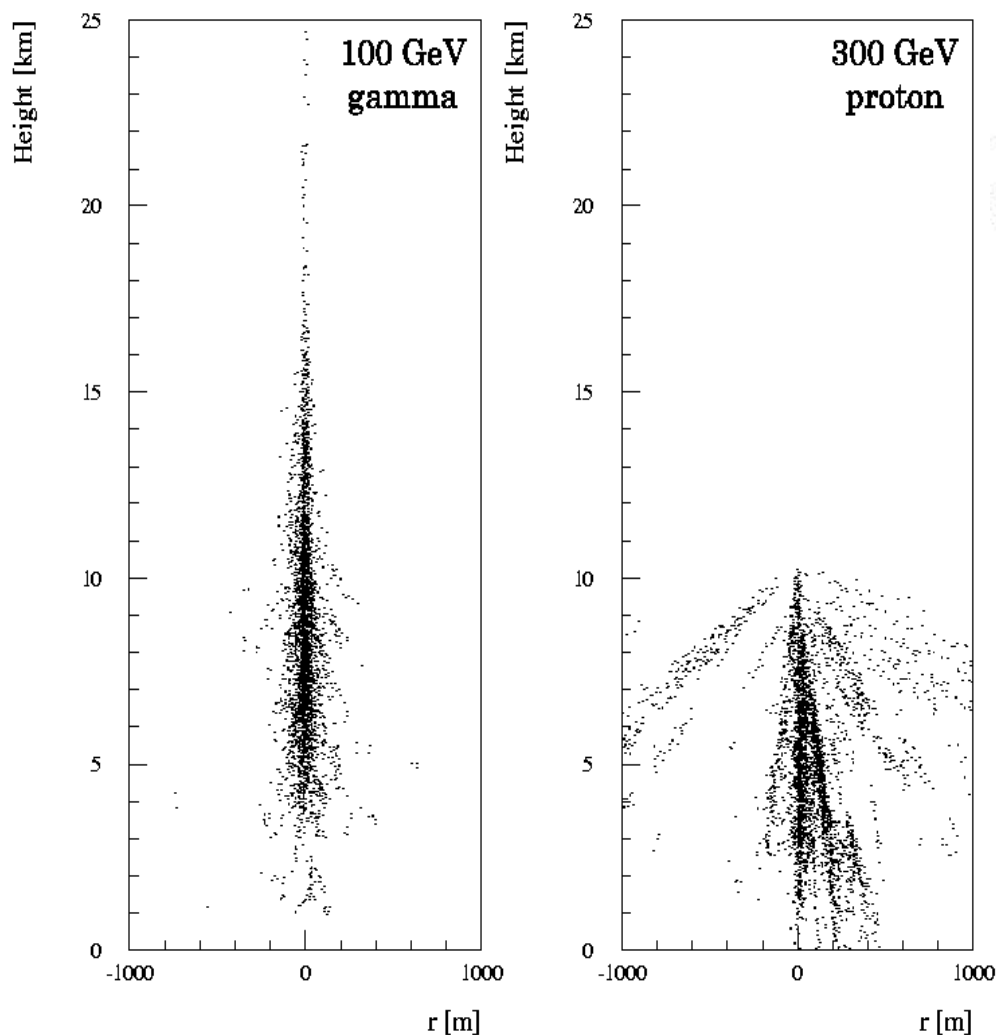


チェレンコフ光の横分布と時間分布

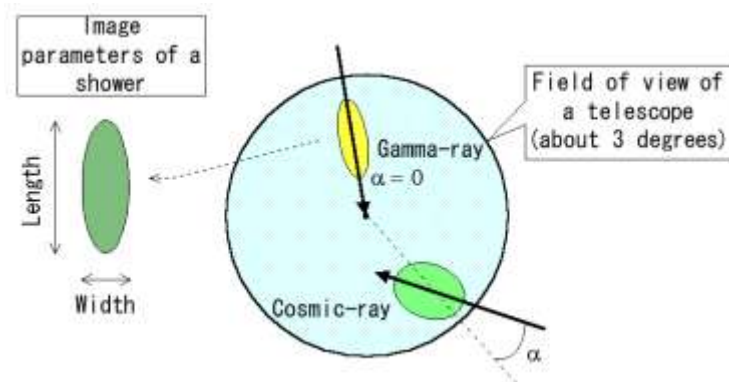
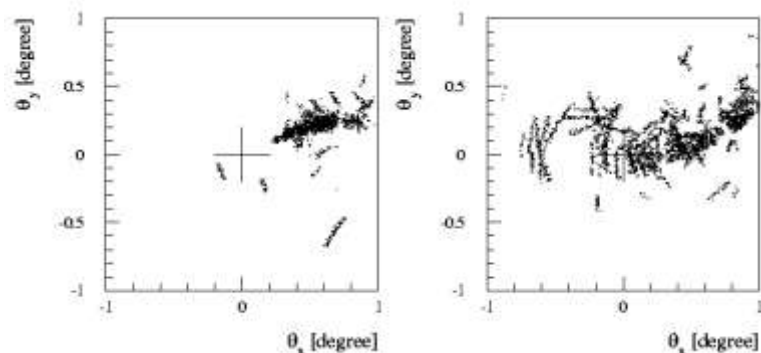


イメージング法によるガンマ線の識別

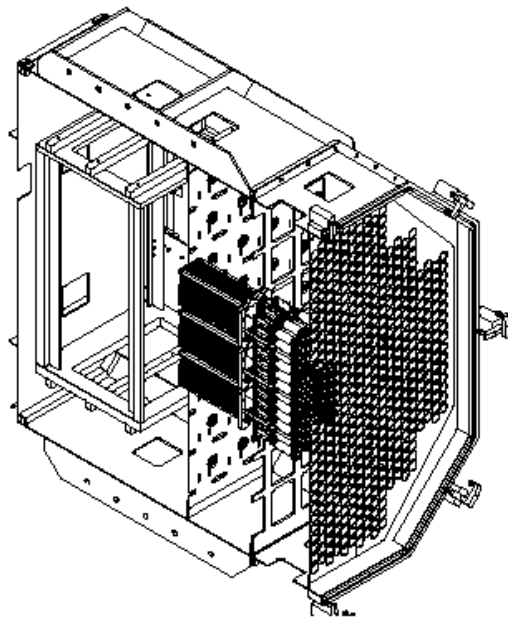
シャワーの発達の違い



焦点面でのイメージ

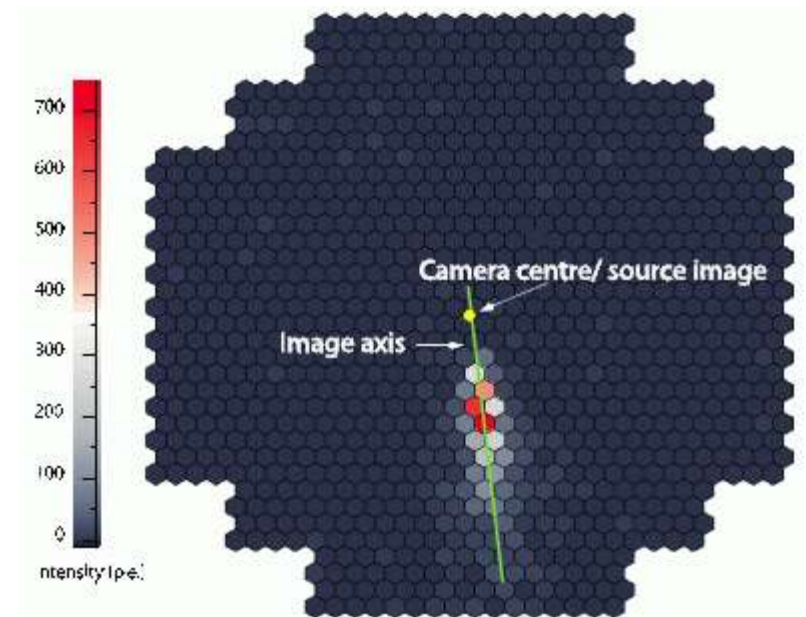


カメラ

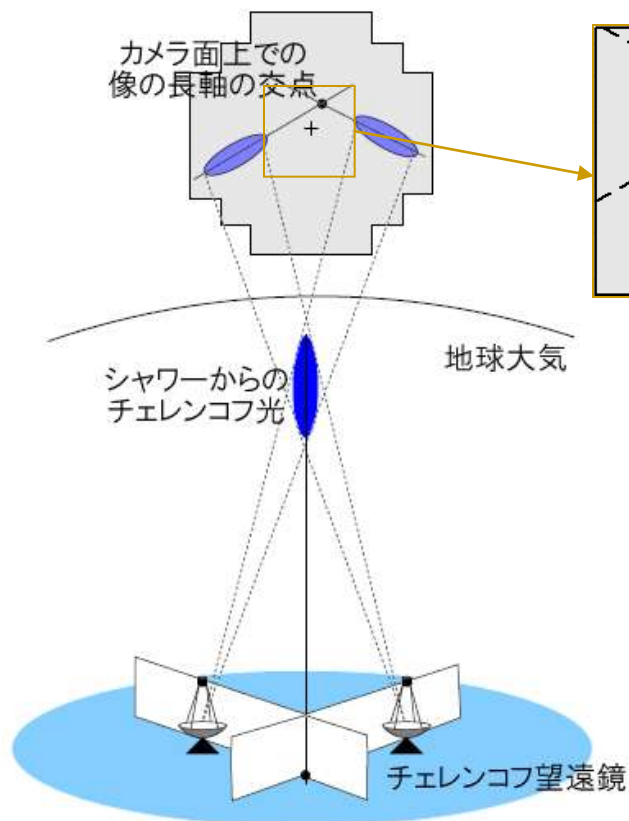


H.E.S.S. camera

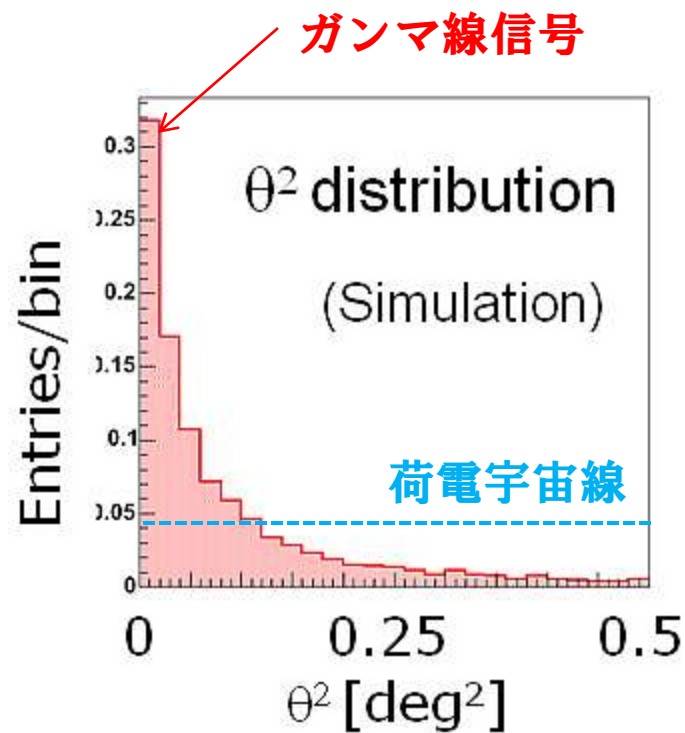
- 960 **ピクセル** (PMT)
- 1GHz Analog Ring Sampling ASICs
- 1.6m ϕ , 1.5m L, 800kg



ステレオ観測法

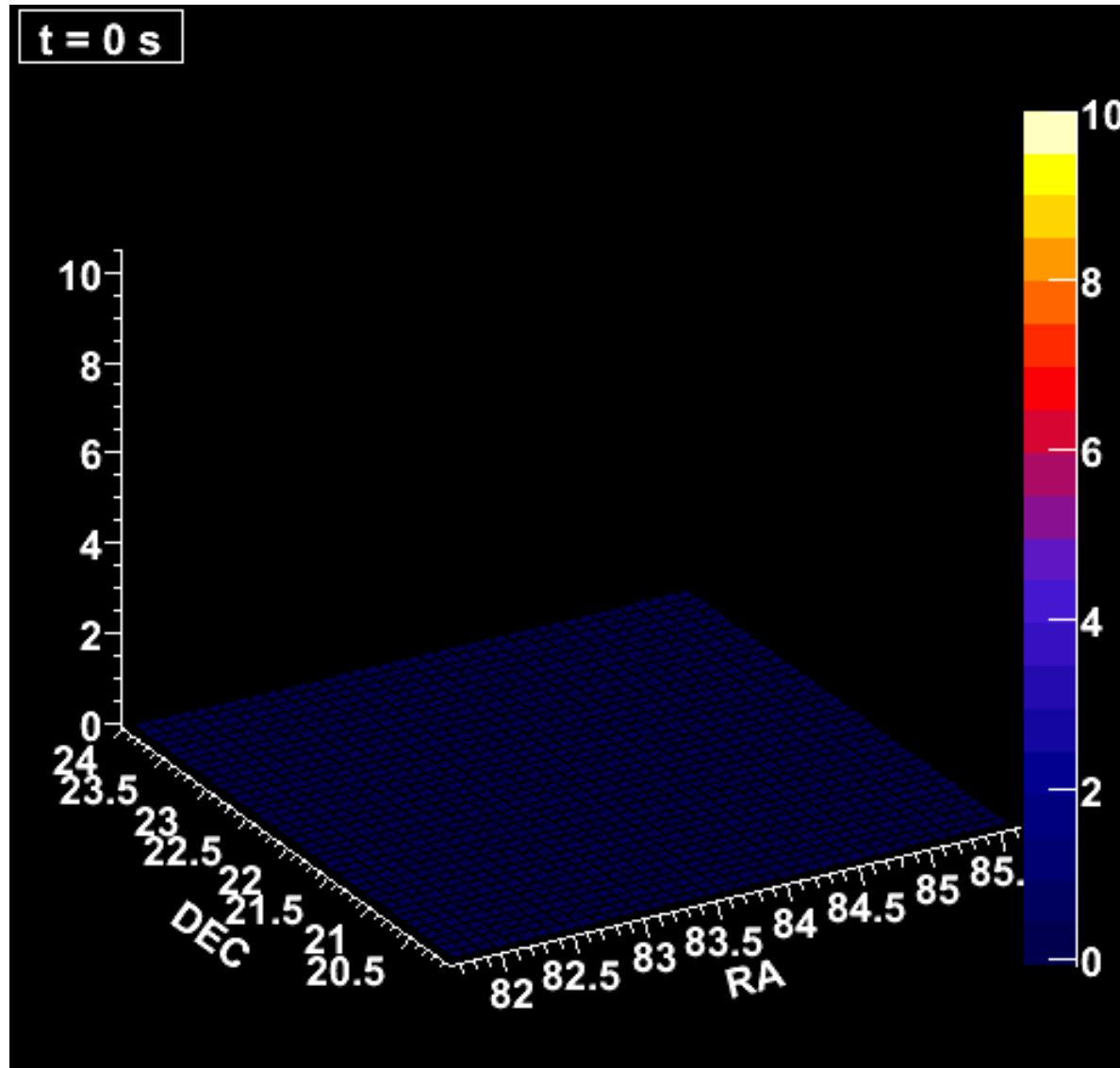


複数の望遠鏡で像を同時にとらえることにより高精度観測が実現 (ステレオ法)



「かに」星雲

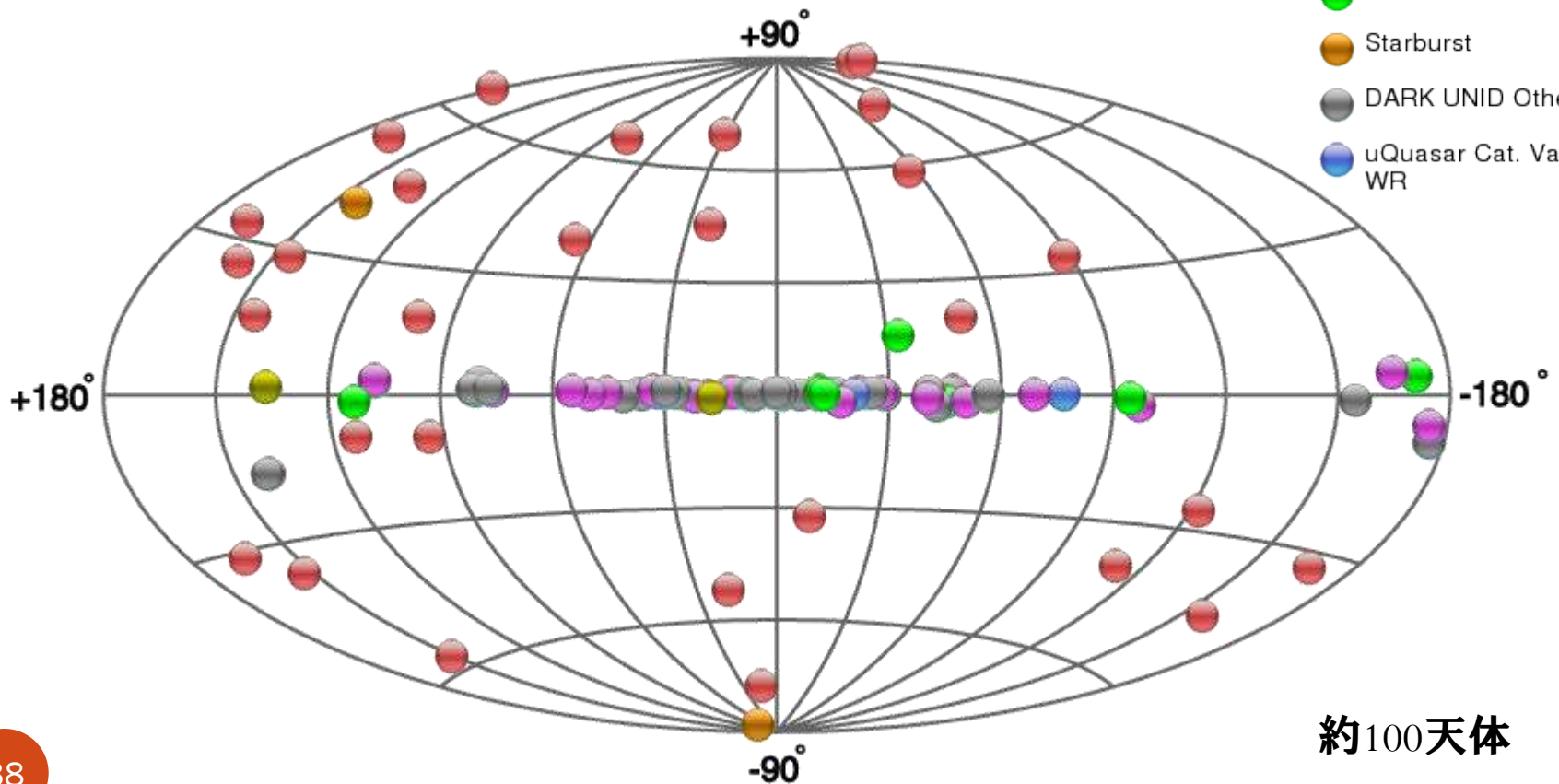
Crab Signal as seen in VERITAS in real time



TeVガンマ線天体マップ

Source Types

- PWN
- XRB PSR Gamma BIN
- HBL IBL FRI FSRQ LBL
- Shell
- Starburst
- DARK UNID Other
- uQuasar Cat. Var. BIN WR



約100天体

Summary

- 天体ガンマ線の検出器は、到来方向が決定的に重要なため、種々の工夫がなされてきたが、天文学と呼べるようになったのは、検出技術の発達したごく最近になってである。
- 天体ガンマ線の観測は、エネルギー領域別に最適な方法が開発されてきた。
 - MeV領域：コンプトン望遠鏡（衛星高度）
 - GeV領域：ペア望遠鏡（衛星高度）
 - TeV領域：大気チェレンコフ望遠鏡（地上）