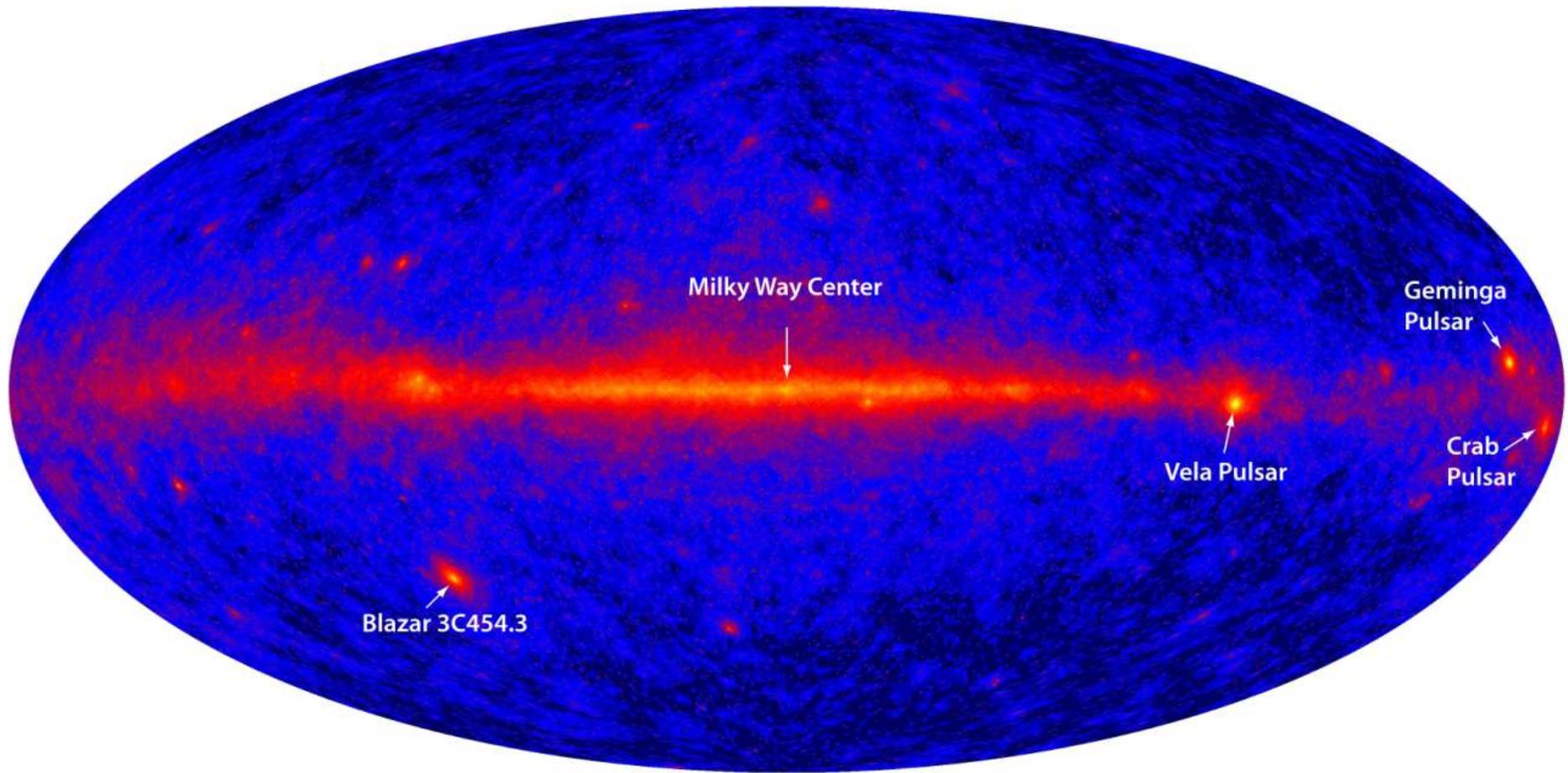


# 人工衛星による天体ガンマ線・ 宇宙線電子の観測

森 正樹

立命館大学BKC・学術フロンティア公開シンポジウム  
「表面・界面ナノ構造の形成と制御－新奇現象の発現とその機構解明」  
2012年3月13日

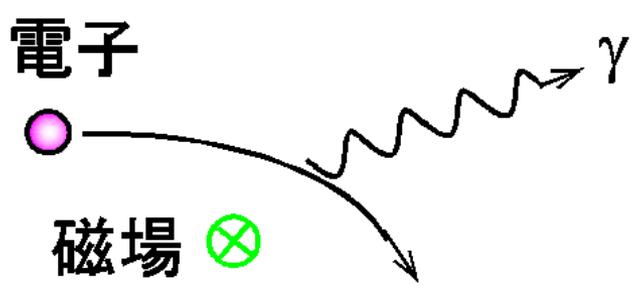
# ガンマ線で見た天球



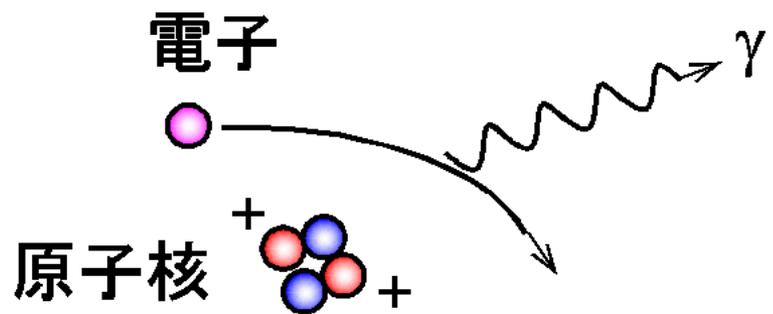
Fermi Gamma-ray Space Telescope,  $E > 100\text{MeV}$ , Galactic coordinate

# 天体ガンマ線

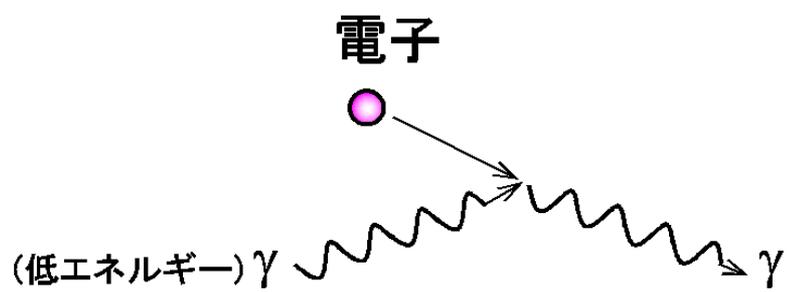
## シンクロトロン放射



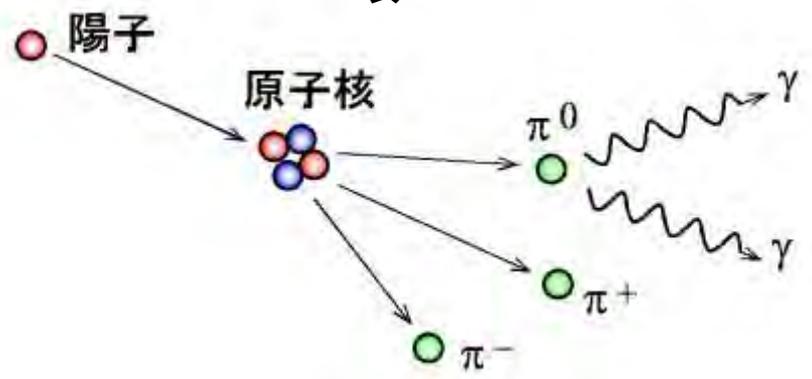
## 電子の制動放射



## 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

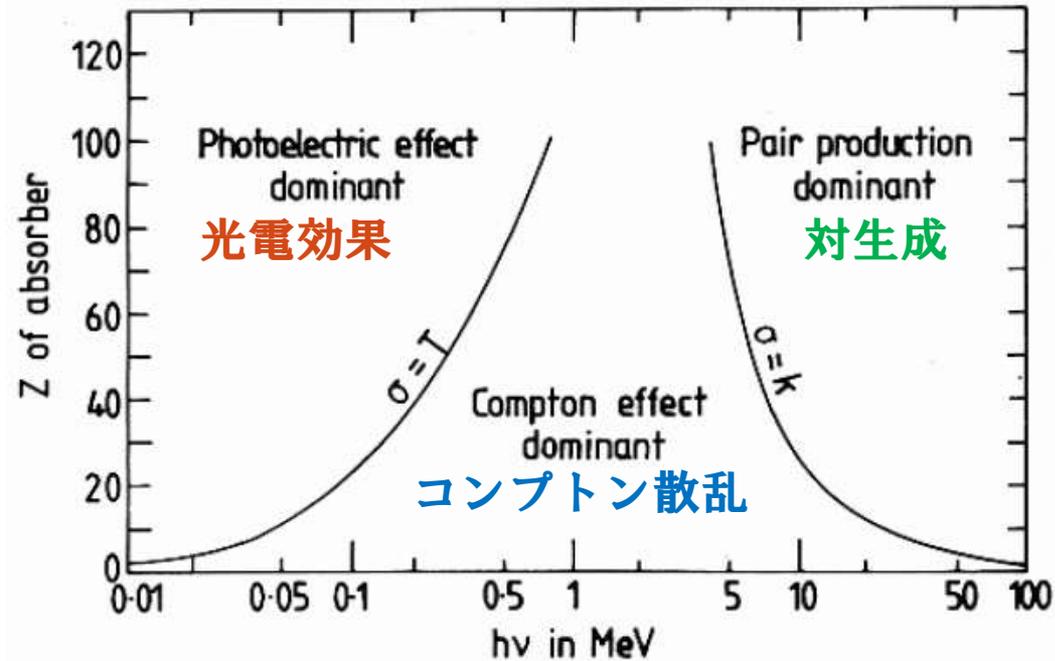
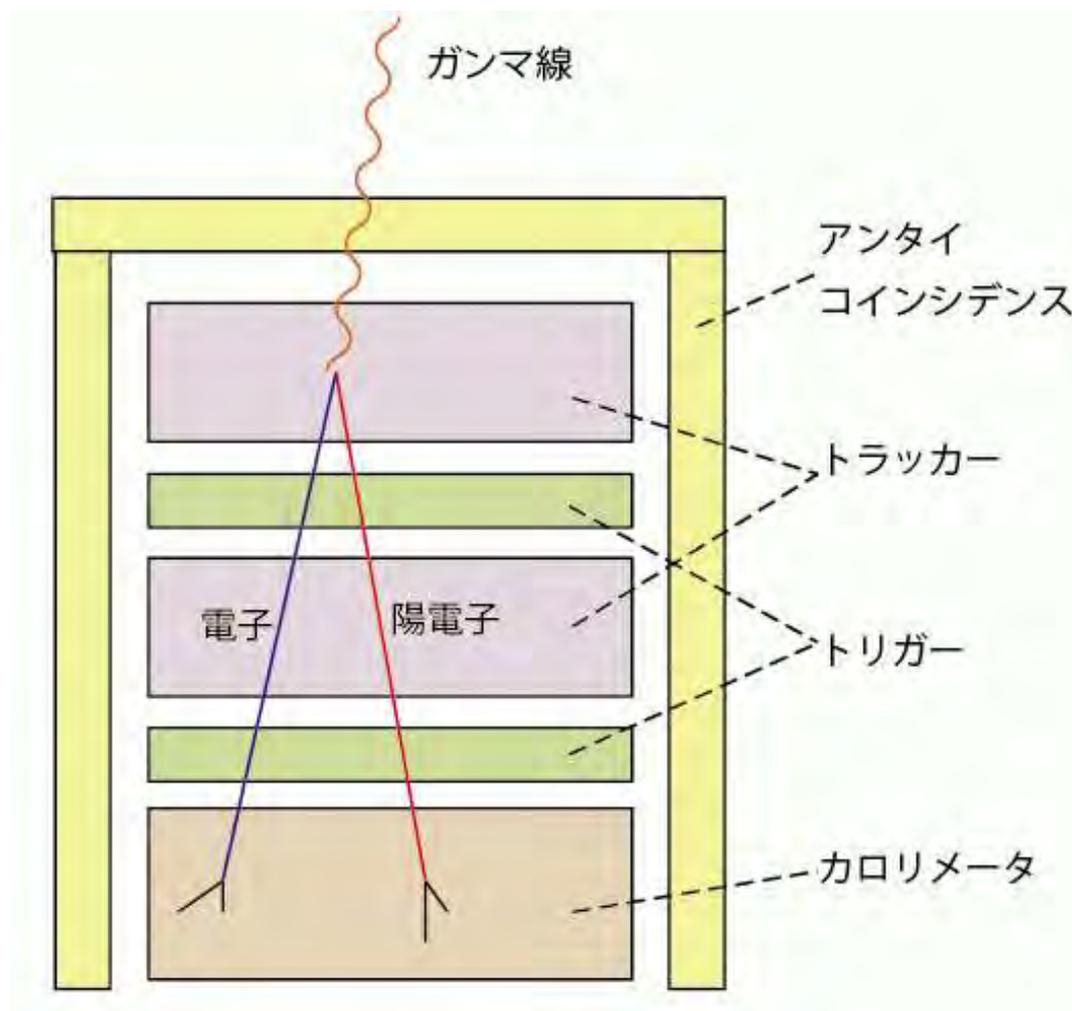


図 2.12 主要なガンマ線と物質の相互作用過程. 物質の原子番号  $Z$  に依存するが, 数 10 MeV 以上では電子・陽電子対生成過程が主要になる (P.V. Ramana Murthy and A.W. Wolfendale 1993, *Gamma-ray astronomy*, Cambridge University Press).

# ガンマ線の検出

- **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

# 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)

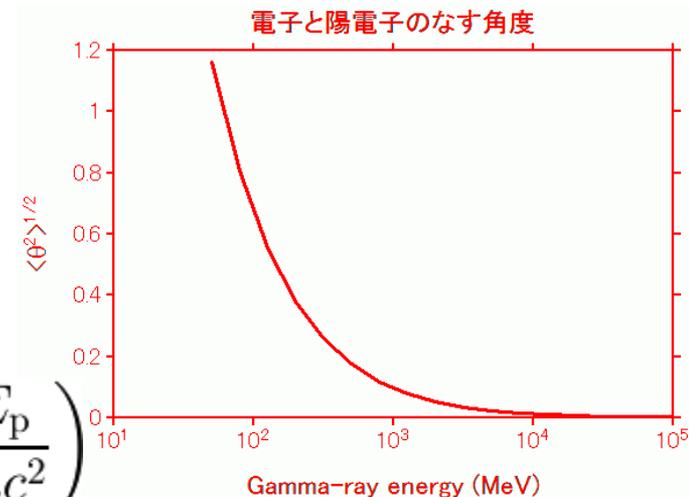
- 到来方向決定

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

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)

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

Ex.  $4^\circ$  at 30 MeV,  $1.5^\circ$  at 100 MeV,  $0.2^\circ$  at 1 GeV

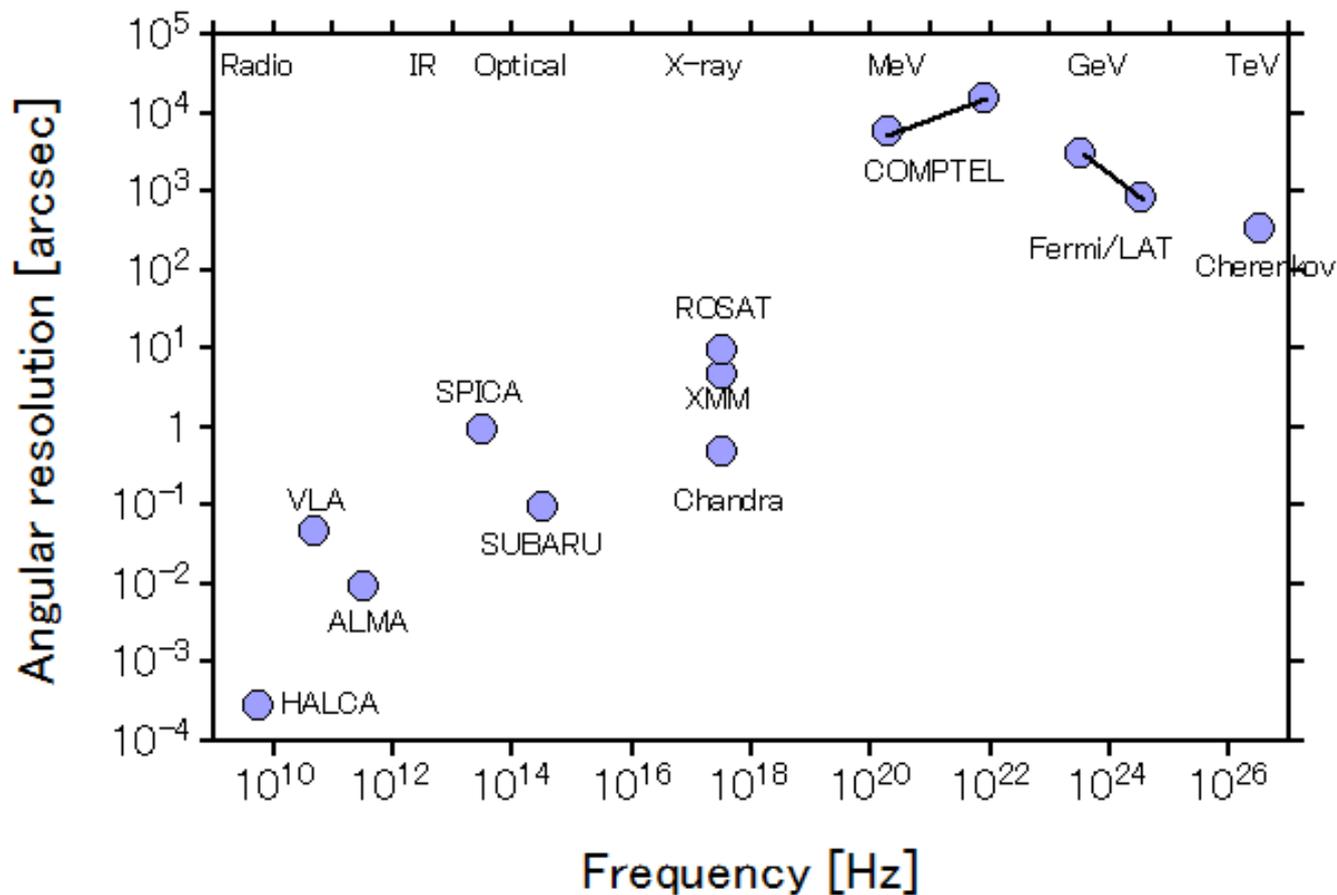
- トラックの精度
- 電子・陽電子のクーロン多重散乱

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = \left( \frac{21 \text{ MeV}}{\beta c p_s} \right)^2 \frac{x}{X_0}$$

# 波長 vs 角度分解能

1 arcsec = 1deg/3600

## Angular resolution of typical telescopes



## 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)

# コンプトン衛星/EGRET検出器

1991~2000

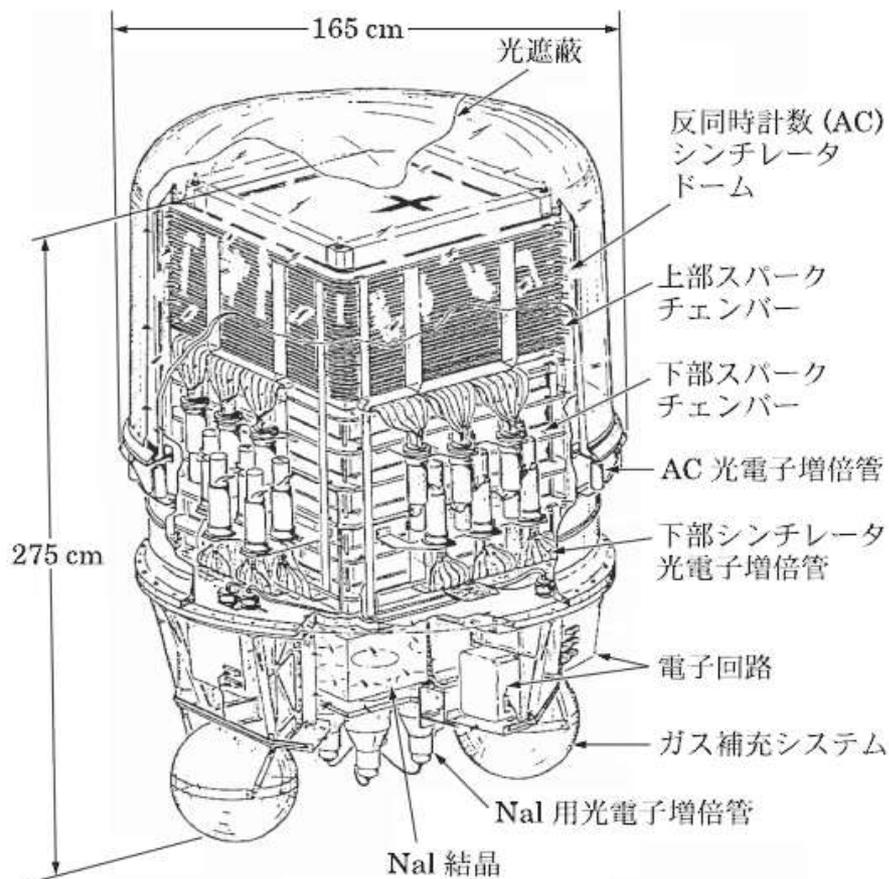
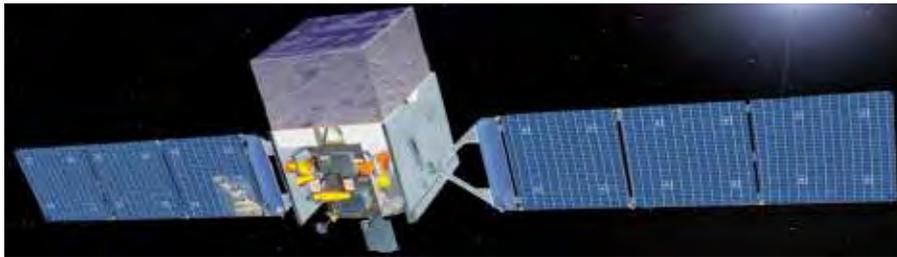


図 2.28 コンプトン衛星の EGRET 検出器 (NASA 提供).

# フェルミ衛星/LAT検出器



2008.6-present

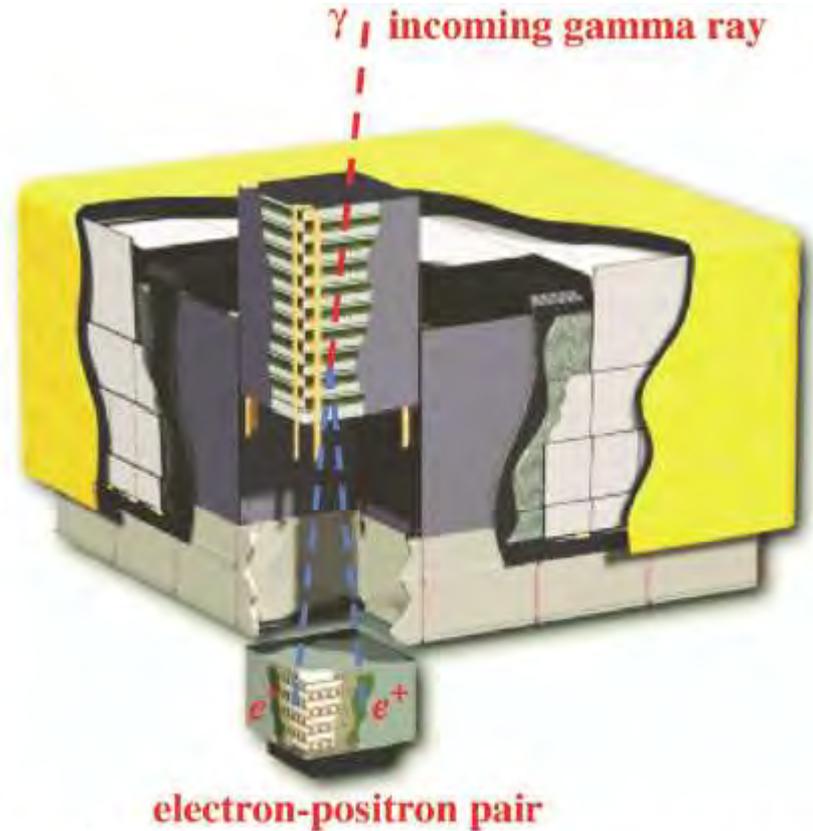
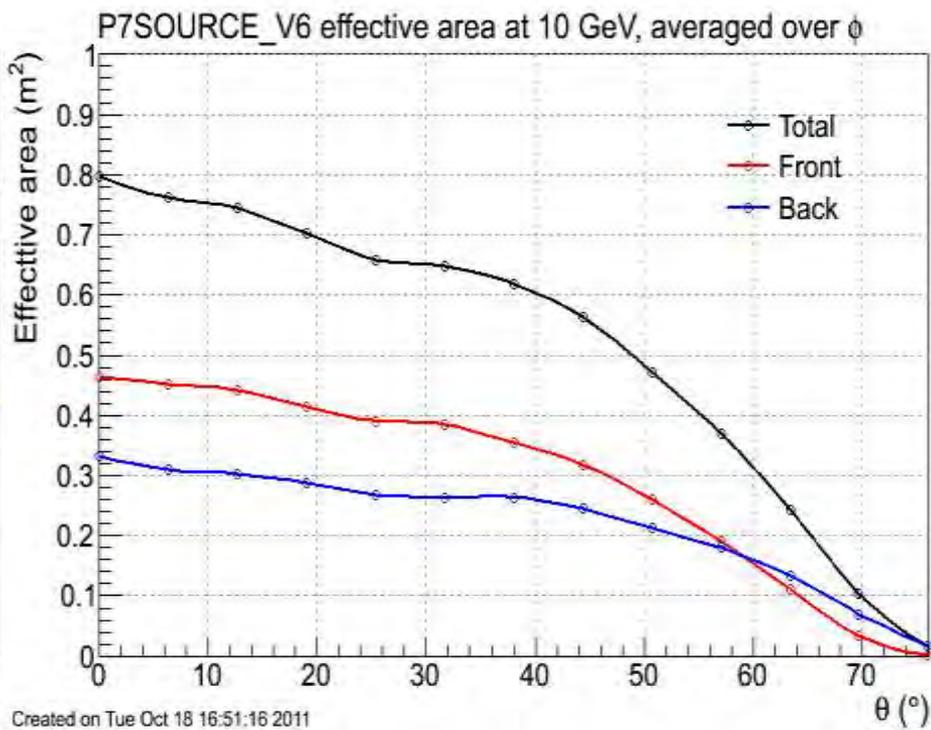
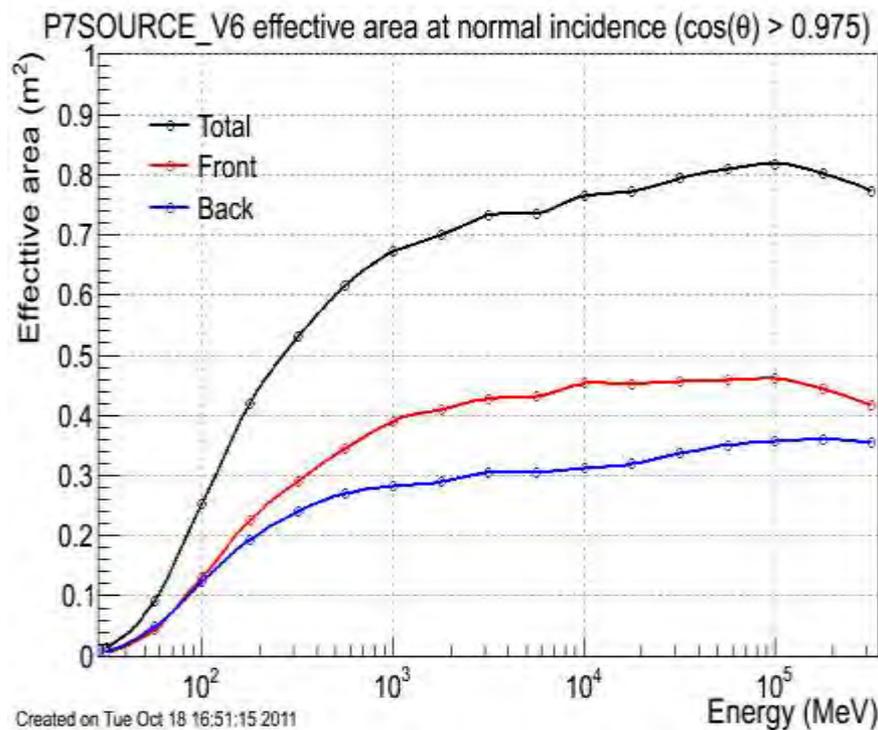
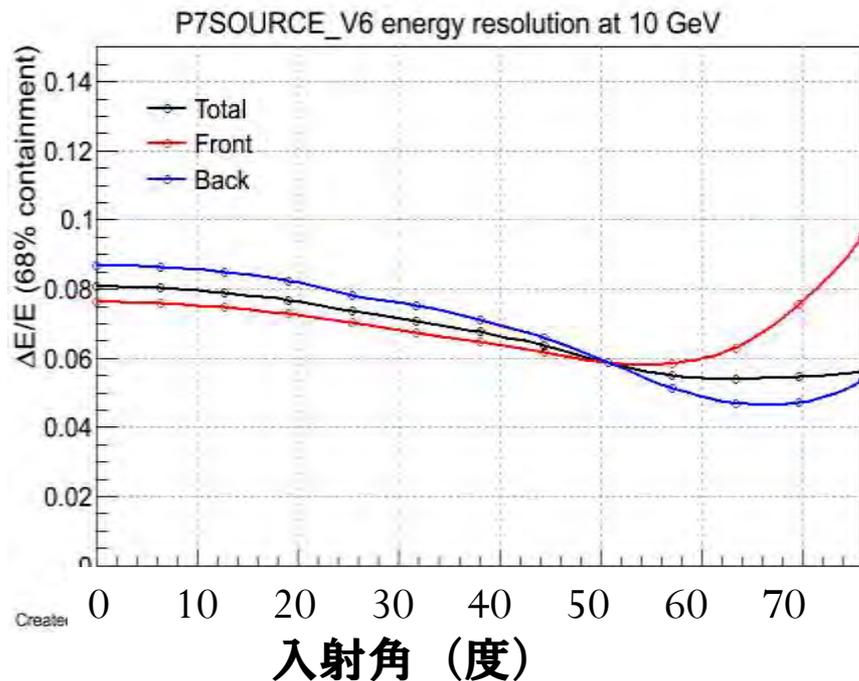
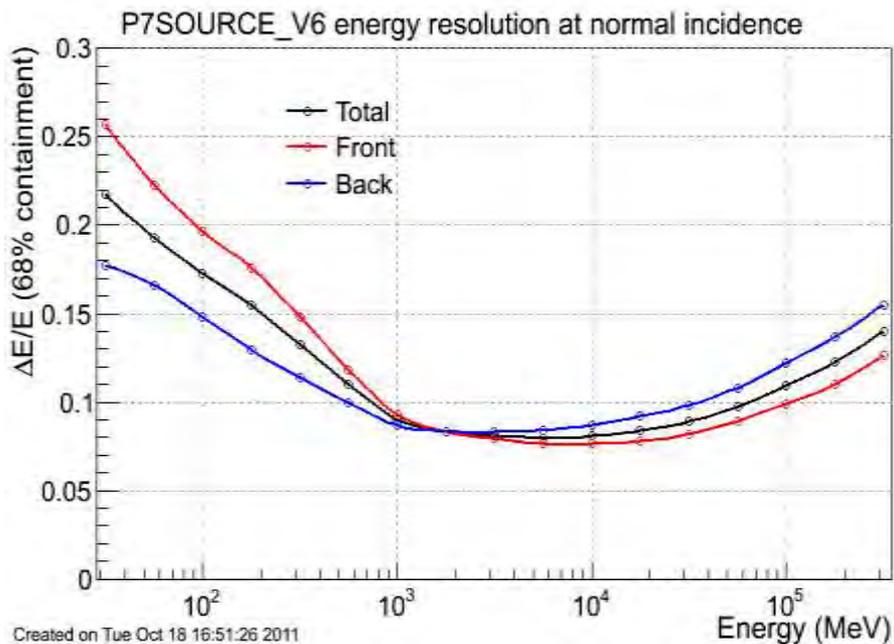


Figure 1. Schematic diagram of the LAT. The telescope's dimensions are 1.8 m × 1.8 m × 0.72 m. The power required and the mass are 650 W and 2789 kg, respectively.

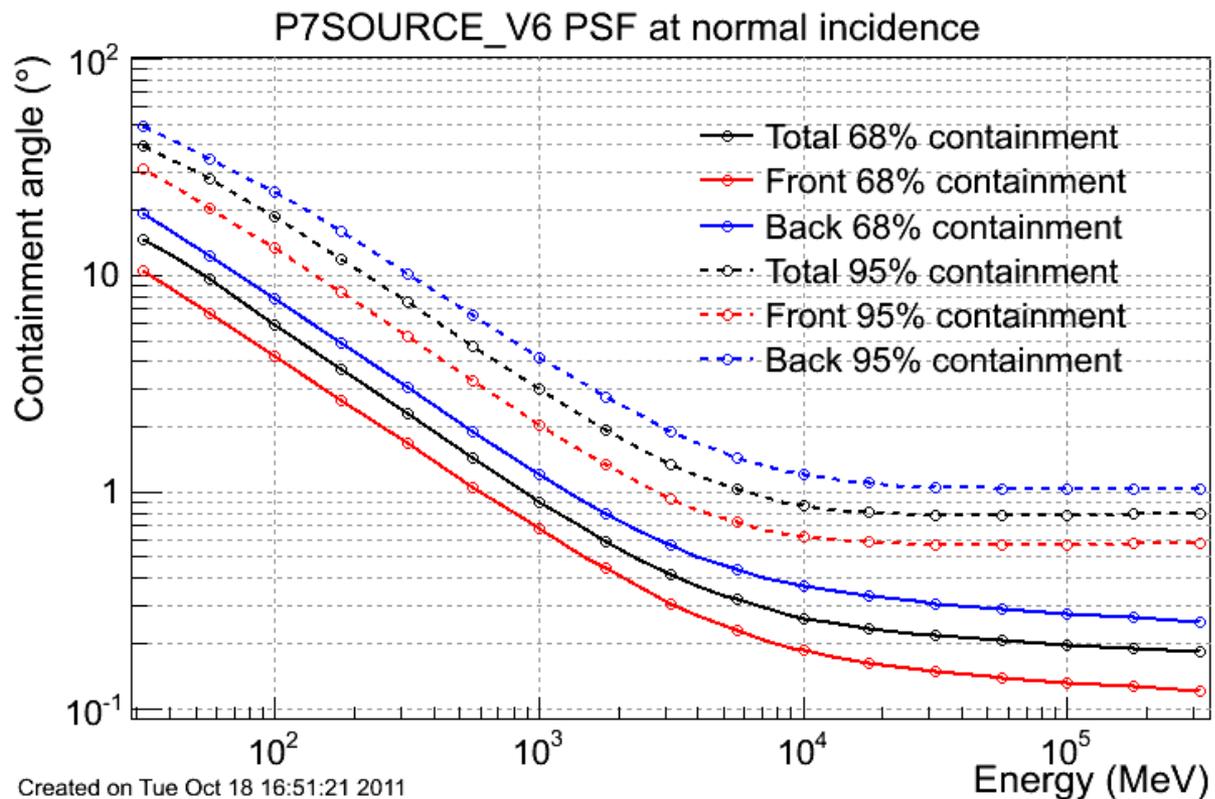
# LAT effective area



# LAT energy resolution



# LAT angular resolution

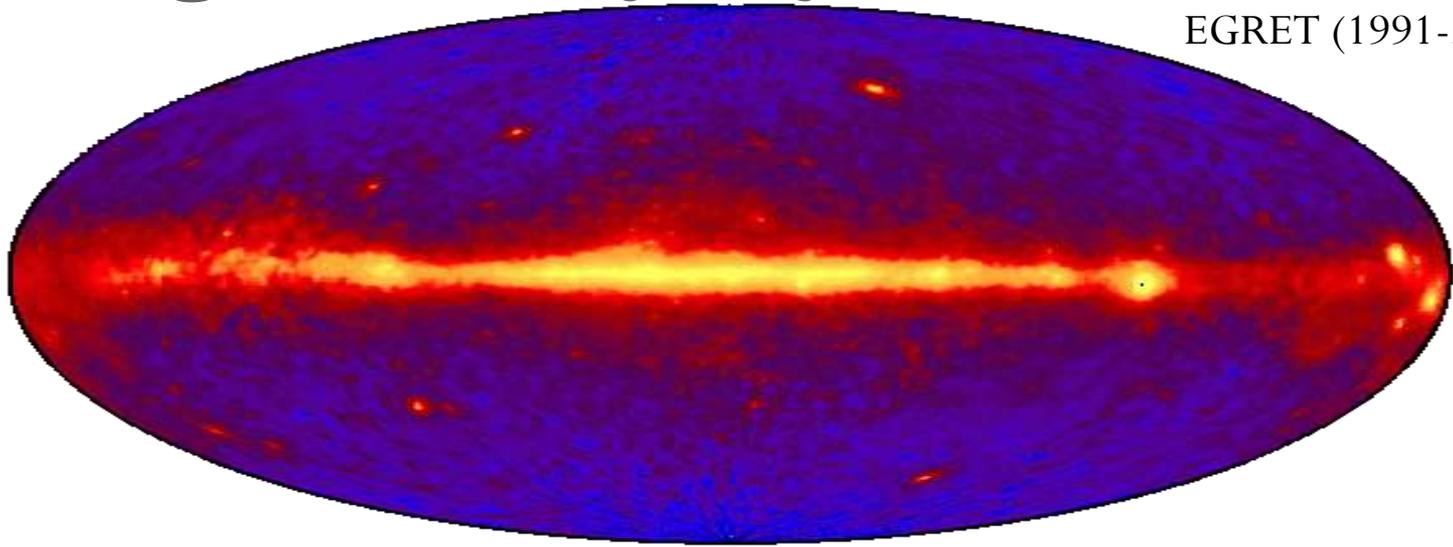


# EGRET vs LAT

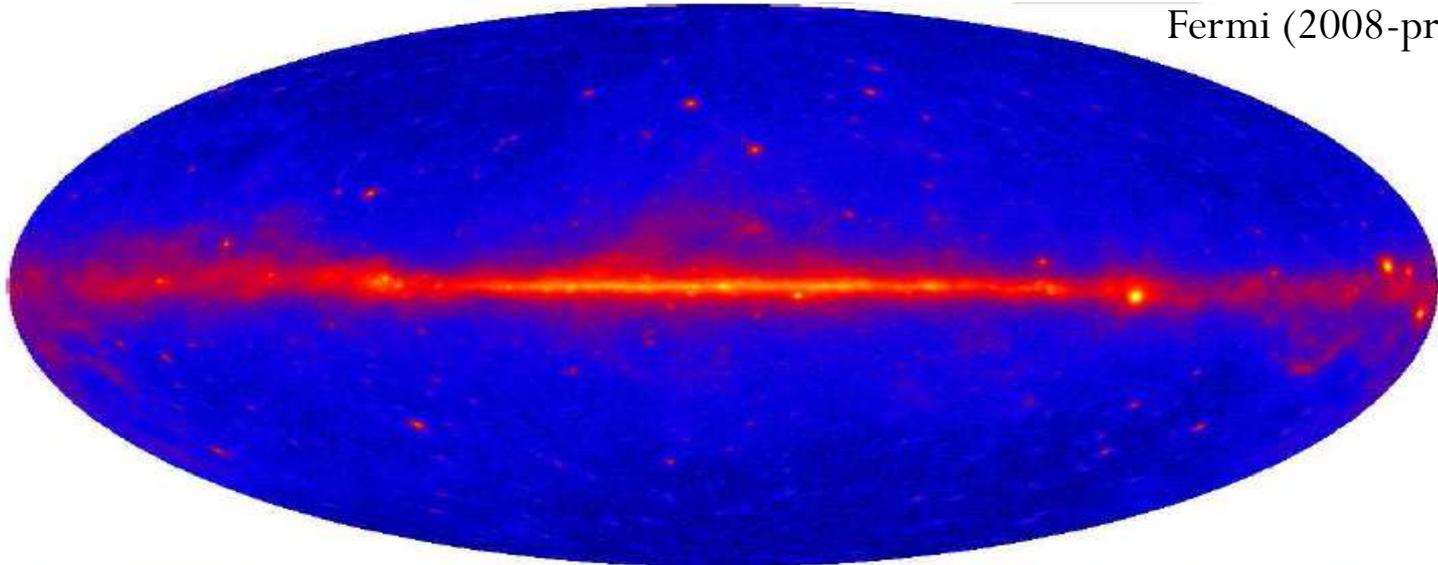
パラメータ	EGRET	LAT
エネルギー領域	20 MeV-30 GeV	100 MeV-300 GeV
有効面積(ピーク)	1500 cm <sup>2</sup>	8000 cm <sup>2</sup>
視野	0.5 sr	2.4 sr
角度分解能	5.8° (100MeV)	3.8° (180 MeV) 0.9° (1 GeV)
エネルギー分解能	10%	9% (1 GeV)
イベントごとの死時間	100 ms	26 μs
天体の位置決定精度	15'	<0.5'
点源に対する感度	~10 <sup>-7</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	3×10 <sup>-9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

# GeV gamma-ray sky

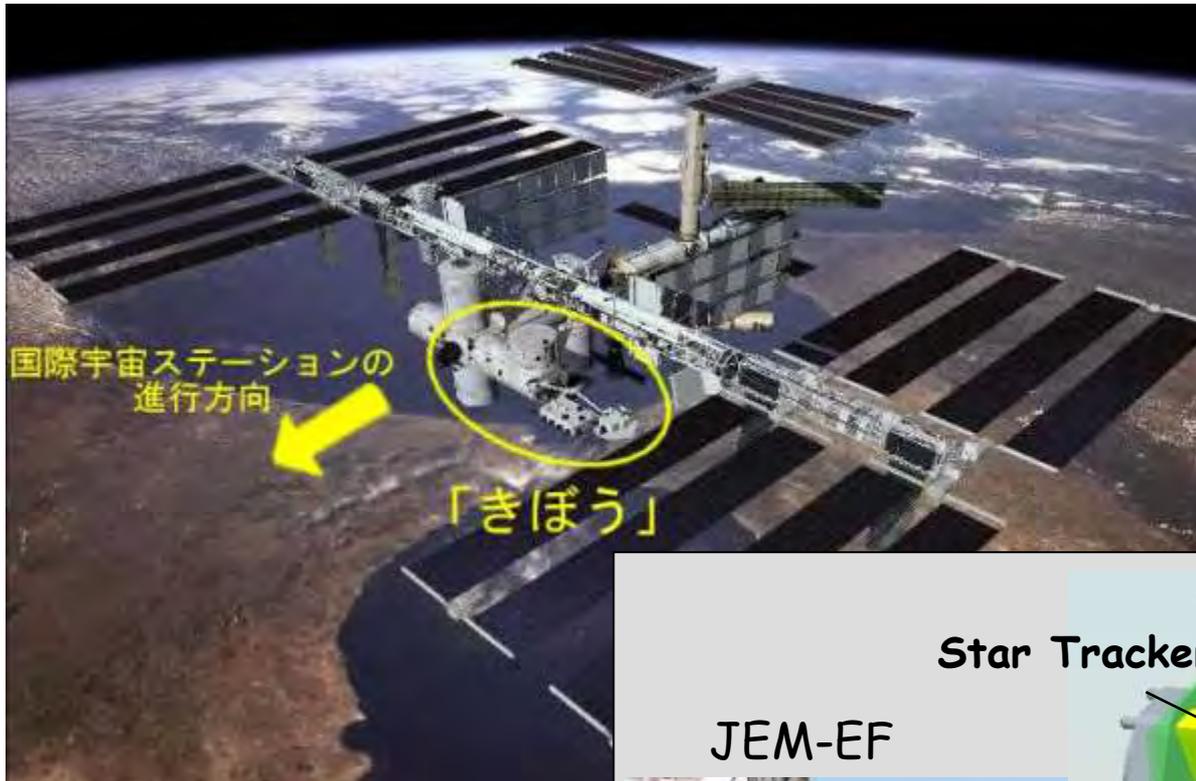
EGRET (1991-2000)



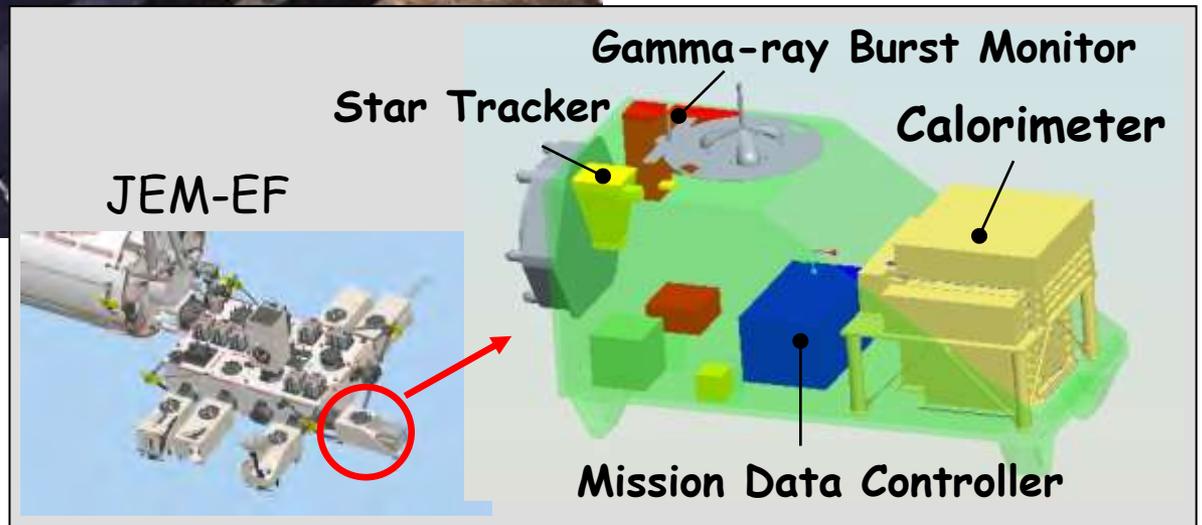
Fermi (2008-present)



# CALET (Calorimetric Electron Telescope)



国際宇宙ステーション  
JEM(きぼう)/EF  
2013年度打ち上げ予定  
観測期間 2-5年  
PI: 鳥居祥二 (早大)



# CALET：目的

- **電子（+陽電子）**：  $1\text{GeV} \sim 10\text{TeV}$ 
  - 近傍の源、暗黒物質、宇宙線の伝播、太陽風
- **ガンマ線**：  $10\text{GeV} \sim 10\text{TeV}$ 
  - 暗黒物質、拡散ガンマ線
  - 点源（超新星残骸、パルサー、活動銀河核など）、ガンマ線バースト Bursts
- **陽子・原子核**： a few  $10\text{GeV} \sim 1000\text{TeV}$ 
  - 宇宙線の伝播と加速

# CALET : 装置

## SIA Charge Measurements

(Silicon Pixel Array)

Square Pixels, Each  $11.25\text{mm}^2$

$525 \times 525 \text{ mm}^2 \times 2\text{Layers}$

## IMC Particle ID, Direction

(Imaging Calorimeter)

Scintillating Fiber Belt :  $(X,Y) \times 8\text{Layers}$

Each Scintillating Fiber :  $1\text{mm}^2 \times 448 \text{ mm}$

W plates : 7layers

Total Absorber Thickness:  $3X_0$   
 $(0.2X_0 \times 5 + 1.0X_0 \times 2)$

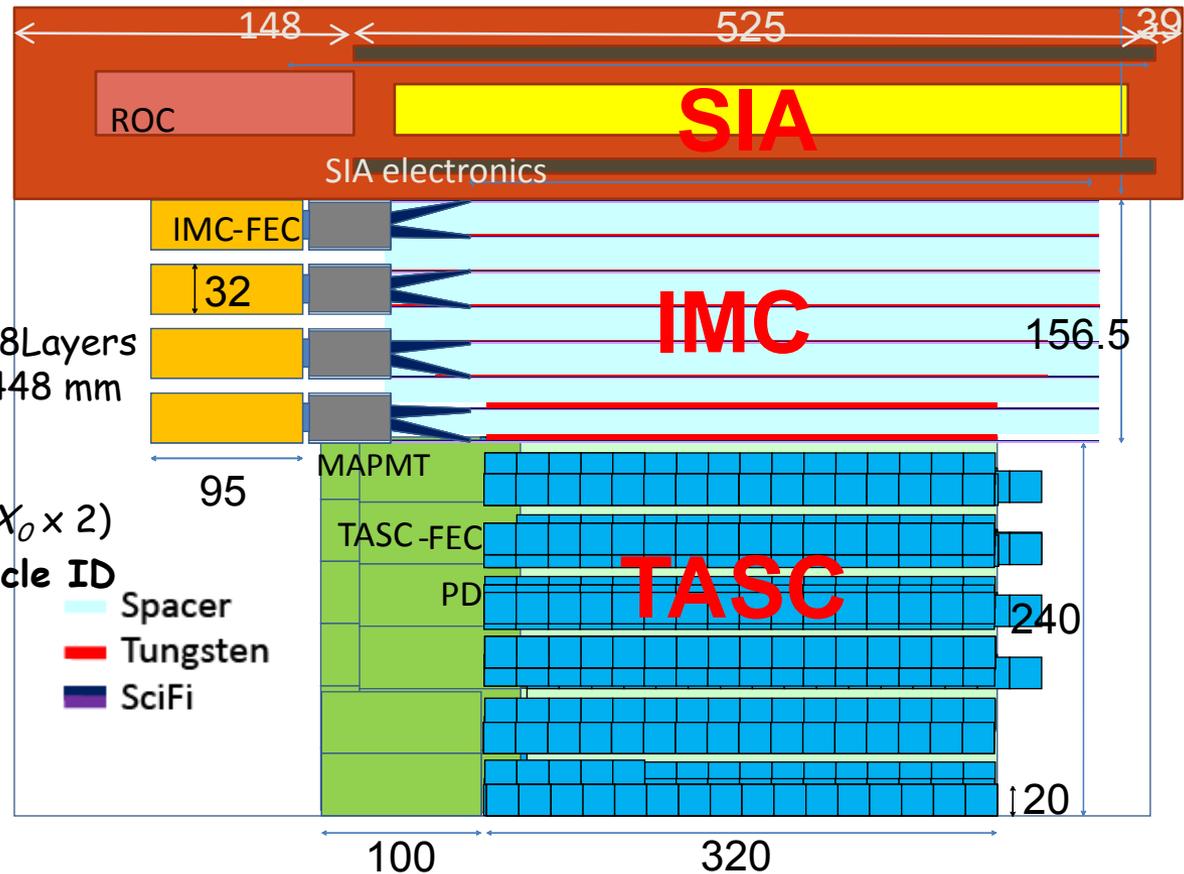
## TASC Energy Measurements, Particle ID

(Total Absorption Calorimeter)

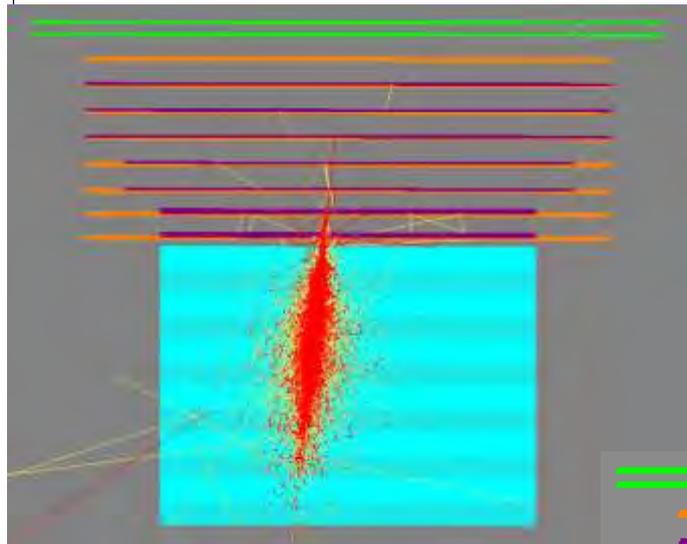
$\text{PbWO}_4$  :  $16\text{Log} \times 12\text{Layers}$

1log :  $20 \times 20 \times 320 \text{ mm}^3$

Total Absorber Thickness :  $27X_0$

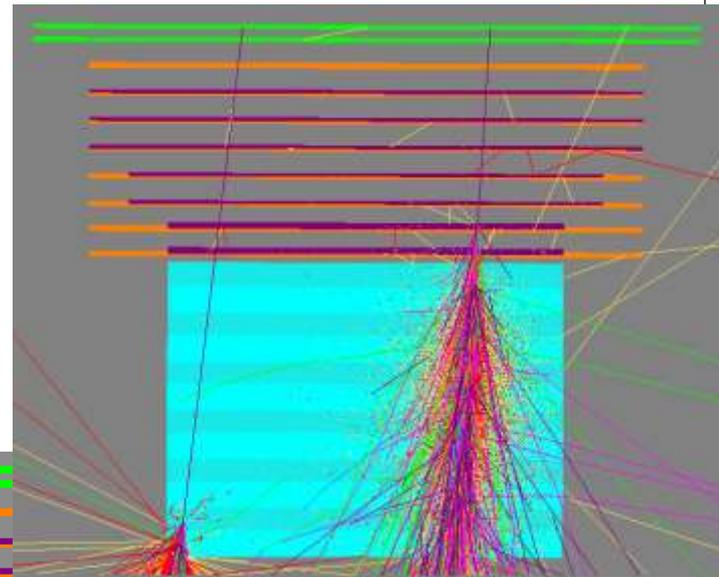


# CALET : シミュレーション

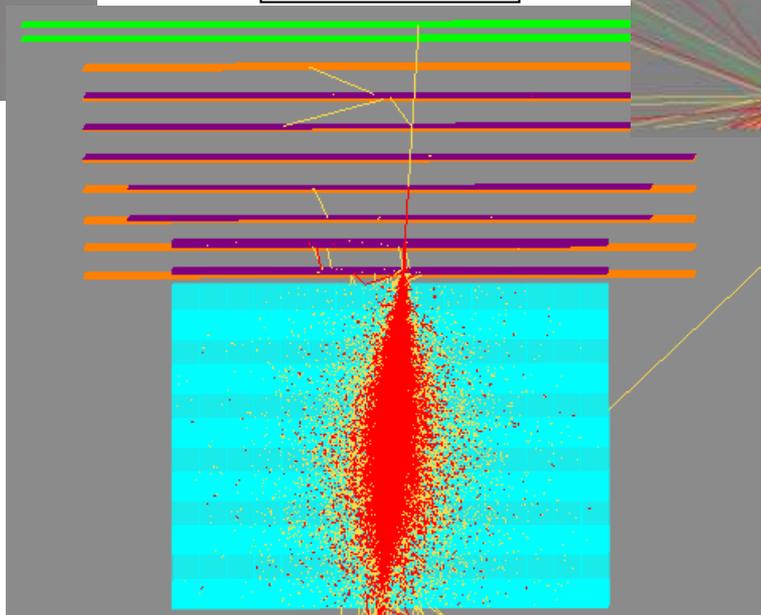


Gamma Ray  
200GeV

Electron  
1TeV

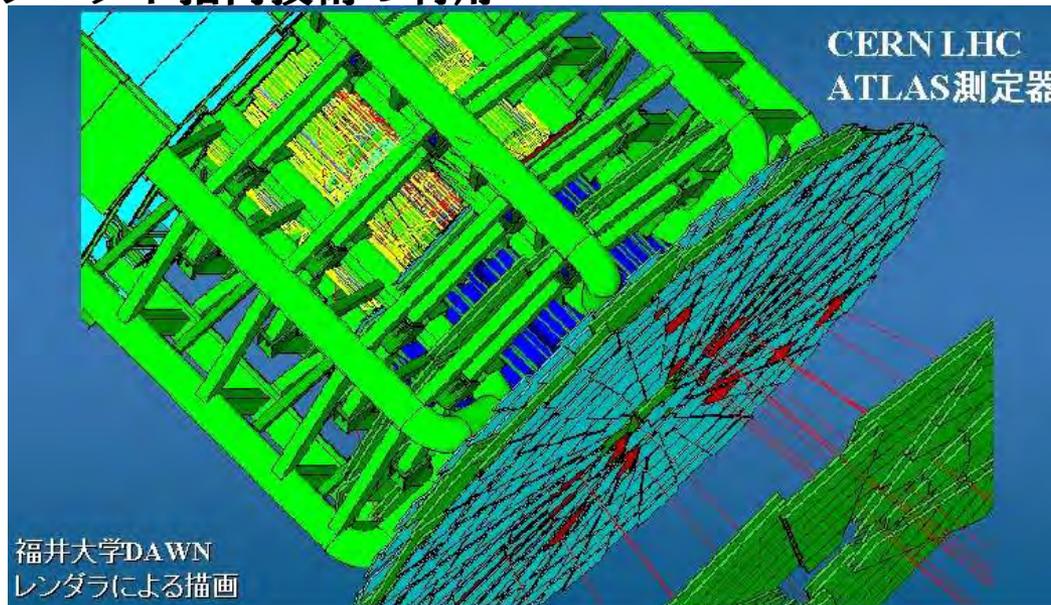


Proton  
3TeV

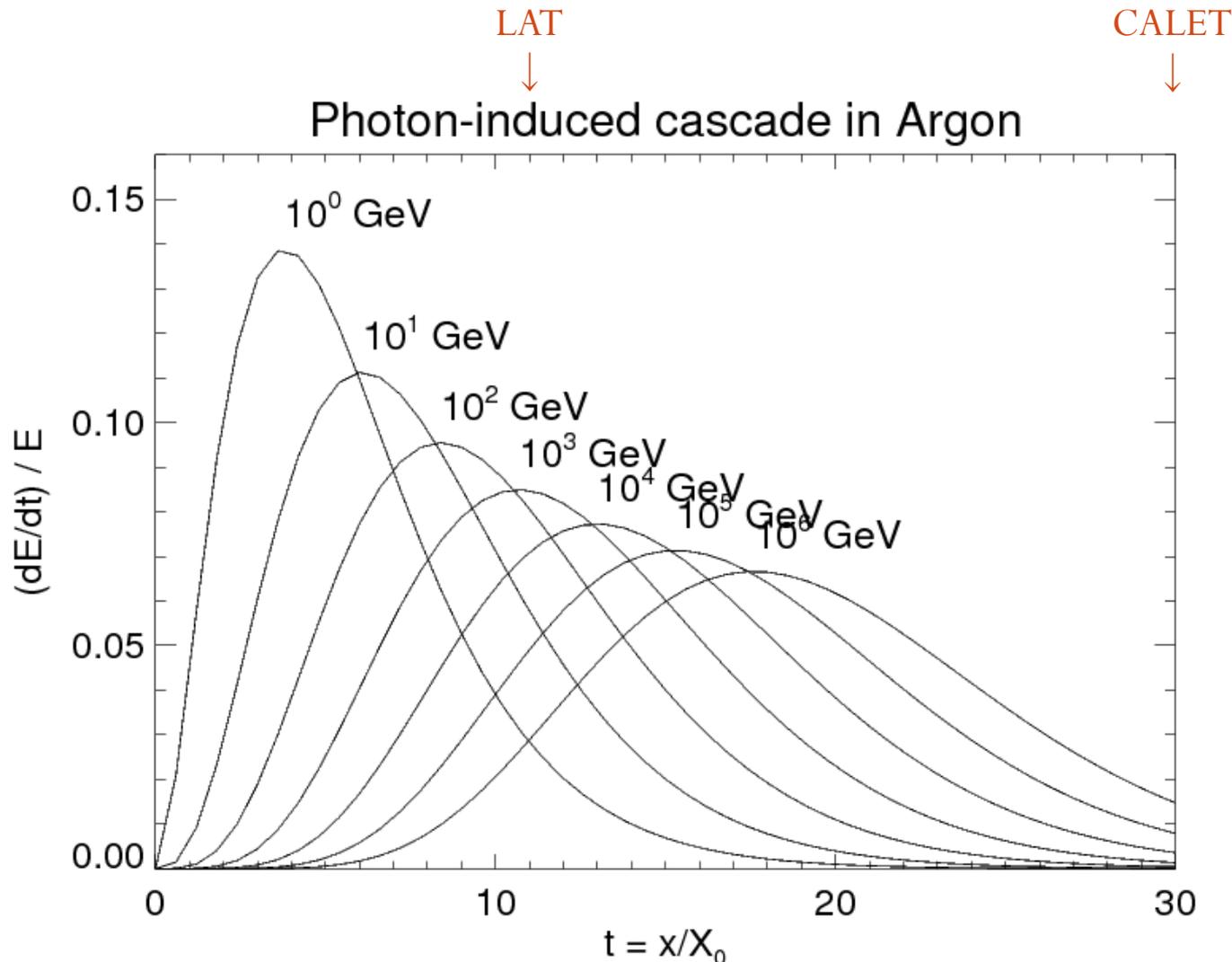


# GEANT (Geometry ANd Tracking)

- CERNで開発された測定器シミュレーションのためのソフトウェアツールキット
- 放射線と物質の相互作用のシミュレーション
- 多くの高エネルギー実験及び応用分野で使用
  - 複雑なgeometryを記述
  - 外部システムとのインターフェース(GUI, CAD etc.)
- GEANT4 (1998年正式版リリース)
  - 120人以上の物理学者・技術者・計算機科学者が国際共同開発
  - オブジェクト指向技術の利用



# 電磁カスケード vs 物質質量



# CALET : トリガーシステム

## シャワートリガー

- エネルギー閾値 : 観測対象のエネルギー領域のイベントを効率的に選別
- 高エネルギーガンマ線 : トリガーにおける後方散乱粒子の影響を除去

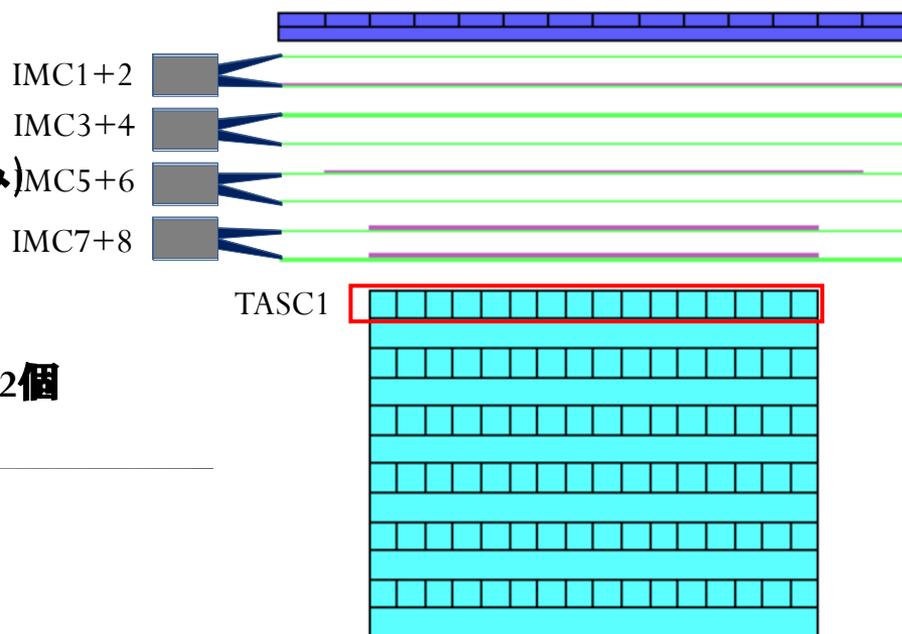
## トリガー用シグナル

- CHD: 1層14枚の和
- IMC: SciFiベルト2層ずつの和
- TASC: TASC最上層の和

トリガーは、これらの組み合わせで生成

## トリガーモード

- 高エネルギーシャワートリガー  
10GeV以上のシャワー粒子
- 低エネルギーシャワートリガー  
1GeV以上のシャワー粒子(電子のみ)
- シングルトリガー  
最小電離粒子を含む全粒子



64chMA-PMT : 14 x 4層 x 2(X,Y)、全112個  
SciFi:32本 x 2層のシグナル和

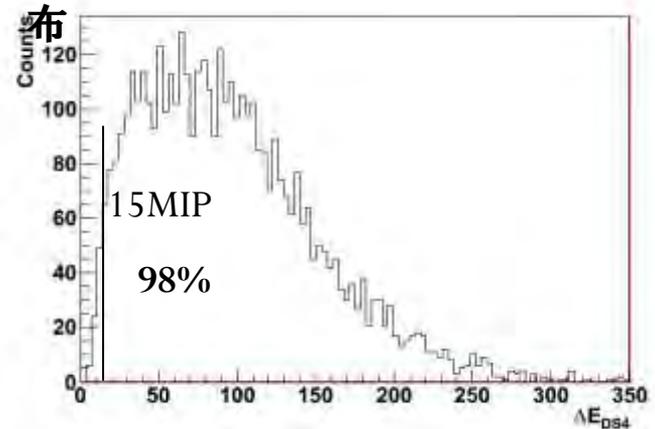


# CALET IMCにおけるガンマ線トリガー

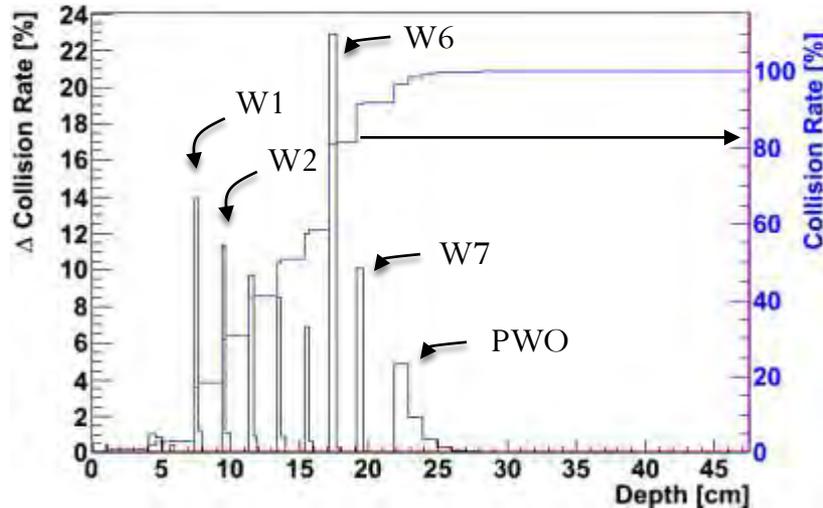
## ガンマ線の検出効率を考慮

- ① TASC最上層の閾値  
電子(>10GeV)と同じ
- ② IMC7,8層目の和のみ利用  
IMCの上部6層内で最初の対生成を起こす確率が8割

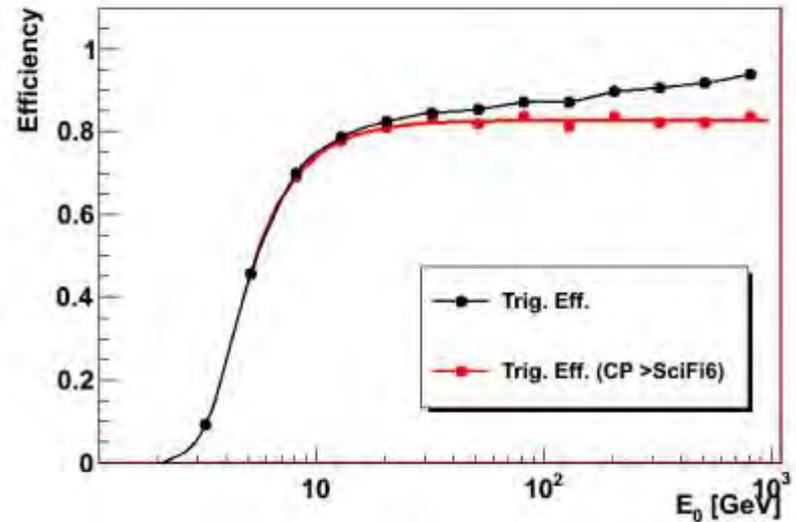
上6層以内で対生成した10GeV $\gamma$ 線におけるSciFi7,8層目のエネルギー分布



最初の対生成の割合

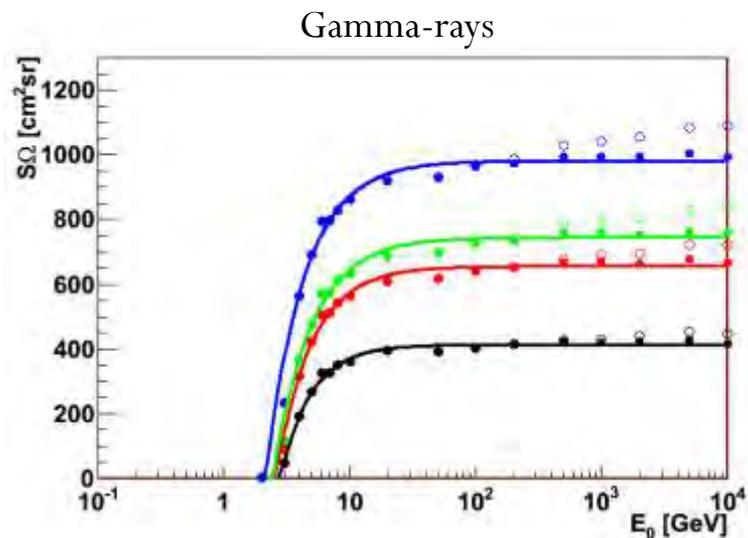
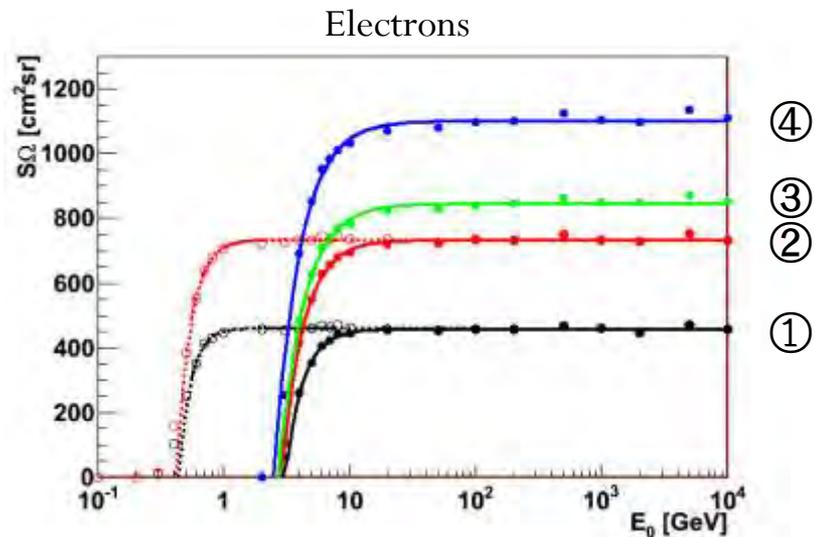
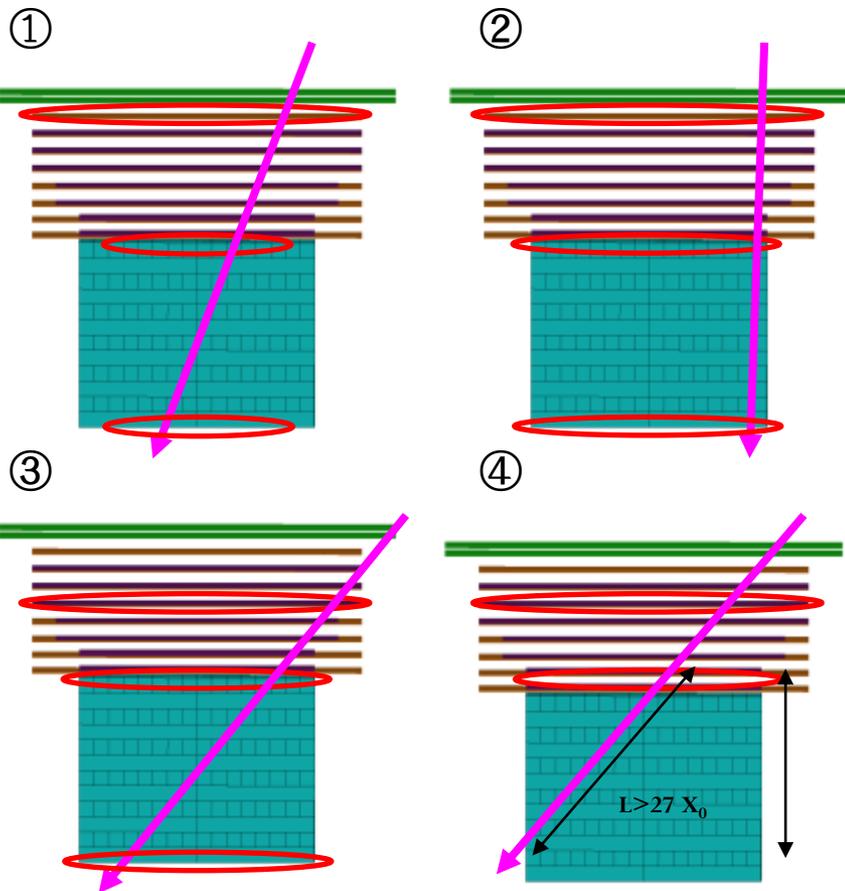


ガンマ線の検出効率



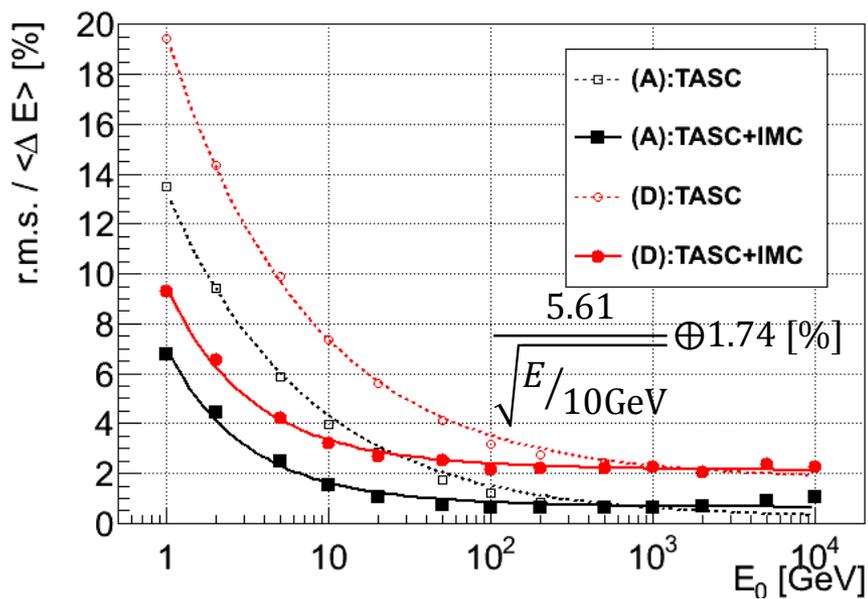
# CALET : 幾何学的因子 (面積 × 立体角)

Classification by the shower axis geometry

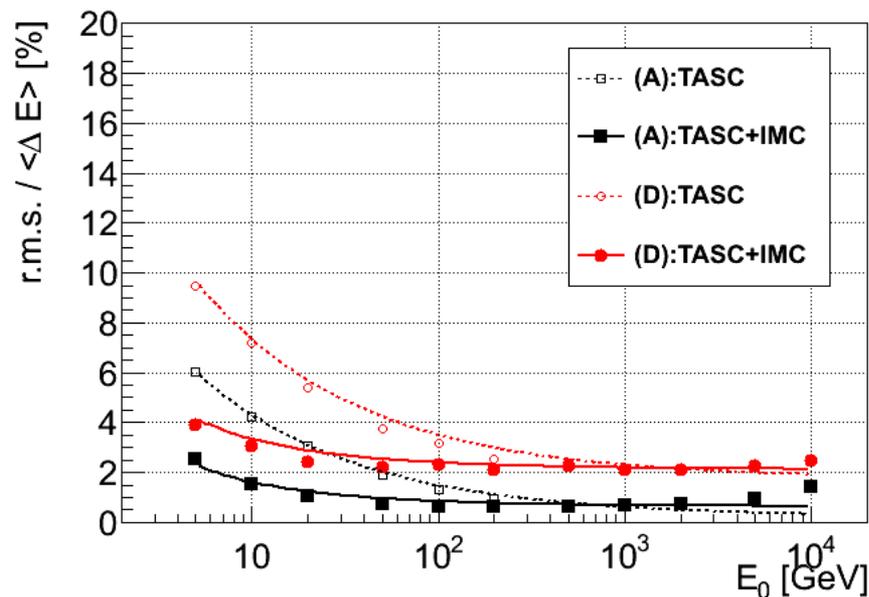


# CALET : エネルギー分解能

## 電子



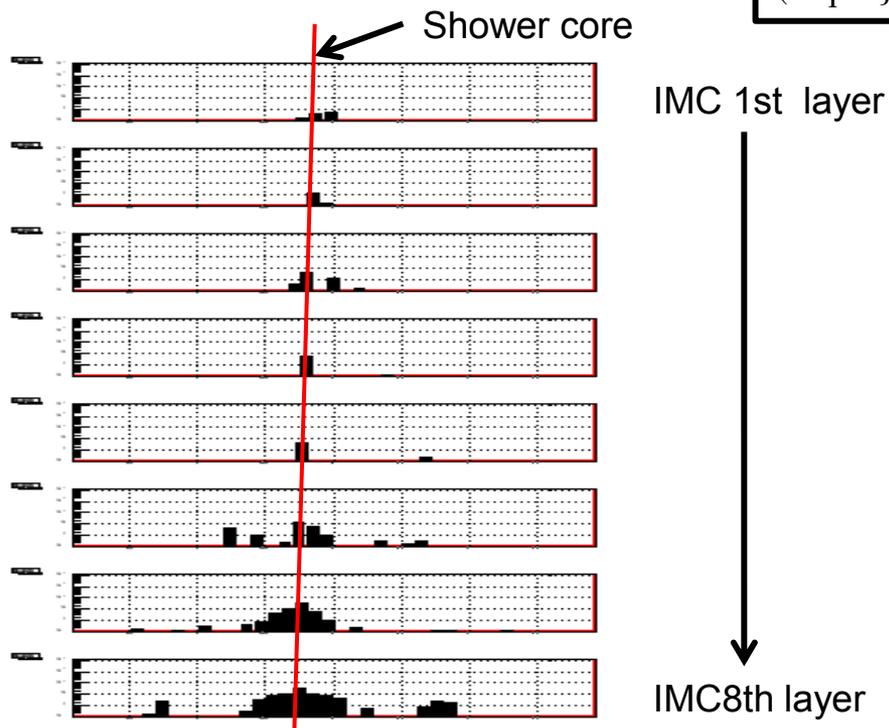
## ガンマ線



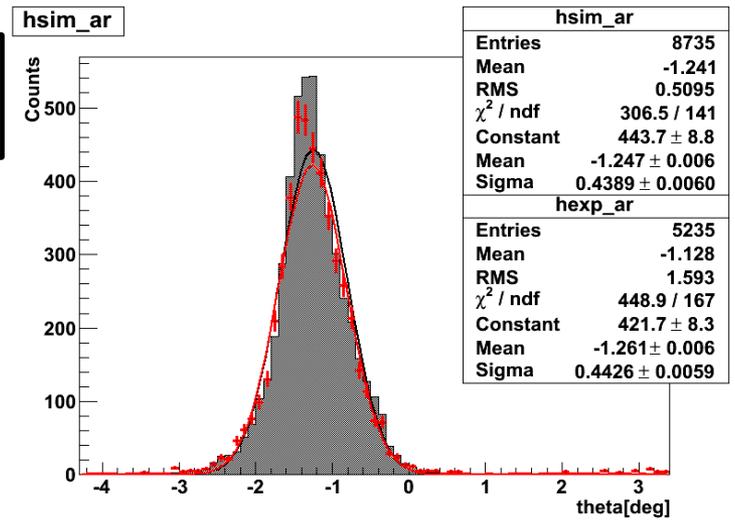
A : full-contained events  
D : partially contained events

# CALET : 角度分解能

CERN-SPS  
(X-projection)



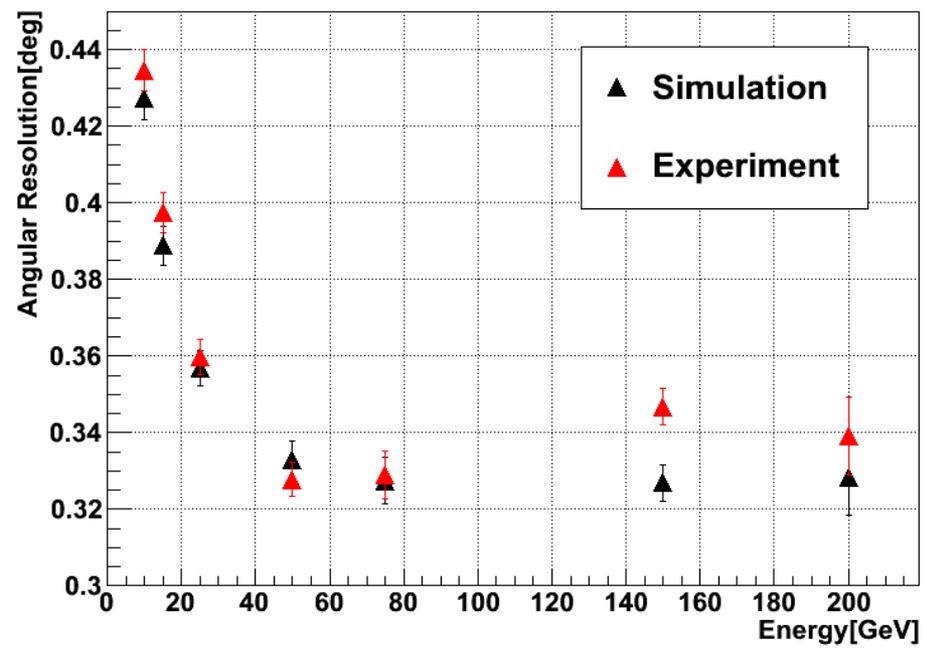
Example Event (electron 10GeV)



Angular distribution (electron 10GeV)

Black : Simulation Red : Experiment

**CALET Simulation (IMC+TASC)**  
 Electrons: 0.26 ~ 2.0 deg (1~10GeV)  
 0.13 ~ 0.26 deg (>10GeV)  
 Gamma Rays: 0.24 ~ 0.76 deg  
*(Preliminary)*



Energy dependency of angular resolution

# CALET vs LAT

パラメータ	LAT	CALET
エネルギー領域	100 MeV-300 GeV	4 GeV-10 TeV
有効面積(ピーク)	8000 cm <sup>2</sup>	1000 cm <sup>2</sup>
視野	2.4 sr	1.8 sr
角度分解能	0.9° (1 GeV) 0.25° (10 GeV)	0.24-0.76° (>10 GeV)
エネルギー分解能	8% (10 GeV)	2-3% (>10 GeV)
イベントごとの死時間	26 μs	1 ms (TBD)
点源に対する感度	3×10 <sup>-9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	8×10 <sup>-9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

# 暗黒物質からのラインガンマ線

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)暗黒物質  
(Neutralino, Kaluza-Klein D.M.)

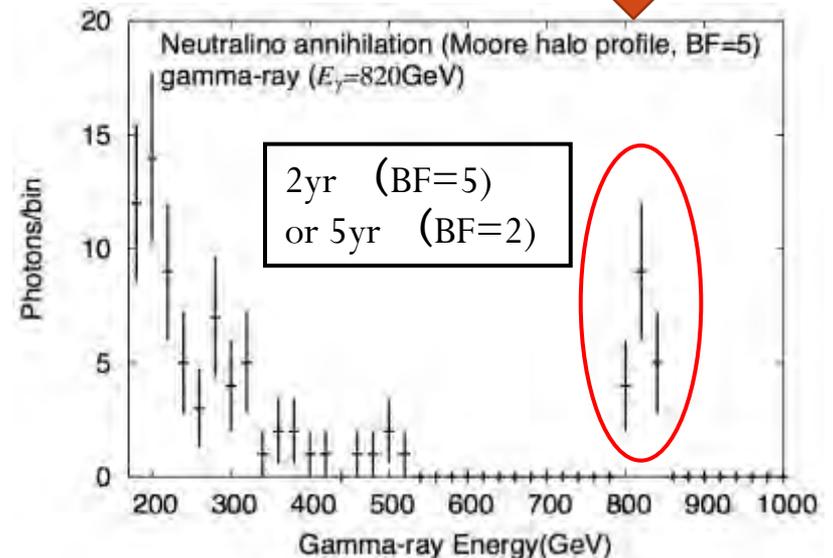
- 対消滅あるいは崩壊
- ラインガンマ線



CALETの優れたエネルギー分解能  
(2%: 10GeV~10TeV)



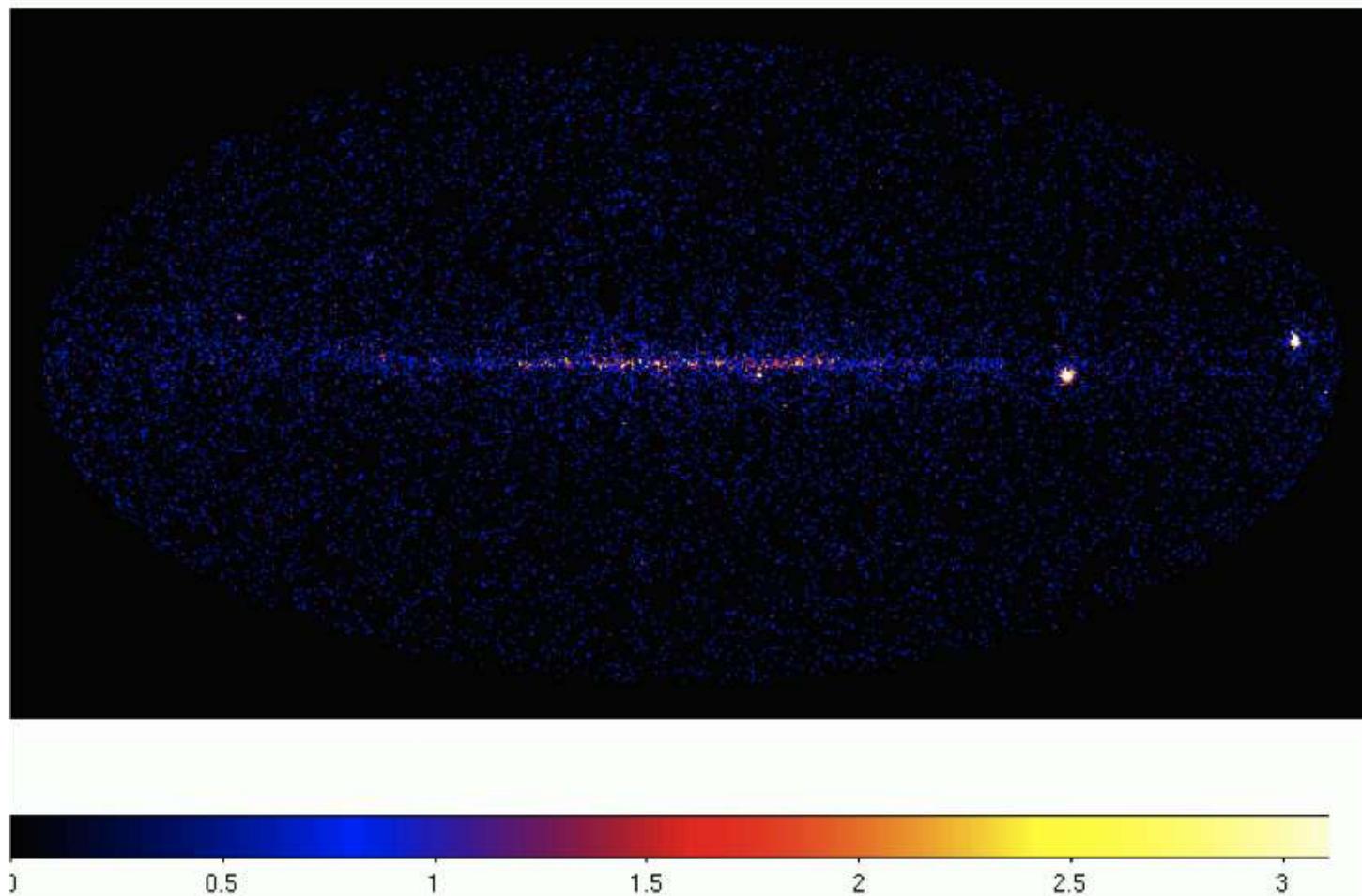
WIMP質量に対応するエネルギー  
のラインガンマ線の検出が可能



Expected gamma-ray line for DM  
( $m=830\text{ GeV}$ ) annihilation by CALET  
observation

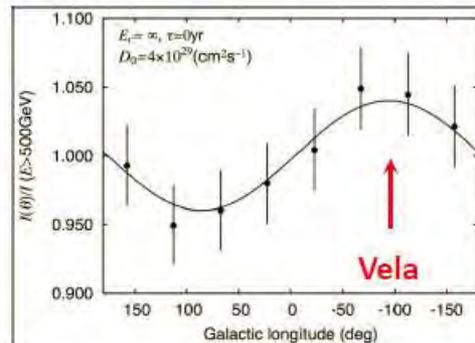
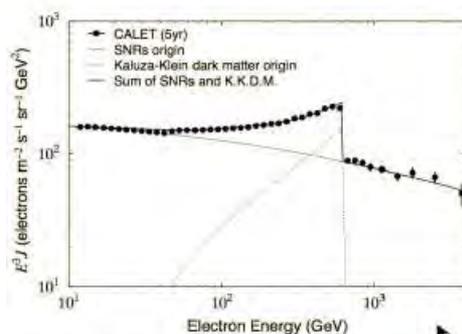
(ref. Bergstrom et al. 2001)

# ガンマ線で見える天球



# CALET : 電子(+陽電子)の観測

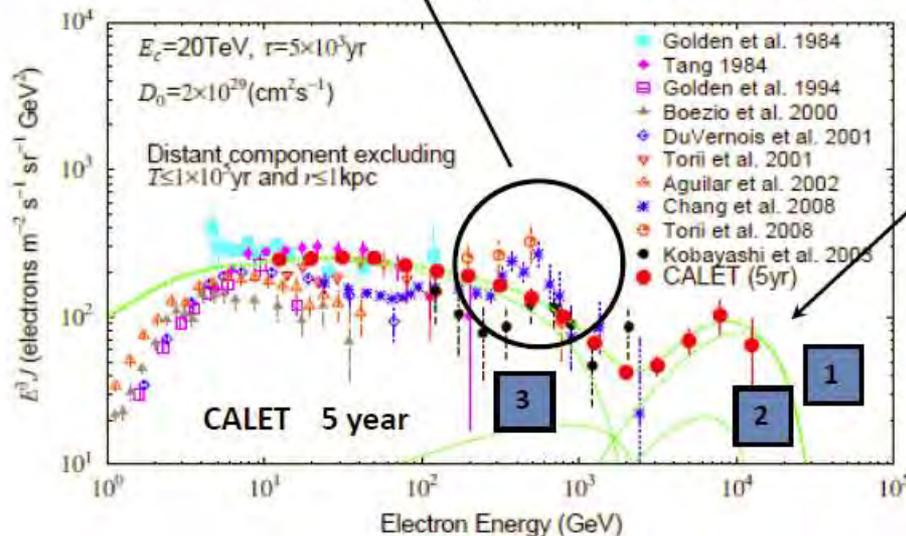
- TeV領域での観測を陽子雑音の十分な除去(残存率~1%)と優れたエネルギー分解能(~2%)で実施する(世界初)
- 正確かつ高統計な1GeVからTeV領域までの電子観測を実現する
- 近傍ソースの発見に不可欠な電子到来方向の異方性の検出が可能である



近傍ソース  
or  
暗黒物質?

近傍ソースの候補

- 時間 < 10<sup>5</sup> years
- 距離 < 1 kpc



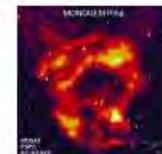
Vela  
10,000 years  
820 ly

1



Cygnus Loop  
20,000 years  
2,500 ly

2



Monogem  
86,000 years  
1,000 ly

3

# 電子と陽子の分離

## ■ Ratio of Flux

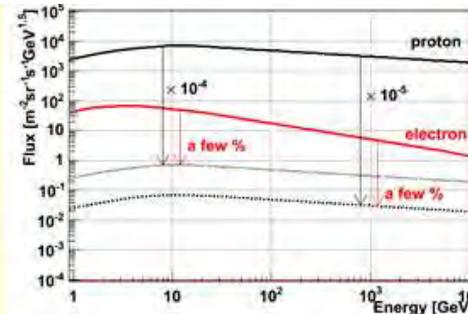
$e : p = 1 : 100$  @10GeV

$e : p = 1 : 1000$  @1TeV

⇒ Requirement for proton contamination:  
~1% at 1TeV (rejection power:  $\sim 10^5$ )

## ■ The Method of Identification

We distinguish electrons and protons from the difference in shower development in TASC.



Flux of Electron and Proton ( $\times E^{2.5}$ )

### (Lateral Spread)

Electrons : 90% energy deposit within  $1R_M$   
Protons : Wider spread due to secondary particles

Definition of Lateral Spread,  $R_E$

$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta E_{layer i} \times R_i^2)}{\sum_i \Delta E_{layer i}}}$$

$$R_i = \sqrt{\frac{\sum_j (\Delta E_{BGO j} \times (x_j - x_c)^2)}{\sum_j \Delta E_{BGO j}}}$$

### (Longitudinal Profile)

Electrons : Almost all energy absorbed

Protons : 40% of incident energy deposited

⇒ At the bottom layer, proton shower is still surviving

Energy fraction in the bottom layer to all,  $F_E$

$$F_E = \frac{\Delta E_{layer 12}}{\sum_i \Delta E_{layer i}} \left( \begin{array}{l} x_c : \text{shower axis center} \\ \Delta E_{BGO j} : \text{Deposit energy at } j\text{th BGO crystal} \\ \Delta E_{layer i} : \text{Deposit energy at } i\text{th BGO layer} \end{array} \right)$$

## ■ Estimation

Electrons: 1TeV

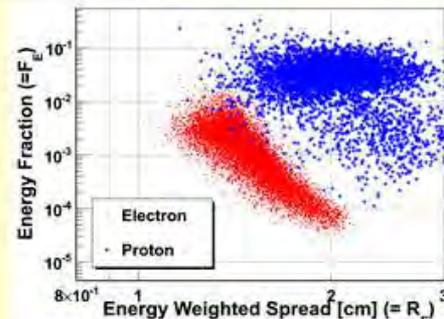
Protons: 1~1000TeV ( $E^{-2.7}dE$ )

Generated event number:  $1.6 \times 10^6$

Electrons: 95% eff.

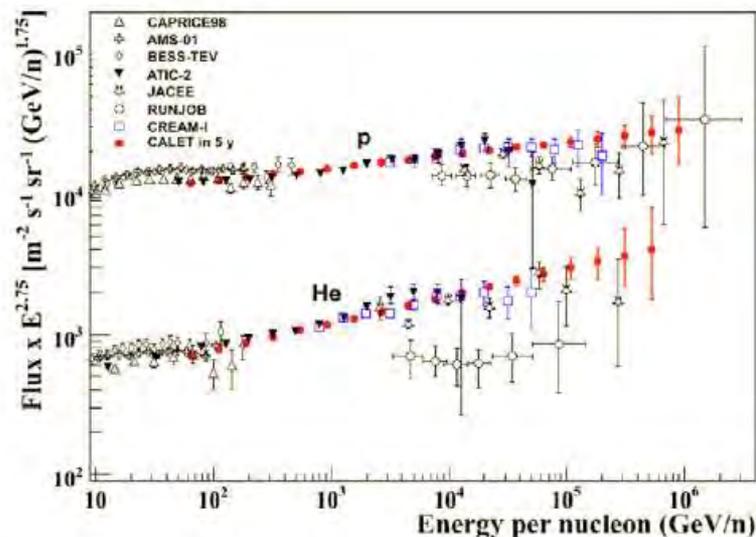
Protons : 4 events

⇒  $2.0 \times 10^5$  (90% C.L.)

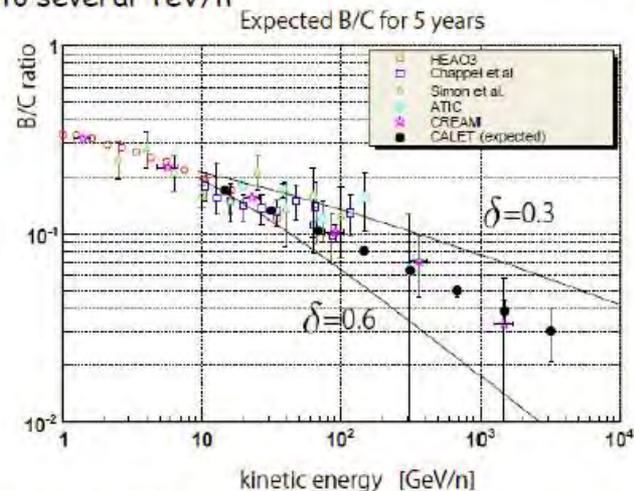


Scatter Plots of  $F_E$  vs.  $R_E$

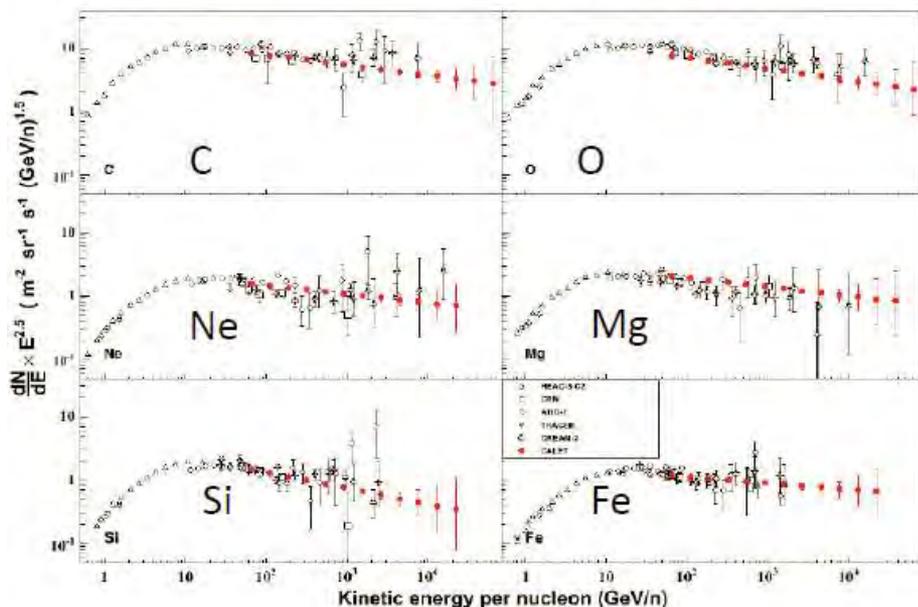
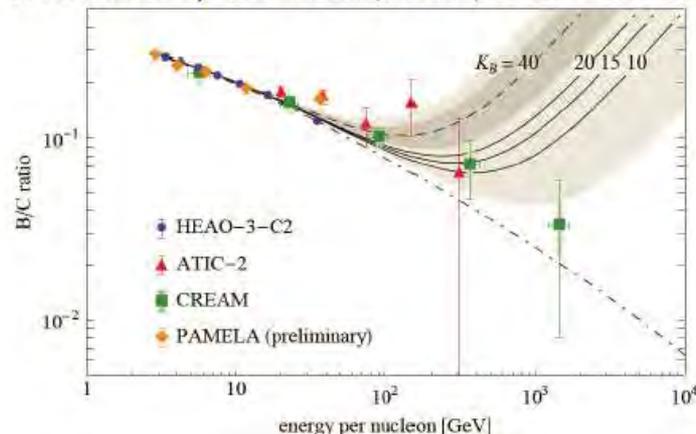
# CALET : 陽子・原子核成分の観測



- 2ry/ 1ry ratio ( B/C )
- Energy dependence of diffusion constant:  $D \sim E^\delta$
  - Observation free from the atmospheric effect up to several TeV/n



The B/C ratio in a model where the positrons come from a nearby SNR where the secondary particles are also accelerated by the shock. (Ahlers, et al. 0909.4060)





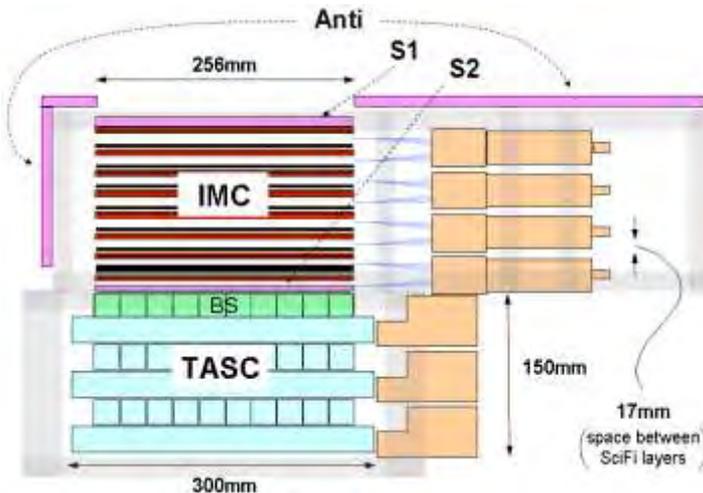
# CALET プロトタイプ性能試験 (気球観測、加速器)

CALET プロトタイプ検出器 : bCALET-2(1/4 スケール) による気球実験 (2009)

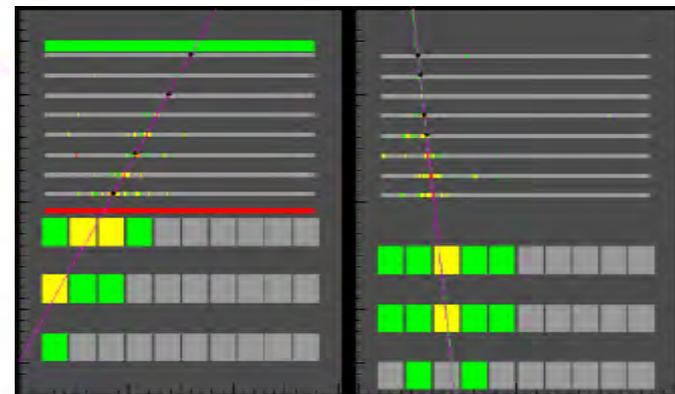
気球搭載装置 : bCALET2



bCALET-2の概念図 (側面)

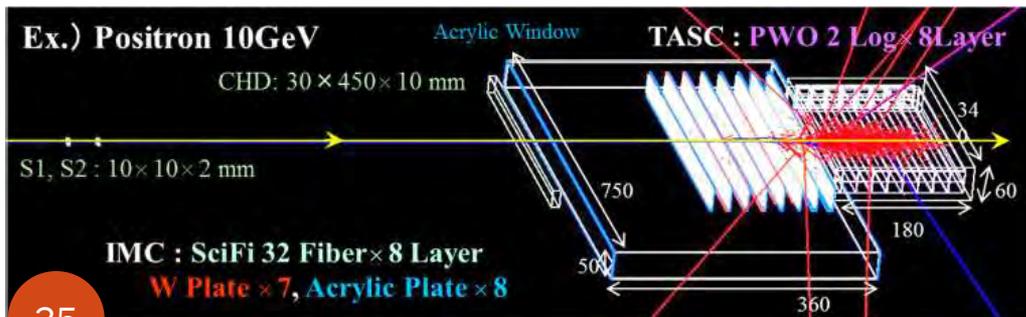


電子候補イベントの観測例

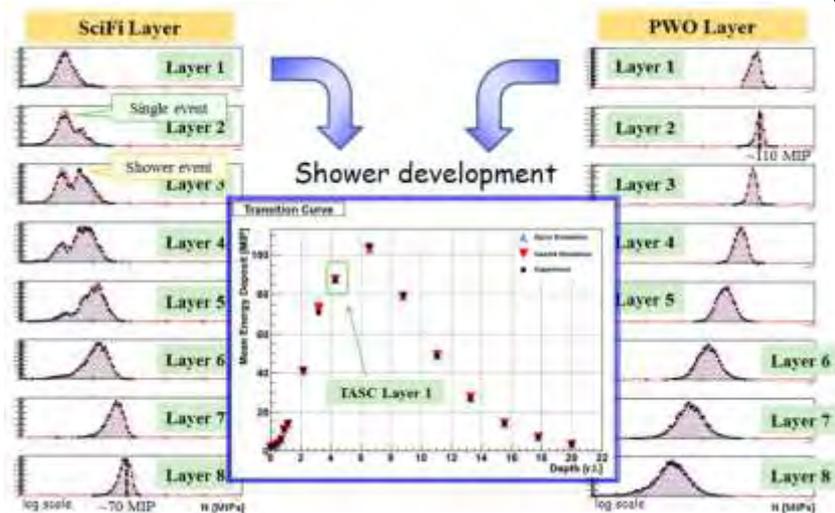


CERN-SPSにおけるビーム実験 (2009,2010,2011)

装置概念図と10GeV電子のシミュレーション例 (2010)



10GeVの電子における検出器内でのシャワー発達とシミュレーションの比較



# Summary

- GeV領域のガンマ線は衛星軌道のPair telescopeによって観測されている。
- 天体観測では角度分解能が最も重要だが、他の波長に比べまだ分解能が低い。
- Fermi-LATによりガンマ線観測は大きく進歩しており、さらに2014年打ち上げ予定のCALETにより高エネルギー側の観測は改善されるだろう。
- 地上観測でもCTA (Cherenkov Telescope Array) という大型計画が準備中である。