

CALETによる電子観測

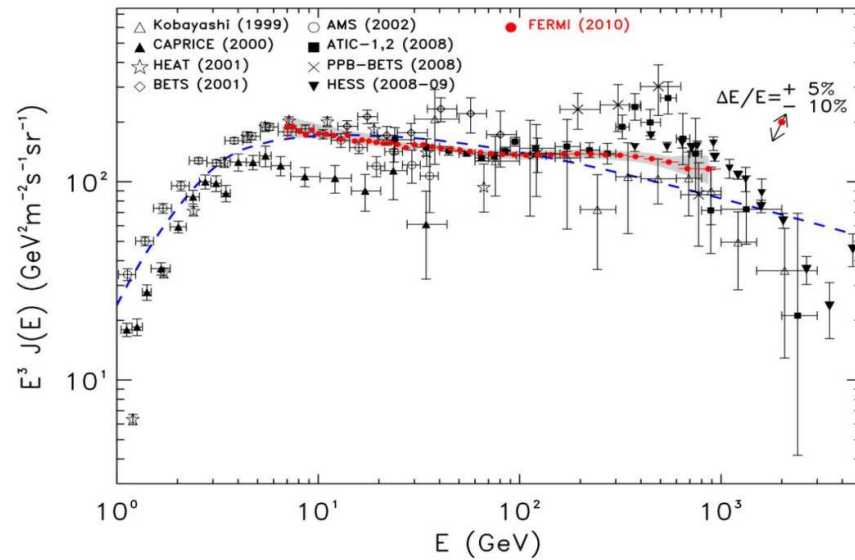
2013.8.22

赤池陽水

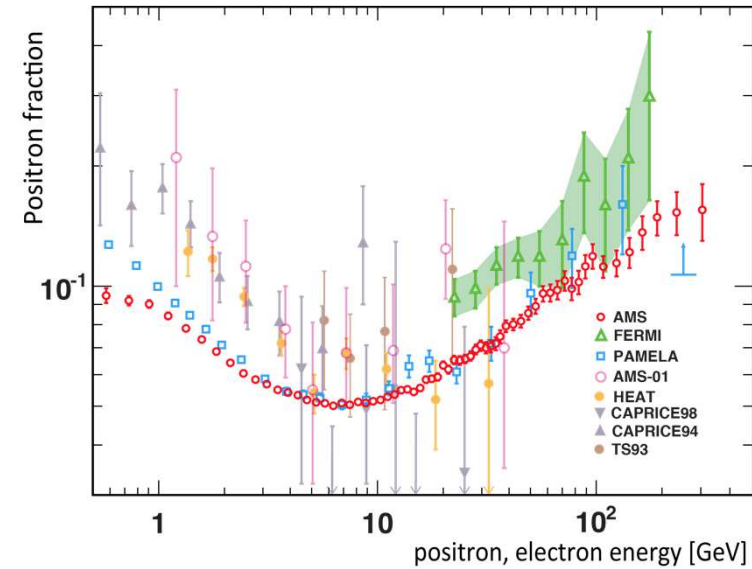
@乗鞍観測所

電子のエネルギースペクトル

電子 + 陽電子のエネルギースペクトル



陽電子 / (電子+陽電子) (AMS02)



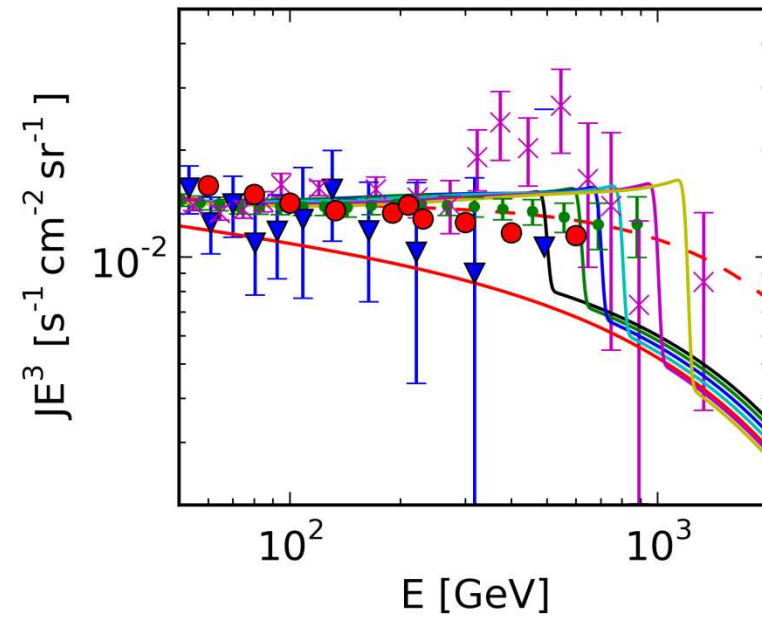
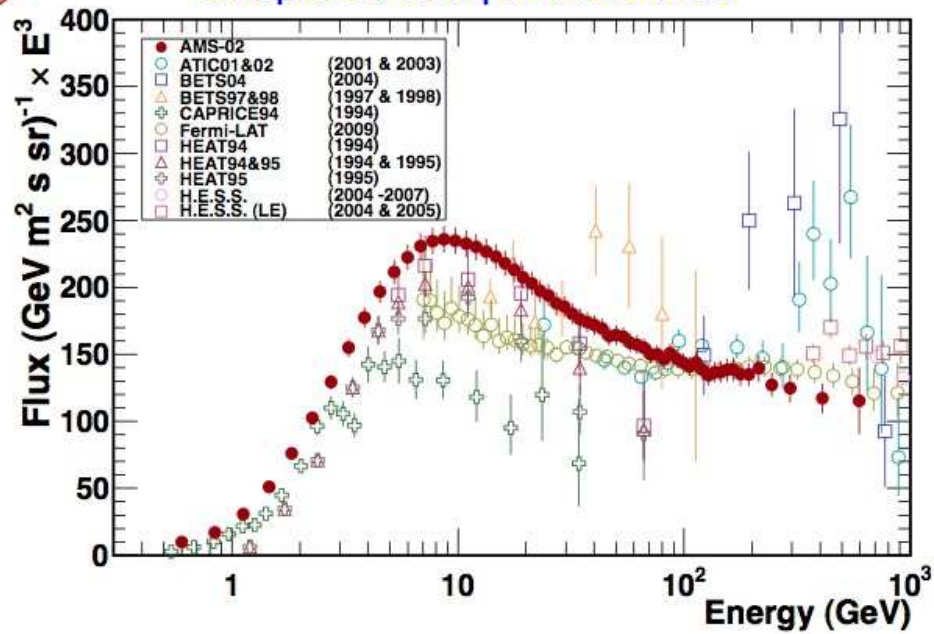
- 数100GeVの領域に標準的な伝播モデルからの過剰な成分がある
- ATIC, Fermi/LAT, HESSなどの各実験の観測結果には、統計誤差以上の差が存在する
- 電子の起源を探るためには、精確なエネルギースペクトルの導出が必要

- 10GeV以上で増大
 - 陽電子が伝播中に生成されるモデルでは説明できない
 - 陽電子の加速源が必要
 - 暗黒物質?
 - パルサー?

AMS-02による電子+陽電子のエネルギースペクトル



Electron plus Positron Spectrum compared with previous data

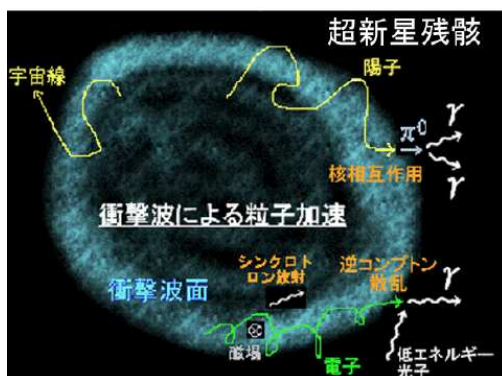


電子成分

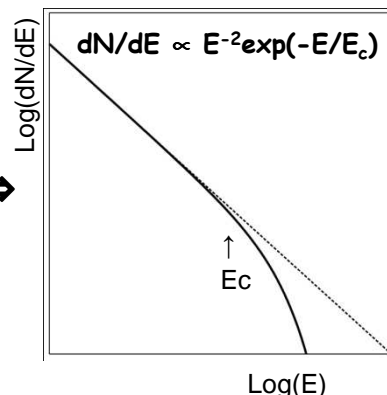
高エネルギー宇宙線電子・陽電子の観測は、
宇宙物理学における最大の謎である**暗黒物質**及び**宇宙線加速源**の解明につながる

宇宙物理的起源

- ・超新星残骸における衝撃波加速
- ・パルサー風星雲による加速

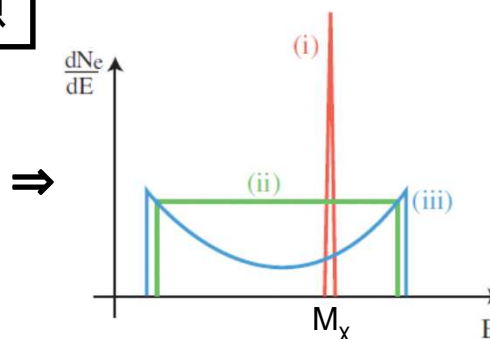
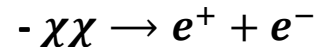


生成スペクトル
(冪型関数+カットオフ)



素粒子物理的起源

暗黒物質の候補:
WIMPの対消滅、崩壊



生成スペクトル(WIMPの種類に依存)

- (i) 単一エネルギー: 電子・陽電子対直接生成(LKP)
- (ii) 一様分布: 一様分布で崩壊する中間粒子を経由
- (iii) ダブルピーク: 双極的分布で崩壊する中間粒子を経由(SUSY)

銀河内伝播過程

$$\frac{\partial}{\partial t} f(t, \epsilon_e, \vec{x}) = \underbrace{D(\epsilon_e) \nabla^2 f}_{\text{拡散項}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \epsilon_e} [b\epsilon_e^2 f]}_{\text{エネルギー損失}} + \underbrace{q(t, \epsilon_e, \vec{x})}_{\text{ソース項}}$$

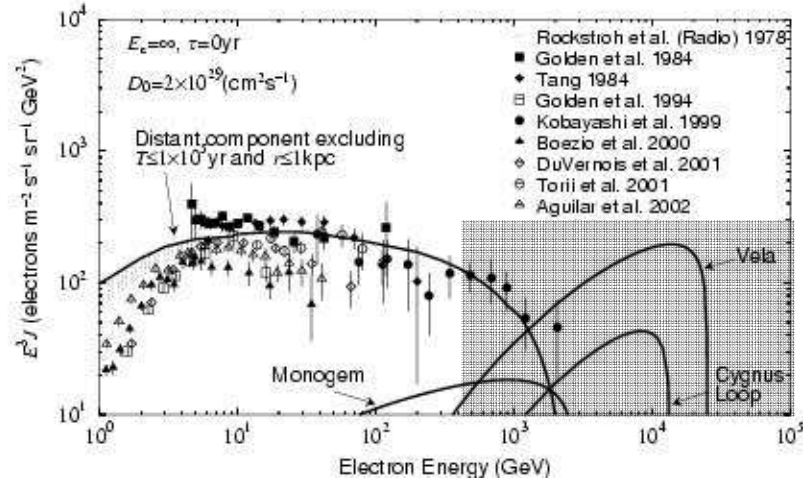
エネルギー損失
- シンクロトロン放射
- 逆コンプトン散乱

$$\epsilon_{\text{cut}} \sim \frac{1}{bt}$$

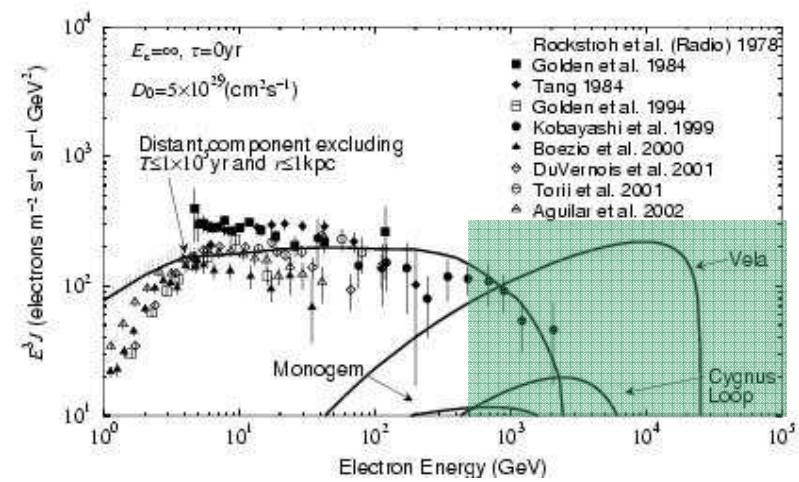
高エネルギー電子は若い
加速源からしか到達しえない

近傍加速源からの電子寄与のモデル依存性

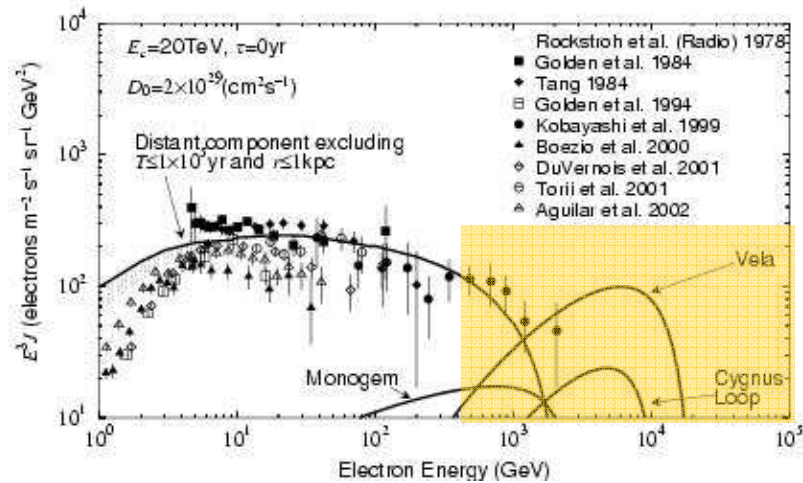
$E_c = \infty, \Delta T = 0 \text{ yr}, D_0 = 2 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$



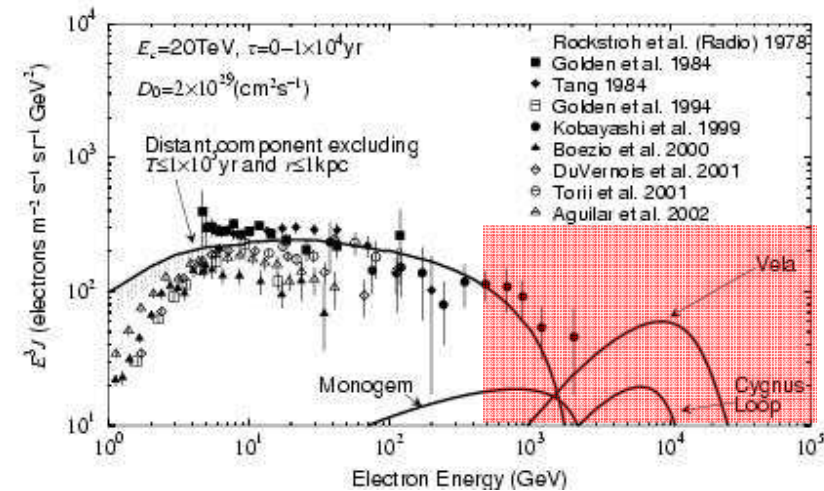
$D_0 = 5 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$



$E_c = 20 \text{ TeV}$



$E_c = 20 \text{ TeV}, \Delta T = 10^4 \text{ yr}$



電子観測における検出器の性能要求

電子観測の現状:

- 各観測結果に統計誤差だけでは説明できない差異
- TeV領域はほぼ未観測

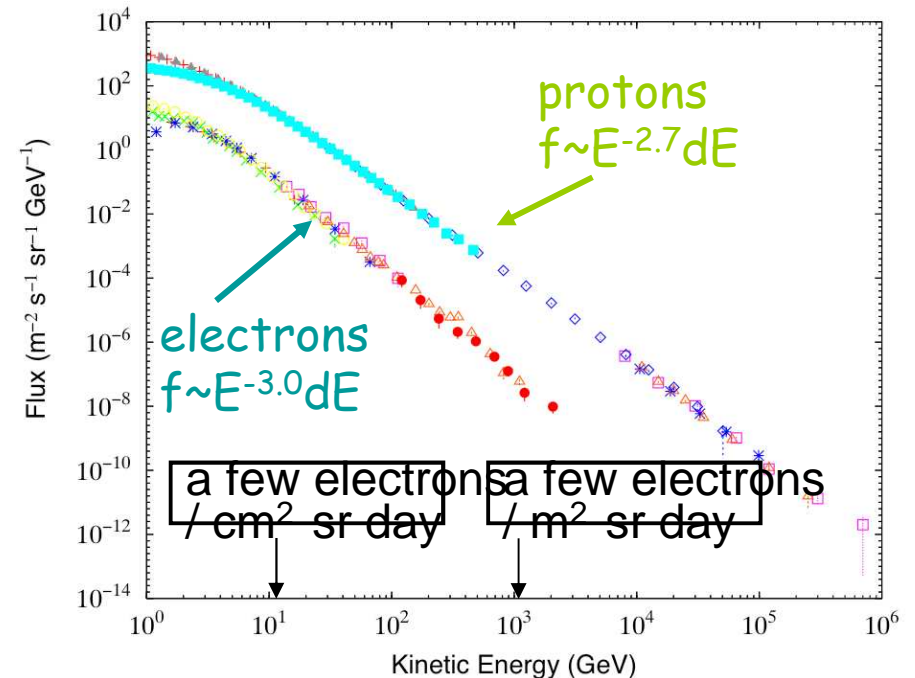
電子観測の困難:

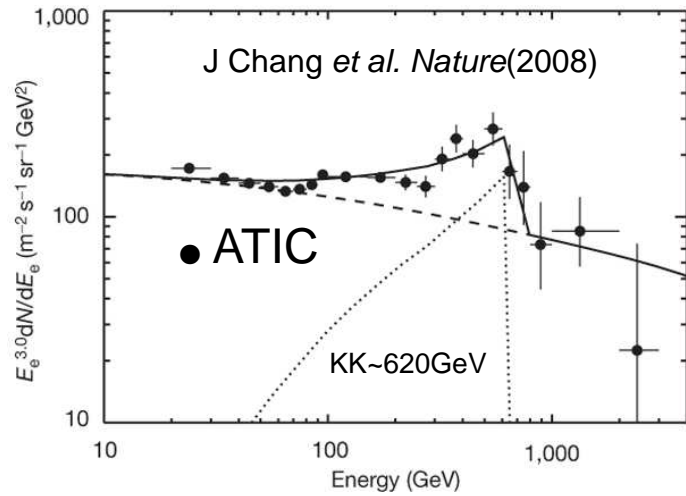
- Flux自体が希少
~ 5 イベント / $\text{m}^2\text{sr day}$ ($> 1\text{TeV}$)
- 膨大な陽子バックグラウンド
電子:陽子 = 1: 100 @ 10GeV
電子:陽子 = 1:1000 @ 1TeV

電子観測のための必須事項:

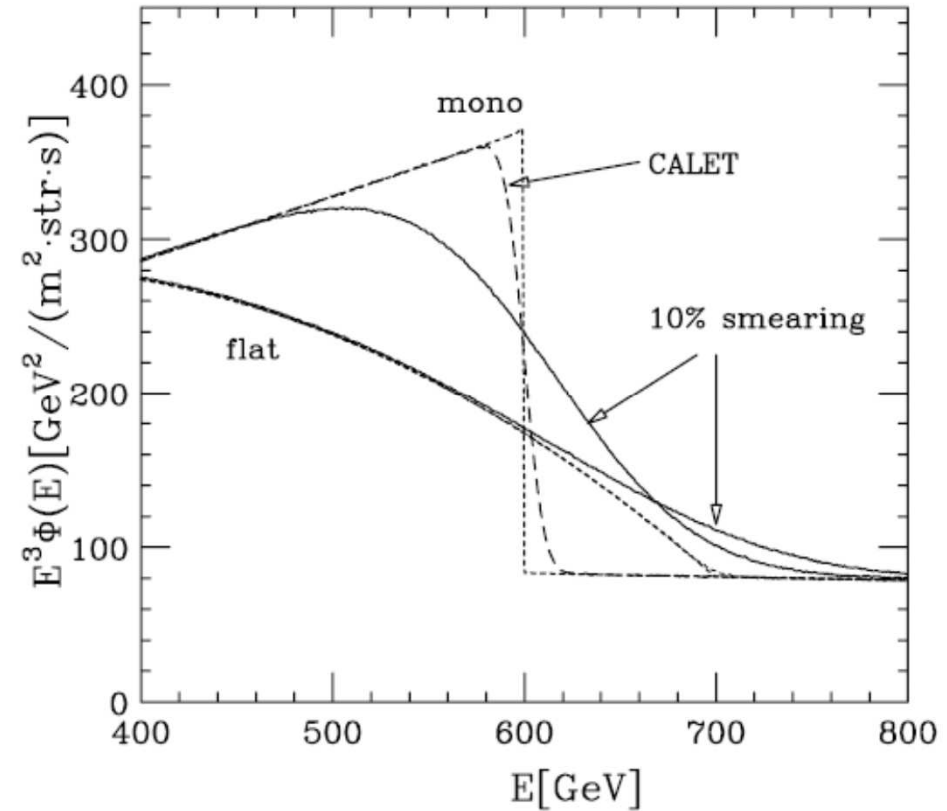
- 大きな検出器による長期間観測
~ $270 \text{m}^2\text{sr day}$ \Rightarrow 約1000例 ($> 1\text{TeV}$)
- 強力な粒子識別能力
 10^5 @ TeV
- 優れたエネルギー分解能
数% (数 100GeV 領域)

Cosmic-ray Energy Spectra

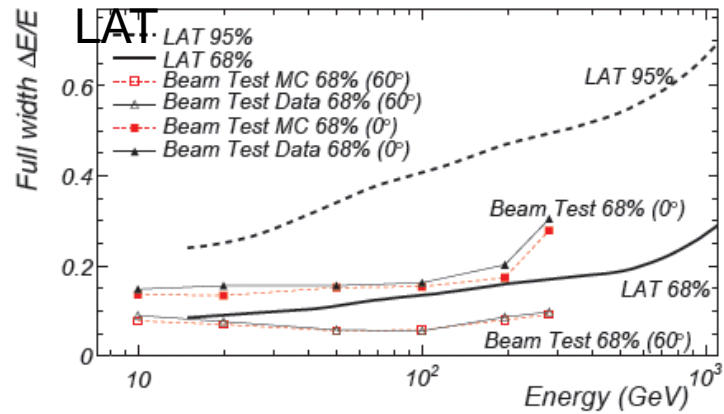




Energy Resolution vs. DM Sensitivity



Energy resolution of Fermi-



arXiv: 0812.4200[astro-ph] C.R.Chen et al.

CALET計画

CALET: CALorimetric Electron Telescope

国際宇宙ステーションにおける宇宙線観測計画

2014年打ち上げ予定

5年間の観測

日本を中心とするイタリア、アメリカとの共同実験

電子・陽電子: 1GeV ~ 20TeV

加速・伝播機構、暗黒物質、太陽磁気圏

ガンマ線: 10GeV ~ 10TeV

暗黒物質、 γ 線点源 (SNR, Pulsar, AGN, etc.)

銀河内外拡散成分、 γ 線バースト

陽子・原子核: 数10GeV ~ 1000TeV

加速機構、銀河内伝播機構

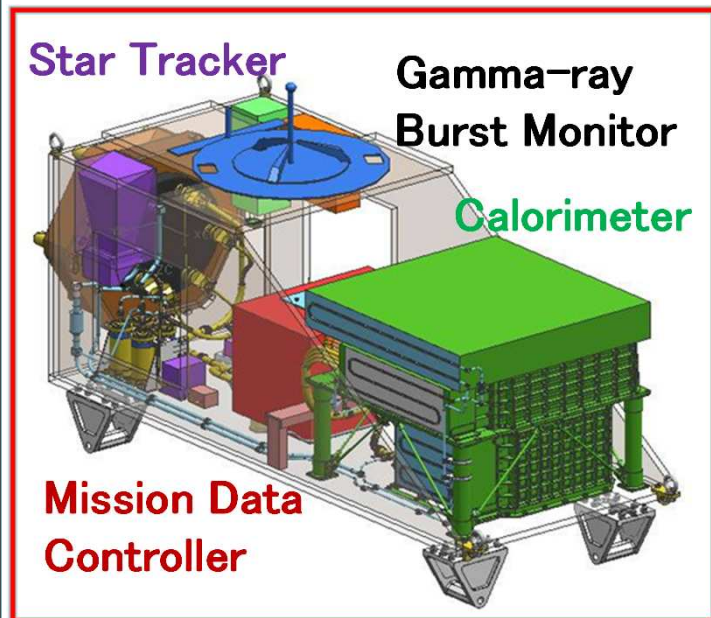


Star Tracker

Gamma-ray
Burst Monitor

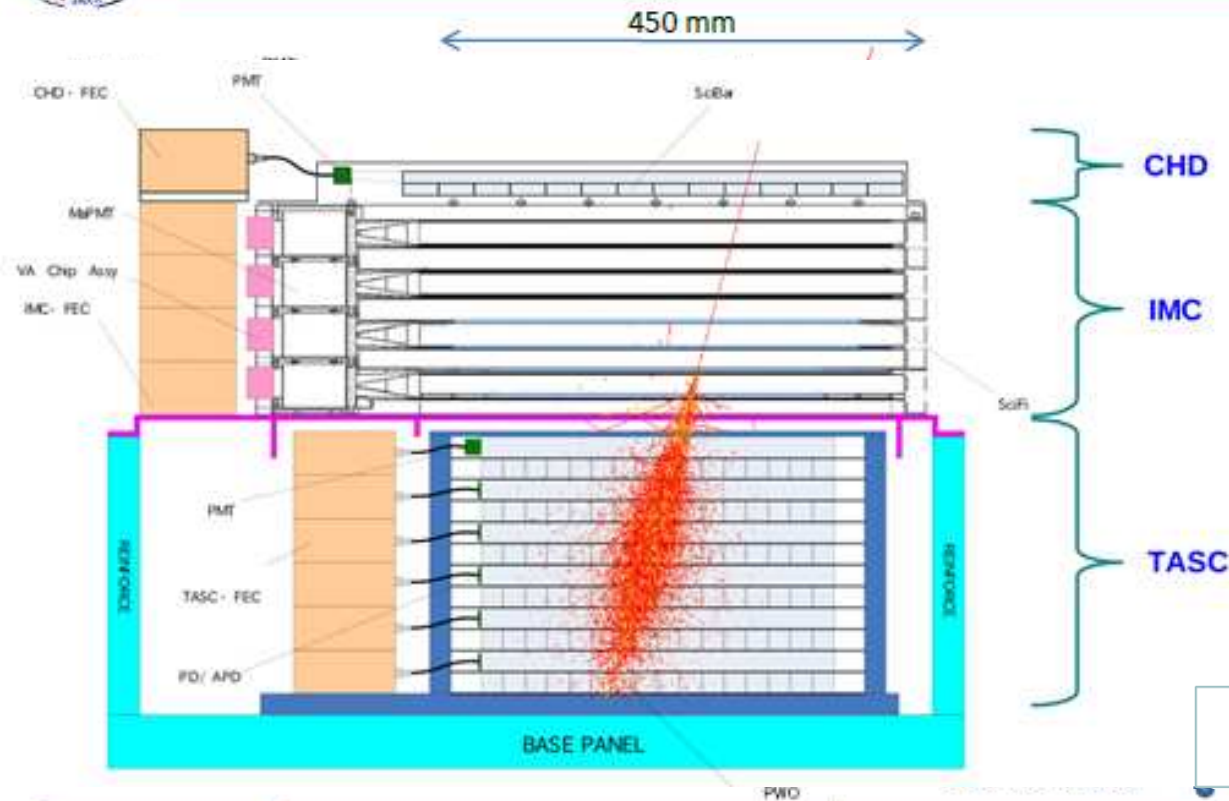
Calorimeter

Mission Data
Controller





カロリメータ概要



Expected Performance
(from Simulations and/or Beam Tests)

- $S\Omega$:
1200 cm^2sr for electrons
1000 cm^2sr for gamma-rays
- $\Delta E/E$:
a few % (>10 GeV) for e, γ 's
~30 % for protons
- e/p separation : 10^{-5}
- Charge resolution : 0.15-0.3 e
- Angular resolution :
0.24-0.76 deg. for gamma-rays

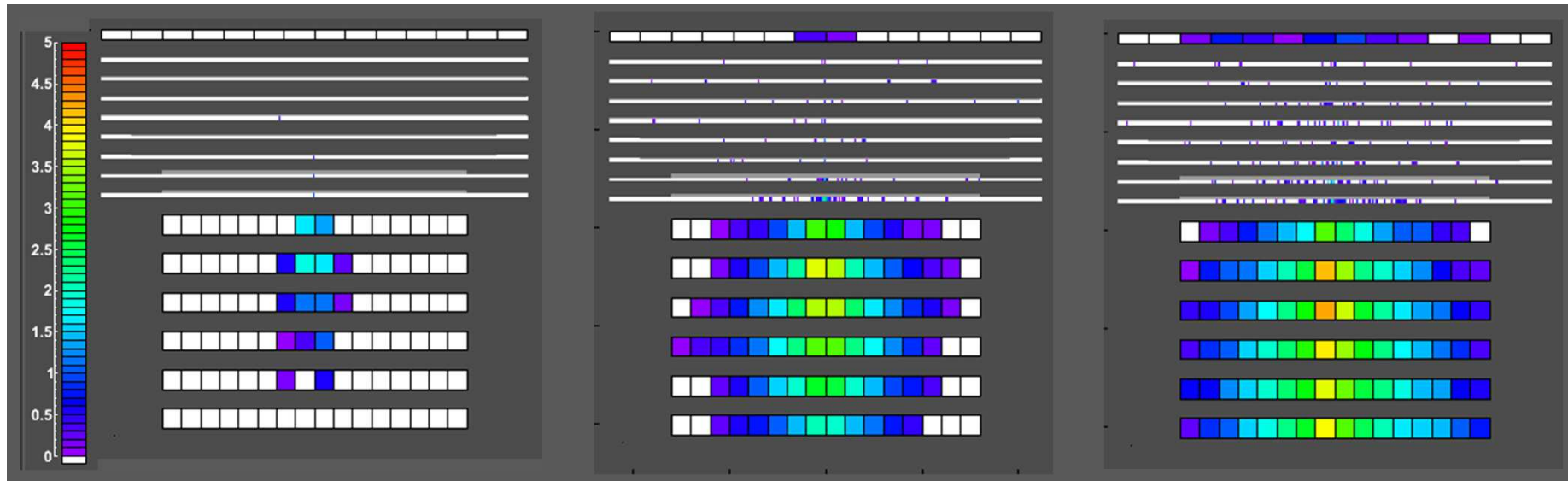
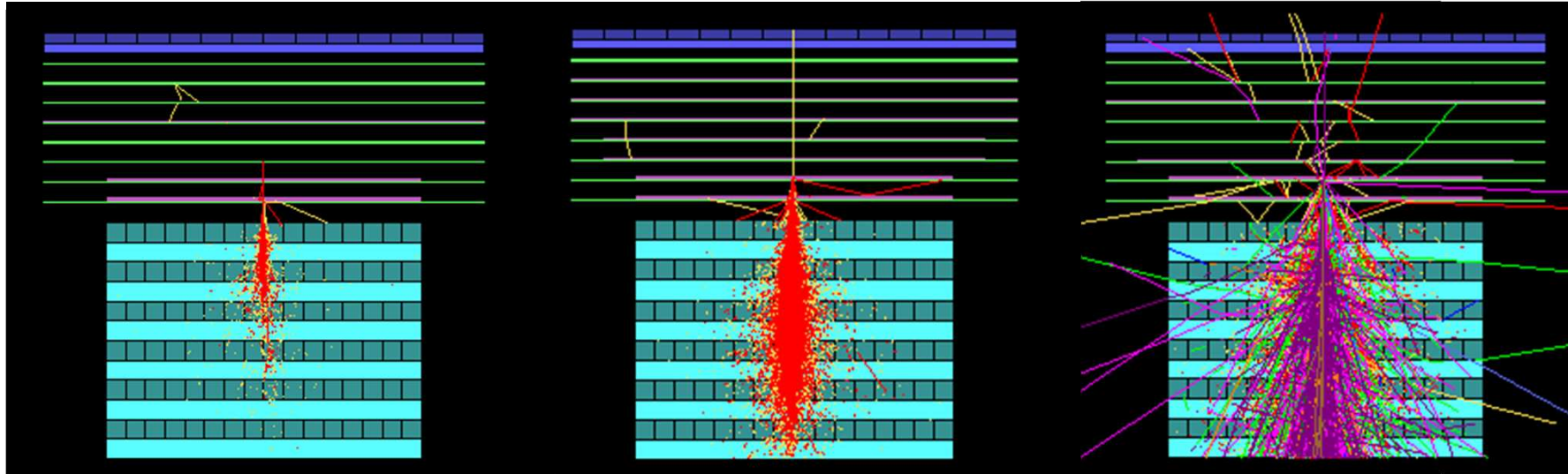
	CHD (Charge Detector)	IMC (Imaging Calorimeter)	TASC (Total Absorption Calorimeter)
Function	Charge Measurement (Z=1-40)	Arrival Direction, Particle ID	Energy Measurement, Particle ID
Sensor (+ Absorber)	Plastic Scintillator : 14 × 1 layer (x,y) Unit Size: 32mm x10mmx450mm	SciFi : 448 x 8 layers (x,y) = 7168 Unit size: 1mmsq x 448 mm Total thickness of Tungsten: 3 r.l.	PWO log: 16 x 6 layers (x,y)= 192 Unit size: 19mm x 20mm x 326mm Total Thickness of PWO: 27 r. l.
Readout	PMT+CSA	64 -anode PMT+ ASIC	APD/PD+CSA PMT+CSA (for Trigger)

検出イメージ

Gamma-ray

Electron 1TeV

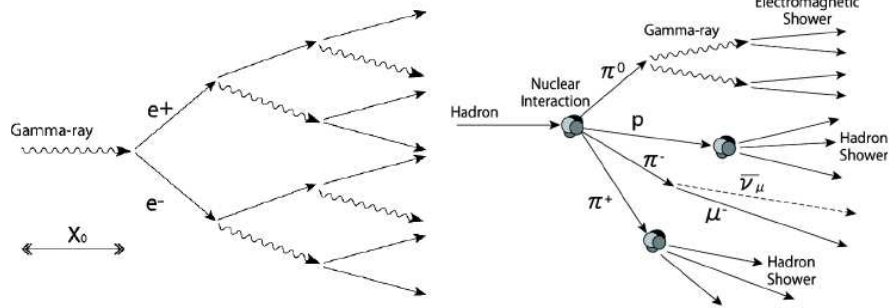
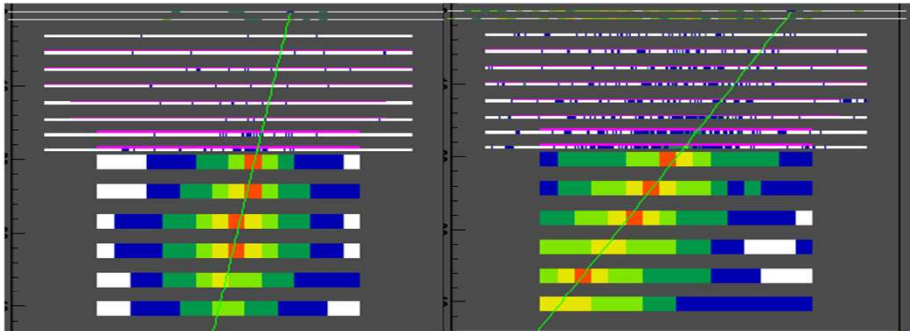
proton 10TeV



電子陽子識別

Electron 1 TeV

Proton 2.9 TeV

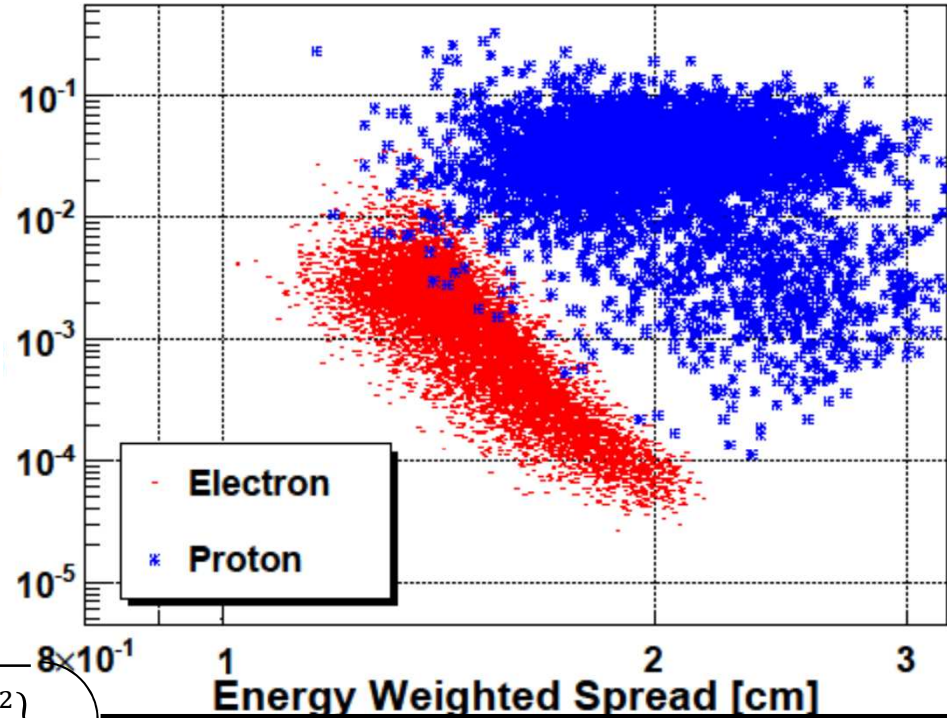


Generated Events

Protons: 1.6×10^6 events

$E^{-2.7} dE$ in 1-1000 TeV

Electrons: 1 TeV



$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i \{ \sum_j \Delta E_{i,j} \times R^2_{i,j} \}}{\sum_i \sum_j \Delta E_{i,j}}}$$

$$F_E = \frac{\sum_j \Delta E_{12,j}}{\sum_i \sum_j \Delta E_{i,j}}$$

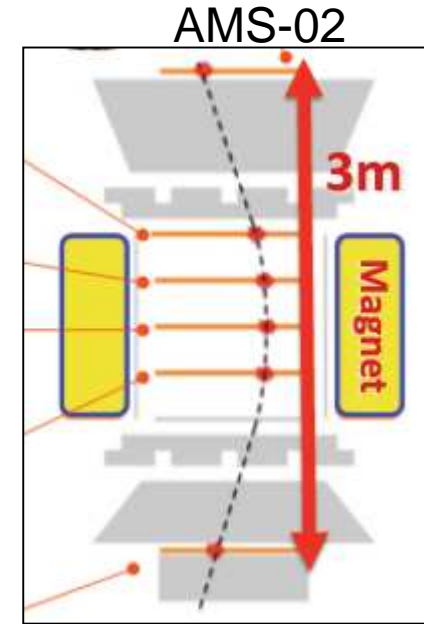
$$R_i = \sqrt{\frac{\sum_j \{ \Delta E_{i,j} \times (x_j - x_c)^2 \}}{\sum_j \Delta E_{i,j}}}$$

x_c : shower axis center
 $\Delta E_{i,j}$: ΔE at i-th layer, j-th PWO

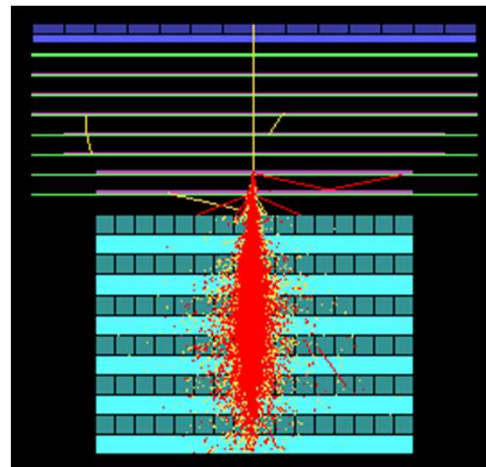
4 proton events are contaminated in electron region (95 % electron retained)
 \Rightarrow Proton rejection power: $\sim 2 \times 10^5$ (90% C.L.)

検出器の種類と粒子識別

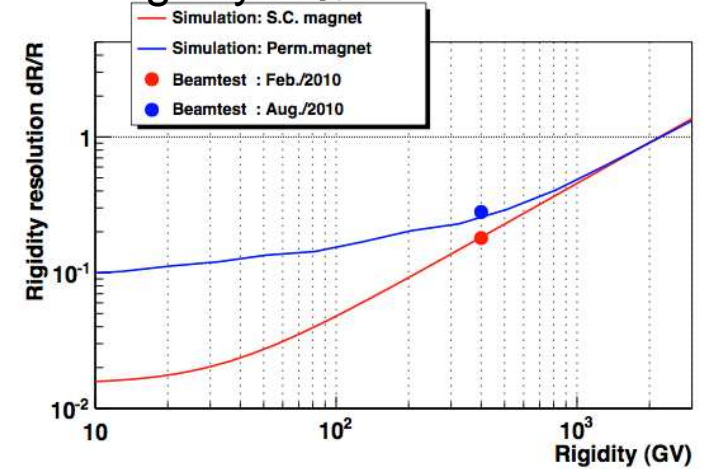
- Magnet Spectrometer(PAMELA, AMS)
 - マグネットと、電磁カロリメータの組み合わせで粒子識別
 ⇒ $\Delta R/R$ は、 BL^2 に依存
 Pamela: MDR ~ 1TV ($S\Omega \sim 21\text{cm}^2\text{sr} : < 500\text{GeV}$)
 AMS-02: MDR ~ 2TV
 MDR: Maximum Detection Rigidity



- Calorimeter(ATIC, Fermi, CALET)
 - シャワー形状で粒子識別
 ⇒ 識別能力は、物質質量に依存
 ATIC: 22r.l. ($\sim 10^4$)
 Fermi: 8.6r.l. ($\sim 10^4$)
 CALET: 30r.l. ($\sim 10^5$)



Rigidity分解能 (AMS-02)



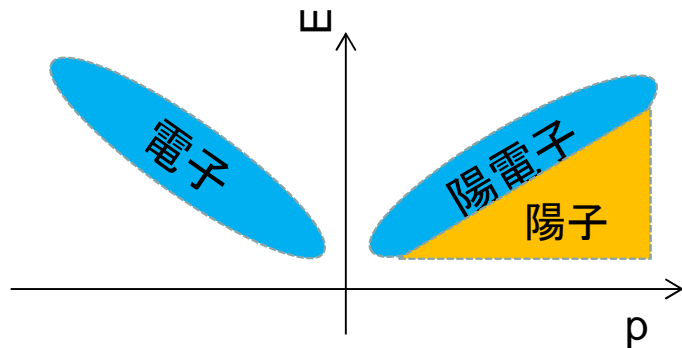
AMS-02 の陽子除去

TRD: Transition Radiation Detector

誘電率が異なる物質の境界を荷電粒子が通過する際、X線を放射する
 発光量は γ に比例
 ⇒ 高エネルギー領域では飽和するため、有効でなくなる

Tracker & ECAL

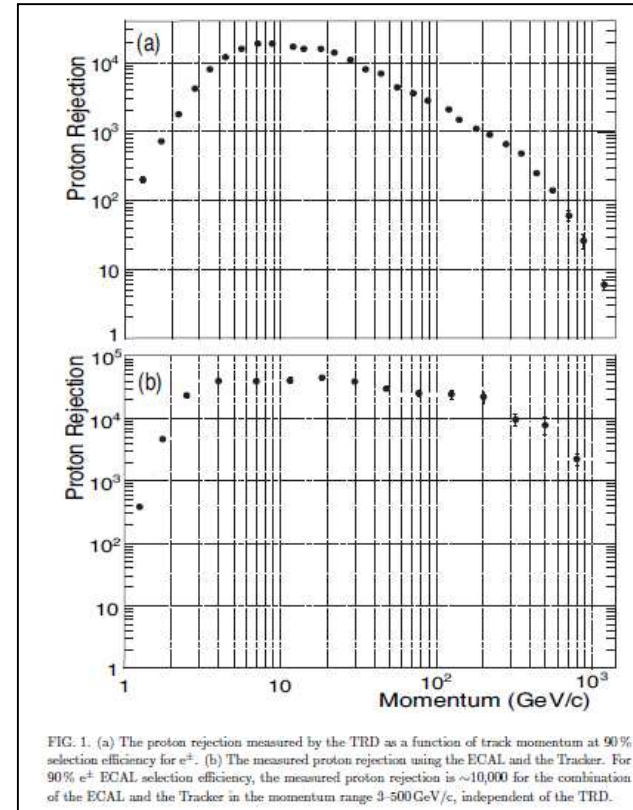
運動量 p とシャワーエネルギー E の相関からハドロン成分を分離する (ハドロン成分の mfp は長い)



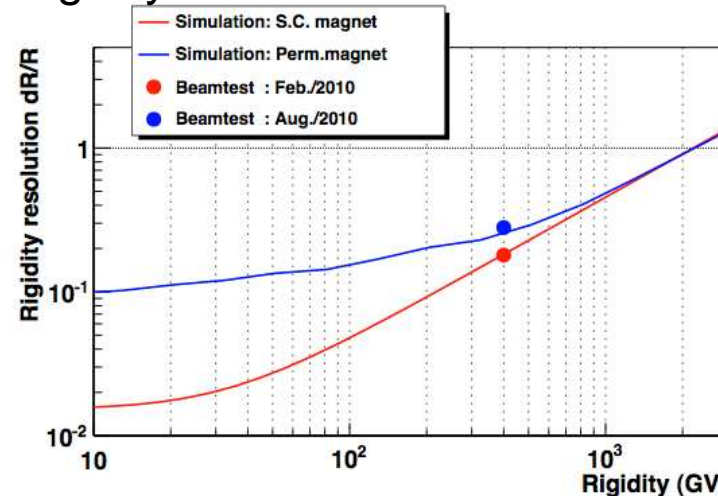
⇒ 陽子除去性能の上限は、運動量の測定上限で決まる

観測エネルギーの上限は~1TeV程度

陽子除去性能



Rigidity分解能

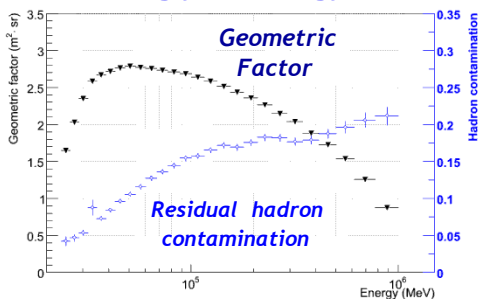


Fermi/LATとCALETの比較

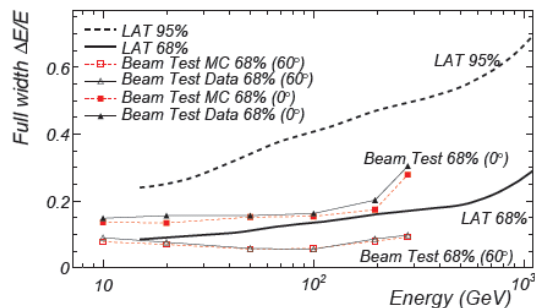
CALETは電子観測に最適化された装置であり、FERMI/LATが不可能なTeV領域の観測が可能であるだけでなく、TeV以下でもはるかに優れた性能をもつ。

FERMI Electron Analysis

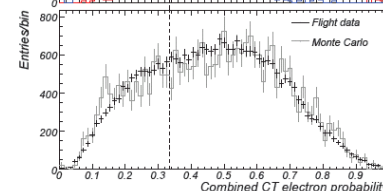
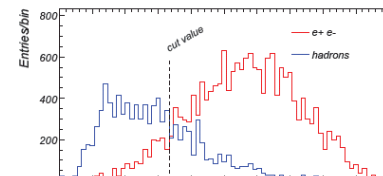
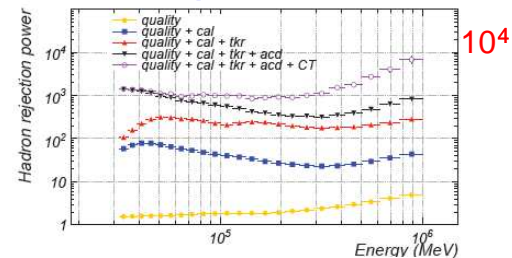
Geometric Factor depends strongly on energy



Energy resolution becomes worse at high energies (~30% @ 1TeV)

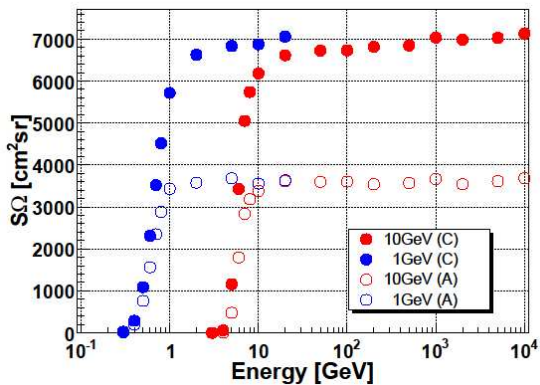


Proton rejection power depends fully on simulation by using different parameters

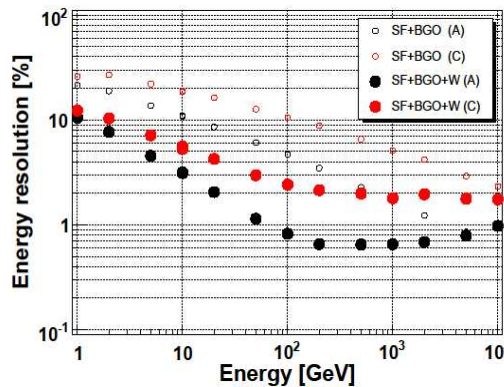


Expected CALET Performance

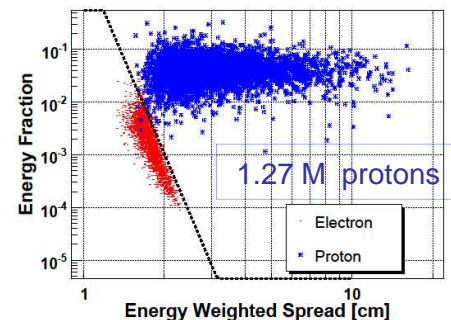
Geometric Factor is constant up to 1TeV



Energy resolution is nearly 2% over 100GeV



Proton rejection power at 4 TeV is better than 16 with 95% electron retained



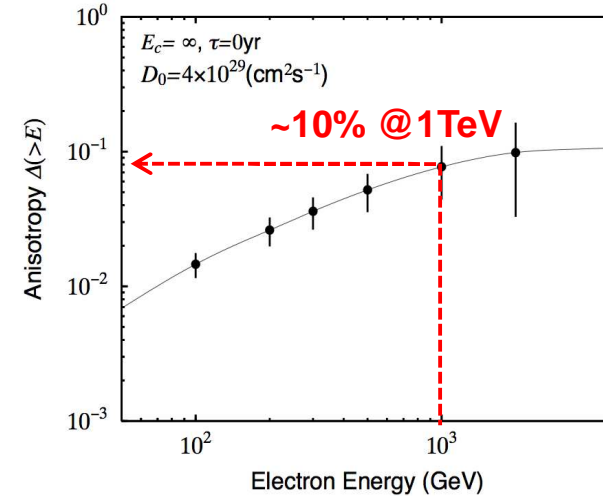
電子観測による近傍加速源探索

5年間の観測予測

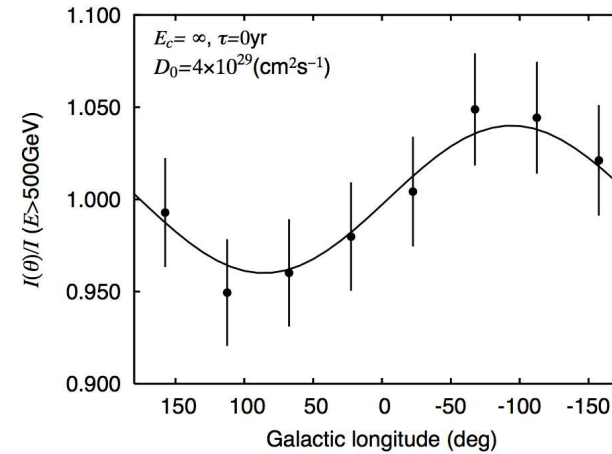
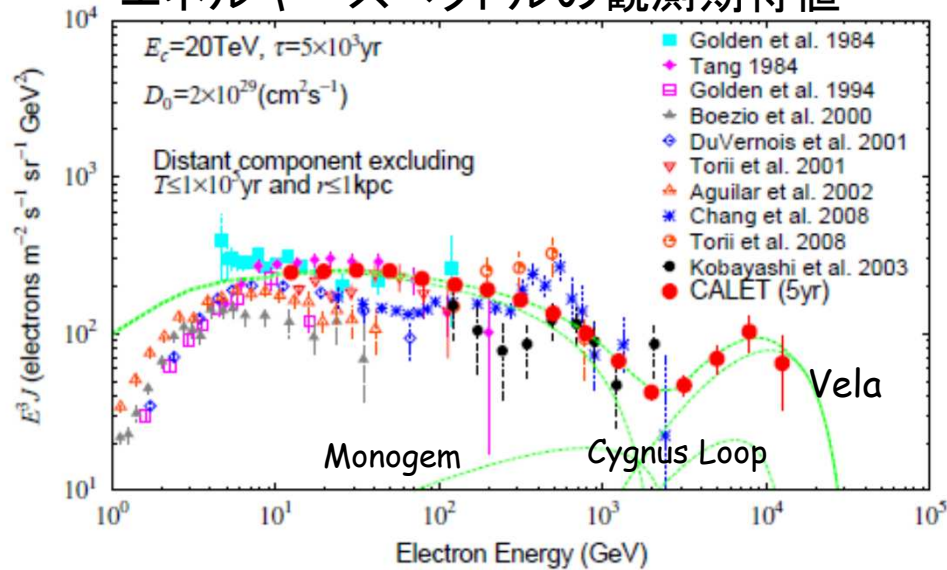
(Primary)
Fermi + Hess
(Vela)
Kobayashi et al. 2004

Energy[GeV]	Primary e-	e- from Vela
500-600	1168	154
600-800	1235	239
800-1000	501	168
1000-1500	546	270
1500-2000	146	134
2000-3000	99	134
3000-4000	23	51
4000-5000	7	23
5000-7000	5	22
7000-9000	1	7
>9000	0	3
>1000	827	644

Vela からの非等方性



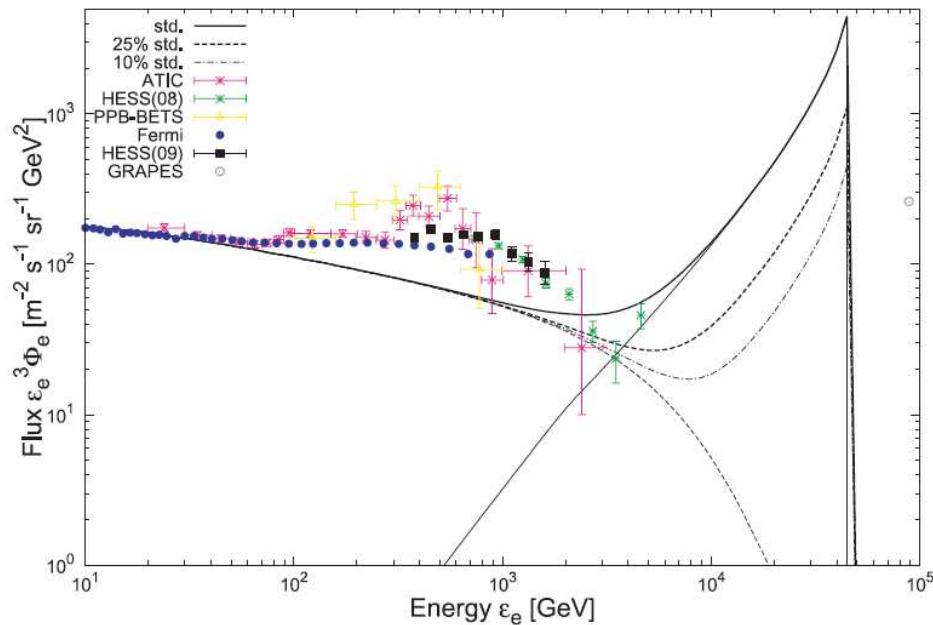
エネルギースペクトルの観測期待値



電子成分の異方性観測

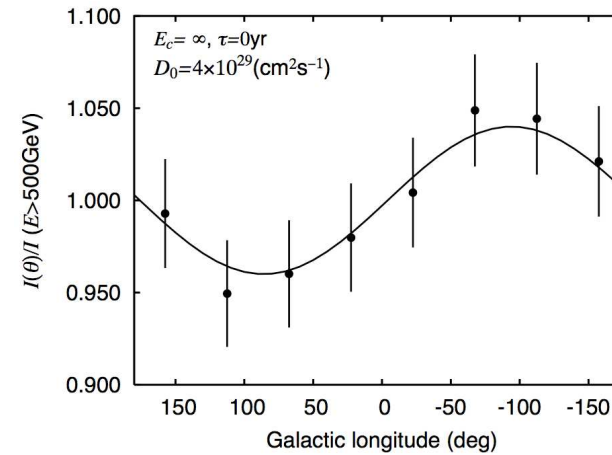
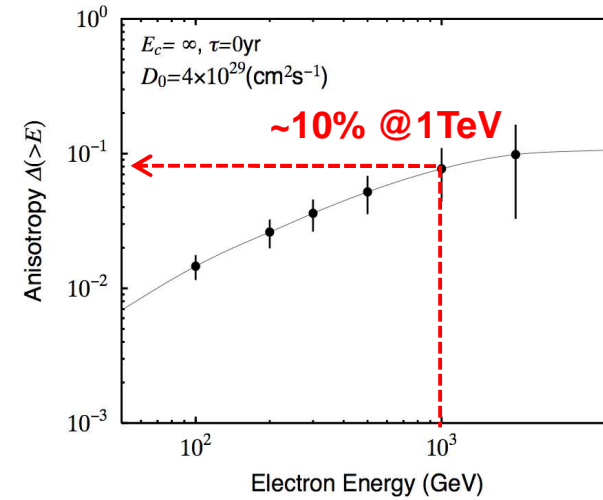
Kisaka et al. 2011

TeV領域の電子成分として、近傍パルサーからの寄与(数10個の天体からの重ね合わせ)



異方性の有無からモデル制限が可能

Vela からの非等方性



プロトタイプ検出器による開発・性能評価

気球実験・加速器実験を通して、開発要素の技術実証、性能評価を実施

2006 気球実験 (bCALET-1 @三陸)

1/4プロトタイプ検出器

2008 加速器実験 (東北大核理研)

GeV領域ガンマ線の観測性能

2009 気球実験 (bCALET-2 @大樹町)

1/2プロトタイプ検出器

2010 加速器実験 (CERN-SPS)

μ 粒子、電子の観測性能

2011 加速器実験 (HIMAC)

CHD, SciFiの電荷分解能

2012 加速器実験 (CERN-SPS)

μ 粒子、電子、陽子の観測性能

2012 加速器実験 (CERN-SPS)

μ 粒子、電子、陽子の観測性能

熱構造モデルによる性能検証

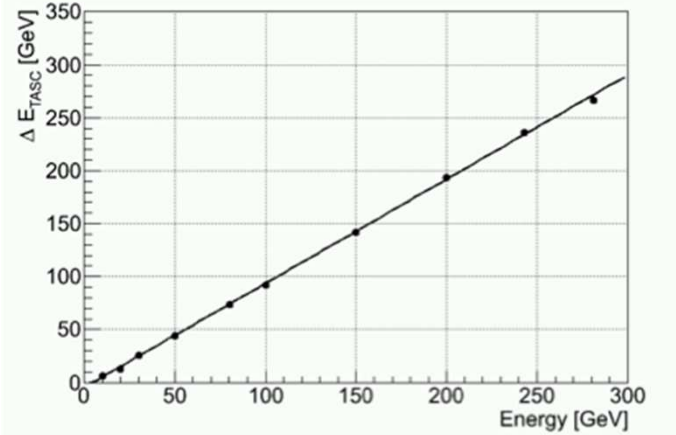
2013 加速器実験 (CERN-SPS)

原子核の観測性能

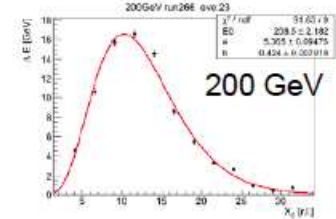
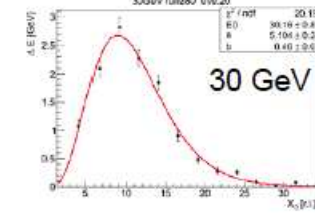
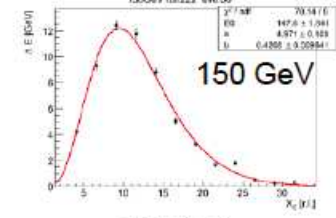
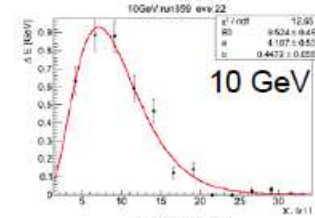
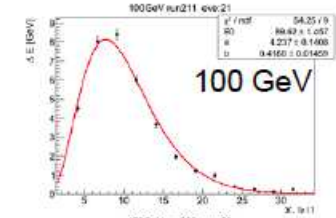


CERN実験の結果

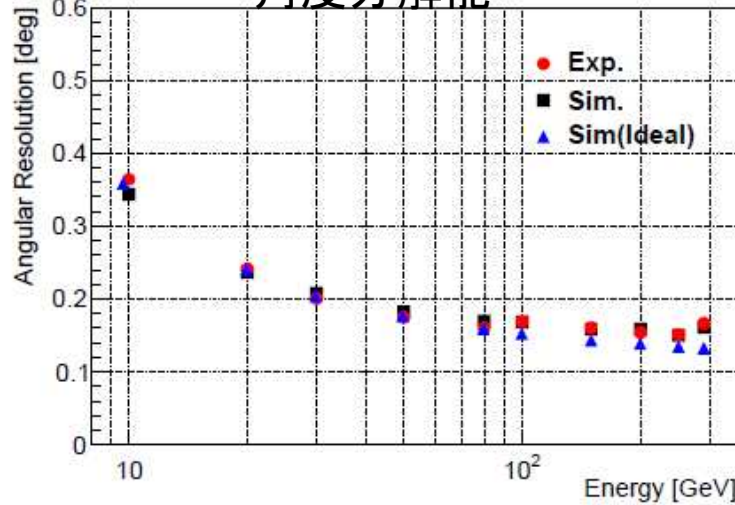
ビームエネルギーと測定エネルギーの相関



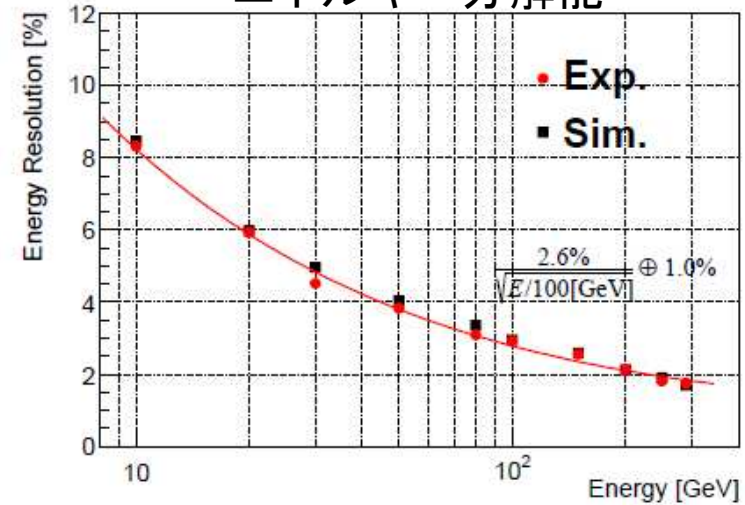
電子シャワー発達
カーブが理論曲線と
一致することを確認



角度分解能



エネルギー分解能



シミュレーションが観測結果を再現することを確認できた

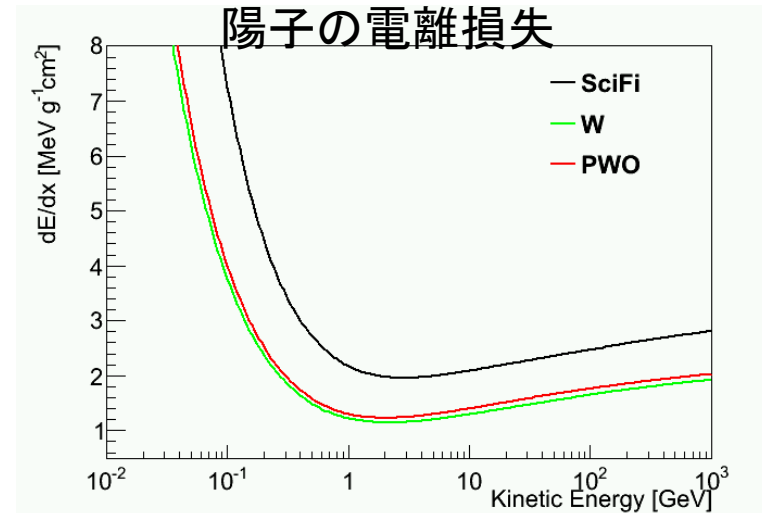
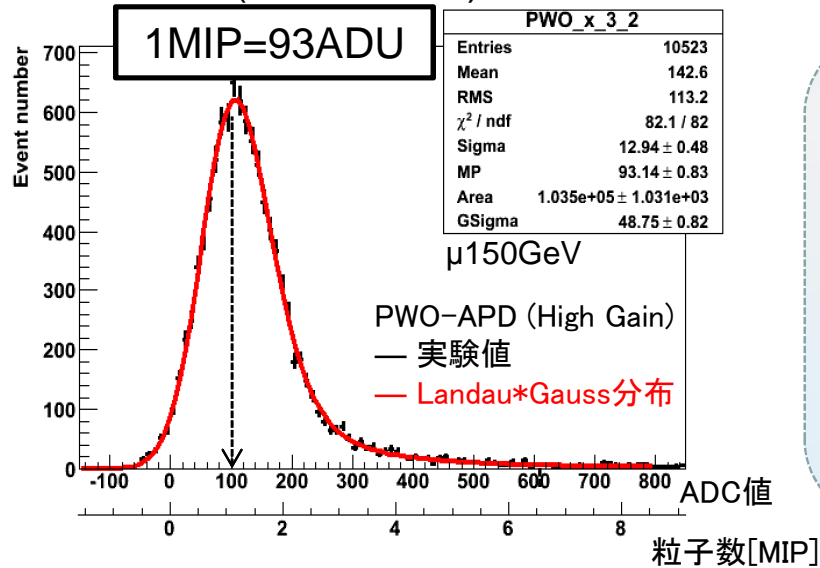
軌道上における検出器校正

- 軌道上における宇宙線陽子やHeの最小電離粒子を利用して検出器校正を行う

最小電離粒子(MIP: Minimum Ionizing Particles)

一粒子が通過する際に落とすエネルギー損失量の最頻値を定義とする
(例: TASCのシンチレータの1MIP~20MeV)

最小電離粒子のADC分布
(加速器(CERN-SPS)試験結果)



地上試験では、 μ 粒子の利用が効率的
(μ 粒子の相互作用長が長いため)

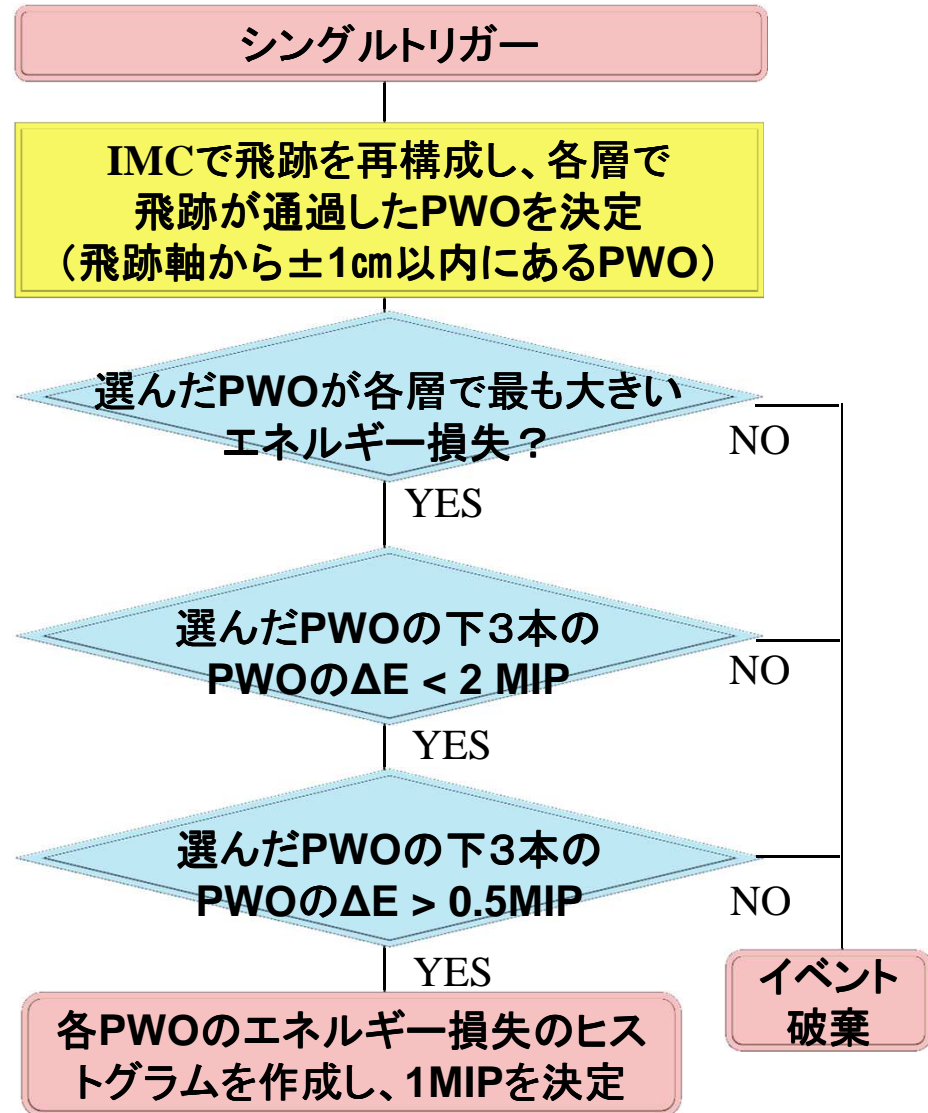
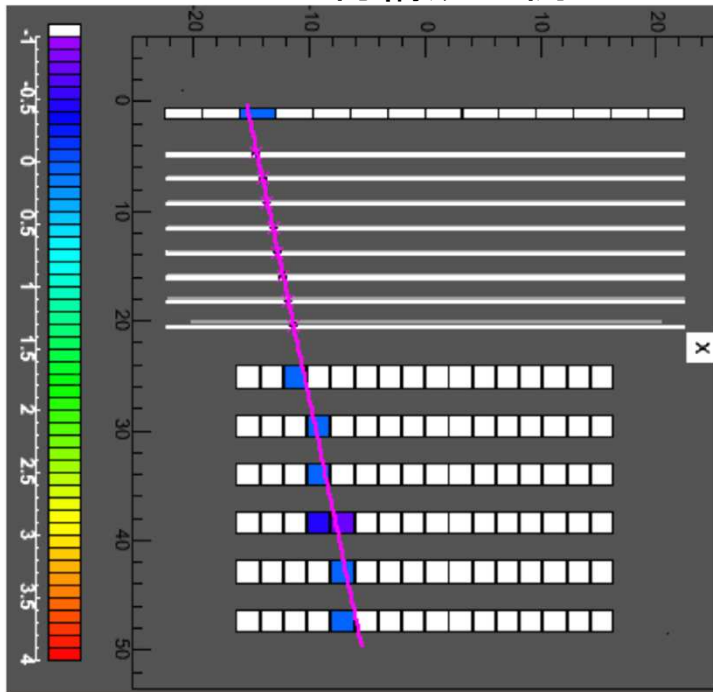
ISS軌道上では陽子の最小電離粒子を利用
ただし、陽子は検出器中でシャワーを引き起こすため、最小電離粒子の選別が必要
CALET: ~1.3 m.f.p.

検出器校正に利用するイベント選別

■ 検出器校正に利用できるイベント条件

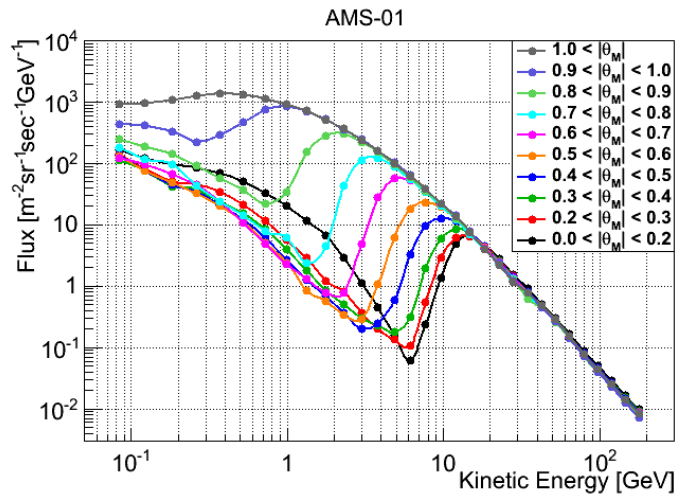
- ① 幾何条件を満たす(飛跡がPWOを通過)
- ② 検出器中でシャワーを起こさない
- ③ 検出器中で止まらない

イベント再構成の例

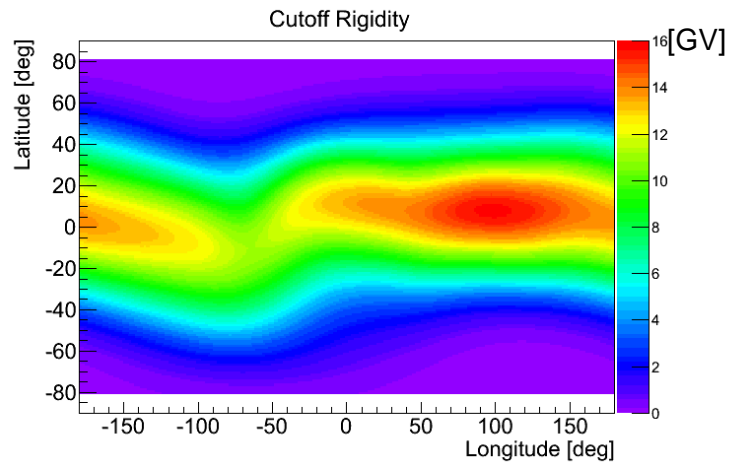
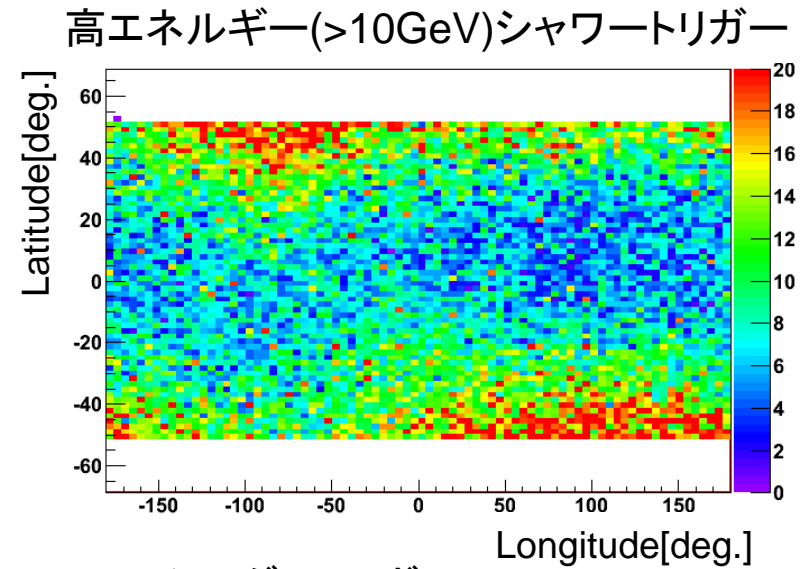


トリガーレート

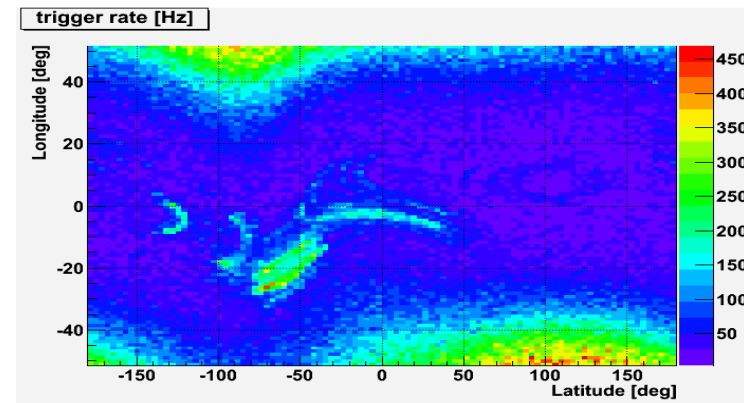
陽子のエネルギースペクトル(AMS-01)



トリガーレート(2次粒子を含む)の強度分布



シングルトリガー



まとめ

- 宇宙線電子成分は寿命が短いことに由来して、近傍加速源の影響がエネルギースペクトルに反映される
- CALETは電子観測に最適化した検出器である
 - 測定領域: 1GeV – 20 TeV
 - エネルギー分解能 ~ 2% (>100GeV)
 - 陽子除去性能 ~ 10^5
- CALETの観測精度はシミュレーション計算や加速器実験で検証を行っている
- 2014年度に打ち上げ予定

END