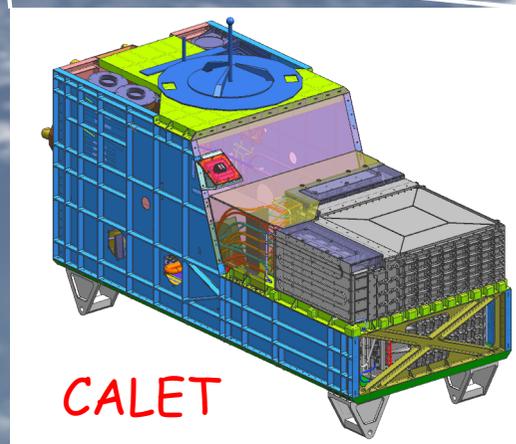
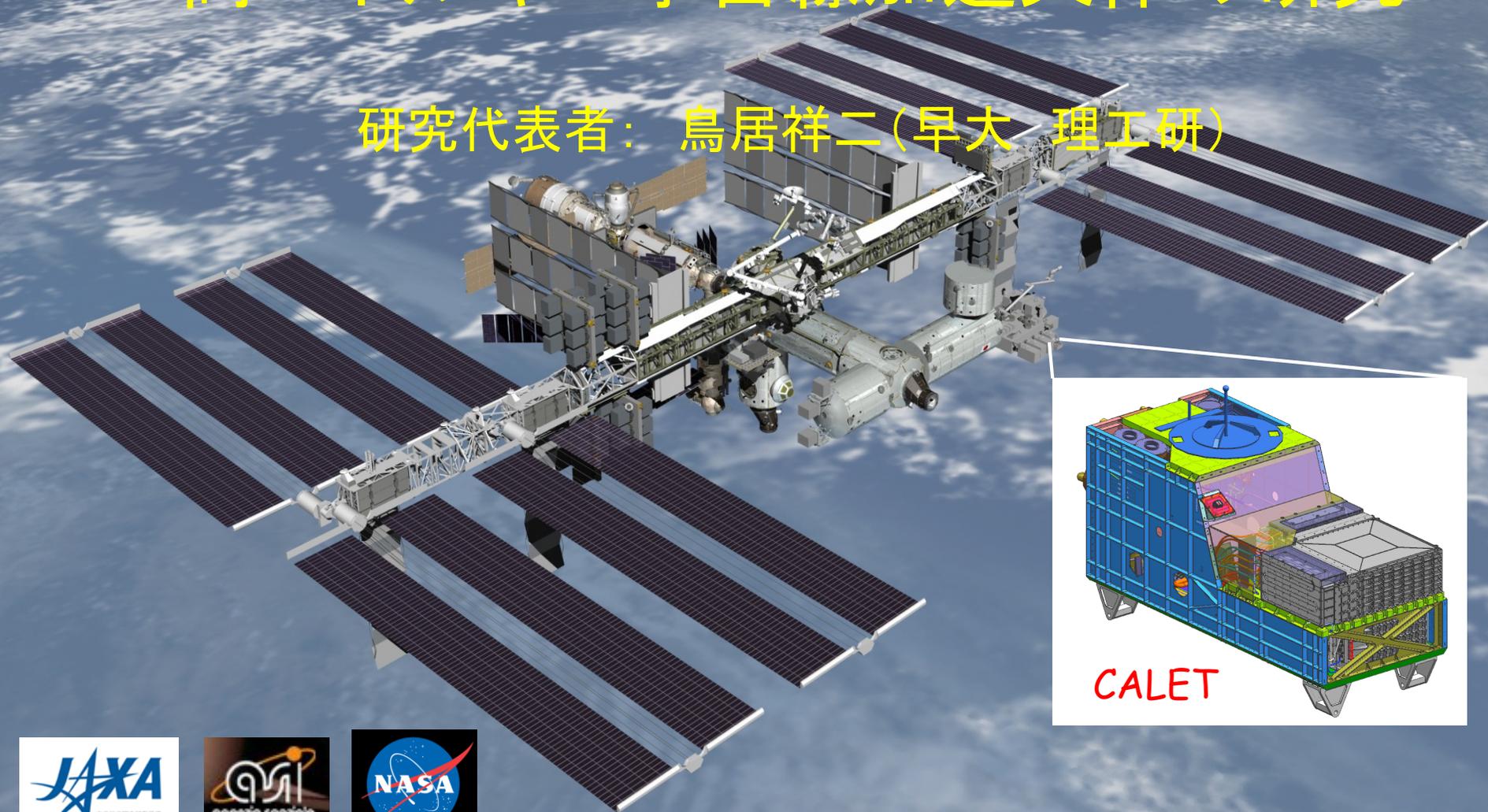


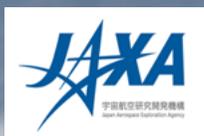


# 飛翔体観測による 高エネルギー宇宙線加速天体の研究

研究代表者：鳥居祥二(早大 理工研)



CALET



# 共同利用研究概要(2013)

## ■ 研究内容

- Calorimetric Electron Telescope (CALET)の全吸収型カロリメータ (TASC)の性能試験
- CALET性能最適化のためのシミュレーション計算

## ■ 発表概要

- CALETプロジェクト
- CERN-SPSビーム実験とシミュレーション計算の比較
- 全吸収型カロリメータ (TASC)の地上試験用多チャンネルレーザシステム
- まとめ今後の予定

## ■ 予算 研究費 400千円

支出内容： レーザシステム部品, 旅費

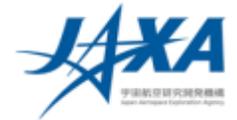
## ■ 共同利用 計算機 (シミュレーション計算)

### 参加研究者及び研究補助

早稲田大学	笠原克昌、小澤俊介、浅岡陽一、植山良貴、仁井田多絵、片平 亨、金子翔伍、		
村田 彬、小林慎太郎、齋藤 優、塚原一樹、下村健太、木村寿利、堀内陽介、山村咲弥			
宇宙線研究所	寺澤敏夫、赤池陽水、瀧田正人	神奈川大学	田村忠久
JAXA/ISAS	福家英之	JAXA/SEUC	清水雄輝
横浜国立大学	柴田慎雄、片寄祐作	芝浦工業大学	吉田健二
立命館大学	森正樹	弘前大学	市村雅一
茨城大学	柳田昭平	常磐大学	三宅晶子



# CALETによる科学観測

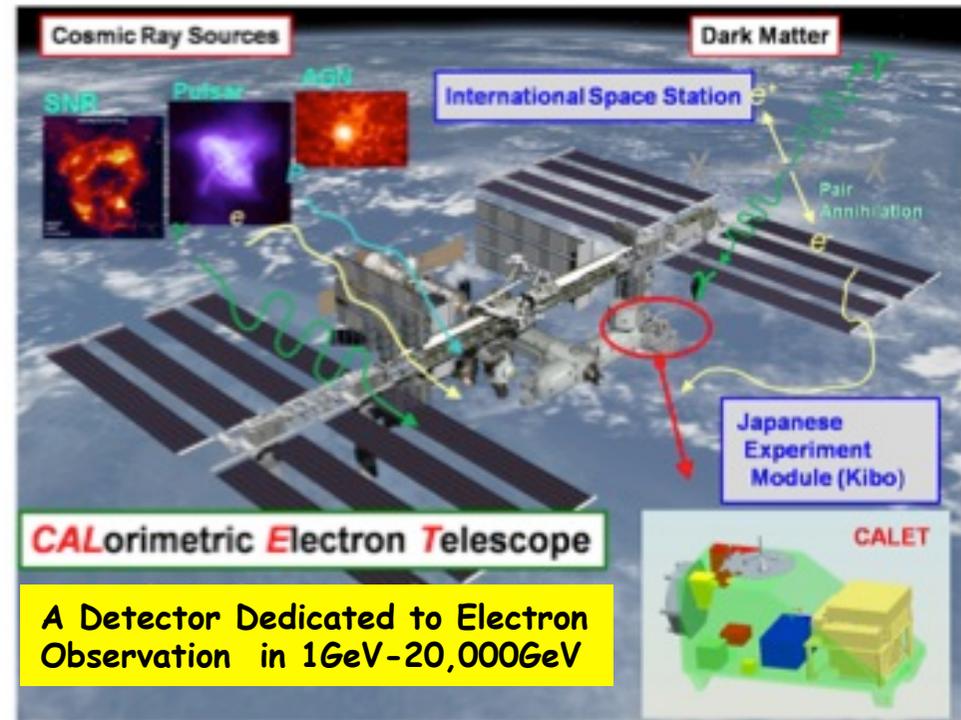


## カロリメータ (CALET/CAL)

- 電子: 1 GeV – 20,000 GeV
- ガンマ線: 10 GeV – 10,000 GeV  
(ガンマ線バースト: > 1 GeV)
- 陽子・原子核:  
数10GeV – 1,000 TeV
- 超重核:  
Rigidity Cut 以上のエネルギー

## ガンマ線バーストモニタ (CGBM)

- 軟ガンマ線: 30 keV – 30 MeV
- 硬X線: 3keV – 3 MeV



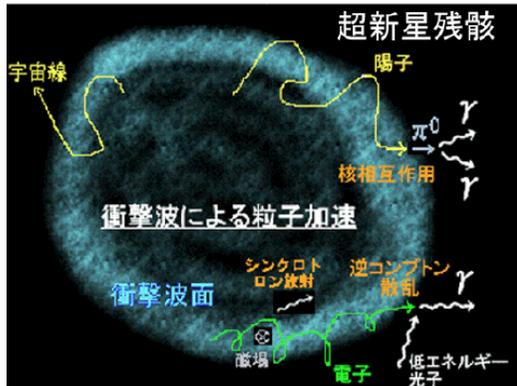
観測目的	観測対象
宇宙線近傍加速源の同定	TeV領域における電子エネルギースペクトル
暗黒物質の探索	電子・ガンマ線の100 GeV-10 TeV領域におけるスペクトルの”異常”
宇宙線の起源と加速機構の解明	電子及び陽子・原子核の精密なエネルギースペクトル、超重核のフラックス
宇宙線銀河内伝播過程の解明	二次核/一次核(B/C)比のエネルギー依存性
太陽磁気圏の研究	低エネルギー(<10GeV)電子フラックスの長・短期変動
ガンマ線バーストの研究	3 keV – 30 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象



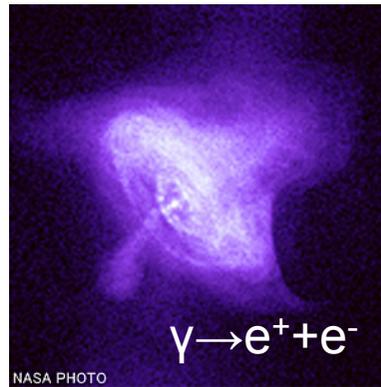
# 高エネルギー電子(+陽電子)の加速と銀河内伝播

## 天体起源

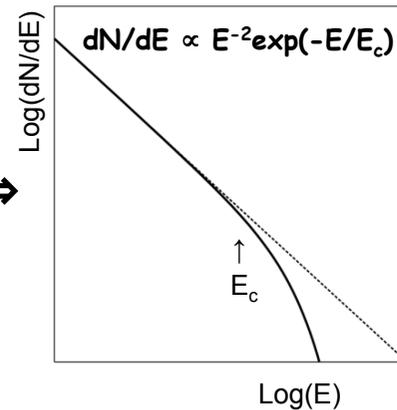
超新星残骸における衝撃波加速



パルサー風星雲での電子・陽電子生成

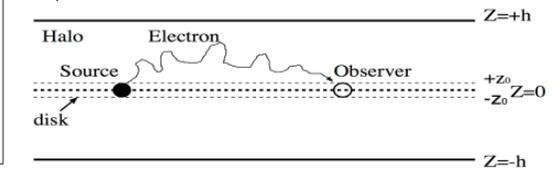


加速後のエネルギースペクトル  
(幕型分布 + 高エネルギーカットオフ)

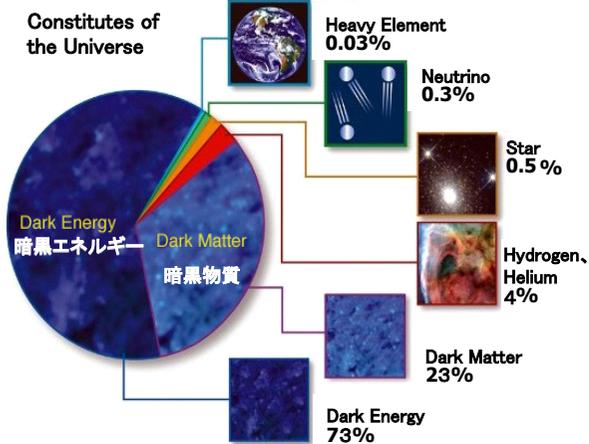


銀河内での伝播プロセス

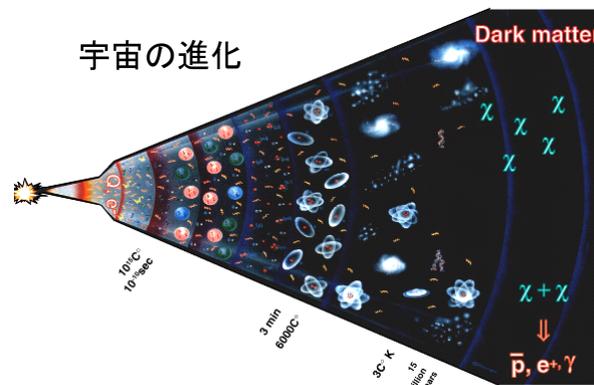
- ・拡散過程(銀河磁場)
- ・エネルギー損失
- $dE/dt = -bE^2$   
(シンクロトロン放射+逆コンプトン散乱)
- ・荷電パイ中間子の崩壊による二次的な電子・陽電子生成
- $\pi^+/- \text{ or } K^+/- \rightarrow \mu^+/- \rightarrow e^+/-$



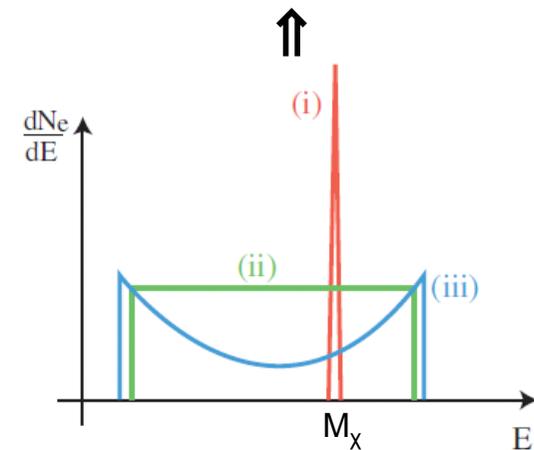
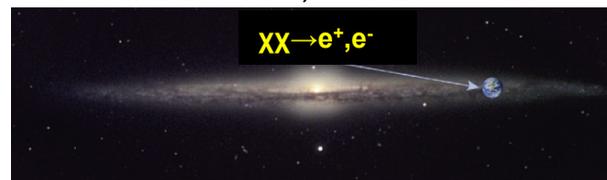
## 暗黒物質起源



宇宙の進化



暗黒物質(WIMP)の対消滅



暗黒物質の対消滅による電子・陽電子の生成エネルギースペクトル

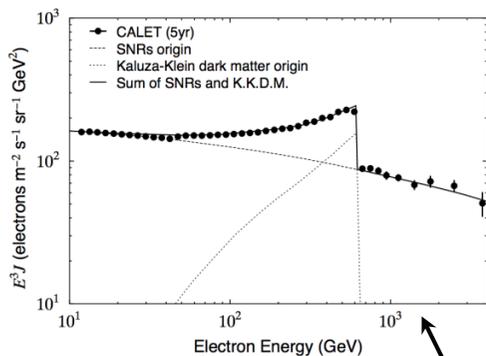
- (i) ライン型:  $e^+e^-$  対の直接生成
- (ii) 一様分布: 中間生成粒子の崩壊(一様)
- (iii) 双極分布: 中間生成粒子の崩壊(双極)



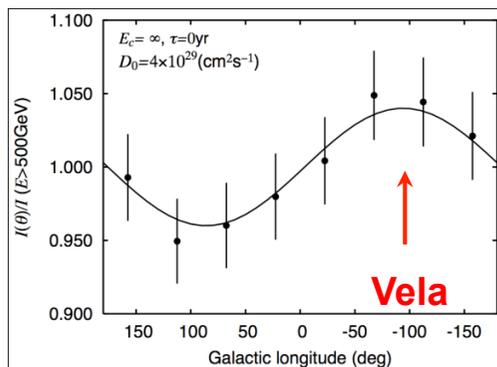
# CALETによる電子(+陽電子)の観測

- ▶ TeV領域での直接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(<3%)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
- ▶ 近傍ソースや暗黒物質の発見に不可欠なスペクトル構造と到来方向の異方性の検出が可能である

暗黒物質から期待される電子・陽電子の過剰



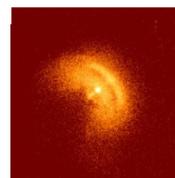
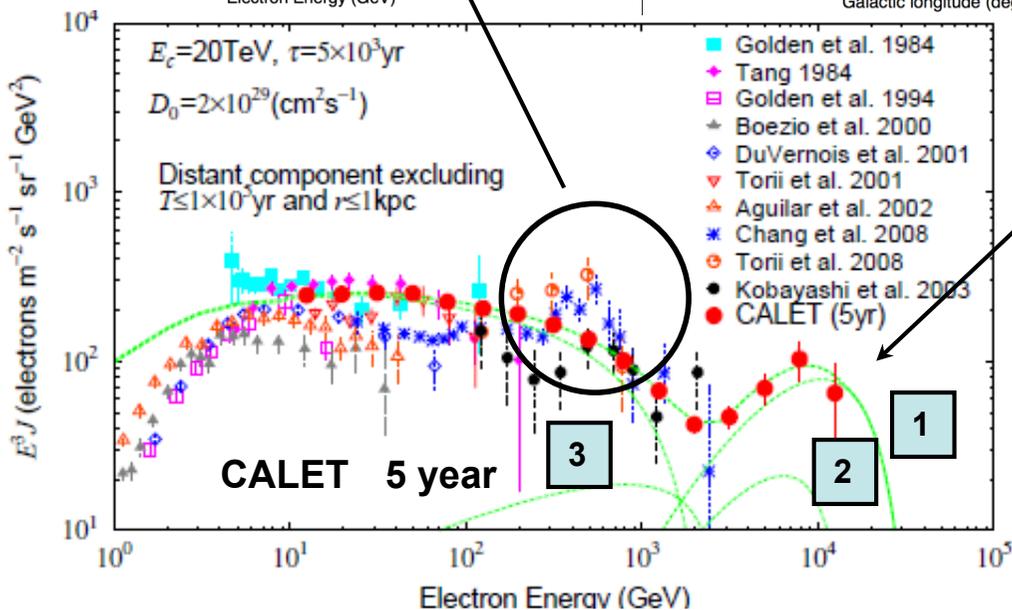
Velaから期待される到来方向の異方性



近傍ソース(超新星残骸等)

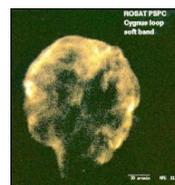
or  
暗黒物質?

近傍ソースの候補  
- 時間 < 10<sup>5</sup> years  
- 距離 < 1 kpc



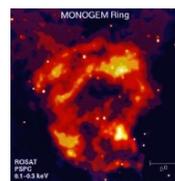
Vela  
10,000 years  
820 ly

1



Cygnus Loop  
20,000 years  
2,500 ly

2



Monogem  
86,000 years  
1,000 ly

3

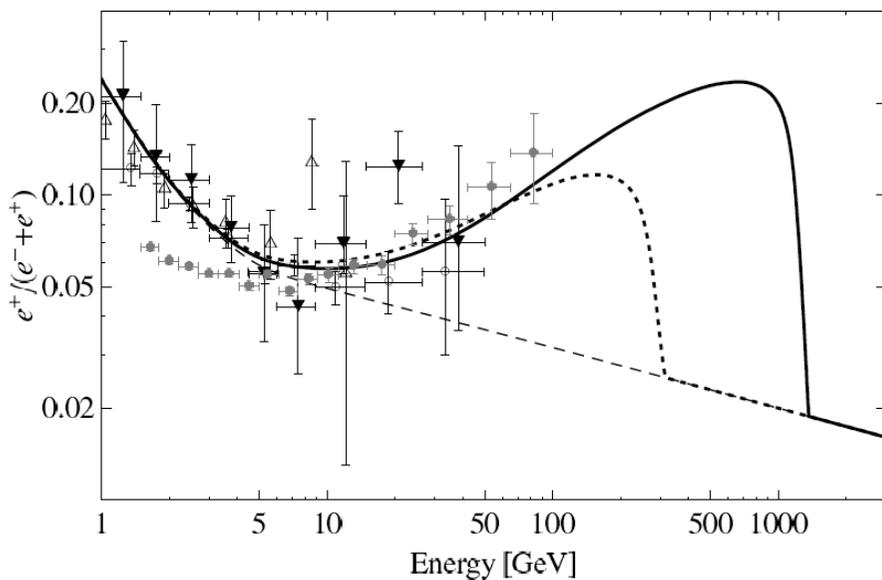


# 電子(+陽電子)観測による暗黒物質探索

## 暗黒物質の崩壊モデル

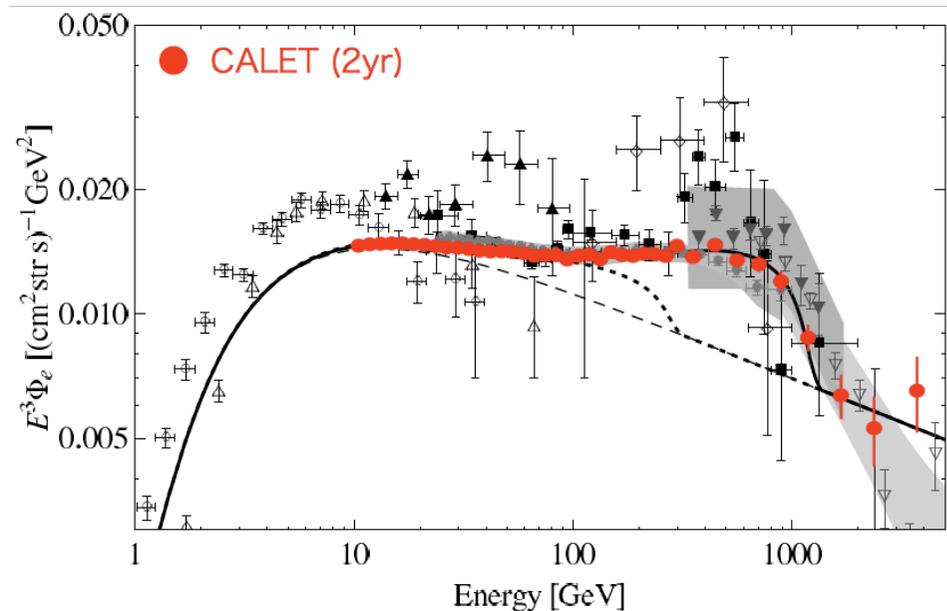
Decay Mode: D.M.  $\rightarrow l^+l^-v$   
Mass:  $M_{D.M.} = 2.5 \text{ TeV}$   
Decay Time:  $\tau_{D.M.} = 2.1 \times 10^{26} \text{ s}$

陽電子/電子比のこれまでの  
観測結果とモデル計算の比較



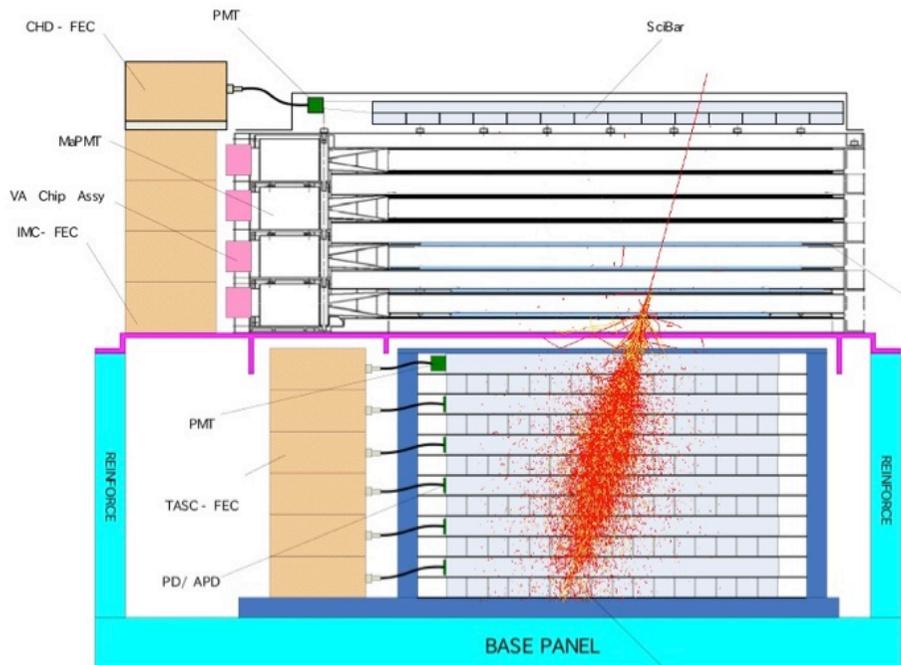
Ibarra et al. (2010)

モデル計算によるCALETにおける電子・  
陽電子の観測予測とこれまでの観測結果

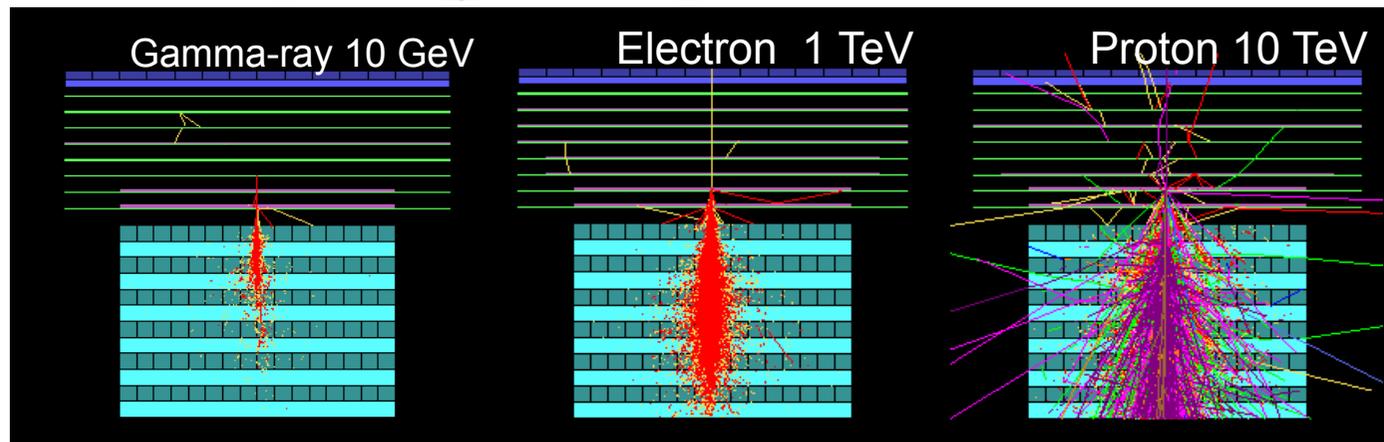


TeV領域での電子・陽電子観測

暗黒物質のシグナルを検出可能

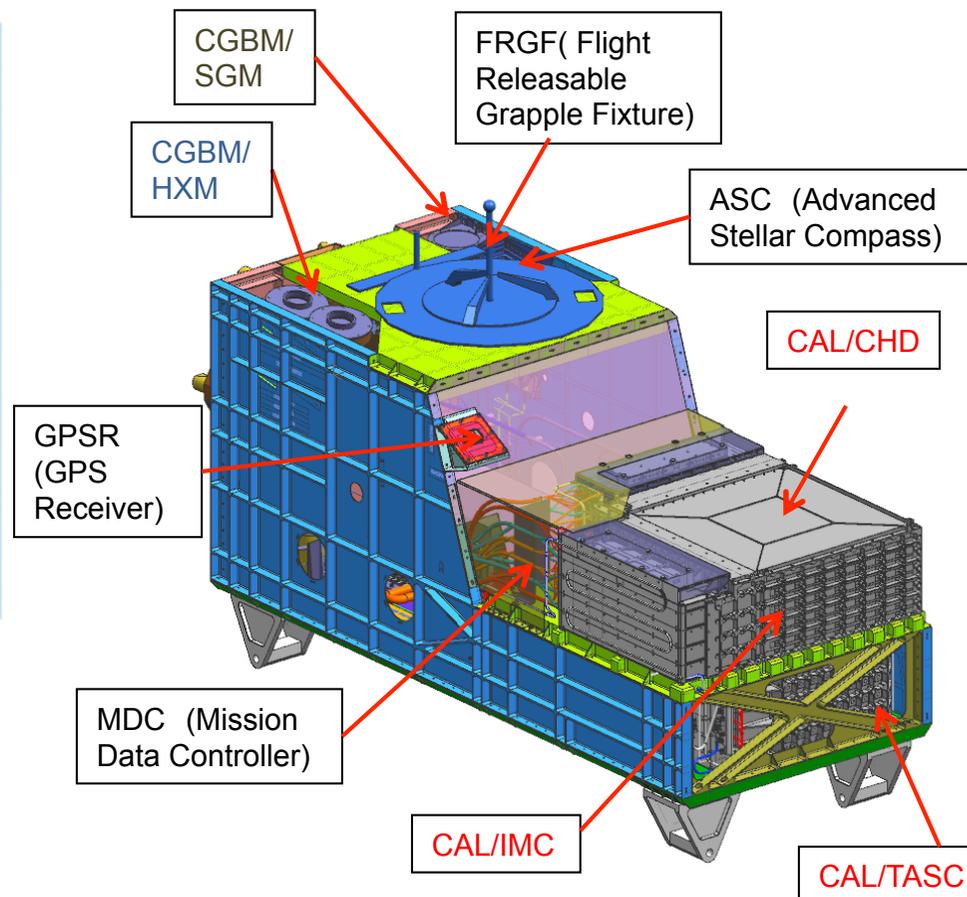
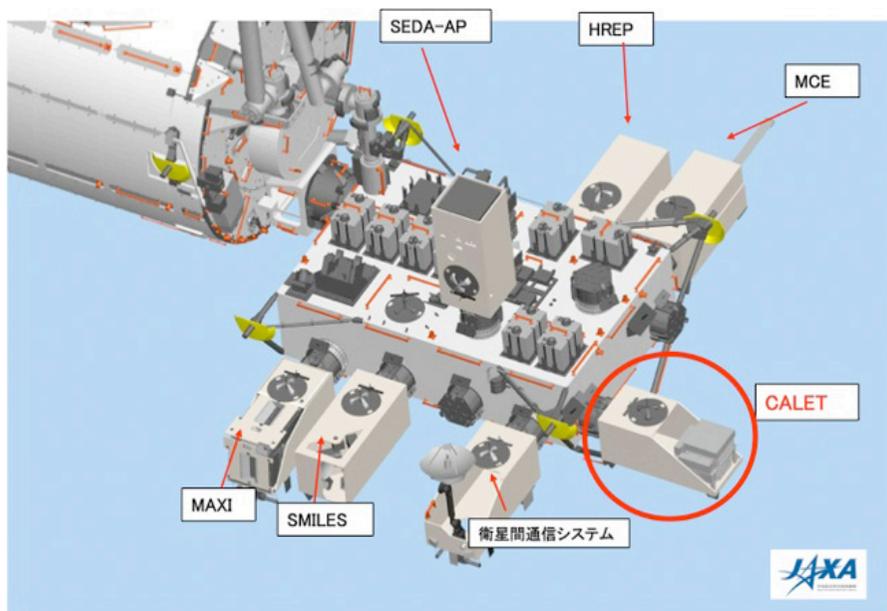


- CHD** Plastic Scintillator : 14 × 1 layer (x,y)  
Unit Size: 32mm x10mmx450mm
- IMC** SciFi : 448 x 8 layers (x,y) = 7168  
Unit size: 1mmsq x 448 mm  
Total thickness of Tungsten: 3 r.l.
- TASC** PWO log: 16 x 6 layers (x,y)= 192  
Unit size: 19mm x 20mm x 326mm  
Total Thickness of PWO: 27 r. l.



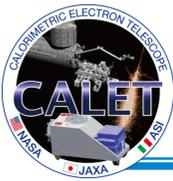
- ☛ Proton rejection power  $> 10^5$  can be achieved by shower imaging with the IMC and TASC.
- ☛ CHD determines the charge of incident particles to  $\Delta Z=0.15-0.3$ .

## Japanese Experiment Module Exposed Facility as of 2014



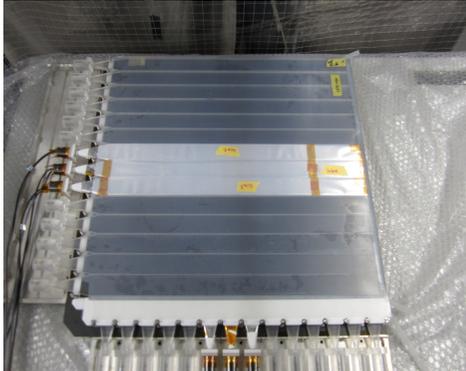
- ❑ Launch carrier: HTV-5
- ❑ Planned location: JEM Port 9
- ❑ **Launch target date: FY 2014**
- ❑ Mission period: More than 2 years  
(5 years target)
- ❑ Data rate:
  - Medium data rate: 600 kbps
  - Low data rate: 35 kbps (20-50kbps)

- ❑ Mass: 650kg (Max)
- ❑ JEM/EF Standard Payload Size  
(1850L×800W×1000H in mm)
- ❑ Power: 650W (Nominal)

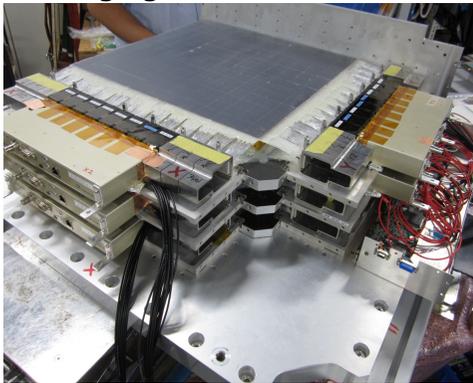


# CERN Beam Test using the Structure & Thermal Model (STM)

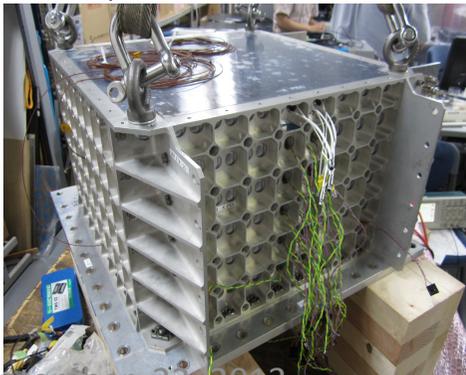
Charge Detector: CHD



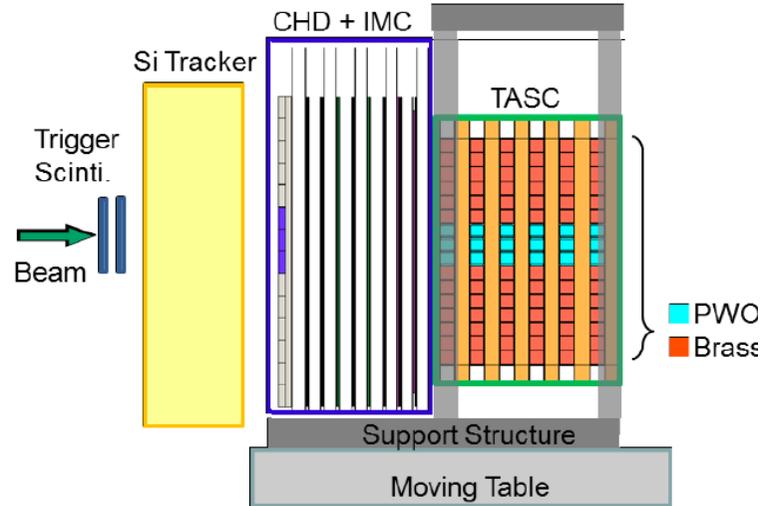
Imaging Calorimeter: IMC



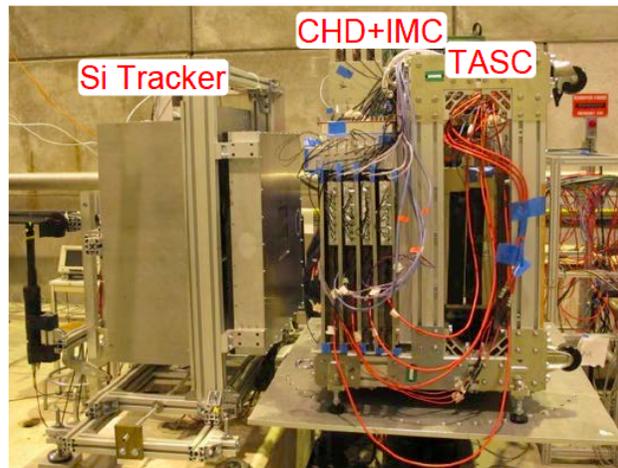
Total Absorption Calorimeter: TASC



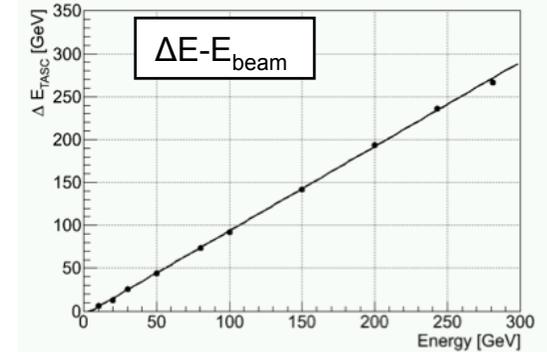
Schematic Side View of the Beam Test Model



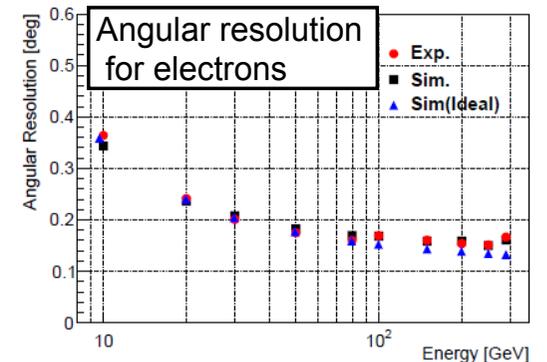
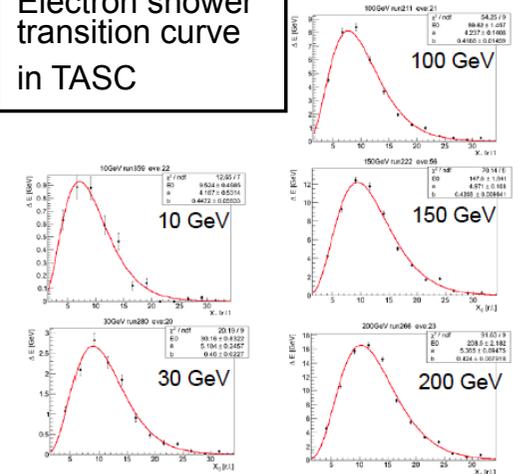
Beam Test Model at CERN SPS H8 Beam Line



## Beam Test Results



Electron shower transition curve in TASC



# 他ミッション(含む計画)との電子観測における比較表

装置名称 (打ち上げ時期)	観測可能エネルギー範囲 (ギガ電子ボルト)	エネルギー分解能 (小さいほど高性能)	電子識別能力 (電子が識別できる陽子雑音の数:大きいほど高性能)	装置構成* (カロリメータの厚さは放射長 $X_0$ で表す: 厚くなるほど高性能)	5年間の観測規模** (装置サイズ: $m^2 sr$ $\times$ 観測時間: day)	装置重量 (衛星構体を含む)
PAMELA (2006)	1-700	5% @200 GeV	$10^5$	マグネットスペクトロメータ (0.43T) + サンプル型カロリメータ (Si+W: 16 $X_0$ )	~ 4	470
FERMI/LAT (2008)	20-1,000	5-20 % (20-1000 GeV)	$10^3$ - $10^4$ (20-1000GeV) エネルギー依存性大	飛跡検出型カロリメータ (Si+W: 1.5 $X_0$ ) + 全吸収型カロリメータ (CsI: 8.6 $X_0$ )	1500@TeV	7,000
AMS-02 (2011)	~ 2,000 (~800)	~10% @100 GeV	$10^4$ - $10^5$ 低エネルギーで増加	マグネットスペクトロメータ (0.15T) + サンプル型カロリメータ ( SciFi + Pb: 17 $X_0$ ) + 電荷・速度測定器 (TOF+TRD+RICH)	55 (170)	7,000
CALET (2014)	1 - 20,000	~2% (>100 GeV)	~ $10^5$	飛跡検出型カロリメータ (W+SciFi: 3 $X_0$ ) + 全吸収型カロリメータ (PWO : 27 $X_0$ ) + 電荷測定器(SCN)	220	650
TANSUO (中国, :2016?)	5 - 10,000	~1.5%	~ $10^5$	飛跡検出型カロリメータ (W?+SCN: 6.5 $X_0$ ) + 全吸収型カロリメータ (BGO: 27 $X_0$ )	900	1,500
GAMMA-400 (ロシア:2017?)	1 - 3,000	~1% (>100GeV)	~ $10^4$	飛跡検出型カロリメータ (W+Si: 6 $X_0$ ) + 全吸収型カロリメータ (PWO:22.5 $X_0$ )	1,280	1,700

\*) 装置略称説明

Si: シリコンストリップ W: タングステン SciFi: シンチファイバー Pb: 鉛 TRD: 遷移放射検出器 RICH : リングイメージチェレンコフ光検出器  
CsI : ヨウ化セシウム結晶シンチレータ PWO: タングステン酸鉛結晶シンチレータ BGO: ビスマスゲルマニウムオキサイド結晶シンチレータ SCN: プラスティックシンチレータ

\*\*）観測規模が大きいほど観測粒子数は増えるが、これまでの観測装置(PAMELA, FERMI,AMS) はエネルギーの測定限界のため、1000 ギガ電子ボルトを上回る測定はできない。

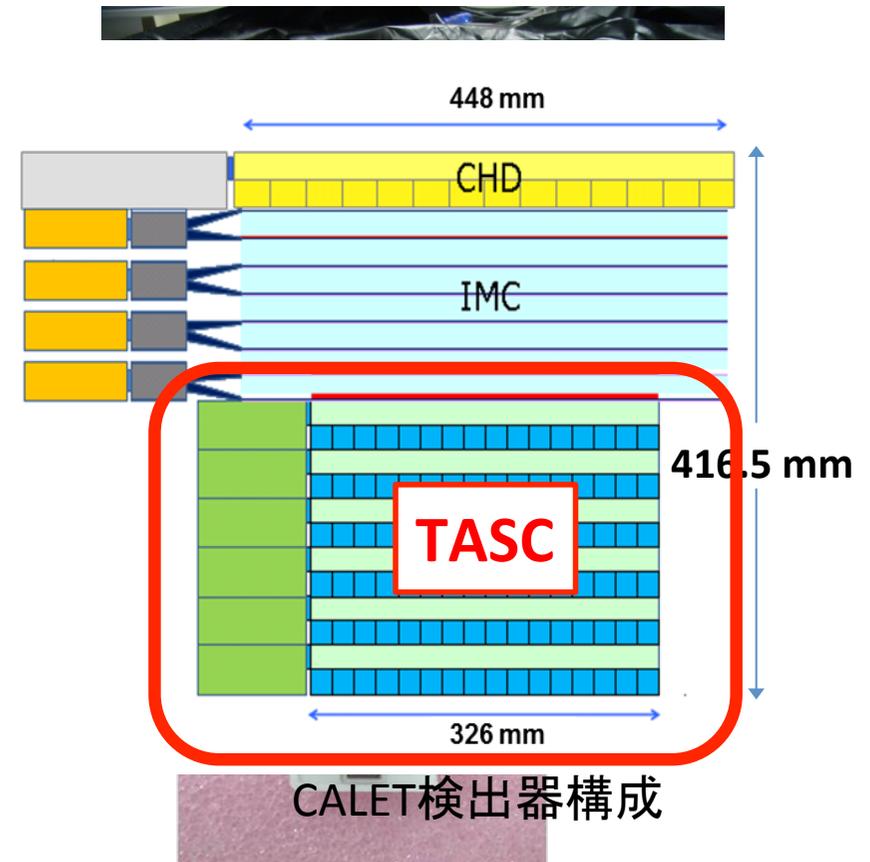
# CALET-TASC検出器

## 全吸収型カロリメータ (TASC)

- エネルギー測定, 電子/陽子識別
- シンチレータ
  - PWO ( $20 \times 19 \times 326 \text{ mm}^3$ )
    - 16本 $\times$ 6層 $\times$ 2 (x,y)  $\Rightarrow$  27  $X_0$ 厚
- 光検出器
  - 1層目: PMT (計16個)
    - $\Rightarrow$  トリガー用
  - 2層目以降: **APD/PD (計176個)**

TASC各系統のダイナミックレンジの想定値

	APD/PD gain	APD/PD 面積比	Amp gain比	ダイナミックレンジ (MIP)
APD_HG	50	18	30	$5.0 \times 10^{-1} - 2.5 \times 10^2$
APD_LG	50	18	1	$1.3 \times 10^1 - 7.6 \times 10^3$
PD_HG	1	1	30	$4.5 \times 10^2 - 2.2 \times 10^5$
PD_LG	1	1	1	$1.1 \times 10^4 - 6.7 \times 10^6$



CALET検出器構成

APD/PD パッケージ (S10937-9351)

ゲインの違う4系統の読み出しで  
6桁のダイナミックレンジを実現する

# TASCによるエネルギー測定の実理

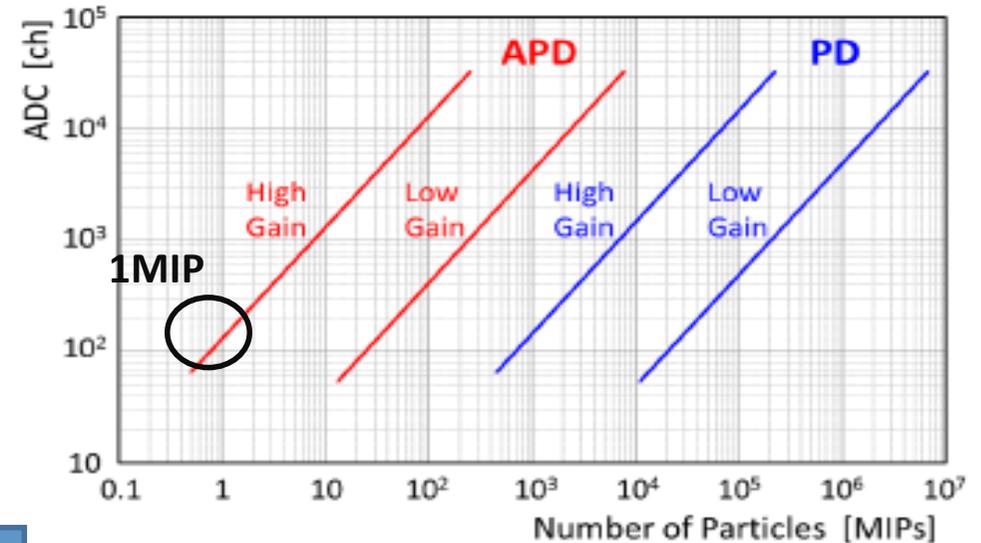
## ◆ 観測運用時の較正

- 1MIP測定からAPD\_HGを較正
- ✓ 各系統のレンジを繋ぐため、APD/PDの出力相関が不可欠

## ⇒ 地上での較正実験

- **10<sup>6</sup> MIP** までの粒子実験を行うことが困難

APD/PD各系統のダイナミックレンジ想定値



## □ APD/PD全176chをEnd to Endで較正できる装置の開発

- 多チャンネルを効率的に同時測定
- PWO発光量に対するAPD/PD出力シグナルの較正
- 測定可能なダイナミックレンジの確認

# レーザー照射システム

## ◆ 光学装置により8系統に光を分割

- PWO-APD/PD全176chの効率的な測定
- 石英ファイバーによりPWOにUV光を導入
  - PWO検出器の端面に照射光導入窓を設置

## ◆ 入射光量は光学フィルターとアイリスで調整

- フィルター減光率 $1\sim 10^{-5}$ とアイリス1-100%

## ◆ レーザー光量のモニターシステム

- PIN-PDでパルスごとにUV光量をモニター

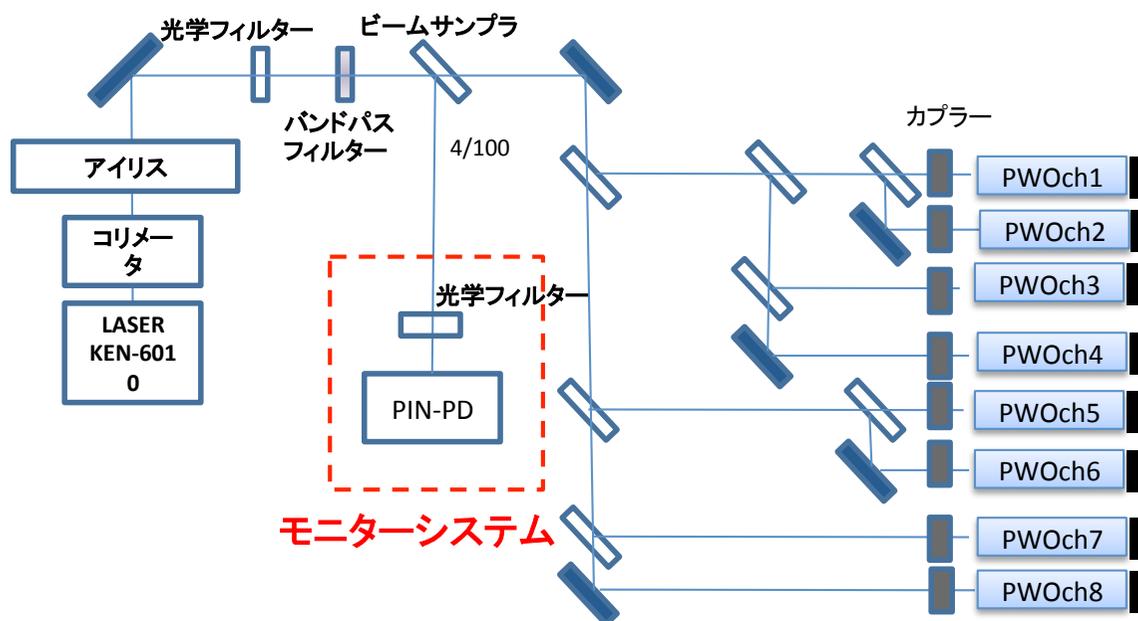


UVLASER 宇翔KEN-6010

出力エネルギー:300 $\mu$ J

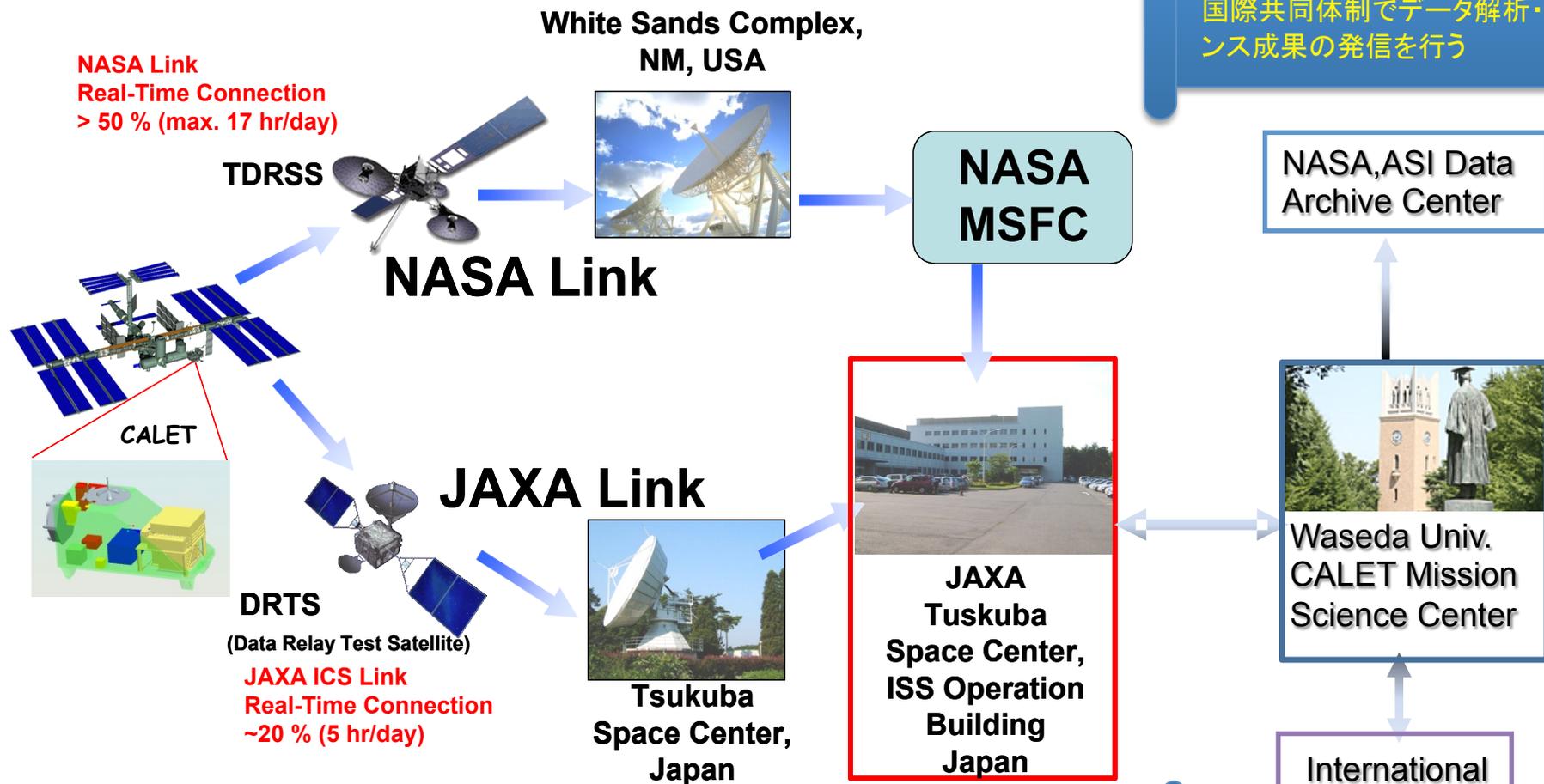
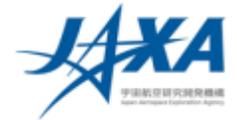
波長:337.1nm

パルス幅: 900ps





# データダウンリンクとCALETデータ解析



**NASA Link**  
Real-Time Connection  
> 50 % (max. 17 hr/day)

White Sands Complex,  
NM, USA

TDRSS

**NASA Link**

**NASA MSFC**

NASA, ASI Data  
Archive Center

CALET

**JAXA Link**

**JAXA Tuskuba Space Center, ISS Operation Building Japan**

Waseda Univ.  
CALET Mission Science Center

DRTS  
(Data Relay Test Satellite)

**JAXA ICS Link**  
Real-Time Connection  
~20 % (5 hr/day)

Tsukuba Space Center,  
Japan

International  
Collaboration  
Organization

早稲田大学にCALET Mission Science Center(CSC)を構築して、国際共同体制でデータ解析・サイエンス成果の発信を行う

つくば宇宙センターにおいてデータ受信・運用を行う



## まとめと予定

- CALETはTeV領域の電子・ガンマ線観測により近傍加速源と暗黒物質の探索を行うほか、陽子・原子核の観測を1000TeV領域まで実施して宇宙線の加速・伝播機構の解明を行う。さらに、太陽変動やガンマ線バーストのモニター観測を実施する。
- CALETは、これまでの気球実験(BETS,PPB-BETS)の経験をもとに開発されており、日本で初めての宇宙空間における高エネルギー宇宙線観測プロジェクトである。2014年度の打ち上げ後5年間の観測を目指している。
- CALETは、JAXA有人宇宙利用ミッション本部宇宙環境利用センターと早稲田大学の共同研究によるプロジェクトであり、JAXAが米国NASAとイタリアASIと協定を結んで実施している。
- CALETは、現在詳細設計を終えて、2013年より搭載装置の製作を開始している。

**BACKUP**

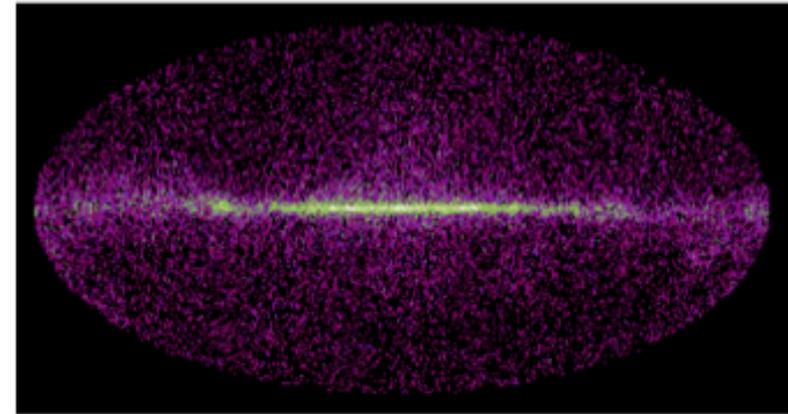


# Detection of High Energy Gamma-rays

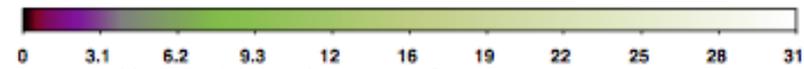
## Performance for Gamma-ray Detection

Energy Range	4 GeV-10 TeV
Effective Area	600 cm <sup>2</sup> (10GeV)
Field-of-View	2 sr
Geometrical Factor	1100 cm <sup>2</sup> sr
Energy Resolution	3% (10 GeV)
Angular Resolution	0.35 ° (10GeV)
Pointing Accuracy	6'
Point Source Sensitivity	8 × 10 <sup>-9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Observation Period (planned)	2014-2019 (5 years)

## Simulation of Galactic Diffuse Radiation

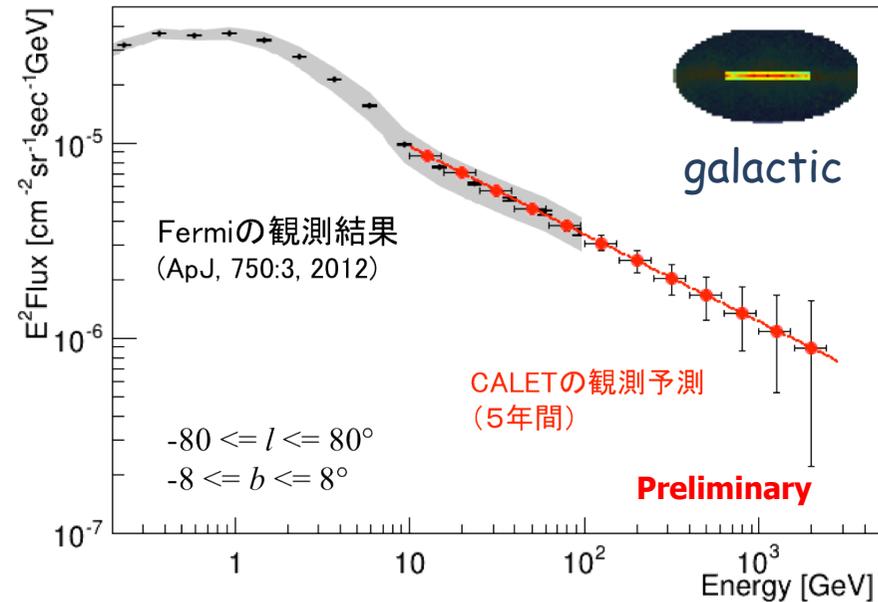
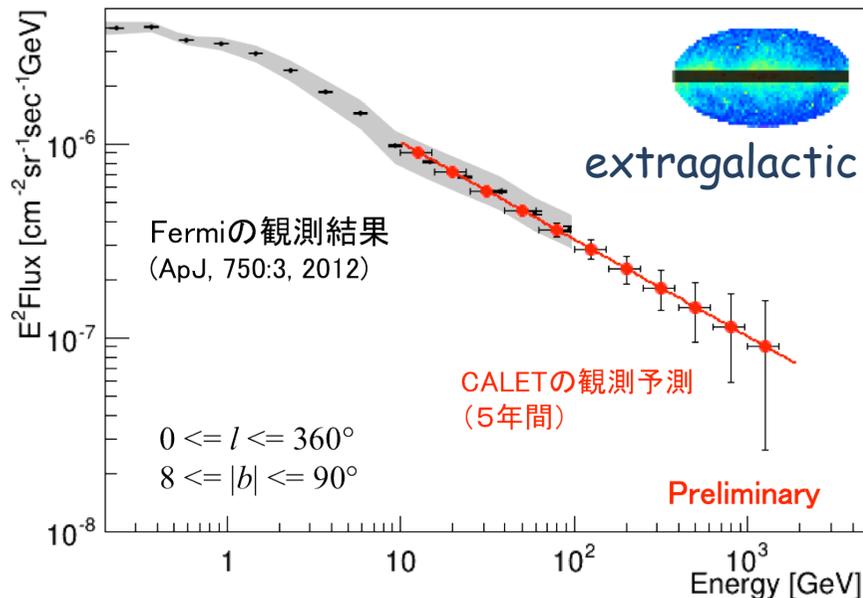


~25,000 photons are expected per one year



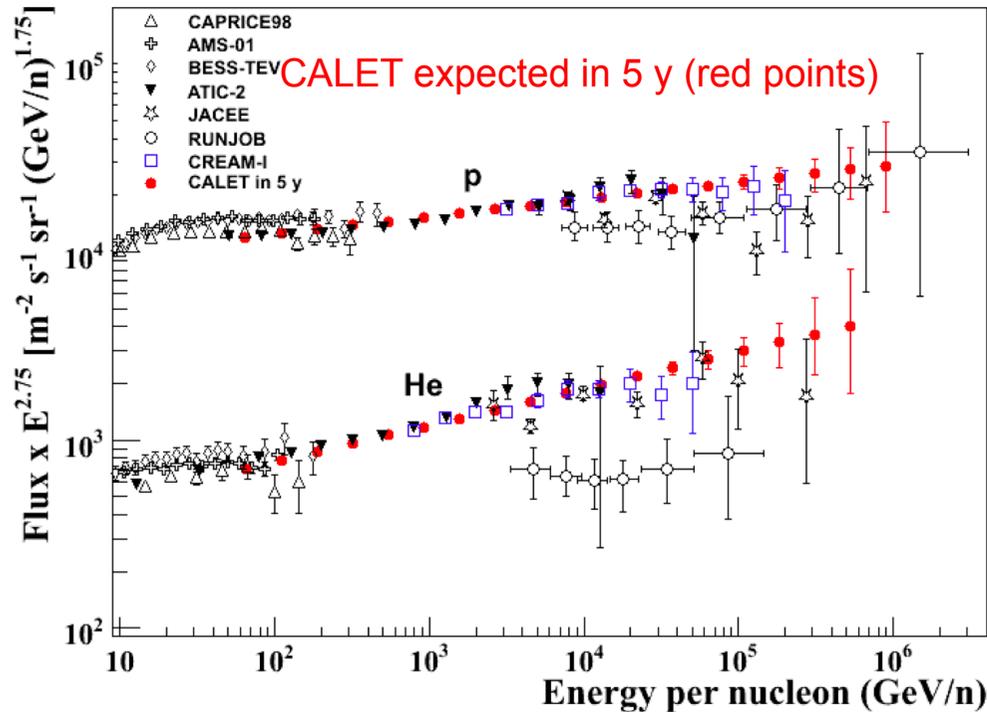
\*) ~7,000 photons from extragalactic  $\gamma$ -background (EGB) each year

## Expected flux of diffuse gamma-rays observations in five year





# P and He Observation



Energy reach in 5 years:

- Proton spectrum to  $\approx 900$  TeV
- He spectrum to  $\approx 400$  TeV/n

## Multi -TeV Region

- Proton and He **slopes** are different ?
- Single power law or **curvature**.
- Is there a **proton cutoff** below 1 PeV ?

## Requirements for calorimetry:

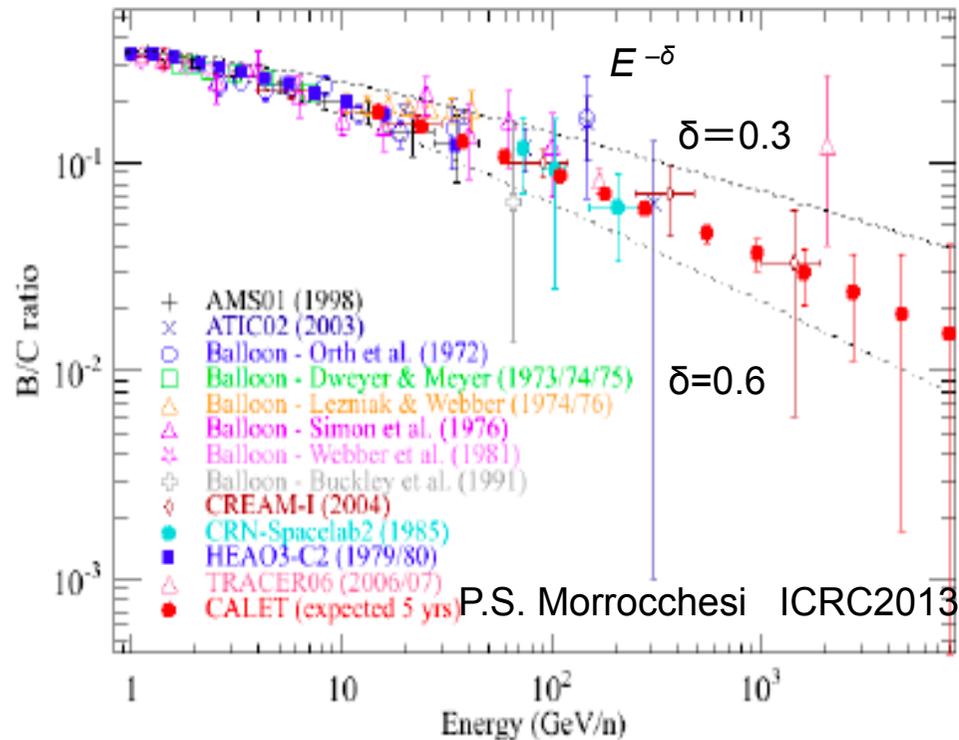
- **Proton** interaction requires  $> 0.5 \lambda_{INT}$
- Energy Measurement at 100 TeV scale requires confinement of the e.m. core of the shower, i.e.  $> 20 X_0$

	$\lambda_{INT}$	$X_0$ (nominal incidence)
<b>CALET</b>	<b>1.5</b>	<b>30</b>
CREAM	0.5+0.7	20
AMS-02	0.5	17



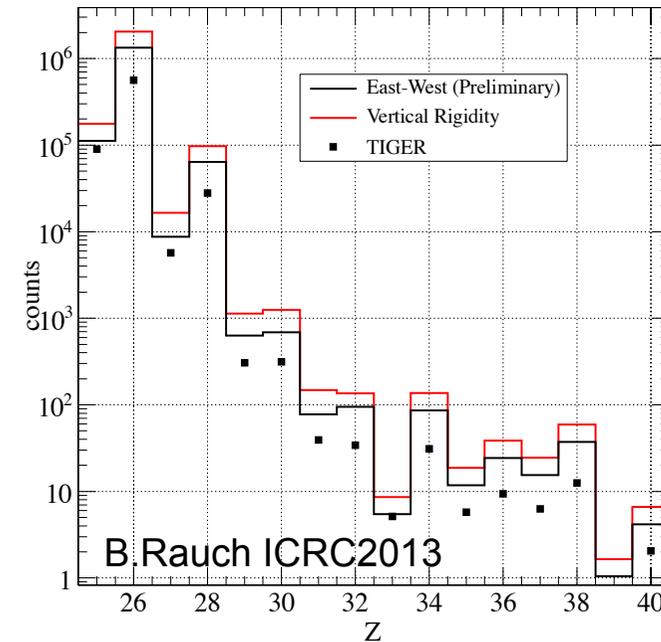
# Expected Measurements of B/C ratio and Ultra-heavy Particles

CALET expected in 5 y (red points)



CALET will measure the B/C ratio to over 1 TeC/nucleon and provide an exact value of the energy exponent  $\delta$  within an accuracy of  $\sim 0.05$

Ultra-heavy ( $Z > 26$ ) Particles



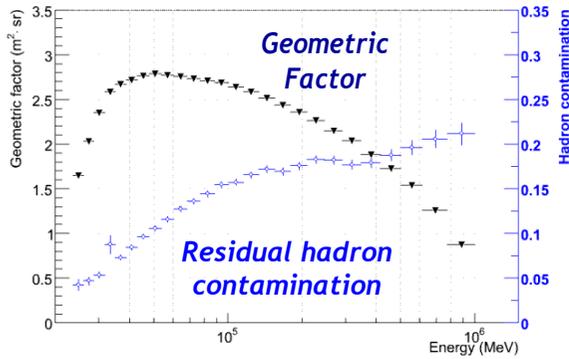
- CALET should obtain 2-4 $\times$  the statistics of TIGER in expected 5 year mission.
- Assumption that results for vertical cutoff rigidities represent average of East-West effect is not valid.
- CALET measurements in orbit will require less correction for nuclear interactions.

# Why we need CALET ?

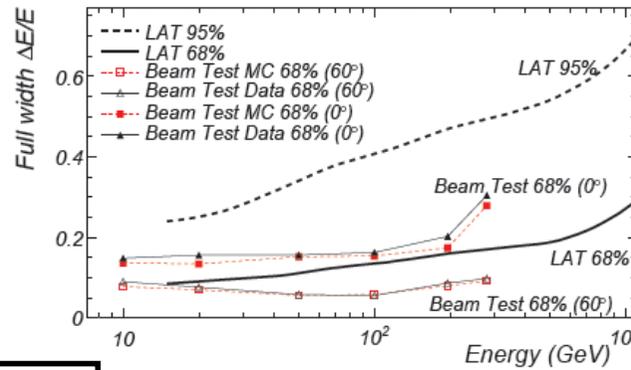
CALET is a dedicated detector for electrons and has a superior performance in the trans-TeV region as well as at the lower energies by using IMC and TASC

## FERMI Electron Analysis

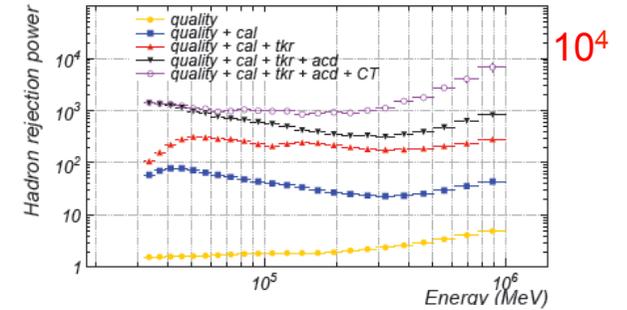
Geometric Factor depends strongly on energy



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



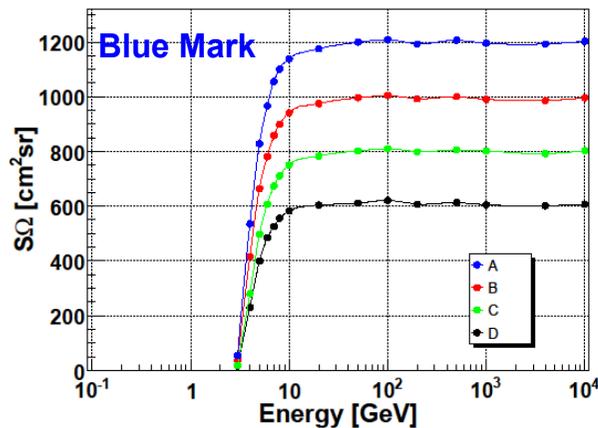
Proton rejection power depends fully on simulation by using different parameters



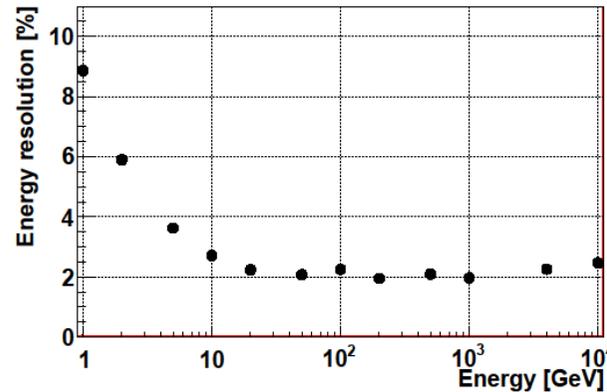
10⁴

## Expected CALET Performance

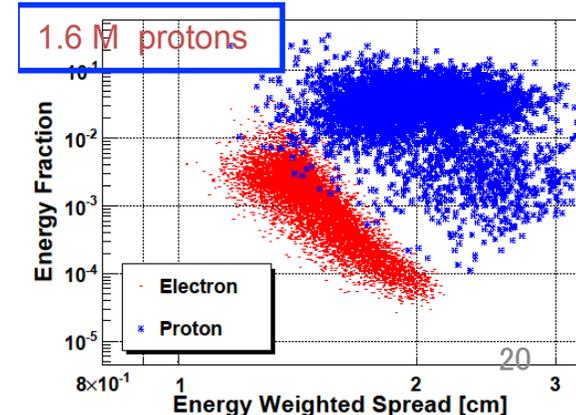
Geometric Factor is constant up to 10 TeV



Energy resolution is nearly 2 %, and constant over 10 GeV

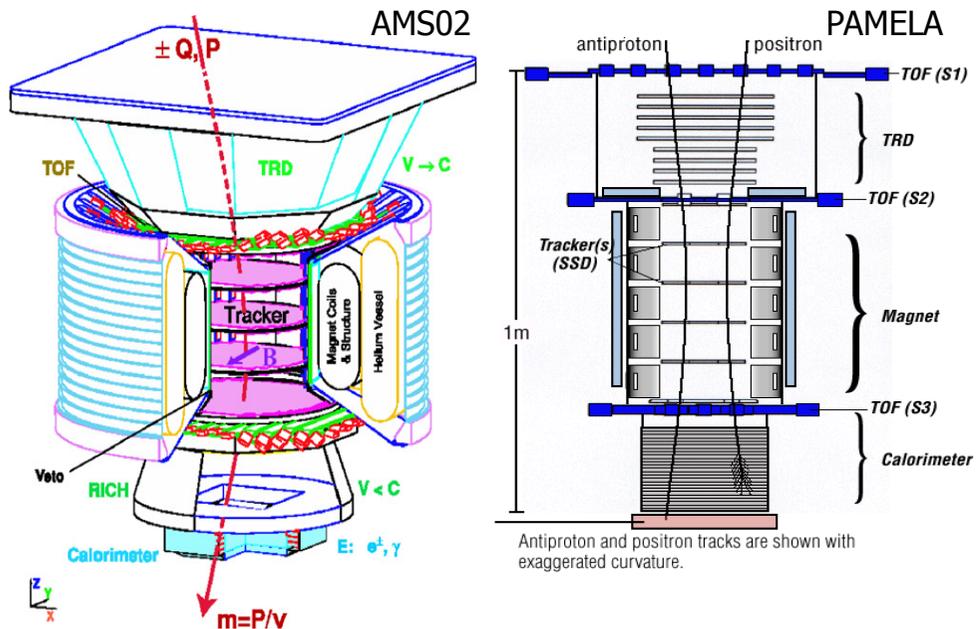


Proton rejection power at 4 TeV is better than 10⁵ with 95 % electron retained

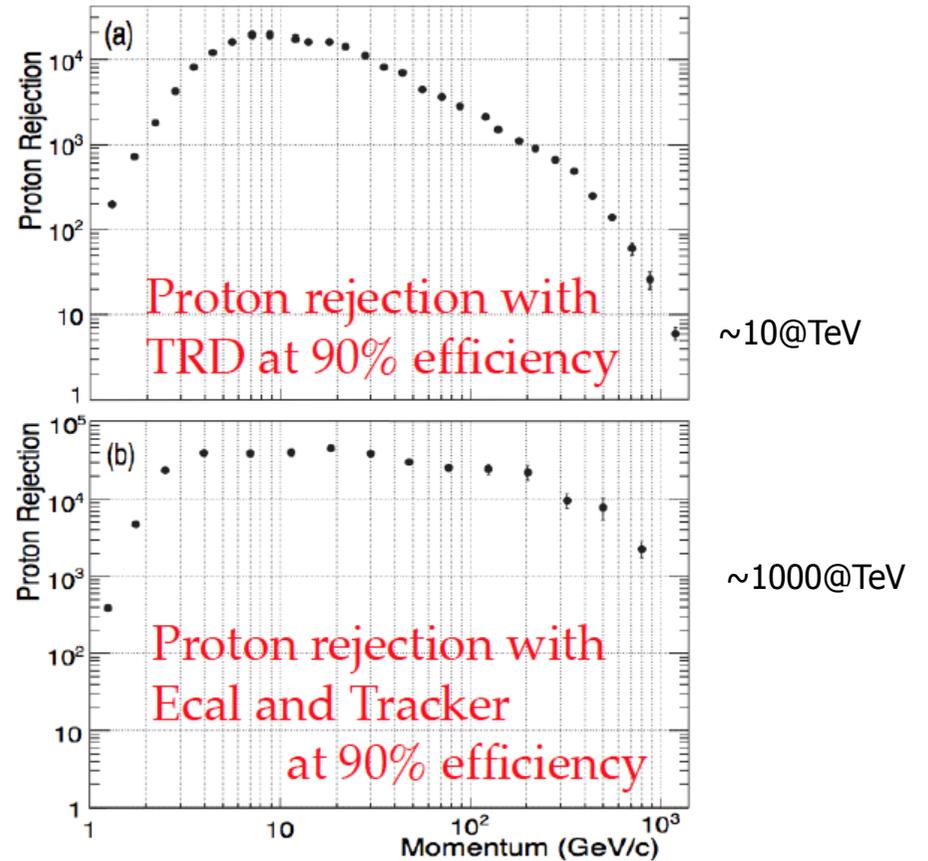


20

# General Capability of Magnet Spectrometer



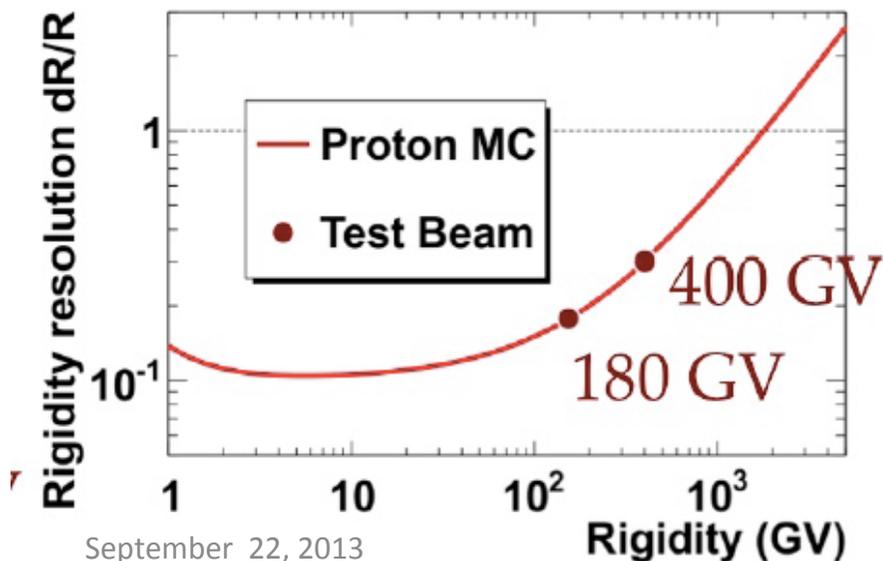
## Particle Identification with Additional Detectors: AMS-02



Maximum Detectable Momentum:  $\Delta p/p = 100\%$

$$P_{MDM} \sim 2 (0.3BL^2) / \Delta x$$

ex. AMS-02:  $P_{MDM} \sim 2 TV$



Geometrical Factor( $S\Omega$ ) for Full Performance  
 $4500 \text{ cm}^2@0.2TV \Rightarrow 300\text{cm}^2\text{sr}@2.0TV$

Magnet Spectrometer (ex. AMS-02) has an excellent performance at low energies. However, the capability is poor over TeV