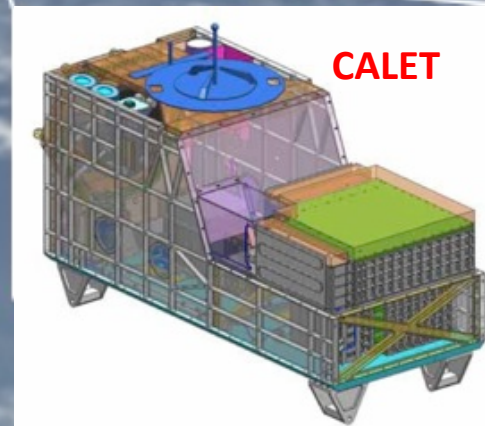
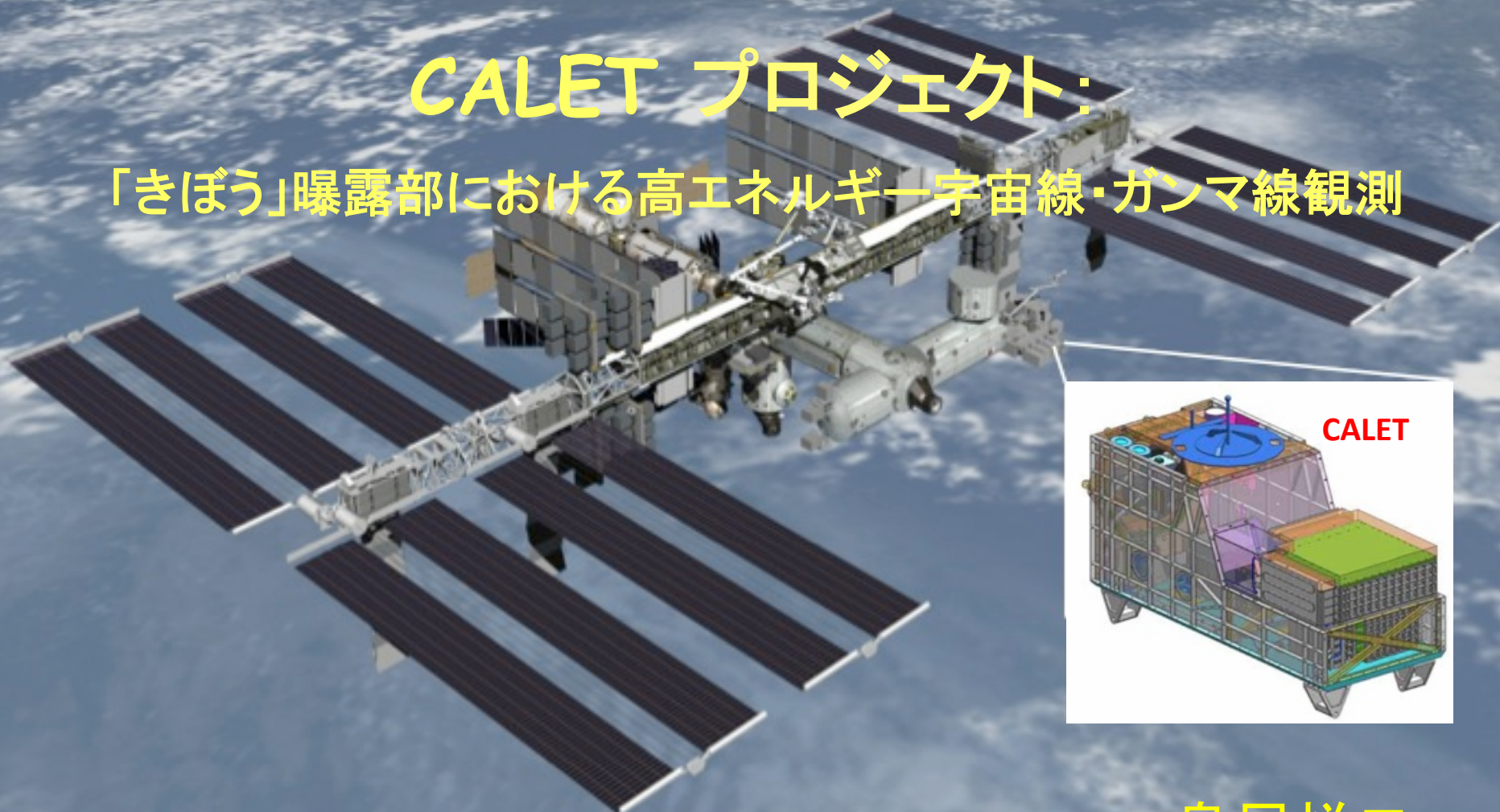




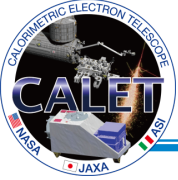
CALET プロジェクト:

「きぼう」曝露部における高エネルギー宇宙線・ガンマ線観測



鳥居祥二

早稲田大学理工研
他 CALETチーム



CALET 国際研究チーム



JAPAN

Waseda University
JAXA/Space Environment Utilization Center
JAXA/ Institute of Aerospace and Astronautical Sciences
Kanagawa University,
Aoyama Gakuin University
Shibaura Institute of Technology
Institute for Cosmic Ray Research , University of Tokyo
Yokohama National University
Hirosaki University
Tokyo Technology Inst.
National Inst. of Radiological Sciences
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
Kanagawa University of Human Services
Saitama University
Shinshu University
Nihon University
Ritsumeikan University



USA

NASA/GSFC
Louisiana State University
Washington University in St Louis
University of Denver



ITALY

University of Siena
University of Florence & IFAC (CNR)
University of Pisa
University of Roma Tor Vergata
University of Padova



JAXA/SEUC



Waseda University
supported also by
JSPS, MEXT



NASA



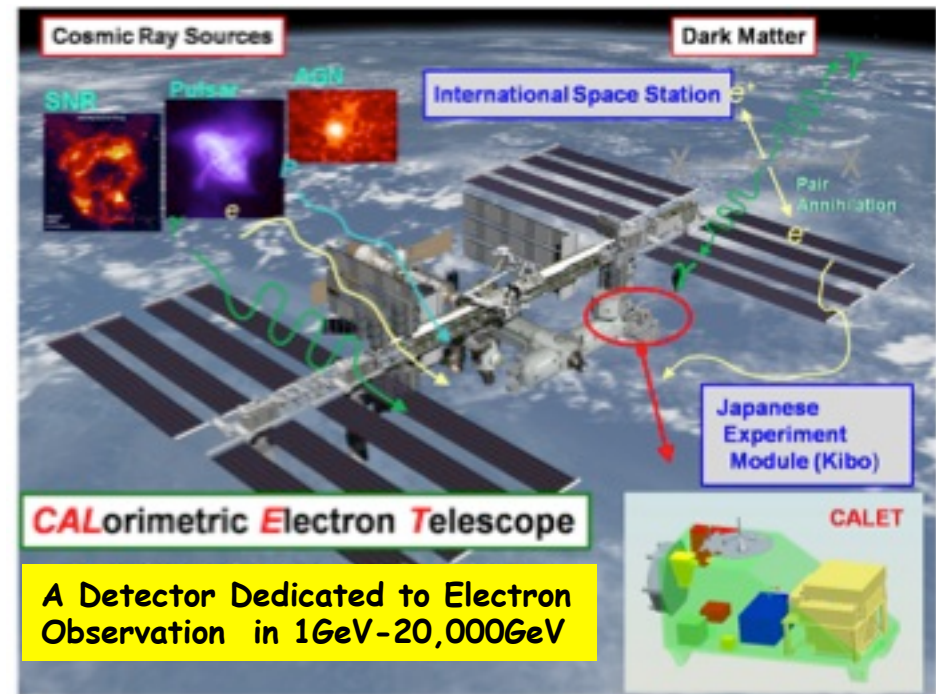
ASI

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
- 山岡和貴(ISAS/JAXA) 他 P2-031
- 硬X線: 3 keV – 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

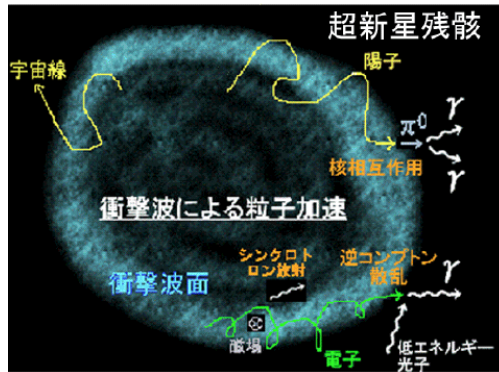
ガンマ線バーストの研究

3 keV – 30 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象

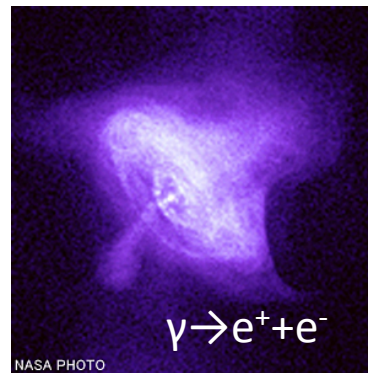
高エネルギー 電子(+陽電子)の加速と銀河内伝播

天体起源

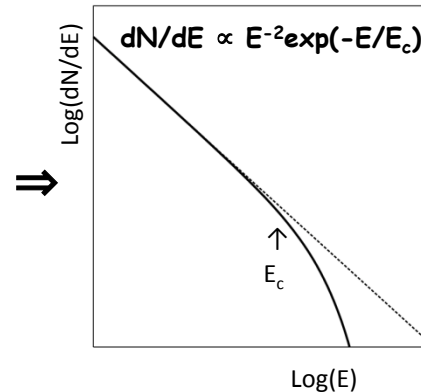
超新星残骸における衝撃波加速



パルサー風星雲での電子・陽電子生成

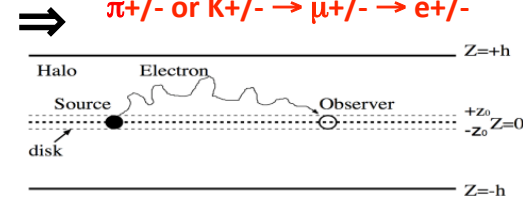


加速後のエネルギースペクトル
(幕型分布 + 高エネルギーカットオフ)

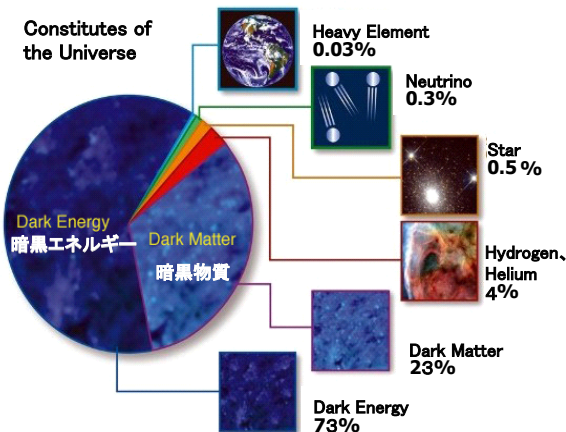


銀河内での伝播プロセス

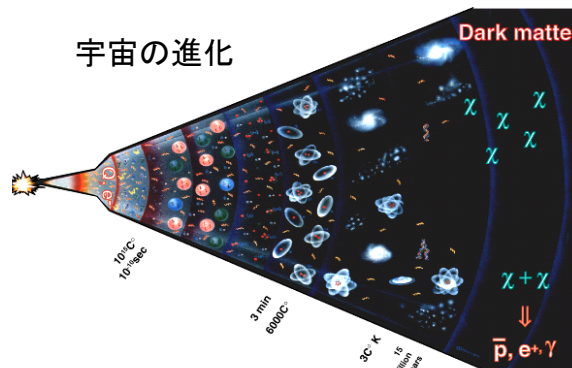
- 拡散過程 (銀河磁場)
- エネルギー損失
 $dE/dt = -bE^2$
 (シンクロトロン放射 + 逆コンプトン散乱)
- 荷電パイ中間子の崩壊による二次的な電子・陽電子生成
 $\pi^{+/-} \text{ or } K^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} \rightarrow e^{+/-}$



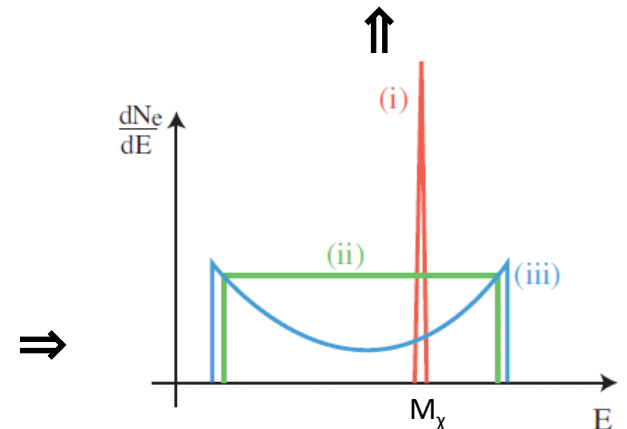
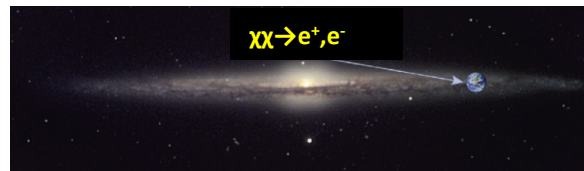
暗黒物質起源



宇宙の進化

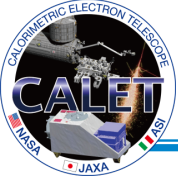


暗黒物質 (WIMP) の対消滅



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)

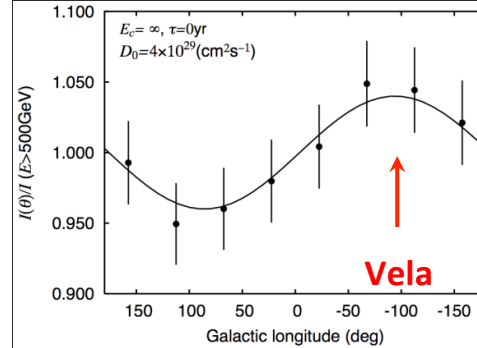
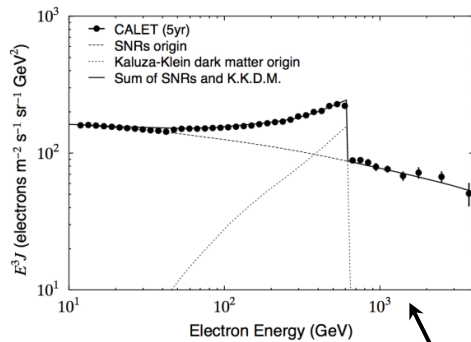


CALETによる電子(+陽電子)の観測

- 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

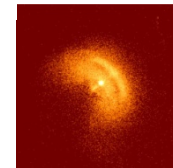
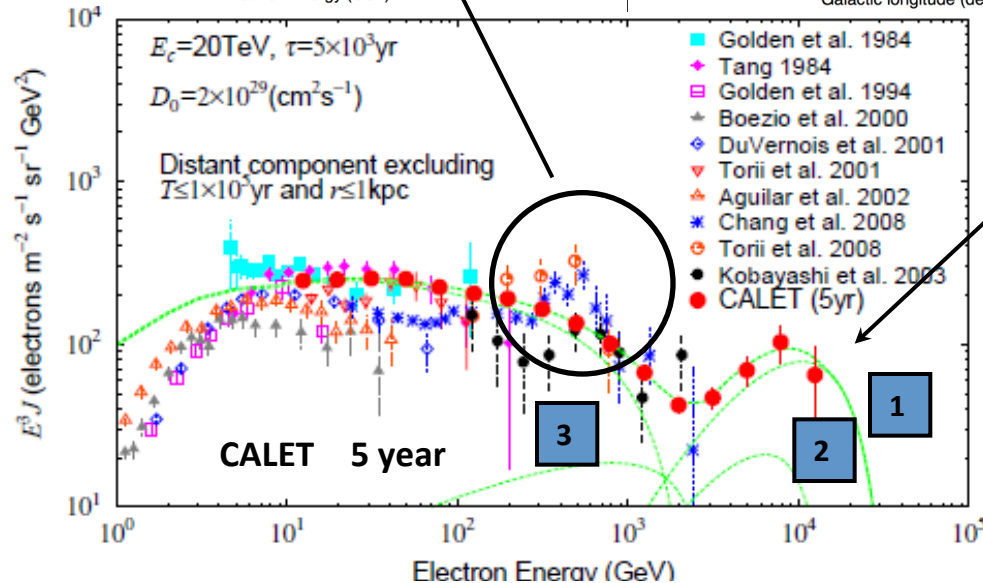


近傍ソース(超新星残骸等)

or
暗黒物質？

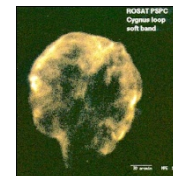
近傍ソースの候補

- 時間 < 10^5 years
- 距離 < 1 kpc



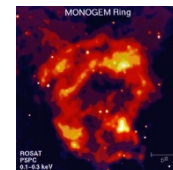
Vela
10,000 years
820 ly

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. $\rightarrow l^+l^-\nu$

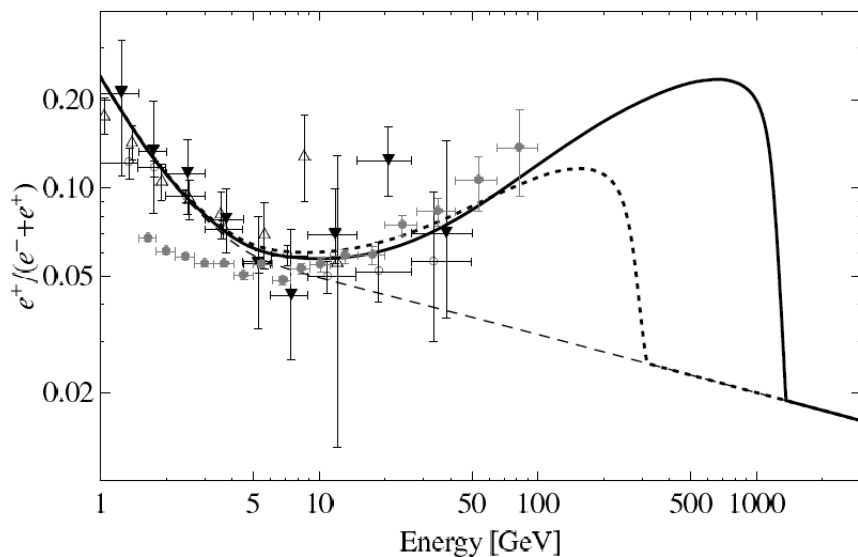
Mass: $M_{\text{D.M.}} = 2.5 \text{ TeV}$

Decay Time: $\tau_{\text{D.M.}} = 2.1 \times 10^{26} \text{ s}$

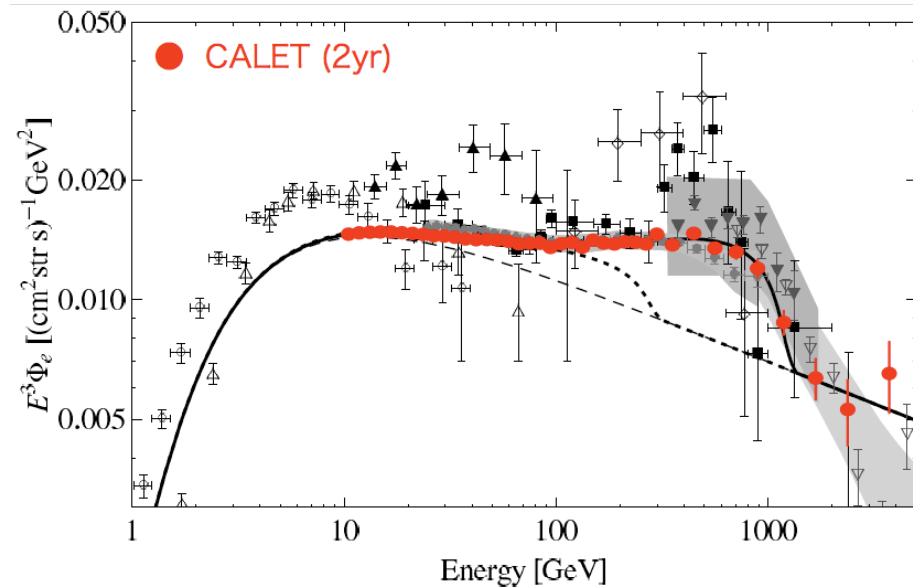


モデル計算によるCALETにおける電子・陽電子の観測予測とこれまでの観測結果

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)



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

銀河系外拡散ガンマ線による暗黒物質探索

暗黒物質の崩壊モデル

Decay Mode: $D.M. \rightarrow l^+l^- \nu$

Mass: $M_{D.M.} = 2.5 \text{ TeV}$

Decay Time: $\tau_{D.M.} = 2.1 \times 10^{26} \text{ s}$



銀河系外拡散ガンマ線成分

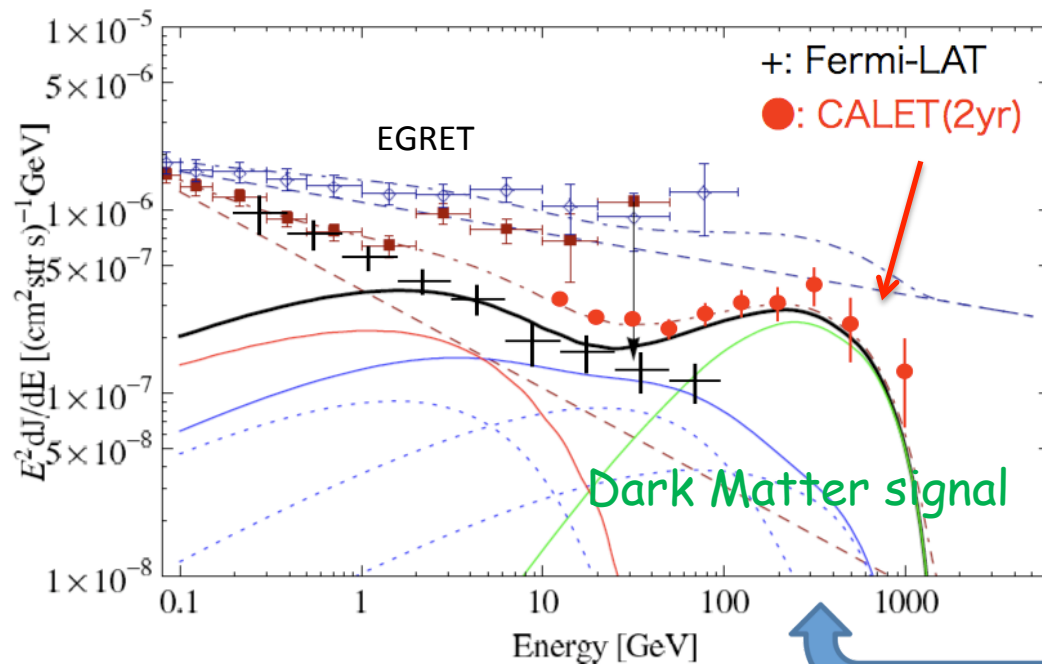
銀河系外背景ガンマ線

+

暗黒物質の崩壊等により生成される
電子・陽電子の逆コンプトン散乱による
ガンマ線

+

暗黒物質の対消滅や崩壊で直接生
成されるガンマ線



100 GeV-TeV領域でのガンマ線観測



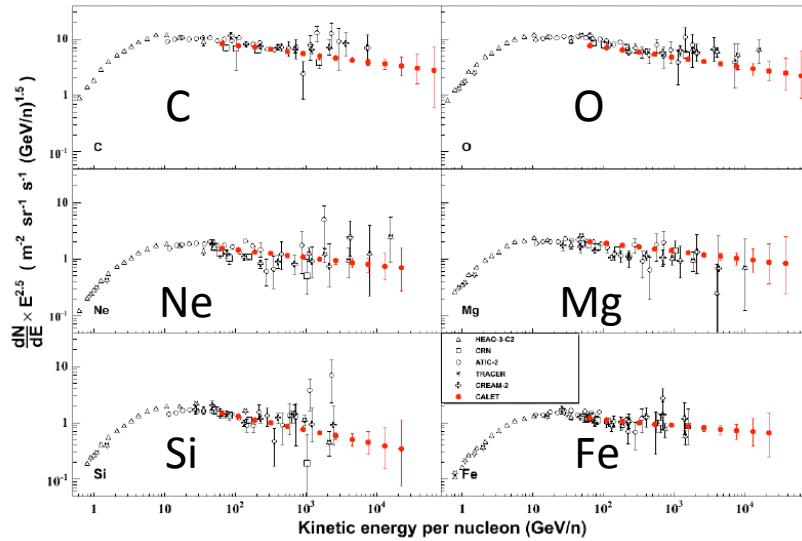
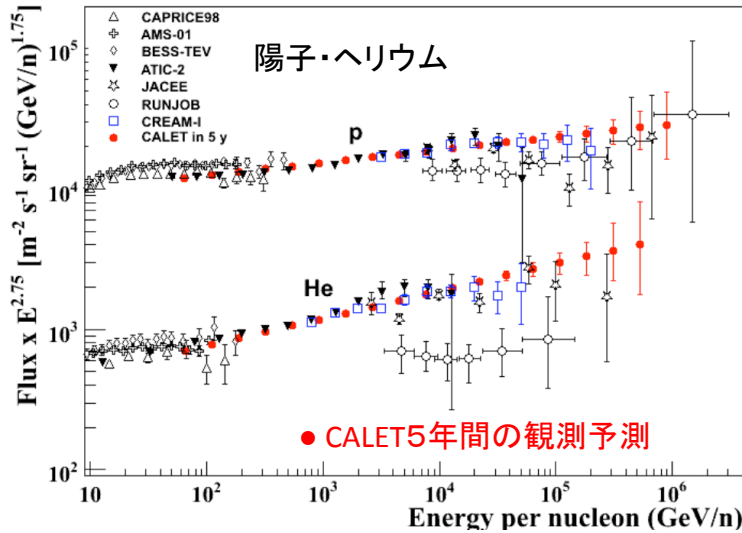
Ibarra et al. (2010)

陽子・原子核成分の観測

原子核毎のエネルギースペクトル

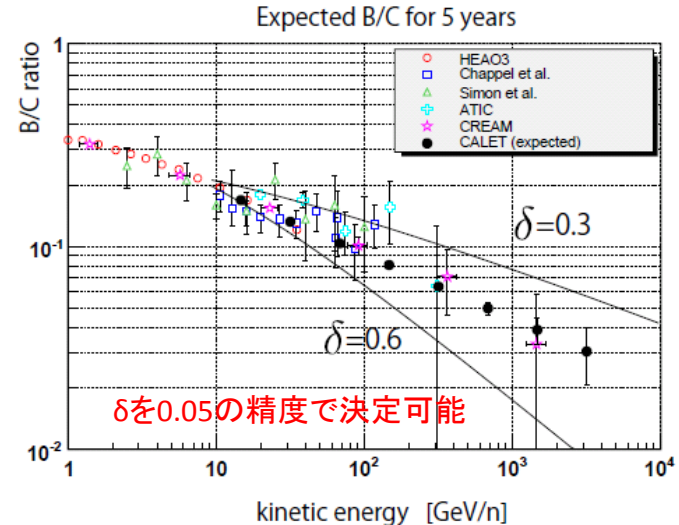
標準モデル(衝撃波加速+拡散過程)の定量的検証

- 最大加速エネルギーの電荷(Z)依存性: $E_{\max} \sim 100 \times Z(\text{TeV})$
- 冪形スペクトルの(変化の)高精度測定

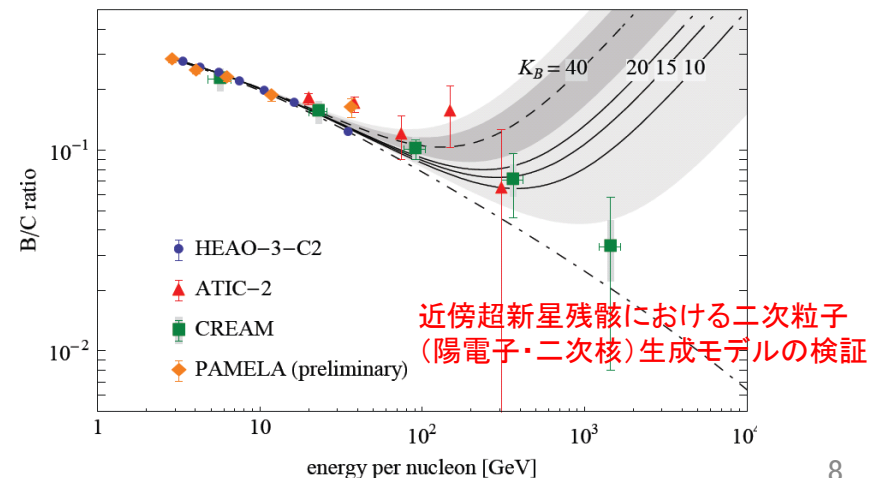


2次核/1次核 比 (B/C)

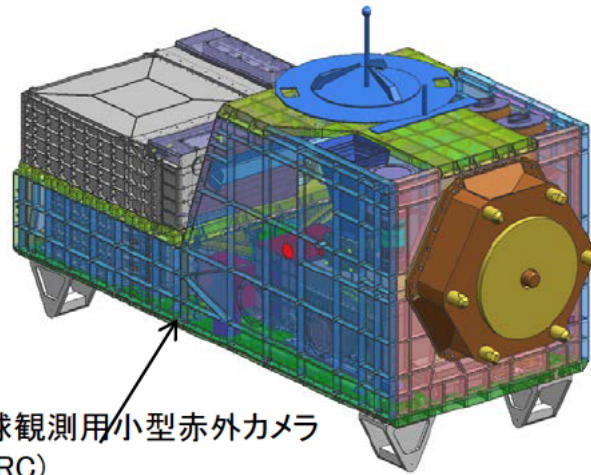
- 拡散係数のエネルギー依存性: $D \sim E^\delta$
- 残留大気の影響を受けない観測が数TeV/nまで可能



陽電子が近傍の超新星残骸で生成されるとするモデル(Ahlers, et al. 0909.4060)では、B/Cが100GeV以上で増大する



<ガンマ線バーストモニタ(CGBM)>



軟ガンマ線モニタ(SGM)
硬X線モニタ(HXM)

スターセンサ(ASC)

地球観測用小型赤外カメラ
(CIRC)

GPS受信機(GPSR)

電荷測定器(CHD)

イメージングカロリ
メータ(IMC)

全吸収型カロリメ
ータ(TASC)

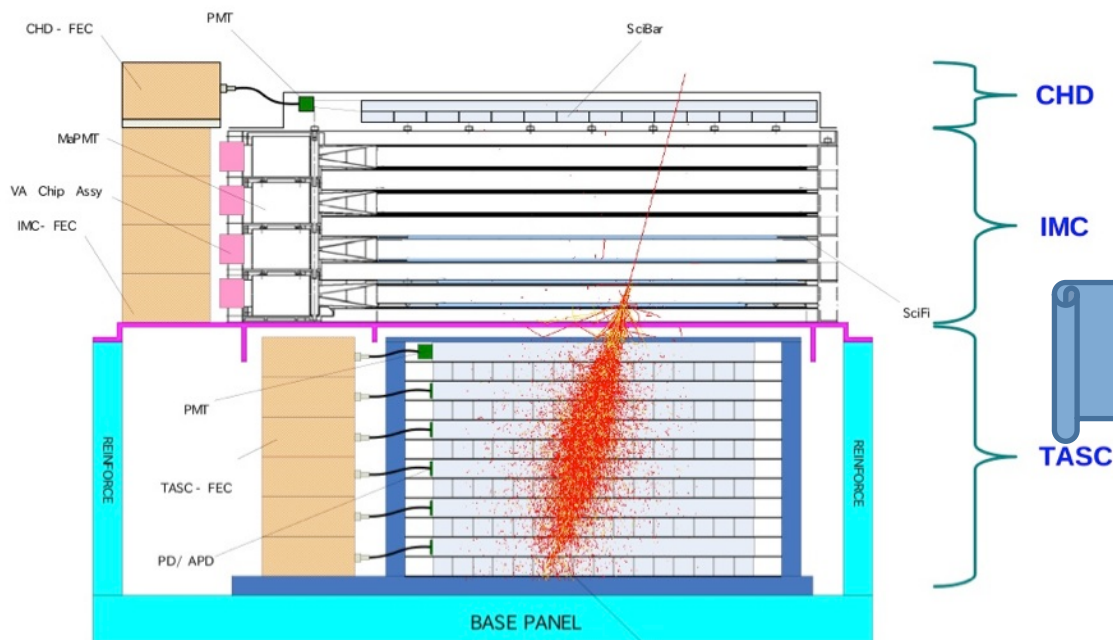
<カロリメータ(CAL)>

項目	仕様
ミッション機器	カロリメータ(CAL) ガンマ線バーストモニタ(CGBM)
打上げ	HTV5 (HTV運用4号機)
打上げ時期	2014年度夏期
設計寿命	2年以上 5年目標
質量	650 [kg]以下
エンベロープ	標準ペイロードサイズ
電力	650 [W]以下
通信量	中速データ 300 [kbps]以下 低速データ 20 [kbps]以下

ミッションデータ処理回路
(MDC)

高電圧電源配電箱
(HV-BOX)

カロリメータ概要



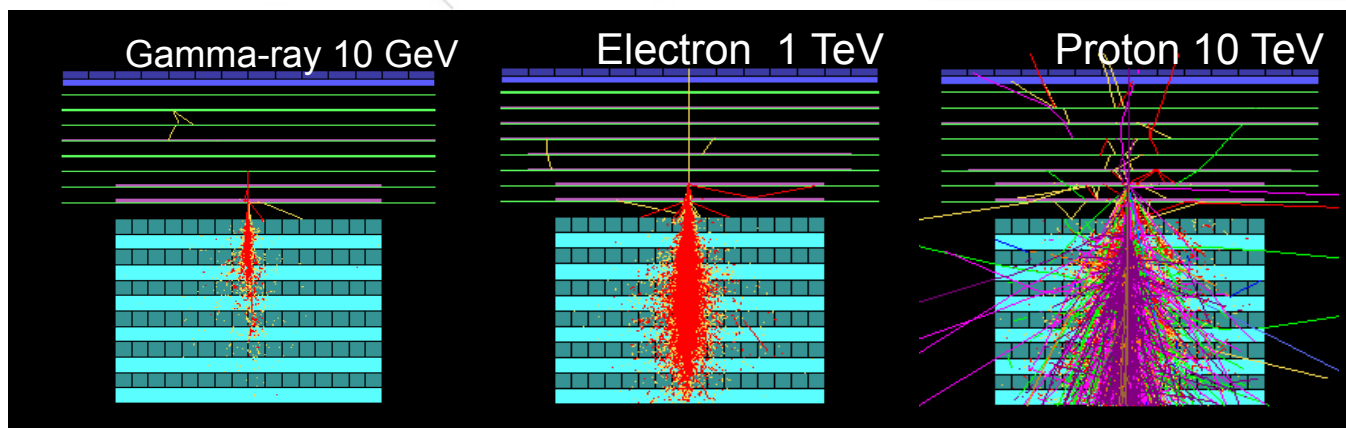
Expected Performance

(from Simulations and/or Beam Tests)

- $S\Omega$:
1200 cm^2sr for electrons
1000 cm^2sr for gamma-rays

仁井田多絵(早大)他 P2-030
小澤俊介(早大)他 P2-032

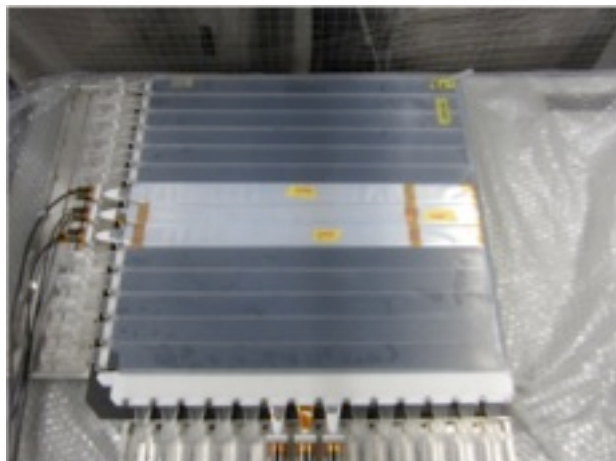
- $\Delta E/E$:
e/p separation : 10^{-5}
Charge resolution : 0.15-0.3 e
Angular resolution :
0.21-0.35 deg. for γ -rays(>10GeV)



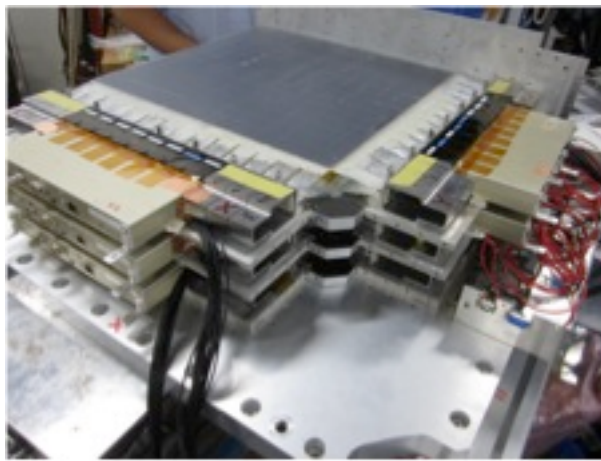
- Proton rejection power $\sim 10^5$ can be achieved by shower imaging with the IMC and TASC.
- CHD determines the charge of incident particles to $\Delta Z=0.15-0.3$.

熱構造モデル+前置回路BBMを用いたCERN-SPSによるビーム実験(1)

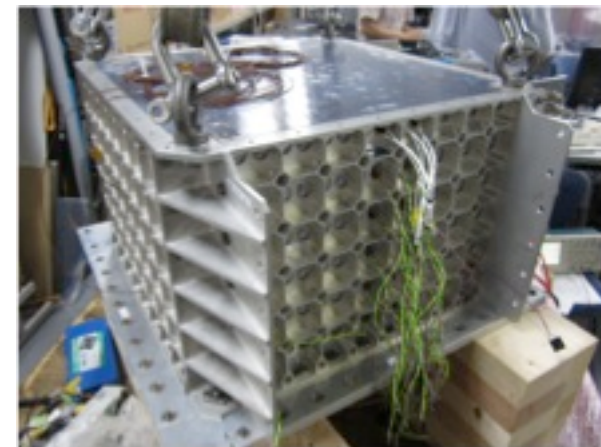
CHD



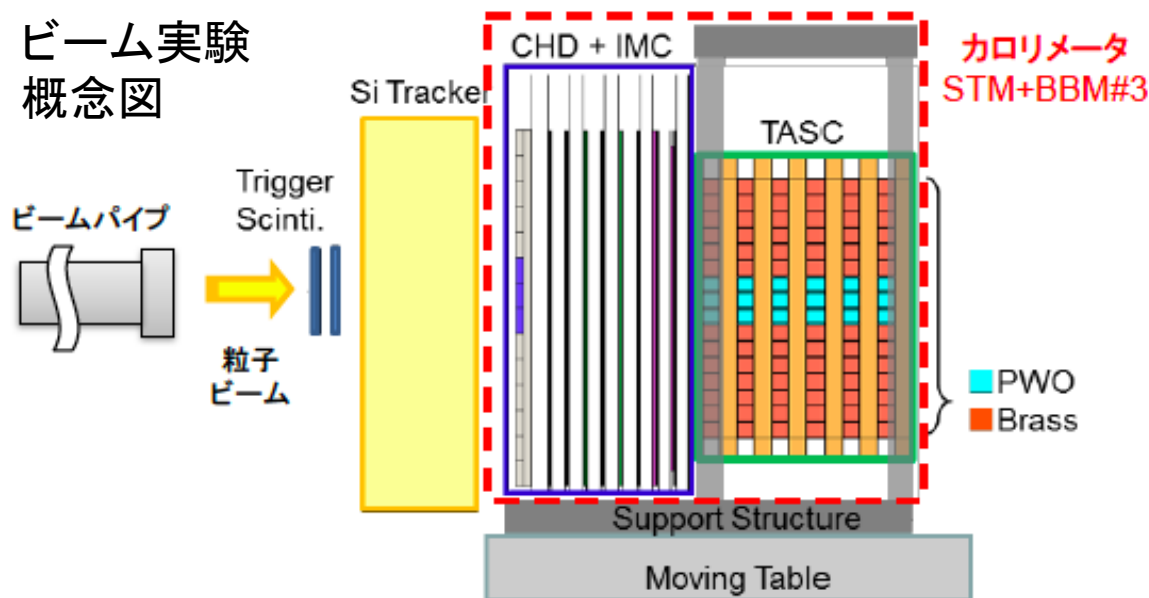
IMC



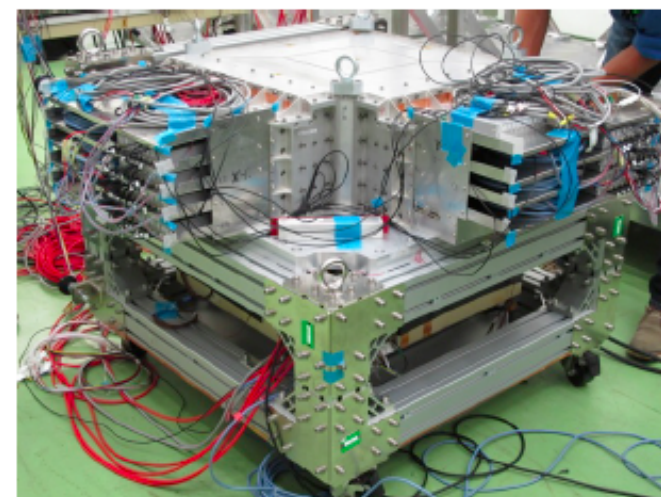
TASC



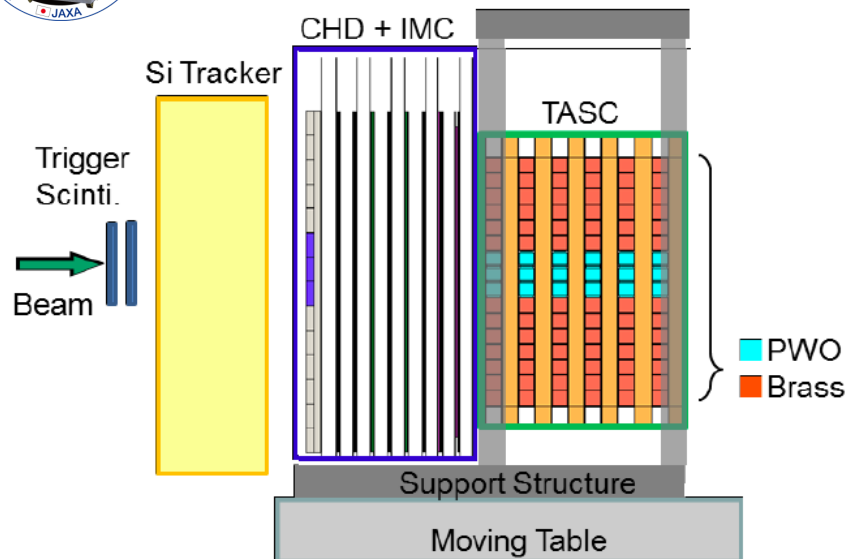
ビーム実験 概念図



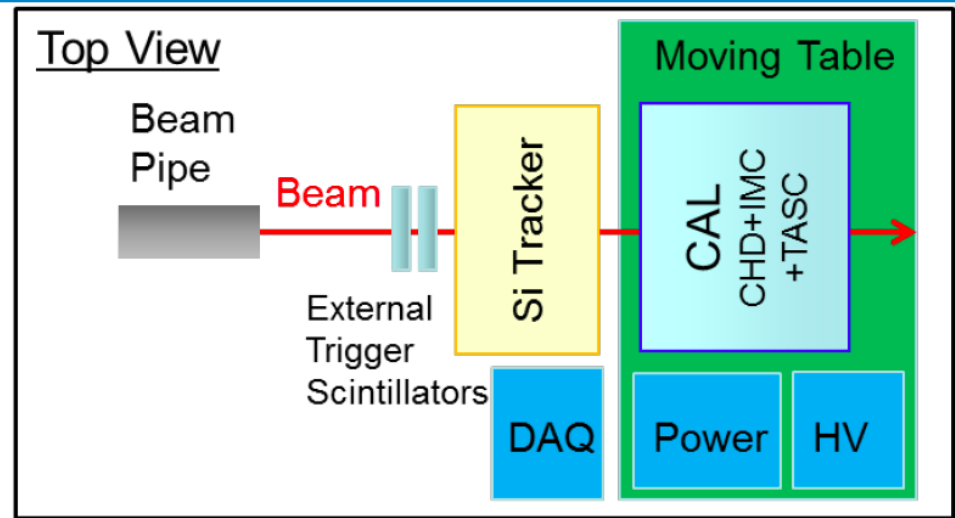
装置全体構造



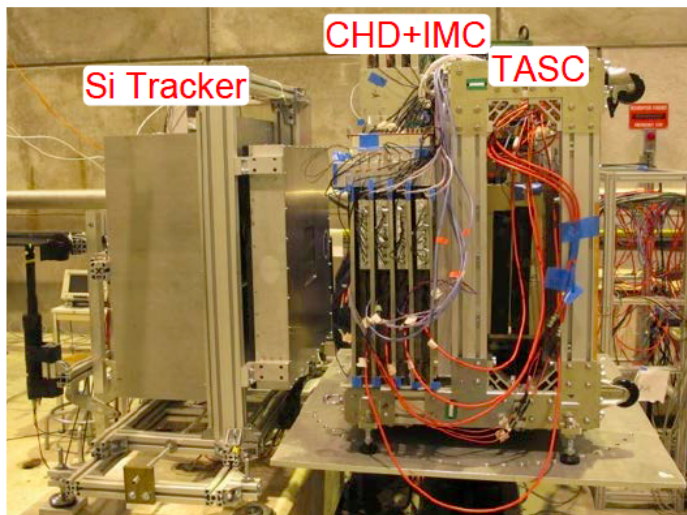
熱構造モデル+前置回路BBMを用いたCERN-SPSによるビーム実験(2)



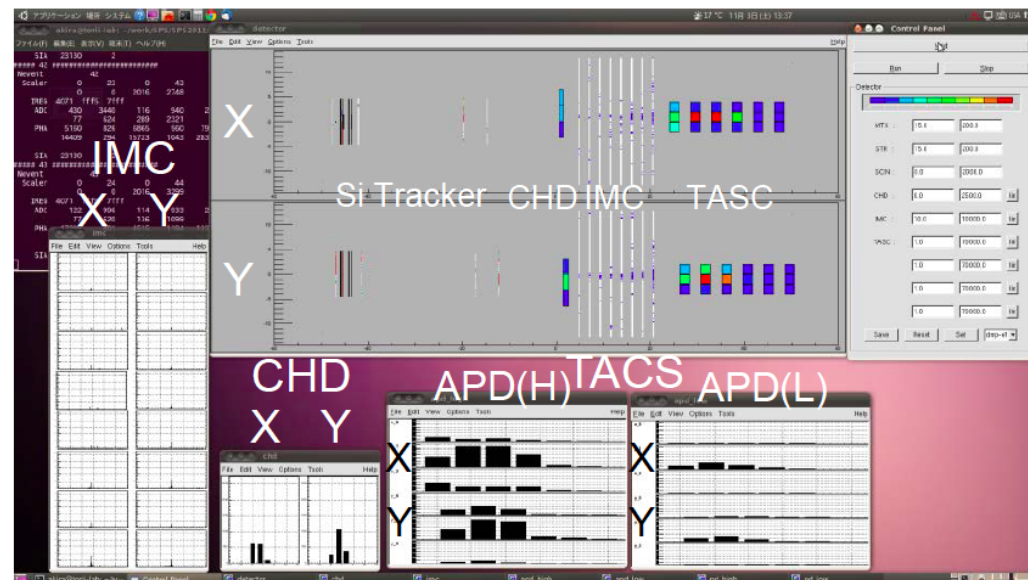
(a) 供試体概略図



(c) ビームラインでのセットアップ概略図



(b) 供試体(ビームラインへの設置)



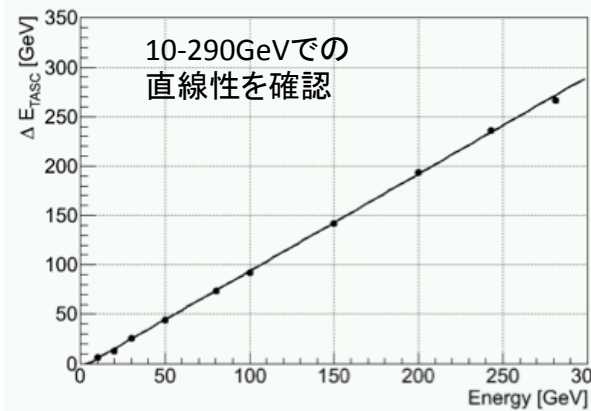
(d) オンラインモニタ (電子290 GeV/c の例)

ビーム実験の結果 (Preliminary)

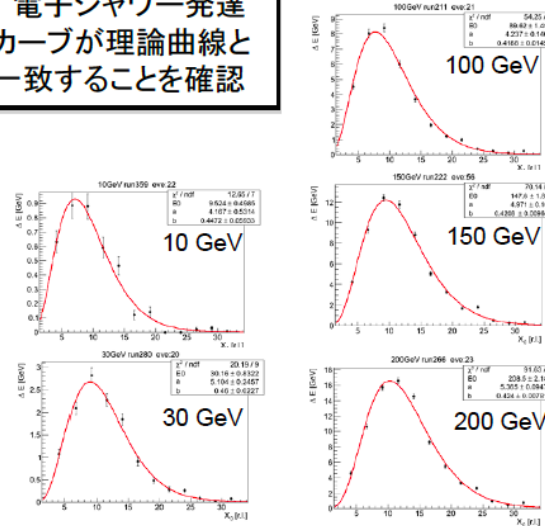
ミュー粒子: 150 GeV, 180 GeV 電子: 10-290 GeV 陽子: 30-400 GeV

黒線(点): 実験値
赤線: シミュレーション

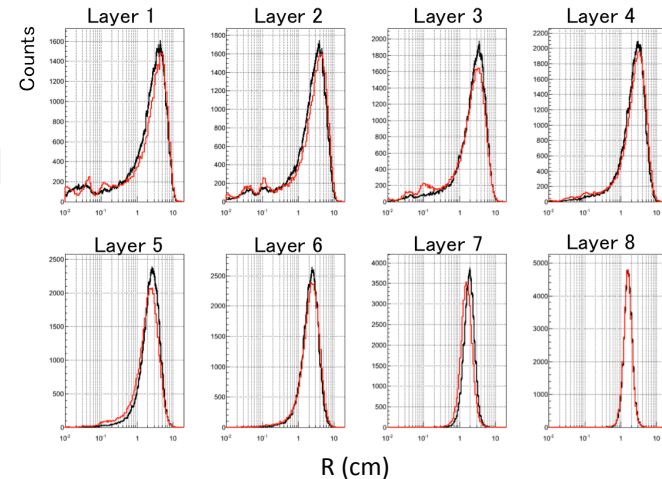
電子入射エネルギーとTASCにおけるエネルギー付与(ΔE_{TASC})の相関



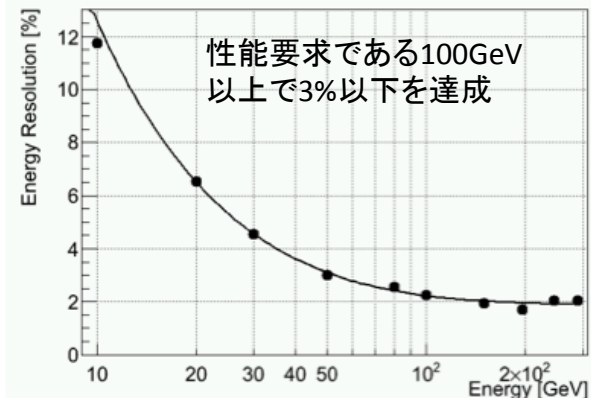
電子シャワー発達カーブが理論曲線と一致することを確認



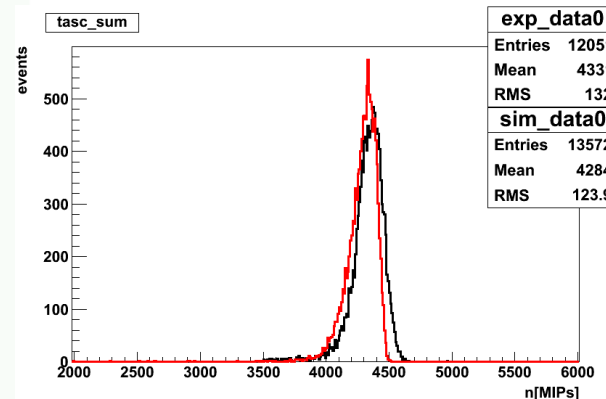
IMC各層における横広がり(電子290 GeV)



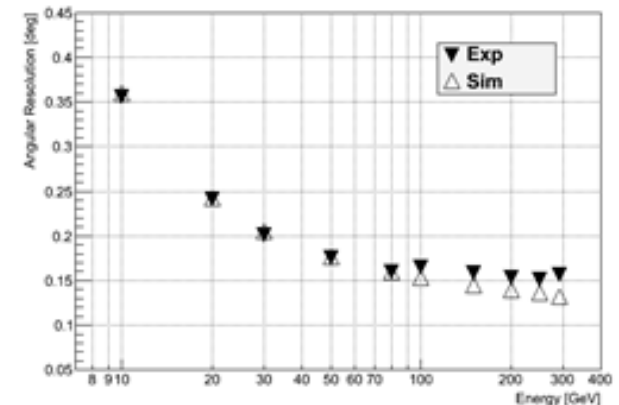
電子におけるエネルギー分解能



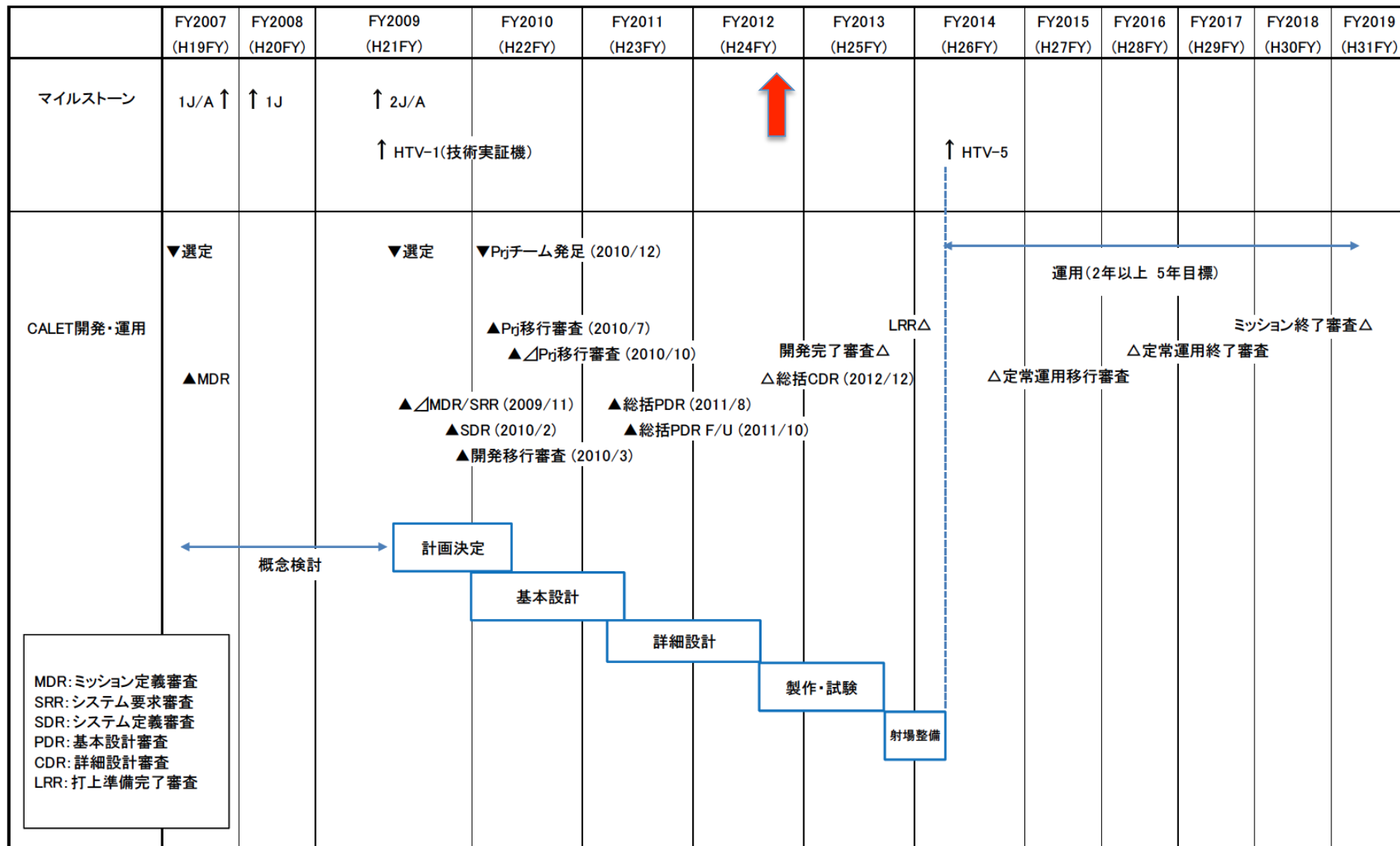
TASCにおける観測粒子数の総和(電子100 GeV)



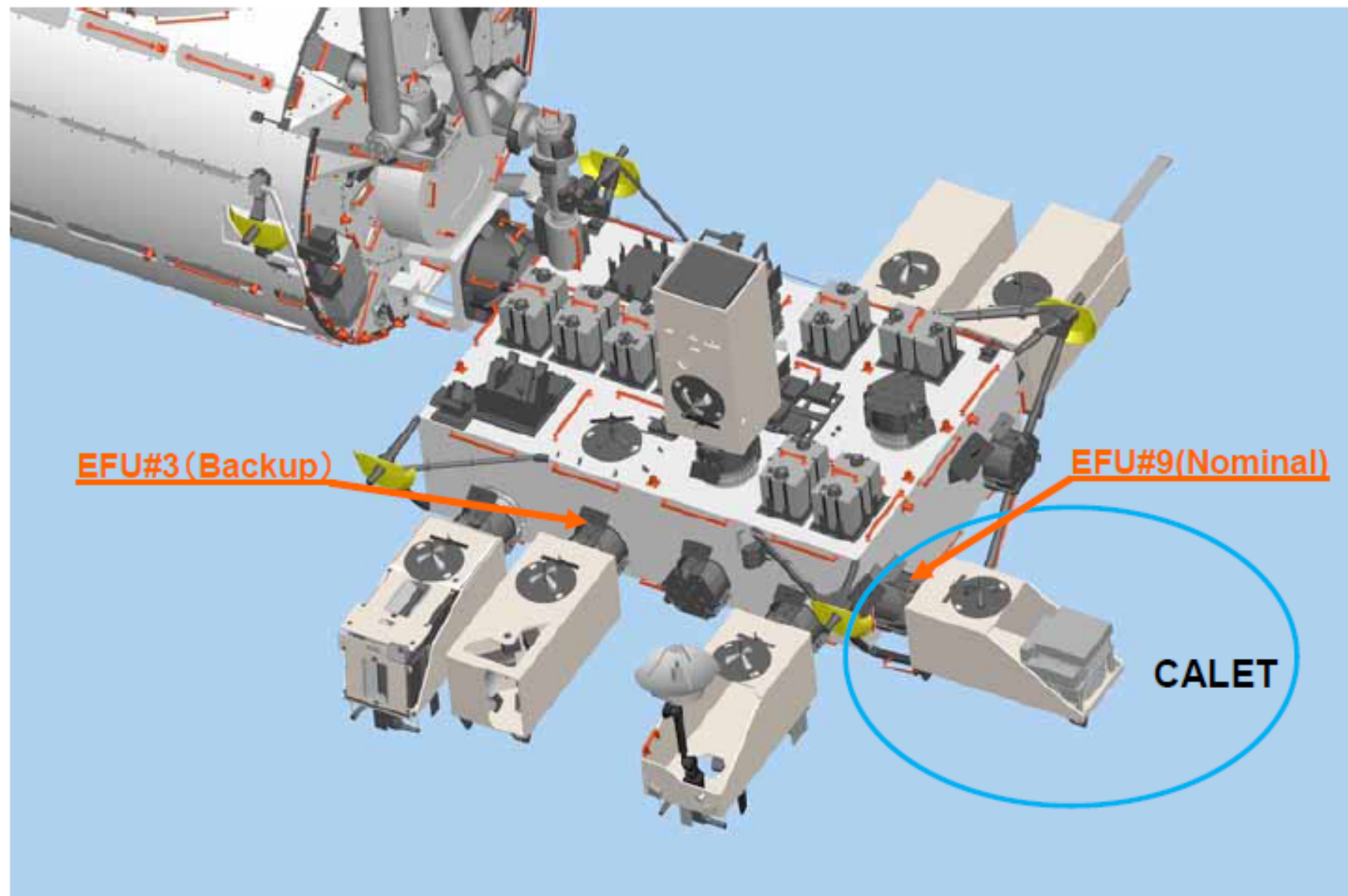
電子の角度分解能のエネルギー依存性



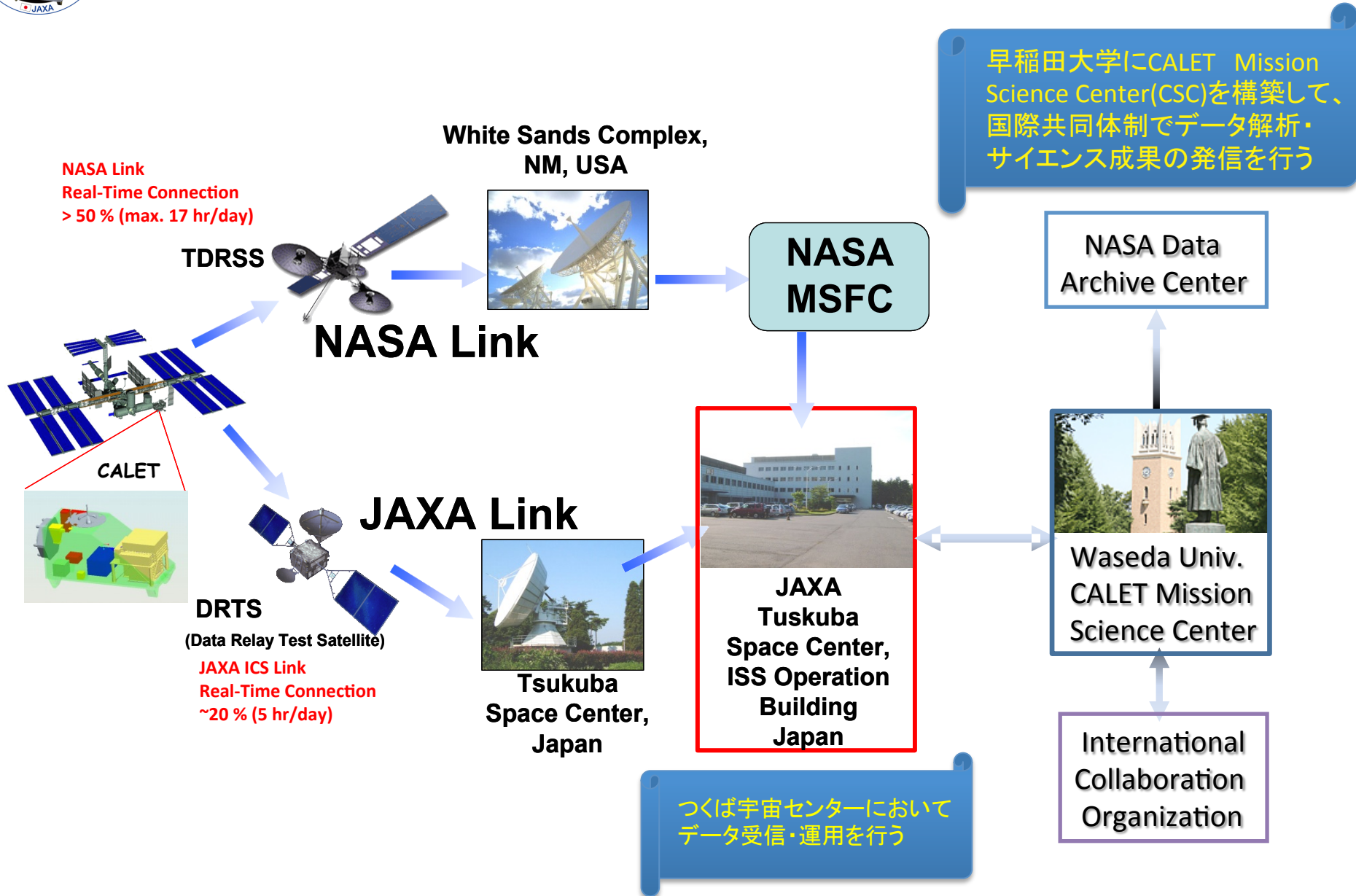
全体スケジュール



JEM船外実験プラットフォームにおけるCALETの設置概念図 (2014年にHTV5で打ち上げた時点での予定)



データダウンリンクとCALETデータ解析



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は日本で初めての宇宙空間における本格的宇宙線観測プロジェクトであり、2014年の打ち上げ後5年間の観測により、これまで実現できなかった高精度、高統計な宇宙線観測を目指している。
- CALETは、JAXA有人宇宙環境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JAXAプロジェクトであり、宇宙科学研究所の支援を受けている。
- 米国NASAからISSにおける協力としてCALETミッション支援の予算(APRA)が承認されており、イタリアASIとも高圧電源の供給を含む共同研究の枠組みが構築されている。
- 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。

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: $m^2 sr$ x 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: リンゲ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

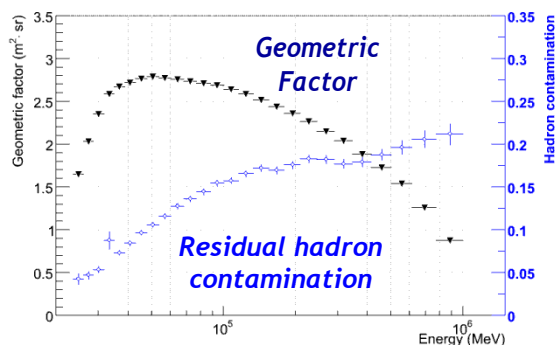
**) 観測規模が大きいほど観測粒子数は増えるが、これまでの観測装置(PAMELA, FERMI, AMS) はエネルギーの測定限界のため、1000 ギガ電子ボルトを上回る測定はできない。

Why we need CALET ?

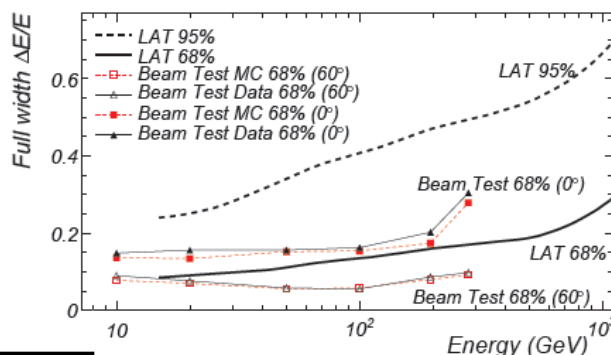
CALET is a dedicated detector for electrons and has a superior performance in the trans-TeV region as well as at the lower energies by using IMC and TASC

FERMI Electron Analysis

Geometric Factor depends strongly on energy

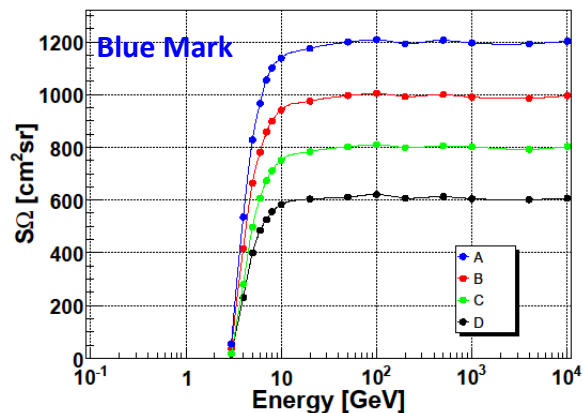


Energy resolution becomes worse at high energies (~30 % @ 1 TeV)

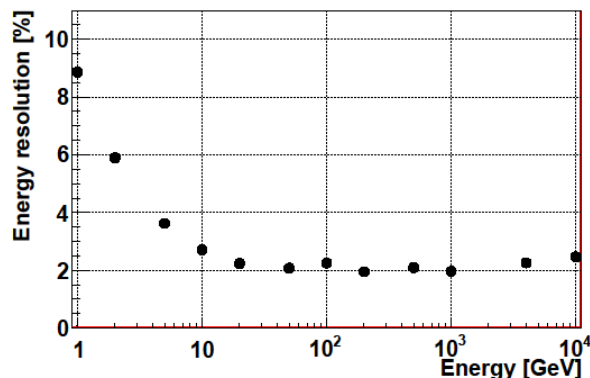


Expected CALET Performance

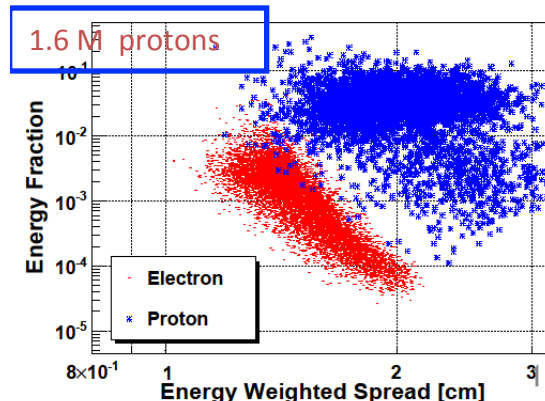
Geometric Factor is constant up to 10 TeV



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



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



Proton rejection power depends fully on simulation by using different parameters

