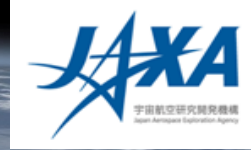




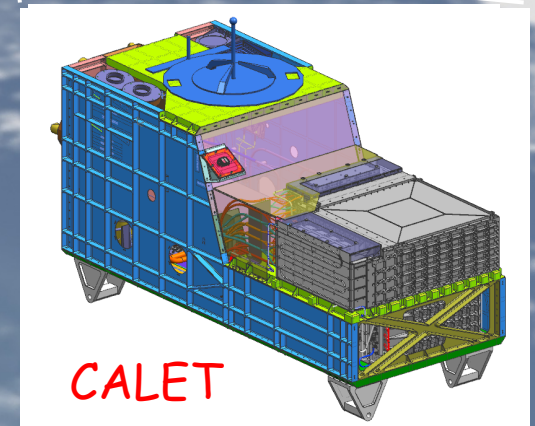
CALorimetric Electron Telescope



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

研究代表者： 鳥居祥二

早稲田大学 理工研 & 先進理工物理
JAXA 宇宙環境利用センター



CALET Collaboration

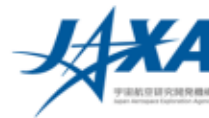


O. Adriani¹⁹, Y. Akaike³, K. Asano¹⁷, Y. Asaoka²³, M.G. Bagliesi²², G. Bigongiari²², W.R. Binns²⁴, S. Bonechi²², M. Bongi¹⁹, J.H. Buckley²⁴, A. Cassese¹⁹, G. Castellini¹⁹, M.L. Cherry⁹, G. Collazuol²⁶, K. Ebisawa⁵, V. Di Felice²¹, H. Fuke⁵, T.G. Guzik⁹, T. Hams³⁰, N. Hasebe²³, M. Hareyama⁶, K. Hibino⁷, M. Ichimura², K. Ioka⁸, M.H. Israel²⁴, A. Javid⁹, E. Kamioka¹⁵, K. Kasahara²³, Y. Katayose²⁵, J. Kataoka²³, R. Kataoka³², N. Kawanaka³³, H. Kitamura¹¹, T. Kotani²³, H.S. Krawczynski²⁴, J.F. Krizmanic³¹, A. Kubota¹⁵, S. Kuramata², T. Lomtadze²⁰, P. Maestro²², L. Marcelli²¹, P.S. Marrocchesi²², J.W. Mitchell¹⁰, S. Miyake²⁸, K. Mizutani¹⁴, A.A. Moiseev³⁰, K. Mori^{5,23}, M. Mori¹³, N. Mori¹⁹, H.M. Motz²³, K. Munakata¹⁶, H. Murakami²³, Y.E. Nakagawa⁵, S. Nakahira⁵, J. Nishimura⁵, S. Okuno⁷, J.F. Ormes¹⁸, S. Ozawa²³, F. Palma²¹, P. Papini¹⁹, B.F. Rauch²⁴, S. Ricciarini¹⁹, T. Sakamoto¹, M. Sasaki³⁰, M. Shibata²⁵, Y. Shimizu⁴, A. Shiomi¹², R. Sparvoli²¹, P. Spillantini¹⁹, I. Takahashi¹, M. Takayanagi⁵, M. Takita³, T. Tamura^{4,7}, N. Tateyama⁷, T. Terasawa³, H. Tomida⁵, S. Torii^{4,23}, Y. Tunesada¹⁷, Y. Uchihori¹¹, S. Ueno⁵, E. Vannuccini¹⁹, J.P. Wefel⁹, K. Yamaoka²⁹, S. Yanagita²⁷, A. Yoshida¹, K. Yoshida¹⁵, and T. Yuda³

- 1) Aoyama Gakuin University, Japan
- 2) Hirosaki University, Japan
- 3) ICRR, University of Tokyo, Japan
- 4) JAXA/SEUC, Japan
- 5) JAXA/ISAS, Japan
- 6) St. Marianna University School of Medicine, Japan
- 7) Kanagawa University, Japan
- 8) KEK, Japan
- 9) Louisiana State University, USA
- 10) NASA/GSFC, USA
- 11) National Inst. of Radiological Sciences, Japan
- 12) Nihon University, Japan
- 13) Ritsumeikan University, Japan
- 14) Saitama University, Japan
- 15) Shibaura Institute of Technology, Japan
- 16) Shinshu University, Japan
- 17) Tokyo Institute of Technology, Japan
- 18) University of Denver, USA
- 19) University of Florence, IFAC (CNR) and INFN, Italy
- 20) University of Pisa and INFN, Italy
- 21) University of Rome Tor Vergata and INFN, Italy
- 22) University of Siena and INFN, Italy
- 23) Waseda University, Japan
- 24) Washington University-St. Louis, USA
- 25) Yokohama National University, Japan
- 26) University of Padova and INFN, Italy
- 27) Ibaraki University, Japan
- 28) Ibaraki National College of Technology, Japan
- 29) Nagoya University, Japan
- 30) CRESST/NASA/GSFC and University of Maryland, USA
- 31) CRESST/NASA/GSFC and Universities Space Research Association, USA
- 32) National Institute of Polar Research, Japan
- 33) The University of Tokyo, Japan



CALET はISSに向けて打上げられました！



- ① 8月19日: JAXA種子島宇宙センターから、20時50分49秒にH2-BロケットによってCALETを搭載したこうのとり5号機(HTV-5)が、国際宇宙ステーションに向けて打上げられました。



- ② 8月24日: HTV-5が国際宇宙ステーションのロボットアームにより把持されました。



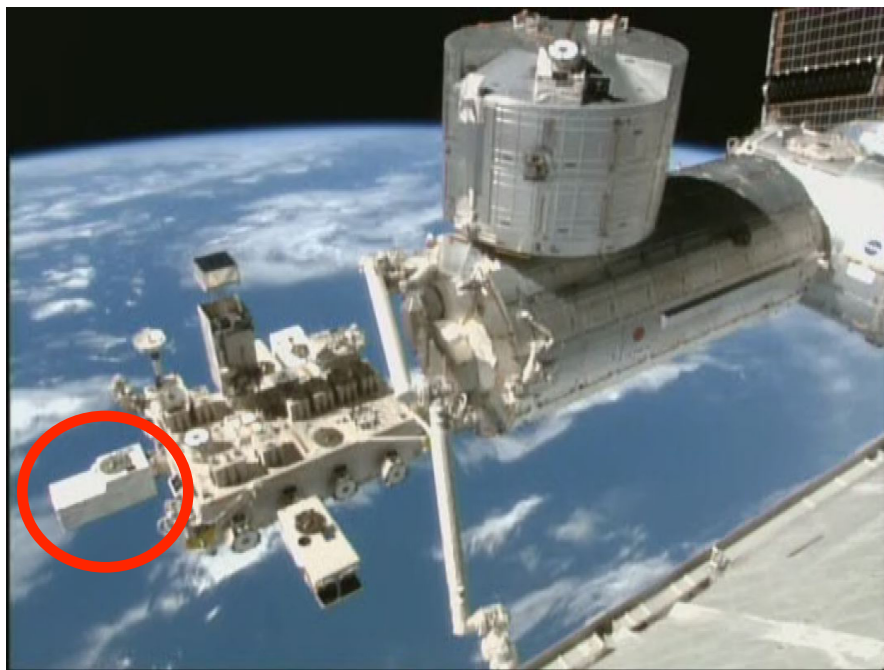
- ③ その後: HTV-5が国際宇宙ステーションにドッキングしました。



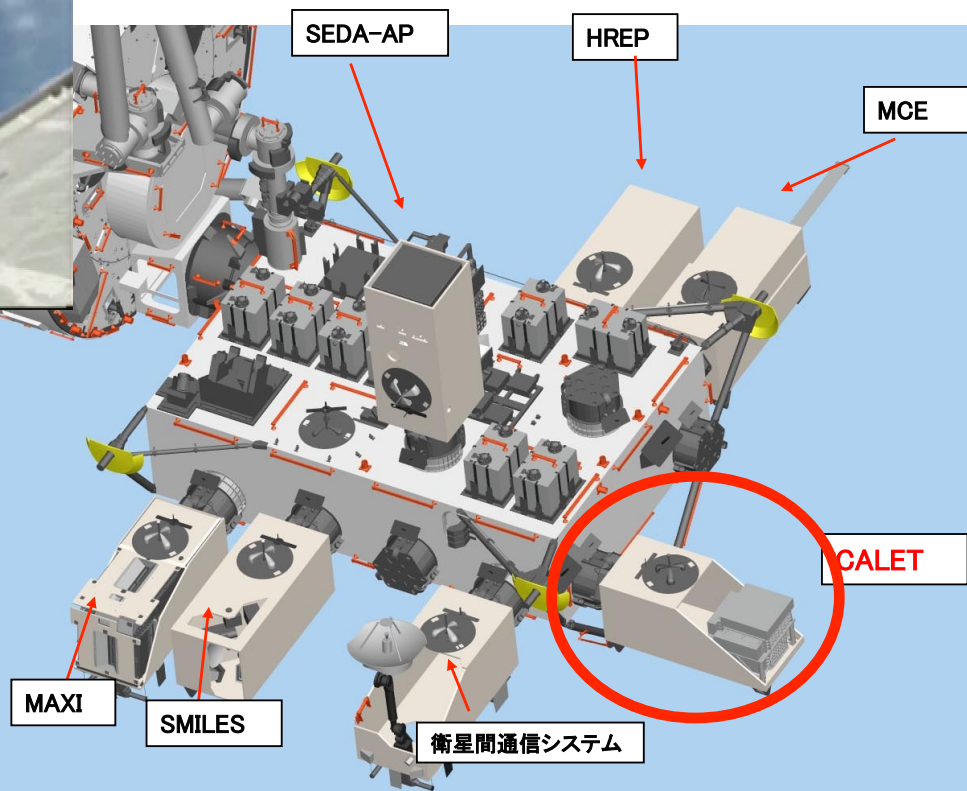
- ④ 8月25日: CALETが日本実験棟船外実験プラットフォームのNo.9ポートに設置され、装置の稼働が始まりました。



CALETを船外実験プラットフォームに設置 (2015～)



実際に設置された様子



模式図



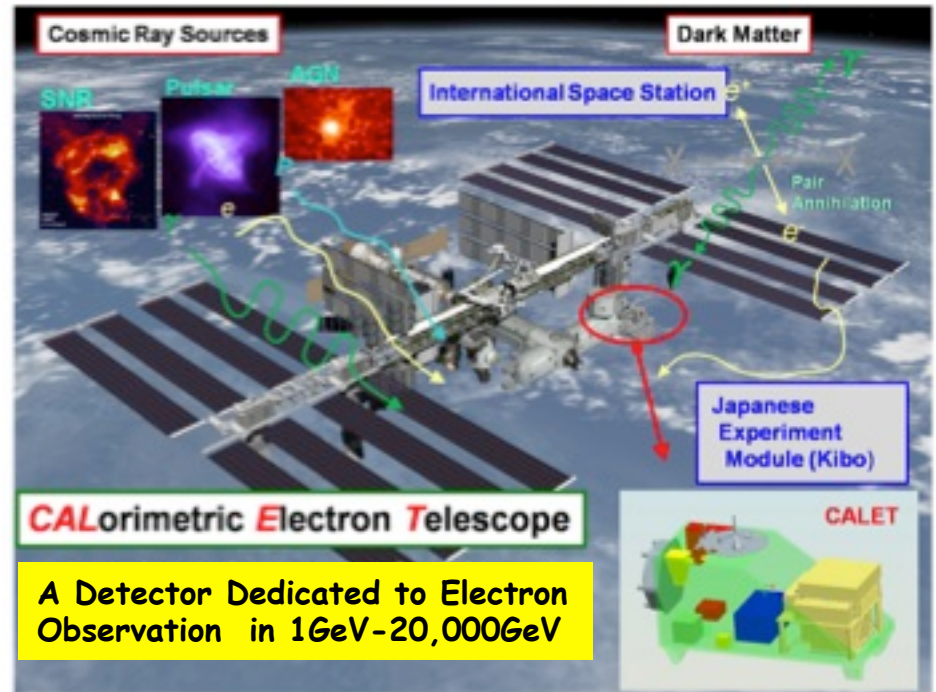
CALETによる科学観測

カロリメータ (CALET/CAL)

- 電子: 1 GeV – 20 TeV
- ガンマ線: 1 GeV – 10 TeV
(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 : 100 keV – 20 MeV
- 硬X線 : 7 keV – 1 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

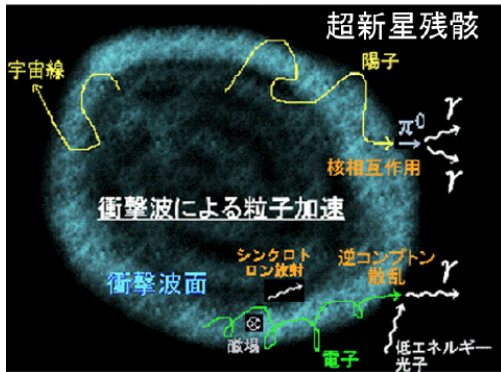
ガンマ線バーストの研究

7 keV – 20 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象

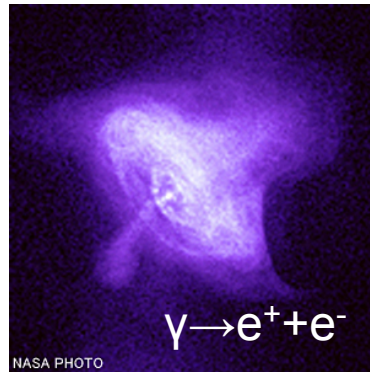
高エネルギー電子(+陽電子)の加速と銀河内伝播

天体起源

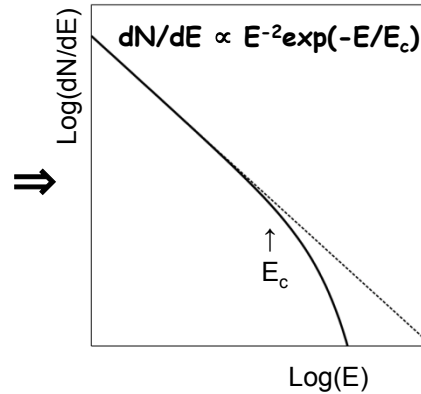
超新星残骸における衝撃波加速



パルサー風星雲での電子・陽電子生成

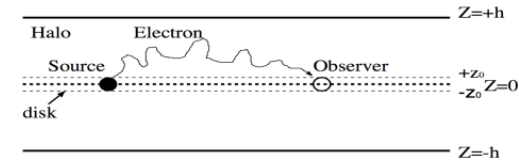


加速後のエネルギースペクトル
(冪型分布 + 高エネルギーカットオフ)

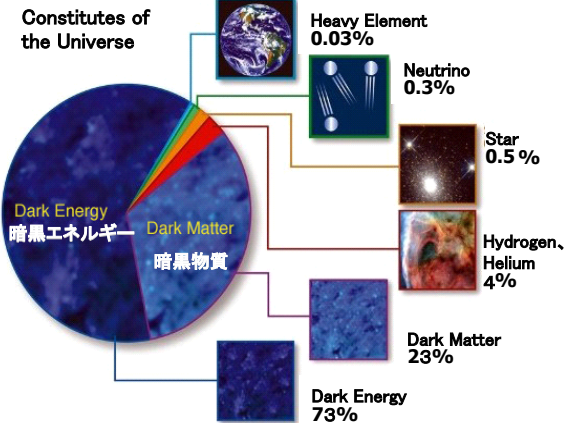


銀河内での伝播プロセス

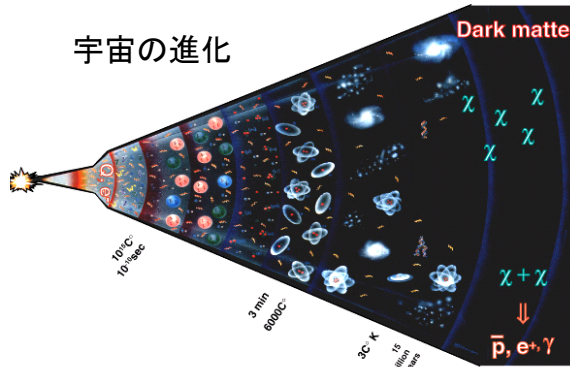
- 拡散過程 (銀河磁場)
 - エネルギー損失
- $dE/dt = -bE^2$
(シンクロトロン放射 + 逆コンプトン散乱)
- 荷電パイ中間子の崩壊による二次的な電子・陽電子生成
- $\pi^+/- \text{ or } K^+/- \rightarrow \mu^+/- \rightarrow e^+/-$



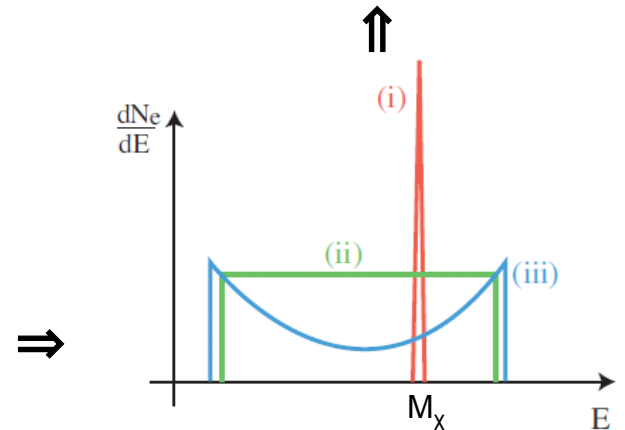
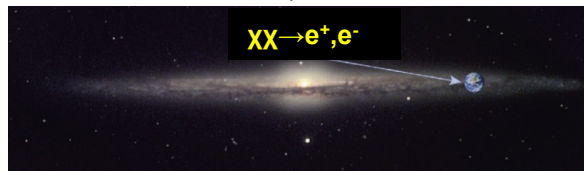
暗黒物質起源



宇宙の進化



暗黒物質 (WIMP) の対消滅



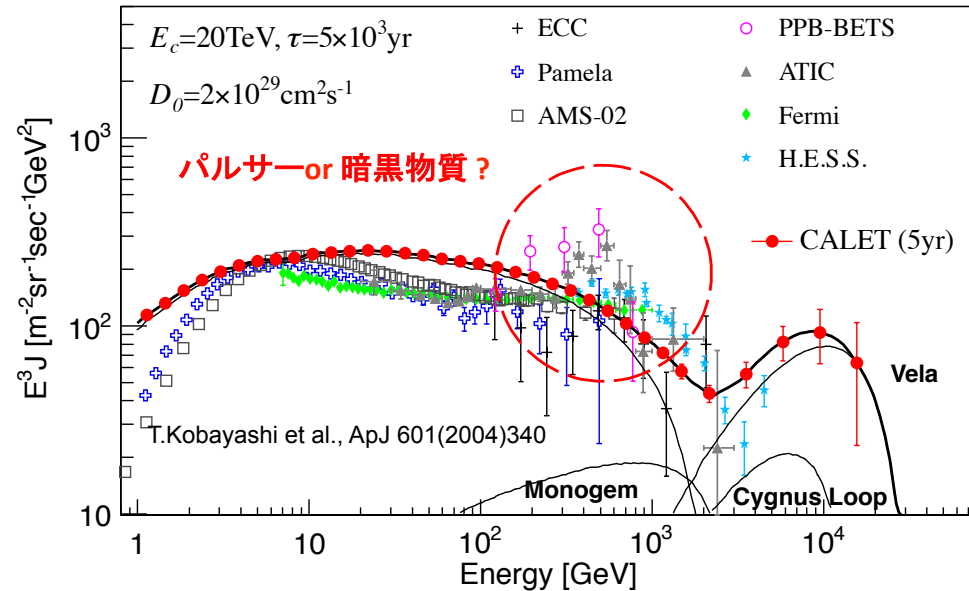
暗黒物質の対消滅による電子・陽電子の生成エネルギースペクトル

- (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)

GeV-TeV領域におけるCALETによる電子観測予測

P-048 Motz Holger

超新星残骸(近傍加速源)



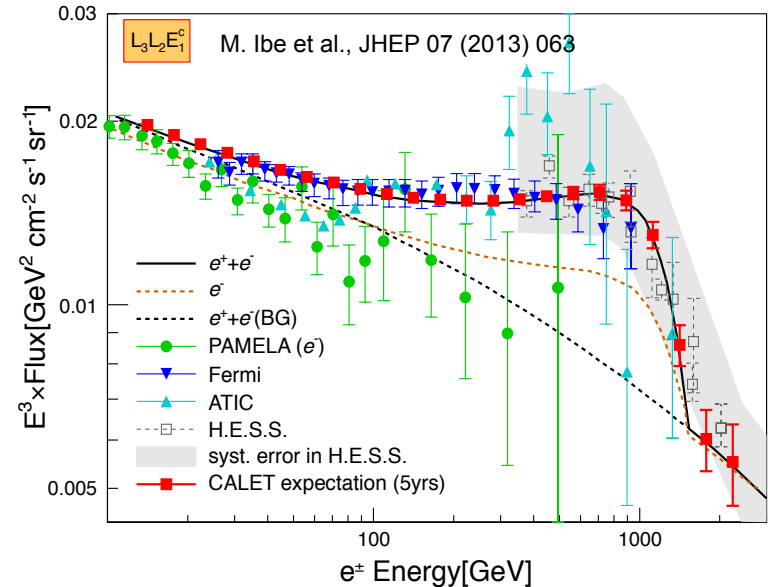
□ TeV領域: 近傍加速源 ($R < 1 \text{ kpc}$, $T < 10^4 \text{ year}$)の検出候補となる超新星残骸: Vela, Cygnus Loop, Monogem

□ 10–1000 GeV: 衝撃波加速+伝播過程の定量化
特に数100GeV領域でのパルサーor暗黒物質の寄与

□ 1–10 GeV: 太陽変調の観測

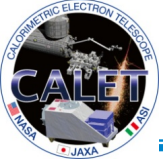
短期: フォーブッシュ減少 長期: 太陽活動

暗黒物質(LSP崩壊モデル)



□ これまでの電子・陽電子の観測結果と矛盾しないLSP (Lightest Super Symmetric Particle)の崩壊モデルから期待される全電子スペクトルの検出がTeV領域で可能

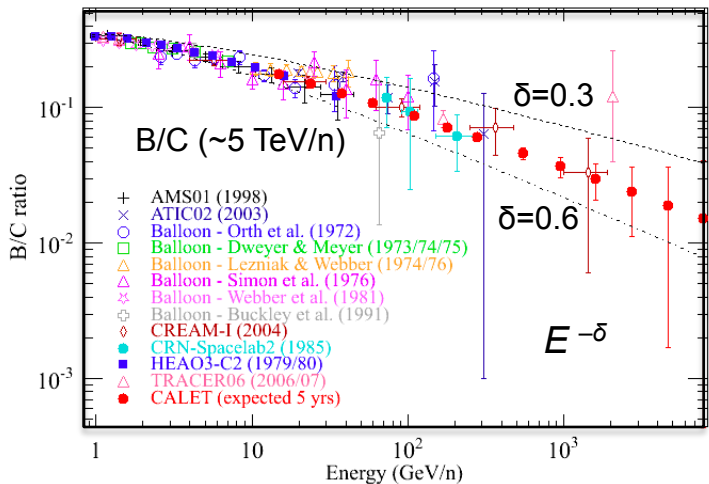
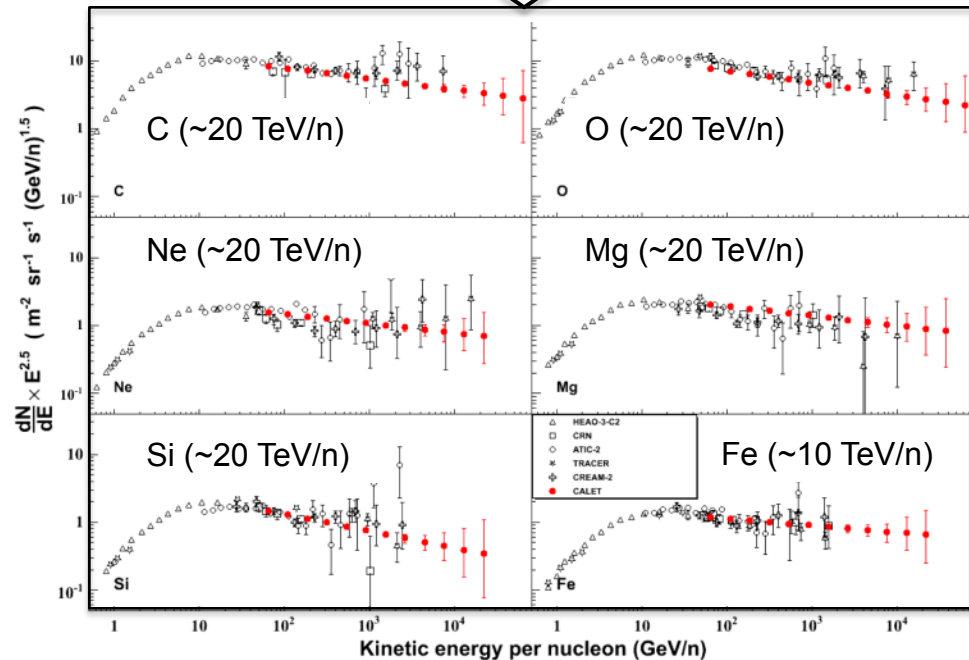
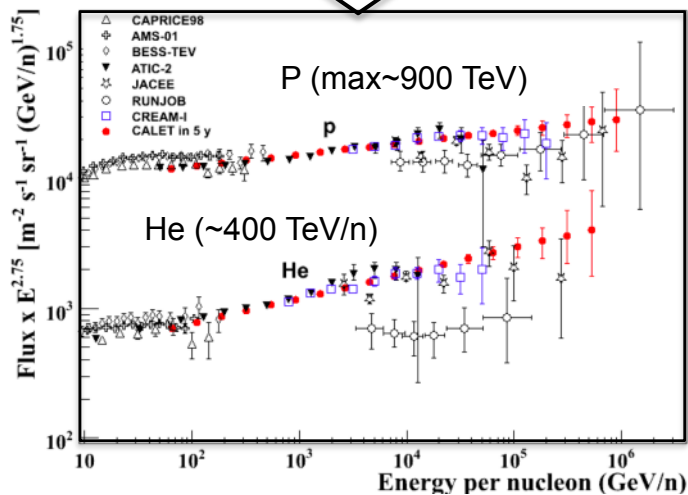
□ 異方性の測定との併用により、天体(パルサー等)起源か暗黒物質起源かを識別



陽子・原子核観測

- p、Heの200GeV/nにおける“硬化”の検証
- pとHeのスペクトルにおける冪の差？(加速or 伝播)
- pの100TeV領域でのカットオフ検出(衝撃波加速？)

- 宇宙線成分比のエネルギー依存性(加速+伝播)
- PeV以下にカットオフはあるか(衝撃波加速)？



銀河の磁場構造を決める拡散係数のエネルギー依存性 ($D \sim E^\delta$) はB/C比のエネルギー依存性 ($\sim E^{-\delta}$) の観測で求まる。Kolmogolov Type ($\delta = 0.3$) or Random ($\delta = 0.6$) CALETの5年間の観測で δ による銀河磁場モデルの選別を実現する。

観測システムの概要(1)

質量: 613kg 電力:507W

CAL

- Charge Detector (CHD)
- Imaging Calorimeter (IMC)
- Total Absorption Calorimeter (TASC)

CGBM

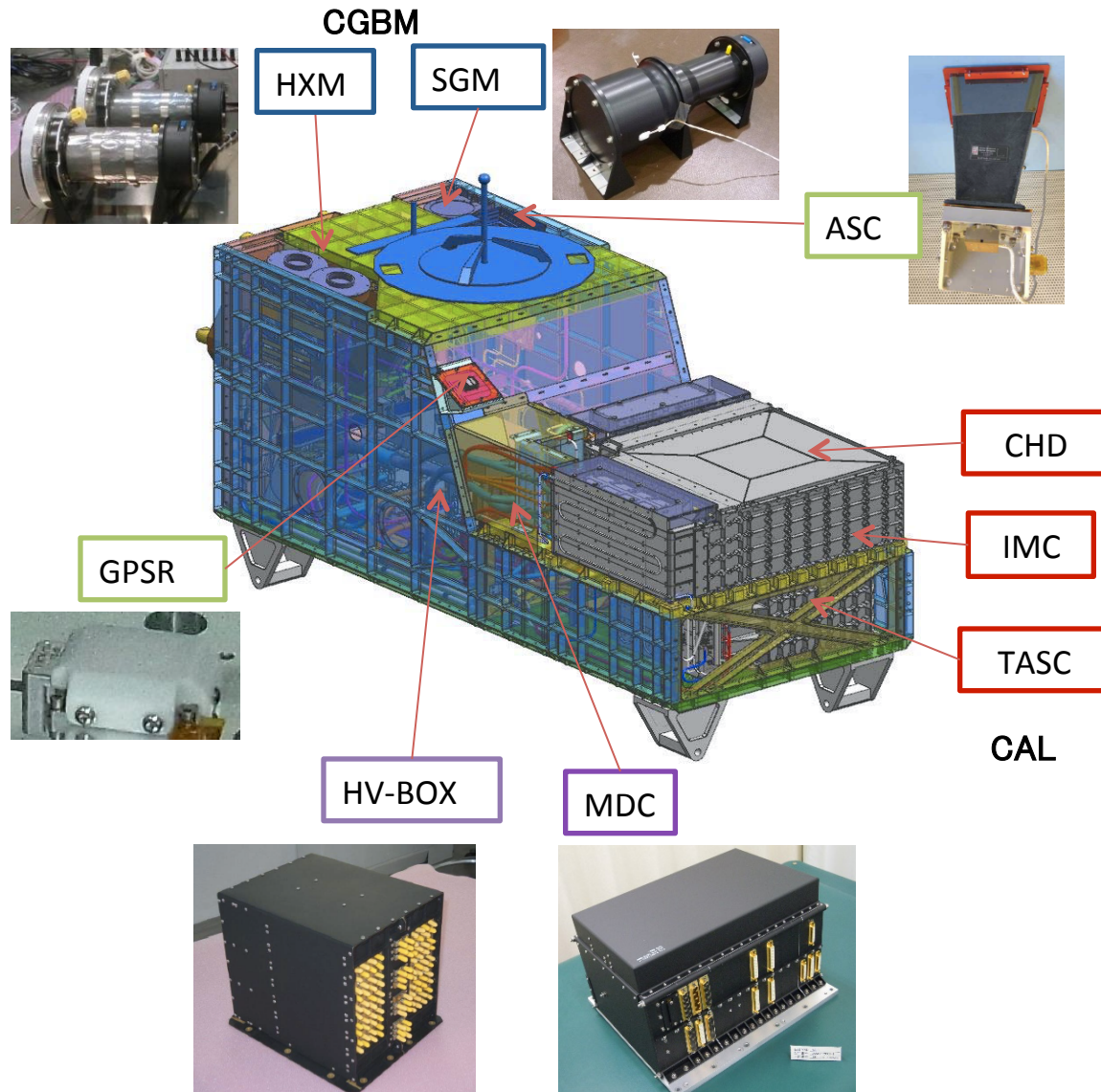
- Hard X-ray Monitor (HXM)
LaBr₃ : 7keV~1MeV
- Soft γ -ray Monitor (SGM)
BGO : 100keV~20MeV

データ処理・電源

- Mission Data Controller (MDC)
制御、データ送受信、トリガ、電源
- HV-BOX
高電圧電源 (PMT:68ch, APD:22ch)

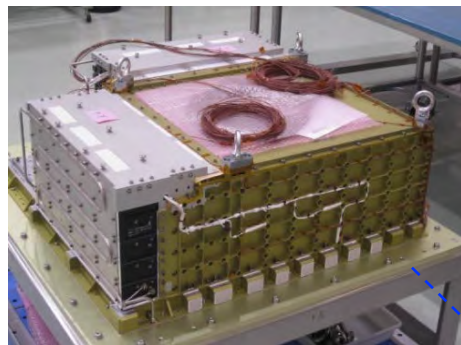
サポートセンサ

- Advanced Stellar Compass (ASC)
観測装置の方向測定
- GPS Receiver (GPSR)
イベントへの時刻付け(<1ms)



観測システムの概要(2)

CALET構成機器



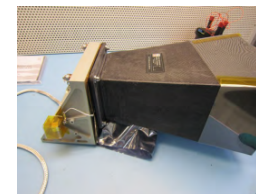
CHD/IMC [CAL]



GPSR-ANT



HXM#1, #2 [CGBM]



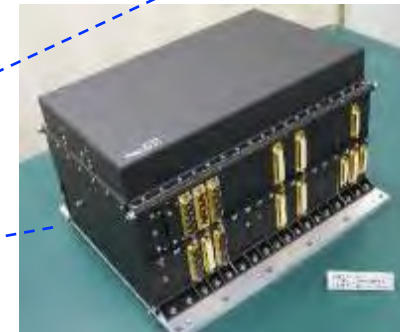
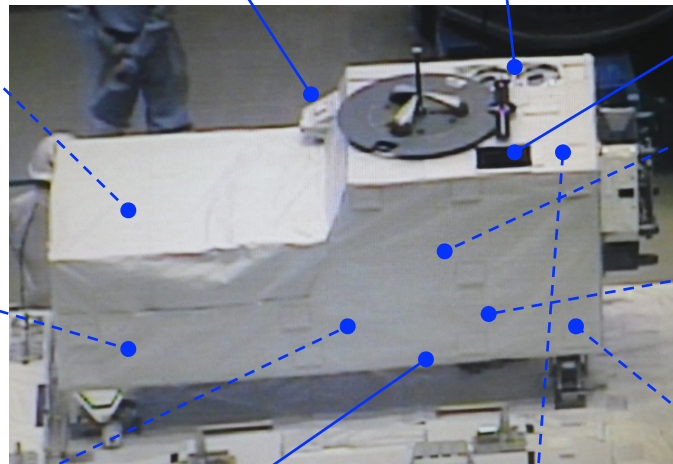
CHU(buffle付)[ASC]



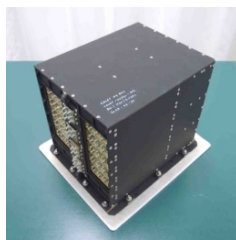
DPU[ASC]



TASC [CAL]



MDC



HV-BOX



CIRC



SGM [CGBM]



GBM-EBOX[CGBM]

観測システムの概要(3)

CAL構成機器

カロリメータのコンポーネント

● 検出器アセンブリ

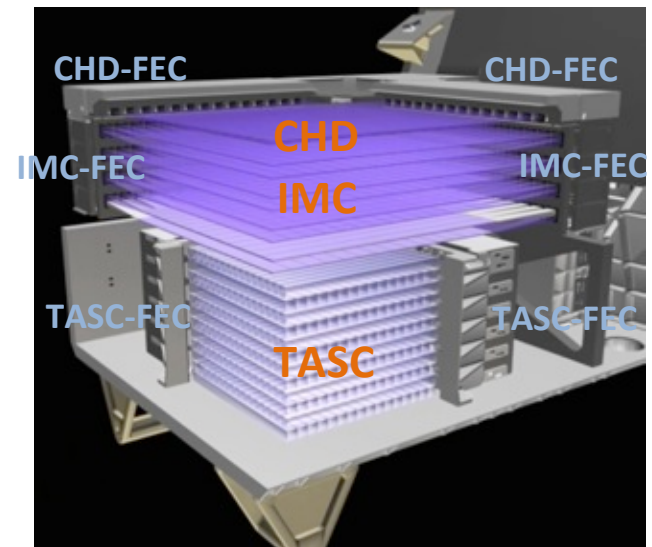
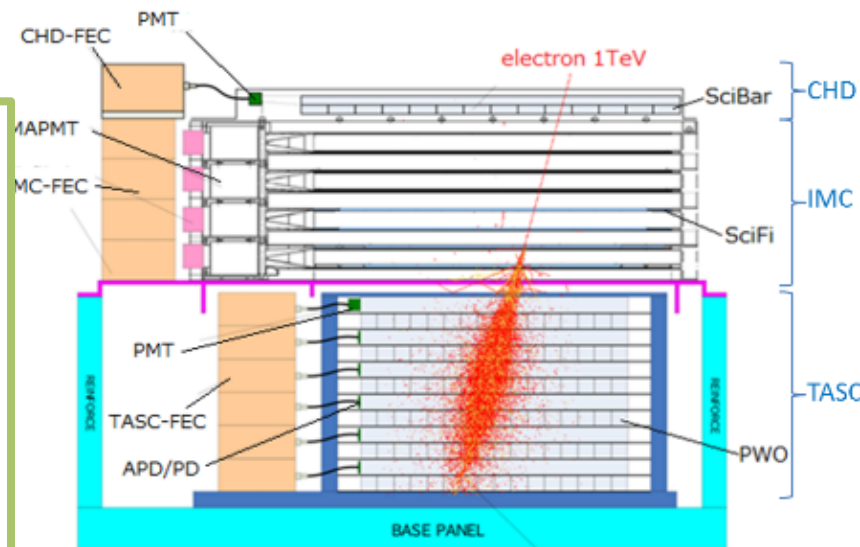
- CHD: プラスチックシンチレータ(EJ200)
PMT(R7400-06相当品)
- IMC: シンチレーティングファイバー(SCSF-78)
64ch MaPMT(R7600相当品)
- TASC: PWOシンチレータ(SICCAS製)
PMT(R-7400-06相当品)
PD/APD(S1227-33/S8664-10相当品)

● 検出器構体

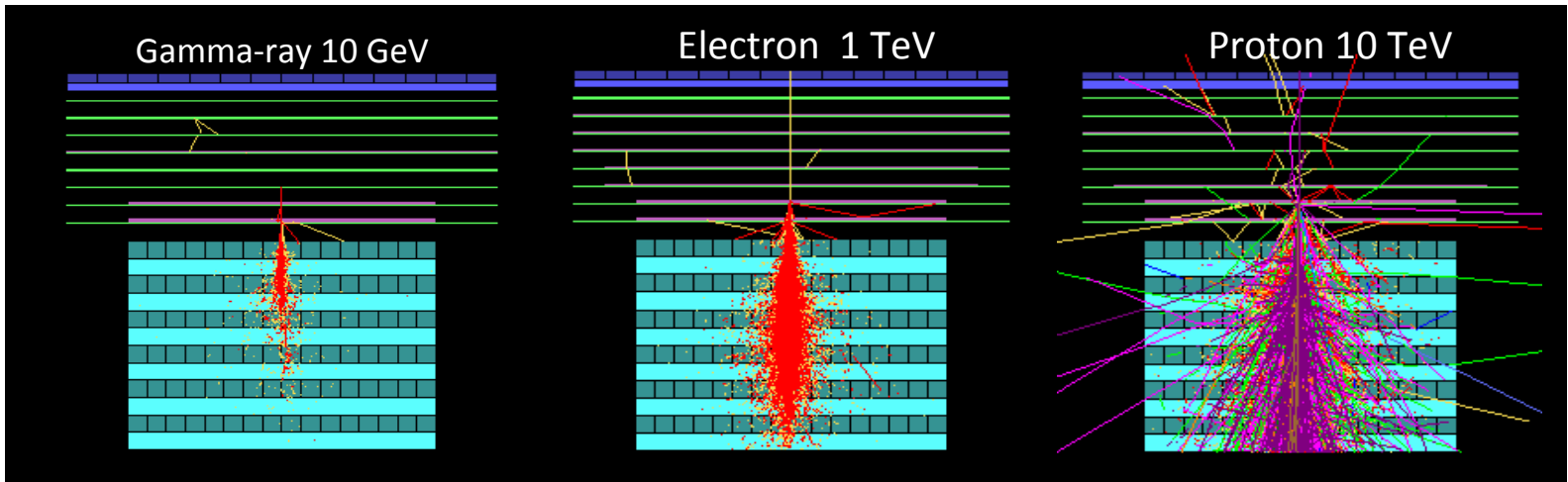
- IMC/CHD構体: タングステン板、アルミハニカム
- TASC構体: CFRPセル

● フロントエンド回路(FEC)

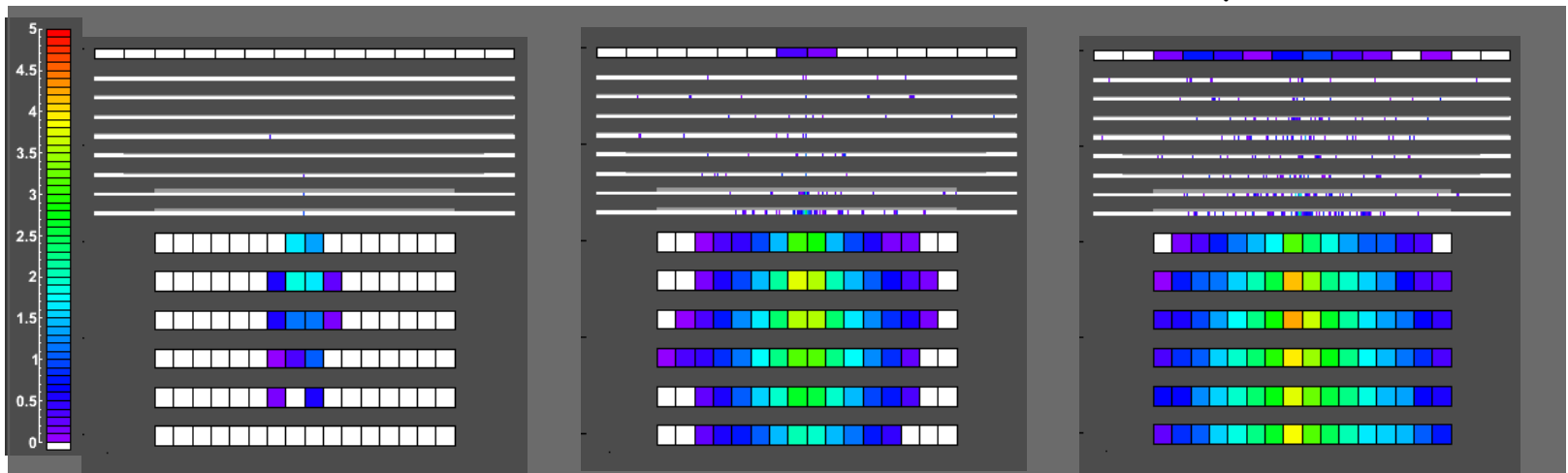
- CHD-FEC: CHIC + 整形アンプ + ADC(16bit)
- IMC-FEC: VA32-HDR14.3 + ADC(16bit)
- TASC-FEC: CHIC + 整形アンプ(H/L) + ADC(16bit)
- ※CHIC(CALET Hybrid IC)



シミュレーション計算による粒子識別の概念



In Detector Space



- 非常に厚い(30 r.l.) カロリメータ(IMC+TASC)によるシャワー画像の可視化技術により、電子選別に必要な陽子除去性能($\sim 10^5 @ \text{TeV}$)を実現している。
- CHDにより入射粒子の電荷測定をp-Feの領域で $\sigma_Z=0.15-0.3$ の精度で達成している。¹²

打上げから初期運用迄の経過 (1)

- (1) 8/19にH-IIB/HTV5により打ち上げ, 8/25にJEM曝露部9番ポートに取り付け, 装置を起動した.
- (2) 8/25~10/8の間, 機能チェックアウトを実施し, 機能・性能に問題が無いことを確認した.
- (3) 打上げ90日後の11/17までミニマムサクセス向け観測を行い, 所定の観測データが取得できた. 以降, 定常プロセスに即した観測を実施している.

8/19 L+0 HTV5 打上げ

8/24 L+5 HTV5 ISS到着・係留

HTV-EP JEM-EF係留
CALET JEM-EF#9取付

8/25 L+6 CALET起動

MDC/GPSR/ASCチェックアウト
IMC/CHD/TASC-FECチェックアウト

8/31 L+12

9/3 L+15

9/4 L+16

機器動作確認

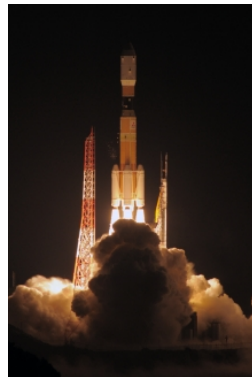
HV-BOX/GBM-EBOX/CIRCチェックアウト
システム(連動機能)チェックアウト

9/14 L+26

9/15 L+27

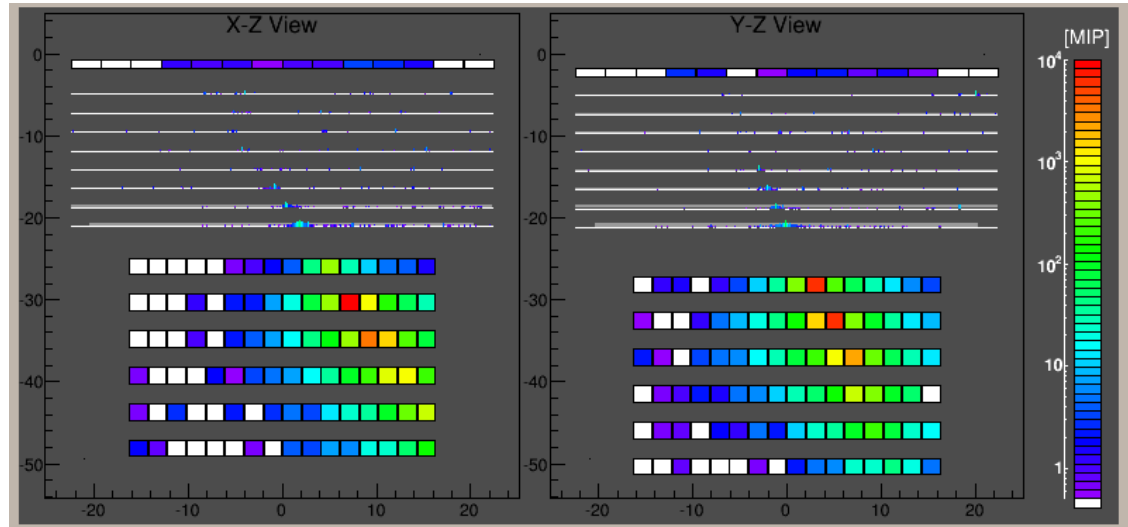
スケジュールファイル実行試行

9/18 L+30

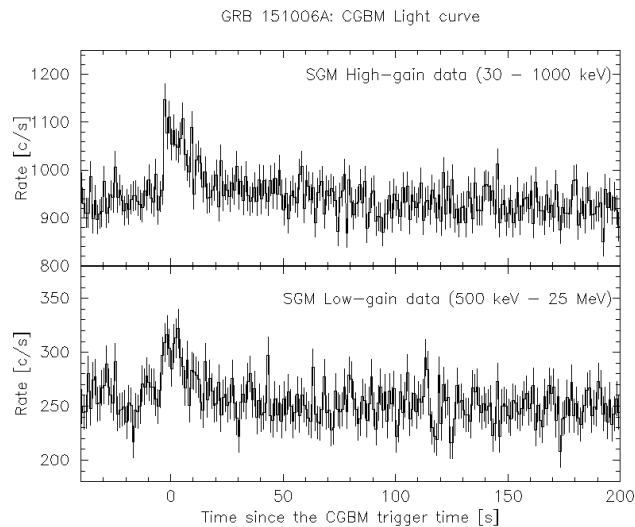


P-046 赤池陽水

- 9/22 L+34 CGBM高電圧チェックアウト
- 9/24 L+36 **高電圧印加確認**
 カロリメータ必要真空度到達
 CHDチェックアウト
 IMCチェックアウト
 TASCチェックアウト
 カロリメータチェックアウト
 CGBM検知機能チェックアウト
 CALET総合動作チェックアウト
- 10/5 L+47 72時間連続動作確認
- 10/8 L+50 **機能チェックアウト完了**
 カロリメータ
 キャリブレーションデータ計測
- 10/20 L+62 ミニマムサクセス向け観測
 定常観測運用プロセス試行
- 11/17 L+90 **初期チェックアウト終了**
 定常プロセスに即した観測開始



カロリメータ
TeV領域の電子(候補)イベント



P-047 坂本貴紀

CGBM 初観測GRBイベント
Light Curve(GRB 151006A)

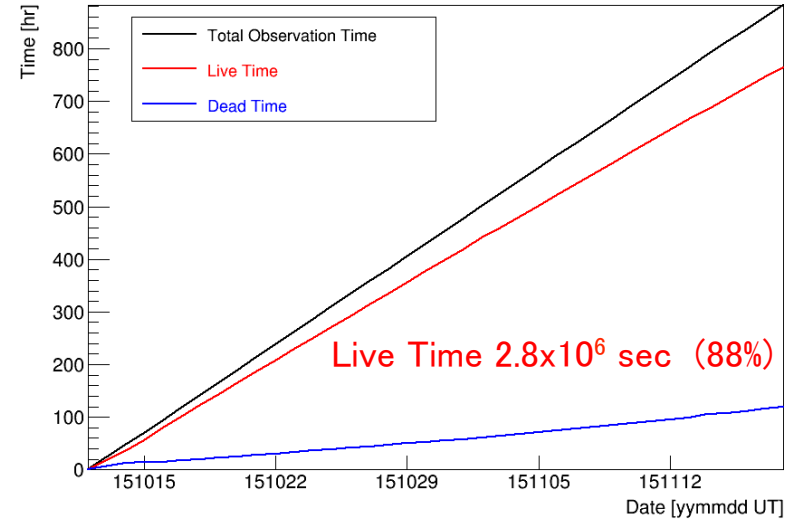


初期観測期間における運用とデータ取得状況

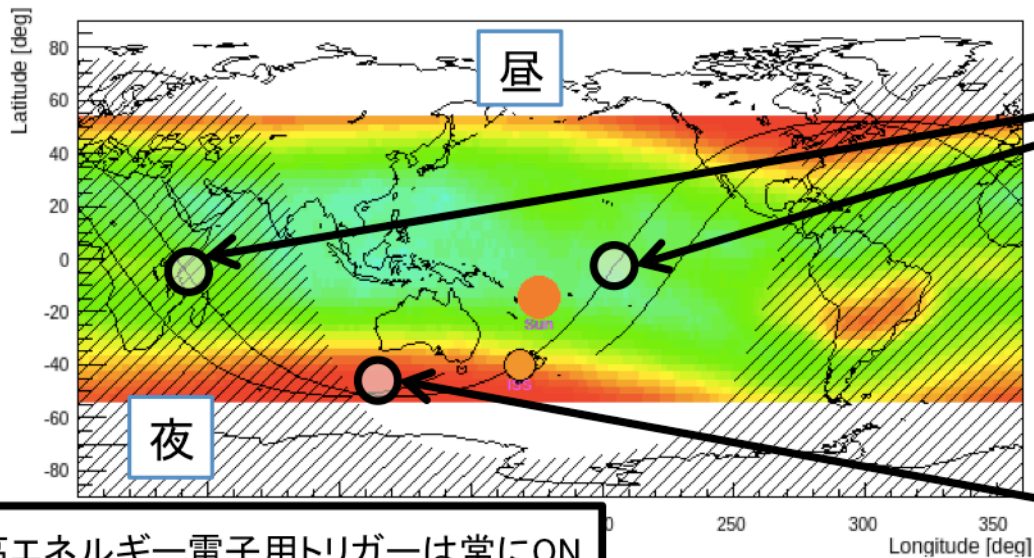
2015年10月12日から2015年11月17日(打上後90日)の期間の主なトリガーモード(高エネルギー電子観測用)における観測運用の積算時間とLive Time

ミニマムサクセス達成のための観測期間を通して、安定した観測(LiveTime~88%)が継続できている。

High Energy Trigger



スケジュールコマンドによる軌道上運用



Pedestal data acquisition

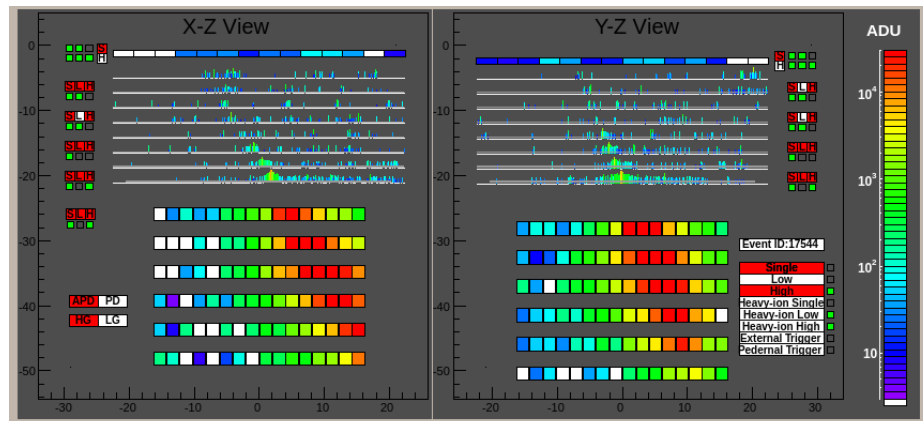
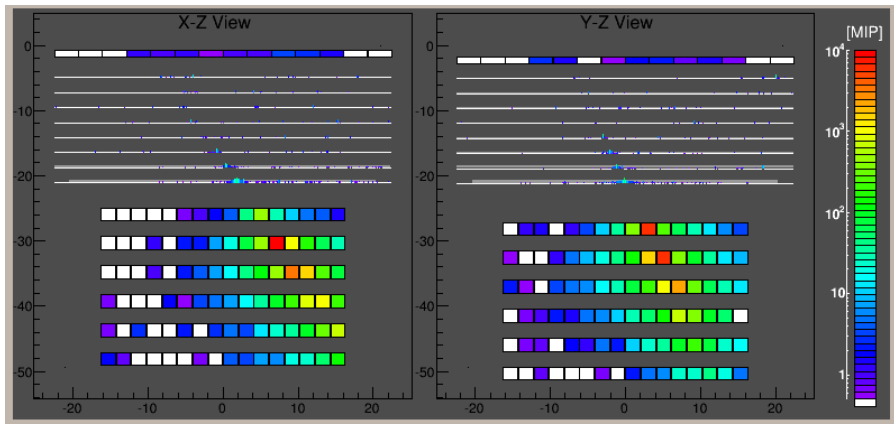
Schedule file: sequence of time and command

Low energy electron shower data acquisition

高エネルギー電子用トリガーは常にON

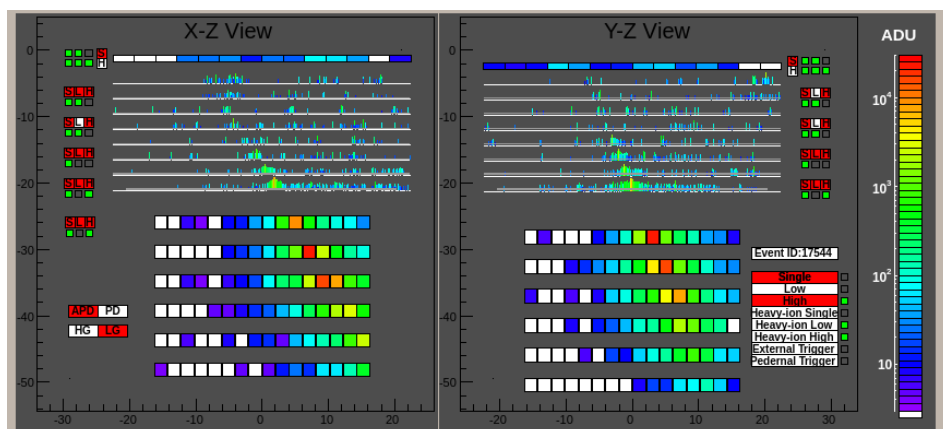
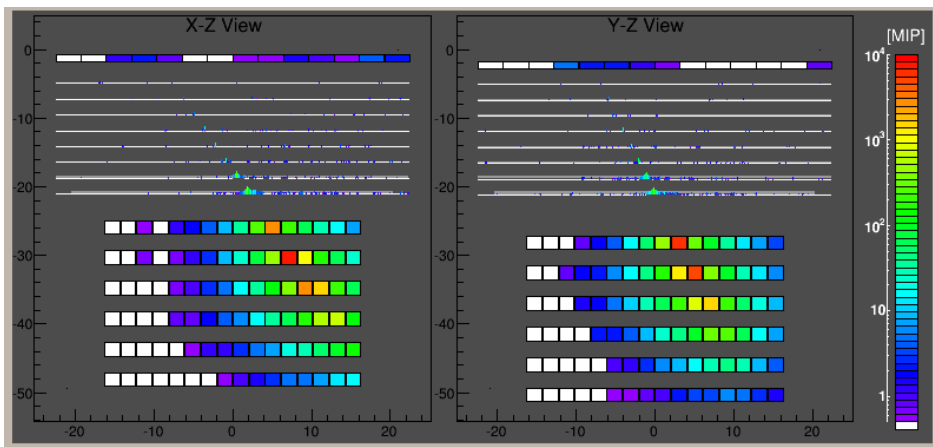


1TeV electron candidate (#1128791625_17544) Raw data (#1128791625_17544) (converted to MIP by calibration) (APD-H)



Simulated events (1TeV electron) obtained with same incident position and direction with the observed event

(APD-L)

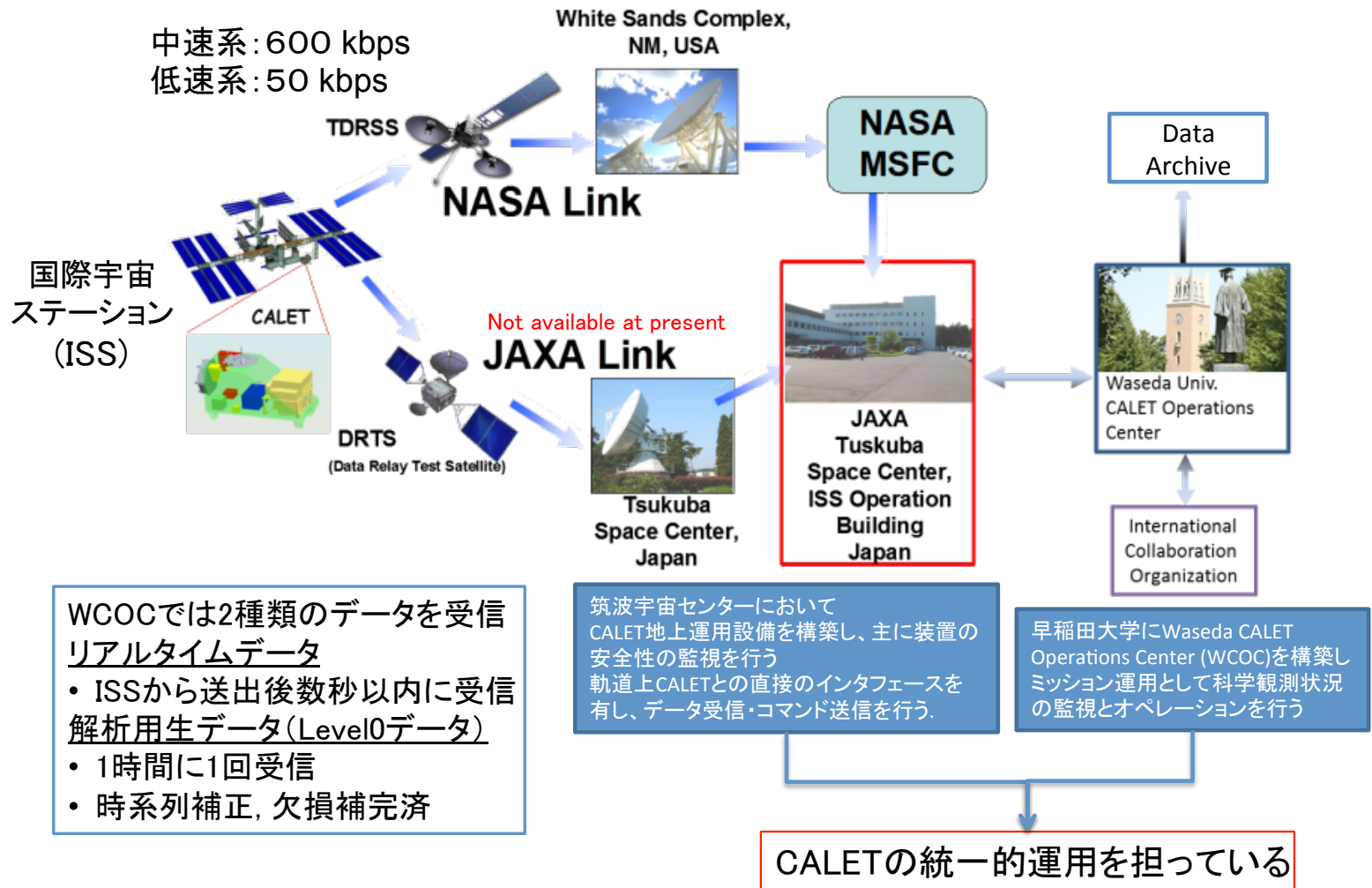


約30日間の観測で電子10GeV以上約10万イベントを観測



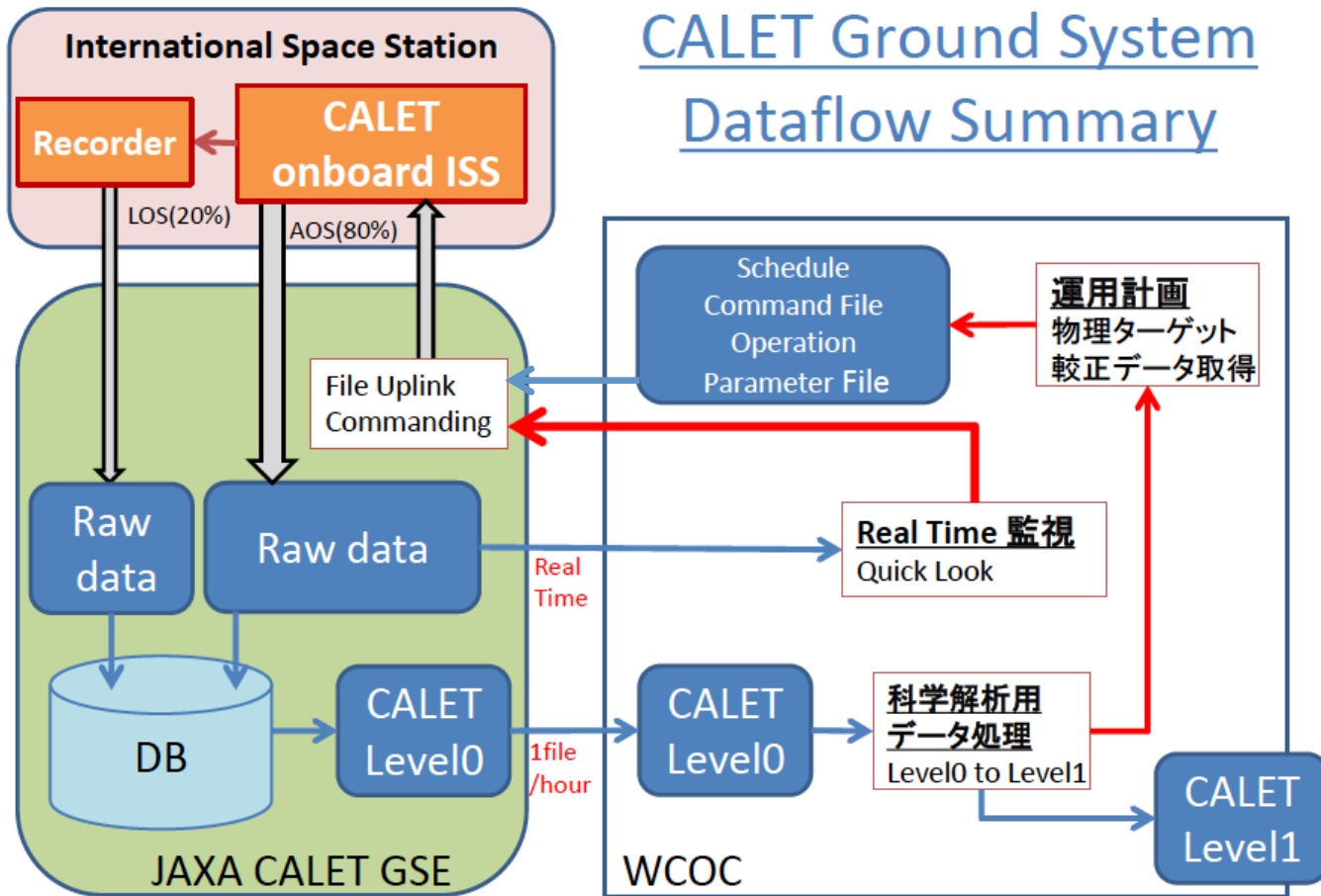
CALETサイエンス運用システム (1)

- NASAリンクの低速・中速系によりリアルタイムデータ及び欠損補完データ (Level0) の Waseda CALET Operations Center (WCOC) での正常に受信している。



CALETのデータフローとサイエンス運用概念

- Waseda CALET Operation Centers (WCOC) における24時間体制のリアルタイム監視を行い、つくば宇宙センターのオペレーションチームとの共同運用体制を構築した。
- 科学解析用データ処理、国内外研究機関へのL1データ配信、運用計画に基づくスケジュールコマンドの作成による、数日間の観測運用の自動化を実現した。





まとめと予定

- CALETはTeV領域に及ぶ電子・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・伝播機構の包括的な解明を行う。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、JAXAと早稲田大学の共同研究によるプロジェクトである。国際共同ミッションとして、JAXAが米国NASA,イタリアASIと協定を結んで実施している。
- つくば宇宙センターにおけるシステム試験終了後、JAXAにおける「開発完了審査」を経て、種子島宇宙センターへ輸送をおこなった。そして、2015年8月19日にHTV5号機に搭載しH-IIIBロケットで打ち上げられ、船外実験プラットフォーム#9ポートに設置された。
- 現在つくば宇宙センターユーザ運用エリア(UOA)と早稲田大学CALET Operations Center (WCOC)において、CALETの軌道上運用を順調に実施している。10月初旬からサイエンスデータの取得を実施し、90日間の運用でミニマムサクセスを達成している。今後、2年間の観測でフルサクセスを達成し、その成果により5年間の観測を実現する予定である。



ポスター発表

P- 044 ISS軌道上におけるCALETの電荷識別性能

小澤 俊介 (早大先進理工) ほか

P- 045 ISS軌道上におけるCALETの電子観測条件最適化

浅岡 陽一 (早大理工研) ほか

P- 046 軌道上データを用いたCALET検出器のMIP較正

赤池 陽水 (早大先進理工) ほか

P- 047 CALET ガンマ線バーストモニターの機上性能と初期成果

坂本 貴紀 (青学大) ほか

P- 048 Ability of CALET to Identify or Constrain Dark Matter Annihilation and Decay in the Galactic Halo

Motz Holger (早大国際教育センター) ほか