国際宇宙ステーション(ISS)曝露部 における電子、ガンマ線観測計画 (CALET: CALorimetric Electron Telescope)

早稲田大学 理工学総合研究センター 鳥居祥二

メンバーリスト(国内35名、国外31名)





日本:

早稲田大理工総研、JAXA/ISAS^A、神奈川大工^B、横国大工^C、弘前大理工^D、放医研^E、 芝工大シエ^F、埼玉大理^G、立教大理^H、青学大理工^I、神奈川保健福祉大^J、東大宇宙線研^K、 東大理^L、クリアパルス^M、オービタルエンジニアリング^N 鳥居祥二、長谷部信行、宮島光弘、宮地孝、晴山慎、奥平修、山下直之、西村 純^A、 槇野文命^A、山上隆正^A、斉藤芳隆^A、福家英之^A、高柳昌弘^A、上野史郎^A、冨田洋^A、 田村忠久^B、立山暢人^B、吉田健二^B、奥野祥二^B、日比野欣也^B、柴田槙雄^C、片寄祐作^C、 倉又秀一^D、市村雅一^D、内堀幸夫^E、北村尚^E、笠原克昌^F,水谷興平^G、村上浩之^H、小林正^I、 古森良志子^J、湯田利典^K、寺沢敏夫^L、久保信^M、山口耕司^N



米国:

NASA/GSFC: R. E. Streitmatter, J.W.Michell, L.M.Babier, A.A. Moissev, J.F.Krizmanic Washington University in Saint Louis : W. R. Binns, M. H. Israel, H. S. Krawzczynski Louisiana State University: G.Case, M. L. Cherry, T. G. Guzik, J. B. Isbert, J. P. Wefel University of Denver : J. F. Ormes



イタリア:

University of Siena and INFN: P.S.Marrocchesi, P.Maestro, M.G.Bagliesi, V.Millucci, M.Meucci, G.Bigongiari, R.Zei INFN sezione di Pisa and Scula Normale Superiore: F.Ligabue, F.Morsani University of Florence: O.Adriani, P. Papini, P. Spillantini, L.Bonechi, E. Vannuccini



中国:

Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science: Jin Chang, Weiqun Gan, Tan Lu

CALETミッション概要



- 目的: 宇宙における高エネルギー過程の体系的解明
- 装置: 粒子選別機能を備えた高精度イメージング・カロリメータ
 - ペイロード重量:2500kg、消費電力:600W、テレメトリー:600kbps

● 観測: 電子(1 GeV~10 TeV)

電子加速源、加速機構、銀河伝播機構、暗黒物質、太陽磁気圏

 γ 線(20 MeV ~ 10 TeV)

γ線点源 (SNR, Pulsar, AGN etc)、銀河内、外拡散成分、γ線バースト、暗黒物質 陽子,原子核 (数10 GeV~1000 TeV)

衝撃波加速、銀河内伝播モデル、KNEEの起源

● 打ち上げ: 国際宇宙ステーション JEM/EF(~3年間) (輸送機はHTVを利用)



JEM: Japanese Experiment Module

CALET System











超新星爆発時に生じる衝撃波によって、Fermiの1次過程によって統計的に加速される。このモデルでは、加速の上限エネルギーは~Z×10¹⁴ eVとなる。

- 陽子、原子核成分では、
 加速限界が存在しエネルギースペクトルが折れ曲がる(Knee)
 ⇒ エネルギーの増大とともに、平均組成は重くなる
- ・ 電子成分では、
 ・ ・ 逆コンプトン散乱、シンクロトロン放射のため、エネルギー
 、ペクトルにカットオフ(~1TeV)が存在する
 ・ → 1TeV領域で近傍ソース(<1kpc, <10⁵ year)の影響が現れる
- ガンマ線成分は、

電子起源:

散乱光子 ⇒ 逆コンプトン散乱

陽子(原子核)起源:

標的となる星間物質 ⇒ 核相互作用で生じる中性π中間子の崩壊

電子観測の目的 (1GeV~10TeV)



陽子バックグラウンド: p/e 100 ~ 数10²

 $10^{3} \sim 10^{5}$

・陽子の除去性能は10⁶が必要!!!



Nearby Source Candidates



Electron Energy Loss by

- Inverse Compton Scattering
- Synchrotron Radiation

Energy Loss Rate $dE/dt \propto 1/E^2$

Age
$$\propto 1/E$$

Distance \propto Age $\frac{1}{2}$



1 TeV Electron Source:
Age < 10⁵ years
Distance < 1 kpc
Vela

Cygnus Loop Monogem

Unobserved ?

近傍ソースからの電子寄与のモデル依存性(拡散過程)







ALET

陽子、原子核成分の観測



	エネルギー (TeV)	期待値
陽子に対する有効面積(重原子核ではこれ以上)	1	~106
$S_{eff} \sim 0.5 \text{ m}^2 \times 1/3 \text{ (for p)} \sim 0.17 \text{ m}^2$	10	1.8 x 10 ⁴
3年間の全観測量	100	3.2 x 10 ²
170 m ² sr day~ 1.5 × 10 ⁷ m ² s sr	1000	6

陽子、ヘリウムについてはマグネ ットスペクトロメータでは観測が難 しい1 TeV 以上の領域で観測を行 い、100TeV近辺にあると予測さ れるKneeを検出する。



成分ごとのエネルギースペクトル

proton

heliun

103

E₀^{2,5}dl/dE₀ [m⁻²sec⁻¹sr⁻¹{GeV/n}^{1,4}]

101

10

'10⁻¹

10



Leaky Box Model によるB/Cの期待値



10

kinetic energy En [Gev/nucleon]

10

t0⁷

ガンマ線観測 (20 MeV~10 TeV)



- 広い視野(1.8 sr)、大きな有効面積 (1.0 x10⁴ cm² @ 10 GeV)
- 観測装置の姿勢制御なしに観測
- ~20日で全天を観測
- 点源観測時間:1年に平均48日

ほぼ一様に全天を観測



ー年間の全天観測マップ(E>100 MeV) (最小:43日間~最大:52日間)

個々のソースに対する観測期間(3年間)

- > Diffuse Component from the Galactic Plane : ~ 100 days
- > Halo and Extragalactic component: ~ 1000 days
- Point Sources: ~ 30-100 days
- Gamma-Ray Bursts (> 10^{-5} erg/cm²): ~ 10 events /year

> 100 MeV 300 / burst > 1 GeV 30 / burst

2005年12月6日

ガンマ線観測の期待値





2005年12月6日



暗黒物質消滅からのガンマ線

銀河中心からのTeV ガンマ線?



Contours from Hooper et al. 2004

銀河系ハローのニュートラリーノ暗黒物質消滅により発生するラインガン
マ線強度
$$\Phi_{\gamma}$$

$$\Phi_{\gamma} = rac{N_{\gamma}\sigma v}{m_{\chi}^2}rac{1}{4\pi}\int\int_{line \; of \; sight}
ho^2(\ell)d\ell d\Omega \; \; .$$

 $(m_{\chi}: ニュートラリーノ質量、<math>N_{\gamma}\sigma v$: 対消滅率、 ρ : 暗黒物質密度) N 体シミュレーションによる Clumpy な銀河系ハロー (Moore et al., ApJL (1999))

CALETの優れたエネルギー分解能 (<u>2.5%@100</u> GeV)
 ⇒ WIMP暗黒物質の消滅による 10 GeV~10 TeV
 のラインガンマ線を検出可能

 $m_{\chi} = 690 \text{GeV}$

•
$$N_{\gamma}\sigma v = 1.5 imes 10^{-28} ext{cm}^{3} ext{s}^{-1}$$

ニュートラリーノ消滅によるガンマ線スペク トル・シミュレーション(3年間の観測)



•



	CALET	EGRET	GLAST(SRD)
Energy Range (GeV)	0.02~104	0.02~30	0.02~300
Effective Area @10GeV(cm ²)	$7.9 \ge 10^3$	1,500	> 8,000
F.O.V. (sr)	1.0 ~ 1.8	0.5	> 2
Angular Resolution @ 100 MeV(deg.)	< 5.0	5.8	< 3.5
Energy Resolution (%)	7/SQRT(E/10GeV)	10	<10
Point Source Sensitivity (/cm ² s) (> 100 MeV)	7.5×10^{-8}	3×10^{-8}	6 × 10 ⁻⁹



2005年12月6日

太陽磁気圏の物理



1. 太陽磁気圏宇宙線伝播モデルの検証 I – Force-Field 近似 モデル –

Force-Field 近似はどこまで成り立っているか?

3年間の長期スペクトル変動は Force-Field 曲線 ($\Phi - N$ 関係式) に乗るか?

(Φ : Modulation Parameter , N : NM rate , The Slope $d\Phi/dN$ (Climax) $-0.5 \sim -0.7$)

太陽磁気圏における宇宙線拡散係数のエネルギー依存性はいくらか?

長期変動のエネルギースペクトルを観測

エネルギー依存性: 依存指数が小さい程, スペクトルはフラットになる.

 太陽磁気圏宇宙線伝播モデルの検証 II - ドリフトモデル - Drift 効果はあるか?

Drift 予想 (2010年以降 A > 0期):電子=ピーク型,陽子(NM)=フラット型

⇒ 太陽活動静穏期の $\Phi = N$ 関係式 の傾きは, Force-Field 近似の曲線に比べて Steep になる. Drift 効果の現れる時期:静穏期のみか,あるいは活動期にも現れるか?

3. フォーブッシュ減少の原因と電荷依存性

フォーブッシュ減少の大きさは何で決まるか?

Fds の大きさをエネルギースペクトルで観測 \Rightarrow Shock と CMEs の 寄与の解明 電荷依存性はあるか?

電子の Fds プロファイルをエネルギースペクトルで観測 ⇒ 回復期の電荷依存性を解明 長期変動と短期変動の関連性



CALETの装置概要



装置要求性能:

 > 有効面積: 1 m² sr
 > イメージング性能: < 1mm
 > 陽子除去性能: ~10⁶(電子), x 10²(γ線)
 > エネルギー領域: 20 MeV~10 TeV: e, γ 数10GeV ~ 1000 TeV: p~Fe

イメージングカロリメータ (IMC):

▶ 面積: ~1 m²

> シンチファイバー:

1mm square x ~1 m length
18 layers(x &y) ~37,000 fibers
> 鉛の厚さ: 4 r.l, 0.13 m.f.p
+シリコンストリップ検出器(電荷、入射位置)
+アンチコインシデンス(γ線 < 10 GeV)

全吸収型カロリメータ (TASC):

▶ 面積: ~0.5 m²

➢ BGO: 25 x 25 x 350 mm

7 layers (x &y) 784 logs → BGOの厚さ: 32 r.l, 1.6 m.f.p

CALETの側面断面図

検出器質量: 1760 kg 全吸収層の厚さ: 36 r.l ~1.7m.f.p



Electron Detection in CALET









シミュレーション計算で得られたシャワーの例



Gamma-ray 20 MeV



Gamma-ray 100MeV



Gamma-ray 1GeV



Gamma-ray 10GeV



2005年12月6日

Electron 10 GeV



Electron 100 GeV



Electron 10 TeV



CRC将来計画シンポジウム

Proton 3 TeV



Proton 3 TeV



検出装置の概念図





Structural Design





Simulation Study on Hadron Rejection Power



Simulation Events: Isotropic Incident and Uniform Distribution on the Top **Proton Events** ~10⁶ at 10 TeV (Spectrum) : Electron Events 1000 at 4 TeV

ΔE/E: Fraction of Energy Deposit at the Bottom Layer (BGO14) Rrms: Root Mean Square Lateral Spread of Shower (Energy Weighted)



2005年12月6日

CRC将米計画ンンホジウム





Bonding of Viking Chip







 VA, TA (for 1
 Carefully select parts(ADC, Op Amp etc) <- small size, low power consumption
 Signal between back plane and FEC is separated with photo-coupler
 Noise reduction

 □Power consumption for 1 set up FEC (for 1 MA-PMT, 64 channel)
 → 300 mW (measured)
 ○ Specification of VA power consumption 109 mA * 2 + 30 mA(other)
 → total(40000 channel)
 ~ 190 W(with only VA)
 □ Readout speed of more than 1 kHz

New FEC (2) - Readout Speed-





1 ADC for 1 VA chip(A/D conversion is performed in FEC) 16 bit ADC(max 250 kHz) operated with 10 μ sec / channel (100 kHz) \rightarrow 320 μ sec / event (3 kHz) \leftarrow enough for CALET application



Measurement of 1MIP Peak of SciFi



PMT Dynamic Range Depending on Gain

*) Measured value of 20 ns width is corrected by 6/20 for 6ns pulse width of SciFi



At 550V: Gain ~4,600 Dynamic Range 2500 MIP (~11 pC) At 650V: Gain ~15,000 Dynamic Range 1400 MIP (~20 pC)

Peak – 6.5 p.e for the β - ray source \rightarrow 5.7 p.e for 1 MIP FEG

FEC Dynamic Range up to 18pc (~10%)



ADC count VS input charge ADC count VS input charge 15000 15000 10000 5000 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 input charge (pC)

If noise ~0.8fC at 650V:
Detection probability of 1 MIP is larger than 10 σ (1 p.e is 3 σ)
Dynamic range > 10³ MIP Satisfy CALET requirement 1



CERN Beam Test at H6 Beam Line
 General purpose Front End Card developed in ISAS
 CAEN VME modules for controlling VA readout and ADC
 ADC separated from FEC
 512 ch multiplexed in one ADC

HIMAC Beam Test
Heavy Ions:
He 1.7MeV, C 10.1MeV,
Si 29.9MeV, Fe 71.6 MeV

Electron: 50 GeV/c, 100GeV/c Proton: 150 GeV/c





Charge Resolution

Setup of Imaging Calorimeter





TASC Setup





BGO Crystal 25mm × 25mm × 300mm

Teflon Sheet 0.1mm thick × 3

Photodiode S3204-08 Area 18mm×18mm Aluminized Sheet 12µthick on both side



BGO Logs and PD

Scale Model (~ 1/50) and Examples of Observed Showers



Beam Tests at CERN in 2003







→ 0.2 mm



at the bottom (25cm thick BGO) layer





Scintillating fibers readout







Hamamatsu 64 ch (8x8) 8 dynode MAPMT

VA32HDR14 chip from IDEAS •1 µs shaping time •Huge dynamic range (30 pC) •32 channels

MAPMT+FEC

Particle discrimination





Longitudinal shower profile (γ/n)





気球実験用プロトタイプ (2005年)



CALET 1/64 スケールモデル 2006年5月放球予定

検出器サイズ 128mmx128mm

- シンチファイバー: 1024ch PMT読み出し
- BGO: 24本 BGO PD読み出し







CALET 1/16スケールモデル(2007年)



Plastic Scintillator Scintillting Fiber(X & Y) 1mm square x 256 mm Lead Plate 0.15 r.l. BGO (X &Y) (25x 25 x 250 mm ³)	観測項目 観測希望時期 飛翔回数 レベルフライト 必要高度 装置重量	高エネルギー電子、ガンマ線 9月 1回 24時間以上 40 km 200 kg
Dimension Area : 256 x 256 mm ² Thickness : 215 mm Material Lead : 1.05 r.l. (7 layers) BGO : 8.93 r.l. (X&Y, 2 layers)	装置サイズ 姿勢制御 回収	100 cm

SciFi MAPMT FEC Readout Sciti Lead + BGO BGO	 : 4096 fibers : 64 tubes : 8 units : WLS-fiber : 10 r.l. : 40 logs 	Weight (Material) Acceptance Energy Res. Angular Res. Rejection Power	: 91 kg : 350 cm ² sr : 13 % (best) : 0.7 deg. : 5000
---	---	---	--

CALETスケールモデル ・電子10GeV~1TeVの観測 ・ガンマ線20MeV~10GeVの観測 Crab、AGN、大気ガンマ線

CALET ¼ スケールモデル 100日間気球観測







Gamma-Rays at Lower Energies: 20 MeV ~ 10 GeV

- Anti-Coincidence (< 0.5 MIPs) & On-board Tracking in IMC (> 3 layers) Trigger Rate of Gamma Rays: ~ 14 Hz (mostly from the Galactic Plane) Background: Albedo. ~37 Hz (> 10 MeV); Hadron, negligibly small
- Identification of gamma-ray by image analysis in IMC

Electrons and Gamma Rays* at Higher Energies: 10 GeV~ 10 TeV

*) The anti-coincidence is not valid due to backscattered particles

- On-Board Shower Trigger in IMC to reduce the backgrounds less than 1 % Trigger Rate: ~40 Hz
- Analysis of the Shower Development in TASC and the Shower Image in BGO Proton backgrounds to electrons and gamma-rays: < less than10⁻⁵ Electron background to gamma-rays : < 2 x 10⁻³

Proton and Heavy Ions: 1 $TeV \sim 1000 \ TeV$

- On-Board Shower Trigger in TASC
 - Trigger Rate: ~ 0.1 Hz
- Charge Identification by Incident Track in IMC

Data Processing Flow Chart





項目	数量	質量(kg)
カロリメータ本体	1式	1,760
ミッション部電子回路系*	1式	150
PIU	1式	36
FRGF	2個	26
通信制御装置·電源部	1式	53
主構体	1式	300
カーゴ取付機構**	1式	50
MLI	1式	10
外部艤装	1式	115
合 計	2,500	

*) 外部トリガシステム、フロントエンド処理部、データ処 理部およびサポートセンサ

**) HTV非与圧パレットに用いられている構造インタ

フェース

項目	数量	質量(kg)
カロリメータ本体	1式	1,760
ミッション部電子回路系*	1式	150
PIU	1式	36
FRGF	2個	26
通信制御装置·電源部	1式	53
主構体	1式	168
カーゴ取付機構**	1式	50
MLI	1式	10
外部艤装	1式	115
合 計		2,368
システムマージン		132
総計		2,500

構造解析 (剛性)

2005年12月6日

熱解析(温度制御なし)

カロリーメータ部分の温度予測結果 FEP/DPC間を高熱結合

高温ケース: 38~43 ℃

低温ケース: 6~12℃

CALETの温度制御

JEMに標準的に装備されている流体による温度制御の検討

CALETのISS軌道上への打ち上げ

CALET

Launching of H-II Rocket

Separation from H-II

2005年12月6日

CALET

Institution	Current Project	Contribution in CALET	Co PI
NASA/Goddard	GLAST, BESS	Anti Trigger System	R. E. Streitmatter
Washington U.	ACE, TIGER	Scintillating Fiber Detector	W. R. Binns
Louisiana State U.	ATIC	BGO Calorimeter	J.P.Wefel
U. of Siena and Pisa	AMS,CREAM	NASA 予昇甲請 Silicon Detector	P. S. Marrocchesi
U.of Florence	PAMELA	DAQ System, Silicon Detector	0. Adrinani
Purple Mountain Obs.	Lunar Mission	BGO Calorimeter, Simulation	J. Chang

コンポーネントとして供給

想定されるスケジュールと予算

ミッション部(搭載装置)経費:

国内(JAXA)予算: 20億円 + α 国外(NASA, INFN, NSFC) 10億円

 ミッション部以外のバス部とパレット部に関する経費:
 (曝露部およびHTVとのインタフェースに関わる部分) ISS 利用促進に関わる経費(補助金)を検討

ミッションの現状と展望

- 財団法人日本宇宙フォーラム「宇宙環境利用に関する地上研究公募 宇宙科学フェーズIA」によって、2期6年間にわたって概念設計、フェーズA相当の開発研究を実施し、JEM曝露部へのCALET搭載に関する基本的な技術的課題を克服している。
 採択テーマ名:

 1)高エネルギー電子、ガンマ線観測装置(CALET)の概念設計(平成13-15年度)
 - 2)シンチファイバー測定器を用いた高エネルギー宇宙電子、ガンマ線の観測(平成10-12年度)
- CERN-SPSのビームを用いた性能実証化テスト、南極周回気球実験(13日間)を実施した。
- 宇宙3機関統合にともない、それまでNASDAで推進されていたJEM曝露部のプロジェクトは宇宙科学研究本部で実施されることになった。科学ミッションは宇宙理学委員会での承認をうける。
- 平成16、17年度に「高エネルギー宇宙線計測」 宇宙環境利用科学委員会研究班WGとして提案し、採択されている。
- 宇宙理学委員会による「宇宙科学に関する小型計画の構想募集について」の「国際宇宙ステーション(ISS)曝露部の科学観測・実験計画」への提案を、国際研究チームを組織して行っている。
- 2012年頃の打ち上げをめざす。このため、宇宙理学委員会におけるWGの承認とミッション公募 の早期発出を強く期待している。

宇宙線コミュニィティーからのサポートが不可欠

2005年12月6日