

高エネルギー電子、ガンマ線観測計画 (CALET: CALorimetric Electron Telescope)

神奈川県工学部 鳥居祥二

torii@phu2.n.kanagawa-u.ac.jp

神奈川大工 (JSF*)、宇宙研^A、NASDA^B、横国大工^C、放医研^D、芝工大シ工^E、埼玉大理^F、
立教大理^G、青学大理工^H、神奈川衛生短大^I、名大STE研^J
中国科学院紫金山天文台^K

鳥居祥二、槇野文命、立山暢人、田村忠久、立山暢人、柏木利介、吉田健二、奥野祥二、
日比野欣也、安楽和明*、山下太郎*、西村純^A、山上隆正^A、斉藤芳隆^A、高柳昌弘、
柴田槇雄^C、片寄祐作^C、内堀幸夫^D、北村尚^D、笠原克昌^E、水谷興平^F、村上浩之^G、
小林正^H、古森良志子^I、湯田利典^I、甘為群^K、常進^K

ミッション概要

観測概要:

宇宙ステーションの日本実験モジュールに2.5トンの装置を搭載して3年以上観測する。

電子及び陽子、原子核により宇宙線加速と銀河構造の解明を行う。
ガンマ線観測により、宇宙の進化、暗黒物質、銀河形成の謎にせまる。

観測装置:

シンチファイバーを用いたイメージングカロリメータと無機シンチレータの全吸収型カロリメータの組み合わせで、極めて広いエネルギー領域で高精度な観測を行う。

電子: 3GeV – 10 TeV ガンマ線: 20 MeV – 10 TeV 陽子、原子核: 1TeV-1000TeV

装置技術:

宇宙線シャワーのイメージングにより粒子弁別を行う技術を世界で初めて宇宙で実現する。

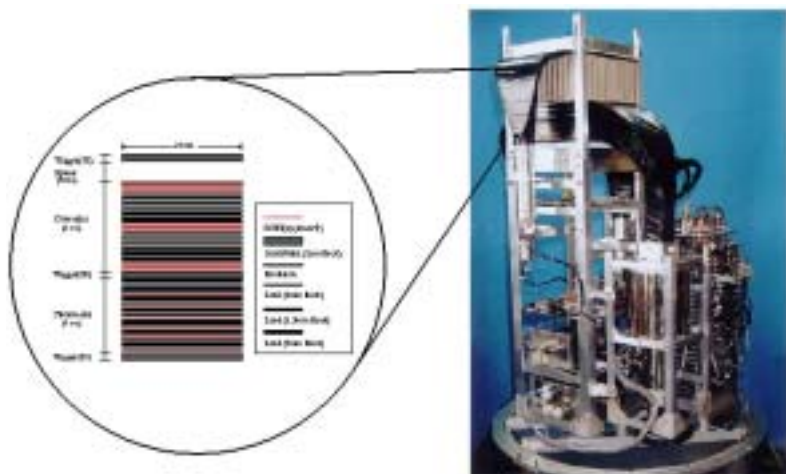
3万チャンネル以上の光電子増倍管の多チャンネル読み出しの最新技術を用いる。
無機シンチレータによる高精度な粒子識別とエネルギー測定とを実現する。
日本では初めてのトンを超える科学観測機器を製作し、観測を実現する。

with Scintillating fibers

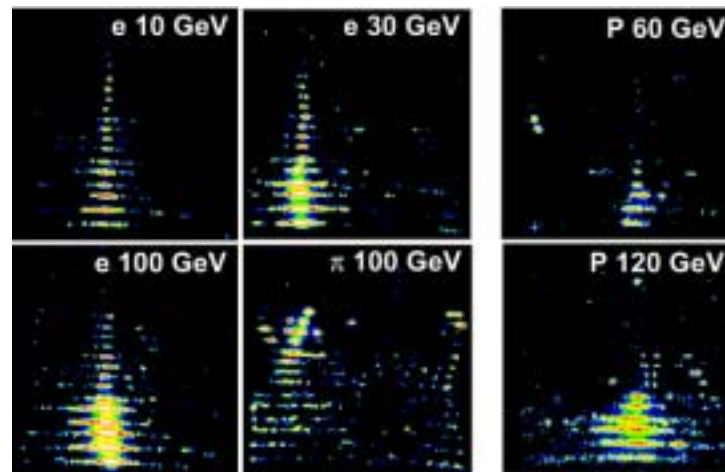
1993年—1998年：

**世界に先駆けてシンチファイバーを用いた気球搭載用解像型
カロリメータにより10-100 GeV領域の電子観測に成功**

NIM 457, 499-508 (2001) ApJ 559, 973-984 (2001)



BETS



Shower Image (CERN)

南極周回気球実験 (PPB-BETS)

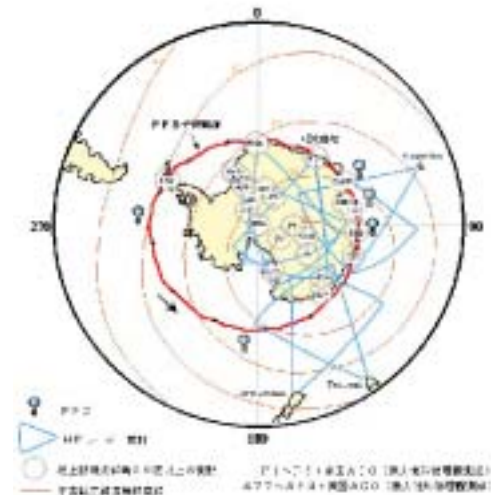
2002年—2003年:

南極周回気球による長期間 (>20日) 観測により
TeV領域電子の観測を目指す. 装置開発では、
衛星観測と同様な技術 (高真空、太陽電池、衛星通信、長期安定) を利用している。



PPB-BETS

Expected Trajectory of PPB (Polar Patrol Balloon)



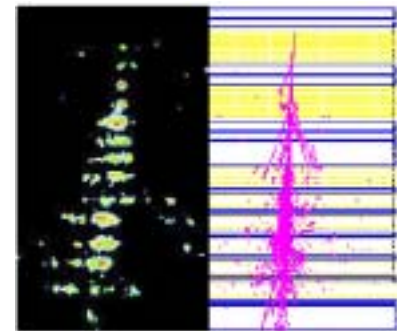
太陽電池をつけたゴンドラ

BETSによる大気ガンマ線観測

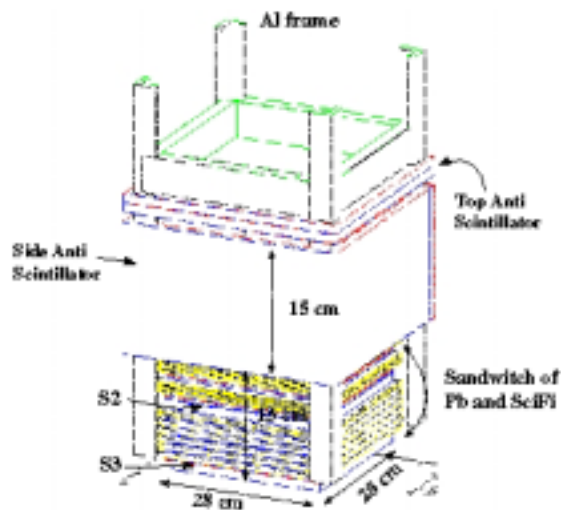
1999年ー2001年:

BETSにガンマ線用アンチカウンターを付加して**GeV領域の大気ガンマ線**の観測を行ない、**大気ニュートリノ振動の解明**に必要なシミュレーション計算の相互作用モデルを検証。

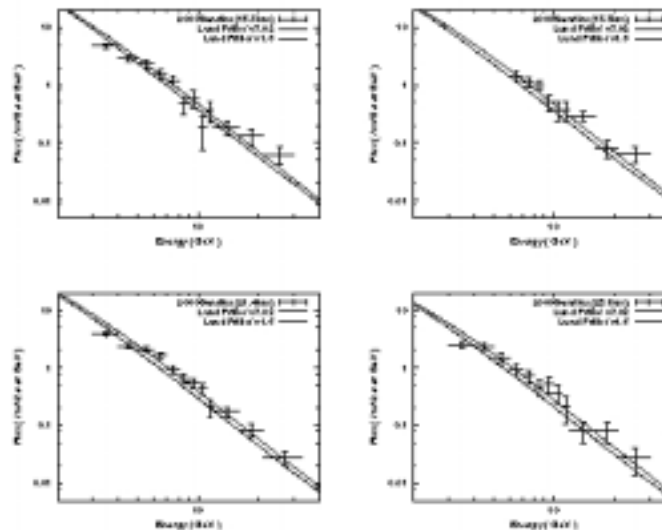
Phy.Rev. D.66 052004(1-9) (2002)



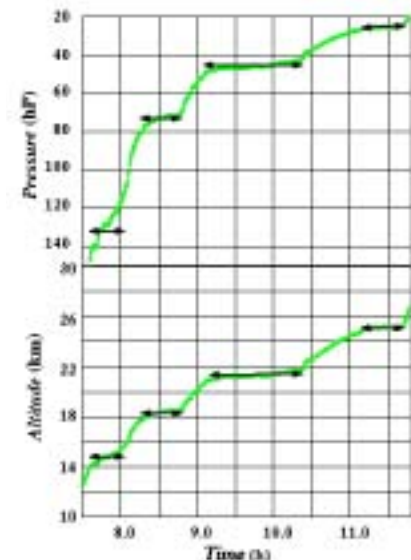
γ ray shower



Anti-counter



Gamma-ray Energy Spectrum



Flight Curve

2003年2月1日

宇宙線研究所シンポジウム

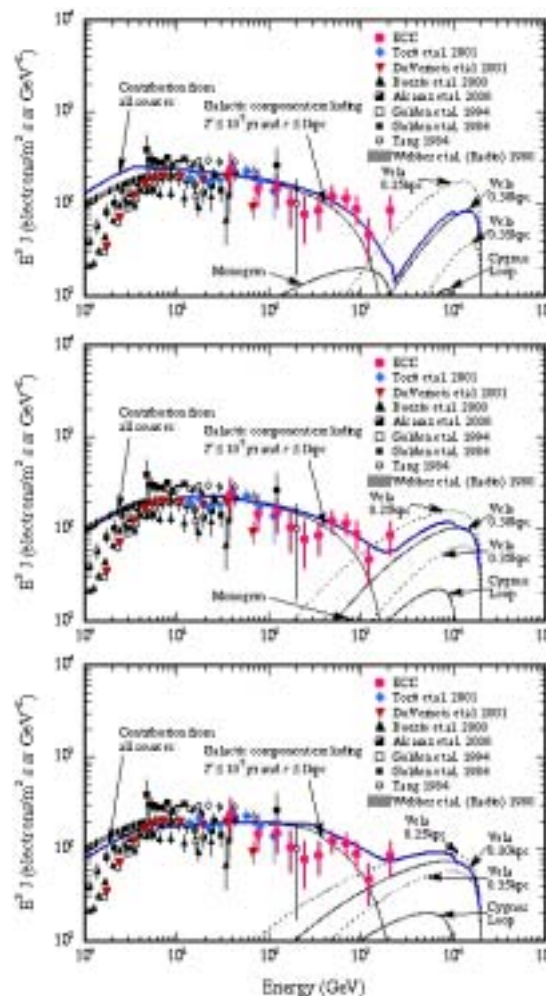
電子観測源の同定

数100 GeV ~ 10 TeV の高エネルギー領域の電子スペクトルには、電子加速源と推定される超新星残骸のうち、地球近傍 (1kpc以内) で年齢10万年以下の超新星残骸の影響が強く表れる。特に高エネルギー限界の10TeV近辺ではVelaを最有力とした数個の加速源候補にしばられ、超新星残骸での電子加速の直接検証となり得る。また高エネルギーであるため異方性を伴って検出される可能性もある。

10 GeV ~ 100 GeV の電子スペクトルの統計精度を格段に向上させ、銀河内での電子の拡散係数を精密に決定することで銀河構造に関する知見を深める。超新星爆発で電子が獲得するエネルギー量を押さえることで超新星の出現率、距離、エネルギーなどのモデルに対する厳しい制限を与えることができる。電磁波では見えない超新星残骸や新たな電子加速源の存在の示唆へとつながる可能性もある。

~ 10 GeV の電子は太陽変動の影響を受けて強度が変動する。長期間にわたる詳細な観測が、太陽による宇宙線強度変動のモデルの解明に役立つ。

拡散モデルによる電子エネルギー スペクトルの予測値とデータの比較



D at 1TeV:

$1 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$

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

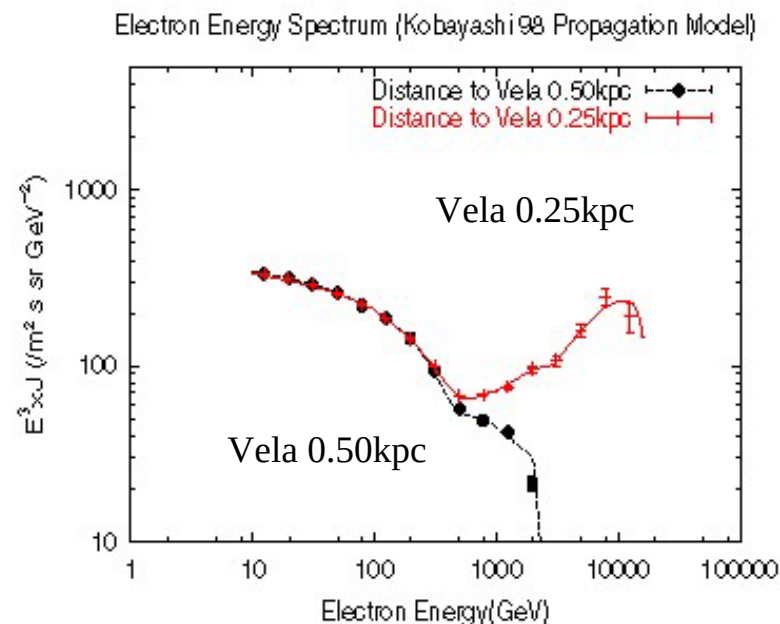
$4 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$

電子観測の期待値

CALETによる電子観測量は、 $S \Omega T \sim 1000 \text{ m}^2 \text{srday}$ であり、その観測量から期待される電子観測数を、低エネルギー領域からの-3.3のべきを仮定して求める。

E (GeV)	Expected Number	e/p
10	7.4×10^7	120
100	3.8×10^5	420
1,000	1.8×10^3	1,500

CALETの観測量とエネルギー分解能を仮定した場合に、Vela まで距離が 0.25 kpcの時と0.50 kpcの時に予測される電子エネルギースペクトルの比較。

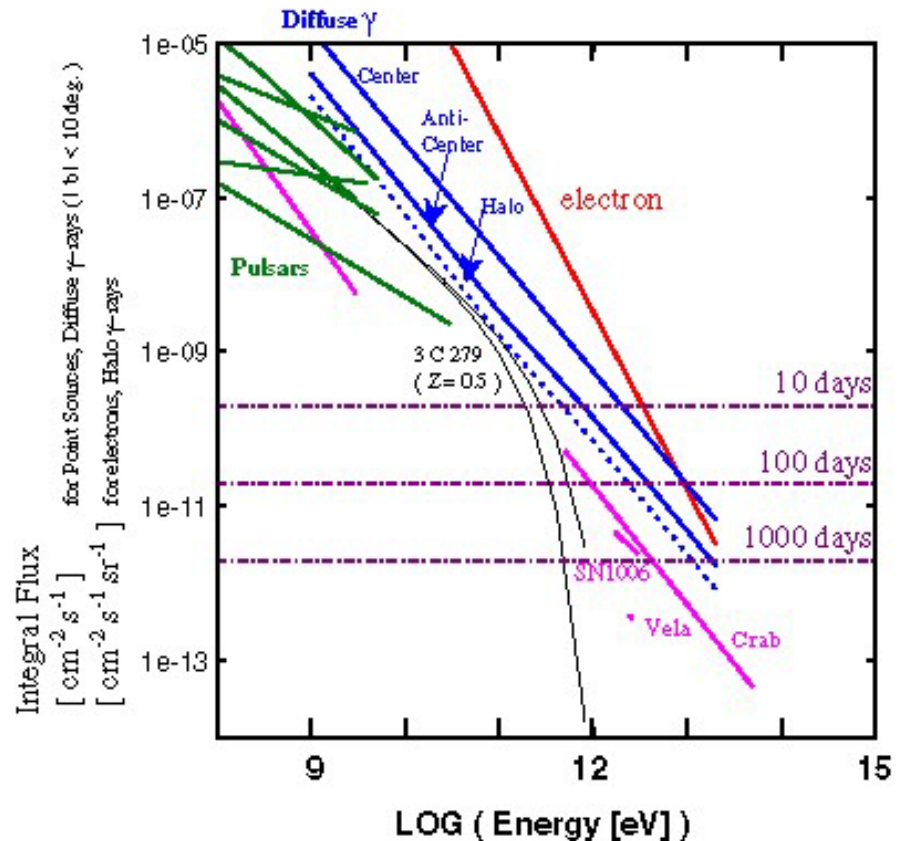


ガンマ線の起源

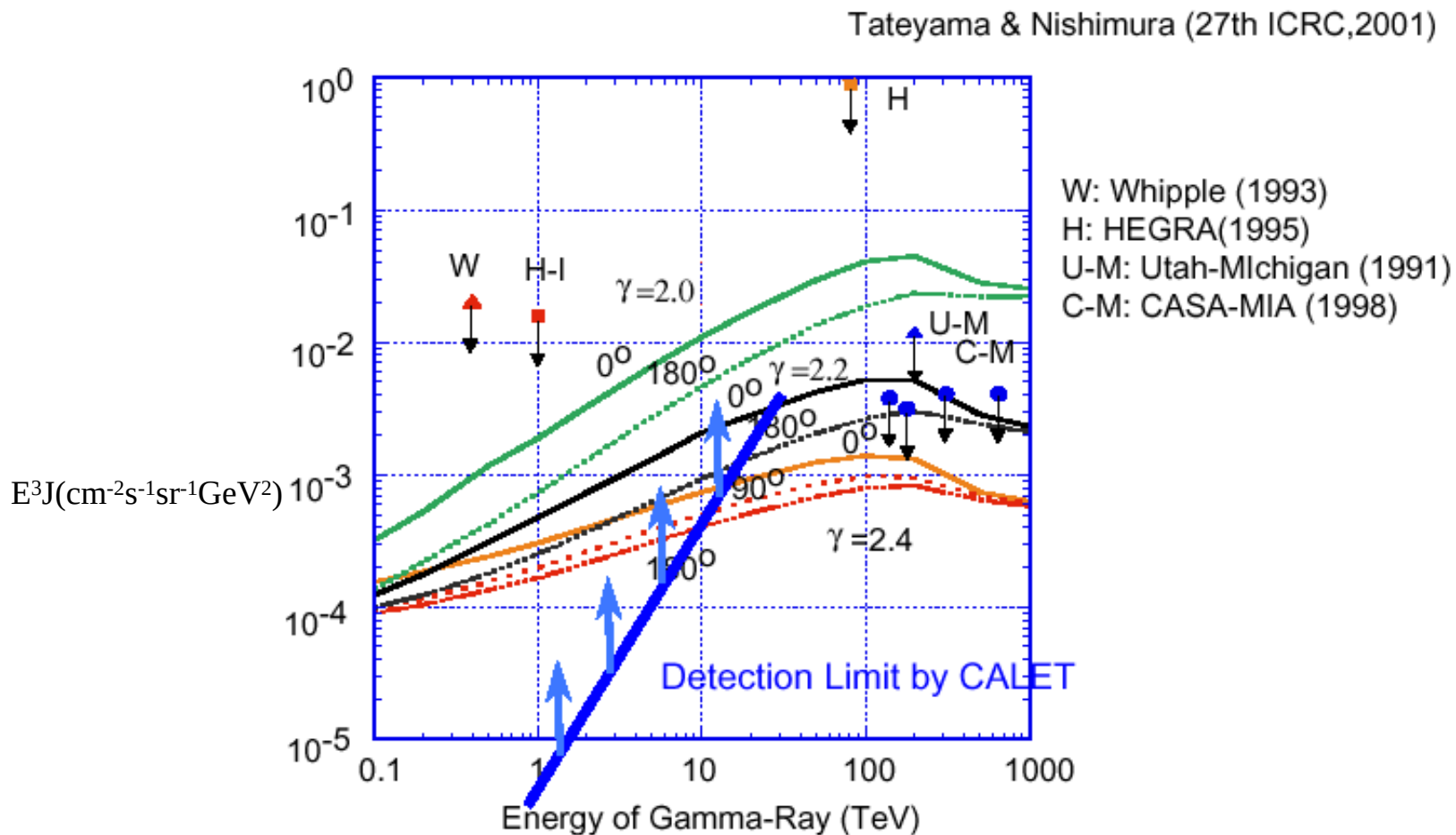
20 MeV ~ 10 TeV 領域では、ガンマ線天体、拡散ガンマ線、ガンマ線バーストの観測が期待される。3年間の観測では、各ガンマ線天体については数10日間程度、拡散ガンマ線の場合、銀河円盤は約100日間、銀河ハローと銀河系外は約1000日間の観測時間が取れる(図中の検出限界は1光子の検出を示す)。

CALETによって未開の100 GeV領域の探索も可能になる。その結果、拡散成分の起源の解明や、AGNからのガンマ線スペクトルの赤外線背景輻射による吸収の検出、暗黒物質の探索、パルサーのガンマ線放射限界にせまることも可能となる。ガンマ線バーストについても高エネルギーまでのびる 10^{-5} erg/cm²程度のものが年間数個検出されると予測される。

CALETによる観測限界



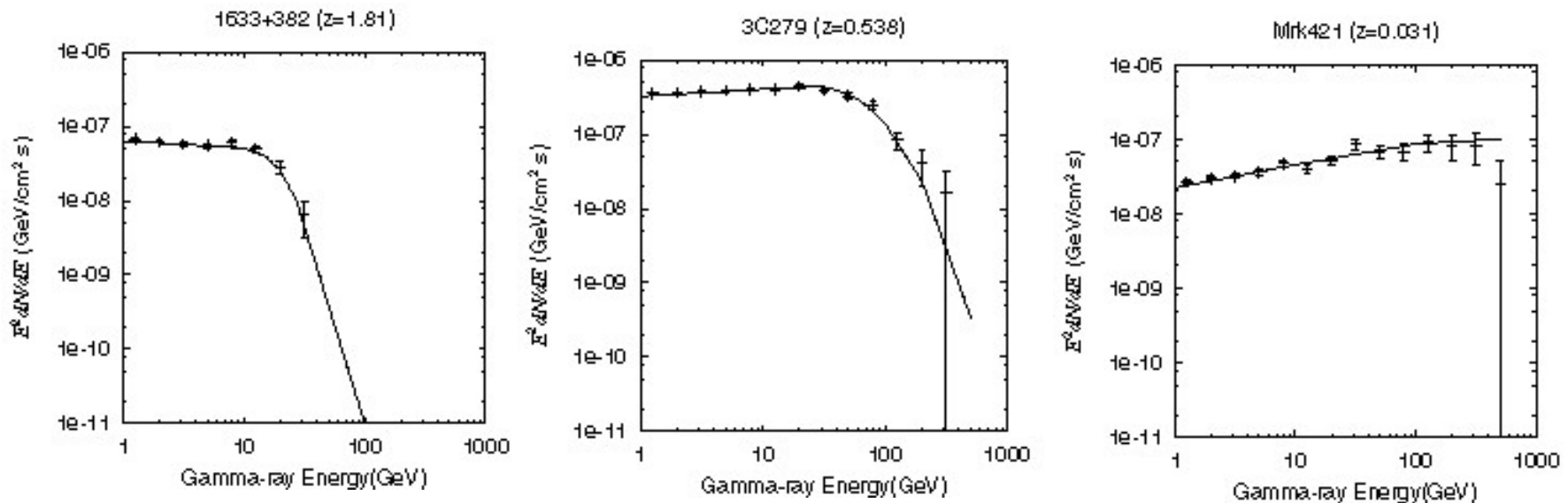
Diffuse Gamma-Ray Emission from the Galactic Plane ($|b| < 10^\circ$)



Expected Observation of Gamma-Rays from AGN

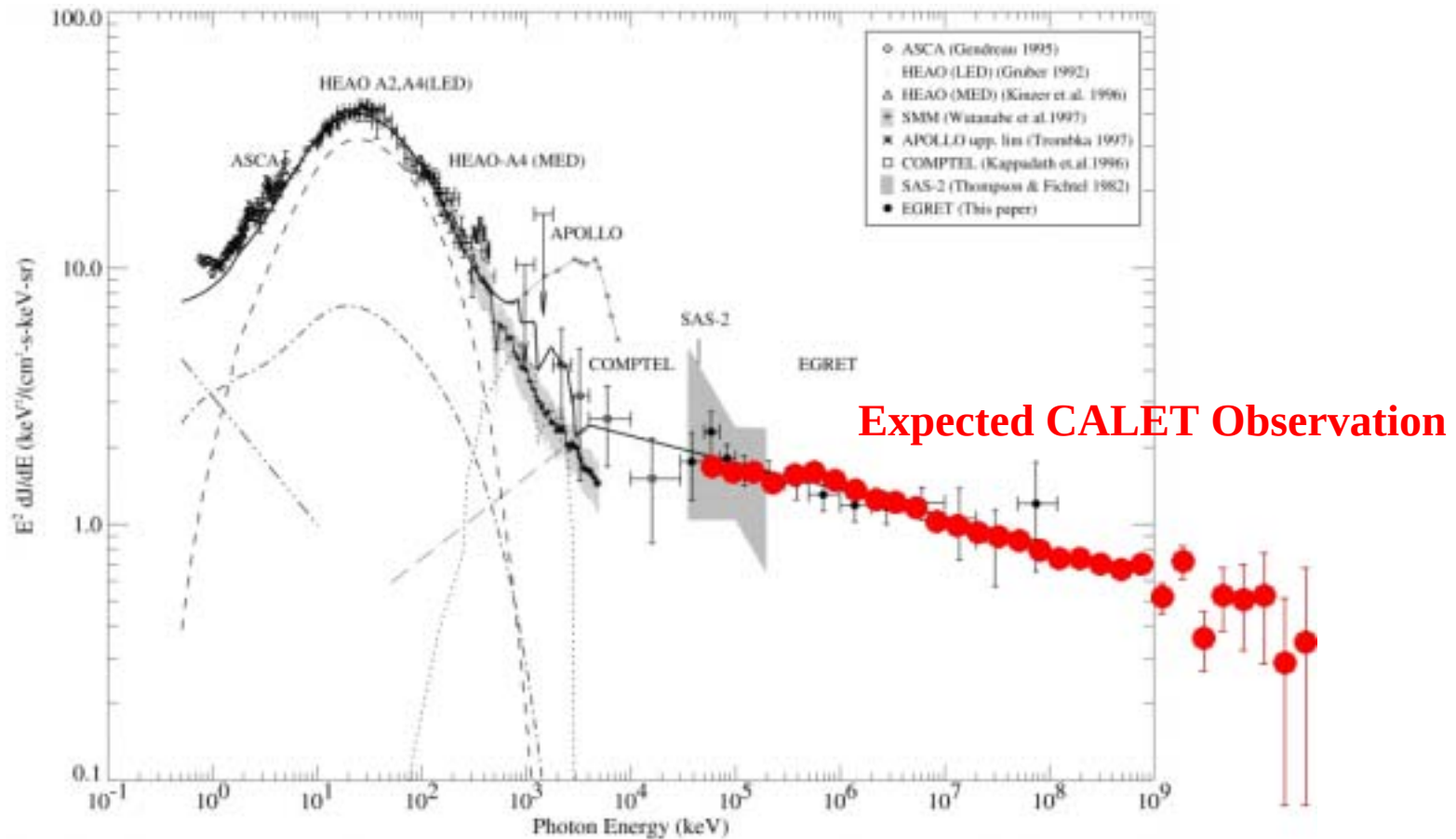
Gamma-rays from AGN are absorbed in the extra-galactic space mainly by the background IR. The absorption depends on the distance of AGN.

CALET has a capability to detect the change of spectral index in 10 ~1000 GeV .



Calculated spectra by Salamon and Stecker, 1998 (ApJ) and the expected observation by CALET.

Extra Galactic Radiation and Gamma-ray Component



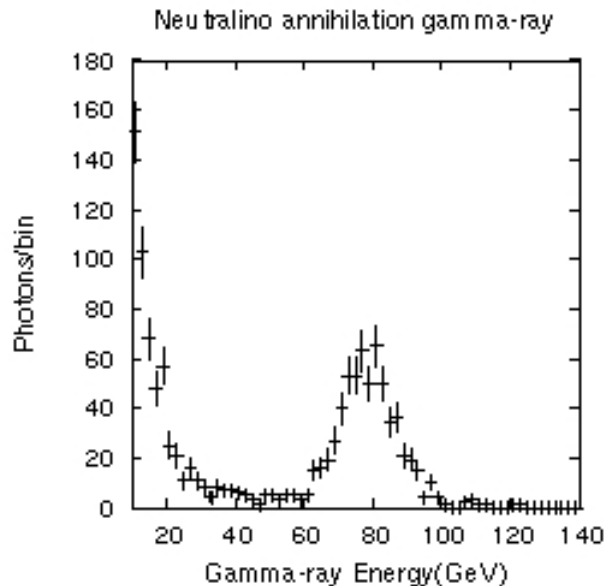
Expected Observation of Dark Matter

Line gamma-ray by annihilation of Neutralino
(Bergstrom et al., Phy.Rev. D (2001)

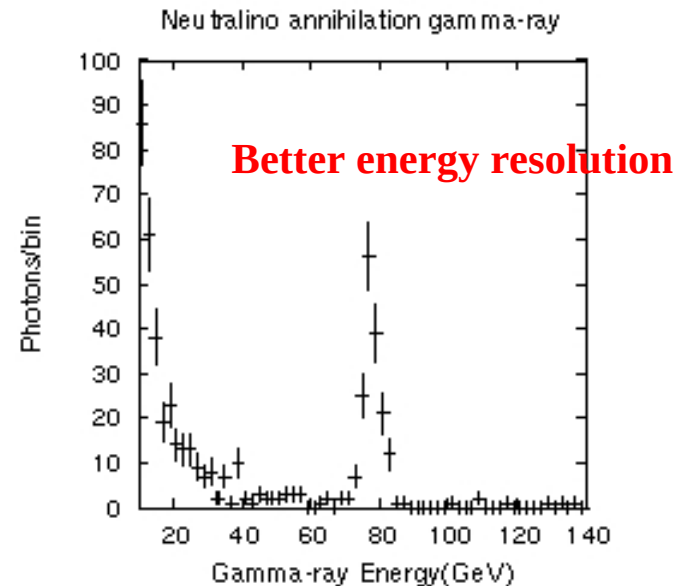
Gamma-Ray Energy: 78 GeV

Flux: $3 \times 10^{-7} / \text{cm}^2 \text{ s sr}$ ($b=-10^\circ$, $44^\circ \times 1^\circ$)

GLAST



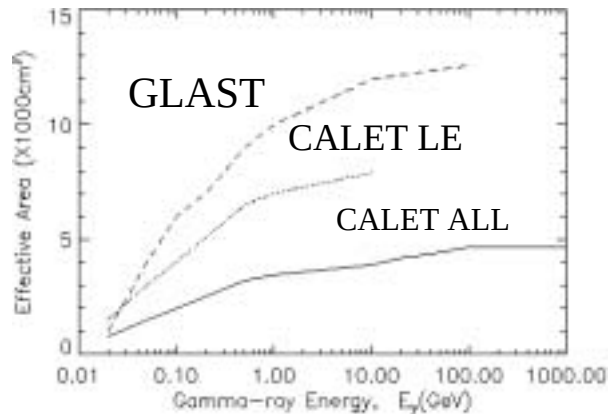
CALET



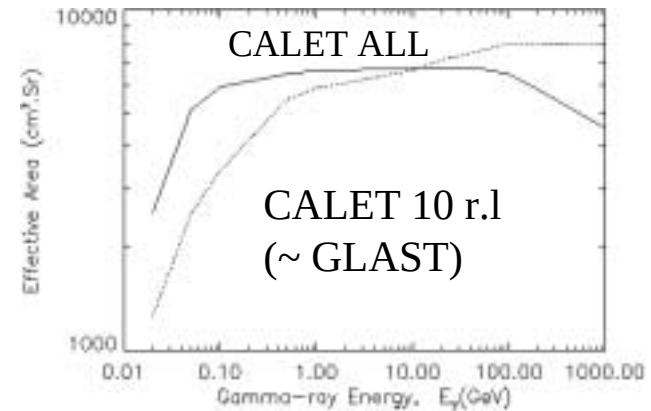
Simulation Study on Performance of Gamma-Ray

(Preliminary)

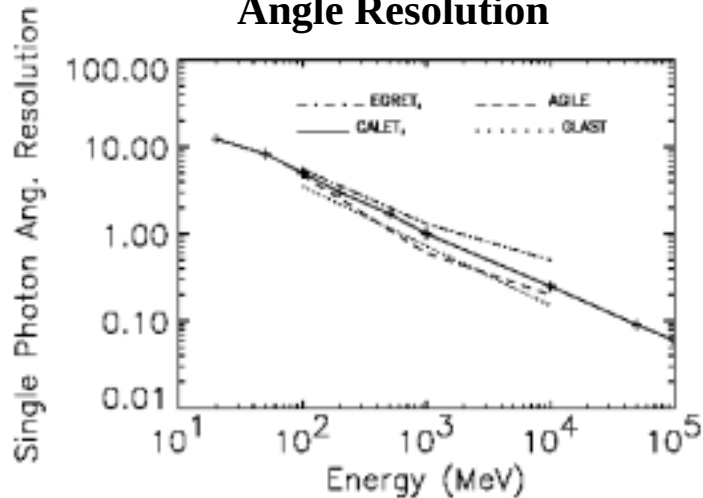
Effective Area



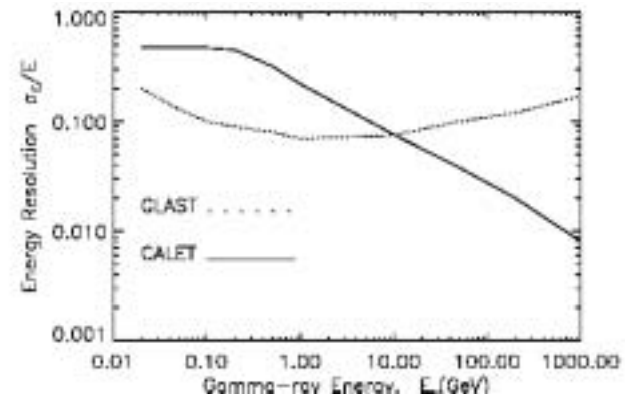
Geometrical Factor



Angle Resolution



Energy Resolution



陽子、原子核加速機構の解明

CALET can measure proton and heavy ion flux in the energy region exceeding 1 TeV, in which magnet spectrometer is powerless.

For proton measurement:

Seff $\sim 0.5 \text{ m}^2 \times 1/3$ (for p) ~ 0.17

Exposure factor for 1000 days:

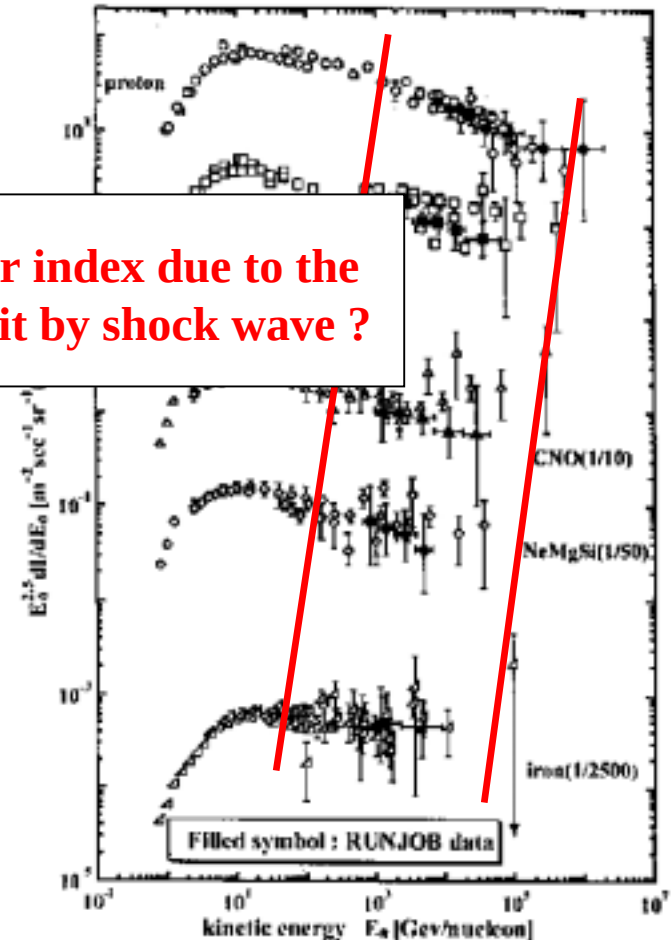
$170 \text{ m}^2 \text{ sr day} \sim 1.5 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ sr s}$

Expected numbers of protons:

Energy (TeV)	Number
1	$\sim 10^6$
10	1.8×10^4
100	3.2×10^2
1000	6

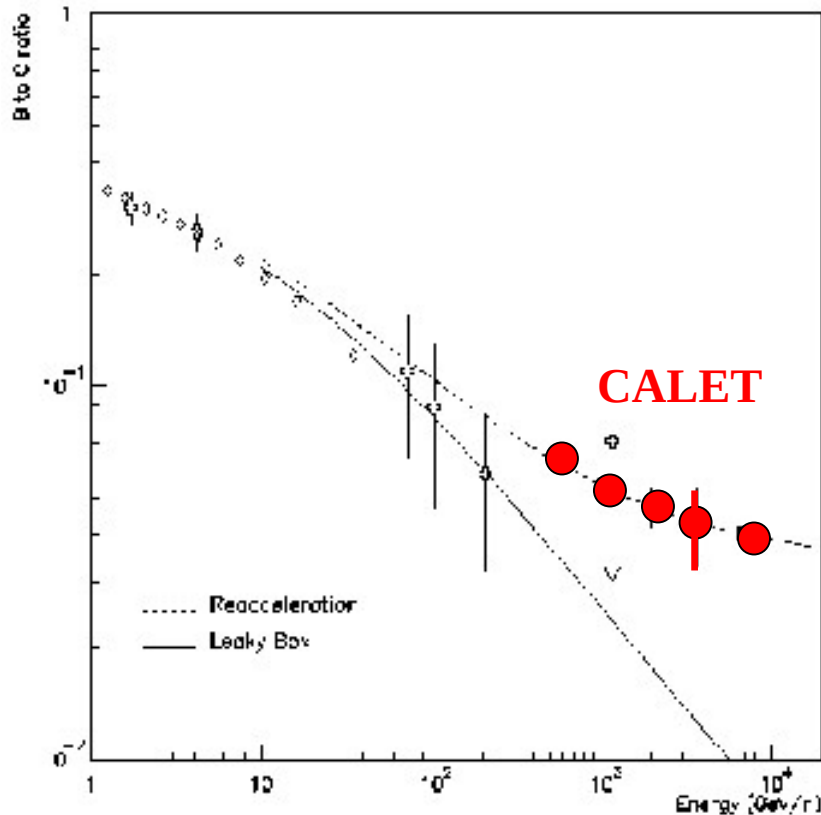
Change of power index due to the acceleration limit by shock wave ?

Present Data



B/C Energy Dependence of B/C by Leaky Box Model

S.Swordy1998 (Corrected for CALET)



- Observe all-particle primary spectrum $\sim E^{-2.7}$ to $\sim 10^{15}$ eV.
- S/N shock models predict $\sim E^{-2.1}$
- Observe secondary/primary $\sim E^{-0.6}$ to $\sim 10^{12}$ eV
- $2.1 + 0.6 = 2.7$ so no problem?
- But $E^{-0.6}$ cannot extend to 10^{15} eV because of low observed anisotropy.
- Need secondary/primary measurements at higher energy.

Conceptual Structure of CALET

Requirements:

Large Size $1 \text{ m}^2 \text{ sr}$
Imaging Capability $\sim 1 \text{ mm}$
Hadron Rejection Power $\sim 10^6$

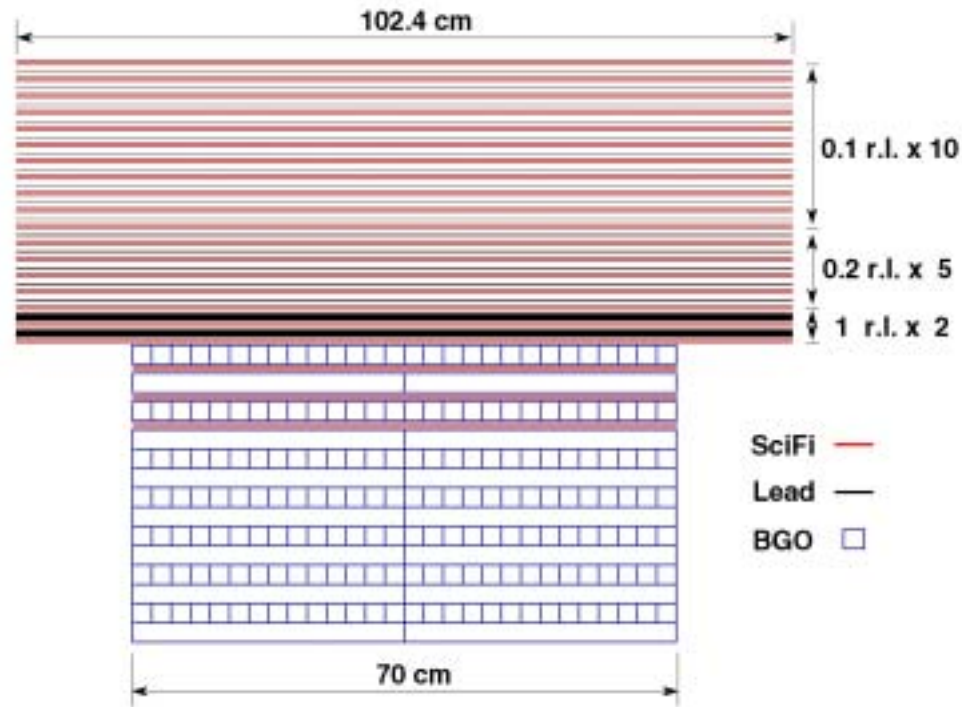
SciFi/ Lead Sampling Calorimeter:

Area: $1024 \times 1024 \text{ mm}^2$
SciFi Sheet: $1 \text{ mm} \times 1024 \text{ mm}$
7 layers (x & y) ($\square 40,000$ fibers)
Lead Thickness: 4 r.l., 0.13 m.f.p

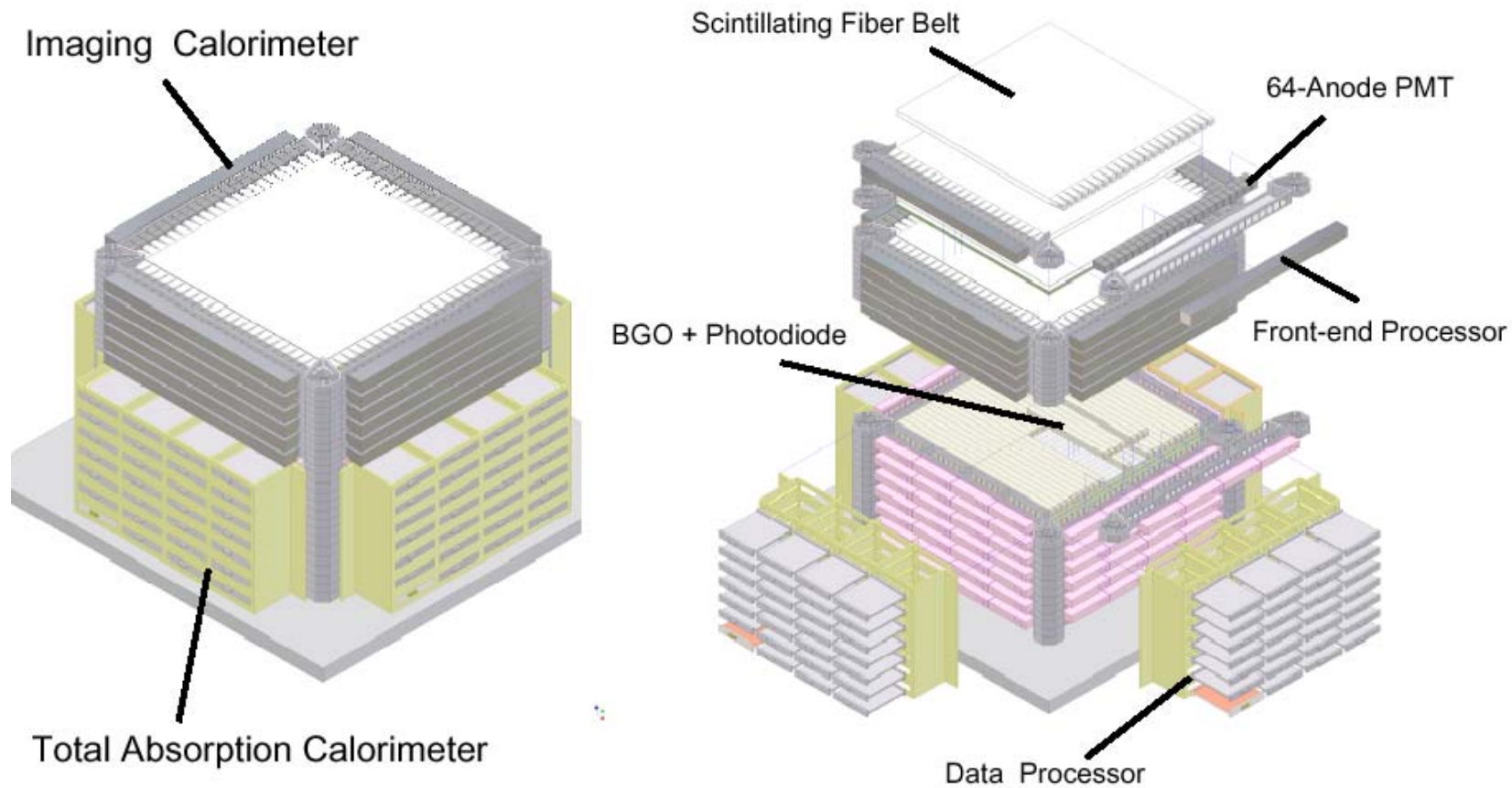
Total Absorption Calorimeter:

Area: $700 \times 700 \text{ mm}^2$
BGO Log: $25 \times 25 \times 350 \text{ mm}$
7 layers (x & y) (784 logs)
SciFi Sheet for 3 layers
Thickness: 32 r.l., 1.6 m.f.p

Total Weight: 1760 kg
Absorber Thickness: 36 r.l., $\sim 2 \text{ m.f.p}$



Configuration of Detector

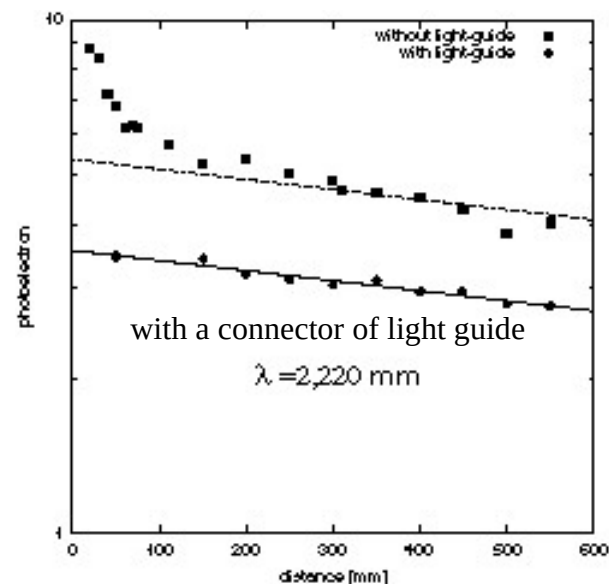
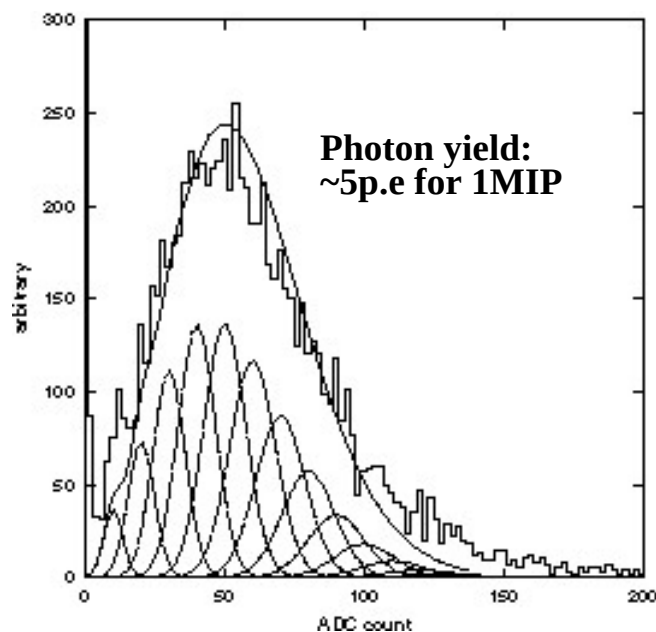


Qualification Tests of Scintillating Fiber

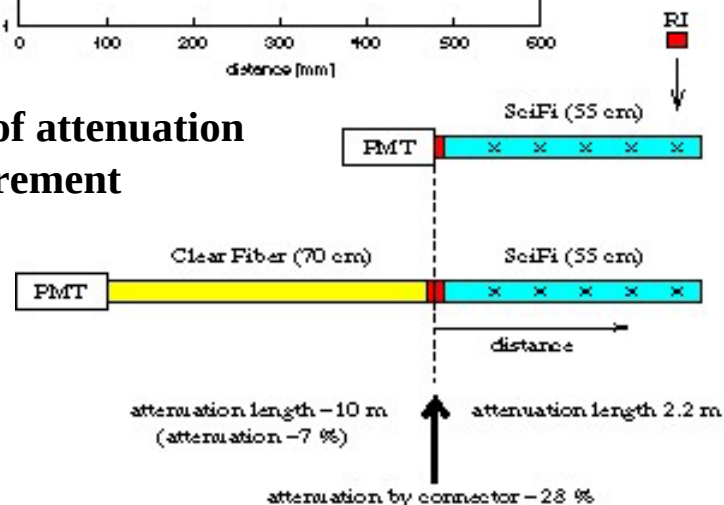
Measurement of attenuation of signal in fiber

Cross talk: $\sim 3.7\%$

Pulse height distribution for
1 MIP in 1mm square fiber

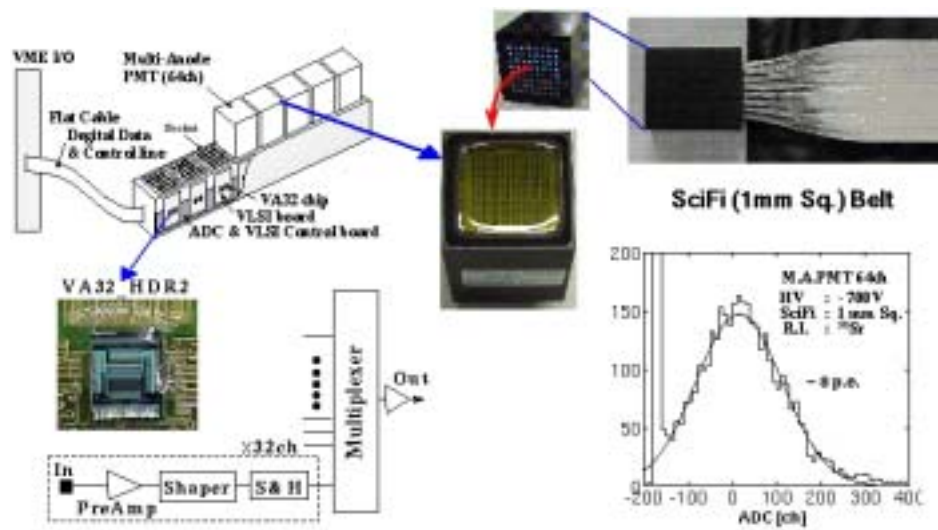


Setup of attenuation measurement

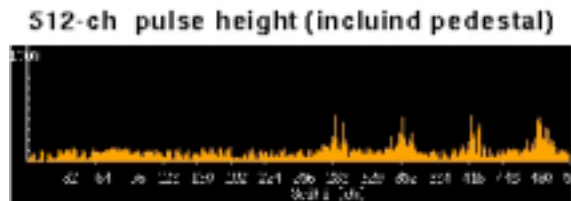


SciFi Readout System by PMT/Viking Chip

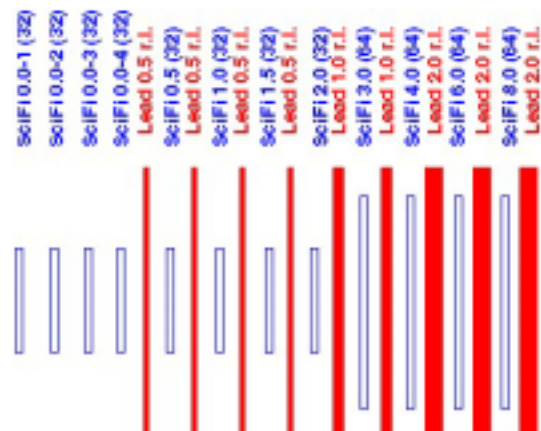
512ch Proto Type



200 GeV Electron Shower (CERN)



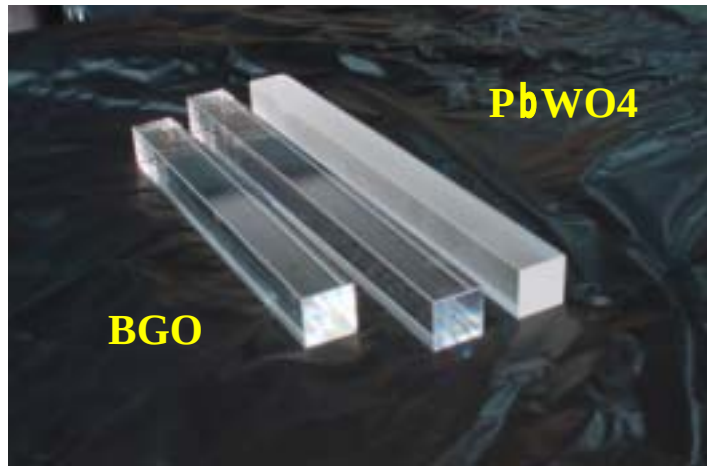
Shower development



SICFI Read-Out System

	I.I +CCD	PMT+VLSI
Detector Structure	Extra space for the light guide	Compact structure
Number	6 sets (5000 fibers / set)	500 PMTs 1000 Chips
Power Consumption	72 W (12 W / set)	PMT: 7.5W (15mW / PMT) Chip: 48 W (48mW / Chip)
Weight	36kg (6 kg / set)	PMT: 30 kg (60g / PMT) Chip: < 1kg
DAQ Rate	- 30 Hz (1024 x1024 pixels)	> 1 KHz (Max 20Mz / 512 ~ 40 kHz)
Dynamic Range in Number of MIPs	~ 3000	~ 1000 3000

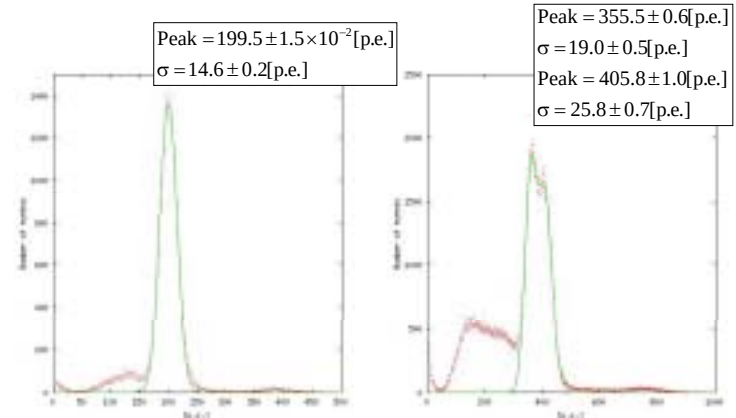
シンチレータの光量測定



ADC-distribution , BGO(SICCAS)

Cs137 (0.662MeV γ)

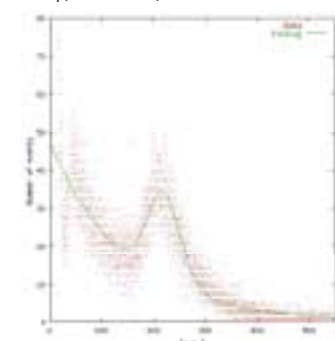
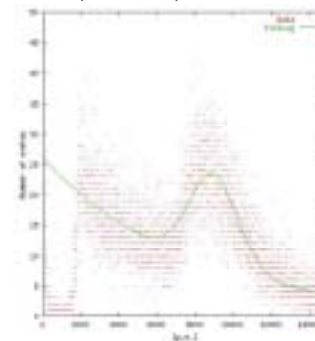
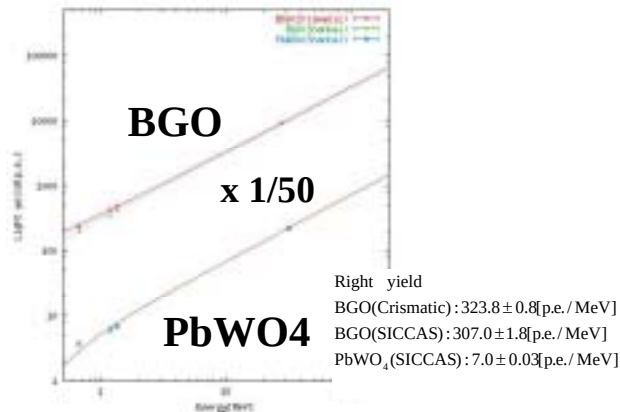
Co60(1.173MeV,1.333MeV γ)



ADC-distribution, Isotropic muon

BGO(Crismatic)

PbWO₄(SICCAS)

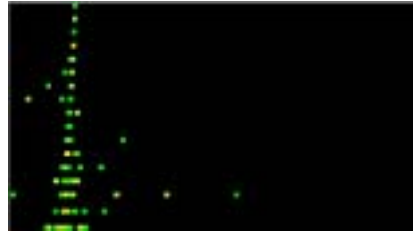


Shower Images by Simulation

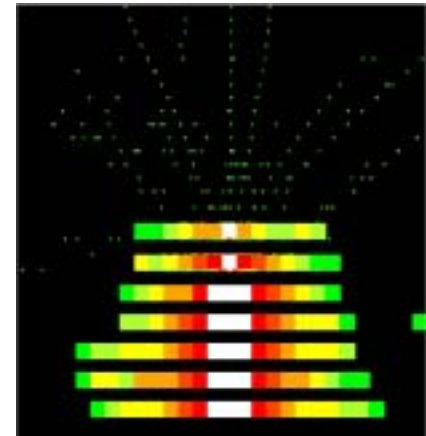
Gamma-ray 20 MeV



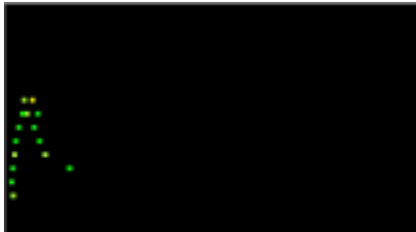
Electron 10 GeV



Proton 3 TeV



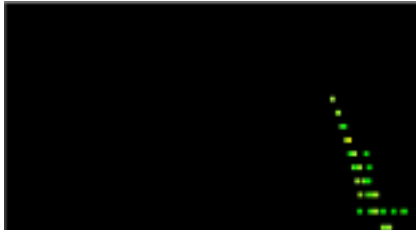
Gamma-ray 100MeV



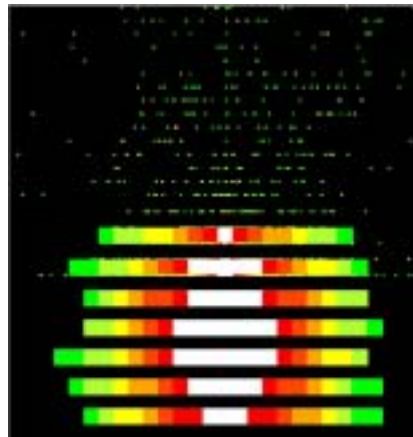
Electron 100 GeV



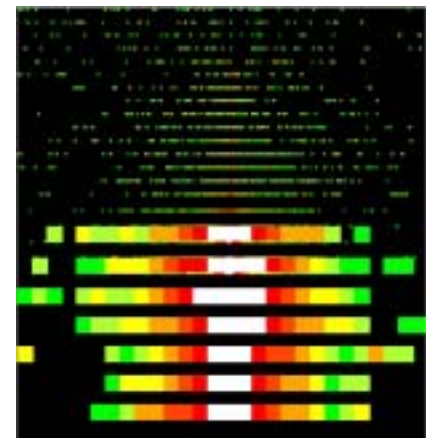
Gamma-ray 1GeV



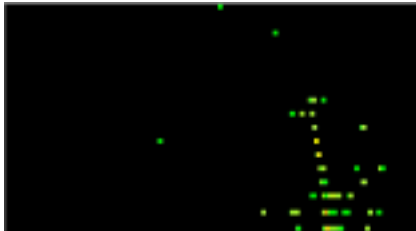
Electron 10 TeV



Proton 3 TeV



Gamma-ray 10GeV

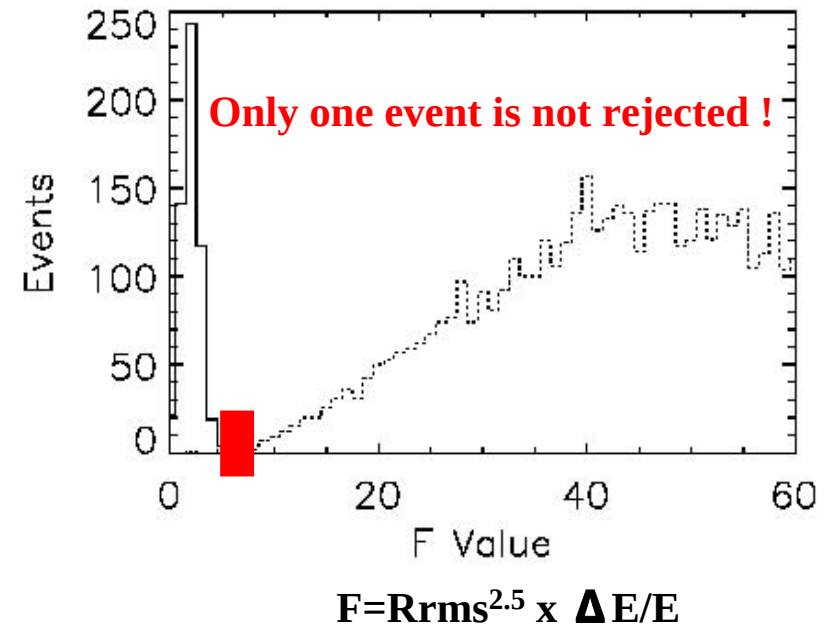
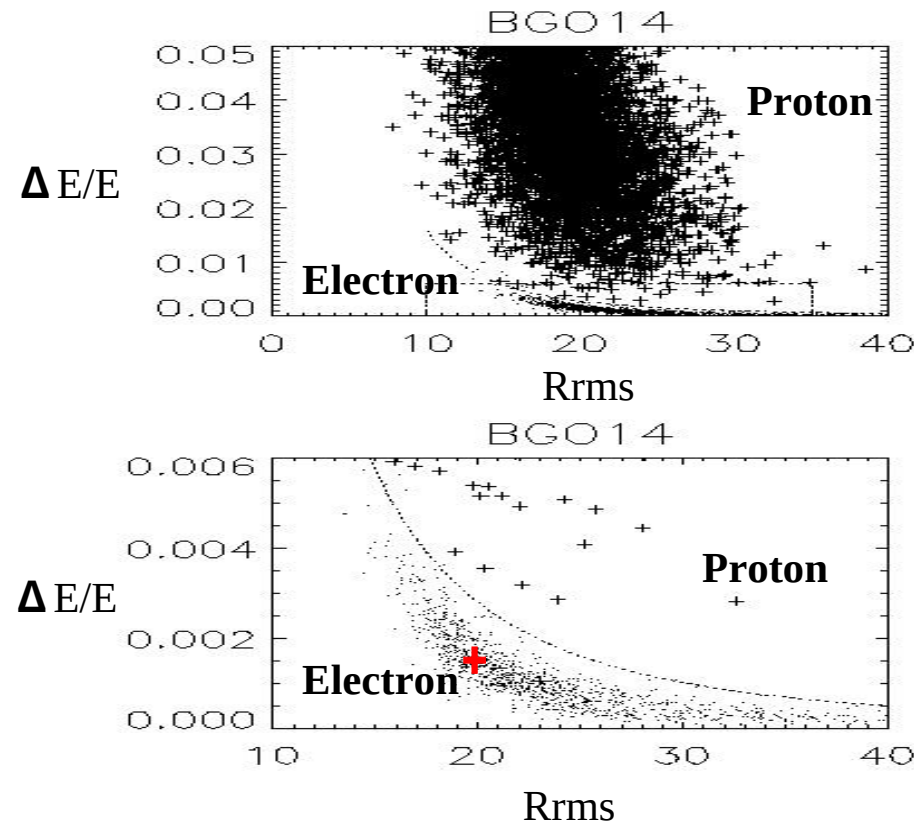


Simulation Study on Hadron Rejection Power

Simulation Events: Isotropic Incident and Uniform Distribution on the Top
 Proton Events $\sim 10^6$ at 10 TeV : Electron Events 1000 at 10 TeV

$\Delta E/E$: Fraction of Energy Deposit at the Bottom Layer (BGO14)

Rrms: Root Mean Square Latera Spread of Shower (Energy Weighted)



CALETの電子観測装置性能

Attachment Payload (Max. Total Weight)	JEM/EF Heavy (2500 kg)
Energy Range of Electrons	3) ~ 10,000 GeV
Geometrical Factor	0.5~1.0 m ² sr
Proton Rejection Power	~ 10 ⁶ #)
Energy Resolution	9.2 / sqrt(E(10 GeV)) %
Angular Resolution [deg.]	0.03 ~0.1 deg.
Instrumental Weight	2,200 kg

#) Total Rejection Power by Scifi .Cal. and BGO Cal. for the protons
at same energy with electrons

重量配分案

Subsystem	Mass (kg)
Detector	1760
Electronics (+ Sensors)	150
Trigger	50
Front End Processor	20
Control, Data Strage	50
Power Supply	30
System Intreface (GF、PIU, Attachment)	203
Electronics Insterface	18
Others	69
Structure	300
Total	2500

CALET概観

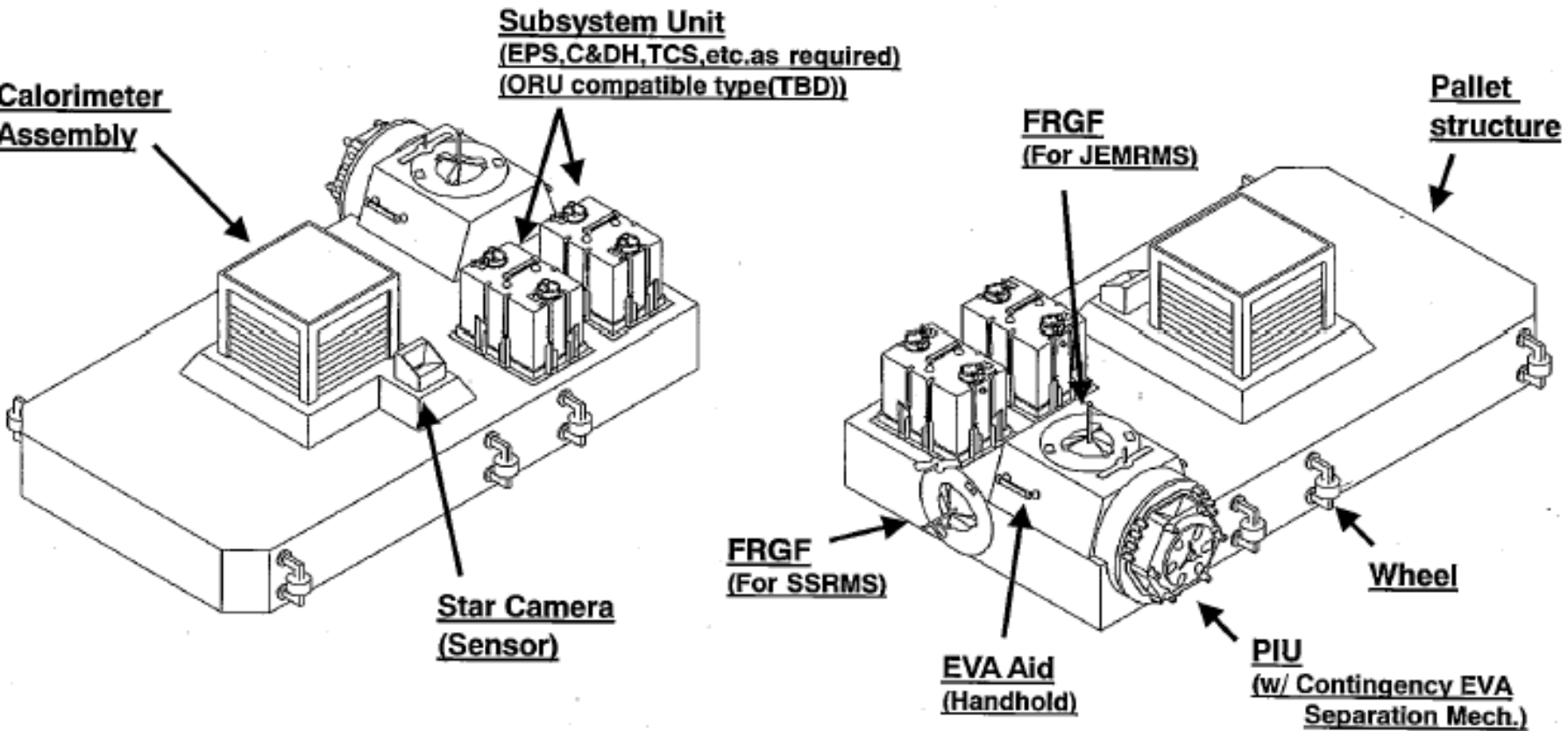
Area: 5000 cm² (~1 m²sr)

Material : 36 r.l ~2 m.f.p

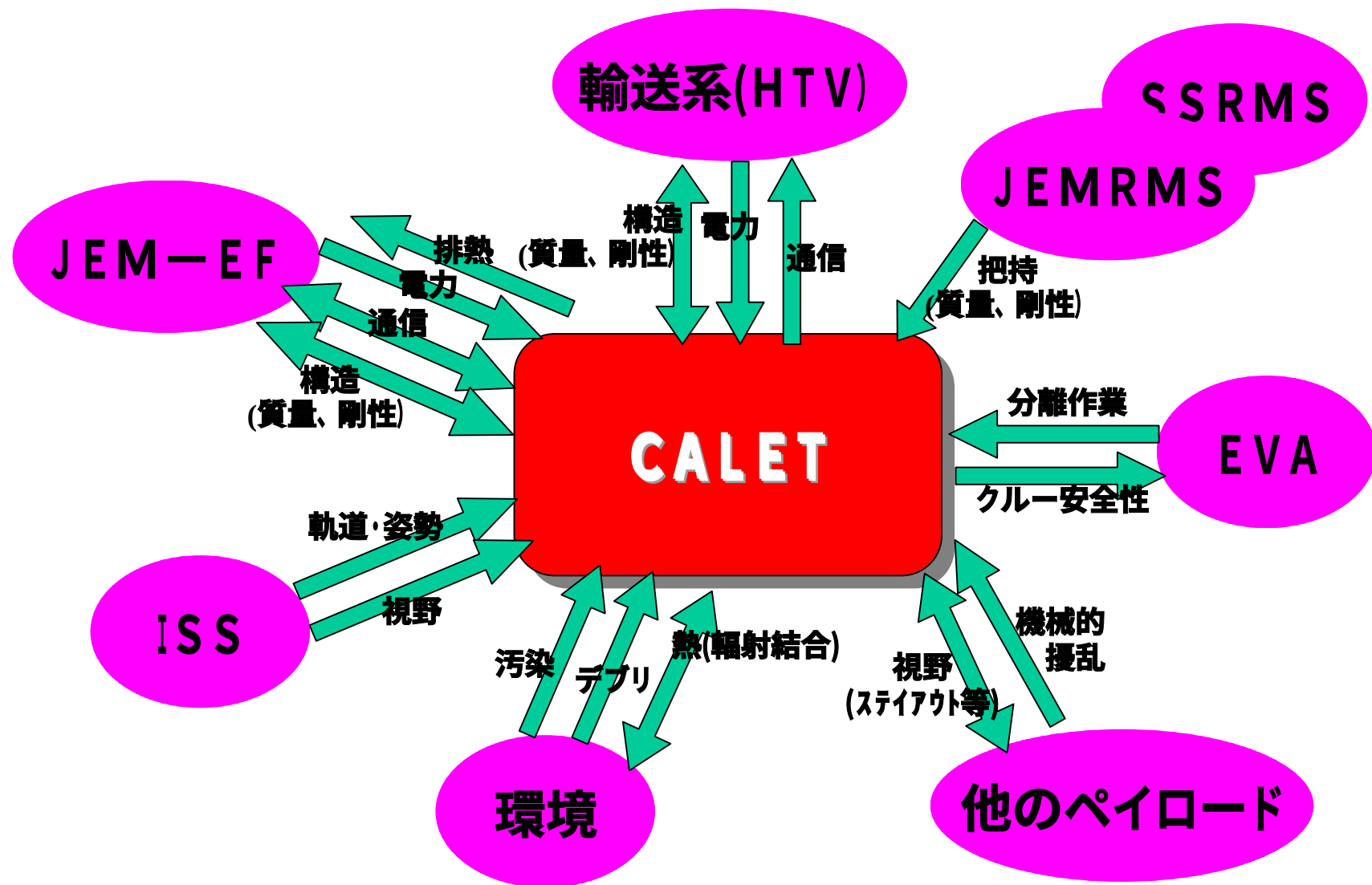
Weight: ~ 2,200 kg

Power : < 500 W

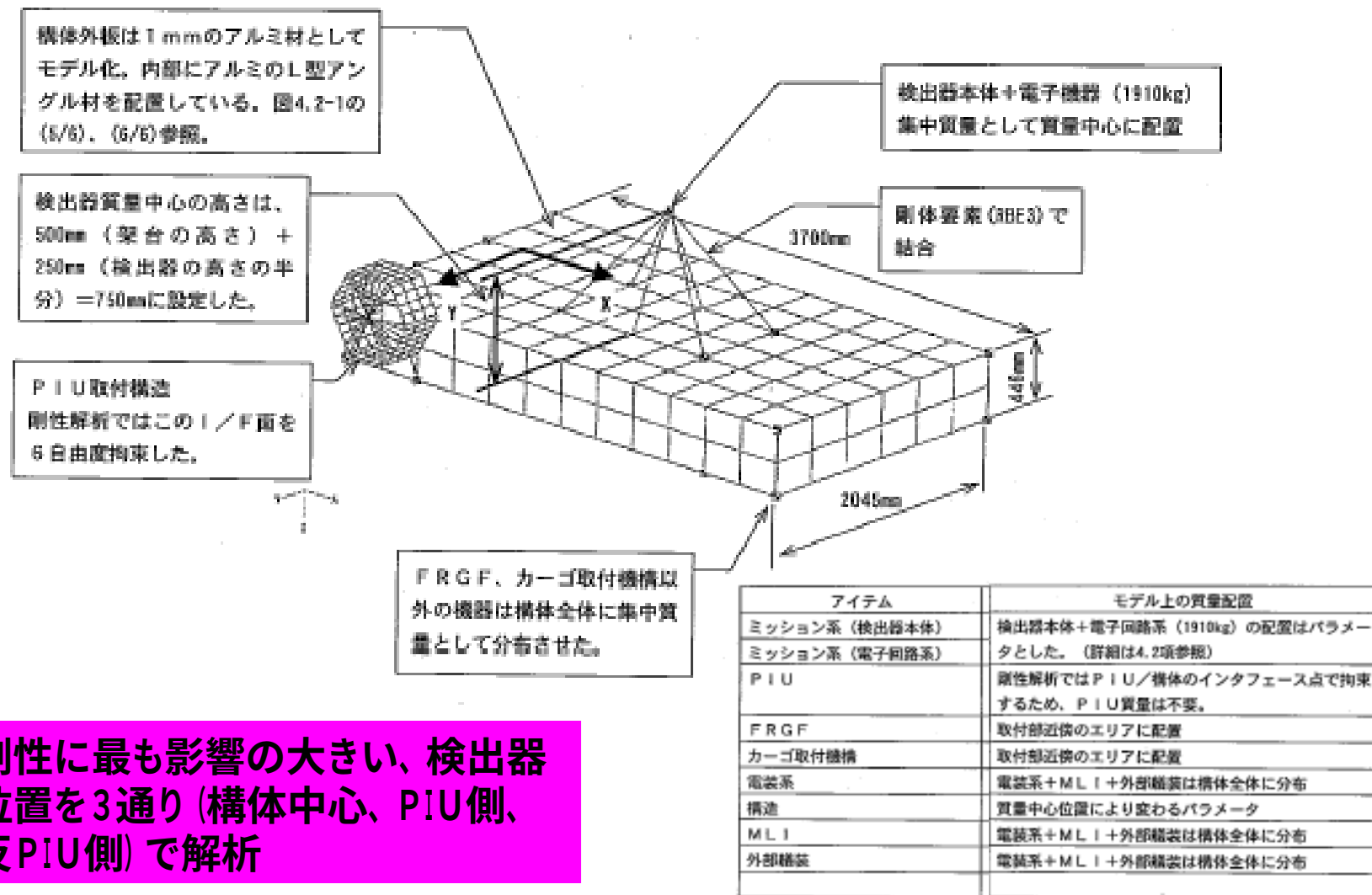
Data Rate : ~600kbps



インタフェース項目



簡易構造解析モデル



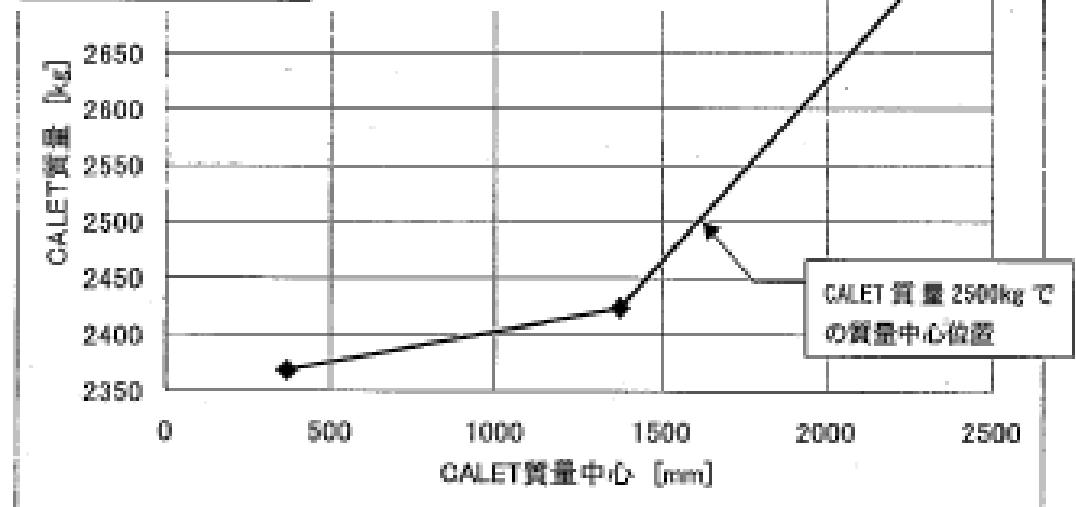
剛性に最も影響の大きい、検出器位置を3通り（構体中心、PIU側、反PIU側）で解析

簡易構造解析結果

検出器搭載位置		② PIU側	① 中央	③ 反PIU側
質量	検出器	1910.0 kg	1910.0 kg	1910.0 kg
	その他機器類	263.0 kg	263.0 kg	263.0 kg
	構体	167.7 kg	222.6 kg	508.0 kg
	合計	2340.7 kg	2395.6 kg	2681. kg
質量中心位置 (X軸原点はPIU中心)	X	368.8 mm	1375.8 mm	2257. mm
	Y	1.9 mm	1.8 mm	1.6 mm
	Z	-557.1 mm	-539.2 mm	-458. mm
固有振動数	1次モード	3.007 Hz	2.998 Hz	2.983 Hz
	2次モード	3.859 Hz	3.413 Hz	3.295 Hz

剛性目標 3 Hz 以上を
満足するように設定

PIUから離れるほど質量
が重くなる。



結論

検出器本体をPIU寄りに
配置すれば、剛性要求
を守れる

国際宇宙ステーションに搭載

国際宇宙ステーション

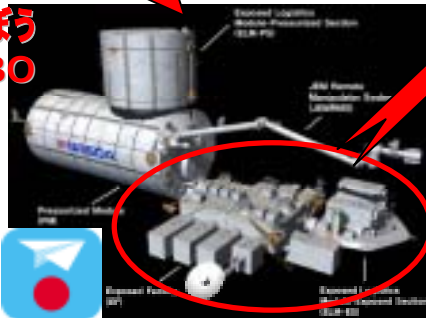
International
Space Station



国際宇宙ステーション(ISS)は恒常的に人間が滞在する、巨大な軌道上設備。1998年11月に組立てが始まり、2008年頃に完成の予定。

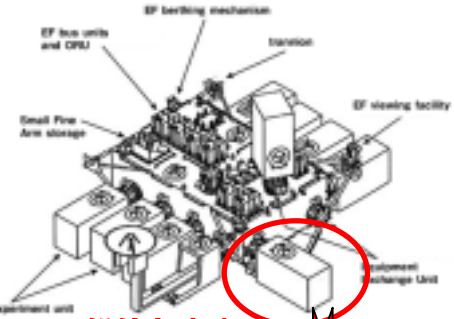
CALETは、2010年頃のISS搭載を目指し、研究・開発中。

きぼう KIBO



ISSの日本のモジュール「きぼう」は、船内実験室、船内保管庫、船外実験プラットフォーム、船外パレット、マニピュレータ等から構成される。

船外実験 プラットフォーム Exposed Facility



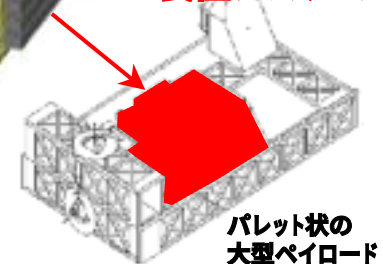
「きぼう」の船外実験プラットフォームは、宇宙空間に直接曝露した環境を提供する、ISS上最も特徴的な施設のひとつ。CALETはここに搭載され、観測を行う。

CALET

検出器本体

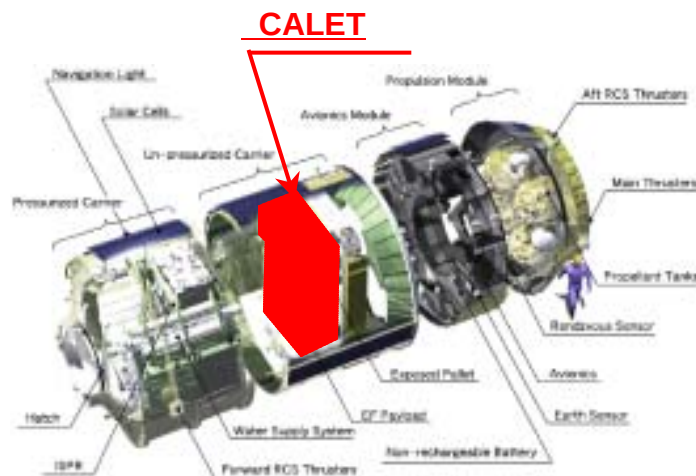
Area: 5000 cm²
(~1 m²sr)
Material: 36 r.l.
(~2 m.f.p)
Weight: 2,500 kg
Power: 500 W
Data Rate: 600kbps

装置システム



パレット状の
大型ペイロード

国際宇宙ステーションに打ち上げ



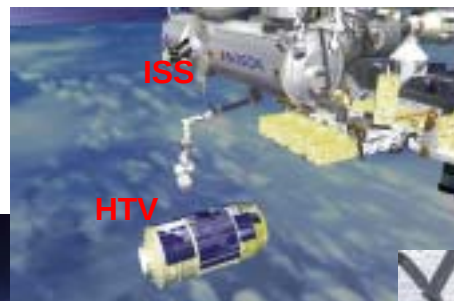
宇宙ステーション
補給機 (HTV)



H-IIロケットで打上げ

2003年2月1日

CALETは、宇宙ステーション補給機 (H-II Transfer Vehicle:HTV)の曝露キャリアに搭載され、H-IIロケットにより打上げられる。

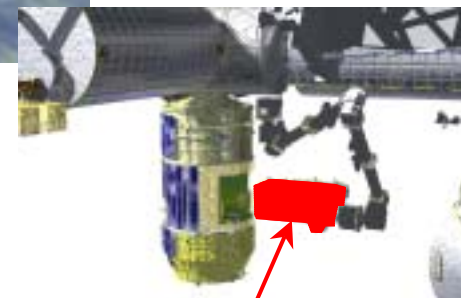


HTV繫留、マニピュレータ
によるCALETの取出し



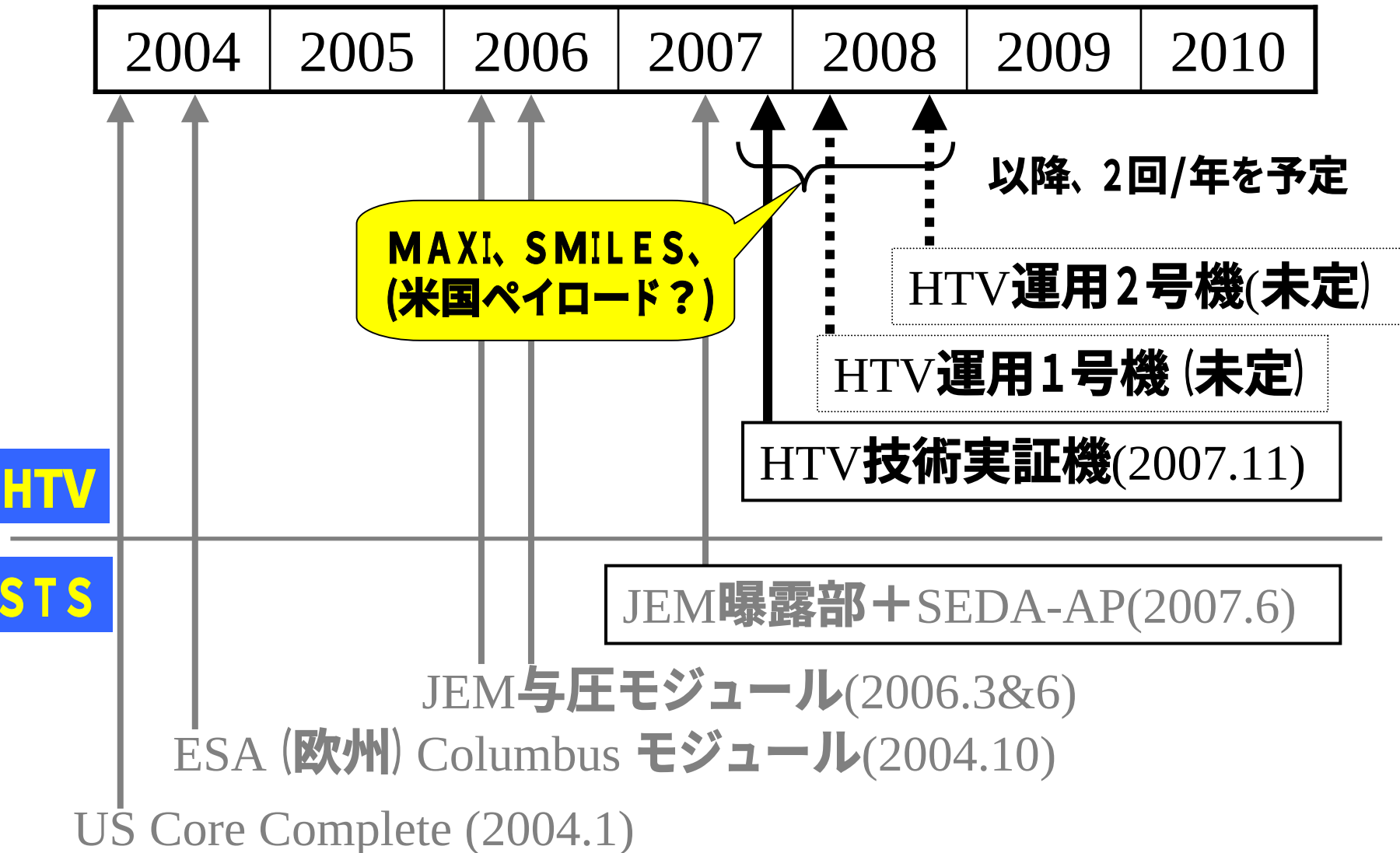
HTV分離

ISSへ接近、捕捉



CALET

HTV打上げ計画



研究費配分状況

日本:

- 平成13-15年度 財団法人日本宇宙フォーラム (JSF)
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
「高エネルギー電子、ガンマ線観測装置 (CALET) の概念設計」
- 平成10-12年度 財団法人日本宇宙フォーラム (JSF)
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
「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14-16年度 科学研究費 基盤B
- 平成14-15年度 科学研究費 基盤C
- 平成13年度 宇宙科学研究所基礎開発経費

中国:

- 2003-2005 国家重点国際合作研究

まとめ

1. CALETは、電子、ガンマ線をTeV領域まで観測できる唯一のスペースにおける観測装置として開発が行われている。1-1000 TeVの陽子、原子核の観測も視野に入れて装置の概念設計を実施している。
2. JEM/EFにおける2.5トンの重量ペイロードとして、CALETの観測装置としての重量は1700kgが確保されることが、HTVによる打ち上げを前提としたパレットと一体化した装置の設計より明らかになった。
3. この重量制限内で、 $1\text{m}^2\text{sr}$ の有効面積を持つ装置が製作可能であることがシミュレーション計算より求められている。
4. 今後はCALETの概念設計をさらにすすめ、1年以内に予想されるAOに応募して、2010年頃と予想される打ち上げに向けて装置の製作を実施する予定である。このため、グループの拡大、観測の多様化に向けて努力する。

この研究は、日本宇宙フォーラムの地上研究フェーズIA (1998－2000、2001－2003) として遂行されている。