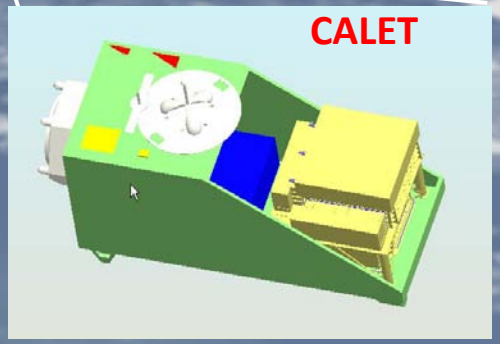
CRCタウンミーティング＠東工大　　2012年1月22日

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

JAXA/SEUC

Waseda University
supported also by
JSPS, MEXT

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

NASA

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

ASI

CALET Collaboration Member

O. Adriani[19], K.Asano[17], M.G. Bagliesi[22], G. Bigongiari[22], W.R. Binns[24], S. Bottai[19], J.Buckley[24], G. Castellini[19], M.L. Cherry[9], G. Collazuol[20], K. Ebisawa[5], V. Di Felice[21], H. Fuke[5], T.G. Guzik[9], T. Hams[10], N. Hasebe[23], M. Hareyama[5], K. Hibino[7], M. Ichimura[2], K. Ioka[8], J. B. Isbert[9], M. H. Israel[24], E. Kamioka[15], K. Kasahara[23], Y. Katayose[25], J. Kataoka[23], R.Kataoka[17], N. Kawanaka[8], M.Y. Kim[22], H. Kitamura[11], Y. Komori[6], T. Kotani[23], H.S. Krawzczynski[24], J.F. Krizmanic[10], A. Kubota[15], S. Kuramata[2], T.Lomtadze[20], P. Maestro[22], L. Marcelli[21], P. S. Marrocchesi[22], V. Millucci[22], J.W. Mitchell[10], K. Mizutani[14], A.A. Moiseev[10], K.Mori[23], M. Mori[13], F. Morsani[20], K. Munakata[16], H. Murakami[23], Y.E.Nakagawa[23], J. Nishimura[5], S. Okuno[7], J.F. Ormes[18], S. Ozawa[23], P. Papini[19], B.Rauch[24], S.Ricciarini[19], Y. Saito[5], M. Sasaki[10], M. Shibata[25], Y. Shimizu[4], A. Shiomi[12], R. Sparvoli[21], P. Spillantini[19], M. Takayanagi[5], M. Takita[3], T. Tamura[7], N. Tateyama[7], T. Terasawa[3], H. Tomida[5], S. Torii[23], Y. Tunesada[17], Y. Uchihori[11], S. Ueno[5], E. Vannuccini[19], J.P. Wefel[9], K.Yamaoka[1], A. Yoshida[1], K. Yoshida[15], T. Yuda[3]

1) Aoyama Gakuin University, Japan
2) Hirosaki University, Japan
3) ICRR, University of Tokyo, Japan
4) JAXA/SEUC, Japan
5) JAXA/ISAS, Japan
6) Kanagawa University of Human Services, 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 Technology Inst., Japan
18) University of Denver, USA
19) University of Florence and IFAC(CNR), Italy
20) University of Pisa, Italy
21) University of Rome Tor Vergata , Italy
22) University of Siena, Italy
23) Waseda University, Japan
24) Washington University - St Louis, USA
25) Yokohama National University, Japan

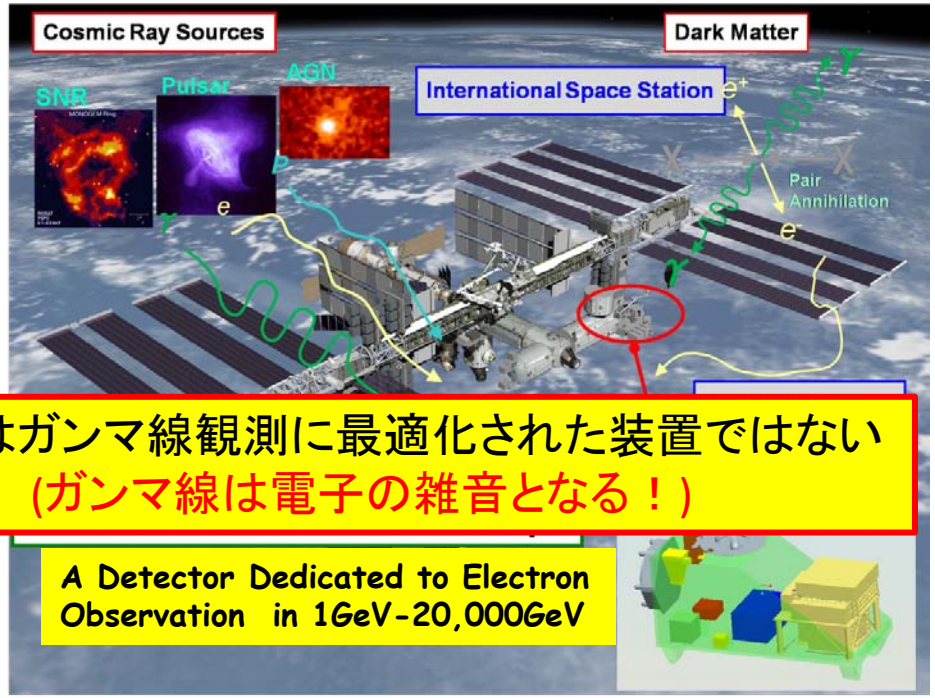
CALETによる科学観測

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

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



CALET はガンマ線観測に最適化された装置ではない
(ガンマ線は電子の雑音となる！)

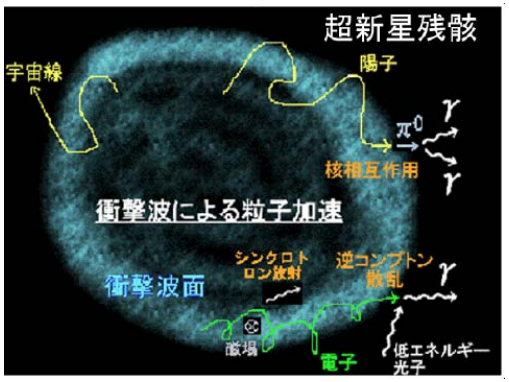
観測目的	観測対象
宇宙線近傍加速源の同定	TeV領域における電子エネルギースペクトル
暗黒物質の探索	電子・ガンマ線の100 GeV−10 TeV領域におけるスペクトルの”異常”
宇宙線の起源と加速機構の解明	電子及び陽子・原子核の精密なエネルギースペクトル、超重核のフラックス
宇宙線銀河内伝播過程の解明	二次核/一次核(B/C)比のエネルギー依存性
太陽磁気圏の研究	低エネルギー(<10GeV)電子フラックスの長・短期変動
ガンマ線バーストの研究	3 keV − 30 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象

高エネルギー電子（＋陽電子）で期待されるサイエンス

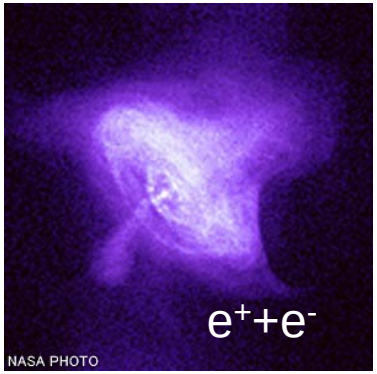
Astrophysical Origin: Charged Particle Astronomy

> 1 TeV Synchrotron and Inverse Compton losses
⇒ Age < ~10^5 years, Distance < 1 kpc
(A few sources; Vela, Monogem, Cygnus Loop)

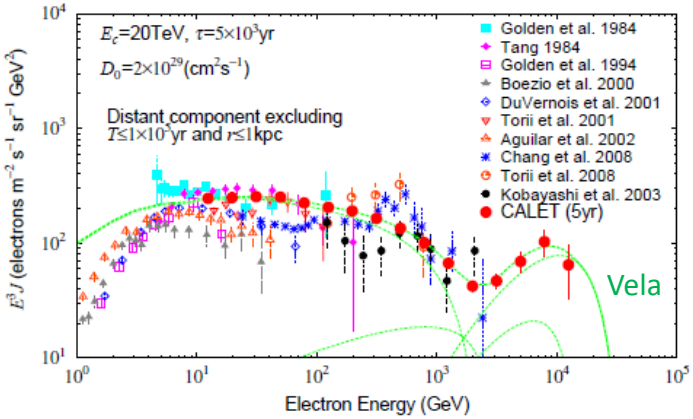
Shock Wave Acceleration in SNR



Acceleration in PWN



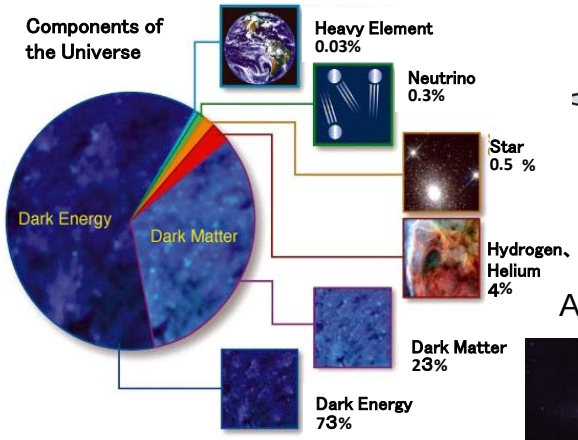
⇒



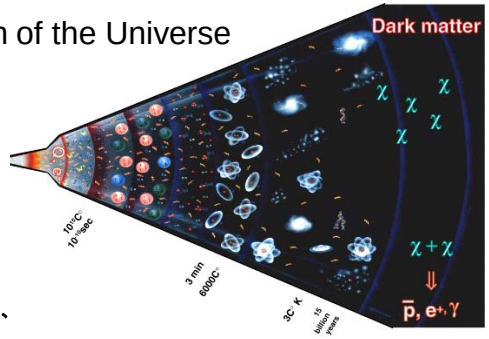
Measured Spectrum Tags DM Species

(i) Kaluza-Klein Particle Annihilation: Monoenergetic direct production of e+e- pair – Sharp high energy cut-off
(ii) Neutralino Particle Annihilation: Broad production spectrum via intermediate particles - Soft distribution over range of energy
(iii) Single WIMP Decay: Wide production spectrum below mass via Neutrino (Ibarra et al. 2010) - Soft cut-off and high intensity without requiring local DM "clump"

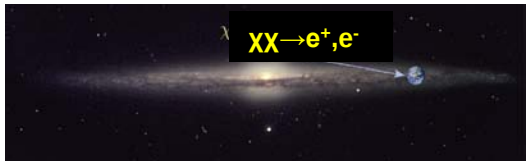
Dark Matter Origin: Annihilation or Decay Signatures



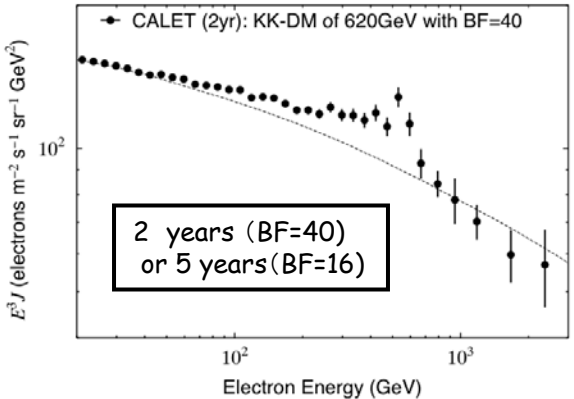
Evolution of the Universe



Annihilation of Dark Matter（WIMP）

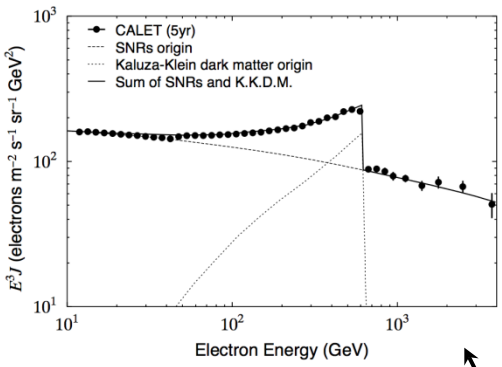


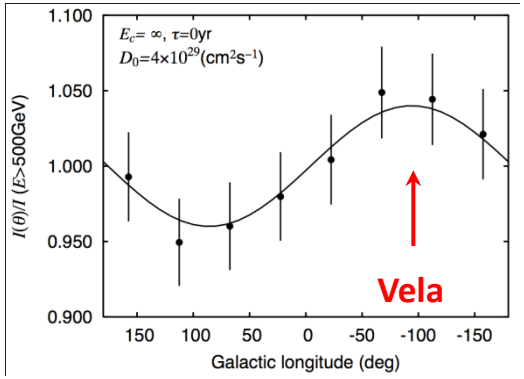
⇒



CALETによる電子(+陽電子)の観測

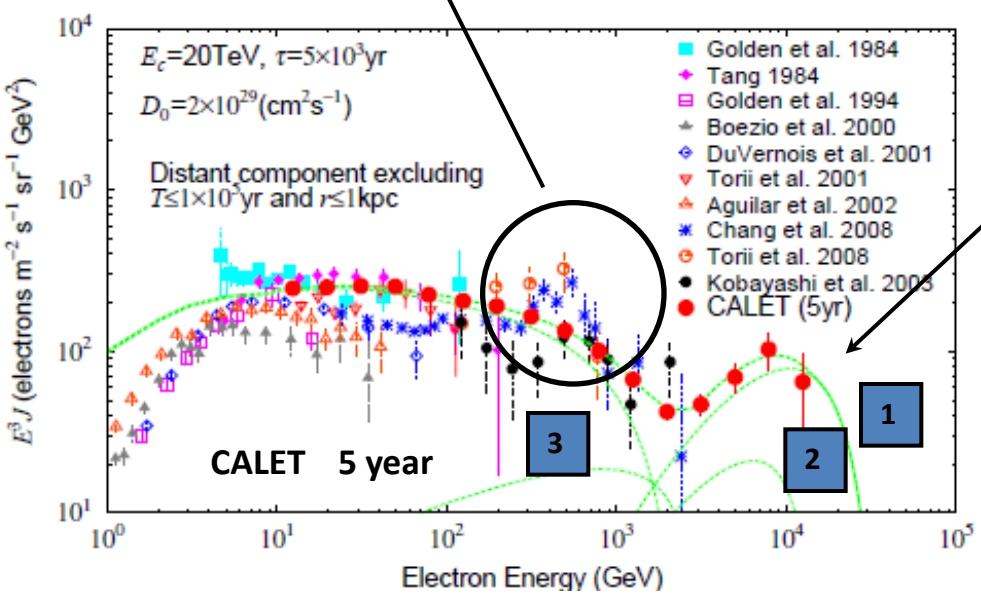
- TeV領域での観測を陽子雑音の十分な除去(残存率~1%)と優れたエネルギー分解能(~2%)で実施する(世界初)
- 正確かつ高統計な1GeVからTeV領域までの電子観測を実現する
- 近傍ソースの発見に不可欠な電子到来方向の異方性の検出が可能である

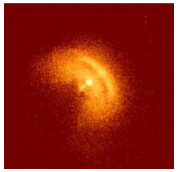




近傍ソース
or
暗黒物質？

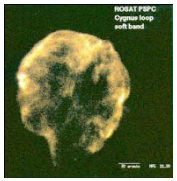
近傍ソースの候補
- 時間 < 10^5 years
- 距離 < 1 kpc





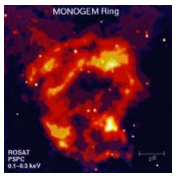
Vela
10,000 years
820 ly

1



Cygnus Loop
20,000 years
2,500 ly

2



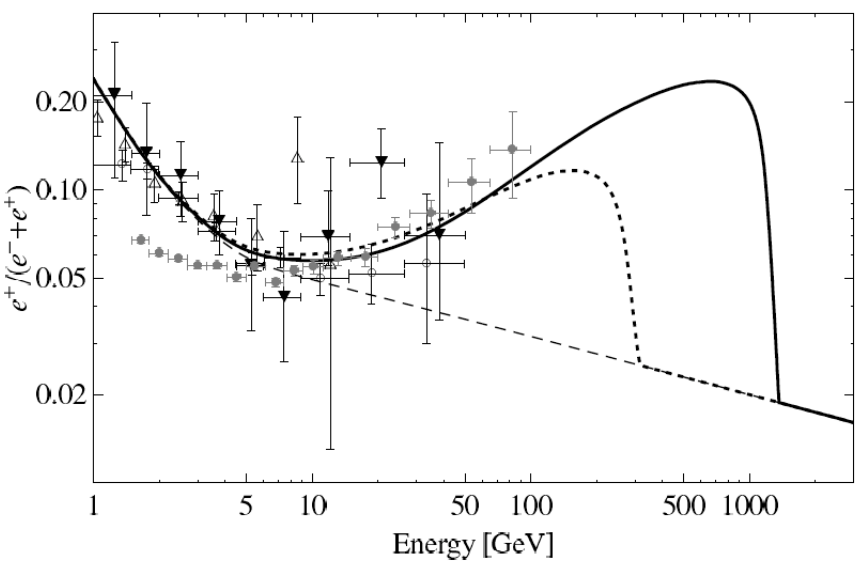
Monogem
86,000 years
1,000 ly

3

暗黒物質の崩壊で期待される電子/陽電子フラックス

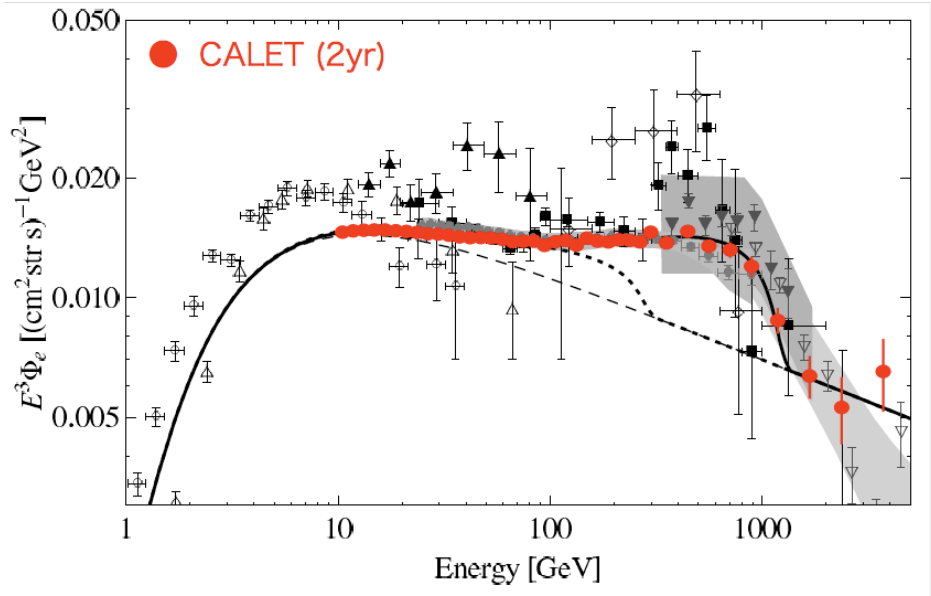
Decay Mode: D.M. -> $l^+l^-\nu$
Mass: $M_{D.M.}$=2.5TeV
Decay Time: $\tau_{D.M.}$ = 2.1×10^{26} s

Expected $e^+/(e^-+e^+)$ ratio by a theory and the observed data



Ibarra et al. (2010)

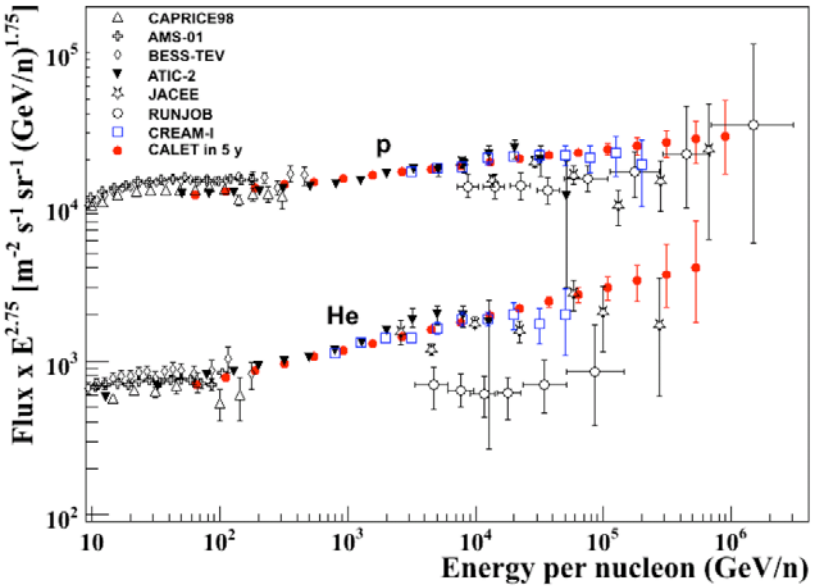
Expected e^-+e^+ energy spectrum by CALET observation

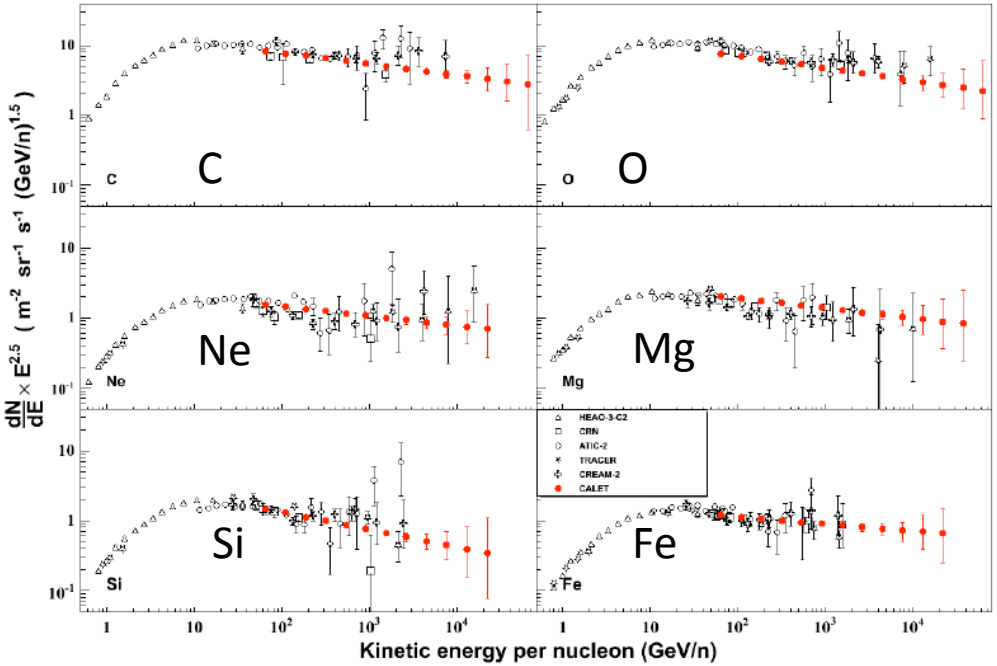


Observation in the trans-TeV region

Dark Matter signal

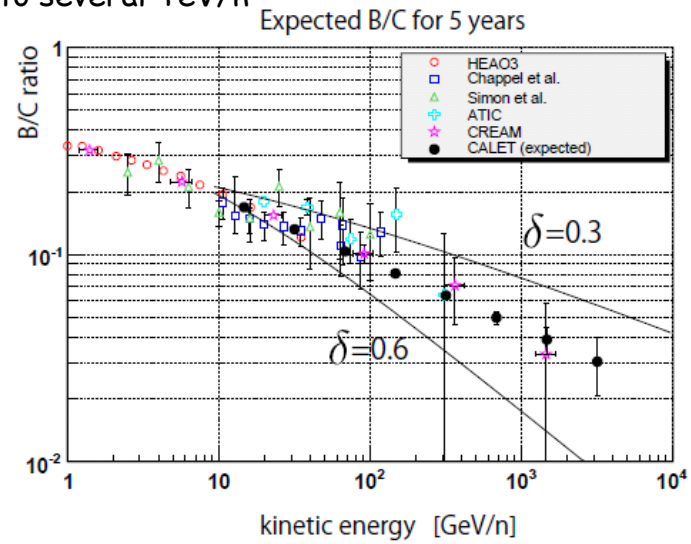
陽子・原子核成分の観測



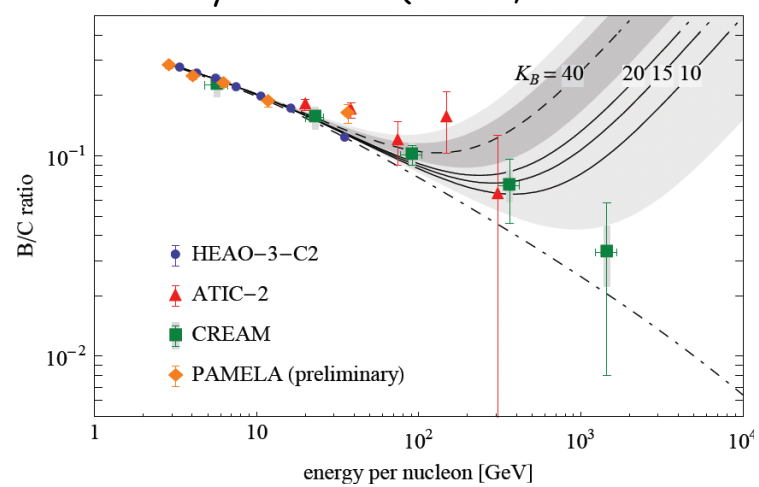


2ry/ 1ry ratio (B/C)

- Energy dependence of diffusion constant: $D \sim E^{\delta}$
- Observation free from the atmospheric effect up to several TeV/n



The B/C ratio in a model where the positrons come from a nearby SNR where the secondary particles are also accelerated by the shock. (Ahlers, et al. 0909.4060)



ガンマ線観測

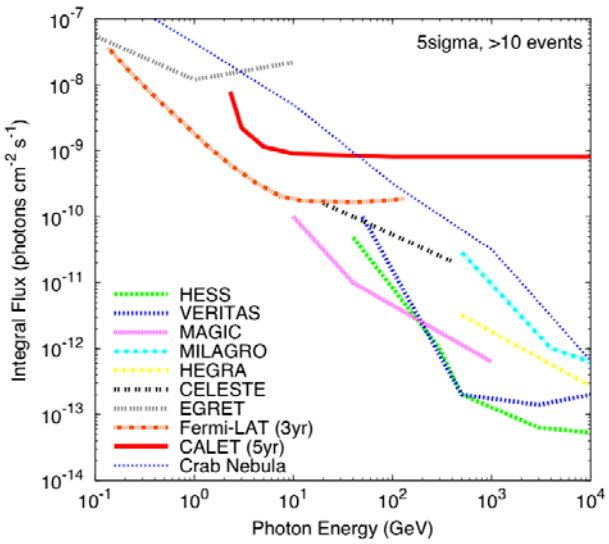
ポイントソース

➢ ガンマ線観測では、アンチコインシデンスの除去により、観測エネルギー領域は10GeV以上に限られる。観測量の減少にともない、5年間の観測で100GeV領域までCrab等のポイントソースが観測可能（右上図）である。

➢現在観測を行っているFermi/LATとは相補的な観測が可能であり、変動の大きなAGNなどでの銀河系外ソースの共同観測や、Fermi/LATが観測を終了する予定の2015年頃以降のフォローアップ観測が可能になる。

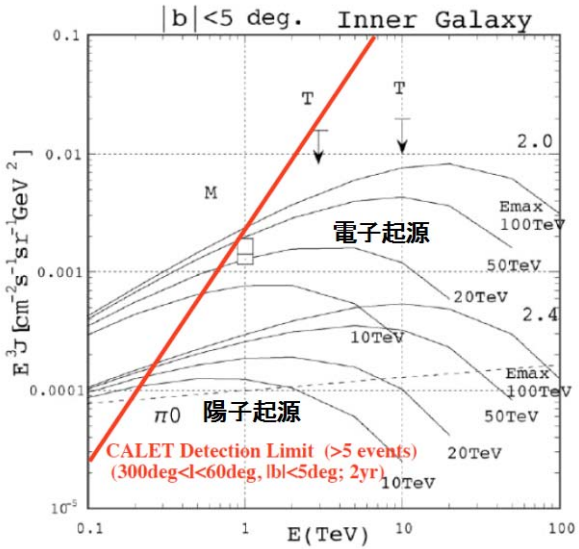
➢地上のチェンレンコフ望遠鏡（CT)との同時観測により、広い波長領域での観測や、CTのキャリブレーションが実現できる。

ガンマ線ポイントソースに対する感度比較とCrabのフラックス（水色点線）

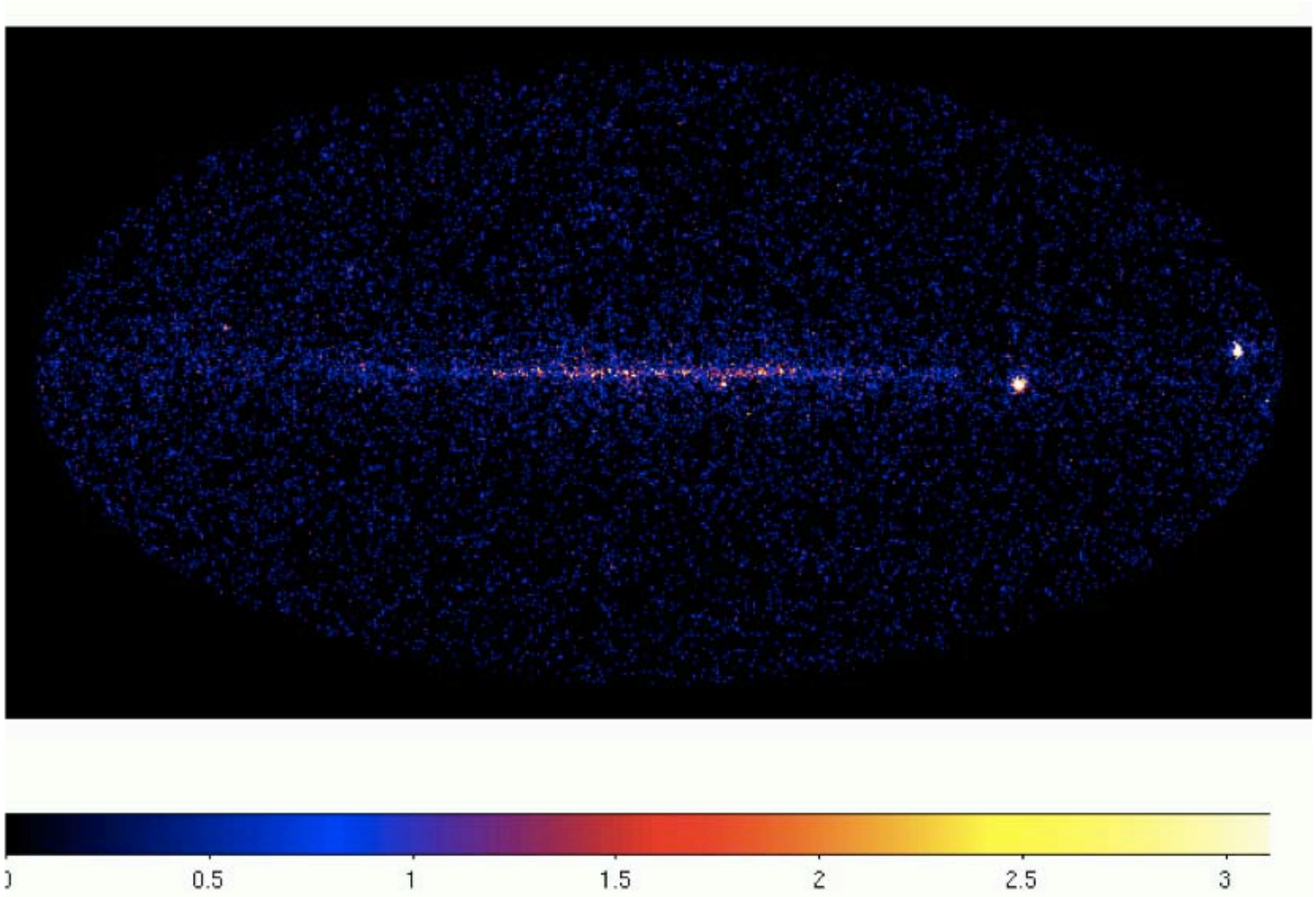


銀河内拡散成分

CALETのガンマ線観測では、これまで観測が限られていた拡散成分の観測を10TeV領域まで行う。100GeV領域ではガンマ線の起源について、右下図に示すように2年間の観測で理論的予測に基づいて電子かハドロンかの識別を行うことができる。

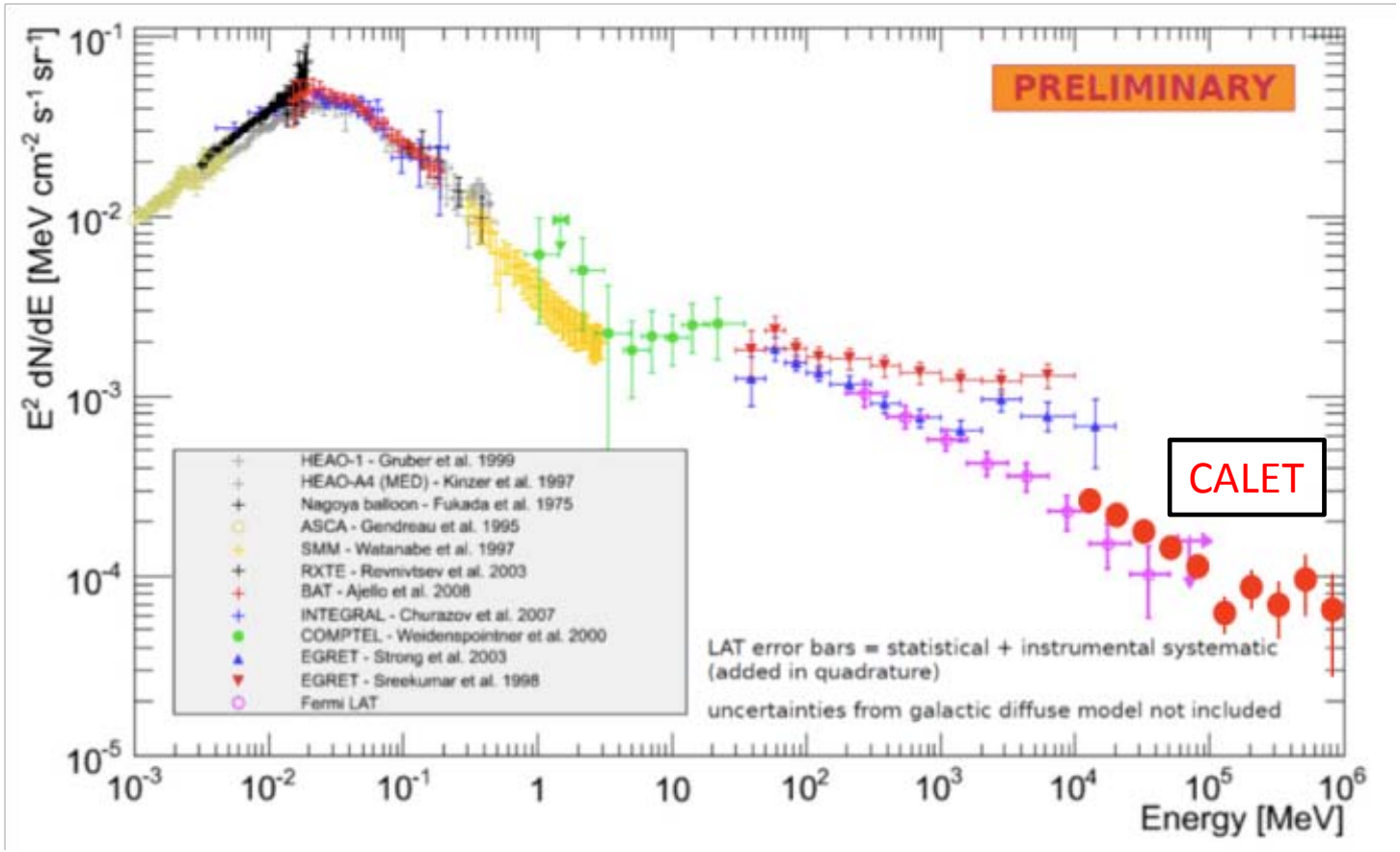


Expected Gamma-ray Sky Map by CALET (>10 GeV)



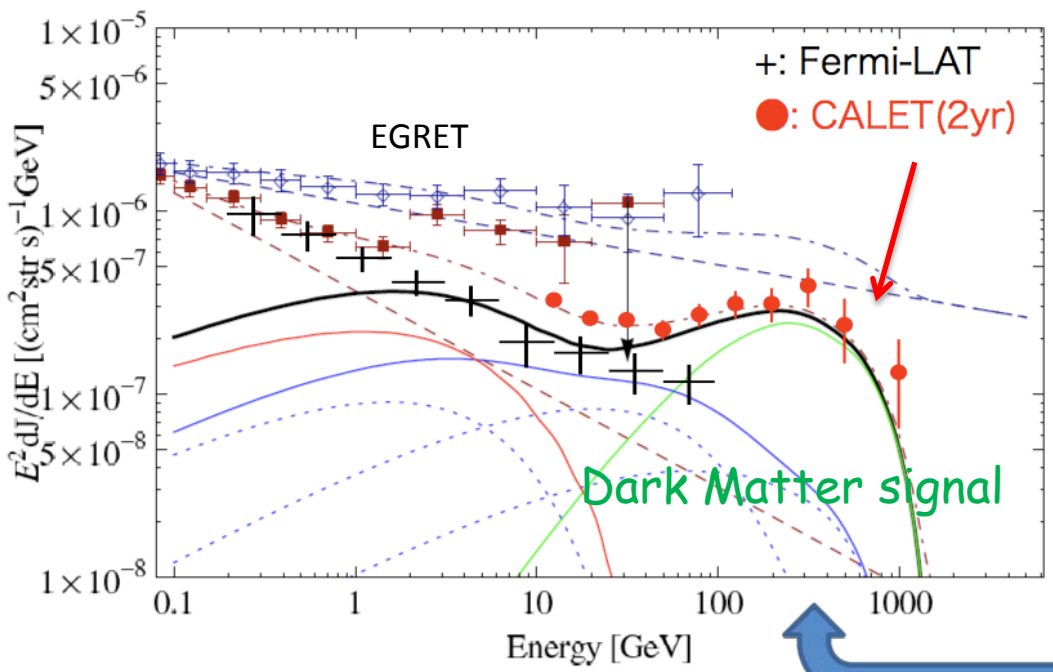
Simulated all sky map for gamma-rays (>10 GeV) expected from the CALET observation. The 289 sources in the Fermi First Catalog are adopted.

銀河外拡散成分のこれまでの観測結果と CALET予測（2年間）の比較



暗黒物質の崩壊から期待される銀河系外拡散ガンマ線成分

Decay Mode: D.M. -> $l^+l^-\nu$
Mass: $M_{D.M.}$=2.5TeV
Decay Time: $\tau_{D.M.}$ = 2.1×10^{26} s



Ibarra et al. (2010)

Extra-galactic diffuse gamma-rays

Extragalactic background

+

Gamma-rays by inverse Compton scattering of the electrons and positrons from DM decay with the inter-stellar and extragalactic photons

+

Gamma-rays from DM

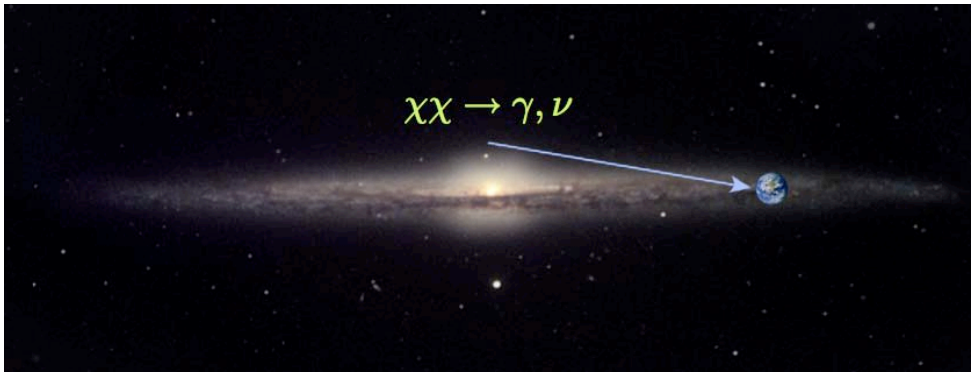
Observation in the sub-TeV region

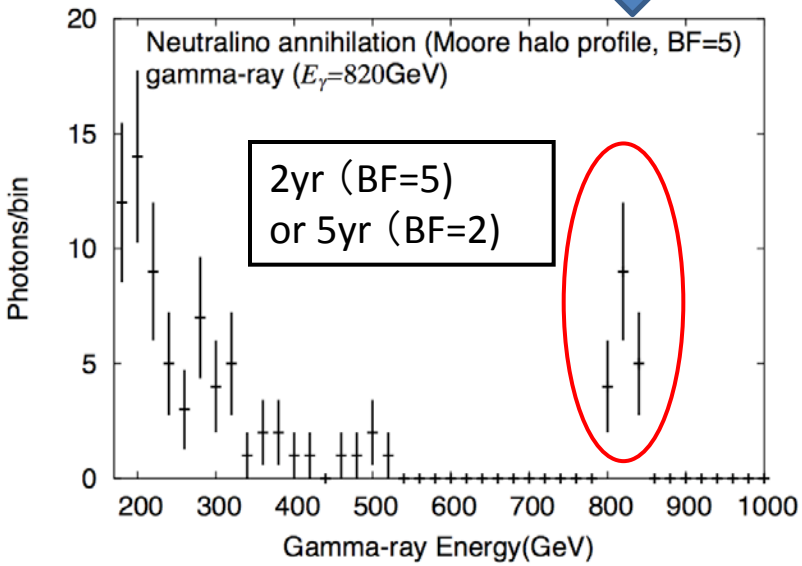
暗黒物質の対消滅で期待されるラインガンマ線

WIMP Dark Matter（Neutralino, Kaluza-Klein D.M.）

➡ Annihilation or Decay

➡ Gamma-ray Line





Excellent energy resolution with CALET
（2%：10GeV～10TeV）

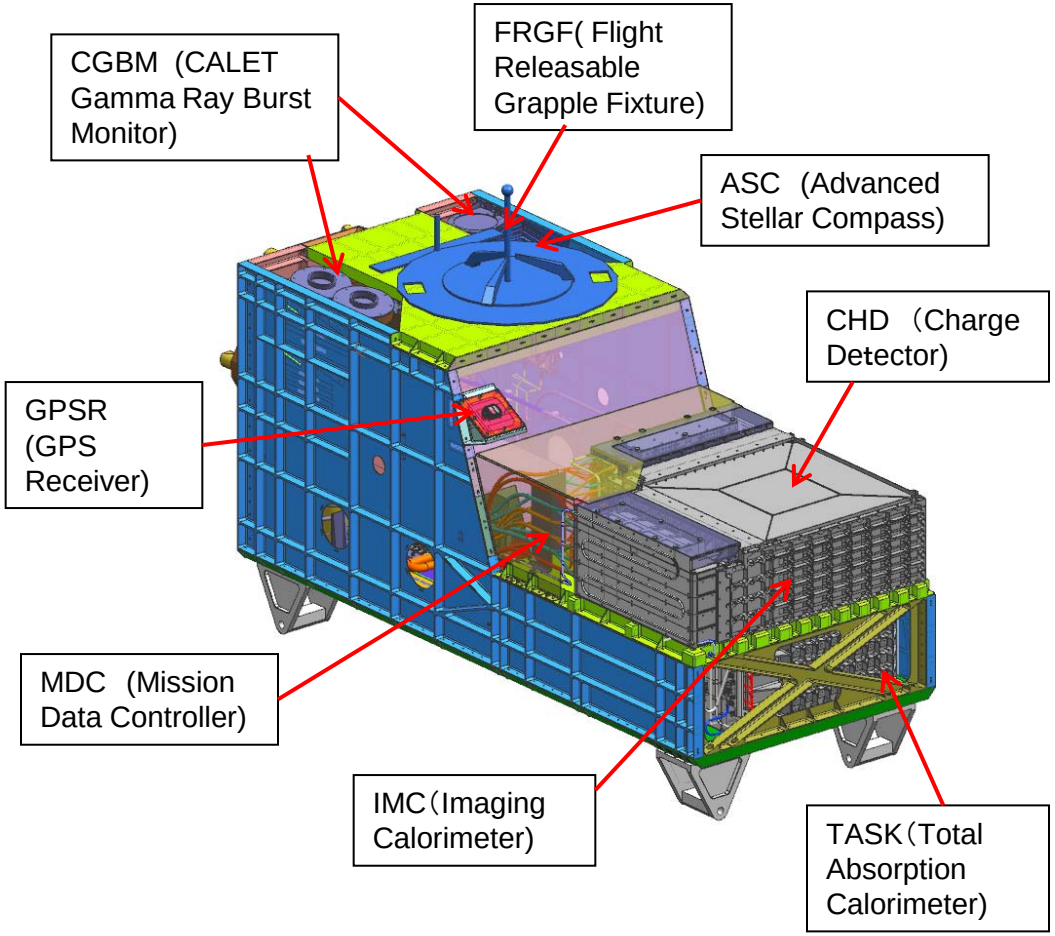
➡ Detection for gamma-ray line due to DM annihilation or decay

Expected gamma-ray line for DM (m=830 GeV) annihilation by CALET observation

(ref. Bergstrom et al. 2001)

CALET ペイロード

CALET 検出器	サポートセンサ	JEM/EF 用艤装
カロリメータ(CAL): CHD,IMC, TASC+MDC ガンマ線バーストモニタ(CGBM): HXM, SGM	GPSR ASC	FRGF



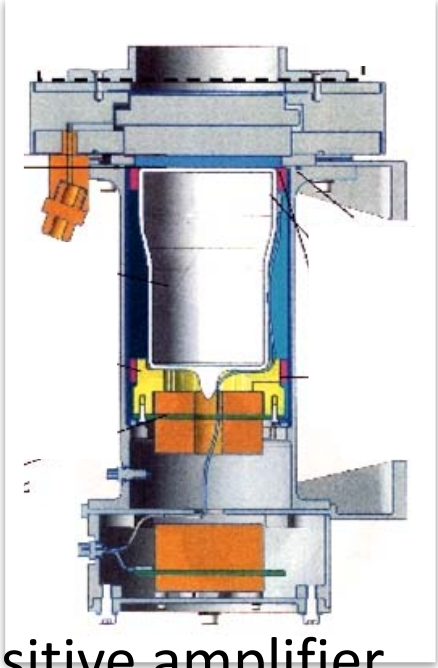
ミッション概要

ミッション機器	CAL: Calorimeter CGBM: Gamma-ray Burst Monitor
打ち上げ機	HTV-5 (H2B)
打ち上げ時期	2014年夏期 (TBD)
観測期間	2 年間 (5 年間 目標)
ペイロード形態	標準ペイロード ポート占有ミッション
装置質量	650 kg（最大）
消費電力	500 W（最大）
テレメトリー	中速系 : 300 kbps 低速系 : 20 kbps

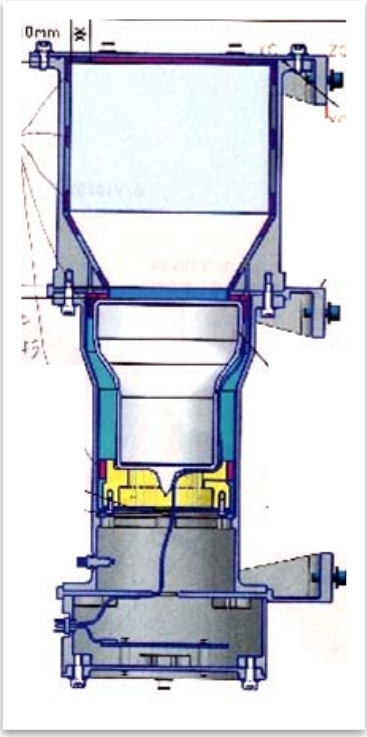
CGBM instrumentation – Sensors –

- 2 Hard X-ray Monitors (HXMs)
  - $LaBr_3$(Ce) (ϕ66 mm x 0.5 inch) with a 410um thick beryllium window by Saint Gobain Crystals. This crystal is used in GRB observations for the first time.
  - Hamamatsu 2.2-inch PMT R6232-05
  - High voltage divider and charge-sensitive amplifier

HXM

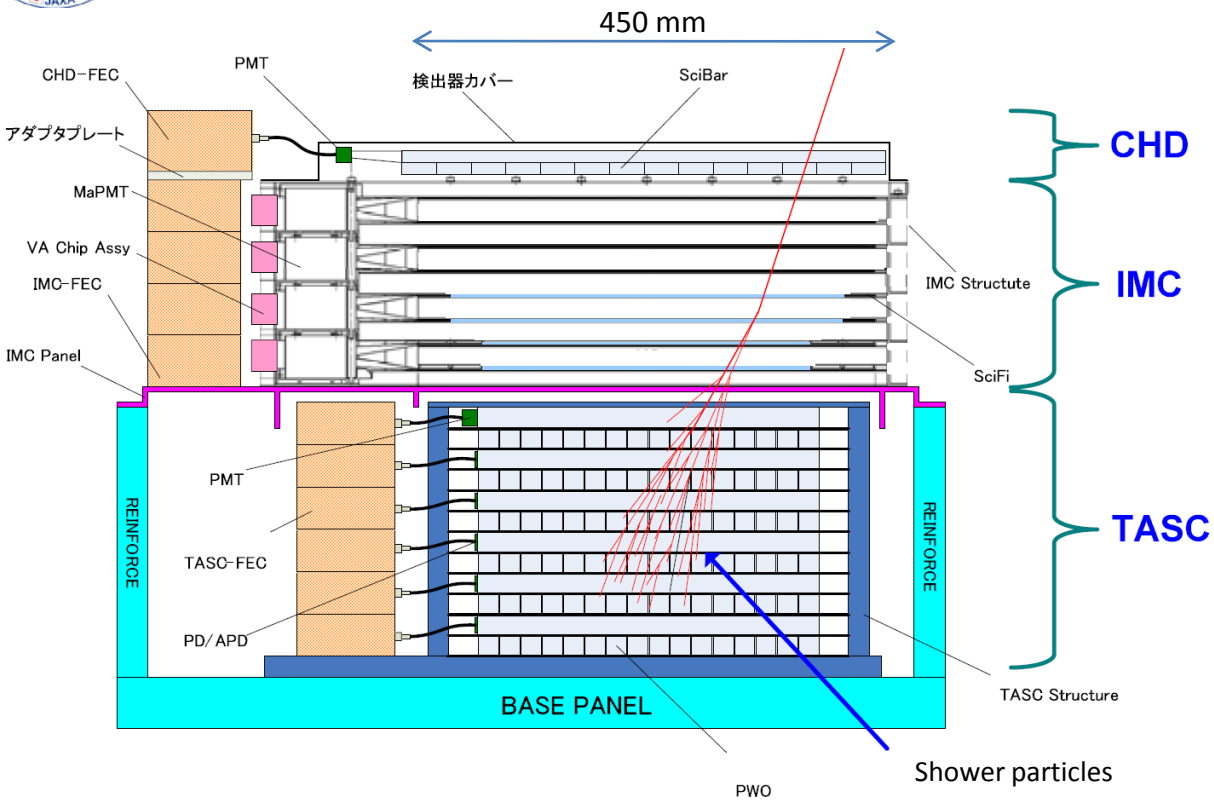


SGM



- Soft Gamma-ray Monitor (SGM)
  - BGO (ϕ4 inch x 3 inch) + Light guide by OKEN Co Ltd.
  - Hamamatsu 3-inch PMT R6233-20

カロリメータ概要



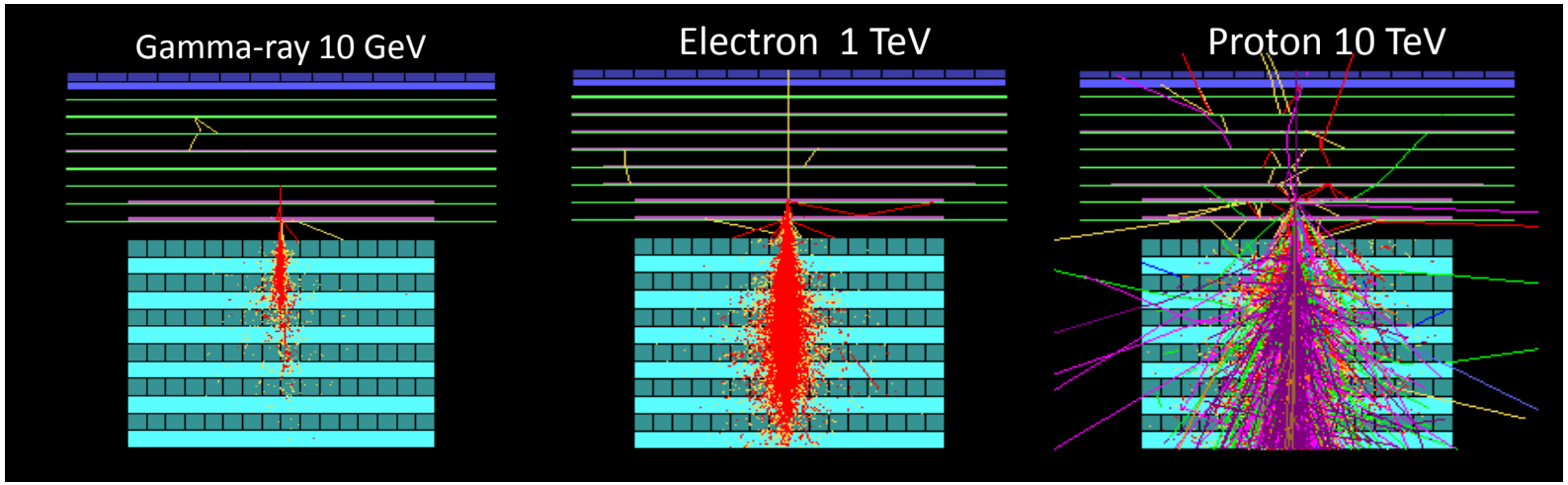
Expected Performance

(from Simulations and/or Beam Tests)

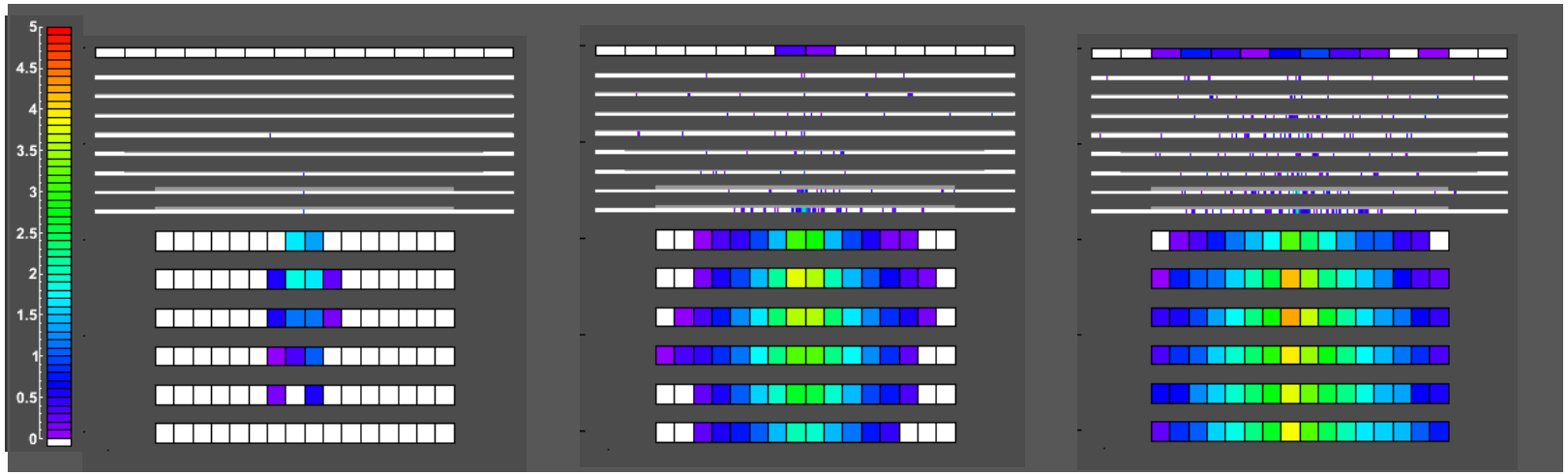
- SΩ :
  1200 cm^2sr for electrons
  1000 cm^2sr for gamma-rays
- ΔE/E :
  a few % (>10 GeV) for e,γ's
  ~30 % for protons
- e/p separation : 10^{-5}
- Charge resolution : 0.15-0.3 e
- Angular resolution :
  0.24-0.76 deg. for gamma-rays
  (Preliminary)

	CHD (Charge Detector)	IMC (Imaging Calorimeter)	TASC (Total Absorption Calorimeter)
Function	Charge Measurement (Z=1-40)	Arrival Direction, Particle ID	Energy Measurement, Particle ID
Sensor (+ Absorber)	Plastic Scintillator : 14 × 1 layer (x,y) Unit Size: 32mm x10mmx450mm	SciFi : 448 x 8 layers (x,y) = 7168 Unit size: 1mmsq x 448 mm Total thickness of Tungsten: 3 r.l.	PWO log: 16 x 6 layers (x,y)= 192 Unit size: 19mm x 20mm x 326mm Total Thickness of PWO: 27 r. l.
Readout	PMT+CSA	64 -anode PMT+ ASIC	APD/PD+CSA PMT+CSA (for Trigger)

CALET における宇宙線シャワーの観測例 (シミュレーション)



実際の検出器



- IMCとTASCのシャワー可視化技術により、電子イベントに対して10^5 の陽子イベント除去性能が達成可能である
- CHDにより入射粒子に対してΔZ=0.15-0.3 の電荷分解能が実現できる

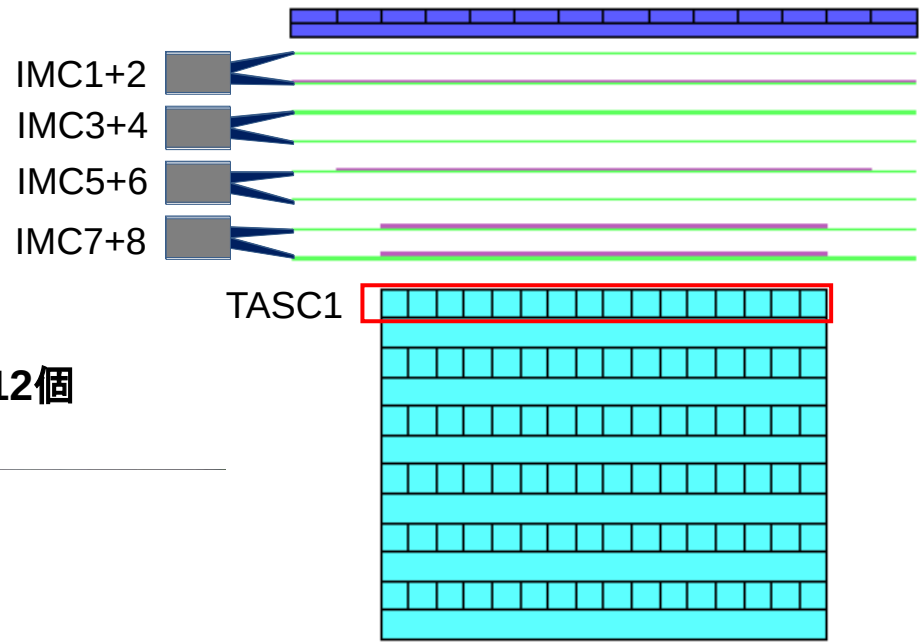
トリガーシステム

シャワートリガー
- エネルギー閾値： 観測対象のエネルギー領域のイベントを効率的に選別
- 高エネルギーガンマ線： トリガーにおける後方散乱粒子の影響を除去

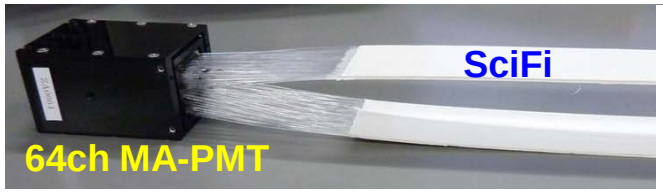
トリガー用シグナル
- CHD: 1層14枚の和
- IMC: SciFiベルト2層ずつの和
- TASC: TASC最上層の和

トリガーは、これらの組み合わせで生成

トリガーモード
- 高エネルギーシャワートリガー
  10GeV以上のシャワー粒子
- 低エネルギーシャワートリガー
  1GeV以上のシャワー粒子(電子のみ)
- シングルトリガー
  最小電離粒子を含む全粒子



64chMA-PMT：14 x 4層 x 2(X,Y)、全112個
SciFi:32本 x 2層のシグナル和



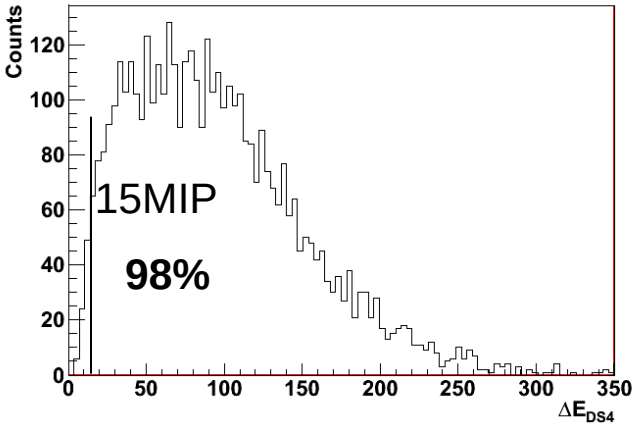
IMCにおけるガンマ線トリガー

ガンマ線の検出効率を考慮

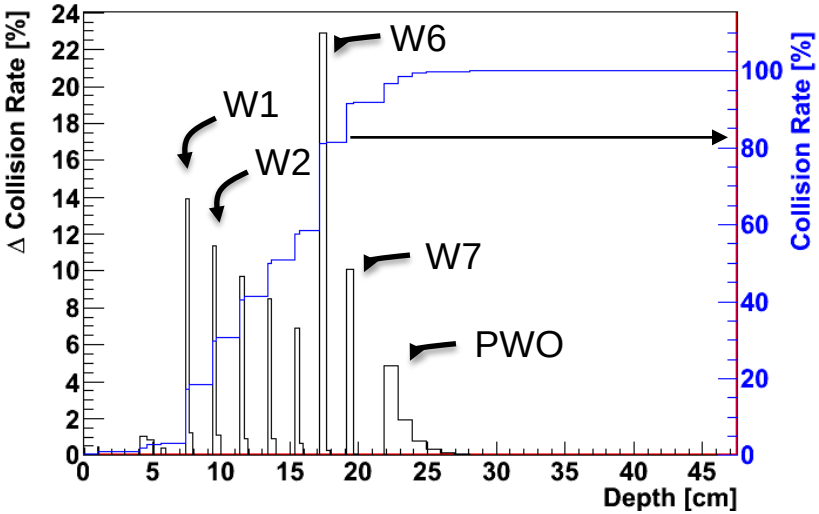
① TASC最上層の閾値
電子(>10GeV)と同じ

② IMC7,8層目の和のみ利用
IMCの上部6層内で最初の
対生成を起こす確率が8割

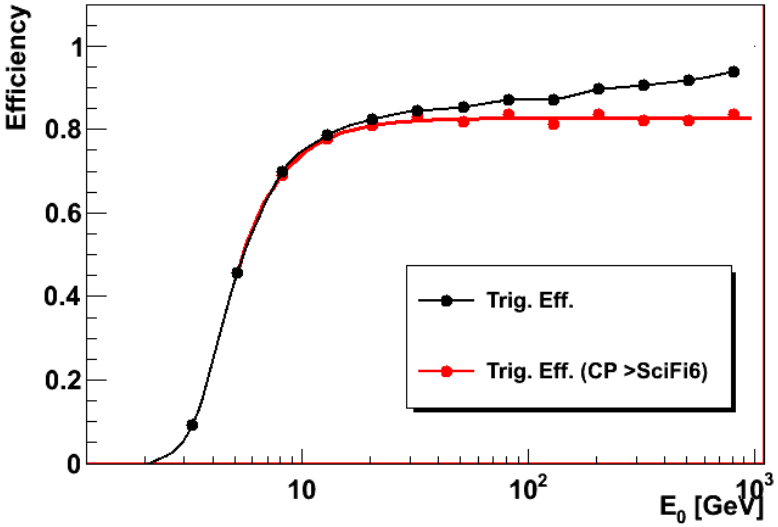
上6層以内で対生成した10GeVγ線に
おけるSciFi7,8層目のエネルギー分布



最初の対生成の割合

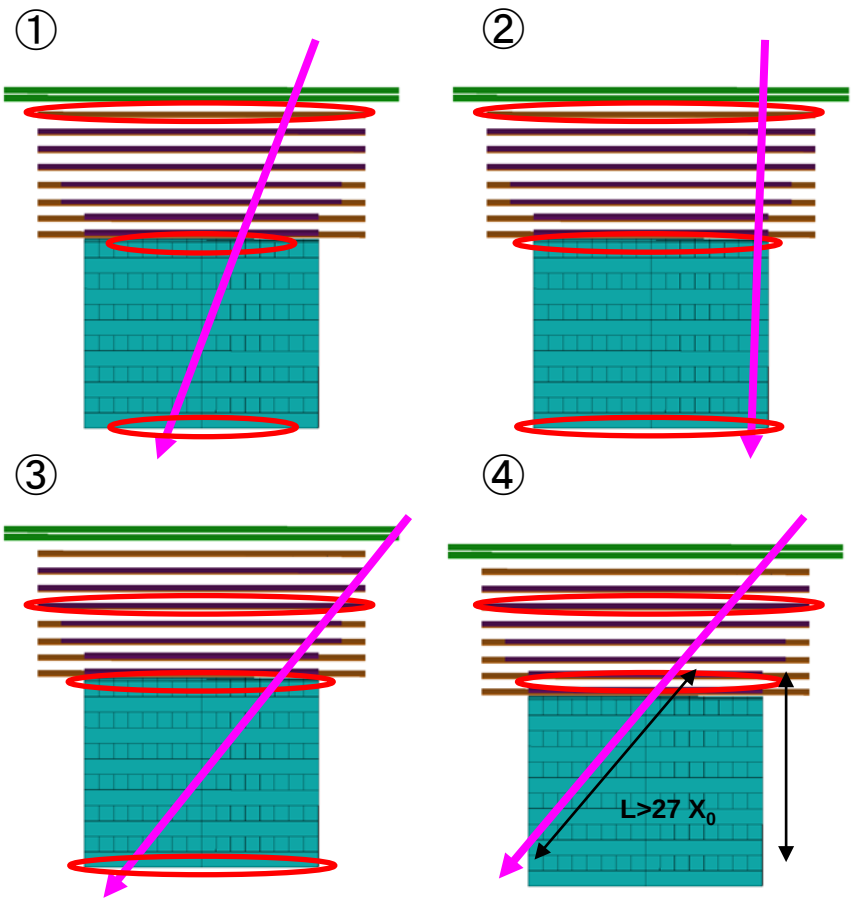


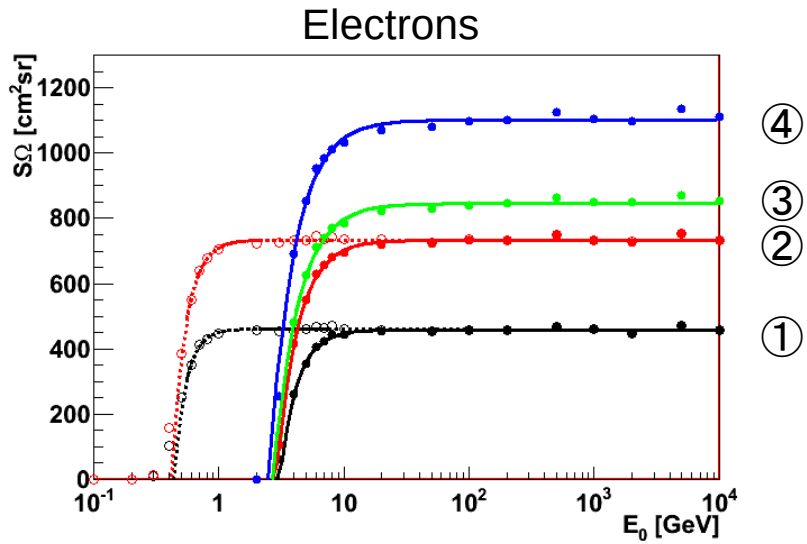
ガンマ線の検出効率

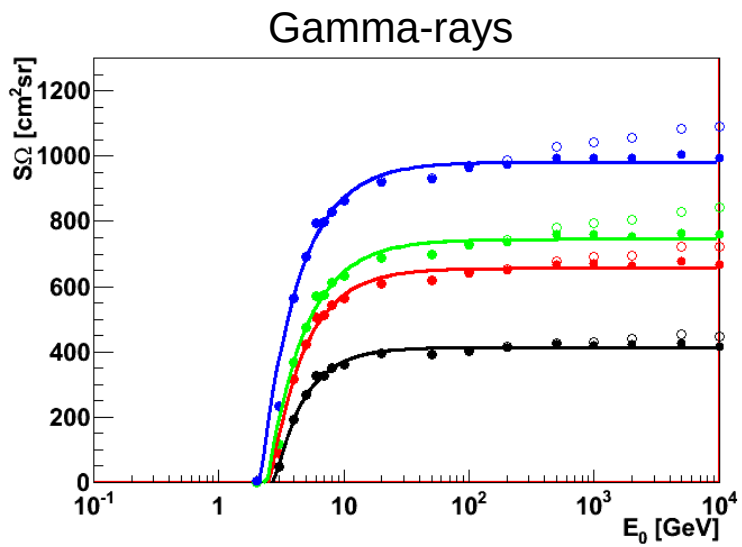


電子・ガンマ線の幾何学的因子のエネルギー依存性

Classification by the shower axis geometry



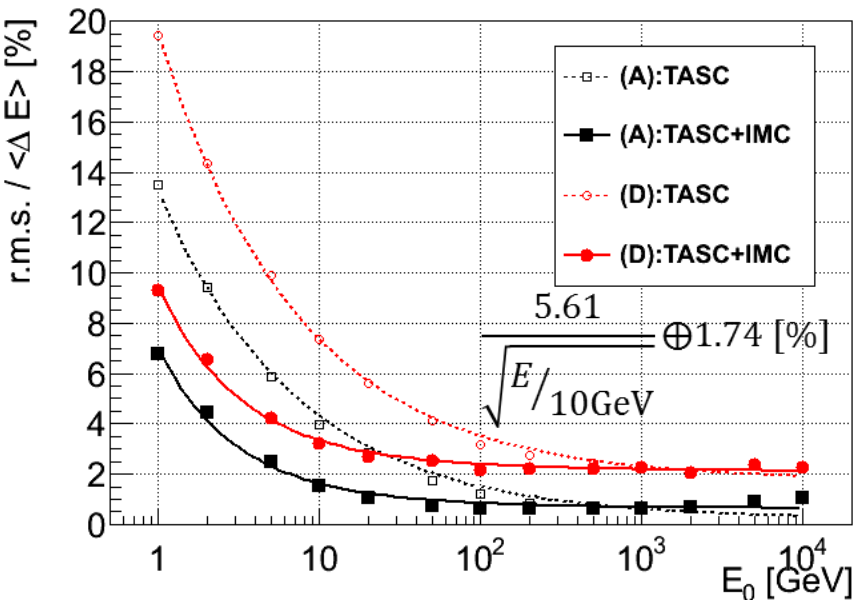




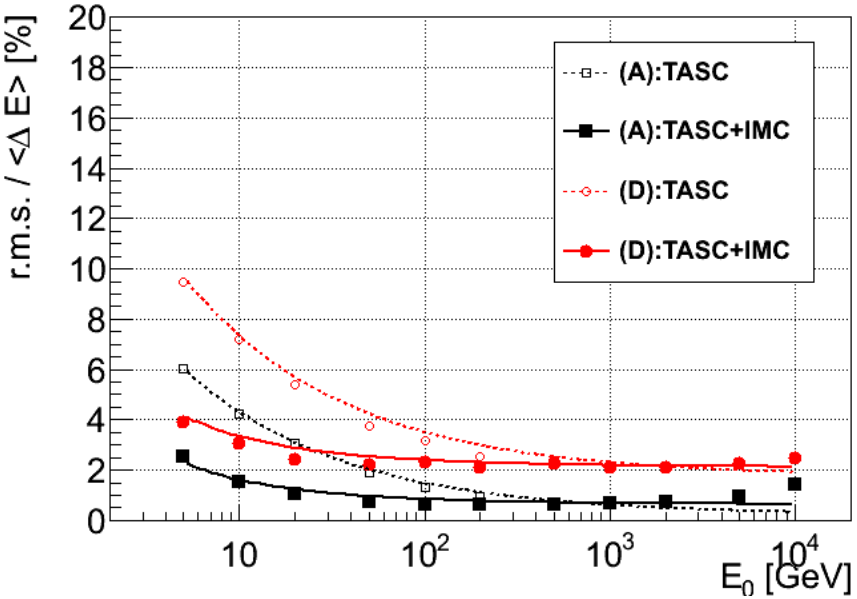
エネルギー分解能

A : full-contained events
D : partially contained events

電子



ガンマ線

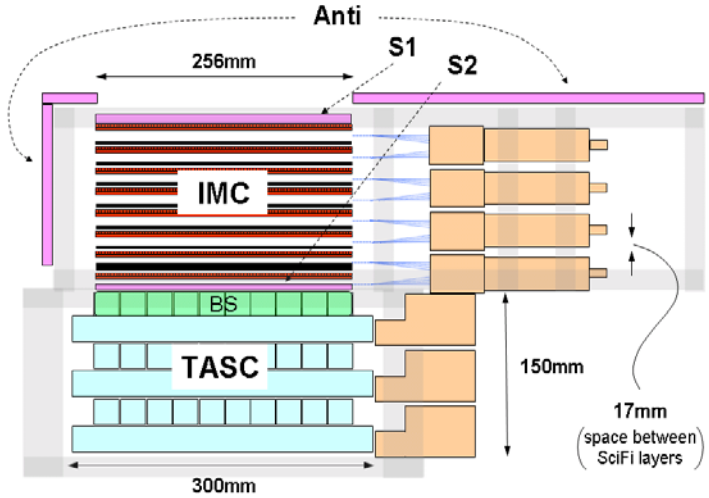


CALET プロトタイプ性能試験（気球観測、加速器）

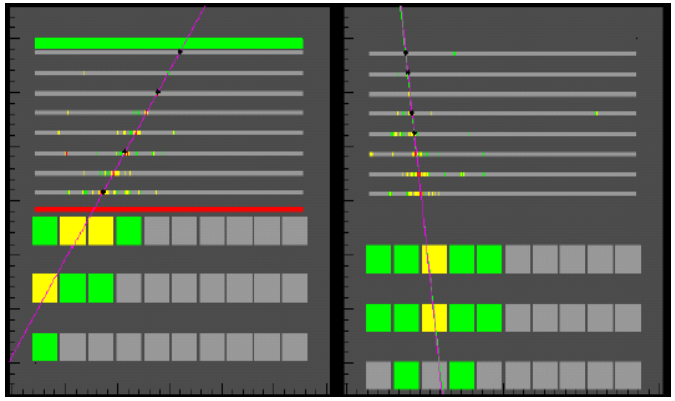
CALET プロトタイプ検出器 ：bCALET-2(1/4 スケール）による気球実験 (2009)

気球搭載装置：bCALET2

bCALET-2の概念図（側面）

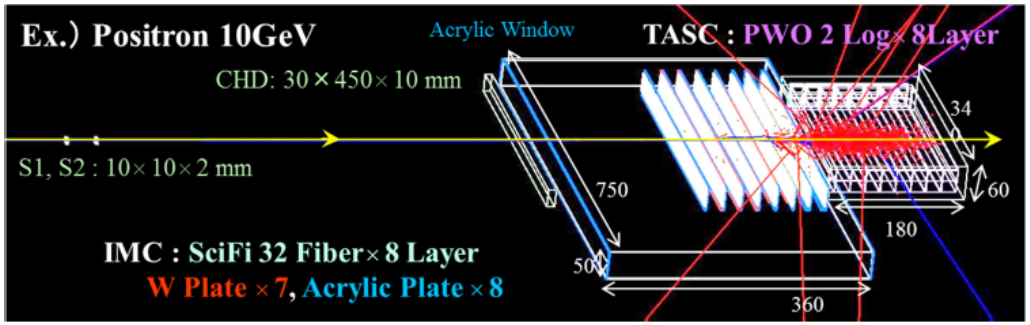


電子候補イベントの観測例

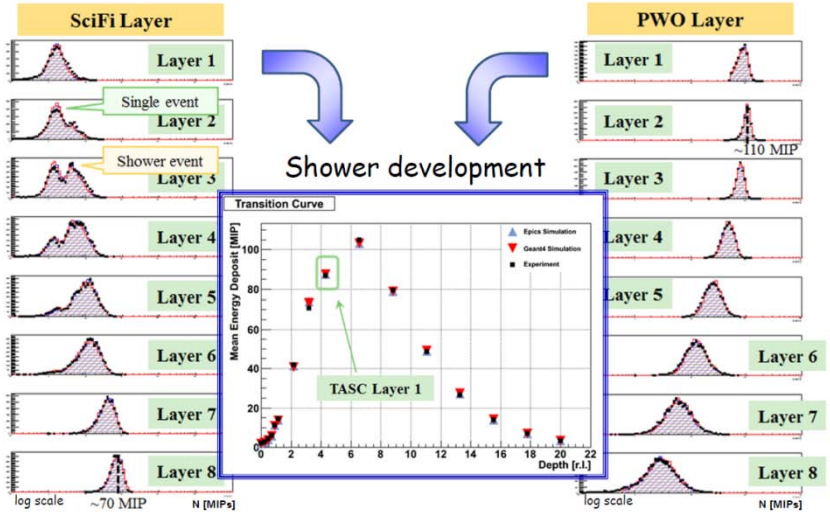


CERN-SPSにおけるビーム実験（2009,2010,2011）

装置概念図と10GeV電子のシミュレーション例 （2010)

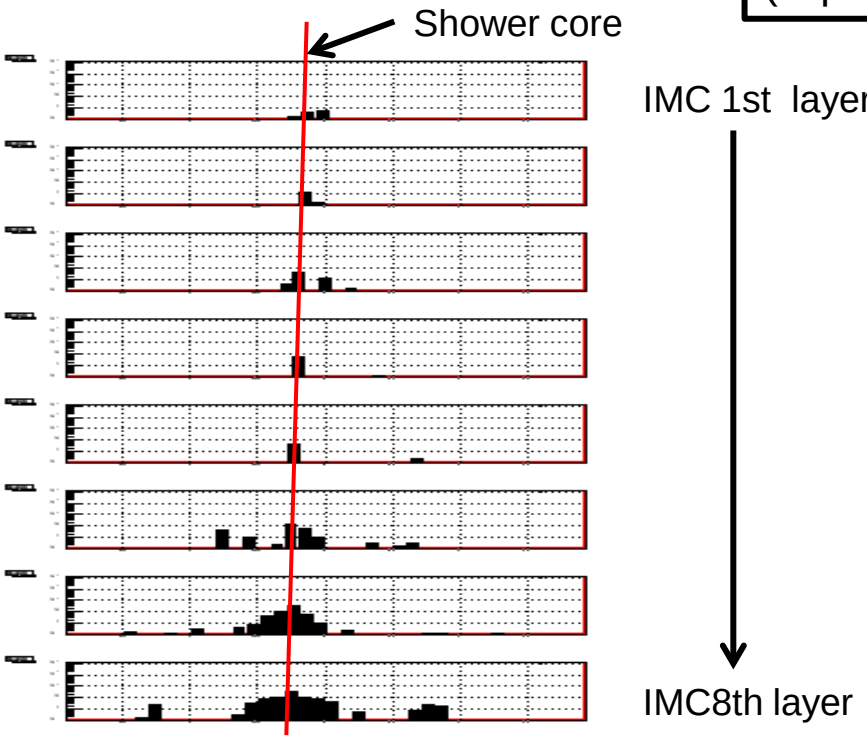


10GeVの電子における検出器内でのシャワー発達とシミュレーションの比較

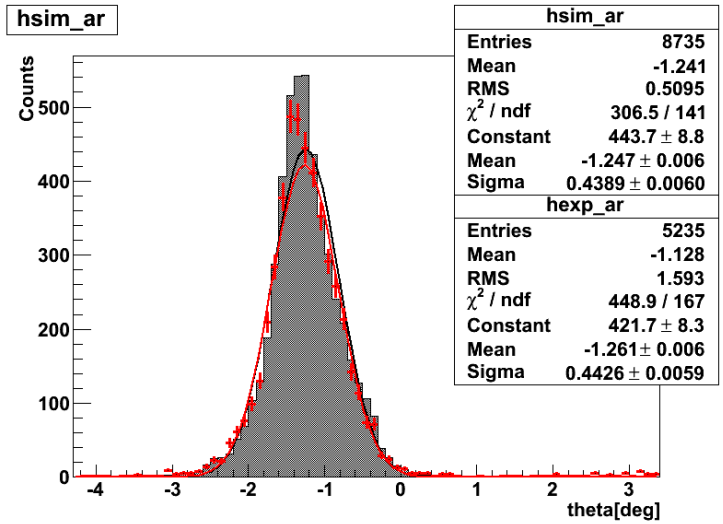


角度分解能のエネルギー依存性

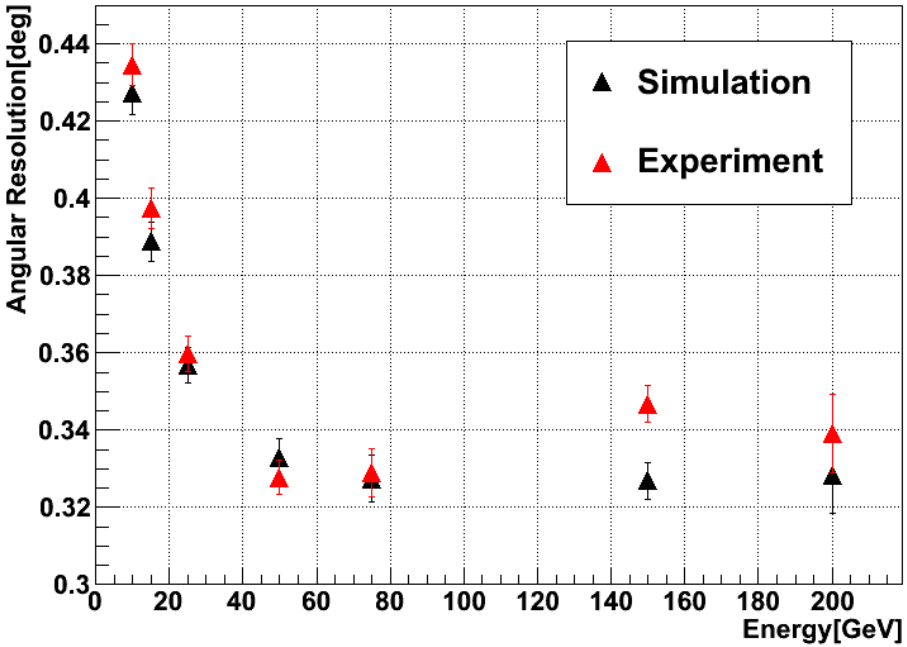
CERN-SPS
(X-projection)



Example Event（electron 10GeV）



Angular distribution（electron10GeV）
Black：Simulation　Red：Experiment



Energy dependency of angular resolution

CALET Simulation (IMC+TASC)
Electrons: 0.26 ~ 2.0 deg (1~10GeV)
0.13 ~ 0.26 deg (>10GeV)
Gamma Rays: 0.24 ~ 0.76 deg
(Preliminary)

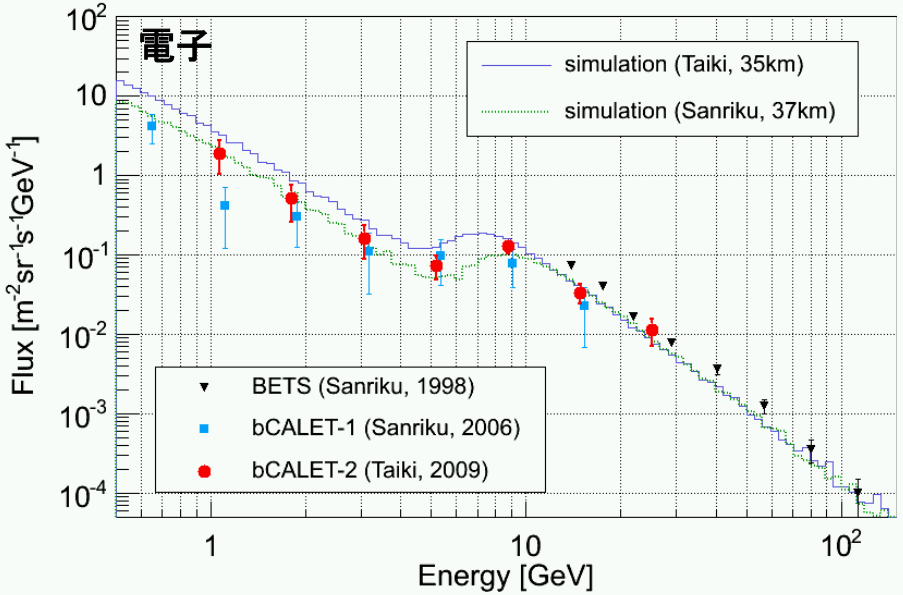
bCALET-2における電子・ガンマ線フラックスの観測結果

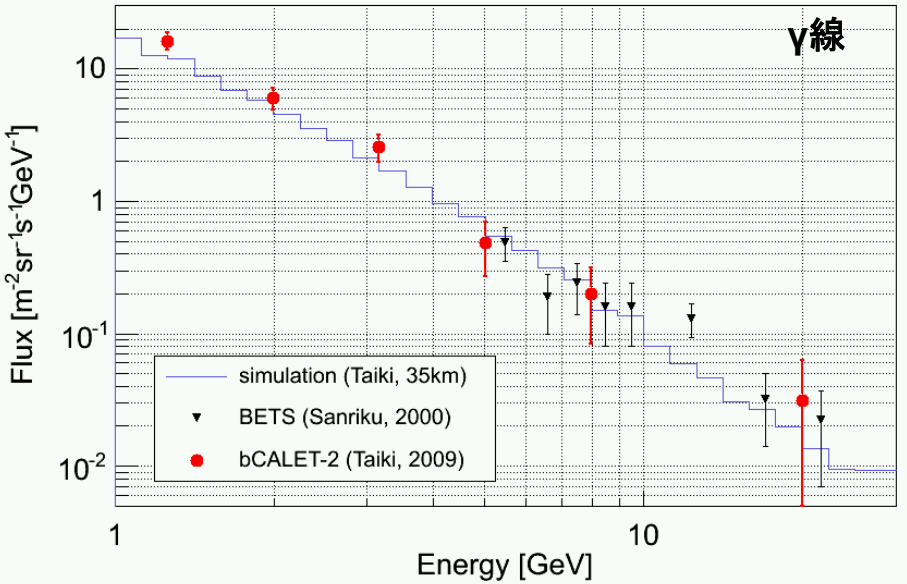
粒子識別で選別された電子・ガンマ線候補イベントを用いて、右式からフラックスを計算

$$Flux\ [\mathrm{m}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{GeV}^{-1}] = \frac{N}{\Delta E \cdot t \cdot S\Omega} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \delta$$

※ N ：イベント数
ΔE ：エネルギー幅
t ：観測時間
$S\Omega$ ：幾何学的因子
ε ：残存率
δ ：混入率

- シミュレーションと統計誤差の範囲で一致
- 過去の実験結果（BETS、bCALET-1）とも矛盾のない結果
- 10GeV付近のRigidity Cutの影響を観測
- 10GeV以下の二次電子、大気γ線の観測にも成功



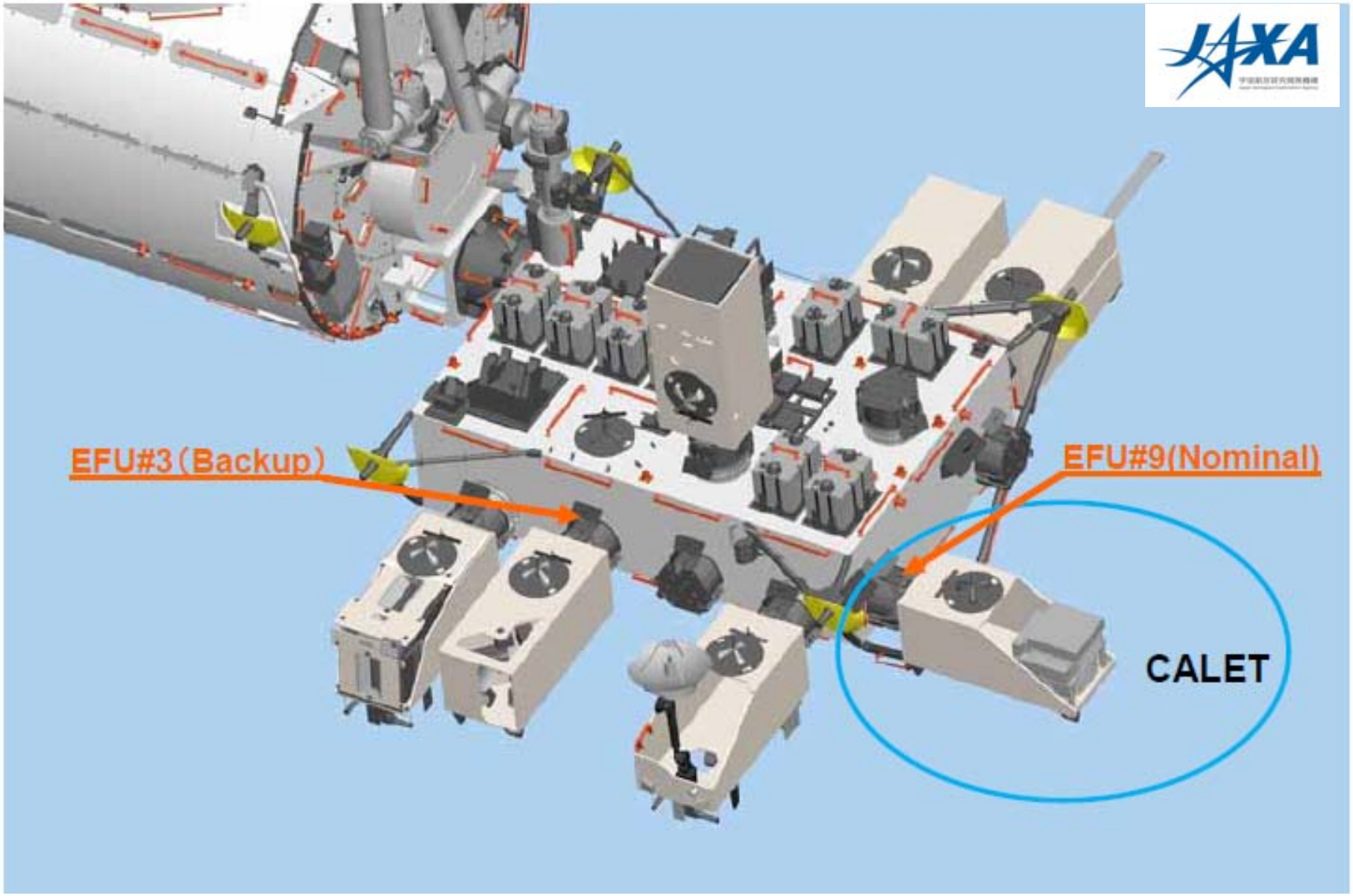


Fermi/LATとCALETのガンマ線観測性能比較

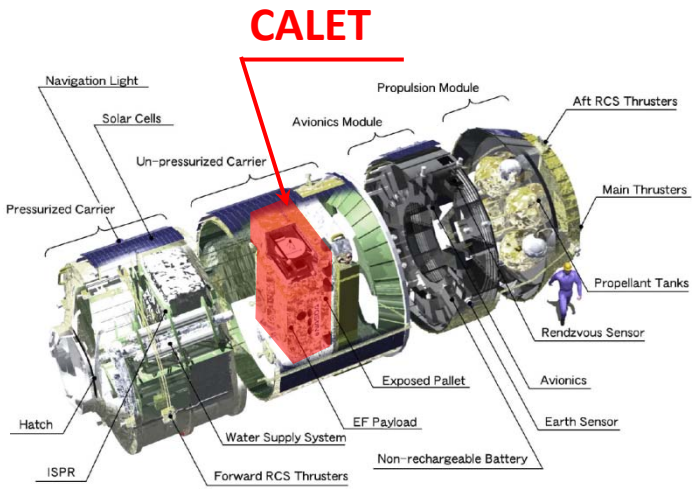
	Fermi/LAT	CALET
エネルギー領域	20 MeV-300 GeV	4 GeV - 10 TeV
有効面積	7600 cm^2@10GeV	~1000 cm^2@10GeV
視野	2.5 sr	~ 1.8 sr (max)
Acceptance	2.0 m^2sr (>10 GeV)	~1000 cm^2sr (>10GeV)*
角度分解能(68%)	0.25° @10 GeV	0.24° - 0.76° (>10GeV)
エネルギー分解能	8 % @10GeV	2 - 3 % (> 10 GeV)
イベント毎の死時間	26.5 μs	1 ms (TBD)
点源の感度（1年間）	6 ×10^{-10}/ cm^2s	4 ×10^{-9} /cm^2s

*) 装置構造による制限を含む

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）

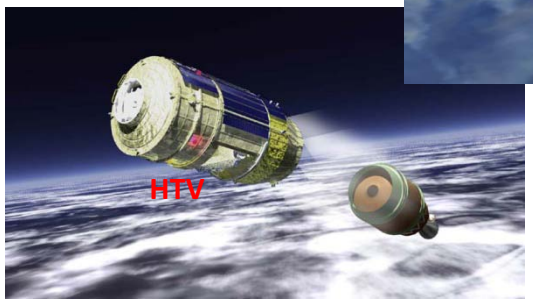


CALETのHTVによる打ち上げ

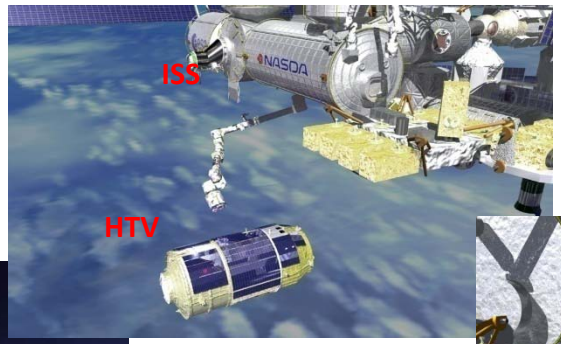


H2B Transfer Vehicle(HTV)

Launching by H2B Rocket

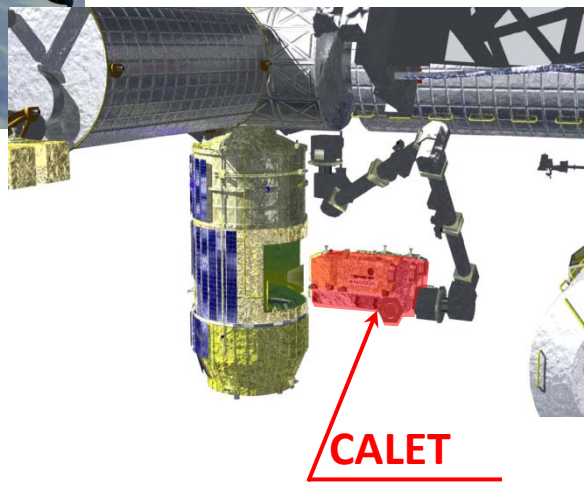


Separation from H2B



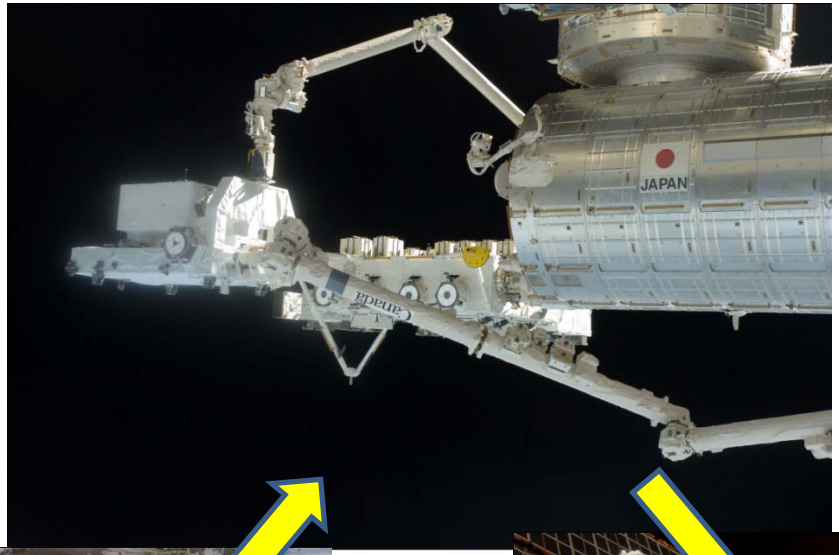
Approach to ISS

Pickup of CALET



HTVからJEM曝露部への装置設置のプロセス

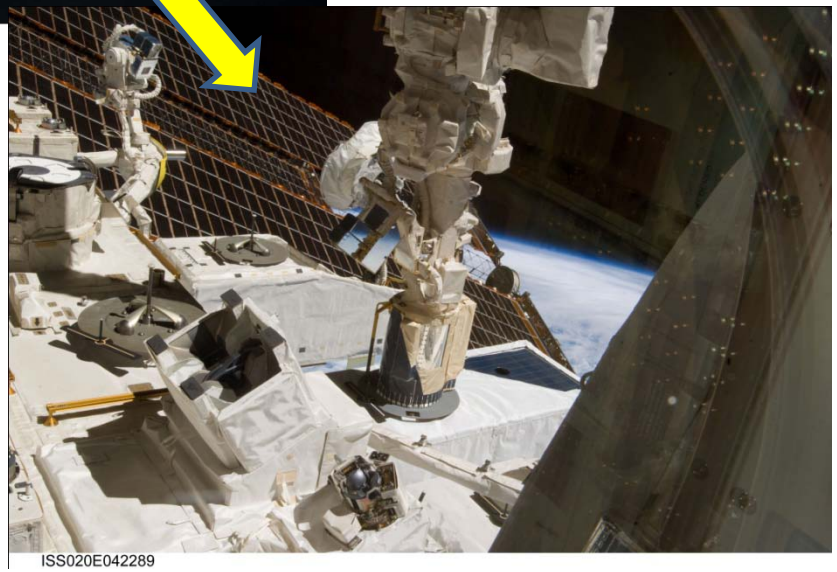
Hand-off of HTV Palette



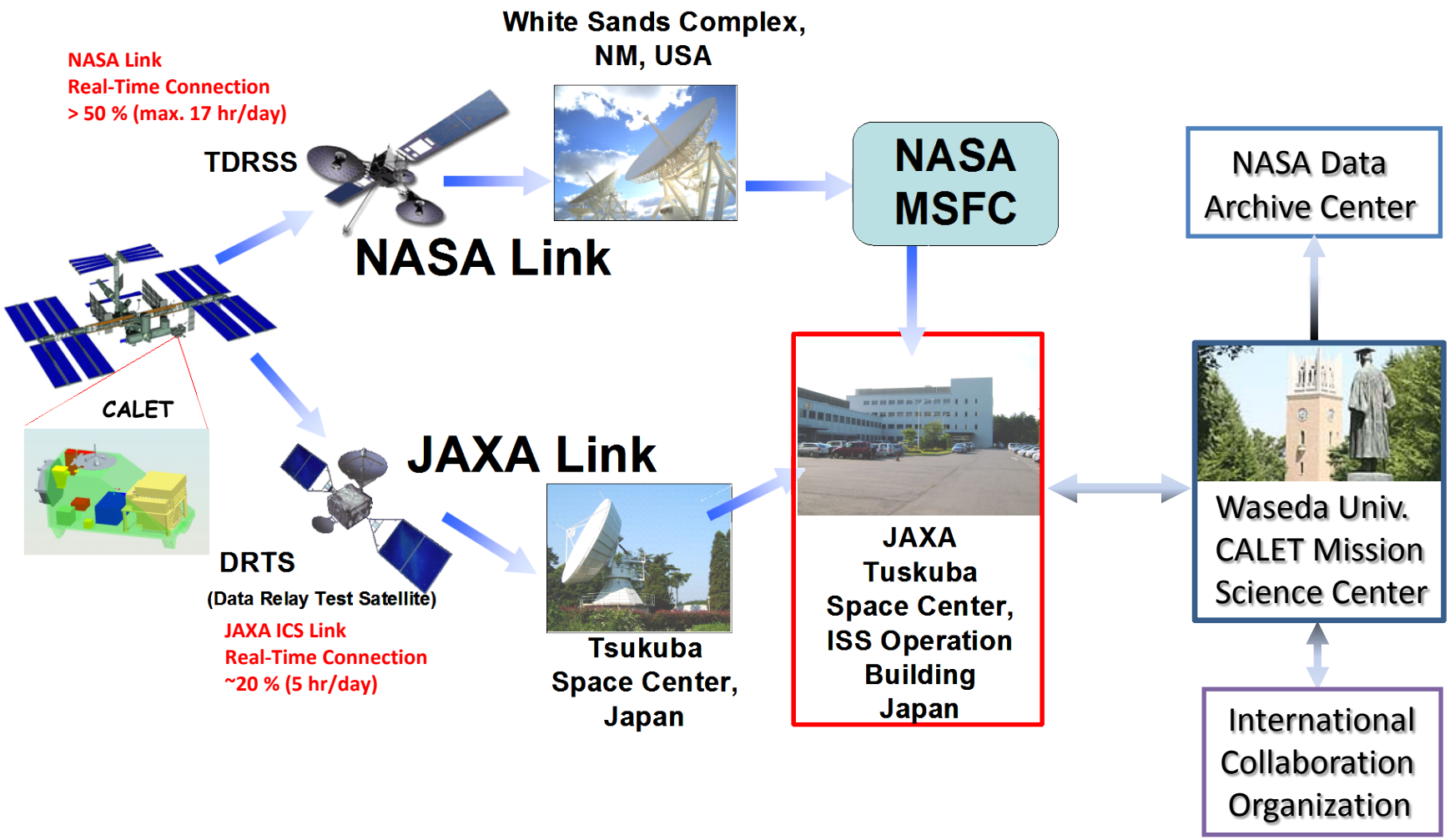
Real Pictures !!

Pick up HTV Palette

Place JEM/EF Payload



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、現在詳細設計フェーズにあり、2012年度にはCDRを経て搭載装置の製作を開始する予定である。

BACKUP
-Gamma-ray Burst-

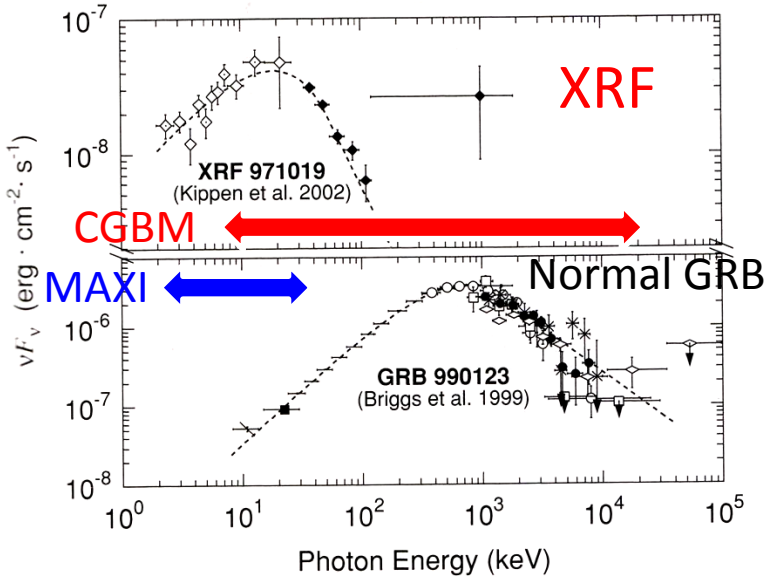
GRB observations with CALET (I)

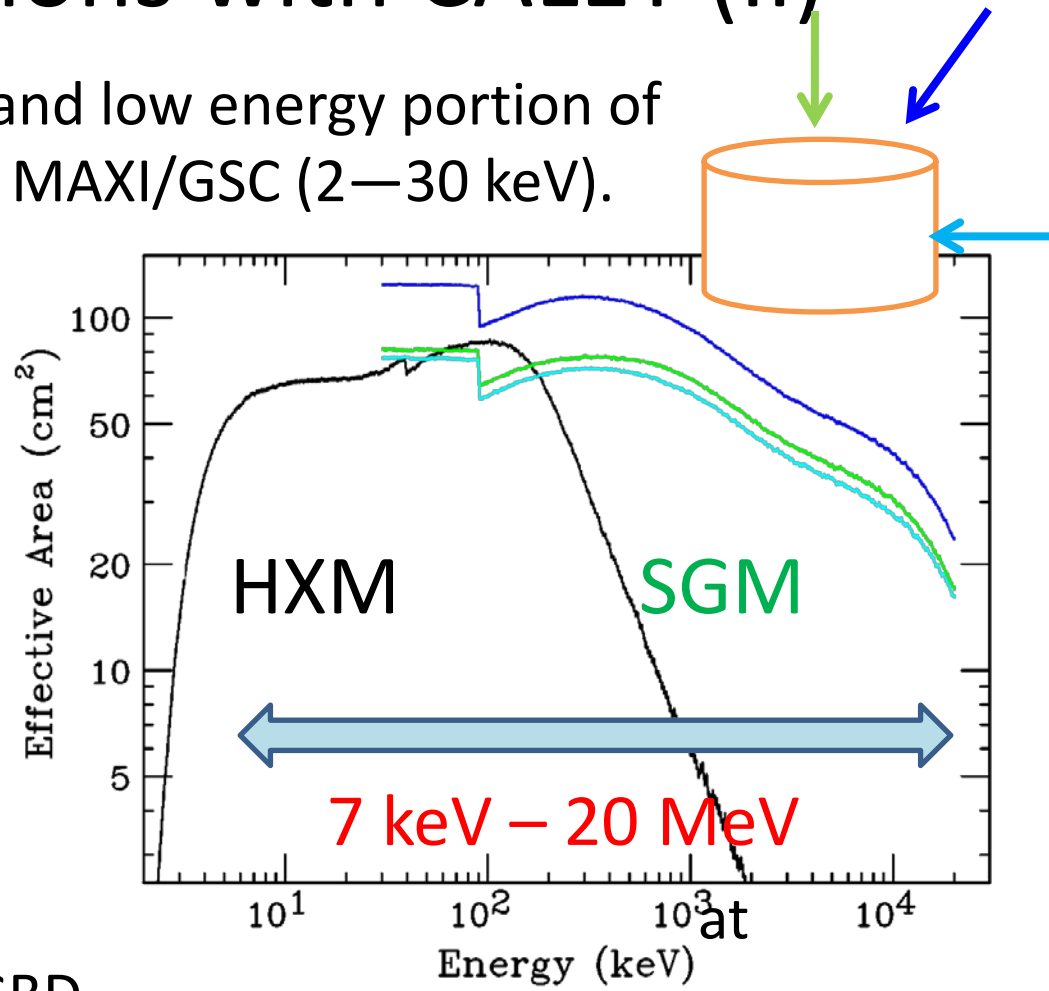
- Simultaneous broadband coverage with CAL(GeV-TeV), CGBM(keV-MeV), and possibly ASC (Advanced Star Camera: optical)
- The CAL would be comparable to the CGRO/EGRET sensitivity.

Parameters	CAL	CGBM
Energy	1 GeV- 10 TeV (GRB trigger)	HXM: 7keV– 1MeV (Goal 3 keV--3 MeV) SGM: 100keV– 20MeV (Goal 30keV-30MeV)
Effective area	~1000 cm^2	68 cm^2 (2HXMs), 82 cm^2 (SGM)
Angular resolution	2.5 deg@1 GeV, 0.4 deg@10 GeV	No localization capabilities by CGBM itself, but IPN localization is possible
Field of view	~45 deg.(~2 str.)	~π str. (HXM), ~4π str. (SGM)
Dead time	~1.8 ms	~20 us
Time resolution	1 ms	GRB trigger : 62.5 us (Event-by-event data) Normal mode:1/8 s with 4 channels and 4 s with 256 channels (Histogram data)

GRB observations with CALET (II)

- Study of X-ray flashes (XRFs) and low energy portion of normal GRBs with CGBM and MAXI/GSC (2—30 keV).





- Study of absorption features at 20-30 keV seen by Ginga/GBD.
- The CGBM effective area is comparable to that of Ginga/GBD (~60 cm^2). We will expect to detect -40 GRBs/year by HXM and -80 GRBs/year by SGM.