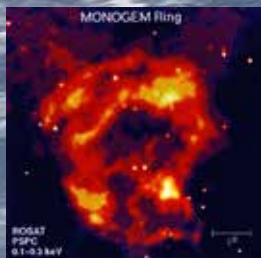


CALETによる高エネルギー 電子・ガンマ線観測

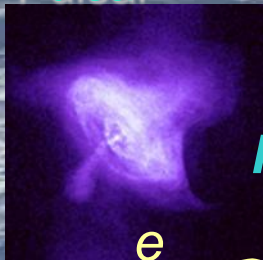
神奈川大学
田村忠久

宇宙線ソース

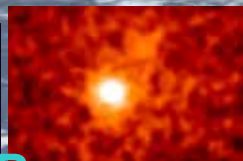
SNR



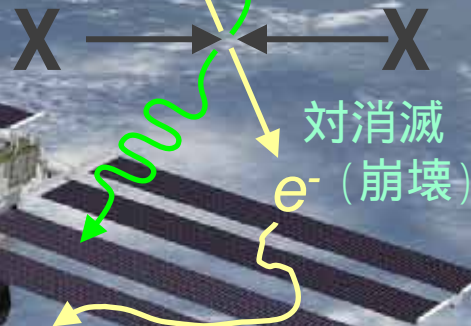
Pulsar



AGN



暗黒物質

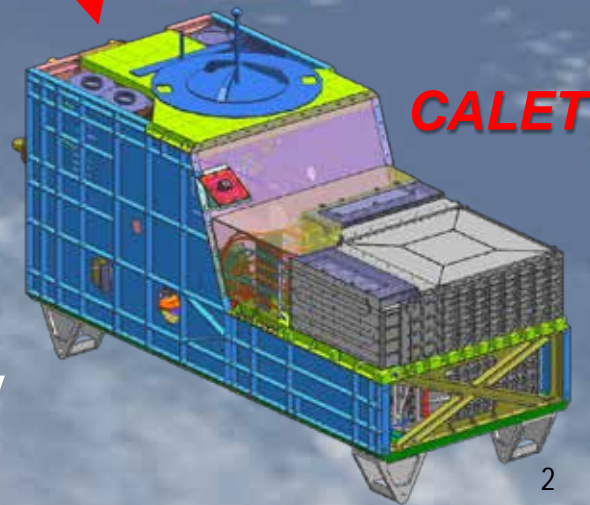


国際宇宙ステーション
ISS

きぼう
船外実験プラットフォーム
(曝露部)
JEM-EF

CALorimetric **E**lectron **T**elescope

主目的: 電子観測 1 GeV ~ 20 TeV





CALET International Collaboration Team



JAPAN

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



ITALY

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



USA

NASA/GSFC
 CRESST/NASA/GSFC and University of Maryland
 CRESST/NASA/GSFC and University Space Research Association
 Louisiana State University
 Washington University in St Louis
 University of Denver

Support Agencies



JAXA/SEUC



Waseda University
with JSPS, MEXT



ASI



NASA

CALET 概略

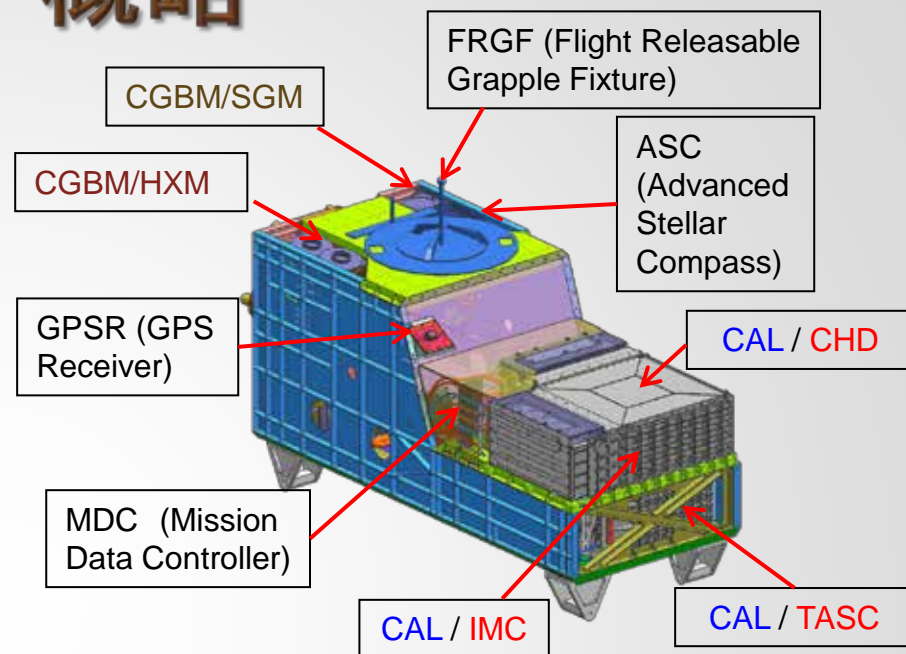
観測対象:

- l 電子 : 1 GeV ~ 20 TeV
- l ガンマ線 : 4 GeV ~ 10 TeV
(GRB: > 1 GeV)
- l 陽子, 核子:
数 10 GeV ~ 1000 TeV (per particle)
- l 超重核 (Z>28) : > 600 MeV/u
- l 太陽活動、モジュレーション:
1 ~ 10 GeV (電子)
- l ガンマ線バースト : 7 keV ~ 20 MeV

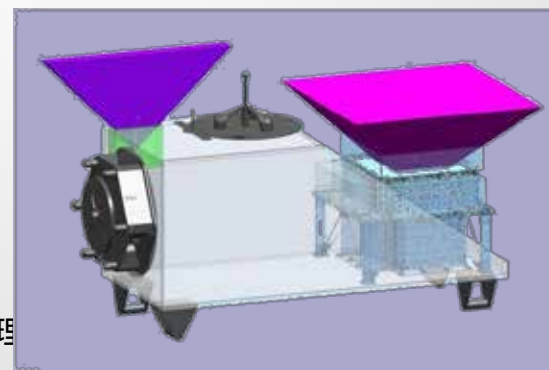
装置構成:

CAL: 高エネルギー電子・ガンマ線望遠鏡

- **CHD**: 電荷検出器 CHD
- **IMC**: イメージングカロリメータ
粒子選別、入射方向決定
- **TASC**: 全吸収カロリメータ
エネルギー決定、粒子選別



寸法: 標準ペイロード (0.8 × 1.0 × 1.85 m³)
 質量: 650 kg
 電力: 650 W
 データ転送: 中速系 300 kbps (Nominal)
 低速系 20 kbps



視野
(天頂角 45度)

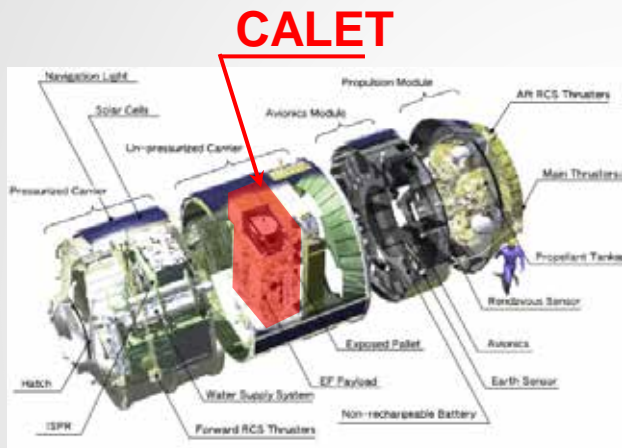
HTV による観測装置輸送

HTV: H-IIB Transfer Vehicle

H-IIB ロケットによる
HVTの打ち上げ

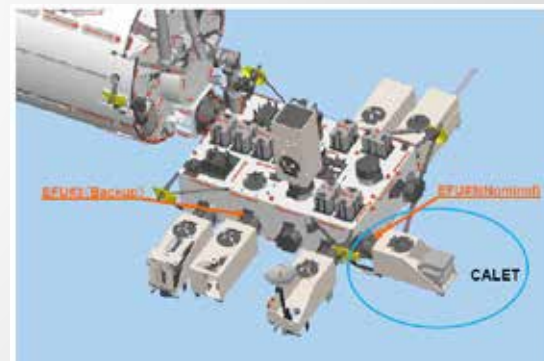


HVT-1 (技術実証機)
2009.9.11 (SMILES)



CALETの予定

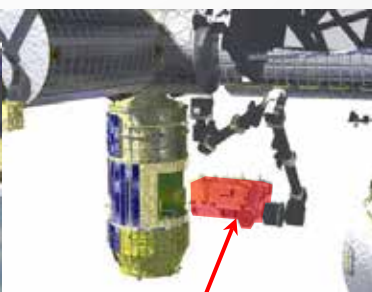
- ・HTV-5
- 2014年打上げ
- ・観測期間2年以上
- 5年目標



H-IIBからの切り離し



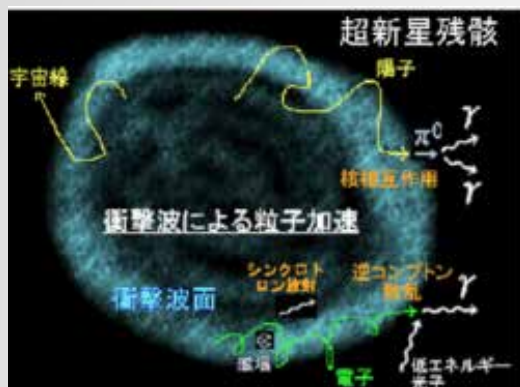
ISSへの接近



機器の取り出し

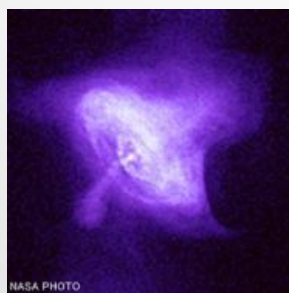
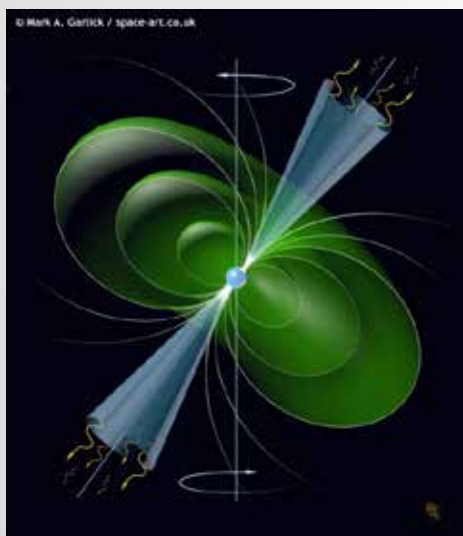
電子加速源 — 天体起源 —

超新星残骸 (SNR) での衝撃波加速

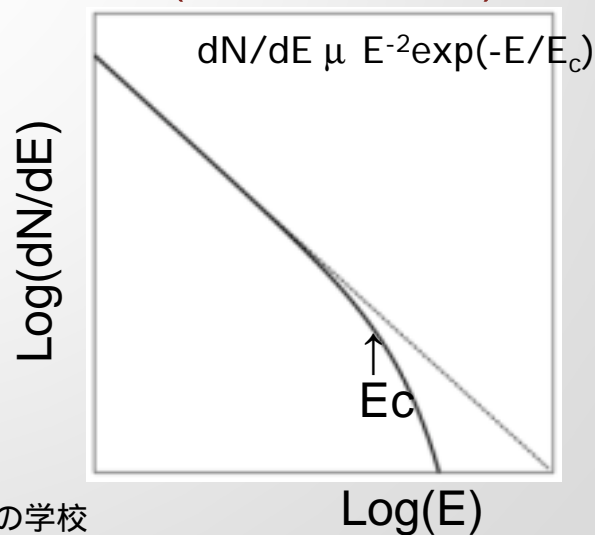


- 超新星爆発のエネルギーは、 $\sim 10^{53}$ erg
- ニュートリノが99%持ち去る
 - SN1987A KAMIOKANDE
- 衝撃波のエネルギーとして1% 10^{51} erg
 - 衝撃波加速
- その10%が陽子 (+ 原子核) の加速に 10^{50} erg
- さらにその1%が電子の加速に 10^{48} erg

パルサー磁気圏での加速



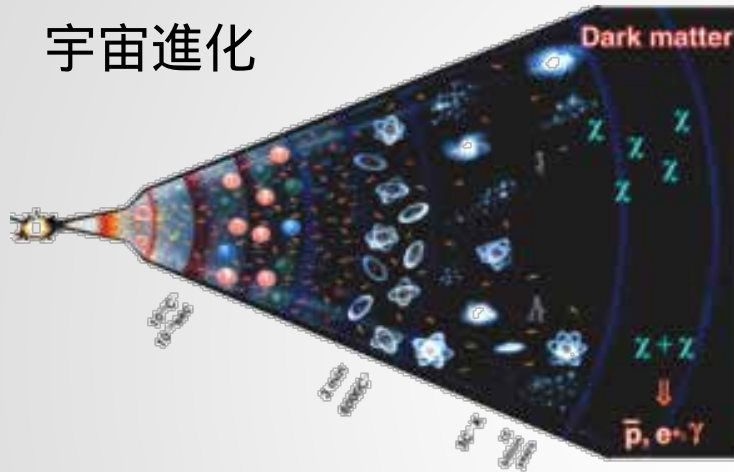
ソースでのスペクトル (べき型 + カットオフ)



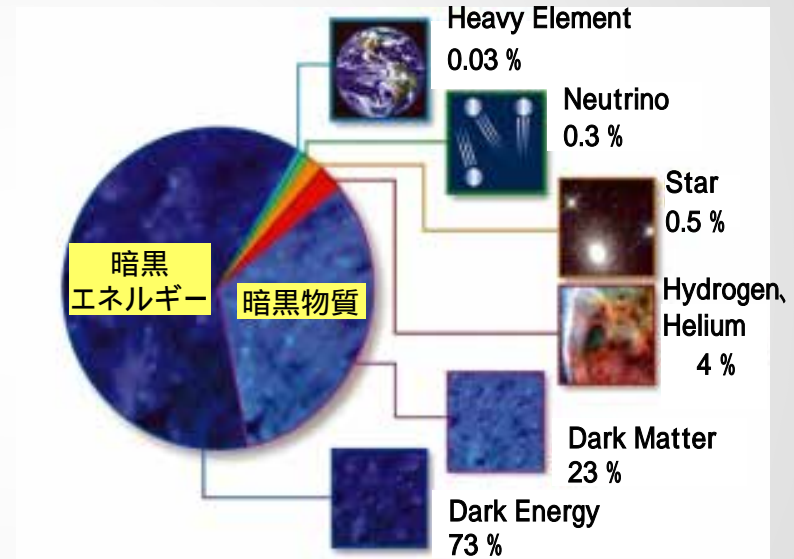
電子源 —宇宙論、素粒子論—

暗黒物質起源

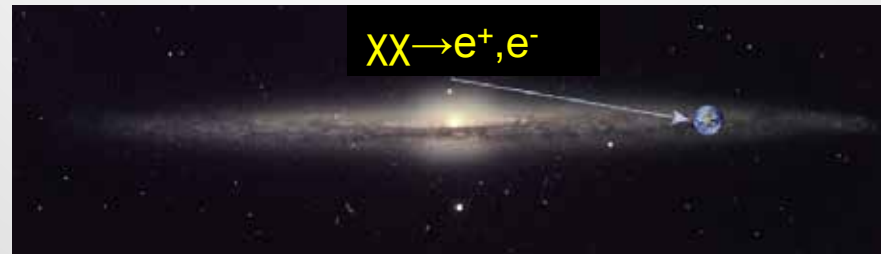
宇宙進化



宇宙の構成要素



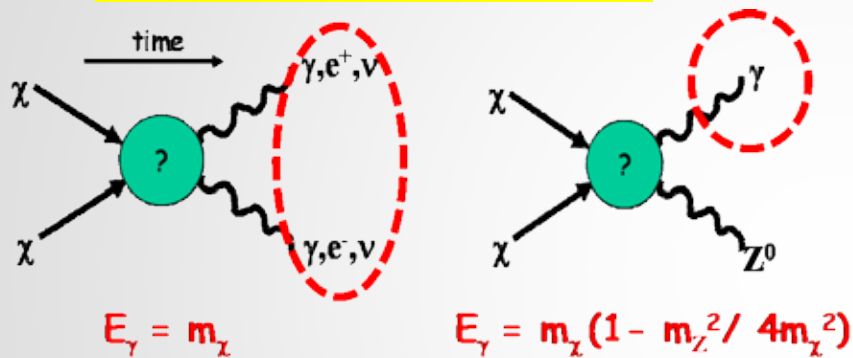
暗黒物質の対消滅、崩壊 (WIMP)



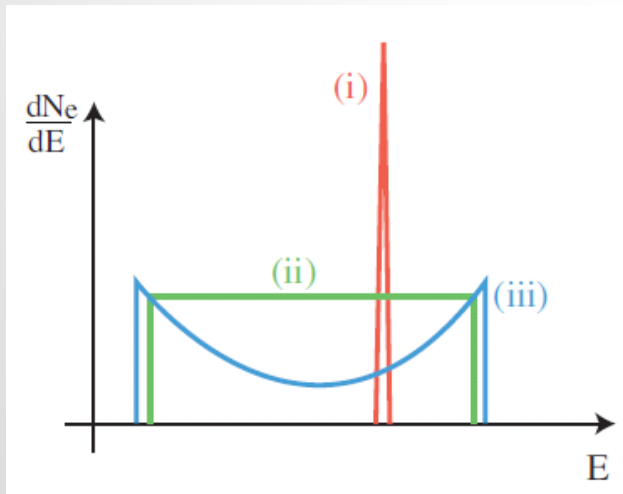
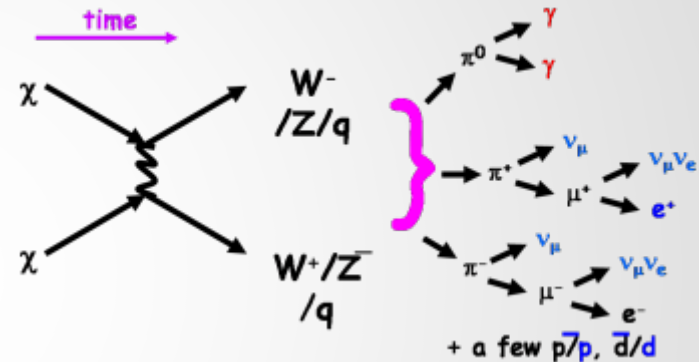
電子源 — 宇宙論、素粒子論 —

— 暗黒物質 (WIMP) の対消滅

(1) WIMP line Emission



(2) WIMP continuum Emission



電子・陽電子の生成スペクトル

- () Monoenergetic: Direct Production of e^+e^- pair
- () Uniform: Production via Intermediate Particles
- () Double Peak: Production by Dipole Distribution via Intermediate Particles

銀河内の伝播

– 拡散過程

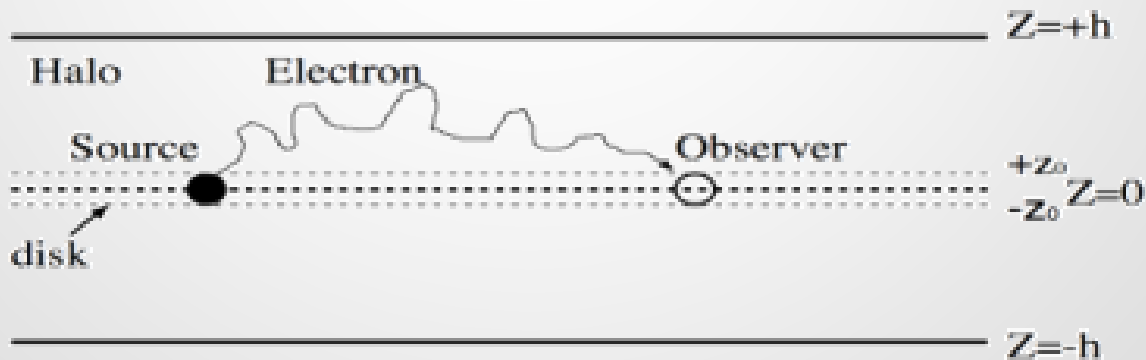
電子のエネルギー損失 (銀河磁場、光子との相互作用)

シンクロトロン放射

逆コンプトン散乱 (IC)

陽子、原子核 二次成分

$p^{+/-}$ or $K^{+/-}$ \otimes $m^{+/-}$ \otimes $e^{+/-}$



拡散過程

– Diffusion Model

単一の電子ソースからの拡散方程式

$$\frac{dN_e}{dt} - \tilde{N}(D\tilde{N}N_e) - \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}E} (bE^2 N_e) = Q$$

E : 電子のエネルギー

$N_e(t, r, E)$: 電子の密度 (加速後の経過時間 t , ソースからの距離 r)

Q : 電子ソースの強度 (電子生成率)

b : エネルギー損失に関する定数

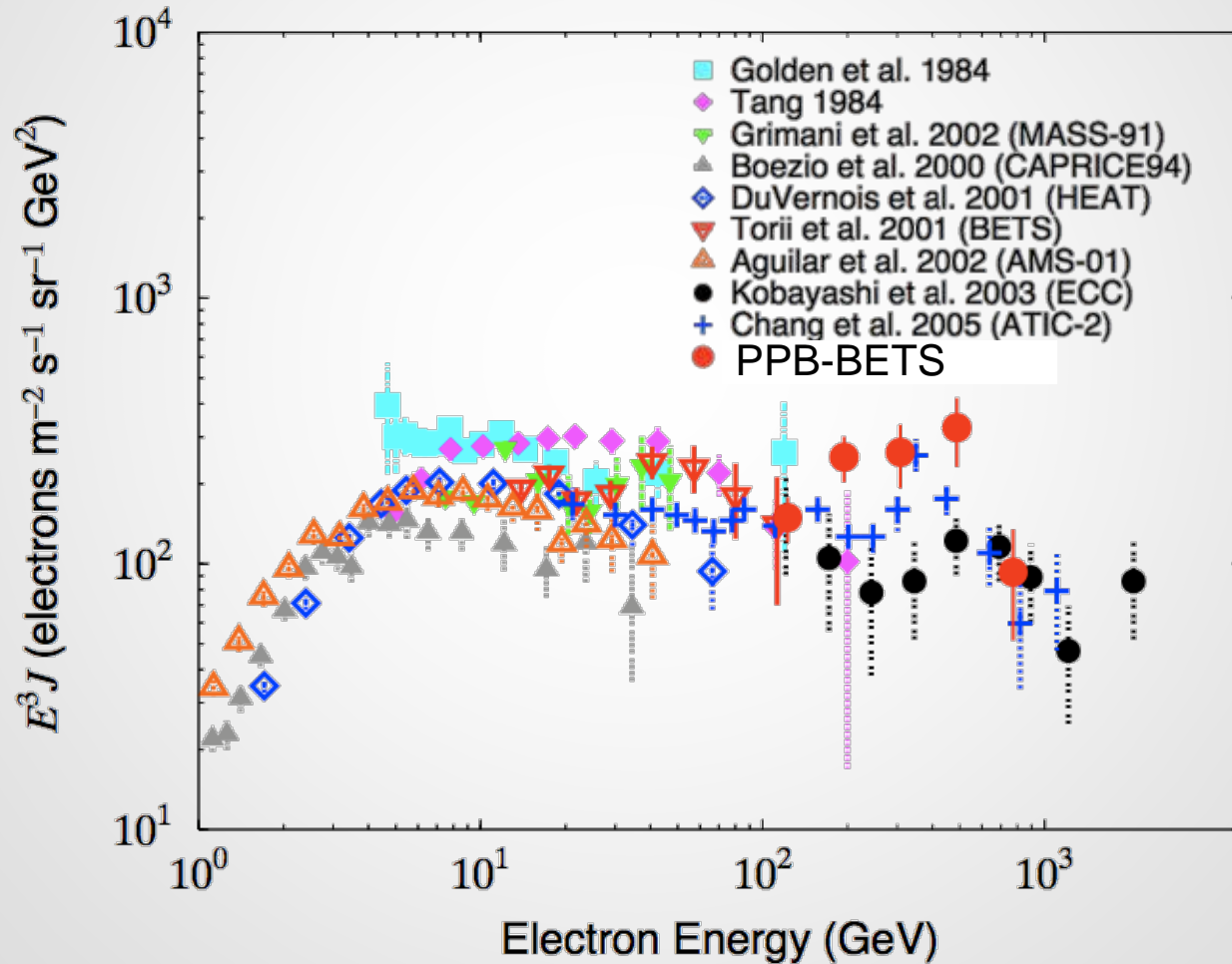
D : 拡散係数 $D = D_0 (E / 5 \text{ GeV})^d$

$$D_0 = 2 \sim 5 \cdot 10^{29} [\text{cm}^2 \text{s}^{-1}]$$

$$d = \begin{cases} 0 & E < 5 \text{ GeV} \\ 0.3 \sim 0.6 & E \geq 5 \text{ GeV} \end{cases}$$

地球での電子観測

– 10 GeV ~ 数 TeV: べき型のスペクトル ~ E^{-3}



伝播する電子のエネルギー損失

– シンクロトロンと逆コンプトンによってエネルギー損失

$$\frac{dE}{dt} = -bE^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{E(t)} = bt + \frac{1}{E_0} \quad b = \frac{4s_{\text{Thomson}}}{3m_e^2 c^4} \frac{c}{e} \frac{\omega B^2}{8\rho} + w_{\text{ph}}$$

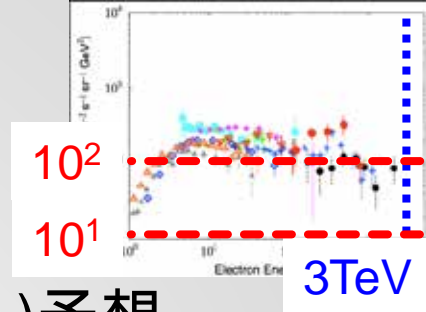
– 電子の初期エネルギー E_0

– 例えば、 $E(t) = E_0/2$ になるのにかかる時間は、

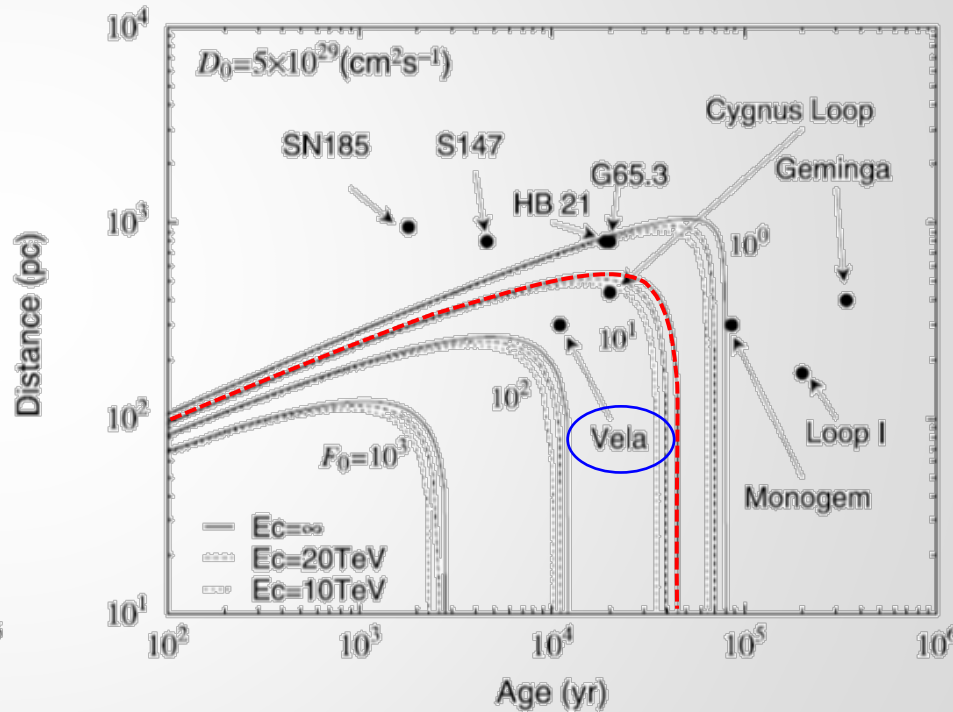
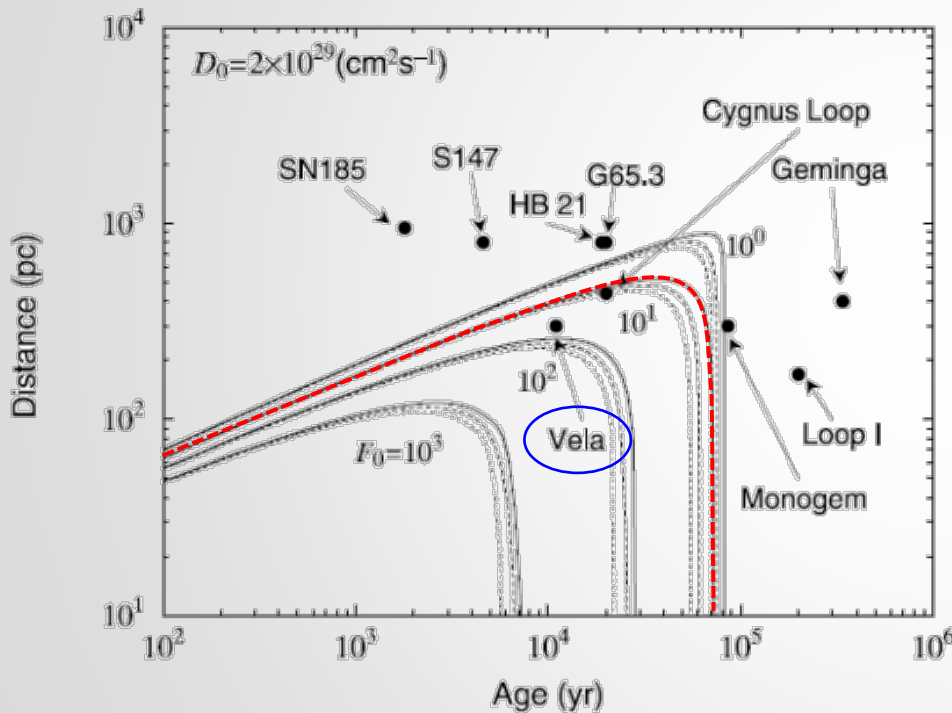
$$t_{1/2} = \frac{1}{bE_0}$$

– 高エネルギーになるほど早くエネルギー損失する

高エネルギー電子の伝播



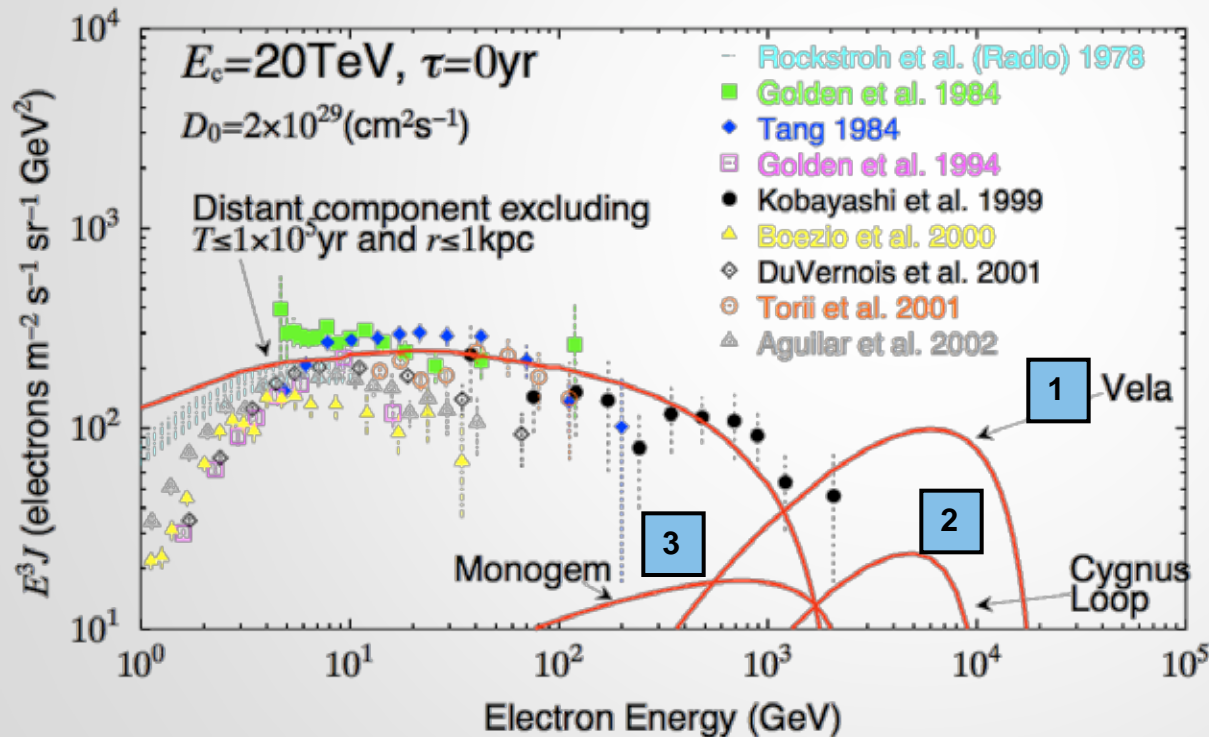
- SNRが加速源だとすると、古くても、遠くても✕
- SNRから地球に到達する3 TeVの電子の強度(F_0)予想



- SNR < 1 kpc かつ < 10万年 TeVの電子が検出可能
- 近傍のソースは数個に限られる

近傍ソース

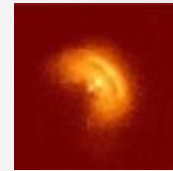
- TeV領域の高エネルギー電子のスペクトル
SNRが電子加速源であれば…
近傍ソースだけの影響が見えるはず



近傍ソース候補

- T (年齢) $< 10^5$ 年
- R (距離) < 1 kpc

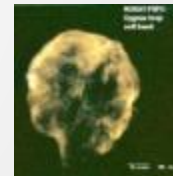
1



Vela

10,000 年
250 pc (815 光年)

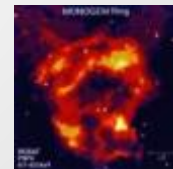
2



Cygnus Loop

20,000 年
770 pc (2,500 光年)

3

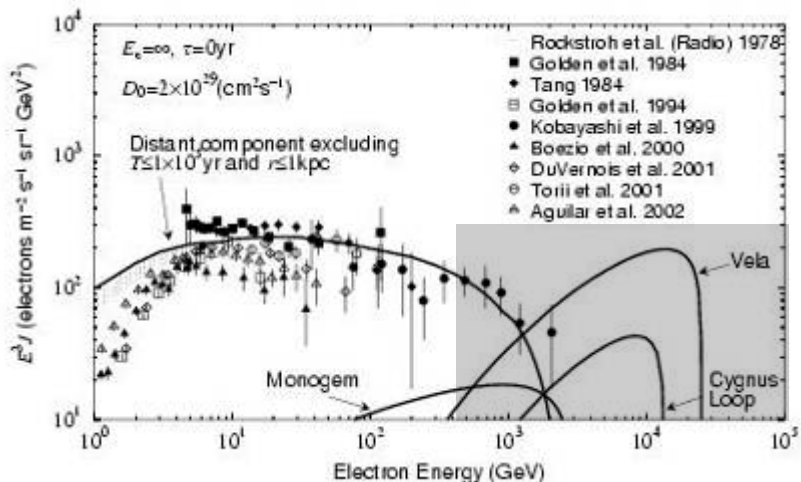


Monogem

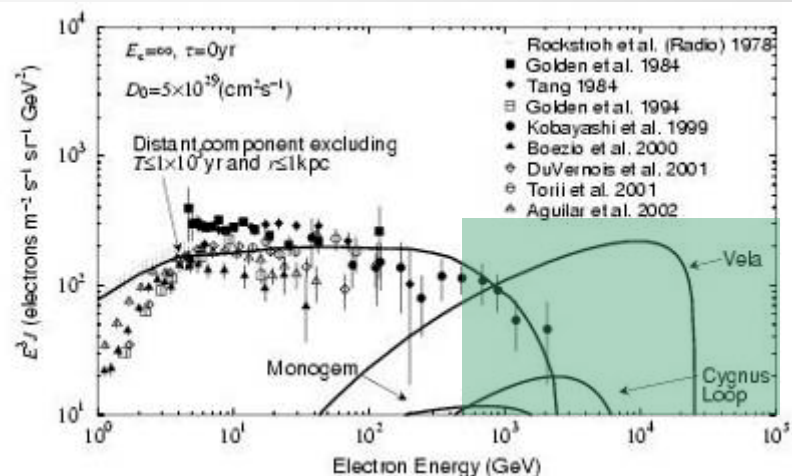
86,000 年
300 pc (1,000 光年)

近傍の超新星残骸による影響のモデル依存性

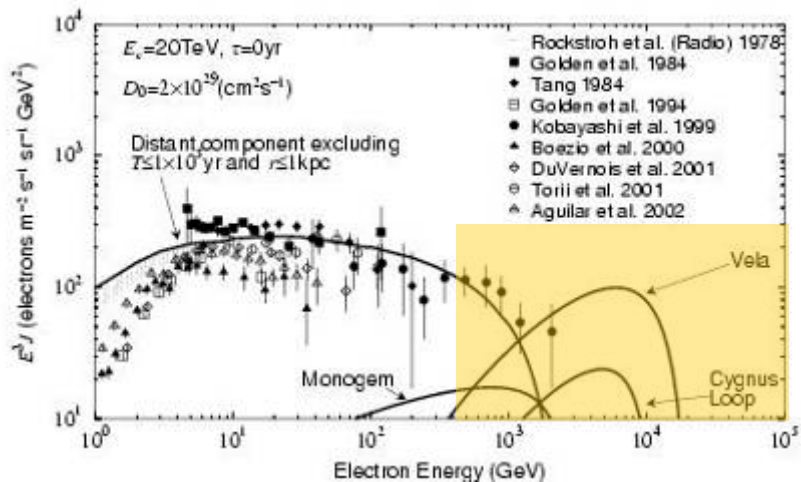
$E_c = \infty$, $\Delta T = 0$ yr, $D_0 = 2 \times 10^{29}$ cm²/s



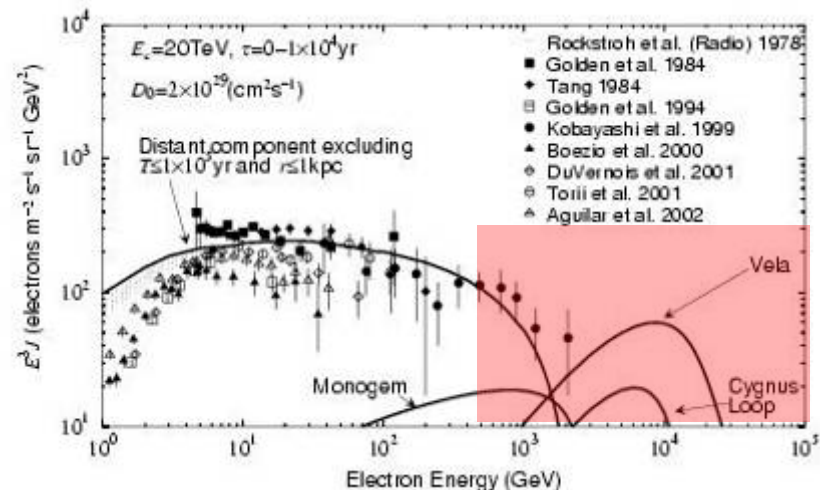
$D_0 = 5 \times 10^{29}$ cm²/s



$E_c = 20$ TeV



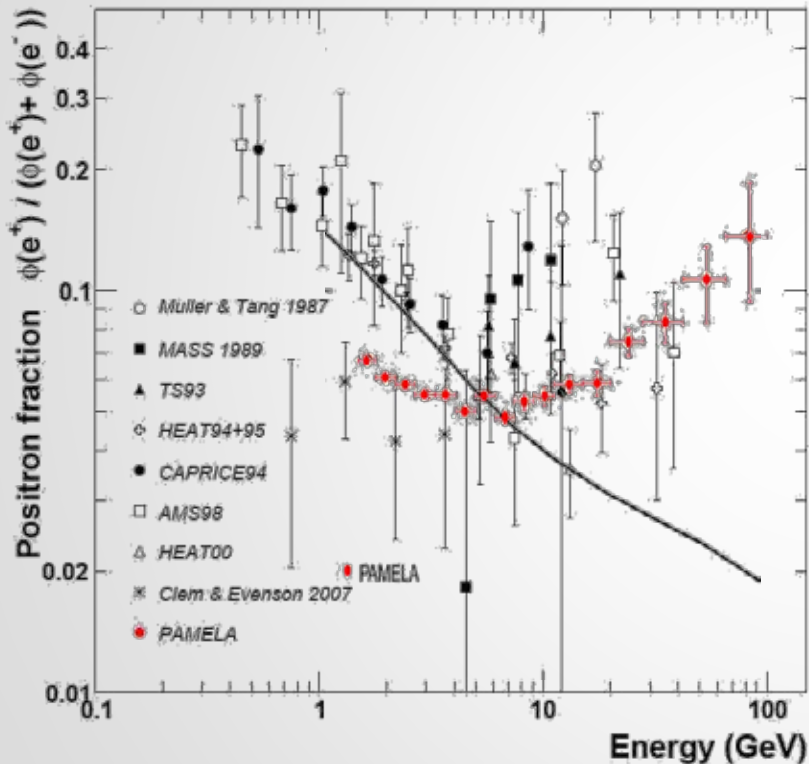
$E_c = 20$ TeV, $\Delta T = 0 \sim 1 \times 10^4$ yr



暗黒物質探索

PAMELA

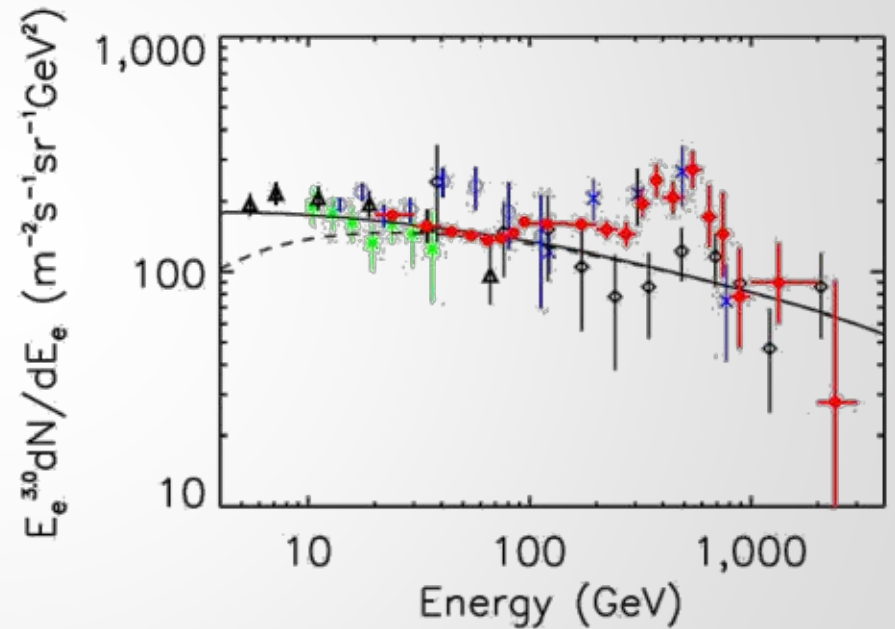
Adriani et al. (2008)



陽電子 / (陽電子+電子)

ATIC

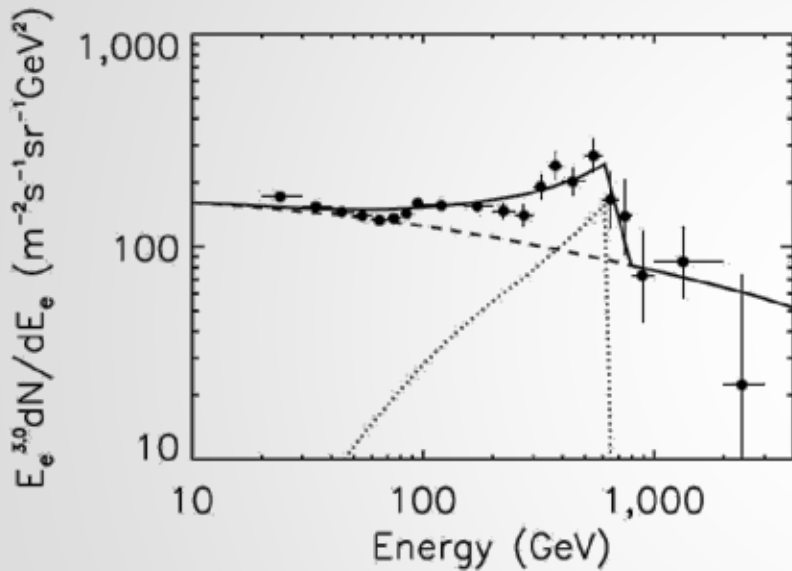
Chang et al. (2008)



電子+陽電子

暗黒物質探索

ATICによる電子(+陽電子)観測



KKDM (620 GeV) とすると、
boost factor ~ 200 が必要
(KKDMの分布に非一様な塊がある?)

hidden $U(1)_H$ ゲージボソンが
ダークマター (質量 1.2 TeV) で、
標準模型の粒子へ崩壊すると (寿命 $\sim 10^{26}$ s)
(arXiv:0811.3357 / PTP 122(2),553,2009)、

→

反陽子を増やさずに、
(BESS, PAMELAの観測に矛盾せず)
PAMELAの陽電子比の増大と、
ATIC/PPB-BETSの電子・陽電子過剰を
自然に説明できる。

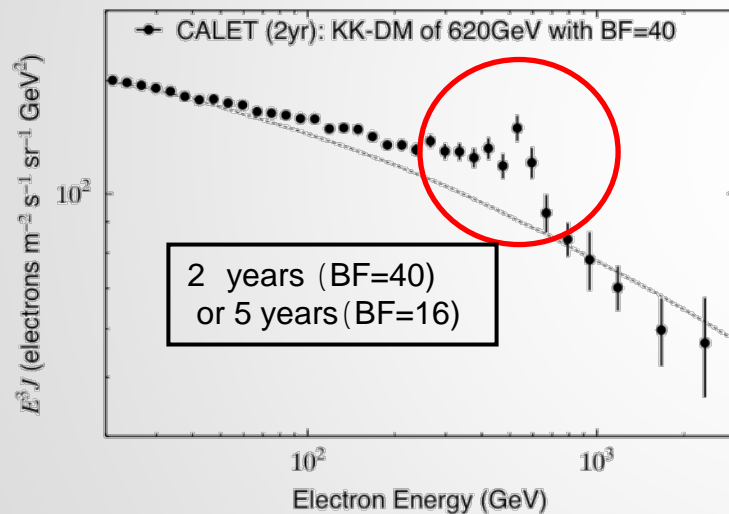
→

但し、ガンマ線100 GeV周辺にピークが出る

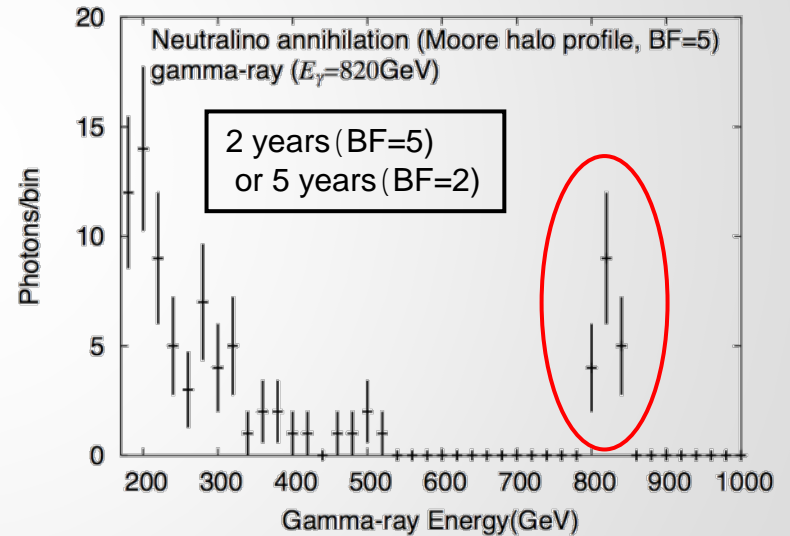
暗黒物質探索

CALETによる観測で期待される暗黒物質の検出

KK 暗黒物質 (質量 620 GeV) による
電子 + 陽電子の超過スペクトル

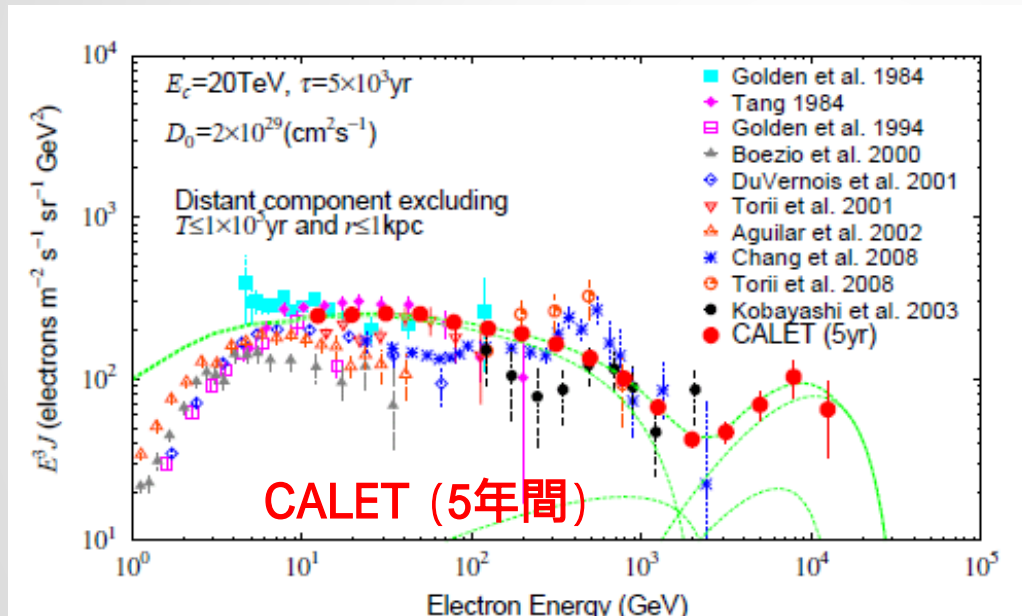


SUSY 暗黒物質 (質量 820 GeV) による
ラインガンマ線スペクトル

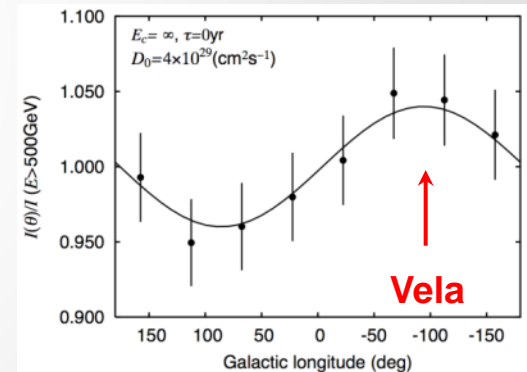


CALET による電子観測

- 低バックグラウンド (陽子除去能力: 10^5) と高いエネルギー分解能 ($\sim 2\%$) で、1 TeV を超える領域へのスペクトル観測を伸ばす
- ATIC anomaly と 低エネルギー側 1 GeV までの精密なスペクトル測定
- 異方性の検出による近傍ソースの特定



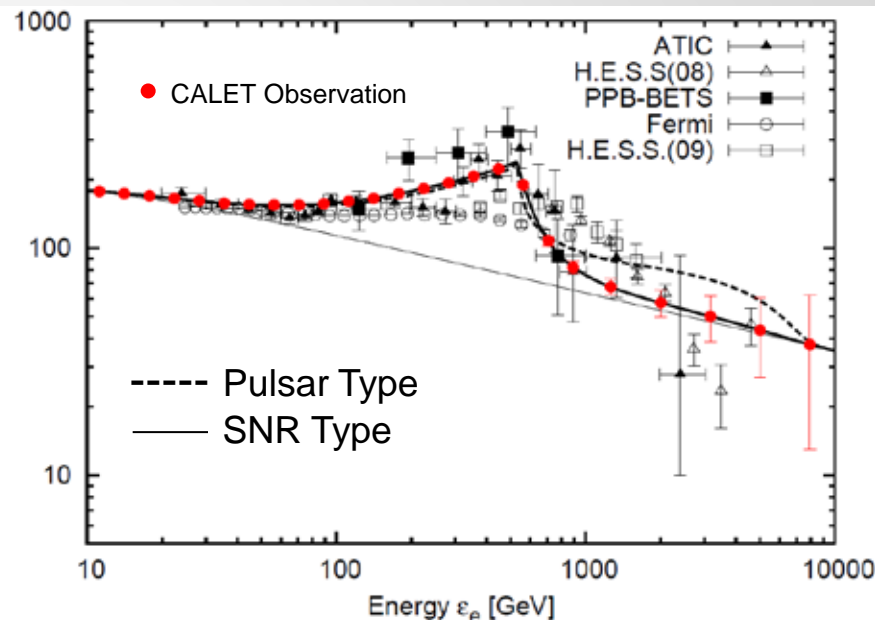
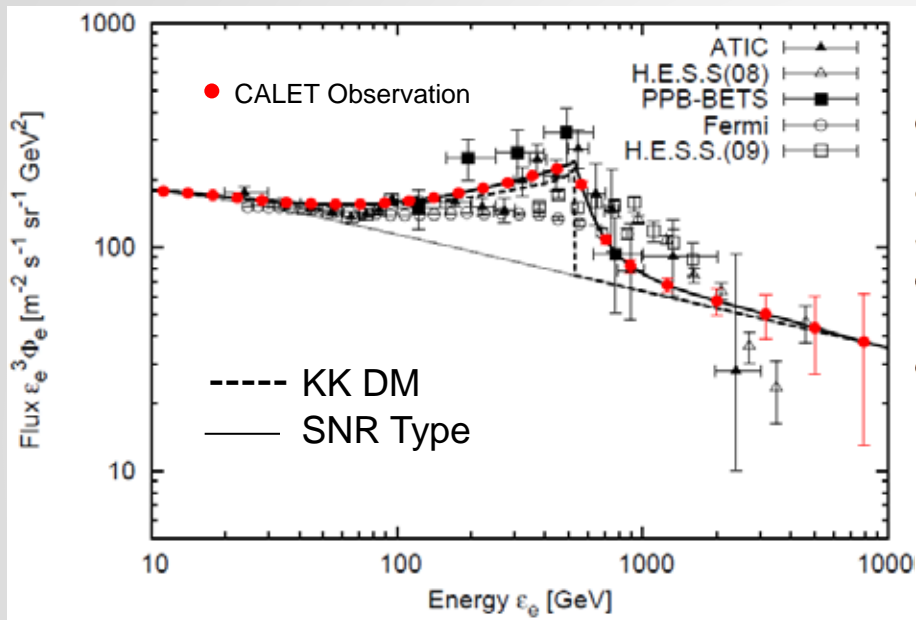
近傍ソースなのか？
暗黒物質なのか？



CALETによる電子観測(5年間) - Astrophysical Model -

KK DM vs. SNR type ($\Delta t=10^5$ year)

SNR Type vs. Pulsar ($\Delta t=3 \times 10^5$ year)

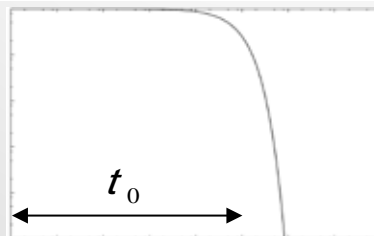


Source

age= 5.6×10^5 yr,
 $E_e = 1.7 \times 10^{50}$ erg,
spectral index=1.7

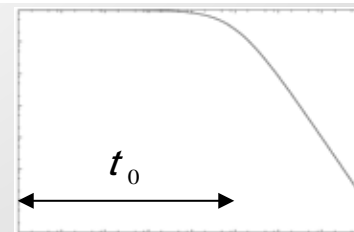
SNR Type ($\exp(-t)$)

$$Q_0(t) \propto \frac{E_{tot} \ln 4}{t_0} \exp\left(-\frac{t \ln 4}{t_0}\right)$$



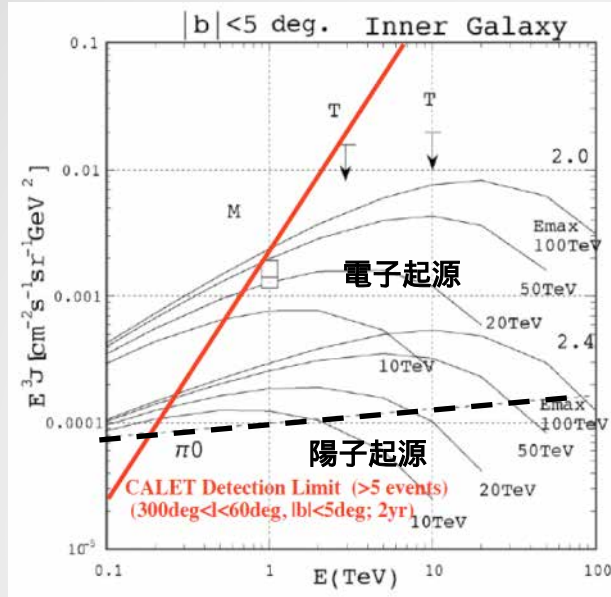
Pulsar Type (t^{-2})

$$Q_0(t) \propto L_{\text{spindown}} = \frac{E_{tot}}{t_0 (1+t/t_0)^2}$$



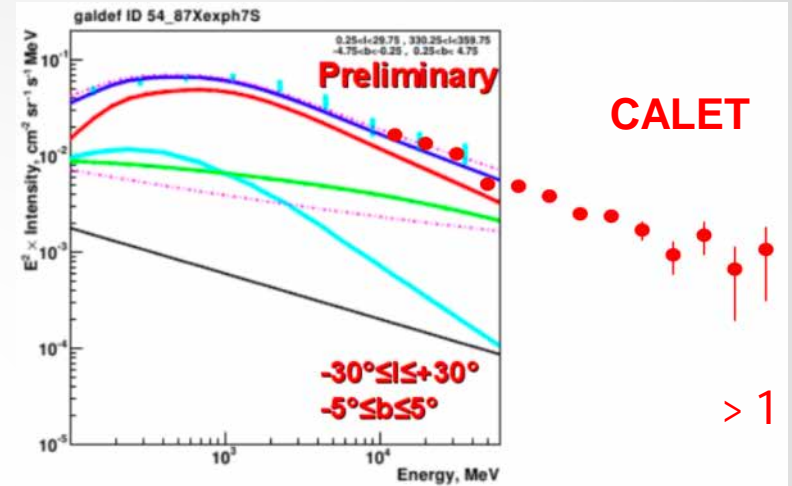
拡散ガンマ線成分

銀河内
拡散成分

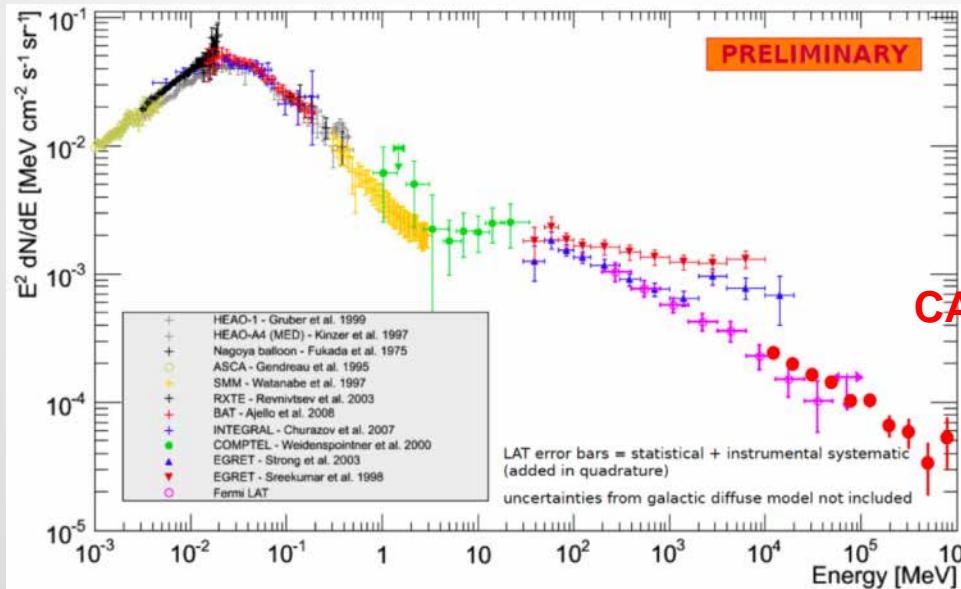


N.Tateyama
(Ph.D Thesis)

CALET 2年間の観測による
銀河内拡散成分の観測期待値



銀河系外
拡散成分



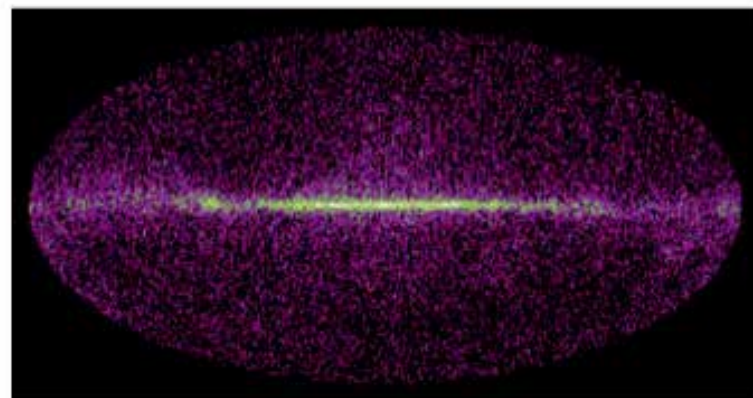
CALET 5年間の観測による
銀河系外拡散成分の観測期待値

Detection of High Energy Gamma-rays

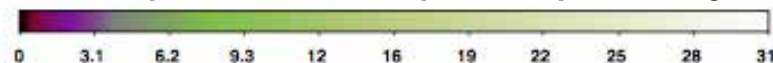
Performance for Gamma-ray Detection

Energy Range	4 GeV-10 TeV
Effective Area	600 cm ² (10GeV)
Field-of-View	2 sr
Geometrical Factor	1100 cm ² sr
Energy Resolution	3% (10 GeV)
Angular Resolution	0.35 ° (10GeV)
Pointing Accuracy	6'
Point Source Sensitivity	8 x 10 ⁻⁹ cm ⁻² s ⁻¹
Observation Period (planned)	2014-2019 (5 years)

Simulation of Galactic Diffuse Radiation

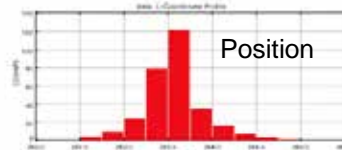
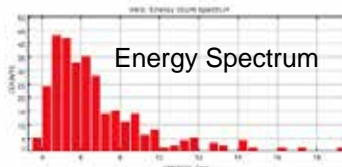
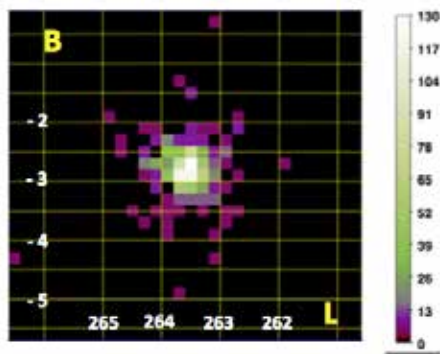


~25,000 photons are expected per one year

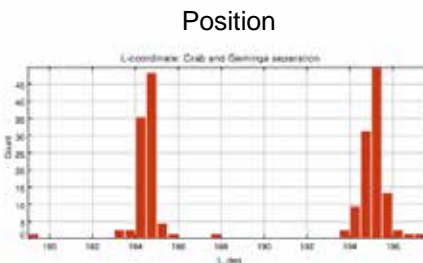
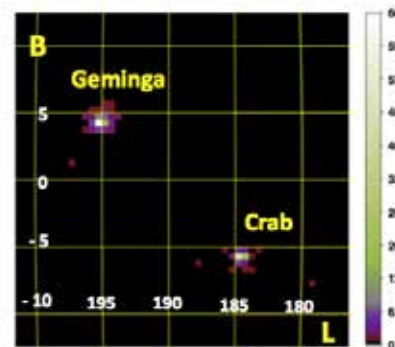


*) ~7,000 photons from extragalactic γ -background (EGB) per one year

Simulation of point sources per one year



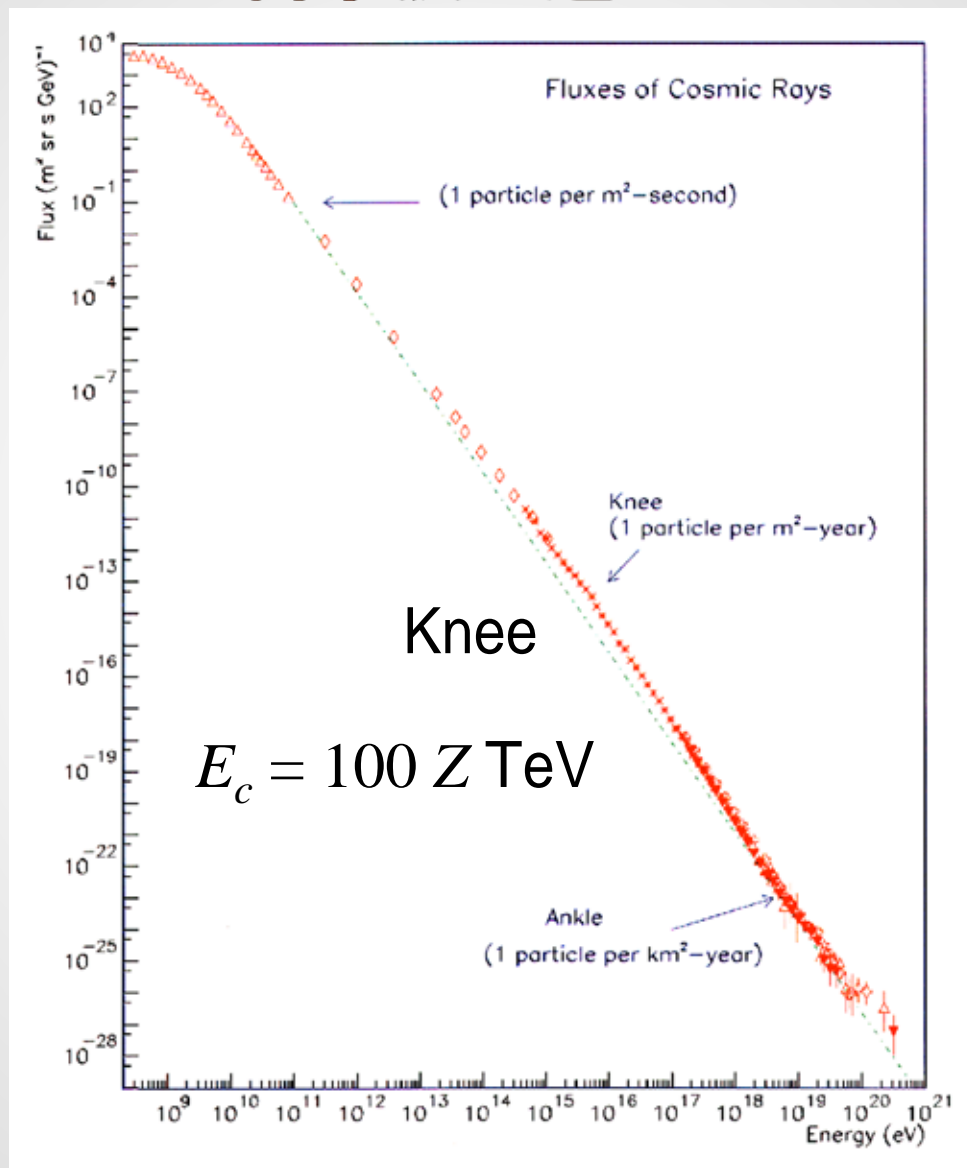
Vela: ~ 300 photons above 5 GeV



Geminga: ~150 photons above 5 GeV

Crab: ~ 100 photons above 5 GeV

陽子・原子核の観測 — 衝撃波加速か? —



陽子・原子核の観測 — 衝撃波加速か? —

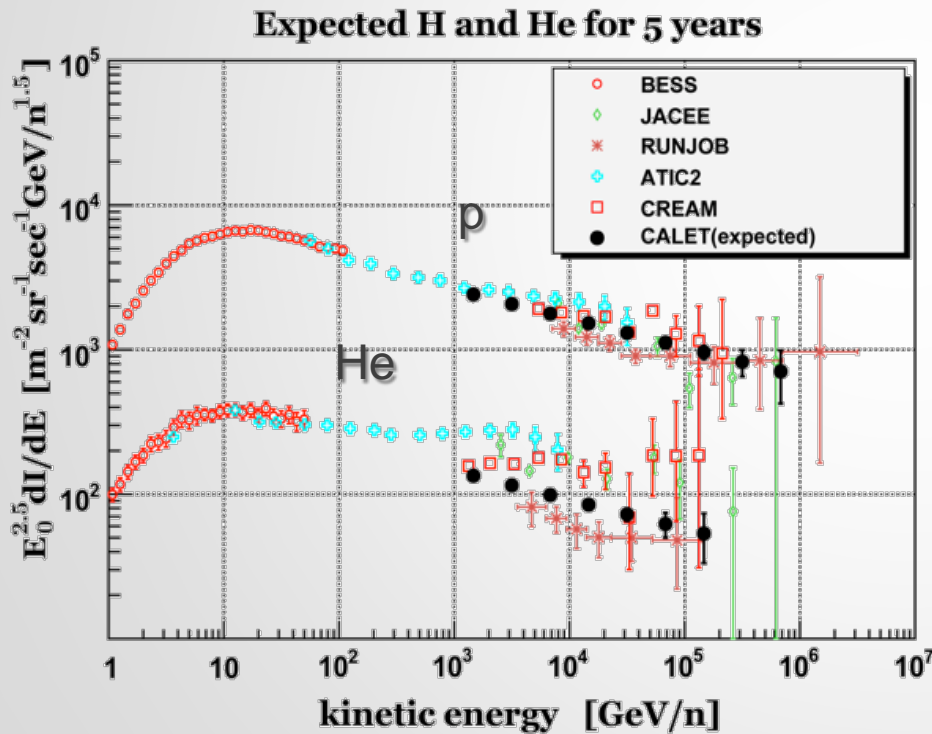
CALET

Mean Free Path: 1.65

Energy Resolution: < 30 %

イベント数の期待値

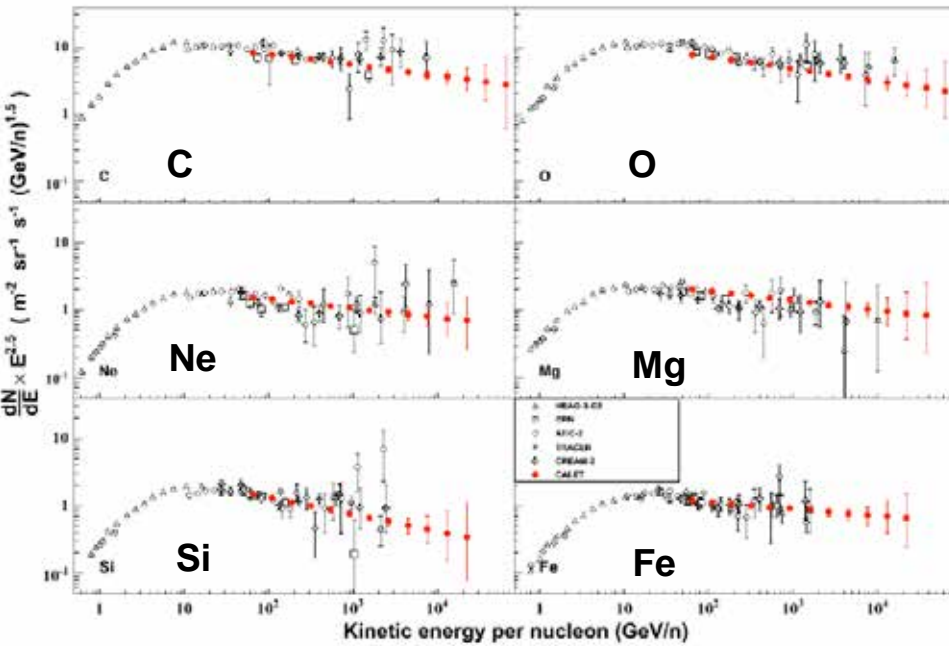
CALET による観測予測とこれまでの気球データ



E range (TeV/n)	Proton	He
0.4-0.7	967734	128408
0.7-1.2	402176	56356
1.2-2.0	167138	24733
2.0-3.5	69460	10855
3.5-5.9	28866	4764
5.9-10.0	11996	2091
10.0-16.9	4986	918
16.9-28.8	2072	403
28.8-48.9	861	177
48.9-83.0	358	78
83.0-140.9	149	34
140.9-239.3	62	15
239.9-406.4	26	6.6
406.4-690.2	10.7	2.9
690.2-1172.1	4.4	1.3
>1172.1	1.8	0

陽子・原子核の観測 — 衝撃波加速か? —

CALET による観測予測と
これまでの気球データ ● CALET (5年間)



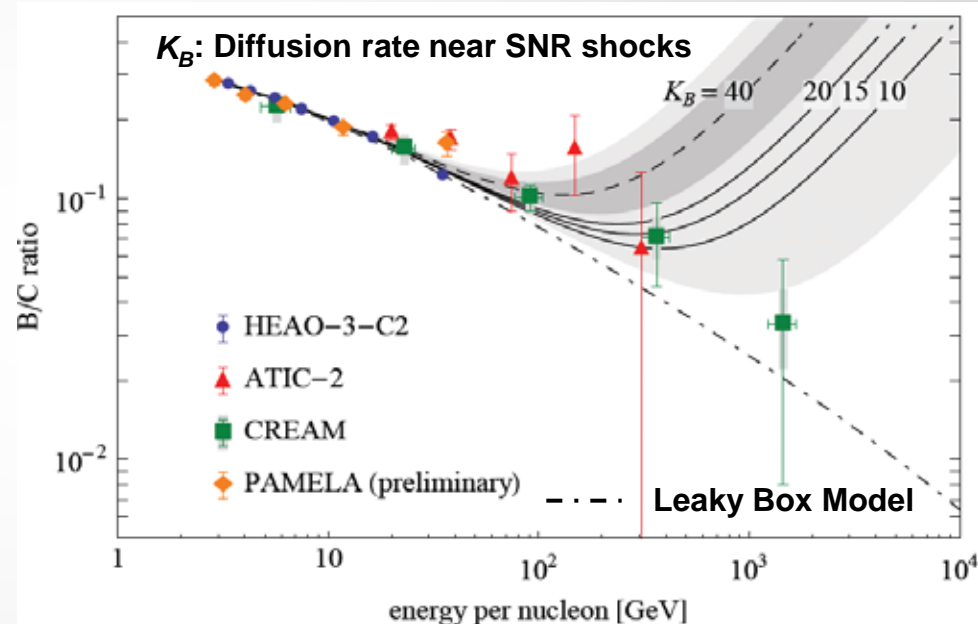
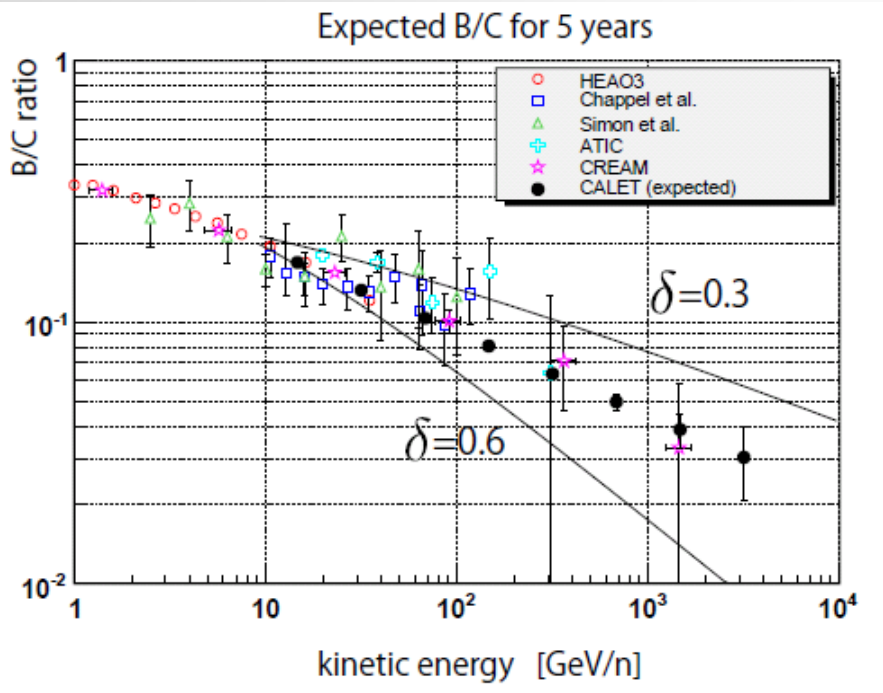
観測可能な最高エネルギー

Nucleus	10 events with E (TeV/n) >	5 events with E (TeV/n) >
H	586	893
He	265	416
C	22.9	34.6
O	20.6	30.9
Ne	9.2	14
Mg	10.8	16.4
Si	6.3	9.3
Fe	9	13.8

二次核/一次核比(B/C)の測定 — 銀河内伝播 —

- | 拡散係数のエネルギー依存性: $D \sim E^\delta$
- | 大気の影響を受けずに数TeV/nまで観測

$K_B=40$: ATIC Ti/Fe より
1 σ 2 σ



CALETによる5年間の観測(黒丸)で期待される
スペクトルとこれまでの気球データの比較

SNRの衝撃波中でp-p相互作用に続いて二次 e^- , e^+ も加速されるとして電子スペクトル(Fermi-LAT, HESS)を解釈すると、Pamelaの $e^+/(e^++e^-)$ 増大とも、二次核がSNRで加速される場合のB/C比とも合う($K_B=20$)

(arXiv:0909.4060/ Phys. Rev. D 80,123017 (2009))

高エネルギー側のデータが必要

CALET カロリメータ

ρ CHD 電荷検出器

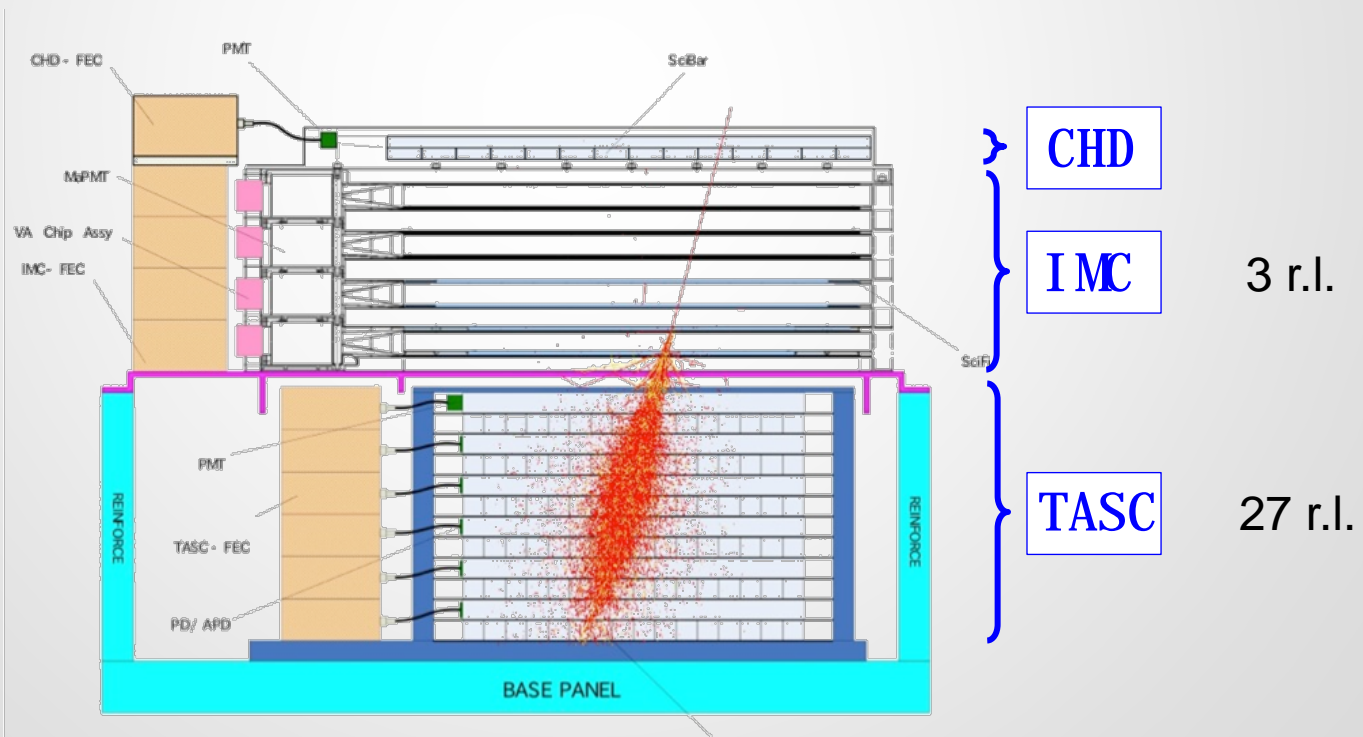
プラスチックシンチレータバー (32 × 10 × 450 mm³): 14本 × 2 (X,Y) PMT読出し

ρ IMC イメージングカロリメータ

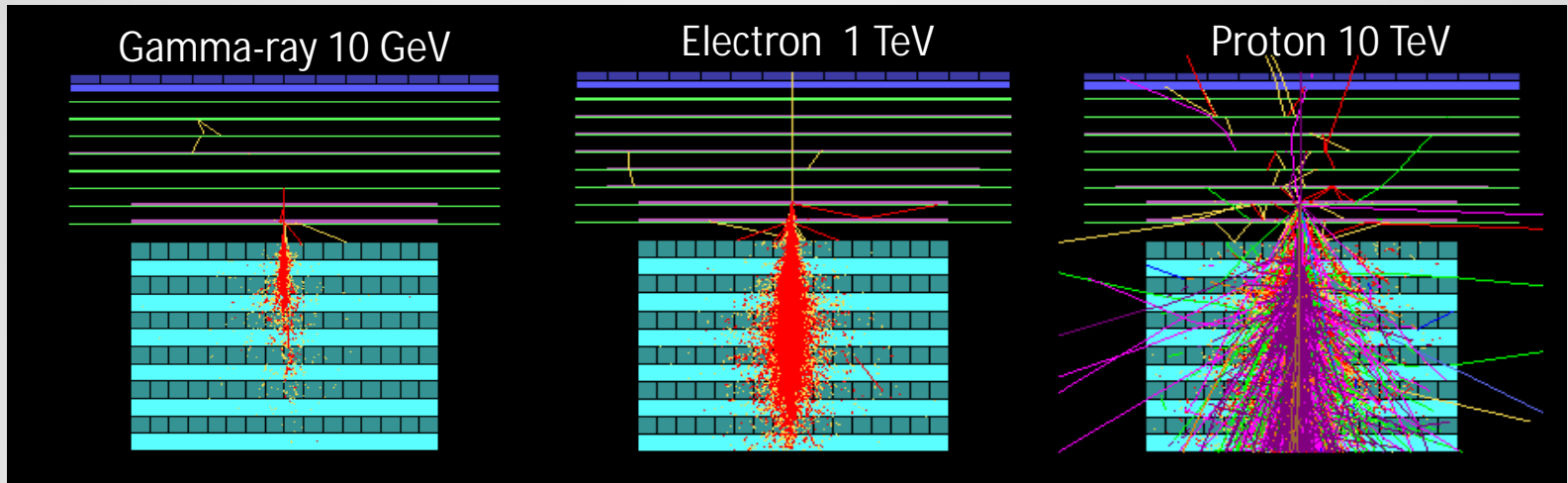
シンチファイバー (1 mm角 × 448本): 8層 × 2 (X,Y) 64chマルチアノードPMT読出し
タングステン板: 3 r.l. (0.2 r.l. × 5 + 1 r.l. × 2)

ρ TASC 全吸収カロリメータ

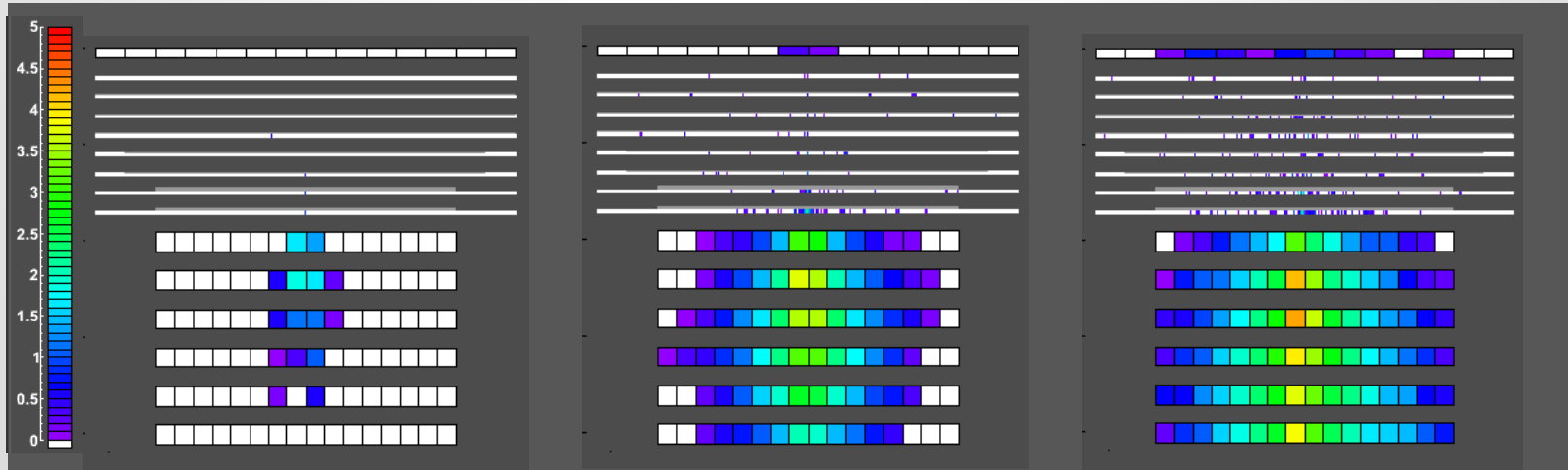
PWOシンチレータ (19 × 20 × 326 mm³): 16本 × 12層 (27 r.l.) APD/PD読出し



CALETのシャワーイメージング(シミュレーション)



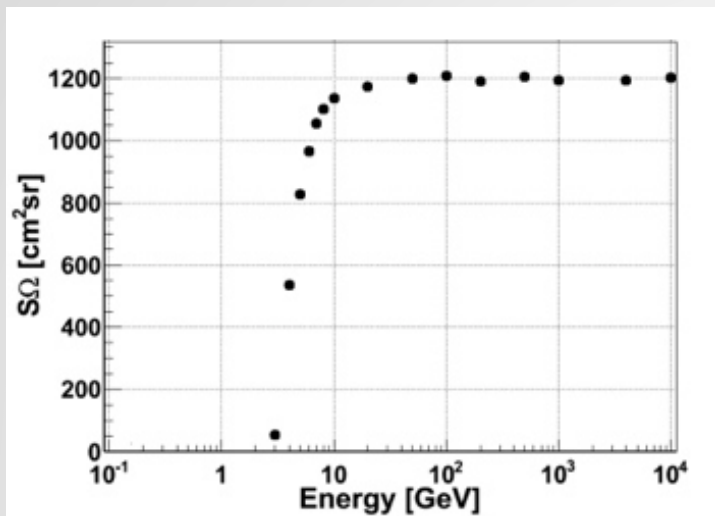
検出されるイメージ



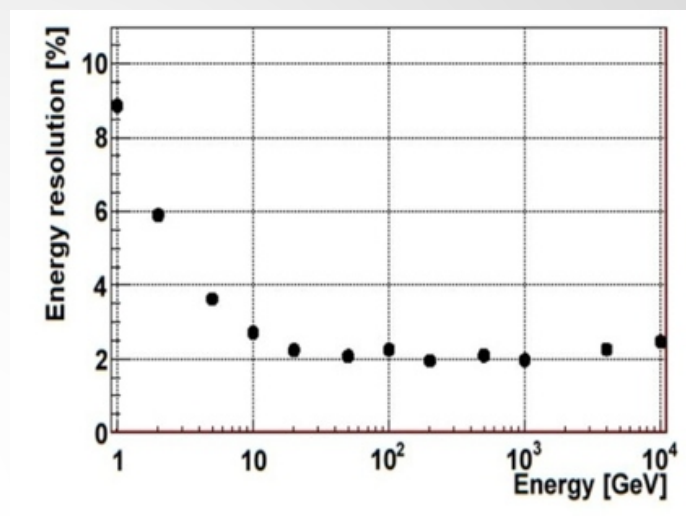
- ・IMCとTASCのイメージ解析による陽子除去能 10^5 (電子選別へ混入する陽子は 10^5 個に1個)
- ・CHDによる電荷分解能 0.15 ~ 0.3 e

CALET 電子観測性能

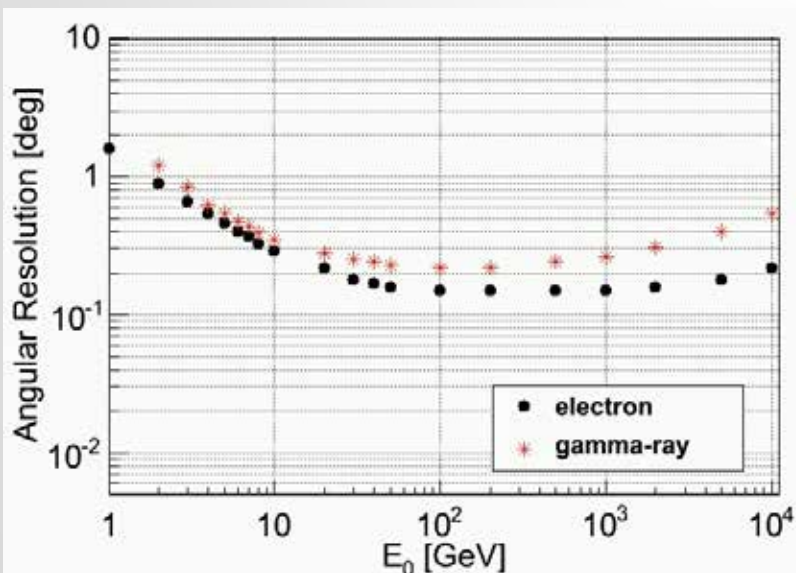
電子に対する $S\Omega$ (幾何学的因子)



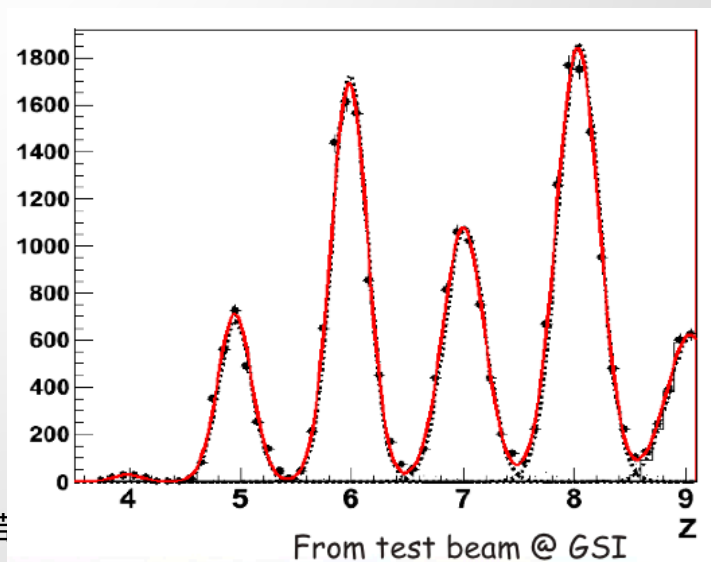
電子に対するエネルギー分解能



電子/ガンマ線に対する角度分解能

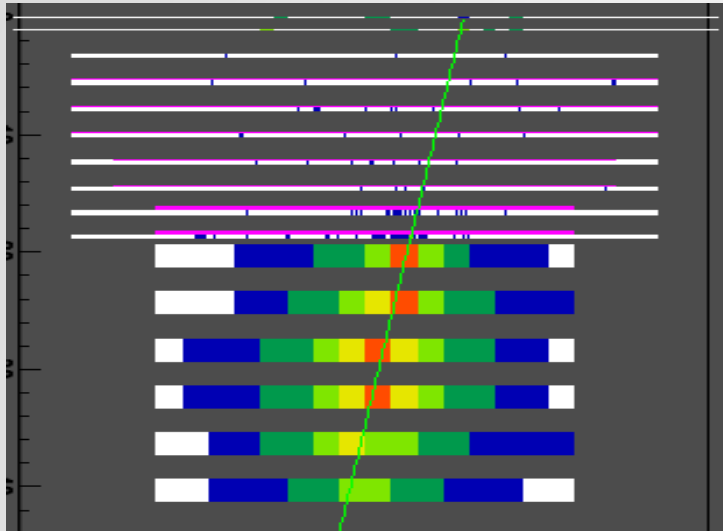


CHDによる電荷分解能 ($\Delta Z=0.15 \sim 0.3 e$)

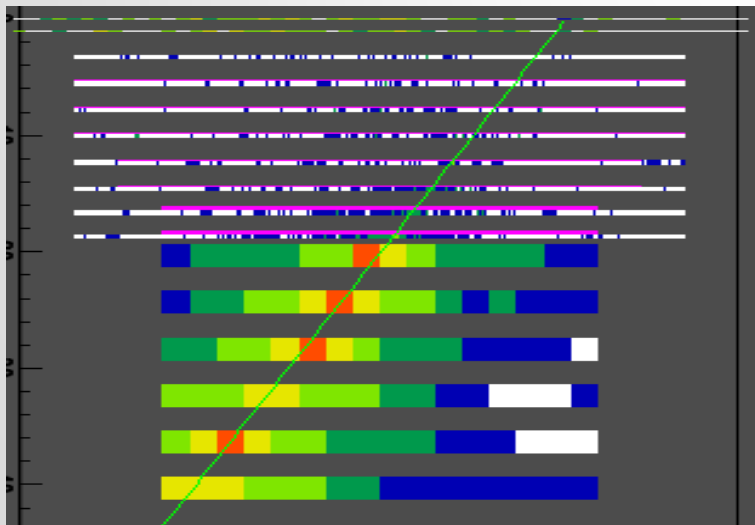


電子1TeVに対する陽子除去能力

電子 1 TeV



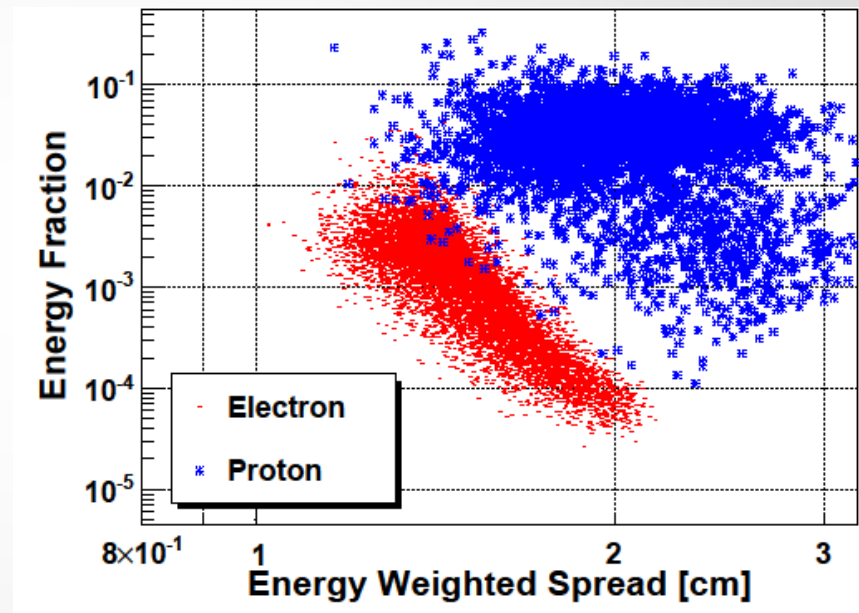
陽子 2.9 TeV



シミュレーション

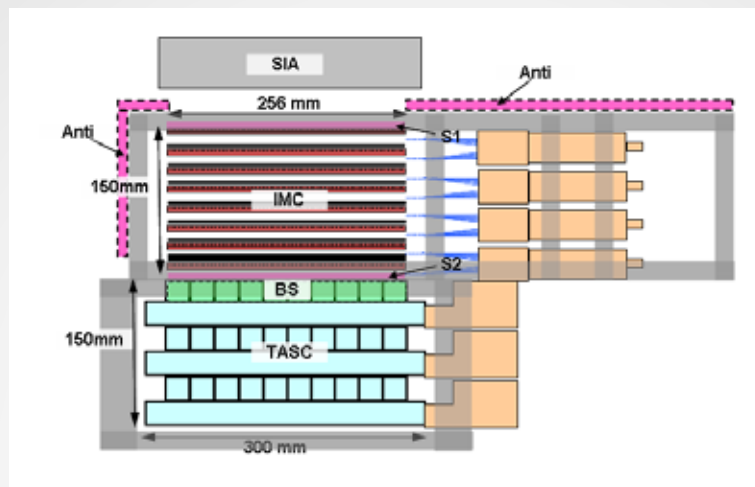
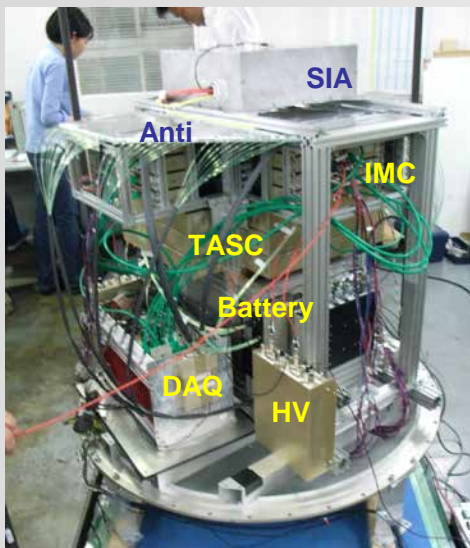
陽子: $E^{-2.7}$ (1~1000TeV) 1.6×10^6 イベント

電子: 1 TeV



電子95%を残すカットで陽子は4個残留
陽子除去能力: $\sim 2 \times 10^5$ (90% C.L.)

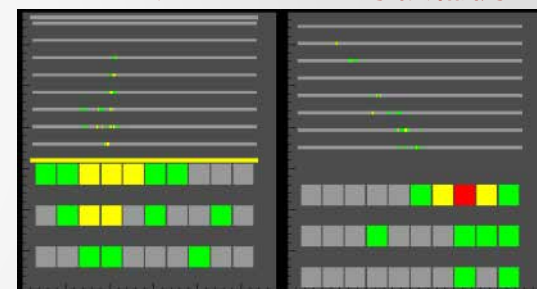
気球実験 bCALET-2 (実証化)



10GeV 程度の電子候補例



1GeV 以上のガンマ線候補例



2013年8月1日

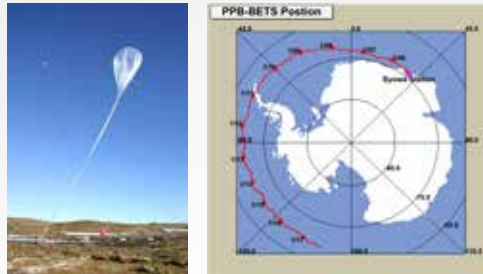
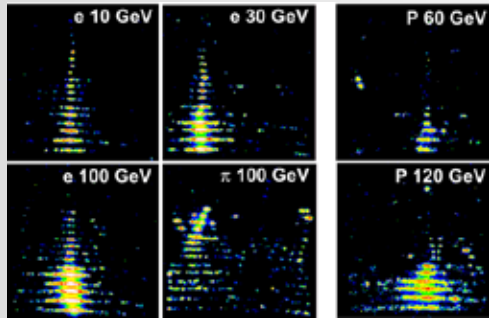


第43回天文・天体物理若手夏の学校

陽子候補例



電子観測の軌跡



PPB-BETS

(2000~2004)

電子10~1000 GeV

南極周回気球観測



BETS

(1994~2000)

電子10~100 GeV

三陸気球観測

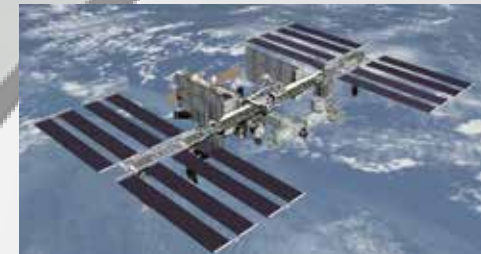
CALET

(R&D 1998~2010)

(開発着手 2010~)

電子10~20,000 GeV

国際宇宙ステーション



電子観測

- I CALETは電子観測を主目的とし、
電子検出に最適化されている
- I 電子観測以外を主目的とするが、
電子観測も可能な装置
ATIC, PAMELA, Fermi-LAT, AMS, HESS,
ISS-CREAM, DAMPE, GAMMA-400, CREST

ATIC

- Advanced Thin Ionization Calorimeter

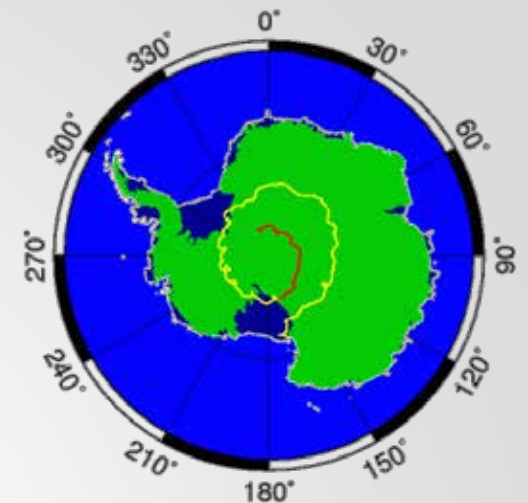
$Z = 1 \sim 28$

$E = 10 \text{ GeV} \sim 100 \text{ TeV}$

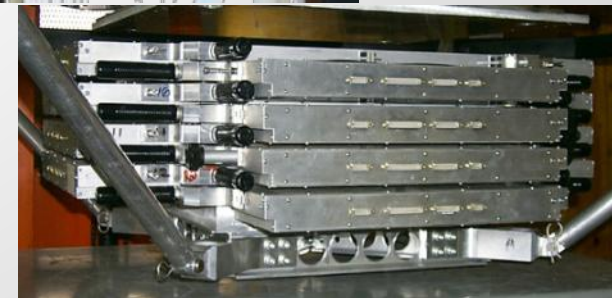
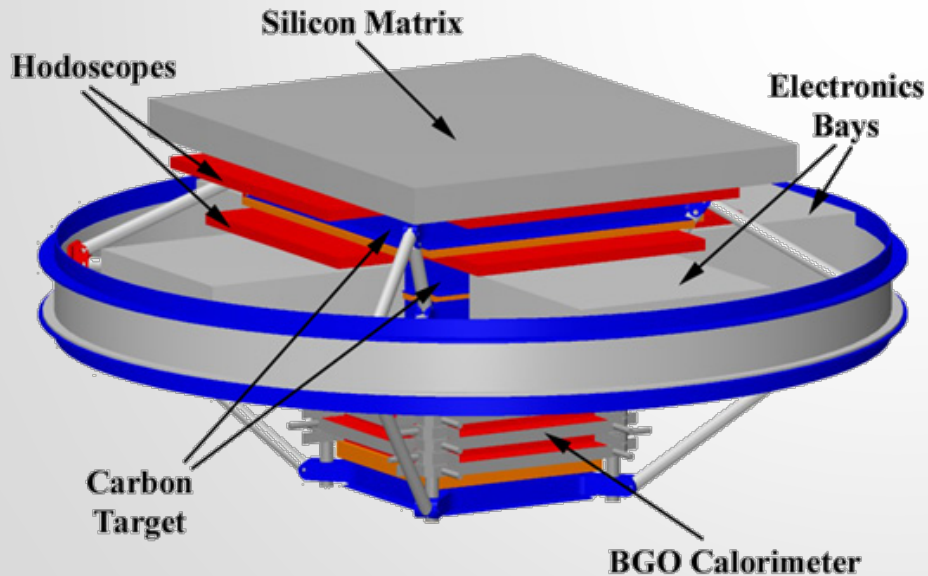
南極(米国)

2001, 2003, 2005, 2007年

電子: $10 \text{ GeV} \sim \text{数 TeV}$

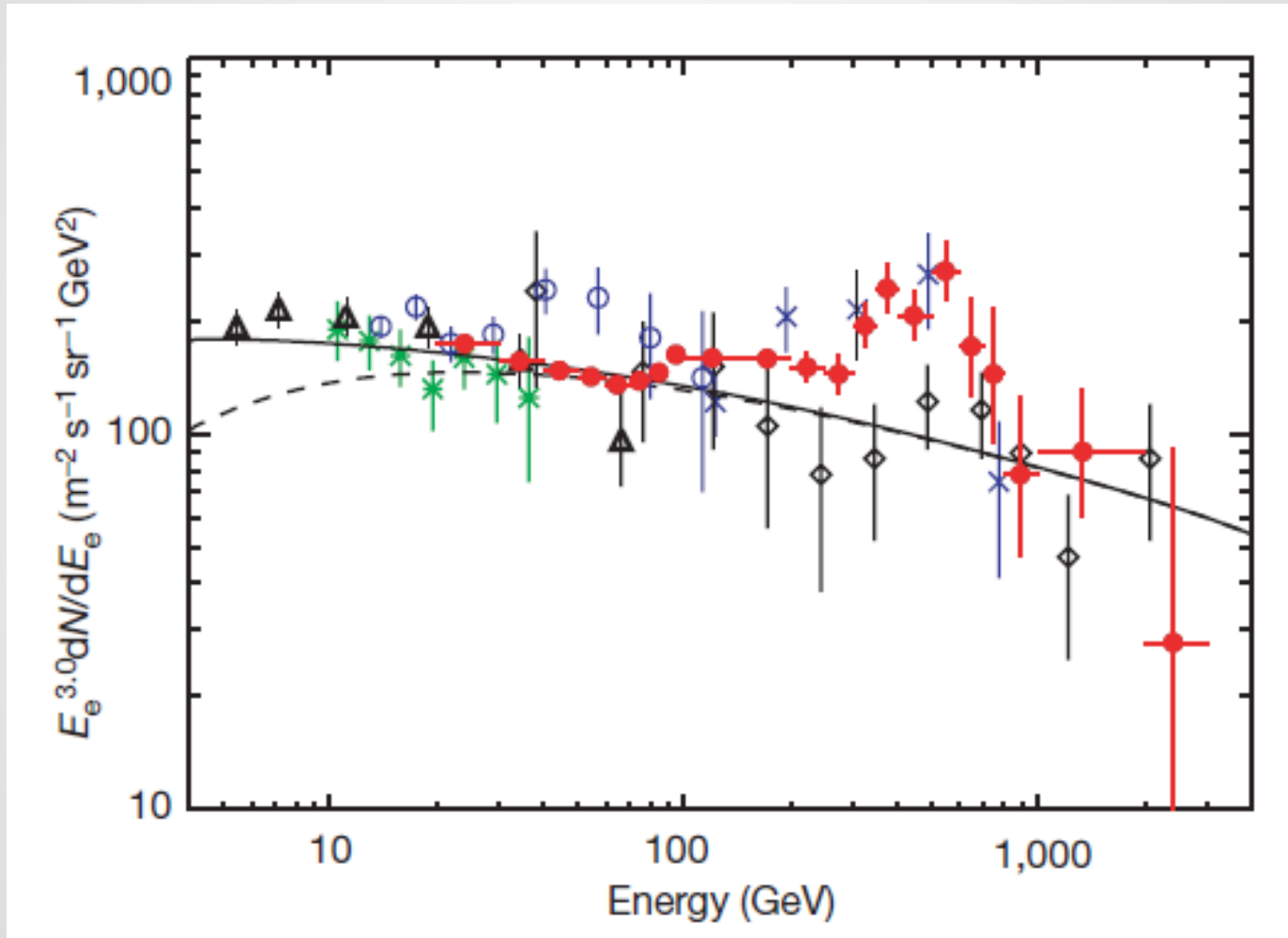


ATIC-4 (2007-2008)
19 d 10 h 43 m



ATICによる電子観測

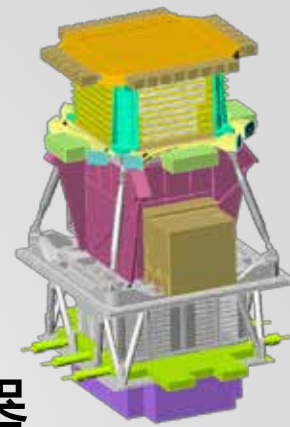
ATIC-1,2



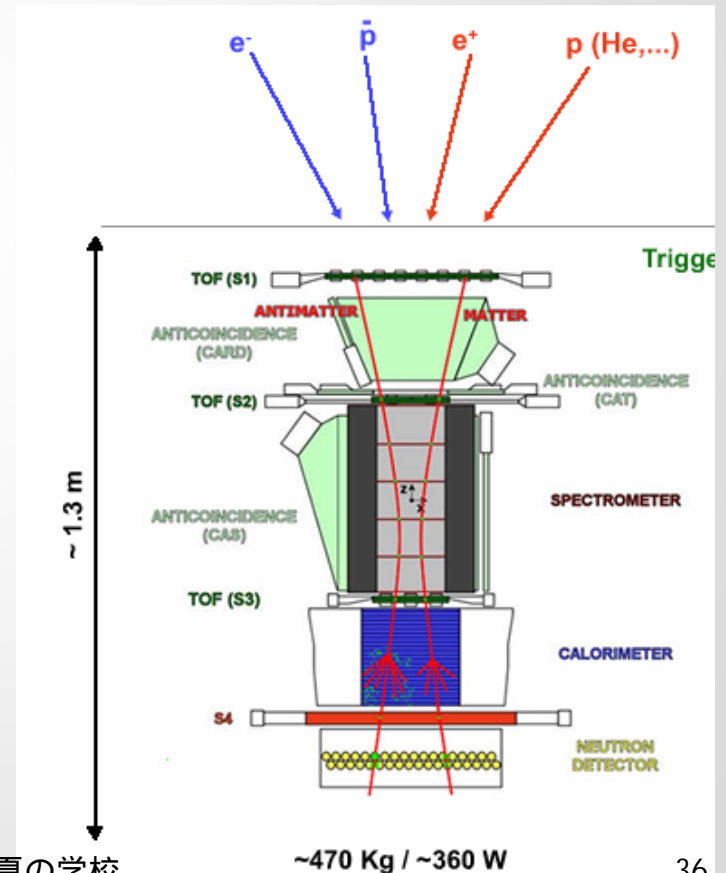
AMS (green stars), HEAT (open black triangles), BETS (open blue circles),
PPB-BETS (blue crosses), emulsion chambers (black open diamonds)

PAMELA

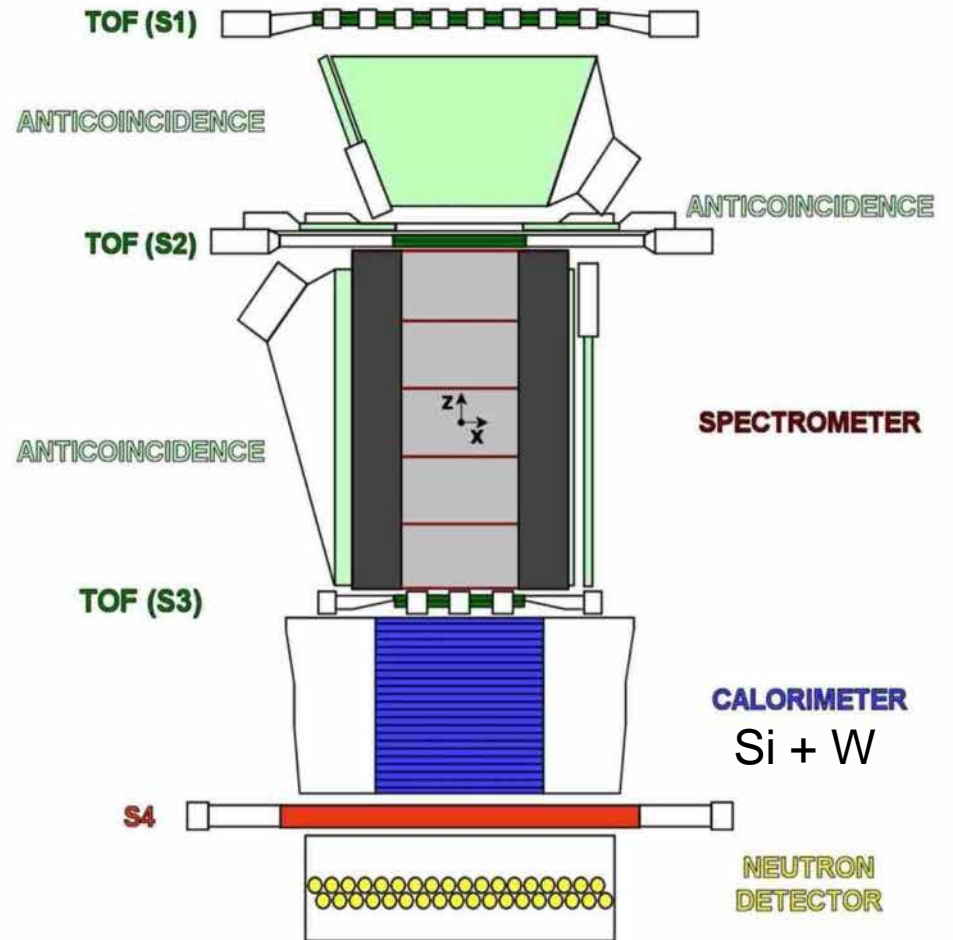
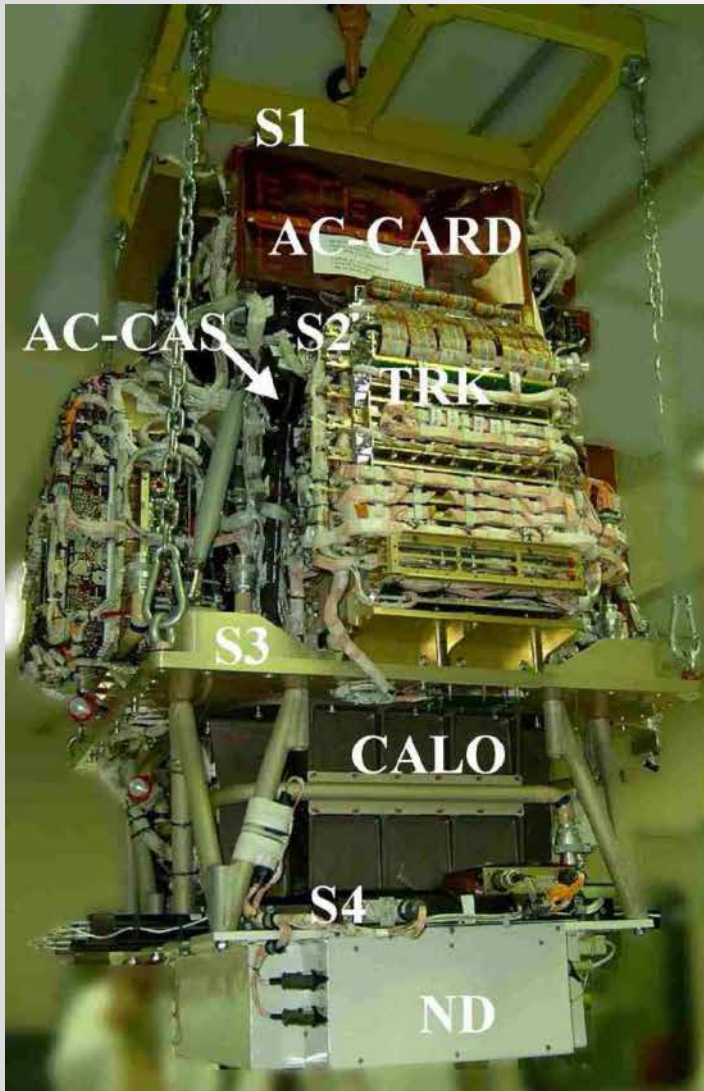
- Payload for **A**ntimatter **M**atter **E**xploration and **L**ight-nuclei **A**strophysics
- 永久磁石, カロリメータ, TOF, Anti, 中性子検出器
- 2006年 ~

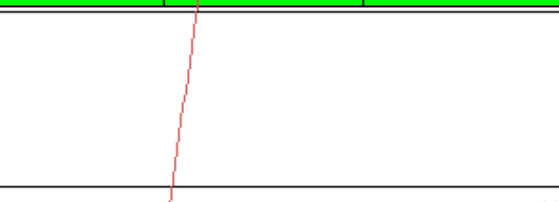
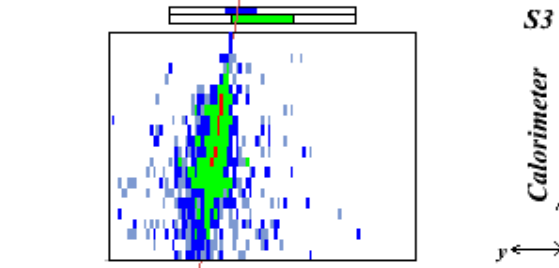
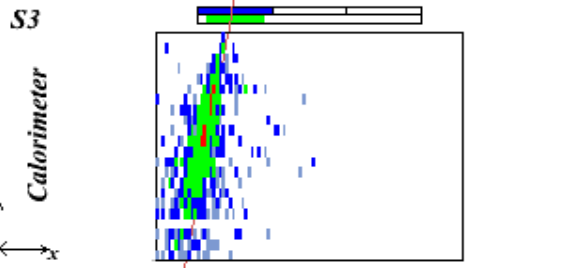
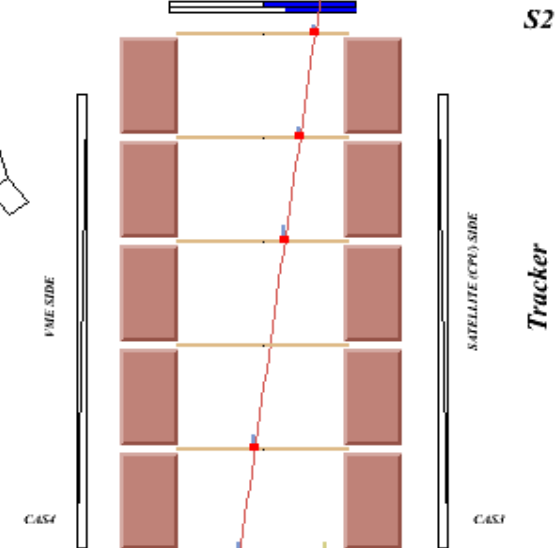
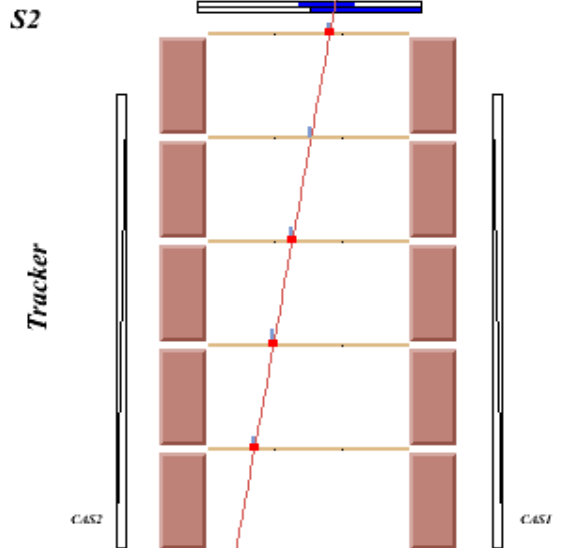
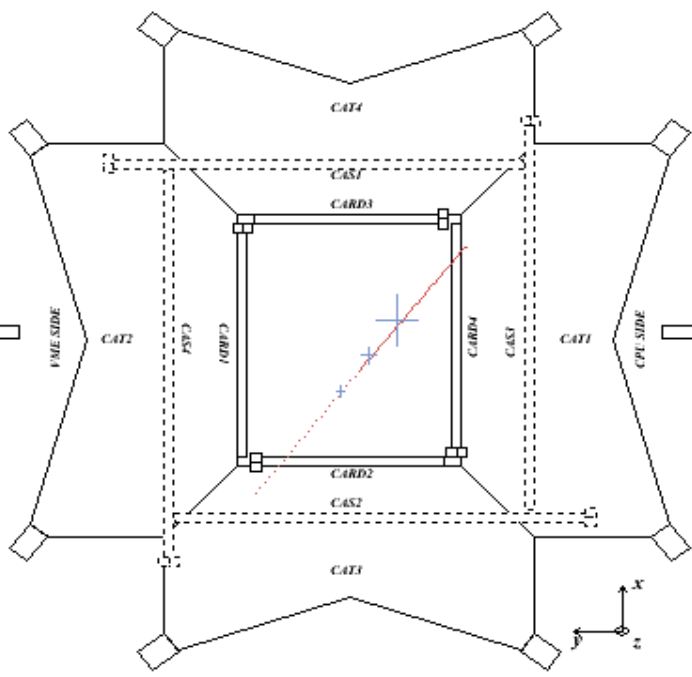
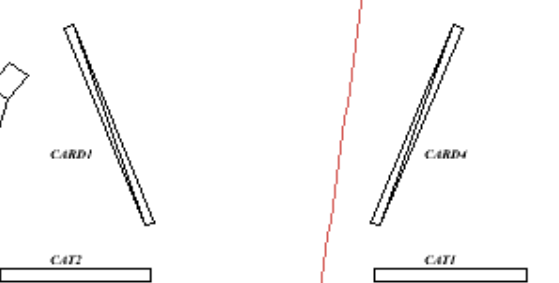
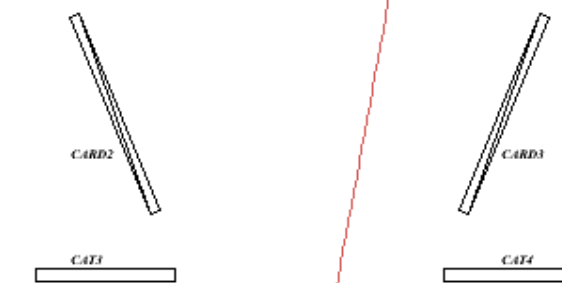
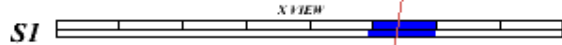


Particle	Energy Range
Antiproton flux	80 MeV - 190 GeV
Positron flux	50 MeV - 270 GeV
Electron flux	up to 400 GeV
Proton flux	up to 700 GeV
Electron/positron flux	up to 2 TeV
Light nuclei (up to Z=6)	up to 200 GeV/n
Light isotopes (D, ³ He)	up to 1 GeV/n
Antinuclei search	(better than 10 ⁻⁷ in anti He/He)



PAMELA





PALETTE

TOF, TRK, CALO, S4 (MIP):

0	0 - 2	2 - 10	10 - 100	100 - 500	> 500
---	-------	--------	----------	-----------	-------

ND (neutrons):

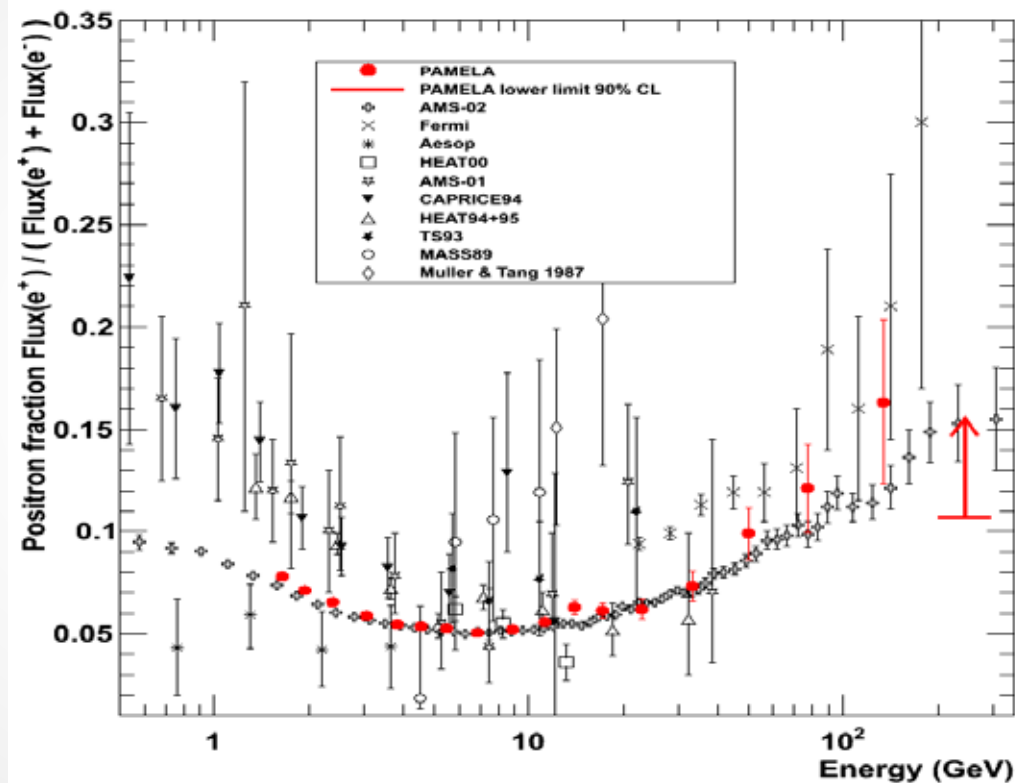
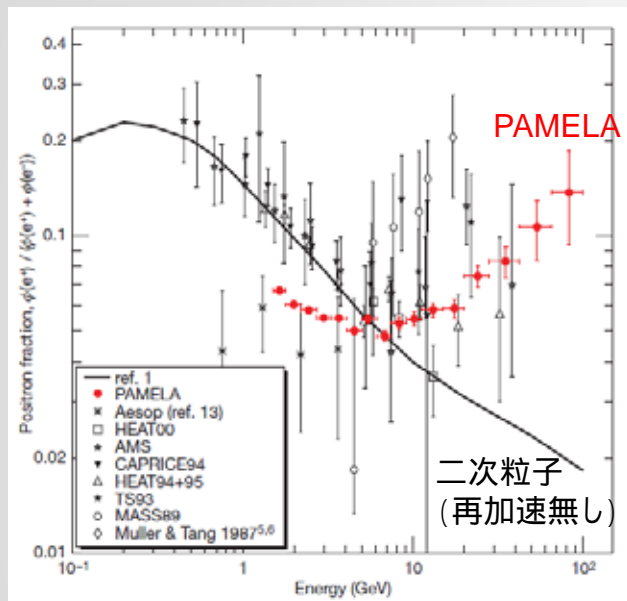
0	1	2	3 - 6	7 - 14	> 14
---	---	---	-------	--------	------

AC:

NOT HIT	HIT trigger	HIT background
---------	-------------	----------------

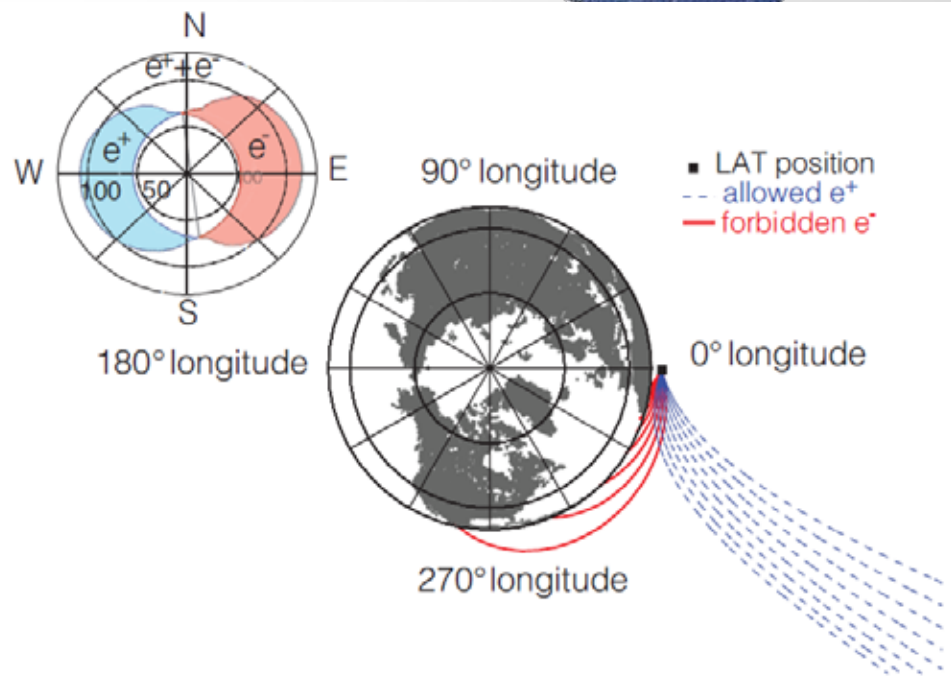
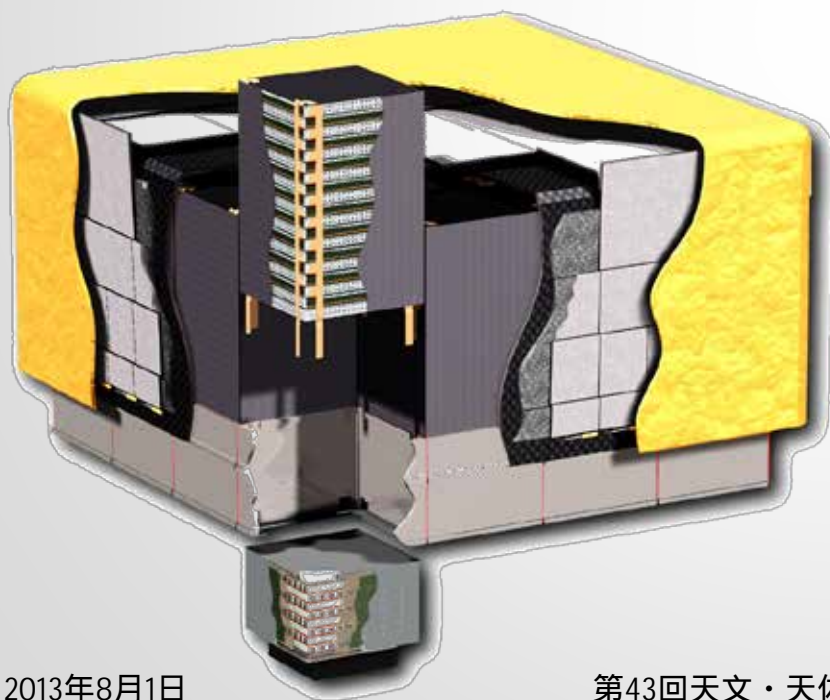
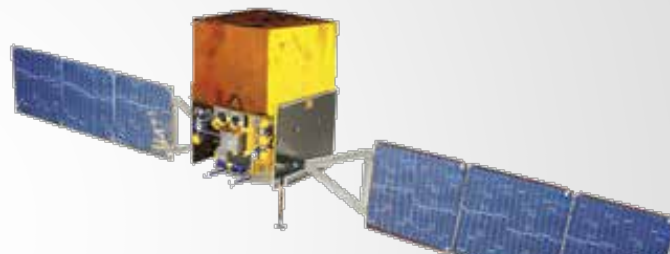
PAMELAによる陽電子比観測

陽電子比率

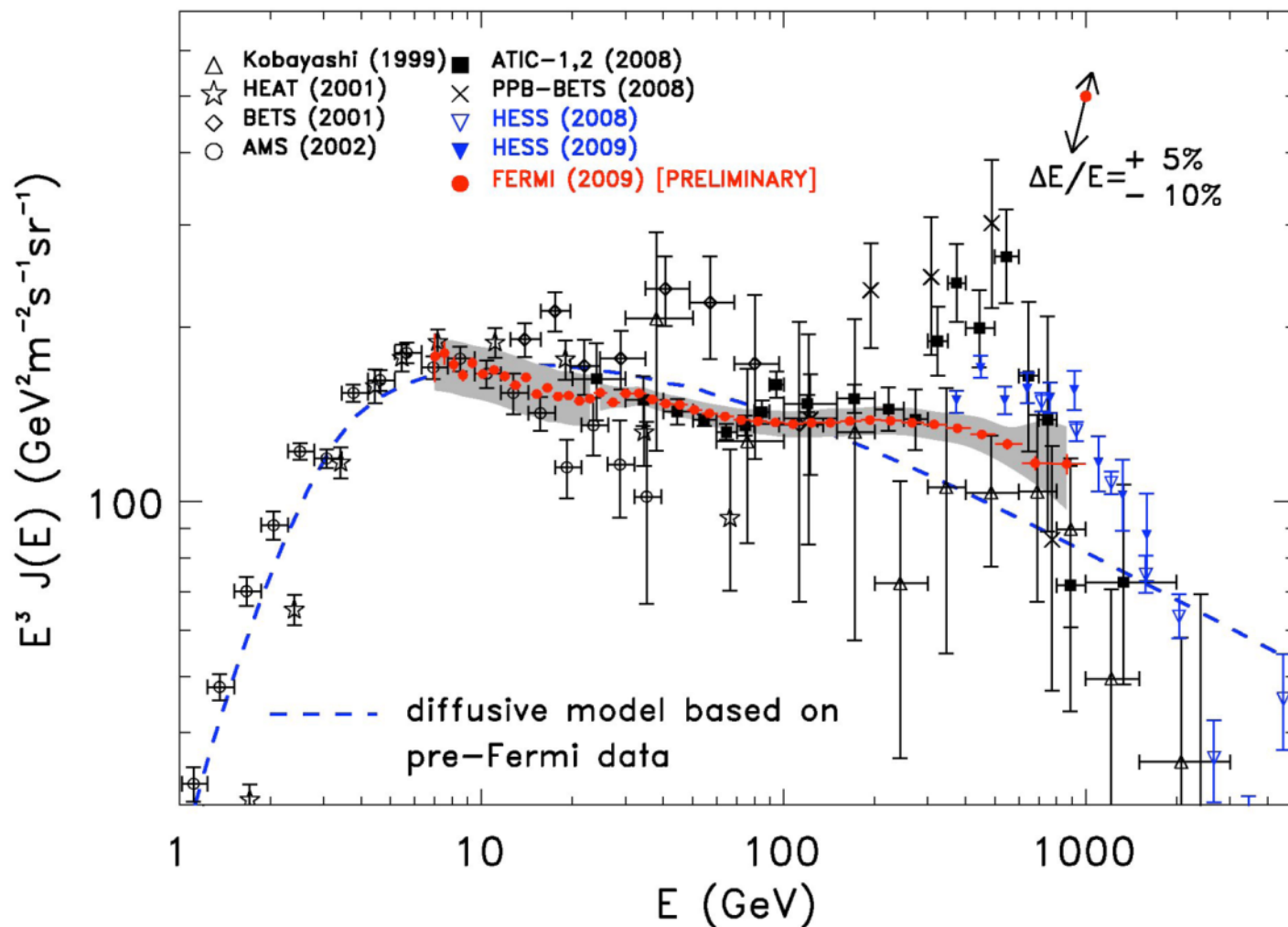


Fermi-LAT

- Large Area Telescope
- ガンマ線観測衛星 (20 MeV ~ 300 GeV)
- シリコントラッカー、カロリメータ、アンチカウンタ
- 2008年 ~
- 電子: 20 GeV ~ 1 TeV

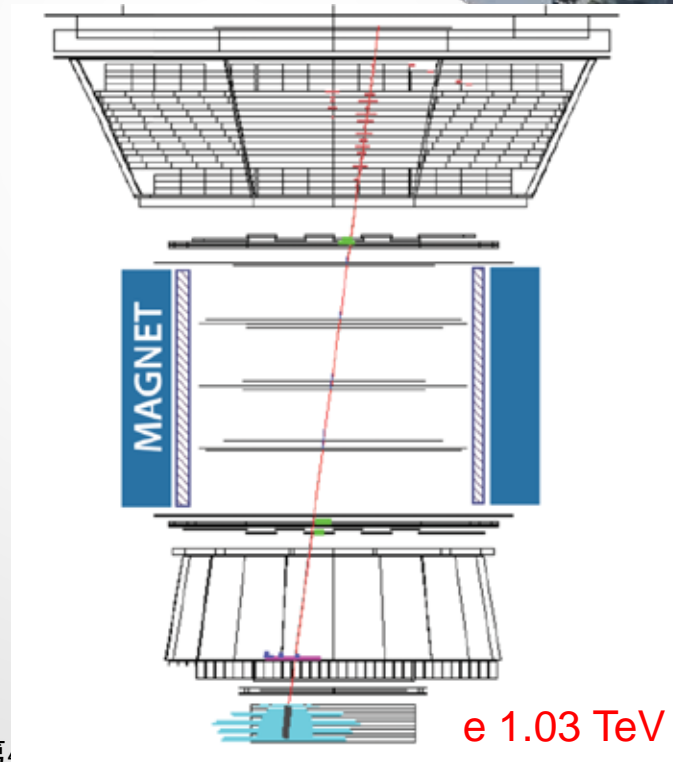
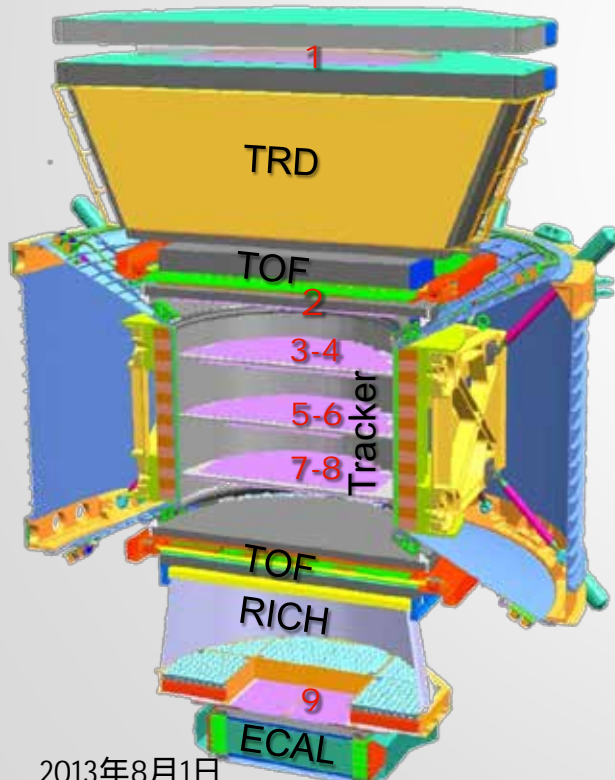


Fermi-LAT, HESSによる電子観測

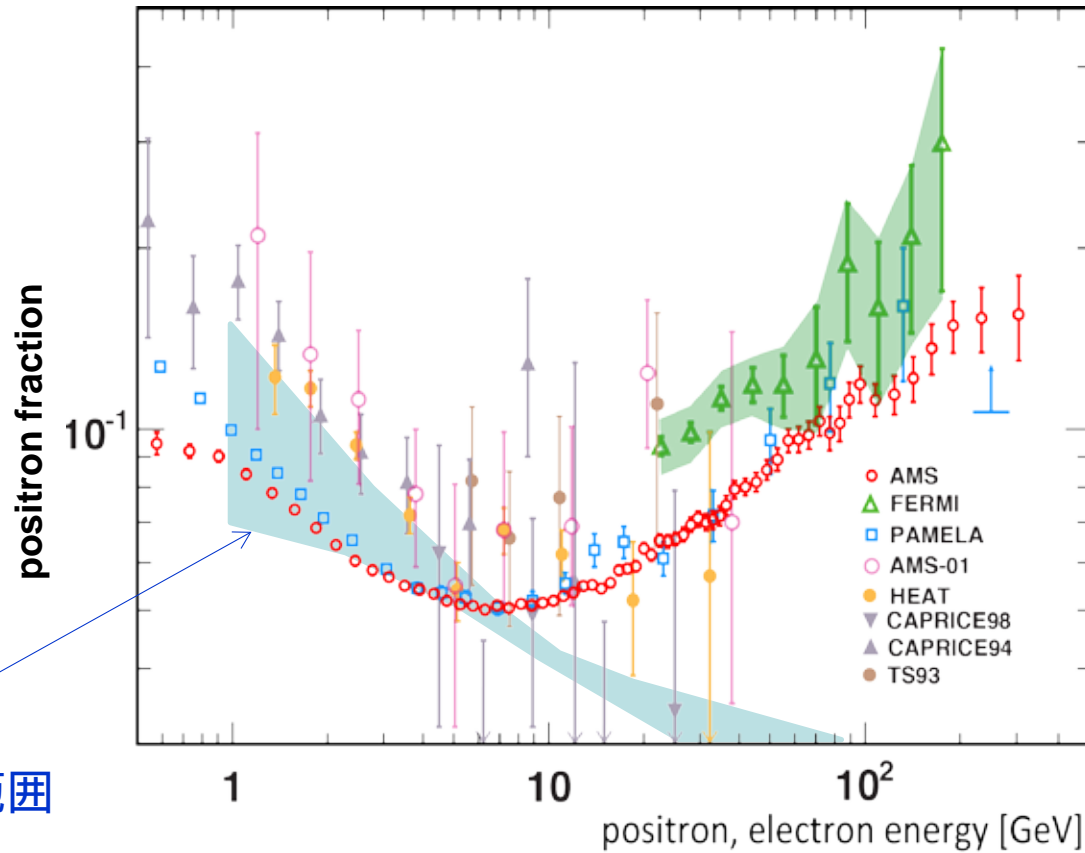


AMS-02

- Alpha Magnetic Spectrometer
- 反粒子、暗黒物質...
- 永久磁石, TRD, TOF, RICH, カロリメータ, アンチ
- 2011年5月 ~

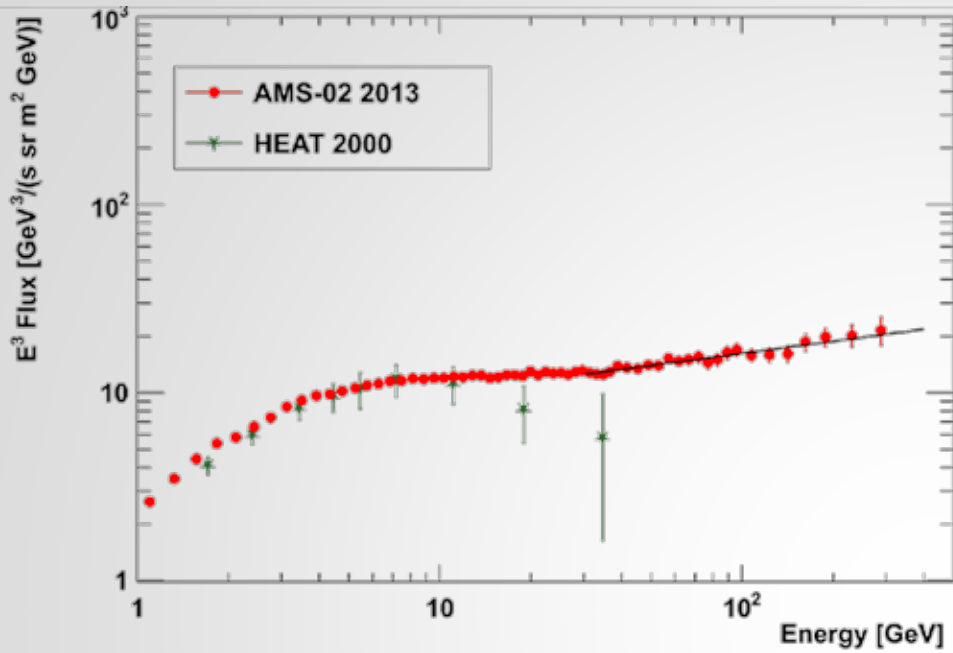


陽電子比率

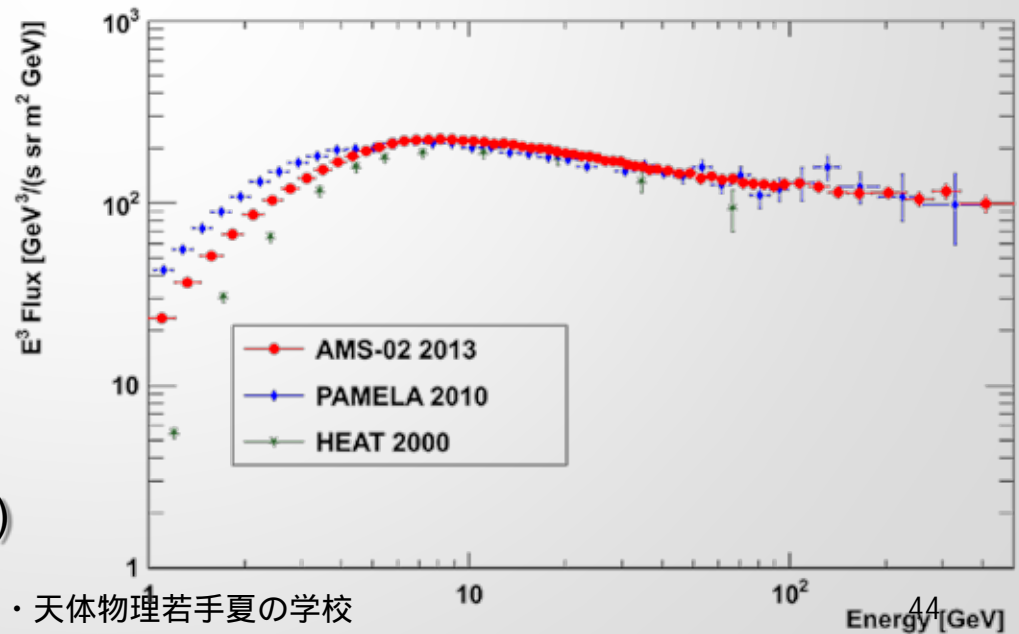


宇宙線伝播による
二次成分の予測範囲

陽電子スペクトル



電子スペクトル



(ICRC2013 @ Rio de Janeiro)

電子観測装置の性能比較

Detector	Energy Range (GeV)	Energy Resolution	e/p Selection Power	Key Instrument (Thickness of CAL)	SΩT (m ² sr day)
PPB-BETS (+BETS)	10 -1000	13% @100 GeV	4000 (> 10 GeV)	IMC (Lead: 9 X ₀)	~0.42
ATIC1+2 (+ ATIC4)	10 - a few 1000	~2% (>100 GeV)	6,000	Thick Seg. CAL (BGO: 18 X ₀) + C Targets	3.08
PAMELA	0.05-400	5% @200 GeV	10 ⁵	Magnet + IMC (W:16.3 X ₀)	~1.6 (2 years)
FERMI-LAT	20-1,000	5-20 % (20-1000 GeV)	10 ³ -10 ⁴ (20-1000GeV) Energy dep. GF	Tracker + ACD + Thin Seg. CAL (W:1.5X ₀ +CsI:8.6X ₀)	770@100GeV 110@TeV (1 year)
AMS	1.5-1,000 (Due to Magnet)	~2.5% @100 GeV	10 ⁴ (x10 ²⁻³ by TRD)	Magnet+TRD+RICH+IMC (Lead: 16.7X ₀)	~100 (?) (1year)
CALET	1-20,000	~2% (>100 GeV)	~ 10 ⁵	IMC + Thick Seg. CAL (W: 3 X ₀ + PWO : 27 X ₀)	220 (5 years)

CALETは、GeVからTeVを超えるエネルギー領域の電子観測に最適化されている

まとめ

- ü CALETは、宇宙での高エネルギー現象を探求することを目的に、電子を 20 TeV まで、ガンマ線を 10GeV~ 10TeV で、陽子と原子核を数 10 GeV ~ 1000 TeVで観測する。
- ü 気球実験の経験に基づいて、6年間の Pre-phase A 研究の完了後、CALET は JEM-EFの第2期利用ミッションに選定され、2010年3月に開発に着手した。現在は、2014年夏期の打上げを目指して、フライト品の製造・試験を行っている。
- ü 電子観測は、暗黒物質探査を含む重要な課題となっており、電子検出を主目的としない各装置も観測を行っている。精密なスペクトルを出すためには、高いエネルギー分解能が必要。そして、TeV領域でのスペクトルの見極めが必要。