

CALETによる銀河宇宙線の 観測成果と今後の展望



CALET

Calorimetric
Electron Telescope

赤池 陽水
早稲田大学
理工学術院総合研究所

CRCタウンミーティング





CALET Payload

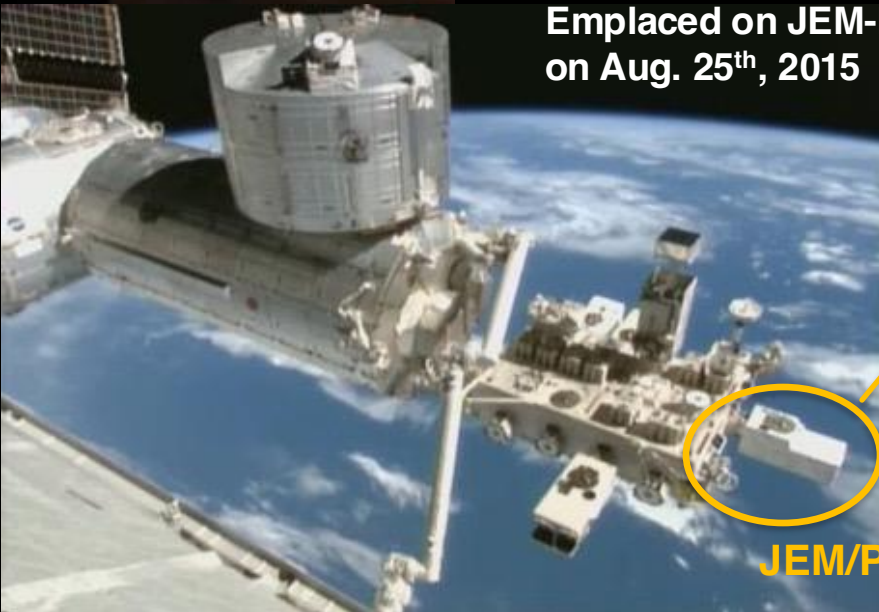


Kounotori (HTV) 5

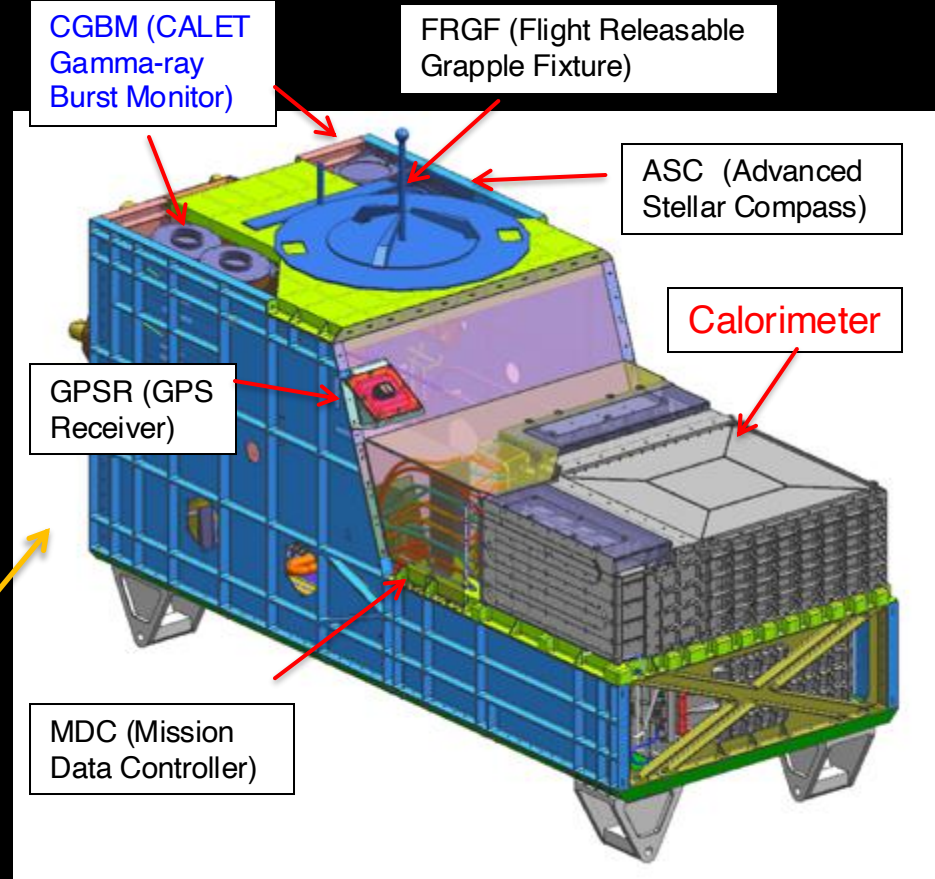


Launched on Aug. 19th, 2015 by the Japanese H2-B rocket

Emplaced on JEM-EF port #9 on Aug. 25th, 2015



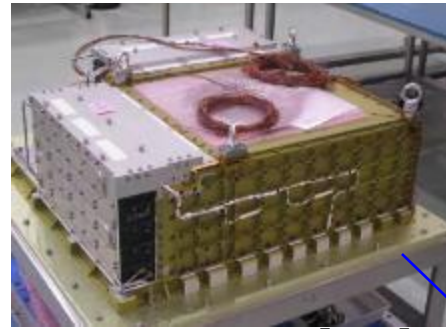
JEM/Port #9



- Mass: 612.8 kg
- JEM Standard Payload Size: 1850mm(L) × 800mm(W) × 1000mm(H)
- Power Consumption: 507 W (max)
- Telemetry: Medium 600 kbps (6.5GB/day) / Low 50 kbps

CALETプロジェクトと機器構成

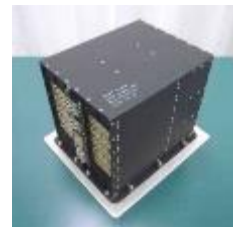
- CALETは日本が主導する日本初の本格的な宇宙線観測ミッションである。
- 世界に先駆けて宇宙空間においてカロリメータによるTeV領域での高エネルギー宇宙線の観測を実現している。
- 装置開発、製造および観測運用は、JAXAと早稲田大学の協定(覚書)にて実施されている。
- 米国NASA, イタリアASIとの共同プロジェクトで、NASAは軌道上運用のリソース提供、ASIは高圧電源装置を支給している。



CHD/IMC [CAL]



TASC [CAL]



HV-BOX

イタリア側支給



GPSR-ANT



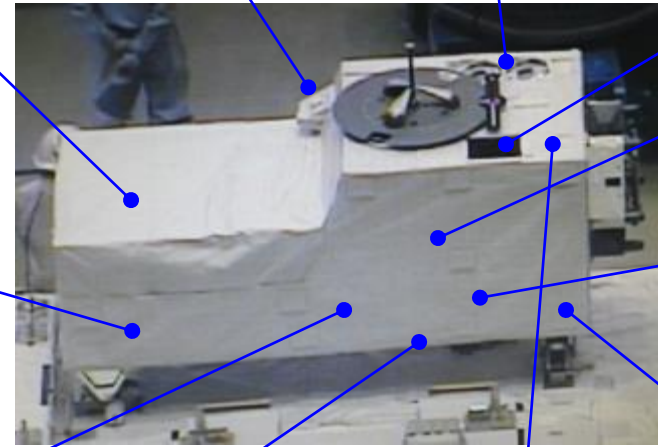
HXM#1, #2 [CGBM]



CHU(buffle付)[ASC]



DPU[ASC]



MDC



CIRC【運用終了】



SGM [CGBM]



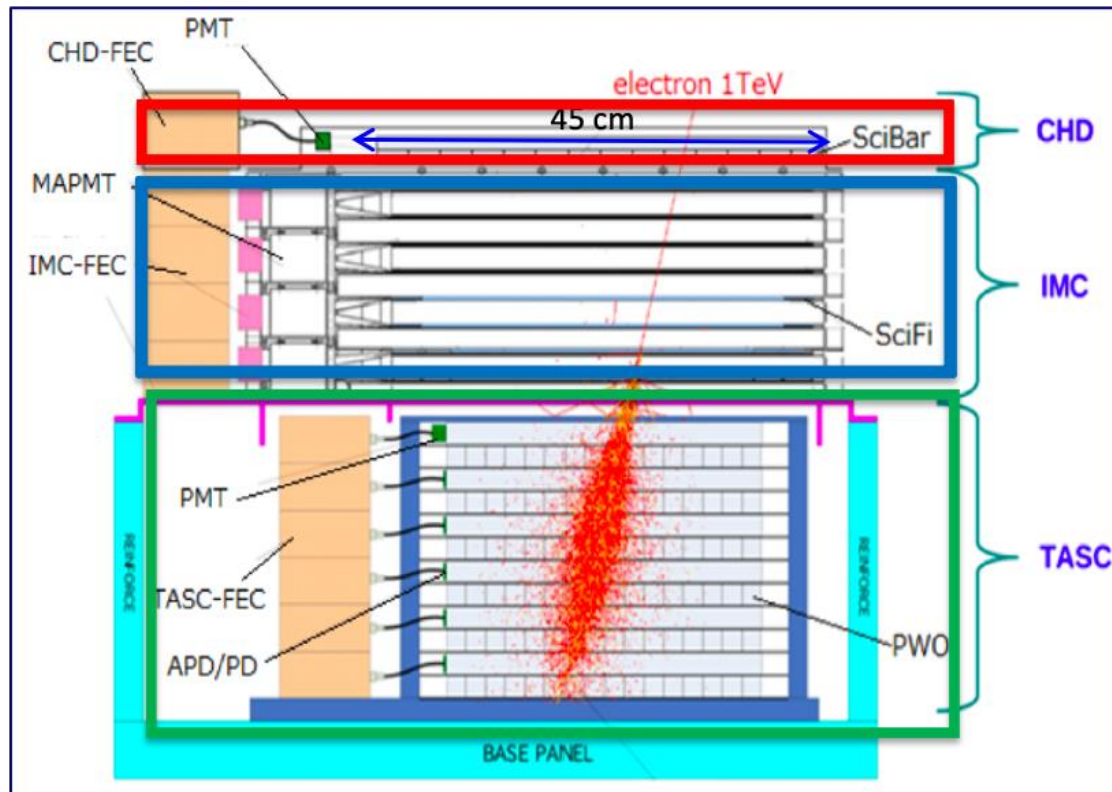
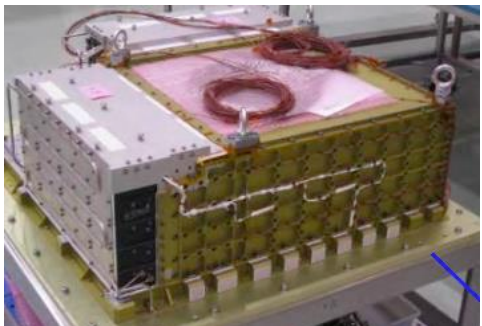
GBM-EBOX[CGBM]



Overview of CALET Calorimeter

Field of view: ~ 45 degrees (from the zenith) : Geometrical Factor: ~ 1,040 cm²sr (for electrons) : Thickness: 30 X₀, 1.3 λ_I

CHD/IMC



CHD – Charge Detector

- 2 layers x 14 plastic scintillating paddles
- **single element charge ID** from p to Fe and above (Z = 40)
- charge resolution ~0.1-0.3 e

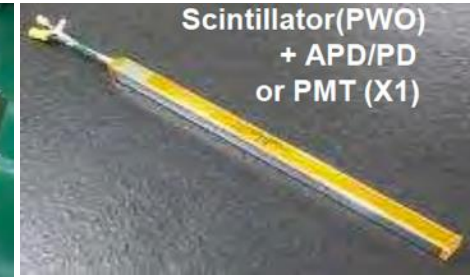
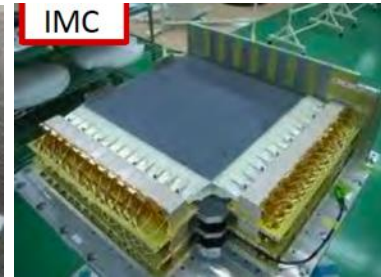
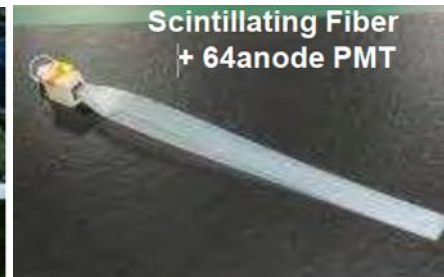
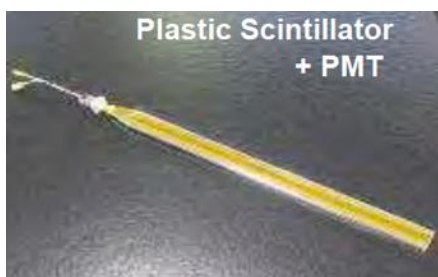
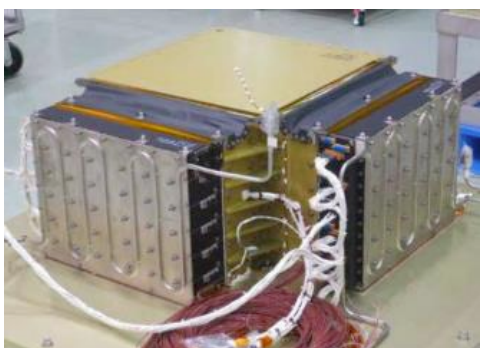
IMC – Imaging Calorimeter

- Scifi. + tungsten absorbers: **3 X₀**
- 8 x 2 x 448 plastic scintillating fibers (1mm) **readout individually**
- **tracking** (~0.1° angular resolution) + **Shower imaging**

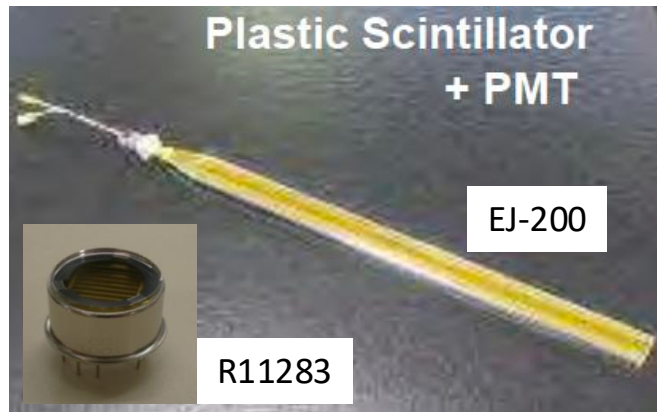
TASC – Total Absorption Calorimeter

- 6 x 2 x 16 lead tungstate (PbWO₄) logs: **27 X₀, 1.2 λ_I**
- **energy resolution**: ~2 % (>10GeV) for e, γ
~30-35% for p, nuclei
- **e/p separation**: ~10⁻⁵
- **angular resolution**: 0.2° for gamma-rays > ~50 GeV

TASC

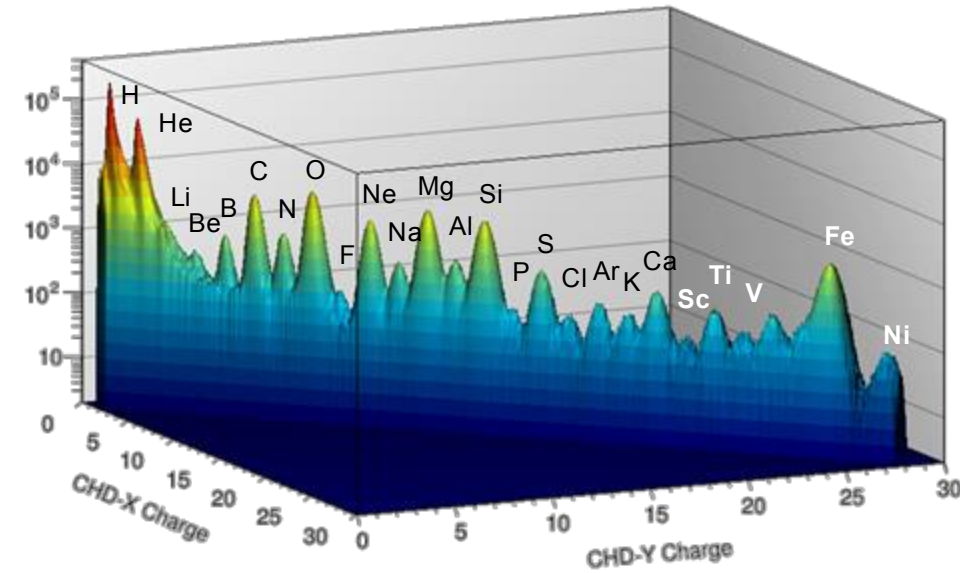
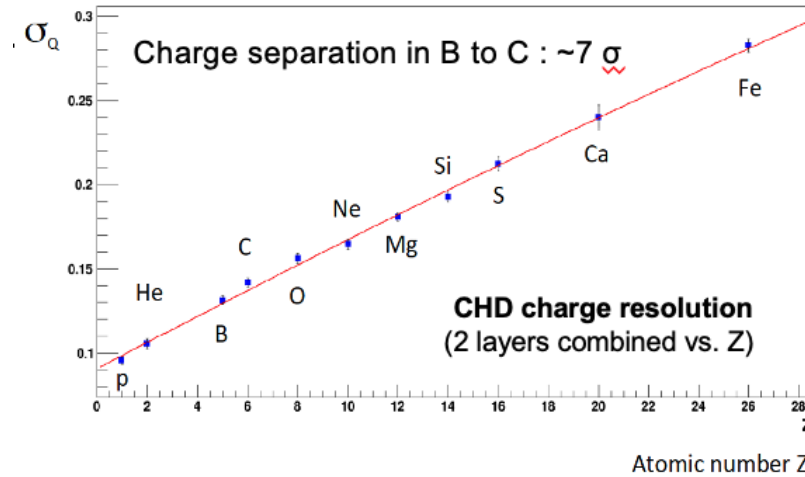


CALETの革新的技術開発(1): CHD, IMC



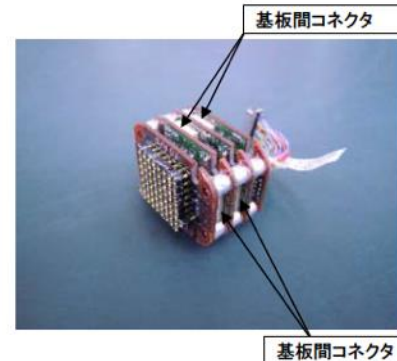
シンチレータ14本を2層(X, Y)を
PMTで読み出し
→ Z=0-44の領域で電荷測定

CHDの電荷分解能

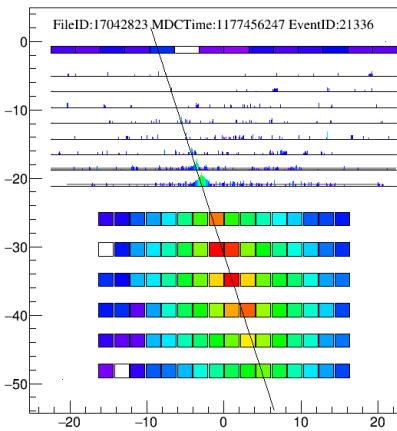


64 anode-PMT
8段ダイノードに減らして、
ASICとダイナミックレンジを最適化

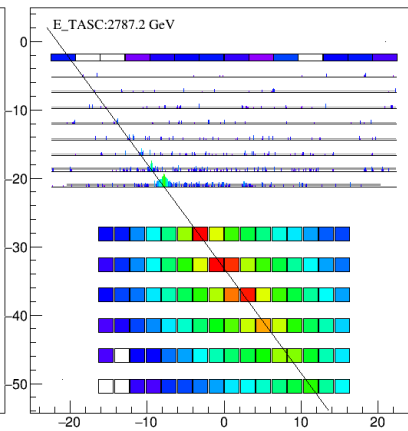
Viking Chip (VA32-HDR13.3)
- (Pre.Amp. + Shaping Amp. + Sample Hold) x 32ch
- Multiplexer 読み出し, 10 μ sec/ch



X-Z view



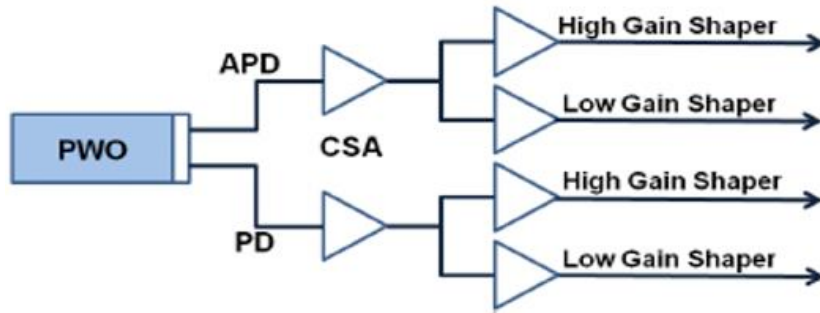
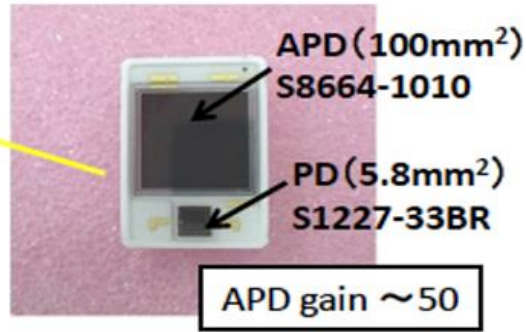
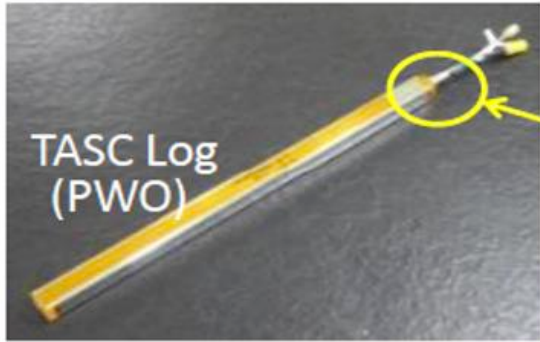
Y-Z view



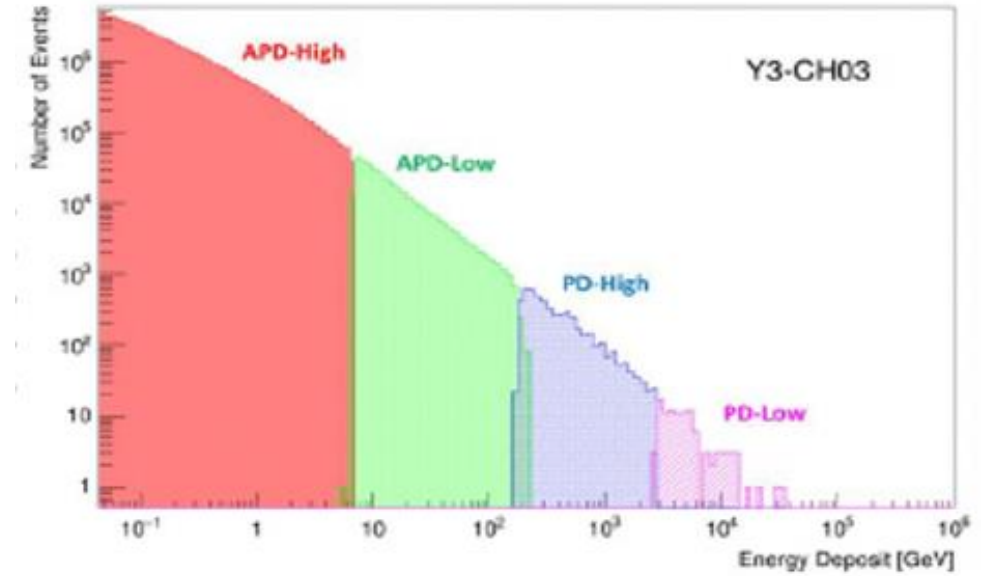
1つのPMTで64ch (32ch x 2層):を読み出し

→ 省電力かつ高速な7,168chの読み出しを実現

CALETの革新的技術開発(2): TASC

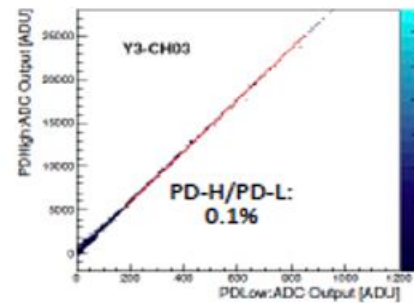
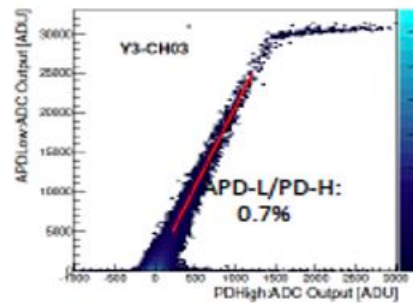
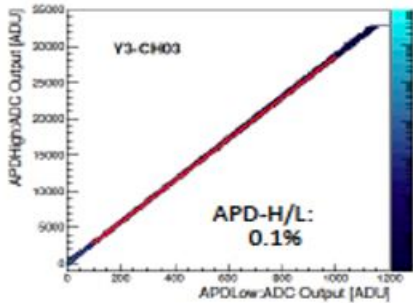


1PWO当たり4系統で読み出し



- 低雑音 (<0.5fc ~ <0.1MIP)
- ワイドダイナミックレンジ (0.5fc – 15pC)

- 1MIPから1PeVのシャワーに対応する **1 – 10⁶ MIPの幅広いダイナミックレンジ**
- 軌道上で収集する宇宙線(p, He)の最小電離損失粒子を基にエネルギー較正
- 各ゲイン間の接続はシャワー粒子で較正
- 地上でUV照射試験により、全チャンネルの直線性を確認済み





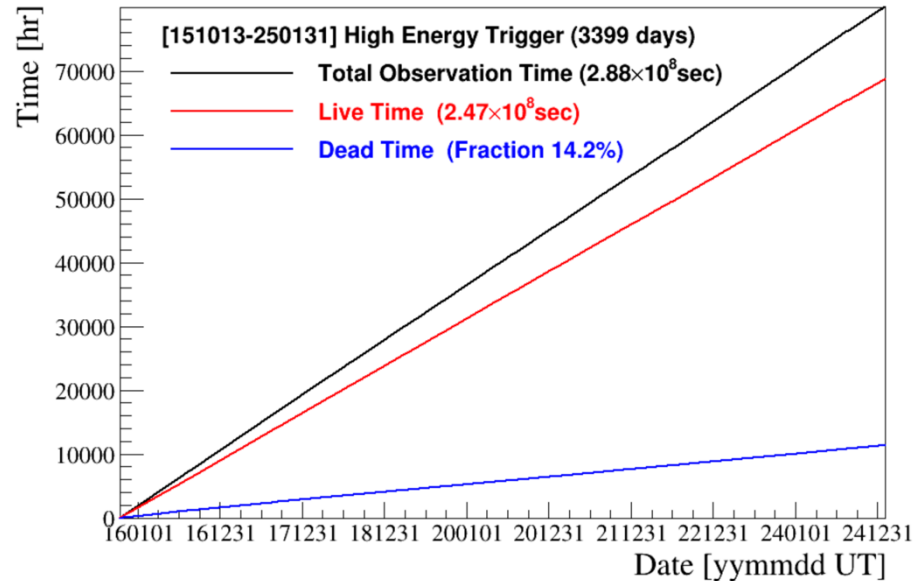
9年以上における観測状況

Geometrical Factor:

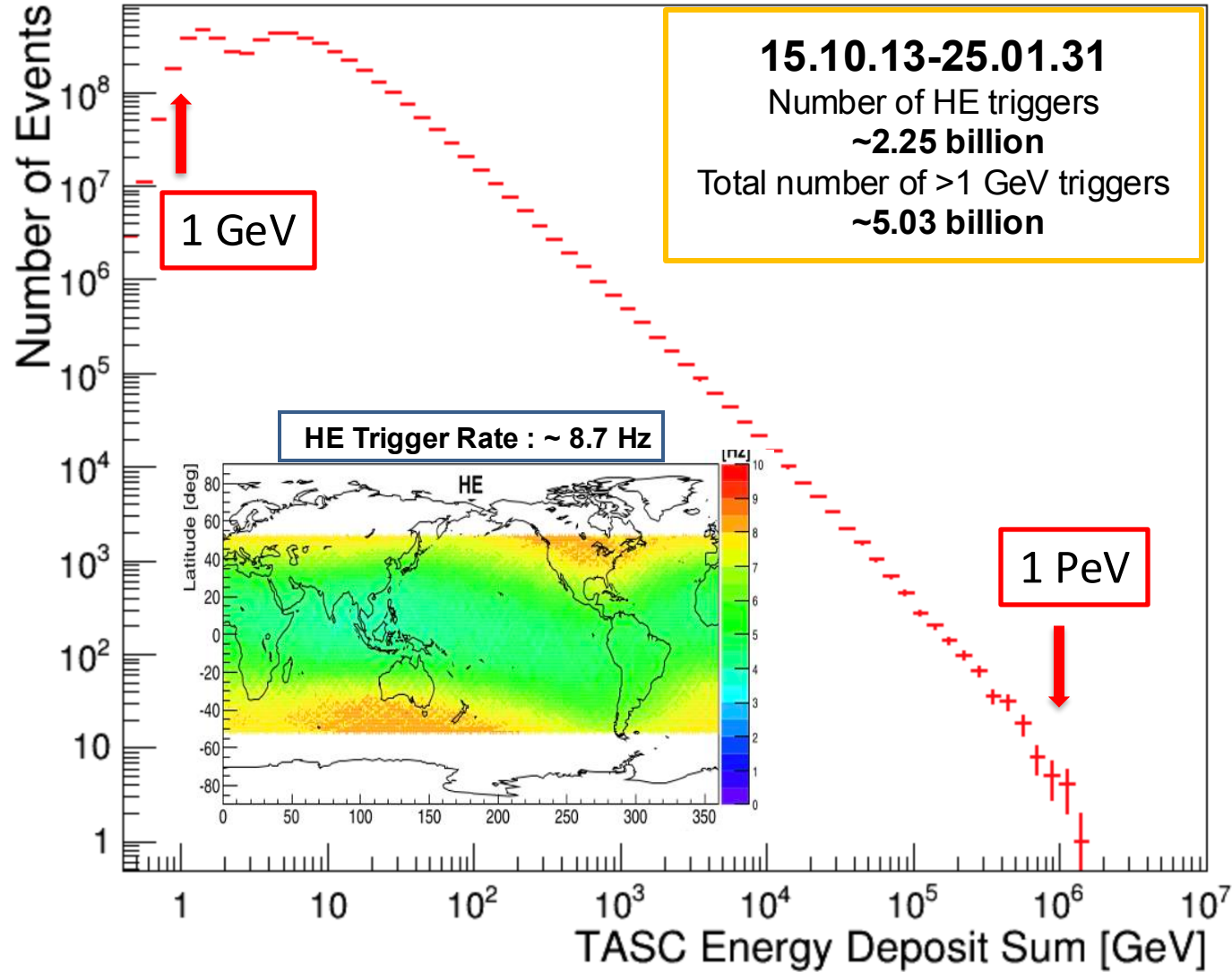
- 1040 cm² sr for electrons, light nuclei
- 1000 cm² sr for gamma-rays
- 4000 cm² sr for ultra-heavy nuclei

High-energy trigger (> 10 GeV) statistics:

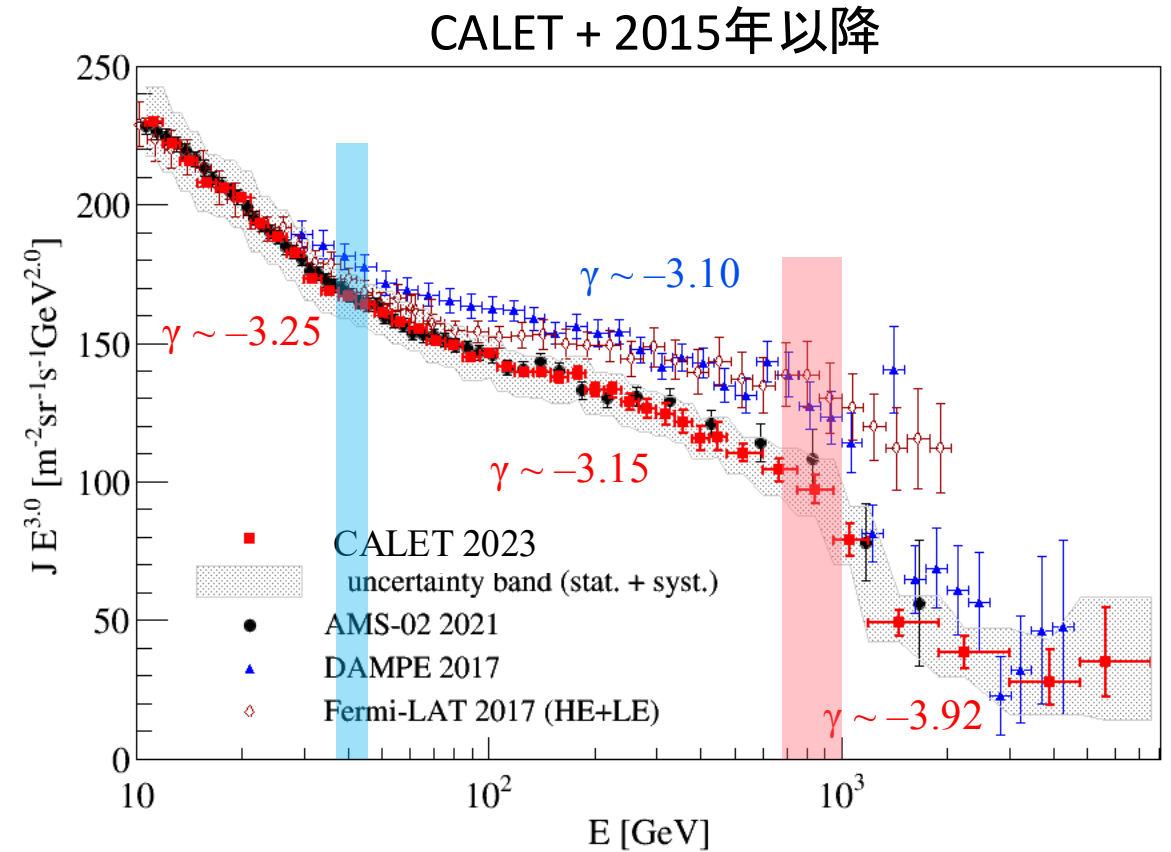
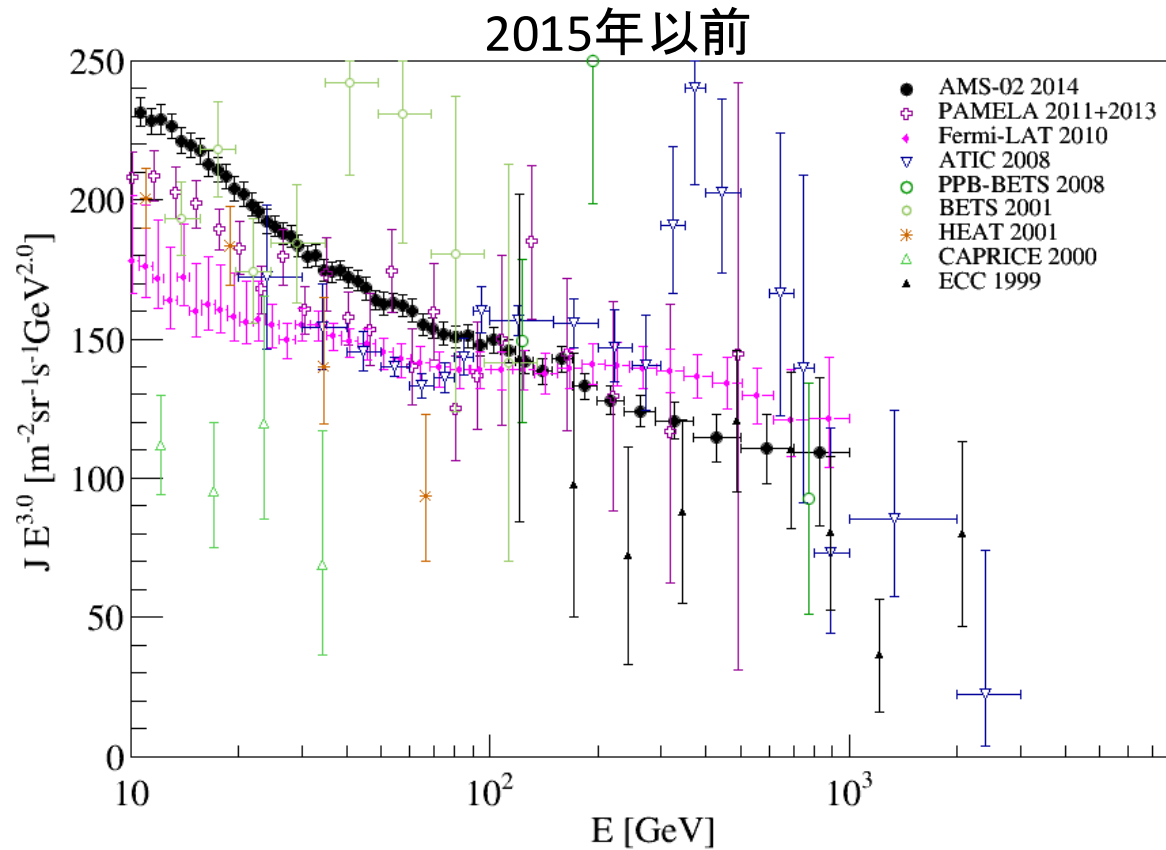
- Orbital operations : **3399 days (>9 years)** as of January 31, 2025
- Observation time : 2.88×10^8 sec
- Live time fraction: **~ 86%**
- Exposure of HE trigger : **~300 m² sr day**



Energy deposit (in TASC) spectrum: 1 GeV-1 PeV



15.10.13-25.01.31
 Number of HE triggers
 ~2.25 billion
 Total number of >1 GeV triggers
 ~5.03 billion



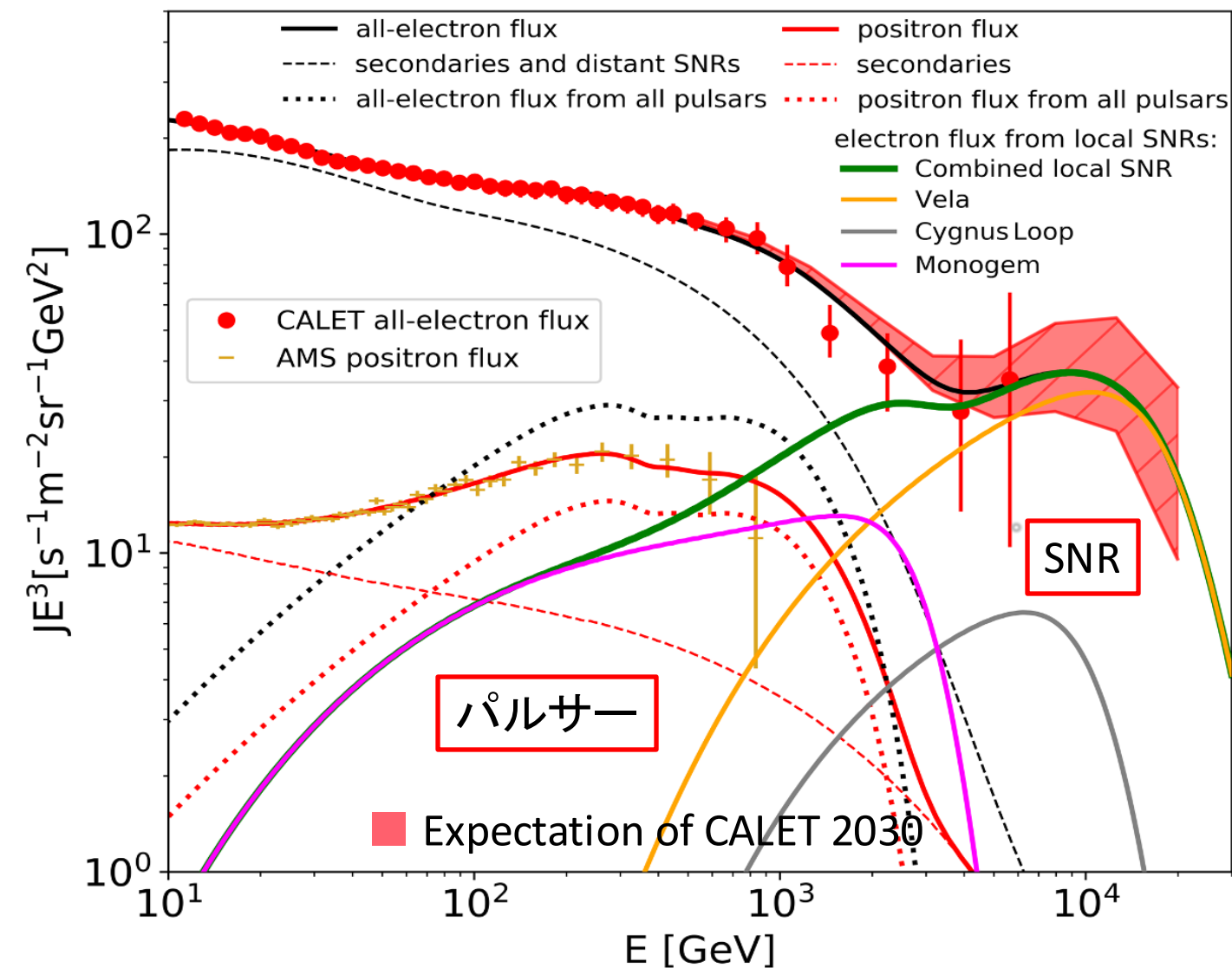
CALET: 10 GeV – 7.5 TeVを測定
 スペクトルの変化を検出:

- 軟化(~ 1 TeV): 遠方源からの電子の銀河内伝播中におけるエネルギー損失
- 硬化(~ 40 GeV): 加速? 伝播? + 一次陽電子源



陽電子過剰の解釈と近傍加速源探索

PRL 131, 191001 (2023)



銀河内伝播計算コード(DRAGON)を用いたスペクトルの解釈

• 陽電子フラックス: AMS-02
二次粒子 + パルサー

陽電子起源をパルサーとして、AMS-02の陽電子スペクトルをフィット

• (電子 + 陽電子): CALET
二次粒子 + パルサー + SNRs

パルサーからの電子 + 陽電子対の寄与と遠方SNRによる電子フラックスでフィット
➡ 暗黒物質からの寄与の上限値

近傍加速源(Vela)からのTeV領域での電子フラックスへの寄与ベストフィット
 0.8×10^{48} erg in $E > 1$ GeV

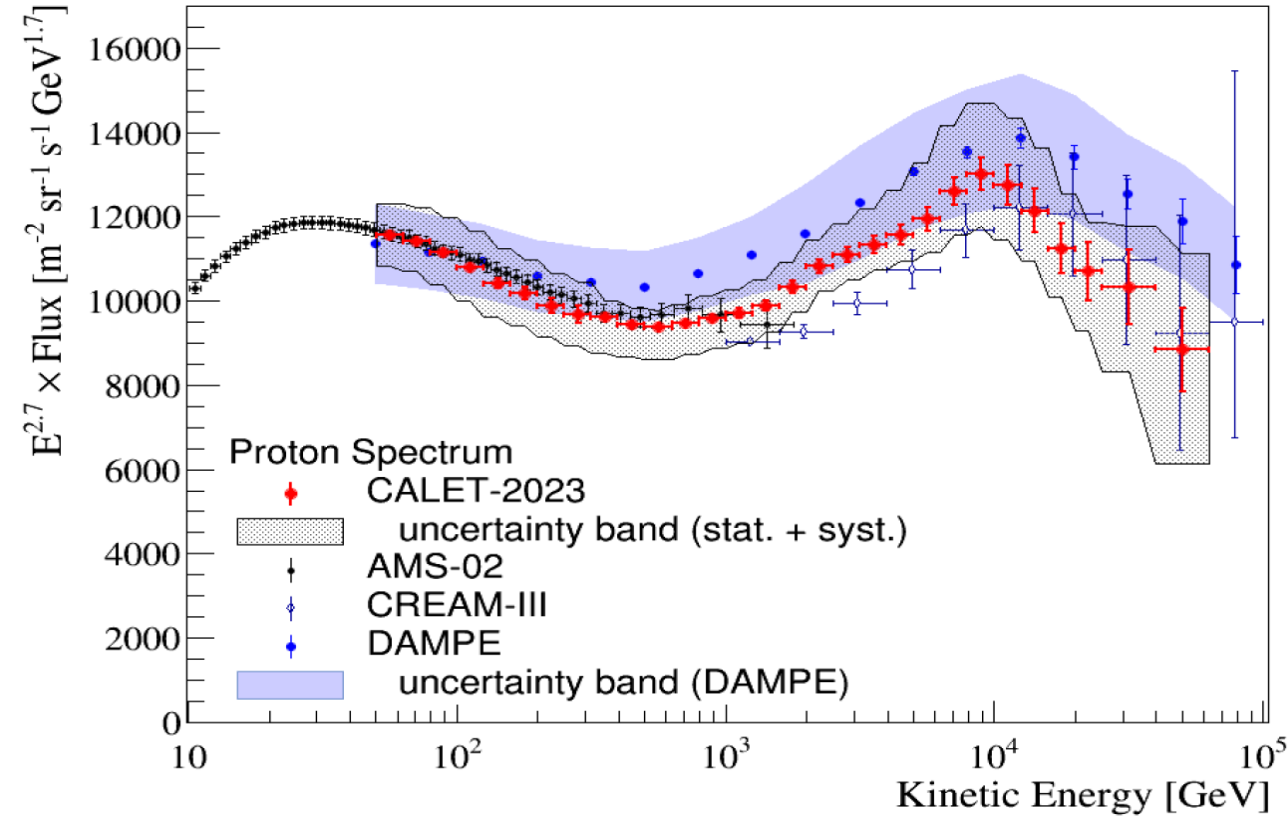
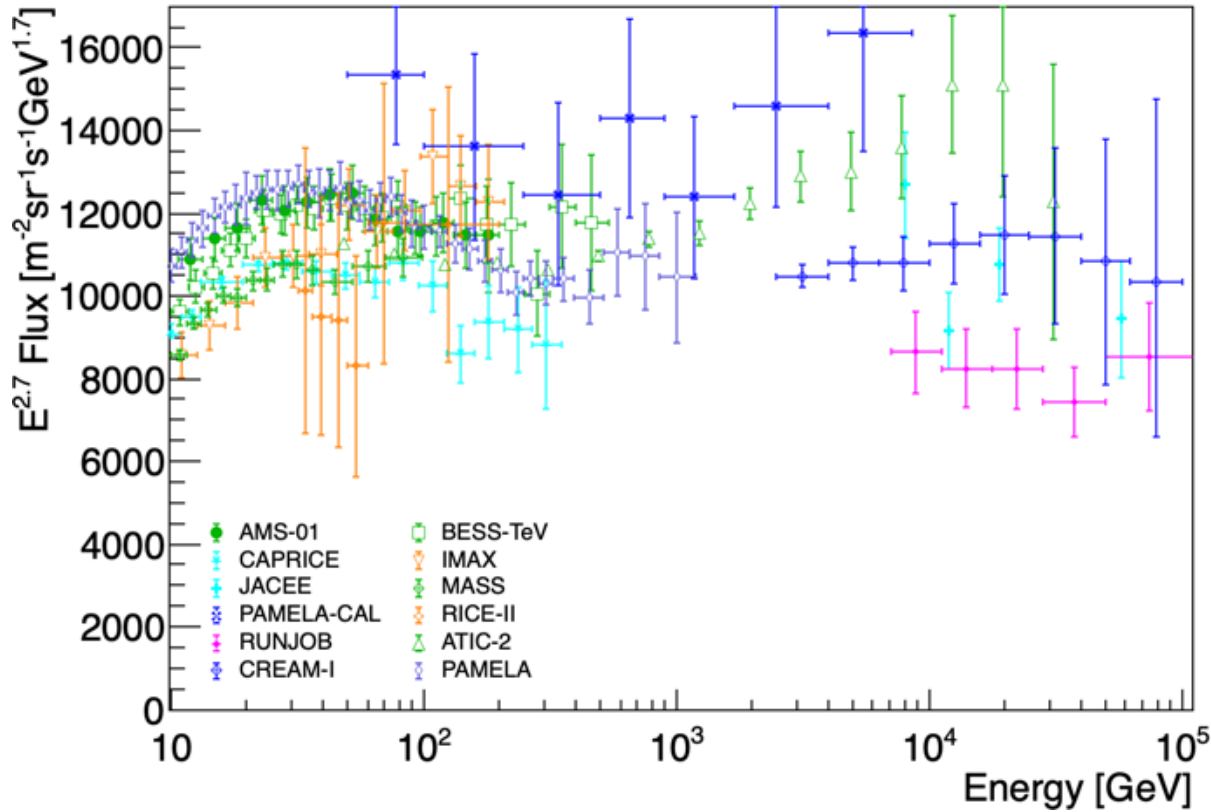


陽子スペクトルの観測

PRL 129, 101102 (2022)

2015年以前

CALET + 2015年以降



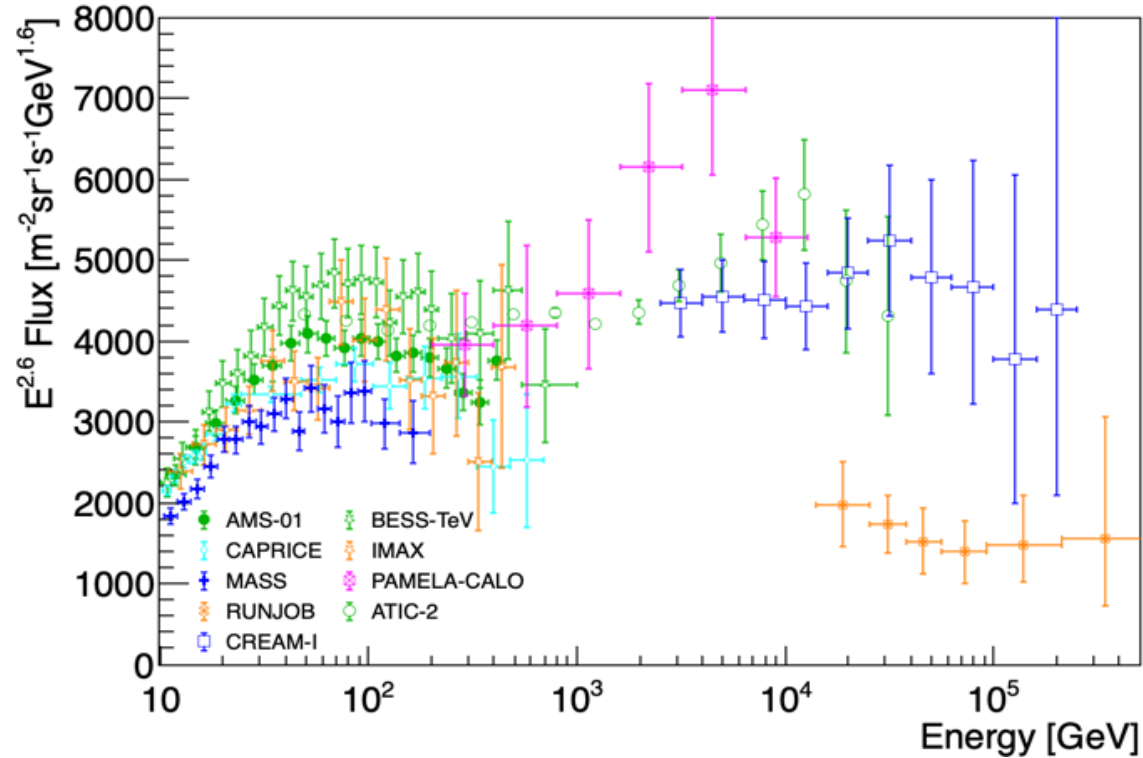
CALETによる50 GeV – 60 TeVのエネルギースペクトルを観測することにより、CALET以前の標準的理解であった単一冪のスペクトルとは大きく異なる、スペクトルの硬化(~550GeV)と軟化(~10TeV)を検出



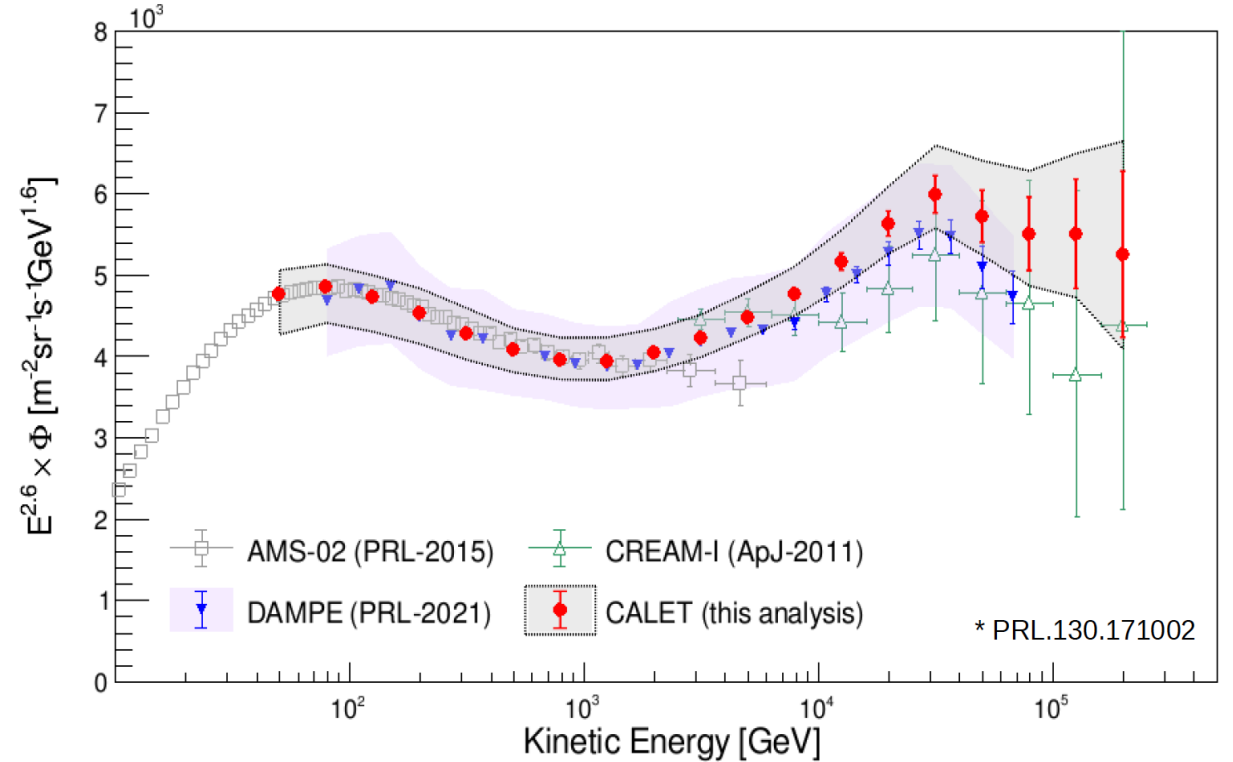
ヘリウムスペクトルの観測

PRL 130, 171002 (2023)

2015年以前

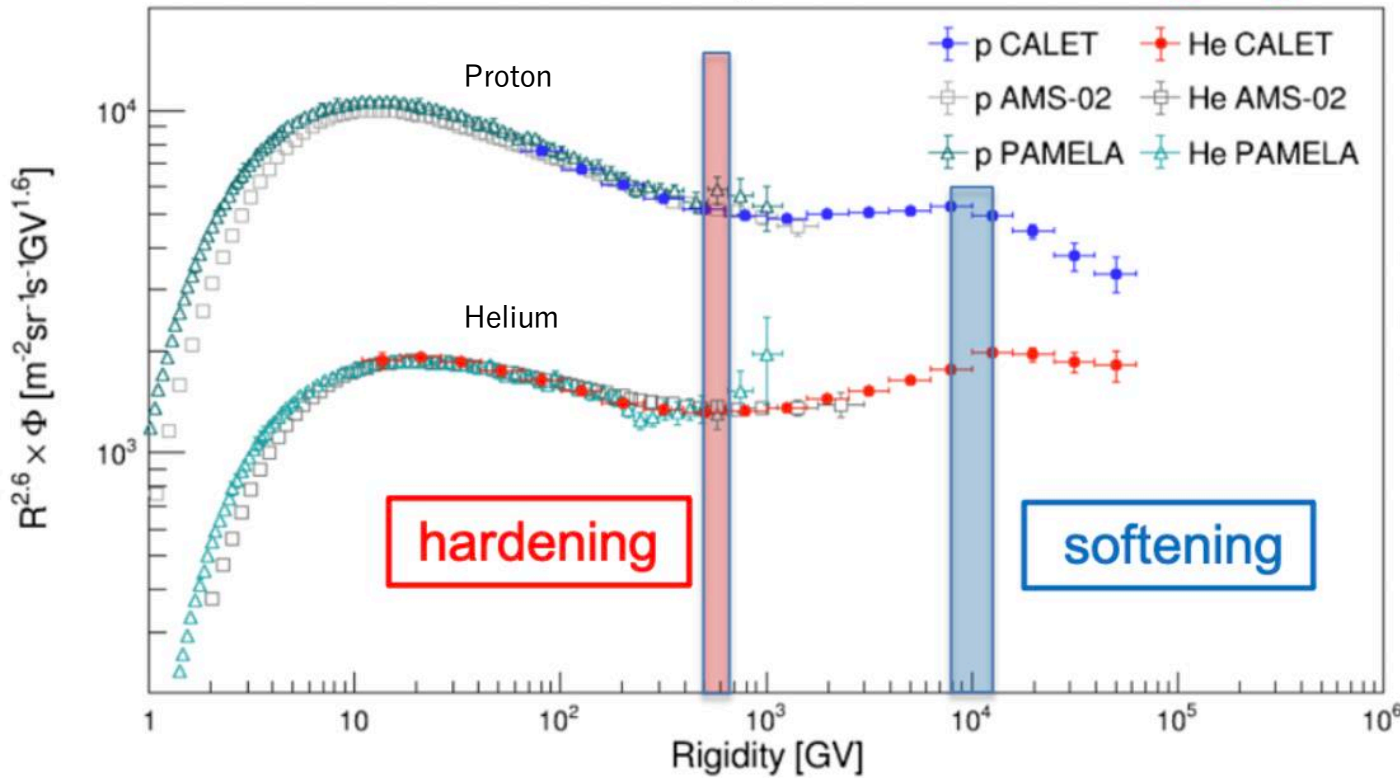


CALET + 2015年以降

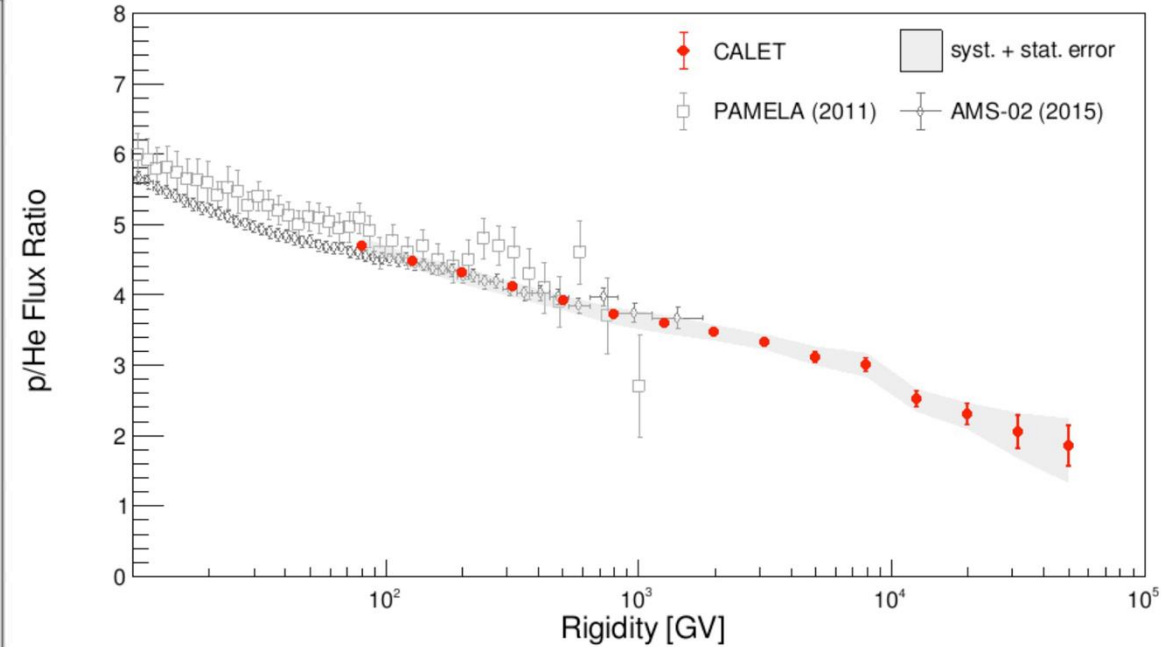


CALETによる50 GeV – 250 TeVのエネルギースペクトルを観測することにより、CALET以前の標準的理解であった単一冪のスペクトルとは大きく異なる、スペクトルの硬化(~1300GeV)と軟化(~30TeV)を検出

陽子、ヘリウムのスペクトル



p/He ratio



Best fit parameters with DBPL function for proton and helium spectrum (energy/particle)

	γ	E_0 (GeV)	$\Delta\gamma$	S	E_1 (TeV)	$\Delta\gamma_1$	S_1
Proton	-2.843 ± 0.005	553^{+44}_{-38}	0.29 ± 0.01	2.1 ± 0.4	$9.8^{+3.2}_{-2.1}$	$-0.39^{+0.15}_{-0.18}$	~ 90
Helium	$-2.703^{+0.005}_{-0.006}$	1319^{+113}_{-93}	$0.25^{+0.02}_{-0.01}$	$2.7^{+0.6}_{-0.5}$	$33.2^{+9.8}_{-6.2}$	$-0.22^{+0.07}_{-0.10}$	30

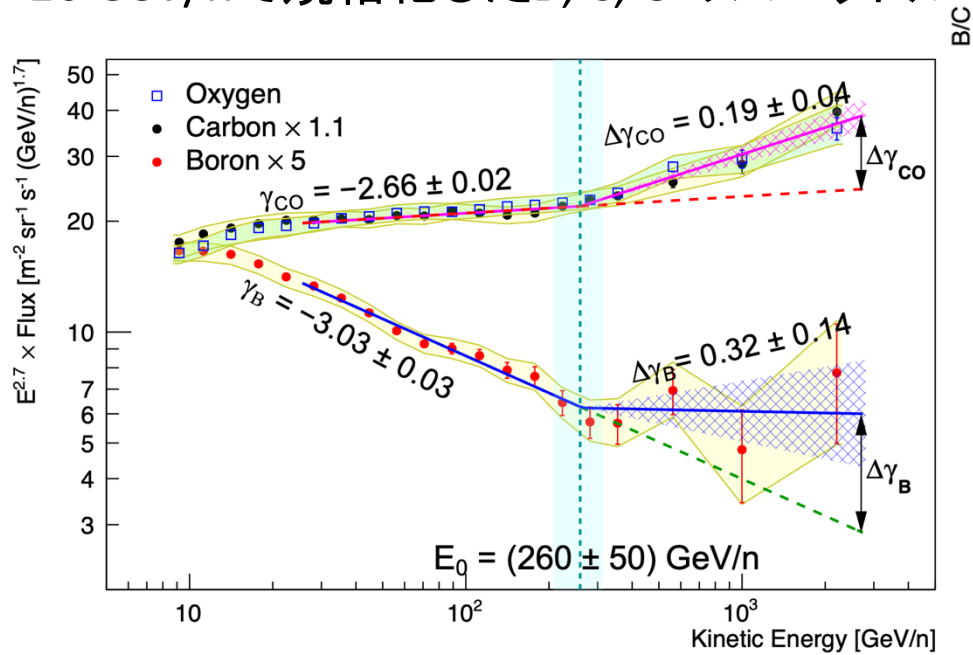
- ✓ 同じRigidityにおける陽子とヘリウムの硬化(~550 GV)と軟化(~10 TV)を検出
- ✓ ヘリウムのスペクトルの冪は、標準的なモデルでは陽子と同じであるが、陽子の冪より~0.1 大きい (E<60 TeV)



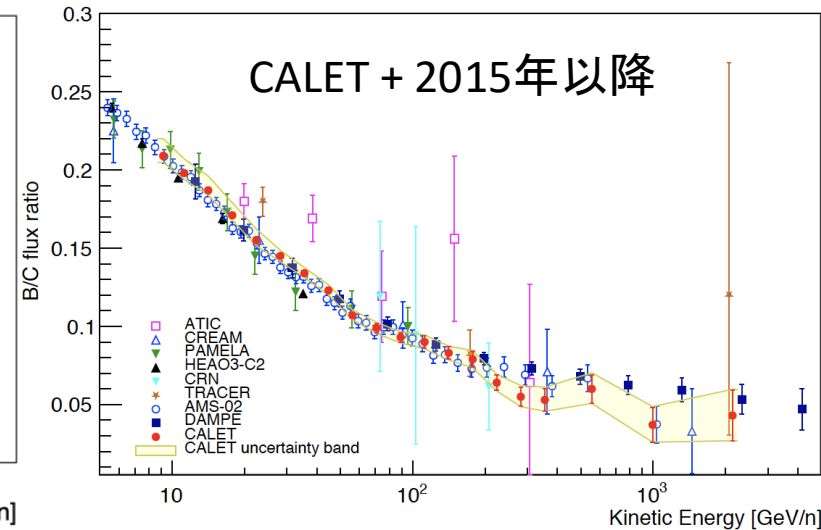
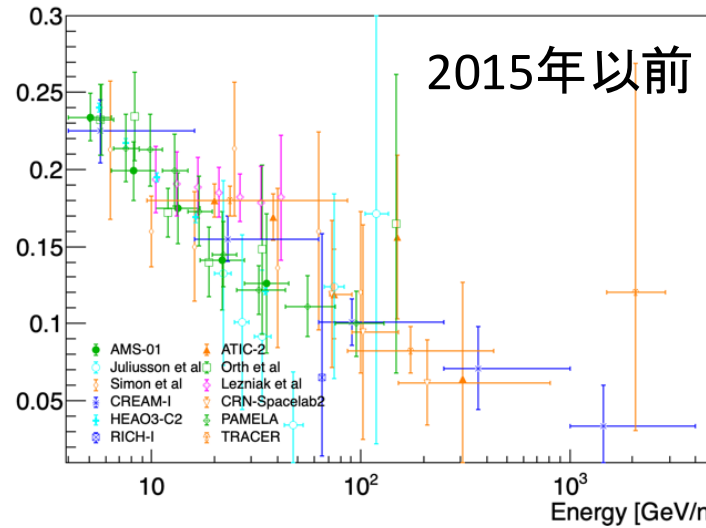
ホウ素、炭素、酸素のスペクトル

PRL 129.251103 (2022)

10 GeV/nで規格化したB, C, Oのスペクトル

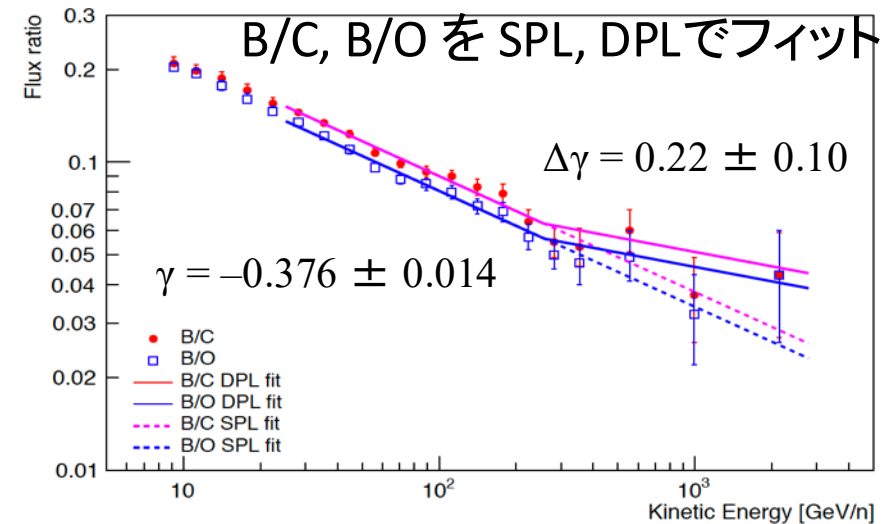


二次核(B)/一次核(C)比の観測



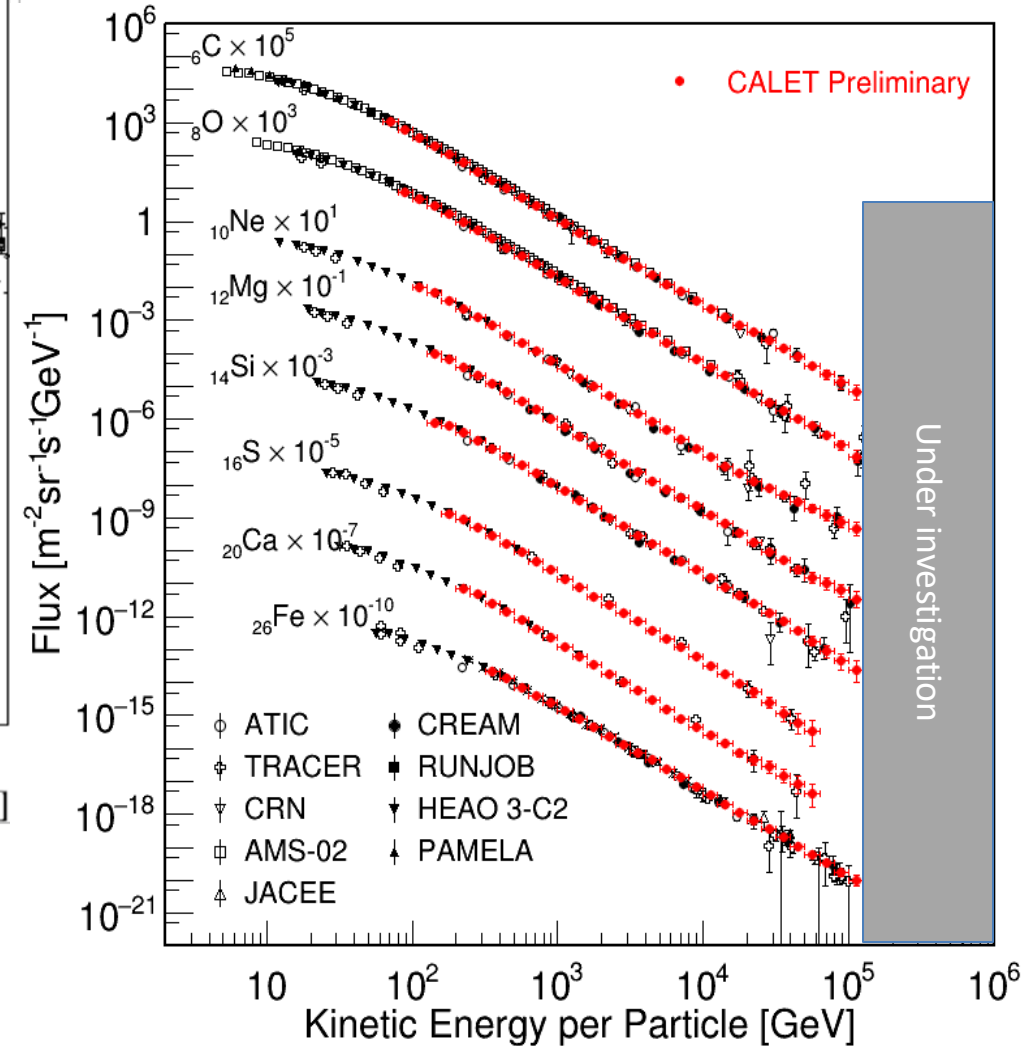
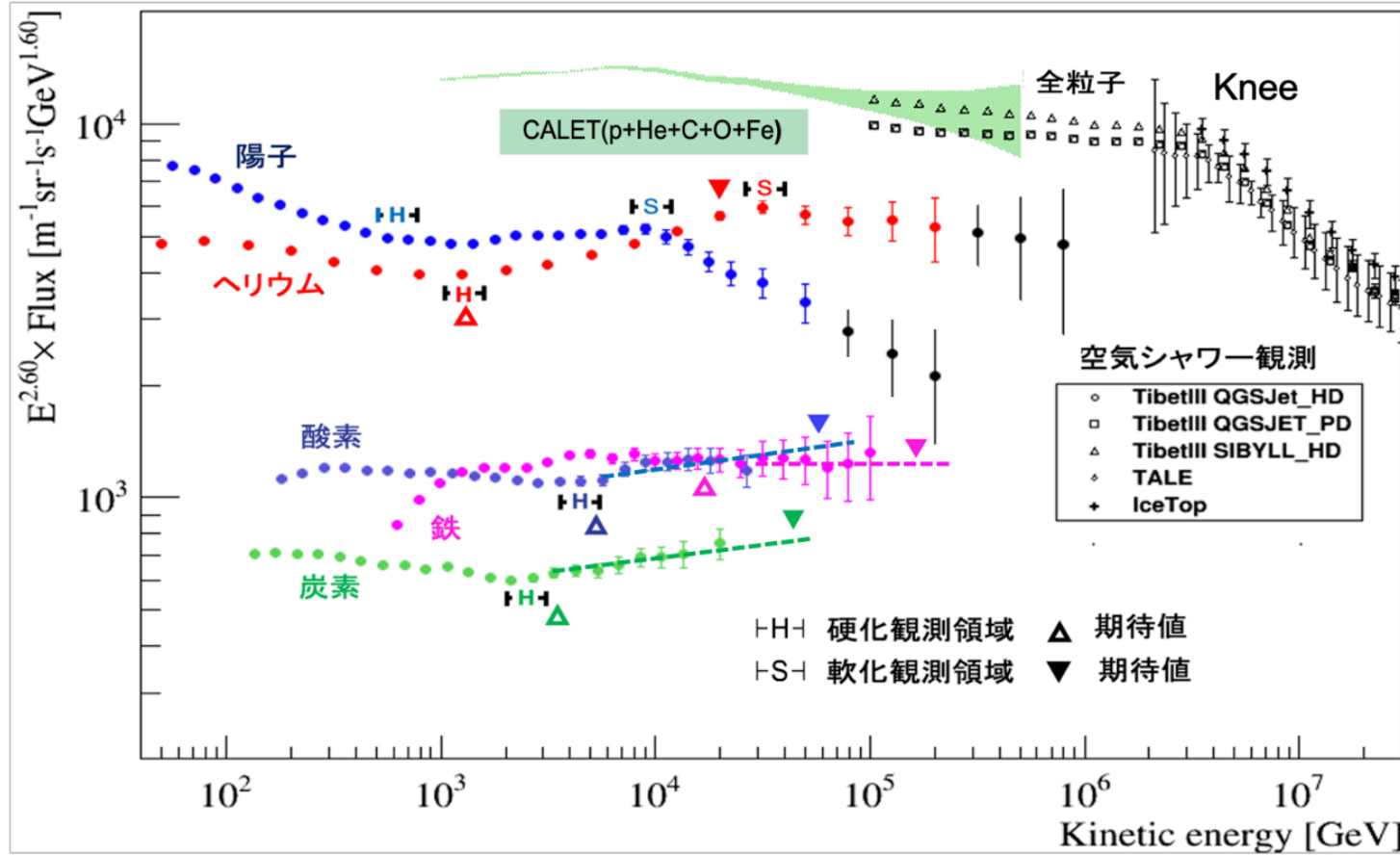
CALET: 8.4 GeV/n – 3.8 TeV/n:

- ✓ スペクトル硬化を検出(260 ± 50 GeV/n)
p, Heと同じRigidity
- ✓ 二次粒子(B)の硬化の変化量($\Delta\gamma$)は
一次粒子(CO)より大きい





原子核成分スペクトルと全粒子スペクトル



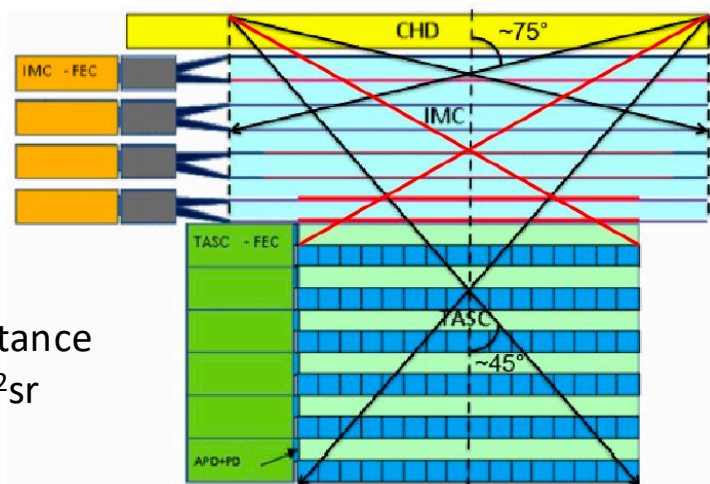
- H** : 陽子・ヘリウム、炭素、酸素、鉄の観測結果と硬化領域
- S** : 同、軟化領域
- △ : 陽子観測から期待される各原子核の硬化エネルギー (電荷あたり)
- ▼ : 同、軟化エネルギー (電荷あたり)
- : 陽子・ヘリウムの今後の観測による期待値
- 緑領域 : 1 TeV-500 TeVでのこれらの総和のスペクトル (Knee領域の全粒子スペクトルとの比較のため)



超重核($Z > Fe$)の観測: CALET & 将来計画(TIGER-ISS)

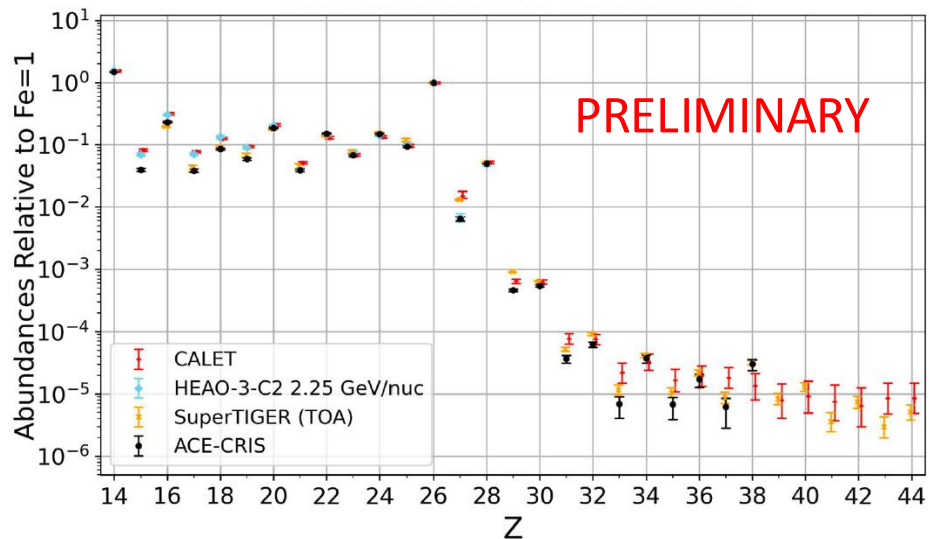
■ CALET

組成比 ($Z \leq 44$) の観測



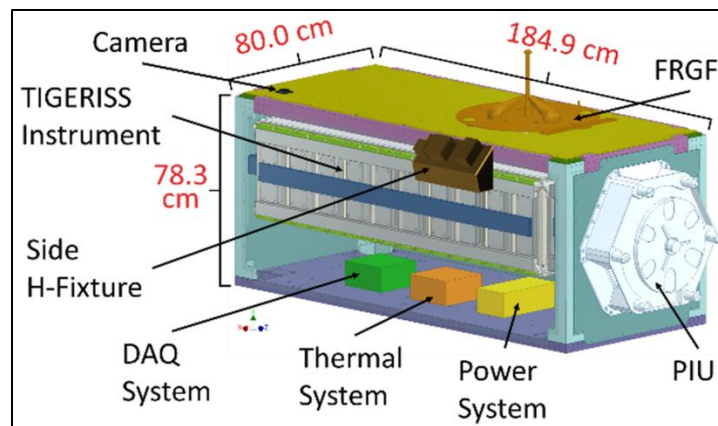
UH Trigger

- Wide acceptance
- $\Omega \sim 0.4 \text{ m}^2 \text{ sr}$

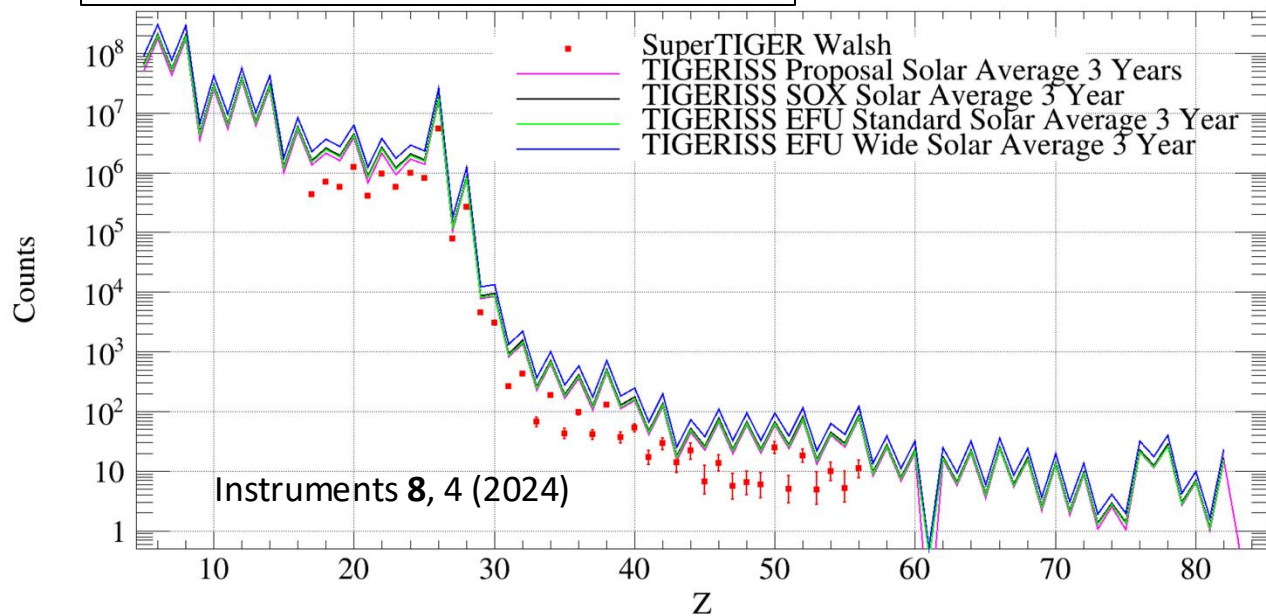
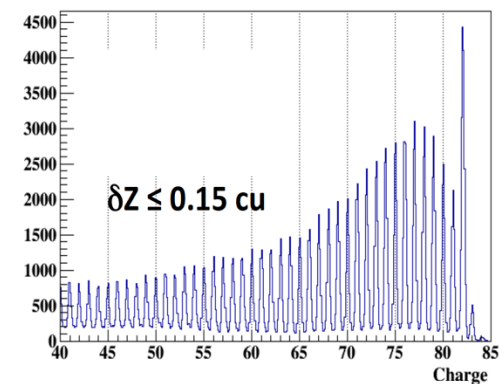


■ TIGER: Trans-Iron Galactic Element Recorder

- SuperTIGER 南極周回気球 ($Z \leq 56$)
- TIGERISS ISS in 2026 ($Z \leq 82$)



Charge resolution of Si-Det.



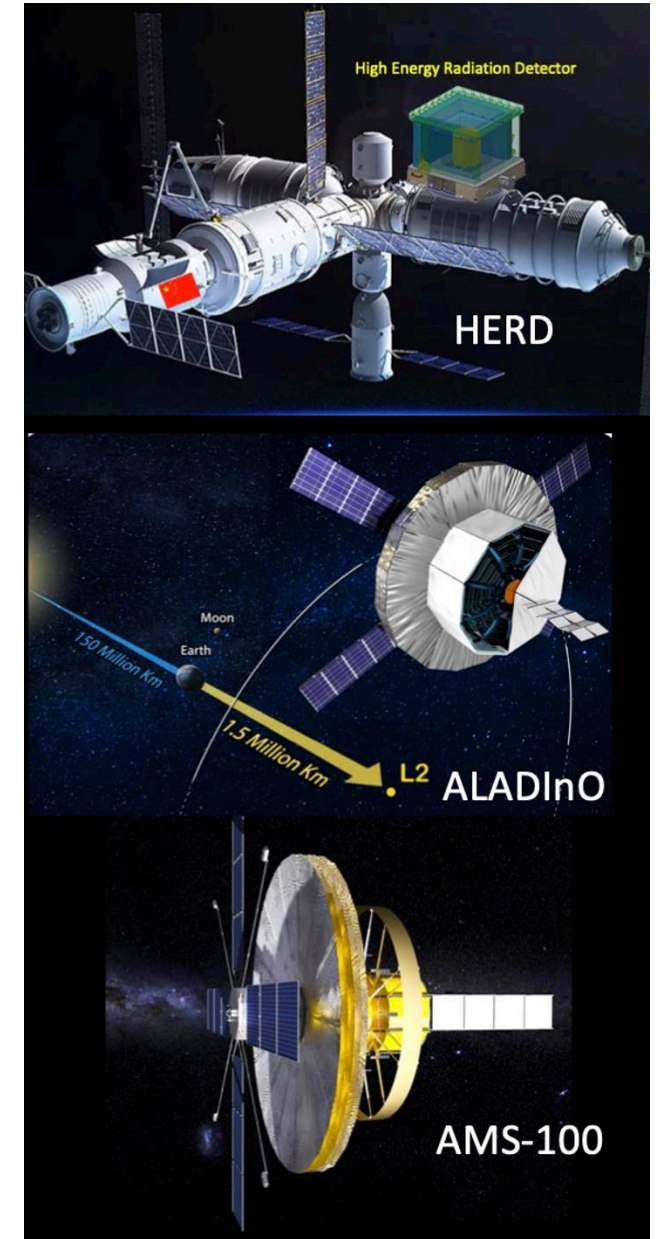
Instruments 8, 4 (2024)



次世代の宇宙線観測計画

Knee領域の直接観測: 少なくとも $>10 \text{ m}^2\text{sr}$ を超える観測が必要 (CALET: $\sim 0.1 \text{ m}^2\text{sr}$)
 計画されている超大型計画: 重量、コスト、電力等に課題

Item	HERD (LEO)	ALADINO (L2)	AMS-100 (L2)
calorimeter depth for electrons	$55 X_0$	$61 X_0$	$70 X_0$
calorimeter depth for protons	$3 \lambda_I$	$3.5 \lambda_I$	$4 \lambda_I$
MDR	N/A	20 TV	100 TV
Acceptance (spectrometer + calorimeter)	N/A	$\sim 3 \text{ m}^2 \text{ sr}$	$\sim 20\text{-}30 \text{ m}^2 \text{ sr}$
Acceptance (calorimeter)	$\sim 2\text{-}3 \text{ m}^2 \text{ sr}$	$\sim 9 \text{ m}^2 \text{ sr}$	$\sim 20\text{-}30 \text{ m}^2 \text{ sr}$
# of channels	300 k	2.5 M	8 M
Weight	$\sim 4,000 \text{ kg}$	$\sim 6,000 \text{ kg}$	$\sim 40,000 \text{ kg}$
Power Consumption	$\sim 1.4 \text{ kW}$	$\sim 4 \text{ kW}$	$\sim 15 \text{ kW}$

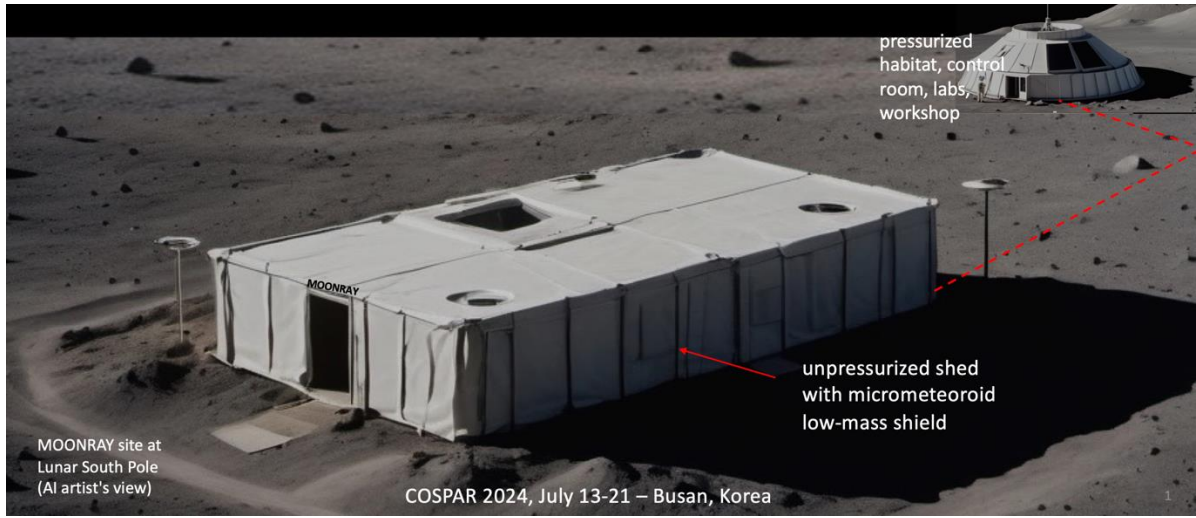




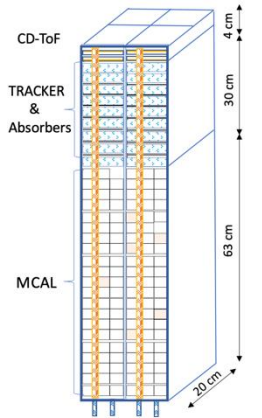
月面での宇宙線観測計画: MOONRAY

月面(南極)におけるモジュール化した検出器による直接観測

CALETのイタリアメンバーが提案しており日本側も参加を検討



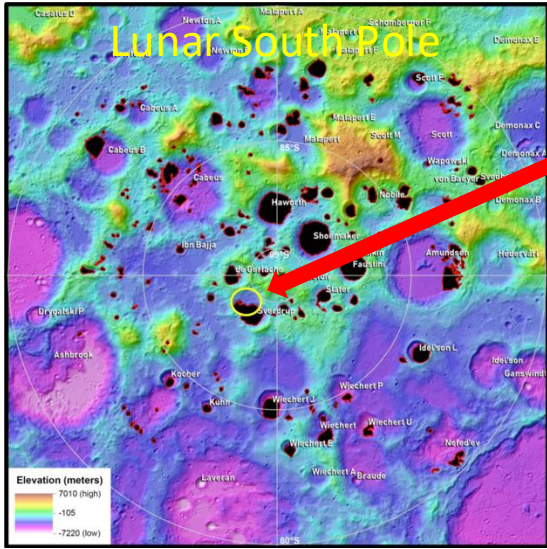
- 完全に独立したモジュール型(タワー型)の検出器による大面積Array状の検出器
- 複数回の月面ミッションにより段階的に大面積化
- 1 GeV以上の荷電粒子とガンマ線の直接観測



Main Sub-detectors:	
<input type="checkbox"/> ACD	Anti-Coincidence Detector (not shown in this picture)
<input type="checkbox"/> CD-ToF	Charge Detector and Time-of-Flight
<input type="checkbox"/> MT	Tracker (Silicon Strip Detectors + absorbers)
<input type="checkbox"/> MCAL	Calorimeter (homogeneous, 3D crystal array)

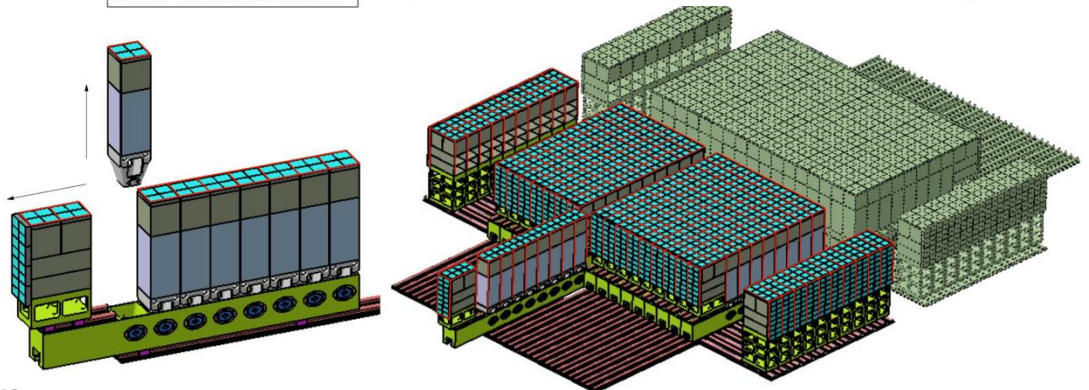
1 tower: ~20cm x 20cm x 100 cm (envelope)
MCAL: 6x6 crystals / layer
depth: 21 crystals => 63 cm ($55X_0, 3\lambda$)
1 tower: 6 x 6 x 21 = 756 crystals
tower mass dominated by MCAL: ~151.2 Kg (25.2 kg-moon) + tracker + W foils + r/o electronics + mechanics ~ 200 kg/tower (33.2 kg-moon)

example: LYSO (Ce) 1 crystal: 3x3x3 cm ³ 200gr
$\rho = 7.4 \text{ gr/cm}^3$ density
$\lambda = 21 \text{ cm}$ proton nuclear interaction length
$X_0 = 1.14 \text{ cm}$ radiation length
$R_M = 2.1 \text{ cm}$ Molière radius



Henson Crater (88.5 S, 129.6 W)

- 月面(南極)の他の候補地:
- Sverdrup (88.5 S, 152.0 W)
 - Henson (88.5 S, 129.6 W)
 - Shackelton (89.4 S, 129.4 E)
 - de Gerlache (88.5 S, 87.1 W)
 - Malapert Massif (85.8 S, 3.8 E)

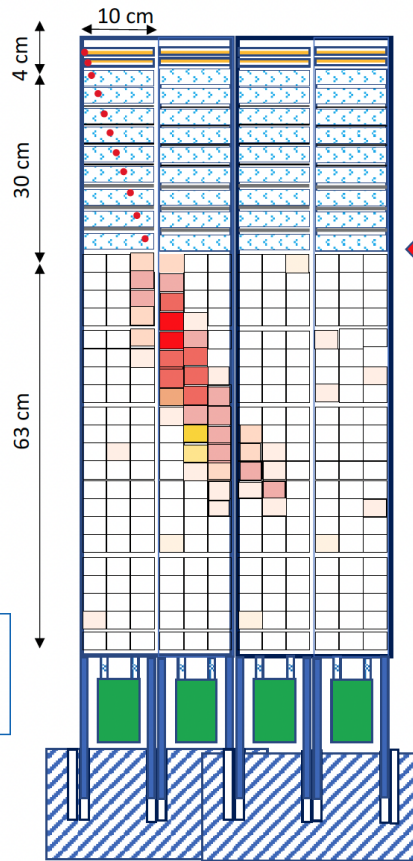
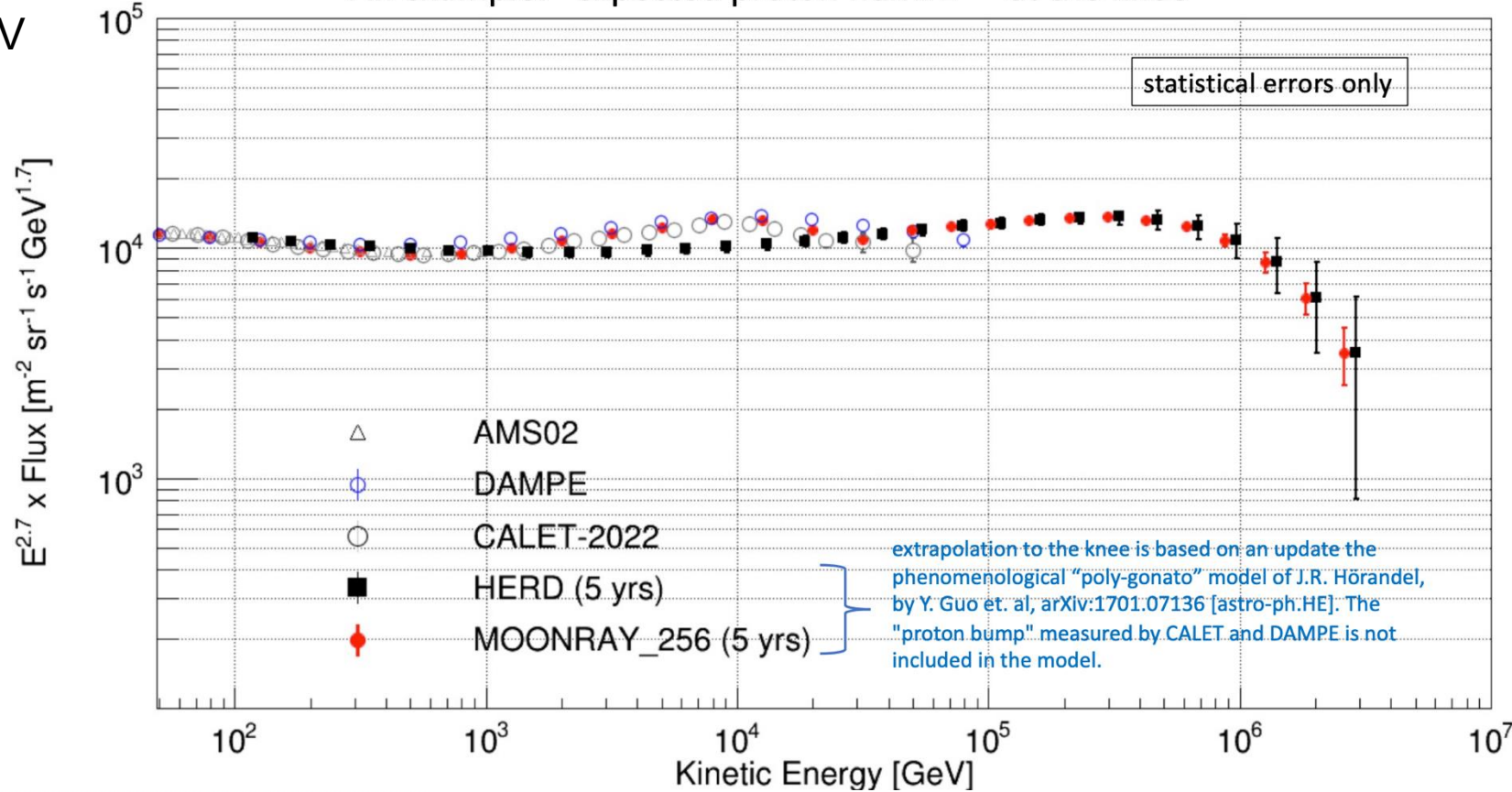




MOONRAY で期待される性能と観測

- up to 256 towers (3.2 m x 3.2 m x 1m)
- Geometric Factor: $\sim 30 \text{ m}^2\text{sr}$
- **Effective Acceptance: up to $16 \text{ m}^2\text{sr}$**
- can explore the knee up to 10 PeV

An example: expected proton flux $\times E^{2.7}$ at the knee



Artist's view of an electron shower propagating into two adjacent towers



CALET Summary and Future Prospects

- 2015年8月の打ち上げ以降、9年以上に渡り安定的に観測データを収集している
 - 2015年1月末時点で、3,399日(9.3年)間の観測時間であり、86%のLive Time fractionである.
 - 50.3億例(>1 GeV), 22.5億例(>10 GeV)のイベントを収集
- 現在までに得られた宇宙線(荷電粒子)について得られた成果と今後の観測予測:
 - 全電子(電子+陽電子): 10 GeV – 7.5 TeV
 - スペクトルの硬化(~40 GeV)と 軟化(~1 TeV)を検出
 - 近傍加速源の存在を示唆する結果. 異方性の測定を合わせて同定を検証予定
 - 原子核のエネルギースペクトル
 - スペクトル硬化(500 – 600 GV)
 - スペクトル軟化(~10 TV): p, Heについて検出、重原子核の電荷依存性を検証予定
 - 二次粒子(B) の硬化の変化量が一次粒子(C,O)より大きい
 - subFe (Ti, Cr)の観測結果を投稿中
 - 1 PeV付近まで全粒子スペクトル、及び各成分のスペクトルを測定予定
- ガンマ線観測、太陽変調、宇宙天気(REPなど)、GRB, GW-Follow up 等の観測
- CALETはISSの運用予定の2030年までの観測が承認済み

本研究は科学研究費基盤(S)24H00025(2024-2028年度)の支援を受けて実施されています