

ISS搭載CALETによる10年間の 観測成果ハイライトと将来展望

18aEL104-1

CALET

Calorimetric
Electron
Telescope

on the International Space Station



鳥居祥二
早稲田大学理工総研
他CALET国際研究チーム



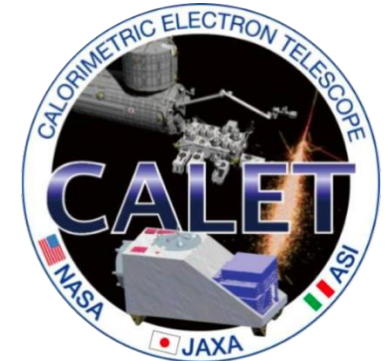
2025年9月17日

日本物理学会 第80回年次大会(2025年)

広島大学



The CALET Collaboration



O. Adriani,^{1,2} Y. Akaike,^{3,4} K. Asano,⁵ Y. Asaoka,⁵ E. Berti,^{2,6} P. Betti,^{2,6} G. Bigongiari,^{7,8} W.R. Binns,⁹
M. Bongio,^{1,2} P. Brogi,^{7,8} A. Bruno,¹⁰ **N. Cannady,¹¹** G. Castellini,⁶ C. Checchia,^{7,8} M.L. Cherry,¹²
G. Collazuol,^{13,14} G.A. de Nolfo,¹⁰ K. Ebisawa,¹⁵ A. W. Ficklin,¹² H. Fuke,¹⁵ S. Gonzi,^{1,2,6} T.G. Guzik,¹²
T. Hams,¹⁶ K. Hibino,¹⁷ M. Ichimura,¹⁸ M.H. Israel,⁹ K. Kasahara,¹⁹ J. Kataoka,²⁰ R. Kataoka,²¹
Y. Katayose,²² C. Kato,²³ N. Kawanaka,^{24,25} Y. Kawakubo,²⁶ K. Kobayashi,^{3,4} K. Kohri,^{25,27}
H.S. Krawczynski,⁹ J.F. Krizmanic,¹¹ P. Maestro,^{7,8} **P.S. Marrocchesi,^{7,8}** M. Mattiazzi,^{13,14} A.M. Messineo,^{8,28}
J.W. Mitchell,¹¹ S. Miyake,²⁹ A.A. Moiseev,^{11,30,31} M. Mori,³² N. Mori,² H.M. Motz,³³ K. Munakata,²³
S. Nakahira,¹⁵ J. Nishimura,¹⁵ M. Negro,¹² S. Okuno,¹⁷ J.F. Ormes,³⁴ S. Ozawa,³⁵ L. Pacini,^{2,6} P. Papini,²
B.F. Rauch,⁹ S.B. Ricciarini,^{2,6} K. Sakai,³⁶ T. Sakamoto,²⁶ M. Sasaki,^{11,30,31} Y. Shimizu,¹⁷ A. Shiomi,³⁷
P. Spillantini,¹ F. Stolzi,^{7,8} S. Sugita,²⁶ A. Sulaj,^{7,8} M. Takita,⁵ T. Tamura,¹⁷ T. Terasawa,⁵ **S. Torii,³**
Y. Tsunesada,^{38,39} Y. Uchihori,⁴⁰ E. Vannuccini,² J.P. Wefel,¹² K. Yamaoka,⁴¹ S. Yanagita,⁴² A. Yoshida,²⁶
K. Yoshida,¹⁹ and W. V. Zober⁹

PI: Japan
Co-PI: Italy
Co-PI: USA

- 1) University of Florence, Italy
- 2) INFN Florence, Italy
- 3) WISE, Waseda University, Japan
- 4) Space Environment Utilization Center, JAXA, Japan
- 5) ICRR, University of Tokyo, Japan
- 6) IFAC, CNR, Italy
- 7) University of Siena, Italy
- 8) INFN Pisa, Italy
- 9) Washington University, St. Louis, USA
- 10) Heliospheric Physics Laboratory, NASA/GSFC, USA
- 11) Astroparticle Physics Laboratory, NASA/GSFC, USA
- 12) Louisiana State University, USA
- 13) University of Padova, Italy
- 14) INFN Padova, Italy

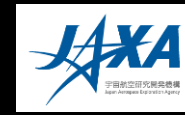
- 15) ISAS, JAXA, Japan
- 16) University of Maryland, Baltimore County, USA
- 17) Kanagawa University, Japan
- 18) Hirosaki University, Japan
- 19) Shibaura Institute of Technology, Japan
- 20) ASE, Waseda University, Japan
- 21) OIST, Japan
- 22) Yokohama National University, Japan
- 23) Shinshu University, Japan
- 24) Tokyo Metropolitan University, Japan
- 25) NAOJ, Japan
- 26) Aoyama Gakuin University, Japan
- 27) IPNS, KEK, Japan
- 28) University of Pisa

- 29) NIT(KOSEN), Gifu College, Japan
- 30) CREST II, NASA/GSFC, USA
- 31) University of Maryland, College Park, USA
- 32) Ritsumeikan University, Japan
- 33) GCSE, Waseda University, Japan
- 34) University of Denver, USA
- 35) NICT, Japan
- 36) Chicago University, USA
- 37) Nihon University, Japan
- 38) Osaka Metropolitan University, Japan
- 39) NITEP, Osaka Metropolitan University, Japan
- 40) QST, Japan
- 41) Nagoya University, Japan
- 42) Ibaraki University, Japan

Guest Investigator: L. W. Blum (U. of Colorado), M. Teramoto (KIT), Y. Kato (Tohoku U.), Y. Ohira (U. of Tokyo)



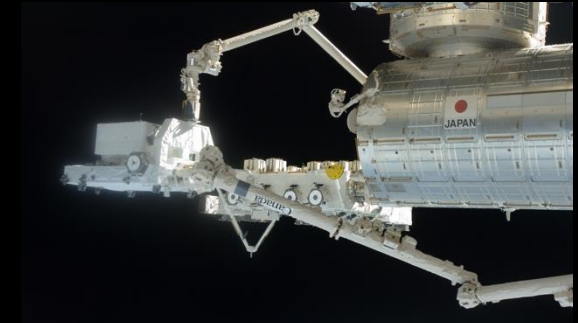
CALET Payload



Kounotori (HTV) 5

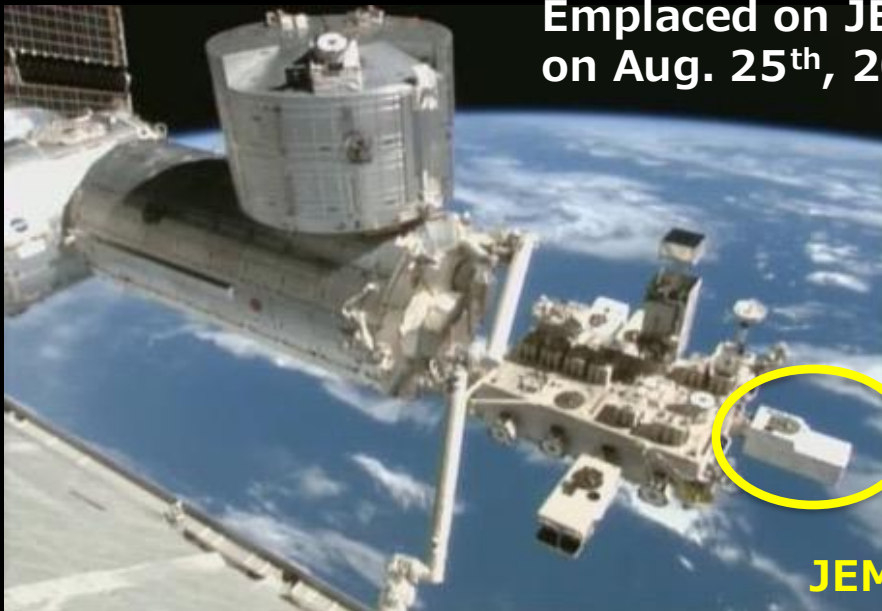


CGBM (CALET
Gamma-ray
Burst Monitor)

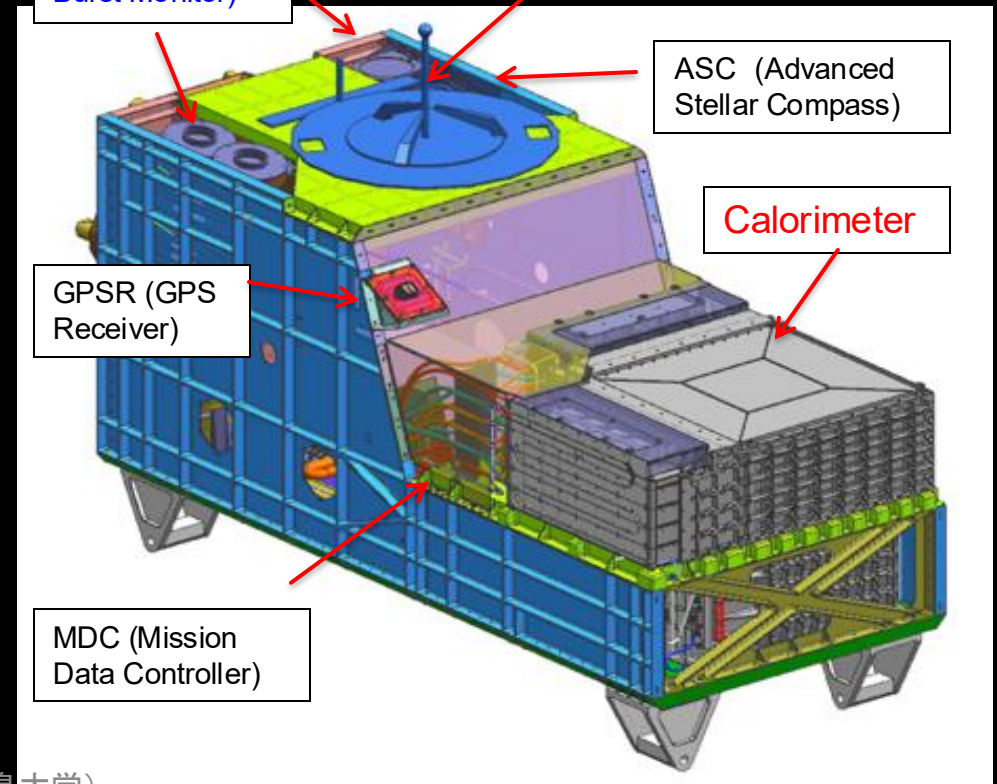


FRGF (Flight Releasable
Grapple Fixture)

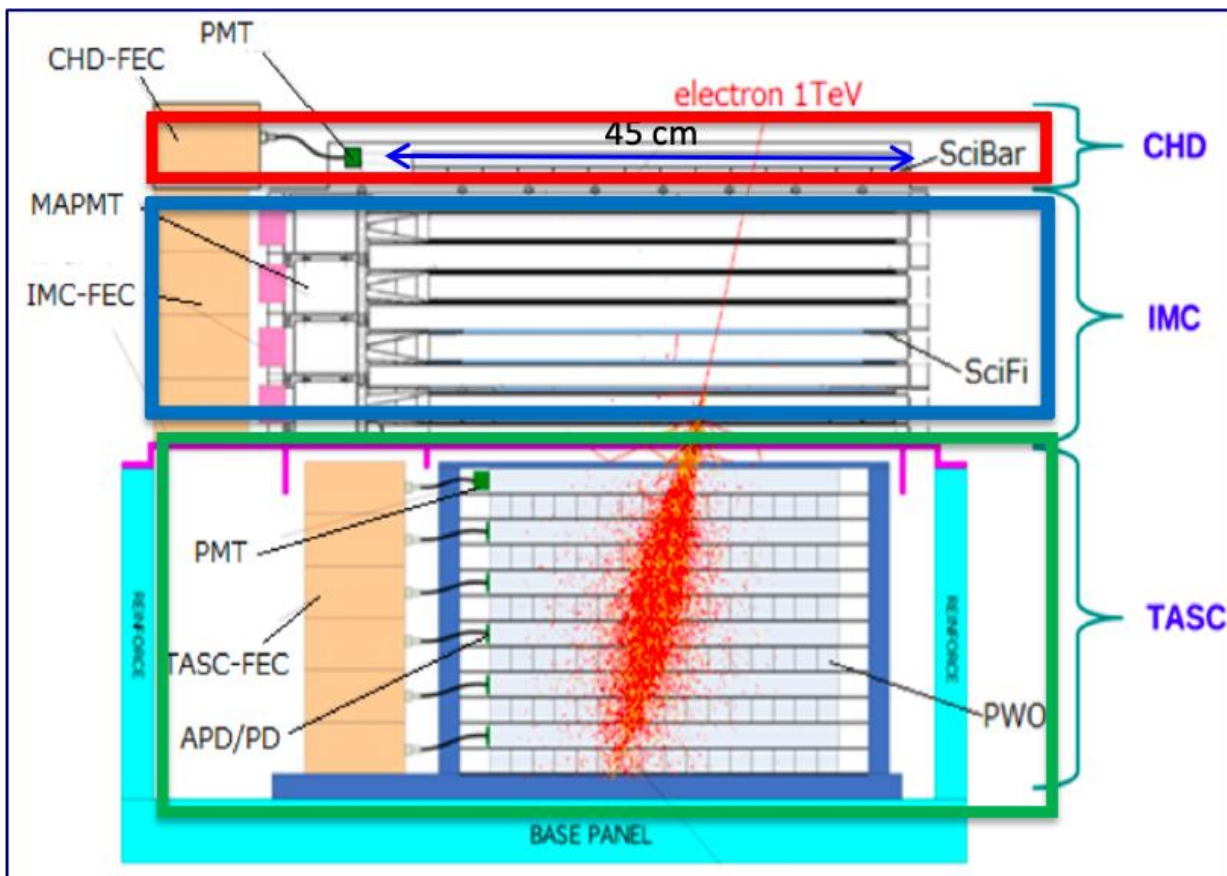
Launched on Aug. 19th, 2015
by the Japanese H2-B rocket
Emplaced on JEM-EF port #9
on Aug. 25th, 2015



JEM-EF/Port #9



Overview of the CALET Calorimeter



CHD – Charge Detector

- 2(X,Y) layers x 14 plastic scintillating paddles
- **Charge Measurement $Z=0-40+$**

IMC – Imaging Calorimeter

- 8 x 2 (X,Y) x 448 plastic scintillating fibers (1mm)
- 7 tungsten sheets:
 $3 X_0$ ($5 \times 0.2 X_0 + 2 \times 1 X_0$), $0.1 I_I$
- **Pre-shower development and imaging**

TASC – Total Absorption Calorimeter

- 6 x 2 (X,Y) x 16 lead tungstate (PbWO_4) logs:
 $27 X_0$, $1.2 I_I$
- **Electromagnetic shower absorption**

• Geometrical Factor:

1040 $\text{cm}^2 \text{sr}$ for electrons, light nuclei
 1000 $\text{cm}^2 \text{sr}$ for gamma-rays
 4000 $\text{cm}^2 \text{sr}$ for ultra-heavy nuclei

• $\Delta E/E$:

$\sim 2\%$ ($>10\text{GeV}$) for e, γ
 $\sim 30-35\%$ for protons, nuclei

• e/p separation: $\sim 10^5$

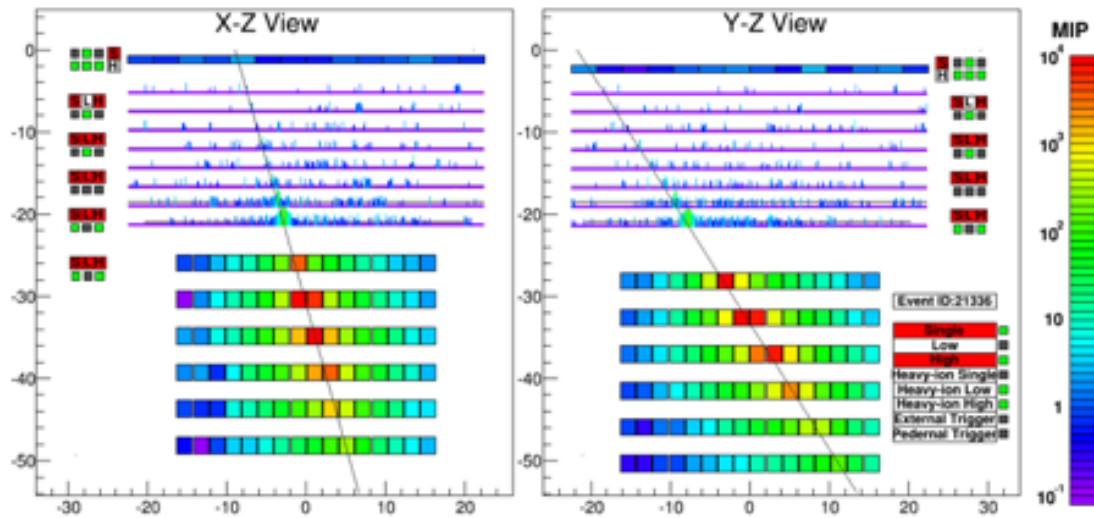
• **Charge resolution:** 0.15-3 e (p-Fe)

• Angular resolution:

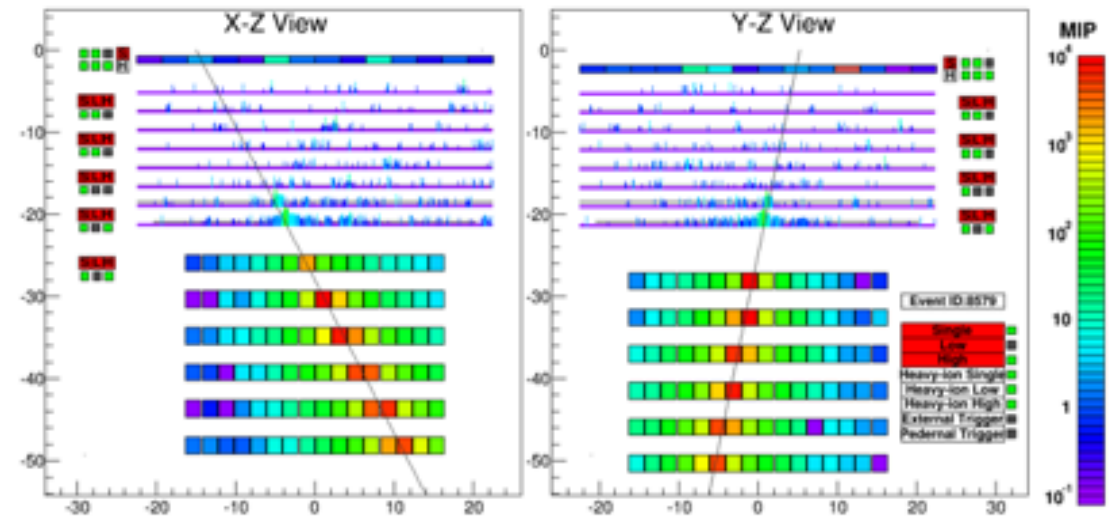
0.2° for gamma-rays $> \sim 50 \text{ GeV}$

Examples of CALET Event Candidates

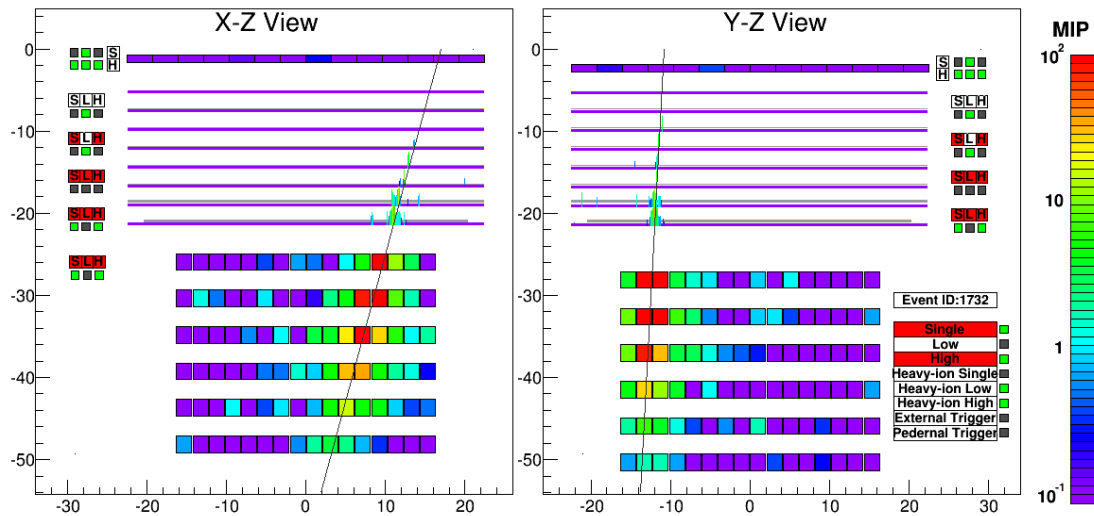
Electron, $E=3.05$ TeV



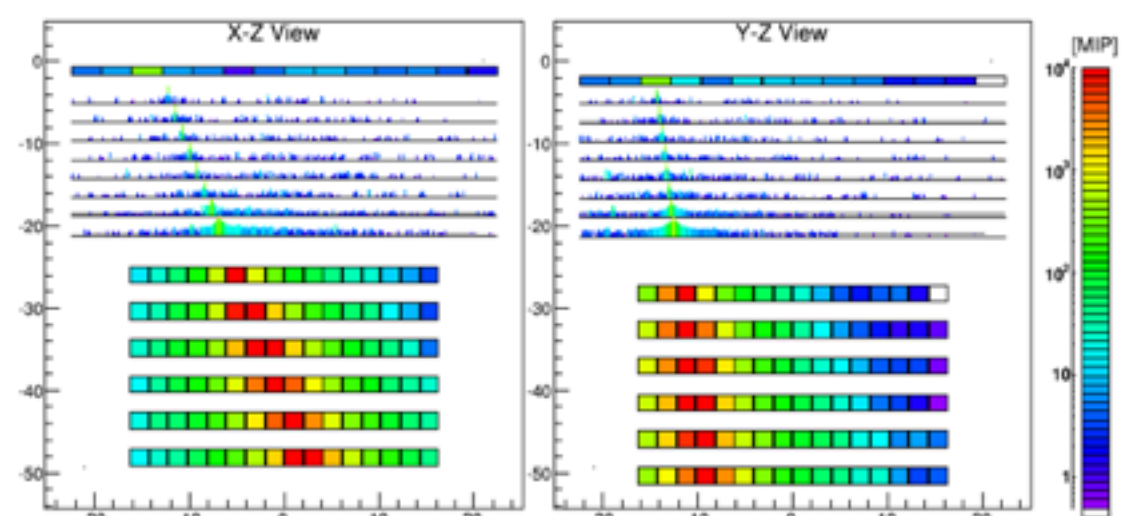
Proton, $E_{TASC}=2.89$ TeV



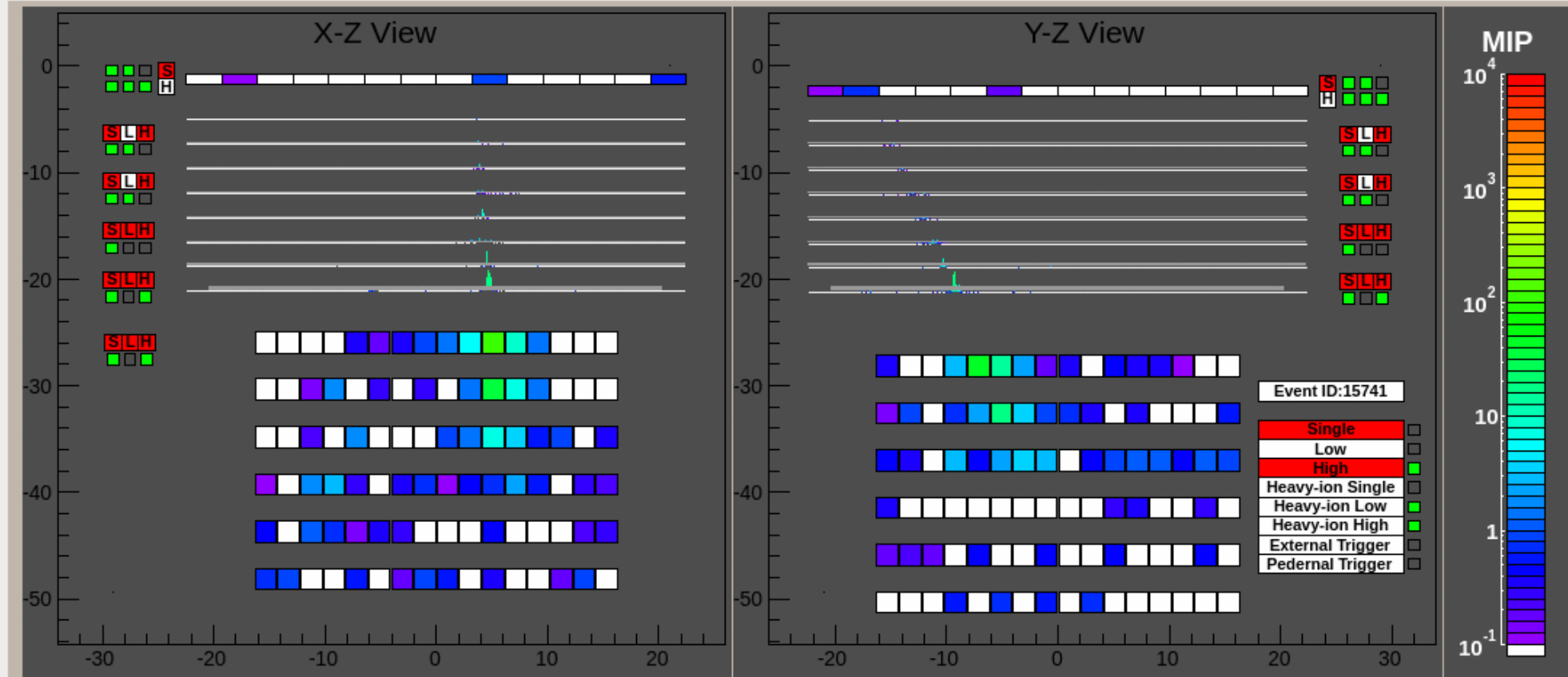
Gamma-ray, $E=44.3$ GeV



Iron, $E_{TASC}=9.3$ TeV



Real Event Monitor: Electron Candidates with Energy above 100 GeV



YYMDDHH:15101303 EventID:1128743511-15741 UTCtime:2015/10/13/03:52:18.41342 KE 7.45[GeV] RE 4.5079[cm] FE 0.0036 Entry: 30883													
No.	dirX	dirY	dirZ	posX	posY	posZ	Chi2_x	Np_x	Chi2_y	Np_y	Zenith[deg]	Azimuth[deg]	Color ID
0	0.07	0.37	0.93	3.26	-17.83	0.00	0.55	7	1.23	8	22.09	-79.64	2
1	0.05	0.37	0.93	3.82	-17.83	0.00	0.31	7	0.29	8	21.92	-77.90	3
2	0.05	0.37	0.93	3.82	-17.83	0.00	0.31	7	0.29	8	21.92	-77.90	4
3	0.07	0.37	0.93	3.25	-17.83	0.00	0.08	8	0.28	8	22.08	-79.67	5

G	RunMode	TrgMode	Pres1	ID-c	Energy	F_E	R_E	K	nIMC_X7X8	nIMC_Y7Y8	nTASC_X1	nIMC_X8	nIMC_Y8	nIncX8-EM	nIncY8-EM	L	nIncX8-SI	nIncY8-SI	L	concX8	concY8
1	101	1	11111	1110	7.446e+00	3.613e-03	4.51	-0.19	1.695e+02	1.362e+02	1.348e+02	6.073e+01	4.777e+01	9.976e-01	2.167e-01	0	9.976e-01	2.167e-01	0	0.6172	0.5631

EntryNum Tracking ☐

MDCTime

EntryID Prescaling

Energy Itgl

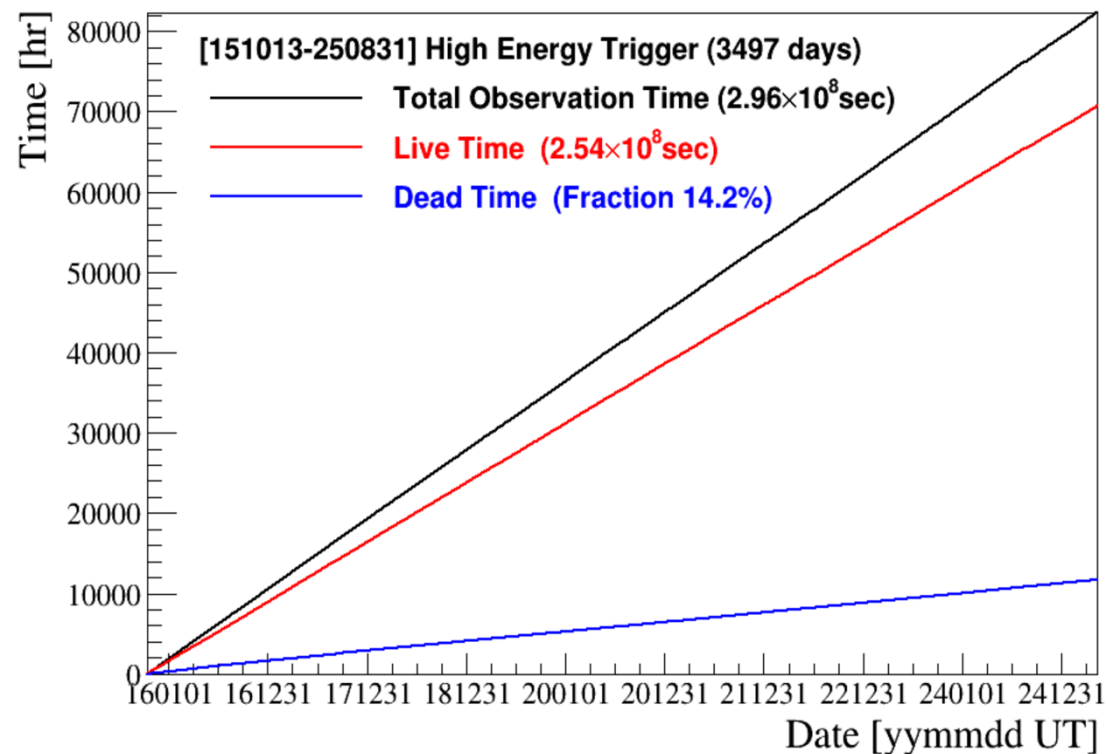


CALET Observations over 10 years

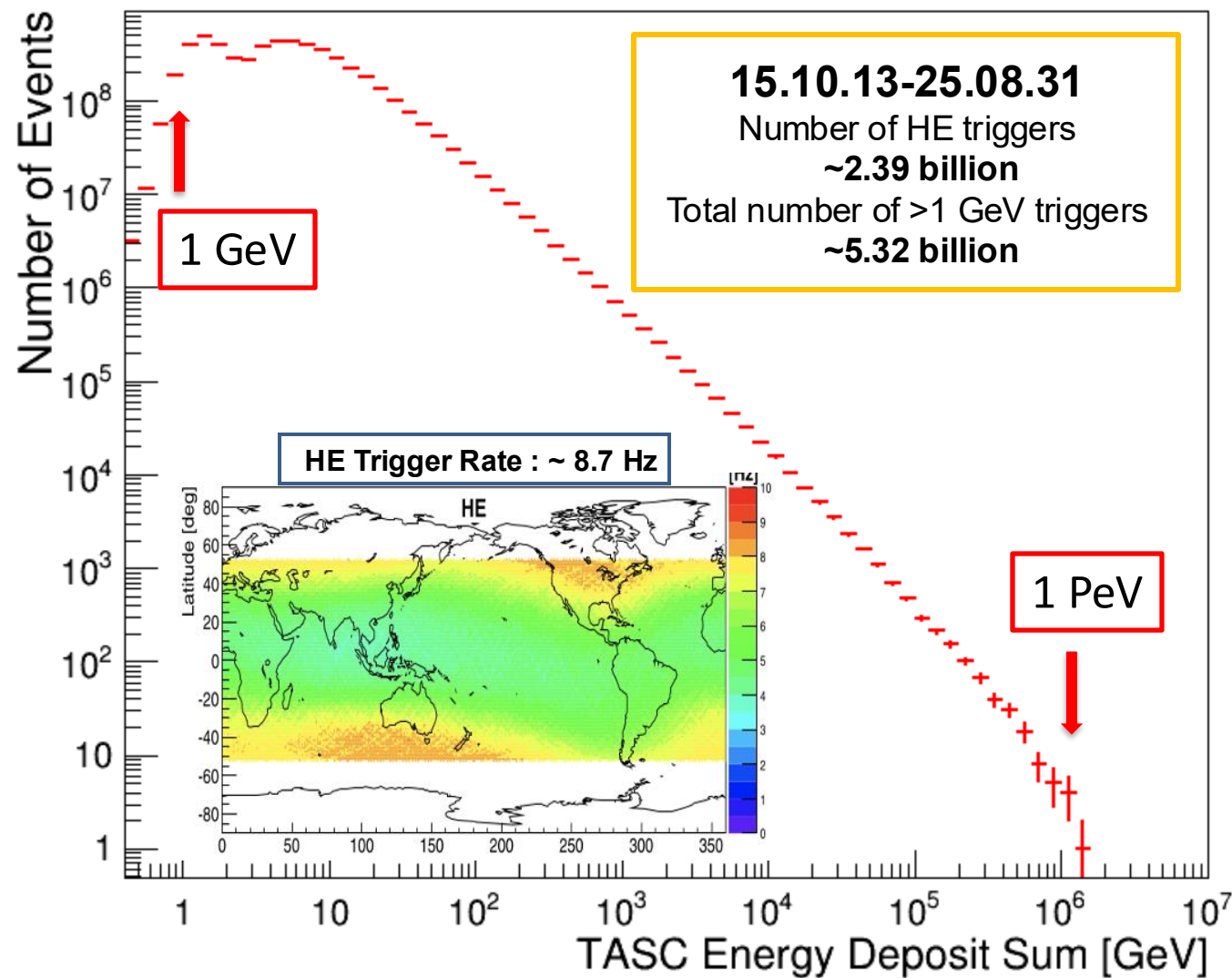
田村(神奈川大)
17aEL104-2

High-energy trigger (> 10 GeV) statistics:

- Orbital operations : **3497 days (~10 years)**
as of August 31, 2025
- Observation time : 2.96×10^8 sec
- Live time fraction: $\sim 86\%$
- Exposure of HE trigger : $\sim 310 \text{ m}^2 \text{ sr day}$



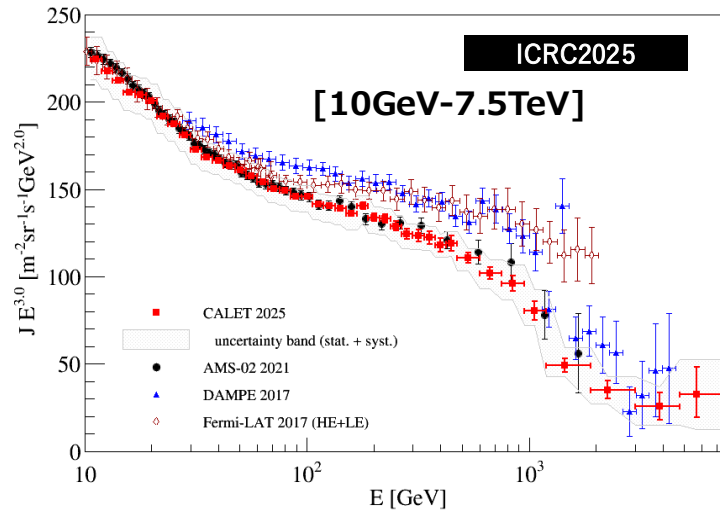
Energy deposit (in TASC) spectrum: 1 GeV-1 PeV



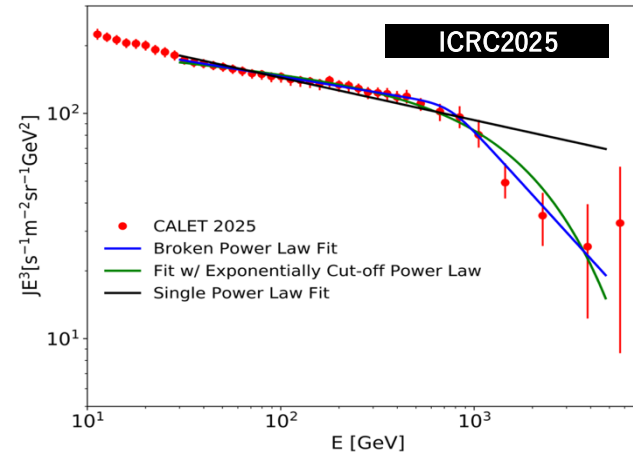
電子+陽電子観測：エネルギースペクトル

- 直接観測の最高エネルギーである7.5 TeVまで観測を達成し、1TeV領域でのスペクトルの軟化を実証。
- 陽電子過剰の原因をパルサーとするモデルにより、電子+陽電子スペクトルを検証。

1 伝播過程におけるエネルギー損失によるスペクトル軟化の理論的予測を実証



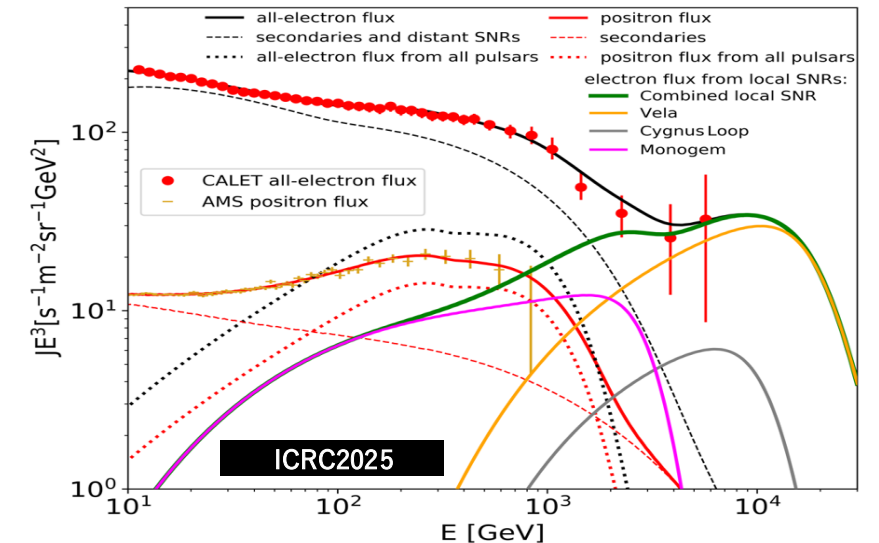
CALETの電子+陽電子観測と他観測結果との比較。TeV以下でAMS-02の観測とは一致



30 GeV-4.8 TeV領域のスペクトルを単一幂（黒線）と折れ曲がりのある関数でフィットした結果。スペクトルの軟化（ $-3.08 \Rightarrow -3.88$ ）を 6.7σ の有意性で検出。

2 陽電子過剰をパルサー起源とするモデルによる、電子+陽電子スペクトルの理解

3 TeV領域での近傍加速源の存在を示唆

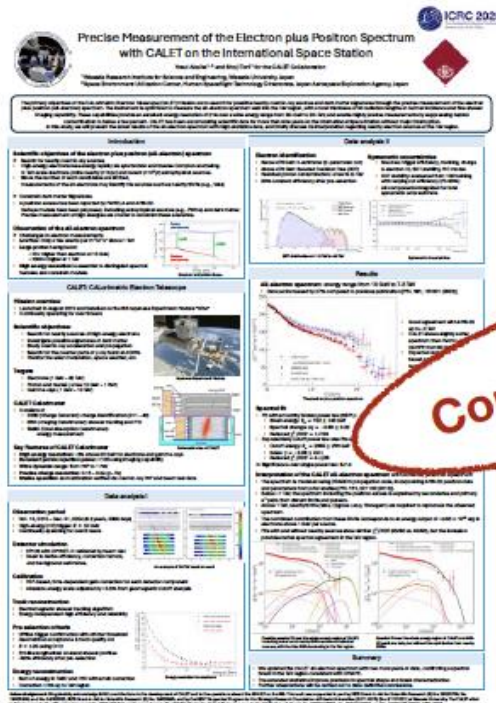


今後の観測課題

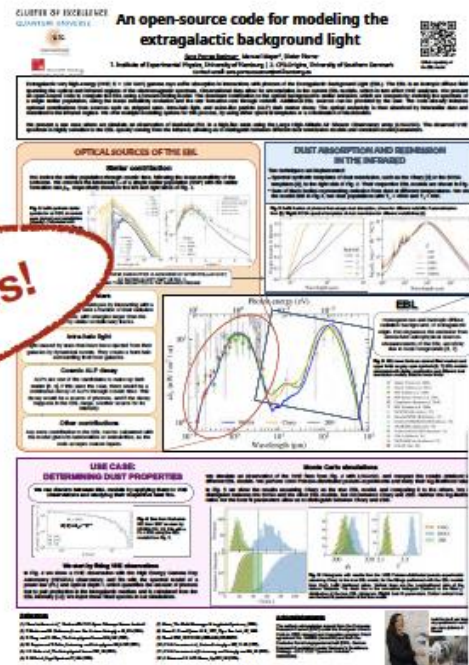
- DAMPE、Fermi- LATとの統計・系統誤差について、相互検証により原因検証
- スペクトル構造の正確な理解に必要な高精度測定を実施することにより、パルサー及び暗黒物質の寄与を定量的に評価

- 陽電子過剰の原因として暗黒物質を起源とするモデルの検討を加えて行う。
- TeV領域で示唆される近傍加速源の存在を有意（ $\sim 5\sigma$ ）に検証する。（+異方性）

Winners of ICRC Poster Prize 2025



Yosui Akaike



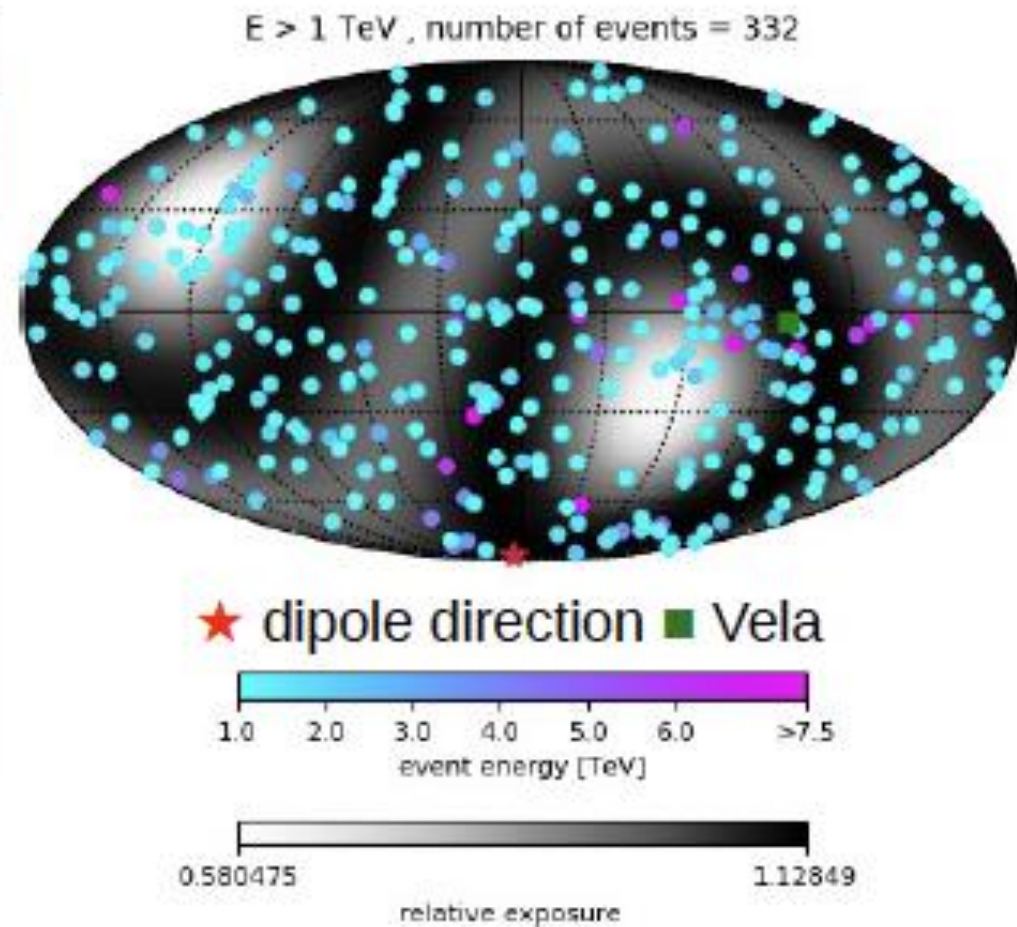
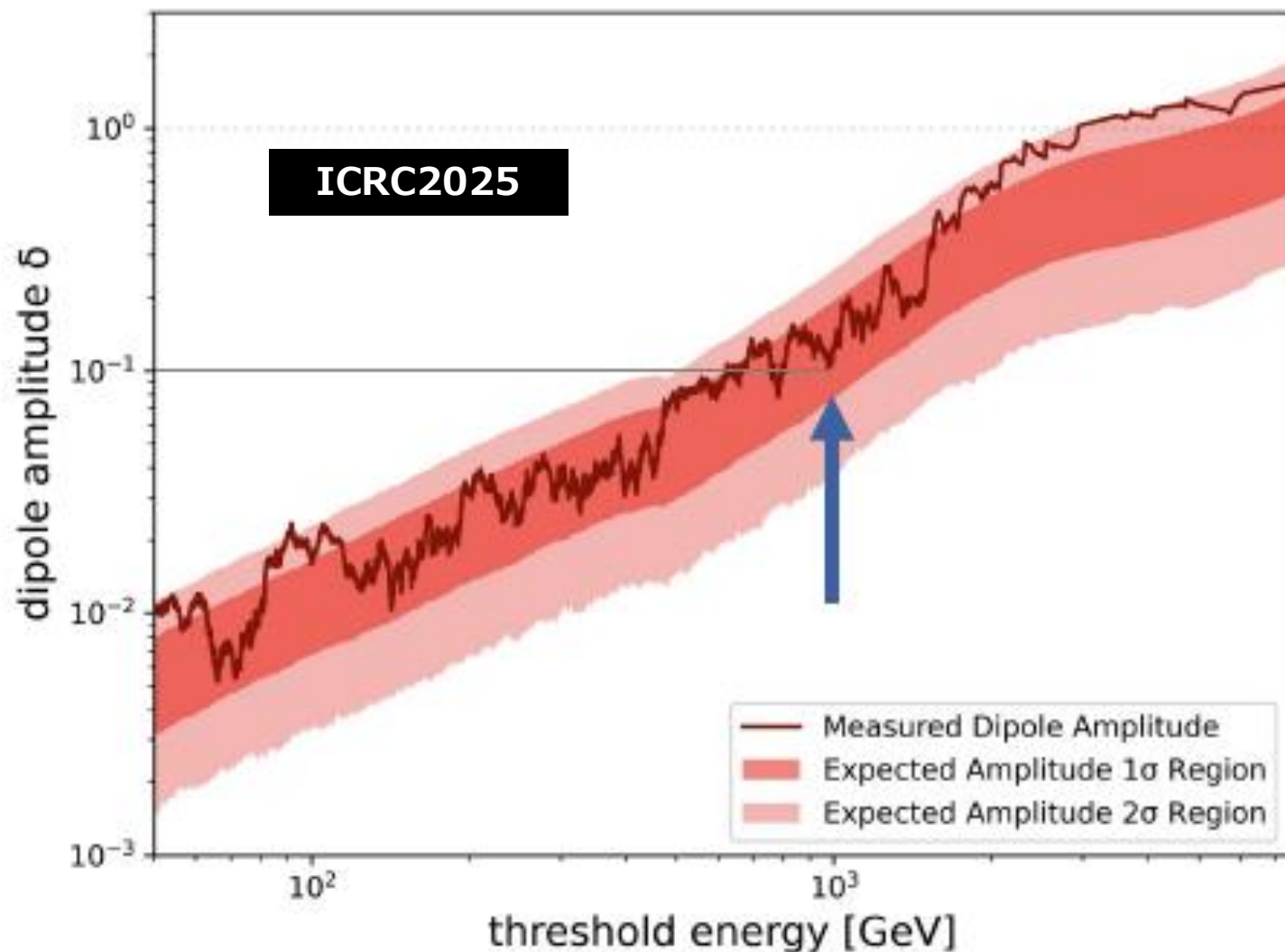
Sara Porras Bedmar

赤池さんがICRC2025のポスタ賞受賞！



Dipole Amplitudeの測定結果とランダムな分布の予測値の比較

1 TeV以上の電子到来方向の分布

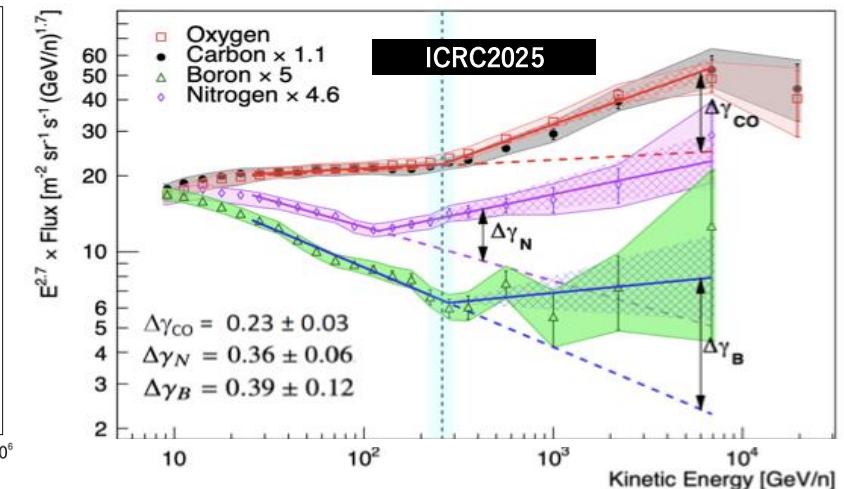
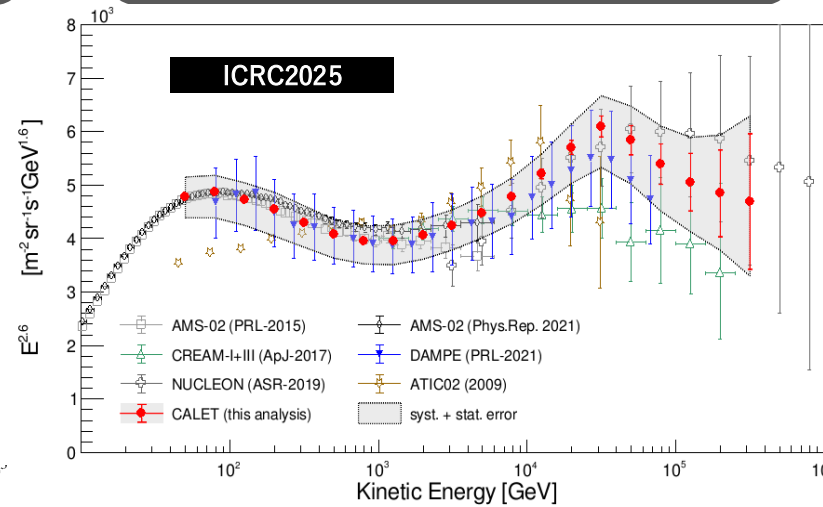
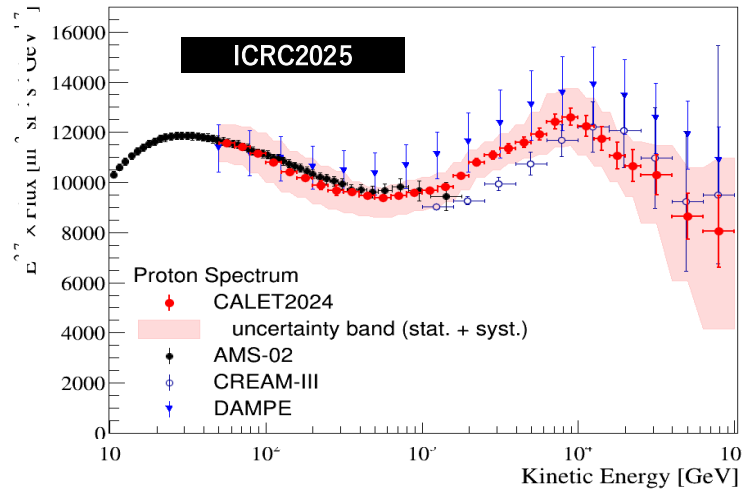


- 陽子・ヘリウム・ホウ素・炭素・酸素についてこれまでの最高エネルギー領域での直接観測を達成
- 従来の宇宙線の概念を変えるエネルギー・スペクトルの構造（硬化、軟化）の高精度観測に成功

陽子：50 GeV-**100** TeV

ヘリウム：40 GeV-**400** TeV

C,O: 8.4GeV/n - **20**TeV/n B,N: 8.4GeV/n - **6.7**TeV/n



今後の観測課題

- さらに高精度かつ高エネルギー領域での世界最高レベルの観測を実施
- 今後の観測により以下のスペクトル構造に関わる問題を解決

Kneeの起源

陽子、ヘリウムの数100TeV領域への観測進展により、加速限界はどこに存在するのか？

軟化、硬化の原因

スペクトルの硬化や軟化のエネルギーは、p,Heと同様にRigidityに依存するのか？

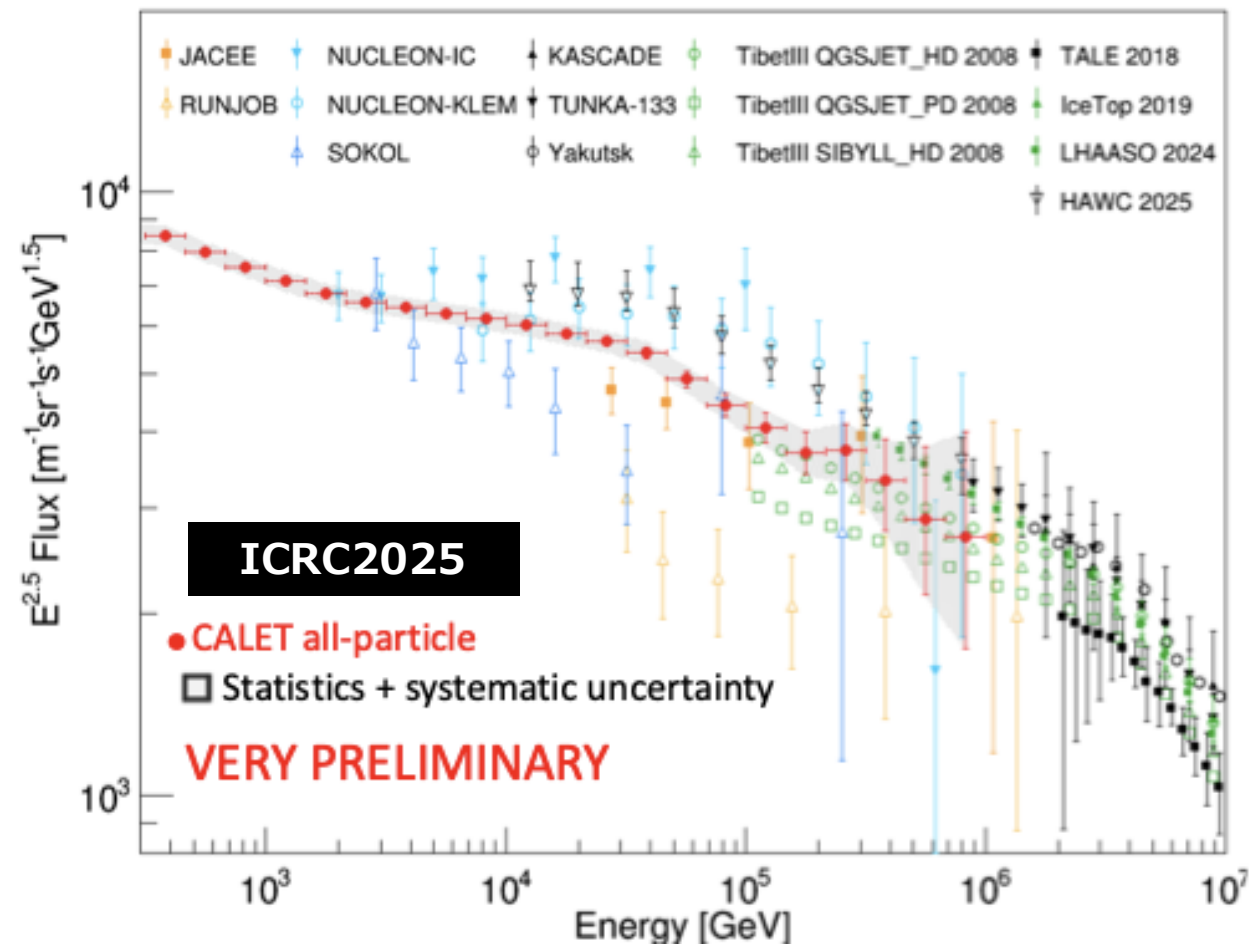
硬化の電荷依存性

スペクトルの硬化は、酸素より重い鉄までの全ての原子核で観測されるのか？

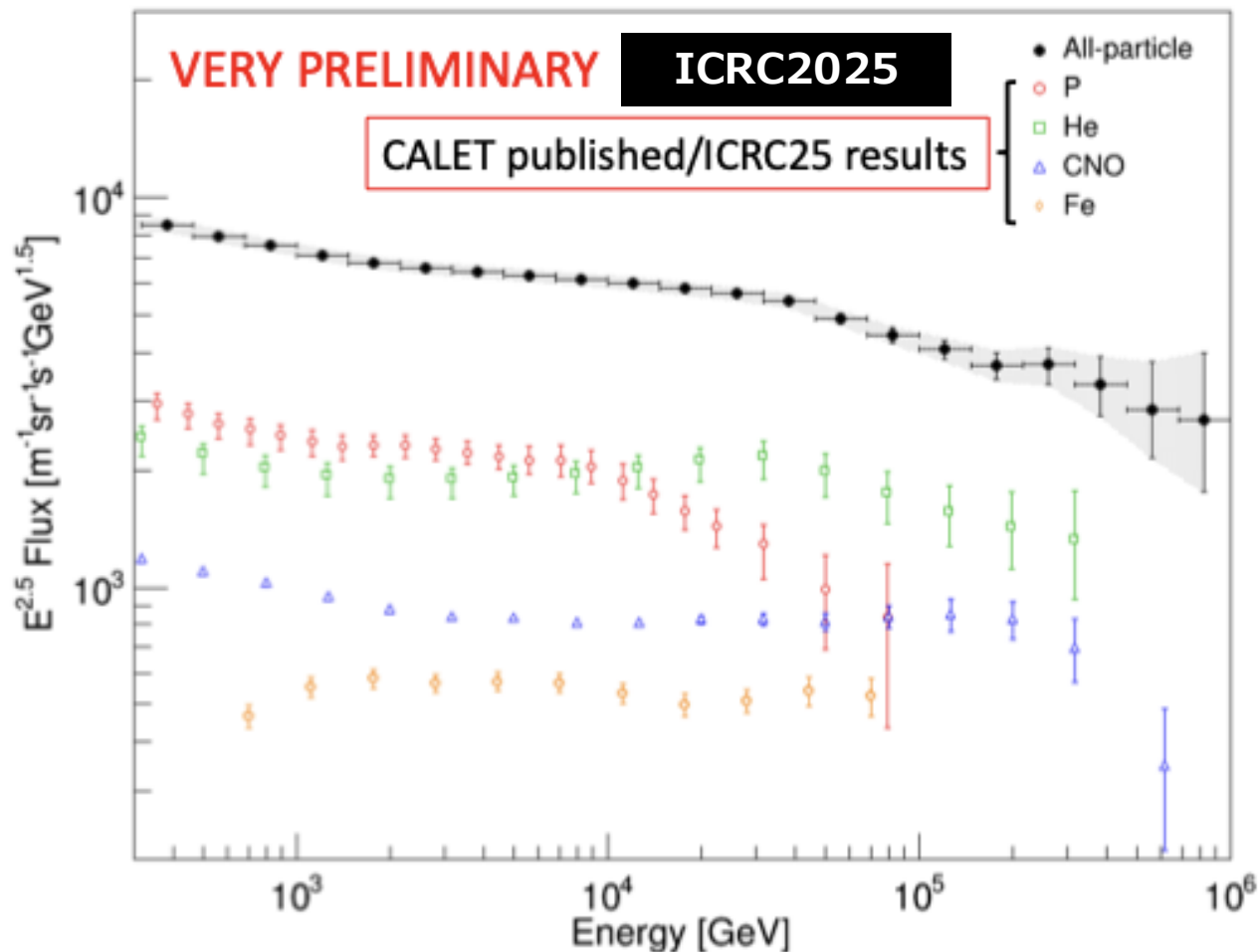
軟化の電荷依存性

スペクトルの軟化は、陽子、ヘリウム以外の原子核でも観測されるのか？

CALETの全粒子スペクトルと他観測 (気球、衛星、地上) の比較



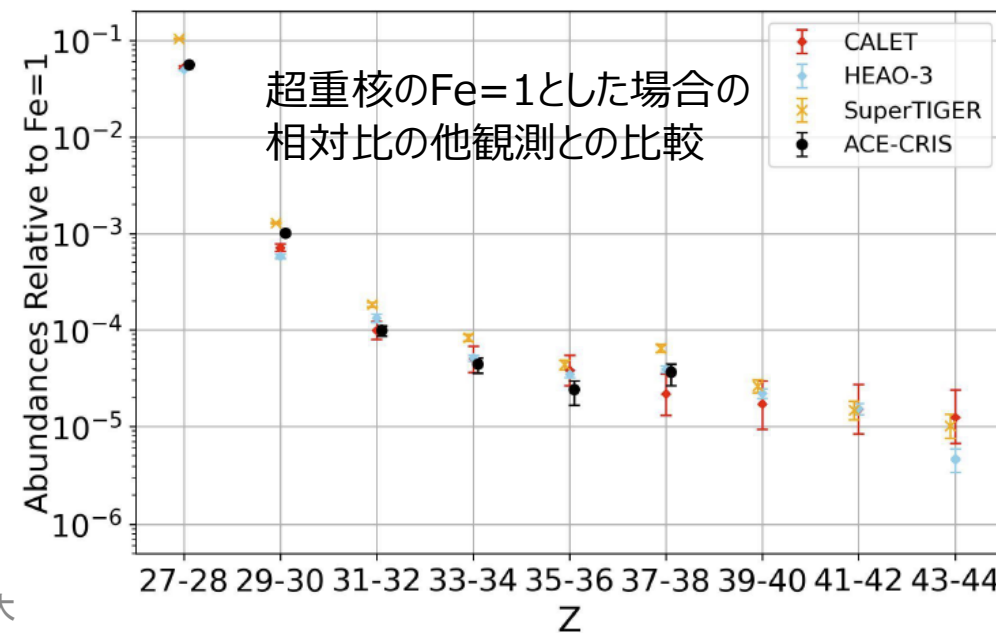
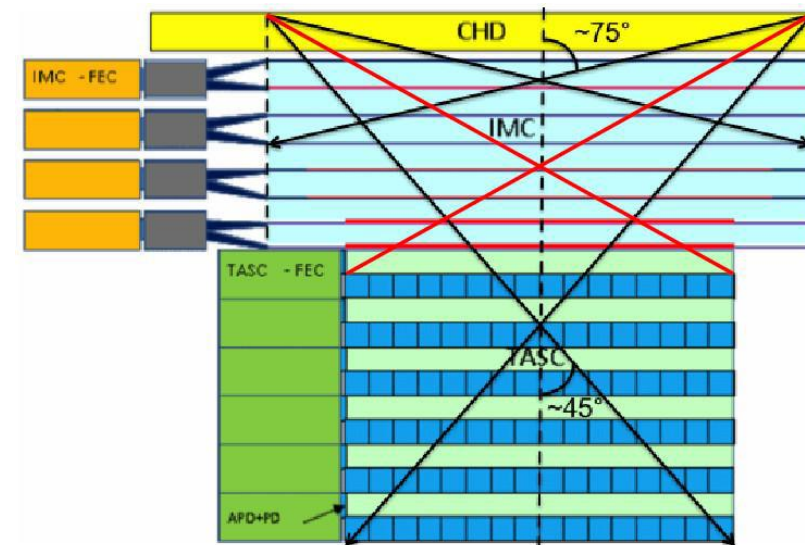
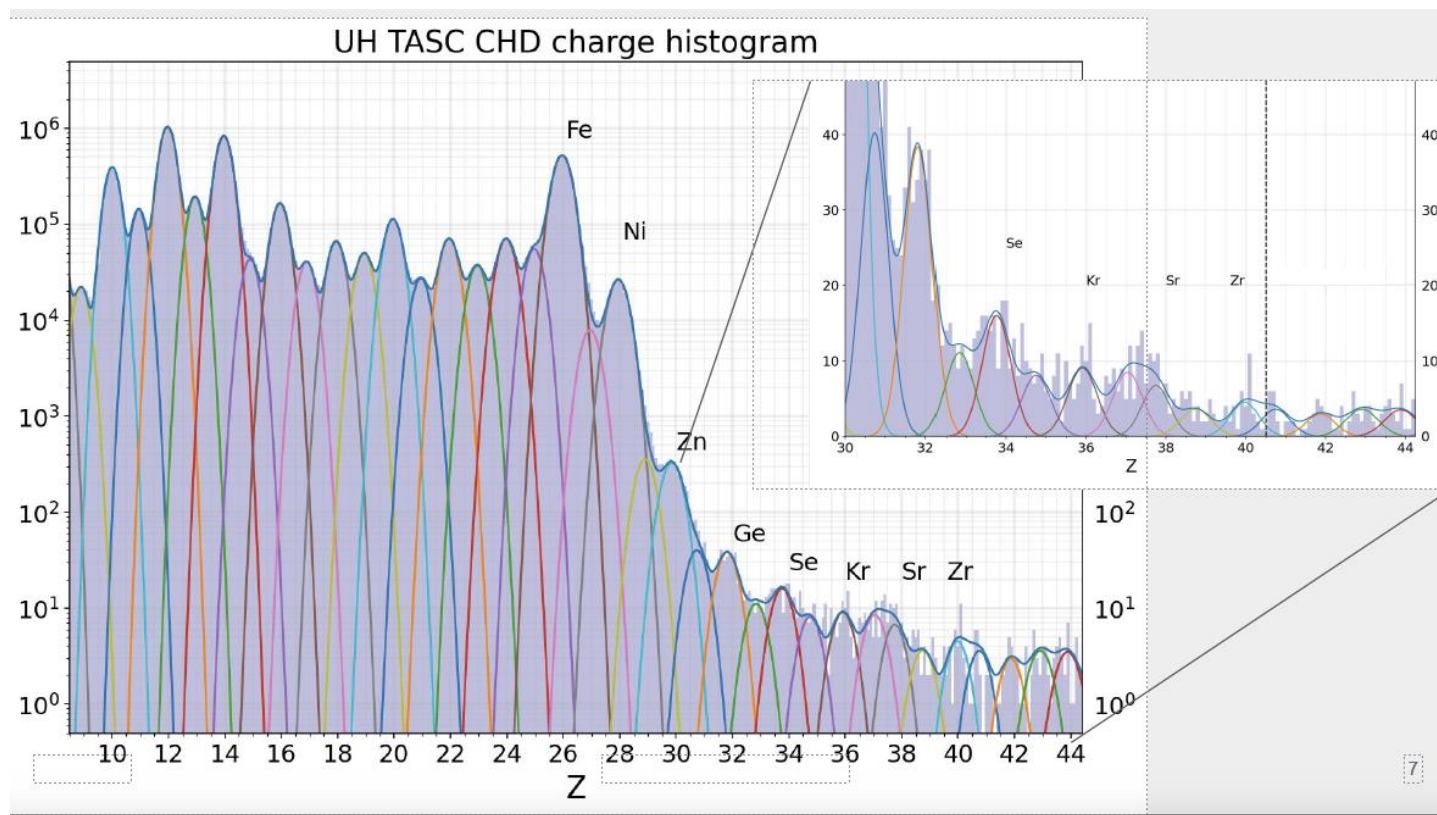
CALETの全粒子と各主要成分のスペクトル



超重核(UH:Z=29-44) の観測成果

The Astrophysical Journal, 988:148 (14pp), 2025 August 1

右図で示すUHトリガー(CHD+IMC)で観測された電荷分布

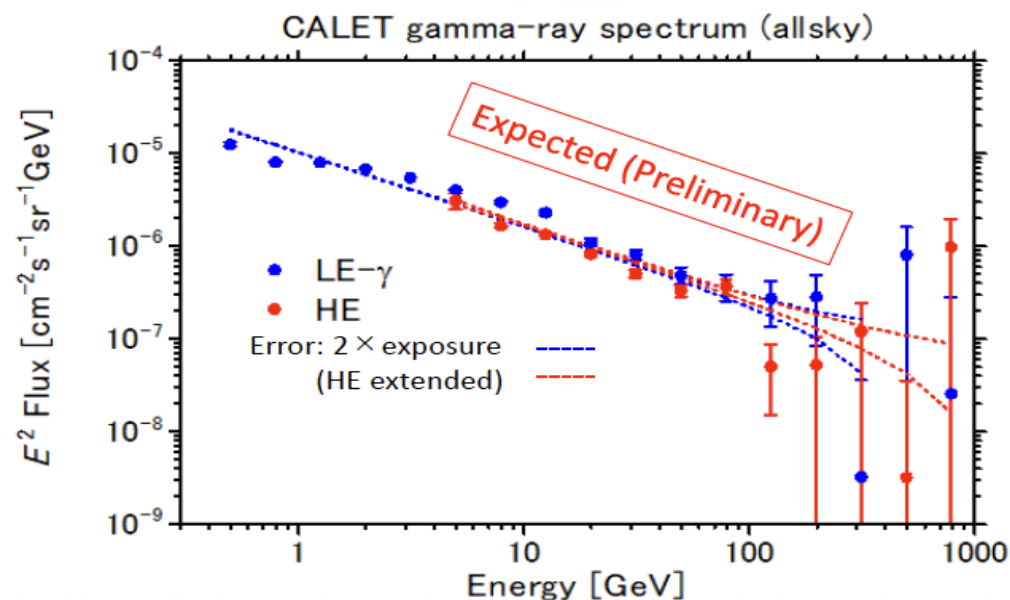
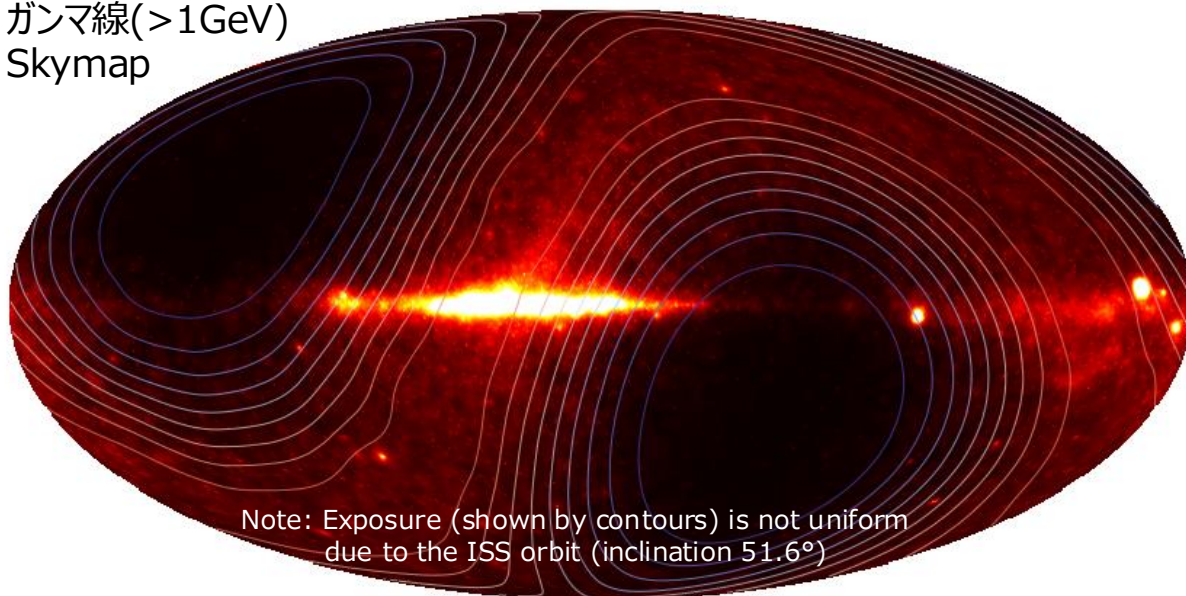




高エネルギーガンマ線とガンマ線バーストの観測成果

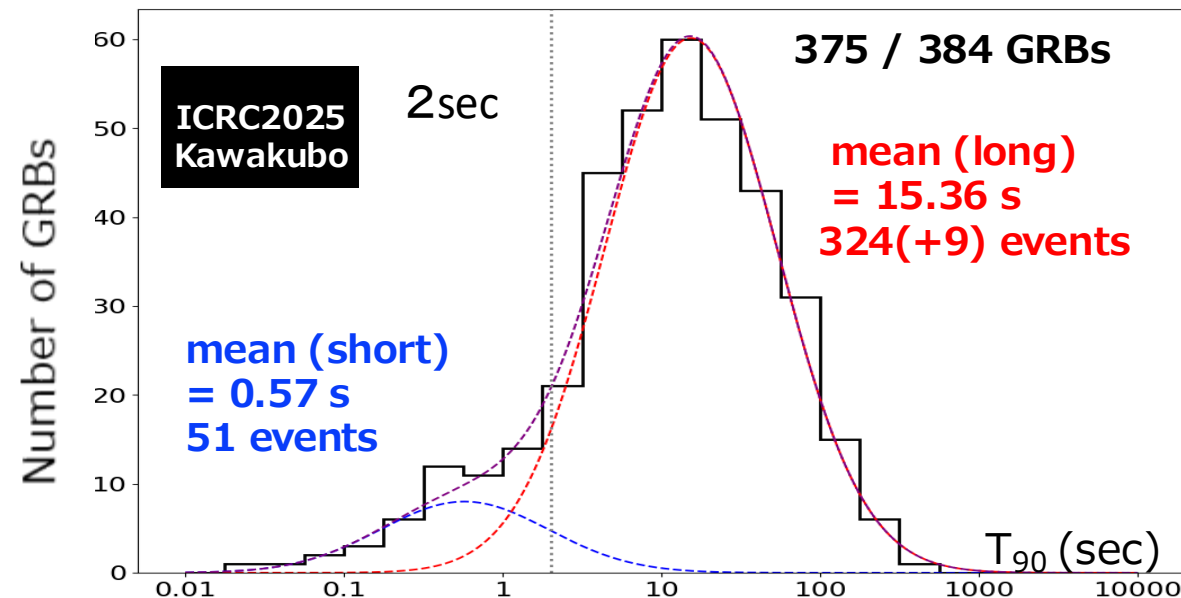
森(立命館大)
17aEL104-5

ガンマ線(>1GeV)
Skymap



As of the end of April 2025, CGBM had been triggered 1888 times since October 5, 2015. 384 out of 1888 triggers were due to GRBs (20 % of total triggers).

T90 distribution of CGBM GRBs



Search for EM counterparts of GW events in O4

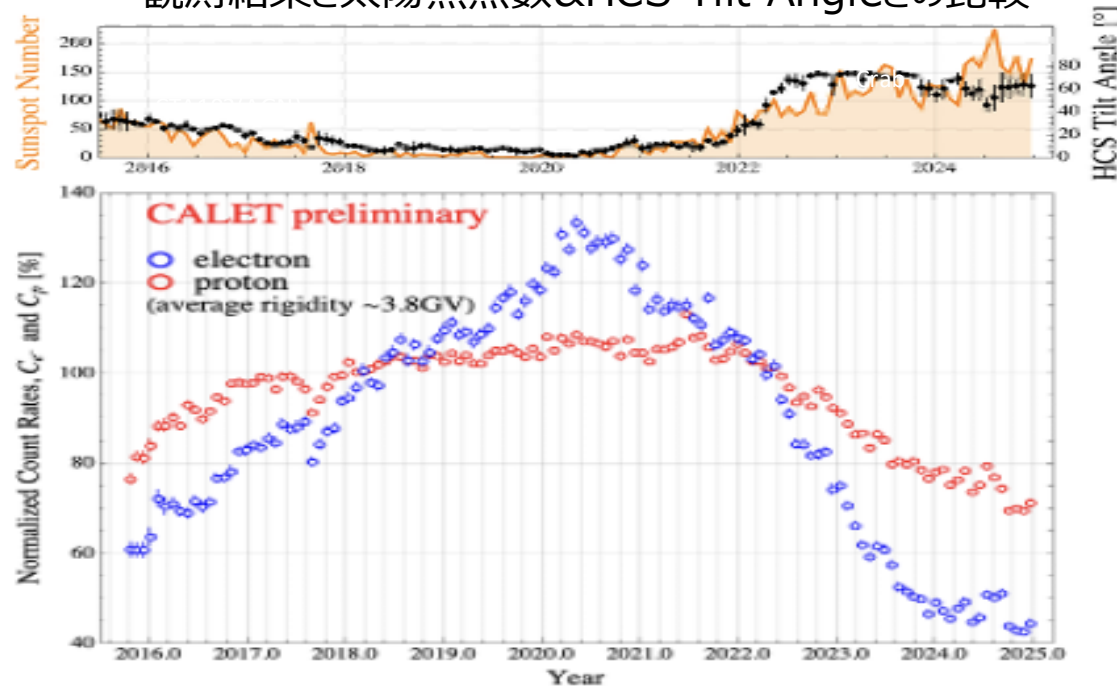
As of the end of April 2025, there was no candidate for EM counterparts of GW events in CGBM data.

	Detection (SNR ≥ 7)	No detection	HV off	Outside of FOV
O4a	0	44	37	4
O4b	1 (S241122a)*	51	47	7
O4c	0	8	7	2
O4 total	1	103	91	13

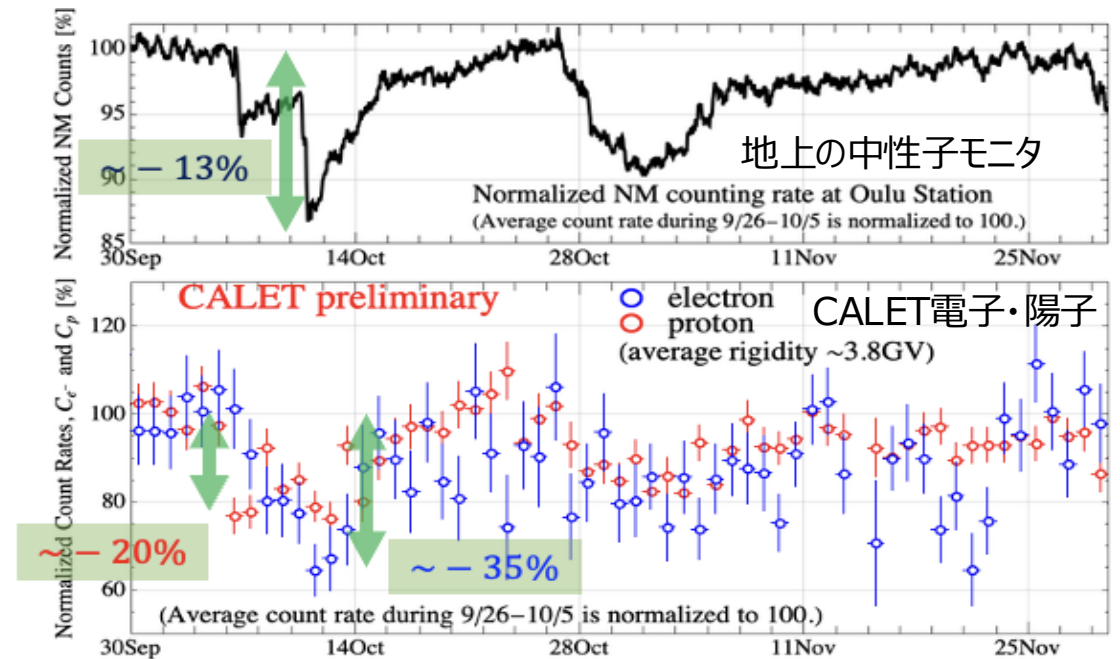
*A solar event coincided with S241122a.

- 太陽活動の極小期(2019 年)を挟んで太陽周期 (～11 年) のほぼ一周に亘って、電子、陽子の太陽変動の観測を実施
→ その電荷(正負)依存性から、太陽変動のドリフトモデルによる理解を世界に先駆けて行っている。
- これまでに、中性子モニタに矛盾しないタイミングでフォーブッシュ減少*の検出を確認した。電子と陽子による違いがあることが示唆されている。

観測結果と太陽黒点数&HCS Tilt Angleとの比較



2024年10月におけるフォーブッシュ減少の観測



今後の観測課題

- 太陽磁場の極性が正から負に反転する次の太陽半周期での観測を継続により、電荷依存性を解明するドリフトモデルの確立し、10 GeV/Z以下の銀河宇宙線への影響を理解
- 新たなデータ解析と観測により、10 GeV/Z以下の重原子核成分の太陽変動を観測することにより、ドリフトモデルの高精度に検証



これまでの成果のまとめ（最新版のみ）

CALETの観測性能と軌道上運用

- Stable operations over a range of observing modes continue
 - Continuous on-orbit updates from ground calibration **Astropart. Phys. 100, 29 – 37 (2018)**
 - Operational over 3200 days with 85% live time, total triggers over 4.5 billion **Astropart. Phys. 91, 1 – 10 (2017)**

宇宙線（電子・陽電子、陽子、原子核）

- All-electron spectrum in the range 10.6 GeV – 7.5 TeV **PRL 131, 191001 (2023)**
- Proton spectrum in the range 50 GeV – 60 TeV **PRL 129, 101102 (2022)**
- Carbon and oxygen spectra in the range 10 GeV/n – 2.2 TeV/n **PRL 125, 251102 (2020)**
- Iron spectrum in the range 50 GeV/n – 2 TeV/n **PRL 126, 241101 (2021)**
- Nickel spectrum in the range 8.8 GeV/n – 240 GeV/n **PRL 128, 131103 (2022)**
- Boron spectrum in the range 8.4 GeV/n – 3.8 TeV/n **PRL 129, 251103 (2022)**
- Helium spectrum in the range 40 GeV – 250 TeV **PRL 130, 171002 (2023)**
- Cr and Ti spectra in the range 10 – 250 GeV/n **PRL 135, 021002 (2025)**
- Abundances of heavy and ultra-heavy nuclei ($13 \leq Z \leq 44$) **ApJ 988:148 (2025)**

浅野(ICRR)
17aEL104-8

ガンマ線、ガンマ線バースト、重力波天体

- Calorimeter instrument response characterized **ApJS 238:5 (2018)**
- GW follow-up and GRB analysis with CGBM & CAL **ApJL 829:L20 (2016)**
- Counterpart search in LIGO/Virgo O3 with CGBM & CAL **ApJ 933:85 (2022)**
- Updates **in progress**

太陽変調、宇宙天気予報（REP）

- Charge-sign dependence of Solar modulation **PRL 130, 211001 (2023)**
- Heliospheric transients such as relativistic electron precipitation, etc. **GRL 52, e2024GL113660 (2025) + 3 papers in 2024**

新井(東北大)
17aEL104-9

お知らせ

2025年11月15日に、早稲田大学小野記念講堂において
「国際宇宙ステーション搭載CALET10周年記念シンポジウム」
を開催します。みなさまぜひご参加ください。
シンポジウムの詳細は、近日中にHPにて広報を予定しています。

謝辞

- ✓ つくば宇宙センター（TKSC）におけるCALET運用への完璧なサポートについて、JAXA運用担当のスタッフの皆さんに感謝します。
- ✓ 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。



これまでの経緯と今後の観測計画

JAXAによるCALET観測の承認プロセスと審査会の経緯

2015年8月： こうのとり 5 号機によって打ち上げ、きぼう船外実験プラットフォーム #9に設置

2015年11月： 定常運用 (2015年12月～2018年3月)

2017年11月： 定常運用終了審査及び後期運用移行審査

2018年 4月： 後期運用 (1) (2018年4月～2019年3月)

2019年 3月： 後期運用 (1) 終了審査及び再延長可否審査

2019年 4月： CALETプロジェクト終了審査

2019年 4月： 後期運用 (2) (2019年4月～2021年3月)

2020年12月： 後期運用 (2) ISAS理学委員会科学成果評価

2021年 3月： 後期運用 (2) 終了審査及び再延長可否審査

2021年 4月： 後期運用 (3) (2021年4月～2024年12月)

2022年 3月： 後期運用 (3) 中間確認会 (その1)

2023年 3月： 後期運用 (3) 中間確認会 (その2)

2023年11月： 後期運用 (3) ISAS理学委員会科学成果評価

2024年 3月： 後期運用 (3) 終了審査／後期運用(4)計画審査【本審査】

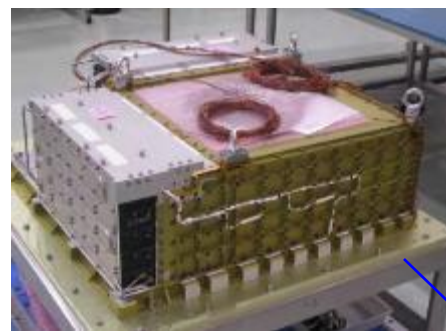
2024年 4月： 後期運用 (4) (2025年1月～2030年12月)

2024年 3月： 2030年までの延長観測の承認！

科研費基盤Sに採択 (R6-R10)

CALETプロジェクトと機器構成

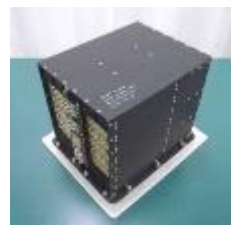
- CALETは日本が主導する日本初の本格的な宇宙線観測ミッションである。
- 世界に先駆けて宇宙空間においてカロリメータによるTeV領域での高エネルギー宇宙線の観測を実現している。
- 装置開発、製造および観測運用は、JAXAと早稲田大学の協定(覚書)にて実施されている。
- 米国NASA, イタリアASIとの共同プロジェクトで、NASAは軌道上運用のリソース提供、ASIは高圧電源装置を支給している。



CHD/IMC [CAL]



TASC [CAL]



HV-BOX



GPSR-ANT



HXM#1, #2 [CGBM]



CHU(buffle付)[ASC]



DPU[ASC]



MDC



CIRC【運用終了】



SGM [CGBM]



GBM-EBOX[CGBM]

イタリア側支給