

# ISS搭載CALETによる 観測成果ハイライトと今後の展望

# 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





# The CALET Collaboration



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

- |  |   |   |
|--|---|---|
| 1) University of Florence, Italy                     | 15) ISAS, JAXA, Japan                             | 29) NIT(KOSEN), Gifu College, Japan             |
| 2) INFN Florence, Italy                              | 16) University of Maryland, Baltimore County, USA | 30) CREST II, NASA/GSFC, USA                    |
| 3) WISE, Waseda University, Japan                    | 17) Kanagawa University, Japan                    | 31) University of Maryland, College Park, USA   |
| 4) JEM Utilization Center, JAXA, Japan               | 18) Hirosaki University, Japan                    | 32) Ritsumeikan University, Japan               |
| 5) ICRR, University of Tokyo, Japan                  | 19) Shibaura Institute of Technology, Japan       | 33) GCSE, Waseda University, Japan              |
| 6) IFAC, CNR, Italy                                  | 20) ASE, Waseda University, Japan                 | 34) University of Denver, USA                   |
| 7) University of Siena, Italy                        | 21) NIPR, Japan                                   | 35) NICT, Japan                                 |
| 8) INFN Pisa, Italy                                  | 22) Yokohama National University, Japan           | 36) Chicago University, USA                     |
| 9) Washington University, St. Louis, USA             | 23) Shinshu University, Japan                     | 37) Nihon University, Japan                     |
| 10) Heliospheric Physics Laboratory, NASA/GSFC, USA  | 24) Tokyo Metropolitan University, Japan          | 38) Osaka Metropolitan University, Japan        |
| 11) Astroparticle Physics Laboratory, NASA/GSFC, USA | 25) NAOJ, Japan                                   | 39) NITEP, Osaka Metropolitan University, Japan |
| 12) Louisiana State University, USA                  | 26) Aoyama Gakuin University, Japan               | 40) QST, Japan                                  |
| 13) University of Padova, Italy                      | 27) IPNS, KEK, Japan                              | 41) Nagoya University, Japan                    |
| 14) INFN Padova, Italy                               | 28) University of Pisa                            | 42) Ibaraki University, Japan                   |

Guest Investigator: L. W. Blum (University of Colorado, USA), M. Teramoto (Kyushu Institute of Technology, Japan), Y. Kato (Tohoku University, Japan)



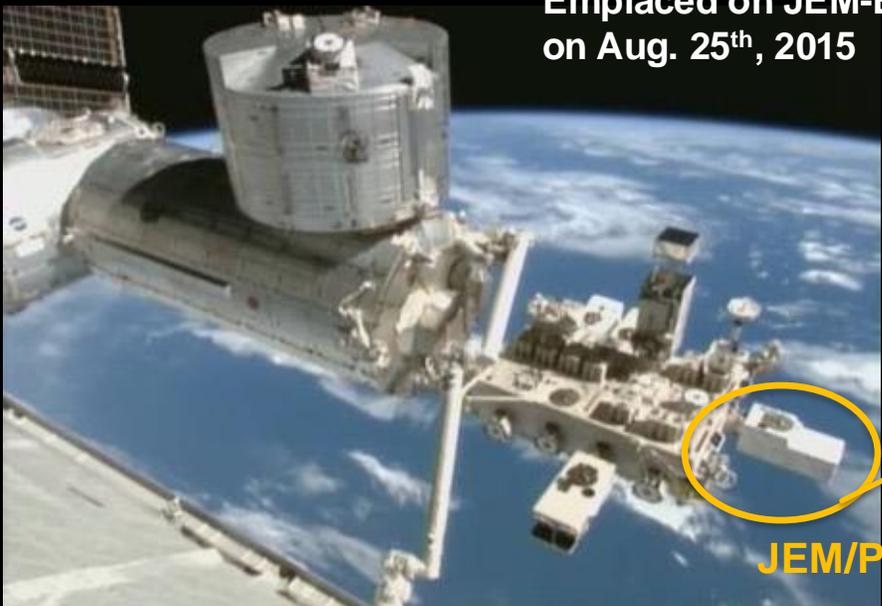
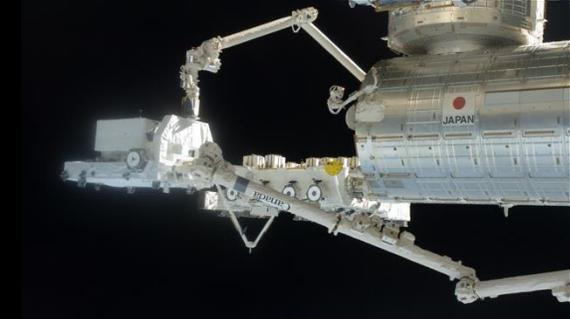
# CALET Payload



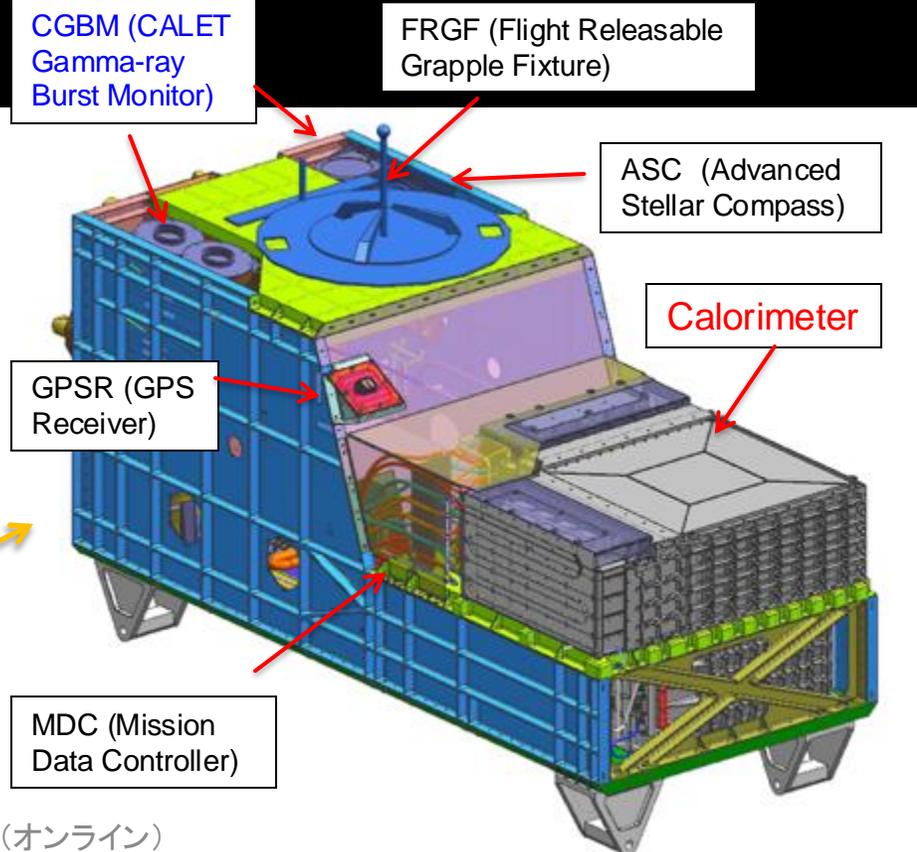
Kounotori (HTV) 5

Launched on Aug. 19<sup>th</sup>, 2015  
by the Japanese H2-B rocket

Emplaced on JEM-EF port #9  
on Aug. 25<sup>th</sup>, 2015

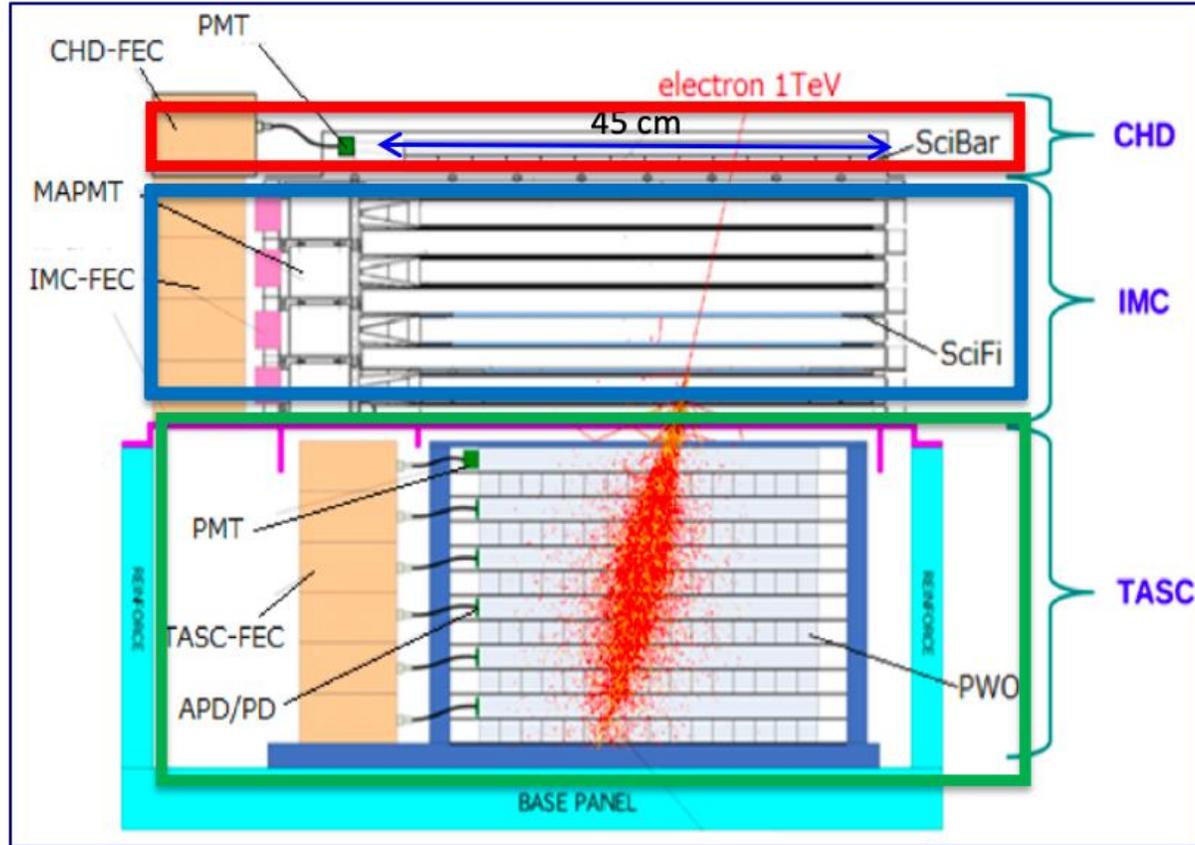


JEM/Port #9





# 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 x 0.2  $X_0$  + 2 x 1  $X_0$  ), 0.1  $\lambda_I$
- **Pre-shower development and imaging**

## TASC – Total Absorption Calorimeter

- 6 x 2 (X,Y) x 16 lead tungstate ( $\text{PbWO}_4$ ) logs:
  - 27  $X_0$ , 1.2  $\lambda_I$
- **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,  $\gamma$
- $\sim 30\text{-}35\%$  for protons, nuclei

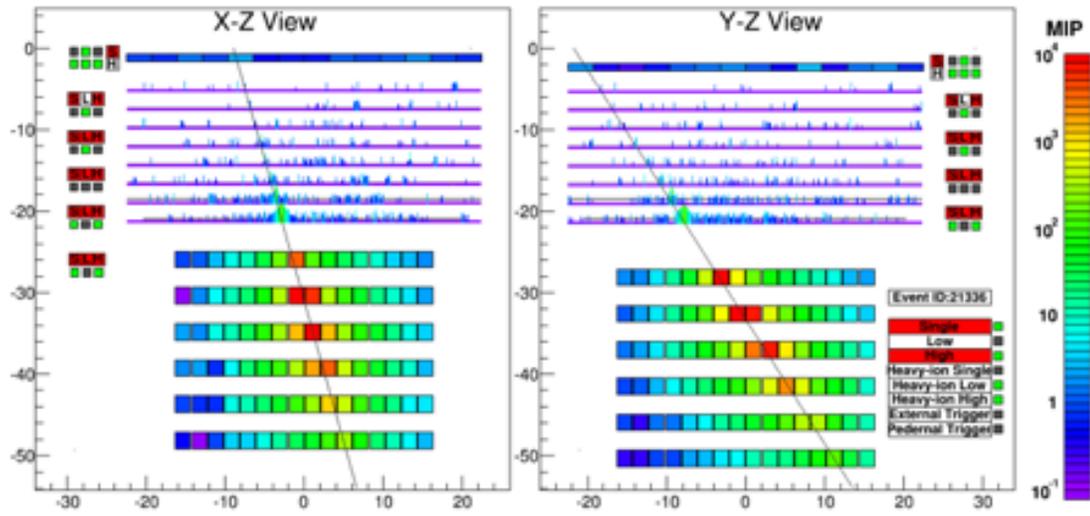
### • e/p separation: $\sim 10^5$

- **Charge resolution:** 0.15-3 e (p-Fe)
- **Angular resolution:**
  - 0.2° for gamma-rays  $> \sim 50 \text{ GeV}$

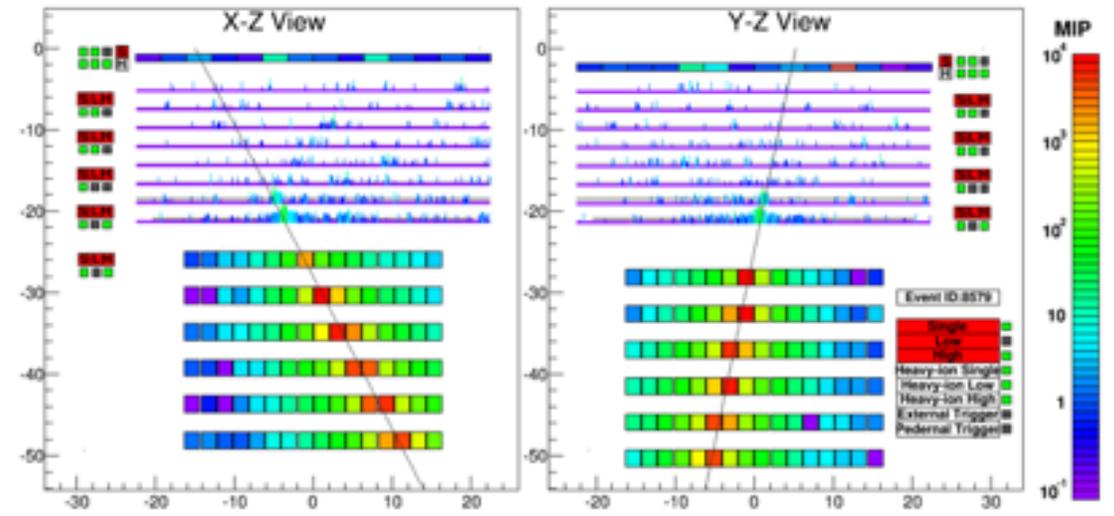


# Examples of CALET Event Candidates

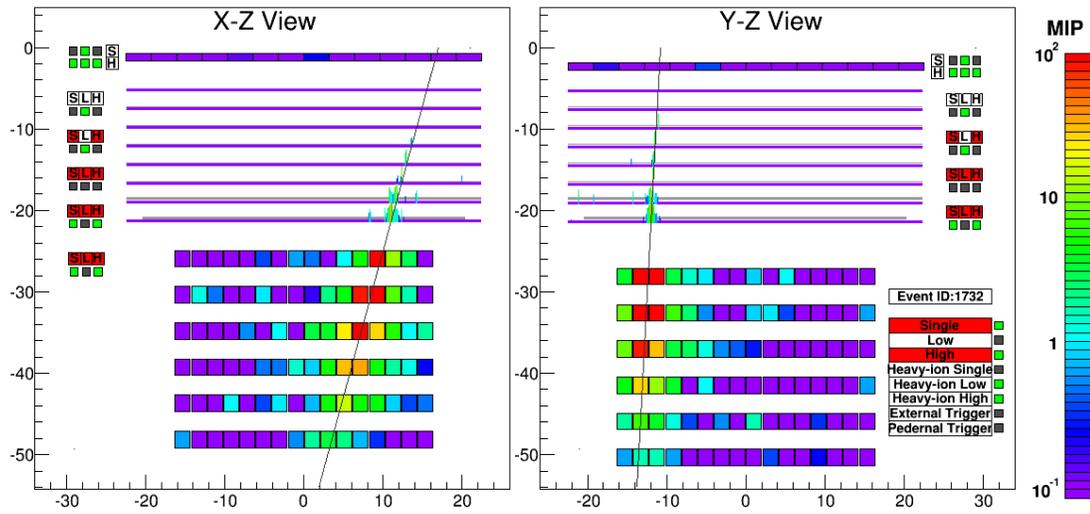
Electron,  $E=3.05$  TeV



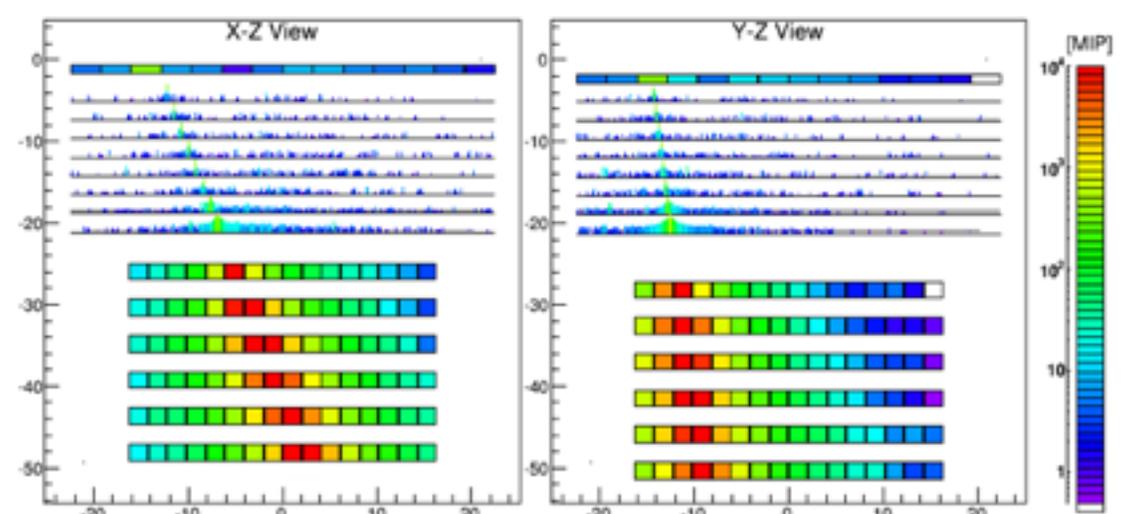
Proton,  $E_{TASC}=2.89$  TeV



Gamma-ray,  $E=44.3$  GeV



Iron,  $E_{TASC}=9.3$  TeV

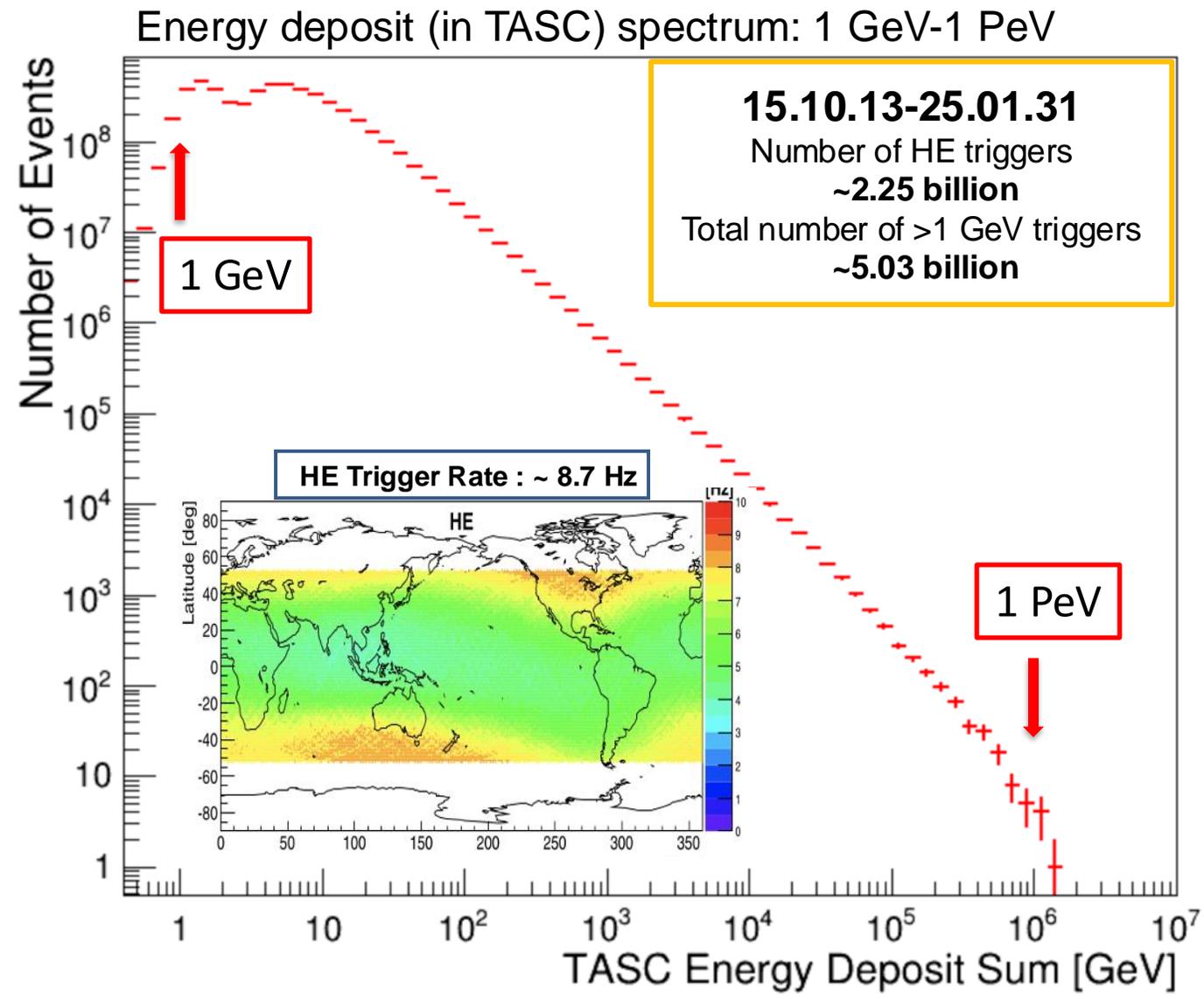
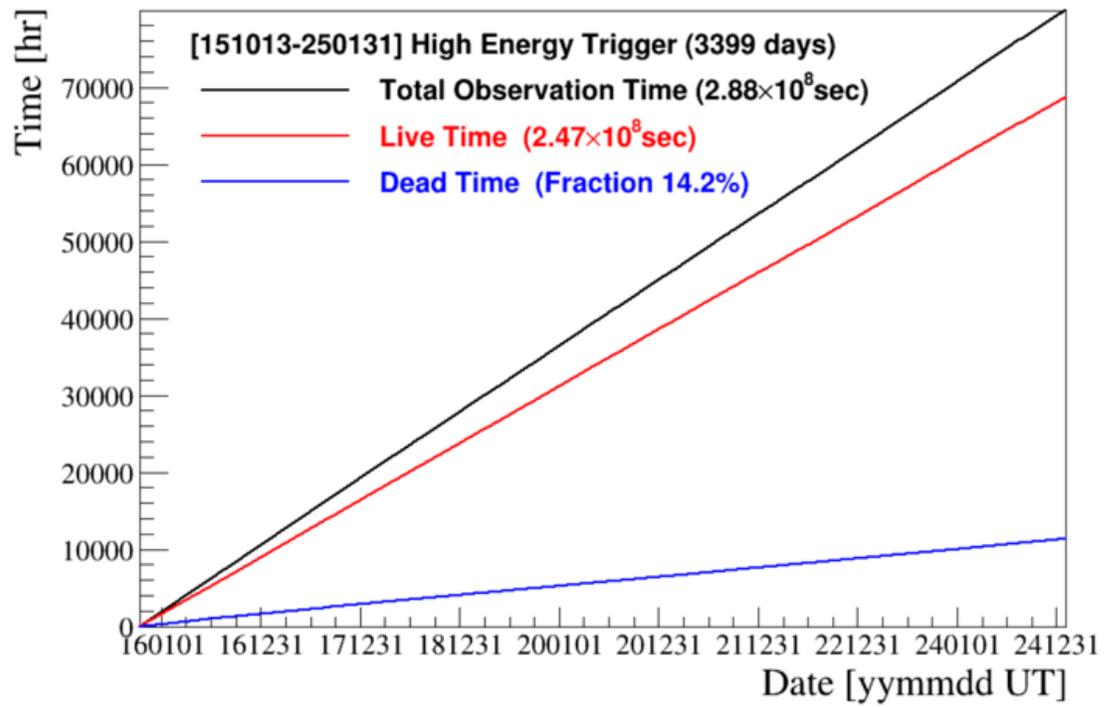




# CALET Observations over > 9 years

K.Kobayashi  
18aW1-2

- High-energy trigger (> 10 GeV) statistics:
- Orbital operations : **3399 days (>9 years)** as of January 31, 2025
  - Observation time :  $2.88 \times 10^8$  sec
  - Live time fraction:  $\sim 86\%$
  - Exposure of HE trigger :  $\sim 300 \text{ m}^2 \text{ sr day}$

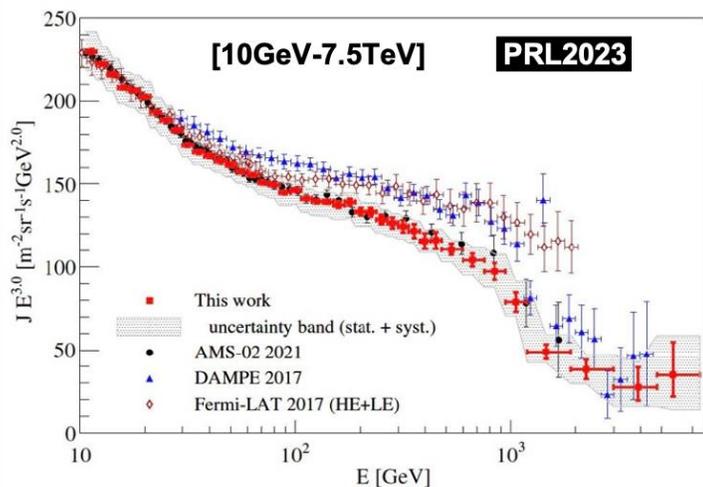




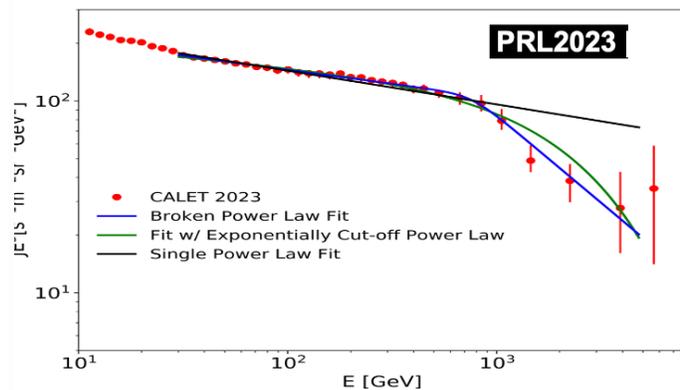
# 電子+陽電子観測の成果

- 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
- 宇宙線研究に従来の理解を検証し新たな理解をもたらす以下の成果を挙げる。

## 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



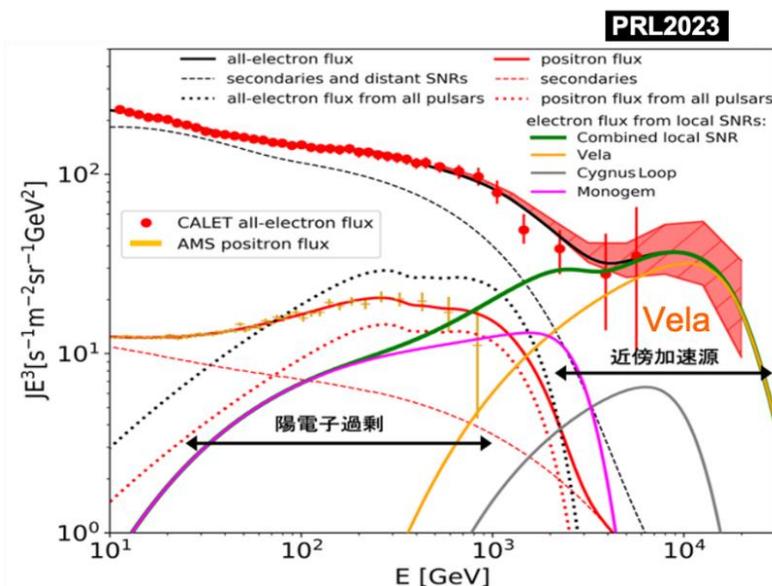
CALETの電子+陽電子観測と他観測結果との比較。TeV以下でAMS-02の観測とは一致



30 GeV-4.8 TeV領域のスペクトルを単一冪（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（ $-3.15 \leftrightarrow -3.91$ ）を $6.9\sigma$ 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（ $\sim 5\sigma$ ）（誤差：赤色領域）に検証する。

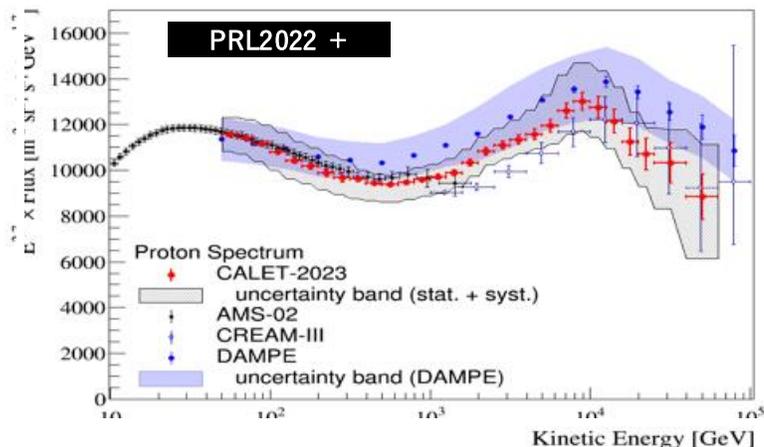


# 陽子・原子核のスペクトル観測の成果

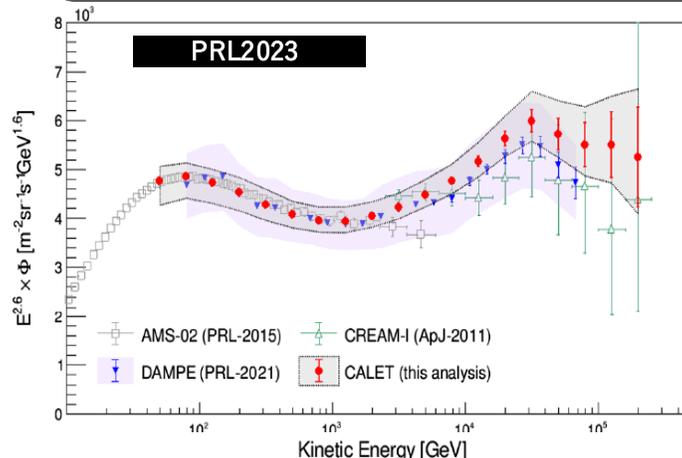
Y.Akaike, 18aW1-2  
+ New: Sub-Fe, Fe

- 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

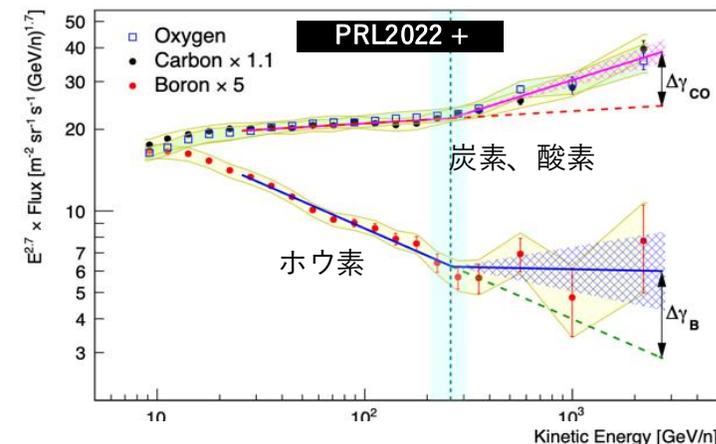
陽子 : 50 GeV-60 TeV



ヘリウム : 40 GeV-250 TeV



炭素・酸素・ホウ素 : 8.4 GeV/n-3.8 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？

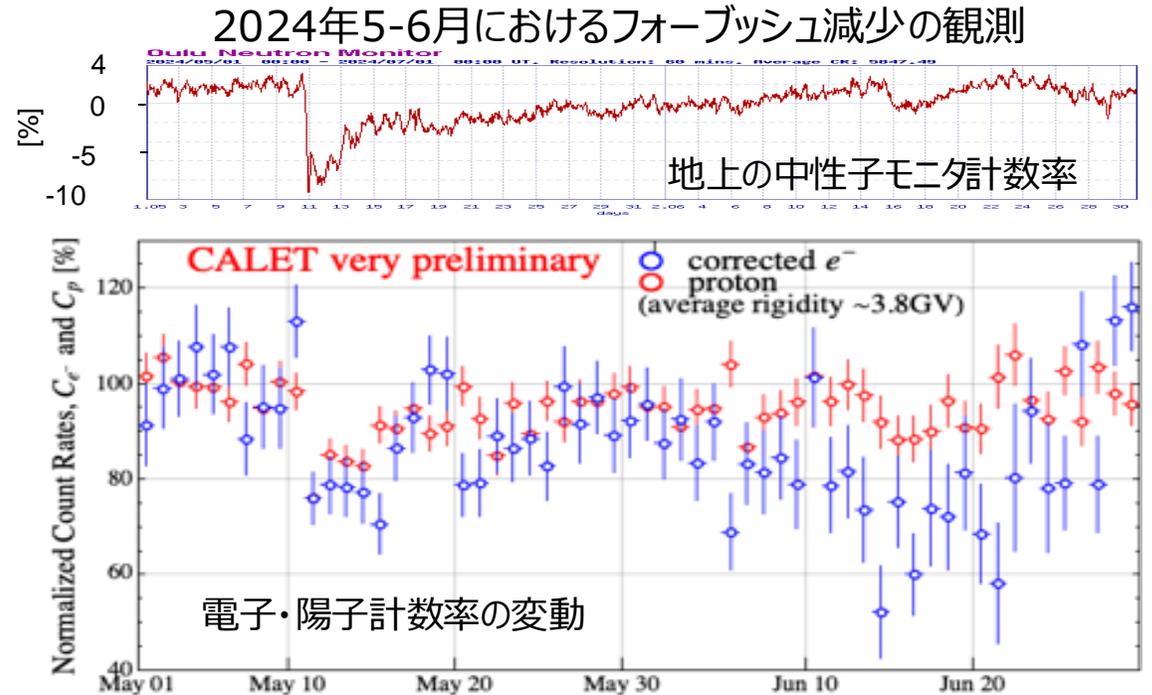
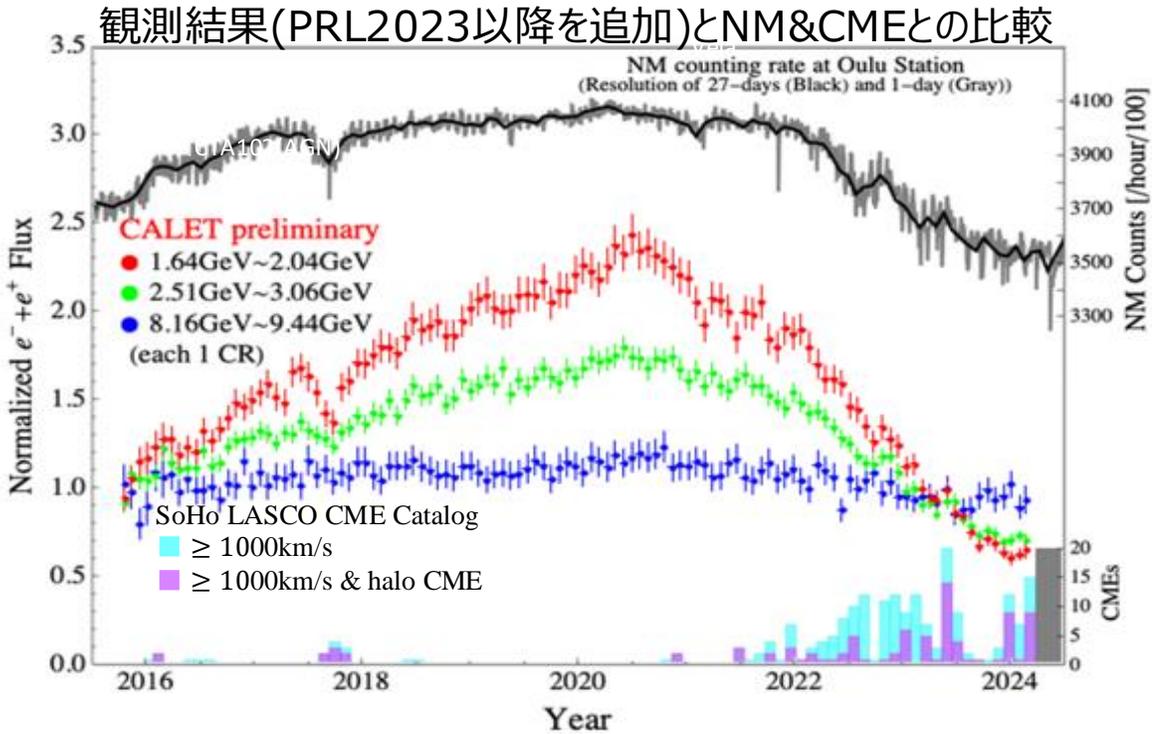
### 軟化の電荷依存性

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？



# 太陽変調の観測成果

- 太陽活動の極小期(2019年)を挟んで太陽周期(～11年)のほぼ一周期に亘って、電子、陽子の太陽変調の観測を実施  
→ その電荷(正負)依存性から、太陽変調のドリフトモデルによる理解を世界に先駆けて試行
- 2024年5月には複数のXクラスフレアが発生し、5つのCMEがマージした状態で地球に到来し、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。通常よりも長いRecovery timeの特徴も一致する。現象論的説明をこえる物理過程を検証



## 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調を観測することにより、ドリフトモデルの高精度に検証

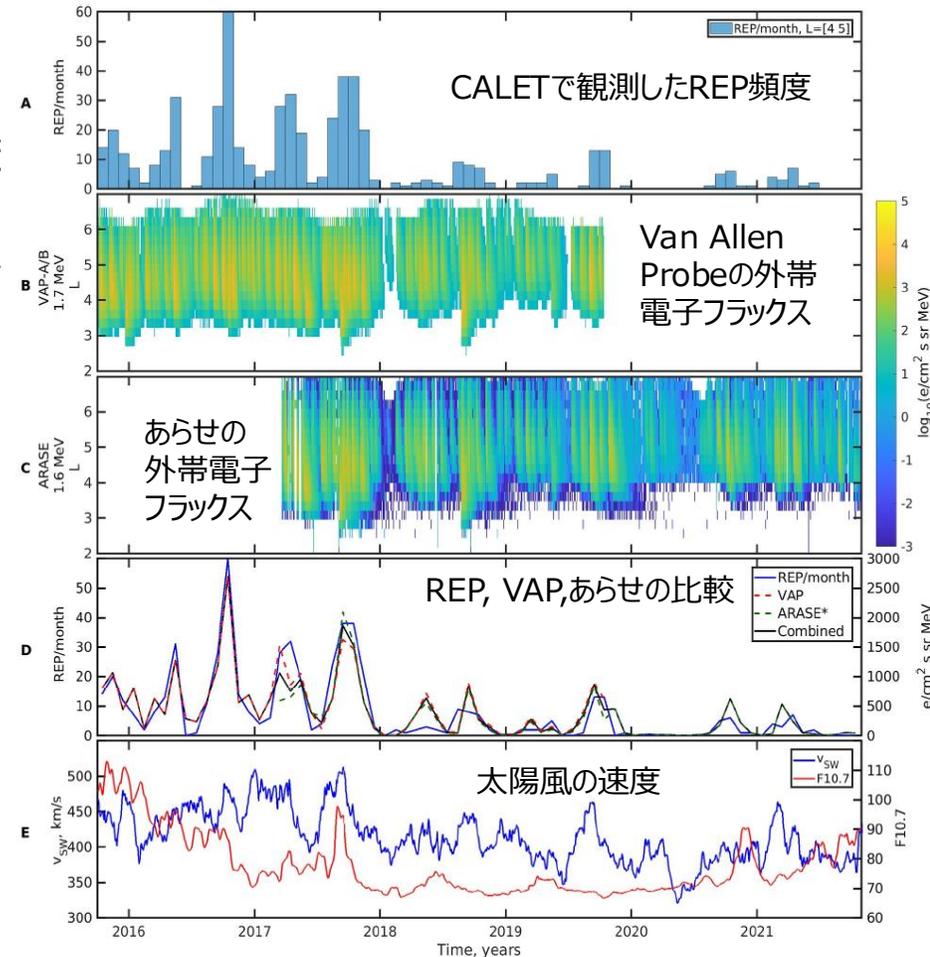
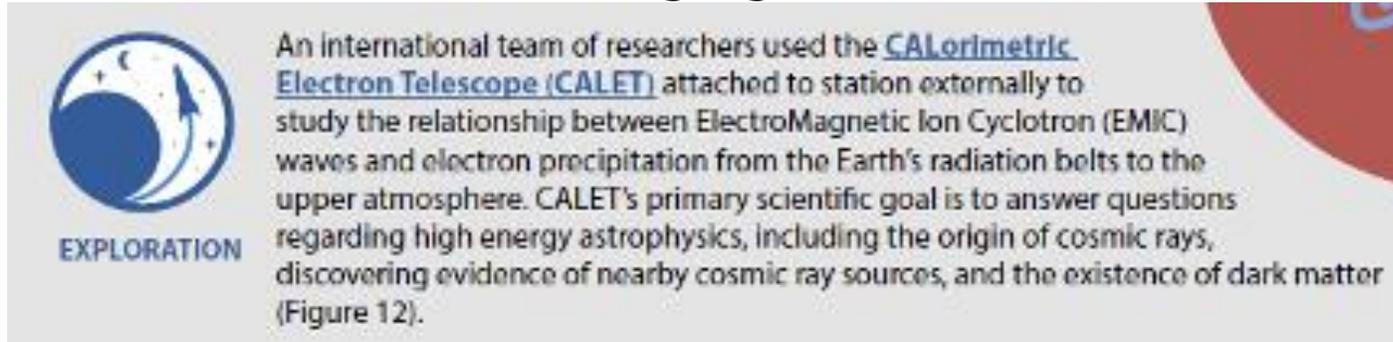


# 宇宙天気予報の観測成果

- 放射線監視に用いているCHD カウントレートの短時間（数秒～ 数10 秒）変動の計測から **Relativistic Electron Precipitation (REP)** を検出
- その成因が太陽フレアと関連するプラズマ波動の一種であるEMIC 波動によるものであることが判明
- 「その場観測」を行うあらせ衛星、Van Allen Probes との同時観測により、上述とは成因が異なるREP を観測

太陽風速度の季節変化に依存して、あらせ・Van Allen Probeで観測された放射線帯外帯電子フラックスとREP発生頻度が同期して変動することが明らかになった [GRL 51, e2024GL109673 (2024)]

## ISS Annual Highlightsに採択



## 今後の観測課題

- 太陽活動の極大期を含む長期観測によるREP の検出により、太陽活動との関連性を統計的に確立
- 他衛星との同時観測結果により、REP成因を解明し、宇宙天気予報 の高精度化に貢献



# CALETの運用状況：ISS Science Top Newsに採択！

CALETは2015年10月の観測開始以来9年以上に亘って所期の観測性能を維持して、継続的に観測を続けている。

## Station Science Top News: Feb. 27, 2025

### Performance report for cosmic ray observatory

Researchers report on-orbit performance from the first 8 years of operation of the International Space Station's cosmic ray observatory, CALET. The instrument has provided valuable data on cosmic ray, proton, and helium spectra; produced a gamma-ray sky map; observed gamma-ray bursts; and searched for gravitational wave counterparts and solar effects.

The JAXA CALorimetric Electron Telescope or CALET helps address questions such as the origin and acceleration of cosmic rays and the existence of dark matter and nearby cosmic-ray sources. The instrument also could help characterize risks from the radiation environment that humans and electronics experience in space.



The CALorimetric Electron Telescope instrument is visible on the far left of the space station's Kibo laboratory module.  
JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency)/Norishige Kanai

ISSの運用が終了する予定の2030年12月まで観測が承認されている。



# これまでの成果のまとめ (最新)

M,Mori. 18aW1-3  
+ Gamma-ray, GRB

## 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 submitted to **PRL (2025)**
- Abundances of heavy and ultra-heavy nuclei ( $13 \leq Z \leq 44$ ) in preparation for **ApJ (2025)**

## 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**

## 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心より感謝します。
- ✓ 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。