

# CALET

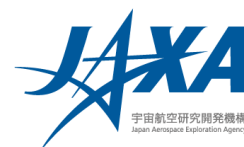
Calorimetric  
Electron  
Telescope



## CALETによる軌道上観測の最新成果報告

鳥居祥二  
早稲田大学、神奈川大学  
他、CALETチーム

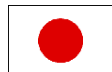
日本物理学会2019年秋季大会  
山形大学、9月17日 17aT11-5





# CALET国際研究チーム

O. Adriani<sup>25</sup>, Y. Akaike<sup>2</sup>, K. Asano<sup>7</sup>, Y. Asaoka<sup>9,31</sup>, M.G. Bagliesi<sup>29</sup>, E. Berti<sup>25</sup>, G. Bigongiari<sup>29</sup>,  
W.R. Binns<sup>32</sup>, S. Bonechi<sup>29</sup>, M. Bongi<sup>25</sup>, P. Brogi<sup>29</sup>, A. Bruno<sup>15</sup>, J.H. Buckley<sup>32</sup>, N. Cannady<sup>13</sup>,  
G. Castellini<sup>25</sup>, C. Checchia<sup>26</sup>, M.L. Cherry<sup>13</sup>, G. Collazuol<sup>26</sup>, V. Di Felice<sup>28</sup>, K. Ebisawa<sup>8</sup>, H. Fuke<sup>8</sup>, T.G. Guzik<sup>13</sup>, T. Hams<sup>3</sup>,  
N. Hasebe<sup>31</sup>, K. Hibino<sup>10</sup>, M. Ichimura<sup>4</sup>, K. Ioka<sup>34</sup>, W. Ishizaki<sup>7</sup>, M.H. Israel<sup>32</sup>, K. Kasahara<sup>31</sup>, J. Kataoka<sup>31</sup>, R. Kataoka<sup>17</sup>,  
Y. Katayose<sup>33</sup>, C. Kato<sup>23</sup>, Y. Kawakubo<sup>1</sup>, N. Kawanaka<sup>30</sup>, K. Kohri<sup>12</sup>, H.S. Krawczynski<sup>32</sup>, J.F. Krizmanic<sup>2</sup>, T. Lomtadze<sup>27</sup>,  
P. Maestro<sup>29</sup>, P.S. Marrocchesi<sup>29</sup>, A.M. Messineo<sup>27</sup>, J.W. Mitchell<sup>15</sup>, S. Miyake<sup>5</sup>, A.A. Moiseev<sup>3</sup>, K. Mori<sup>9,31</sup>, M. Mori<sup>20</sup>,  
N. Mori<sup>25</sup>, H.M. Motz<sup>31</sup>, K. Munakata<sup>23</sup>, S. Nakahira<sup>9</sup>, J. Nishimura<sup>8</sup>, G.A De Nolfo<sup>15</sup>, S. Okuno<sup>10</sup>,  
J.F. Ormes<sup>25</sup>, S. Ozawa<sup>31</sup>, L. Pacini<sup>25</sup>, F. Palma<sup>28</sup>, V. Pal'shin<sup>1</sup>, P. Papini<sup>25</sup>, A.V. Penacchioni<sup>29</sup>, B.F. Rauch<sup>32</sup>,  
S.B. Ricciarini<sup>25</sup>, K. Sakai<sup>3</sup>, T. Sakamoto<sup>1</sup>, M. Sasaki<sup>3</sup>, Y. Shimizu<sup>10</sup>, A. Shiomi<sup>18</sup>, R. Sparvoli<sup>28</sup>, P. Spillantini<sup>25</sup>, F. Stolz<sup>29</sup>,  
S. Sugita<sup>1</sup>, J.E. Suh<sup>29</sup>, A. Sulaj<sup>29</sup>, I. Takahashi<sup>11</sup>, M. Takayanagi<sup>8</sup>, M. Takita<sup>7</sup>, T. Tamura<sup>10</sup>, N. Tateyama<sup>10</sup>, T. Terasawa<sup>7</sup>,  
H. Tomida<sup>8</sup>, S. Torii<sup>31</sup>, Y. Tunesada<sup>19</sup>, Y. Uchihori<sup>16</sup>, S. Ueno<sup>8</sup>, E. Vannuccini<sup>25</sup>, J.P. Wefel<sup>13</sup>, K. Yamaoka<sup>14</sup>,  
S. Yanagita<sup>6</sup>, A. Yoshida<sup>1</sup>, and K. Yoshida<sup>22</sup>



22 機関  
42 人



6機関  
26人



5機関  
15人

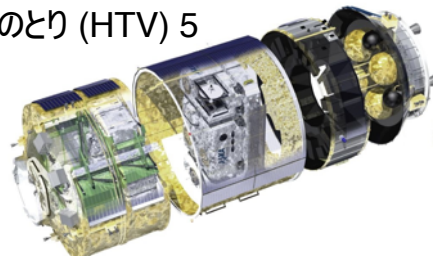
早稲田大、立命館大、神奈川大、青山学院大、JAXA/ISAS、JAXA/HSTD、東大宇宙線研、KEK、国立極地研、理研、放医研、弘前大、芝工大、日大、横国大、茨城大、茨城高専、信州大、名古屋大、京大基研、京大、大阪市大

Pisa INFN, Florence U. & INFN, IFAC, Siena U., Padova U. & INFN, Rome Tor Vergata U. & INFN

NASA/GSFC, Louisiana State U., Maryland U., Washington U. (St. Louis), Denver. U



このとり (HTV) 5



- 2015年8月19日に、H2-Bに搭載したHTV5で打上げ
- ISS日本実験棟船外実験プラットフォーム(JEM/EF) #9ポートに設置
- 現時点まで約3.5年間の観測を順調に継続

CGBM (CALET Gamma-ray Burst Monitor)

FRGF (Flight Releasable Grapple Fixture)

ASC (Advanced Stellar Compass)

Calorimeter

GPSR (GPS Receiver)

MDC (Mission Data Controller)

CALorimetric Electron Telescope

- 全質量 : 612.8 kg
- 標準ペイロードサイズ : 1850mm(L) × 800mm(W) × 1000mm(H)
- 消費電力(最大値) : 507 W
- データ転送レート(中速系) : 600 kbps (6.5 GB/day), 1Mbps(最大値)

JEM/Port #9



## 学術的背景

## 核心をなす「問い」

### 銀河内宇宙線加速・伝播の“標準モデル”

#### □ 超新星残骸における衝撃波加速

- 冪型エネルギースペクトル :  $dN/dE \propto E^{-\gamma}$   
強い衝撃波では  $\gamma = 2$  を与える
- 電荷( $Z$ )に比例した加速限界 :  $E_{max} \sim 100 Z \text{ TeV}$
- 電子成分は伝播過程におけるエネルギー損失 ( $-dE/dt = bE^2$ ) のため、TeV領域では寿命が10万年以下の1kpc内にある加速源のみが寄与



陽子・原子核:  
p、Heの加速限界はどこに存在するか?  
スペクトルの冪に電荷依存性はあるか?



電子:  
近傍加速源で加速されたTeV領域電子は存在しているか?

#### □ 銀河磁場による拡散的伝播過程

- エネルギースペクトルの変化  
銀河磁場からの漏れだしの効果 :  $dN/dE \propto E^{-\gamma-\alpha}$
- 一次/二次成分比(B/C)のエネルギー依存性 :  $B/C \propto E^{-\delta}$



B/C比:  
拡散係数のエネルギー依存性( $D \propto E^{\delta}$ )  
はどのようにになっているか?  
銀河磁場の乱流成分はコルモゴロフ則 ( $\delta = 1/3$ ) に従うか?

### 標準モデルと矛盾する観測結果

#### □ 陽電子比の増大(電子+陽電子の過剰)

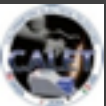


高エネルギー陽電子・電子の未知な加速源  
の正体は(パルサー か暗黒物質)?

#### □ 陽子・ヘリウムスペクトルの硬化



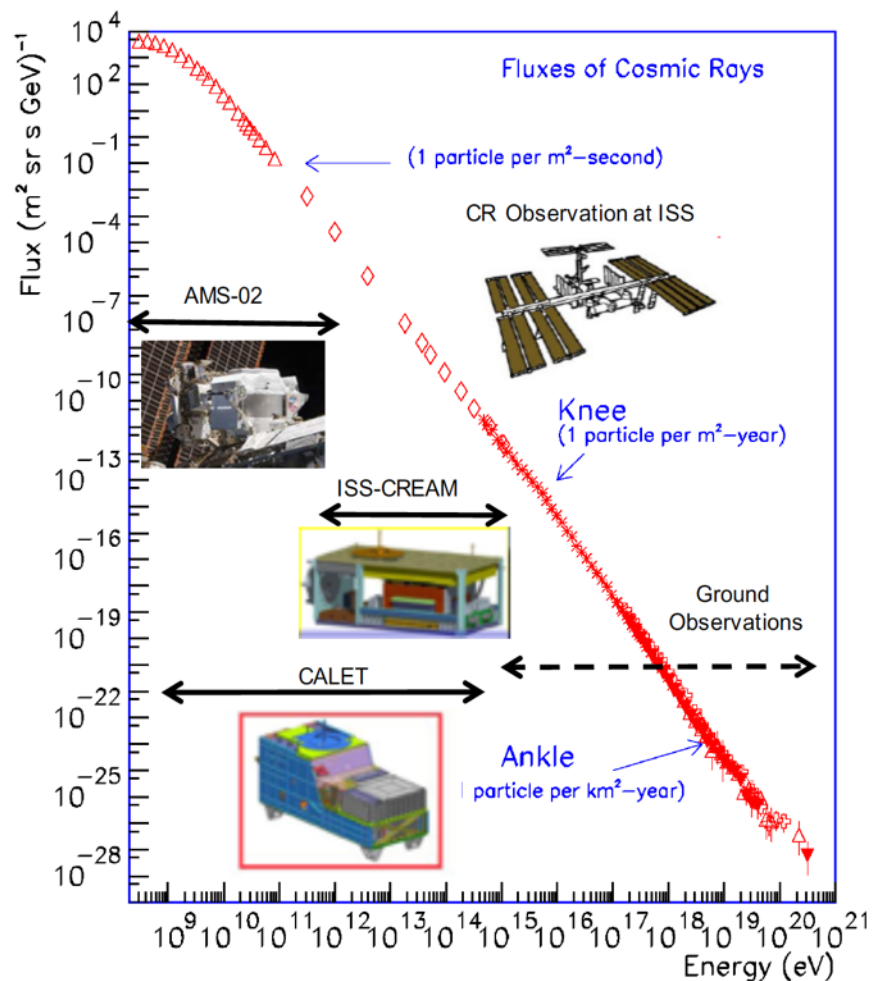
陽子・ヘリウムの未解明な加速又は伝播機構とは何か?



## CALETによる宇宙線観測の独自性

- 宇宙空間における**最も高いエネルギー領域での宇宙線直接測定**
- 国際宇宙ステーションにおける大型装置による長期観測 (5.5年間)により、**世界最高レベルの宇宙線観測**を実施
- 電子観測に最適化することにより、 $10^9$  eV (GeV) –  $20 \times 10^{12}$  eV (TeV) 領域での電子観測を高エネルギー分解能で達成
  - ➡ **近傍加速源、暗黒物質の探索**
- 原子核成分の観測を $10$  GeV–  $10^{15}$  eV (PeV) の領域で実施
  - ➡ **宇宙線加速・伝播機構の解明**
- 安定的運用により突発的天体現象の観測
  - ➡ **ガンマ線バースト、太陽フレア、重力波の同時観測 など**

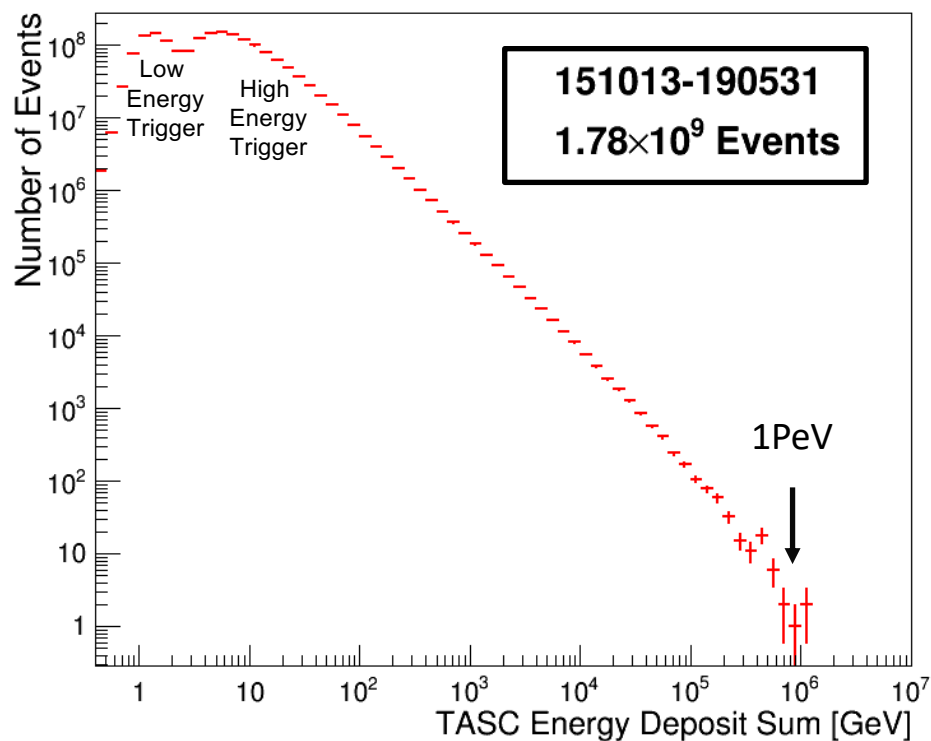
## 全宇宙線エネルギースペクトルとCALETの観測領域 (1GeV–1PeV)



\*) ISS-CREAMは観測を中断

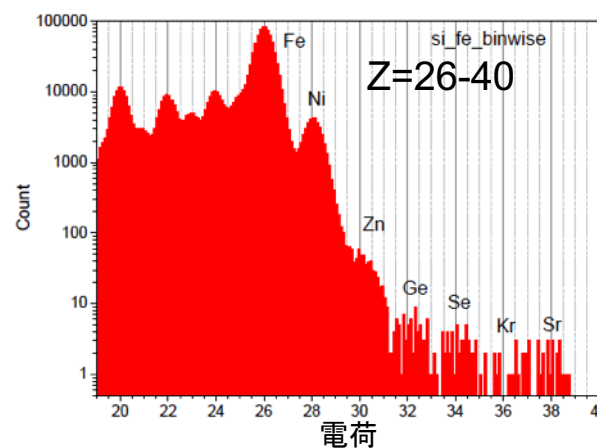
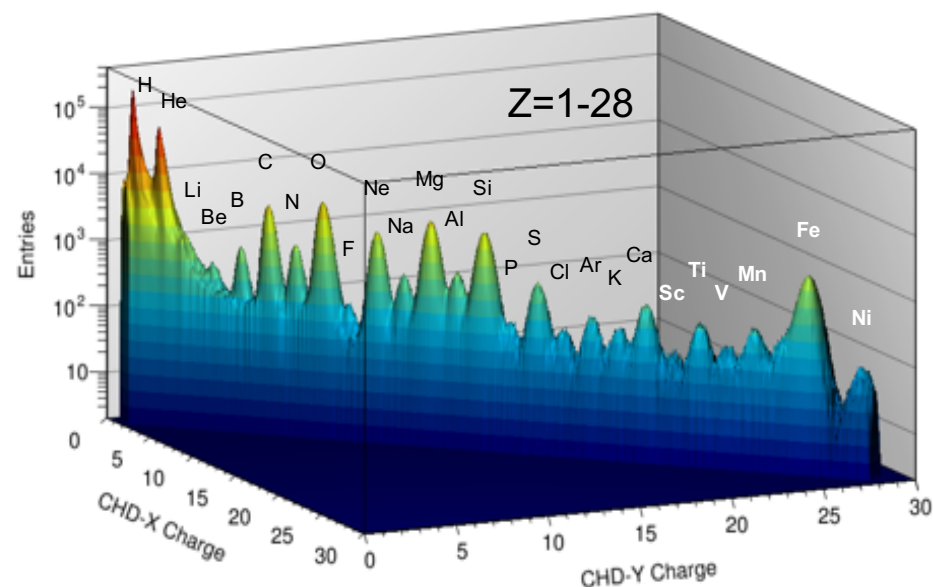
## 1 GeV-1 PeVのエネルギー領域で測定

カロリメータに付与された全粒子のエネルギー分布



6桁にわたる高精度なエネルギー較正により  
高エネルギー領域で正確な冪型のエネルギー  
分布が得られている。

## Z=1-40 での電荷識別



Z=1-26の領域では全ての原子核が観測されており、Z>26では主要な超重核が検出されている。



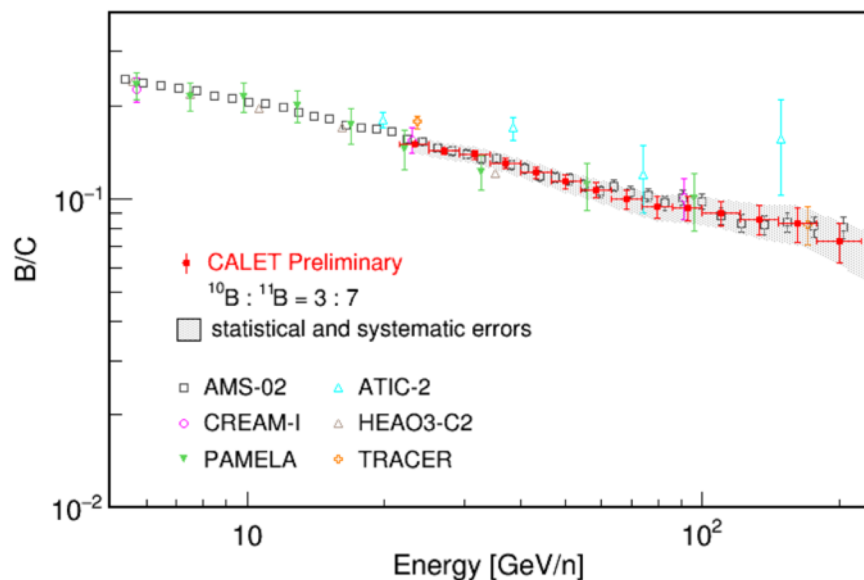
## 重原子核のエネルギースペクトル測定:

- 現時点ですでにこれまでの気球実験の結果を凌駕する100TeV領域に及ぶスペクトルの観測を達成
- **5年(以上)の観測で100TeV以上のスペクトルを求め**、各原子核の冪の値や変化を高精度に測定して、電荷に依存した加速・伝播機構を検証

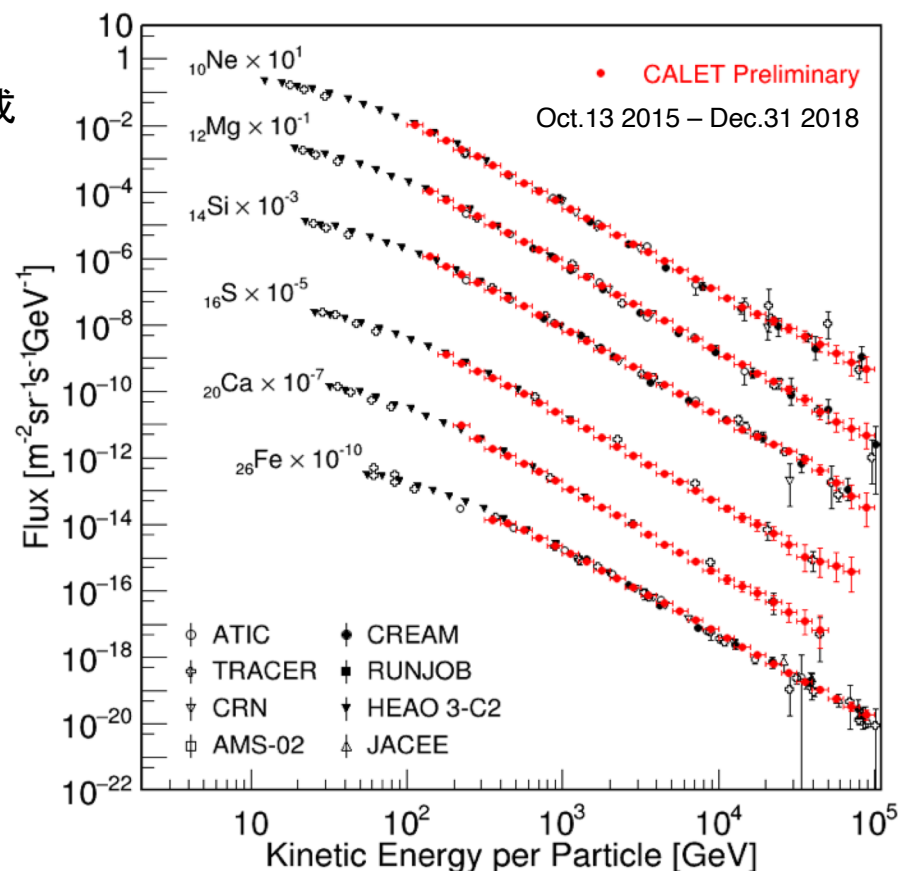
## 代表的な2次核/1次核(B/C)比:

- B/C比の観測をこれまでの最高エネルギー領域まで達成
- **5年(以上)の観測で1TeV/n以上まで測定**して、エネルギー依存性( $\propto E^{-\delta}$ )を決定し伝播モデルを検証

B/C比のエネルギー依存性



一次重原子核主要成分のエネルギースペクトル



エネルギー領域の拡大(高統計)に加えて、解析の深化及び系統誤差の評価が重要課題



# 陽子観測 -加速上限エネルギーの検出-

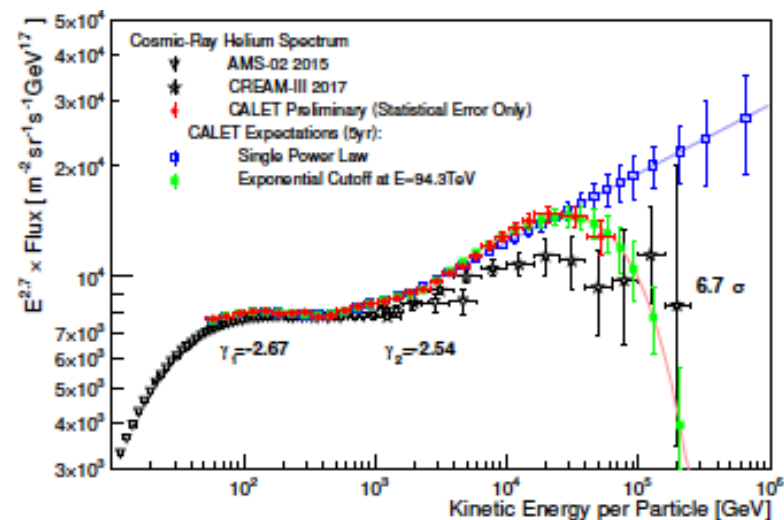
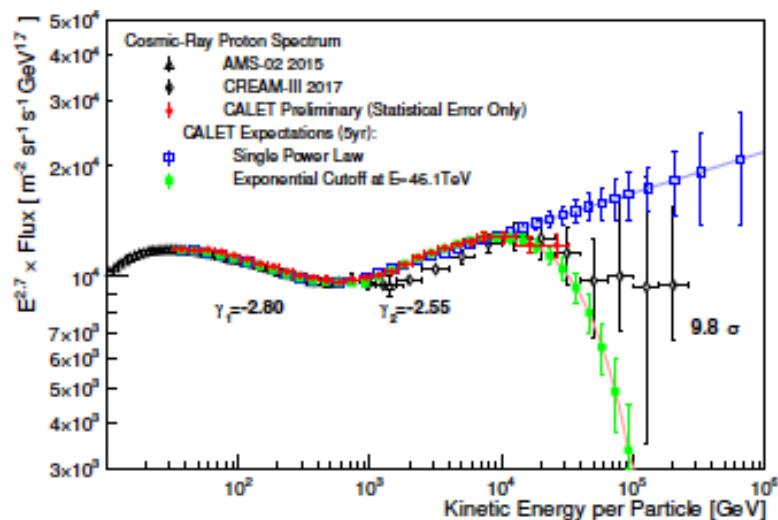
- これまでに複数の観測で得られた陽子スペクトルの冪の変化(硬化)を**単一の検出器により50GeV-10 TeVの領域で初めて検出**(右上図)
- 5年(以上)の観測で100TeV以上まで測定し、加速・伝播モデルを検証

衝撃波加速モデルにおける加速上限エネルギーの予測

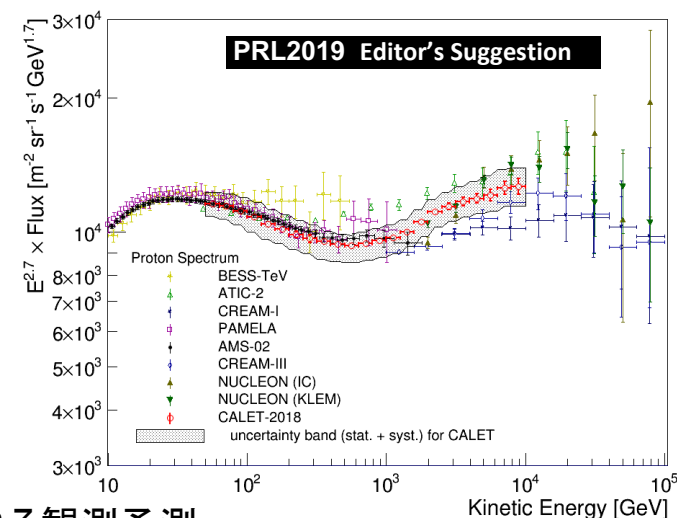
$$E_{\max} = 6 \times 10^{13} \text{ eV } Z \left( \frac{B}{10^{-6} \text{ G}} \right) \left( \frac{u_1}{10^4 \text{ km/s}} \right) \left( \frac{t_{\text{free}}}{200 \text{ year}} \right)$$

大平他、物理学会誌 67(2012) 832

陽子・ヘリウムの観測結果と5年間の観測で得られる観測予測



陽子(左)とヘリウム(右)のこれまでの観測結果から、5年間の観測により期待されるスペクトルにより、**100TeV領域におけるカットオフの有無が有意に検証できる。**

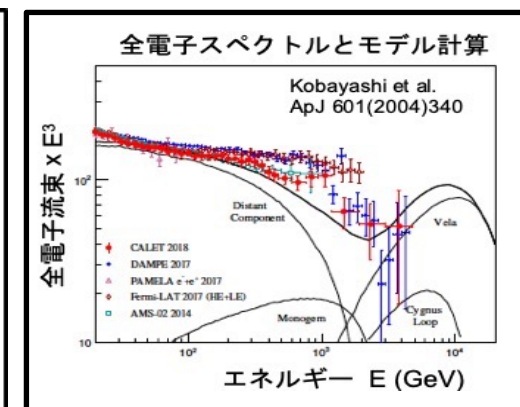
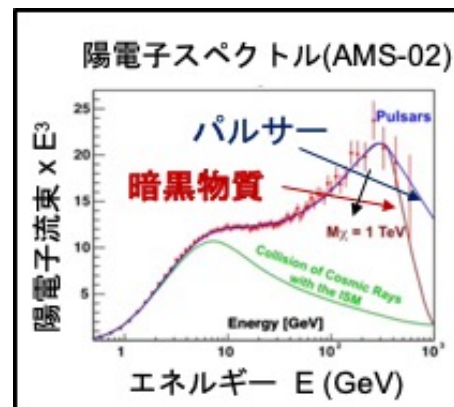






# 電子(+陽電子)観測 -近傍加速源の同定+暗黒物質探索-

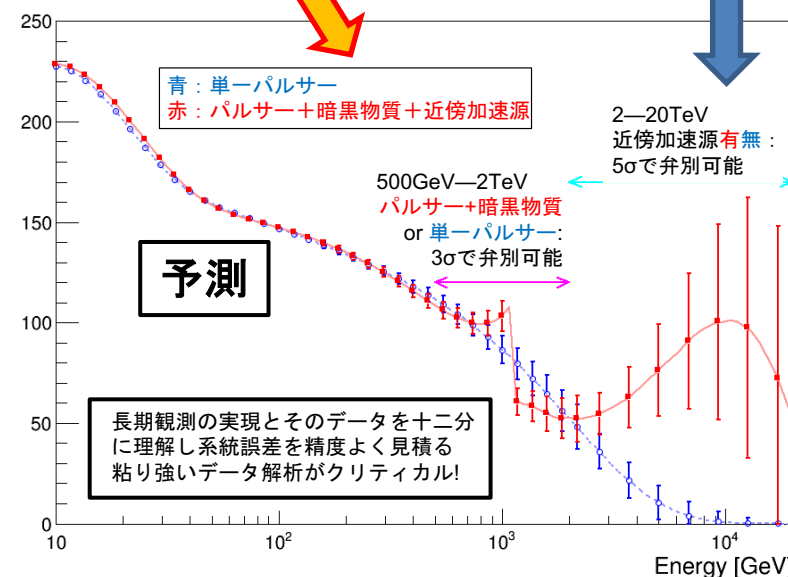
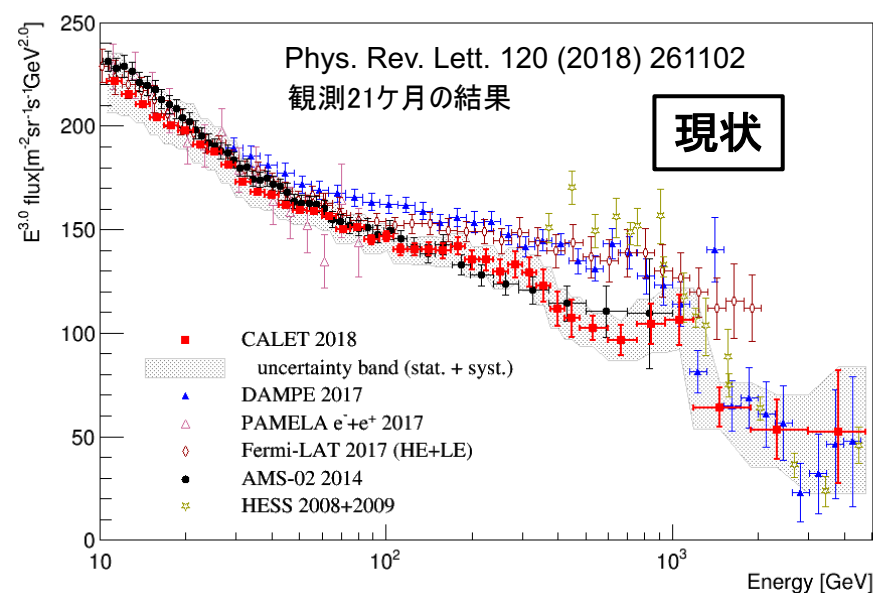
- 全電子スペクトルの宇宙空間からの直接観測において、**世界最高レベルの結果を公表【受賞2件】** **PRL2017, 2018**
- TeV領域の電子の測定により近傍加速源の物理に迫る
  - 近傍加速源の直接的検証
  - 宇宙線加速効率・逃走過程
- 電子(+陽電子)スペクトルの構造への暗黒物質の寄与の検証を実施
  - 未知の陽電子・電子対生成源の検出(パルサーor 暗黒物質)



陽電子・電子対生成源の検出

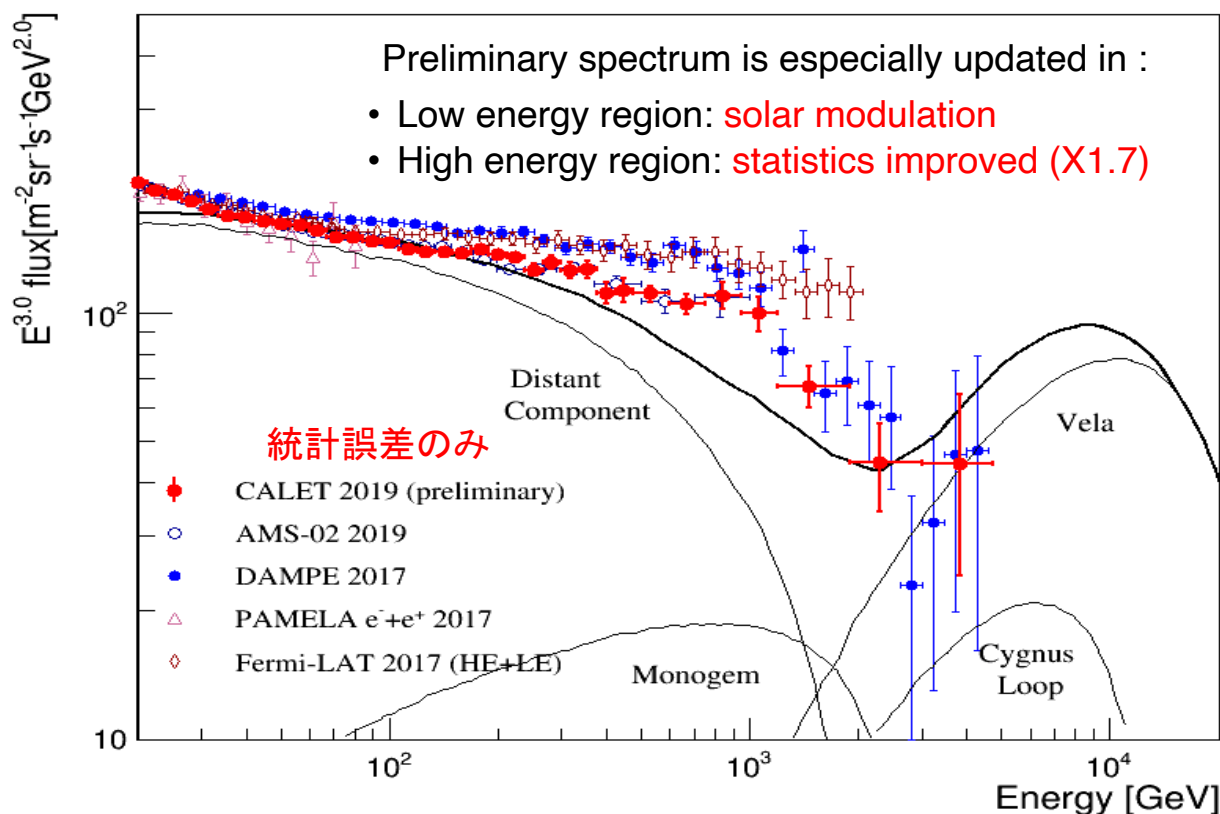
近傍加速源の同定

観測5年での期待スペクトル



- 3.5年間の観測データにより、5TeV領域での初期的な観測結果を取得
- 更新されたAMS-02 (2019) の結果と、1TeV以下の領域で非常に良く合致
- 近傍加速源の検出のために不可欠な10TeV領域に及ぶ観測を実現
- $E > 5\text{TeV}$  のスペクトル形状を議論するためには、さらなる統計とBG推定の高精度検証が不可欠

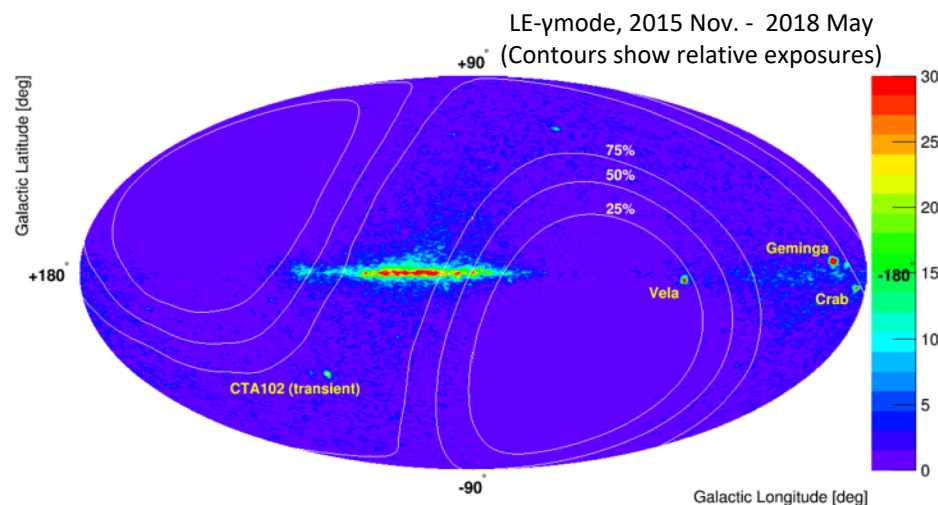
未発表データを含む電子スペクトルの3.5年間の観測結果 (**Preliminary**) と近傍加速源候補 (Vela, Cygnus Loop, Monogem) の予測



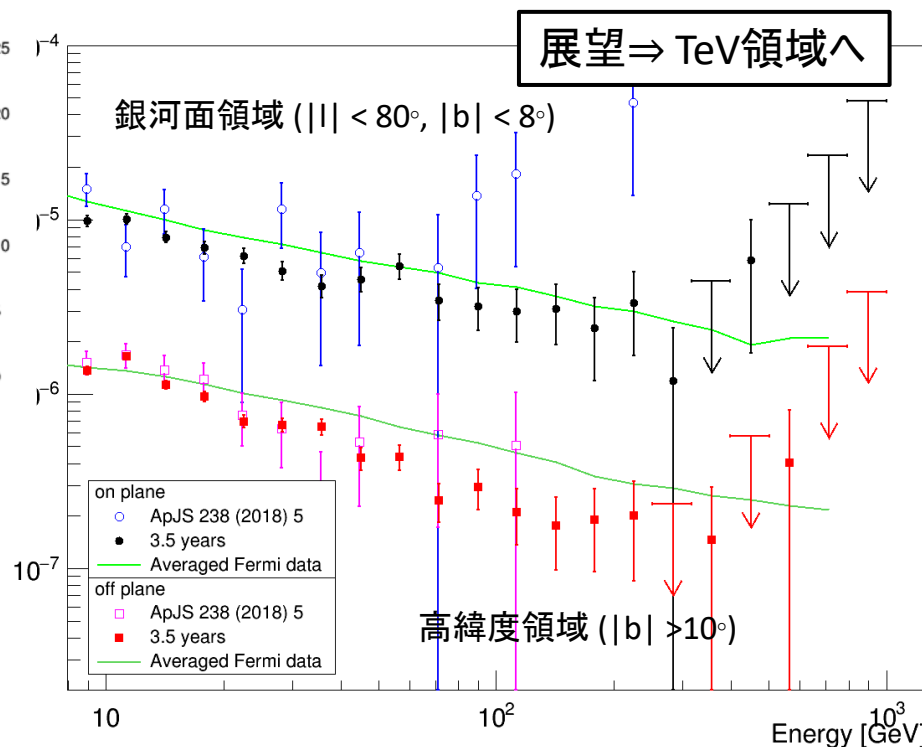
## 1GeV以上の天体ガンマ線の広視野+GRBやAGNのモニター観測

ApJS2018

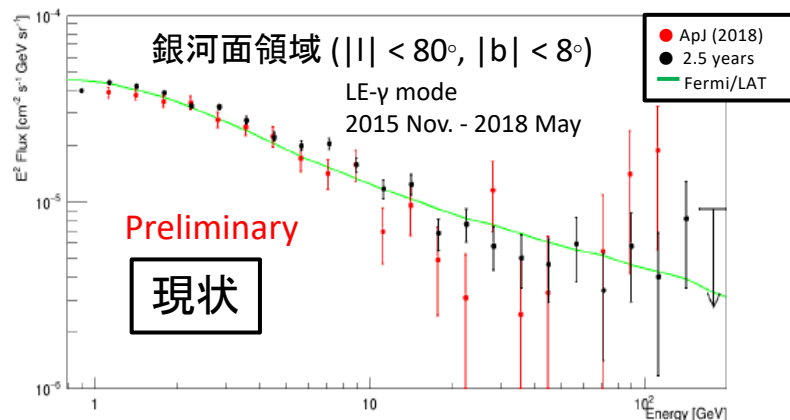
### 銀河座標系におけるガンマ線イベントの分布



### 高エネルギー(10GeV)トリガーによる ガンマ線フラックス (10~1000GeV)



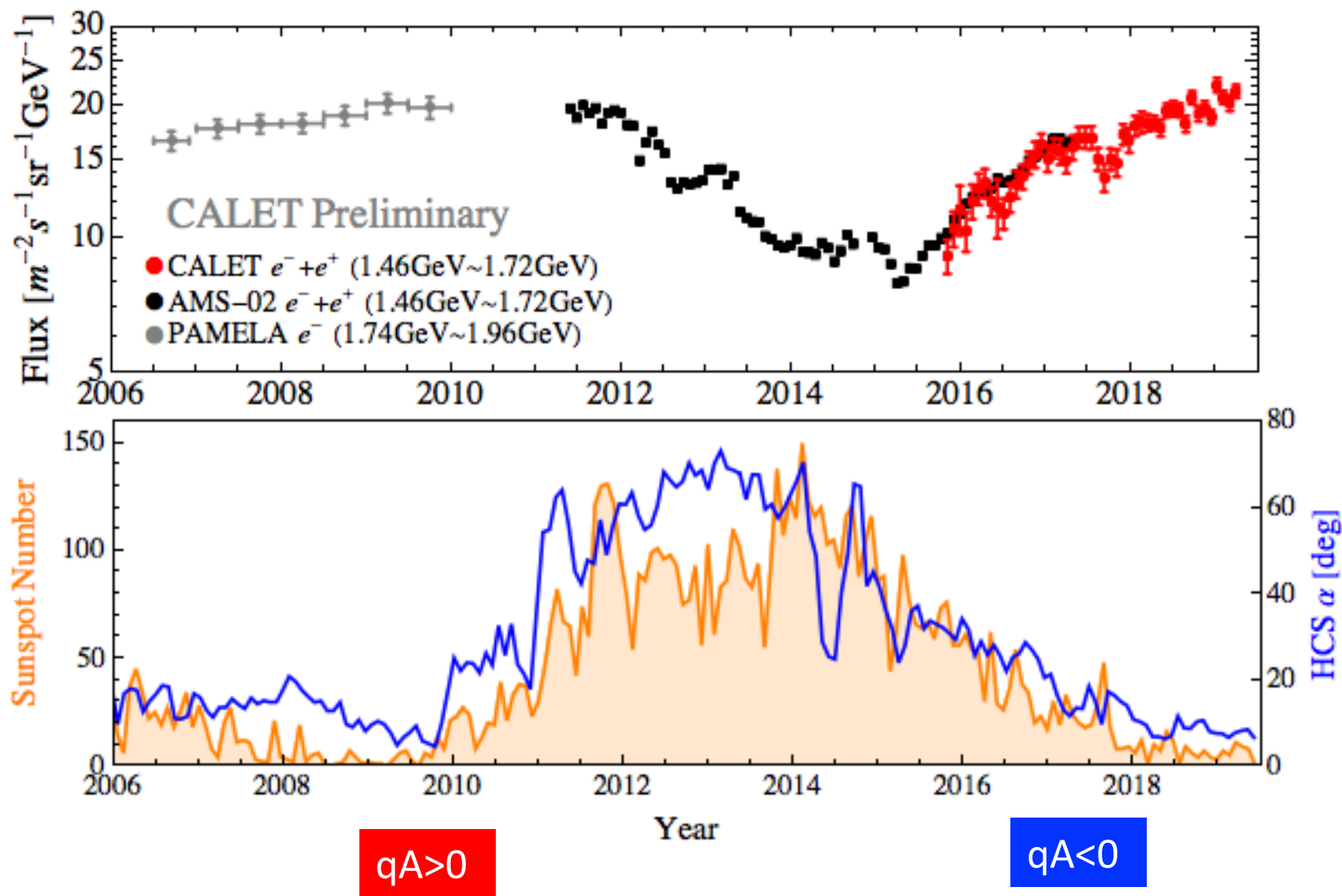
### ガンマ線フラックス (1~100GeV)



5. 5年間の観測データを用いたTeV領域に至る  
銀河内外ガンマ線拡散成分の観測結果を用いて  
「拡散ガンマ線生成機構の解明」を目指す。



## CR $e^- + e^+$ Flux during the solar cycle 24



## LIGO/Virgo O3 におけるCALETによるガンマ線（上限値）観測結果

| GCN No. | LIGO/Virgo trigger | Trigger time $T_0$ (2019) | Events $T_0 \pm 60$ s | 90% C.L. U.L.          | Summed probability | CAL $\alpha$ (°) | CAL $\delta$ (°) |
|---------|--------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 24960   | S190630ag          | 06-30 18:52:05.180 UT     | 0                     | $1.2 \times 10^{-5}$   | 25%                | 84.0             | 31.5             |
| 24970   | S190701ah          | 07-01 20:33:06.578 UT     | 0                     | —†                     | No                 | 286.8            | −1.6             |
| 25027   | S190706ai          | 07-06 22:26:41.345 UT     | 0                     | —                      | No                 | 210.4            | −45.4            |
| 25033   | S190707q           | 07-07 09:33:26.181 UT     | 0                     | $2.1 \times 10^{-6}$ † | 20%                | 262.4            | 2.2              |
| 25099   | S190718y           | 07-18 14:35:12.068 UT     | 0                     | $1.7 \times 10^{-6}$ † | 5%                 | 195.8            | −11.1            |
| 25134   | S190720a           | 07-20 00:08:36.704 UT     | 0                     | $3.0 \times 10^{-5}$   | 25%                | 49.7             | −32.1            |
| 25184   | S190727h           | 07-27 06:03:33.986 UT     | 0                     | —                      | No                 | 201.1            | 38.2             |
| 25214   | S190728q           | 07-28 06:45:10.529 UT     | 0                     | —†                     | No                 | 184.8            | 30.3             |
| 25390   | S190814bv          | 08-14 21:10:39.013 UT     | 0                     | —                      | No                 | 181.3            | 49.5             |
| 25536   | S190828j           | 08-28 06:34:05.756 UT     | 0                     | —                      | No                 | 13.9             | 12.6             |
| 25537   | S190828l           | 08-28 06:55:09.887 UT     | 0                     | —                      | No                 | 106.9            | 51.0             |
| 25647   | S190901ap          | 09-01 23:31:01.838 UT     | 0                     | $6.3 \times 10^{-5}$ † | 5%                 | 353.8            | 16.6             |

**Table 1:** Summary of CALET/CAL gamma-ray observations on gravitational event candidates in the LIGO/Virgo third observing run reported in GCN circulars [1]. Upper limits (U.L.) are given in unit of  $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  for the energy range 10–100 GeV except for those marked with † which are for 1–10 GeV, which corresponds to the HE and the LE- $\gamma$  mode of the trigger condition of CAL around  $T_0$ . ‘Summed probability’ is the maximum probability in the overlap region of the CAL field-of-view at  $T_0$  with the summed LIGO/Virgo probability map (‘No’ means there is no overlap). Also shown are the coordinates of the center of CAL field-of-view at  $T_0$ .



- ❑ CALET は、2015年8月19日に打ち上げられ、これまで所期の性能を発揮して順調に観測が実施されており、現時点ですでに約4年間の観測を実施して、約20億イベントのデータを取得している。
- ❑ CALETの主要目的である宇宙線電子の観測では、宇宙空間における4.5TeVまでの高精度観測に初めて成功し、その成果を論文(PRL)発表している。その他、陽子観測結果の論文(PRL)発表を行い、原子核成分、ガンマ線の観測も順調に実施されており、データ解析が進んでいる。
- ❑ CALETは、宇宙線観測だけでなくガンマ線バーストの観測を同時に行うことにより、重力波源観測における国際連携(LIGO/Virgo)や、「きぼう」搭載装置(MAXI, SEDA)との共同研究が進行している。
- ❑ LIGO/VirgoやMAXIとの連携による突発的X線・ガンマ線天体の共同観測や、「あらせ」との連携による太陽地球磁気圏に関する新たな研究展開が期待できる。
- ❑ 2019年2月14日にJAXA有人部門きぼう利用センターで行われた後期運用延長審査会において、2021年3月31日までの観測延長(約5.5年間)が承認されている。

CALETの安定的運用にご尽力頂いている、JAXAのISS関係者の皆様に深く感謝します !!!

＊)本研究は、科学研究費基盤S(H21-25, H26-30)、文部科学省「私立大学戦略的研究基盤形成事業」(H23-27)(研究代表者 鳥居祥二)等の支援を受けて行われました。  
本年度からは、科学研究費基盤S(令和元年-5年)の支援を受けて研究を実施しています。