



3) 陽子、ヘリウムスペクトルの精密測定

2025年11月15日

早大理工総研 小林兼好

国際宇宙ステーション搭載CALET10周年記念シンポジウム





宇宙線粒子

- 宇宙線の素粒子で陽子は90%、ヘリウムが9%を占める。
- 飛来した宇宙線は大気と反応し、二次粒子を作る。
- CALETは大気と相互作用する前に直接検出することで強力な粒子識別が可能。
- 一方で地上にある空気シャワー検出器は大面積での高統計測定ができる。高エネルギー粒子のみ観測でき、粒子識別は限定的。

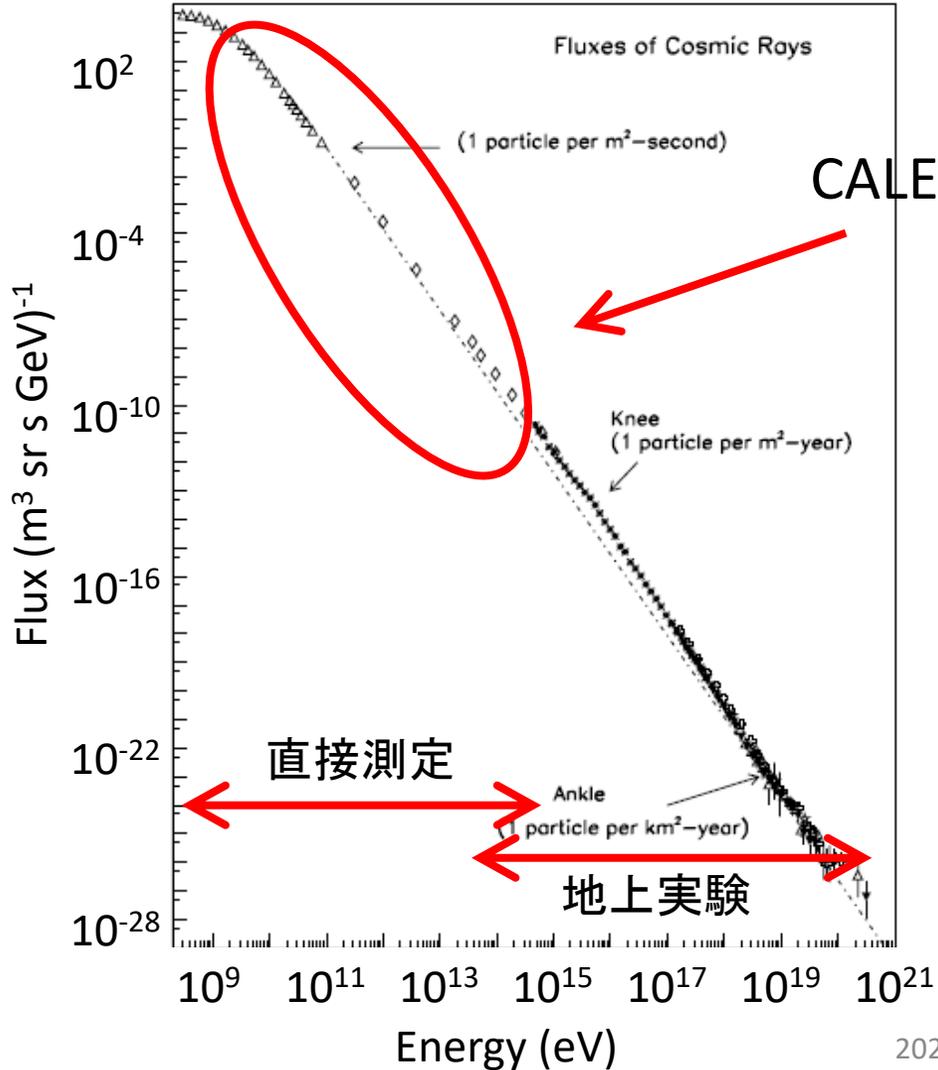


https://www.ies.or.jp/ri_online/history/history002.html



宇宙線測定

宇宙線全粒子スペクトル



CALETの測定領域

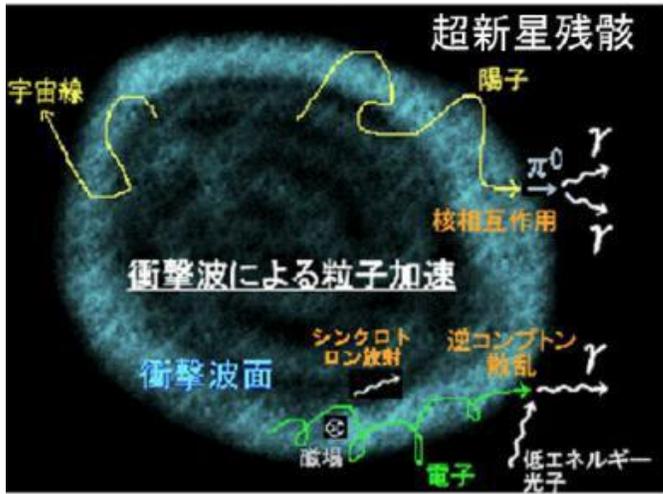
- 10桁以上にわたる冪型スペクトルの構造をもっている（およそ E^{-3} 程度）。
- CALETの測定エネルギー領域は我々の銀河系内からの宇宙線（銀河宇宙線）が主成分

10.1023/A:1013828611730

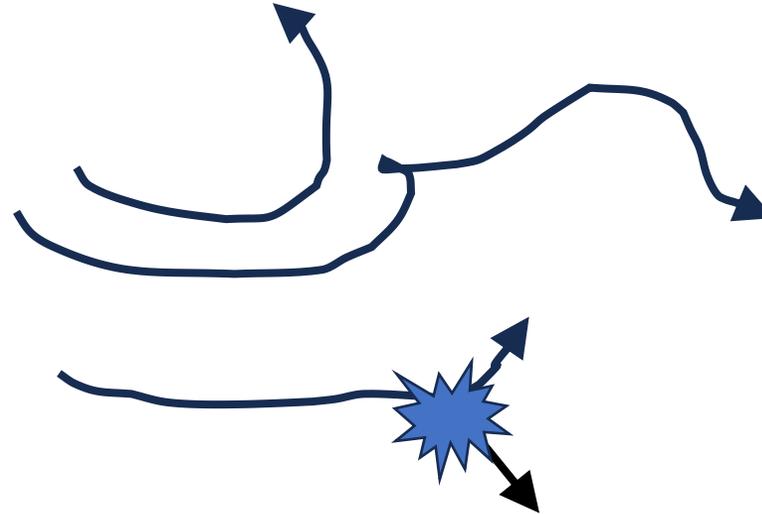


銀河宇宙線がどこから、どのように地球へきているのか？ (銀河宇宙線加速伝搬の標準モデル)

超新星残骸における衝撃波加速



銀河磁場による拡散的伝搬



地球へ



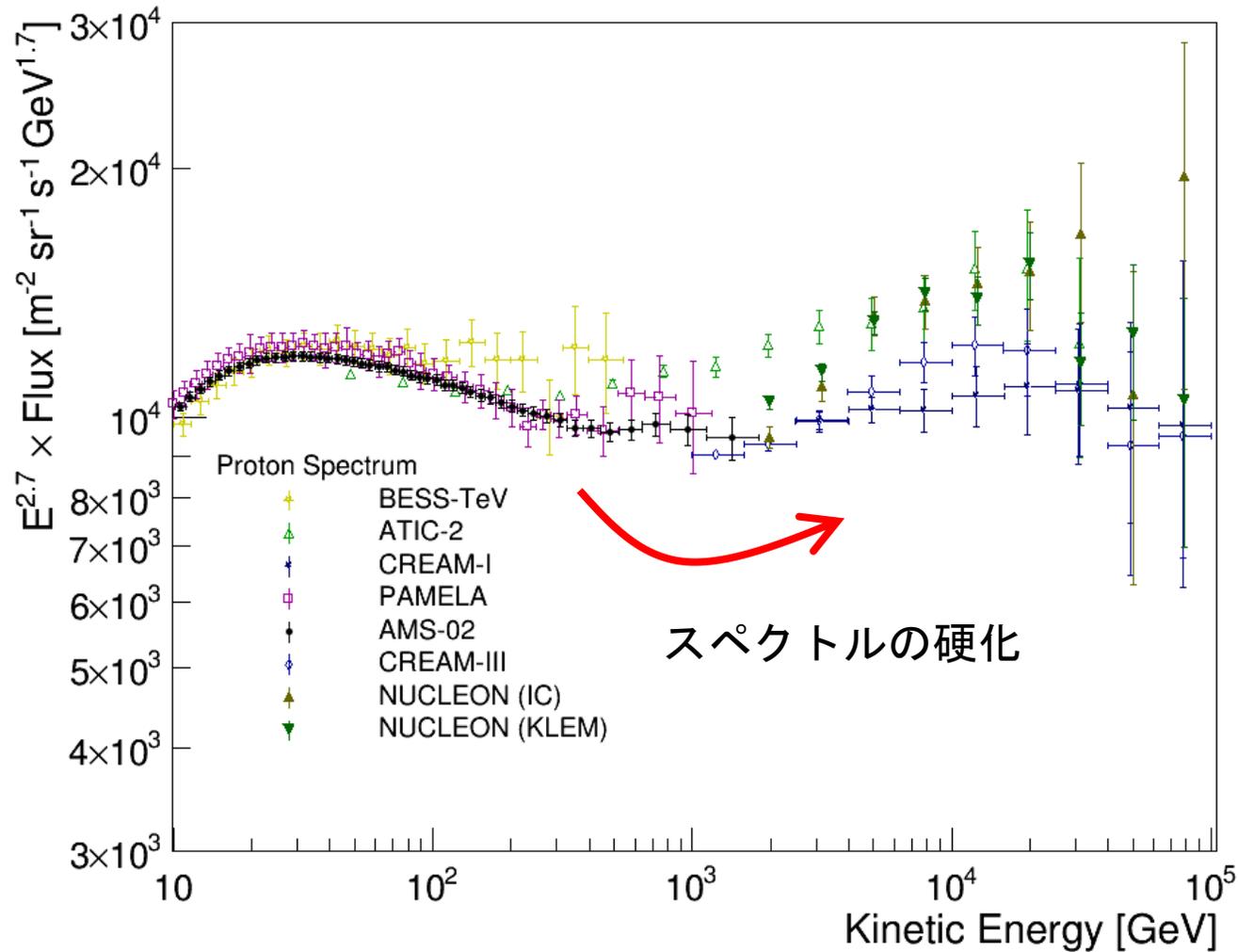
- 冪型エネルギースペクトル
($dN/dE \propto E^{-\gamma}$)

- 銀河磁場からの漏れ出し
 $E^{-\gamma} \rightarrow E^{-(\gamma+\delta)}$
- 宇宙線と星間物質の衝突による2次宇宙線の生成

<https://web.archive.org/web/20160112123725/http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-001138.html>



CALETの最初の陽子スペクトルの論文前の理解（～2018年）

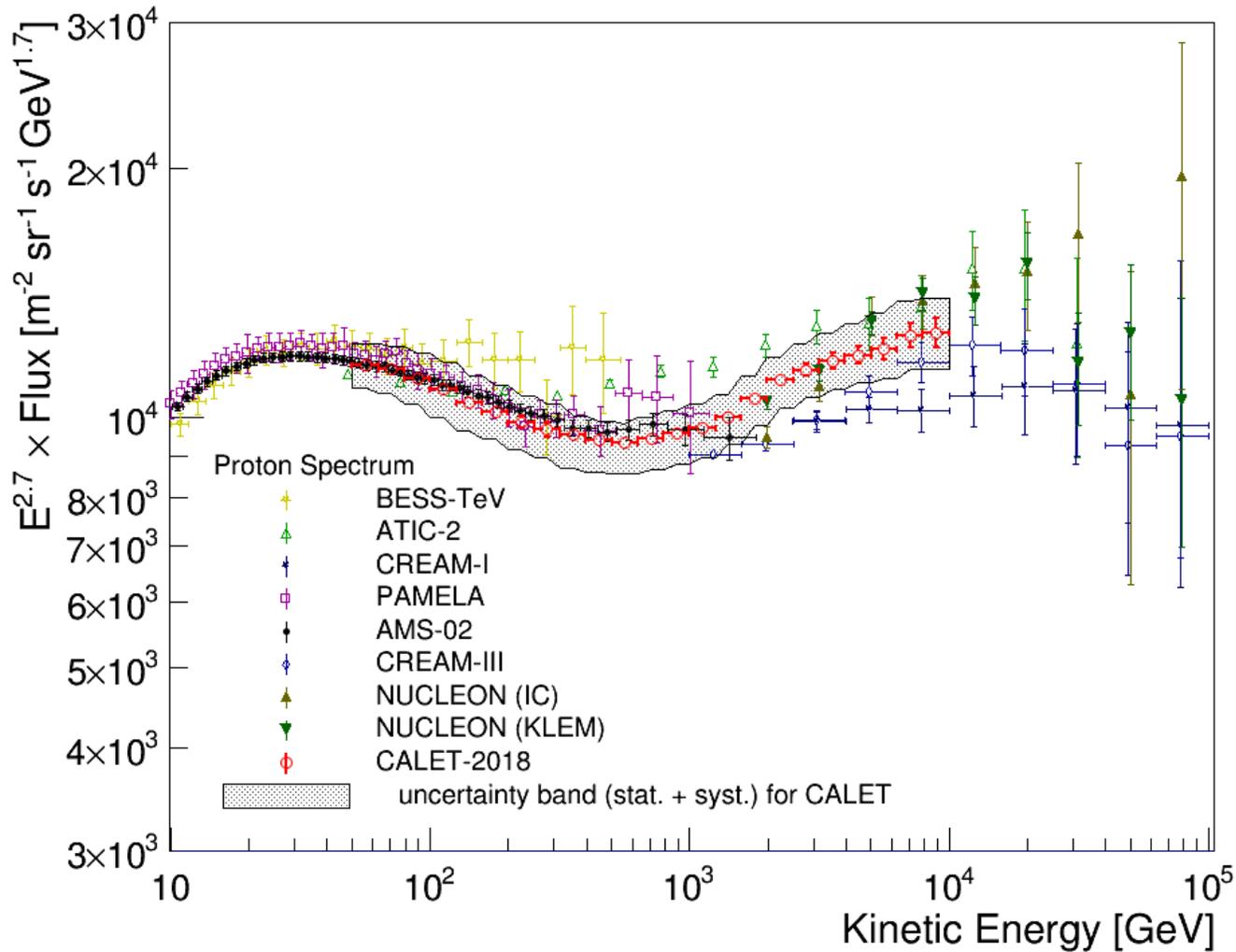


- 低いエネルギー領域（ $E < 3 \times 10^2 \text{ GeV}$ ）ではAMS実験が精度よく測定。
- スペクトルは単純な冪型ではなく、スペクトルの硬化の傾向が見られる。原因が明確になっていない



CALET観測の陽子スペクトルの第一論文（2019年）

PRL 122, 181102 (2019)



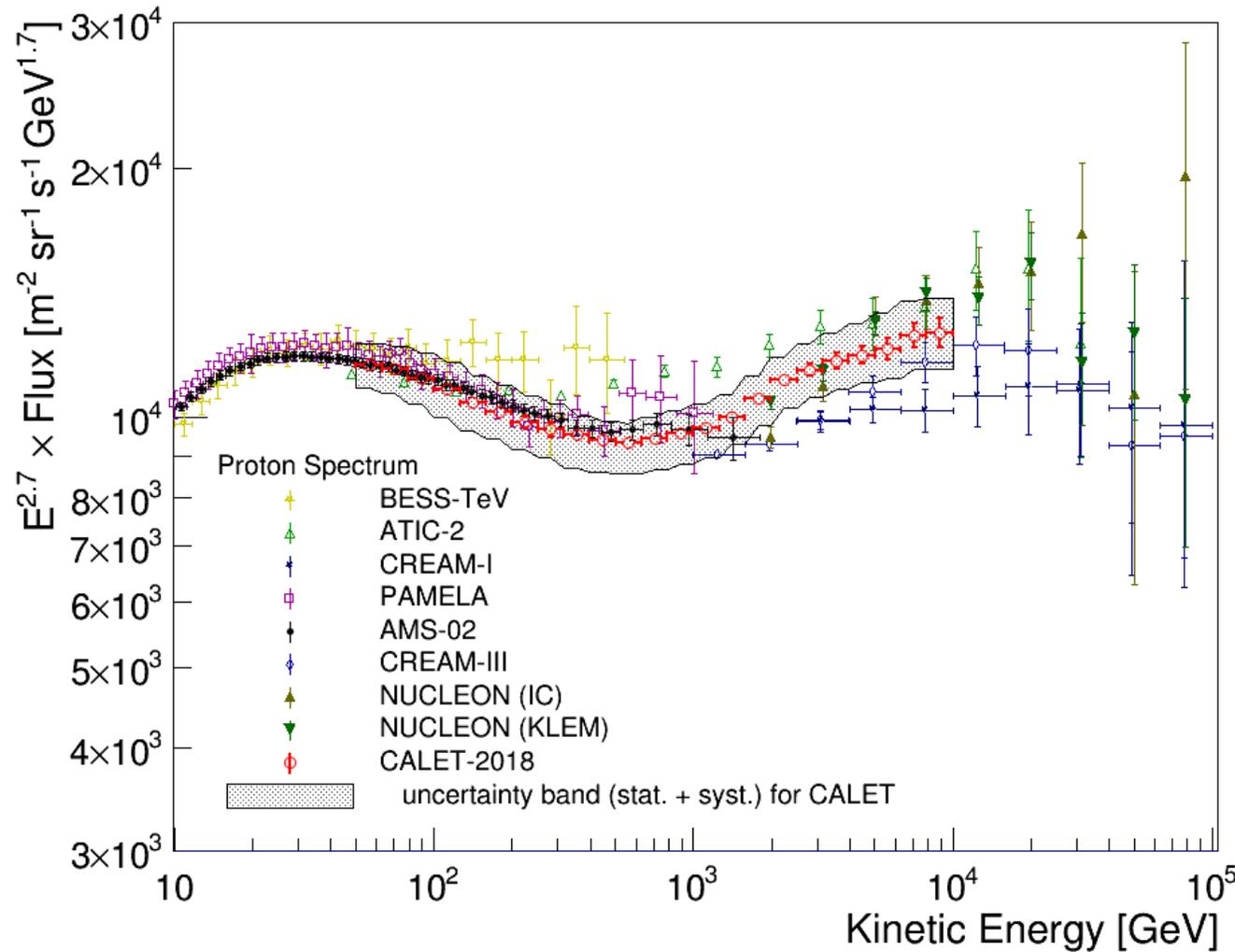
- CALETの観測で幅広いエネルギー領域を1つの検出器で測定理解することができた。
- 10^3 GeV以上ではこれまでの実験より誤差の小さい観測。
- エネルギースペクトルの硬化の構造を精度良く観測。



CALET観測の陽子スペクトルの第一論文（2019年）

PRL 122, 181102 (2019)

Editors' Suggestionに選出！



- CAL
- 領域
- る
- 10
- 験
- 工
- 造

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Editors' Suggestion

Direct Measurement of the Cosmic-Ray Proton Spectrum by the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station

O. Adriani,^{1,2} Y. Akaike,^{3,4} K. Asano,⁵ Y. Asaoka,^{6,7,*} M. G. Bongi,^{8,9} S. Bonechi,^{8,9} M. Bongi,^{1,2} P. Brogi,^{8,9} A. Bruno,¹¹ J. H. Buckley,¹² M. L. Cherry,¹² G. Collazuol,^{14,15} V. Di Felice,^{16,17} K. Ebisawa,¹⁸ K. Hibino,²⁰ M. Ichimura,²¹ K. Ioka,²² W. Ishizaki,⁵ M. H. Israel,¹⁹ C. Kato,²⁵ N. Kawanaka,^{26,27} Y. Kawakubo,^{12,28} K. Kohri,²⁹ P. Maestri,^{8,9} P. S. Marrocchesi,^{8,9,†} A. M. Messineo,^{30,9} J. W. Mitchell,³¹ M. Mori,³³ N. Mori,² H. M. Motz,³⁴ K. Munakata,²⁵ H. Murakami,³⁵ S. Okuno,²⁰ J. F. Ormes,³⁶ S. Ozawa,⁶ L. Pacini,^{1,13,2} F. Palma,³⁷ B. Ricciarini,^{13,2} K. Sakai,^{19,3} T. Sakamoto,²⁸ M. Sasaki,^{19,32} Y. Sawada,³⁸ F. Stolzi,^{8,9} J. E. Suh,^{8,9} A. Sulaj,^{8,9} I. Takahashi,³⁹ M. Takayanagi,⁴⁰ S. Torii,^{6,40,‡} Y. Tsunesada,⁴¹ Y. Uchihori,⁴² S. Ueno,¹⁸ E. VandenKrieken,⁴³ A. Yoshida,²⁸ and K. Yoshida

(CALET Collaboration)

¹Department of Physics, University of Florence, Via

²INFN Sezione di Florence, Via Sansone,

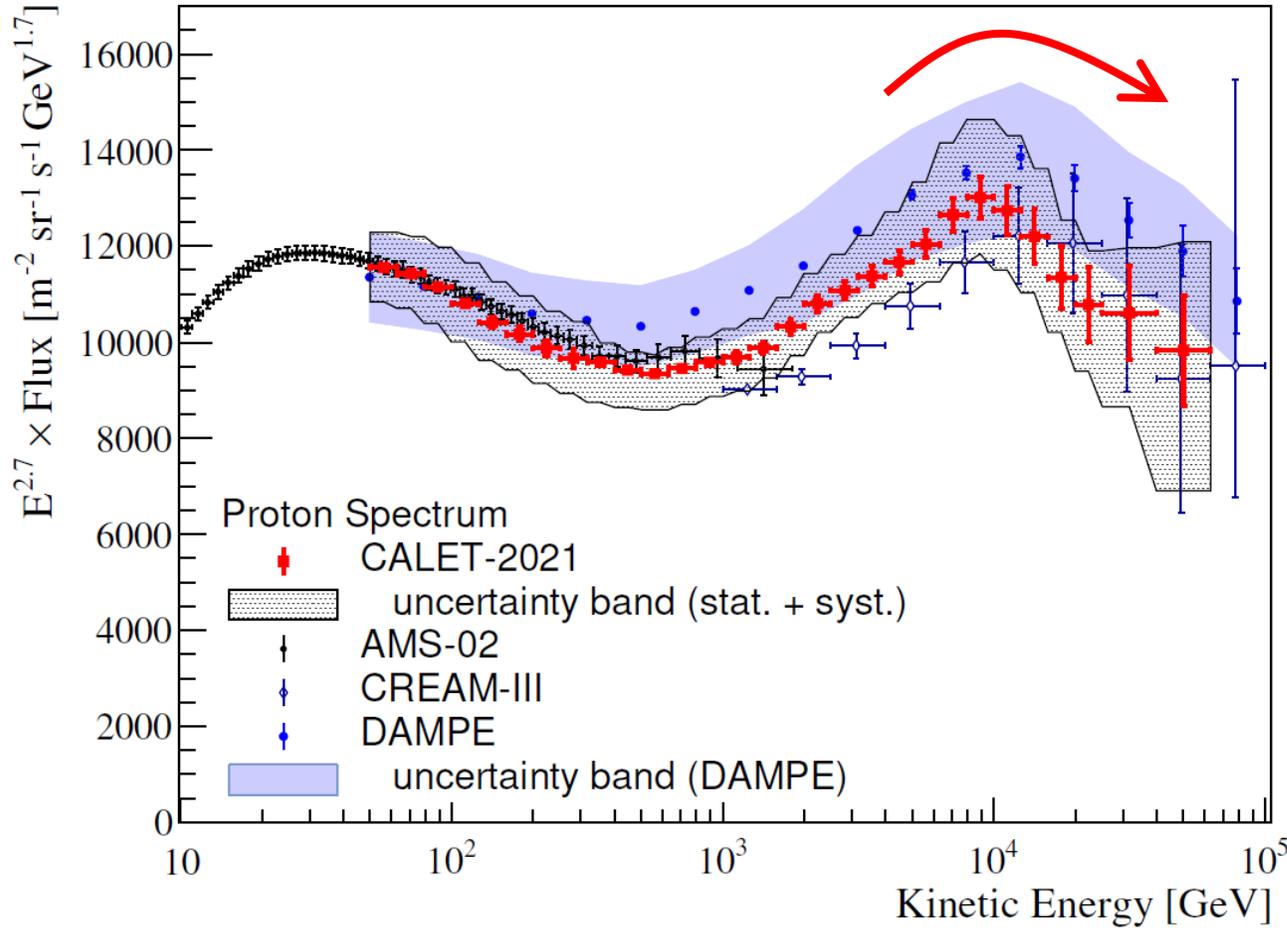
³Department of Physics, University of Maryland, Baltimore County

⁴Astroparticle Physics Laboratory, NASA/GSFC



CALET観測の陽子スペクトルの第二論文（2022年）

スペクトルの軟化

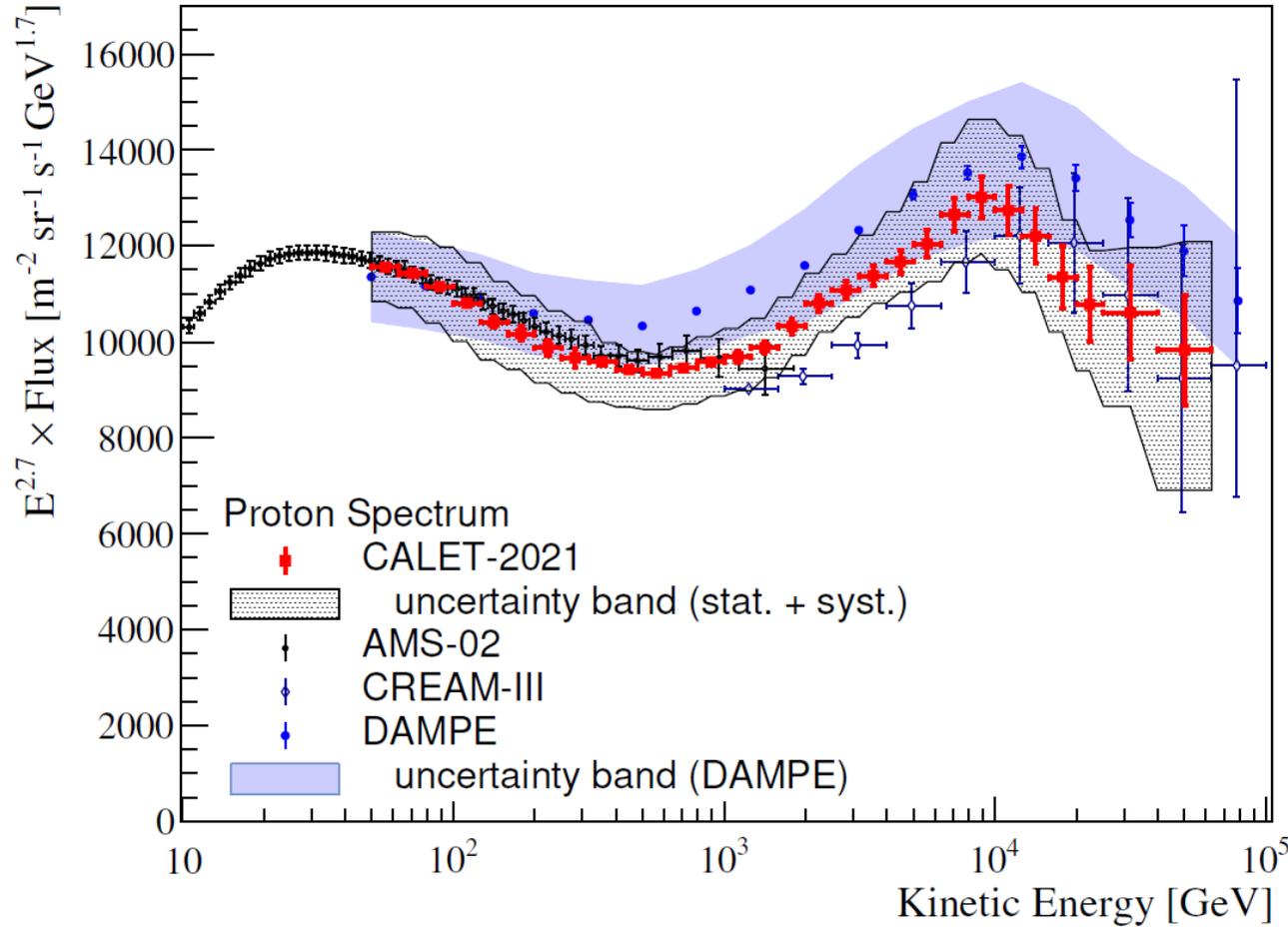


- 10 TeV以上でスペクトルの軟化を観測。軟化は硬化に比べて急激に起こっている。



CALET観測の陽子スペクトルの第二論文（2022年）

再度Editors' Suggestionに選出される！



10
を観
にお

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Editors' Suggestion

Observation of Spectral Structures in the Flux of Protons from 10 GeV to 60 TeV with the Calorimetric Electron Telescope

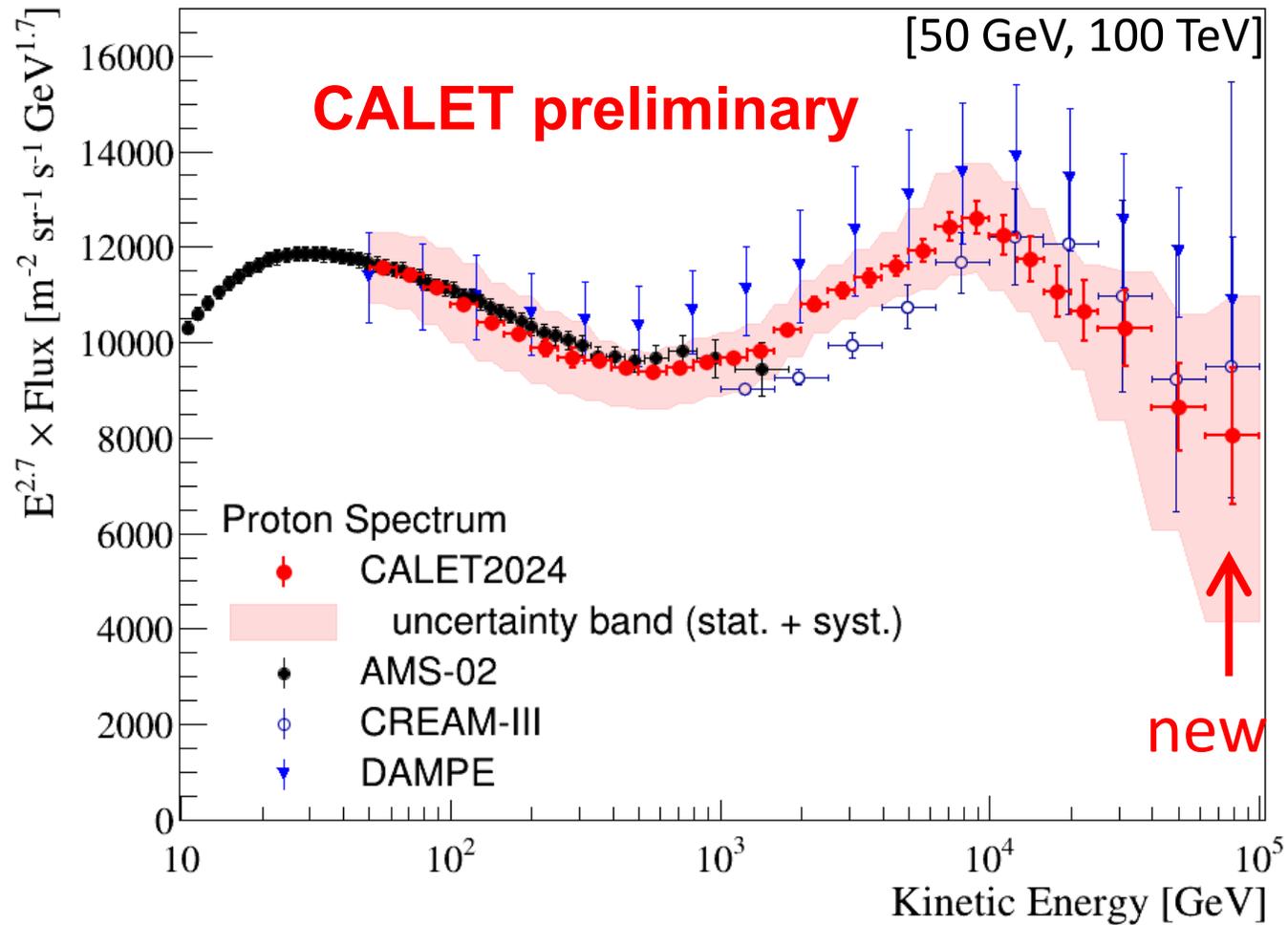
O. Adriani,^{1,2} Y. Akaike,^{3,4} K. Asano,⁵ Y. Asaoka,⁵ E. Berti,¹ A. Bruno,⁹ J. H. Buckley,⁸ N. Cannady,^{10,11,12} G. Castellina,¹³ K. Ebisawa,¹⁷ A. W. Ficklin,¹⁴ H. Fuke,¹⁷ S. Gonzi,^{1,2} T. G. Guzik,¹⁵ W. Ishizaki,⁵ M. H. Israel,⁸ K. Kasahara,²¹ J. Kataoka,²² R. Kawakubo,¹⁴ K. Kobayashi,^{3,4,*} K. Kohri,²⁶ H. S. Krawczynski,¹⁶ A. M. Messineo,^{27,7} J. W. Mitchell,¹¹ S. Miyake,²⁸ A. A. Moiseev,¹⁸ S. Nakahira,¹⁷ J. Nishimura,¹⁷ G. A. de Nolfo,⁹ S. Okuno,¹⁸ F. Rauch,⁸ S. B. Ricciarini,^{13,2} K. Sakai,^{10,11,12} T. Sakamoto,³⁴ M. Sasaki,¹⁹ F. Stolzi,^{6,7} S. Sugita,³⁴ A. Sulaj,^{6,7} M. Takita,⁵ T. Tamura,¹⁸ E. Vannuccini,² J. P. Wefel,¹⁴ K. Yamaoka,³⁹ S. Yanagi,²⁰ and the CALET Collaboration

¹Department of Physics, University of Florence, V.le S. Galvani, 50127 Florence, Italy
²INFN Sezione di Firenze, Via Sansone 1, I-50025 Florence, Italy
³Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 2-2 Higurashi, Maebashi-shi, Saitama, Japan
⁴JEM Utilization Center, Human Spaceflight Technology Center, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, Japan
⁵Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 2-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
⁶Department of Physical Sciences, Earth and Environment, University of Ferrara, 43100 Parma, Italy
⁷INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, I-67010 Assergi, Italy
⁸Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
⁹INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, I-67010 Assergi, Italy
¹⁰Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹¹INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, I-67010 Assergi, Italy
¹²Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹³INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, I-67010 Assergi, Italy
¹⁴Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹⁵Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹⁶Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹⁷Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹⁸Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
¹⁹Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁰Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²¹Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²²Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²³Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁴Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁵Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁶Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁷Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁸Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
²⁹Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁰Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³¹Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³²Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³³Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁴Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁵Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁶Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁷Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁸Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy
³⁹Department of Physics, University of Perugia, 06100 Perugia, Italy



陽子スペクトル最新結果

ICRC2025 update



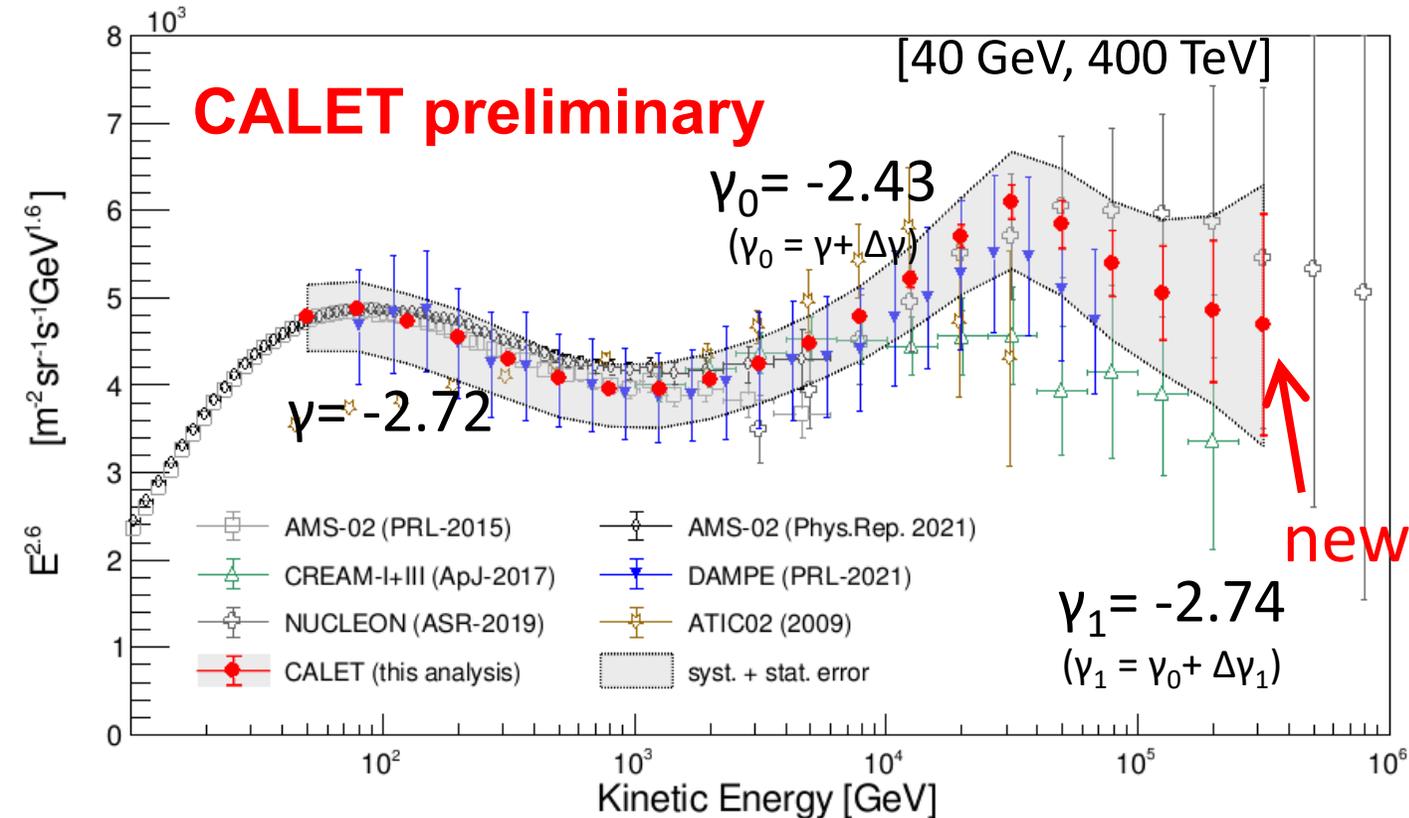
- エネルギー領域を100TeVまで広げた。
- さらに数100TeVまで広げるべく解析中。



ヘリウムスペクトルの最新結果

PRL 130, 171002 (2023)
ICRC2025 update

Data: Oct. 2015 – Dec. 2024

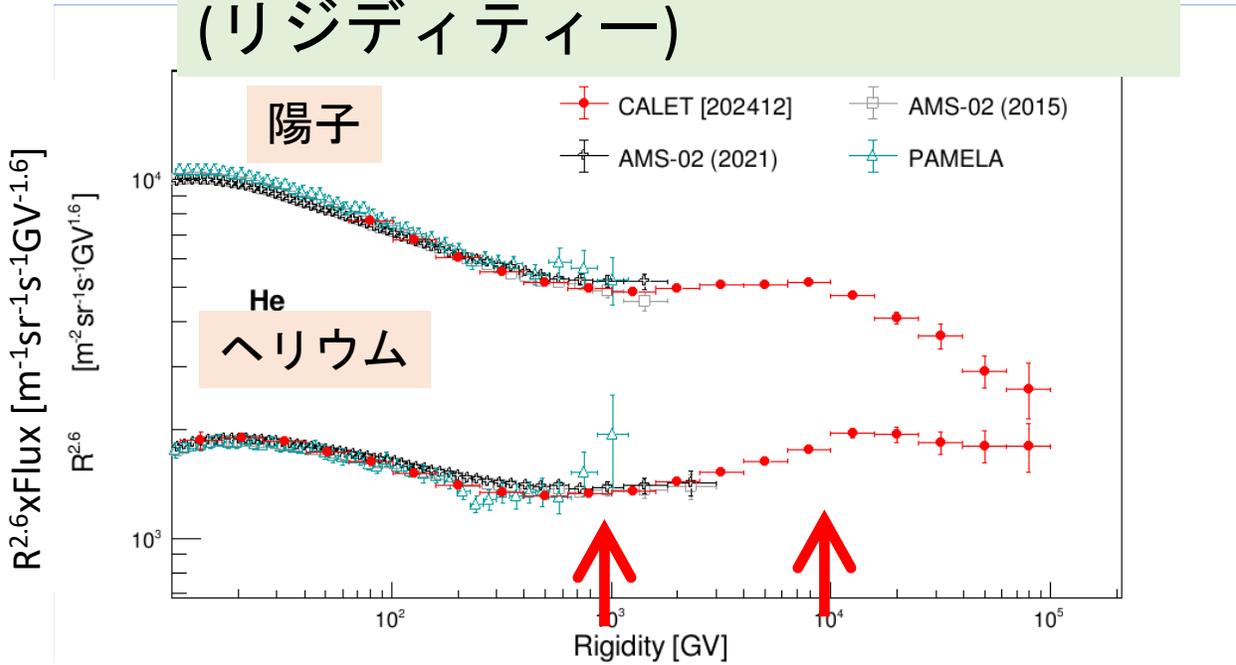


- 2023年に論文に投稿。
- 陽子と同様なエネルギースペクトルの硬化、軟化の構造が見える。
- 10 TeV以上のエネルギー領域では陽子よりもフラックスが多いことが判明。

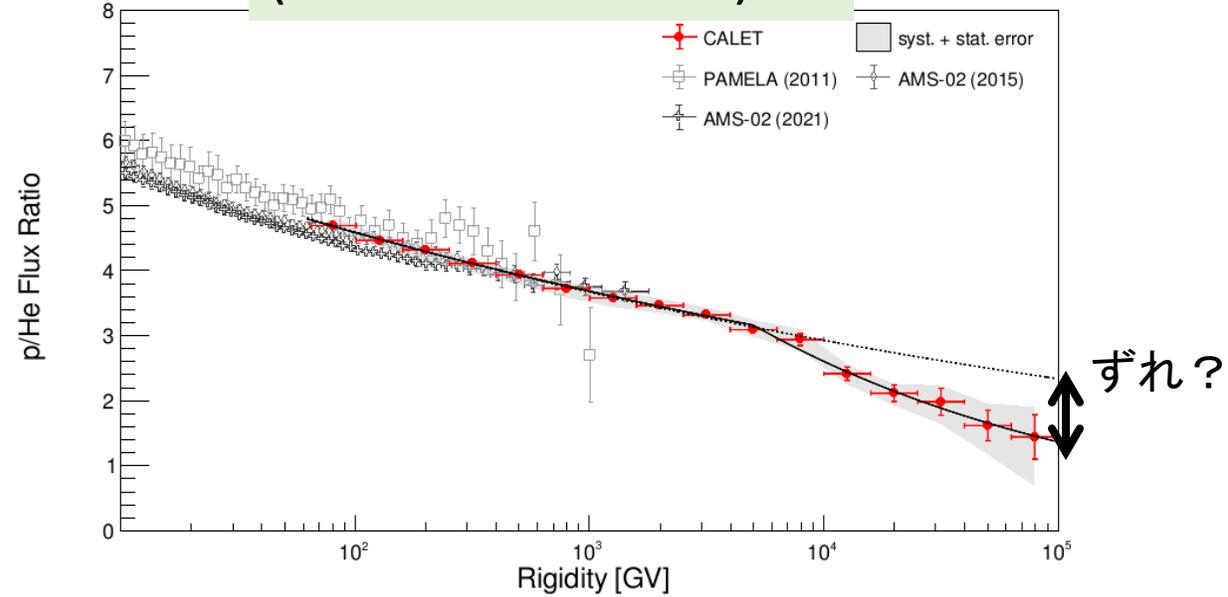


陽子とヘリウムのスペクトルの比較

陽子とヘリウムスペクトルの比較 (リジディティー)



陽子/ヘリウムの比 (リジディティー)

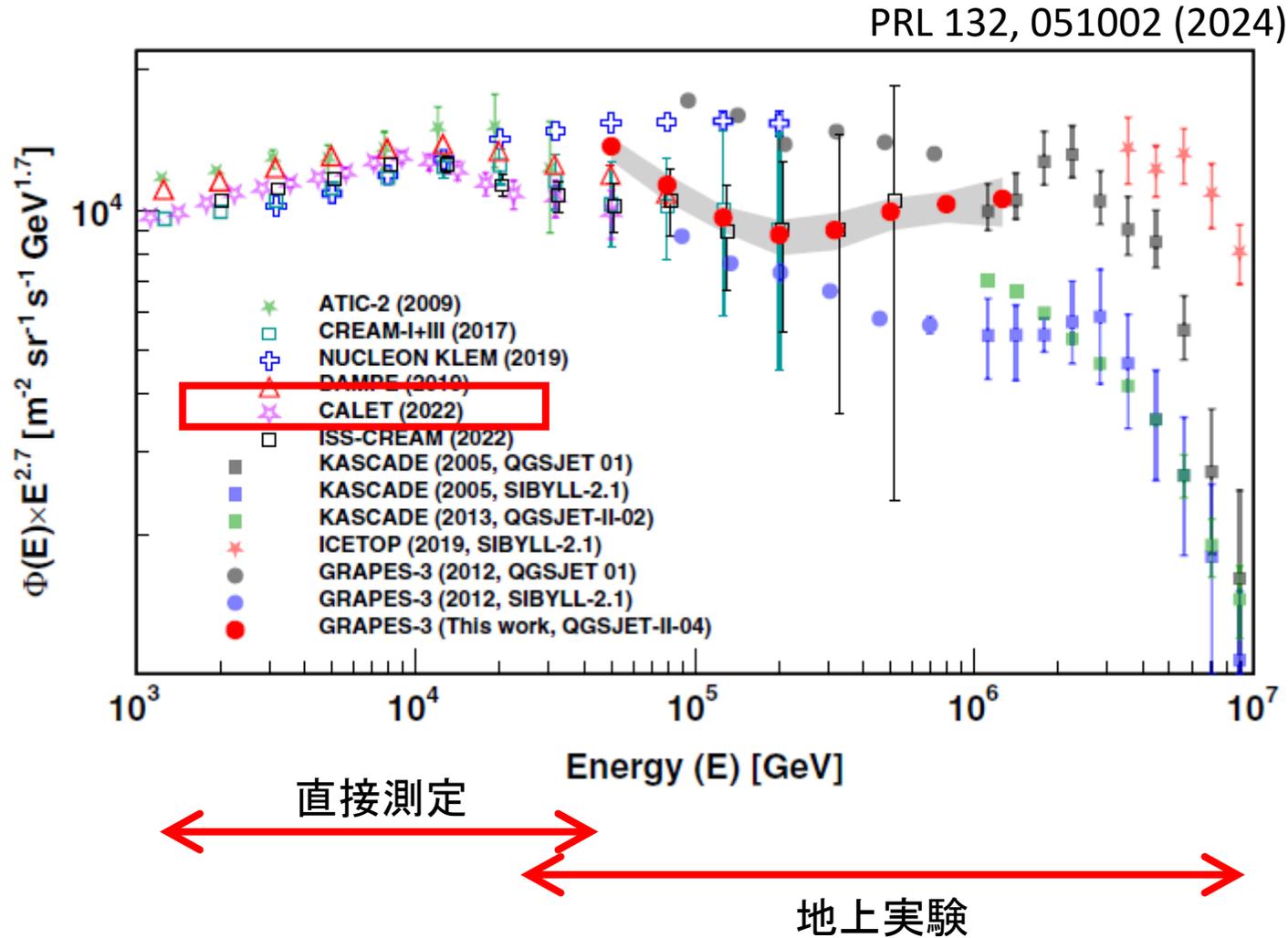


- スペクトルの硬化が見られるエネルギーは陽子とヘリウムでは異なるが、リジディティー ($R=p/(Ze)$, R : リジディティー、 p :運動量、 Z : 電荷、 e : 素電荷) で比較すると同じ領域になる。

- スペクトルの陽子/ヘリウム比は硬化が見られる領域では一定の割合で減少しているが、軟化の領域でずれの兆候が見られており調査中。



今後の展望



- 地上実験がCALETよりも高エネルギー側で陽子のエネルギースペクトルの結果を出してきている。
- 今後さらにデータを増やし、陽子で100 TeV以上の領域も系統誤差を小さく測定できれば、knee領域に近いところでの検証ができ、不定性の大きい地上実験との整合性を議論できるようになる。