宇宙線研大学院カイダンス2022年度 2022年6月4日 オンライン

# 「チベット実験・ALPACA実験グループ 大学院ガイダンス」 宇宙線研究所 瀧田正人・浴<sub>さこ</sub>隆志 研究の主な目的

- ★ TeV領域以上の高エネルギーガンマ線放射天体の探索と観測
- ★ Knee領域(10<sup>15-16</sup> eV)の一次宇宙線の研究
- ★ 一次宇宙線の異方性の研究

★ 太陽活動期の宇宙線変動の研究



# 銀河宇宙線・ガンマ線 ・宇宙線の起源、Pevatronを探せ!

• PeVatronからのsub-PeV領域ガンマ線の検出!

比較的小規模でユニークな研究 が好きな方、お待ちしております。

岱<sub>さこ</sub>(A8)

瀧田(A8)

### ガンマ線観測:宇宙線の起源



Gaisser et al. Front. Phys. (Beijing) 8 (2013) 748

- ✓ 銀河系内の宇宙線の起源
   → 超新星残骸(SNR)??,銀河中心?
   ✓ かに星雲 距離:7000 光年
   1000TeV陽子ジャイロ半径:1光年
  - ✓ ガンマ線による間接的な観測 高エネルギー電子+光子 逆コンプトン散乱 and/or 高エネルギー陽子+星間物質 (p + ISM → π<sup>0</sup> → 2γ)
     → 100TeV以上にエネルギースペクトルが 硬いべキ(~2) ∝E,<sup>-2</sup>で続く 広がった天体 (+分子雲)

銀河系内のどこで/どのように/どのエネルギーまで 宇宙線が加速されているのか? (cf. 人口加速器LHC @ CERN 7 TeV!)





M. Amenomori(1), Y. W. Bao(2), X. J. Bi(3), D. Chen(4), T. L. Chen(5), W. Y. Chen(3), Xu Chen(3), Y. Chen(2), Cirennima(5), S. W. Cui(6), Danzengluobu(5), L. K. Ding(3), J. H. Fang(3,7), K. Fang(3), C. F. Feng(8), Zhaoyang Feng(3), Z. Y. Feng(9), Qi Gao(5), A. Gomi(10), Q. B. Gou(3), Y. Y. Guo(3), Y. Y. Guo(3), Y. Y. Guo(3), H. H. He(3), Z. T. He(6), K. Hibino(11), N. Hotta(12), Haibing Hu(5), H. B. Hu(3), J. Huang(3), H. Y. Jia(9), L. Jiang(3), P. Jiang(4), H. B. Jin(4), K. Kasahara(13), Y. Katayose(10), C. Kato(14), S. Kato(15), K. Kawata(15), M. Kozai(16), D. Kurashige(10), Labaciren(5), G. M. Le(17), A. F. Li(18,8,3), H. J. Li(5), W. J. Li(3,9), Y. Li(4), Y. H. Lin(3,7), B. Liu(19), C. Liu(3), J. S. Liu(3), L. Y. Liu(4), M. Y. Liu(5), W. Liu(3), X. L. Liu(4), Y-Q. Lou(20, 21, 22), H.Lu(3), X. R. Meng(5), K. Munakata(14), H. Nakada(10),
Y. Nakamura(3, 15), Y. Nakazawa(23), H. Nanjo(1), C. C. Ning(5), M. Nishizawa(24), M. Ohnishi(15), T. Ohura(10), S. Okukawa(10), S. Ozawa(25), L. Qian(4), X. Qian(24), X. B. Qu(27), T. Saito(28), M. Sakata(29), T. Sako(15), T. K. Sako(151), J. Shao(3,8),
M. Shibata(10), A. Shiomi(23), H. Sugimoto(30), W. Takano(11), M. Takita(15), Y. H. Tan(3), N. Tateyama(11), S. Torii(31), H. Tsuchiya(32), S. Ud(11), H. Wang(3), Y. P. Wang(5), Wangdui(5), H. R. Wu(3), Q. Wu(5), J. L. Xu(4), L. Xue(8), Y. Yamamoto(29), Z. Yang(3), Y. Q. Yao(4), J. Yin(4), Y. Yokoe(15), N. P. Yu(4), A. F. Yuan(5), L. M. Zhai(4), C. P. Zhang(4), H. M. Zhang(3), J. L. Zhang(3), X. Zhang(2), S. Y. Zhang(3), Yin Zhang(3), S. P. Zhao(3), Sin Zhang(4), Su Zhang(3), J. H. Zhang(3), Yin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Yin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Sin Zhang(3), Yin Zhang(3), Yin Zhang(3), Yin Zhang(3), Sin Zhang(3), Yin Zhang

(1) Department of Physics, Hirosaki University, Hirosaki 036-8561, Japan (2) School of Astronomy and Space Science, Naniing University, Naniing 210093, China (3) Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China (4) National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China (5) Department of Mathematics and Physics, Tibet University, Lhasa 850000, China (6) Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China (7) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China (8) Institute of Frontier and Interdisciplinary Science and Key Laboratory of Particle Physics and Particle Irradiation (MOE), Shandong University, Qingdao 266237, China (9) Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong University, Chengdu 610031. China (10) Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan (11) Faculty of Engineering, Kanagawa University, Yokohama 221-8686, Japan (12) Faculty of Education, Utsunomiva University, Utsunomiva 321-8505, Japan (13) Faculty of Systems Engineering, Shibaura Institute of Technology, Omiva 330-8570, Japan (14) Department of Physics, Shinshu University, Matsumoto 390-8621, Japan (15) Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa 277-8582, Japan (16) Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA), Sagamihara 252-5210, Japan (17) National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China (18) School of Information Science and Engineering, Shandong Agriculture University, Taian 271018, China (19) Department of Astronomy, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China (20) Department of Physics and Tsinghua Centre for Astrophysics (THCA), Tsinghua University, Beijing 100084, China (21) Tsinghua University-National Astronomical Observatories of China (NAOC) Joint Research Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China (22) Department of Astronomy, Tsinghua University, Beijing 100084, China (23) College of Industrial Technology, Nihon University, Narashino 275-8575, Japan (24) National Institute of Informatics, Tokyo 101-8430, Japan (25) National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo 184-8795, Japan (26) Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shangdong Management University, Jinan 250357, China (27) College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China (28) Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Tokyo 116-8523, Japan (29) Department of Physics, Konan University, Kobe 658-8501, Japan (30) Shonan Institute of Technology, Fujisawa 251-8511, Japan (31) Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (32) Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura 319-1195, Japan (33) Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China



#### Yangbajing Cosmic Ray Observatory



90°522E, 30°102N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm<sup>2</sup>)







ガンマ線シャワーの選別

#### ガンマ線**→**少ないミュー粒子





地下ミュー粒子の有無で選別可能!!

9



#### チベットASγ実験による最高エネルギーガンマ線の発見

Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, PRL 123, 051101 (2019)





bet source position: R.A. =  $336.82^{\circ} \pm 0.16^{\circ}$ Dec =  $60.85^{\circ} \pm 0.10^{\circ}$ 

●分子雲と超新星残骸の重なる領域からのガンマ線 ●パルサーの位置から来ていない → 陽子起源を示唆! 0.44°離れる(系統誤差込みで3.1σ離れている) ※HAWC実験のソースの位置はパルサーとも分子雲の両 方とも可能なので、分離できていない。  $\Rightarrow \sigma_{\text{EXT}} = 0.24^{\circ} \pm 0.10^{\circ}$ 

※ 過去の他の実験結果と無矛盾 VERITAS:  $\sigma_1$  = 0.27°±0.05°,  $\sigma_2$  = 0.18°±0.03° Fermi: 0.25°-radius disk HAWC: <0.23° (90% C.L.) 12



銀河面に沿って(-10°<銀経<10°)0.4 – 1 PeV ガンマ線23事例を5.9σで観測 (そのうち雑音は2.7事例)

→既知のTeVガンマ線天体から来ていない! & 事例の場所からそれ以外の10 TeV 以上のガンマ線が来ていない! → 孤立ガンマ線→ ガンマ線は宇宙線陽子起源



陽子をPeV領域まで加速しているPeVatronが過去/現在の銀 河系に存在することを示した初めての決定的証拠。



#### 銀河面からのsub-PeVガンマ線の解釈

高エネルギー 宇宙線

銀河系星間物質

Sub-PeVガンマ線



高エネルギー宇宙線が作る宇宙線プール Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

電波(21cm) で見た水素原子の分布 Hartmann et al. (1997) Dickey & Lockman (1990)

今回の観測結果

✓ PeVatronによって加速されたPeV領域宇宙線が銀河磁場によって銀河系内に長い 間閉じ込められて宇宙線プールと作っているという理論的モデルを検証した。 天の川銀河のリモートセンシンク

#### Dawn of sub-PeV gamma-ray astronomy





## The ALPACA Collaboration



I. Sako <sup>A</sup>, M. Anzorena <sup>A</sup>, S. Asano <sup>B</sup>, C. A. H. Condori <sup>C</sup>, E. de la Fuente <sup>D</sup>, A. Gomi <sup>E</sup>, K. Hibino <sup>F</sup>, N. Hotta <sup>G</sup>, Y. Katayose <sup>E</sup>, C. Kato <sup>B</sup>, S. Kato <sup>A</sup>, T. Kawashima <sup>A</sup>, K. Kawata <sup>A</sup>, T. Koi <sup>H</sup>, H. Kojima <sup>I</sup>, D. Kurashige <sup>E</sup>, J. Lozoya <sup>D</sup>, R. Mayta <sup>J,K</sup>, P. Miranda <sup>C</sup>, K. Munakata <sup>B</sup>, K. Nagaya <sup>E</sup>, Y. Nakamura <sup>A</sup>, Y. Nakazawa <sup>L</sup>, C. Nina <sup>C</sup>, M. Nishizawa <sup>M</sup>, S. Ogio <sup>J,K</sup>, M. Ohnishi <sup>A</sup>, S. Okukawa <sup>E</sup>, F. Orozco <sup>D</sup>, A. Oshima <sup>H</sup>, M. Raljevich <sup>C</sup>, H. Rivera <sup>C</sup>, T. Saito <sup>N</sup>, Y. Sakakibara <sup>E</sup>, T. K. Sako <sup>A</sup>, S. Shibata <sup>I</sup>, A. Shiomi <sup>L</sup>, M. Subieta <sup>C</sup>, N. Tajima <sup>O</sup>, W. Takano <sup>F</sup>, M. Takita <sup>A</sup>, Y. Tameda <sup>P</sup>, K. Tanaka <sup>Q</sup>, R. Ticona <sup>C</sup>, I. Toledano-Juarez <sup>D</sup>, H. Torres <sup>D</sup>, H. Tsuchiya <sup>R</sup>, Y. Tsunesada <sup>J,K</sup>, S. Udo <sup>F</sup>, K. Yamazaki <sup>H</sup>, Y. Yokoe <sup>A</sup> et al. (The ALPACA Collaboration)

ICRR, Univ. of Tokyo <sup>A</sup>, Dept. of Phys., Shinshu Univ.<sup>B</sup>, IIF, UMSA <sup>C</sup>, Univ. de Guadalajara <sup>D</sup>,
 Fac. of Engn., Yokohama Natl. Univ.<sup>E</sup>, Fac. of Engn., Kanagawa Univ.<sup>F</sup>, Utsunomiya Univ.<sup>G</sup>,
 Coll. of Engn., Chubu Univ.<sup>H</sup>, Astro. Obs., Chubu Univ.<sup>I</sup>, Grad. Sch. of Sci.,
 Osaka City Univ.<sup>J</sup>, NITEP, Osaka City Univ.<sup>K</sup>, Coll. of Ind. Tech., Nihon Univ.<sup>L</sup>, NII <sup>M</sup>,
 Tokyo Metro. Coll. of Ind. Tech.<sup>N</sup>, RIKEN <sup>O</sup>, Fac. of Engn., Osaka Electro-Comm. Univ.<sup>P</sup>,
 Fac. of Info. Sci., Hiroshima City Univ.<sup>Q</sup>, JAEA <sup>R</sup>



# **ALPACA** Array







ガンマ線観測:Dark Accelerators

#### その他 10TeV以上ターゲット



# ALPAQUITA & infrastructure

- Central electronics hut
- Perimeters
- Powerline (branch from the substation-Chacaltaya observatory line)
- Cable drains
- Lightning rods
- Long distance Wifi
- Water system





PROYECTO ALPACA

Detector (center of array)











今週から日本人が訪問して建設作業再開 7月から最初のデータ収集開始予定!



• 現行実験:Tibet-AS+MD sub-PeV γ 天文学: **PeVatron**を探せ! Tibet-AS+YAC 宇宙線の加速機構解明 MD & YAC-II Started 2014 次期計画 ALPACA計画 南天sub-PeV γ. Pevatron等 Half ALPACA 2023, ALPAC: 2024 「今」ボリビアで建設中 Good Timing For You! 来年から初期データ解 ・チベット・ボリビア出張 約1ヶ月/年 その後も拡張作業編 • その他:本郷で講義 (M1)、TAグループと共同で柏でゼミ、 測定器開発やデータ解析、共同研究者と研究の議論(宇宙線研 内・国内・国際)、学会(国内・国際)発表、論文執筆

#### 銀河宇宙線・ガンマ線

- 宇宙線の起源、Pevatronを探せ!
   最も高いエネルギーのガンマ線観測
  - 南半球初の sub-PeV観測
  - 宇宙線そのものの観測
  - 銀河系「内」が主題(伝播距離の限界)



比較的小規模でユニークな研究 が好きな方、お待ちしております。

