

令和元年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03655

研究課題名(和文)100TeV超領域ガンマ線天文学の開拓

研究課題名(英文)The opening of gamma ray astronomy above 100 TeV energy region

研究代表者

大西 宗博(Ohnishi, Munehiro)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：10260514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：中国チベット自治区の羊八井宇宙線観測所にある広視野宇宙線望遠鏡チベット空気シャワー観測装置と地下水チェレンコフ型ミューオン検出装置を連動し、100 TeV (10の14乗 電子ボルト) 超領域の宇宙ガンマ線を超低雑音で観測する研究である。これらの装置を使って、世界で初めて100 TeVを超えるガンマ線が「かに星雲」から到来していることを有意に検出した。また、MGRO J1908+06 からの100 TeV超ガンマ線も有意に捉えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、今まで誰も検出することができなかった100 TeV (10の14乗 電子ボルト) を超える最高エネルギーの宇宙ガンマ線を観測することに成功した。100 TeVを超える高いエネルギーのガンマ線を観測した本研究は、物理学的には未だ解明されていない宇宙線の起源と加速に重要な知見を与えるとともに、天文学的には新しいエネルギー領域のガンマ線天文学を切り開くものである。

研究成果の概要(英文)：This study is to observe cosmic gamma rays above 100 TeV energy region with very high signal-to-noise ratio and wide field of view using the Tibet air shower array with the underground water-Cherenkov-type muon detector array. We observed highest energy gamma rays above 100 TeV from the Crab Nebula by these arrays. We also detected above 100 TeV gamma rays from MGRO J1908+06. These results give the new important knowledge to the cosmic ray physics, and we succeeded to open the gamma ray astronomy above 100 TeV energy region.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 ガンマ線天文学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

V. F. Hess によって 1912 年に発見された宇宙線（原子核宇宙線）は陽子から鉄原子核を越える超重核まで、 10^9 eV から 10^{20} eV の最高エネルギー領域に至るまで観測されているが、その加速源・加速機構の実験的証拠は未だ見つかっていない。Knee 領域 (10^{15} から 10^{16} eV) で宇宙線エネルギースペクトルの折れ曲がり（冪 -2.7 から -3.1 ）と化学組成の変化（軽核から重核）が観測されているが、これは超新星残骸（SNR）での宇宙線加速限界によるものであることを示唆し、理論的コンセンサスではこれより低エネルギーの宇宙線の加速源は銀河系内の SNR とされている。しかし、電荷を持った Knee 領域宇宙線は銀河磁場に曲げられるため、その加速源の方向を特定できない。さて、SNR で原子核宇宙線が加速されると、その一部は近くの物質と相互作用して、中性パイ中間子を発生し、その崩壊ガンマ線のエネルギーは親原子核宇宙線エネルギーの約 $1/10$ 、すなわち 100 TeV を超えるエネルギー領域まで達する。そのガンマ線を観測すれば銀河磁場に邪魔されずに加速源の方向を特定できる。他方、SNR では電子も同様に加速される。加速された高エネルギー電子は自身の出したシンクロトロン光子や周囲の光子と逆コンプトン散乱し、高エネルギーガンマ線を生成するが、親の高エネルギー電子は磁場によるシンクロトロン冷却によりエネルギーを失うこと、「クライン-仁科効果」による電子-光子衝突断面積が減少することにより、電子起源ガンマ線のエネルギーは数 10 TeV 程度が限界であると考えられている。すなわち、原子核宇宙線の加速源を特定するためには 100 TeV 超領域宇宙ガンマ線観測が鍵となる。

これまで、大気チェレンコフ望遠鏡（ナミビア共和国の H.E.S.S. 実験 [1] 等）や空気シャワー観測装置（我々 Tibet AS γ 実験 [2] や米国の MILAGRO 実験 [3]）により、1 TeV 領域ガンマ線放射天体は現在全天で約 100 個観測されている。ただし、既存の観測は 10 TeV 領域（高々数 10 TeV 程度）のエネルギーまでしか測定できないために、観測されたガンマ線が電子加速起源か原子核宇宙線加速起源かの識別についての結論は出ていない。この問題の解決のためには 100 TeV を超えるエネルギー領域の宇宙ガンマ線観測データが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、現有設備である広視野宇宙線望遠鏡チベット空気シャワー観測装置と平成 25 年度に完成した世界最大 ($3,200$ m²) の地下水チェレンコフ型ミュオン観測装置を連動する世界で類のない独創的な提案により、世界最高感度で 100 TeV を超えるエネルギー領域宇宙ガンマ線放射天体の低雑音広視野連続観測を世界に先駆けて行う。研究期間内に複数個の 100 TeV 超領域ガンマ線放射天体からのエネルギースペクトルを測定できることが予想される。その天文学・物理学的意義は、現在まで未同定の 100 TeV 領域ガンマ線放射天体すなわち、Knee 領域の原子核宇宙線について新しい知見を得るとともに、100 TeV 超領域ガンマ線天文学を開拓することにある。

3. 研究の方法

図 1 のようにシンチレーション検出器を 7.5 m 間隔に配置したチベット空気シャワー観測装置が稼働している。この装置で検出できる空気シャワーの親粒子である宇宙ガンマ線の最低エネルギーは約 1 TeV であり、そのトリガー頻度は約 1.7 kHz である。空気シャワーの到来方向は約 0.8 度の精度で決めることができる。100 TeV 超領域の空気シャワーに対しては、その精度は約 0.2 度である。一方、本研究で使用する水チェレンコフ型ミュオン観測装置の検出器の 1 単位の面積は約 50 m² であり、水深 1.5 m の水の中に 20 インチの光電子増倍管 (PMT) を 1 本下向きに取り付け、荷電粒子から放出され床や壁で反射するチェレンコフ光を検出する。この検出器は地下 2.5 m に作られている (図 2)。これにより約

1 GeV 以上のミュオンを効率良く検出できる。平成 25 年度に完成した水チェレンコフ検出器の総数は 64 単位であり、チベット空気シャワー観測装置の中心部に 4 クラスターに分けて設置され、その総面積は 3,200 m² である。宇宙ガンマ線観測の雑音となる原子核宇宙線が空気中で生成する空気シャワーはミュオンが多数含まれるが、宇宙ガンマ線が空気中で生成する空気シャワーにはミュオンがほとんど含まれない。従って、水チェレンコフ型ミュオン観測装置によりミュオンの数を計測することにより、原子核宇宙線による雑音を効率的 (100 TeV で 1000 分の 1 以下) に除去することが可能となる。点源天体からのガンマ線に関して、図 3 に示すように、10 から数 100 TeV では空気シャワー観測装置単体と比較して約 3-10 倍程度感度が向上する。

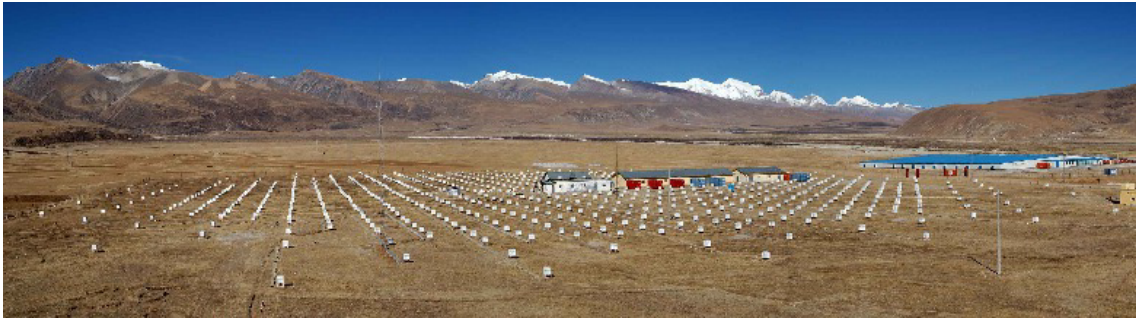


図 1: チベット空気シャワー観測装置全景。白い点が空気シャワー中の電磁成分を測定するシンチレーション検出器。

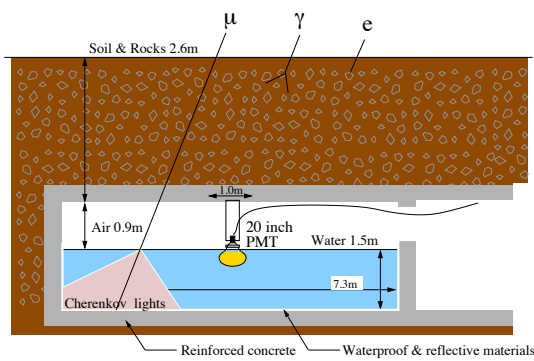


図 2: 水チェレンコフ検出器断面図。

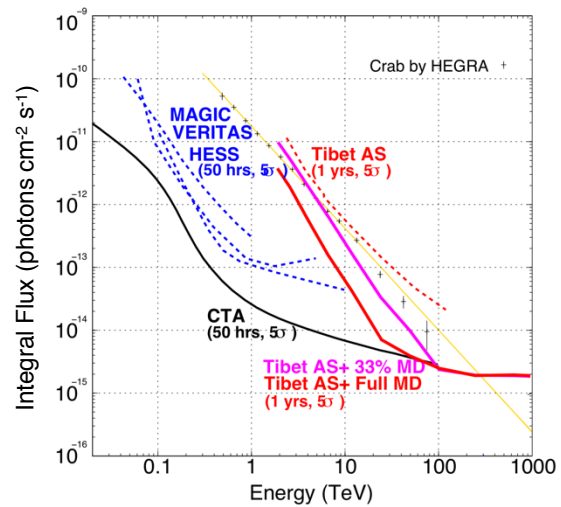


図 3: 感度曲線。Tibet AS+33% MD が本研究で使用した装置の感度。

4. 研究成果

本研究ではこれらの装置を使って、世界で初めて 100 TeV を超えるガンマ線が「かに星雲」から到来していることを有意に検出した (図 4, 5)。また、MGRO J1908+06 からの 100 TeV 超ガンマ線も有意に捉えた。これら 2 天体と G106.3+2.7 の 3 天体からの数 TeV から 100 TeV 超領域ガンマ線のエネルギースペクトルを観測した。「かに星雲」からのガンマ線のエネルギースペクトルを図 6 に示す。これらの観測結果は 100 TeV 超領域宇宙ガンマ線の新しい重要な知見であり、本研究により 100 TeV 超領域ガンマ線天文学を切り開くことに成功した。これらの成果は 2019 年 3 月の日本物理学会第 74 回年会で発表し、論文は現在 Physical Review Letters に投稿中である。

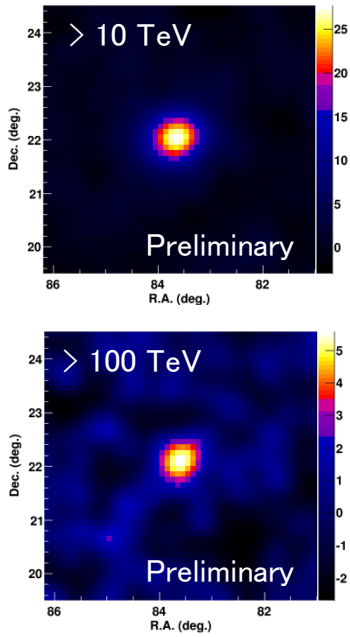


図 4: 本研究で得られた「かに星雲」周辺のイベント数有意性マップ。上図と下図はそれぞれ 10 TeV 以上と 100 TeV 以上。

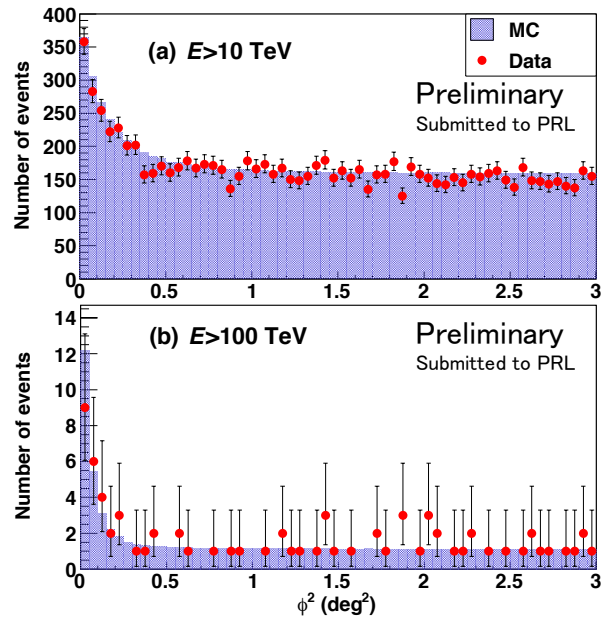


図 5: イベント数の「かに星雲」からの角距離 2 乗分布の実験データと点源を仮定したモンテカルロシミュレーションとの比較。(a) と (b) はそれぞれ 10 TeV 以上と 100 TeV 以上。実験データはどちらのエネルギー領域でも点源と矛盾しない。

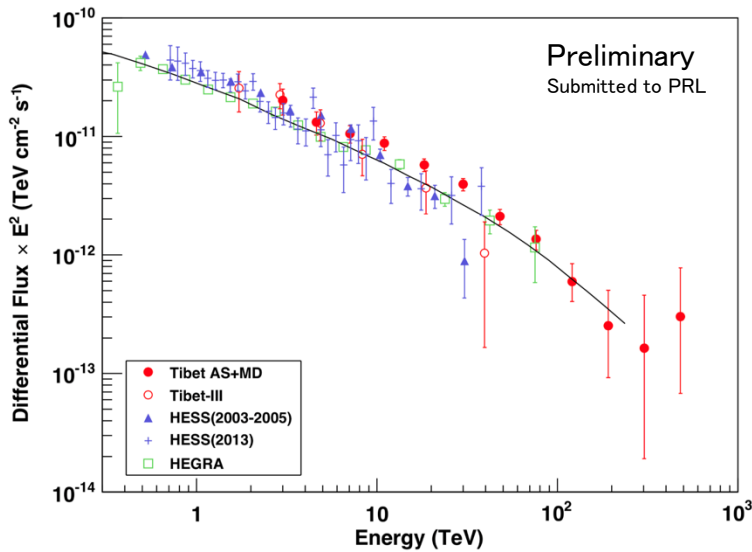


図 6: 「かに星雲」からのガンマ線のエネルギースペクトル。赤の中実丸が本研究の観測結果。ほかに Tibet-III [4]、H.E.S.S. [5][6]、HEGRA [7] の結果を示す。

参考文献

- [1] F. Aharonian *et al.*, *Science*, **307**, 1938 (2005).
- [2] M. Amenomori *et al.*, *Science*, **314**, 439 (2006).
- [3] A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J.*, **664**, L91 (2007).
- [4] M. Amenomori *et al.*, *Astrophys. J.*, **692**, 61 (2009).
- [5] F. Aharonian *et al.*, *Astron. & Astrophys.*, **457**, 899 (2006).
- [6] A. Abramowski *et al.*, *Astron. & Astrophys.*, **562**, L4 (2014).
- [7] F. Aharonian *et al.*, *Astrophys. J.*, **614**, 897 (2004).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) “Influence of Earth-directed Coronal Mass Ejections on the Sun’s Shadow Observed by the Tibet-III Air Shower Array”,
M. Amenomori, K. Kawata (27), M. Ohnishi (46), T. K. Sako (54), M. Takita (60) *et al.* (計 81 名),
The Astrophysical Journal, **860**, 13 (7pp) (2018), 10.3847/1538-4357/aac2e6, 査読有.
- (2) “Evaluation of the Interplanetary Magnetic Field Strength Using the Cosmic-Ray Shadow of the Sun”,
M. Amenomori, K. Kawata (27), M. Ohnishi (46), T. K. Sako(54), M. Takita (60) *et al.* (計 82 名),
Physical Review Letters, **120**, 031101 (6pp) (2018), 10.1103/PhysRevLett.120.031101, 査読有.
- (3) “Northern Sky Galactic Cosmic Ray Anisotropy between 10 and 1000 TeV with the Tibet Air Shower Array”,
M. Amenomori, K. Kawata (27), M. Ohnishi (47), T. K. Sako (55), M. Takita (61) *et al.* (計 83 名),
The Astrophysical Journal, **836**, 153 (7pp) (2017), 10.3847/1538-4357/836/2/153, 査読有.
- (4) “Search for Gamma Rays above 100 TeV from the Crab Nebula with the Tibet Air Shower Array and the 100 m² muon Detector”,
M. Amenomori, K. Kawata (27), M. Ohnishi (47), T. K. Sako (55), M. Takita (61) *et al.* (計 84 名),
The Astrophysical Journal, **813**, 98 (5pp) (2015), 10.1088/0004-637X/813/2/98, 査読有.

〔学会発表〕(計 12 件)

- (1) 佐古崇志, 「チベット空気シャワー観測装置による超高エネルギーガンマ線源の観測 (1)」,
日本物理学会 第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日- 17 日, 九州大学.
- (2) 川田和正, 「チベット空気シャワー観測装置による超高エネルギーガンマ線源の観測 (2)」,
日本物理学会 第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日- 17 日, 九州大学.
- (3) 瀧田正人, “Observation of high-energy cosmic rays with the Tibet air shower array”,
日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日- 17 日, 信州大学.
- (4) 川田和正, 「チベット空気シャワー観測装置におけるガンマ線起源空気シャワーの再構成」,
日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日- 17 日, 信州大学.
- (5) 大西宗博, 「ALPACA 実験 2: ALPAQUITA 進捗状況」,
日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年 9 月 11 日- 13 日, 北海道大学.
- (6) Masato Takita, “The Tibet AS+MD Project; status report 2017”,
35th International Cosmic Ray Conference (国際学会), 2017 年 7 月 12 日- 20 日, Busan, Korea.
- (7) 川田和正, 「チベット空気シャワーアレイにおける 100TeV 領域ガンマ線のエネルギー決定方法」,
日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日- 20 日, 大阪大学.
- (8) Takashi K. Sako, “The ALPACA experiment” (招待講演),
7th Workshop on Air Shower Detection at High Altitude (国際学会),
2016 年 11 月 30 日- 12 月 2 日, Torino, Italy.
- (9) 大西宗博, 「ALPACA 実験 1: ALPACA 実験計画概要」,
日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 14 日- 16 日, 愛媛大学.
- (10) Masato Takita, “The ALPACA Project” (招待講演),
19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (国際学会),
2016 年 8 月 22 日- 27 日, Moscow, Russia.
- (11) Masato Takita, “The TIBET AS+MD Project; progress report 2015”,
34th International Cosmic Ray Conference (国際学会),
2015 年 7 月 30 日- 8 月 6 日, The Hague, The Netherlands.
- (12) Takashi K. Sako, “Search for gamma rays above 100 TeV from the Crab Nebula using the Tibet air shower array and the 100 m² muon detector”,
34th International Cosmic Ray Conference (国際学会),
2015 年 7 月 30 日- 8 月 06 日, The Hague, The Netherlands.

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 瀧田 正人

ローマ字氏名： Masato Takita

研究協力者氏名： 佐古 崇志

ローマ字氏名： Takashi K. Sako

研究協力者氏名： 川田 和正

ローマ字氏名： Kazumasa Kawata

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。