

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 22日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244027

研究課題名（和文） 最高エネルギーガンマ線放射天体の研究

研究課題名（英文） STUDY OF CELESTIAL SOURCES EMITTING HIGHEST-ENERGY GAMMA RAYS

研究代表者

瀧田 正人 (TAKITA MASATO)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：20202161

研究成果の概要（和文）：中国と共同で中国チベットの羊八井高原（標高 4,300m）に空気シャワー観測装置（Tibet-III, 面積 37,000m²）を設置して、高エネルギー宇宙線・宇宙ガンマ線の研究を行っている。本研究では、宇宙ガンマ線に対する Tibet-III 空気シャワー観測装置の感度向上のために、大型地下ミュオン検出器を建設した。また、Tibet-III 空気シャワー観測装置を用いて宇宙からの最高エネルギーガンマ線等の宇宙ガンマ線や宇宙線に関する幅広い研究を行った。

研究成果の概要（英文）：In joint research with Chinese colleagues, we study high-energy cosmic rays/ gamma rays by means of an air shower array (called Tibet-III, 37,000m² in area) set up at Yangbajing (4,300m above sea level), Tibet, China. In this research program, a large underground muon detector is constructed to improve the Tibet-III sensitivity to cosmic gamma rays. Furthermore, various researches are made on cosmic rays and cosmic gamma rays including highest-energy cosmic rays by means of Tibet-III.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	0	0	0
2008年度	0	0	0
2009年度	29,000,000	8,700,000	37,700,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・(素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理)

キーワード：チベット・宇宙ガンマ線・宇宙線・ミュオン・空気シャワー・水チェレンコフ

1. 研究開始当初の背景

(1) 一次原子核宇宙線全粒子エネルギースペクトルの 10^{15} - 10^{16} eV に折れ曲がり (Knee) が発見されて以来約 40 年が経ち、Knee エネルギー領域以下の原子核宇宙線は我々の銀河系内にある超新星爆発起源であり、その加速機構は超新星残骸によるショック加速であることが近年の理論的なコンセンサスとなっている。その加速シナリオによると銀河原子

核宇宙線の加速限界が Knee の成因であるが、Knee エネルギー領域以下の原子核宇宙線は銀河磁場により方向性を失うためにその起源天体を同定できない。他方、超新星残骸で加速された原子核宇宙線は残骸周辺の物質と反応することにより π^0 中間子を生成し、その π^0 中間子は 2 本のガンマ線に崩壊する。そのガンマ線エネルギーは親原子核宇宙線の加速限界の約 1/10、即ち 100TeV 領域となる。

ガンマ線は銀河磁場により曲げられることなく地球に到達するので、原子核宇宙線の加速天体源を同定することができる。また、宇宙論的な距離（銀河系外）に 100TeV 領域以上のガンマ線放射天体がある可能性は否定できないが、 3° K 宇宙背景放射による減衰効果のためにそのガンマ線が地球に到達することは想定しにくい。従って、100TeV 領域ガンマ線は人類が天然加速器から現実的に期待できる最高エネルギーガンマ線となる。

(2)さて、ここで世界の情勢近況について簡単に触れておく。2005 年にアフリカのナミビア共和国に設置された狭視野（数度程度）解像型空気チェレンコフ型望遠鏡 HESS 実験（直径 12m の解像型空気チェレンコフ望遠鏡 4 台によるステレオ観測）が南天で銀河面にあるガンマ線放射天体を探索したところ、新たに 14 個の 1TeV 領域ガンマ線放射天体を発見した。また、北天では米国の Milagro 実験（1TeV 領域のガンマ線観測に特化した光遮蔽のない 2 層型水チェレンコフ型空気シャワー観測装置であり、下層検出器で電磁シャワーの漏れ（ガンマ線）とミュオン（原子核宇宙線）の識別ができない。2007 年実験終了。）が、1TeV 領域ガンマ線放射強度がカニ星雲程度に強い 3 つの 1TeV 領域ガンマ線放射天体と 4 つの候補天体を観測した旨を 2007 年に報告した。これまでの実験により、1TeV 領域ガンマ線放射天体は現在全天で約 70 個観測されている。ただし、既存の観測は 1TeV 領域（高々 10TeV 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。当然のことながら、100TeV 領域ガンマ線の観測は未開拓のままである。

2. 研究の目的

本研究では、空気シャワー観測装置（既存の Tibet-III）の宇宙ガンマ線に対する感度を向上するために、地下大型水チェレンコフ型ミュオン観測装置を建設する。また、空気シャワー観測装置と併用することにより、最高エネルギー（100TeV 領域： $5 \times 10^{13} - 10^{15}$ eV）宇宙ガンマ線放射天体の広視野連続観測を可能にすることを目指す。ミュオン観測装置を用いて、ミュオンを伴う原子核宇宙線起源空気シャワーによる雑音とミュオンを伴わないガンマ線起源空気シャワーによる信号の弁別が可能となる。銀河系内超新星残骸において Knee エネルギー領域（ $10^{15} - 10^{16}$ eV）まで加速された原子核宇宙線が超新星残骸の周辺物質と反応し、生成された π^0 中間子からの崩壊ガンマ線が最高エネルギーガンマ線となる。また、チベット空気シャワー観測装置を用いて、宇宙線や宇宙ガンマ線に関する幅広い研究を行う。

3. 研究の方法

本研究では、現在チベットで稼働中の空気シャワー観測装置 Tibet-III の地下に大型水チェレンコフ型ミュオン観測装置を建設する。そして、2 つの観測装置の連動実験により最高エネルギーガンマ線放射天体の研究を開始することを目指す。地下大型ミュオン観測装置により、ミュオンを伴う原子核宇宙線起源空気シャワーによる雑音とミュオンを伴わないガンマ線起源空気シャワーによる信号の弁別が可能となる。研究期間内に地下大型ミュオン観測装置を建設し、データ解析に必要なシミュレーションやデータ解析用ソフトウェアを開発する。さらに、本研究課題と深い関わりがある、広い意味での宇宙線及び宇宙ガンマ線に関する研究をチベット空気シャワー観測装置を用いて行う。

4. 研究成果

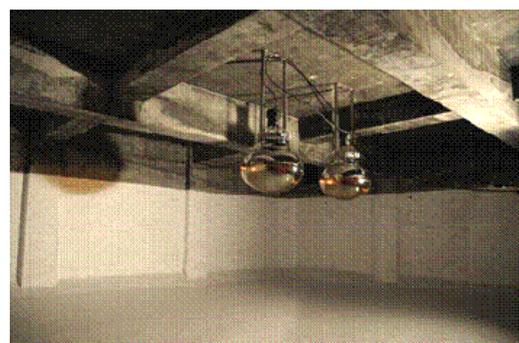
チベット空気シャワー観測装置の地下に平成 22 年度の 12 月に鉄筋コンクリート製地下プールの躯体が完成した。

図 1 チベット空気シャワー観測装置



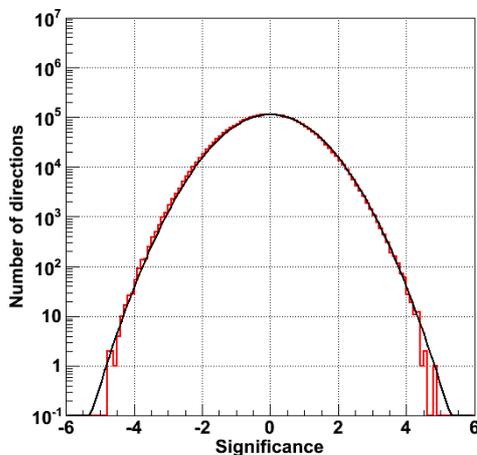
平成 23 度は完成した躯体の内部に防水塗料を塗布して水密構造とした。また、地下プール内に光センサーである 20 インチ光電子増倍管 (PMT)、信号・高電圧ケーブル等のインストールを行ってミュオン検出器プールが完成した。最高エネルギー領域宇宙ガンマ線観測用としては過去現在を通して世界一の有効面積を持つミュオン観測装置が完成したことになる。

図 2 完成した大型地下ミュオン観測装置の一部



また、最高エネルギーガンマ線データ解析に必要なソフトウェアの開発を精力的に行った。最高エネルギーガンマ線に関する予備的な解析も進行中である。地下大型ミュオン観測装置の一部に相当するミュオン観測装置を用いて sub-PeV 領域ガンマ線放射天体に関する予備的な北天解析を行ったところ、統計的に有為なガンマ線放射天体は発見されなかった。(図 3 参照)

図 3 sub-PeV 領域ガンマ線放射天体北天探索の significance マップ。ヒストグラムは観測データを表し、実線は放射天体が感度以下に存在する場合の期待値。



今後、大型ミュオン観測装置全体で蓄積予定の観測データを解析することにより、最高エネルギーガンマ線放射天体に関する研究が大きく進むことが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects, M. Amenomori, H. B. Hu, M. Ohnishi (43 番目), M. Takita (57 番目) et al., (全 85 名), *Advances in Space Research*, **47**, 629-639 (2011), 査読有, DOI:10.1016/j.asr.2010.08.029
- ② Observation of the Fermi pulsar catalog at TeV energies with the Tibet air shower experiment, M. Amenomori, H. B. Hu, M. Ohnishi (45 番目), M. Takita (56 番目) et al., (全 84

名), *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, **7**, 211-215 (2011) 査読有, DOI: 10.5194/astra-7-211-2011

- ③ Cosmic-ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air-shower experiment, M. Amenomori, H. B. Hu, M. Ohnishi (45 番目), M. Takita (56 番目) et al., (全 84 名), *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, **7**, 15-20 (2011) 査読有, DOI: 10.5194/astra-7-15-2011
- ④ Observation of TeV Gamma Rays from the Fermi Bright Galactic Sources with the Tibet Air Shower Array, M. Amenomori, M. Ohnishi (45 番目), M. Takita (56 番目), et al. (全 84 名), *ApJ*, **709**, L6-L10 (2010) 査読有, DOI:10.1088/2041-8205/709/1/L6
- ⑤ On Temporal Variations of the Multi-TeV Cosmic Ray Anisotropy Using the Tibet III Air Shower Array, M. Amenomori, M. Ohnishi (46 番目) M. Takita (58 番目), et al. (全 86 名), *ApJ*, **711**, 119-124 (2010) 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/711/1/119
- ⑥ Heliospheric signatures seen in the sidereal anisotropy of high-energy galactic cosmic ray intensity, M. Amenomori, M. Ohnishi (45 番目), M. Takita (58 番目), et al. (全 85 名), *AIP Conf. Proc.*, **1302**, 285-290 (2010), 査読有, DOI:10.1063/1.3529985
- ⑦ SOLAR CYCLE DEPENDENCE OF THE DIURNAL ANISOTROPY OF 0.6 TeV COSMIC-RAY INTENSITY OBSERVED WITH THE MATSUSHIRO UNDERGROUND MUON DETECTOR, K. Munakata, M. Takita (6 番目), et al. (全 7 名), *ApJ*, **712**, 1100-1106 (2010) 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/712/2/1100
- ⑧ Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds, H. Tsuchiya, T. Enoto, M. Takita (11 番目), K. Makishima et al. (全 12 名), *Physical Review Letters* **102**, 25500 (1-4), (2009) 査読有,

- ⑨ Recent results on gamma-ray observation by the Tibet air shower array and related topics,
M. Amenomori, M. Ohnishi (45番目) M. Takita (56番目), et al. (全84名),
J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 88-91 (2009)
査読有,
<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJS/78SA/88/>
- ⑩ Chemical Composition of Cosmic Rays around the Knee Observed by the Tibet Air-Shower-Core Detector,
M. Amenomori, M. Ohnishi (45番目), M. Takita (56番目), et al. (全84名),
J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 206-209 (2009)
査読有,
<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJS/78SA/206/>
- ⑪ Multi-TeV Gamma-Ray Observation from the Crab Nebula Using the Tibet-III Air Shower Array Finely Tuned by the Cosmic-Ray Moon's Shadow,
M. Amenomori, M. Ohnishi (43番目), M. Takita (57番目), et al. (全85名),
ApJ, **692**, 61-72 (2009) 査読有,
DOI:10.1088/0004-637X/692/1/61
- ⑫ Exploration of a 100 TeV gamma-ray northern sky using the Tibet air-shower array combined with an underground water-Cherenkov muon-detector array, T.K.Sako, M. Ohnishi (3番目) M. Takita (5番目), et al. (全6名),
Astroparticle Physics **32**, 177-184 (2009) 査読有,
DOI:10.1016/j.astropartphys.2009.07.006

[学会発表] (計 34件)

- ① 発表者 大西宗博
題目 Tibet ASg 実験 現状と将来
日本物理学会 2012年3月27日 関西学院大学
宇宙線・宇宙領域シンポジウム
高エネルギー天体物理・宇宙線の将来計画
- ② 発表者 中尾優太
題目 チベット空気シャワー実験におけるランダムフォレスト法を用いた原子核/ガンマ線弁別
日本物理学会 2012年3月27日 関西学

- ③ 発表者 正川友朗
題目 チベット空気シャワーアレイで観測された太陽の影の観測による太陽磁場構造の研究1
日本物理学会 2012年3月24日 関西学院大学
- ④ 発表者 川田和正
題目 チベット空気シャワーアレイで観測された太陽の影による太陽磁場構造の研究2
日本物理学会 2012年3月24日 関西学院大学
- ⑤ 発表者 吉越功一
題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置18:チベット空気シャワーアレイ及びプロトタイプ検出器を用いた銀河面からのガンマ線の観測
日本物理学会 2011年9月18日 弘前大学
- ⑥ 発表者 川田和正
題目 チベット空気シャワー観測装置による太陽の影の太陽活動周期変動とシミュレーションとの比較
日本物理学会 2011年9月18日 弘前大学
- ⑦ 発表者 中尾優太
題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置17:建設報告3
日本物理学会 2011年9月18日 弘前大学
- ⑧ 発表者 大西宗博
題目 チベット空気シャワー観測装置による「かに星雲」からのTeVガンマ線強度の時間変動
日本物理学会 2011年9月18日 弘前大学
- ⑨ 発表者 佐古崇志
題目 チベット空気シャワー検出器による高エネルギー宇宙線異方性の研究
日本物理学会 2011年9月17日 弘前大学
若手奨励賞受賞記念講演
- ⑩ The TIBET AS+MD Project; progress report 2011,
M. Takita,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 16, 2011
- ⑪ Correlation between Solar Activity and the Sun's Shadow Observed by the Tibet Air Shower Array,
K. Kawata,

- the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 17, 2011
- ⑫ Air-shower core detector array to study the mass composition of cosmic rays beyond 100 TeV by Tibet hybrid experiment,
M. Shibata,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 11, 2011
- ⑬ Modeling of the galactic cosmic-ray anisotropy at TeV energies,
T.K. Sako,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 15, 2011
- ⑭ Time Dependence of Loss Cone Amplitude measured with the Tibet Air-shower Array,
T. Saito,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 17, 2011
- ⑮ Observation of atmospheric charged particles associated with thunderstorms at Tibet,
K. Hibino,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 13, 2011
- ⑯ Observation of Sub-PeV Gamma Rays from the Galactic Plane Using the Tibet Air Shower Array with the Prototype Muon Detector,
A. Shiomi,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 11, 2011
- ⑰ Variability of TeV Gamma-ray Flux from the Crab Nebula with the Tibet Air Shower Array,
M. Ohnishi,
the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 11, 2011
- ⑱ 発表者 井上大輔
題目 チベット空気シャワー観測装置の観測データモニタリングシステムの開発
日本物理学会 2010年9月14日 九州工業
- 大学
- ⑲ 発表者 宗田天志
題目 チベット空気シャワー観測装置による TeV 領域での Fermi/LAT ガンマ線放射天体の探索
日本物理学会 2010年9月14日 九州工業大学
- ⑳ 発表者 吉越功一
題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置 15 : 建設報告
日本物理学会 2010年9月14日 九州工業大学
- 21 The Tibet AS+MD Project,
M. Takita,
COSPAR2008, Bremen, Germany, July 19, 2010
- 22 発表者 塩見昌司
題目 チベット空気シャワー観測装置による Fermi/LAT ガンマ線天体の探索
日本物理学会 2010年3月20日 岡山大学
- 23 発表者 佐古崇志
題目 チベット空気シャワー観測装置を用いた恒星時における大規模宇宙線異方性の時間変動の測定
日本物理学会 2010年3月20日 岡山大学
- 24 発表者 瀧田正人
題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置 14 : プロトタイプ検出器を用いた原子核宇宙線除去能力の検証
日本物理学会 2010年3月20日 岡山大学
- 25 発表者 柴田慎雄
題目 空気シャワーコアアレイ (YAC) による空気シャワー相互作用モデルの検証 (II)
日本物理学会 2010年3月20日 岡山大学
- 26 発表者 郷 昌樹
題目 空気シャワーコアアレイ (YAC) による空気シャワー相互作用モデルの検証 (I)
日本物理学会 2009年9月13日 甲南大学
- 27 発表者 宗像一起
題目 Large-scale sidereal anisotropy of multi-TeV galactic cosmic rays and the heliosphere
日本物理学会 2009年9月13日 甲南大学
- 28 Demonstration of hadronic cosmic-ray rejection power by a water Cherenkov

- underground muon detector with the Tibet air shower array,
M. Takita,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 14, 2009
- 29 A northern sky survey for PeV gamma rays using the Tibet air shower array with water-Cherenkov-type underground muon detectors,
M. Ohnishi,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 10, 2009
- 30 Tibet AS+MD Project,
K. Kawata,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 14, 2009
- 31 Interpretation of the cosmic-ray energy spectrum and the knee inferred from the Tibet air-shower experiment,
M. Shibata,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 8, 2009
- 32 Large-scale sidereal anisotropy of multi-TeV cosmic rays and the heliosphere,
K. Munakata,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 14, 2009
- 33 New estimation of the power-law index of the cosmic-ray energy spectrum as determined by the Compton-Getting anisotropy at solar time frame,
T.K. Sako,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 14, 2009
- 34 Sun's Shadow in changing phase from the Solar Cycle 23 to 24 Observed with the Tibet Air Shower Array,
M. Nishizawa,
the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 10, 2009

[その他]
ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧田 正人 (TAKITA MASATO)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号：20202161

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

大西宗博 (OHNISHI MUNEHIRO)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：10260514