

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244026

研究課題名(和文)100TeV領域ガンマ線天文学の開拓

研究課題名(英文)Breaking new ground for gamma-ray astronomy at 100 TeV energies

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円

研究成果の概要(和文)：中国との国際共同実験としてチベット(標高4300m)高原に37000平方メートルの空気シャワー観測装置を設置して高エネルギー宇宙線・ガンマ線の研究を行っている。本研究により、空気シャワー観測装置の地下に約4000平方メートルの大型地下ミュオン観測装置が完成し、空気シャワー観測装置との連動実験を開始した。約1年間程のデータが蓄積され、世界に先駆けて世界最高感度で100TeV領域ガンマ線天文学を開拓するために観測を継続中である。また、空気シャワー観測装置を用いて高エネルギー宇宙線・ガンマ線に関する幅広い研究を行った。

研究成果の概要(英文)：As an international joint experiment, we set up a large-area (37000m²) air shower array at the Tibet highland in China in order to study high-energy cosmic rays and gamma rays. With this grant-in-aids, a large (roughly 4000m²) underground muon detectors were completed under the air shower array and a joint experiment with the air shower array started. We have accumulated approximately one-year data and continue data-taking now. We will be soon ready for breaking ground for gamma-ray astronomy at 100 TeV energies for the first time in our history with the world best sensisivity. We also studied various interesting high-energy cosmic-ray and gamma-ray physics by the air shower array.

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙ガンマ線 ミュオン 宇宙線 空気シャワー 水チェレンコフ チベット 100 TeV

1. 研究開始当初の背景

100TeV 領域ガンマ線の観測は未開拓で、天文学的に大変興味深いテーマであるとともに宇宙線発見以来 100 年の謎である宇宙線の起源及び加速機構の解明に飛躍的な進歩が期待される。

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、電子起源のガンマ線は Klein-Nishina 効果により、100TeV 領域まで加速されることは極めて困難である。従って、100TeV 領域のガンマ線観測が原子核宇宙線加速源の発見の鍵となる。

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 100 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クリアな結論は出ていない。

2. 研究の目的

現有設備のチベット空気シャワー観測装

置と本研究で完成予定の水チェレンコフ型地下ミュオン観測装置を連動する独創的な提案により、世界最高感度で 100TeV 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。銀河系内超新星残骸において Knee エネルギー領域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、生成され中性パイ中間子からの崩壊ガンマ線が 100TeV 領域ガンマ線となる。現在まで未同定の 100TeV 領域ガンマ線放射天体すなわち原子核宇宙線の起源を世界に先駆けて同定し、100TeV 領域ガンマ線天文学を開拓すると共に、標準的な原子核宇宙線モデルに対する世界で初めての検証を目指す。

また、空気シャワー観測装置を用いて広い意味での宇宙線及び宇宙ガンマ線に関する研究を行う。

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の地下に約 4000m² の大型水チェレンコフ型ミュオン観測装置を建設する。

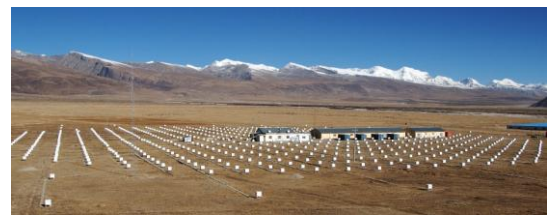


図1 チベット空気シャワー観測装置

そして、2 つの観測装置の連動実験により、100TeV 領域ガンマ線放射天体の観測研究を開始する。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。また、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。また、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

平成 25 年度に地下大型ミュオン観測装置が完成し、100TeV 領域ガンマ線天文学の開拓を目指す空気シャワー観測装置との連動実験を世界に先駆けて開始した。現在までに約 1 年程度の連動実験観測データを蓄積し、観測を継続中である。観測と表裏の関係にあるモンテカルロシミュレーションや解析用ソフトウェアの整備を行った。特に 100TeV 領域宇宙ガンマ線や背景雑音となる宇宙線事例に関する詳細なモンテカルロシミュレ

ーションを行い、観測データとの比較が可能となった。すなわち、100TeV 領域のガンマ線天文学の開拓が始まった。

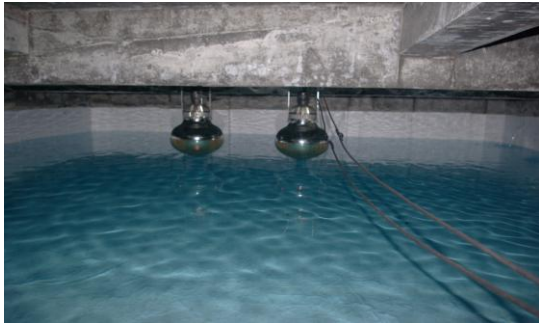


図2 注水中の地下ミューオン観測装置

この他に、空気シャワー観測装置を用いていくつかの研究を行った。

米国のMILAGRO実験が代表エネルギー6TeVで米国のMILAGRO実験が代表エネルギー6TeVで恒星時宇宙線異方性を観測したところ、LOSS CONEと呼ばれる0.1%程度の凹みの深さが年変化(2000年の0.1%から2007年の0.35%へ増加)しており、太陽活動と相関があるとの論文を発表した。我々も同様な解析を行ったところ、LOSS CONEの深さに変化は見られなかった。また、sub-TeV領域の宇宙線異方性を長期観測している松代地下ミューオン観測装置でも、そのような変化は観測されなかった。

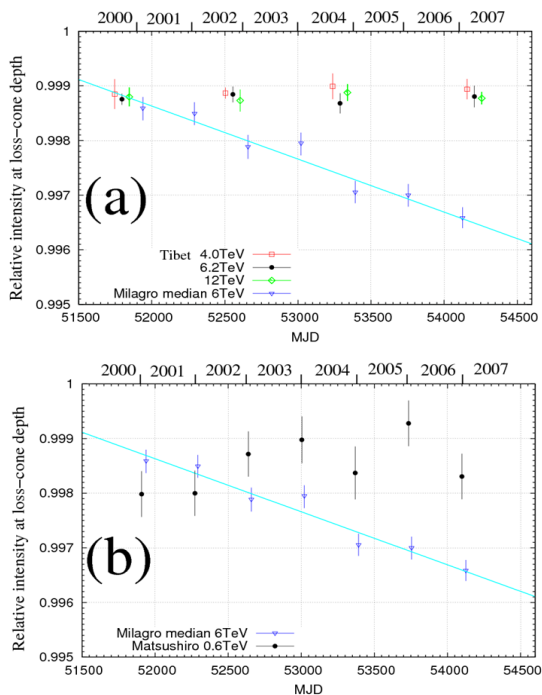


図3 LOSS CONEの深さの年変化

通常私たちの見る太陽は明るく輝いて見えるが、太陽方向を空気シャワー観測装置で観測するとほぼ様な宇宙線中に浮かぶダークスポット「太陽の影」として観測される。この「太陽の影」を1996年から2009年まで連続的に観測した結果、「太陽の影」の大きさが11年の太陽活動周期と相関して変化していることを発見した。また、「太陽の影」の深さの年変化を利用して、太陽近傍の磁場構造の検証を世界で初めて行った。この成果はPhysical Review Letters誌のeditors suggestionとして掲載され、東大のプレスリリース記事となった。

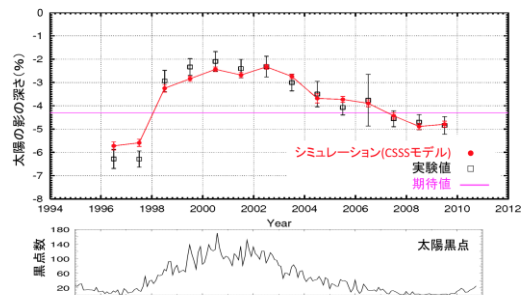


図4 太陽の影の深さと黒点数の年変化

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 2件)

① Probe of the Solar Magnetic Field Using the “Cosmic-Ray Shadow” of the Sun, M. Amenomori, J. Huang, K. Kawata (28番目), M. Ohnishi (43番目), M. Takita (58番目), *et al.* (全80名), Physical Review Letters, **111**, 011101-1-5 (2013), 査読有
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.011101>

② Is the large-scale sidereal anisotropy of the galactic cosmic-ray intensity really instable at TeV energies?, M. Amenomori, J. Huang, K. Kawata (28番目), M. Ohnishi (41番目), M. Takita (55番目), *et al.* (全77名), Astroparticle Physics, **36**, 237-241 (2012), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.astroparticphys.2012.06.005>

[学会発表] (計 26件)

① 発表者 山内紘一
題目 空気シャワーコアアレイ (YAC) による宇宙線化学組成測定

- 日本物理学会 2015年3月21日-3月24日 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
- ② 発表者 佐古崇志
 題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置 20
 日本物理学会 2015年3月21日-3月24日 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
- ③ 発表者 中村佳昭
 題目 チベット AS γ アレイで観測された数十~数百 TeV 領域での銀河宇宙線の恒星時異方性の解析
 日本物理学会 2015年3月21日-3月24日 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
- ④ Observation and modeling of cosmic-ray anisotropy observed with the Tibet air shower array,
M. Takita,
 CRA2015, Bad Honnef, Germany, January 26 - 30, 2015
- ⑤ 発表者 中村佳昭
 題目 チベット空気シャワーアレイで観測された 100TeV 領域での銀河宇宙線の恒星時異方性の解析
 日本物理学会 2014年9月18日-9月21日 佐賀大学本庄キャンパス (佐賀県・佐賀市)
- ⑥ Cosmic-ray shadow of the Sun at 3 TeV with the Tibet Air Shower Array,
 T. K. Sako,
 COSPAR2014, Moscow, Russia, August 2-10, 2014
- ⑦ 発表者 佐古崇志
 題目 チベット水チェレンコフミュオン観測装置 19: 建設報告
 日本物理学会 2014年3月27日-3月30日 東海大学湘南キャンパス (神奈川県・平塚市)
- ⑧ Progress report on the TIBET AS+MD Project,
 T. K. Sako,
 APPC12, Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 14-19, 2013
- ⑨ Test of the hadron interaction model EPOS-LHC and QGSJETII-04 with Tibet EAS core data,
 D. Chen,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑩ Study on primary mass sensitivity of muon multiplicity measured with (YAC-II + Tibet-III+ MD) experiment,
 D. Chen,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑪ Progress Report on the MD-A under TIBET III array,
 C. Liu,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑫ Primary proton and helium spectra at energy range from 50 TeV to 10^{15} eV observed with (YAC-II+Tibet-III) hybrid experiment,
 J. Huang,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑬ Observation of the large-scale sidereal anisotropy of the galactic cosmic ray at 300 TeV with the Tibet Air shower Array,
 Z. Y. Feng,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑭ Hadronic interaction and EAS muon investigated with the (YAC + Tibet-III + MD) hybrid experiment,
 J. Huang,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑮ A Monte Carlo study to measure heavy-component spectra of the primary cosmic-rays at the knee by a new hybrid experiment (YAC-II + Tibet-III+ MD),
 J. Huang,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑯ The TIBET AS+MD Project: progress report 2013,
M. Takita,
 The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013
- ⑰ Observation of thundercloud-related charged particles in Tibet,

- K. Hibino,
The 33rd International Cosmic Ray
Conference, Rio de Janeiro, Brazil,
July 2-9, 2013
- ⑱ Observation of Multi-TeV Gamma Rays
from MGRO J2019+37 and MGRO J2031+41
with the Tibet Air Shower Array,
M. Ohnishi,
The 33rd International Cosmic Ray
Conference, Rio de Janeiro, Brazil,
July 2-9, 2013
- ⑲ Average mass of primary cosmic rays in
the knee energy region inferred from
Tibet experiment,
Y. Katayose,
The 33rd International Cosmic Ray
Conference, Rio de Janeiro, Brazil,
July 2-9, 2013
- ⑳ A Northern Sky Survey for TeV
gamma-ray steady point sources using
the Tibet-III air shower array,
A. Shiomi,
The 33rd International Cosmic Ray
Conference, Rio de Janeiro, Brazil,
July 2-9, 2013
- 21 “Cosmic-ray shadow” of the Sun at 3
TeV observed by the Tibet Air Shower
Array,
T. K. Sako,
The 33rd International Cosmic Ray
Conference, Rio de Janeiro, Brazil,
July 2-9, 2013
- 22 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3
日本物理学会 2013年3月26日-3月29
日 広島大学東広島キャンパス (広島
県・東広島市)
- 23 発表者 宍戸清哉
題目 空気シャワーコアアレイ (YAC)
による陽子・ヘリウムスペクトル
日本物理学会 2012年9月11日-9月14
日 京都産業大学 (京都府・京都市)
- 24 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2
日本物理学会 2012年9月11日-9月14
日 京都産業大学 (京都府・京都市)
- 25 発表者 佐古崇志
題目 チベット空気シャワーアレイを用

いた 3TeV 領域における太陽の影の観測
日本物理学会 2012年9月11日-9月14
日 京都産業大学 (京都府・京都市)

- 26 Modeling of the TeV galactic
cosmic-ray anisotropy,
T. K. Sako,
COSPAR2012, Mysore, India,
July 14-22, 2012

[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

川田 和正 (KAWATA KAZUMASA)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号：10401291