

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02084

研究課題名(和文) sub-PeV領域宇宙ガンマ線で見える高エネルギー宇宙

研究課題名(英文) High-energy universe by means of sub-PeV cosmic gamma rays

研究代表者

瀧田 正人 (TAKITA, MASATO)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：20202161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：中国チベットの標高4300 mに設置されたチベット空気シャワー観測装置と水チェレンコフ型地下ミュオン観測装置との連動実験を行い、世界最高感度でsub-PeV領域宇宙ガンマ線放射天体の探索を行うとともに、TeVからsub-PeV領域の原子核宇宙線・ガンマ線で見えた宇宙を探求する。  
100m<sup>2</sup>のミュオン検出器を用いてかに星雲からの0.14 PeV以上のガンマ線放射に対して世界で最も厳しい上限値を得た。又、4200 m<sup>2</sup>の大型ミュオン検出器を用いた観測を開始・継続中である。その他、数TeV - 1 PeVの宇宙線の精密測定により、恒星時異方性及び太陽地球間磁場モデルに関する新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The Tibet air shower array and underground water-Cherenkov muon detectors are located 4,300m in altitude, in Tibet, China. By means of the hybrid experiment, we aim at search for celestial sub-PeV gamma-ray sources with the highest sensitivity in the world. In addition, we will also study our universe by gamma rays and cosmic rays with energies between TeV and sub-PeV. With the 100 m<sup>2</sup> muon detectors, we set the most stringent upper limit on the gamma-ray flux from the Crab nebula above 0.14 PeV. Furthermore, the 4200 m<sup>2</sup> large muon detectors started operation, accumulating data. In addition, some new knowledge on the cosmic-ray anisotropy and the interplanetary magnetic field strength is obtained, based on cosmic-ray data in the energy region from a few TeV and 1 PeV.

研究分野：宇宙線物理学

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

## 1. 研究開始当初の背景

銀河宇宙線(原子核宇宙線)は陽子から鉄原子核を越える超重核まで、 $10^8$  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、その加速機構や加速源の実験的証拠は未だ見つかっていない。Knee 領域(=PeV 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が示唆され、これより低いエネルギーの宇宙線は銀河系内のSNRで加速されているというのが理論的コンセンサスである。

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。一方、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、その崩壊ガンマ線エネルギーは親原子核宇宙線エネルギーの約  $1/10$ 、即ち 100 TeV 以上にまで達する。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 では電子も同様に高エネルギーに加速され、電子自身の出す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。しかし、親の高エネルギー電子が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や、「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高々 10TeV 領域である。即ち、原子核宇宙線の加速源を特定するためには、100TeV 領域のガンマ線のエネルギースペクトル測定が重要である。

従って、広視野連続観測装置により TeV から sub-PeV 領域の宇宙ガンマ線・原子核宇宙線を長時間観測する実験が待望されている。

## 2. 研究の目的

チベット空気シャワー観測装置(約  $50,000\text{m}^2$ )と世界最大( $4,200\text{m}^2$ )の水チェレンコフ型地下ミュオン観測装置との連動実験を行い、世界最高感度で sub-PeV 領域宇宙ガンマ線放射天体を世界に先駆けて発見することを目指す。

銀河系内の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相互作用を行って生成された中性  $\pi$  中間子からの崩壊ガンマ線が sub-PeV 領域宇宙ガンマ線となる。地下ミュオン観測装置で観測されたミュオン数の情報を用いることにより、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弁別が可能となる。現在までに未検出の sub-PeV 領域ガンマ線放射天体を同定することにより、sub-PeV 領域ガンマ線天文学を開拓するとともに原子核宇宙線の起源天体を世界に先駆けて同定することを目指す。また、これは標準的な原子核宇宙線加速モデルに対する世界で初めての検証につながる。

広視野連続観測可能な空気シャワー観測装置と地下ミュオン検出器の組み合わせにより、TeV から sub-PeV 領域の宇宙ガンマ線・原子核宇宙線を用いて我々の宇宙がどのように見えるかを探求することは重要な研究テーマである。

## 3. 研究の方法

地表に設置された空気シャワー観測装置(約  $50,000\text{m}^2$ )と地下 2.5m に設置された世界最大の水チェレンコフ型ミュオン観測装置( $4200\text{m}^2$ )を連動させて TeV-sub-PeV 領域の宇宙ガンマ線・宇宙線の北天広視野連続観測を行う。2つの観測装置の連動実験を行うことにより、sub-PeV 領域宇宙ガンマ線放射天体を世界最高感度で観測する。地下ミュオン

ン観測装置により、ミューオンを伴う原子核起源空気シャワーによる雑音とミュー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。

シミュレーションによると sub-PeV 領域 (100-1000TeV) のガンマ線が引き起こす空気シャワーではミューオンは 1 本/100TeV 以下しか観測されないのに対して、原子核宇宙線の引き起こす空気シャワーでは、25 本/100TeV 程度のミューオンが観測される。シミュレーションによると原子核宇宙線による雑音を 1/1000 (@100TeV) に除去することができる。他方、ガンマ線信号に関しては、例えばかに星雲からの点源ガンマ線のエネルギースペクトル (冪は-2.6) を仮定すると、1 年間の観測で数十事例 (>100TeV) が観測されるはずである。それに対して原子核宇宙線による雑音は 1 事例/1 年よりも少ない。従って、点源のガンマ線源に関して sub-PeV 領域では事実上原子核宇宙線による雑音は無視できる。

また、より広い視点に立ち、我々の宇宙が TeV から sub-PeV 領域の宇宙ガンマ線・原子核宇宙線を通してどのように見えるかを探求することを目指す。

#### 4. 研究成果

様々な研究成果の中からいくつかを取り上げて紹介する。

##### (1)

チベット空気シャワー観測装置と地下ミューオン観測装置の連動実験を開始し、カレンダー年で数年間分のデータを蓄積した。観測装置の校正や保守を行い、シミュレーション及びデータ解析に必要なツールを開発した。sub-PeV 領域ガンマ線を検出するためにはエネルギー分解能を向上することがキー要素のひとつであり、新しいエネルギー決定方法を開発した。空気シャワーアレイで観測される、10TeV-1000TeV のエネルギーを持つガン

マ線起源空気シャワーのラテラル分布に着目して、親ガンマ線エネルギーの決定方法を新たに開発した。標高 4300m に設置されたチベット空気シャワーアレイを想定して、モンテカルロシミュレーションを行った。新しいエネルギー評価パラメーターとして、我々は空気シャワー軸から距離 50m 離れた場所における粒子密度 S50 を採用する予定である。この S50 パラメーターを用いてガンマ線エネルギーを決定すると、入射天頂角が 20° より小さい 100TeV のガンマ線起源空気シャワーに対して約 16%のエネルギー分解能が得られることが判明した。同様の条件のガンマ線を比較対象として、空気シャワーサイズ (Ne) を用いると約 27%のエネルギー分解能が得られ、我々が現在使用している検出粒子数の和 ( $\Sigma \rho$ ) を用いると約 30%のエネルギー分解能が得られることが判明した。図に S50 を用いたエネルギー分解能のエネルギー依存性を示す。

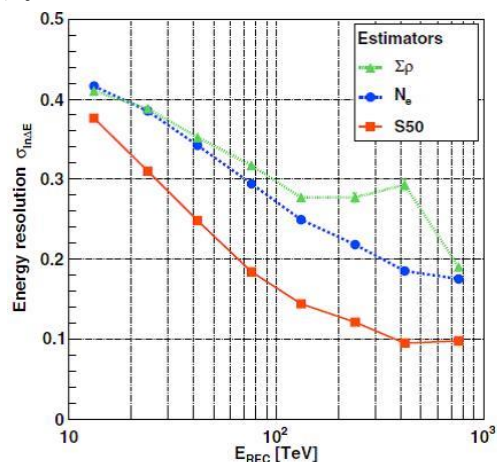


図 2 雑誌論文②の Fig. 3 より引用。ガンマ線起源空気シャワーに対する S50 を用いたエネルギー分解能のエネルギー依存性。参考に Ne や  $\Sigma \rho$  によるエネルギー分解能も示している。

sub-PeV 領域ガンマ線放射天体に関する研究が進行中で、近々成果を取り纏め予定である。

##### (2)

2007年に、100 m<sup>2</sup>の地下ミュオン検出器をチベット空気シャワー観測装置の下に建設した。チベットでの大型地下ミュオン検出器の建設の feasibility study が最も大きな目的であったが、このミュオン検出器とチベット空気シャワー観測装置との連動実験により、宇宙ガンマ線に対する検出感度が向上することを利用して、かに星雲からの sub-PeV 領域ガンマ線探索を行った。シングルミュオンのエネルギーデポジットである電荷分布や原子核宇宙線雑音の除去率等、我々のモンテカルロシミュレーションがデータを reasonable に再現していることを示した。2008年3月から2010年2月にわたる観測期間に、チベット空気シャワー観測装置と100 m<sup>2</sup>の地下ミュオン観測装置の連動実験で取得された観測データを用いて、かに星雲からの sub-PeV 領域ガンマ線放射の探索を行った。統計的に有意な超過事例は観測されなかったが、その結果を用いて、0.14 PeV以上のガンマ線放射に対して、世界で最も厳しい上限値を得ることに成功した。わずか100m<sup>2</sup>のミュオン検出器でもこれだけの成果が得られることが判明し、現在稼働中の4200 m<sup>2</sup>の地下ミュオン観測装置とチベット空気シャワー観測装置との連動実験から面白い成果が期待できることを示唆する。

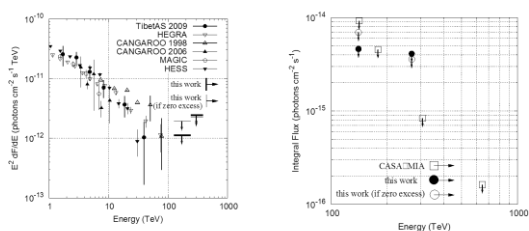


図 2 雑誌論文⑤のFig. 4より引用。左図：本実験で得られたかに星雲からのガンマ線微分フラックスの 90%信頼度の上限値（淡い上限値は超過信号事例が0を仮定）と他実験との比較。右図：本実験で得られたかに星雲からのガンマ線積分フラックスの90%信頼度の上限値（白抜き○の上限値は超過信号事例が0を仮定）とCASA-MIA実験との比較。

(3)

チベット空気シャワーアレイで約 15 年間に記録された 10TeV-1000TeV のエネルギーを持つ空気シャワー事例を用いて銀河宇宙線恒星時異方性を観測した。数百 TeV 領域の恒星時宇宙線異方性を数十 TeV 領域以下の異方性と比較すると、その強度 (0.1-0.2%程度) は同程度であるが、位相が大きくずれていくことが判明した(図 3 参照)。この結果は南半球で行われている IceCube 実験の観測結果と良く合っているが、原因究明はこれからの研究テーマとなる。

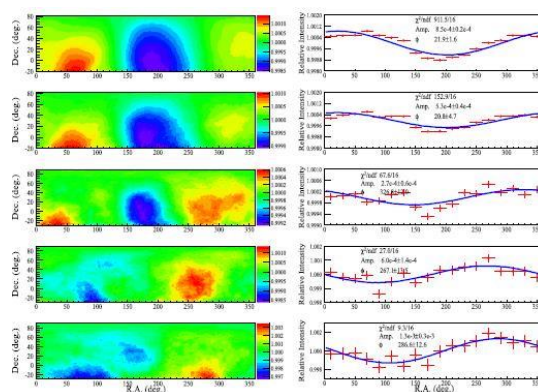


図 2 雑誌論文③のFig. 4より引用。恒星時宇宙線異方性のエネルギー依存性（上から15, 50, 100, 300, 1000 TeV）を示す。左側は2D図、右側はRA方向への投影1D図である。

(4)

チベット空気シャワー観測装置を用いて高エネルギー宇宙線中の太陽の影の南北方向のずれを観測した。このずれを定量的に評価することにより、地球と太陽の間の惑星間磁場 Interplanetary Magnetic Field (IMF) の平均強度に関する知見を得ることができる。

空気シャワー観測装置で観測された 3 TeV 以上の高エネルギー宇宙線データ約 9 年分を解析した。IMF は太陽の自転に合わせて回転し、Toward セクター (磁力線が太陽に向かう

磁場領域) と Away 領域 (磁力線が太陽から外方向に向かう領域) に分けられる。そして、Away 領域では宇宙線中の太陽の影は北にずれ、Toward 領域では南にずれる。

太陽の影の中心位置の南北方向のずれをシミュレーションと比較した結果、図 4 に示すように Away セクターでは  $1.54 \pm 0.21_{\text{stat.}} \pm 0.20_{\text{sys.}}$  倍、Toward セクターでは  $1.62 \pm 0.15_{\text{stat.}} \pm 0.22_{\text{sys.}}$  倍だけずれが予想値より大きいことがわかった。これは我々がシミュレーションで用いた太陽磁場モデルが磁場を過大評価していることを示唆する。このように我々は世界で初めて、3TeV 以上の宇宙線の太陽の影の南北方向のずれを定量的に評価することに成功した。

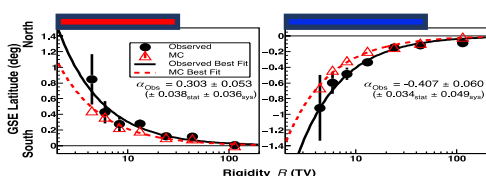


図 4 雑誌論文①Fig.2 より引用。Away (左) と Toward (右) セクターの太陽の影のずれ。赤△はシミュレーション、黒●はデータ。縦軸は角度、横軸は Rigidity(TV)。

## 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 14 件)

- ① M. Amenomori, ..., J Huang, ..., M. Takita (61 番目/全 83 人中), ..., et al., "Evaluation of the Interplanetary Magnetic Field Strength Using the Cosmic-Ray Shadow of the Sun", Physical Review Letters, vol. 120, 031101:pp1-6, 2018. 査読有  
DOI: 10/1103/PhysRevLett.120.031101
- ② K. Kawata, ..., M. Takita, (4 番目/全 6 人中) ..., et al., "Energy determination of gamma-ray induced air showers observed by an extensive air shower array", Experimental Astronomy, vol. 44, pp1-9, 2017 査読有

DOI: 10.1007/s10686-017-9530-9

- ③ M. Amenomori, ..., J Huang, ..., M. Takita (61 番目/全 83 人中), ..., et al., "Northern Sky Galactic Cosmic Ray Anisotropy between 10 and 1000 TeV with the Tibet Air Shower Array", Astrophysical Journal, vol. 836, 153:pp1-7, 2017. 査読有  
DOI: 10.3847/1538-4357/836/2/153
- ④ J. Huang, ..., M. Takita (14 番目/全 14 人中), ..., et al., "Performance of the Tibet hybrid experiment (YAC-II + Tibet-III + MD) to measure the energy spectra of the light primary cosmic rays at energies 50 - 10,000 TeV", Astroparticle Physics, vol. 66, pp18-30, 2015. 査読有  
DOI: 10.1016/j.astropartphys.2014.12.013
- ⑤ M. Amenomori, ..., J Huang, ..., M. Takita (61 番目/全 84 人中), ..., et al., "SEARCH FOR GAMMA RAYS ABOVE 100 TeV FROM THE CRAB NEBULA WITH THE TIBET AIR SHOWER ARRAY AND THE 100 m<sup>2</sup> MUON DETECTOR", Astrophysical Journal, vol. 813, 98:pp1-5, 2015. 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/813/2/98

[学会発表] (計 33 件)

- ① M. Takita for the Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, "Study of the magnetic field between the Sun and the Earth by the Sun shadow", AOGS2017, Singapore, August 6 - 11, 2017.
- ② M. Takita for the Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, "The Tibet AS + MD Project; status report", ICRC2017, Busan, Korea, July 12 - 20, 2017.
- ③ 瀧田正人 for the Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, 「ALPACA 実験 1: ALPACA 実験計画概要」, 日本物理学会 (宮崎大学 木花キャンパス) 2016 年 9 月 21 日-9 月 24 日
- ④ M. Takita for the ALPACA Collaboration, "The ALPACA Project", ISVHECRI2016, Moscow, Russia August 22 - 27, 2016.
- ⑤ M. Takita for the TIBET AS  $\gamma$  Collaboration, "The Tibet AS + MD Project; progress report 2015",

ICRC2015, Hague, Netherlands, July 30  
- August 6, 2015.

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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・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

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )