

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05373

研究課題名(和文) 解像型大気チェレンコフ望遠鏡群で探る宇宙線kneeの起源

研究課題名(英文) Origin of the Cosmic Ray Knee Explored by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope Arrays

研究代表者

吉越 貴紀 (Yoshikoshi, Takanori)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30322366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線物理学の長年の謎であるkneeの起源を、解像型大気チェレンコフ望遠鏡と呼ばれるガンマ線望遠鏡を用いた観測で解明することを試みた。超新星残骸が起源として最も有望な天体であると考えられているため、大天頂角観測法という効率的な観測手法を採用して、北半球の天文台から南天の超新星残骸を観測した。しかし、天候に恵まれない等の悪条件が重なり、起源の解明に迫る十分な観測データを蓄積することはできなかった。解明に近づけるため、今後も研究を継続する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線の起源は、宇宙線が発見されてから100年が経過した現在でも謎のままである。Kneeは宇宙線のエネルギースペクトルの1ベタ電子ボルト辺りに存在する特徴的な折れ曲がりであり、特に銀河系内宇宙線の起源の問題に密接にかかわるため、世界中の多くの研究者が様々な方法でその解明に取り組んでいる。これらの問題は宇宙線物理学において最も重要なものであり、解明された暁には、我々の銀河系および宇宙の理解が大きく前進すると考えている。

研究成果の概要(英文)：We tried to explore the origin of the cosmic ray knee, which has been a long-standing mystery in cosmic ray physics, using gamma-ray telescopes called imaging atmospheric Cherenkov telescopes. Since supernova remnants are the most promising objects as the origin, we observed a southern supernova remnant from an observatory located in the northern hemisphere employing an efficient observation technique called the large zenith angle observation technique. We could not, however, accumulate much data enough to clarify the origin because of bad weather, etc. The study will be continued to get closer to clarification.

研究分野：ガンマ線天体物理学

キーワード：宇宙線(実験)

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線の起源は、宇宙線が発見されてから 100 年が経過した現在でも謎のままである。宇宙線の大部分は陽子を始めとする原子核であり、銀河系内磁場によって攪乱され地球にほぼ等方的に到来することが、起源の解明を困難にしている。ガンマ線は宇宙線が起源近傍の分子雲等と相互作用して生成され、その後直進して観測されるため、宇宙線起源を特定するための有力な探針である。

宇宙線のエネルギースペクトルには 1 ペタ電子ボルト ($\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$) 辺りに knee と呼ばれる特徴的な折れ曲がりがあり、このことは少なくとも knee まで銀河系内で宇宙線が加速されていることを示唆している。また、宇宙線起源の最有力候補は超新星残骸の衝撃波であると考えられており、テラ電子ボルト ($\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) 領域のガンマ線観測で、実際に超新星残骸が 20 個程度同定されている。しかし、これらのガンマ線スペクトルにはカットオフがあるか、高エネルギー帯の統計が不足しており、knee までの宇宙線スペクトルを説明することはできていない。これまでに得られている TeV ガンマ線観測結果は、銀河系内宇宙線の超新星残骸起源説に重大な疑問を投げかけている。

TeV 領域ガンマ線の観測には解像型大気チェレンコフ望遠鏡群 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) array) という観測装置が使用される。IACT は、大気に入射したガンマ線が生成する空気シャワーの発達形状を、シャワー中の高エネルギー電子が発する大気チェレンコフ光を地上で集光し像として捉えることで、源のガンマ線の情報を推定する。現在も世界で H. E. S. S.、MAGIC、VERITAS といった IACT 群が、上記の問題を始めとする高エネルギー天体の物理を解明するために稼働を続けている。また、この分野のさらなる発展を目指して、IACT 100 基規模の大型地上ガンマ線天文台 CTA (Cherenkov Telescope Array) が計画され、欧州を中心とした全世界の 1000 人以上の研究者の協力のもと推進されている。

2. 研究の目的

上記の knee に関する仮説が正しければ、knee 領域の宇宙線陽子から生成された 100 TeV 以上のガンマ線が超新星残骸から観測されるはずである。しかし、陽子起源ガンマ線スペクトルが 100 TeV まで伸びていても、そのフラックスが現在の IACT 群の感度より低い、あるいは電子起源のそれに隠されている可能性がある。従って、IACT 群で観測されるガンマ線スペクトルの高エネルギー端 (10 TeV 以上) における感度をさらに改善することがこの問題の鍵を握る。我々はこの目的のため、以下の 2 つの研究を行った。

(1) VERITAS による超新星残骸からの 10 TeV 以上のガンマ線観測とデータ解析。10 TeV 以上で高統計精度を得られる大天頂角観測法を利用し、北半球に位置する VERITAS で南天の超新星残骸を、現行装置規模における最高感度で観測する。同観測法に適した解析手法を開発し、それを用いて超新星残骸の観測データを解析することで、knee に迫るガンマ線信号の有無を従来にない精度で調べる。

(2) CTA の 10 TeV 以上における観測感度を改善するデータ解析手法の開発。CTA で最も高いエネルギー帯の観測を担う Small-Sized Telescopes (SSTs) のデータ解析において、大気チェレンコフ光の到着時間情報を観測感度向上に有効活用できることが示唆されている。そこで新たな試みとして、現在慣習的に使われている大気チェレンコフ光像の特徴抽出法に時間情報を統合した解析手法を開発する。その効果を CTA 用モンテカルロシミュレーションを用いて調べ、10 TeV 以上における SST 群のガンマ線観測感度を改善し、将来の CTA の本格稼働に備える。

3. 研究の方法

(1) 米国アリゾナ州で稼働中の VERITAS IACT 群を用いて、超新星残骸のガンマ線スペクトルの高エネルギー端 (10 TeV 以上) を高統計精度で観測する。高エネルギー領域でガンマ線統計を稼ぐには大天頂角観測法が有効であり、この方法で南天の超新星残骸を観測する。天頂から入射したガンマ線に起因する大気チェレンコフ光は、地上で半径約 120 m の領域に広がって到来するが、この光プールの大きさが IACT の有効検出面積を決める。大天頂角観測においてはガンマ線が大気に斜めに入射するため、大気チェレンコフ光が地上に作る光プールの面積がおおよそ $\sec^2 \theta$ 倍 (θ は天頂角で、 $\theta = 60^\circ$ の場合 4 倍) に拡大する。この大有効検出面積を利用して、天頂観測の場合よりガンマ線統計を稼ぐことができる。IACT は、通常は天頂近くを通過する天体を観測標的とする。すなわち、北半球に位置する VERITAS は、主として北天の天体を観測する。しかし、大天頂角観測法においては南天の天体も観測可能となり、さらに南天の天体の方が大天頂角に留まる時間が長いいため、高エネルギー領域でのガンマ線統計を稼ぐにはこの観測方法が有利である。

(2) CTA 計画は、IACT 群によるガンマ線観測感度を TeV 領域では一桁改善し、また、観測エネルギー帯を高低エネルギー両側にそれぞれ延伸し、20 GeV から 100 TeV 以上まで 4 桁程度の帯域をカバーすることを基本概念とする。これを実現するため、3 種類の口径の IACT を合計 100 基程度製作し、南北の 2 サイトに配置する。本研究項目では、CTA の特に SST 群によるデータ解析手法を新しい特徴抽出法に基づき開発し、10 TeV 以上のガンマ線観測感度を改善する。IACT

群は、空気シャワー由来の大気チェレンコフ光像を多画素カメラで捉え、その空間的特徴がガンマ線シャワーと宇宙線（バックグラウンド）シャワーの間で異なることを利用して高い信号対雑音比を得る。特徴を抽出する標準的なパラメータ群は Hillas パラメータと呼ばれ、空気シャワーの拡がりや視差を反映する。他方、近年になって大気チェレンコフ光閃光を高時間分解能（1 ns）で記録する技術が確立し、新たな次元として大気チェレンコフ光の像内到着時間差を、特に高エネルギー帯域で有効活用できることが示唆されている。そこで我々は新しい試みとして、大気チェレンコフ光の空間的、時間的性質を統合した特徴抽出法を導入し、その効果を CTA 用モンテカルロシミュレーションで生成した擬似データに適用して考察する。

4. 研究成果

(1) 研究期間の初年度に VERITAS における観測計画を精査し、最も成果が期待できる南天の超新星残骸として、1 TeV で最も明るい RX J1713.7-3946（以後 J1713）に照準を絞った。しかし、この天体は VERITAS サイトでは通常観測の範囲（仰角 20° 以上 = 天頂角 70° 以下）外の「超」大天頂角領域を推移するため、以下の特別な検討が必要となった。

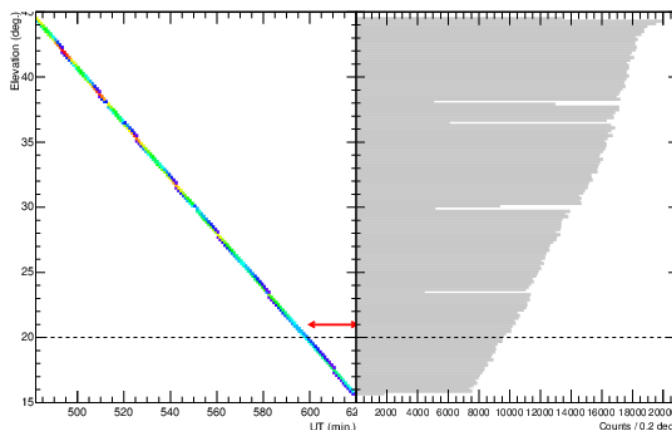
- ① VERITAS サイトの南側には低い山があり、J1713 がそれに遮られないか？
- ② VERITAS サイト内にある建物が、J1713 の観測時に大気チェレンコフ光の集光を遮らないか？
- ③ 超大天頂角領域の観測を可能にする望遠鏡制御ソフトウェアの作成が可能か？
- ④ 超大天頂角観測時に、望遠鏡周囲のプラットフォーム等に衝突することなく、望遠鏡を安全に運用することが可能か？

VERITAS の観測シフトに参加した際に、上記①に関する簡易測定を行い、望遠鏡の仰角が 15° 以上であれば山に遮られず観測が可能であることを確認した。また、観測所のスタッフの協力のもと、④の安全性についても問題がないことを確かめた。③については、かつて現行のソフトウェアを作成した研究者に連絡を取り、変更の方法を提供していただいて特別版制御ソフトウェアの作成に成功した。特に③は VERITAS の観測可能範囲を広げることにつながり、研究グループに我々の目的以外での貢献ができたと考えている。

ここまでで、J1713 の観測に向けた技術的な問題は概ね解決した。しかし、超大天頂角観測は VERITAS にとって未知の領域であるため、グループメンバーと相談した結果、まず標準天体のかに星雲を超大天頂角で観測して、その有効性を実証することになった。本観測計画をグループに提案したところ高い優先度で認められ、2017 年度にかに星雲の超大天頂角試験観測を行い（下図がかに星雲の試験観測時の様子で、縦軸は仰角、横軸左は観測時間、右は事象数、赤い矢印の部分が超大天頂角観測に相当する）、2018 年度には観測データを長時間蓄積することになった。しかし、2018 年度は VERITAS にとってまれに見る悪天候に見舞われ、かに星雲の超大天頂角観測データを全く取得することができなかった。そのような状況下ではあったが、翌年には試験的な J1713 の観測を実施し、合計 2 時間程度のデータを取得することに成功した。その際、上記②の問題が比較的軽微なものであることも確認できた。

上記観測データの解析は、VERITAS にとって経験のない領域であるため、大規模なモンテカルロシミュレーションを実施して観測装置の応答を新規に調べることが必須である。本研究の期間を延長して取り組んだものの、現在はまだその途上であり、今後も研究を続けて成果をまとめていきたいと考えている。

(2) 本研究項目においては、IACT 群、特に CTA で捉えた大気チェレンコフ光信号の空間的、時間的性質を統合した特徴抽出法の開発を目指し、モンテカルロシミュレーションで生成した擬似データを可視化して構想を具体化するためのソフトウェア開発までは行った。しかし、(1) の研究で想定以上の時間を要し、また、人的資源も不足したため、それ以上の進展は見られなかった。本項目については、当初のエフォートの見積もりが不十分だったことを反省しつつ、将来の課題としたい。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Ohishi, T. Yoshikoshi, T. Yoshida for the CTA Consortium	4. 巻 -
2. 論文標題 A Monte Carlo Simulation Study for Cosmic-Ray Chemical Composition Measurement with Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science, 35th International Cosmic Ray Conference (Busan)	6. 最初と最後の頁 540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 F. Acero, M. Ohishi, T. Yoshikoshi, et al.	4. 巻 840
2. 論文標題 Prospects for Cherenkov Telescope Array Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7-3946	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa6d67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Ohishi, L. Arbeletche, V. de Souza, G. Maier, K. Bernloehr, A. Moralejo, J. Bregeon, L. Arrabito, T. Yoshikoshi for the CTA Consortium	4. 巻 1468
2. 論文標題 Influence of Uncertainty in Hadronic Interaction Models on the Sensitivity Estimation of Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Acharyya, M. Ohishi, T. Yoshikoshi, et al.	4. 巻 111
2. 論文標題 Monte Carlo Studies for the Optimisation of the Cherenkov Telescope Array Layout	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 35-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2019.04.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大石理子、奥村暁、折戸玲子、片桐秀明、神本匠、榎田淳子、郡司修一、齋藤隆之、榊直人、佐々井義矩、高橋知也、種田裕貴、千川道幸、中森健之、西嶋恭司、藤原千賀己、三浦智佳、吉越貴紀、吉田龍生、李健、Anatolii Zenin、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告140：モンテカルロシミュレーションを用いたCTAでのgamma-ray like陽子事象の空気シャワー特性とハドロン相互作用モデル依存性の調査
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石理子、奥村暁、折戸玲子、片桐秀明、神本匠、榎田淳子、郡司修一、齋藤隆之、榊直人、佐々井義矩、高橋知也、種田裕貴、千川道幸、中森健之、西嶋恭司、三浦智佳、吉越貴紀、吉田龍生、李健、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告132：CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル測定性能のシミュレーション評価（III）
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石理子、稲田知大、奥村暁、片桐秀明、榎田淳子、郡司修一、齋藤隆之、榊直人、千川道幸、西嶋恭司、三浦智佳、吉越貴紀、吉田龍生、李健、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告124：CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル測定性能のシミュレーション評価（II）
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Ohishi, T. Yoshikoshi, T. Yoshida for the CTA Consortium
2. 発表標題 A Monte Carlo Simulation Study for Cosmic-Ray Chemical Composition Measurement with Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名 35th International Cosmic Ray Conference (Busan) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石理子、池野祐平、稲田知大、奥村暁、片桐秀明、櫛田淳子、郡司修一、齋藤隆之、榊直人、佐藤雄太、Dang Viet Tan、永吉勤、西嶋恭司、増田周、吉越貴紀、吉田龍生、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告118：CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル測定性能のシミュレーション評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石理子、池野祐平、稲田知大、奥村暁、片桐秀明、櫛田淳子、郡司修一、齋藤隆之、榊直人、佐藤雄太、Dang Viet Tan、永吉勤、西嶋恭司、増田周、吉越貴紀、吉田龍生、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告109：Direct Cherenkov光を用いた宇宙線化学組成計測手法のモンテカルロシミュレーション評価(V)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大石理子、L. Arbeletche、V. de Souza、G. Maier、K. Bernloehr、A. Moralejo、J. Bregeon、L. Arrabito、吉越貴紀、他CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告156：CTAのガンマ線感度推定におけるハドロン相互作用モデルの不定性の影響の評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ohishi, L. Arbeletche, V. de Souza, G. Maier, K. Bernloehr, A. Moralejo, J. Bregeon, L. Arrabito, T. Yoshikoshi for the CTA Consortium
2. 発表標題 Influence of Uncertainty in Hadronic Interaction Models on the Sensitivity Estimation of Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名 TAUP 2019 (Toyama) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 The Cherenkov Telescope Array Consortium: B. S. Acharya, M. Ohishi, T. Yoshikoshi, et al.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 213
3. 書名 Science with the Cherenkov Telescope Array	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大石 理子 (Ohishi Michiko) (10420233)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	
連携 研究者	森 正樹 (Mori Masaki) (80210136)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	