

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：17701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20386

研究課題名（和文）X線連星ジェットによる宇宙線粒子加速機構と加速可能エネルギーの解明

研究課題名（英文）Investigation of Cosmic-ray Particle Acceleration Mechanism and Maximum Energy by Galactic X-ray Binary Jets

研究代表者

酒見 はる香（Haruka, Sakemi）

鹿児島大学・理工学研究科・プロジェクト研究員

研究者番号：40944848

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は電波観測データの解析に基づき、系内のX線連星SS433から噴出する宇宙ジェットにおける宇宙線粒子の加速機構と加速可能エネルギーを明らかにすることを目的に行われた。我々はSS433ジェット周辺を野辺山45m電波望遠鏡を用いて観測し、ジェットと相互作用している可能性の高い分子雲を発見した。これらの分子雲とTeVガンマ線放射の空間分布との比較から、SS433ジェットで加速されTeVガンマ線の起源となっている宇宙線は主に電子である可能性が高いことを明らかにした。また、ジェットと分子雲との相互作用により磁気乱流が形成され、効率よく宇宙線電子が加速されている可能性が高いことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、X線連星ジェットによる宇宙線加速機構が、一般的に考えられる衝撃波統計加速だけではない可能性を示した。このことは、X線連星ジェットだけではなく系外のAGNジェットでも起こっていると考えられる。AGNジェットは観測されている最高エネルギー宇宙線の加速源の候補でもあるが、遠方に存在するためその詳細を観測的に調査することが困難であった。比較的近傍に存在し、その詳細構造が観測されているX線連星ジェットから本研究で得られた知見は、将来的にはAGNジェットにも拡張され、広エネルギー帯域にわたる宇宙線の加速機構の網羅的な理解において重要な役割を果たすと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the acceleration mechanism and possible acceleration energy of cosmic ray particles emitted from the jet of the X-ray binary SS433 based on the analysis of radio observation data. We observed the area around the SS433 jet with the Nobeyama 45-m radio telescope and found molecular clouds that are likely to interact with the jet. Comparison of these molecular clouds with the spatial distribution of TeV gamma-ray emissions indicates that the cosmic rays accelerated by the SS433 jet and originating from TeV gamma-rays are likely to be mainly electrons. It was also found that the interaction between the jet and the molecular cloud is likely to form magnetic turbulence, which efficiently accelerates the cosmic-ray electrons.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 宇宙ジェット 宇宙線

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

$10^9\sim 10^{21}$ eV の高エネルギー宇宙線は、現在でもその加速源や加速機構に謎が多く残されている。特に、 $10^{15}\sim 10^{18}$ eV の帯域の宇宙線は、加速源が銀河系内外のどちらに存在するのかも特定されていなかった。しかし近年、 10^{15} eV 以上に宇宙線を加速する天体『ペバトロン』が系内に存在している証拠が見つかった (Amenomori et al. 2021)。このペバトロンの正体は未だ明らかにされていないが、いくつかの天体が提案されている。それらの候補のうち、申請者は X 線連星から噴出する宇宙ジェットに着目している。X 線連星は系内に $10^3\sim 10^4$ 個程度存在すると考えられており、それらから噴出するジェット内部に形成される衝撃波で、観測される $10^{15}\sim 10^{18}$ eV の宇宙線の大部分を説明可能であるとして期待されている。

本課題の対象天体である X 線連星 SS433 からは、高エネルギー宇宙線の証拠となる TeV ガンマ線がジェット噴出領域とジェット先端のちょうど中間領域から検出されており (図 1 左下; Abeysekara et al. 2018)、系内 X 線連星ジェットによる宇宙線加速研究に最適な天体である。申請者は先行研究で、電波帯域の偏波情報から SS433 ジェットの先端領域に形成された衝撃波に付随する磁場構造と衝撃波の運動を明らかにした (図 1 左上)。その結果、加速機構が衝撃波統計加速である可能性が高く、さらに加速される宇宙線が 10^{15} eV 以上のエネルギーに到達する可能性を指摘した (Sakemi et al. PASJ, 70, 27, 2018; Sakemi, et al. PASJ, 73, 530, 2021)。同解析を TeV ガンマ線放射領域で行うことで、一般に用いられる広帯域スペクトル解析に加え、電波観測データのみでも独立に宇宙線加速機構・加速可能エネルギーの制限が可能である。しかしながら、TeV ガンマ線放射領域ではジェット本体からの電波放射の検出例がない。そのため先行研究と同様の解析は困難であり、また広帯域スペクトル解析についても、Abeysekara et al. (2018) などの先行研究では宇宙線加速領域と無関係な領域の放射を含む過剰な電波強度が用いられている現状がある (図 1 右)。この状況を打開すべく、最も高感度な電波干渉計の 1 つである南アフリカ共和国の MeerKAT を用いた観測が現在行われている。この観測によって TeV ガンマ線放射領域からの電波放射の初検出が期待されており、系内 X 線連星ジェットでの宇宙線加速機構・加速可能エネルギーに制限をつけることが望まれている。

2. 研究の目的

SS433 TeV ガンマ線放射領域の MeerKAT 電波観測データを用いて、系内 X 線連星ジェットにおける宇宙線粒子加速の謎を解明し $10^{15}\sim 10^{18}$ eV の宇宙線の起源を探る。

3. 研究の方法

当初予定していた研究方法は以下の通りであった。まず、SS433 の MeerKAT 観測データを取得して一次処理を行い、TeV ガンマ線放射領域からの電波放射を調査する。その後、X 線やガンマ線のフラックスと比較し広帯域のスペクトル情報を取得し、当該領域での宇宙線粒子加速機構を理論計算結果との比較から明らかにする。

上記の方法で研究を行うため、まずは MeerKAT 解析環境を整えるための計算機の導入、各種ソフトウェアのインストール作業を行い、テストデータによる一次処理試験を行った結果、問題なく MeerKAT 観測データの解析を行える環境となった。しかしながら、近年の MeerKAT 望遠鏡のユーザーの急増や観測所運用スタッフの不足、ハードウェアの故障等の理由から、最終的に必要データの取得ができなかった。具体的には、MeerKAT で観測され一般公開されたデータは、データサイズが膨大であるために観測所のメインのサーバーではなく別の場所に保存されることとなる。データアーカイブウェブページでユーザーからダウンロードリクエストのあったデータに関しては、リクエストから約 1 ヶ月ほどで再びメインのサーバーにリストアされることになっており、その後ダウンロードリンクが発行され 1 ヶ月程度のデータダウンロード期間をすぎると自動的にメインサーバーから削除される。しかしながら上記の問題により、リクエストをしてもデータがリストアされない、リストアされたデータのダウンロードリンク発行依頼申請をしてもリンクが発行されない、ヘルプデスクの回答を待つうちにリストアされたデータが削除されるなどの問題が発生しており、MeerKAT 観測データの取得が困難な状況が長期に渡り続いている。

そこで、当初研究計画とは異なる方法で、SS433 TeV ガンマ線放射領域における宇宙線粒子加速機構の解明を目指すこととなった。我々は、当該領域を国立天文台野辺山宇宙電波観測所が運用する野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて観測した。特に、当該領域に分布する分子雲と X 線連星ジェットとの比較から宇宙線粒子加速機構に制限を与えるために、一酸化炭素輝線の観測を行った。これにより、SS433 で観測されている TeV ガンマ線放射が、ジェットにより加速された宇宙線電子を起源とするのか、あるいは加速された宇宙線陽子と星間物質との相互作用を起源とするのかを明らかにすることができると考えた。

4. 研究成果

以下に本研究の成果を記す。図1は野辺山45m電波望遠鏡で観測した ^{12}CO ($J=1-0$)の46.5–58.1 km/sの速度帯の積分強度図である。SS433のジェット(白コントア)の北西方向の表面に沿うように分子雲が空間分布している様子がわかる。また、図2はSS4333ジェット表面に分布する分子雲について、北東から南西方向に向けて横軸をとり、各位置での分子雲の中心速度を示した1速度図である。分子雲の中心速度が約4 km/s程度シフトしている様子が確認できる。このような傾向は、分子雲に対して外部から何かしらの力が加わった場合に見られることが多い。今回観測した分子雲については、近くにSS433ジェットが存在し、またそれ以外に視線方向に強い外力を与えるような天体が確認されないことから、分子雲とSS433ジェットが衝突している可能性が高いと考えられる。

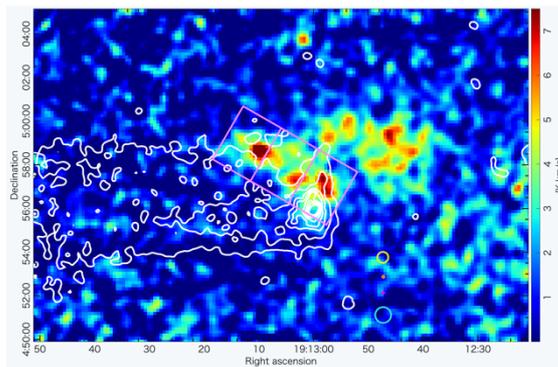


図1 野辺山45m電波望遠鏡で観測した、SS433 TeVガンマ線放射領域周辺に分布する分子雲。

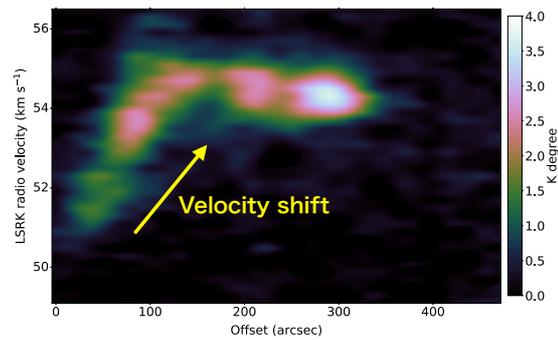


図2 SS4333ジェット表面の分子雲の位置速度図。速度勾配が見られる。

次に分子雲とTeVガンマ線の空間分布の比較を行った(図3、H.E.S.S. Collaboration 2024)。図3の上図と下図ではTeVガンマ線のエネルギー帯が異なっており、ジェットの下流に行くにつれてTeVガンマ線のエネルギーが下がっている様子が確認できる。このような傾向は一般的に宇宙線電子を起源とするTeVガンマ線放射で見られる。また、野辺山45m電波望遠鏡で観測した分子雲(マゼンタコントア)とTeVガンマ線放射の分布を比較すると、そのピーク位置が異なっていることがわかる。以上のことから、SS433から放射されるTeVガンマ線は主に宇宙線電子起源である可能性が高いと考えられる。ただし、一部放射については、宇宙線陽子起源である可能性も棄却できない。

最後に、宇宙線の加速機構について述べる。本研究で同定した分子雲周辺では、光子指数がフラットな傾向にあることが知られており(Safi-Harb, et al. 2022)、最も一般的に考えられている宇宙線粒子加速機構である衝撃波統計加速では説明が困難である。また、分子雲とX線ジェットの空間分布を詳細に比較したところ、それぞれの放射強度ピーク位置がわずかにずれていることがわかった。以上のことから、我々は野辺山45m電波望遠鏡により初めて同定された分子雲とSS433ジェットとの相互作用により、磁気乱流が形成され宇宙線電子が加速されている可能性が高いと考えた。このような例は過去に超新星残骸などの天体で確認されていたが、X線連星ジェットでは本研究が初めてとなる。今後は当該領域の分子雲の他輝線での追観測、磁気流体シミュレーションとの比較から、SS433ジェットにおける宇宙線粒子加速機構を確定させ、最終的にどの程度のエネルギーまで宇宙線を加速可能であることを明らかにすることを目指す。

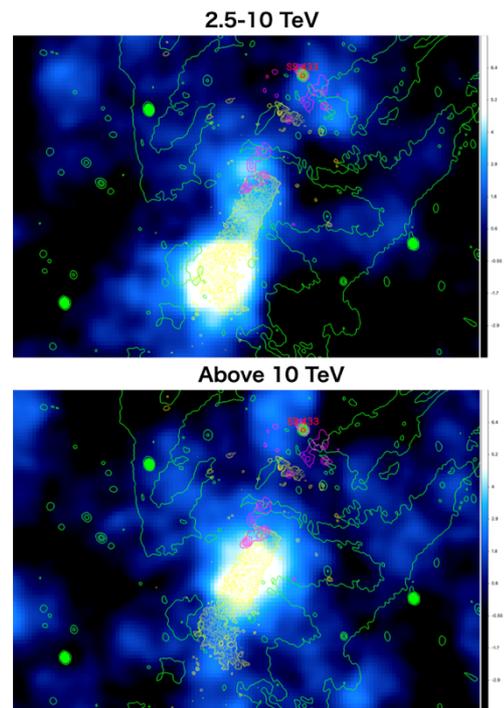


図3 H.E.S.S.により観測されたTeVガンマ線放射の分布(カラー)。マゼンタのコントアが分子雲の分布を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sakemi Haruka, Machida Mami, Yamamoto Hiroaki, Tachihara Kengo	4. 巻 75
2. 論文標題 Molecular clouds at the eastern edge of radio nebula W 50	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 338 ~ 350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psad001	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 酒見はる香（鹿児島大学）、永井洋、町田真美（国立天文台）、赤堀卓也（国立天文台/SKA天文台）、大村匠（東京大学）、赤松弘規（SRON）、中西裕之（鹿児島大学）、藏原昂平（国立天文台）
2. 発表標題 SS433ジェット先端のコンパクトな高偏波率領域の磁場構造
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒見はる香（鹿児島大学）、永井洋、町田真美（国立天文台）、赤堀卓也（国立天文台/SKA天文台）、大村匠（東京大学）、赤松弘規（SRON）、中西裕之（鹿児島大学）、藏原昂平（国立天文台）
2. 発表標題 SS433 ジェット先端フィラメントの広帯域スペクトル解析
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sakemi, H., Machida, M., Nagai, H., Ohmura, T., Akahori, T., Akamatsu, H., Nakanishi, H., Kurahara, K.
2. 発表標題 Identification of high-ordered magnetic fields at the SS433 jet terminal region
3. 学会等名 COSPAR 2022 44th Scientific Assembly（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒見はる香 (鹿児島大学), 永井洋, 町田真美 (国立天文台), 赤堀卓也 (国立天文台/SKA天文台), 大村匠 (東京大学), 赤松弘規 (SRON), 中西裕之 (鹿児島大学), 藏原昂平 (国立天文台)
2. 発表標題 マイクロクエーサーSS433ジェット先端領域の電波観測
3. 学会等名 SKA-Japanワークショップ2022
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruka Sakemi (Kagoshima Univ.), Hiroshi Nagai, Mami Machida, Takuya Akahori (NAOJ), Takumi Ohmura (NAOJ/U Tokyo), Hiroki Akamatsu (QUP/KEK), Hiroyuki Nakanishi (Kagoshima Univ.), Kohei Kurahara (NAOJ)
2. 発表標題 High-ordered magnetic fields at microquasar SS433 jet terminal region
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 酒見はる香 (鹿児島大学), 町田真美 (国立天文台), 山本宏昭, 立原研悟 (名古屋大学)
2. 発表標題 SS433/W50東側領域と分子雲との相互作用
3. 学会等名 SNR Workshop 2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------