

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32702

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22356

研究課題名（和文）ガンマ線・X線観測を用いた最高エネルギー宇宙線のハローの探査と起源の解明

研究課題名（英文）Search for halos of ultra high-energy cosmic rays with X-ray and gamma-ray observations

研究代表者

辻 直美（Tsuji, Naomi）

神奈川大学・理学部・特別助教

研究者番号：50878444

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：最高エネルギー宇宙線(UHECR)は宇宙背景放射と相互作用することで、天体の周囲にハローと呼ばれる電子陽電子のプールが形成される。本研究ではハローからのX線やガンマ線の測定を通して、UHECRの生成メカニズムの検証を目指す。本研究ではTeVガンマ線望遠鏡HESSによる広がった天体のデータ解析方法を取得した。活動銀河核やスターバースト銀河を選定し、データ解析に着手したが、現在までにハローと思われる広がった天体は確認できなかった。並行して、チャンドラ衛星、XMM-Newton衛星のデータを用い、X線のイメージとスペクトルを取得した。またHESSの解析ソフトウェアの解析性能の評価、改善にも貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

UHECRの観測的研究は、地上望遠鏡による直接観測によって発展を遂げ、近年ではIceCubeによるニュートリノ観測も加わり、UHECRの起源にはより一層注目が集まっている。そこで、電磁波観測から間接的にUHECRの兆候が捉えられれば、宇宙線観測や理論研究といった多岐に渡る分野に大きなインパクトをもたらすことができる。今回は残念ながら検出には至らなかったが、本研究で確立したデータ解析方法は、チェレンコフ望遠鏡CTAなどに適応可能である。CTAは既に一号機の運用がスタートしており、近い将来、より空間分解能の高い観測データが取得されるため、本研究はUHECRの分野における将来に先駆けた研究となった。

研究成果の概要（英文）：Ultra high energy cosmic rays (UHECRs) interact with CMB (cosmic microwave background), forming a pool of electrons and positrons, referred to as halo, around sources. This work aims at searching for the halos induced by UHECRs through gamma-ray and X-ray observations in order to understand the mechanism of UHECRs. I obtained analysis method of TeV gamma-ray observational data taken by HESS (The High Energy Spectroscopic System). A few active galactic nuclei and star burst galaxies, which are considered to be suitable for this study, were selected and analyzed in the TeV gamma-ray and X-ray bands. Unfortunately, there was no significant signal of the halos. I also contributed to evaluation and improvement on performances of analysis software of HESS.

研究分野：X線ガンマ線天文学

キーワード：宇宙線 ガンマ線観測 X線観測 最高エネルギー宇宙線

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙線のうち、 $10^{18}$  eV 以上ものエネルギーをもつ最高エネルギー宇宙線(UHECR)の起源は、現代の物理学における大きな未解決問題の一つに位置付けられている。UHECR ほどのエネルギーを持つ荷電粒子を銀河系内に閉じ込めておくことは難しいため、その起源は銀河系外の天体であると考えられてきた。地上望遠鏡 TA や Auger の直接観測から、銀河系外起源を支持する結果が報告されてきた。さらに近年では、IceCube によるニュートリノ観測からも UHECR の研究が進められるようになった。しかしながら、UHECR の事象数は少なく( $10^{20}$  eV で 1 個/年/100 km<sup>2</sup>)、到来方向の不定性も大きいいため、観測からは UHECR の天体を同定するまでには至っていない。

### 2. 研究の目的

銀河系外の天体から放出された最高エネルギー宇宙線陽子(UHECRp)は、宇宙背景放射(CMB)と相互作用(電子陽電子対生成および photopion 生成)することで、電子(陽電子を含む)を生成する。電子陽電子は CMB との逆コンプトン散乱によりガンマ線で、シンクロトロン放射により X 線で光り輝く。予想されるハロー放射の特徴として、わずかな空間的広がりを持つことが挙げられる。これは、加速源から放出された最高エネルギー宇宙線陽子が CMB と相互作用を起こすまでにある程度の距離を進ためである。

本研究は、ガンマ線、X 線観測を用いて、UHECR 候補天体の周りのハロー探査を行い、UHECR の起源を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

ターゲット天体として、活動銀河核(M87, Centaurus A, PKS 0625-35)、銀河団(かみのけ座銀河団)、スターバースト銀河(NGC 235)をピックアップした。これらは、近傍(数百 Mpc 以内)に位置し、ブレーザーではないため、UHECR ハロー探査に最適である。なぜなら、一次ガンマ線からのハローの存在も考えられるが、近傍天体においてはガンマ線吸収があまり効かず、一次ガンマ線由来のハローの寄与は小さいからである。

ガンマ線観測には、TeV ガンマ線望遠鏡である H.E.S.S. (The High Energy Spectroscopic System)を用いる。上に挙げた天体は、HESS により合計 500 時間を超える十分な観測が行われている。最新ソフトウェアでの再解析、特に角度分解能の向上の手法(HESS Coll., 2020, Nat Astron 4 167-173)を適応し、空間分解能 1 分角以内の達成を目指し、広がった放射を探査する。また、新しい大口径望遠鏡 CT5 も含めることで、広域(数十 GeV から 100 TeV)のガンマ線スペクトルを測定する。

X 線観測には、X 線衛星チャンドラとニュートンを用いる。上記の天体は、十分に深い(計 3 Ms 以上)観測が行われている。バックグラウンド(宇宙 X 線背景放射、検出器、別の X 線天体からの放射の混入など)の正確な評価を行うことで、X 線測定の改善を図る。

### 4. 研究成果

#### 4-1. データ解析環境の整備

HESS のデータ解析に必要な環境を整備し、本研究に用いるデータセットの選定を改めて行った。研究対象として、これまでに HESS により十分観測の行われてきた、活動銀河核、スターバースト銀河(3. 参照)を取り扱う。

#### 4-2. データ解析方法の取得

活動銀河核 M87 やスターバースト銀河 NGC 253 の本格的な解析を行う前に、標準光源であるかに星雲と、TeV ガンマ線で明るい銀河系外の活動銀河核 PKS 2155-304 の HESS のデータ解析を行った。従来の HESS の解析ツール HAP に加えて、オープンツールである Gammapy も用いた。概ね先行研究の結果を再現することができ、本研究の下準備を整えることができたと言える。特にかに星雲についてはガンマ線の広がりも確認した。これは UHECR 由来のハローを捉える上でも必要な解析である。

#### 4-3. HESS J1848-018 の解析

大質量星団 W43/HESS J1848-018 のデータ解析をリードし、TeV ガンマ線の詳細な空間分布を明

らかにし、空間分解されたスペクトル解析を行った。この解析を通して、広がった天体の取り扱いについて理解を深めることができた。同時に X 線のデータ解析にも取り組んだ。チャンドラ衛星、ニュートン衛星のデータを用い、X 線の空間構造とスペクトルを取得した。スペクトル解析では銀河拡散放射を考慮し、詳細なバックグラウンドの見積もりを行った。得られた結果は国内学会や HESS コラボレーション会議で報告した。

#### 4-4. 活動銀河核・スターバースト銀河の解析

本研究の UHECR 由来のハロー探査に適していると考えられる、活動銀河核 M87 やスターバースト銀河 NGC 253 のデータ解析に着手した。ガンマ線の空間分布とスペクトルを明らかにした。さらに、X 線のデータ解析にも取り組んだ。チャンドラ衛星、ニュートン衛星のデータを用い、X 線のイメージとスペクトルを取得した。残念ながら、UHECR 由来のハローと思われる成分はこれまでに見つかっていない。

#### 4-5. HESS コラボレーションへの貢献

HAP ワーキンググループの一員として、その解析性能の評価を行なった。HESS は 4 台の小口径望遠鏡と 1 台の大口径望遠鏡から成るが、ガンマ線イベントが測定される望遠鏡の数によって再構成の精度が異なり、その影響を調査した。このような多数の望遠鏡を用いたステレオ観測の観測精度の向上は、将来の CTA 望遠鏡で重要となり得る。また、HESS による観測の運用当番、コラボレーション会議での発表、多波長観測の公募案内の管理などを通して、コラボレーションへ貢献した。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 The H.E.S.S. Collaboration, Abdalla H., Adam R., et al. (Tsujii N.; 198番目)	4. 巻 583
2. 論文標題 Publisher Correction: Resolving acceleration to very high energies along the jet of Centaurus A	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 E23 ~ E23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2455-x	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 The H.E.S.S. Collaboration, Aharonian F., Ashkar H., et al. (Tsujii N.; 133番目)	4. 巻 666
2. 論文標題 A deep spectromorphological study of the $\gamma$ -ray emission surrounding the young massive stellar cluster Westerlund 1	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A124 ~ A124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244323	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

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 辻直美
2. 発表標題 大質量星団W43/HESS J1848-018の多波長観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻直美
2. 発表標題 HESS J1848-018/W43領域の多波長観測
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021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			
ドイツ	Max-Planck-Institut für Kernphysik	DESY		
アイルランド	Dublin Institute for Advanced Studies			