

立教大学学術推進特別重点資金(立教 S F R)

大学院学生研究

2021年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院		理学研究科	物理学専攻
研究代表者 (2022年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年		氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 2年		日暮 凌太	
指導教員	所属部局・職名		氏名	
	理学部 准教授		山田 真也	
自然・人文 ・社会の別	<input type="checkbox"/> 自然 ・ 人文 ・ 社会		個人・共同の別	<input type="checkbox"/> 個人 ・ 共同 名
研究課題	Vela 超新星残骸からのガンマ線放射機構解明と逃走宇宙線の観測的研究			
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2022年3月現在 のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名	
	理学研究科・物理学専攻 博士課程後期過程 2年		日暮 凌太	
研究期間	2021 年度			
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 399,996 円 / (採択金額) 400,000 円			

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

宇宙空間は宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子で満たされている。宇宙線の起源は宇宙物理学において重要な未解決問題である。数 PeV 以下のエネルギーを持つ宇宙線は、銀河系内に起源が存在すると考えられており銀河宇宙線と呼ばれている。銀河宇宙線源の最有力候補天体として超新星残骸が考えられている。宇宙線の直接観測では、星間磁場で宇宙線の進行方向が曲げられてしまうため期限を捉えることができない。

銀河宇宙線のような高エネルギー粒子は、星間物質や星間磁場、放射場と相互作用し X 線やガンマ線を放射する。そのため、X 線やガンマ線を用いて超新星残骸を観測することで加速された粒子の物理的な情報を探査することができる。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

{ 超新星残骸 } { 宇宙線 } { ガンマ線 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)**1. Vela 超新星残骸からのガンマ線放射の解析**

Vela 超新星残骸は、これまで観測された超新星残骸の中で最も地球近傍に位置する超新星残骸である。その距離は約 290 pc であり、視直径が約 8 度と非常に大きく観測される。そのため、超新星内部を詳細に解析することができる。近年の高精度な宇宙線観測から宇宙線電子陽電子の起源として近傍の加速源から直接飛来する成分の存在が示唆されている。Vela 超新星残骸は地球に近いため加速された電子がエネルギーを失わずに直接地球に飛来することができる。Vela 超新星残骸は電子の加速源として注目されており、この超新星残骸で起こる粒子加速や被加速電子の存在は非常に重要である。荷電粒子は星間磁場で進行方向が曲げられてしまうため、到来方向からその起源に迫ることができない。そのため、被加速粒子が加速現場で星間物質や磁場、光子場と相互作用することで放射するガンマ線放射を検出し解析することで、粒子が加速されている証拠や、そのスペクトルなどに迫ることができる。Vela 超新星残骸は未だにガンマ線で検出されていない。しかし、Vela 超新星残骸と同年代に超新星残骸は GeV ガンマ線で観測された超新星残骸の多くを占めているため、Vela 超新星残骸からも GeV ガンマ線を放射していると考えられる。

本研究の目的は、Vela 超新星残骸からのガンマ線放射を検出し、被加速電子の存在に迫ることである。本研究では Vela 超新星残骸の領域を約 12 年間 Fermi 衛星 LAT 検出器で観測した GeV ガンマ線のデータ解析を行なった。初めに、既存のガンマ線カタログに含まれているソースを用いて Vela 超新星残骸の領域をモデル化したところ、X 線観測で知られている Vela 超新星残骸の大きさと同程度の大きさをもつガンマ線の超過が Vela 超新星残骸の位置に観測された。そこで、この超過が有意なガンマ線放射か検証した結果、この位置から統計的に有意なガンマ線放射が広がって検出された。また、Vela 超新星残骸の中心からの未同定ガンマ線源の数密度プロファイルを作成すると半径 4 度以内に多数の未同定ガンマ線源が分布していることを明らかにした。そのため、Vela 超新星残骸内に位置する未同定ガンマ線源は Vela 超新星残骸からのガンマ線放射を再現するために加えられたソースと考えて解析を行なった。

Vela 超新星残骸の位置から観測された空間的に広がった超過や未同定ガンマ線源のプロファイルから Vela 超新星残骸がガンマ線放射をしている可能性が明らかになった。つまり、Vela 超新星残骸で粒子が高エネルギーまで加速されていることを示唆している。そこで、Vela 超新星残骸の大きな視直径を生かして空間分解した解析を行なった。空間分解した解析を行うことで、各領域で支配的なガンマ線の放射機構に迫ることができる。また電子由来のガンマ線が Vela 超新星残骸からのガンマ線放射で支配的な成分ではない場合でも被加速電子の存在に迫ることができる。Vela 超新星残骸を 50 個のグリッド領域に分けてスペクトル解析を行った結果、スペクトルの形状や明るさは領域ごとに異なり冪型のスペクトルでモデル化したときの指数である光子指数は 1.5-3.0 の間に分布した。一般的な加速機構では被加速粒子のスペクトル指数は 2.0 となり、被加速陽子がガンマ線を放射するパイゼロ崩壊ガンマ線や被加速電子が星間物質と相互作用してガンマ線を放射する制動放射ではガンマ線の光子指数は 2.0 以下になることは考え難い。被加速電子が低エネルギーの光子場と相互作用してガンマ線を放射する逆コンプトン散乱では被加速電子のスペクトル指数が 2.0-3.0 のとき光子指数が 1.5-2.0 を取ることができる。そのため、グリッド領域に空間分解した解析の結果、光子指数が 1.5-2.0 を取る領域では加速された電子由来の逆コンプトン散乱でガンマ線が放射されていることが示唆される。

また、グリッド領域の解析からスペクトルがソフトな (光子指数が大きい) 領域ではガンマ線フラックスが大きいことから、Vela 超新星残骸全体のスペクトルではソフトなガンマ線放射が支配的になるが、高エネルギー側ではハードな (光子指数が小さい) ガンマ線放射が支配的になると推測できる。そのため、Vela 超新星残骸全体のスペクトル解析を行なった。1-1000 GeV のエネルギー範囲で解析した時の光子指数は約 2.5 であったが、高エネルギー側の 50 GeV 以上では光子指数が 1.3 ± 0.3 であった。これは、高エネルギー側ではハードな放射が支配的になることを示唆しており、50 GeV 以上のスペクトルはスペクトル指数が 2.0 の被加速電子スペクトルで説明することができる。しかし、被加速陽子ではハードなスペクトルを再現することが難しく陽子スペクトルの指数が 2.0 以下になる必要がある。これは、一般的な加速機構と矛盾する。よって、高エネルギー側のハードなガンマ線放射は被加速電子に由来したガンマ線放射であると考えられ、そのスペクトルは TeV ガンマ線帯域まで伸びている。これは、TeV 帯域のエネルギーをもつ高エネルギーな電子の存在を示唆している。

このように、宇宙線電子の起源として重要な Vela 超新星残骸の領域をガンマ線解析した結果、空間的に広がったガンマ線放射を有意に検出し、その大きさは X 線で知られている Vela 超新星残骸の大きさと同程度であった。また、未同定ガンマ線源の数密度からも、この領域には Vela 超新星残骸の大きさと同程度のガンマ線放射をしていることが示唆された。これらの結果から Vela 超新星残骸の領域で検出されたガンマ線放射は Vela 超新星残骸で加速された粒子からの放射であると考えられる。また、空間分解した解析や Vela 超新星残骸全体の高エネルギー側のスペクトル解析から電子が高エネルギーまで加速されていることを示唆する結果を得ることができた。

研究成果の概要 (つづき)**2. 超新星残骸 W50 マイクロクエーサー SS 433 東側領域の hot spot のガンマ線解析**

超新星残骸と考えられている星雲 W50 内部には、マイクロクエーサー SS 433 と呼ばれているコンパクト星と大質量星の連星系が位置し、高速の 27% 程度の非常に高速でジェットが噴出していることが知られている。このように非常に高速で噴出するジェットは宇宙線の加速源の可能性があり、非常に高エネルギーな TeV ガンマ線が実際に観測されたことから粒子加速を研究する上で近年注目されている天体である。その東側領域には X 線で点源状 (hot spot) に光っている構造が観測されている。本研究では、この hot spot を電波、X 線、ガンマ線の多波長で観測することで、hot spot の領域での粒子加速に迫る研究を行なった。X 線で観測された hot spot は衛星の特性を考慮しても空間的に広がっている可能性が高く、加速された電子が磁場と相互作用して放射するシンクロトロン放射と考えられるスペクトルが得られた。また、電波でも hot spot の位置から電波放射で明るいピークが見られた。しかし、ガンマ線では hot spot の位置から有意な放射を検出されなかった。そこで、ガンマ線帯域では明るさの上限値を系統誤差も含めて求めた。そして、電波から X 線、ガンマ線までのスペクトルを加速された電子が放射するシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱の放射過程でモデル化した。電波から X 線はシンクロトロン放射で、ガンマ線帯域は逆コンプトン散乱で観測された多波長スペクトルを説明できる単一の電子スペクトルを推定した。ガンマ線で有意な放射が検出されないため、hot spot は強磁場であることが予測されたが、モデル化した結果、約 50 μ G 程度で数十 TeV にカットオフを持つ電子スペクトルが予測された。これらの結果から、hot spot は非常に高エネルギーまで加速された電子が存在し強磁場環境によりシンクロトロン放射で明るく光っていることがわかった。また、磁場との相互作用で電子がエネルギーを失うため逆コンプトン散乱では明るく光ることができずガンマ線では検出されないと考えられる (Hayakawa et al., 2022)。今後は、なぜこの位置で非常に強磁場な環境が存在し電波や X 線で明るく光るのかに迫ることで、近年注目されている SS 433/W50 の系で起こる粒子加速の理解に繋がると考えている。

3. 超新星残骸 Cassiopeia A 北東ジェットからの安定チタン検出

超新星残骸 Cassiopeia A (Cas A) は、銀河系内で知られている超新星残骸の中で 2 番目に若い超新星残骸である。非常に若い超新星残骸であるため、その進化過程で周囲の星間環境の影響を大きく受けずに進化していることから超新星爆発時の情報を保持している。そこで、超新星爆発の爆発メカニズムに迫る研究を行うことができる重要な天体である。本研究では Chandra 衛星によって 2004 年に約 1 Ms 観測したデータを用いて Cas A 北東領域に位置するジェット構造内のスペクトル解析を行なった。この Cas A で観測されるジェット構造は、超新星爆発を引き起こす要因として注目されていることから、ジェットの形成過程を明らかにすることで超新星爆発のメカニズムに迫ることが本研究の目的である。詳細なスペクトル解析の結果、Cas A の親星内部で生成されたと考えられる安定チタンの検出に成功した。その他の元素 (Si, S, Ar, Ca, Fe) などの組成比から不完全シリコン燃焼層で生成されたと考えられることを明らかにした。このことから、ジェット構造の形成過程では核燃焼時のピーク温度が 5×10^9 K より低いと推測された。よって、ジェット構造が超新星爆発を引き起こす要因ではないという結論が得られた (Ikeda et al., 2022)。Cas A は超新星爆発のメカニズムに迫る研究を行う際に非常に重要な天体であり、本研究でジェット形成過程における観測的な制限を加えることができ、今後のシミュレーション研究などに応用されることが期待される。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて研究成果報告書提出フォームより提出してください (紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)

③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)

④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

※修士論文・博士論文は含みません。

① 雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

[1] R. Hayakawa, S. Yamada, H. Suda, Y. Ichinohe, R. Higurashi, H. Sakemi, M. Machida, T. Ohmura, S. Katsuda, H. Uchiyama, T. Sato, H. Akamatsu, and M. Axelsson
“X-ray hot spots in the eastern ear of the supernova remnant W 50 and the microquasar SS 433 system”

Publications of the Astronomical Society of Japan, psac011, 2022

[2] T. Ikeda, Y. Uchiyama, T. Sato, R. Higurashi, and T. Tsuchioka

“Discovery of stable titanium at the northeastern jet of Cassiopeia A: Need for a weak jet mechanism?”

Publications of the Astronomical Society of Japan, psab130, 2022

② 図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)

なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)

なし

④ その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

なし