

## 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

## 2020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 (2021年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年 (学生番号: 20RA002Y )		日暮 凌太	印
指導教員	所属部局・職		氏名	
	理学部物理学科 准教授		山田 真也	印
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	銀河宇宙線源の候補天体として重要な若い超新星残骸からのガンマ線放射機構の解明			
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2021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 博士課程後期課程1年		日暮 凌太	
研究期間	2020 年度			
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 249,988 円 / (採択金額) 250,000 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起源を捉えることができない。

銀河宇宙線などの高エネルギー粒子は、星間物質や星間磁場、放射場と相互作用することで 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。そこで、本研究では、X 線、ガンマ線を用いて超新星残骸の観測を行なった。

## 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。)

{ 宇宙線 } { 超新星残骸 } { X 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. Fermi 衛星 Large Area Telescope (LAT) を用いた Vela 超新星残骸からの GeV ガンマ線の解析**

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存在する超新星残骸である。その距離は約 290 pc であり、地球からは非常に大きく(視直径が約 8 度)観測される。地球近傍の超新星残骸は、超新星残骸内で加速した電子陽電子が直接地球に飛来することができる。近年の、詳細な宇宙線陽電子の解析では、これまで考えられてきた宇宙線陽子が星間物質と相互作用して生成される二次陽電子が支配的に飛来することで予想される量と比較し大きな超過成分が存在することが明らかになった。これは、近傍の加速源から直接飛来した成分と考えられ、近傍のパルサーやパルサー風星雲、超新星残骸、ダークマターの対消滅などが超過成分の起源と考えられている。また、Vela 超新星残骸の大きな視直径は超新星残骸の内部を詳細に観測することができ、これまで電波や X 線で何度も観測されてきた。しかし、ガンマ線では未だに検出されていない。Vela 超新星残骸と同年代の超新星残骸は 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 超新星残骸も GeV ガンマ線を放射していると考えられる。

そのため本研究の目的は、Vela 超新星残骸からの GeV ガンマ線放射の検出である。解析に用いた Fermi 衛星 LAT 検出器はこれまで全天を 10 年以上観測している。ガンマ線は到来数が少なく、X 線観測などと異なり集光できないため、長期観測が非常に有効である。解析には Fermi コラボレーションが提供している 4FGL カタログを使用した。このカタログは 8 年間の観測データをもとに検出されたガンマ線源が 5000 個以上が含まれているが、未同定のガンマ線源も 1000 個以上含まれている。Vela 超新星残骸は銀河中心から離れた位置に存在するため解析領域内のガンマ線源の少ないと考えられるが、多くのガンマ線源が解析領域内に存在し、その多くは未同定ガンマ線源であった。そのため、複数の未同定ガンマ線源によって Vela 超新星残骸からの放射を再現している可能性に着目した。ガンマ線源は機械的にサーベイしているため、Vela 超新星残骸のような大きなソースは見逃されてしまう。そこで、Vela 超新星残骸の周囲に存在する未同定ガンマ線源を全て取り除いて解析を行なった。その結果、Vela 超新星残骸からのガンマ線放射と考えられる放射を有意に検出した。

Fermi 衛星 LAT 検出器は空間分解能に優れていないため、これまで、超新星残骸を詳細に分解した解析は行われていない。しかし、Vela 超新星残骸は非常に大きいため LAT 検出器でも十分に空間分解した解析が可能である。そこで、LAT 検出器を用いて初めて詳細に空間分解した超新星残骸の解析を行い、Vela 超新星残骸の内部は各領域で明るさやスペクトル指数(光子指数)が異なり、大きくばらついた分布をしていることが明らかとなった。X 線で暗い西から南西の領域は、ガンマ線でも暗いことが明らかとなった。また、Vela 超新星残骸全体からのガンマ線スペクトルを作成した。このとき、通常ガンマ線解析では全体で一様な放射を仮定して作成するが、本解析で領域ごとに明るさや光子指数が異なることが明らかになったため、スペクトルの各ビンごとに、各領域からの明るさを計算したモデルを用いてスペクトルを作成した。その結果、スペクトルは GeV 帯域で折れ曲がりやカットオフなどは、見られず TeV 帯域まで伸びたスペクトルが得られた。これは、近年注目を集めている TeV ガンマ線源の候補に Vela 超新星残骸が含まれ、TeV 帯域まで加速された粒子の存在を示唆している。

また、Vela 超新星残骸の周囲の分子雲の分布と一致する位置からガンマ線放射が観測された。これは、Vela 超新星残骸で加速された粒子が加速領域からエスケープして近傍の分子雲まで拡散し、分子雲内の物質と相互作用したことでガンマ線放射をしたと考えられる。エスケープした高エネルギー粒子からのガンマ線放射は、昔に加速した粒子の情報を含んでいるため、粒子加速を解析する上で重要な情報をもつ。さらに、超新星残骸の加速領域から、どのように星間空間に拡散するかを明らかにする上でも重要な現象である。ただ、この分子雲 Vela Molecular Ridge には、星形成領域などが存在するためエスケープ粒子起源のガンマ線放射から星形成領域で加速した粒子によるガンマ線放射か、今後慎重に解析する必要がある。

**研究成果の概要 (つづき)****2. Chandra 衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西領域の hotspot の解明**

超新星残骸 RX J1713.7-3946(以後、RX J1713)は TeV ガンマ線で明るい超新星残骸であり、TeV 帯域のエネルギーまで加速した粒子が存在することが明らかたため、粒子加速を研究する上で重要天体である。本研究では、角度分解能に優れた Chandra 衛星によって観測された RX J1713 北西領域のデータを解析した。北西領域は、RX J1713 で明るい領域であり、粒子加速を研究する上で重要な領域である。北西領域の観測はこれまで、7 回行われており露光時間を合計すると約 266 ks の豊富なデータが蓄積されている。

本研究により RX J1713 北西領域には近傍の観測などと比較し、多数の点源状 X 線源(hotspot)が存在することを初めて明らかにした。これらの hotspot に対し、イメージ解析、スペクトル解析、時間変動の解析を行った。イメージ解析の結果、エネルギー帯を変えてイメージを作成したところ、各 hotspot はエネルギー帯ごとに明るさが異なることが明らかとなった。これは、星間物質による吸収量が hotspot ごとに異なる可能性を示唆している。そのため、スペクトル解析を行うことで各 hotspot のスペクトルから星間吸収量(水素柱密度)やスペクトル指数(光子指数)を調べた。Hotspot のスペクトルは非熱的放射を示し、水素柱密度や光子指数は RX J1713 の典型的な値に対し大きくばらついた分布を示した。水素柱密度が大きな hotspot はハードなスペクトル(光子指数が小さい)を示し、水素柱密度が小さい hotspot はソフトなスペクトル(光子指数が大きい)を示すという特徴があった。また、7 回の観測から時間変動の解析が可能であり、hotspot からの光子フラックスの時間変動を解析することができる。解析の結果、数年スケールで有意に変動する hotspot は全体の 1/3 程度存在することが明らかとなった。また、数ヶ月スケールで有意に変動する hotspot も存在した。これは、X 線の放射環境が強磁場であることを示唆している。

これらの解析結果と先行研究から hotspot は超新星残骸の衝撃波と分子雲コアが相互作用することで生じる放射の可能性を定量的に提示した。先行研究から RX J1713 は超新星爆発を起こす前は大質量星で、その強い星風により周囲の低密度な分子雲を吹き飛ばし高密度な分子雲コアが点在する非一様な星周空間で超新星爆発を起こしたと考えられている。衝撃波と分子雲コアが相互作用することで、分子雲コア周囲の磁場が mG スケールまで増幅され被加速電子はシンクロトロン放射で X 線を放射する。また、被加速陽子は分子雲コアの内部深くまで侵入することができ、分子雲コア内部の原子核と相互作用し荷電  $\pi$  中間子を生成する。荷電  $\pi$  中間子はすぐに崩壊し、最終的に電子陽電子となる。この二次的に生成された電子陽電子は、分子雲コア内部の磁場でシンクロトロン放射をすることで X 線を放射する。その結果、hotspot のスペクトルには、分子雲コア内部から放射され星間物質の吸収量が大い X 線と吸収量が小さい X 線が存在する。さらに、高エネルギー陽子ほど分子雲コア内部には深く侵入するため吸収量が大い X 線はハードなスペクトルを示す。分子雲コアの数密度が  $10^5\text{-}10^7 \text{ cm}^{-3}$  とすると観測された水素柱密度と整合性がある。また、観測された hotspot のエネルギーフラックスとも整合性が得られる。これらの解析結果や議論をまとめ、国際専門誌 *Astrophysical Journal* に論文を投稿した(Higurashi et al., 2020)。

**3. 超新星残骸 G350.1-0.3 東領域の視線垂直方向の速度場の解明**

超新星残骸 G350.1-0.3 は観測された形の歪さが有名な天体で、超新星爆発の機構を解明する上で重要な天体である。超新星爆発は非一様に爆発が起こると考えられているため、この超新星残骸の解析は爆発機構解明に繋がる。また、この超新星残骸は数百歳程度の年齢と考えられており、非常に若い超新星残骸である。超新星残骸の粒子加速は若い時ほど、高エネルギーまで粒子を加速すると考えられている。その理由として、超新星残骸の衝撃波速度が早いことがあげられる。そのため、この超新星残骸の最も明るい東領域の速度を Chandra 衛星が観測した 2 つのデータから解析した。両データは約 9 年隔りがあるため、二つのデータの移動量を見積もることで速度を求めることができる。

解析には、画像処理などで使用される Optical flow とよばれる 2 枚の画像から移動量を推定するアルゴリズムを用いた。その結果、東領域は 3000-5000 km/s の速度で東方向に移動していることが明らかとなった。これは、非常に効率よく粒子加速を起こしている可能性を示唆しており、ガンマ線源の候補となる。また、本解析結果に加え、本グループ内で G350.1-0.3 全体の速度場を求め、非常に歪んだ形をした G350.1-0.3 の爆発中心を推定し、年齢や爆発機構に制限を課す重要な結果が得られた。これらの結果は、国際専門誌 *Astrophysical Journal* に論文を投稿した(Tsuchioka et al., 2021, including R.Higurashi )

**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提出してください。)

- ① 雑誌論文 (著者名、論文タイトル、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)

① 雑誌論文 (著者名、論文タイトル、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

[1] R.Higurashi, N.Tsuji and Y.Uchiyama

“X-Ray Hotspot in the Northwest Shell of the Supernova Remnant RX J1713.7-3946”

The Astrophysical Journal 899, 2020, 102

[2] T.Tsuchioka, Y.Uchiyama, R.Higurashi, H.Iwasaki, S.Otsuka, S.Yamada and T.Sato

“On the origin of the asymmetry of the ejecta structure and explosion of G350.1-03”

(Accepted for publication) The Astrophysical Journal,

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