

**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**  
**2019年度研究成果報告書**

<b>研究科名</b>	立教大学大学院	理学研究科	物理学専攻
<b>研究代表者</b> (2020年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名
	<input checked="" type="checkbox"/> 博士前期課程 2年 <input type="checkbox"/> 博士後期課程 年 (学生番号: 18LA014E )		日暮 凌太 印
<b>指導教員</b>	所属部局・職		氏名
	理学部物理学科 教授		内山 泰伸 印
<b>自然・人文・社会の別</b>	<input type="checkbox"/> 自然 ・ 人文 ・ 社会	<b>個人・共同の別</b>	<input type="checkbox"/> 個人 ・ 共同 名
<b>研究課題</b>	Super Bubble・Local Bubbleにおける宇宙線加速機構の解明		
<b>研究組織</b> (研究代表者 ・共同研究者) ※2020年3月現在 のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名
	研究代表者 理学研究科物理学専攻 博士課程前期課程2年		日暮 凌太
<b>研究期間</b>	2019 年度		
<b>研究経費</b> (1円単位)	(支出金額) 299,974円 / (採択金額) 300,000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。しかし、その起源は発見から100年以上経過した現在でも未解明である。宇宙線のうちエネルギーが約 $10^{15}$  eV以下の宇宙線は銀河宇宙線と呼ばれ、銀河系内に起源が存在すると考えられている。その有力候補として超新星残骸が考えられてきた。超新星残骸では衝撃波を介し荷電粒子にエネルギーが与えられる。特に超新星爆発を起こして数千年程度経過した若い超新星残骸はX線やガンマ線観測から $\sim 10^{13} \sim 10^{14}$  eVまで加速された粒子の存在が明らかになっているため、超新星残骸での粒子加速を研究する際の重要天体である。そこで、超新星残骸RX J1713.7-3946のX線・ガンマ線解析、RX J0852.0-4622のガンマ線解析を行った。

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 } { 粒子加速 } { 超新星残骸 }

## 研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

## 1. 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 は TeV ガンマ線で明るい超新星残骸であり、X 線観測からもシンクロトロン放射が支配的である。そのため TeV 帯域のエネルギーまで加速された粒子の存在が明らかで超新星残骸で起こる粒子加速研究において重要天体である。これまでに多くの観測・研究が行われており、本研究では角度分解能に優れた Chandra X 線観測衛星がこれまでに観測した RX J1713.7-3946 北西領域のデータ解析を行った。北西領域は、この超新星残骸で明るい領域であり、観測期間が異なる観測が 7 回行われているため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。全ての観測データを足し合わせたイメージを作成した結果、北西領域のシェル内に多数の点源状 X 線源(hotspot)の存在が確認された。北西領域に存在する hotspot 数と近傍の観測(超新星残骸 CTB 37A、惑星状星雲 IC 4637)で検出された点源状ソース数の比較や北西領域のシェル内で顕著に hotspot 数が多いことから hotspot は RX J1713.7-3946 に由来する放射と考えられる。

Hotspot の X 線スペクトルを再現するモデルとして冪関数のスペクトルに、X 線が観測されるまでに星間空間を伝播する際の星間物質による吸収を考え(冪関数×星間吸収)のモデルを用いた。モデルのパラメータである X 線が観測されるまでに通過した星間物質質量を表す水素柱密度と、スペクトルをエネルギーの冪関数で表した時の指数である光子指数の値は RX J1713.7-3946 の典型的な値から外れる値を示した。つまり、RX J1713.7-3946 の典型的な水素柱密度の値と比較し小さな値を示す hotspot や大きな値を示す hotspot が存在する。同様に光子指数も典型的な値と比較しソフトなスペクトルを示す(光子指数が大きい)hotspot やハードなスペクトルを示す(光子指数が小さい)hotspot が存在する。また、hotspot 全体の傾向として水素柱密度が大きいほどハードなスペクトルを示すことが明らかとなった。水素柱密度が典型的な値よりも大きいことは、シェルで観測される X 線よりも hotspot は濃い星間空間内を伝播したことを示唆している。

さらに本研究で使用した観測データは観測期間の異なる 7 観測のデータを使用しているため、光子フラックスの時間変動を調べることができる。解析の結果、光子フラックスが数年スケールで有意に変動する hotspot が全体の 1/3 程度存在することが明らかになった。また数ヶ月スケールで有意に時間変動を示す hotspot も存在した。スペクトル解析の結果、hotspot のスペクトルには熱的な輝線が観測されないことなどから、hotspot からの X 線放射は非熱的な電子のシンクロトロン放射と考えられる。このとき、数年スケールで時間変動をすることは X 線を放射する環境が強磁場であることが示唆される。

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増幅した磁場や分子雲コア内の強磁場で被加速電子がシンクロトロン放射することで点現状の X 線源として観測される可能性を提案した。これまでの先行研究から RX J1713.7-3946 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掃き飛ばし高密度な分子雲コアが点在する非一様な星間環境で超新星爆発を起こしたと考えられる。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コア周囲の磁場が増幅する。衝撃波で加速された電子はコア周囲の増幅した強磁場でシンクロトロン放射することで X 線を放射する。磁場は mG スケールまで増幅されることで、電子がエネルギー損失し光子フラックスが時間変動すると考えられる。このとき電子はコア内部まで侵入することができず、スペクトル解析で得られた水素柱密度が大きな hotspot を説明することができない。一方で、水素柱密度が小さくソフトなスペクトルは、衝撃波がコアで反射することで起こる反射衝撃波によって粒子加速された電子を仮定することで解釈することができる。水素柱密度が大きく、ハードなスペクトルを示す hotspot は衝撃波で加速した陽子がコア内を深く侵入すると考えると解釈することができる。分子雲コアの数密度を  $10^5\text{-}10^7\text{ cm}^{-3}$  とすると陽子がコア内に侵入する距離は陽子のエネルギーに依存する。よって、高エネルギー陽子ほどコア内を深く侵入することができる。高エネルギー陽子はコア内の物質と相互作用し電子陽電子(二次電子)を生成する。これらの電子陽電子がシンクロトロン放射を起こすと考えると、水素柱密度が大きな hotspot ほどハードなスペクトルを示すことと整合性があり、陽子がコア内を侵入する深さとコアの数密度から見積もられる柱密度も観測されている水素柱密度の値と整合性がある。さらに、超新星爆発で解放されるエネルギーのうち粒子加速に用いられると考えられる典型的な値(10%)が陽子加速に用いられたと仮定することで、見積もられる二次電子によるシンクロトロン放射のエネルギーフラックスも観測値と整合性がある。

これらの議論から、hotspot は超新星残骸の衝撃波と分子雲コアの相互作用で引き起こされるコア周囲の磁場増幅で被加速電子がシンクロトロン放射をすることと、コア内部まで侵入した被加速陽子がコア内の物質と相互作用して生成された二次電子がシンクロトロン放射をすることで hotspot として X 線で観測されたと考えられる。

これらの内容を日本天文学会の秋季年会で口頭発表を行った。また、第 49 回天文・天体物理若手夏の学校の星間現象分科会でも口頭発表しオーラルアワード 1 位を獲得した。さらに、国際専門誌へ論文を投稿した。

**研究成果の概要 つづき****2. 超新星残骸 RX J1713. 7-3946, RX J0852. 0-4622 の GeV ガンマ線観測**

2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星は現在までに 10 年以上の豊富な観測データを蓄積している。そこで、超新星残骸で起こる粒子加速研究において重要天体である RX J1713. 7-3946 と RX J0852. 0-4622 の GeV ガンマ線解析を Fermi 衛星の観測データを用いて行うことで、先行研究では観測時間が短く十分なデータ得られずに解明できなかった新たな結果が得られると期待される。RX J1713. 7-3946 と RX J0852. 0-4622 では TeV 帯域のエネルギーまで加速された粒子の存在が明らかであるが、これらの超新星残骸のガンマ線放射が被加速電子と被加速陽子のどちらが支配的な放射をしているか未だに解明されておらず現在でも議論的となっている。GeV ガンマ線帯域の空間構造やスペクトルの情報はガンマ線放射機構解明に向け制限を与えること期待できる。

これまでの先行研究ではシンクロトロン X 線と TeV ガンマ線の空間構造の相関から GeV ガンマ線でも同様の空間構造をしていると考えられてきたが、これは未だに調べられていない。そこで、今回 10 年以上のデータを用いて GeV ガンマ線の空間構造の解析を行った。その結果、TeV ガンマ線や X 線観測から明らかになっているシェル型構造を GeV ガンマ線観測からも初めて有意に確認された。さらに、GeV ガンマ線と TeV ガンマ線、X 線の空間構造を比較した結果、RX J1713. 7-3946 では TeV ガンマ線と GeV ガンマ線では明るい領域が異なる可能性が示唆された。さらに、X 線観測で発見された直径 0.8 pc 程度の暗い領域(ボイド構造)で GeV ガンマ線のカウント数はピークになることが明らかとなった。TeV ガンマ線観測ではボイド構造にカウント数のピークが見られないため、GeV ガンマ線と TeV ガンマ線では異なるガンマ線成分の存在が示唆される。また、RX J0852. 0-4622 ではシェル領域の方位角プロファイルを作成すると、X 線では顕著に暗くなる領域かつ TeV ガンマ線でも暗くなる傾向がある領域で GeV ガンマ線では暗くなる傾向が見られないことが明らかになった。この領域では、GeV ガンマ線と TeV ガンマ線では異なる放射成分が支配的であると考えられる。

次に、RX J1713. 7-3946 と RX J0852. 0-4622 の GeV ガンマ線スペクトル解析を行った。先行研究では観測時間が短いから、ガンマ線のカウント数が少ないことから GeV ガンマ線スペクトルのビン数が少なく詳細なスペクトルは得られていない。特に RX J0852. 0-4622 の先行研究は、たったの 4 ビンで議論されてきた。今回は豊富なデータを用いて詳細な GeV ガンマ線スペクトルを得るため、RX J1713. 7-3946 では 15 ビン(1-500 GeV)、RX J0852. 0-4622 では 17 ビン(0.5-500 GeV)でスペクトルを作成した。その結果、RX J1713. 7-3946 では約 15 GeV 付近でスペクトルが折れ曲がるブレイク構造が有意に検出された。ブレイクの前後でハードなスペクトルからソフトなスペクトルに変化した。RX J0852. 0-4622 のスペクトルにも約 7 GeV 付近でスペクトルが折れ曲がるブレイク構造が有意に検出され、ブレイクの前後でソフトなスペクトルからハードなスペクトルへと変化した。

さらに、豊富な観測データを利用し空間分解したスペクトル解析を行った。その結果、RX J1713. 7-3946 では西側ではソフトなスペクトルを示す一方で東側ではハードなスペクトルを示すことが明らかになった。さらに東側では有意にスペクトルが折れ曲がるブレイク構造が検出された。これまでの多くの先行研究では空間分解したスペクトル解析を行うことができず超新星残骸全体を 1 成分のガンマ線放射成分が支配的であると考え解析が行われてきた。しかし、東西でスペクトルが有意に異なることは支配的なガンマ線放射成分が東西で異なることを示唆している。

スペクトル解析で得られたブレイク構造を単一の被加速粒子で説明するためには、粒子スペクトルにブレイク構造が存在する必要がある。しかし、超新星残骸で起こる加速プロセスである衝撃波統計加速では一般的に被加速粒子スペクトルにブレイク構造を持たない。そのため、単一の粒子でブレイク構造を再現することは難しい。RX J1713. 7-3946 の GeV ガンマ線スペクトルはブレイクの前後でハードなスペクトルからソフトなスペクトルへ(光子指数 1.5→2)と変化する。この変化は電子がガンマ線を放射すると仮定すると、電子がシンクロトロン放射でエネルギーを損失することで電子スペクトルにブレイク構造が現れ、ハードなスペクトルからソフトなスペクトルへと変化するが、X 線と TeV ガンマ線から見積もられる磁場とブレイクエネルギーから見積もられる磁場が異なるため、シンクロトロン冷却によるブレイクではないと考えられる。つまり、RX J1713. 7-3946 と RX J0852. 0-4622 で検出されたブレイク構造を単一のガンマ線放射成分で再現することは難しい。そのため、複数のガンマ線放射成分の重ね合わせでスペクトルにブレイクが生じると考えられる。このとき、RX J0852. 0-4622 では、ブレイク前は被加速陽子によるガンマ線放射、ブレイク後は被加速電子によるガンマ線放射が支配的になると考えるとブレイク構造を再現できる。RX J1713. 7-3946 では、単純な 2 成分の重ね合わせではスペクトルを再現することが難しいため、詳細な解析とモデリングをしていく必要がある。本解析によって、これらの超新星残骸のガンマ線放射を再現するために多くの先行研究で行われてきた、単一のガンマ線放射成分が支配的では再現できないブレイク構造を検出し、ガンマ線放射機構解明における強い制限をつけた。

※この(様式 2)に記入の成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差し控え期間等を記入した調書(A 4 縦型横書き 1 枚・自由様式)を添付すること。

**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 HOTSPOTS IN THE NORTHWEST SHELL OF THE SUPERNOVA REMNANT RX J1713.7-3946”  
Submitted to the Astrophysical Journal
- [2] N. Tsuji, Y. Uchiyama, F. Aharonian, D. Berge, R. Higurashi, R. Krivonos and T. Tanaka  
“*NuSTAR* OBSERVATIONS OF THE SUPERNOVA REMNANT RX J1713.7-3946”  
The Astrophysical Journal, Volume 877, 2019, 96

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)

- [3] 日暮凌太「Chandra X線衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西領域の hot-spot の解明」  
2019年度第49回天文・天体物理若手夏の学校、口頭発表、ロジワール豊橋、2019年7月30日-8月2日  
オーラルアワード1位受賞
- [4] 日暮凌太「超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西領域の hot-spot の解明」  
日本天文学会秋季年会 口頭発表 熊本大学黒髪キャンパス、2019年9月11日-9月13日