

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：32601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840036

研究課題名(和文) 超新星残骸における宇宙線加速のエネルギー注入と持続性の解明

研究課題名(英文) Revealing energy injection and the durability of cosmic-ray acceleration at shocks of supernova remnants

研究代表者

澤田 真理 (Sawada, Makoto)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：00633281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系内宇宙線をつくる衝撃波でのフェルミ加速は、別の過程による予備加速を要する。これを解明するため、予備加速された粒子(超熱的粒子)が周囲の熱的ガスを効率よく電離することを利用しその検出をめざした。まずこの電離作用を考慮した場合に熱的ガスからのX線放射がどのように変化するかを計算した。つぎに熱的ガス自身による電離作用が小さく超熱的粒子の影響をとらえやすい再結合プラズマをもつ超新星残骸でこれを検証した。結果、再結合過程が進行しすぎ超熱的粒子による過去の電離の痕跡があるか判定できなかった。一方でより精密な測定が可能な次期X線衛星ASTRO-Hをもちいれば超熱的粒子を検出できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Production of Galactic cosmic rays requires some pre-acceleration process prior to Fermi acceleration at shocks of supernova remnants. To reveal the process, we focus on the ionization effect of thermal gas by supra-thermal particles which appear in a pre-acceleration process. We calculated X-ray spectra from thermal gas that interacts with supra-thermal particles. With these calculations we examined X-ray spectra of recombining plasma in supernova remnants, because the ionization effect by thermal particles would be negligible in this type of plasma. We found no significant observational evidence of ionization effect by supra-thermal particles in the spectra, because the X-ray spectra are suffered by strong recombination effect for a long time after the possible acceleration and ionization in the early stage of evolution. On the other hand, we found a different X-ray diagnostic with high-resolution spectrometer on the next X-ray satellite ASTRO-H to detect supra-thermal electrons.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：超新星残骸 宇宙線加速 X線天文学 プラズマ

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線の加速メカニズムの解明は現代の宇宙物理学の重要課題である。超新星残骸の観測から、銀河系内の宇宙線加速源について理解が進みつつある。残骸外縁部の衝撃波面から発見されたX線シンクロトロン放射および GeV/TeV ガンマ線放射は、衝撃波により TeV 程度まで加速された高エネルギー粒子の存在を示唆する。宇宙線加速の標準理論はフェルミ加速で記述され、観測される宇宙線エネルギースペクトルなどを説明することに成功している。しかし、このメカニズムが有効に働くためには、初期段階であらかじめ熱的粒子と非熱的粒子の中間の「超熱的」なエネルギーをもたなくてはならない。そのような超熱的粒子を生成するエネルギー注入メカニズムは明らかではなく、宇宙線物理学における大きな未解決問題となっている(インジェクション問題)。これを解決するためには、なんらかの方法で超熱的粒子を観測し、その物理的性質を理解することが必須である。

(2) 宇宙線物理におけるもう1つの問題は、加速プロセスの持続性である。これまで X線・ガンマ線観測でくわしく研究されてきたものは、年齢1千年程度の若い残骸がほとんどであるため、残骸の衝撃波がいつまで加速を維持できるのかは不明だった。近年、Fermi 衛星や大気チェレンコフ望遠鏡 HESS などの銀河面探査は、年齢1万年ほどの中年齢の残骸からも GeV/TeV ガンマ線放射を検出した。これらの残骸で長期にわたって効率的な加速が持続されているのか、あるいは加速自体はすでに終息していて、若い時期に生成した宇宙線を保持しているにすぎないのかは、現在も決着がついていない。この問題に答えるためには、宇宙線へのエネルギー注入の過渡段階である超熱的粒子が、超新星残骸のどの年齢まで存在しているかを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超新星残骸の X線プラズマ分光により、宇宙線加速の初期段階におけるエネルギー注問題に観測的に迫ることである。超新星残骸におけるこれまでの観測的研究は、すでに十分加速された高エネルギー粒子からの X線・ガンマ線の検出に焦点をあてており、加速の初期段階に関する情報をもたらさなかった。そのため、進化のどの段階まで加速が持続するのかも不明であった。加速が有効に働くためには、粒子が初期条件として熱的粒子の数倍のエネルギーを持つ必要がある。この超熱的粒子はイオンの電離を促進し、その痕跡は数万年残る。本研究では、銀河面上に偏在する再結合プラズマをプローブとして、加速粒子へのエネルギー注入量

と加速プロセスの持続性を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、再結合プラズマをもつ超新星残骸をターゲットとする。すざく衛星の観測した X線スペクトルを解析し、各元素の電離度を精密測定する。電離非平衡プラズマコードを用いて、超熱的成分と熱的イオンとの相互作用(電離過程)と、そのあとの熱的プラズマの緩和過程(再結合過程)をシミュレーションし、観測と比較する。これにより、超熱的粒子のエネルギースペクトルと加速期間の長さ、および電離からの緩和時間を見積もる。これらからそれぞれ、エネルギー注入量と注入時期を決定する。ターゲットとなる超新星残骸は十分大きな空間的広がりをもつので、電離度を残骸中の領域ごとに測定して、超熱的粒子の分布を明らかにする。またこれをもとに、超熱的粒子と GeV/TeV ガンマ線放射の空間分布を比較し、宇宙線の加速領域からの逃亡・伝播のようすを可視化する。

再結合プラズマでは、熱的電子が低温なため再結合過程が優勢である。加速領域では、加速が進行する期間中、超熱的粒子の存在によりイオンの電離が促進される。加速が終息すると、イオンと熱的電子との再結合が進行する。各期間で達成される平衡状態はそれぞれ超熱的粒子と熱的電子のエネルギーで決まる。実際にはそれぞれの期間の長さに応じた過渡状態が実現される。電離・再結合の特性時間が元素ごとに異なるので、このような進化の歴史が、電離度の元素間の違いをつくる。したがって元素ごとの電離度を精密測定することで、加速期間の長さや超熱的粒子のエネルギースペクトル、および緩和期間の長さや熱的電子の温度を推定できる。これらから、超熱的粒子へのエネルギー注入量と加速の持続性を明らかにする。そこで、再結合プラズマを持ち、GeV/TeV ガンマ線放射をとまなう超新星残骸をターゲットにえらび、すざく衛星で取得した X線スペクトルを解析する。

4. 研究成果

(1) 超熱的電子との相互作用を考慮した電離非平衡プラズマモデルの作成

超新星残骸中のプラズマは希薄であるため、おおくの場合電離非平衡にある。電離優勢な場合、再結合優勢な場合のいずれについても、これまでではプラズマ中の熱的電子とイオンの相互作用のみが考えられてきた。そこで、SRON の Jelle Kaastra 氏と共同であらたなプラズマ放射モデルを作成し、超熱的電子をふくむ非マクスウェル分布の電子による電

離・再結合を考慮した計算を行った。
その結果、超熱的電子による電離は効率よくおこるものの、相対的にエネルギーの低い熱的電子とイオンが再結合するため、全体として超熱的電子の電離効果は当初の予想にくらべ小さいことが判明した。

(2) すざく衛星による超新星残骸での再結合プラズマの探査

本研究では、超熱的電子による過去の電離の痕跡をとらえることを目的としたため、イオンの電離エネルギーにくらべ熱的電子の温度が低い、再結合プラズマの X 線放射を解析した。このようなプラズマでは、熱的電子とイオンの相互作用は主に再結合であり、電離は超熱的電子の効果が支配的になると考えられるためである。

すざく衛星によって発見された、再結合プラズマをもつ超新星残骸は7つ程度ある。このうち、とくに明るい4つについて解析した。元素ごとに電離状態を測定することで、再結合プラズマが、(i) 過去に衝撃波加熱・電離されたのち、(ii) 急速な冷却を経験し、(iii) その後現在まで徐々に熱的に緩和（再結合）している状態であることをあきらかにした。そのうえで、(i)における電離過程には、超熱的電子をふくむ非マクスウェル分布は必要なく、通常の熱的電子のみで説明可能なことがわかった。

超熱的電子の痕跡を検出できなかった原因としては、(a) 成果(1)で述べたとおり、そもそも熱的電子との再結合も考慮すると、影響があまり大きくなかったこと、(b) 実際に解析した再結合プラズマはいずれも、過程(iii)の影響が非常に大きく、より過去の(i)における電離状態が精度よく決定できなかったためである。

(3) すざく衛星による X 線スペクトルで探る再結合プラズマの起源

このように当初の目的は達成できなかったが、一方で再結合プラズマそのものについて副次的な成果があった。

一方で、同様に MM 型の超新星残骸 W51C は、再結合プラズマではなく電離優勢プラズマをもつことを明らかにした。この残骸は、これまでの扱ったサンプルと同程度に明るく、十分な光子統計があった。すなわち、MM 型がかならず再結合プラズマをもつという仮説に対し明確な反例を提示した。これは、仮に MM 型と再結合プラズマに物理的因果関係があったとしても、その初期条件によりプラズマの熱的進化に分岐があることを示唆する。

(4) 次期 X 線衛星 ASTRO-H の精密分光を利用したあたらしい超熱的探査手法の検討

成果(2)で述べたとおり、超熱的電子による電離の効果は小さく、またのちの再結合でなまされるため、本研究の最終的な目的を達成することができなかった。熱的プラズマとの相互作用を再度検討した結果、超熱的電子によるイオンの電離と熱的電子によるイオンの再結合は、電離度としてみた時には互いに打ち消し合うが、輝線放射という観点では相乗効果をもたらすことに気づいた。

この輝線スペクトルの変化は、すざく衛星などが用いる X 線 CCD では分解できず、イオン存在量などの別のパラメータで吸収されるため、検出できない。

日本が主導する次期 X 線衛星 ASTRO-H は、極低温で動作する X 線マイクロカロリメーターをもちいることで、X 線 CCD の約 20 倍という精度で輝線構造を分解できる。そこで、将来的に本研究目的に再挑戦するための準備として、ASTRO-H による高分解鉄輝線スペクトルのシミュレーションを行った。その結果、超熱的電子との相互作用がある場合には、低電離イオンの内殻電離過程が頻繁に起こり、鉄の禁制線が非常にあかるくなることを発見した。この効果への熱的電子への寄与は、ほかの輝線をもちいて見積もることができると、この手法であれば再結合プラズマに対象を限定する必要がなくなる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Ohnishi, Takao; Uchida, Hiroyuki; Tsuru, Takeshi Go; Koyama, Katsuji; Masai, Kuniaki; Sawada, Makoto, “Discovery of Enhanced Radiative Recombination Continua of He-like Iron and Calcium from IC 443 and its Implications”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 784, 2014, 74
- ② Yamazaki, Ryo; Ohira, Yutaka; Sawada, Makoto; Bamba, Aya, “Synchrotron X-ray diagnostics of cutoff shape of nonthermal electron spectrum at young supernova remnants”, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 14, 2014, 165
- ③ Hanabata, Yoshitaka; Sawada, Makoto; Katagiri, Hideaki; Bamba, Aya; Fukazawa, Yasushi, “X-Ray Observations of the W 51 Complex with Suzaku”, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 査読有, 65, 2013, 42

- ④ Uchida, Hiroyuki; Koyama, Katsuji; Yamaguchi, Hiroya; Sawada, Makoto; Ohnishi, Takao; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Yoshiike, Satoshi; Fukui, Yasuo, “Recombining Plasma and Hard X-Ray Filament in the Mixed-Morphology Supernova Remnant W 44”, Publication of Astronomical Society of Japan, 査読有, 64, 2012, 141

[学会発表] (計 5 件)

- ① 澤田真理, 馬場彩, Jelle Kaastra, “ASTRO-H 搭載 SXS による精密 X 線分光でめざす超新星残骸衝撃波における超熱的電子の検出”, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 03 月 19 日~2014 年 03 月 22 日
- ② Makoto Sawada, Aya Bamba, Katsuji Koyama, Shigeo Yamauchi, Yasuo Fukui, “Suzaku comprehensive study of recombining plasma in SNRs”, Suzaku-MAXI conference, 2014 年 02 月 19 日~2014 年 02 月 22 日
- ③ Makoto Sawada and Jelle Kaastra, “Supra-thermal electrons in SNRs probed by line diagnostics with ASTRO-H SXS”, Fujihara Seminar: X-raying the Gamma-ray Universe - CTA-X-ray link meeting-, 2013 年 11 月 04 日~2013 年 11 月 06 日
- ④ 澤田真理, Jelle Kaastra, “超新星残骸の X 線精密分光にむけた電離非平衡プラズマモデルの開発”, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 09 月 09 日~2013 年 09 月 12 日
- ⑤ Makoto Sawada, “Suzaku Observation of W28: Formation & Evolution of recombining Plasma Probed by the Spatial Distribution”, SNSNR12 超新星と超新星残骸の融合研究会 -恒星進化・爆発メカニズムと元素合成-, 2012 年 10 月 15 日~2012 年 10 月 17 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田真理 (SAWADA, Makoto)
青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号 : 0 0 6 3 3 2 8 1

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :