

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540229

研究課題名(和文) 過電離プラズマで解明する超新星残骸の構造進化の新シナリオ

研究課題名(英文) A New Scenario of the SNR evolution using the Recombining Plasma

研究代表者

小山 勝二 (Katsuji, Koyama)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：10092206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はすざく衛星の高性能分光観測をもとに過電離プラズマを発見、研究し超新星残骸の構造・進化の新シナリオを構築することが目的である。具体的には7個の超新星残骸から初めて過電離プラズマを発見し、そのスペクトルと空間分布の解明からこれら超新星残骸に共通する進化の新シナリオを構築した。その他多くの超新星残骸から初めてクロム、マンガン、鉄、ニッケル輝線を検出し爆発の詳細研究、銀河面拡散X線源の起源探査、宇宙線起源解明の研究を進展させた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to detect Recombining plasma (RP) from many SNR, using the Suzaku high spectral capability, and address new scenario of SNR evolution. We found RP from 7 SNRs for the first time, and study the evolutionary scenario to produce the RP. Furthermore we detect Cr, Mn, Fe and Ni K-shell line from many SNRs and address the explosion mechanisms, origin of the Galactic diffuse X-ray emission and the origin of the Cosmic Rays.

研究分野：X線天文学

キーワード：超新星残骸 エックス線 過電離プラズマ 元素組成 宇宙線起源

### 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発 (SuperNova: SN) は、ほぼ球対称に広がる衝撃波を作り、それが周囲の希薄なガスを加熱して殻状の高温プラズマを形成する。これが超新星残骸 (Supernova Remnant: SNR) である。SNR のプラズマ温度は粒子の質量に比例するので、最初はイオン温度 ( $T_i$ ) が高温になり、ゆっくりと電子温度 ( $T_e$ ) にエネルギー移行する。高温になった電子はイオンを電離し徐々に電離度 = 電離温度 ( $T_z$ ) を増大させる。すなわち常に  $T_e > T_z$  の関係が成り立つ。電離の時間スケールは電子 - イオンの衝突確率に比例するので  $n_e t$  (電子密度 × 衝撃波加熱後の経過時間) で与えられる。十分に電離が進行する ( $T_e = T_z$ ) には  $n_e t = 10^{13} \text{ s/cc}$  程度必要である。星間空間の電子密度は約  $1/\text{cc}$  だからこれは  $10^{13}$  秒、すなわち 3 万年である。高温プラズマは数万 year 程度は X 線を放射するに必要な高温を保持する (図 1)。

こうして殆ど全ての X 線超新星残骸は  $T_e > T_z$  の状態である。これを電離優勢プラズマ (Ionizing Plasma: IP) という。このようなシナリオに従い、「観測結果から爆発の初期条件と時間発展の物理パラメータを導出する」という従来の方法論が確立されてきた。

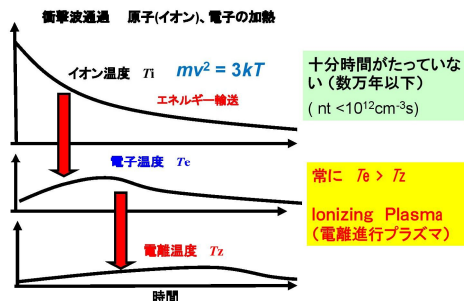


図 1 SNR プラズマの標準進化

### 2. 研究の目的

最近のすざく衛星 (Suzaku) の観測で、従来の常識に全く反する事実、ある種の超新星残骸 (SNR IC443 と W49B) から  $T_e < T_z$  のプラズマ、すなわち過電離プラズマ (Recombining Plasma: RP) が発見された。SNR IC443 と W49B のみが例外的なのだろうか、それとも RP は広範な SNR にみられる普遍的な現象なのだろうか。後者なら従来の SNR 進化の描像が大幅に書きなおされることになる。

このような背景のもとに我々はすざく衛星の高性能分光能力を生かして、広範な SNR を探査することにより、RP の発見と、SNR 起源解明、その構造と進化の新シナリオを創生することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は RP は一部の特別な SNR のみでなく、広範な SNR に普遍的にみられる事実といくことを確定することである。すなわち SNR の進化に新しい視点にたつことである。

本研究では数値計算を屈指して観測結果をもっとも自然に説明できるのは「濃い星周ガス中にできた高温プラズマ = これは IP = がより希薄な星間ガス中に断熱的に膨張する (Rarefaction scenario)」という仮説を実証することである (図 2)。

Rarefaction scenario のメリットは宇宙線の起源である SNR の拡散衝撃波加速をより高いエネルギーまで可能とする。これによって、SNR 中での宇宙線加速の諸問題解決の示唆も得る。

高密度の CSM で  $T_e = T_z \rightarrow$  低密度の ISM へ break out  
断熱膨張で  $T_e \rightarrow$  小

衝撃波の速度が急上昇 (通常の描像より速度大)。  
→ 短時間で高エネルギー (速度の 2 乗に比例する)。  
→ ISM の低密度状態では熱的粒子との Coulomb 衝突が抑えられるので、加速された粒子はさらに加速されやすくなる。

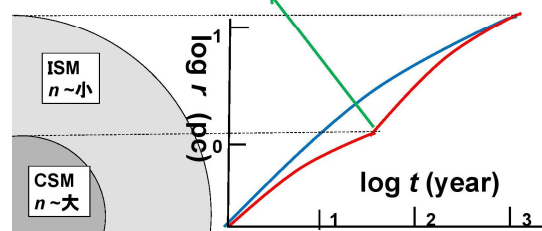


図 2 Rarefaction scenario の概念図

### 4. 研究成果

具体的な成果は

H24 年度は、W44, W28 から過電離状態を発見した。過電離プラズマ生成の新たなモデル (Rarefaction scenario) を作った。

H25 年度には、銀河中心南部から過電離プラズマを発見し、銀河中心核の過去の活動性を示した。過電離プラズマ生成のモデルを数値計算した。G346.6-0.2 から過電離プラズマを発見した。

H26 年度には、3C391, G348.5+0.1 から過電離プラズマを発見した。G350.1-0.3 と G349.7+0.2 から強い Fe, Ni K-shell line を発見した。

H27 年度は、大マゼラン雲の SNR N49 から過電離プラズマを発見した。系外 SNR では初めての発見である。G290.1-0.8 から過電離プラズマを発見した。3C397 から Fe, Ni の異常増加を発見した。

H28 年度は、Kes17 から過剰電離プラズマを発見した。いままでの研究の発展として銀河中心からの鉄輝度分布の解明に超新星の寄与を推定した。

### 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 (すべて査読あり)] (計 16 件)

1) Uchida, Hiroyuki; Koyama, Katsuji; Yamaguchi, Hiroya; Sawada, Makoto;

Ohnishi, Takao; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Yoshiike, Satoshi; Fukui, Yasuo, 2012, PASJ, 64, 141-150

Recombining Plasma and Hard X-Ray Filament in the Mixed-Morphology Supernova Remnant W 44.

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012PASJ...64..141>  
U/DOI:10.1093/pasj/64.6.141

2) Sawada, Makoto; Koyama, Katsuji, 2012, PASJ, 64, 81-88

X-Ray Observations of the Supernova Remnant W28 with Suzaku. I. Spectral Study of the Recombining Plasma

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012PASJ...64...81>  
S/DOI:10.1093/pasj/64.4.81

3) Shimizu, Takafumi; Masai, Kuniaki; Koyama, Katsuji, 2012, PASJ, 64, 24-32

Evolution of Supernova Remnants Expanding out of the Dense Circumstellar Matter into the Rarefied Interstellar Medium

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012PASJ...64...24>  
S/DOI:10.1093/pasj/64.2.24

4) Nakashima, S.; Nobukawa, M.; Uchida, H.; Tanaka, T.; Tsuru, T. G.; Koyama, K.; Murakami, H.; Uchiyama, H. 2013, ApJ, 773, 20-28

Discovery of the Recombining Plasma in the South of the Galactic Center: A Relic of the Past Galactic Center Activity ?

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2013ApJ...773...20>  
N/DOI:10.1088/0004-637X/773/1/20

5) Shimizu, Takafumi; Masai, Kuniaki; Koyama, Katsuji 2013, PASJ, 65, 69-77

Non-Thermal Radio and Gamma-Ray Emissions from a Supernova Remnant by Blast Wave Breaking Out of the Circumstellar Matter

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2013PASJ...65...69>  
S/DOI:10.1093/pasj/65.3.69

6) Yamauchi, Shigeo; Nobukawa, Masayoshi; Koyama, Katsuji; Yonemori, Manami, 2013, PASJ, 65, 6-13

Evidence for Recombining Plasma in the Supernova Remnant G346.6-0.2

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2013PASJ...65....6Y>  
/DOI:10.1093/pasj/65.1.6

7) Sato, Tamotsu; Koyama, Katsuji; Takahashi, Tadayuki; Odaka, Hirokazu; Nakashima, Shinya, 2014, PASJ, 66, 124-133

Discovery of recombining plasma in the supernova remnant 3C 391

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2014PASJ...66..124>  
S/DOI:10.1093/pasj/psu120

8) Ohnishi, Takao; Uchida, Hiroyuki; Tsuru, Takeshi Go; Koyama, Katsuji; Masai, Kuniaki; Sawada, Makoto 2014, ApJ, 784, 74-78

Discovery of Enhanced Radiative Recombination Continua of He-like Iron and Calcium from IC 443 and its Implications

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2014ApJ...784...74>  
O/DOI:10.1088/0004-637X/784/1/74

9) Yamauchi, Shigeo; Minami, Sari; Ota, Naomi; Koyama, Katsuji, 2014, PASJ, 66, 2-9

Thermal and non-thermal X-rays from the Galactic supernova remnant G348.5+0.1

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2014PASJ...66....2Y>  
/DOI:10.1093/pasj/pst004

10) Yasumi, Masato; Nobukawa, Masayoshi; Nakashima, Shinya; Uchida, Hiroyuki; Sugawara Ryusuke; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Koyama, Katsuji, 2014, PASJ, 66, 68-77

Abundances in the ejecta of core-collapse

supernova remnants G350.1-0.3 and G349.7+0.2

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2014PASJ...66...68Y/DOI:10.1093/pasj/psu043>

11) Uchida, Hiroyuki; Koyama, Katsuji; Yamaguchi, Hiroya, 2015, ApJ, 808, 77-84

N49: The First Robust Discovery of Recombining Plasma in an Extra-galactic Supernova Remnant

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2015ApJ...808...77U/DOI:10.1088/0004-637X/808/1/77>

12) Kamitsukasa, Fumiyoshi; Koyama, Katsuji; Uchida, Hiroyuki; Nakajima, Hiroshi; Hayashida, Kiyoshi; Mori, Koji; Katsuda, Satoru; Tsunemi, Hiroshi, 2015, PASJ, 67, 16-24

Global distribution of ionizing and recombining plasmas in the supernova remnant G290.1-0.8

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2015PASJ...67...16K/DOI:10.1093/pasj/psu149>

13) Yamaguchi, Hiroya; Badenes, Carles; Foster, Adam R.; Bravo, Eduardo; Williams, Brian J.; Maeda, Keiichi; Nobukawa, Masayoshi; Eriksen, Kristoffer A.; Brickhouse, Nancy S.; Petre, Robert; Koyama, Katsuji,

2015, ApJ, 801L, 31-37

A Chandrasekhar Mass Progenitor for the Type Ia Supernova Remnant 3C 397 from the Enhanced Abundances of Nickel and Manganese

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2015ApJ...801L...31Y/DOI:10.1088/2041-8205/801/2/L31>

14) Washino, Ryosaku; Uchida, Hiroyuki; Nobukawa, Masayoshi; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Kawabata Nobukawa,

Kumiko; Koyama, Katsuji, 2016, PASJ, 68S, 4-11

Recombining plasma in the remnant of a core-collapsed supernova, Kes 17

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2016PASJ...68S...4W/DOI:10.1093/pasj/psv095>

15) Yamauchi, Shigeo; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Uchiyama, Hideki; Koyama, Katsuji, 2016, PASJ, 68, 59-72

Scale heights and equivalent widths of the iron K-shell lines in the Galactic diffuse X-ray emission

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2016PASJ...68...59Y/DOI:10.1093/pasj/psw057>

16) Nobukawa, Masayoshi; Uchiyama, Hideki; Nobukawa, Kumiko K.; Yamauchi, Shigeo; Koyama, Katsuji, 2016, ApJ, 833, 268-279

Origin of the Galactic Diffuse X-Ray Emission: Iron K-shell Line Diagnostics

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2016ApJ...833..268N/DOI:10.3847/1538-4357/833/2/268>

[ 国際学会発表 ] ( 計 4 件 )

1) Koyama, K, 2102

Proceedings of "An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years)" - 9th INTEGRAL Workshop and celebration of the 10th anniversary of the launch (INTEGRAL 2012). 15-19 October 2012. Bibliotheque Nationale de France, Paris, France. Published online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=176>, id.109

Structure and Dynamics of the Galactic X-rays

2) Katsuji Koyama, 2014

Suzaku-MAXI, Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda.

Diffuse High Energy Object in the Galactic Center and New Scenario of the SNR Evolution

3) Koyama, Katsuji, 2014

40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract E1.2-11-14.

Structure and Dynamics of the Galactic X-rays

4) Koyama, Katsuji; Sato, Tamotsu, 2016  
Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death, Proceedings of the Conference held 6-11 June 2016, in Chania, Greece. Online at <http://snr2016.astro.noa.gr>, id.93

Iron K shell line, a probe of low energy cosmic rays in SNRs

〔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  
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/koyama/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

小山勝二 (Koyama Katsuji)  
京都大学・大学院理学研究科・名誉教授  
研究者番号：10092206

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし