

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00704

研究課題名(和文) 実験室宇宙物理の開拓によるIa型超新星残骸研究の革新

研究課題名(英文) Transformative research of Type Ia supernova remnants by pioneering laboratory astrophysics

研究代表者

山口 弘悦 (Yamaguchi, Hiroya)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：00513467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：Ia型超新星残骸3C 397の観測から、極めて高いTi/FeおよびCr/Fe比が得られ、この天体の親星である白色矮星の爆発直前の中心密度が理論的に標準とされる値と比べて約3倍も高かったことを明らかにした。Ia型超新星やその残骸の観測を通して親星の中心密度にまで制限を与えた例は、本研究が世界初である。さらに、観測結果の信頼性向上を目的に、鉄族元素の蛍光輝線の原子データを取得するための実験装置「電子ビームイオントラップ(EBIT)」を製作し、大型放射光施設SPring-8にて多価イオンの分光実験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Ia型超新星は、遠方銀河までの距離を測る「ものさし(標準光源)」として利用され、宇宙の加速膨張の発見(2011年のノーベル物理学賞)をもたらしている。本研究は、超新星残骸に含まれる鉄族元素の質量比に着目する新手法によって、爆発前の白色矮星の中心密度の決定に初めて成功した。その結果は、本研究で観測した超新星残骸の親星が、標準的ではないIa型超新星爆発を起こしたことを強く示唆する。つまりIa型超新星にも多様性があり、標準光源として利用するためには、その選別が必要であることを示す。今後の研究によって多様性に関する理解がより進むことで、宇宙膨張史の詳細が紐解かれると期待される。

研究成果の概要(英文)：We obtained extremely high mass ratios of Ti/Fe and Cr/Fe from the Type Ia supernova remnant 3C 397, revealing that the central density of its progenitor had been about three times higher than theoretically expected values. This is the first observation of a supernova remnant or even a supernova that has successfully constrained the progenitor's pre-explosion density. We also developed an electron beam ion trap to obtain atomic data of the Fe-group elements that help improve the reliability of the astrophysical observations. Experiments at the large synchrotron radiation facility SPring-8 were carried out for spectroscopy of highly-charged ions of the Fe-group elements.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：X線天文学 超新星 原子物理学 多価イオン

## 1. 研究開始当初の背景

白色矮星の爆発的核融合によって起こる「Ia 型超新星」は、宇宙に存在する鉄族元素の主要生成源であるとともに、宇宙論の研究にも欠かせない重要天体である。しかしながら、親星の進化経路や爆発メカニズムは未だ解明されていない。我々は、本研究課題の開始以前に行った研究で、Ia 型超新星の残骸中に含まれる鉄族元素の量が親星の最終質量や中心密度に強い制限を与えることを示し、問題解決への突破口を開いた。しかし現状では、X線スペクトルを解析する際に参照される原子データの不定性が大きく、元素量測定に顕著な系統誤差が残る。爆発前の白色矮星の中心密度にまで制限を与える精度で元素量を決定するためには、超新星残骸で普遍的に観測される非平衡プラズマと、それに特有な内殻過程の物理を実験的に理解し、必要な原子データを整備する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、様々な Ia 型超新星残骸の鉄族元素量を X 線観測によって精密測定し、親星の最終質量と中心密度を高精度で決定することを目的に設定した。さらに、観測結果の信頼性を向上させるため、元素量決定に必要な原子データ、例えば、主要鉄族元素 (Cr, Mn, Fe, Ni) の多価イオンを起源とする輝線放射の波長や内殻電離後の蛍光収率等を実験的に取得する。これを実現するため、ドイツのマックスプランク核物理研究所 (MPIK) と共同で小型の「電子ビームイオントラップ (EBIT)」を製作し、必要な実験を行うことを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究は、(1) XMM-Newton などの X 線天文衛星を用いた Ia 型超新星残骸の観測と、(2) EBIT の製作およびそれを用いた実験研究の 2 パートからなる。(1)については、超新星残骸 3C 397 など、鉄族元素由来の K 殻輝線放射が顕著な天体を観測し、スペクトル分析によって、その組成比を測定する。得られた結果を、様々な初期条件を課した Ia 型超新星爆発の元素合成モデルと比較することで、親星の最終質量と密度を制限する。(2)については、研究代表者と大学院生が MPIK に長期滞在し、現地の研究者らと協力して EBIT を製作する。EBIT とは、強磁場中で細く絞られた電子ビームを使って任意の重元素イオンを作り、電子遷移に伴う特性 X 線を発生させる装置である。本研究では、電子ビームでイオンの価数をコントロールしながら、高エネルギー光子を EBIT 内に導き内殻電離を起こすという新手法を用いる。そのために、EBIT を大型放射光施設 SPring-8 のビームライン上に設置して実験を行うこととした。これを可能とするため、EBIT は移動が容易な小型のものとし、冷媒を用いずに稼働できるよう永久磁石を用いる仕様とした。さらに、放射光による電極の損傷を避けるため、電子ビームの入射軸をずらすなどの工夫を行った。

なお当初の予定では、(2)を先行させ、必要な原子データを取得した後に、そのデータを(1)で得られる超新星残骸の X 線スペクトルの解析に適用することを計画したが、COVID-19 の影響による渡航制限や資材の供給不足が発生したため、順序を入れ替えることとした。

## 4. 研究成果

Ia 型超新星残骸の観測研究に関しては、当初の期待を上回る成果が得られた。XMM-Newton 衛星により観測した超新星残骸 3C 397 から、極めて高い Ti/Fe および Cr/Fe 比が得られ、この天体の親星である白色矮星の爆発直前の中心密度が理論的に標準とされる密度と比べて 3 倍程度も高かったことを明らかにした。Ia 型超新星やその残骸の観測を通して親星の中心密度にまで制限を与えた例は、本研究が世界初である。さらに、観測された Ti/Fe 比や Cr/Fe 比は、現在の宇宙の平均的な組成比と比べても 1 桁ほど高いものだった。この事実は、3C 397 が Ia 型超新星の中では特異な存在であり、近年示唆されていた Ia 型超新星の多様性を独立に示すものである。今後は 3C 397 以外の Ia 型超新星残骸に対しても、本研究と同様の手法で爆発前の質量や中心密度を調べ、宇宙の標準光源として確実に利

用できる Ia 型超新星の特徴を明らかにできると期待される。

上記の他にも、超新星残骸 N103B から、爆発噴出物が双極状に拡散する証拠を捉えた。これは、親星が連星系を成し、星風活動を通して非対称な星周環境を形成していたためと考えられる。また、超新星残骸 Tycho や SN 1006 から、親星の星風活動を示唆する観測結果が得られた。親星の質量と周辺環境の関係を明らかにすることが、今後の重要課題となるだろう。

EBIT の製作に関しては、先述の通り COVID-19 の影響のため当初の計画から遅れが発生したが、2021 年度中に装置を完成させ、予定通りの性能を得たことを確認した。研究期間を 1 年延長(繰越制度を利用)し、2022 年度には SPring-8 にて放射光を用いた多価イオンの分光実験を実施した。今後のさらなる実験データの取得に向けて、装置の改良を進めた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohshiro Yuken, Yamaguchi Hiroya, Leung Shing-Chi, Nomoto Ken'ichi, Sato Toshiki, Tanaka Takaaki, Okon Hiromichi, Fisher Robert, Petre Robert, Williams Brian J.	4. 巻 913
2. 論文標題 Discovery of a Highly Neutronized Ejecta Clump in the Type Ia Supernova Remnant 3C 397	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L34 ~ L34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/abff5b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamaguchi Hiroya, Acero Fabio, Li Chuan-Jui, Chu You-Hua	4. 巻 910
2. 論文標題 Discovery of Double-ring Structure in the Supernova Remnant N103B: Evidence for Bipolar Winds from a Type Ia Supernova Progenitor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/abee8a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sano H., Yamaguchi H., Aruga M., Fukui Y., Tachihara K., Filipovi? M. D., Rowell G.	4. 巻 933
2. 論文標題 An Expanding Shell of Neutral Hydrogen Associated with SN 1006: Hints for the Single-degenerate Origin and Faint Hadronic Gamma-Rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 157 ~ 157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac7465	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuda Masamune, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Yamaguchi Hiroya, Tsuru Takeshi Go	4. 巻 940
2. 論文標題 Discovery of Year-scale Time Variability from Thermal X-Ray Emission in Tycho's Supernova Remnant	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 105 ~ 105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac94cf	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 大城勇憲、山口弘悦
2. 発表標題 XMM-NewtonとNuSTARによるIa型超新星残骸3C397の鉄族元素の空間分布測定
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Connecting supernova remnants to their progenitor systems and explosion mechanism through X-ray observations
3. 学会等名 The 43rd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大城勇憲、山口弘悦、Shing-Chi Leung, 野本憲一、佐藤寿紀、田中孝明
2. 発表標題 高密度な白色矮星を起源とするIa型超新星残骸3C 397の重元素分布
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 X-ray view of Type Ia supernova remnants
3. 学会等名 FOE19 Fifty-One Erg (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Plasma and radiative transfer diagnostics in the hot intracluster medium
3. 学会等名 European Week of Astronomy and Space Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Probing the stellar nucleosynthesis and explosion with X-ray observations of supernova remnants
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Atomic processes in astrophysical non-equilibrium plasma
3. 学会等名 第1回 宇宙における物質進化 -原子核・原子・分子- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Tycho's supernova remnant
3. 学会等名 Progenitors of Type Ia Supernovae (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 Non-equilibrium plasma in astrophysical objects
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口弘悦
2. 発表標題 硬X線で探る熱的プラズマ現象
3. 学会等名 高感度・広帯域X線天文衛星FORCEで探る高エネルギー宇宙 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天野雄輝、山口弘悦、他
2. 発表標題 天文学への応用を目指した小型電子ビームイオントラップ (EBIT) の開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「宇宙のものさし」の異端児？ 最最高密度な白色矮星による超新星爆発の痕跡を特定  
<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002635.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	辻本 匡弘  (Tsujiimoto Masahiro)  (10528178)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授    (82645)	
研究分担者	山崎 典子  (Yamasaki Noriko)  (20254146)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授    (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	マックスプランク核物理学研究所		