

令和元年6月16日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17673

研究課題名(和文) 超新星残骸のX線および可視光観測で迫るIa型超新星の親星と最大光度の関係

研究課題名(英文) Probing the relation between progenitors and maximum brightness for Type Ia supernovae through X-ray and optical observations of supernova remnants

研究代表者

勝田 哲 (Katsuda, Satoru)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：50611034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：「ASTRO-H(ひとみ)」衛星の早期運用停止を受け、当初予定していたIa超新星の研究計画から重力崩壊型超新星に関する研究に切り替えた。急な変更にも関わらず、以下に述べる通り、爆発元の親星の素性および爆発のメカニズムについて重要な知見を得ることに成功した。銀河系外のIIn型超新星のX線スペクトル解析から、親星が爆発直前に放出した恒星ガスの空間構造がトーラス状になっている可能性を指摘した。近傍の超新星残骸のX線観測からは、親星の質量分布が標準的なサルピーター分布と矛盾しないこと、及び、非対称爆発の反動で中性子星が蹴り飛ばされることを観測的に発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力崩壊型超新星爆発の親星の素性(質量や爆発直前の活動性)及び爆発メカニズムの解明は、現代天文学の中心的課題の一つである。本研究では、これらの問題に超新星とその残骸のX線観測から取り組んだ。その結果、親星が爆発直前に大量放出する星周ガスの空間構造を探る新しい手段を開拓したり、最近の研究でしばしば指摘される、爆発に成功する親星の質量上限値が確認できないことを示したり、非対称な爆発により中性子星が蹴り飛ばされていることを観測的に確立させ、それを基に近年有力視されている「ニュートリノ加熱モデル」の妥当性を裏付けるなど、多岐にわたる重要な研究成果を創出した。

研究成果の概要(英文)：Given the unexpectedly early loss of the ASTRO-H(Hitomi) X-ray astronomy satellite, we changed our research plan from studies of Type Ia supernovae (SNe) and their progenitors to studies of core-collapse SNe. Regardless of this sudden change, we succeeded in obtaining important results on the progenitors and explosion mechanisms of core-collapse SNe. Based on X-ray observations of extragalactic Type IIn SNe, we suggested that the geometry of the circumstellar medium is most likely to be torus-like. From X-ray observations of nearby SN remnants, we found that the progenitor mass distribution is consistent with the standard Salpeter initial mass function and that neutron stars are kicked by asymmetric SN explosions.

研究分野：数物系科学

キーワード：超新星残骸 X線観測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年2月17日、日本が世界の期待を背負って開発したX線天文衛星「ASTRO-H(ひとみ)」が無事に打ち上がった。その1週間後に行われた最初の観測では、世界で初めてX線マイクロカロリメータによる広がった天体(ペルセウス座銀河団)の精密分光を実現し、期待を上回る高品質データの取得に成功した。その後は他の観測機器の立ち上げにも成功し、順調な滑り出しを見せた。ところが、約1カ月を経た3月26日に衛星からの通信が途絶し、その1カ月後には運用の断念という結末を迎えた。このため、本研究で予定していた、「ひとみ」によるIa型超新星残骸のX線精密分光観測は果たせなかった。しかし、「ひとみ」衛星が稼働した1カ月間に取得したデータからの成果創出に貢献するとともに、代案として検討していた重力崩壊型超新星残骸の既存X線データ解析を強力に推進し、当該分野の発展に寄与することができた。以下では、既存X線データに基づく科学成果について詳述する。

2. 研究の目的

以下に述べる三つの問題を観測的に解明することを本研究の目的とした。

(1) 重力崩壊型超新星爆発の親星の質量分布の解明

全ての重い恒星($M > 8$ 太陽質量(M_{\odot}))は進化の最終段階で重力崩壊する。その後のシナリオは、華々しく超新星爆発を引き起こすものと、静かに消滅するものの二に分かれると信じられている。爆発の成否を左右する最重要パラメータの一つが爆発元の星「親星」の質量である。そのため、どの質量範囲の星が爆発に至るのかを特定することが、現代宇宙物理学の重要課題の一つとなっている。理論的には、爆発に成功する最大質量は40 M_{\odot} 程度とされたこともあったが、その後の詳細な多次元シミュレーションでは確かな結論が得られず混沌としている。観測的には、質量範囲17—25 M_{\odot} の最重量級の赤色超巨星が見つからない事実などから、爆発可能な質量範囲を絞り込む努力が続いている。この状況を踏まえ、本研究では、天の川銀河・大小マゼラン銀河に存在する超新星残骸の親星の質量分布を、元素組成比の切り口から新たに導出することを目的とした。

(2) 重力崩壊型超新星爆発のメカニズム、特に中性子星キックの原因究明

前述の通り、一部の重い恒星は進化の最終段階で重力崩壊型超新星爆発を起こし、華々しくその一生を終える。超新星爆発は宇宙最大規模の爆発現象であり、宇宙物理学の様々な局面で重要な役割を果たしている。ところが、その根本となる爆発メカニズムが未だに完全には理解されていない。つまり、コンピュータ上でどうしても爆発を再現できない状況が半世紀以上続いているのである。近年有力とされる爆発モデルは「ニュートリノ加熱」を考慮しており、このモデルの自然な帰結・予言の一つに、爆発後に中心に残る中性子星が爆発の非対称性の反動で勢いよく蹴り出されるというシナリオがある。本研究では、このシナリオを観測的に実証することを目的とした。

(3) 超新星爆発直前に親星が放出した星周物質の構造の解明

近年の超新星観測から、大質量星終末期100年ほどの期間に、既存の理論では説明できない様々な動的・爆発的現象を起こすことが知られるようになった。これにより、すでに確立したと思われる恒星進化理論に再検討が迫られている。超新星観測の優れた点は、超新星爆発に伴う衝撃波速度(10000 km/s)が親星の恒星風速度(10—100km/s)に比べ100—1000倍速いため、例えば爆発後10年間モニター観測すれば、親星の活動履歴を爆発直前から1000—10000年前までの長い期間に遡って調査できるところにある。本研究では、超新星からのX線スペクトルの時間変動から、星周物質(親星の恒星風)の空間構造を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

最新鋭のX線天文衛星「Chandra」「XMM-Newton」「Suzaku」による超新星及び超新星残骸の観測データを解析した。以下では研究目的ごとにその詳細を述べる。

(1) 天の川銀河およびマゼラン銀河中の超新星残骸は近傍に位置するため、他の銀河の超新星(残骸)には不可能な詳細な観測・解析が可能である。そのため、爆発噴出物の元素組成比をきちんと計測できる。これまで、X線、紫外線、可視光などの多波長観測から、多数の超新星残骸の元素組成比が測られ、元素合成モデルと比較することで、親星質量が推定されてきた。しかし天体毎の各論にとどまり、統計的な議論は行われてこなかった。

そこで我々は、多数の文献から超新星残骸の親星質量をまとめ、親星の質量分布関数を導出することにした。その結果、重い星ほど数が多いという、これまで報告されたどんな初期質量関数(IMF: initial mass function)とも一致しない驚くべき結果が得られた。この結果を鵜呑みにできなかった我々は、様々な視点で結果を検証した。その結果、元素組成比に基づく親星質量推定が、多く場合に不適切であったことに気が付いた。従来親星質量推定においては、元素組成比を元素合成モデルと比較する際、測定した全ての元素組成比を同じ重みで評価していた。しかし元素合成モデルを精査した所、Fe/Si以外の元素組成比は親星質量に鈍感であることが判明したのである。そこで本研究では、Fe/Siのみに着目し、全ての超新星残骸の親星質量を推定し直した。

(2) 超新星爆発の観測研究は、日々出現・発見される新しい超新星を用いるのが主流だが、超新星は距離が遠すぎて点にしか見えないため、中性子星の位置や爆発噴出物の詳細な分布

はとでも計測できない。そこで本研究では、至近距離にある、天の川銀河やマゼラン銀河中の「超新星残骸」を観測対象とした。超新星残骸は、その近傍さゆえに中性子星の位置と爆発噴出物の空間分布を同時に調べられる貴重な対象である。

高温プラズマを含む超新星残骸の観測にはX線を用いるのが一般的である。実際、X線観測はこれまで何度となく実施されてきた。ところが、爆発噴出物の分布を解明するには、超新星残骸の各地点で視線方向に重なる掃き集められた星間物質をきちんと切り分ける必要があり、大変な手間が掛かる。そのため、爆発噴出物の全貌が解明されたのは、有名超新星残骸2-3天体ほどに限られていた。

我々は、この困難を解決する効率的な解析手法を編み出した。手法を掻い摘んで説明すると、まず2つのインプットファイルを準備する。一つは、エネルギーごとにスライス(0.5-7 keVを対数的に40区間に分割)した40枚の画像、もう一つは分離したい成分数種の典型的なX線スペクトル(テンプレート)である。前者は画素ごとのX線スペクトルを与える。これをテンプレートスペクトルの組み合わせによってフィッティングし、各成分の強度マップを作成する。フィッティングの際には、X線天文学の標準的ツールは利用せず、独自ツールを開発することで圧倒的な計算効率を実現した。

ターゲット選定には次の3つの条件を課した。(A)比較的若い(爆発後数千年以下)、(B)中間質量元素(主にシリコンと硫黄)の輝線がX線で検出されている、(C)中性子星が残骸の中に発見されている。この条件を全て満たす Cassiopeia A, G292.0+1.8, Puppis A, Kes 73, RCW 103, N49 の解析を行った。

- (3) 近傍銀河で発生した、爆発後数十年以内のIIn型超新星2005kd, 2006jd, 2010jlのモニター観測データを解析した。IIn型超新星は極めて明るいタイプの超新星である。そのため長期間に渡って、X線スペクトル解析に耐える高統計スペクトルが得られる。したがって、超新星のX線スペクトル変動を調査するには打ってつけの天体と言える。

4. 研究成果

我々の得た主な研究成果を項目ごとに簡潔に述べる。

- (1) 本研究で提案したFe/Si比に基づく親星質量推定法によると、質量分布は、 $f_A : f_B : f_C = 0.47^{+0.35}_{-0.24} : 0.32 \pm 0.32 : 0.21^{+0.26}_{-0.12}$ と得られた。なお、(A) $M < 15 M_{\odot}$, (B) $15 M_{\odot} < M < 22.5 M_{\odot}$, (C) $M > 22.5 M_{\odot}$ の質量範囲に対応し、 f は各質量範囲の個数割合を示す。この分布は標準的な恒星質量分布であるサルピーターIMFと矛盾しない。つまり、爆発に成功する親星質量には上限カットオフ(high-mass cutoff)がないことを意味し、大変興味深い。
- (2) 解析した6天体全てにおいて、爆発噴出物の重心が爆発中心からずれており、かつ、重心と中性子星が爆心に対して概ね反対方向に位置していることが判った。このような反配置が何の根拠もなく偶然に発生する確率は0.1%以下と計算できるので、爆発時に両者が反跳したと考えるのが自然である。これは、近年主流となっている「多次元ニュートリノ加熱モデル」の妥当性を裏付ける結果である。同時に、中性子星の高速キックが超新星爆発の非対称性に起因するとする仮説を強く支持している。
- (3) 解析した三つのIIn型超新星が、次の三段階のスペクトル進化を示すことを発見した：(A) 爆発1-2年未満、硬X線成分のみ、(B) 爆発1-2年後、硬X線成分に軟X線成分が加わる、(C) 爆発2年以降、軟X線成分のみ。このようなスペクトル進化は、ドーナツ状の星周物質を斜めから観測した場合に期待される。つまり、(A) 初期には超新星衝撃波の半径が小さいため、全放射が冷たい星周物質で強い吸収を受けた硬X線成分として観測され、(B) 次第に衝撃波半径が大きくなるにつれ、星周物質を通らない軟X線成分が出現し、(C) 最終的には衝撃波が星周物質を完全に突っ切り、強い吸収を受けた硬X線成分が消滅する、という筋書きである。現状ではこれ以外の解釈も可能ではあるが、可視光の偏光分光観測などからも星周物質のトーラス形状が示唆されていることから、上記解釈は尤もらしいと考えられる。このように、X線スペクトル進化が星周物質の形状を探る新しい手段となり得ることを示すことが出来た。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Katsuda, S., Takiwaki, T., Tominaga, N., Moriya, T.J., & Nakamura, K., Progenitor Mass Distribution for Core-Collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds Based on Elemental Abundances, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 863, 127 (2018年)
DOI: 10.3847/1538-4357/aad2d8

Katsuda, S., Morii, M., Janka, H.-T., Wongwathanarat, A., Nakamura, K., Kotake, K., Mori, K., Takiwaki, T., Tanaka, M., Tominaga, N., & Tsunemi, H., Intermediate-Mass-Elements in Young Supernova Remnants Reveal Neutron Star Kicks by Asymmetric Explosions, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 856, 18 (2018年)
DOI: 10.3847/1538-4357/aab092

Hitomi Collaboration, including Katsuda, S. as a 66th author (one of the 7

corresponding authors). Hitomi Observations of the LMC SNR N132D: Highly Redshifted X-Ray Emission from Iron Ejecta, Publ. Astron. Soc. Japan, 査読有, Vol.70, Issue 2, id.16 (2018 年)

DOI: 10.1093/pasj/psx151

Katsuda, S., Maeda, K., Bamba, A., Terada, Y., Fukazawa, Y., Kawabata, K., Ohno, M., Sugawara, Y., Tsuboi, Y., & Immler, S., Two Distinct-Absorption X-Ray Components from Type II_n Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium, The Astrophysical Journal, 査読有, 832, 194 (2016 年)

DOI: 10.3847/0004-637X/832/2/194

〔学会発表〕(計 36 件)

勝田 哲、大野雅功、森浩二ほか、X 線天文衛星「すざく」による大規模太陽フレアループ中のプラズマ元素組成比の測定、日本天文学会(口頭発表)、2019 年 3 月、法政大学

Katsuda, S., High-resolution X-ray Spectroscopy of Galactic Supernova Remnants, Seminar at NASA/GSFC (口頭発表), 2019 年 2 月, NASA/GSFC (USA)

Katsuda, S., Probing Supernova Progenitors from Observations of Supernova Remnants, 10th DTA Symposium: Stellar deaths and their diversity (招待講演), 2019 年 1 月, NAOJ

Katsuda, S., Takiwaki, T., Tominaga, N., Moriya, T.J., & Nakamura, K., Progenitor Mass Distribution of Core-Collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds based on Elemental Abundances, Massive Stars and Supernovae 2018 (口頭発表), Nov. 5—9, 2018, Baliroche (Argentina)

Katsuda, S., et al., Elemental Abundances for Huge Solar Flares Measured with Suzaku's XIS, New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese and Chinese observatories (ポスター発表), Nov. 2018, ISAS/JAXA (Japan)

Katsuda, S., Takiwaki, T., Tominaga, N., Moriya, T.J., & Nakamura, K., Progenitor Mass Distribution of Core-Collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds, IWARA2018 – 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics (招待講演), Sep. 5—9, 2018, Ollantaytambo (Peru)

Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori, K., & Uchida, H., Establishing Charge-Exchange X-Ray Emission from Supernova Remnants with Athena's X-IFU, Exploring the Hot and Energetic Universe: The second scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory (口頭発表), Sep. 24 – 27, 2018, Palermo (Italy)

Katsuda, S., SNR View on SN Ia Progenitors, 15th Marcel Grossmann Meeting (招待講演), July 1—7, 2018, Rome (Italy)

Katsuda, S., Maeda, K., Subaru Observations of H α Filaments of the Cygnus Loop and Tycho's Supernova Remnants (ポスター発表), Ohira Y., et al., 42nd COSPAR Scientific Assembly, July 2018, Pasadena (USA)

Katsuda, S., Maeda, K., Bamba, A., et al., Two Distinct-Absorption X-Ray Components from Type II_n Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium (ポスター発表), XMM-Newton Workshop 2018 “Time-Domain Astronomy: A High Energy View”, June 2018, Madrid (Spain)

Katsuda, S., Kawabata, K., Shimoda, J., et al., SKA Workshop “The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields” (口頭発表), May 28 – June 1, 2018, Miyazaki (Japan)

Katsuda, S., Observations of X-Ray Emission from Thin-Thermal Plasmas in Supernova Remnant (招待講演), Collaborative Conference on Plasma Physics, 7—11 May, 2018, Dubrovnik (Croatia)

勝田 哲、森井幹雄、Hans-Thomas Janka ほか、超新星残骸の X 線観測で明らかにした非対称爆発と反跳中性子星、日本天文学会(口頭発表)、2018 年 3 月、千葉大学

勝田 哲、森 浩二、田代 信、寺田幸功、佐藤浩介、森田佳恵、相楽ひかり、村上弘志、信川正順、常深博、林田清、松本弘典、中嶋大、X 線天文衛星「すざく」の昼地球データを用いた超高層大気研究の新展開、研究会 X (口頭発表)、2018 年 3 月、広島大学

Katsuda, S., Probing Core-Collapse Supernova Explosion Physics through X-Ray Observations of Supernova Remnants, Seminar at CEA-Saclay (口頭発表), January, 2018, Paris (France)

Katsuda, S., Measuring Cosmic-Ray Acceleration Efficiencies in Supernova Remnants, The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2017 (招待講演)、2017 年 12 月、東京大学柏キャンパス

Katsuda, S., Supernova Explosion Mechanisms and Cosmic-Ray Acceleration through X-Ray Observations of Supernova Remnants, セミナー発表、2017 年 12 月、早稲田大学

山田・前田研究室

- Katsuda, S., X-Ray Observations of Supernova Remnants Since 2005 (招待講演), SNR, XPD, and X-ray Astronomy: Looking Back and Forward Workshop in Celebration of Tsunemi-sensei, October 7, 2017, Osaka University (Japan)
- Katsuda, S., X-Ray Expansion Measurements of Supernova Remnants and Explosion Asymmetries anti-correlating with Neutron Star Kicks, SNR workshop 2017 (招待講演), 28-29 Sep., 2017, Nagoya University (Japan)
- Katsuda, S., X-Ray Spectroscopy of Supernova Remnants, 2017 Collaborative Conference on Plasma Physics (招待講演), 4—8 Sep., 2017, Budapest (Hungary)
- 21 勝田 哲, Fabio Acero, 富永 望ほか、超新星残骸 RX J1713.7-3946 からの熱的 X 線放射の発見、日本天文学会 (口頭発表) 2017 年 9 月、北海道大学
- 22 Katsuda, S., Morii, M., Janka, H.-T., et al., Explosion Asymmetries Anti-Correlating with Neutron-Star Kicks in Young Supernova Remnants, The Progenitor-Supernova-Remnant Connection (口頭発表), 24—28 July, 2017, Ringberg Castle (Germany)
- 23 Katsuda, S., A Review of Recent Observations of Supernova Remnants, Frascati Workshop 2017 – Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources – XII (招待講演), 12—17 June, 2017, Parelmo (Italy)
- 24 Katsuda, S., Probing Supernova Explosion Mechanisms through Observations of Supernova Remnants, FOE 2017 (招待講演), 5—8 June, 2017, Oregon State University (USA)
- 25 勝田 哲, 森井幹雄, H.-T. Janka ほか、超新星残骸の効率的な空間分離分光解析、天文学におけるデータ科学的方法 (口頭発表) 2017 年 5 月、統計数理研究所
- 26 勝田 哲, Eric Miller, 山口弘悦ほか Hitomi Collaboration、X 線天文衛星「ひとみ」による超新星残骸 N132D の観測、日本物理学会 (口頭発表) 2017 年 3 月、大阪大学
- 27 Katsuda, S., Acero, F., Tominaga, N., et al., Detection of Thermal X-Ray Emission and Proper Motions in RX J1713.7-3946, IAU Symposium 331: <SN 1987A, 30 years later> (口頭発表), Feb. 2017, Reunion Island (France)
- 28 勝田 哲, 超新星残骸における電荷交換反応の観測, 「自然科学における階層と全体」シンポジウム (招待講演), 2017 年 2 月, 名古屋
- 29 Katsuda, S., Maeda, K., Bamba, A., et al., Two Distinct-Absorption X-Ray Components from Type II In Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium, Molecule 2017: "Transient Universe in the Big Survey Era: Understanding the Nature of Astrophysical Explosive Phenomena" (口頭発表), Jan. 2017, Kyoto U. (Japan)
- 30 Katsuda, S., Maeda, K., Ohira, Y., et al., High-Resolution H-alpha Spectroscopy of Balmer-Dominated Shocks in Supernova Remnants, Subaru Users' Meeting (口頭発表), Jan. 2017, NAOJ (Japan)
- 31 Katsuda, S., Yamaguchi, H., Sawada, M., et al. (Hitomi Collaboration), Hitomi Observations of Supernova Remnants N132D and G21.5-0.9, 7 years of MAXI (口頭発表), Dec. 2016, RIKEN-Wako (Japan)
- 32 Katsuda, S., Maeda, K., Ohira, Y., et al., Spatially-Resolved Spectroscopy of a Balmer-Dominated Shock in the Cygnus Loop: An Extremely Thin Cosmic-Ray Precursor?, Panoramas of the Evolving Universe (The 6th Subaru International Conference) (ポスター発表), Nov. 2016, Hiroshima (Japan)
- 33 勝田 哲, 田中雅臣, 諸隈智貴, Robert Fesen, & Dan Milisavljevic, 「KWFC」H α 測光観測による超新星残骸 G156.2+5.7 の膨張率測定、日本天文学会年会 (口頭発表) 2016 年 9 月、愛媛大学
- 34 Katsuda, S., Maeda, K., Bamba, A., et al., Soft and Hard X-Ray Components from Type II In Supernovae: Evidence for Asphericity in the CSM, Supernovae Through the Ages (ポスター発表), Aug. 2016, Easter Island (Chile)
- 35 Katsuda, S., X-Ray Spectroscopy of Supernova Remnants, RIKEN-RESCEU Joint Seminar 2016 (口頭発表), July 2016, The University of Tokyo
- 36 勝田 哲, 田中雅臣, 諸隈智貴, Robert Fesen, & Dan Milisavljevic, 超新星残骸 G156.2+5.7 を縁取る H α フィラメントの固有運動測定～距離と年齢の新しい制限～、木曾シュミットシンポジウム 2016 (口頭発表) 2016 年 7 月、東京大学木曾観測所

〔図書〕(計 1 件)

Katsuda, Satoru, Supernova of 1006 (G327:6 + 14:6), Handbook of Supernovae – Chapter 45, Springer, p.63 (2017 年)

DOI: 10.1007/978-3-319-21846-5_45

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。