

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800119

研究課題名(和文)分散分光器とカロリメータを用いた超新星残骸のX線精密分光学の開拓

研究課題名(英文)Pioneering high-resolution X-ray spectroscopy of supernova remnants using dispersive spectrometers and the calorimeter onboard ASTRO-H

研究代表者

勝田 哲(Katsuda, Satoru)

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・宇宙航空プロジェクト研究員

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)：点源専用と思われがちな「ニュートン」衛星の分散分光器RGSを、比較的コンパクトな超新星残骸(Kepler's SNR, SNR 0509-67.5)、及び大きく広がった超新星残骸(Puppis A, Cygnus Loop)の局所的に明るい構造に対して用いることで、超新星残骸のX線精密分光を世界に先駆けて実施した。その結果、電荷交換反応由来のX線の確立、爆発破片の運動、窒素が豊富な星周物質の検出など、多岐に渡る興味深い成果を出すことに成功した。さらに、X線精密分光から派生して、可視光や極端紫外線による高分散分光観測への着想も得た。

研究成果の概要(英文)：It was generally thought that XMM-Newton's reflection grating spectrometer (RGS) is applicable only for point-like sources. However, in this research, we have successfully demonstrated that the RGS can provide high-resolution spectra for compact supernova remnants (SNRs) like Kepler's SNR and SNR 0509-67.5 and compact features in large SNRs such as Puppis A and the Cygnus Loop. The outcomes include establishing charge-exchange X-ray emission in X-ray spectra, revealing 3D geometries of supernova ejecta, and the discovery of N-rich circumstellar medium. These are all new to X-ray astronomy and are scientifically important. In addition, inspired by this X-ray high-resolution spectroscopy, we initiated new high-resolution spectroscopy of SNRs in optical and extreme ultraviolet wavelengths.

研究分野：X線天文学

キーワード：超新星残骸 X線精密分光

1. 研究開始当初の背景

超新星残骸 (SuperNova Remnant: SNR) を始めとする宇宙の高温希薄プラズマのX線スペクトルは多数の輝線を持つ。輝線は各元素からの特性X線であり、それらを1本1本分離することで、元素量や温度など様々な情報が引き出せる。

SNRのX線分光観測は、1993年に日本が打ち上げたX線天文衛星「あすか」を皮切りに、主にX線CCDカメラによって進められてきた。その分光能力は $E/\Delta E \sim 20$ @ 1keV程度で、異なる元素、異なる電離状態のイオンからの輝線を分離できる。それを基に重元素量や電離状態が明らかにされてきた。

その成果の先に自然と要求された性能は、より高い分光力であった。というのも、X線CCDスペクトルであたかも1本の輝線のように見える構造はほぼすべて、数本の輝線から構成されていることがわかってきたからである。主要な輝線を1本1本分離し、各輝線の強度、中心値、幅を直接測定するには、分光精度をさらに1桁程度上げる ($E/\Delta E > 100$) 必要があった。

点源については、「Chandra」と「XMM-Newton」の分散分光器 (Reflection Grating Spectrometer: RGS) により、 $E/\Delta E \sim 500$ @ 1keVレベルの分光精度が達成された。しかし、両衛星のRGSはスリットを装備しないため、広がった天体では分散軸方向の天体の広がりが分解能の悪化を引き起こす。そのため、広がった天体のX線精密分光は、日本のX線天文衛星「ASTRO-H」搭載のカロリメータの登場を待つ状況が続いていた。

2. 研究の目的

われわれは、「ASTRO-H」衛星を待たずして、SNRのX線精密分光を実現することに気づいた。これには、「ニュートン」衛星搭載のRGSを利用する。前述のとおり、スリットを装備しないRGSは、基本的には拡散源には不向きであるが、分散角が大きいため、意外と天体の広がりに鈍感である。定量的には、1分角の広がりをもつ天体に対する実質的な分解能は、 $E/\Delta E = 160$ (@0.5keV) になる。これはX線CCDカメラに比べて1桁近くも高い。

要するに、サイズが1分角程度のSNRについては、RGSで十分X線精密分光が可能なのである。そのアイデアは至ってシンプルであるが、解析が比較的込み入っているためかほとんど手つかずの状態であった。われわれはそこに突破口を見だし、「ASTRO-H」に先立ちSNRのX線精密分光観測を開拓することを目的とした。

3. 研究の方法

真っ先に思い当たる観測対象は、見かけのサイズの小さいマゼラン銀河中のSNRである

う。実際、複数のマゼラン雲中のSNRについて、質の高い高分散スペクトルが取得されていた。しかし、そのスペクトルはSNR全体に対するもので、組成や温度、速度などさまざまに異なるプラズマからの放射の重ね合わせである。このため、スペクトルの解析・解釈は、とても複雑になる。

物事を単純化するため、場所ごとにスペクトルを切り出したい。これは見かけの小さいマゼラン銀河のSNRでは難しい作業である。視直径の大きい系内SNRを狙うしかない。しかし、系内SNRはその拡がりのため、RGSの実質的な分光能力が著しく低下してしまう。このジレンマを解消する唯一の方法は、系内SNR中の局所的に明るいコンパクトな構造 (輝点) に着目することであった。

4. 研究成果

主な研究成果を天体毎に詳述する。

(1) パピスA

最初のターゲットは、Puppis A SNRの東端と北端に位置する輝点構造だった。東端輝点のRGSスペクトルを図1に示す。比較のため

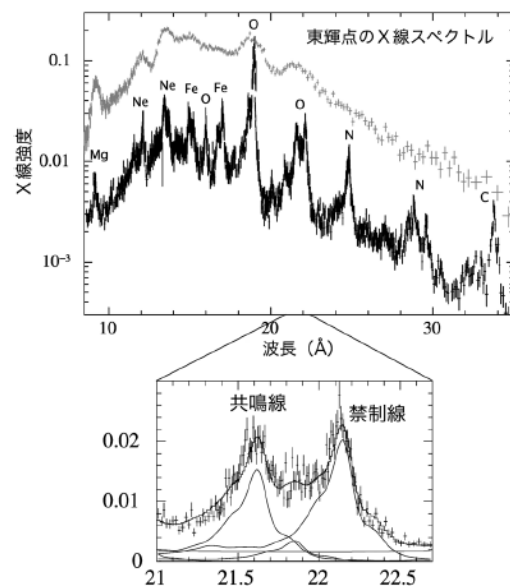


図1: パピスA 東端に位置する輝点のRGSスペクトル (黒) と「すざく」XISスペクトル。下のパネルはヘリウム様酸素 $K\alpha$ 輝線の拡大図。

に表示した「すざく」XISスペクトル (灰色十字) との違いは歴然としている。各輝線の上に元素名を添えたように、実にたくさんの輝線をきちんと分離しており、その中には「すざく」XIS (灰色) が分離できなかった輝線も複数含まれる。とりわけ興味深いのは、ヘリウム状酸素からの $K\alpha$ 禁制線 (@0.561keV) と $K\alpha$ 共鳴線 (@0.574keV) であった。驚いたことに、禁制線が共鳴線より強いのだ。このような強度比は従来の熱放射モデルでは説明がつかない。この異常の原因を様々な観点から慎重に検討した結果、共鳴散乱効果や再結合放射、内核電離の効果差を差し置いて、これまでSNRのX線放射過程と

してはほとんど効かないと考えられてきた電荷交換反応が想像以上に寄与している可能性の高いことを突き止めた。この説が本当に正しいかどうかは、今後の研究で突き詰める余地があるが、いずれにせよ「ニュートン」RGS のスペクトルが、通り一遍なプラズマ放射モデルの枠組みを抜け出す必要性を突きつけた意義は大きい。

さらに我々は、パピス A 中の爆発破片構造についても、RGS による観測を実施した。その結果、それらのドップラー速度の精密な測定 (-1500 ± 200 km/s, 650 ± 100 km/s) に成功した。これを基に、爆発点からの実距離 (見かけの距離 + 奥行き) を計算すると、両者共に半径 8 pc に位置することが判明した。超新星爆発の 3 次元構造を解明するうえで大きな一歩である。

また、輝線幅からは、イオン温度の上限値を得た。ガスの運動速度が大きいので、イオン温度は非常に高い (したがって熱拡がりのため輝線幅は太い) のかと思いきや、観測結果は見事にその予想を裏切り、非常に細かった ($1 \sigma < 1$ eV)。これを素直に解釈すれば、爆発破片がフォワードショックではなく、それよりずっと速度の遅いリバースショックで加熱されたことを示唆している。リバースショックのアイデアは 40 年以上前から理論的に予想されていたが、未だに観測例に乏しい状況が続いているため、本研究はその存在を裏付ける貴重な実例を提供したと言える。

(2) 白鳥座ループ

南西端の輝点構造について、RGS による観測を実施した。その結果、パピス A 東端領域と同様、ここでも共鳴線に比べ禁制線の強いことが判明し、電荷交換反応の混入の可能性がある。電荷交換反応は、SNR からの X 線放射過程として予想以上に重要な役割を果たしているのかもしれない。

(3) ケプラーの SNR (SN 1604)

ケプラーの SNR (SN 1604) は、過去の様々な研究結果により、Ia 型の超新星 (Ia SN) の残骸とほぼ確定している。Ia SN は、極大時の可視光絶対等級を精度よく決めることができるため、宇宙で最も明るい高精度の標準光源として重要な役割を果たしている。2011 年のノーベル物理学賞も、Ia SN の観測結果 (宇宙の加速膨張の発見) である。それにも関わらず、爆発前の親星が未だに同定されておらず (白色矮星の爆発と信じられているが、確証がない) 親星の解明に向けて熱心な研究が続けられている。

親星の推定手段として近年注目を集めるのが、SN 周辺環境の観測である。一般に、恒星は恒星風などにより周辺をかき乱す。このため、親星周辺には親星特有の痕跡 (星周物質 = CircumStellar Medium: CSM) が現れる。その観測から親星に迫ろうというのである。

ケプラーの SNR は、CSM が確認されている唯一の SNR だ。CSM は SNR 北部から中心に飛散する clump 構造として観測される。その固有運動から判断して、爆発の数万年前に親星から放出された物質と考えられている。ケプラーの SNR は比較の見かけのサイズが小さいので、「ニュートン」RGS の絶好の対象になる。観測データを解析したところ、強い窒素輝線が検出されていることが判明した (図 2)。

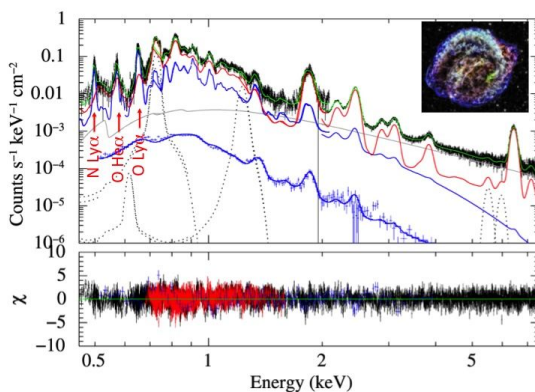


図 2 : ケプラーの SNR の X 線スペクトル (2keV 以下は RGS、2keV 以上は「すざく」XIS による)。青のデータと埋め込み画像は「チャンドラ」による。

この輝線は X 線 CCD カメラではほぼ検出不可能であり (参考: 図中の「チャンドラ」衛星の X 線 CCD データ (青) から明白)、RGS だけからこそ得られた優れた成果と言える。

窒素量 (N/H 組成比) は、太陽の 4 倍程度と高く、比較的重い恒星の星風由来すると考えられる。さらに、CSM は高密度の clump 成分だけでなく、広範囲に淡く拡がる成分の寄与も大きい (質量 $\sim 1 M_{\odot}$) ことを発見し、その質量から質量放出率を $1 \times 10^{-5} (V_{\text{wind}}/10 \text{ km/s}) M_{\odot}/\text{yr}$ 程度と導いた。測定した組成比と質量放出率から、親星は漸近巨星分枝であったものと推察される。

当初の研究計画では、最後の 1 年は「ASTRO-H (Hitomi)」衛星による X 線精密分光を実施する予定であった。しかし残念ながら、打ち上げ後 1 カ月ほどで深刻なトラブルが発生し運用が断念されたため、この計画は頓挫した。それでも、「ニュートン」RGS による他の銀河系内の SNR (例えば、MSH15-52、RCW86、G292.0+1.8 など) やマゼラン星雲の SNR の良質なデータがほとんど手つかず状態で存在している。これらのデータを解析することで、SNR の X 線精密分光観測をまだまだ開拓できる手応えがある。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

Katsuda, S., Maeda, K., Ohira, Y., Yatsu, Y., Mori, K., Aoki, W., Moihana, K., Raymond, J.C., Ghavamian, P., Lee,

J.-J., Shimoda, J., & Yamazaki, R., Spatially Resolved Spectroscopy of a Balmer-dominated Shock in the Cygnus Loop: An Extremely Thin Cosmic-Ray Precursor?, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol.819, No.2, article id. L32,
DOI: 10.3847/2041-8205/819/2/L32
Katsuda, S., Acero, F., Tominaga, N., Fukui, Y., Hiraga, J.S., Koyama, K., Lee, S.-H., Mori, K., Nagataki, S., Ohira, Y., Petre, R., Sano, H., Takeuchi, Y., Tamagawa, T., Tsuji, N., Tsunemi, H., & Uchiyama, Y., Evidence for Thermal X-Ray Line Emission from the Synchrotron-dominated Supernova Remnant RX J1713.7-3946, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.814, No.1, article id. 29,
DOI:
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/814/1/29>
Katsuda, S., Mori, K., Maeda, K., Tanaka, M., Koyama, K., Tsunemi, H., Nakajima, H., Maeda, Y., Ozaki, M., & Petre, R., Kepler's Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.808, No.1, article.id 49,
DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/49
勝田 哲, 常深 博, 森 浩二, 内田裕之, 銀河系内超新星残骸のX線精密分光観測, *天文月報*, 査読無, Vol.108, No.2, pp.113-121,
http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2015_108_02/108_113.pdf
勝田 哲, 超新星残骸のX線精密分光観測～XMM-Newtonによる先駆けとASTRO-Hへの展望～, *ISAS news*, 査読無, Vol.403, pp.1-3,
<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/2014/ISASnews403.pdf>
Katsuda, S. & Tsunemi, H., High-Resolution X-Ray Spectroscopy of Galactic Supernova Remnants, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, Vol.1, No.1, pp.201-204,
DOI: 10.14311/APP.2014.01.0200
Katsuda, S., Ohira, Y., Mori, K., Tsunemi, H., Uchida, H., Koyama, K., & Tamagawa, T., Dynamics of X-Ray-emitting Ejecta in the Oxygen-rich Supernova Remnant Puppis A Revealed by the XMM-Newton Reflection Grating Spectrometer, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.768, No.2, 2013, article.id 182
DOI: 10.1088/0004-637X/768/2/182

[学会発表](計 15 件)

勝田 哲, 前田啓一, 大平 豊, 谷津陽一, 森 浩二, 森鼻久美子, Raymond J., Ghavamian G., Lee J.-J., 霜田治朗, 山崎 了, 田中雅臣, Cygnus Loop 衝撃波プリカーサーのH α 高分散分光・空間分離観測, 日本天文学会(口頭講演), 2016/3/14-2016/3/17, 首都大学東京・八王子キャンパス
勝田 哲, 超新星残骸のX線観測で探る元素合成, 宇核連研究会(招待講演), 2016/2/22-2016/2/24, 国立天文台・三鷹キャンパス
Katsuda, S., ASTRO-H Observations of the Cygnus Loop ~Opening New Fields in SNRs~, ASTRO-H SWG meeting(口頭講演), 2015/7/29-2015/7/30, 首都大学東京・八王子キャンパス
Katsuda, S., Identifying subclasses of young Type Ia supernova remnants by X-ray observations, 14th Marcel Grossmann Meeting(口頭講演), 2015/7/12-2015/7/18, University of Rome (Italy)
Katsuda, S., High-Resolution X-Ray Spectroscopy of Supernova Remnants: Current Challenges and Future Prospects, Japanese-Dutch Bilateral Workshop(招待講演), 2015/5/25-2015/5/29, 青山学院大学・相模原キャンパス
勝田 哲, X線精密分光で探る超新星残骸, 東京理科大学セミナー, 2015/5/8, 東京理科大学・野田キャンパス
Katsuda, S., Charge-Exchange X-Ray Emission from Supernova Remnants, Charge Exchange X-Rays in Current & Future Astrophysical Researches(招待講演), 2015/4/13-2015/4/16, ITAMP (Harvard University, USA)
勝田 哲, 超新星残骸のX線精密分光観測～XMM-Newton/Chandraによる先駆けとASTRO-Hへの展望～, 立教大学セミナー(口頭講演), 2015/1/22, 立教大学・池袋キャンパス
Katsuda, S., High-Resolution X-Ray Spectroscopy of Supernova Remnants, ISAS Astrophysics Colloquia(口頭講演), 2014/5/29, 宇宙科学研究所
内田裕之, 勝田 哲, 常深 博ほか, はくちょう座ループ南西端におけるヘリウム様酸素からの強い禁制線の発見, 日本天文学会(口頭発表), 2014/9/11, 山形大学
Katsuda, S., High-Resolution Imaging and Spectroscopy of Supernova Remnants, The Many Facets of Supernova Remnants: Cosmic Particle Accelerator and

Environmental Impact (招待講演)、
2014/11/10、立教大学
Uchida, H., Katsuda, S., Tsunemi, H.,
Mori, K., Koyama, K., Tsuru, G.T.,
Tanaka, T., Nakajima, H., &
Kamitsukasa, F., Enhancement of the
Forbidden Line in the Southwestern
Knot of the Cygnus Loop, 40th COSPAR 2014
(口頭講演)、2014/8/06、Moscow
(Russia)
Katsuda, S., High-Resolution X-Ray
Spectroscopy of Supernova Remnants,
Multi-Messengers from Core-Collapse
Supernovae (招待講演)、
2013/12/2-2013/12/6、福岡大学
勝田 哲、大平 豊、森 浩二、常深 博、
内田裕之、小山勝二、玉川 徹、X線精密
分光で明らかにするパピス A SNR 爆発噴
出物の運動学、日本天文学会(口頭講演)
2013/9/10-2013/9/10、東北大学
Katsuda, S., Galactic SNRs: A Short
Review of Recent X-Ray Observations,
Frascati Workshop 2013 (招待講演)、
2013/5/27-2013/6/1、Paremo (Italy)

〔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

勝田 哲 (KATSUDA, Satoru)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号：50611034