

SXS装置によるかに超新星 残骸の熱的プラズマ放射探査

辻 本 匡 弘¹
森 浩 二²



辻本



森

〈¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

〈² 宮崎大学工学部電子物理工学科 〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1〉

e-mail: ¹ tsujimot@astro.isas.jaxa.jp, ² mori@astro.miyazaki-u.ac.jp

かに星雲は「ひとみ」衛星搭載のX線マイクロカロリメータでデータを得た最後の天体となった。較正目的であったが、同天体の高分解能分光観測であった。微弱なスペクトル線に対する比類なき感度から、未検出の熱的プラズマ放射の上限を得た。更に、超新星爆発から非平衡プラズマの時間発展を追い、観測データからSN1054についての制限をつけた。超新星爆発・残骸の観測的研究におけるX線マイクロカロリメータの威力が十分垣間見え、XRISM衛星への期待が膨らむ。

メシエ・カタログ1番のかに星雲は、おうし座にある超新星残骸で、歴史的記録に残る超新星爆発SN1054に同定される。中心には、約34ミリ秒で自転する中性子星があり、加速電子によるシンクロトロン放射が幅広い電磁波域で卓越する。X線・γ線では全天でも特に明るい天体であり、明るさ・偏光・時刻など幅広い装置性能の較正に使える、極めて有用な天然の標準光源である。

夭折した「ひとみ」衛星の数少ないデータの1つが、かに星雲であった。較正目的¹⁾であったが、X線マイクロカロリメータによる初めての高分解能分光観測でもあった。約10年を費やして開発した装置喪失の失意の中で、我々はその貴重なデータを活かすべく、データが一体何を語ろうとしていたのか虚心に耳を傾けた。本稿ではその研究の概要を紹介する。詳細は、PASJ「ひとみ」特集号掲載論文²⁾を参照されたい。

かに星雲は較正天体として標準的であるが、超新星残骸として見た場合、かなり標準から外れている。まず、超新星残骸の観測的定義たる円環状

の熱的なプラズマ放射（爆発時から星間空間へ拡大する衝撃波面に相当する）が検出されていない。実は、X線・γ線で検出される超新星残骸の中で、円環状熱的放射が見られないものは約10%あり³⁾、かに星雲がその代表例である。これらの天体は、中心の中性子星が作るシンクロトロン放射星雲によって、重力崩壊型の超新星の残骸だと認識される。さらに、かに星雲では、観測される超新星爆発の放出物質の質量や力学的エネルギーの総量が、一般的な鉄コア重力崩壊型と比べて大幅に少ないことも知られる⁴⁾。

これらを説明する2つのアイデアが30年以上前に提唱された。1つは、星雲の外縁部に未検出の円環状熱的プラズマがあり、それが大半の質量と力学的エネルギーを有するという説⁵⁾である。もう1つはそもそも、かに星雲を作った超新星爆発が、一般的な鉄コア型より爆発エネルギーも放出質量も小さい電子捕獲型であるという説⁶⁾である。同型爆発については、天文月報に平易な解説記事⁷⁾と系譜譚⁸⁾があるので参照されたい。

これまでは、前者を作業仮説として、より広い範囲で熱的放射を探す努力がなされてきた。最も厳しい制限を与えたのが、米国チャンドラX線衛星⁹⁾である。高い空間分解能を活かして、撮像的手法により熱的放射の上限値を求めた。しかし、後説を採る場合、期待される円環状放射の位置は星雲中心に近く、極めて明るいシンクロトロン放射に埋もれる。従って、撮像的手法では攻めきれず、分光的手法を併用する必要がある。

そこで、我々のマイクロカロリメータ装置SXSの出番である。SXSは非分散型分光器であるため、欧米X線衛星に搭載された分散型分光器とは異なり、広がった天体でも分光性能を落とさず観測でき、エネルギー帯域も広い。またX線イベント再構築を機上で行う(雛型波形との相関を時空間でとる)故に時間分解能にも優れ、シンクロトロン放射を特徴づけるパルス成分を容易に取り出すことができる上にパイルアップ(複数のX線イベントが重なって区別できない現象)耐性も高い。

図1にX線スペクトルの一部を示す。SXSで得たスペクトルを、輝・吸収線なしのシンクロトロン成分でフィットする。その上に、プラズマの温度・非平衡度・ドップラー分散などを仮定して熱

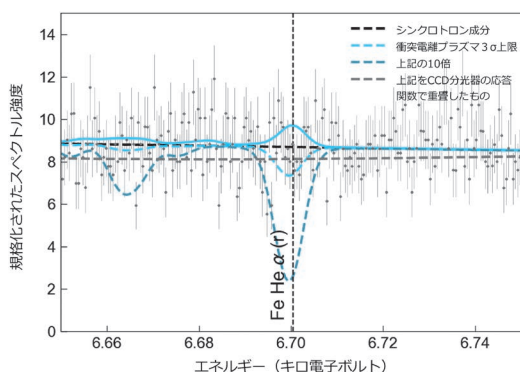


図1 24階電離鉄の共鳴線(6.70キロ電子ボルト)付近のX線スペクトル(灰色エラーバー)と、温度37 MKの衝突電離平衡プラズマで期待されるスペクトル(実線は輝線、点線は吸収線)の上限値

的放射スペクトルを合成し、データと矛盾しないように上限値を得る。このように、微弱線の検出や上限値導出は、高分解能分光器の真骨頂で、従来の非分散型分光器との差は歴然である。

さて、円環状の熱的プラズマの有無を始めとする超新星残骸(コンパクト星も含む)の様々な観測的多様性は、その原因たる超新星爆発の物理から説明されるべきである。X線マイクロカロリメータの高質データは、その試練に耐えると我々は考えており、XRSIM衛星に残された主要テーマの1つである。本観測はその先駆を為す。データの解釈には理論家との共同研究が欠かせない。

そこで、「ひとみ」コラボレーション内外から専門家を集め、超新星爆発(富永望・守屋堯)から残骸の時間発展(Herman Lee)、X線観測(山口弘悦・森)、装置応答(佐藤寿紀・辻本)まで一貫して計算で追うことにした。これにより、超新星残骸の観測データから超新星爆発SN1054について知ることが出来る。

具体的には、爆発型(Feコア型か電子捕獲型か)と周辺物質分布(一様な星間物質か前駆星の星風による中心集中型か)を想定し、爆発エネルギーや放出物質量などを媒介変数にしたモデルを作る。そして、強い衝撃波で各荷電粒子種が等速を得たとして、クーロン散乱による熱平衡過程を、物質の膨張運動の中で1000年分計算する。これにより、観測時の超新星残骸の粒子種毎の密度と温度が位置の関数として得られるので、これを視線方向積分して望遠鏡と検出器の応答を重畳し、X線スペクトルを合成してデータと直接比較する。

これにより、SN1054について以下の制限を得た。まず爆発型については、Feコア型も電子捕獲型も許容される。但し両者とも、周辺物質密度はかなり低い必要がある。一様分布なら約0.1(Feコア型)もしくは0.03(電子捕獲型) cm^{-3} 以下、前駆星による分布なら \dot{M} (質量放出率)/ v_{wind} (星風速度)が約 10^{14}g cm^{-1} 以下となる。これよ

り大きければ、より多くの放出物質が衝撃波加熱され、高感度X線観測で容易に検出されてしまう。明月記などにあるSN1054の異常に明るく長い光度曲線を説明するため提唱された高い値 ($M/\nu_{\text{wind}} \sim 6 \times 10^{18} \text{ g s}^{-1}$)¹⁰⁾ は棄却される。

他の間接的な証拠から、SN1054が電子捕獲型爆発の有力候補であることに変わりない。理論的にはもっともらしい崩壊チャンネルであるが、観測的にはどの天体も同型と確定されていない。SN1054からの熱的放射の検出は、それ自体が大きな観測的マイルストーンになるのみならず、SN1054が電子捕獲型かどうかの強い証拠になり得る。なぜなら、検出によって初めて衝撃波円環の半径が分かり、爆発エネルギーが強く制限されるからである。

SXSによる観測は、かに星雲の中心3分角四方だけであった。我々の計算では、円環状熱的放射はこれより外側に位置する。そして円環縁を中心に観測すれば、検出可能な視線積分強度が合成スペクトルで得られている。実はこのような観測が、衛星喪失の約8時間後に始まる筈であった。X線望遠鏡の点源応答較正のため、かに星雲周辺のマッピング観測が計画されていたのである。

この8時間は、また数年のお預けとなってしまった。しかし、我々は限られたデータにX線マイクロメータの威力を垣間見た。XRISM衛星搭載の同装置がたくさん観測的偉業を達成することへの期待が膨らむ。また、これらの高質データを解釈するには、幅広い天体物理学に基づいた計算と新しいデータ解析の道具立てが必要であると改めて認識した。読者諸賢のご協力が不可欠なので、ご興味を持たれたらどんな分野でもよいのでご一報賜りたい。

参考文献

- 1) Tsujimoto, M., et al., 2018, PASJ, 70, 20
- 2) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 14
- 3) Ferrand, G., & Safi-Harb, S., 2012, Advances in Space Research, 49, 1313
- 4) Hester, J. J., 2008, ARA&A, 46, 127
- 5) Chevalier, R. A., 1977, in Astrophysics and Space Science Library, 66, Supernovae, ed. David N. Schramm., 53
- 6) Nomoto, K., et al., 1982, Nature, 299, 803
- 7) 富永望, 守屋堯, 2015, 天文月報, 108, 159
- 8) 高橋慶太郎, 2018, 天文月報, 111, 468
- 9) Seward, F. D., et al., 2006, ApJ, 636, 873
- 10) Smith, N., 2013, MNRAS, 434, 102

Search for Thermal X-ray Features from the Crab nebula with Hitomi Soft X-ray Spectrometer

Masahiro TSUJIMOTO¹ and Koji MORI²

¹Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

²Department of Applied Physics and Electronic Engineering, University of Miyazaki, 1-1 Kibana-dai Nishi, Gakuen, Miyazaki, Miyazaki 889-2192, Japan

Abstract: Crab turned out to be the last data set delivered by Hitomi. Though planned as a calibration observation, it was the first data taken with an X-ray microcalorimeter. We obtained a new upper limit on the thermal plasma emission yet to be detected using the unprecedented sensitivity for spectral lines. We further calculated the development of a non-equilibrium plasma, and obtained constraints on SN1054. This study shows the potential of X-ray micro-calorimeters in the observations of supernovae and their remnants.