

# X線で探る超新星残骸の多様な形成史

## —「すざく」がもたらした新展開



内田 裕之

〈京都大学大学院理学系研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: uchida@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

超新星爆発でまき散らされたさまざまな元素は、数百–数万年の間に周辺環境と相互作用して超新星残骸を形成し、X線で明るく輝く。今日発見されている超新星残骸は銀河系内だけで300にも上り、その形状、スペクトルは多種多様である。本稿ではさまざまな点で性質の異なる二つの超新星残骸、SN 1006、W44のX線スペクトルに注目する。X線で観測したこれらの超新星残骸は、両者が全く異なる条件、環境で進化したことを強く示唆している。日本のX線天文衛星「すざく」は、このように広がった天体の分光撮像に他の追従を許さない威力を発揮する。筆者らは「すざく」の高統計X線スペクトルを解析することで、二つの超新星残骸の爆発から現在に至る興味深い形成史の一端を明らかにした。

### 1. はじめに

超新星爆発は宇宙における最も劇的な天文現象の一つである。われわれの銀河系でも数十年に1回の頻度で起きていると考えられ、なかには歴史上の記録が残っているものもある。古代の人々は夜空に突如出現する超新星をそれぞれの宇宙観に従って凶兆あるいは吉兆と考えた。この突発現象が、実は銀河系においてわれわれのルーツにもつながる重要な元素の供給過程だと判明したのは、人類の長い歴史からすればつい最近のことである。われわれや太陽系を構成するヘリウムより重い元素（重元素と総称する）は、すべて星の内部の核融合反応で合成され、超新星爆発によって宇宙空間に拡散したものである。超新星爆発で生じた衝撃波は周辺物質と相互作用して超新星残骸を形成する。今日観測される年齢数百–数万年の超新星残骸は、その性質において多種多様である。人類が地球上で発展してきたおよそ数万年の間に、それぞれの超新星残骸はどのように進化して

宇宙空間へ重元素を供給し、現在のような姿を見せるのだろうか。

超新星残骸の進化の途上において、噴出した星の重元素や星間物質はプラズマ化し、数万年の間X線で輝き続ける。個々の超新星残骸のX線スペクトルは、爆発の条件や周辺環境の違いにより異なる形成過程を反映していると考えられる。そこでX線スペクトルを仔細に検討すれば、形成史の一端を過去にさかのぼって探ることができるだろう。日本のX線天文衛星「すざく」は、特にこのように広がった天体の分光撮像について、同種の観測衛星をはるかにしのぐ現在最高の性能を有している。本稿では、銀河系内で明るい二つの超新星残骸、SN 1006とW44に注目する。両者は「爆発の種類」「形状」「年齢」などさまざまな点で対照的な超新星残骸である。

筆者らはX線天文衛星「すざく」による高統計の分光撮像を用いて、X線スペクトルから爆発の起源と残骸の形成過程に迫り、両者がその進化において全く異なる経過をたどったことを示した。

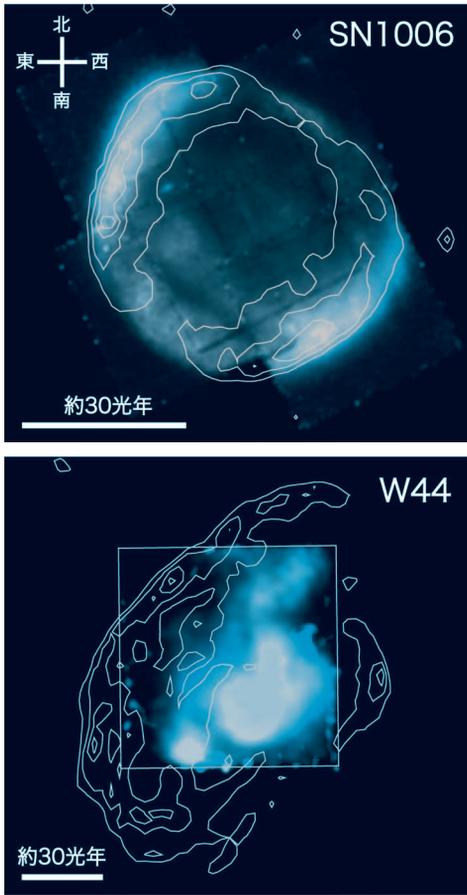


図1 「すざく」によるSN 1006 (上) とW44 (下) のX線イメージ (0.5-8.0キロ電子ボルト). 等高線は電波連続波の強度分布を表す. W44は中央の観測のみ完了している (正方形が観測視野).

## 2. 性質の対照的な二つの超新星残骸

### 2.1 X線イメージ

図1に「すざく」が観測したSN 1006とW44のX線イメージを示す. 電波連続波の強度を等高線で重ねてある. SN 1006は縁の明るいリング状で, 輝度分布はX線と電波で良い相関を示している. 超新星爆発で発生した衝撃波は毎秒約1万キロメートルの初速度で等方的に広がり, 周囲の星間物質を掃き集めて球殻を形成する. 点対称なSN 1006は一般的な残骸形成の描像に最も近い.

北東 (左上) と南西 (右下) の縁が明るいのは主に衝撃波面で加速された電子からのシンクロトロン放射によるものである. 「あすか」の時代に高エネルギー宇宙線の加速の証拠がSN 1006から初めて見つかったことはよく知られている<sup>1)</sup>. SN 1006のように電波やX線で明確な球殻構造を示すものを「シェル型」超新星残骸と総称する. シェル型は超新星残骸全体の7割を占める多数派であり, SN 1006はその代表格である. これに対してW44のイメージはSN 1006と明らかに様子が違っている. 南北に延びた扁平な形状はW44が成長過程で濃い星間物質と衝突して変形したことを伺わせる. また, X線ではシェルが完全に消失し輝度分布は中心にピークをもつ. 電波の等高線が不規則ながら縁の明るいシェル状を保っているのと対照的である. X線で中心集中した成分の起源は加熱された爆発噴出物 (イジェクタ) である. このような形態の超新星残骸をシェル型と対比させて「混合形態型」と呼ぶ.

二つの超新星残骸の違いは主に周辺環境に起因すると考えられる. 希薄な環境下における超新星残骸の形成過程は理想的な点源爆発のシナリオに近い. この場合, SN 1006のような球対称シェルが形成される. 一方, 衝撃波が過去に濃い星間物質を通過して減速した場合, W44のようにX線シェルが消失して混合形態をとると考えられる. SN 1006とW44の銀河系内における位置の違いがこの推測を裏づけている. すなわち, SN 1006は銀緯+14.6度 (距離約2,000光年) とこの種の天体としては異例なほど銀河面から離れているのに対して, 銀河中心に近いW44は比較的周辺密度の高い場所で成長した超新星残骸である. このように超新星残骸の形態は周辺物質との相互作用によって全く異なる様相を呈する.

さて, 超新星残骸がプラズマ化してX線で明るく輝くのは, 衝撃波の並進運動エネルギーの一部が効率よく熱エネルギーに変換されるからである. 衝撃波には2種類あり, 外向きに膨張する

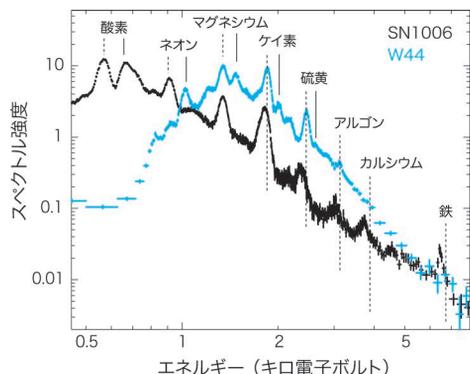


図2 「すぎく」によるSN 1006(黒)とW44(青)のX線スペクトル。各輝線の縦実線は水素状、縦点線はヘリウム状イオンからの輝線の中心エネルギーを表す。

「進行衝撃波」が周囲の星間物質を掃き集めて加熱する一方、その反作用で逆向きに発生した「逆行衝撃波」が星から噴出したイジェクタを徐々に加熱していく。この基本的なシナリオにおいて、衝撃波と相互作用する周辺環境の違いは熱的プラズマの形成に重大な影響を及ぼす。そこでX線スペクトルを仔細に検討すれば、環境によって異なる経過をたどった超新星残骸の多様な形成史の一端を探ることができるだろう。

## 2.2 X線スペクトル

図2に「すぎく」が観測したSN 1006内部(黒)とW44(青)の熱的X線スペクトルを示す\*1。このスペクトルは基本的に制動放射による連続X線と加熱された物質の衝突励起による特性X線(輝線)からなる。超新星残骸から検出される多数の輝線は、衝撃波加熱された星間物質およびイジェクタの元素組成を反映したものである。

こうしたX線スペクトルからどのような情報を引き出せるだろうか。まず、大まかな傾向として、W44のスペクトルは低エネルギー側(1キロ電子ボルト以下)でSN 1006のスペクトルよりも強度が著しく低下している。これはX線の星間吸

収によるものである。吸収量は天体から検出器までの星間物質の総量によって決まるので、遠方の超新星残骸ほど低エネルギー側のX線強度は落ちていく。もちろん、銀河面上にあるW44と銀河面から離れたSN 1006との違いも大きい。また高エネルギー側(2キロ電子ボルト以上)に着目すると、SN 1006よりもW44の連続成分の勾配が急である。一般に制動放射のスペクトルは電子温度が高いほど高エネルギー側まで伸びていくので、強度の下がり方が急なW44はSN 1006より低温の超新星残骸と予想される。これはおそらく両者の年齢の違いを反映している。超新星残骸は時間とともに冷却していくので、W44はSN 1006より古い超新星残骸と考えられる。

次に輝線に着目すると、6-7キロ電子ボルト付近でSN 1006から鉄輝線が受かっているのに対してW44にはそのような兆候が見られない。鉄輝線は低温では出にくいので、この結果はW44のほうが温度が低いことの傍証になると同時に、SN 1006の起源として鉄を多く噴出するIa型超新星の可能性を示唆している。一方、鉄より軽い元素からの輝線はどちらの超新星残骸からも多数受かっているが、注意深く見ると輝線の出方が両者で異なっているのがわかる。図2の縦の実線と点線は、水素状イオンとヘリウム状イオンの輝線エネルギーを表している。ここで、最内殻の電子1個だけになったイオンを水素状イオン、2個残っているものをヘリウム状イオン(以下同様にリチウム状、ベリリウム状……)と呼ぶ。超新星爆発で噴出した重元素は、衝撃波加熱による自由電子との衝突電離で徐々に外殻電子をはぎ取られていくので、高電離プラズマほど水素状イオンの割合が高くなる。つまり水素状イオンからの輝線(Ly $\alpha$ 線)の強度は端的にその超新星残骸の電離状態の進行度合を示している。W44からはネオン、マグネシウム、ケイ素、硫黄のLy $\alpha$ 線が受

\*1 本稿では熱的プラズマに注目するので、シンクロトロン放射の強いSN 1006南西と北東のシェルは解析に含めない。

表1 SN 1006とW44の比較.

	SN 1006	W44
爆発の種類	Ia型	重力崩壊型
形態	シェル型	混合形態型
年齢	約1,000年	約20,000年
銀河面からの距離	約2,000光年	約70光年
プラズマの状態	高温低電離	低温高電離

かっているのに対して、SN 1006では同じエネルギーで明確な輝線構造が見られない。Ly $\alpha$ 線の強いW44はSN 1006より電離の進んだ状態にあると考えられ、この結果は先ほど述べたW44が低温で年齢の古い超新星残骸という推測とも矛盾しない。

図2のスペクトルからはほかにもいろいろと興味深い事実を引き出せるが、それを指摘するのは後回しにして、まずSN 1006とW44の基本情報を表1にまとめておく。これらは他波長も含めた先行研究でほぼ確定したものであり、いま筆者がX線スペクトルから行った見積もりとも矛盾しない。実のところ超新星残骸のX線スペクトルはそれほど単純ではないので、ある程度以上の解析はプラズマモデルとの比較から定量的に行う必要がある。スペクトル解析の結果、高温の熱的スペクトルと思われた成分が実はシンクロトロンX線の寄与で説明できたというケースは珍しくない。また、強い鉄輝線を出している超新星残骸が予想に反して重力崩壊型だったというケース（あるいはその逆）もある。したがって、本格的な議論はモデルとの比較によって行うのが通例だが、まずは生のX線スペクトルからできる限りその素性を把握しておくことで、その天体の基本パラメーターを一通り推量できることを示した。経験上こうした「観察」がその後の解析の成否を左右し、新しい発見の契機となることが多い。

以上のように、SN 1006とW44の性質はさまざまな点で両極端である。SN 1006は「希薄な環境で—Ia型爆発を起こした—若い—シェル型」超

新星残骸、W44は「密度の不均一な環境で—重力崩壊型爆発を起こした—古い—混合形態型」超新星残骸の代表格である。銀河系内の明るい超新星残骸という共通項を除けば、その素性は全く異なっている。これらのX線スペクトルからそれぞれに固有の形成史を過去にさかのぼって探っていくには相応の工夫と戦略が必要である。次項からはそれぞれの天体について、「すぎく」による高統計のX線分光撮像データからいかにして超新星残骸の形成過程に迫っていくかを示し、近年われわれが明らかにした興味深い研究結果を紹介したい。

### 3. 希薄な環境におけるIa型爆発: SN 1006 (年齢1,000年)

#### 3.1 スペクトルに刻印された残骸の形成過程

SN 1006はその名のとおり西暦1006年に観測された超新星の残骸である。筆者の知る限り、近代以前に最も広範な地域（アジア、中東、ヨーロッパ）に観測記録が残されている超新星である。ある天文学者は北アメリカのある民族が遺した壁画にもこの超新星が描かれているのではないかと指摘している<sup>2)</sup>。日本では平安中期当時の天文博士・陰陽頭が観測し、200年後に藤原定家が明月記において過去の天文現象を整理した際、特にほかの「客星」と区別して「大客星」と記述した。これらの事実は、SN 1006が有史以来最も明るい天文現象の一つであったことを示唆する。これは現在わかっている研究結果とも符合する。おそらく、地球の比較的近傍で爆発したこと、銀河面から離れていたために可視光を遮る星間塵が相対的に少なかったことが理由の一端だろう。

こうした希薄な環境で爆発したことを示す証拠は、X線スペクトル中にもはっきりと見いだすことができる。再び図2に戻ってSN 1006のケイ素から鉄の輝線に注目すると、ヘリウム状イオンの輝線のエネルギー（縦の点線）から有意に低エネルギー側にずれていることがわかる。これはSN

1006の電離の進行が遅く、イオンがヘリウム状にも達していないことを示している。特に最もずれの大きい鉄輝線のエネルギー中心は、ヘリウム状の場合の6.7キロ電子ボルトに対して6.5キロ電子ボルト以下と極端に低く、酸素状以下のきわめて低電離な状態にある。多くの超新星残骸は若いうちにヘリウム状あたりまで効率的に電離が進むので、ヘリウム状にすら達していないSN 1006はやや異例である。スペクトルに現れるケイ素や鉄は、超新星残骸を内向きに進む逆行衝撃波によって加熱されるイジェクタである。逆行衝撃波は、星間物質を押し広げて進む進行衝撃波の反作用によって生じるので、周辺密度が低いと逆行衝撃波の進行はそれだけ遅くなる。SN 1006で観測されるケイ素から鉄にかけての低電離輝線は、以上のような経緯で電離の進行が遅れたことを示唆している。この点をよりはっきりさせるために、衝突電離を模擬するプラズマモデルで実際のX線スペクトルを再現した(図3)。この結果、重元素からの輝線の多くは温度と電離度の異なる2成分のイジェクタの重ね合わせで記述できることがわかった。この複雑なモデルに至る経緯については、過去の天文月報に山口弘悦氏の詳細な解説があるので、そちらの記事および当該論文を参照していただきたい<sup>3), 4)</sup>。図3はこの先行研究に依拠するが、観測領域を全域に拡大し、総観測時間を増やして統計を大幅に向上させたことで、新たに低電離クロムの可能性のある輝線をSN 1006から初めて検出した。結果として、SN 1006から検出したマグネシウムから鉄までの重元素は、ほとんどイジェクタの寄与で説明できた。輝線強度から測定したイジェクタの元素組成比は、Ia型超新星爆発の理論モデルとよく一致する。「すぎく」によるTycho超新星残骸の観測が明らかにしたように<sup>5)</sup>、Ia型のイジェクタ分布は軽い元素が重い元素を取り巻

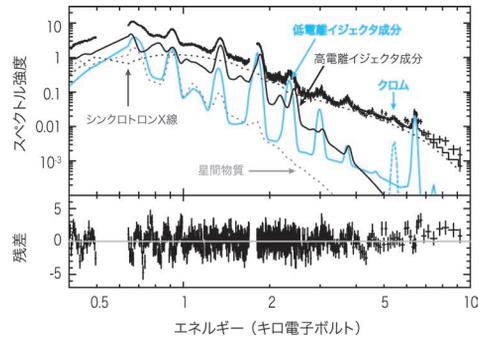


図3 SN 1006全域のX線スペクトルのモデルフィット結果。輝線の多くは、先に加熱された高電離イジェクタ成分(黒)と最近加熱された低電離イジェクタ成分(青)の重ね合わせで説明できる。

く層構造を示すことが多い。Ia型爆発の標準的なシナリオの場合、白色矮星の中心で核反応の点火が起き、燃焼波の伝播に伴って高温高密度な内側で重い元素が、温度の低い外側で軽い元素が合成される。そのような構造のイジェクタが膨張し、ある段階で逆行衝撃波が外側からイジェクタを加熱し始めたとする。このとき軽い元素から先に電離していき、中心の鉄は最も遅く加熱されるため他の元素よりも低い電離状態を示す。このようなシナリオを念頭に図3の結果を眺めると、確かに鉄輝線は低電離成分の寄与だけで説明でき、軽い元素ほど高電離成分が支配的になる様子が見えて取れる<sup>\*2</sup>。先に述べたとおり、通常は若い超新星残骸でも早い段階でヘリウム状まで電離する。SN 1006は極端に周辺密度が低い(=電離の進行が遅い)環境で爆発したおかげで、超新星残骸の電離過程の過渡的な姿を垣間見せてくれた貴重な例と言える。

### 3.2 爆発の起源に迫る

以上のように希薄な環境で成長したSN 1006のX線スペクトルは特徴的である。一方、理想的な点源爆発に近いという意味では格好の教科書的な

<sup>\*2</sup> 最も単純な2成分モデルで再現したが、実際は連続的な電離状態の重ね合わせと考えられる。

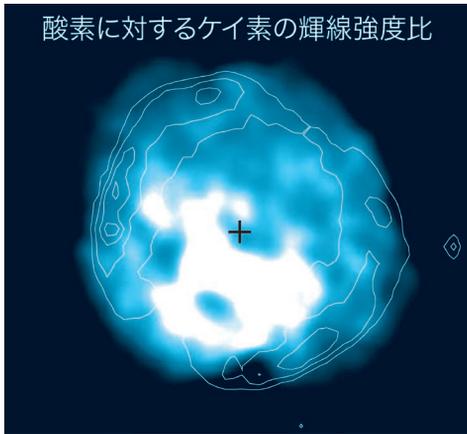


図4 酸素に対するケイ素の輝線強度比. 等高線は図1と同じ電波連続波を表す. 十字はシンクロトロンX線シェル形状から求めたSN 1006の幾何学中心. ほぼ爆発中心と一致すると考えられる

サンプルと言える. 多くの超新星残骸が周辺物質との相互作用で徐々にその球対称を崩していくのに対して, SN 1006のシェルはそのような変形をほとんど受けていない. 内部のイジェクタの重元素分布を明らかにできれば, 時間をさかのぼって爆発直前の星内部の構造を推測するのは比較的容易である. 従来の標準的なIa型のシナリオが予測する中心対称な層構造は, 1,000年後の超新星残骸からも観測的に示せるのだろうか.

X線イメージから各元素の輝線強度分布を調べると, 軽い元素(酸素-ネオン-マグネシウム)が外縁部まで一様に広がっているのに対して, 重い元素(ケイ素や硫黄)はより内側に集中していた. ここまでは先行研究<sup>5)</sup>でTycho超新星残骸が示したのと同じ, 文字どおりの「教科書的な」Ia型爆発の描像と矛盾しない. ところが, 意外なことにケイ素や硫黄は球対称からほど遠い偏った分布を示していた. 例として図4に酸素に対するケイ素の分布図を示す. 等高線で示した電波シェルの内側で, ケイ素は幾何学中心より南東(左下)に偏っている. この傾向は, ケイ素を硫黄に, 酸素をネオンやマグネシウムに置き換えた場

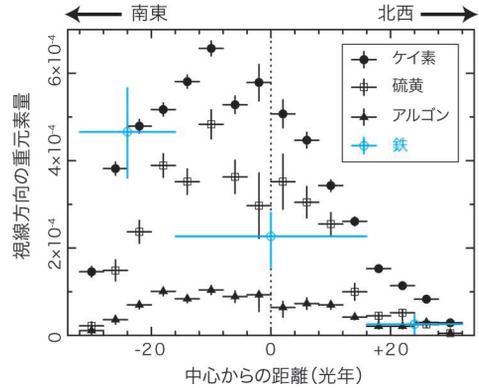


図5 SN 1006イジェクタのケイ素, 硫黄, アルゴン, 鉄の動径分布. 図4の十字を中心として, 南東(左下)から北西(右上)にかけての分布を示している.

合も変わらない. イジェクタのうちケイ素や硫黄といった重い元素だけが南東に偏って流出したと考えられる. ただしイメージ解析では視線方向のシェル(星間物質)成分の影響を完全には否定できない. そこで次にSN 1006を細かい領域に分け, 領域ごとに図3のようなモデルフィットを行って, イジェクタと星間物質の寄与を切り分けた. こうして南東から北西にかけてイジェクタの重元素量の動径分布を調べた結果, ケイ素はやはり南東に偏っていることがはっきりとした(図5). 硫黄, アルゴンも同様に非対称で, 分布の傾向はこの三つの元素でよく似ている. プロファイルの相似は, ケイ素-硫黄-アルゴンがイジェクタの同じ層で合成されたことを裏づけている. 統計が悪いため3点しか取れなかったが鉄もやはり南東に多く, これは過去の南東部の観測で示唆されていたとおりである<sup>4)</sup>.

以上より, イジェクタのうち重い元素(ケイ素-硫黄-アルゴンおよび鉄)は南東に偏って分布することがはっきりした. 仮に周辺環境の影響でこのようにイジェクタが変形したのなら, 酸素やマグネシウムなどの軽い元素も南東に偏った分布を示すはずである. ところが, これらの元素はより中心対称な動径分布を示していた. したがって,

図5が示す重元素分布は、まさに爆発の時点における非対称構造を反映していると考えるのが自然である。近年、系外の超新星爆発の観測とシミュレーションとの比較から、Ia型超新星が「ゆがんだ」爆発を引き起こすことが強く示唆されている<sup>6)</sup>。彼らの研究では特に鉄が一方向に偏って生成されることが示されている。われわれの発見は、Ia型爆発の「ゆがんだ」構造を眼に見える形で提示し、鉄以外のさまざまな元素の非対称構造を明らかにしたものである。図5よりケイ素の分布中心は、過去1,000年の間に爆発中心から10光年ほど移動したことになる。見かけ上の移動速度は単純計算で毎秒3,000キロメートルである。超新星は毎秒10,000キロメートルの初速度で膨張するので、この結果は下限値としてよい値を与える。

#### 4. 密度の非一様な環境に置ける重力崩壊型爆発: W44 (年齢20,000年)

##### 4.1 スペクトルが示唆する特異な形成過程

W44は、中心にパルサーが存在することから、Ia型のSN 1006とは違って重力崩壊型の超新星残骸である。パルサーの年齢は約20,000年と推定されているため、W44はSN 1006よりさらに1桁以上も年齢の古い超新星残骸である<sup>7)</sup>。W44はその扁平な形状が示すとおり、分子雲に挟まれた星間密度の濃い領域で成長し、東部では巨大分子雲と衝突しつつある<sup>8), 9)</sup>。極端に非一様な周辺環境と衝撃波との相互作用は熱的プラズマの形成にも大きな影響を及ぼしたと考えられる。

SN 1006のように衝突電離の途上にある超新星残骸の場合、イオンから電子がはぎ取られていく電離過程が優勢である。しかしこのような若い超新星残骸においても、ある確率で自由電子がイオンに束縛される再結合過程が起きている。爆発後20,000-30,000年を経過するとプラズマは電離過程と再結合過程がつり合った「電離平衡」状態に落ち着く。一般に電離平衡プラズマにおいては、

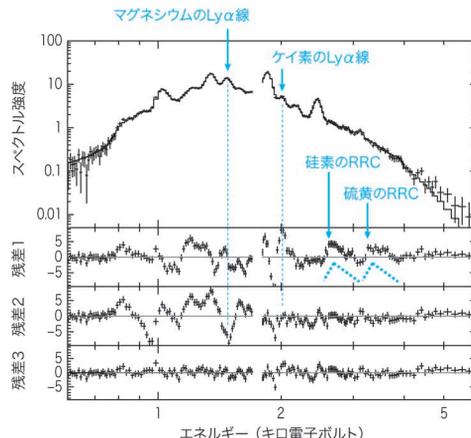


図6 W44のX線スペクトル。残差は上から電離平衡モデル(残差1)、過電離モデル(残差2)、元素ごとに電離状態の異なる過電離モデル(残差3)とデータとの差分を表す。スペクトルには残差3のモデルを重ねてある。

水素状イオンとヘリウム状イオンとがある混合比で共存しているので、X線スペクトルからはLyα線とヘリウム状イオンからの輝線が同時に検出される。両者の輝線が顕著なW44のX線スペクトル(図2)は、多くの古い超新星残骸と同じく電離平衡モデルでおよそ説明がつきそうである。

ところが、W44のX線スペクトルは電離平衡モデルでは全く再現しない。実際にはケイ素のLyα線が電離平衡で期待されるよりもさらに強く、残差に特徴的な山形の構造が現れる(図6; 残差1)。この残差は再結合過程で放射される連続成分(Radiative Recombination Continuum; RRC)で説明でき、電離平衡モデルで予想される強度よりもRRCが卓越していることを示している。端的に結論から言えばW44は再結合過程が優勢な「過電離」状態にある珍しい超新星残骸である。過電離が進むにつれて水素状イオンの割合は増えていくので、ケイ素のLyα線が電離平衡モデルより強いこともこれで説明がつく。「過電離」プラズマの詳細については過去の天文月報に小澤 碧氏の報告がある<sup>10)</sup>のでそちらをご覧くださいとして、この種の超新星残骸は現在までに6例見つ

表2 W44プラズマ中の各元素の平均電荷.

元素	平均電荷	
	W44	電離平衡の場合
炭素	5.99	5.99
窒素	6.98	6.98
酸素	7.92	7.92
ネオン	9.51	9.34
マグネシウム	10.87	10.32
ケイ素	12.26	12.01
硫黄	13.95	13.91
鉄	16.45	16.37

かり\*<sup>3</sup>, 今後も増える見込みである.

さて、図6の残差2に示したとおり、W44スペクトルに過電離モデルを適用すると、ケイ素のLy $\alpha$ 線強度や二つのRRC構造をよく説明できた。ところが、低エネルギー側(1.5キロ電子ボルト以下)は依然としてスペクトルを再現せず、今度はマグネシウムのLy $\alpha$ 線のエネルギーに深い谷のような構造が現れた。ケイ素のLy $\alpha$ 線が過電離状態を再現する一方、マグネシウムのLy $\alpha$ 線がモデルよりも著しく弱いということは、マグネシウムはケイ素や硫黄ほど過電離の度合いが強いということを示唆する。ではSN 1006と同じく電離状態の異なる2成分で説明できるのかと言うと、そのようなモデルではうまくスペクトルを再現しなかった。したがって唯一の合理的な解釈は、全体として過電離だが元素ごとに状態が異なり、ケイ素や硫黄は特に過電離の度合いが強いものである。そこで、元素ごとに電離状態の異なる過電離モデルを適用した結果、ようやくW44のX線スペクトルをうまく再現できた(図6; 残差3)。このときの各元素の平均電荷を同じ温度の電離平衡モデルと比較した結果、比較的重い元素は電離平衡の場合より平均電荷が軒並み大きく、つまり電離の進んだ(過電離)状態にあることがはつき

りした(表2太字)。

#### 4.2 過電離プラズマ形成の起源に迫る

SN 1006の複雑なモデルフィットと比べるとW44の結果は驚くほど単純である。視野内のすべてのX線が単一の過電離モデルで説明できたということは、過電離プラズマがある共通のプロセスで形成されたことを物語る。過電離の超新星残骸は次々に見つかっているが、その形成過程はいまだに不明である。X線の分光撮像からどのようなアプローチが可能だろうか。

W44のX線スペクトルから、表2のように各元素の電離状態を定量的に評価できた。これを手掛かりに、過去にさかのぼって過電離プラズマの形成過程を推測してみたい。仮に超新星残骸が進化のある時期に過電離状態に陥ったとする。その後の時間経過\*<sup>4</sup>に伴って各元素は徐々に再結合して電離平衡に戻っていく。再結合のタイムスケールは元素ごとに異なる(大まかに言って軽い元素ほど短時間で電離平衡に戻る)ので、初期の電離状態と電子温度を仮定すれば、任意の時間における各元素の電離の進行度合のパターンはほぼ一意に決まる。筆者らはこのような研究手法でW44過電離プラズマの成因を探った。その結果、W44は約20,000年前に温度約1キロ電子ボルトの電離平衡に到達していたこと、この時期に電子温度が約0.4キロ電子ボルトまで急低下して過電離を実現したことを突き止めた。W44の年齢を考えると、爆発後のかなり早い時期にこのような事象が起きたと推測できる。

このような電子温度の急低下は、超新星残骸形成の途上においてどのようなシナリオで起きうるだろうか。筆者らは最も必然性の高い説明\*<sup>5</sup>として、次のような過程を考えている—(1)超新星爆発後の初期に衝撃波が濃い星周物質を通過し、加熱されたプラズマが短時間(100-1,000年)で

\*<sup>3</sup> 6例すべて「すぎく」が発見したものである<sup>13)-17,19)</sup>。興味深いことに、いずれも「混合形態型」超新星残骸である。

\*<sup>4</sup> 実際には粒子の衝突確率にも依存するので、密度と時間経過の積( $n_e t$ )が電離の進行度合のよい指標である。

\*<sup>5</sup> ほかにもいくつかの仮説を検討している。詳細は当該論文<sup>19)</sup>をご覧ください。

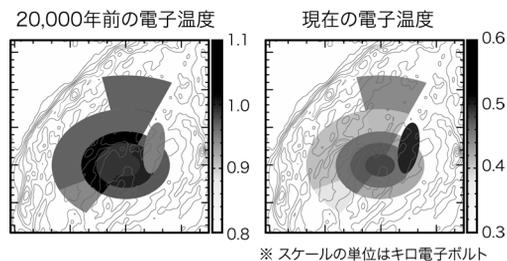


図7 W44スペクトルから推定した約20,000年前の電子温度(左)と現在(冷却後)の電子温度(右)の空間分布。周辺領域は未観測。等高線は電波連続波の強度分布を表す。

電離平衡に近づく。(2) 星周物質を通過した後、衝撃波はより密度の低い星間空間に広がって一気に断熱膨張し、このとき電子温度が急激に低下して過電離を実現する。(3) 軽い元素から先に再結合して電離平衡に戻っていくが、全元素が電離平衡に戻るまでに約30,000年かかるため、その途上で重い元素(W44の場合、ネオンから鉄までの元素)は長く過電離状態を維持する一以上を「断熱膨張モデル」と呼び、理論からの先駆的な予測があったシナリオである<sup>11)</sup>。最近の研究によれば、爆発前の星が赤色超巨星などの大質量星の場合に断熱膨張モデルが実現可能と推測されている<sup>12)</sup>。

断熱膨張は局所的に起きるものではなく、超新星残骸で一様に起きると考えるのが自然である。したがって「断熱膨張する直前の電子温度」「断熱膨張後の現在の電子温度」「断熱膨張からの時間経過」は場所によらずほぼ一定であるという推測が成り立つ。そこで観測領域を細かく分けてスペクトル解析した結果、事実それぞれのパラメータは領域ごとにほぼ共通で、いずれも約20,000年前に電子温度が1.0キロ電子ボルトから0.4キロ電子ボルトまで冷却したことを示していた(図7)。誤差を考慮すると、これらのパラメータは空間的にほぼ一様である。この結果は過電離の主因としての断熱膨張モデルを観測的に支持している。将来的に観測視野外の全域で同様の結果を示

すことができれば、より強固な立証ができるはずである。

## 5. ASTRO-Hへ向けて

以上、「すぎく」が観測した二つの超新星残骸のX線スペクトルから両者の対照的な形成過程を明らかにした。電離過程の優勢なSN 1006が徐々に電離平衡に近づく途上にあるのに対して、過去にいったん電離平衡に達したW44は過電離状態から再結合過程優勢で再び電離平衡に戻る途上にある。いずれもX線スペクトルの輝線強度やそのエネルギーの微妙な違いが発見の端緒となった。以上の研究には「すぎく」の分光能力、低いバックグラウンドレベル、高い検出感度が不可欠だった。次世代X線天文衛星「ASTRO-H」の時代には、さらに精密なX線分光観測によって、筆者らの研究にさらなる発展をもたらせると期待している。ASTRO-Hでなしうるサイエンスは多岐にわたる。一例を挙げるなら、SN 1006の輝線のドップラーシフトから膨張速度を測定して、奥行き方向の非対称性を示せるかもしれない。超新星残骸の“立体”非対称構造を初めて明らかにできれば、超新星爆発機構の解明に向けて大きな前進をもたらせる。ASTRO-Hを成功に導くために、筆者らは開発チームの一員として日夜奮闘している。

## 謝辞

本稿の内容は、2012年と2013年に発表した論文<sup>18), 19)</sup>に基づいています。共著者の皆様のご協力に改めて感謝いたします。また、学生時代から研究のさまざまな面でご指導いただいている常深博先生、共同研究者として多大なご協力をいただいている小山勝二先生、鶴剛先生にも深く感謝いたします。さらに日頃の研究においてしばしば議論と有益な助言をくださる偉大な先輩の皆様、とりわけ山口弘悦氏、勝田哲氏、森浩二氏、田中孝明氏に深く感謝いたします。最後に、本稿の執筆を勧めてください、内容に関しても有益な

助言を数多くいただきました富永 望氏に厚く御礼を申し上げます。本研究を遂行するうえで筆者は日本学術振興会から援助をいただきました。

### 参考文献

- 1) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 2) Barentine J. C., 2006, Bulletin of the American Astronomical Society 38, 78
- 3) 山口弘悦, 2010, 天文月報 103, 43
- 4) Yamaguchi H., et al., 2008, PASJ 60, S141
- 5) Hayato A., et al., 2010, ApJ 725, 894
- 6) Maeda K., et al., 2010, Nature 466, 82
- 7) Cox D. P., et al., 1999, ApJ 524, 179
- 8) Seta M., et al., 1998, ApJ 505, 286
- 9) Reach W., et al., 2005, ApJ 618, 297
- 10) 小澤 碧, 山口弘悦, 2010, 天文月報 104, 58
- 11) Itoh H., Masai K., 1989, MNRAS 236, 885
- 12) Moriya T. J., 2012, ApJL 750, L13
- 13) Yamaguchi H., et al., 2009, ApJL 705, L6
- 14) Ozawa M., et al., 2009, ApJL 706, L71
- 15) Ohnishi T., et al., 2011, PASJ 63, 527
- 16) Sawada M., Koyama K., 2012, PASJ 64, 81
- 17) Yamauchi S., et al., 2013, PASJ 65, 6
- 18) Uchida H., Yamaguchi H., Koyama K., 2013, ApJ 771, 56
- 19) Uchida H., et al., 2012, PASJ 64, 141

### Diverse Formation Mechanisms of Supernova Remnants Observed with Suzaku Satellite

Hiroyuki UCHIDA

*Cosmic Ray Group, Physics, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: So far, more than 300 supernova remnants have been found in our Galaxy. They show a large variety of the morphologies and the spectra. In this article, we focus on X-ray spectra of SN 1006 and W44. A lot of observational evidence suggests that these supernova remnants have evolved in very different circumstances. A high resolution spectroscopy with a Japanese satellite, Suzaku revealed some of interesting formation mechanisms of these supernova remnants.