

# 「すざく」が暴いた激動の過去 ～超新星残骸における 再結合プラズマの発見～



小澤



山口

小澤 碧<sup>1</sup>・山口 弘悦<sup>2</sup>〈<sup>1</sup> 京都大学大学院 理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉〈<sup>2</sup> 理化学研究所 仁科加速器研究センター 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉e-mail: <sup>1</sup> midori@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp, <sup>2</sup> hiroya@crab.riken.jp

超新星残骸のプラズマでは、衝撃波が通過した直後は原子（イオン）の電離の度合いが低い。その後、自由電子がイオンに衝突することにより徐々に電離が進んでいくが、プラズマ密度が低いために電離平衡（電離と再結合の頻度が釣り合う状態）に達するまでには数万年以上の歳月がかかる。このことから、ほぼすべての超新星残骸においてプラズマは電離が再結合よりも優勢な状態にある、というのが今までの常識であった。ところが私たちはX線衛星「すざく」を用いた観測によって、複数の超新星残骸から異常に強い再結合X線を発見した。これはプラズマが再結合のほうが電離より優勢な、常識破りの状態であることを示す証拠である。本稿ではこれらの観測成果を紹介するとともに、不可思議なプラズマ状態の形成メカニズムに迫りたい。

## 1. はじめに

夜空に突如明るい星が輝き出すという天文現象が、貴賤問わず古来より人々の関心をひいたであろうことは想像に難くない。この突発現象は、不吉の予兆としてとらえられることが多かったようである。わが国でも、鎌倉時代の歌人である藤原定家が、「当時の如きは客星の条不審なし」（今のようなご時世では客星が出現しても不思議ではない）と残している\*<sup>1</sup>。客星を、その出現後に起こった記録的な飢饉の前兆とみなしたのだろう。

正体不明ゆえに古人に畏怖の念を抱かせた客星のうちのいくつかの素性は、星がその生涯を終える際の爆発現象（超新星）であることが今ではわかっている。この超新星爆発が起きると、元の星を構成していた物質（爆発噴出物）は星間空間へ

と超音速で飛び散り、周囲の星間物質とぶつかることによって強烈な衝撃波を形成する<sup>1)</sup>。衝撃波は爆発噴出物や星間物質を圧縮・加熱して高温の電離気体（プラズマ）を産みだし、宇宙空間に爆発の痕跡を残す。これが超新星残骸である。

超新星爆発は宇宙で元素を合成し、大量のエネルギーを宇宙空間へと放出する現場でもある。数百～数千歳の超新星残骸は、爆発の運動エネルギーを熱エネルギーに転化することによりX線で明るく輝き、爆発や親星の情報を提供してくれる。これらは宇宙の歴史をひも解くうえで重要な素材となる。

超新星残骸の衝撃波では宇宙線の加速が行われることもよく知られており、電波からガンマ線に及ぶ広い波長域で高エネルギー粒子からの放射が観測される。最近ではフェルミ衛星の活躍<sup>2)</sup>など

\*<sup>1</sup> 客星の正体は、超新星、彗星、新星（白色矮星表面に降り積もったガスが核融合爆発を起こしたもの）のいずれかであると考えられている。

もあって、このような宇宙線加速の研究がますます盛んである。

本稿では、軟 X 線帯域 (0.1-10 キロ電子ボルト) で観測される、超新星残骸の熱的なプラズマをあつかう。「熱的」とは、構成粒子のもつミクロな運動速度がマクスウェル・ボルツマンの分布則に従うことを意味し、私たちの周りにある空気と似たような状態である。ただし、地上と比べてはるかに希薄な宇宙空間では、粒子同士の衝突が極めて起こりにくい。そのため、低密度極限ならではの非平衡現象が観測される。今回紹介する観測成果も、このような「非平衡プラズマ」に関するものである。あらかじめ断っておくと、本稿の内容には若干マニアックなフシがある。しかしながらこの観測結果は、過去 20 年以上も受け入れられてきた超新星残骸の進化に関する「常識」を大きく覆したものであることを、最初に強調しておきたい。

## 2. 電子温度と電離温度

超新星残骸の話に入る前に、ここでは二つの特徴的な温度の概念について触れる。一つ目は、電子同士が熱平衡にあるときに定義できる「電子温度」である。これは電子の熱運動エネルギーに相当する。

もう一つは、原子のイオン化度合いにより定められる温度であり、「電離温度」と呼ばれる。プラズマ中では、自由電子は陽イオンにぶつかると、束縛された別の電子を引きはがす (電離)。一方で、自由電子が再び陽イオンにつかまる過程も存在する (再結合)。プラズマ中の原子は電離と再結合の頻度が釣り合うところで電離平衡に落ち着く。例として、図 1 にケイ素 (a) と鉄 (b) の、プラズマ温度とイオン化度合いの関係を示す<sup>3)</sup>。高温のプラズマほど高階電離した (束縛電子数の少ない) イオンが増えていくのがおわかりいただけと思う。例えばケイ素の完全電離イオンと水素状イオンの存在比がほぼ 1:1 であれば、図 1(a)

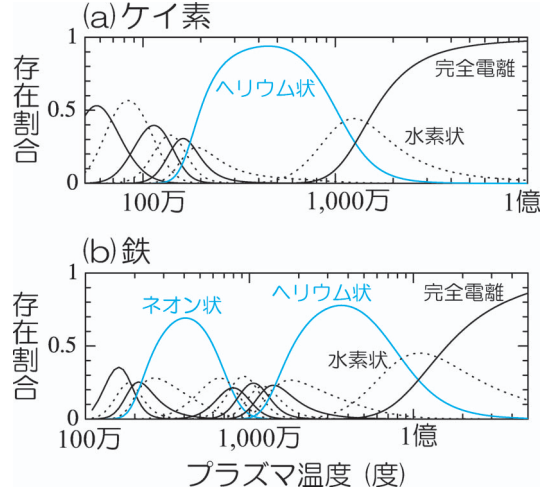


図1 プラズマの温度とイオン化度合いの関係。グラフは右側から順に、完全電離イオン、水素状イオン (束縛電子一つ)、ヘリウム状イオン (束縛電子二つ)、...を表している。

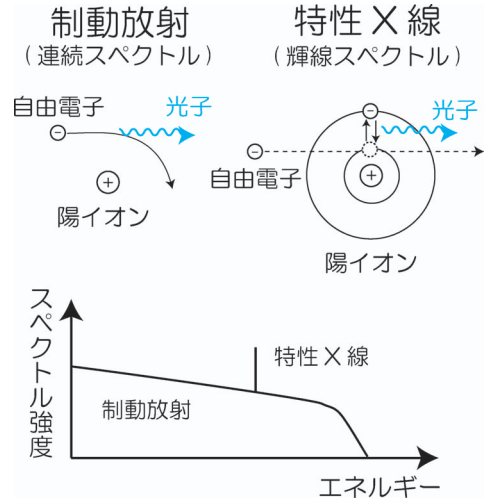


図2 制動放射と特性 X 線の放射過程 (上) と、そのスペクトルの特徴 (下)。

からそのプラズマの電離温度はおおよそ 1,500 万度となる。

これら二つの温度は、どうすれば観測から求められるだろうか。プラズマ中の自由電子は、陽イオンが作る電場によってときどきその進行方向を曲げられる。これは電荷の加速度運動なので、電磁波が放射されることになる (制動放射: 図 2)。そ

のスペクトルは連続的な光子分布を示し、電子温度が高いほど高いエネルギーまで伸びる。例えば電子温度が2,000万度のプラズマであれば、スペクトルは2キロ電子ボルト付近まではほぼべき状に続き、それより高いエネルギーでは指数関数的に光子数が減少する（自由電子の運動エネルギーの一部しか、光子のエネルギーになれないためである）。つまり、観測される制動放射スペクトルの曲がり方を調べれば、電子温度を正確に測定できる。

一方、プラズマ中の陽イオンは自由電子がぶつかりと励起状態となり、特性X線を放射する（図2）。このエネルギーは、元素ごと、さらには電離状態ごとに異なるので、原理的には各輝線の強さからさまざまなイオンの存在量を独立に知ることができる<sup>\*2</sup>。つまり、観測で元素のイオン化度合いがわかれば、図1から電離温度を求めることができる。

天文学の対象の多く、例えば近傍の星生成領域や天の川銀河中心、あるいは遠方の銀河や銀河団などのプラズマでは、たいていの場合、上述の二つの温度が一致することが観測的に確認されている。つまり、これらは電離平衡状態にある。ところが、宇宙に存在するプラズマすべてが平衡状態にあるわけではない。プラズマが電離平衡に達するにはそれなりの時間を要するので、二つの温度が一致しないケースも存在しうるので。その代表例が、超新星残骸である。

### 3. 超新星残骸の電離非平衡プラズマ ～今までの常識～

超新星爆発が起こった直後、星の内部を通過する衝撃波によって爆発噴出物は一度はほぼ完全に電離する。しかしながら、この段階では密度が高いため、電離したイオンはすぐに再結合してしまう。その後、衝撃波が爆発噴出物や星間物質を加

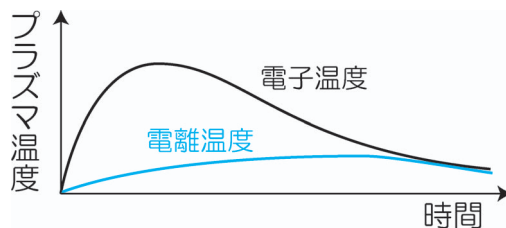


図3 通常の超新星残骸におけるプラズマ温度の時間変化。電離温度は長い時間をかけて電子温度に追いつき、やがては両者とも断熱膨張や放射冷却によって冷えていく。

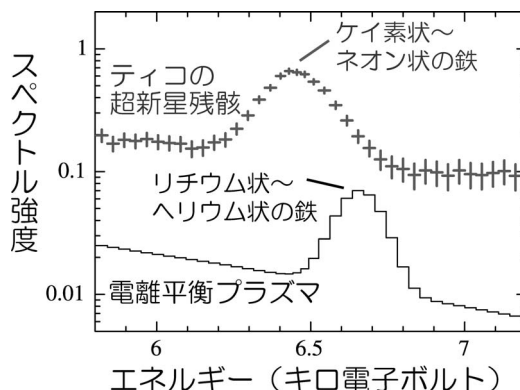


図4 「すざく」によるティコの超新星残骸のスペクトル（グレー）と、温度2,000万度の電離平衡プラズマのシミュレーションスペクトル（黒）。

熱し、高温になった電子の衝突によってイオンの電離が進む（図3）。

超新星残骸の典型的なプラズマ密度（1個/cm<sup>3</sup>）と温度（1,000万度）を仮定すると、電子同士が熱平衡に達するには数百年かかる。一方で、イオンが電離平衡に達するには数万年も時間を必要とする<sup>5)</sup>。つまり、ほとんどの（数千歳以下の）超新星残骸では、まだ電離平衡に達していないことが予想される。

具体例として、有名なティコ・ブラーエの超新星残骸のスペクトルを図4に示す。図中に見られ

<sup>\*2</sup> 実際には検出器のエネルギー分解能に限界があるため、すべての輝線が分離できないことも多い（図4の鉄輝線がその一例）。ただし、その場合も輝線の重心エネルギーから支配的なイオン化度合いを調べられるので、電離温度を決定できる。なお、本章で示した温度の概念や名称は、天文学に限らずプラズマ物理学分野においても、一般的に用いられている<sup>4)</sup>。

る強いピークは、鉄イオンからの輝線である。ティコの超新星残骸の電子温度は、少なくとも2,000万度以上であることが知られている<sup>9)</sup>ので、比較のため2,000万度の電離平衡プラズマのモデルスペクトルを黒で示した。データ点のピークが、モデルと比べて低いエネルギーに出ていることにお気づきいただけると思う。図1(b)からわかるように、2,000万度の電離平衡プラズマでは80%以上の鉄はリチウム状かヘリウム状まで電離する。一方、ティコの残骸中の鉄は、ピークの中心値(6.45キロ電子ボルト)から、ケイ素状～ネオン状までしか電離していないことがわかる。電離平衡プラズマ中で鉄がこのような電離状態を示すのは、温度が約400万度のときである。つまり、ティコの超新星残骸の電離温度は電子温度の5分の1程度しかない。

このようなプラズマは、慣例的に「電離非平衡プラズマ」と呼ばれているが、非平衡は非平衡でも電離のほうが再結合よりも高い頻度で起こっている状態なので、本稿では「電離優勢プラズマ」と呼ぶことにする(図5)。電離優勢状態はティコの超新星残骸だけでなく、約1,000年前に爆発したSN1006<sup>7)</sup>、さらには10,000年以上前に爆発したはくちょう座ルーブ<sup>8)</sup>でも成り立つことが確認されている。したがって、実質的にほぼすべての超新

星残骸が電離優勢プラズマを伴うというのが、今までの常識であった。

#### 4. 「あすか」が見つけた再結合プラズマの片鱗

もし前章の例とは逆に、電離温度が電子温度よりも高ければ、何が起こるだろうか？ プラズマは平衡状態へと向かうため、電離よりも再結合の頻度が高くなる。このような非平衡プラズマは「再結合優勢プラズマ」、あるいは単に「再結合プラズマ」と呼ばれる(図5; 過電離プラズマと呼ばれることもある)。宇宙における再結合プラズマは、強いX線源を伴う連星系<sup>9)</sup>や、ウォルフ・ライエ星<sup>10)</sup>、惑星状星雲<sup>11)</sup>の周辺など、極めて局所的な範囲内では観測されているが、超新星残骸のような空間スケールの大きい天体においては今まで認められてこなかった。

このようななか、数少ないながらも例外的な観測事例が存在する。1993年から2001年まで稼働したX線天文衛星「あすか」は、それまでの衛星をはるかにしのぐエネルギー分解能を誇り、2-10キロ電子ボルトの帯域における撮像分光を初めて可能にした。これらの優れた性能がもたらした成果の中に、超新星残骸W49BとIC 443の観測がある<sup>12), 13)</sup>。この二つの天体が、再結合プラズマを伴う可能性が指摘されたのである。例えばW49Bでは、制動放射スペクトルから測定された電子温度は約2,000万度であった。電離平衡プラズマであれば、この温度では大半の鉄はヘリウム状までしか電離できず、水素状のイオンは鉄全体の0.3%にも満たない(図1(b))。ところが「あすか」のスペクトルは、この予想よりも強い水素状鉄イオンの輝線放射を示した。これは、プラズマが再結合状態にあることを暗示している。

先述のように超新星残骸がたどる通常の進化過程では、再結合プラズマは生じえない。「あすか」の観測結果が真実であれば、超新星残骸の進化に対するインパクトは極めて大きい。しかしなが

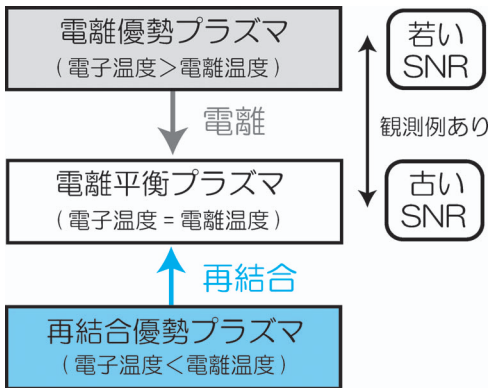


図5 熱的なプラズマの三つの状態。現在までに見つかっているほぼすべての超新星残骸は電離優勢状態であった。

ら、世界中の多くの研究者からは、この結果に対する疑問の声が数多くあがっていた。例えば、欧州の研究グループが XMM-Newton 衛星を使い、上記と同じ方法で測定を行ったところ、W49B, IC 443 のいずれにおいても電子温度と電離温度は誤差の範囲内で一致したと報告している<sup>14), 15)</sup>。さらには「温度の異なる複数のプラズマがたまたま視線方向に重なっているだけでは？」という反論も少なからず存在した。つまり W49B について極端な状況でたとえると、2,000 万度の電離平衡プラズマと、水素状鉄イオンだけを多量に含むような（すなわち温度の高い）別の平衡プラズマが共存し、電離温度の高い一つのプラズマがあるかのように錯覚しているだけではないか、という主張である。そのような状況が物理的に成立しうるかどうかはさておき、この「多成分プラズマ説」を否定できる十分な証拠を持ち合わせていなかったのも事実である。これまでの温度診断方法では、3 次元的に空間分解したスペクトルでも取りださない限り、再結合プラズマの実証は極めて困難だったと言える。

### 5. 「すざく」がもたらした決定打

このような膠着状態を打開したのが、2005 年に打ち上げられた X 線天文衛星「すざく」である。「すざく」に搭載されている X 線 CCD は、大きな有効面積と高いエネルギー分解能、低く安定したバックグラウンドレベルを特長としており、輝線などのスペクトル構造をもつ広がった天体（まさに超新星残骸！）の観測にうってつけである。これらの特性を活かし、私たちは「あすか」がしばしばつかみかけた W49B と IC 443 の再結合プラズマの存在を、疑う余地のない証拠をもって決定づけた。以下でそれぞれの結果を紹介する。

#### 5.1 W49B<sup>16)</sup>

わし座の方向に位置する超新星残骸 W49B。年齢は 1,000 年程度と言われているが、定かではない。ジェット状に爆発したような著しく非対称な姿から、ガンマ線バーストの残骸であるという

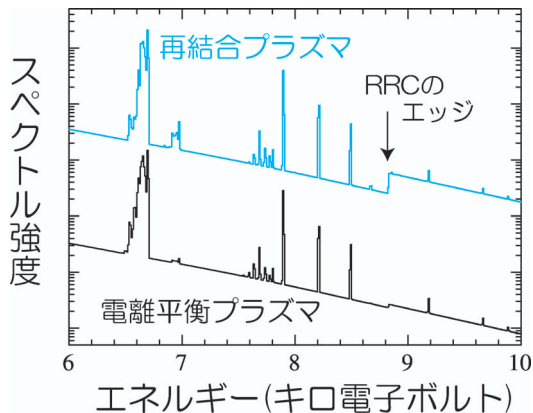


図6 電子温度・電離温度がそれぞれ 2,000 万度と 2,900 万度するとき（青）と、ともに 2,000 万度するとき（黒）に期待されるシミュレーションスペクトル。縦軸は見やすさのためずらしてある。

説<sup>17)</sup>も存在するが、明確な証拠があるわけでもない。謎が多い天体である。

もしこの天体に再結合プラズマが存在すれば、どのようなスペクトルが期待されるだろうか？図 6 に、「あすか」で求められた温度のプラズマから放射されるモデルを青で示す。また、同じ電子温度の電離平衡プラズマモデルも黒で示した。両者を見比べて気づくのが、前者のみでひときわ目立つ 9 キロ電子ボルト付近のエッジ構造である。これは、水素状まで電離した鉄イオンが自由電子をとらえる際に放出される「放射性再結合連続 X 線」に起因する。英語名の Radiative Recombination Continuum から頭文字を取って“RRC”と呼ばれるのが一般的なもので、以後このように書く。

放射性再結合は光電効果の逆過程なので、放射される光子のエネルギーは、つかまる電子の運動エネルギーとイオン化エネルギーの和である。したがって RRC のスペクトルは、イオン化エネルギーで立ち上がり、これより高エネルギー側で指数関数的に強度が下がる形になる。電子温度が高いプラズマほど運動エネルギーの大きい電子が多く存在するので、スペクトルの傾きは電子温度に依存する。再結合過程は電子温度が低いほど起こ

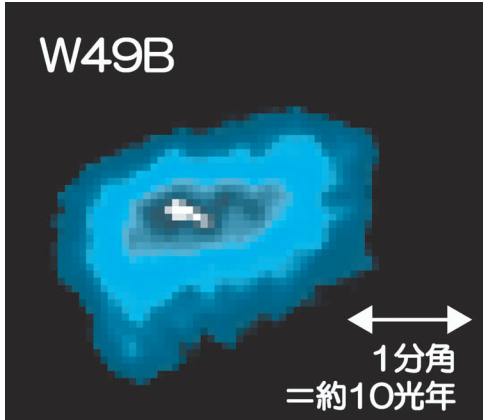


図7 「すざく」による W49B の X 線画像 (1.5-7 キロ電子ボルト)。カラーは表紙図参照。東西 (図では左右) に伸びた著しく非対称な姿をしていることがわかる。

りやすくなるため (トロい電子ほどつかまりやすい)、図に示されたような強い RRC は電離度の高いイオンと温度の低い電子が共存しない限り観測されない。したがって RRC が検出されれば、先述の「多成分プラズマ説」は完全に排除できる。

私たちは「すざく」を用いて、W49B を約 30 時間観測した。得られた X 線画像を図 7 に、スペクトルを図 8 に示す。スペクトルは CCD のエネルギー分解能のためなまっではいるものの、9 キロ電子ボルト付近に予想 (図 6) とそっくりなエッジ構造があるのがおわかりいただけると思う。エッジのエネルギーを調べたところ、予想値 (8.83 キロ電子ボルト) とぴったり一致した。紛れもなく鉄イオンからの RRC である。制動放射 (黒実線) と RRC (青実線) の傾きは、どちらも 1,800 万度の電子の存在を示している。両者が単一のプラズマから放射されている証拠だ。さらに鉄のイオン化度合いから、電離温度が電子温度の 2 倍近く高いことがわかった。再結合プラズマの存在は、もはや疑問の入り込む余地のないレベルで証明されたのである。

余談になるが、当初「あすか」の結果を否定していた欧州のグループも、私たちの発見を受けて

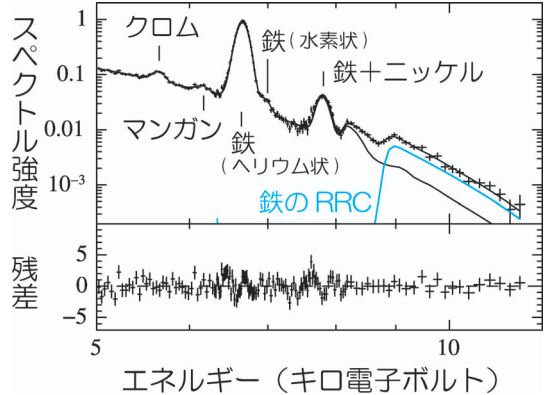


図8 「すざく」による W49B の X 線スペクトル。鉄の再結合 X 線 (青) がはっきりと検出された。

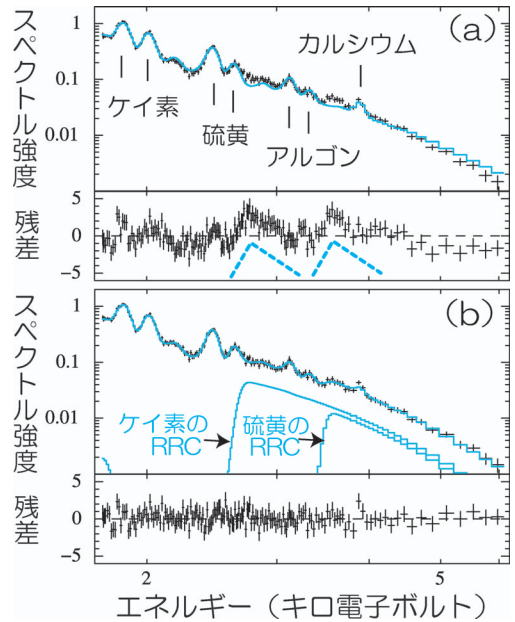


図9 「すざく」による IC 443 の X 線スペクトル。(a) 電離平衡プラズマでスペクトルを再現しようとすると山形の残差 (下段) が二つ残る。(b) ケイ素と硫黄の RRC を加えると、残差はきれいに解消した。

データを解析し直し、RRC は確かにあったと報告している<sup>18)</sup>。

## 5.2 IC 443<sup>19)</sup>

IC 443 は、ふたご座の方向に位置する年齢 4,000 年ほどの超新星残骸である。特徴的な形から、アマチュアのア天文写真家の間では「くらげ星

雲」の通称でも親しまれている。

図9は、「すざく」によるIC 443のスペクトルである。ヘリウム状や水素状まで電離したケイ素や硫黄からの輝線が見られる。こちらはW49Bほど単純ではなく、一見して明らかなエッジ構造は視認できない。しかしながら、このスペクトルを輝線と制動放射だけで構成されるプラズマモデルで再現しようと試みたところ、図9(a)のように二つの山なりの残差が認められた。これら二つの「山」のピークは、水素状のケイ素と硫黄のイオン化エネルギーと一致する。このことから残差の起源は、完全電離状態のケイ素と硫黄へ、自由電子が再結合する際に放出されるRRCだと推測できる。そこで二つのRRCを加えたところ、図9(b)のように残差が解消した。イオンの電離度合いから測定された電離温度（1,400万度）は電子温度（700万度）の2倍も高かった。IC 443にも、再結合プラズマは存在したのだ。

## 6. 解釈と今後の展望

私たちは、強いRRCという直接的な証拠をもって、超新星残骸における再結合プラズマの存在を決定づけた。超新星残骸のプラズマが電離優勢状態にあることが初めて観測的に示されて以来<sup>20)</sup>、長年にわたって信じられてきた熱的進化の常識が、ここに至って大きく覆されたのである。

その後の研究で、私たちは天の川銀河中心領域にある超新星残骸G359.1-0.5からも強いRRCを検出した<sup>21)</sup>。早くも3例目が見つかったのである。再結合プラズマはとりたてて奇異な存在ではないのかもしれない。そこで、これらの天体の共通点を探り、プラズマの形成メカニズムに迫ってみようと思う。

強いRRCが検出された3天体は、いずれも星生成領域に付随する可能性が高く、太陽より10倍以上重い星による重力崩壊型超新星の残骸ではないかと考えられる。また、X線の表面輝度は残骸の周縁部よりも内部で明るい<sup>22)</sup>（図10）。つま

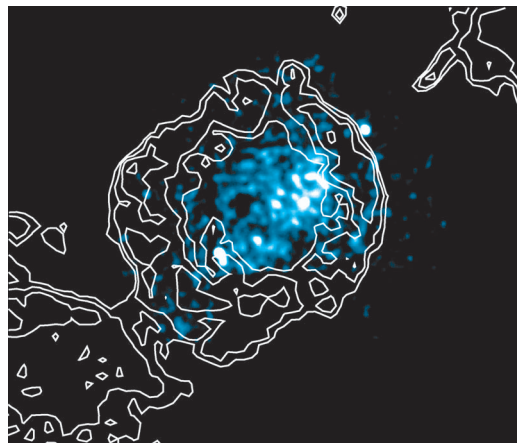


図10 XMM-Newton 衛星による超新星残骸 G359.1-0.5 のイメージ。青は X 線、白コントアは電波を表している<sup>23)</sup>。X 線は衝撃波（電波の円状の輪郭）近傍ではなく、内部で明るい。

り高温のプラズマは、膨張する衝撃波の近傍ではなく、なぜか中心集中的に分布しているのだ。このような分布は、一様な密度の星間空間で進化する超新星残骸では生じ得ないため、親星が爆発前にふきだした星風由来の濃いガス（星周物質）の中で爆発が起こった可能性が示唆されている<sup>24)</sup>、<sup>25)</sup>。3天体に共通して見られる再結合プラズマの形成にも、星周物質が何らかの役割を果たしたのだろうか？

実をいうと、星周物質の中で超新星爆発が起こると、その後の進化でプラズマが再結合状態になりえることは、以前から理論的に予想されていた<sup>26)</sup>。初期に爆発噴出物と星周物質が激しく衝突し合うため、図11のように両者は比較的短時間で高温・高階電離状態になる。その後の断熱膨張では、急激に電子温度が下がる一方で電離状態が高いまま保たれるので、再結合優勢状態が実現するのだ。初期に形成された超高温プラズマは、再結合プラズマへと姿を変え、激動の過去を今に伝えているのだろうか。

もちろん、上記以外のシナリオも考えられないわけではない。再結合状態を作り出すためには、断熱膨張などで「電子温度だけを下げる」のでは

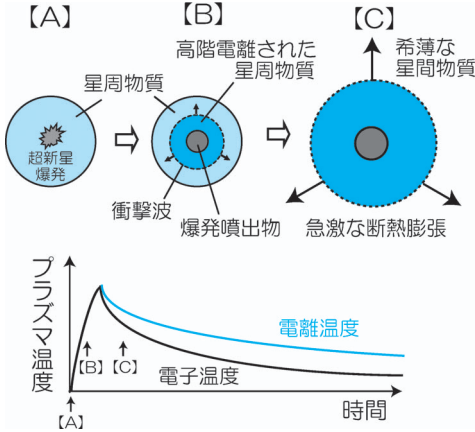


図 11 超新星残骸で再結合プラズマを作ることが可能な一つのシナリオ (上) と、このとき予想されるプラズマ温度の時間変化 (下). 衝撃波によって星周物質が高階電離され、希薄な星間空間へと急激に断熱膨張する。膨張により電子温度は一気に下がるが、密度が低いために再結合はなかなか進行しないので高階電離状態が持続する。

なく、何らかの方法で「電離温度だけを上げる」プロセスでもよいからだ。後者の例として、強い X 線照射源により電離が進む光電離が考えられる。いずれの超新星残骸においても近くに強い照射源が見られないことから、光電離が起こったとすれば、爆発直後であろう。だとすれば、ガンマ線バーストの X 線残光や、X 線フラッシュだろうか。しかしながら、これらは星周物質や星間物質は電離できても、爆発噴出物の電離は行えない。W49B の観測からは、爆発噴出物由来の大量の鉄が再結合状態にあることが確かめられている<sup>16)</sup>ので、光電離説は若干分が悪い。

W49B や IC 443 と同タイプの中心部が X 線で明るい超新星残骸は、他にも数多く存在する。もし親星周辺の高密度環境が再結合プラズマの形成に関係するのであれば、同じタイプの天体からも強い再結合放射が検出できるだろう。今後は系統的な観測やデータ解析を進め、どのような超新星残骸に再結合プラズマが伴うのかを突き止めなければならない。私たちは、すでに候補天体の観測

を始めている。これらのデータは、もしかすると残骸の激動の進化過程のみならず、われわれが全く予期していなかった超新星の未知の爆発機構につながる貴重な手がかりを与えてくれるかもしれない。

筆者 (小澤) は、自分が死ぬまでにどれほど人類のパラダイムシフトを伴う科学的発見があるかと夢想するのが好きである。現在の円熟した物理学や天文学では (残念ながら) 「ルールが敷かれた (予期された) 発見」が主流となっていることは、多くの人が実感しているところだろう。そうではない、真の発見はこれからいかにあるだろうか。想いをはせつつ筆を置くことにする。

謝 辞

本稿の多くは、筆者 (小澤) が京都大学の院生時にまとめた博士論文をもとにしたものです。在学中、厳しくご指導いただいた小山勝二先生に深く感謝いたします。政井邦昭先生 (首都大学東京) には、驚くほど親身に面倒をみていただきました。田中雅臣氏 (東京大学 IPMU)、冨永 望氏 (甲南大学) には、超新星について多くを学ばせていただきました。今まで研究を支えてくださった、愉快的な宇宙線研究室の皆さま、個性あふれるすぎくチームの皆さまに感謝します。そしていつも精神的な支えになってくれた、本当に素敵な同期その他の皆さま、心からありがとう。博士課程を通じて援助していただいた日本学術振興会に感謝いたします。【小澤】

本稿の一部 (IC 443 の観測) は、筆者 (山口) が理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室在籍中にあげた成果に基づいています。データ解析・論文執筆にあたり、参考文献をご紹介いただくなど、親身に相談に乗ってくださった牧島一夫先生に深く感謝いたします。また、論文改訂に際しては Randall Smith 氏 (CfA) に多数の有意義な示唆をいただきました。観測提案者である尾崎正伸氏 (ISAS/JAXA)、平賀純子氏 (東大)、ならびに共



同研究者の皆さまにも深く感謝します。【山口】

最後に、本研究は「あすか」の成果<sup>12), 13)</sup>があってこそなしたものであることを強調したいと思います。研究主導者の川崎正寛氏をはじめ、関係者各位に深く感謝するとともに、その先見性に心から敬服の意を表します。【小澤, 山口】

### 参考文献

- 1) 山口弘悦, 2010, 天文月報 103, 43
- 2) 片桐秀明, 2010, 天文月報 103, 438
- 3) Mazzotta P., et al., 1998, A&AS 133, 403
- 4) 山本 学, 村山精一, 1995, プラズマの分光計測 (学会出版センター)
- 5) Masai K., 1984, Ap&SS 98, 367
- 6) Hwang U., Hughes, J. P., Petre R., 1998, ApJ 497, 833
- 7) Yamaguchi H., et al., 2008, PASJ 60, S141
- 8) Katsuda S., et al., 2008, PASJ 60, S107
- 9) Kawashima K., Kitamoto S., 1996, PASJ 48, L113
- 10) Sugawara Y., Tsuboi Y., Maeda Y., 2008, A&A 490, 259
- 11) Nordon R., et al., 2009, ApJ 695, 834
- 12) Kawasaki M., et al., 2002, ApJ 572, 897
- 13) Kawasaki M., et al., 2005, ApJ 631, 935
- 14) Miceli M., et al., 2006, A&A 227, 191
- 15) Troja E., et al., 2008 A&A 485, 777
- 16) Ozawa M., et al., 2009, ApJ 706, L71
- 17) Keohane J. W., et al., 2007, ApJ 654, 938
- 18) Miceli M., et al., 2010, A&A 514, L2
- 19) Yamaguchi H., et al., 2009, ApJ 705, L6
- 20) Tsunemi H., et al., 1986, ApJ 306, 248
- 21) 小澤 碧, 2010, 博士論文 (京都大学)
- 22) Rho J., Petre R., 1998, ApJ 503, L167
- 23) LaRosa T. N., et al., 2000, AJ 119, 207
- 24) White R. L., Long K. S., 1991, ApJ 373, 543
- 25) Dwarkadas V. V., 2005, ApJ 630, 892
- 26) Itoh H., Masai K., 1989, MNRAS 236, 885

### Discovery of Recombining Plasma in Supernova Remnants

Midori OZAWA<sup>1</sup> and Hiroya YAMAGUCHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kyoto University, Kitashirakawa oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan;* <sup>2</sup>*RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan*

Abstract: The initial ionization state of shock-heated materials is nearly neutral for most supernova remnants (SNRs). Heated electrons subsequently collide with ions and gradually ionize them. Since the plasma density in SNRs is so low, it typically takes tens of thousands of years to reach ionization equilibrium. Therefore, it has been generally believed that almost all the SNRs are characterized by ionizing plasma. We have, however, discovered anomalously strong recombination X-rays from several SNRs by utilizing the excellent sensitivity of Suzaku. These X-rays are definitive evidence for recombining plasma that is not expected according to SNR evolution theories. Here we present our recent results and discuss the possible formation mechanisms of the recombining plasma in SNRs.