

論文内容の要旨

論文題目： X-ray Study of Ionization States in Supernova Remnants

(X線を用いた超新星残骸における電離状態の研究)

氏名 川崎 正寛

超新星残骸 (SNR) プラズマの最大の特徴は、数千万度 (数 keV) の高温と、粒子の数密度が約 1 個/cm^3 という、地上の実験装置では実現できないほどの超高温低密度環境である。そのため、超新星爆発による衝撃波に起因して急激に加熱された電子の温度とイオンの電離状態が平衡に達する (電離平衡状態) までに、数万年ほども時間がかかる。また、温度数千万度のプラズマからの放射は X 線領域で最も強くなる。よって、X 線観測によって SNR プラズマの電離状態、すなわちイオンの電離温度がどれだけ電子温度に近付いているか、を調べることが SNR の進化の度合を知る強い指標となる。ここでイオンの電離温度とは、ある電離度を示す電離平衡プラズマの電子温度の値と定義し、プラズマの電離状態を示す指標としている。実際に過去の X 線観測から、特にカシオペア A、ティコ・ブラーエの SNR といった非常に若い (数百年) SNR からプラズマが電離非平衡状態であることが示されている。

このように、SNR 中のプラズマの電離状態は SNR の進化を示すパラメータとなる。よって本研究では、プラズマの電離状態に注目して SNR を系統的に解析した。中でも我々が注目し詳細な解析を行なったのは、「Mixed-Morphology 型 SNR (MM 型 SNR)」と呼ばれる X 線で熱的プラズマが中心に集中して見える一群である。超新星残骸からは衝撃波によって加熱・加速されたシェル状領域にいるプラズマや粒子からの熱的・非熱的放射が X 線や電波で観測されると考えられており、カシオペア A をはじめとして多くの SNR が電波、X 線共にシェル状の空間構造を示す (シェル型 SNR)。よって MM 型 SNR の中心集中な X 線構造は従来の超新星残骸の理解では説明がつかないように思われる。しかしながらその数は我々の銀河系内で 20 個程度あり、X 線で観測される SNR の 20% 程度になる。よってそれぞれの天体の個性であるとするには数が多過ぎる。このような SNR は、観測される X 線像が一般的な SNR の理解と異なっているために SNR の進化を追った標準的な理論 (セドフ解) の適用が難しい。我々の注目するプラズマの電離状態から SNR の進化を求める方法は X 線像とは独立に求められるものなので、MM 型 SNR も含めた全ての SNR に適用可能なものである。

我々の解析手法は、X 線スペクトルの連続成分から電子温度を求め、重元素イオンの水素様輝線とヘリウム様輝線の放射強度比から求められる電離温度とを比較するものである。この方法は、

電離プロセスに特に仮定を置かずに X 線データから直接プラズマの電離状態を求めることができる。ただし、本解析には水素様輝線とヘリウム様輝線を分解できるエネルギー分解能を持つ検出器による観測が必要不可欠であり、「あすか」衛星搭載の SIS 検出器 (X 線 CCD 検出器) でそれが初めて可能となった。我々はそのなかでも「あすか」衛星打ち上げ後 2 年以内の特にエネルギー分解能の良い時期に観測された MM 型 SNR 6 天体を解析し、シェル型 SNR との比較を行なった。

結果をまとめたものを図 1 に示す。MM 型 SNR については我々の解析結果を、シェル型 SNR については SIS 検出器もしくは同等のエネルギー分解能をもつ衛星による観測結果で論文として発表されたデータ元に示している。全ての MM 型 SNR において、電離平衡状態もしくはそれ以上までプラズマの電離が進んでいた。このことは電離温度が電子温度に追い付いていないシェル型 SNR とは対照的で、MM 型 SNR がシェル型 SNR に比べ進化が進んだ SNR であることを示唆するものである。これに加え、IC 443 と W49B の 2 天体ではイオンの電離温度が電子温度を越えてしまっている「過電離状態」になっていることが示された。この過電離プラズマの証拠は本研究において初めて発見されたものである。この様な過電離プラズマを作るメカニズムとしては、イオンが衝突電離に加え別の方法で電離されるか、電子が急激に冷却されるかの 2 通りが考えられる。前者は光電離プラズマであるが、SNR のような低密度環境下では自身からの放射による光電離は考えにくく、また SNR プラズマ全体を光電離させるほどの強い X 線源も観測されていない。もう一方の電子の急激な冷却というのは、プラズマ中のガスがイオンの再結合のスピード以上に冷却が進んでいる状態である。電子の冷却メカニズムとしては、放射、膨張、熱伝導の 3 通りが考えられる。おのおののタイムスケールをイオンの再結合タイムスケールと比べたところ、両天体共に熱伝導による冷却がプラズマを過電離状態にしていることが示された。

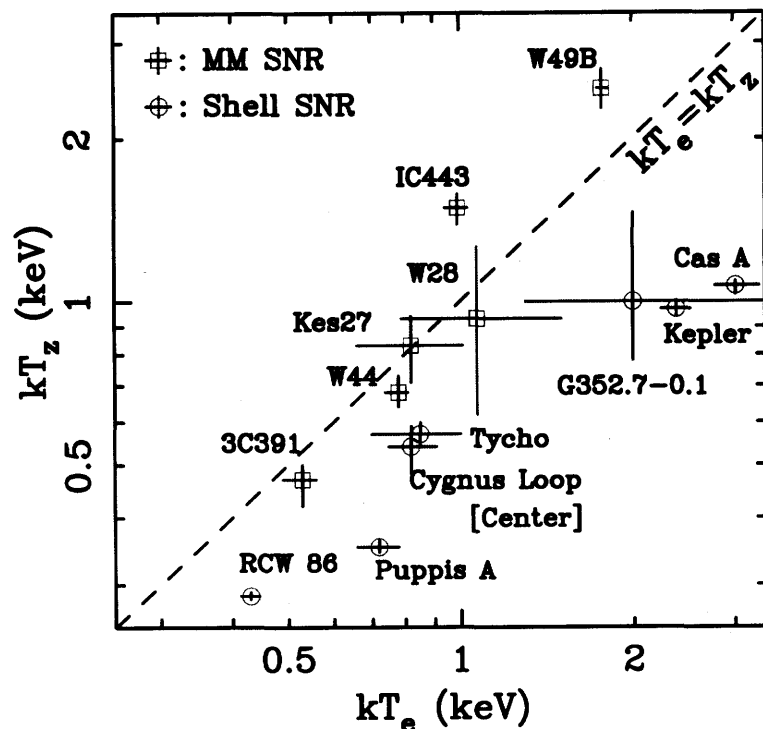


図 1: 様々な超新星残骸における電子温度 (kT_e) と電離温度 (kT_z) の関係。赤の四角が Mixed-Morphology 型 SNR (MM SNR) を、青の丸がシェル型 SNR (Shell SNR) のプロットである。

また我々は、MM型SNRの中心付近と周辺部でのスペクトルの違いも調べた。その結果、6天体中5天体で中心付近の電子温度が高く、周辺部で温度が低くなっているという結果が得られた。特に過電離状態が発見されたIC443とW49Bについては内部で高温低密度、周辺部で低温高密度なプラズマ構造が示された。このプラズマ構造はSNRの進化についての標準的な理解の範疇内で収まっているものである。なぜなら星間物質を加熱するたびに衝撃波は弱くなっていくのでSNRの進化とともに衝撃波加熱される物質の電子温度は低くなっていき、圧縮された衝撃波面近くの周辺部の密度は中心付近より上がっているはずだからである(セドフ解)。このことからMM型SNRは特別な進化をしたSNRではなく、シェル型SNRと同等の進化を経てきたことが示唆される。

以上の解析結果から、MM型SNRはシェル型SNRと同様の進化をたどり、且つシェル型SNRよりも進化が進んだSNRであると考えられる。このことを踏まえて、SNRの進化とX線像・電離状態の変化について以下のシナリオを提案する。若いSNRにおいては、強い衝撃波によって加熱されたプラズマがX線でシェル状に観測される。急加熱された電子温度にイオンの電離温度が到達するまで長い時間がかかるために、プラズマは電離の進んでいない状態となる。こうしてX線でシェル状の電離非平衡なプラズマが観測される。一方でSNRの進化とともに衝撃波加熱される物質の電子温度は低くなっていく。過去に加熱された物質はSNR内部で高温のまま残っているので、内部で高温、周辺部で低温なプラズマが形成される(セドフ期)。このようなプラズマは圧力平衡を保ちつつ熱伝導によって内側と外側の温度差を埋めようとするので、内部プラズマの温度は下がり密度は上がる。こうした熱伝導が十分効き出す頃には外側の衝撃波は非常に弱くなり、加熱されたプラズマの温度が低くて星間物質による吸収のためX線で観測出来なくなってしまう。よって比較的密度が高く密度も上昇した中心付近の方がX線領域において相対的に強い放射が見え、中心集中的なX線像が観測されると考えられる(MM型SNR)。IC443やW49Bはこの段階が見えているものと考えられるが、このことは観測された外側のプラズマの温度が0.2 keV程度の低いものであったことから示唆される。このシナリオの骨子はRho & Petre (1998)等により提案されたが、我々が付け加えた新しい観点は、この熱伝導による電子の冷却スピードに電離温度の変化が追い付かず、結果としてSNR内部プラズマを「過電離状態」にすることも可能であることを観測から示した点である。ただし電離温度は3万年/cm³のタイムスケールで電子温度に追い付くので、更に進化が進んだSNRではIC443やW49B以外のMM型SNRのように電離平衡状態に達していると考えられる。SNRの進化を扱ったShelton (1999)の数値シミュレーション結果も「過電離プラズマ」も含めてこのシナリオをサポートする。

故に我々の結果は、SNRが進化すると熱伝導の効果によりX線で中心集中な過電離プラズマを示す「熱伝導期」が観測されることを示唆する。