

論文の内容の要旨

論文題目

A Systematic Study of Supernova Remnants in the Scutum Arm as Possible Sources of Low Energy Cosmic Rays

(低エネルギー宇宙線加速源の解明に向けた 楯座腕超新星残骸の系統的な研究)

氏名 佐藤 有

近年、電波からX線ガンマ線にいたる広帯域の観測に基づき、超新星残骸中の高温プラズマ、さらに宇宙線の加速現場の研究が大きく進んでいる。ガンマ線衛星 Fermi は、複数の超新星残骸から、 π^0 中間子の崩壊ガンマ線に特徴的なガンマ線スペクトルを検出し、超新星残骸において陽子が加速されていることを明らかにした。その多くが分子雲と相互作用する超新星残骸であることから、分子雲のような星周環境の存在が、超新星残骸の構造形成やその進化にまで影響を及ぼしていることが予想されるが、その詳細はまだわかっていない。

GeV ガンマ線で明るい超新星残骸は、超新星爆発から数千年以上を経過し、電波で明るい中年期のものが多い。近年、X線衛星「すざく」の観測と詳細なX線スペクトル解析により、このような中年期の超新星残骸において、旧来の標準進化理論では形成しえない、再結合優勢な電離過剰プラズマを伴う特殊な進化を経るものが発見された。また、超新星残骸のX線スペクトル解析から得られる重元素の組成比は、超新星残骸の親星が Ia 型の超新星に起因するものか、あるいは重力崩壊型であるかの区別を与えるだけでなく、親星の質量まで推定することが可能であるということが分かってきた。このように、X線による高温プラズマの詳細な観測とガンマ線、あるいは電波の観測を組み合わせ、今明らかにされつつある新しい種族の超新星残骸を系統的に調べることは、超新星残骸の進化と星周環境の関係を明らかにするばかりではなく、これまで研究が及んでいなかった低エネルギー宇宙線加速源の解明にもつながると期待される。

本研究では、低いバックグラウンド性能を有し、拡がった天体に対して高いX線観測感度をもつ「すざく」衛星を用い、銀河系の楯座腕上において ($l = 32\text{-}35^\circ$, $b = 0^\circ$) に隣接する4つの超新星残骸の系統的な解析を行った。観測を行った 3C 391、Kes 79、Kes 78 および W44 は、GeVガンマ線で明るく、また分子雲と相互作用している超新星残骸である。拡がった天体の解析では、銀河面に分布する銀河面リッジ放射 (GRXE) が観測バックグラウンドとして混入するため、それを正確にモデル化することが重要である。本研究では銀河中心から 3kpc 以上距離があり棒状構造体よりもさらに外側にある、GRXE の影響が比較的低い領域の超新星残骸を系統的に解析することにより、バックグラウンドのモデル化の不定性を最小限にすることを目指した。バックグラウンドスペクト

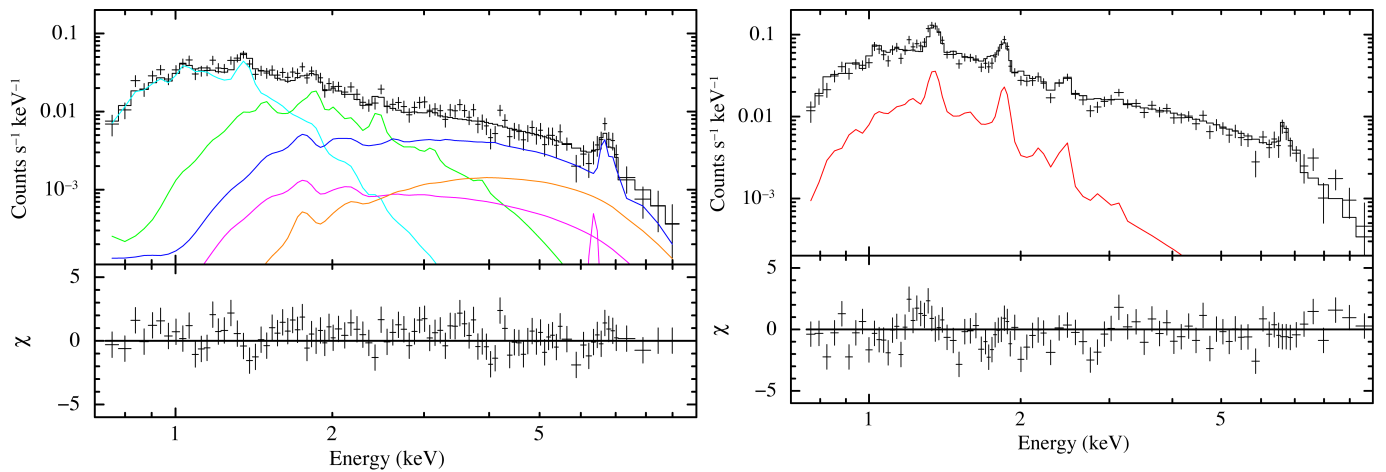


図1：Kes 78 (左) と Kes 79 (右) のバックグラウンド領域に GRXE モデルを適用して得られたスペクトル。隣接する領域のために予想される GRXE の強度差は 3% 以下であるが、Kes 79 の場合は、赤で示すように周辺のバックグラウンド領域に Kes 79 自身の放射が漏れこんでしまっている。これは X 線望遠鏡の空間的な応答特性が原因であり、これを考慮せずに差し引くとバックグラウンドを過大評価し、SNR の X 線強度を正しく見積もることが出来ず、スペクトルの構造をかき消してしまう場合がある。本研究では Kes 78 バックグラウンド領域の GRXE 放射モデルを基準とし、Kes 79、3C 391 など、観測した SNR 自身からの混入放射を考慮したモデルを開発し、それをスペクトル解析に適用することで、バックグラウンドの差し引きによる系統誤差を最小限に抑えることに成功した。

ルは近傍の領域から取得し、より正確なモデル化を行うべきである。この段階で、X 線望遠鏡の空間的な応答特性から生ずる、超新星残骸本体からバックグラウンド領域への漏れこみの成分を正確にモデル化し、それを差し引くことで、超新星残骸の X 線放射の空間分布と X 線フラックスの評価を行うことに成功した (図1)。

1) SNR 3C 391

SNR 3C 391 の解析を行い、この超新星残骸のプラズマが電離過剰の状態にあることを初めて発見した。図2に示すように、2 温度の電離平衡プラズマモデルを適用すると、残差に過電離プラズマの特徴が現れる。 ~ 0.6 keV の電離平衡プラズマに対し、 $n=2 \rightarrow 1$ の H-like Si 輝線が過剰に出ており、

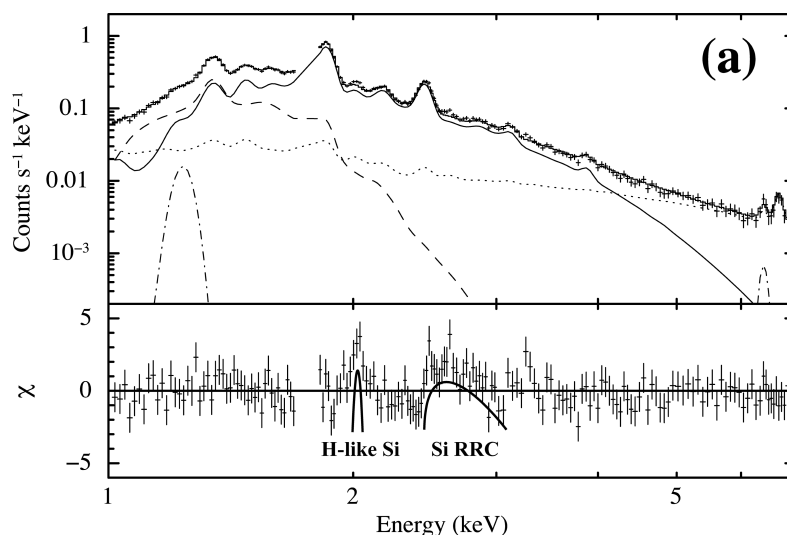


図2：SNR 3C 391 を電離平衡プラズマモデルで fit したスペクトルと残差。電離平衡状態と比較して、電離過剰なスペクトル構造を示している。

同時に自由電子が $n=1,2,\dots$ へと落ち込む連続放射 (RRC) が見られる。これは過電離状態のためにこれらの再結合放射が優勢となっているとして説明される。またプラズマの輝線強度から得られた過電離プラズマの金属組成比とプラズマ密度の考察から、3C 391 は 15~20 太陽質量の星が重力崩壊型の超新星爆発を起こしたことで形成されたと考えられる。3C 391 では電波殻構造内とその破れが引き起こされた東西の領域双方で過電離のパラメータに有意な差が認められなかったことから、爆発初期に電離平衡状態に対して電子温度だけが急激に減少する現象を経たか、あるいは低エネルギー宇宙線による電離作用が効果的に働いたことで、過電離の状態になったと解釈される。

2) SNR Kes 79

SNR Kes 79 のスペクトル解析により、X線放射が低温の ~ 0.2 keV の電離平衡プラズマと高温の ~ 0.8 keV の未電離プラズマの2成分からなっていることを確認した。さらに、イオンごとに温度と電離パラメータの異なる複合型のプラズマモデルを作成し、Al、Ca、Ar の金属組成比を明らかにした。この研究により、高温プラズマ成分の金属組成量は比較的重い 30-40 太陽質量の星が、3C 391 と同様に重力崩壊型の超新星爆発を起こした場合の放出物と似た組成を示していることが分かった。

本研究で開発したバックグラウンドの詳細なモデル化を適用、スペクトルの詳細な解析を行うことで、 $\sim 3.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の放射強度をもつ 6.4 keV のラインを 3.5σ の有意度で検出した。図3

(左) に Kes 79 (黒) とその周辺領域(赤)の 6.4 keV 付近での放射の比較を示す。また、図3 (右) に 6.2-6.5 keV の放射強度の空間分布を示す。6.4 keV 放射は SNR の殻状構造とは異なる空間分布を示し、分子雲の存在する方向に偏っていることがわかる。

Kes 79 の半径 10 pc の電波殻構造内に確認されていた ~ 0.2 keV の低温プラズマ放射は、爆発中心から約 16 pc のさらに外縁部まで拡がっていることを、初めて見出した。この2温度プラズマの空間分布と Kes 79 でこれまで確認されていた特徴的な電波二重殻構造は、外へと進行して星間物質をプラズマ化する衝撃波と、中心へと逆行し、爆発放出物をプラズマ化する衝撃波との境界を見ていると解釈できる。

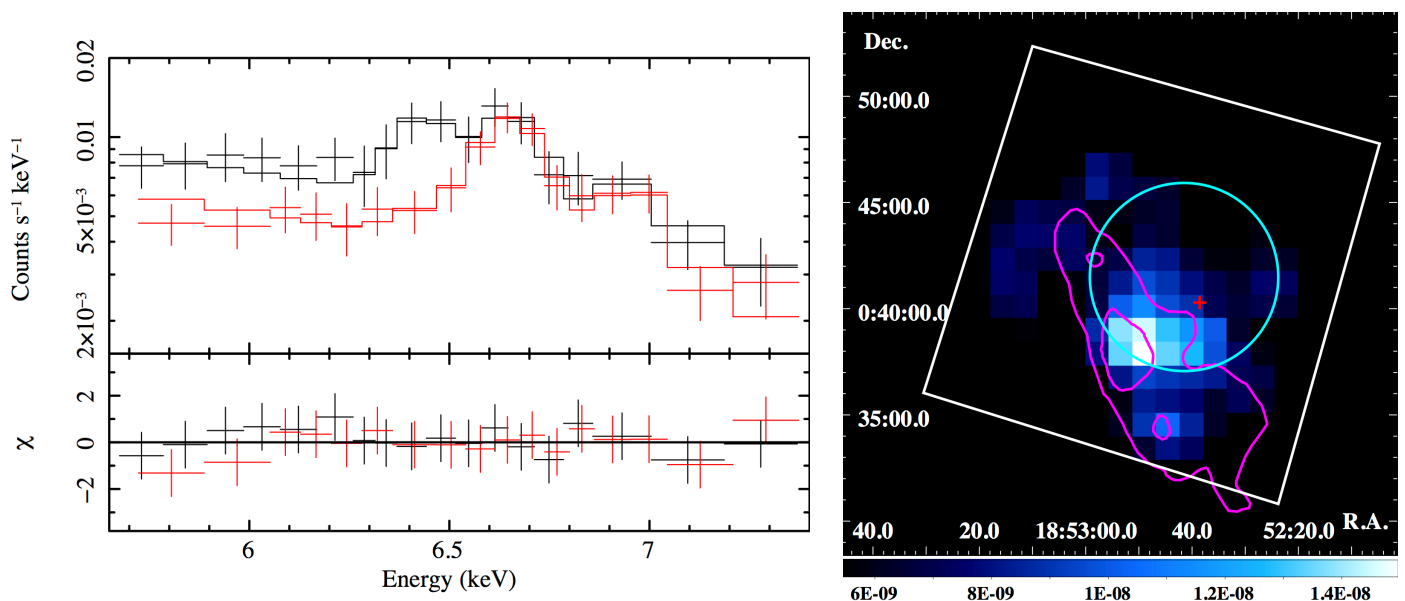


図3 左：SNR Kes 79 (黒) と周辺領域 (赤) の 6.4 keV 付近のスペクトルの比較。右：SNR Kes 79 の 6.2-6.5 keV の放射強度のカラーマップ (単位は $\text{photons/s/keV/cm}^2$)。水色の円が電波殻放射の概形、赤い十字が超新星爆発後の残留候補天体、マゼンタが ^{13}CO の強度コントラストであり分子雲の分布を示す (Giacani et al. 2009)。

3) Kes 79 における 6.4 keV 放射の起源

本研究では、Kes 79 から初めて有意な6.4 keVの鉄輝線の放射を発見した(3.5 σ)。さらに、系統的に研究した他の3天体においても、2.1 σ -2.4 σ の有意度で同様な低電離の鉄からの輝線の兆候が得られた。Kes 79は、本研究において明らかとなったプラズマ密度と重元素の組成比から30-40太陽質量の非常に重い星を親星とする重力崩壊型の超新星爆発であると言える。このような場合、爆発放出物の高温プラズマ中に鉄の含有量が少なく、また、存在する鉄も高階電離していることがほとんどで、鉄輝線はそれに特徴的な6.7 keV 付近の放射となる。一方、分子雲の近傍にX線放射源がある場合、X線により励起された分子雲中の中性の鉄から6.4 keV が放射される可能性がある。しかし、Kes 79 の近傍にも2008年に見つかった点状光源があるが、観測光度から計算した6.4 keVの再放出強度は $1.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とKes 79の6.4 keVを説明するには2桁足りない。

ここで、分子雲中に注入された低エネルギー宇宙線陽子によって6.4 keVの鉄輝線が放射されることを考える。本研究で系統的に観測を行った超新星残骸はすべてGeVガンマ線で明るい。そのため、GeVガンマ線を放射している分子雲中の同じ領域から、中性鉄輝線も放射されているとして、6.4 keV放射強度の定量的な解析を行うことが可能である。本研究では、第一に、観測されたGeVガンマ線強度から、陽子と分子雲中の物質との反応断面積(Kamae et al. 2006)を用いて元の高エネルギー宇宙線スペクトルを見積もった。このスペクトルが1 GeV以下の低エネルギーまで同じべき関数で伸びていると仮定する。6.4 keVの鉄輝線の放射強度は、数MeVのエネルギーを持つ陽子のフラックスによって大きく影響を受ける。実際は、分子雲中の電離損失が働くため陽子フラックスは大きく減衰し、観測された鉄輝線はこの電離損失による減衰に対して制限を与えることになる。Kes 79にこのモデルを適用すると $n \times t \sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ と求まる。典型的な分子雲密度 $n = 100\text{-}200 \text{ cm}^{-3}$ を用いた場合には、電離損失のタイムスケールとして数ヶ月から数年を与える。ガンマ線観測から、この短いタイムスケールで陽子フラックスが変動することは考えにくい。ここでは、分子雲が均質な密度で分布せず、低密度の場所が存在することで、一部電離損失を免れた低エネルギー陽子によって、6.4 keVの鉄輝線が強く放射されるという考えを提案する。

本研究では楯座腕の隣接する4つの超新星残骸の系統的観測を行い、X線による高温プラズマのスペクトル解析を行った。従来より報告されていたW44のほか、3C 391において、過電離プラズマを発見することができたが、予想に反しKes 79とKes 78にはその兆候は見られなかった。スペクトル中の重元素の組成比から、いずれもが重力崩壊型の超新星爆発により形成されたSNRであり、親星の星風が作りだした濃い星周環境の中で進化をしてきたことがわかった。Kes 79からは低エネルギー宇宙線起源と見られる6.4 keV放射を3.5 σ の有意度で、また他の天体からも2 σ 以上の有意度で検出することに成功した。これが考察の通り宇宙線起源であるとするれば、ガンマ線による直接観測が難しい低エネルギー宇宙線、特に陽子のフラックスや分布に対して新しいプローブを与えることになる。