

( 続紙 1 )

|      |   |    |       |
|------|---|----|-------|
| 京都大学 | 博士 ( 理学 )   | 氏名 | 天野 雄輝 |
| 論文題目 | Diagnostics for Physical Processes of X-ray Plasma in Supernova Remnants<br>(超新星残骸の X 線プラズマにおける物理過程の診断) |    |       |

(論文内容の要旨)

超新星の親星 (爆発前の星) やその爆発機構は明らかではなく、天文学における重要な未解決問題である。超新星爆発によって吹き飛ばされた物質は周囲のガスと衝突し、超新星残骸 (SNR) と呼ばれる数千万度の高温プラズマを形成する。SNRのX線観測から、親星の合成した元素の組成比などを知ることができ、上記の問題に迫ることができる。近年の研究により、超新星残骸の形成過程や、X線放射過程は、非一様な周辺物質との相互作用により、従来予想以上に複雑になることがわかってきた。例えば、イオンと中性原子の電荷交換反応によるX線放射の検出やイオンによる輝線光子の散乱 (共鳴散乱) の示唆など、これまでSNRにおいて考慮されてこなかった物理過程の重要性が指摘されている。これらの物理過程を見逃すと組成比などの測定を正確に行うことができない。一方で、その効果を定量的に測定できれば、イオンの運動速度やプラズマの奥行き方向の厚みなどの従来測定の難しかった物理量の測定が可能になる。本研究では、SNRから電荷交換や共鳴散乱を検出し、こういった条件下でこれらのプロセスが効果的に働くのかを明らかにした。また、共鳴散乱の効果からプラズマの視線方向の厚みを測定する方法を開発し、SNRの形状から親星を明らかにする手法を開拓した。

電荷交換反応や共鳴散乱の観測的特徴は、 $\text{He } \alpha$  線や $\text{L } \alpha$  線の微細構造に現れるため、X線天文学の主力検出器であるCCDよりも一桁以上優れたエネルギー分解能の検出器による観測が必要である。そこで、我々は現在最高のエネルギー分解能を持つ X 線検出器の回折格子を用いて、濃い中性ガスに囲まれたSNR N49 と J0453-6829 の解析を行った。N49のスペクトルは、OVII  $\text{He } \alpha$  線の高い禁制線/共鳴線、OVIII  $\text{Ly } \beta / \alpha$ 、FeXVII (3s-2p)/(3d-2p) 比を示した。これらの強度比はSNRのX線放射モデルとして一般的な光学的に薄い熱プラズマからの放射では説明できず、共鳴散乱の効果を考慮することで説明できた。J0453.6-6829の場合、OVII  $\text{He } \alpha$  線の禁制線/共鳴線比とOVIII  $\text{Ly } \beta / \alpha$  比が高く、これらの比は電荷交換による放射を考慮することでよく説明できた。また、ATCA & Parkesのアーカイブ電波データを解析した結果、HI雲がJ0453.6-6829と相互作用している可能性があることが判明した。HI雲の存在する領域では、特に強いCXによる放射が観測された。これらの結果はJ0453.6-6829における電荷交換反応の強い証拠となる。

我々は共鳴散乱の効果から、SNRの3次元構造を制限する手法を提示した。SNRの形状は親星が質量損失によって形成した周辺物質との相互作用の痕跡を起している場合があり、親星の進化過程などを探る上で重要な情報を持つ。本研究では、この方法を銀河系外SNR 1E 0102-72.9 (E0102) に適用した。E0102の親星はその高い質量損失率に基づいて、単独のWolf-Rayet 星もしくは連星の可能性が指摘されているが、両者を切り分ける観測的な証拠は得られていない。解析の結果、多くの輝線の透過率は0.8以上と比較的弱い散乱のみが検出された。我々は、二重リング構造と膨張速度を持つ円筒構造を、我々の観測結果と先行研究の両方と矛盾しない構造として提案した。両者の切り分けは将来計画であるXRISMなどの非分散系の精密分光が適しているが、二重リング構造である場合は、E0102の親星が連星をなしていた可能性を示唆する。この方法は、将来計画のXRISMを用いて多くの天体に適用することができる。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

超新星残骸のX線観測はその親星の爆発機構に迫る有効な手段である。近年の研究で、電荷交換反応や共鳴散乱といった物理過程が超新星残骸のX線スペクトルからパラメーターを測定する際の不定性となっていた。申請者は回折格子による超新星残骸のX線精密分光観測によって、これらのプロセスの観測的な証拠を得た。

電荷交換や共鳴散乱に特徴的な輝線構造は従来のX線CCDでは分離できないため、申請者はX線回折格子に注目した。X線回折格子は優れたエネルギー分解能を持つが、スリットのない分散系なので、天体の位置情報と光の波長情報の分離が困難という問題点がある。申請者は観測対象を比較的に見かけの大きさがコンパクトなSNRに絞り、点源用の応答関数に天体の輝度分布を畳み込むなどの工夫を行うことで、回折格子の弱点を最小限に抑え、超新星残骸の精密分光観測を可能にした。超新星残骸における電荷交換反応や共鳴散乱の可能性は約20年前から指摘されていたものの、観測的証拠はほとんど得られていなかった。申請者はSNRのX線スペクトルに加えて、SNRの形状や周辺環境にも注目することで、これらのプロセスの観測的証拠を得るのみならず、これらのプロセスが起きる物理的な条件を明らかにした。また、共鳴散乱の効果から超新星残骸の3次元構造を制限する手法を提示し、超新星残骸の観測から親星を推定する研究を開拓した。この研究の過程で電荷交換や共鳴散乱によっても説明できない強度の輝線を見つけ、その原因が輝線放射の素過程の反応係数などの理論値の系統誤差にある可能性も指摘した。これらは申請者の独創的なアイデアに基づく優れた成果であり、高く評価できる。

以上より、本論文は博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、令和5年4月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降