

氏 名	やま ぐち ひろ や 悦 山 口 弘 悦
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3247 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	X-Ray Study of Ejecta-Dominated Supernova Remnants with Suzaku (『すざく』を用いた爆発噴出物優勢超新星残骸のX線研究)

論文調査委員	(主 査) 教 授 小 山 勝 二	教 授 笹 尾 登	准教授 鶴 剛
--------	----------------------	-----------	---------

論 文 内 容 の 要 旨

現在の宇宙に存在するほぼ全ての重元素は、星の内部で合成され、超新星爆発によって宇宙空間に放出されたものである。また、元素合成は超新星爆発のまさにその瞬間に最も活発に行われる。従って個々の超新星が供給する元素の組成比や総量、ひいては爆発時の元素合成機構を正しく知ることは、宇宙の化学進化を理解する上で極めて重要である。

超新星残骸 (SNR) はイジェクタ (元の星を構成していた物質から成るガス) や、衝撃波が掃き集めた星間物質による高温・希薄なプラズマを形成し、爆発後 1 万年以上 X 線などで輝き続ける。中でも年齢 1000 年前後の若い SNR は非常に明るく、かつイジェクタからの放射が星間物質からの放射に対して卓越するため、超新星によって合成された元素の組成や分布を調査するのに最適な観測対象である。

2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星 Suzaku は、優れた分光能力と高い感度を持つため、電離した重元素からの輝線スペクトルの検出を得意とする。著者はこの性能を最大限に活かして 5 つの若い SNR, SN1006, E0509-67.5, RCW86, Tycho, N103B を観測し、それらの元素組成やプラズマ状態を詳細に調査した。

まず SN1006 からは、爆発的核融合型 (Type Ia) 超新星の主要生成元素である鉄からの K 殻輝線を初めて検出した。全 X 線帯域 (0.3-10 keV) のスペクトルは、「(a) 順行衝撃波によって加熱された星間物質」「(b) 爆発後間もない時期に逆行衝撃波によって加熱されたイジェクタ」「(c) SNR が比較的進化した後に加熱されたイジェクタ」「(d) 非熱的電子」の 4 成分からの X 線によってよく再現できることを明らかにした。(b) と (c) それぞれの重元素組成比を Type Ia 超新星の理論モデルと比較したところ、(b) の成分では C, O, Ne, Mg, Si, S の元素組成比はモデルとよく一致するが、Ca, Fe は予想値を有意に下回ることが判明した。一方 (c) の成分は全体的にモデルとよく一致する組成比を示した。この結果は、Fe などの特に重い元素は逆行衝撃波による加熱の開始が遅かった、すなわちこれらが SNR の内部に集中していたと解釈できる。

他の Type Ia SNR, もしくはその候補である E0509-67.5, Tycho, N103B についても同様に解析を行い、これら全てにおいて Fe が Si などの比較的軽い元素よりも遅れて加熱を受けたことを明らかにした。Type Ia 超新星の爆発時における Fe の放出速度が他の元素よりも有意に遅いことが強く示唆される。また、Tycho, N103B からは非常に強度の弱い Cr-K 輝線の検出にも初めて成功した。

著者はさらに、SNR 周辺の星間物質密度が逆行衝撃波の進化、言い換えればイジェクタの加熱および電離のプロセスに強く影響することを明確に示した。例えば SN1006 (年齢約 1000 年) は Tycho (年齢約 380 年) より 2 倍以上も古い、星間物質が極めて希薄 (0.03 コ/cc) な空間に存在するため、Tycho (星間物質密度 = 約 1 コ/cc) よりも電離の進行がはるかに遅いことがわかった。

また、RCW86 北東領域の観測データからは鉄輝線の放射分布を初めて明らかにした。詳細なスペクトル解析により、この鉄輝線が極めて近い過去に逆行衝撃波によって加熱されたイジェクタ起源であることを示すと同時に、密度の高い星間空間中を膨張する順行衝撃波の背後でのみ放射が強いことを証明した。これは、単一の SNR 中でさえも星間物質の密度に依

存して逆行衝撃波の進化が場所によって大きく異なることを示す興味深い例である。

論文審査の結果の要旨

Suzaku衛星は優れたエネルギー分解能と大有効面積、非常に低く安定したバックグラウンドレベルを誇る。そのため、とりわけ鉄K殻輝線を含む5-10keVのエネルギー帯域での感度において他の観測機器を凌駕する。著者はこの特長を最大限に活かして若い超新星残骸（SNR）の観測的研究を行い、以下の通り数々の重要な成果を挙げた。

(1) SN1006からは、極めて電離度の低い鉄のK殻輝線を初めて検出した。これだけでも画期的な成果だが、著者はここに留まらずさらに詳細な解析を行った。SNRの熱的スペクトルは様々な成分からの放射が複雑に入り混じるため一般的に解析は極めて困難だが、論理的な手順を踏むことにより全X線バンドのスペクトルを星間物質からの熱的X線、イジェクタからの熱的X線、非熱的X線への分離に成功した。その結果、Ia型超新星（核暴走型）の最大の証拠であるカルシウムや鉄が大量に含まれることを明確にした。さらに、鉄などの重い元素がSNRの内部に分布するため十分に加熱が進んでいないことなど、若いSNR研究の鍵になる事実も明らかにした。

(2) 大マゼラン星雲内のIa型SNR、E0509-67.5からはこれまでで最も統計の良い鉄輝線スペクトルを取得し、鉄の電離状態が過去の（質の劣る）観測結果が示したものよりも有意に低いことを明らかにした。さらにSN1006と同様のプロセスで全X線バンドのスペクトル解析を行い、やはり鉄がSNRの内部に分布することを証明した。

(3) RCW86北東部からも鉄輝線の明確な検出に成功し、その放射分布を初めて明らかにした。詳細な解析により、その放射起源がごく最近に加熱されたイジェクタであることを示した。さらに、このSNRの周囲の星間物質密度が極めて非一様であるため、逆行衝撃波の進化が場所によって大きく異なる、すなわち密度の大きい領域ほどイジェクタの加熱が効率的に進行する事実を明らかにした。

(4) Tycho, N103BからはクロムのK殻輝線を初めて検出した。また、イジェクタの膨張に起因する鉄輝線の赤方・青方偏移の証拠を捉えるとともに、鉄の電離状態に対してこれまでで最も強い制限を与えた。上記(1)、(2)の結果と合わせ、少なくともIa型超新星では、一般的に爆発時における鉄の放出速度が珪素などの比較的軽い元素と比べて十分に遅いという重要な示唆を得た。

以上の成果は全て、SNRやプラズマ物理に関する知識、観測機器の特性に対する著者の深い理解によって成し得たものであり、かつ超新星の爆発時における元素合成機構やSNRの熱的および動的な進化過程に対して重要な観測的制限を与えるものである。また、これらは単に超新星やSNRの物理に閉じず、宇宙の化学進化の理解に対しても大きく貢献するものであろう。さらに解析過程も独創的かつ論理的で、結果の信頼性も極めて高いと判断できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、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。