

氏名（本籍） <sup>たけ</sup> <sup>うち</sup> <sup>よう</sup> <sup>こ</sup> 武内陽子（埼玉県）  
学位の種類 博士（理学）  
学位記番号 甲第1100号  
学位授与の日付 平成28年3月18日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 **A Systematic Study of Supernova Remnants  
in the Large and Small Magellanic Clouds  
with Suzaku**  
(**すざく衛星を用いたマゼラン星雲内の超新星  
残骸の系統解析**)

論文審査委員 (主査) 教授 松下 恭子  
教授 長嶋 泰之 教授 辻川 信二  
准教授 鈴木 克彦  
連携大学院 物理学専攻 客員教授 玉川 徹

## 論文内容の要旨

星がその生涯の最後に起こす超新星爆発は、水素やヘリウムよりも重い元素を合成し、宇宙空間に撒き散らす唯一のメカニズムである。爆発には、核融合暴走型と重力崩壊型の2種類があり、それぞれの爆発で合成される元素に違いがあることがわかっている。爆発の種類とその頻度を調べることは、我々の身近な元素の組成比の起源を調べることに繋がる。爆発後に見られる超新星残骸は高温の薄いプラズマからなり、星を構成していた爆発噴出物の元素が放つX線を直接観測できることから、その元素の種類と量を調べることで、爆発の種類を特定することができる。爆発噴出物を正確に見積もるためには、爆風によって掃き集められる星間物質と爆発噴出物を空間的に切り分けることが重要だと考えられ、今まで空間分解能に優れたX線望遠鏡による観測が行われてきた。本研究は、従来の方法とは違い、エネルギー分解能が十分にあれば、元素の生成量が爆発の種類ごとに違うことを活かして、爆発の種類の特定が可能ではないかという点に着目した。私は、大小マゼラン星雲の超新星残骸のうち、エネルギー分解能に優れたX線観測衛星「すざく」によって観測された超新星残骸の観測データを使い、その方法の検証を試みた。

本論文は全部で9章からなり、1章の序論でこの研究の背景と目的を述べる。2章から4章までは、超新星爆発の種類や、爆発後どのように宇宙空間に広がり、超新星残骸として観測されるようになるのかを説明し、X線の放射機構や先行研究を紹介する。そして、5章と6章で、本研究で用いた「すざく」の検出器と系統解析した選定天体についてまとめ、7章から9章で観測的検証を示し、全体をまとめている。

## 1. 研究の背景・目的

水素とヘリウムしか存在していなかった初期の宇宙から、現在のような身近にある様々な元素がどのようにして作られてきたのか、その起源は恒星の一生と深い関わりがある。恒星は、その星の中心で、自らを構成する水素を燃料に核融合反応を起こして輝いている。この時生成された元素は、超新星爆発により宇宙空間にばら撒かれる。この爆発には大きく分けて2種類あることが知られている。太陽質量より8倍以上重い星は、核融合の燃料が無くなった時点で、星が自らの重力を支えきれずに潰れる、重力崩壊型の超新星爆発を起こす。この時、大量の酸素、ネオン、マグネシウムなどの軽い元素を周囲にばらまく。一方で、軽い星が核融合を終えると、電子の縮退圧で重力を支える白色矮星となる。この白色矮星が恒星と連星系になる場合、相手の星からのガスが白色矮星に降り積もり、電子の縮退圧で支えられる限界値(チャンドラセカール質量: 1.4太陽質量)を超えると、核融合暴走型の超新星爆発(Ia型)が起きる。この爆発の瞬間、元素が効率よく核融合するので、主に生成された鉄族の元素が宇宙空間にばらまかれる。したがって、宇宙の歴史の中で、どちらの種類の爆発がどのくらいの頻度で発生したのかを知ることは、現在の我々の回りの元素組成比が、なぜ今の値に落ち着いたのかを知ることに直結する。

超新星爆発のなごりである超新星残骸は、数10万から1000万度の、高温で薄いプラズマから構成され、星で生成された元素がX線帯域で輝線を放射しているので、直接元素の種類と量を調べることができる。また、超新星残骸は1万年以上もX線で観測できることから、超新星爆発の観測(約100日程度)と比べ、過去にさかのぼって研究できる利点がある。超新星残骸は一般的に、爆発により放出された元の星の物質(爆発噴出物)が、爆発の衝撃波で掃き集められた星間物質に取り囲まれるような構造をしている。爆発噴出物の元素組成とその量を正確に調べ、爆発の種類を知るためには、X線観測衛星でこれらの構造が空間分解できるサイズであることが最も重要だと考えられてきた。しかし、これでは空間分解できないほど遠方にある銀河の超新星残骸を調べることができない。実際、現在最高の5秒角の空間分解能力持つChandra衛星でも、空間分解できる超新星残骸は、我々の銀河から最も近い伴銀河である、大小マゼラン星雲までに限られている。それより遠くにある超新星残骸はあまりの遠さに点源として見え、爆発噴出物と星間物質を空間分解できないため、現状では爆発の種類を特定するのは難

しい。

## 2. 研究内容・結果

そこで、私は超新星残骸を空間分解できなくても、X線望遠鏡の検出器のエネルギー分解能が十分に優れていれば、観測された元素が爆発噴出物なのか星間物質なのかを区別することができ、爆発の種類を特定できるのではないかと考えた。この手法の検証のため、私は以下の2点に着目した。

### (1) 観測手段： 日本のX線天文衛星「すざく」

搭載されているX線CCDカメラは、現在稼働中のX線観測衛星の中で最もエネルギー分解能が優れている。エネルギー範囲0.2~12 keVを高感度で検出でき、超新星残骸を構成する主な元素が発する輝線の帯域と被っている点から見ても最適な検出器である。

### (2) 観測対象： 地球から約50~60 kpc離れた大小マゼラン星雲にある超新星残骸

これらの超新星残骸は「すざく」の空間分解能では分解できず、ほぼ点源に見えるため、仮説検証には最適である。また、マゼラン星雲は、銀河面から30度以上離れており、地球との間にある星間物質によるX線の吸収量は銀河面内の超新星残骸と比べて1-2桁も少ない。つまり、星間物質によって吸収されやすい1 keV以下の低エネルギーも精度よく観測でき、輝線構造を調べるのに適した天体である。

「すざく」で観測された大小マゼラン星雲の超新星残骸のうち、爆発噴出物よりも掃き集めた星間物質の影響が優勢になる、爆発から1万年以上が経過している年老いた超新星残骸9天体 (DEM L238, DEM L249, 0534-69.9, 0548-70.4, B0532-71.0, B0532-67.5, 0103-72.6, 0049-73.6, 0104-72.3) を無バイアスに選び出し、系統的にスペクトル解析を行った。一般的に古い超新星残骸のX線スペクトルでは、星間物質の寄与が卓越するため爆発噴出物起源の重元素量の測定は難しい。一方で、爆発後の経過時間が長いために、外側から中心に向かって進む逆行衝撃波が超新星残骸の中心まで到達しており、全ての爆発噴出物がプラズマ化しているので、爆発噴出物全体からX線を観測できる利点もある。解析の結果、対象の9天体は1 keV周辺のスペクトル構造が明確に異なる2つのグループに分類できた。一方のグループは鉄のL殻輝線が卓越することからIa型、もう一方はネオンのK殻輝線が卓越することから重力崩壊型の超新星爆発であるとスペクトルの構造から予想された。詳細なスペクトル解析によって得られた結果から、鉄とネオンの質量比は、いずれのグループでもマゼラン星雲の星間物質の平均組成比と有意に異なることが確認された。さらに全ての重元素の種類と量は、過去にそれぞれの超新星残骸を空間分解して爆発噴出物について調べた先行研究の結果とエラーの範囲で一致することがわかった。

### 3. 考察・まとめ

本研究によって得られた結果は、古い超新星残骸において、空間分解していないスペクトルを解析しても爆発噴出物の寄与がまだ十分にあることを示している。さらに、鉄とネオンの質量比と、超新星残骸の半径の関係を図示したところ、理論的に予想される掃き集めた星間物質と爆発噴出物を合計した鉄-ネオン比の曲線とおおよそ一致した。この結果を受け、私の手法の有効性を確かめることができた。また、このような古い超新星残骸の、空間分解していないスペクトルから、爆発の種類を系統的に特定したのは、世界で初めてのことである。

現在の衛星では、前述した通り、空間分解能の良し悪しに関わらず、我々の銀河系とそれに付随する大小マゼラン星雲の超新星残骸しか、有意な観測はできていない。2016年に打ち上げられる日本のASTRO-H衛星や2028年に打ち上げられる欧州のAthena衛星は、「すざく」の20倍以上優れたエネルギー分解能を持つマイクロカロリメータを搭載している。これを用いれば、「すざく」よりも詳細な輝線構造を検出し、今回注目した鉄とネオンの輝線構造の判別を明確に行え、爆発の種類を特定できる。さらに「すざく」よりも角度分解能が60倍以上優れたAthena衛星では、今回確立した手法を用いることで、X線サーベイで超新星残骸候補天体が数10天体見つまっている、約750 kpcほど遠方にあるアンドロメダ銀河の超新星残骸も研究対象にできる。こうして、爆発の種類を調べられる超新星残骸が飛躍的に増え、爆発の種類ごとの発生率が銀河ごとに系統的に調べられると期待できる。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、無バイアスで選んだ大小マゼラン星雲内における超新星残骸(SNR)について、空間分解しないエネルギースペクトルを系統的に解析し、その結果から爆発のタイプ分けを試みたものである。

星の爆発（超新星）は、重い元素を合成し、宇宙空間に撒き散らすことができる唯一のメカニズムである。超新星には核融合暴走型と重力崩壊型の2タイプあることが知られており、それぞれ生成される元素のパターンが異なる。138億年の宇宙の歴史の中で、どのタイプの爆発がどのくらいの頻度で発生したのかを知ることは、我々の身の回りの元素組成の起源を探るための、数少ない手段の一つである。

本論文は全九章から構成されている。第一章はイントロダクションである。超新星爆発の種類、X線観測、観測の限界等を簡単に説明した上で、論文の研究動機が端的に述べられている。

第二章は超新星爆発とSNRのレビューである。星の一生の最後に起きる超新星爆発は、その観測事実から、いくつかの種類に分類されることが述べられている。特に白色



矮星にガスが降り積もって起きる Ia 型超新星爆発と、ガス圧が重力を支えきれなくなった時に起きる重力崩壊型超新星爆発について、詳しく述べられている。また、星の燃焼や超新星爆発の際に、どのような元素が生成されるのか、原子核反応にさかのぼって丁寧に記述されている。二章の後半は、SNR が時間とともにどのように発展し、加熱され、X 線を発し、最後は星間空間に消えていくのか、典型的なセドフ解などをもとに、詳細に記述されている。さらに、SNR で見られる衝撃波による加熱や宇宙線の加速について述べられており、X 線偏光観測が有効な手段であることが示唆されている。

第三章は熱的なプラズマにおける基礎物理過程のレビューであり、X 線で SNR を観測する際に、どのような輝線がどのような強度で観測されるのかが詳細に述べられている。SNR 中のプラズマは、高温の電子により、イオンの電離が時間とともに進む、典型的な非平衡プラズマである。爆発からの経過時間や密度が、観測される輝線の強度比にどのように影響するのか、丁寧に述べられている。第四章は X 線による SNR の観測について、関連するテーマがレビューされ、最後に Fe K-shell 放射を使って、SNR のタイプを分類する研究について述べられている。

第五章は本研究で観測に用いた、日本の X 線天文衛星「すざく」に搭載された検出器の詳細が書かれている。X 線反射望遠鏡と X 線 CCD カメラの詳細が手際よくまとめられ、その性能や感度リミットについて述べられている。第六章では「すざく」衛星により観測された、大小マゼラン星雲中の SNR のリストが提示され、爆発から 1 万年を境に、young SNR と old SNR に分類されている。また、CCD により撮像された X 線画像から、どのようにスペクトルを切り出すのかについてまとめられている。

第七章はデータ解析の方法についての詳細が述べられている。9 個の SNR に対する、一温度の非平衡プラズマモデル、二温度の非平衡プラズマモデルのフィット結果とモデルの詳細が述べられている。第八章では、七章で示した解析結果を受けた議論が展開されている。まず初めに、今回の解析により得られた結果と、先行研究の詳細な比較が行われている。次に、解析から得られた、鉄とネオンの比を用い、SNR のタイプ分けを試みている。その結果、重力崩壊型の SNR ではネオンが卓越し、いっぽうで、Ia 型 SNR では鉄が卓越するという、予想通りの結論が得られた。また、爆発噴出物と星間物質の組成比の違いに着目し、星間物質密度や親星の質量をパラメーターとし、経過時間とともに鉄とネオンの比がどのように変化するかを調べた。その結果、概ね予想される範囲に収まっていることを確認した。また、二温度モデルの平均から得られた電子温度を、典型的なセドフ解と比較し、予想される範囲に収まっていることを確認し、鉄とネオン比から得られた結果と無矛盾であることも示している。最後に本研究の今後の見通しとして、近い将来打ち上げられる、エネルギー分解能が良い日本の X 線天文衛星 ASTRO-H、欧州の Athena 衛星を例にとり、M31 や M33 のような、遠方の銀河においても、空間分解しないスペクトル解析により SNR のタイプ分け研究ができることを示した。第九章は本論文のまとめである。

本研究により、爆発から 1 年以上が経過し、爆発噴出物と星間物質が混ざり合った SNR に対しても、スペクトル解析のみによる SNR のタイプ分けができることが、世界で初めて系統的に示された。

以上により、本研究は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。