

X線天文衛星 Suzaku および Chandra を用いた 小マゼラン星雲中の超新星残骸 0103-72.6 の観測的研究

川井田 英広¹⁾・木村 結樹¹⁾・森 浩二²⁾

A study of the Supernova Remnant 0103-72.6 in the small Magellanic Cloud with Suzaku and Chandra X-ray Observatories

Hidehiro KAWAIDA, Yuuki KIMURA, Koji MORI

Abstract

A supernova remnant (SNR) is the remains of the violent explosion of a star at the end of its life. High velocity shocks triggered by the explosion heat both the interstellar medium (ISM) and synthesized materials in progenitor star, called ejecta, to several million degree. Therefore, X-ray observations of SNRs allow us to investigate the constituents in ISM and ejecta. The SNR 0103-72.6 in the Small Magellanic Cloud (SMC), which is known to show clear sign of ejecta, has been observed with Suzaku and Chandra X-ray observatories. Suzaku and Chandra have better energy and spatial resolutions, respectively, compared to each other. Utilizing the respective advantages, we derived the elemental abundances of the ejecta of 0103 precisely. The abundances of light elements like O, Ne, Mg are highly elevated while those of heavy elements like Si and Fe are comparable to the SMC abundances, suggesting that 0103 is a remnant of a core-collapse explosion, not of a thermonuclear one. The relative abundance ratio indicates that the progenitor star had a 15-18 solar mass.

Key word:

SNR 0103-72.6, ejecta, ISM, Suzaku, Chandra

1. はじめに

1.1 星の進化と元素合成

現在、ビッグバンという大爆発が137億年前におこり我々の宇宙ができたと考えられている。宇宙ができた当初は、水素とヘリウムしか存在していなかった。だが、我々の存在している地球にはさまざまな元素が

存在し、我々の体や地球自体も多くの元素からできている。水素とヘリウムより重い元素のほとんどは、宇宙誕生後、星の内部で元素合成されたものであると考えられている。星が生まれると星の中心で核融合反応がある。水素とヘリウムより重い元素のほとんどは、宇宙誕生後、星の内部で元素合成されたものであると考えられている。星が生まれると星の中心で核融合反応がはじまり、炭素、窒素と次々に重元素を形成していく。しかし、重元素が星の内部に留まるままでは今の

1) 応用物理学専攻大学院生

2) 材料物理工学科准教授

地球や我々は存在することができない。多くの星は年月が経つと、星の大部分を吹きとばすような超新星爆発を起こし、超新星残骸へと進化する¹⁾。この超新星残骸は星の化石の事であり、星が自ら作りだした元素(ejecta)が含まれている。このようにして重元素は星の残骸として宇宙空間にばらまかれ、それが新たな星、惑星、さらにはわれわれのような生命体を誕生させた。

1.2 X線による超新星残骸の観測

超新星残骸は爆発で生じた衝撃波²⁾により ejecta や星の周りにあった物質(ISM)が加熱される事で約1千万度まで温度が上昇しX線を出して輝く。X線は可視光に比べエネルギーが高く、強い透過力を持つ。その為、星間物質による吸収も弱く、遠くの天体でも観測する事ができるという特徴を持つ。また、超新星残骸中の元素が出すK殻輝線はX線帯域に属し、元素の種類や量に対する情報を我々に与える。X線を用いた観測にはこのような利点があるが、X線は大気により遮断されてしまうという特徴もあり、我々はX線天文衛星を宇宙に打ち上げる事で、超新星残骸からのX線を検出している。X線天文衛星の望遠鏡の焦点面にはX線 CCD 検出器が備えられている。このX線 CCD 検出器により、X線で輝く天体の形態、さらにはスペクトルといった情報を得る事ができる。

1.3 超新星残骸 0103-72.6

本論文では地球から約20万光年の距離にある小マゼラン銀河の中に存在している超新星残骸 0103-72.6 を研究した。超新星残骸 0103-72.6 はX線領域において小マゼラン星雲中で二番目に明るい。視直径は約3分角であり(満月の約10分の1)楕円型に広がっている。これは小マゼラン星雲までの距離を200000光年とすると直径が約170光年に相当する。

超新星残骸 0103-72.6 はこれまで様々なX線天文衛星を用いて観測されてきた³⁻⁵⁾。数ある超新星残骸の中で、超新星残骸 0103-72.6 が研究対象として選ばれて来た理由は ejecta 成分が比較的明るいという特徴があり、ejecta を研究する上では恰好のターゲットになる為である。また、小マゼラン星雲は天の川銀河に比べ星間吸収量が少ない為、超新星残 0103-72.6 から

のX線が吸収されずに検出できる事や、星間物質の元素存在量が太陽系の元素存在量の約0.1倍⁶⁾と少ない為、ejecta と ISM の区別が明確にできるという特徴もある。

過去に行われた超新星残骸 0103-72.6 の研究として最も新しい Chandra 衛星の結果を紹介する⁷⁾。図1は2003年に Park et al.(2003)がX線天文衛星の中で最も空間分解能に優れた Chandra 衛星から得られたデータから作成した超新星残骸 0103-72.6 の三色合成イメージである。

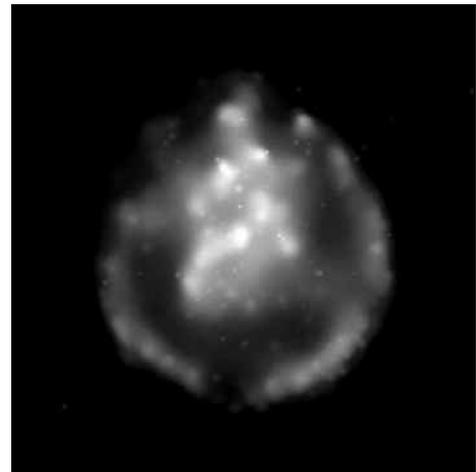


図1 Chandra 衛星から得られた超新星残骸 0103-72.6 の三色合成イメージ。赤は 0.3-0.75 keV、緑は 0.75-0.99 keV、青は 0.99-3.0 keV を示す。Park et al.(2003)

このイメージから中心部分の白く輝く楕円型の部分とその周囲を殻(以下、shell と呼ぶ)で取り巻かれているシェル型の構造になっていることが分かった。shell の部分はスペクトルの特徴から爆発時に生じた blast wave の前方で掃き集められた ISM からのX線放射であるのに対して、中心の領域は三色全ての色で明るい事からこれは reverse shock により温められた ejecta からの放射であると考えられた。

最後に、Chandra 衛星を用いたスペクトルフィッティングの結果を紹介する。ISM 成分に対しては shell 領域でフィッティングを行い、ejecta 成分に対しては図1の中心の白い部分に対してフィッティングを行った。表1は ISM と ejecta のベストフィットの結果である。ejecta 成分の温度は 0.53 keV と ISM 成分に対して高く、その他のパラメータについても違いが見られた。また、ejecta の元素の存在量は O、Ne が小マゼラ

ン星雲の典型的な値に比べ約 4-6 倍、Mg、Si に対しては約 1.5 倍、Fe に関しては約 0.3 倍である事が分かった。

表 1 Chandra 衛星からのデータを用いて得られた ISM と ejecta のベストフィットの結果.

	星間吸 収量 nH (10^{21} cm^{-2})	温度 kT (keV)	電離度 ($10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$)	EM (10^{58} cm^{-3})
ISM	< 1.2	$0.30^{+0.1}_{-0.1}$	$1.6^{+1.2}_{-0.7}$	$5.4^{+1.1}_{-1.1}$
ejecta	$1.1^{+0.6}_{-0.4}$	$0.53^{+0.3}_{-0.2}$	$1.4^{+0.3}_{-0.3}$	$0.8^{+0.3}_{-0.3}$

1.4 本研究の目的

本研究の目的は超新星残骸 0103-72.6 をエネルギー分解能に優れた X 線天文衛星 Suzaku と空間分解能に優れた Chandra で観測し得られたデータから ejecta に含まれている元素の組成比を調べ様々な物理量を見積もると同時に、元素合成のメカニズムを解き明かす事である。

2. 観測機器

本研究では、超新星残骸 0103-72.6 を解析するために Suzaku 衛星^{8, 9)}と Chandra 衛星¹⁰⁾の二種類の X 線天文衛星を使用した。

2.1 Suzaku 衛星

日本で第 5 番目の X 線天文衛星 Suzaku は内之浦宇宙空間観測所から ISAS/JAXA の M-V-6 号ロケットにより 2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた。図 2 は Suzaku 衛星の外観を示す。Suzaku 衛星には 5 台の X 線反射望遠鏡 X-Ray Telescope(XRT)とその焦点面には X 線 CCD カメラ X-ray Imaging Spectrometer(XIS) が搭載されている。XIS は 0.2-12keV のエネルギー帯域をカバーし、撮像可能な X 線 CCD カメラであり、典型的なエネルギー分解能は 130eV@5.9keV で他の X 線天文衛星に比べ優れている。



図 2 Suzaku 衛星.

2.2 Chandra 衛星

X 線天文衛星 Chandra は NASA のスペースシャトルコロンビアにより 1999 年 7 月 23 日に打ち上げられた。Chandra 衛星の空間分解能は 0.5 秒角であり、歴代の X 線天文衛星の中で最も高いという特徴を活かし、様々な天体の空間構造を明らかにしてきた。図 3 は Chandra 衛星の外観図である。Chandra 衛星は全長 10m の X 線望遠鏡 High Resolution Mirror Assembly(HRMA) が外形の大部分を占め、焦点面には X 線検出器 ACIS Advanced CCD Imaging Spectrometer(ACIS)が搭載されている。



図 3 Chandra 衛星.

3 観測

3.1 Suzaku 衛星を用いた観測

Suzaku 衛星を用いた観測は 2006 年 4 月 23 日に行われた。4 台の X 線検出器 XIS(XIS 0-3)を用いて得られたデータを使用する。観測対象のポインティングは赤経 01h 05m 54s、赤緯-72 度 23 分 00 秒(2000 年分点)である。観測は約 49 ksec 間行った。

3.2 Chandra 衛星を用いた観測

Chandra 衛星を用いた観測は 2002 年 8 月 27 日に行われた。X 線検出器 ACIS を用いて得られたデータを使用する。観測対象のポインティングは赤経 01h 05m 05s、赤緯-72 度 23 分 01 秒(2000 年分点)である。観測は約 49 ksec 間行った。

4. 解析

Suzaku 衛星と Chandra 衛星から得られたデータの解析について説明する。この解析の最終目標は ejecta 成分を調査し、様々な物理量を求める事である。その為に、エネルギー分解能が優れている Suzaku 衛星を用いて母星により元素合成された ejecta の成分を解析する。しかし、Suzaku 衛星は空間分解能が Chandra 衛星に比べそれほど特化しておらず、ejecta 成分の領域と超新星爆発時に掃き集められた ISM 成分の領域を空間的に分解できない。そこで、本研究では空間分解能が最も優れている Chandra 衛星で ejecta 成分と ISM 成分の放射量の比を見積もり、この結果を用い Suzaku 衛星で最終的に ejecta 成分を見積もる。以上が解析のおおまかな流れである。

4.1 Chandra 衛星を用いたデータ解析

4.1.1 shell 領域のスペクトル解析

Chandra 衛星や Suzaku 衛星から得られたイメージは全て 3次元の超新星残骸 0103-72.6 を 2次元投影したものである。つまり、Chandra 衛星の ejecta 領域には掃き集められた ISM が構成している Shell からの放射も含まれている事になる。そこで、ejecta 部分を見積もるためにはこの ISM からの放射の寄与を取り除く必要がある。ISM からの放射のスペクトルは図4の2種類の緑の円の間 shell 領域から見積もる事ができる。その理由は shell が球殻状に広がっているので、図4の緑の線で囲まれた shell 領域は球殻上の端の部分に相当し、2次元投影されたイメージでは密度が濃くなり ISM からの寄与を見積もる事に対して適しているからである。

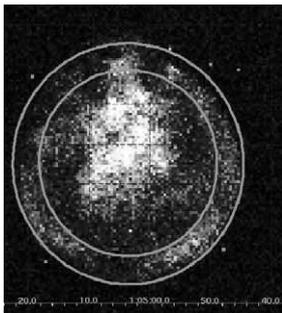


図4 Chandra で得られた超新星残骸 0103-72.6 の

イメージ。緑の円の間が shell 領域。

この shell 領域が ejecta からの放射を含んでいない ISM からの成分のみの放射であるか検証した。理由は中心の ejecta 領域は円状、もしくは、楕円状に均一に広がっていない事が Chandra 衛星のイメージから見て分かるからである。つまり、その成分が shell 領域に重なって投影されている可能性がある。そこで、図5で示すように shell 領域を 10 箇所領域に分割した。

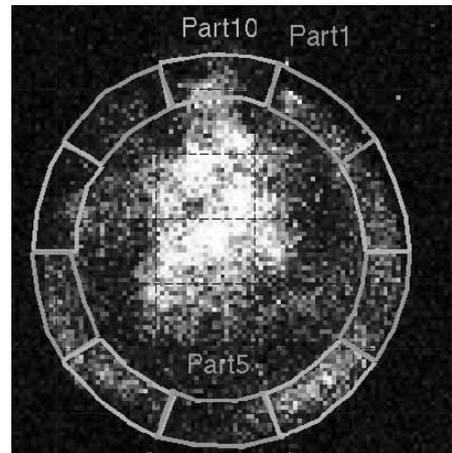


図5 10箇所に分割した shell 領域。

この 10 箇所領域を part1 から part10 と定義し、スペクトルの形態とスペクトルフィッティングを行い調査した。10 箇所領域の X 線スペクトルを比較すると part10 の領域には他では見られない O、Ne、Mg の輝線が目立っている事が確認できた。また、光学的に薄いプラズマからの熱制動放射と衝突電離平衡に達していない状態での元素からの輝線を考えたモデルでスペクトルフィッティングを行った結果 Part10 は他の領域に比べ高い温度が得られた。以上の事から Part10 には ejecta 成分が含まれていると言える。よって Part10 以外の shell 領域を純粋な shell 領域と定義し、今後の解析において ISM の成分は全てここで定義した純粋な shell 領域の結果を使用する。図6は純粋な shell 領域を示し、表2はこの領域の成分値を示す。元素存在比は太陽系の組成比¹¹⁾に対する値である。

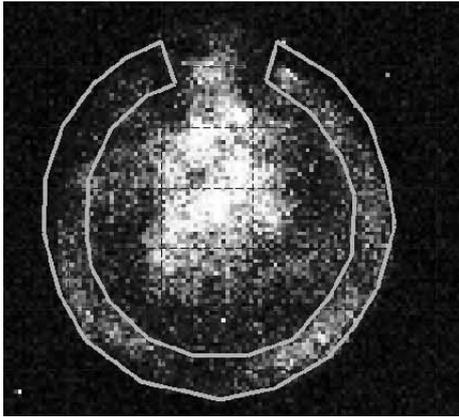


図6 純粋な shell 領域.

表2 フィットングにより得られた
純粋な shell 領域の ISM 成分値.

Parameter	純粋な shell
星間吸収量 nH (10^{22}cm^{-2})	$0.064^{+0.06}_{-0.06}$
温度 kT (keV)	$0.29^{+0.06}_{-0.04}$
電離度 ($10^{11} \text{cm}^{-3} \text{s}$)	$1.9^{+1.70}_{-0.87}$
O	$0.041^{+0.01}_{-0.01}$
Ne	$0.066^{+0.02}_{-0.02}$
Mg	$0.078^{+0.05}_{-0.04}$
Si	<0.48
Fe	$0.083^{+0.03}_{-0.02}$

4.1.2 ejecta 領域のスペクトル解析

前節で決定された純粋な shell 領域の ISM 成分を用いて Chandra 衛星での ejecta 領域を解析する。図7は Chandra 衛星で ejecta 領域として使用した領域を示す。スペクトルフィッティングには shell 成分と ejecta 成分に対してそれぞれ電離非平衡モデルを掛け合わせた。shell に対しては前節で求めた純粋な shell の結果を用いた。ejecta 領域には、掃き集められた ISM が構成している shell からの放射も投影されている。この放射を分離する方法として、ejecta 領域に shell の放射がどれだけ含まれているかを見積もる必要がある。そこで、純粋な shell 領域の体積に対する投影されている shell の体積の比を見積もった。純粋な shell 領域からの ISM の放射量は既に求めているので、この値に対して体積比をかける事で投影されている shell の放射量を仮定した。図8に ejecta 領域のスペクトル、表3にスペクトルフィッティングの結果を示した。

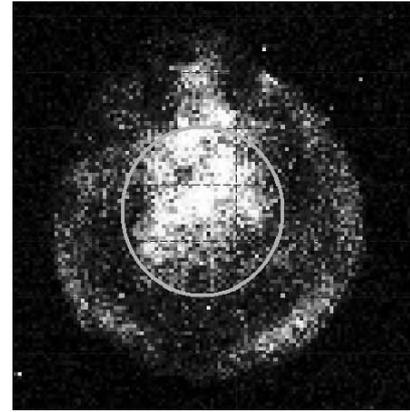
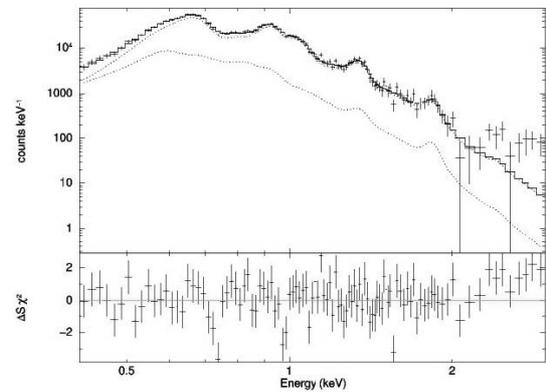
図7 Chandra 衛星のデータで ejecta 領域として
使用した領域.

図8 図の上は ejecta 領域のスペクトル。点線は純粋な shell 領域からの寄与を示す。図の下はモデルとデータの差を表す残差である。

表3 ejecta 領域のスペクトルフィッティングの結果.

Parameter	純粋な shell
星間吸収量 nH (10^{22}cm^{-2})	$0.17^{+0.02}_{-0.02}$
温度 kT (keV)	$0.34^{+0.03}_{-0.02}$
電離度 ($10^{12} \text{cm}^{-3} \text{s}$)	$3.8^{+6.66}_{-2.42}$
O	$0.81^{+0.52}_{-0.33}$
Ne	$1.13^{+0.97}_{-0.43}$
Mg	$0.69^{+0.19}_{-0.18}$
Si	$0.48^{+0.25}_{-0.21}$
Fe	$0.03^{+0.10}_{-0.08}$

4.1.3 超新星残骸 0103-72.6 全体のスペクトル解析

前節で ejecta 領域をフィッティングした結果を用いて、Chandra 衛星のデータで超新星残骸 0103-72.6 全体をスペクトルフィッティングする。全体で解析する

理由はこの次に行う Suzaku を用いた解析で超新星残骸 0103-72.6 全体を用いて解析を行うため、ISM と ejecta がどれだけの割合で存在しているかを知っておく必要がある。スペクトルフィッティングの結果から ejecta 成分より約 1.3 倍の ISM からの放射があるという結果が得られた。

4.2 Suzaku 衛星を用いたデータ解析

Suzaku 衛星のデータは 2 という空間分解能から Chandra 衛星のデータのように shell 領域や ejecta 領域が区別できない為、超新星残骸 0103-72.6 全体を用いてスペクトルフィッティングする。図 9 はフィッティングに用いた Suzaku 衛星でのイメージである。Suzaku 衛星のデータは X 線検出器 XIS が 4 台搭載されているのでフィッティングは 4 台のデータを用いて同時に行う。

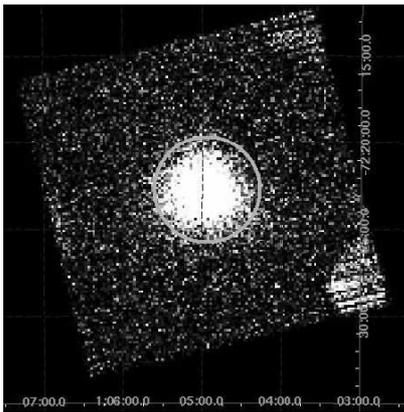


図 9 Suzaku 衛星 (XIS1) を用いて得られた超新星残骸 0103-72.6 のイメージ。

次に、モデルのパラメータに用いた値について述べる。ejecta 成分を示す電離非平衡モデルでは使用したエネルギー帯域内に輝線を持つ O、Ne、Mg、Si、Fe の元素存在比と温度 kT、電離度、ejecta 成分の放射量をフリーパラメータとした。ISM 成分を示す電離非平衡モデルでは O、Ne、Mg、Si、Fe の元素存在比、温度、電離度は Chandra 衛星で定義した純粋な shell から得られた値を用い固定した。また、ISM の放射量は Chandra で全体をフィッティングした時に得られた ejecta の 5.6 倍が ISM の放射量であるという結果を用いた。図 10 はスペクトル、表 4 はフィッティング結果を示している。

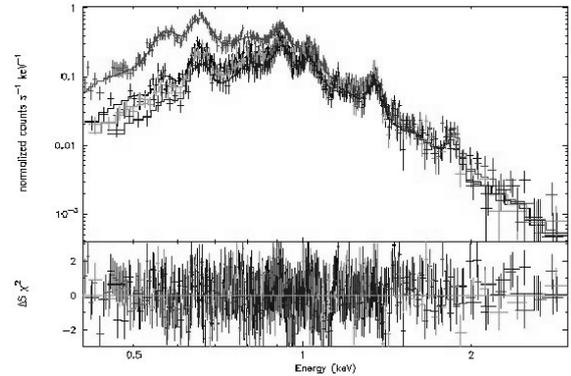


図 10 Suzaku 衛星を用いて得られた超新星残骸 0103-72.6 のスペクトル。黒は XIS0 に対するモデル、赤は XIS1、緑は XIS2、青は XIS3 をそれぞれ示す。

表 4 Suzaku を用いたスペクトルフィッティングの結果。

Parameter	純粋な shell
星間吸収量 nH (10^{22}cm^{-2})	$0.066^{+0.02}_{-0.01}$
温度 kT (keV)	$0.63^{+0.06}_{-0.06}$
電離度 ($10^{11} \text{cm}^{-3} \text{s}$)	$2.9^{+0.82}_{-0.67}$
O	$0.65^{+0.14}_{-0.10}$
Ne	$0.96^{+0.16}_{-0.13}$
Mg	$0.49^{+0.09}_{-0.09}$
Si	$0.24^{+0.10}_{-0.10}$
Fe	$0.14^{+0.06}_{-0.04}$

5. 解析結果と考察

5.1 ejecta 成分に対する考察

Suzaku 衛星を用いたスペクトル解析の結果、ejecta の温度は 0.63keV で、小マゼラン星雲の星間物質に対して元素組成比は O が 5.2 倍、Ne が 6.3 倍、Mg が 1.9 倍と大きな値を示した。一方、Si が 0.8 倍、Fe が 0.9 倍で小マゼラン星雲の元素とほぼ等しい元素量を示した。この ejecta の元素組成から重力崩壊型の超新星爆発であると推測でき、この結論はこれまでの過去の解析結果と一致する。また、この Suzaku 衛星の解析から得られたスペクトルフィッティングの結果は Chandra 衛星でのスペクトルフィッティングで得られた値に比べ、誤差範囲が O や Ne で 25% また、Mg、Si で 50% に狭まりより厳密な値であると言える。

次にスペクトル解析から得られた結果を基に ejecta

領域の物理量を求めた。算出した物理量は高温プラズマの密度や大きさの指標である Emission Measure(EM)、電子密度、爆発してからの経過時間であり、表 5 で示す。

表 5 Suzaku 衛星から得られた ejecta の物理量値。

Parameter	ejecta
EM (10^{58}cm^{-3})	4.71
電子密度(cm^{-3})	0.42
爆発後の経過時間(年)	21000

ejecta 成分のスペクトルフィッティングから母星の質量を計算する。母星自体の全質量を求めるには、理論計算から得られた O、Ne、Si、Fe の質量比と今回の観測結果から得られた質量比を比較する事で推測する。理論計算から得られた値は表 6 の 13-40 太陽質量の行の値であり、今回の観測結果から得られた値は表 6 の観測結果の行である。理論値と今回の結果を比較すると、 $M_{\text{O}}/M_{\text{Si}}$ を除いて 15-18 太陽質量でよく一致する。この結果より、超新星残骸 0103-72.6 の母星の総質量は 15-18 太陽質量程度であったという結論が得られた。

表 6 ejecta の質量比の観測結果と理論値

	$M_{\text{O}}/M_{\text{Si}}$	$M_{\text{O}}/M_{\text{Fe}}$	$M_{\text{O}}/M_{\text{Ne}}$	$M_{\text{Si}}/M_{\text{Fe}}$
観測結果	7.5	5.2	2.4	0.7
13 太陽質量	2.3	1.0	6.7	0.4
15 太陽質量	5.0	2.5	17	0.5
18 太陽質量	9.1	10.5	4.9	1.1
20 太陽質量	17	20	6.5	1.2
25 太陽質量	29	57	5.0	2.0
40 太陽質量	21	121	14	5.7

5.2 ISM 成分に対する考察

Chandra 衛星を用いた解析により、ISM 成分のみを含む純粋な shell 領域が定義された。この領域で見積もられた ISM 成分の小マゼラン星雲の星間物質に対する元素組成比は O が 0.33 倍、Ne が 0.44 倍、Mg が 0.31 倍、Si が 0.70 倍、Fe が 0.56 倍という値が得られ小マゼラン星雲の元素に対して若干少ない元素量を示した。Suzaku 衛星と Chandra 衛星を用いたス

ペクトル解析の結果から ejecta 成分と同様にして ISM 成分の EM、電子密度をそれぞれ求めた。最後に、掃き集められた ISM の質量を見積もった結果、約 200 太陽質量が掃き集められていると見積もる事ができた。

6. まとめ

Suzaku 衛星を用いた超新星残骸 0103-72.6 の ejecta 成分の解析から、小マゼラン星雲の星間物質に対して元素組成比は O が 5.2 倍、Ne が 6.3 倍、Mg が 1.9 倍と大きな値を示した。一方、Si が 0.8 倍、Fe が 0.9 倍で小マゼラン星雲の元素とほぼ等しい元素量を示した。このような ejecta の元素組成から重力崩壊型の超新星爆発であると推測でき、この結論はこれまでの過去の解析結果と一致するという結果が得られた。また、超新星残骸 0103-72.6 は爆発してから約 21000 年経過している事が分かった。さらに、母星の総質量は 15-18 太陽質量であると見積もられた。

Chandra 衛星を用いた解析により、ISM 成分のみを含む純粋な shell 領域が定義された。この領域で見積もられた ISM 成分の小マゼラン星雲の星間物質に対する元素組成比は O が 0.33 倍、Ne が 0.44 倍、Mg が 0.31 倍、Si が 0.70 倍、Fe が 0.56 倍という値が得られ小マゼラン星雲の元素に対して若干少ない元素量を示した。また、掃き集められた ISM の総量は 200 太陽質量であると見積もられた。

参考文献

- 1) 小山 勝二, 1992 年, 「X線で探る宇宙」, 培風館
- 2) 坂下 志郎, 池内 了, 1996 年, 「宇宙流体力学」, 培風館
- 3) Seward, F.D., & Mitchell, M. 1980, Apj, 243
- 4) Inoue, H., Koyama, K., Tanaka, Y. 1983, IAU, 101
- 5) Yokogawa, J., Imanishi, K., Koyama, K., Nishiuchi, M., Mizuno, N. 2002, PASJ, 54, 53
- 6) Russell, S.C., Dopita, M.A., 1992 Apj, 384, 508
- 7) Park, S., Hughes, J.P., Burrows, D.N., Slane, P.O., Nousek, J.A., & Gamire, G.P. 2003, ApJ, L95
- 8) ISAS/JAXA, NASA/GSFC, The Suzaku Technical Description
- 9) 「すざく」ヘルプデスク, 2007, 「すざく」ファーストステップマニュアル

10) The Chandra Proposers' Observatory Guide
(http://cxc.harvard.edu/proposer/POG/pog_pdf.html)

11) Anders,E., & Grevesse,N., 1989,
Geochim. Cosmochim. Acta,53,197