

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### The effect of interaction with the interstellar medium on the over-ionisation of plasma in evolved supernovae remnants (進化した超新星残骸における過電離プラズマの 形成過程への星間環境の影響)

氏名 桂川 美穂

大質量星の爆発である超新星は宇宙に存在する鉄までの重元素の起源と考えられており、その残骸である超新星残骸 (Supernova remnant: SNR) は、超新星爆発が周辺環境へエネルギーと物質を供給する過程である。そのため、SNR は銀河宇宙の物理的および化学的進化を駆動する重要な宇宙の構成要素と言える。SNRは爆発時に解放される約 $10^{51}$  erg のエネルギーを様々な波長で放出するため多波長での観測が必要であり、X線観測によるプラズマの熱的放射からは電子の温度だけでなく元素の元素組成や電離状態など多くの情報を得ることができる。一般的な SNR の進化では、親星から噴出した物質 (イジェクタ) が自由膨張の後、星間物質 (Inter Stellar Matter: ISM) を掃き集めて衝撃波を形成しながら膨張し (断熱膨張期)、次第に放射冷却の影響を強く受ける (放射冷却期)。加熱された SNR のプラズマは、電離平衡へ向けて徐々に電離が進行し、SNR は電波とX線の両方でシェル状に観測される。しかし、SNR の中には電波とX線で異なる放射構造をもつ Mixed-Morphology (MM) 型のような特異な SNR が存在し、近年の X 線観測からいくつかの MM SNR では、電離よりも再結合が優勢な過電離プラズマが確認されている。その多くは近傍に分子雲や原子雲の存在が確認されているため、SNR の進化や構造形成には周辺ガス環境が深く関わっていると考えられる。しかし、その進化機構の詳細は明らかにされていない。

これらを明らかにするには、周辺環境と SNR の進化の関係を定量的に評価する必要がある。しかし、実際に観測によって過電離プラズマが報告されている SNR は十数個と少ない。また、現在の X 線スペクトル解析で使用されているプラズマモデルは温度の時間発展が考慮されておらず、プラズマからの放射を再現するには不十分である。一方で、SNR の温度や電離度の時間発展を数値計算する理論的研究はすでに行われており、断熱膨張期にある年齢が数百年程度の SNR を対象に、X 線スペクトルの

鉄輝線の中心エネルギーを用いて1次元数値流体計算と観測との比較が行われてきた。しかし、過電離プラズマが発見されたSNRは放射冷却期と考えられ、断熱膨張期期では影響が少なかった放射冷却の効果を考慮した年齢数万程度程度のSNRの数値計算が必要となる。

本研究では、高いX線観測感度をもつ「すぎく」衛星を用いてMM SNRの一つであるCTB 1の解析を行い、原子雲が付随するCTB 1の南西領域は過電離プラズマであることがわかった。また、我々は、プラズマの時間発展を考慮した放射冷却期のSNRの1次元数値流体計算を行い、時間進化する温度や電離度からスペクトルやイメージを生成することで、観測のスペクトルやイメージと直接比較し、周辺ガス環境がSNRのプラズマ状態にどのような影響を与えているかを調べることができる枠組みを構築した。

## 1) CTB 1の観測と過電離プラズマの研究 (Chapter 4)

CTB 1は、9千から4万年の年齢と推定されている銀河中心の反対側に存在するMM SNRである。CTB 1は、南西方向にSNRに付随する原子雲が存在し、北東方向に衝撃波が突き抜けたような特異な構造を持つ。これまでのX線衛星の観測からは、プラズマは電離平衡状態であると報告されている。

「すぎく」衛星のスペクトルを解析することで、原子雲の存在が確認されていない北東領域は、先行研究と同様に電離平衡の状態であることがわかった。一方で、原子雲が付随する南西領域のプラズマは過電離状態であることがわかった。我々は、電離平衡を仮定したプラズマモデルをスペクトルに適用したところ、残差の1.23 keVと1.45 keVに山形の構造を見つけた(図1、矢印)。この二つの構造は、8階電離と9階電離のネオンに落ち込む電子からの放射再結合に伴う連続スペクトル成分(Radiative Recombination Continuum: RRC)であり、これはCTB 1の南西方向のプラズマが過電離状態にあるという証拠である。この南西領域には付随する原子雲があることから、過電離プラズマの生成起源としては冷たい原子雲との熱伝導によるプラズマの冷却が考えられる。本結果は、過電離プラズマの空間分布と原子雲との関係を示した初めての結果である(Katsuragawa et al. 2018)。

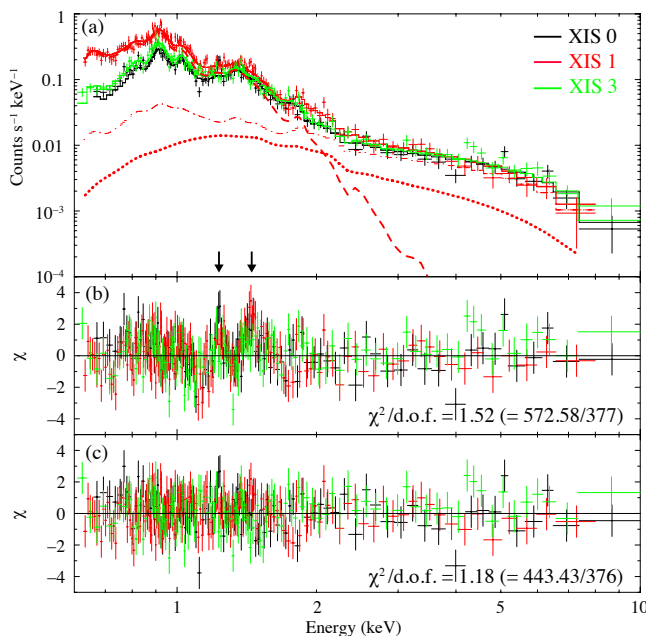


図1: Suzaku XIS 0 (黒)、1 (赤)、3 (緑)のCTB1 SWのスペクトルとモデルとの残差。(a)の破線、点線、一点鎖線は、プラズマモデルVRNEIとべき関数、バックグラウンド成分を示している。(b)は電離平衡状態を仮定したAPECを用いたモデル、(c)は過電離状態を仮定したVRNEIモデルを使用している。二つの矢印はそれぞれ1.23 keVと1.45 keVを示す。

## 2) プラズマの時間発展を考慮した数値流体計算に基づく解析手法の開発 (Chapter 5)

周辺環境と相互作用するプラズマの時間発展を考慮した解析を行うため、1次元の数値流体計算を用いて年齢数万程度のSNRから観測されるスペクトルとイメージを作成する枠組みを開発した。我々の

コードは、これまでは考慮されていなかった放射冷却を取り入れることで、数万年の SNR まで対応した新たな数値計算を行なっている。開発した枠組みは、流体計算を基本として SNR のプラズマの物理・化学状態の時間発展を記述した数値流体計算コードと、数値流体計算から得られた結果にイオンから放射されるエネルギーとその放射率を適用することで X 線スペクトルとイメージを生成するコードの二つから構成されている。本研究では、周辺環境の変数を ISM の密度として計算を行った。

X 線のスペクトルは、主に電子温度と各イオンの分配比から形状が決まるため、数値流体計算コードでは、電子温度と電子・イオンの密度、イオンの電離状態の時間発展を計算した。また、流体計算には、場ではなく流体要素の運動に着目するラグランジアン法を採用することで、格子内の物質を保存させたまま、数値計算の全時間にわたって、初期状態の各流体要素がどのように運動し物理状態を変えていくかを追跡することが可能である。計算に取り入れた物理過程は、衝撃波加熱、クーロン相互作用による電子-陽子間のエネルギー交換、放射冷却、温度依存する電離確率と再結合確率からの電離度の計算である。スペクトル生成コードでは、電子温度、電子・イオンの密度、イオンの分配比からプラズマの局所的な放射スペクトルを計算することができる。

### 3) ISMの密度変化がプラズマの電離状態に与える影響の評価 (Chapter 6)

我々は、開発したコードを用いて実際の ISM の密度が電子温度や電離度にどのような影響を与えるのか調べた。電離度の指標には、14 階電離と 15 階電離の硫黄の存在比から求めた電離温度を用いた。電離温度 ( $T_Z$ ) は、電離平衡を仮定した時にその電離度を実現し得る電子温度であり、過電離かどうかを電子温度 ( $T_e$ ) と直接比較して判断することができる (電離進行状態:  $T_Z < T_e$ 、過電離状態:  $T_Z > T_e$ 、電離平衡状態:  $T_Z = T_e$ )。硫黄は多くの過電離プラズマのスペクトルで輝線が確認されており、14 階電離と 15 階電離の硫黄は電離平衡状態で 2 keV 付近に多く存在するため、0.1-10 keV 程度の電離温度の時間変化を調べるのに適している。

ISM の密度を 1, 3, 10, 30  $\text{cm}^{-3}$  と変化させて数値計算を行なった結果、どの密度でも衝撃波加熱後から徐々に電離が進み、数千から数万年経過すると過電離の傾向を示す (図 2)。さらに、ISM が高密度である程、早く過電離の状態へ推移することがわかった。また、高密度な ISM 中で爆発した SNR の方が電子温度と電離温度は高くなり、冷えるのも早いことがわかった。これは、高密度の ISM で衝撃波通過後の密度も高くなりクーロン相互作用による電子温度上昇が激しいことと、衝撃波が早く減速することで衝撃波に加熱された電子の温度が低いことが原因である。

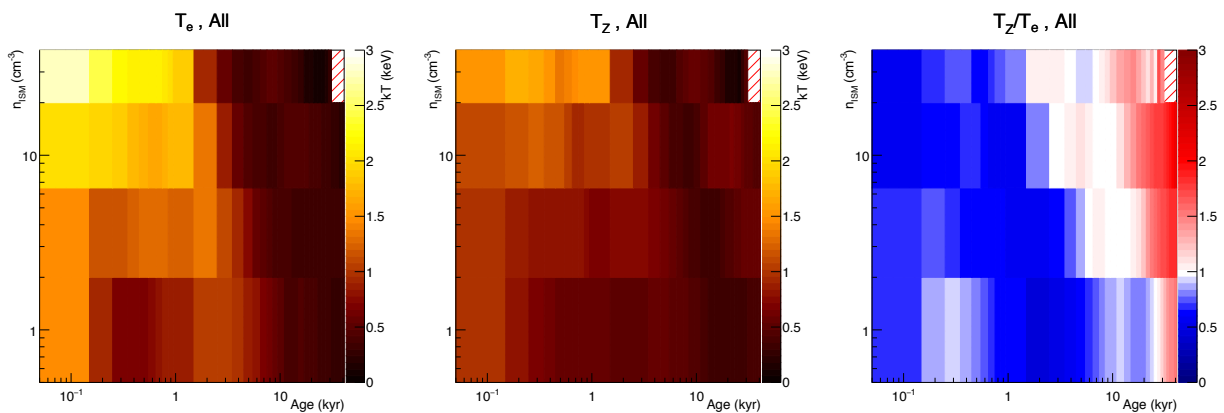


図 2: シミュレーションから得られた  $T_e$  (左) と  $T_Z$  (中央)、 $T_Z/T_e$  (右) の時間進化。それぞれの温度は、0.5–10 keV の X 線の光子数によって重み付けされた SNR 全体の平均値。縦軸は ISM の密度を表す。

#### 4) 数値流体計算の結果と観測結果の比較 (Chapter 7)

数値流体計算の結果から、ISMの密度が高ければ数万年後にはSNRのプラズマは過電離状態になることがわかった。我々は、これらの結果と実際に過電離プラズマの存在が報告されているSNRの観測との比較を行った。観測のスペクトル解析から得られた過電離プラズマの元素組成はISMとは異なり、観測された過電離プラズマはイジェクタ由来であると考えられるため、我々は、数値計算のイジェクタ成分の電子温度と電離温度に着目した。観測された電離温度（赤点）は数値計算のイジェクタ成分の電離温度（赤破線）付近に分布しており、電子温度（青点、青破線）は電離温度よりも低い結果を得た。我々は、ショック加熱、断熱冷却、放射冷却、イオン・電子相互作用といったよくわかっているエネルギーの取り扱いだけで、定性的に観測の傾向を説明することができた。しかし、電子温度（青点）は数値計算の結果（青破線）よりも低くなっている天体が多く、まだ考慮していない冷却機構によって実際の電子はさらに冷やされていると考えられる。それは、例えば熱伝導による電子冷却である。プラズマ中の濃密で冷たい領域への熱伝導によってイジェクタの電子温度はさらに低下すると考えられる。

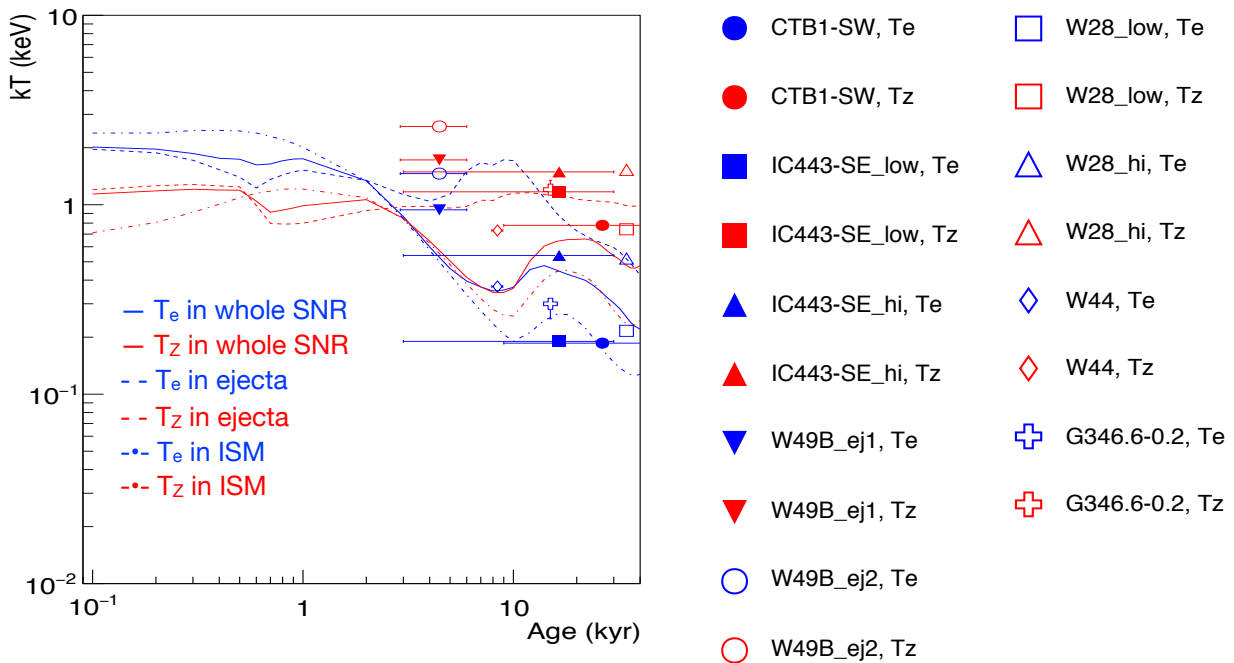


図3：ISM密度が  $10 \text{ cm}^{-3}$  のシミュレーションから得られた電子温度（青）と電離温度（赤）の時間進化。データ点は、X線観測から見積もられた過電離プラズマの電子温度（青点）と電離温度（赤点）。

#### 5) まとめ

我々はCTB1のX線スペクトルの解析を行い、原子雲が付随している南西領域は過電離プラズマであることがわかった。また、新しく放射冷却を取り入れた1次元数値流体計算を用いて放射冷却期にあるSNRのプラズマの電子温度や電子・イオンの密度、イオンの電離状態の時間発展を計算し、X線スペクトルを生成する枠組みを開発した。さらに、観測から求められた過電離プラズマの電子温度と電離温度を数値計算の結果と比較することで、定性的に観測の傾向を説明することができた。一方で、観測されている電子温度を説明するにはさらに電子を冷却する必要がある。その可能性として、熱伝導などまだ考慮していない冷却機構が考えられる。