

論文の内容の要旨

論文題目

Suzaku Studies of Supernova Remnants Hosting Non-Rotation-Powered Neutron Stars

(非回転駆動型の中性子星をもつ超新星残骸の「すざく」による研究)

中野 俊男

1 研究の背景

大質量星がその最期に起こす重力崩壊は、超新星 (SN) 爆発を引き起こし $\sim 10^{53}$ erg もの膨大な重力エネルギーを解放する。解放されたエネルギーの多くはニュートリノにより持ち去られ、残り数パーセントにあたる $\sim 10^{51}$ erg が超新星残骸 (SNR) に与えられる。また同時に、熱や磁場、回転エネルギーとして中性子星 (NS) にも蓄えられる。SNR は星間物質を取り込みながら成長し、衝撃波や放射、粒子加速を介して徐々にエネルギーを失う。他方で NS は、熱的放射、磁気双極子放射、重力波放射、粒子加速、磁場散逸といった、タイムスケールの異なる様々なメカニズムで、その内部に蓄えられたエネルギーを解放する。このように SNR と NS はともに、高エネルギー天体現象において重要な役割を果たす。

NS の典型例である電波パルサーが回転エネルギーを利用して活動するのに対し、それらを活動源としない、非回転駆動型の NS の発見数が、2000 年代になり急速に伸びている。これら新たな種類の発見により、NS が、われわれの想像以上に多様であることが明らかになってきた。この多様な性質を決定する重要な働きを成すのが、NS の持つ磁場であると考えられる。電波パルサーの 2 桁も上の、 10^{14-15} G にもなる超強力な磁場を持つと考えられる NS、『マグネター』は、その強力な磁場に蓄えられた膨大なエネルギーを解放することによって、主に X 線で輝くと考えられ、磁気駆動型 NS の代表的な存在である。

電波パルサーと同様に、非回転駆動 NS も SN 爆発で作られると考えられ、実際に SNR を伴うマグネターなどが発見されている。しかし SN 爆発のどのような違いが、回転駆動 NS とそうでない NS の区別を生むかは、未解決問題である。この問題を解くには、NS よりも寿命が短く、爆発の初期条件をより良く保存すると考えられる、SNR の観測が有力な手段となる。

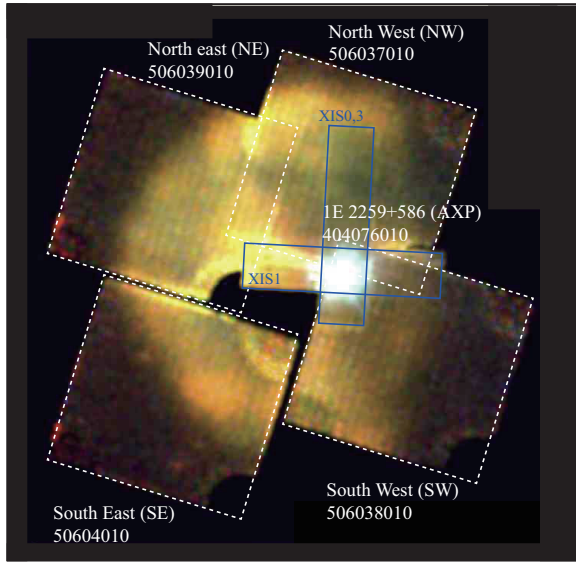


図 1: 「すざく」XIS により得られた SNR CTB 109 の疑似カラー X 線イメージ。各色は(赤) 0.4-1.1 keV、(緑) 1.1-1.7 keV、(青) 1.7-4.0 keV の X 線を示す。

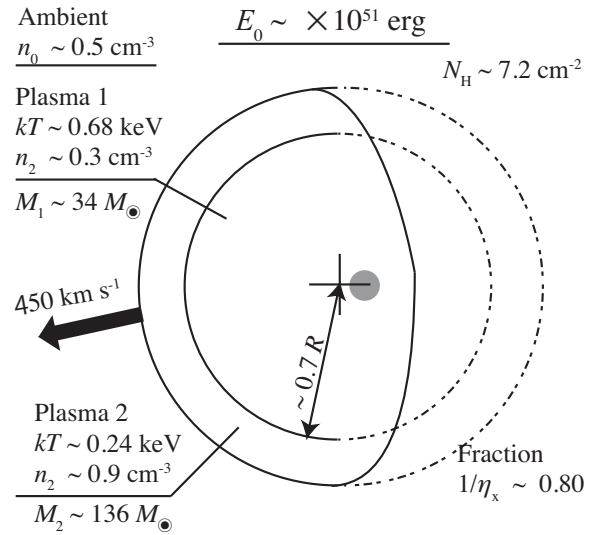


図 2: データ解析によって得られた CTB 109 の模式図。

2 研究方法

マグネターの誕生シナリオを解明するために、我々は2つの方法を採用した。1つ目は、これまで独立に研究されることが多かった NS と SNR を包括的に研究すること、もう1つは、SNR の研究手段として、広がった軟 X 線源の撮像分光に適した「すざく」衛星の XIS (XIS0, 1, 3) 装置を用いることである。

我々はマグネター 1E 2259+586 とそれに付随する SNR CTB 109 を、この目的に最適な天体として選択し「すざく」による観測を行った。CTB 109 は隣接する分子雲のために特徴的な半月状をした SNR で、1E 2259+586 の図 1 にあるように、二度に渡る観測によってその西側境界を含む、SNR のほぼ全体がカバーされた。1E 2259+586 と CTB 109 が関連していることは、この図からも強く示唆されるが、一方で 1E 2259+586 の特性年齢 (23 万年) は CTB 109 の推定年齢 (~1 万年) より 10-20 倍も長いことが知られている。そこで分子雲との衝突の詳細や、この年齢齟齬の原因解明を目的にデータ解析を行った。

3 データ解析と結果

「すざく」XIS により得られたデータの詳細な X 線スペクトル解析 (図 3) を行い、CTB 109 が、主に温度の異なる 2 成分のプラズマで構成されていることを再確認し (先行研究, Sasaki et al 2013)、これらプラズマの温度、電離状態、元素組成をそれぞれ求めることに成功した。さらに撮像分光性能を活かし、両成分の空間分布から、温度およそ 0.24 keV の低温プラズマによって形成されたシェルに、0.59 keV の高温プラズマが閉じ込められた、図 2 のような典型的な SNR の構造を成していることが分かった。これにより、外殻をなす低温成分は衝撃波によって掃き集められ加熱された星間物質であり、その内部に存在する高温成分が親星の残骸であると同定された。

CTB 109 の西側の欠けた領域を詳しく調べたところ、南西の領域 (図 1 の SW) で表面輝度が階段状に変化している筋状の構造があることが分かった。またこの構造の東から西で、X 線輝度がおよそ半分にまで減少するのに対し、スペクトルにかかる吸収量はほとんど変化しない。これらにより分子雲は CTB 109 の視線上ではなく、むしろ CTB 109 の西側背後から食い込むように存在しており、過去に SNR 衝撃波とこの分子雲が衝突したために、SNR が現在のような半月状をしているのだと考えられる。

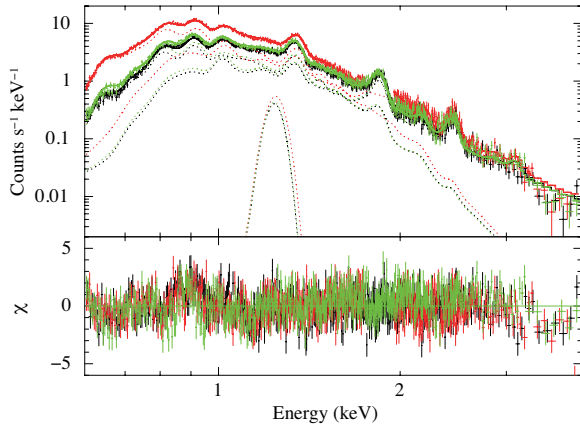


図 3: 「すざく」XIS によって得られた、CTB 109 の X 線スペクトル。黒は XIS0、赤は XIS1、緑は XIS3 によるスペクトル。実線はプラズマモデルによるフィッティング、点線は低温成分による寄与を示す。

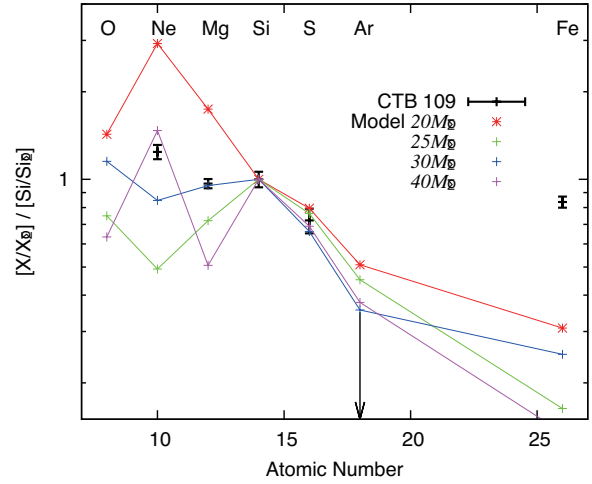


図 4: CTB 109 の元素組成と、モデル計算 (Nomoto et al 2006) との比較。(黒) は CTB109 のスペクトル解析より得られた組成。赤および緑、青、紫はそれぞれ、親星質量を 20, 25, 30, 40 M_{\odot} とした場合のモデル計算を示す。

スペクトル解析で得られたプラズマ 2 成分の、強度比と温度比の組み合わせから、圧力平衡の仮定のもとに両成分の体積比を推定すると、高温成分と低温成分でその比はおおよそ 43:57 となった。距離 3.2kpc とおおよそ 2 割の欠損した球殻の SNR 構造を仮定すると、プラズマの平均密度は、低温成分が $0.9 m_p \text{ cm}^{-3}$ と高温成分が $0.3 m_p \text{ cm}^{-3}$ と求まった (m_p : 陽子質量)。また、両成分の総質量は、低温成分が $140 \pm 30 M_{\odot}$ 、高温成分が $39 \pm 7 M_{\odot}$ と推定された。内側にある高温成分の質量は、親星の質量を反映していると考えられるので、マグネター 1E 2259+586 はひじょうに大質量の親星の超新星爆発から生まれたと考えられる。また、図 3 のように CTB 109 のスペクトルから Ne、Mg、Si、S からの輝線を検出した。これらの組成比を、図 4 のように元素合成の理論モデルと比較したところ、親星質量が 30、40 M_{\odot} のモデル予想に近いことが分かった。これは、親星の総質量 $\sim 39 M_{\odot}$ という推定とも合致する。

CTB 109 のシェルを成す低温成分の総質量は、高温成分の総質量の 3 ～ 4 倍あるため、CTB 109 は現在、Sedov-断熱膨張期にあると予想され、その衝撃波速度は、加熱された低温成分の温度からおおよそ 450 km s^{-1} と計算された。この膨張速度と SNR 半径から CTB 109 の年齢はおおよそ 1.3 万年と推定される。SNR の膨張を考慮し高温成分の電離の進行度から年齢を推定すると、先の結果と無矛盾な結果となり、独立な検証ができた。また Sedov 相似解を用いて爆発のエネルギーは、 $0.7 \times 10^{51} \text{ erg}$ であったと計算され、先行研究 (Sasaki et al. 2013) を支持する結果を得た。この爆発のエネルギーは重力崩壊型超新星の典型的な値で、高速回転する原始マグネターで期待される爆発エネルギーの過剰性は見受けられなかった。

これらの結果を考慮すると、マグネター 1E 2259+586 の親星は質量 $\sim 39 M_{\odot}$ のひじょうに大きな星で、強磁場 NS を残したものの、その超新星の規模は爆発エネルギー $0.7 \times 10^{51} \text{ erg}$ と、重力崩壊として典型的なものであったと推定される。

4 考察と議論

SNR CTB 109 の解析から、マグネター 1E 2259+586 を残した SN は、かなり大質量の親星が起こしたものであると同時に、その爆発エネルギーは、重力崩壊型として典型的であることが分かった。一方で、CTB 109 の推定年齢 1 万年と、1E 2259+586 の自転周期とその変化率から逆算される特性年齢 23 万年 ($\propto P/\dot{P}$) との間で、10～20 倍の不一致があることが再確認された。SNR が 23 万年ものあいだ X 線で輝き続けることはひじょうに難しいため、1E 2259+586 の特性年齢が過大に評価されていると考えられる。こうした特性年

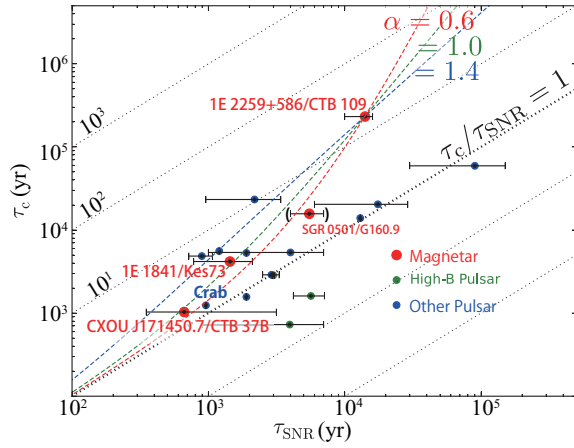


図 5: マグネターを含む、中性子星の特性年齢 (縦軸) と付随する SNR の年齢 (横軸) の比較。(赤) はマグネター/SNR のデータを、その他 (緑と青) は回転駆動中性子星/SNR のデータを示す。(緑) と (青) はそれぞれ、やや磁場の強い中性子星と電波パルサーを示す。

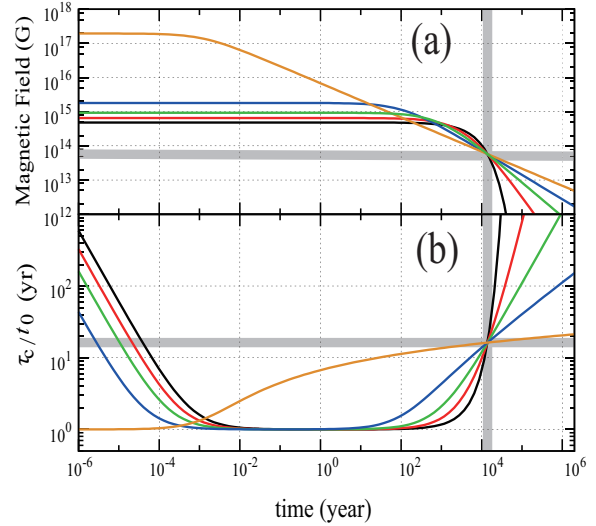


図 6: マグネター磁場の減衰と、それによる特性年齢の過大性のモデル計算。(a) は様々な崩壊指数 α (黒から橙に向けて $\alpha=0, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0$) を用いた磁場の進化、(b) は特性年齢の実年齢に対する比。各曲線は、1E 2259+586 の特性年齢と CTB 109 の推定年齢 (\sim 実年齢) を同時に再現する解となっている。

年齢の過大性が、マグネター特有の事象なのか、それともひろく NS 一般で起きえることなのかを確かめるために、図 5 のように NS の特性年齢と付随する SNR の年齢を比較した。回転駆動 NS が SNR と良い年齢一致を示す一方で、マグネターでは年齢が進むにつれて、SNR 年齢に比べて特性年齢が大きくなる傾向があることが分かった。

特性年齢は中性子星年齢の指標として広く用いられているものの、磁場の変化を考慮されていない。そのため、電波パルサーのような一定磁場の回転駆動型 NS では良い年齢推定となるが、マグネターのような磁場を消費して輝く磁気駆動型 NS では、実年齢よりも系統的に大きく見積もられてしまう (Colpi et al. 2000)。そこで我々は、磁場強度の時間変化が $dB/dt \propto B^{1+\alpha}$ であらわされる、準ベキ型の磁場減衰モデルを用いて図 6 のように調べた。CTB 109 の推定年齢をこの系の実年齢と仮定した場合、1E 2259+586 の特性年齢の過大性を説明できる解を崩壊指数 α ごとに調べることで、磁場の減衰により年齢の不一致問題が解消されることが分かった。

マグネターの磁場が系統的に過大評価されているということは、逆にそれらが、これまでに考えられていたより若いことを示唆しており、SN 爆発においてマグネターのような非回転駆動 NS が作られる頻度も、従来の推定よりも高い可能性を示唆している。