

# ティコの超新星残骸で増光する構造を発見

## —加熱過程をリアルタイムで捉える—

### 概要

京都大学理学研究科 松田真宗 博士課程学生、内田裕之 同助教らの研究チームは、今年で爆発から 450 周年を迎える「ティコの超新星残骸」をチャンドラ X 線天文衛星で観測した結果、わずか数年で急速に増光・加熱する特異な構造を発見しました。

超新星爆発で生じた爆風（衝撃波）は、宇宙空間を膨張しながら周囲の星間ガスを加熱していきます。しかしながら、加熱の様子をリアルタイムで捉えることは難しく、銀河系内で直接の観測例はこれまでありませんでした。本研究チームは、ティコの超新星残骸が膨張する年単位の「動画」を解析することで、星間ガスが加熱されていく決定的瞬間を世界で初めて捉えることに成功しました。今回の研究により、星間ガスの温度が数年のうちに 1000 万度近くまで急上昇し、X 線を放出して明るく輝いていく様子が明らかになりました。この温度上昇から、この領域では、電子や陽子の衝突によるエネルギーの授受を経て加熱していることを観測的に実証しました。さらに詳細な数値計算と比較した結果、この領域では、電子や陽子が、衝突せずに電磁場を介してエネルギー交換を行う、「無衝突過程」による加熱も示唆されました。

本成果は、2022 年 11 月 25 日に国際学術誌「The Astrophysical Journal」にオンライン掲載されました。

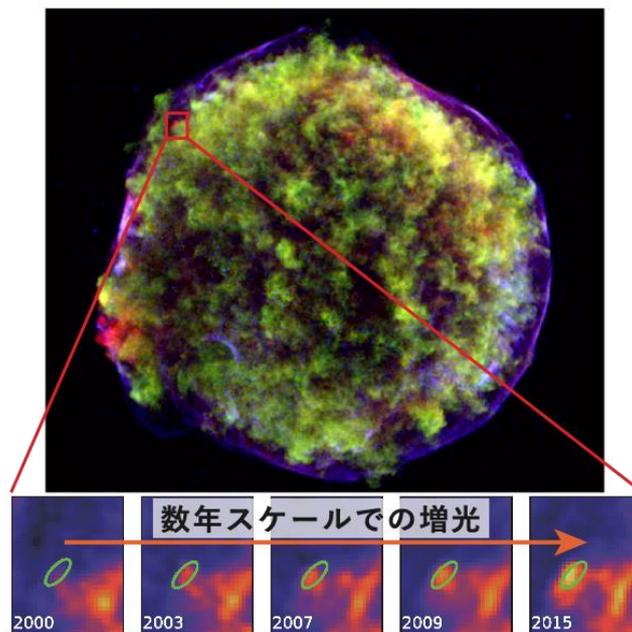


図 1：チャンドラ衛星で撮影されたティコの超新星残骸の X 線画像。下のパネルは赤い四角の領域の拡大図になっています。緑の楕円で囲まれた構造が年々明るくなっていることがわかります。

## 1. 背景

星が一生の最期に引き起こす超新星爆発は、宇宙空間に莫大なエネルギーを解放し、太陽の 1500 倍という高温（およそ 1000 万度）で輝く超新星残骸を形成します。そこには生命や次世代の星の素となる元素が大量に存在し、また高エネルギー宇宙線の生成現場と考えられています。しかし、一発の超新星爆発により絶対零度の星間ガスが数 1000 万度まで加熱するプロセスには不明な点が多く、全貌ははまだ明らかになっていません。鍵を握るのは衝撃波です。大気などガス中を伝播する密度や圧力の不連続面を「衝撃波」と呼びます。衝撃波は、今年 1 月に起きたトンガの大規模火山噴火でも発生しており、決して我々と縁遠いものではありません。超新星爆発で生じた衝撃波は、トンガで発生した衝撃波の数万倍（秒速 1 万～数千キロメートル）もの初速度で宇宙空間に広がっていきます。この衝撃波の莫大なエネルギーが、星間ガスを高温に加熱するわけです。しかし、遠方の超新星残骸から微小な加熱の瞬間を捉えることは非常に難しく、これまで直接の観測例はありませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究チームが注目したのは、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが 1572 年に観測した超新星爆発の痕跡、ティコの超新星残骸<sup>\*1</sup>です。我々は、チャンドラ衛星<sup>\*3</sup>が 2000 年、2003 年、2007 年、2009 年、2015 年に観測したティコの超新星残骸の X 線データを解析しました。この天体は地球から 8000 光年と比較的近くに位置する超新星残骸で、画像を時系列に並べて「動画」にすると、衝撃波が宇宙空間を膨張する様子が手に取るようにわかります。この「動画」から、北東部のある領域で、X 線が急増光する構造を発見しました（図 1）。爆発から数百年が経過した現在でもこのような年単位の変動が見つかることは珍しく、たいへん稀な現象です。

X 線スペクトル解析やハッブル宇宙望遠鏡の可視光画像との比較から、この領域にはもともと濃い星間ガスが存在し、最近そこに超新星残骸の衝撃波が突入して数年で加熱が一気に進んだことを突き止めました（図 2）。このような明らかな温度上昇は銀河系内の超新星残骸で初の発見です。温度変化のタイムスケールから、ガス粒子同士が衝突して（熱）エネルギー交換が行われているまさにその最中を観測していることがわかりました。また、詳しい数値計算と比較した結果、衝撃波加熱の瞬間に「無衝突」加熱も示唆されました。真空に近い希薄な宇宙空間では、衝撃波とガスがぶつかる瞬間、電場や磁場のような遠隔作用を介した「無衝突」と呼ばれるプロセスでエネルギーのやりとりが行われます。今回の研究により、超新星残骸の衝撃波で「無衝突」加熱が起きている可能性を示し、さらにその加熱効率を観測的に制限することに成功しました。

## 3. 波及効果、今後の予定

無衝突衝撃波は、近傍では太陽風、遠方ではガンマ線バースト、衝突銀河団など、宇宙のさまざまな場所で起きうる普遍的な現象です。また無衝突過程は衝撃波の加熱メカニズムだけでなく、高エネルギー宇宙線の加速効率とも密接に関わると考えられています。今回の発見は、超新星爆発に限らず広く一般に天体の高エネルギー

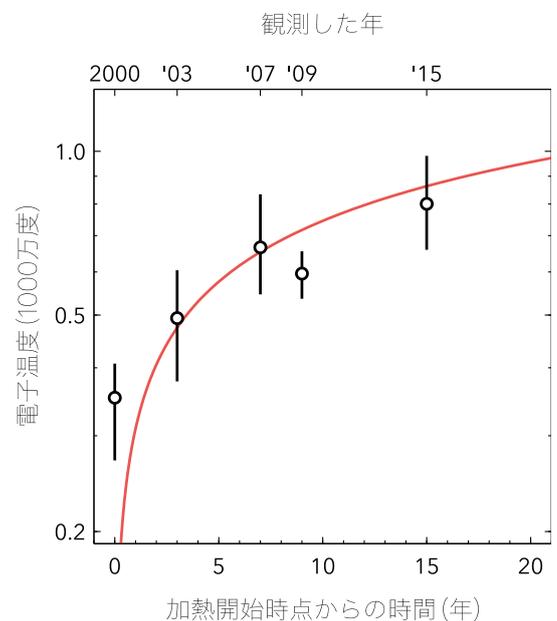


図 2：X 線観測から得られた電子温度変化（プロット点）と数値計算から得られた電子温度変化（曲線）。

ギー活動が宇宙空間に及ぼす影響について、粒子がエネルギーを得る一番初期の段階という観点から解き明かすものです。

本研究は衝撃波によって電子が熱化するプロセスを捉えました。星間ガスに含まれる粒子のうち、残りの組成はイオンです。イオンの温度変化を捉えるには、全く異なる研究手法が必要です。これを実現するのが、来年度に日本が打ち上げを予定し、本研究チームも開発に携わる X 線天文衛星 XRISM です。XRISM は CCD 検出器を遥かに凌ぐ分光性能を持っており、イオンの熱運動のドップラー遷移を検出することで、元素ごとの温度測定を可能にします。これを実現させることで、今後は全粒子の熱化過程を明らかにし、無衝突衝撃波におけるエネルギー交換機構の全貌に迫っていきたいと考えています。

#### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記メンバーによって構成されるチームによって実施しました。

- 松田真宗（京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 博士学生）
- 内田裕之（京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 助教）
- 田中孝明（甲南大学 理工学部 物理学科 准教授）
- 山口弘悦（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 准教授）
- 鶴剛（京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 教授）

本研究は JSPS 科研費 JP21J20027, JP19K03915, JP22H01265, JP19H01936, JP22K18721, JP22H04572, JP21H04493 の助成を受けたものです。

#### <用語解説>

※1 **超新星残骸**：恒星が超新星爆発を起こした後の残骸。爆発によって発生した衝撃波が物質を加熱することで、数 1000 万度の高温プラズマとなり X 線を放射する。

※2 **シンクロトロン放射**：光に近い速さで飛ぶ荷電粒子（主に電子）が磁場で曲げられる際に放出される電磁波。超新星残骸では衝撃波で加速された電子から放出される。

※3 **チャンドラ衛星**：1999 年 7 月 23 日に NASA によって打ち上げられた X 線天文衛星。現行の X 線天文衛星で最も優れた角度分解能を誇り、天体の鮮明な画像を撮影できる。

#### <研究者のコメント>

##### 松田真宗 博士課程学生：

ティコの超新星残骸は既に爆発から 450 年経過しています。そのような天体が、今なお数年スケールの変化を見せていることに超新星爆発のエネルギー現象の莫大さを実感するとともに、そのような変化を発見できたことに感激しています。

##### 内田裕之 助教：

ティコ・ブラーエは、この超新星の観測から、宇宙が不変であるという古来よりの概念を打ち破りました。同じ天体から、450 年後の私たちが、不変どころか激動する宇宙の姿を目の当たりにできたことに感慨を覚えます。

**<論文タイトルと著者>**

タイトル：Discovery of Year-Scale Time Variability from Thermal X-ray Emission in Tycho's Supernova  
Remnant (ティコの超新星残骸における熱的 X 線放射の数年スケールでの変動)

著者：松田真宗、内田裕之、田中孝明、山口弘悦、鶴剛

掲載誌：The Astrophysical Journal

DOI：10.3847/1538-4357/ac94cf