

ティコの超新星残骸の衝撃波の急激な減速を発見

—Ia型超新星の爆発メカニズムに迫る—

概要

京都大学大学院理学研究科 田中孝明 助教らの研究チームは、1572年に起こったIa型超新星の残骸である「ティコの超新星残骸」の衝撃波の膨張が、予想を遥かに上回るペースで減速していることを発見しました。

Ia型超新星は、宇宙論研究において距離測定のための標準光源として用いられています。また、宇宙の重元素合成の主要な現場の一つとしても知られています。しかしながら、その爆発機構については、論争が続いており、宇宙物理学の重要課題の一つに挙げられています。研究チームは、米国のX線天文衛星チャンドラによって2003年、2007年、2009年、2015年に得られた観測データを解析することで、膨張の急激な減速を発見しました。これは、密度の低い空洞を進んでいた衝撃波が、最近になって密度の高いガスの壁と衝突したと考ええると、うまく説明できます。Ia型超新星については、白色矮星と恒星による連星系が引き起こすという説と、白色矮星同士の連星系が引き起こすという説がありますが、本結果は、このうち前者を支持するものです。

本成果は、2021年1月7日に米国の国際学術誌「The Astrophysical Journal Letters」にオンライン掲載されました。

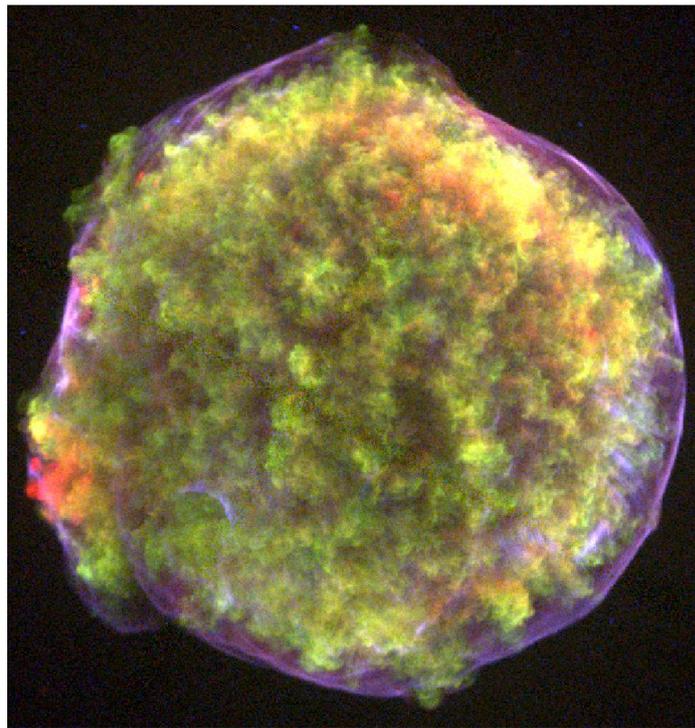


図 1: チャンドラ衛星によって得られたティコの超新星残骸のX線画像。青色に見える外縁部の細い筋が衝撃波に対応します。今回、その膨張が急激に減速していることを発見しました。

1. 背景

Ia型超新星爆発は、白色矮星と呼ばれる高密度の星が引き起こす宇宙の大爆発です。その明るさから、宇宙論の研究において距離を測定する標準光源として用いられることでも有名です。2011年のノーベル物理学賞は、まさに、その手法を用いて得られた成果です。また、Ia型超新星爆発は、宇宙に存在する鉄などの重元素の主要起源としても重要です。しかしながら、白色矮星がどのように超新星爆発に至るのかについては、未だに論争が続いており、宇宙物理学分野の重要課題の一つです。大別すると二つの説があります。一つは白色矮星と恒星の連星系が爆発を引き起こすというものです。この説では、白色矮星に恒星からのガスが降り積もることで、限界質量(チャンドラセカール質量)に近づき、暴走的な核融合が始まり爆発するというものです。もう一つの説は、連星系をなす二つの白色矮星同士が合体して爆発を起こすというものです。

2. 研究手法・成果

本研究が対象とした天体は、カシオペア座の方向で1572年に起こったIa型超新星の残骸です(図1)。当時、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが観測を行ったことにちなみ、「ティコの超新星残骸」と呼ばれています。我々は、米国が打ち上げたX線天文衛星チャンドラ(Chandra)によって、2003年、2007年、2009年、2015年に取得されたティコの超新星残骸の観測データの解析を行いました。超新星爆発によって音速を超えた速度で噴出物が飛び出したために生成された衝撃波は、爆発後、約450年経った現在も膨張し続けています。我々は、その衝撃波の膨張速度を精密に測定しました。その結果、膨張速度が最近になって急激に減速していることを発見しました(図2)。

数値計算を行い、データと比較してみたところ、観測されたような減速は、これまで密度の低い空間を進んでいた衝撃波が、密度の高いガスの壁のような構造に衝突したと考ええると、うまく説明できることがわかりました。この結果から、ティコ・ブラーエが観測した超新星は、濃いガスに囲まれた空洞の中で起こったと考えられます。この空洞は、爆発前の親星の活動によって作られたはずですが、Ia型超新星を白色矮星と恒星の連星系が引き起こすという説においては、東京大学(当時)の蜂巢氏らによって、ガスが降り積もる白色矮星の表面から高速の風が吹くと提唱されています。この風によって空洞が作られたと考ええると、我々の観測結果と合致することがわかりました。つまり、今回の結果は、ティコの超新星は白色矮星と恒星の連星系が引き起こしたという説を強く支持するのです。

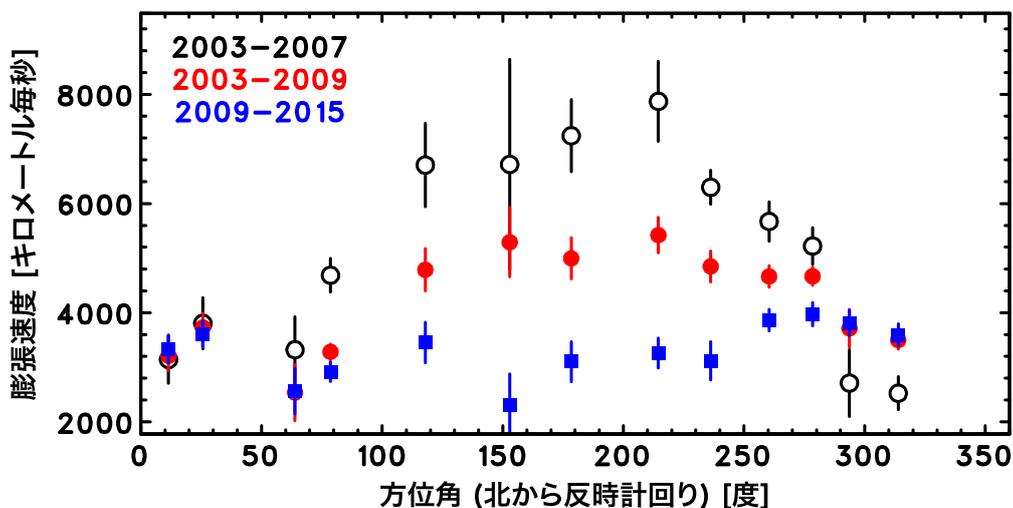


図2: ティコの超新星残骸の各領域で測定した膨張速度。黒色、赤色、青色のデータ点は、それぞれ、2003年と2007年の間、2003年と2009年の間、2009年と2015年の間の平均速度。

3. 波及効果、今後の予定

これまでの様々な観測から、ティコの超新星は標準的な Ia 型超新星爆発であったことがわかっています。それ故、今回の成果は、この天体だけでなく、Ia 型超新星一般について、親星や爆発メカニズムを解明するのに重要な役割を果たすものです。

ティコの超新星残骸については、本研究チームが提案したチャンドラ衛星による追観測が認められており、本年中に実施される予定になっています。これにより、今回発見したガス構造に関して、さらなる情報が得られるはずですが、また、ティコの超新星残骸だけでなく、他の天体についても、チャンドラ衛星や今後計画されている X 線天文衛星を用いて長期間モニタを続けることで同様の現象を捉え、超新星の爆発メカニズムに迫っていきたいと考えています。

本研究チームのうち、田中、内田、山口、Williams は、日本主導の次期 X 線天文衛星 XRISM のチームメンバーとして、2022 年度に予定している打上げに向けて準備を進めているところです。XRISM の特徴は本研究で用いたチャンドラ衛星を凌駕する高い分光性能です。XRISM を用いれば、ティコの超新星残骸などの天体において、爆発で生成された重元素の組成比や、その速度分布を高精度で測定することができます。これにより、画像を用いた本研究とは相補的なアプローチで Ia 型超新星の物理に迫っていきたいと考えています。また、それらの新たな観測データを説明する理論モデルの構築にも取り組んで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。

- 田中 孝明 (京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 助教)
- 奥野 智行 (研究当時 京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 大学院生、現在 民間企業)
- 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)
- 山口 弘悦 (JAXA 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 准教授)
- 李 兆衡 (京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室 講師)
- 前田 啓一 (京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室 准教授)
- Brian J. Williams (NASA ゴダード宇宙飛行センター Research Astrophysicist)

本研究は JSPS 科研費 JP19H01936、JP19K03915、JP19H00704、JP19K03913、JP18H05223、JP20H00174 の助成を受けたものです。

<研究者のコメント>

今回発見した超新星残骸の衝撃波の減速は全く予想していなかったもので、最初に結果を見た時は、我々自身もにわかには信じられなかったほどです。データ解析に間違いがないかどうか何度も確認を重ね、さらに、同様の測定をしていた NASA の Williams 氏にもクロスチェック解析を依頼し、論文として発表するに至りました。今回のように、誰も予想もしていないような結果が出てくるところが、宇宙研究の醍醐味だと思っています。

<論文タイトルと著者>

タイトル Rapid Deceleration of Blast Waves Witnessed in Tycho's Supernova Remnant (ティコの超新星残骸における衝撃波の急激な減速)

著者 田中 孝明、奥野 智行、内田 裕之、山口 弘悦、李 兆衡、前田 啓一、Brian J. Williams

掲載誌 The Astrophysical Journal Letters (アストロフィジカルジャーナル・レターズ)

DOI 10.3847/2041-8213/abd6cf