

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	小橋 亮介
論文題目	A research on the long-term evolution of various types of supernova remnants and a proposal of novel environment of Tycho's supernova remnant (超新星残骸の長時間にわたる時間発展計算の構築および超新星残骸 Tycho の環境に関する新たな提案)		
(論文内容の要旨) 超新星という突発天体现象は毎日のように銀河系外において発見されるが、その多様性の起源についてはまだ完全に解明されていない。太陽の8から10倍以上の大質量を持つ星のコアの重力崩壊、あるいは白色矮星の核反応暴走という、2種類に大別できるが、近年ではそれぞれにさらに細かく分類できることがわかってきた。各タイプの超新星にはそれぞれ異なるタイプの親星があり、その進化と爆発機構、さらにその周りの環境など様々な要素が超新星の観測特徴に関与する。しかし、それらの要素にはまだ謎が多く、超新星という種族の全貌はまだ解明できていない。近年はその問題の解決に向け、これまでとは逆の方向性を持ったアプローチが発展しつつある。観測が難しい親星からではなく、超新星爆発後に残された超新星残骸 (SNR) の多波長観測から多角的な情報を集め、その元であるはずの親星と超新星の素性に遡るというアプローチである。本論文は、超新星残骸の流体シミュレーションを通じた理論モデル構築を行い、これをもとにして超新星の多様性の解明に寄与することを主な目的とする。 超新星残骸は約10光年のスケールに広がる天体现象であり、広い波長域で観測できる。SNRでは衝撃波で加熱された残骸からの熱的X線放射に加え、加速された荷電粒子 (陽子、電子、重イオン等) からの非熱的電磁波放射が観測される。超新星のタイプや性質、および親星との同定において、熱的放射に関しては既にさまざまな先行研究が行われている。一方、被熱的放射はあまり注目されてこなかった。小橋氏はそこに着目し、超新星爆発とその星周環境に関して多数のモデルを用意し、この分野において初めて、SNRの長時間進化 (爆発から数万年程度) を解くことのできるシミュレーションフレームワークを開発した。本論文の前半はそのフレームワークの構築方法と実装された物理モジュールを紹介し、多様なSNRの長時間進化モデルの計算とその解析について解説した。具体的には、核反応暴走型と重力崩壊型両方のケースを含め、それぞれの星周環境モデルを用意し、爆発後の数年から数万年までの時間進化とそれに伴う粒子加速を定量的に調べた。主な結果として、若い年齢のSNRから古いSNRに至る非熱的電磁波放射の進化と粒子加速の歴史、およびそれらが超新星の種類にどのように依存するかを系統的に示すことに成功した。以上を持ち、SNRの非熱的電磁波放射を用いて超新星爆発機構と親星の同定・解明を目指すアプローチにおいて、大きな一歩を踏み出した。 本論文の後半は、前半で開発した流体シミュレーションプラットフォームの応用として、系内のIa型超新星残骸ティコへの応用に関するものである。Ia型超新星は近年重力崩壊型と同じく豊かな多様性を持つことがわかってきた。Ia型超新星残骸も同様に、従来の理論モデルでは一般的に対応できなくなり、爆発機構および星周環境の多様性を含む複雑なモデリングが必要となった。ティコの超新星残骸はその一つの例として、最近のX線観測データ解析により、直近の数十年に渡ってその膨張速度が急激な減速を示していることが発見された。今までの簡単な流体モデルでは明らかに			

説明できない現象であり、従ってモデルの更新が急務になった。小橋氏はこのタスクに着手し、これまでより現実的なティコ SNR のモデル化に成功した。その研究内容は本論文の後半に解説されている。内容としては、今までに仮定された一様な星間媒介に対して、本論文においては低密度の空洞とそれを囲む高密度なガスのなかでの超新星爆発を想定し計算を行った。パラメーターサーベイを行い、流体シミュレーションの結果と X 線観測データを詳細に比較した結果、ティコは非等方性を持つ星風に作られた空洞の中でこれまで 400 年余程度に渡り進化してきたことを発見した。特に、上記のような星周構造を考えることで、直近数十年に衝撃波が急激に減速したという観測データをよく再現できることを明らかにした。この結果は長年にわたり議論されてきた Ia 超新星の爆発機構及び親星進化問題に一石を投げたものである。星風の空洞の存在とその質量から、ティコは非縮退伴星から白色矮星への質量輸送により進化する経路 (single degenerate チャンネル) に対応した天体であることが強く示唆された。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、SNRの観測と理論を強く結び付けた内容である。シミュレーションコードの開発から観測データへの応用まで一通り網羅した、将来の発展性がある研究であると評価できる。コード開発に関しては、これまで考慮されていなかった物理モジュールの実装により、今までに扱うことのできなかつた進化段階（特に、爆発後数千年以降）を計算できるような拡張がなされている。この新規性により、これまでより現実的なモデル構築が可能となっている。

数万年に渡る超新星残骸進化の計算が可能となったことは、特に二点の意味で重要である。第一に、超新星残骸が大きなスケールまで膨張する段階までのモデリングが可能となったことで、親星自体が作り出した星周環境にとどまらず、親星が生まれた分子雲などのより大きなスケールにおける環境の調査が可能となったことである。これは、超新星親星の理解にとって大きな発展と言える。第二に、超新星残骸衝撃波において比熱的粒子の加速が起り得るすべての段階をおさえることができるようになり、超新星が銀河宇宙線の主要な起源であるかどうかを定量的に議論することが可能となったことである。これは、長年にわたり議論されている宇宙線の起源の解明に向け、大きな前進と言える。

また、本研究においては系統的なパラメーターサーベイも行い、親星・超新星・超新星残骸を繋げる新たな理論描像の発展に大きく貢献している。これまで、超新星のモデリングと超新星残骸のモデリングは異なるコミュニティにより独立に議論されてきたが、これを学際的につなぐ視点として、高く評価できる。

論文後半部においては、ティコの超新星残骸という有名かつ重要とみなされている天体に対し、最新の観測データとの整合性を持つ理論モデルを提唱している。得られた星周構造及びそこから示唆される親星進化経路は、パラダイムシフトと言ってもよいものである。Ia型超新星という宇宙物理学に留まらず、宇宙論においても極めて重要とされる天体の起源の解明にもインパクトを与えた結果である。

以上、本論文は、その新規な視点、「宇宙線と超新星」「超新星と超新星残骸」といった学際的研究の発展への寄与、Ia型超新星という重要天体の起源への新たな示唆など、大宇野重要な結果を含んだものと評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降