

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	松岡 知紀
論文題目	Modern Approaches to Radio Supernovae (電波超新星の現代的アプローチ)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>大質量星の終末期進化には多くの未解明問題が残されており、天文学におけるフロンティアの一つとされる。大質量星の進化の最期には中心部が重力崩壊により収縮し、中性子星 (場合によってはブラックホール) を形成するとともに、外層が爆発的に宇宙空間に放出される。これが重力崩壊型超新星爆発であり、様々な波長で明るく輝く超新星として観測される。まさに大質量星の終焉の現場であり、その観測および理論計算との比較により、大質量星の終末期進化について様々な知見が得られる。</p> <p>申請者が注目した過程は、超新星からの電波放射である。超新星爆発により放出される物質は周囲の星周物質と衝突して衝撃波を形成する。衝撃波において加速された電子と磁場との相互作用によるシンクロトロン放射は、超新星周囲の星周物質の状況の調査に用いられる。星周物質は大質量星 (超新星親星) からの質量放出により形成されるため、これは大質量星終末期の質量放出史を再構築することに他ならない。</p> <p>超新星からの電波放射計算自体は、多くの研究者によりこれまで行われている。申請者の独創性は、近年の恒星進化理論・超新星観測研究の急激な発展をもとに、電波超新星モデルにおける「現代的アプローチ」を提案したことにある。本論文は、主に3つの研究内容 (3, 4, 5章) により構成される。</p> <p>3章においては、多数の超新星からの電波観測データに対して統計的に電波放射モデルを適用したところが現代的アプローチに相当する。申請者はマルコフ連鎖モンテカルロ法を導入することで、統計的な超新星電波モデリングを初めて可能にした。その結果、大質量星終末期の質量放出史について、多くの新知見が得られた。例として、赤色超巨星が親星の場合には質量放出率が爆発の瞬間に向け増大する傾向がみられ、一方で水素外層の剥げたヘリウム星・酸素星が親星の場合には高い質量放出率を保つものの終焉に向け質量放出率は減少する傾向が見いだされた。</p> <p>4章においては、これまで電波放射モデルにおいて調査されてこなかった進化過程の検証方法を提案した。2017年に重力波検出によりその存在が確定した連星中性子星合体に至る恒星進化過程の理解は、喫緊の課題とされる。申請者は、近接連星中性子星に至る進化過程として有力視される「Ultra-Stripped Supernovae (USSNe)」に注目し、進化モデルから予想される星周物質構造を用いた電波放射計算を行った。その結果、USSNeからの電波放射の性質が、形成される中性子星同士の間距離に強く依存することを見出し、電波観測によりその連星間距離に制限を与えるというアイデアを提案した。</p> <p>5章においては、恒星進化理論と電波放射研究を繋ぐ手法として、電波計算においては単純化して取り扱われてきた星周物質構造を見直し、各進化モデルから予想される密度構造を取り入れた計算手法を確立した。例として、上述のUSSNeのモデルに対して、爆発直後から長時間かけて超新星残骸として進化する過程の計算を行った。通常超新星残骸はゆっくりと減光していくが、この場合には星風が作り出した高温プラズマに衝撃波が突入した段階で一気に弱まり、急激に減光するという、従来考えられてきたものとは異なる振る舞いをすることを示した。</p> <p>以上、超新星からの電波放射の理論計算において様々な「現代的アプローチ」を導入し、大質量星進化における新知見を得るとともに、将来観測への提言を行った。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

恒星進化は天文学の基礎をなす重要な分野であるが、多くの未解明問題が存在する。特に、近年の超新星および突発天体の観測研究の急激な発展により、既存の恒星進化理論では説明できないような現象が次々に発見され、恒星進化理論の再構築は天文学における喫緊の課題の一つとされている。

重力崩壊型超新星は大質量星の終焉の現場そのものであり、その性質は終末期進化の特徴を色濃く残し得る。逆に、超新星のさまざまな観測データの中から、最終進化過程を強く反映した観測シグナルを選別することで、大質量星の終末進化という未解明問題に取り組むことができる。申請者は本申請論文において、超新星からの電波放射に注目し、その理論計算と観測データの比較から質量放出史を再構築する問題に取り組んだ。これまで当該分野では考慮されてこなかった「現代的アプローチ」を導入することに申請者の鋭い洞察力と非凡な発想が見られ、実際に数多くの新知見が得られたことは、本申請論文の高い評価に繋がるものである。

申請者が「現代的アプローチ」として提唱した取り組みは、主に3つである。

(1) 近年の統計的手法であるマルコフ連鎖モンテカルロ法を導入することで、これまで個別の天体にフォーカスして行われてきた研究から、統計的に多数のサンプルを調査する研究へと発展させること、(2) 近年の当該分野の発展を受け、これまで考慮されてこなかった恒星進化過程を、電波放射の観点から検証すること、(3) これまで単純化されてきた星周物質構造の代わりに、個別の恒星進化モデルから予想される複雑な星周物質を用いて計算を行うことで、より現実的な電波放射予想を行う事。

以上は、これまで当該分野で慣習的に用いられてきた既存の枠組みを打破し、より高い段階に進むための野心的な試みとして評価できる。実際に、恒星物理・恒星進化における多数の新知見が申請論文において報告され、申請者の試みが成功したことを示している。

(1) においては、赤色超巨星とコンパクトなヘリウム星あるいは酸素星を親星とする超新星への進化過程において、質量放出史の傾向が異なることを見出した。恒星終末期進化理論への新たな制限として、重要な結果である。また、本研究の結果は、天体物理にとどまらず、物理素過程の理解においても新たな示唆を与える。これまでも超新星衝撃波において実現される加速電子のエネルギー分布が一般に提唱されるフェルミ加速機構からの予測より急激であることが提唱されていた。申請者はこれが多数の超新星の一般的傾向であることを確認したのみならず、Broad-line超新星と呼ばれる特殊な超新星ではフェルミ加速機構の予測に近い傾向があることを明らかにした。以上のように、恒星進化過程において重要なマイルストーンとなるとともに、粒子加速の物理の理解にも波及を及ぼす結果が得られており、申請者の提唱するアプローチは大きな成功を収めたと言える。

(2) においては、具体例として近接連星中性子星に至る進化過程の検証という点に着目している。2017年に重力波検出によりその存在が確定した連星中性子合体であるが、そこに至る近接連星系の形成過程が完全には解明されていない。現在有力とされるシナリオは「Ultra-Stripped Supernovae (USSNe)」と呼ばれる、大質量星の近接連星がその進化に伴い複雑に相互作用をしながら進化するというモデルである。このシナリオからは、複雑な星周物質構造が予想されるが、特に親星ごく近傍の星周物質密度が連星軌道半径に強く依存することが予想される。申請者はこのことに注目し、連星パラメータの異なる一連の進化モデルに対して、電波放射の計算を行った。その結果、電波観測から親星連星の軌道半径に制限を付けられることを見出した。これは、可視光観測からは得られない情報であり、電波および多波長

観測の重要性を明らかにしたものとして、重力波天文学からの観点も重要な結果である。近年話題となっている重要天体现象に関して、他の研究者とは違った視点でのアプローチとして、申請者の独創性を良く示す成果である。

(3) においては、やはり具体例として上述のUSSNシナリオに基づいて、その恒星進化理論から予想される星周物質構造を直接インプットとして爆発から超新星残骸へと至る長時間にわたる進化の電波放射計算を行っている。従来考えられてきた単純な星周物質構造からは予想されていなかった振る舞いを示し、またこれまでに連星中性子星周囲に超新星残骸が検出されていないことも整合的に説明することができる。

以上、超新星からの電波放射の理論計算において様々な「現代的アプローチ」を導入したことは申請者の独創性および既存の枠組みにとらわれない挑戦的姿勢を良く表すものであり、それにより得られた多数の新知見および将来観測への提言は、天文学において非常に意義の高いものである。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5年1月13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