

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	打田 晴輝
論文題目	Black Hole Formation, Explosion and Gravitational Wave Emission from Rapidly Rotating Very Massive Stars (高速回転するととても重い星のブラックホール形成、爆発及び重力波放出についての研究)		
(論文内容の要旨)			
Very Massive Star (VMS)とは、初期質量が約100太陽質量を上回る非常に重い恒星の総称である。近傍銀河でいくつか観測例が存在するが、それらの形成過程や進化過程については詳しくわかっておらず、現代の星形成および恒星進化に関する未解決問題の一つとされている。VMSはまた、その起源が未解決である中間質量ブラックホールの母天体、さらには超大質量ブラックホールの種天体とも指摘されており、興味深い研究対象である。 VMSの中でも質量が約150太陽質量を超えるものは、進化の最終段階で対不安定と呼ばれる不安定性により重力崩壊を起こし、ブラックホールへ直接崩壊すると考えられている。仮にVMSが高速で回転していれば、ブラックホール形成に伴い、その周りにトーラスが誕生しうるため、観測可能な電磁波が放射される可能性が以前から示唆されてきた。また、ブラックホールの誕生時には、高い振幅の重力波が放射されることも予想されてきた。このようなシグナルが重力崩壊時に実際に放射され、それらが将来観測されれば、VMSの形成頻度が推定できるとともに、VMSの質量や回転速度などに関する情報が得られ、VMSの理解が飛躍的に進むと期待される。 これらの動機にもとづいて、打田氏は、回転するVMSの重力崩壊について、完全に一般相対論なシミュレーションを実行し、定量的な研究を行った。重力崩壊途中には高温環境が実現するため、原子核の核融合反応や光分解、およびニュートリノ放射冷却が、一般相対論的な重力とともに重要な役割を担う。打田氏はこれらの効果を全て取り入れた計算コードを独自で開発し、シミュレーションを行った。初期条件には、高速で回転する320太陽質量のゼロ金属量星を主系列段階から対不安定になるまで進化計算を行い得られた現実的なモデルを用いた。VMSの重力崩壊およびブラックホール形成に対して、現実的な恒星進化計算で得られたモデルを初期条件とし、かつ原子核反応も考慮にいった一般相対論的シミュレーションは以前に実行されたことがない。打田氏は、シミュレーションによって、回転するVMSの重力崩壊過程、誕生するブラックホールの形成過程と性質、さらにはブラックホール周りに形成されるトーラスの性質について、初めて定量的に明らかにした。そして、粘性を考慮した場合のトーラスの進化過程、およびそれに付随して放射されると予想される電磁波の光度曲線について議論した。さらに、ブラックホール形成に伴い放射される重力波の周波数、振幅を定量的に信頼できる結果を初めて導出した。その結果、回転するVMSが重力崩壊し、ブラックホールが誕生すると、将来観測可能な電磁波および重力波が放射される可能性があることが示された。特に重力波に関する計算結果は、現在議論が進んでいる第3世代の重力波望遠鏡の将来計画に貴重な提案を与えている。 博士論文は以下のように構成されている。まず第1章では研究の背景を述べた後に、第2章および第3章ではVMSの特徴およびその進化過程に関するこれまでに得られている研究や知見が概説されている。第4章以降で、氏のオリジナルの研究成果が記述されている。まず第4章では、シミュレーションの定式化や手法が解説されてい			

る。次に第5章では、VMSの重力崩壊の長時間シミュレーションの結果が記述されている。回転するVMSが重力崩壊すると、回転するブラックホールとトーラスが誕生するが、今回採用されたモデルでは、最大で10太陽質量程度のトーラスがブラックホール周りに誕生すること、そしてそれは、光分解により軽元素で構成されることが示されている。またトーラス形成に伴い、強い衝撃波が発生するが、それはVMSの外側へ、落下してくる物質を掃きながら伝播していくことが示された。さらに、粘性の効果を考えた場合に、トーラスがどのような進化をするのかについて議論されている。トーラスからは、粘性加熱の効果によって数十秒程度のタイムスケールで質量放出が起きる可能性があるが、仮にトーラスから1太陽質量程度の物質が放出された場合、放出された軽元素が再び核融合を起こすことで熱エネルギーが大量に発生し、 10^{52} erg程度のエネルギーがVMSの外層部に注入されることが示唆された。 10^{52} ergのエネルギーがVMSの外層部に注入されると、外層は超新星爆発のように爆発し、 10^{43} erg/s程度の光度が1年程度維持されうるということも明らかにされた。このような高光度天体は、観測可能であり、興味深い観測対象を提案している。

第6章ではブラックホール形成前後に対してより高解像度シミュレーションを実行し、ブラックホール形成に伴い放射される重力波についての定量的な知見が得られている。具体的には、ブラックホールが形成される際にバースト的重力波が放射され、その周波数は初期に形成されたブラックホールの準固有振動の周波数とほぼ一致することが明らかにされた。今回のモデルでは300—600Hz程度の周波数を持つ重力波が放射されるが、advanced LIGOのような第2世代の重力波望遠鏡では10Mpc程度の距離以内で発生する重力波しか観測できないものの、Einstein Telescopeのような第3世代重力波望遠鏡では100Mpc程度の距離以内で発生すれば観測可能であることが明らかにされた。これは、将来の重力波望遠鏡の新たな可能性を示しており、興味深い。

最後に第7章において、本論文のまとめが簡潔に述べられている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本博士論文で記述されている物理的内容は、大質量星の重力崩壊研究に対して十分なインパクトがある。一般相対論、現実的な初期条件、原子核反応、ニュートリノ放射効果全てを考慮した現実的なシミュレーションはこの研究以前に実行されていない。その点で、この研究は非常に先進的で独自性の高いものである。そして、現実的なシミュレーションを用いて、放射されうる電磁波や重力波について予言を行い、それらの観測可能性を指摘し、将来計画に対して興味深い提言を行った点も評価に値する。

本論文に関する審査会は平成31年1月18日に行われた。そこでは、本論文にもとづいて、大質量星に関するレビュー、および重力崩壊のシミュレーションの設定と手法の解説、また本研究で新たに得られた知見に関する発表が行われた。プレゼンテーションは簡潔にして要領を得たものであり、質疑応答についても現在明らかになっている事実とまだ解明されていないことを明確に回答した。全体として審査会は円滑に行われ、質疑応答を含めて予定通りの時間内に完了した。

以上まとめると、本博士論文で得られた成果は、大質量星の進化、光学天文学、重力波物理学を始めとする関連分野において博士(理学)の学位を与えるに質・量ともに十分なものであり、論文の体裁やプレゼンテーションについても学位に遜色の無いものである。以上の審査結果より、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、平成31年1月18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： 平成31年1月21日以降