

博士論文タイトル: Black-Hole forming Supernovae

学籍番号: 0560-29-5646 氏名: 早川朝康

論文要旨

この広い宇宙には、恒星質量ブラックホール ($M_{\text{BH}} \sim 10M_{\odot}$) の存在が確実視されている。特に、2015年には、ブラックホール同士が合体したときに発生される重力波の検出に成功し、その存在をさらに確固にした。しかしながら、このようなブラックホールがどのようにして形成されたのかは未解決な問題であり、またその形成の瞬間は捉えられていない。申請者は、ブラックホール形成によって引き起こされる現象とその観測的特徴を理論的に明らかにすることで解決の糸口を探った。本博士論文は、これらの成果を発表した1本の主著論文 (Hayakawa & Maeda 2018) に基づいている。

ブラックホール形成の現場として、GRB(GRB) や超新星爆発が候補天体として考えられている。GRBは、ガンマ線で突発的に数秒間輝くジェットを伴った爆発現象である。一方で、超新星は、可視光で輝く現象であり、その光度は太陽の数億倍以上で数週間から数ヶ月かけて減光する。これらの現象は、別々に観測が進められてきたが、現在では大質量星の進化での最終段階で起こる重力崩壊現象によって引き起こされうると理論的に示唆されている。特にこの二つの現象が同時に起こる現象 (GRB付随超新星爆発) が1998年以降報告されており、その関連性が支持されている。

しかしながら、GRB付随超新星爆発は、普通の超新星よりも爆発エネルギーが大きいことや、付随するジェット、合成される ^{56}Ni の量が多いなどの特異な特徴を持つ。このような特徴を同時に説明しつつ、イベント毎の多様性を同時に説明する理論モデルはこれまで提唱されていない。

第3章では、重力崩壊する星のモデリングを行い数値計算することで、GRB付随超新星爆発の爆発機構について議論がされている。計算には、ブラックホール、円盤、外層間での物質の輸送を解きつつ、ジェットのエネルギーや、円盤から吹き出すアウトフロー(円盤風)によるエネルギーが見積もられている。さらに本モデルでは、降着する外層とジェットや円盤風との競合を解くことで、爆発の有無の判定や、爆発時の ^{56}Ni 合成量も計算に含まれている。

その結果、GRB付随超新星が説明されるためには、特定の条件が必要であることがわかった。その条件は、(1)円盤風は立体角を絞られた状態で放出され、(2)その放出によって外層からの降着を止めないこと、の二つである。さらに親星の回転の速さによって放出される物質の量や ^{56}Ni の量の相関など観測されているGRB付随超新星の特徴を説明することに成功した。また、回転の早い親星からはエネルギーを多く持ったGRB付随超新星が説明できることがわかり、弱いGRBを付随した超新星を再現できるモデルはなかった。逆に回転の遅い星では、降着円盤を残しながら崩壊するだけで、超新星になり得ないこともわかった。

このように超新星に失敗した重力崩壊現象は、failed supernovaとして、超新星の親星の観測や、第一原理からの数値計算などから強く存在が示唆されている。failed supernovaでは弱い爆発を伴うか、もしくは伴わずにブラックホールを形成することが示唆されている。このような系は可視光での観測は難しいため、他の波長帯での観測が期待されるが、重力波やニュートリノ放射は銀河系内でのイベントのみが観測可能であり、その発生率は1世紀に一度と極めて低い。しかしながら、ブラックホールまわりの降着円盤自身は年単位で高い降着率を維持できるため、円盤自身のX線放射が観測されうる。第4章ではfailed supernovaにおけるX線放射とそれに伴う突発天体現象が議論されている。

failed supernovaでの弱い爆発や、重力崩壊する過程でのブラックホールからの追加のエネルギー注入を含めた爆発計算を一次元輻射流体力学計算で行い、ポストプロセスでのX線放射の見積もりを行なった。その結果、failed supernovaは、崩壊時に可視光で観測可能な突発天体現象とそれに続いてX線で光る可能性があることが判明した。さらに数年以上のタイムスケールで遅くから光る円盤由来の軟X線と、崩壊後数年以内でのみ見える非熱的放射からの硬X線の二種類が、どの親星からも予想されると判明した。中心のブラックホールが激しくエネルギーを解放している場合、さらにこれらの突発天体現象は明るく、早い進化を起こすことも示された。

これらは可視光での明るさや継続時間により、数種類の突発天体現象として予測され、今後の突発天体サーベイなどで観測されうる。さらにX線による追観測を同時に行うことで、10Mpc以内で起こった現象は、ChandraやNuSTARといった人工衛星により観測可能であると判明した。

ブラックホールを伴う、大質量星の重力崩壊現象は様々な突発天体現象として期待されることが本研究により解明された。しかしながら、これらはモデリングによる不定性も多く含み、今後の展望が理論と観測双方に臨める。理論では、多次元効果や、磁場、輻射、ニュートリノ輸送といった複雑な物理過程を含んだ計算が不可欠である。さらに、円盤内ではr-process元素等の起源としても期待されており、銀河化学組成進化理論にも大きな影響がある。予測される突発天体は、Zwicky Transient Facility等のプロジェクトにより、今後さらに数を増やすと期待される。加えて、多波長でのフォローアップ観測により、コンパクト天体や爆発機構等に制限をかけられることも期待され、本研究の最終目的である恒星質量ブラックホールの形成の瞬間を捉えられる日もそう遠くない。本研究は、数多くの突発天体が多波長を用いて議論される新しい時代に必要なモデリングや理論、観測手法の発展の重要性を示した極めて重大なものである。