

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	早川 朝康
論文題目	Black-Hole forming Supernovae (ブラックホールを形成する超新星爆発)		
(論文内容の要旨)			
太陽質量の数倍から100倍程度の質量を持つブラックホールは恒星質量ブラックホールと呼ばれる。主にX線観測によりその存在が示唆されてきたが、近年では連星ブラックホールの衝突合体に伴う重力波が直接検出されている。このような恒星質量ブラックホールはどのように誕生するのか、その形成の現場を観測的に検証することができるか、以上が本論文で扱う主要な問いである。 通常、太陽質量の10倍以上をもって生まれた大質量星は、その生涯の最期に中心部に中性子星を形成し、残りの外層を吹き飛ばすと考えられている。これは超新星爆発と呼ばれる。しかしながら、太陽質量の20倍以上の質量を持つ星においては、通常の超新星爆発機構では重力崩壊を止めることができずに、中心部はさらに収縮してブラックホールを形成することが、近年の超新星爆発のシミュレーションから示唆されている。本論文は、大質量星の重力崩壊に伴い中心にブラックホールが形成された場合に発生し得る電磁波対応天体現象の理論モデルを構築し、（１）既知の候補天体現象であるガンマ線バーストと極超新星の性質を説明できるか調べ、（２）ブラックホールへの質量降着に伴うX線の理論モデル構築を通し、ブラックホール形成現場の直接検証の可能性を検討したものである。 （１）は、ガンマ線バーストの有力なモデルとされるコラプサーモデルに基づく研究である。高速回転する大質量星が重力崩壊を起こし中心にブラックホールと降着円盤を形成することで、Blandford-Znajek過程を通し相対論的ジェットを形成、これがガンマ線バーストを引き起こすとするモデルである。ガンマ線バーストに付随しエネルギーの大きい超新星（極超新星）も発生することが知られているが、コラプサーモデルにおいてどのように超新星を起こすか、その過程は解明されていない。申請者は、降着円盤からの質量放出（円盤風）が重力崩壊を続ける外層部を吹き飛ばし超新星と同様な爆発現象になる可能性について、理論モデル構築を行った。中心ブラックホール、降着円盤、降着円盤に質量を供給する重力崩壊する外層の三つからなる理想化した系を考え、各成分間のエネルギーや質量輸送、円盤風による質量供給の阻害の効果を考慮し、準解析的な進化計算を行った。初期条件として様々な親星質量と角運動量を与えることで、ガンマ線バースト成分の光度曲線、超新星成分のエネルギー、放出質量、超新星からの可視放射のエネルギー源である放射性同位体⁵⁶Niの放出質量を計算した。 その結果、以下のようなことが分かった。（a）球対称的に放出される円盤風では、観測されている超新星のエネルギーを説明することができない。これは、円盤風により外層が吹き飛ばされることで降着円盤への質量供給が止まり、円盤風へのエネルギー供給が十分でなくなるためである。観測されている超新星のエネルギーを説明するためには、円盤風は特定の方向に集中して放出され、それ以外の方向からは外層部の降着が継続することが必要である。（b）超新星のエネルギーを説明するためには、従来コラプサーモデルで考えられていたよりも数倍角運動量の大きい、超高速回			

転星が必要である。(c) 上記の条件が満たされた場合、ガンマ線バーストに付随する超新星約10例でみられる、超新星エネルギー、放出物質質量、 ^{56}Ni 質量の間の相関関係が良く説明される。以上から、ガンマ線バーストのモデルとしてコラプサーモデルが有力であることを検証し、さらにその発生条件に様々な制限をつけることができた。

(2) では、大質量星の重力崩壊に伴いブラックホールが形成され、弱い超新星爆発により外層の一部は低速で宇宙空間へ膨張しつつも、中心ブラックホールへの降着が継続するというシナリオについて考察した。これは、failed Supernovaと呼ばれ、恒星質量ブラックホールの形成シナリオとして近年注目されているモデルである。二例の候補天体が報告されているが、これらが本当にfailed Supernovaであるかの直接証拠は無い。

申請者は、輻射流体計算により超新星爆発からの可視光放射を計算するとともに、中心ブラックホールへの降着により発生する軟X線、降着円盤からの円盤風が超新星膨張物質に衝突することで発生する硬X線のモデル計算を行った。これにより、爆発から一年程度後に円盤風起源の硬X線が超新星物質を透過して観測者に届くようになり、10年程度後に降着流起源の軟X線が発生するという理論予測を立てた。特に後者は理論的不定性が小さく、既存のChandra望遠鏡などにより検出できるフラックスが期待される。この理論予測から、今後failed supernova候補天体のX線観測を継続することで、ブラックホール形成の証拠が得られると期待されると結論された。

(論文審査の結果の要旨)

近年、重力波直接検出により、恒星質量ブラックホールの存在は疑いのないものとなった。一方で、恒星質量ブラックホールがどのように誕生し、どのような電磁波対応天体を伴うかは明らかにされていない。本論文では、(1) 恒星質量ブラックホール誕生の現場の一つであると考えられてきたガンマ線バーストおよび極超新星について、大質量星崩壊に伴うブラックホール形成というシナリオの妥当性を検証した。さらに、重力崩壊に伴いガンマ線バーストと極超新星が発生する条件に新たな制限を与えた。また、(2) 近年注目を集めている、大質量星の重力崩壊に伴いブラックホールが形成され弱い超新星爆発が起こるといったシナリオに基づき、中心ブラックホールに起因するX線放射の理論予測を行い、将来的にブラックホール誕生の現場を直接検証する可能性を提案した。

(1) のシナリオにおいて、ガンマ線バーストの性質が再現されるかを扱った先行研究は存在したが、ガンマ線バーストに伴う極超新星の存在およびその性質を再現できるかの定量的議論は皆無であった。申請者はこのモデルに基づき、極超新星の発生条件、そのエネルギーや放出物質質量といった性質が親星の質量および角運動量にどのように依存するか準解析的計算を行うことで、極超新星の豊富な観測データとの比較に耐え得る理論予測を始めて提出した。その結果、従来提案されてきたよりもさらに高速回転する親星でなければ極超新星の性質を説明できないこと、角運動量の違いにより極超新星の観測的性質が統一的に理解できることを示した。高速回転星の重力崩壊によりガンマ線バーストが引き起こされるというシナリオの妥当性を観測データに基づき示したものとして、極限的なブラックホール形成現場についての理解を大きく進展させる結果であると判断される。

(2) は、(1) よりも一般的な状況におけるブラックホール形成の有力なシナリオである。Failed supernovaが存在するかは近年非常に注目を集めており、可視光での明るい超新星を伴わずに消滅した大質量星2例がこれまで候補天体として報告されている。しかし、この観測データはブラックホールに直接かかわる放射を検出したものではないため、あくまでも間接証拠に基づく候補天体である。申請者は、このような場合にも中心ブラックホールへの降着が継続することに注目し、この降着流に起因するX線放射の理論計算を行った。この結果を用い、既存および将来の観測機器での観測可能性を議論した。ブラックホールへの高温降着流を起源とする軟X線が10年程度のタイムスケールで発生することが理論計算の結果として予測される。既存の観測機器でも十分に観測可能なフラックスが期待され、failed supernovaの候補天体に対してX線観測を継続することで、ブラックホール誕生の証拠を得られると提案している。これは、failed supernovaの候補天体に対して、本当に恒星ブラックホールが誕生したかを判別する強力な新手法である。恒星ブラックホール誕生についての直接的な検証として、今後のさらなる観測研究につながるものである。

以上の結果は、恒星ブラックホール形成に関しての理解を大きく前進させるものであり、天文学分野の研究における重大な知見であると判断できる。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2年1月20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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、（令和3年3月31日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降