

大質量連星系における超新星爆発とその伴星への影響

平井 遼介 (早稲田大学大学院 先進理工学研究科)

Abstract

重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) は、 M_{\odot} 以上の質量を持つような大質量星がその進化の最後に起こす現象ということは広く知られている。一方、そのような大質量星の大半 (約 69%) が、2 つ以上の星が互いの重心周りを公転する「連星系」という系を組んでいることが観測事実として知られてきた。以上より、CCSN の大半が連星系内で起きているということが予想される。実際にここ数年の観測技術の発達により連星系内で CCSN が起きているような候補天体がいくつも見つかってきており、特に昨年見つかった iPTF 13bvn という Ib 型超新星に関しては親星が連星であることが裏付けられ、約 3 年後には残骸の中で伴星の存在が直接確認されると予測されている。このようなことから、連星系の進化が超新星爆発に与える影響が注目を浴びてきている。連星系内での CCSN が注目されてきているもう一つの理由として、コンパクト連星の存在がある。コンパクト連星とは、中性子星 (NS) やブラックホール (BH) などの高密度な星同士の連星系であるが、近年、日本の KAGRA などに代表される重力波検出器の筆頭観測ターゲットとしてコンパクト連星の合体が挙げられており、コンパクト連星がどのように形成されるかを探ることが急務となっている。コンパクト連星を形成するためには、大質量星同士の連星系内で両方の星が CCSN を起こし、NS を残すという過程を経る必要がある。その第一歩として、連星系内で一度目の SN が起きた場合にどのような系が残されるかについて数値シミュレーションを用いた研究を行った。今回はその結果及びパラメータ依存性について議論する。

1 Introduction

重力崩壊型超新星爆発 (CCSN: Core-Collapse Supernova) は、太陽の約 10 倍以上の質量を持つような大質量星がその進化の最後に起こす現象ということは広く知られている。一方、そのような大質量星の大半 (約 69%) が、2 つ以上の星が互いの重心周りを公転する「連星系」という系を組んでいることが観測事実として知られてきた。以上より、CCSN の大半が連星系内で起きているということが予想される。実際にここ数年の観測技術の発達により連星系内で CCSN が起きているような候補天体がいくつも見つかってきており、特に昨年見つかった iPTF 13bvn という Ib 型超新星に関しては親星が連星であることが裏付けられ、約 3 年後には残骸の中で伴星の存在が直接確認されると予測されている ([1])。このようなことから、連星系の進化が超新星爆発に与える影響が注目を浴びてきている。

連星系内での CCSN が注目されてきているもう一つの理由として、コンパクト連星の存在がある。コ

ンパクト連星とは、中性子星 (NS: Neutron Star) やブラックホール (BH) などの高密度な星同士の連星系であるが、近年、日本の KAGRA などに代表される重力波検出器の筆頭観測ターゲットとしてコンパクト連星の合体が挙げられている。また、コンパクト連星合体の際にはガンマ線バースト (GRB: Gamma-ray Burst)、重元素の合成など数多くの興味深い現象が起きると期待されており、それらの研究を進めるためにもコンパクト連星がどのように形成されるかを探ることが急務となっている。

コンパクト連星を形成するためには、大質量星同士の連星系内で両方の星が CCSN を起こし、NS を残すという過程を経る必要があるが、SN を起こす際には大量の質量が放出され、連星系が系として生き残れなくなる可能性がある。一般に系全体の質量の 50% 以上が失われると系が壊れるということが簡単な計算から知られているため、コンパクト連星を形成するのは困難であるとされてきた。しかし SN の際には爆発時に NS へ運動量が与えられるほか、爆

風と伴星の相互作用など単純な力学では説明ができない効果もあり、質量の 50 % が失われても系が生き残る可能性がある。これらの効果も含めた統一的理解が、コンパクト連星形成シナリオを構築する上で必要である。今回はこの中でも爆風と伴星の相互作用に注目し、爆風によって伴星から剥ぎ取れる質量と、そのパラメータ依存性を調べる研究を行った。

2 Method

同様の研究として、小さい質量をもつ連星系内で起こる Ia 型超新星爆発の爆風が伴星へ与える影響を流体シミュレーションによって計算した例が数多くある。数多くのグループが 2 次元や 3 次元の大規模数値計算、解析を行い、観測結果と照らし合わせることで Ia 型超新星の親星や爆発シナリオに制限をつけることに成功している。本研究では、これらの Ia 型超新星の場合に行われてきた計算を踏襲しつつ、大質量連星系の場合に対応させた計算を行った。

具体的には、主星の爆発と、その爆風が伴星に当たって物質を剥ぎ取っていく一連のプロセスを 2 段階に分けてシミュレーションを行った。これには、Ia 型超新星と違って CCSN では爆風の様子が主星の構造や爆発エネルギーによって変わるため爆発を解く必要があるという理由と、パラメータサーチを容易にする狙いがある。CCSN を扱う場合、従来と比べ扱っている系のパラメータ領域が広く、より多くのモデルについて解析する必要がある。本研究において工夫した点は、束縛判定条件の変更である。従来は、局所的な速度がその地点での脱出速度より小さかったら星に束縛されているというような判定条件が用いられてきた。今回はベルヌーイの定理を用いた新たな判定条件を用いることで、剥ぎ取れた質量を半分程度の計算時間で見積もることを可能にした。

このことは、計算コストの削減と高解像度の実現につながり、たくさんのモデルを解くことが容易になった。実際に、本計算でも公転半径を変えた複数のモデルをシミュレーションし、その依存性を詳細に調べた。

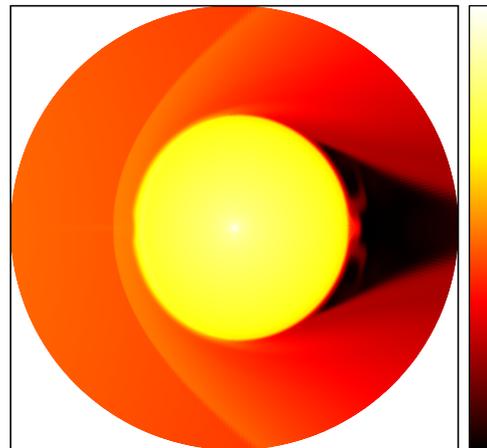


図 1: ある時間における伴星の周囲の密度分布

3 Results & Discussions

図 1 は、シミュレーションの結果得られた密度分布の一例を表している。図の左側から超新星爆風が吹き込み、中央にある伴星に当たって複数の衝撃波が形成されている様子が見える。この計算から、爆風の運動量によって直接質量が剥ぎ取れる分は少なく、大部分は爆風が当たって形成される衝撃波が星の物質を熱したことで、星が膨張しながら外層が蒸発して取れるということが分かった。公転半径を変えた複数のモデルをシミュレーションしたことで、剥ぎ取れる質量の距離依存性が単純なべき乗の関係で表されることも示した。また、人工的に爆風の密度や速度を変更した実験的なモデルを解き、それらの依存性も調べた。その結果、剥ぎ取られる質量を決めているのは星の立体角に注入される全エネルギーではなく、表面に当たった瞬間の物理量であることがわかった (図 2)。これらのシミュレーションの結果は、注入される全エネルギーが大事とされてきた過去の解析的なモデルでは説明できない。

そこで、我々は図 2 のべき乗則を説明できるような新たな解析的モデルを構築することを試みた。このモデルでは、爆風が伴星表面に当たる瞬間に星表面でリーマン問題が発生すると考える。このリーマン問題によって発生した衝撃波が伴星内部を伝わり、星の一部を熱するとする。この衝撃波によって伴星に与えられた熱が剥ぎ取れる質量に直接比例してい

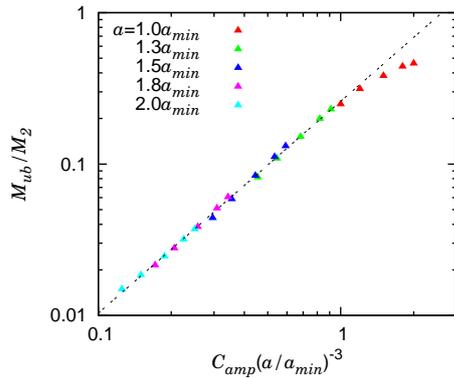


図 2: 爆風密度に対する剥ぎ取れた質量

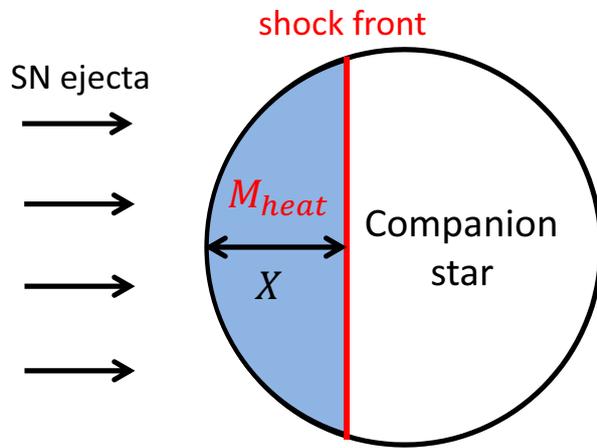


図 3: 星に与えられる熱の解析的モデル

ると考える。熱される時間は爆風が星を通り抜けるタイムスケールで決まっており、距離に応じてさほど変わらない。熱される時間を固定すると、熱される質量は衝撃波の伝搬速度のみで決まる。衝撃波の伝搬速度は衝突初期のリーマン問題で決まる。よって、爆風が伴星表面に当たった瞬間のリーマン問題によってその後の伴星に与えられる熱が決定されるということになる。このモデルを模式的に示したのが、図 3 である。星と爆風の典型的な物理量を使ってリーマン問題を解いた結果、本研究におけるシミュレーションから得られたべき乗則と、この解析的モデルによって導かれたべき乗則が非常によく一致することがわかった。

4 Conclusion

大質量連星系内の超新星爆発において、爆風によって最大約 25% の質量が伴星から剥ぎ取れることが分かった。これは、その後の連星の生存や進化に大きな影響を与える可能性がある。また、剥ぎ取れる質量は連星の公転半径についてべき乗で落ちていく。そのべきは簡単な解析的モデルによって説明することができ、爆風が伴星表面に当たった瞬間の物理量で剥ぎ取れる質量が決まるということが分かった。

Reference

R.Hirai, S.Sawai & S.Yamada 2014. ApJ in press