

超新星 iPTF13bvn の連星親星モデル

早稲田大学 博士後期課程 3 年 平井 遼介

1. 研究背景

iPTF13bvn は 2013 年 6 月 16 日に Intermediate Palomar Transient Factory によって発見され、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) で爆発前の画像が受かっている唯一の Ib 型超新星として有名な超新星爆発である。光度曲線の減衰が早かったことから親星は $3.5M_{\odot}$ の He 星であることがわかった。このようなコンパクトな親星を単独星の進化で説明しようとするとう不自然に強い星風が必要になるため、連星相互作用が不可欠であったという見方がされるようになった。Bersten et al. 2014 は連星進化シミュレーションを行い、最終的に爆発前の画像と合致するような明るさの $\sim 3.5 M_{\odot}$ の He 星を作ることに成功した (図 1)。彼らのモデルは $20+19 M_{\odot}$ の連星系が主星の水素燃焼期の質量輸送 (case A mass transfer) によって主星から伴星へ質量が大量に渡され、水素外層を完全に失った親星を作るというものだった。それによると伴星はある程度大きくなるため ($23-40 M_{\odot}$)、爆発の約 3 年後に超新星残骸中に青く明るい星が浮かび上がってくると予想された。

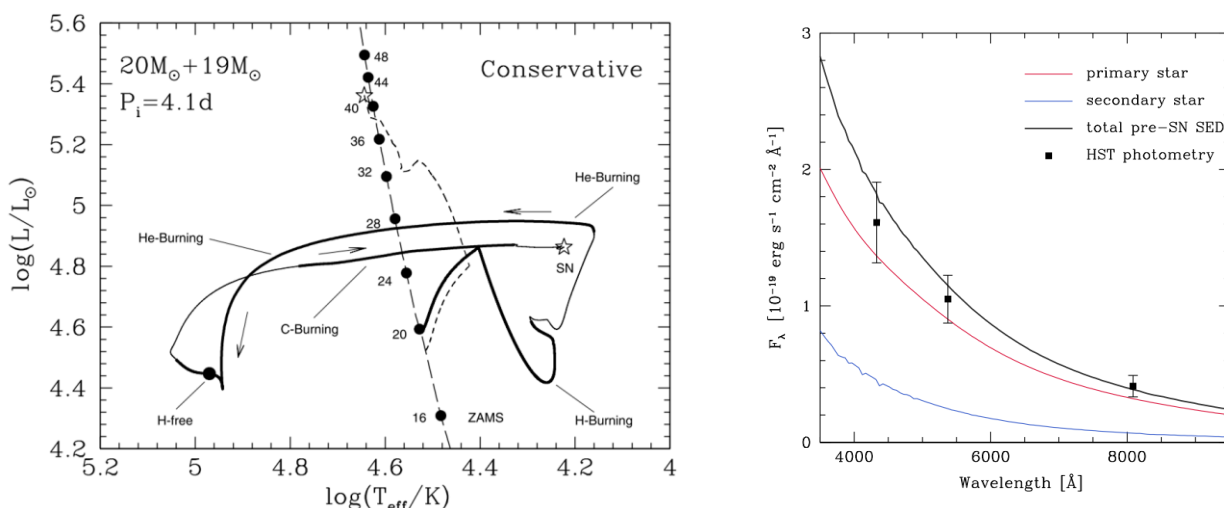


図 1. Bersten et al. 2014 による連星進化計算の結果。(左) 連星進化の最後の星から得られるフラックスと爆発前観測のフラックスの比較 (右)

2. 爆風衝突シミュレーション

実際に連星系内で超新星爆発が起こった場合には爆風が伴星へ当たることで見え方が変わる可能性がある。そのため、本研究の第一段階では伴星へ爆風を当てるシミュレーションを行った。具体的な手順としては、連星進化コード MESA を用いて Bersten et al. 2014 の進化経路を再現し、それによって得られた伴星モデルを流体シミュレーションコードに乗せ、爆風を衝突させて時間発展を追った。その結果、爆風によって伴星から質量がはぎ取れることはほぼ無いものの、伴星表面が衝撃波によって加熱されることで大きく膨張する可能性があることがわかった。膨張のタイムスケールが長すぎるため流体計算ではどこまで膨張するかわからない。改めて MESA を用いて爆風によって加熱された後の星の発展を追い、爆発から数年後の見え方を予想した (図 2)。その結果、従来予想と比べ大きく膨張し表面温度が低くなった状態で見つかる可能性があることがわかった。赤い星として出てくるため、HST などの可視光バンドでは従来予想より明るいだろうと予想された。そのため、従来予想の 2016 年より早く伴星が見えてく

ることが示唆された。

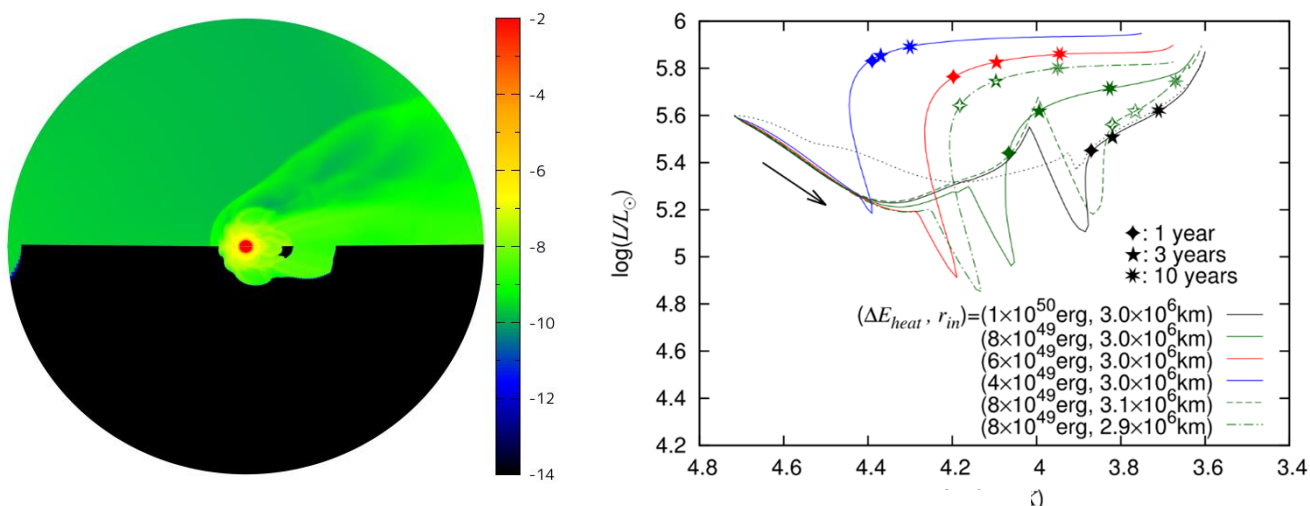


図2. 爆風衝突シミュレーションのスナップショット (左)

爆風加熱による伴星のHR図上での位置の変化 (右)

3. 追観測の結果と新たなモデルの構築

2015年6月下旬に iPTF13bvn の追観測が HST で実施された。その結果、伴星の明るさに非常に強い制限がかけられた。我々が予想した爆風加熱による膨張が否定されたどころか、 $20M_\odot$ 以上の大きい星が残っている可能性が限りなく低くなった。爆発前の画像は同じデータを使用しているにも関わらず、グループによって報告しているフラックスが異なっている (図3)。そのため、爆発後の観測データもどこまで信用できるかわからないが、強い制限であることは間違いない。

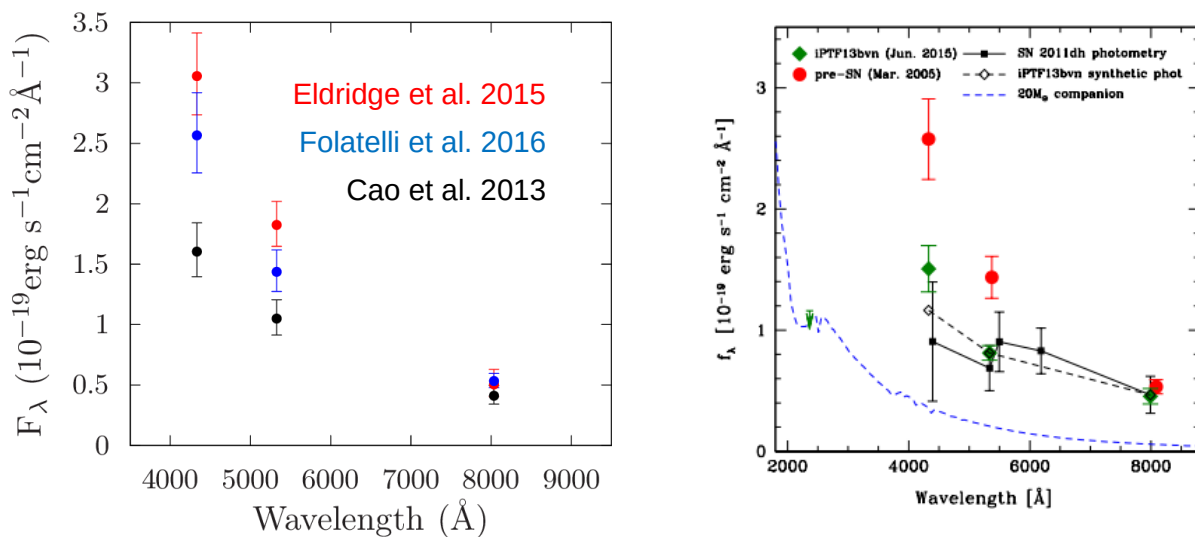


図3. 爆発前の親星の観測 (左) Folatelli et al. 2016: 爆発から2年後の追観測 (右)

図4に観測からかけられる親星系への制限をまとめた。左図では爆発前の親星がいたはずの HR 図上の領域を塗りつぶしてある。爆発前データの解析結果がグループによって異なるため、それぞれの結果を色分けしてある。右図では爆発後の伴星にかけられる上限を塗りつぶしてある。右図より、伴星が主系列星に近い場合は $20M_\odot$ 以下であることが読み取れるが、もし爆風衝突による加熱も考慮するとその上限はさらに下がる。これにより Bersten et al. 2014 が示したような連星進化モデルは伴星が大きいことを

要請するため、ほぼ否定された。

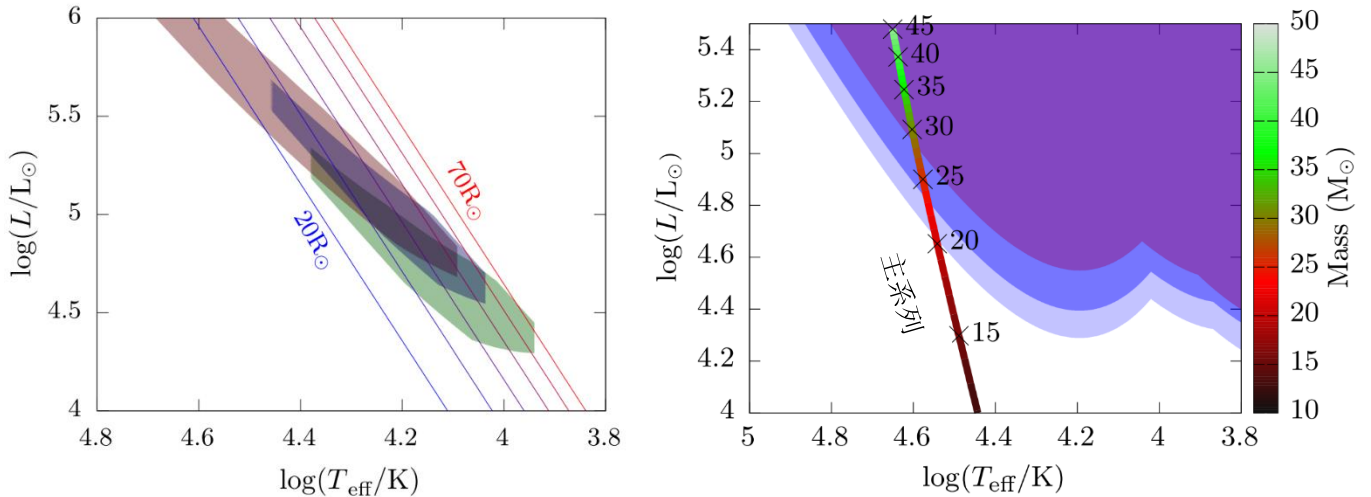


図4．爆発前観測から親星へかけられる制限（左）追観測から伴星へかけられる制限（右）

今回は代替案として、伴星が小さくても主星の外層を効率的にはぎ取ることのできる共通外層状態を経たような進化経路を検証した。共通外層状態とは、主星が膨張した段階で伴星を飲み込んでしまう現象である。飲み込まれた伴星は摩擦で軌道エネルギーを失い中心に落ち込んでいく。失われた軌道エネルギーは主星の外層に渡され、吹き飛ばされていく。外層を吹き飛ばしきることができれば、主星のコアと伴星だけが残し、近接連星としてさらに進化を続けることができる。もし外層を吹き飛ばすだけのエネルギーが系に無ければ、そのまま合体して一つの星になってしまう。このように、外層を吹き飛ばしきれるかが共通外層状態の議論をする際の焦点となる。

まず、共通外層状態を経た星が爆発前の観測と合うかどうかを確認した。恒星進化計算を行い、膨張してきた段階で人工的に外層を一気に剥がし取り、むき出しになったコアを重力崩壊するまで進化させる。その結果が図5である。17 M_⊙のモデルに関しては最終的に爆発直前の観測と合致する位置に到達することがわかった。このことから、共通外層状態を経たようなモデルでも iPTF13bvn の親星の形成を説明できる可能性があることがわかった。

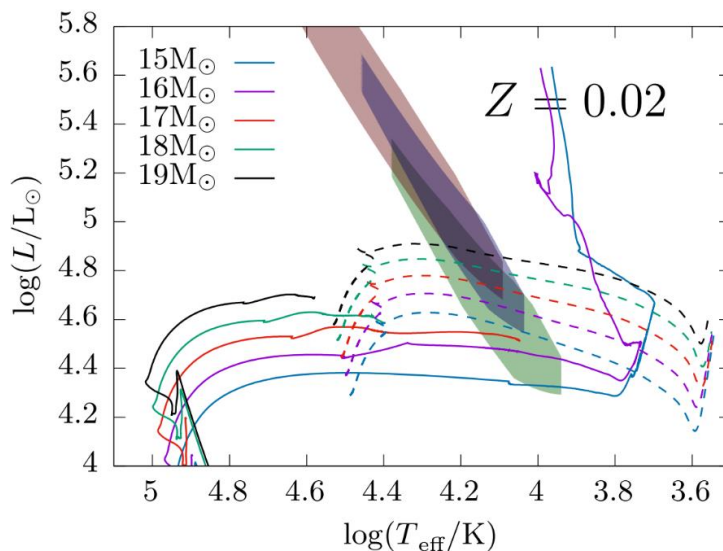


図5．共通外層状態再現シミュレーションの結果

共通外層状態の最大の争点である、系が外層を吹き飛ばしきれるかどうかを調べるために一般的に一番使われている α -formalismを用いる。これは、以下のような式で表される。

$$E_{\text{env}} = \alpha_{\text{CE}} \left(-\frac{Gm_1m_2}{2a_i} + \frac{Gm_cm_2}{2a_f} \right)$$

外層の束縛エネルギー E_{env} と共通外層状態前後の重力エネルギーの差にエネルギー変換効率として α_{CE} をかけたものを比較している。通常は、 α_{CE} を手で与えて他の物理量を代入すると最終的な軌道長半径 a_f が得られ、その時点で両方の星がロッシュローブを満たしているかどうかを調べることで共通外層状態の成否を判定する。今回は最終的な主星の半径の制限から a_f の下限を求め、伴星の質量への制限などと合わせて逆に α_{CE} に制限をかけるということを試みた。 α_{CE} は通常は1とすることが多いが、今回は5~7ぐらいの下限值が得られた。1以上の値が出るということは外層を剥がし取るのに軌道エネルギー以外のエネルギー源が存在する(再結合エネルギー等)か、そもそも共通外層状態モデルが間違っているということを意味する。iPTF13bvnの親星の形成シナリオはますます混迷を極めている。

参考文献：

- [1] Bersten et al. 2014, The Astronomical Journal, 148, 68
- [2] Hirai et al. 2015, The Astrophysical Journal, 805, 170
- [3] Folatelli et al. 2016, The Astrophysical Journal, 825, 22

追記：

研究会の後に少しだけ研究に発展がありました。

共通外層状態モデルは α_{CE} への制限から不適當であると思われる。もともと通常の連星進化モデルが否定されたのは伴星が大きくて明るくなるはずにも関わらず後期の観測で伴星が見つかっていないことが原因である。しかし、伴星がブラックホール等のコンパクト天体であれば大きな質量を持っていてもその後観測されることはない。伴星がブラックホールであると仮定して連星進化計算を行ったところ、爆発前の画像と合致するモデルが見つかった。このモデルは今後の観測から検証することは難しいが、伴星が今後も発見されない場合、伴星がブラックホールである可能性が高いと言えよう。

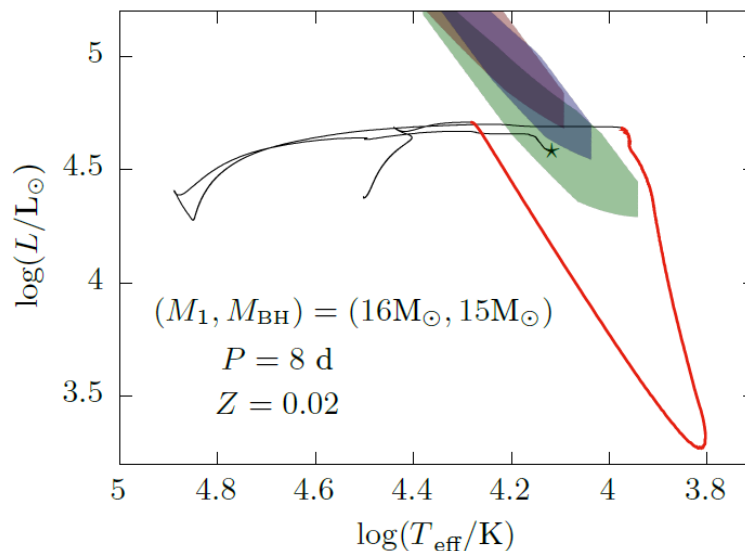


図6. 伴星がブラックホールの場合の連星進化計算(色が薄い部分は質量輸送中)