爆発直前の大質量星の進化や観測的特徴、 身近な候補天体について

守屋尭 国立天文台



大質量星の中心部の進化



大質量星の表面の進化



Smartt (2015)

時間スケール

- ・ 星の寿命は核反応の時間スケールで決まっている
- ・ 恒星進化は通常静水圧平衡を仮定
- 中心部での変化はthermal timescaleで表面まで伝播する

$$\tau_{\rm dyn} \sim 4 \left(\frac{R}{100 R_{\odot}}\right)^{3/2} \left(\frac{M}{10 M_{\odot}}\right)^{-1/2} \,\rm{days}$$

$$\tau_{\rm th} \sim 300 \left(\frac{M}{10M_{\odot}}\right)^{2} \left(\frac{R}{100R_{\odot}}\right)^{-1} \left(\frac{L}{10^{5} L_{\odot}}\right)^{-1} \,\rm{yr}$$

$$\tau_{\rm nuc} \sim 10^{6} \left(\frac{\varepsilon}{10^{-3}}\right) \left(\frac{M}{10 M_{\odot}}\right) \left(\frac{L}{10^{5} L_{\odot}}\right)^{-1} \,\rm{yr}$$

大質量星の重力崩壊直前の進化

- 15 Msunの星の中心部のキッペンハーン図
 - ・ 崩壊へ向かう進化は数十年の時間スケールで起こる
 - ・ thermal timescaleよりも長い
 - ・ 中心部が崩壊に向かっても表面の変化はないと考えられてきた



今日の内容

爆発直前の大質量星を外から電磁波で観測していても爆発の兆候は ないと思われてきたが、実はあることが分かってきた。

- どのような兆候があるのか
 - ・ 赤色超巨星の場合
 - ・ Wolf-Rayet星の場合
- ・ 身近にそのような兆候を示している星はあるのか

重力崩壊型超新星の種類

- ・ 赤色超巨星の爆発(水素が観測される超新星: Ⅱ型)~60%
- ・ Wolf-Rayet星の爆発(水素が観測されない超新星:lb, lc型) ~ 20%
 - Ic-BL [broad line] (いわゆる"ハイパーノヴァ") ~ 1%



重力崩壊型超新星の親星



重力崩壊型超新星の親星

- ・ 赤色超巨星の親星
 - ・ 5 Msun以上の水素層、半径が500-2000 Rsun
- Wolf-Rayet星
 - ・ 水素層(ほとんど)なし、半径が0.1 10 Rsun



赤色超巨星の超新星親星の例

- ・ SN 2008bk (II型; 水素あり)の親星
 - 約12 Msunの赤色超巨星
- ・ 現在数十個の赤色超巨星超新星親星が確認されている



Wolf-Rayet星の超新星親星の例

- iPTF13bvn (lb型; 水素なし、ヘリウム有り)の親星
 - ・約3.5 MsunのWolf-Rayet星。ZAMS massは10-20 Msun
- ・ 現在数個のWolf-Rayet超新星親星が確認されている



- Ⅱ型超新星
- ・ 初めの衝撃波からの熱エネルギーで光る



















可視光域での光度曲線

- 外層が断熱膨張して可視光域で明るい温度になると明るくなる
 - ・ 明るくなる時間スケールは断熱膨張の時間スケール
 - ・ 親星の半径に大きく依存

•



可視光域での光度曲線

・ 光度曲線の理論モデルとの比較



赤色超巨星爆発直後の光度曲線

光度曲線の理論モデルとの比較

•



Moriya et al. (2017)

赤色超巨星爆発直後の光度曲線

- ・ 可視光域で最大の明るさに達するまでの時間が理論より短い
 - ・ 親星の半径が小さい?他の原因?



Gonzalez-Gaitan et al. (2015)

・ SN 2013fs: 爆発約3時間後に発見された



SN 2013fs: 爆発約6時間後にスペクトルがとられた

•



Yaron et al. (2017)





爆発直前の赤色超巨星まわりの密度構造



高密度星周物質中での超新星爆発



星周物質の密度構造



Moriya et al. (2018)



Moriya et al. (2011, 2018)

可視光での光度曲線



Moriya et al. (2011, 2018)

最大の明るさに達する時間と等級



Moriya et al. (2011, 2018)

SN 2013fsとの比較

- ・ SN 2013fsの可視光光度曲線は高密度星周物質があれば再現可能
 - ・爆発直前100年以内に質量放出率が10-3 Msun/yr程度であった
 - ・ 星周物質の質量は約0.1 Msun



Moriya et al. (2017), see also Morozova et al. (2017)

赤色超巨星の質量放出率

- ・ 観測されている赤色超巨星の質量放出率は高々10-4 Msun/yr
 - ・ 爆発直前に質量放出率が上昇?



Mauron & Josselin (2011)
SN 2013fsの爆発時の星周環境



Yaron et al. (2017)

他の赤色超巨星からの超新星ではどうか

・ 赤色超巨星の爆発直前の質量放出率の上昇の一般性は?



Gonzalez-Gaitan et al. (2015)

High cadence Transient Survey (HiTS)

- ショックブレイクアウトを発見するためのサーベイ
 - ・ チリにあるDECam(HSCのようなカメラ)を用いたサーベイ
 - チリ大学によって主導された
 - ・ 赤色超新星からの爆発直後の超新星を26個発見した。



ショックブレイクアウト



ショックブレイクアウト



HiTSで見つかった赤色超巨星由来の超新星(26個)の光度曲線



Förster, Moriya, et al. (2018)

ショックブレイクアウトは見つからなかった



Förster et al. (2016)

HiTSで見つかった赤色超巨星由来の超新星(26個)の光度曲線



Förster, Moriya, et al. (2018)

赤色超巨星の爆発直前の質量放出率

8割以上の赤色超巨星が爆発直前に10-4 Msun/yr以上の質量放出率を持つ

•



Förster, Moriya, et al. (2018)

赤色超巨星の質量放出率

8割以上の赤色超巨星が爆発直前に質量放出率の上昇を示す

•

・ 爆発直前の赤色超巨星の質量放出率上昇は一般的に起こっている



ショックブレイクアウトはほとんど見られない?

・ 高密度星周物質によって吸収、散乱されてしまう。



質量放出の時間スケール

- 1e15 cm以内の星周密度が上昇
 - ・赤色超巨星の星風速度は約10 km/s
 - 1e15 cmに達するのに約30年かかる



爆発直前の質量放出率上昇の原因

$$\tau_{\rm dyn} \sim 4 \left(\frac{R}{100 R_{\odot}}\right)^{3/2} \left(\frac{M}{10 M_{\odot}}\right)^{-1/2} \,\mathrm{days}$$

$$\tau_{\rm th} \sim 300 \left(\frac{M}{10 M_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{R}{100 R_{\odot}}\right)^{-1} \left(\frac{L}{10^5 L_{\odot}}\right)^{-1} \,\mathrm{yr}$$

$$\tau_{\rm nuc} \sim 10^6 \left(\frac{\varepsilon}{10^{-3}}\right) \left(\frac{M}{10 M_{\odot}}\right) \left(\frac{L}{10^5 L_{\odot}}\right)^{-1} \,\mathrm{yr}$$

中心部と表面をdynamical timescaleで繋いで質量放出させる機構が必要



Wave-driven mass loss

- 中心部で崩壊直前に発生する強い対流によりgravity wave(g mode の波)が発生して、外層で熱化される
 - Quataert & Shiode (2012)



Wave-driven mass loss

・ 赤色超巨星のHR図上での爆発直前の変化の理論予測



・ Wolf-Rayet星のHR図上での爆発直前の変化の理論予測



爆発直前の赤色超巨星の様子

・赤色超巨星からの超新星2020tlf



爆発直前の赤色超巨星の様子



爆発直後のスペクトル



Jacobson-Galan et al. (2021)

爆発直前の親星の光度上昇



大質量星の密度構造も影響を受ける

爆発メカニズムに影響??

•



爆発直前に変化があまり見られなかった例

・赤色超巨星からの超新星2017eawの爆発前9年間の明るさの変化



LSST時代には爆発直前の様子を系統的に探れる

年間数百個規模で爆発前の状態を強く制限できる可能性がある



Jacobson-Galan et al. (2021)

Wolf-Rayet星からの超新星の場合

Wolf-Rayet星の質量放出率

Wolf-Rayet星の質量放出率



Yoon (2017)

Wolf-Rayet星の星風速度

- ・ Wolf-Rayet星の星風速度は約1000 km/s
- ・赤色超巨星の星風速度の100倍
- ・ 同じ質量放出率を持っていたとしても、密度が1/100となる



Wolf-Rayet星の爆発と高密度星周物質

- SN 2019hgp
 - ・ 水素もヘリウムも見られなかった超新星(Ic型)
 - ・ 爆発後1日でスペクトルがとられた
 - ・ 高密度星周物質からの細い輝線が捉えられた



Gal-Yam et al. (2021)

Wolf-Rayet星の爆発と高密度星周物質

- SN 2018gep
 - ・ "ハイパーノバ" (Ic-BL型)
 - ・ 爆発前15日くらいから親星の光度が上昇



Ho et al. (2019)

可視光で高密度星周物質が見られるのは特殊例

- FBOTs (Fast Blue Optical Transients)
 - ・ Wolf-Rayet 星からの超新星の1%弱



Gal-Yam et al. (2021)

超新星爆発噴出物と星周物質の衝突



forward shock(FS)からのシンクロトロン放射

- ・ 超新星は電波波長域ではFSからのシンクロトロン放射で主に光っている
- ・ 電波光度曲線の最大光度と最大に達する時間は吸収プロセスで決定
 - ・ 星周物質密度が低い時は衝撃波でのシンクロトロン自己吸収
 - ・ 星周物質密度が高い時は衝撃波前方のfree-free吸収



Wolf-Rayet星からの超新星の爆発直後からの電波観測

- SN 2020oi
 - ・ 水素とヘリウムを持たないWolf-Rayet星の爆発(Ic型)
- ・ 爆発直後から電波の広帯域で観測された



Maeda et al. (2021)

SN 2020oiの電波スペクトル



Maeda et al. (2021)

SN 2020oiの電波光度曲線



SN 2020oiの爆発時の星周構造



Maeda et al. (2021)

SN 2020oiのWolf-Rayet星親星の爆発直前の質量放出率

- ・ 赤色超巨星の場合と同様の質量放出率の上昇が見られた
- ・ コンパクトなWolf-Rayet星でも爆発直前の質量放出率上昇が発生
 - ・ 爆発直前の質量放出率の変動もある?
- ・ 親星の半径に寄らない質量放出機構が爆発前に働いている?


ここまでのまとめ

- 超新星爆発を起こす大質量星は多くの場合爆発数十年前から質量放 出率を上昇させている
 - ・ 1e-5 Msun/yr以下から1e-3 Msun/yr前後まで上昇
 - ・ 赤色超巨星とWolf-Rayet星の両方で起こっている
- ・ 爆発前に可視光で光度上昇を示す超新星親星も見つかり始めている
 - ・ 光度上昇していないものもある
- ・ 質量放出率が上がる原因はよくわかっていない
 - wave-driven mass loss?

身近な超新星親星候補天体

ベテルギウス

- 15 Msunくらいの単独星
- ・ 50 km/sくらいで星間空間を移動しているrunaway star





ベテルギウスの質量放出率



ベテルギウスの星周環境

・ 赤色超巨星に戻ったばかり?



Mackey et al. (2012)



VY Canis Majoris (VY CMa)

- 1.2 kpc
- ・ 25 Msunくらいの単独赤色超巨星



VY Canis Majoris (VY CMa)

- ・ 長い間高い質量放出率を保っている
 - ・ 500-1000年前には一時的に1e-3 Msun/yrまで上がっていた



Smith et al. (2009)

赤色超巨星の質量放出率が高くなる機構は多い

- ・ 表面の不安定性など
 - ・ 特に質量が大きい場合
- ・ 質量放出率が高いからといって、爆発直前とは限らない
 - 比較的質量が小さい場合は例外?



Yoon & Cantiello (2010)

Wolf-Rayet星の質量放出率



Yoon (2017)

SN 1987A

- ・ 特に爆発直前の質量放出の兆候は知られていない
 - ・ 偶然?青色超巨星だから?



Supernova 1987A • December 2006 Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, P. Challis, and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

STScI-PRC07-10



Morris & Podsiadlowski (2007)

まとめ

- ・ 大質量星の多くは爆発直前に質量放出率を上昇させている
- ・ 重力崩壊型超新星爆発の直前に親星の増光が見られた例もある
- 身近に爆発直前の質量放出率上昇を持っていそうな大質量星は今のところ知られていない
 - ・ 質量放出率が測られていない星も多くある
 - 質量放出率が上昇しない例もある