

連星系・変光星研究会2020

連星系での超新星爆発が与える連星進化への影響： SN 2006jcへの制限

小形美沙 (早稲田大学)

共同研究者：平井遼介 (モナッシュ大学)
聖川昂太郎 (東京大学)

Introduction: 連星系と超新星

● 超新星爆発 (SN)

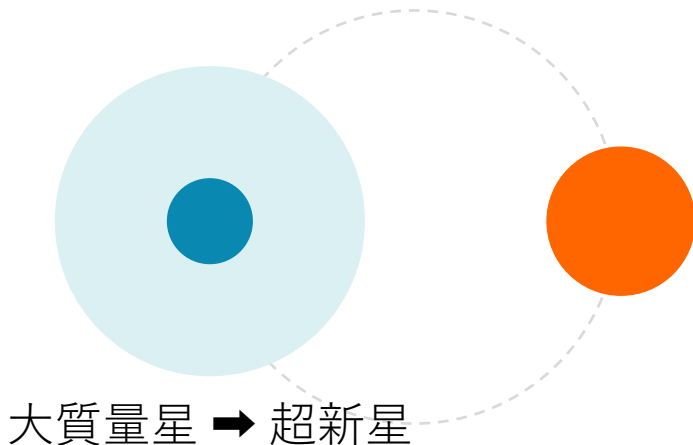
重力崩壊型超新星 (CCSN)

大質量星($\geq 8M_{\text{sun}}$)の最期の爆発
中性子星やブラックホールを残す

Ia型超新星 (SN Ia)

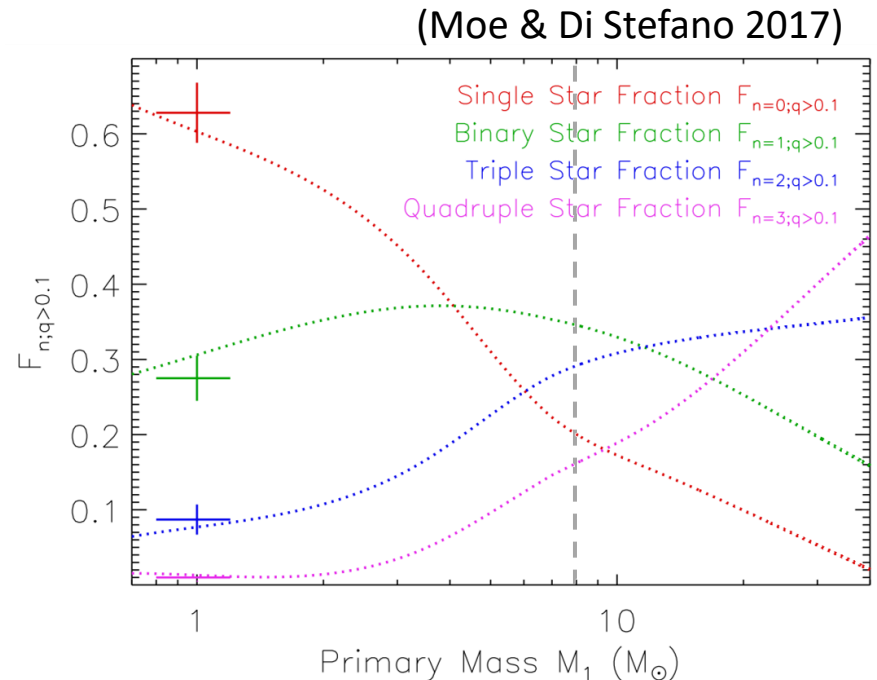
連星系の白色矮星で起こる爆発

ここでは
連星系での超新星 \rightarrow Ia型超新星 \times



● 連星系

連星相互作用によって進化に影響
大質量星になるほど割合が増加



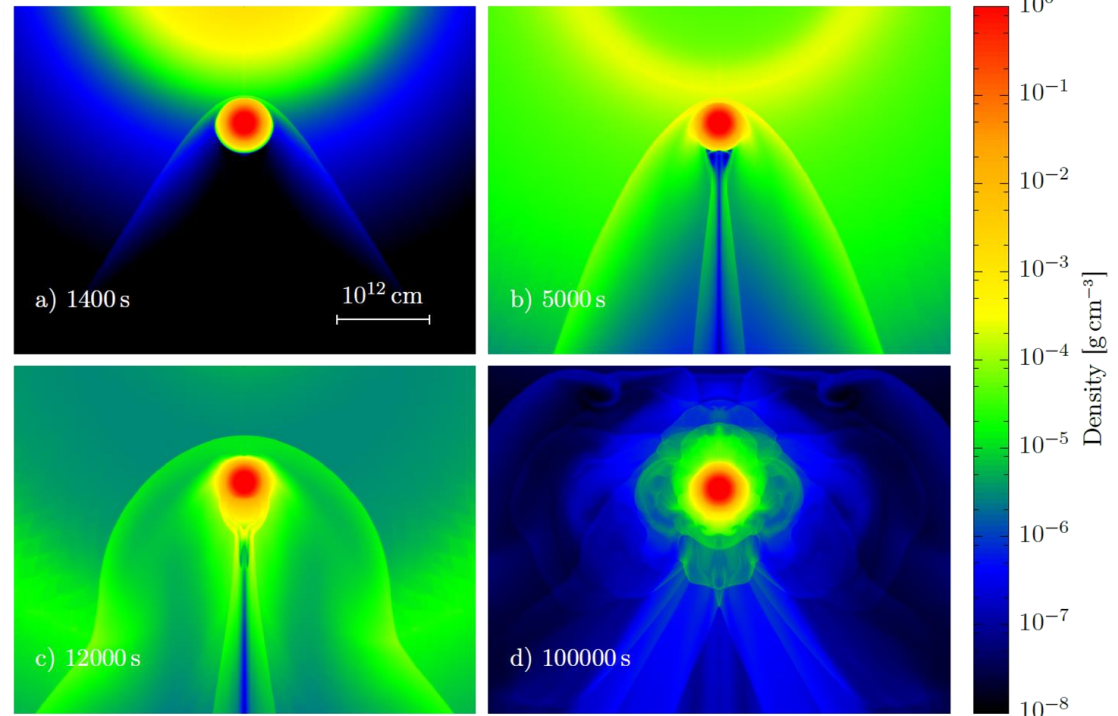
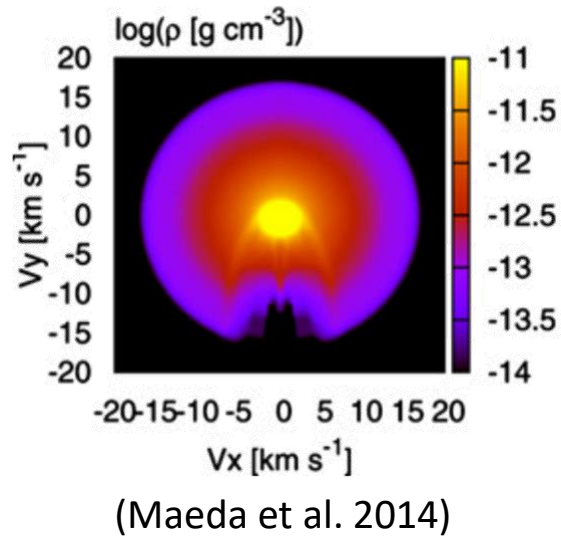
Introduction: 連星系と超新星

連星系内に存在する重力崩壊型超新星

伴星についての観測がある：SN 1993J, SN 2001ig, SN 2006jc, SN 2011dh

Ejecta-Companion Interaction (ECI)

超新星爆発のejectaと伴星の相互作用

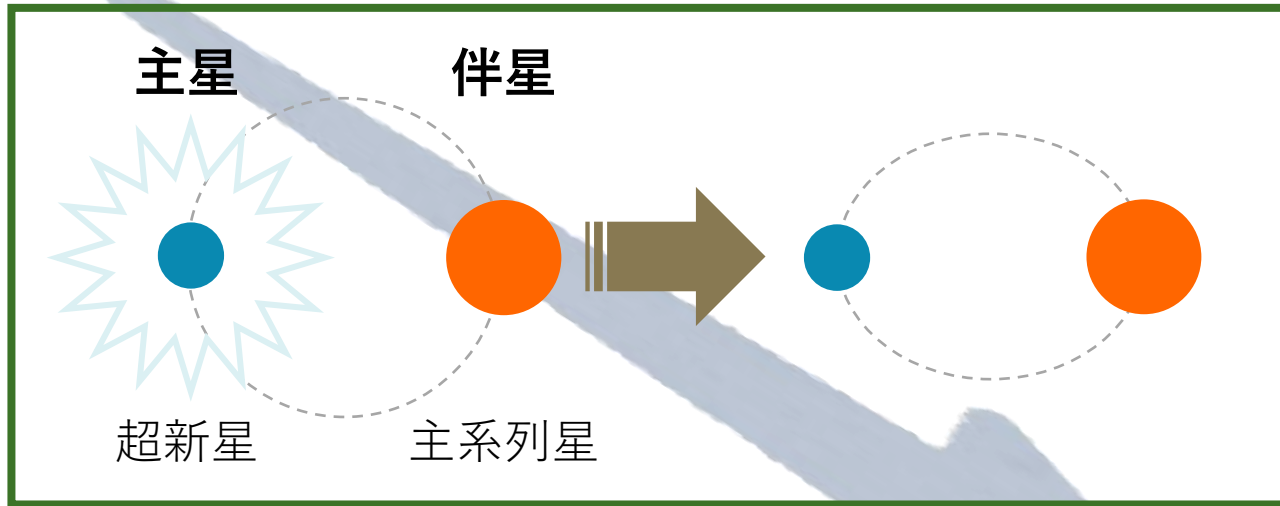


(Hirai et al. 2018)

目的

✓ 連星進化理論

連星系内で超新星爆発が起きた場合の進化への影響



✓ 超新星親星への制限

中性子星連星
ブラックホール連星

先行研究

□ Hirai et al. (2018)

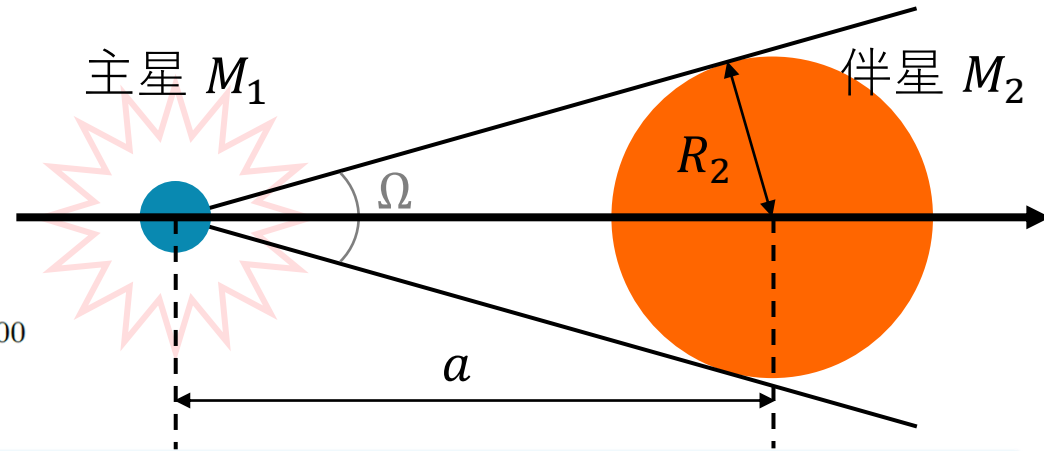
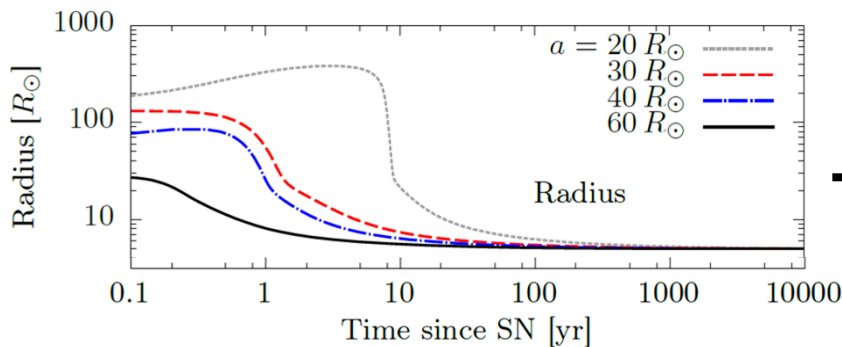
CCSNとMSのECIについて流体力学シミュレーション
爆発エネルギーによって伴星がどのように加熱されるかを調べた

伴星を加熱するエネルギー

$$E_{\text{heat}} = E_{\text{expl}} \times \tilde{\Omega} \times 0.08$$

$$\tilde{\Omega} = \frac{\Omega}{4\pi} = \left[1 - \sqrt{1 - (R_2/a)^2} \right] / 2$$

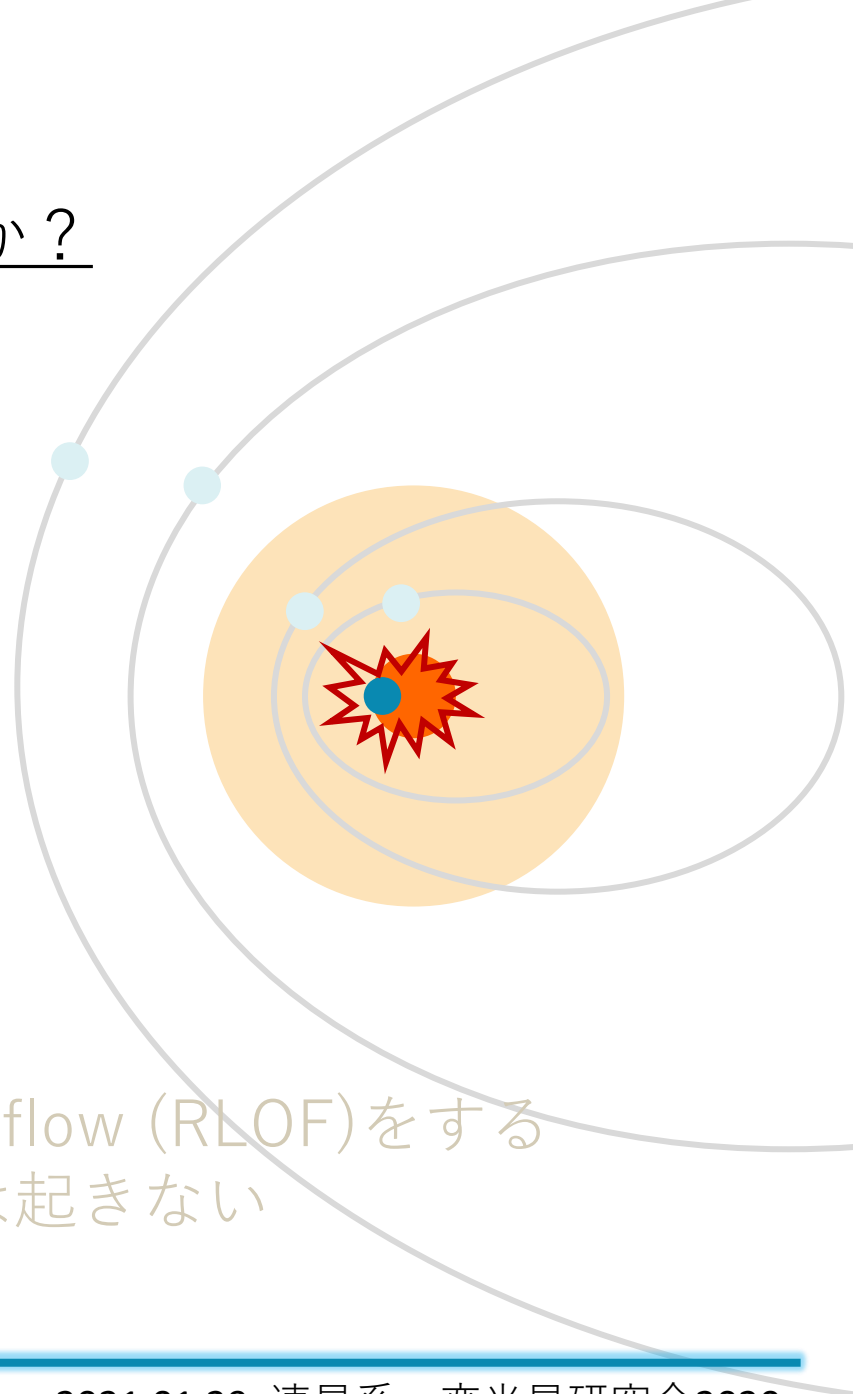
(伴星に向かう爆発エネルギーの8%)



超新星爆発後に連星系がどうなるか？

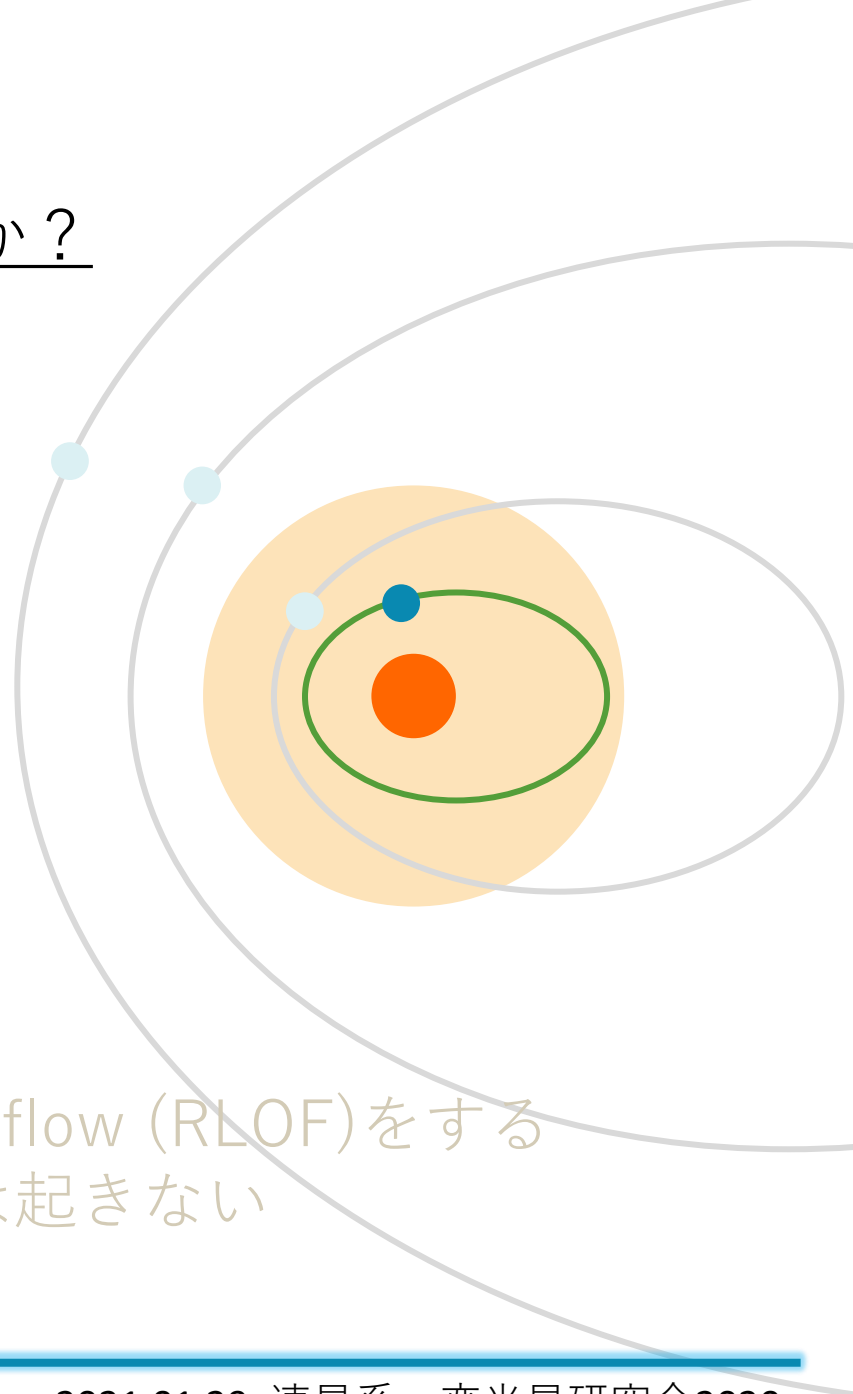
1. 主星と伴星が衝突

2. 遠点でも外層に包まれる
3. 近点では外層に包まれる
4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
6. 連星としての束縛を失う



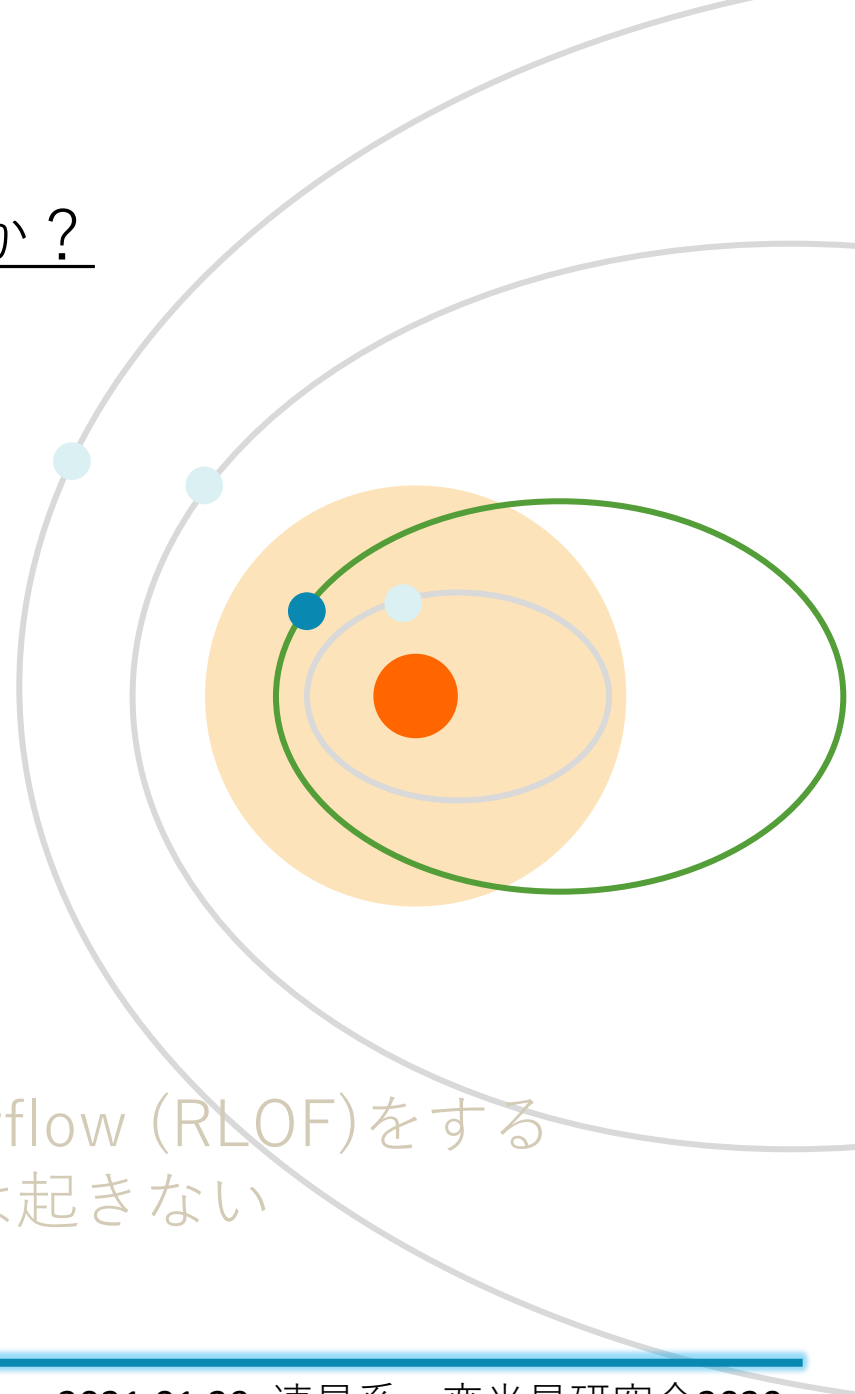
超新星爆発後に連星系がどうなるか？

1. 主星と伴星が衝突
- 2. 遠点でも外層に包まれる**
3. 近点では外層に包まれる
4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
6. 連星としての束縛を失う



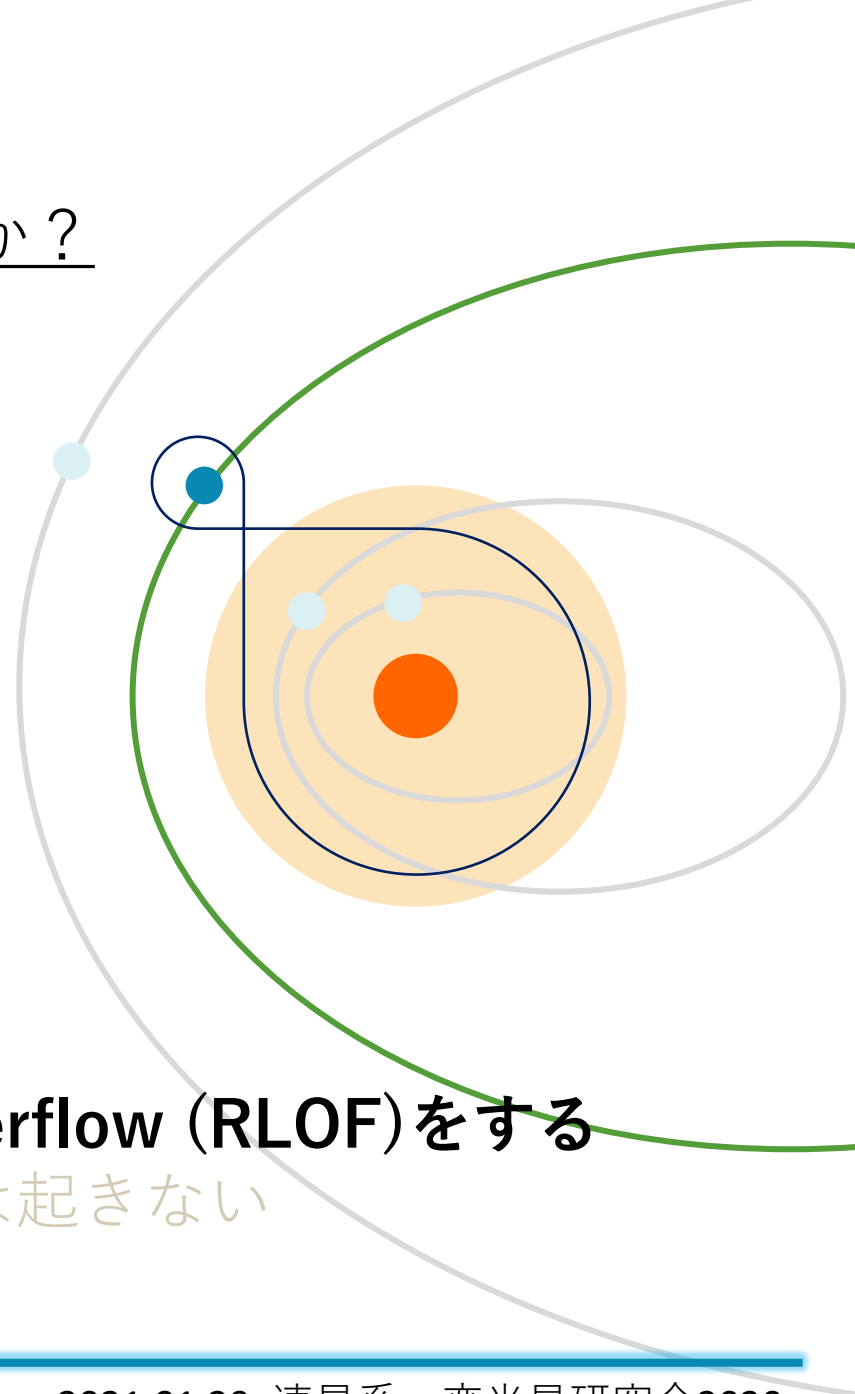
超新星爆発後に連星系がどうなるか？

1. 主星と伴星が衝突
2. 遠点でも外層に包まれる
- 3. 近点では外層に包まれる**
4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
6. 連星としての束縛を失う



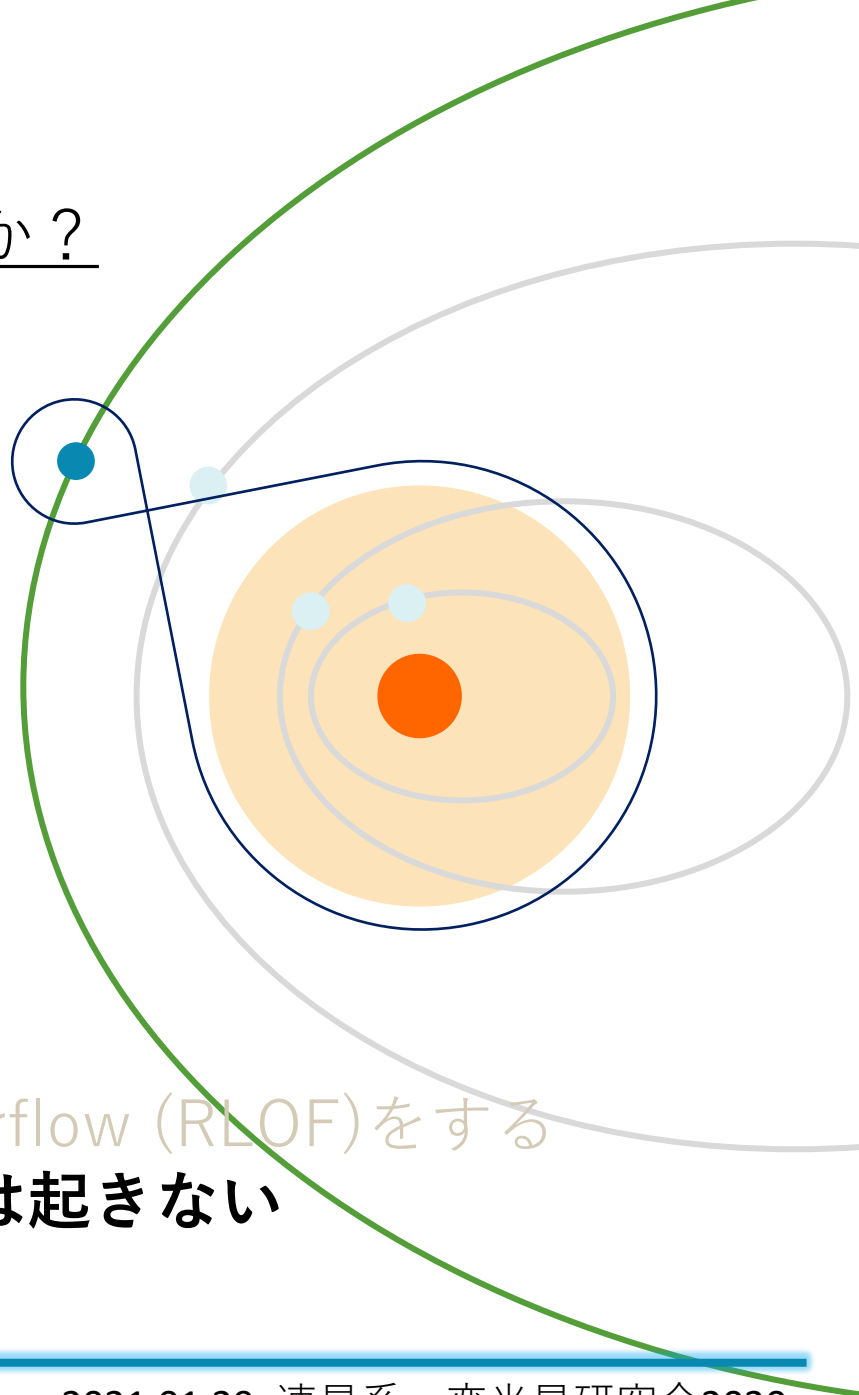
超新星爆発後に連星系がどうなるか？

1. 主星と伴星が衝突
2. 遠点でも外層に包まれる
3. 近点では外層に包まれる
4. **主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする**
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
6. 連星としての束縛を失う



超新星爆発後に連星系がどうなるか？

1. 主星と伴星が衝突
2. 遠点でも外層に包まれる
3. 近点では外層に包まれる
4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする
- 5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない**
6. 連星としての束縛を失う



超新星爆発後に連星系がどうなるか？



1. 主星と伴星が衝突
2. 遠点でも外層に包まれる
3. 近点では外層に包まれる
4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRoche-lobe overflow (RLOF)をする
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
- 6. 連星としての束縛を失う**

Method

1. MESAで爆発後10000年の進化計算

$$E_{\text{heat}} = E_{\text{expl}} \times \tilde{\Omega} \times 0.08$$

2. 爆発後の軌道要素を求め、爆発後の系の状態を調べる

Orbital velocity: $V_{\text{orb}} = \left(G \frac{(M_1 + M_2)}{a_i} \right)^{1/2}$ (爆発前)

Impact velocity: $V_{\text{im}} = \sqrt{0.35 \times \left(\frac{R_2}{a_i} \right)^{2.4}} V_{\text{orb}}$

Separation: $a_f = a_i \left[2 - X \frac{(v_x + V_{\text{orb}})^2 + (v_y + V_{\text{im}})^2 + v_z^2}{V_{\text{orb}}^2} \right]^{-1}$

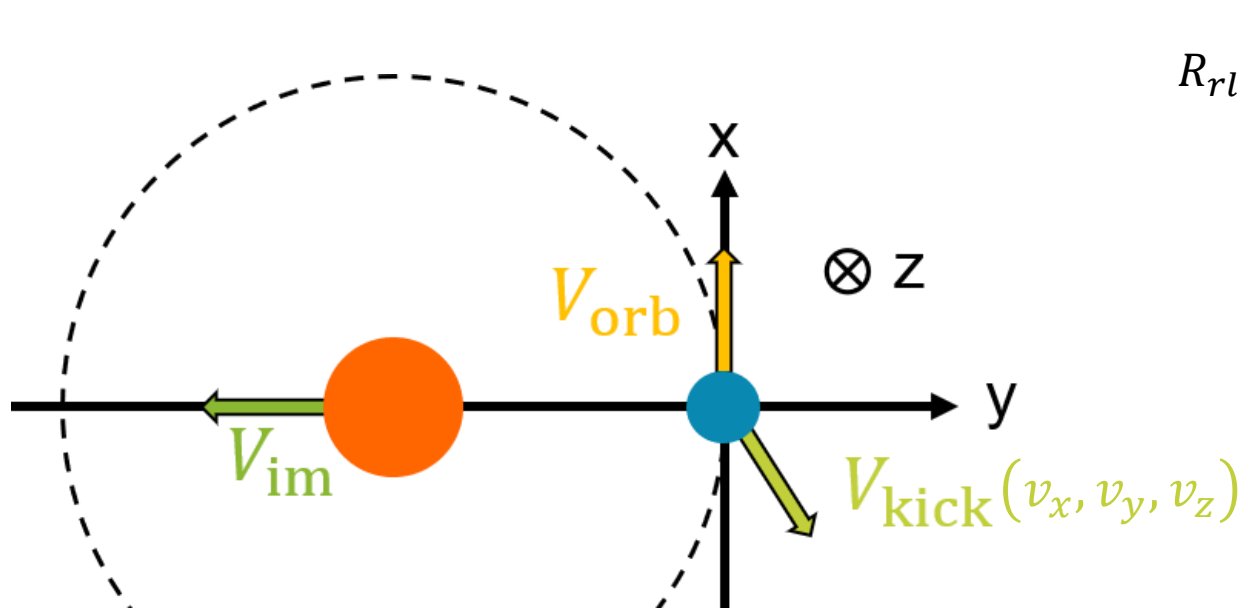
Eccentricity: $e = \left(1 - X \frac{a_i}{a_f} \frac{(v_y + V_{\text{im}})^2 + v_z^2}{V_{\text{orb}}^2} \right)^{1/2}$ $X = \frac{m_1 + m_2}{m_c + m_2}$

Kick velocity: v_x, v_y, v_z

Method

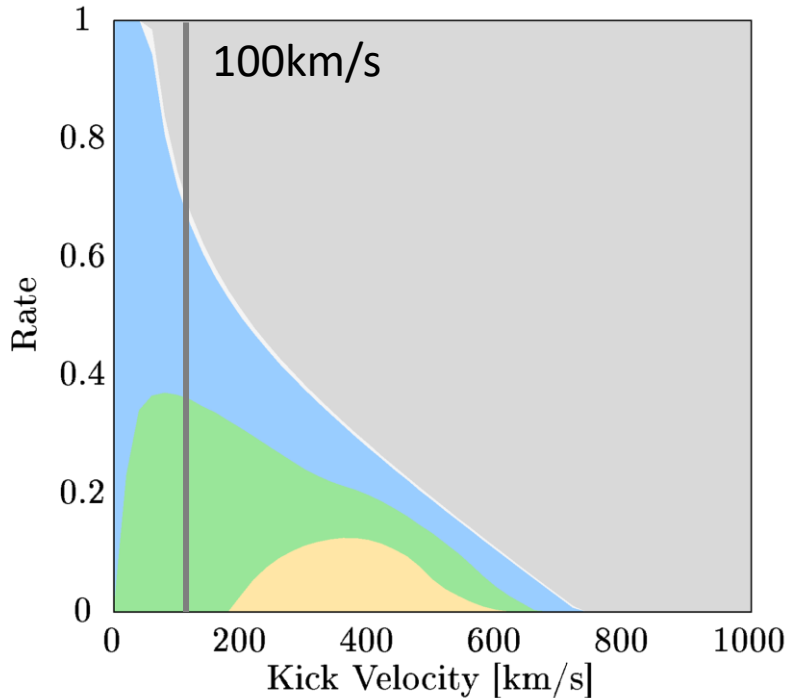
2. 爆発後の軌道要素を求め、爆発後の系の状態を調べる

1. 主星と伴星が衝突 ($a_f < R_2$)
2. 遠点でも外層に包まれる ($a_f(1 + e) < R_{2,\max}$)
3. 近点では外層に包まれる ($a_f(1 - e) < R_{2,\max}$)
4. 主星は外層内に入らないが、伴星外層がRLOFをする ($R_{rl} < R_{2,\max}$)
5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない ($R_{rl} > R_{2,\max}$)
6. 連星としての束縛を失う ($e > 1$)



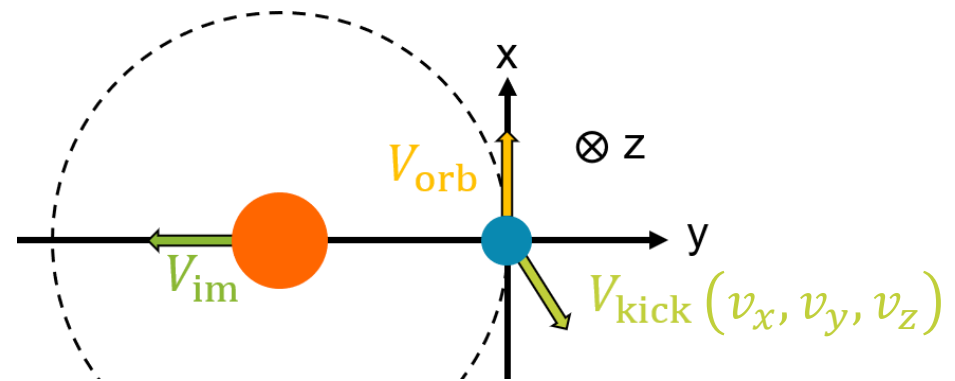
$$R_{rl} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} a_f$$

Results



Kick velocityごとにどのケースになるか

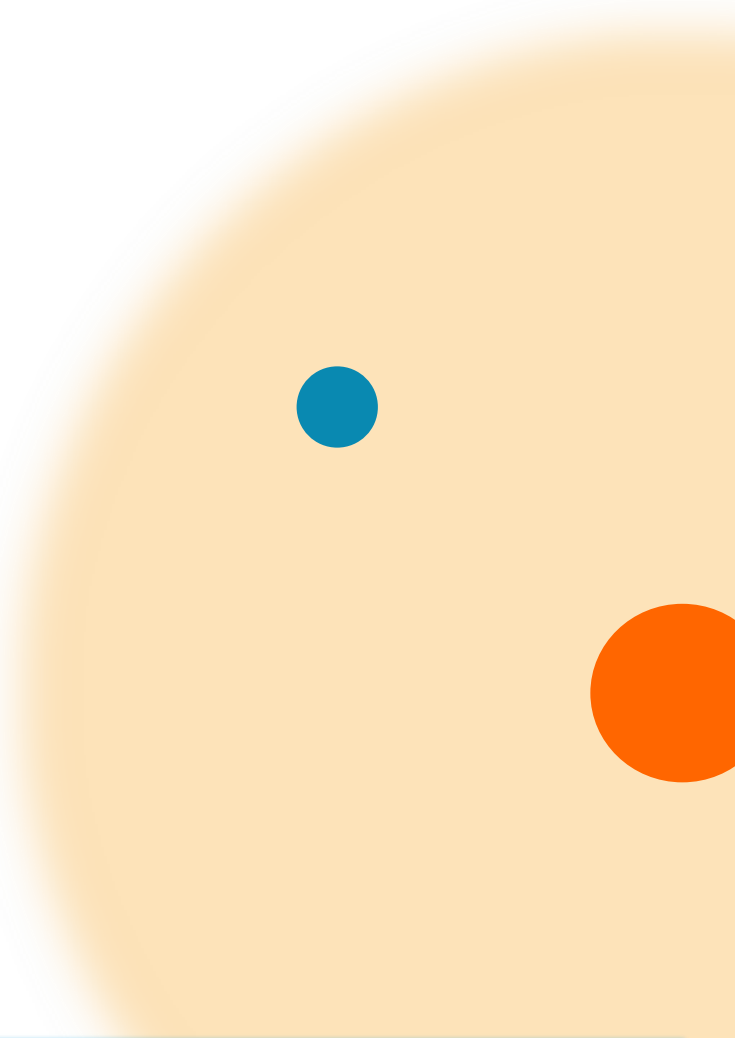
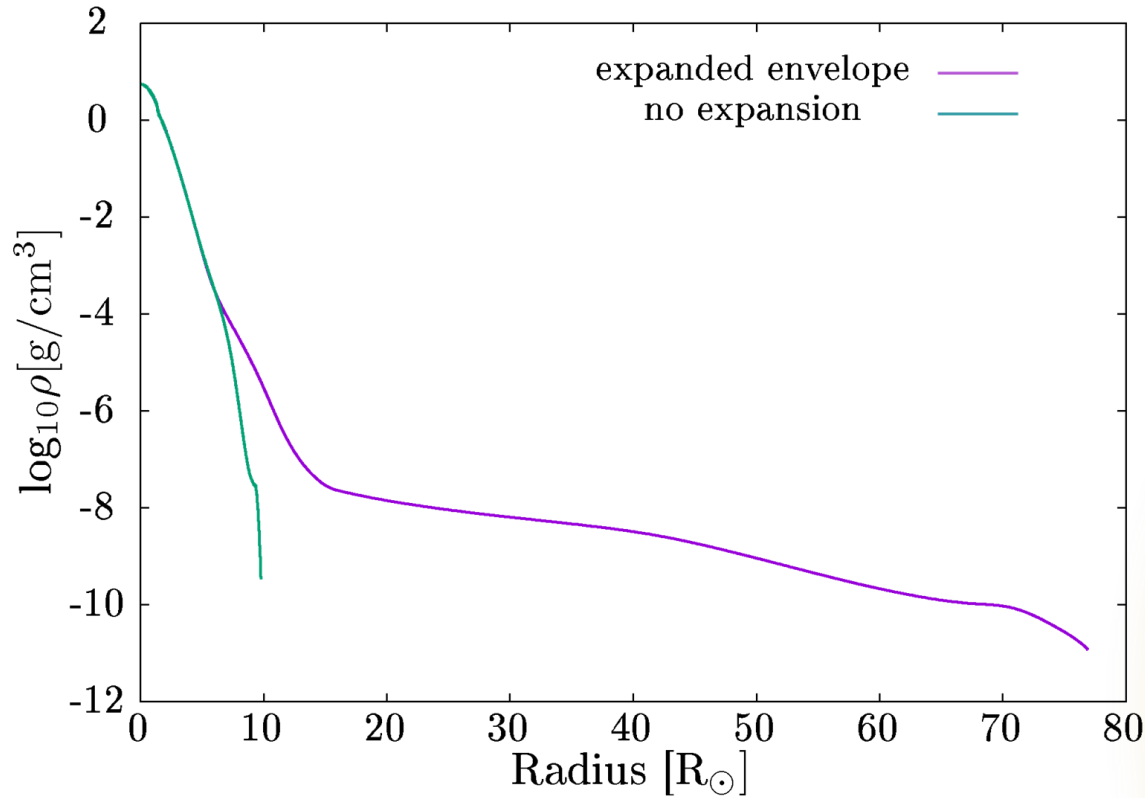
$$M_2 = 15M_{\odot}, R_2 = 7R_{\odot}, a = 40R_{\odot}$$



- 1. 主星と伴星コアが衝突
- 2. 遠点でも外層に包まれる
- 3. 近点では外層に包まれる
- 4. 主星は外層内に入らないが、
伴星外層がRLOFをする
- 5. 連星として生き残るが、RLOFは起きない
- 6. 連星としての束縛を失う

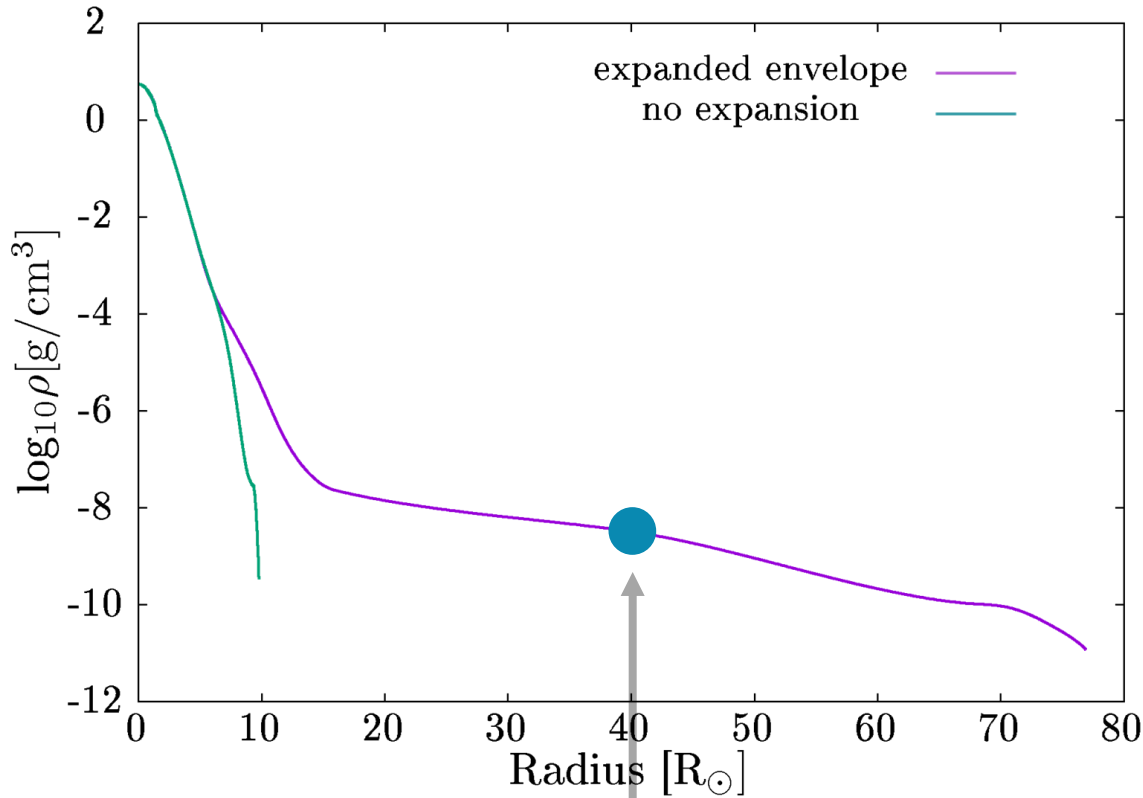
Results

膨張前後の伴星外層の密度分布 $M_2 = 15M_{\odot}, R_2 = 7R_{\odot}, a = 40R_{\odot}$



Results

膨張前後の伴星外層の密度分布 $M_2 = 15M_{\odot}, R_2 = 7R_{\odot}, a = 40R_{\odot}$

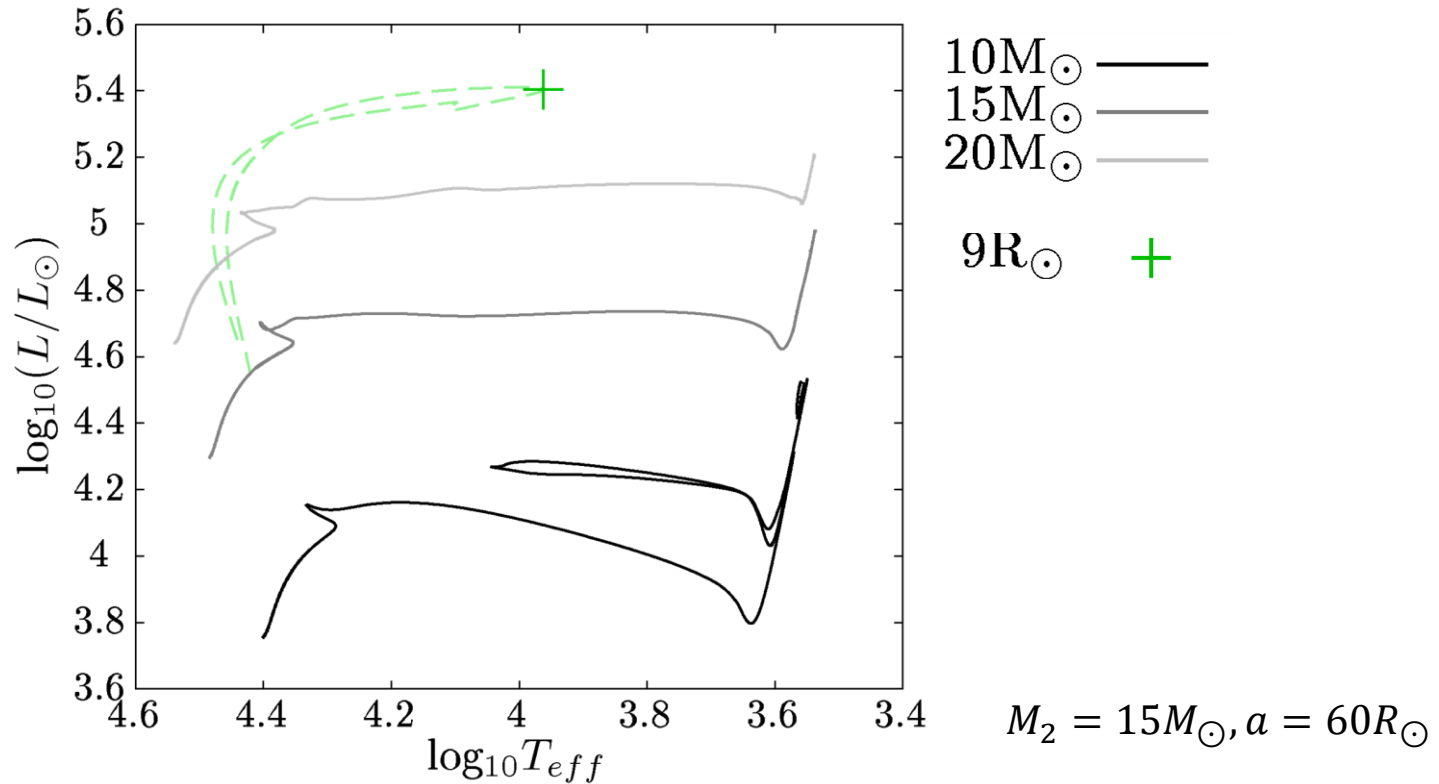


膨らんだ伴星外層が主星に降着して
それ以上膨らめなくなる

Results

伴星が膨張した時のHR図上の位置の変化

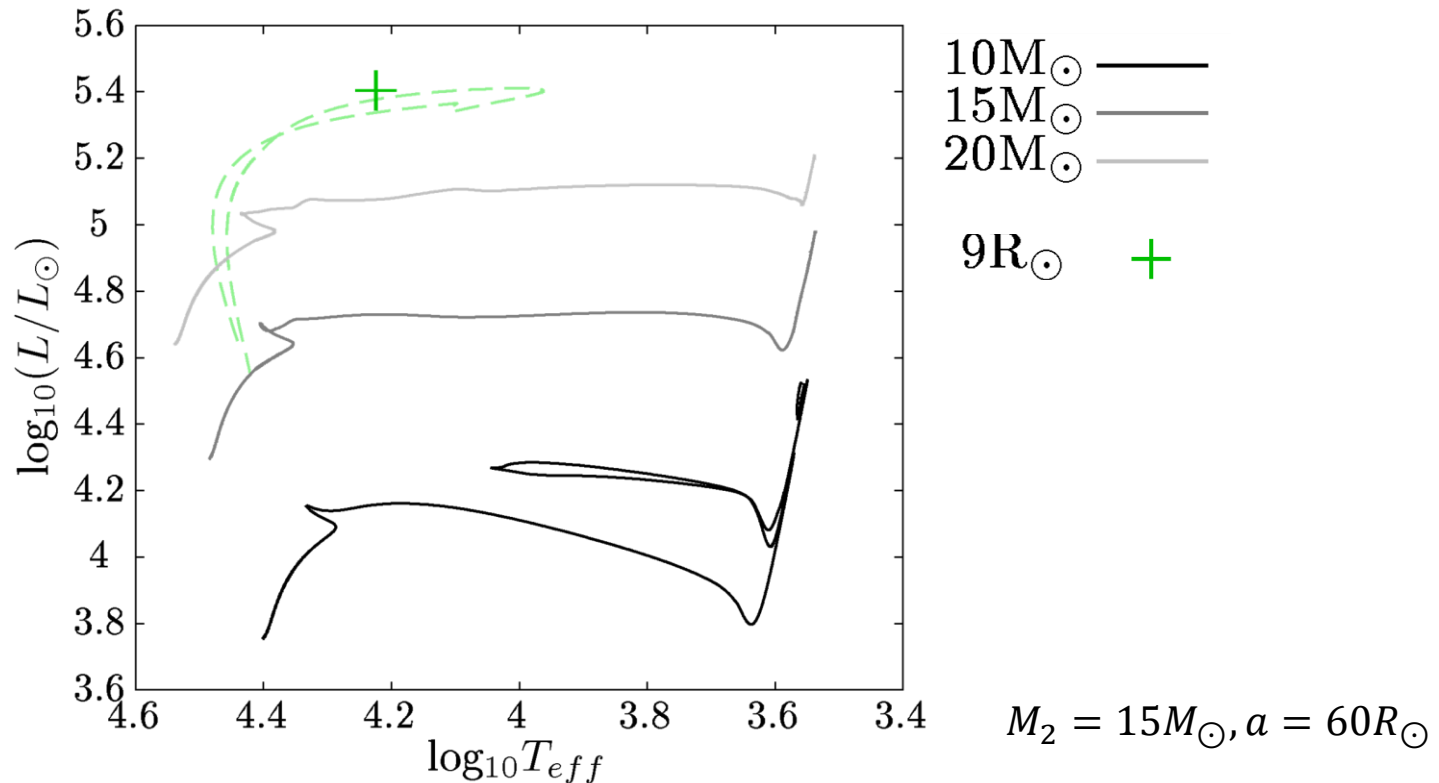
外層が膨張した伴星は通常の進化とは異なる位置に移動する
→通常の進化よりも明るく、温度は下がる



Results

伴星が膨張した時のHR図上の位置の変化

外層が膨張した伴星は通常の進化とは異なる位置に移動する
→通常の進化よりも明るく、温度は下がる
主星によって抑えられる影響を考慮すると、高温側に留まる

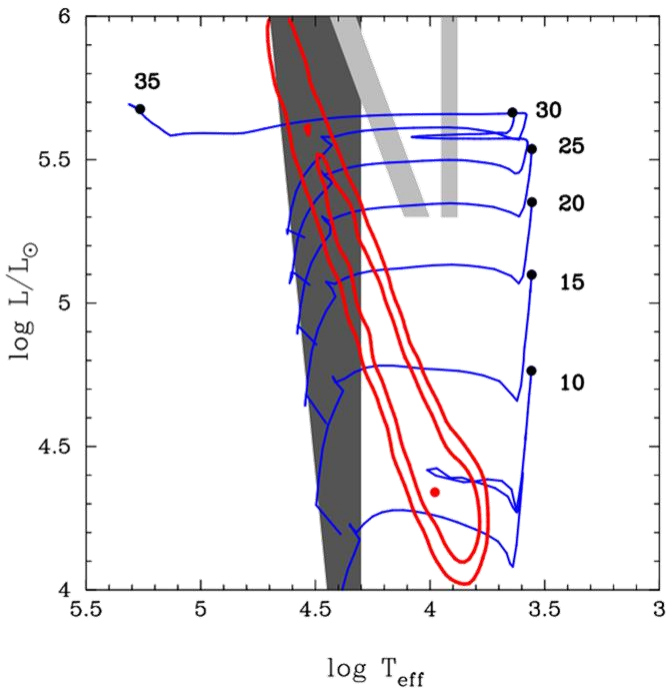


SN 2006jc

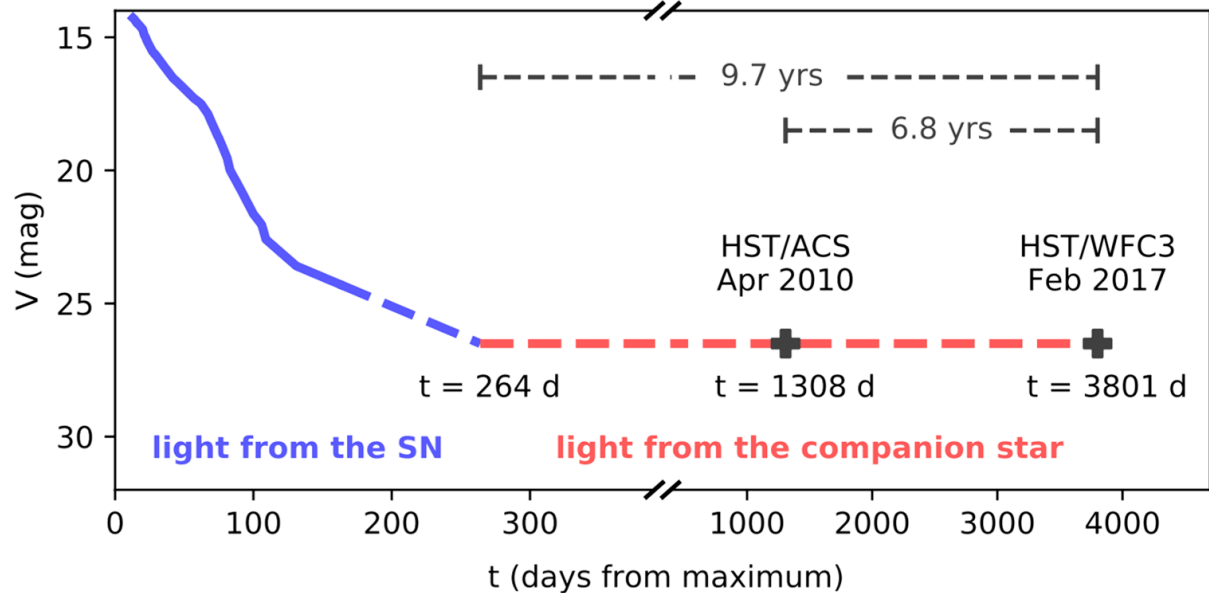
- ◆ Type Ib SN (Stripped-envelope)
- ◆ 伴星が観測されている (Late-time observation)

Light curveは減光し、最大光度から約260日以降flatに
10年以上後まで一定の光度を保っている
伴星のHR図上の位置はHertzsprung gapの領域

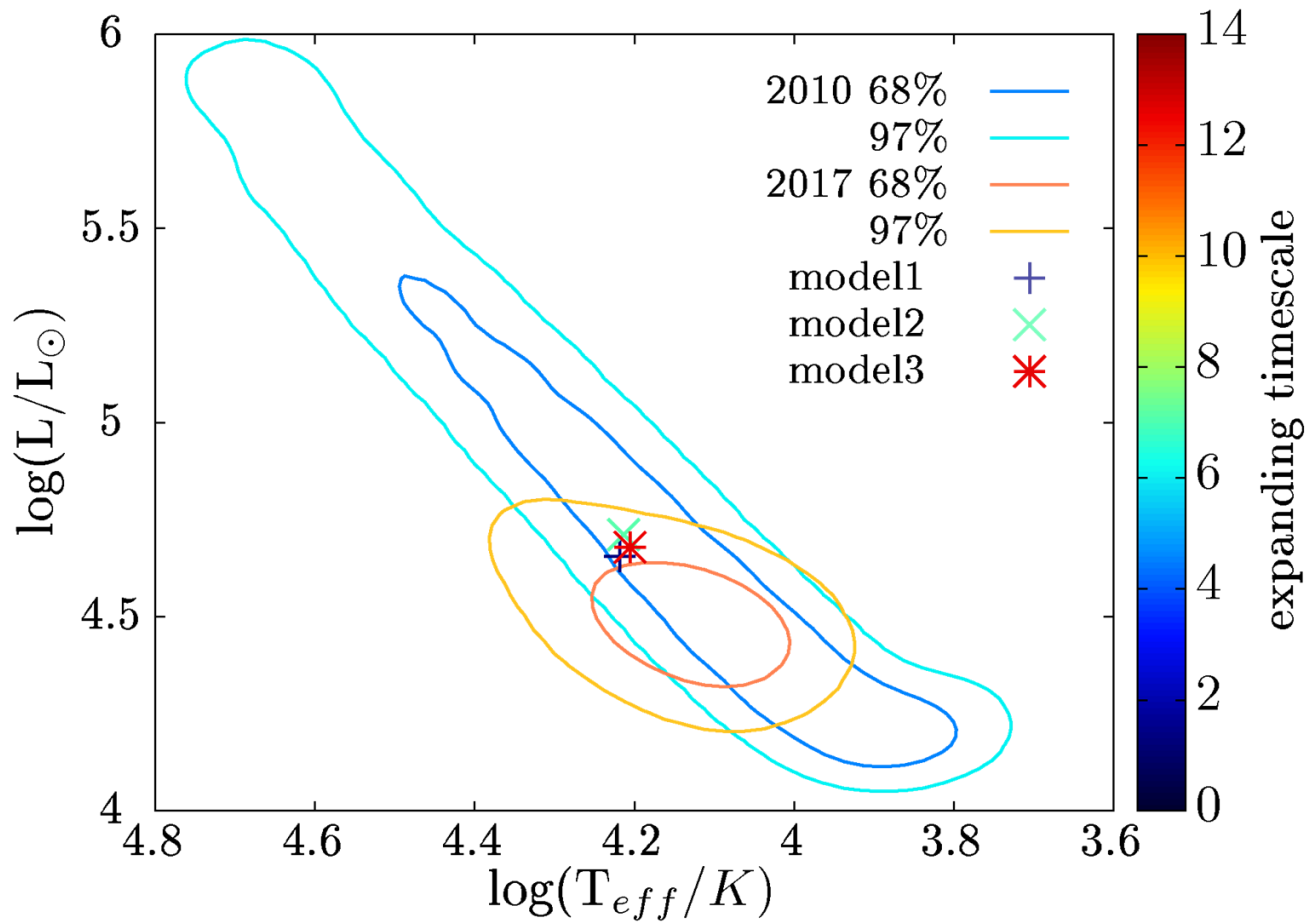
Maund et al. (2016)



Sun et al. (2019)



Results: SN 2006jc



Model1: $M_2 = 4M_\odot, R_2 = 2.5R_\odot, a_i = 40R_\odot, E_{\text{expl}} = 1 \times 10^{51} \text{erg}$ (1.1年)

Model2: // //, $E_{\text{expl}} = 5 \times 10^{51} \text{erg}$ (7.0年)

Model3: // //, $E_{\text{expl}} = 10 \times 10^{51} \text{erg}$ (12.5年)

Summary

- 連星系内での重力崩壊型超新星爆発について、ECIを通して系がどのように変化するかを調べた。
- Kick velocityの大きさや向きに応じて、爆発後の系の様子は大きく変わる。
- 特に伴星の膨張が、主星との距離で抑えられる場合に注目した。
- SN 2006jcに適用し、親星の系についての制限を与えた。
 $M_2 = 4M_{\odot}, R_2 = 2.5R_{\odot}, a_i = 40R_{\odot}, E_{\text{expl}} = 10 \times 10^{51} \text{erg}$
- このモデルから、SN 2006jcは今後は暗くなっていき、元の進化経路に戻っていくと予測される。

今後、こういった天体がどのくらいの距離まで観測可能か、どの程度の割合で観測されるかを見積もっていく予定