

ベテルギウスの寿命について

梅田 秀之(東京大学 天文学専攻) 2022/01/7

Luo Tianyin, Umeda Hideyuki, Yoshida Takashi and Takahashi Koh, 2022, ApJ submitted

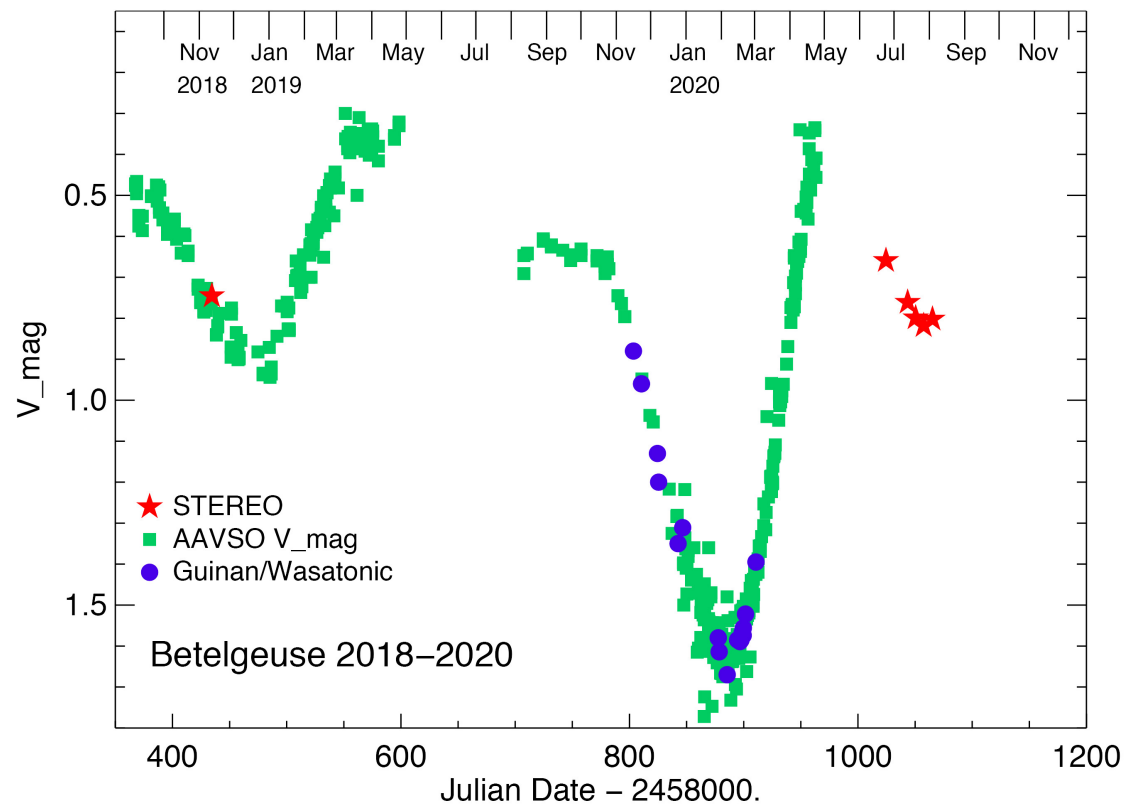


ベテルギウス



©国立天文台

- ・2019年から2020年にかけて急激に減光
- ・超新星爆発の前兆かと騒がれる
- ・その後2020年4月には通常の明るさに戻り、数万年は爆発しないとも言われ騒動は収まる
- ・本講演: 数万年の根拠は？ 実際はどうか



過去の仕事

HR図上の位置から年齢を推定。赤色超巨星であるので典型的に寿命は1万から数十万年と見積もられる（が、寿命ほぼゼロも排除できない）。例えば、以下の仕事。

- Dolan et al. 2016 – non-rotating models （組成観測と矛盾しないことも確認）
- Wheeler et al. 2017と後続論文 – rotating models （現在の自転速度を説明するためには、連星効果（合体など）による最近のスピンアップが必要と結論）

Joyce et al. 2020, ApJ は異色な方法（星振動学）で制限をつけている。

彼らは、星の質量は $16.5\text{--}19 M_{\odot}$ であり、**definitively in the early core helium-burning phase**（その場合には寿命は数万年以上となる）と言っているが全面的に信じられるわけではない理由がいくつかある（次のページ）

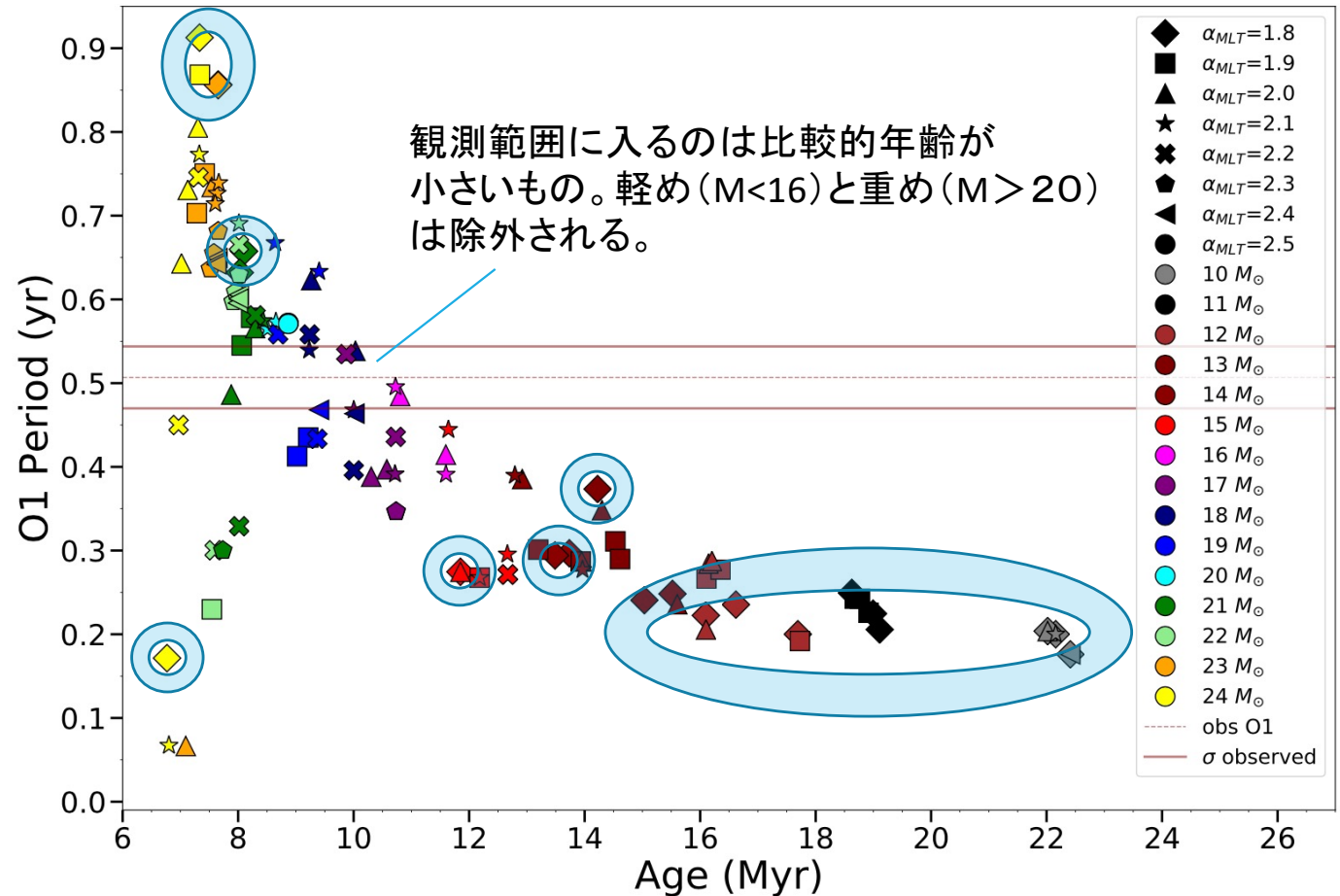
Joyce et al. 2020, ApJ

気になる点

- ・ 非回転モデル
- ・ Overshooting parameter
(我々の標準は 1.8)
- ・ ヘリウム燃焼時の計算のみ
- ・ T_{eff} エラーで小さいものを採用
($T_{\text{eff}} = 3600 \pm 25 \text{ K}$)

(最近の観測値がこの値な事に疑問は挟まないが
変光星であることや、その変光を理論的に説明で
きていない現状も考慮すべきでは)

結論の根拠としている解析、2つの振動モード(の一つの図)



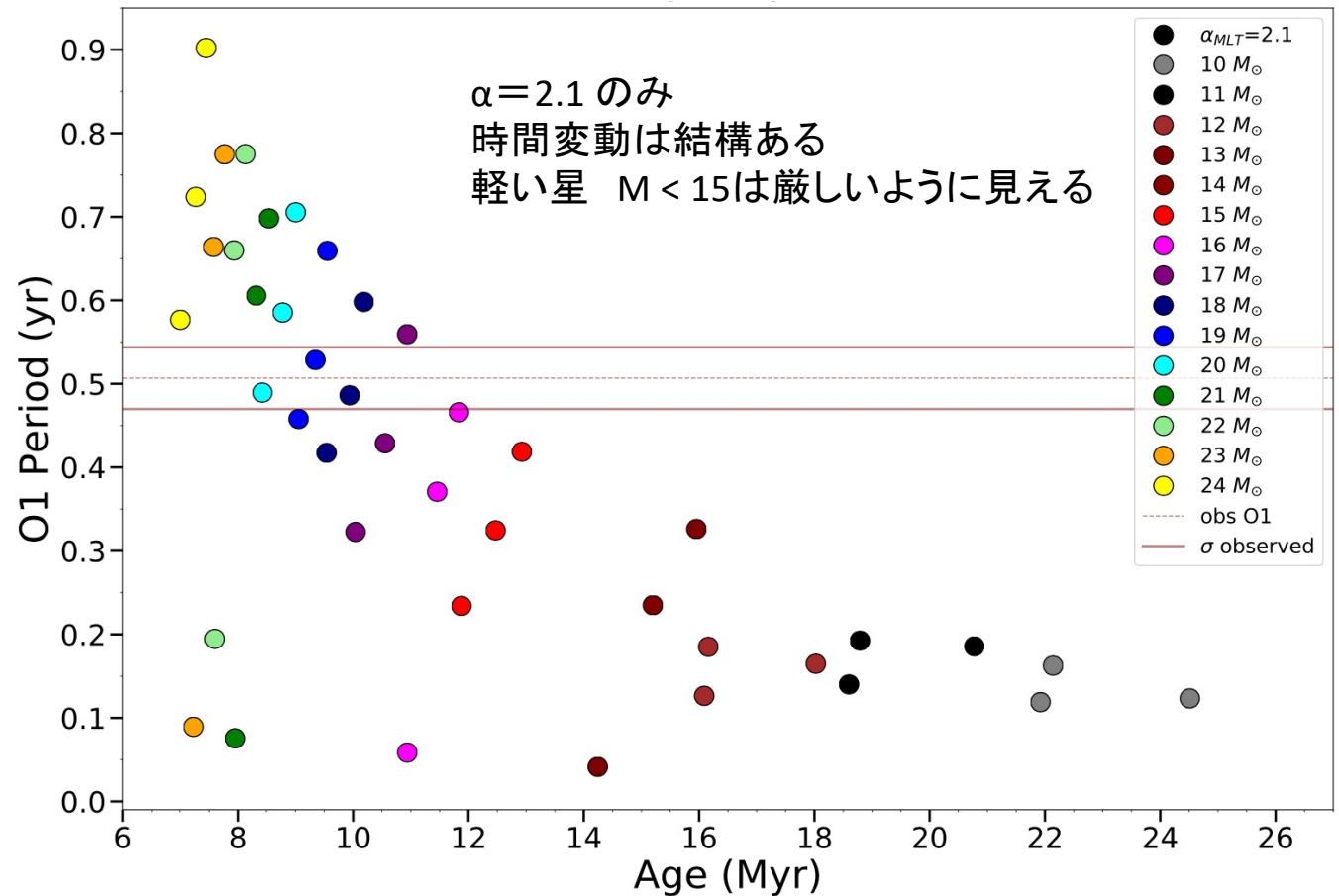
Joyce et al. 2020, ApJ

気になる点

- ・ 非回転モデル
- ・ Overshooting parameter
(我々の標準は 1.8)
- ・ ヘリウム燃焼時の計算のみ
- ・ T_{eff} エラーで小さいものを採用
($T_{\text{eff}} = 3600 \pm 25 \text{ K}$)

(最近の観測値がこの値な事に疑問は挟まないが
変光星であることや、その変光を理論的に説明で
きていない現状も考慮すべきでは)

時間変動の図



本研究 (Luo, Umeda, Yoshida & Takahashi 2022)

- ・ 星の進化計算（HOSHIコードによる）と観測との制限により
初期質量と進化段階を制限
- ・ 特徴：回転星モデル（表面組成変化の効果が重要
表面組成(C, N, O)を“まじめに”考慮（これまではされていなかった）
Overshooting parameter の依存性（最近よく使われている2種の値）

Methods (Observational constraints)

Observational constraints:

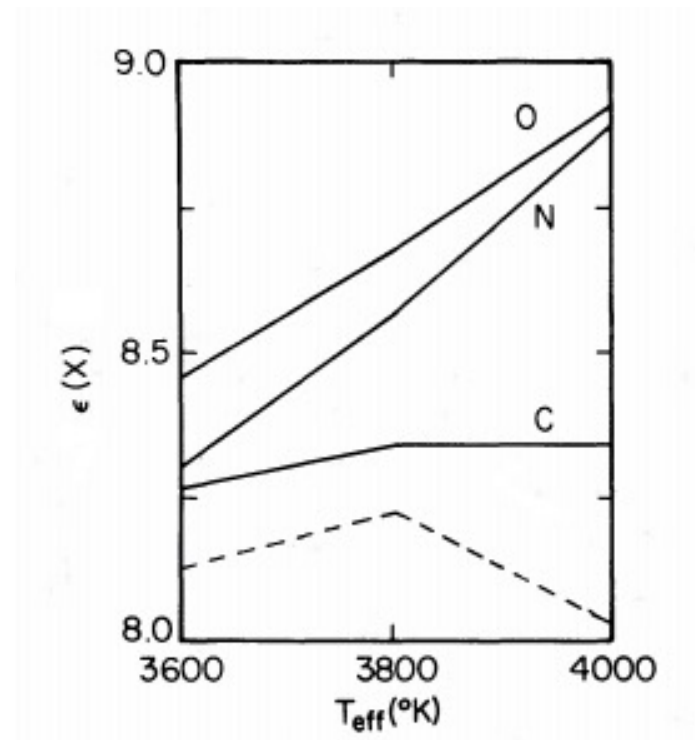
- Same HR diagram constraints as Dolan et al. 2016
- Surface abundances of carbon, nitrogen, oxygen based on 3600K values from Lambert et al. 1984 (right)

$$\epsilon_C = 8.29 \pm 0.15$$

$$\epsilon_N = 8.37 \pm 0.25 \quad [\text{Also } \epsilon_N - \epsilon_O = -0.15 \pm 0.05]$$

$$\epsilon_O = 8.52 \pm 0.25$$

$$\epsilon_i = \log(X_i/X_{\text{H}}A_i) + 12$$



Methods (initial parameters)

Initial rotation, in line with typical massive stars (Ekstrom 2012)

- $v/v_K = 0.1, 0.2, \text{ and } 0.4$
- **Non-rotating**

Two overshoot parameters, calibrated using local stellar populations

- $f_{ov} = 0.01 (M_A)$ and $0.03 (L_A)$

Table 2.1. Initial surface velocity

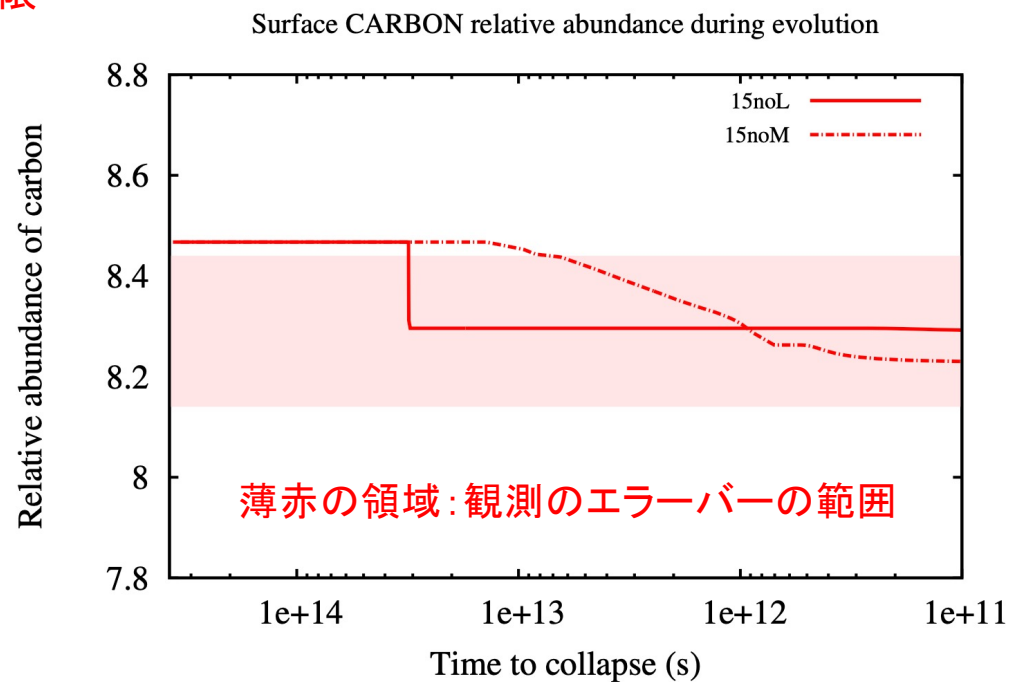
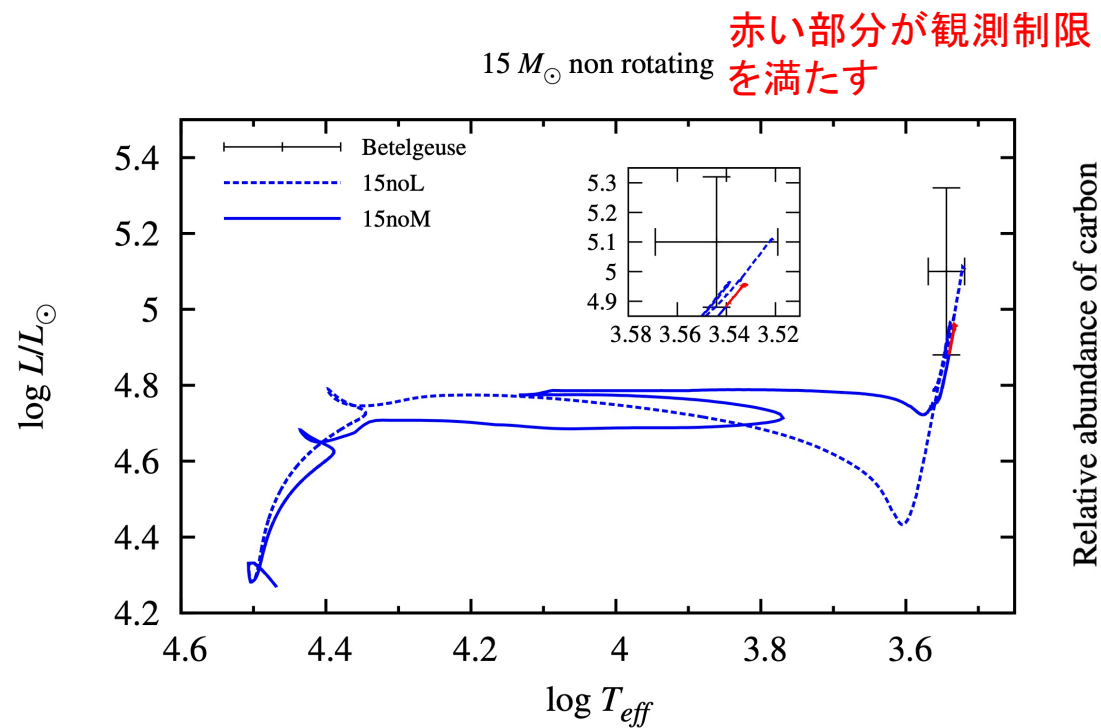
Mass ($M_\odot$)	v/v_K	v (km s $^{-1}$)
15	0.1	79.0
	0.2	157.6
	0.4	296.1
17	0.1	81.0
	0.2	161.2
	0.4	315.1
20	0.1	83.9
	0.2	166.7
	0.4	328.9

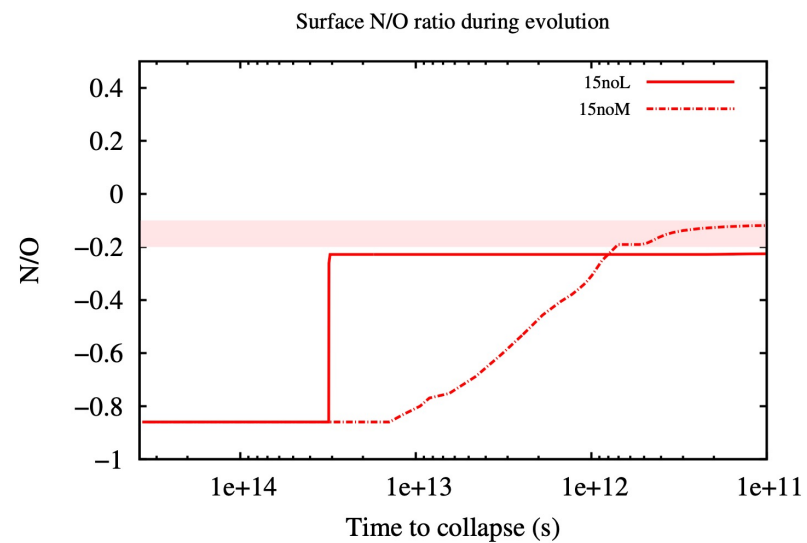
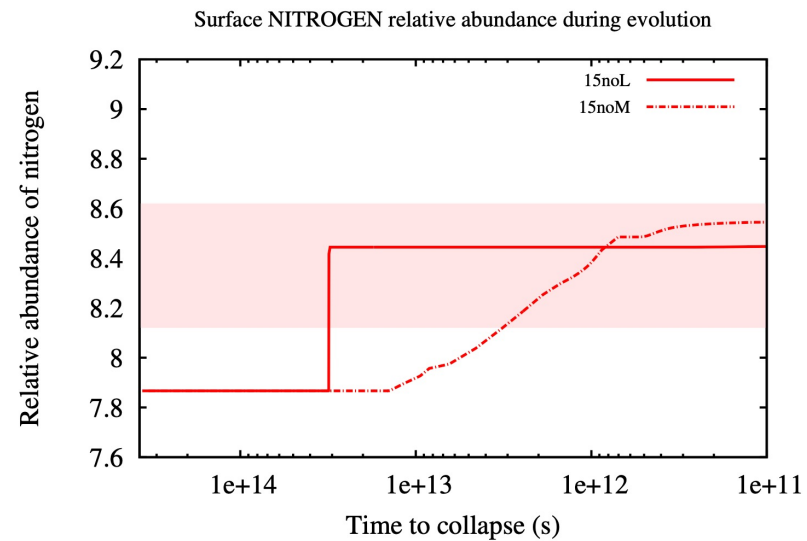
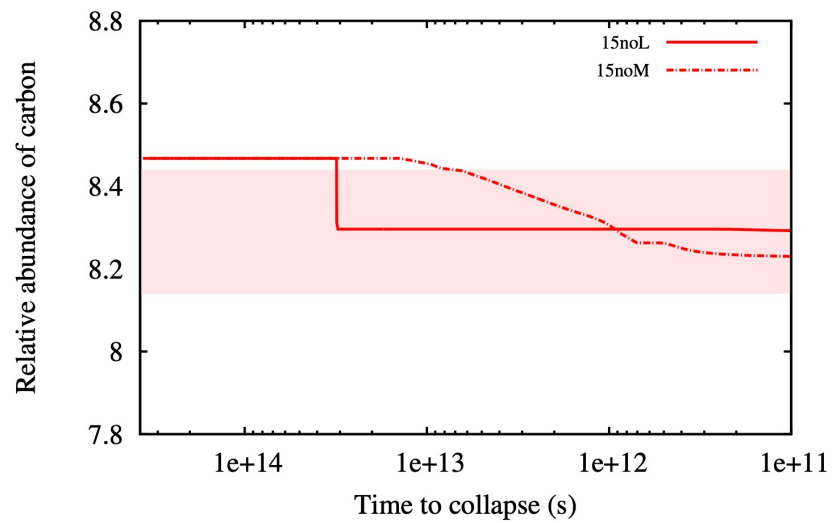
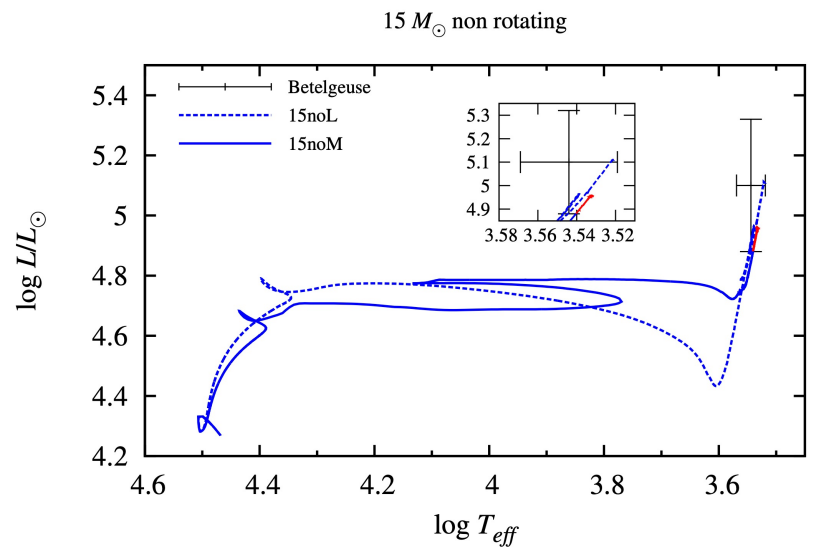
Methods (other)

- Mixing length parameter (MLT) – $\alpha = 1.8$
- Mass Loss Rate – Vink et al. 2001 (main sequence), de Jager et al. 1988 (red giant)
- Metallicity – Solar $Z = 0.014$ (Asplund 2009)
- Nuclear reaction rate from reaclib v1, (except $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ which is 1.2 times Caughlan & Fowler 1988)

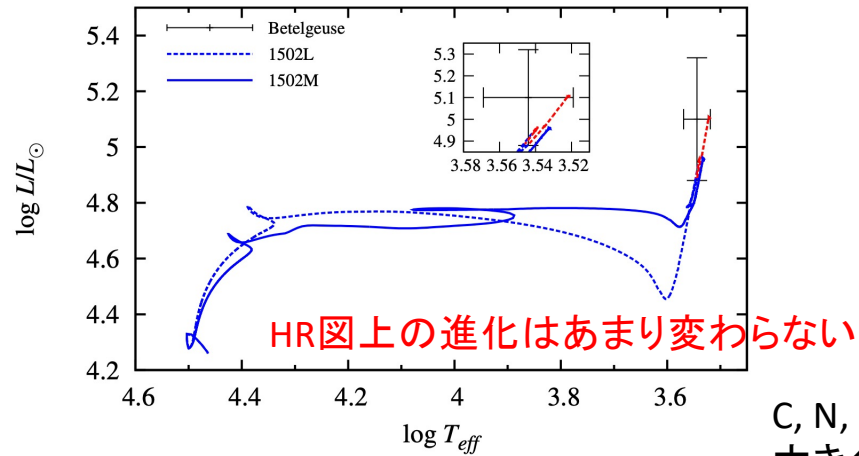
All models evolved from ZAMS to core carbon burning, using HOSHI

結果と解析の例 ($15M_{\odot}$, 非回転)

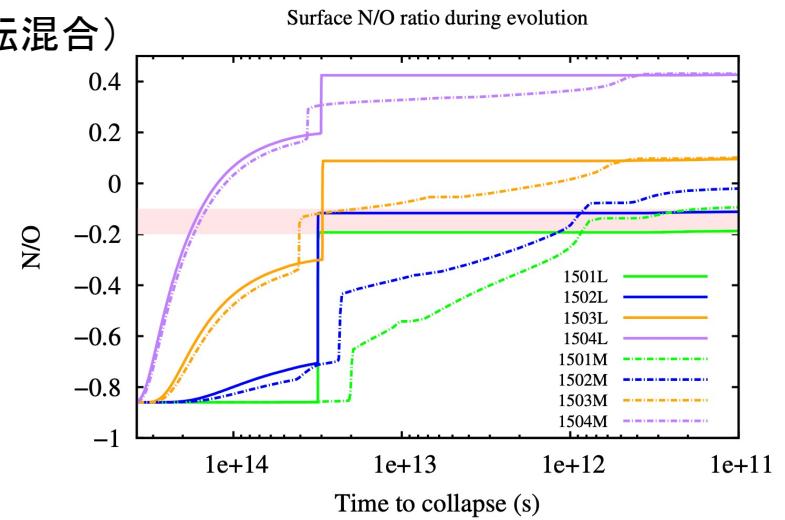
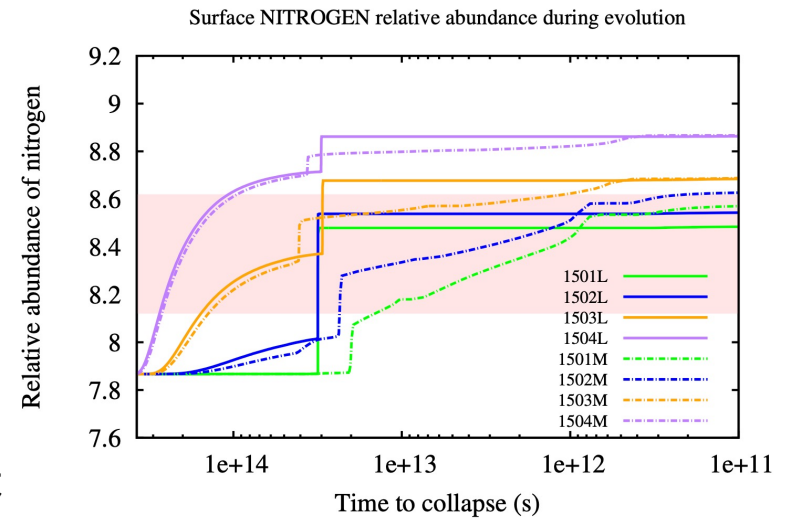
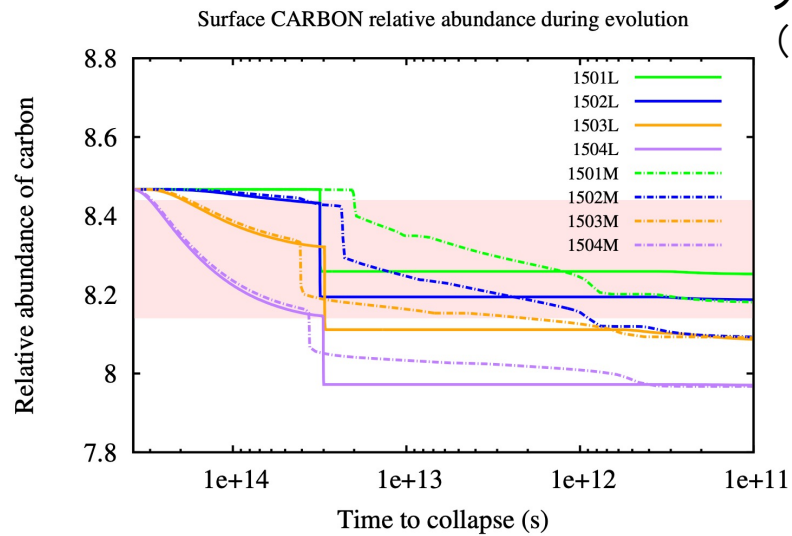




自転の効果 $15 M_{\odot}, v/v_K=0.2 \Rightarrow 1502$



C, N, Oの組成は大きく変わる
(自転による回転混合)



Results

- Lower mass limit of 12 solar masses & Upper mass limit of 25 solar masses depending on initial rotation
 - $v/v_K = 0.4$ models are unviable across the board
 - Time to collapse possibly zero in models less or equal to 17 solar masses
- 

Table 2. Summary of the fit to Betelgeuse for all models which were tested

Rotation (v/v_K)	12 $M_\odot$		13 $M_\odot$		15 $M_\odot$		17 $M_\odot$		20 $M_\odot$		24 $M_\odot$		25 $M_\odot$		26 $M_\odot$	
	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A	L_A	M_A
no-rot	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	×	—	—
0.1	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	—	—	×	×	×	×
0.2	○	×	○	×	○	×	○	○	×	○	—	—	×	○	×	×
0.3	—	—	—	—	×	×	×	○	×	×	—	—	×	×	—	—
0.4	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	—	—	×	×	—	—

Notes – ○ represents a model which had a good fit for Betelgeuse on the red giant branch, × represents a model which did not, and — represents models which were not calculated.

Table 3. Summary of the fit timings for all models marked with $\circ$ in table 2

Mass ($M_{\odot}$)	Overshoot	v/v_K	$t_{col,u}$ (yr)	$t_{col,l}$ (yr)	t_{total} (yr)
12	L_A	0.2	5.90E+03	0	5.90E+03
13	L_A	0.2	1.25E+04	0	1.25E+04
15	L_A	0.1	9.81E+05	8.98E+05	1.00E+05
			2.17E+04	0	2.17E+04
		0.2	9.99E+05	8.96E+05	1.03E+05
			2.18E+04	0	2.18E+04
	M_A	no	1.31E+04	0	1.31E+04
17	L_A	no [†]	8.42E+05	6.57E+05	1.84E+05
			1.04E+05	0	1.04E+05
		0.1	8.38E+05	0	8.38E+05
	M_A	0.2 [†]	8.38E+05	6.14E+05	2.24E+05
		no	2.15E+04	1.71E+04	4.41E+03
		0.1	2.69E+04	1.87E+04	9.21E+03
		0.2	9.29E+04	4.93E+04	4.36E+04
20	L_A	0.3	8.60E+05	8.53E+05	6.88E+03
		no [†]	8.66E+04	4.95E+04	3.71E+04
	M_A	0.1	7.30E+05	9.70E+03	7.20E+05
		no	3.47E+04	2.64E+04	8.21E+03
		0.2	7.52E+04	1.85E+04	5.67E+04
24	M_A	0.1	1.76E+05	1.43E+05	3.29E+04
24	M_A	no	8.10E+04	7.19E+04	9.07E+03
25	M_A	0.2	2.92E+05	2.29E+05	6.27E+04

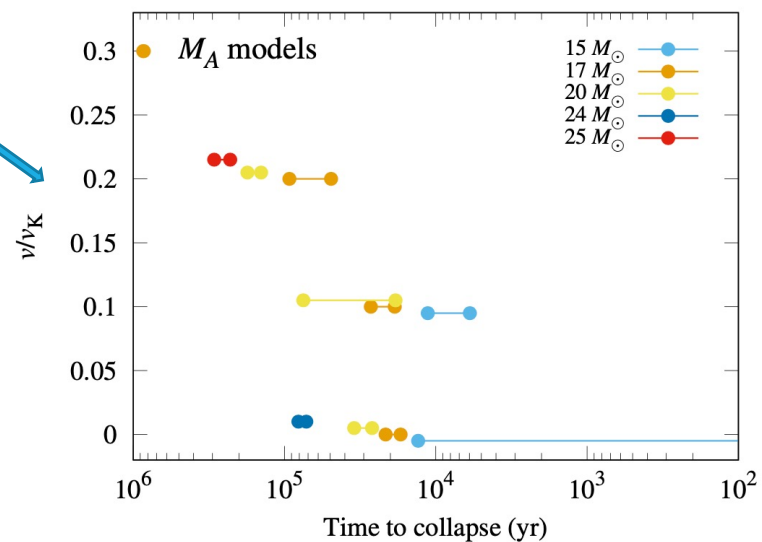
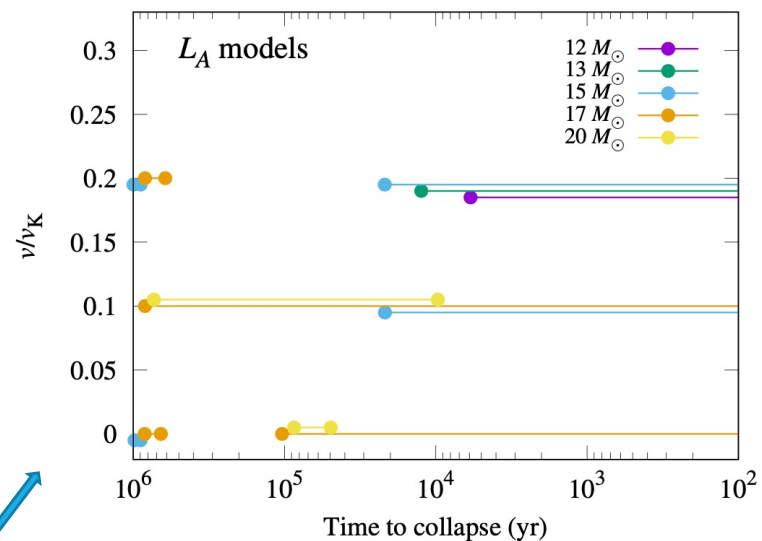
寿命の

上限

下限

観測制限
を満たす
期間 =
 $t_{col,u} - t_{col,l}$

寿命の
まとめ
の図



implication of results (Initial Mass)

Acceptable range is larger than previous studies, 12 to 25 $M_{\odot}$

(Dolan's results 17-25 $M_{\odot}$, Joyce's results 16.5-19 $M_{\odot}$):

- Dolan et al.:
 - only examined non-rotating models
 - used $f_{ov} = 0$ (we found models $<15 M_{\odot}$ requires higher overshoot parameter)
 - Surface abundances did not completely fit for their best fit model
- Joyce et al.:
 - also only studied non-rotating models
 - did not study Carbon burning and later stages

まとめ

- ・寿命がほぼゼロの可能性は否定できない（特に L_A モデルの場合）： 警戒は怠らずに！
- ・非回転のモデルでも観測と矛盾しないケースはある（しかし観測されている大質量星は通常高速自転している－ 典型初期（推測）値 $v/v_K \sim 0.4$
- ・ $v/v_K \sim 0.4$ のモデルは観測組成を再現できない
（ベテルギウス固有の特徴か回転星モデルの一般的な問題か？）