

種族合成計算コードにおけるコア情報の取り扱い

東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻

小川 翔平

鈴木 英之

加藤 ちなみ

目的

爆発直前のCOコアの質量と半径から恒星が爆発時にどの程度の重元素を宇宙に放出するかを見積もるために、SSEコードを用いて初期質量と初期メタリシティーが異なる星に関して、Heコアおよび爆発直前のCOコアの半径と質量をそれぞれ評価する。

星の種族合成コードの紹介

初期漸近巨星分枝段階においてCOコアの半径が計算されていないためある初期質量を持つ星に関しては Rcoを計算することができない

	Mco	Rco	Mhe	Rhe
SSE/BSE	○	△	○	○
MOBSE	○	△	○	○
COMPAS	○	×	○	×

表1 それぞれのコードに対するCOコアとHeコアの質量と半径の出力の有無

SSEコードはBSEコードの中に含まれているコードで、コアの情報に関する計算はSSEとBSEで共有されている

全ての星において計算されていない

二連星系の情報のみを出力するため、単一星の議論ができない

星の種族合成コード (stellar population synthesis code)

Single star evolution code

(Hurley J.R., Pols O.R., Tout C.A., 2000, MNRAS, 315, 543)

Fitting formulae

Output data

- mass
- radius
- temperature
- luminosity
- core mass
- core radius

as a function of time

Input parameters

(initial mass , metallicity and so on)

星の進化段階の分類 ($Z = 0.02$)

軽い星(約 $8M_{\odot}$ 以下) \longrightarrow 1- \rightarrow 2- \rightarrow 3- \rightarrow 4- \rightarrow 5- \rightarrow 6- \rightarrow 11 or 12

中質量星1($9M_{\odot} \sim 13$) \longrightarrow 1- \rightarrow 2- \rightarrow 3- \rightarrow 4- \rightarrow 5- \rightarrow 13

中質量星2($14M_{\odot} \sim 23M_{\odot}$) \longrightarrow 1- \rightarrow 2- \rightarrow 4- \rightarrow 5- \rightarrow 13 or 14

大質量星(約 $24M_{\odot}$ 以上) \longrightarrow 1- \rightarrow 2- \rightarrow 4- \rightarrow 7- \rightarrow 8- \rightarrow 14

SSEコードにおける各進化段階(kw)

1: 主系列

2: Hertzsprung Gap

3: 巨星分枝

4: コアヘリウム燃焼

5: 初期漸近巨星分枝

6: 熱パルス漸近巨星分枝

7: ネイキッドヘリウムスター

8: HGヘリウムスター

9: 巨星分枝ヘリウムスター

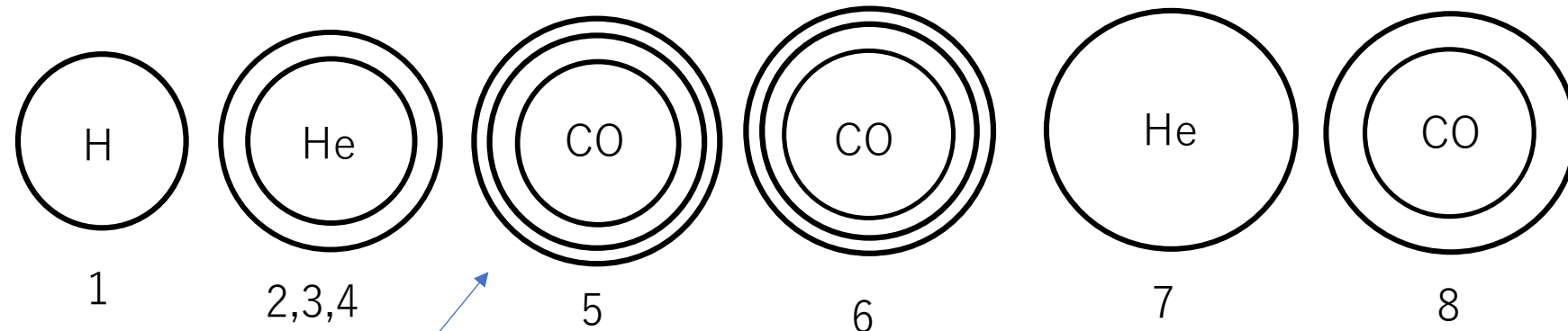
10: He白色矮星

11: CO白色矮星

12: ONe白色矮星

13: 中性子星

14: ブラックホール



COコアが成長し、中質量星の場合はここで炭素燃焼が始まる。

各進化段階における星の様子

データ比較 ($Z = 0.02$)

親星データと比べると約 $1M_{\odot}$ 程度の差

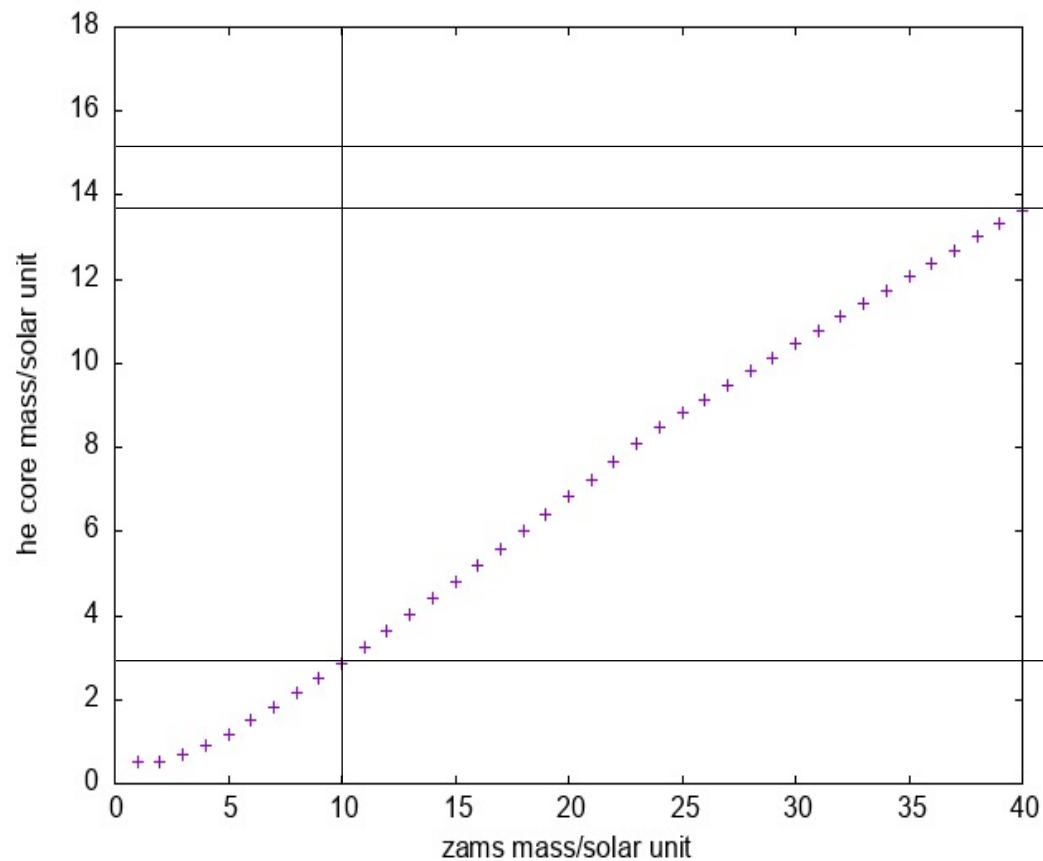


図1 SSEを用いて算出された初期質量と炭素酸素コアに置き換わる直前のヘリウムコアの質量

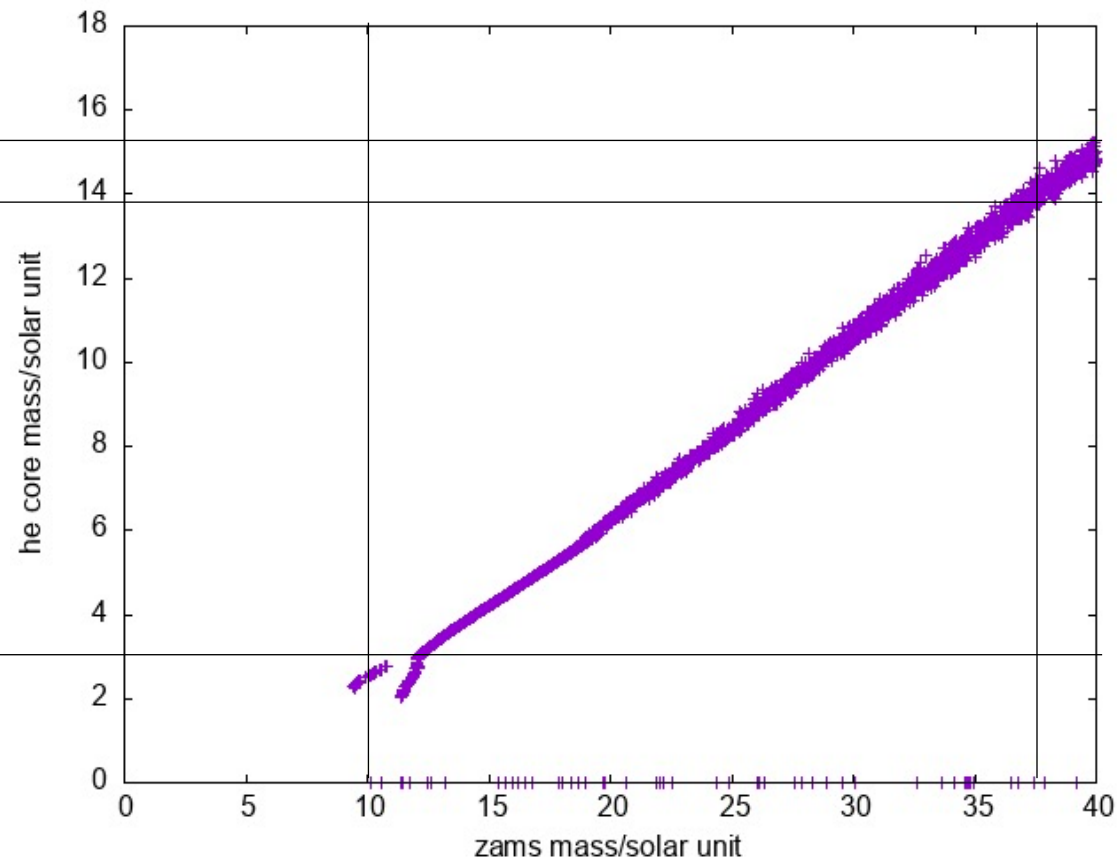


図2 Stanford Earl Woosleyらの研究(本格的な星のモデル)によって得られたヘリウムコアの質量

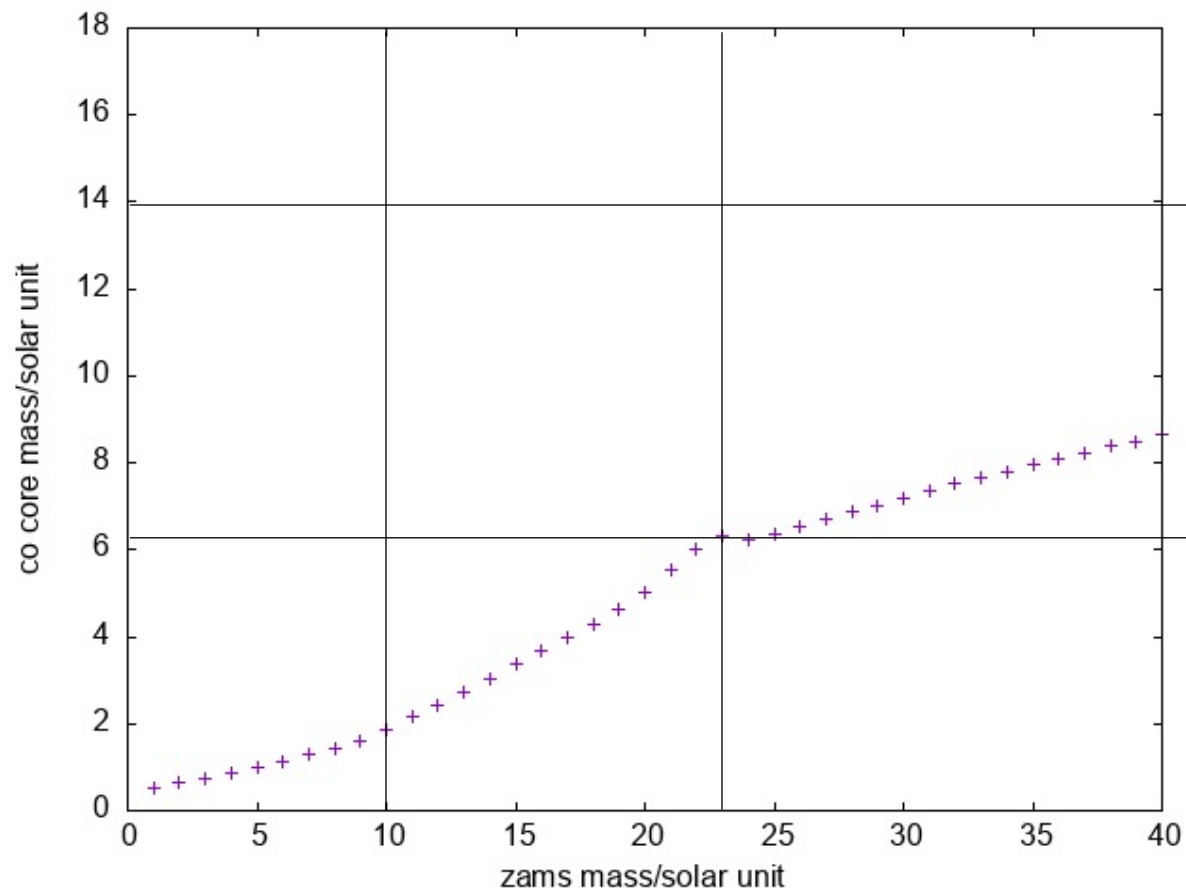


図3 SSEを用いて算出された初期質量に対する爆発直前の炭素酸素コアの質量

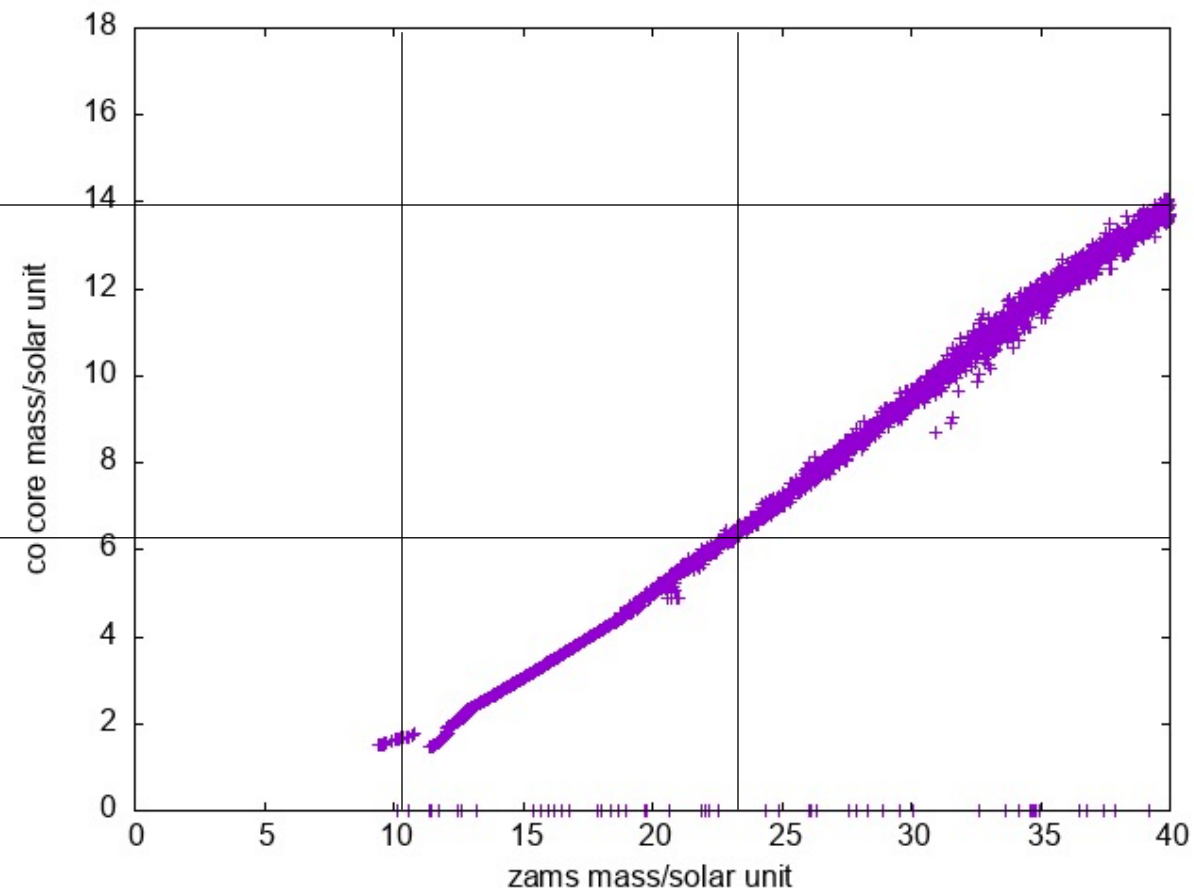


図4 Woosleyらの研究(本格的な星のモデル)によって得られた爆発直前の炭素酸素の質量

改良後のコアの半径(Philip D.Hall & Christopher A. Tout 2014)

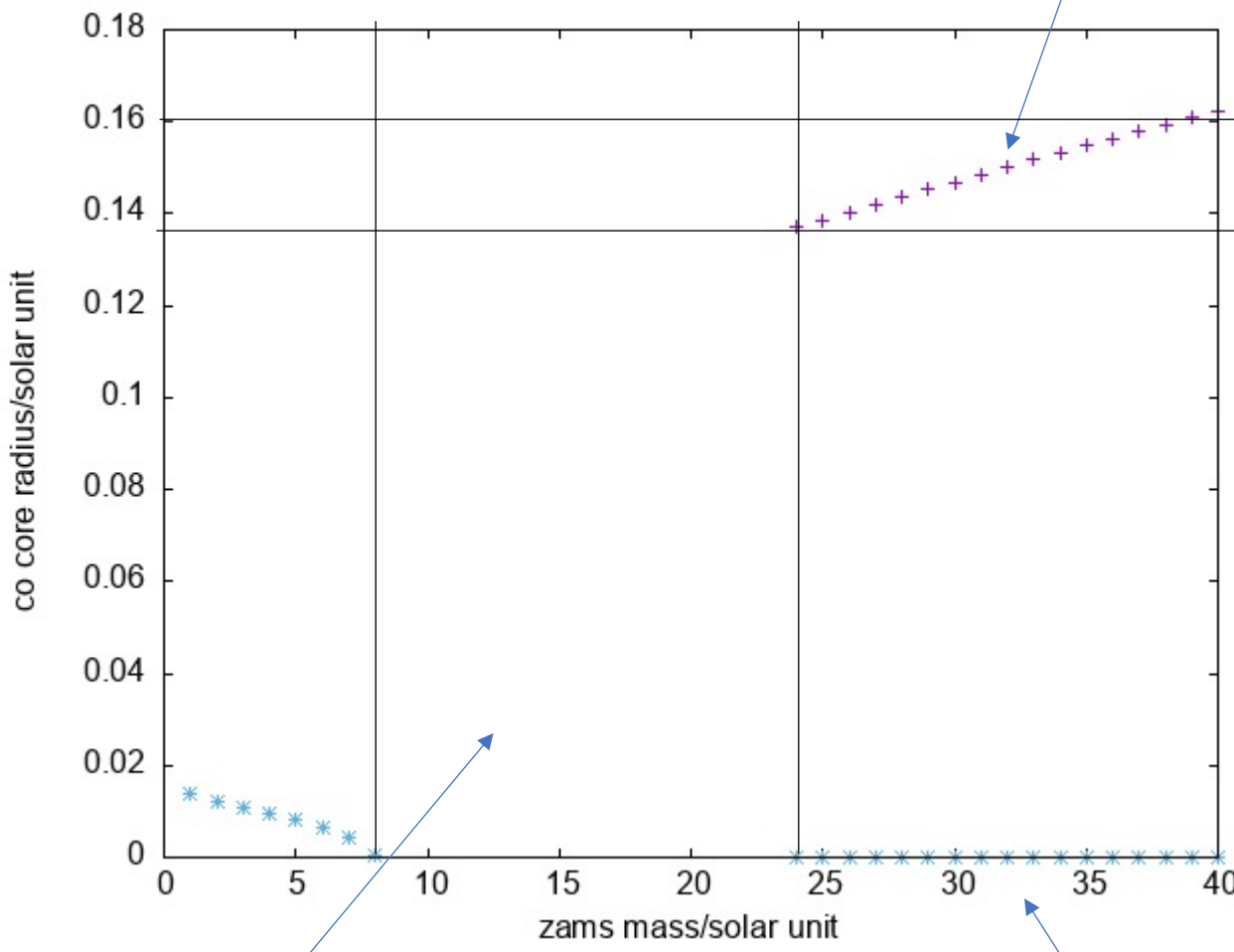


図5 SSEを用いて算出された初期質量に対する爆発直前の炭素酸素コアの半径

SSEでは計算されていない領域

改良前のコアの半径

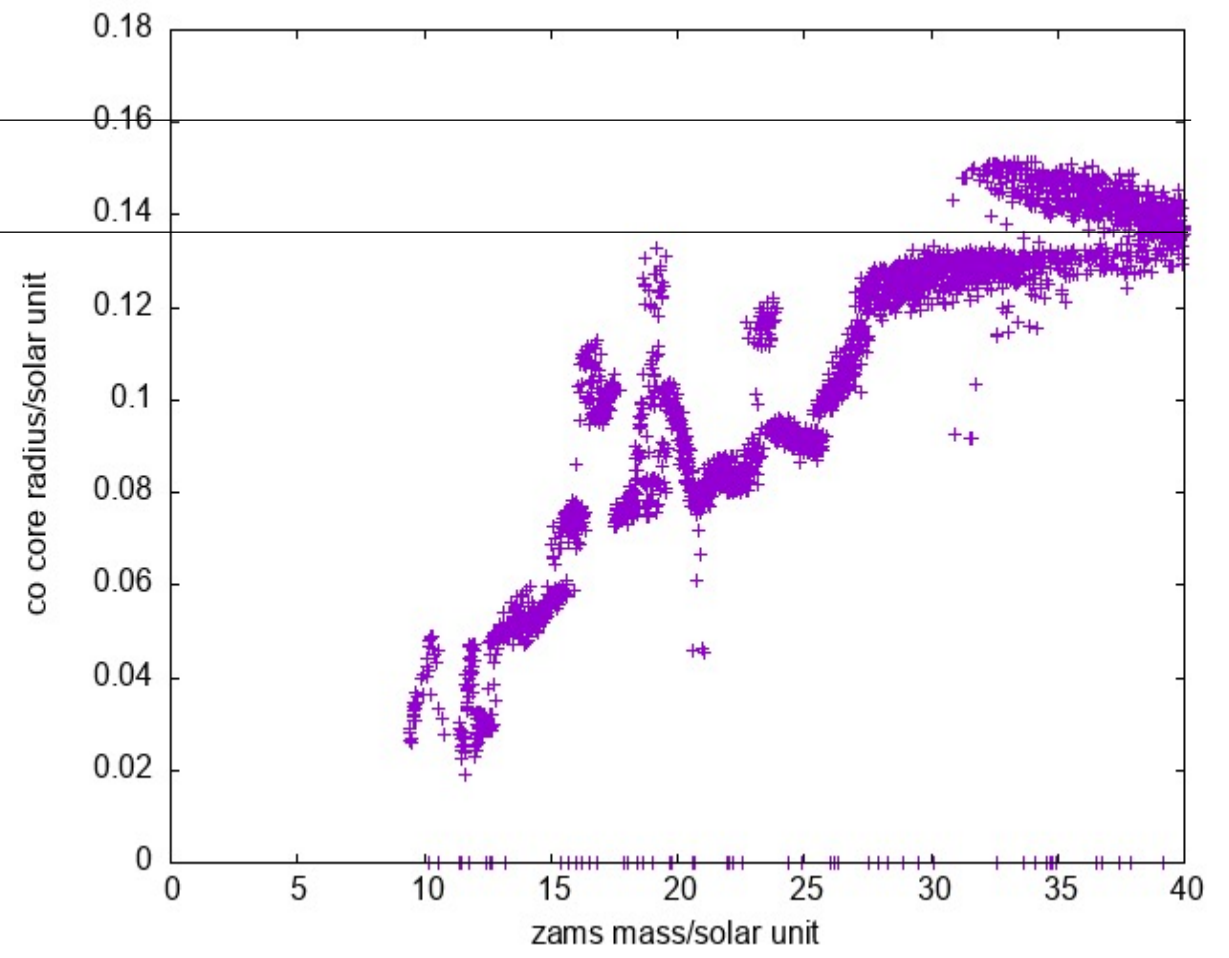


図6 Woosleyらの研究(本格的な星のモデル)によって得られた爆発直前の炭素酸素の半径

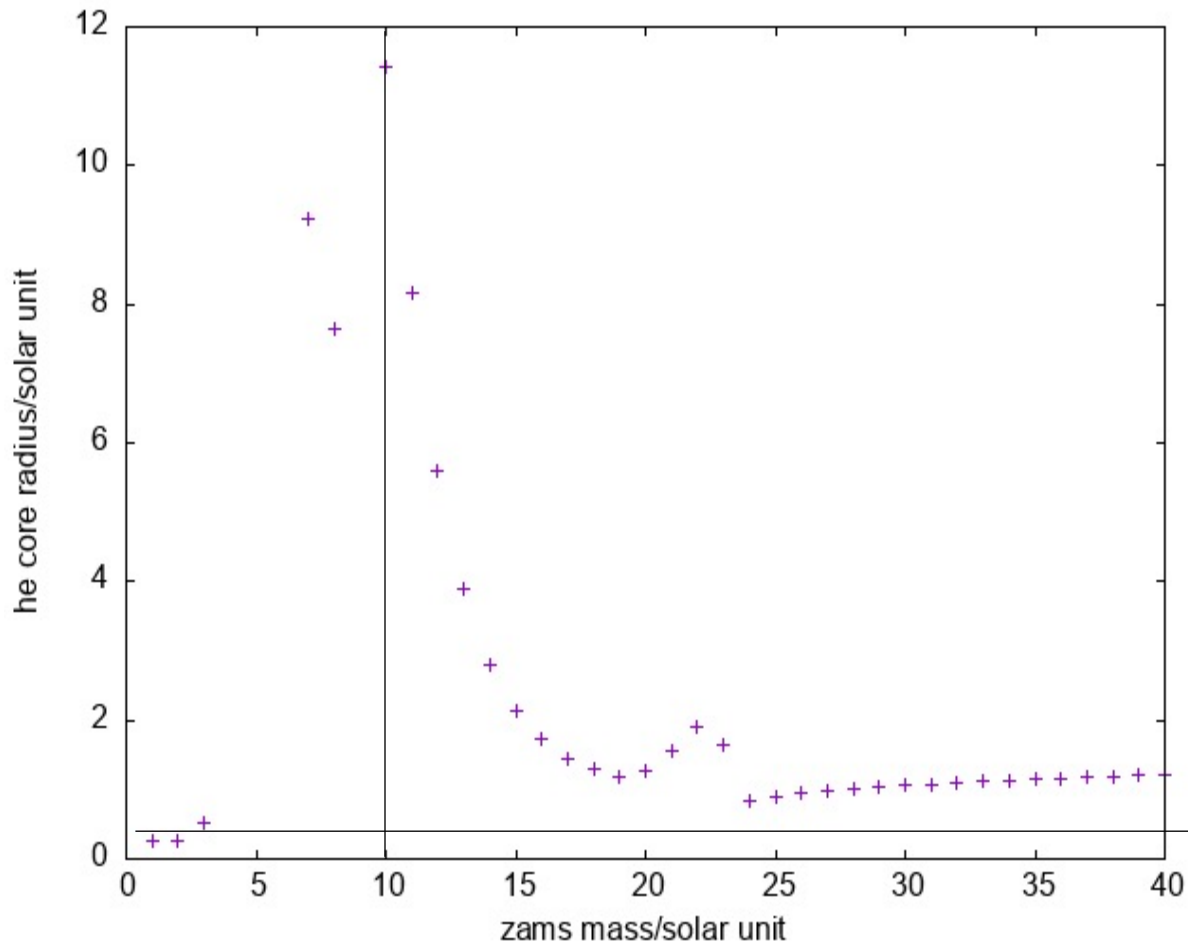


図7 SSEを用いて算出された初期質量に対するヘリウムコアの半径

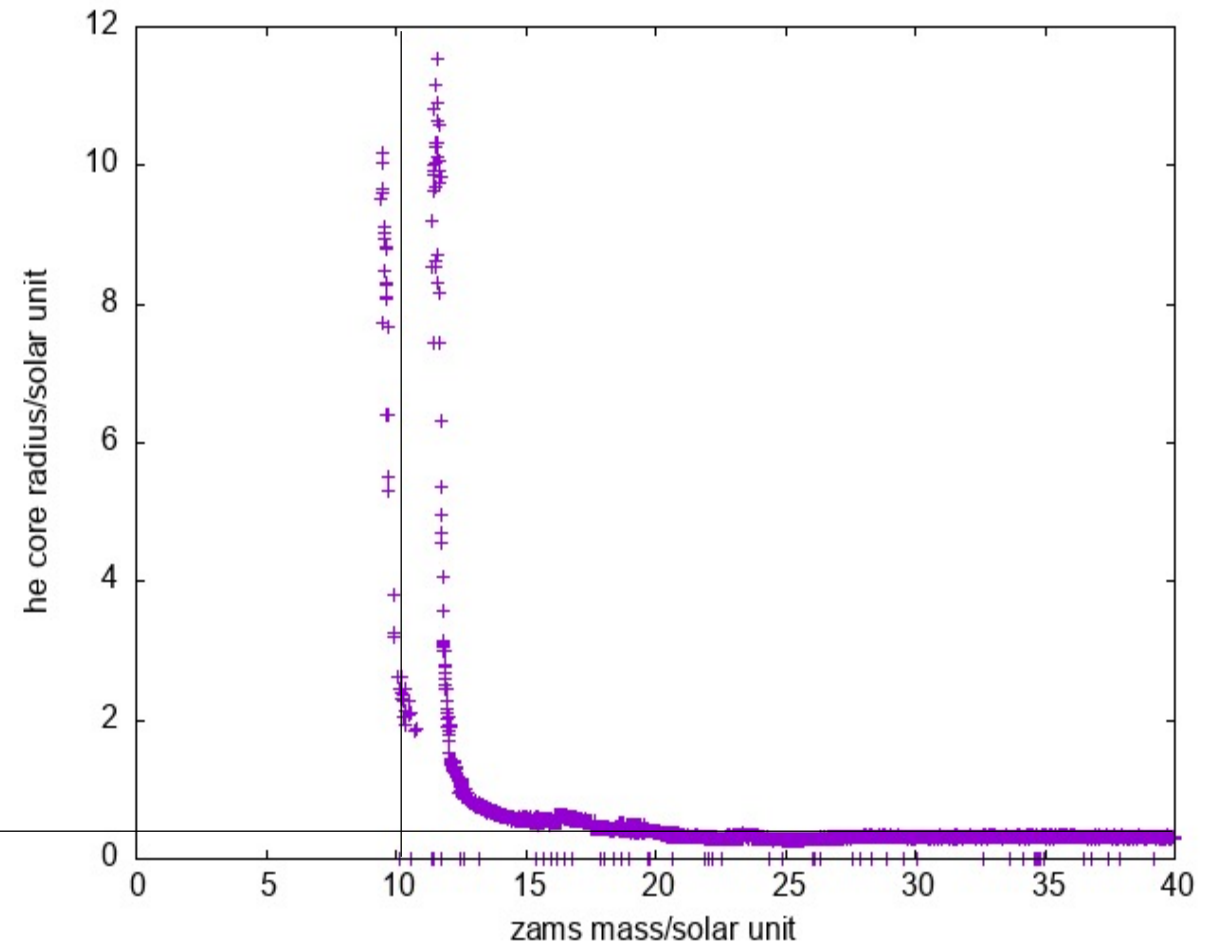


図8 Woosleyらの研究(本格的な星のモデル)によって得られた炭素酸素の半径

初期質量 $23M_{\odot}$ の星のコアの質量の変化 MS->HG->Che->EAGB->BH

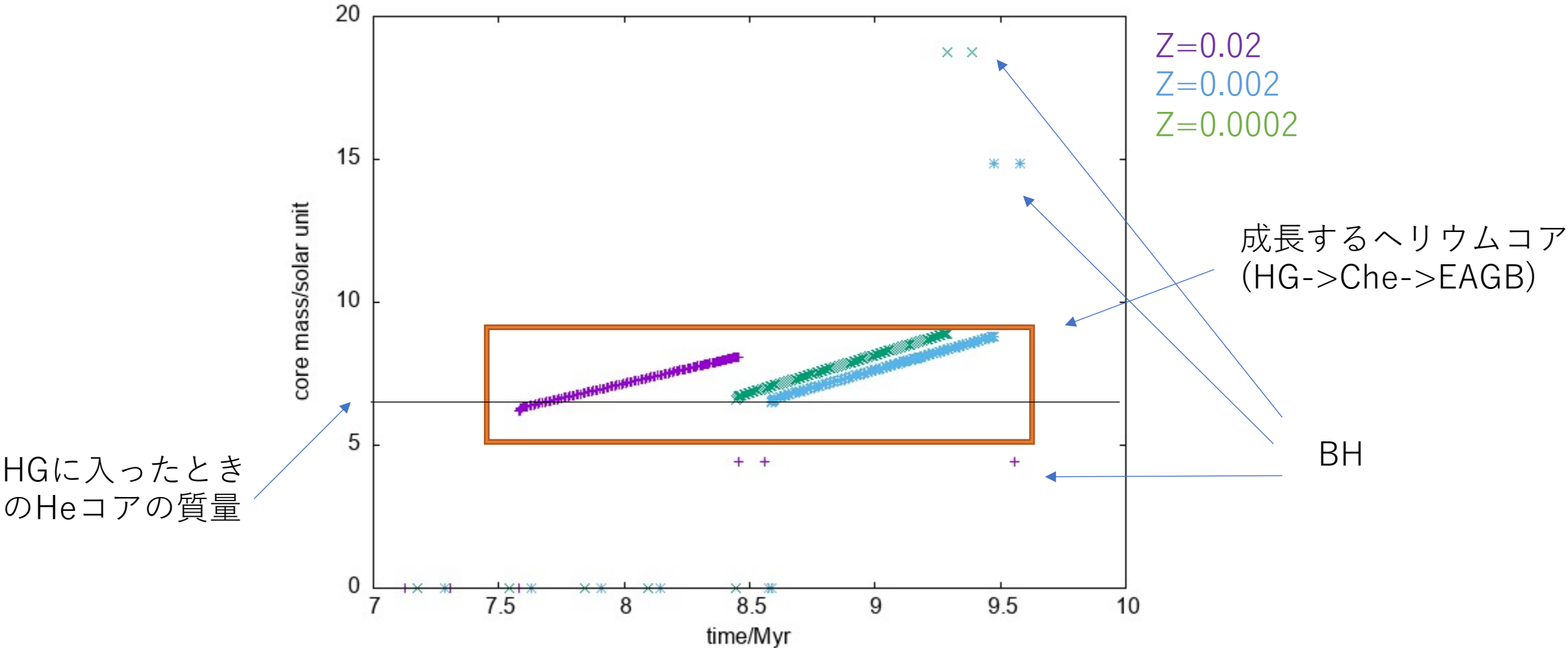
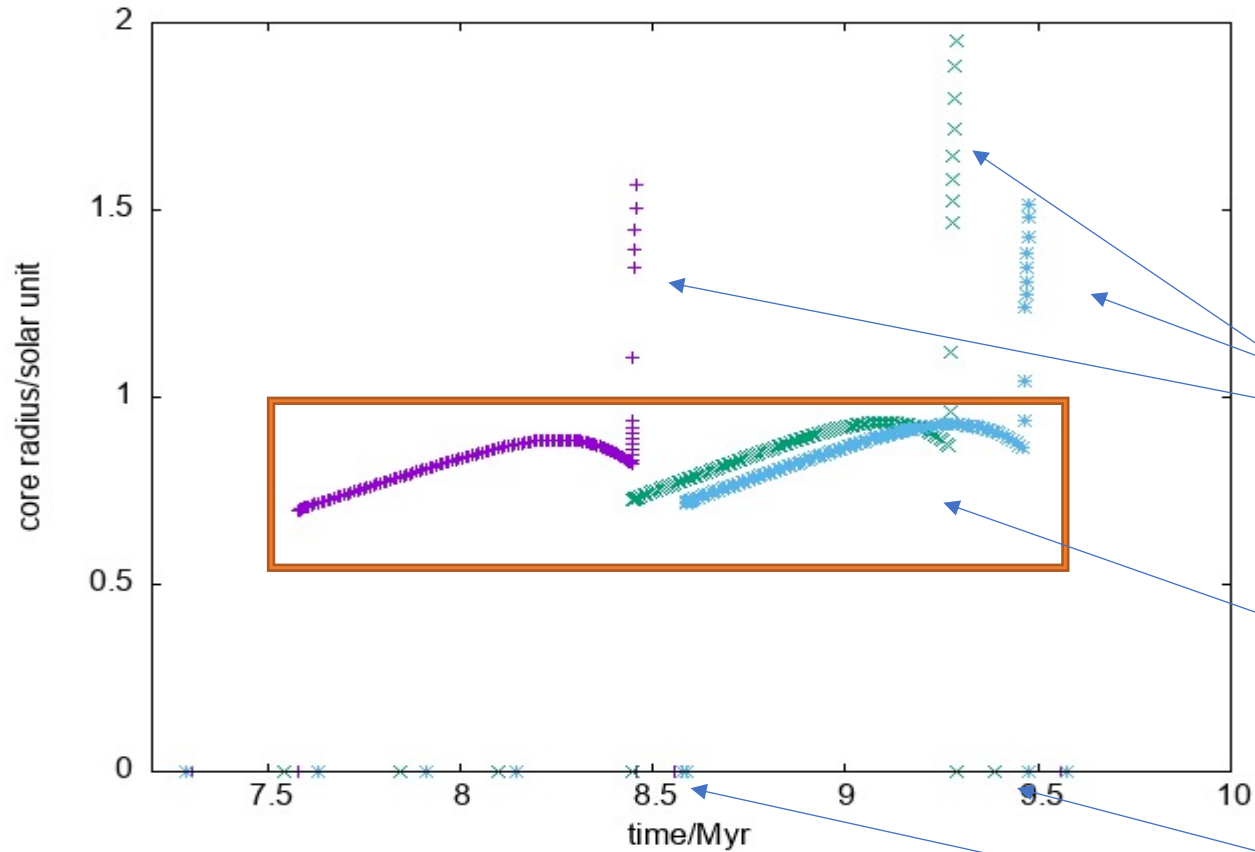


図7 初期メタリシティー $Z=0.0002, 0.002, 0.02$ の時のコアの質量の変化

初期質量 $23M_{\odot}$ の星のコアの半径の変化 MS->HG->CheB->EAGB->BH



Z=0.02
Z=0.002
Z=0.0002

BSEコードではこのようにして計算されたコアの半径を用いて、星が合体するか外層が除去されて二連星系として生き残るかについての判定がなされる

ヘリウム燃焼殻から生じる圧力によってコアの半径が増加している。

HG->CheBの段階での半径

BH半径(Schwarzschild radius)

図7 初期メタリシティ $Z=0.0002, 0.002, 0.02$ の時のHeコアの半径の変化

まとめ

SSEコードの長所

- ・ 集団の中の星々がどのようにその一生を終えるかを簡単に計算できる。
- ・ 入力変数を変えることで様々な初期条件から星の進化を追うことができるため、様々な初期メタリティーの星々の結果を得られる。
- ・ 本格的なコードよりも圧倒的に計算が早いため、様々な恒星に対しての計算が可能。
- ・ ヘリウムコアの質量に関しては妥当な計算結果を出力する。

SSEコードの短所

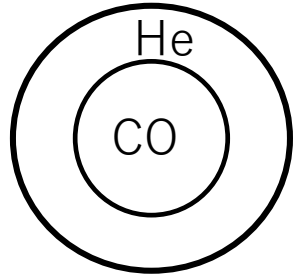
- ・ COコアの半径がきちんと計算されていない領域があるので、COコアの情報を使う重元素の放出量の評価にはやや不向き。

今後の展望

- ・ COコアの半径が計算されていない領域に対してHeコアの質量や半径から計算できるような式の導入を図る。
- ・ 二連星系を考慮に含めた上で様々な星に対してCOコアの半径と質量から星が爆発直前にどれほどの重元素を放出するのかを見積もる

改良点

冷えた白色矮星の半径を5倍している



8

24 M_{\odot} 以上の星に関して
 7.0×10^{-5} の
Rcoを出力してしま

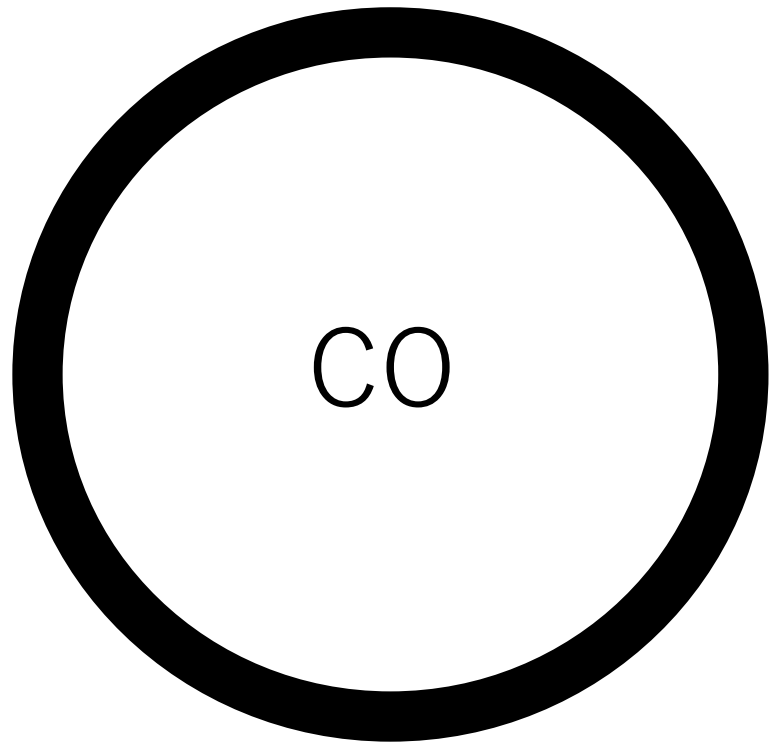
中性子星半径

$$rc = 5 \times R_{WD} = 5 \times \max \left[R_{NS} (= 1.4 \times 10^{-5}), 0.0115 \sqrt{\left(\left(\frac{M_{ch}}{M_{co}} \right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{M_{co}}{M_{ch}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)} \right] \quad (1)$$

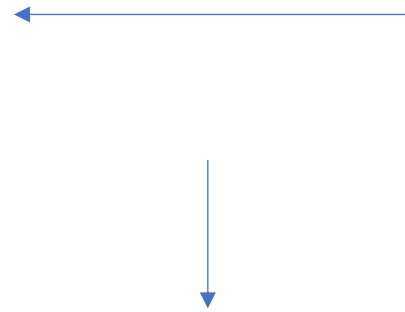
改良後

$$rc = \frac{0.00123 + 0.0806M_{co} - 0.00331M_{co}^2}{1.00 + 0.467M_{co} - 0.00303M_{co}^2} \quad (2)$$

(Philip D.Hall & Christopher A. Tout 2014)



爆発直前のCOコアには恒星内部の核燃焼によってできた重元素が蓄積されている



$$M_{co} - M_{remnant}(M_{co}, \xi_{co}, ?) = M_{total\ heavy\ elements} \quad (3)$$

$$\xi_{co} = \frac{M_{co}/M_{\odot}}{r_{co}/1000\text{km}} \quad (4)$$

BSEコードでの二連星系の合体判定

$$M_{env1} = M_1 - M_{c1} \quad (5) \quad \text{主星に関する式}$$

主星の外層質量 コアの質量

$$M_{env2} = M_2 - M_{c2} \quad (6) \quad \text{伴星に関する式}$$

$$E_{bind,i} = -\frac{G}{\lambda} \left(\frac{M_1 M_{env1}}{R_1} + \frac{M_2 M_{env2}}{R_2} \right) \quad (7) \quad \text{外層のinitial binding energy}$$

$$E_{orb,i} = -\frac{1}{2} \frac{GM_{c1}M_{c2}}{a_i} \quad (8)$$

BSEでは0.5

Initial separation
(主星によるロッシュローブオーバーフローが始まったときの分離度)

$$E_{bind,i} = \alpha_{CE} (E_{orb,f} - E_{orb,i}) \quad (9)$$

コアの外層に対する軌道エネルギーの輸送率
(BSEでは1に設定されている)

$$E_{orb,f} = -\frac{1}{2} \frac{GM_{c1}M_{c2}}{a_f} \quad (10)$$

外層を取り去るのに十分なエネルギーが輸送された時のfinal separation

$$\frac{R_{L1}}{a} = \frac{0.49q_1^{2/3}}{0.6q_1^{2/3} + \ln(1+q_1^{1/3})} \quad (11)$$

(5)~(10)式から求められた a_f を(11)式に代入し、質量比をコアの質量 M_{c1}, M_{c2} を用いて書き換えることにより、主星のコアのロッシュローブ半径を算出できる。同様の方法で伴星のコアのロッシュローブ半径も計算でき、いずれのコアの半径もこのロッシュローブ半径を満たさない場合には a_f の分離度を持った二連星系として生き残る。

$$\frac{M_1}{M_2}$$

Separationと質量比 q_1 からロッシュローブ半径を求める式

$23M_{\odot}$ の半径の4の段階での半径の沈み

kw=2,3での重い星の
ヘリウムコアの半径

$$R_c = \frac{0.2391mc^{4.6}}{0.0065+(0.162+mc)mc^3} \quad (12)$$

kw=4(CheB)での
コアの半径

$$R_c = R_c(1 + \beta\tau - \beta\tau^6) \quad (13)$$

$$\beta = \max(0, 0.4 - 0.22 \log_{10} mc)$$

$$\tau = \frac{\text{current time} - \text{He ignition timescale}}{\text{Core He burning timescale}}$$