

種族合成計算コードによるCOコアの質量と半径の評価およびそれらを用いたコンパクト天体の予測

小川 翔平、加藤 ちなみ、鈴木 英之(東京理科大学)

研究目的

本研究の最終目的は宇宙空間内に蓄積されているニュートリノと重元素量の理論予測である。その際に個々の星から放出されるニュートリノ量は爆発後に形成されるコンパクト天体の種類に応じて変化するため、爆発によって形成されるコンパクト天体の予測をする必要がある。また、形成されるコンパクト天体が中性子星(NS)である場合には、放出されるニュートリノと重元素量は爆発直前の恒星が持つCOコアの情報とそこから算出されるNSの質量から見積もることができるため、NSの質量分布をCOコアの情報から見積もる必要がある。本研究では、星の種族合成計算コードSSEおよびBSEを用いて、それらがCOコア半径を計算できるように改良を施し、爆発直前の星が持つCOコアの質量と半径を算出した後、その情報に基づいてコンパクト天体の予測およびNSの質量分布の作成を試みた。

SSEおよびBSEコード[1][2]

- Pols et al.,1998によって構築された詳細な恒星モデルを再現するような fitting formulaeによって構成されている種族合成計算コード
- 単一星および二連星系の表面温度や半径、コア質量等を時間の関数として、比較的短時間で計算できる。
- COコアの半径およびNSの質量に関しては妥当な値を出力することができない

計算コードの改良

図1のようにSSEおよびBSEコードは爆発直前のHeコアの質量に関しては詳細な計算コードで計算された単一星モデルと比較しても妥当な値を出力することができる。従って、図2のように爆発直前のCOコア半径を対応するHeコア質量から見積もるfitting式をMESA[4]を用いて開発した

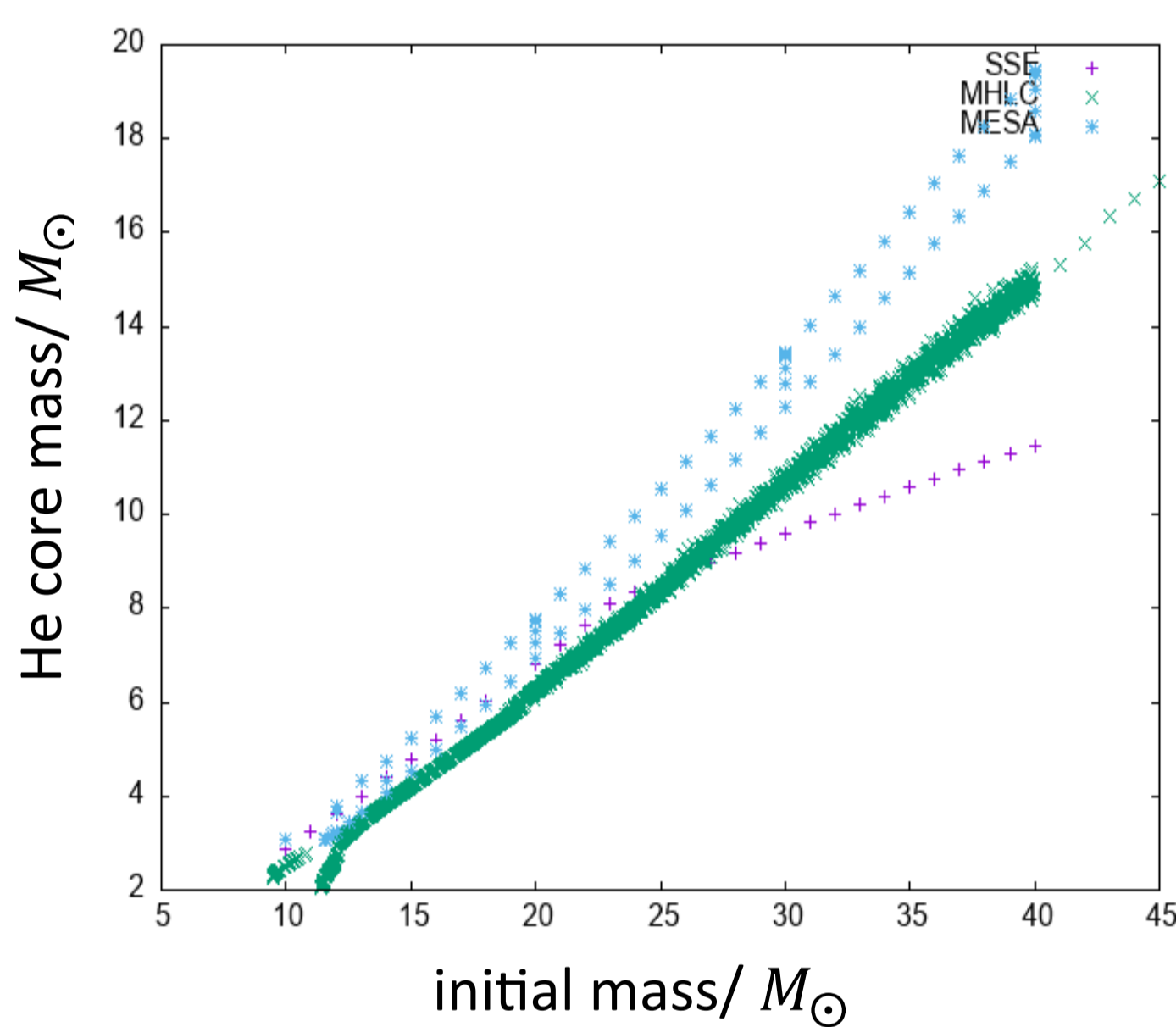


図1 詳細な計算コードMESAおよびMuellerらによって計算された詳細な恒星モデル(MHLCモデル[3])とSSEによって計算されたモデルの初期質量とそれらのモデルが爆発直前に内部にもつHeコア質量の関係(初期メタリシティーZは太陽メタリシティーZ_sunに固定)

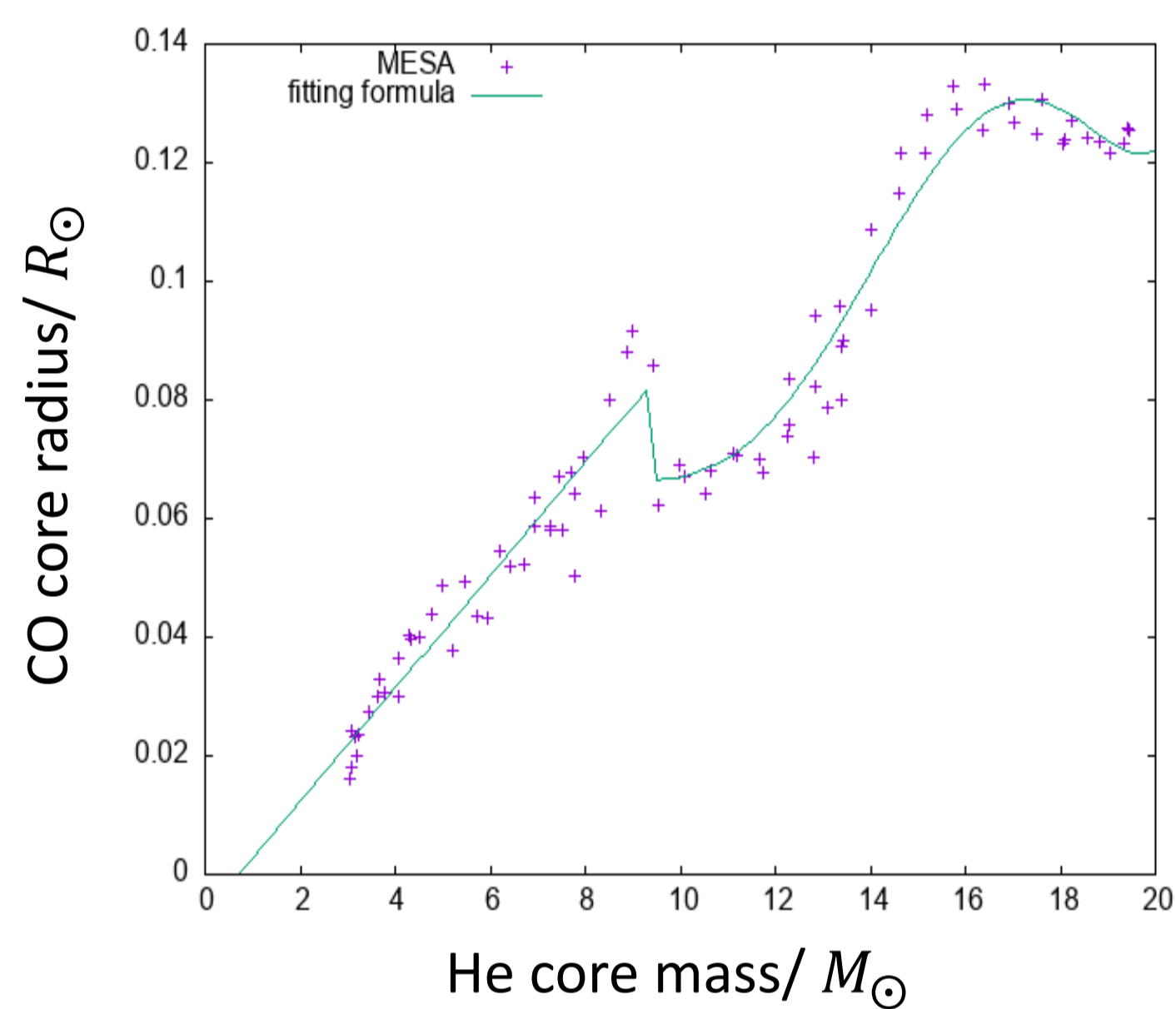


図2 MESAで計算された恒星モデルが爆発直前にもつCOコアの半径とそれに対応するHeコア質量の関係およびその振る舞いを再現するfitting式(初期メタリシティーZは0.0003,0.0001,0.001,0.004,0.01,0.03,0.002の7種類で取っている)

図2から得られたfitting式

$$r_{CO} = \begin{cases} 0.00950299M_{He} - 0.00657887 & (M_{He} \leq 9.42M_{\odot}) \\ 0.00000044363M_{He}^6 - 0.0000309075M_{He}^5 + 0.000836296M_{He}^4 - 0.011084412M_{He}^3 + 0.074567928M_{He}^2 - 0.230438331M_{He} + 0.283230749 & (9.42M_{\odot} < M_{He}) \end{cases} \quad (1)$$

をSSEおよびBSEに実装することでSSEおよびBSEコードでCOコアの半径を計算できるように改良を施した。

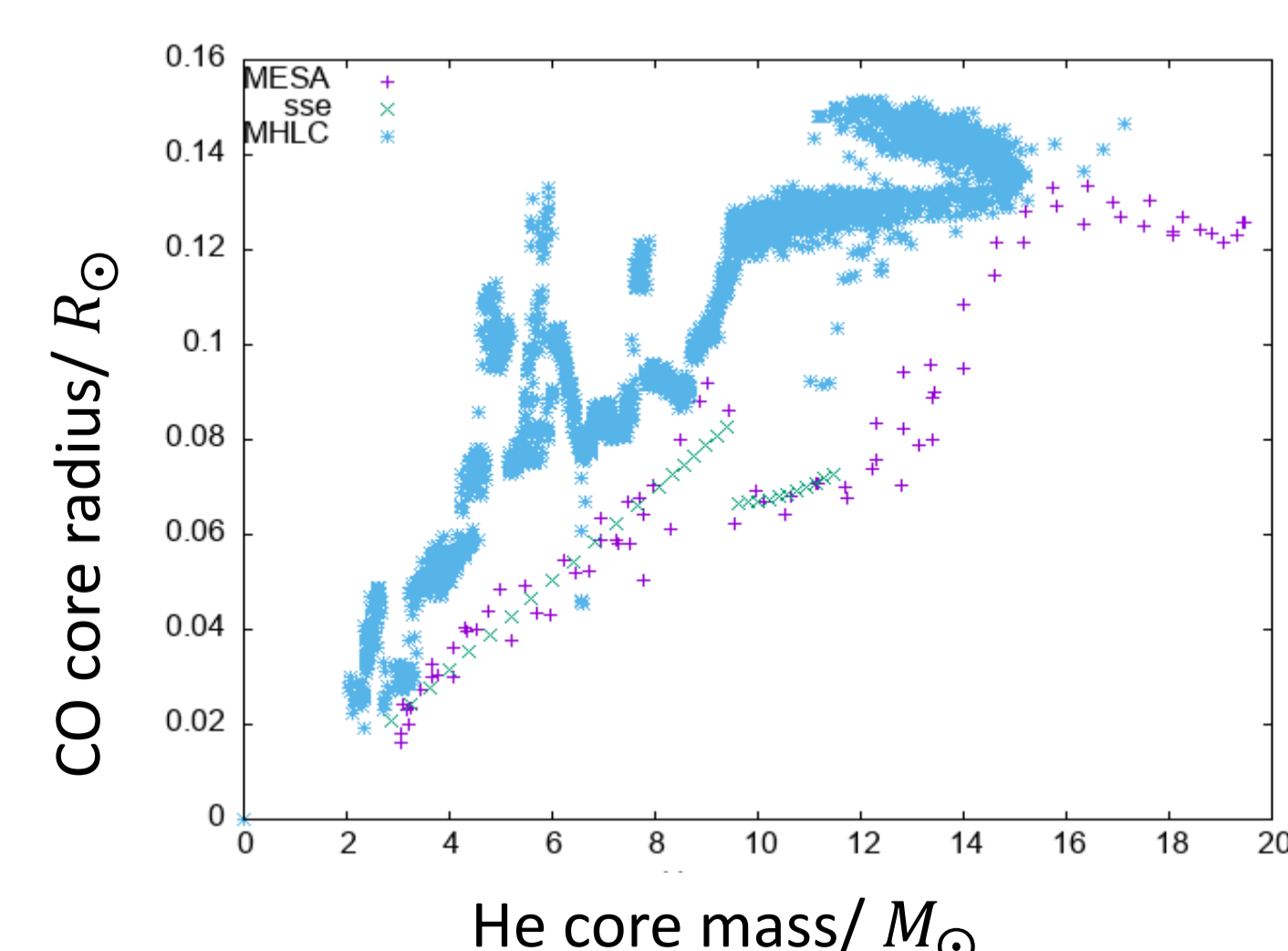


図3 改良後のSSEコードによって計算されたモデル(Z=0.02)でのCOコア半径とMHLIC、MESAモデル半径

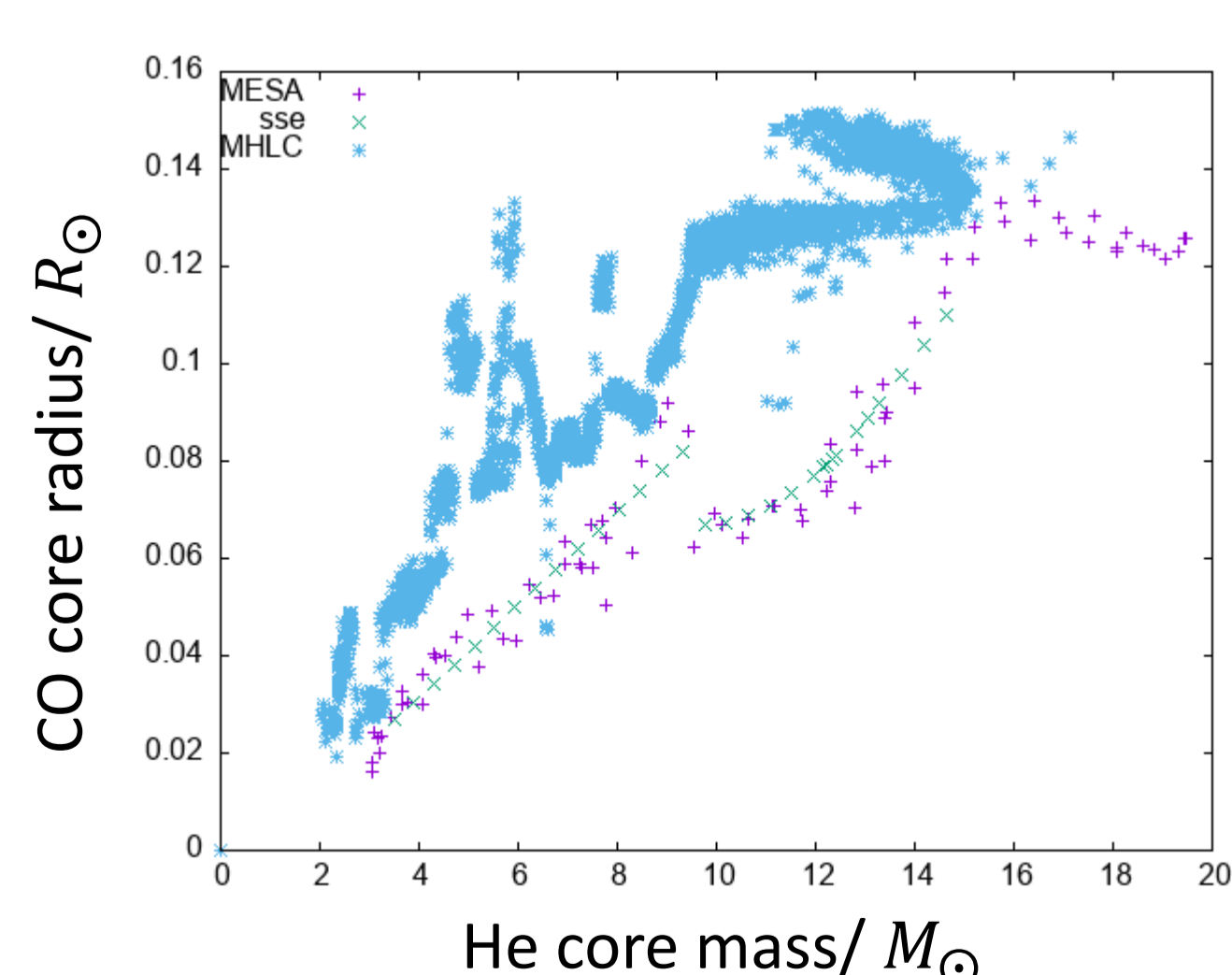


図4 改良後のSSEコードによって計算されたモデル(Z=0.0003)でのCOコア半径とMHLIC、MESAモデル半径

手法と結果

本研究では爆発直前のCOコアのコンパクトネス

$$\xi_{CO} = \frac{M_{CO}/g}{R_{CO}/cm} \quad (2)$$

およびR_COから以下の表を用いて恒星モデルの最終進化を予測した。

表1 Muellerの手法[5]によって得られたNSとBHを分けるxi_COの閾値 ([7]の表A.1より引用)

R_COの範囲	xi_CO
0 ≤ R_CO/10^9cm < 3.5	NS
3.5 ≤ R_CO/10^9cm < 4.0	1.5563 × 10^24
4.0 ≤ R_CO/10^9cm < 4.5	NS
4.5 ≤ R_CO/10^9cm < 5.0	BH
5.0 ≤ R_CO/10^9cm < 5.5	1.5427 × 10^24
5.5 ≤ R_CO/10^9cm < 6.0	BH
6.5 ≤ R_CO/10^9cm < 6.5	BH
6.5 ≤ R_CO/10^9cm < 7.0	1.4692 × 10^24
7.0 ≤ R_CO/10^9cm < 7.5	1.4175 × 10^24
7.5 ≤ R_CO/10^9cm	BH

また、(2)式および表1の結果から中性子星と判断されたものに関しては以下のfitting式([7]の(5.3)式より引用)

$$M_{NS} = 0.25631 + 0.88522 \left(\frac{M_{CO}}{M_{\odot}} \right) - 5.24223 \left(\frac{R_{CO}}{R_{\odot}} \right) - 7.59994 \left(\frac{M_{CO}}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{R_{CO}}{R_{\odot}} \right) - 0.0437 \left(\frac{M_{CO}}{M_{\odot}} \right)^2 + 128.001 \left(\frac{R_{CO}}{R_{\odot}} \right)^2 \quad (3)$$

から中性子星の質量を導出した。この手法により、単一星および二連星系(Z = Z_sun)のコンパクト天体の予測は次のようになった。

表3 改良後のSSEコードから計算されたCOコアの情報と表1から見積もられた星の最終進化

初期質量M_iniの範囲	進化の最終段階
4M_sun ≤ M_ini ≤ 7M_sun	白色矮星(WD)
8M_sun ≤ M_ini ≤ 17M_sun	中性子星(NS)
18M_sun ≤ M_ini ≤ 40M_sun	ブラックホール(BH)

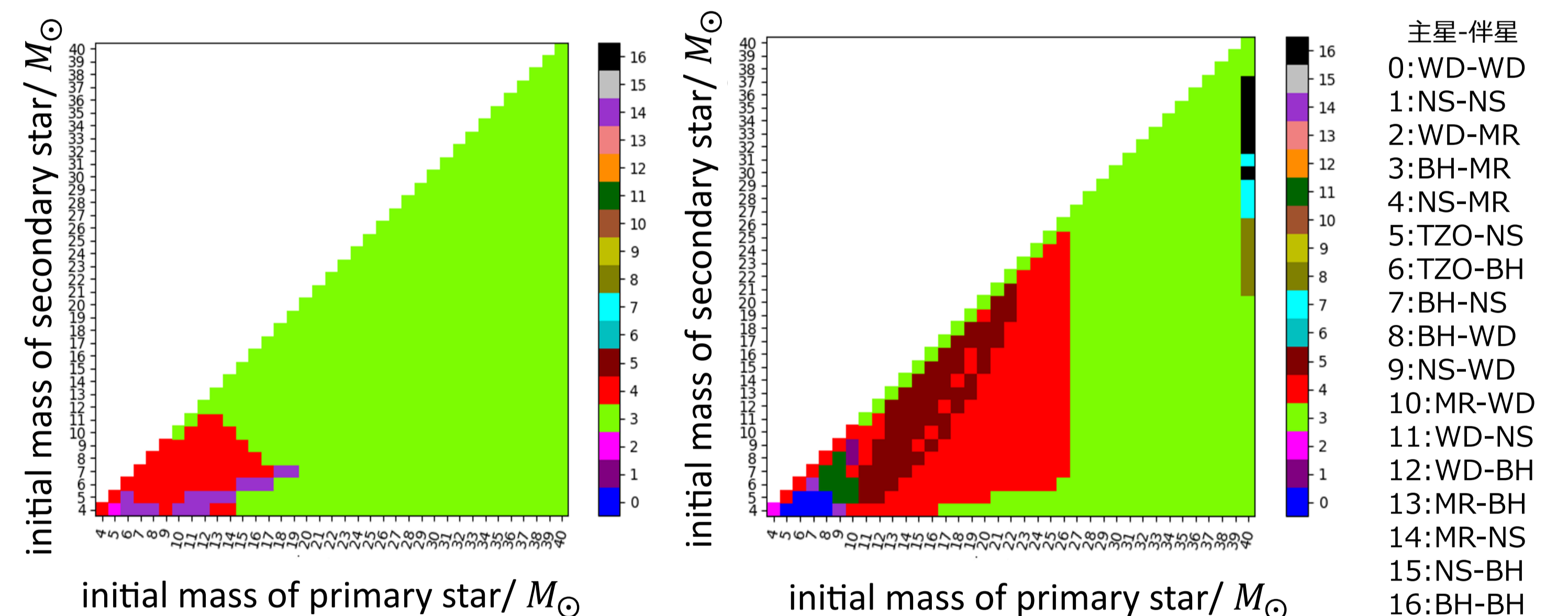


図5 初期公転周期が2日の場合の二連星系の最終進化

図6 初期公転周期が10日の場合の二連星系の最終進化

また、初期質量4M_sun ~ 40M_sunの単一星モデルおよび二連星系モデルから初期質量関数およびflatな分布を持つ質量比と初期分離度を用いて、中性子星の質量分布を求めると次のようになった。

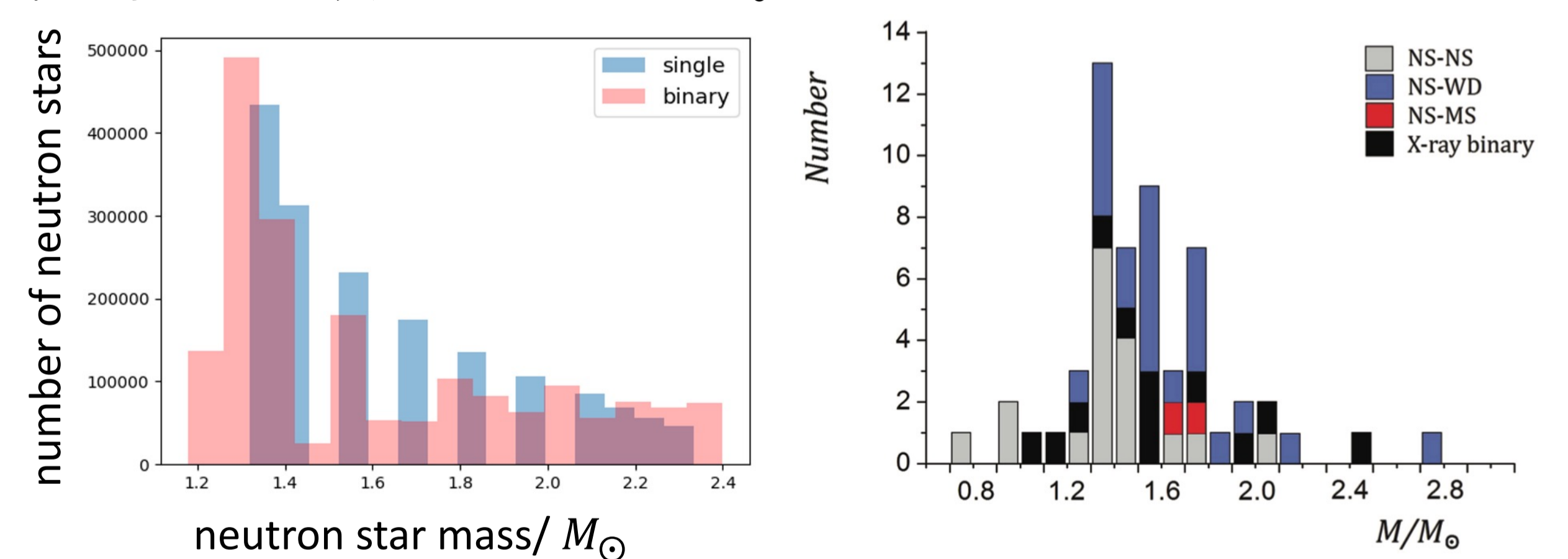


図7 中性子星の質量分布(左図は本研究で得られた1.0×10^12個の二連星系と単一星の集団を考えた際の分布であり、右図は観測によって得られた二連星系を構築する中性子星の質量分布(Valentim et al.,2011[6]のfigure 1より引用))

まとめ

- 種族合成計算コードを改良し、COコアの半径を対応するHeコアの質量から計算できるように改良を施した
- 種族合成計算の結果とMuellerの手法からコンパクト天体の評価および中性子星の質量分布を作成した

参考文献

- [1] Hurley J.R., Tout C.A., Pols O.R., MNRAS, 2000, vol.315, pp.543-569
- [2] Hurley J.R., Tout C.A., Pols O.R., MNRAS, 2002, vol.329, pp.897-928
- [3] <https://2sn.org/DATA/MHLC16/presn/>(2022年12月26日参照)
- [4] <https://docs.mesastar.org/en/release-r22.11.1/>(2022年12月26日参照)
- [5] Mueller B., Hegar A., Liptai D., Cameron J. B., MNRAS, 2016, vol.460, pp.742-764
- [6] Valentim R., Rangel E., Horvath J.E., MNRAS, 2011, vol.414, pp.1427-1431
- [7] 令和3年度 修士論文 太田 慧史 "種族合成計算に超新星背景ニュートリノ等の見積りを組み込む手法の開発"