

Muellerの一次元簡易モデルに
基づく超新星爆発、
中性子星・ブラックホール形成

東京理科大学理工学研究科物理学専攻 太田慧史 鈴木英之

目的

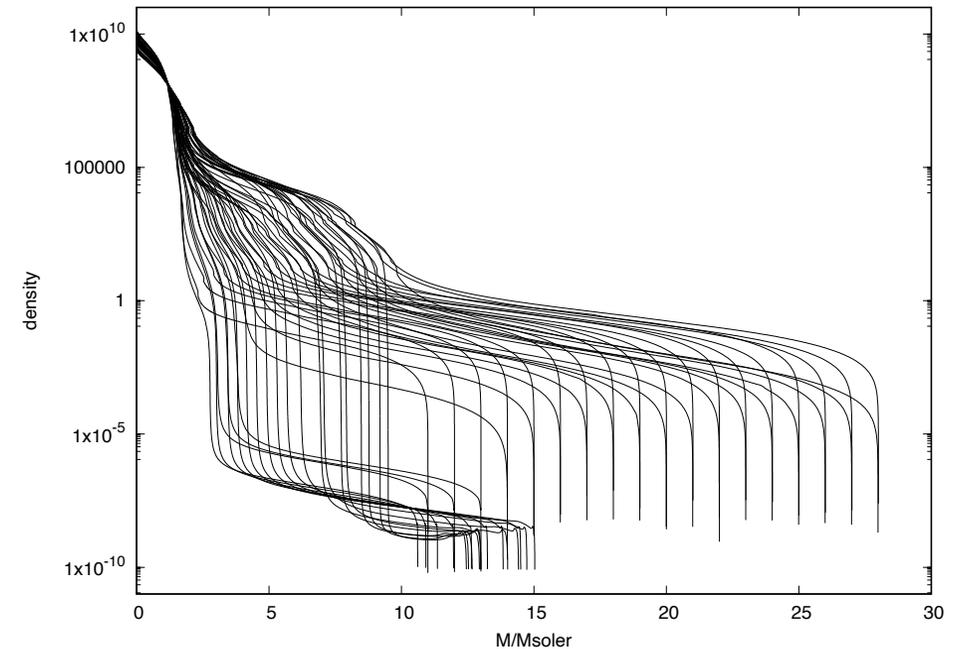
- 崩壊直前の星の内部の情報から爆発後の状態を

爆発後の中性子星の質量から、中性子星が形成されるまでに放出されたニュートリノの量を評価することができる。

- すなわち、崩壊直前の情報から中性子星の質量がわかればニュートリノの放出量が評価できる。

Input data

- Steller evolution data pageにて公開されている、Woosleyらの2008年の親星のデータを使用した。
- 重力崩壊する直前の親星の一次元のおよそ1000メッシュの構造データ。
- 計算に使用したのは、そのうちの中心からの半径、中心からの質量、各メッシュの密度、そして各メッシュにおける元素の質量分率。
- 用いた親星のZAMS質量はMuellerらの計算に合わせて $M = 10 \sim 30 M_{\odot}$ の範囲
- Z は $Z = 1Z_{\odot}, 10^{-4}Z_{\odot}, 0Z_{\odot}$ の3種類。



計算に用いた一部の親星の密度分布。
($Z = 0, 0.0001, 1Z_{\odot}, M = 10 \sim 30 M_{\odot}$)

計算の流れ

一次元の親星構造データをインプット
各メッシュが自由落下する時間を評価する



形成された原始中性子星と自由落下した質量シェルが放出する
 L_ν から衝撃波手前の領域の加熱を評価する



加熱から衝撃波の復活の可否を判定



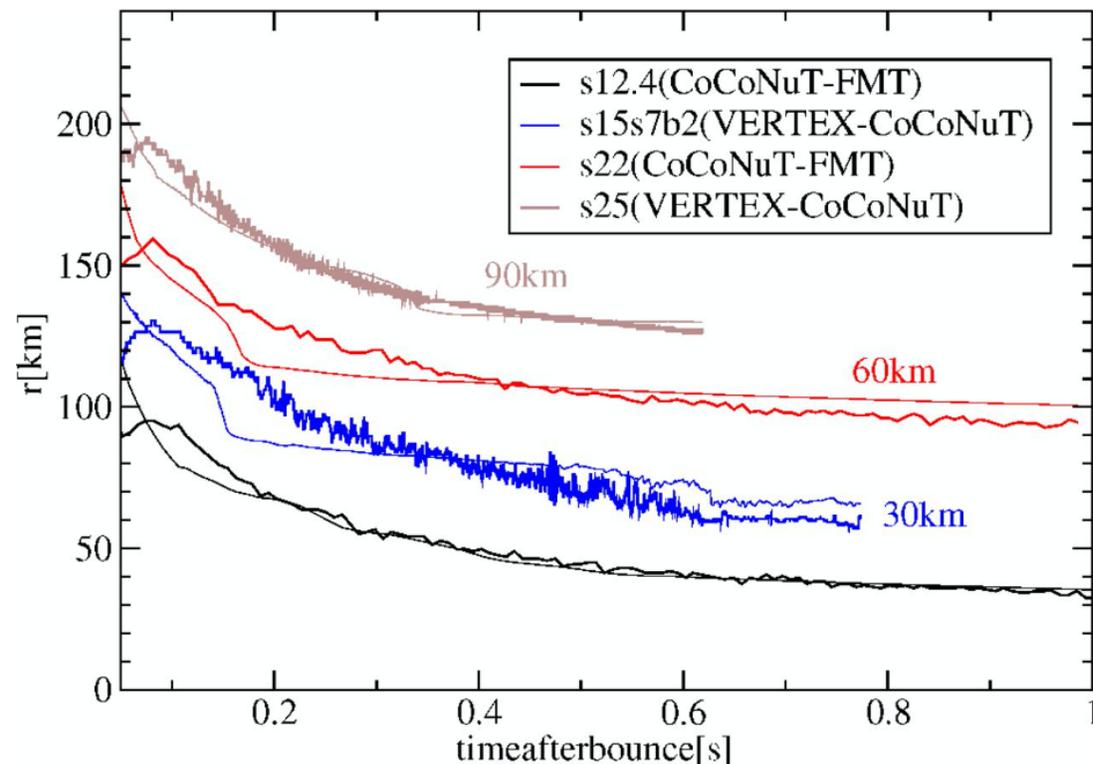
衝撃波の速度等から爆発のエネルギーや核燃焼を評価



爆発や爆発失敗後の中性子星、ブラックホール質量の評価

モデルの妥当性

- Muellerらが行った、このモデルを用いての計算結果と2Dや3Dのシミュレーションとのゲイン半径の比較。
- 細い線:このモデルを用いての計算結果
太い線:シミュレーションでの計算結果
- 右図では見易さのために30kmずつずらして描画されている。
- コア反跳後のゲイン半径の収縮を再現できている。



Mueller et al., MNRAS 460 742-764(2016)

コア反跳後のゲイン半径

パラメータについて

- 1次元の計算では爆発せず全てのケースで潰れてしまうので、2次元や3次元の効果をパラメータとして取り入れている。計算に用いられたパラメータを以下に示す。

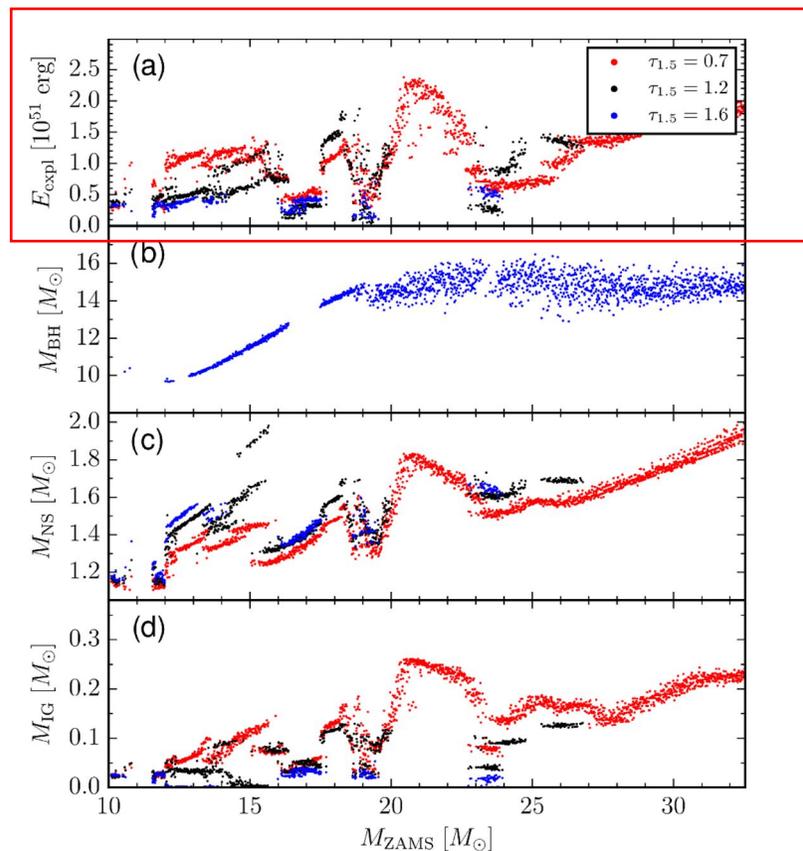
パラメータ	説明	作用する要素
α_{out}	外向きblobの割合	エネルギー、原始中性子星質量
α_{turb}	乱流応力による衝撃波膨張	衝撃波半径
β_{expl}	衝撃波の圧縮比	核燃焼
ζ	降着エネルギーをニュートリノ光度へ変換する効率	ニュートリノ光度
$\tau_{1.5}$	$1.5M_{\odot}$ の中性子星の冷却タイムスケール	ニュートリノ光度

パラメータの影響(例:爆発エネルギー)

差異の要因

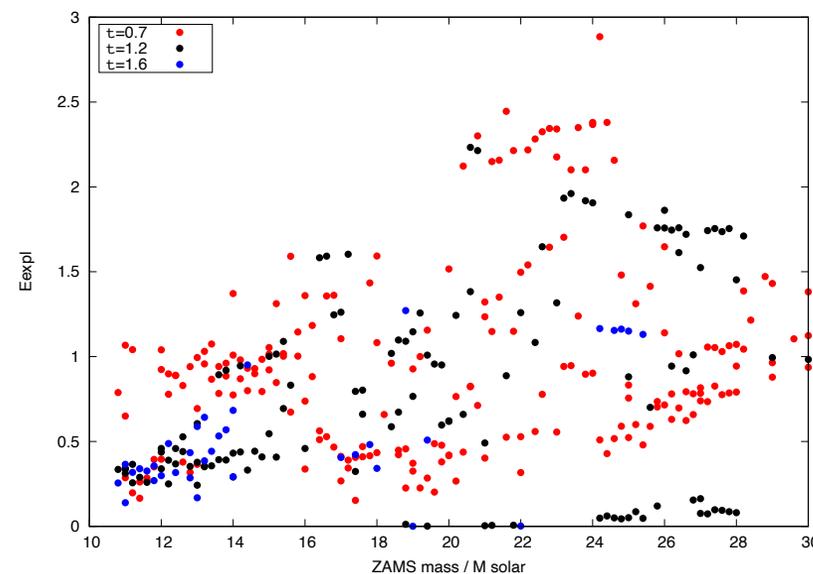
- ・ Muellerらと本研究では違う親星モデルを用いたこと
- ・ モデル自体の更新(Mueller'16→Mueller'20)が行われたことが考えられる。

主な変更点として、原始中性子星の質量が最大質量を超えてブラックホールが形成される場合は、最大質量を超えた段階でニュートリノによる加熱が止まる処理を加えた。



Mueller et al., MNRAS 460 742-764(2016)

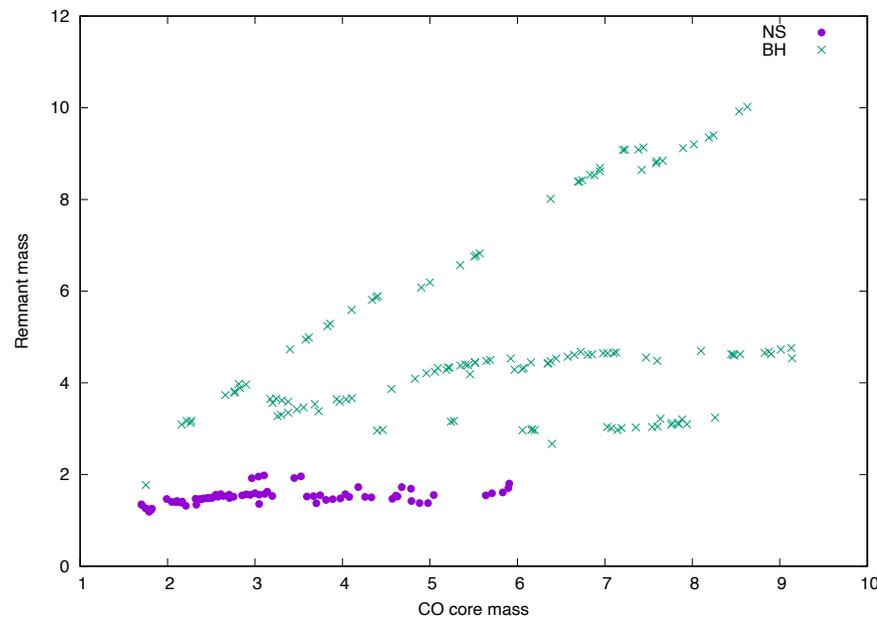
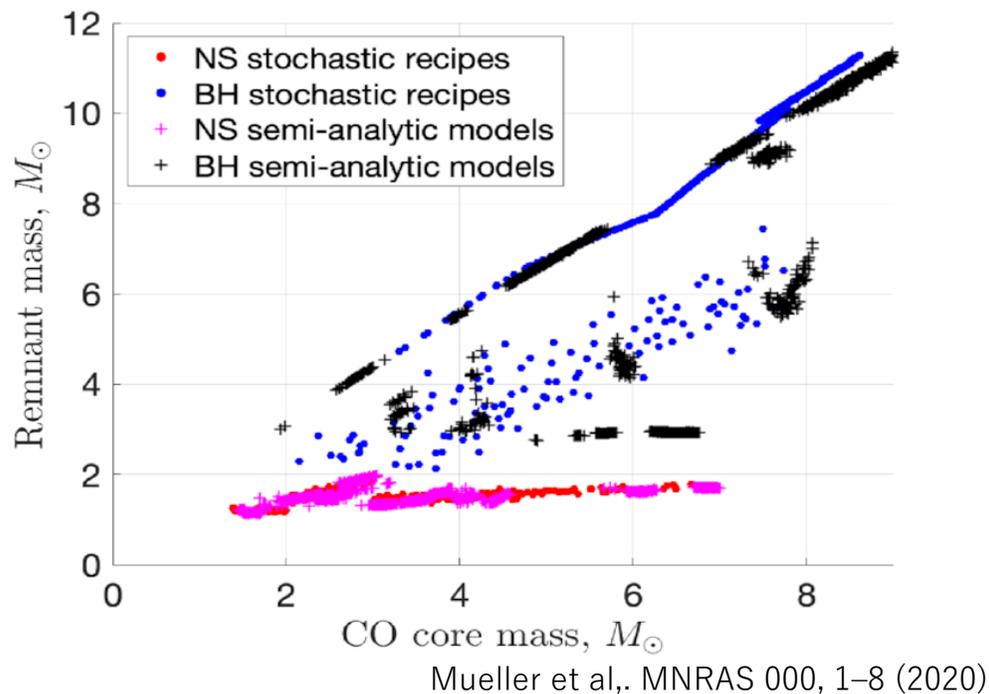
Muellerらの計算結果(2016)



本研究での計算結果

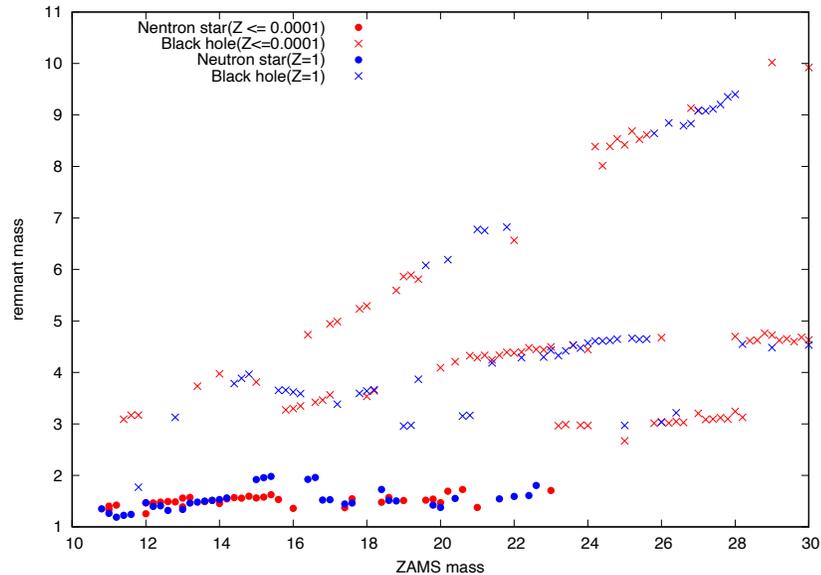
中性子星、ブラックホール質量の見積について

- 中性子星質量
衝撃波によって放出される領域より内側の質量から、結合エネルギーの分軽くなったもの。
- ブラックホール質量
潰れる直前の星の全質量がブラックホールになるが、条件を満たした場合は一部の領域が放出される。水素層は全てのケースにおいて放出されるとしている。

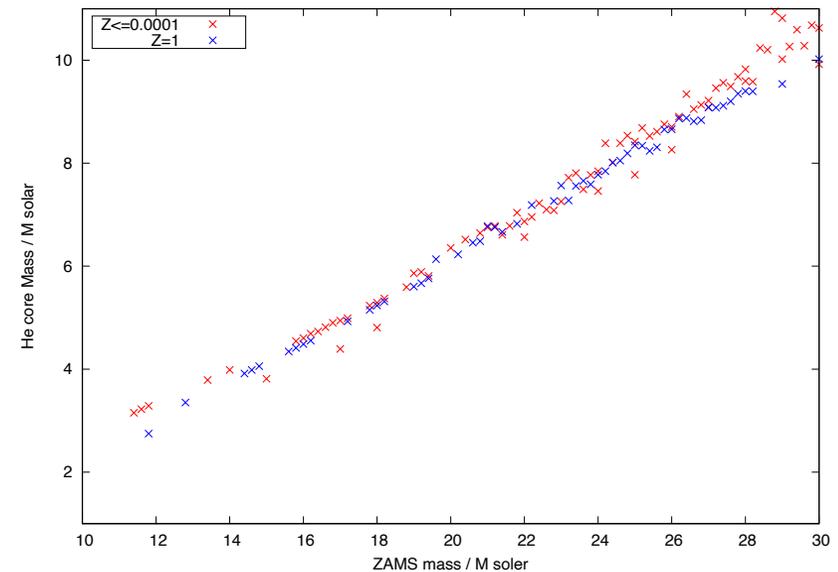


Remnant mass

- ブラックホールが形成される上のラインは、水素層のみが排出され、ヘリウムコアの質量がそのままブラックホールになったケース
- 中性子星の最大質量($M = 2.05M_{\odot}$)を超えるものは潰れてブラックホールになる扱いをしているため、 $2.05M_{\odot}$ を超える中性子星は形成されない。



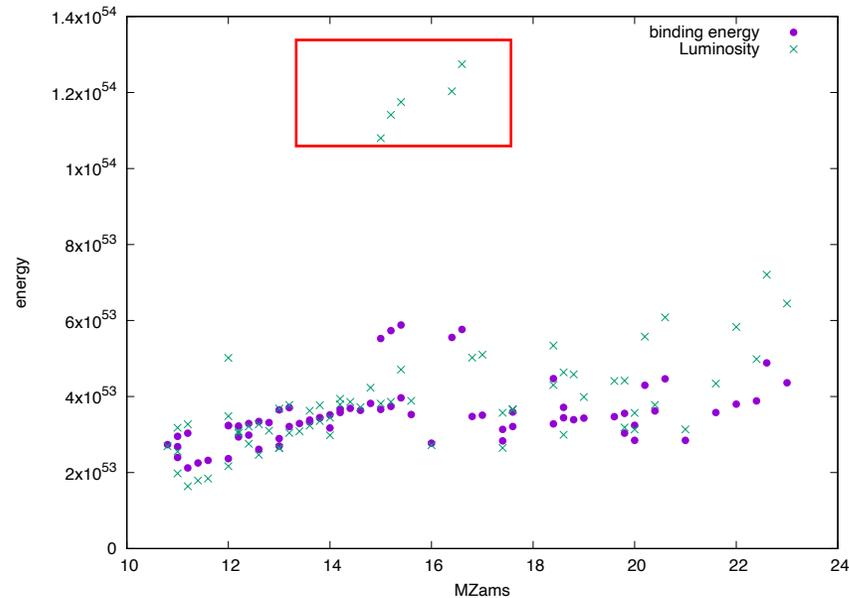
中性子星、ブラックホール質量



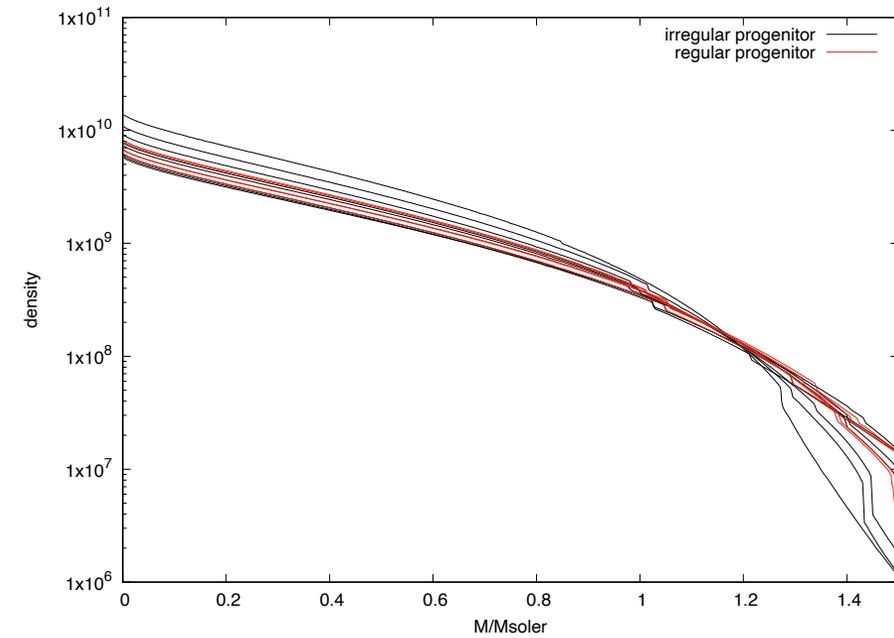
Heコア質量

neutrino

- 中性子星の質量から計算したもの
- 各メッシュでの $(L_\nu, \overline{L}_\nu)$ を三倍したものを星の内部から表層まで積分したもの
- 一部の親星ではうまく計算することができず改善の余地がある。
(中心付近で表面へ向かっての密度の減少が緩やかな親星)



中性子星が形成されるまでに
放出されたニュートリノの量



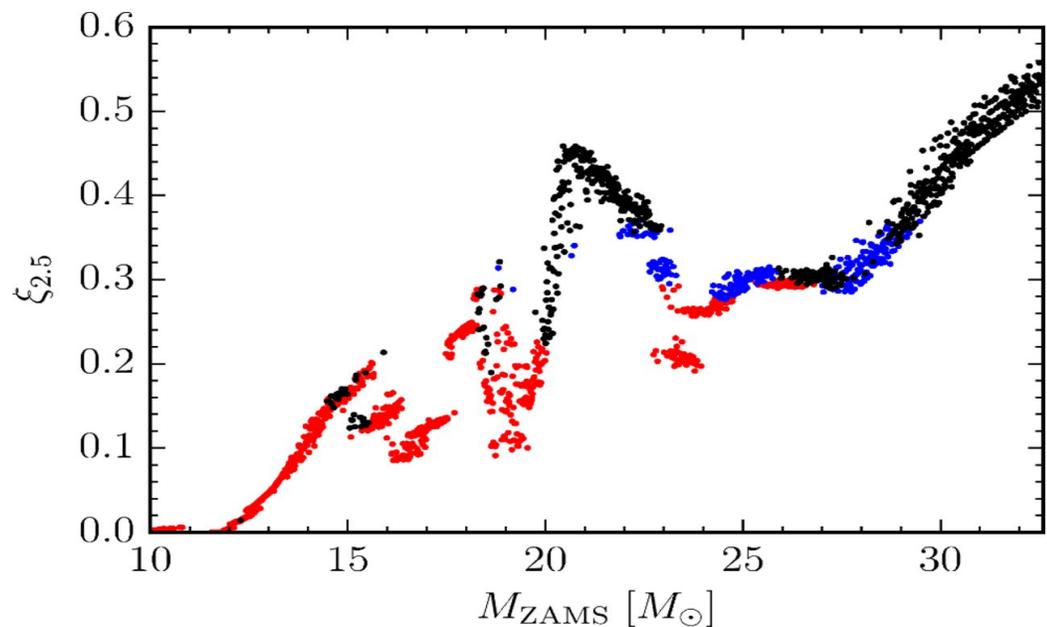
中心付近の親星の密度分布

コンパクトネスパラメータ

コンパクトネスパラメータ

$$\xi = \frac{M/M_{\odot}}{r(M)/1000\text{km}}$$

- COコア、Heコアでのコンパクトネスパラメータに相当する量(M/R)によって、爆発/非爆発を区別することを試みた。
- 大まかな傾向は分けることができたが、BHとNSの完全な分離はできない。

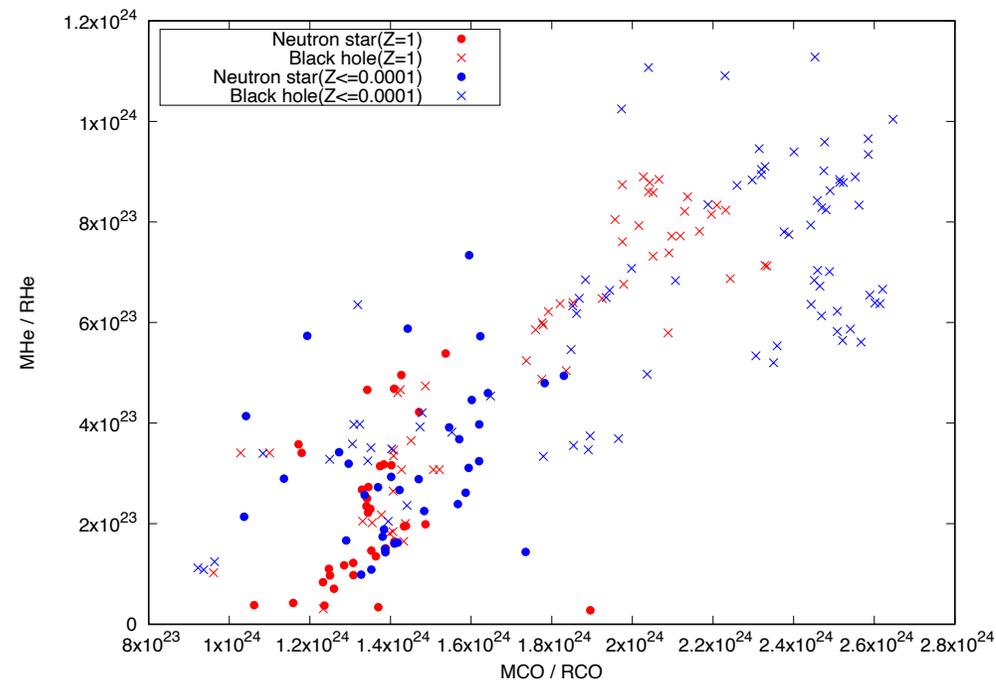


Mueller et al., MNRAS 460 742-764(2016)

赤:爆発

青:衝撃波は復活したが爆発しないケース

黒:爆発しない



まとめと今後の展望

まとめ

- ニュートリノの放出量の評価は改善の余地がある
- HeコアやCOコアのコンパクトネスパラメータに相当する量では、中性子星とブラックホールを完全に区別することはできない

今後の展望

- $M \geq 30M_{\odot}$ や、他の親星のケースについても扱う。