

星の種族合成計算とMuellerの1次元超新星モデルを用いた超新星背景ニュートリノ等の見積もり方法の開発

東京理科大学大学院 理工学研究科
中村広貴 本間卓磨 加藤ちなみ 鈴木英之

背景

超新星背景ニュートリノ (SRN) . . . 超新星爆発やブラックホール形成の際に放出されたニュートリノが、宇宙誕生から現在に至るまで蓄積したもの

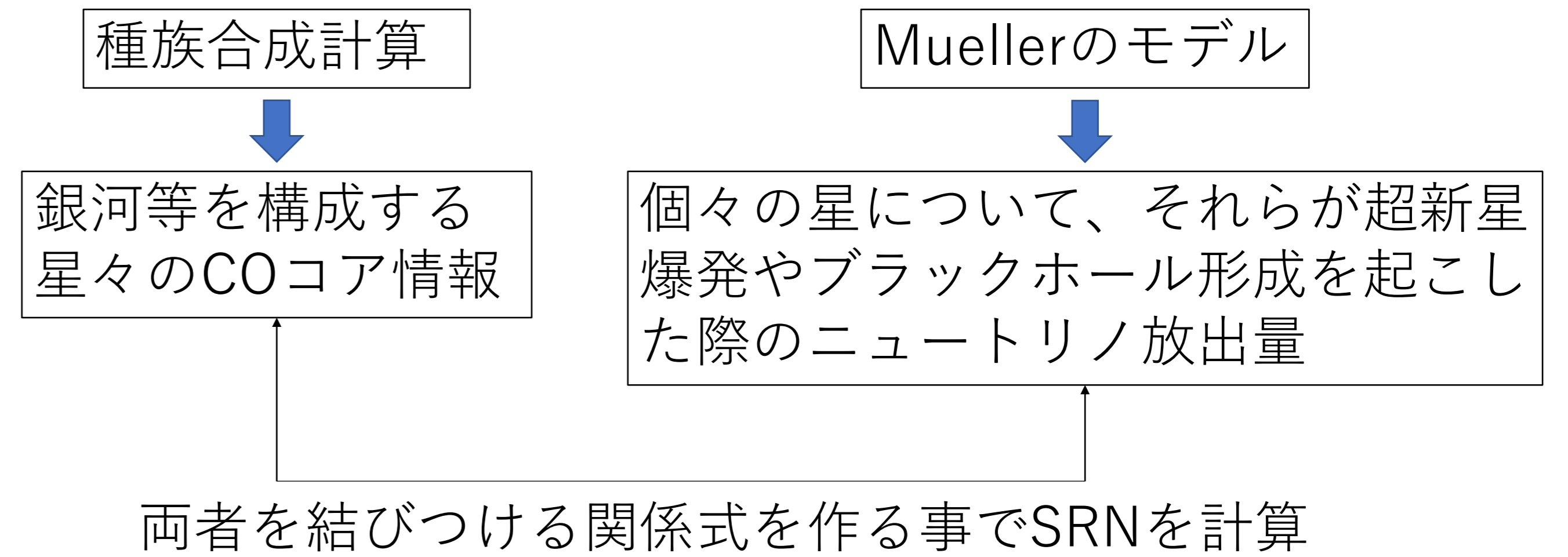
SRNの研究により、

- 過去に起こった超新星爆発やブラックホール形成
- ニュートリノの性質
- 星形成史

が解明されると期待

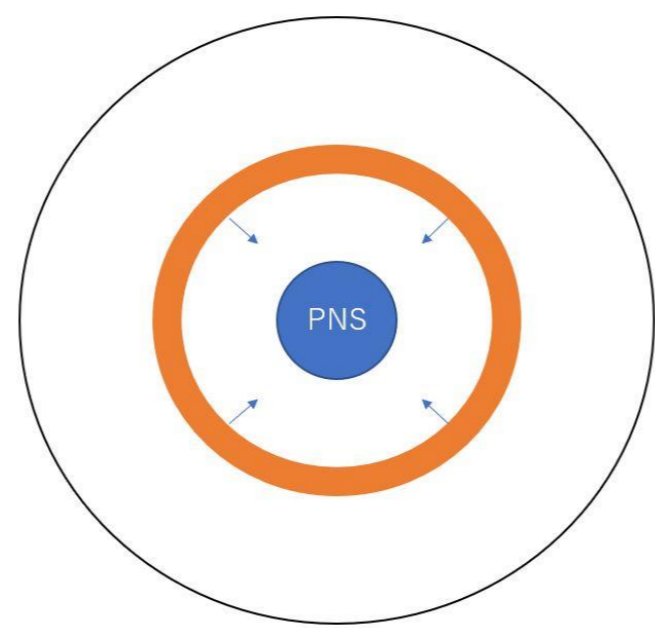
研究目的

SRNの値を数値計算によって見積もる。



Muellerのモデルについて

1次元球対称モデル。5つのパラメータの値の調整によって、より詳細なシミュレーションの結果を再現。



- α_{out} : 流出流の割合
- α_{turb} : 乱流応力による衝撃波拡張
- β_{expl} : 衝撃波通過前後の圧縮比
- ζ : 降着のエネルギーをニュートリノ光度に変換する際の変換効率
- $\tau_{1.5}$: $1.5M_{\odot}$ のNSの冷却時間

例1). 3Dシミュレーションの再現
 $\alpha_{out} = 0.5, \alpha_{turb} = 1.18, \beta_{expl} = 4, \zeta = 0.8, \tau_{1.5} = 1.2 \text{ s}$

例2). 1Dシミュレーションの再現
 $\alpha_{out} = 0.5, \alpha_{turb} = 0.86, \beta_{expl} = 4, \zeta = 0.8, \tau_{1.5} = 1.2 \text{ s}$

○数値計算の流れ

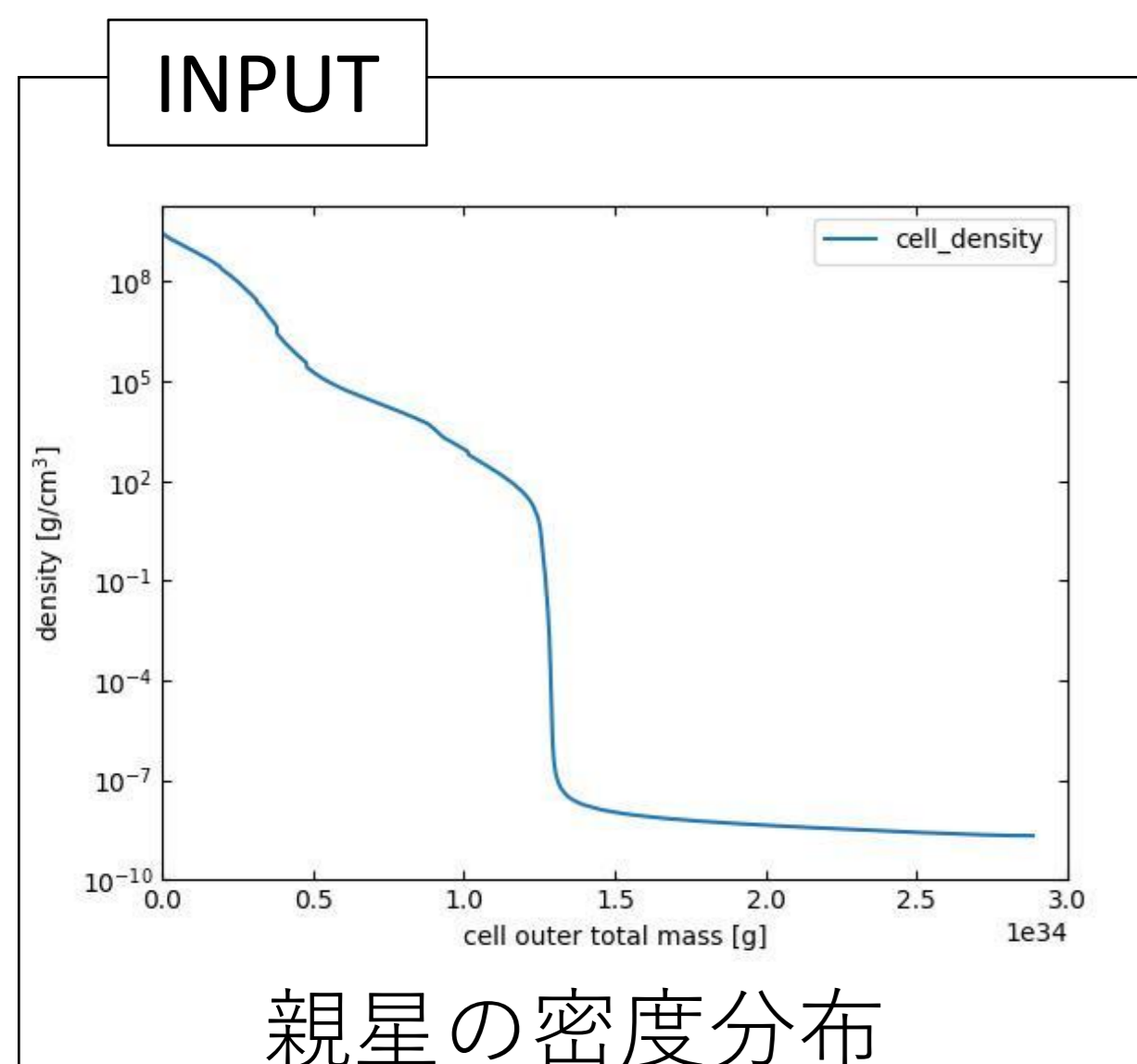
Pre-explosion phase

衝撃波が復活
($\tau_{adv} > \tau_{heat}$)

Explosion phase I

降着が収まる
($v_{post} > v_{esc}$)

Explosion phase II



親星の密度分布

OUTPUT

- 爆発のエネルギー E_{expl}
- 中性子星又はブラックホールの質量 M_{NS} or M_{BH}
- 爆発成功の可否など

出典: <https://2sn.org/DATA/MHLC16/presn/s20.11@presn.xz>

○ニュートリノ光度について
電子型ニュートリノ、及び反電子型ニュートリノの光度の合計。

$$L_{\nu} = L_{acc} + L_{diff} \quad (\text{phaseによらず})$$

PNSから放出される成分

降着物質の持っていたポテンシャルエネルギーが変換

$$L_{acc} = \zeta \frac{GM\dot{M}}{r_g}$$

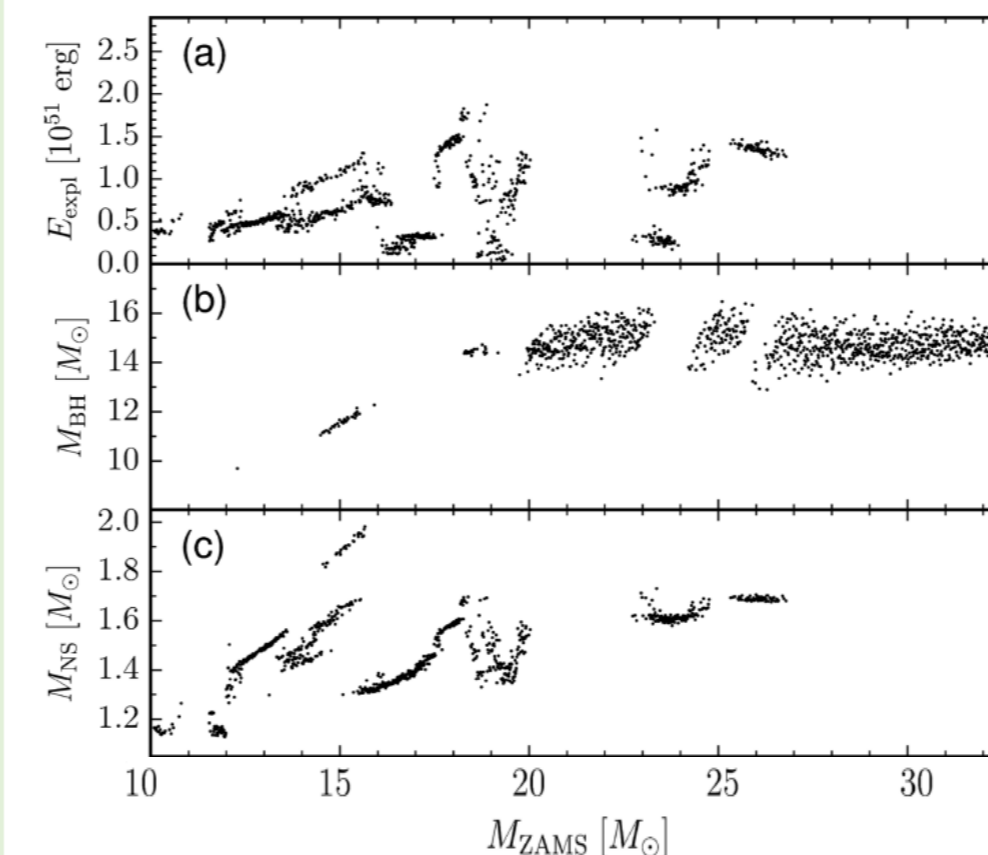
$$L_{diff} = 0.3 \frac{E_{bind}}{\tau_{cool}} e^{-t/\tau_{cool}}$$

○爆発成功の可否について
• 衝撃波が復活しない
• 衝撃波は復活したものの降着が収まらない
• M_{NS} が上限値 $M_{NS,max}$ ($= 2.05M_{\odot}$) を上回る
• 爆発のエネルギーが小さすぎる ($E_{expl} < 10^{45} \text{ erg}$)

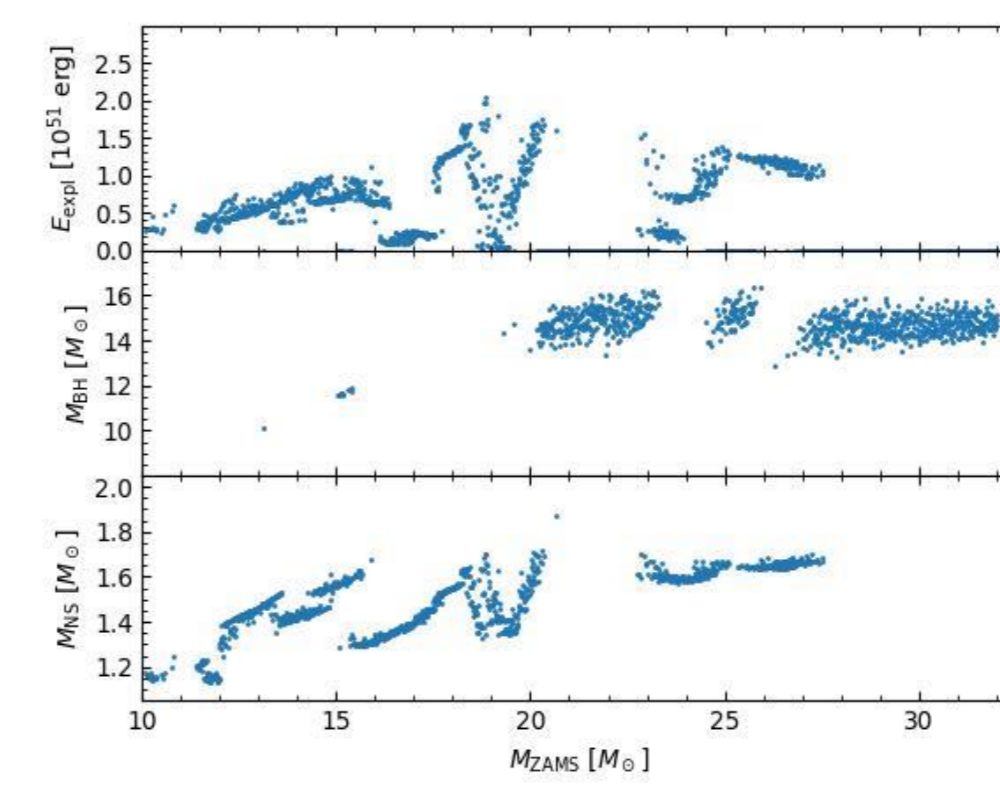
以上4つのうちいずれかに該当する場合、爆発に失敗してブラックホールが形成されたと判断する。

研究進捗

先行研究での結果

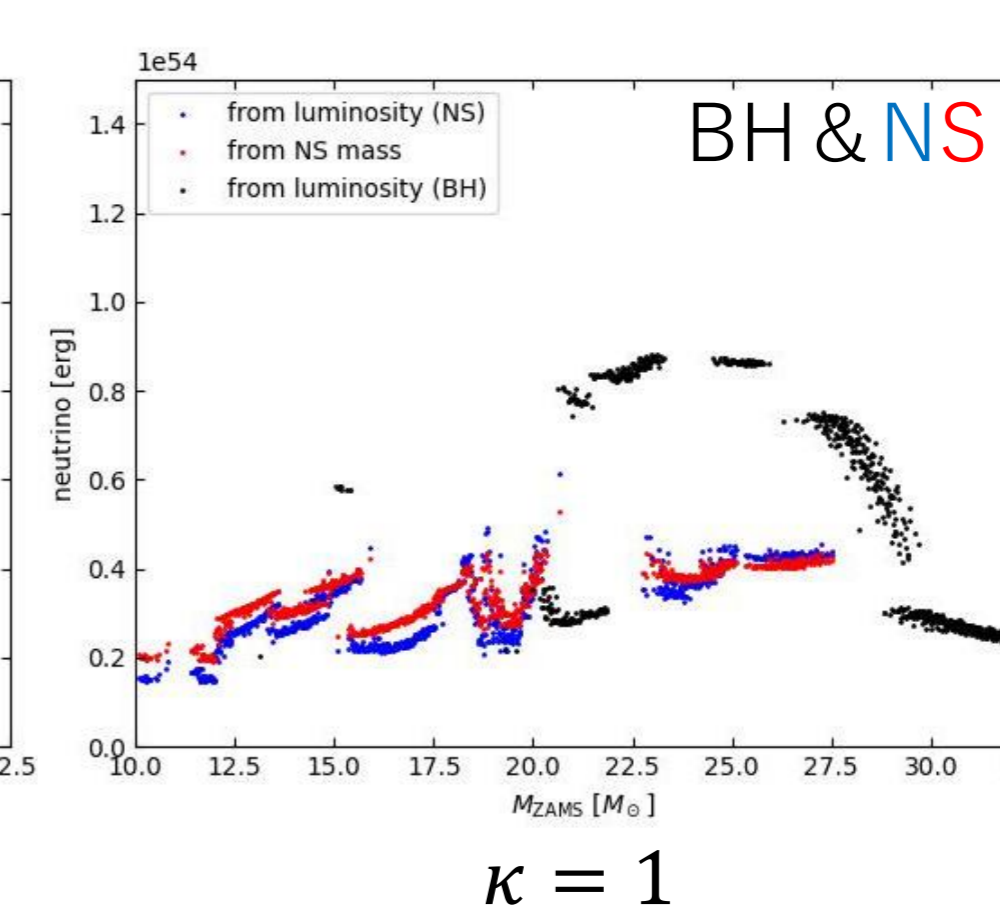
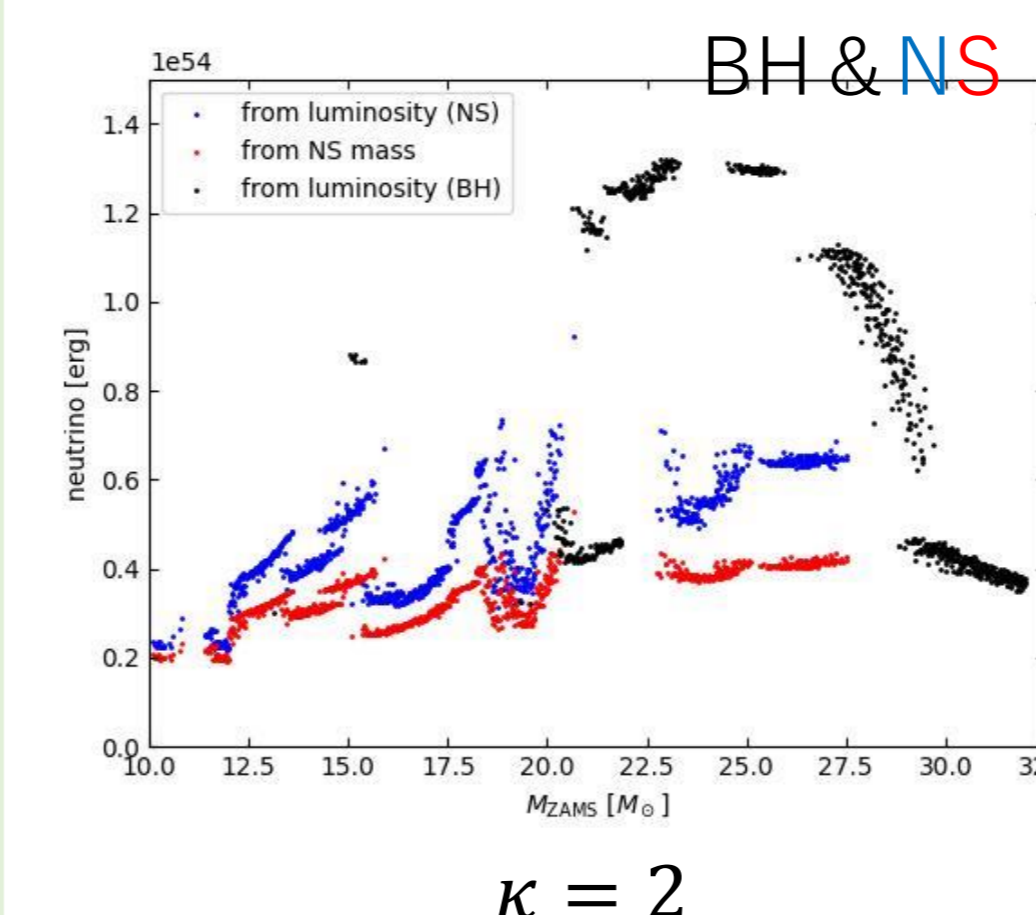


自作コードにより再現したもの

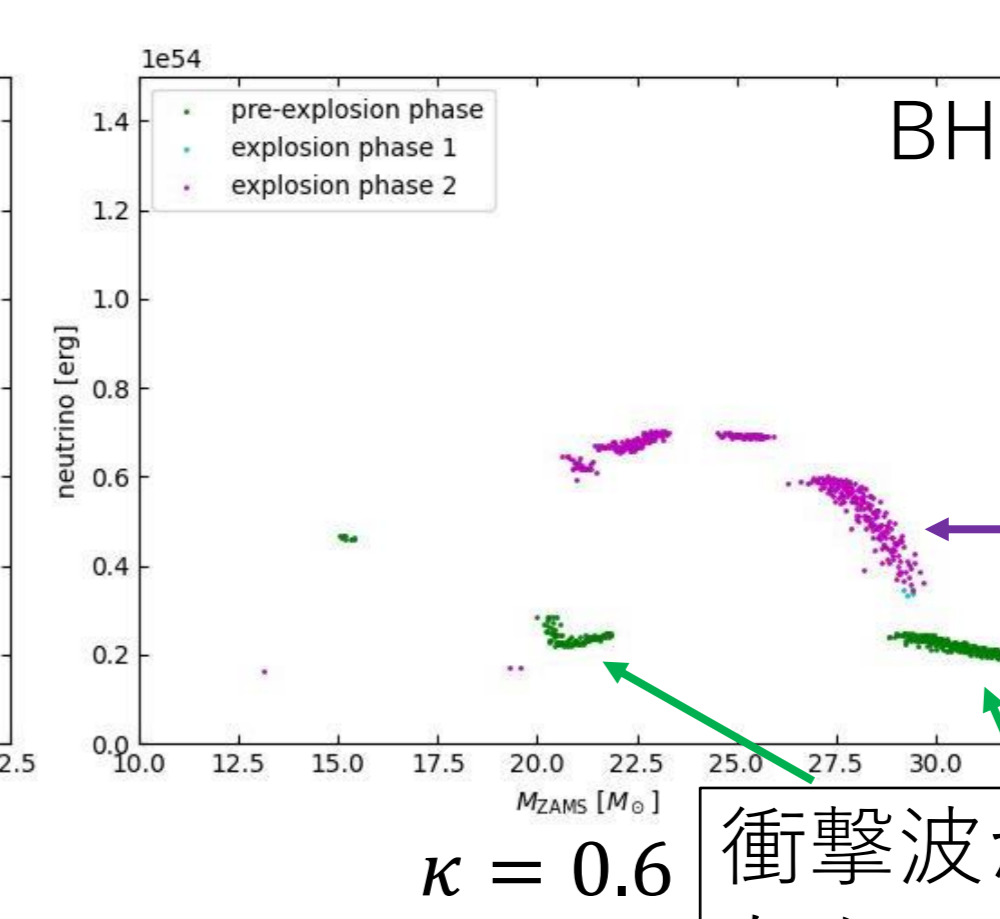
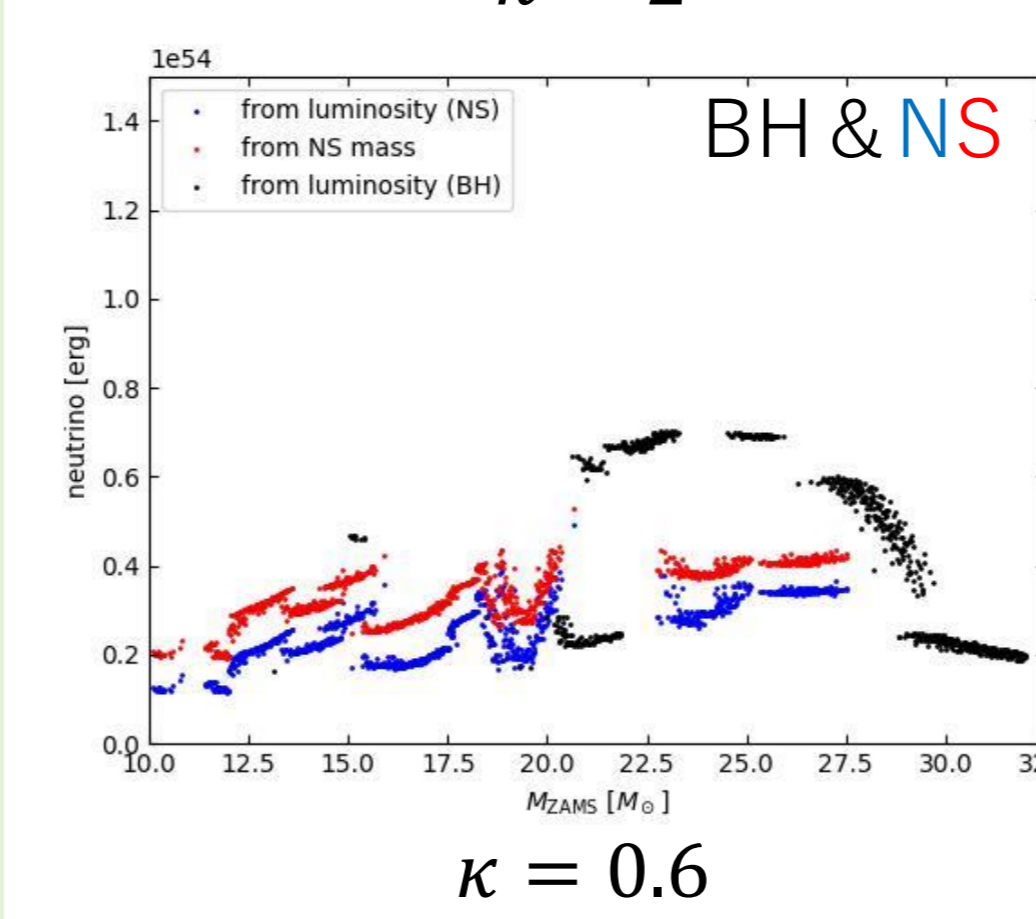


○先行研究の再現。
先行研究がやや古いため使われた親星モデルデータが一部破損して使用不可。しかしある程度再現には成功したと認識。

○ニュートリノ放出量の見積もりをモデルに追加。



• 方法1: ニュートリノ光度 L_{ν} の時間積分 (青、黒)
 $E_{\nu} = (1 + \kappa) \times \int L_{\nu} dt$
ただし、
 $\kappa = 4v_x / (v_e + \bar{v}_e)$
($4v_x = v_{\mu} + \bar{v}_{\mu} + v_{\tau} + \bar{v}_{\tau}$)
また、
 $L_{\nu} = \begin{cases} L_{acc} + L_{diff} & (\text{その他}) \\ L_{diff} & (\text{expl II}) \end{cases}$



• 方法2: 中性子星の結合エネルギーを利用 (赤)
 $E_{\nu} = (M_{by} - M_{NS})c^2$

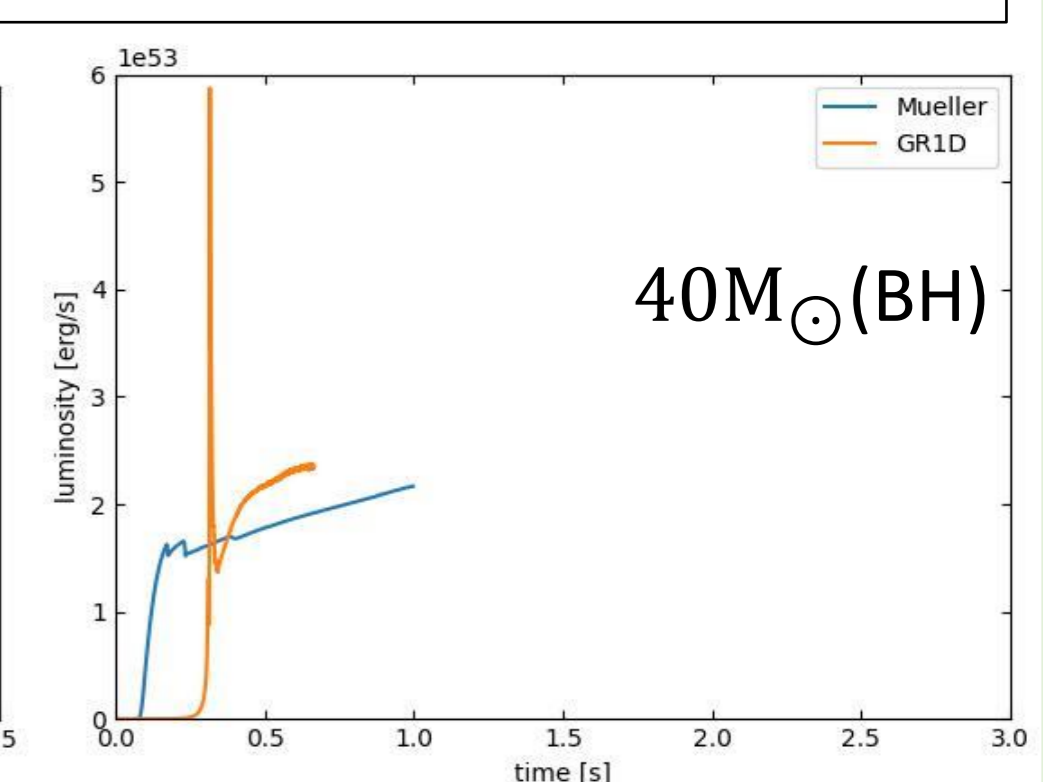
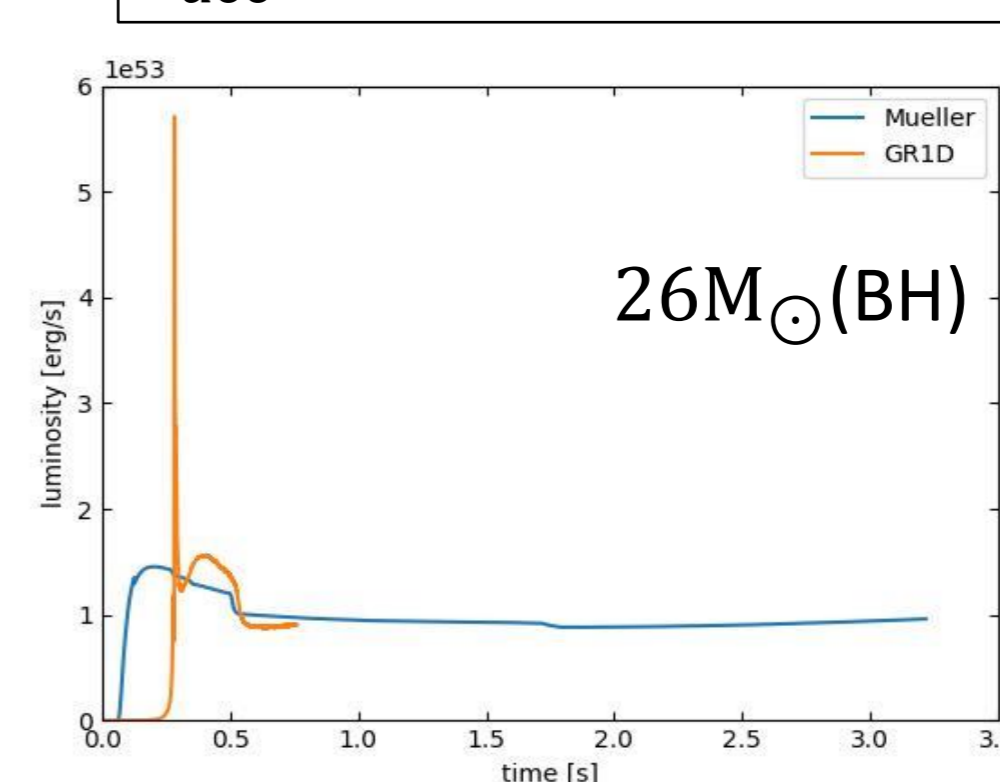
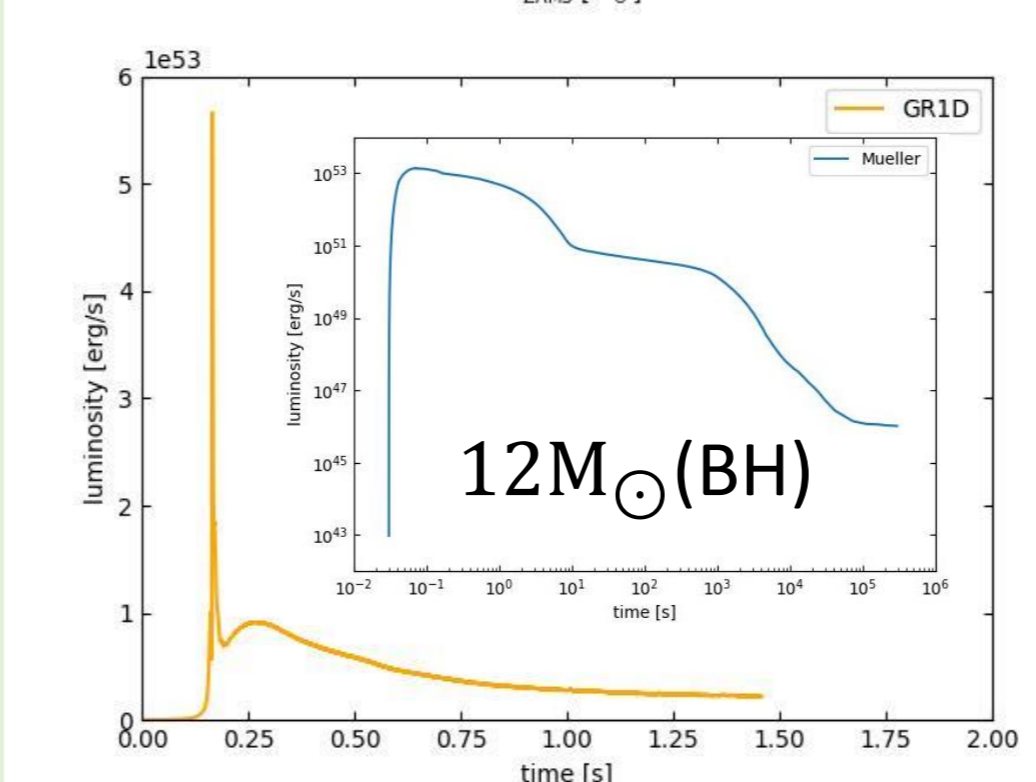
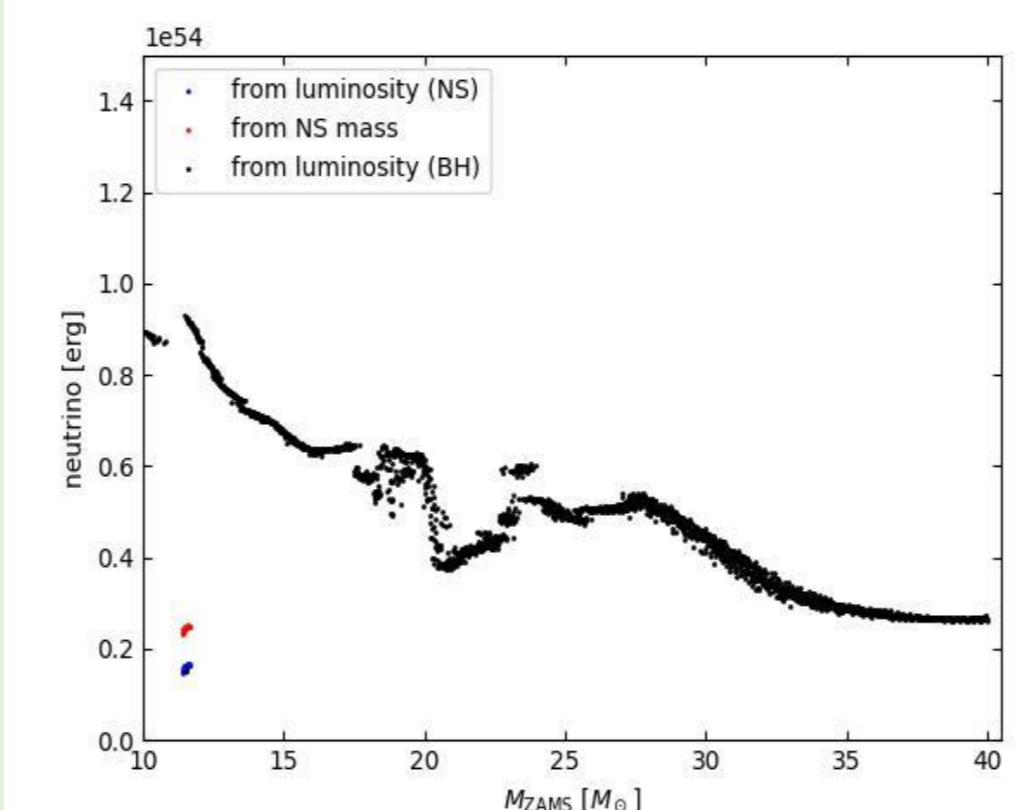
衝撃波が一度は復活したケース

衝撃波が復活しなかったケース

○GR1Dとの比較。

パラメータセットは1Dに調整。 $M_{NS,max} = 2.30M_{\odot}$, $\kappa = 0.633$
初期質量が $12M_{\odot}$, $26M_{\odot}$, $40M_{\odot}$ の親星モデルについて比較。

降着が長く続く様なケースでのニュートリノ放出量の見積もりが問題となる可能性。
Muellerモデルの質量降着率の評価時にニュートリノ加熱による流出を考慮する事で、BH形成時刻や L_{acc} を調整する等の改善方法が考えられる。



Summary and Future works

Muellerのモデルに関する先行研究の再現をある程度行う事が出来た。また2種類の方法でニュートリノの放出量を見積もりそれらと比較したほか、電子型と非電子型ニュートリノの比を変更した際の応答や、衝撃波復活の有無とニュートリノ放出量との関係についても調べる事が出来た。そしてGR1DとMuellerモデルとの比較を行い、ブラックホールになるようなケースにおいて差異が見られた。この問題点はニュートリノ放出量の見積もりにも影響を与える可能性があるため、モデルの改善が必要となる。今後の展望としては、最近の研究を参照して、上述の問題点を改善する事や超新星爆発・ブラックホール形成時の電子型、非電子型ニュートリノの比について知見を深める事などを行っていききたい。