

E02 超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究

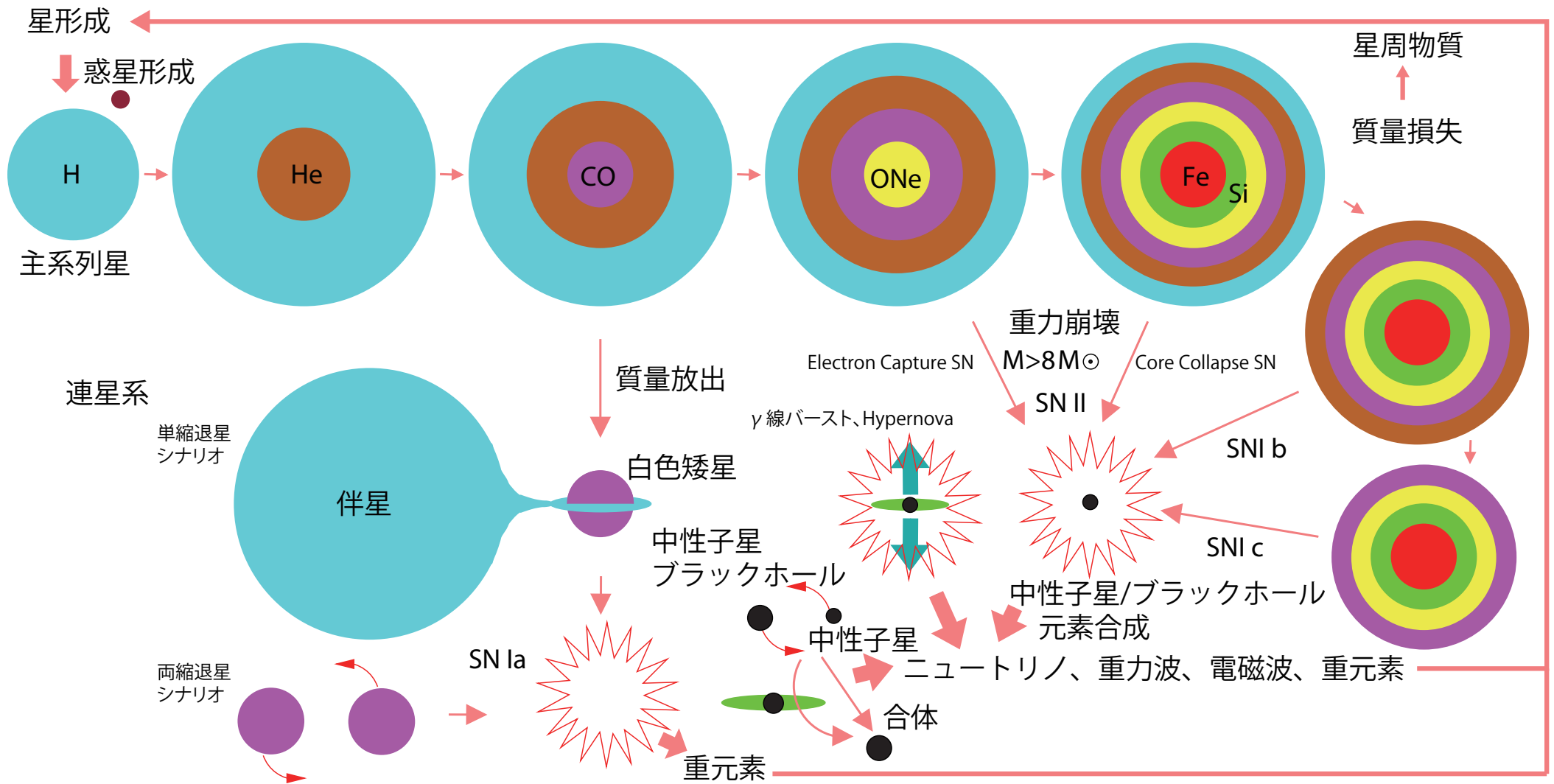
2019.8.25 @大阪大学
東京理科大 理工 鈴木英之

研究組織

研究代表者 鈴木英之（東京理科大学・全体の統括）
研究分担者 山田章一（早稲田大学・超新星爆発シミュレーション）
鷹野正利（早稲田大学・核物理）
中里健一郎（九州大学・超新星（背景）ニュートリノ）
研究協力者 辻本拓司（国立天文台・化学進化）
富樫甫（九州大学・核物理）

- 超新星（背景）ニュートリノの理論モデルの深化
多次元ニュートリノ輸送を含む超新星シミュレーションと原始中性子星冷却シミュレーションによる超新星ニュートリノに関する研究とシミュレーションに必要な状態方程式と高密度物質中でのニュートリノ反応率に関する研究
- 星形成・元素合成史（化学進化）と超新星背景ニュートリノ、地球ニュートリノをつなぐ総合的な研究への発展

公募研究も、大歓迎

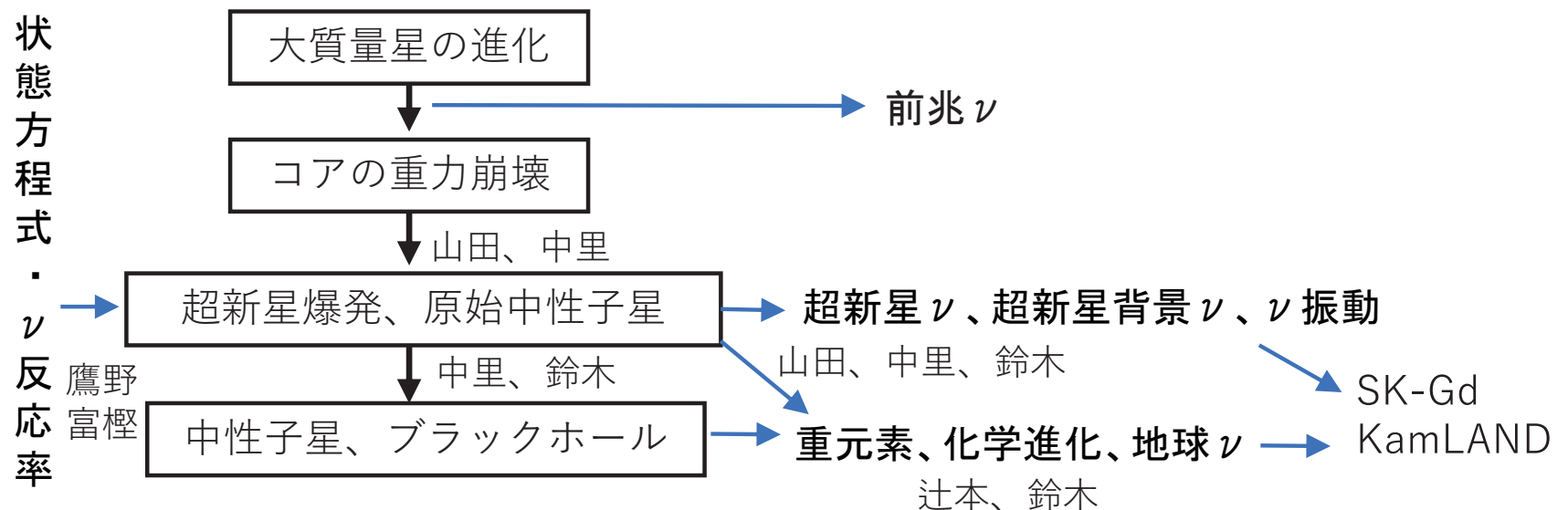


重い星の重力崩壊 ⇒ 中性子星 NS, ブラックホール BH, 超新星 SN ν , 重元素
 中性子星合体 ⇒ 重力波、short GRB、kilonova、重元素 (r 過程) ⇒ 地球 ν
 Ia 型超新星 ⇒ 重元素 (鉄まで)

星形成率 SFR、初期質量関数 IMF、恒星・連星系進化、爆発・合体・元素合成
 金属 (重元素) 量 (化学進化)、超新星背景ニュートリノ

研究テーマ

- 重い星の重力崩壊による超新星爆発、ブラックホール形成イベントの理論研究と放出されるニュートリノの数値シミュレーション
- 原始中性子星の冷却段階に放出されるニュートリノの系統的な研究
- これらに大きな影響を及ぼす高密度物質の状態方程式とニュートリノ反応率の系統的な研究 (核子制動放射、modified URCA など)
- 星形成史、化学進化、星形成時の初期質量分布のモデルと組み合わせた超新星背景ニュートリノの観測予測計算
- 超新星背景ニュートリノの計算と宇宙化学進化モデルの整合性検討
- 天の川銀河の化学進化モデル (場所依存、r 過程を含む) と地球ニュートリノ



他の計画研究との連携：A01, C01, E01 など

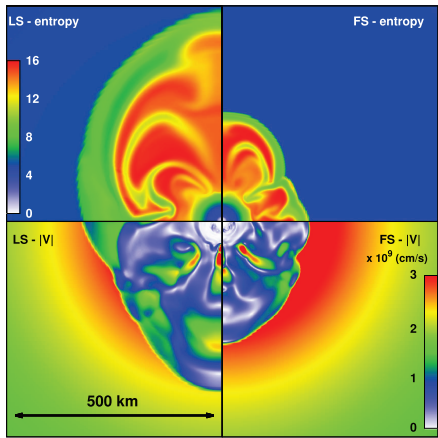
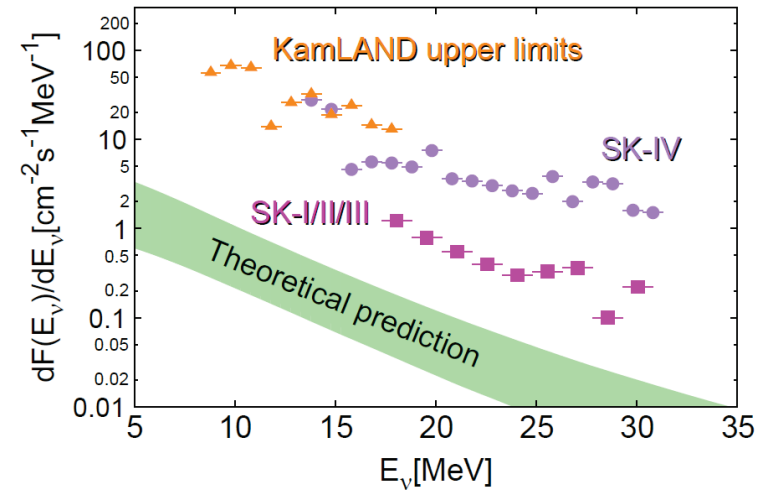
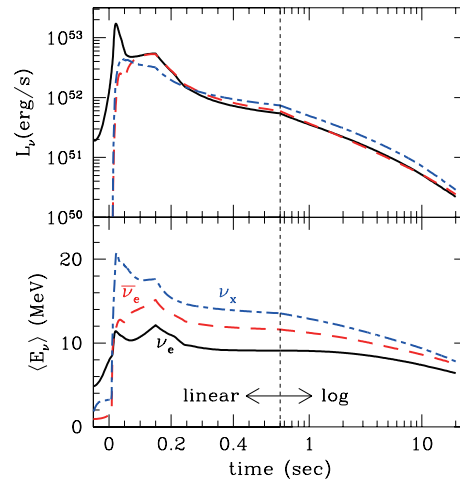
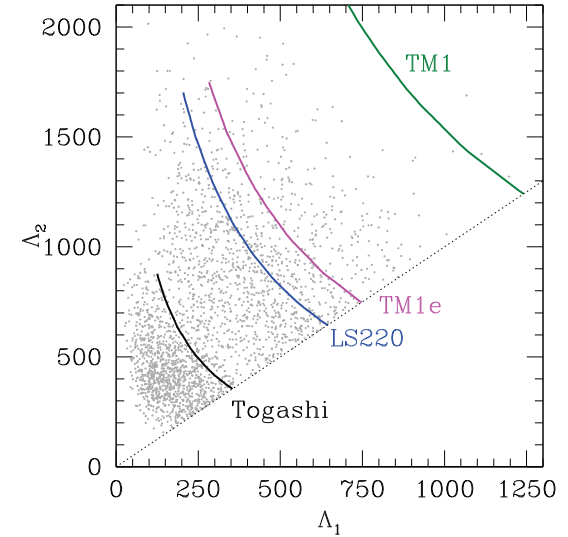
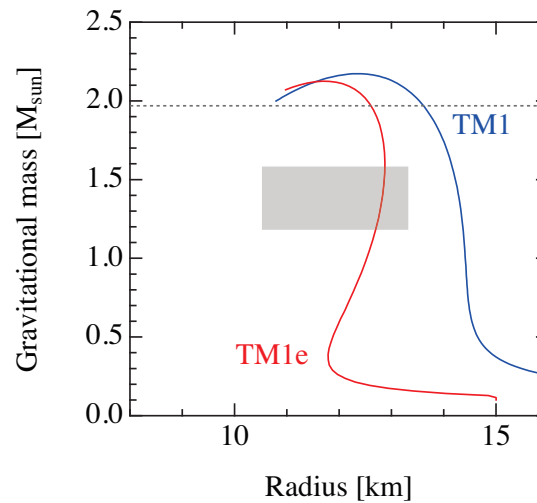
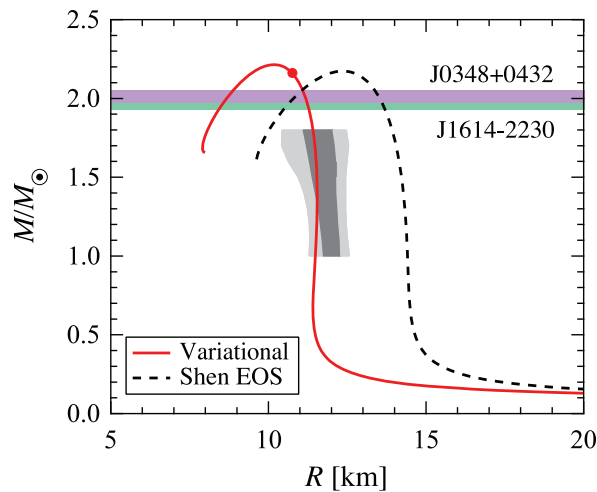


Figure 3. Snapshots of entropy per baryon (upper) and fluid speed (lower) at $t = 200$ ms. Left and right panels are for the LS and FS EOS, respectively.



Nagakura+'18: 多次元 ν 輸送による超新星シミュレーション, Nakazato+'13,'15: 超新星 ν DB, 超新星背景 ν
 3 段階の SN ν (collapse+bounce phase, accretion phase, PNS cooling) 計算



変分法による Togashi EOS(Togashi+'17) と相対論的平均場近似による新旧 Shen EOS(Sumiyoshi+'19): M - R
 関係と tidal deformability

GW,X 線観測 $\Rightarrow$ EOS+ ν 反応率 $\Rightarrow$ 爆発エネルギー, SN ν , NS/BH mass, 重元素量

超新星背景ニュートリノ SRN

- 重力崩壊型超新星発生率 $R_{\text{CC}}(z, M, Z)$
 $\hookleftarrow$ 星形成率 (SFR), 初期質量関数 (IMF), 金属量進化
 z : 赤方偏移 ($\leftrightarrow$ 宇宙時間), M : 親星質量, Z : 金属量
- 個々の超新星からのニュートリノスペクトル $\frac{dN_\nu(E'_\nu, M, Z)}{dE'_\nu}$
- 宇宙膨張 $\rightarrow$ ニュートリノエネルギーの赤方偏移 $E'_\nu \rightarrow E_\nu = \frac{E'_\nu}{1+z}$

$$\frac{dF_\nu(E_\nu, t_0)}{dE_\nu} = c \int_0^{t_0} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^{Z_{\max}} \frac{d^2 R_{\text{CC}}(z, M, Z)}{dM dZ} dZ dM \frac{dN_\nu(E'_\nu, M, Z)}{dE'_\nu} \frac{dE'_\nu}{dE_\nu} dt$$

$$dt = -\frac{dz}{(1+z)H(z)}, \quad H(z) = \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda} H_0, \quad dE'_\nu = (1+z)dE_\nu$$

Our model:

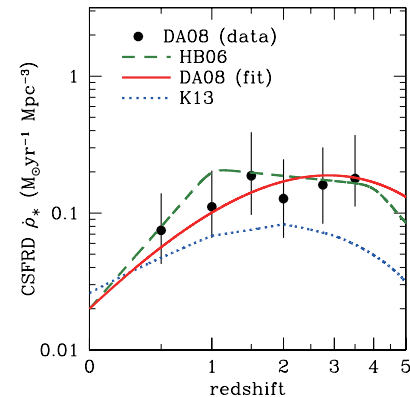
$$\frac{d^2 R_{\text{CC}}(z, M, Z)}{dM dZ} dZ dM = R_{\text{CC}}(z) \psi_{\text{ZF}}(z, Z) dZ \psi_{\text{IMF}}(M) dM$$

$$R_{\text{CC}}(z) = \dot{\rho}_*(z) \times \frac{\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1 M_\odot}^{100 M_\odot} M \psi_{\text{IMF}}(M) dM} [\text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}]$$

初期質量関数 IMF: $\psi_{\text{IMF}}(M) \propto M^{-2.35}$ (Salpeter type)

初期質量 $M \sim M + dM$ の星の形成率 $[\text{yr}^{-1}] \propto \psi_{\text{IMF}}(M) dM$

宇宙星形成率密度 (CSFRD): $\dot{\rho}_*(z) [M_\odot \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}]$ (数モデル)



BH 形成イベントの寄与

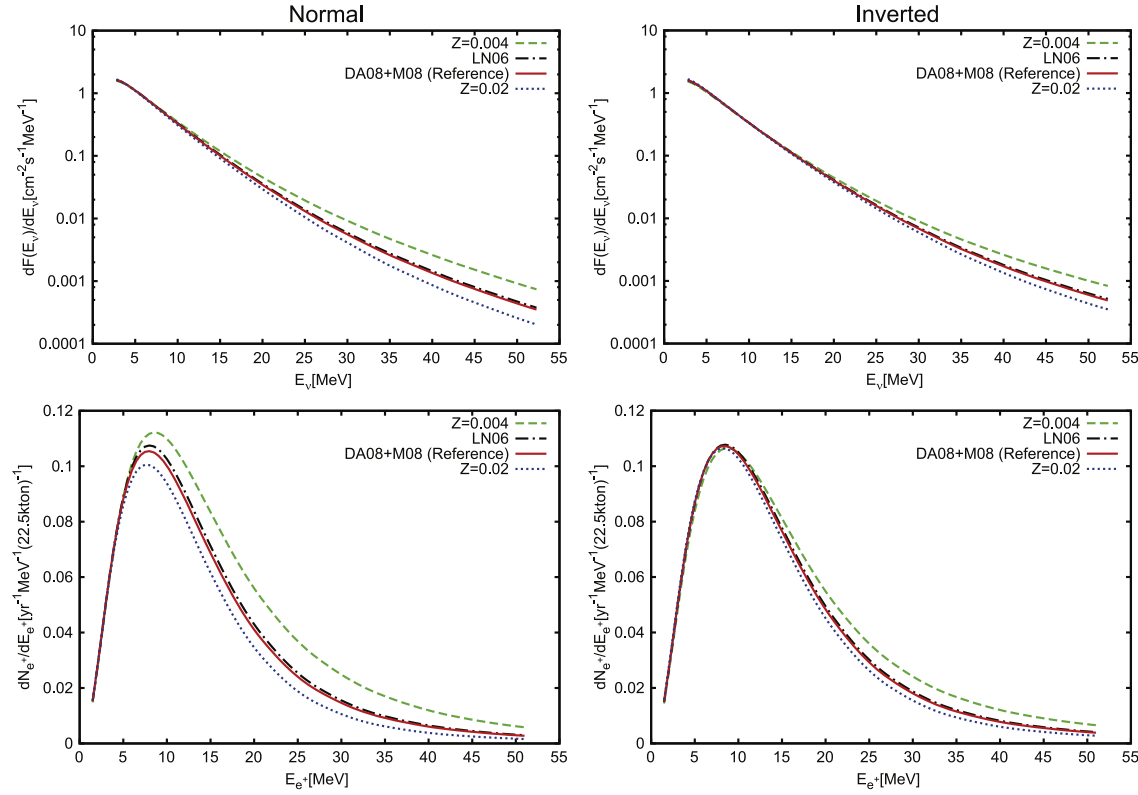


Figure 7. Fluxes of SRNs (upper panels) and event rate spectra in Super-Kamiokande over 1 yr (lower panels) obtained using models with CSFRD of DA08, shock revival time of $t_{\text{revive}} = 200$ ms, and Shen EOS. The left and right panels show the results for the normal and inverted mass hierarchies, respectively. Solid and dotted-dashed lines correspond to models with the metallicity evolutions of DA08+M08 and LN06, respectively, while other lines denote the results for fixed metallicity with $Z = 0.02$ (dotted) and 0.004 (dashed).

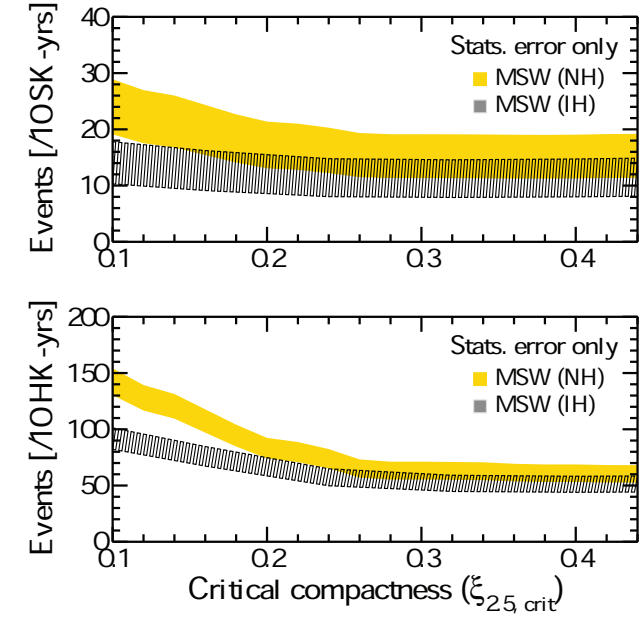


Figure 8. The same as Figure 7, but showing the predictions for MSW mixing implementation for 10 yr in SK (22.5 kton inner volume, top panel) and 10 yr in HK (374 kton inner volume, bottom panel), with each bar width reflecting the statistical square-root N error only, adopting the predictions using the WHW02 suite of progenitors and assuming ν_x shape parameter of 3.0. In all predictions, small critical compactness leads to more massive stars collapsing to black holes, thereby increasing the DSNB event rate. Apart from a simple normalization, slight differences appear between the SK and HK dependences on $\xi_{2.5, \text{crit}}$, due to the different detection threshold.

Nakazato+'15, Horiuchi+'17