

# ニュートリノで見る 原始中性子星の冷却と 核物質状態方程式

中里 健一郎

(九州大学 基幹教育院)

九州大学

UNIVERSITY OF KYUSHU

新学術「地下宇宙」2021年領域研究会@オンライン R3/5/19-21

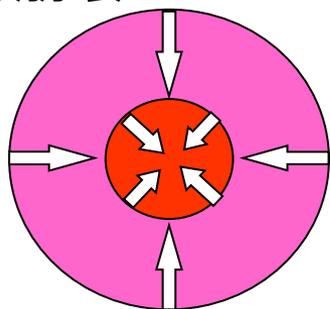
# 重力崩壊型超新星

- 太陽より約10倍以上重い恒星が、その進化の最後に起こす大爆発。
  - 大量のニュートリノを放出
  - 中性子星 or ブラックホールを形成

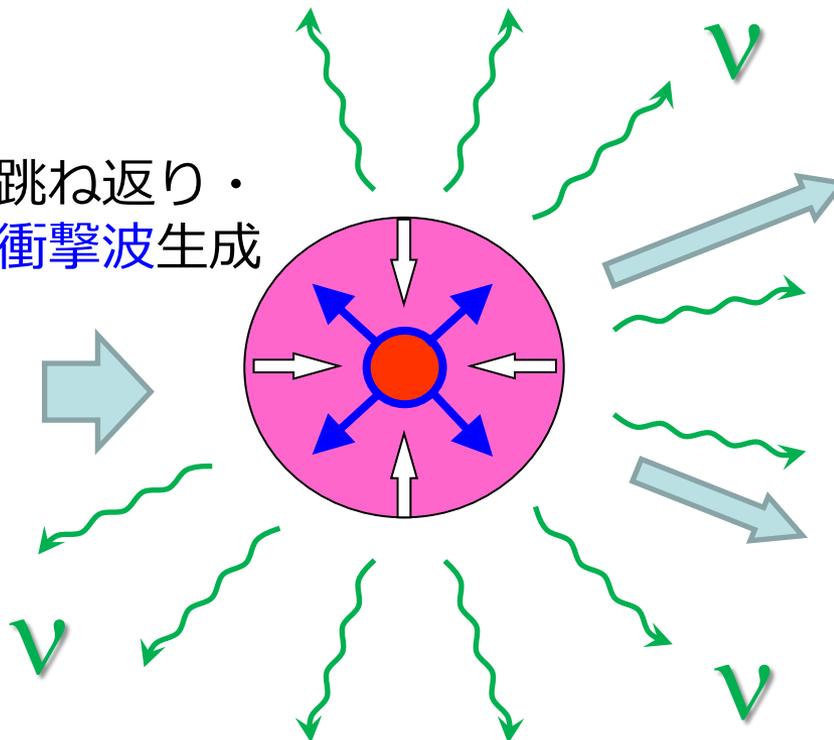


衝撃波伝播 → 爆発  
(中性子星の形成)

重力崩壊



跳ね返り・  
衝撃波生成

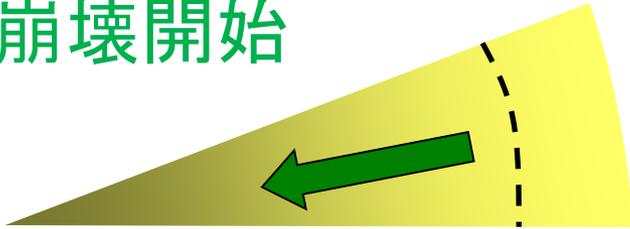


ブラックホール

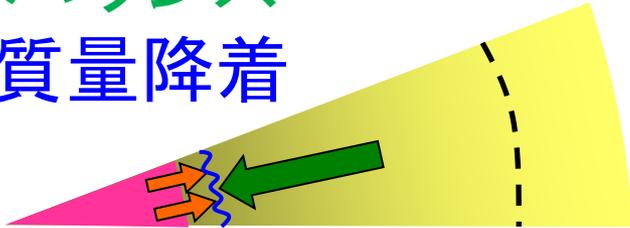


# 超新星ニュートリノの時間変化

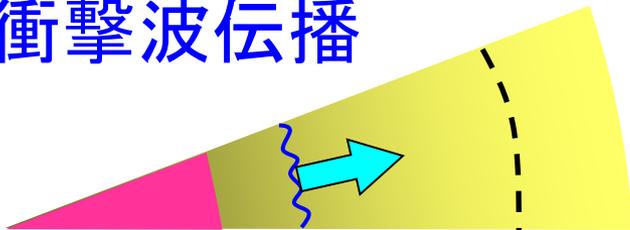
崩壊開始



バウンス  
質量降着



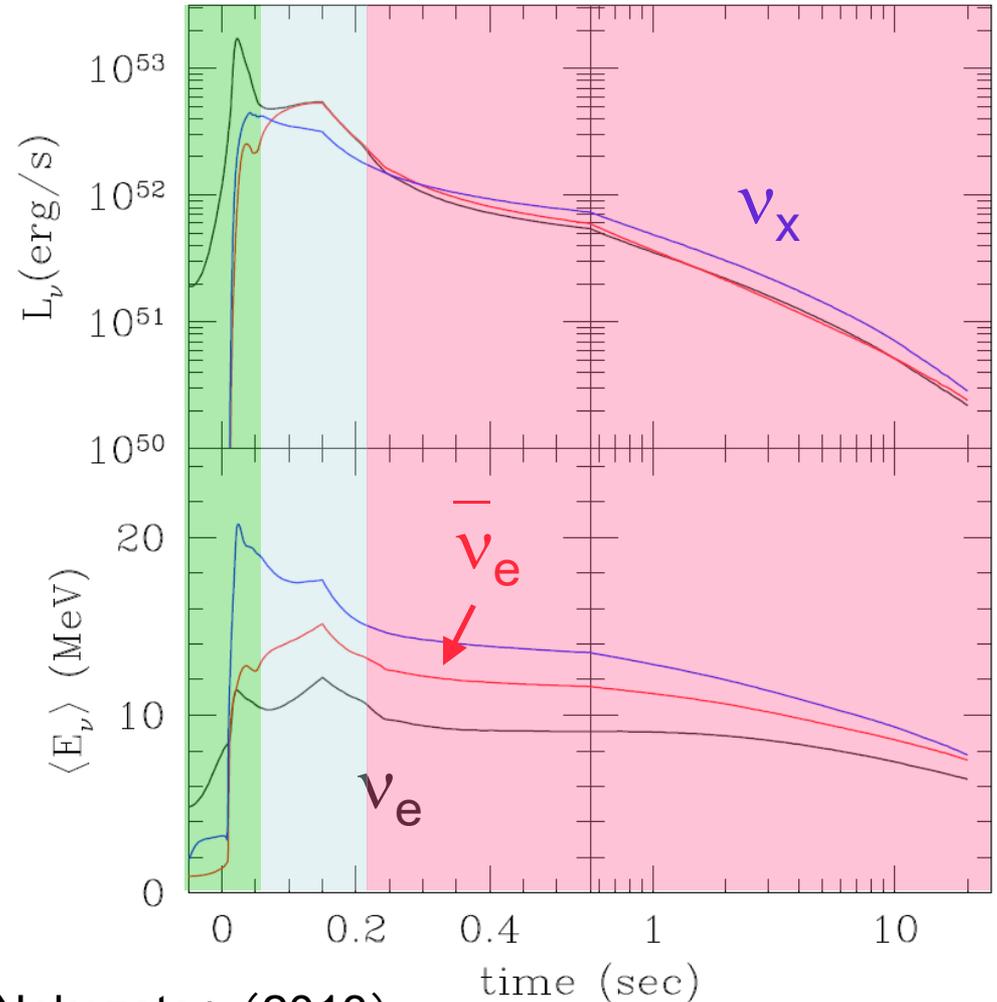
衝撃波伝播



原始中性子星



① ② ③ ← ココに注目



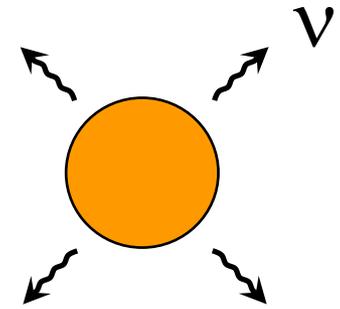
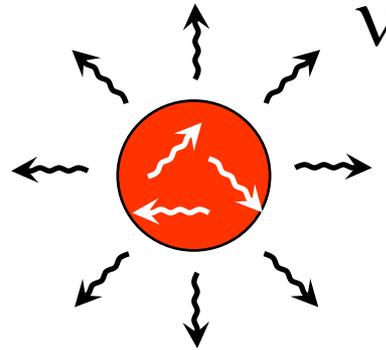
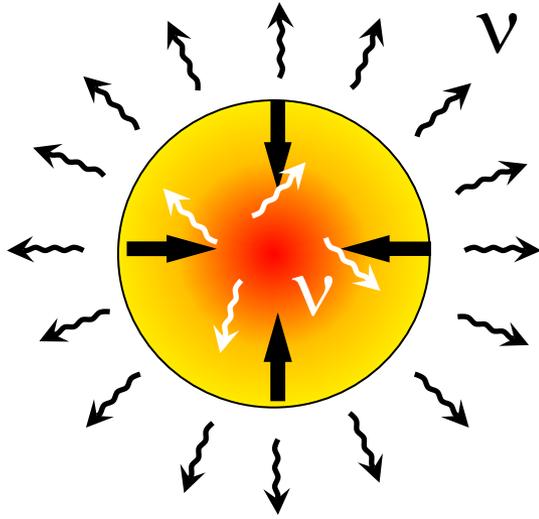
Nakazato+ (2013)

# 原始中性子星冷却の概略図

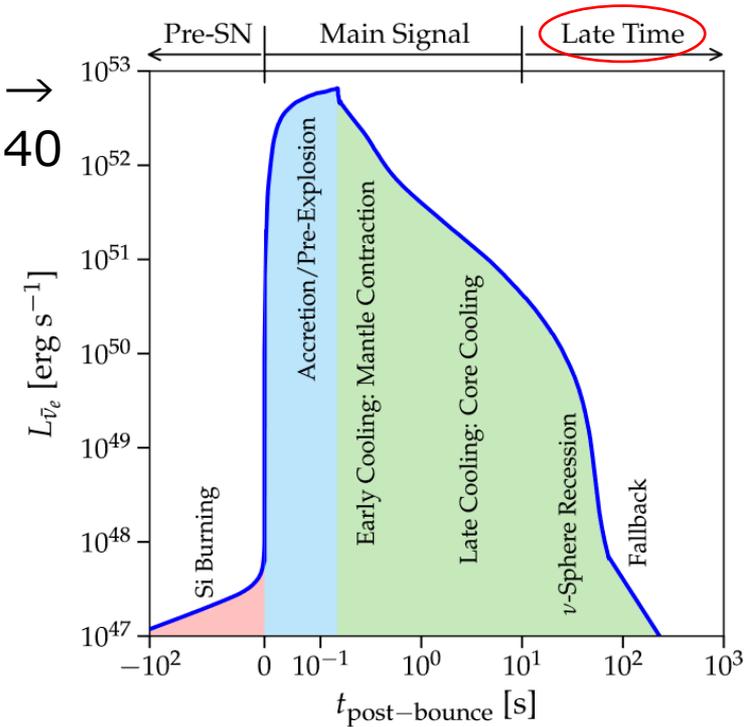
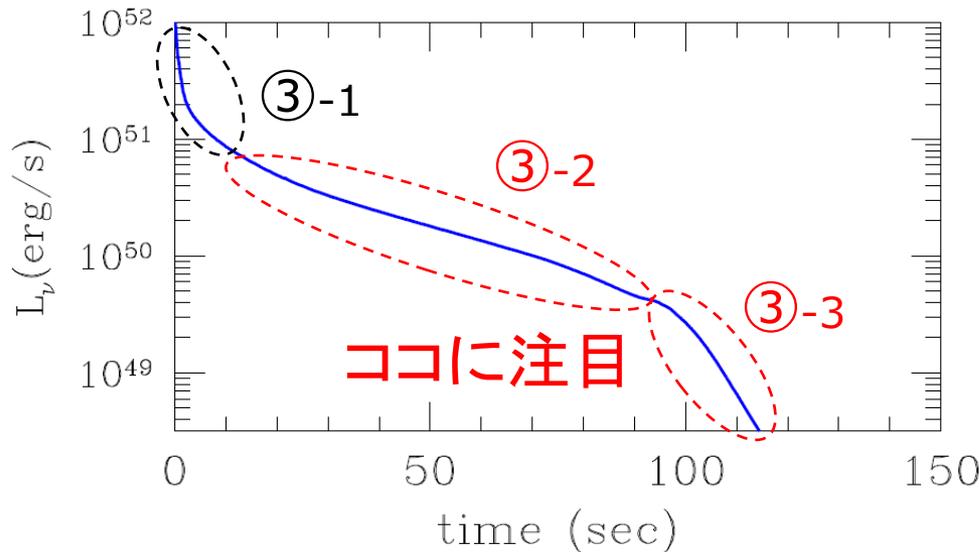
③-1 contraction

③-2 shallow decay

③-3 volume cooling

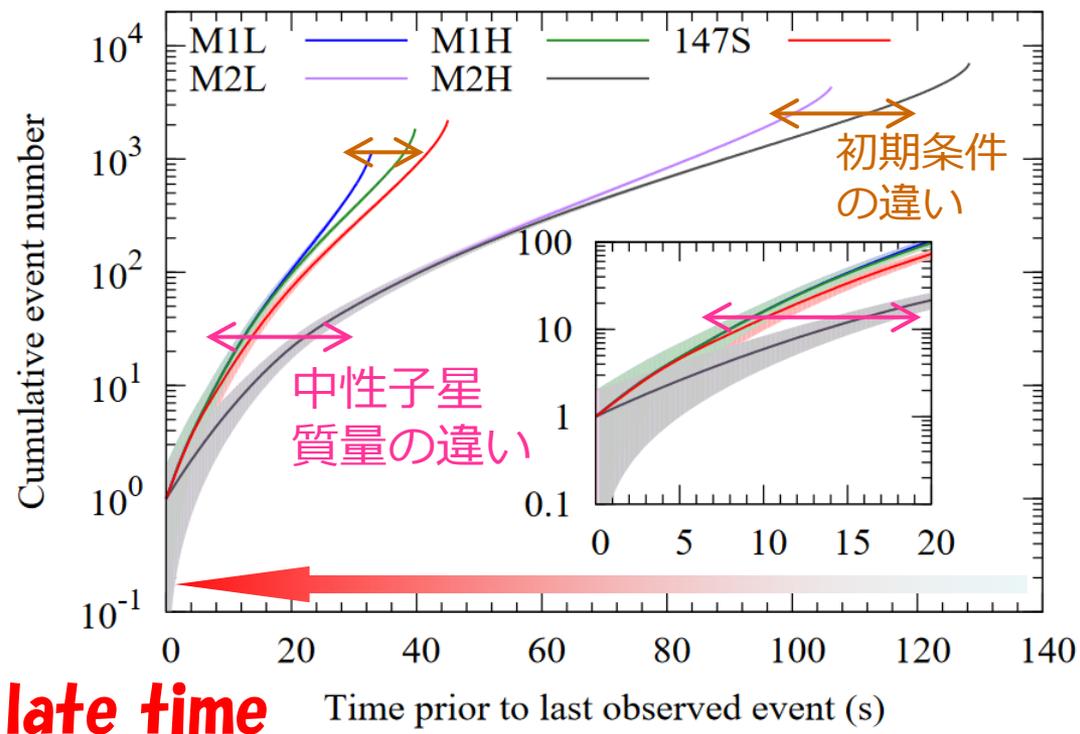


Li et al.  
arXiv:2008.04340



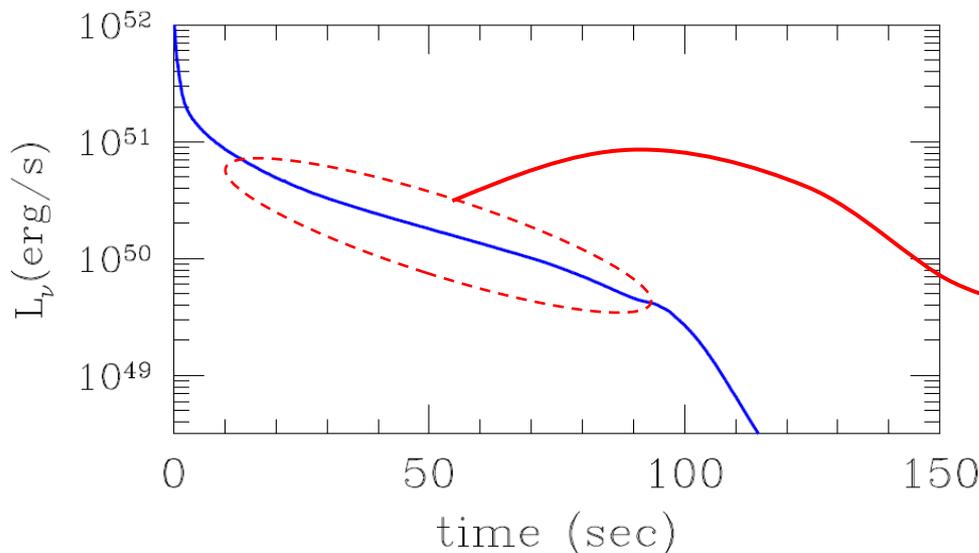
# 時間逆向き 累積イベント数

Suwa et al.,  
ApJ **881** (2019),  
arXiv:1904.09996



- 「最後の1イベント」から遡った時間を横軸に、累積イベント数を縦軸にプロット。
- 初期放射に比べて後期放射は不定性が少なく、形成される中性子星の素性を見やすい。

# ニュートリノの減光時間スケール

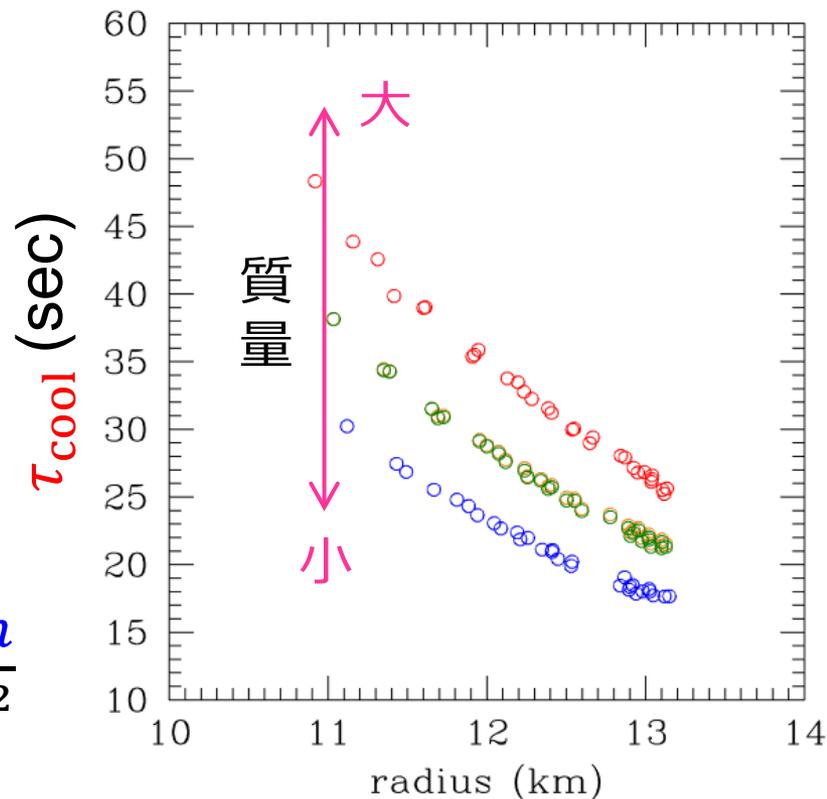


Nakazato & Suzuki,  
ApJ **891** (2020),  
arXiv:2002.03300

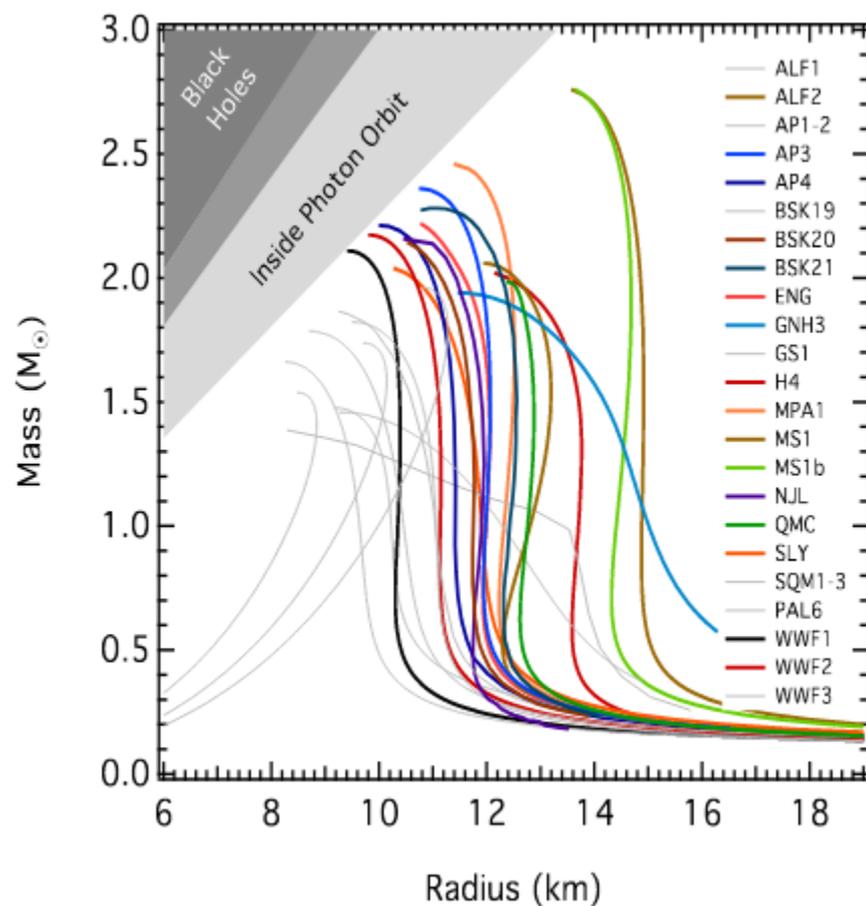
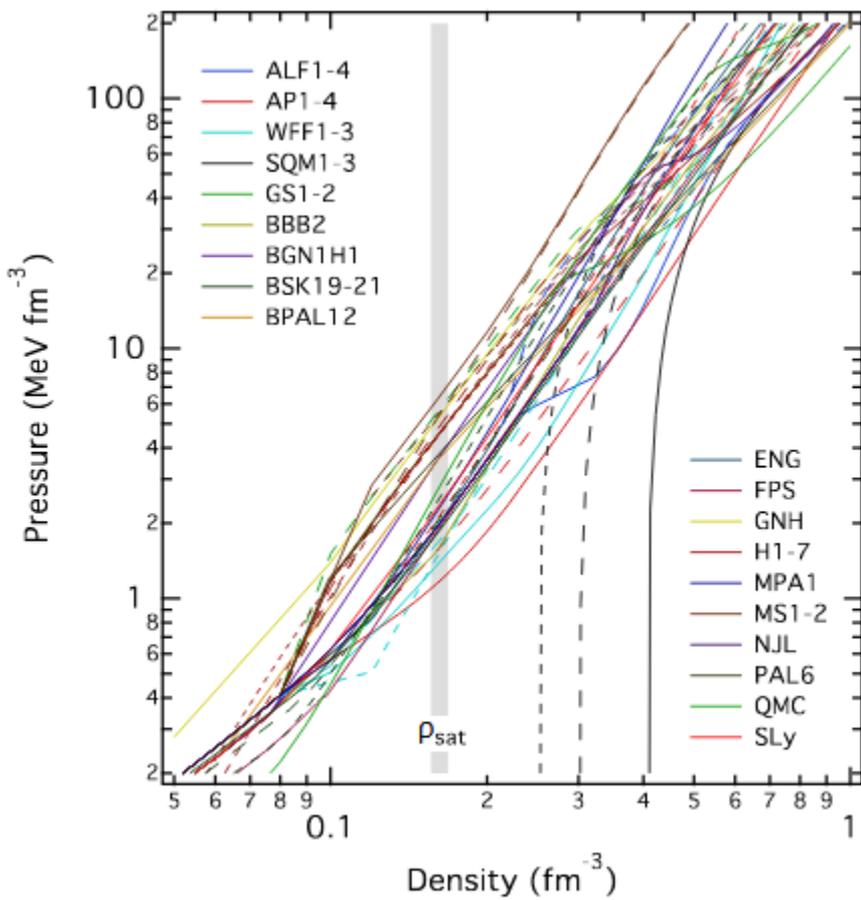
$$L_{\bar{\nu}_e}(t) \sim L_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{cool}}}\right)$$

- ニュートリノの減光時間スケールは、中性子星質量が大きいほど長く、半径が大きいほど短い。

$$\tau_{\text{cool}} \propto \frac{m^2}{r^3(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}, \quad \beta = \frac{Gm}{rc^2}$$



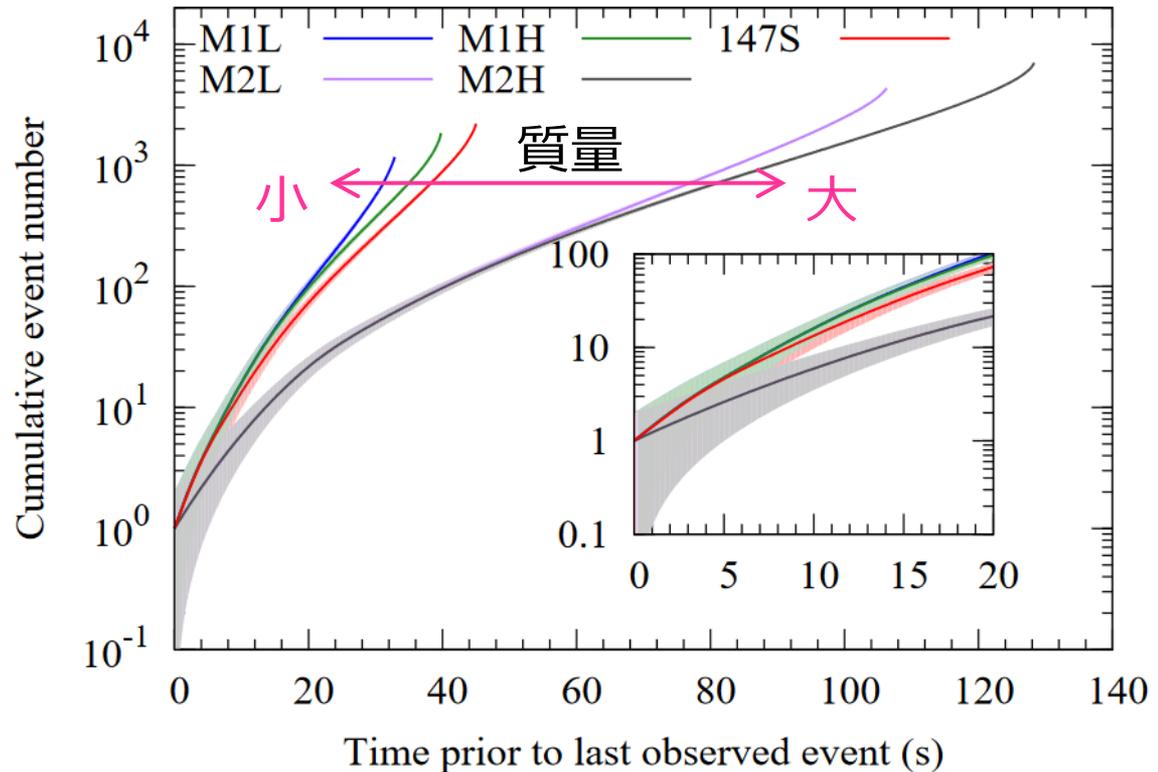
# 核物質の状態方程式を決めると 中性子星の質量—半径関係が求まる



Özel & Freire, ARAA **54** (2016)

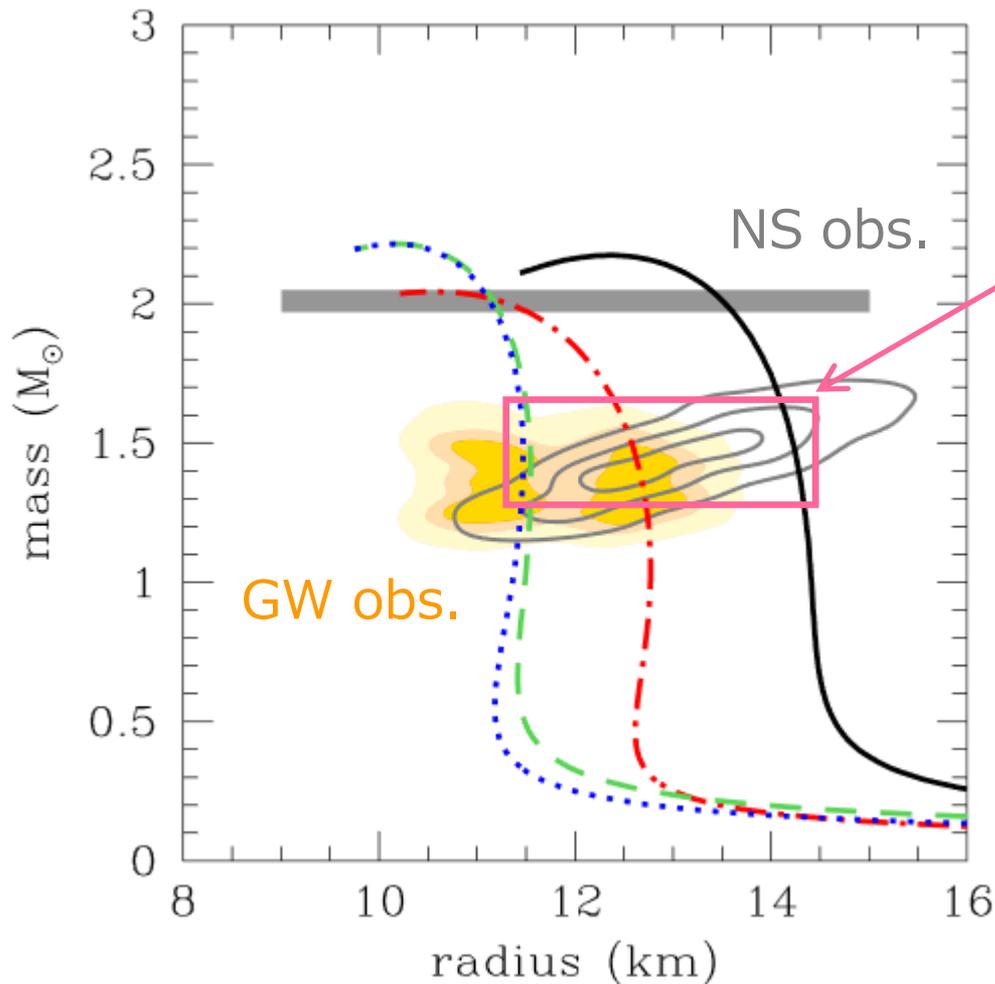
# 本研究の概要

- 先行研究 (Suwa et al., 2019) では、質量の異なる原始中性子星モデルを用いて、ニュートリノ検出イベントの時間発展の違いを調べた。
- この研究では、加えて核物質の状態方程式 (EOS) の依存性と平均エネルギーの時間変化を調べる。



# 原始中性子星モデル

- ニュートリノ拡散近似による星の進化計算。



- 重力質量:  
1.28-1.65  $M_{\odot}$

- 状態方程式:

- Shen EOS

- LS220 EOS

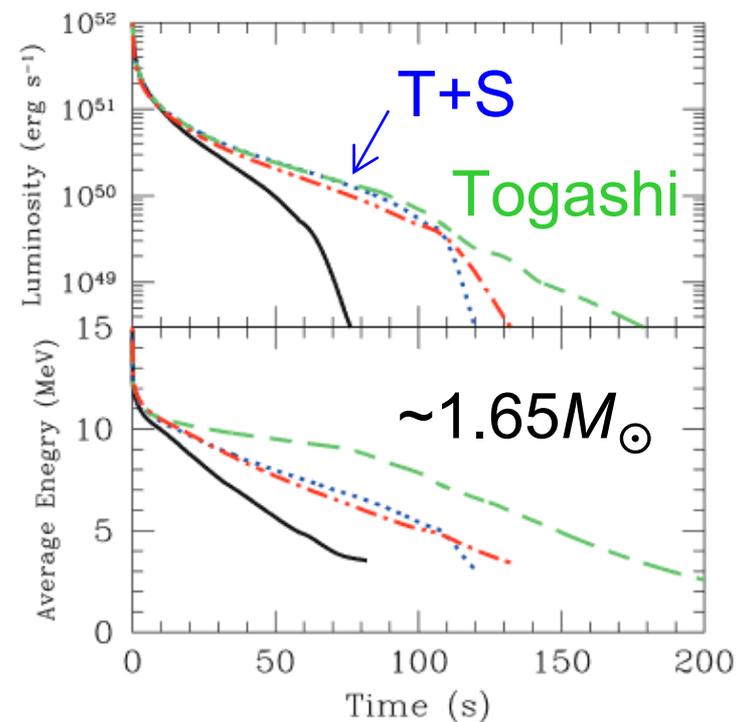
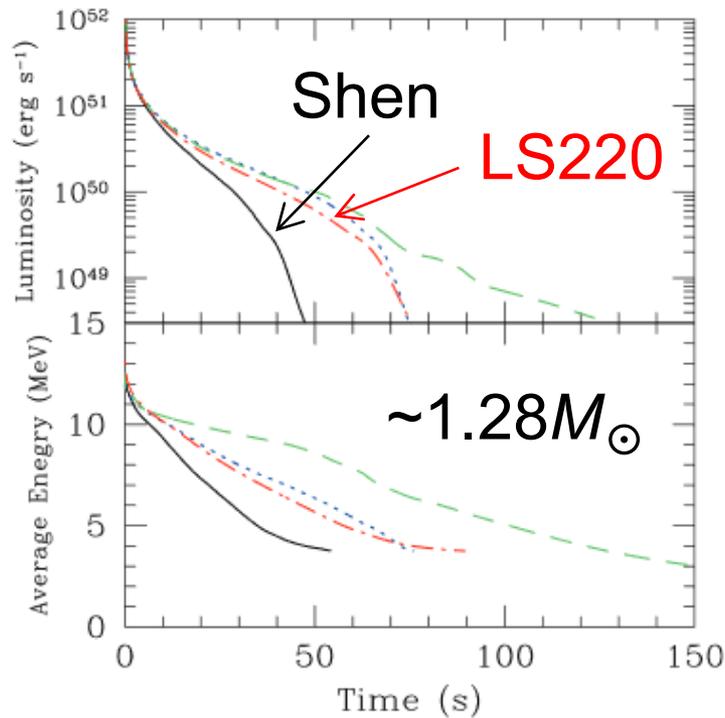
- Togashi EOS

- T+S EOS

高密度: Togashi

低密度: Shen

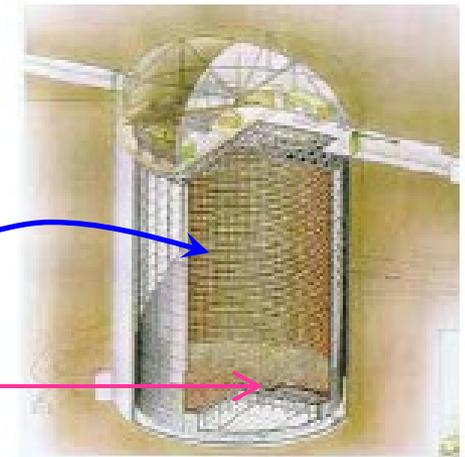
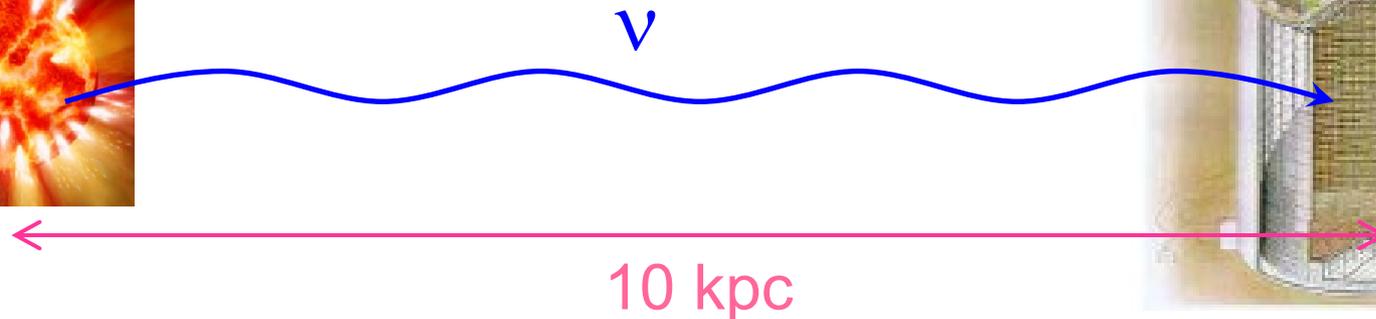
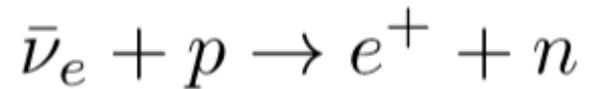
# ニュートリノ光度・平均エネルギー



- 質量が大きいほど、また、半径が小さいほど、ニュートリノの減光時間スケールが長い。
- Togashi EOS は平均エネルギーが高い。  
→ 低密度領域の組成の違いにより温度が高い。

# ニュートリノ検出数の計算

- 距離  $D = 10 \text{ kpc}$  で起こった超新星から放出されたニュートリノを、スーパーカミオカンデ ( $E_{\text{th}} = 5 \text{ MeV}$ ) で検出したと仮定。
- 逆  $\beta$  崩壊反応のみを考慮し、イベントのエネルギーースペクトルまで評価する。
  - Strumia & Vissani (2003)



# 質量依存性

- 時間逆向き累積イベント数
- 質量が大きいほど、最後の1イベントの時刻が遅い。
- どの状態方程式を採用しても、質量の違いは有意。

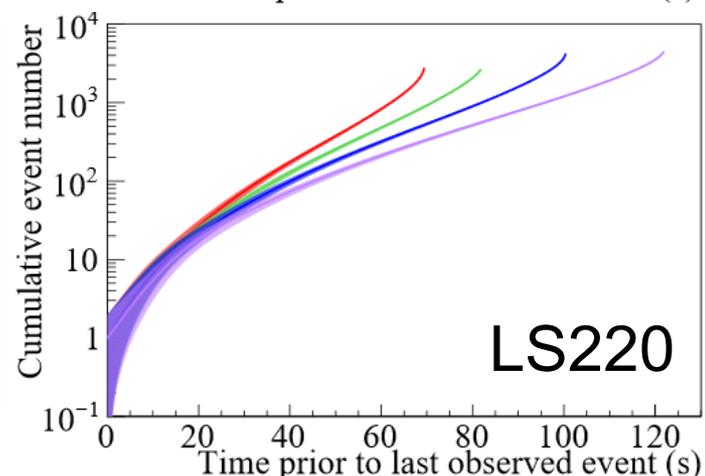
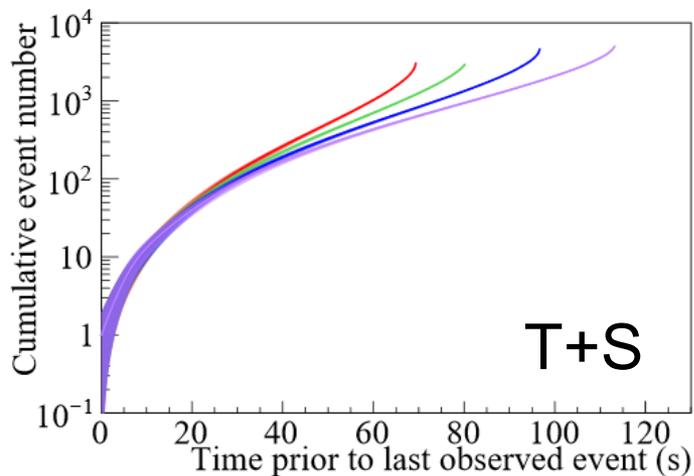
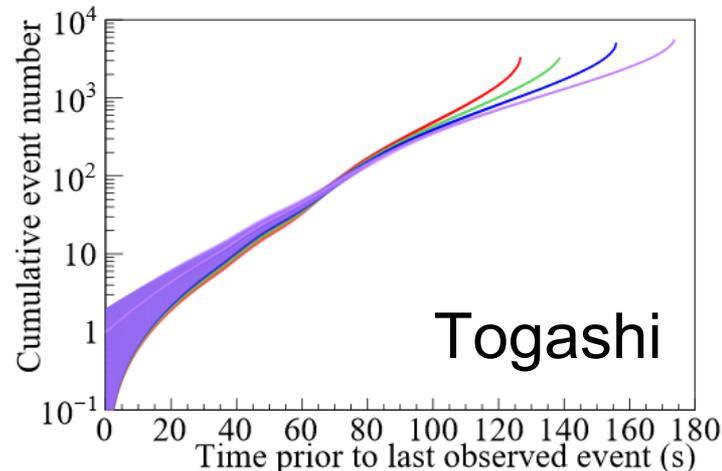
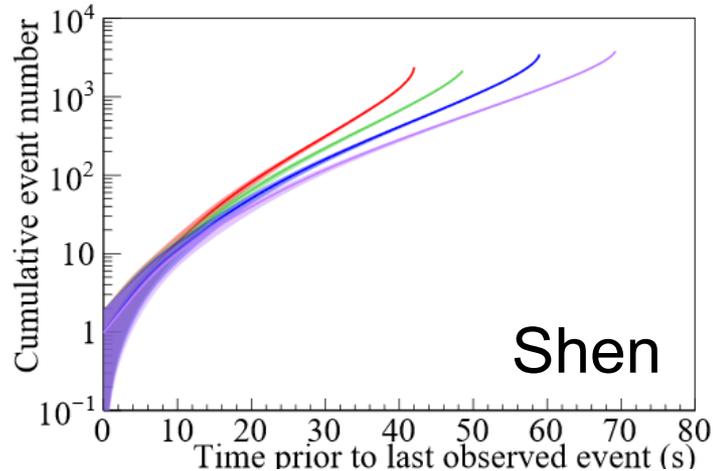
重力質量：

~1.28 $M_{\odot}$

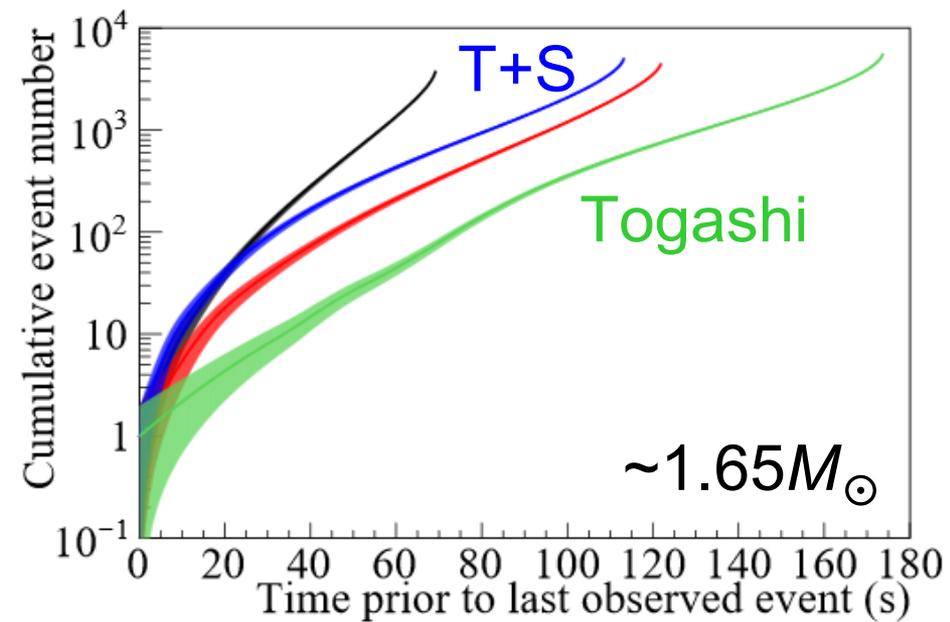
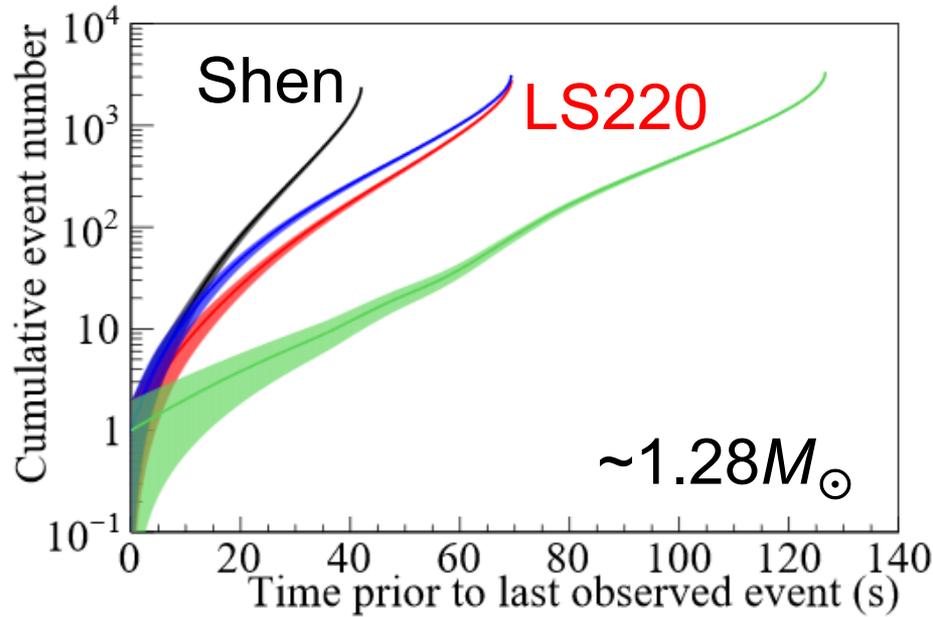
~1.39 $M_{\odot}$

~1.52 $M_{\odot}$

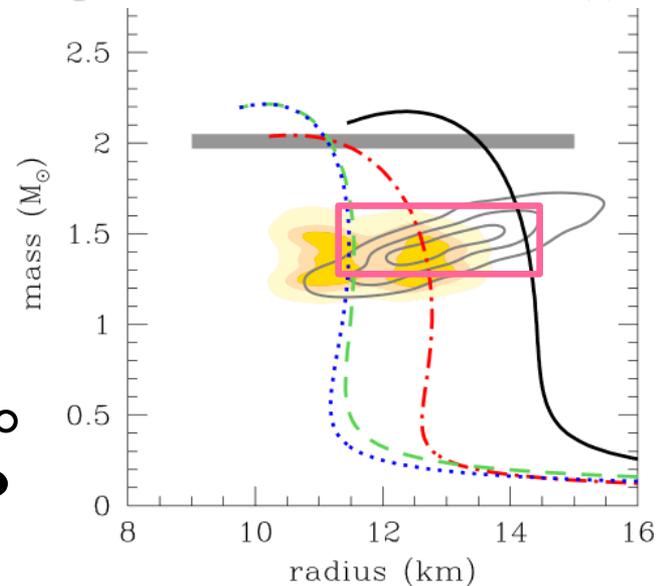
~1.65 $M_{\odot}$



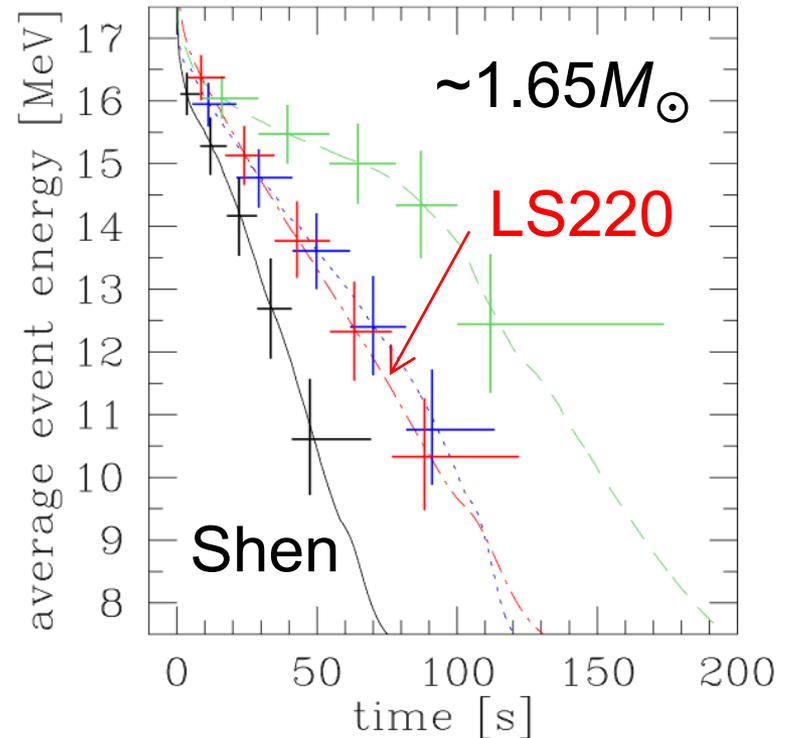
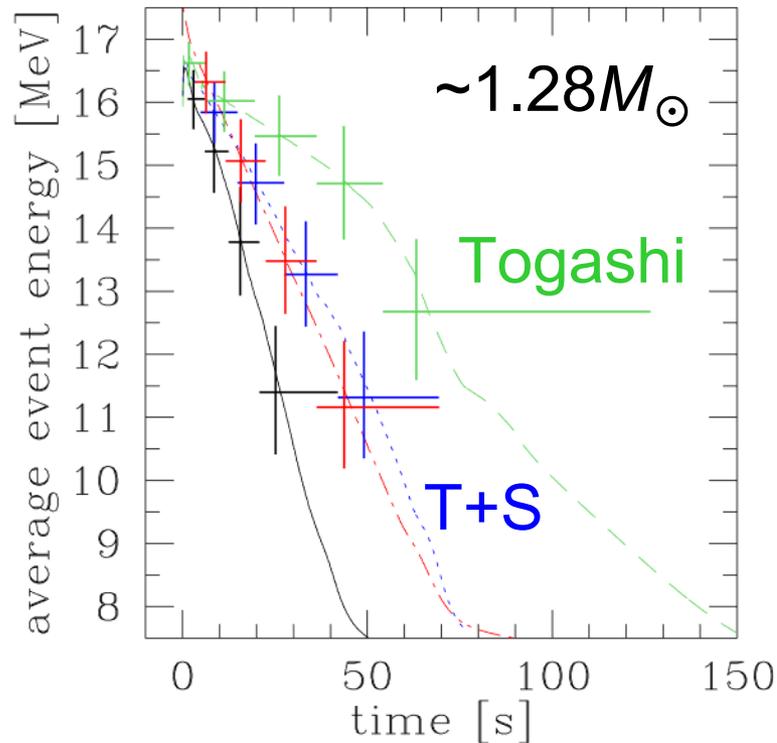
# 状態方程式依存性



- 質量依存性よりも状態方程式依存性のほうが顕著。
- 中性子星半径だけでなく低密度の状態方程式にも依存する。  
→ 平均エネルギーは測れるか？



# 平均エネルギーとその不定性



- 平均エネルギーの低下は有意に観測できる。
- 累積イベント数による解析よりは不定性が大きいですが、状態方程式によるちがいも読みとれる。

# まとめと展望

- 後期における超新星ニュートリノ放射により、形成される中性子星の素性が見える。
- 累積イベント数の時間逆向き解析からは、原始中性子星の質量のみならず、状態方程式のちがいも読みとることができる。
- 平均エネルギーの時間逆向き解析は、不定性があるものの、原始中性子星の温度変化を、超新星までの距離に依らずに観測できる。
- 実際に超新星が起こった際、すぐに使えるデータ解析手法の提案を目指す。