

超新星ニュートリノで探る 中性子星の質量・半径

中里 健一郎

(九州大学 基幹教育院)

第6回超新星ニュートリノ研究会@東大宇宙線研 2020年1月7日

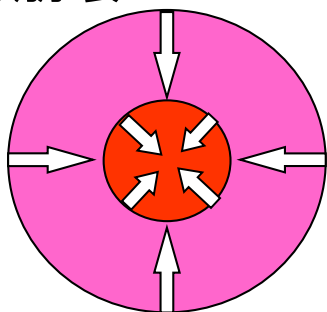
重力崩壊型超新星

- 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

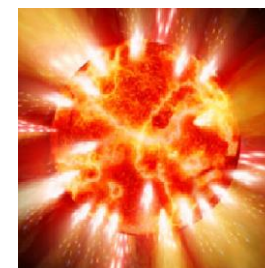
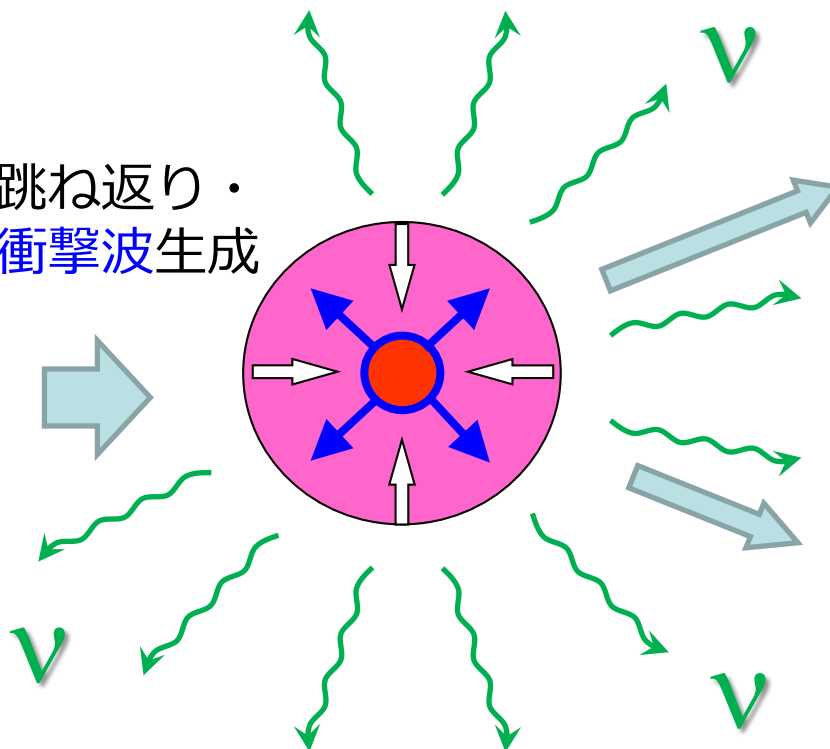


衝撃波伝播 → 爆発
(中性子星の形成)

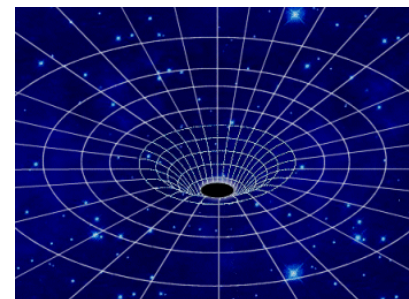
重力崩壊



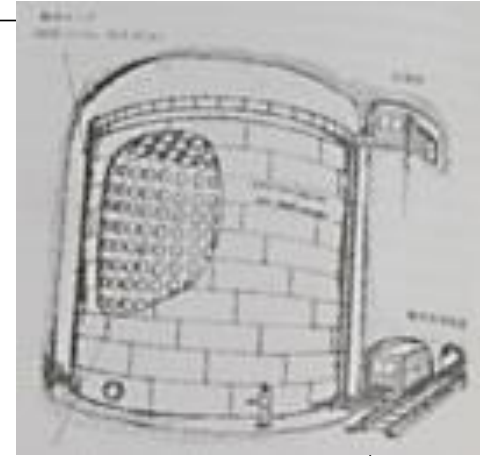
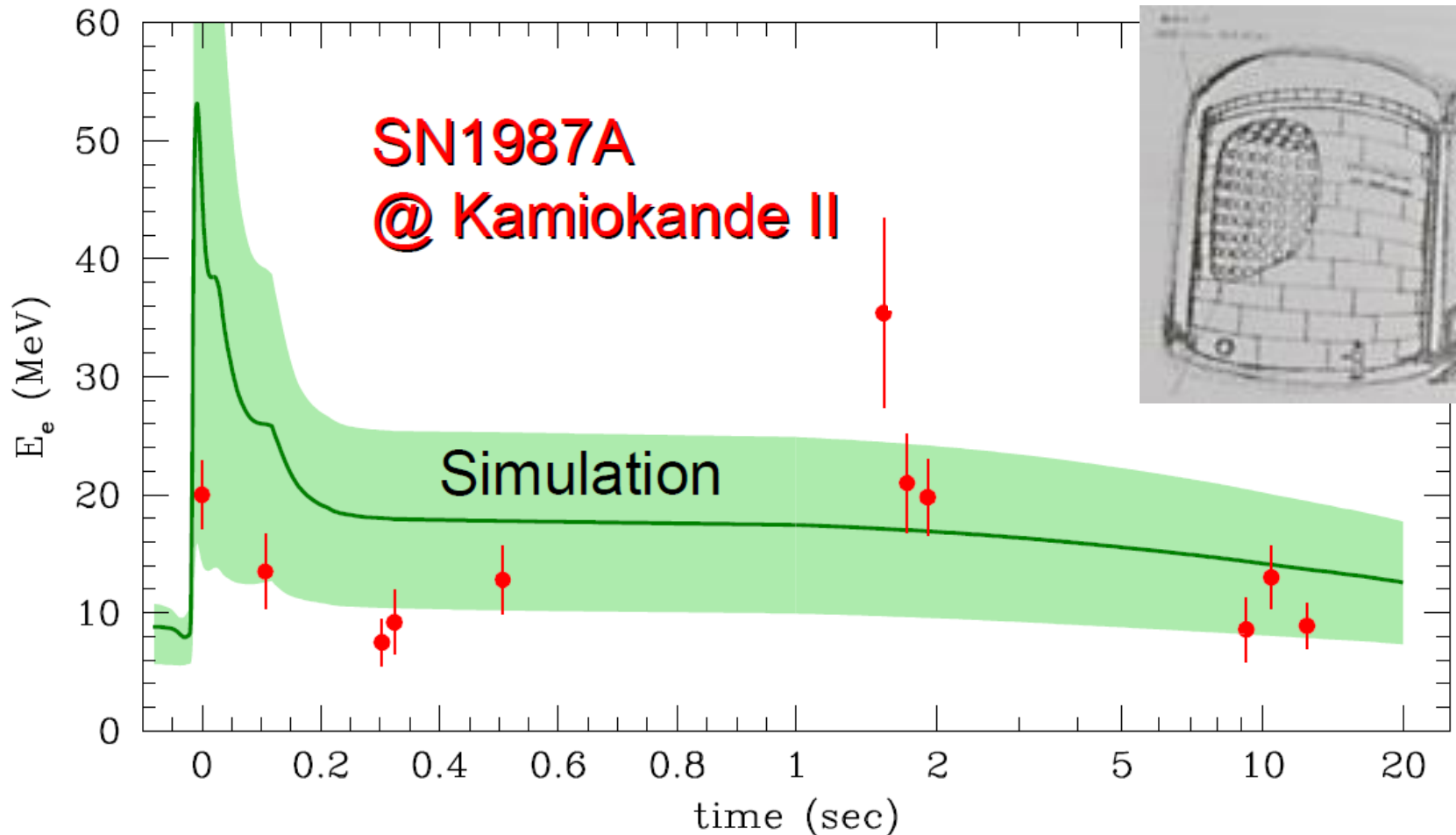
跳ね返り・
衝撃波生成



ブラックホール



SN1987A からのニュートリノ

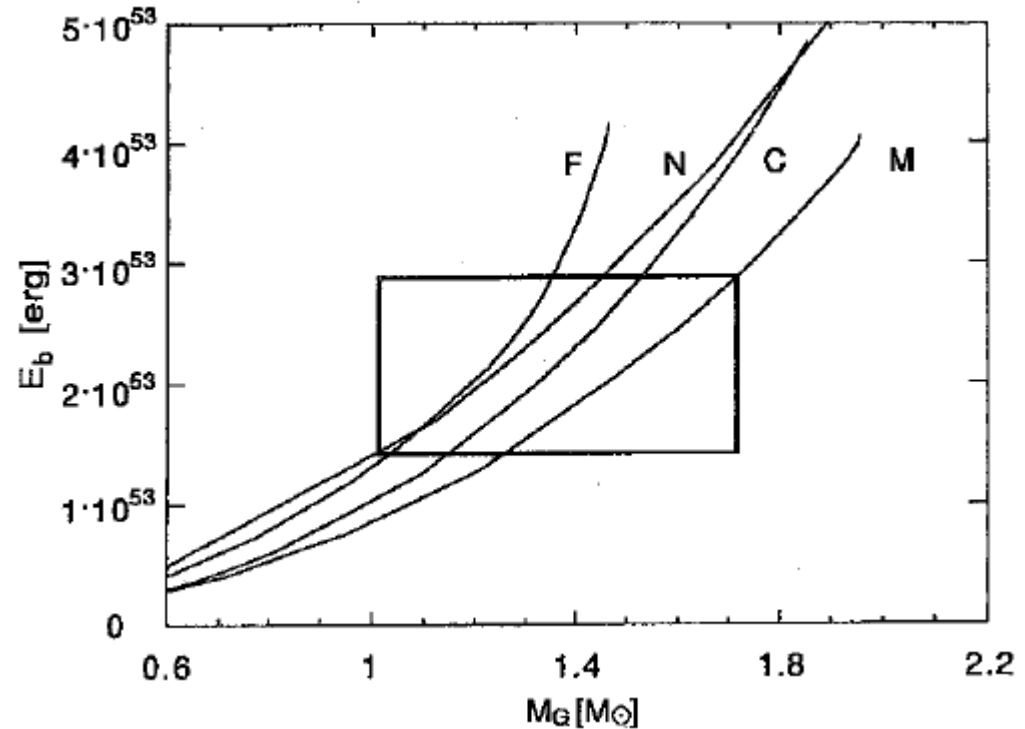


- 検出数、エネルギー、継続時間の観測値から超新星の標準シナリオが確立。

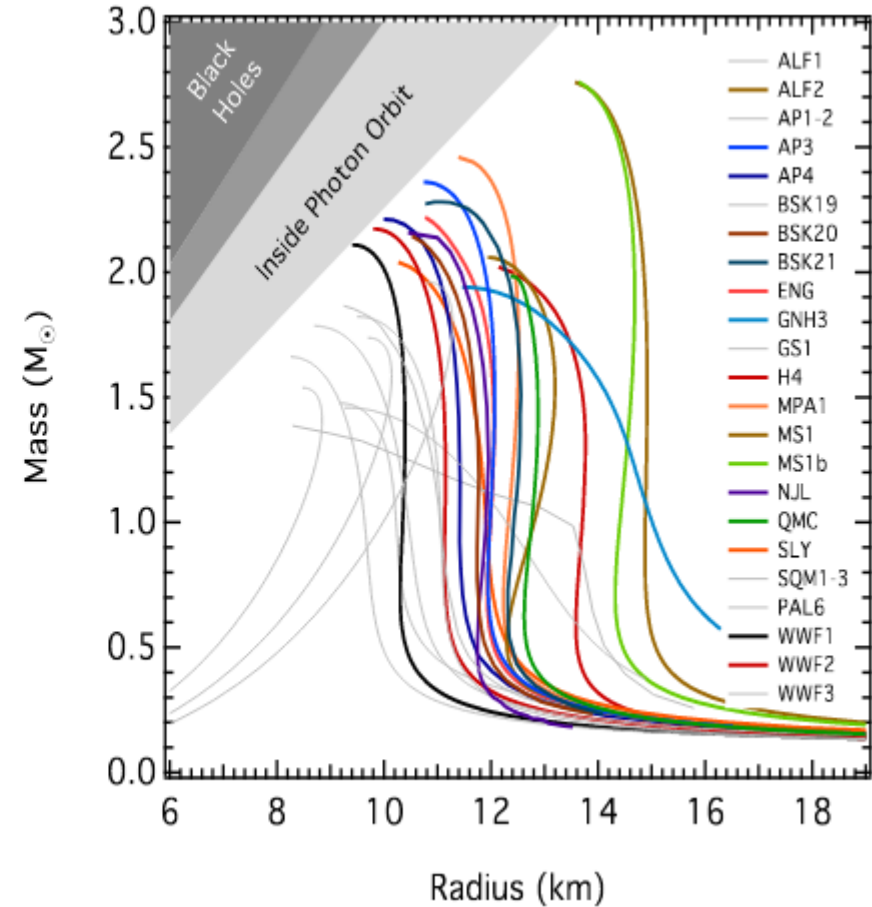
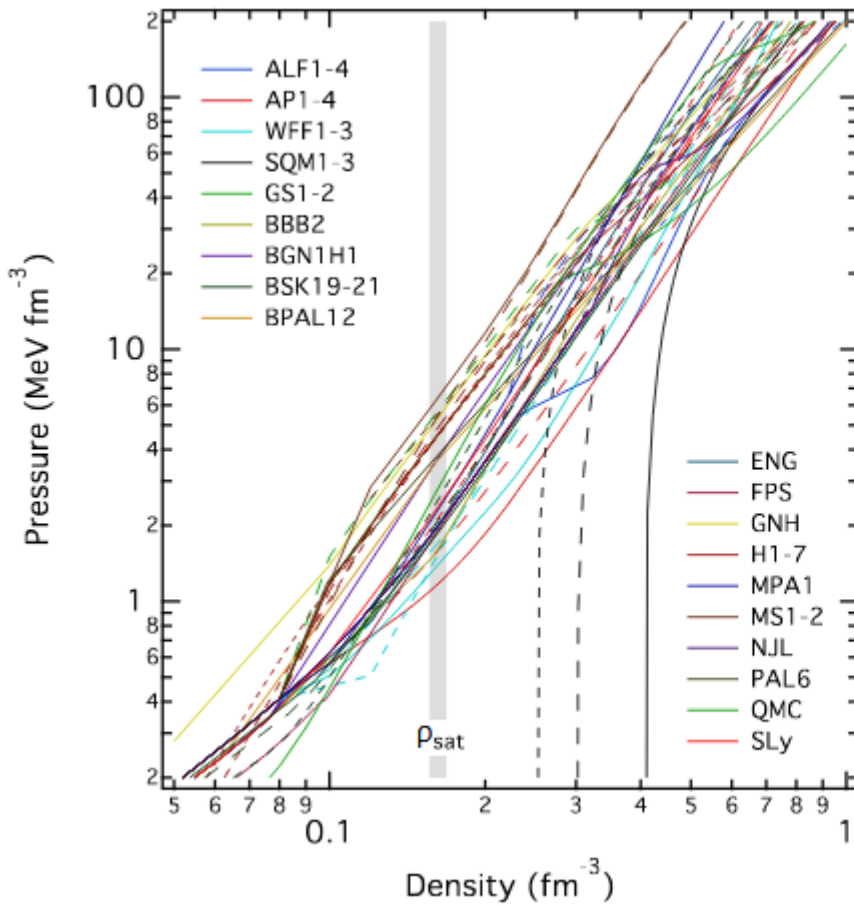
ニュートリノ観測から中性子星の 質量を探る

Sato & Suzuki, PLB 196 (1987)

- ニュートリノによる総放出エネルギーは、形成された中性子星の束縛エネルギーに対応する。
- ニュートリノ観測によって中性子星の質量を見積もることができる。
- ただし、核物質状態方程式に依存する。



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)

中性子星の質量・半径と 束縛エネルギーの関係の経験則

Lattimer & Prakash, ApJ **550** (2001)

- 広いクラスの状態方程式にたいして、以下の関係が成り立つ:

$$\frac{E_b}{mc^2} = \frac{0.6 \times Gm / r c^2}{1 - 0.5 \times Gm / r c^2}$$

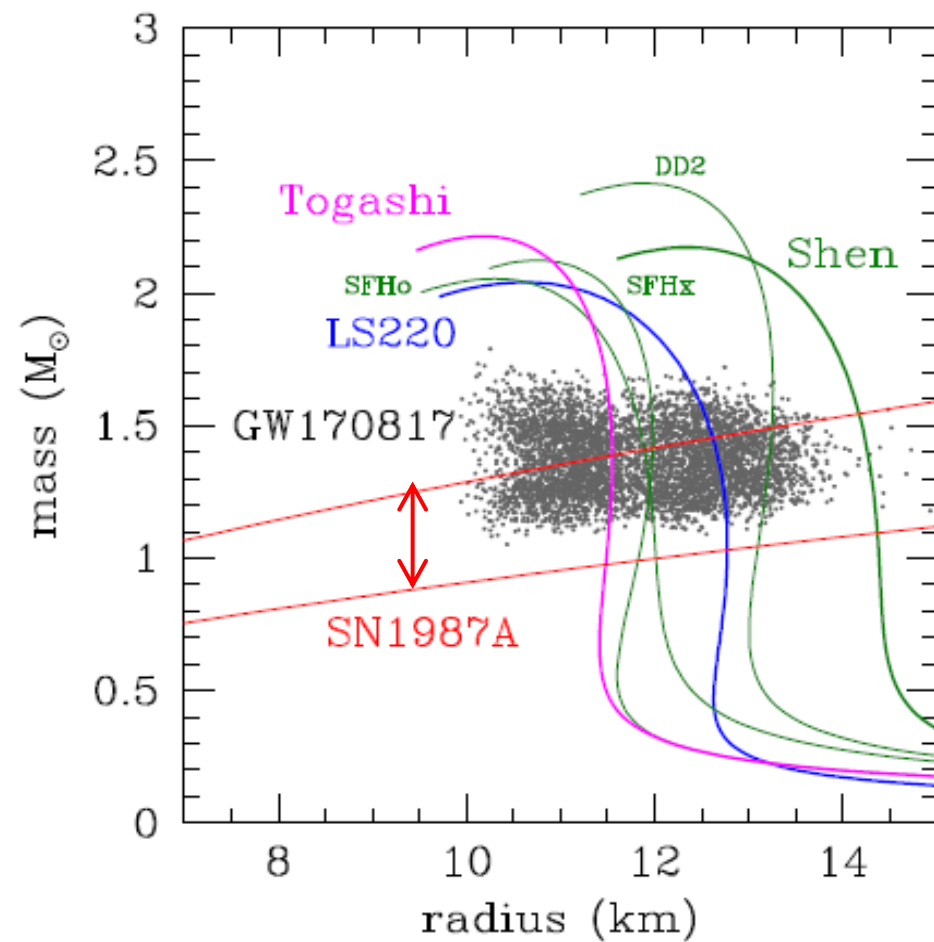
E_b : 中性子星の束縛エネルギー

m : 中性子星の質量

r : 中性子星の半径

形成される中性子星の大きさは？

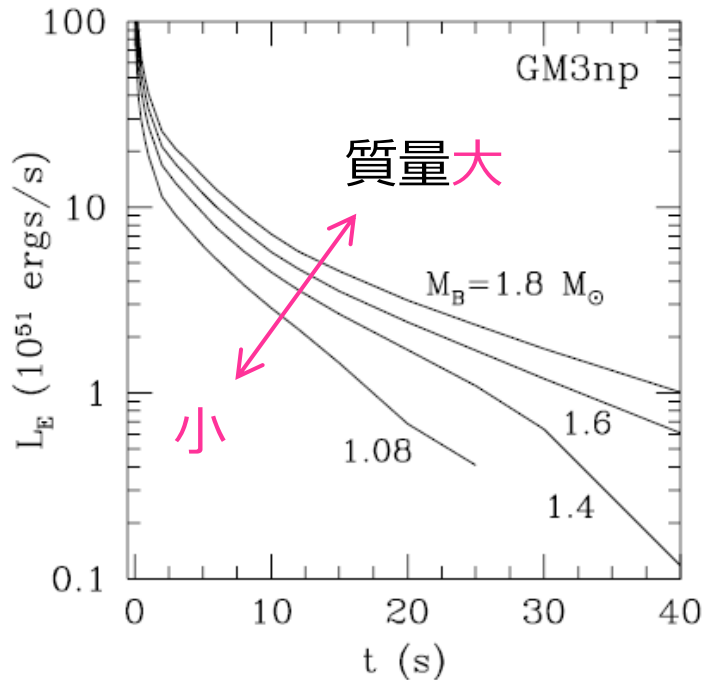
- さきの経験式を使うと中性子星半径の値をある程度、仮定すれば (e.g., 10~13.5 km)、 $\pm 10\%$ 程度で見積もることができる。
- それ以上は、核物質の状態方程式に関する情報が必要。



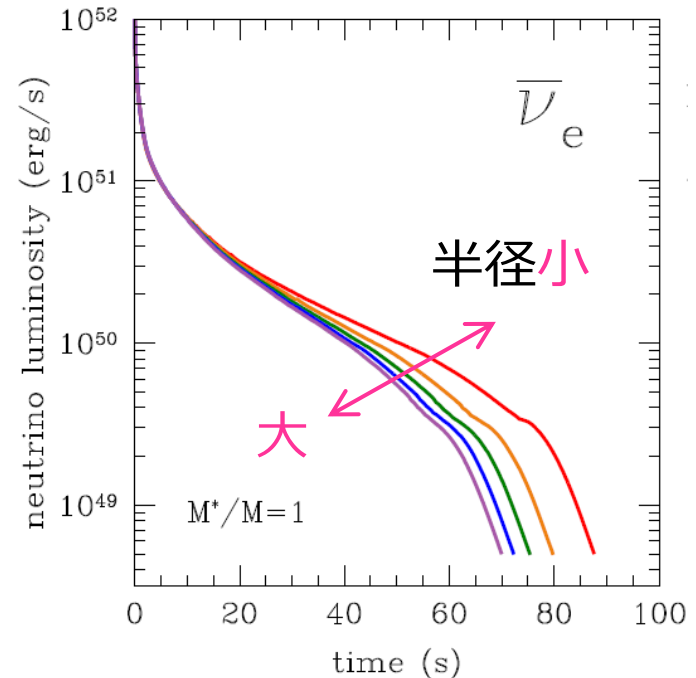
→ 逆に、質量・半径に関する情報がもう1つあれば中性子星の質量と半径を両方、決められる！

原始中性子星の冷却

Pons et al., ApJ 513 (1999)



Nakazato & Suzuki, ApJ 878 (2019)



- 超新星爆発直後の中性子星は熱く、数十秒かけてニュートリノを放出して、冷えていく。
- 冷却のタイムスケールは質量が大きいほど長く、半径が大きいほど短い。

原始中性子星冷却時間の理論(1)

- Kelvin-Helmholtz timescale

$$\begin{array}{l} \text{冷却時間} \\ \text{スケール} \end{array} \rightarrow \tau_{\text{KH}} = \frac{|E_g|}{L} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{重力エネルギー} \\ \leftarrow \text{光度} \end{array}$$

- 中性子星の質量 m , 半径 r として、以下を仮定。

1. 光度は表面積に比例する: $L \propto r^2$

2. 一般相対論による時間遅れ

3. $|E_g| \rightarrow E_b$ (中性子星の重力束縛エネルギー)

$$\tau_{\text{cool}} \propto \frac{E_b}{r^2 \sqrt{1 - 2Gm/rc^2}}$$

原始中性子星冷却時間の理論(2)

- 中性子星の束縛エネルギーに関する経験式

Lattimer & Prakash, ApJ **550** (2001)

$$\frac{E_b}{mc^2} = \frac{0.6 \times Gm/rc^2}{1 - 0.5 \times Gm/rc^2}$$

✓ c.f. ニュートン力学で一様密度の場合: $|E_g| = \frac{3Gm^2}{5r}$

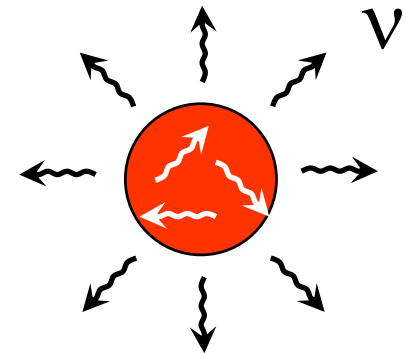
- よって、

$$\tau_{\text{cool}} \propto \frac{m^2}{r^3 \left(1 - 0.5 \times Gm/rc^2\right) \sqrt{1 - 2Gm/rc^2}}$$

本研究の目的

Nakazato & Suzuki, submitted

- 中性子星半径の異なる様々な状態方程式を用いて、系統的な原始中性子星冷却の計算を行ない、前述の理論式を検討する。
- 超新星ニュートリノの観測だけから中性子星の質量と半径を決める手法を探る。



ゼロ温度状態方程式

$$w(n_b, Y_p) = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2} (n_b - n_0)^2 + S(n_b) (1 - 2Y_p)^2,$$

proton fraction

対称エネルギー

$$S(n_b) = S_0 + \frac{L}{3n_0} (n_b - n_0) + \frac{1}{n_0^2} \left(S_{00} - S_0 - \frac{L}{3} \right) (n_b - n_0)^2,$$

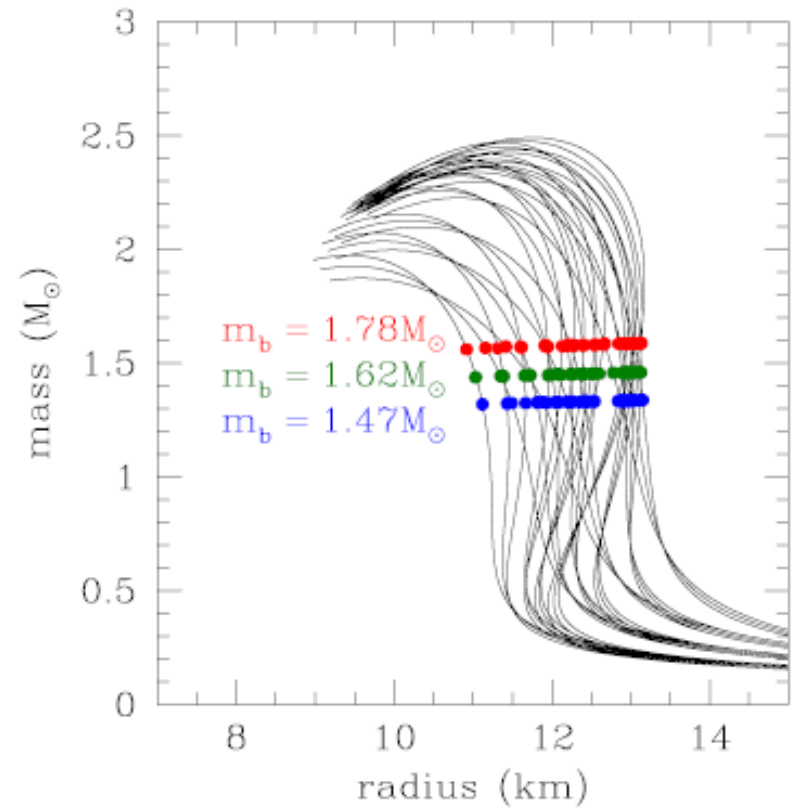
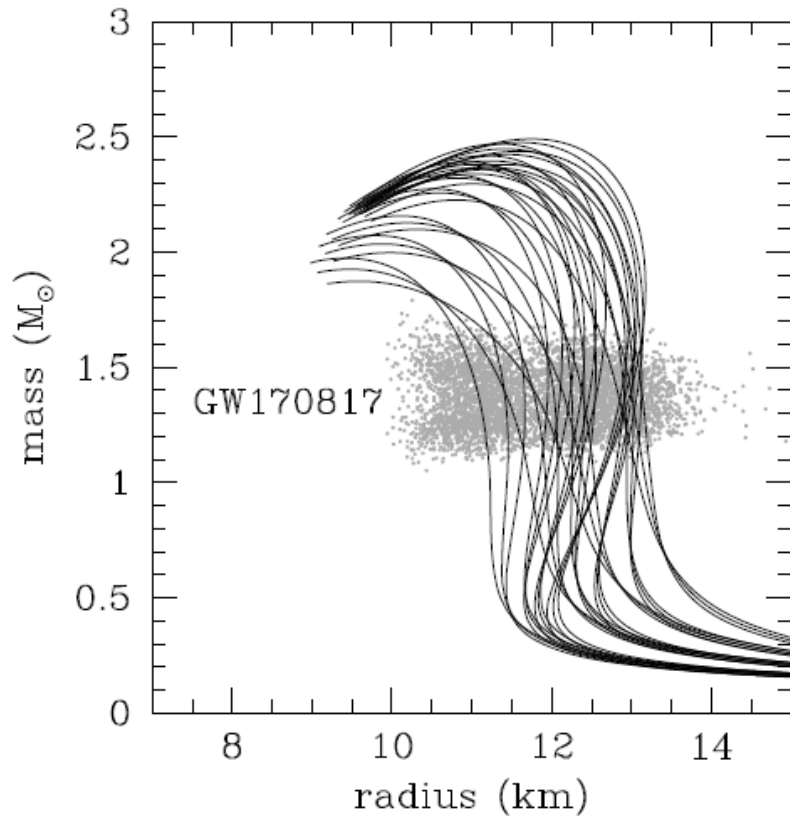
$2n_0$ における
対称エネルギー

- 状態方程式パラメータ (30組)

- $K_0 = 220, 245, 270 \text{ MeV}$

- $(S_0, L, S_{00}) = (30, 35, 35), (30, 35, 40), (30, 35, 45),$
 $(30, 35, 55), (31, 50, 40), (31, 50, 45), (31, 50, 55),$
 $(32, 65, 45), (32, 65, 55), (33, 80, 55) \text{ in MeV unit.}$

中性子星の質量と半径の関係



- GW170817 と consistent な範囲にある、重力質量 $1.3 \sim 1.6M_{\odot}$ 、半径 $11 \sim 13$ km を持つ原始中性子星の冷却に焦点を当てる。

有限温度の自由エネルギー

- 理想量子気体の熱力学量を用いて近似

$$F_b(n_b, Y_p, T) = \frac{1}{n_b} \left[\varepsilon_b^{(0)}(n_b, Y_p) + \varepsilon_n^F(n_n, T; M_n^*) - \varepsilon_n^F(n_n, 0; M_n^*) \right. \\ \left. + \varepsilon_p^F(n_p, T; M_p^*) - \varepsilon_p^F(n_p, 0; M_p^*) \right] - T s_b(n_b, Y_p, T),$$

$$\varepsilon_b^{(0)} = n_b \omega$$

理想フェルミ気体
の内部エネルギー

$$s_b(n_b, Y_p, T) = (1 - Y_p) s_n^F(n_n, T; M_n^*) + Y_p s_p^F(n_p, T; M_p^*),$$

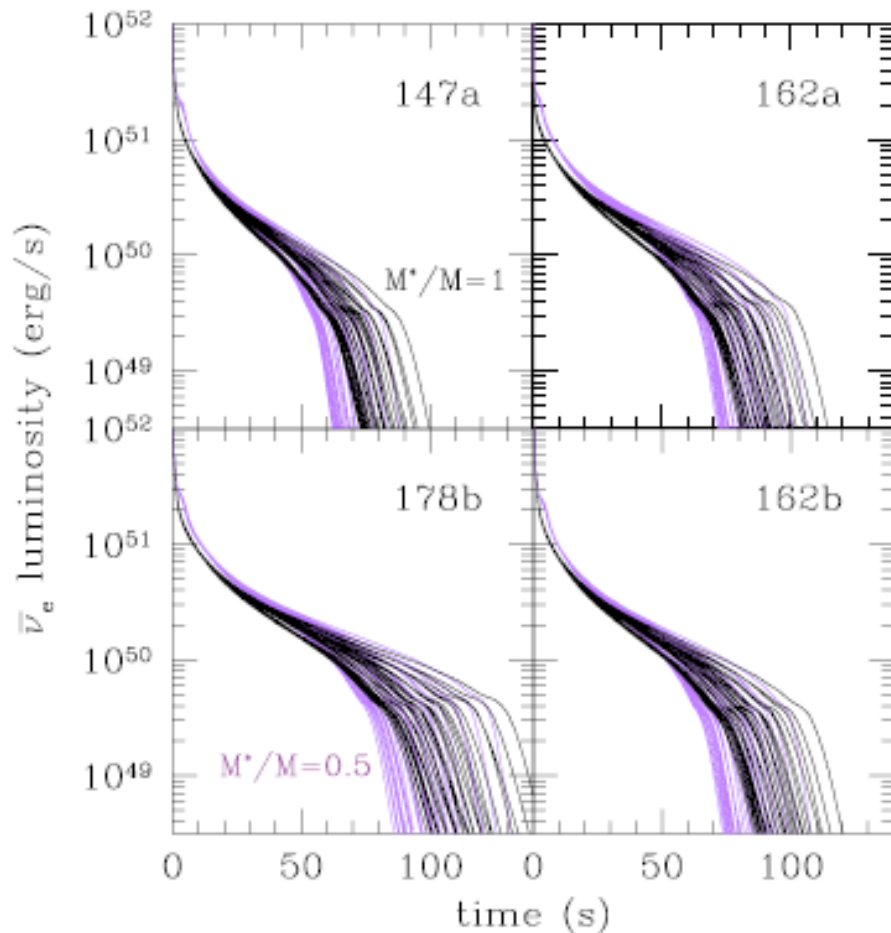
理想フェルミ気体のエントロピー

effective mass $M_n^*/M_n = M_p^*/M_p \equiv u$

- u は定数として、 $u = 0.5, 1$ の2通りを調べる。

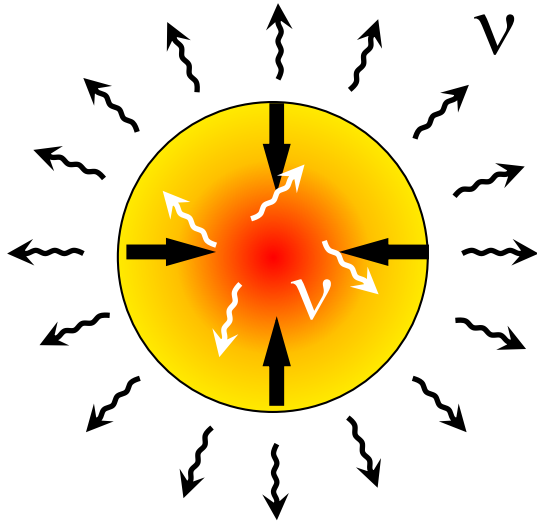
冷却シミュレーションのまとめ

- バリオン質量 $1.47, 1.62, 1.78M_{\odot}$ を持つ原始中性子星モデルを準備。
 - $1.62M_{\odot}$ のモデルは、初期条件の違うものを、2モデルずつ。
- ゼロ温度のパラメータ 30組 × effective mass 2通り、計60通りの状態方程式を作成。
- 全240モデルを計算。

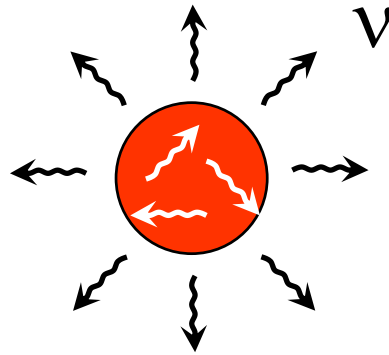


原始中性子星冷却の概略図

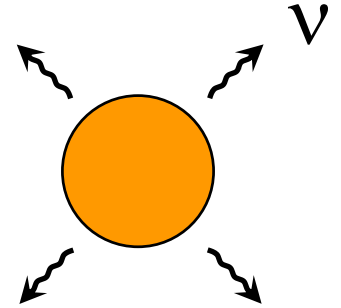
(i) contraction



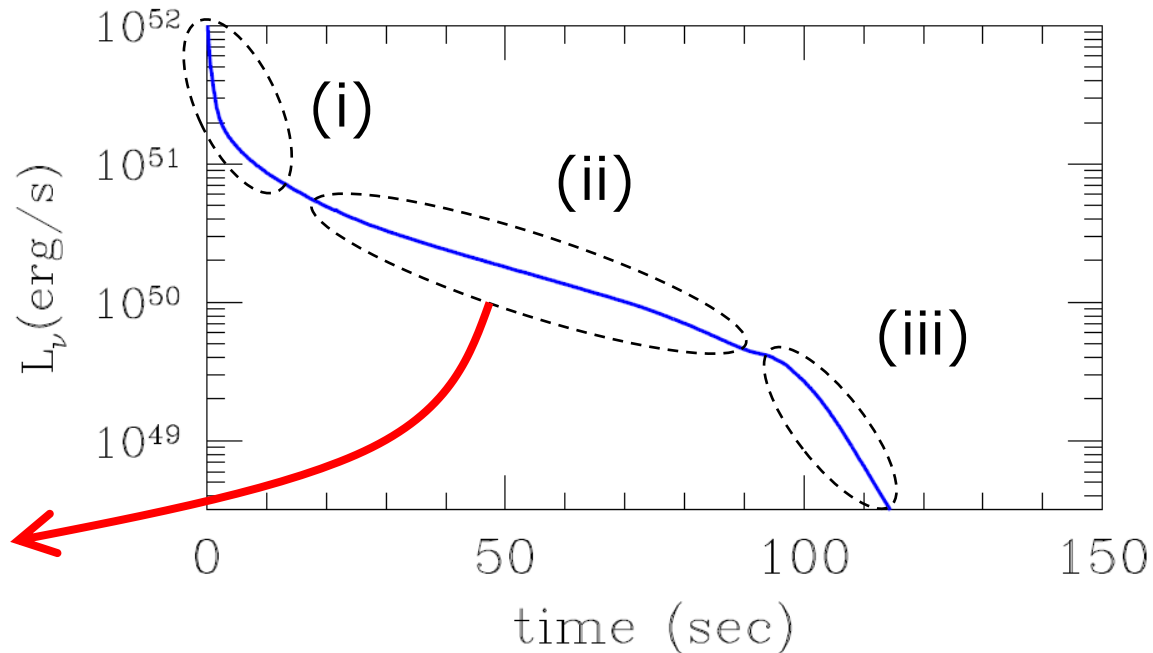
(ii) shallow decay



(iii) volume cooling



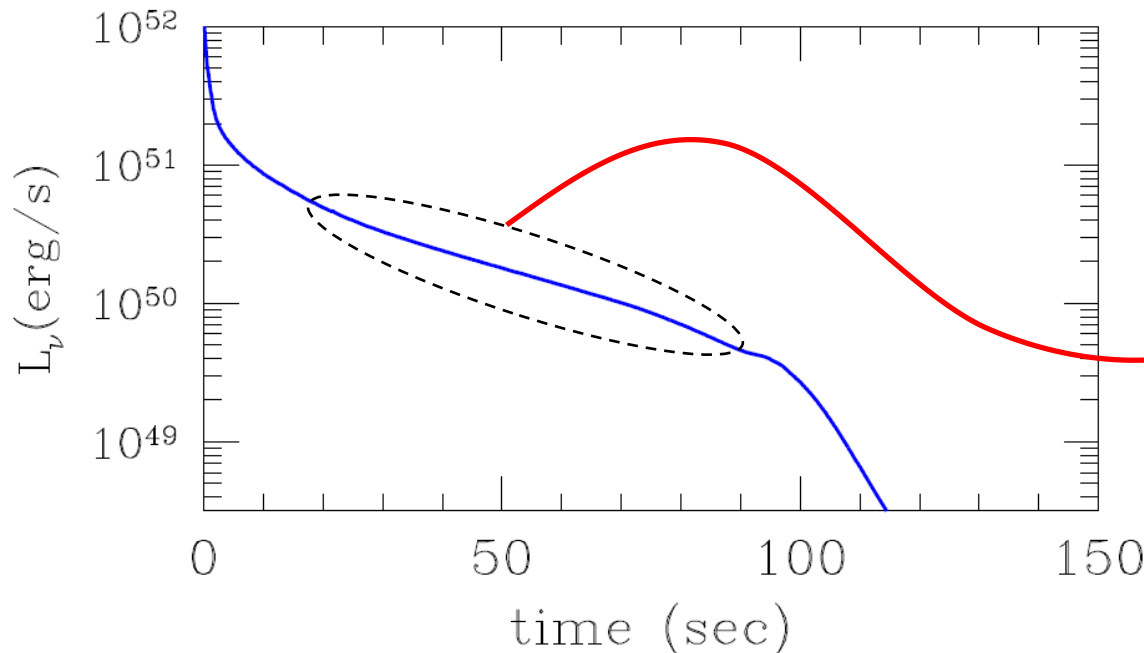
- ニュートリノ光度曲線の decay の時定数が**極大**となる時刻がある。



e-folding time で見積もる冷却時間

- ニュートリノ光度曲線の **e-folding time** の極大値を各モデルの冷却時間と定義する。

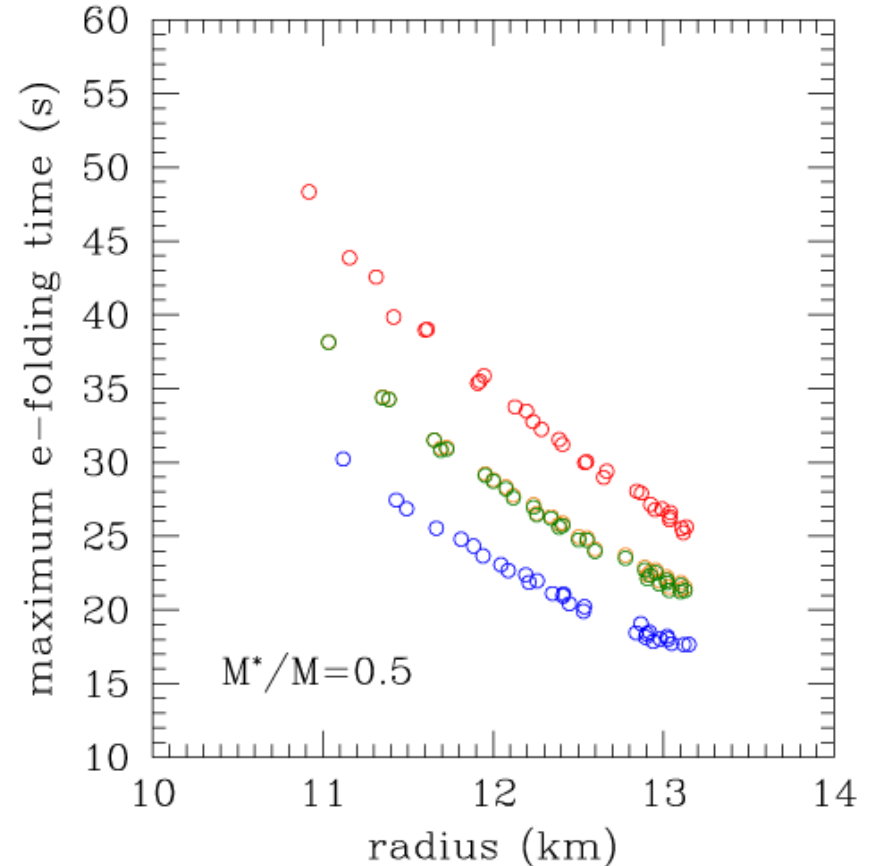
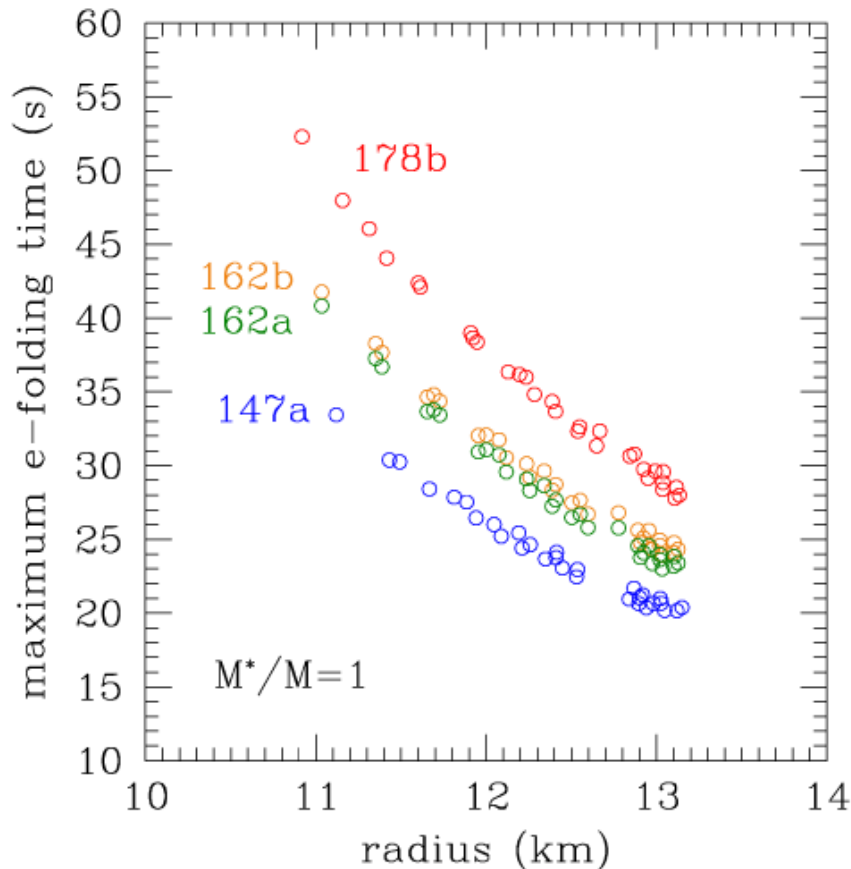
$$L_{\bar{\nu}_e}(t + \tau_{\bar{\nu}_e}) = \frac{L_{\bar{\nu}_e}(t)}{e}, \quad \tau_{\text{cool}} = \max_t \tau_{\bar{\nu}_e}$$



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

冷却時間の質量・半径依存性

- 原始中性子星の冷却時間は、質量が大きいほど長く、半径が大きいほど短い。
 - 状態方程式(有限温度効果)の不定性も残る。

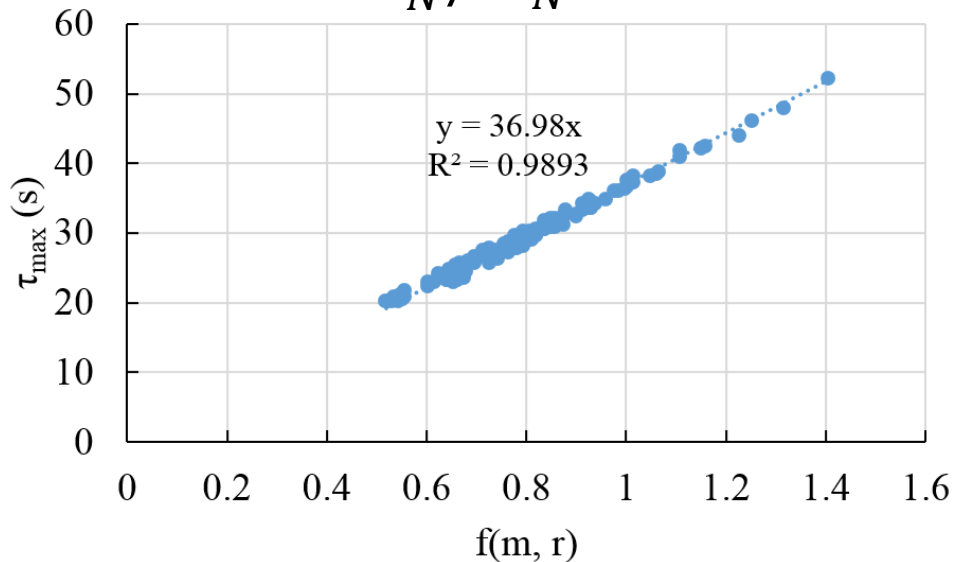


理論とシミュレーションの比較

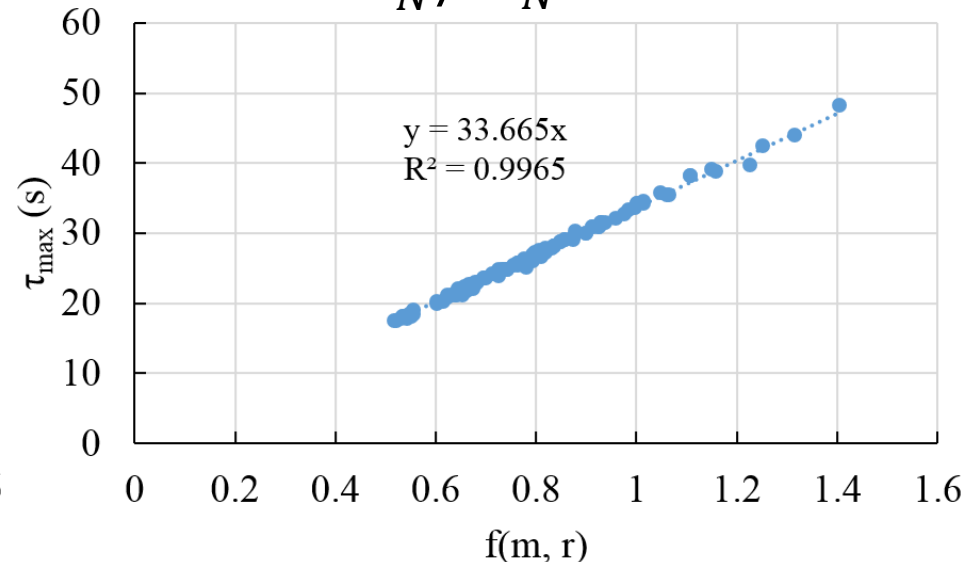
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \underbrace{\left(\frac{m}{1.4M_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}}\right)^{-3}}_{f(m, r)} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}, \quad \beta = \frac{Gm}{rc^2}$$

- ✓ シミュレーション結果は理論と良く一致する。
- ✓ $33.7 \text{ s} \leq \tau^* \leq 37.0 \text{ s}$ (effective mass の不定性)

$$M_N^*/M_N = 1$$



$$M_N^*/M_N = 0.5$$



中性子星の質量・半径の推定

- ニュートリノによる冷却時間スケール

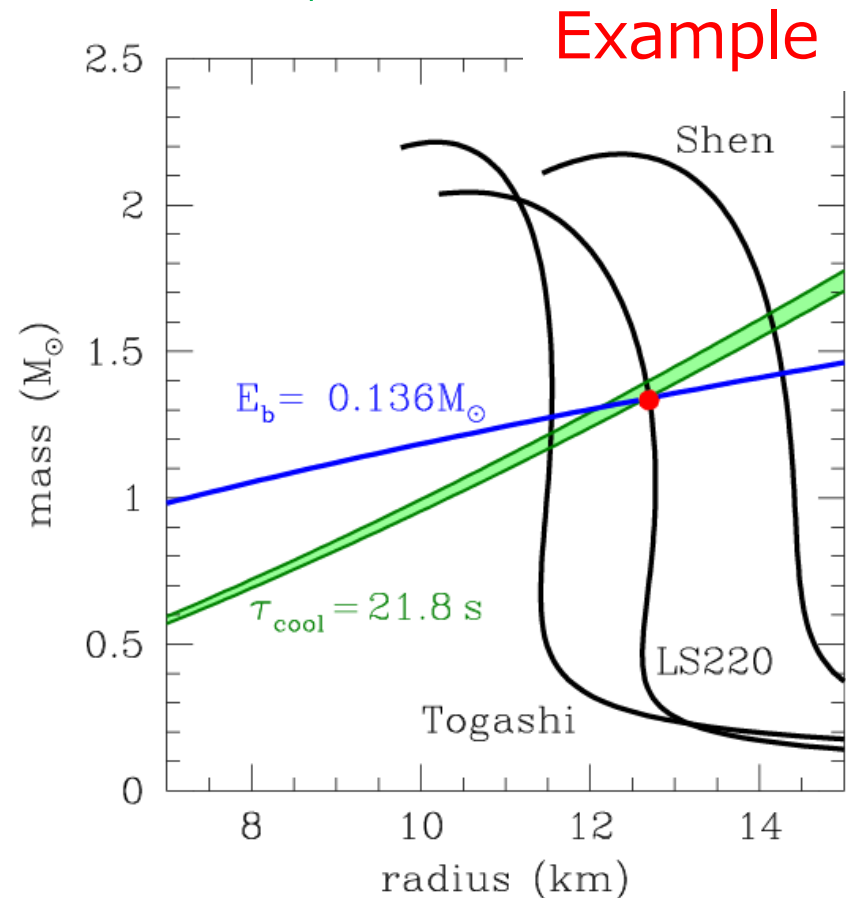
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}$$

と総放出エネルギー

$$\frac{E_b}{mc^2} = \frac{0.6\beta}{1-0.5\beta} \quad \left(\beta = \frac{Gm}{rc^2} \right)$$

の交点として求まる。

- 既存の核物質状態方程式による結果とも整合的で、半径の差も判別できる。



まとめ

- 原始中性子星の冷却時間スケールは、

$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}, \quad \beta = \frac{Gm}{rc^2}$$

$$33.7 \text{ s} \leq \tau^* \leq 37.0 \text{ s}$$

で与えられることがわかった。

- これと中性子星の束縛エネルギーの経験式を連立させることにより、ニュートリノ観測だけから形成された中性子星の質量と半径を推定する手法を提案し、状態方程式の制限にも応用できることを示した。

今後の展望 (2019年8月)

- ニュートリノ放出計算の改良・拡張
 - コラプスフェーズからの一貫した計算
 - ニュートリノ振動、多次元効果の影響
 - 状態方程式、核子・ニュートリノ反応率の改良
- 冷却時間スケールの経験則の物理的解釈
- 実際のイベント数に即した解析法
- 背景ニュートリノへの影響 (incl. ブラックホール)

今後の展望 (2020年1月)

- ニュートリノ放出計算の改良・拡張
 - コラプスフェーズからの一貫した計算
 - ニュートリノ振動、多次元効果の影響
 - 状態方程式、核子・ニュートリノ反応率の改良
- 冷却時間スケールの経験則の物理的解釈 *done!*
- 実際のイベント数に即した解析法
- 背景ニュートリノへの影響 (incl. ブラックホール)