

超新星ニュートリノで 探る中性子星の核物理

中里 健一郎

(九州大学 基幹教育院)

九州大学

新学術「地下宇宙」領域研究会@阪大 2019年8月25日

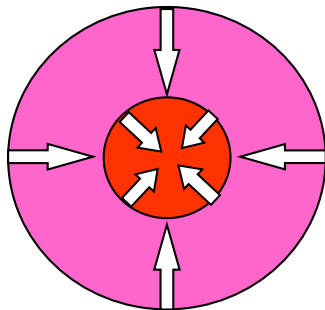
重力崩壊型超新星

- 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

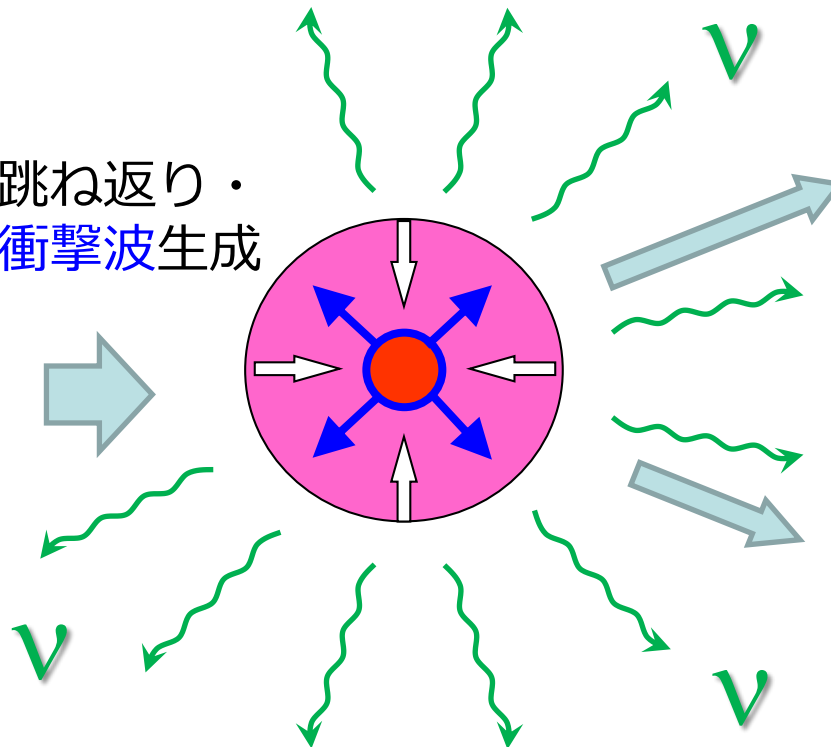


衝撃波伝播 → 爆発
(中性子星の形成)

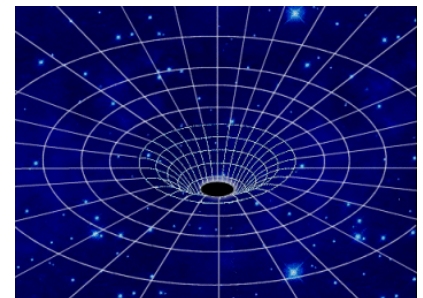
重力崩壊



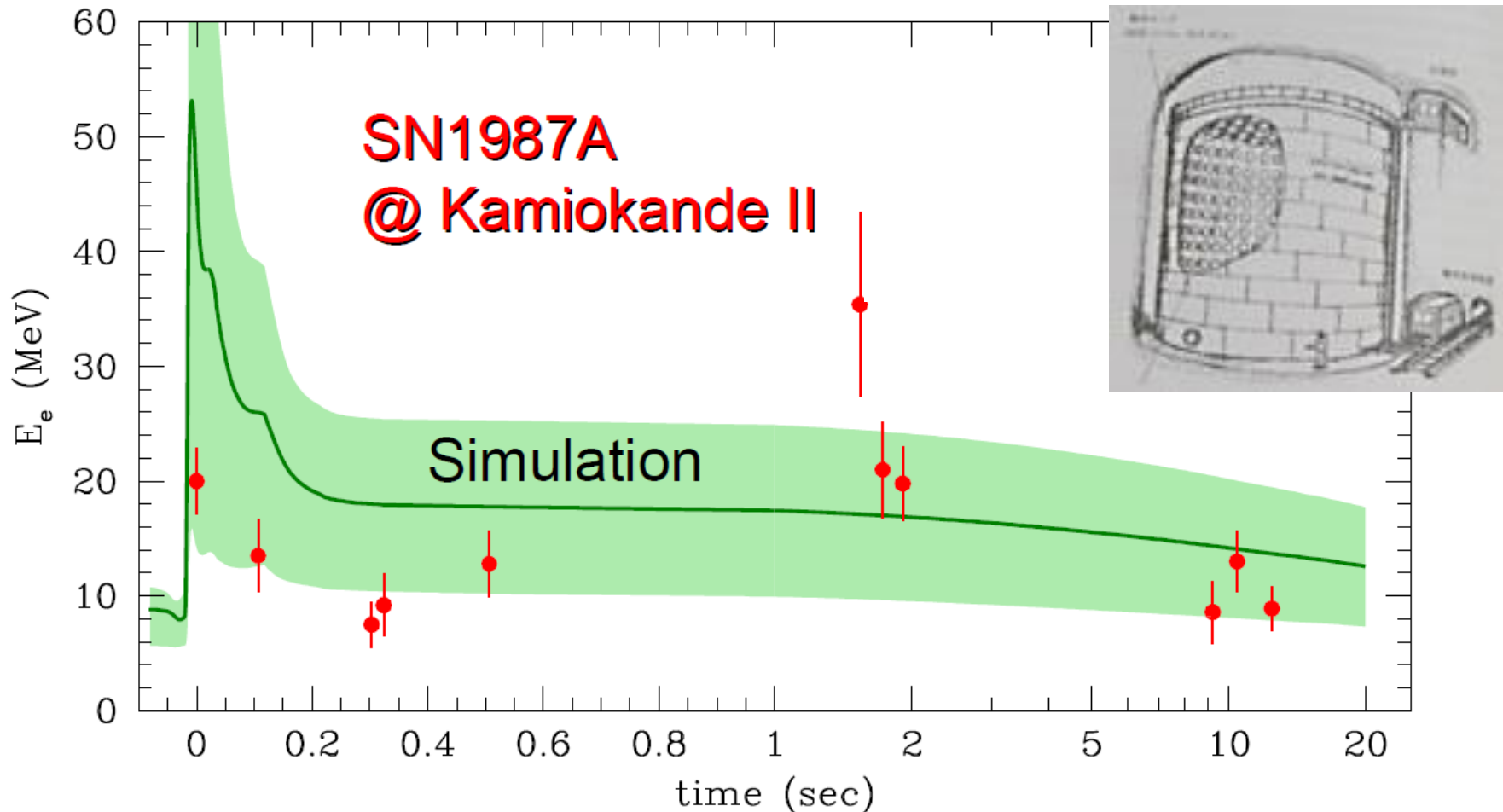
跳ね返り・
衝撃波生成



ブラックホール



SN1987A からのニュートリノ

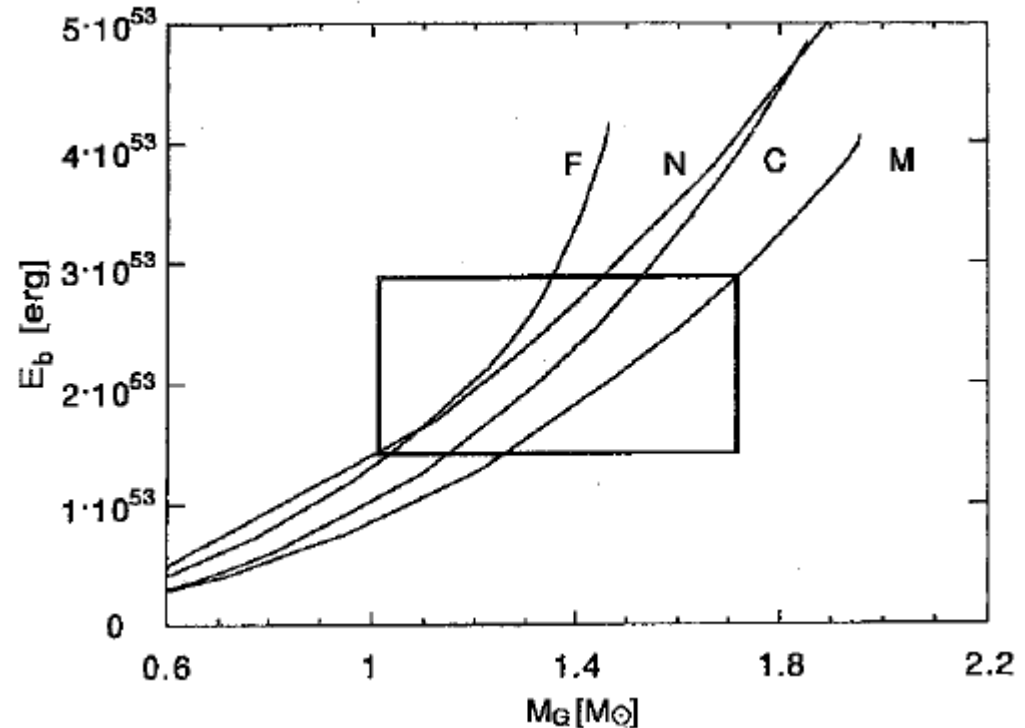


- 検出数、エネルギー、継続時間の観測値から超新星の標準シナリオが確立。

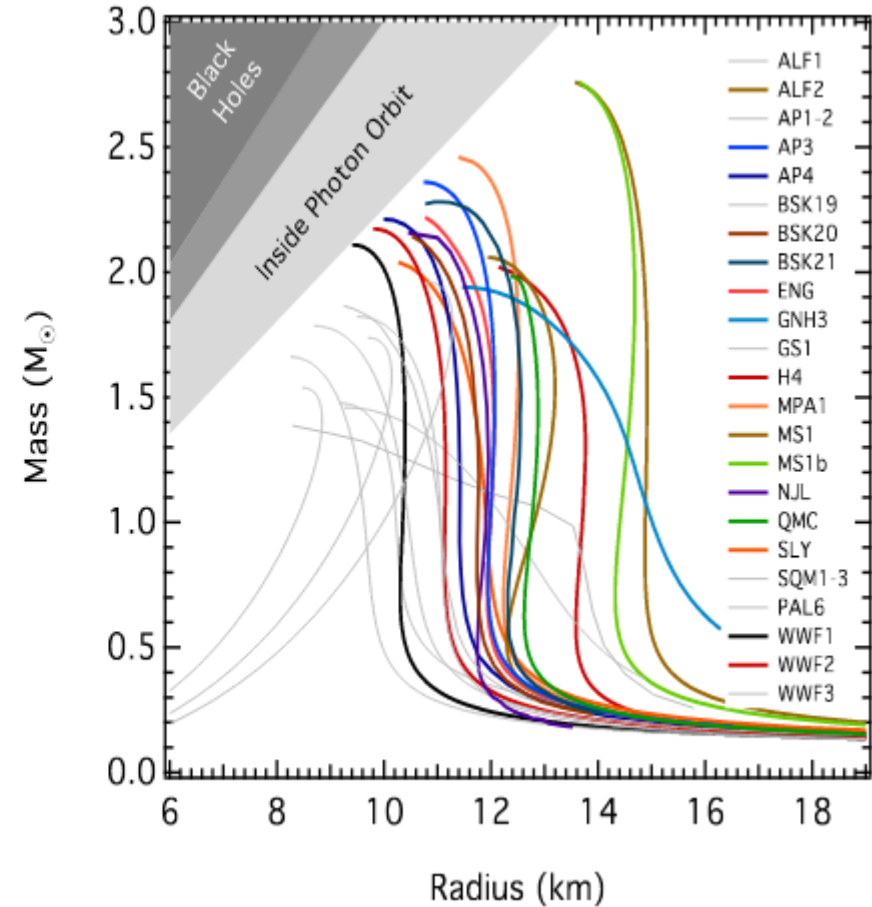
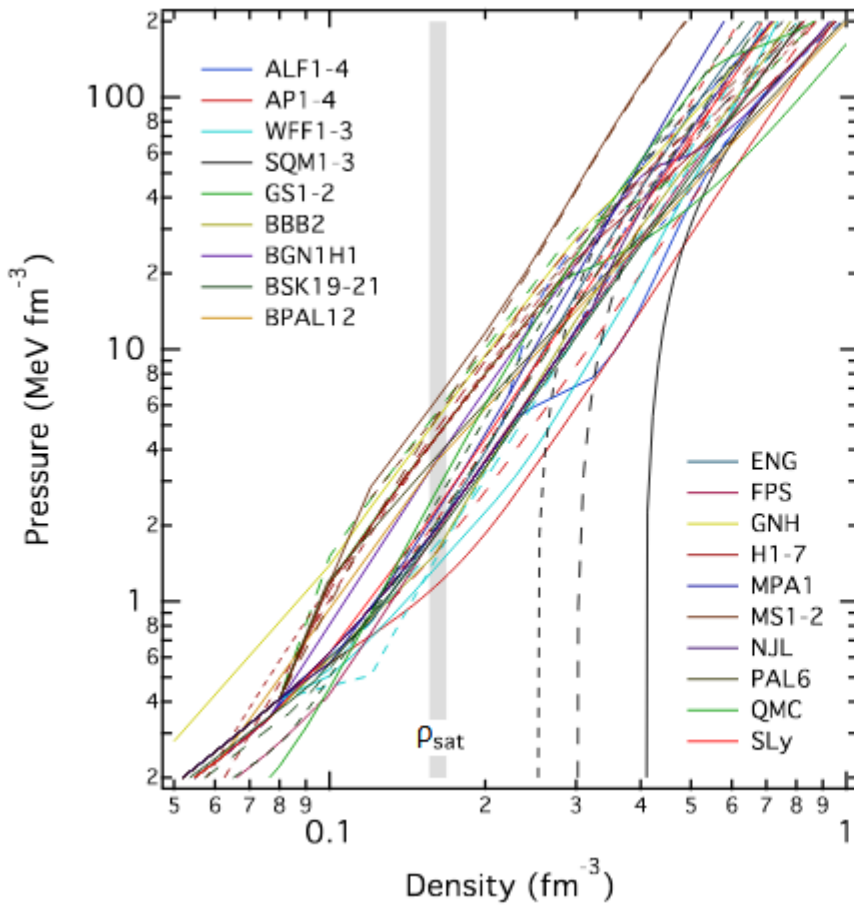
ニュートリノ観測から中性子星の 質量を探る

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 中性子星の質量一半径関係が求まる



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:

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

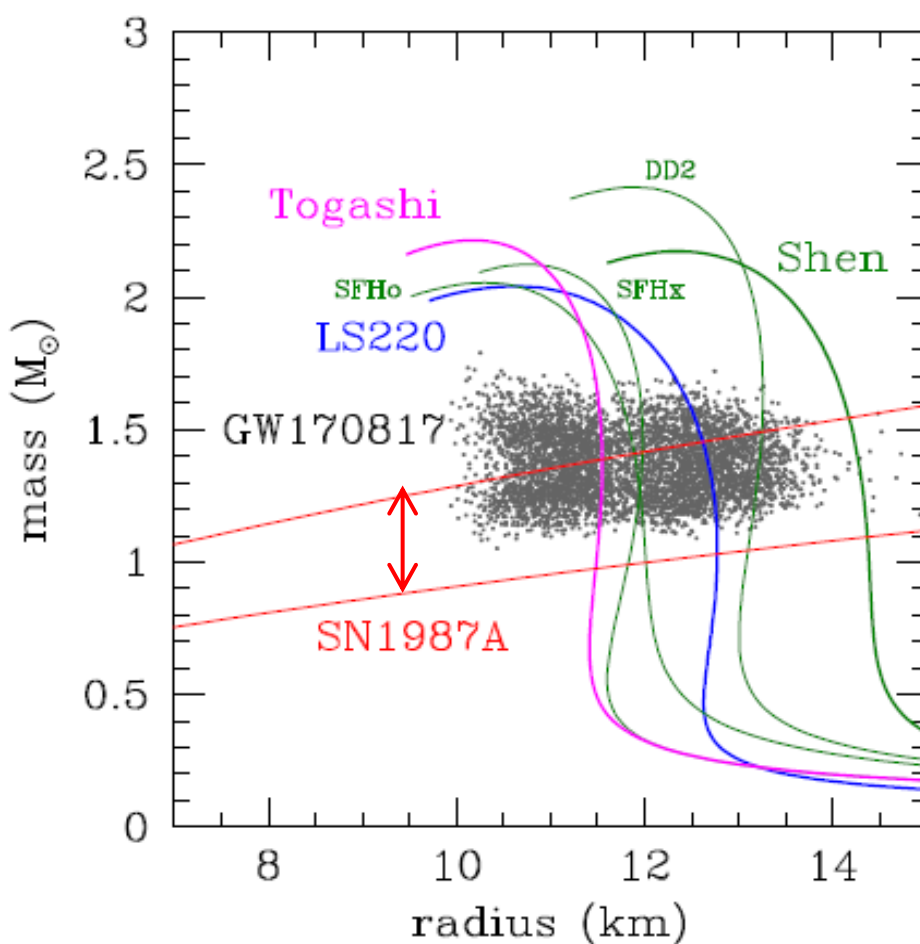
E_b : 中性子星の束縛エネルギー

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？

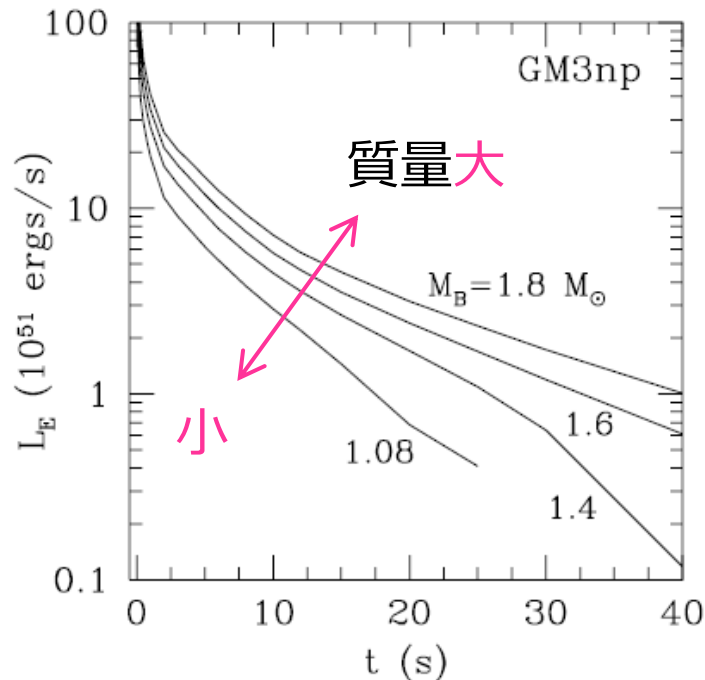
- さきの経験式を使うと中性子星半径の値をある程度、仮定すれば (e.g., 10~13.5 km)、 $\pm 10\%$ 程度で見積もることができる。
- 半径を見積もるには、状態方程式が分らないといけない。



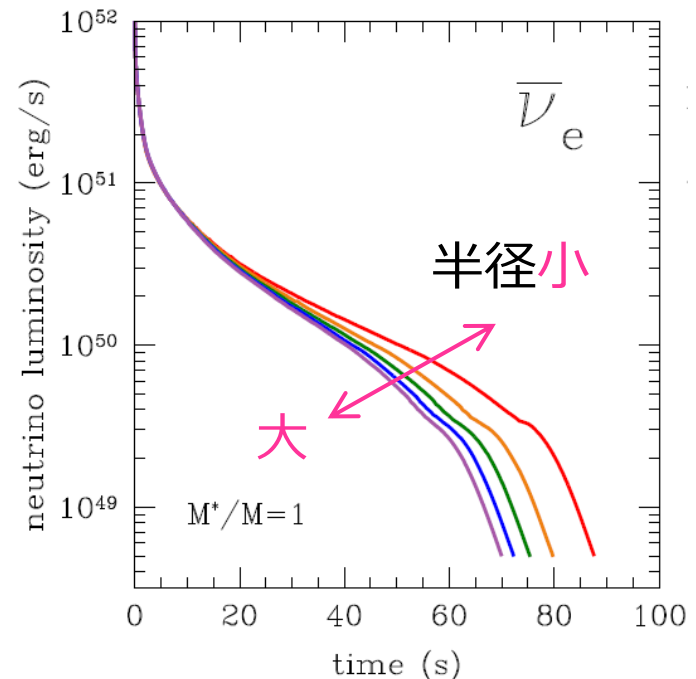
→ 逆に中性子星の質量と半径の両方が分かれば
状態方程式に制限をかけられる！

原始中性子星の冷却

Pons et al., ApJ **513** (1999)



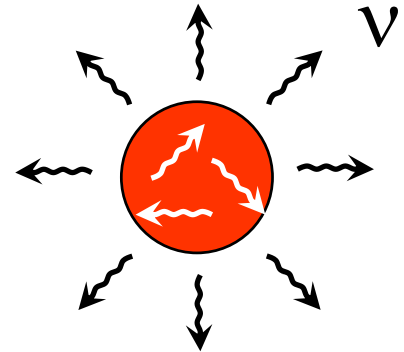
Nakazato & Suzuki, ApJ **878** (2019)



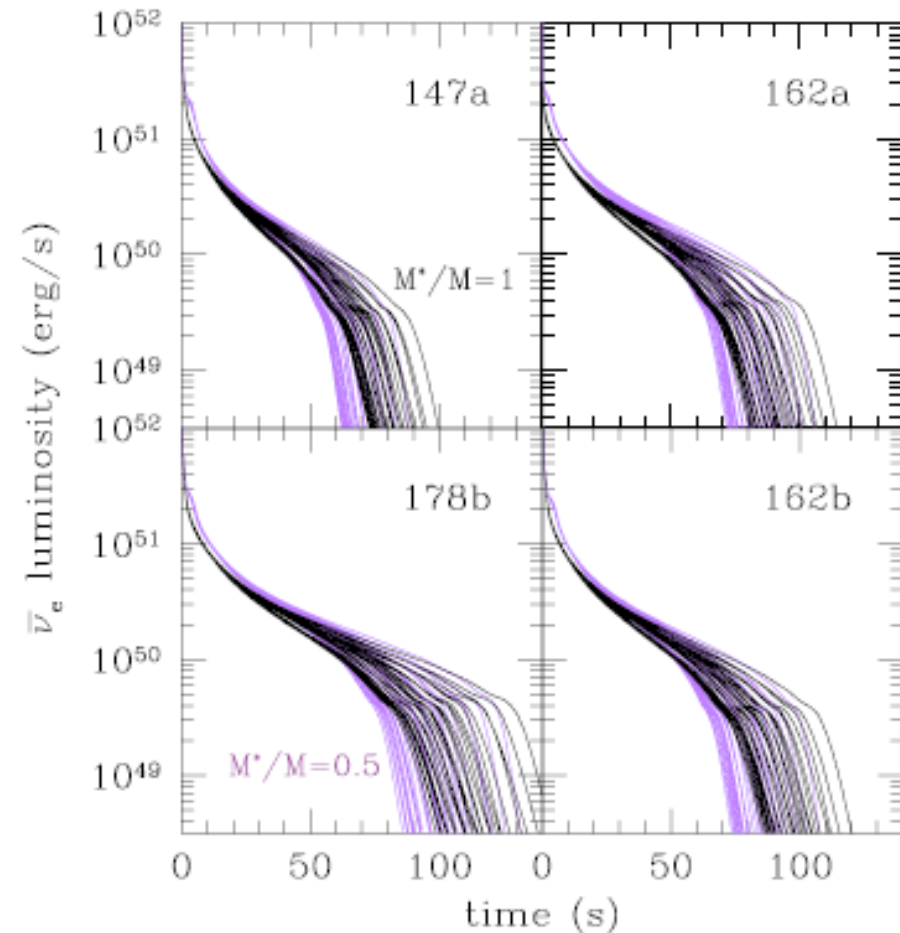
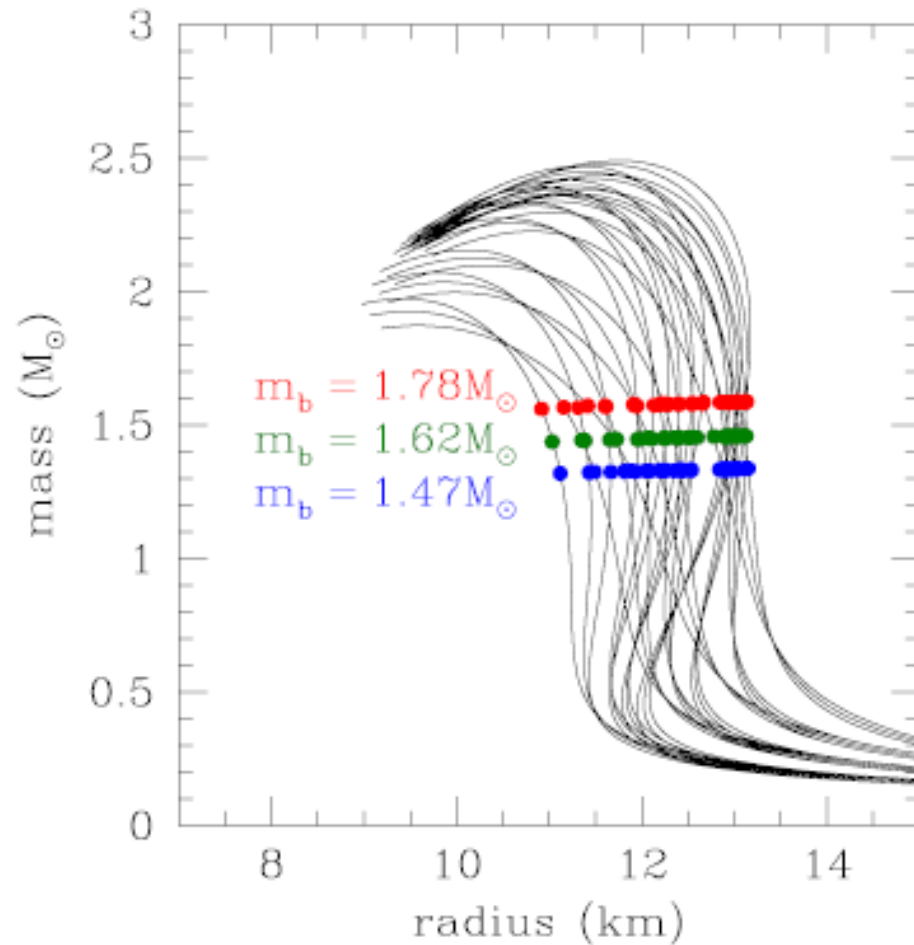
- 超新星爆発直後の中性子星は熱く、数十秒かけてニュートリノを放出して、冷えていく。
- 冷却のタイムスケールは質量が大きいほど長く、半径が大きいほど短い。

本研究の概要

- 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う。
- ニュートリノ放出のタイムスケールが中性子星の質量と半径にどう依存するかを調べる。



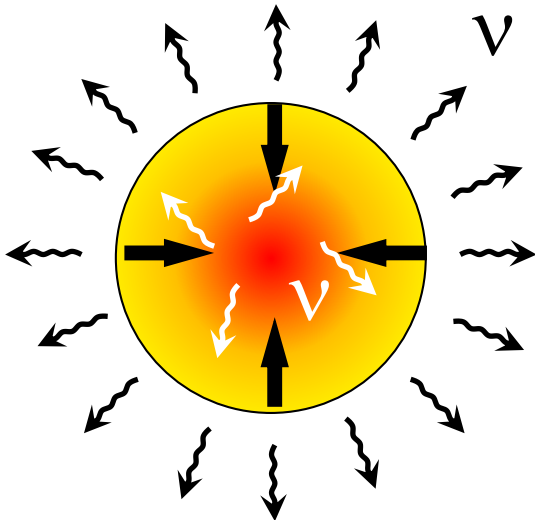
計算モデルと結果のまとめ



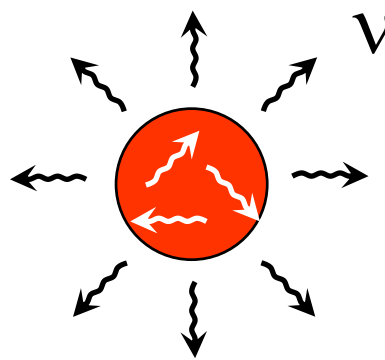
- 重力質量 $1.3 \sim 1.6M_{\odot}$, 半径 $11 \sim 13$ km の中性子星の冷却を網羅的に計算。

原始中性子星冷却の概略図

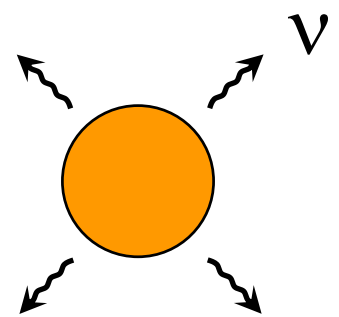
(i) contraction



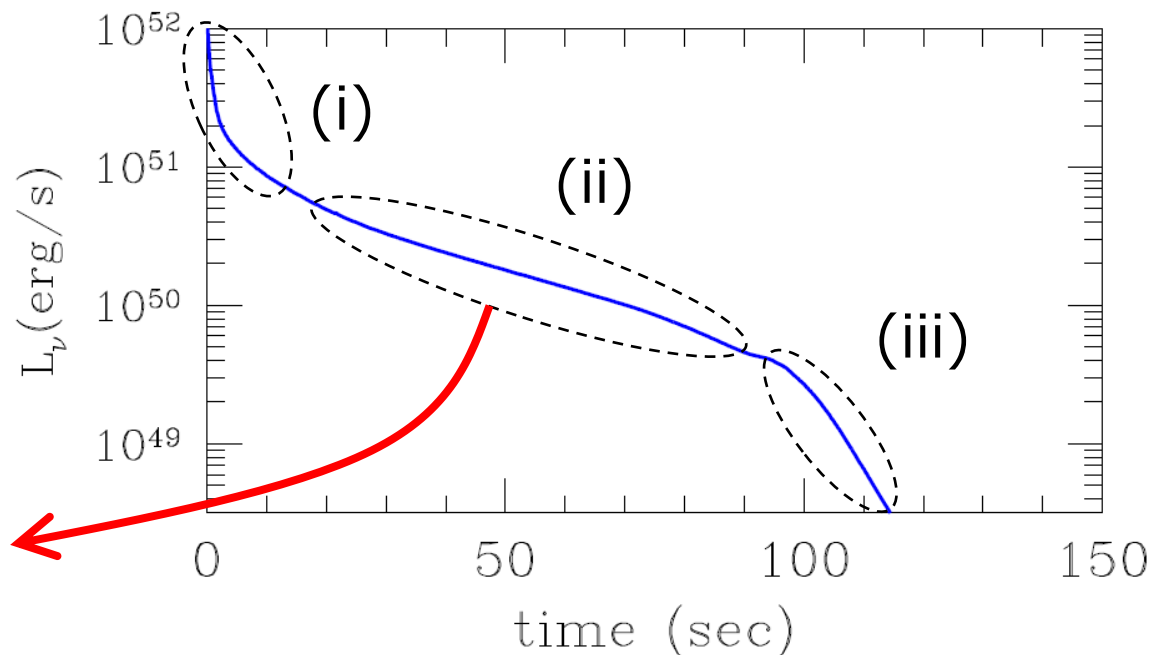
(ii) shallow decay



(iii) volume cooling



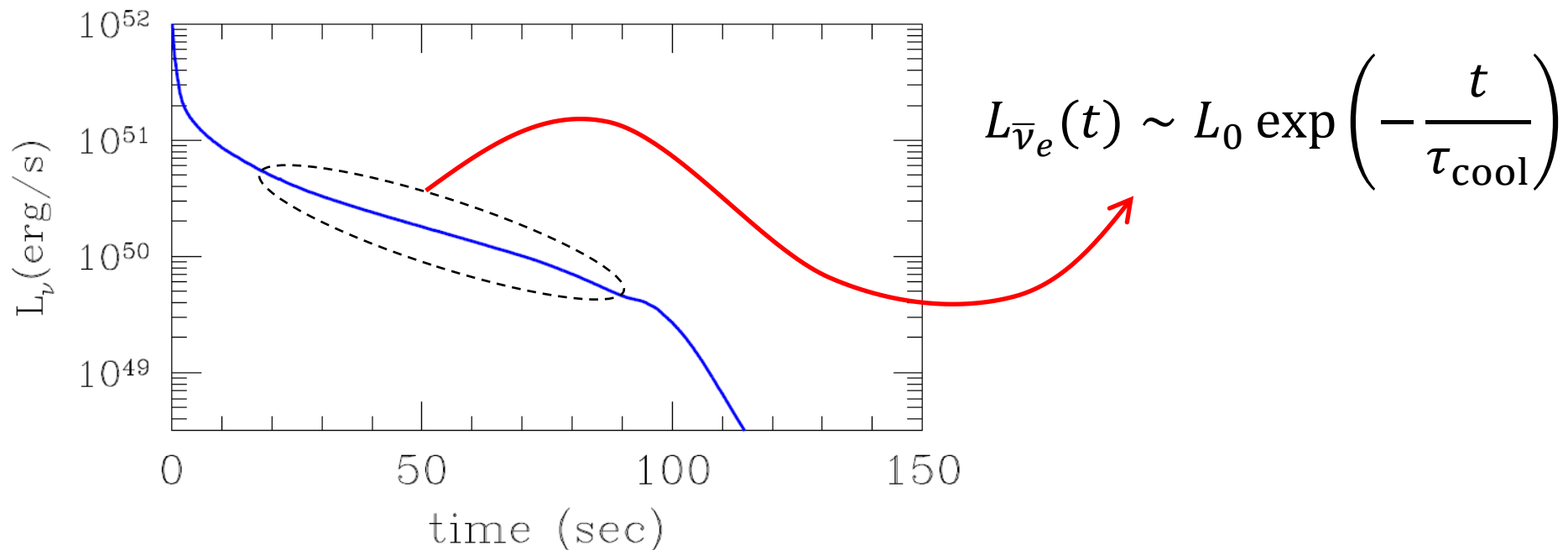
- ニュートリノ光度
曲線の decay の
時定数が**極大**
となる時刻がある。



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。

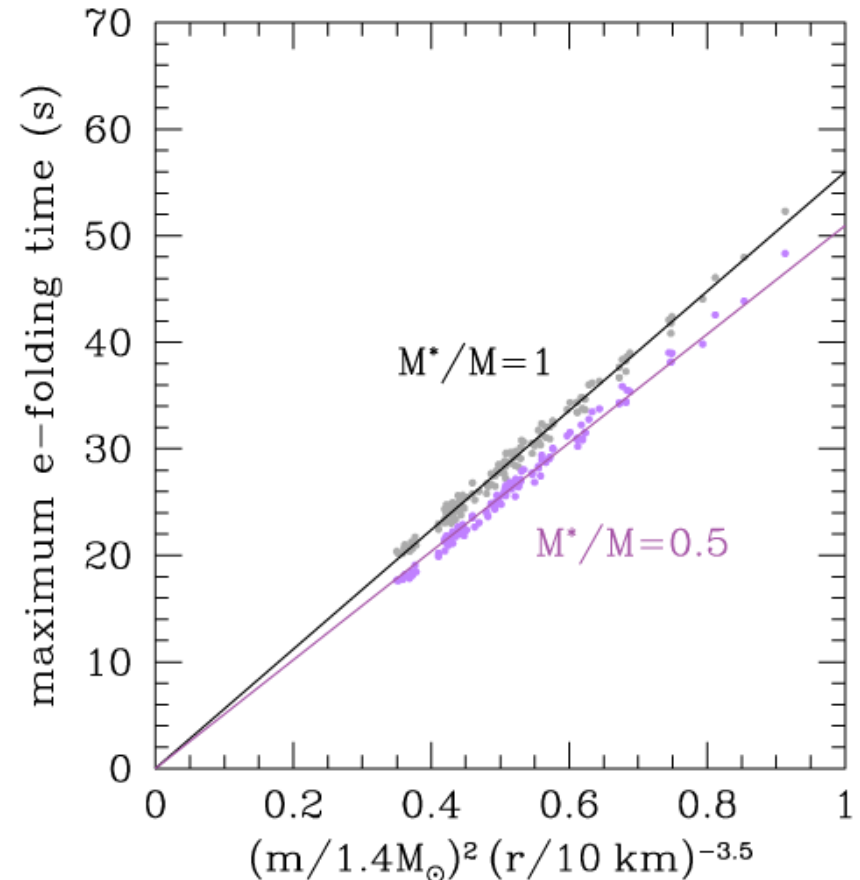
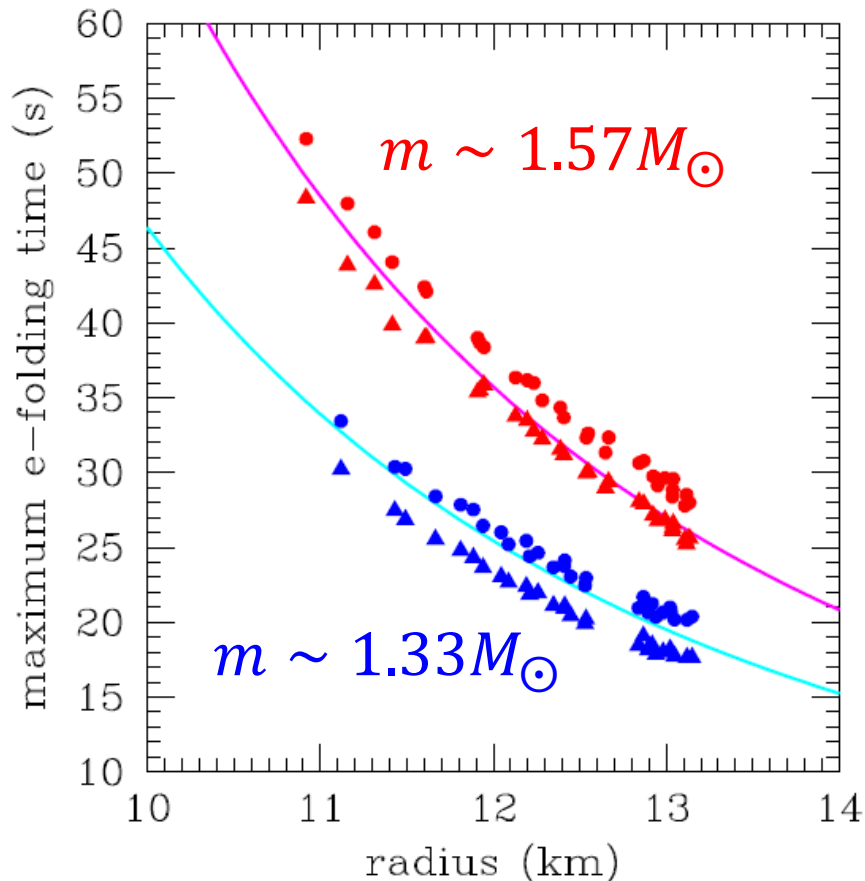
$$L_{\bar{\nu}_e}(t + \tau_{\bar{\nu}_e}) = \frac{L_{\bar{\nu}_e}(t)}{e}, \quad \tau_{\text{cool}} = \max_t \tau_{\bar{\nu}_e}$$



冷却時間スケールの経験則

$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3.5}, \quad 51 \text{ s} \leq \tau^* \leq 56 \text{ s}$$

✓ 状態方程式(有限温度効果)の不定性は残る。



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

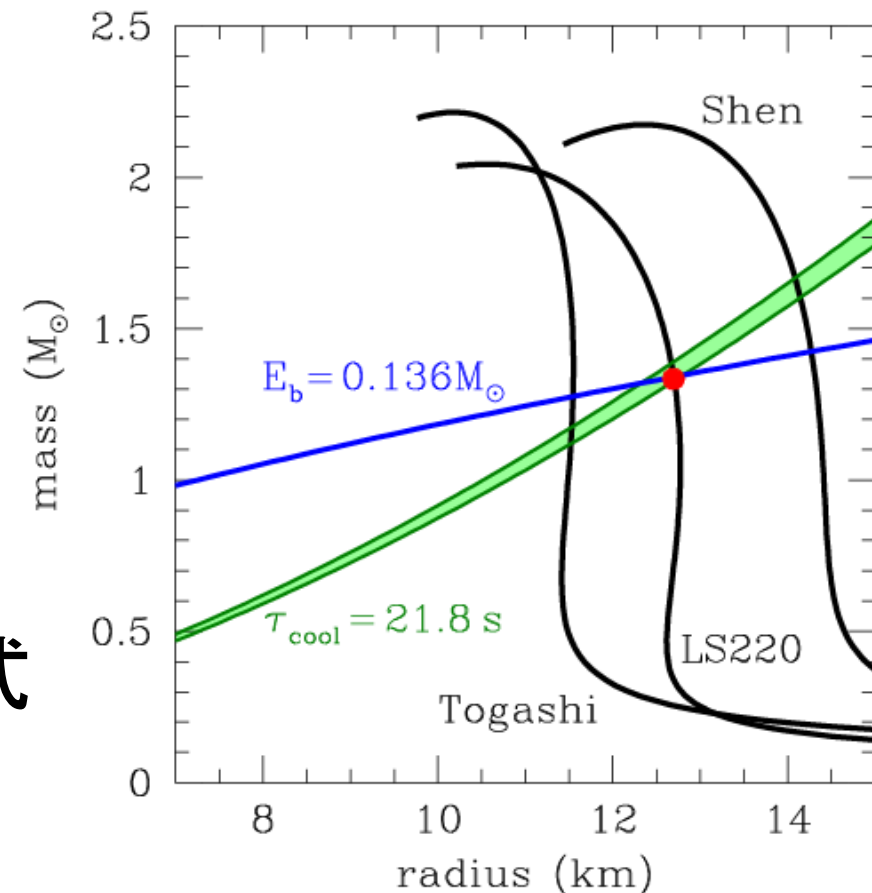
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4 M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3.5}$$

と総放出エネルギー

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

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、

$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4 M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3.5}$$

$$51 \text{ s} \leq \tau^* \leq 56 \text{ s}$$

で与えられることがわかった(経験則)。

- 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

- 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)