

スーパーカミオカンデで 見る超新星ニュートリノ バーストの時間変動

中里 健一郎 (九州大・基幹教育院)

2021年9月17日@日本物理学会(オンライン)

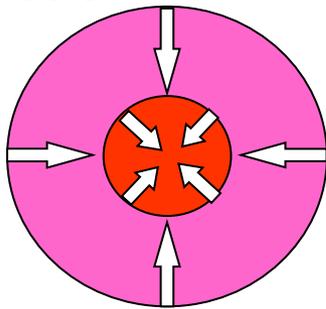
重力崩壊型超新星

- 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

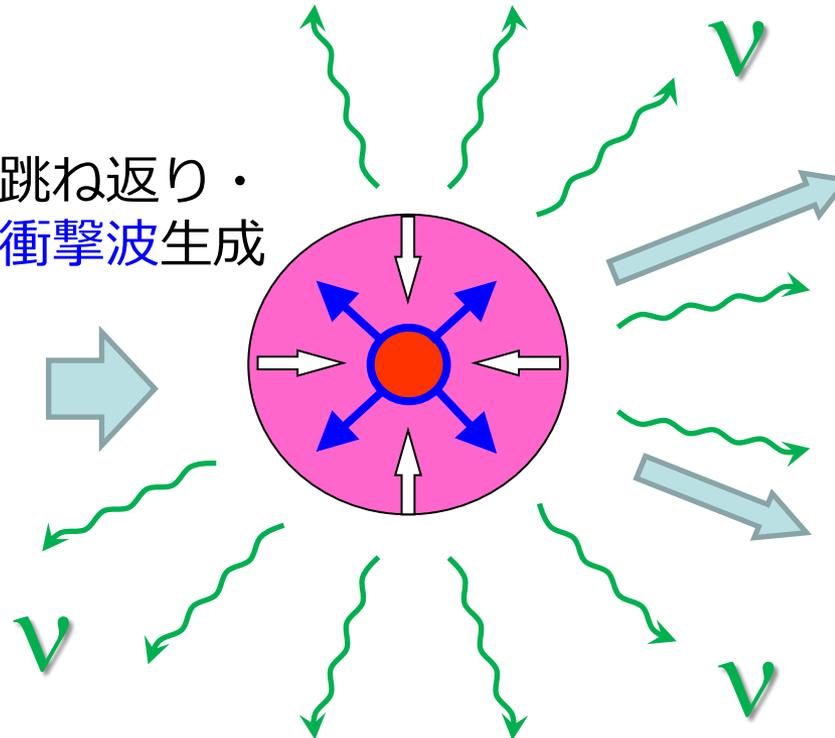


衝撃波伝播 → 爆発
(中性子星の形成)

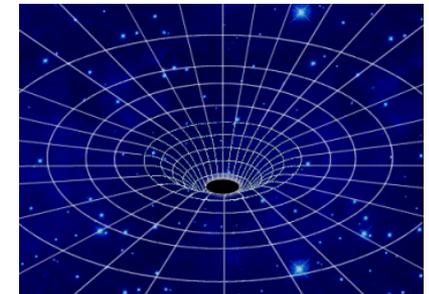
重力崩壊



跳ね返り・
衝撃波生成

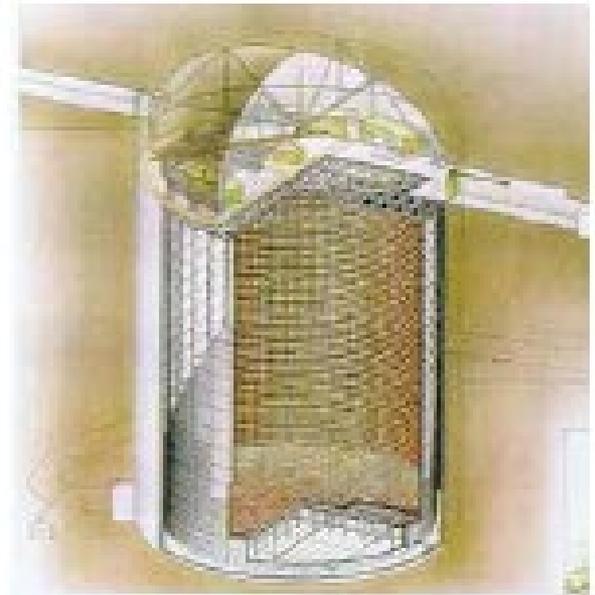


ブラックホール



超新星ニュートリノ検出の意義

- ニュートリノは弱い相互作用しかしないため、超新星深部からの情報が直接われわれに届く。
 - 爆発前の星(親星)の構造
 - 爆発メカニズム(コアの振動 etc.)
 - 中性子星の質量・半径
- 電磁波や重力波の観測と組み合わせることで、より多角的な情報が得られると期待される。(マルチメッセンジャー天文学)



ニュートリノで見る超新星

Li et al., PRD **103** (2021), arXiv:2008.04340

Pre-SN phase は、この後の
吉田さんの講演を参照

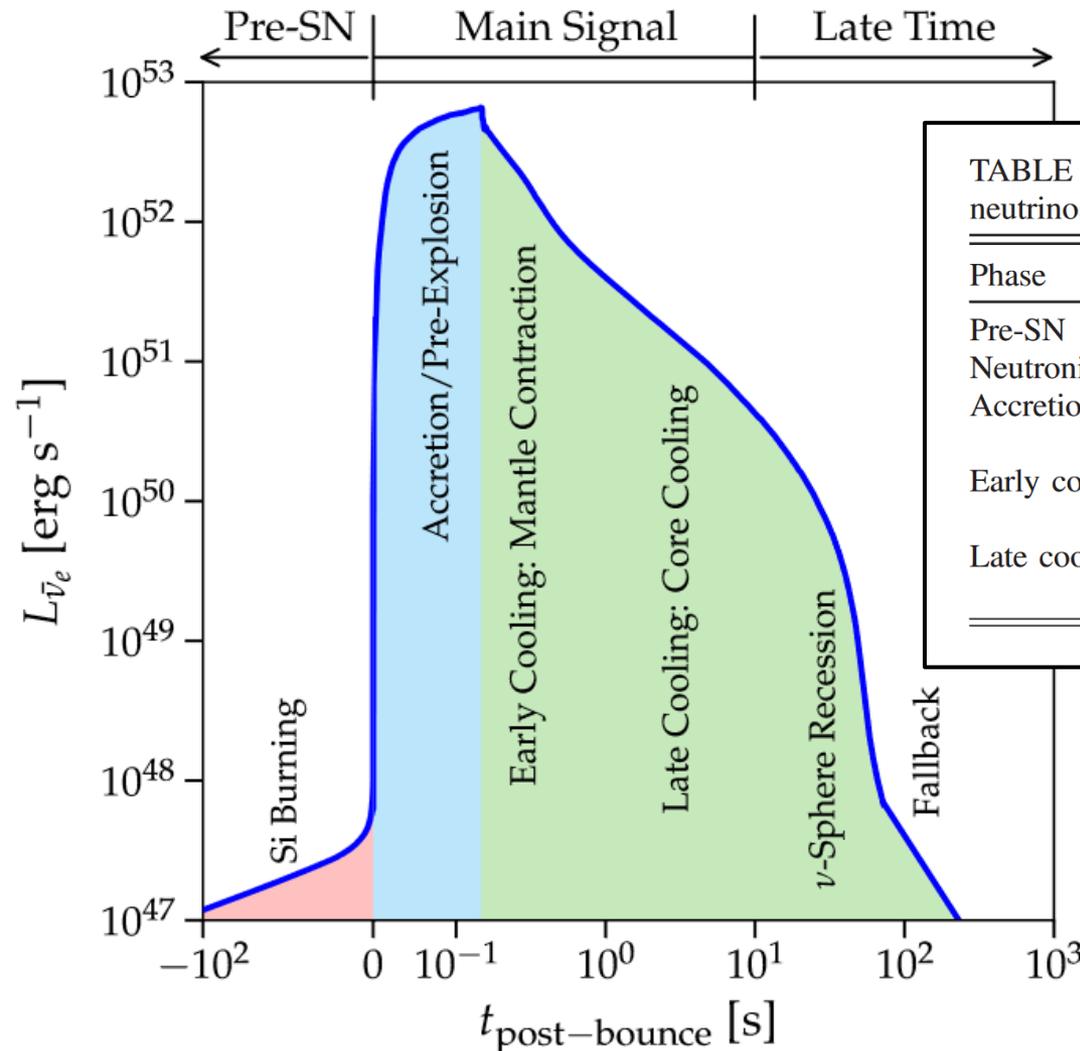


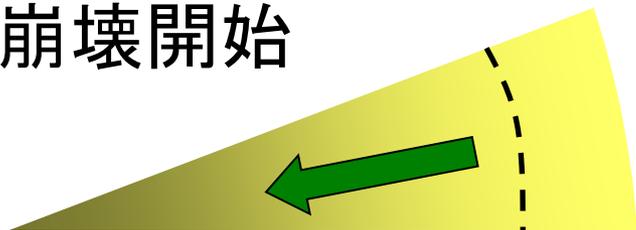
TABLE I. Key physics opportunities from detecting supernova neutrinos in different phases.

Phase	Physics opportunities
Pre-SN	Early warning, progenitor physics
Neutronization	Flavor mixing, SN distance, new physics
Accretion	Flavor mixing, SN direction, multidimensional effects
Early cooling	Equation of state, energy loss rates, PNS radius, diffusion time, new physics
Late cooling	NS vs BH formation, transparency time, integrated losses, new physics

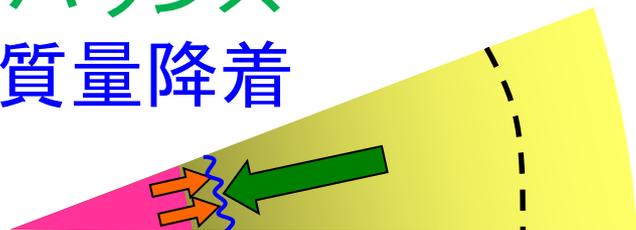
- 各 phase ごとに探れる物理が異なる。

Main signal 以降の時間変化

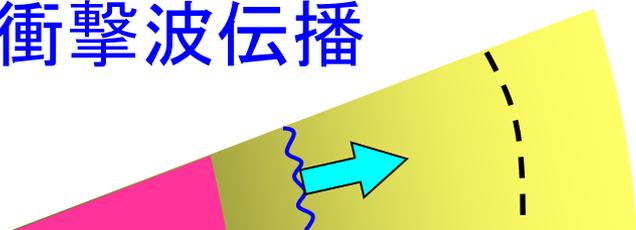
崩壊開始



バウンス
質量降着



衝撃波伝播

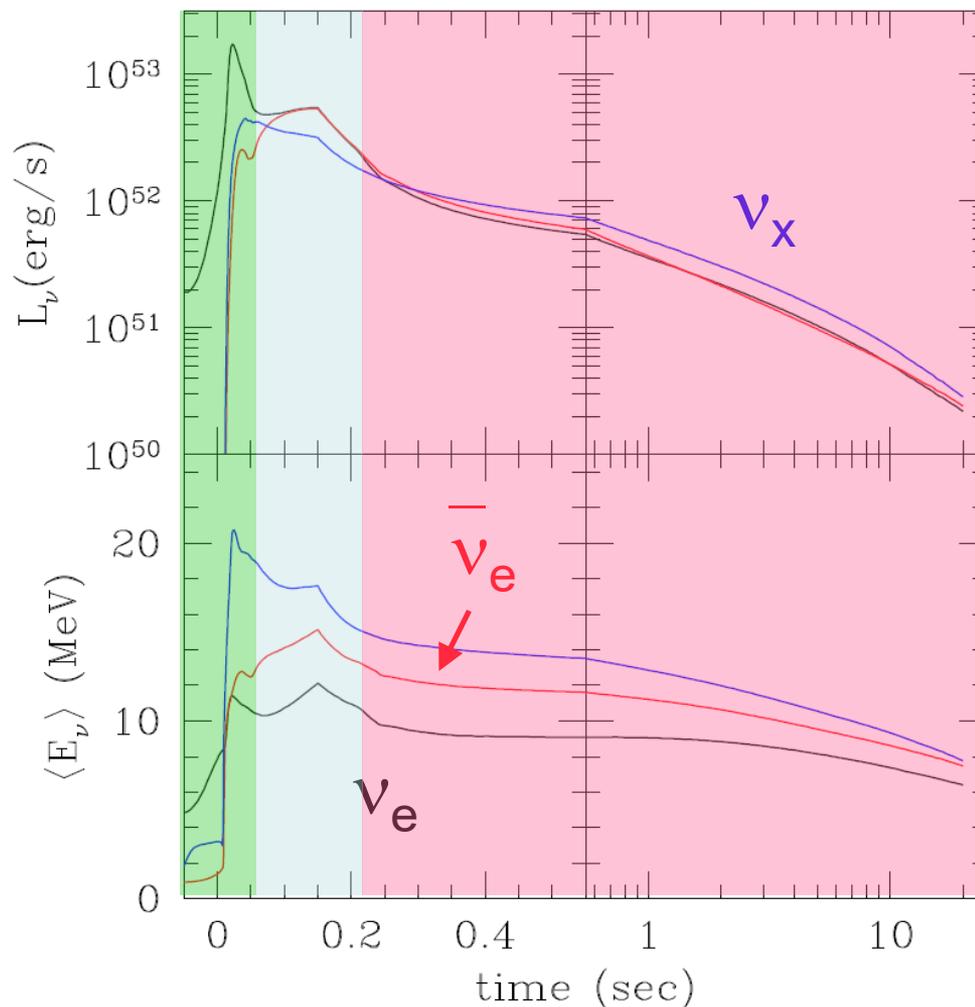


原始中性子星



Nakazato et al., ApJS **205** (2013),
arXiv:1210.6841

① ② ③



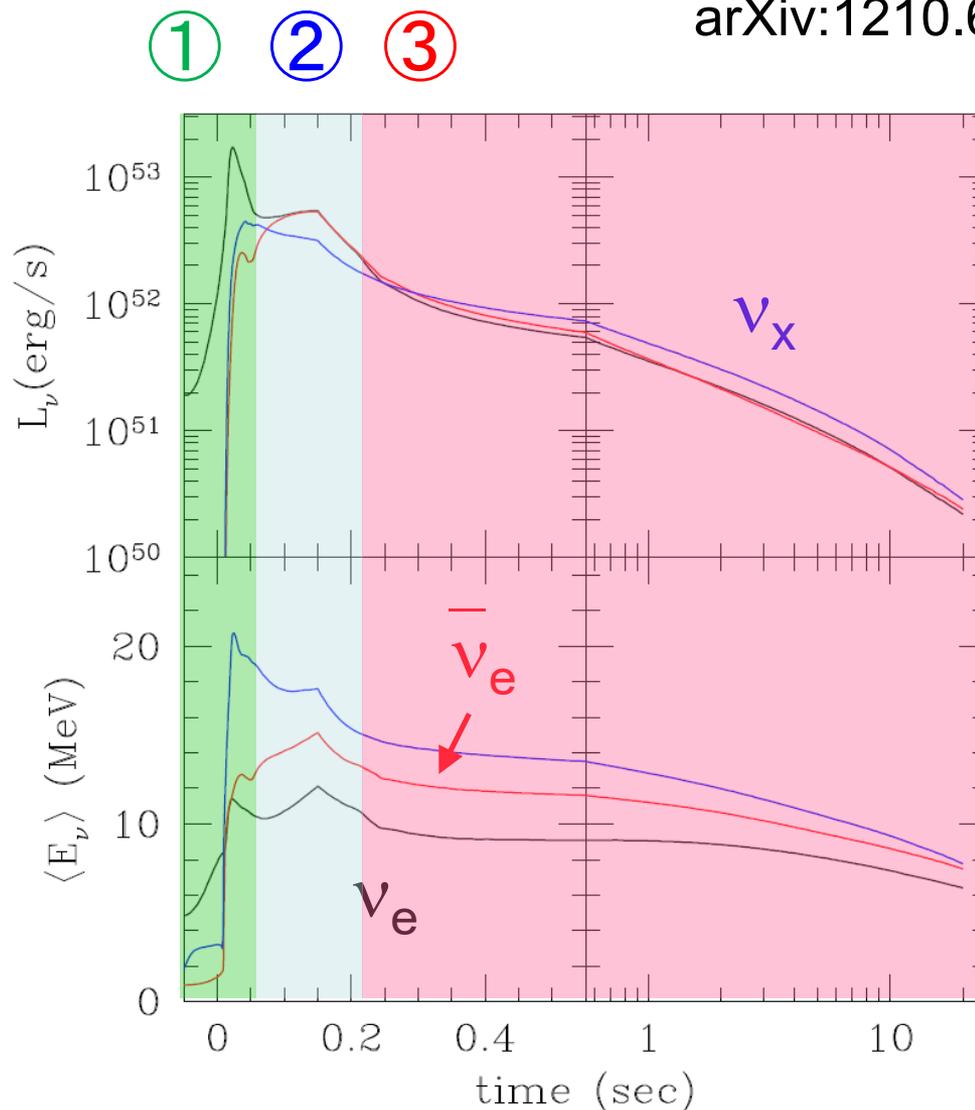
Main signal 以降の時間変化

Nakazato et al., ApJS **205** (2013),
arXiv:1210.6841

① 中性子化
バースト
~ O (10 ms)

② 降着フェーズ
~ O (100 ms)

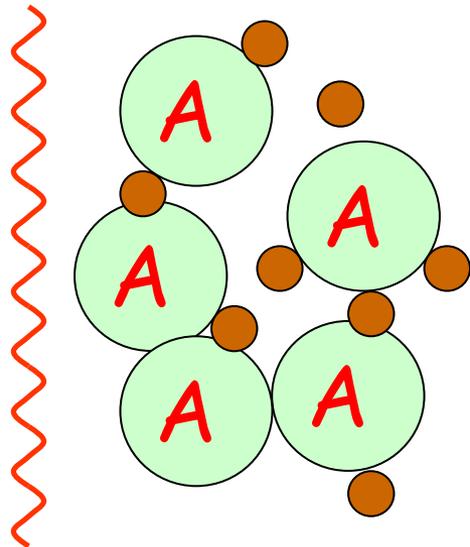
③ 冷却フェーズ
~ O (10 sec)



① 中性子化バースト

- 衝撃波が原子核を破壊する。
- 陽子による電子捕獲により ν_e が放出される。
→ deleptonization

Shock



● : electron

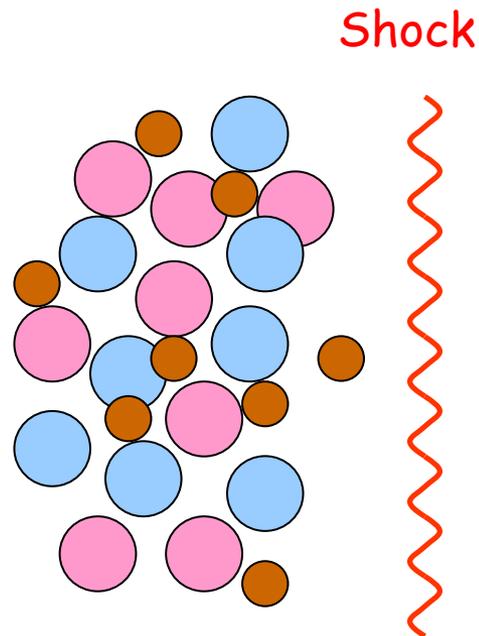
① 中性子化バースト

- 衝撃波が原子核を破壊する。
- 陽子による電子捕獲により ν_e が放出される。
→ deleptonization

● : neutron

● : proton

● : electron



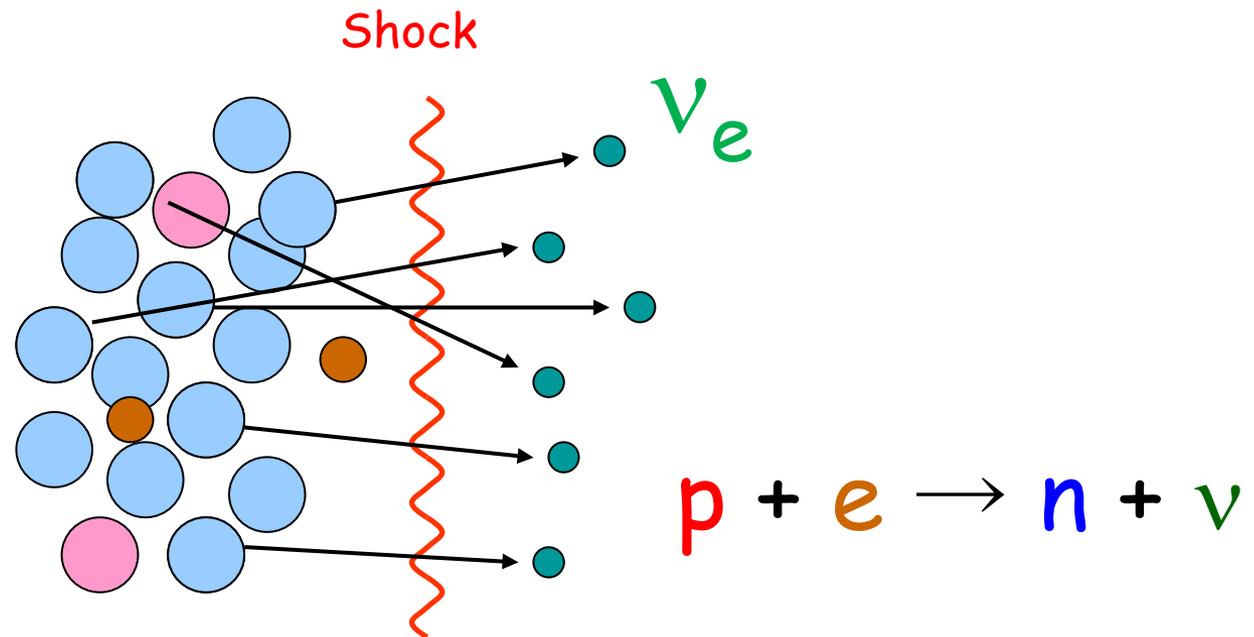
① 中性子化バースト

- 衝撃波が原子核を破壊する。
- 陽子による電子捕獲により ν_e が放出される。
→ deleptonization

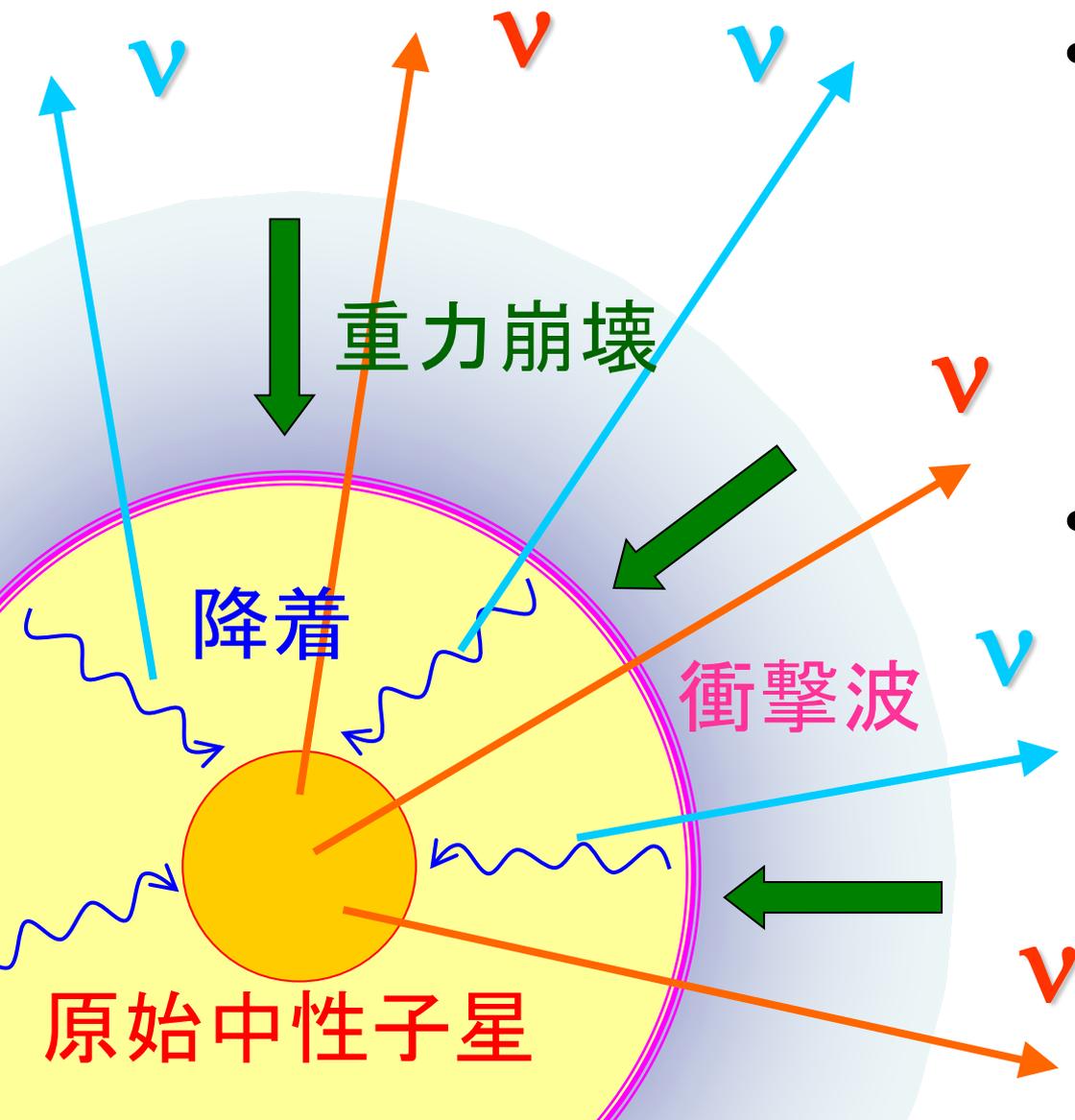
● : neutron

● : proton

● : electron

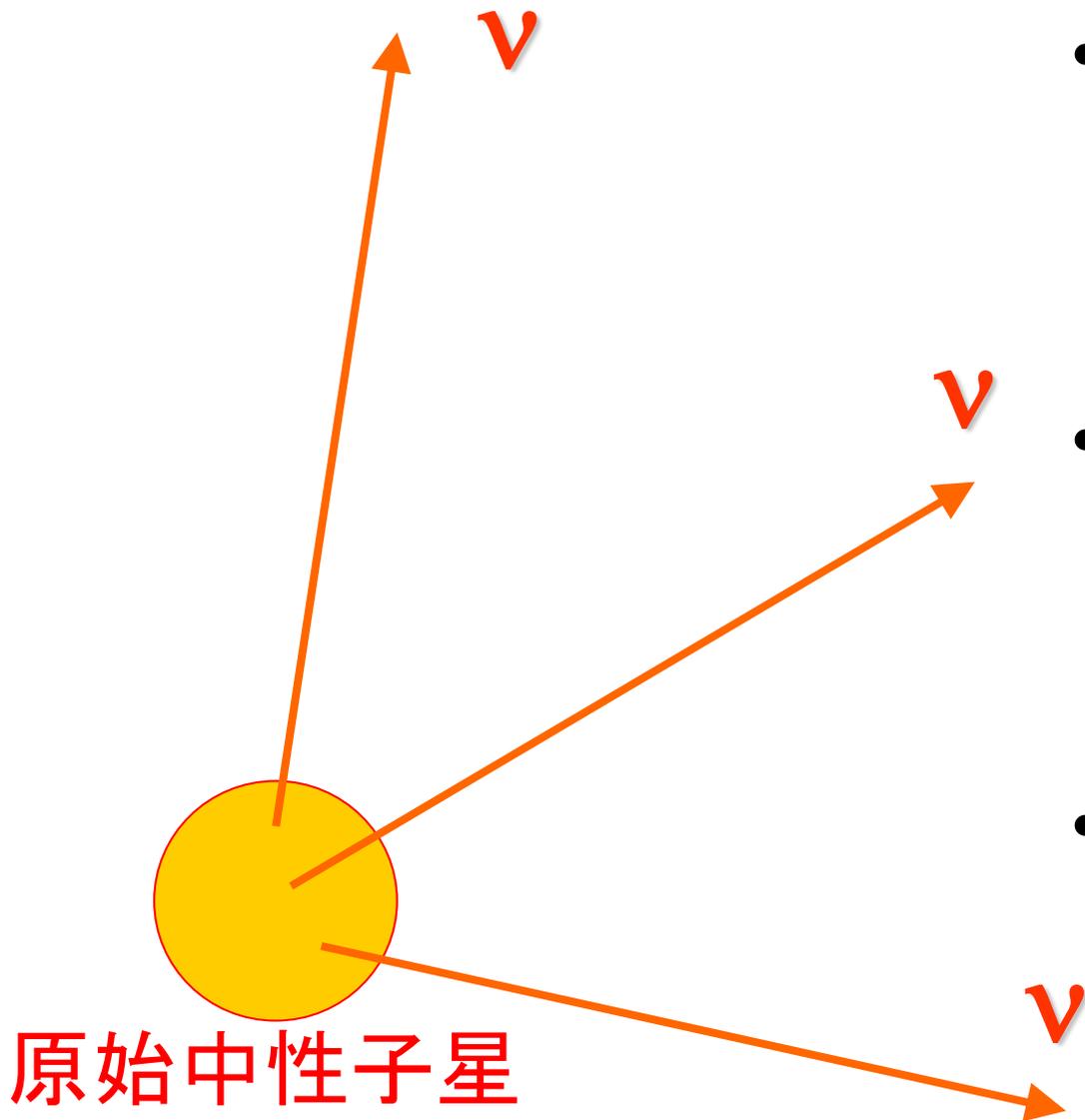


② 降着フェーズ



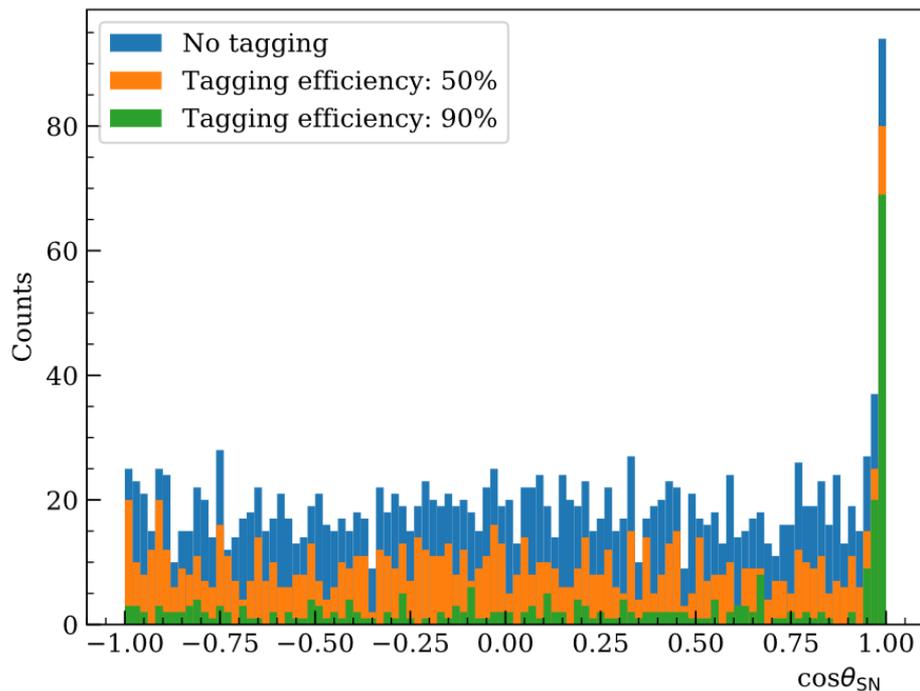
- 降着物質が解放する重力エネルギーにより、原始中性子星が加熱される。
- 熱的なプロセスにより、すべてのフレージャーのニュートリノが放射される。

③ 冷却フェーズ



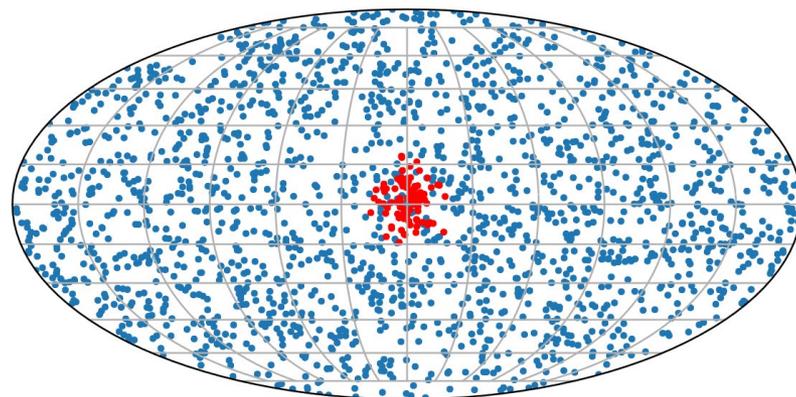
- 衝撃波が復活して外側に伝播すると、物質降着がやむ。
- それにより、原始中性子星の加熱も止まる。
- ニュートリノ放出量や平均エネルギーが下がる。

ニュートリノで探る超新星の方向



Mori et al., PTEP **2021** (2021),
arXiv:2010.16254

・ 電子散乱 (Red dot)
・ 逆ベータ崩壊 (Blue dot)

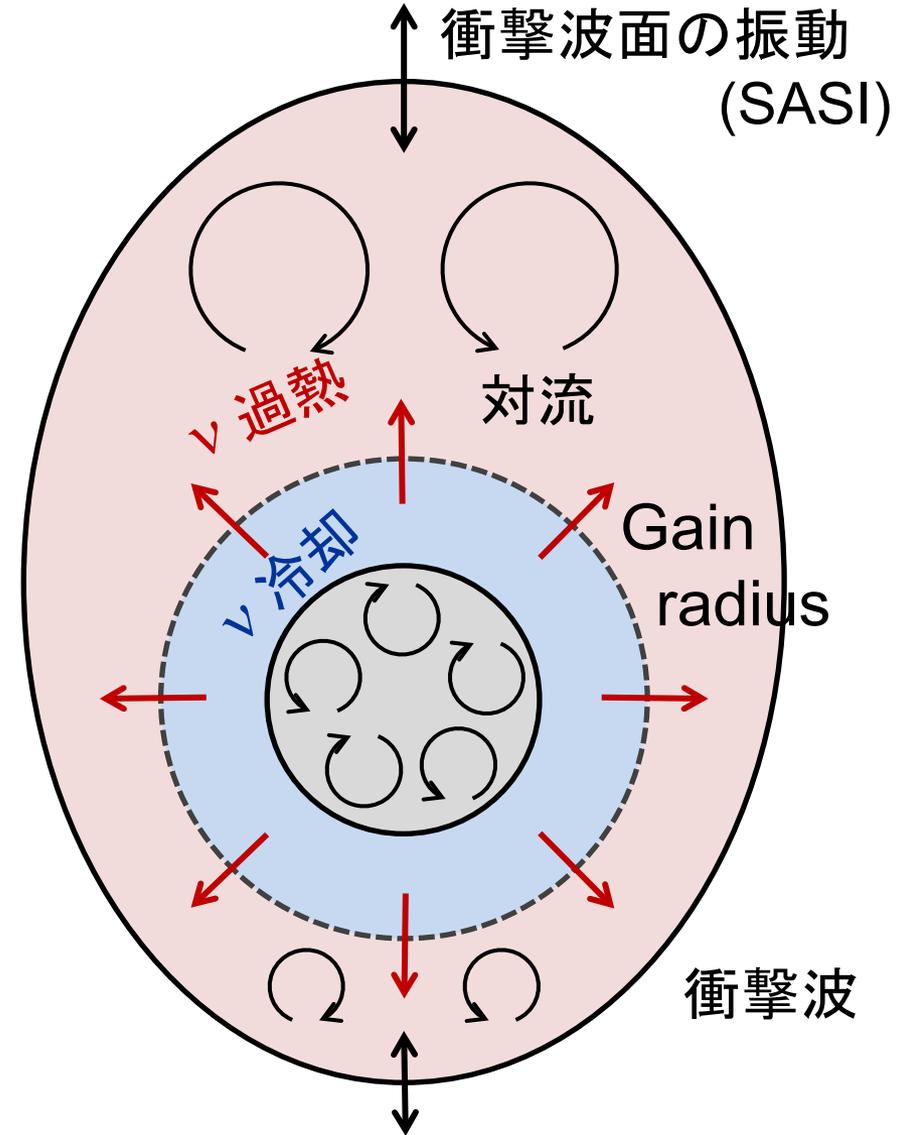


- ・ 電子散乱事象が前方に集中するため、超新星の方向を探ることができる。
- SK-Gd により方向精度が向上。



爆発メカニズム

- 衝撃波のエネルギーは鉄などの原子核の分解で消費される。
- 中心部から飛んでくるニュートリノにより衝撃波面が過熱される。
- 対流や衝撃波面の振動 (SASI) が衝撃波の伝播・爆発を後押しすると推定される。

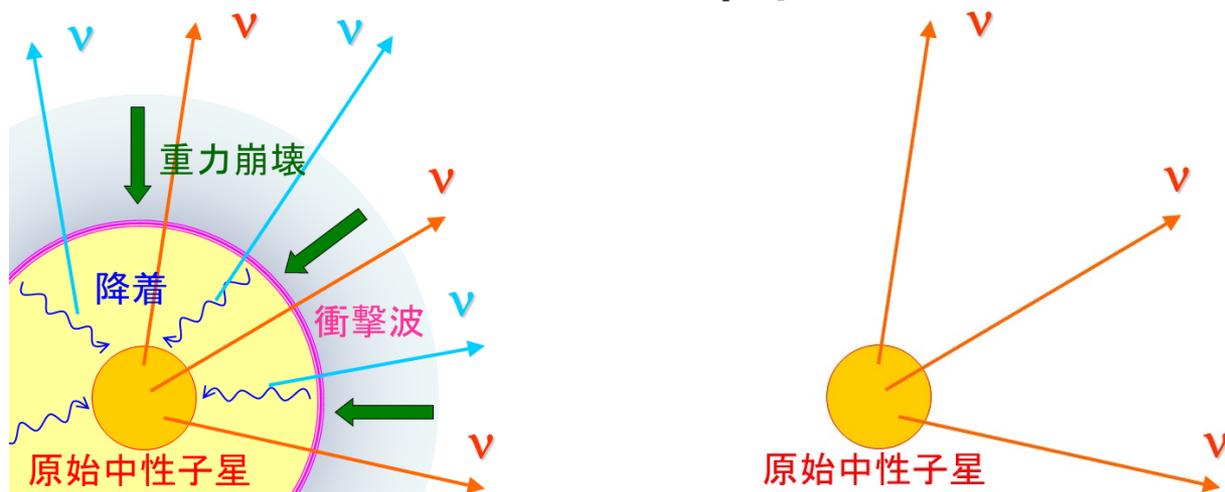
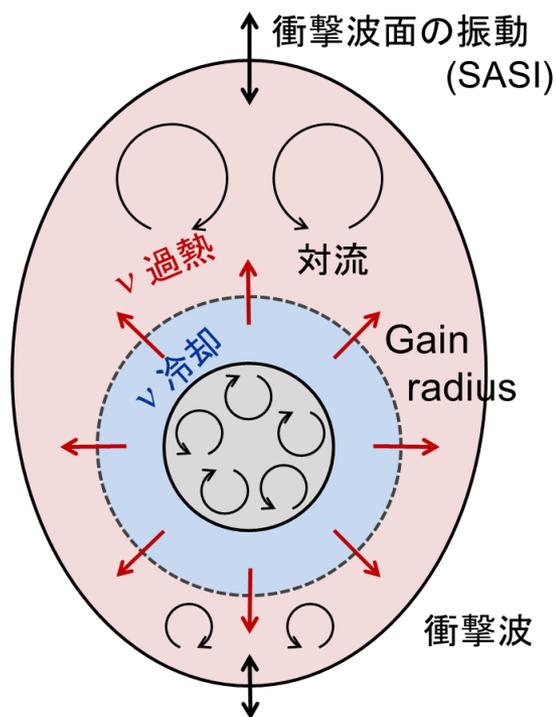
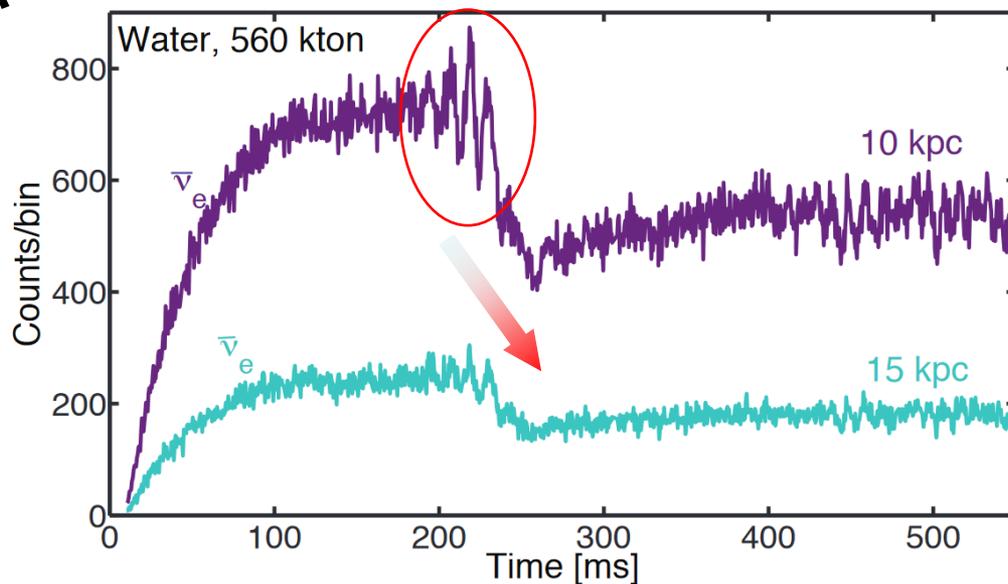


Adapted from B. Müller

ニュートリノで見る爆発の様子

- SASI による変動や
衝撃波復活による
減衰が見える。

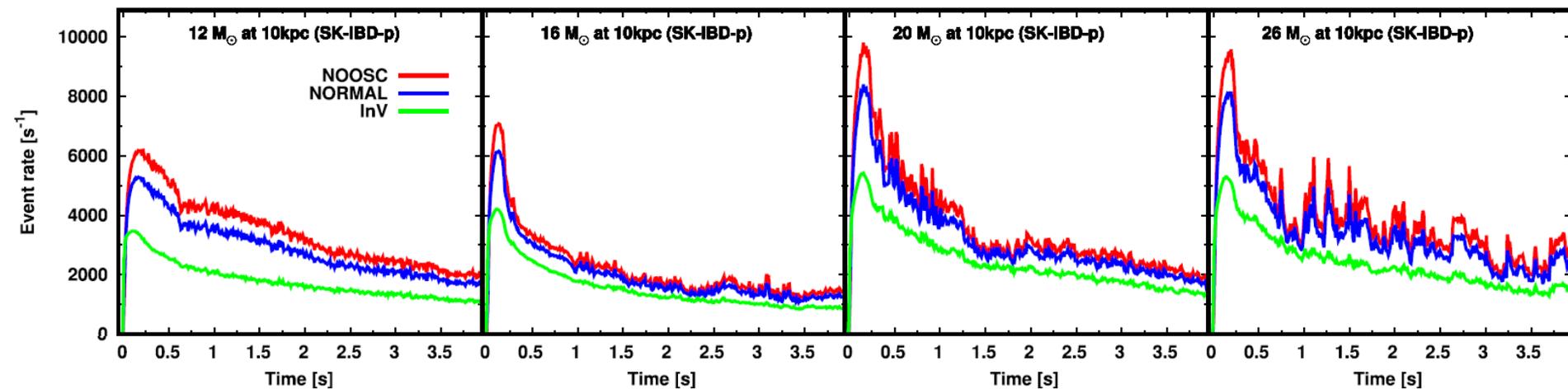
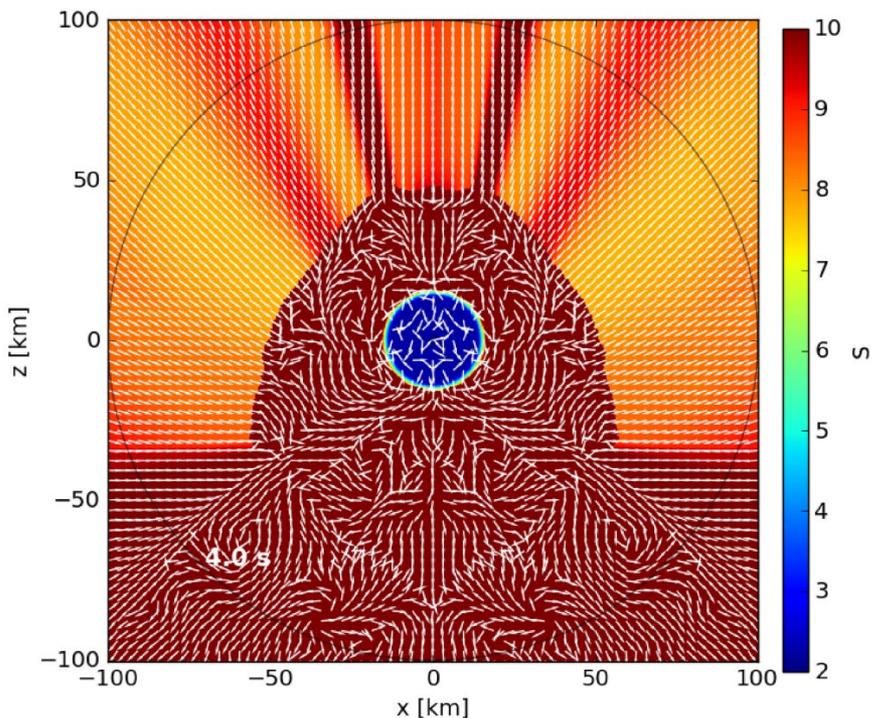
Mirizzi et al., arXiv:1508.00785



Fallback 起源の時間変動

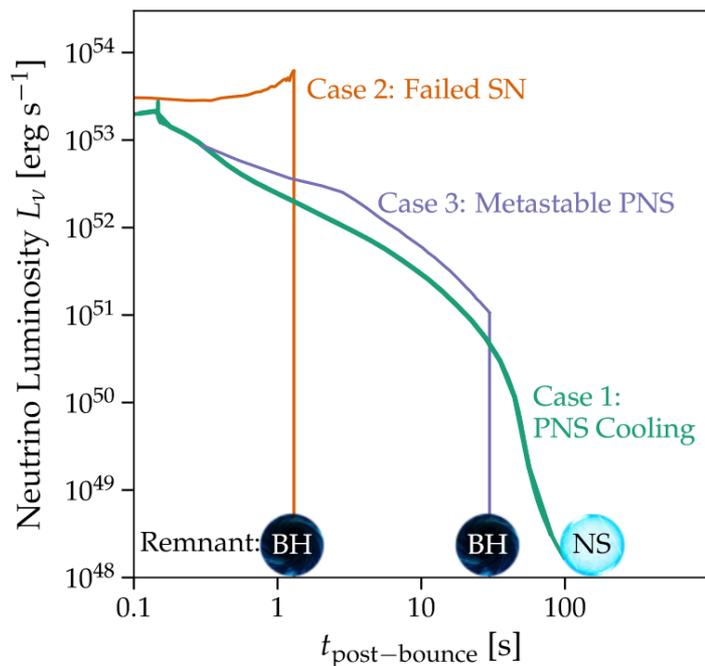
Nagakura et al., MNRAS 506 (2021),
arXiv:2102.11283

- 爆発後4秒まで、衝撃波後方の物質が不均一に原始中性子星表面に、降り積もることによる変動が確認される。



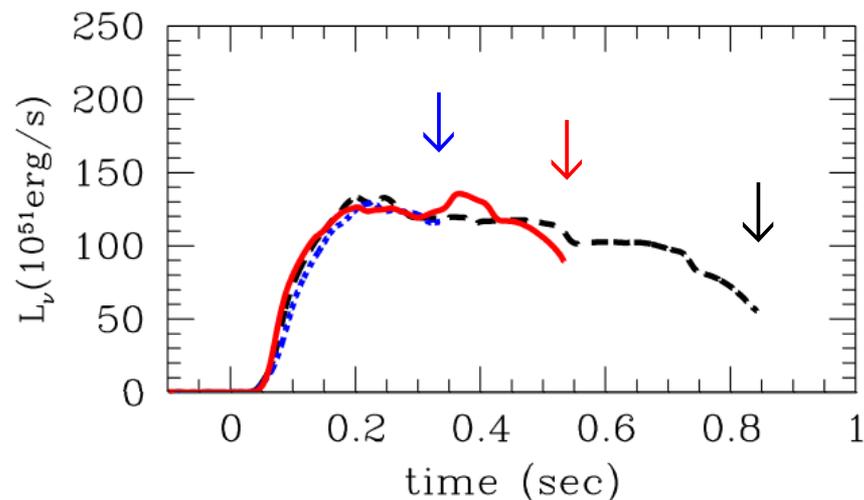
ブラックホールの形成

- 途中でブラックホールが形成されると、ニュートリノの放出が止まる。



Li et al., arXiv:2008.04340

Nakazato et al., PASJ 73 (2021),
arXiv:2103.14386



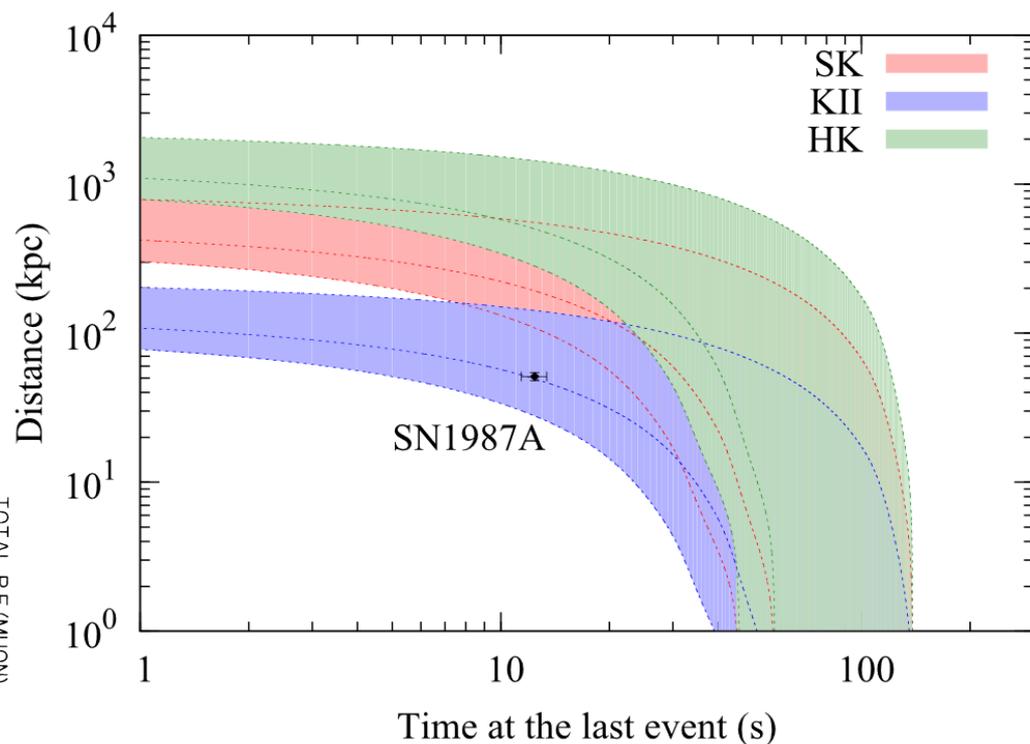
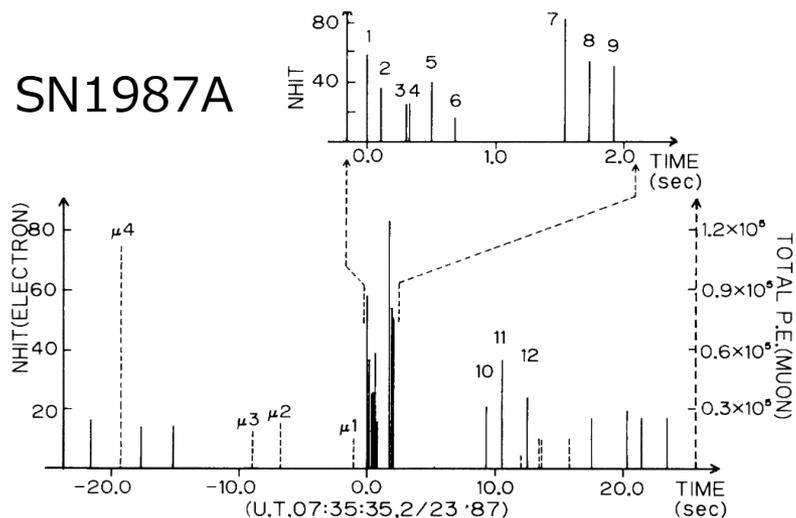
- 状態方程式によって決まる最大質量が異なると、どこでブラックホール形成が起こるか変わってくる。

ニュートリノ検出の継続時間

- 中性子星の質量や半径(状態方程式)に依る。
→ 後期では爆発直後の擾乱の影響が少なく中性子星の性質を探れる。

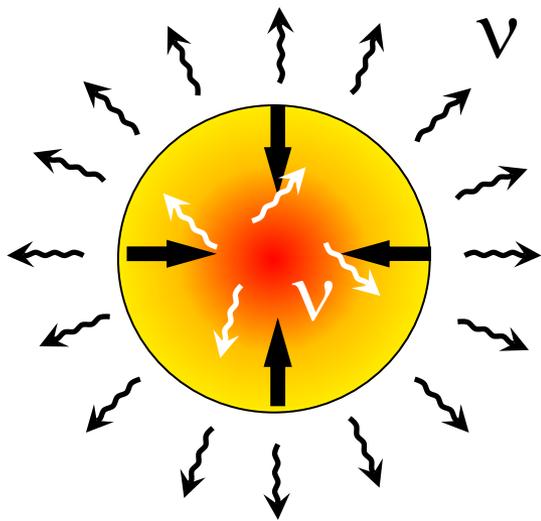
Suwa et al., ApJ **881** (2019),
arXiv:1904.09996

- SK の Background を考慮した解析は、
中西講演 (14aW1-1)

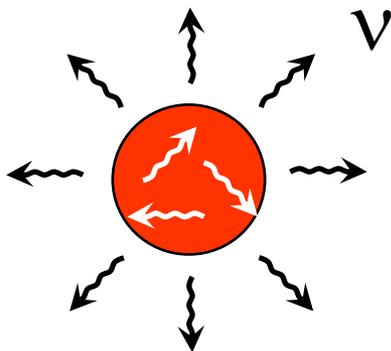


原始中性子星冷却の概略図

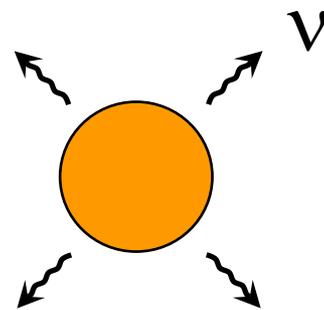
③-1 contraction



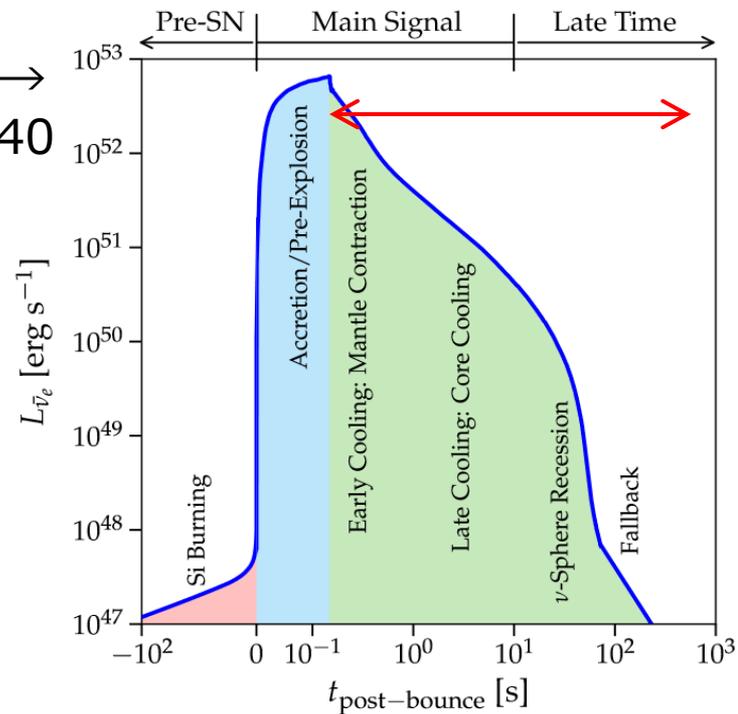
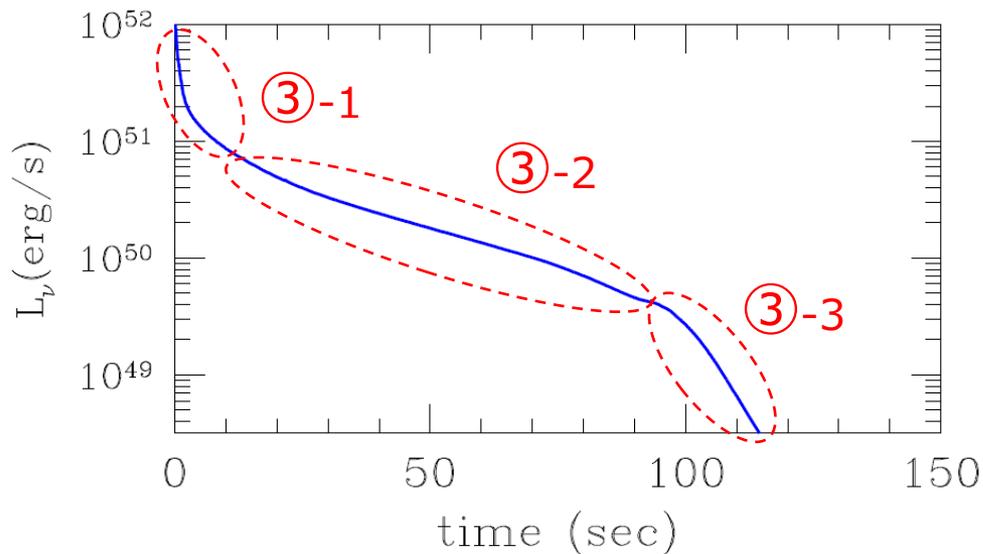
③-2 shallow decay



③-3 volume cooling



Li et al.
arXiv:2008.04340



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)

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

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)

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

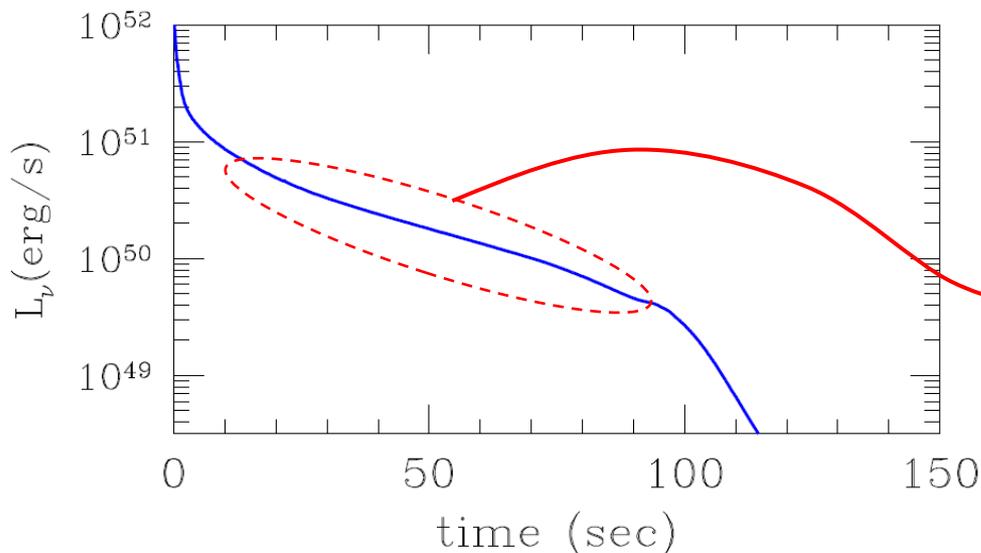
✓ c.f. ニュートン力学で一様密度の場合: $|E_g| = \frac{3Gm^2}{5r}$

- よって、

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

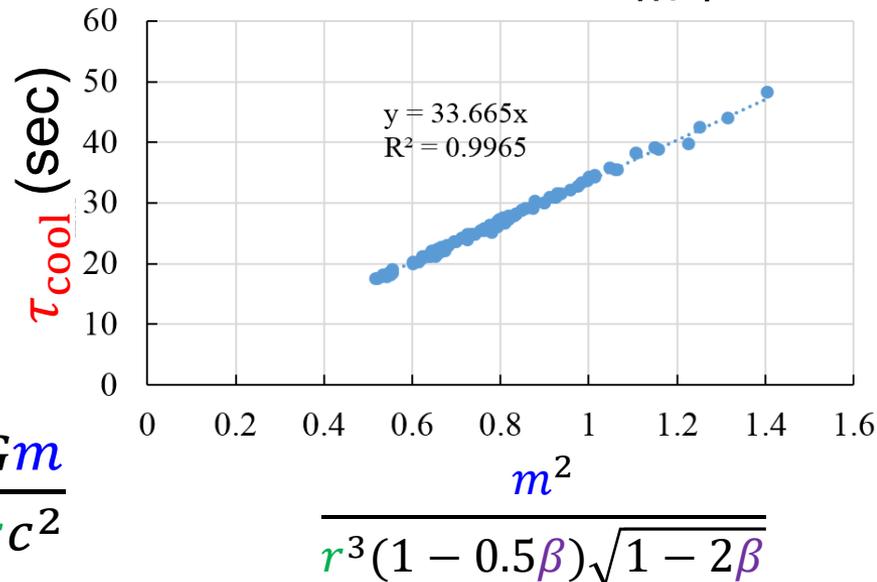
ニュートリノの減光時間スケール

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



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

プロットは質量・半径の異なる
シミュレーション結果



- 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。

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

$$\frac{m^2}{r^3(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}$$

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

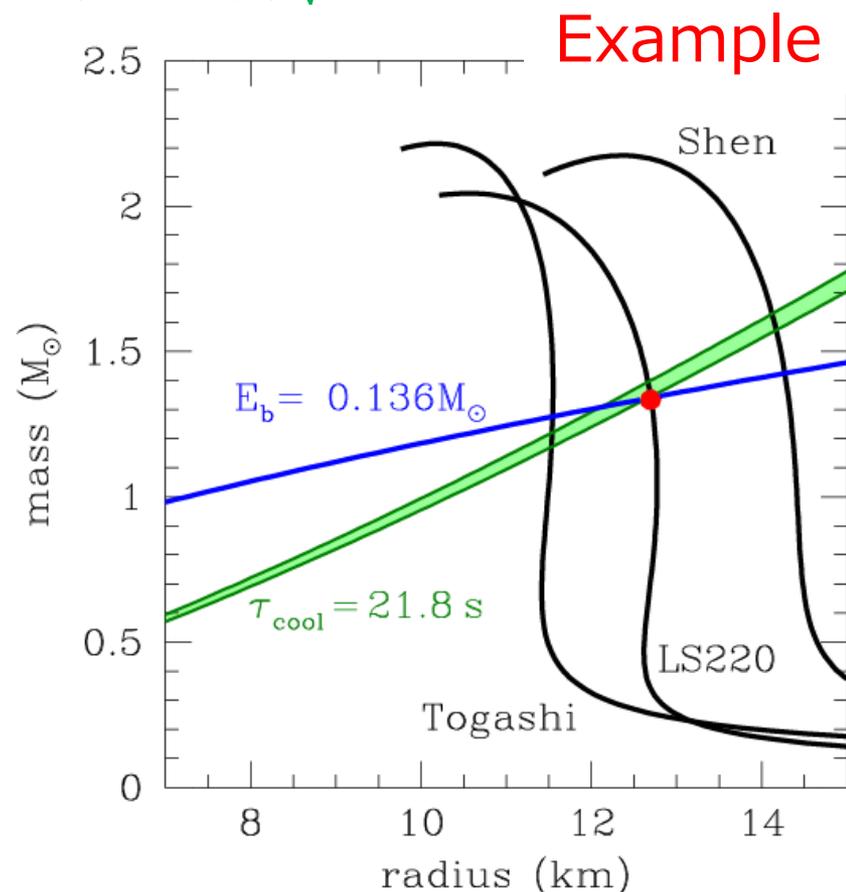
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}$$

と総放出エネルギー

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

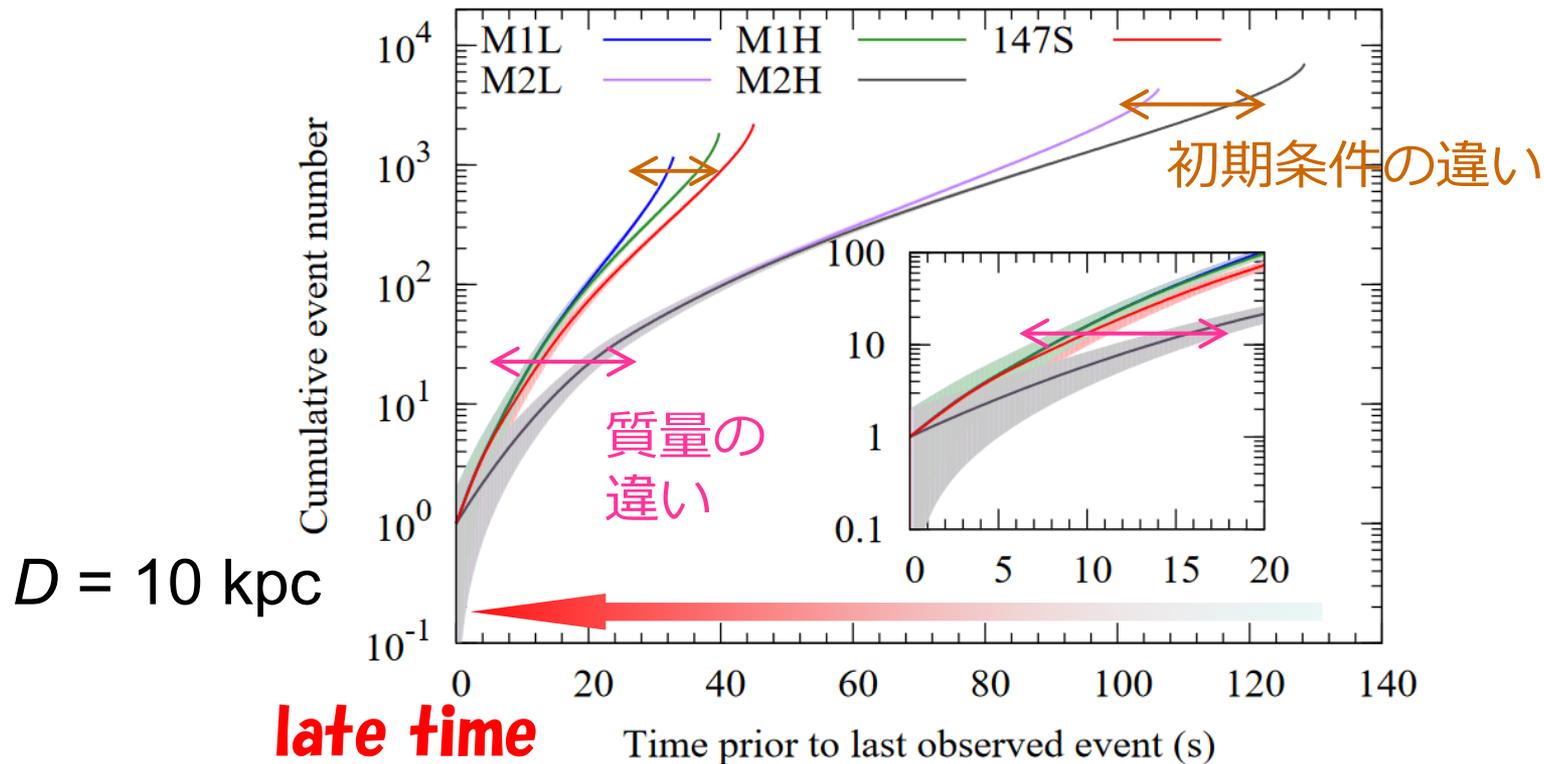
の交点として求まる。

- 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。



時間逆向き累積イベント数

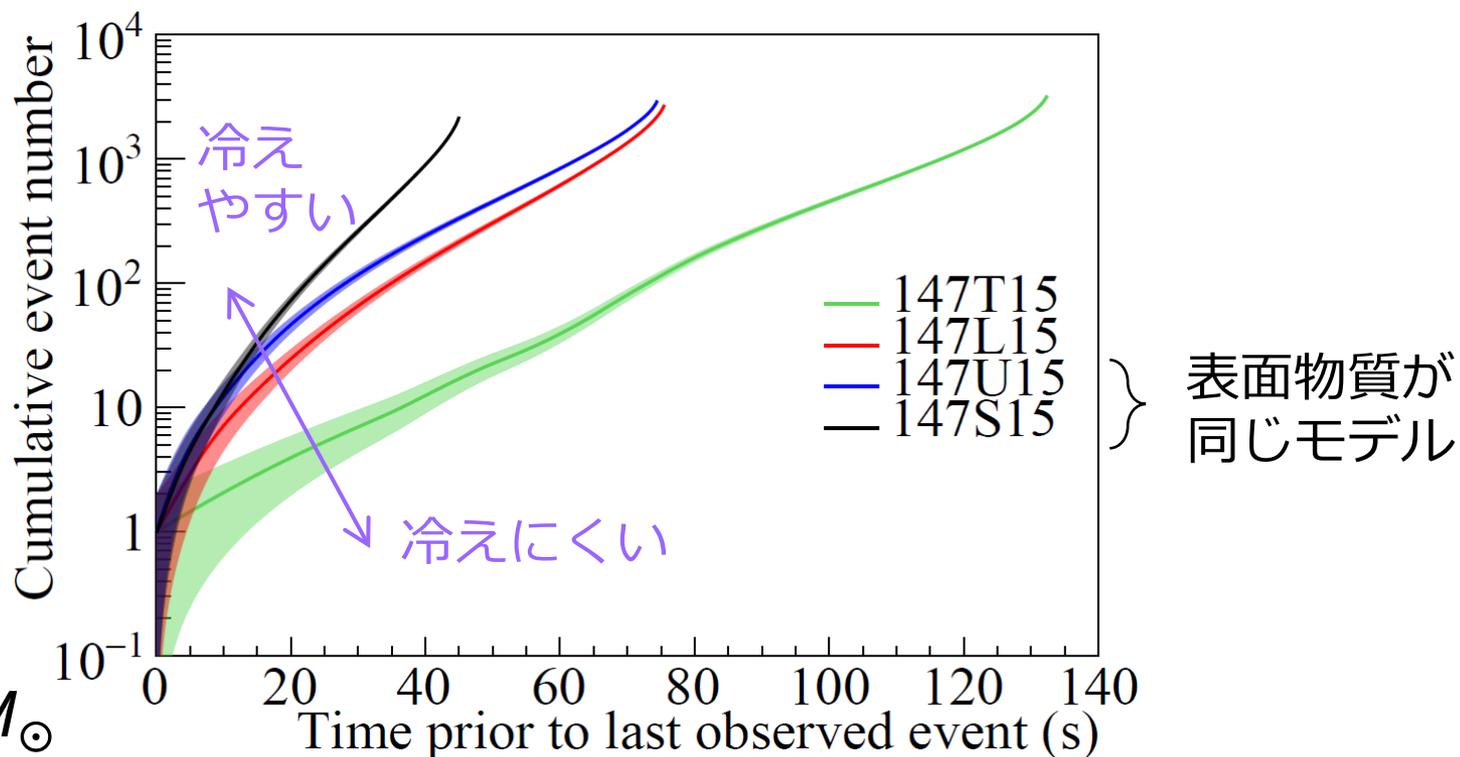
Suwa et al., ApJ 881 (2019), arXiv:1904.09996



- 「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すると、形成される中性子星の素性を見やすい。

状態方程式の依存性

Nakazato et al., arXiv:2108.03009



$D = 10 \text{ kpc}$

$M_{\text{NS}} \sim 1.33M_{\odot}$

- 星表面の物理が「最後の1イベント」付近で重要。
 - 表面温度が高い(緑:Togashi EOS)と、余熱でニュートリノを放出する時間が長くなる。

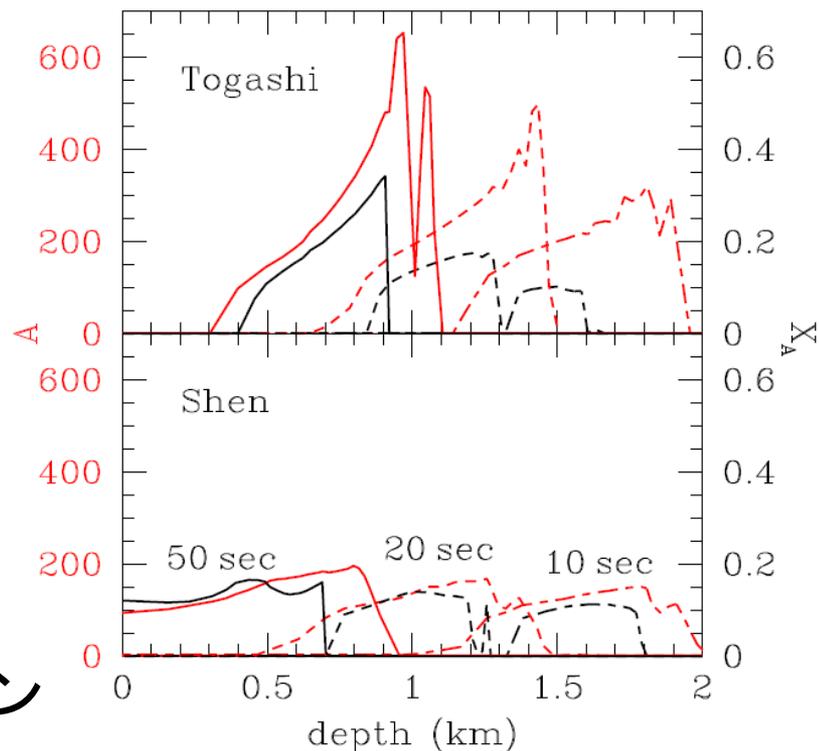
表面付近の原子核が温度を決める

Nakazato et al., PRC 97 (2018), arXiv:1710.10441

- Togashi EOS モデルでは、原始中性子星の表面付近に質量数の大きい原子核が多く存在。
→ 原子核とニュートリノのコヒーレント散乱のため、星表面が冷えにくくなる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \propto A^2 \\ 1 / \lambda \propto X_A \cdot A \end{array} \right.$$

A ; 原子核の質量数
 X_A ; 原子核フラクシオン



後期放射の解析解

Suwa et al., PTEP **2021** (2021), arXiv:2008.07070

イベントレート

質量

半径

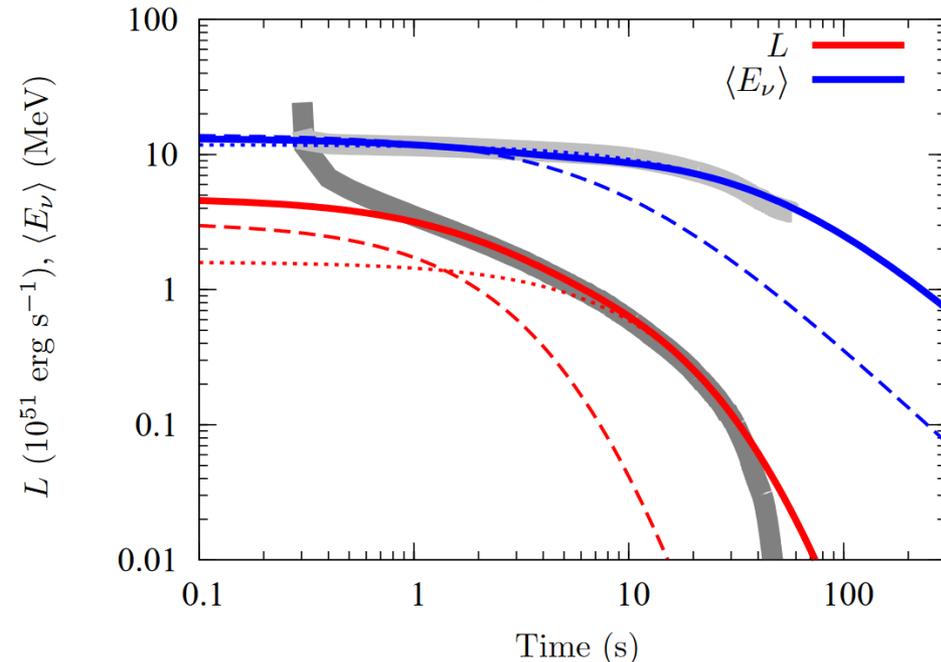
表面の物理

$$\mathcal{R} \approx 720 \text{ s}^{-1} \left(\frac{M_{\text{det}}}{32.5 \text{ kton}} \right) \left(\frac{D}{10 \text{ kpc}} \right)^{-2} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{15/2} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-8} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^5 \left(\frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-15/2}$$

$$t_0 = 210 \text{ s} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{6/5} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6/5} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^{4/5} \left(\frac{E_{\text{tot}}}{10^{52} \text{ erg}} \right)^{-1/5}$$

解析解と数値計算
結果の比較

- 単純化したモデルに基づく解析解を手がかりに、観測データから原始中性子星の素性を暴く道すじを確立したい！

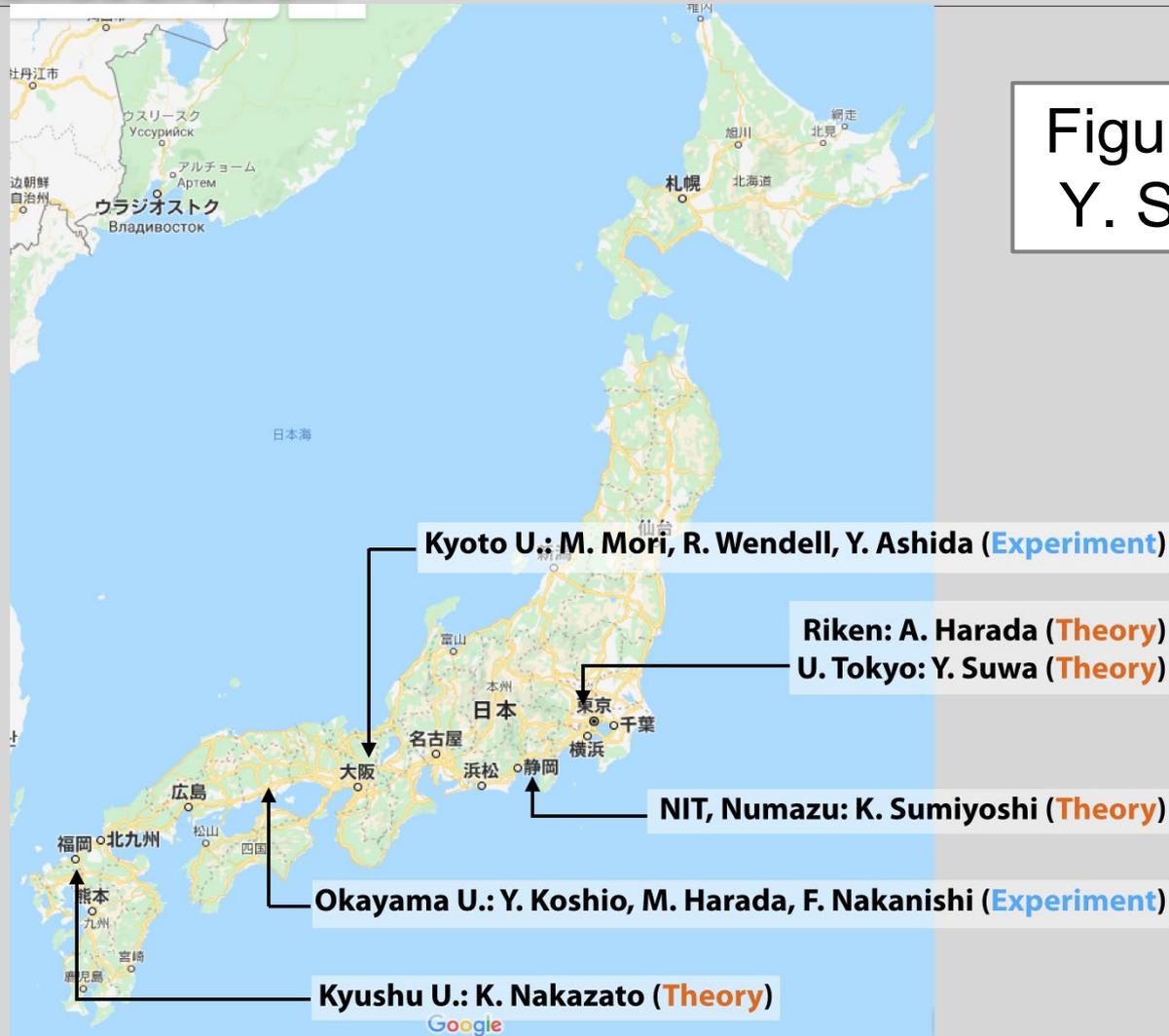


Advertisement

nuLC collaboration

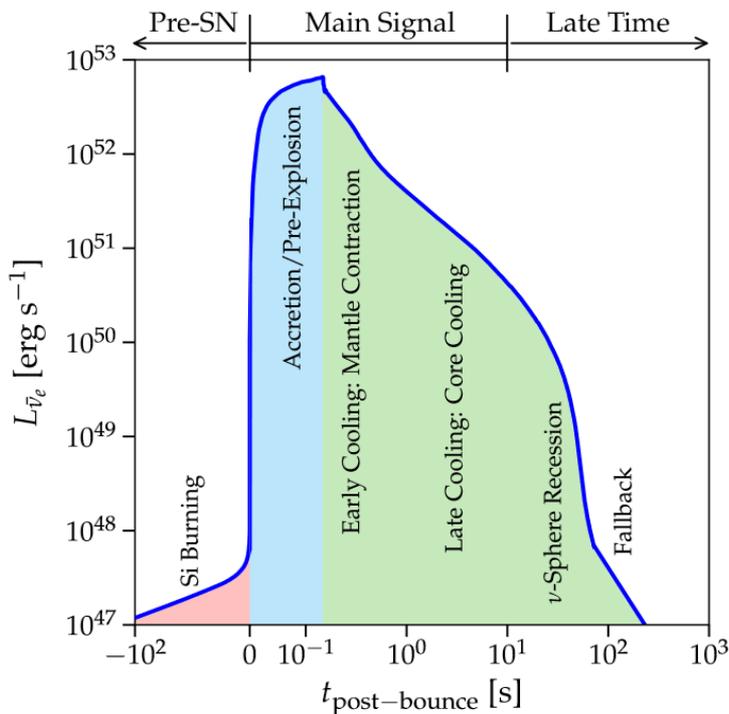
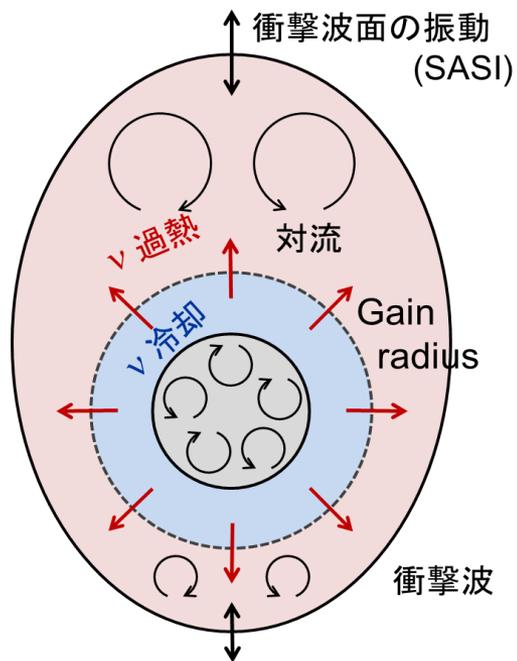
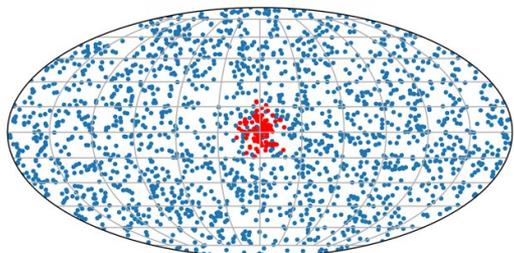
"nuLC"
=neutrino Light Curve

Figure by
Y. Suwa



まとめ

- ・ 電子散乱
- ・ 逆ベータ崩壊



原始中性子星



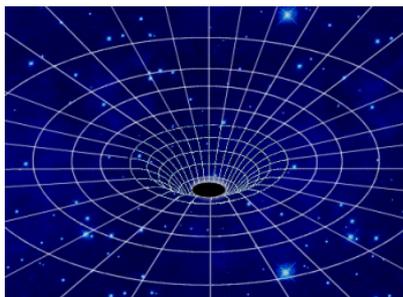
質量



半径



表面温度



ブラックホール形成