

ニュートリノで見る 生まれたての中性子星

中里 健一郎

(九州大学 基幹教育院)

2022年1月7日 第8回超新星ニュートリノ研究会

Core collapse supernovae

- 重力崩壊型超新星爆発では、自然界における4つの基本的な相互作用が顔をだす。
 - 重力相互作用
 - ✓ 一般相対性理論
 - 電磁相互作用
 - ✓ 磁場・プラズマ流体の力学
 - 弱い相互作用
 - ✓ ニュートリノの生成・反応
 - 強い相互作用
 - ✓ 核物質状態方程式

物理のオールスター戦





Neutrinos as utility player

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

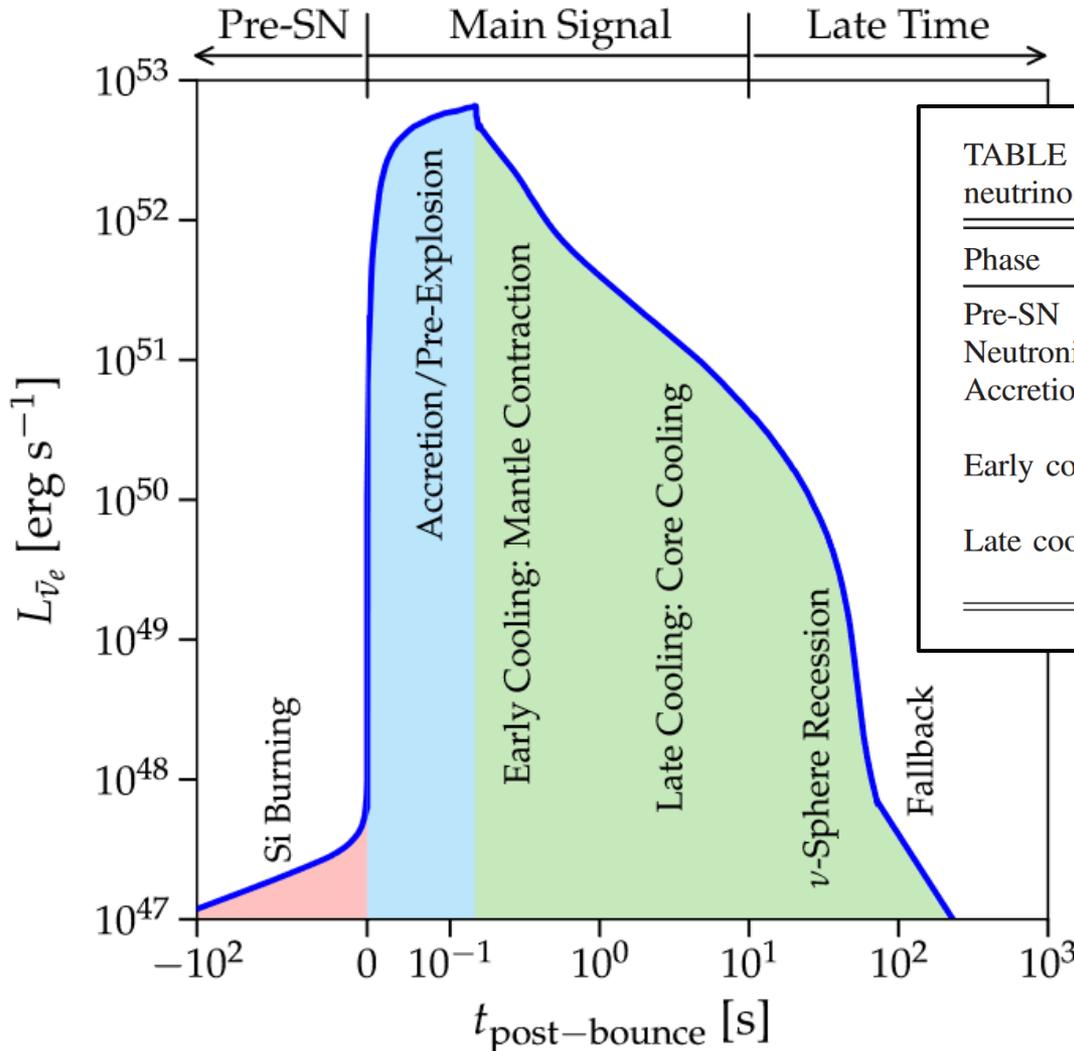


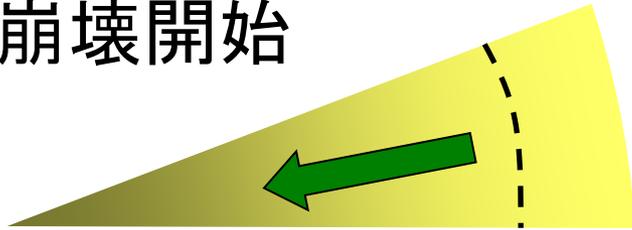
TABLE I. Key physics opportunities from detecting supernova neutrinos in different phases.

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

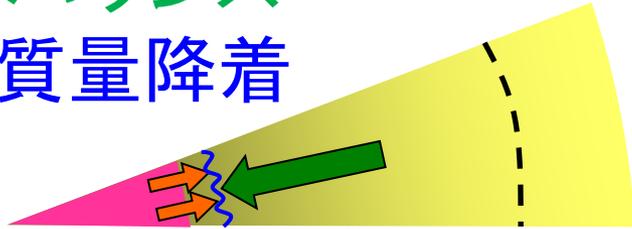
- 各 phase ごとにいろいろな物理が探れる。

各 phase と内部状態の対応

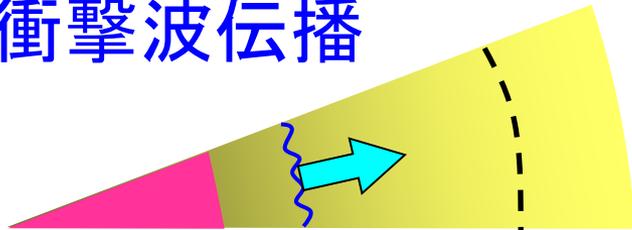
崩壊開始



バウンス
質量降着



衝撃波伝播

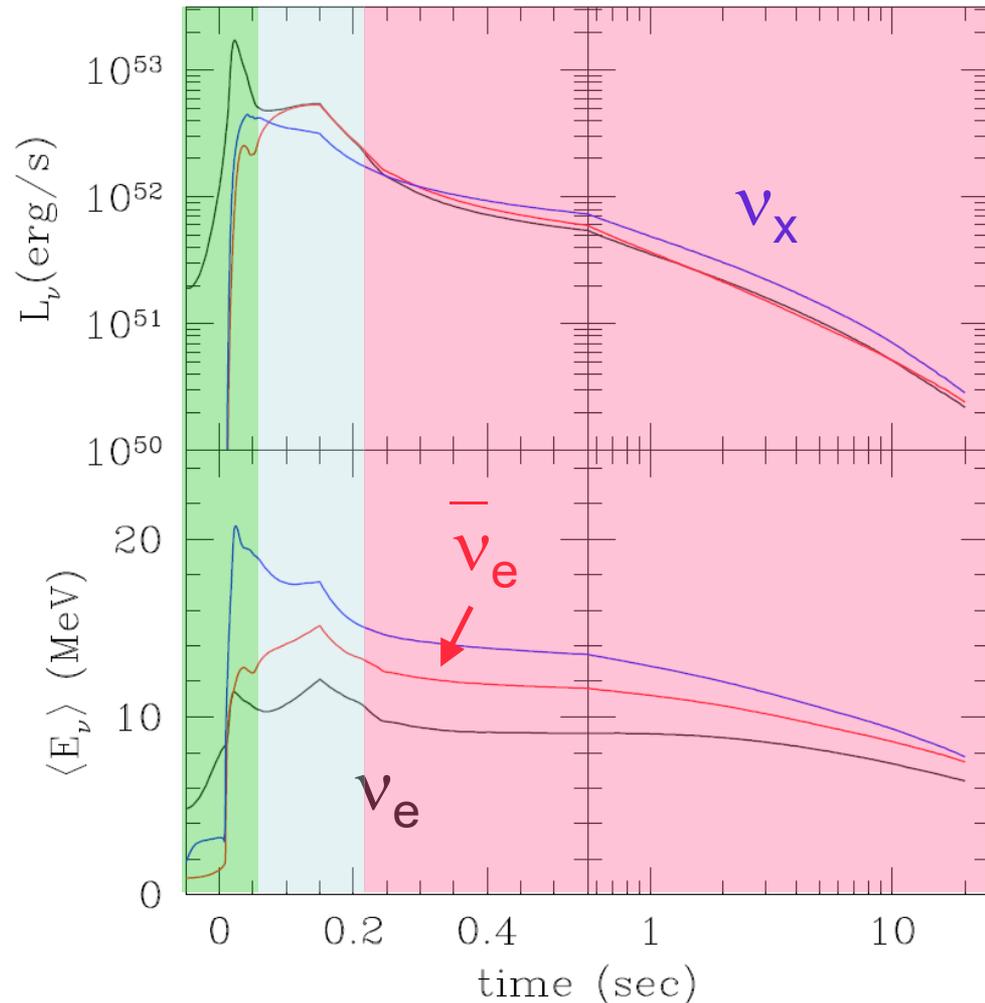


原始中性子星



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

① ② ③

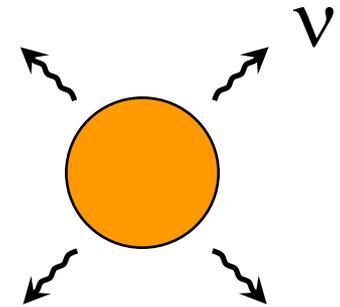
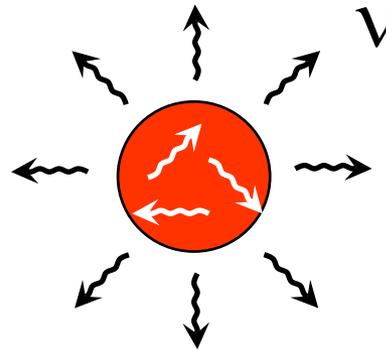
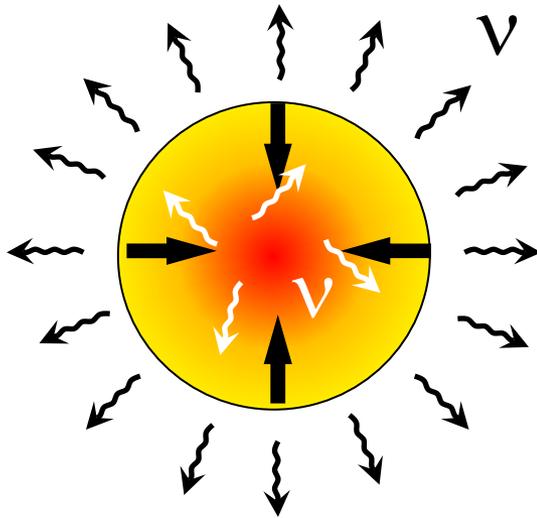


Main signal 以降の時間変化

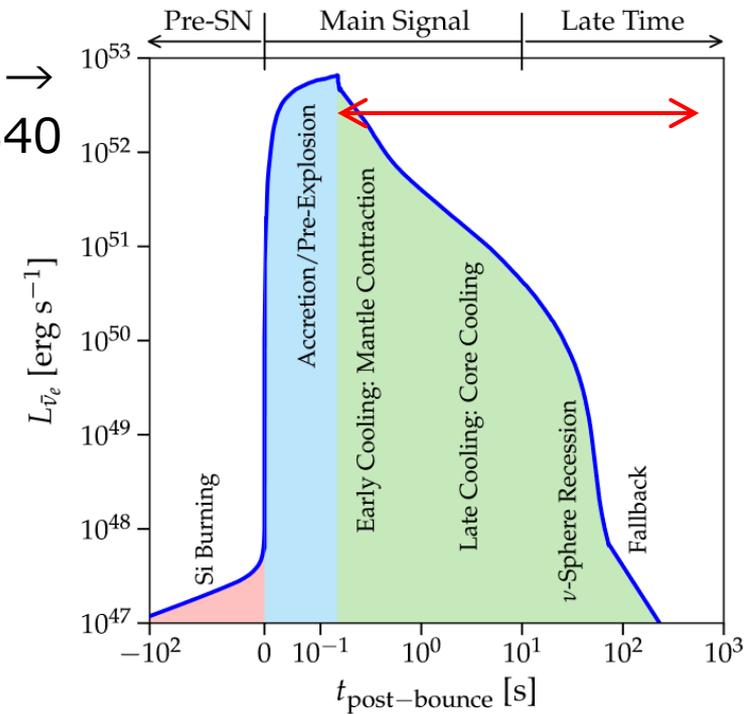
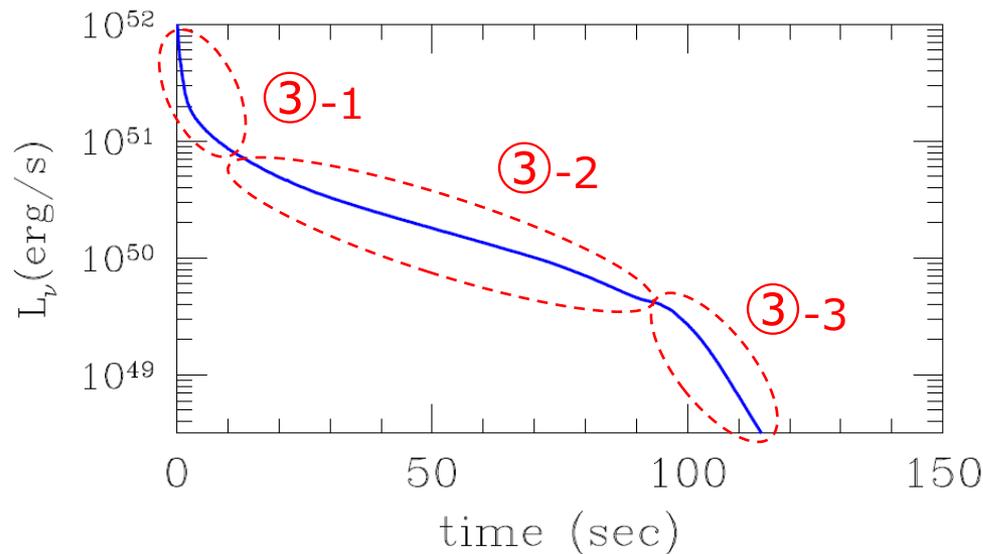
③-1 contraction

③-2 shallow decay

③-3 volume cooling



Li et al.
arXiv:2008.04340

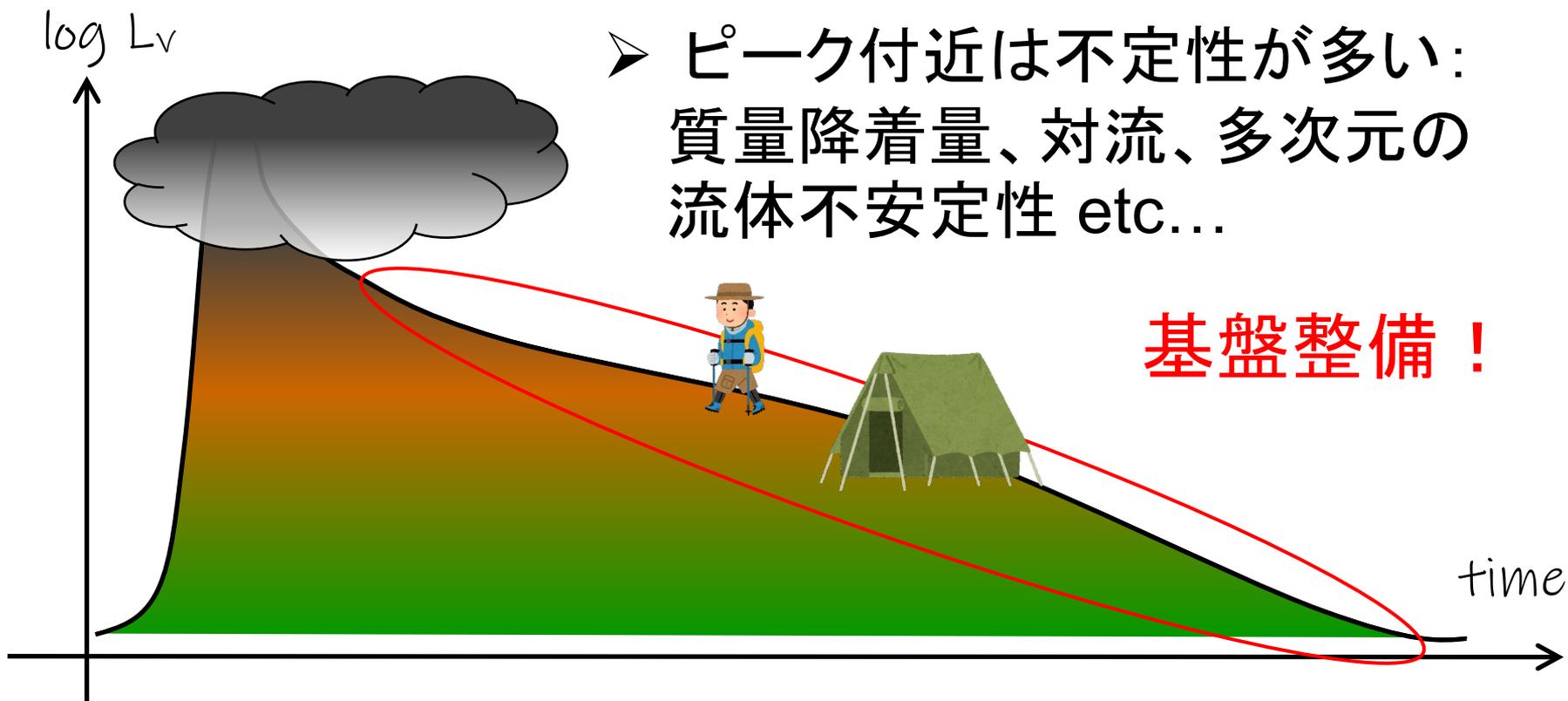


なぜ生まれたての中性子星か？

- 生まれたての中性子星からのニュートリノ放出は質量、半径、表面温度など少数の要素に依存。
- 全放出エネルギーの評価にも重要。

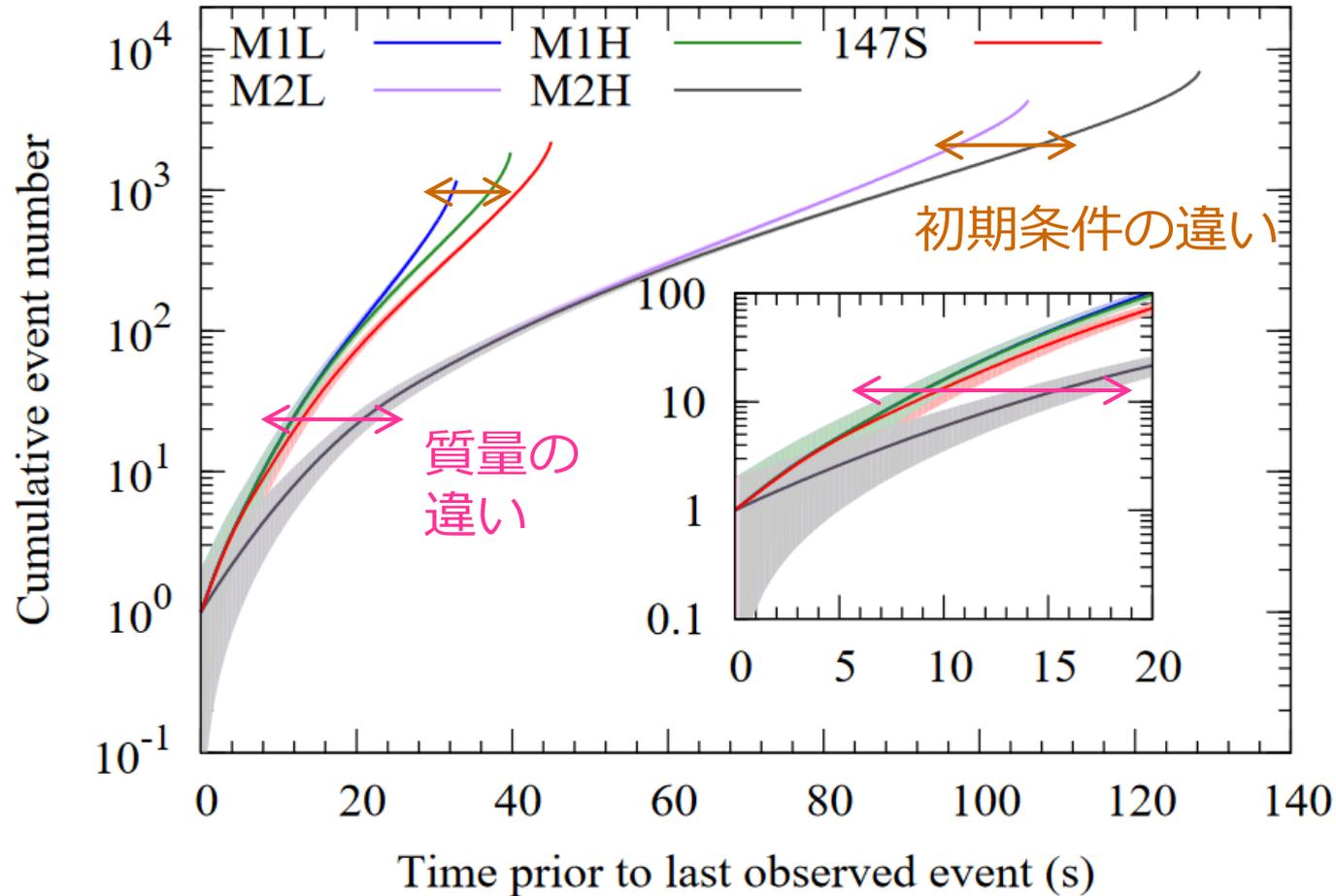
➤ ピーク付近は不定性が多い：
質量降着量、対流、多次元の
流体不安定性 etc...

基盤整備！



時間逆向き解析 (累積イベント数)

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

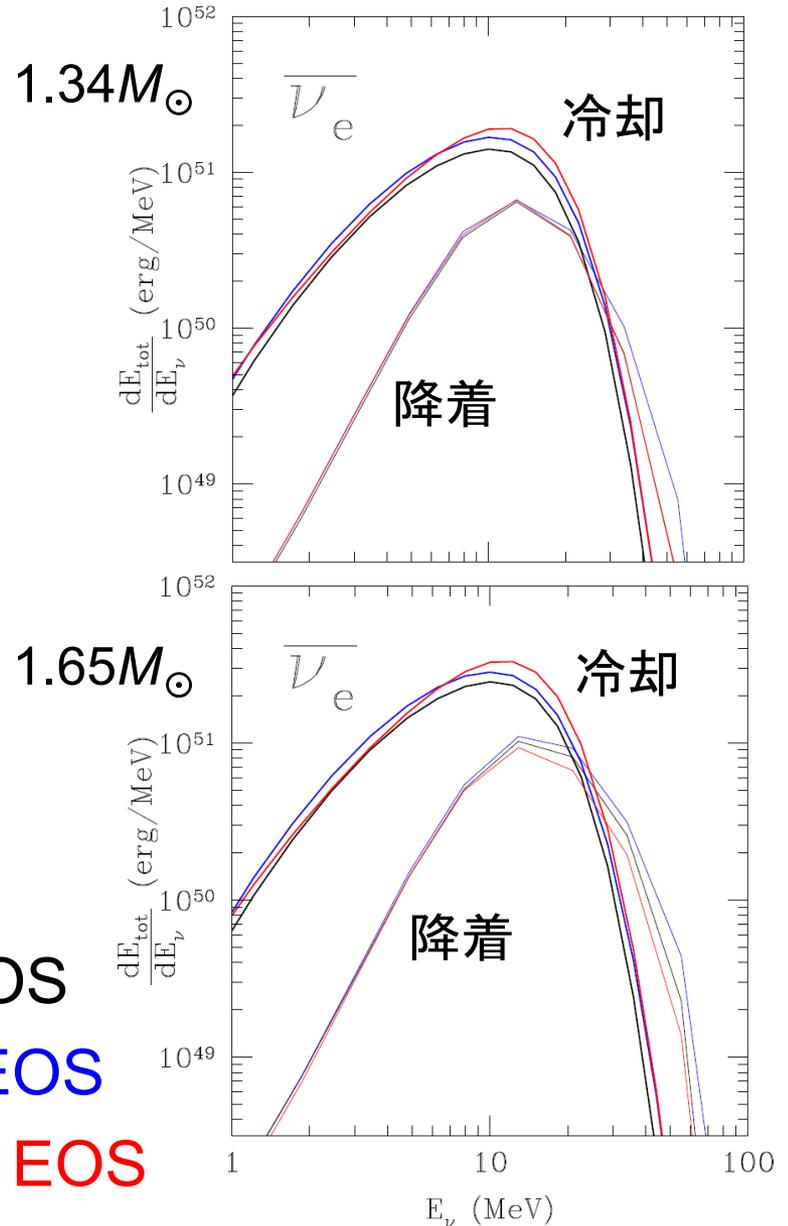


- 「最後の1イベント」の時間から遡って見ていく。

全放出量のスペクトル

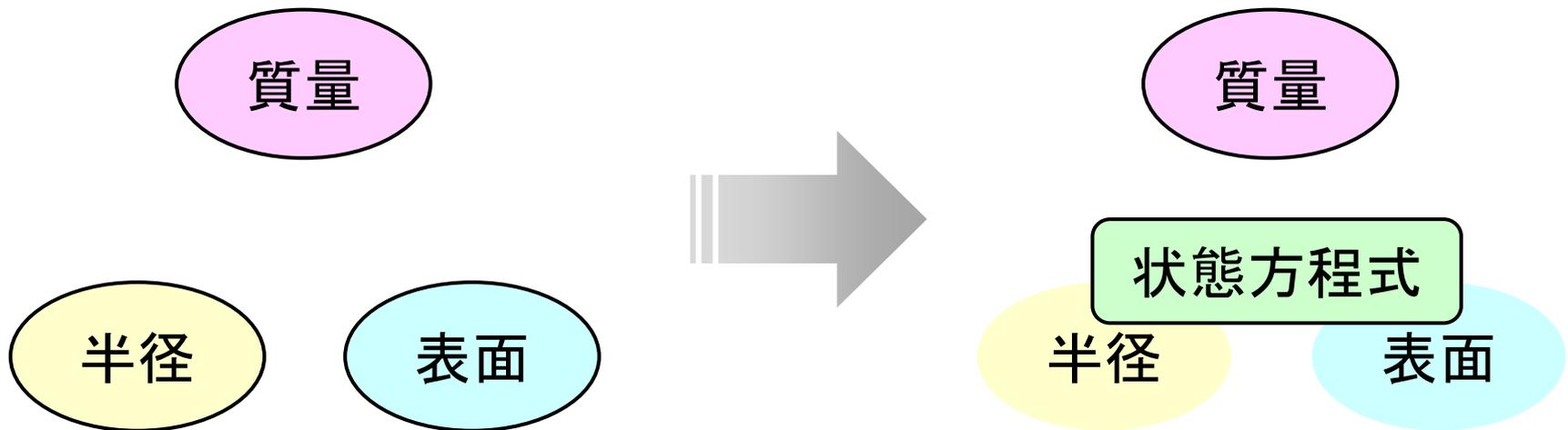
- 衝撃波復活時間(0.2–0.3秒)を手で与えて降着フェーズと冷却フェーズを評価(Nakazato et al. 2013)。
- 背景ニュートリノへの応用については芦田さんの講演を参照。

- Shen EOS
- LS220 EOS
- Togashi EOS



状態方程式の役割

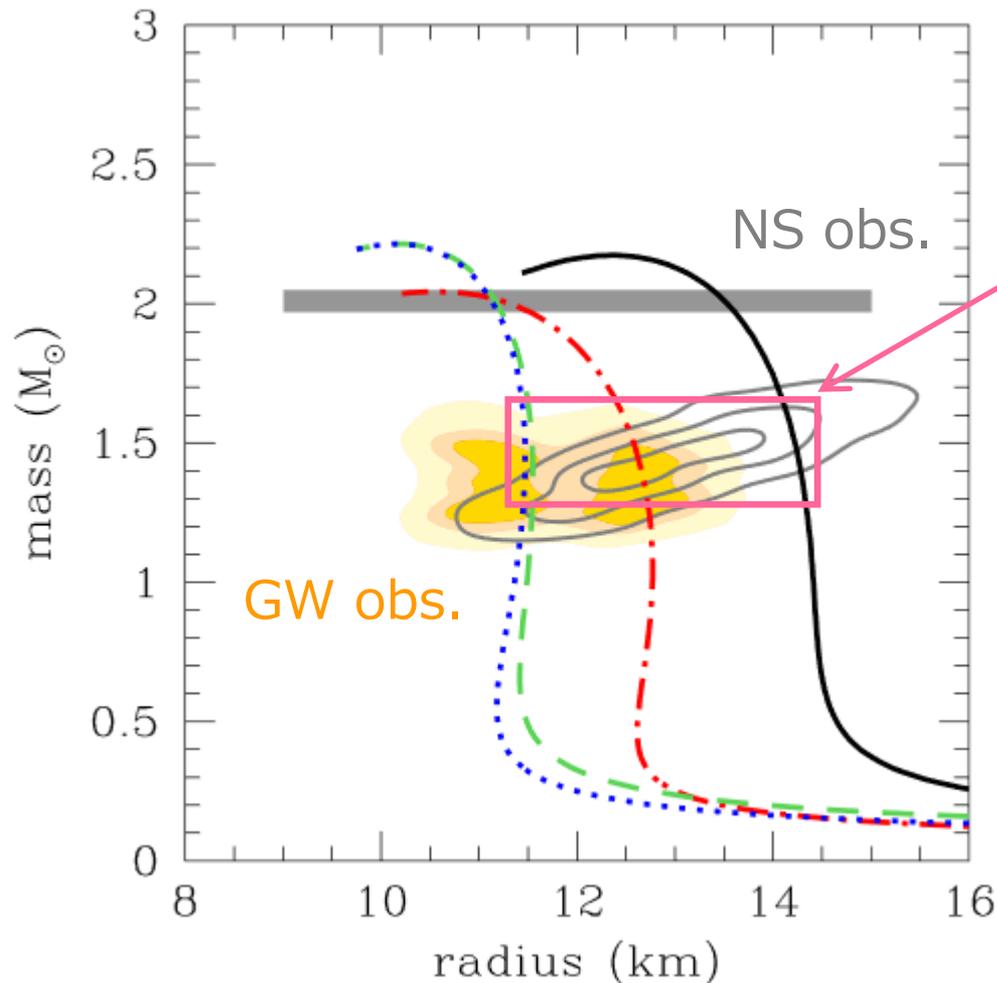
- 中性子星の質量が与えられれば、半径、表面の状態が決定できる。
→ さまざまな質量の原始中性子星の冷却計算をいくつかの状態方程式を用いて実行、ニュートリノ光度曲線の違いから物理を探る。



ニュートリノ放出の数値計算

Nakazato et al., arXiv:2108.03009, accepted by ApJ

- 拡散近似による原始中性子星の進化計算。



- 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

データ公開の予定

- 論文出版後に各時刻ごとのニュートリノスペクトルを公開予定。

Suwa et al.,
ApJ **881** (2019),
で扱ったデータ



April 2, 2021

Dataset Open Access

Supernova Neutrino Light Curves from Cooling of High/Low-Mass Proto-Neutron Stars

NAKAZATO, Ken'ichiro; the nuLC Collaboration

We present the model spectra of neutrinos emitted from proto-neutron star (PNS) cooling used in Suwa et al., *Astrophys. J.* **881** (2019) 139, arXiv:1904.09996 [astro-ph.HE]. So as to obtain the time evolution of neutrino spectra, PNS cooling simulations are performed from some initial conditions with different baryon masses and entropy profiles. The data names are as below:

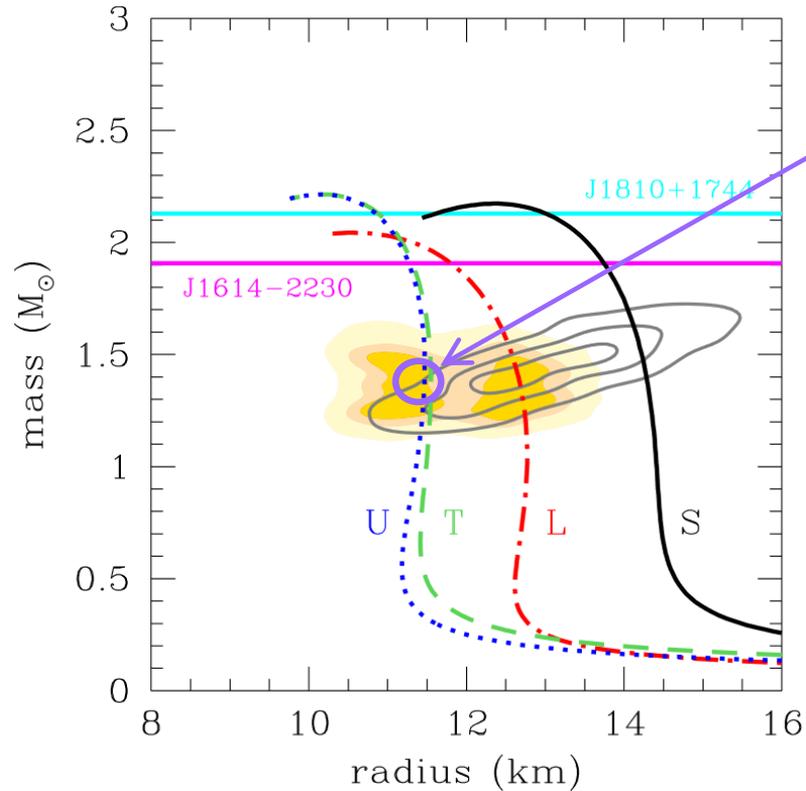
- spectobHmaxS.data: $M_b = 2.35M_\odot$ ($M_{\text{NS,g}} = 2.05M_\odot$), **High** initial entropy
- spectobHminS.data: $M_b = 1.29M_\odot$ ($M_{\text{NS,g}} = 1.20M_\odot$), **High** initial entropy
- spectobLmaxS.data: $M_b = 2.35M_\odot$ ($M_{\text{NS,g}} = 2.05M_\odot$), **Low** initial entropy
- spectobLminS.data: $M_b = 1.29M_\odot$ ($M_{\text{NS,g}} = 1.20M_\odot$), **Low** initial entropy

where M_b is the baryon mass of PNS and $M_{\text{NS,g}}$ is the gravitational mass of the remnant neutron star. The format of these data is the same with that of [Supernova Neutrino Database](#). See also [readme.pdf](#)



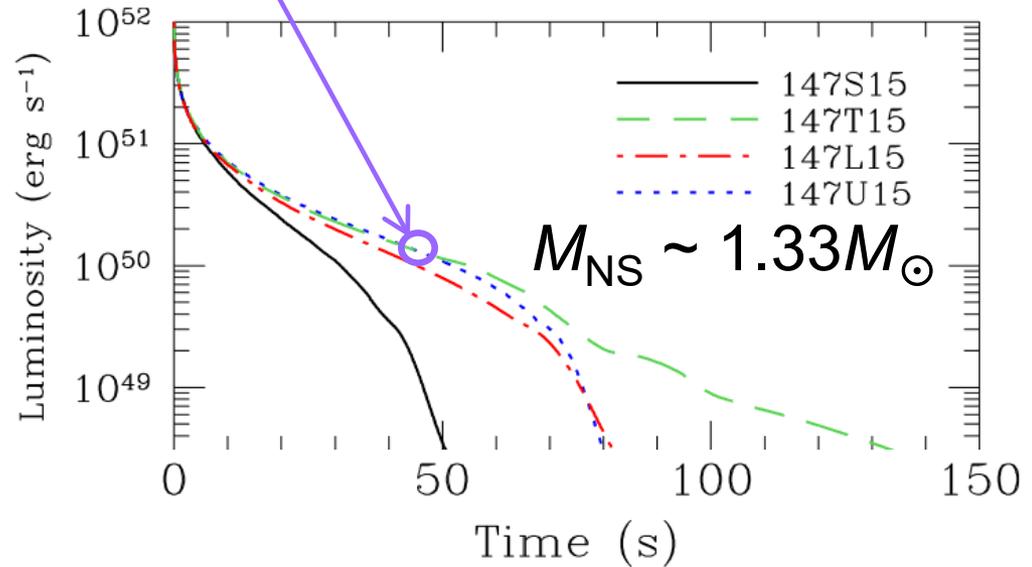
状態方程式と半径

Nakazato et al., arXiv:2108.03009, accepted by ApJ



高密度で同じ
モデル

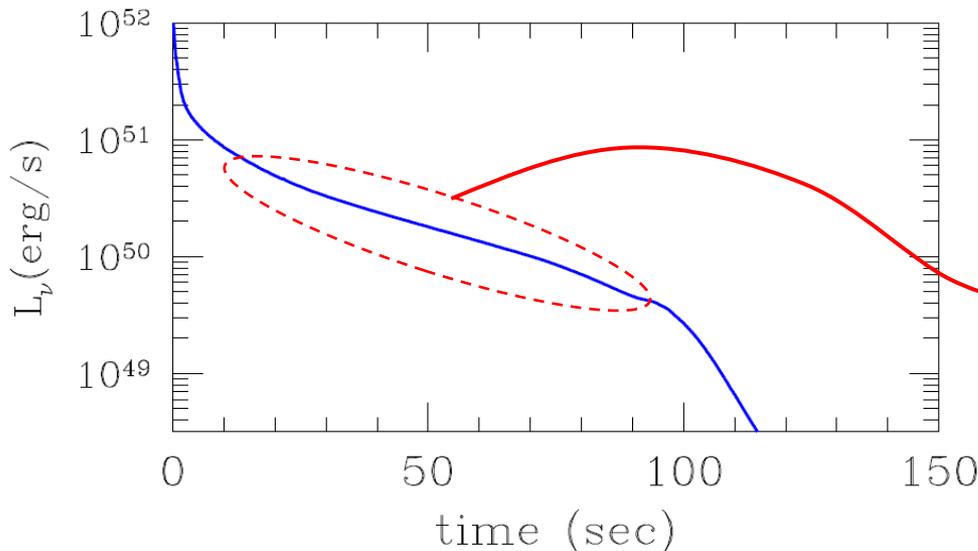
- Shen EOS
 - LS220 EOS
 - Togashi EOS
 - T+S EOS
- 高密度: Togashi
低密度: Shen



- shallow decay phase のニュートリノ光度曲線は高密度の状態方程式で特徴づけられる。

ニュートリノの減光時間スケール

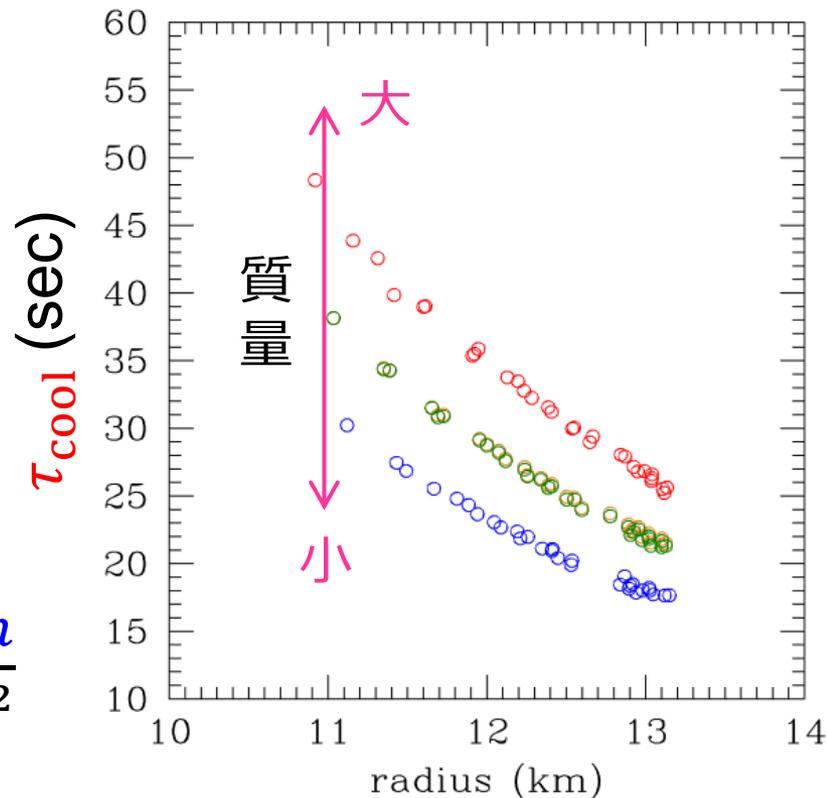
Nakazato & Suzuki, ApJ **891** (2020),
arXiv:2002.03300



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

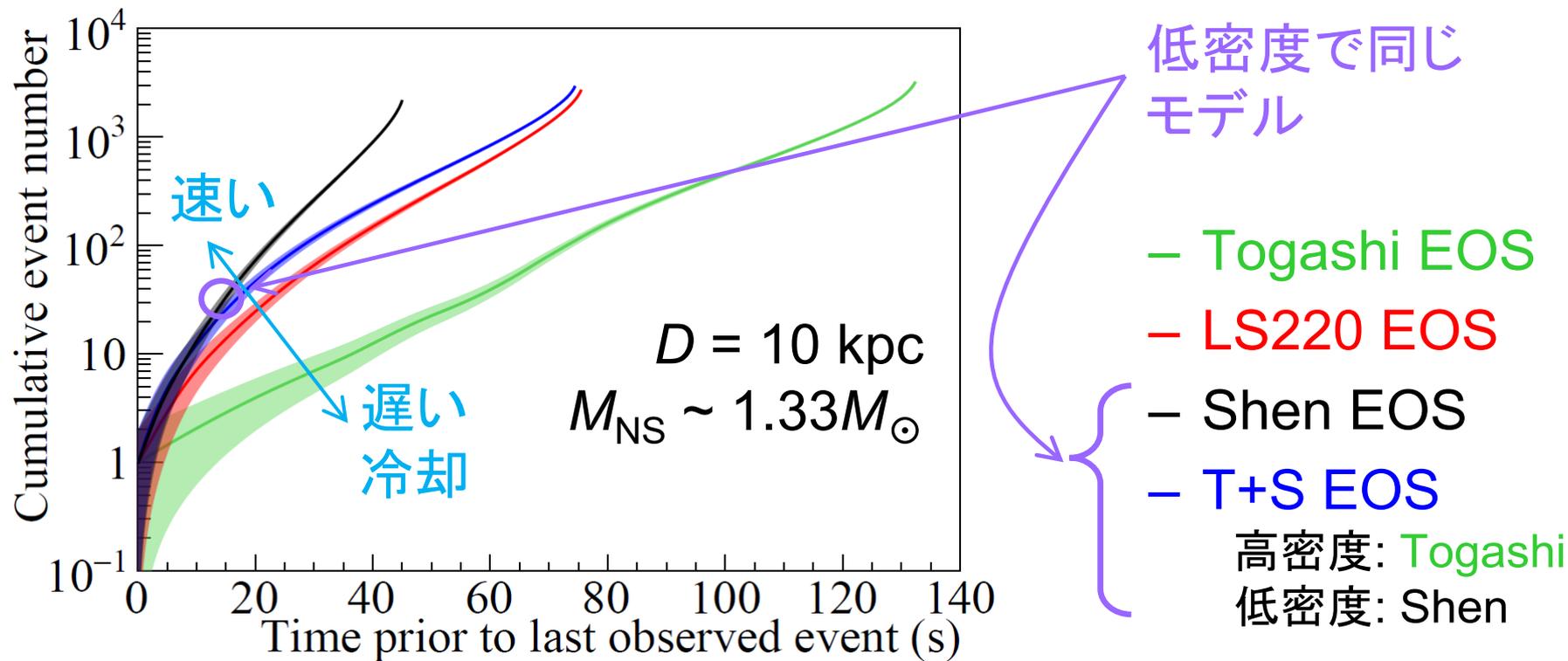
- ニュートリノの減光時間スケールは、中性子星質量が大きいほど長く、半径が大きいほど短い。

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



状態方程式と表面温度

Nakazato et al., arXiv:2108.03009, accepted by ApJ



- 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。

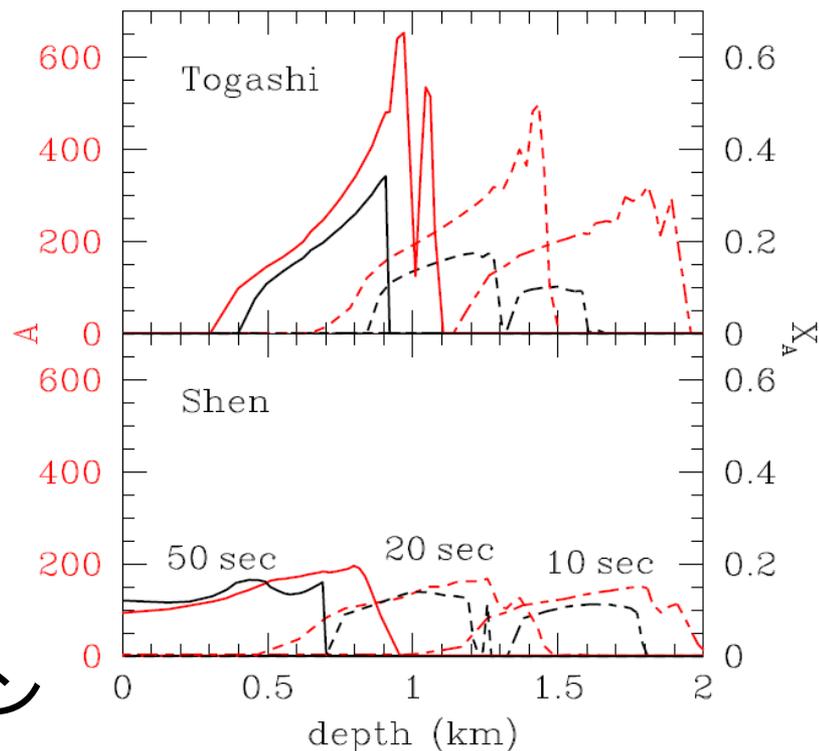
表面付近の原子核が温度を決める

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、星表面が冷えるようになる。

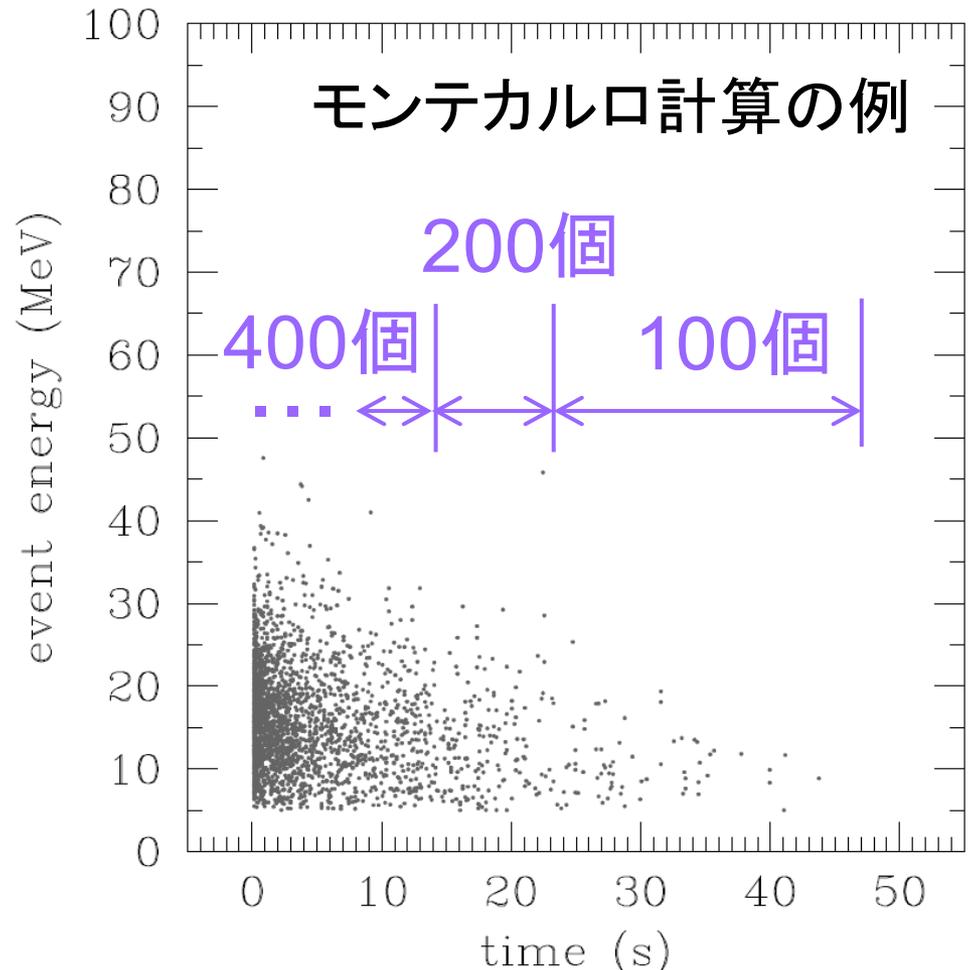
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \propto A^2 \\ 1 / \lambda \propto X_A \cdot A \end{array} \right.$$

A ; 原子核の質量数
 X_A ; 原子核フラクシオン

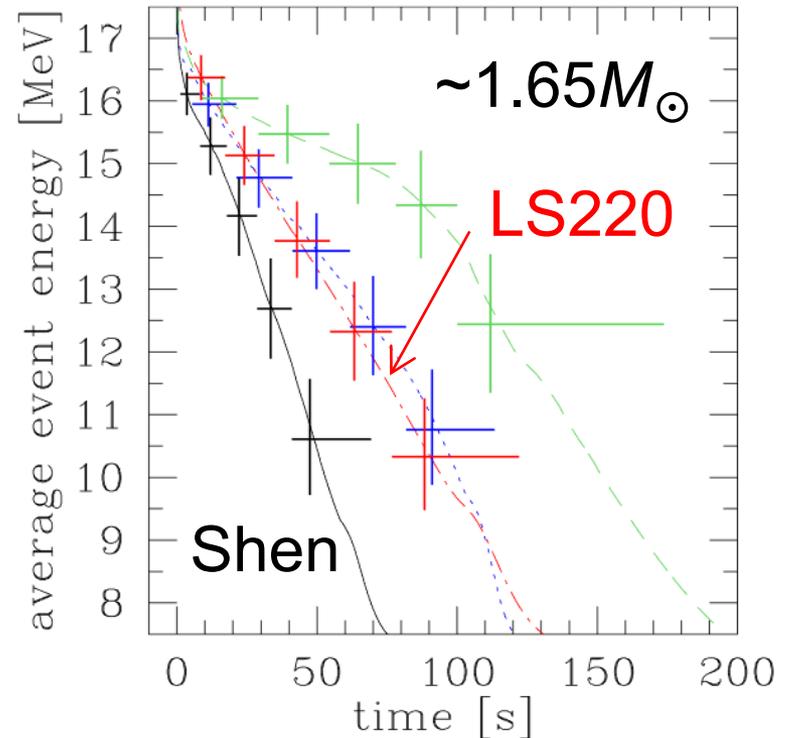
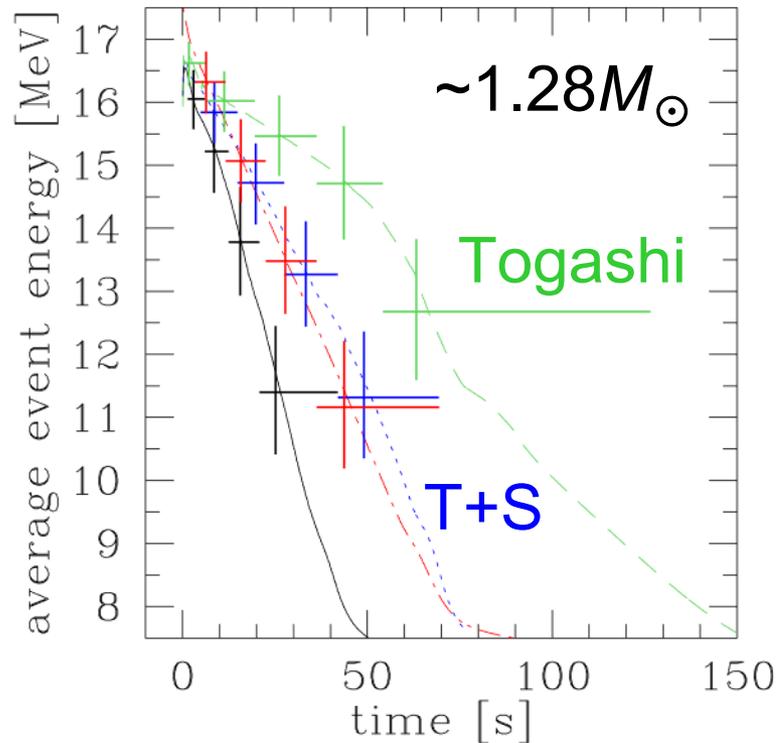


平均エネルギーの見積もり

- 表面温度の違いはイベントやニュートリノの平均エネルギーの違いとしても反映されるはず。
- 予め時間 bin の取り方を決めておくのではなく、後ろから100、200、400イベントと区切っていく。
- 平均エネルギー版「時間逆向き解析」



平均エネルギーとその不定性

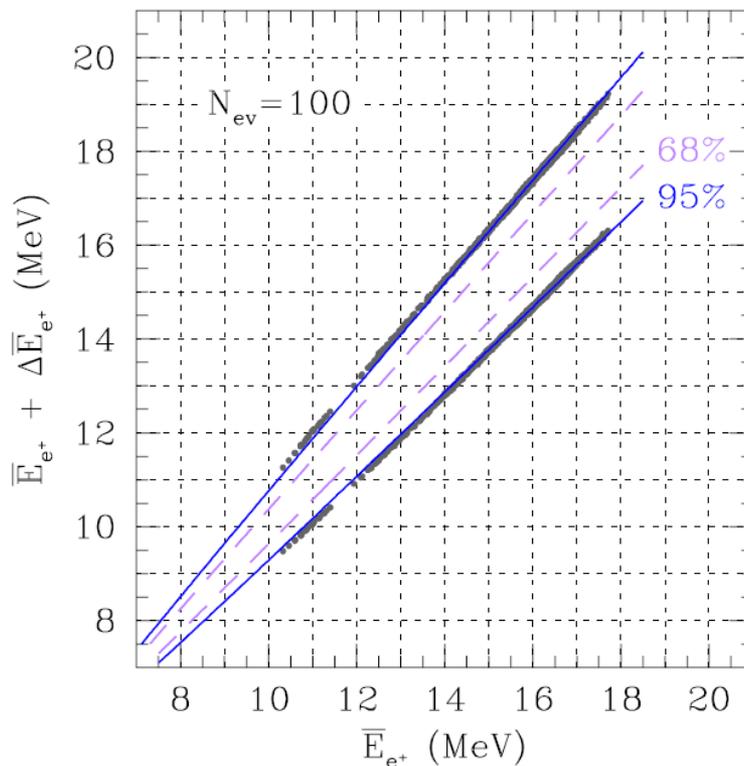


- 平均エネルギーの低下を有意にトレースできる。
- 累積イベント数による解析よりは不定性が大きいですが、状態方程式によるちがいも読みとれる。

平均エネルギーの不定性の推定

- 数値計算データと、解析式 (Fermi-Dirac) を用いて、MC計算を行ない、イベントの平均エネルギーの不定性を求めた。

→ イベント数 100 のとき、
±1 MeV程度



- イベント数、threshold energy の依存性。

$$\Delta \bar{E}_{e^+} = \pm \frac{1}{\sqrt{N_{ev}}} \left(\frac{\bar{E}_{e^+} - E_{th}}{\text{MeV}} \right)^{0.8} (0.1 E_{th} + 1.5 \text{ MeV}) \quad \dots \textcircled{1}$$

ニュートリノ平均エネルギー

- Fermi-Dirac を仮定して、イベントの平均エネルギーをニュートリノの平均エネルギーに変換。

$$\bar{E}_{e^+} \simeq \frac{\int_0^\infty E_\nu^5 \left(1 + A \frac{E_\nu}{M}\right) \left(1 + B \frac{E_\nu}{M}\right) f_{\text{FD}}(E_\nu) dE_\nu}{\int_0^\infty E_\nu^4 \left(1 + A \frac{E_\nu}{M}\right) f_{\text{FD}}(E_\nu) dE_\nu} \quad \sigma(E_\nu) \propto E_\nu^2 \left(1 + A \frac{E_\nu}{M}\right)$$

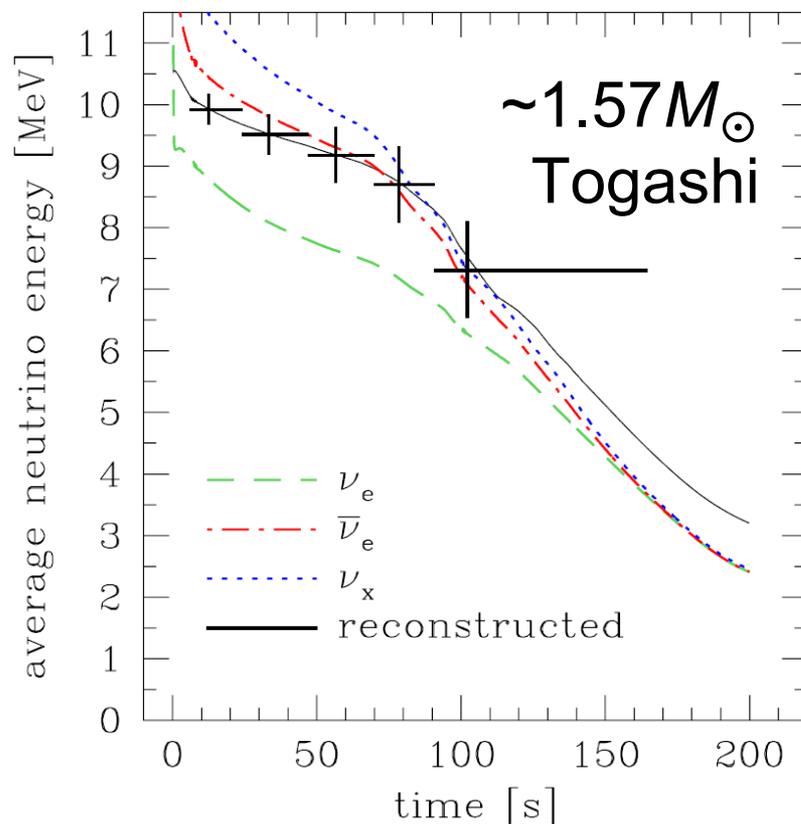
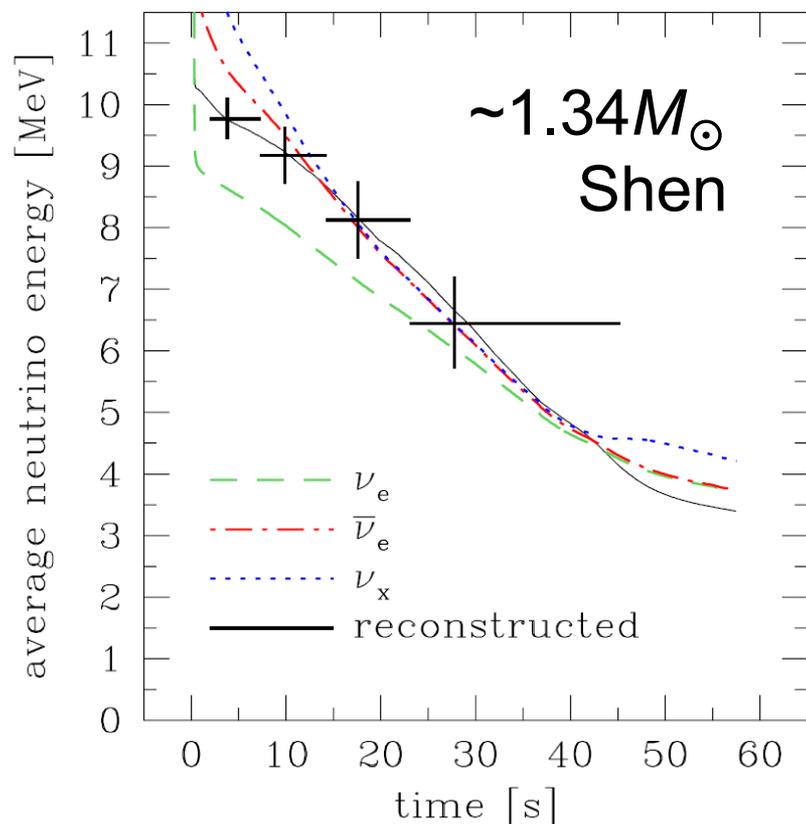
$$\simeq 5.07 k_B T_\nu - A \frac{(5.07 k_B T_\nu)^2}{M} + (A + B) \frac{30.6 (k_B T_\nu)^2}{M} \quad E_{e^+} \simeq E_\nu \left(1 + B \frac{E_\nu}{M}\right)$$

$$\simeq 1.61 \bar{E}_\nu \left(1 - 4 \frac{\bar{E}_\nu}{M}\right), \quad A \simeq -7 \text{ and } B \simeq -0.966$$

- threshold energy の補正: $\bar{E}_{e^+} \rightarrow \sqrt{\bar{E}_{e^+}^2 - E_{\text{th}}^2}$

$$\bar{E}_\nu \simeq \frac{\sqrt{\bar{E}_{e^+}^2 - E_{\text{th}}^2}}{1.61} + \frac{4}{M} \left(\frac{\bar{E}_{e^+}^2 - E_{\text{th}}^2}{1.61^2} \right) \quad \dots \textcircled{2}$$

ニュートリノ平均エネルギー



- 数値モデルに基づき、MC 計算の結果に前述の不定性評価式、変換式を用いると、ニュートリノの平均エネルギーをよく再現できる。

銀河系内超新星202X???? の ニュートリノ観測に向けて

1. イベントを検出時間の遅い順に 100, 200, 400, ... とビン分けして、イベントの平均エネルギーを算出する。
2. ①式から平均エネルギーの不定性を推定する。
3. ②式でニュートリノの平均エネルギーを求める。
4. データと符合する理論モデルに当たりをつける。

→ 超新星までの距離が分からなく
てもできる解析法

Advertisement

nuLC collaboration

"nuLC"
=neutrino Light Curve

Figure by
Y. Suwa



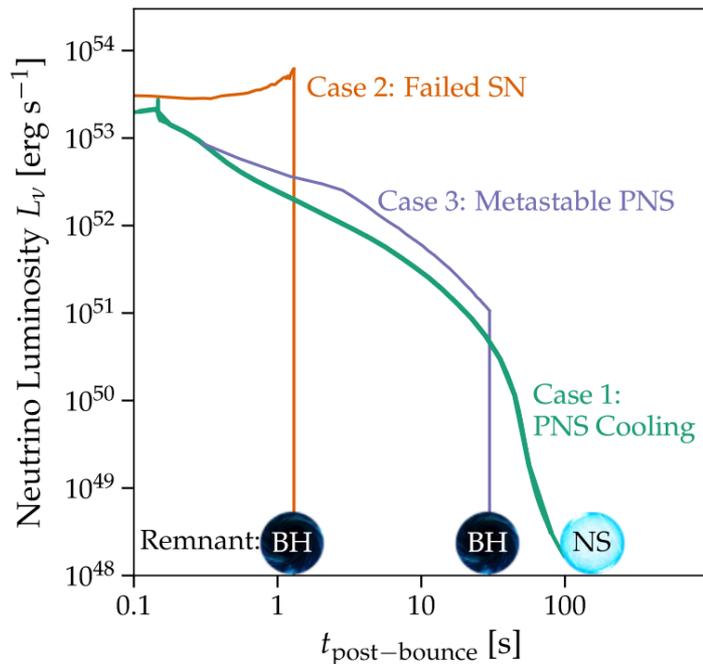
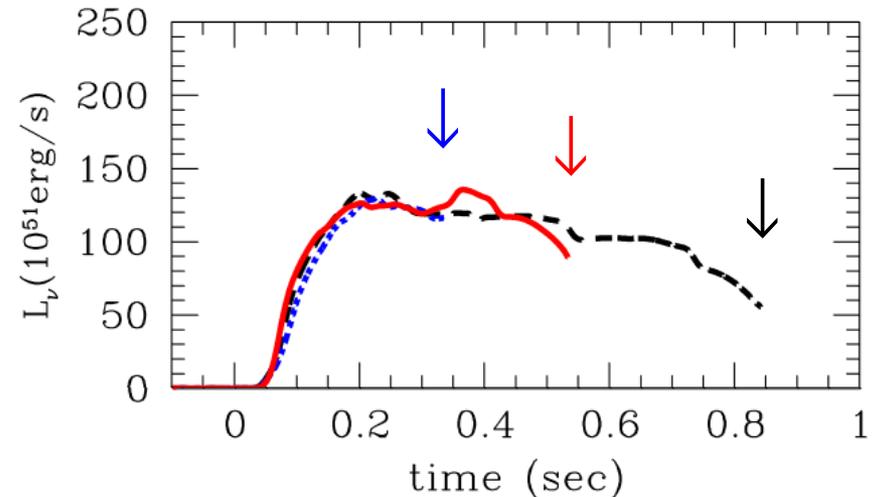
まとめ

- 生まれたての中性子星からのニュートリノ放出は質量、半径、表面温度など少数の要素に依存。
→ 超新星ニュートリノは「消えかけ」がいちばん美味しい。
- 質量・状態方程式の異なる原始中性子星冷却の計算から、物理の違いがニュートリノ光度曲線にどう反映されるか調べられる。
- イベントの平均エネルギーに注目して、実際に超新星が起こった際、すぐに使えるデータ解析の手法を提案した。

(おまけ) 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。

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。

Li et al., arXiv:2008.04340