

原始中性子星冷却の ニュートリノ観測

中里 健一郎 (九州大・基幹教育院)

中西史美, 原田将之, 小汐由介 (岡山大理),
諏訪雄大 (京産大理・京大基研), 住吉光介 (沼津高専),
原田了 (東大ICRR), 森正光, Roger Wendell (京大理)

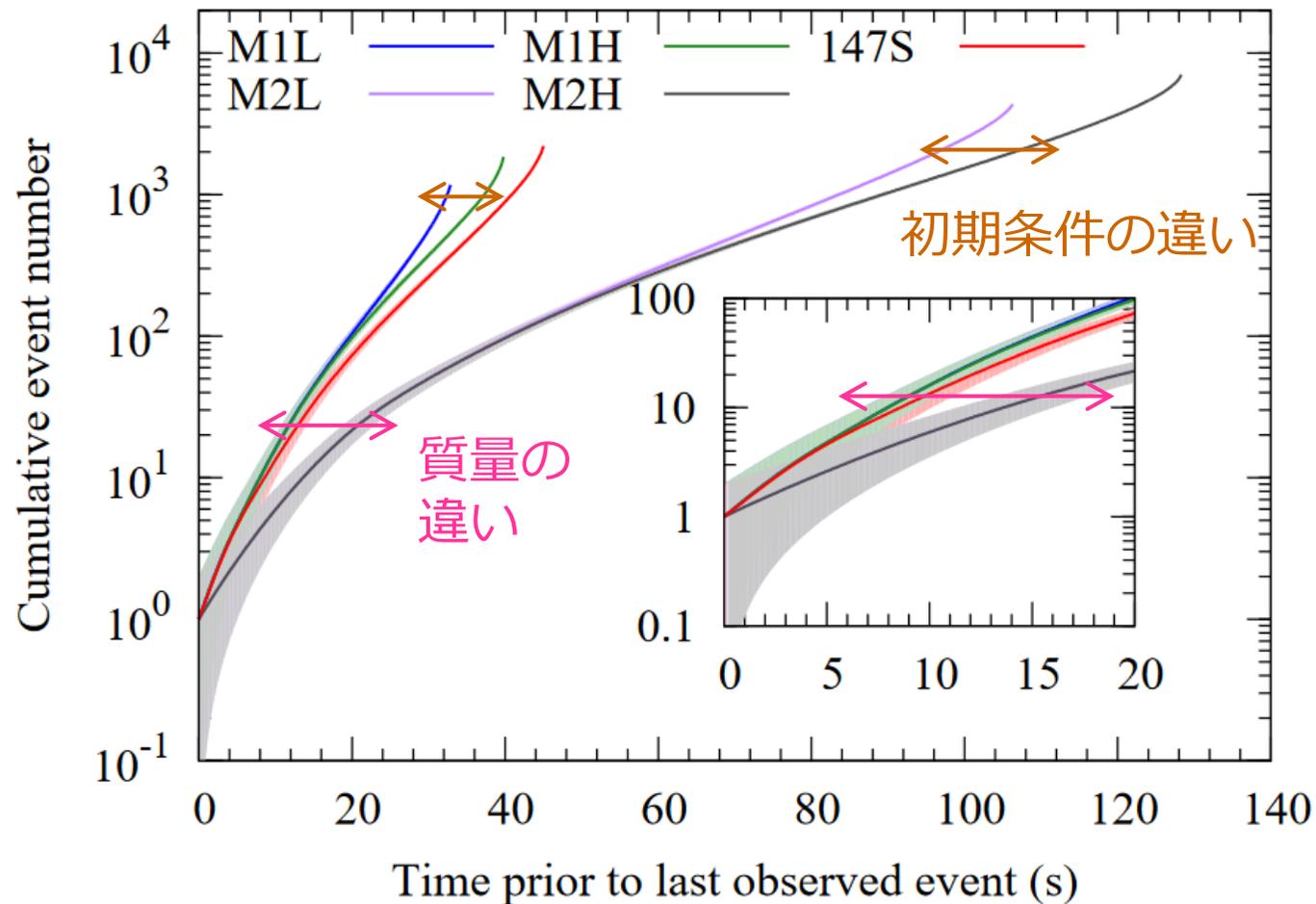
2021年1月7日@第7回超新星ニュートリノ研究会

今回の要点

- 超新星ニュートリノは、「消えかけ」がいちばん美味しい。
 - Very late phase に注目しよう！
 - unknow な爆発メカニズムや物質降着、多次元流体的流体不安定性に影響されず、原始中性子星の個性が見えてくる。
 - 統計的な有意さは？

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。

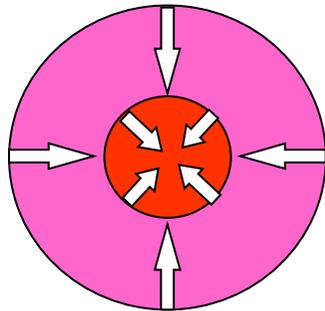
重力崩壊型超新星

- 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

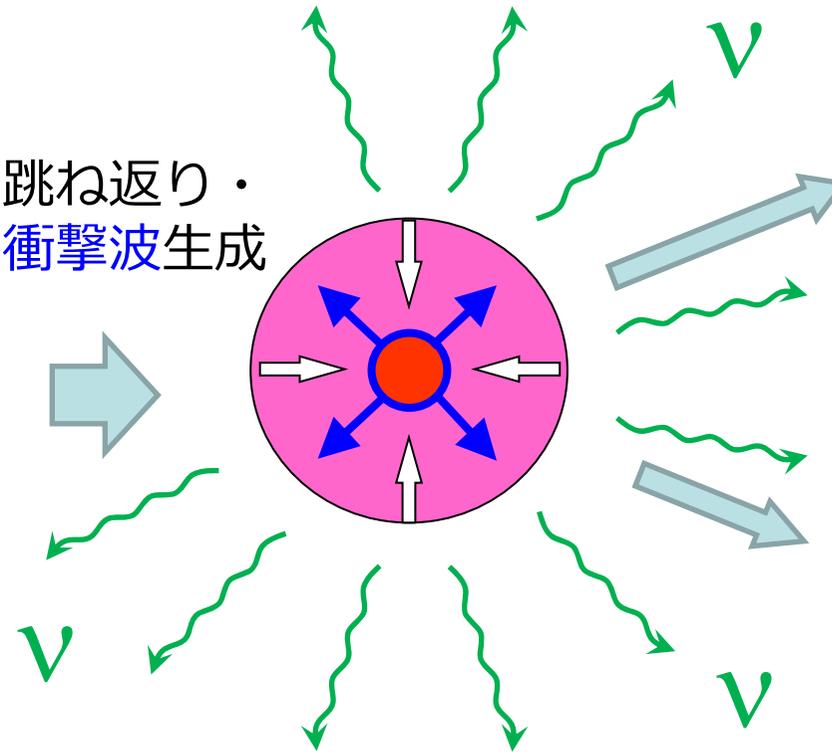


衝撃波伝播 → 爆発
(中性子星の形成)

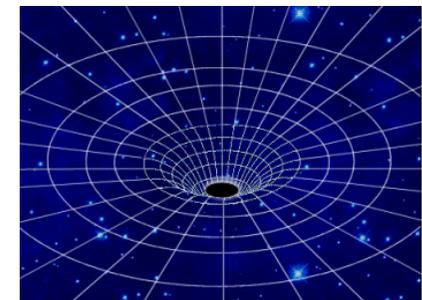
重力崩壊



跳ね返り・
衝撃波生成

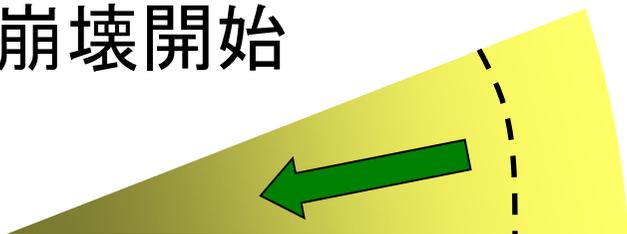


ブラックホール

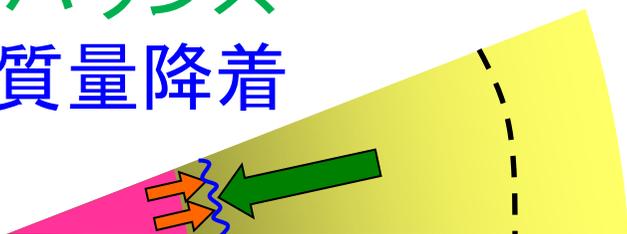


超新星ニュートリノの時間変化

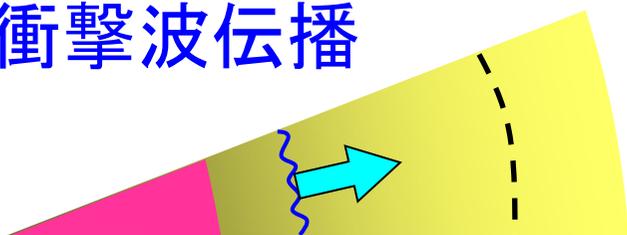
崩壊開始



バウンス
質量降着



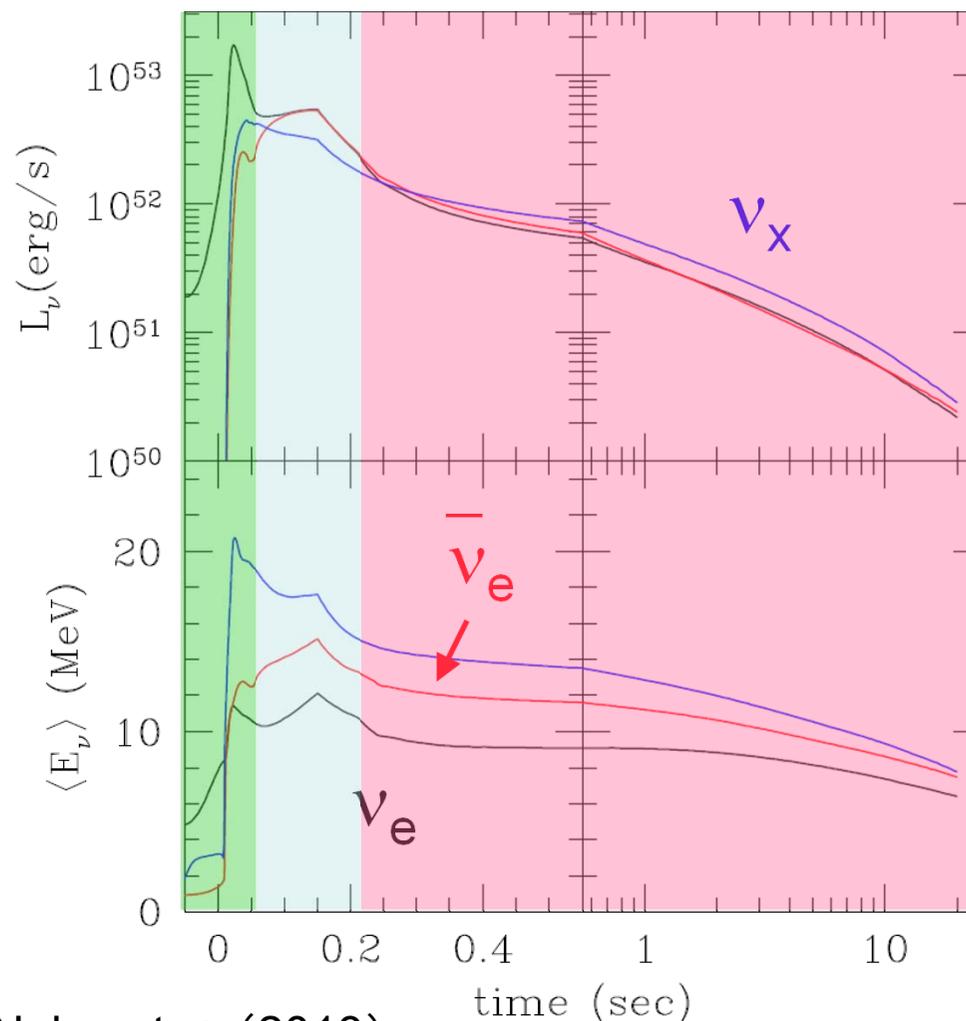
衝撃波伝播



原始中性子星



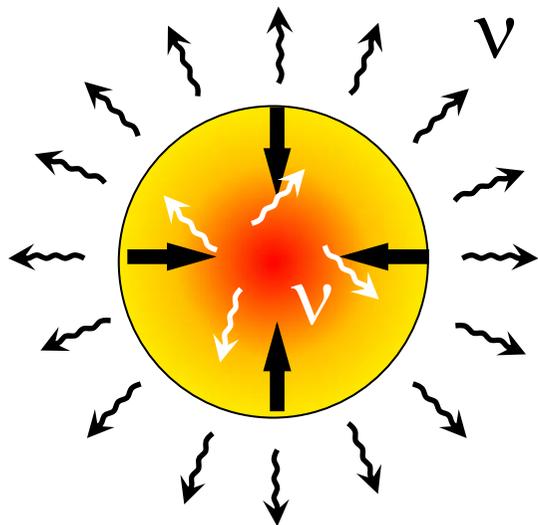
① ② ③ ← ココに注目



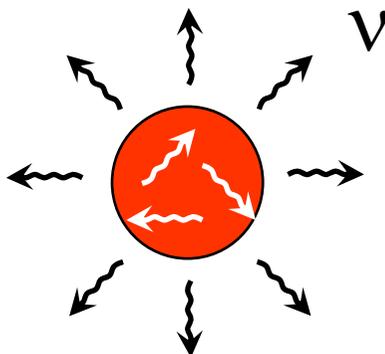
Nakazato+ (2013)

原始中性子星冷却の概略図

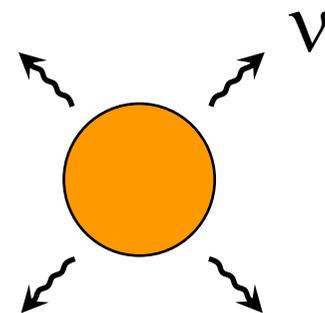
③-1 contraction



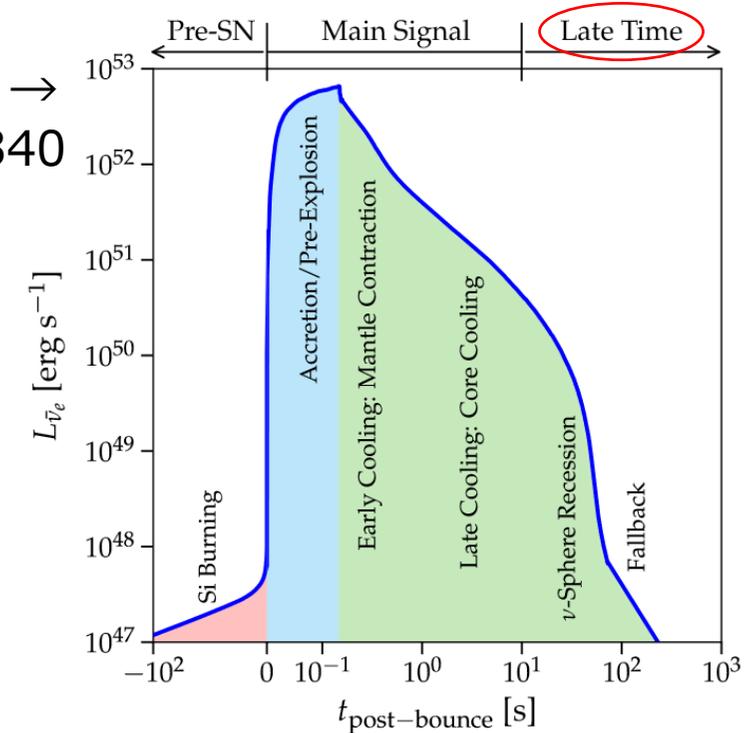
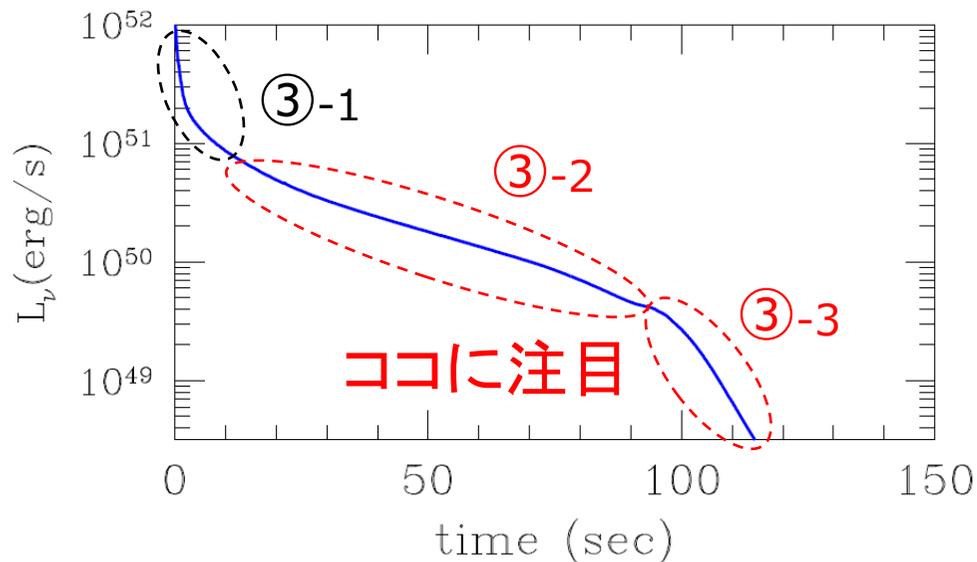
③-2 shallow decay



③-3 volume cooling

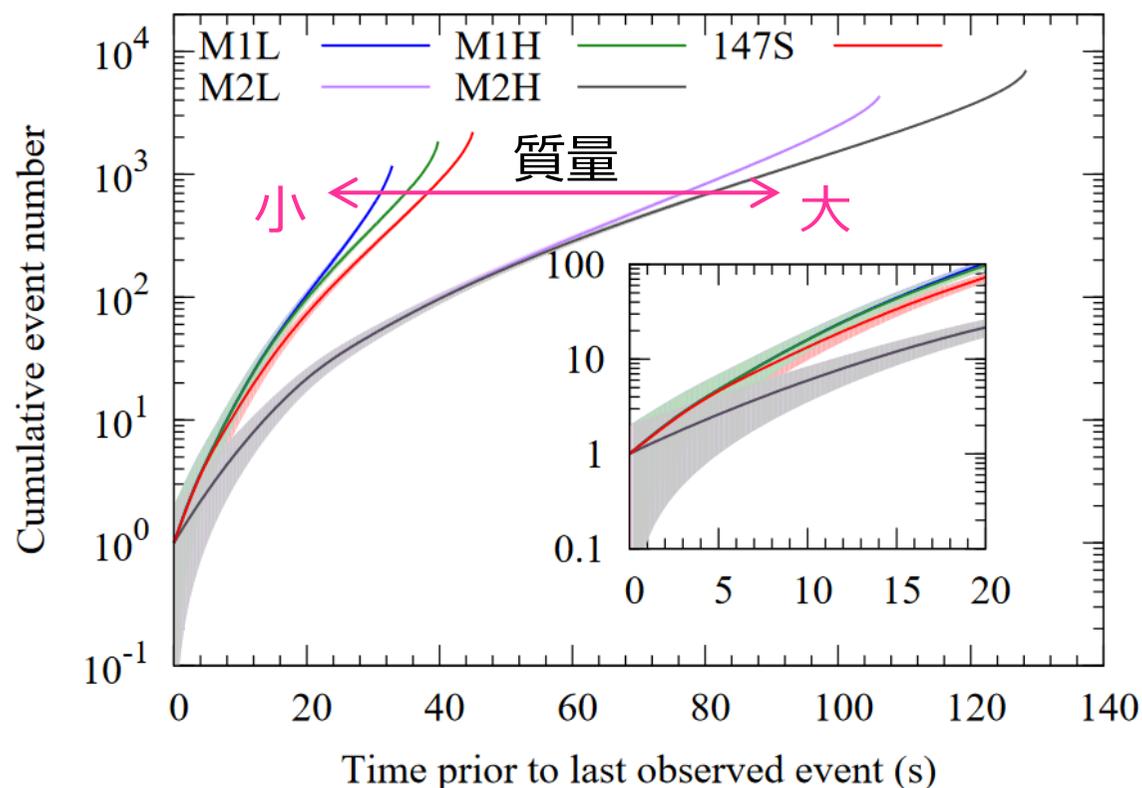


Li et al.
arXiv:2008.04340

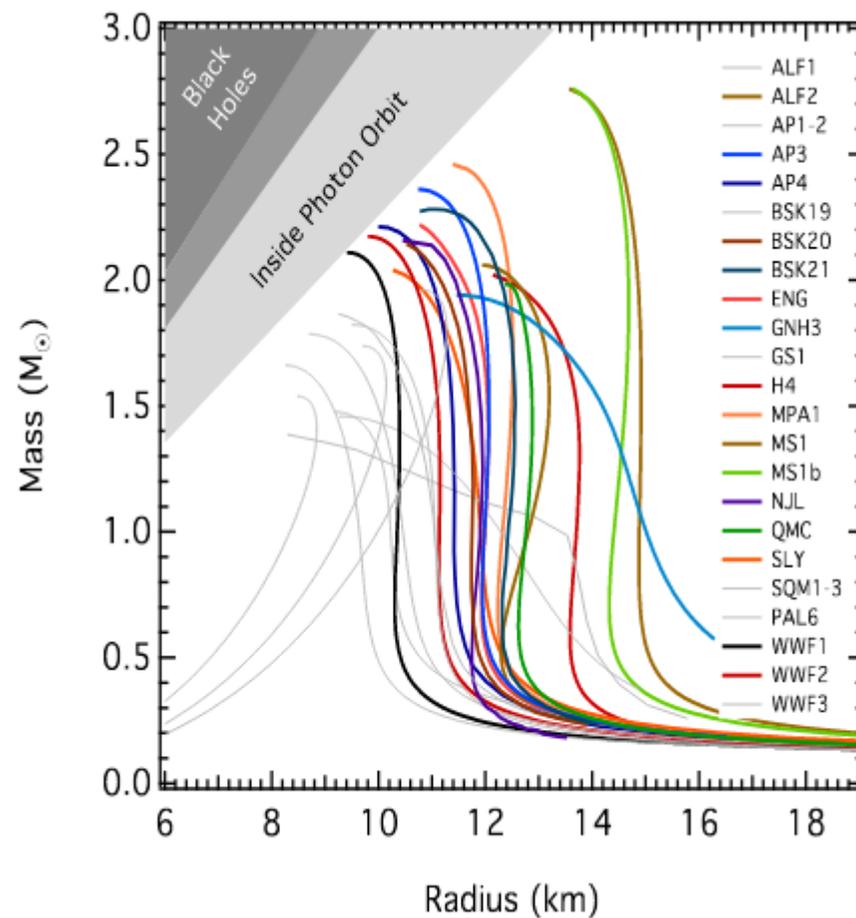
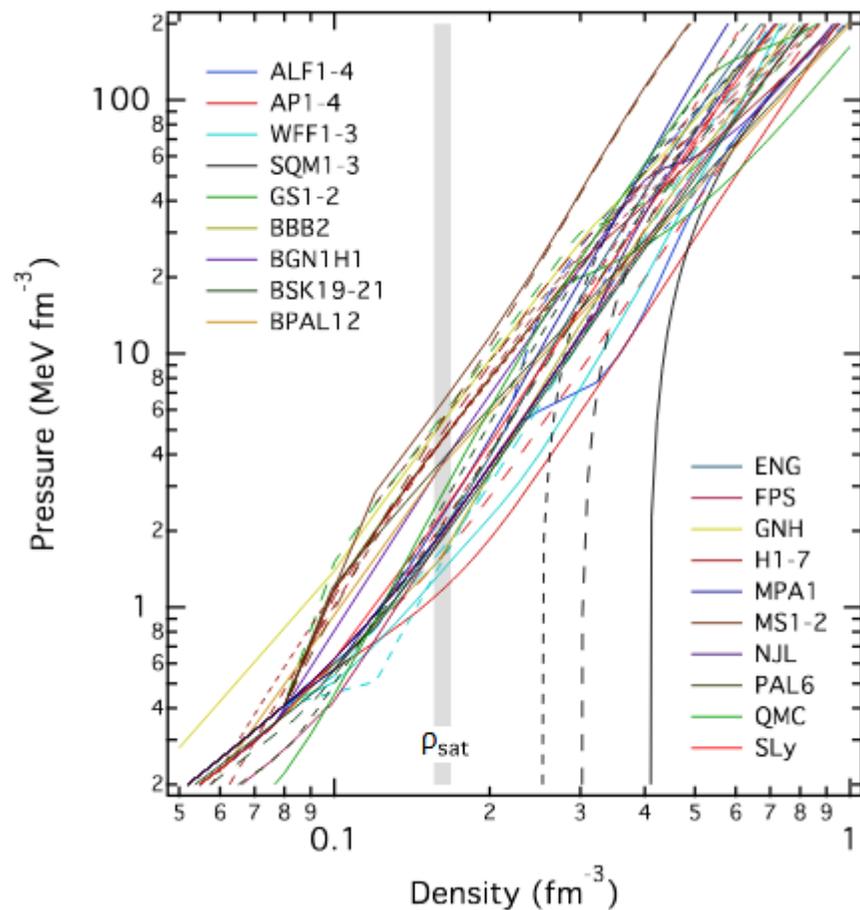


本研究の概要

- 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。
- この発表では、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。



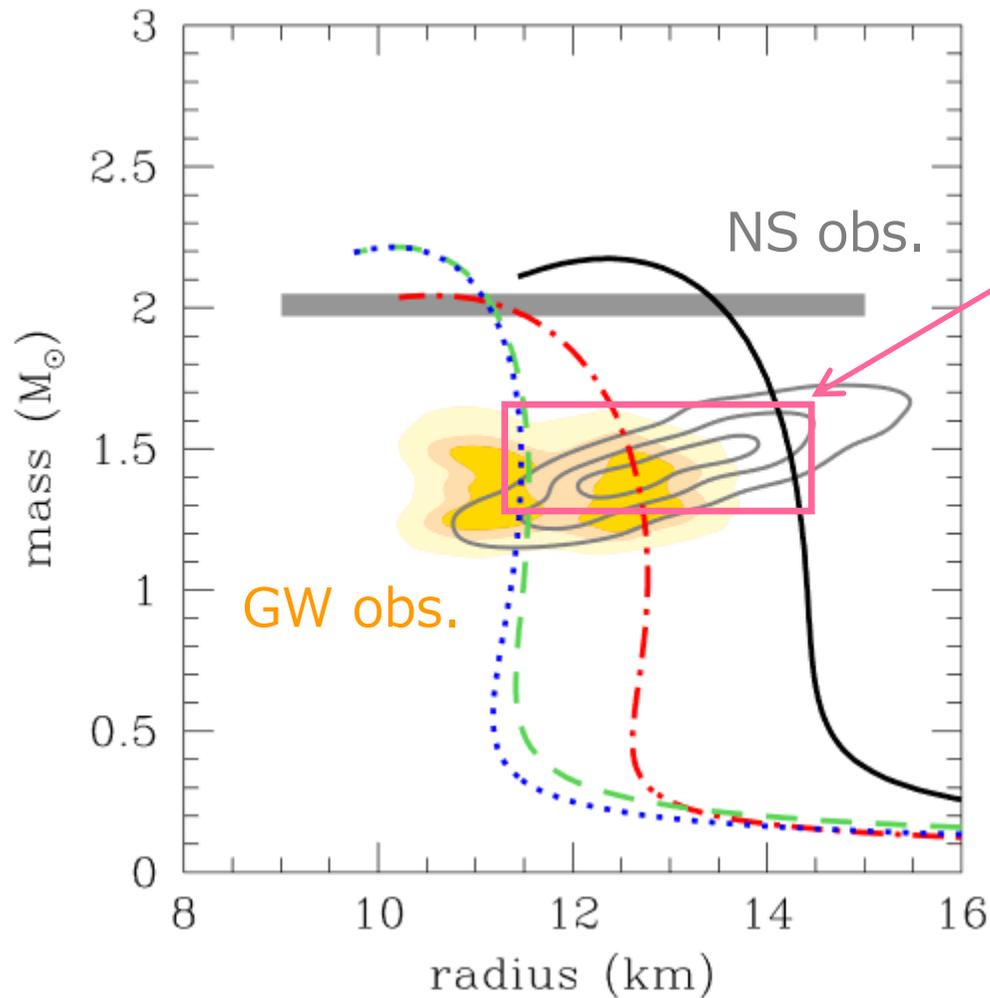
核物質の状態方程式を決めると 中性子星の質量—半径関係が求まる



Özel & Freire, ARAA **54** (2016)

原始中性子星モデル

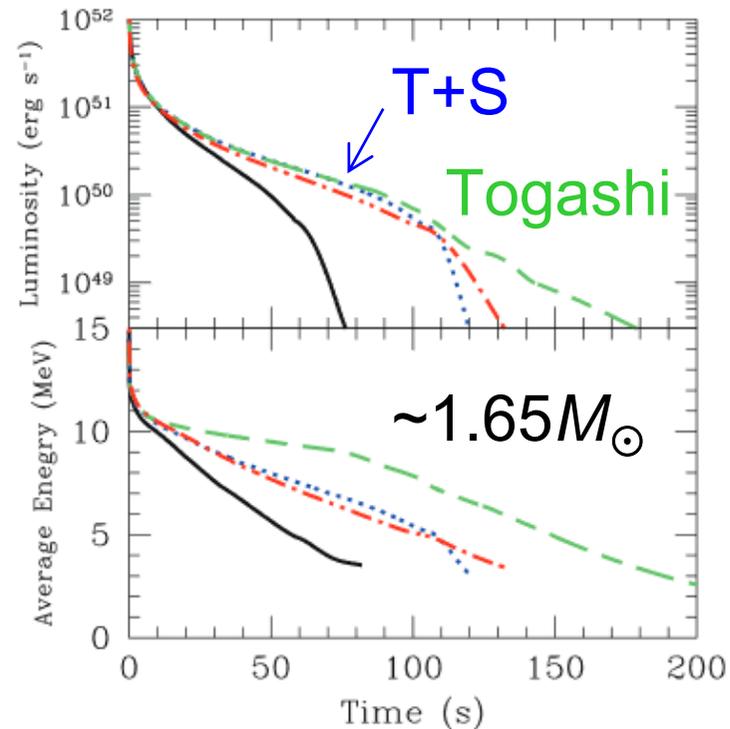
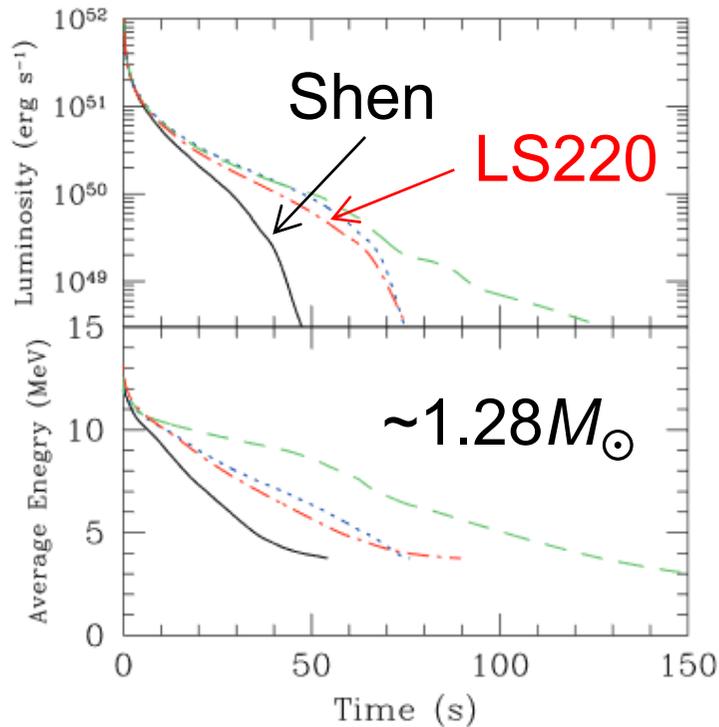
- ニュートリノ拡散近似による星の進化計算。



- 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

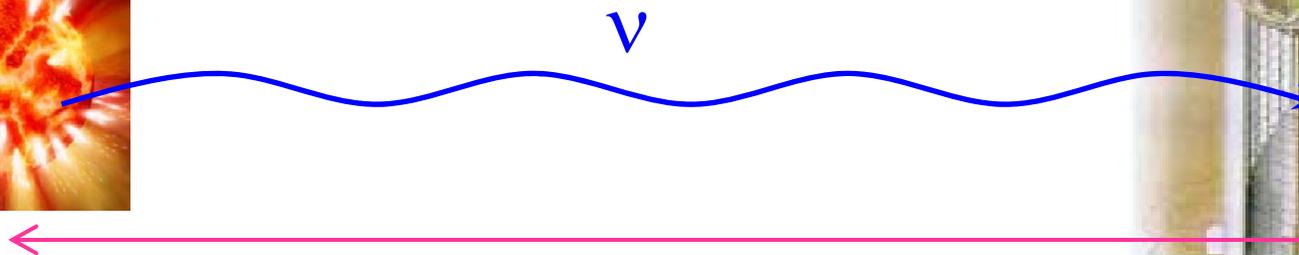
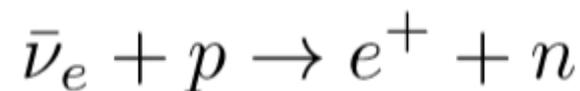


- 質量が大きいほど、また、半径が小さいほど、ニュートリノ放出のタイムスケールが長い。
- Togashi EOS は平均エネルギーが高い。
→ 低密度領域の組成の違いにより温度が高い。

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 β 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)



10 kpc



質量依存性

- 「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。
- どの状態方程式を採用しても、質量の違いは有意。

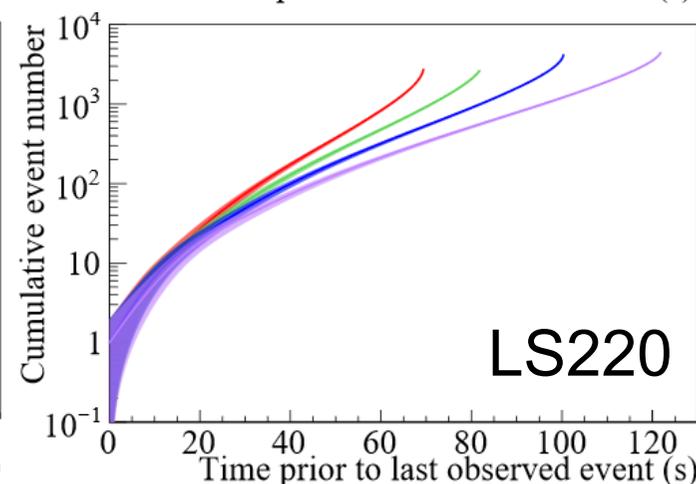
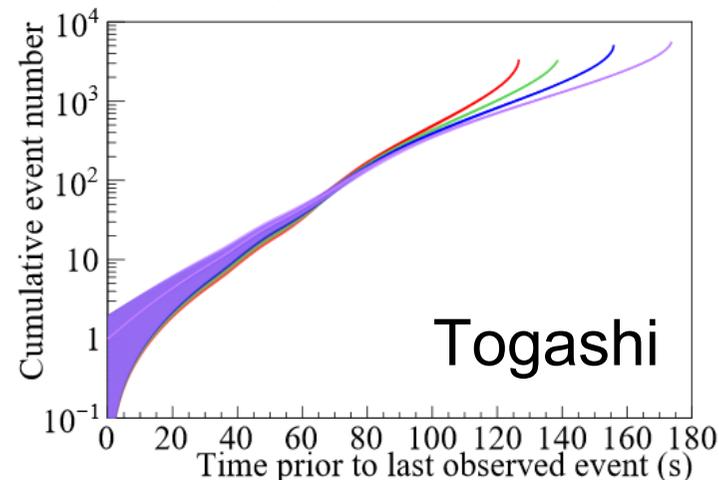
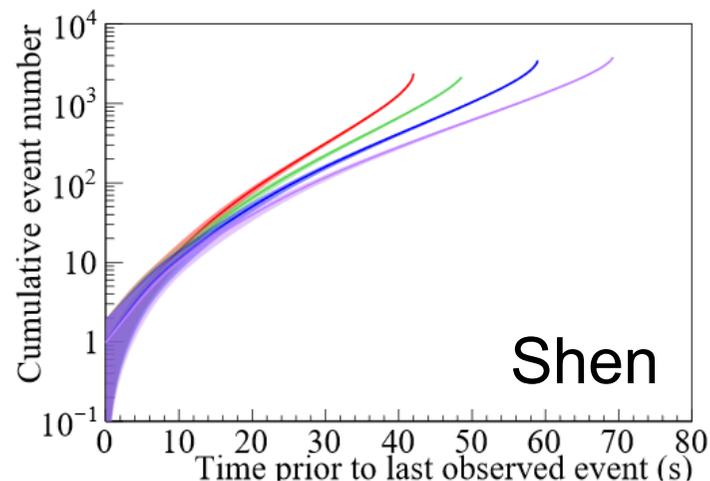
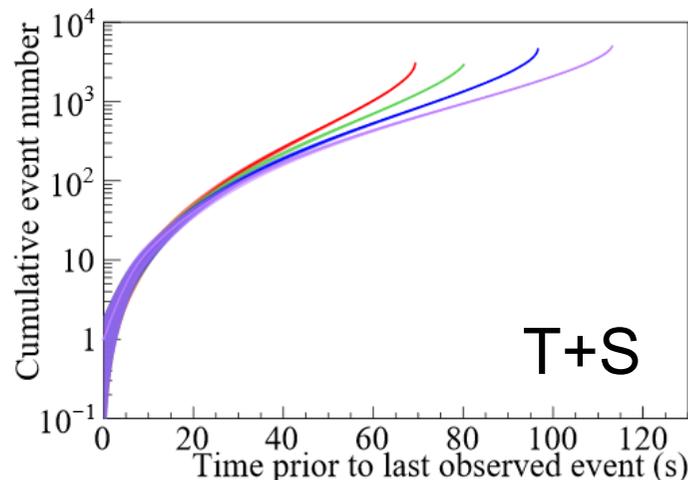
重力質量:

~1.28 M_{\odot}

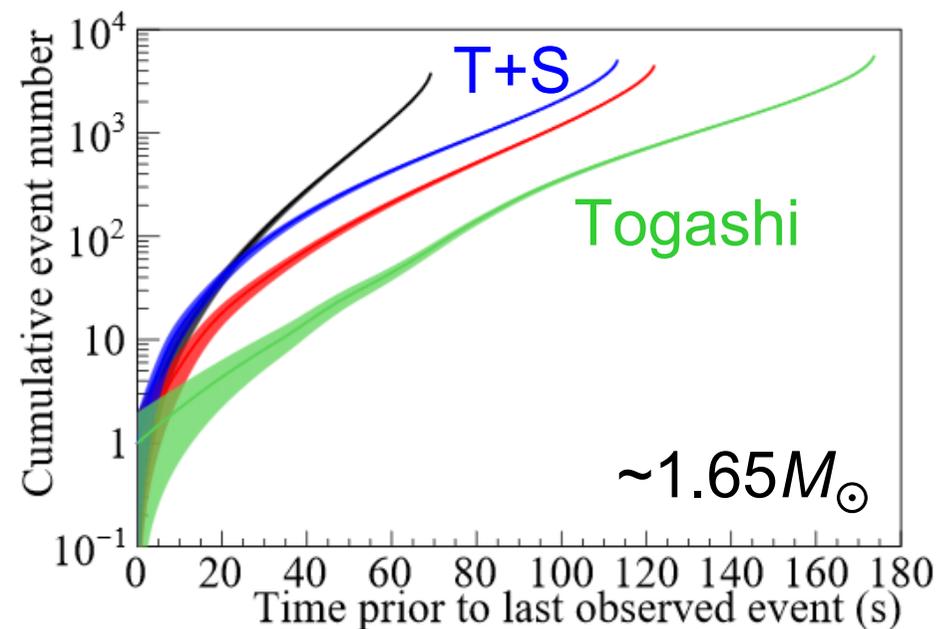
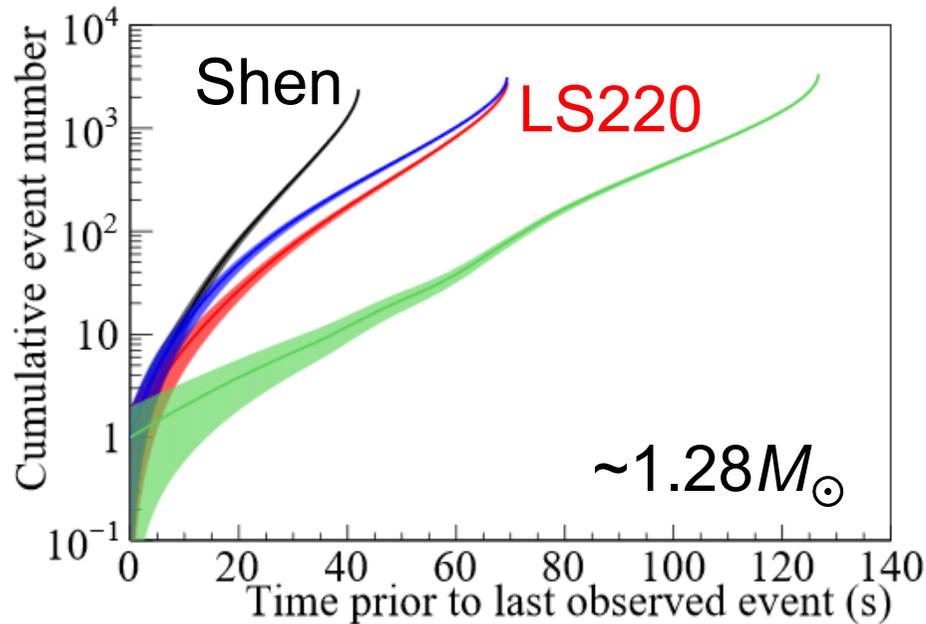
~1.39 M_{\odot}

~1.52 M_{\odot}

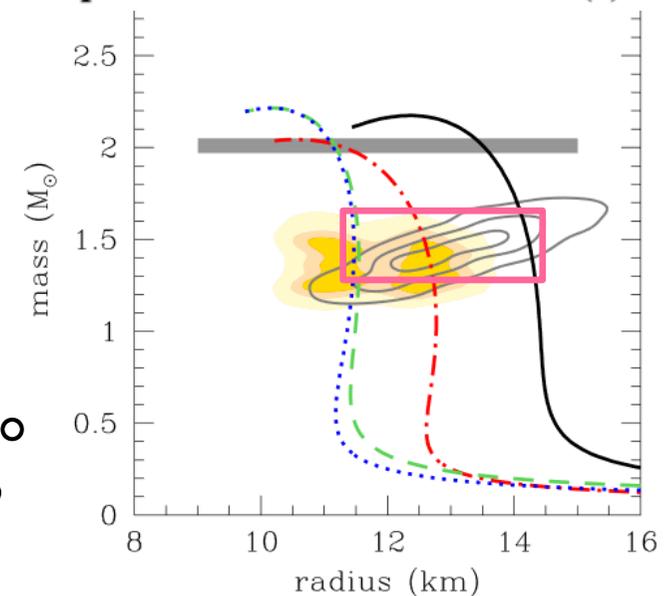
~1.65 M_{\odot}



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。
→ エネルギーを直接測れるか？



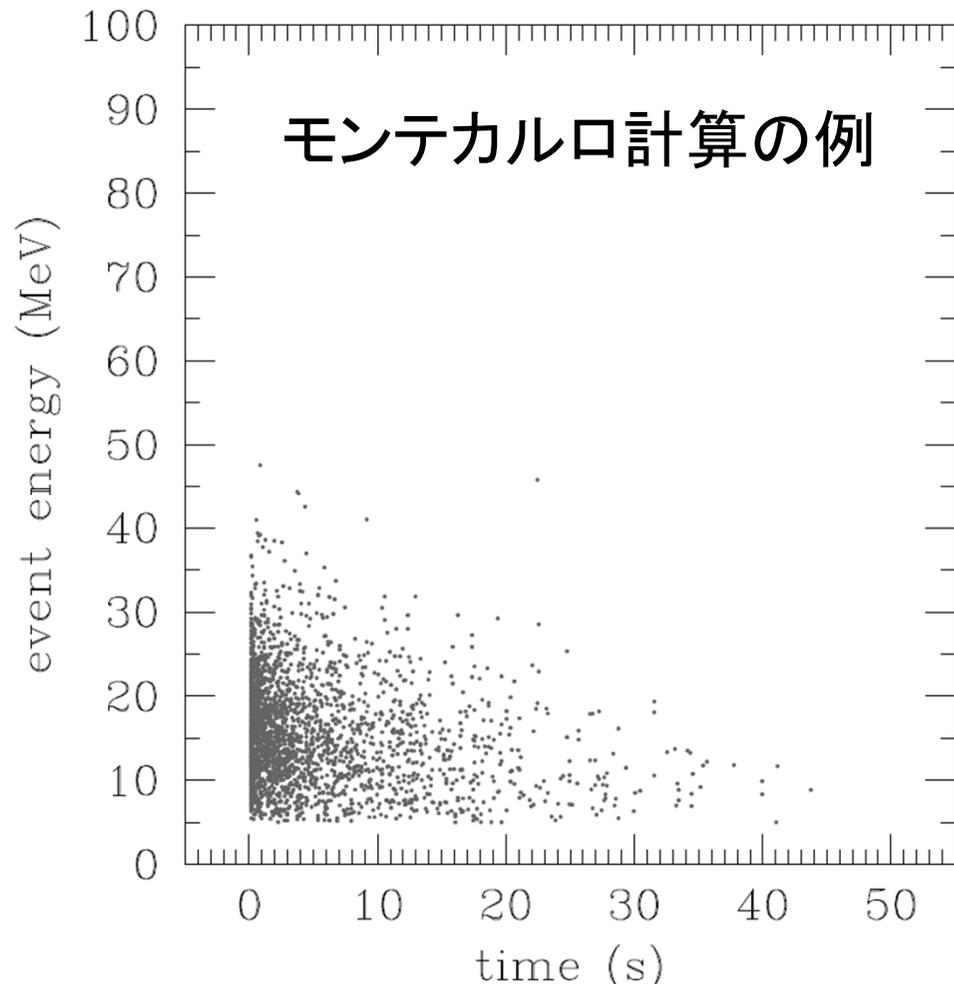
平均エネルギー測定 の 難点

- イベントのスペクトル自体に幅があるため、ある程度の統計がないと、有意な値が得られない。
- ただし時間 bin の幅を広く取りすぎると、時間変化をとらえることが難しくなる。

(不確定性関係?!)

$$\Delta t \Delta \bar{E} \gtrsim ?!$$

- どう binning する？

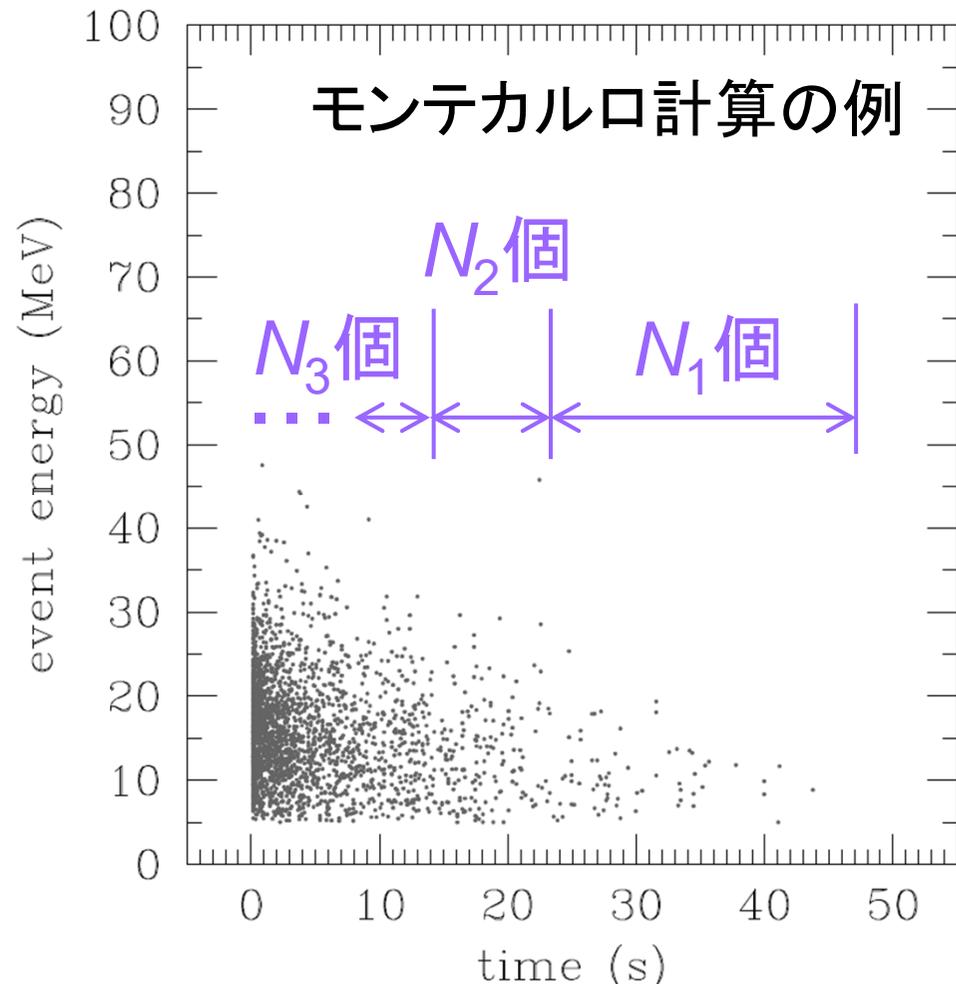


平均エネルギーの見積もり方

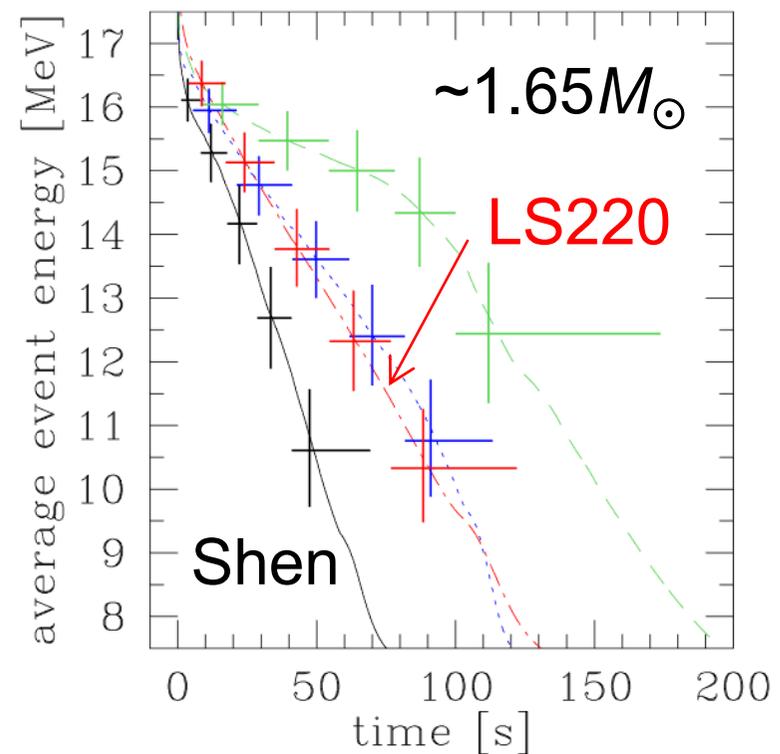
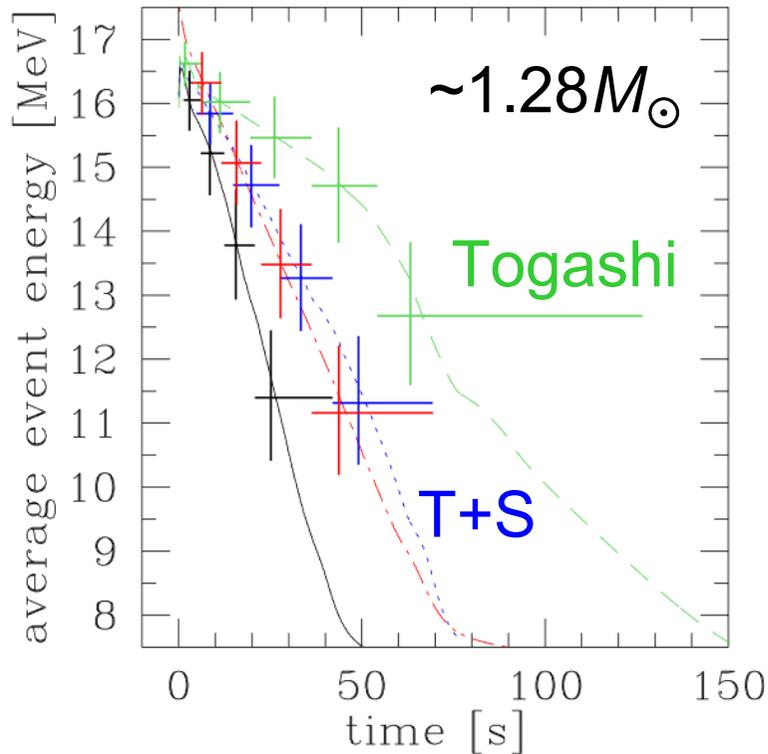
- 予め時間 bin の取り方を決めておくのではなく、後ろから何イベント、と区切っていく。
- 平均エネルギー版「時間逆向き解析」

利点：

超新星までの距離に依らない解析ができる。



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。

まとめと展望

- 超新星ニュートリノは、「消えかけ」がいちばん美味しい。
- 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トレースできる。
- 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。