

超新星爆発における 原始中性子星の冷却過程で放出される ニュートリノ事象の研究

2021年9月14日@日本物理学会（オンライン）

中西史美(岡山大理)

中里健一郎(九大基幹), 小汐由介, 原田将之(岡山大理),
住吉光介(沼津高専), 諏訪雄大(東大総合文化), 原田了(理研),
森正光(東大総合文化), Roger Wendell(京大理)

目次

□ イントロダクション

- 超新星爆発
- 原始中性子星の冷却

□ 本論

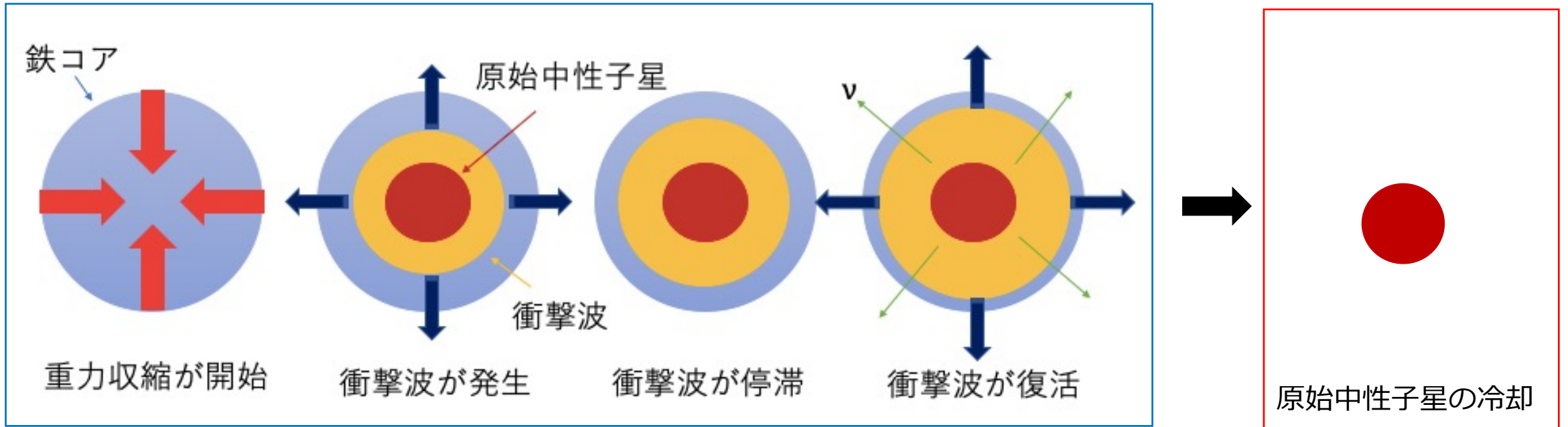
- 原始中性子星のモデル
- 解析手法
- シミュレーション結果

□ まとめと今後の展望

超新星爆発

- 太陽の8倍以上の質量を持つ星が一生の最後に起こす爆発現象
- 爆発時、大量のニュートリノを放つ
- 爆発後、中性子星あるいはブラックホールを形成

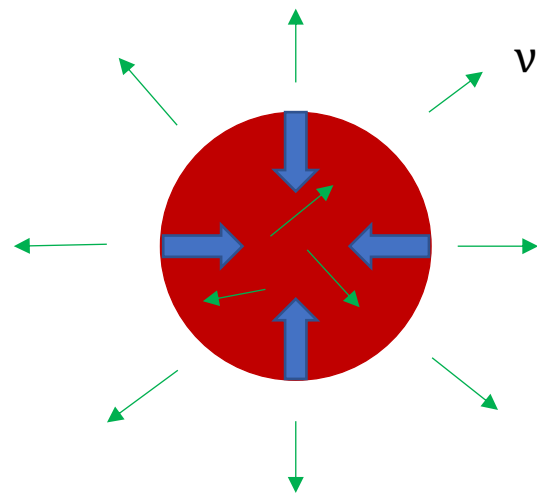
爆発機構、物質降着
など、パラメーター
が多く不定性大



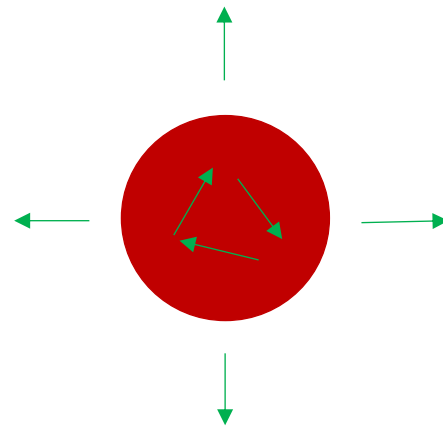
本研究では原始中性子星の冷却過程で放出されるニュートリノに注目

原始中性子星の冷却

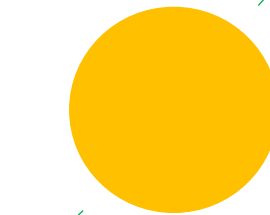
- 原始中性子星冷却の3段階



①原始中性子星が収縮

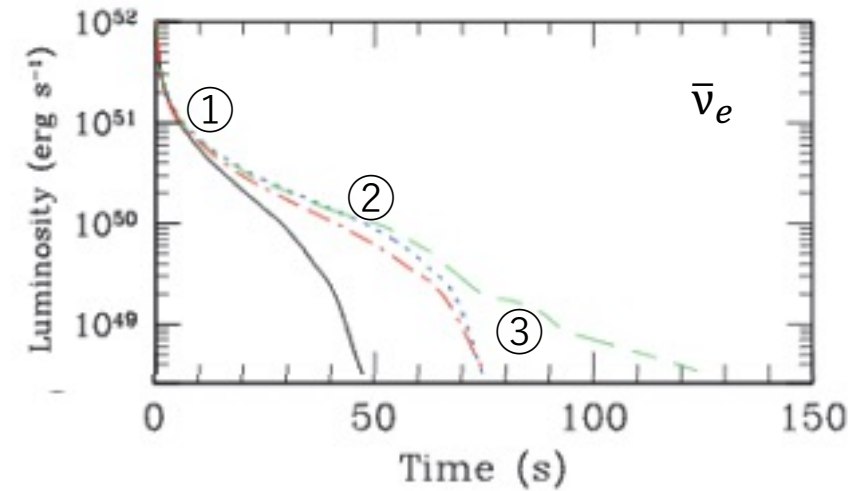


②収縮が止まる



③温度が低下

パラメーターが少なく
シンプル

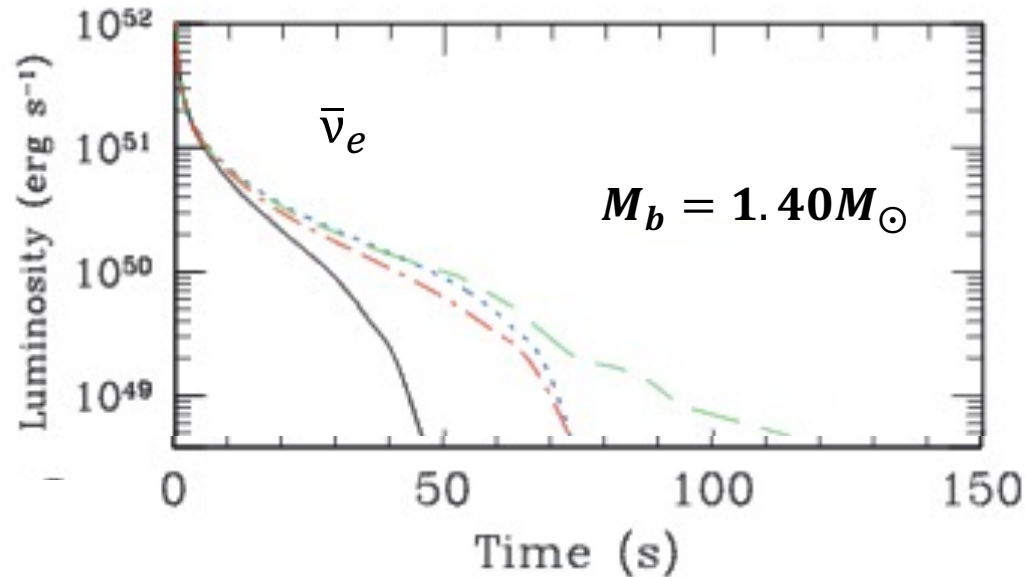


Nakazato *et al.*, (2021)
[arXiv;2108.03009]

本研究では②、③で放出されるニュートリノに注目

原始中性子星のモデル

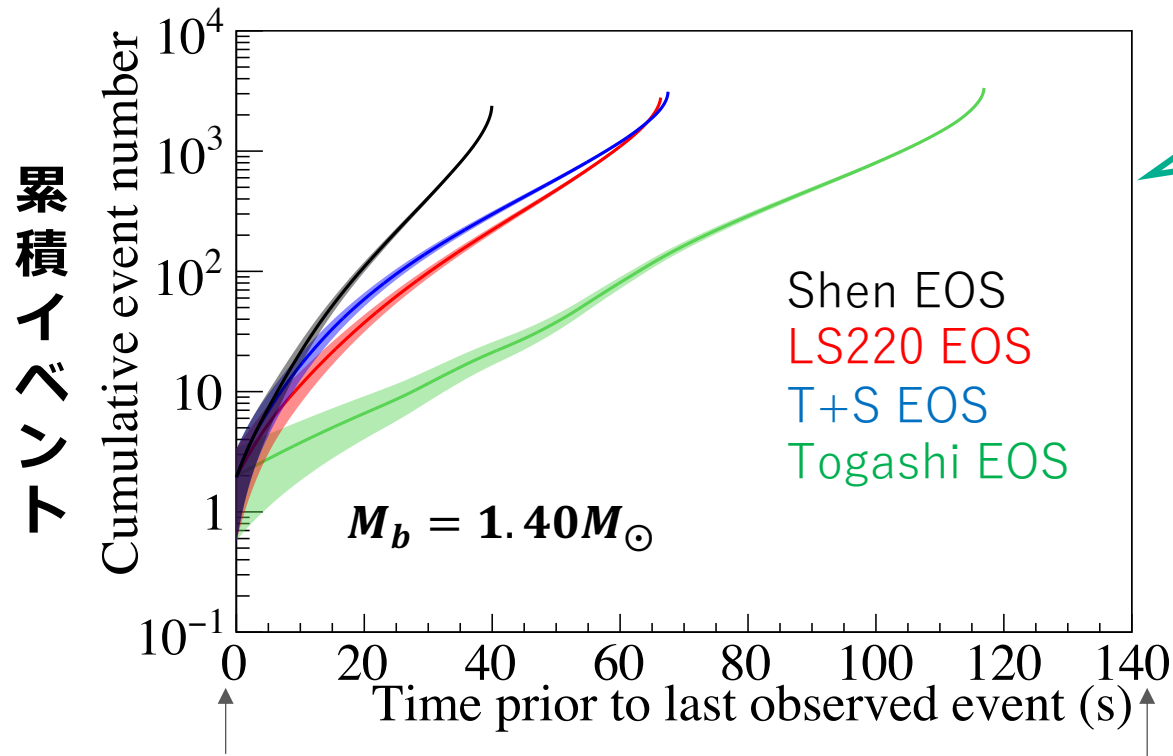
- 使用した状態方程式(EOS)
 - Shen EOS
 - LS220 EOS
 - Togashi EOS
 - T+S EOS (高密度 : Togashi, 低密度 : Shen)
- バリオン質量(M_b)の範囲
1.40~1.62 M_\odot



ニュートリノライトカーブ
時間が経つにつれ、状態方程式によって
ニュートリノ放出に変化

後期イベントを用いた解析手法

- **時間逆向き(Backward time)解析**(Suwa *et al.*, ApJ881, 139(2019))
最後の1イベントから時間を遡って累積イベントをプロット
→状態方程式の差が顕著に現れる



Super-Kamiokande(SK)(32.5 kton)で観測したと仮定した場合のsignalの期待値から求めたBackward-time図

backgroundを考慮した時

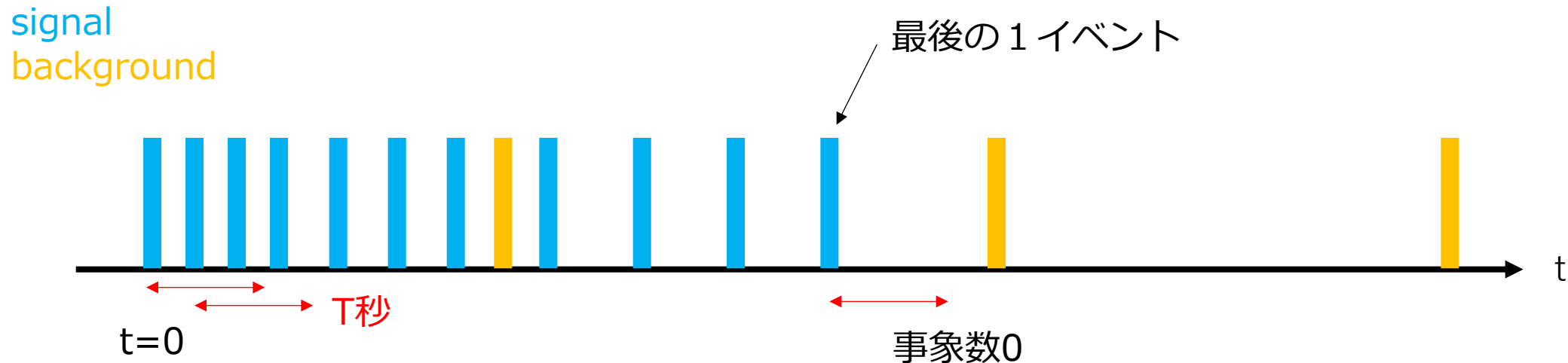
SKのbackgroundを定量的に評価し、ある確率以上で最後の1イベントがsignalであるといえる探索手法を考案

最後の1イベント

最後のイベントから
140秒前

最後の1イベントの決め方

- backgroundが1イベント以上こない確率が $X\sigma$ 以上となる時間幅 T とエネルギー閾値 E_{th} を決める
→ T 秒間にくるイベントは $X\sigma$ 以上の確率でsignalといえる
- $t=0$ から順に T 秒間内にある事象数をカウント
- T 秒間にくる事象数が0になると終わりとして定義
→その1つ前の時間幅にきた最後のイベントを最後の1イベントとする

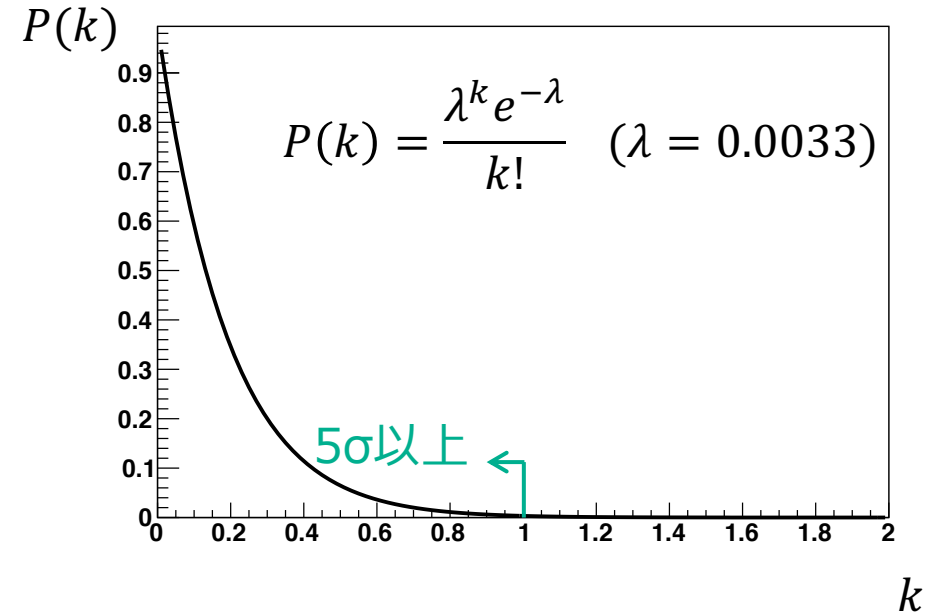


Backgroundの評価

適切な時間幅とエネルギー閾値を決める
→background rateのみを用いて考える

- Poisson分布を用いて、ある現象が1回未満になる確率が 5σ 以上となる期待値を求める
→0.0033(event)

- ある時間幅を設定し、background rateから0.0033(event)を下回るエネルギー閾値を選ぶ
→時間幅：15s、エネルギー閾値：9.5 MeV



SK(22.5 kton)の期待値

エネルギー閾値 (MeV)	background rate (Hz)
5.0	0.00824918
7.0	0.00123796
9.0	0.000347092
9.5	0.000208255

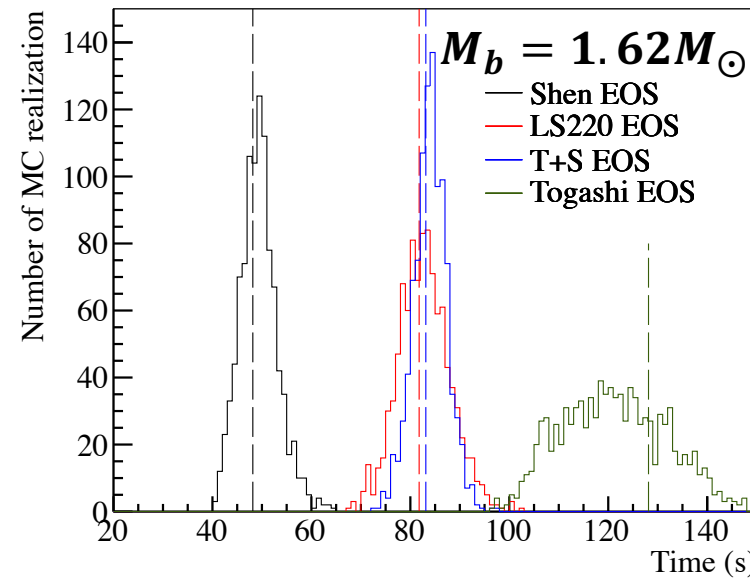
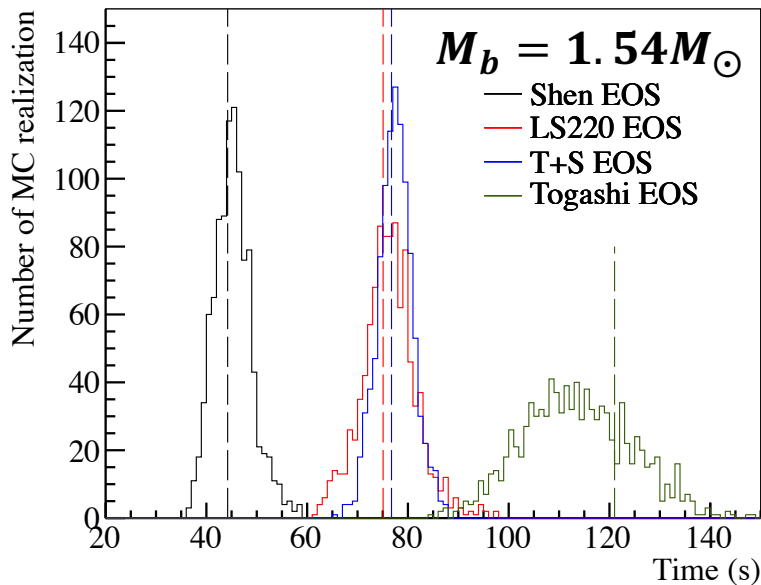
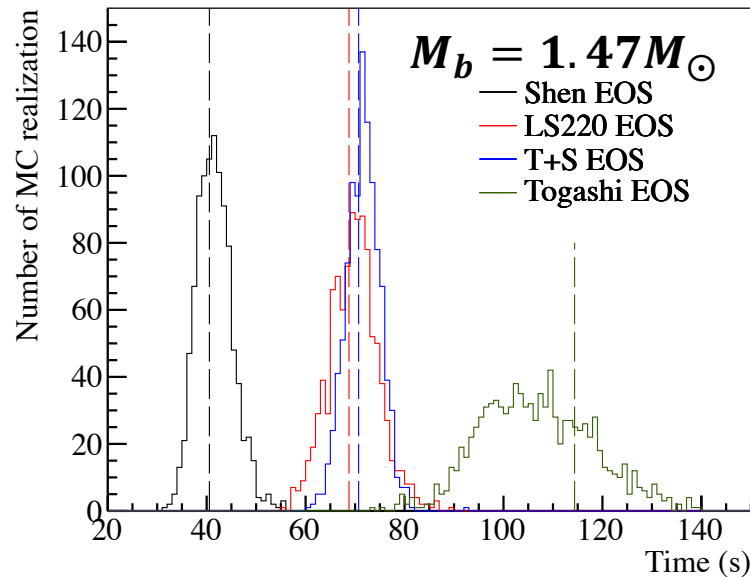
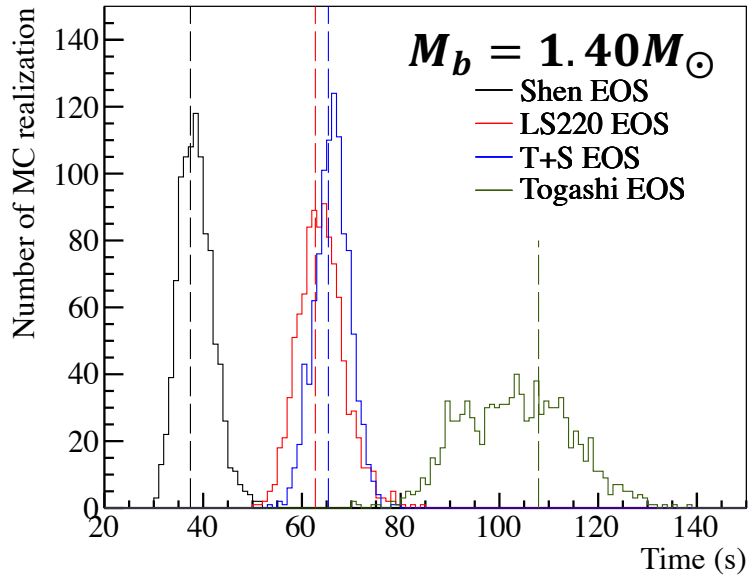
最後の1イベントの決定

- モンテカルロ(MC)シミュレーションをそれぞれの状態方程式で1000回行う
 - 仮定① : 距離 = 10 kpc
 - 仮定② : SKで観測(22.5 kton)
 - 仮定③ : $E_{th} = 9.5$ MeV以上は検出効率100%
 - $E_{th} = 9.5$ MeVのbackground rateを用いて0~20000秒までランダムにbackgroundイベントの生成を1000回行う
- signalイベントとbackgroundイベントを合わせ、最後の1イベントを決定

SK(22.5 kton)の期待値

エネルギー閾値 (MeV)	background rate (Hz)
5.0	0.00824918
7.0	0.00123796
9.0	0.000347092
9.5	0.000208255

最後の1イベントの時間分布



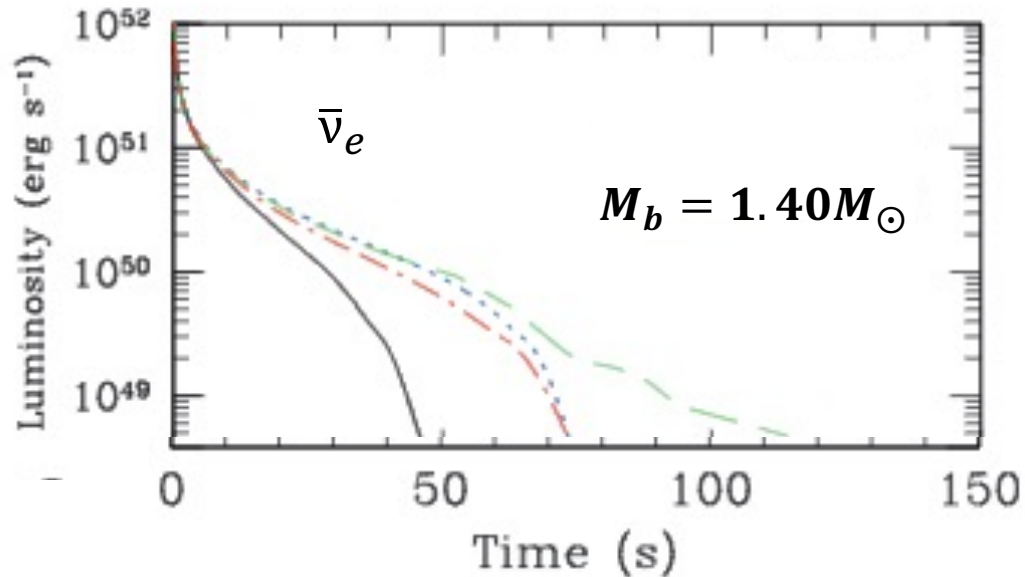
backgroundも含む
シミュレーション結果

点線：理論的期待値から求めた
最後の1イベントの時間

- 状態方程式によって
最後の1イベントの時間に違い
- Togashi EOSは時間分布の
広がりが大きく、期待値より
短くなる傾向

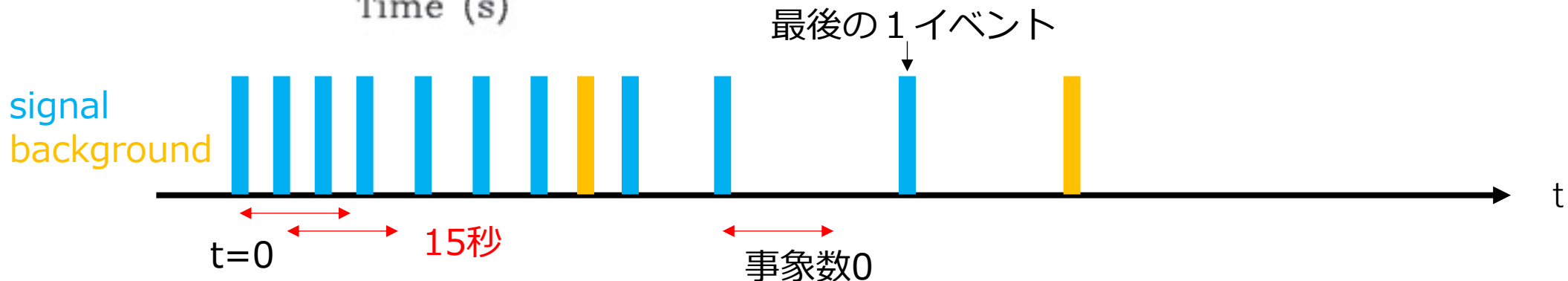
最後の1イベントの時間分布

Togashi EOSモデルは後期のsignalイベントの時間幅が大きい
 →50.7%の確率でsignalの最後の1イベントより前のイベントを選んでしまう



Togashi EOS	解析により損をする時間 (s)
$1.40M_{\odot}$	4.28
$1.47M_{\odot}$	9.36
$1.54M_{\odot}$	7.90
$1.62M_{\odot}$	7.27

理論的期待値—グラフのピーク値



まとめと今後の展望

- 超新星爆発が起こった時にSKで観測される後期のニュートリノイベントに注目
- SKのbackgroundを定量的に評価し、signalを探索する条件を設定
 - 時間幅15s、エネルギー閾値9.5 MeV
- 様々なモデルを用いてMCシミュレーションを1000回行い、最後の1イベントを決定
 - Togashi EOSは理論的期待値より継続時間が短くなる傾向(平均7.22s)
→状態方程式によるsignal継続時間の違いを見ることができる
- SKのdetector simulationを用いて、中性子捕獲により最後の逆ベータ崩壊イベント($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)を探索する