

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

2022年1月7日@超新星研究会（オンライン）

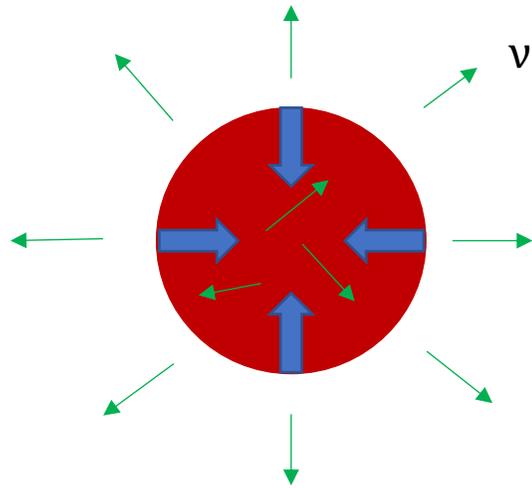
中西史美(岡山大理)

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, 森正光(東大総合文化),
原田了(理研), Roger Wendell(京大理)

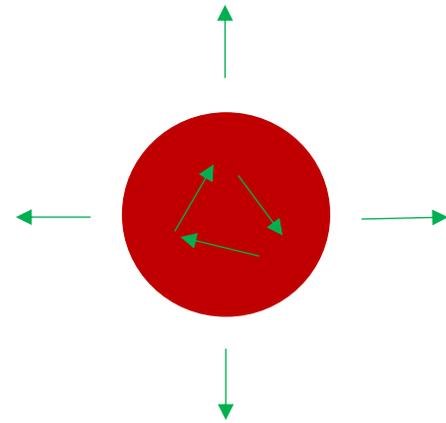
- インTRODクシヨン
 - 原始中性子星の冷却
- 本論
 - 後期イベントを用いた解析手法
 - 原始中性子星のモデル
 - 解析手法
 - シミュレーション結果
 - Backward time図のMCシミュレーションと期待値の比較
- まとめ

イントロダクション

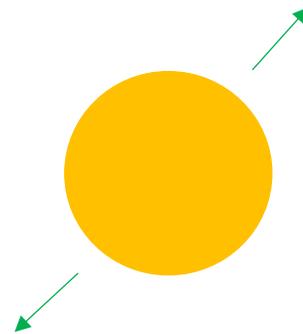
- 原始中性子星の冷却
 - 3段階の冷却過程が存在する



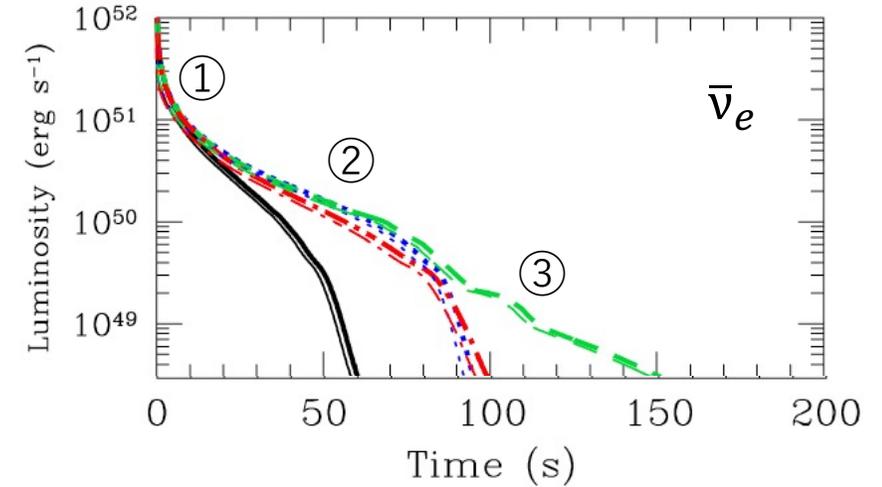
①原始中性子星が収縮



②収縮が止まる



③温度が低下



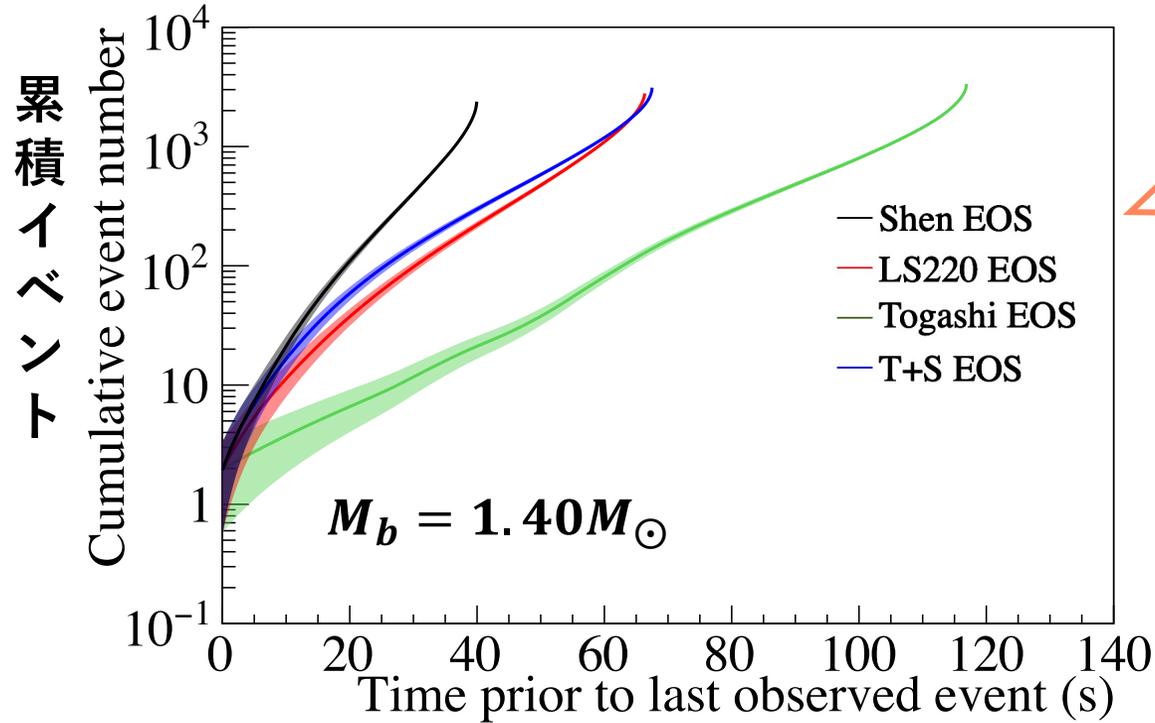
Nakazato *et al.*, (2021)
[arXiv;2108.03009]

原始中性子星の冷却過程は爆発過程に比べパラメータが少なくシンプル

→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

後期イベントを用いた解析手法

- Backward time解析による状態方程式の比較



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

状態方程式の差が顕著に現れる



最後の1イベントの時間の統計的な広がりを知る必要がある



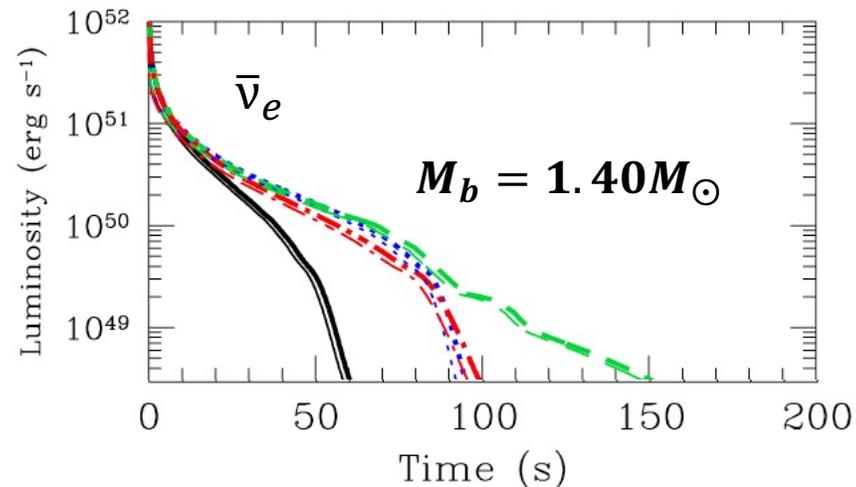
MCシミュレーションを1000回

最後の1イベント

最後のイベントから140秒前

原始中性子星のモデル

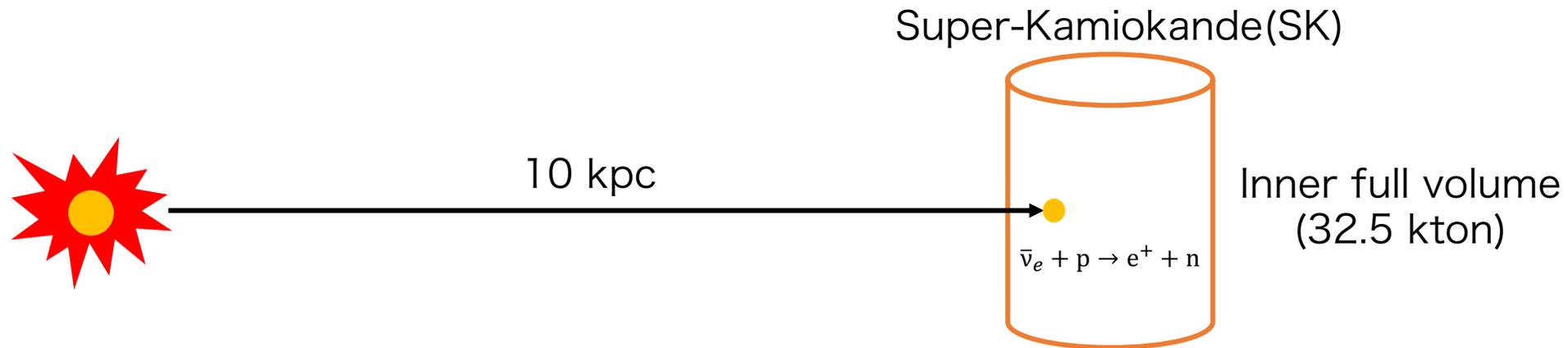
- 使用した状態方程式 (EOS)
 - Shen EOS
 - LS220 EOS
 - Togashi EOS
 - T+S EOS (高密度: Togashi, 低密度: Shen)
- バリオン質量(M_b)の範囲
 - $1.40 \sim 1.62 M_\odot$



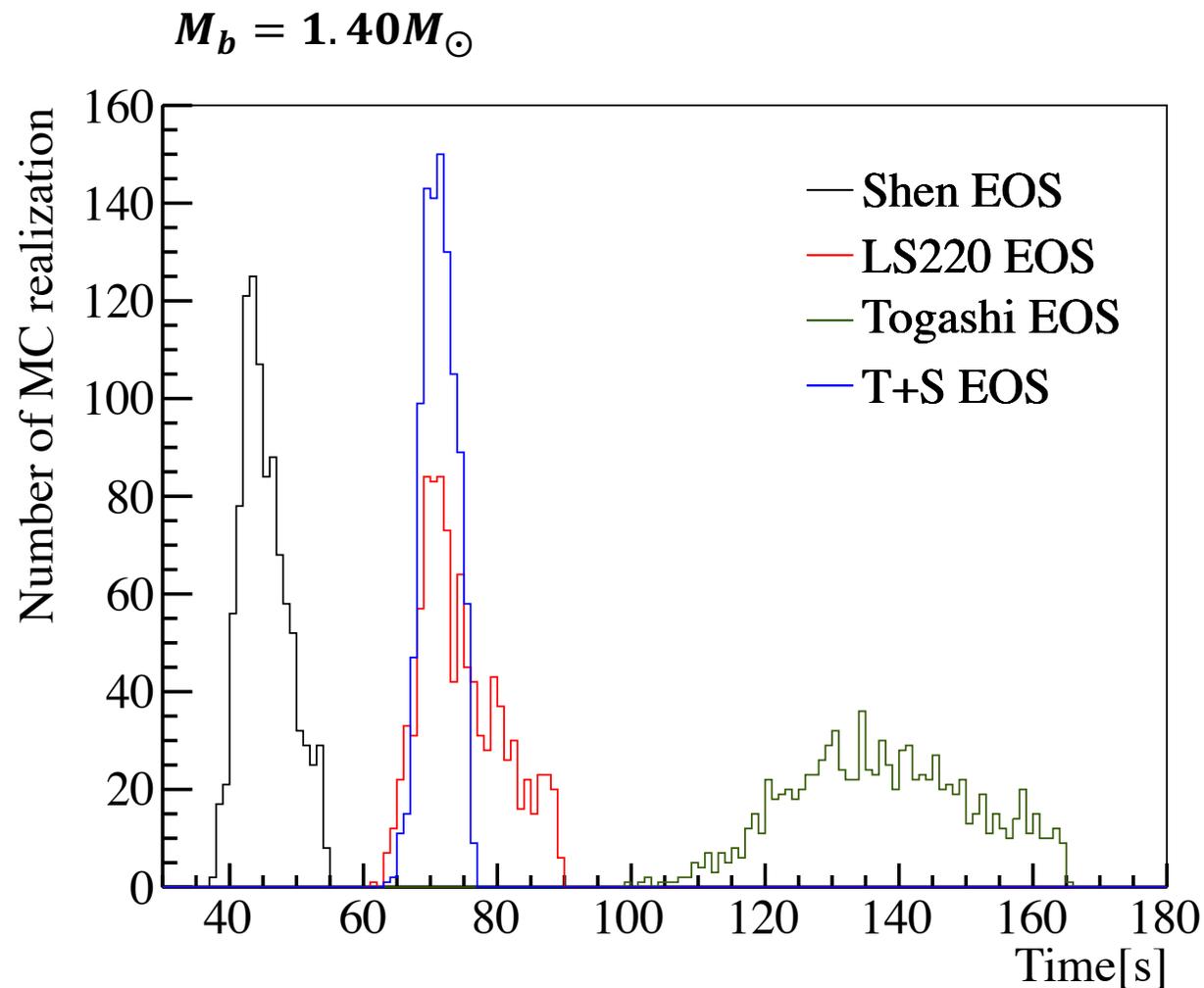
ニュートリノライトカーブ
時間が経つにつれ、状態方程式によって
ニュートリノ放出に変化

シミュレーションの流れ

- モンテカルロ(MC)シミュレーションで最後の1イベントの時間を調べる
 - 仮定①：距離 = 10 kpc
 - 仮定②：Super-Kamiokande(SK)で観測(32.5 kton)
 - 仮定③：逆ベータ崩壊(IBD)のみを考慮
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
 - 仮定④：ポジトロンの $E_{\text{th}} = 3 \text{ MeV}$ 以上は検出効率100%



最後の1イベントの時間分布



- 状態方程式によって最後の1イベントの時間に違い
- Shen EOS, LS220 EOS, T+S EOS は時間幅が小さい
- Togashi EOS は時間幅が大きい

	最頻値 (s)	半値幅/最頻値
Shen EOS	43.5	0.138
LS220 EOS	68.5	0.161
Togashi EOS	134.5	0.357
T+S EOS	69.5	0.086

- Backward time 解析は原始中性子星の質量などの情報を得るために重要な解析であり、状態方程式の区別も可能
- MCシミュレーションで最後の1イベントの時間を計算
- 状態方程式によって最後の1イベントの時間や時間幅が違う

[backgroundを考慮したとき]

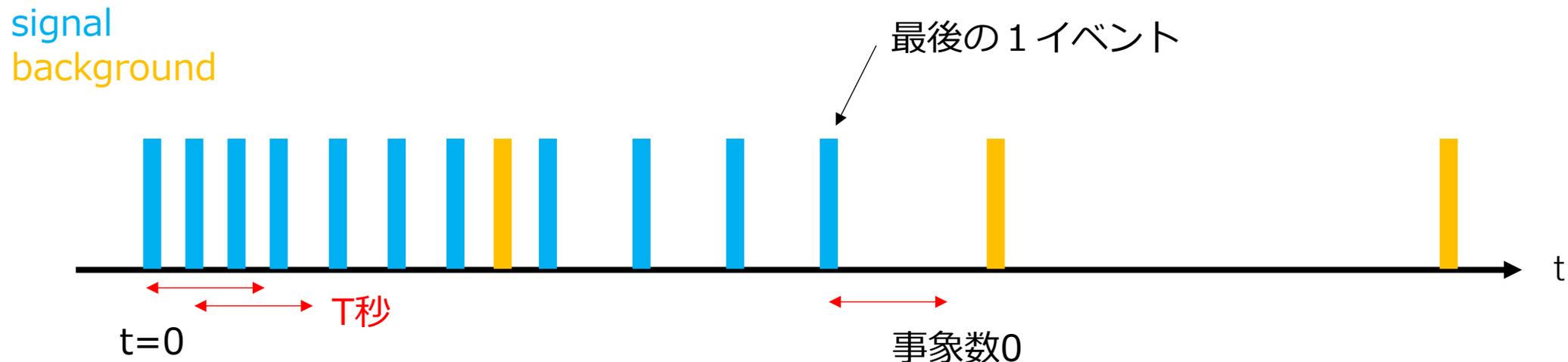
- SKのbackgroundを定量的に評価し、ある確率以上で最後の1イベントがsignalであるといえる探索手法を考案する必要



- 同様のモデルを使用し、最後の1イベントの時間分布を作成

最後の1イベントの決め方

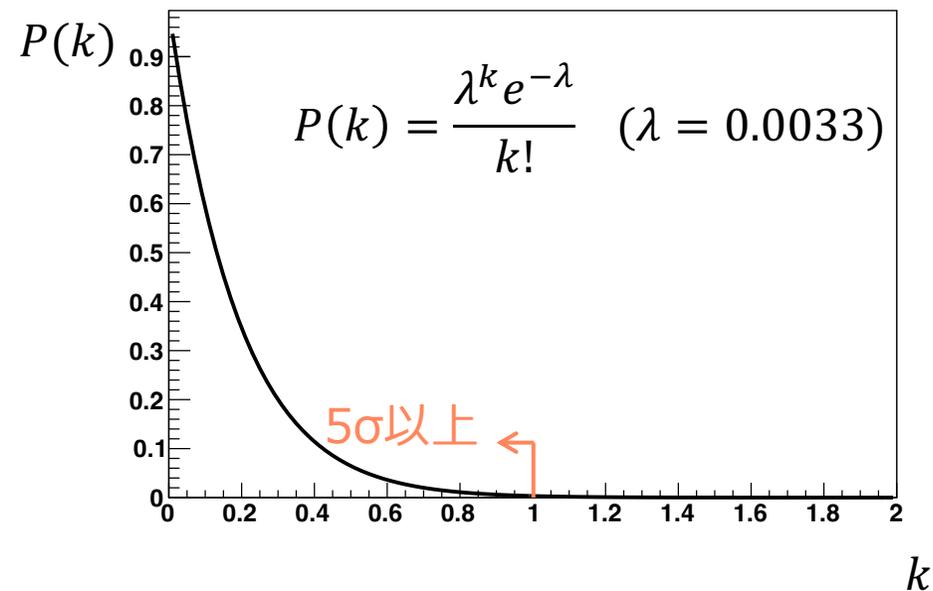
- backgroundが1イベント以上来ない確率が $X\sigma$ 以上となる時間幅 T とエネルギー閾値 E_{th} を決める
 - T 秒間にくるイベントは $X\sigma$ 以上の確率でsignalといえる
- $t=0$ から順に T 秒間内にある事象数をカウント
- T 秒間にくる事象数が0になると終わりとして定義
 - その1つ前の時間幅にきた最後のイベントを最後の1イベントとする



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、ある事象が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：15 s, エネルギー閾値：9.5 MeV

SK(22.5 kton)の期待値 →



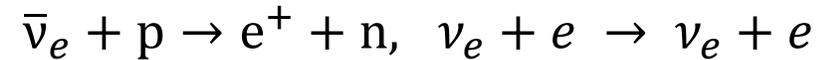
エネルギー閾値 (MeV)	background rate (Hz)
5.0	0.0082
7.0	0.0012
9.0	0.0003
9.5	0.0002

- モンテカルロ(MC)シミュレーションをそれぞれのEOSで1000回行う

仮定①：距離 = 10 kpc

仮定②：スーパーカミオカンデ(SK)で観測(22.5 kton)

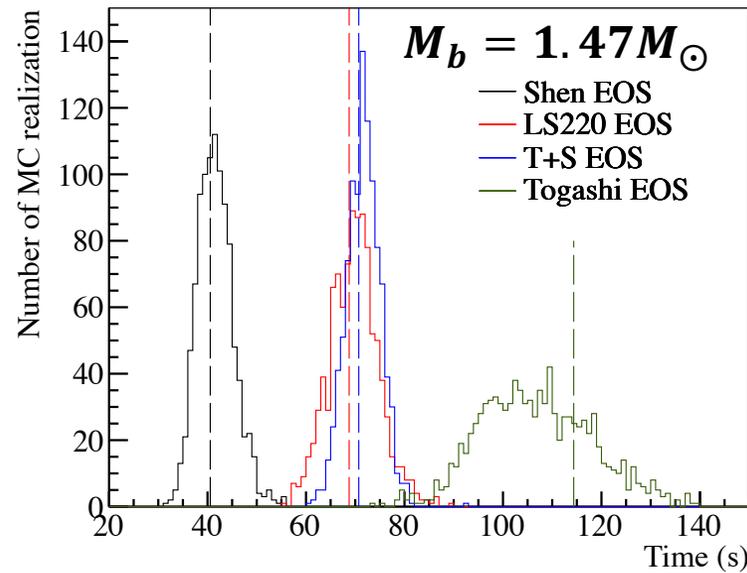
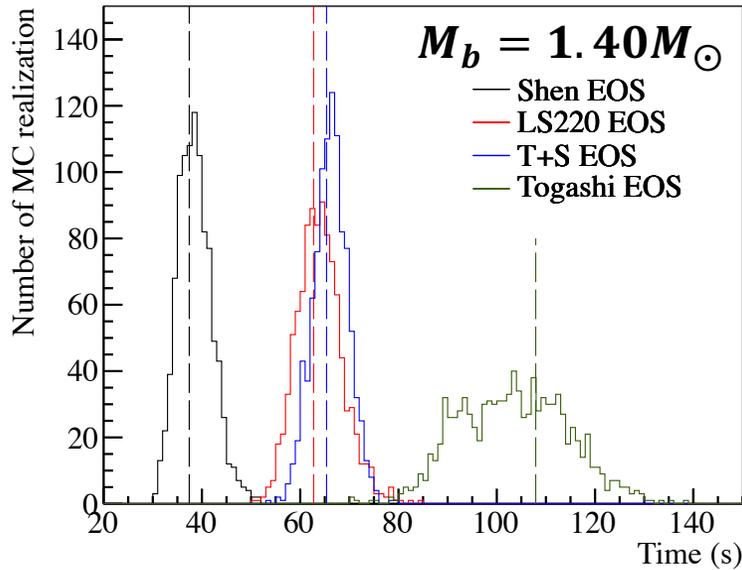
仮定③：逆ベータ崩壊(IBD)と電子散乱反応を考慮



仮定③： $E_{\text{th}} = 9.5 \text{ MeV}$ 以上は検出効率100%

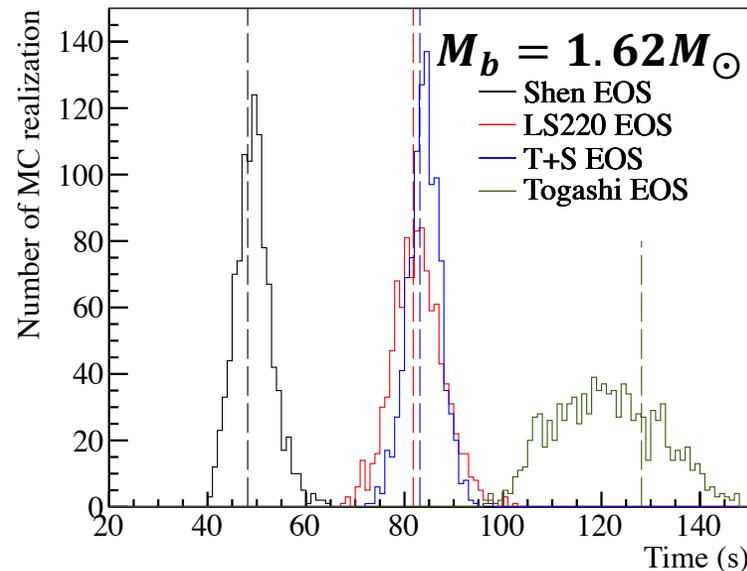
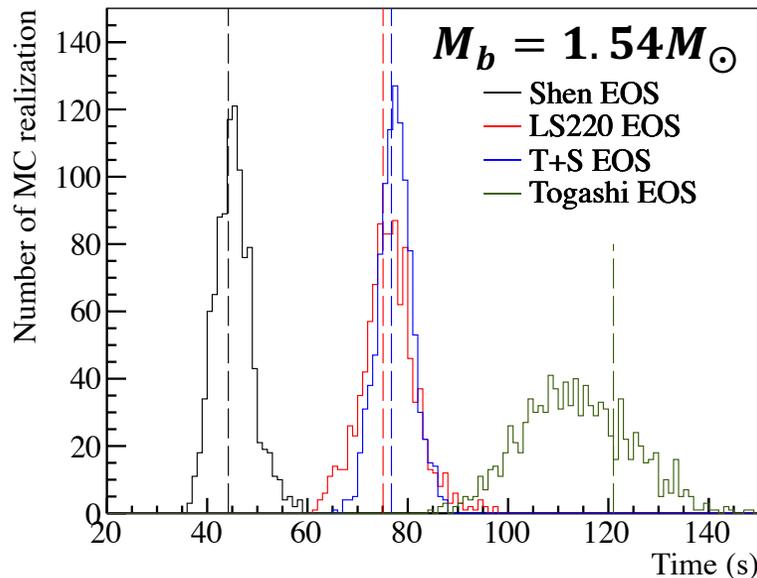
- $E_{\text{th}} = 9.5 \text{ MeV}$ のbackground rateを用いて0~20000秒までランダムにbackgroundイベントの生成を1000回行う
- signalイベントとbackgroundイベントを合わせ、最後の1イベントを決定

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



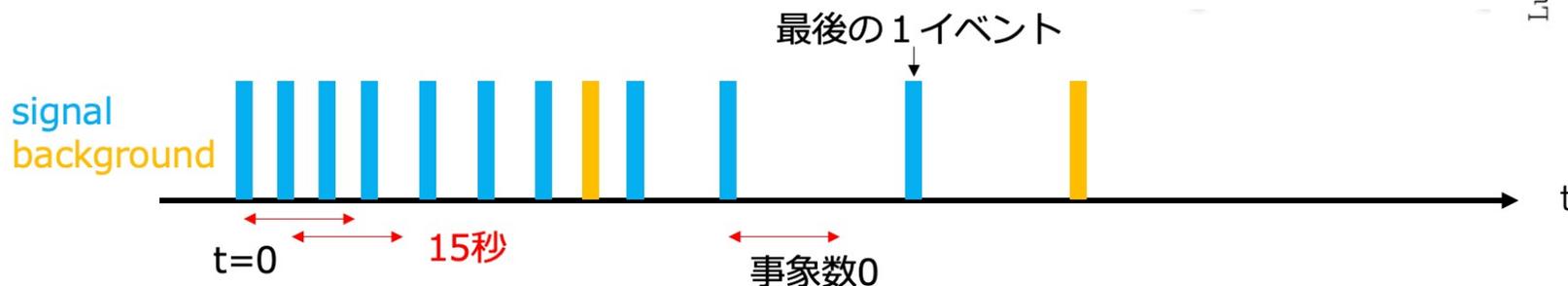
- 状態方程式によって最後の1イベントの時間に違い
- Togashi EOSは時間分布の広がりが大きく、期待値より短くなる傾向

最後の1イベントの時間分布

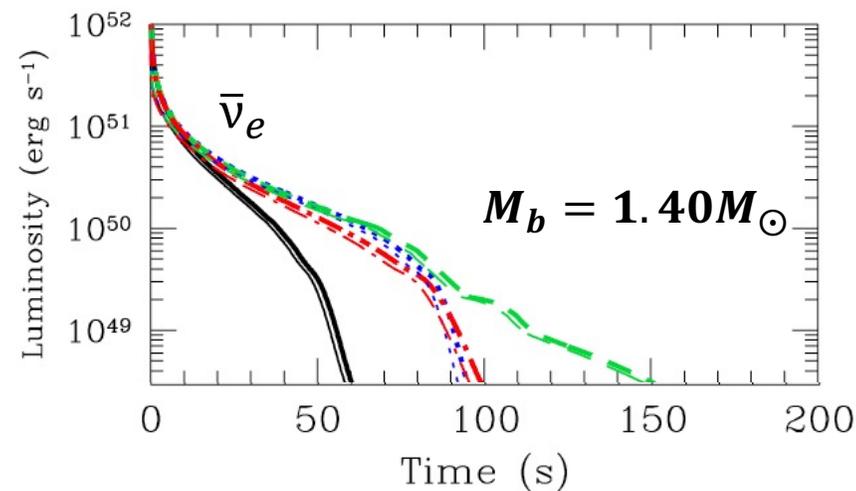
- Togashi EOSモデルは後期のsignalイベントの時間幅が大きい
→約45.3%の確率で最後の1イベントより前のイベントを選んでしまう

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

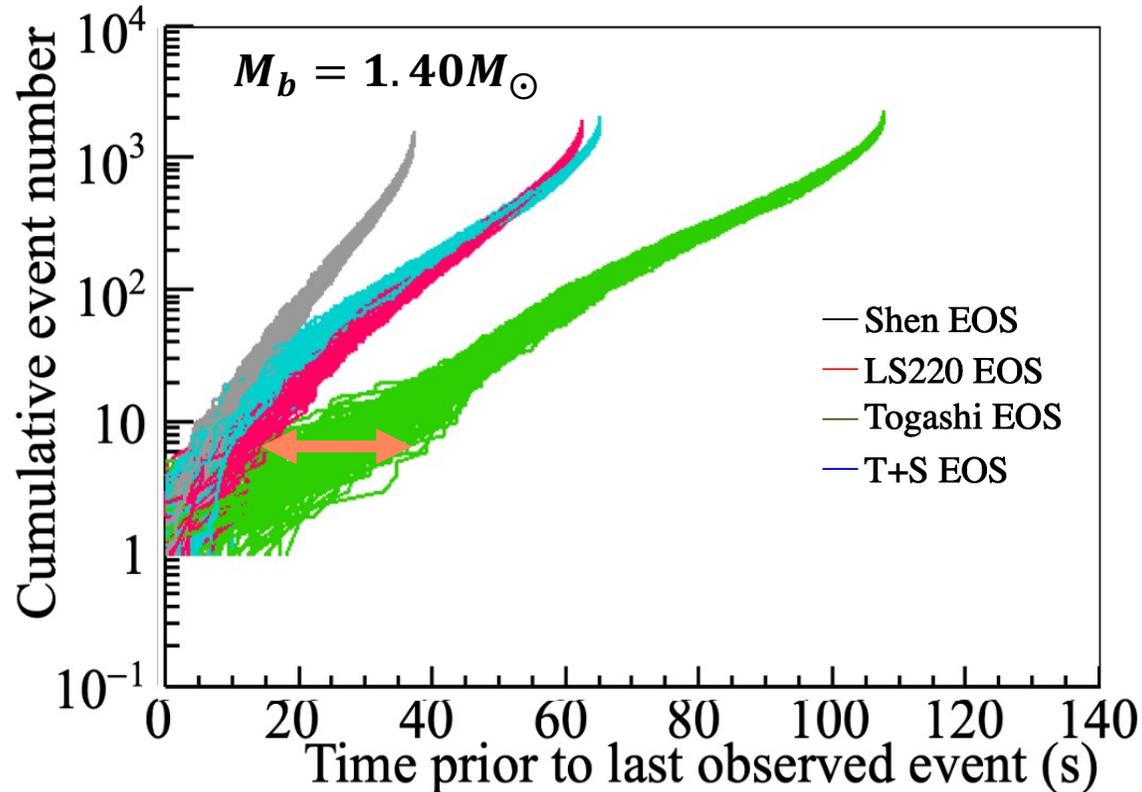


100秒以上続くモデルでの10秒以下の損失
→妥当な解析といえる



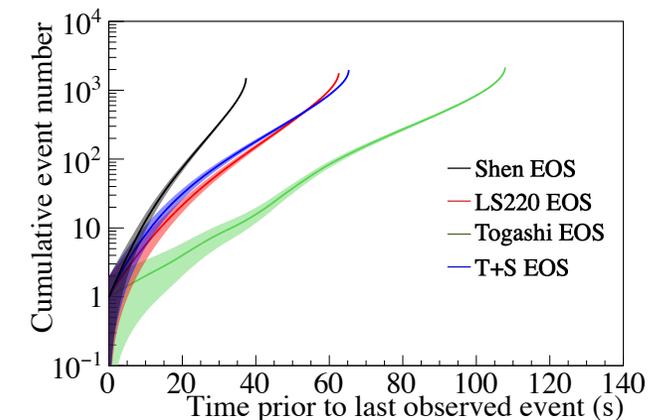
Nakazato *et al.*, (2021)
[arXiv;2108.03009]

- MCシミュレーションを用いてBackward time図を作成する

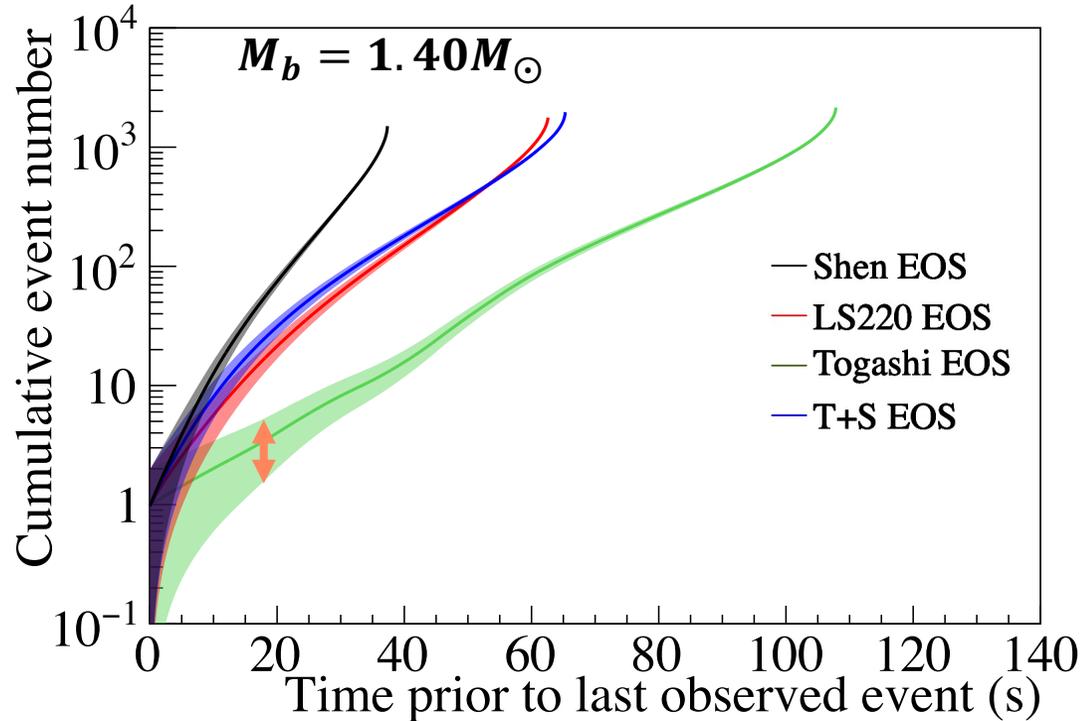


MCシミュレーション100回分を載せた図(1線が1MC)

MCシミュレーションでは、あるイベントの時間を乱数で決定
→時間に対するエラーがつく(横軸)



- MCシミュレーションで下図を作ることは難しい



期待値を用いたBackward time図

期待値では、ある時間幅での期待値を計算
→期待値に対する統計エラーがつく(縦軸)

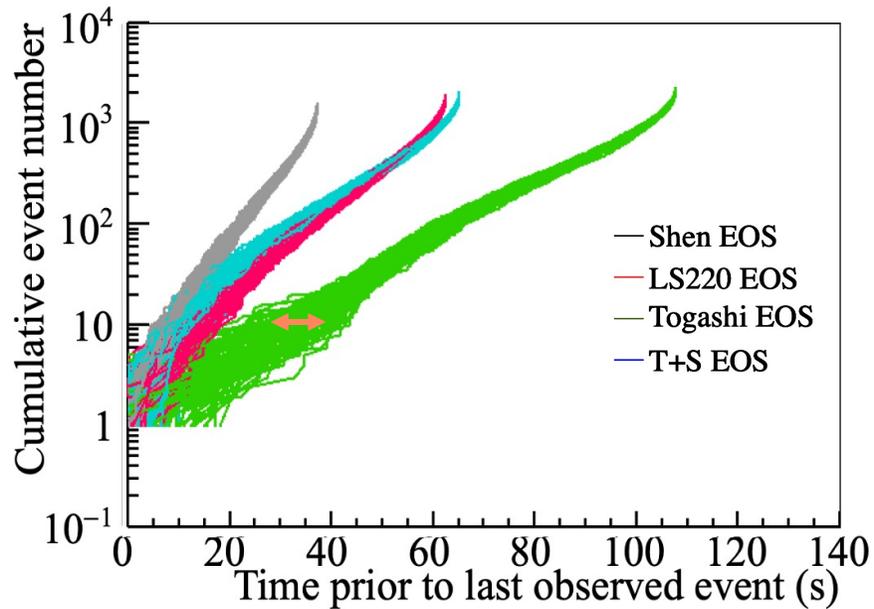


期待値から時間のエラーを見積もることは
難しい
→実際の観測から左図のような図を作ることも
難しい

期待値から時間のエラーを見積もることができないか

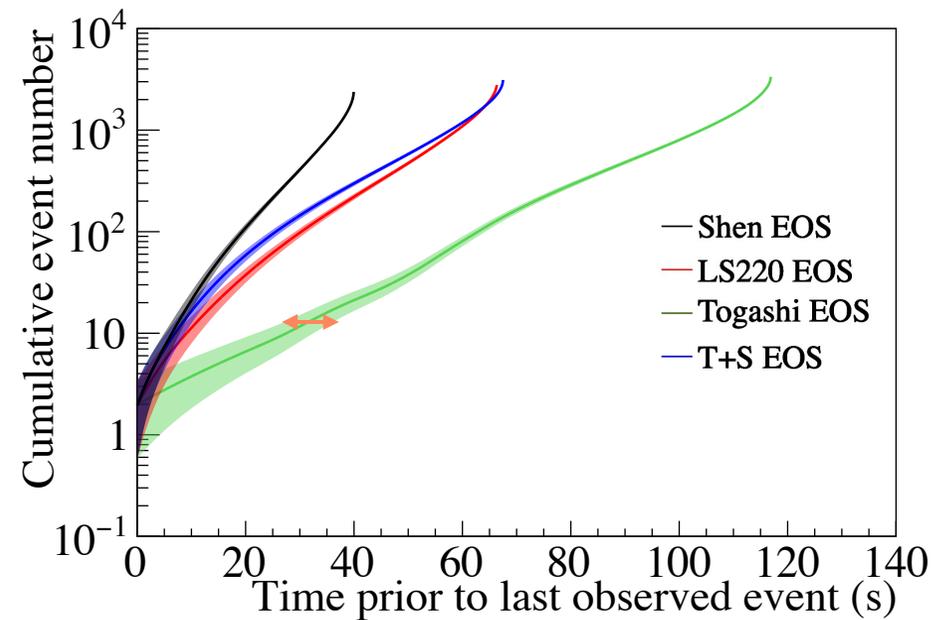
時間幅と期待値の統計エラーの比較方法

- MCシミュレーションの 1σ の時間幅と横に見た期待値の統計エラーを比較



MCシミュレーションの 1σ の時間幅

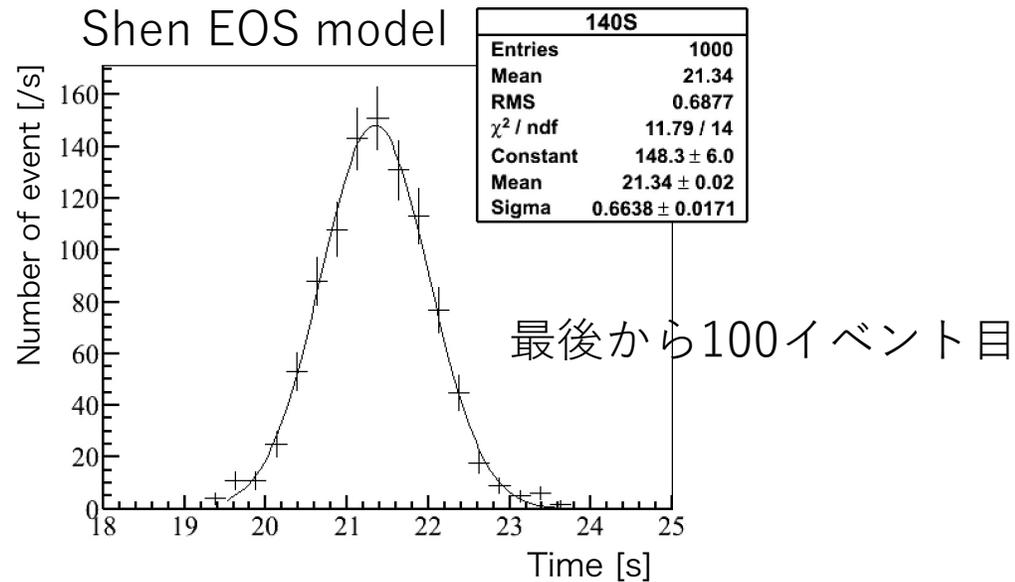
比較



縦軸の統計エラーを各イベントで
横に見た時の幅

1σ時間幅の計算方法

- MCシミュレーションを1000回行った結果を用いて、最後の1イベントから数えた各イベントの時間分布を作成

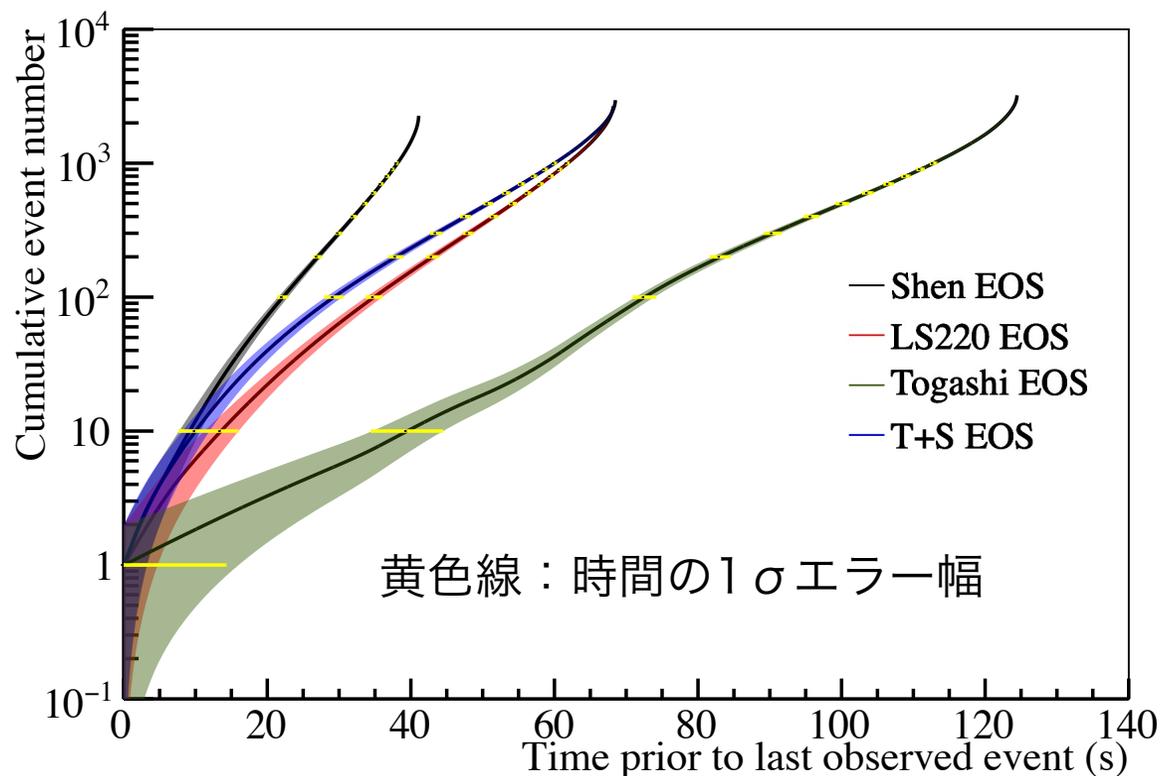


$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

標準偏差S

- 標準偏差の式を用いて1σの時間幅を計算する

- 期待値のBackward time図にMCシミュレーションから求めた 1σ エラーを重ねてプロット



統計エラーと概ね一致している



期待値から求められる縦軸のエラーを横に見た幅が時間(横軸)のエラーになるといえる

- 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15 s, 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7.22 s)
→状態方程式によりsignal継続時間の違いを見ることができる
- 期待値の統計エラーから時間のエラーを見積もる
 - MCシミュレーションの1 σ 時間幅を期待値の統計エラーに重ねる
→概ね一致する
- 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