

背景事象を考えた場合の超新星 ニュートリノの解析手法開発

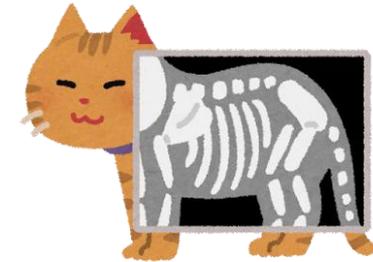
森 正光 (沼津高専)
nuLCコラボレーション

第12回超新星ニュートリノ研究会
3/9 沼津高専 静岡県総合コンベンション施設 プラサヴェルデ

1

超新星爆発

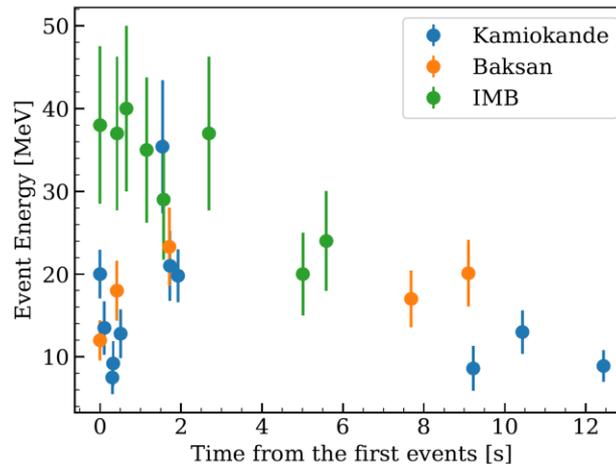
- 太陽の8倍以上の重い星の最期の大爆発
- 複雑な現象のため長時間計算が困難
- エネルギーの99%をニュートリノとして放出
 - ニュートリノは中心部を透過
 - 唯一の観測例: SN1987A



SN1987A events

- 11: Kamiokande [1]
- 8: IMB [2]
- 5: Baksan [3]

- [1] Hirata et al. 1987
- [2] Bionta et al. 1987
- [3] Alekseev et al. 1987

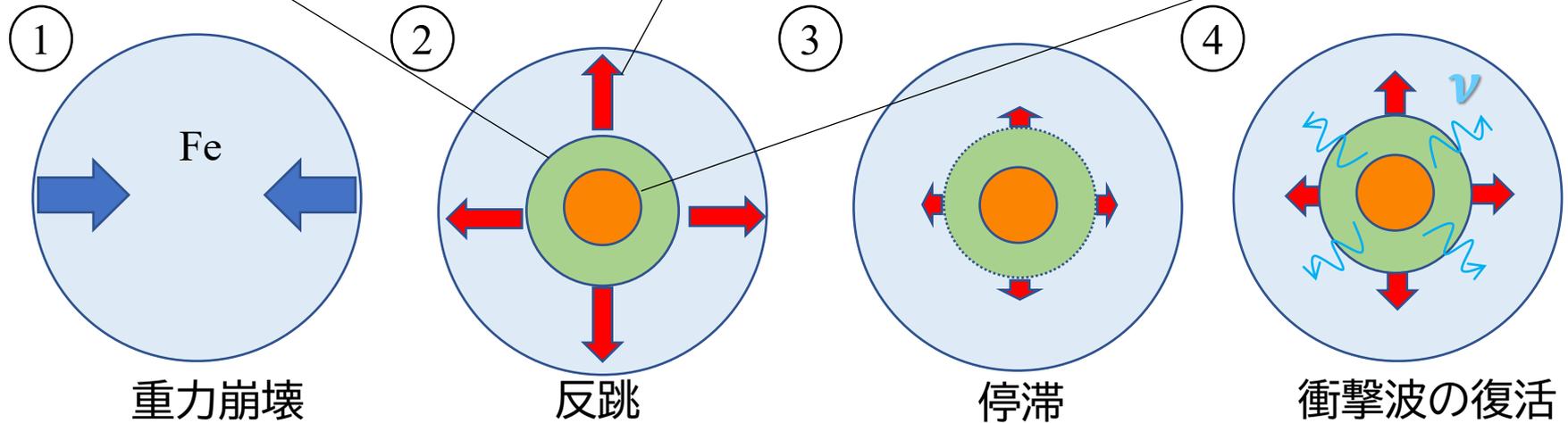


超新星爆発の時間発展

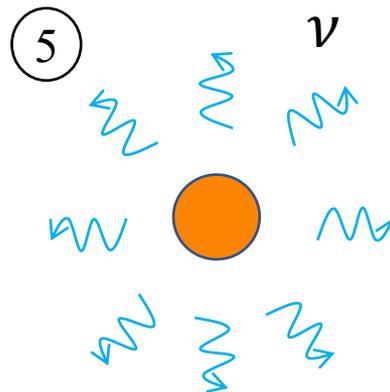
衝撃波

衝撃波の速度

Proto-neutron star (PNS)



約1秒



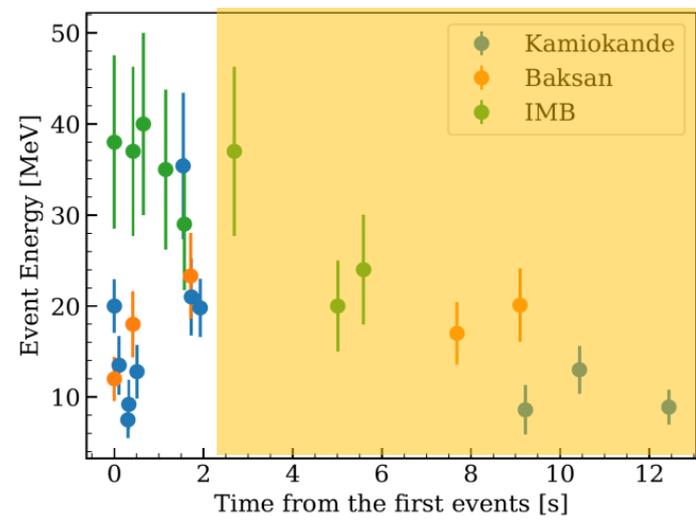
1分以上

PNSの冷却

超新星ニュートリノは長時間計算の時代へ

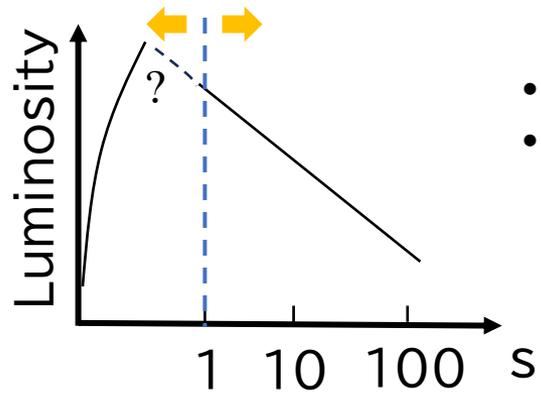
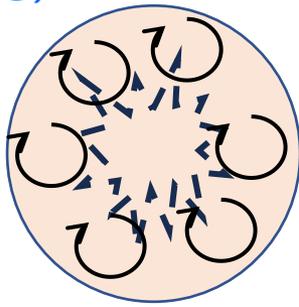
1. ニュートリノ放射は10秒以上続く
2. 後期は不定性が少ない

この時間が重要



多くの不定性 (< 1s)

- 質量
- EoS
- 乱流
- ニュートリノ振動
- etc..

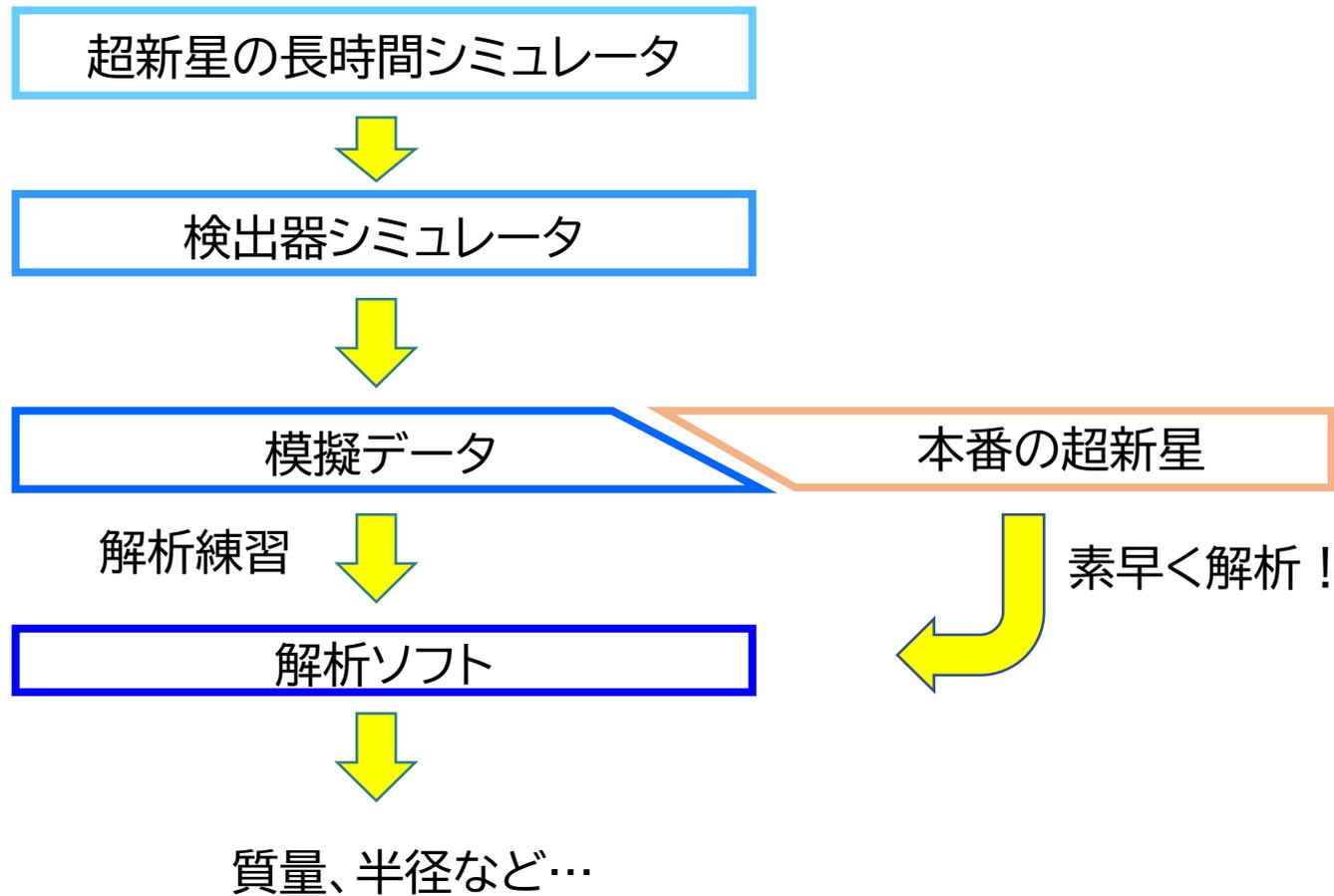


少ない不定性 (> 1s)

- 質量
- EoS



超新星爆発ニュートリノフレームワーク開発

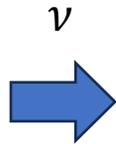
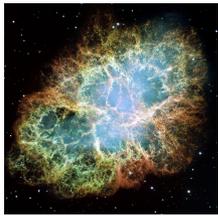


- 近い将来、系内超新星爆発が起きた場合の観測体制を構築

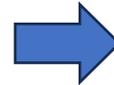
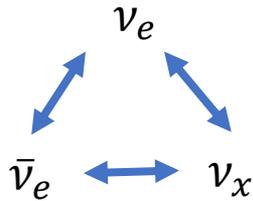
FOREST

- **FOR**ecasting **E**vents from **S**upernova
Theoretical modeling (FOREST)

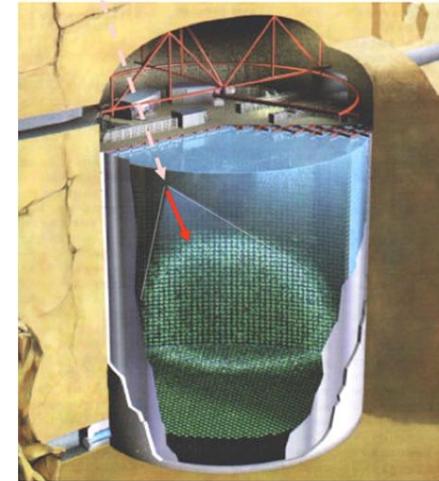
超新星爆発



ニュートリノ振動



検出器
例: スーパーカミオカンデ(SK)

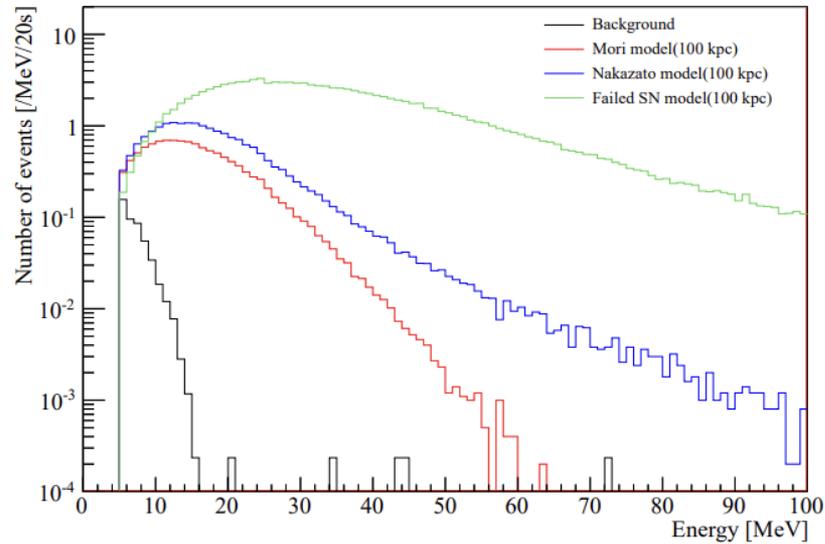


逆ベータ崩壊
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

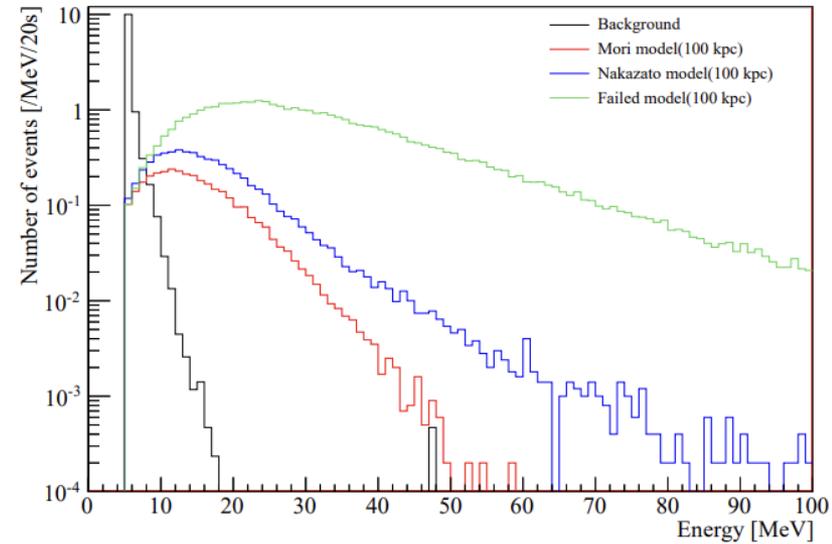
- シミュレーションデータ、解析解からニュートリノイベントを生成
- 背景事象もシミュレーションしよりリアルな状況の再現

SKの背景事象分布

Inside fiducial volume

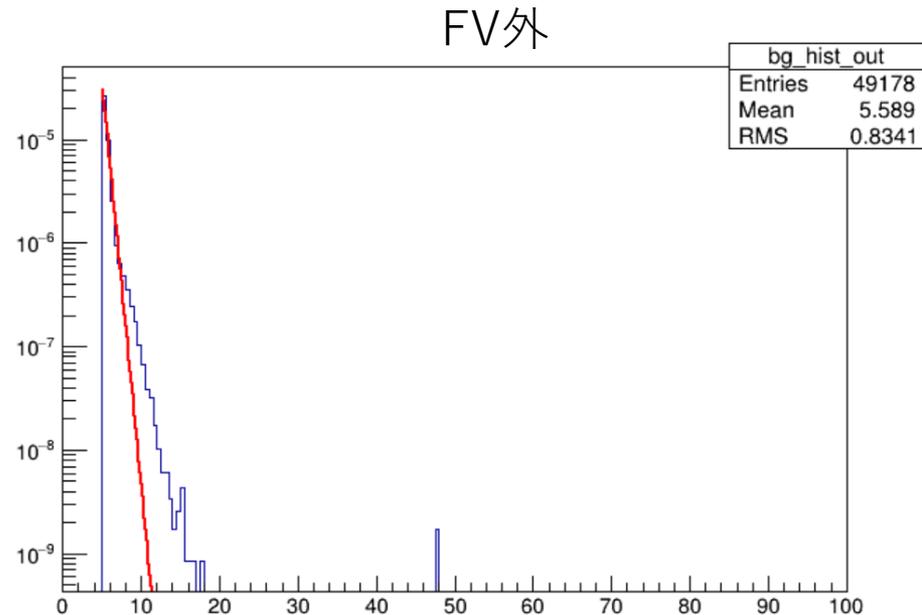
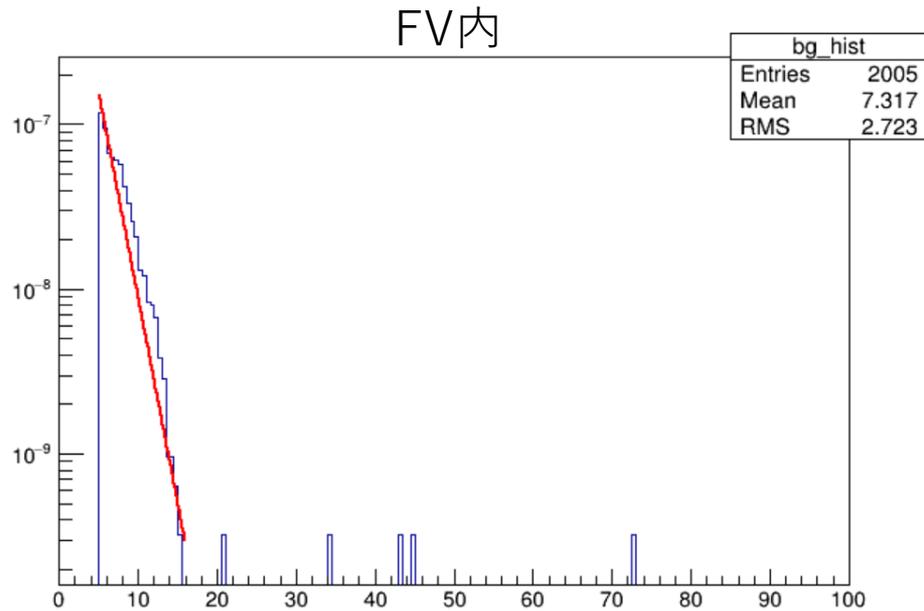


Outside fiducial volume



- 有効体積の外側で背景事象が多い
- 低エネルギー側ほど多くなる
- 公開されているデータは5MeVまで

SKの背景事象分布



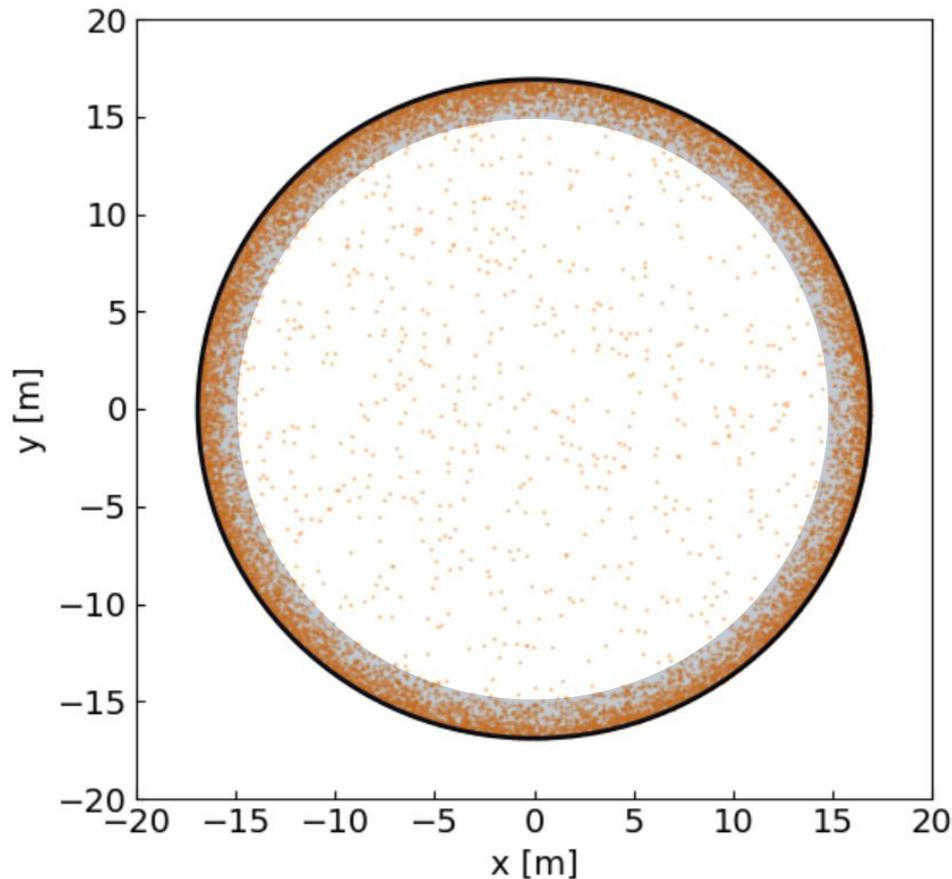
エネルギー [MeV]

エネルギー [MeV]

- 壁際や5MeV以下は外挿する
 - FV外
 - $F(E) \propto E^{-8}$
 - FV内
 - $F(E) \propto e^{-E}$

SKの背景事象シミュレーション

FORESTでシミュレーションしたSKの1日の背景事象分布



通常解析

壁際の背景事象をカット
体積: 22.5 kton

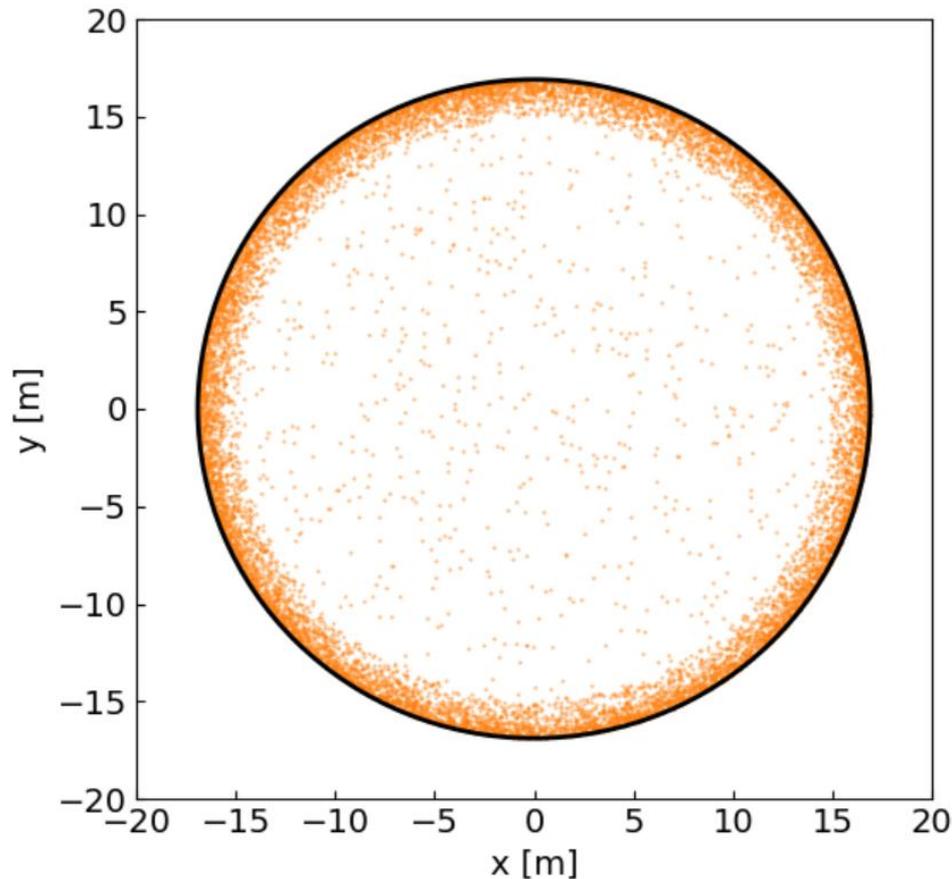
VS

超新星爆発解析

全体積を解析
体積: 32.5 kton

SKの背景事象シミュレーション

FORESTでシミュレーションしたSKの1日の背景事象分布



通常解析

壁際の背景事象をカット

体積: 22.5 kton

VS

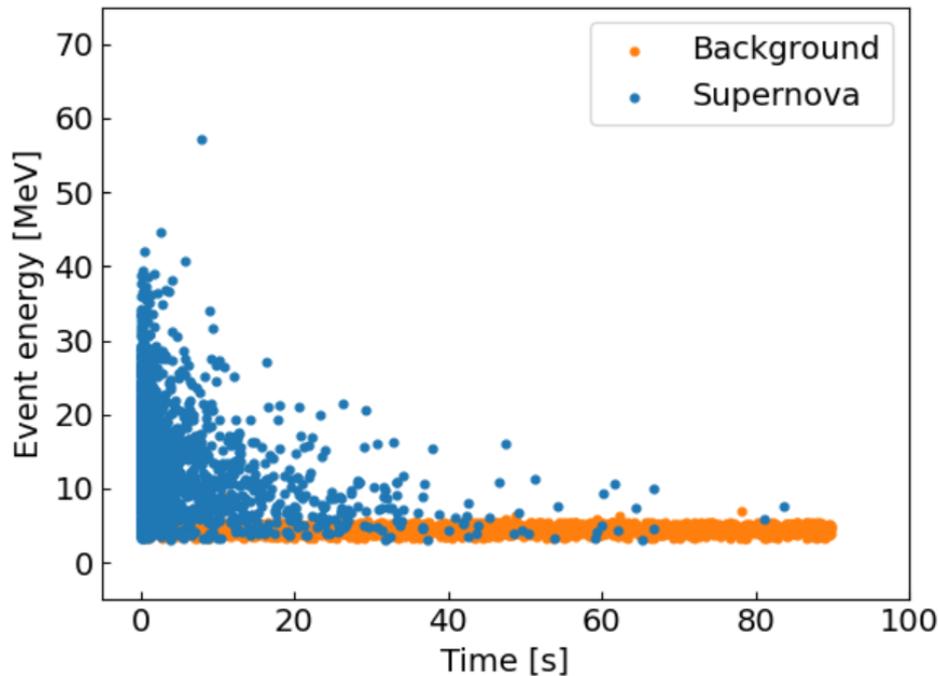
超新星爆発解析

全体積を解析

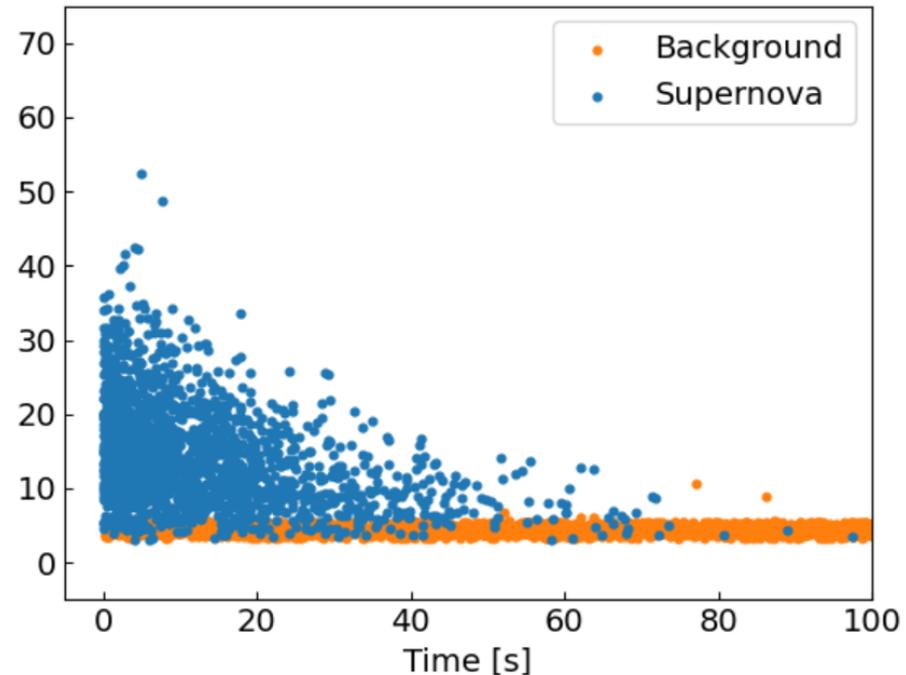
体積: 32.5 kton

模擬データ

シミュレーション



解析解



- 10kpcで超新星爆発が起こったと仮定

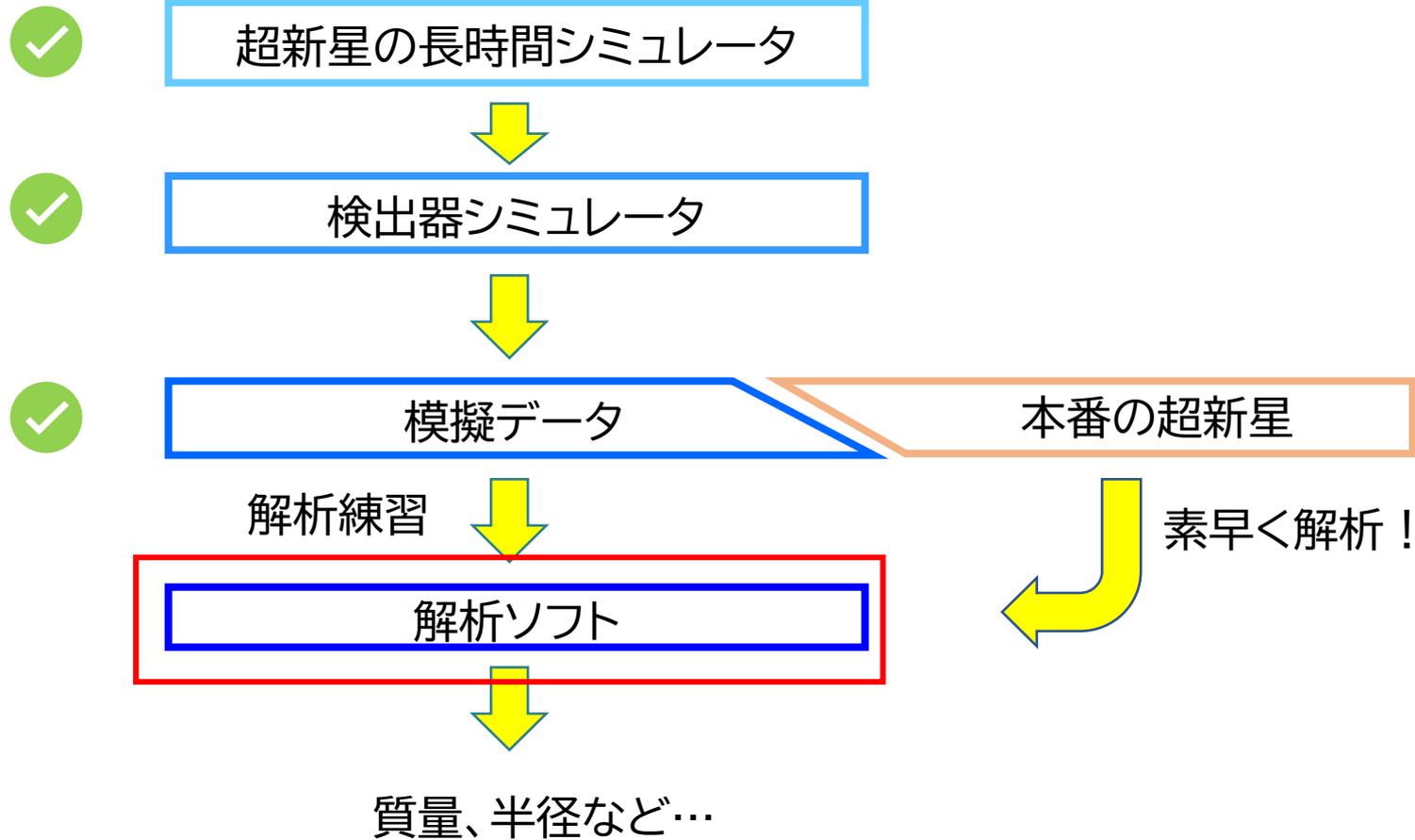
- 1分程度でもSNイベント

- 解析解

- Suwa et al. (2021)

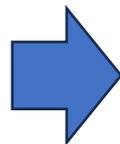
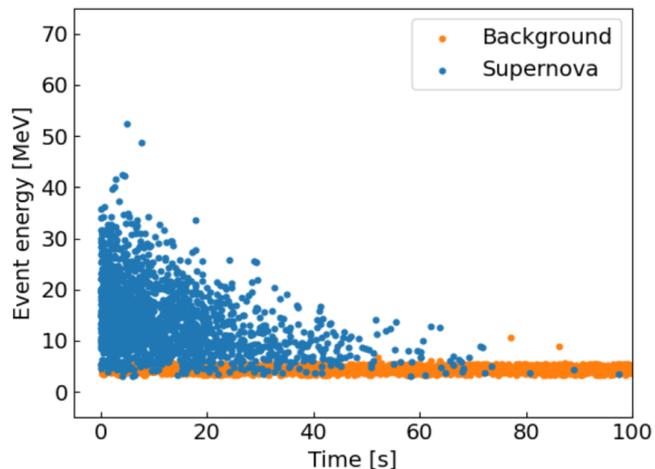
- $$R(t) = 720\text{s}^{-1} \left(\frac{M_{\text{det}}}{32.5 \text{ kton}} \right) \left(\frac{D}{10 \text{ kpc}} \right)^{-2} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{15/2} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-8} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^5 \left(\frac{t+t_0}{100 \text{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

超新星ニュートリノ解析

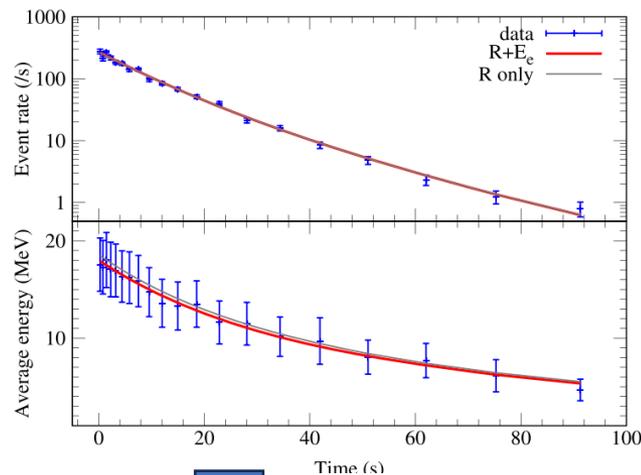


超新星爆発の解析手法

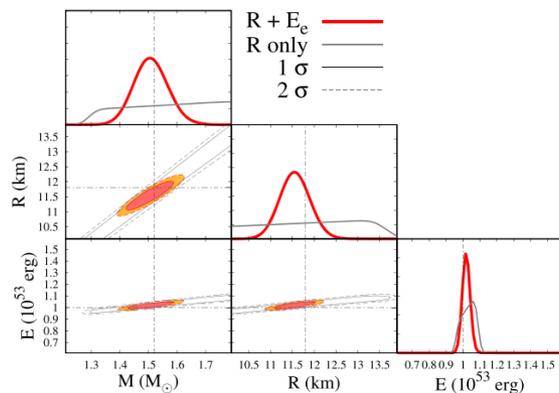
Supernovaイベント



時間ごとに区切る



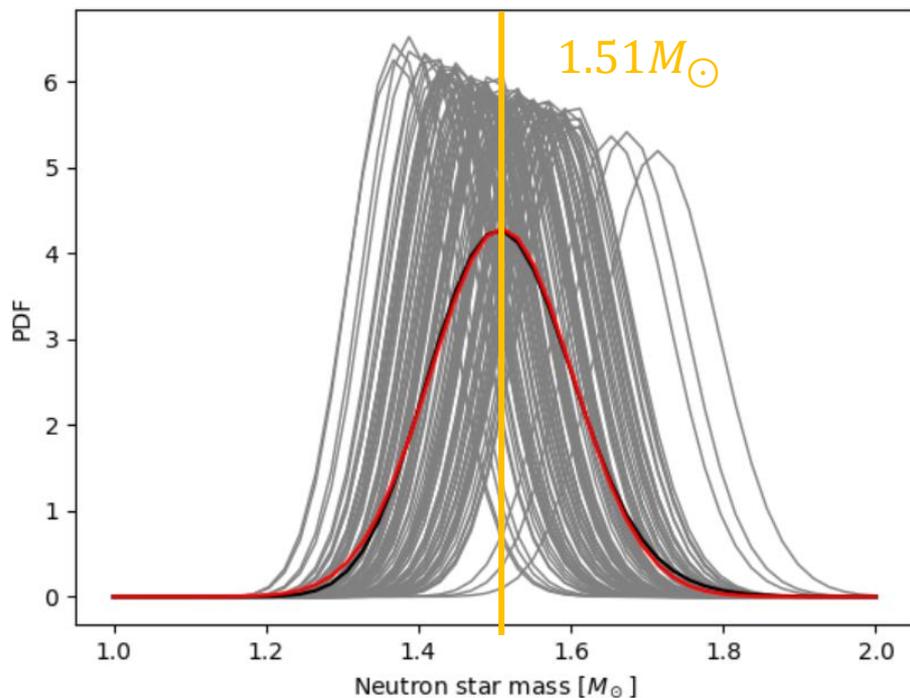
Event rate $R(t)$
and
Average energy $\langle E \rangle(t)$



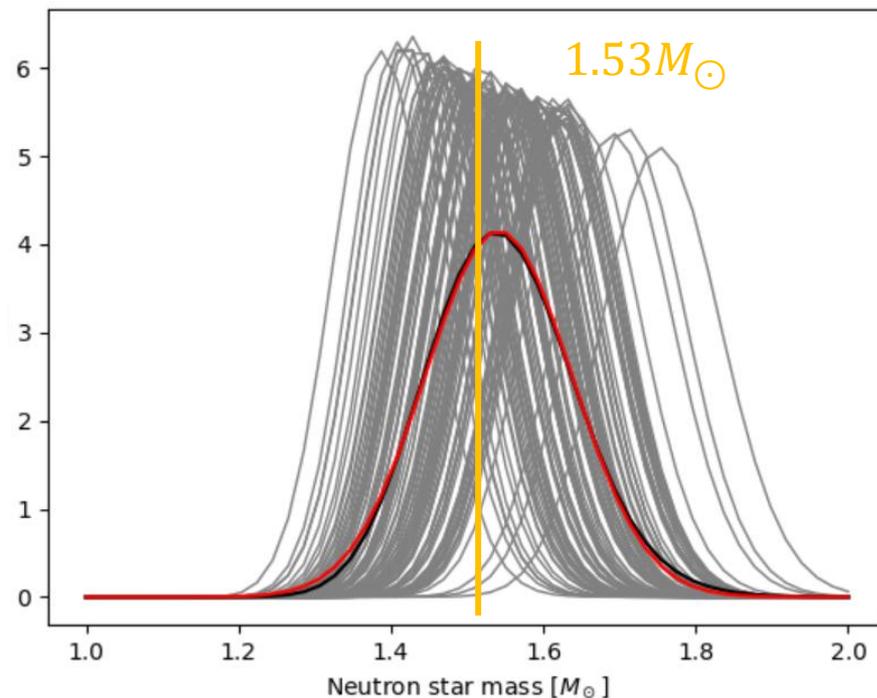
- Suwa et al. (2022), Harada et al. (2023)

パラメータ推定(22.5 kton)

バックグラウンドなし



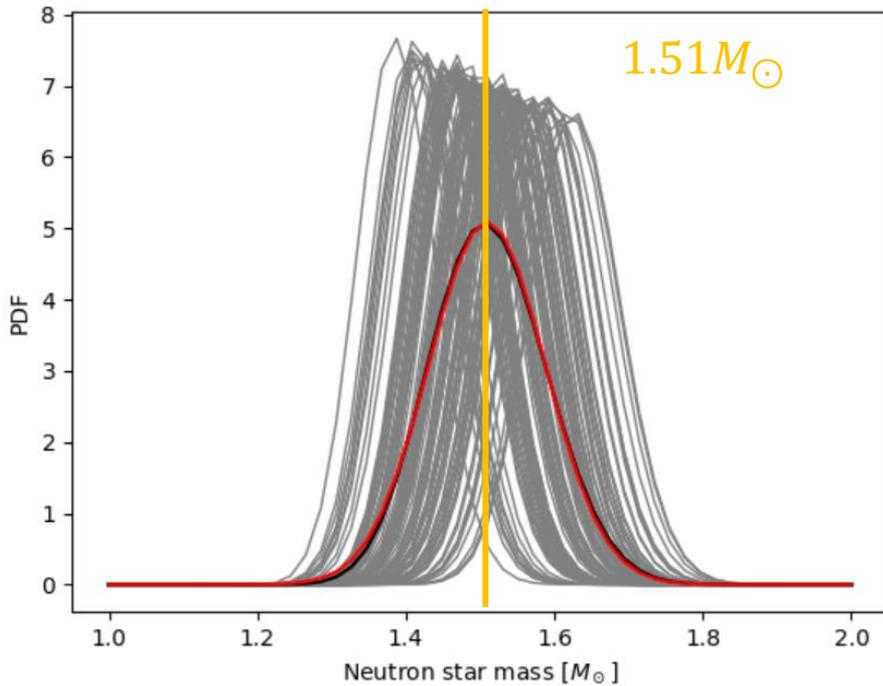
バックグラウンドあり



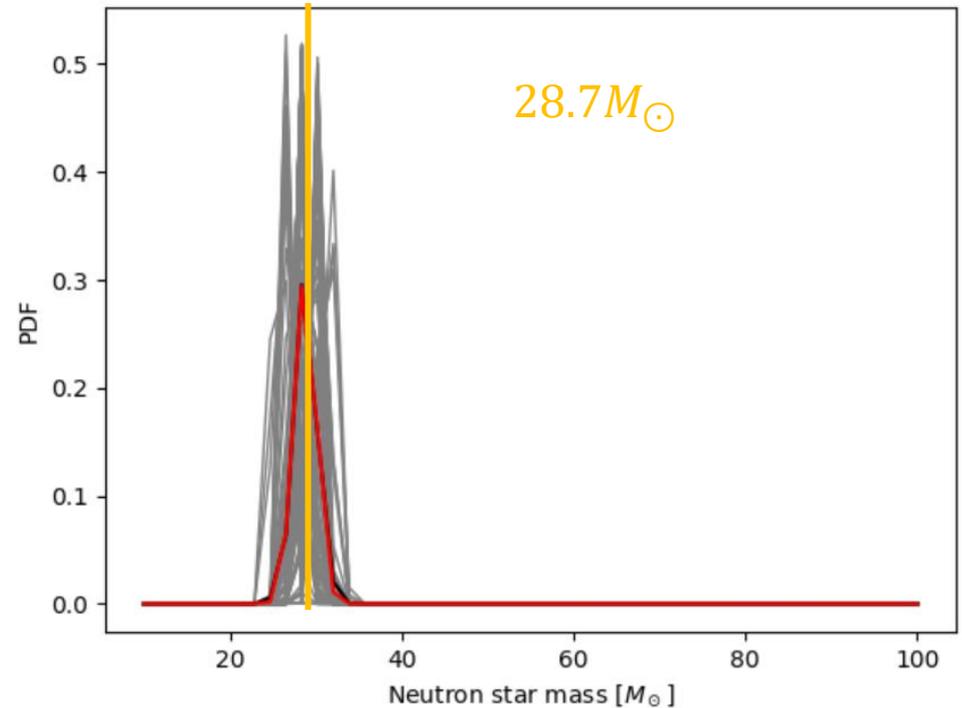
- 100個の模擬データを作って解析解より中性子星の質量を推定
 - Suwa et al. (2022), Harada et al. (2023)
 - 正解: $1.52M_{\odot}$
- 通常の体積(22.5kton)を適用

パラメータ推定(32.5kton)

バックグラウンドなし



バックグラウンドあり



- 3MeV以上の全体積のイベントを解析
 - 正解: $1.52M_{\odot}$
- 全体積のバックグラウンドでは質量が求められない

エネルギーカットの導入

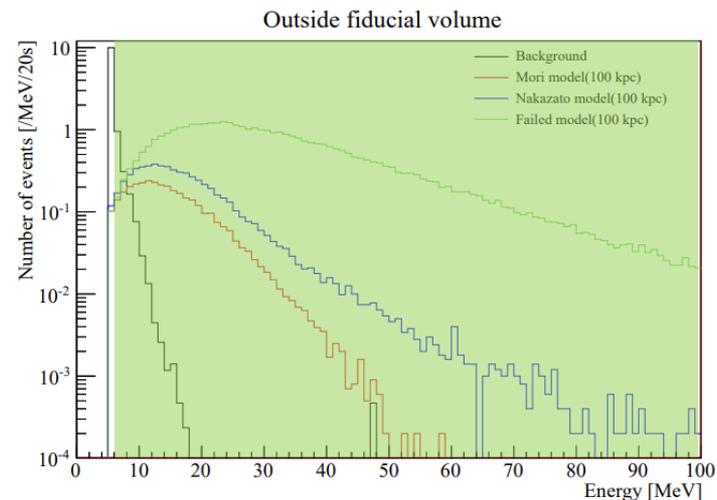
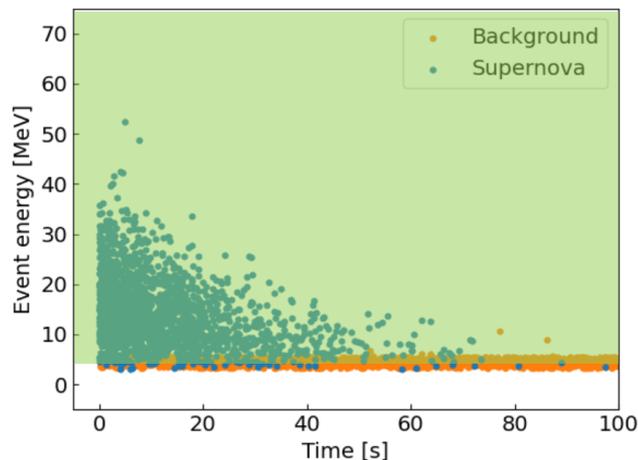
- Suwa et al. (2022), Harada et al. (2023)ではエネルギーカットが考えられていない

- $R(t) =$

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

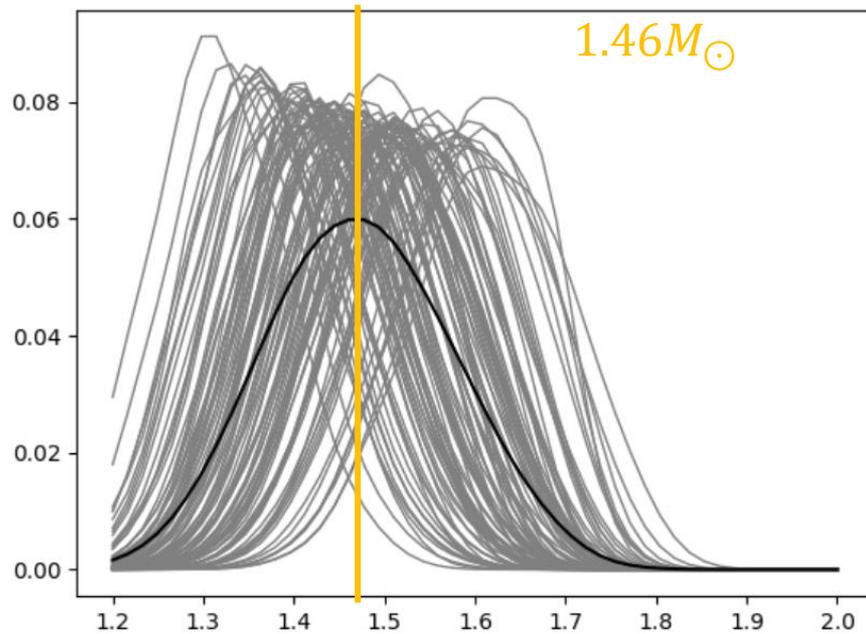
- ニュートリノのエネルギーはFermi-Drac分布に従うと仮定

- $f(E, t) = \int_{E_{\text{cut}}}^{\infty} \frac{E^4}{1 - e^{kT}}$

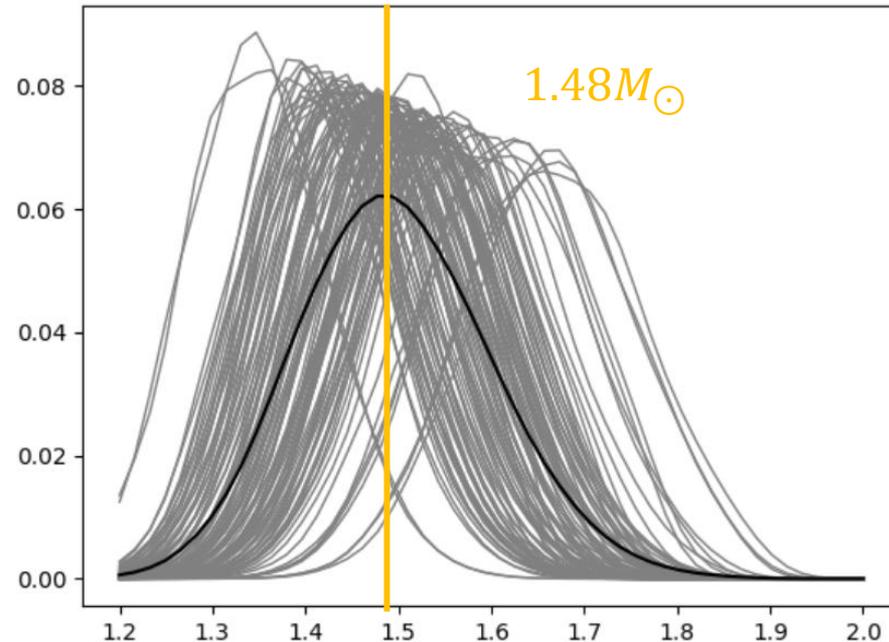


パラメータ推定(5MeVカット)

バックグラウンドなし



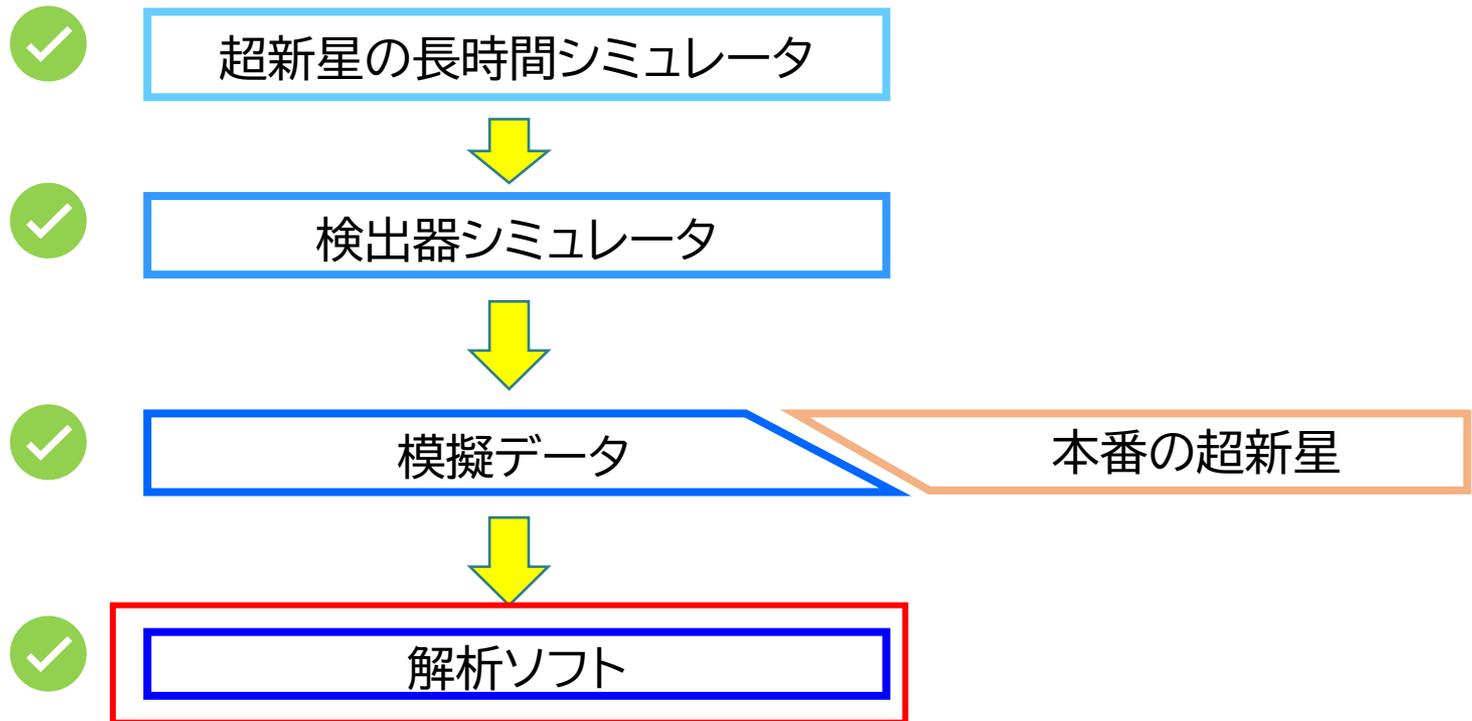
バックグラウンドあり



- 5MeV以上の全体積のイベントを解析
 - 正解: 1.52 M_{\odot}
- バックグラウンドの影響をかなり抑えられた

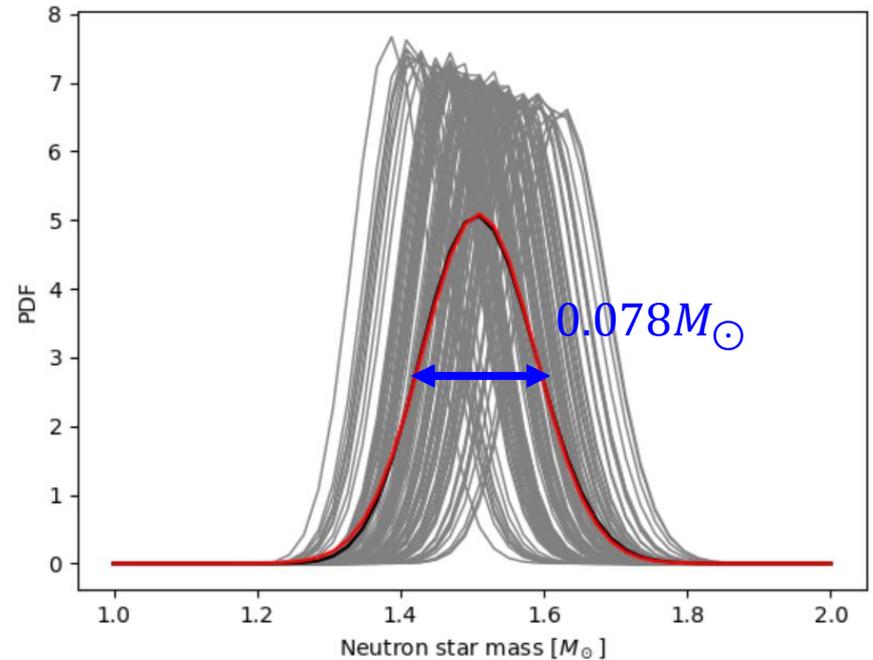
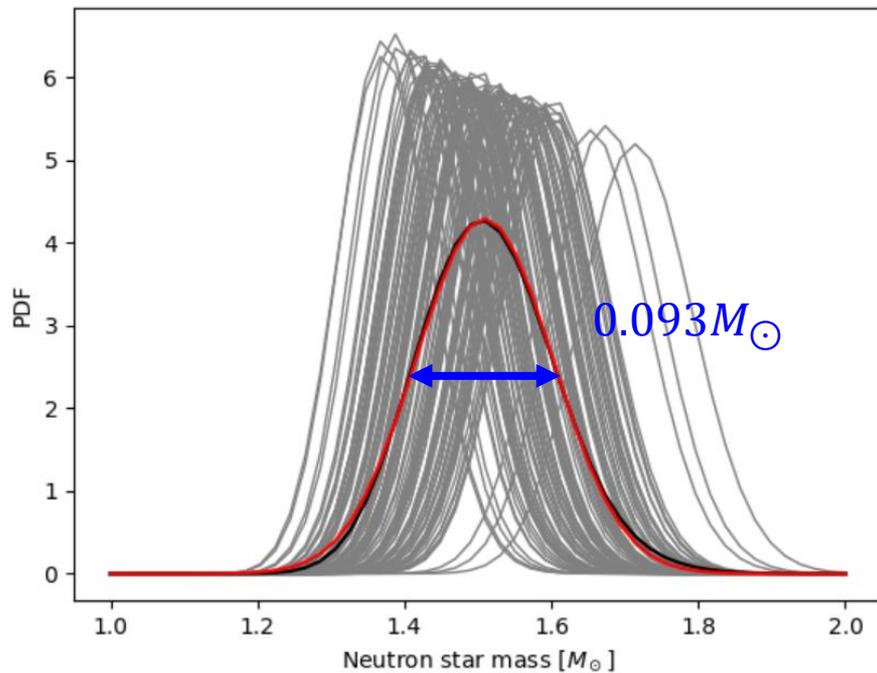
まとめ

- 超新星爆発の長時間計算を開発
- SKでの背景事象を含めた信号予測ソフト、FORESTを開発
- 背景事象の影響を考慮した解析手法を開発



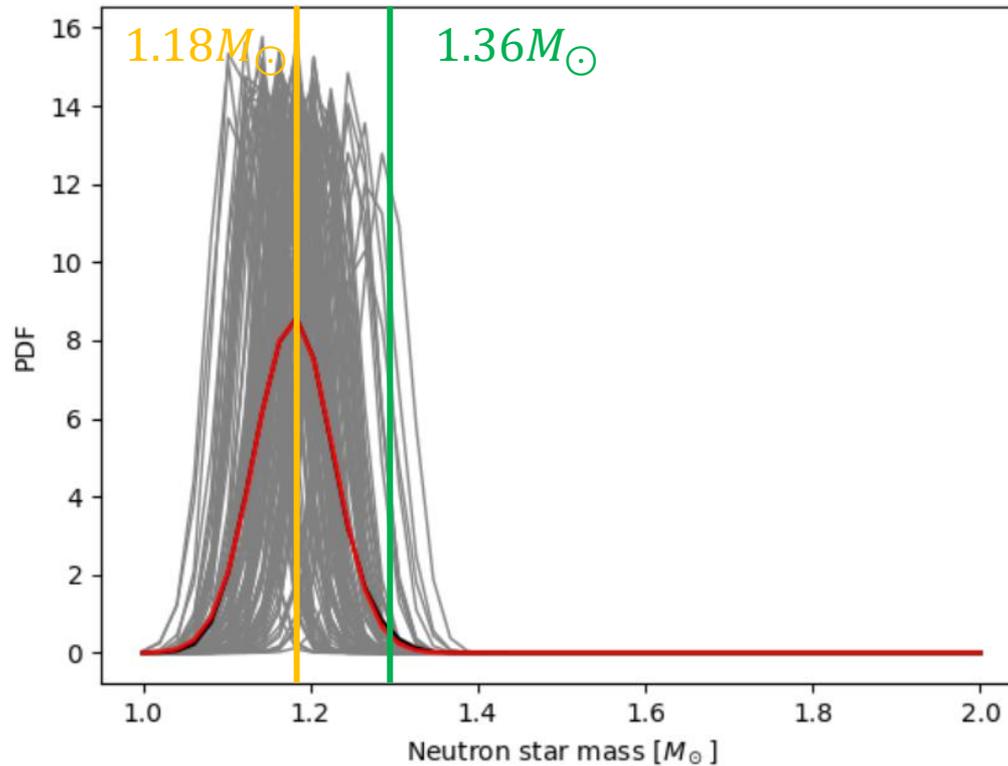
Back up

パラメータ推定の誤差



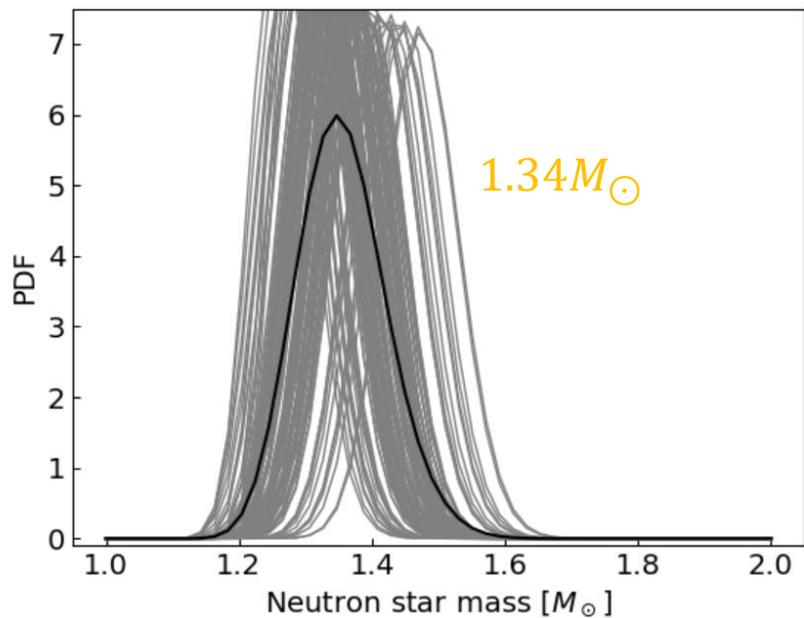
- ガウシアンでフィッティングして分散を求める
 - イベント数が多くなるので分散は小さい

シミュレーションからも推定



- 90秒のシミュレーションデータを解析
 - 20秒だと時間が足りなくて解析できない
- 中央値: $1.18 M_{\odot}$
- 正解: $1.36 M_{\odot}$

5MeV cut 全体積 BGなし



5MeV cut 全体積 BGあり

