

超新星ニュートリノ解析コードSPECIAL

BLENDによるSN1987Aの解析 Harada et al., ApJ, **954**, 52 (2023)
Harada et al., in prep.

原田 了 (理研iTHEMS)

共同研究者: nuLCコラボレーション (中里健一郎 (九州大), 中西史美, 原田将之, 小汐祐介 (岡山大), 森正光 (国立天文台), 赤穂龍一郎 (早稲田大), 諏訪雄大 (東京大), 住吉光介 (沼津高専), ロジャー・ウェンデル (京都大))

超新星ニュートリノ解析コードSPECIAL

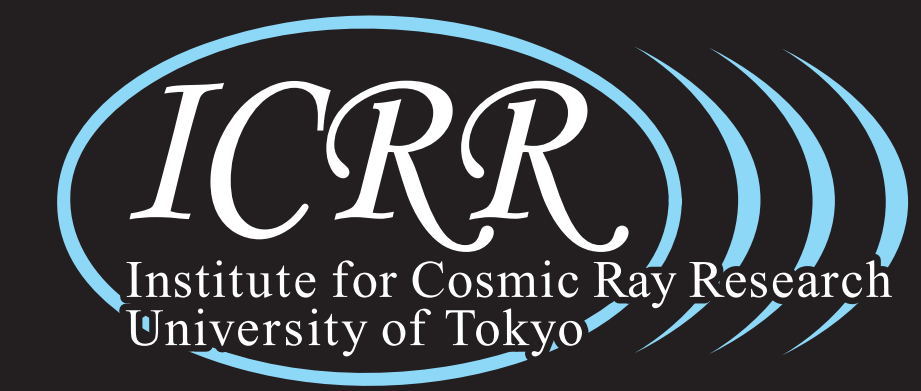
BLENDによるSN1987Aの解析 Harada et al., ApJ, **954**, 52 (2023)
Harada et al., in prep.

原田 了 (理研iTHEMS)

共同研究者: nuLCコラボレーション (中里健一郎 (九州大), 中西史美, 原田将之, 小汐祐介 (岡山大), 森正光 (国立天文台), 赤穂龍一郎 (早稲田大), 諏訪雄大 (東京大), 住吉光介 (沼津高専), ロジャー・ウェンデル (京都大))

nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



Roger Wendell(京都大, 実験)

小汐由介、原田将之、中西史美
(岡山大, 実験)

原田了(理研, 理論)、
諏訪雄大(東京大, 理論)、
森正光(東京大, 理論/実験)、
赤穂龍一郎(早稲田大, 理論)

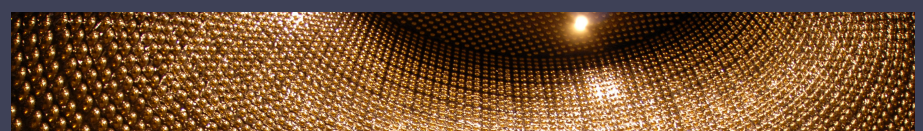
中里健一郎(九州大, 理論)

住吉光介(沼津高専, 理論)

超新星ニュートリノ観測と理論

超新星からのニュートリノ放射

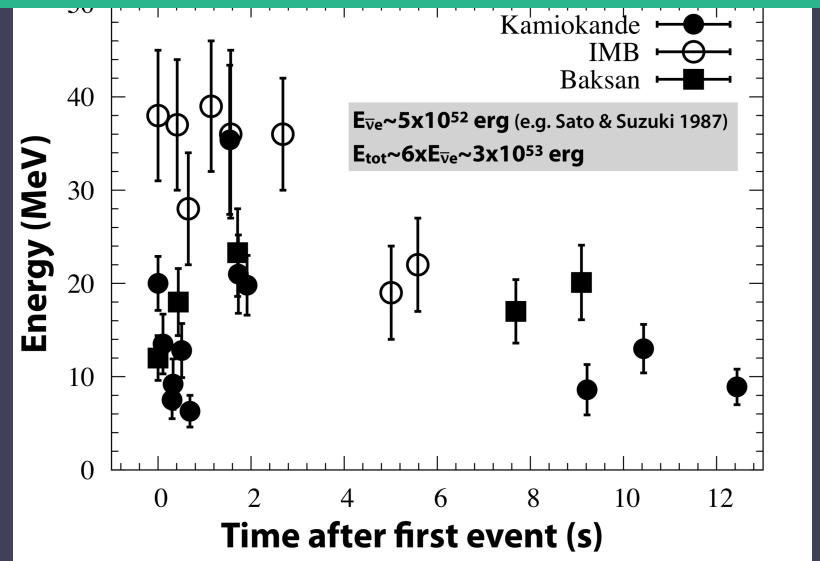
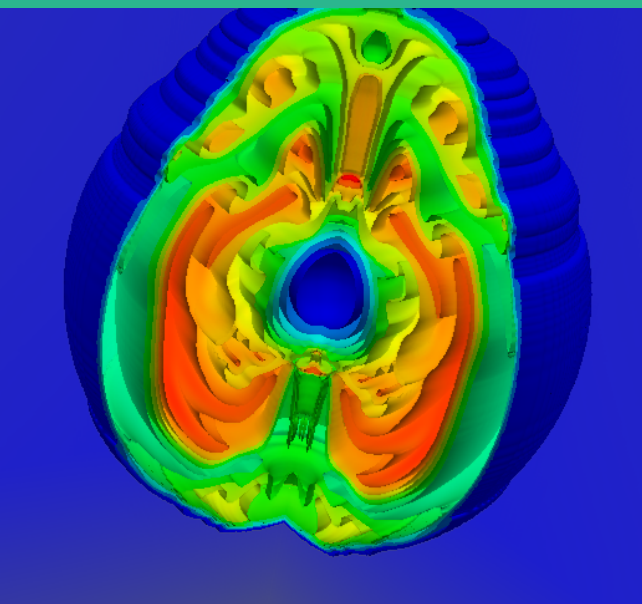
超新星



ニュートリノ

超新星の理論屋とニュートリノの観測屋の密接なコラボレーションが必要！

高次元高精度の
精密計算

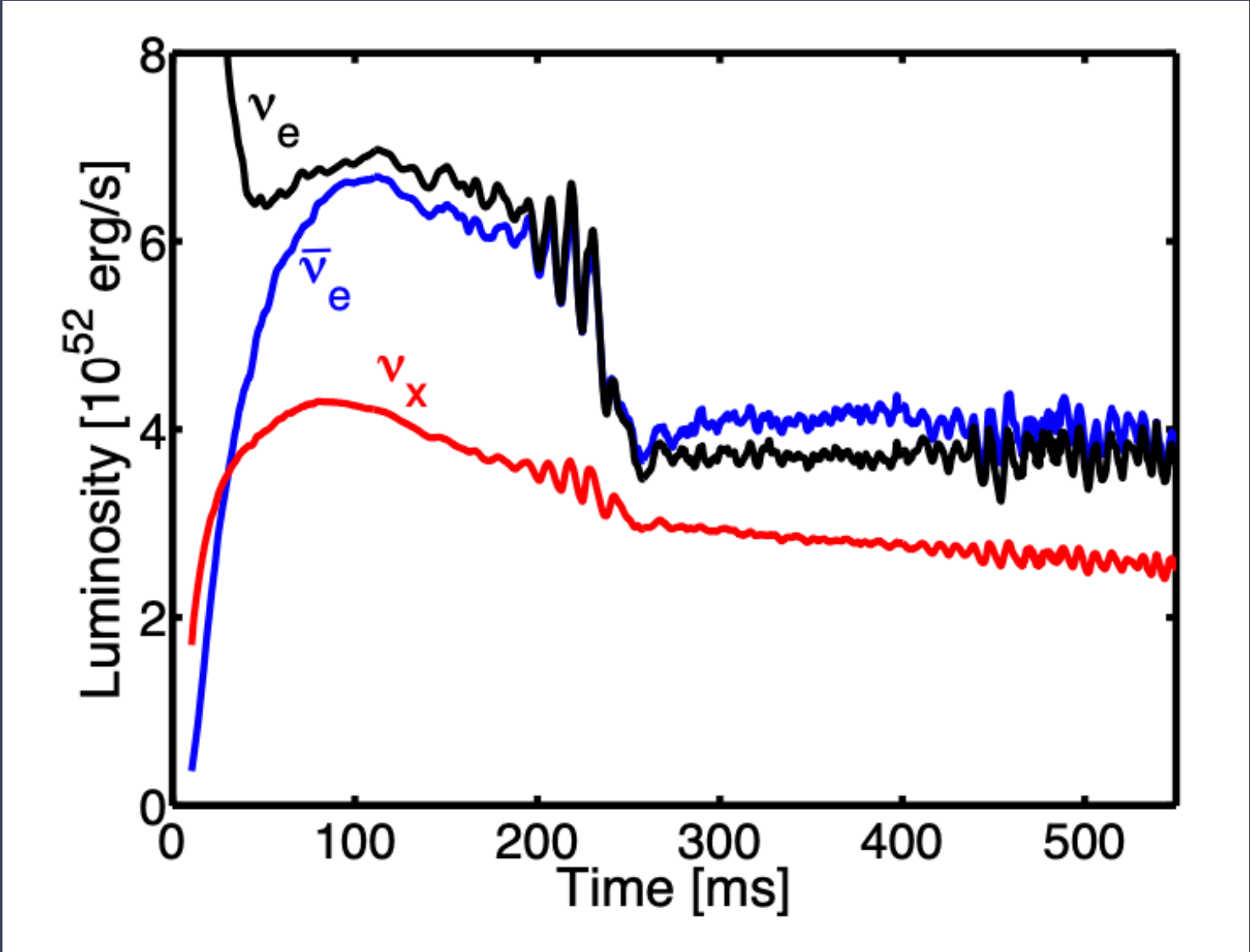


Courtesy of Suwa

SN1987Aのみ

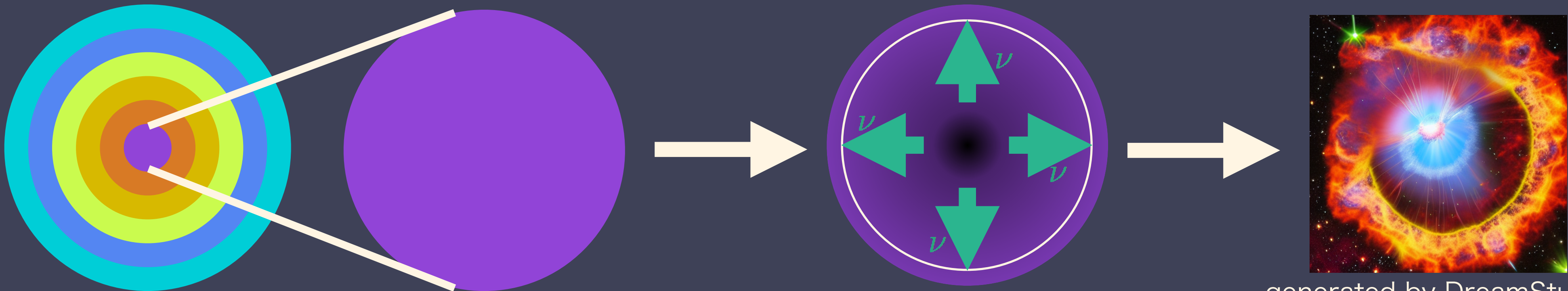
超新星ニュートリノの爆発フェーズ

- ・爆発フェーズ
- ・様々な物理過程が複雑に絡み合っていて、理論的な不定性が高い



Tamborra+ (2014)

・原始中性子星冷却フェーズ

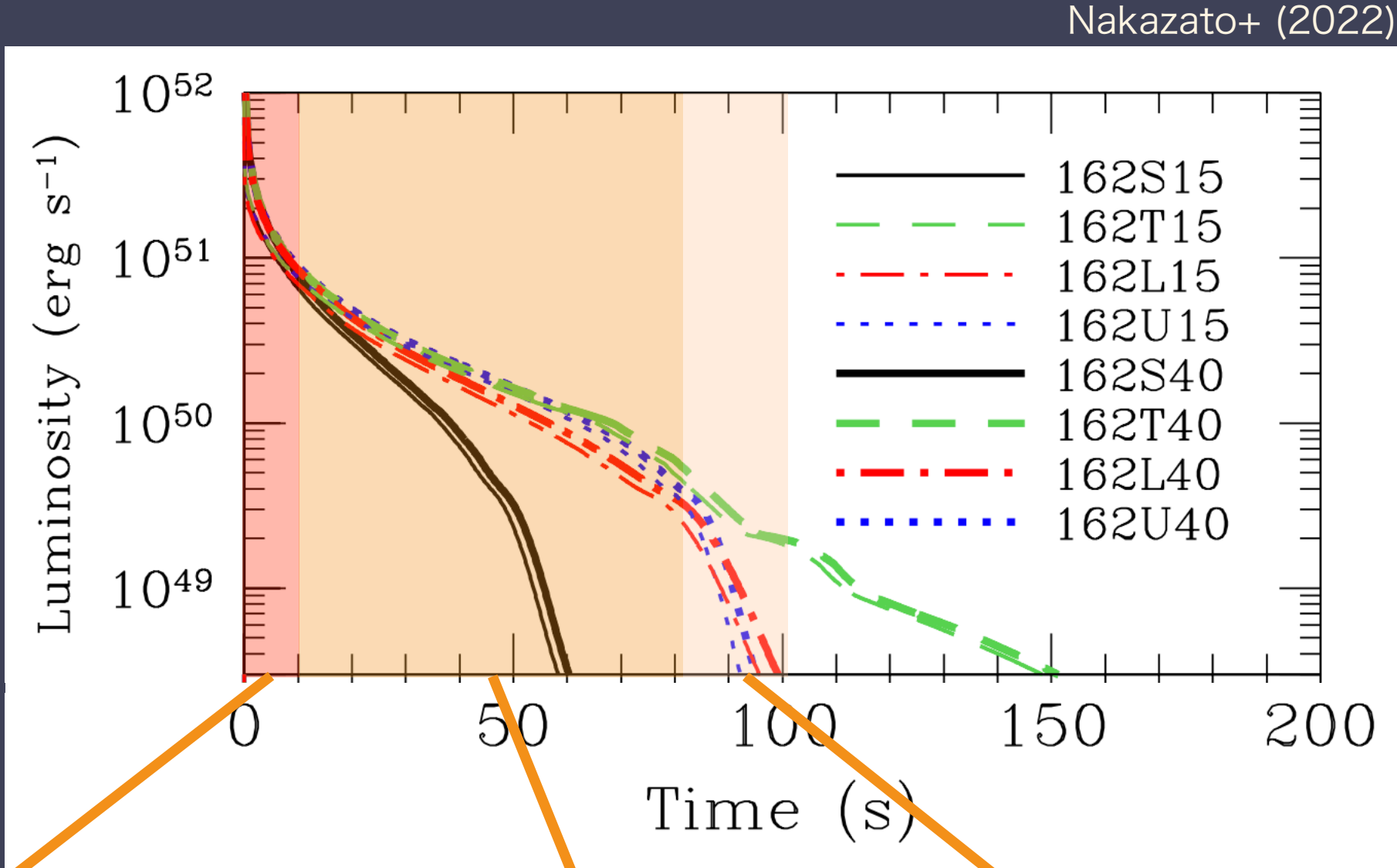


generated by DreamStudio

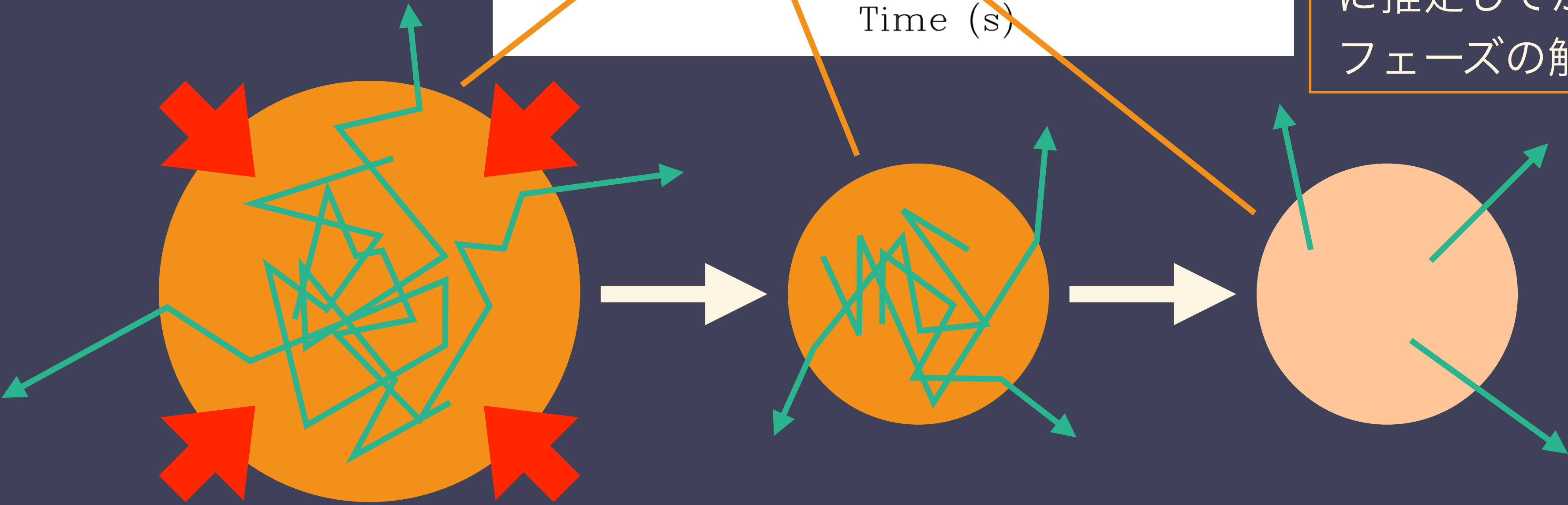
重力崩壊→コアバウンス→衝撃波停滞→乱流発達→衝撃波復活

超新星ニュートリノの原始中性子星冷却フェーズ

- ・爆発フェーズ
- ・様々な物理過程が複雑に絡み合っていて、理論的な不定性が大きい



- ・原始中性子星冷却フェーズ
- ・比較的物理がシンプル(1次元拡散近似)で、不定性が少ない
- ・nuLCコラボレーションではこちらに着目
→単純な後期フェーズをロバストに推定してから、複雑な前期フェーズの解析の手がかりにする

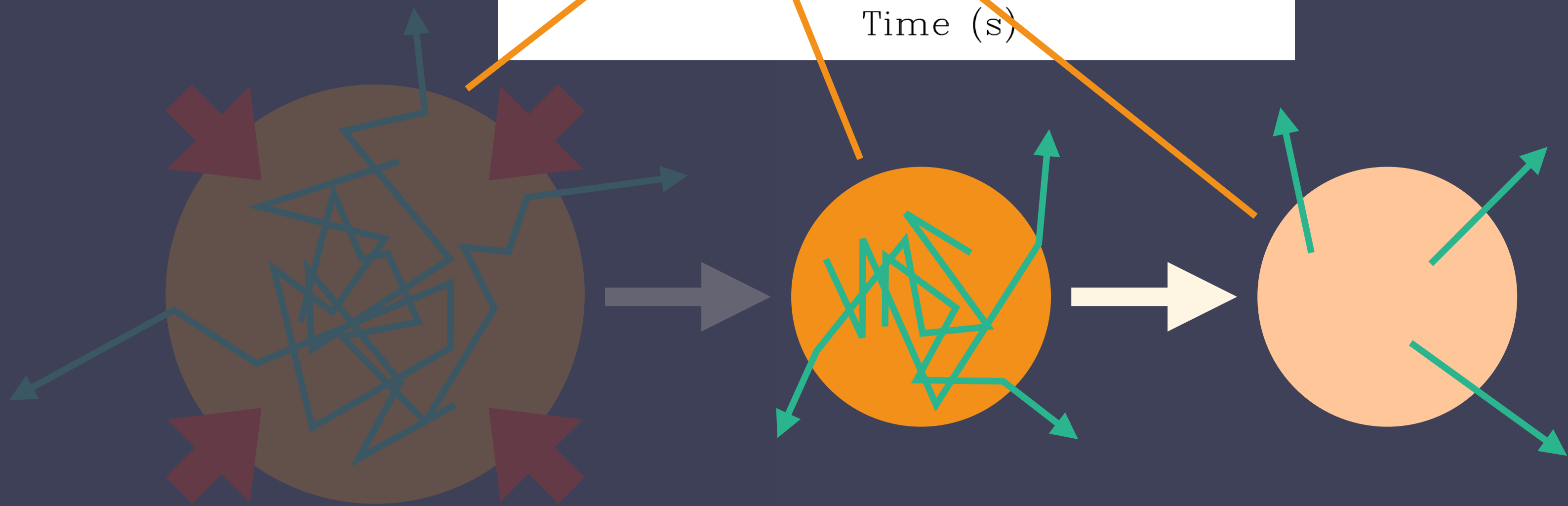
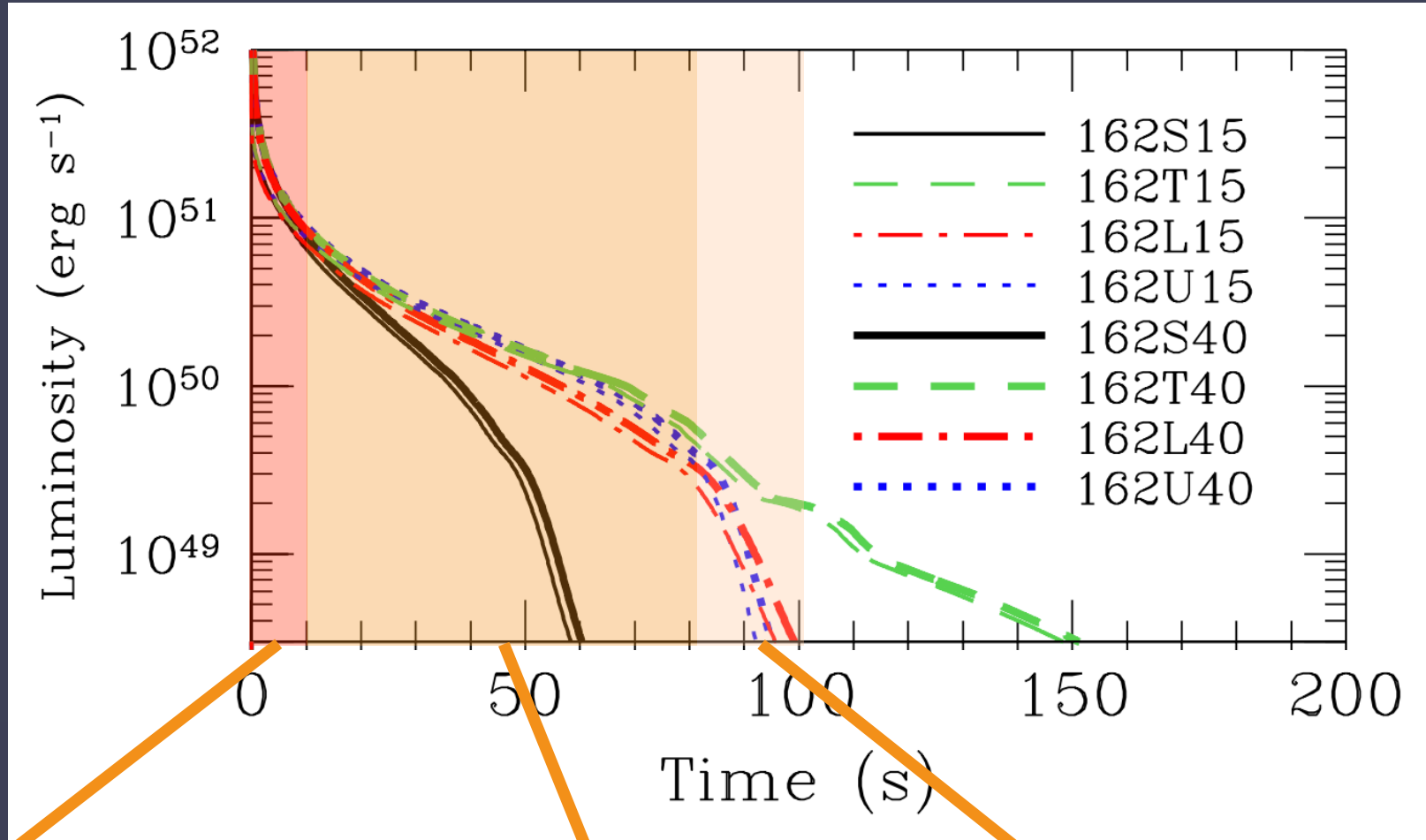


マントル収縮冷却フェーズ → shallow decayフェーズ → volume coolingフェーズ

理論テンプレート：解析的モデリング

・Shallow decayフェーズ以降の、質量と半径が定まった状況に着目

Nakazato+ (2022)



マントル収縮冷却フェーズ→shallow decayフェーズ→volume coolingフェーズ

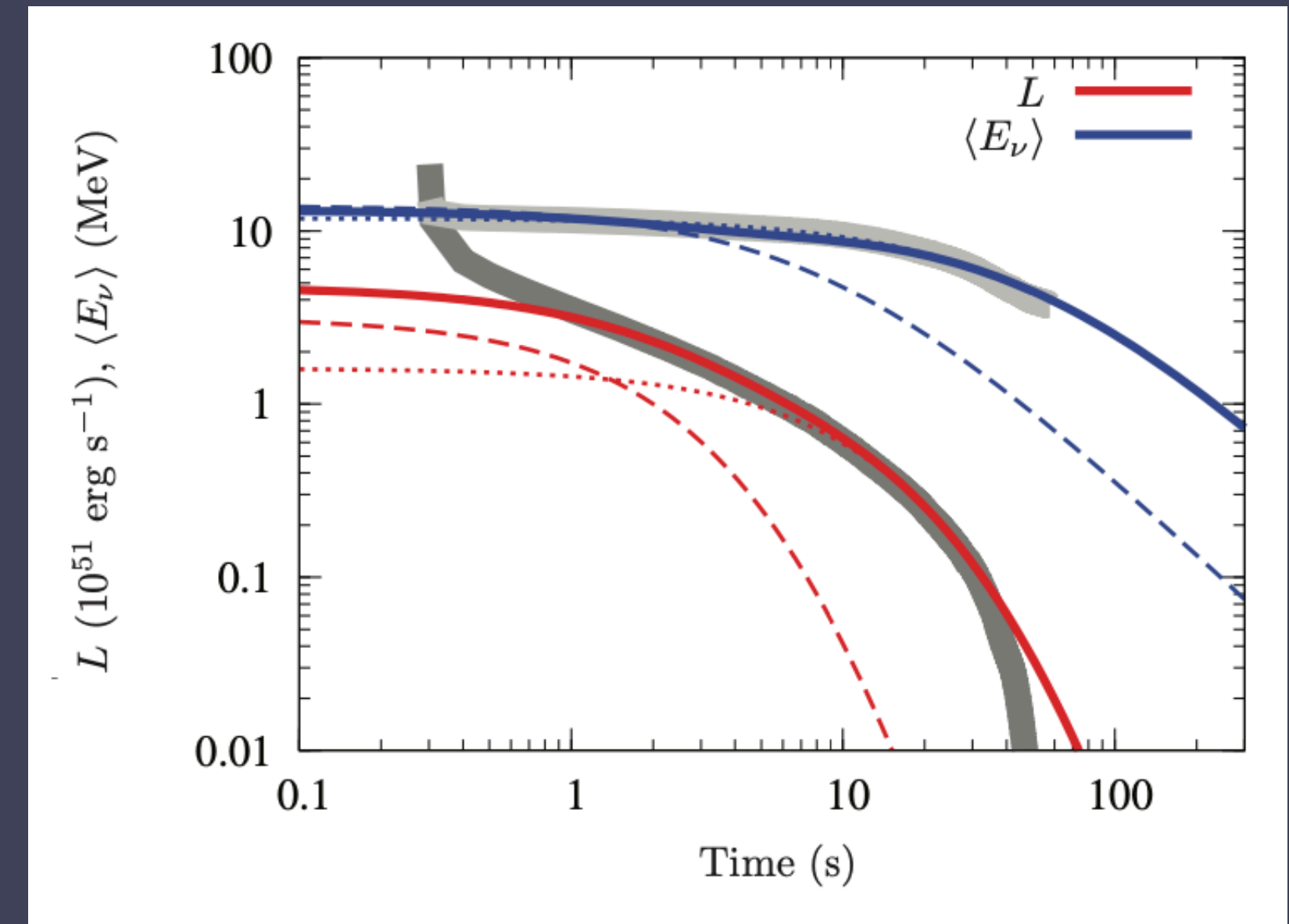
理論テンプレート：解析的モデリング

- ・Shallow decayフェーズ以降の、質量と半径が定まった状況に着目
- ・ $\gamma=2$ のポリトロープ状態方程式を使ったLane-Emden解で原始中性子星の構造をモデル化し、ニュートリノ拡散近似に基づいてニュートリノ光度と熱的平均エネルギーの時間進化を記述する

$$L = 3.3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^6 \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^4 \left(\frac{t + t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-6}$$

$$\langle E_{\nu} \rangle = 16 \text{ MeV} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \left(\frac{g\beta}{3} \right) \left(\frac{t + t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-3/2}$$

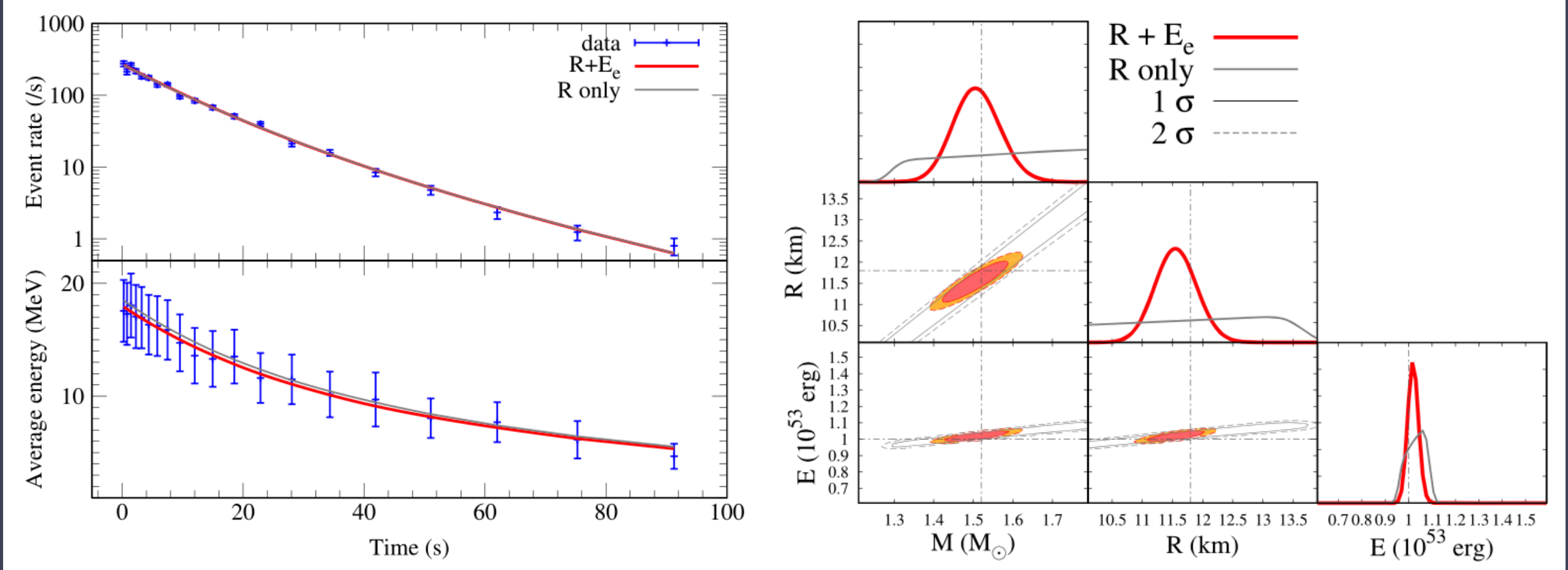
$$t_0 = 210 \text{ s} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{6/5} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6/5} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^{4/5} \left(\frac{E_{\text{tot}}}{10^{52} \text{ erg}} \right)^{-1/5}$$



Suwa+ (2021)

- ・パラメータは M_{PNS} 、 R_{PNS} 、 E_{tot} (shallow decayフェーズでのニュートリノ放射総エネルギー、中性子星の全エネルギーではない)の3つ

解析手法の提案



Suwa+ (2022)

- χ^2 を使うのはad hocなやり方、Gauss分布するデータに使うべき
- 本来はPoisson分布を利用する

$$\chi^2 = \sum_{i \in \text{time bin}} \left(\frac{(N_i / \Delta t_i - \mathcal{R}_i)^2}{\mathcal{R}_i^2 / N_i} + \frac{(\langle \epsilon \rangle_i - E_{e+,i})^2}{(0.05 E_{e+,i})^2} \right)$$

Diagram labels for the equation above:

- 観測レート (Observed Rate) points to $N_i / \Delta t_i$
- 理論レート (Theoretical Rate) points to \mathcal{R}_i
- 観測平均エネルギー (Observed Average Energy) points to $\langle \epsilon \rangle_i$
- 理論平均エネルギー (Theoretical Average Energy) points to $E_{e+,i}$

- χ -squareフィッティング
解析解のカウントレートと平均エネルギーを使って χ^2 を最小化するパラメータを探す

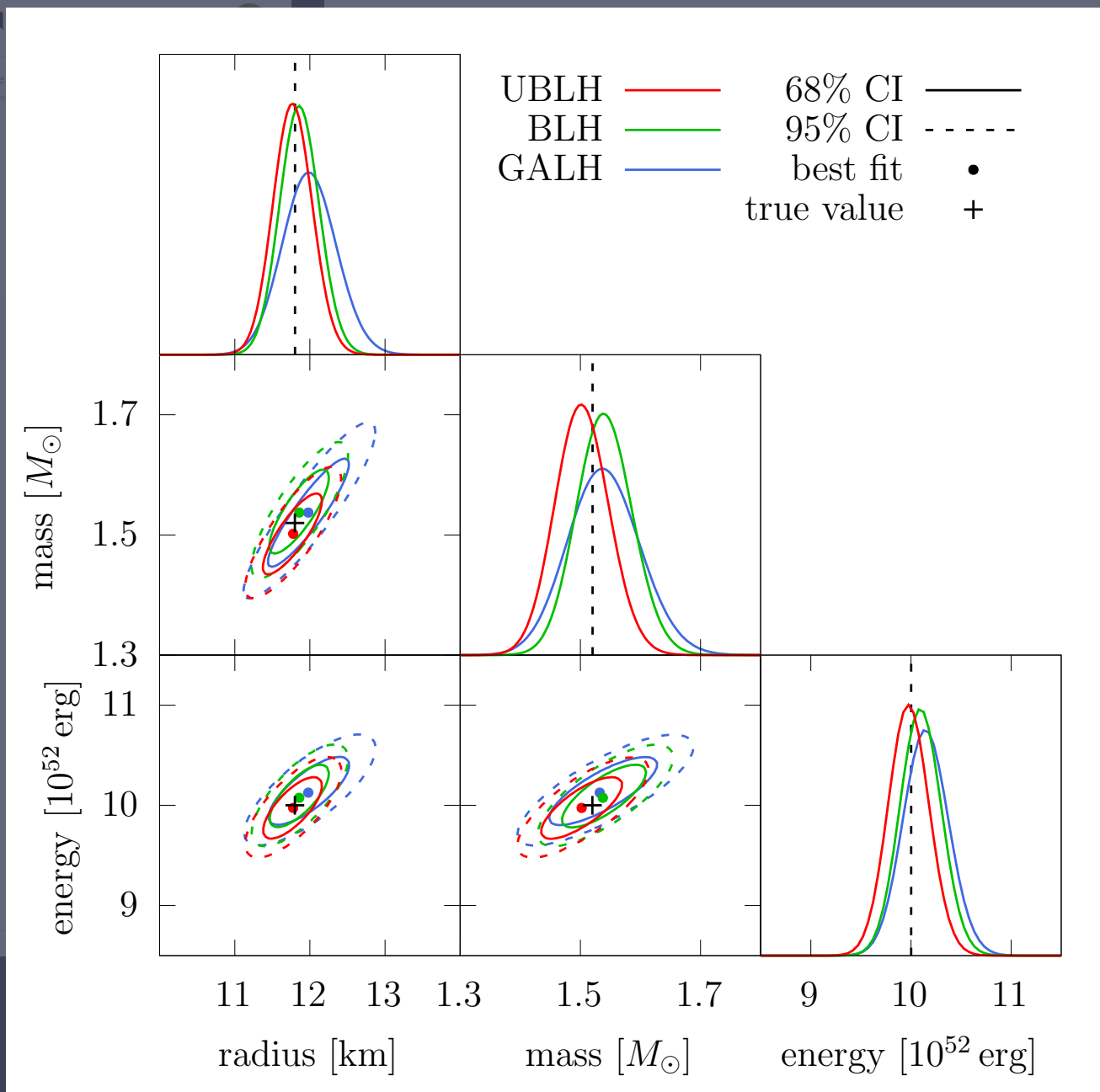
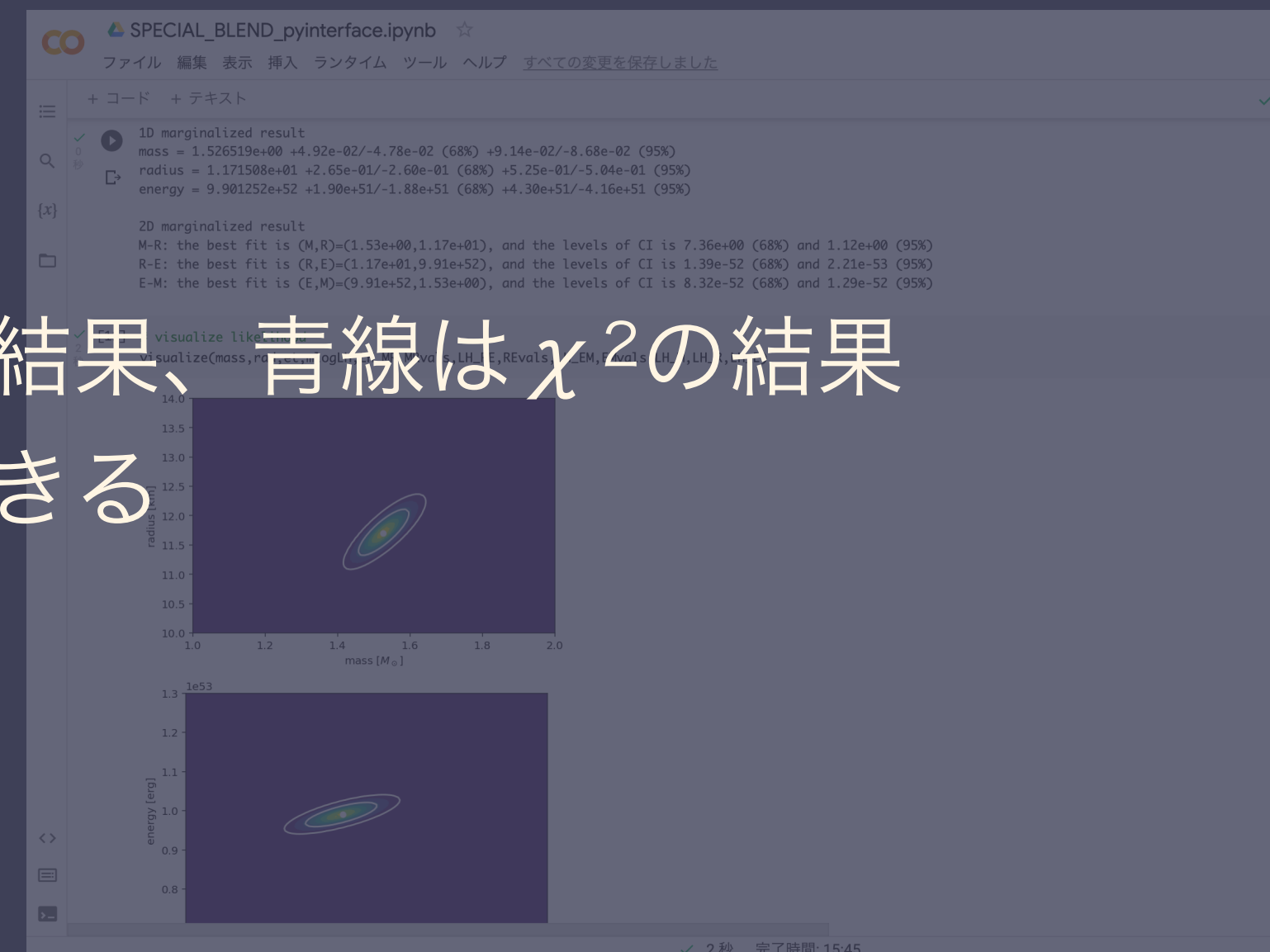
解析パイプライン：SPECIAL BLEND

- ・Poisson分布+Bayesアプローチによるパラメータ推定コード
- ・Supernova Parameter Estimation Code based on Insight on Analytic Late-time Burst Light curve at Earth Neutrino Detector (SPECIAL BLEND; AH+, ApJ, **954**, 52 (2023))
- ・Google colabouratoryなどで動く公開コード
- ・簡単に使えるので、ぜひ遊んでみてください！

```
SPECIAL_BLEND_pyinterface.ipynb
ファイル 編集 表示 挿入 ランタイム ツール ヘルプ すべての変更を保存しました
+ コード + テキスト
[1] !git clone https://[user_name]:[access_token]@github.com/akira-harada/SPECIAL_BLEND.git
Cloning into 'SPECIAL_BLEND'...
remote: Enumerating objects: 100, done.
remote: Compressing objects: 100% (100/100), done.
remote: Total 100 (delta 0), reused 0 (delta 0), pack-reused 100 (uncompressed 100.0 KiB, compressed 100.0 KiB)
Unpacking objects: 100% (100/100), done.

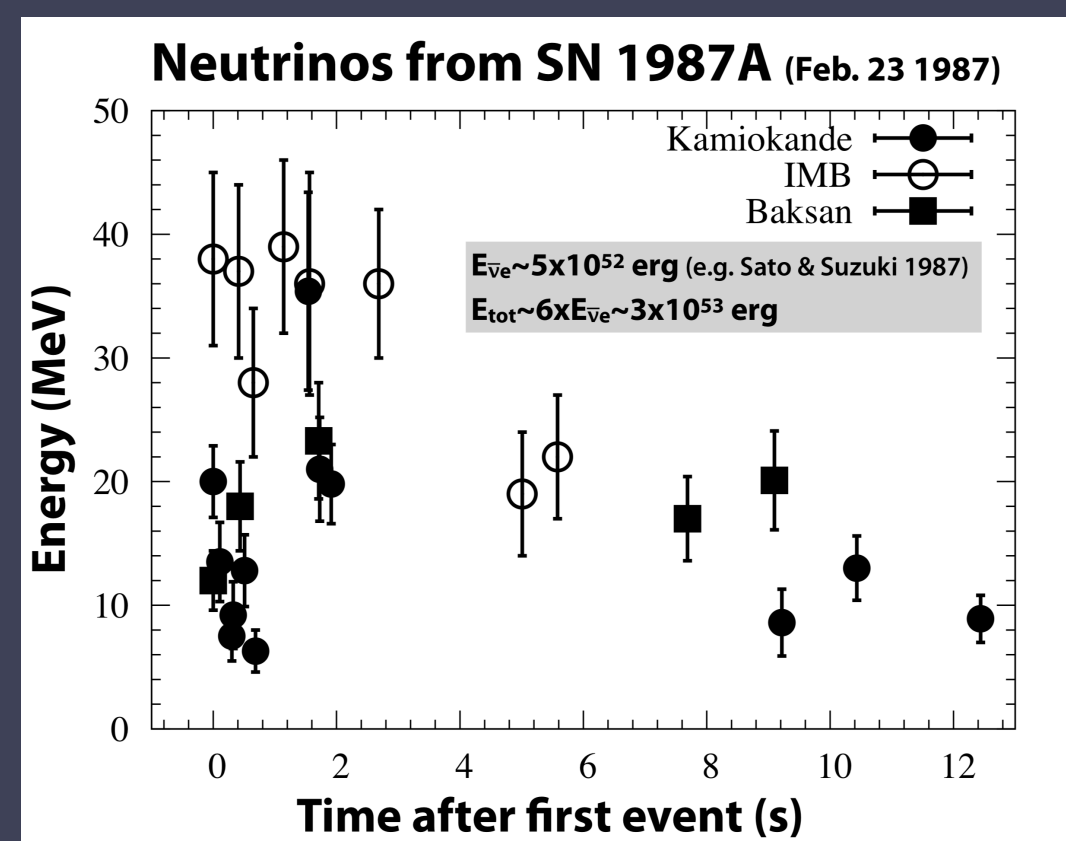
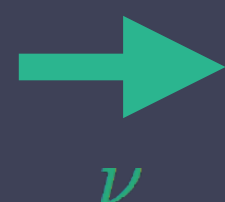
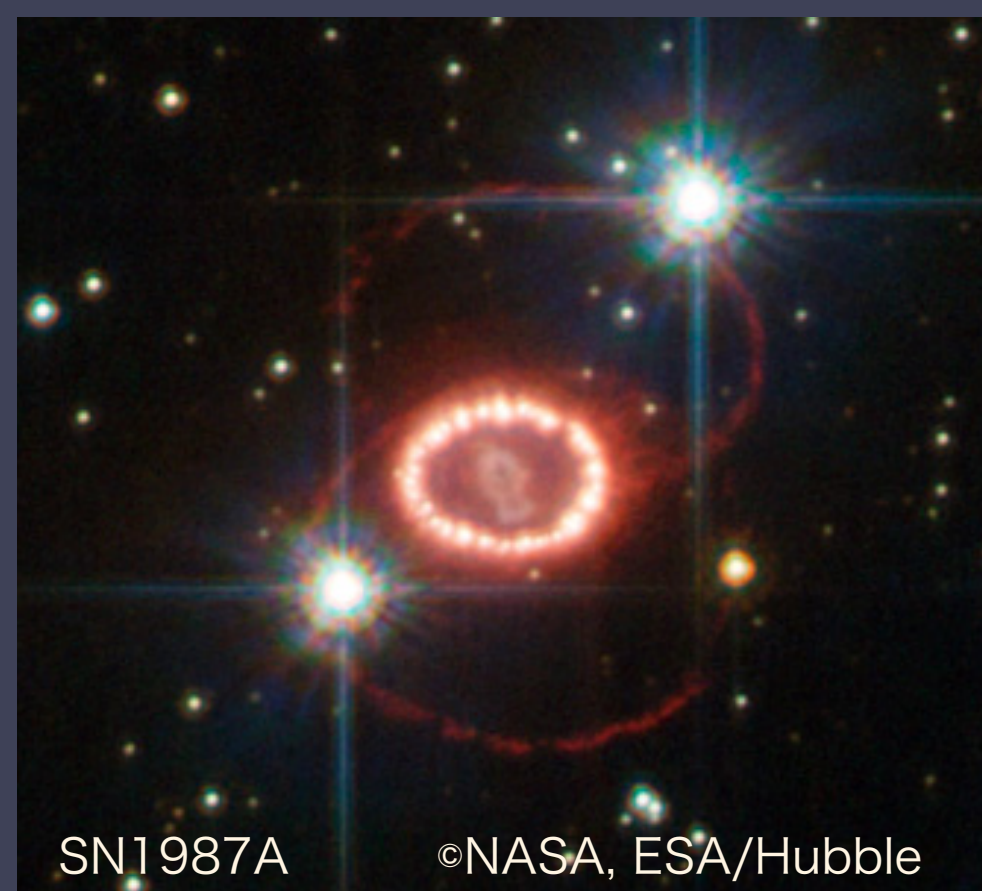
import os
import sys
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import SPECIAL_BLEND as SB

def main():
    params = np.loadtxt('/content/SPECIAL_BLEND/parameters.dat') # 'parameters.dat' file has the following contents: assumed gbeta, distance to the SN [kpc], detector mass [kton], parameter
    origdata = np.loadtxt('/content/time_energy.dat') # 'time_energy.dat' file has the time and energy of each event: first column is time, second column is energy
    analysis_mode = int(params[10]) # 1:unbinned, 2:full-binned (mode 3 and 4 work only in fortran version, not implemented in this Google Collaborator version)
    tmin = params[13]
    tmax = params[14]
    data = loaddata(tmin, tmax, origdata)
    if analysis_mode == 1:
        print("unbinned analysis")
        mlogLH, mass, rad, et = unbinned_likelihood(data, params)
        print("likelihood calculation completed")
    elif analysis_mode == 2:
        print("binned analysis")
        mlogLH, mass, rad, et = binned_likelihood(data, params)
        print("likelihood calculation completed")
```

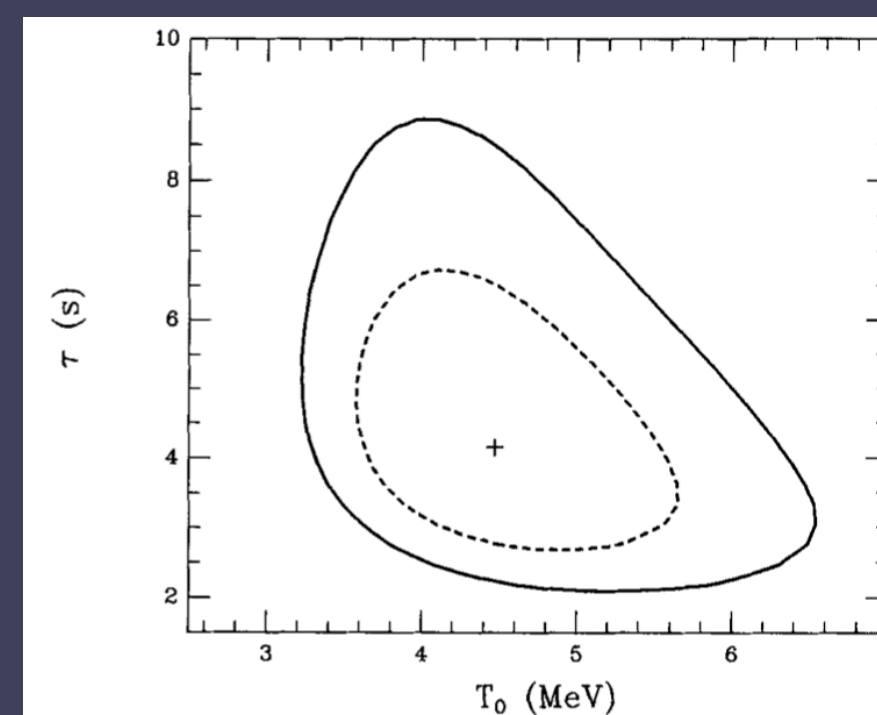


・典型的な推定結果が右図
・赤線と緑線は遠方用と近傍用の解析結果、青線は χ^2 の結果
・典型的には真の値をまあよく再現できる

SN1987Aニュートリノ

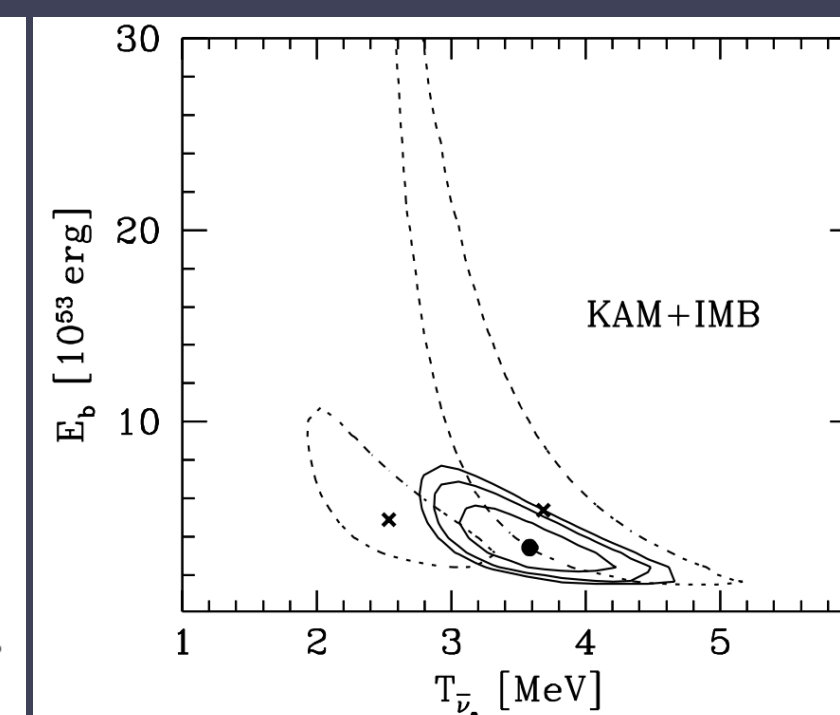


Courtesy of Suwa



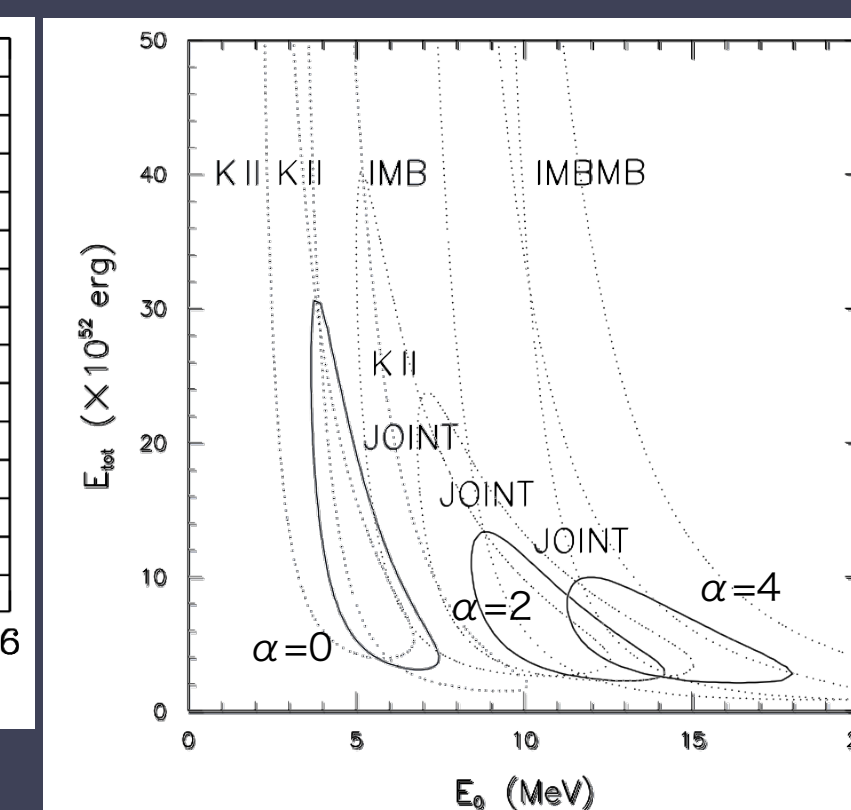
Loredo & Lamb (1989)

時間依存モデル
ジョイント解析のみ



Jegerlehner et al. (1996)

時間平均モデル
ジョイント解析と個別解析

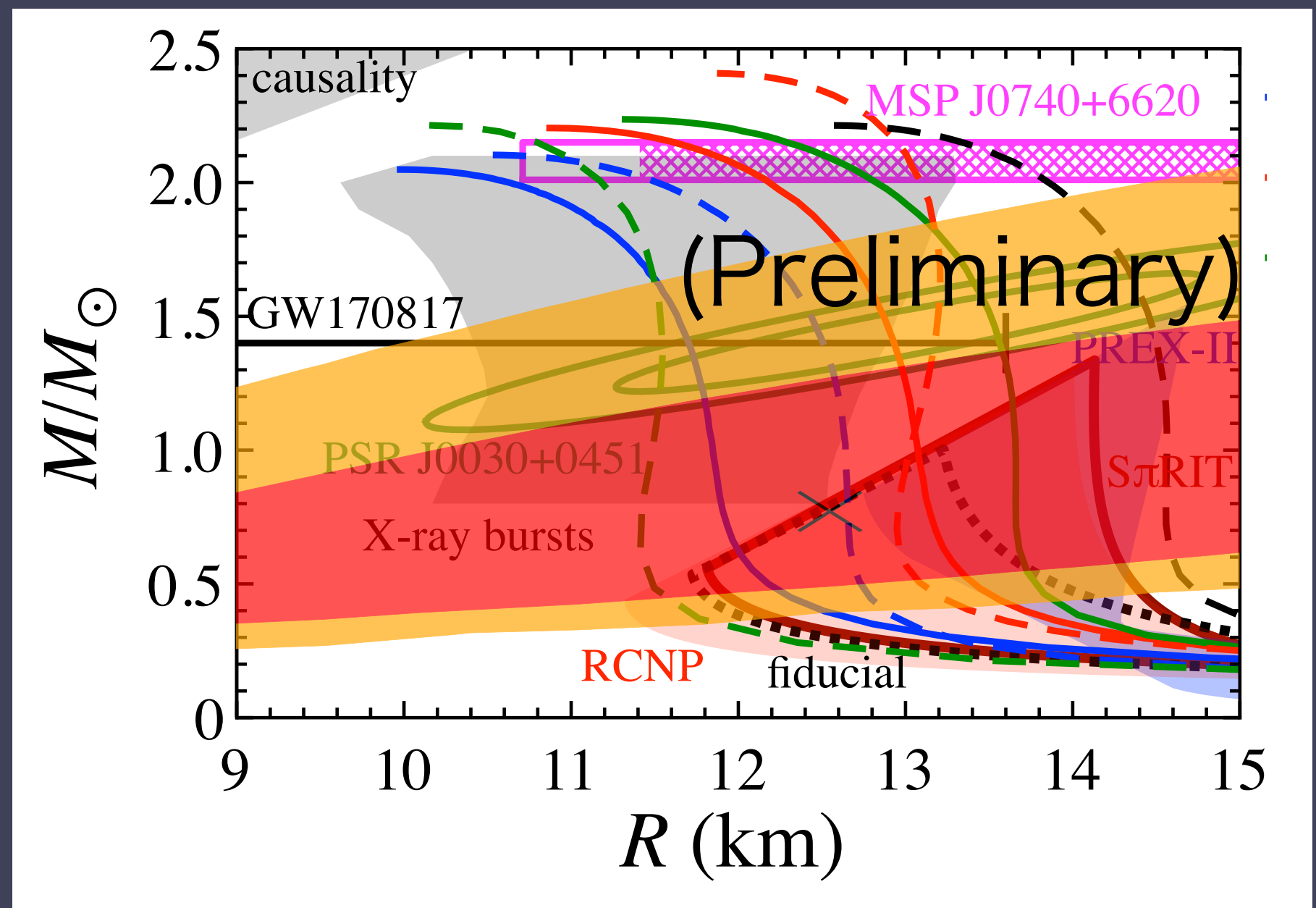
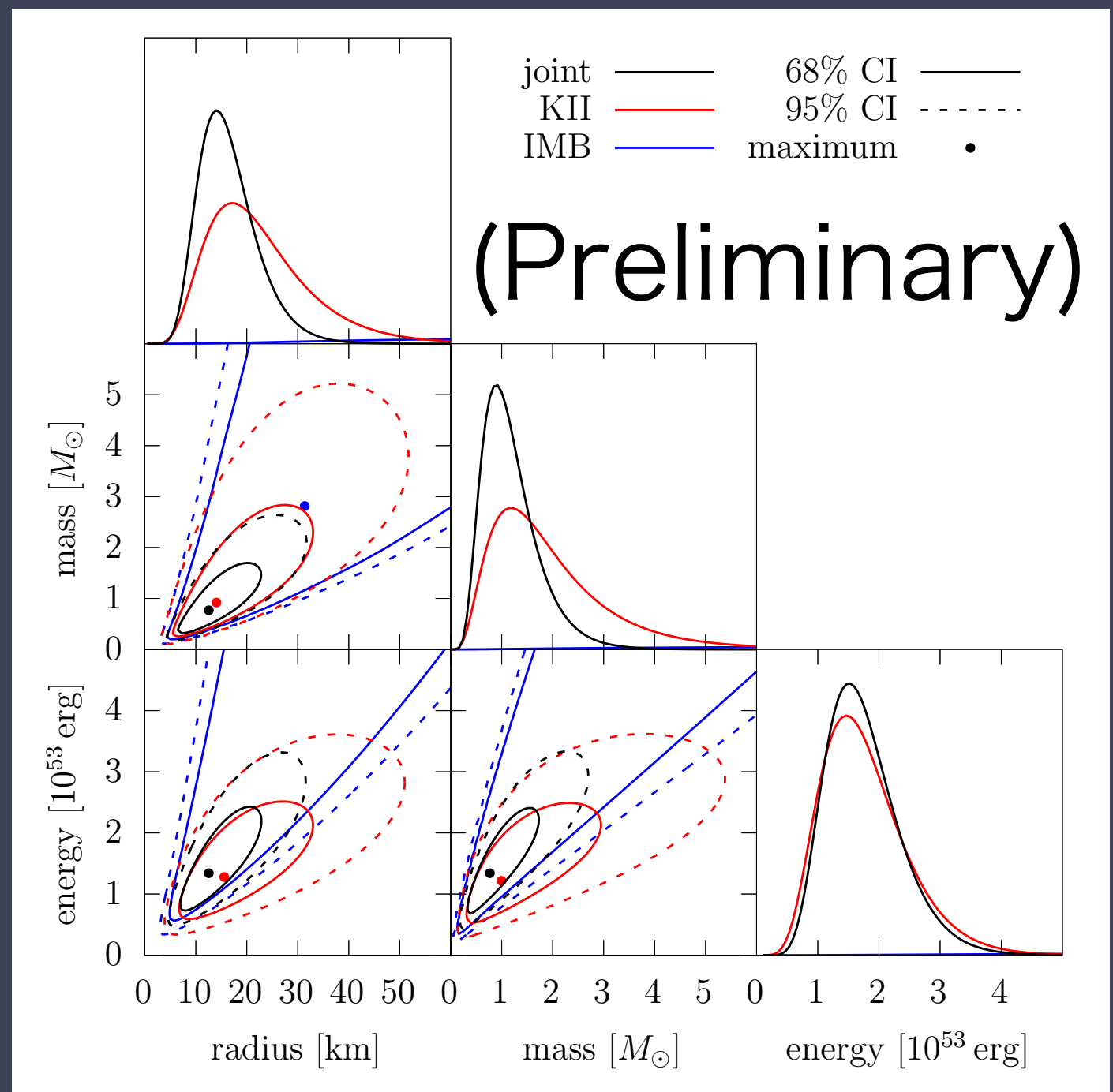


Mirizzi et al. (2006), Fig. 4 superposed

- ・SN1987Aのニュートリノ解析はされてきていても、あくまで現象論的なパラメータを求めていた。
- また、KIIとIMBで結果に食い違いがあった。

NS1987Aのパラメータ推定

- ・SPECIAL BLENDでKII/IMBのデータを解析
- ・KIIのベストフィットはIMBの68% CIの内側←先行研究ではIMBのデータクオリティを過大評価していたかも？
- ・ジョイント解析パラメータ推定の結果： $M_{\text{PNS}} = 0.89^{+0.60}_{-0.38} M_{\odot}$ $R_{\text{PNS}} = 14.1^{+6.3}_{-4.6} \text{ km}$ $E_{\text{tot}} = 1.51^{+0.66}_{-0.49} \times 10^{53} \text{ erg}$



M-R関係への制限 (Sotani+ 2022のFig. 2に重ね書き)

まとめ

- ・将来的な超新星ニュートリノ観測に備えて、公開解析コードSPECIAL BLENDを開発
- ・簡単に動き、パラメータ推定性能も悪くない
- ・SN1987Aからのニュートリノを解析し、NS1987Aのパラメータを推定した：

$$M_{\text{PNS}} = 0.89^{+0.60}_{-0.38} M_{\odot} \quad R_{\text{PNS}} = 14.1^{+6.3}_{-4.6} \text{ km} \quad E_{\text{tot}} = 1.51^{+0.66}_{-0.49} \times 10^{53} \text{ erg}$$

