

超新星SN1987Aからのニュートリノ信号再解析による 中性子星NS1987Aのパラメータ推定

原田 了 (理研iTHEMS)

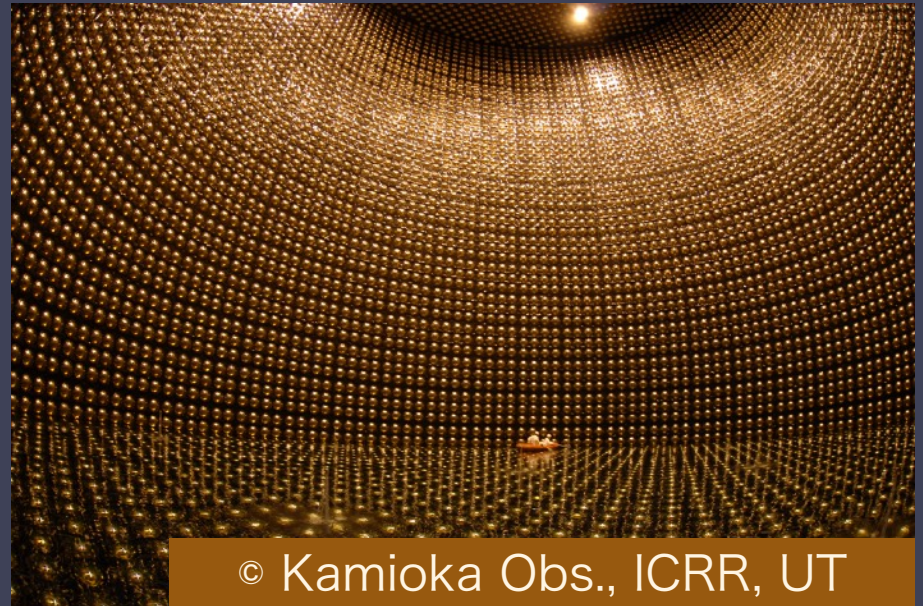
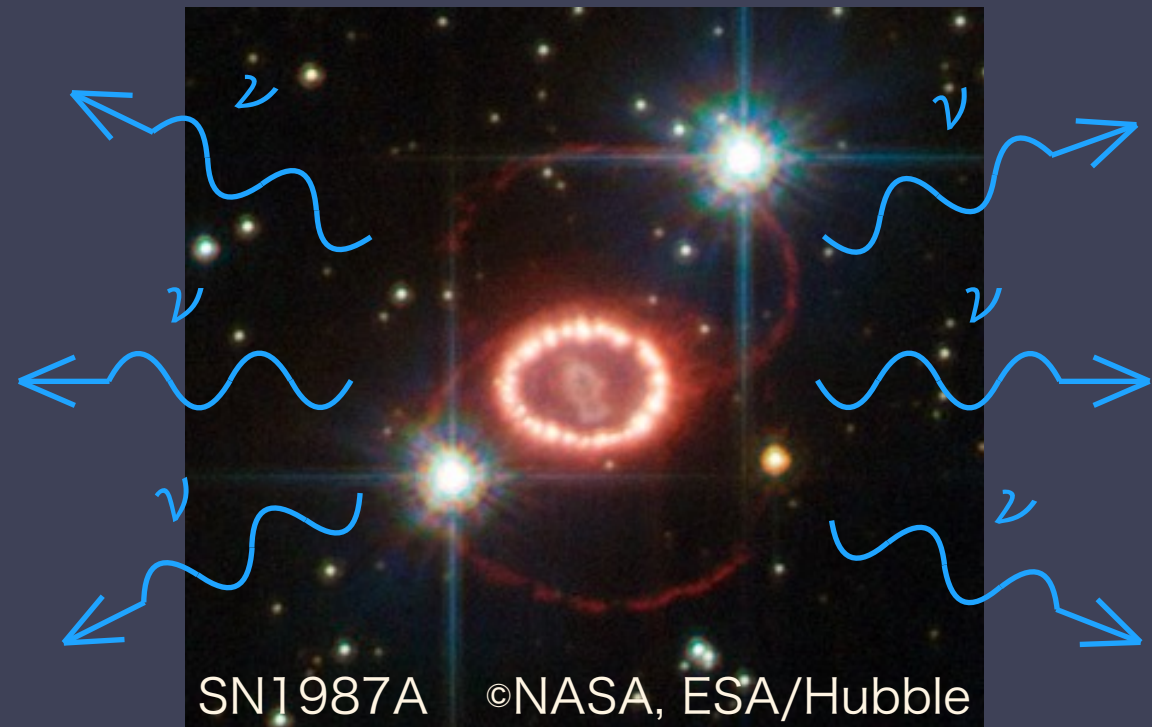
共同研究者: nuLCコラボレーション (中里健一郎 (九州大), 中西史美, 原田将之, 小汐祐介 (岡山大), 森正光, 諏訪雄大 (東京大), 住吉光介 (沼津高専), ロジャー・ウェンデル (京都大))

超新星ニュートリノ観測と理論

超新星からのニュートリノ放射

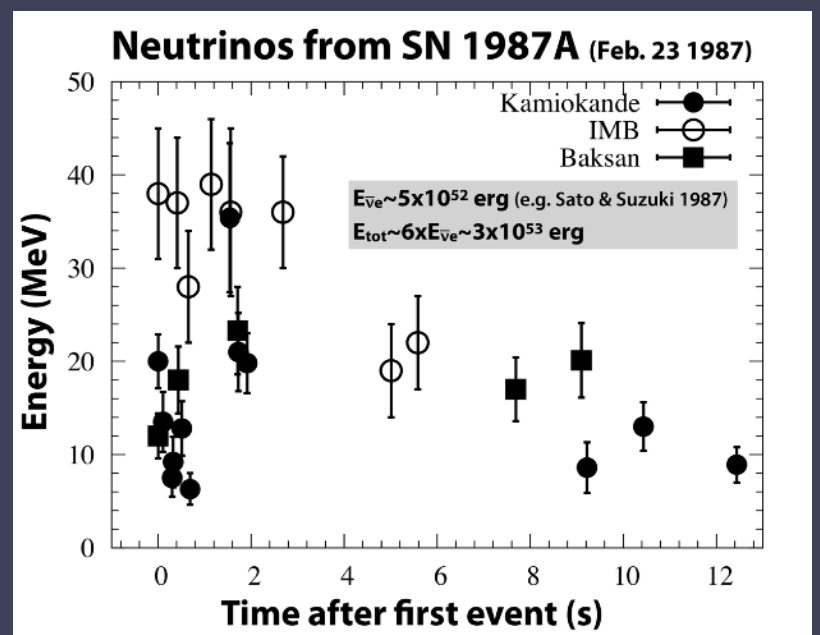
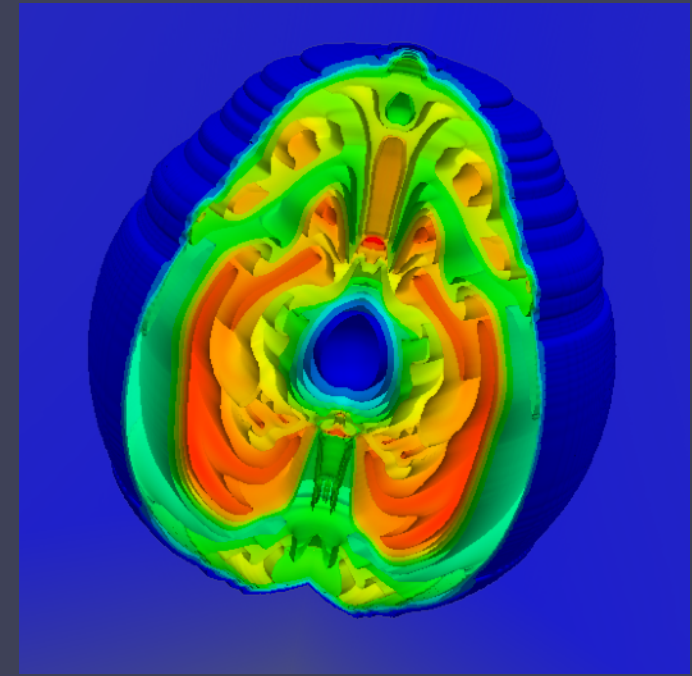
超新星
シミュレーション

大規模スパコン
高次元高精度の
精密計算



ニュートリノ
観測

SN1987Aのみ



観測データを理論モデルに基づいて解釈する

戸谷モデル・SNOWGLOBES・SNEWPY

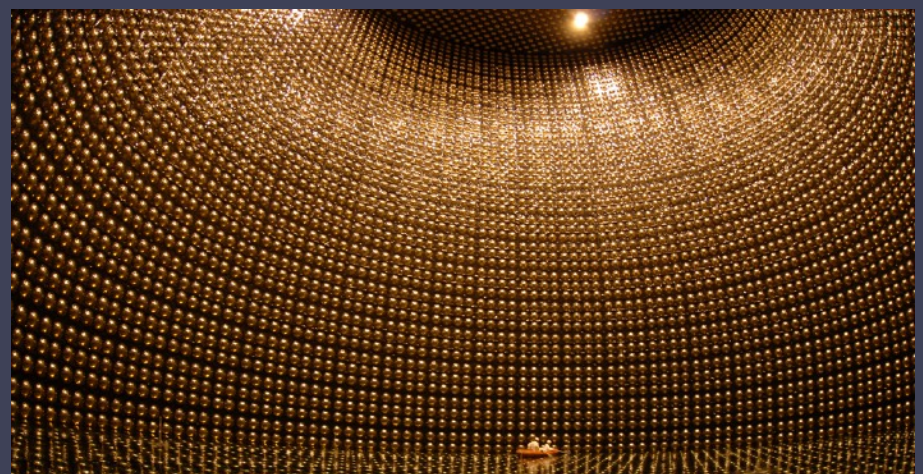
…でも、どうやって？

Totani+ (1997), Scholberg+ (2021), Bakster+ (2021)

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

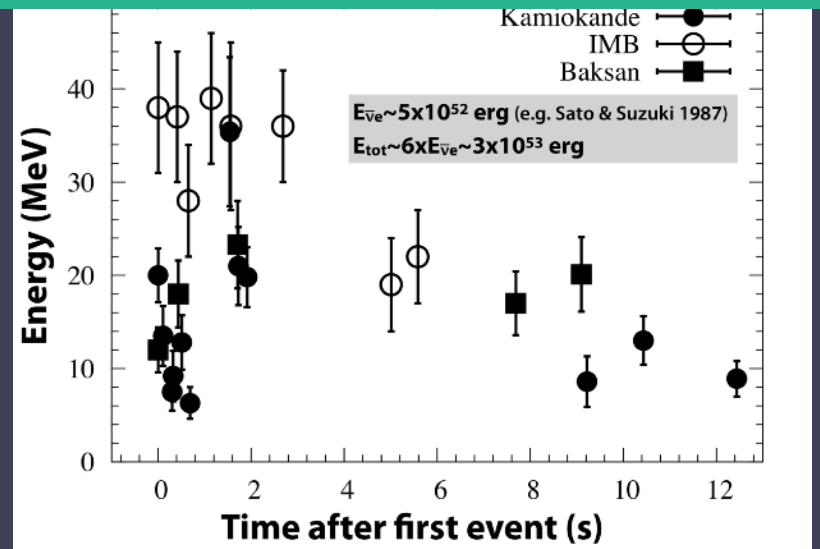
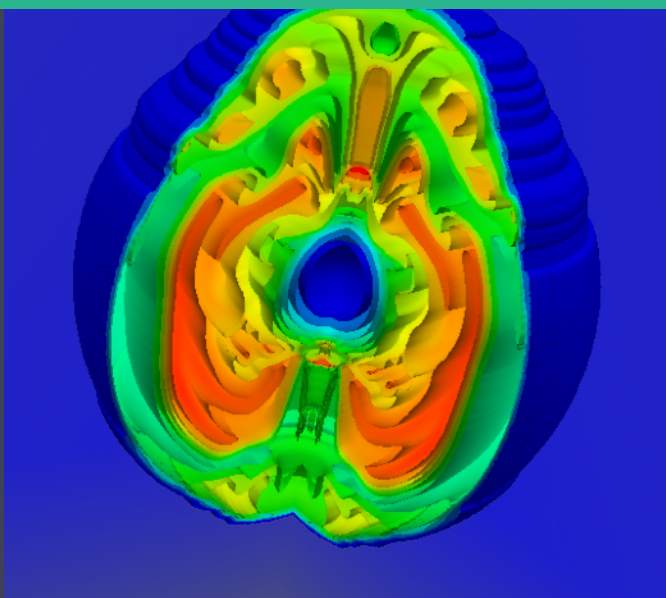
超新星
シミュレーション



ニュートリノ
観測

超新星の理論屋とニュートリノ観測屋のコラボレーションが必要！

高次元高精度の
精密計算



SN1987Aのみ

観測データを理論モデルに基づいて解釈する

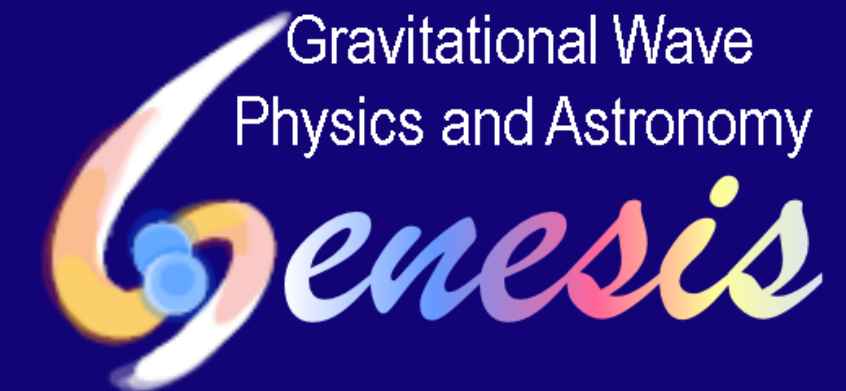
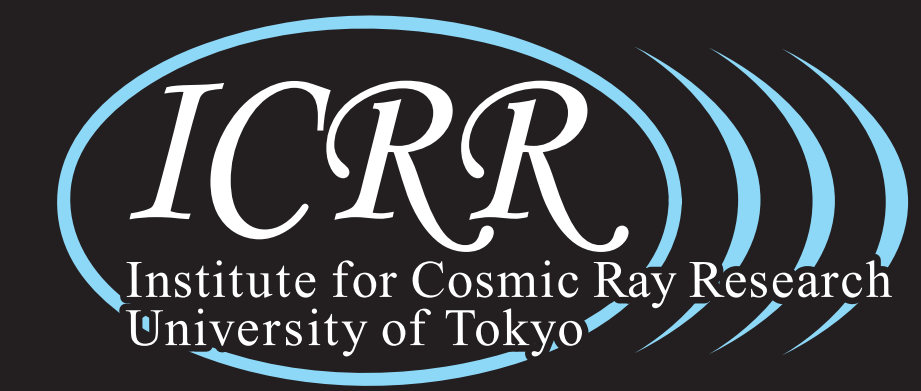
戸谷モデル・SNOWGLoBES・SNEWPY

…でも、どうやって？

Totani+ (1997), Scholberg+ (2021), Bakster+ (2021)

nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



Roger Wendell(京都大, 実験)

原田了(理研, 理論)

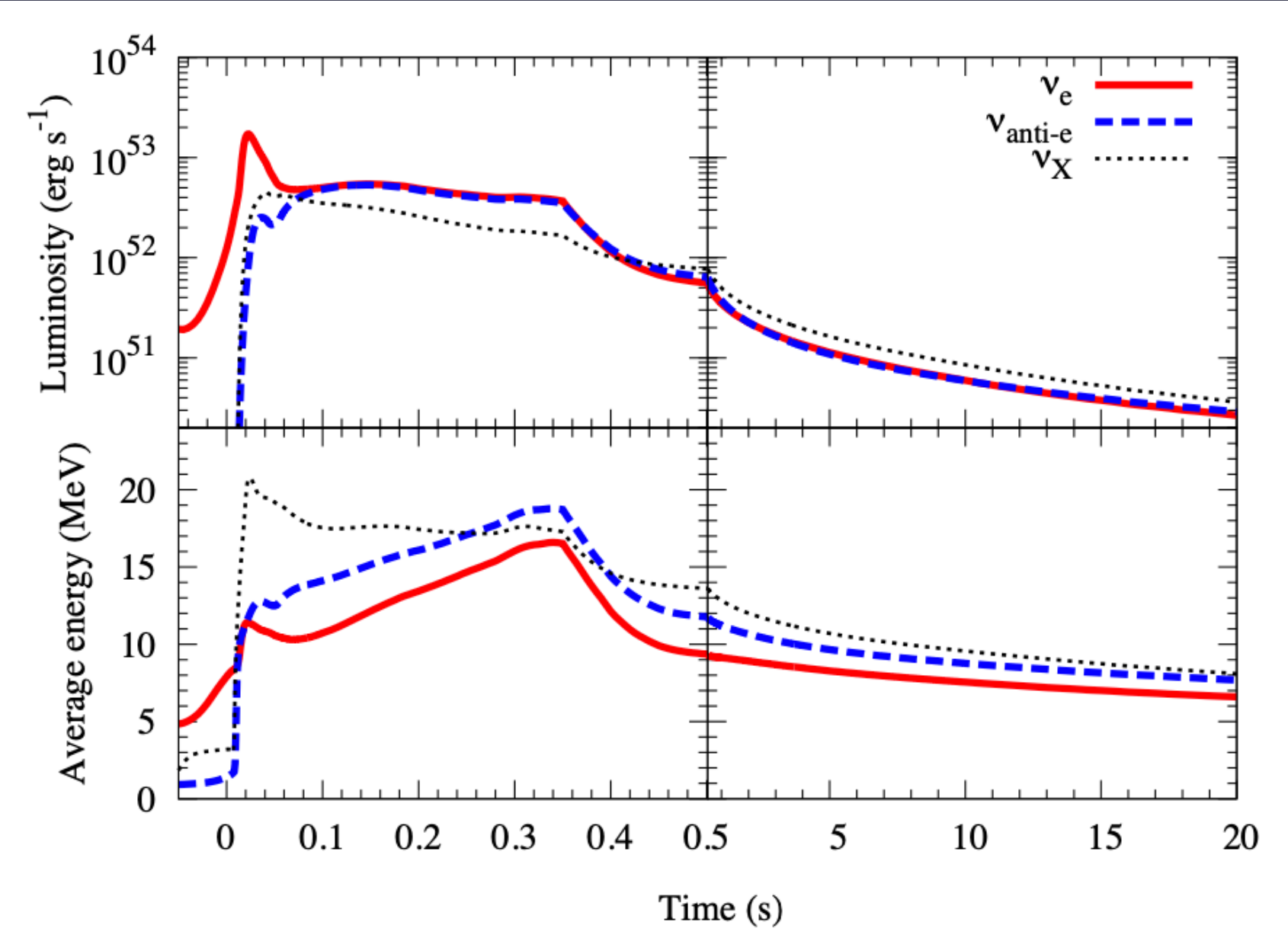
小汐由介、原田将之、中西史美
(岡山大, 実験)

諏訪雄大(東京大, 理論)、
森正光(東京大, 理論/実験)

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のフェーズ



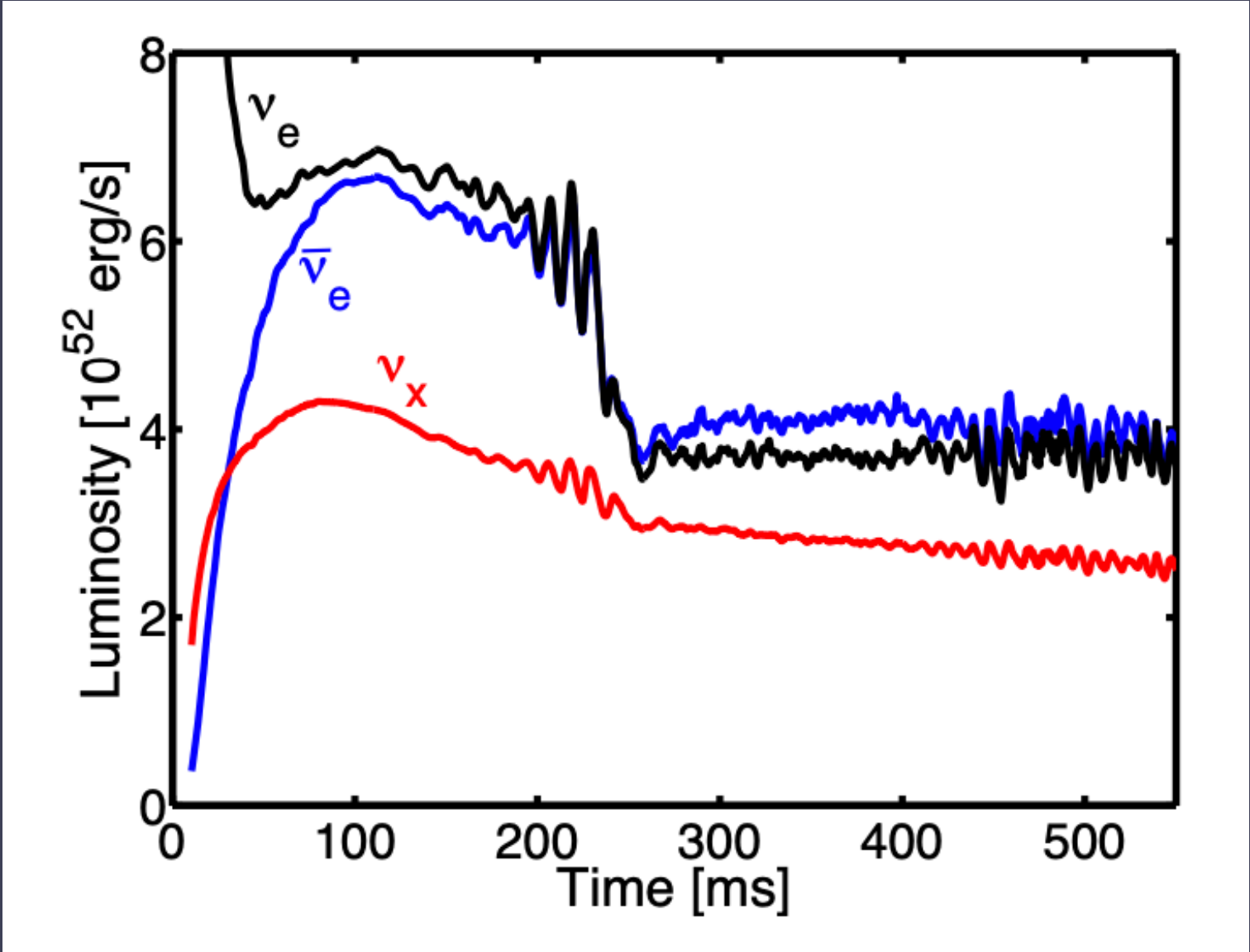
Suwa+ (2019)

爆発フェーズ

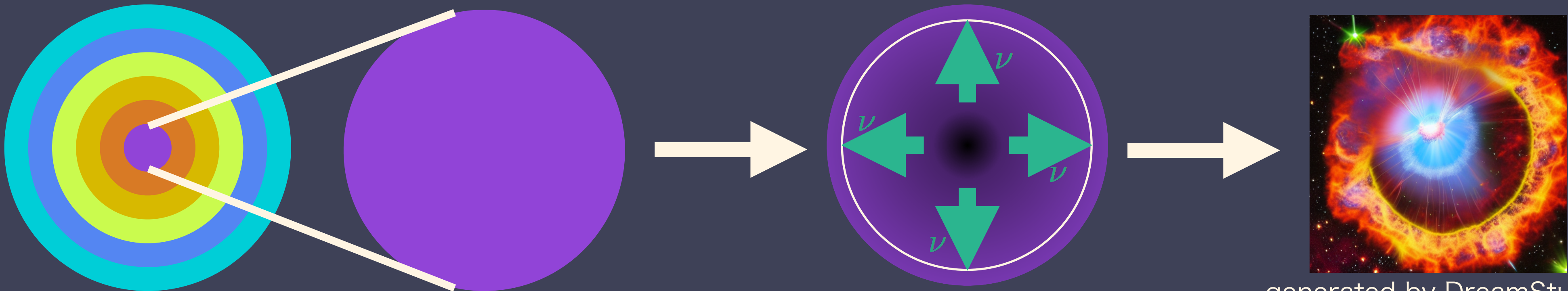
原始中性子星冷却フェーズ

超新星ニュートリノのフェーズ

- ・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)

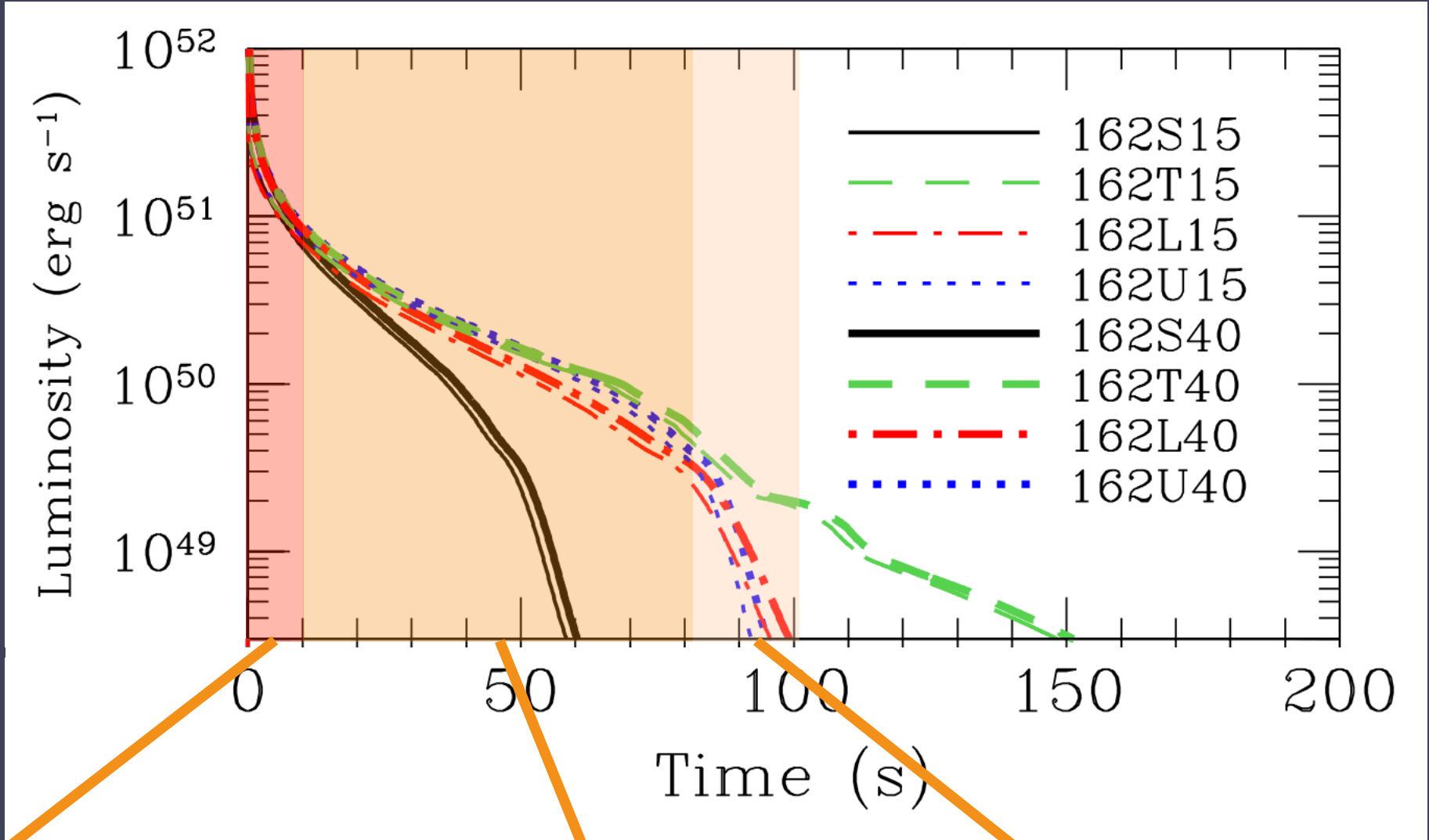


generated by DreamStudio

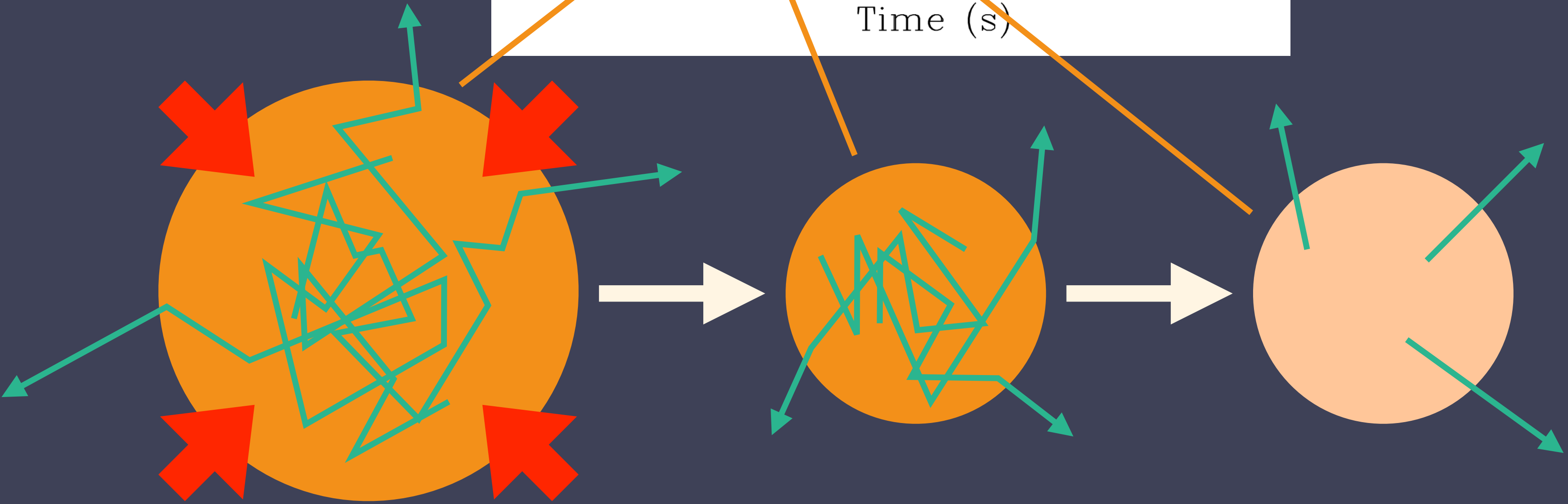
重力崩壊→コアバウンス→衝撃波停滞→乱流発達→衝撃波復活

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



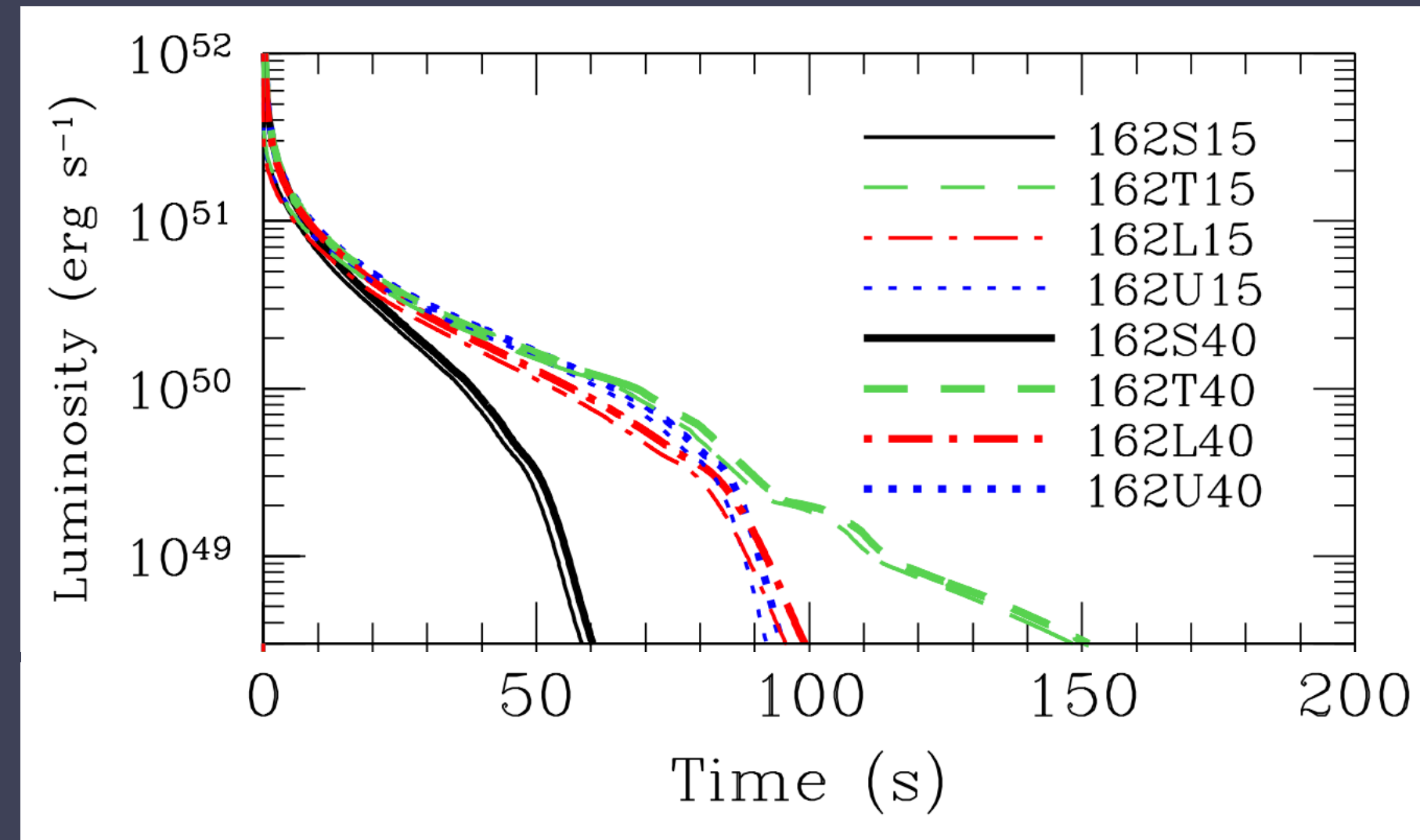
- ・原始中性子星冷却フェーズ
- ・比較的物理がシンプル(1次元拡散近似)で、不定性が少ない



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

超新星ニュートリノのフェーズ

- ・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



Nakazato+ (2022)

- ・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原始中性子星冷却フェーズに着目
 - 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
- ・(前期/爆発フェーズに着目している例：Seegerlund+ (2021), Nagakura & Vartanyan (2022)など)

nuLCコラボの提案

理論テンプレート

- ・中里データベース
原始中性子星冷却シミュレーション: 多数の質量・EOSに基づく
- ・森データベース
公開コードGR1Dに基づく、1Dでも爆発するような親星の重力崩壊シミュレーション
- ・解析的モデリング
Lane-Emden解とニュートリノ拡散近似に基づく解析解

解析手法/パイプライン

- ・backward time analysis
最後の1イベントから後ろ向きに積分する累積分布が原始中性子星の性質推定に便利
- ・ 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観測データのフィッティングに使う
- ・SPECIAL BLEND
スペクトル情報を含むPoisson likelihoodフィッティングを使う公開コード

nuLCコラボの提案

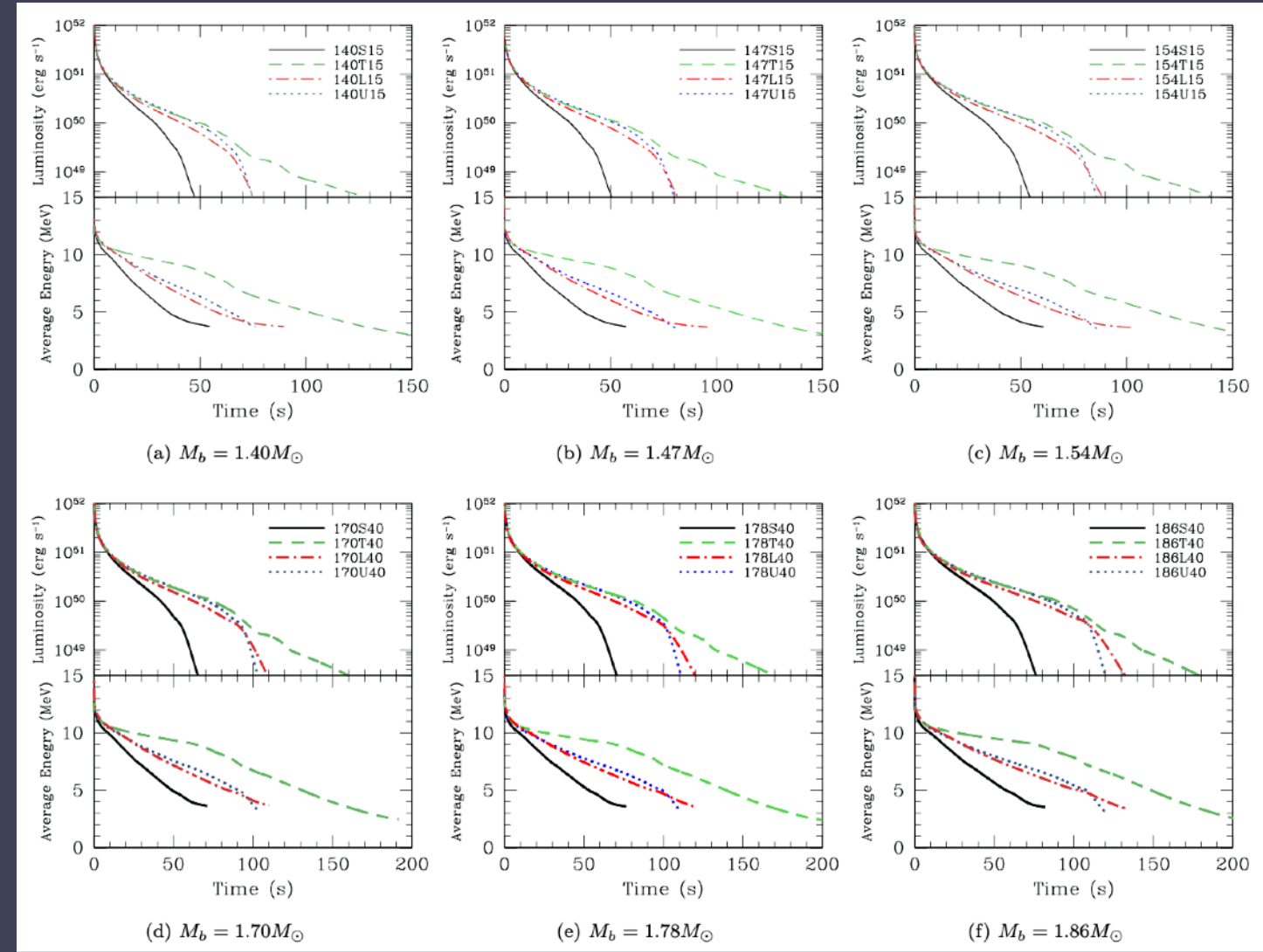
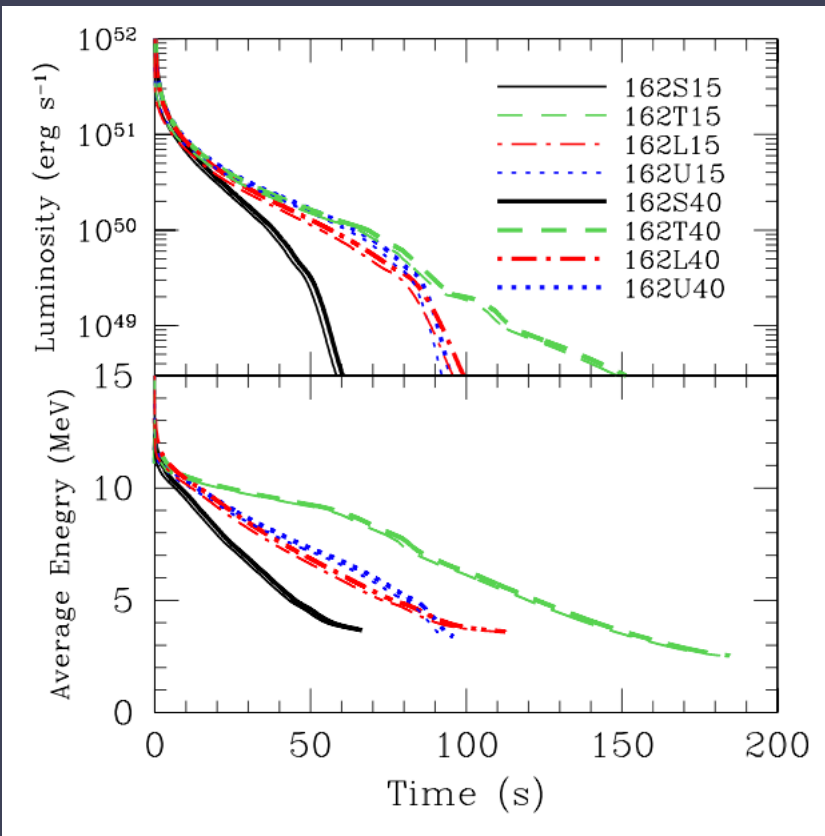
理論テンプレート

- ・中里データベース
原始中性子星冷却シミュレーション: 多数の質量・EOSに基づく
- ・森データベース
公開コードGR1Dに基づく、1Dでも爆発するような親星の重力崩壊シミュレーション
- ・解析的モデリング
Lane-Emden解とニュートリノ拡散近似に基づく解析解

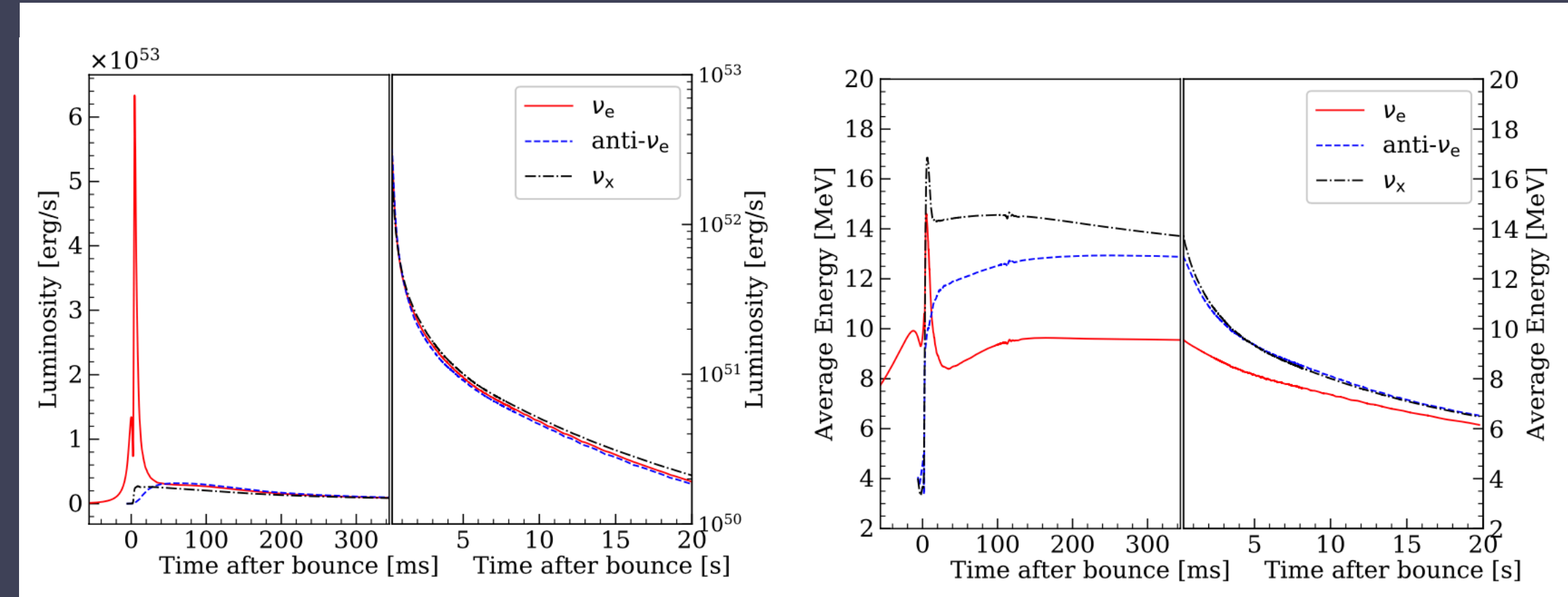
解析手法/パイプライン

- ・backward time analysis
最後の1イベントから後ろ向きに積分する累積分布が原始中性子星の性質推定に便利
- ・ 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観測データのフィッティングに使う
- ・SPECIAL BLEND
スペクトル情報を含むPoisson likelihoodフィッティングを使う公開コード

中里/森データベース



Nakazato+ (2022)



Mori+ (2021)

・中里データベース

原始中性子星冷却シミュレーションで多数の原始中性子星質量・核物質状態方程式についてニュートリノ放射をモデリング

・森データベース

公開コードGR1Dを改造しつつ、1Dでも爆発するような軽い親星について、重力崩壊から爆発、原始中性子星冷却へと続くシミュレーションを行い、ニュートリノ放射をモデリング

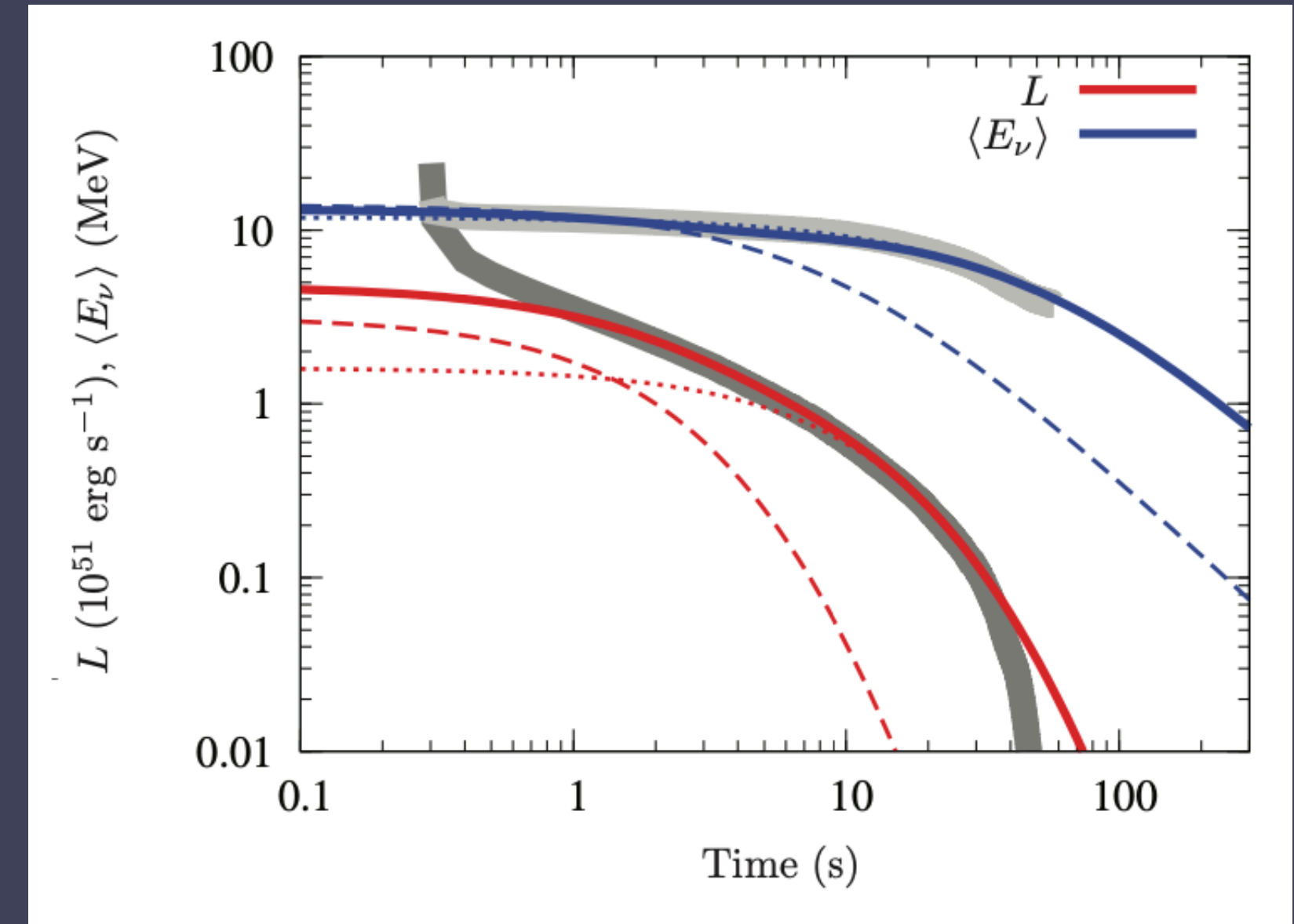
解析的モデリング

- $\gamma=2$ 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

nuLCコラボの提案

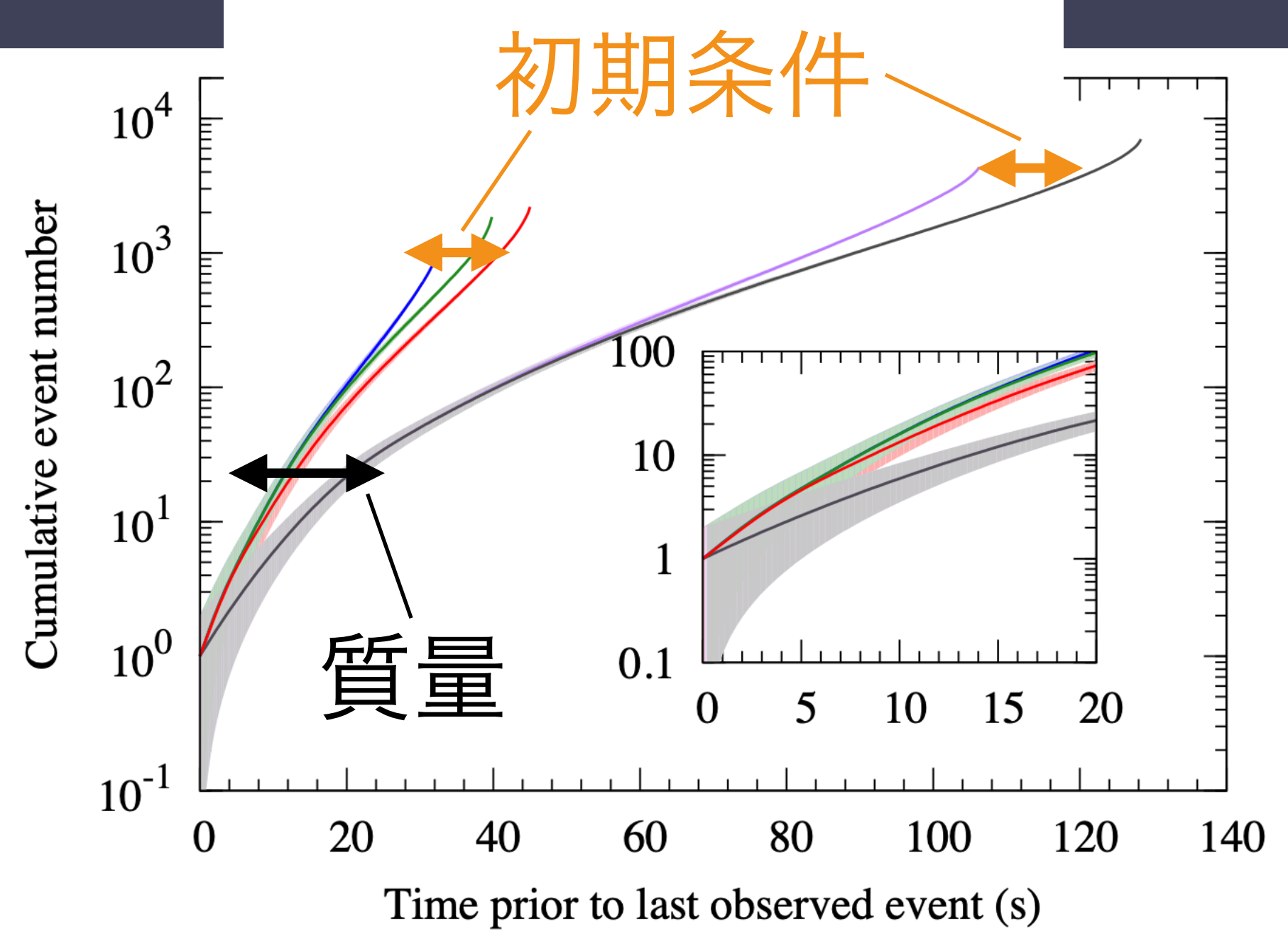
理論テンプレート

- ・中里データベース
原始中性子星冷却シミュレーション: 多数の質量・EOSに基づく
- ・森データベース
公開コードGR1Dに基づく、1Dでも爆発するような親星の重力崩壊シミュレーション
- ・解析的モデリング
Lane-Emden解とニュートリノ拡散近似に基づく解析解

解析手法/パイプライン

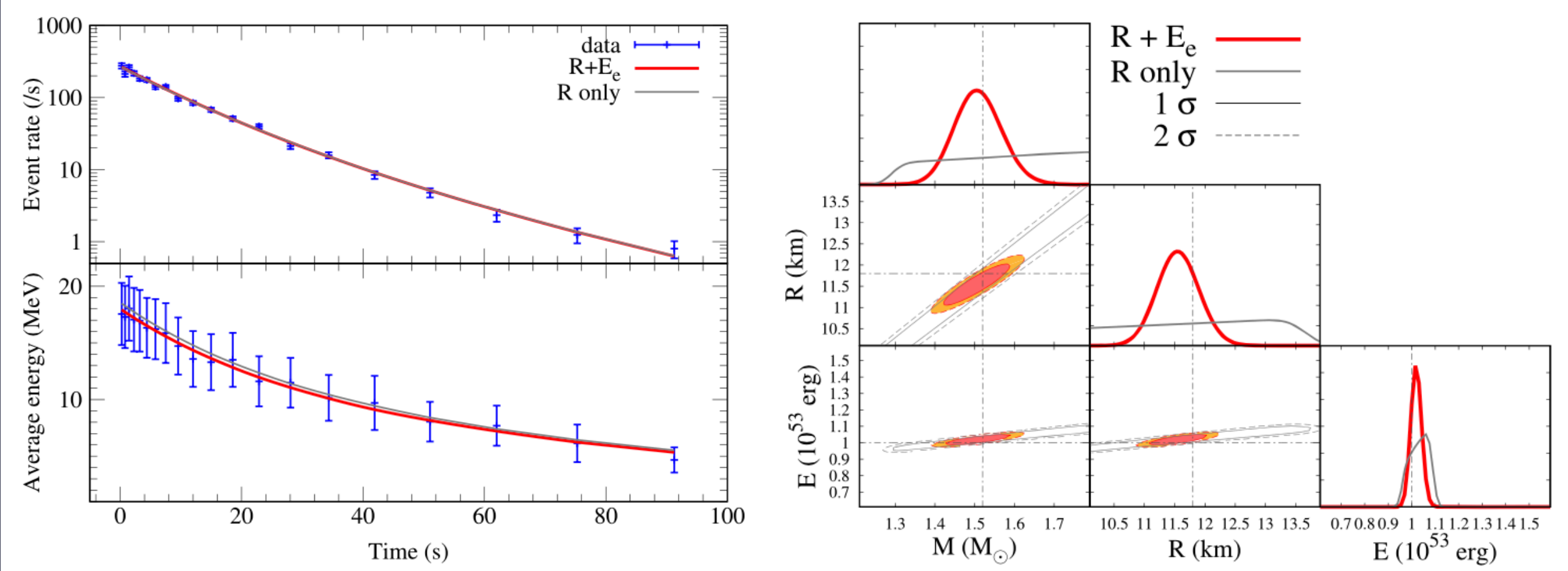
- ・backward time analysis
最後の1イベントから後ろ向きに積分する累積分布が原始中性子星の性質推定に便利
- ・ χ -squareフィッティング
解析解のカウントレートと平均エネルギーを観測データのフィッティングに使う
- ・SPECIAL BLEND
スペクトル情報を含むPoisson likelihoodフィッティングを使う公開コード

解析手法の提案



Suwa+ (2019)

- backward time analysis
- 最後の1イベントから時間を戻す方向に累積分布を作ると、中性子星の特性を判別しやすい



Suwa+ (2022)

理論レート 観測平均エネルギー
観測レート 理論平均エネルギー

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

- 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χ²を最小化するパラメータを探す

nuLCコラボの提案

理論テンプレート

- ・中里データベース
原始中性子星冷却シミュレーション: 多数の質量・EOSに基づく
- ・森データベース
公開コードGR1Dに基づく、1Dでも爆発するような親星の重力崩壊シミュレーション
- ・解析的モデリング
Lane-Emden解とニュートリノ拡散近似に基づく解析解

解析手法/パイプライン

- ・backward time analysis
最後の1イベントから後ろ向きに積分する累積分布が原始中性子星の性質推定に便利
- ・ 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観測データのフィッティングに使う
- ・SPECIAL BLEND
スペクトル情報を含むPoisson likelihoodフィッティングを使う公開コード

Likelihood function

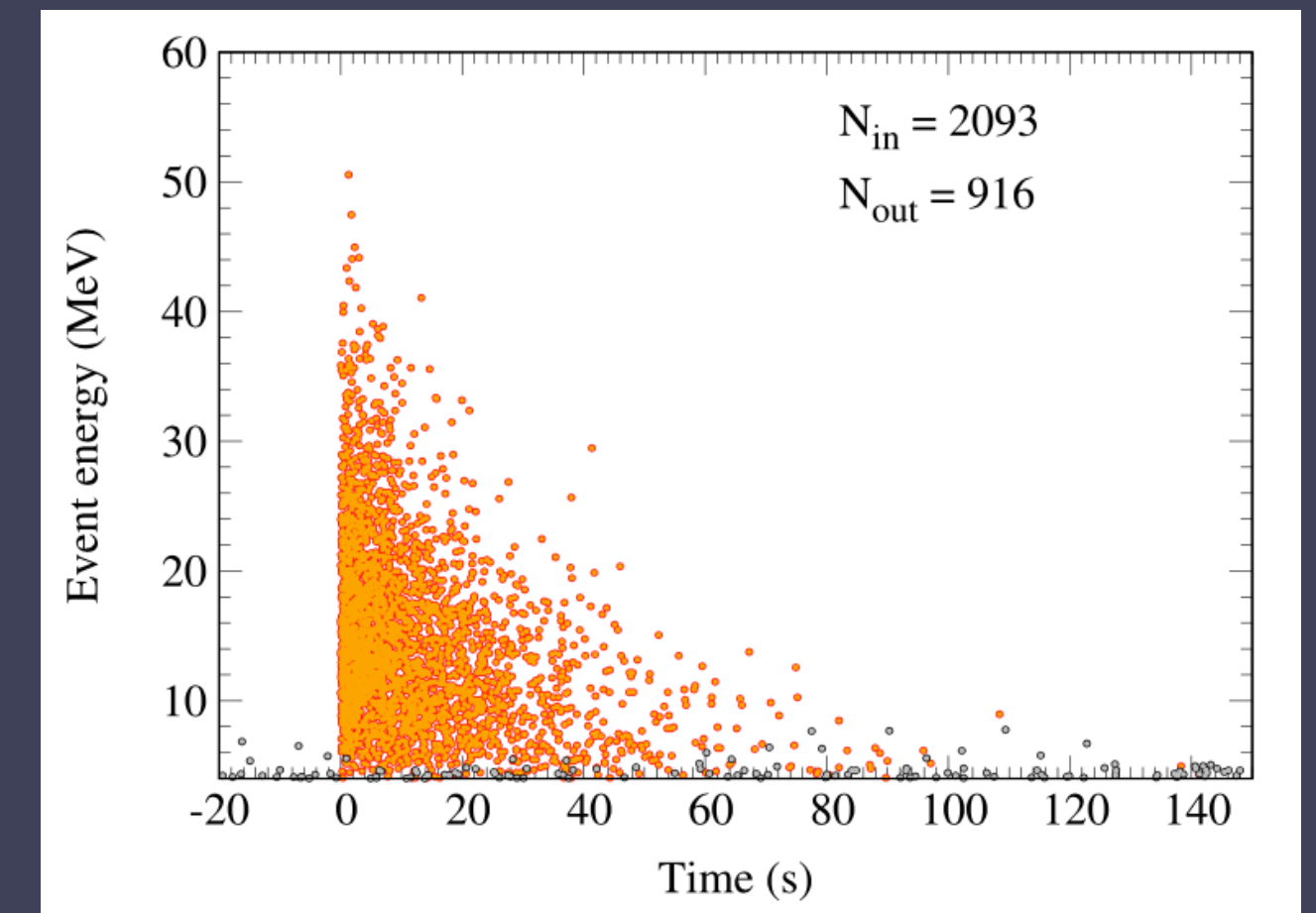
・モデルパラメータ定数 $\{M, R, E\}$ が与えられたとして、観測データ変数 $\{t_j, \epsilon_j\}$ が従う確率分布が $P(\{t_j, \epsilon_j\} | \{M, R, E\})$ であるとき、定数と変数を取り替えた関数 $L(\{M, R, E\} | \{t_j, \epsilon_j\})$ をlikelihood functionと呼ぶ。

→得られた観測データに対して、それを最大化するパラメータを探し、また68/95%のCIを与える

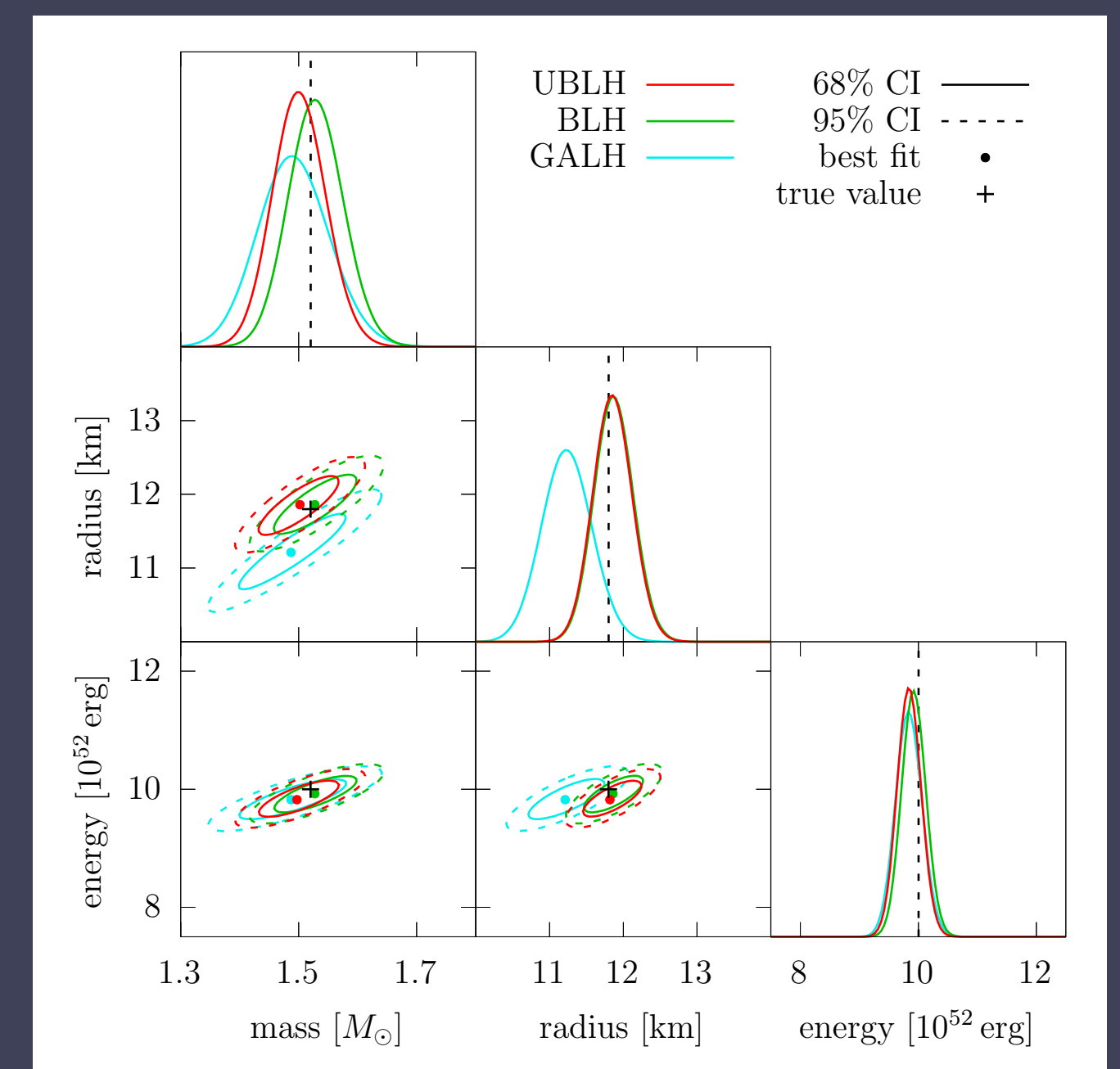
$$\mathcal{L}_{\text{GA}}(\{M, R, E\} | \{t_j, \epsilon_j\}) = \prod_{i \in \text{time bin}} \exp\left(-\frac{(N_i/\Delta t_i - \mathcal{R}_i)^2}{2\mathcal{R}_i^2/N_i}\right) \exp\left(-\frac{(\langle \epsilon \rangle_i - E_{e^+,i})^2}{2(0.05E_{e^+,i})^2}\right)$$

$$\mathcal{L}_{\text{B}}(\{M, R, E\} | \{t_j, \epsilon_j\}) = \prod_{i \in \text{time \& energy bin}} \frac{(\mathcal{R}_i \Delta t_i \Delta \epsilon_i)^{n_i}}{n_i!} \exp(-\mathcal{R}_i \Delta t_i \Delta \epsilon_i)$$

$$\mathcal{L}_{\text{UB}}(\{M, R, E\} | \{t_j, \epsilon_j\}) = \exp\left(-\int \mathcal{R}(t, \epsilon) dt d\epsilon\right) \prod_{j \in \text{events}} \mathcal{R}(t_j, \epsilon_j)$$



観測データの例 Suwa+ (2022)



AH+ in prep.

SPECIAL BLEND

- Supernova Parameter Estimation Code based on Insight on Analytic Late-time Burst Light curve at Earth Neutrino Detector (SPECIAL BLEND)
- Google colaboryやfortranをコンパイルできるPCで動かせる公開コード(準備中)
- 環境整備とかあまり考えずにとりあえず動かせるので、公開したら使ってやってください！

```
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-horada/SPECIAL_BLEND.git
Cloning into 'SPECIAL_BLEND'...
remote: Enumerating objects: 54, done.
remote: Counting objects: 100% (54/54), done.
remote: Compressing objects: 100% (37/37), done.
remote: Total 54 (delta 24), reused 35 (delta 14), pack-reused 0
Unpacking objects: 100% (54/54), done.

import os, sys

!{sys.executable} -m numpy.f2py --quiet -c /content/SPECIAL_BLEND/SPECIAL_BLEND.f90 -m SPECIAL_BLEND

%run /content/SPECIAL_BLEND/event_generator.py

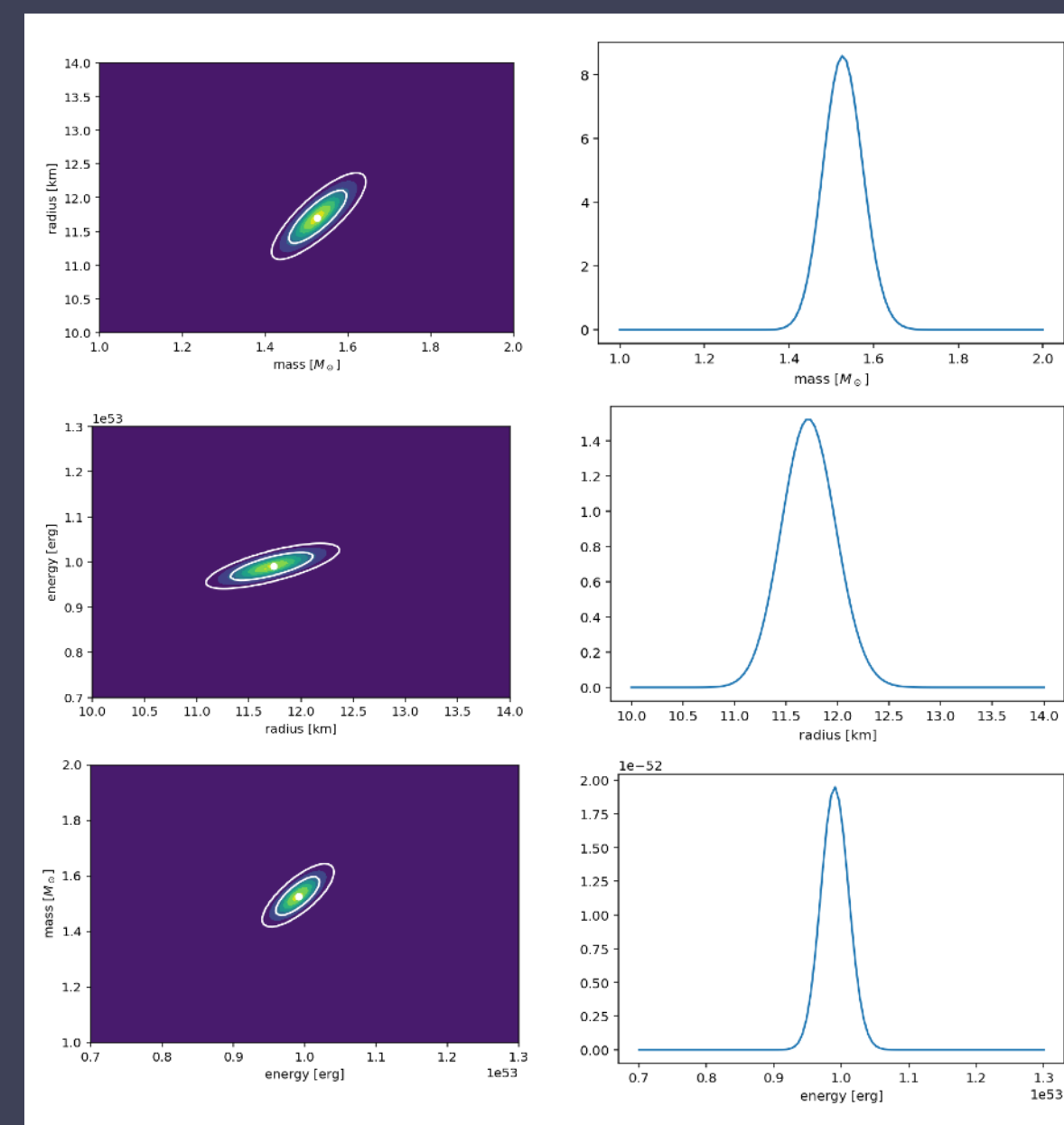
# define functions
%config InlineBackend.figure_format = 'retina'
import numpy as np
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
import SPECIAL_BLEND as SB

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 Colaborator 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")
    else:
        print("analysis mode not supported")
```

```
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] 1D marginalized result
mass = 1.526519e+00 +4.92e-02/-4.78e-02 (68%) +9.14e-02/-8.68e-02 (95%)
radius = 1.171508e+01 +2.65e-01/-2.60e-01 (68%) +5.25e-01/-5.04e-01 (95%)
energy = 9.901252e+52 +1.90e+51/-1.88e+51 (68%) +4.30e+51/-4.16e+51 (95%)

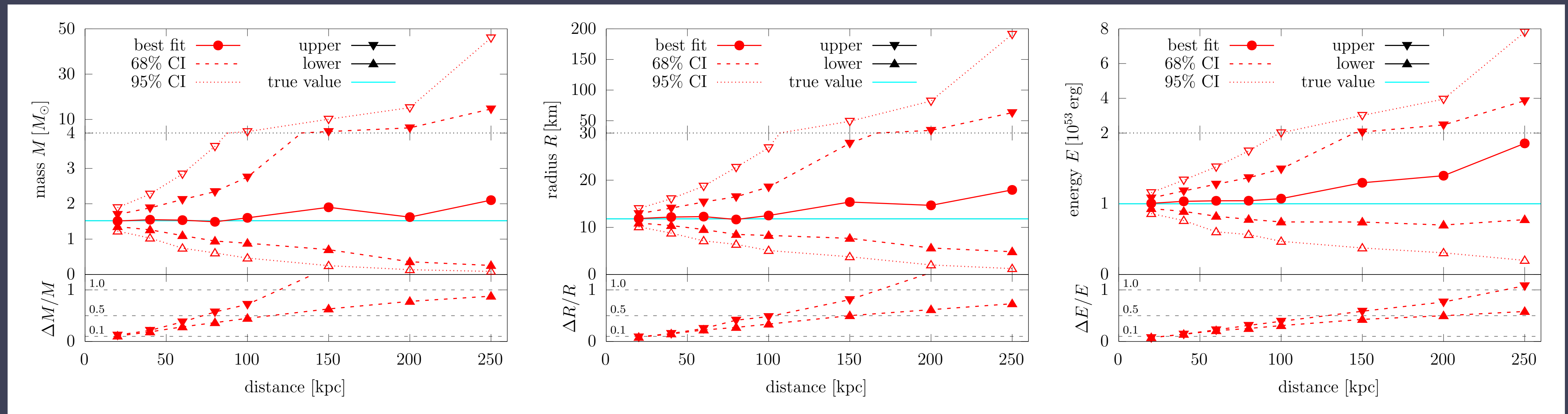
2D marginalized result
M-R: the best fit is (M,R)=(1.53e+00,1.17e+01), and the levels of CI is 7.36e+00 (68%) and 1.12e+00 (95%)
R-E: the best fit is (R,E)=(1.17e+01,9.91e+52), and the levels of CI is 1.39e-52 (68%) and 2.21e-53 (95%)
E-M: the best fit is (E,M)=(9.91e+52,1.53e+00), and the levels of CI is 8.32e-52 (68%) and 1.29e-52 (95%)

[1] # visualize likelihood
visualize(mass, rad, et, mlogLH, LH_MR, MRvals, LH_RE, REvals, LH_EM, EMvals, LHLM, LH_R, LH_E)
```



SPECIAL BLEND性能の距離依存性

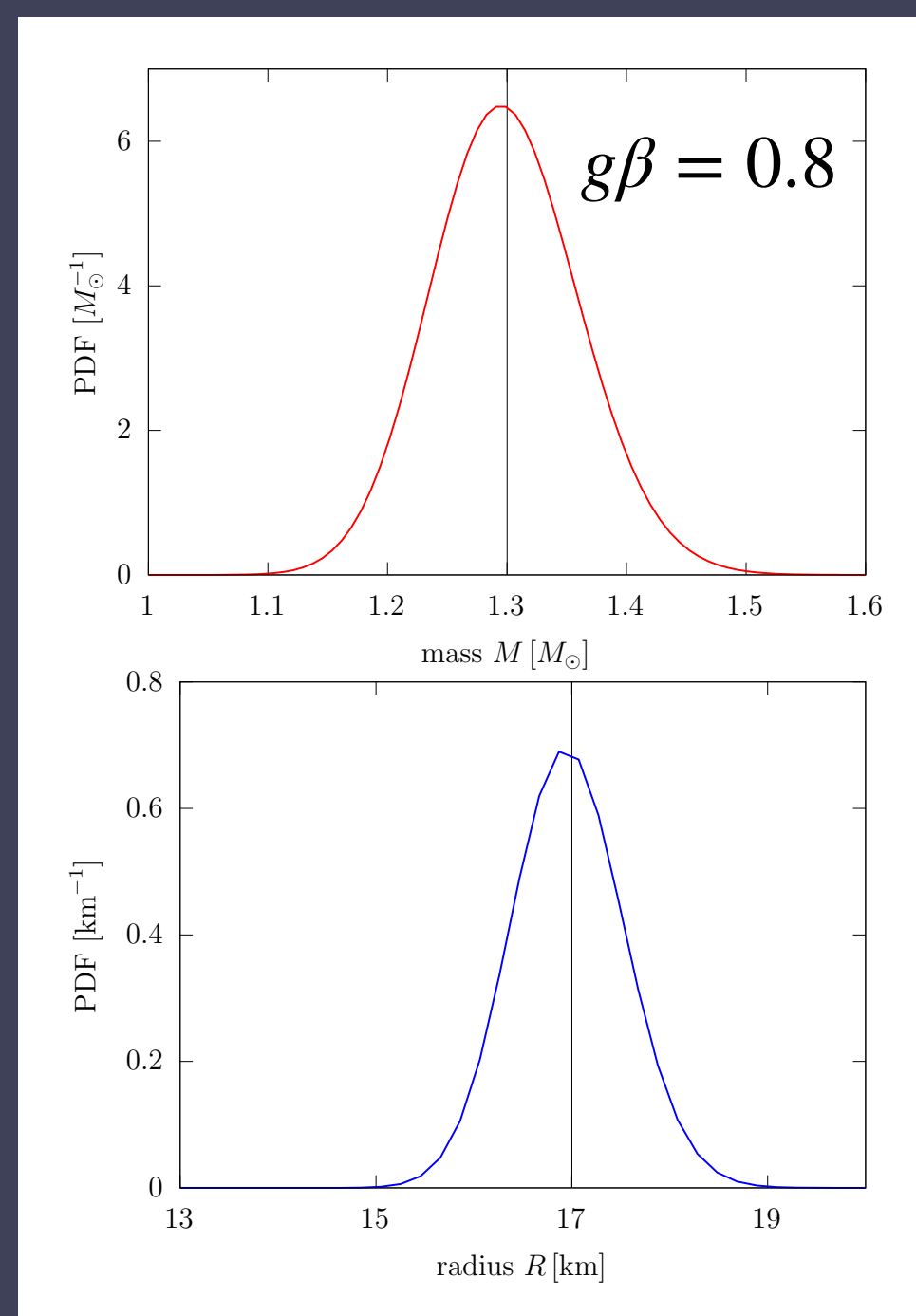
- ・解析解モデルに基づくニュートリノ放射を様々な距離において、SKで受けた場合の模擬観測データを大量に作り、SPECIAL BLENDでもともとのモデルパラメータを再現できるかを確認する
- ・「平均的な」結果の距離依存性
- ・ベストフィットは100 kpcくらいまでいい線行く
- ・120/70/10 kpcくらいまでエラー100/50/10%以内に抑えられる



現実的なデータの場合

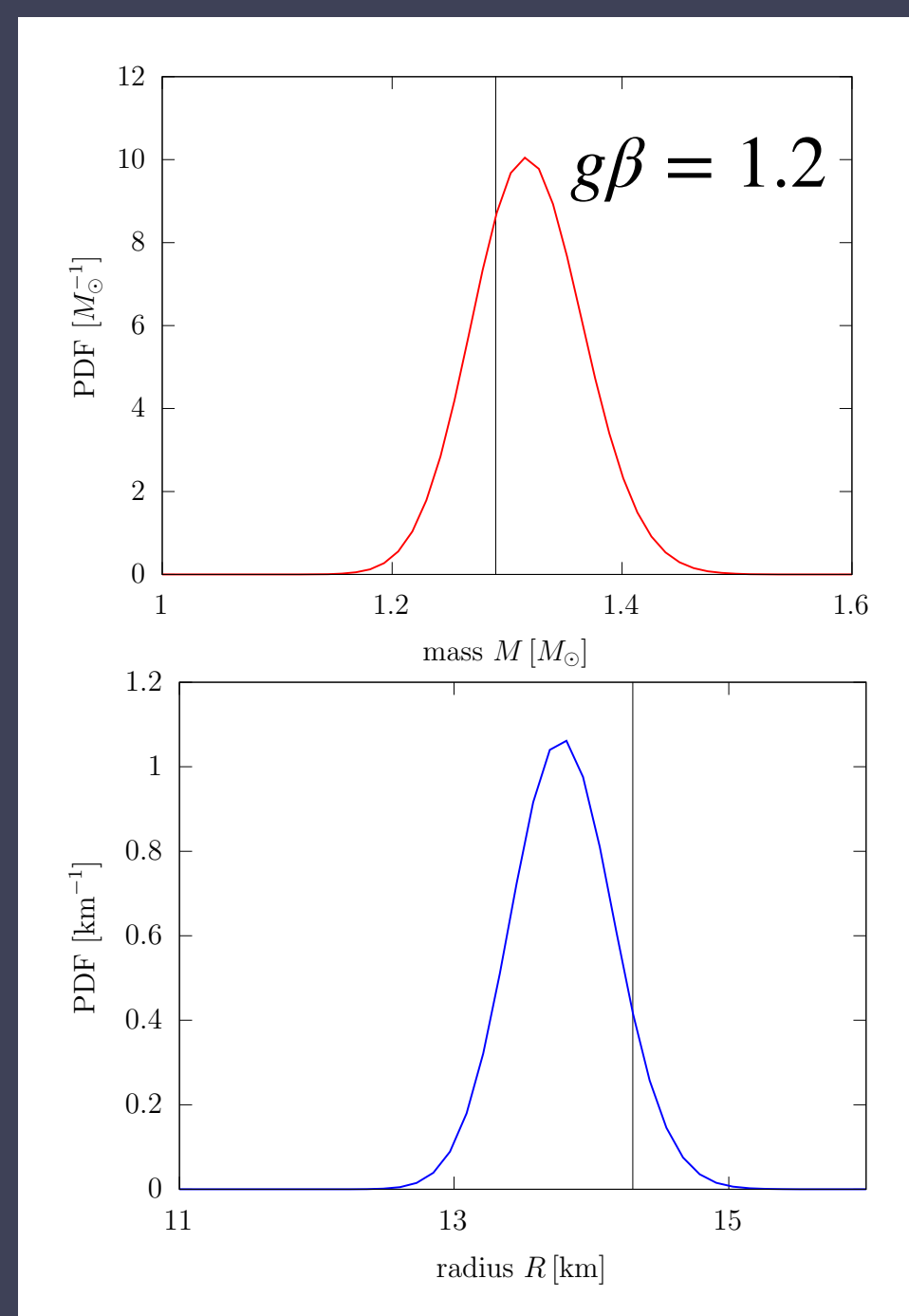
- nuLCコラボが提案してきた観測の理論テンプレート(中里/森データベース)を10 kpcにおき、SKで受けたときの模擬観測データを解析
- データの時間範囲を制限してshallow decayフェーズだと思われるものに絞ることで(今回は最初の0.5秒カット)、中里/森データベースのパラメータでもそれなりに精度良く推定できる

森DB



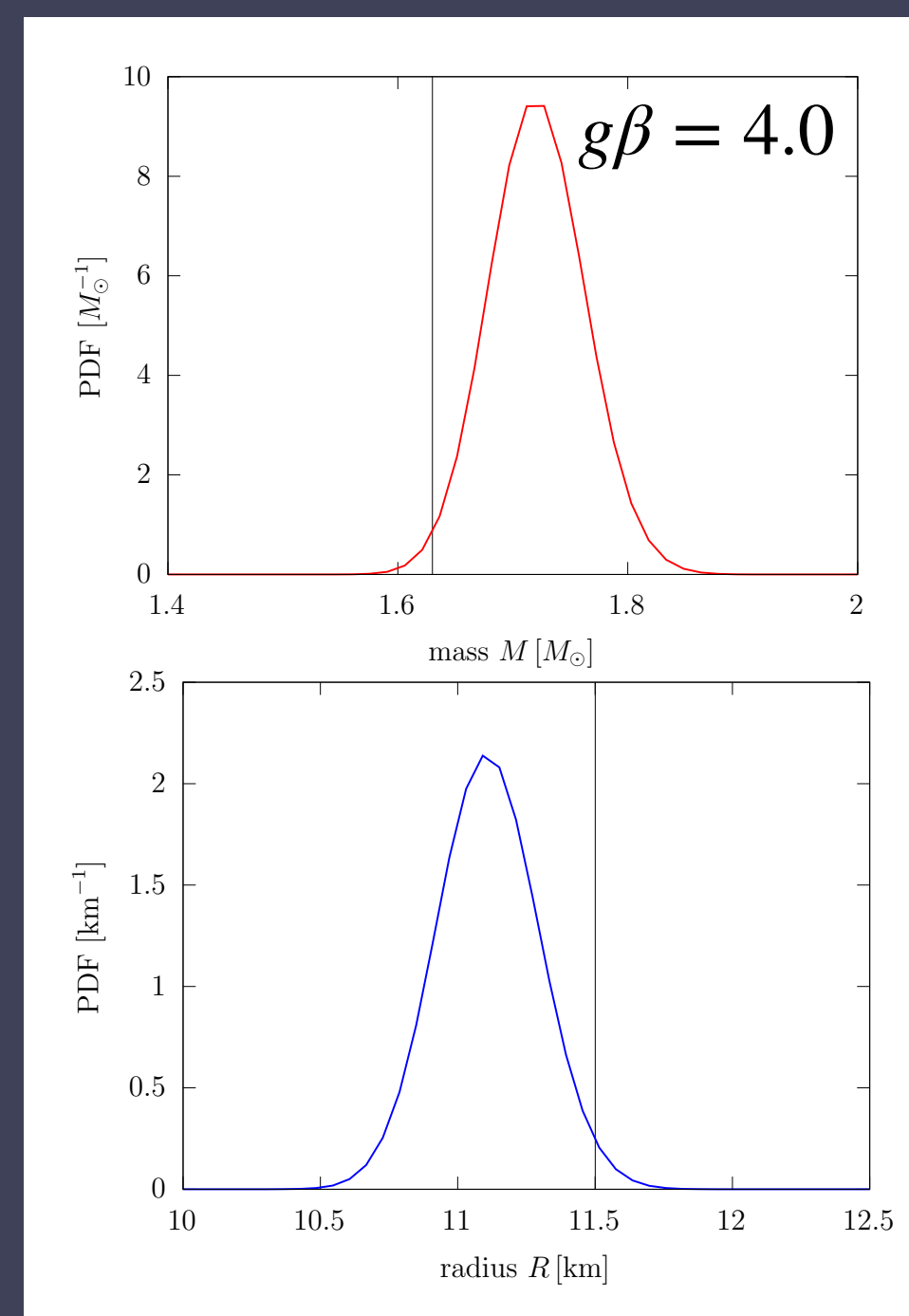
AH+ in prep.

中里DBその1



AH+ in prep.

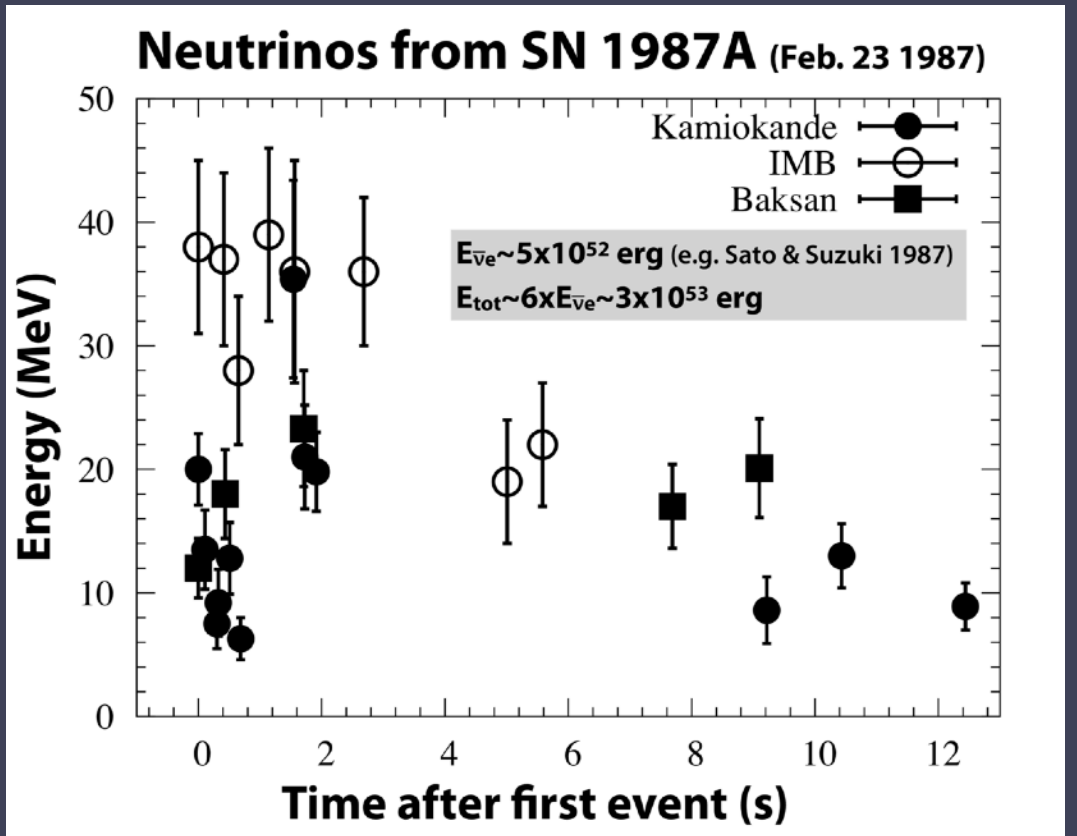
中里DBその2



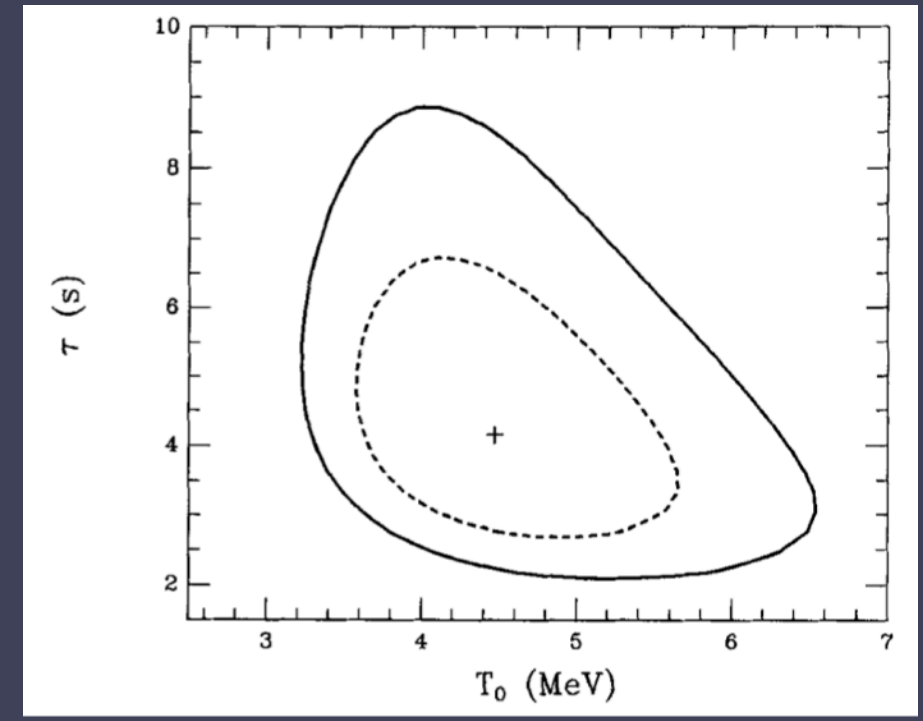
AH+ in prep.

SN1987AニュートリノとNS1987A(?)

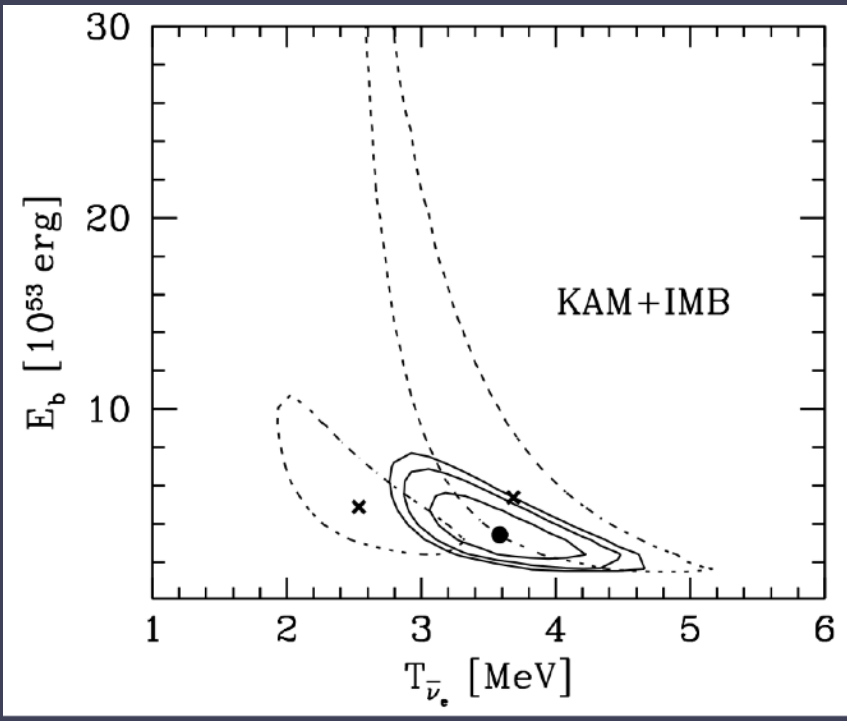
ニュートリノ



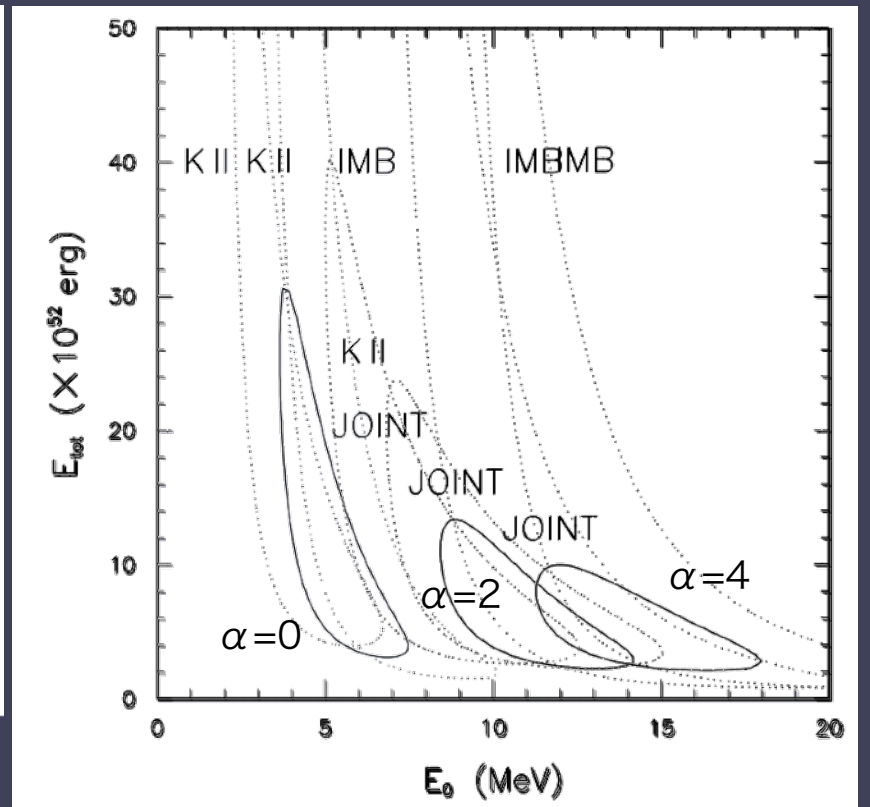
Courtesy of Suwa



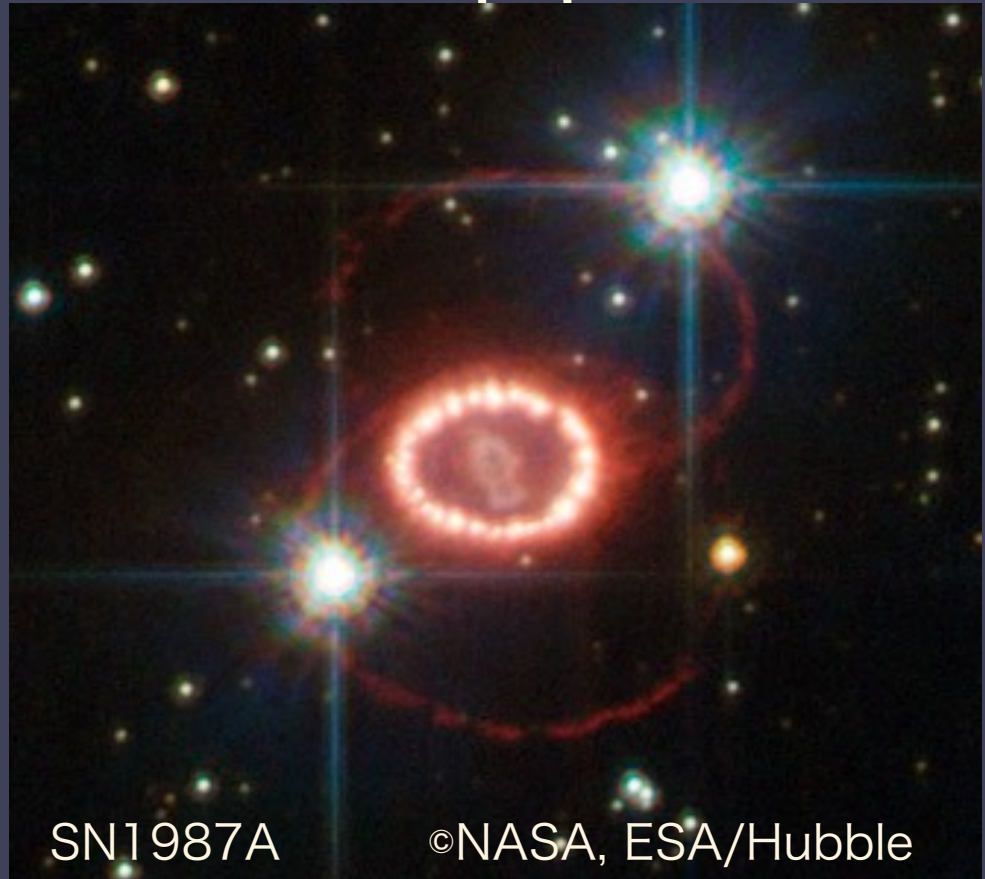
Loredo & Lamb (1989)
時間依存モデル
ジョイント解析のみ



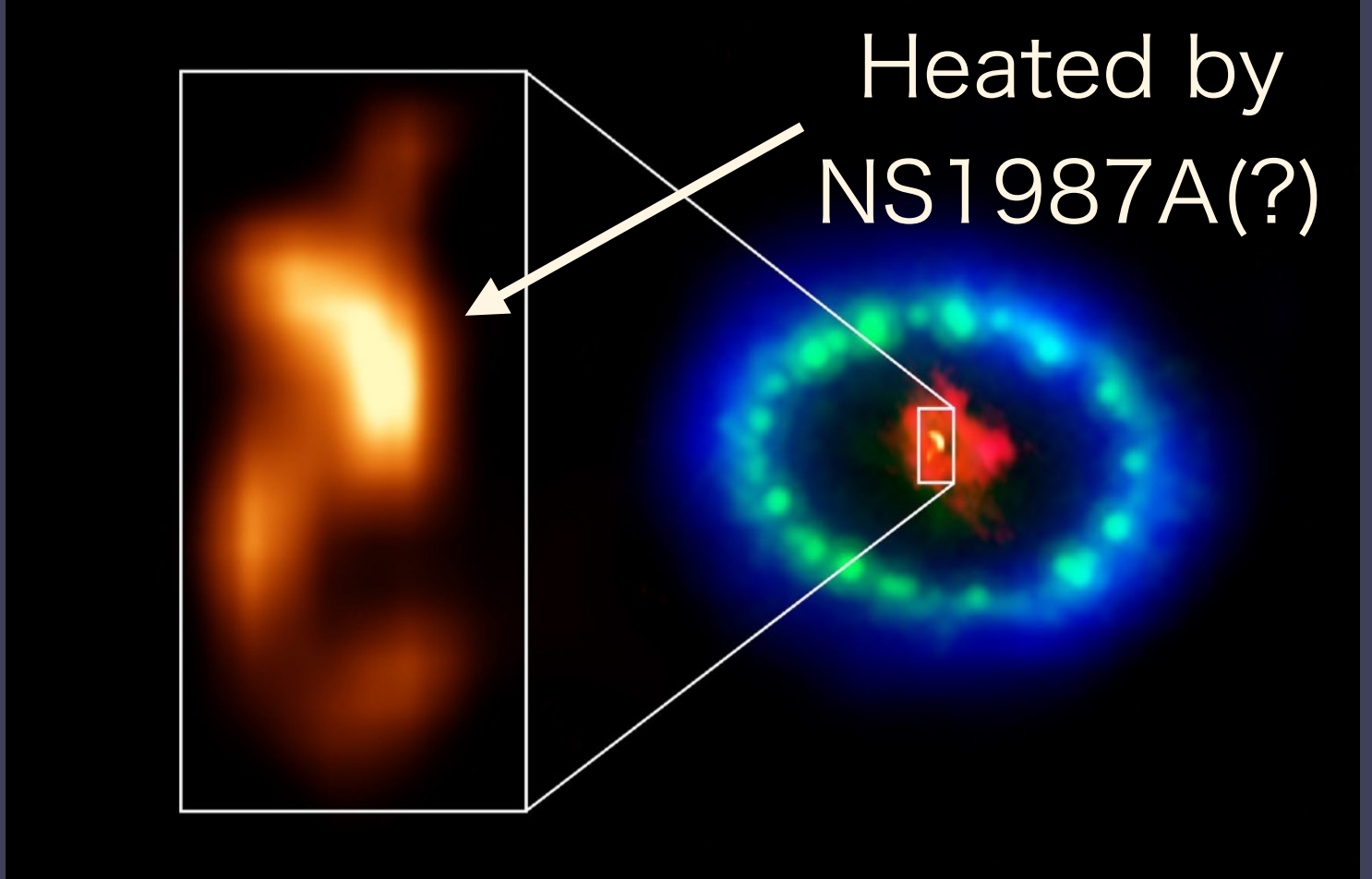
Jegerlehner et al. (1996)
時間平均モデル
ジョイント解析と個別解析



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



光学観測
(~30年後)

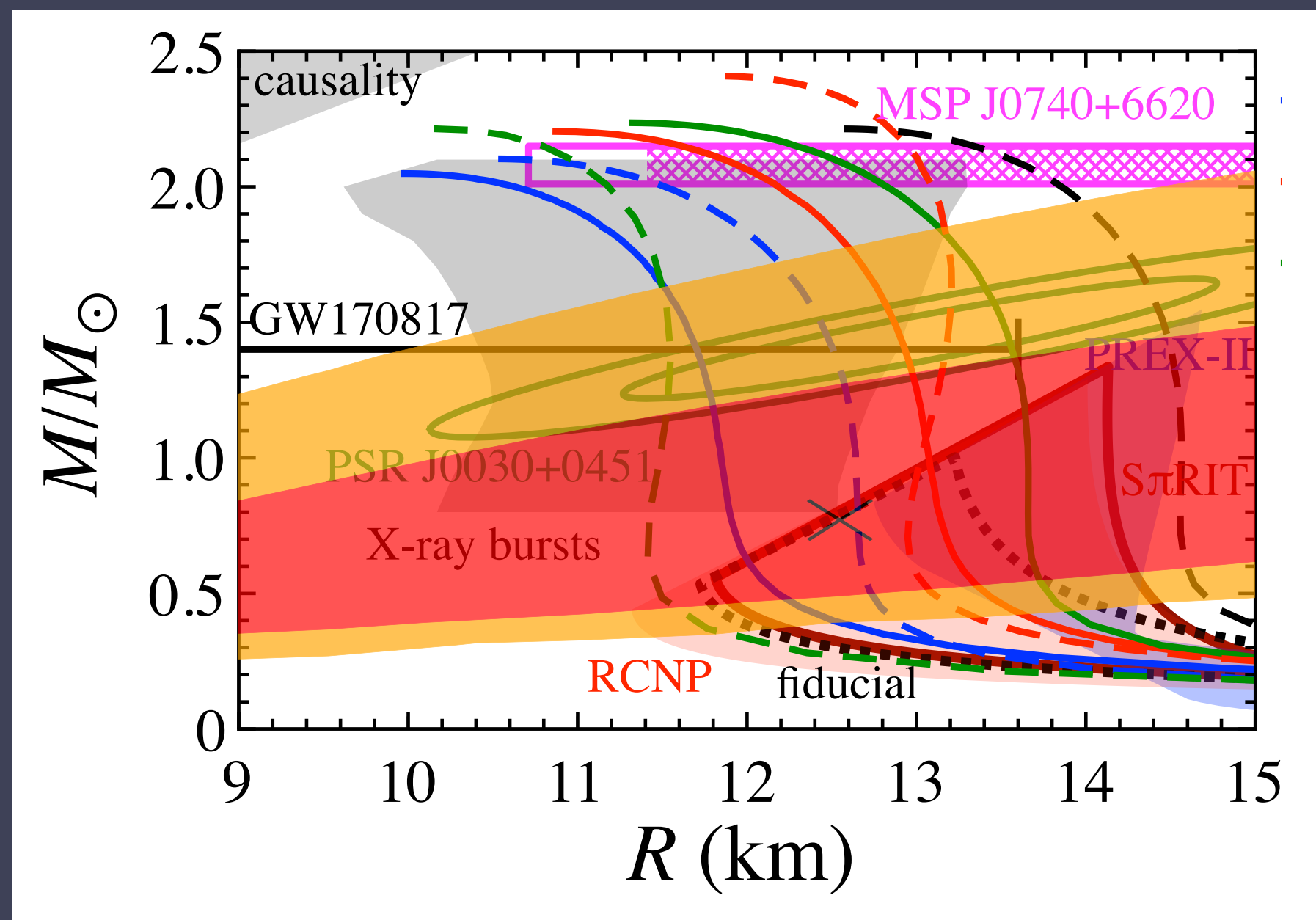
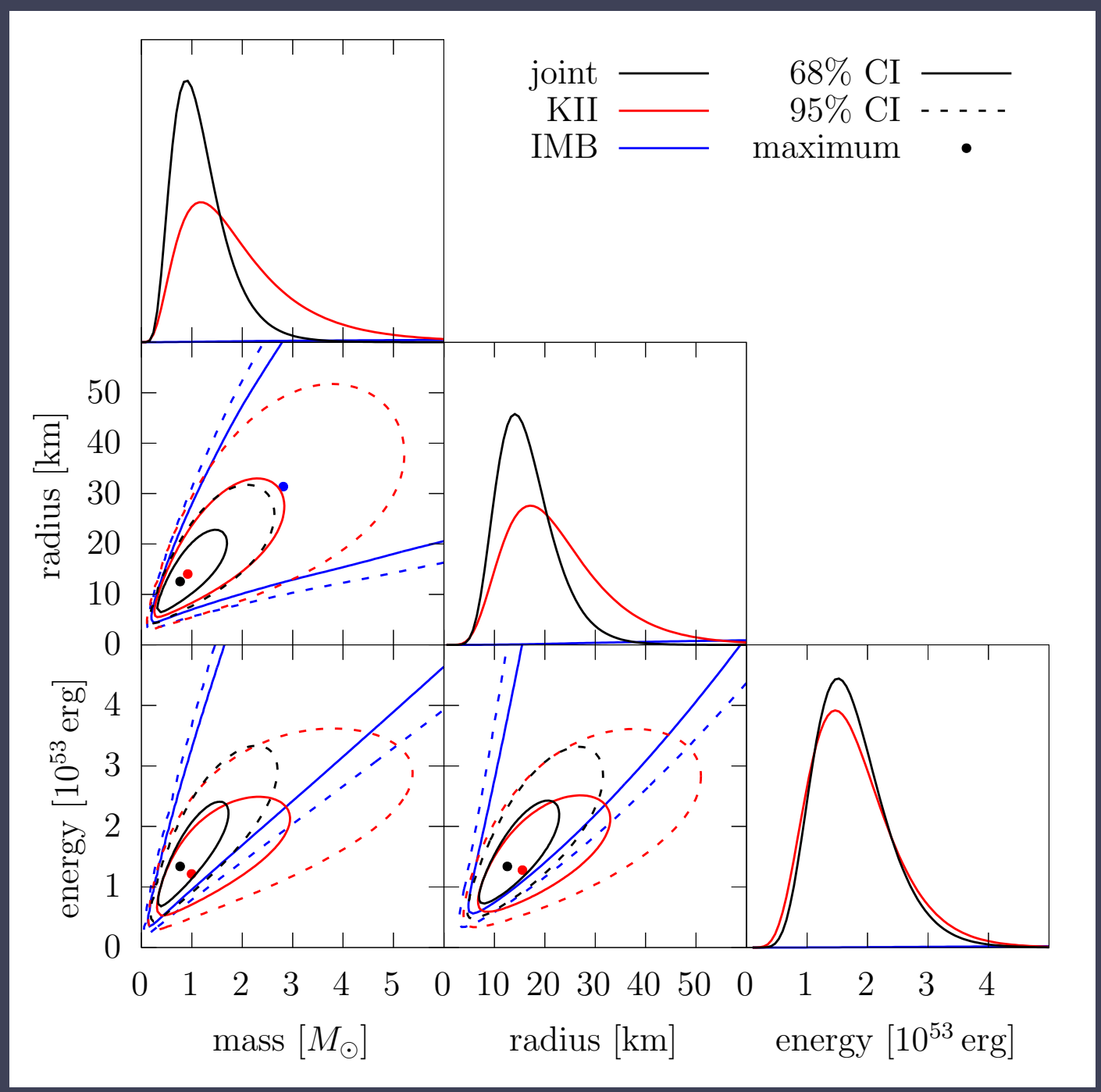


Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), P. Cigan and R. Indebetouw; NRAO/AUI/NSF, B. Saxton; NASA/ESA

- ・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。
- ・ALMAがSN1987A残骸の中にhot regionを発見→NS1987Aがあるということでは？素性はまだ不明だが。

NS1987Aのパラメータ推定

- ・SPECIAL BLENDをKII/IMB時代の検出器性能に対応できるように改造
- ・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)

2D周辺化した場合のベストフィットは $(M_{\text{PNS}}, R_{\text{PNS}}) = (0.768 M_{\odot}, 12.6 \text{ km})$

- ・注意①観測データはあくまで確率的に得られるものなので、統計的なばらつきとしてベストフィットが小さめに出た可能性あり
- ・注意②質量は実際には現象論パラメータ $g\beta$ と縮退
- ・注意③先行研究の推定方法は割とざっくりしている

まとめ

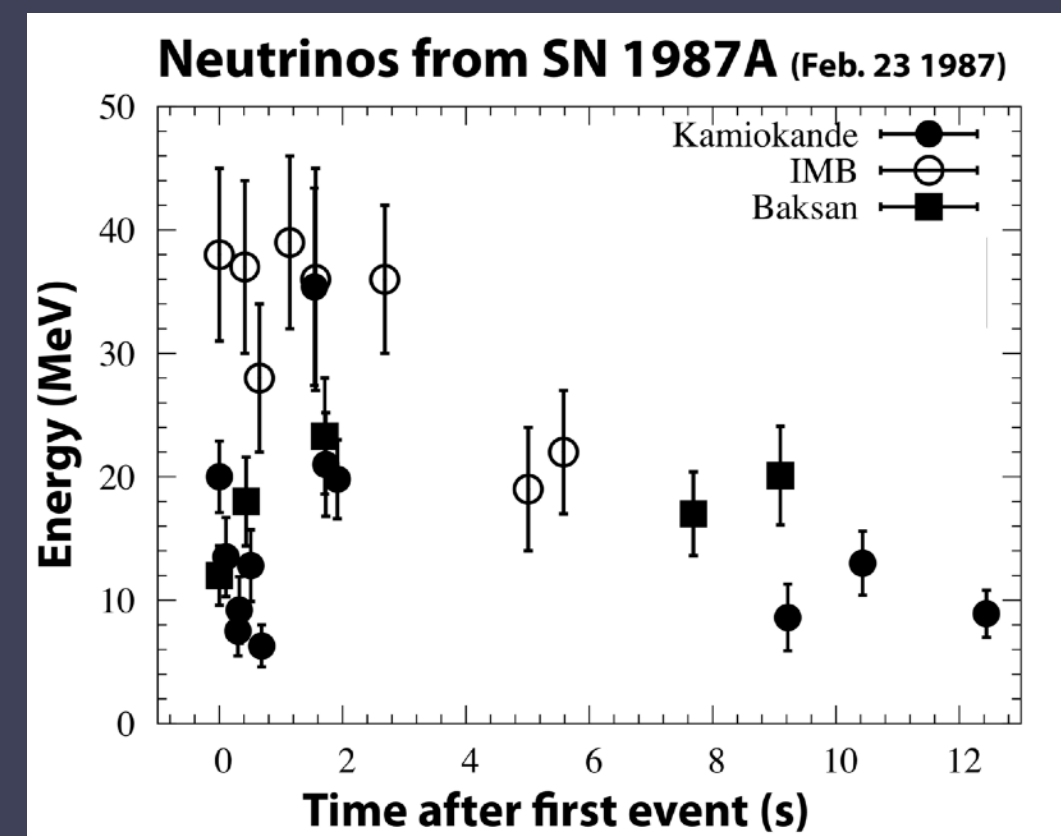
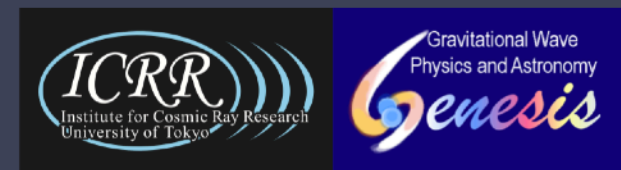
- ・将来の超新星ニュートリノ観測に備えて、理論と観測でタッグを組むnuLCコラボを結成
- ・解析解などの理論テンプレートを提案し、SPECIAL BLENDという解析用公開コードを開発
- ・SN1987Aからのニュートリノを解析し、NS1987Aのパラメータを推定した：

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

- ・注意点はいくらかあるので、今後も改良していくが、超新星ニュートリノが受かったときの簡易的な解析をするツールとしてご利用ください

nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



Courtesy of Suwa

