



103

# スーパーカミオカンデによる 超新星ニュートリノの 観測テンプレートの開発

原田 了 (ICRR)

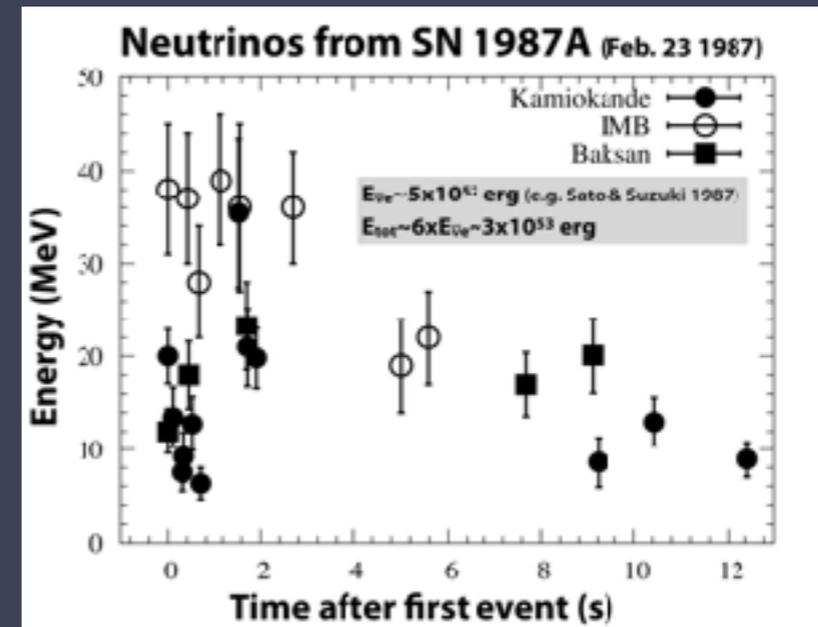
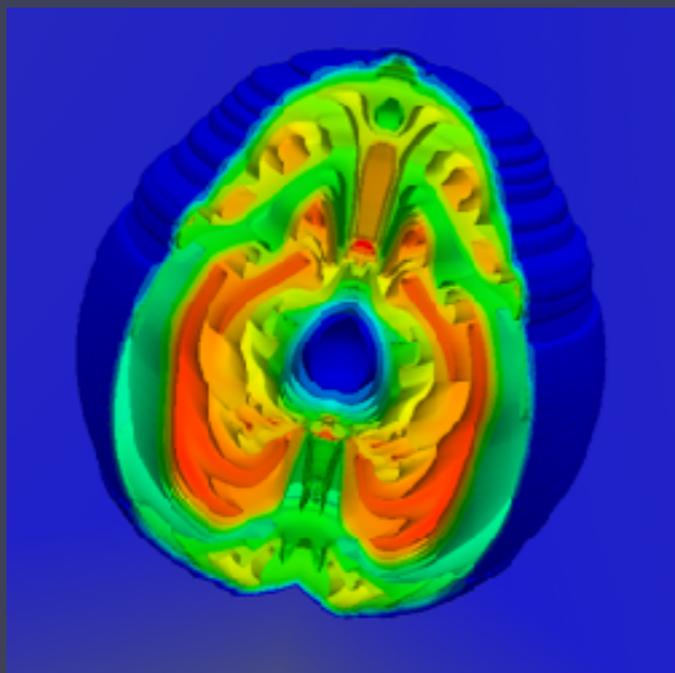
共同研究者: 住吉光介(沼津高専)、中里健一郎(九州大)、諏訪雄大(京産大)、小汐由介、  
原田将之(岡山大)、Roger Wendell、森正光(京都大)

査定額: 対面打合せ旅費として20万円→論文出版費に変更

# 超新星ニュートリノ観測と理論



理論家と実験家で協力して超新星ニュートリノ検出に備える



諏訪のスライドより

# nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



諏訪雄大(京産大, 理論)

Roger Wendell、森正光(京都大, 実験)

小汐由介、原田将之(岡山大, 実験)

原田了(ICRR, 理論)

住吉光介(沼津高専, 理論)

中里健一郎(九州大, 理論)



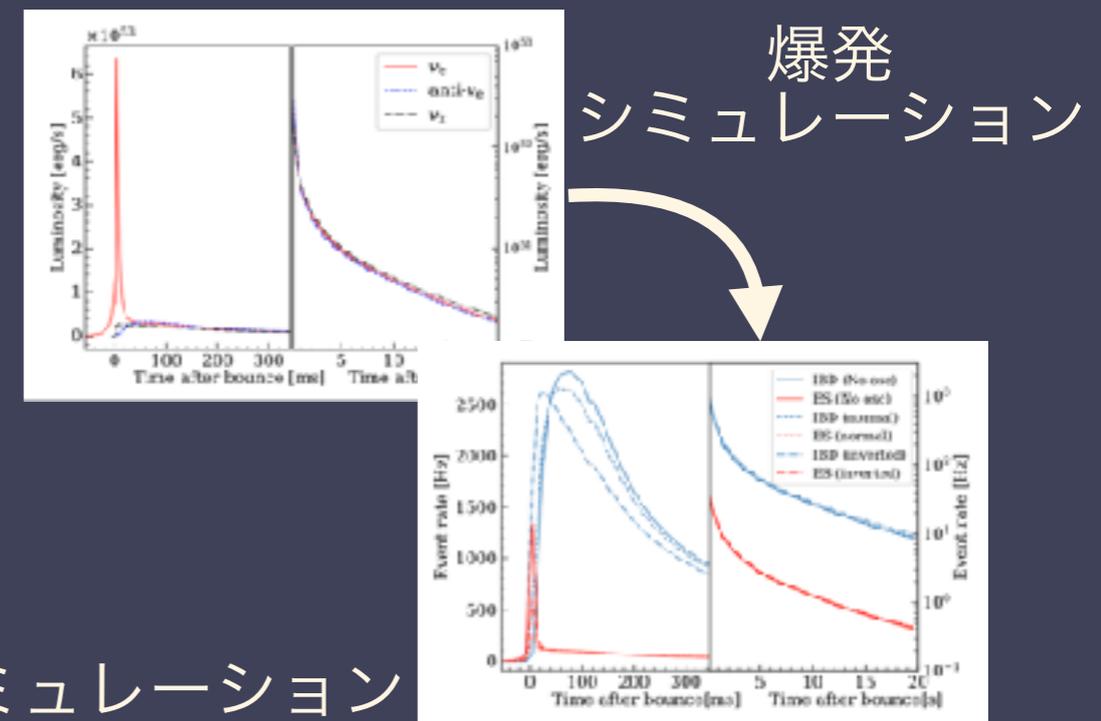
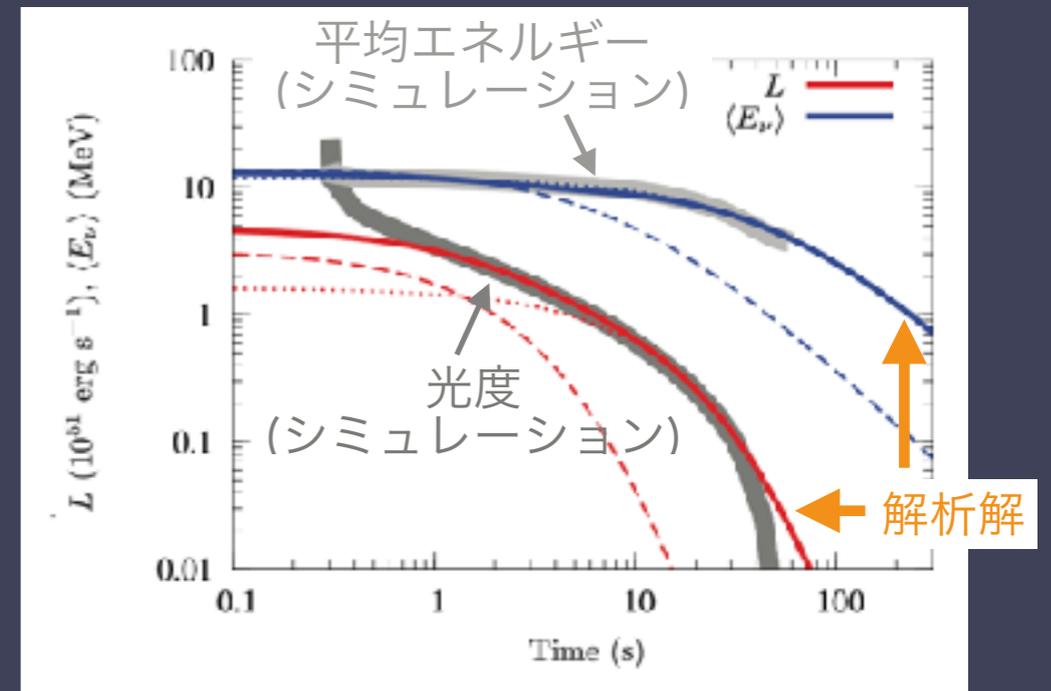
# nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



2020年度

- ・ニュートリノ光度曲線の解析解の開発
- ・Y. Suwa, A. Harada, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, Analytic solutions for neutrino-light curves of core-collapse supernovae, PTEP, 013E01, 2021
- ・超新星爆発から検出まで一貫したフレームワークの開発
- ・M. Mori et al., Developing an end-to-end simulation framework of supernova neutrino detection, PTEP, ptaa185, 2020



検出シミュレーション

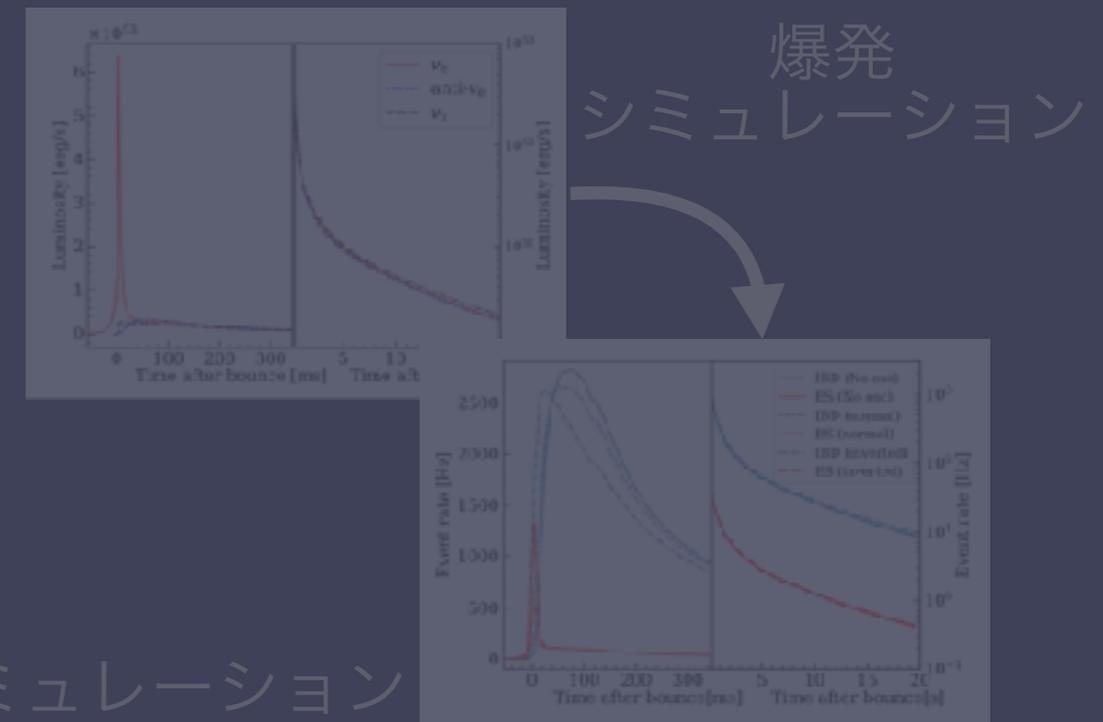
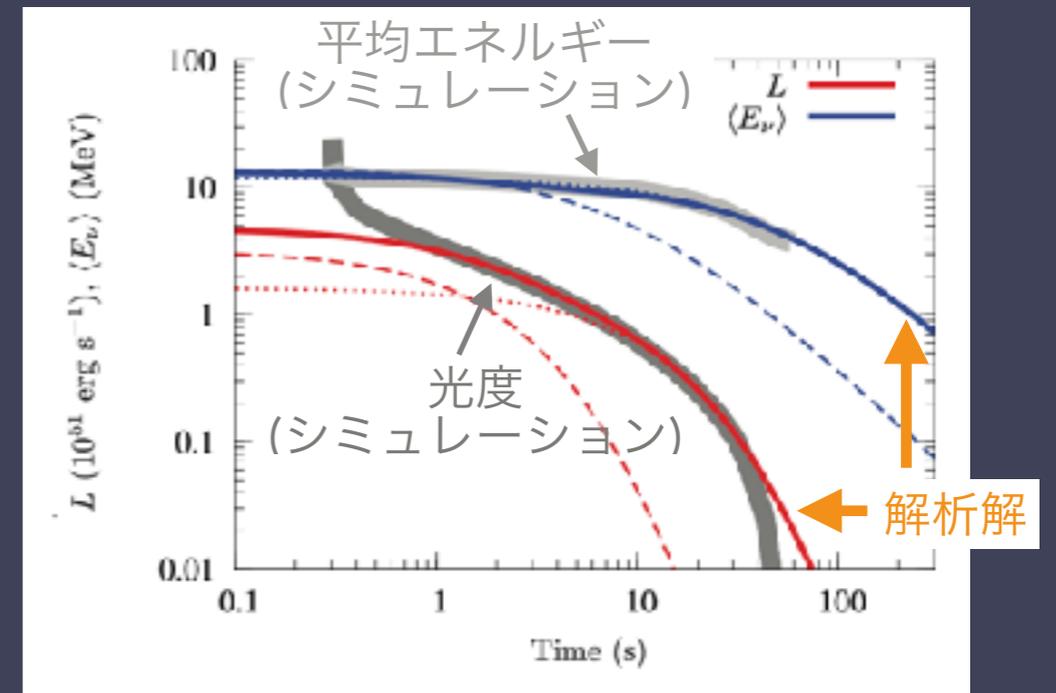
# nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



2020年度

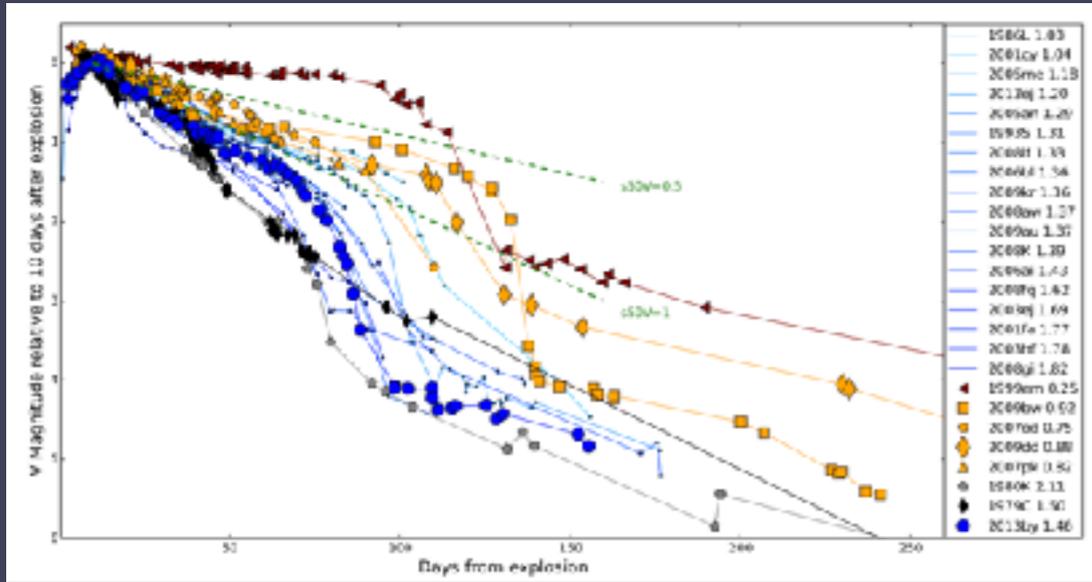
- ・ニュートリノ光度曲線の解析解の開発
- ・Y. Suwa, A. Harada, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, Analytic solutions for neutrino-light curves of core-collapse supernovae, PTEP, 013E01, 2021
- ・超新星爆発から検出まで一貫したフレームワークの開発
- ・M. Mori et al., Developing an end-to-end simulation framework of supernova neutrino detection, PTEP, ptaa185, 2020



検出シミュレーション

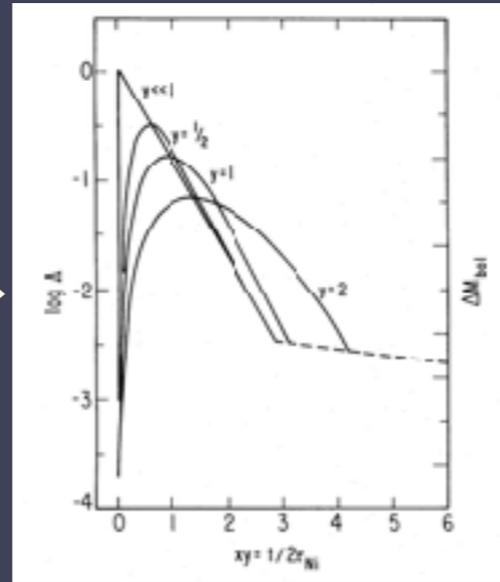
# 解析解の必要性

## 光学観測の光度曲線



Valenti et al. (2015)

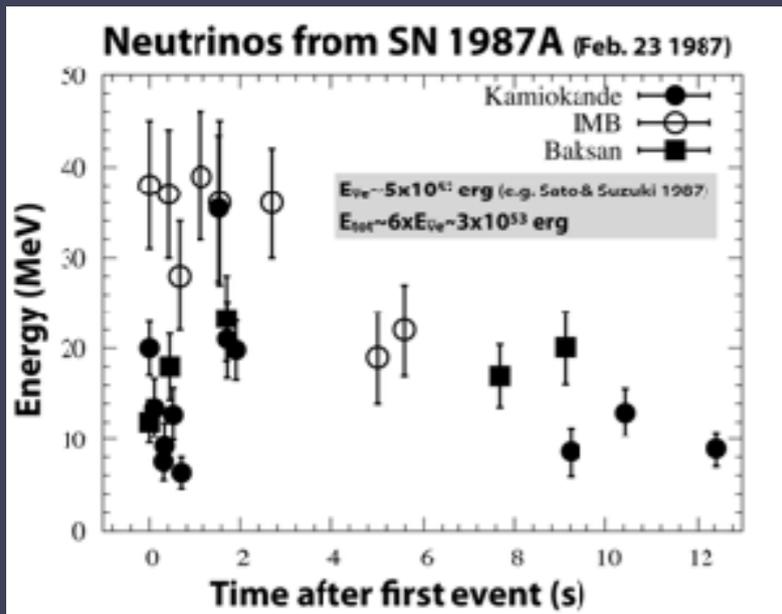
## 解析解



Arnett (1982)

爆発エネルギー  
Ejecta質量  
etc...

## ニュートリノ観測



諏訪のスライドより



原始中性子星半径  
原始中性子星質量  
etc...

# 解析解の構成

温度構造 (Lane—Emden解,  $n=2$  polytrope)

$$k_B T(r) = 30 \text{ MeV} \left( \frac{M_{\text{PBS}}}{1.4 M_\odot} \right)^{2/3} \left( \frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \left( \frac{f(Y_e)}{0.630} \right) \left( \frac{s}{1 k_B \text{ baryon}^{-1}} \right) \left( \frac{\sin r/\alpha}{r/\alpha} \right)^{2/3}$$

ニュートリノ輸送の拡散近似

$$F = -\frac{c}{3} \frac{1}{\langle \kappa_t \rangle^{\text{eq}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}$$

与えられたエントロピーに対するニュートリノ光度

$$L = 1.2 \times 10^{50} \text{ erg s}^{-1} \left( \frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_\odot} \right)^{4/5} \left( \frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6/5} \left( \frac{g\beta}{3} \right)^{-4/5} \left( \frac{s}{1 k_B \text{ baryon}^{-1}} \right)^{12/5}$$

# 解析解の構成

温度構造 (Lane—Emden解,  $n=2$  polytrope)

ニュートリノ輸送の拡散近似

与えられたエントロピーに対するニュートリノ光度

ニュートリノ光度・平均エネルギーの時間進化

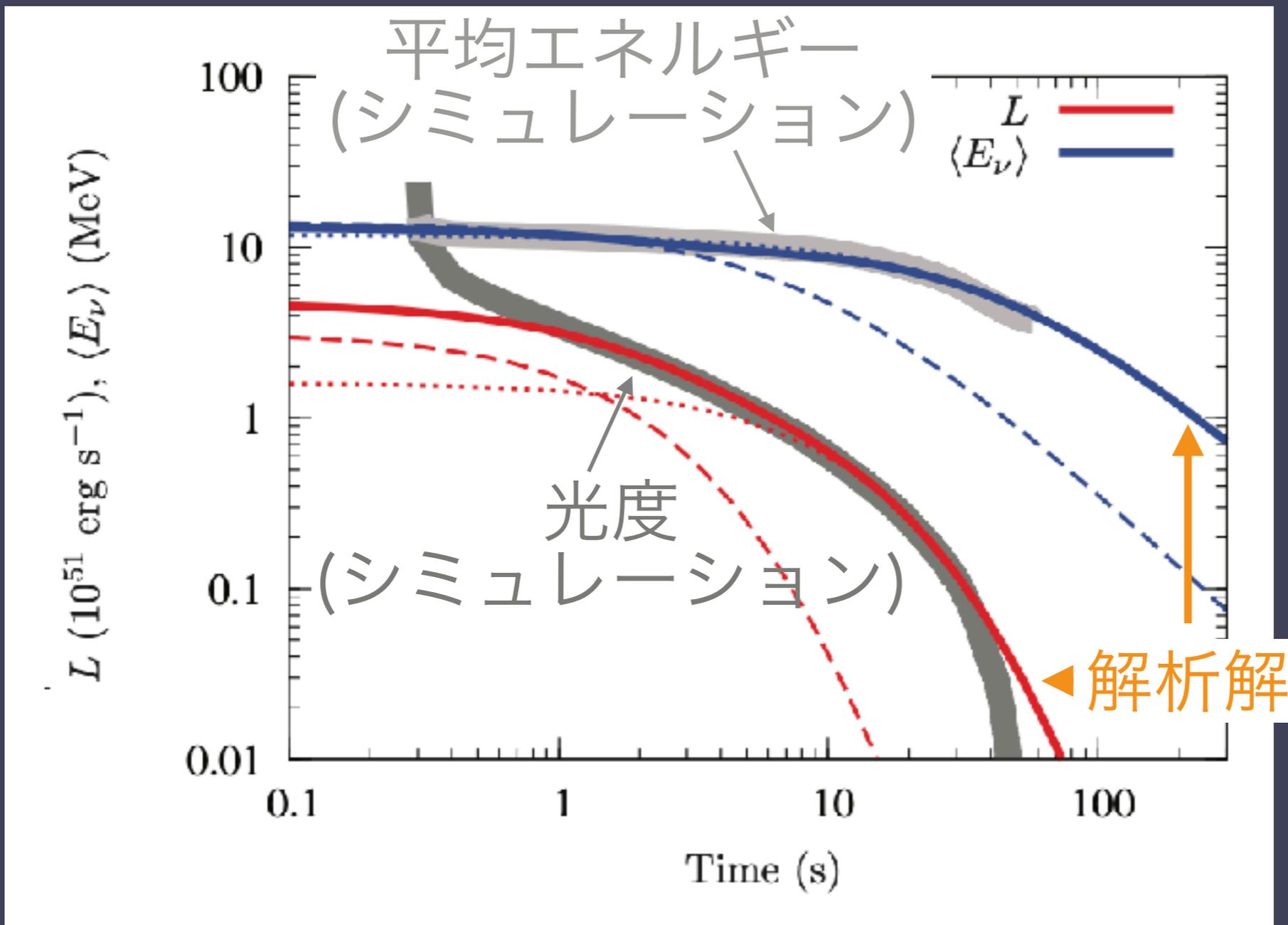
$$L = 3.3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1} \left( \frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^6 \left( \frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6} \left( \frac{g\beta}{3} \right)^4 \left( \frac{t + t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-6}$$

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

# 解析解の評価

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

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



- ・組成の変化を考慮
- ・→Early成分+Late成分で数値計算を再現
- ・ $t > 10 \text{ s}$ はLate成分で十分

# 検出器への応用

イベントレート

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

平均陽電子エネルギー

$$E_{e^+} = 25 \text{ MeV} \left( \frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{3/2} \left( \frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \left( \frac{g\beta}{3} \right) \left( \frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-3/2}$$

原始中性子星半径の推定

$$R_{\text{PNS}} = 10 \text{ km} \left( \frac{\mathcal{R}}{720 \text{ s}^{-1}} \right)^{1/2} \left( \frac{E_{e^+}}{25 \text{ MeV}} \right)^{-5/2} \left( \frac{M_{\text{det}}}{32.5 \text{ kton}} \right)^{-1/2} \left( \frac{D}{10 \text{ kpc}} \right)$$

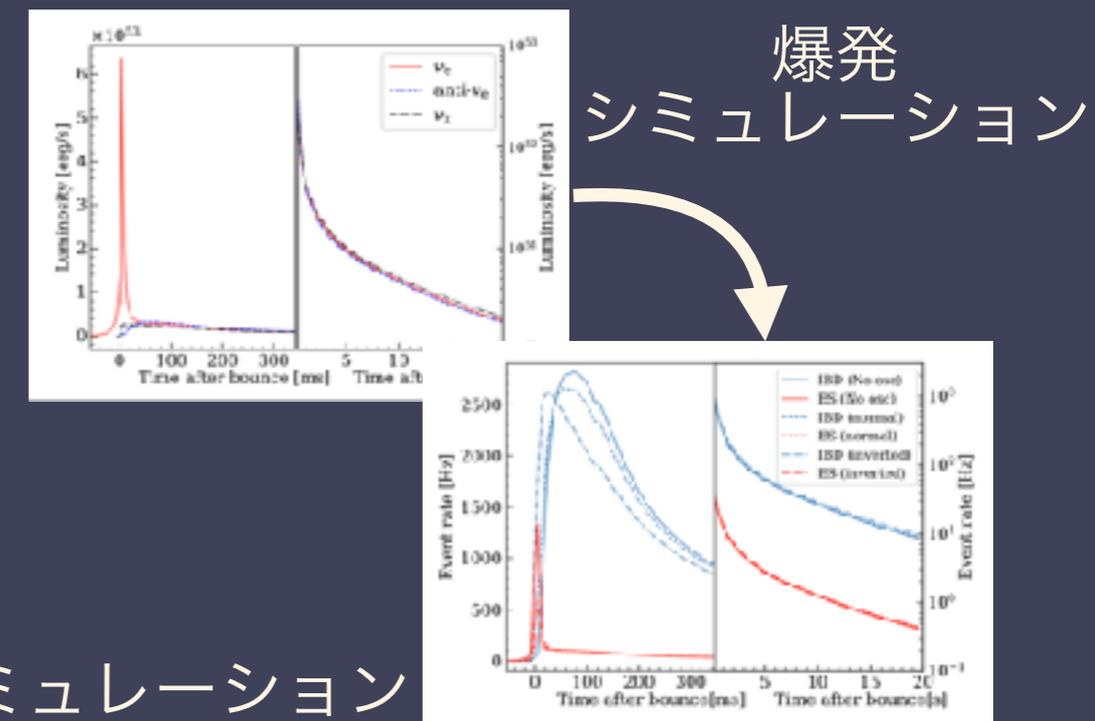
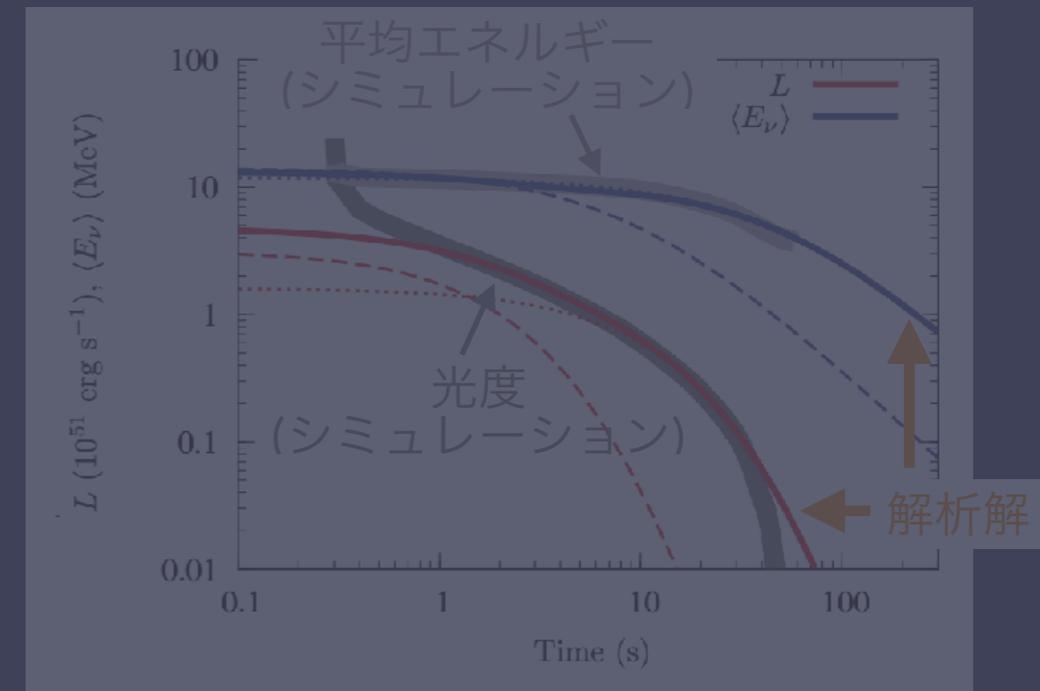
# nuLC コラボレーション

neutrino Light Curve



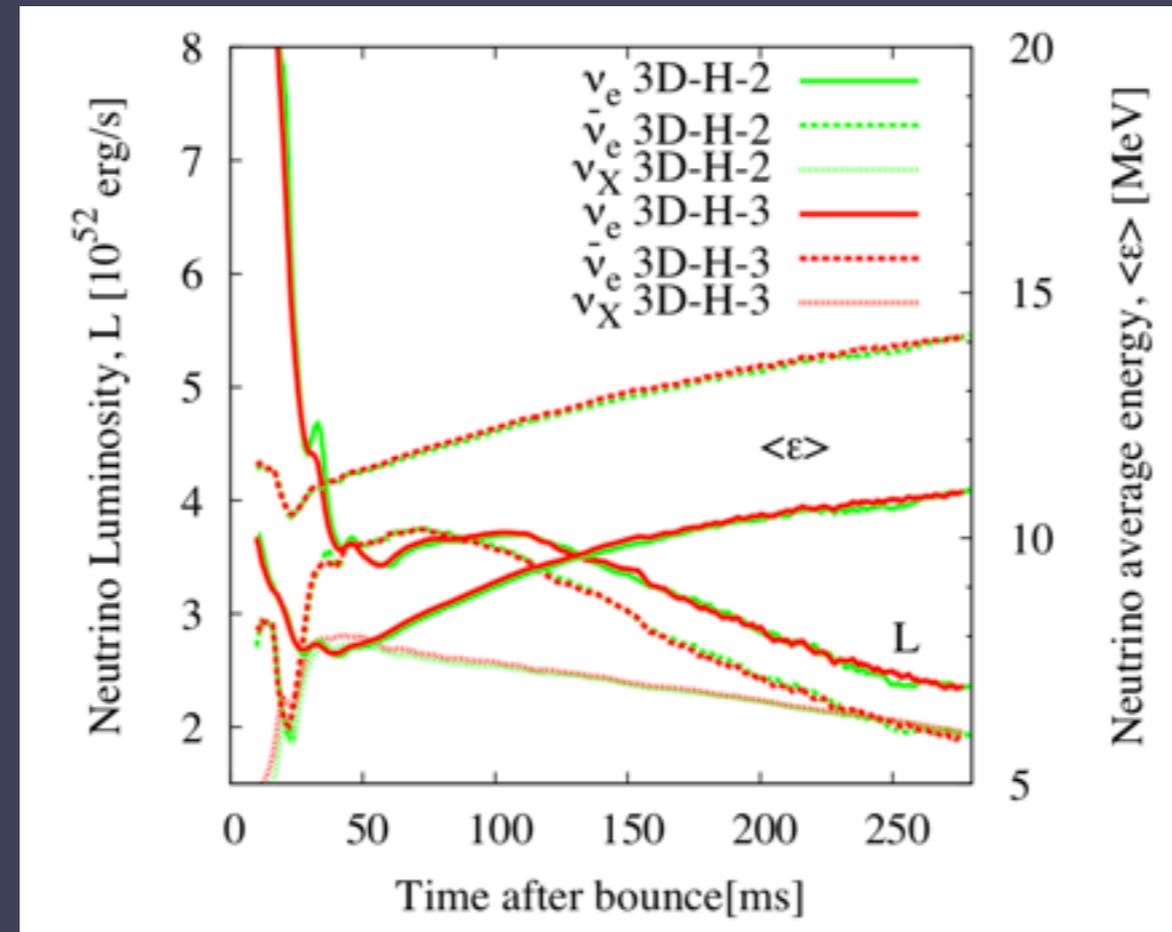
## 2020年度

- ・ニュートリノ光度曲線の解析解の開発
- ・Y. Suwa, A. Harada, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, Analytic solutions for neutrino-light curves of core-collapse supernovae, PTEP, 013E01, 2021
- ・超新星爆発から検出まで一貫したフレームワークの開発
- ・M. Mori et al., Developing an end-to-end simulation framework of supernova neutrino detection, PTEP, ptaa185, 2020



検出シミュレーション

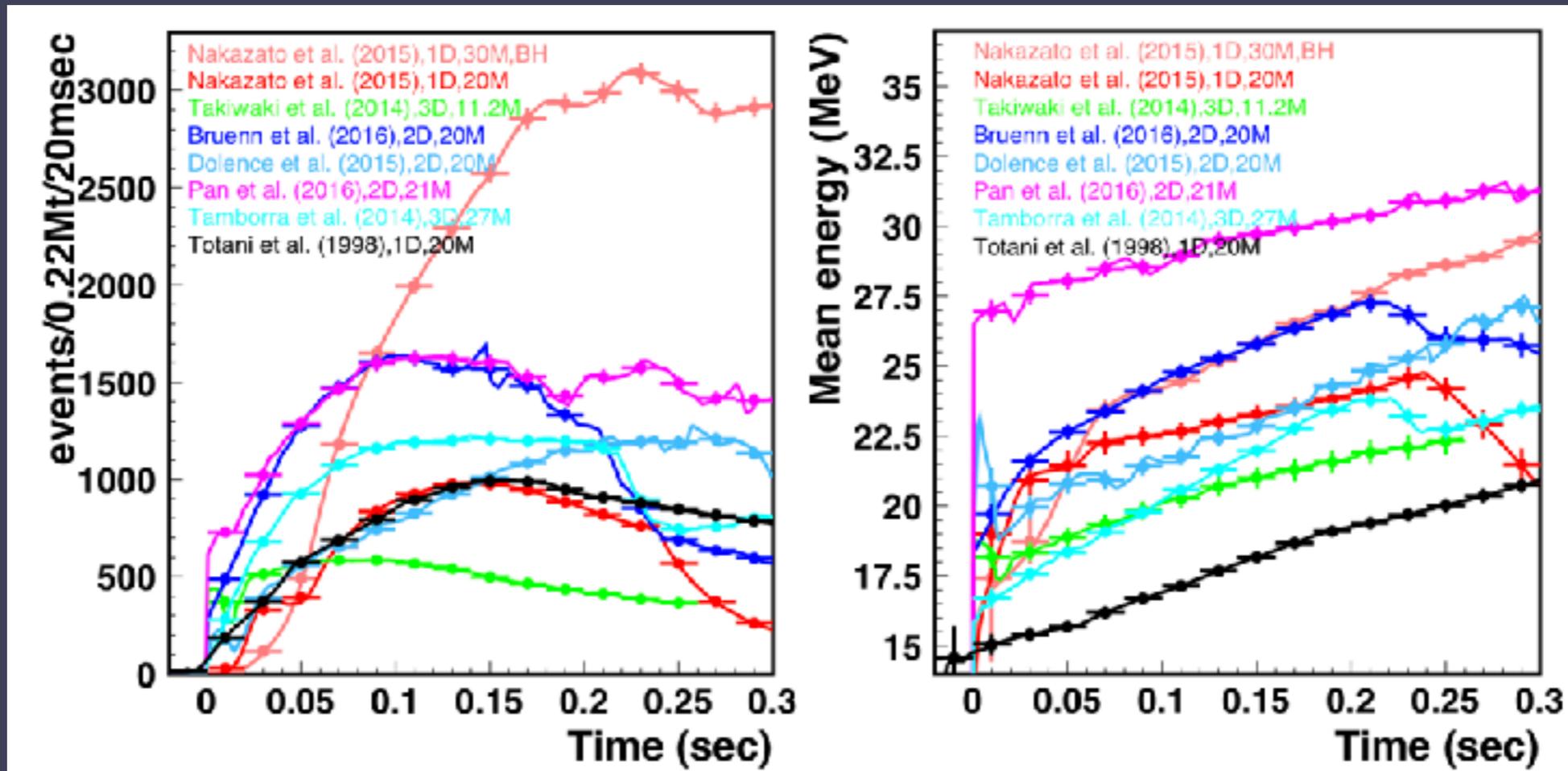
# 理論と観測のギャップ



Takiwaki et al. (2014)

- ・超新星シミュレーションのニュートリノ放射はどう検出されるか？
- ・爆発後期のニュートリノ信号はどのようなものか？

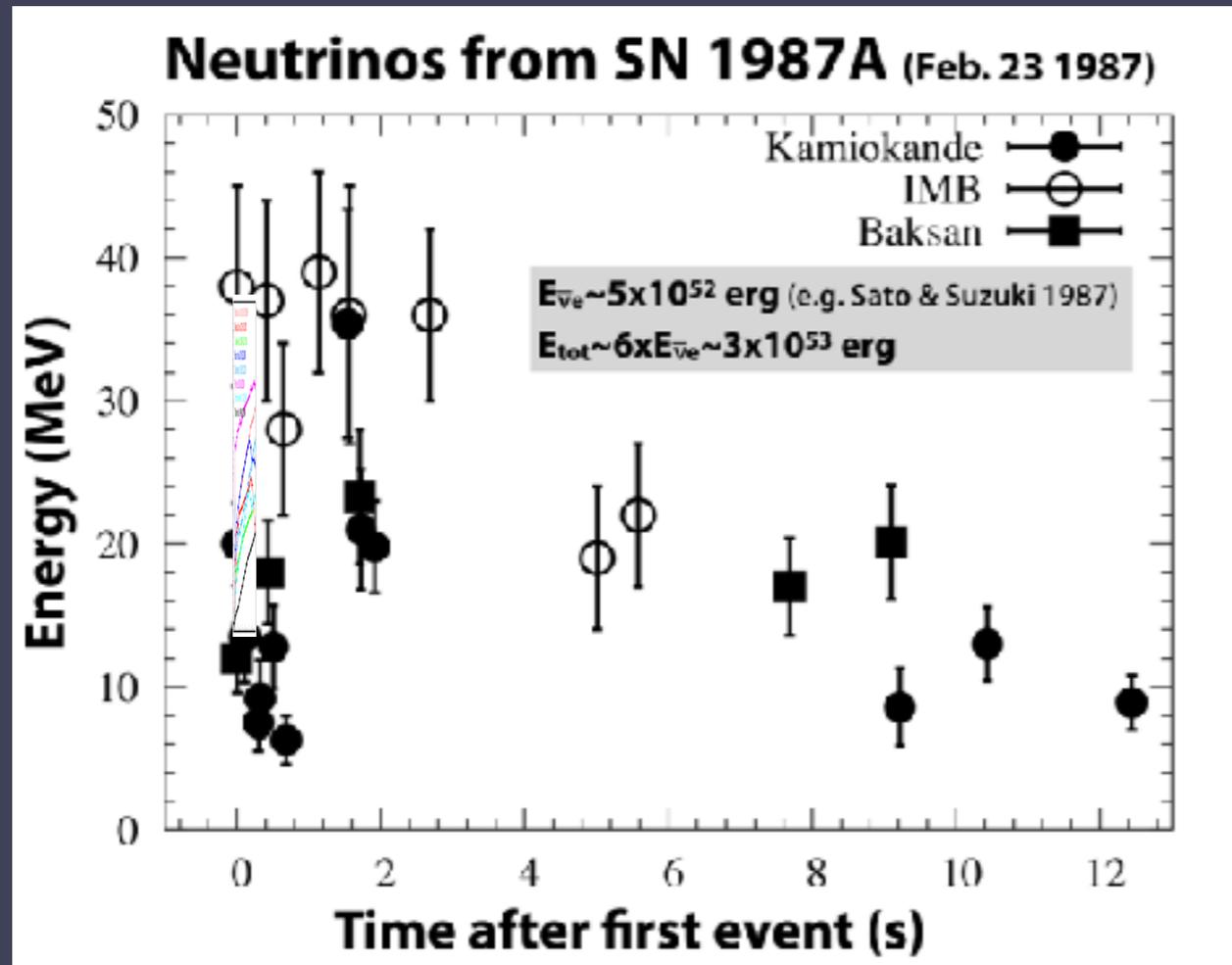
# 理論と観測のギャップ



Hyper-Kemiokande Design Report, arXiv:2018.04163

- ・超新星シミュレーションのニュートリノ放射はどう検出されるか？
- ・爆発後期のニュートリノ信号はどのようなものか？

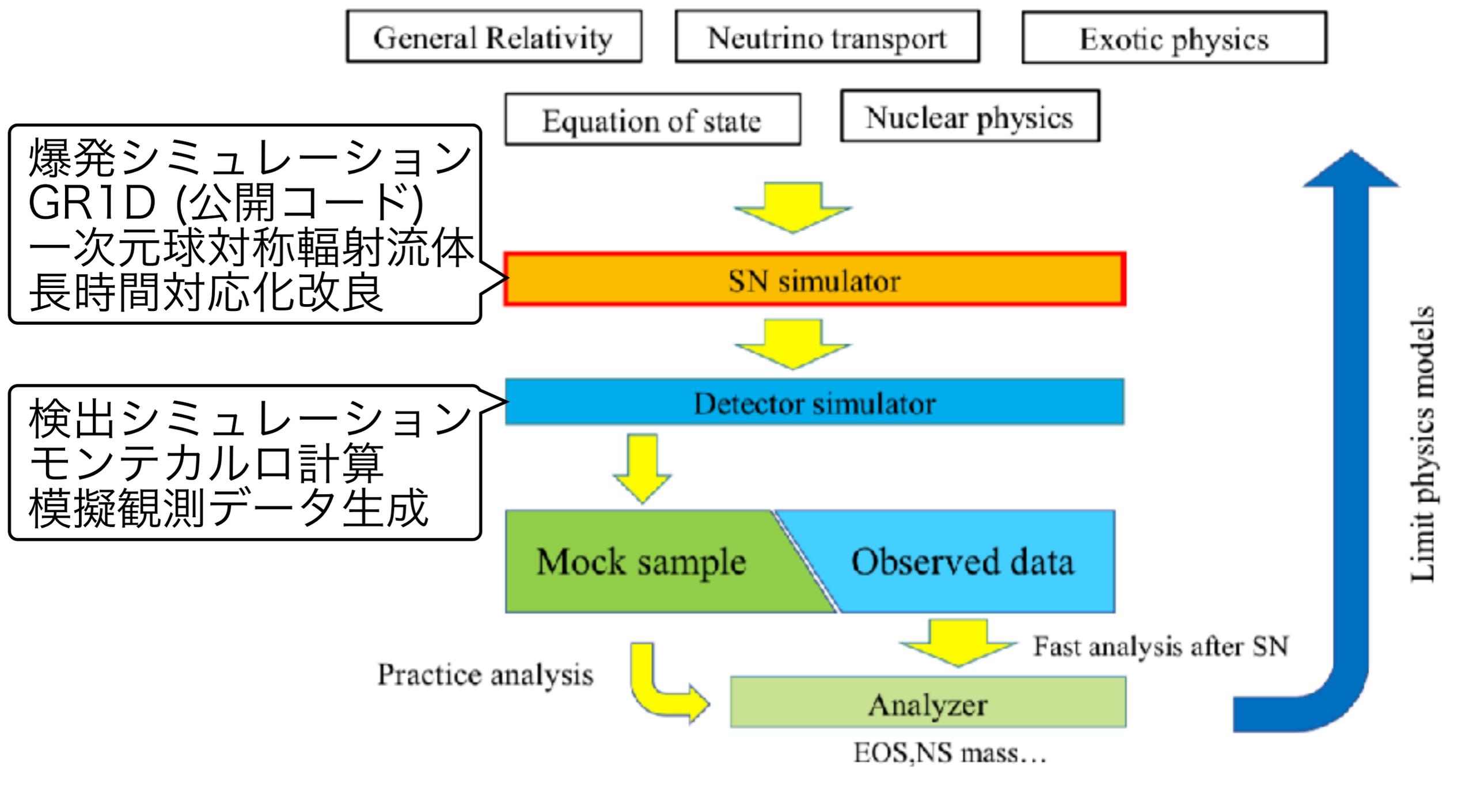
# 理論と観測のギャップ



諏訪のスライドより

- ・超新星シミュレーションのニュートリノ放射はどう検出されるか？
- ・爆発後期のニュートリノ信号はどのようなものか？

# 爆発—検出フレームワーク



爆発シミュレーション  
GR1D (公開コード)  
一次元球対称輻射流体  
長時間対応化改良

検出シミュレーション  
モンテカルロ計算  
模擬観測データ生成

General Relativity      Neutrino transport      Exotic physics

Equation of state      Nuclear physics

SN simulator

Detector simulator

Mock sample      Observed data

Practice analysis

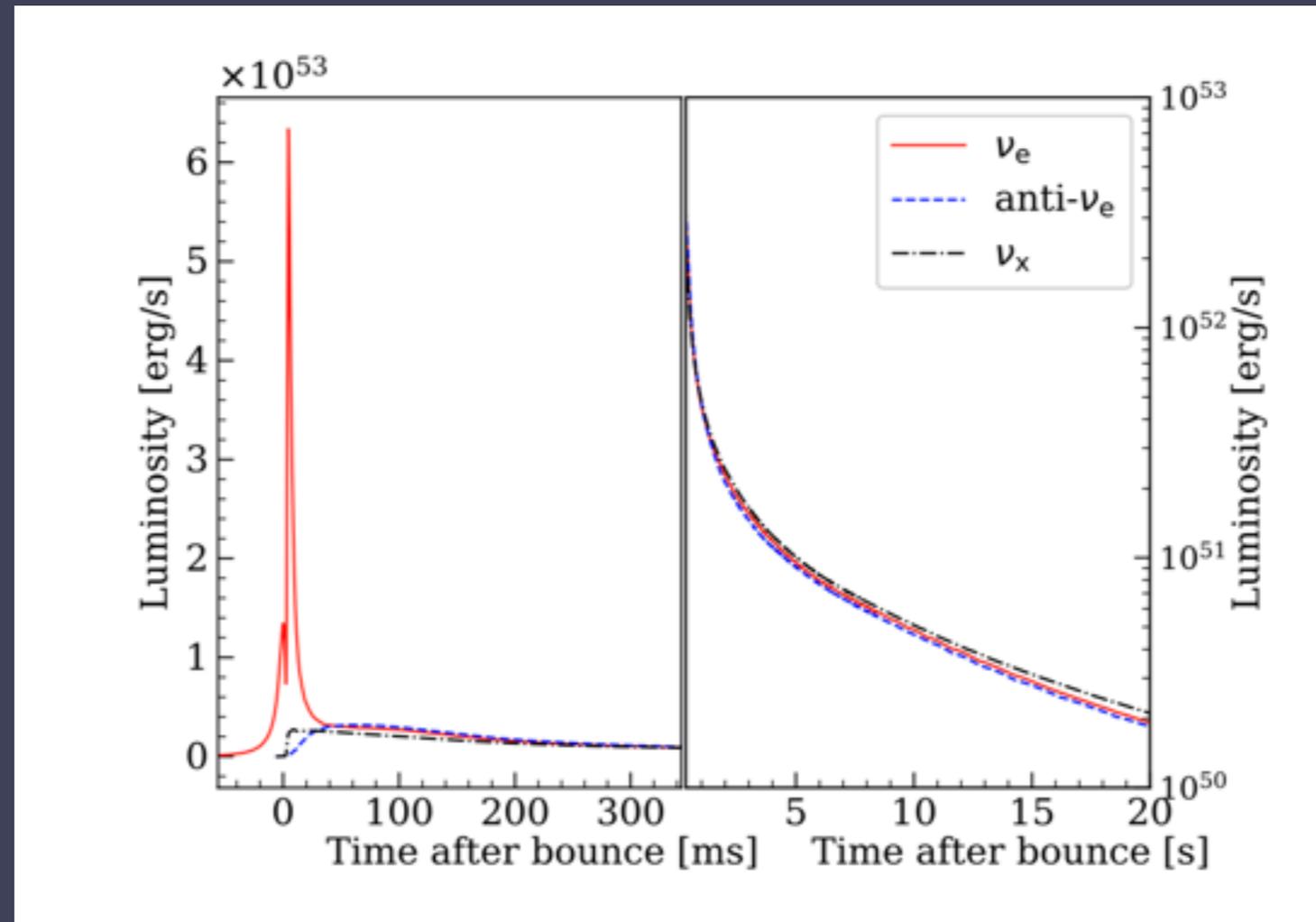
Analyzer

EOS, NS mass...

Fast analysis after SN

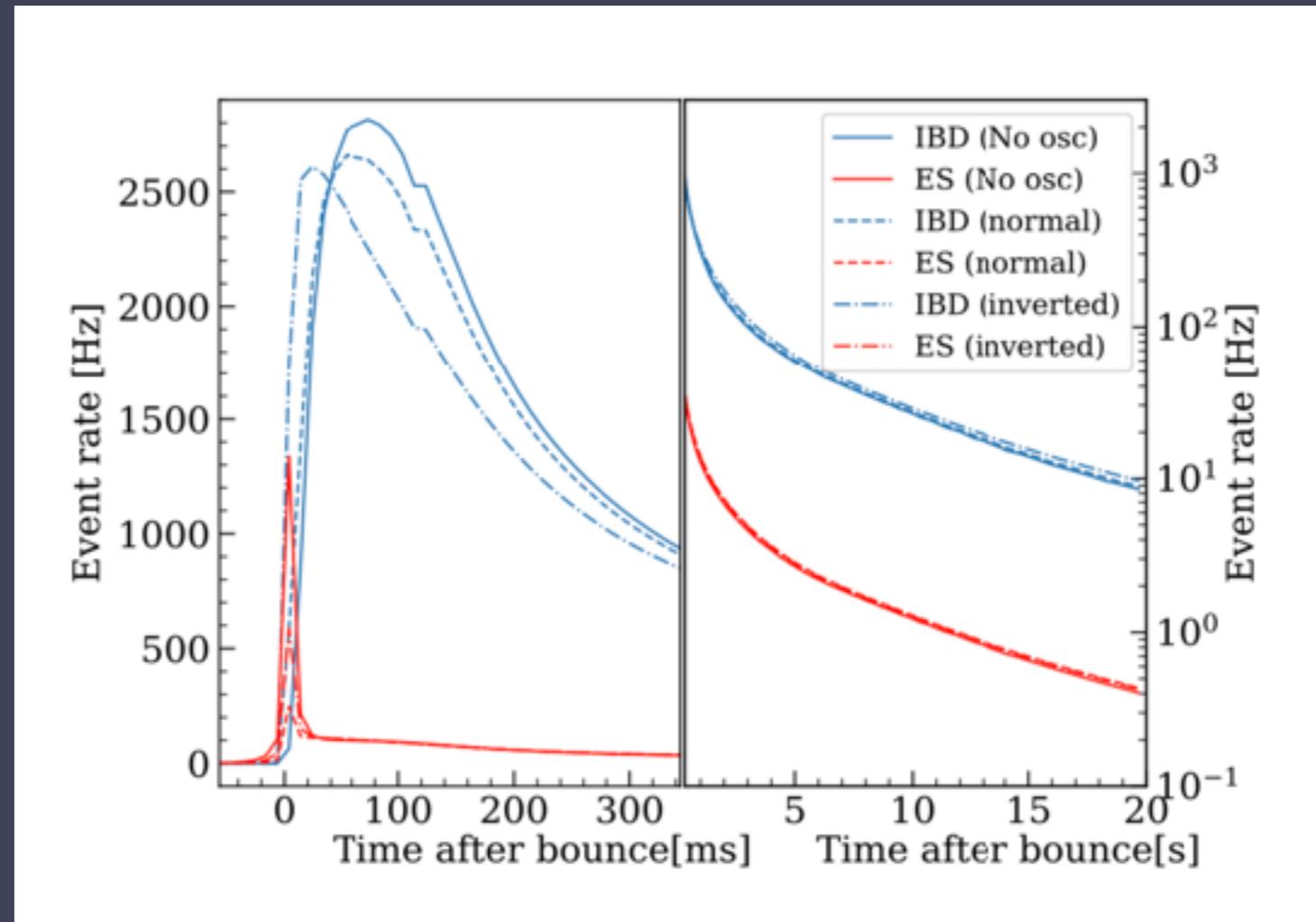
Limit physics models

# 爆発例デモンストレーション



- 1Dでも爆発する軽い親星からのニュートリノ信号

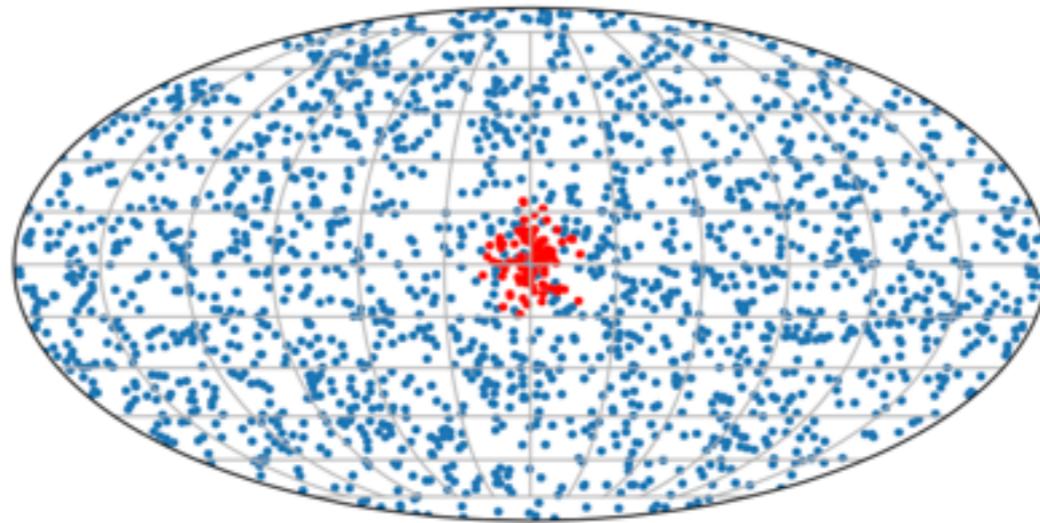
# 爆発例デモンストレーション



- 1Dでも爆発する軽い親星からのニュートリノ信号

# 爆発例デモンストレーション

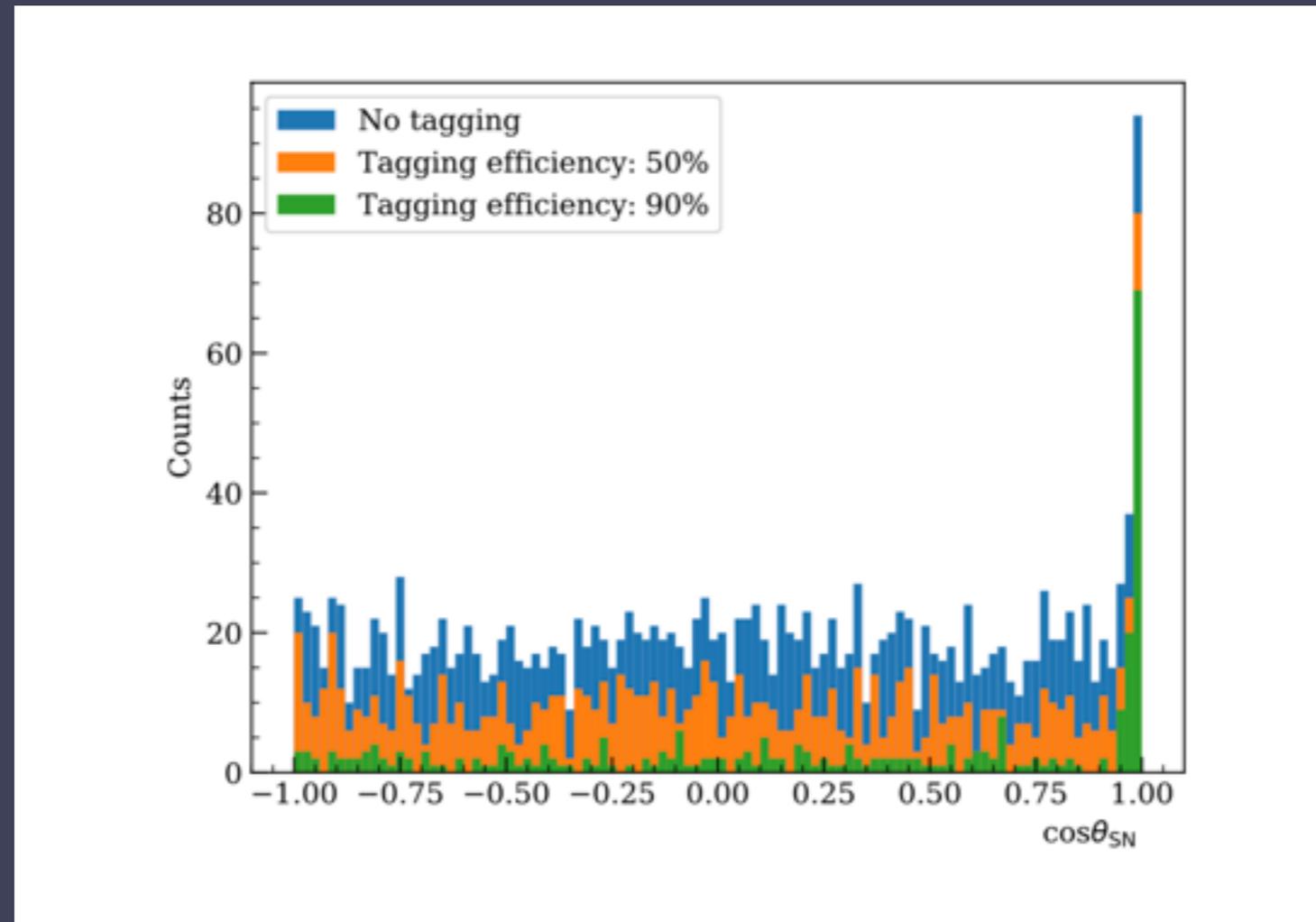
$\nu_e$  電子散乱



$\bar{\nu}_e$  逆ベータ反応

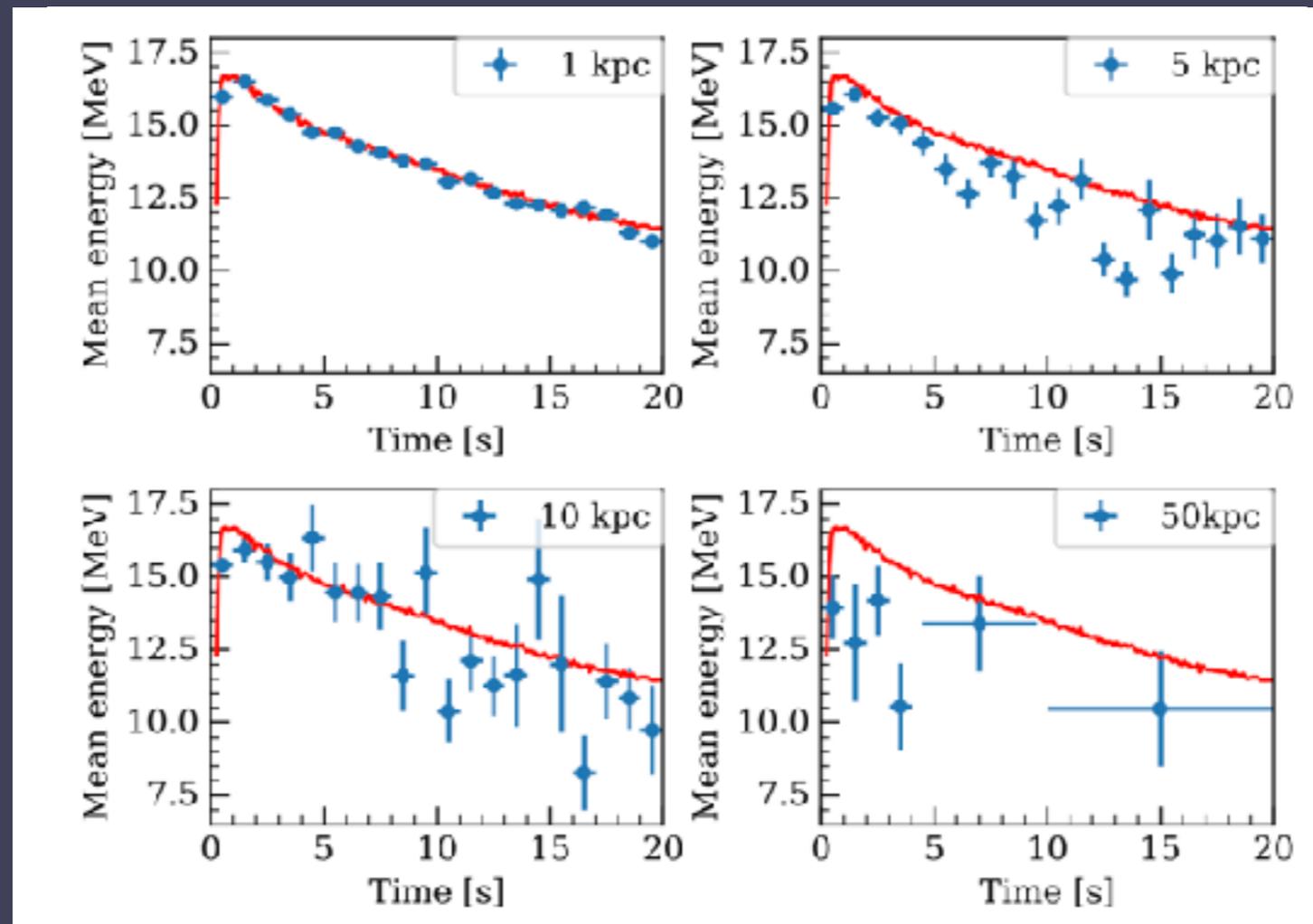
- 1Dでも爆発する軽い親星からのニュートリノ信号
- 電子/陽電子の方向依存性→GdタグでSN方向決定

# 爆発例デモンストレーション



- 1Dでも爆発する軽い親星からのニュートリノ信号
- 電子/陽電子の方向依存性→GdタグでSN方向決定

# 爆発例デモンストレーション



- 1Dでも爆発する軽い親星からのニュートリノ信号
- 電子/陽電子の方向依存性→GdタグでSN方向決定
- 平均エネルギーの散らばり具合

# まとめ

- ・超新星ニュートリノ検出に備えた理論家と実験家のコラボレーション
- 2020年度の成果
- ・観測データからすぐに物理量の解析に使える解析解の開発
- ・詳細な解析を行うための爆発—検出シミュレーションフレームワークの開発

