



13

スーパーカミオカンデによる

超新星ニュートリノ観測データの解析手法の開発

Suwa et al., ApJ, **934**, 15 (2022)

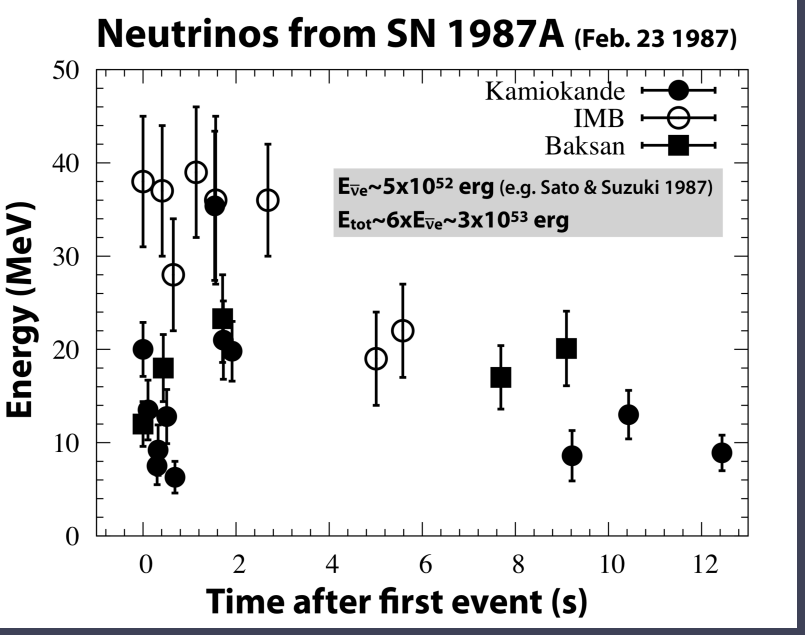
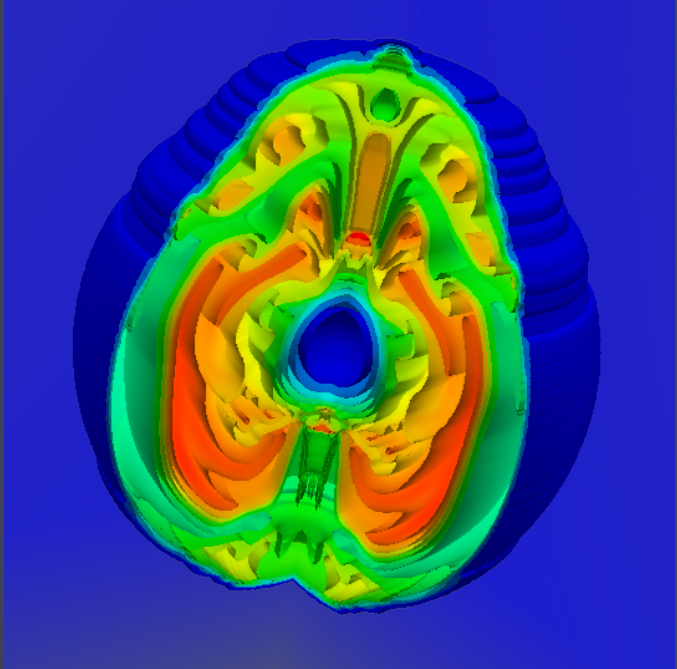
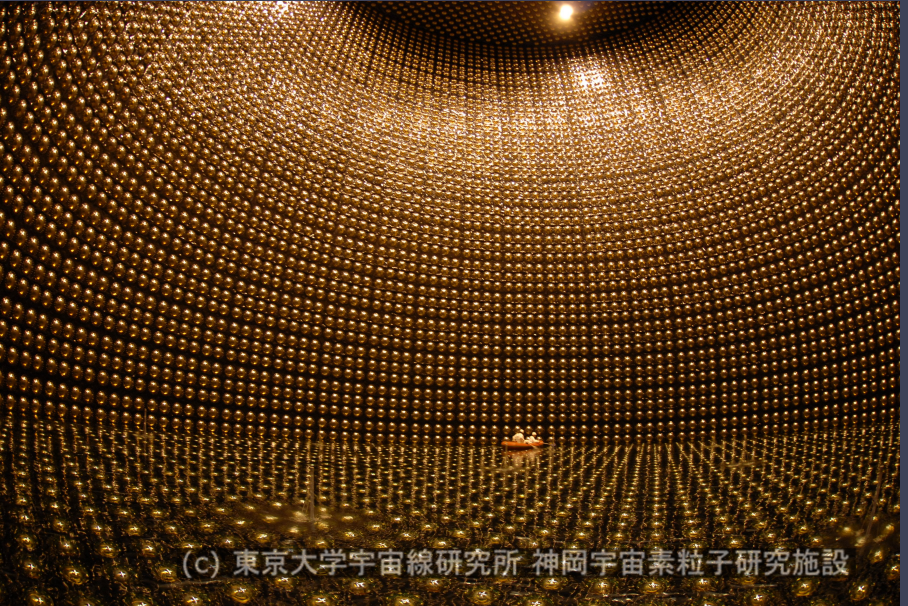
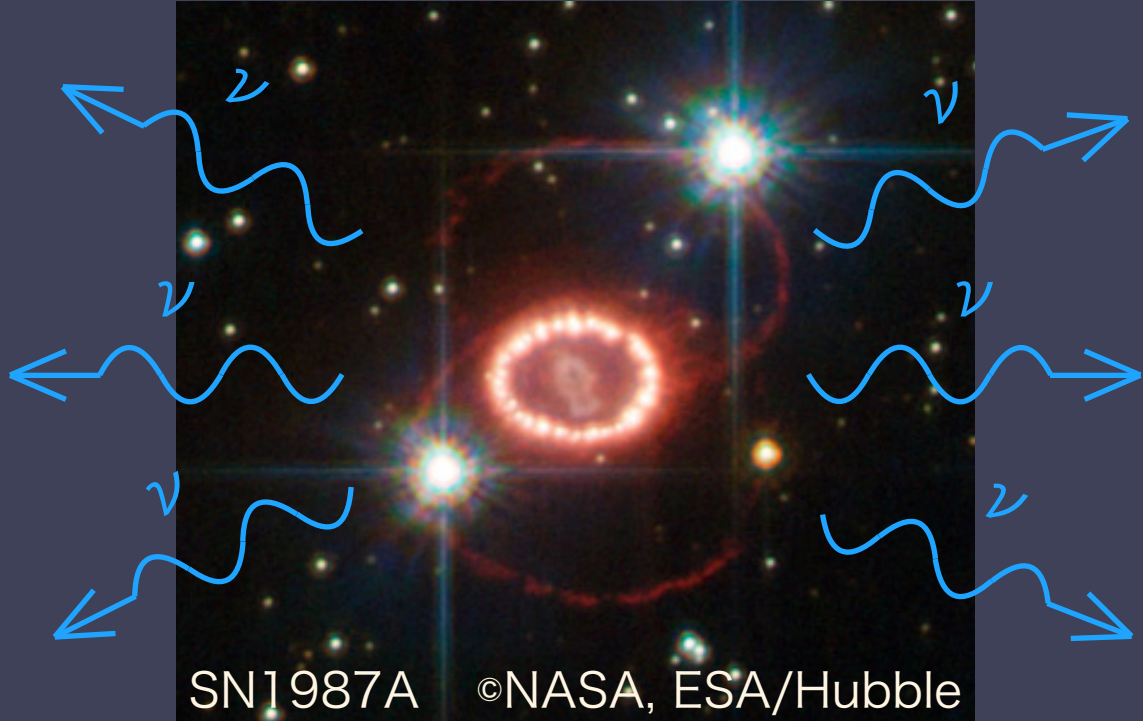
原田了 (理化学研究所)

共同研究者: nuLC collaboration (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))

査定額: オンライン打ち合わせのためのslack利用料として20万円

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



超新星を
シミュレート

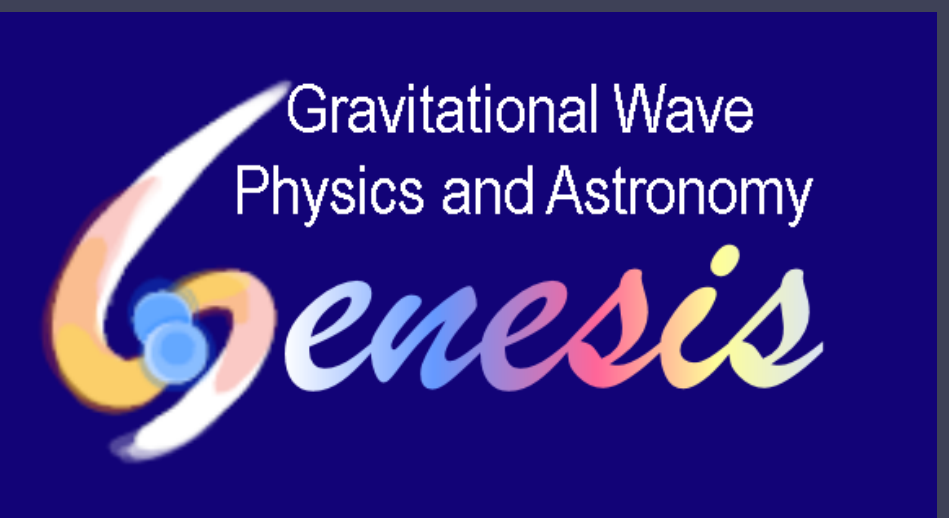
ニュートリノを観測

理論モデルと観測データの対応づけ

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

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)

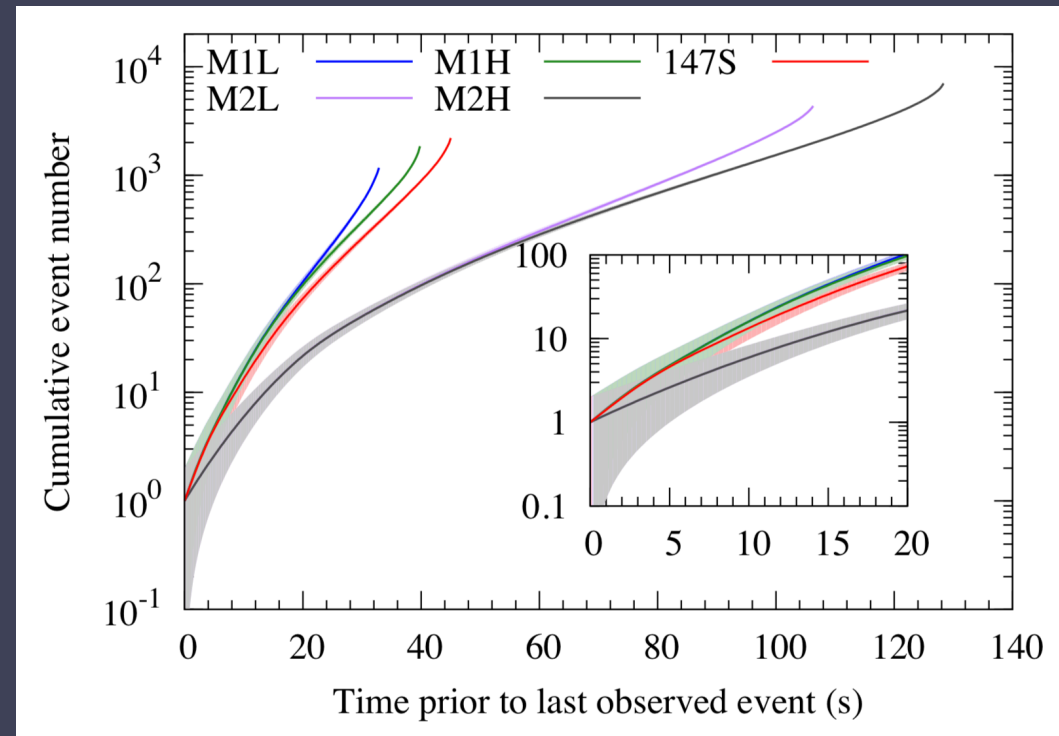
諏訪雄大(東京大, 理論)、
森正光(東京大, 理論/実験)

中里健一郎(九州大, 理論)

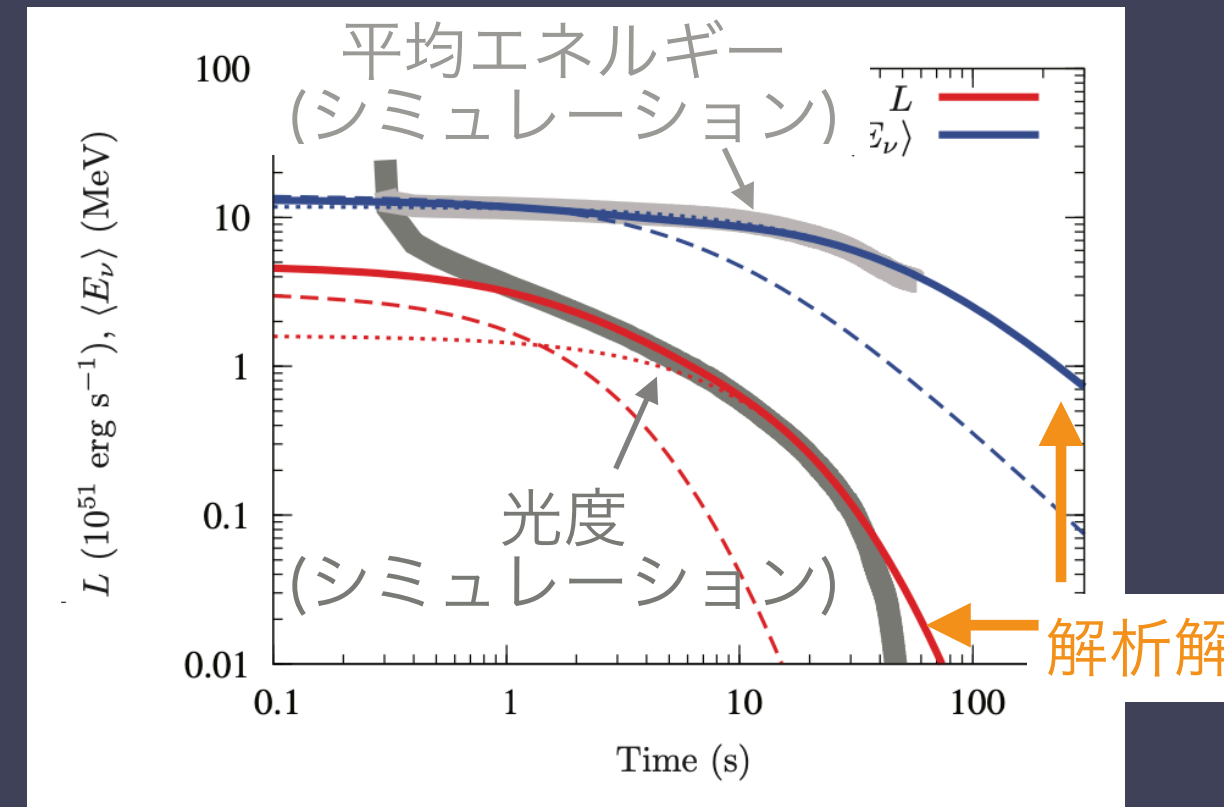
住吉光介(沼津高専, 理論)

nuLC コラボレーション2021

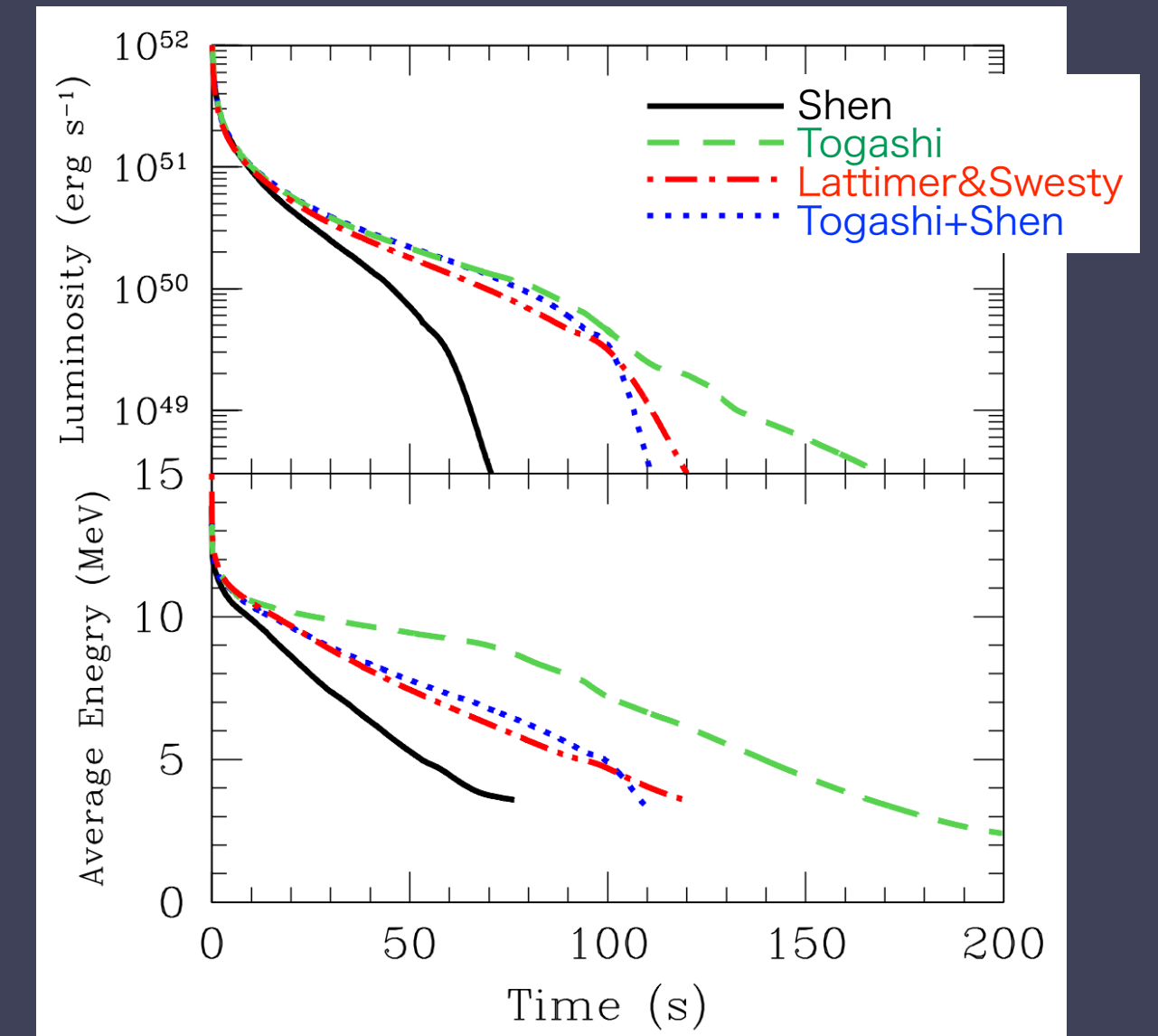
neutrino Light Curve



Suwa et al. (2019)



Suwa et al. (2021)



Nakazato et al. (2022)

2019年度(採択前)

- ・後期のニュートリノ信号
←原始中性子星冷却で決まり、不定性小
- ・Backward time analysisでパラメータを峻別可能！

2020年度(課題一年目)

- ・ニュートリノ光度曲線の解析解の開発→
詳細な数値シミュレーションに頼らず、簡単に光度曲線をモデル化可能

2021年度(課題二年目)

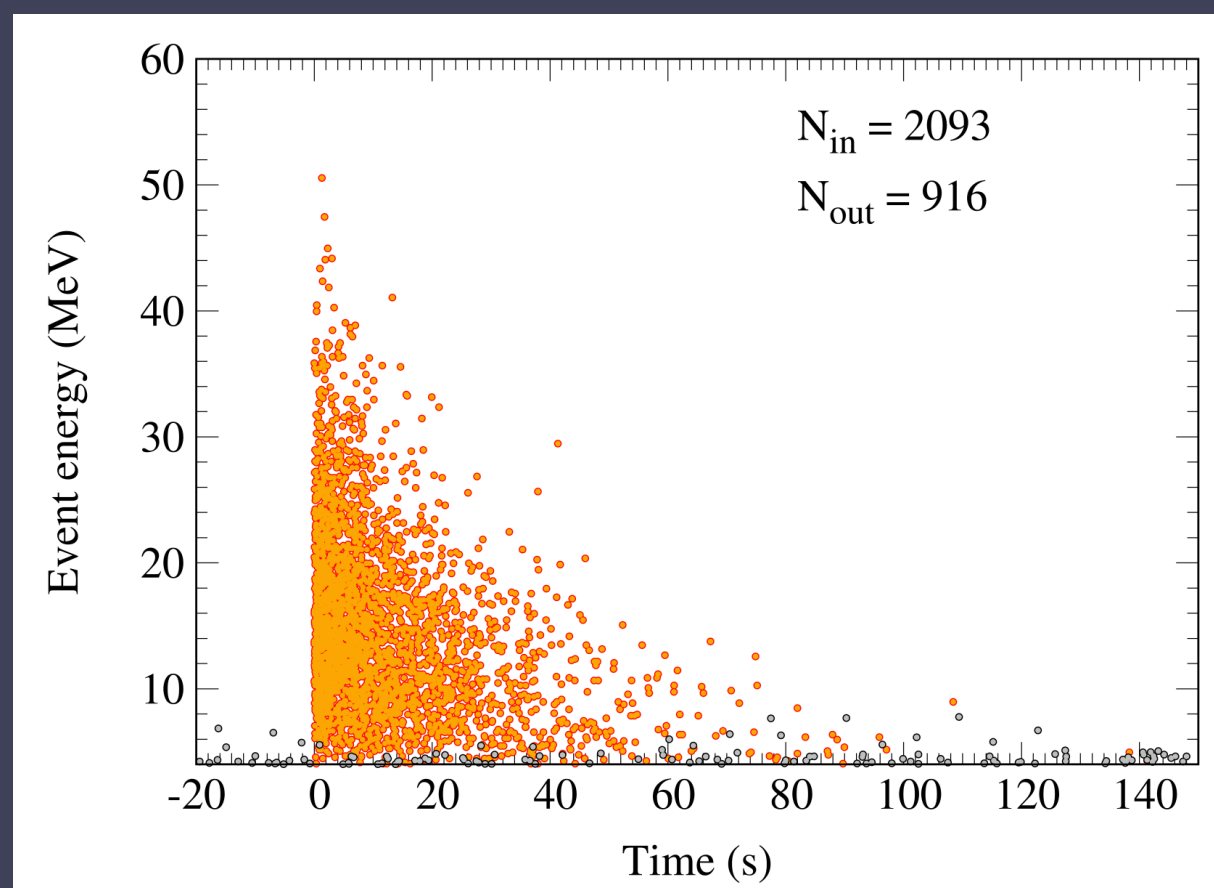
- ・様々な核物質状態方程式・親星について、超新星ニュートリノ信号の理論モデルを開発
- ・ニュートリノエネルギーの誤差推定法を提案

nuLC コラボレーション2022

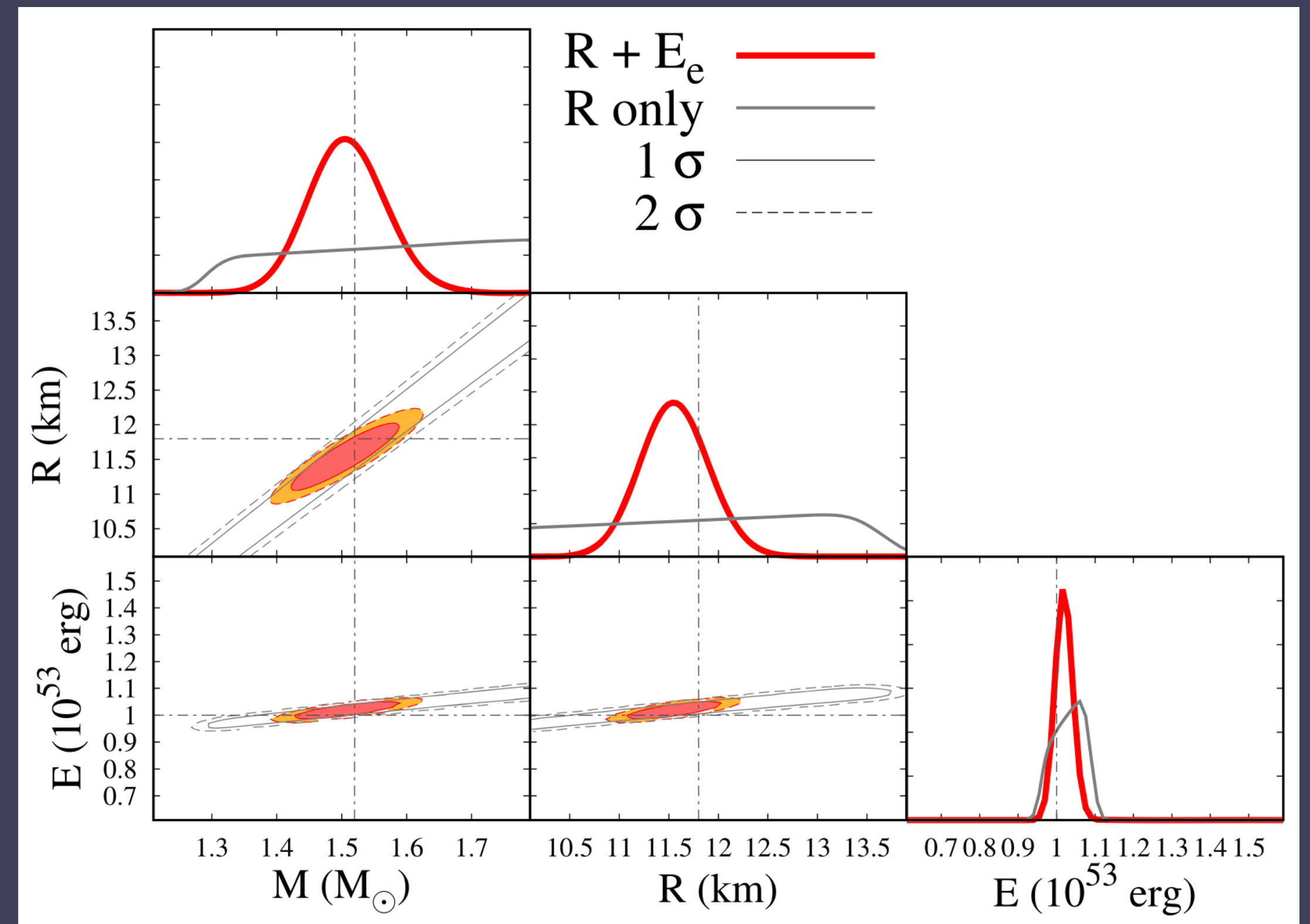
neutrino Light Curve

2022年度(課題三年目)

- ・解析解に基づく超新星ニュートリノ観測データ解析パイプラインを開発
- ・近似的だが観測されしだい即座に解析でき、パラメータに当たりをつけられる



模擬観測データ(イベントエネルギー vs 時間)



Suwa et al. (2022)

カイ二乗フィッティング

- ・原始中性子星の質量 M 、半径 R 、放射エネルギー E の各パラメータに対してカイ二乗を計算

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

観測量
モデル推定量
分散

2020年度成果
2021年度成果

イベントレート
平均エネルギー

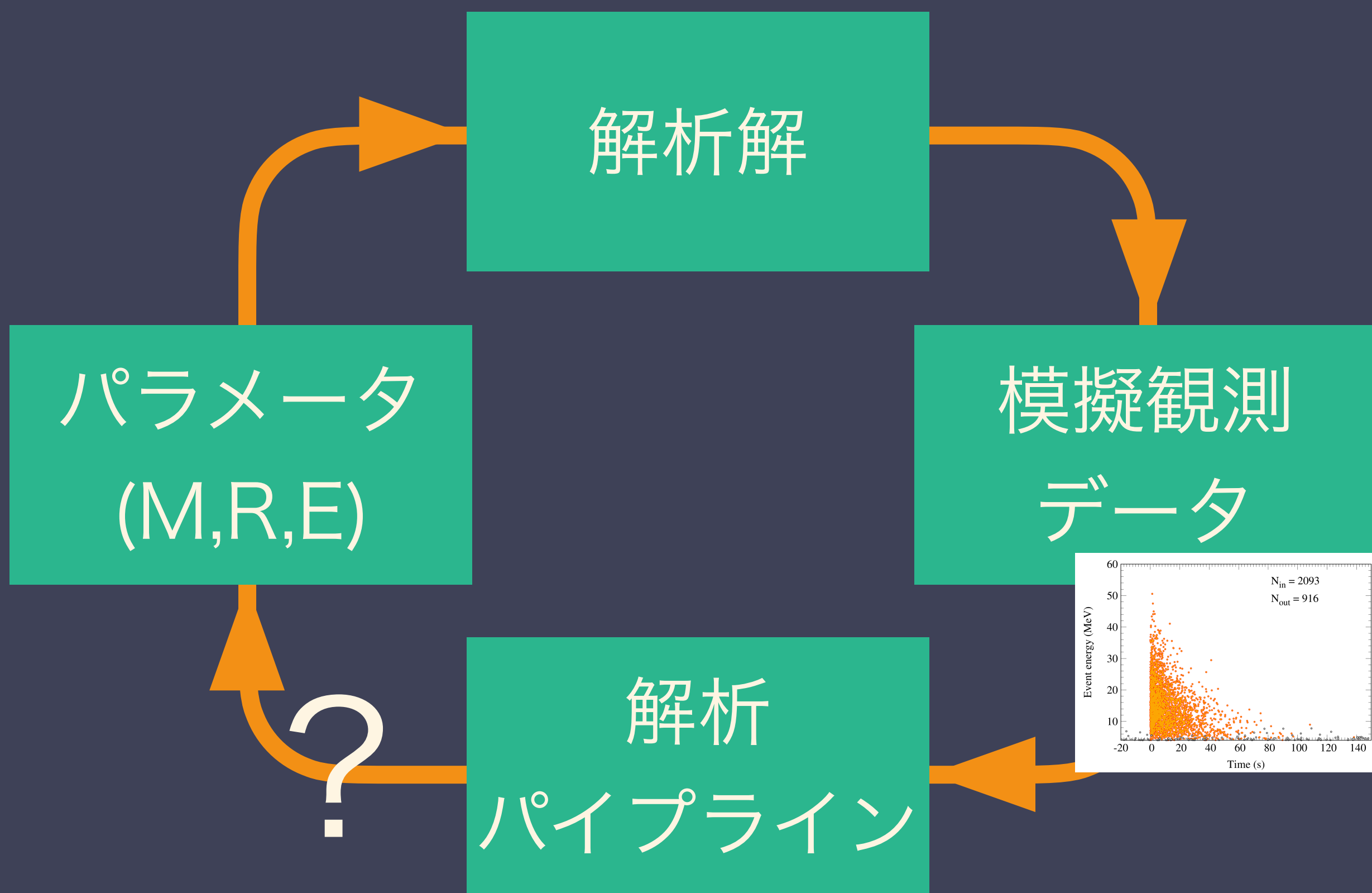
- ・イベントレート \mathcal{R} と平均エネルギー E_{e+} の時間進化の解析解

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

$$E_{e+} = 25.3 \text{ MeV} \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \left(\frac{g\beta}{3} \right) \left(\frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-3/2}$$

$$t_0 = 210 \text{ s} \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right)^{6/2} \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^{-6/5} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^{4/5} \left(\frac{E}{10^{52} \text{ erg}} \right)^{-1/5}$$

パラメータ推定テスト

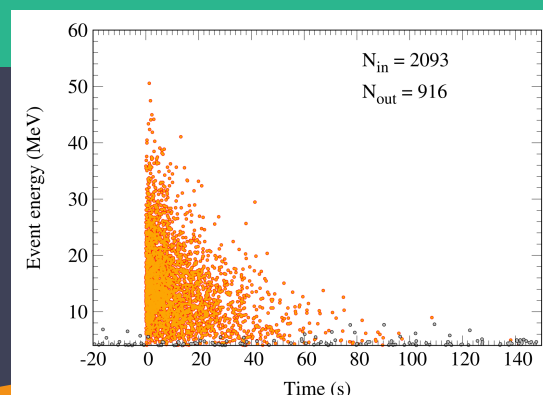


- ・パラメータの確率密度関数が

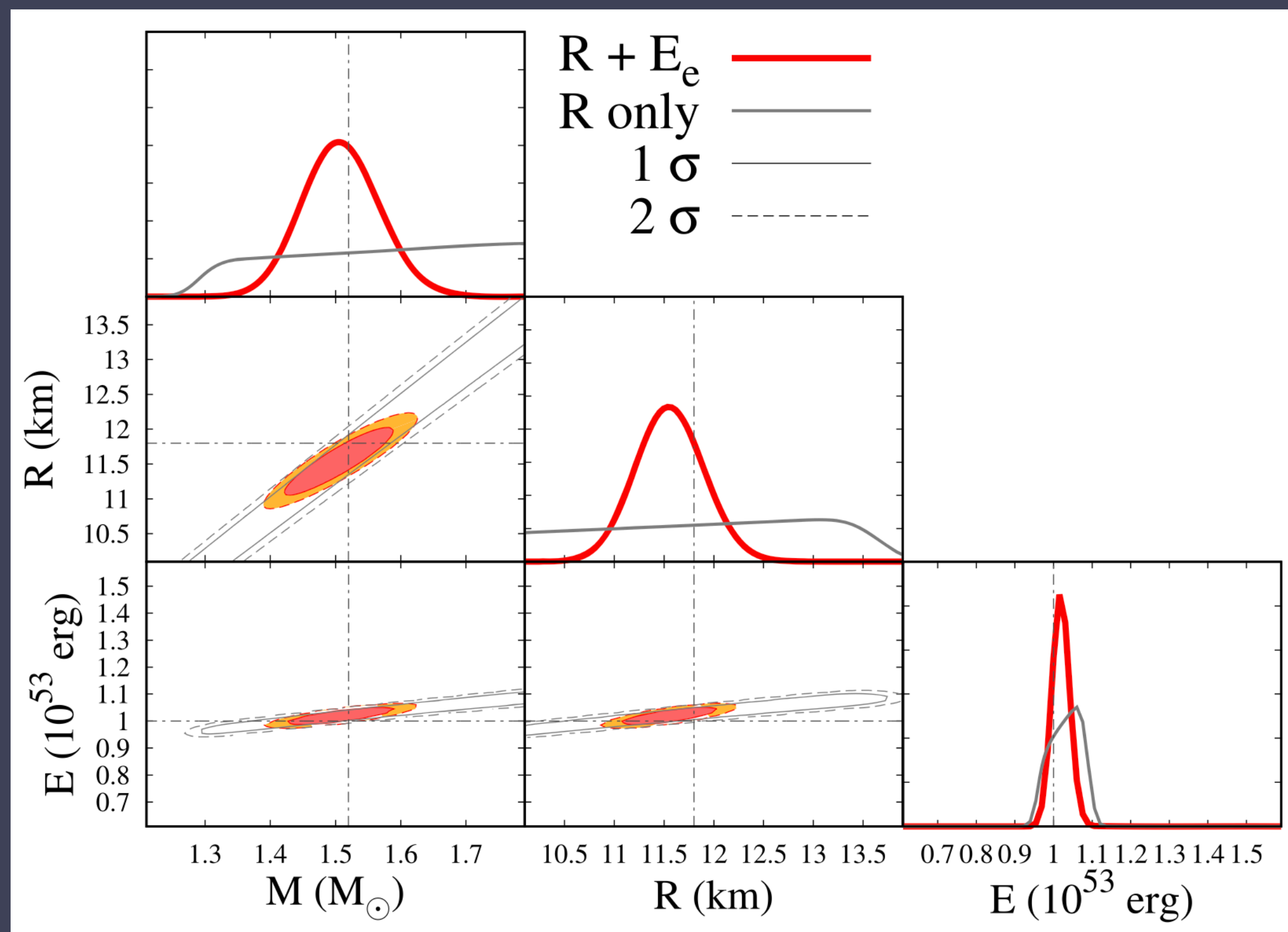
$$\mathcal{P}(M, R, E) \propto e^{-\chi^2(M, R, E)/2}$$

で与えられるとして、その分布を描き、パラメータ推定する

- ・パラメータを決め、解析解をつくり、模擬観測データをつくり、それを解析してパラメータを再現できるか？



パラメータ推定テスト



Suwa et al. (2022)

- パラメータの確率密度関数が

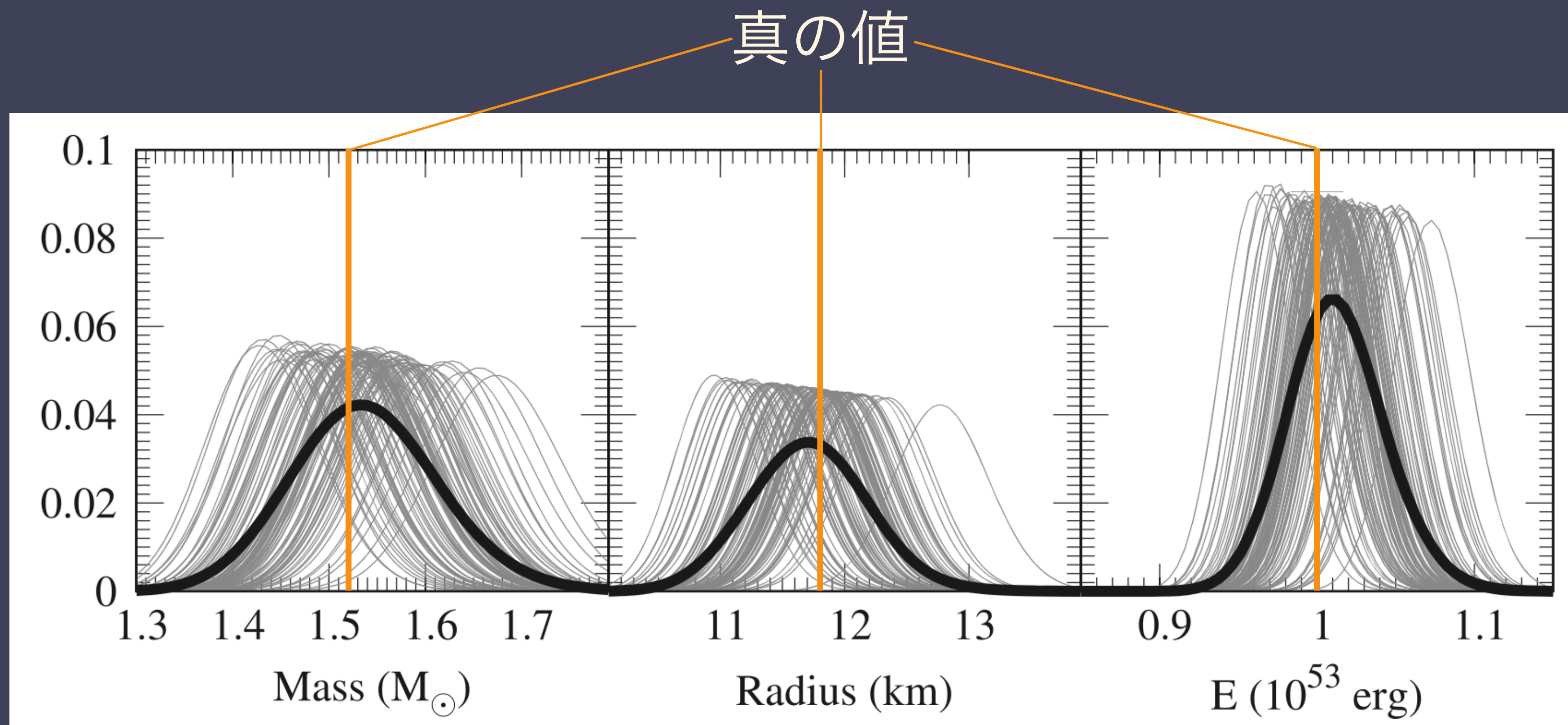
$$\mathcal{P}(M, R, E) \propto e^{-\chi^2(M, R, E)/2}$$

で与えられるとして、その分布を描き、パラメータ推定する

- パラメータを決め、解析解をつくり、模擬観測データをつくり、それを解析してパラメータを再現できるか？
- グレーのイベントレートだけを使う場合と比べて、赤の平均エネルギーも考慮するとパラメータ推定の精度が向上する。

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

パラメータ推定の平均的性能



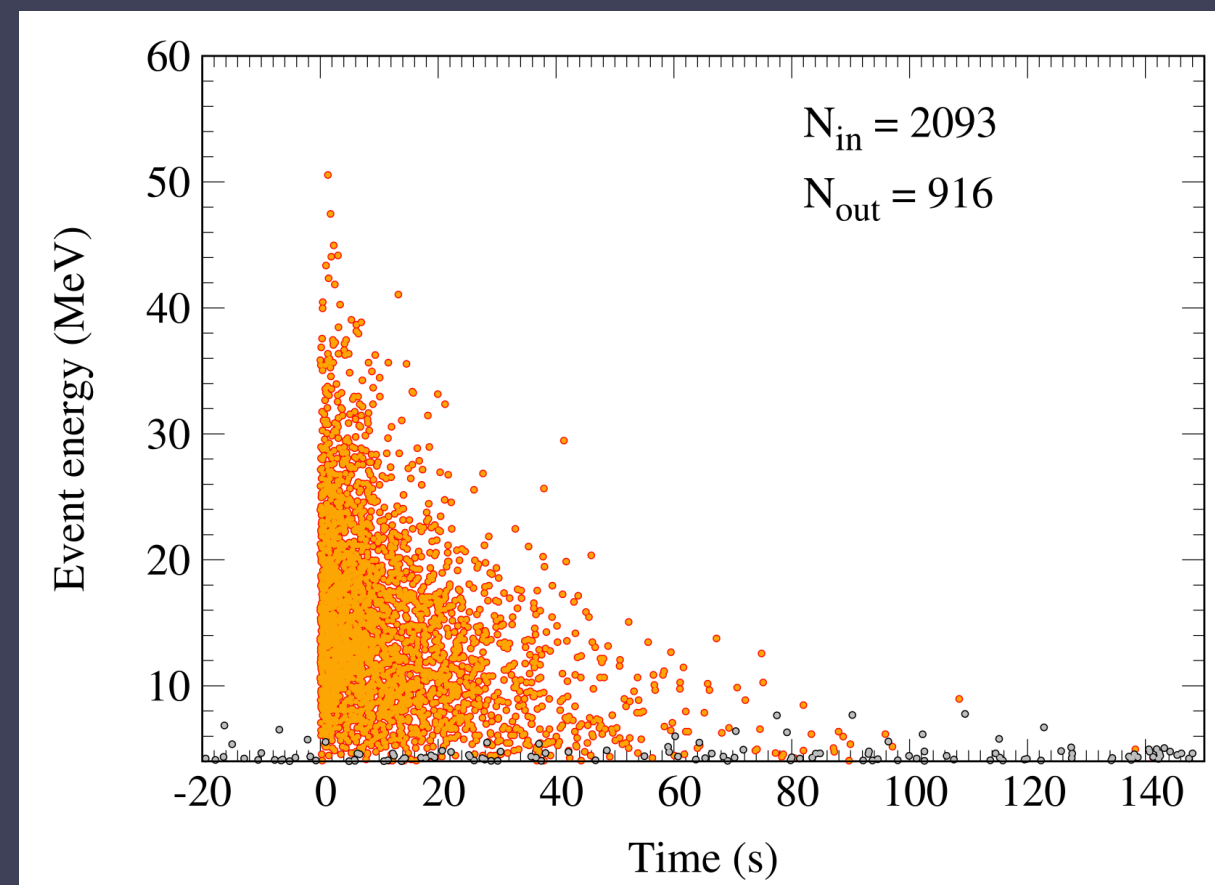
Suwa et al. (2022)

- ・100個模擬観測データセットを生成し、同様の推定を行い(グレー)、パラメータ確率分布の平均を取る(黒)。
- ・パラメータ推定精度は~10%(質量、半径)および~1%(エネルギー)
- ・解析にかかる時間は数秒程度

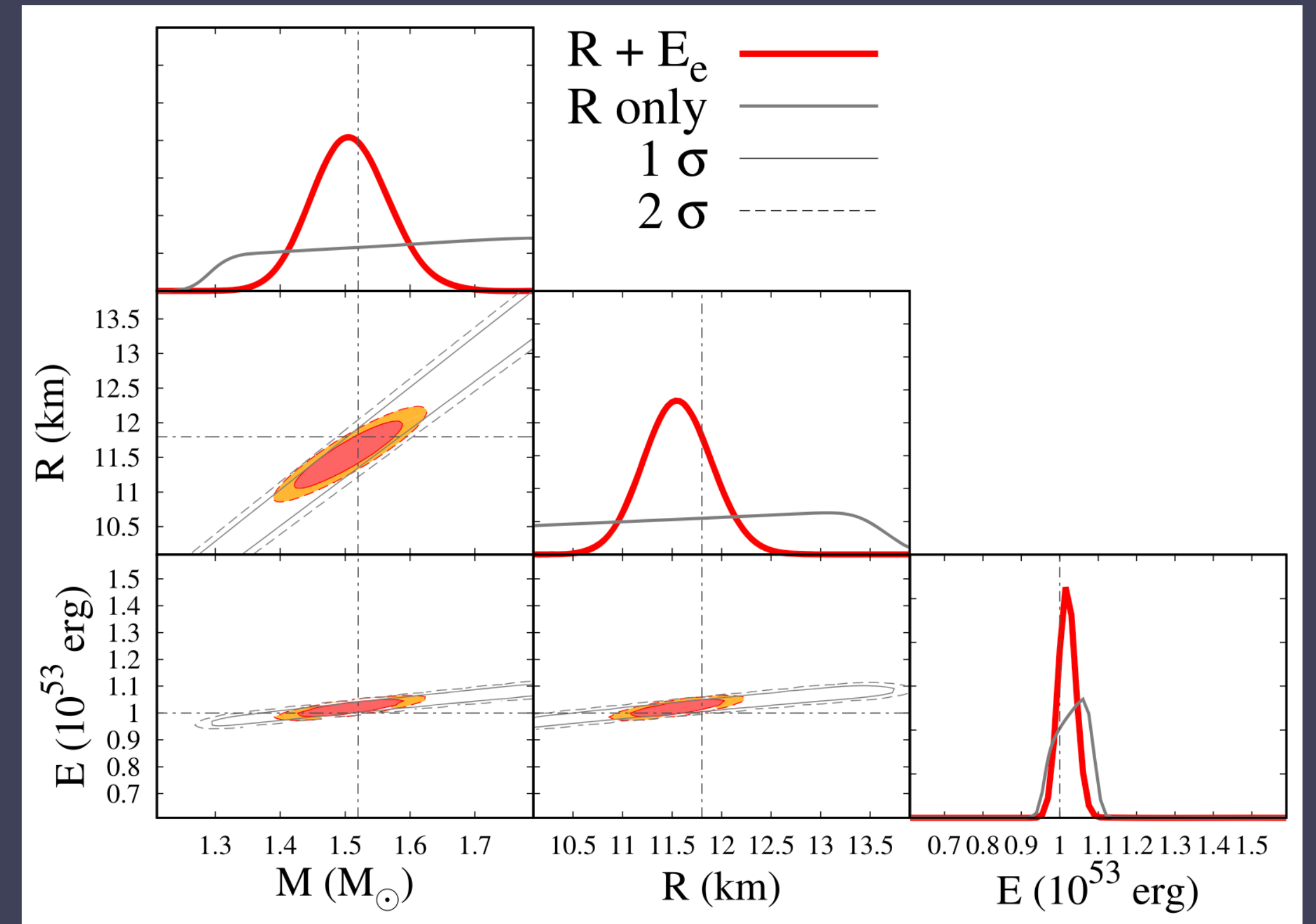
まとめ

2022年度(課題三年目)

- ・解析解に基づく超新星ニュートリノ観測データ解析パイプラインを開発
- ・近似的だが観測されしだい即座に解析でき、パラメータに当たりをつける



模擬観測データ(イベントエネルギー vs 時間)



Suwa et al. (2022)