

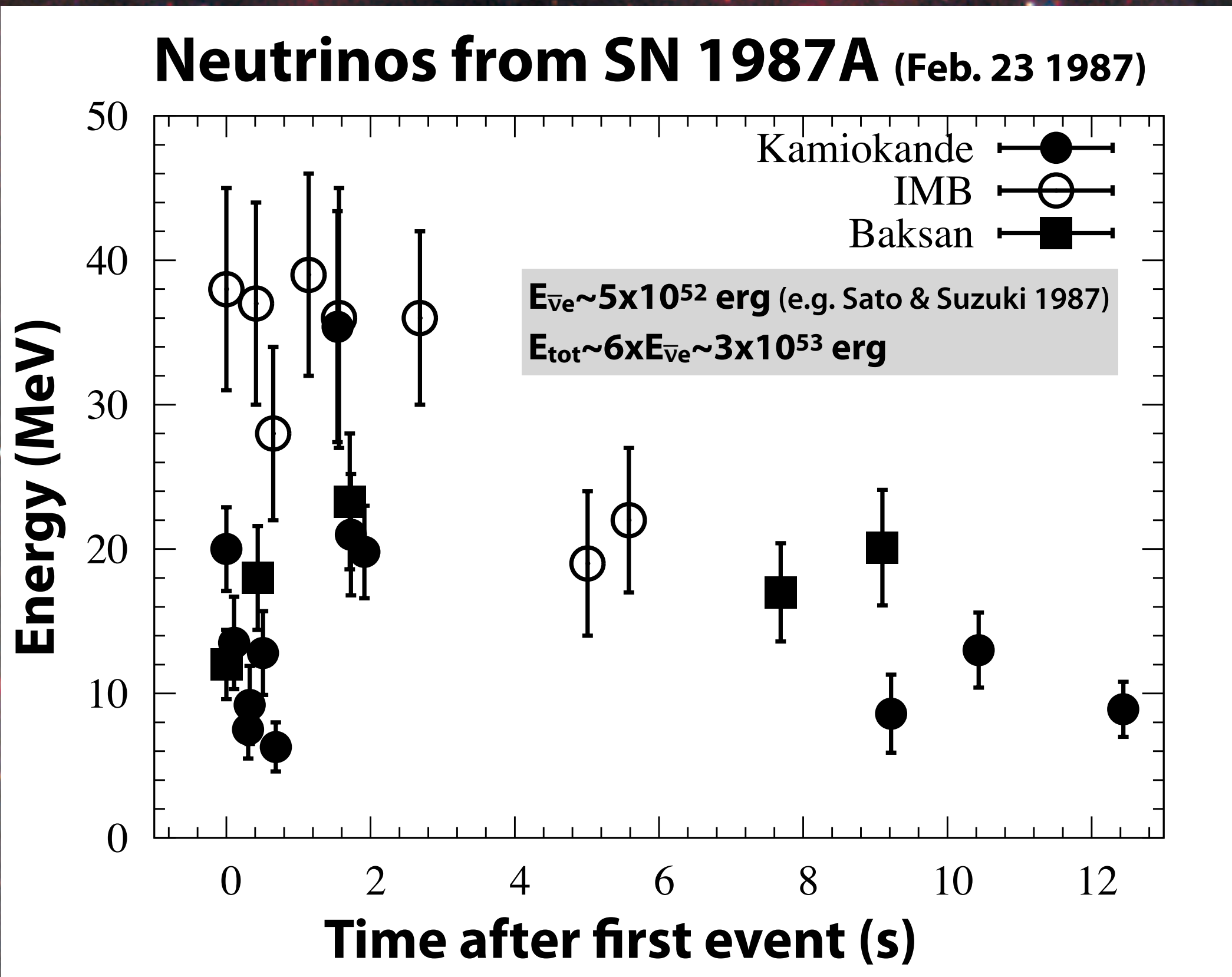
超新星後期ニュートリノの 理論モデル

諏訪雄大

(京産大 & 京大基研)

with nuLCコラボレーション

SN1987A



NASA/ESA

いま超新星が起こったら？2つの疑問。

* いくつかのイベントが観測できるか？

- SN1987AからはKamiokandeで11イベント
 - ▶ $M=2.14$ kton (内部タンクの全容量)
 - ▶ $D=51.2$ kpc (LMC)
- **SK ($M=32.5$ kton), $D=10$ kpc \Rightarrow 4400 イベント**
($O(10)\%$ の統計誤差あるもののオーダーは決まる)

* どれくらいの時間観測可能か？

- SN1987Aでは12.4 秒
- **下限のみ。大きな不定性！**

The latest SN found in our Galaxy, G1.9+0.3 (<150 years old) © NASA

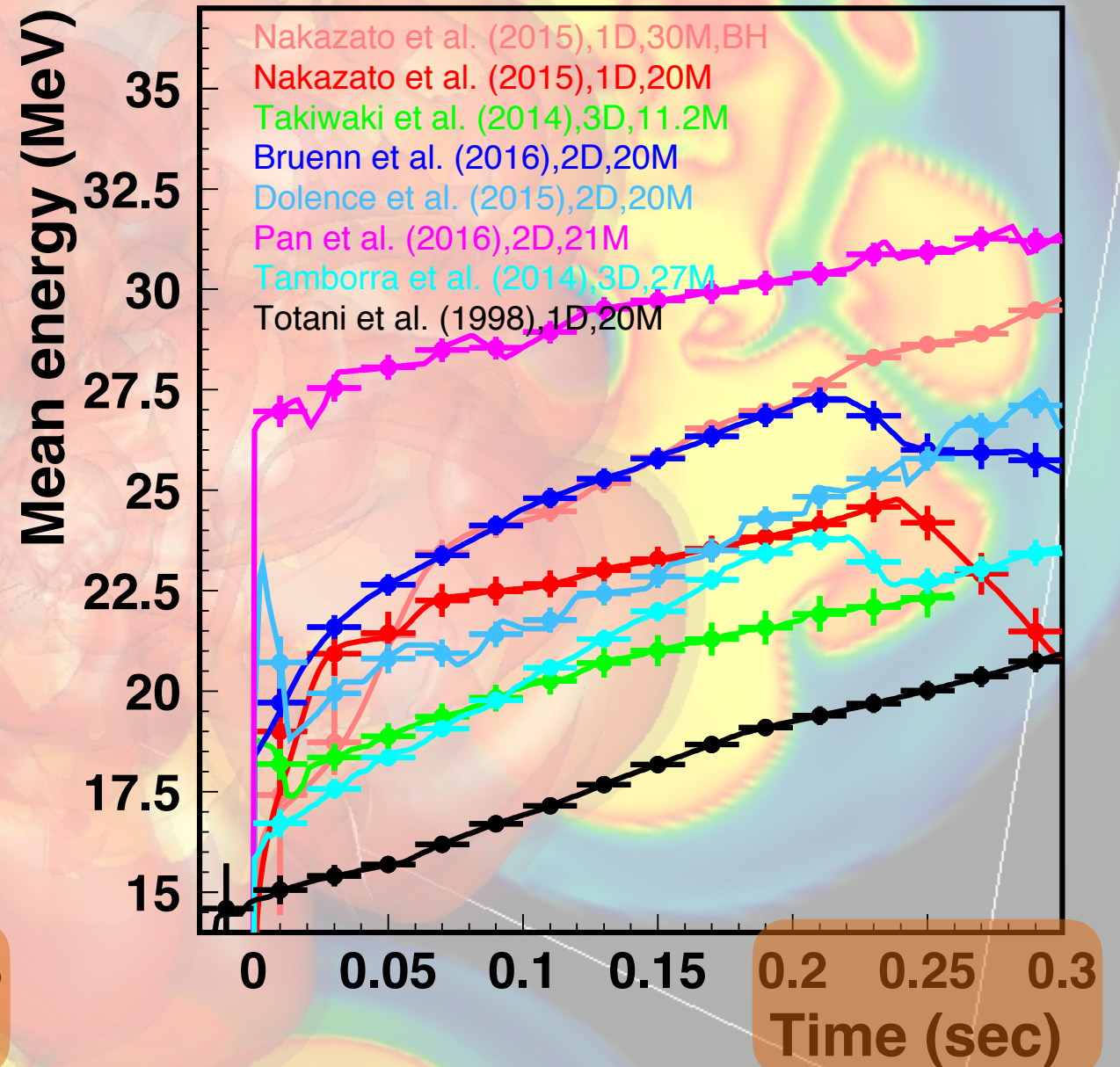
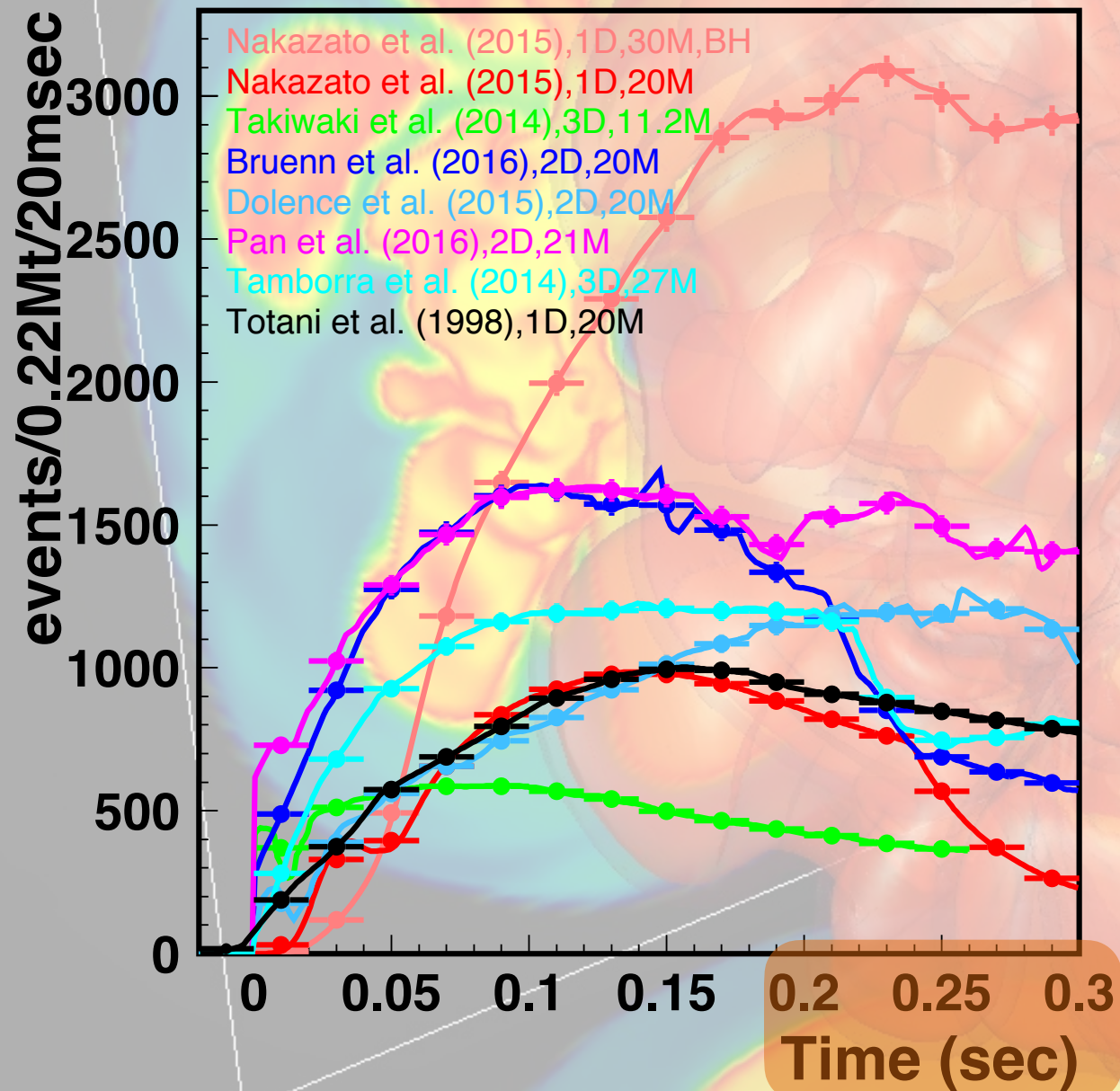
検出数：次の銀河系内超新星からの検出数予想

@10kpc

Detector	Type	Mass (kt)	Location	Events	Status
Super-Kamiokande	H ₂ O	32	Japan	7000	Running
LVD	C _n H _{2n}	1	Italy	300	Running
KamLAND	C _n H _{2n}	1	Japan	300	Running
Borexino	C _n H _{2n}	0.3	Italy	100	Running
IceCube	Long string	(600)	South pole	(10 ⁶)	Running
Baksan	C _n H _{2n}	0.33	Russia	50	Running
HALO	Pb	0.08	Canada	30	Running
Daya Bay	C _n H _{2n}	0.33	China	100	Running
NO ν A*	C _n H _{2n}	15	USA	4000	Running
MicroBooNE*	Ar	0.17	USA	17	Running
SNO+	C _n H _{2n}	0.8	Canada	300	Near future
DUNE	Ar	40	USA	3000	Future
Hyper-Kamiokande	H ₂ O	374	Japan	75 000	Future
JUNO	C _n H _{2n}	20	China	6000	Future
RENO-50	C _n H _{2n}	18	Korea	5400	Future
PINGU	Long string	(600)	South pole	(10 ⁶)	Future

Scholberg 2018

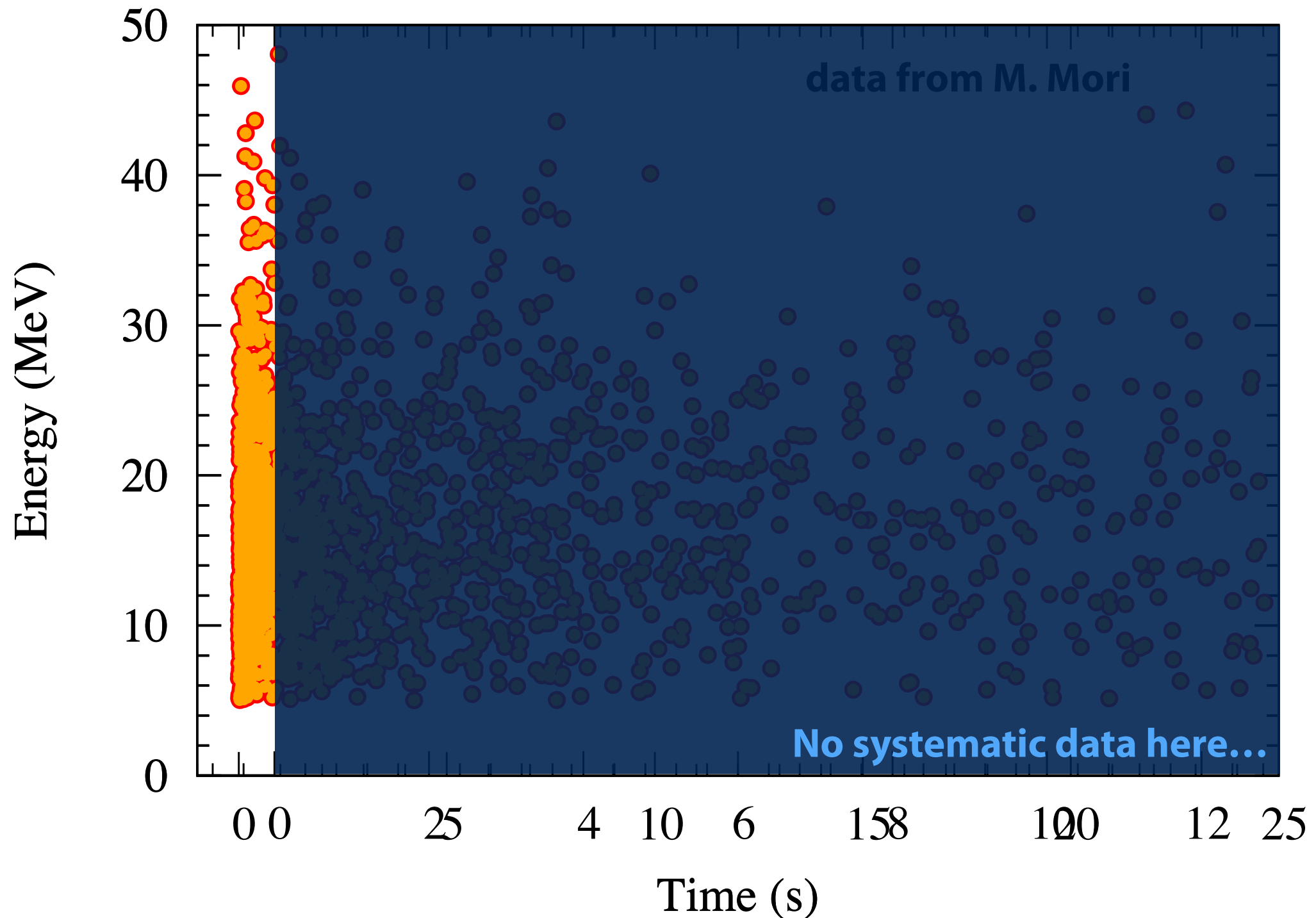
観測時間：現在のシミュレーション時間は不十分



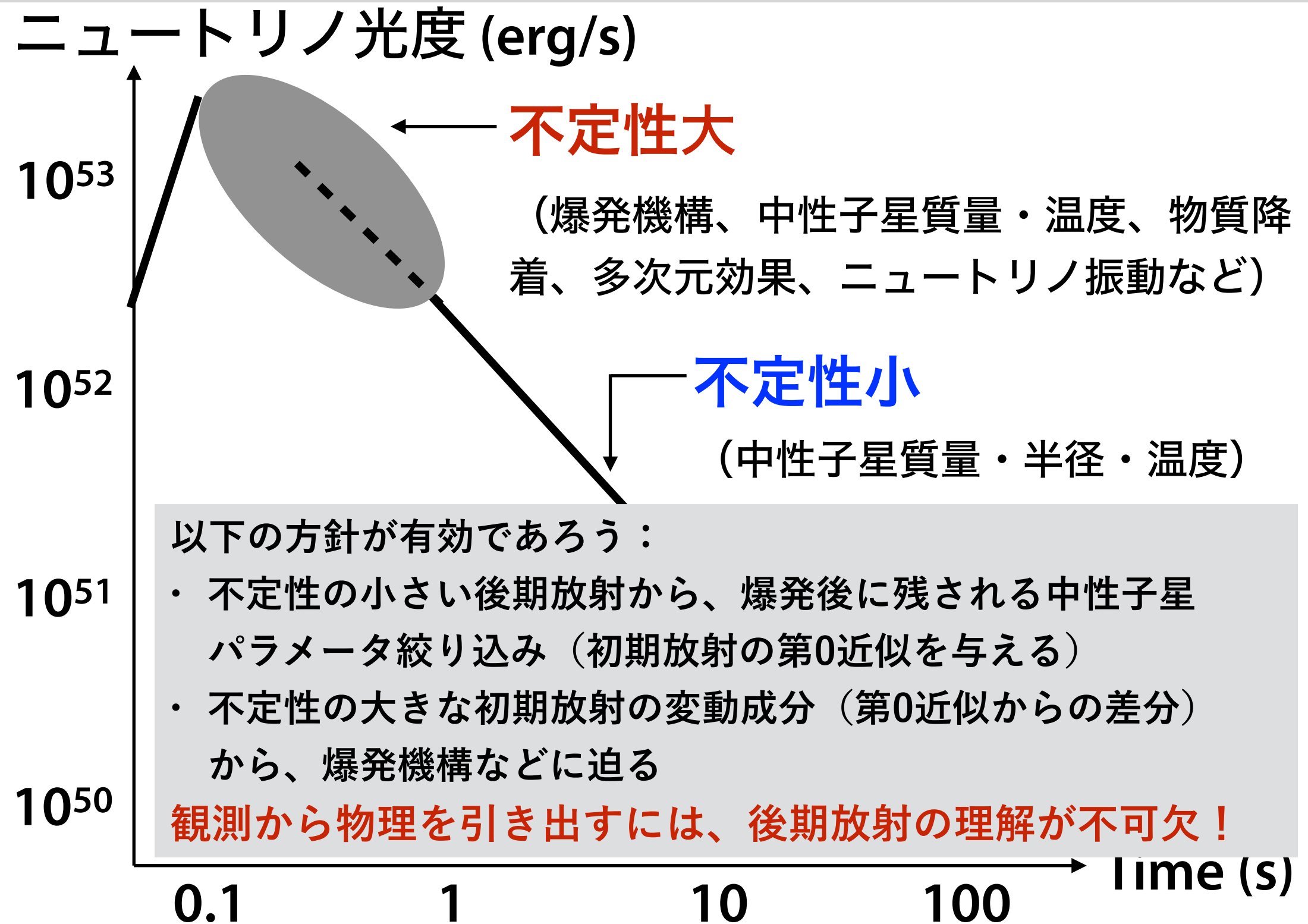
Hyper-Kamiokande Design Report, arXiv:1805.04163

超新星ニュートリノは10秒以上検出される

Neutrinos from SN 2087A



ニュートリノ後期放射はパラメータが少ない



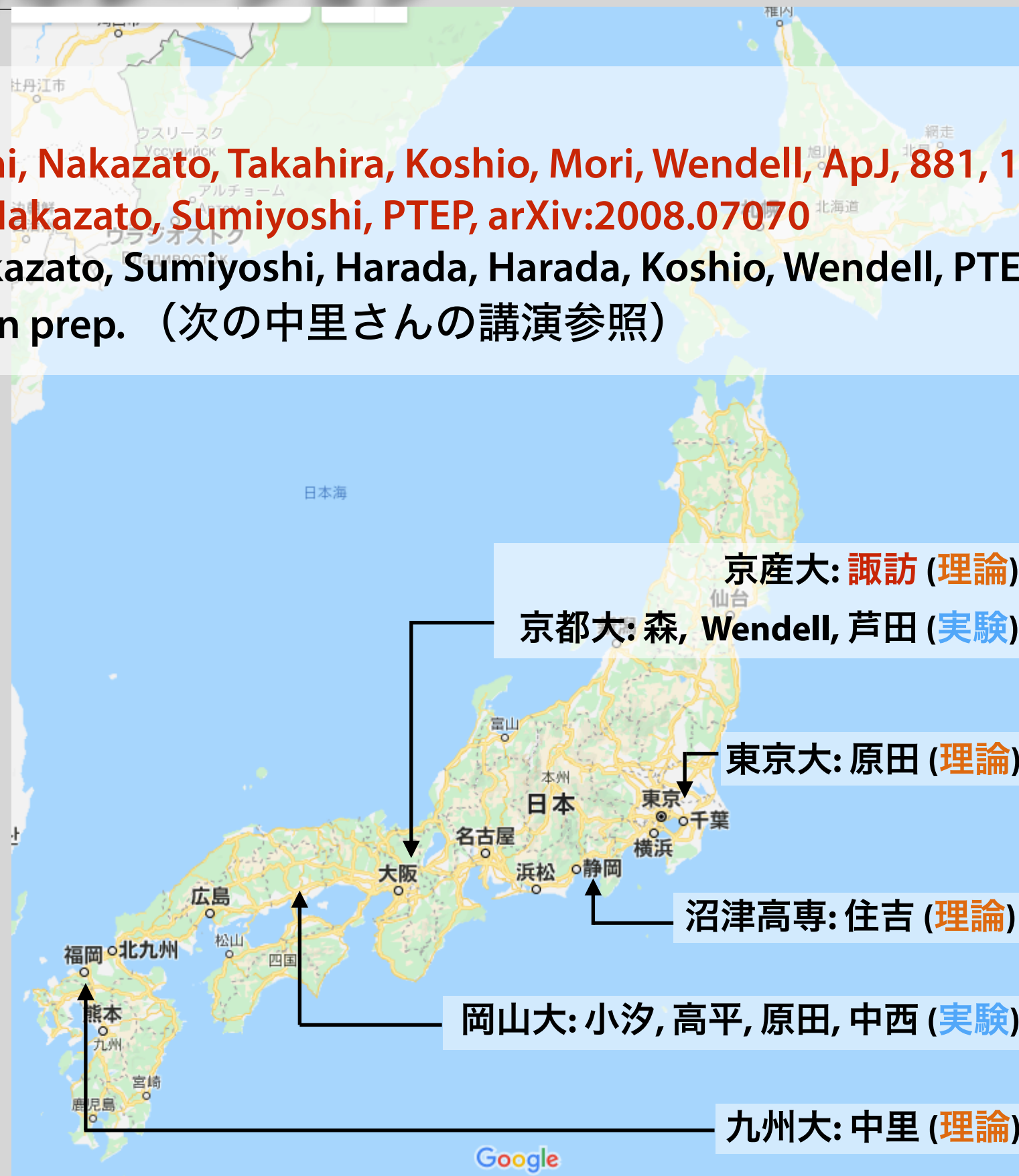
nuLC コラボレーション

“nuLC”

=neutrino Light Curve

Papers:

1. Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)
2. Suwa, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP, arXiv:2008.07070
3. Mori, Suwa, Nakazato, Sumiyoshi, Harada, Harada, Koshio, Wendell, PTEP, arXiv:2010.16254
4. Nakazato *et al.* in prep. (次の中里さんの講演参照)



* 流体計算 ($t < 0.3\text{s}$)

- dynamical, GR, Boltzmann neutrino transport, nuclear EOS, 1D
Yamada 1997, Sumiyoshi+ 2005

* PNS冷却計算 ($t > 0.3\text{s}$)

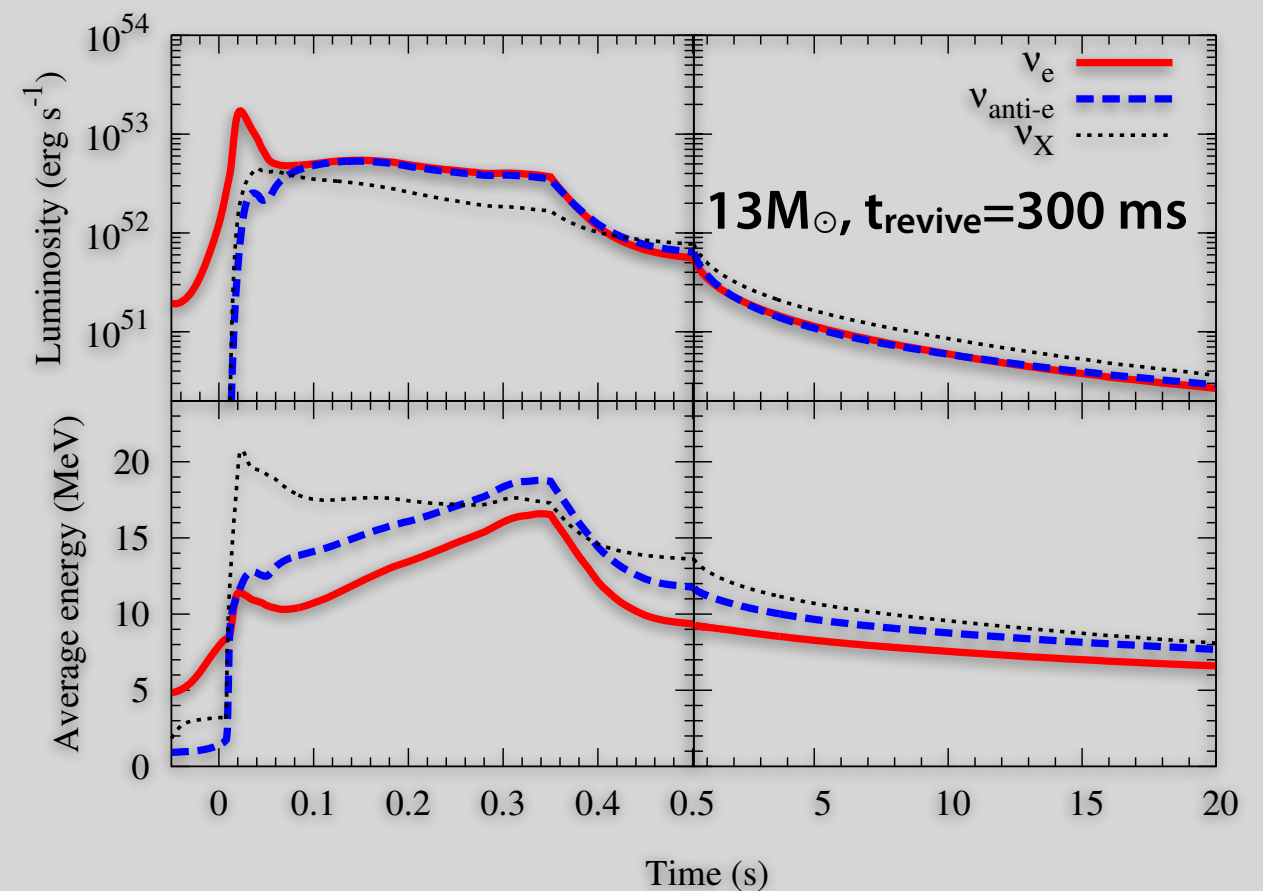
- static (TOV), FLD neutrino transport, nuclear EOS, 1D
Suzuki 1993

* 2つの計算を滑らかに接続

- $t_{\text{revive}} = 100, 200, 300\text{ ms}$
Nakazato+ 2013

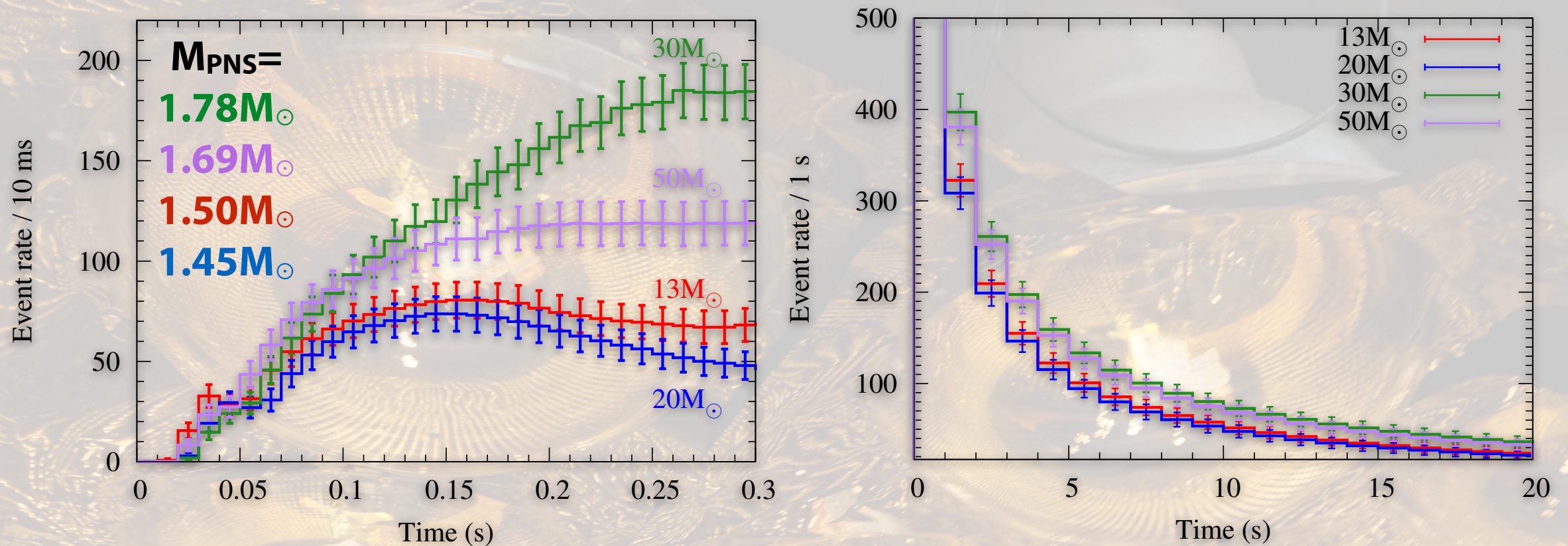
* 親星

- $13, 20, 30, 50 M_{\odot}$
Umeda+ 2012



イベントレート

[Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)]



* 20秒まで計算

- ニュートリノ光度とスペクトル
- SKの内部タンク全容量を仮定(32.5kt)、10kpc
- 逆ベータ崩壊のみ ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)

* イベントレートは親星質量ではなく、PNS質量と強い相関

20秒よりも長いシミュレーションが必要

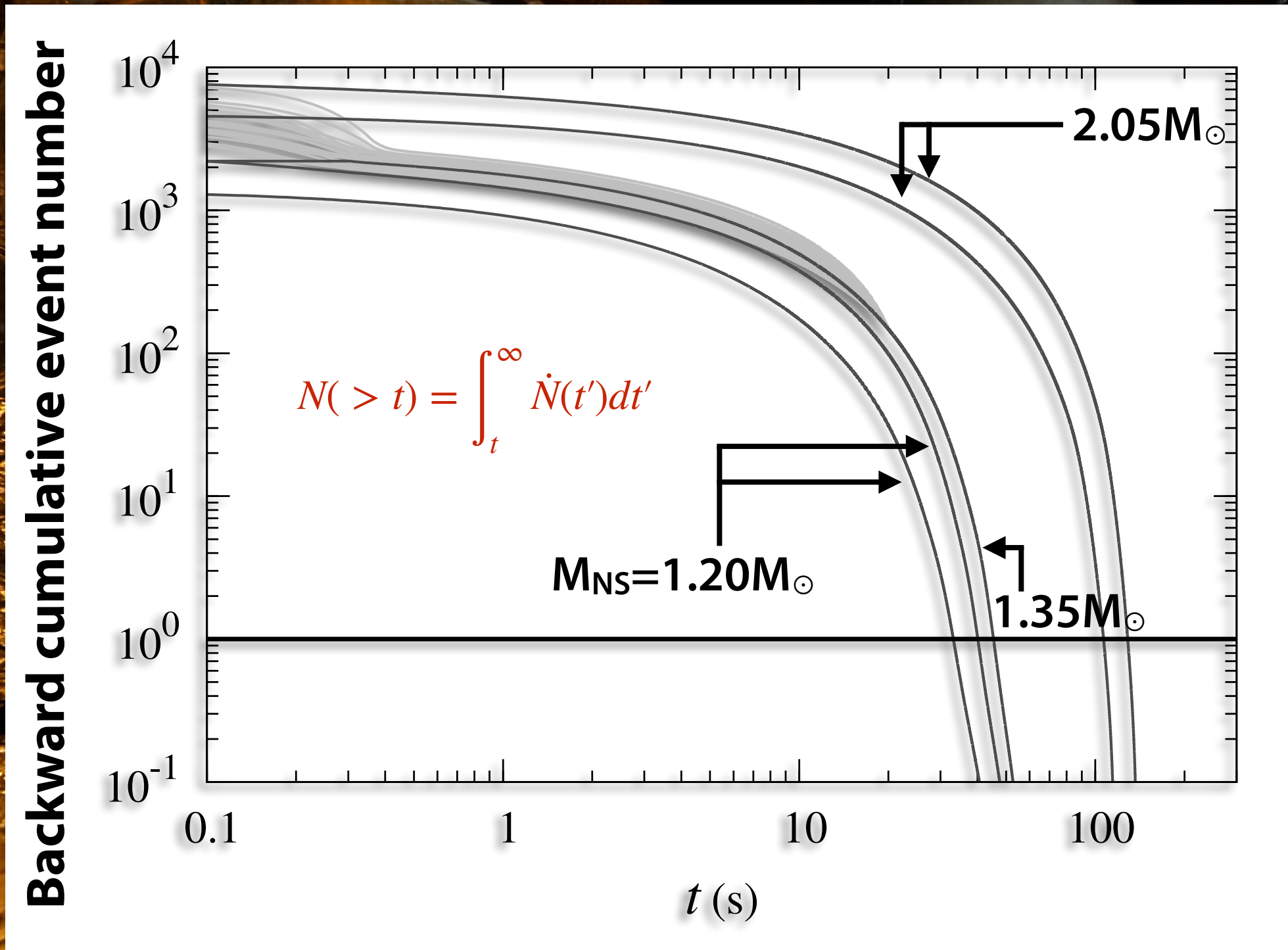
- * 爆発後20秒でも、イベントレートは高い。長時間計算が必要。
- * 既知の中性子星の質量領域もさらに広い: $1.17 \sim 2.01 M_{\odot}$

Demorest+ 2010, Antoniadis+ 2013, Martinez+ 2015
(see also Cromartie+ 2020 for a recent update)

- * 追加PNS冷却計算。より長く、より広いパラメータ領域。
 - ✦ $M_{\text{NS}} = 1.20, 1.35, 2.05 M_{\odot}$
 - ✦ 初期エントロピー構造も2通り（典型的爆発モデルよりも広く）
 - ✦ 最後の検出可能イベントまで

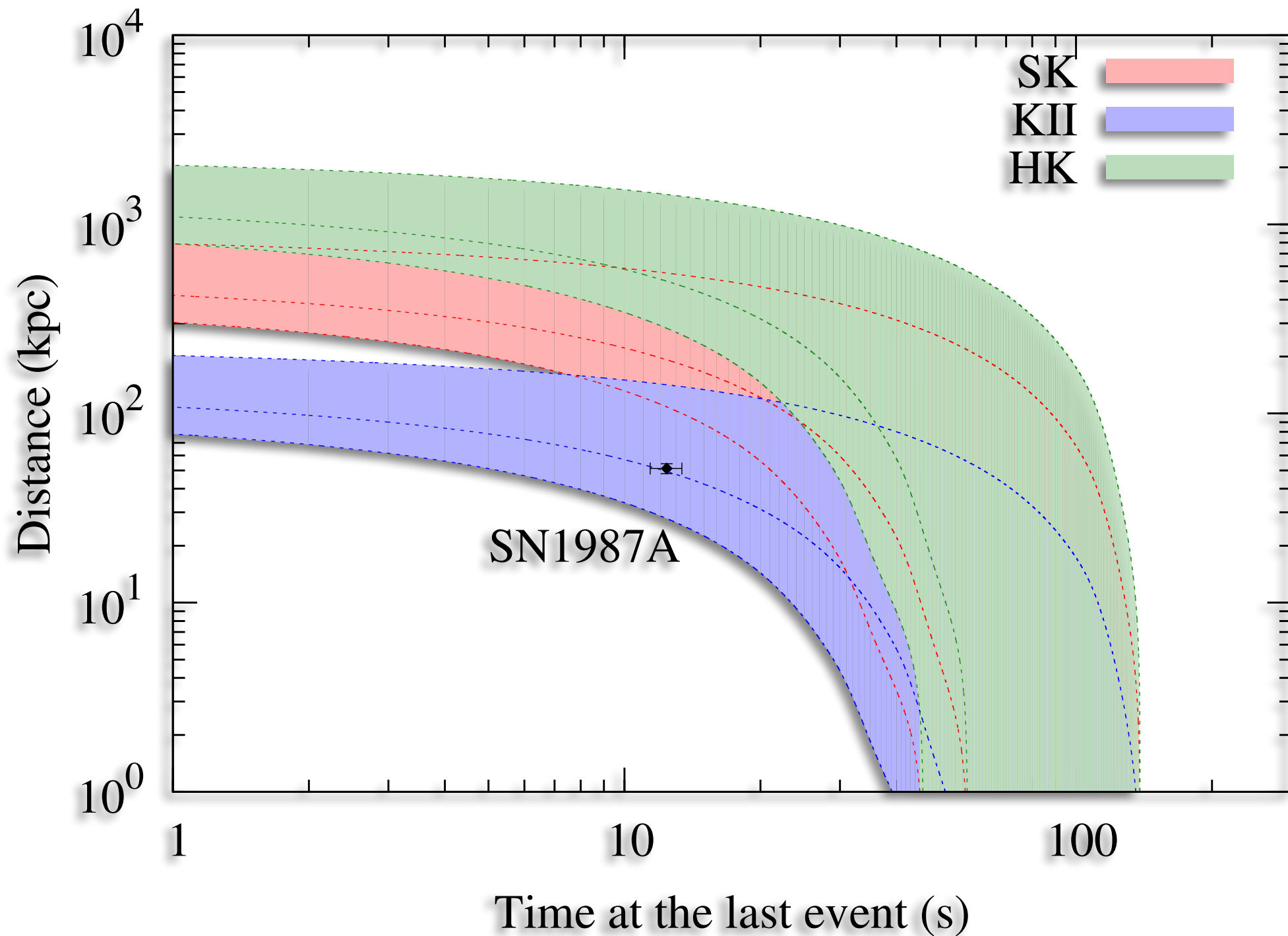
超新星ニュートリノ観測可能時間はいかほど？

[Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)]

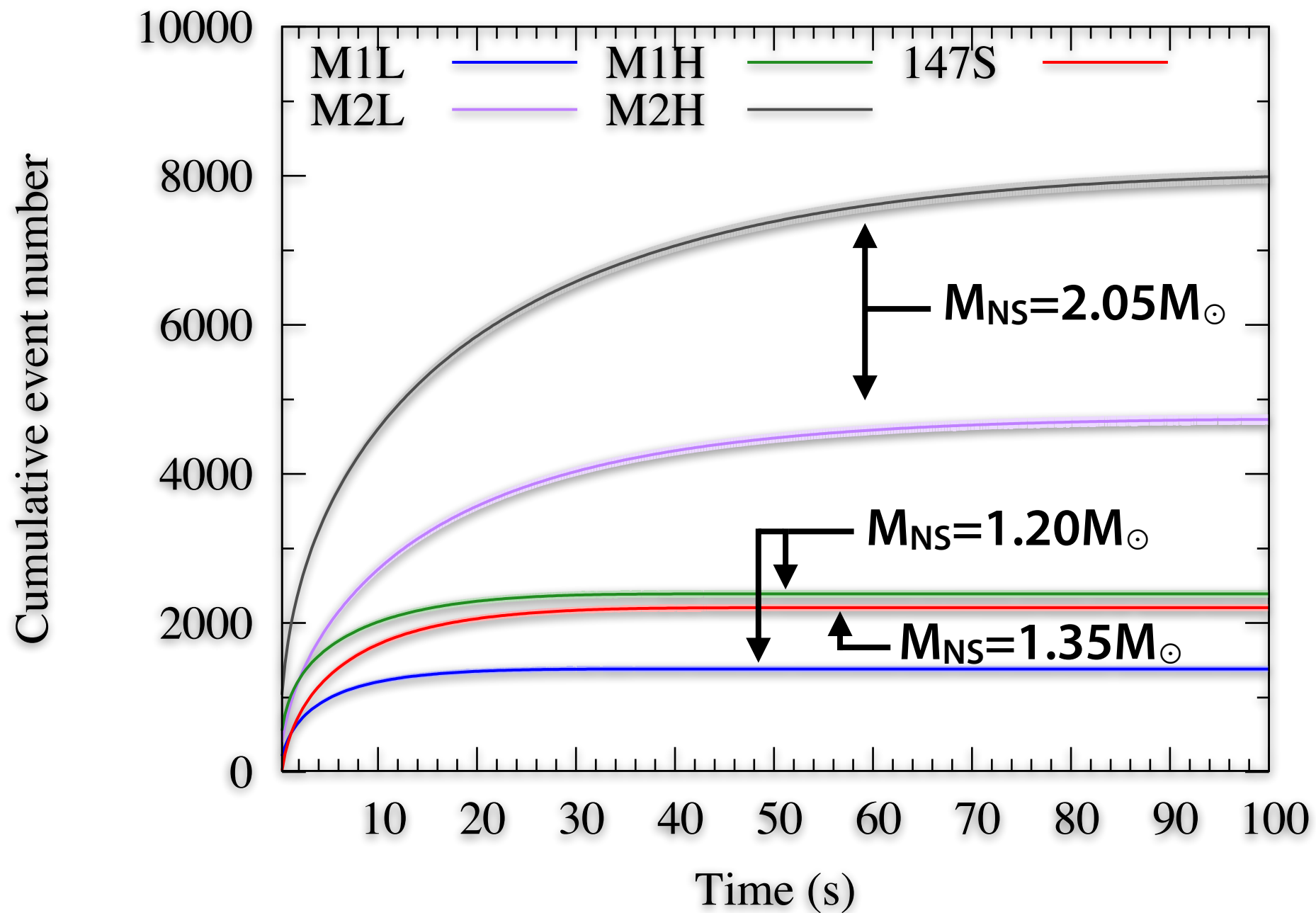


超新星ニュートリノ観測可能時間はいかほど？

[Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)]

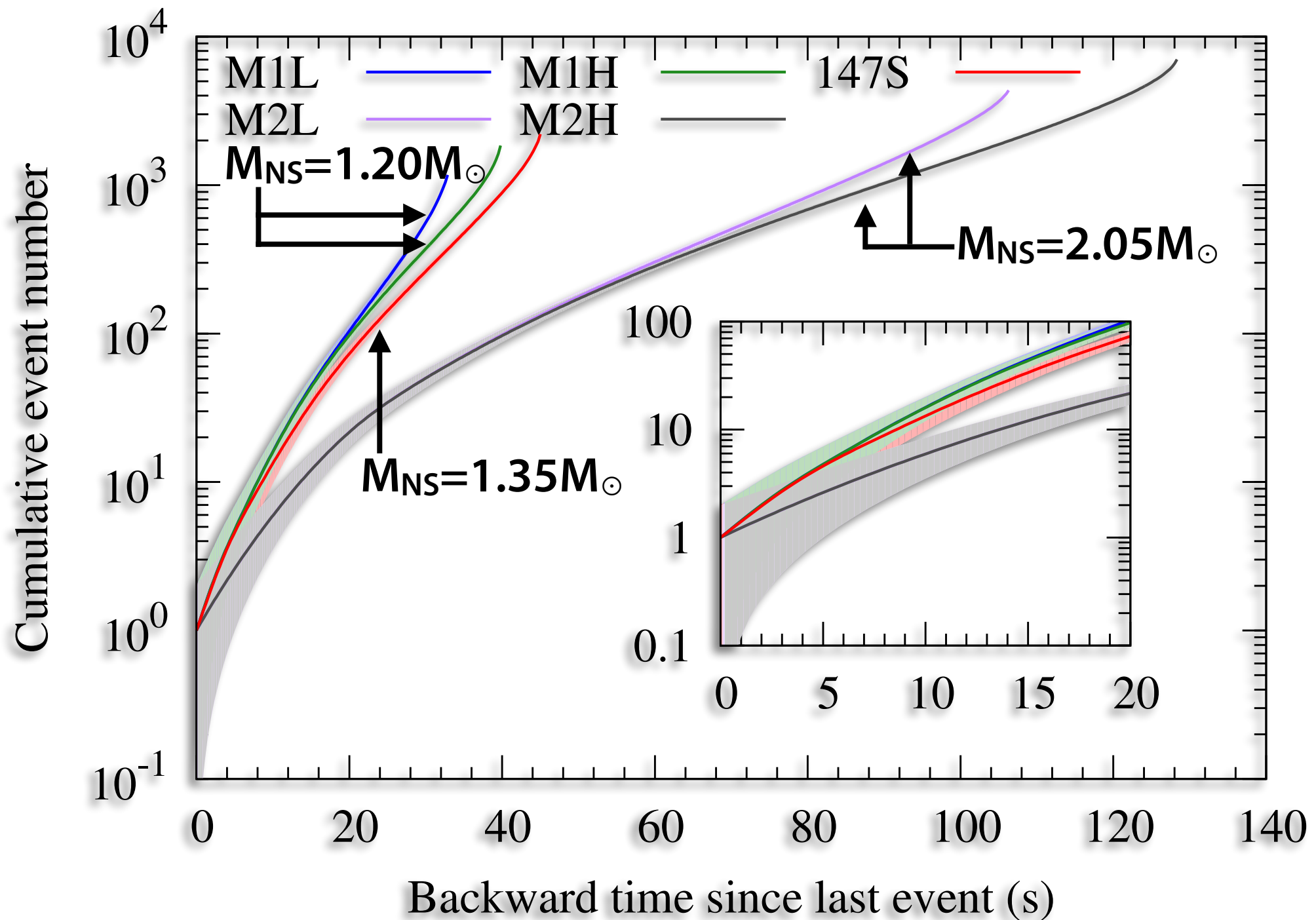


長時間ニュートリノをどう解析するといいいのか？



Backward cumulative plot

[Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)]

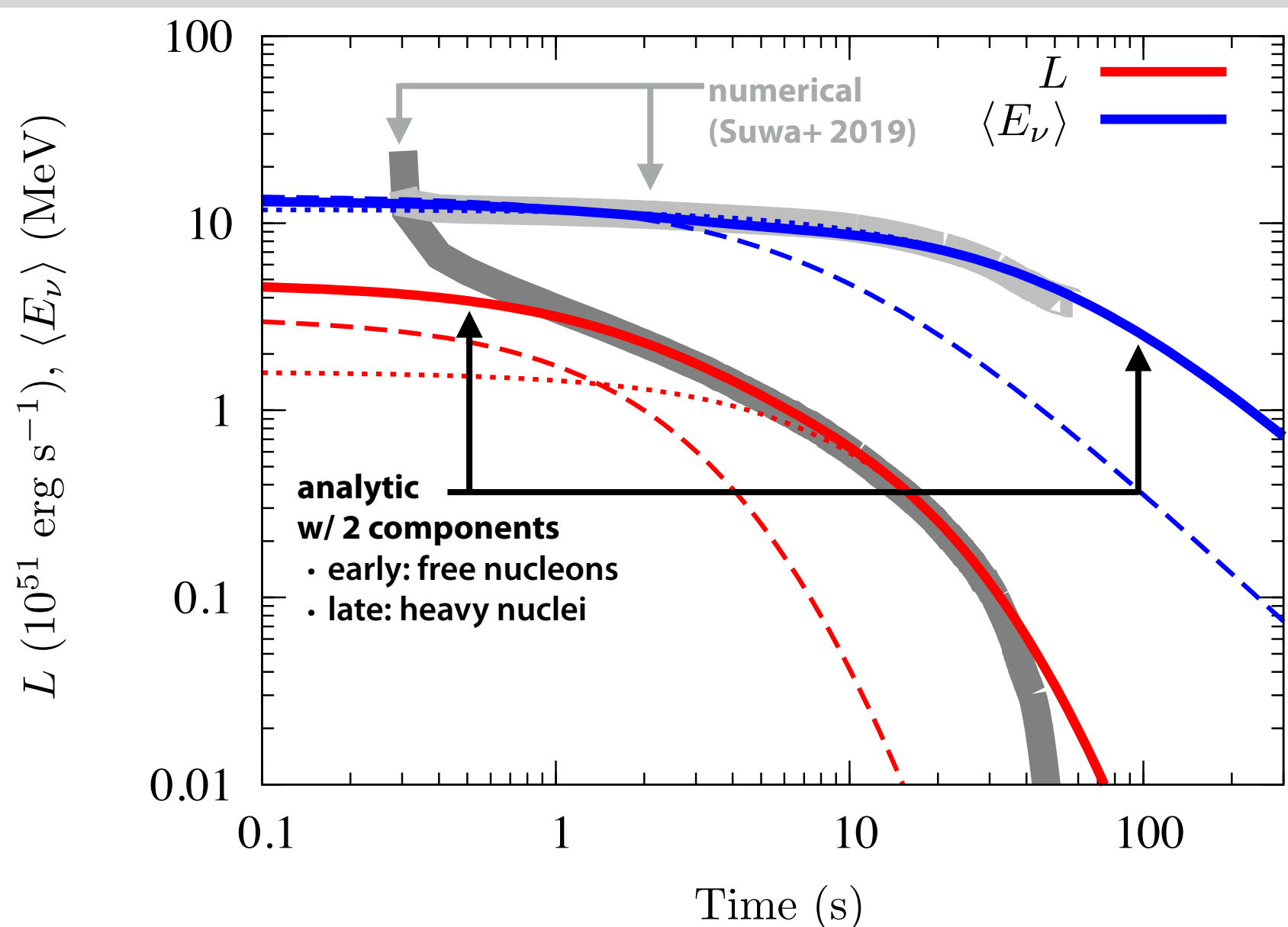


ニュートリノ光度曲線の解析解

[Suwa, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP in press., arXiv:2008.07070]

* ニュートリノボルツマン方程式を解析的に解いた

- 光度: $L = 3.3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^6 \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^4 \left(\frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-6}$
- 平均エネルギー: $\langle E_{\nu} \rangle = 16 \text{ MeV} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \left(\frac{g\beta}{3} \right) \left(\frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-3/2}$



観測量の解析的表式

[Suwa, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP in press., arXiv:2008.07070]

* イベントレート (SN@10kpc)

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

* 陽電子の平均エネルギー

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

* PNS半径

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

* consistency relation (解析解の妥当性を与える)

$$\frac{\mathcal{R} \ddot{\mathcal{R}}}{\dot{\mathcal{R}}^2} = \frac{17}{15}$$

まとめ

* 次の銀河系内超新星ニュートリノ（1秒以降の後期放射）
について理論と観測をつなげる計算

* **Take home messages**

- 検出数： $O(10^3)$ 、 M_{PNS} と相関。
- 検出時間： $O(10)\text{s}$ 、 $>100\text{s}$ もありえる
- 最後のイベントからの時間逆向き解析の有用性
- イベント解析にも使える後期放射の解析解

* **Next step**

- スペクトル解析
 - 核物質の状態方程式
- } 次の中里さんの講演