

超新星ニュートリノが観測されたときに 必要な道具は揃っているか？

諏訪 雄大

(東大総合文化 & 京大基研)

YS, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)

YS, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP, 2021, 013E01 (2021)

Mori, YS, Nakazato, Sumiyoshi, Harada, Harada, Koshio, Wendell, PTEP, 2021, 023E01 (2021)

Nakazato, Nakanishi, Harada, Koshio, YS, Sumiyoshi, Harada, Mori, Wendell, ApJ, 925, 98 (2022)

YS, Harada, Harada, Koshio, Mori, Nakanishi, Nakazato, Sumiyoshi, Wendell, ApJ, 934, 15 (2022)

Heston, Kehoe, YS, Horiuchi, arXiv:2302.04884

想像してみましよう（特に若い人へ）

- * もし、いま銀河系内超新星が観測されたらGCN、ATel、SNEWSなど（もしかしたらTwitterやInstagramの方が早いかも？）から通知が来たら、あなたは どうしますか？
- * 自分ではない誰かがアドレナリン全開で新データと向き合っているときに、指を咥えてみているだけでしょうか？
（ちなみに、僕は重力波のときはそんな感じでした。。。）
- * それとも
自分自身がキープレイヤーとして誰も知らない世界を切り開きたいですか？

思考実験してみましよう

- * 仮定 1 : 近傍宇宙で重力崩壊型超新星が起こったとする
- * 仮定 2 : Super-Kamiokandeでニュートリノが観測されたとする
- * 以下のようなデータがコミュニティに共有されるでしょう

時刻、イベント (e^+) エネルギー、イベント生成場所

(t_1, E_1, x_1)

(t_2, E_2, x_2)

(t_3, E_3, x_3)

$\dots (t_N, E_N, x_N)$

- * このデータ群をどうやって物理につなげるか？

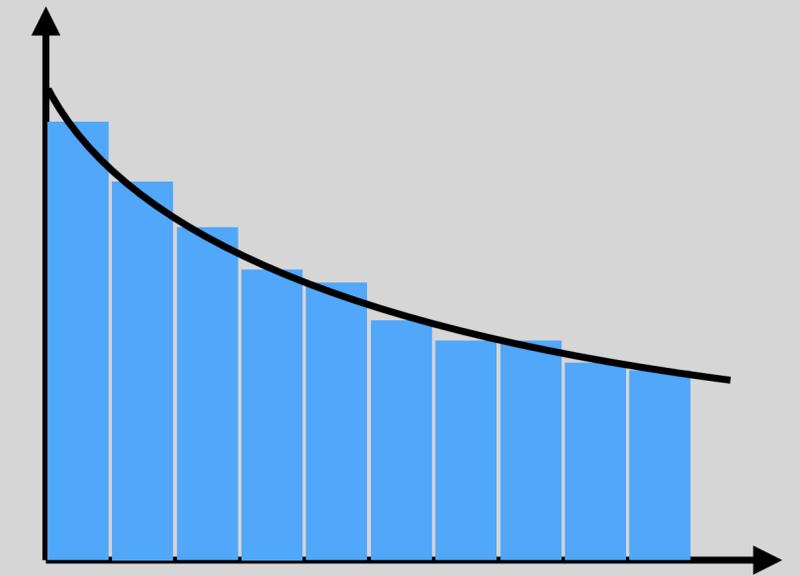
TABLE I. Measured properties of the twelve electron events detected in the neutrino burst. The electron angle in the last column is relative to the direction of SN1987A. The errors on electron energies and angles are one-standard-deviation Gaussian errors.

Event number	Event time (sec)	Number of PMT's (N_{hit})	Electron energy (MeV)	Electron angle (degrees)
1	0	58	20.0 ± 2.9	18 ± 18
2	0.107	36	13.5 ± 3.2	15 ± 27
3	0.303	25	7.5 ± 2.0	108 ± 32
4	0.324	26	9.2 ± 2.7	70 ± 30
5	0.507	39	12.8 ± 2.9	135 ± 23
6	0.686	16	6.3 ± 1.7	68 ± 77
7	1.541	83	35.4 ± 8.0	32 ± 16
8	1.728	54	21.0 ± 4.2	30 ± 18
9	1.915	51	19.8 ± 3.2	38 ± 22
10	9.219	21	8.6 ± 2.7	122 ± 30
11	10.433	37	13.0 ± 2.6	49 ± 26
12	12.439	24	8.9 ± 1.9	91 ± 39

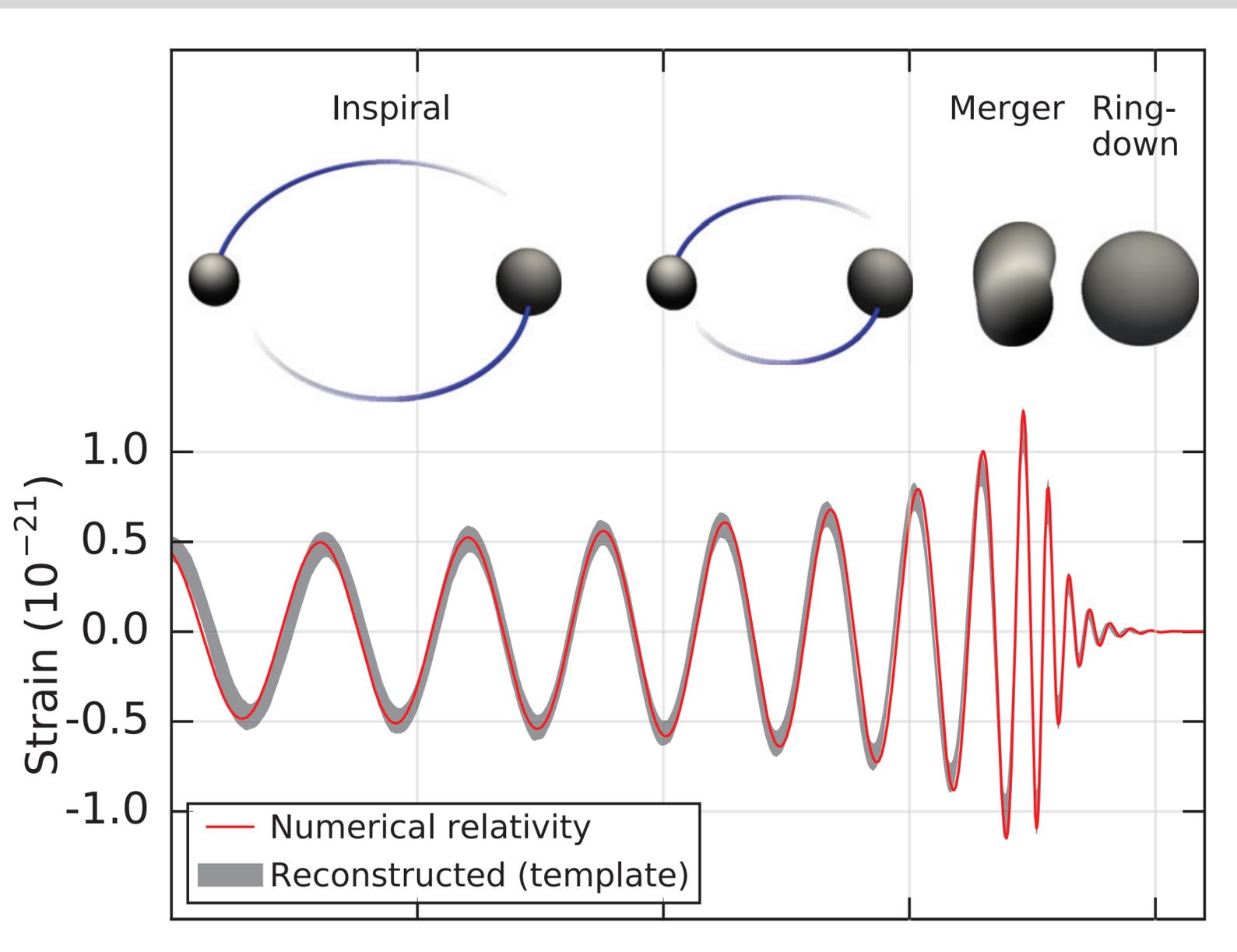
Hirata+ (1987)

どうデータ解析するか？

- * とりあえず、イベントを時間ビンに区切って適当な関数（ベキとか指数関数とか）でフィットしてみる？
- * エネルギー方向にもビンに切って、ヒストグラムを描いてみる？ とりあえず平均と分散を出してみる？
- * そのフィット関数、平均、分散にどんな意味があるか？
物理を引き出すことは可能か？



重力波を参考に考えてみる



LVC (2016)

* early-inspiral

■ ポストニュートン近似

ケプラー運動に摂動として相対論効果を組み込む方法。厳密計算。

■ 連星パラメータ (M_1 や M_2 など) 決定

* merger

■ 数値相対論シミュレーション

アインシュタイン方程式を数値的に解く。ちなみにBH-BH合体が計算できるようになったのは2005年。

■ 強非線形段階の系進化を計算

* その間 (つまり **late-inspiral**)

■ 現象論的モデル

ポストニュートン近似と数値相対論計算をつなぐ (複数のパラメータ有)

■ データのテンプレート解析

必要なもの

* いくつか段階がある

- 数学的な取り扱いが定まっている**厳密解**（不定性 小）
- 上の厳密計算と数値計算をつなぐ**現象論**（不定性 中）
- 高い非線形性をもつ式を解く**数値計算**（不定性 大）

* もし厳密計算がない場合、我々はなにを信じればよいのか？その数値計算は本当に正しく解を求められているか？

- * 介入する物理が一つの場合はまだ収束性の確認などで担保可能
- * マルチフィジックスになってしまったら、定量的な計算はほぼ不可能。定性的な現象の理解に留まる。

いまあるもの

* 超新星ニュートリノ研究の最前線

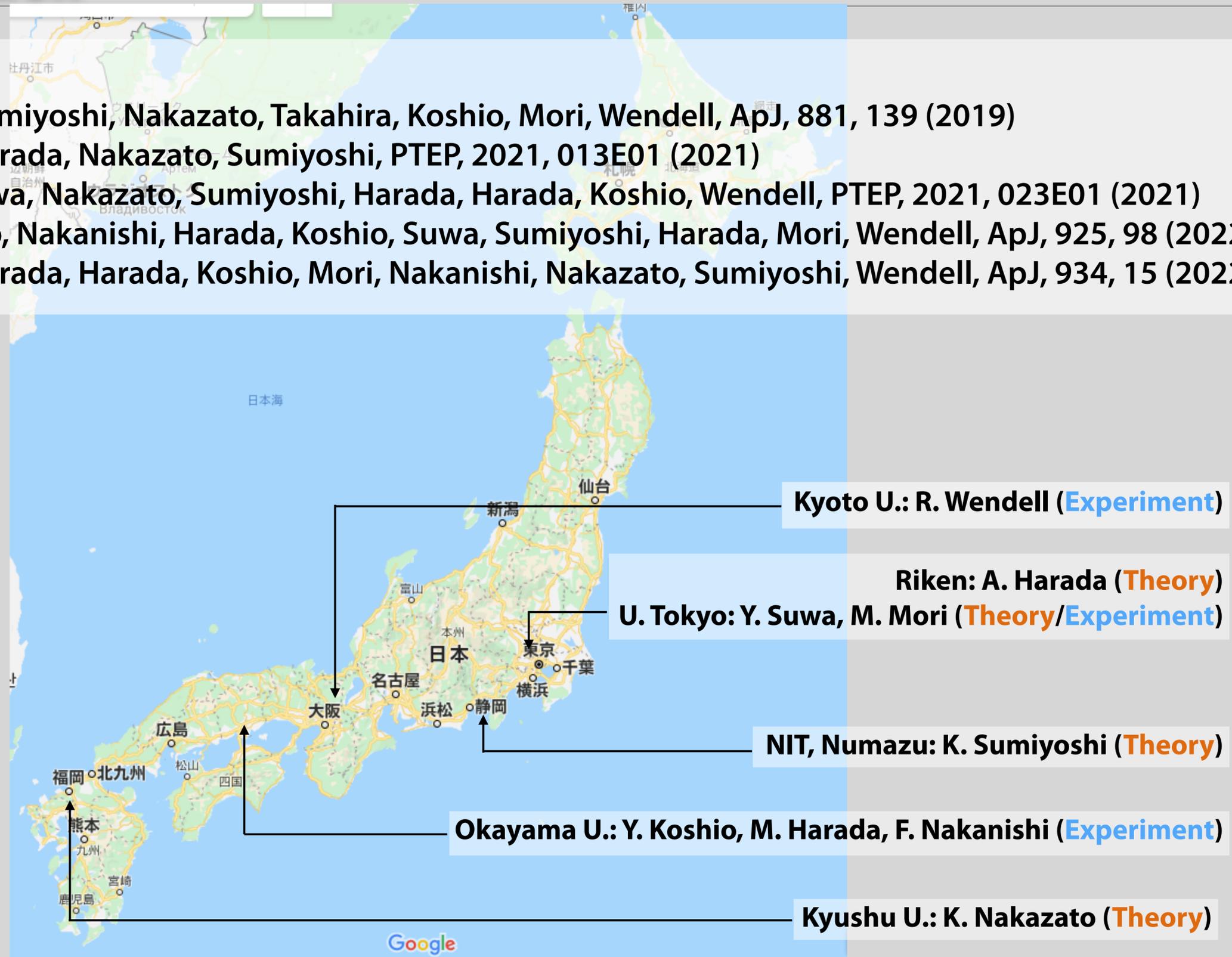
- **厳密解**：なし
- **現象論**：いくつか研究あり [Loredo & Lamb 1989; Keil+ 2003; Nakazato & Suzuki 2020; Suwa+ 2021]
- **数値計算**：最も情報が多い [Sato & Suzuki 1987; Burrows+ 1992; Totani+ 98; Fischer+ 2010; Hüdepohl+ 2010; Roberts+ 2012; Nakazato+ 2013; Suwa+ 2019; Mori+ 2021, and more]

* 次の近傍超新星に向けて、道具を揃える必要がありそう

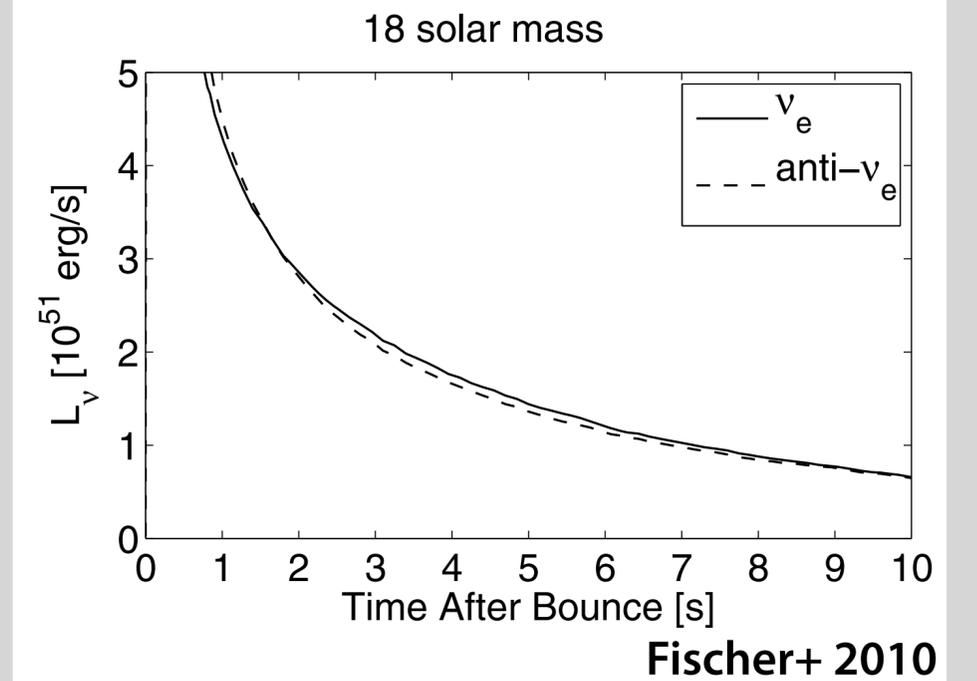
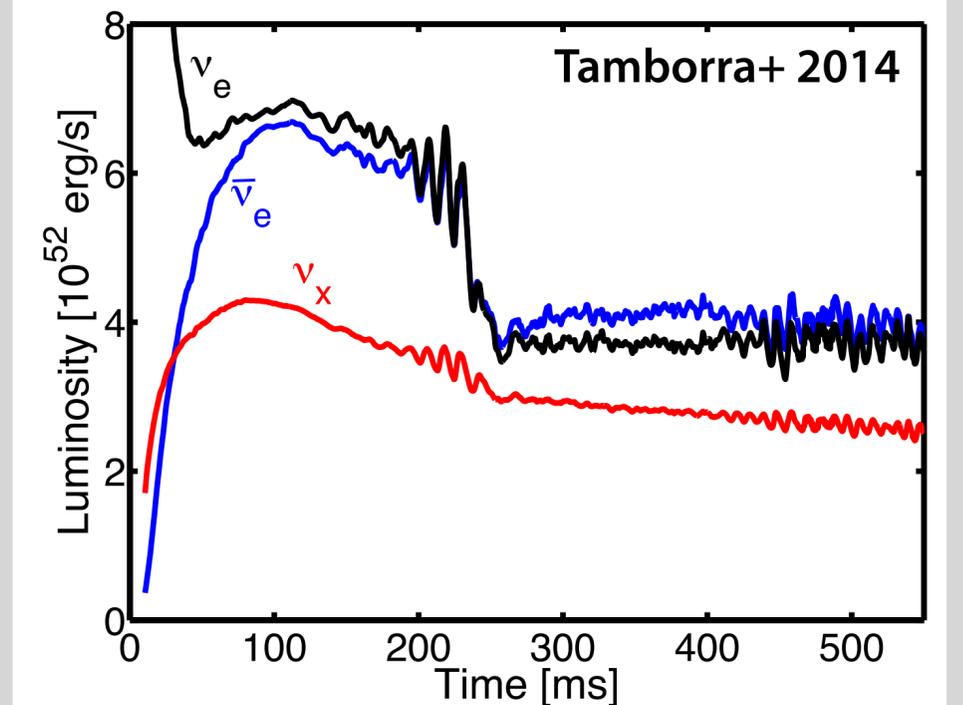
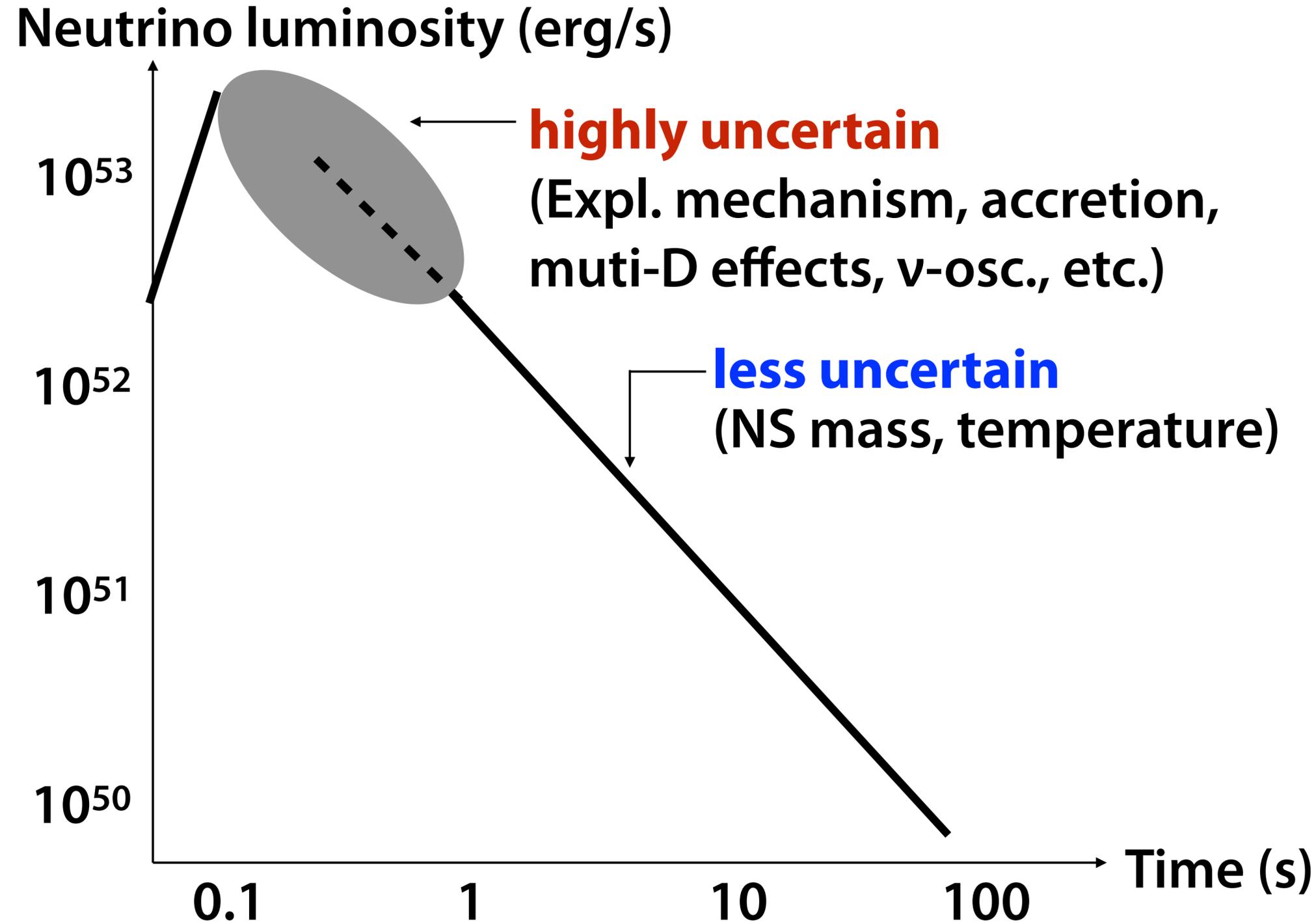
* 2017年からnuLCコラボレーションとして活動中

Papers:

1. Suwa, Sumiyoshi, Nakazato, Takahira, Koshio, Mori, Wendell, ApJ, 881, 139 (2019)
2. Suwa, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP, 2021, 013E01 (2021)
3. Mori, Suwa, Nakazato, Sumiyoshi, Harada, Harada, Koshio, Wendell, PTEP, 2021, 023E01 (2021)
4. Nakazato, Nakanishi, Harada, Koshio, Suwa, Sumiyoshi, Harada, Mori, Wendell, ApJ, 925, 98 (2022)
5. Suwa, Harada, Harada, Koshio, Mori, Nakanishi, Nakazato, Sumiyoshi, Wendell, ApJ, 934, 15 (2022)

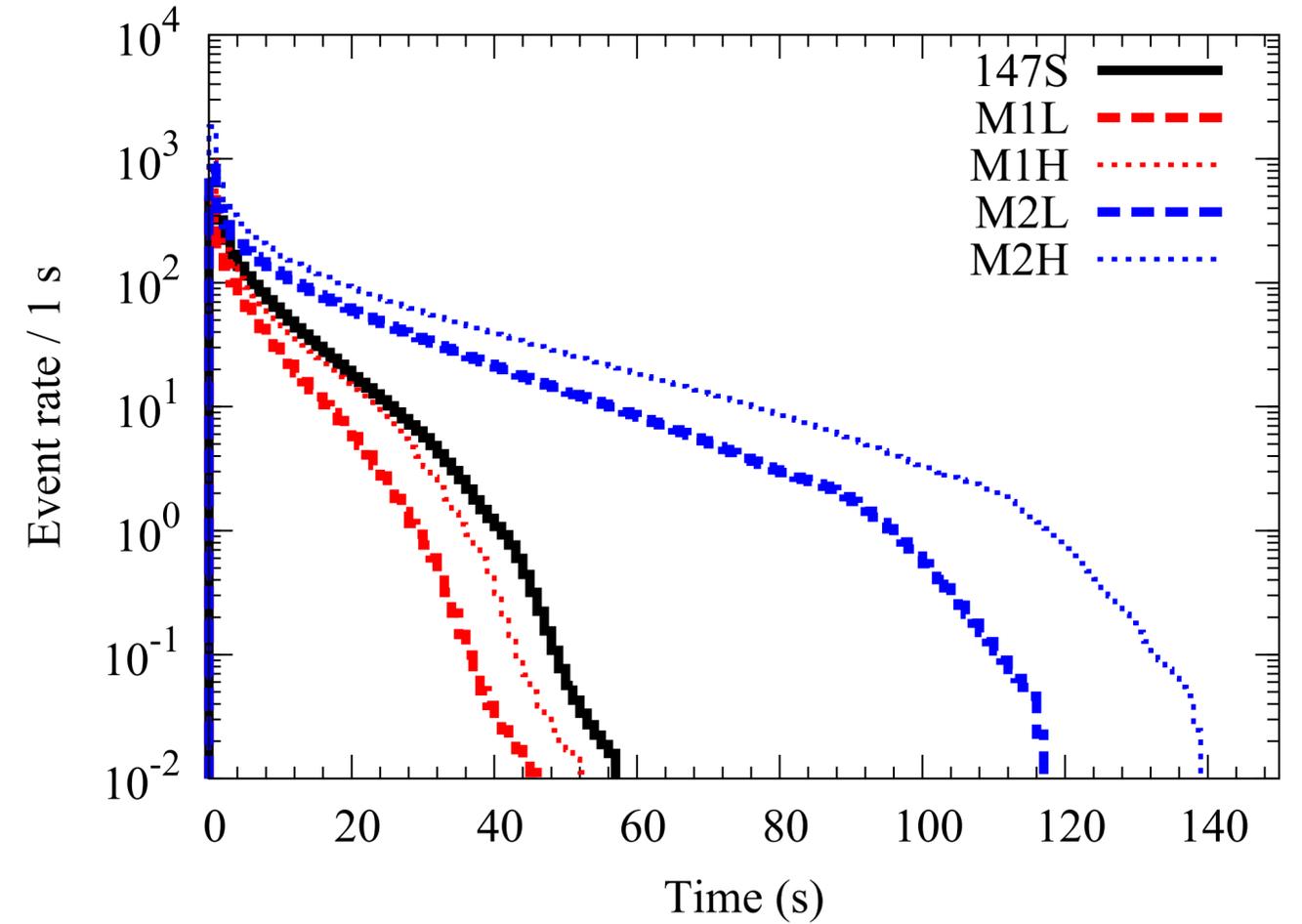
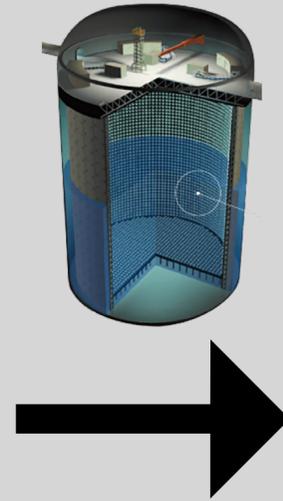
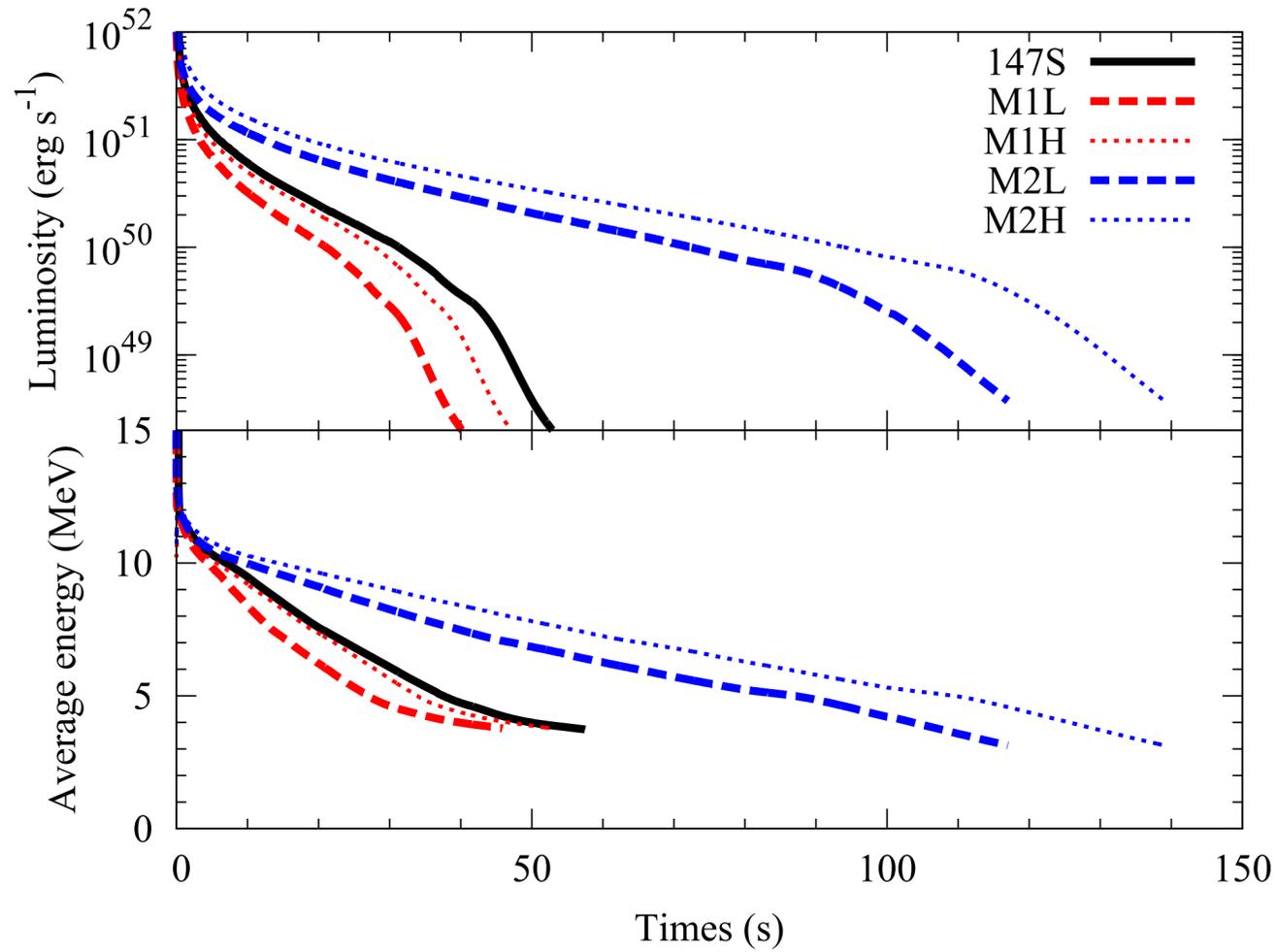


超新星ニュートリノ後期放射



数値計算

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



see also 森さんの講演

現象論的解析解

[Suwa, Harada, Nakazato, Sumiyoshi, PTEP, 2021, 0130E01 (2021)]

* ニュートリノ輸送方程式の解析解

✦ ニュートリノ光度

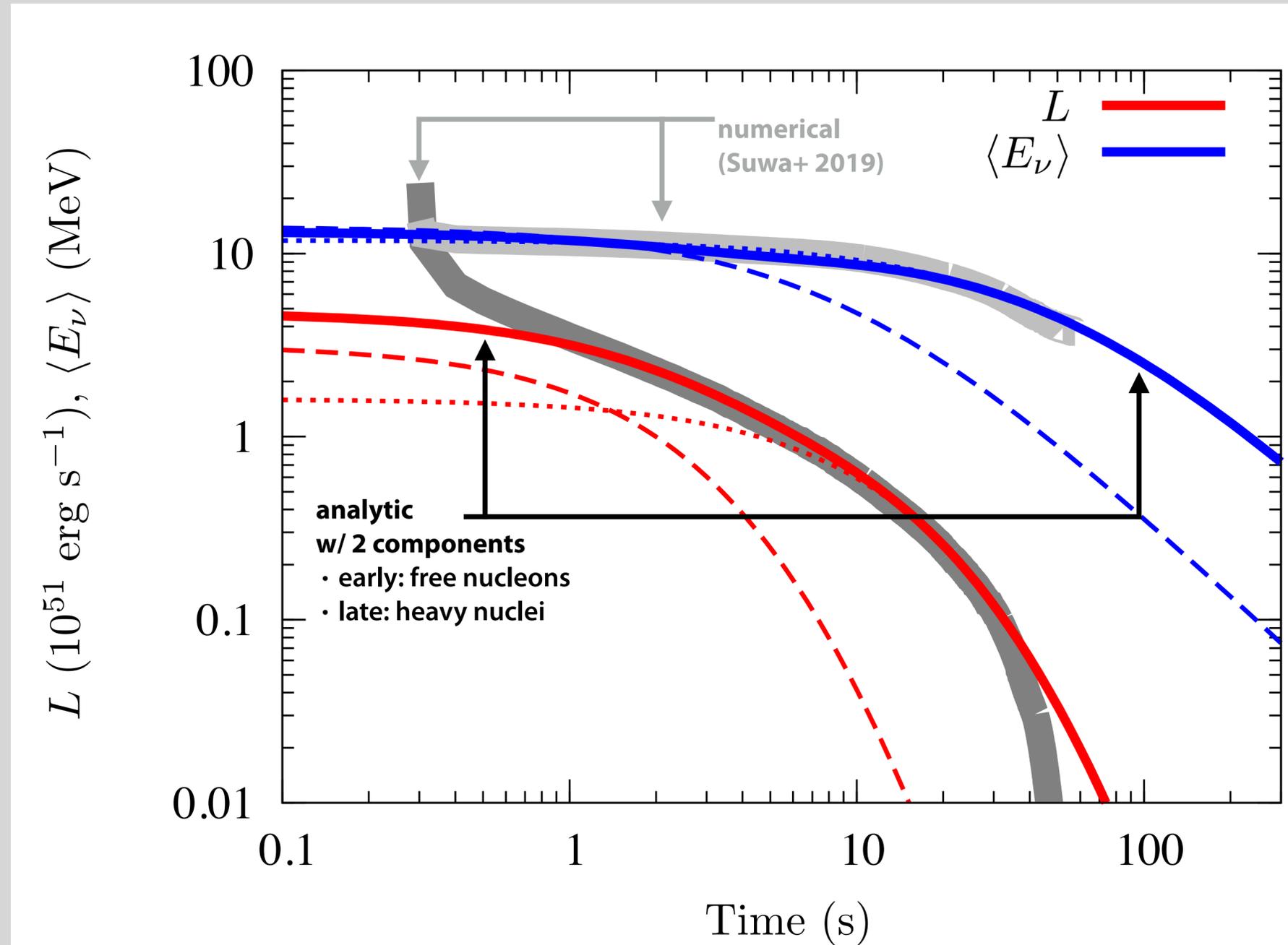
$$L = 3.3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4M_{\odot}} \right)^6 \left(\frac{R_{\text{PNS}}}{10 \text{ km}} \right)^{-6} \left(\frac{g\beta}{3} \right)^4 \left(\frac{t+t_0}{100 \text{ s}} \right)^{-6}$$

✦ ニュートリノ平均エネルギー

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

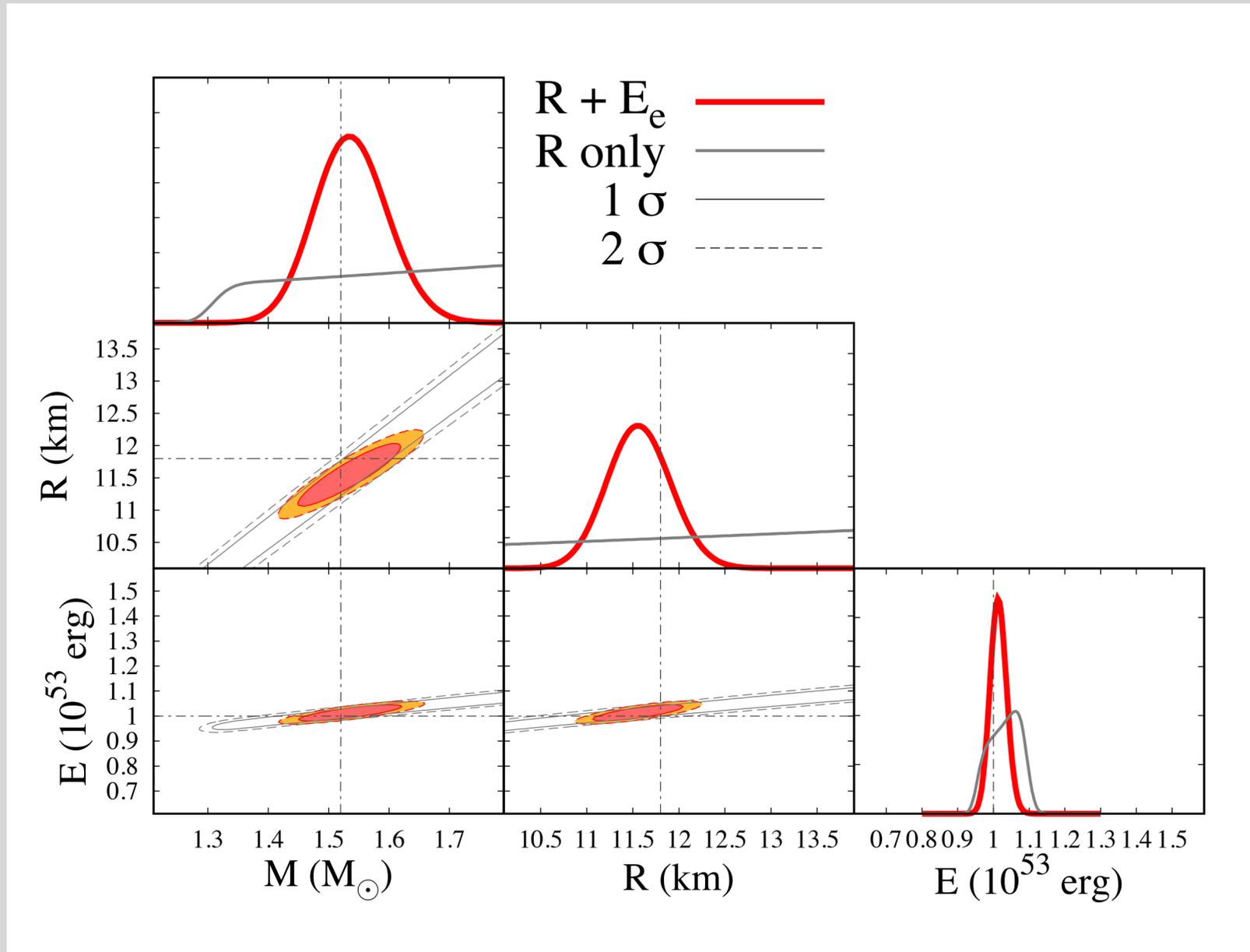
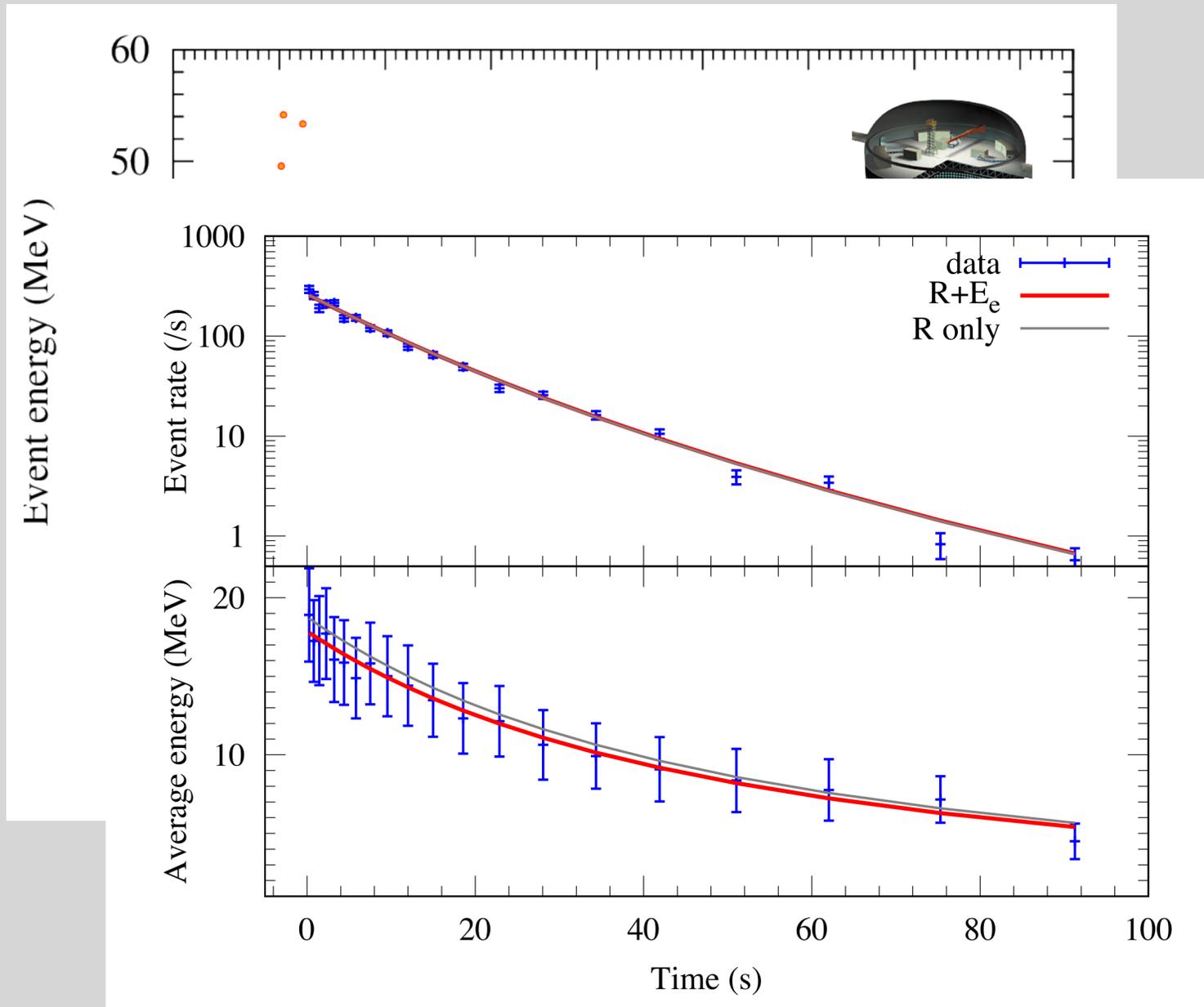
✦ 2成分モデル

- ▶ 初期 ($\beta=3$; 自由核子)
- ▶ 後期 ($\beta=O(10)$; 原子核)



データ解析パイプライン

[Suwa, Harada, Harada, Koshio, Mori, Nakanishi, Nakazato, Sumiyoshi, Wendell, ApJ, 934, 15 (2022)]



see also 原田さんの講演

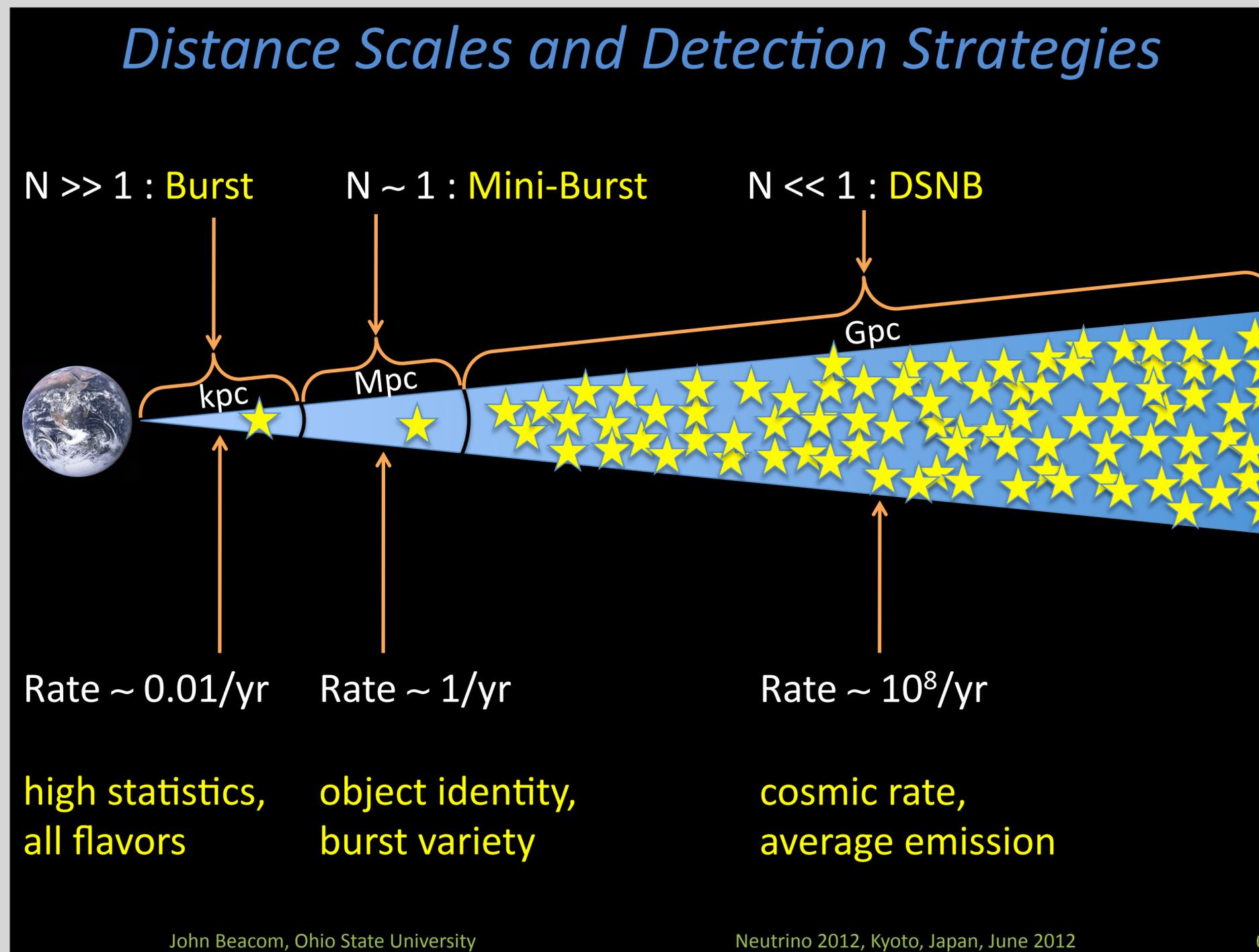
* ここまでで揃った道具

- **厳密解**：なし(-_-;)
- **現象論**：解析的ニュートリノ放射モデル(Suwa+ 2021)とデータ解析パイプライン(Suwa+ 2022)
- **数値計算**： $O(10)$ 秒のモデルが5 (Suwa+ 2019)+1(Mori+ 2021)+32(Nakazato+ 2022)

* 今後やるべきこと

- 数値計算のモデルグリッドをさらに広げ、モデル内挿方法の確立
- 現象論のモデルパラメータを減らす (そんなに難しくない)
- 解析パイプライン整備 (原田さんによって大きく前進中!)
- そもそもの厳密解を作る (激ムズ)
- 興味あるかた、ぜひ一緒にやりませんか？

ちょっと話題を変えて、mini-burstについて

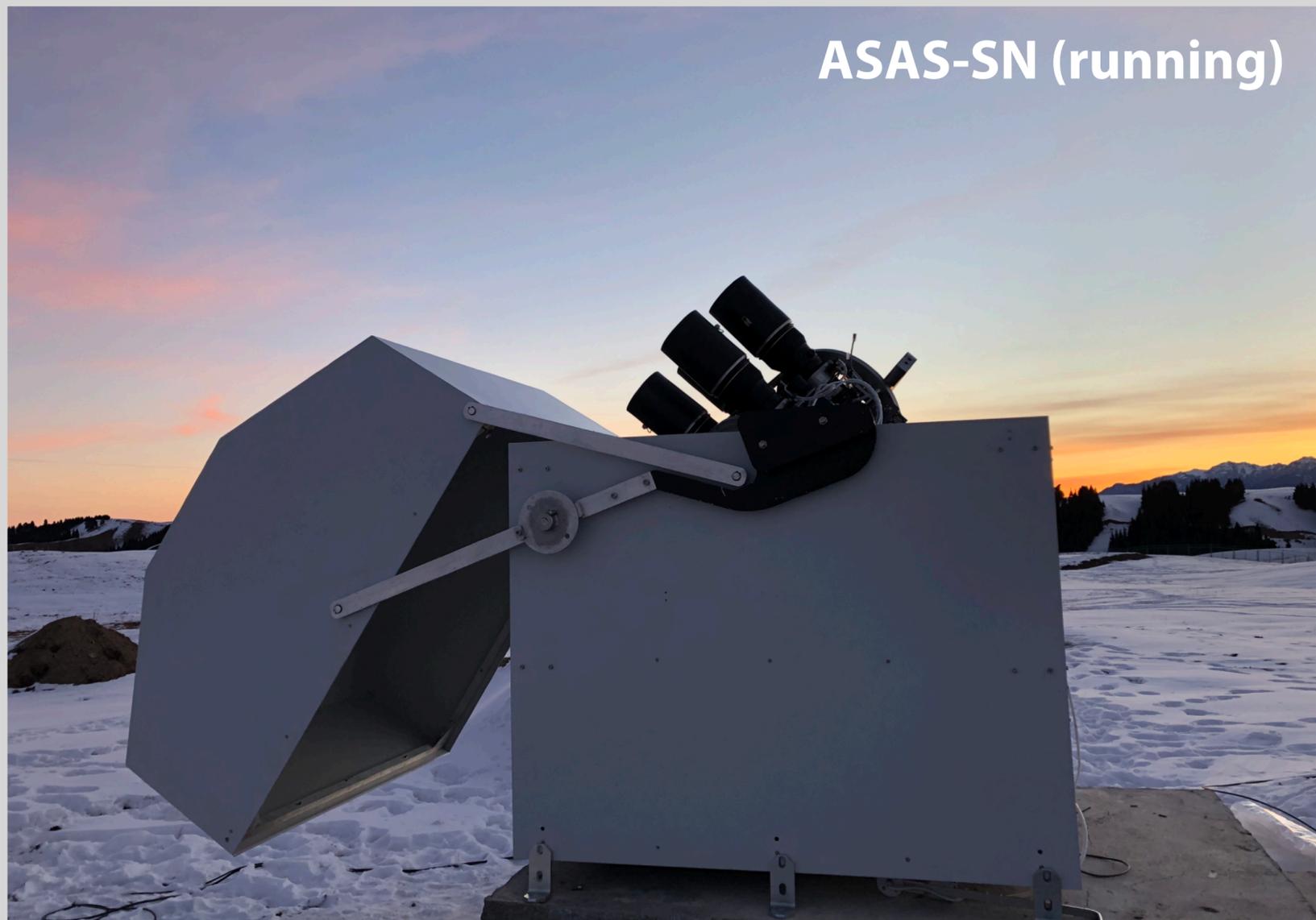


齊藤、本間、森、
柏木、Hu、永塚

原田 (了)

中里、原田 (将)、
中村、酒井

広視野の光学観測は近傍超新星をほぼ確実に捕まえる



ASAS-SN (running)

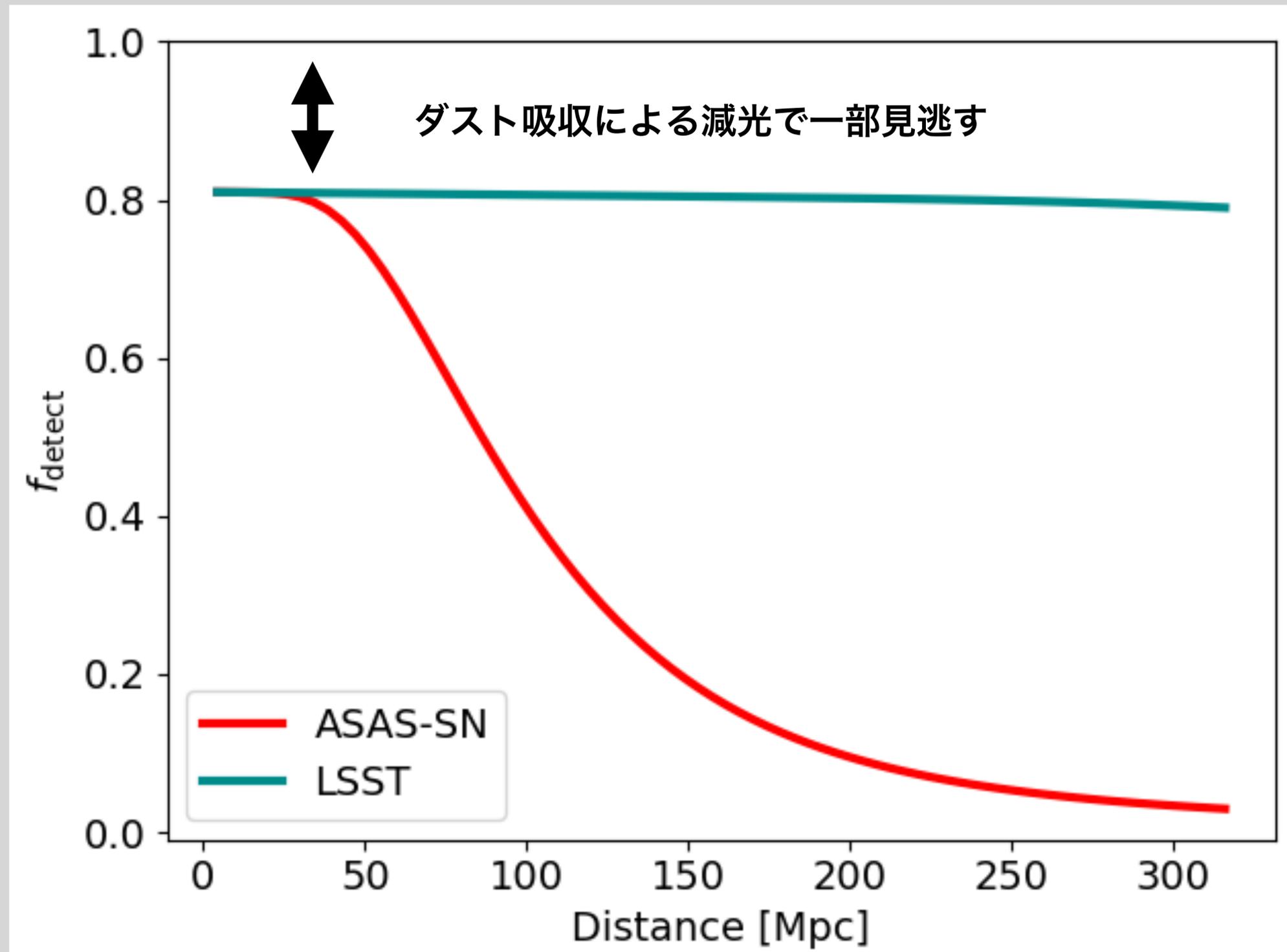
<https://users.obs.carnegiescience.edu/tholoien/research/asas-sn.html>



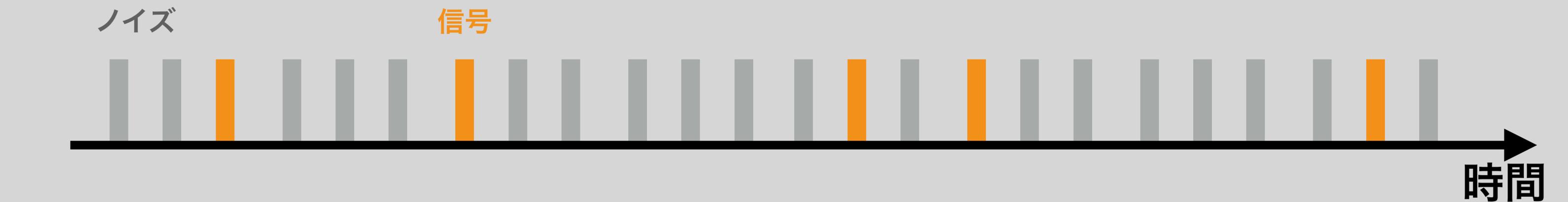
Vera Rubin Observatory / LSST (2024~)

<https://www.lsst.org>

広視野の光学観測は近傍超新星をほぼ確実に捕まえる



超新星が観測された時間だけ背景ニュートリノ探査



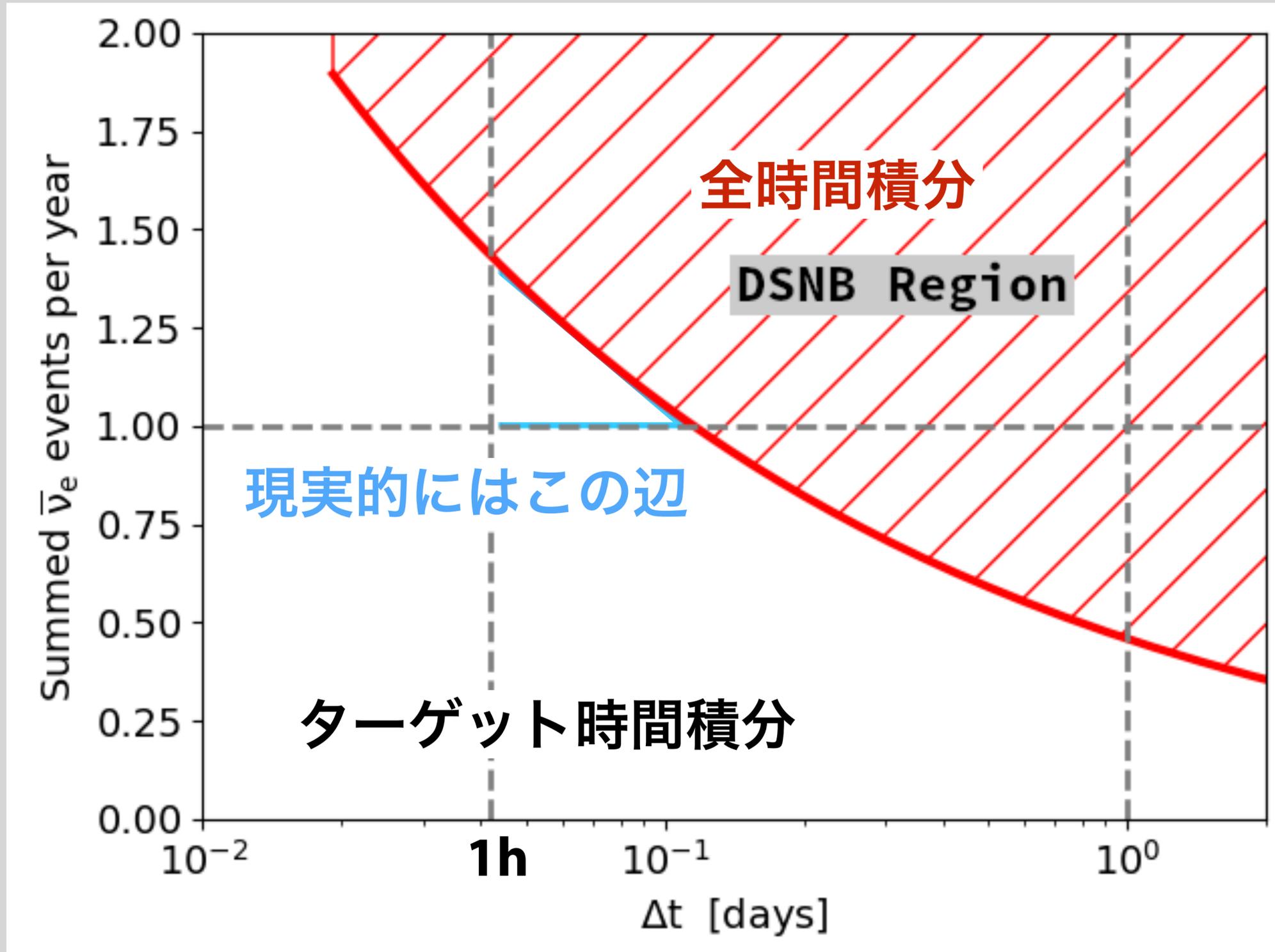
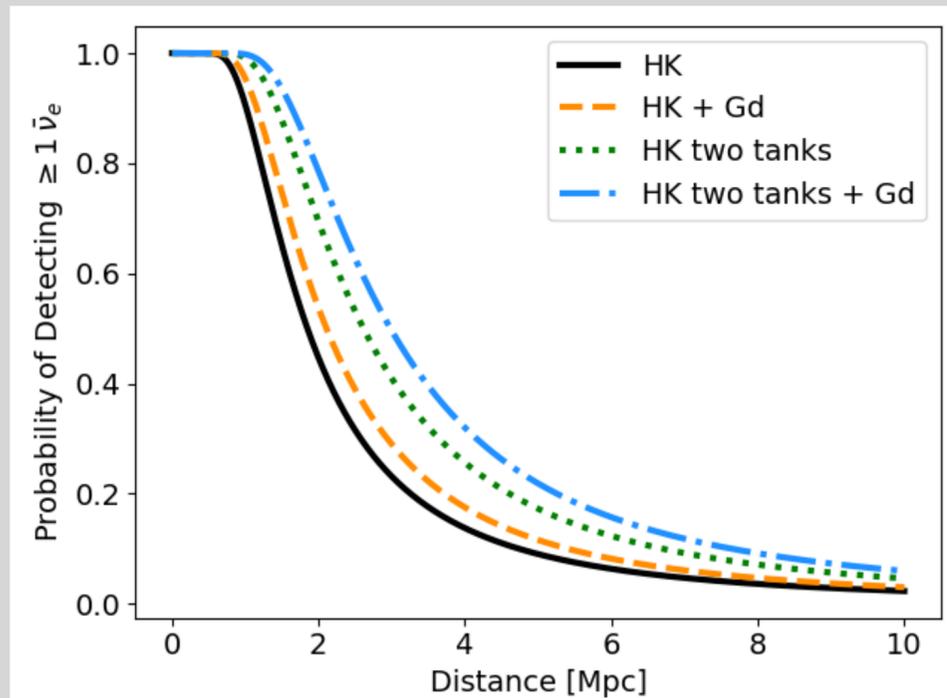
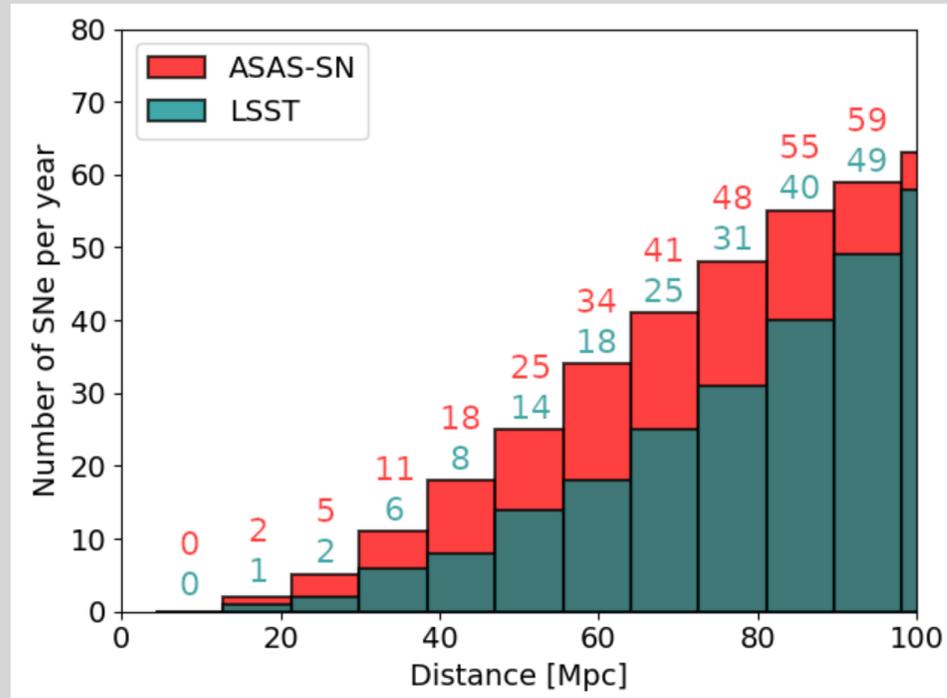
背景ニュートリノ探査は全時間積分



超新星が起こった時間周辺だけ積分したらS/Nは得するか？

Stacking analysis

[Heston, Kehoe, Suwa, Horiuchi, arXiv:2302.04884]



まとめ

- * **超新星ニュートリノから物理に迫るために必要な道具**
 - **厳密解**：手付かず
 - **現象論**：こここのところ進捗あり
 - **数値計算**：方法は成熟したので、次はモデルグリッド整備
 - **nuLCコラボレーション**で道具は揃いつつあるが、まだまだ課題は山積み
- * **mini-burst (~1個/SN) 探査はターゲット時間積分のほうが効率よい**
 - 重力崩壊が起こった時間をどこまで絞り込めるか、が重要
 - Rubin (2024~) + HK (2027~) 時代の超新星ニュートリノデータ解析も面白い