

超新星ニュートリノの 理論予測

中里 健一郎

(東京理科大・理工・物理)

2015年3月24日 物理学会@早稲田大学

超新星からのニュートリノ

超新星ニュートリノ

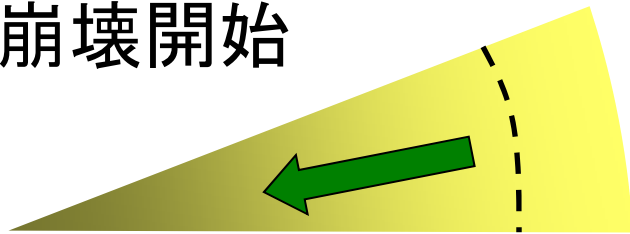
銀河系内、または隣の銀河で起こった超新星からのバースト的ニュートリノ放射

超新星背景ニュートリノ

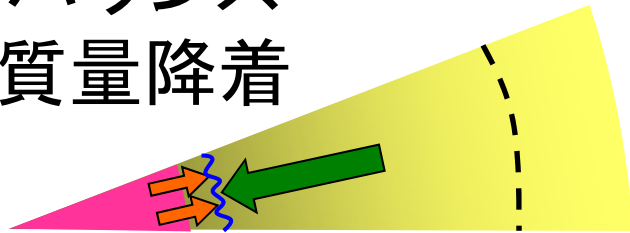
過去の超新星から放出されたニュートリノによるバックグラウンド

重力崩壊型超新星爆発

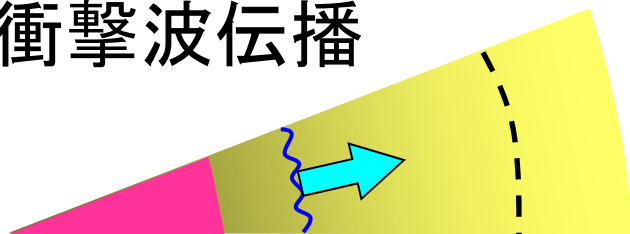
崩壊開始



バウンス
質量降着



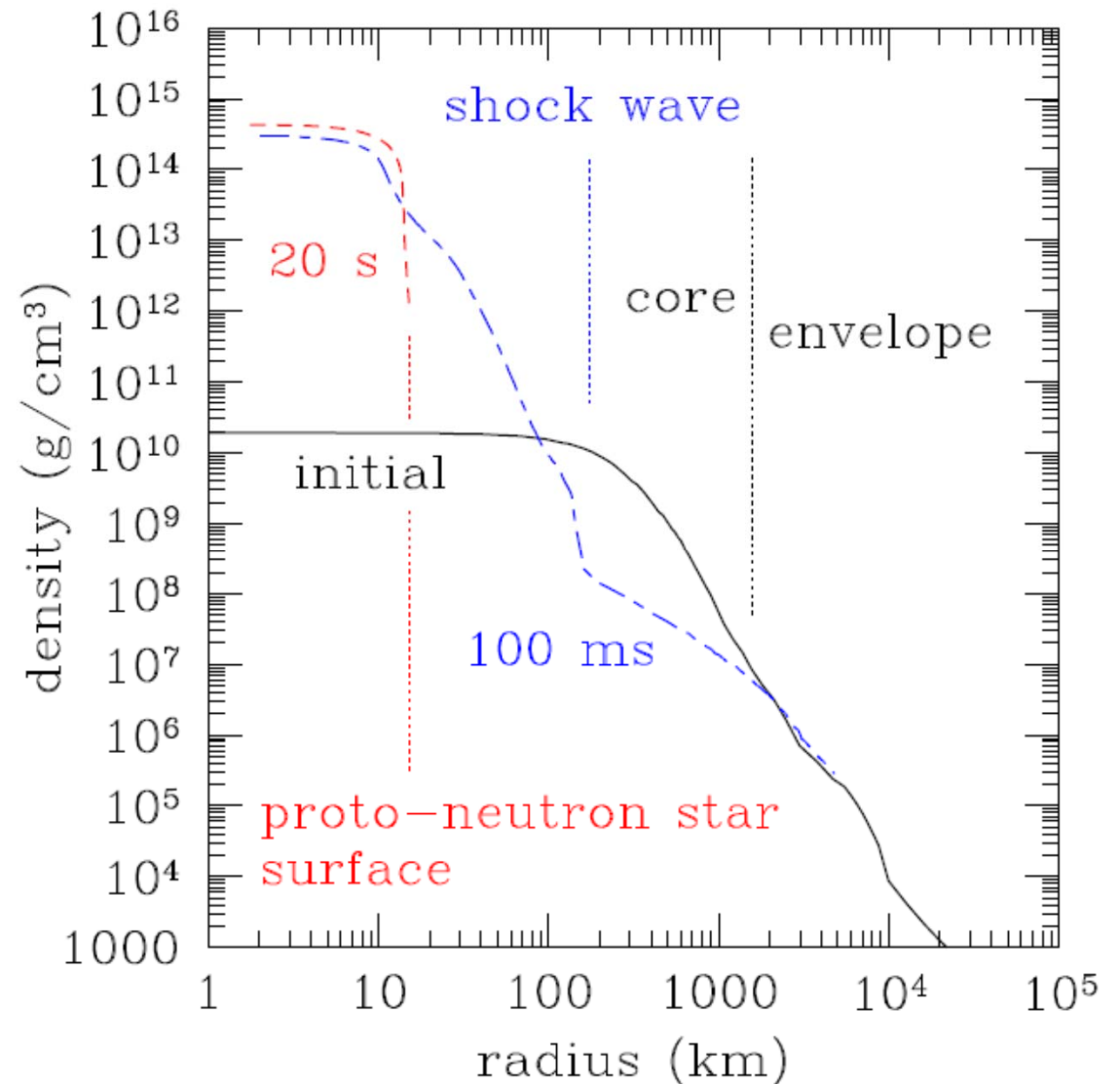
衝撃波伝播



原始中性子星

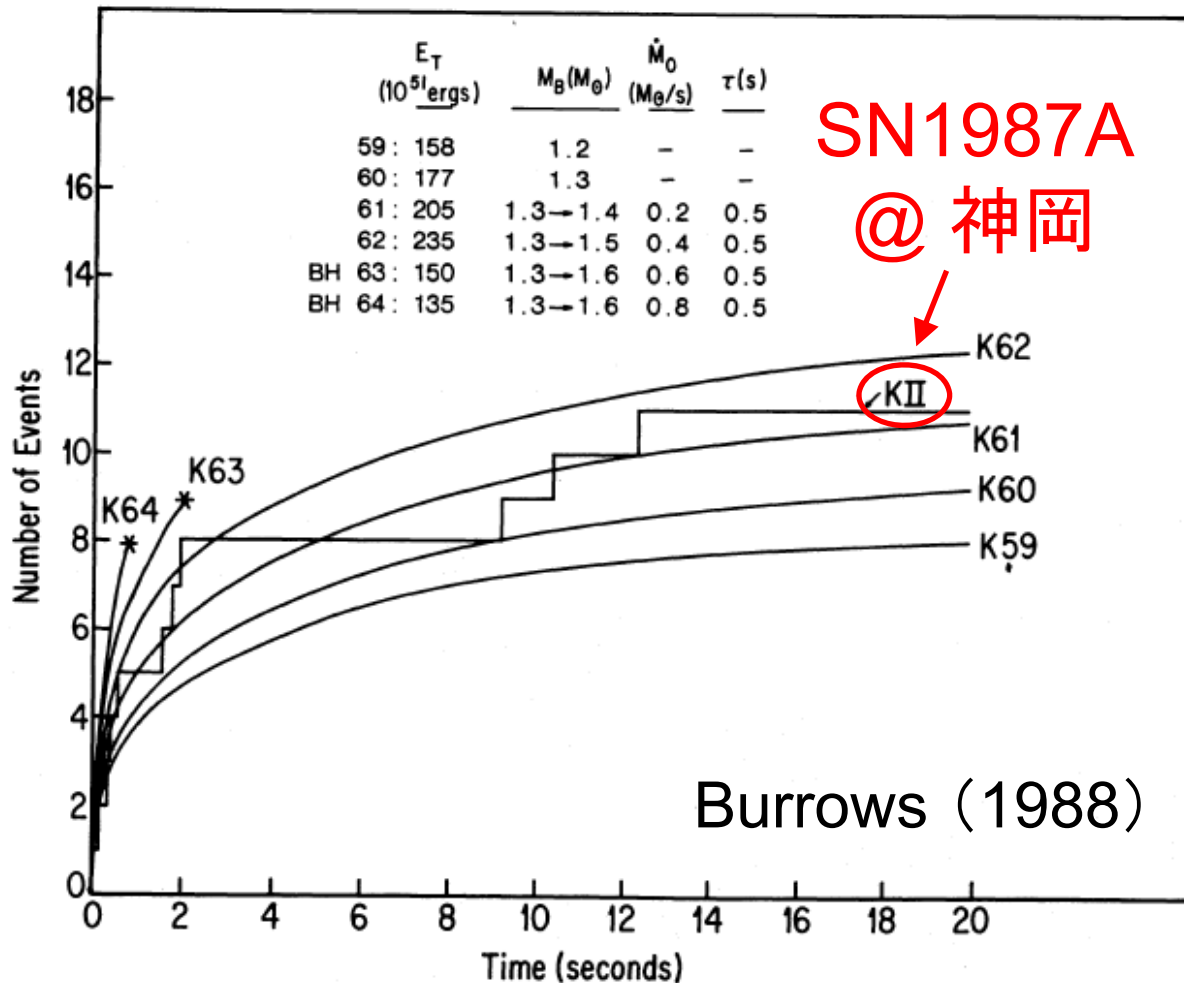


密度の時間変化



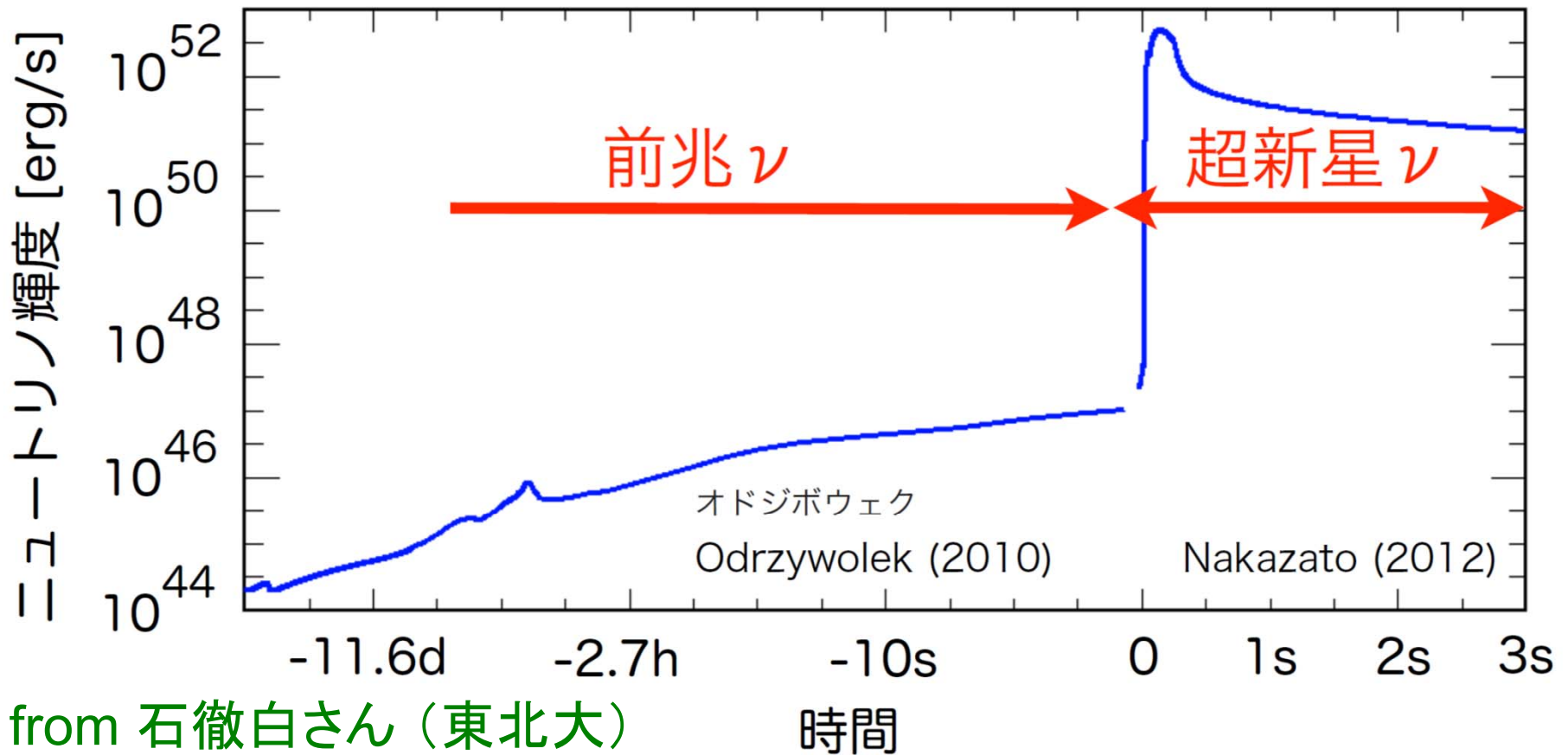
超新星ニュートリノ

- 爆発機構などを探る上で重要な鍵を握る。



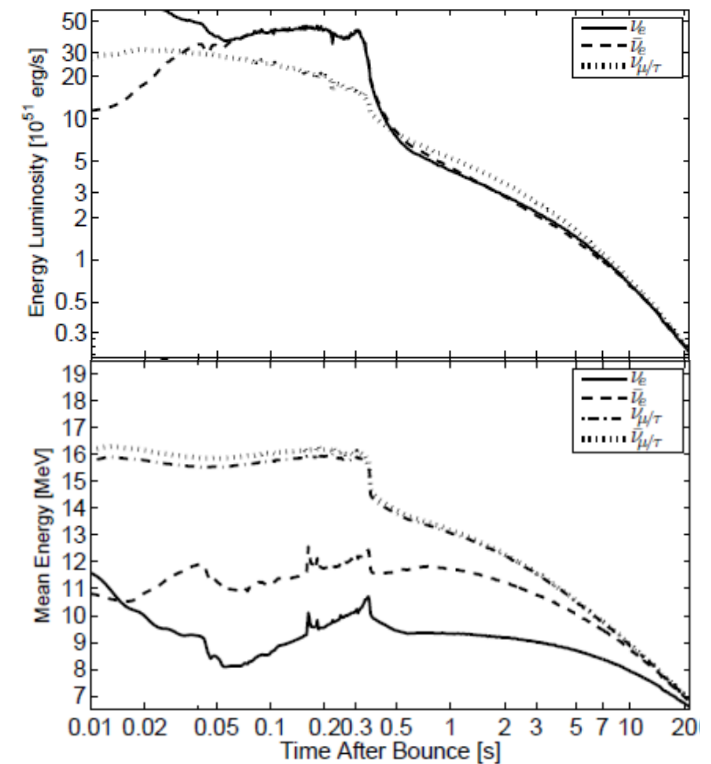
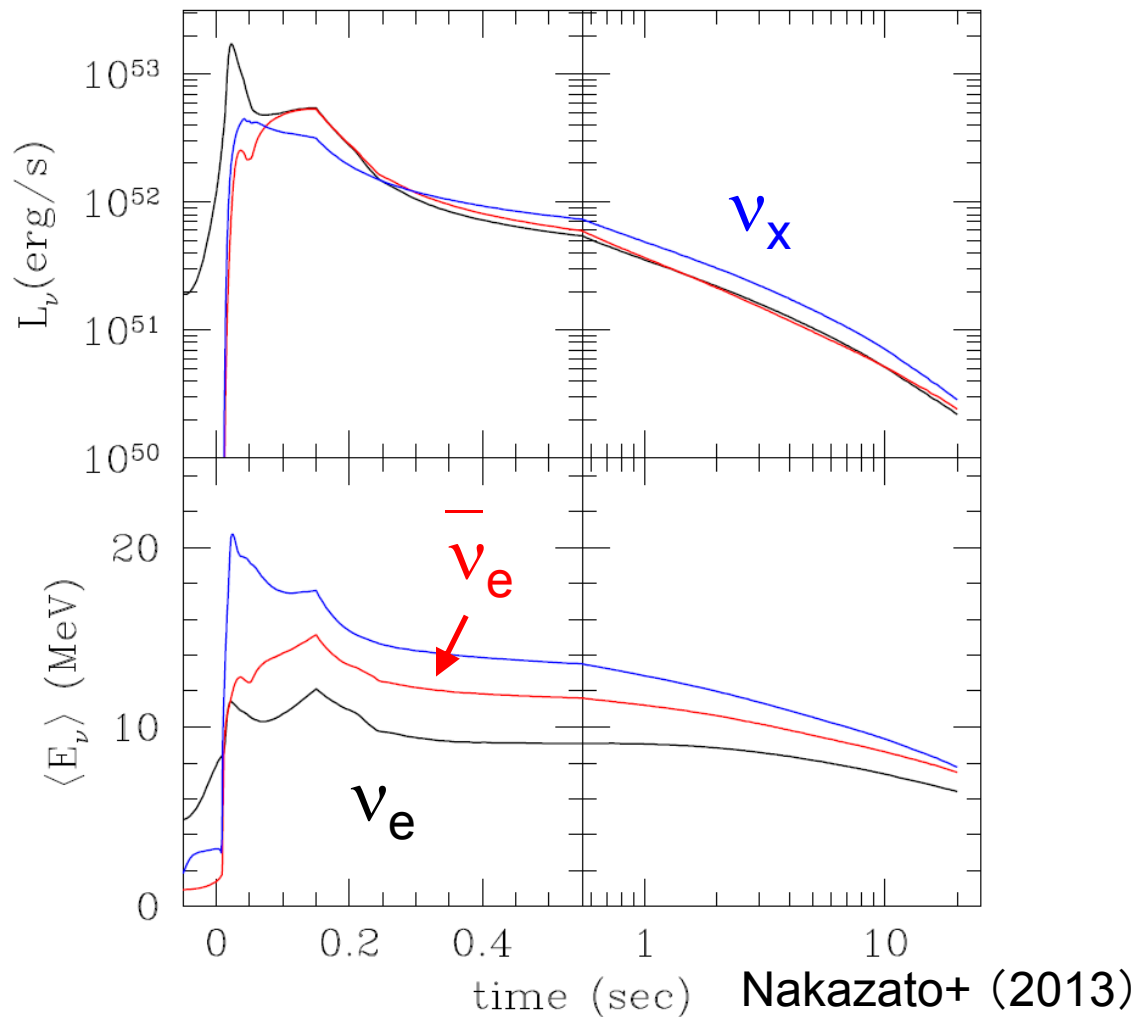
超新星前兆ニュートリノ

- シリコン燃焼フェーズで放出されるニュートリノ
- 極近傍超新星の場合には「予報」の可能性

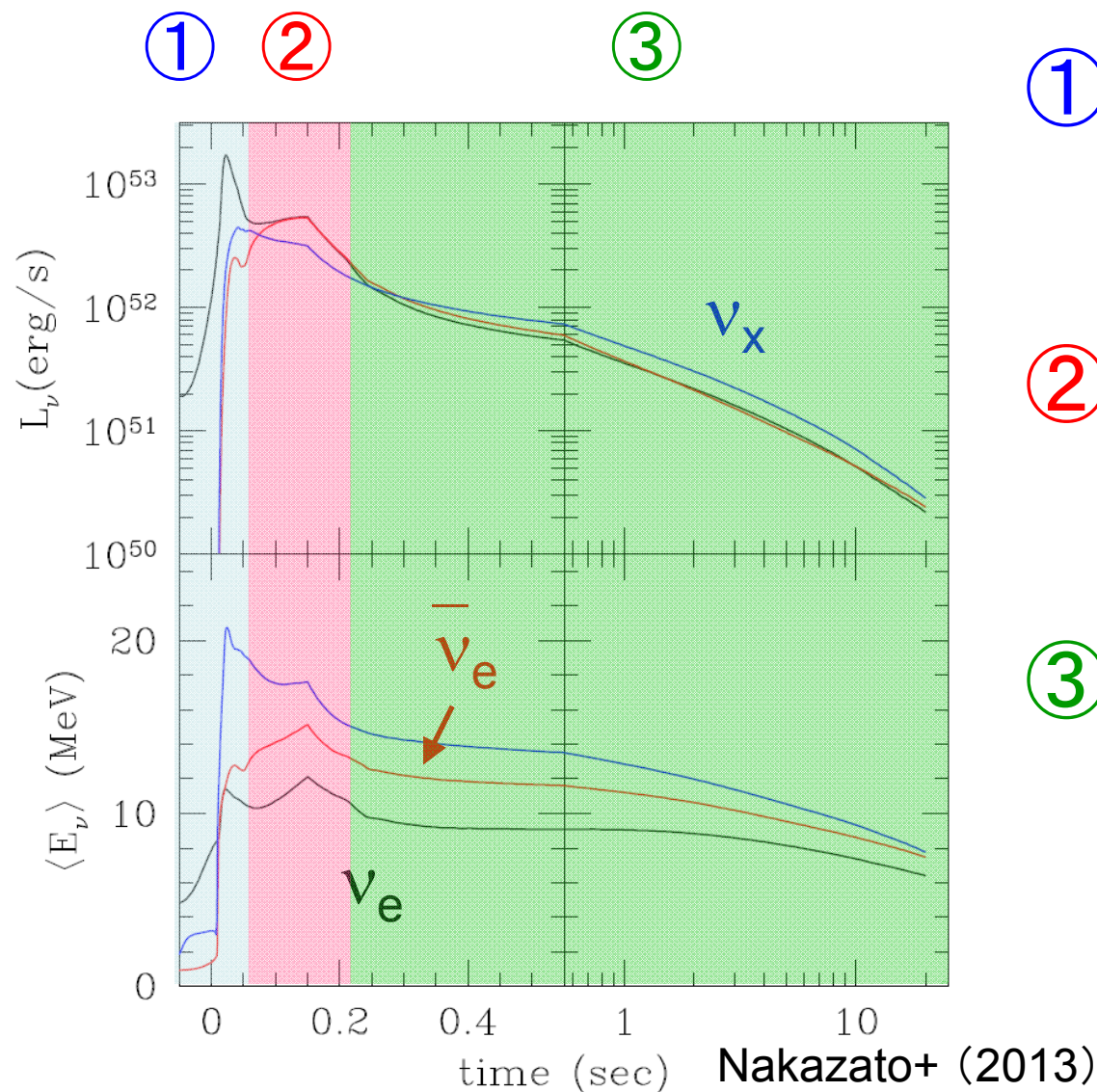


バウンス後の時間変化

- バースト的放出は拡散時間(10秒)程度つづく。



放出ニュートリノの時間的特徴



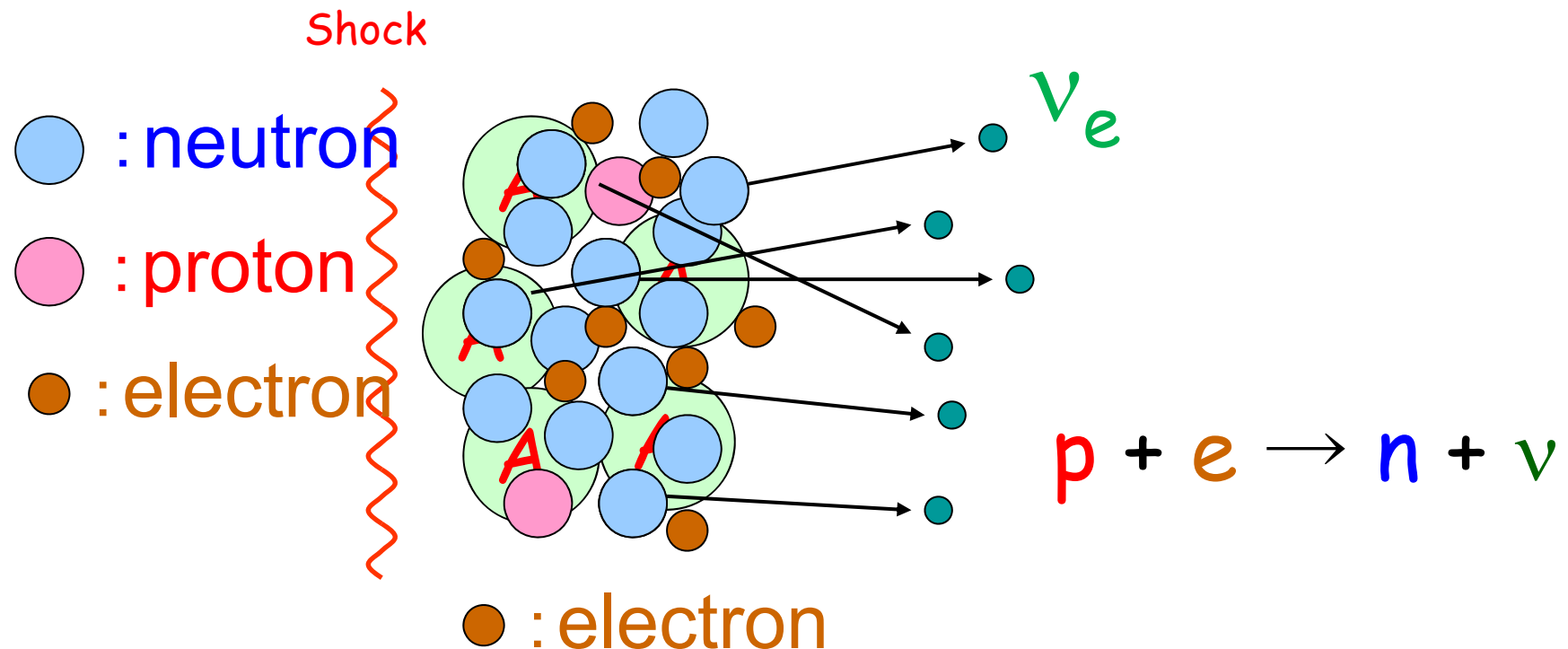
① 中性子化バースト
~ O (10 ms)

② 降着フェーズ
~ O (100 ms)

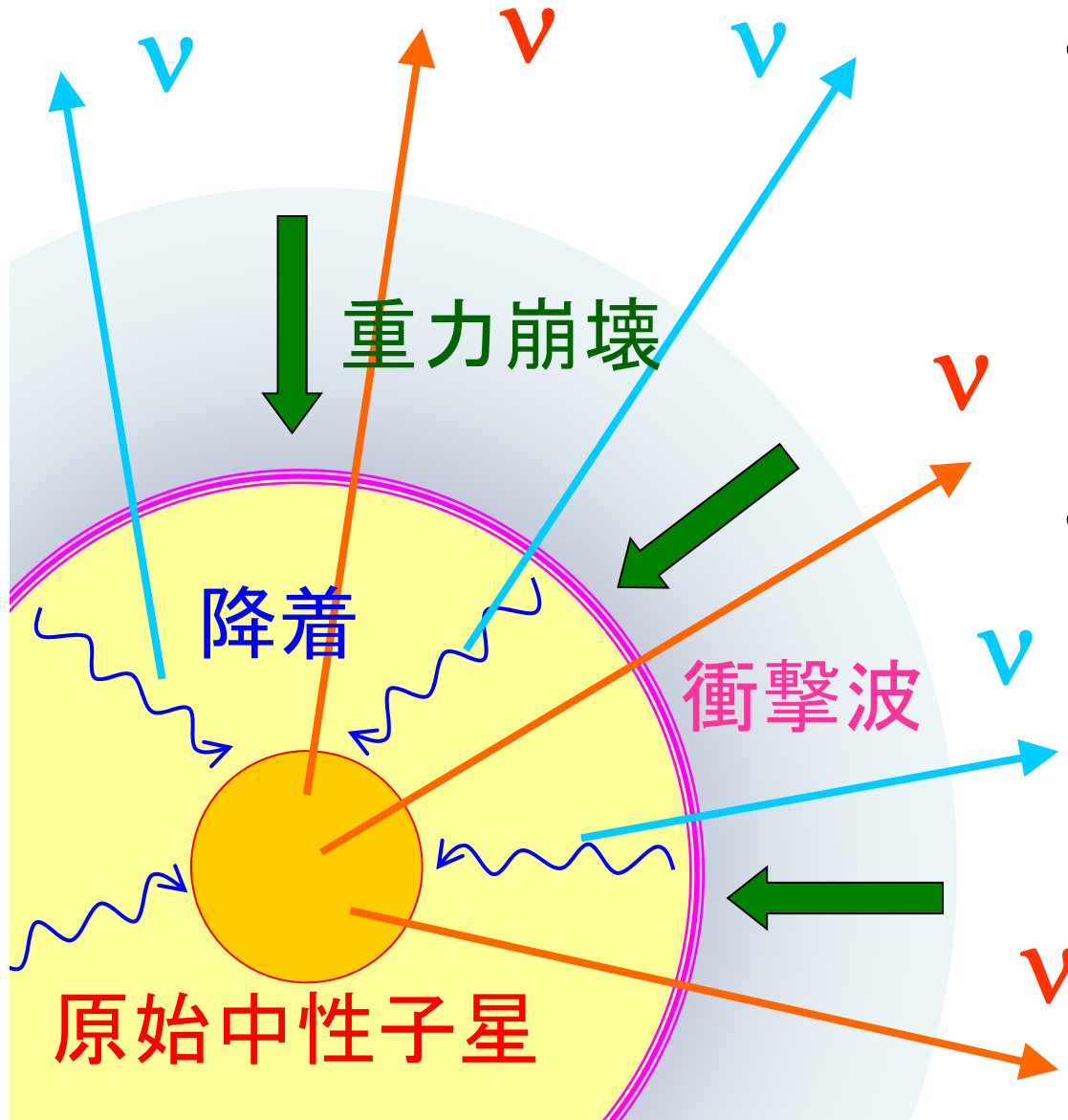
③ 冷却フェーズ
~ O (10 sec)

中性子化バースト

- 衝撃波が原子核を破壊する。
- 陽子による電子捕獲により ν_e が放出される。
→ deleptonization

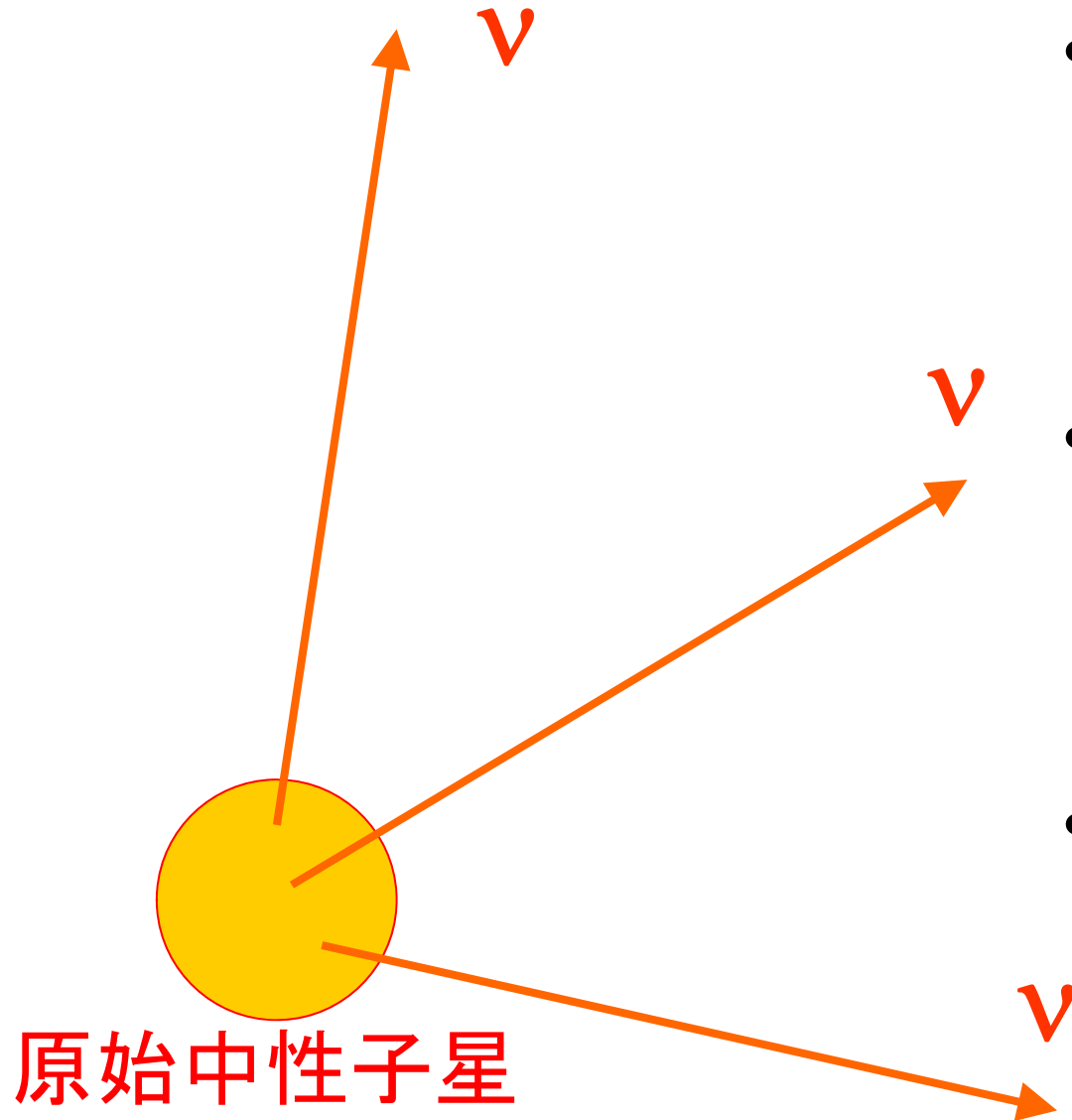


降着フェーズ



- 降着物質が解放する重力エネルギーにより、原始中性子星が加熱される。
- 熱的なプロセスにより、すべてのフレア層のニュートリノが放射される。

冷却フェーズ



- 衝撃波が復活して外側に伝播すると、物質降着がやむ。
- それにより、原始中性子星の加熱も止まる。
- ニュートリノ放出量や平均エネルギーが下がる。

崩壊から原始中性子星まで

Nakazato et al., ApJS **205** (2013) 2

- ニュートリノは、重力崩壊開始から10秒以上にわたり、放出され続ける。
- 最初の1秒程度までについては研究多数。
- 総放出量の評価には後期フェーズも効く。



- 2つのフェーズをわけて数値計算することにより、超新星ニュートリノの包括的な理論モデルを構築しよう。

→ 超新星背景ニュートリノの計算に応用

ニュートリノ輻射流体計算

球対称一般相対論的完全流体

(Yamada 1997)

Metric: Misner & Sharp (1964)

Radial mesh: 255 non-uniform zones

前半部分

(降着期)

ニュートリノ計算 (Peltzman solver)

(Yamada et al. 1999, Shimoyoshi et al. 2005)

ニュートリノ: $v_e = \bar{v}_e = v_\mu (= v_\tau) = \bar{v}_\mu (= \bar{v}_\tau)$

Energy mesh : 20 zones (0 – 300 MeV)

反応リスト: 電子捕獲・陽電子捕獲・核子散乱・電子散乱・
原子核捕獲・原子核散乱・電子陽電子対生成・
プラズモン生成・核制動放射

原始中性子星冷却計算

原始中性子星構造の準静的進化

||

Multigroup Flux Limited Diffusion scheme

後半部分

(冷却期)

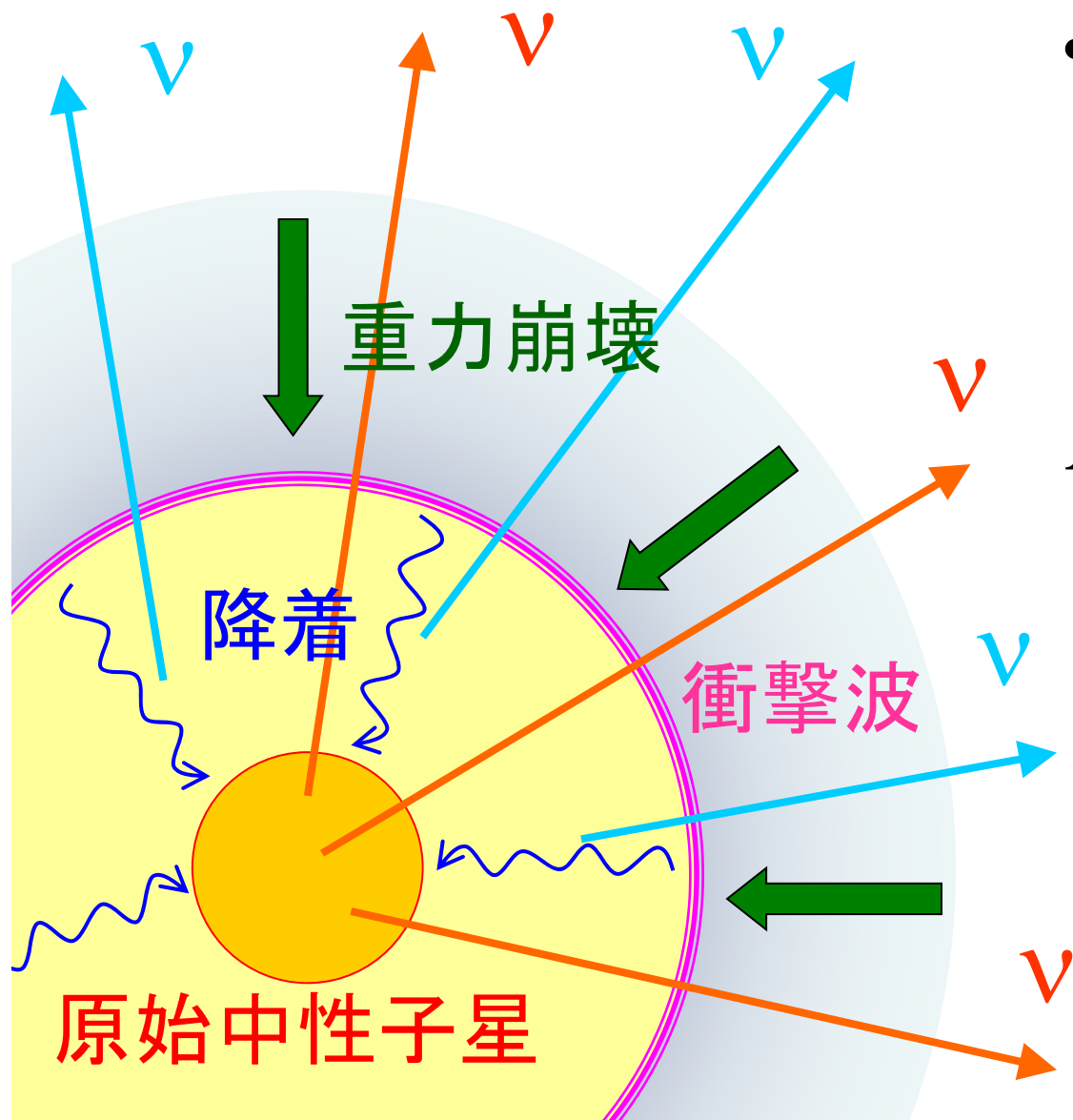
ニュートリノ: $\bar{\nu}_e, \nu_e, \bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$ ($\bar{\nu}_\tau = \bar{\nu}_\mu = \bar{\nu}_\tau$)
Energy mesh: 20 zones (輻射流体計算と同じ)

反応リスト: 電子捕獲・陽電子捕獲・核子散乱・電子散乱・

原子核捕獲・原子核散乱・電子陽電子対生成・

プラズモン生成・核制動放射

放出ニュートリノのエネルギー源



- 降着物質の重力エネルギー + 原始中性子星冷却

$$L_{\nu}(\varepsilon, t) = L_{\nu}^{\text{acc.}}(\varepsilon, t) + L_{\nu}^{\text{cool}}(\varepsilon, t)$$

ニュートリノ放出量の上限と下限

$$L_{\nu}^{\max}(\varepsilon, t) = L_{\nu}^{\text{acc.}, \max}(\varepsilon, t) + L_{\nu}^{\text{cool}}(\varepsilon, t)$$

From 1D ν radiation hydro simulation. V From proto-neutron star cooling simulation.

$$L_{\nu}^{\text{acc.}}(\varepsilon, t)$$

- 1次元の流体計算では降着によるエネルギー放出量の**上限**が押さえられる。
- 原始中性子星冷却に伴って放出されるニュートリノのエネルギーは進化計算によって見積もられる。
→ **下限**が抑えられる。

ニュートリノ光度曲線のモデル

- 衝撃波復活の時間と、降着起源のニュートリノ放出量の減衰率 $f(t)$ を仮定する。

例えば、

衝撃波復活の時間 (t_{revive}): バウンス後 100 ms

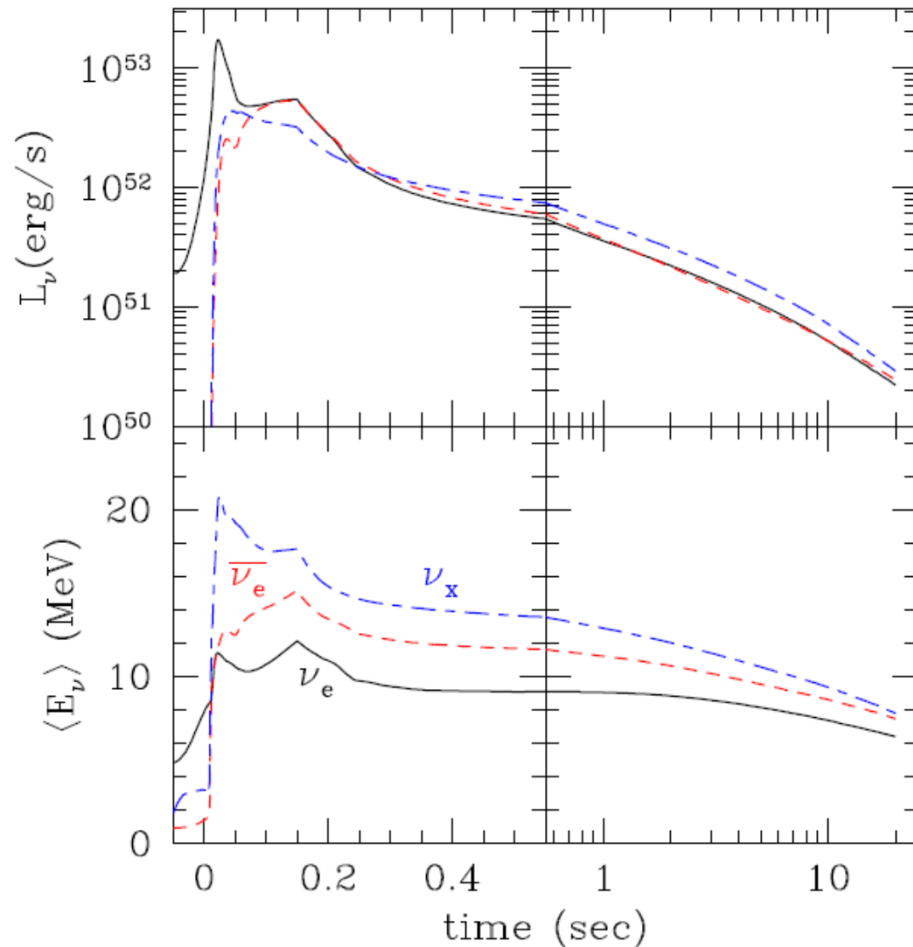
$$L_{\nu}(\varepsilon, t) = L_{\nu}^{\text{acc.,max}}(\varepsilon, t) f(t) + L_{\nu}^{\text{cool}}(\varepsilon, t)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (t < 150 \text{ ms}) \\ \exp\left(-\frac{t - 150 \text{ ms}}{30 \text{ ms}}\right) & (150 \text{ ms} < t < 350 \text{ ms}) \\ 0 & (t > 350 \text{ ms}) \end{cases}$$

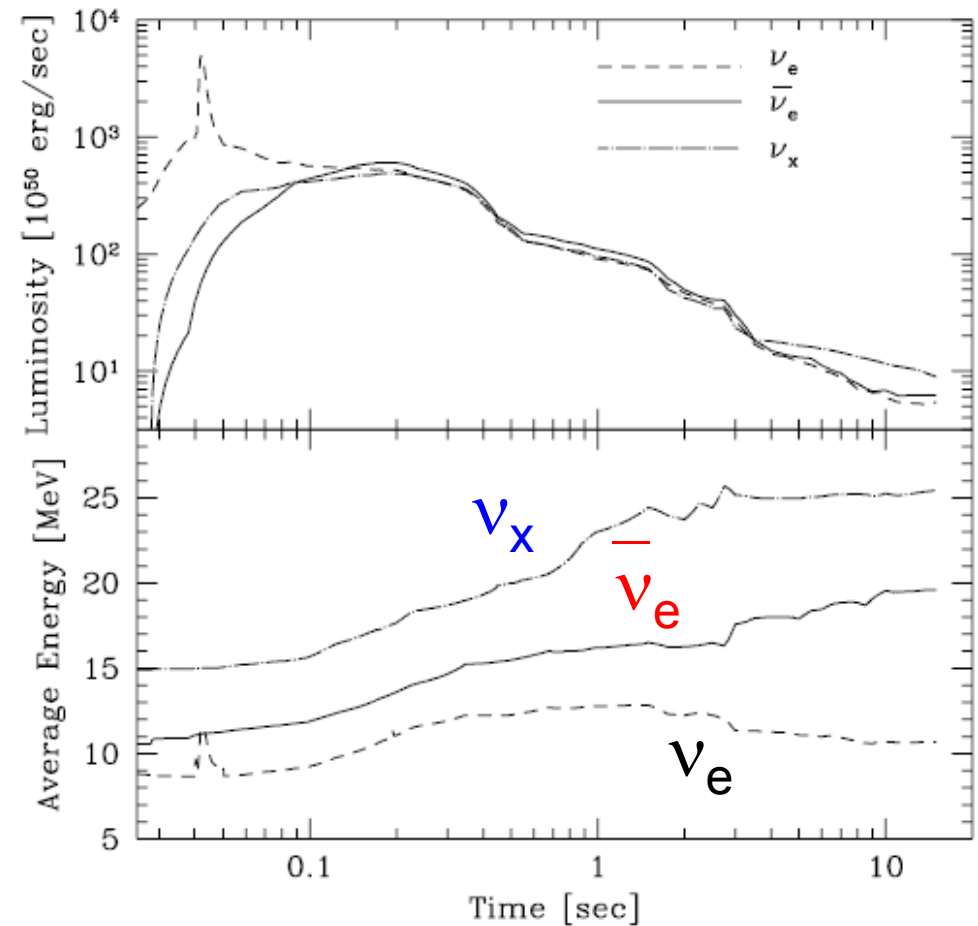
ニュートリノ光度と平均エネルギー

$13M_{\odot}$, $Z = 0.02$, $t_{\text{revive}} = 100$ ms

This work



Wilson model

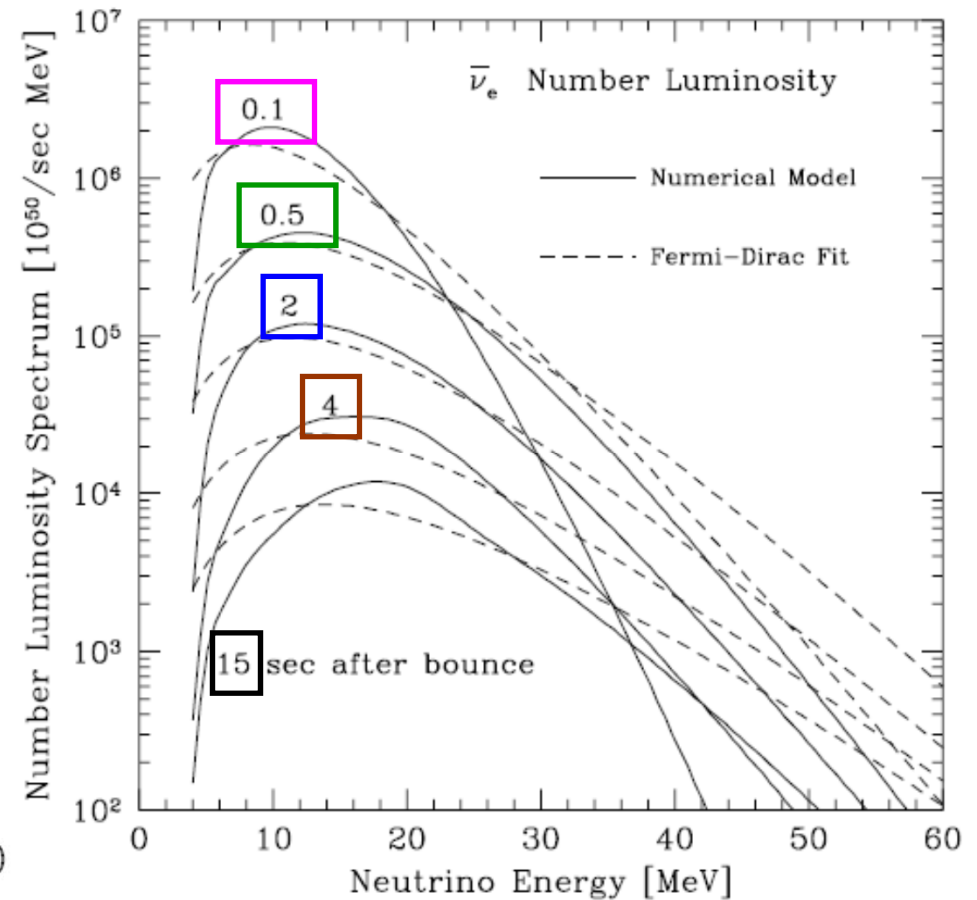
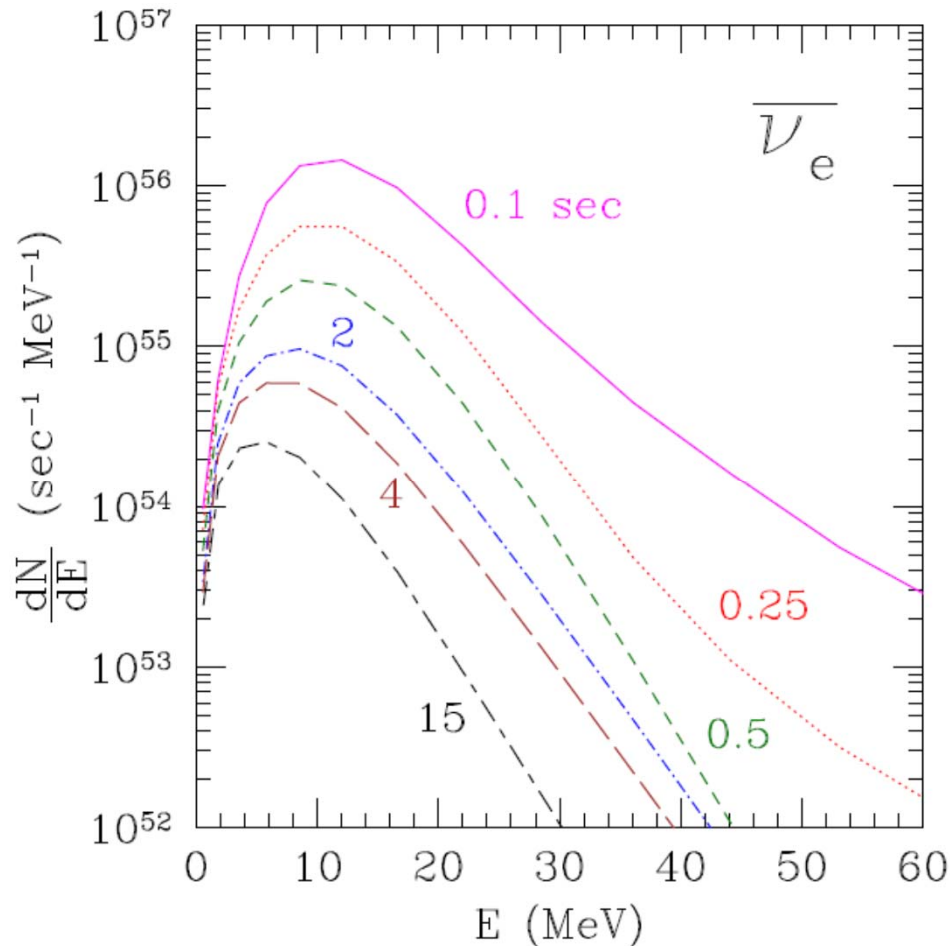


ニュートリノスペクトル

- 反電子型ニュートリノの number luminosity

This work

Wilson model

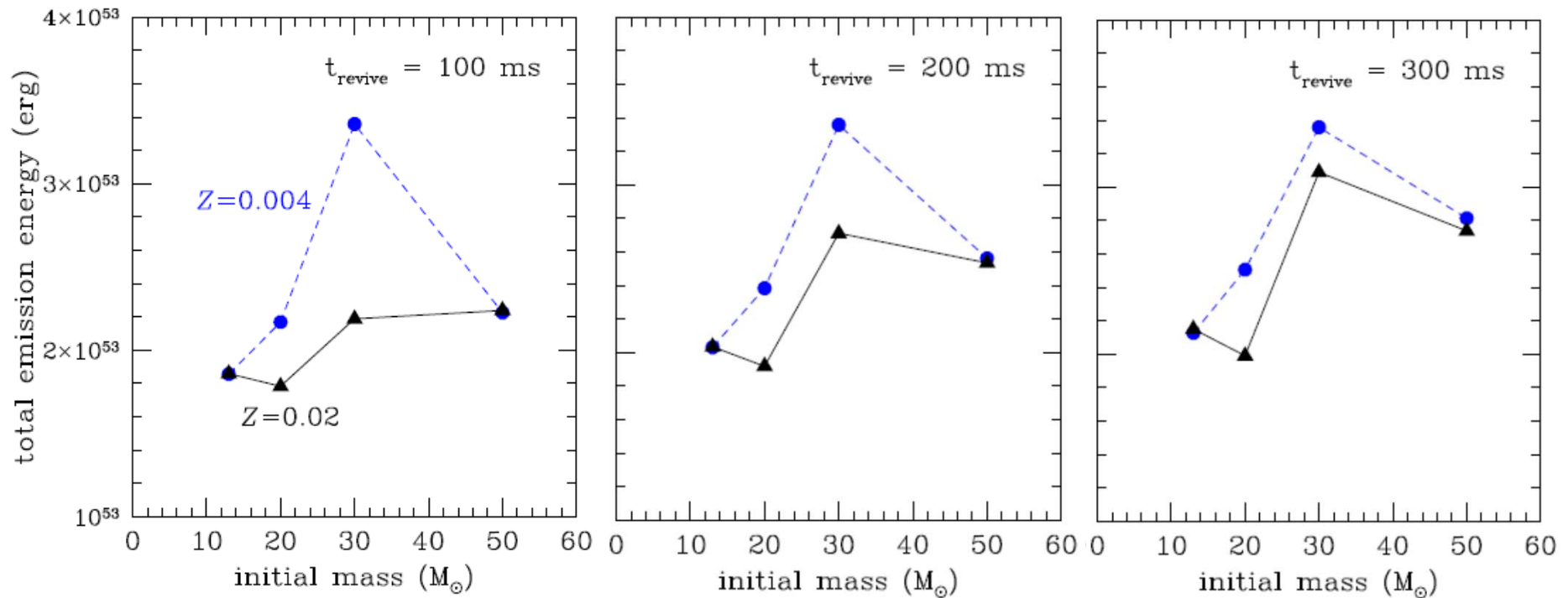


ニュートリノの総放出エネルギー

早い

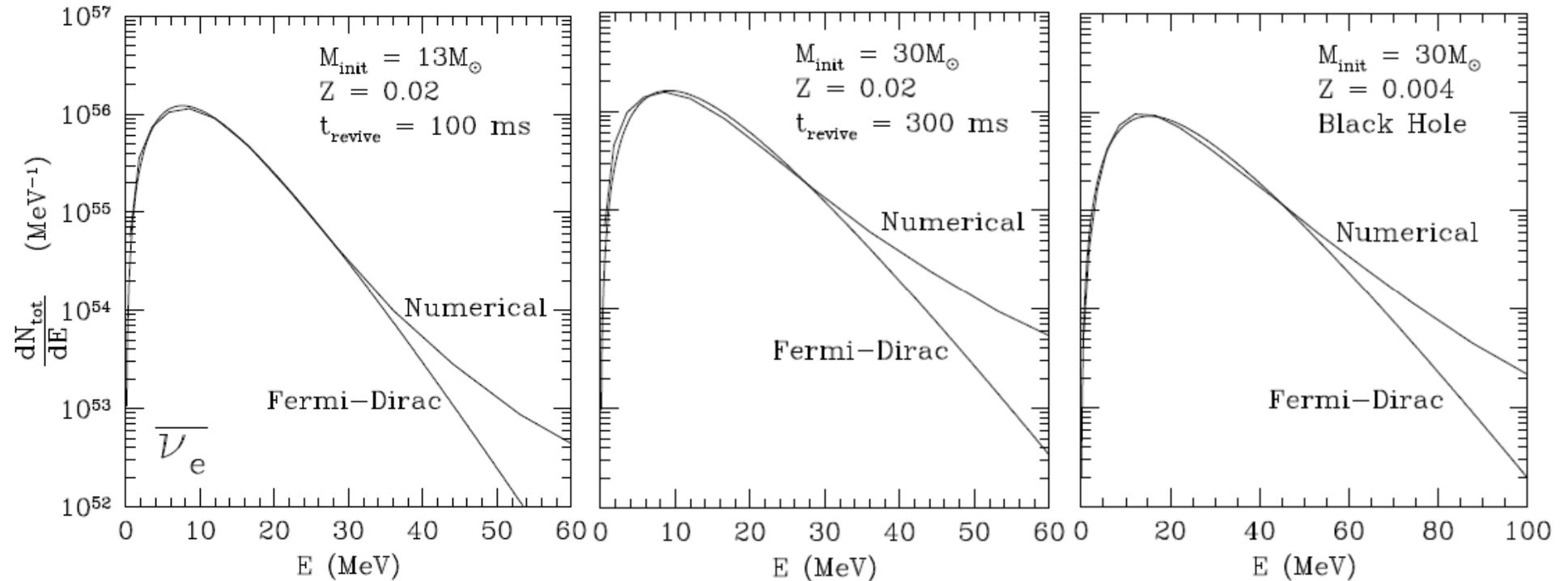
爆発のタイミング

遅い



- 爆発(衝撃波の復活)が遅いほど、親星の依存性が顕著になる。

時間積分したスペクトル



- 30 MeV 以下では Fermi-Dirac 分布でわりあい良く合う。
- 高エネルギーでは、降着起源の tail がみられる。

超新星ニュートリノデータベース

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

Firefox | Supernova Neutrino Database | asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/ | Google

Web site of Supernova Neutrino Database

Abstract

This web site provides a series of numerical simulations of supernova neutrino emission from core collapse to neutron star cooling (~ 20 sec) for various progenitor stellar models ($13\text{--}50M_{\text{solar}}$ with two different metallicities). These numerical data would be useful for various studies about supernova neutrinos, such as simulating future detections of supernova neutrino burst events by underground detectors, or predictions of relic supernova neutrino background flux. For the details of the calculation, caveats or limitation, etc., see Nakazato et al. (2012), [arXiv:1210.6841 \[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/1210.6841). This data set is open for general use in any research for astronomy, astrophysics, and physics, provided that our paper is referenced in your publication.

User's Guide (read me first)

- [guide.pdf](#) (128kB)

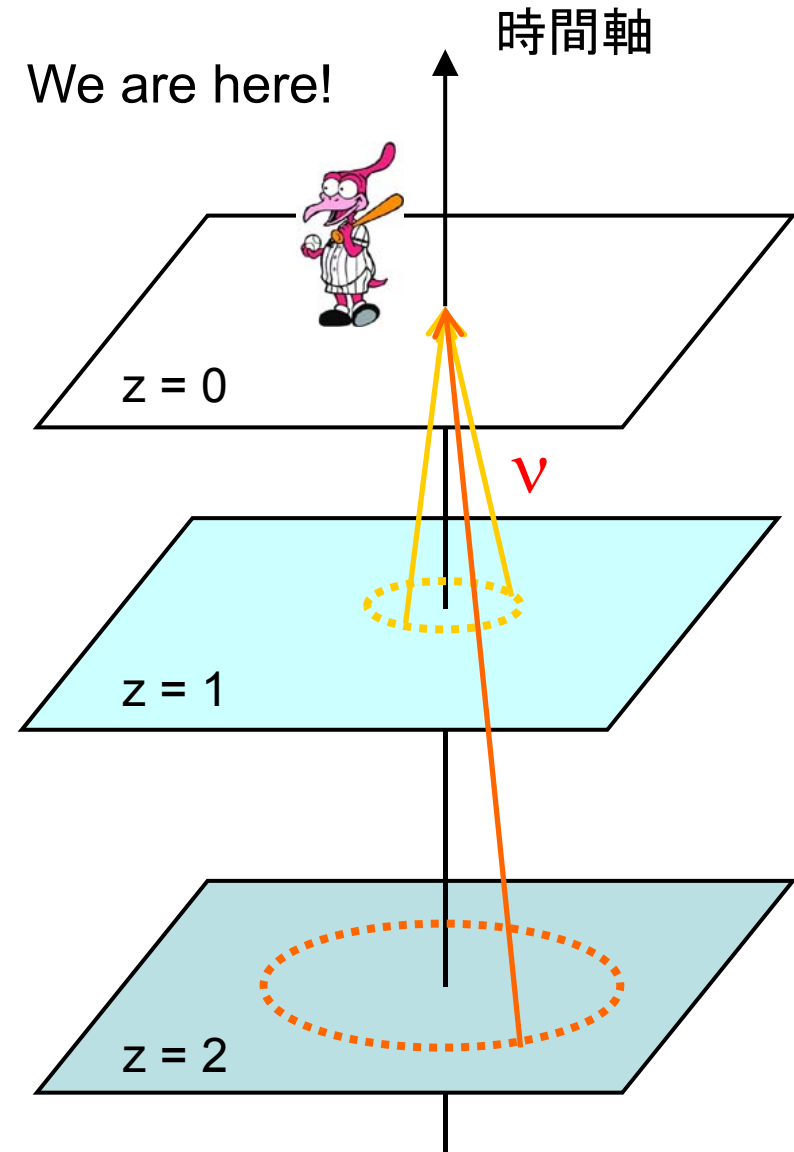
Full Data from Core Collapse to Neutron Star Cooling Phase

- [download all](#) (5.27MB) except for BH model ($30M_{\text{solar}}$ & $Z = 0.004$)

M_{init}	Z	Supernova models			BH model
		$t_{\text{revive}} = 100\text{ms}$	$t_{\text{revive}} = 200\text{ms}$	$t_{\text{revive}} = 300\text{ms}$	
$13M_{\text{solar}}$	0.02	258kB	257kB	256kB	---
$20M_{\text{solar}}$		258kB	257kB	257kB	
$30M_{\text{solar}}$		257kB	257kB	255kB	

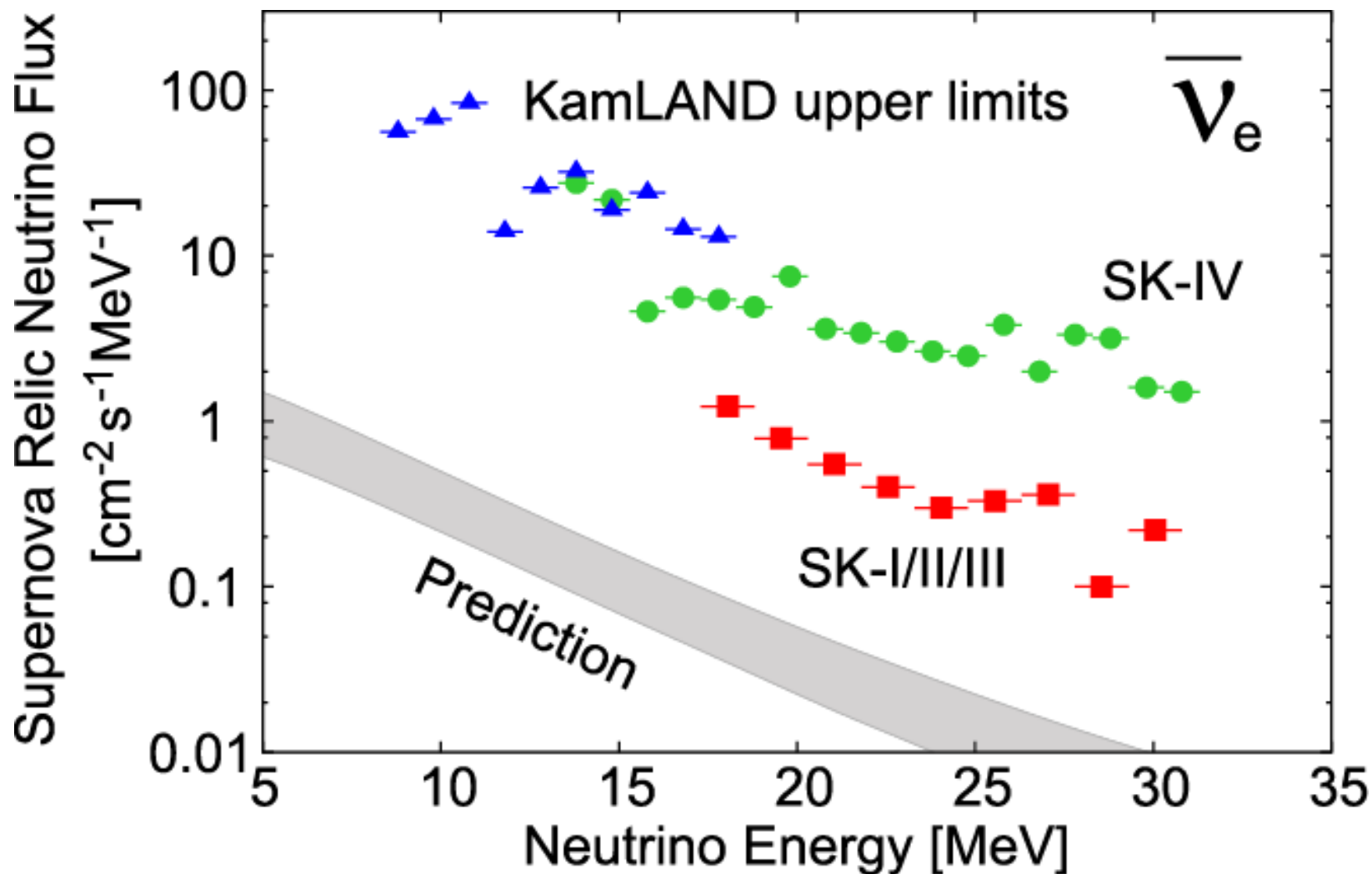
超新星背景ニュートリノ

- 宇宙背景放射のニュートリノ版。
- 過去の超新星から放出されたニュートリノが重ね合わさり、バックグラウンドとして宇宙を満たしている。
- 超新星そのものだけでなく、宇宙の星形成史などを探る上でも重要。



観測の現状

- 上限値が予測値に迫りつつある。



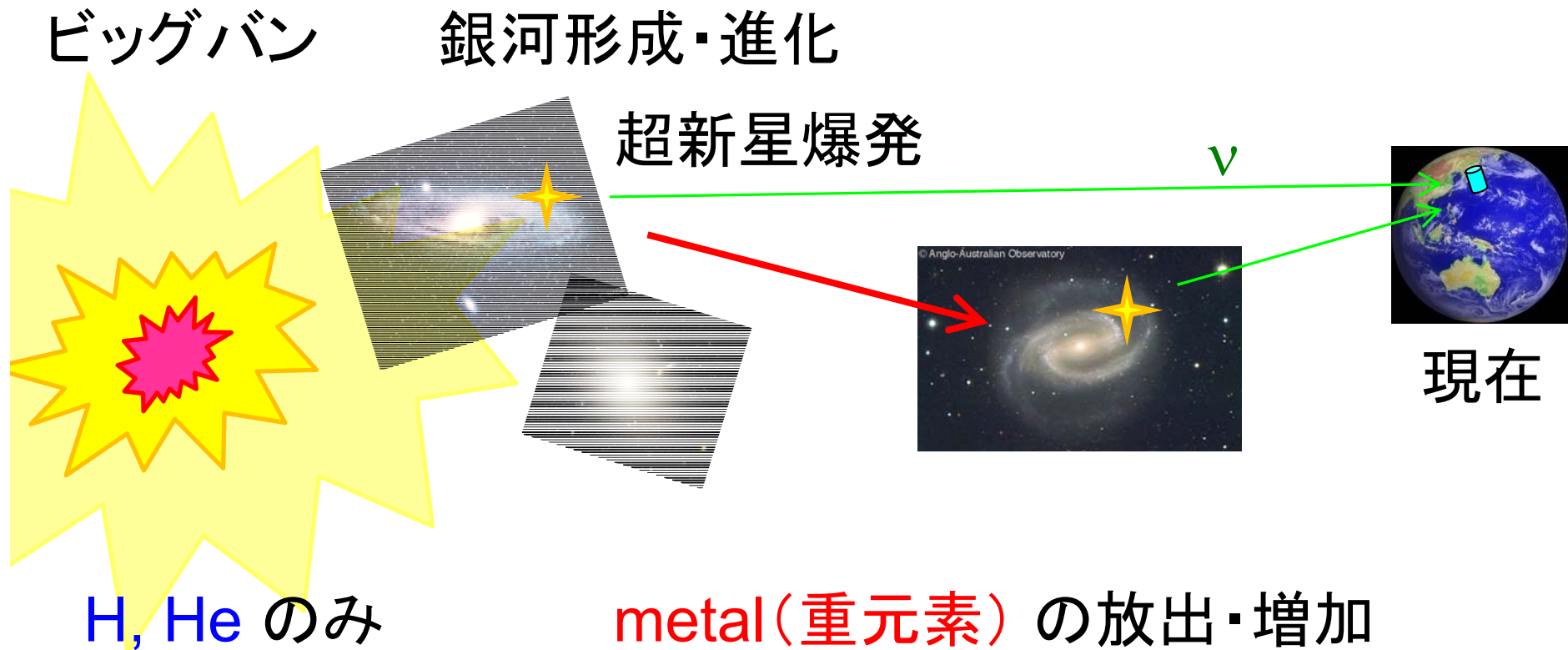
超新星背景ニュートリノ

背景光の明るさは何に依存するか？

- 1つの光源の明るさ → 爆発メカニズム
 - 光源の数
 - 光源までの距離
- } 星形成史
- 宇宙論では、宇宙膨張による赤方偏移も考慮
 - ニュートリノでは、ニュートリノ振動パラメータ



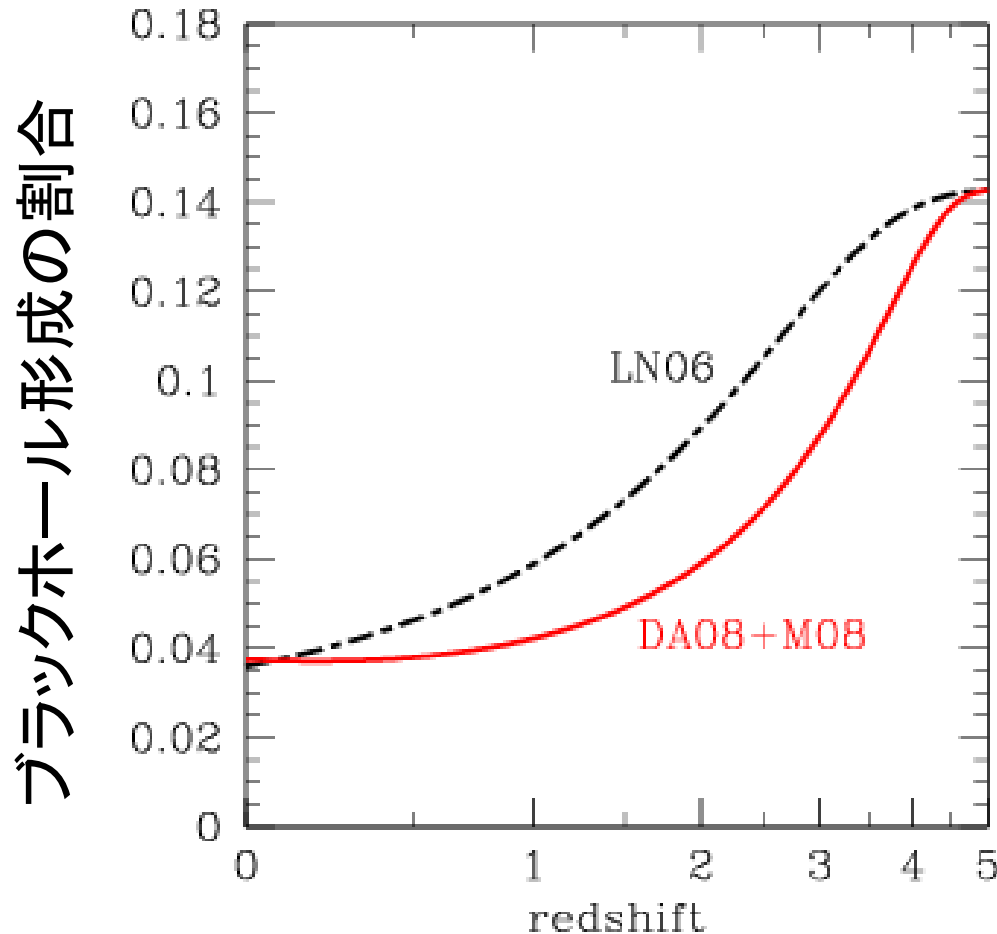
宇宙と銀河の化学進化



- 昔の銀河・星ほど metallicity (重元素量) Z が低い
 - 恒星進化における質量放出が少ない
 - 崩壊時の質量が大きく、black hole になる星も

重力崩壊前の星の金属量依存性

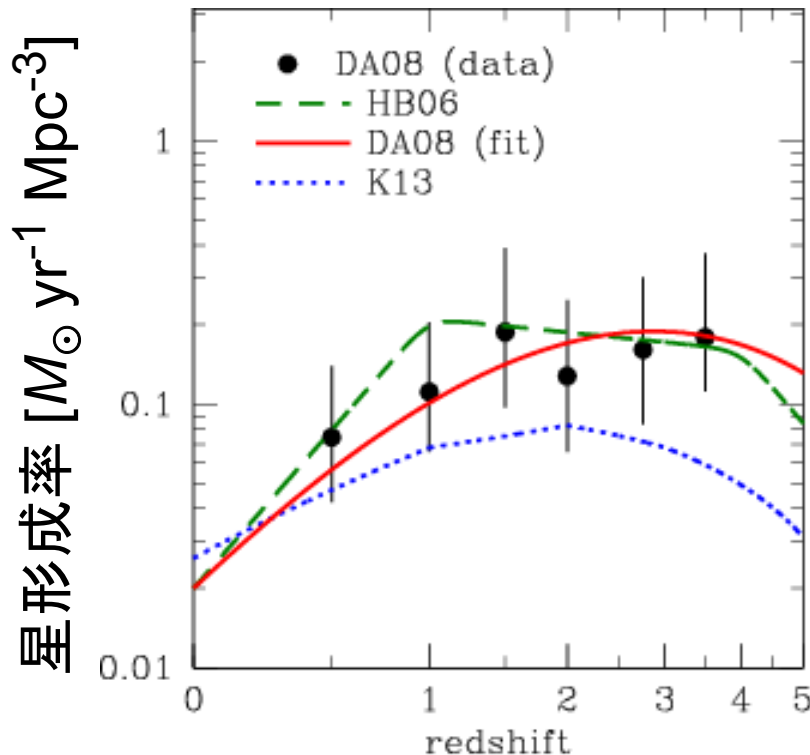
Nakazato+ arXiv:1503.01236



M	Z	
	0.02	0.004
$13M_{\odot}$	SN	SN
$20M_{\odot}$	SN	SN
$30M_{\odot}$	SN	BH
$50M_{\odot}$	SN	SN

- 高赤方偏移ほど black hole になる割合が多い。
- black hole 形成の方が多くのニュートリノが放出

星形成史とその不定性



銀河の観測

Hopkins & Beacom (2006)

Drory & Alvarez (2008)

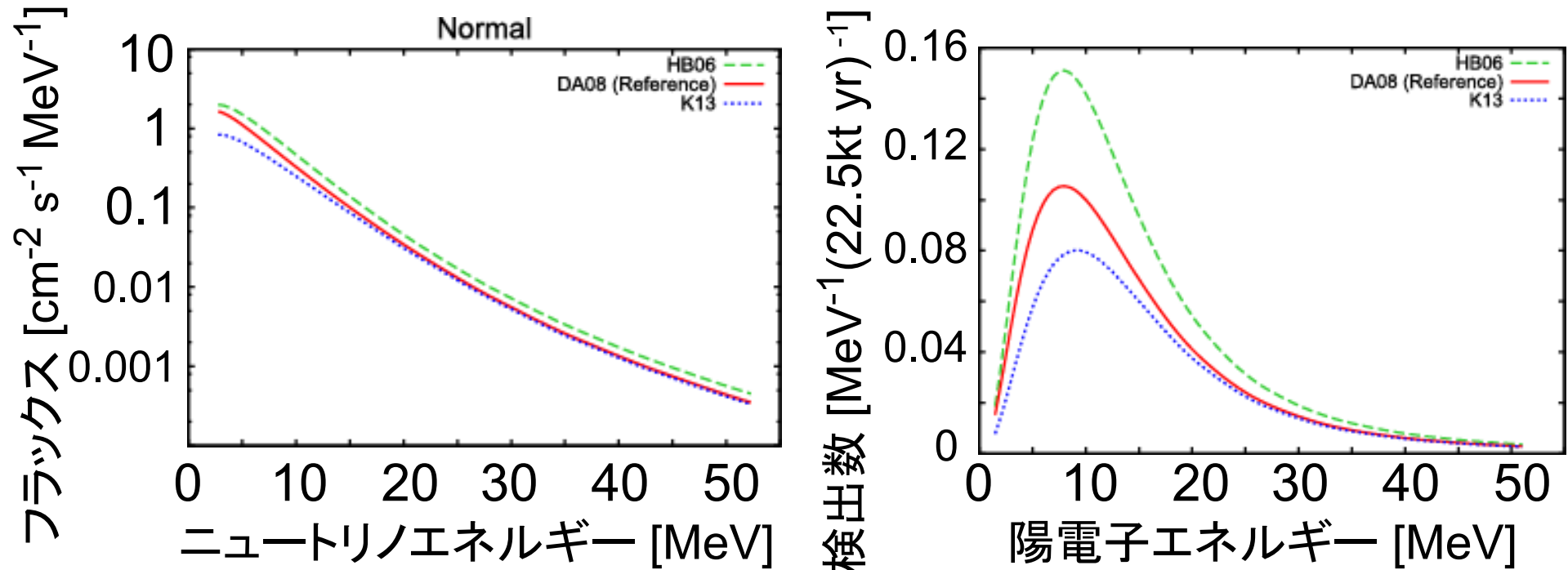
準解析的モデル

Kobayashi+ (2013)

- redshift $z \sim 1-2$ でピーク (不定性は大きい)
 - 観測量 (銀河の UV 光度) から星形成率への変換
 - ダストによる遮蔽の補正

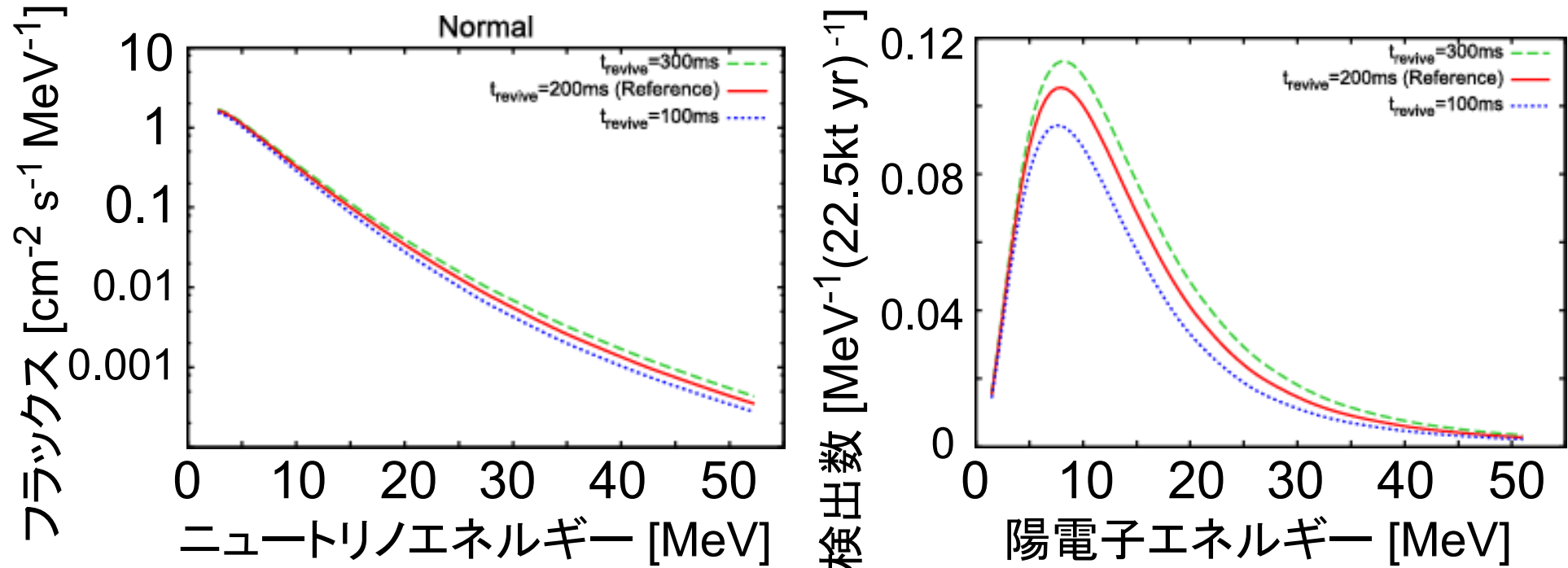
注) $z > 2$ の領域は超新星背景ニュートリノには効かない

星形成史の依存性



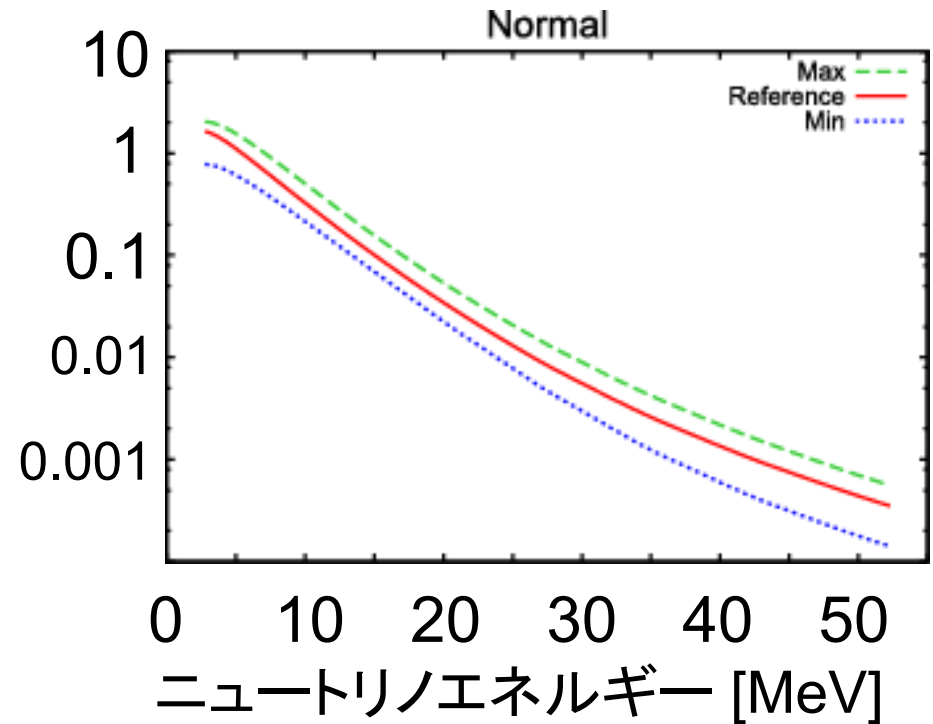
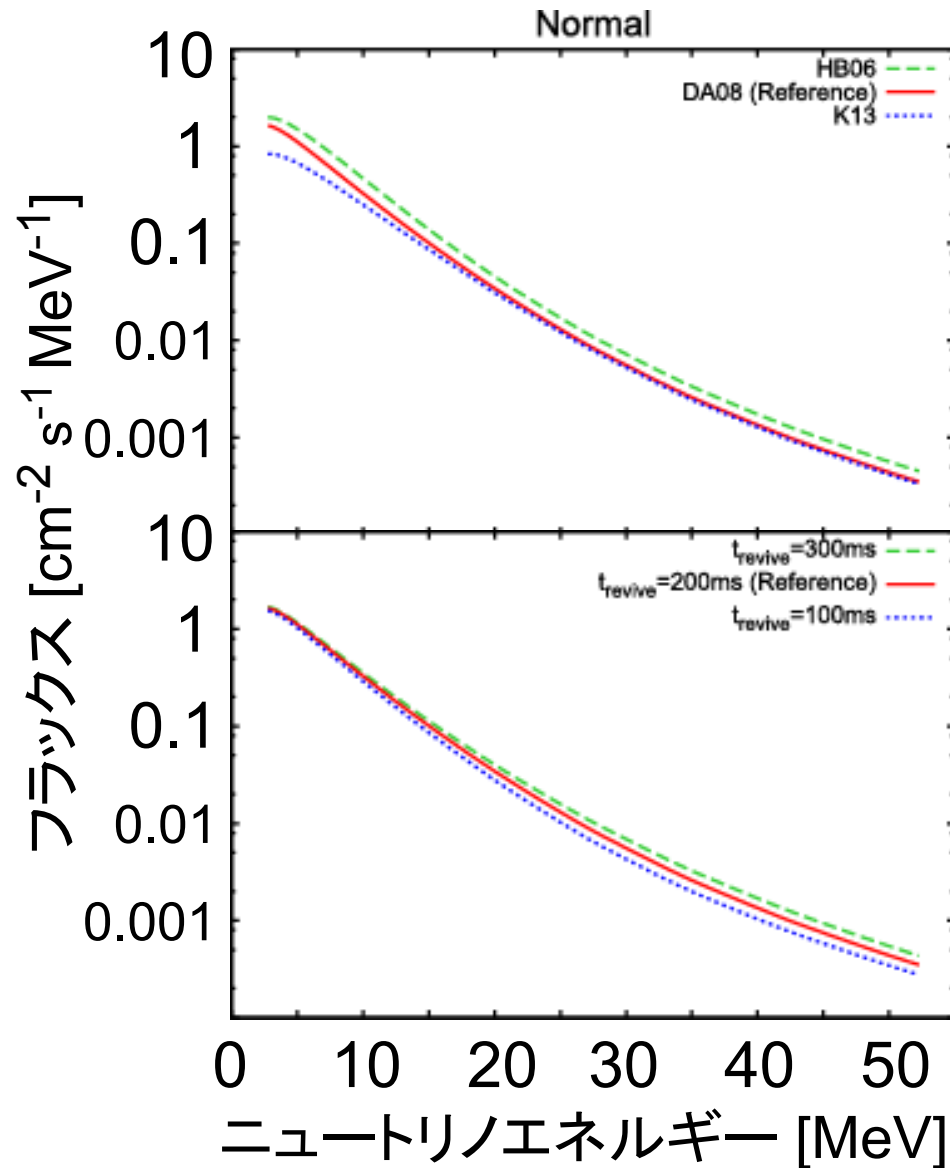
- 低エネルギー領域のほうが不定性が大きい。
- 不定性の大きな遠方の星からのニュートリノが redshift され、低エネルギー領域に差を作る。

衝撃波復活時間の依存性



- 高エネルギー領域のほうが不定性が大きい。
- 衝撃波の復活が遅いほど、加熱が長く続き放出ニュートリノのエネルギーが上がる。

星形成史と衝撃波復活時間



- 星形成史を調べるには低エネルギー領域が有利。

数値テーブル

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/>

Supernova Relic Neutrino x +

asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/ 検索

Web site of Supernova Relic Neutrino Background

--- on the basis of the metallicity evolution of galaxies ---

Abstract

This web site provides models of supernova relic neutrino (SRN) flux from past stellar collapses including black hole formation (failed supernovae). On the basis of the metallicity evolution of galaxies, the dependences of SRNs on the cosmic star formation rate density, shock revival time and equation of state are considered. We show the results for the reference model and models with maximum and minimum values of SRN event rate among models investigated. For the details, see Nakazato et al., [arXiv:1503.01236 \[astro-ph.HE\]](#). For the neutrino spectra emitted from various progenitors, we utilize the [Supernova Neutrino Database](#); Nakazato et al., [Astrophys. J. Supp. 205 \(2013\) 2, arXiv:1210.6841 \[astro-ph.HE\]](#). This data set is open for general use in any research for astronomy, astrophysics, and physics, provided that our papers are referenced in your publication.

User's Guide (read me first)

- [guide.pdf](#) (40.4kB)

$\bar{\nu}_e$ Flux Data with Neutrino Oscillation (Adiabatic MSW Effect)

- [download all](#) (31.6kB)

Model	Mass Hierarchy	
	Normal	Inverted
Maximum	17.2kB	17.2kB
Reference	17.2kB	17.2kB
Minimum	17.2kB	17.2kB

All Flux Data without Neutrino Oscillation

- [download all](#) (47.1kB)

Model	ν_e	$\bar{\nu}_e$	ν_x
Maximum	17.2kB	17.2kB	17.2kB

まとめ

- 次に銀河系内で超新星爆発が起これば、既存のニュートリノ検出器で確実にニュートリノが検出されるであろう。
- 超新星爆発からのニュートリノ放射は重力崩壊開始から10秒以上にわたって続く。
- 超新星背景ニュートリノの量は星形成史に依存し、特に低エネルギー(< 20 MeV)領域でモデルに依る違いが顕著になる。