

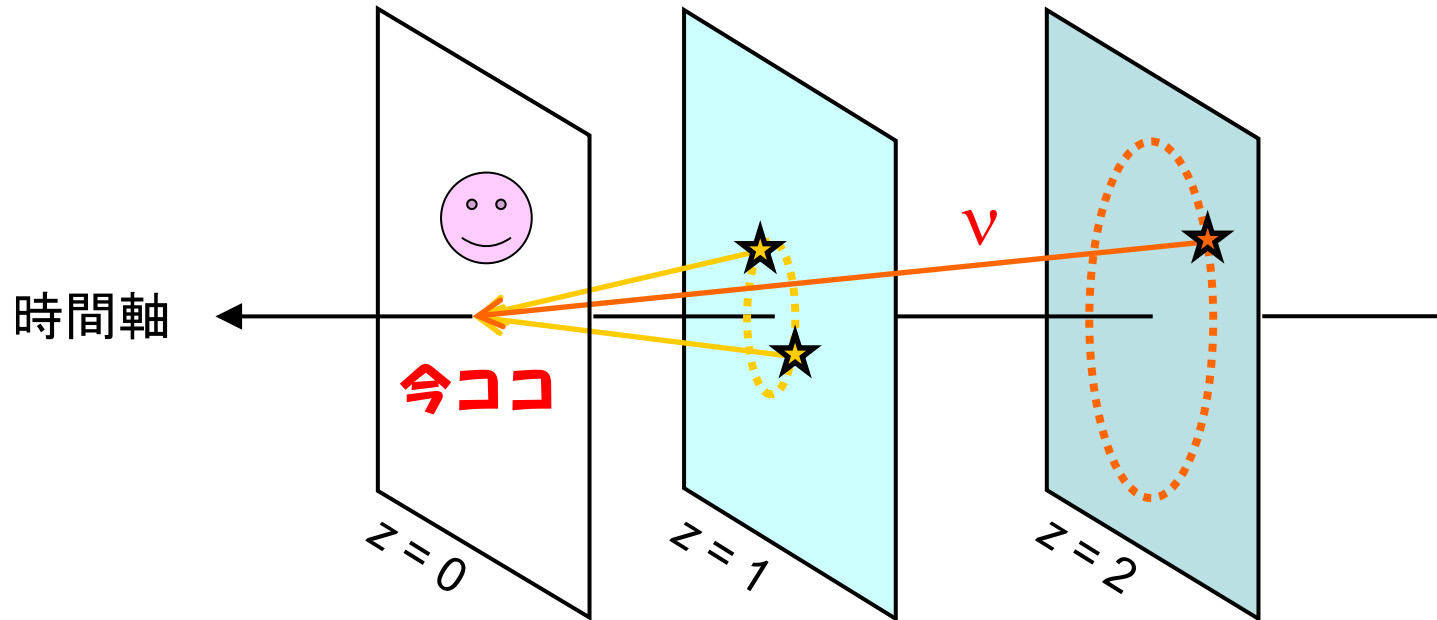
超新星背景ニュートリノの 検出予測：宇宙の化学 進化からの示唆

中里 健一郎
(九州大学 基幹教育院)

Ref.: Nakazato, Akaho, Ashida & Tsujimoto
arXiv:2406.13276

学術変革「地下稀事象」研究会@阪大 2024年7月6日

超新星背景ニュートリノ



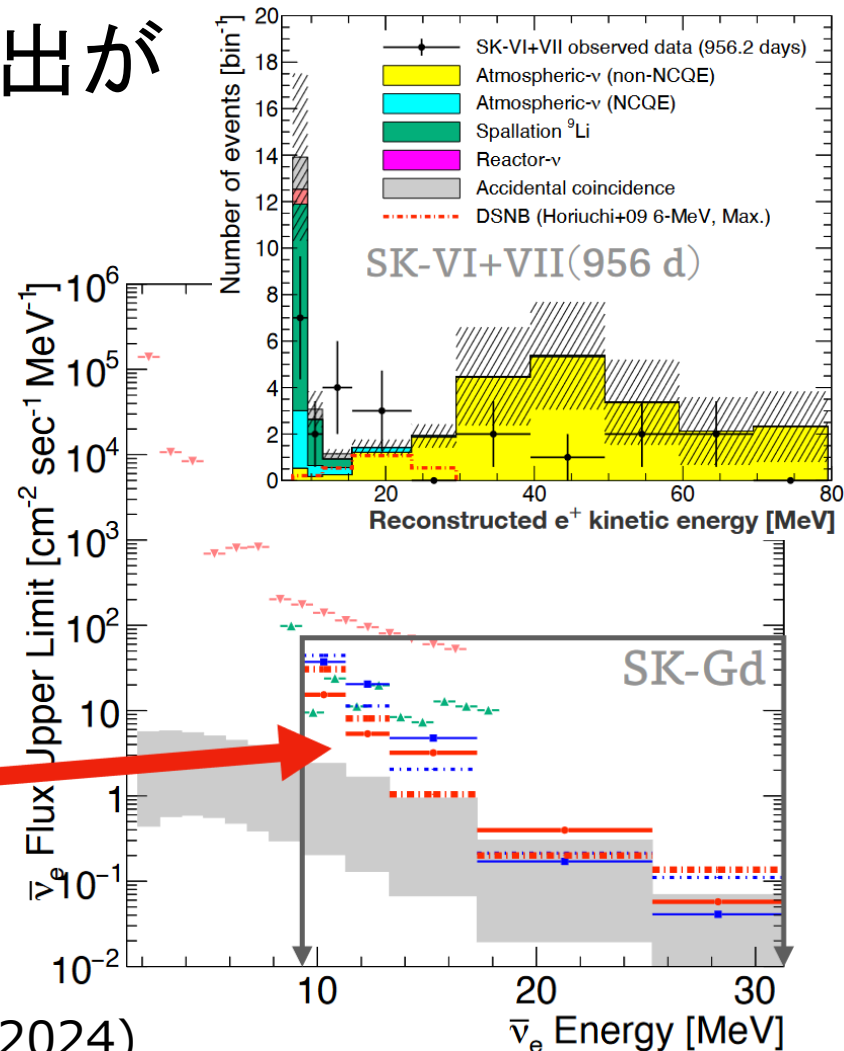
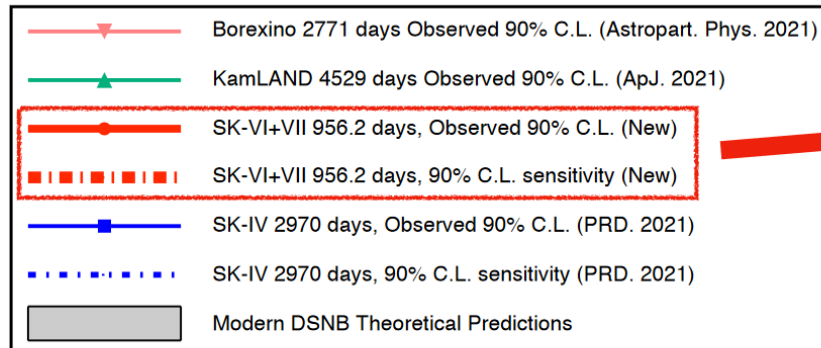
- 宇宙背景放射のニュートリノ版。
- 過去の超新星が放出したニュートリノが重ね合わさり、バックグラウンドとして宇宙を満たす。
- 超新星ニュートリノそのものだけでなく、宇宙の星形成史などを探る上でも重要。

観測の現状

- 観測の上限値が予測値に迫りつつある。
- 今後、SK-Gd, HK での検出が期待されている。

Highlight:

- 956 days of SK-Gd with Gd 0.01%(552 d)+0.03%(404 d)
Spectrum independent analysis
 - Only use $N_n = 1$ events
 - Differential upper limit for $9.3 < E_\nu < 31.3$ MeV
- Update the world stringent sensitivity for almost all bins



adapted from Masayuki Harada (Neutrino 2024)

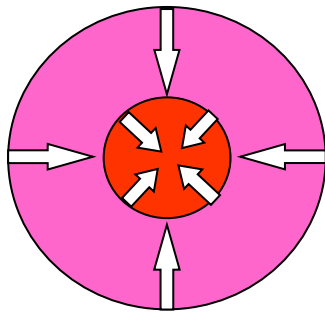
重力崩壊型超新星

- 太陽より約10倍以上重い恒星が、その進化の最後に起こす大爆発。
 - 大量のニュートリノを放出
 - 中性子星 or ブラックホールを形成

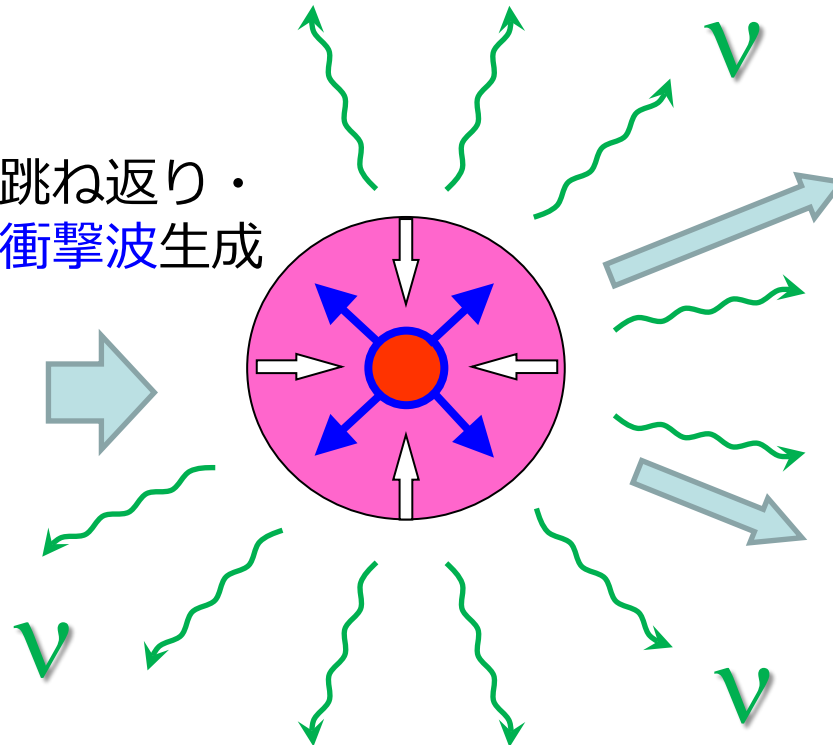


衝撃波伝播 → 爆発
(中性子星の形成)

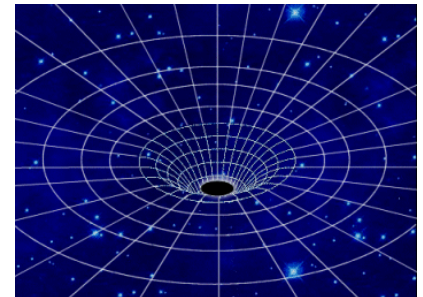
重力崩壊



跳ね返り・
衝撃波生成

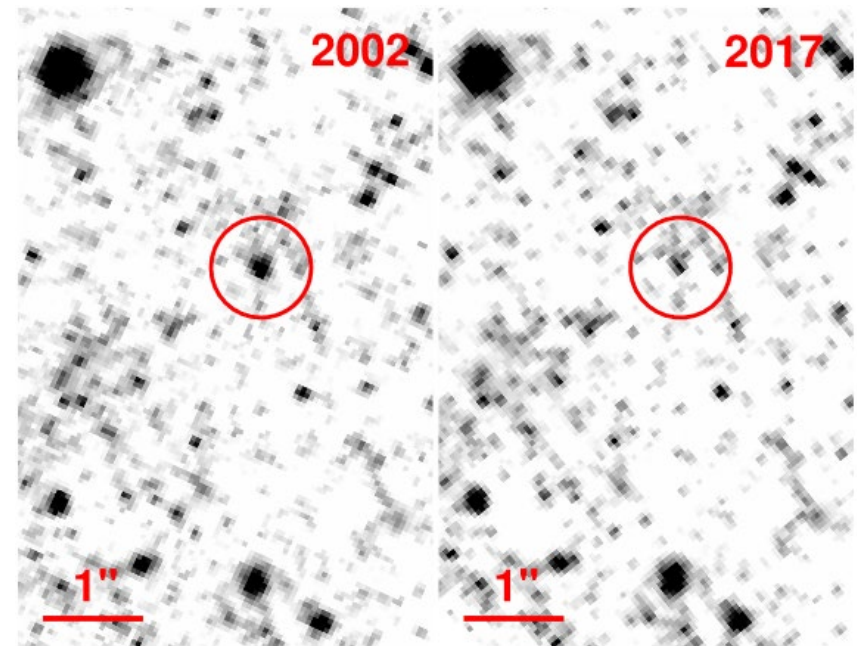
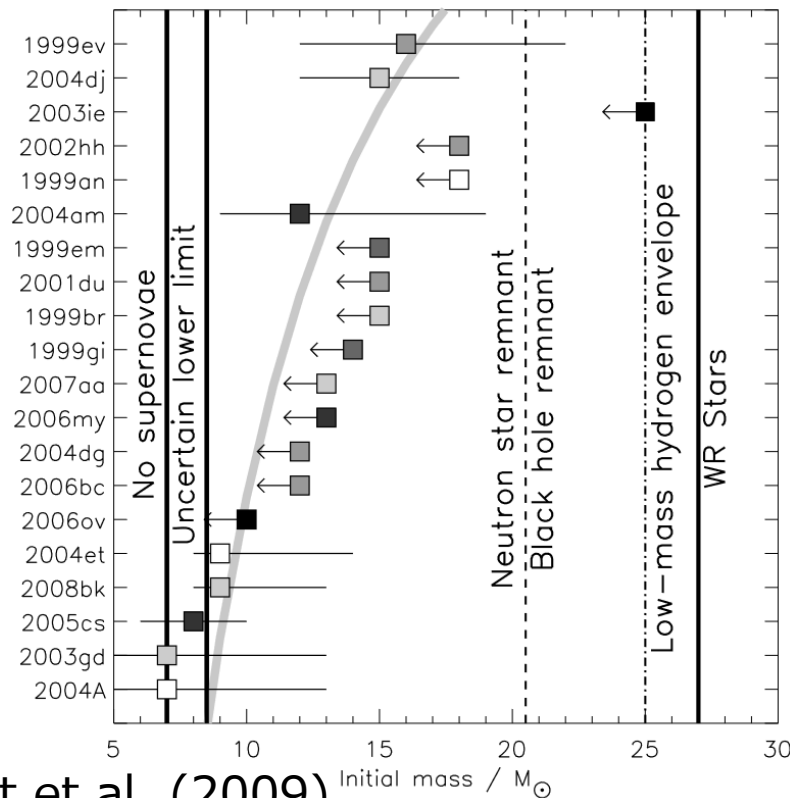


ブラックホール



超新星とブラックホールの境い目

- 観測的には、太陽より18倍以上重い星は爆発せず、すべてブラックホールになると示唆。
 - ブラックホール形成は星の「消失」現象として観測



Neustadt et al. (2021)

Core-collapse rate

ψ_{IMF} : 星の初期
質量関数

- Core-collapse rate
= CCSN rate + BH formation rate

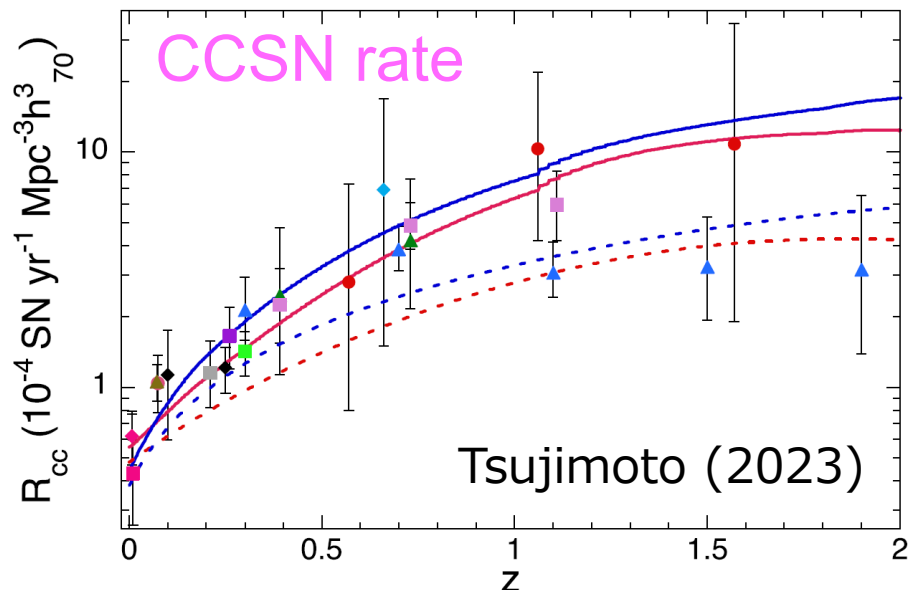
$$R_{\text{CC}}(z) = \dot{\rho}_*(z) \frac{\int_{8M_{\odot}}^{18M_{\odot}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1M_{\odot}}^{100M_{\odot}} M \cdot \psi_{\text{IMF}}(M) dM} + \dot{\rho}_*(z) \frac{\int_{18M_{\odot}}^{100M_{\odot}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1M_{\odot}}^{100M_{\odot}} M \cdot \psi_{\text{IMF}}(M) dM}$$

➤ $\dot{\rho}_*(z)$: cosmic star formation rate (SFR)

- $\dot{\rho}_*(z)$ のモデル

➤ Hopkins & Beacom (2006)

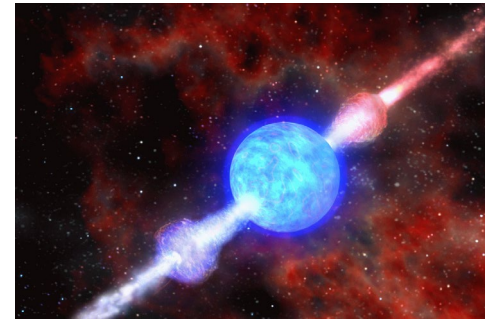
➤ Madau & Dickinson (2014)



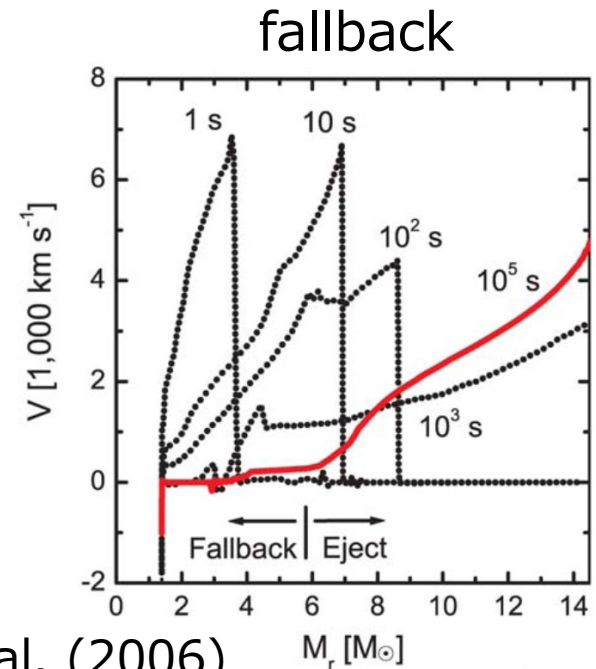
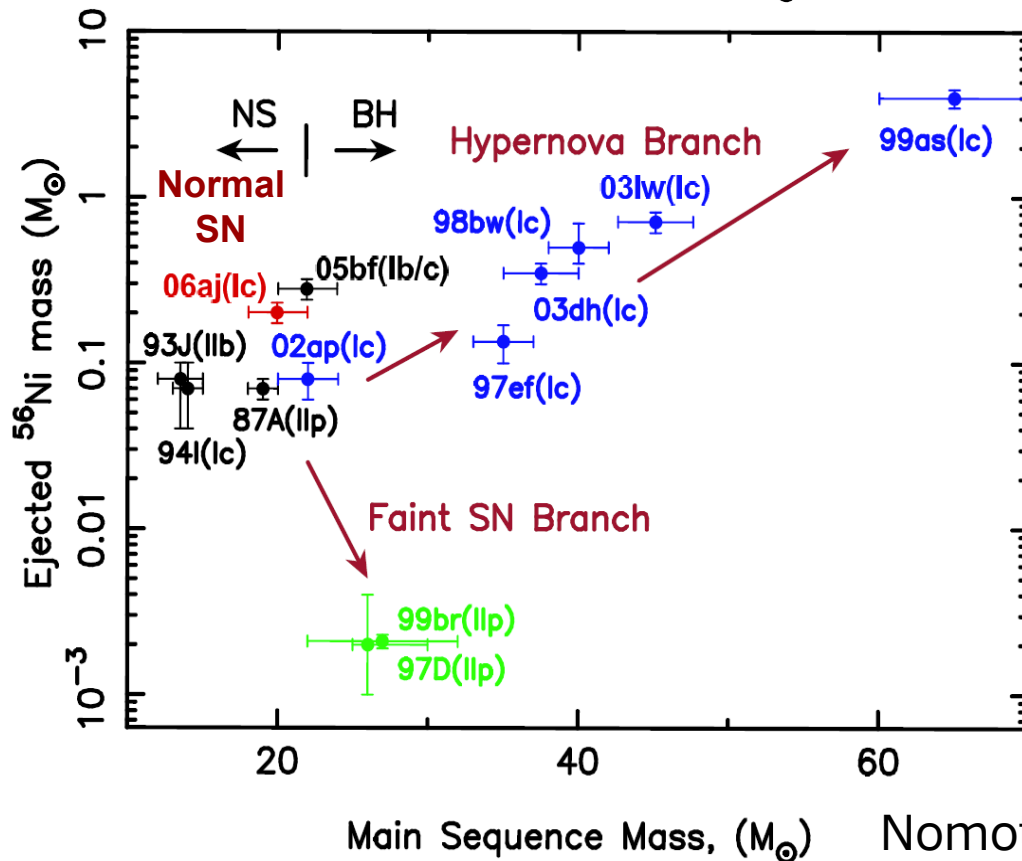
化学進化・元素合成からの示唆

- ブラックホール形成を伴う超新星爆発

- Hypernova
- Faint supernova



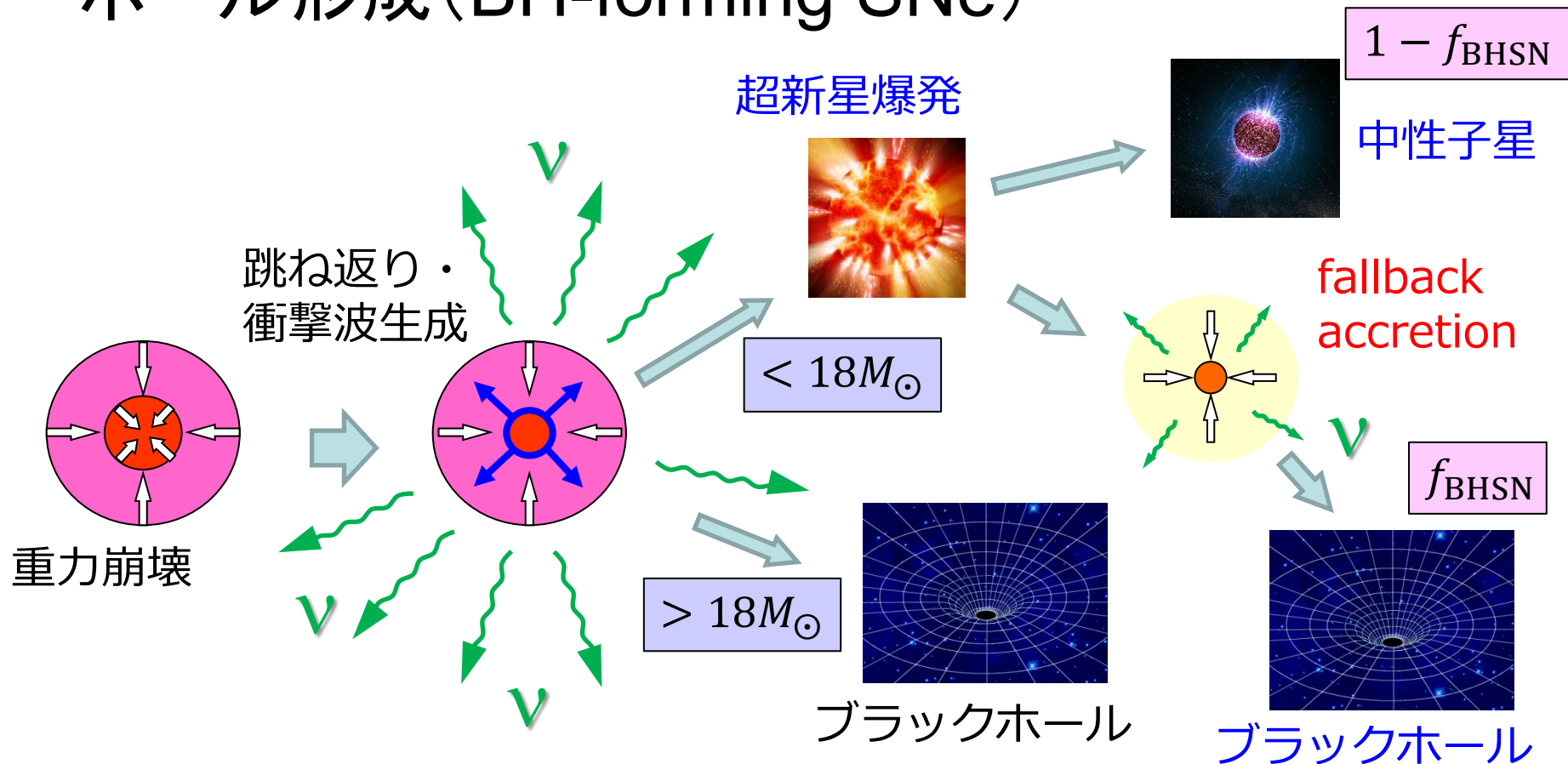
ガンマ線バースト



Nomoto et al. (2006)

大質量星の重力崩壊後のシナリオ

- $18M_{\odot}$ 以下で爆発、 $18M_{\odot}$ 以上で爆発しない。
- 超新星爆発する星のうち、割合 $f_{\text{BH-SN}}$ でブラックホール形成 (BH-forming SNe)



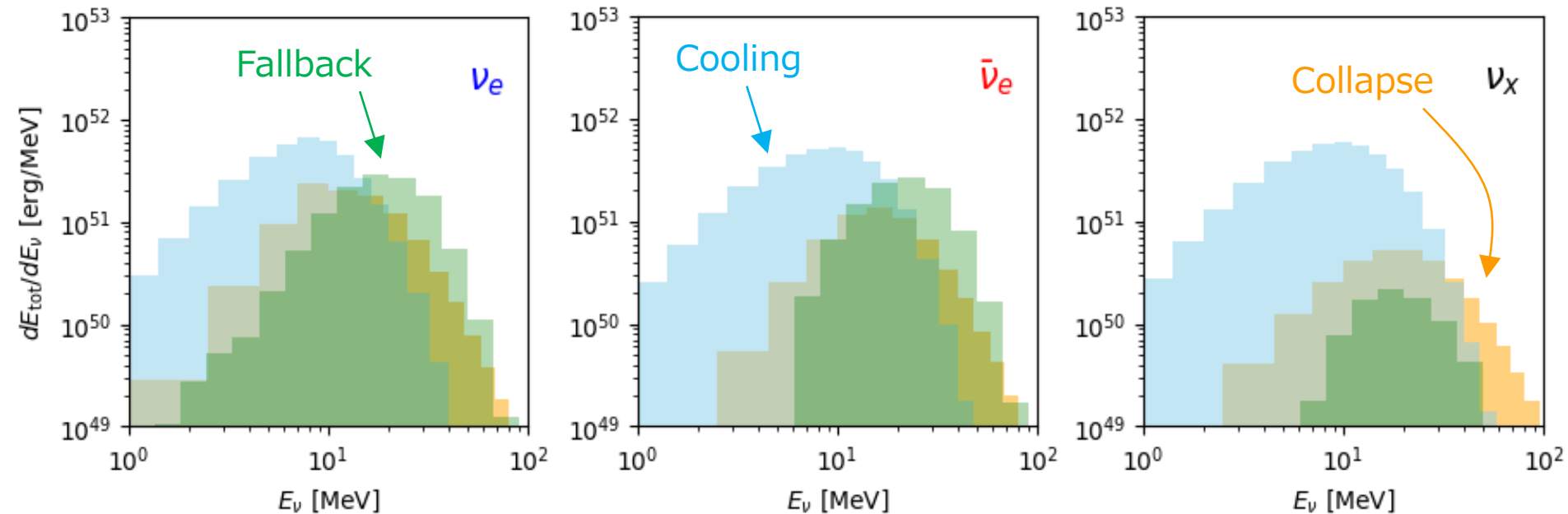
ニュートリノ放出量

- バウンスからブラックホール形成までの時間に依存するため、2つの場合を仮定。
 - i. バウンス後、fallback が 100 秒以上の続く場合
→ 最大質量の中性子星の束縛エネルギーに相当する、大量のニュートリノが放出される
 - ii. 爆発しないとき同様、1 秒程度の場合 (prompt)
→ 放出されるニュートリノの平均エネルギーは高くなるが、総エネルギーは i. の場合より小さい

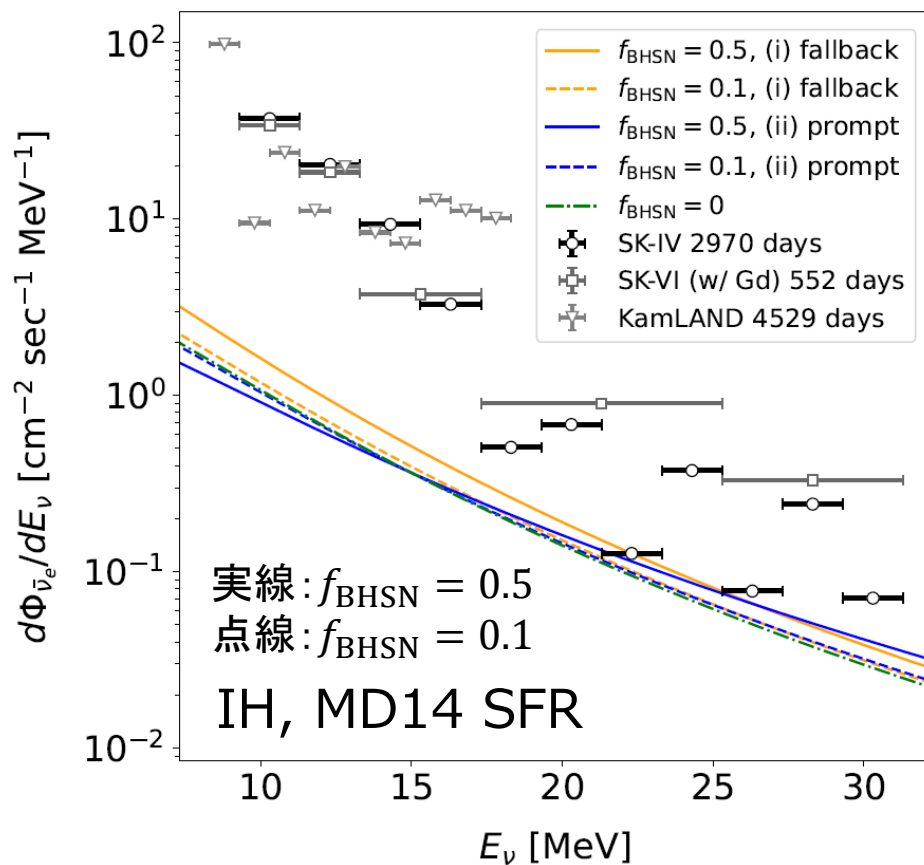
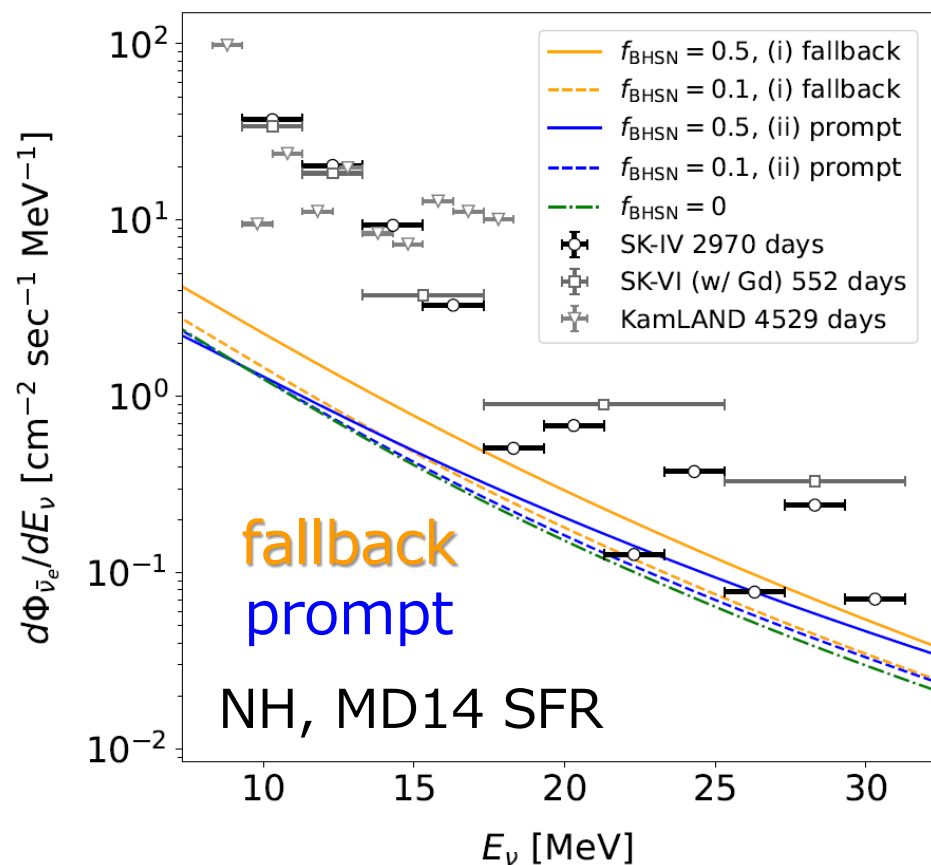
Model	explosion	remnant	$\langle E_{\nu_e} \rangle$	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle$	$\langle E_{\nu_x} \rangle$	$E_{\nu_e, \text{tot}}$	$E_{\bar{\nu}_e, \text{tot}}$	$E_{\nu_x, \text{tot}}$
			(MeV)			(10^{52} erg)		
Ordinary core-collapse SN	successful	NS	9.2	10.9	11.8	4.47	4.07	4.37
BH-forming SN, (i) fallback induced	successful	BH	11.8	13.6	10.9	19.48	18.50	12.07
BH-forming SN, (ii) prompt	successful	BH	16.1	20.4	23.4	6.85	5.33	2.89
Failed SN	failed	BH	16.1	20.4	23.4	6.85	5.33	2.89

Fallback の場合のニュートリノ放出

- 重力崩壊・バウンス直後の段階、原始中性子星からの冷却、fallback 由来の3つに分けて評価。
 - バリオン質量 $2.35M_{\odot}$ の原始中性子星を仮定
 - $0.35M_{\odot}$ fallback して最大質量 ($2.7M_{\odot}$) に達する
 - 総放出エネルギー: 8.7×10^{53} erg ($\doteq E_{\text{bin, max}}$)

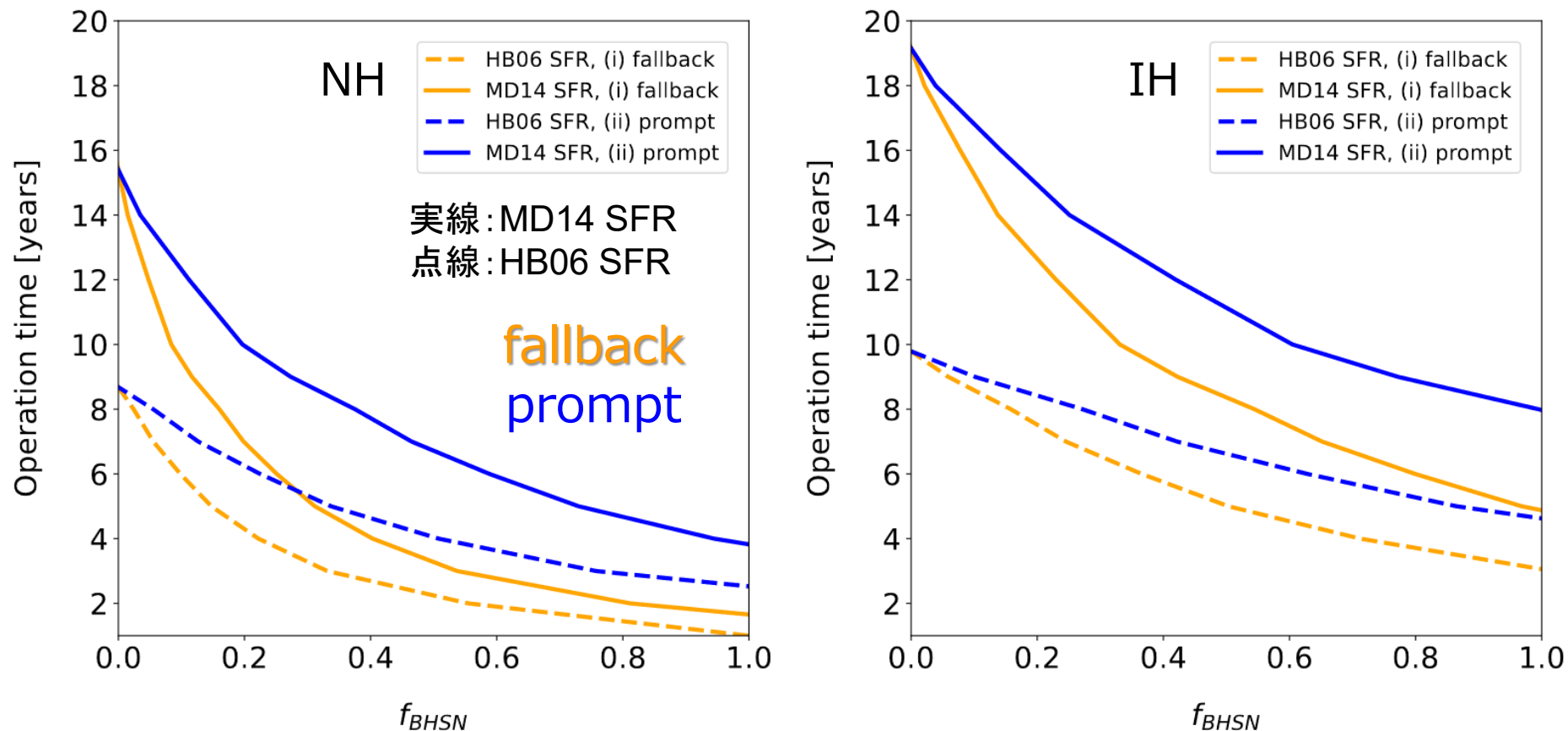


背景ニュートリノフラックス



- BH-forming SNe により、フラックスが増加。
- fallback によりニュートリノ放出が長く続く場合、質量階層が NH であればその影響が顕著。

HyperKamiokande での検出予測



- BH-forming SNe により、 3σ の検出までに必要な時間が短縮。
 - NH, MD14, fallback の場合 $f_{BH,SN} = 0.2$ で半減。

まとめ

- 宇宙の化学進化から示唆される、ブラックホール形成を伴う超新星爆発を考慮して、背景ニュートリノのフラックスを評価した。
 - 観測される超新星爆発のうちブラックホール形成を伴うものの割合を、パラメータ $f_{\text{BH SN}}$ とする。
 - ニュートリノ放出量はバウンスからブラックホール形成までの時間に依存するため、fallback が長く続く場合と、すぐにブラックホールになる場合を仮定。
- 結果として、背景ニュートリノ事象数は増加し、特に fallback, NH(順階層)の場合で顕著。

今後の展望

- 化学進化の研究において考えられているものと整合的な親星モデルに基づいて、ニュートリノ放出量を評価する。
- モデル識別 (fallback or prompt, $f_{\text{BH/HSN}}$ の値) の可能性を検討する。
- これまでの SK のデータや、今後 SK-Gd で update されるデータを用いて、モデルへの制限を行なう。