

# 銀河の化学進化から予測される 超新星背景ニュートリノの フラックス

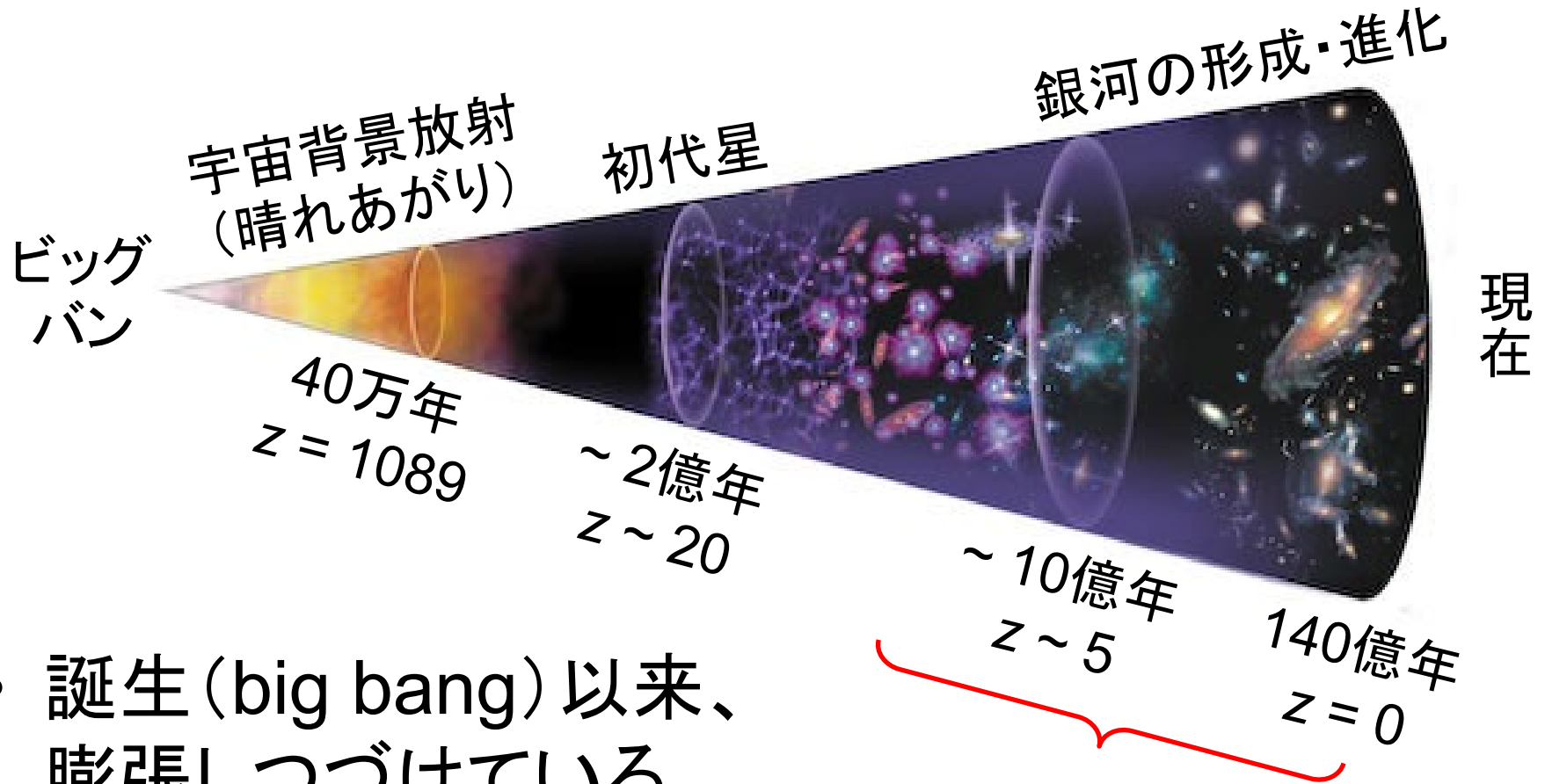
**中里 健一郎** (九州大学 基幹教育院)

**芦田 洋輔** (ウィスコンシン大学), **辻本 拓司** (国立天文台)

九州大学

2023年3月2日 第9回超新星ニュートリノ研究会

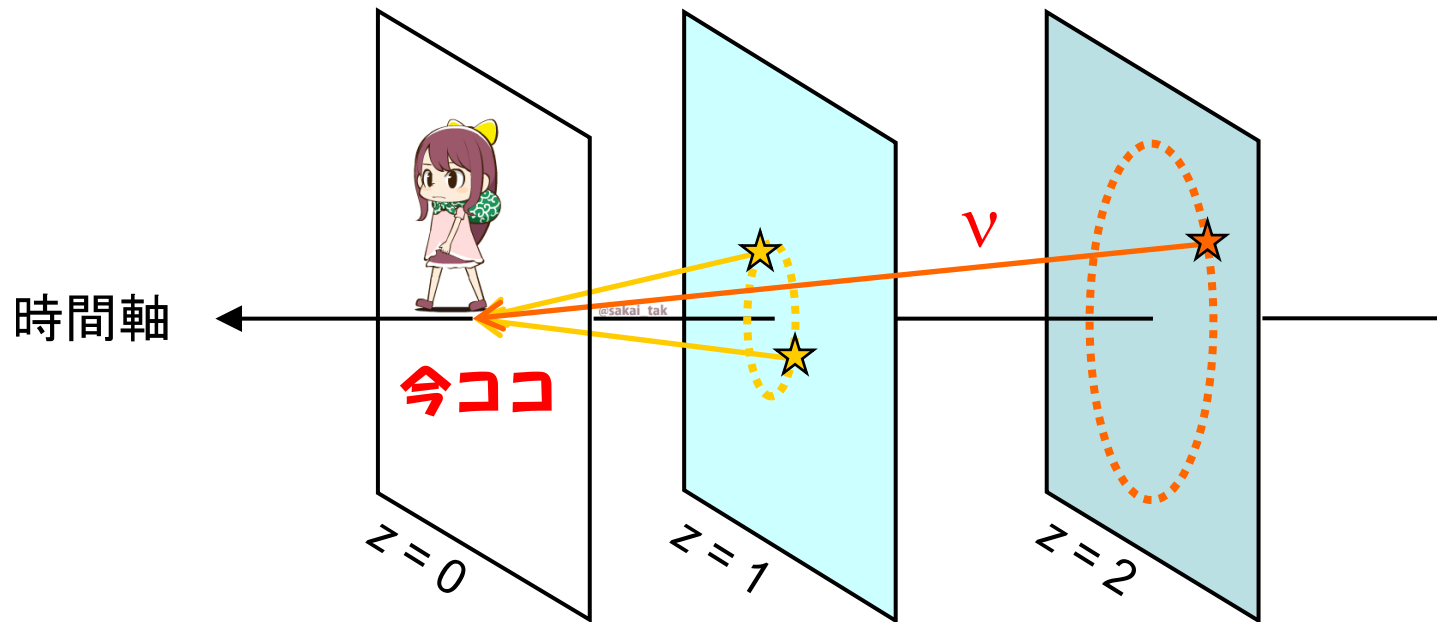
# 宇宙の歴史



- 誕生 (big bang) 以来、膨張しつづけている。
- 「時間」として赤方偏移  $z$  を用いる。

この間、無数の星が生まれ死んでいった

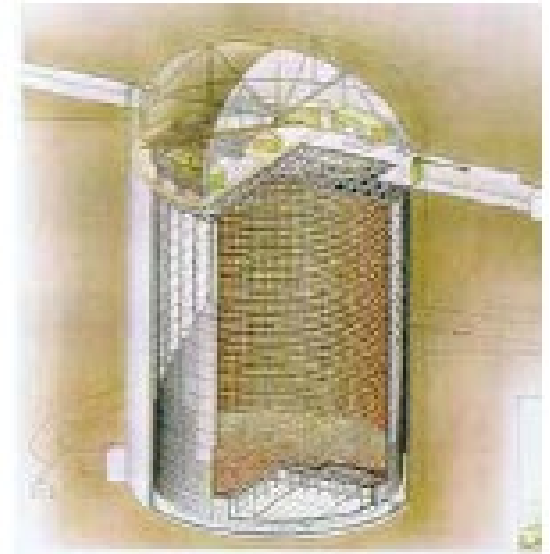
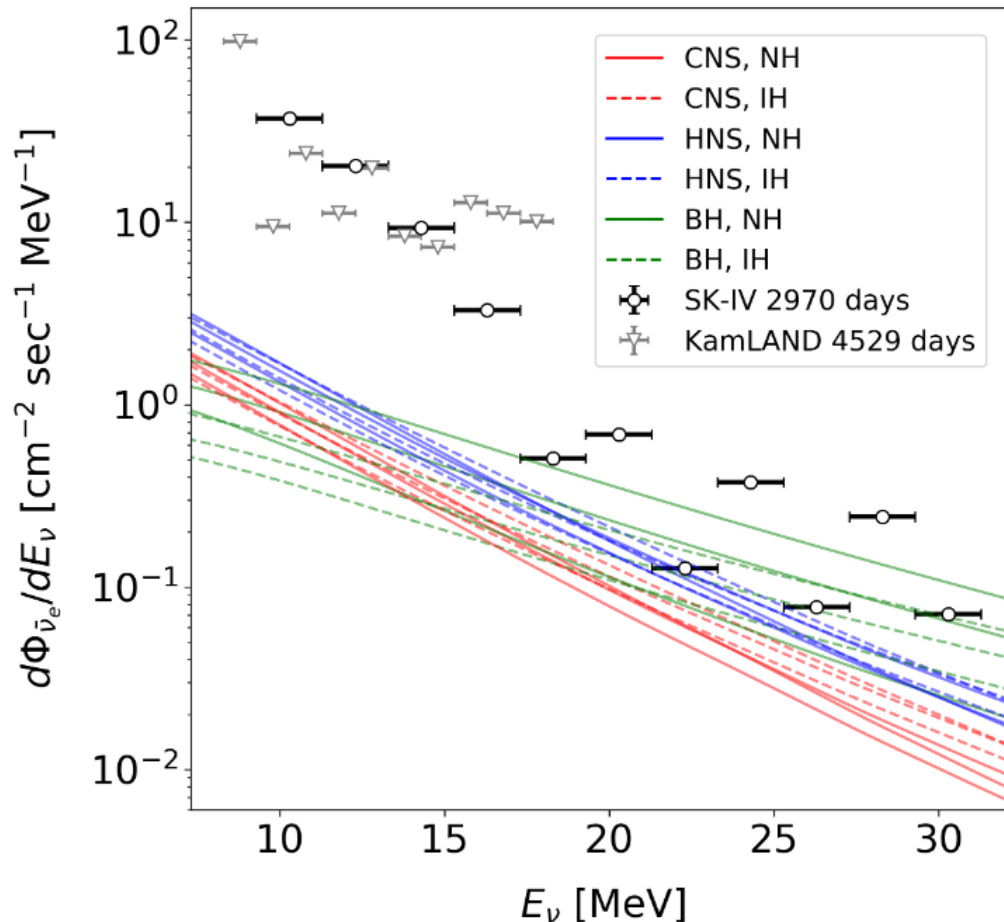
# 超新星背景ニュートリノ



- 宇宙背景放射の超新星ニュートリノ版。
- 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。



Super-Kamiokande

Ashida & Nakazato,  
arXiv:2204.04880

# 理論モデルの定式化

$$\left( \frac{dE'_\nu}{dE_\nu} = 1 + z \right)$$

$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} \underline{R_{\text{CC}}(z)} \left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

- 超新星ニュートリノのスペクトル:  $\left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle$
- 宇宙論的パラメータ:  $H_0 = 67.7 \text{ km/s/Mpc}$   
 $\Omega_m = 0.31, \Omega_\Lambda = 0.69$
- Core-collapse rate:  $R_{\text{CC}}(z)$

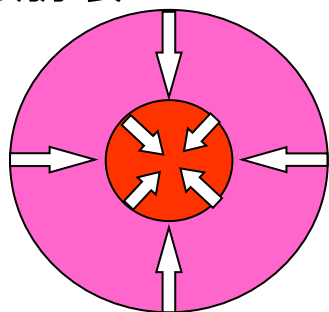
# 重力崩壊型超新星

- 太陽より8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

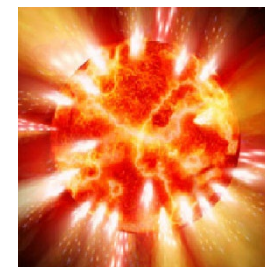
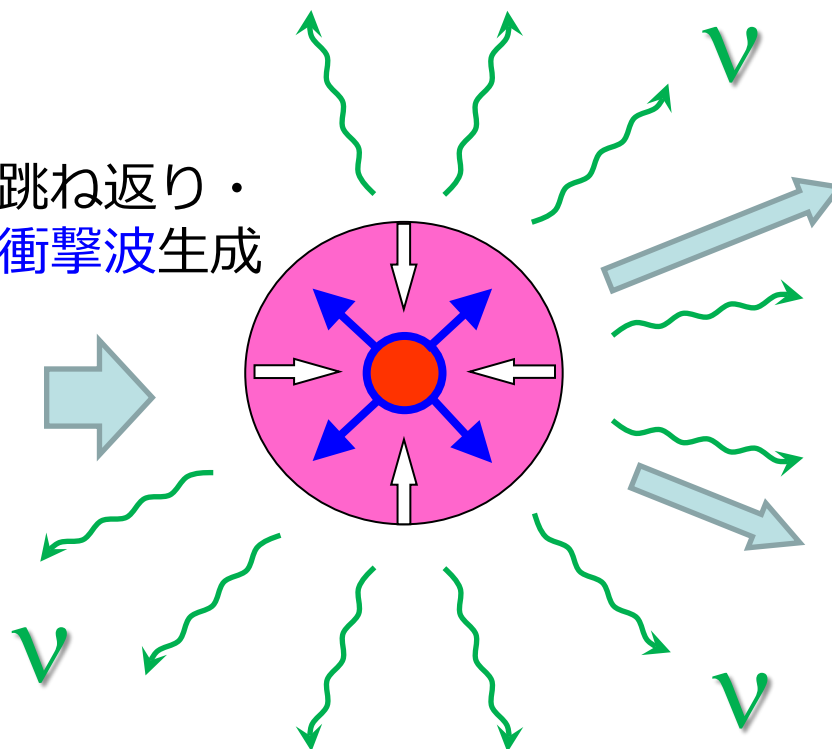


衝撃波伝播 → 爆発  
(中性子星の形成)

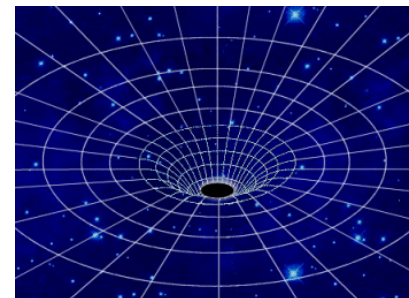
重力崩壊



跳ね返り・  
衝撃波生成

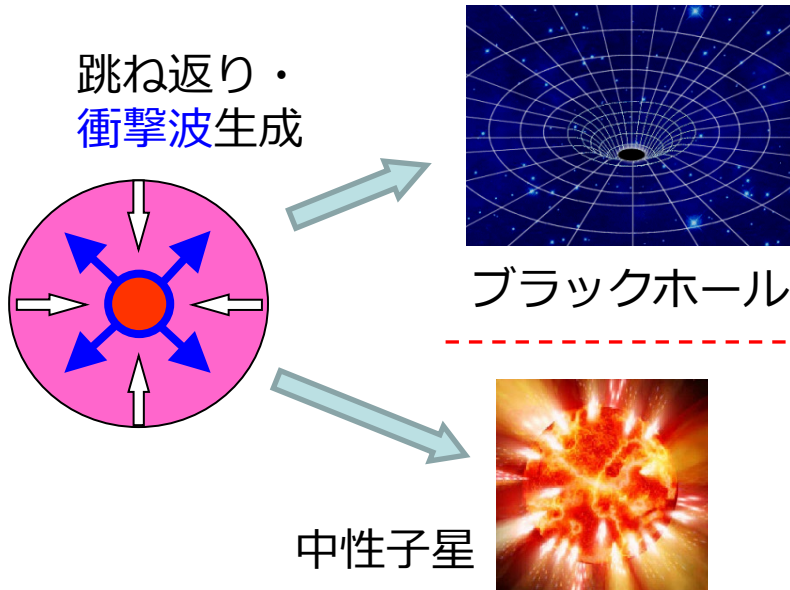
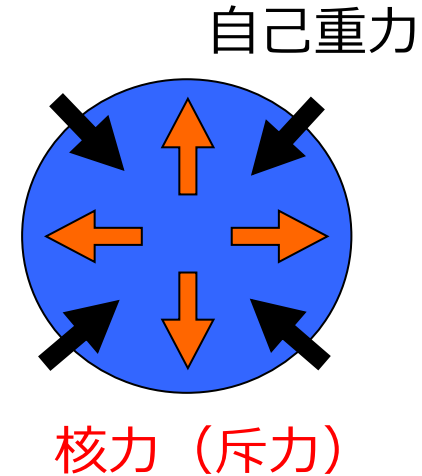


ブラックホール

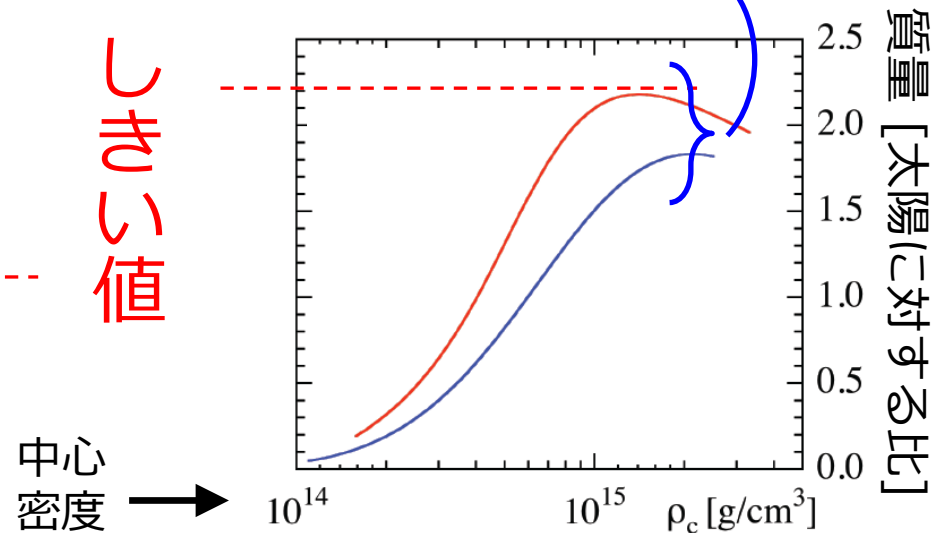


# 中性子星 or ブラックホール

- 中性子星では核力と自己重力が  
つりあって平衡形状にある。
- 核力で支えられる質量には上限が  
ある。
- 上限を超えるとブラックホールになる。

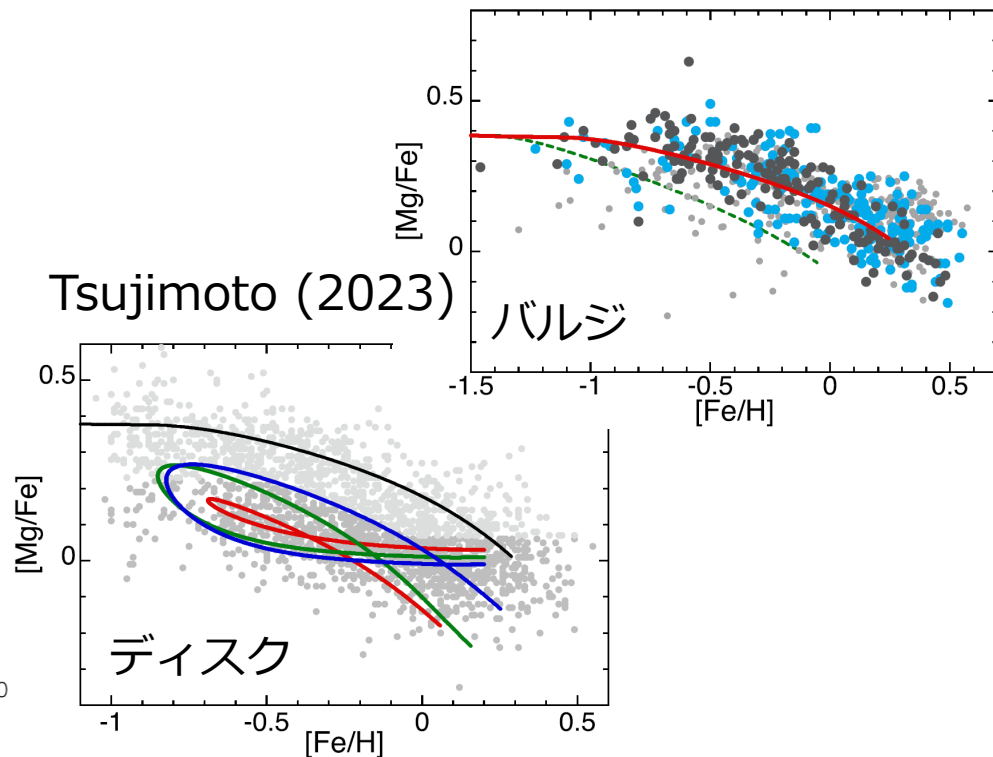
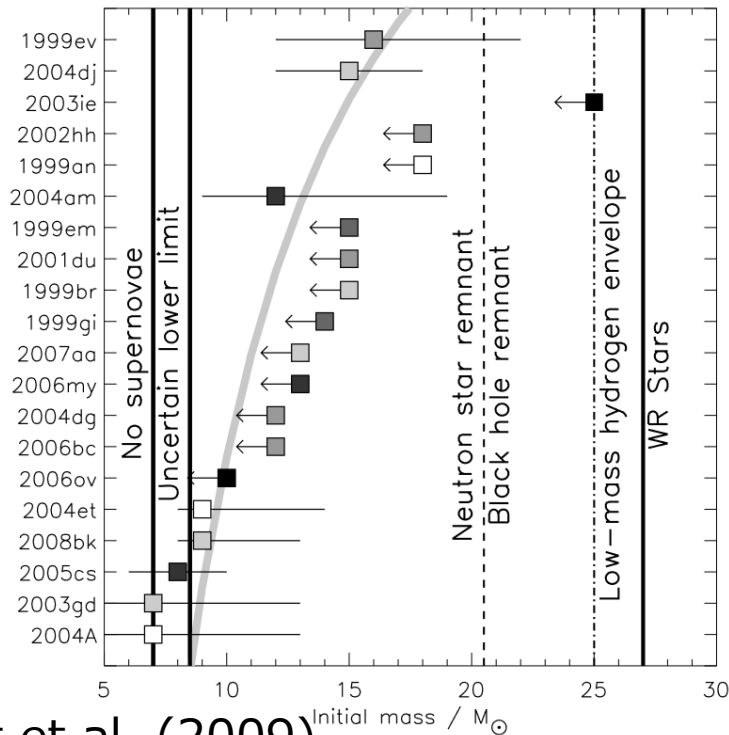


## 高密度物理の不定性



# 親星の質量と重力崩壊の結末

- 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可能性を考える
- 星形成環境による初期質量関数の違いを考慮すると、天の川銀河の化学進化とも整合的。



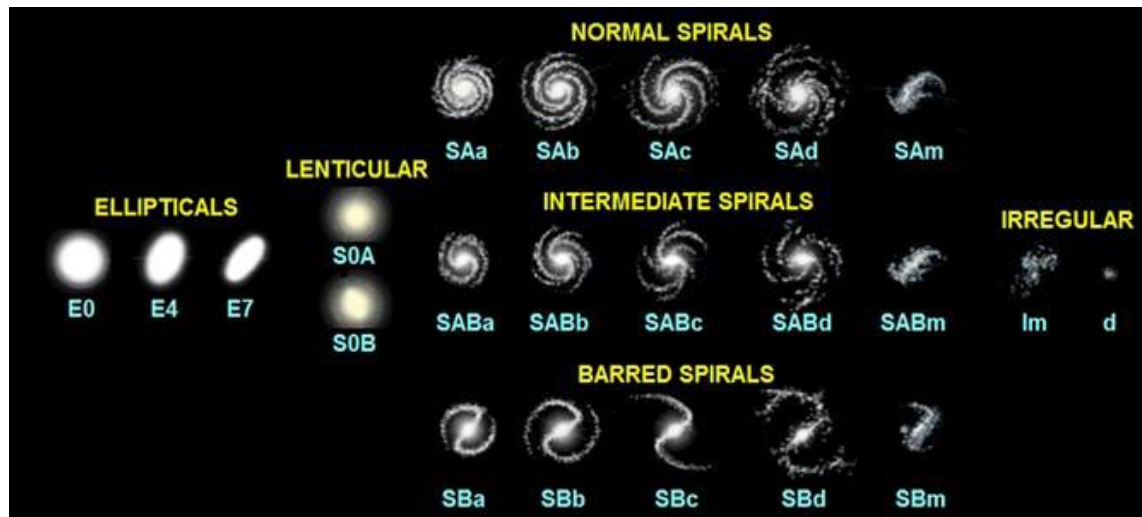


# 銀河のタイプと初期質量関数 (IMF)

- 星形成の環境は銀河のタイプによって異なる。
  - 初期質量関数 (IMF) :  $\frac{dN}{dM} \propto M^{x-1}$ 
    - Sbc, Scd, Sdm 銀河では  $x = -1.35$  (Salpeter)
    - E/S0, Sab 銀河では  $x = -0.9$  (大質量星が多い)
- 昔の銀河ほど core-collapse rate が高い。

$N$  : 星の数  
 $M$  : 星の初期質量

$x = -0.9$   
かつて  
星形成



$x = -1.35$   
星形成中

# Core-collapse rate

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

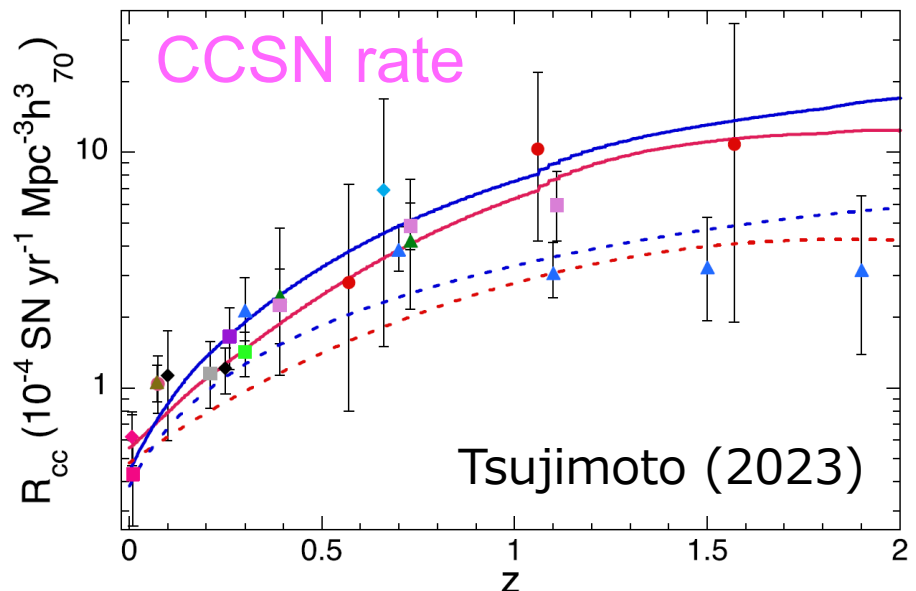
$$R_{\text{CC}}(z) = \dot{\rho}_*(z) \frac{\int_{8M_{\odot}}^{18M_{\odot}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1M_{\odot}}^{100M_{\odot}} M \cdot \psi_{\text{IMF}}(M) dM} + \dot{\rho}_*(z) \frac{\int_{18M_{\odot}}^{100M_{\odot}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1M_{\odot}}^{100M_{\odot}} M \cdot \psi_{\text{IMF}}(M)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

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

- $\dot{\rho}_*(z)$  のモデル

➤ Hopkins & Beacom (2006)

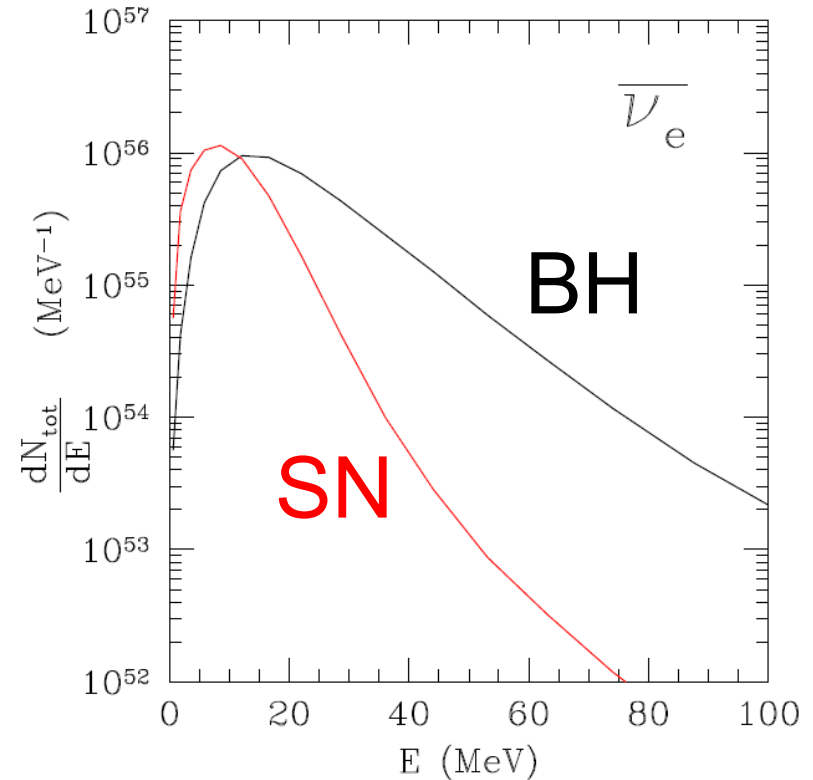
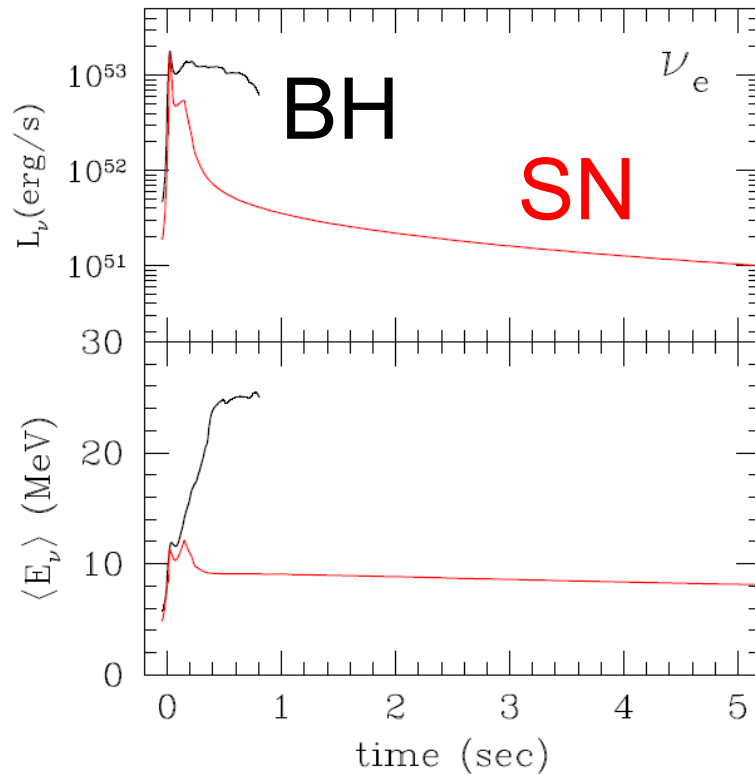
➤ Madau & Dickinson (2014)



# ブラックホール形成からのニュートリノ

- 中性子星の最大質量を超えるまで、物質降着によるコアの加熱とニュートリノの放出が続く。

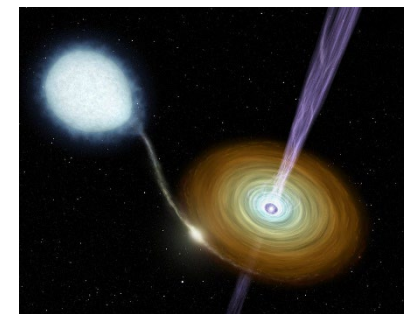
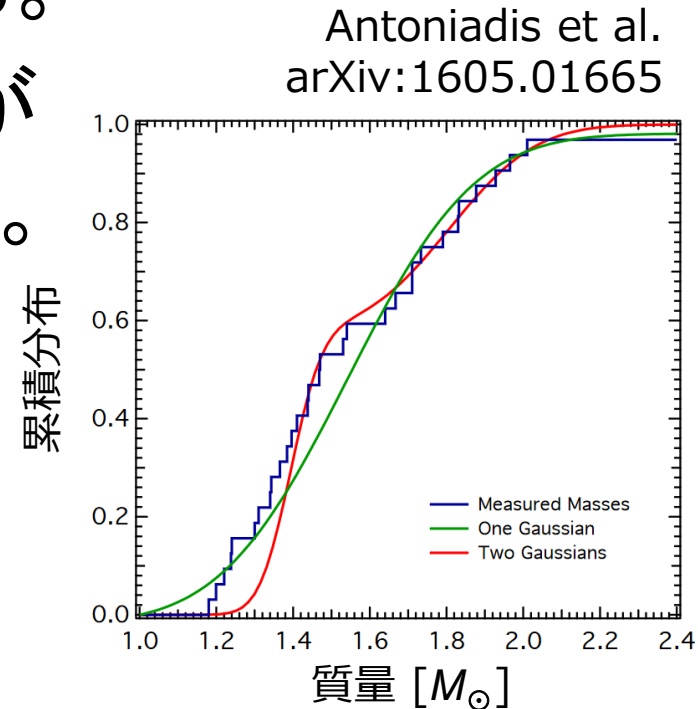
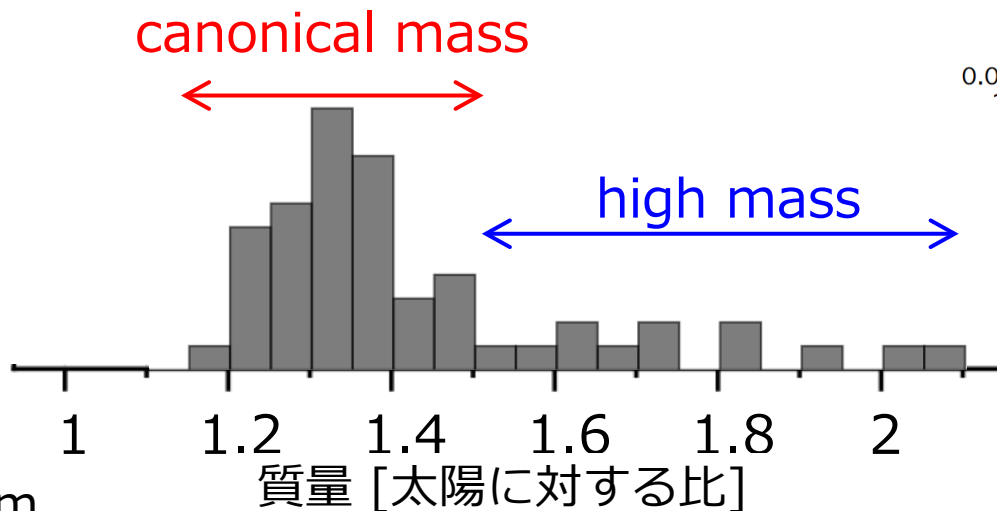
→ 通常の超新星ニュートリノより高エネルギー



超新星( $13M_\odot$ )と重いブラックホール形成( $30M_\odot$ )からのニュートリノ放出

# 形成される中性子星の質量

- 放出ニュートリノの量を決める。
  - 観測は  $1.35M_{\odot}$  付近に多いがそれより重い中性子星も存在。
- 生まれつき重かった and/or 形成後に降着で太った？



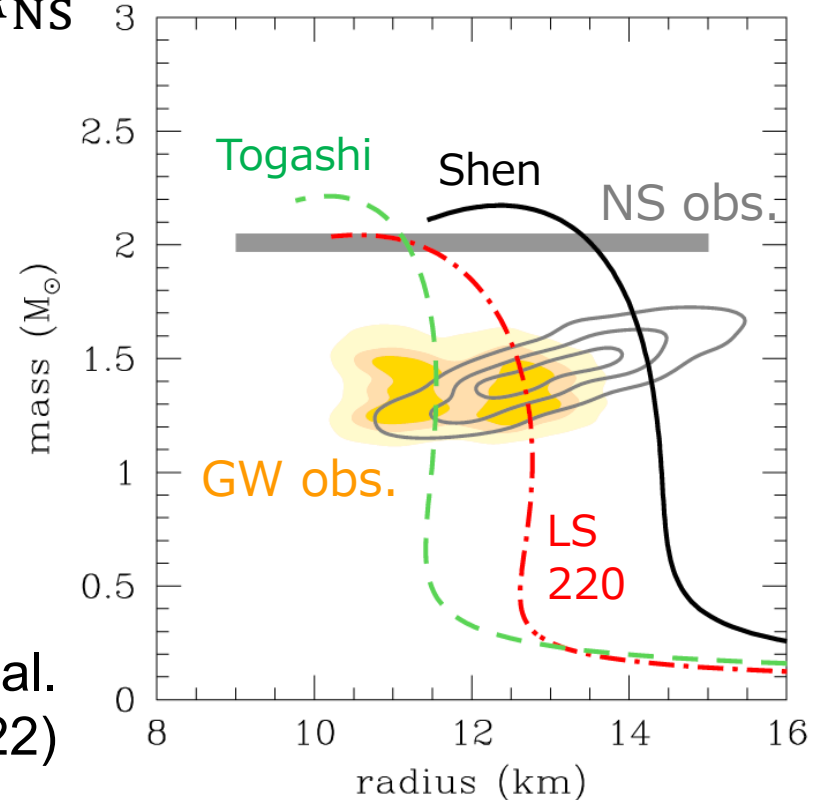
adapted from

[https://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/pfreire/NS\\_masses.html](https://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/pfreire/NS_masses.html)

# ニュートリノ放出量と状態方程式

- 核物質の状態方程式 (EOS) に依存する。
  - 中性子星の場合、半径が小さいほど放出量が多い。
    - 総放出エネルギー  $E \sim \frac{GM_{\text{NS}}^2}{R_{\text{NS}}}$
  - ブラックホールの場合、中性子星最大質量が大きいほど放出量が多い。
- 今回の研究では、3種の状態方程式を採用。

Nakazato et al.  
Astrophys. J. **925**, 98 (2022)



# 背景ニュートリノモデルのまとめ

- 銀河の化学進化モデル (Tsujiimoto 2023)。
  - E/S0, Sab 銀河は大質量星の多い IMF
    - 特に過去の宇宙で高い CC rate を予言
  - $18M_{\odot}$  以上の星はブラックホールになる
    - ニュートリノスペクトルを硬くする
- ⇒ 比較対象として、すべての銀河で IMF が同じ (Salpeter) 場合、 $18M_{\odot}$  以上の星も中性子星になる場合についてもそれぞれ検討。
- 中性子星の質量分布、EOS、ニュートリノ振動 (質量階層) の依存性も考慮する。

# 背景ニュートリノイベントの スペクトル

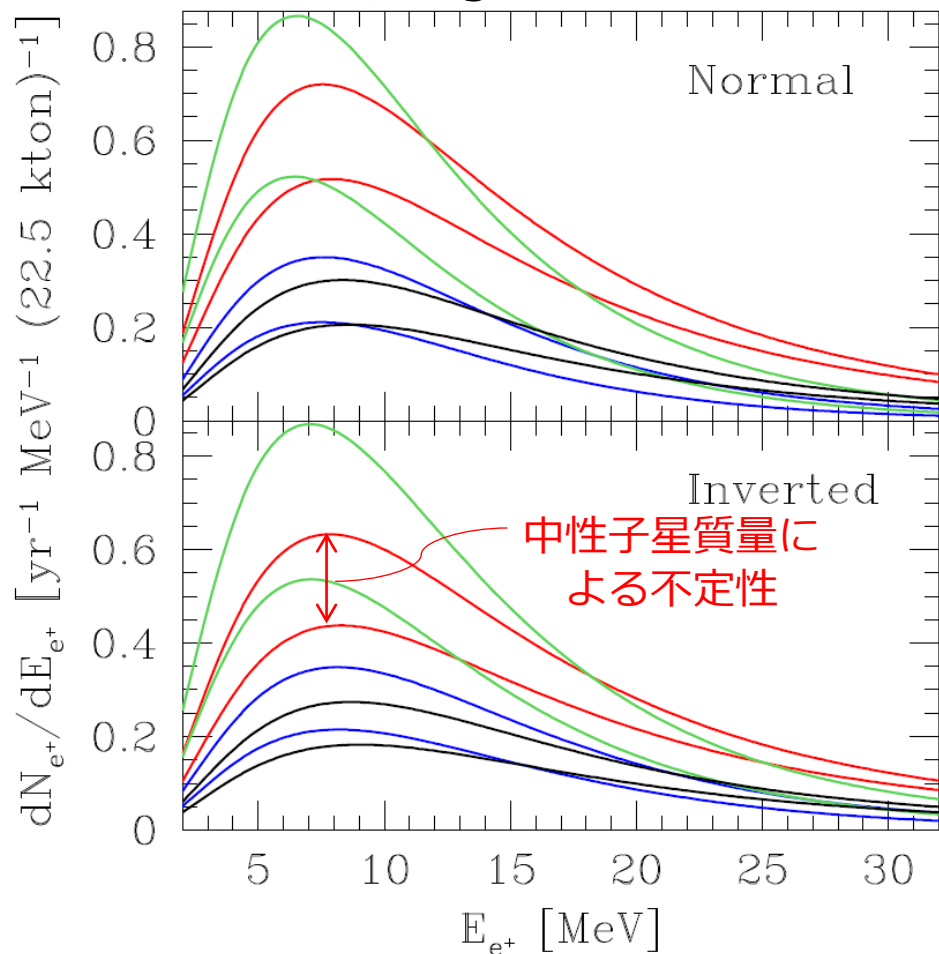
赤: Galaxy-type dependent IMF,  
 $18M_{\odot}$  以上は Black Hole

緑: Galaxy-type dependent IMF,  
 $18M_{\odot}$  以上でも Neutron Star

黒: Universal (Salpeter) IMF,  
 $18M_{\odot}$  以上は Black Hole

青: Universal (Salpeter) IMF,  
 $18M_{\odot}$  以上でも Neutron Star

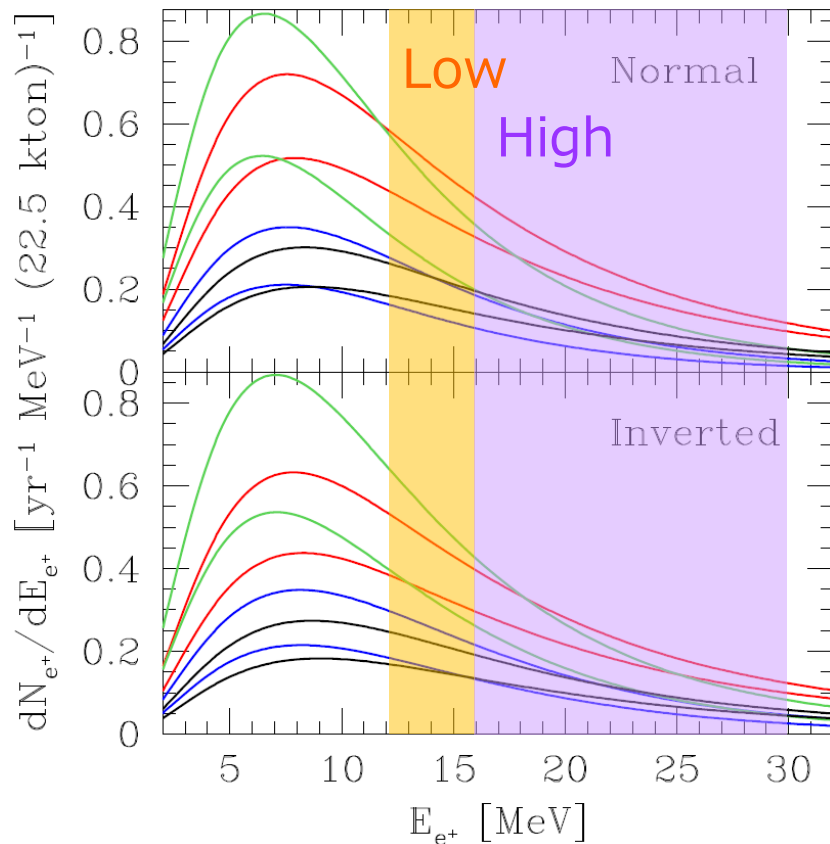
HB06 SFR, Togashi EOS の場合



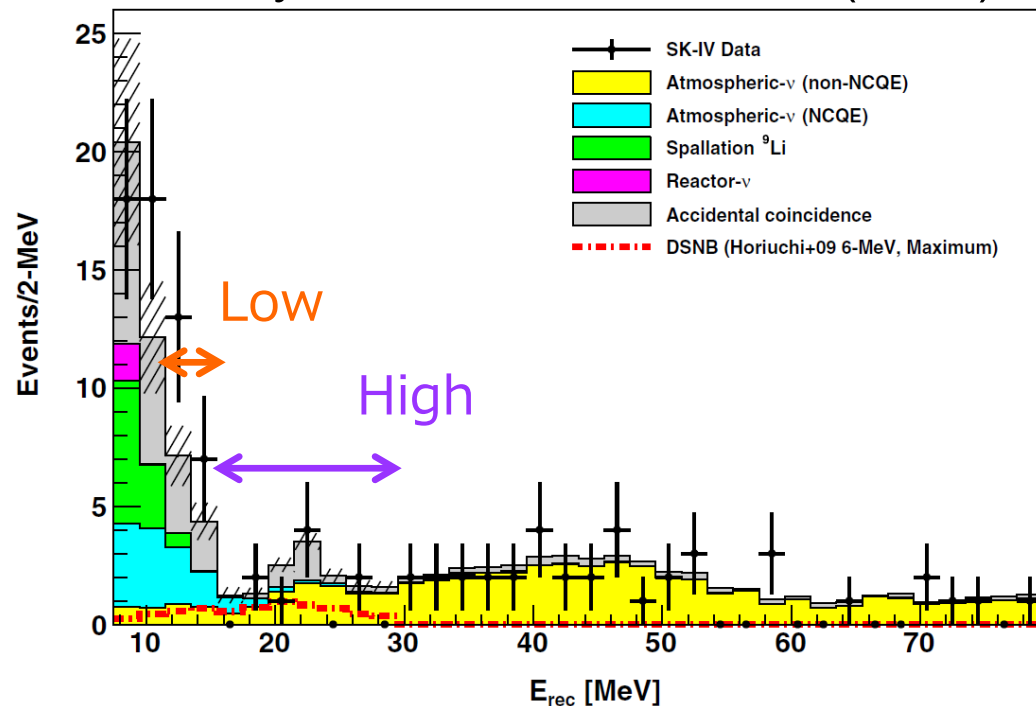
- IMF はイベント数全体を上下させる。
- BH/NS はスペクトルの硬さを変える。

# スペクトルの硬さの評価

- ニュートリノを2つのエネルギービンに分ける。
  - Low-energy bin:  $13.3 < E_\nu < 17.3$  MeV
  - High-energy bin:  $17.3 < E_\nu < 31.3$  MeV



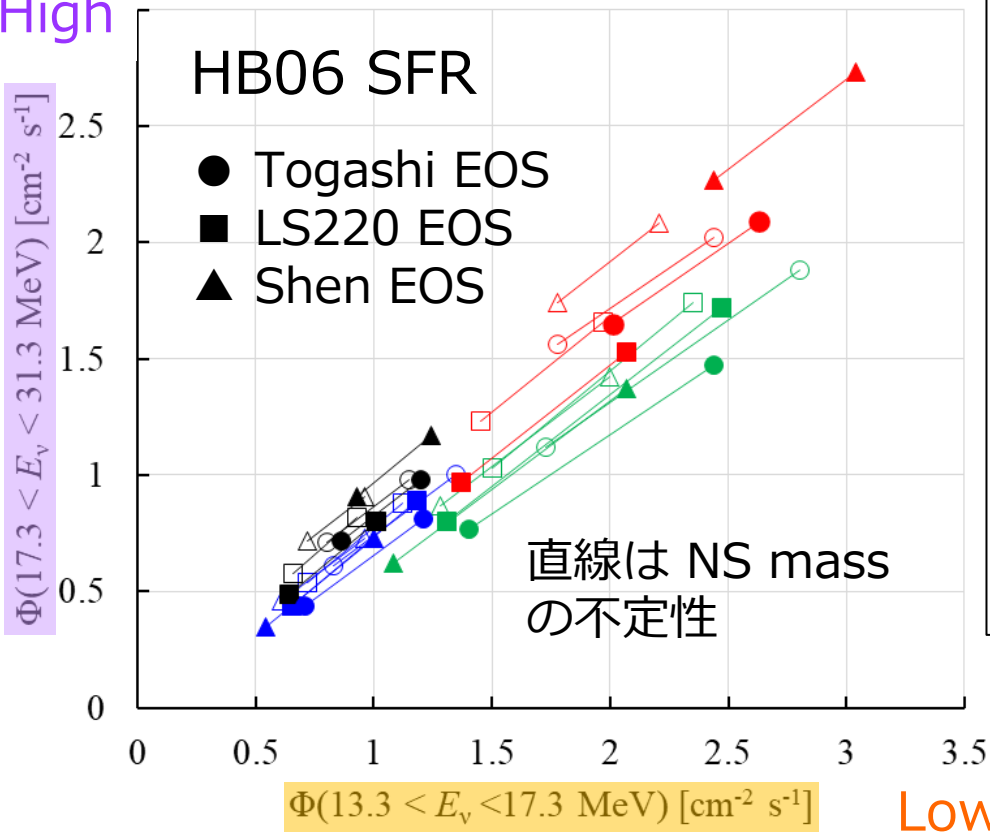
Abe et al.  
Phys. Rev. D **104**, 122002 (2021)





# 高/低エネルギーの積分フラックス

High



赤: Galaxy-type dependent IMF,  $18M_\odot$  以上は Black Hole

緑: Galaxy-type dependent IMF,  $18M_\odot$  以上でも Neutron Star

黒: Universal (Salpeter) IMF,  $18M_\odot$  以上は Black Hole

青: Universal (Salpeter) IMF,  $18M_\odot$  以上でも Neutron Star

Filled symbol: Normal  
Open symbol: Inverted

- IMF,  $18M_\odot$  以上の fate の違いで分けられる。
  - 中性子星の質量分布、EOS、ニュートリノ質量階層の不定性よりも大きい。

# 観測によるモデルの検証

- ベイズの定理に基づいて解析。

$$P(\text{model}|\text{obs}) = \frac{P(\text{obs}|\text{model}) \times P(\text{model})}{\sum_{\text{model}} P(\text{obs}|\text{model}) \times P(\text{model})}$$

- 各モデルの低エネルギー ( $13.3 < E_\nu < 17.3 \text{ MeV}$ )、高エネルギー ( $17.3 < E_\nu < 31.3 \text{ MeV}$ ) イベント数を観測量とする:  $\text{obs} = \{N_{\text{low}}, N_{\text{high}}\}$
- シグナルだけでなくバックグラウンドも含める。
  - non-NCQE, NCQE, accidental, Li9 の4つ。
  - 系統誤差と統計誤差を考慮。

# SK-Gd, HK による検出

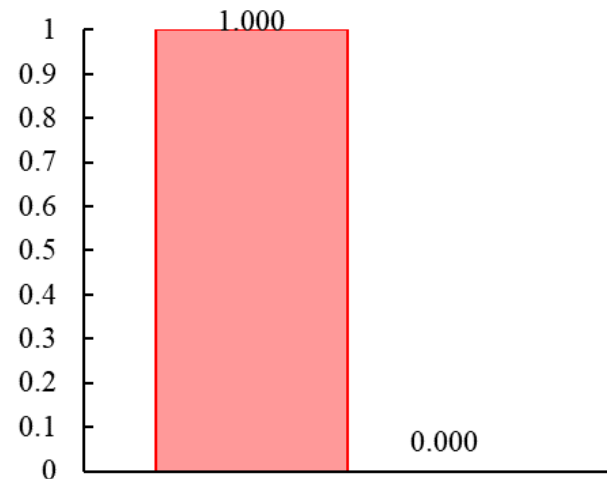
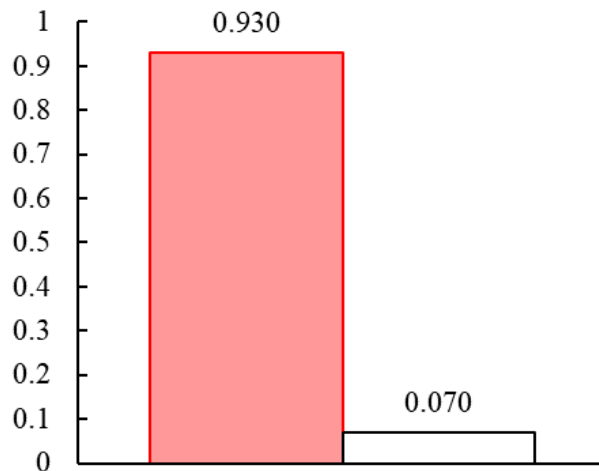
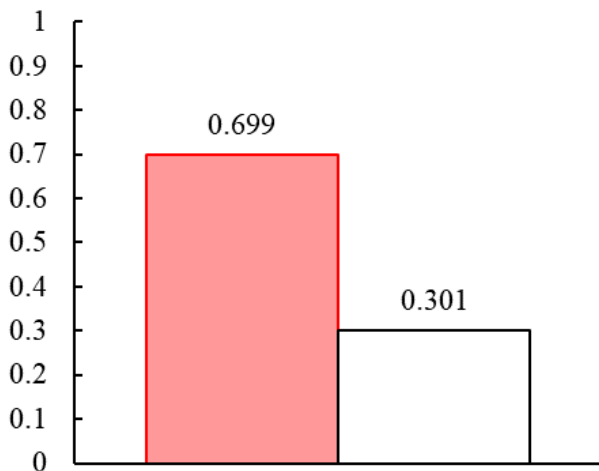
- 銀河の化学進化モデルを input としたときの posterior (HB06 SFR, Togashi EOS, heavy NS 25%, NH)

**Preliminary**

SK IV (参考)

SK-Gd 10年

HK 10年

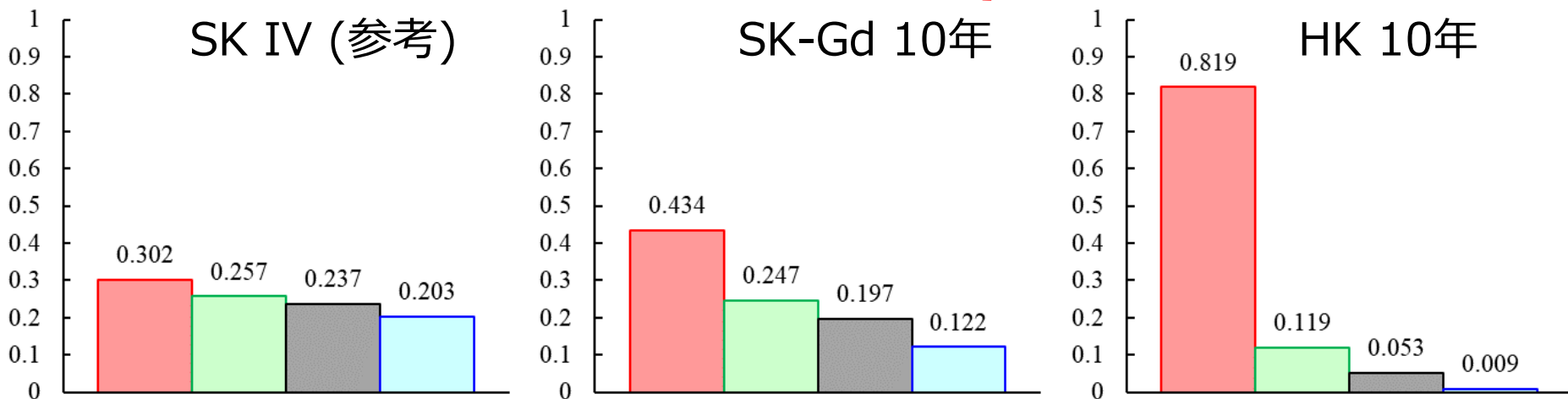


赤: Galaxy-type dependent IMF, 18 $M_{\odot}$  以上は Black Hole  
白: バックグラウンドのみの場合  
= input model

# SK-Gd, HK によるモデル識別

- 銀河の化学進化モデルを input としたときの posterior (HB06 SFR, Togashi EOS, heavy NS 25%, NH)

**Preliminary**



赤: Galaxy-type dependent IMF,  
18M<sub>⊙</sub> 以上は Black Hole  
= input model

黒: Universal (Salpeter) IMF,  
18M<sub>⊙</sub> 以上は Black Hole

緑: Galaxy-type dependent IMF,  
18M<sub>⊙</sub> 以上でも Neutron Star

青: Universal (Salpeter) IMF,  
18M<sub>⊙</sub> 以上でも Neutron Star

# まとめ

- Tsujimoto (2023) の銀河の化学進化モデルに基づいて背景ニュートリノを求めた。
  - 昔の銀河の IMF は大質量星が多いため、背景ニュートリノのイベント数が増える。
  - $18M_{\odot}$  以上の星がブラックホールになるため、ニュートリノのスペクトルが硬くなる。
- 上記の効果は、中性子星の質量分布、EOS、ニュートリノ振動(質量階層)の不定性より大きい。
- SK-Gd 10年の観測で検出、HK 10年の観測でモデルの検証に期待。