

# 初代星からのニュートリノ・重力波 とその観測からわかること



諏訪 雄大

東京大学 宇宙理論研究室

共同研究者：

滝脇知也(東大)、固武慶(国立天文台)、佐藤勝彦(東大)

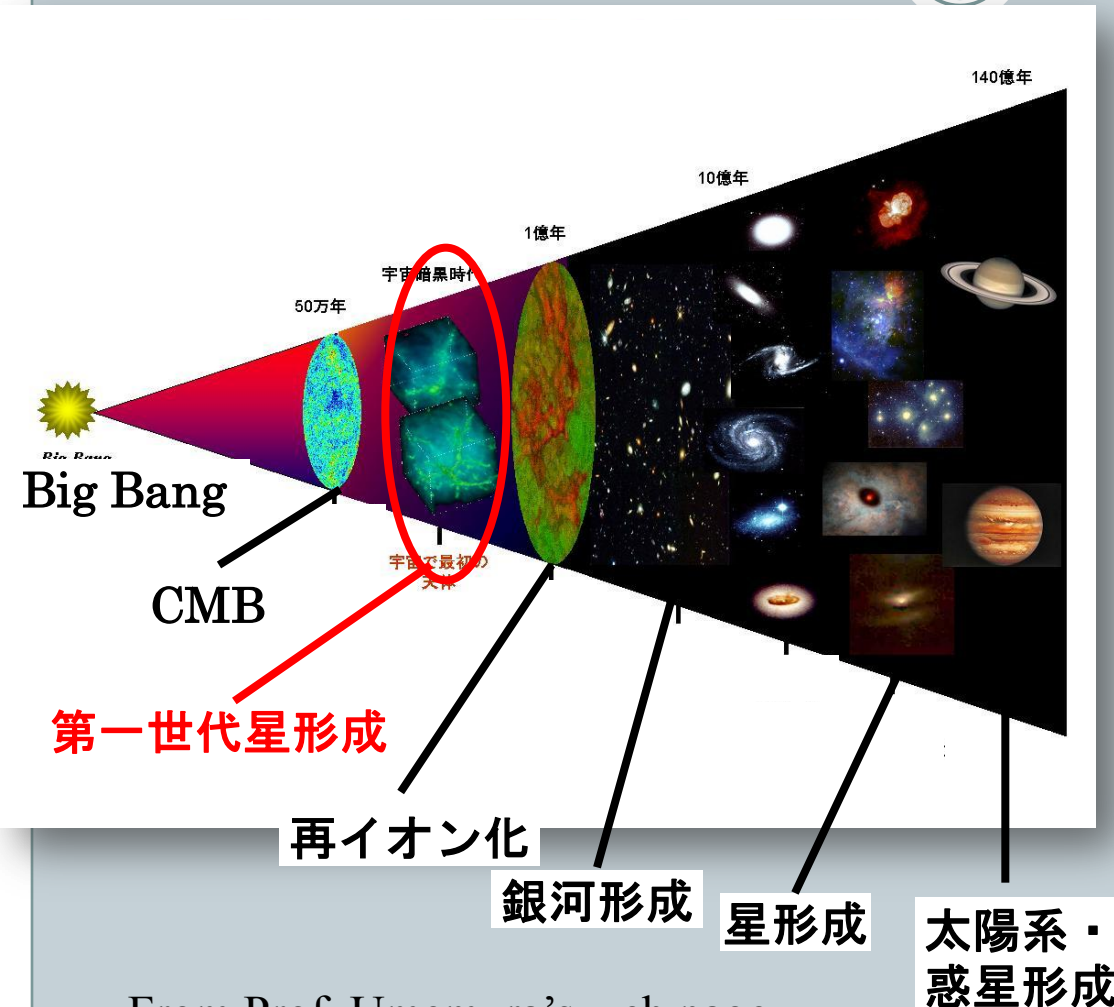
YS, Takiwaki, Kotake, Sato ApJ **665** L43(2007)

YS, Takiwaki, Kotake, Sato ApJ accepted (2008)

# 第一世代星

# 第一世代星

2



- 宇宙の重元素の根源
- 宇宙の再電離の要因
- 赤外背景放射の起源？
- 中間質量BHと関連？
- 高赤方偏移GRB？

From Prof. Umemura's web page

# 星の進化

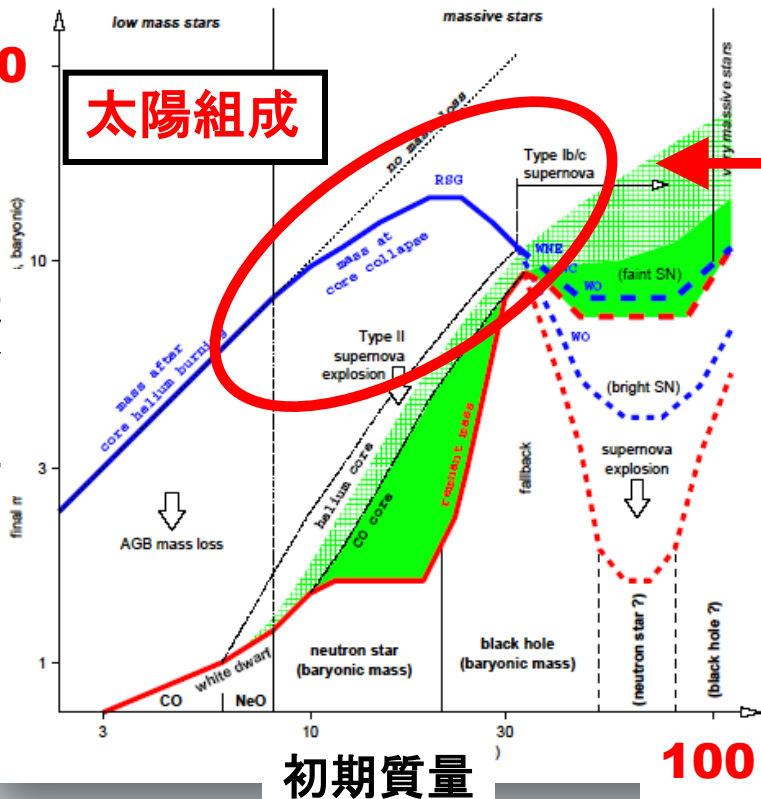
3

Heger et al. (2003)

30

太陽組成

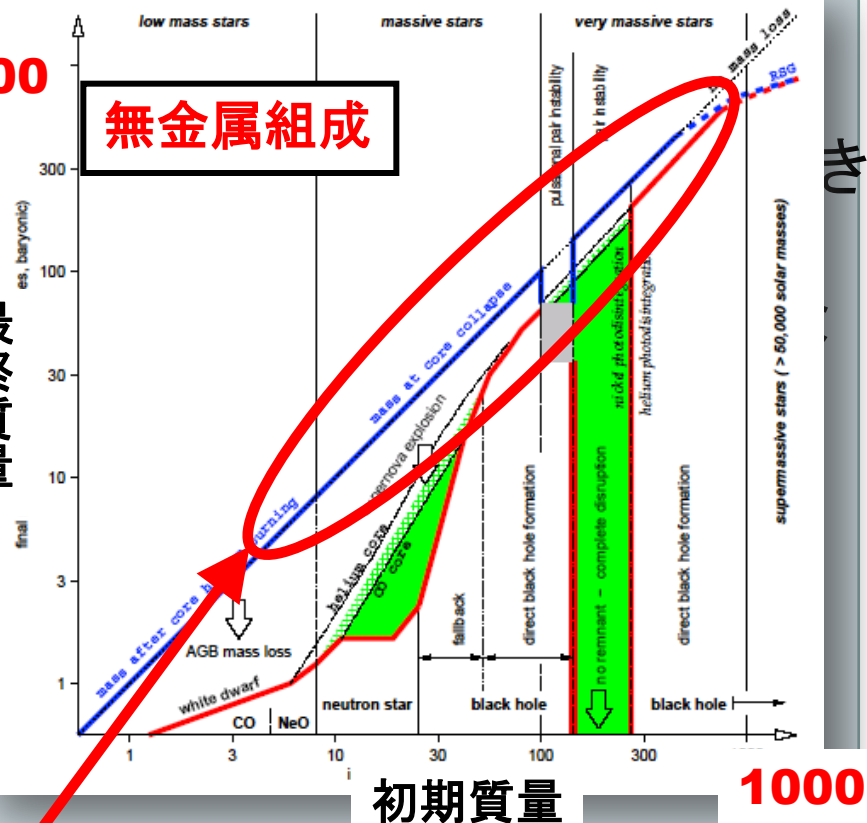
最終質量



1000

無金属組成

最終質量



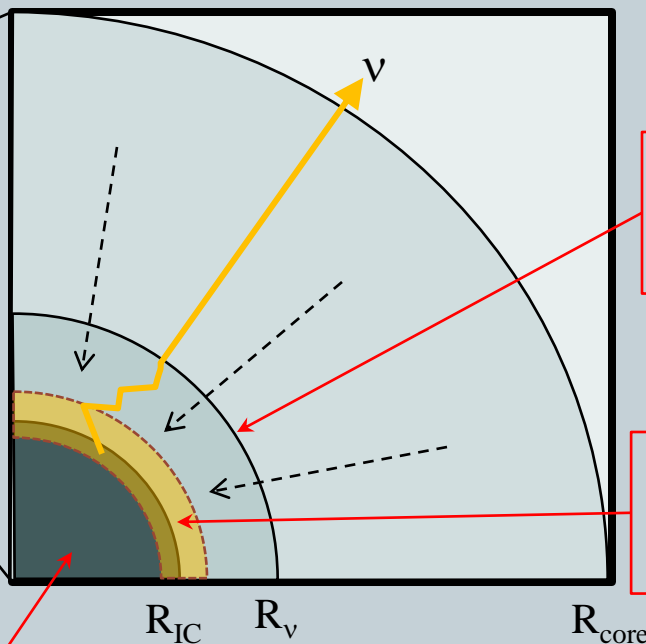
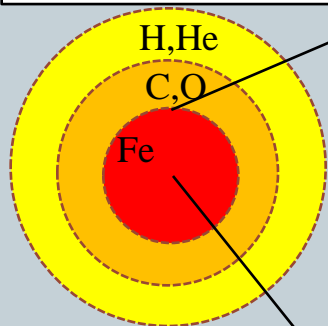
金属量が小さいと、質量損失がほとんどない！！

第一世代星は金属量が少ないため、通常よりもはるかに大きい質量を保持したまま重力崩壊を始める

# 第一世代星の重力崩壊の概要

4

$M \geq 300 M_{\odot}$  の場合



**Neutrino sphere:**

$\tau_v \sim 1$

**Accretion Shock:**

ニュートリノ生成率最大

**Inner core:**

熱的圧力により安定化

⇔ 通常のSNでは、  
核力によって安定化

$M_{IC} \sim O(10)M_{\odot}$

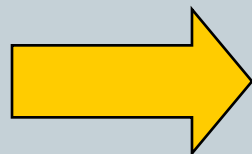
→ BH

# 第一世代星からの放射

5

第一世代星

非常に重い  
BH形成



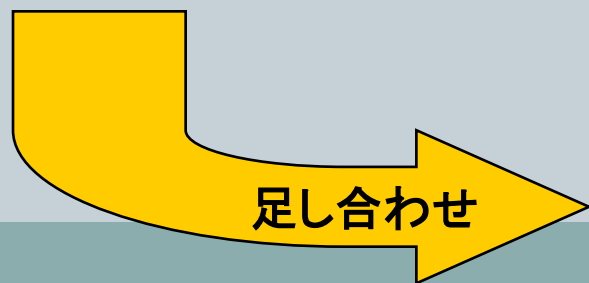
重力波



**重力崩壊の際に放射されたニュートリノ、  
重力波の観測によって初代星の形成史に  
迫る！**

ニュートリノ

重力波



足し合わせ

背景ニュートリノ

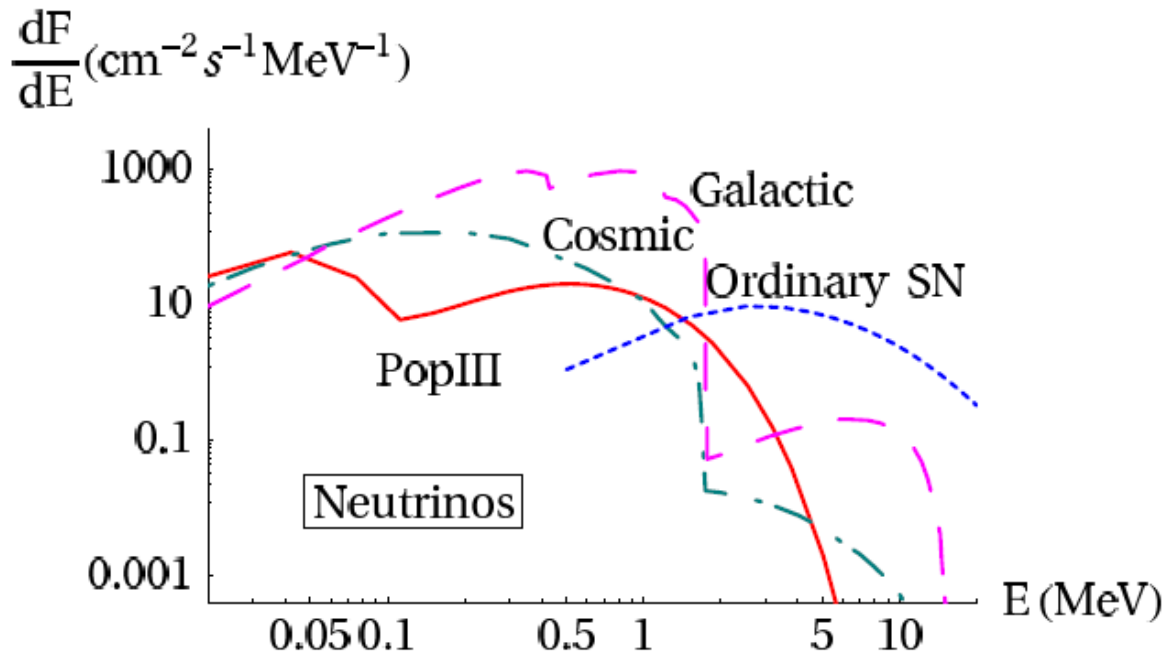
# 第一世代星からの ニュートリノ

YS, Takiwaki, Kotake, Sato ApJ accepted (arXiv:0806.1072)

# 背景ニュートリノスペクトル

7

Iocco et al. (2005)



第一世代星の観測が  
できるエネルギー帯  
は存在しない??



# シミュレーション手法

8

## 計算方法

- 2次元軸対称を仮定
- 流体計算 → ZEUS-2D code (Stone & Norman 1992)
- 現実的状态方程式 (Shen et al. 1998)
- ニュートリノ冷却については、3種類のニュートリノを考慮
- 自己重力 + 一般相対論補正 (Marek et al. 2006)

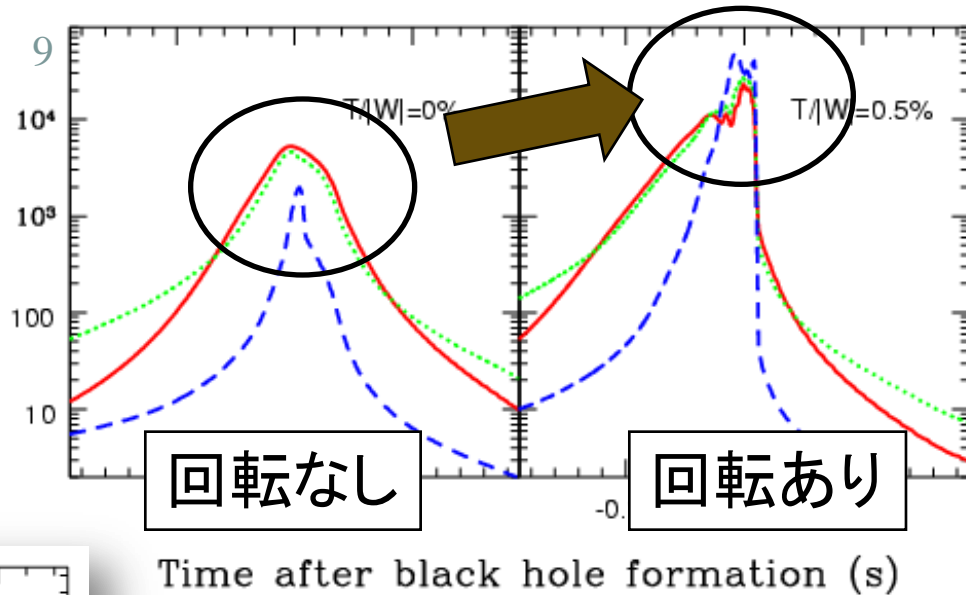
## 初期モデル

- $300 M_{\odot}$  の星の平衡状態
- 回転は微分回転 (星の内側がよく回っている) を仮定し、回転エネルギー/重力エネルギー = 0, 0.5, 2% の3モデルを考える。

# 回転の効果

放射ニュートリノ  
量が増加

ニュートリノ光度  
 $N_{\nu}$

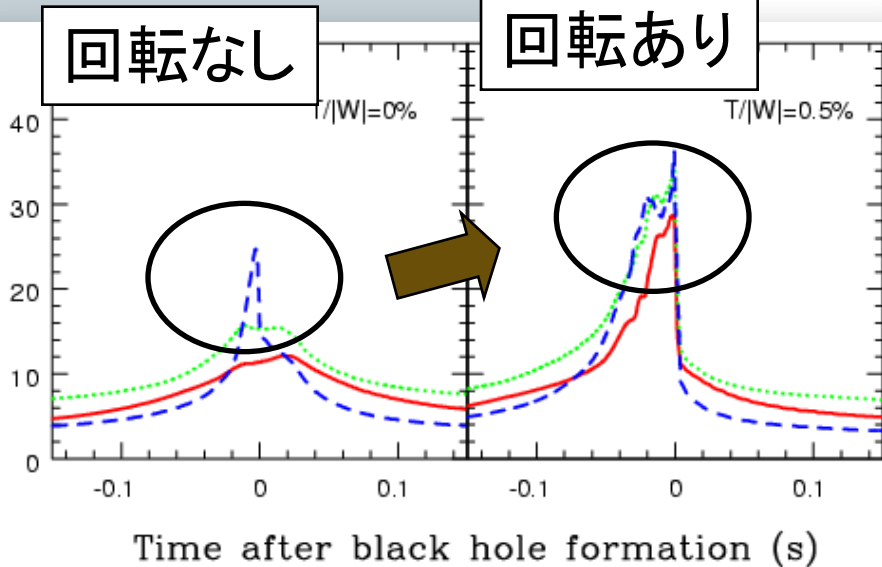


回転なし

回転あり

Time after black hole formation (s)

平均エネルギー



回転なし

回転あり

Time after black hole formation (s)

平均エネルギー  
も大きくなる

# 回転の効果

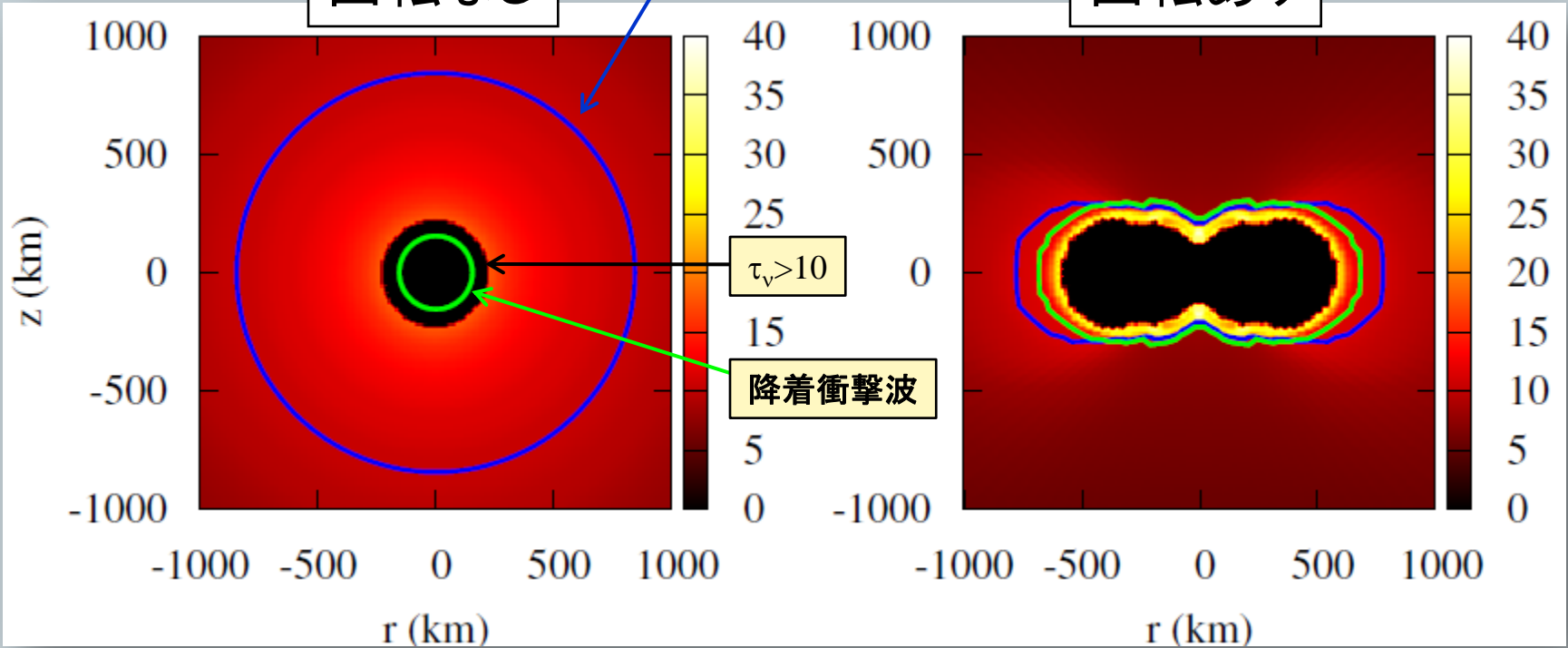
10

ニュートリノエネルギー分布

回転なし

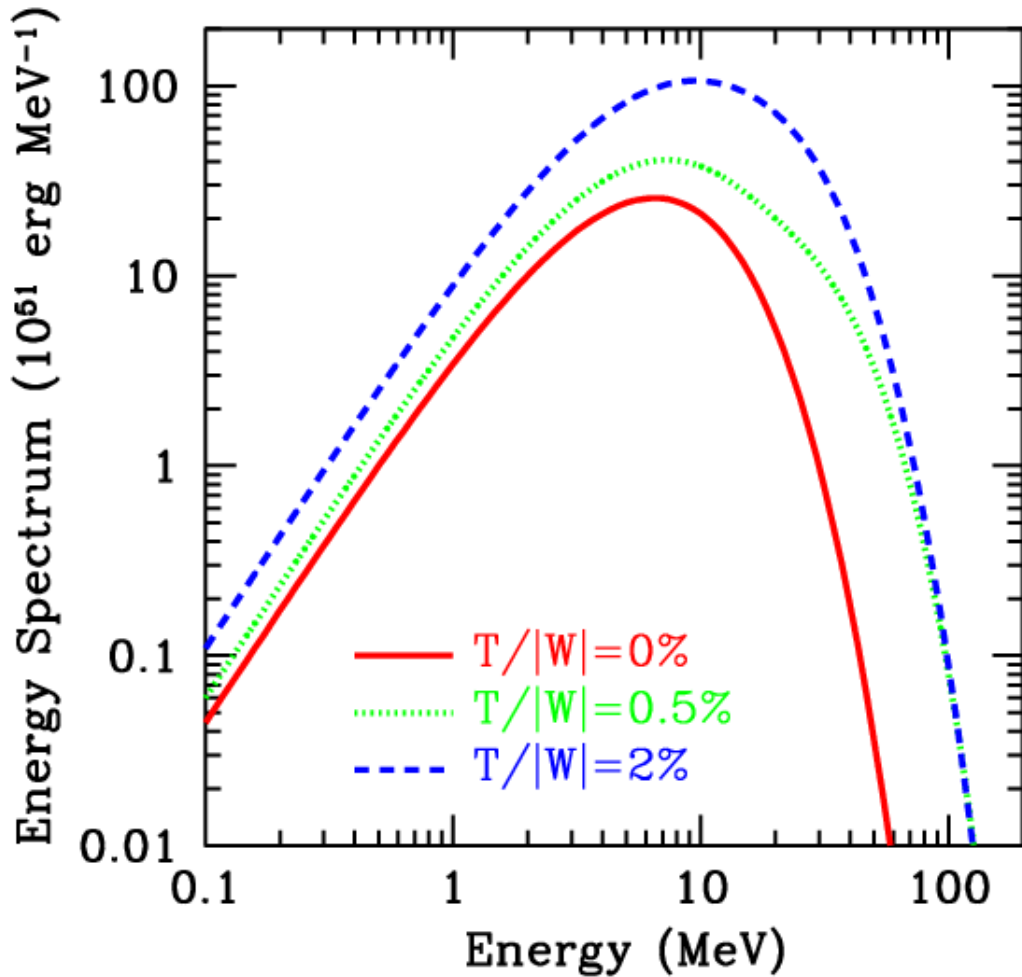
ニュートリノ球 ( $\tau_\nu=2/3$ )

回転あり



# ニュートリノスペクトル

11



Luminosity spectrum

$$\frac{dL_\nu}{d\varepsilon'}(t) = \int dV Q_\nu \frac{dP_\nu}{d\varepsilon'}$$

$Q_\nu$  : emissivity

$\varepsilon'$  :  $\nu$  energy at local frame

(local) Fermi-Dirac distribution

$$\frac{dP_\nu}{d\varepsilon'} = \frac{2}{3\zeta_3 T_\nu^3} \frac{\varepsilon'^2}{e^{\varepsilon'/T_\nu} + 1}$$

$T_\nu$  : effective  
temperature of  $\nu$

# 背景ニュートリノ

12

## Differential flux at Earth

$$\frac{dF_\nu}{d\varepsilon} = cf_{III}n_\gamma\eta\frac{m_N}{m_{III}}\int_0^\infty dz(1+z)\psi(z)\frac{dN_\nu}{d\varepsilon'}$$

$z$ : redshift

$\varepsilon$ :  $\nu$  energy observed at Earth ( $\varepsilon=\varepsilon'/(1+z)$ )

$f_{III}$ : baryon fraction of all baryons going through Pop III

$n_\gamma$ : CMB photon density at  $z=0$  ( $\sim 410\text{ cm}^{-3}$ )

$\eta$ : cosmic baryon-photon ratio ( $\sim 6.3\times 10^{-10}$ )

$m_N$ : nucleon mass

$m_{III}$ : mass of Pop III

$\psi(z)$ : star formation rate

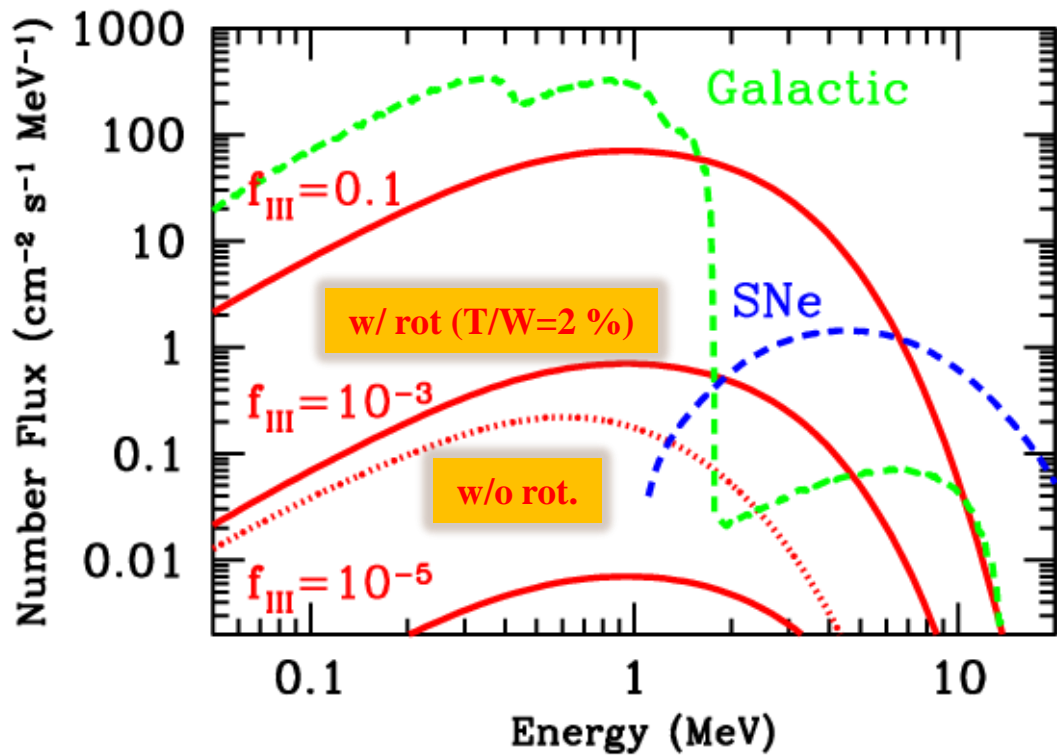
$dN/d\varepsilon'$ : number spectra at the source frame

## Assumptions

$$f_{III} = 0.1, 10^{-3}, 10^{-5} \quad m_{III} = 300M_\odot \quad \psi(z) = \delta(z - 10)$$

# 背景ニュートリノ

13



If we adopt the largest value for  $f_{\text{III}}$ , the contribution of Pop III dominate the ordinary core-collapse SNe below  $\sim 7$  MeV.

# 第一世代星からの 重力波

YS, Takiwaki, Kotake, Sato ApJ **665**, L43 (2008)

# シミュレーション手法

15

## 計算方法

- 2次元軸対称を仮定
- 流体計算 → ZEUS-2D code (Stone & Norman 1992)
- 現実的状态方程式 (Shen et al. 1998)
- ニュートリノ冷却については、3種類のニュートリノを考慮
- 自己重力 + 一般相対論補正 (Marek et al. 2006)

## 初期モデル

- 300-1000  $M_{\odot}$  の星の平衡状態
- 回転は微分回転(星の内側がよく回っている)を仮定し、回転エネルギー/重力エネルギー = 0.5% のモデルを考える。



# 重力波計算

16

非球対称な { 物質の動き } に着目。  
          { **ニュートリノ放射** }

↑ 最近注目されている重力波源

## 物質

四重極公式

$$h_{ij}^{\text{TT}} = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{R} \frac{d^2}{dt^2} \left( I_{ij}^{\text{TT}} \left( t - \frac{R}{c} \right) \right)$$

$$I_{ij}^{\text{TT}} = \int dV \rho(x, t) \left( x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij} \right)$$

ソースまでの  
距離

球対称では0になる

## ニュートリノ

Epstein(1978), Mueller & Janka(1997)

$$h_{\nu}^{\text{TT}} = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{R} \int_{-\infty}^t dt' L_{\nu}(t') \alpha(t')$$

ニュートリノ光度

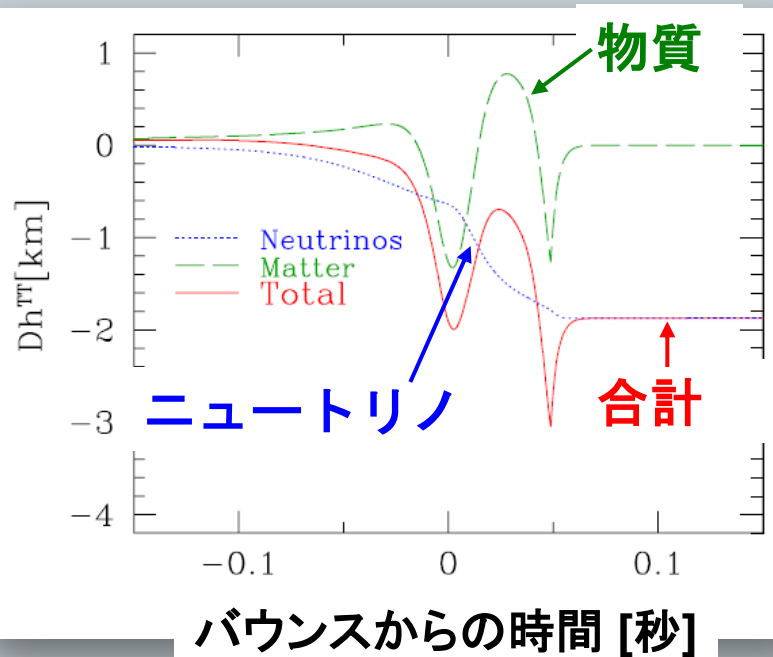
非対称度

$$\alpha(t) \propto \frac{1}{L_{\nu}(t)} \frac{dL_{\nu}(t)}{d\Omega}$$

# 単体の星からの重力波

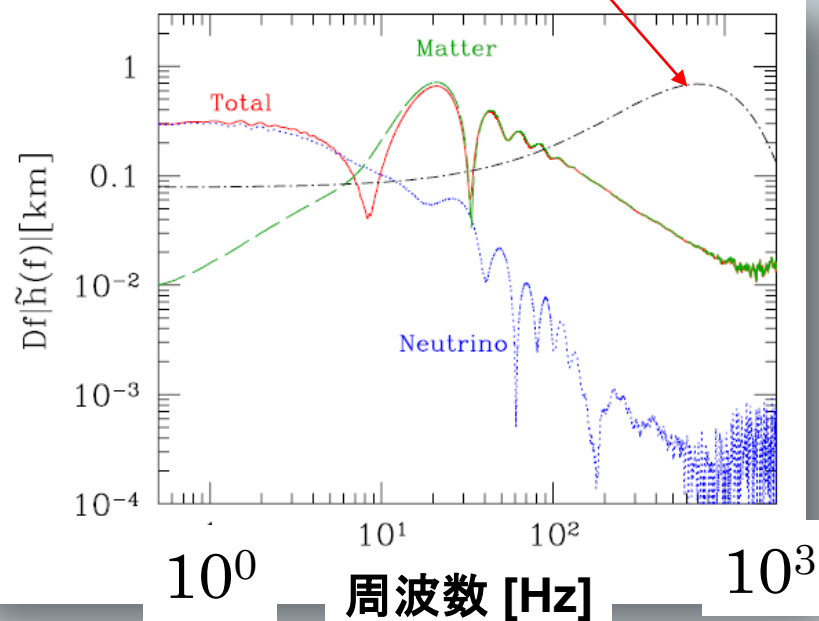
17

## 300M<sub>☉</sub>の場合



FT

通常の超新星  
Buonanno+05



最初は物質起源の重力波が支配的。  
最後はニュートリノ起源が支配的。

低周波数モードではニュートリノ起源。  
高周波数モードでは物質起源。

# 背景重力波スペクトル

18

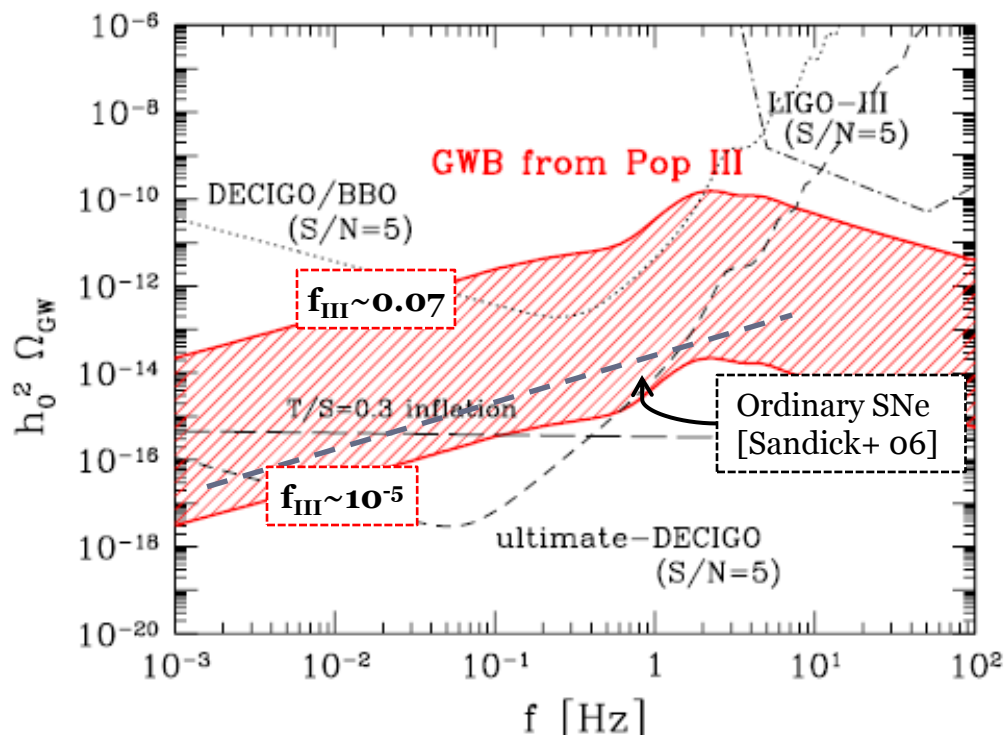
## 密度パラメータ

$$\begin{aligned} \Omega_{GW} &= \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{GW}}{d \log f} \\ &= \frac{16\pi^2 c}{15G\rho_c} \int \frac{dz}{1+z} \left| \frac{dt}{dz} \right| \psi(z) \\ &\quad \times \int_{M_{min}}^{M_{max}} dm \phi(m) f'^3 D^2 |\tilde{h}(f')|^2 \end{aligned}$$

星形成率       $\psi(z)$   
質量関数       $D^2 |\tilde{h}(f')|^2$       重力波強度

$\psi(z) \rightarrow$  Sandick+06

$\phi(m) \rightarrow$  Salpeter ( $\propto m^{-2.3}$ )



- DECIGOやBBOといった重力波干渉計で(相関を取らずに)十分見える強度
- 観測にかかり得るのはニュートリノ起源による低周波数側の重力波
- 星形成率が最大の不定性

# まとめ

# まとめ

20

- **第一世代星の重力崩壊**を数値シミュレーションによって計算し、その際に放出される重力波、ニュートリノの量を見積もった
- **背景ニュートリノ**はこれまで考慮されていなかった回転の効果を考えると、観測可能性が高まることを示した
- **背景重力波**については観測可能性が高いことを示した

**これらの信号を観測すれば、初代星の星形成率に対して制限を加えることができる！**