

極超新星でのニュートリノ駆動風
におけるr-processと
weak r star組成

藤林 翔 (京大理)

吉田 敬 (京大基研)

関口 雄一郎 (京大基研)

ニュートリノ駆動風 (neutrino-driven wind)

PNS



- Proto-Neutron Star (PNS)の質量放出機構

- 冷却過程で放出するニュートリノによる加熱

(Salpeter & Shapiro 1981;
Duncan et al. 1986)

- r-processの舞台として
有力な候補だった

(Hoffman et al. 1997;
Otsuki et al. 2000;
Wanajo et al. 2001;
Roberts et al. 2010;
Wanajo 2013 ...)

Hypernova(HN)での重元素合成

- より重たい星に注目
- HNにおいては計算がなかった
- 数値相対論による計算 (Sekiguchi et al. 2012)
 - massive PNSの一時(~ sec)形成

	mass of PNS	neutrino luminosity
SN	$1.4 M_{\odot}$	$10^{51-52} \text{ erg s}^{-1}$
HN	$\sim 3 M_{\odot}$	$\sim 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$

通常のSNとは異なる (より極端な) 環境が実現しうる

wind解構成

連続の式

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho u$$

運動方程式

$$u \frac{du}{dr} = -\frac{1+u^2-2M/r}{1+\epsilon+P/\rho} \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} - \frac{M}{r^2}$$

エネルギー方程式

$$Tu \frac{ds}{dr} = \dot{q}_{\nu N} - \dot{q}_{eN} + \dot{q}_{e\nu} - \dot{q}_{e+e-} + \dot{q}_{\nu\bar{\nu}}$$

$$\dot{q}_{\nu N} \propto [(1-Y_e)L_{\nu_e}\epsilon_{\nu_e}^2 + Y_eL_{\bar{\nu}_e}\epsilon_{\bar{\nu}_e}^2] \frac{1-g_1(r)}{R^2} \Phi(r)^6$$

$$\dot{q}_{e\nu} \propto \frac{T^4}{\rho} \left(L_{\nu_e}\epsilon_{\nu_e} + L_{\bar{\nu}_e}\epsilon_{\bar{\nu}_e} + \frac{6}{7}L_{\nu_x}\epsilon_{\nu_x} \right) \frac{1-g_1(r)}{R^2} \Phi(r)^5$$

$$\dot{q}_{\nu\bar{\nu}} \propto \left[L_{\nu_e}L_{\bar{\nu}_e}(\epsilon_{\nu_e} + \epsilon_{\bar{\nu}_e}) + \frac{6}{7}L_{\nu_x}^2\epsilon_{\nu_x} \right] \frac{g_2(r)}{\rho R^4} \Phi(r)^9$$

$$q_{eN} \propto T^6 \left[\frac{(1-Y_e)J}{1-\exp(\eta_{\nu}^F - \zeta_n - \eta_e^F)} \Big|_{\text{pc}} + \frac{Y_e J}{1-\exp(\eta_{\nu}^F - \zeta_n - \eta_e^F)} \Big|_{\text{ec}} \right]$$

$$\dot{q}_{e+e-} \propto \frac{T^9}{\rho} K$$

Yeの発展方程式

$$u \frac{dY_e}{dr} = -(\lambda_{\bar{\nu}p} + \lambda_{\text{ec}})Y_e + (\lambda_{\nu n} + \lambda_{\text{pc}})(1 - Y_e)$$

$$\lambda_{\text{ec,pc}} \propto T^5 \frac{I}{1 - \exp(\eta_{\nu}^F - \zeta_n - \eta_e^F)} \Big|_{\text{ec,pc}}$$

$$\lambda_{\bar{\nu}p} \propto \left(\epsilon_{\bar{\nu}_e} - 2\Delta + 1.2 \frac{\Delta^2}{\epsilon_{\bar{\nu}_e}} \right) \frac{L_{\bar{\nu}_e} \Phi(r)^6 [1 - g_1(r)]}{R^2}$$

$$\lambda_{\nu n} \propto \left(\epsilon_{\nu_e} + 2\Delta + 1.2 \frac{\Delta^2}{\epsilon_{\nu_e}} \right) \frac{L_{\nu_e} \Phi(r)^6 [1 - g_1(r)]}{R^2}$$

EOS

Timmes EOS (Timmes & Swesty 2000)

PNS表面での情報 → wind解を構成

windのパラメータ

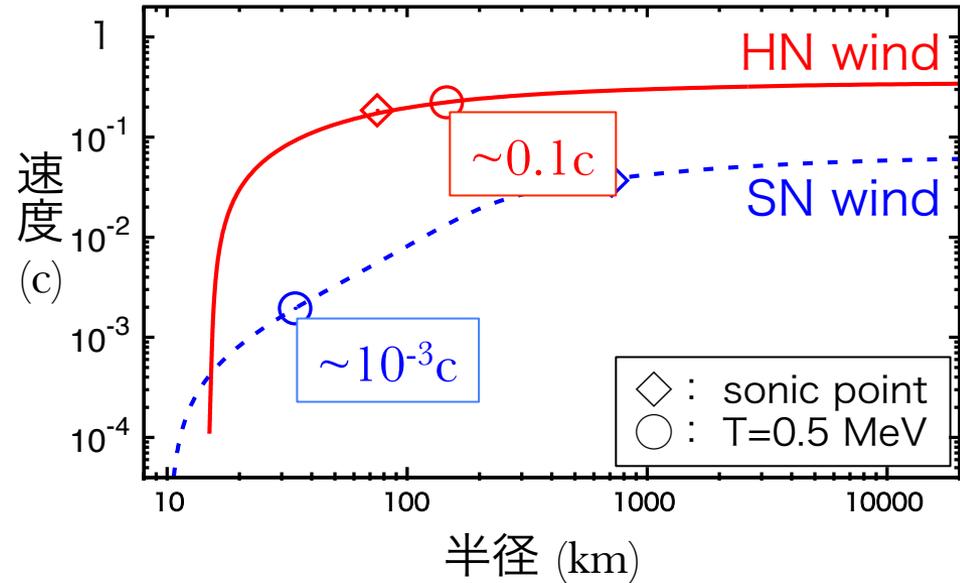
- ✓ PNSの質量・半径
- ✓ neutrinoの光度/平均エネルギー

SN/HNのwindの違い

パラメータ	HN	normal SN
L_{ν_e}	$10^{53} \text{ erg s}^{-1}$	$10^{51} \text{ erg s}^{-1}$
ϵ_{ν_e}	10.5 MeV	12 MeV
$\epsilon_{\bar{\nu}_e}$	16.0 MeV	14 MeV
ϵ_{ν_x}	25 MeV	14 MeV
M	$3 M_{\odot}$	$1.4 M_{\odot}$
R	15 km	10 km
Y_c	0.48	0.53

Sekiguchi et al. (2012)

Fischer et al. (2010)

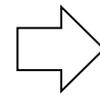


- expansion timescale

HN : $\sim 5 \text{ ms}$

SN : $\sim 50 \text{ ms}$

$$\tau_{\text{exp}} = r/v \text{ @ } 0.5 \text{ MeV}$$



r-processによる
重元素合成に有利

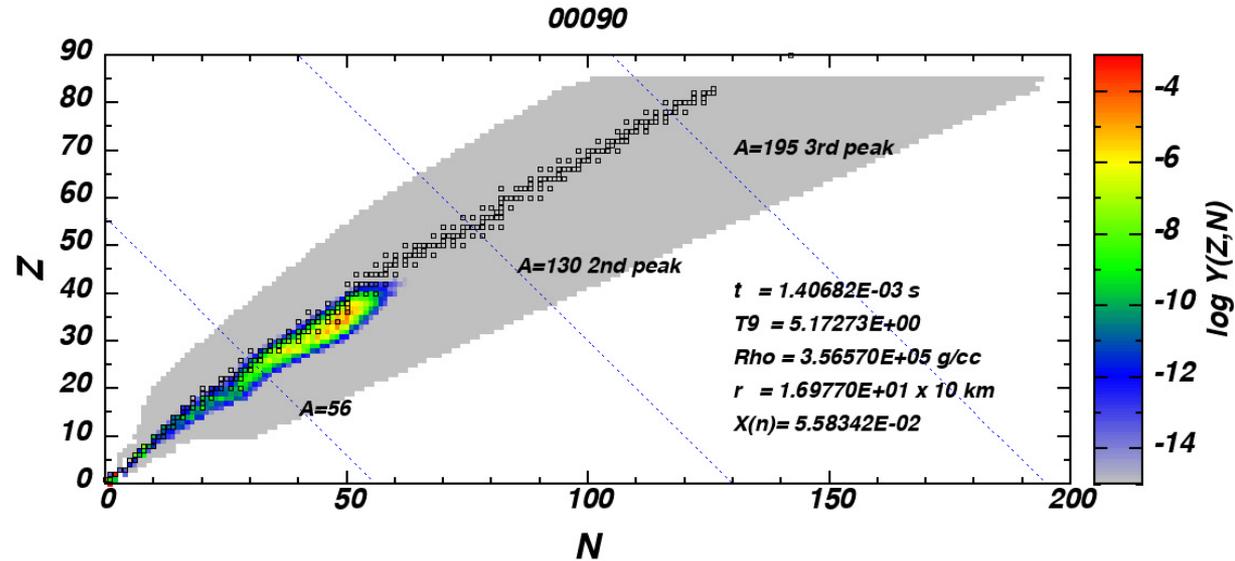
- seed元素(少)
- n/seed比(大)

元素合成計算

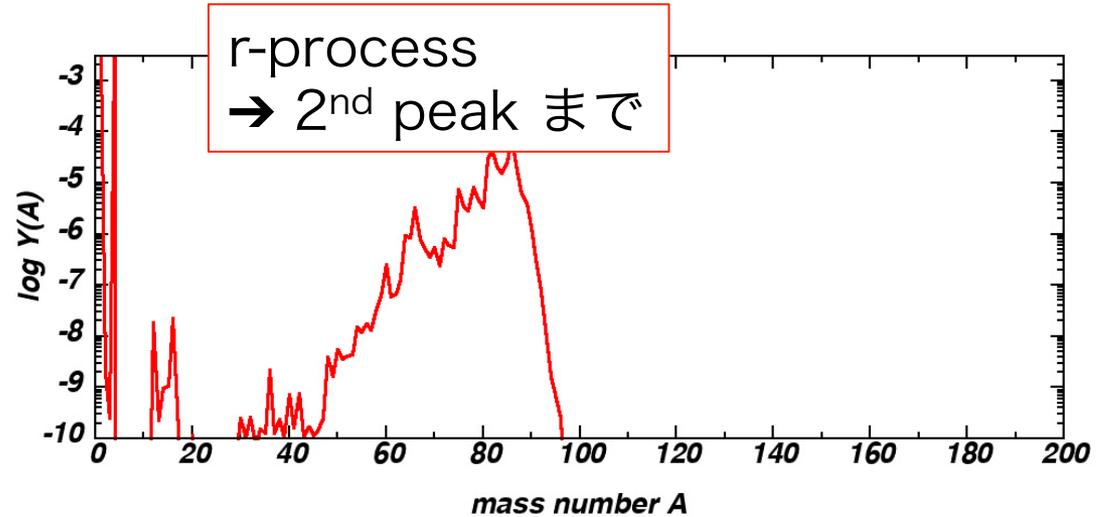
Sekiguchi et al. (2012)

数値相対論シミュレーションの値

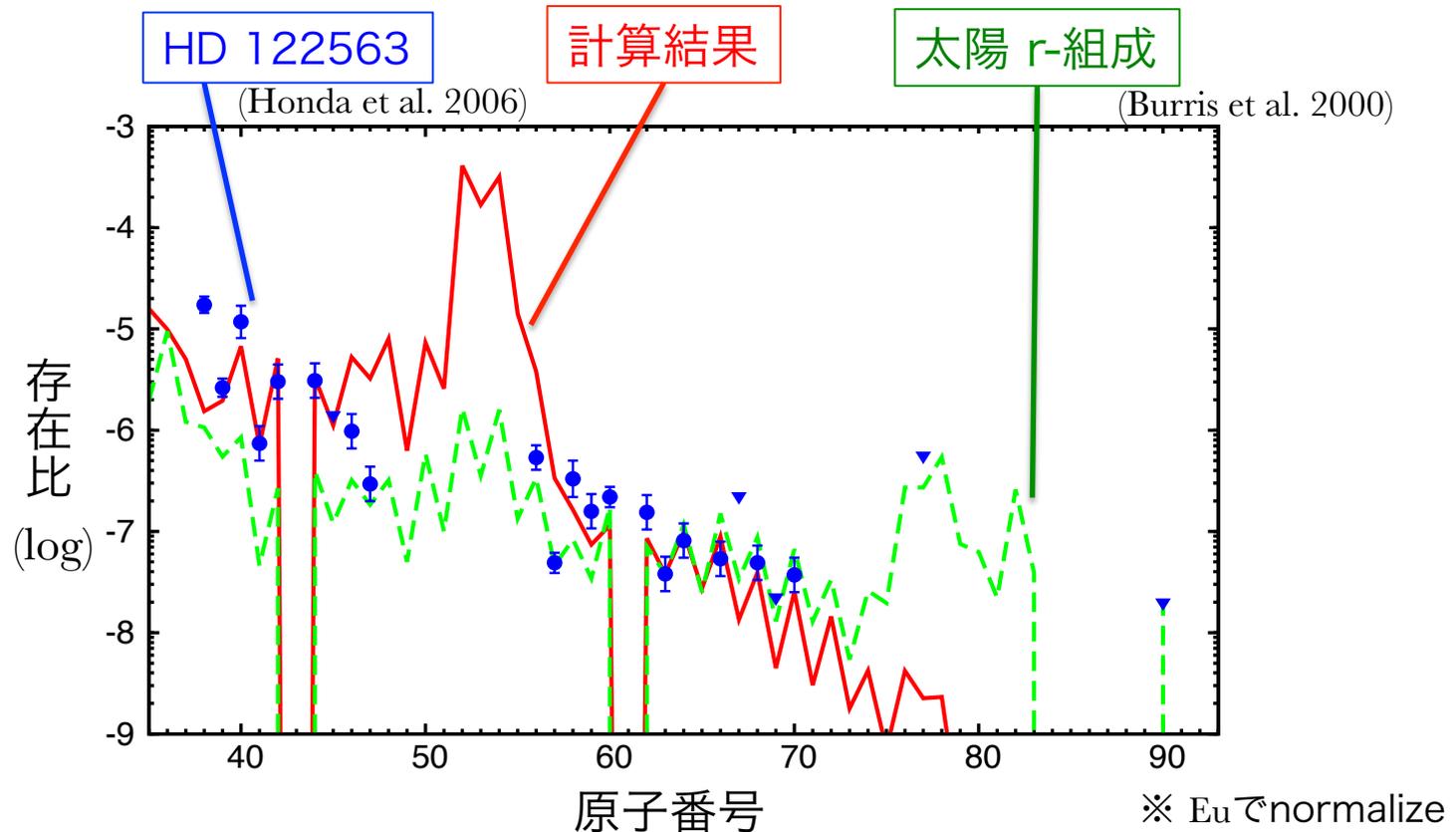
パラメータ	値
L_{ν_e}	$1.5 \times 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$
$L_{\bar{\nu}_e} / L_{\nu_e}$	1.1
L_{ν_x} / L_{ν_e}	0.1
ϵ_{ν_e}	10.5 MeV
$\epsilon_{\bar{\nu}_e}$	16.0 MeV
ϵ_{ν_x}	25 MeV
M	$3 M_{\text{sun}}$
R	15 km



核種数	5406
熱核反応	JINA REACLIB (Cyburt et al. 2010)
β -decay rates	Langanke & Martinez-Pinedo (2001) Oda et al. (1994) Takahashi & Yokoi (1987) Fuller, Fowler & Newman (1985) Horiguchi et al. (1996) Tachibana et al. (2000) Moller et al. (2003)



weak-r star (HD 122563) 組成の起源？



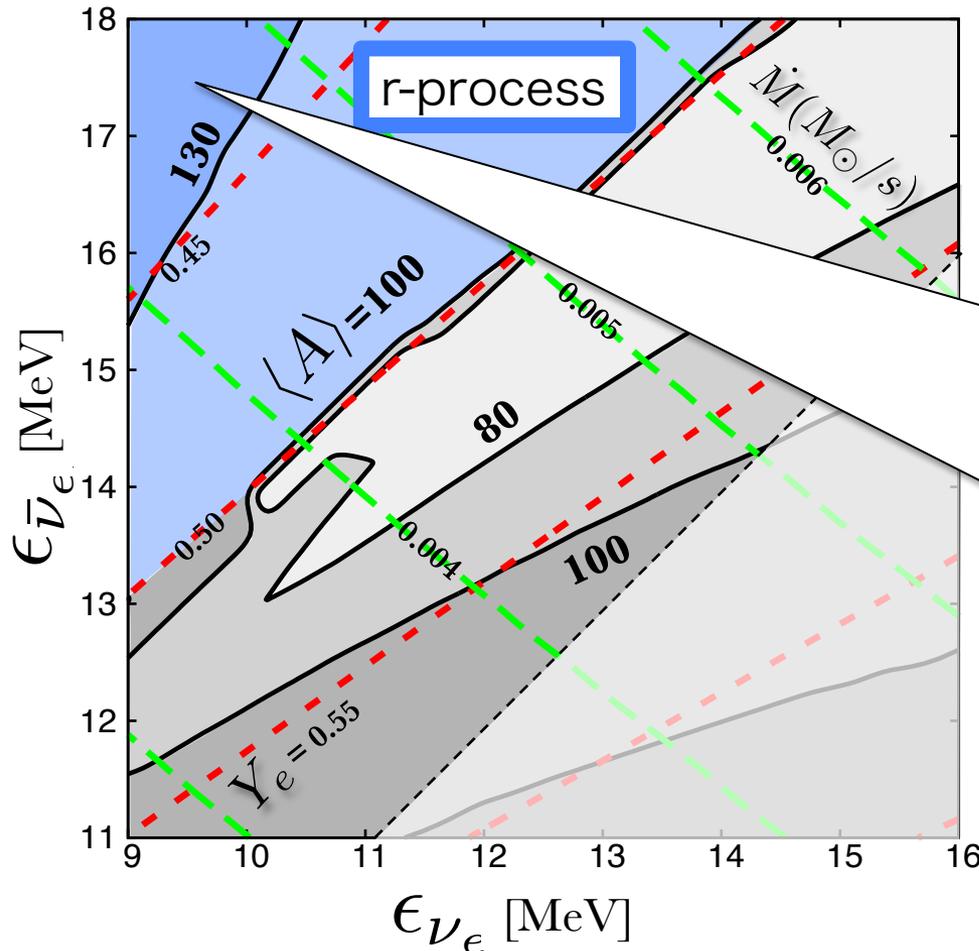
シミュレーションから示唆される値で
weak-r starの元素組成を説明できる可能性がある

strong(main)-r については中性子星連星の合体で説明可能

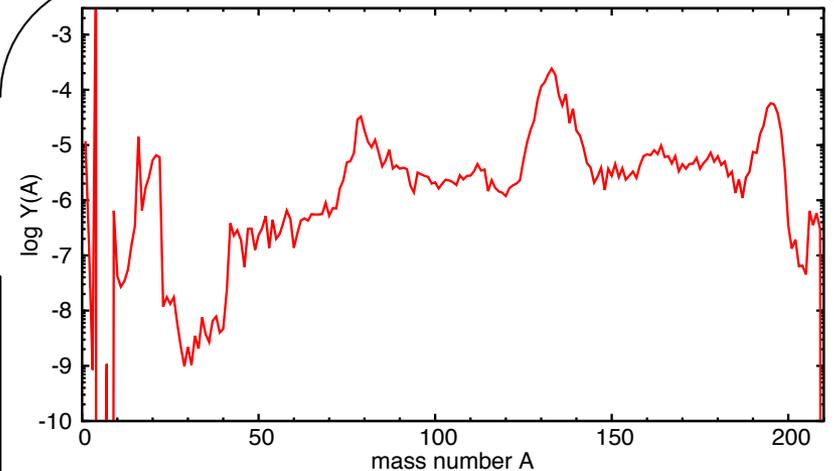
[関口さんの講演 (先ほど) 参照]

ニュートリノエネルギー依存性

- $\epsilon_{\nu_e}, \epsilon_{\bar{\nu}_e}$ の不定性：シミュレーション
核物質の有限密度効果 (Roberts et al. 2012; Horowitz et al. 2012)



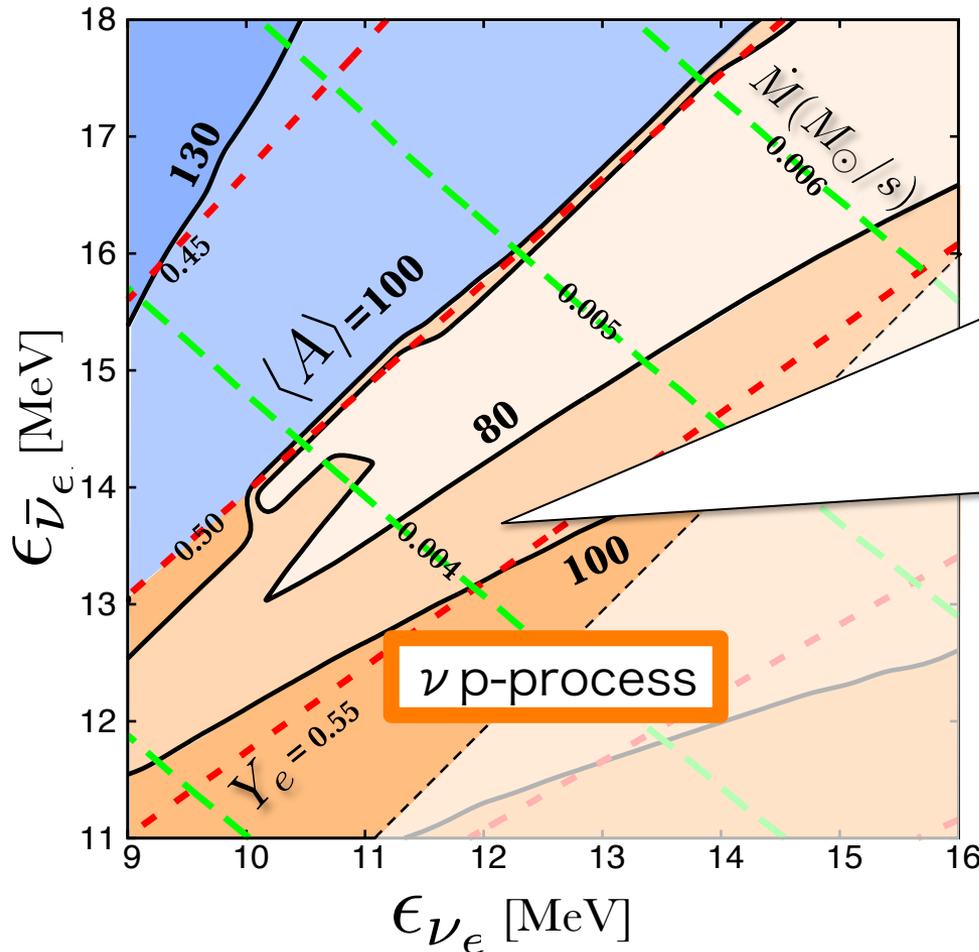
- neutron-rich 領域
➤ r-processによる元素合成



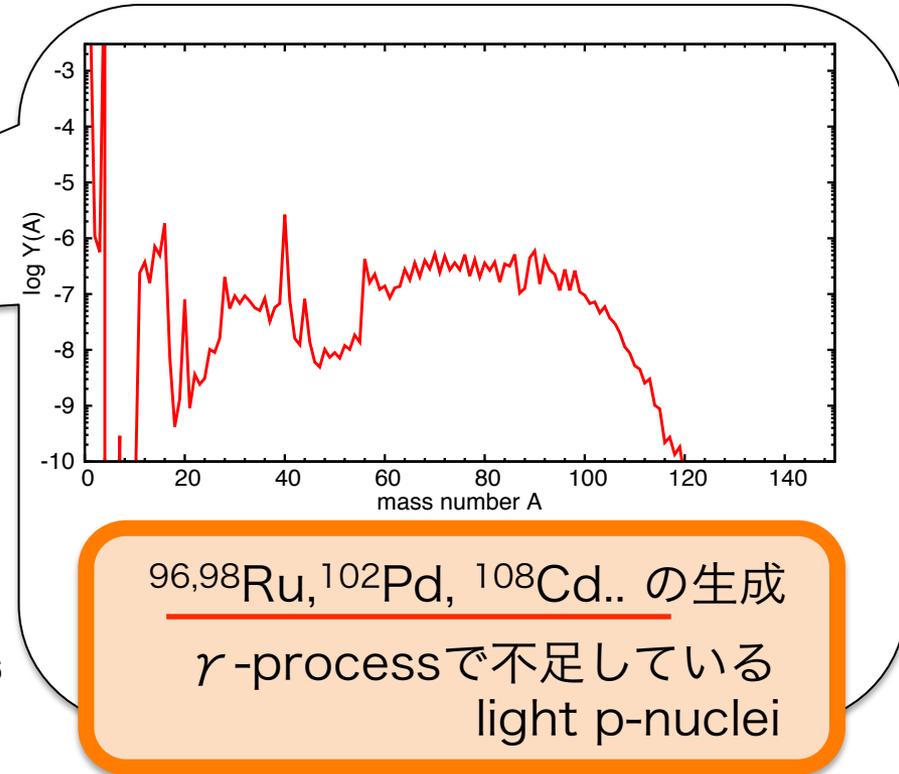
$\epsilon_{\nu_e}, \epsilon_{\bar{\nu}_e}$ の10%ほどの違いで
より強いr-process
→ 3rd peak が作られる

ニュートリノエネルギー依存性

- $\epsilon_{\nu_e}, \epsilon_{\bar{\nu}_e}$ の不定性：シミュレーション
核物質の有限密度効果 (Roberts et al. 2012; Horowitz et al. 2012)



- neutron-rich 領域
➤ r-processによる元素合成



まとめ

- 数値相対論シミュレーションが予言する大質量中性子星における重元素合成過程を調べた
- neutrino-driven wind modelでの元素合成計算の結果、シミュレーションの示唆するパラメータで weak r starの元素組成が説明できる可能性がある
- ニュートリノの平均エネルギーを変えて傾向を見た
 - n-rich side : あと10%ほど差が開けば2nd – 3rd peak
 - p-rich side : 陽子過剰核の生成
(^{96,98}Ru, ¹⁰²Pd, ¹⁰⁸Cd, etc..)
- 議論
 - PNSのmass, luminosityなどの依存性
 - 他のweak r starとの比較