

超新星による爆発的元素合成と ニュートリノプロセス

梅田 秀之 (東京大学天文学専攻)

吉田 敬 (京都大学基礎物理学研究所)

新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会

2015年3月17日

Contents

- Intro: 超新星(の種類)
- **ν -Process**
Li, Be, B (軽元素) + ニュートリノ振動の効果
F (フッ素)
- Abundance of extremely metal poor (EMP) stars
- 鉄族元素 + **ν -Process** (Sc, Mn, Co)
- **νp -Process** (時間の関係でほとんどしない)

超新星

- Ia型：炭素-酸素白色矮星の熱核爆発、鉄族元素の主要な起源
最高到達温度 9×10^9 K程度 ➡ ニュートリノ効果小
 - $M \sim 8-10 M_{\odot}$, 電子捕獲型超新星：次ページ
 - $M \sim 11-25 M_{\odot}$, 重力崩壊型超新星 (II, Ib, Ic型)
：（解明はされていないが）爆発機構は比較的よく調べられている
（例、昨日の住吉さん、中村さんの話し）
 - $M \sim 25-50 ? M_{\odot}$, 極超新星 (Ic-bl 型)
：爆発機構殆ど調べられていない、おそらくブラックホール形成＋降着円盤
 - $M \sim 140-300 M_{\odot}$, 電子陽電子対（ペア）不安定型
：宇宙初期、もしくは低金属の環境で存在する（かもしれない）。
すでに観測されている非常に明るい超新星の一部はこれであると
考えている人たちもいる。
最高到達温度 5×10^9 K程度 ➡ ニュートリノ効果小
-

電子捕獲型超新星 (ECSN)

- ECSN: ONeMg コアが殻燃焼で成長。限界質量（チャンドラセカルmass）に達し崩壊。

Normal Core collapse: Si燃焼後にできたFe核が重力崩壊。

⇒どちらも中性子星を形成するが、作る機構が異なるため基本的にその質量は異なる。

- 問題点と現状：

実際には8-10 $M_{\odot}$ の星すべてがECSNになるわけではなく、その存在は(S)AGB星段階でのmass loss rateに依存し、全く存在しない、もしくは非常に狭い質量範囲でのみ存在できる可能性。

しかし、かに星雲を作った超新星はECSNであるという説がある（本当であるなら比較的多く存在？）

長らく爆発するのかもしれないのか不明であったが、Kitaura et al. (2006)により普通の超新星と同様な delayed explosion mechanismで爆発することが示され、現在では爆発すると信じられている。

（爆発エネルギーは小さいが）爆発機構が似ているため、**通常の超新星と良く似たニュートリノ放射、元素合成、ニュートリノ効果が予想できる。**

これまで親星のモデルが一つ(Nomoto et al. 1984)しかなく、結果の一般性が調べられなかったが、最近Takahashi-Yoshida -Umeda (2013)で新モデルの構築に成功。現在爆発計算の成功に向けて奮闘中 (Takahashi, Sumiyoshi, Umeda, Yamada, Yoshida, ...)

-
- 超新星爆発における元素合成に対するニュートリノの寄与
 - ν -process, (νp -process), Y_e (electron fraction)の変化とニュートリノ振動による上記の効果への影響

Neutrino元素合成 (ν -Process)

超新星ニュートリノ

→ 原始中性子星から $N_\nu \sim 10^{58}$

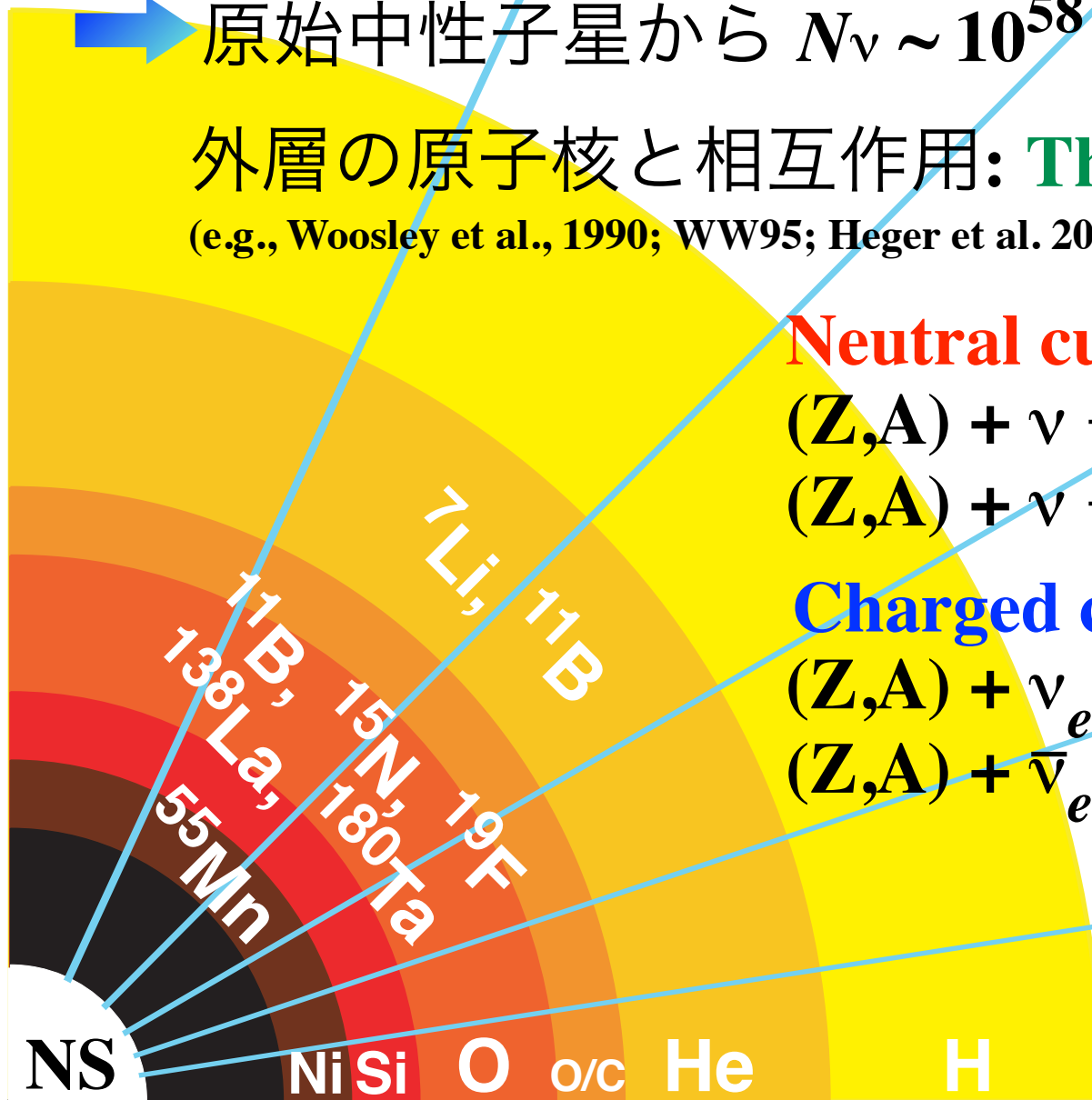
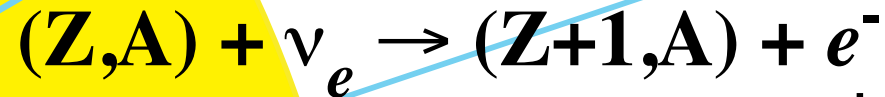
外層の原子核と相互作用: **The ν -process**

(e.g., Woosley et al., 1990; WW95; Heger et al. 2005; Yoshida et al. 2004, 2005)

Neutral current反応



Charged current反応



The ν -Process

- Small neutrino-nucleus reaction cross sections

➡ $\sigma_{\nu} \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$

- Huge number of neutrinos

➡ $N_{\nu}/4\pi r^2 \sim 10^{58} / 10^{19-21} \text{ cm}^2 \sim 10^{58} / 10^{35-37} \text{ cm}^{-2}$

- ➡ Production of less abundant elements

$N_{\text{product}}/N_{\text{target}} \sim 10^{-7 \sim -5}$

The ν -process

- Effects of the ν -process

- ➡ Yields of less abundant elements

Solar composition and metal-poor stars

- ➡ Neutrino oscillations in SN ejecta

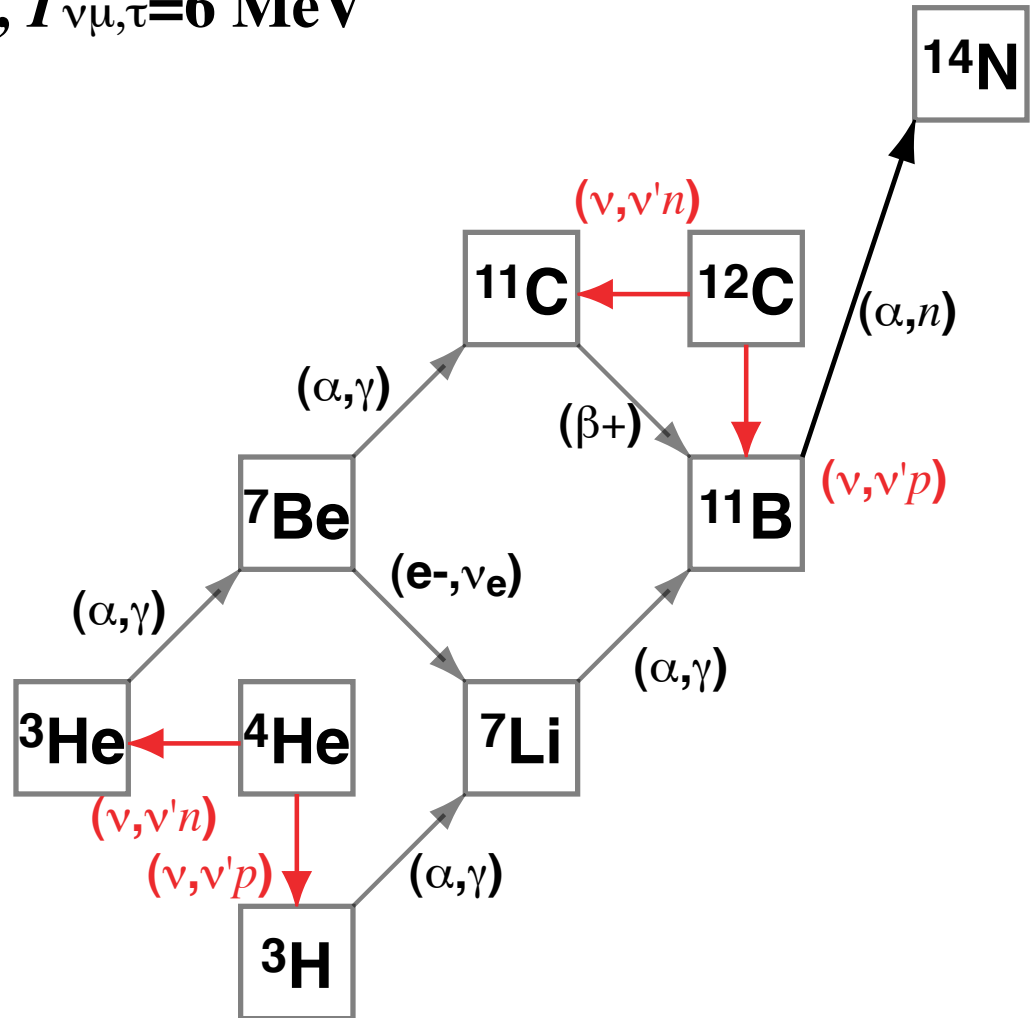
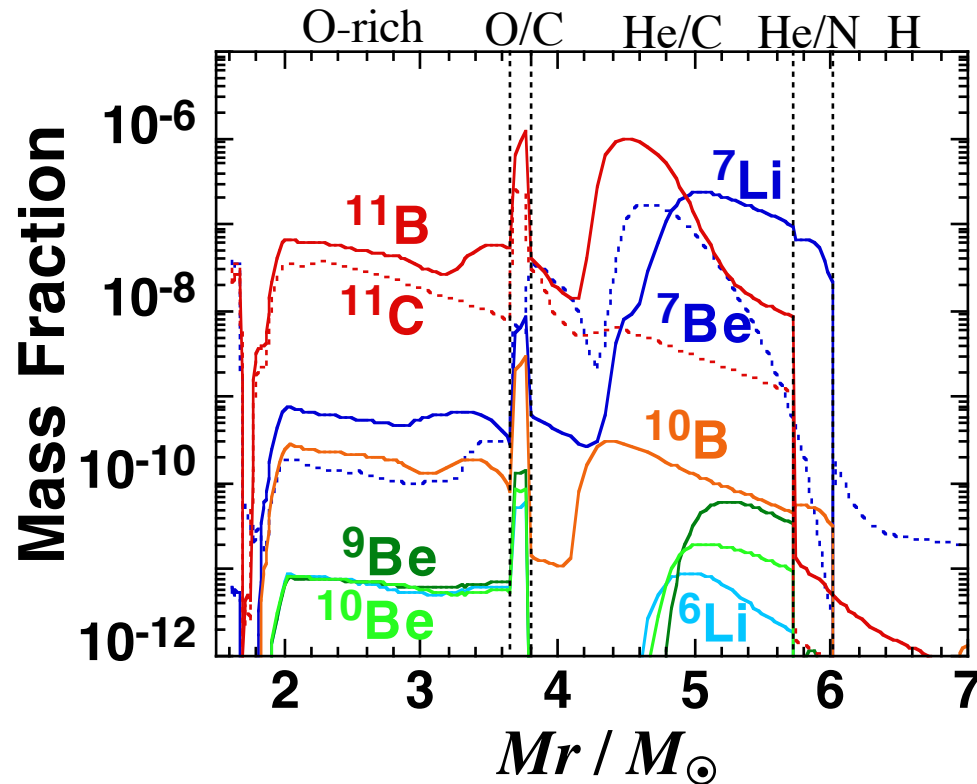
Constraints to oscillation parameters

NS

SN 外層におけるLight Element Synthesis

● Yoshida et al. 2005, 2006, 2008

16.2 $M_{\odot}$ Supernova $E_{\nu}=3\times 10^{53}$ ergs, $T_{\nu\mu,\tau}=6$ MeV



● ν -process reactions



超新星neutrinoモデル

Neutrino luminosity

$$L_{\nu i}(t) = \frac{1}{6} \frac{E_{\nu}}{\tau_{\nu}} \exp\left(-\frac{t-r/c}{\tau_{\nu}}\right) \Theta(t-r/c) \quad \nu i : \nu e \mu \tau, \bar{\nu} e \mu \tau$$

(after Woosley et al. 1990, ApJ 356, 272)

- $\tau_{\nu} = 3 \text{ s}$

- $E_{\nu} = (0, \mathbf{3}, 9, 30) \times 10^{53} \text{ erg}$ **(3: standard)**

Neutrino energy spectra

- Fermi分布 $\eta_{\nu} = \mu_{\nu}/kT_{\nu} = 0$

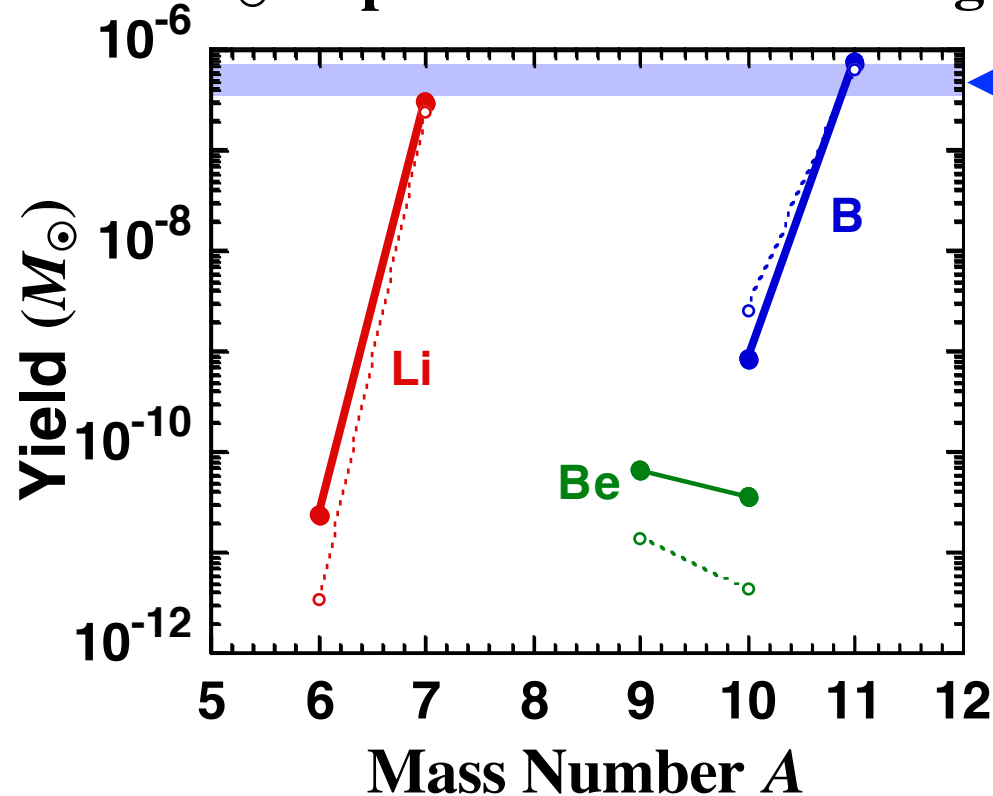
$$(kT_{\nu e}, kT_{\bar{\nu} e}, kT_{\nu \mu \tau}) = (4 \text{ MeV}, 4 \text{ MeV}, 6 \text{ MeV})$$

(e.g., Rauscher et al. 2002 ApJ 576, 323; Yoshida, Umeda, & Nomoto 2005, ApJ 631, 1039)

SN Light Element Synthesis

- Light element Yields

$16.2 M_{\odot}$ Supernova $E_{\nu}=3\times 10^{53}$ ergs, $T_{\nu\mu,\tau}=6$ MeV



Contribution of ^{11}B from SNe suggested from Galactic chemical evolution models

(e.g., Fields et al., 2000; Ramaty et al. 2000)

New rate: Solid lines

- Yields of $10^{-7} M_{\odot}$ for ^7Li and ^{11}B

- New ν -process cross sections for ^{12}C

➡ Enhancement of ^6Li , ^9Be , ^{10}Be yields

Light element synthesis by the ν -Process

- Yoshida et al. 2005; 2006, *PRL* 96, 091101; 2006, *Astrophys. J.* 649, 319; 2008, *Astrophys. J.*
Suzuki et al. 2006, *RPC* 74, 034307
 - From ^{11}B Galactic abundance $\Rightarrow T_{\nu\mu,\tau} = 4.8\text{-}6.6$ MeV
without neutrino oscillations (Yoshida et al. 2005)
 - ^7Li and ^{11}B
 - ➡ Effected by **neutrino oscillations (following pages)**
 - ^6Li , ^9Be , ^{10}Be , ^{10}B
 - ➡ Enhanced with new ν -process cross sections
by Suzuki et al. 2006
-

Supernova Neutrinos

Supernova neutrinos $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_{\mu\tau}=(\nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau)$

➡ Release of gravitational energy of a proto-neutron star

$$E_\nu \sim 10^{53} \text{ ergs}$$

➡ Energy spectra

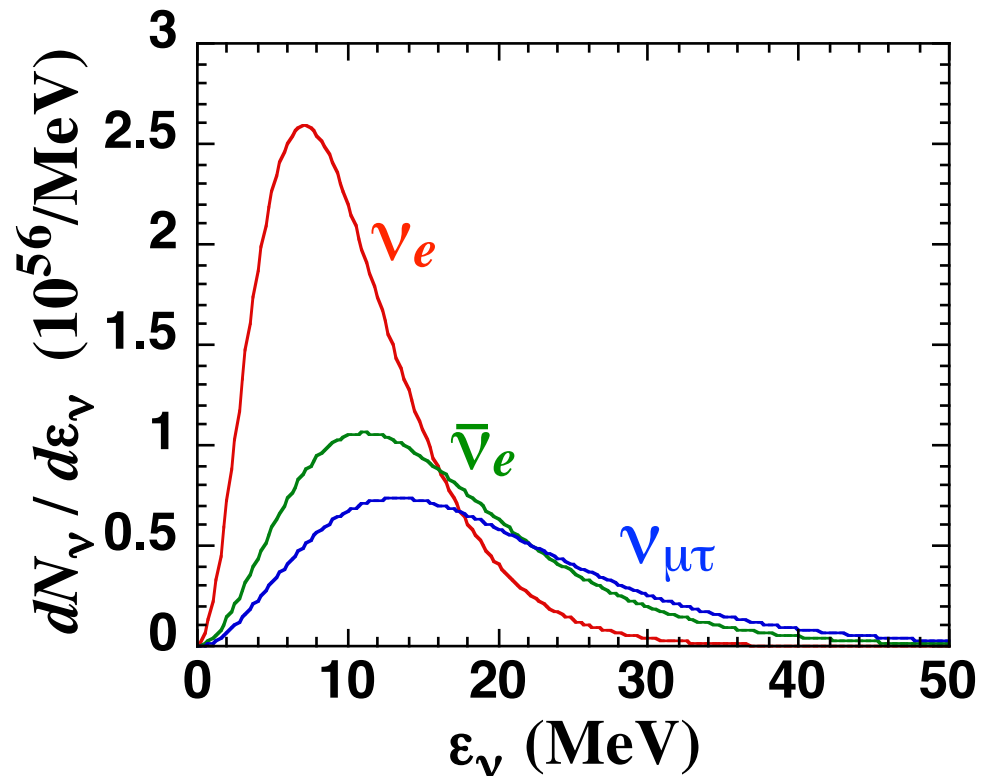
Close to Fermi-Dirac distribution

$$\langle \epsilon_{\nu_e} \rangle < \langle \epsilon_{\bar{\nu}_e} \rangle < \langle \epsilon_{\nu_{\mu\tau}} \rangle$$

$$N_\nu \sim 10^{58}$$

➡ Irradiation time scale

$$O(t_\nu) \sim 10 \text{ s}$$



- Neutrino振動パラメータ
Large Mixing Angle solution

➡ $\Delta m^2_{31} = \pm 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \Delta m^2_{21} = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

+ : 順質量階層, - : 逆質量階層

(Based on SK 2004; SNO 2004; KamLAND 2005)

➡ $\sin^2 2\theta_{12} = 0.816, \sin^2 2\theta_{23} = 1$

~~$\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$ (Based on CHOOZ 2003; SK 2004; SNO 2004; KamLAND 2005)~~

$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.1$ (An et al. 2012 - Daya Bay, Abe et al. 2012 - Double Chooz)

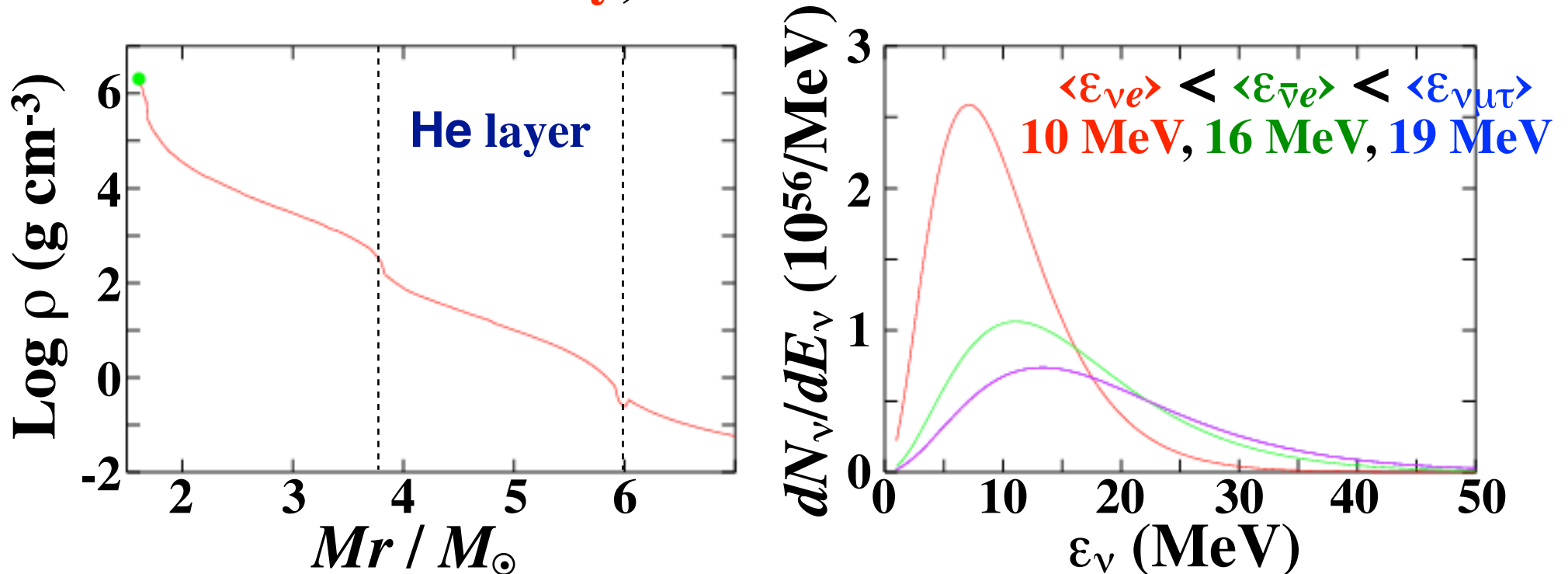
Supernova Neutrinos

Supernova neutrinos $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_{\mu\tau}=(\nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau)$

➡ Neutrino oscillations in SN ejecta

- Mass hierarchy $m_1 < m_2 < m_3$ or $m_3 < m_1 < m_2$
Normal *Inverted*
- Mixing angles $\sin^2 2\theta_{12}=0.816, \sin^2 2\theta_{23}=1, \sin^2 2\theta_{13}<0.1$

Normal mass hierarchy, $\sin^2 2\theta_{13}=0.01$



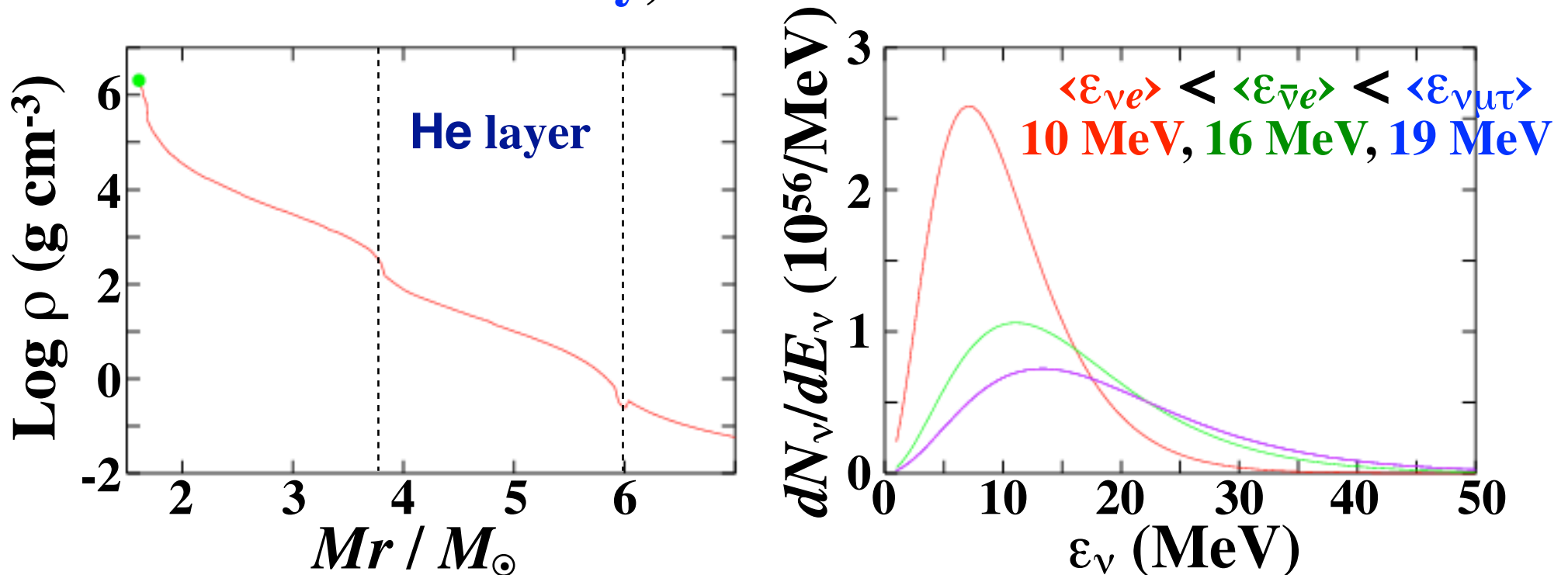
Supernova Neutrinos

Supernova neutrinos $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_{\mu\tau}=(\nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau)$

➡ Neutrino oscillations in SN ejecta

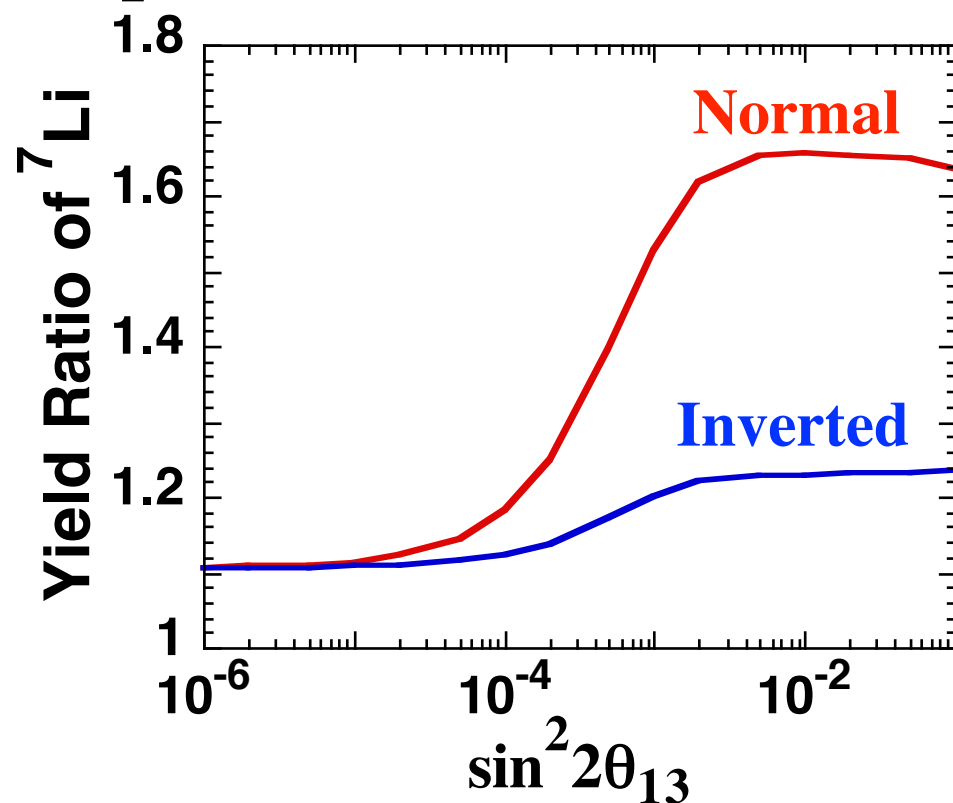
- Mass hierarchy $m_1 < m_2 < m_3$ or $m_3 < m_1 < m_2$
Normal *Inverted*
- Mixing angles $\sin^2 2\theta_{12}=0.816, \sin^2 2\theta_{23}=1, \sin^2 2\theta_{13}<0.1$

Inverted mass hierarchy, $\sin^2 2\theta_{13}=0.01$

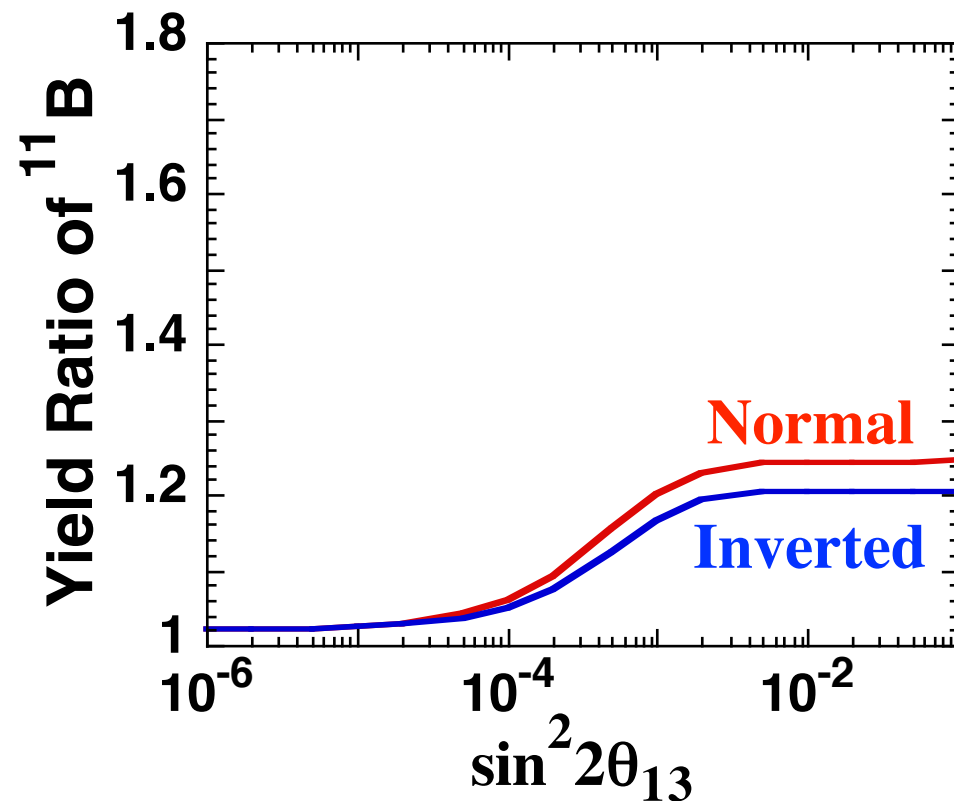


^7Li and ^{11}B Yields with Neutrino Oscillations

- Dependence of mass hierarchies and $\sin^2 2\theta_{13}$



$$M(^7\text{Li}) = 3.00 \times 10^{-7} M_{\odot}$$



$$M(^{11}\text{B}) = 7.54 \times 10^{-7} M_{\odot}$$

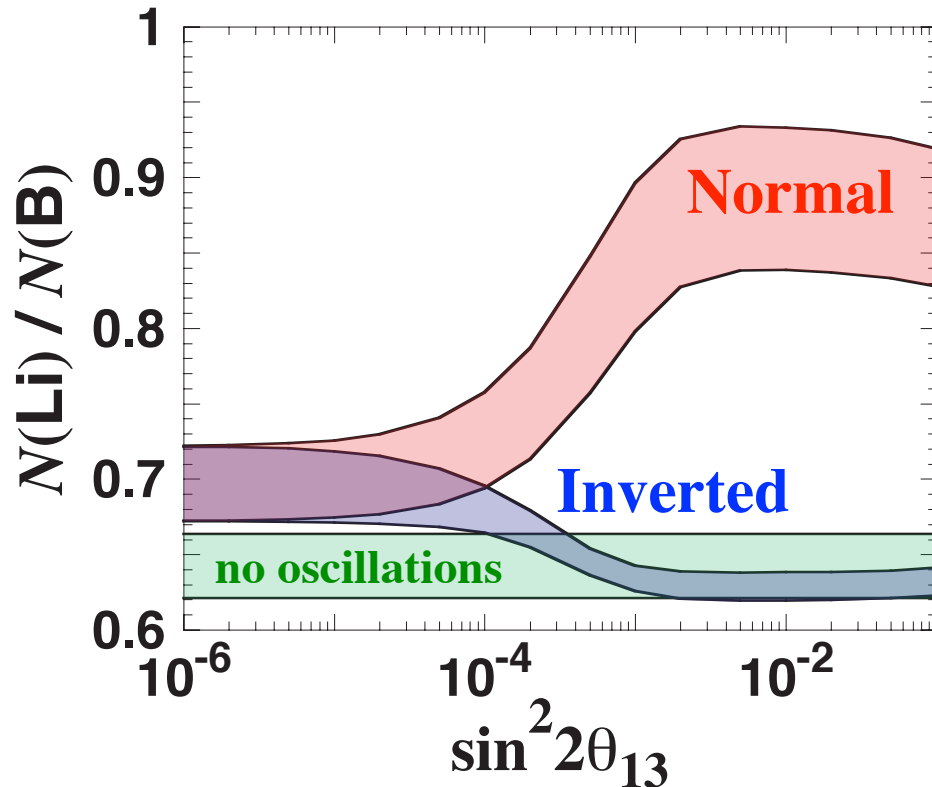
- **Normal** mass hierarchy and $\sin^2 2\theta_{13} > 0.001$

➡ Enhancement of ^7Li and ^{11}B yields

$^4\text{He}(\nu_e, e^- p)^3\text{He}$, $^{12}\text{C}(\nu_e, e^- p)^{11}\text{C}$ rates become large.

${}^7\text{Li}/{}^{11}\text{B}$ Abundance Ratios

- ${}^7\text{Li}/{}^{11}\text{B}$ ratios → Small dependence on ν -temperatures



- Taking account of uncertainties of neutrino temperatures

$$(T_{\nu e}, T_{\bar{\nu} e}, T_{\nu \mu, \tau}, E_{\nu}) = (3.2, 5.0, 6.0, 3.0)$$

$$, (4.0, 4.0, 6.0, 3.0)$$

$$, (4.0, 4.0, 6.4, 2.4)$$

$$, (3.4, 3.4, 5.0, 3.5)$$

$$(\text{MeV}, \text{MeV}, \text{MeV}, \times 10^{53} \text{ ergs})$$

- **Normal** mass hierarchy and $\sin^2 2\theta_{13} > 0.001$

→ $N({}^7\text{Li})/N({}^{11}\text{B}) > 0.83$

SN 外層における ν -Process、他の重要な元素「 ^{19}F フッ素」

通常： $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma) ^{19}\text{F}$ (metal poor の時は奇数元素 ^{15}N が少ないので ^{19}F も少ない)

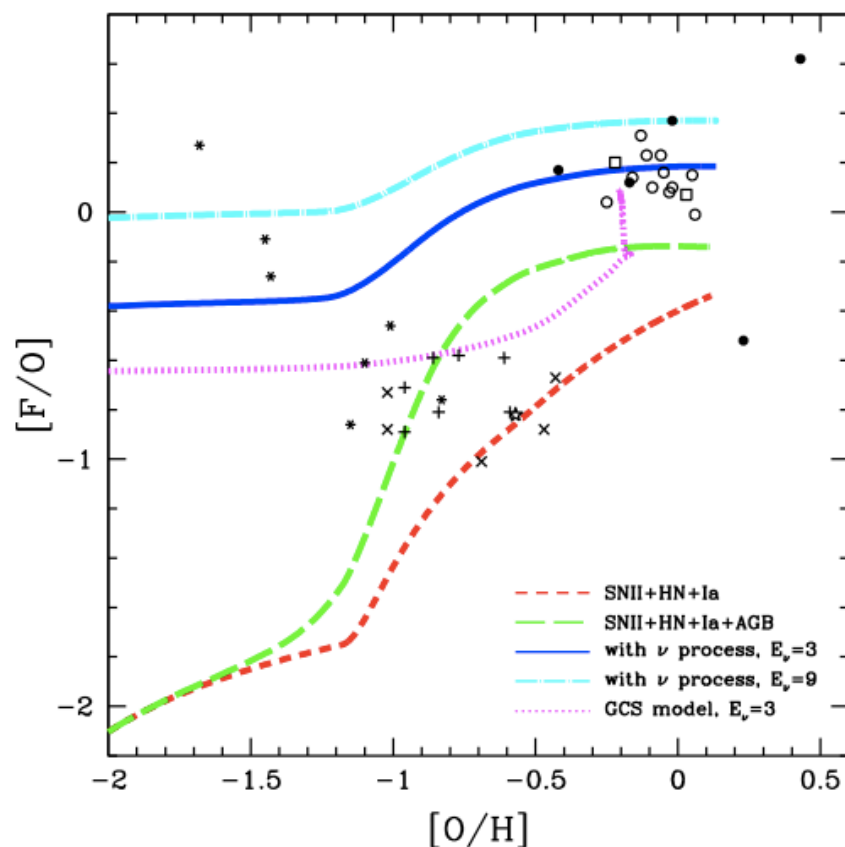
with ν -Process： $^{20}\text{Ne}(\nu, \nu' p) ^{19}\text{F}$

偶数元素はmetal poor でも豊富であり

宇宙初期では ν -Process で作る方が（はるかに）多い

$[\text{F}/\text{O}] \sim -5$ (without ν), $= -1 \sim +1$ (with ν) for metal zero supernova

(Izutani, Umeda, Yoshida 2012)



左図： $[\text{F}/\text{O}]$ の化学進化
球状星団の星の観測との比較

Kobayashi et. al. 2011, ApJL

前半まとめ

ニュートリノ振動によるneutrino energy spectraの変化を
考慮した超新星ν-process軽元素合成

- ^7Li , ^{11}B 生成量は質量階層や混合角 θ_{13} という
振動パラメータに依存性する

➡ 順質量階層, 断熱H-resonance ($\sin^2 2\theta_{13} > 0.002$)

- ^7Li 生成量は約1.65倍に増加

- ^{11}B 生成量は約1.2倍に増加

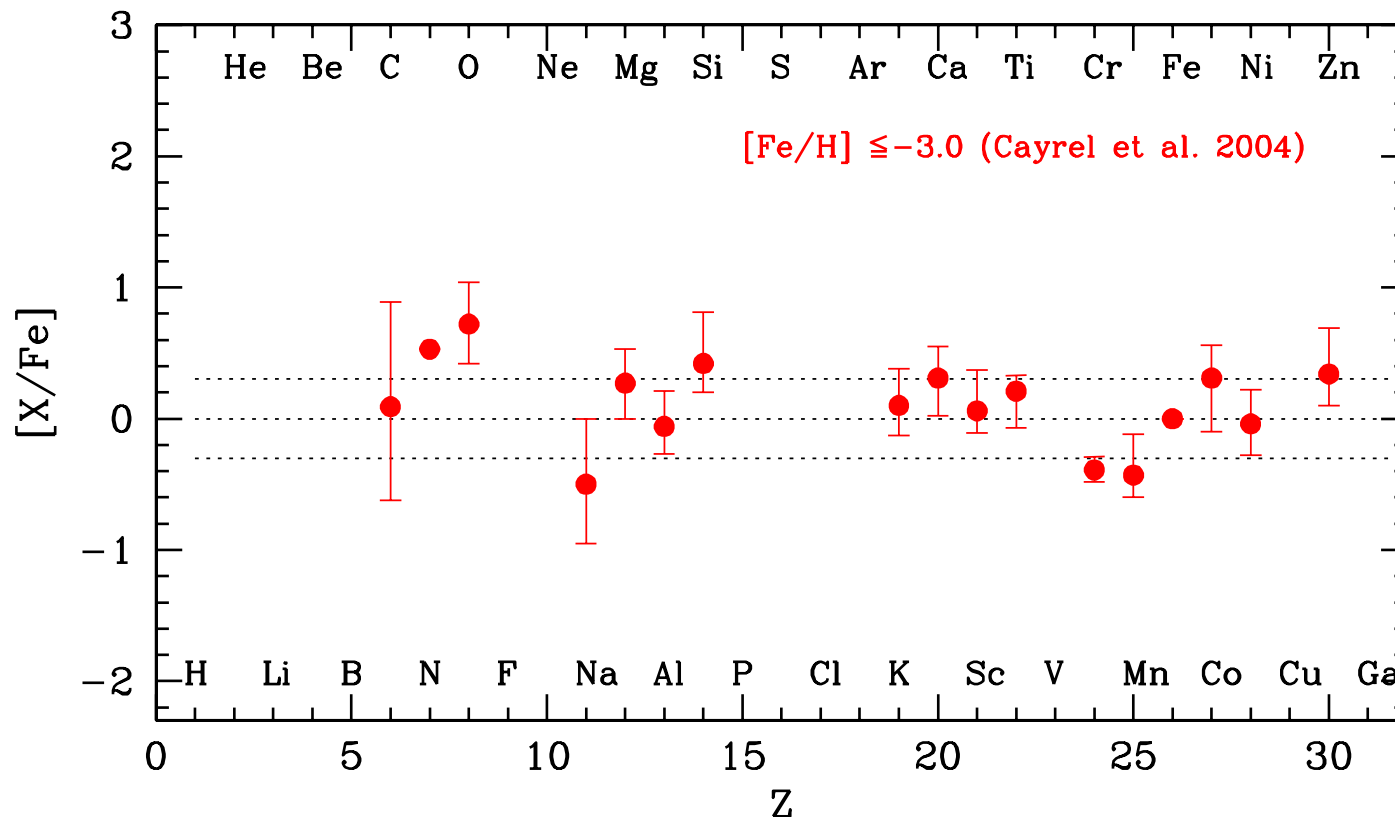
← Charge-exchange反応の寄与の増加

- 順質量階層, 断熱H-resonance

➡ $N(^7\text{Li})/N(^{11}\text{B}) > 0.83$

質量階層や混合角 θ_{13} に制限

- これまでの結果は通常の超新星を想定している、が実際には様々な超新星がある。
- 爆発的元素合成理論の検証：金属超欠乏星の組成との比較



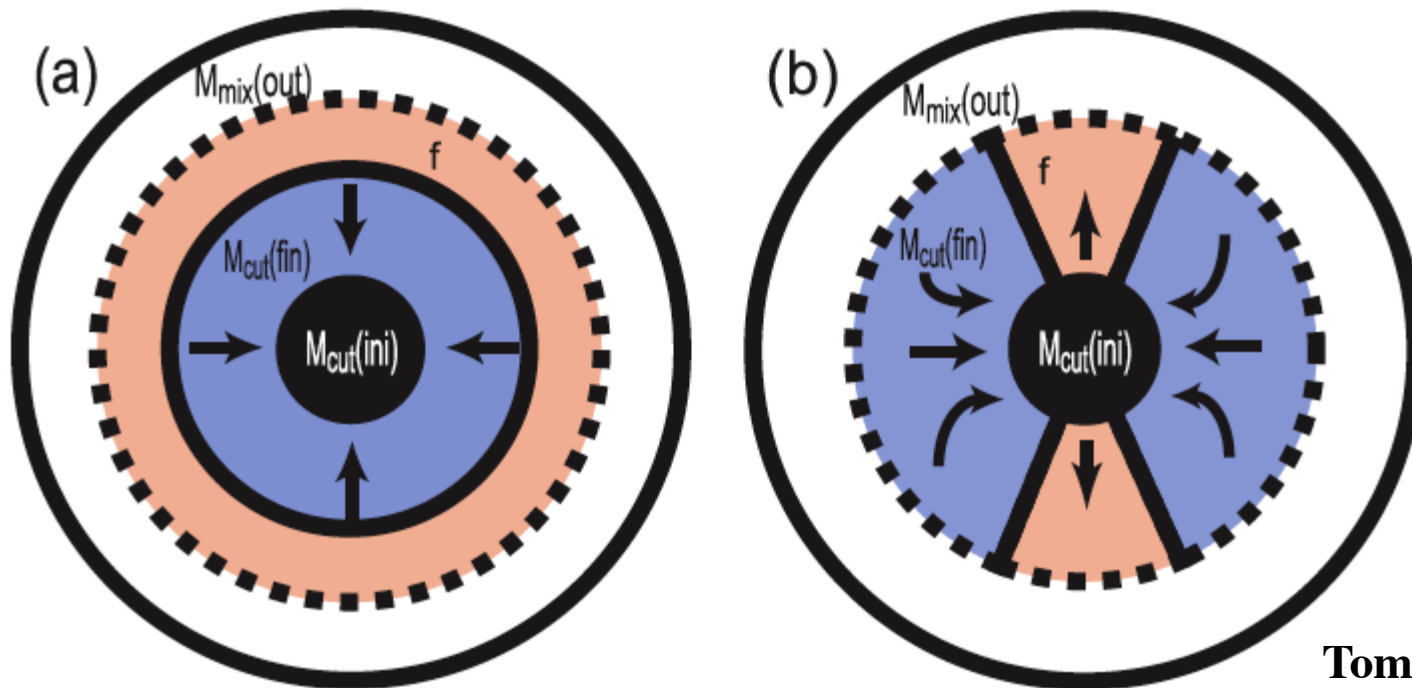
Fe/H 比が太陽系比より
1/1000以上少ない星の組成
の平均値 (log scale)
(Fe の太陽値で規格化)

主要な結論

- 鉄族元素(Cr~Zn)の組成が爆発モデルを制限するために特に重要
- Extremely metal poor (EMP)星, $[\text{Fe}/\text{H}] < \sim -4$, の組成は通常の超新星では説明できない

大きな爆発エネルギーが必要 (Zn, Co生成のため) → 極超新星

単純な球対称的爆発モデルでは観測と不一致 (下図 (a) or (b) のような爆発が必要)



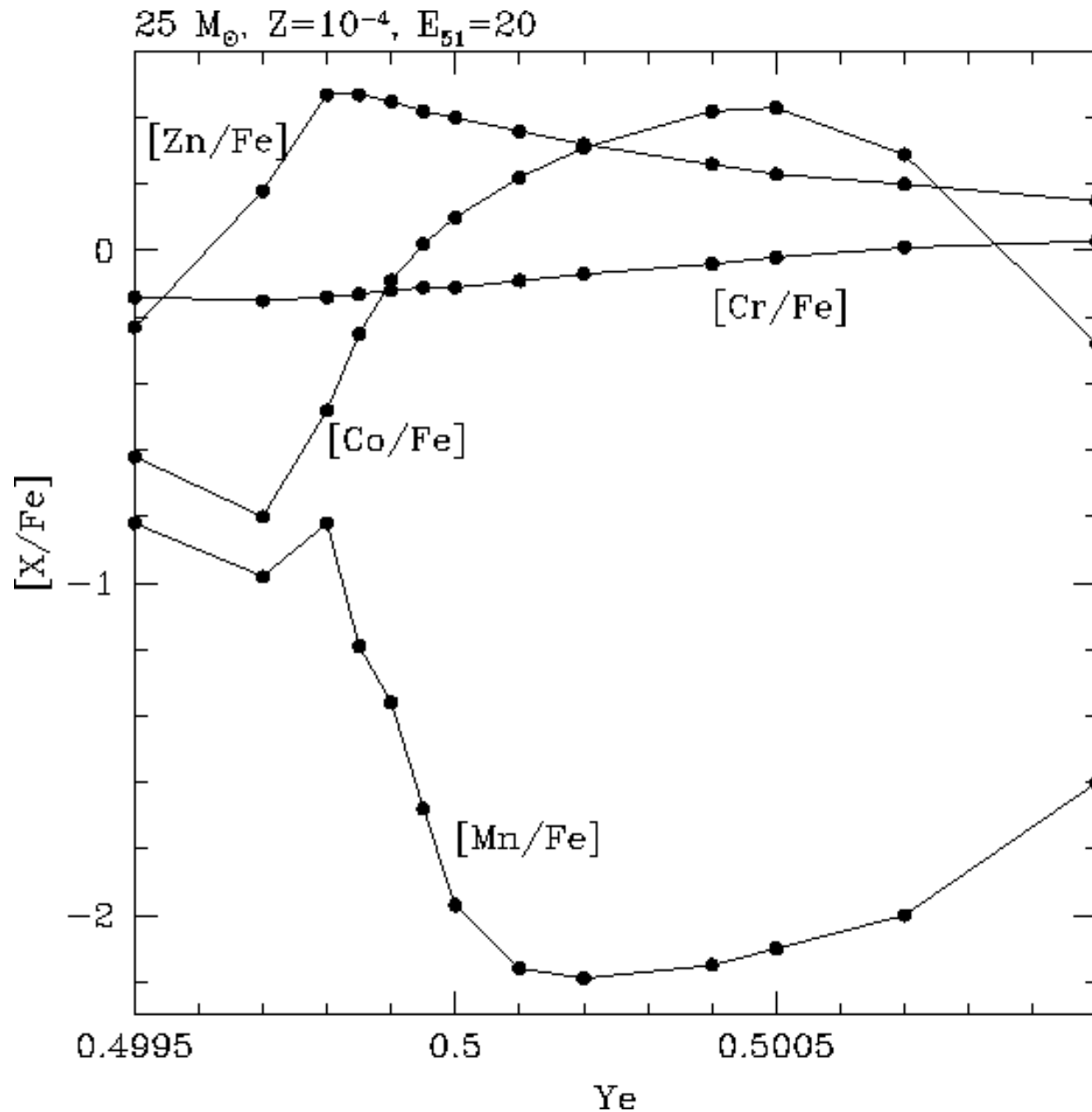
Tominaga et al. (2007) より

主要な結論

- $[\text{Fe}/\text{H}] > \sim -2.5$ 星の組成は 通常の超新星 + 極超新星の足し算 (IMF積分) で説明できる
- ペア不安定型超新星モデルと一致している星が一つも無い (Aoki 星も)
- 鉄族元素の合成比は Y_e (1 核子あたりの電子数) に強く依存

放出物質の Y_e は大部分は超新星親星の値と同じであるが、爆発中心の近くでは次のニュートリノ反応によって変化する：



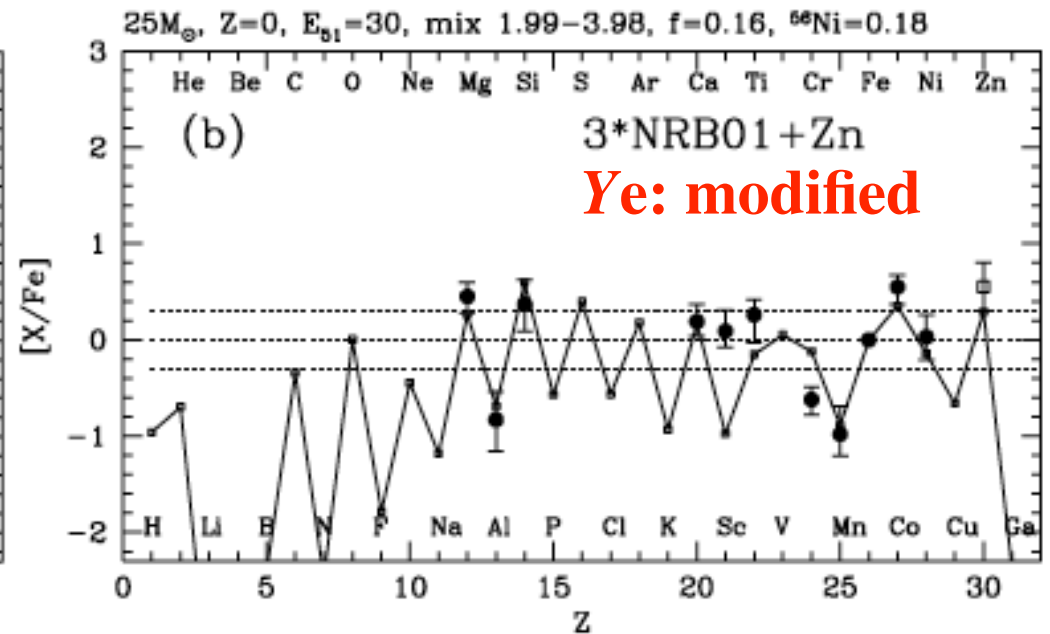
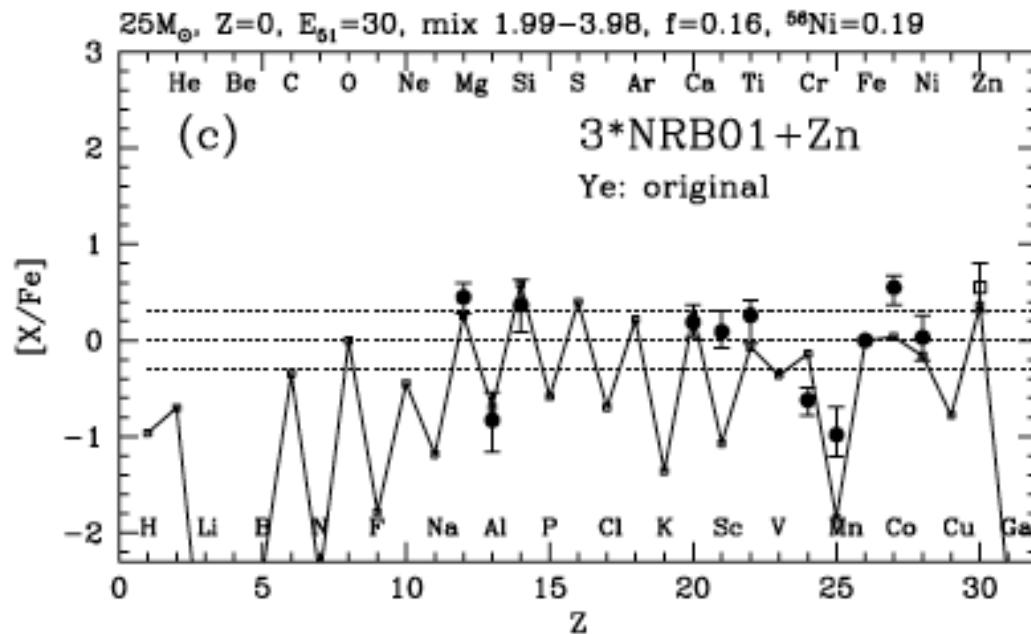


EMP星ではZn, Coが多い
 ($[Zn, Co/Fe] > 0$)。これは
 Ye = 0.50 付近で良く実現
 されるが、この値付近では
 [Mn/Fe] が観測値の -0.5 程度
 より小さいという問題

観測と比較的一致するモデル

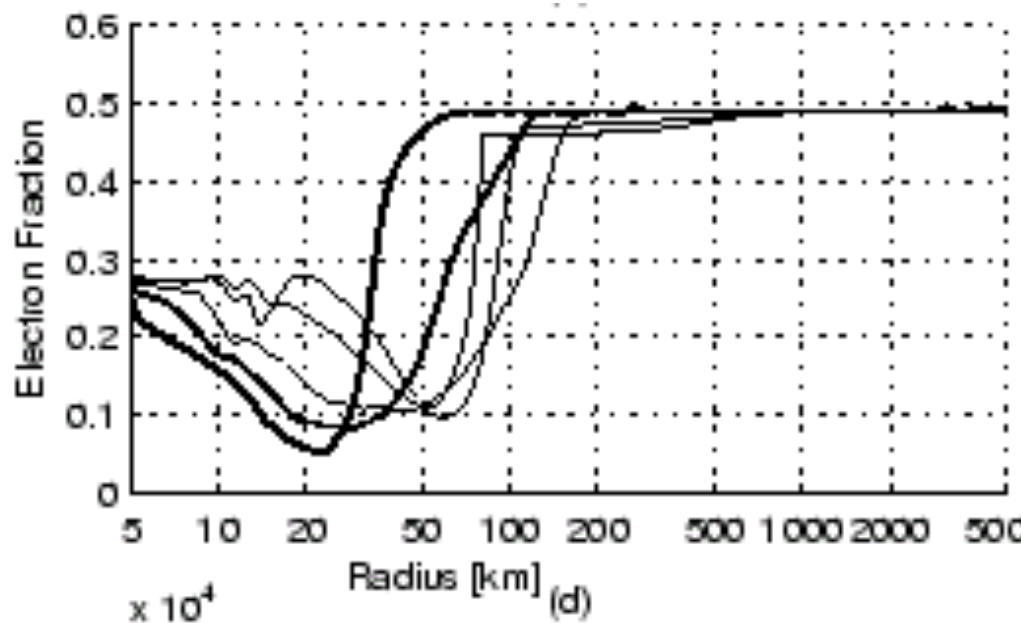
- 極超新星での元素合成(Y_e を修正) (Umeda & Nomoto 2005, ApJ 619, 427)

➡ Ni層で $Y_e = 0.5001$, Si/S層で $Y_e = 0.4997$



*mass cut*付近での Y_e 増加のある極超新星

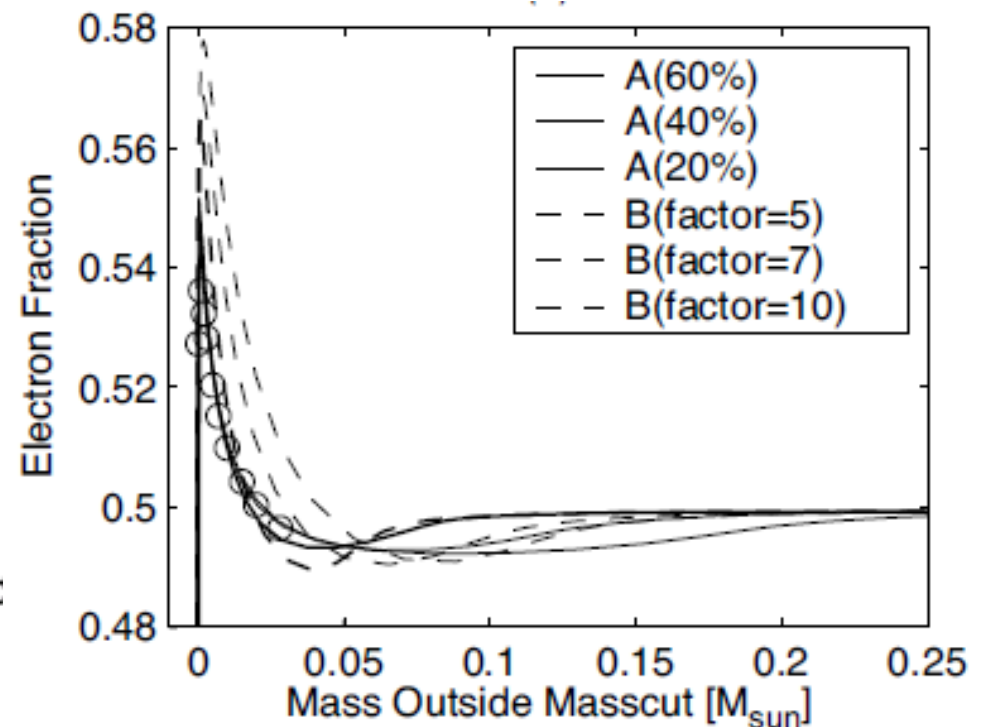
実際の(1D)爆発計算における Y_e 分布の進化



13M star full neutrino transfer :

爆発が失敗したモデル

Mezzacappa et al. (2000)



爆発しているモデル

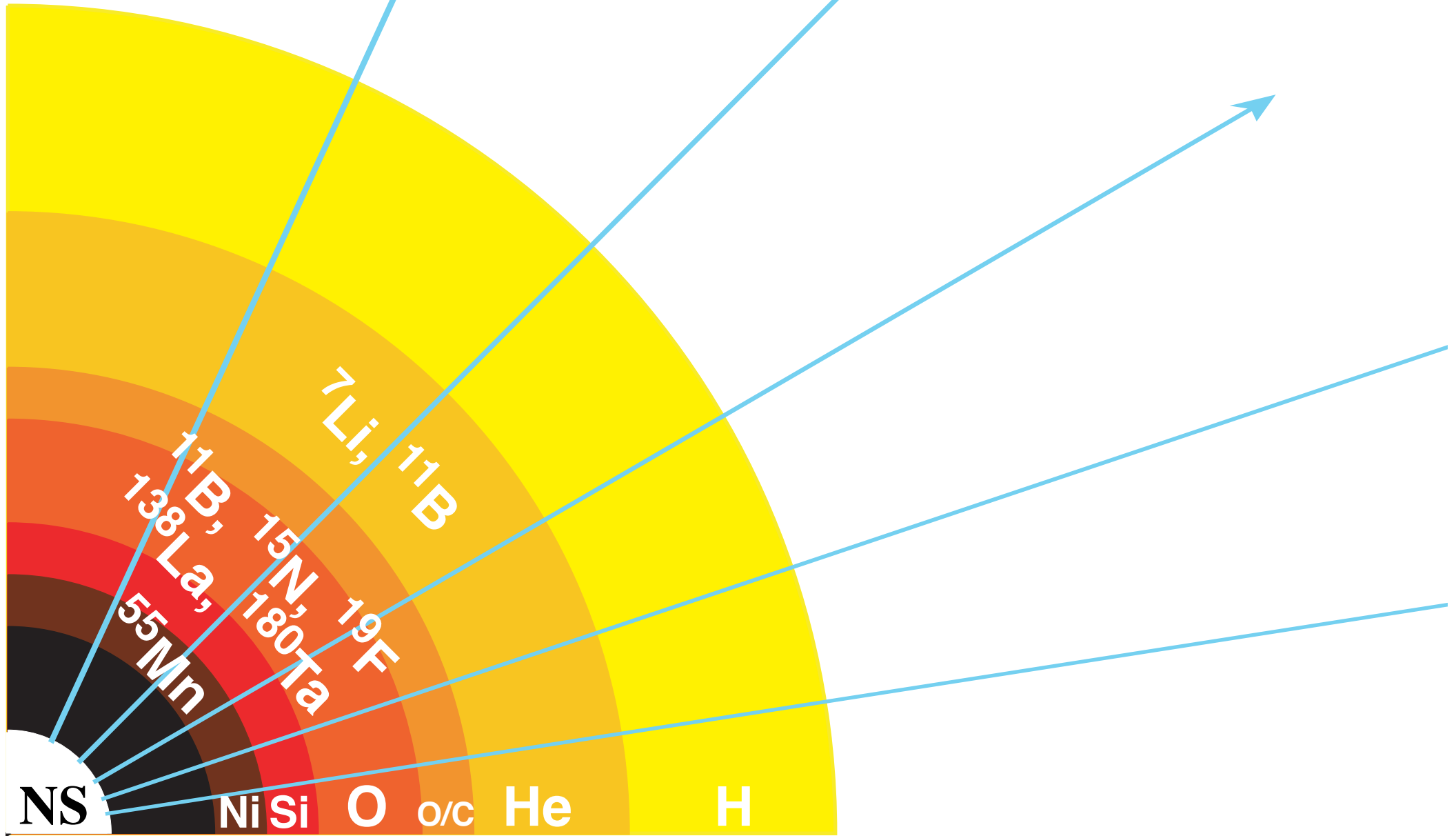
Frohlich et al 2005

今後 3D計算のシミュレーションで爆発に成功した場合に
観測にちゃんと合う(Y_e 分布となっている) であろうか？

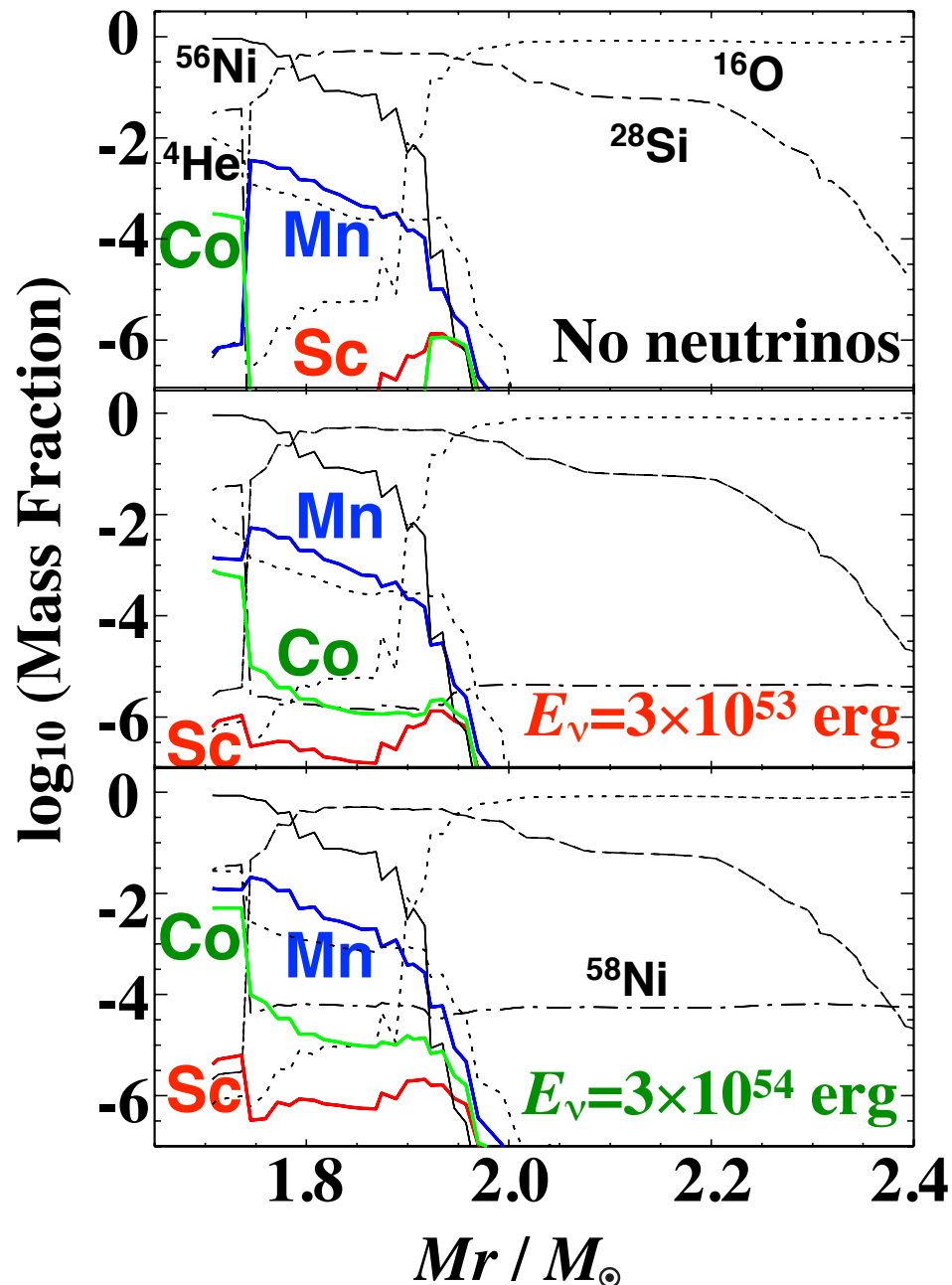
(しかし極超新星の爆発機構はまだ殆ど研究されていない)

Neutrino元素合成 (ν -Process)

爆発中心近くにおける鉄族元素特にMnの合成



Abundance Distributions of $15M_{\odot}$ SN



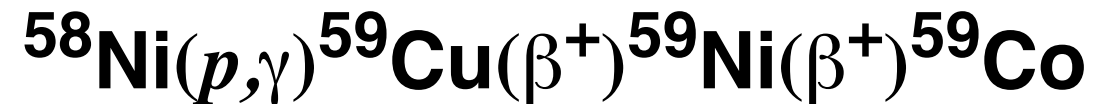
● Sc



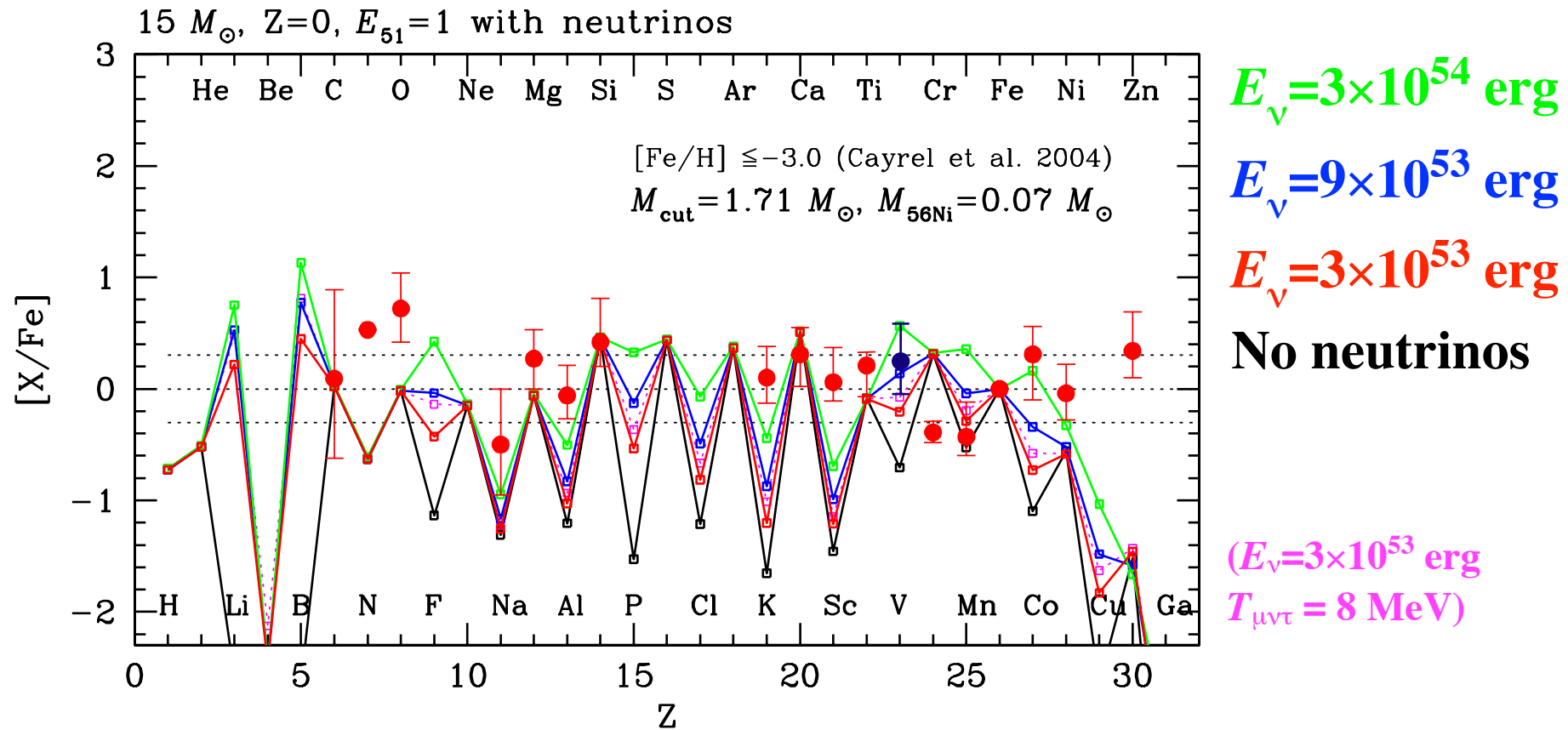
● Mn



● Co

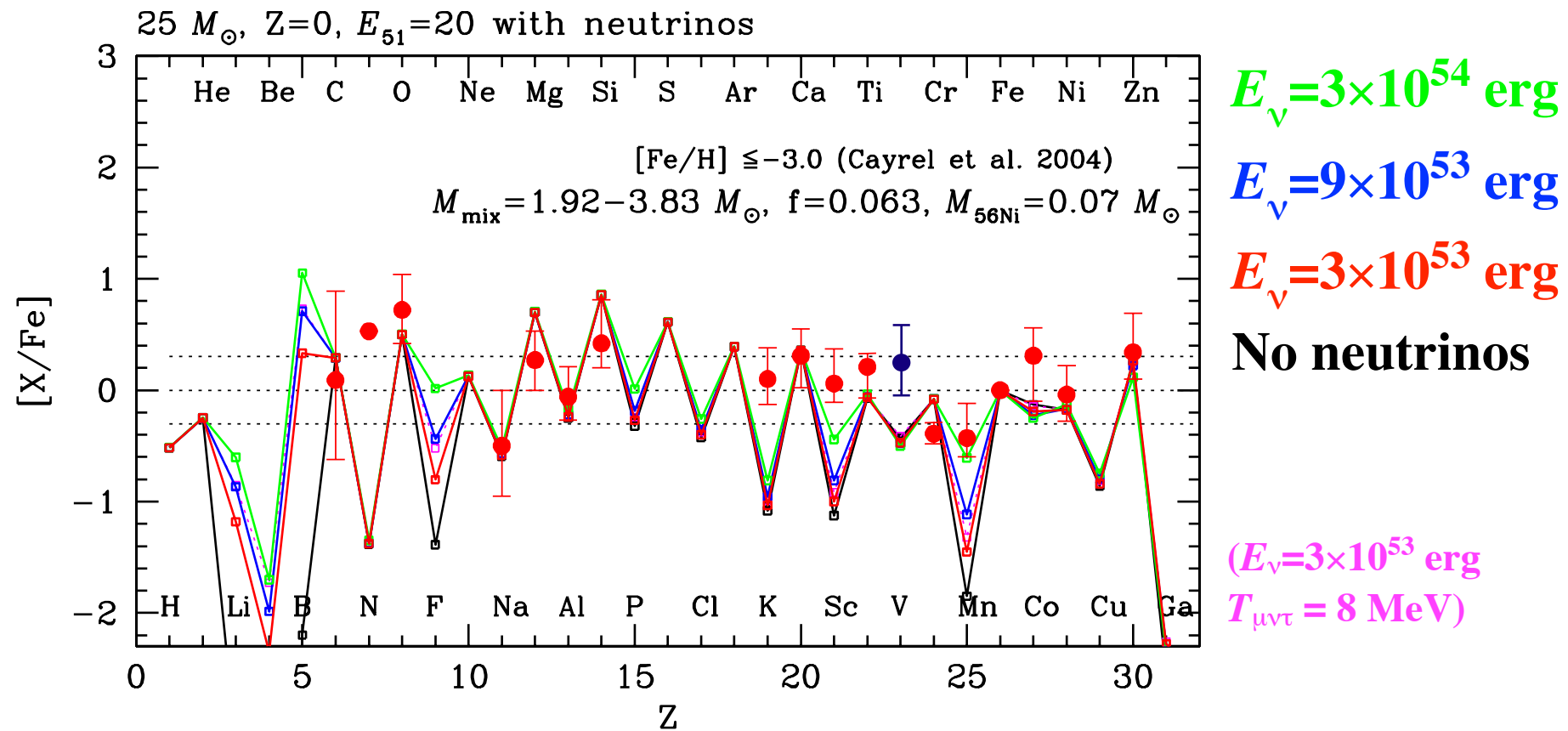


Sc, Mn, Co Abundances in $15M_{\odot}$ Supernova



- **Sc** → Abundance smaller than observed in EMP stars
- **Mn** → Observed abundance in $E_v < 9 \times 10^{53}$ ergs
- **Co** → Observed abundance in $E_v > 9 \times 10^{53}$ ergs

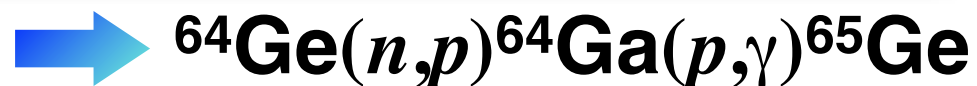
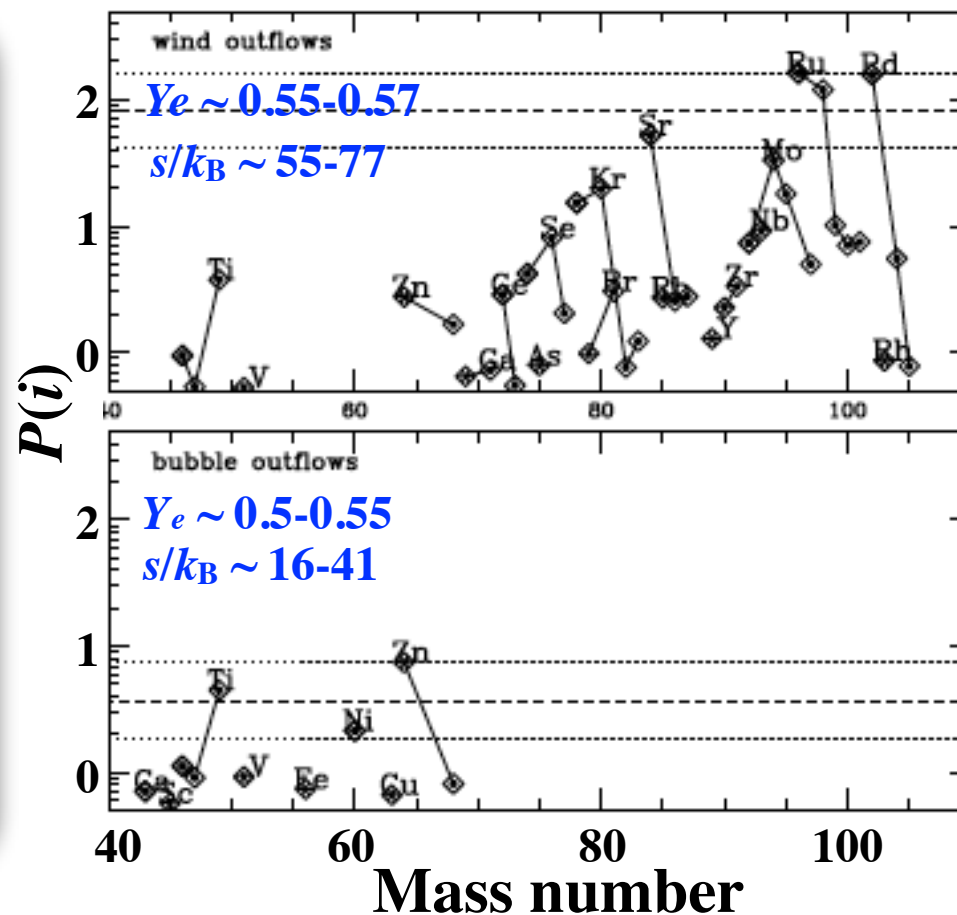
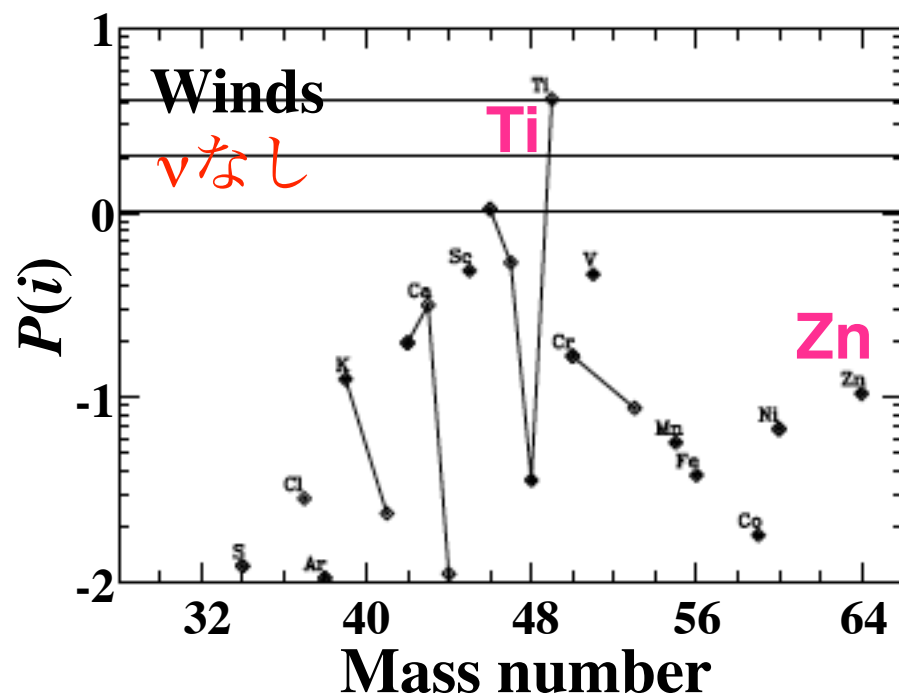
Sc, Mn, Co Abundances in $25M_{\odot}$ Hypernova



- **Sc** ➡ Abundance smaller than observed in EMP stars
- **Mn** ➡ Lowest observed abundance in $E_{\nu} \sim 3 \times 10^{54}$ ergs
- **Co** ➡ ν -process scarcely affects **Co** production.

他にNeutrinoが寄与する元素合成

● vp-process in p-rich hot bubbles & winds (Frohlich et al. 2006)



$A > 64$ nuclei

vp-process

Production factor

$$P(i) = \sum_j (M_j X_{j(i)}) / (M_{\text{ej}} X_{\odot,i})$$

後半まとめ

Pop III大質量星超新星, 極超新星における鉄族元素合成のv-processによる効果

- v-processにより **Sc, Mn, Co**(奇数元素)の生成量は増加

Sc → **0.25 ~ 1.44 dex** (0.13 ~ 0.69 dex for HN)

Mn → **0.24 ~ 1.11 dex** (0.40 ~ 1.24 dex for HN)

Co → **0.37 ~ 1.38 dex** (HNでは減少)

- EMP star観測値との比較

Mn → 超新星v-processでEMP star観測値を再現

$$E_v \sim (3 - 9) \times 10^{53} \text{ erg}$$

- **Sc, Co** → v-processだけでは観測値より少ない

$$E_v > 9 \times 10^{53} \text{ erg}$$

High entropy (jet-like) explosion?
