

p核の合成理論 からの宇宙化学進化

西村 信哉

京都大学・基礎研物理学研究所

元素合成理論と宇宙化学進化

元素合成の理論予言

||

天体での原子核反応・崩壊
= 核種の生成 (変換)

天体理論

反応断面積
崩壊率

太陽系組成 (隕石)

横山さん

銀河化学進化

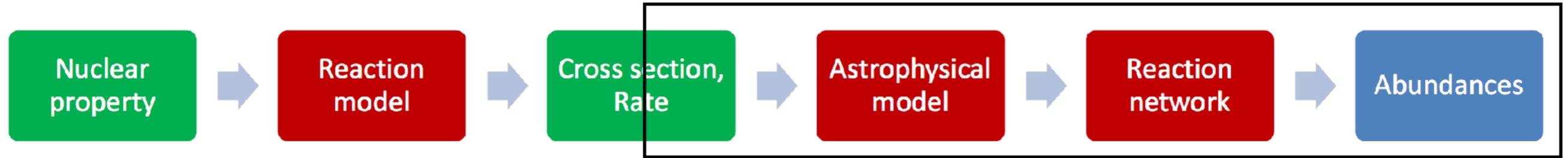
辻本さん

太陽・銀河系外
の元素組成

青木さん

- 反応率の不定性の影響
- 未確定で重要な反応

モンテカルロ元素合成：ストラテジー



核反応ネットワーク

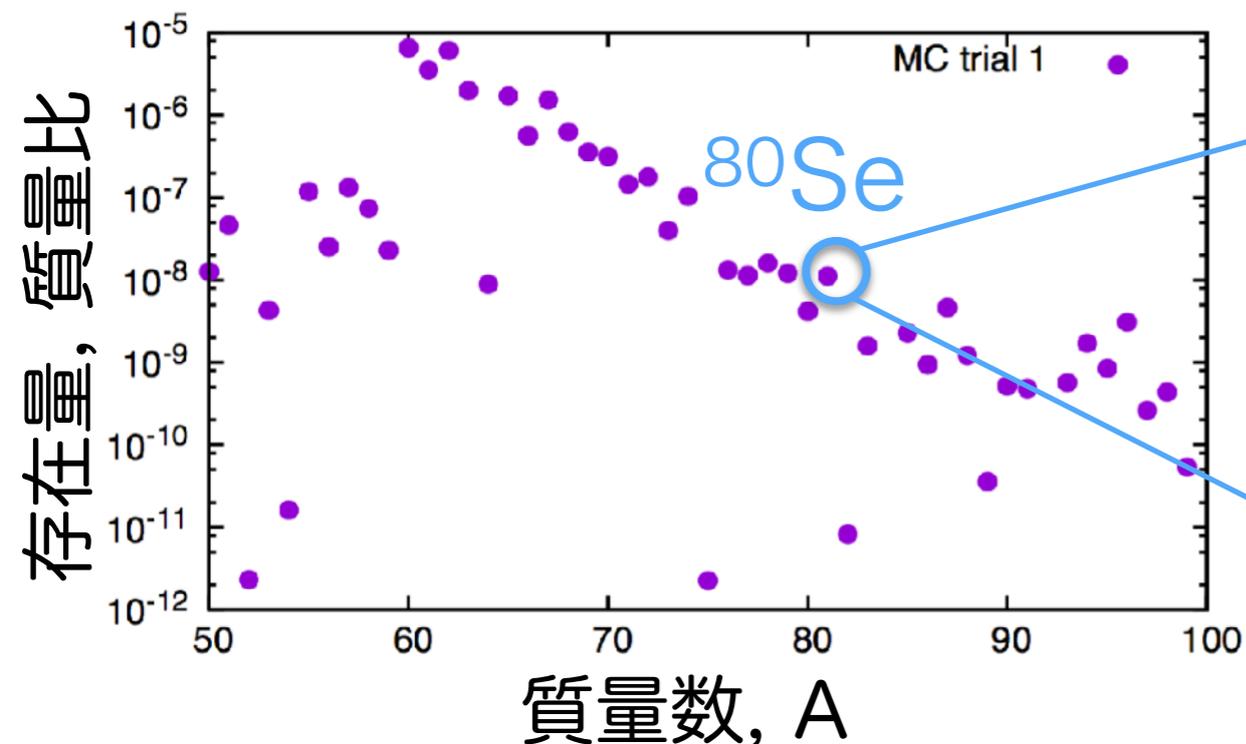
- ・ 元素合成
 - ・ 重元素の核反応
 - ・ ベータ崩壊など
- +天体モデル

モンテカルロ

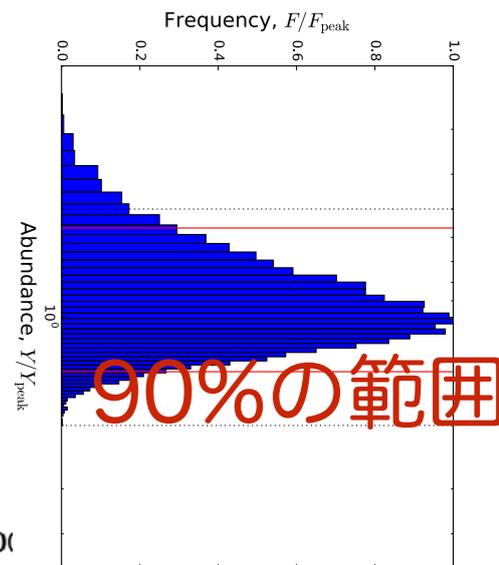
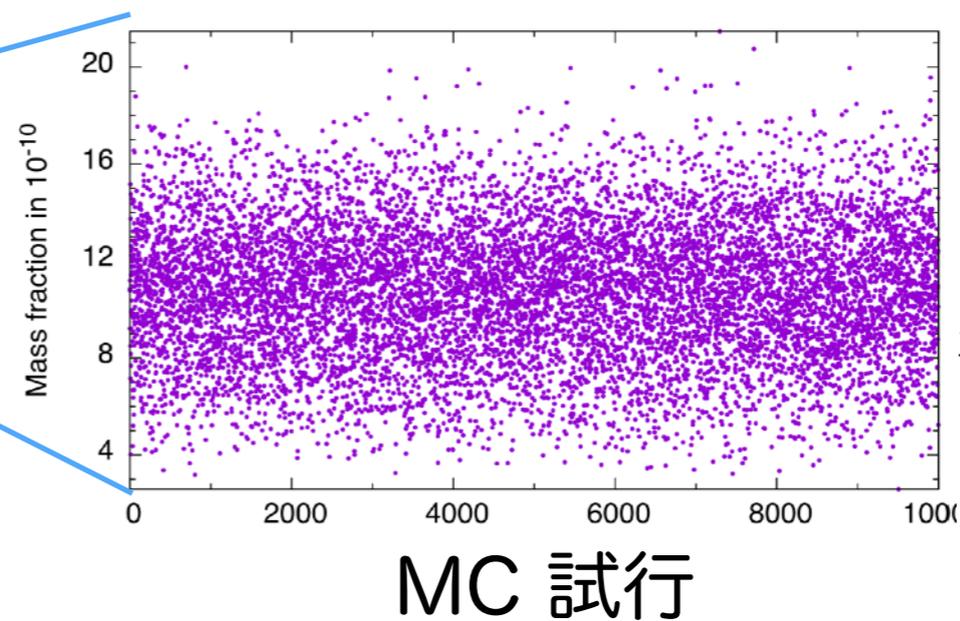
元素合成生成物の
不定性

フィードバック (重要な反応率の特定)

具体例 (sプロセス)



反応率の不定性を考慮



これまでの研究対象

・sプロセス

・安定核線上の中性子捕獲と β 崩壊

① weak s: 大質量星 (NN+2017)

② main s: 小質量星 (Cescutti, Hirsch, NN+2018)

・ガンマ・プロセス (伝統的に「pプロセス」)

・陽子過剰不安定核のあらゆる捕獲反応 (+光分解)

③ 重力崩壊型超新星 (Rauscher, NN+2016)

④ 熱核反応型 (Ia型) 超新星 (NN+2018)

・ ν pプロセス

軽いp核の起源

⑤ (重力崩壊型超新星) 原始中性子星風 (NN+2019)

p核の起源

不定性大

・rプロセス (準備中)

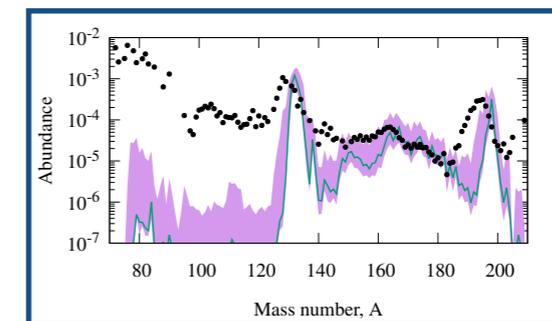
Published papers:

① NN+(2017) MNRAS 469

② Cescutti, Hirschi, NN+(2018) MNRAS 478

③ Rauscher, NN+(2016) MNRAS 463 ④ NN+(2018) MNRAS 474

⑤ NN+(2019) MNRAS 489



Contents

- 元素合成と原子核の不定性
- 太陽系におけるp核の起源
 - p核の基礎
 - ガンマ・プロセスの問題
- 軽いp核の起源としての νp プロセス
 - νp プロセス天体環境（モデル）
 - 不定性と重要反応
 - p核の起源でありうるか？
- まとめと展開

かなりスキップします

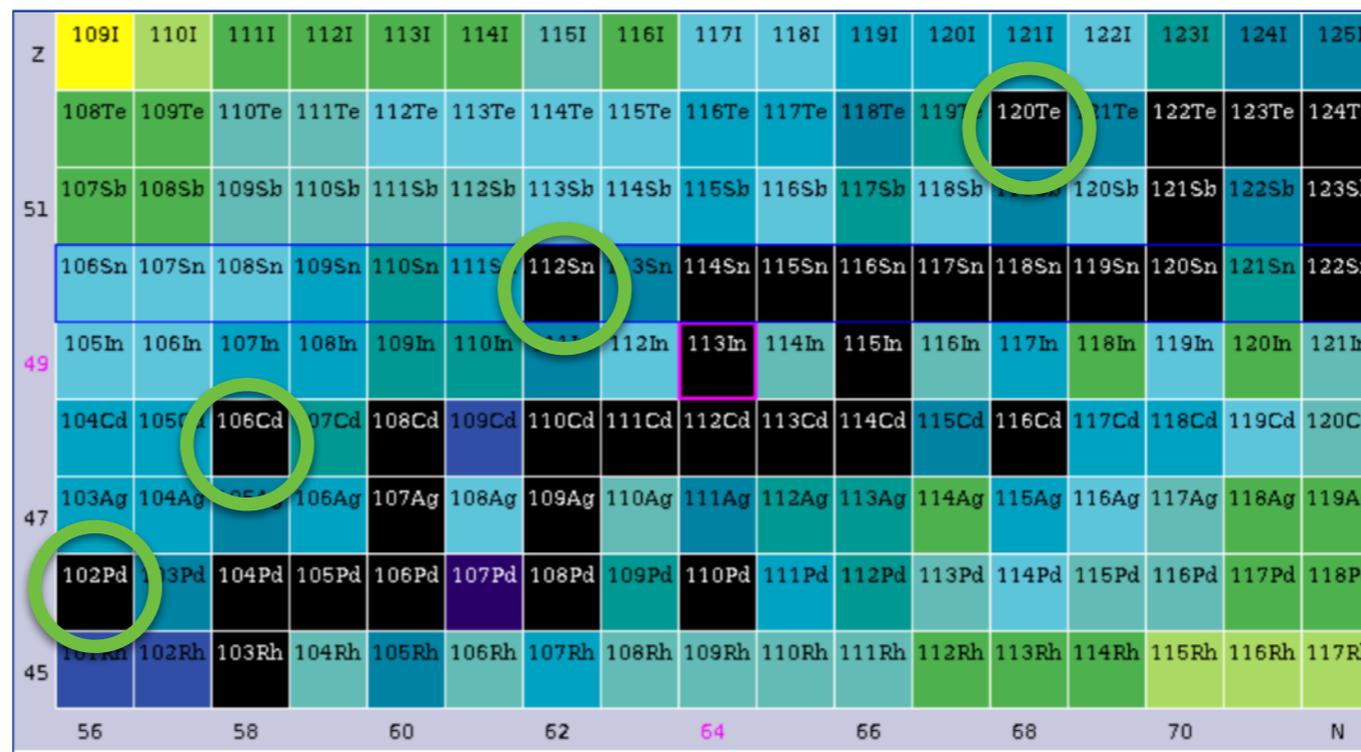
共同研究者

T. Rauscher (Basel), R. Hirschi (Keele), G. Cescutti (INAF),
A. St. J. Murphy (Edinburgh), C. Fröhlich (NCSU)

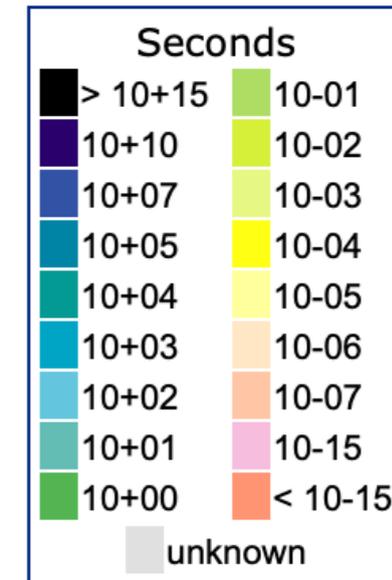
太陽系のp核の起源

p核とは？

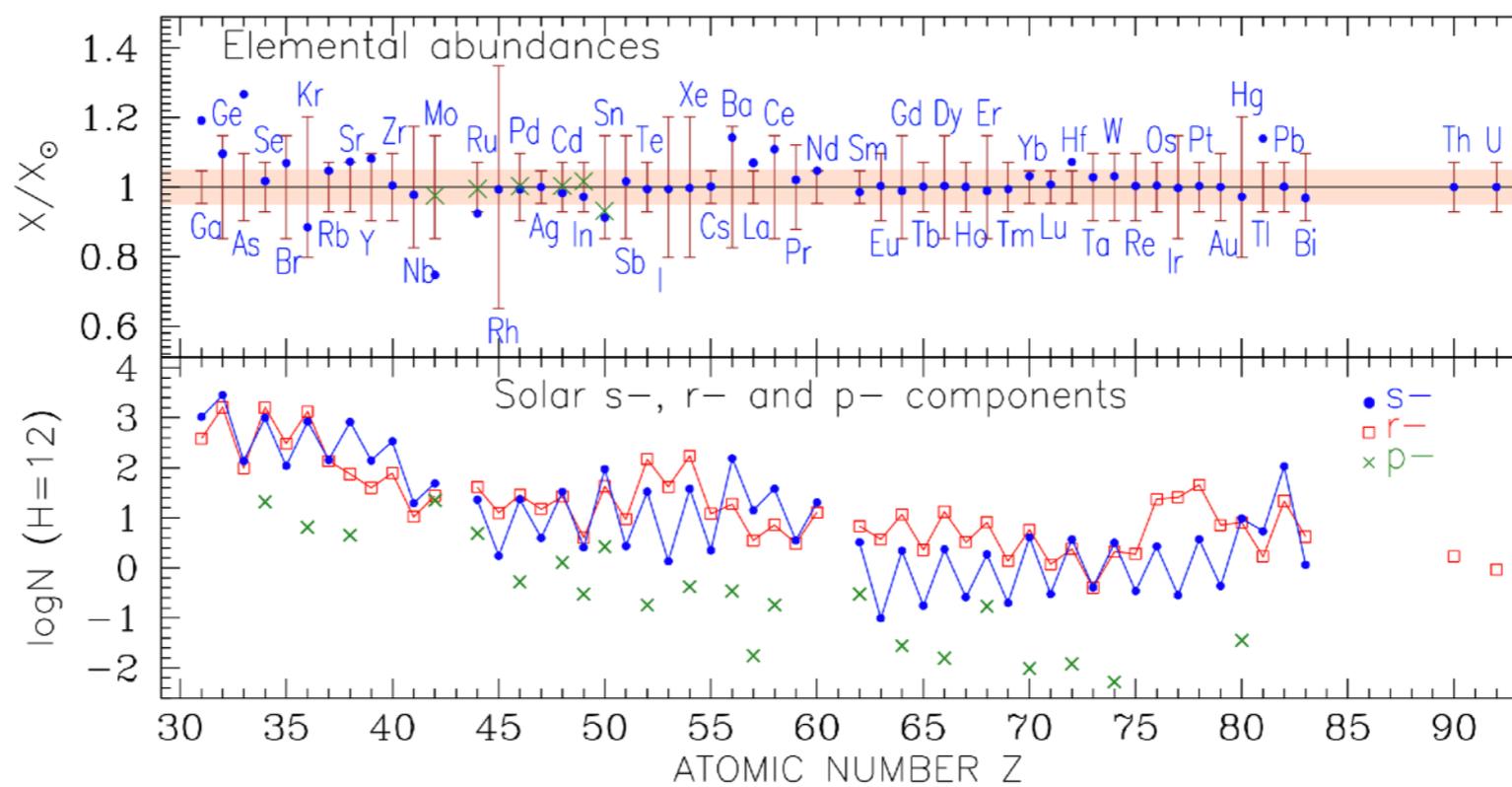
鉄より重い陽子
過剰安定核 (p核)
(35核種)



半減期

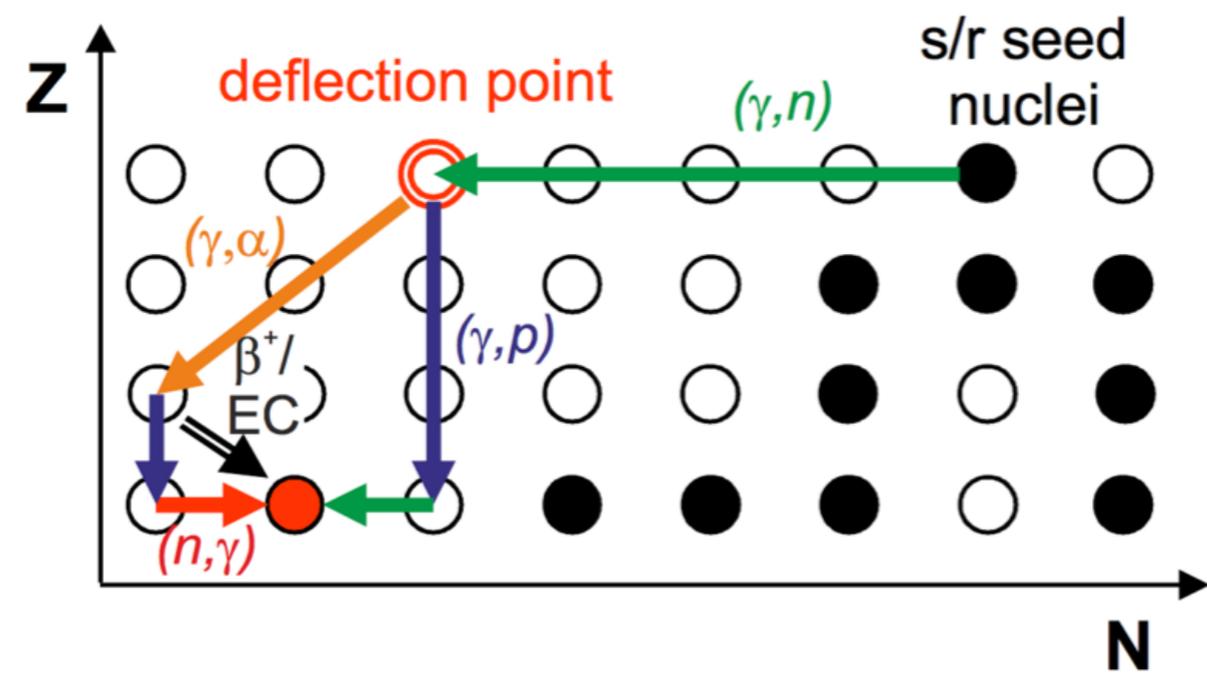


太陽系組成の同位体比 (Prantzos+2020)

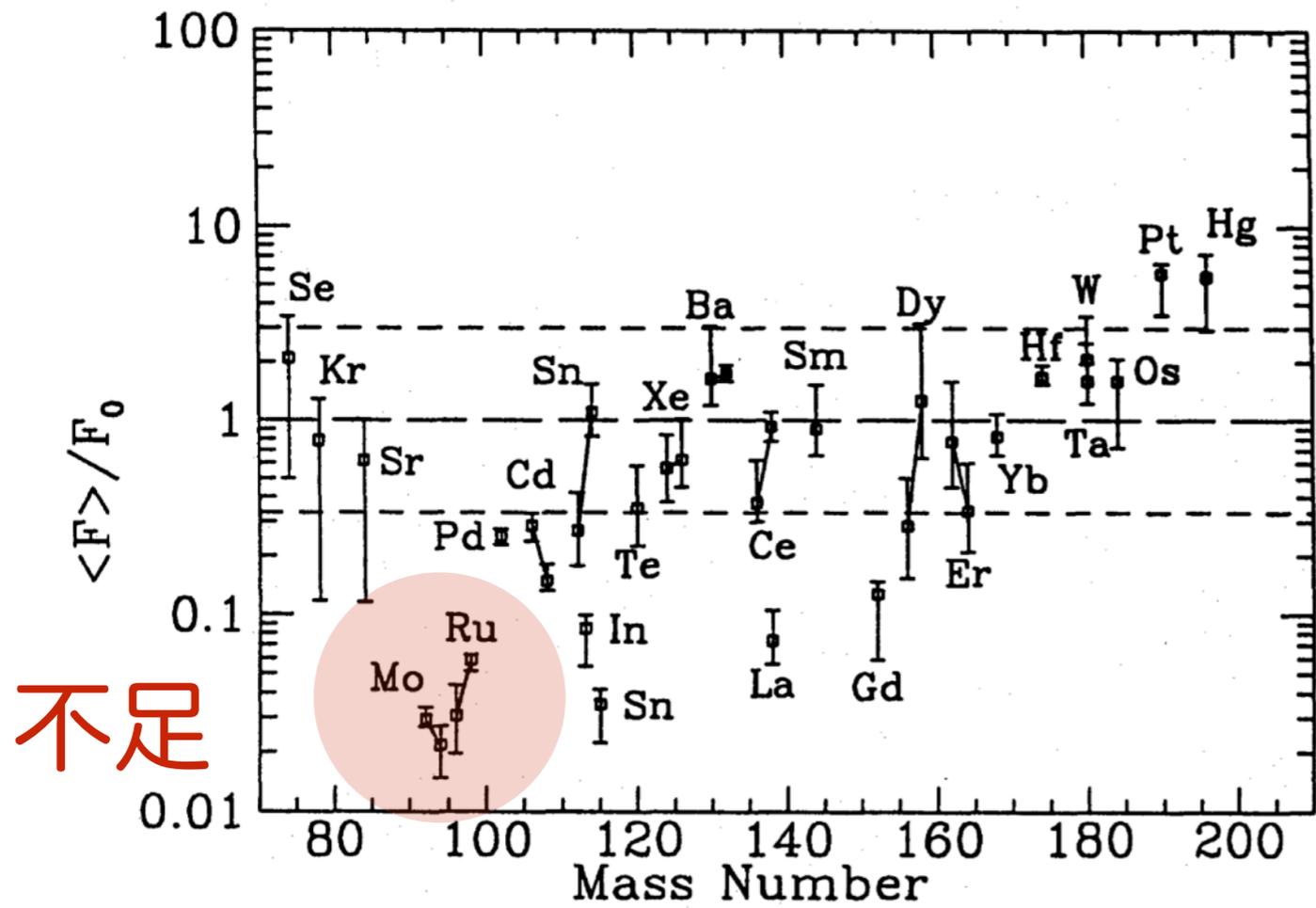


p核の起源：ガンマプロセス

- すでに存在しているs, r核を「壊す」
- 光分解 ($T_9 = 2-3$ GK)
- 超新星爆発による衝撃波伝搬
 - 酸素・ネオン層 ($\sim 10,000$ km)



様々な星のモデルを考慮
(Rayet+1995)



核反応の不定性？
→ Mo, Ruの不足は解消
できなさそう
(e.g., Rauscher+2016; NN+2018)

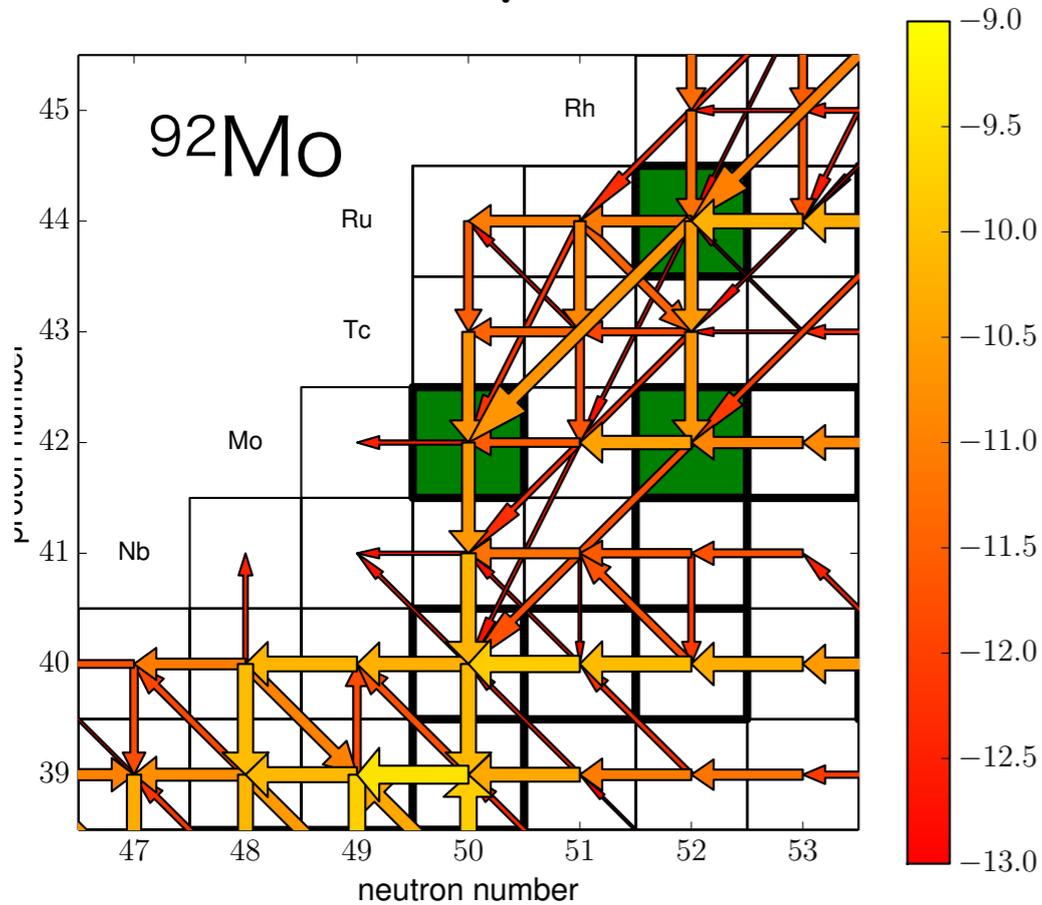
元素合成の流れ

元素合成過程は、爆発時の星の層ごとに異なるので、生成量で重みをつけてFluxを見積もる。

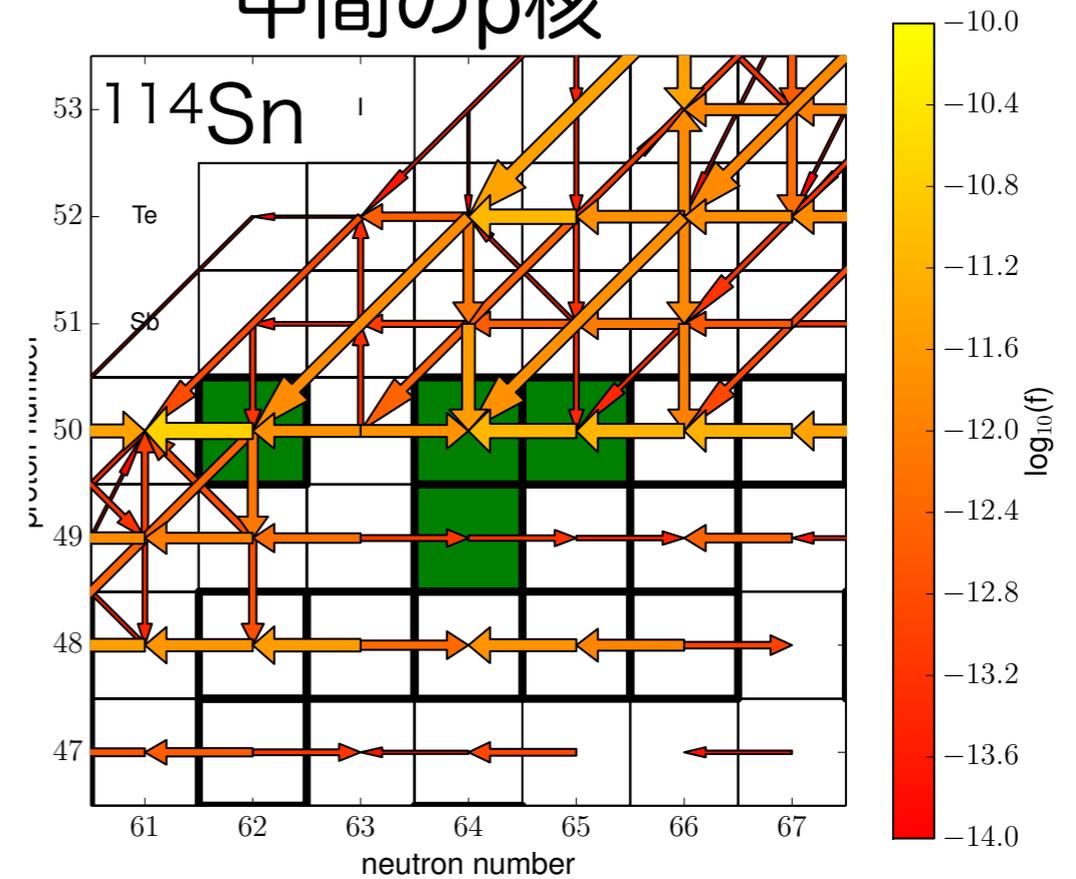
Rauscher+ 2016

$$w_j = \frac{|q Y_j^{\text{std}} - q Y_j^{\text{ini}}|}{\sum_j |q Y_j^{\text{std}} - q Y_j^{\text{ini}}|} \quad (10)$$

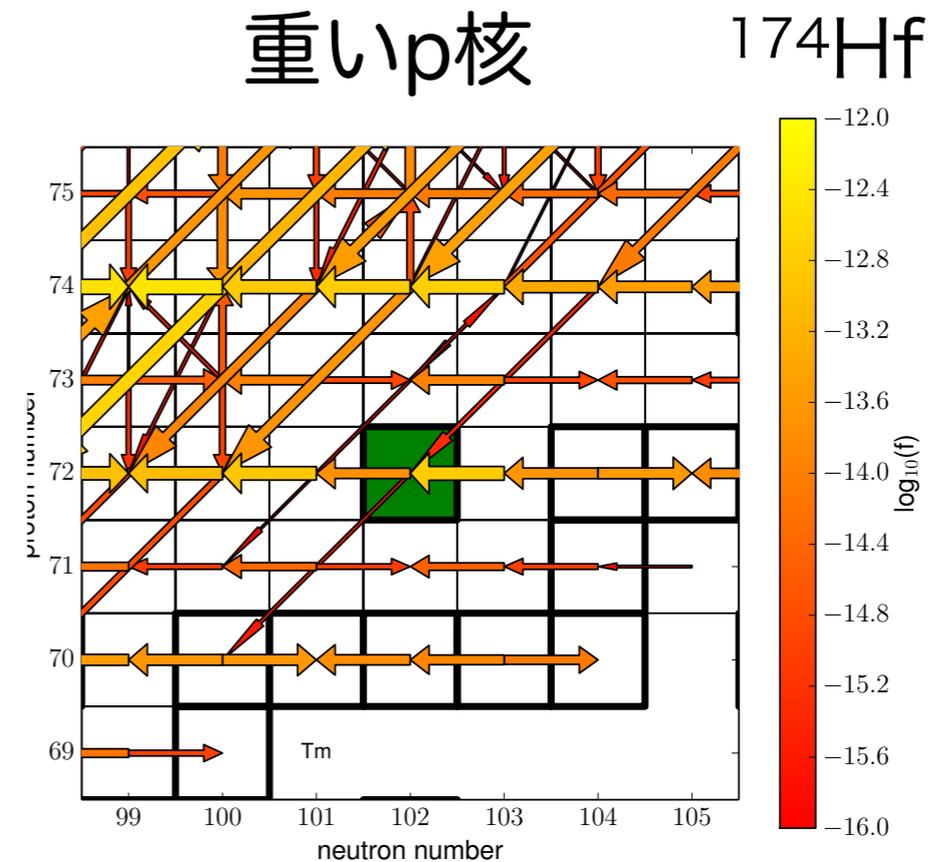
軽いp核



中間のp核

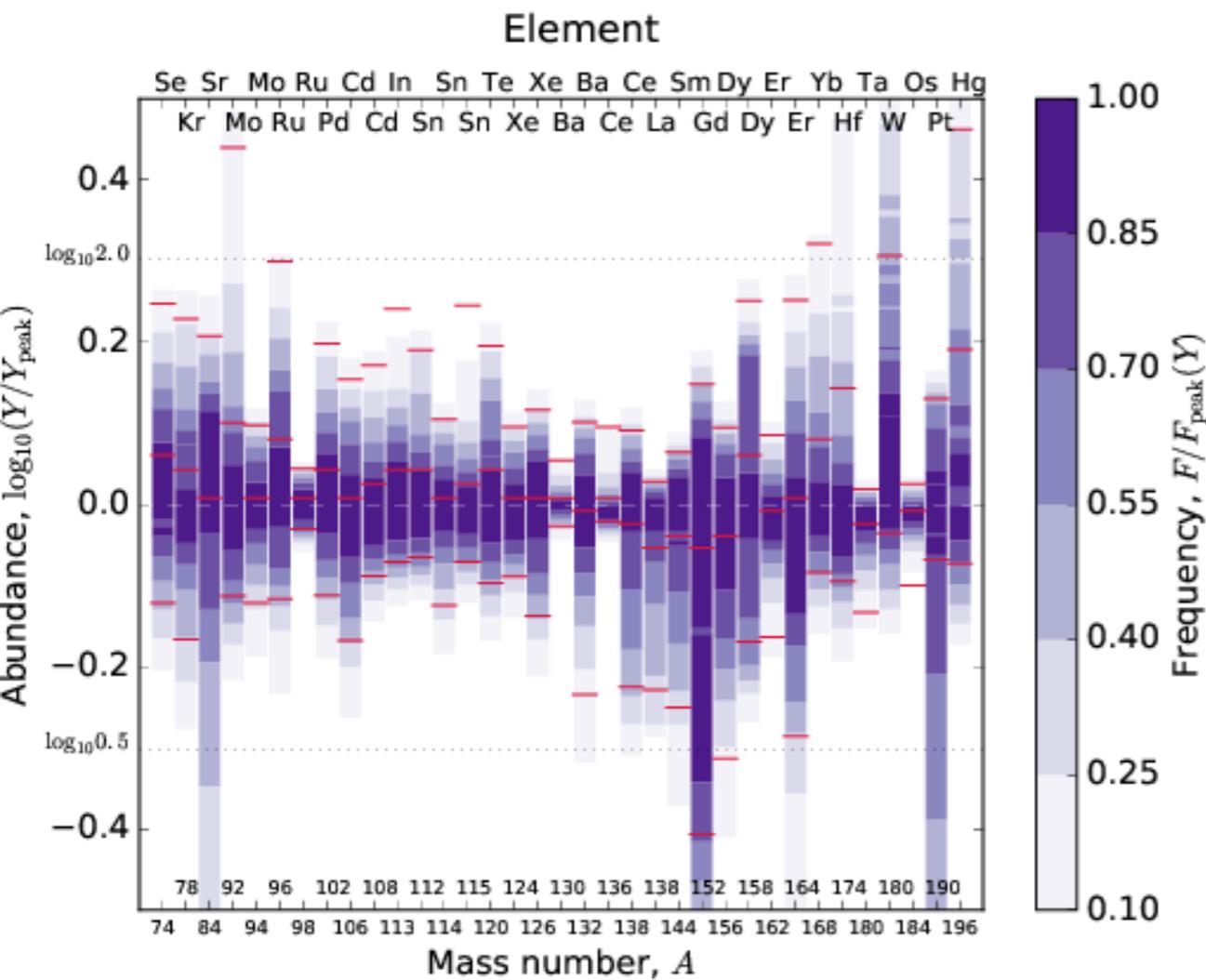


重いp核

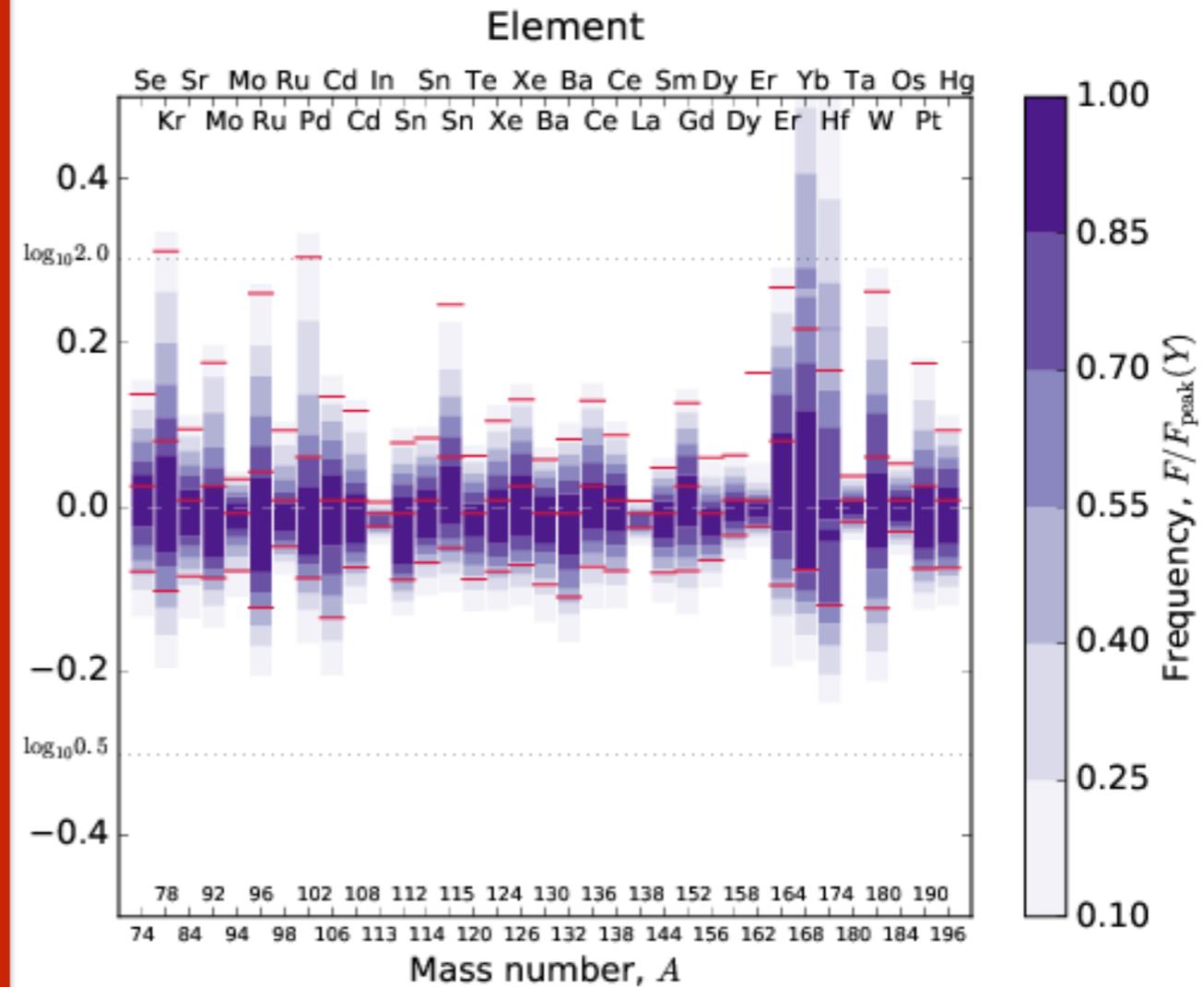


ガンマ・プロセスの不定性

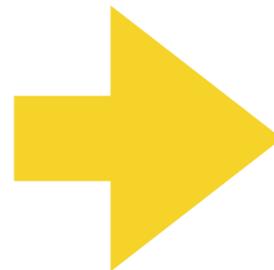
“Hashimoto” model
(Rayet+ 1995)



25 Msun Kepler model
(Rauscher+ 2003)



$$r_{\text{Pearson}} = \frac{\sum_{i=1}^k (\tilde{x}_i - \bar{x})(\tilde{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (\tilde{x}_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}}$$



$$r_{\text{corr}}^q = \frac{\sum_{ij} {}^q w_j^2 (f_{ij} - \bar{f}_j) ({}^q Y_{ij} - \bar{{}^q Y}_j)}{\sqrt{\sum_{ij} {}^q w_j^2 (f_{ij} - \bar{f}_j)^2} \sqrt{\sum_{ij} {}^q w_j^2 ({}^q Y_{ij} - \bar{{}^q Y}_j)^2}}$$

重要な反応率: Kepler 25Msun

Nuclide	$r_{\text{corr},0}$	$r_{\text{corr},1}$	$r_{\text{corr},2}$	Key rate Level 1	Key rate Level 2	Key rate Level 3	X_0 (2 GK) capture	X_0 (3 GK) capture	
^{78}Kr	-0.84			$^{77}\text{Br} + p \leftrightarrow \gamma + ^{78}\text{Kr}$	$^{79}\text{Kr} + n \leftrightarrow \gamma + ^{80}\text{Kr}$		9.63×10^{-2}	4.44×10^{-2}	
	0.34	0.87						1.28×10^{-1}	7.94×10^{-2}
^{92}Mo	-0.74			$^{91}\text{Nb} + p \leftrightarrow \gamma + ^{92}\text{Mo}$			8.88×10^{-1}	8.24×10^{-1}	
^{96}Ru	-0.73				$^{92}\text{Mo} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{96}\text{Ru}$		1.00	9.86×10^{-1}	
	-0.43	-0.69			$^{95}\text{Tc} + p \leftrightarrow \gamma + ^{96}\text{Ru}$		7.64×10^{-1}	6.60×10^{-1}	
^{102}Pd	-0.87			$^{101}\text{Pd} + n \leftrightarrow \gamma + ^{102}\text{Pd}$			5.62×10^{-1}	3.97×10^{-1}	
^{112}Sn	-0.88			$^{111}\text{Sn} + n \leftrightarrow \gamma + ^{112}\text{Sn}$			7.79×10^{-1}	6.73×10^{-1}	
^{114}Sn	-0.77			$^{113}\text{Sn} + n \leftrightarrow \gamma + ^{114}\text{Sn}$			1.82×10^{-1}	1.28×10^{-1}	
^{120}Te	-0.64	-0.66			$^{119}\text{Te} + n \leftrightarrow \gamma + ^{120}\text{Te}$		2.43×10^{-1}	1.77×10^{-1}	
^{124}Xe	-0.74			$^{123}\text{Xe} + n \leftrightarrow \gamma + ^{124}\text{Xe}$			8.25×10^{-2}	4.38×10^{-2}	
^{126}Xe	-0.75			$^{125}\text{Cs} + p \leftrightarrow \gamma + ^{126}\text{Ba}$			1.17×10^{-1}	7.41×10^{-2}	
	0.30	0.64	0.65			$^{127}\text{Ba} + n \leftrightarrow \gamma + ^{128}\text{Ba}$	5.78×10^{-2}	3.59×10^{-2}	
^{130}Ba	-0.66			$^{129}\text{Ba} + n \leftrightarrow \gamma + ^{130}\text{Ba}$			5.77×10^{-2}	3.55×10^{-2}	
^{132}Ba	-0.77			$^{131}\text{Ba} + n \leftrightarrow \gamma + ^{132}\text{Ba}$			1.07×10^{-1}	5.85×10^{-2}	
^{136}Ce	-0.69			$^{135}\text{Ce} + n \leftrightarrow \gamma + ^{136}\text{Ce}$			1.86×10^{-1}	8.94×10^{-2}	
	0.31	0.72			$^{139}\text{Ce} + n \leftrightarrow \gamma + ^{140}\text{Ce}$		8.56×10^{-1}	6.09×10^{-1}	
^{138}Ce	-0.66			$^{137}\text{Ce} + n \leftrightarrow \gamma + ^{138}\text{Ce}$			4.16×10^{-1}	2.54×10^{-1}	
	-0.16	-0.19	-0.66			$^{136}\text{Ce} + n \leftrightarrow \gamma + ^{137}\text{Ce}$	7.57×10^{-1}	4.70×10^{-1}	
^{144}Sm	0.70			$^{145}\text{Eu} + p \leftrightarrow \gamma + ^{146}\text{Gd}$			8.06×10^{-1}	6.02×10^{-1}	
^{152}Gd	-0.74			$^{151}\text{Gd} + n \leftrightarrow \gamma + ^{152}\text{Gd}$			6.18×10^{-1}	3.87×10^{-1}	
	0.43	0.76			$^{153}\text{Gd} + n \leftrightarrow \gamma + ^{154}\text{Gd}$		5.38×10^{-2}	2.78×10^{-2}	
	-0.14	-0.26	-0.73			$^{148}\text{Sm} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{152}\text{Gd}$	8.14×10^{-1}	5.22×10^{-1}	
^{164}Er	-0.78			$^{160}\text{Er} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{164}\text{Yb}$			2.13×10^{-1}	1.24×10^{-1}	
^{180}W	-0.83			$^{176}\text{W} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{180}\text{Os}$			1.83×10^{-1}	1.04×10^{-1}	
	-0.19	-0.60	-0.68			$^{179}\text{Os} + n \leftrightarrow \gamma + ^{180}\text{Os}$	4.89×10^{-2}	2.49×10^{-2}	
^{196}Hg	-0.83			$^{195}\text{Pb} + n \leftrightarrow \gamma + ^{196}\text{Pb}$			2.97×10^{-1}	1.89×10^{-1}	
	0.31	0.70			$^{197}\text{Pb} + n \leftrightarrow \gamma + ^{198}\text{Pb}$		3.28×10^{-1}	2.39×10^{-1}	
	0.17	0.35	0.67			$^{199}\text{Pb} + n \leftrightarrow \gamma + ^{200}\text{Pb}$	6.37×10^{-1}	3.47×10^{-1}	
^{92}Nb	0.76			$^{90}\text{Zr} + p \leftrightarrow \gamma + ^{91}\text{Nb}$			1.00	9.95×10^{-1}	
^{146}Sm	-0.57	-0.75				$^{144}\text{Sm} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{148}\text{Gd}$		9.99×10^{-1}	9.65×10^{-1}
	0.34	0.44	0.79				$^{147}\text{Gd} + n \leftrightarrow \gamma + ^{148}\text{Gd}$	9.92×10^{-1}	9.28×10^{-1}

先行研究 (e.g., Rapp+2006) と有意な違い。

重力崩壊型超新星でのガンマ・プロセスは、
ある程度確立され、議論も精密化されている。

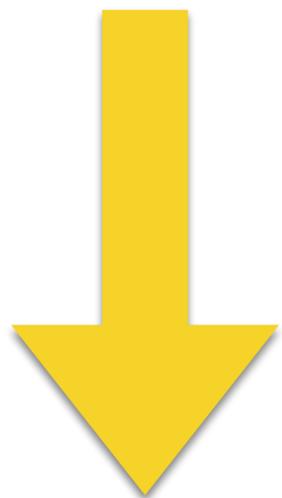
p核の化学進化？

超新星による太陽系組成への影響 (Travaglio+2019)
(異なる星の質量と金属量)

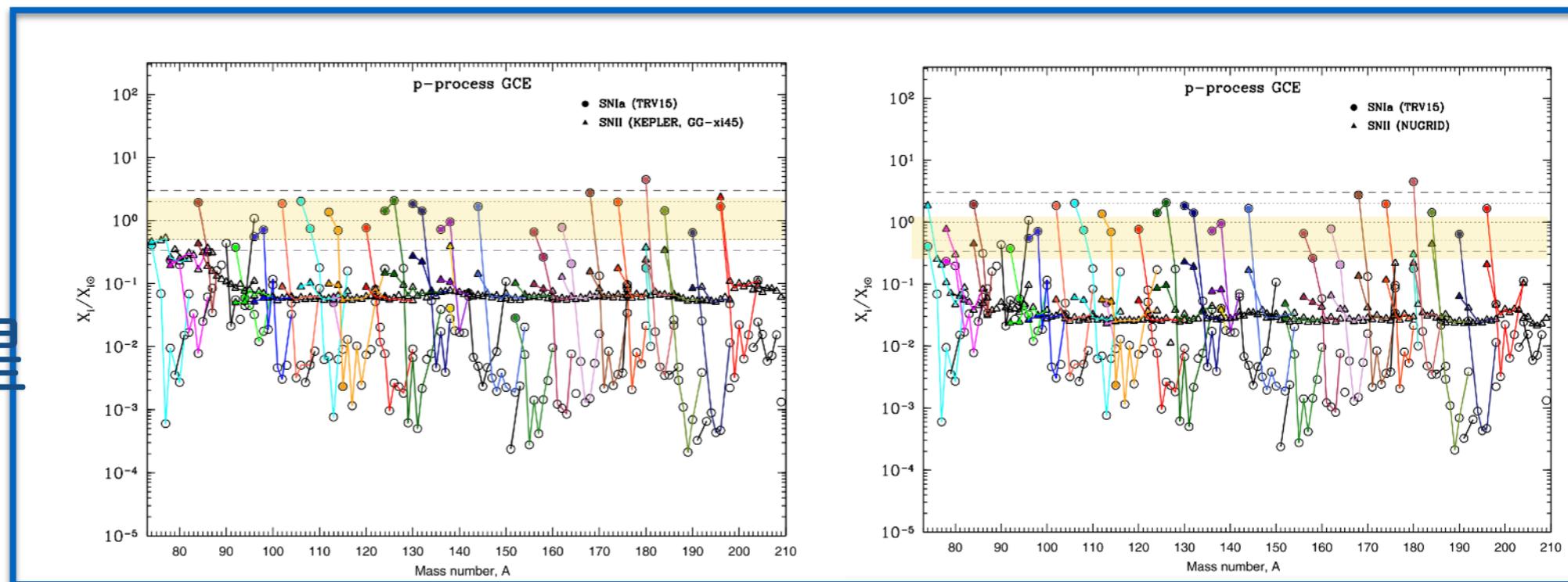
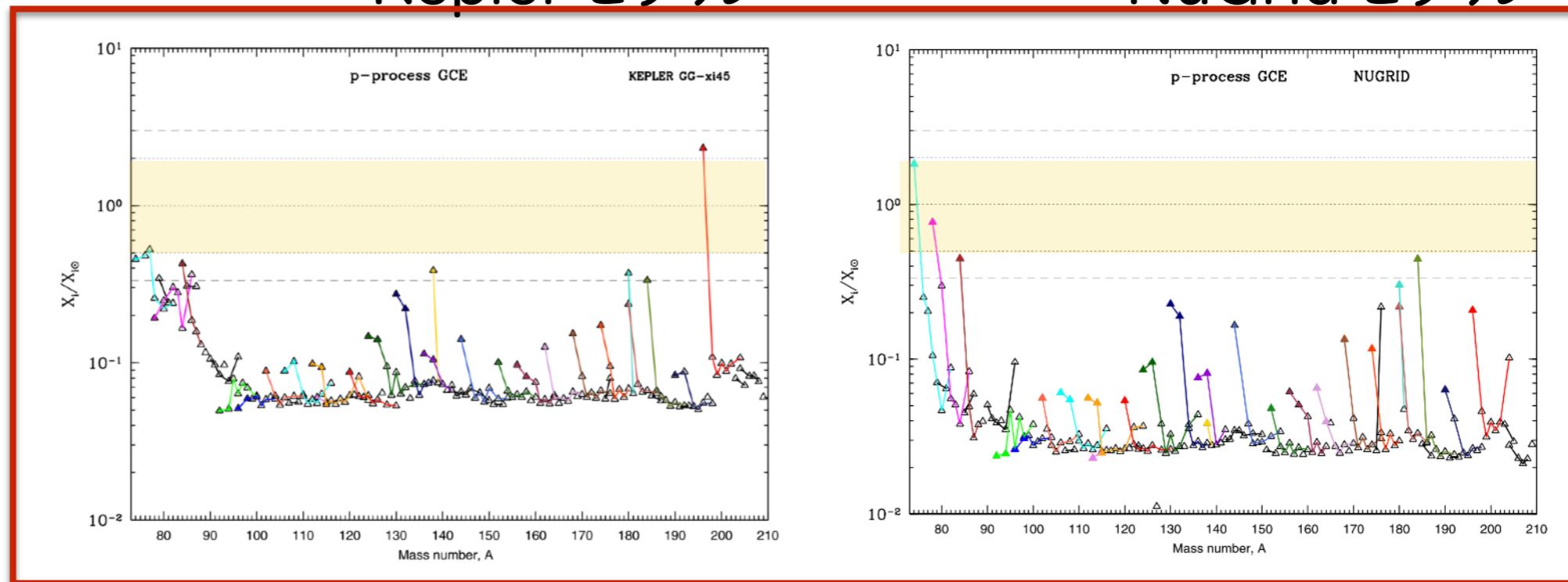
Keplerモデル

NuGridモデル

重力崩壊型
超新星のみ



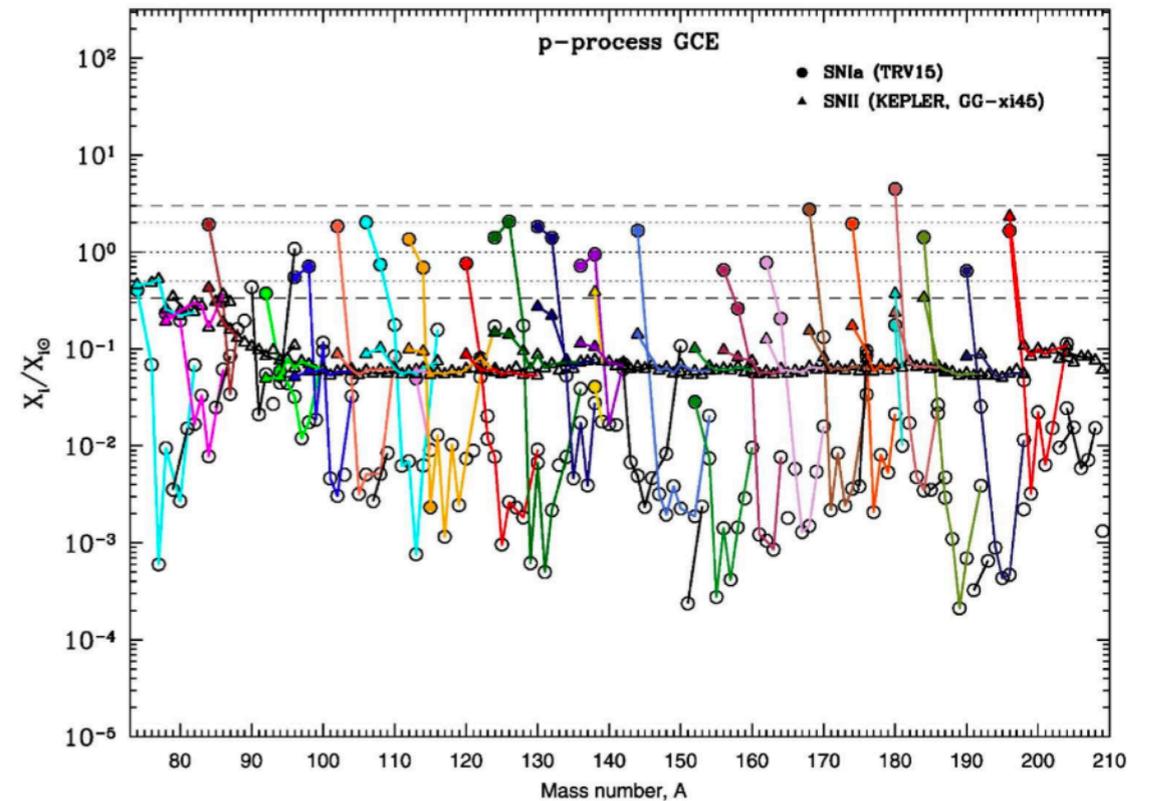
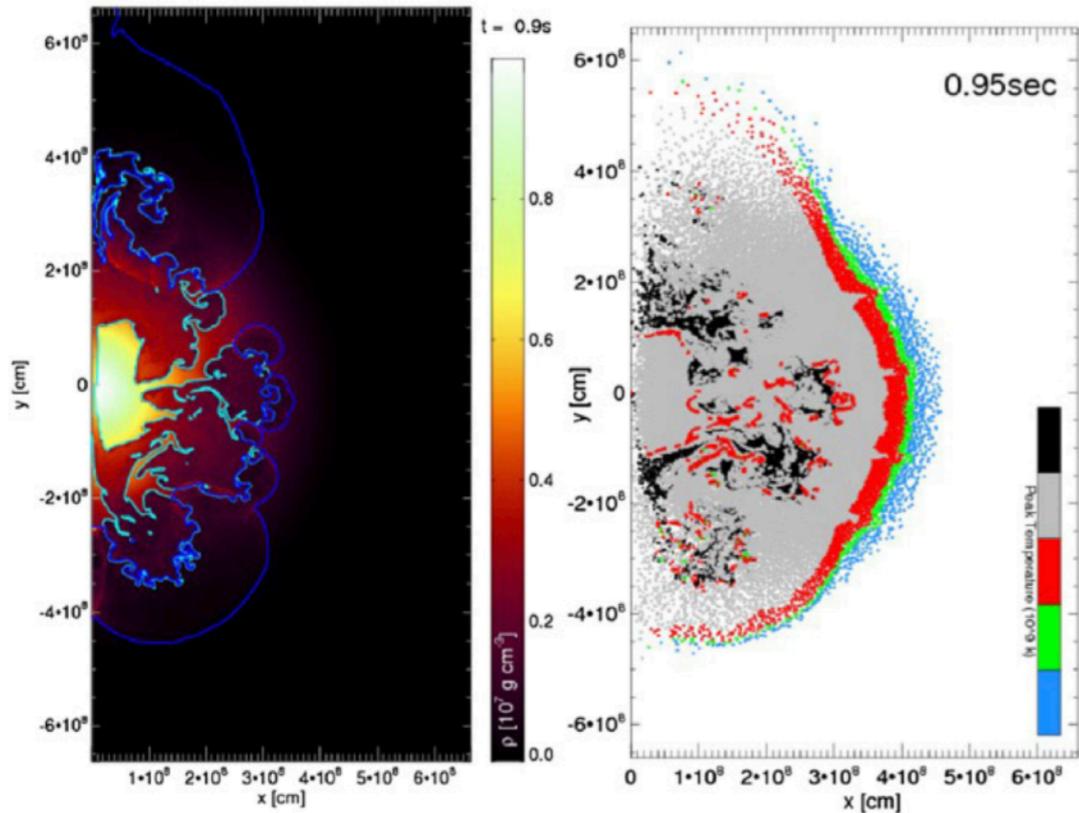
重力崩壊型
vs Ia型超新星
(とあるモデル)



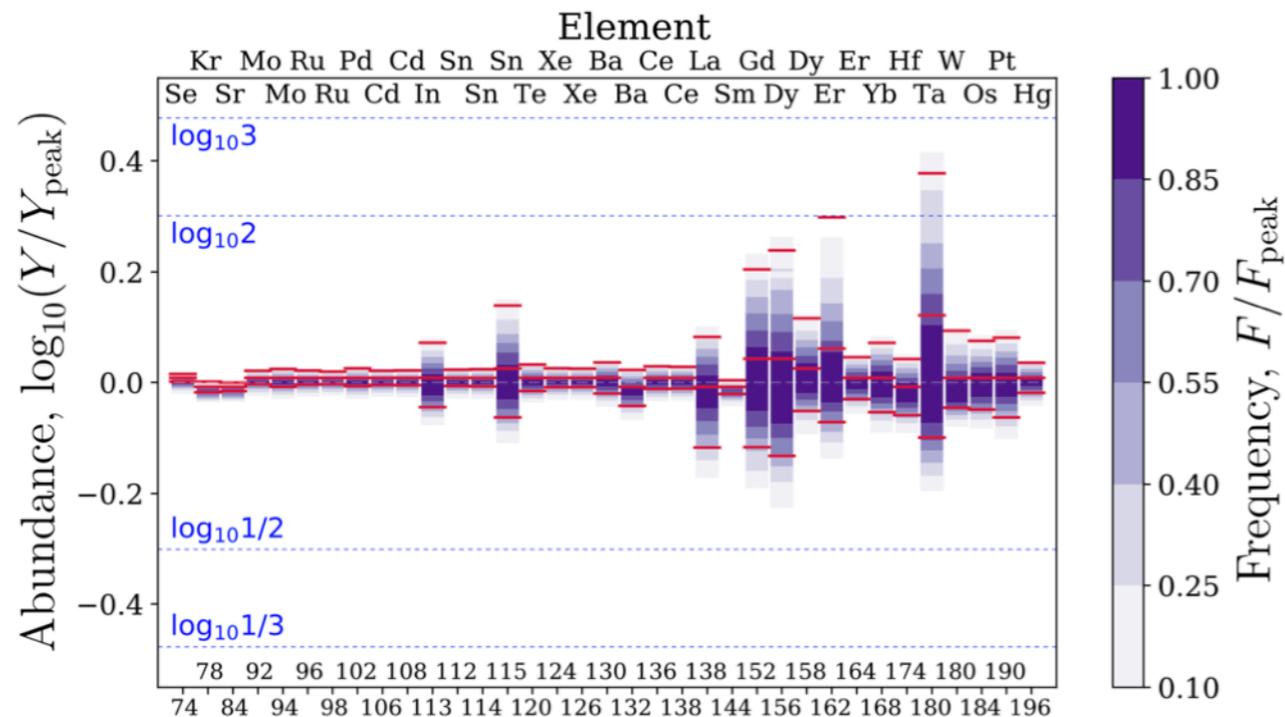
核爆発型超新星でのガンマ・プロセス

2D爆発シミュレーションに基づいた解析 (Travaglio+2011)

元素組成 (重力崩壊型との比較)



反応率の不定性解析 (NN+2018)



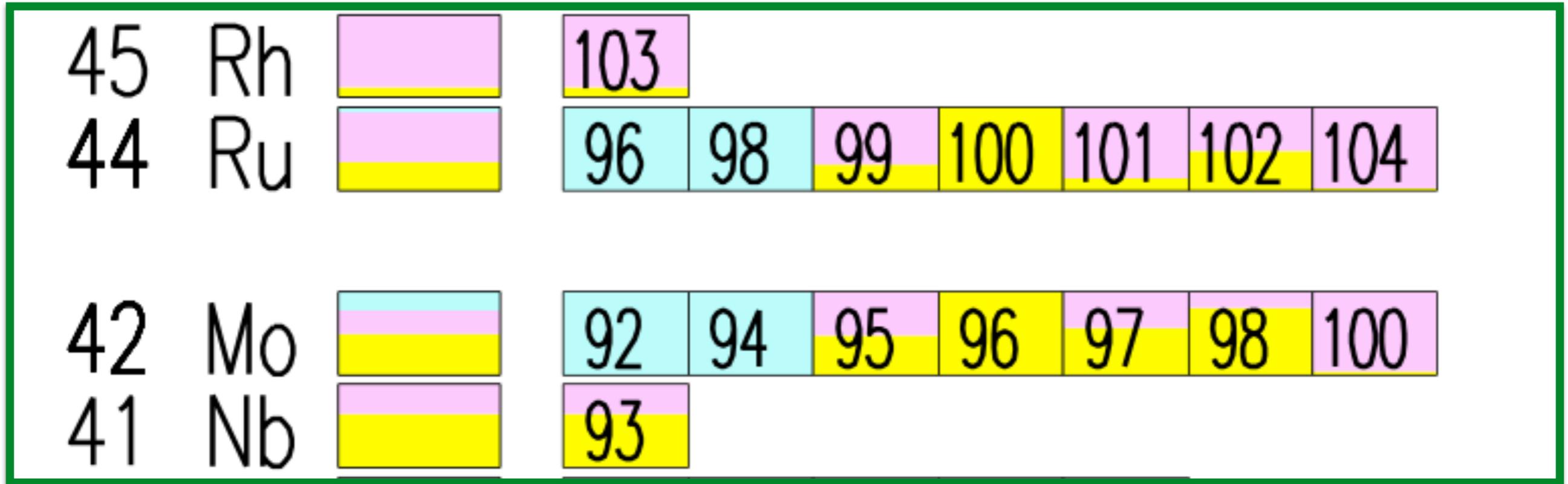
- SDシナリオでなければならない (「白色矮星-恒星」の合体)
- 伴星でのsプロセスや降着時の元素合成が不明 (我々が用いる元素合成モデルが適用可能か?)
- 爆発モデル依存が大きい。

小まとめ：p核の起源

- 多くのp核は**ガンマ・プロセス**で生成
- **重力崩壊型超新星（酸素/水素層）**が有望である。
（個別のアバundanceパターン）
- ところが、**銀河化学進化**に応用してみると、
重力崩壊型だけでは**足りない？**
- しかし、Ia型超新星でのガンマ・プロセスは**分からないことだらけ、**
（今後の天体シミュレーションと元素合成理論の進展によって解決される??）
- **軽いp核（Mo, Ruなど）の起源はガンマ・プロセスでない？**

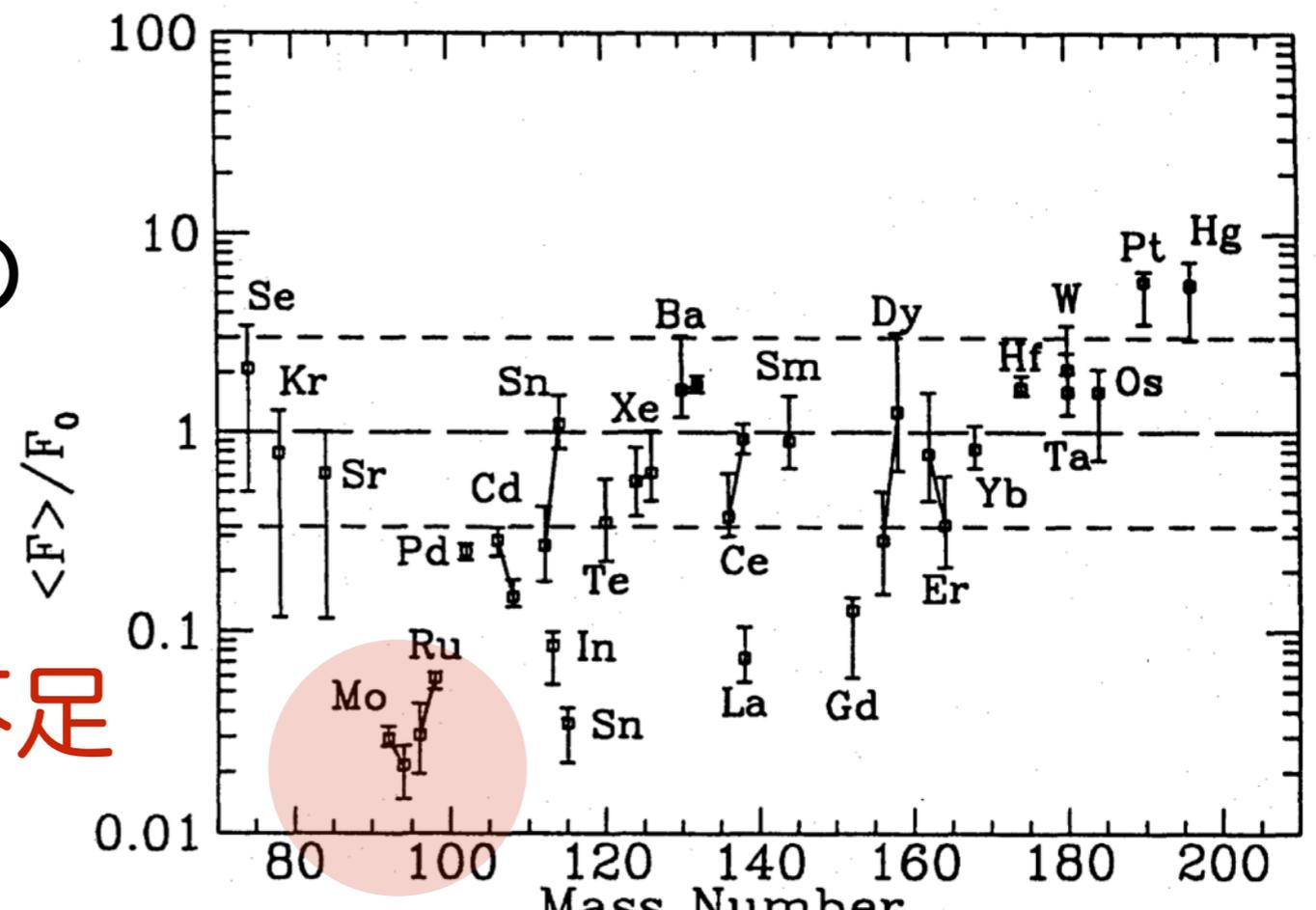
軽いp核の起源としての νp プロセス

νp プロセスとは

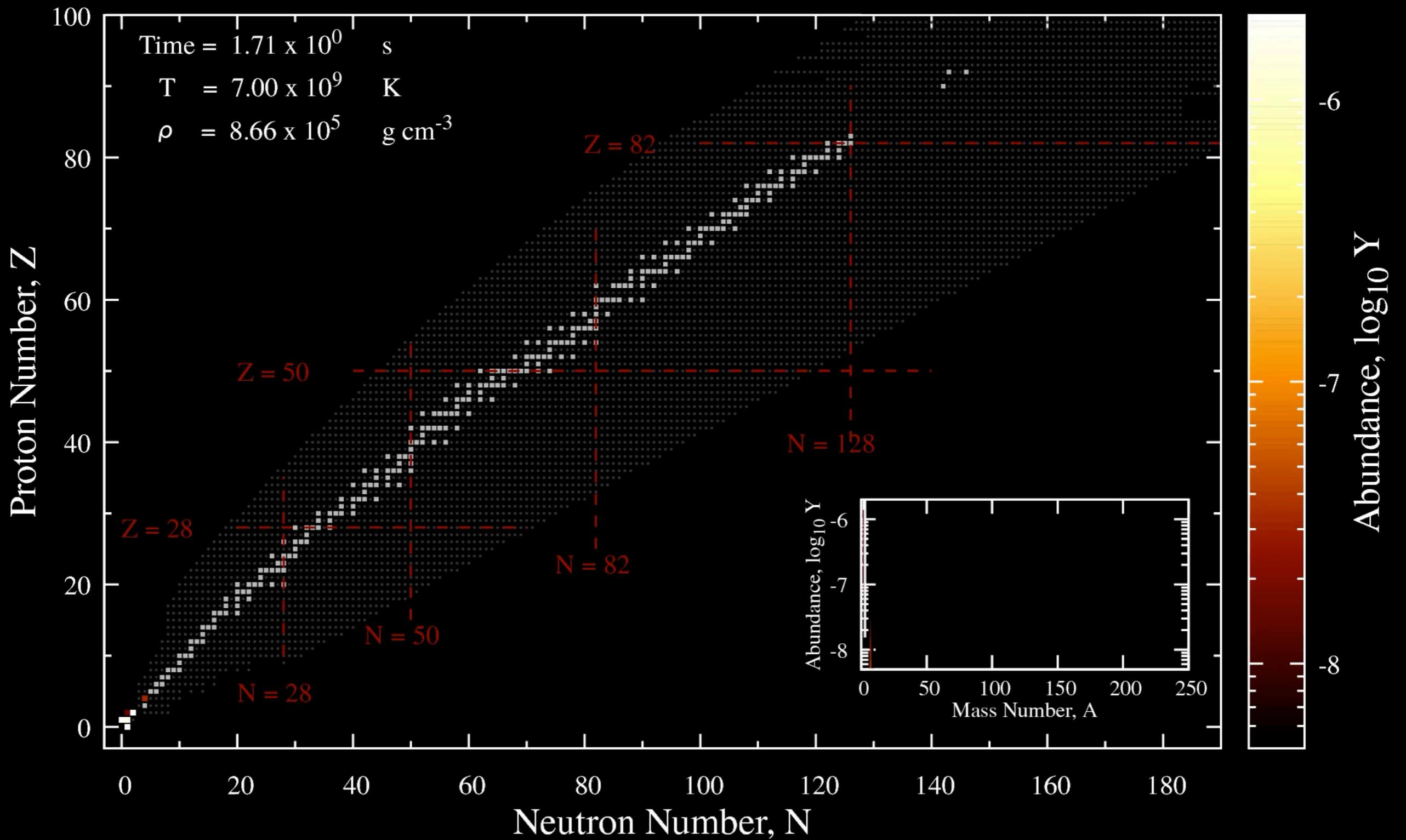


重力崩壊型超新星での
ガンマ・プロセス

不足



νp プロセスとは



ν pプロセス

「 ν (ニュートリノ) 過程」による「速い陽子捕獲過程」

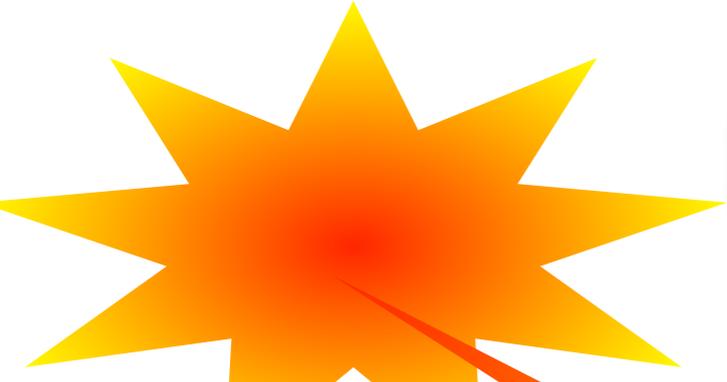
→ ν -process + rp-process

※玄人向け：rpプロセスと ν pプロセスは、同じく陽子過剰側を走る過程であるが、物理環境と素過程が異なる。 ν pプロセスは、ニュートリノ反応によって一定量の中性子が生成されるため、陽子過剰でありながら中性子捕獲も活発である。「ダイナミカルな爆発・膨張環境」(⇔暴走的核焼過程)で、数秒のスケールで温度・密度が急速に減少する。

νp プロセス元素合成の進行

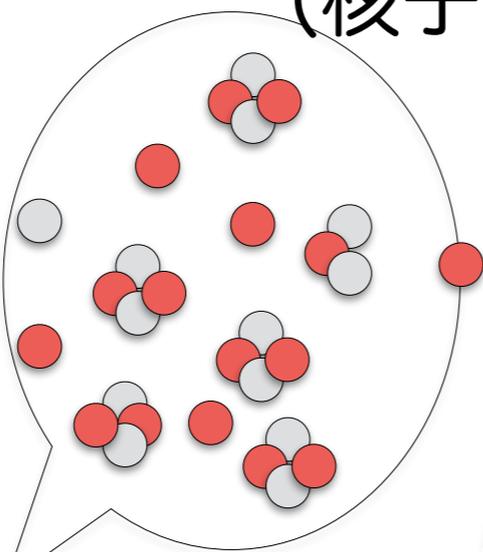


超新星など
爆発現象

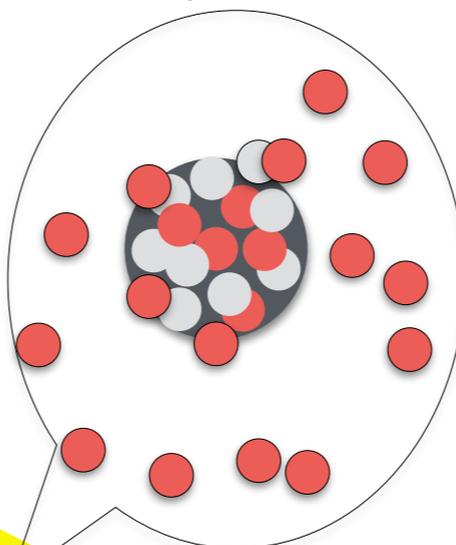


高温・高密度

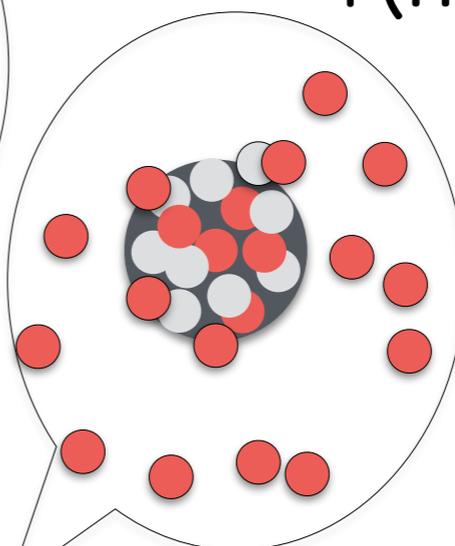
①高温のNSE
(核子・ α 粒子のみ)



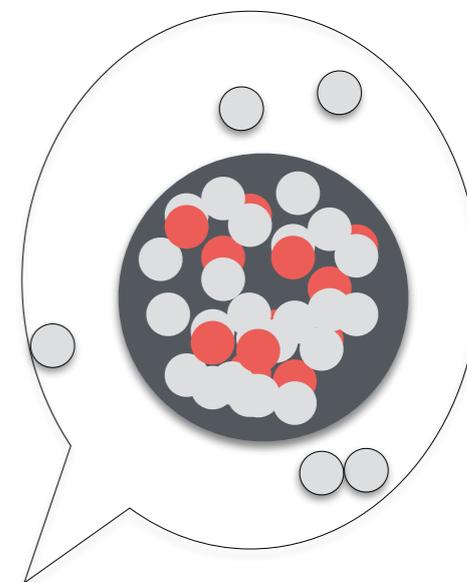
③(p,g)と β^+ の連鎖
 β^+ はA=64で停滞



④(p,g)と β^+ の連鎖
+(n,g)/(n,p)

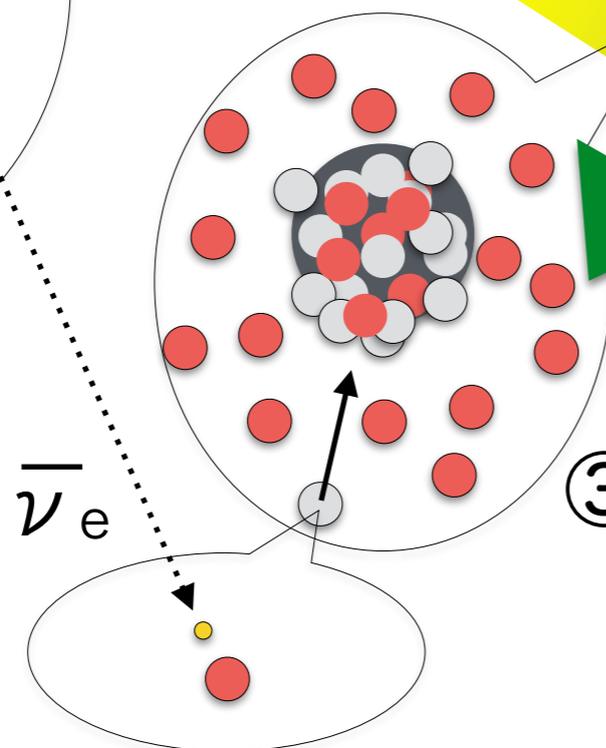
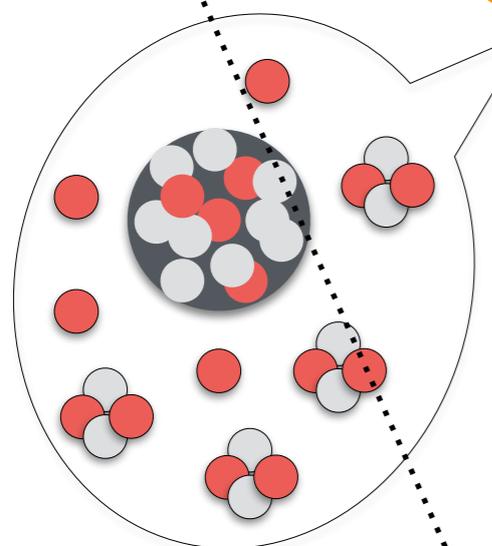


⑤ β^+ 崩壊連鎖



②種核形成

(α 粒子+再結合)
A ~ 50-60



③' 中性子反応で
停滞核を突破

Low T

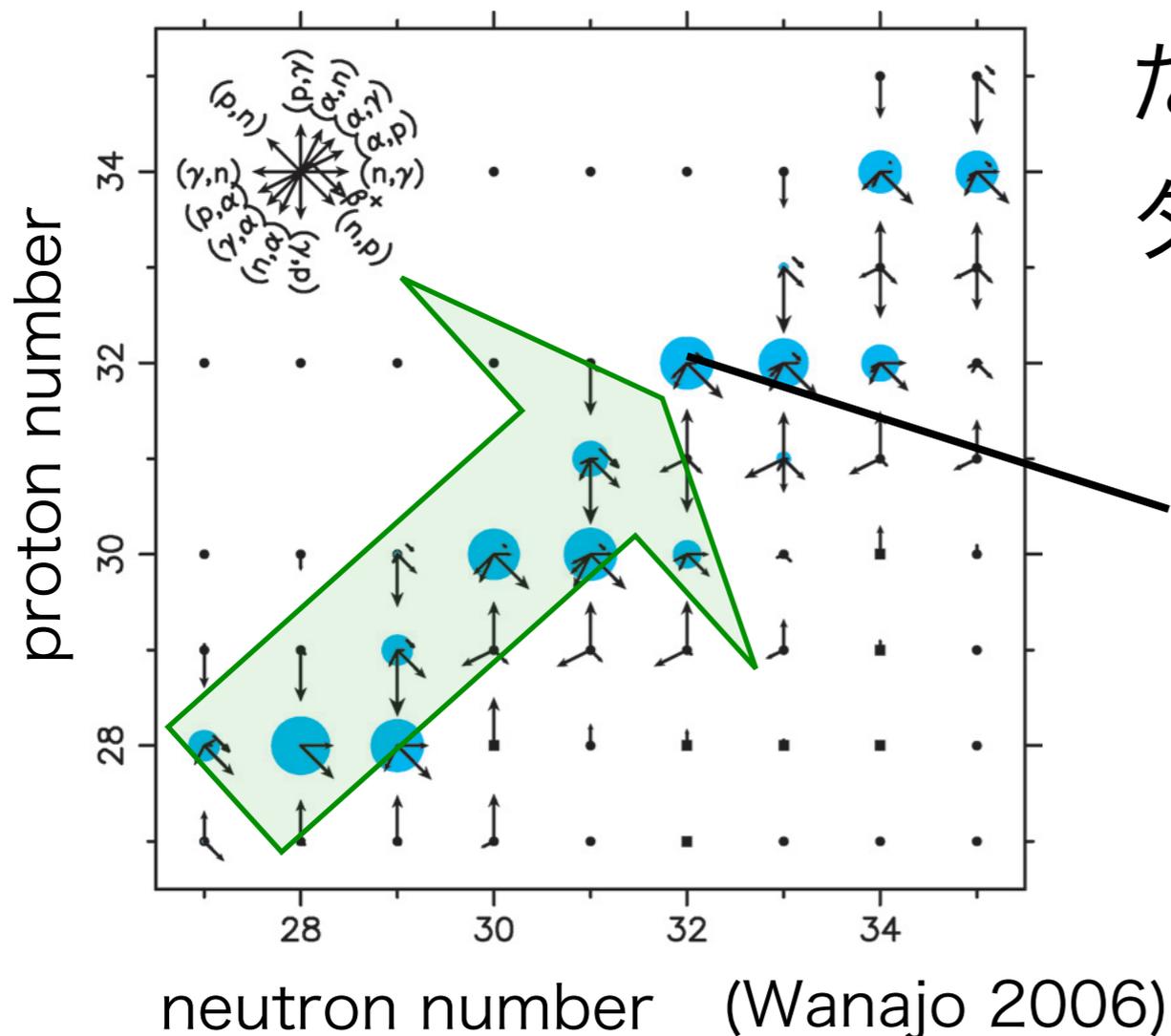
“ νp プロセス”元素合成

陽子過剰な爆発的環境

“classical”なrpプロセスの状況に似る

(X線バースト天体：中性子星表面に伴星から水素が降着し核爆発)

rp-process paths: (p, γ) and β^+ -decay



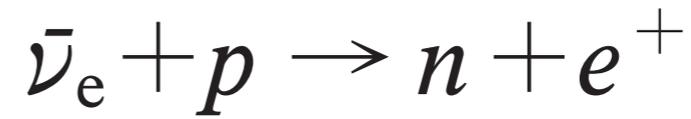
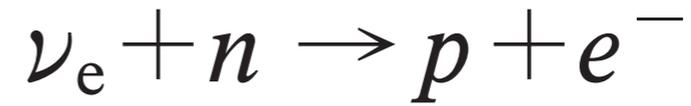
ただし、超新星の環境は
タイムスケールが短い ~ 1 秒

^{64}Ge ($Z=N=32$)
半減期 $\tau_{\beta} \sim 1$ 分
 \Rightarrow 元素合成の流れが止まる

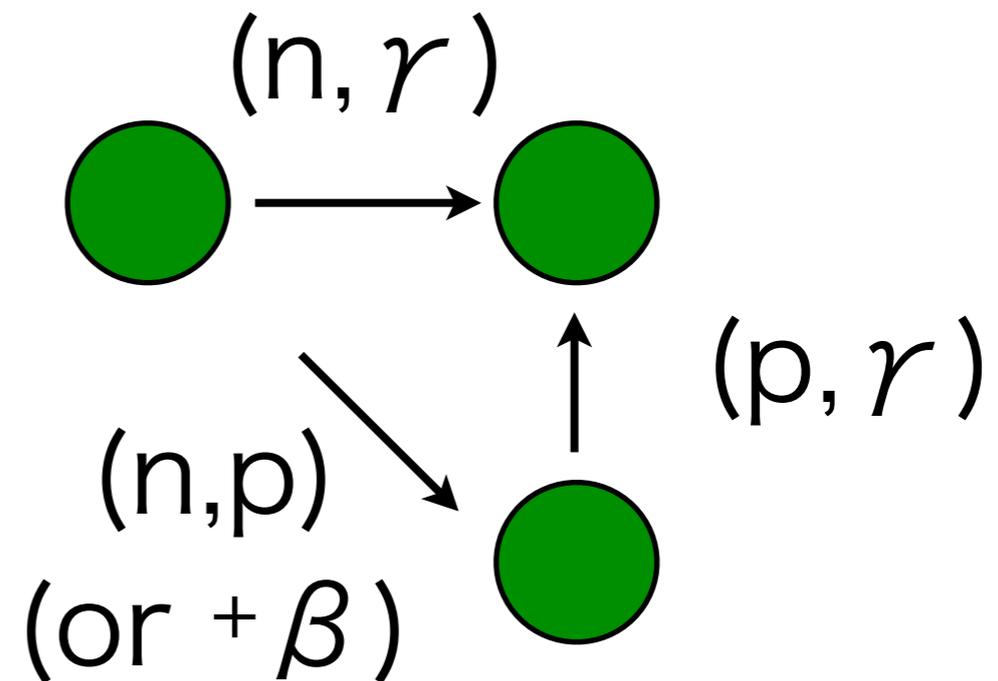
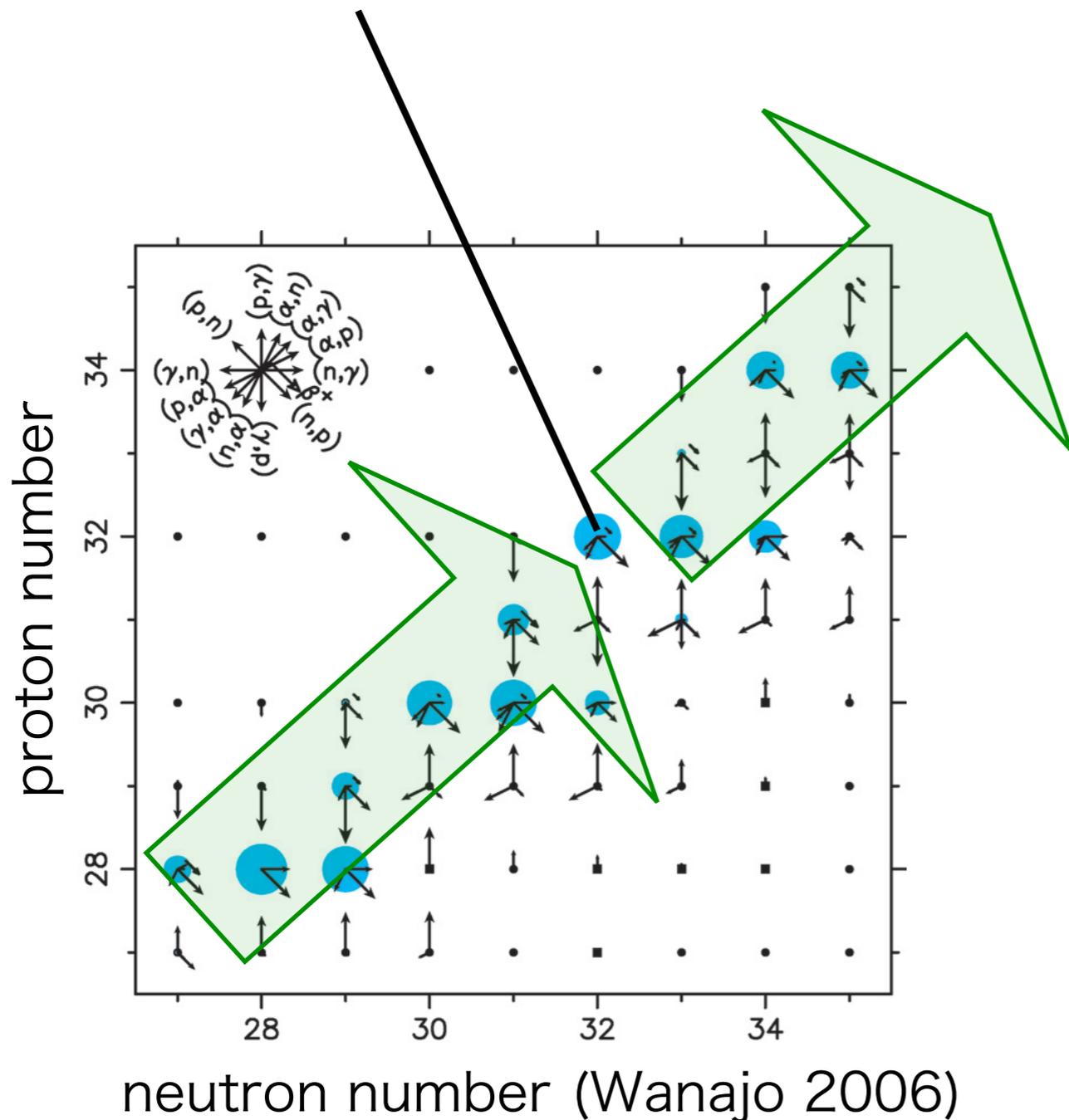
“ νp プロセス”元素合成

中性子捕獲により迂回する

↑ ニュートリノ捕獲に起因



neutron source



天体モデル

νp プロセスの強度

$$\Delta_n \equiv \frac{Y_p}{Y_h} n_{\bar{\nu}_e} = \frac{Y_p}{Y_h} \int_{T_9 \leq 3} \lambda_{\bar{\nu}_e} dt$$

中性子生成量

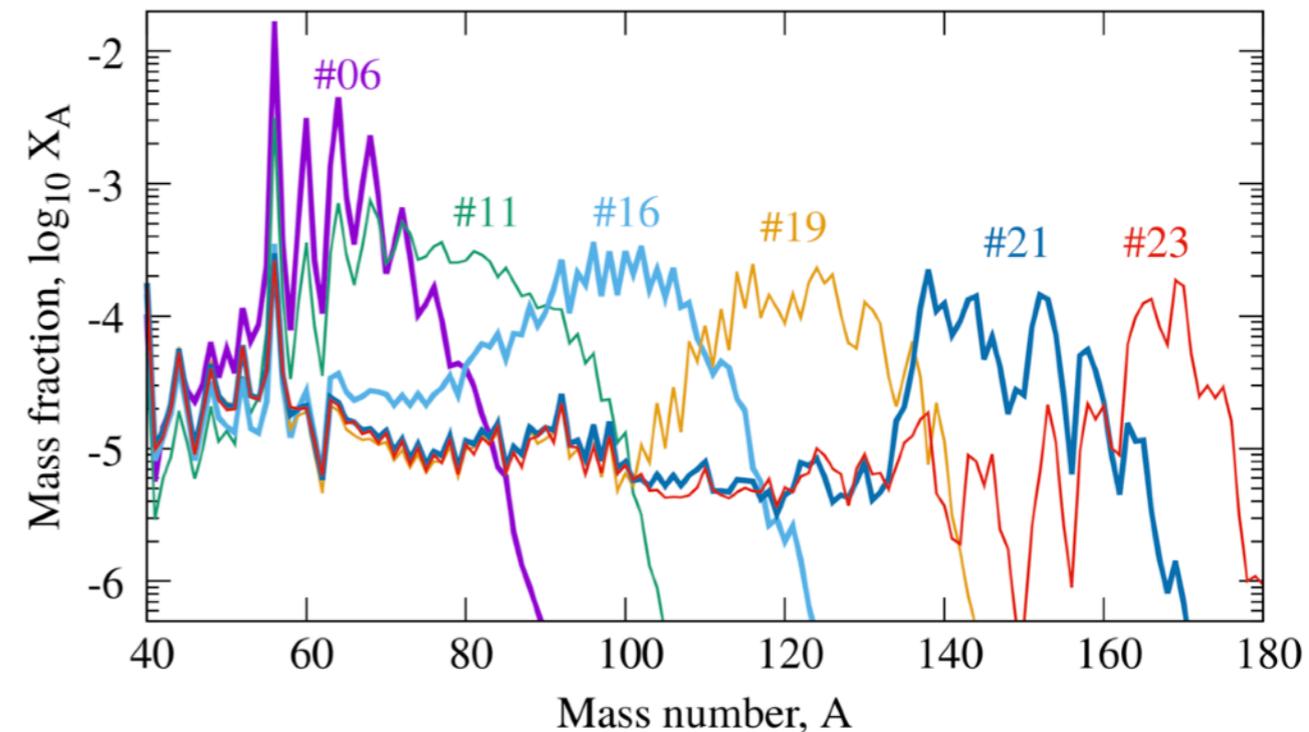
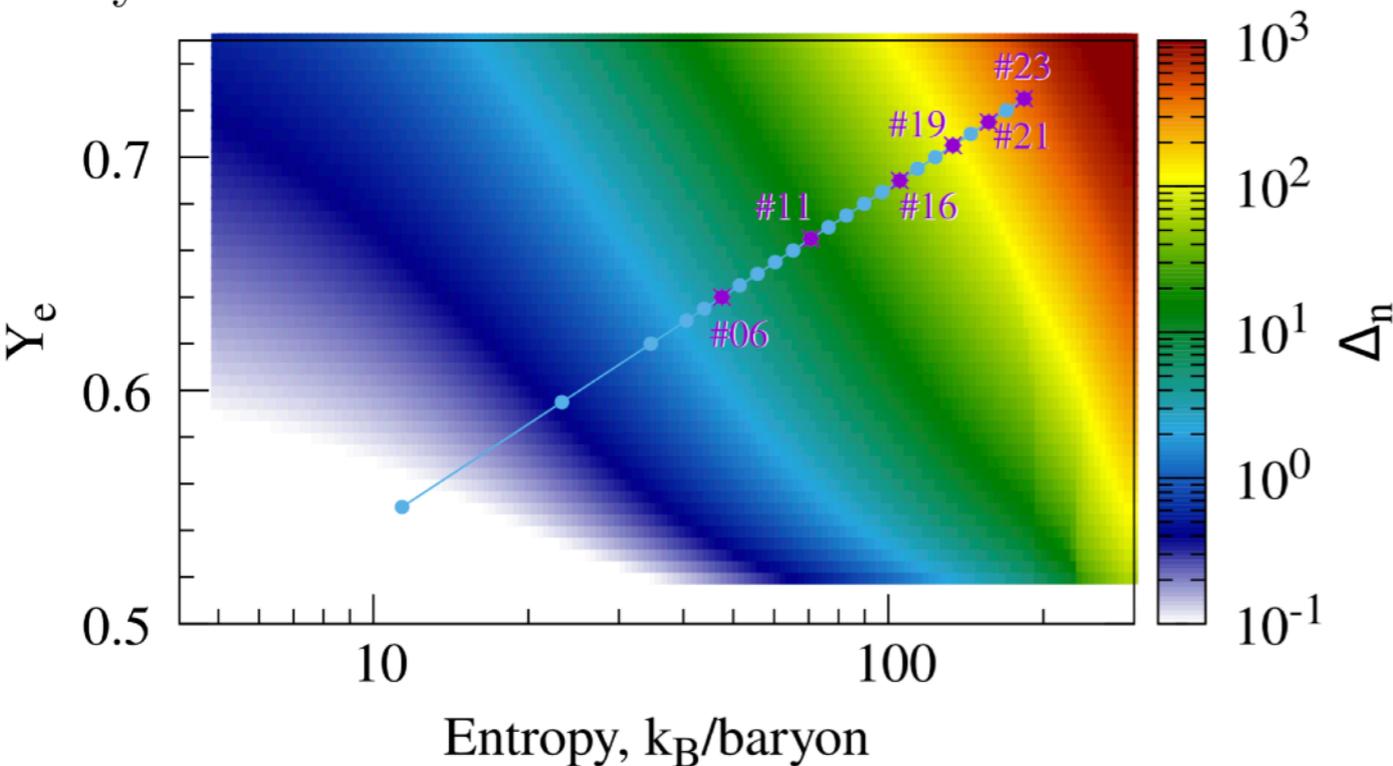
Y_p : 陽子数比

Y_h : 重元素 (種核) 存在量

$n_{\bar{\nu}_e}$: 中性子生成数比

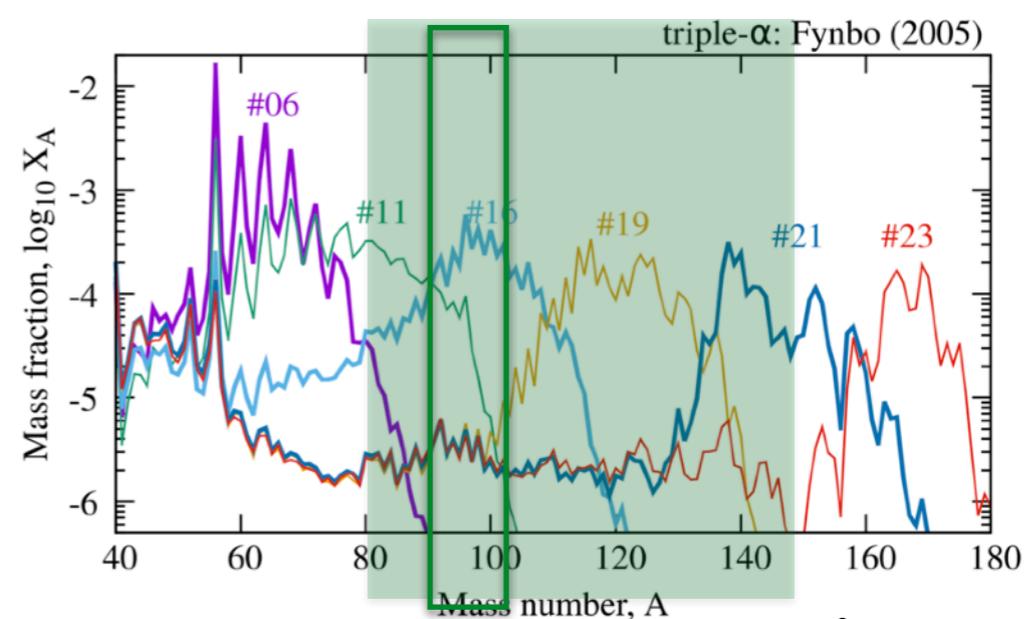
(ニュートリノ吸収)

Fynbo-05



これ以後、現実的な (超新星) モデルを離れ、
元素合成の振る舞いのみに着目する

νp プロセスでの結果



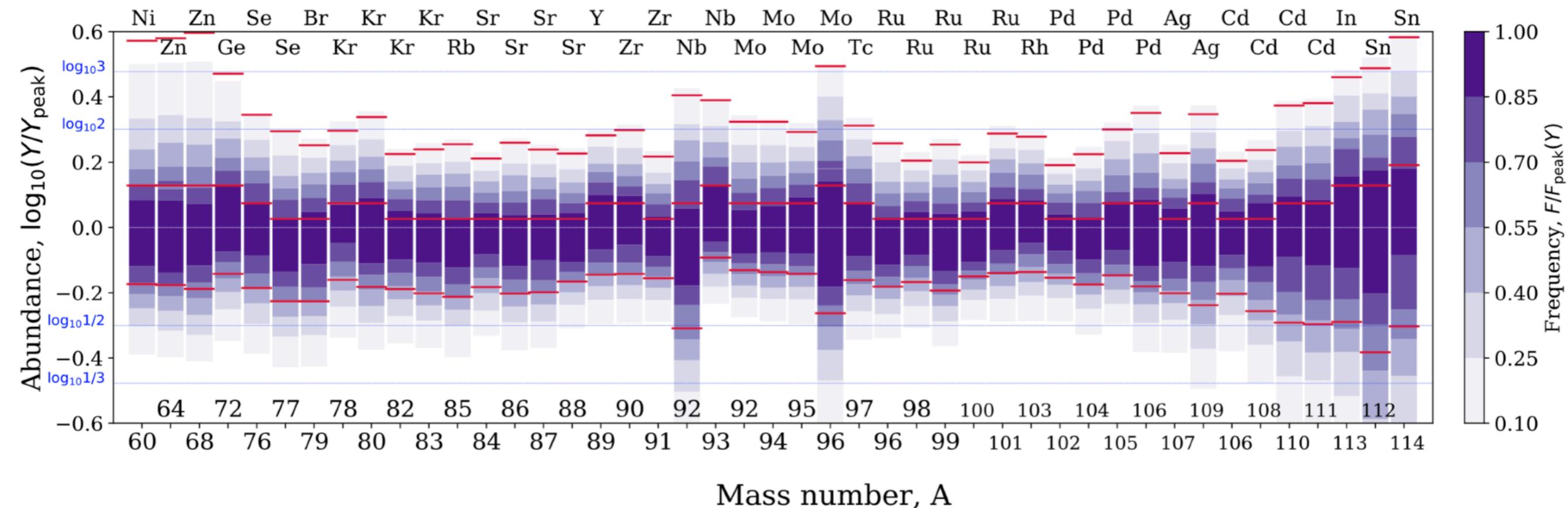
“standard”

#16 ($\Delta_n = 41.4$)

Element

軽いp核

νp プロセス
の限界



・不定性 (90%の領域) の範囲は、2—3倍

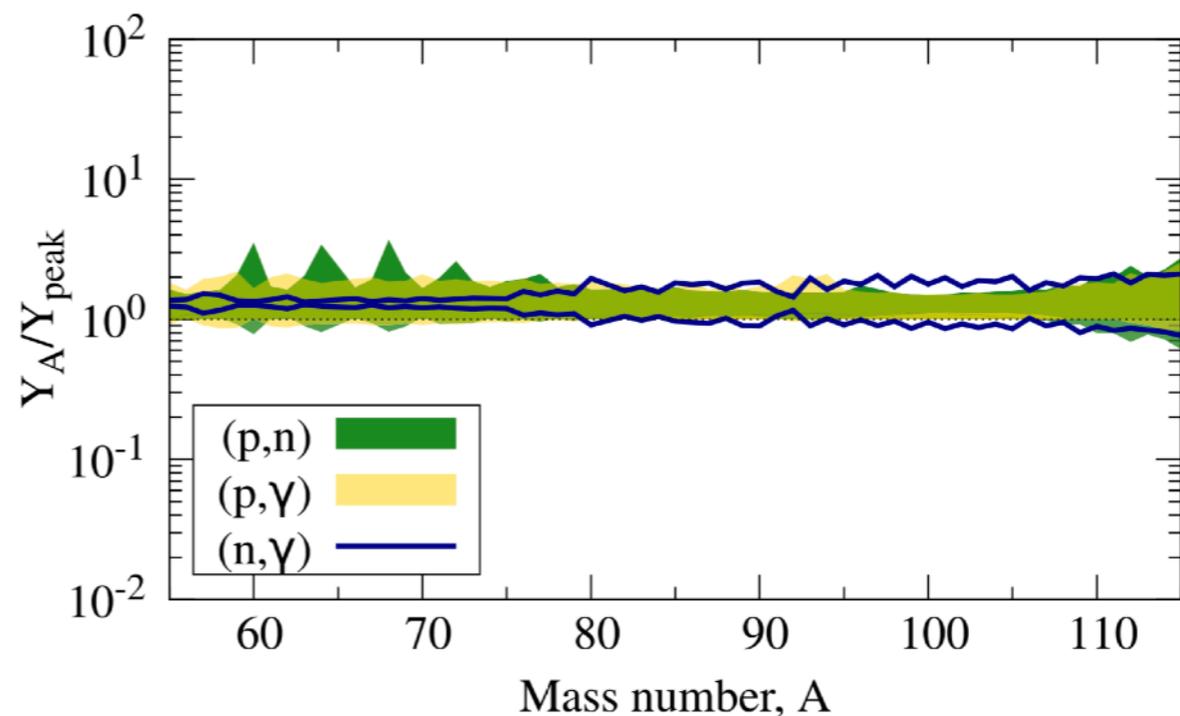
νp プロセスでの「重要な反応率」

天体環境パラメタ

Nucleus	Reaction	#13	#14	#15	#16	#17	#18
^{56}Fe	$^{59}\text{Cu} + p \leftrightarrow \gamma + ^{60}\text{Zn}$	-0.65 (Lv3)					
^{56}Fe	$^{56}\text{Ni} + \alpha \leftrightarrow p + ^{59}\text{Cu}$	0.67 (Lv2)	0.65 (Lv2)				
^{57}Fe	$^{57}\text{Ni} + p \leftrightarrow \gamma + ^{58}\text{Cu}$	-0.66 (Lv3)					
^{60}Ni	$^{59}\text{Cu} + p \leftrightarrow n + ^{59}\text{Zn}$	-0.66 (Lv3)					
^{60}Ni	$^{60}\text{Cu} + p \leftrightarrow n + ^{60}\text{Zn}$	-0.82 (Lv1)	-0.81 (Lv1)	-0.78 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.69 (Lv1)	
^{64}Zn	$^{64}\text{Ga} + p \leftrightarrow n + ^{64}\text{Ge}$	-0.83 (Lv1)	-0.80 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.70 (Lv1)		
^{68}Zn	$^{68}\text{As} + p \leftrightarrow n + ^{68}\text{Se}$	-0.84 (Lv1)	-0.81 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.68 (Lv1)		
^{70}Ge	$^{70}\text{Se} + p \leftrightarrow \gamma + ^{71}\text{Br}$	-0.70 (Lv1)	-0.68 (Lv1)	-0.65 (Lv2)			
^{72}Ge	$^{72}\text{Br} + p \leftrightarrow n + ^{72}\text{Kr}$	-0.78 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.66 (Lv1)			
^{76}Se	$^{76}\text{Rb} + p \leftrightarrow n + ^{76}\text{Sr}$	-0.68 (Lv1)					
^{77}Se	$^{77}\text{Rb} + p \leftrightarrow n + ^{77}\text{Sr}$	-0.69 (Lv1)	-0.65 (Lv1)				
^{80}Kr	$^{80}\text{Sr} + n \leftrightarrow \gamma + ^{81}\text{Sr}$			-0.65 (Lv2)			
^{93}Nb	$^{93}\text{Tc} + n \leftrightarrow \gamma + ^{94}\text{Tc}$				-0.67 (Lv2)		
^{93}Nb	$^{93}\text{Tc} + p \leftrightarrow \gamma + ^{94}\text{Ru}$				-0.70 (Lv3)		
^{92}Mo	$^{92}\text{Mo} + p \leftrightarrow \gamma + ^{93}\text{Tc}$				-0.73 (Lv1)	-0.71 (Lv1)	
^{94}Mo	$^{94}\text{Ru} + p \leftrightarrow \gamma + ^{95}\text{Rh}$		-0.65 (Lv2)	-0.65 (Lv3)	-0.66 (Lv1)		
^{97}Tc	$^{97}\text{Rh} + n \leftrightarrow \gamma + ^{98}\text{Rh}$			-0.70 (Lv1)	-0.66 (Lv1)		
^{99}Ru	$^{99}\text{Rh} + n \leftrightarrow \gamma + ^{100}\text{Rh}$				-0.65 (Lv3)		
^{100}Ru	$^{100}\text{Pd} + n \leftrightarrow \gamma + ^{101}\text{Pd}$				-0.66 (Lv2)	-0.68 (Lv1)	
^{113}In	$^{113}\text{In} + n \leftrightarrow \gamma + ^{114}\text{In}$					-0.67 (Lv1)	
^{117}Sn	$^{117}\text{In} + n \leftrightarrow \gamma + ^{118}\text{In}$						-0.74 (Lv1)

“standard”

#016 ($\Delta_n = 41.4$)



反応の種類ごとに

νp プロセスでの結果

NN+2019

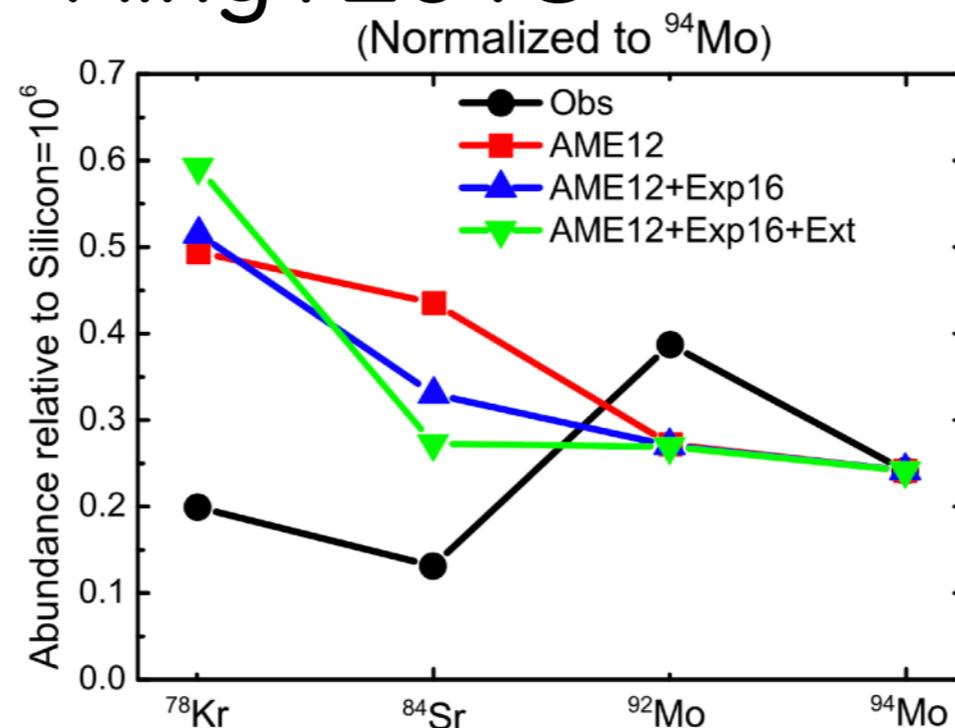
Trajectory	$^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo}$				$^{84}\text{Sr}/^{94}\text{Mo}$				$^{78}\text{Kr}/^{94}\text{Mo}$			
	$\frac{Y(92)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(92)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down	$\frac{Y(84)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(84)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down	$\frac{Y(78)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(78)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down
#06	2.00	2.60	2.24	0.770	76.5	99.4	5.49	0.336	194	718	24.8	0.608
#11	0.923	1.20	2.14	0.793	1.86	2.41	3.03	0.627	2.18	2.83	3.64	0.547
#16	0.631	0.820	2.79	0.666	0.213	0.277	2.50	0.618	0.0837	0.109	2.76	0.573
#19	0.876	1.14	2.98	0.627	0.530	0.689	2.37	0.611	0.311	0.404	2.47	0.618
#21	0.980	1.27	2.87	0.675	0.664	0.862	2.25	0.744	0.390	0.507	2.32	0.733
#23	0.983	1.28	2.85	0.651	0.693	0.900	2.23	0.766	0.393	0.511	2.32	0.749

太陽系組成比(Lodders 2003): $/^{94}\text{Mo}$

$^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo} = 1.6$, $^{84}\text{Sr}/^{94}\text{Mo} = 0.54$, $^{78}\text{Kr}/^{94}\text{Mo} = 0.82$

#16 : $0.55 < ^{92}\text{Mo} < 2.29$, $0.17 < ^{84}\text{Sr} < 0.69$, $0.062 < ^{78}\text{Kr} < 0.30$

Xing+2018

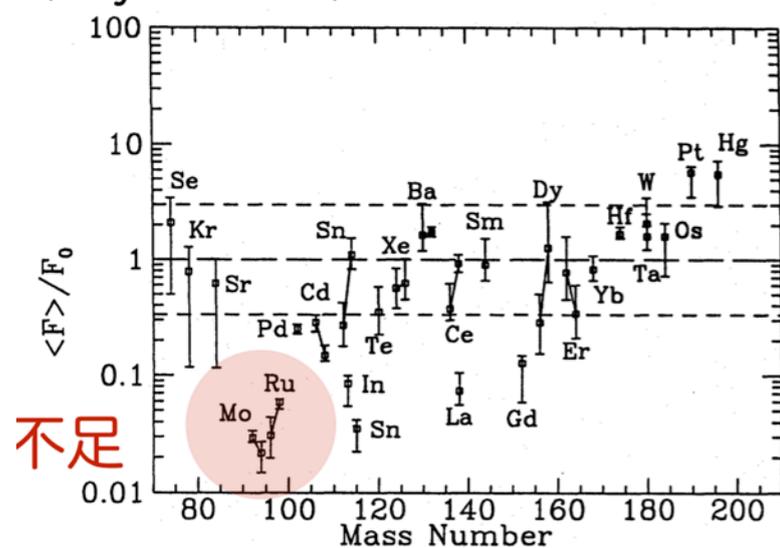


新たな原子核の
質量測定

→ ^{92}Mo が不足

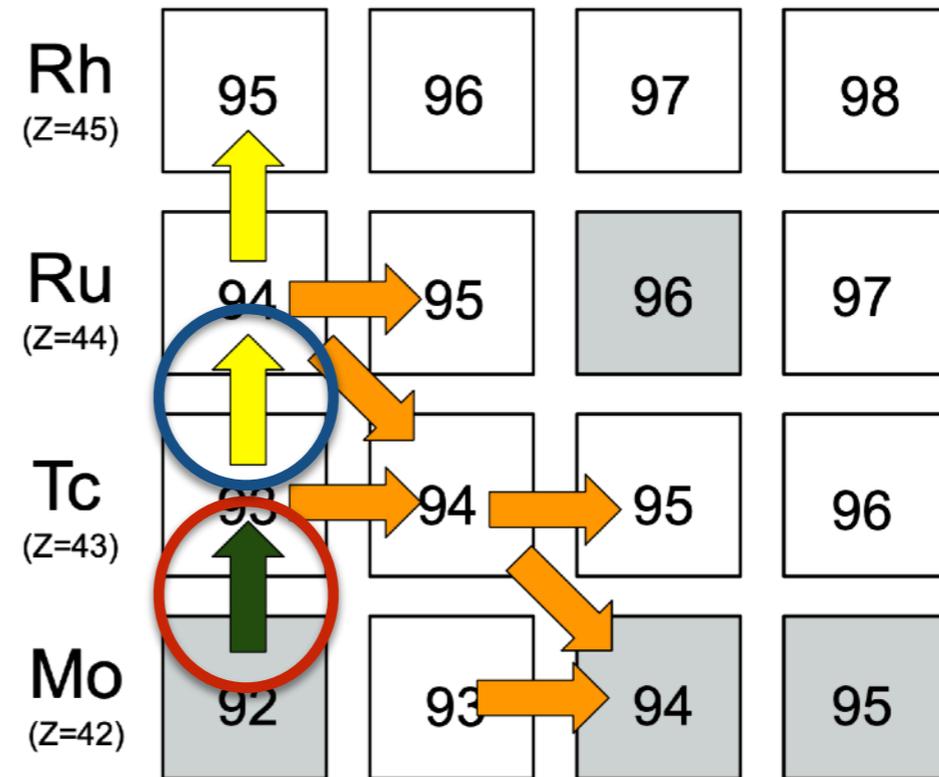
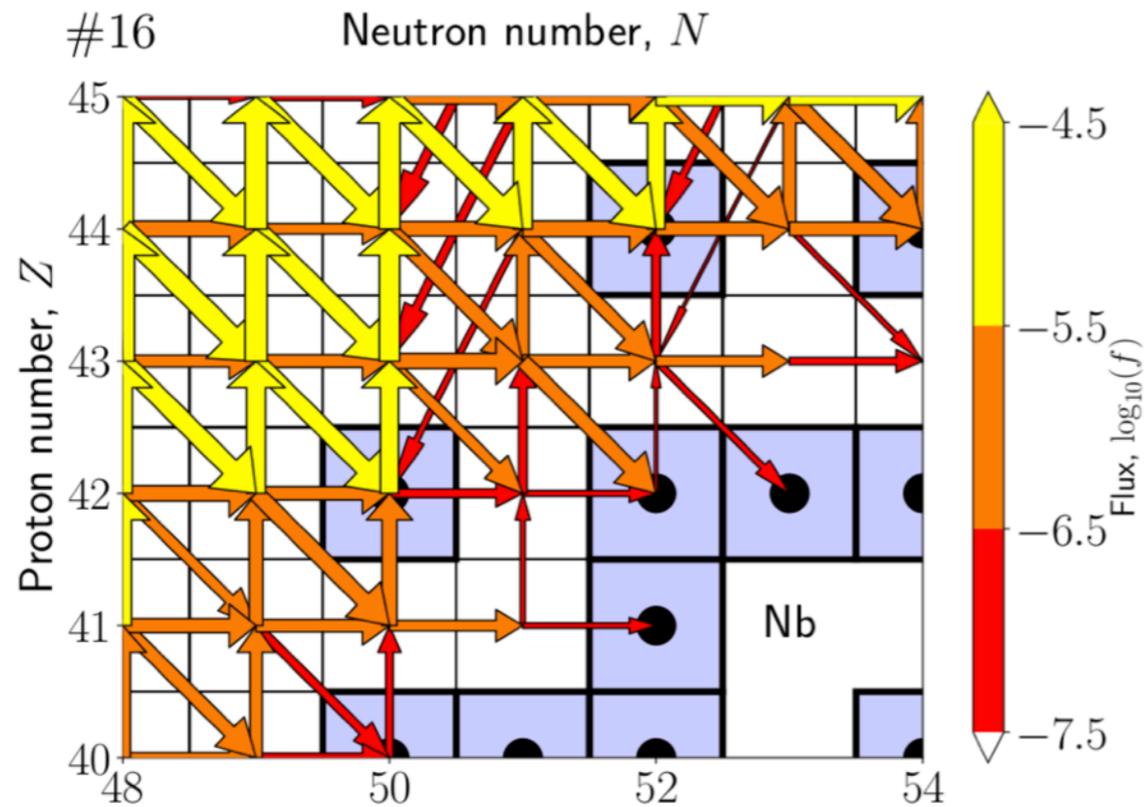
($^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo}=1$ 程度)

(Rayet+1995)



軽いp核（太陽組成）の起源でありうるか？

Trajectory	$^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo}$				$^{84}\text{Sr}/^{94}\text{Mo}$				$^{78}\text{Kr}/^{94}\text{Mo}$			
	$\frac{Y(92)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(92)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down	$\frac{Y(84)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(84)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down	$\frac{Y(78)}{Y(94)} _{\text{peak}}$	$\frac{Y(78)}{Y(94)} _{50}$	Up	Down
#06	2.00	2.60	2.24	0.770	76.5	99.4	5.49	0.336	194	718	24.8	0.608
#11	0.923	1.20	2.14	0.793	1.86	2.41	3.03	0.627	2.18	2.83	3.64	0.547
#16	0.631	0.820	2.79	0.666	0.213	0.277	2.50	0.618	0.0837	0.109	2.76	0.573
#19	0.876	1.14	2.98	0.627	0.530	0.689	2.37	0.611	0.311	0.404	2.47	0.618
#21	0.980	1.27	2.87	0.675	0.664	0.862	2.25	0.744	0.390	0.507	2.32	0.733
#23	0.983	1.28	2.85	0.651	0.693	0.900	2.23	0.766	0.393	0.511	2.32	0.749



重要反応： $^{92}\text{Mo}(p,g)^{93}\text{Tc}$

(次点： $^{93}\text{Mo}(p,g)^{94}\text{Ru}$)

再検討： νp プロセスを支配する反応率

- 「軽い」原子核（種核領域）での

νp プロセスの全体進行を決める。

(Wanajo+2012やNN+2019によって研究)

- トリプル α ： $\alpha + \alpha + \alpha \rightarrow 12C$

核子・ α 粒子から「種核生成」

- $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$: 種核から重い核生成への起点

中性子生成量

$$\Delta_n \equiv \frac{Y_p}{Y_h} n_{\bar{\nu}_e} = \frac{Y_p}{Y_h} \int_{T_9 \leq 3} \lambda_{\bar{\nu}_e} dt$$

Y_p : 陽子数比

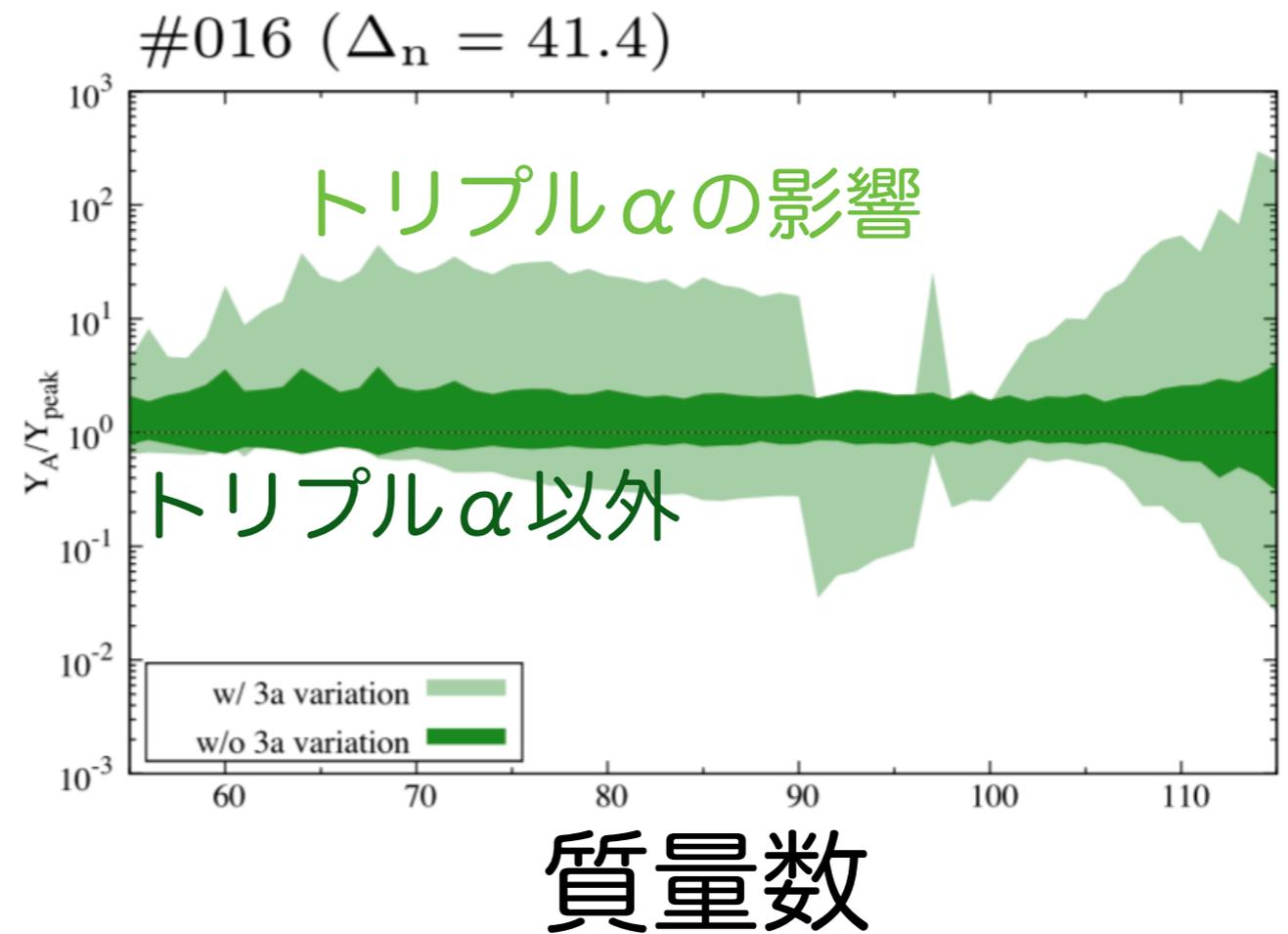
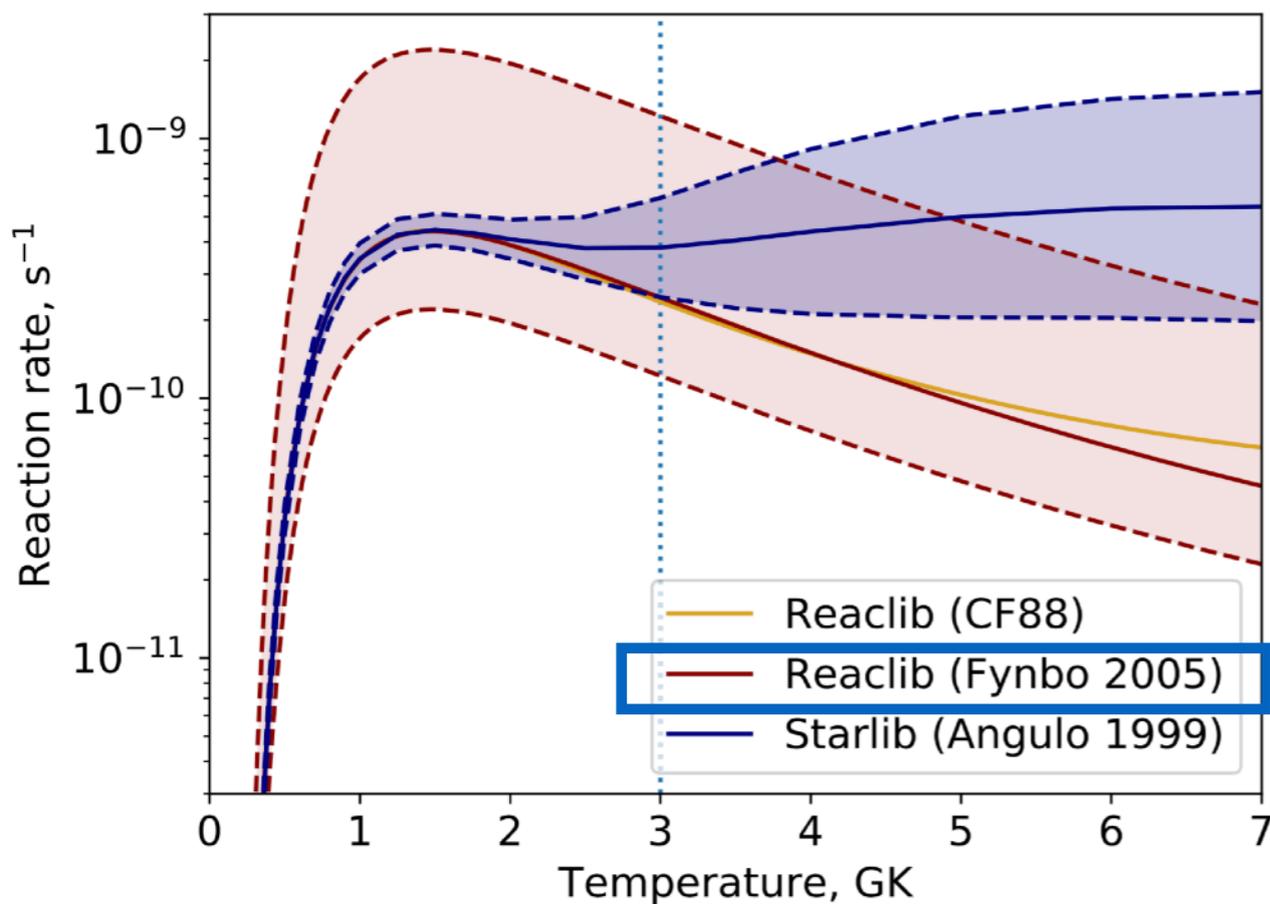
Y_h : 重元素（種核）存在量

トリプル α 反応のインパクト

種核生成の起点（核子 $\rightarrow A > 12$ 核へ）：

νp プロセス領域で2倍程度

元素合成への影響

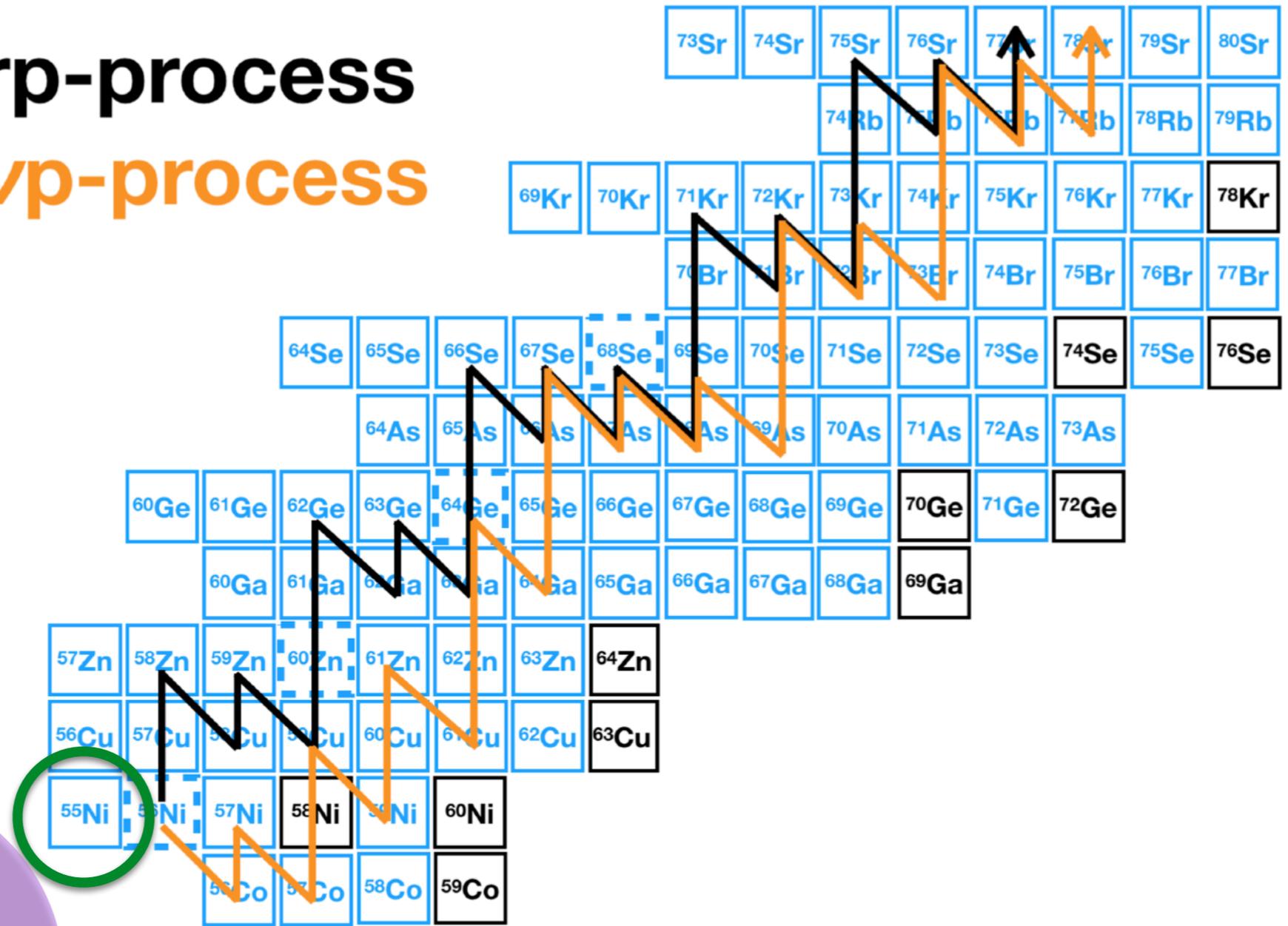


問題はよく認識され、実験的研究の対象となっている。

阪大RCNPでも（川畑さん；private communication）

$^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ 反応のインパクト

↑ **rp-process**
↑ **vp-process**



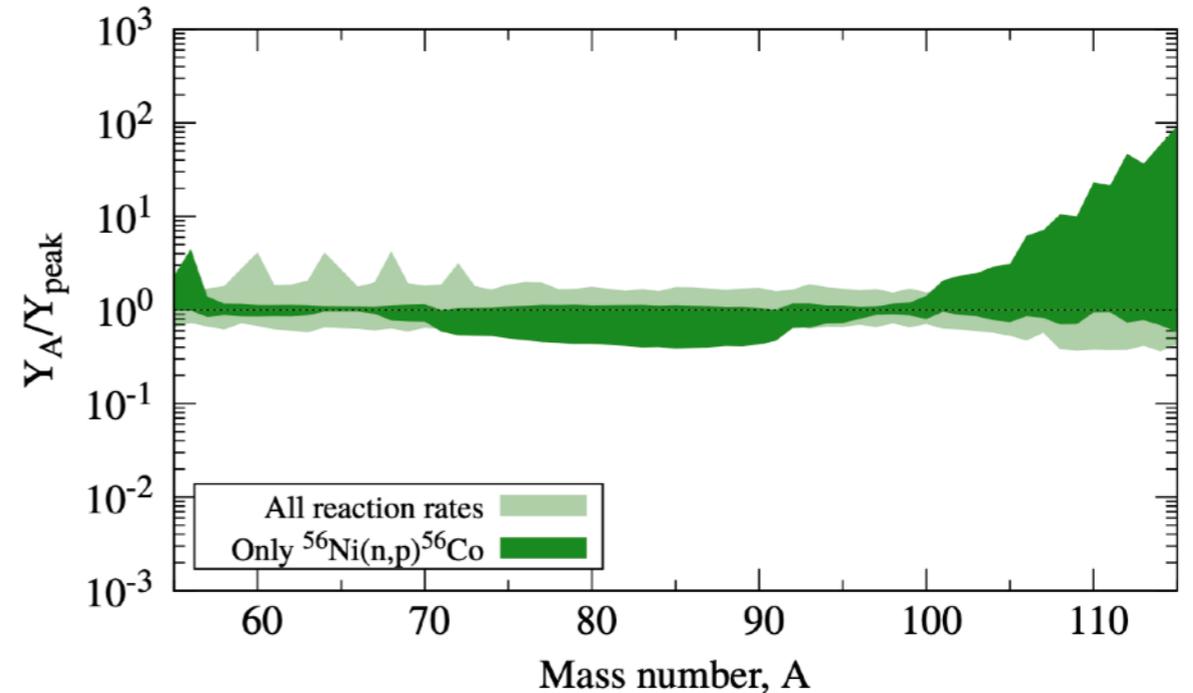
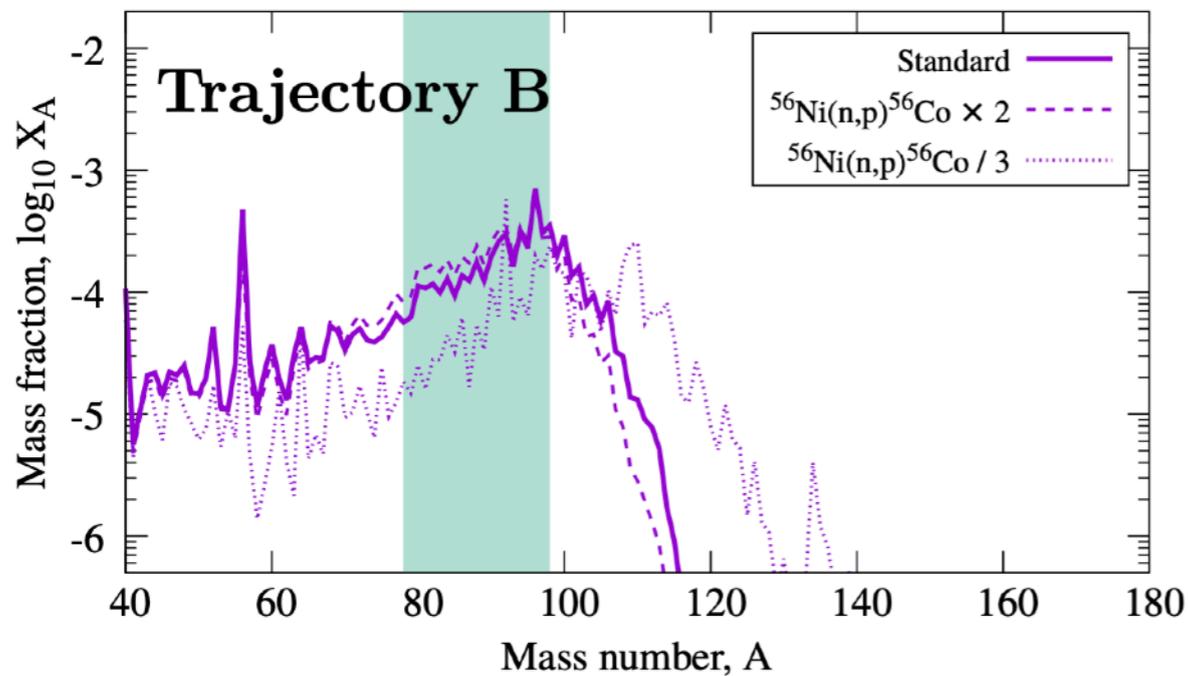
種核生成

(トリプル α により駆動)

^{56}Ni からの突破がrpプロセスと異なる。

$^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ 反応のインパクト

$^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ の νp プロセスへの影響



理研でRIBF+OEDOで実験が予定 (2020年より)

- ・実験代表者: B. Mauss & 鈴木大介 (理研)
- ・代理反応 ($^{56}\text{Ni}(d,p)^{57}\text{Ni}$) による決定
- ・「元素合成に重要である」かつ「本測定により天体核反応率の有効な制限が可能」 (NN+2019, Rauscher2013)

まとめ：νpプロセス

・νpプロセスモデル

- ・νpプロセスの典型的なモデルを構築（Ye-S）し、代表的な「天体パラメタ」の範囲を準備
- ・鉄より重い領域の反応の不定性のみに着目。

（詳細は省略）

・核反応の不定性の影響と重要反応

- ・不定性の範囲は2-3倍程度
- ・overallの不定性の評価；重要な反応率リスト
（詳細は省略）
- ・νpプロセスは、軽いp核の起源となりうる
（不定性の範囲で、太陽系 $^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo}$ 組成比を再現）
- ・律速反応（種核生成）の不定性の影響を改めて評価。
 - ・第一次優先：トリプルα、 $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$

今後の課題・展望

νpプロセス元素合成

- ・律速反応（種核生成）の不定性が減る？
 - ・第一次優先：トリプルα、 $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$
- ・Yeや超新星ニュートリノの影響
 - Ye分布の最大値の制限（下限値）が可能？
(元素合成からの超新星シナリオの制限！)

p核の銀河化学進化

- ・p核全部は難しいが、νpプロセス核のみに着目してシナリオを立てる？
- ・νpプロセス (primary process) が主要生成源ならば、宇宙初期（最初）の元素合成は、p核-richである？
(ただし、vs 超新星での弱rプロセス)