

超新星元素合成に関する 新しい天体核反応実験のススメ

西村 信哉

工学院大学・学習支援センター

東京大学CNS & 理化学研究所PRI



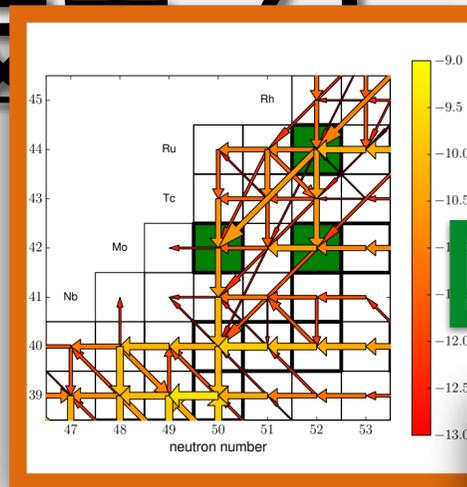
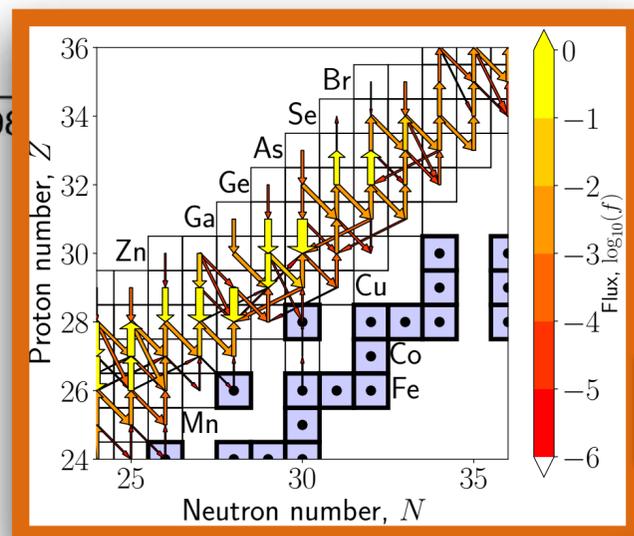
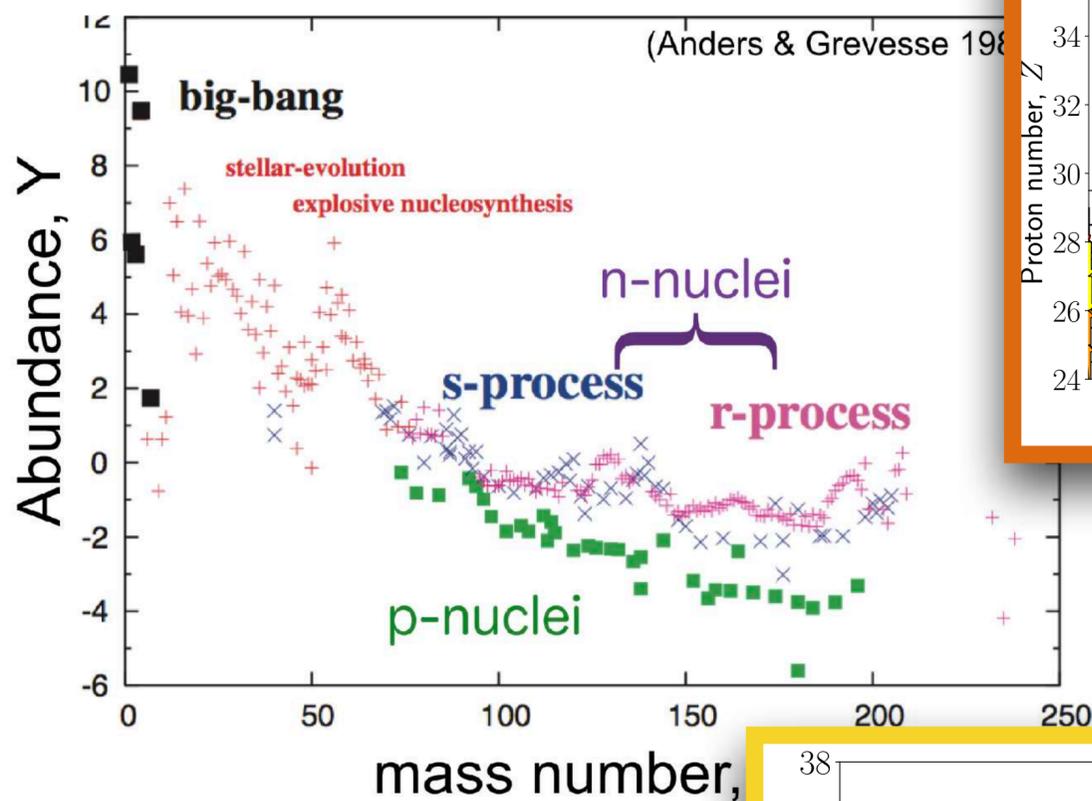
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



科研費
KAKENHI

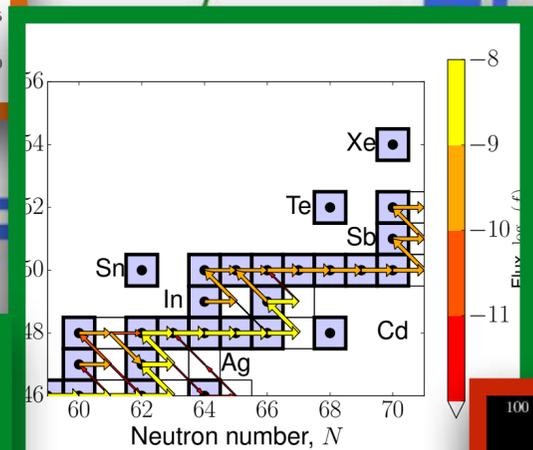
「重元素」の起源と核反応ネットワーク

太陽系組成

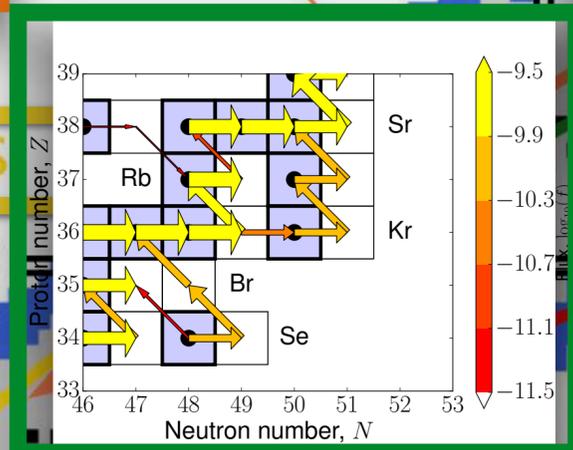


s-process

p-process

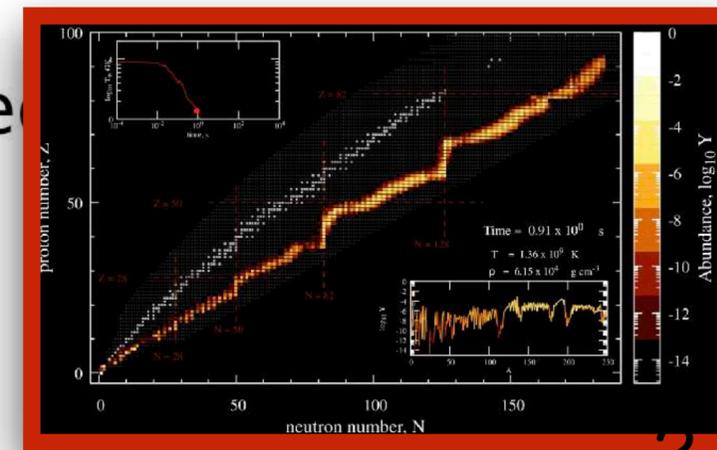
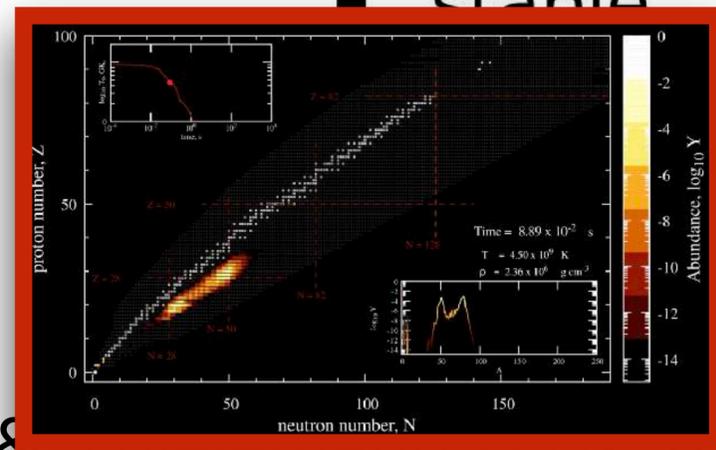
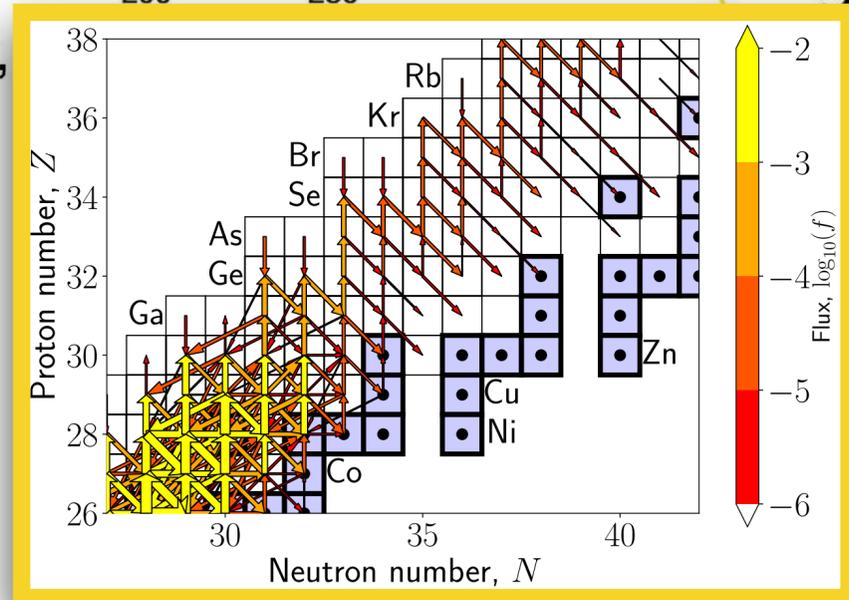
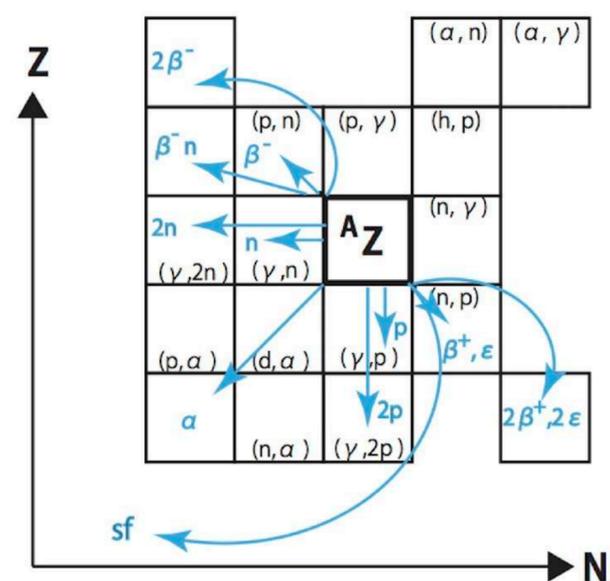


vp-process

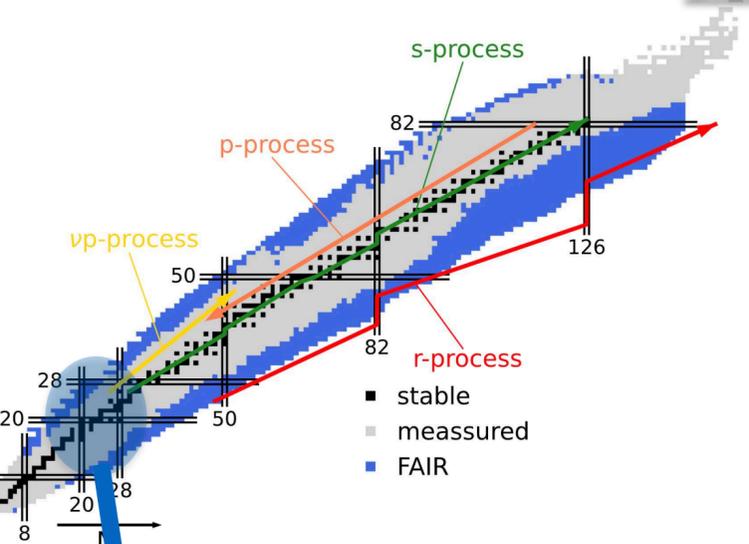


r-process

核反応と崩壊



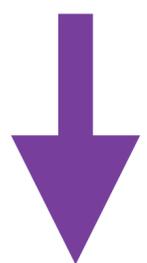
元素合成における「重要な」核反応・崩壊



“sensitivity” study
on nucleosynthesis?

our approach

reaction/decay uncertainty



Monte-Carlo + statistical analysis



observation

- s-process : (2) weak s, (4) main s
- p-process : (1) CC-SNe, (3) Type Ia SNe
- ν p-process : (5) CC-SNe/PNS winds

(1) Rauscher, NN+(2016) MNRAS 463; (2) NN+(2017) MNRAS 469; (3) NN+(2018) MNRAS 474;
(4) Cescutti+NN+(2018) 478 MNRAS; (5) NN+(2019) MNRAS 489

MC-WinNet

Collaborators: G. Cescutti, S. Cristallo, C. Fröhlich, J. den Hartogh,
A. Heger, R. Hirschi, A. Murphy, T. Rauscher, C. Travaglio

explosive nucleosynthesis in cc-SNe (e.g., ^{56}Ni , Fe-group, ^{44}Ti)

Experimental challenges

s-process

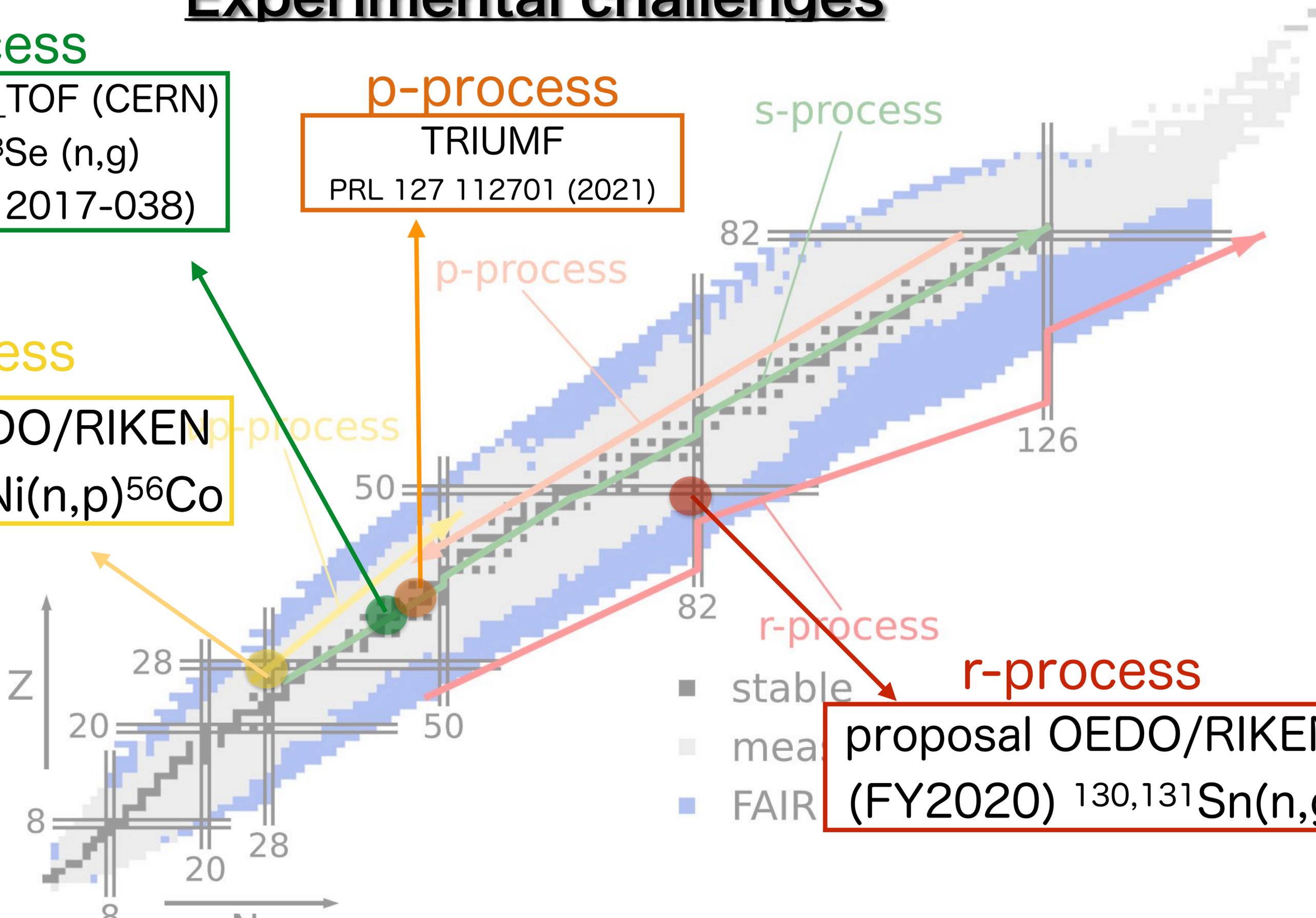
proposal to n_TOF (CERN)
 ^{68}Zn , $^{77,78}\text{Se}$ (n,g)
(CERN INTC 2017-038)

p-process

TRIUMF
PRL 127 112701 (2021)

ν p-process

proposal OEDO/RIKEN
(FY2020) $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$



proposal OEDO/RIKEN
(FY2020) $^{130,131}\text{Sn}(n,g)$

今日の話題

• 導入：宇宙における元素の起源

1. 超新星爆発での爆発的元素合成

- 超新星や連星中性子星の合体におけるrプロセス元素合成
- 原子核の不定性、銀河の化学進化

2. 超新星最新部でのニュートリノ駆動元素合成

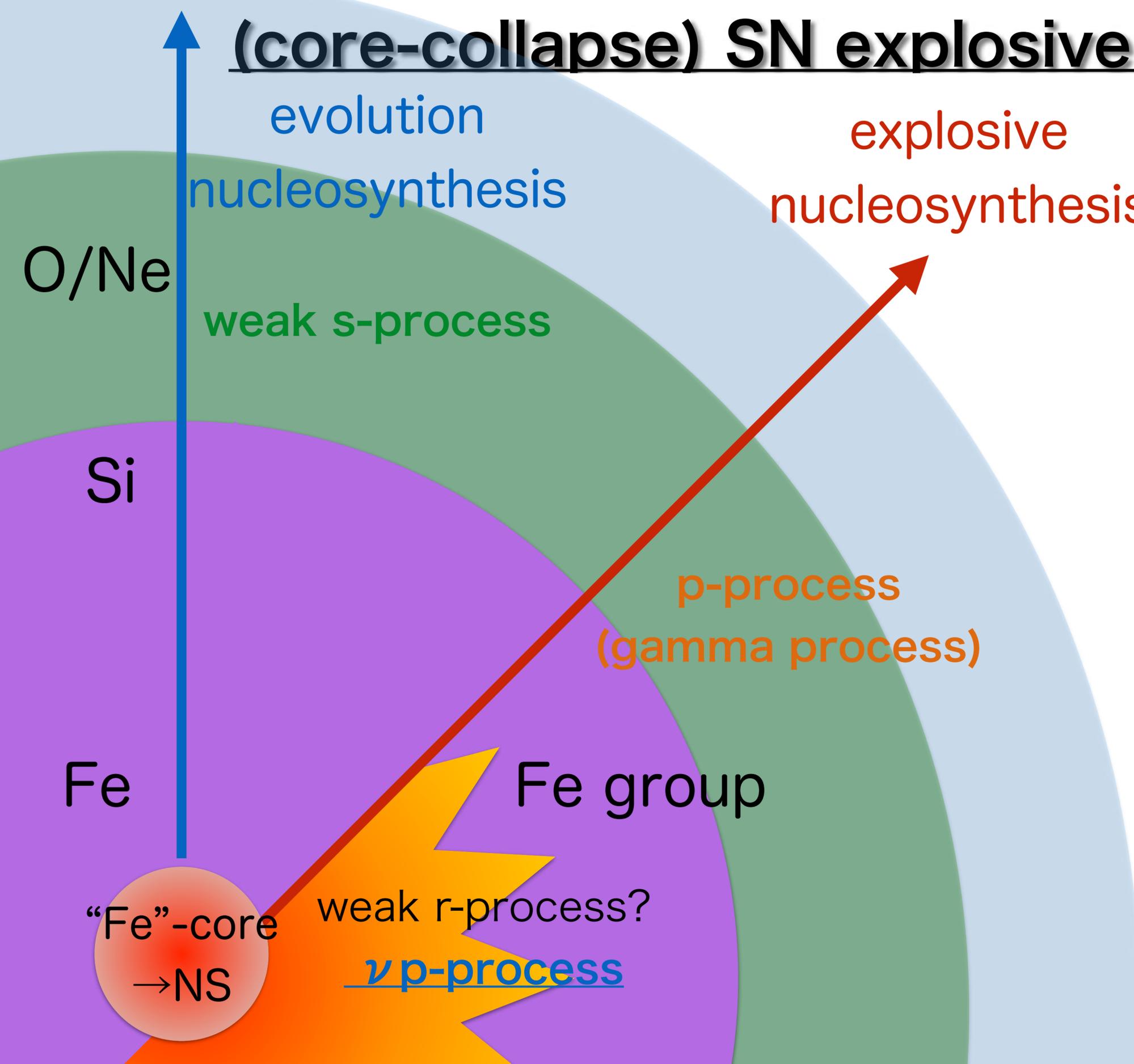
- 超新星爆発での νp プロセス
- $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ の反応率
 - 軽い p 核の起源
 - 超新星での ^{56}Ni の生成 (残留)

1. 超新星爆発での爆発的元素合成

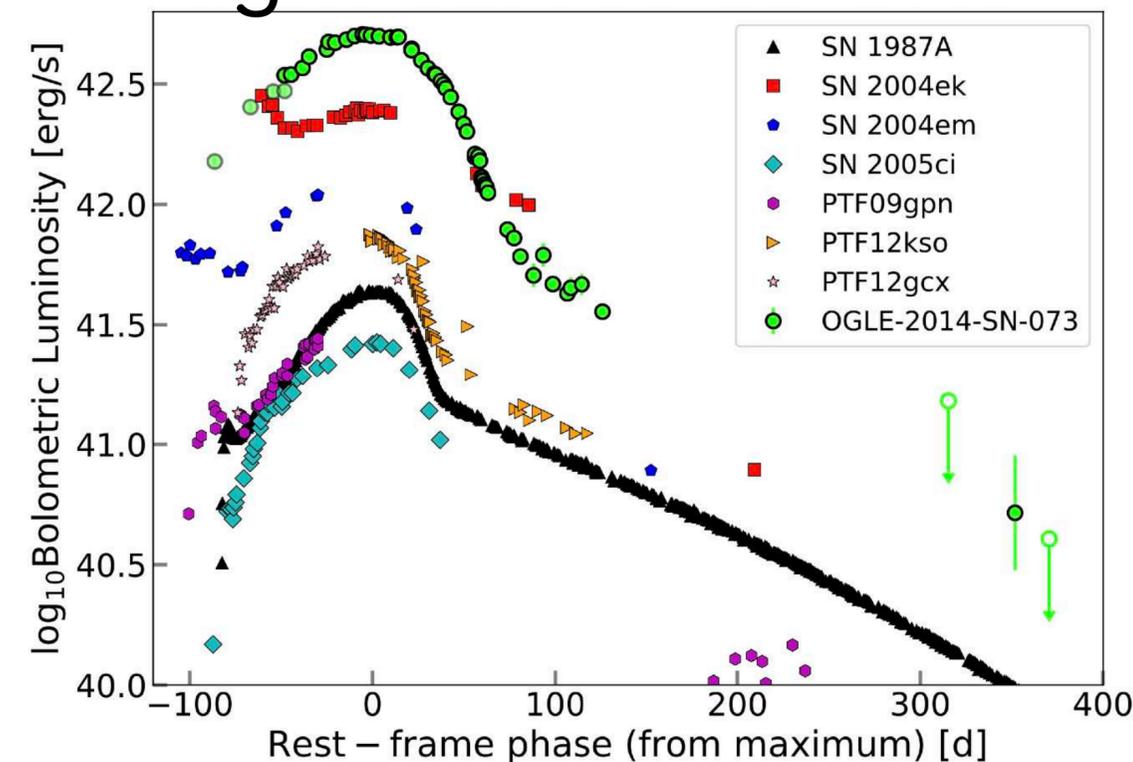
参考：

- NN, Fröhlich & Rauscher (2026) MNRAS 546

(core-collapse) SN explosive nucleosynthesis

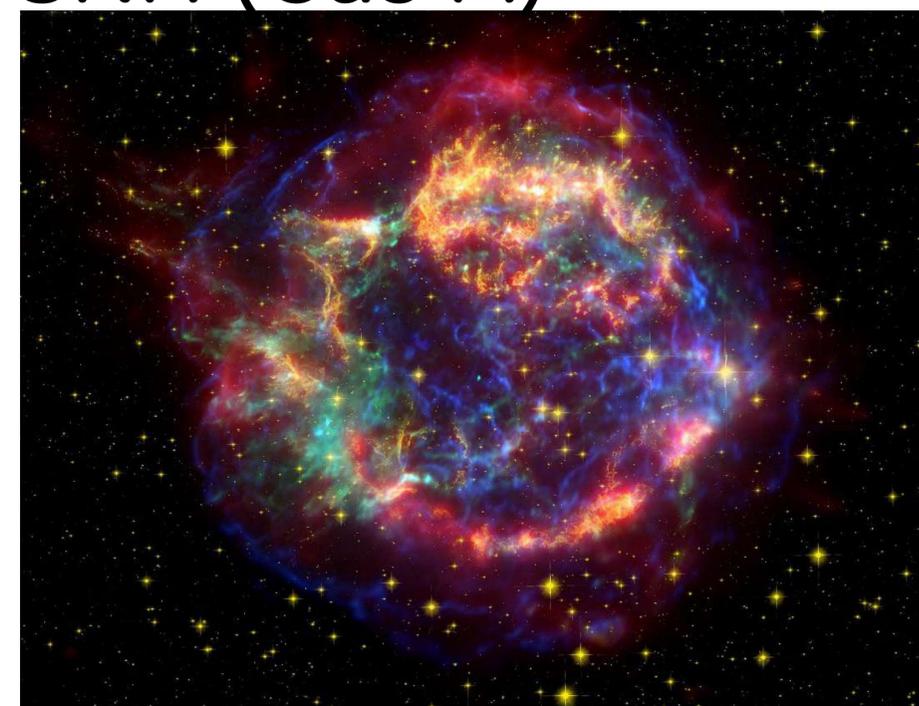


light curves cc-SNe



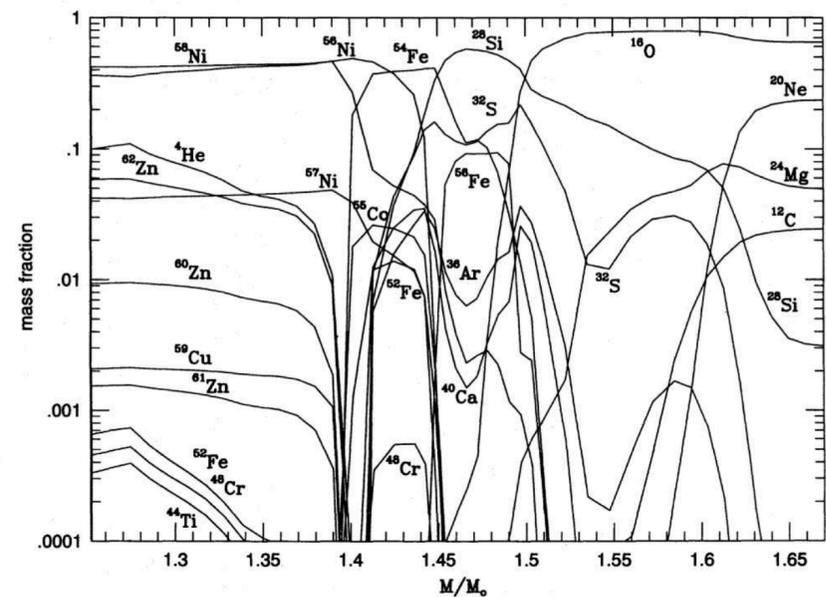
Terreran+2017

SNR (Cas A)



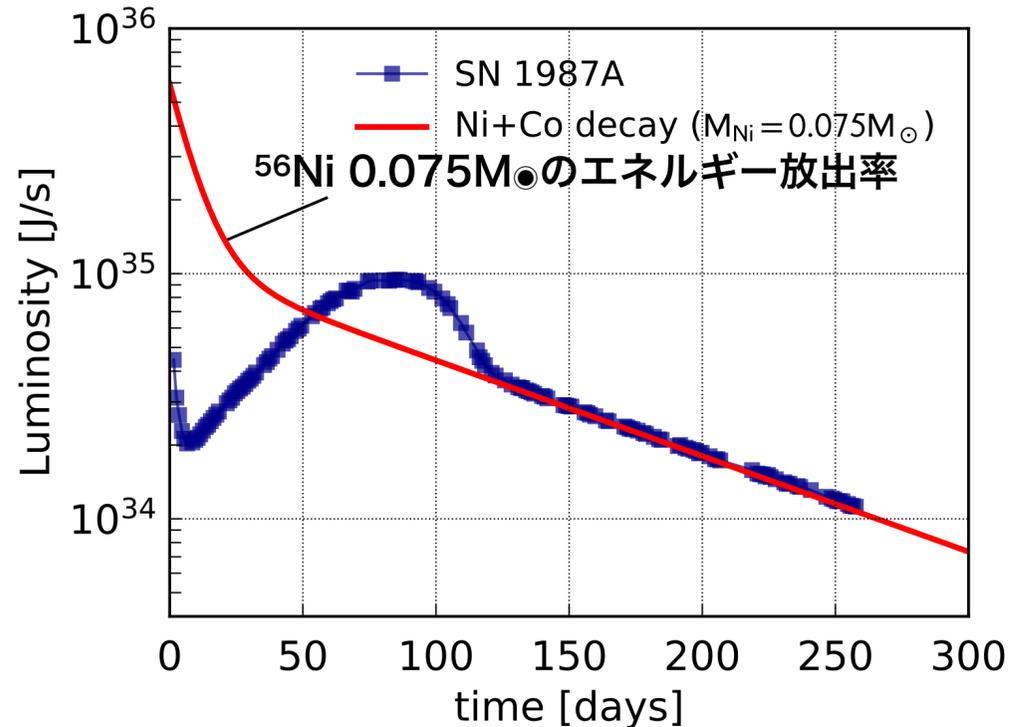
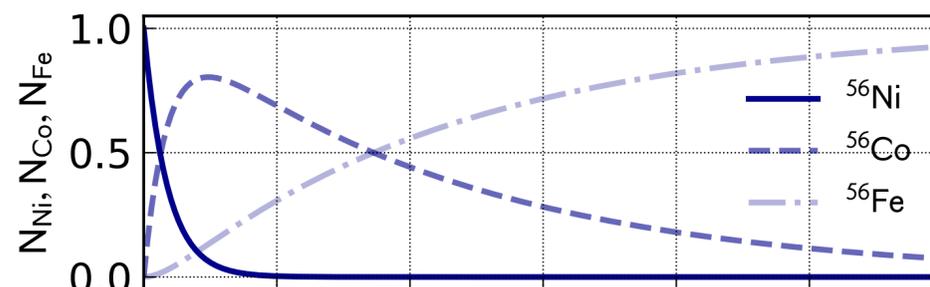
“1D” explosion models of cc-SN

- thermal “bomb” (e.g., Thielemann, Nomoto, Hashimoto 1996)
- “piston” (e.g., Woosley & Weaver 1995)
- recent debate on reasonable 1D explosion treatments
(see, Sawada+2019, Imasheva, Janka+2023)



Thielemann+(1996)

SN1987A (©AAO)



- 超新星の光度曲線 (減光率)
= ^{56}Ni の半減期 (>100 日)
- 超新星の直接観測から、
 ^{56}Ni の放出量が決まる。
→ ^{56}Ni を再現する爆発モデル
- 鉄コア/Siコアから爆発を仕込んで飛ばす
- ニュートリノ加熱など内部物理プロセスを無視。

Basics: explosive nucleosynthesis

- complex combination of reactions and photo-dissociation (partially in NSE)
- What happens at each layer of the star is relatively well known.

several studies on the reaction rate sensitivity

(e.g., Magkotsios+2010, Subedi+2020)

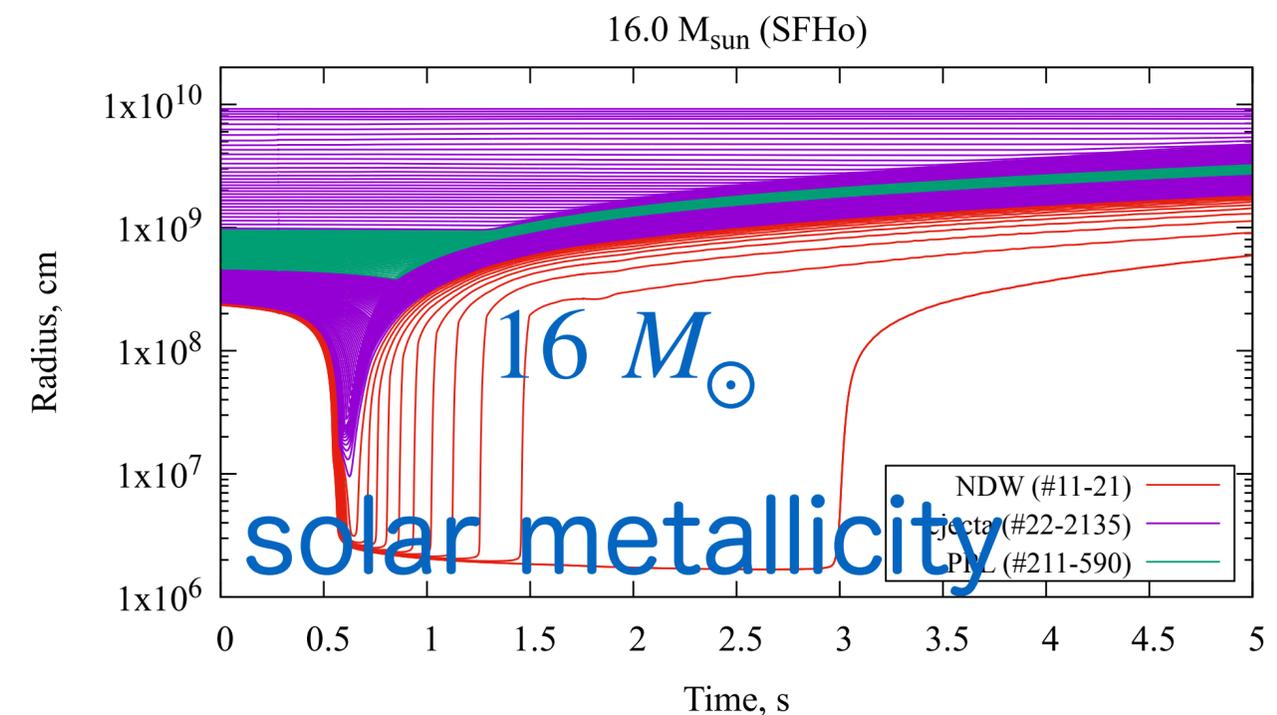
adopted model

PUSH model (Perego et al. 2015):

“energy deposition” by heavy flavor neutrino (not electron type) →

“consistent” Y_e to explosion dynamics

- $T_{9,p} > 5$: explosive Si & O burning (NSE)
→ ^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{44}Ti , Fe peak
- $5 > T_{9,p} > 4$: incomplete Si & explosive O burning
→ ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar , ^{40}Ca (+ ^{56}Ni , ^{44}Ti)
- $4 > T_{9,p} > 3.3$: explosive Ne burning → ^{16}O , ^{28}Si , ^{32}S
- $3.3 > T_{9,p} > 2$: explosive C burning → ^{20}Ne , ^{24}Mg
+ photodissociation of heavy seeds → p-process
- $2 > T_{9,p}$: no explosive burning



MC-WinNet: reaction network code

• Monte-Carlo framework

- PizBuin MC-driver (developed by Rauscher, NN)
- parallelized by OpenMP (shared memory system)

MC-WinNet

• Nuclear Reaction network

• Network solver (base):

- WinNet: U Basel group (Winteler+NN+2012, Reichert+2023); recently public

• Reaction rates:

- Reaclib format (Rauscher & Thielemann 2000, Cyburt+2011)

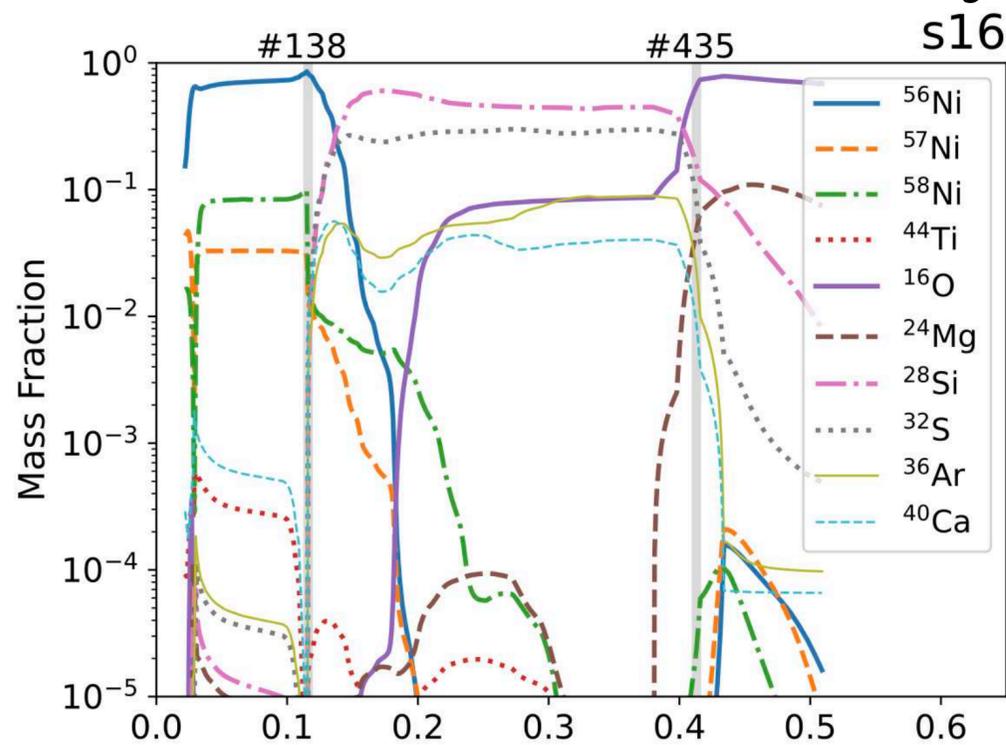
• T-dependent uncertainty:

- X-factor (Rauscher 2012); provided by Reaclib fitting format

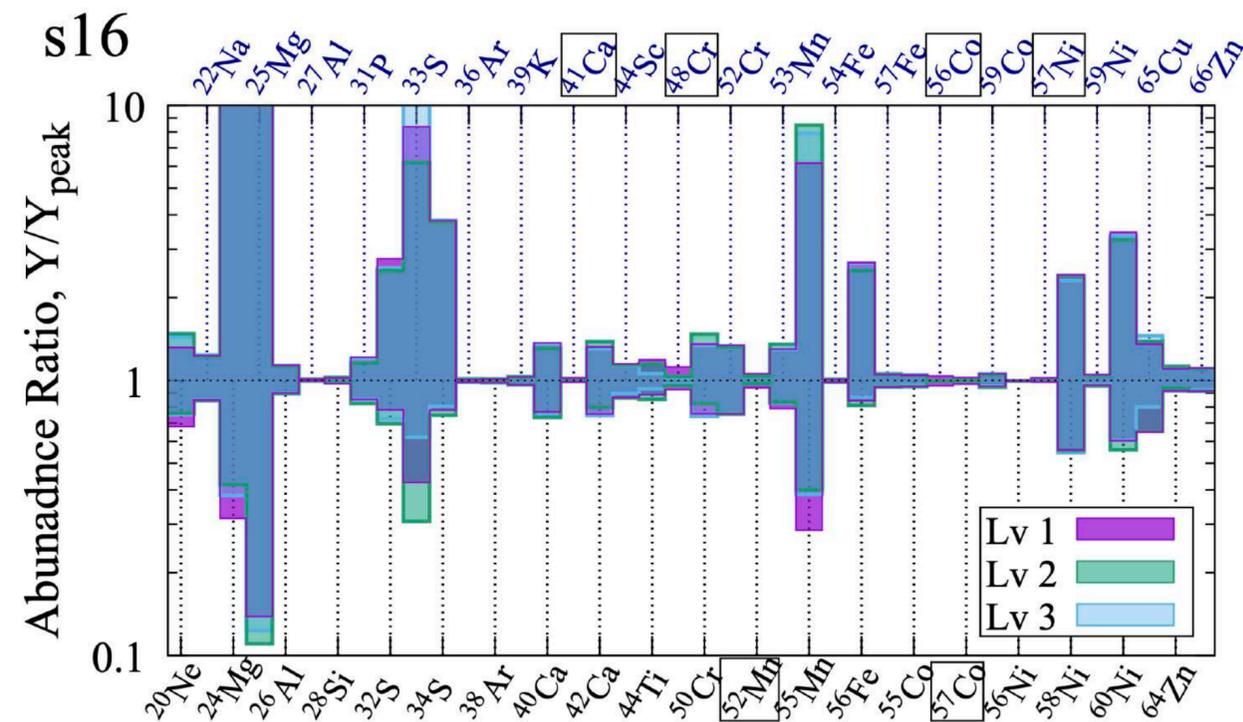
(1) Rauscher, NN+(2016) MNRAS 463; (2) NN+(2017) MNRAS 469; (3) NN+(2018) MNRAS 474;
(4) Cescutti+NN+(2018) 478 MNRAS; (5) NN+(2019) MNRAS 489; (6) NN+2026 MNRAS

Nucleosynthesis yields uncertainty

16 M_{\odot} , 1 Z_{\odot} solar metallicity



星 (爆発的元素合成)
全体の生成物の不定性

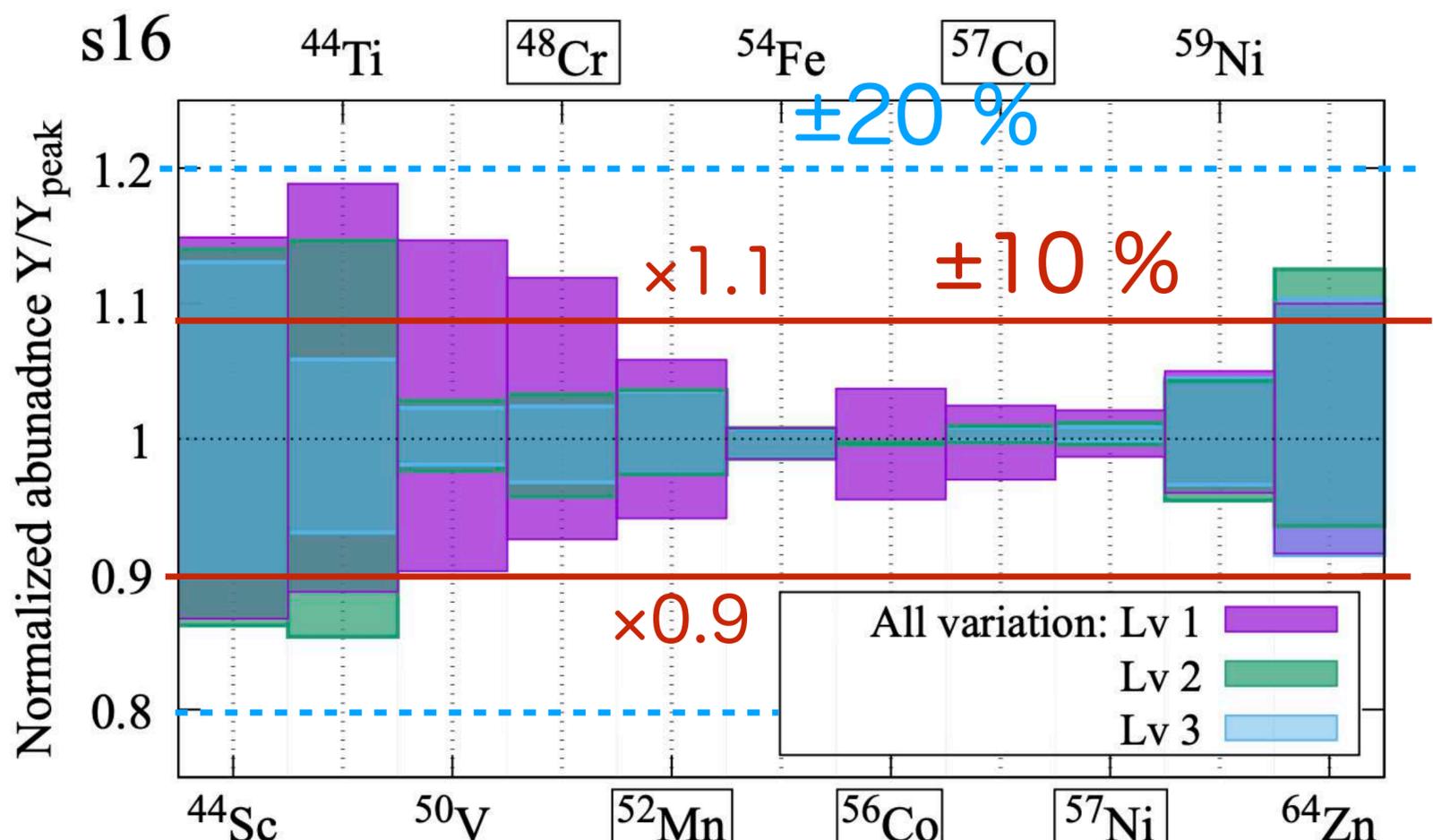


内側 $\xrightarrow{M - M_{cut}, M_{\odot}}$ 外側

反応毎の不定性 (U^{low} — U^{up} に一様乱数)

Reaction	(n, γ)	(p, γ)	(p, n)	(α , γ)	(α , n)	(α , p)
U^{up}	2	2	2	2	2	2
U^{low}	1/2	1/3	1/3	1/10	1/10	1/10

すべての反応率を独立に振る (correlationなし)
→ correlation、物理的不定性など改良の余地あり



重要な反応率：超新星の爆発的元素合成

Pearsonの相関係数で評価 (rate variation vs. 生成核種)

→ 相関係数 $|r_{\text{cor}}| > 0.65$ を重要と定義

solar $16 M_{\odot}, 1 Z_{\odot}$

Nuclide	$r_{\text{corr},0}$	Key rate Level 1	$r_{\text{corr},1}$	Key rate Level 2	$r_{\text{corr},2}$	Key rate Level 3	X_0 (3, 5 GK)	Compound nucleus
^{41}Ca	-0.67	$^{38}\text{Ar} + \alpha \leftrightarrow n + ^{41}\text{Ca}$					1.00, 0.94	^{42}Ca
^{48}Cr	-0.82	$^{48}\text{Cr} + \alpha \leftrightarrow p + ^{51}\text{Mn}$					0.78, 0.50	^{52}Fe
			0.65	$^{44}\text{Ti} + \alpha \leftrightarrow p + ^{47}\text{V}$			0.28, 0.14	^{48}Cr
					0.88	$^{40}\text{Ca} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{44}\text{Ti}$	1.00, 1.00	^{44}Ti
^{52}Mn	-0.70	$^{52}\text{Fe} + \alpha \leftrightarrow p + ^{55}\text{Co}$					0.84, 0.57	^{56}Ni
					0.67	$^{52}\text{Fe}(\beta^+) ^{52}\text{Mn}$		-
^{56}Co	1.00	$^{56}\text{Ni}(\beta^+) ^{56}\text{Co}$						-
			-0.69	$^{56}\text{Ni} + \alpha \leftrightarrow p + ^{59}\text{Cu}$			0.74, 0.46	^{60}Zn
^{57}Co	0.92	$^{57}\text{Ni}(\beta^+) ^{57}\text{Co}$						-
			-0.65	$^{20}\text{Ne} + \alpha \leftrightarrow \gamma + ^{24}\text{Mg}$			1.00, 0.99	^{24}Mg
^{57}Ni	-0.83	$^{57}\text{Co} + p \leftrightarrow n + ^{57}\text{Ni}$					0.89, 0.68	^{58}Ni

$^{57}\text{Ni}(n, p)^{57}\text{Co}$: $^{57}\text{Ni}/^{56}\text{Ni}$ が超新星観測に関係; 複合核 ^{58}Ni が安定

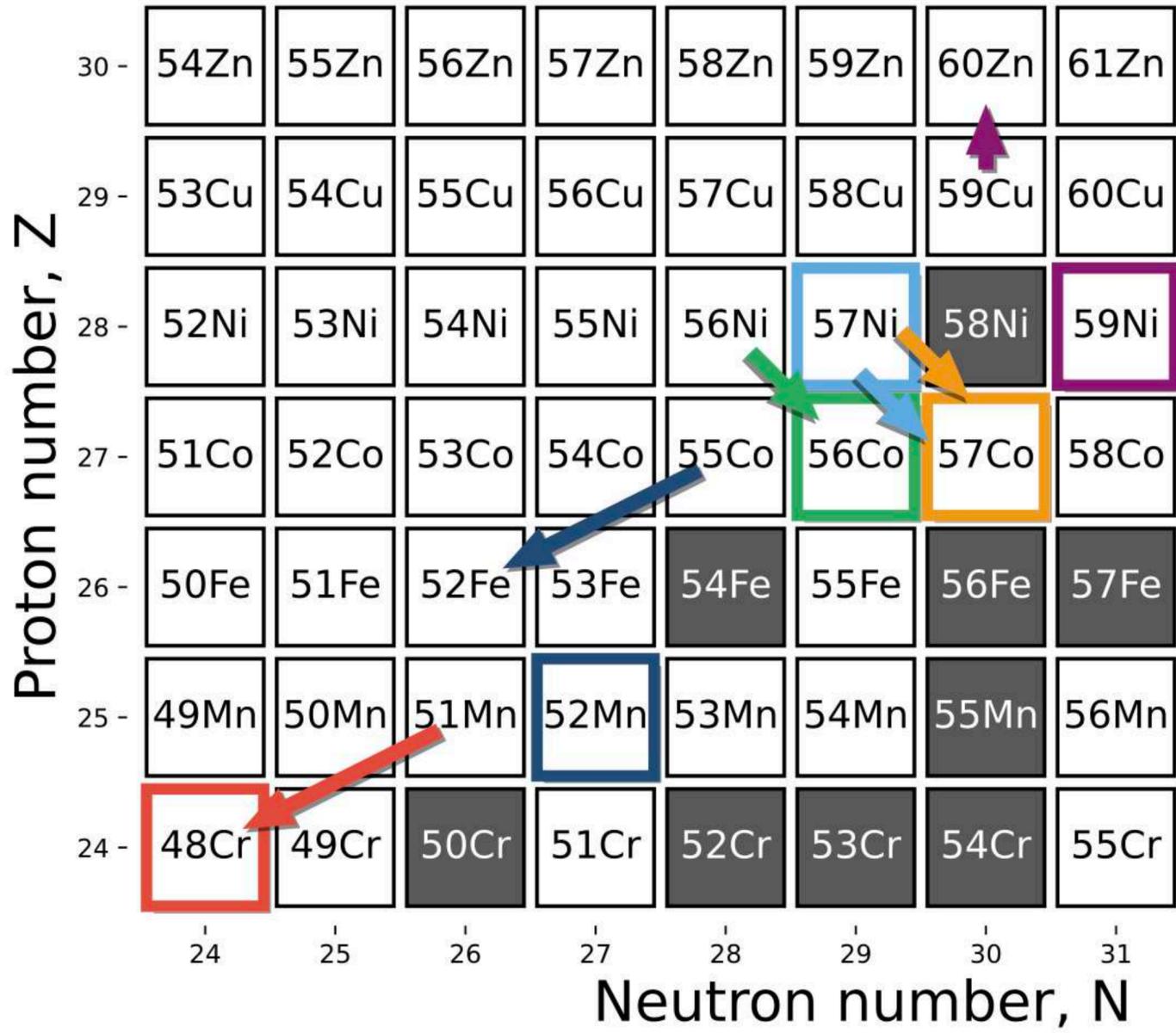
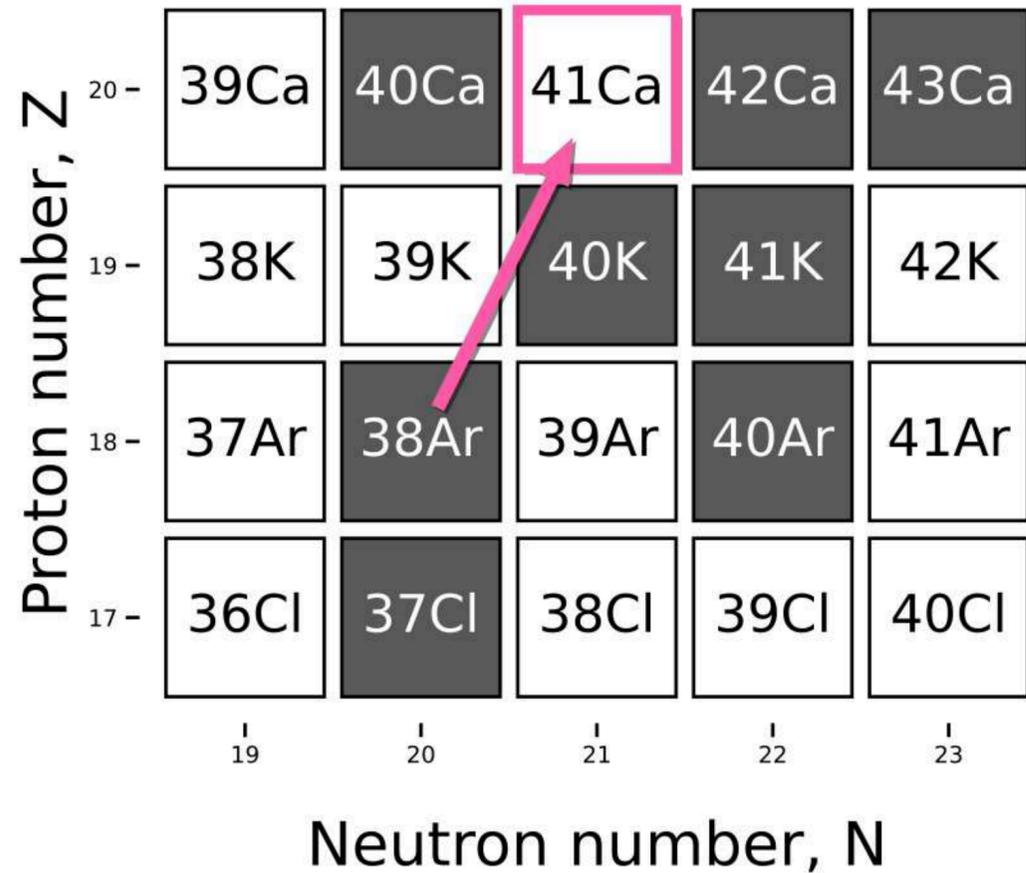
Key reactions on the NZ-plane

元素合成生成物 ↔ 重要核反応の核図表での対応

nucleus key reaction

^{41}Ca

$^{38}\text{Ar}(\alpha, n)^{41}\text{Ca}$



nucleus key reaction

^{48}Cr $^{51}\text{Mn}(p, \alpha)^{48}\text{Cr}$

^{52}Mn $^{55}\text{Co}(p, \alpha)^{52}\text{Fe}$

^{56}Co $^{56}\text{Ni}(\epsilon + \beta^+)^{56}\text{Co}$

^{57}Co $^{57}\text{Ni}(\epsilon + \beta^+)^{57}\text{Co}$

^{57}Ni $^{57}\text{Co}(p, n)^{57}\text{Ni}$

^{59}Ni $^{59}\text{Cu}(p, \gamma)^{60}\text{Zn}$

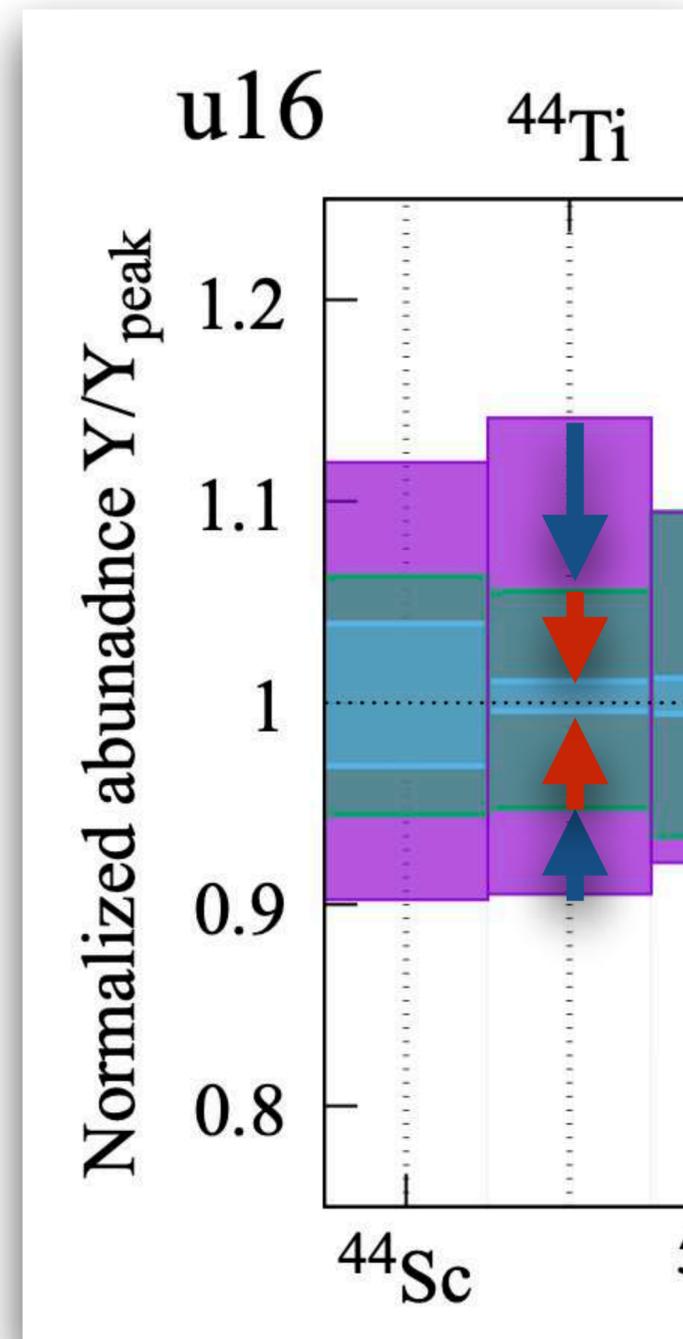
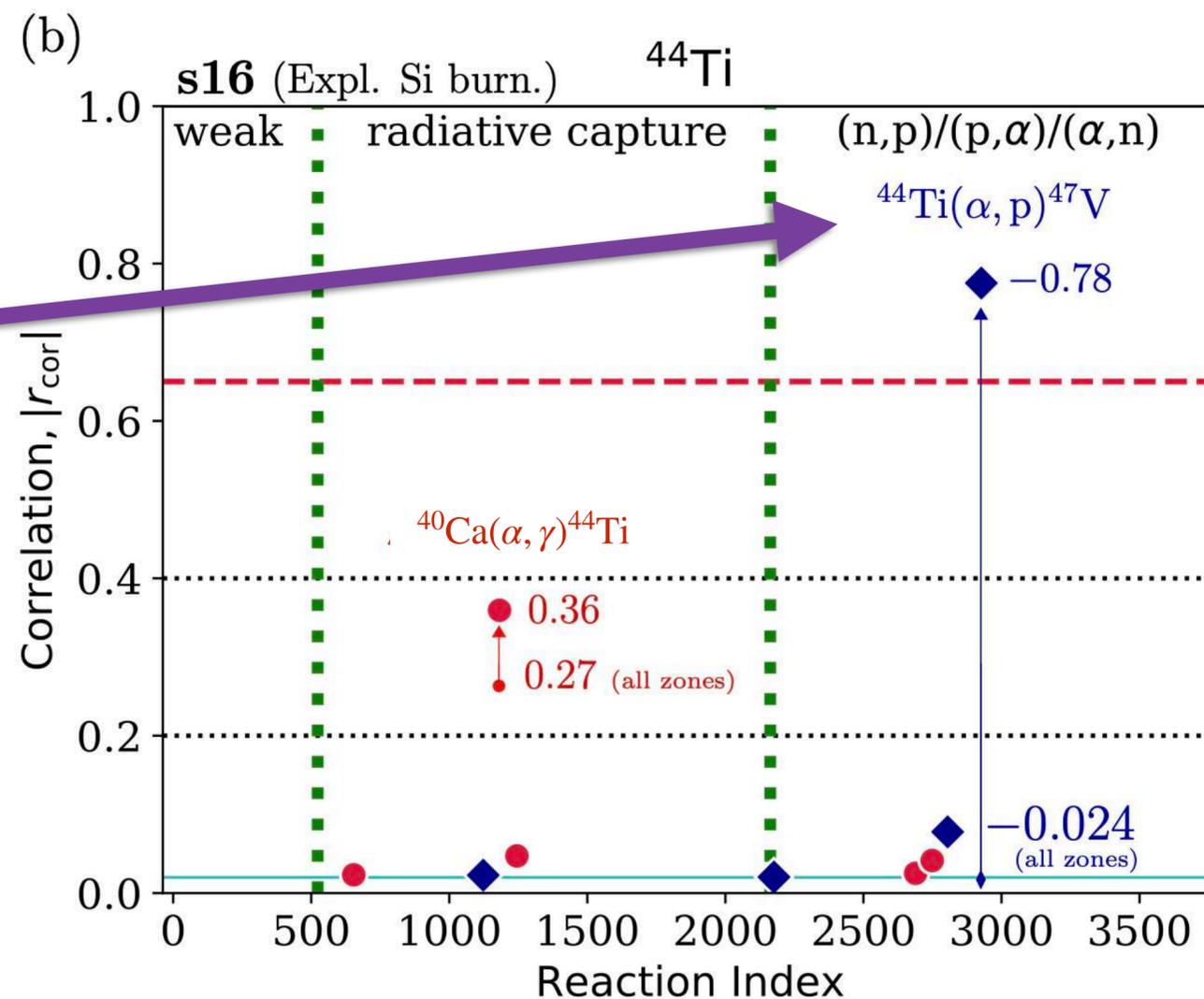
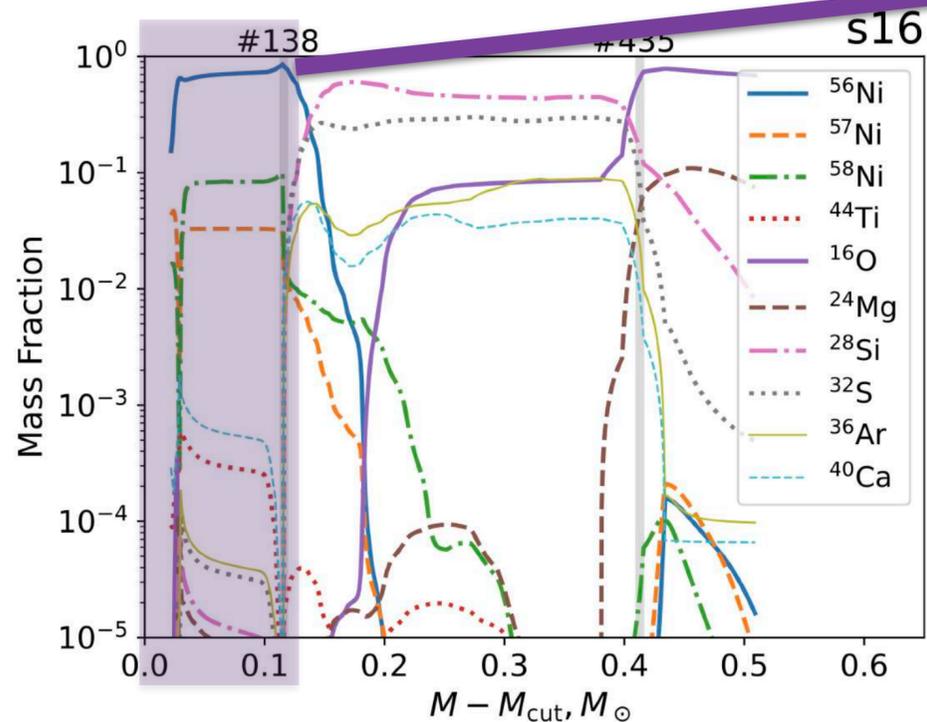
^{44}Ti : reactions??

w16 model

- ^{44}Ti は複数の反応率 (生成flow) に依存する
 - 我々の定義での “key rate” ($|r_{\text{cor}}| > 0.65$) は、なし。
- 注目している反応率の不定性が、100% 効くとは言えない。
 - 既知の $^{44}\text{Ti}(\alpha, p)^{47}\text{V}$ と $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ が効くのは確か。



一部の層に限定

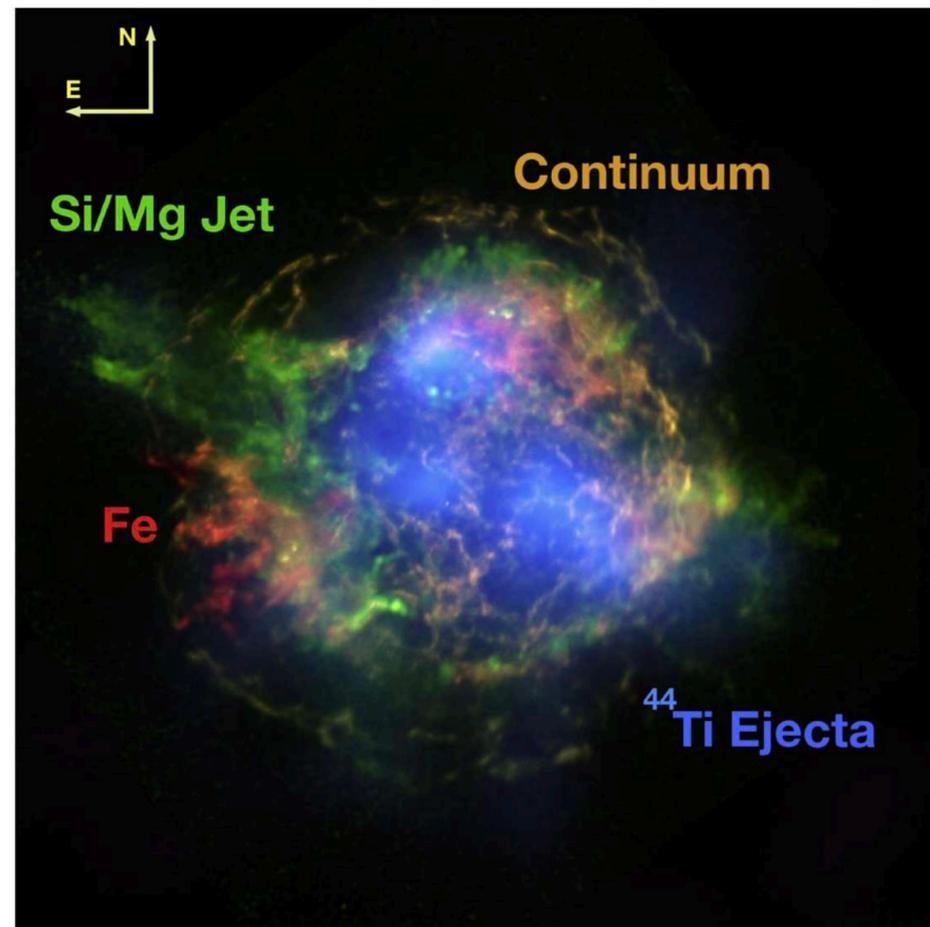


^{44}Ti : additional production?

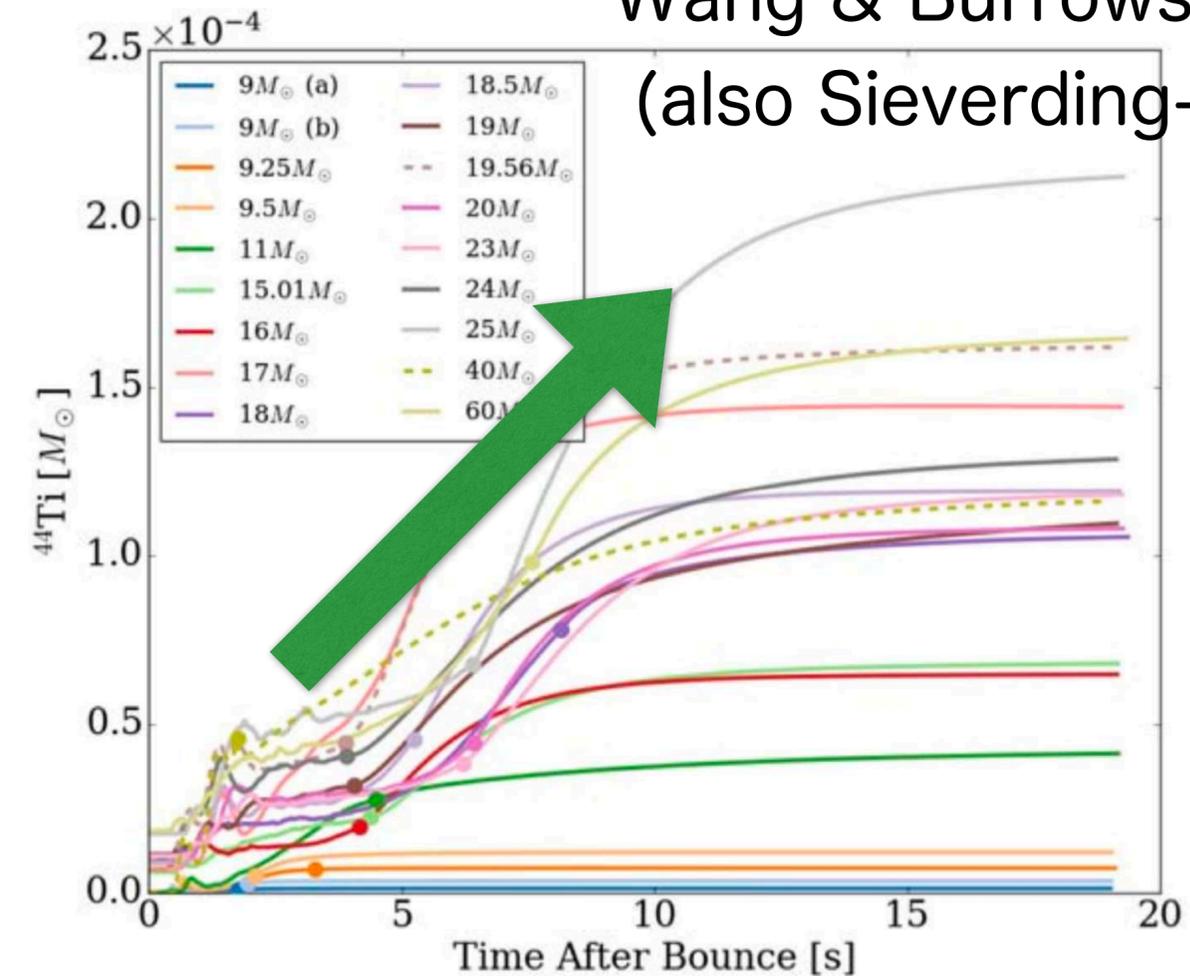
- additional production?
- can be solved 3D long-term simulations?(Wang & Burrows 2024)
- pre-SN model (stellar evolution e.g., Sbedi+2020)
 - ^{44}Ti underproduction problem can be solved by NDW (later ν -heated ejecta)
 - probably in p-rich NSE, but nucleosynthesis mechanism is not clear yet

→ しかし、（我々の定義での）重要核反応の検出は困難？（反応系が複雑になる）

Wang & Burrows (2024)
(also Sieverding+2023)



NuSTAR (Grrenstette+2017)

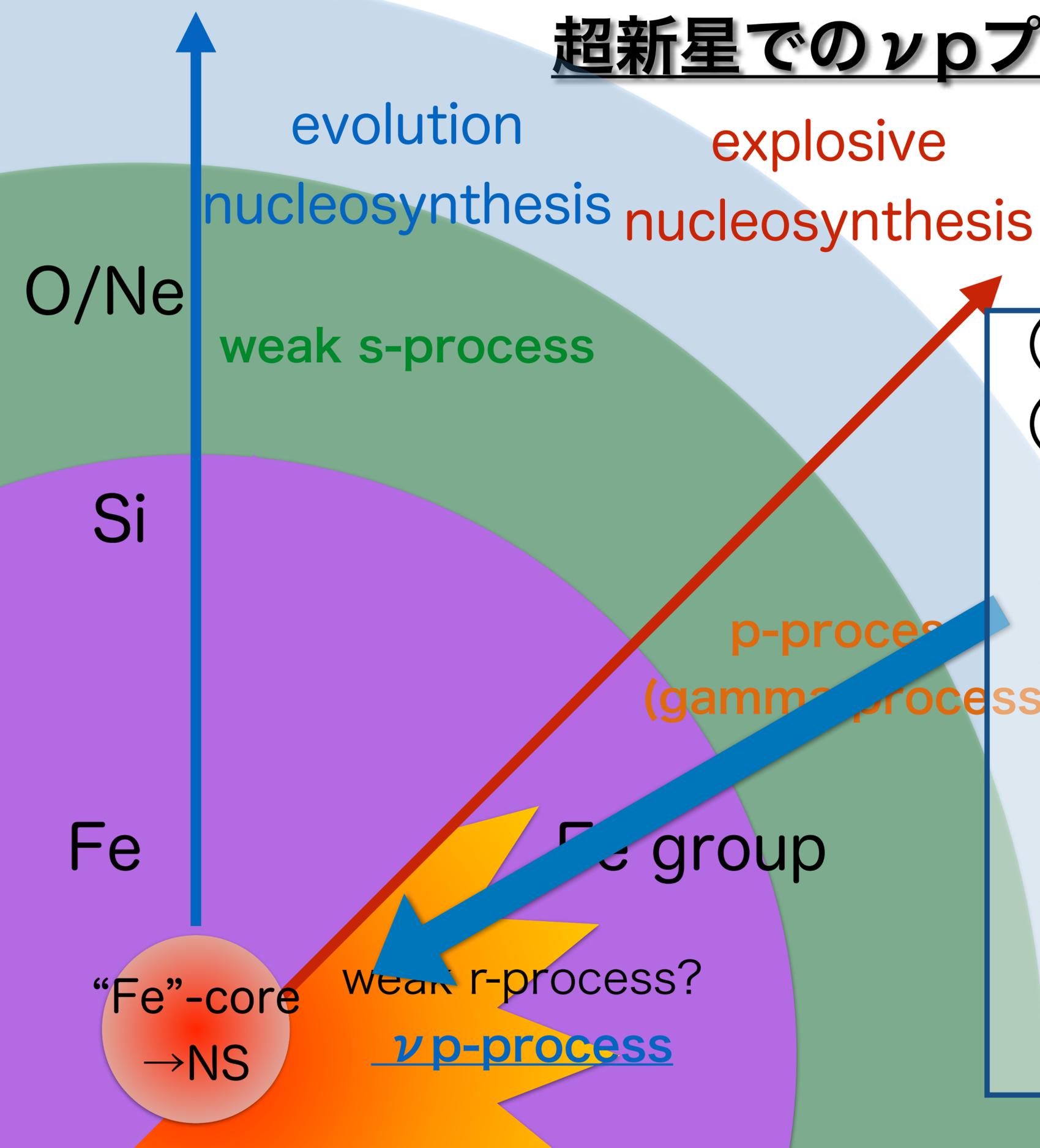


2. 超新星爆発最深部での ニュートリノ駆動元素合成

参考：

- NN+(2019) MNRAS 489
- Li+NN, in prep. (J. Li 博士論文2026@東京大)

超新星での νp プロセス元素合成



(狭義の) 爆発的元素合成領域

(^{56}Ni が生成) より内側

→ ひとまず独立した元素合成過程とする

・陽子過剰な放出物で起こる

・天体サイト

・超新星爆発

・中性子星合体 (陽子過剰であれば)

・銀河化学進化・太陽系の組成

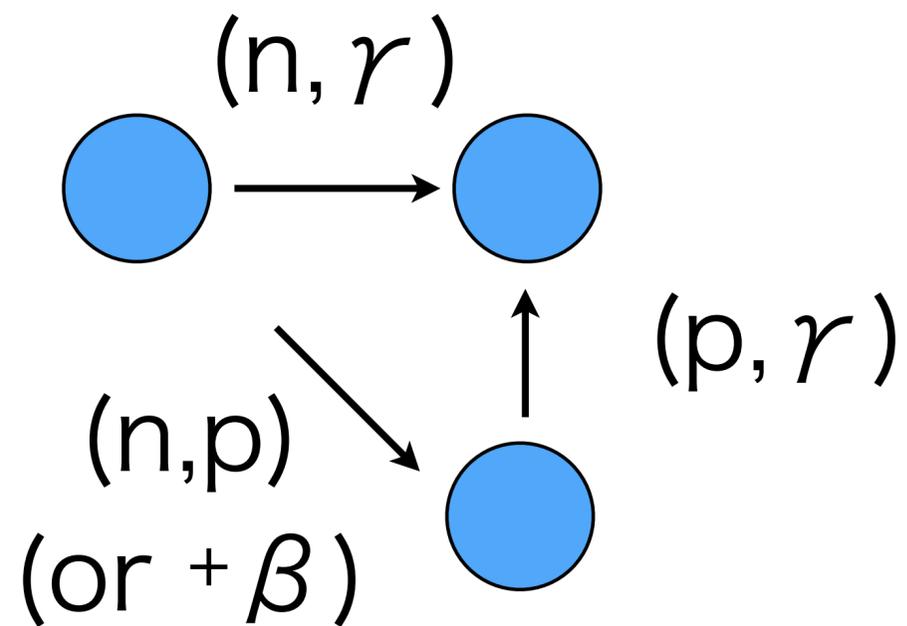
・軽いp核の起源、「モリブデン」問題

・ ^{56}Ni と比べて数桁程度低い量

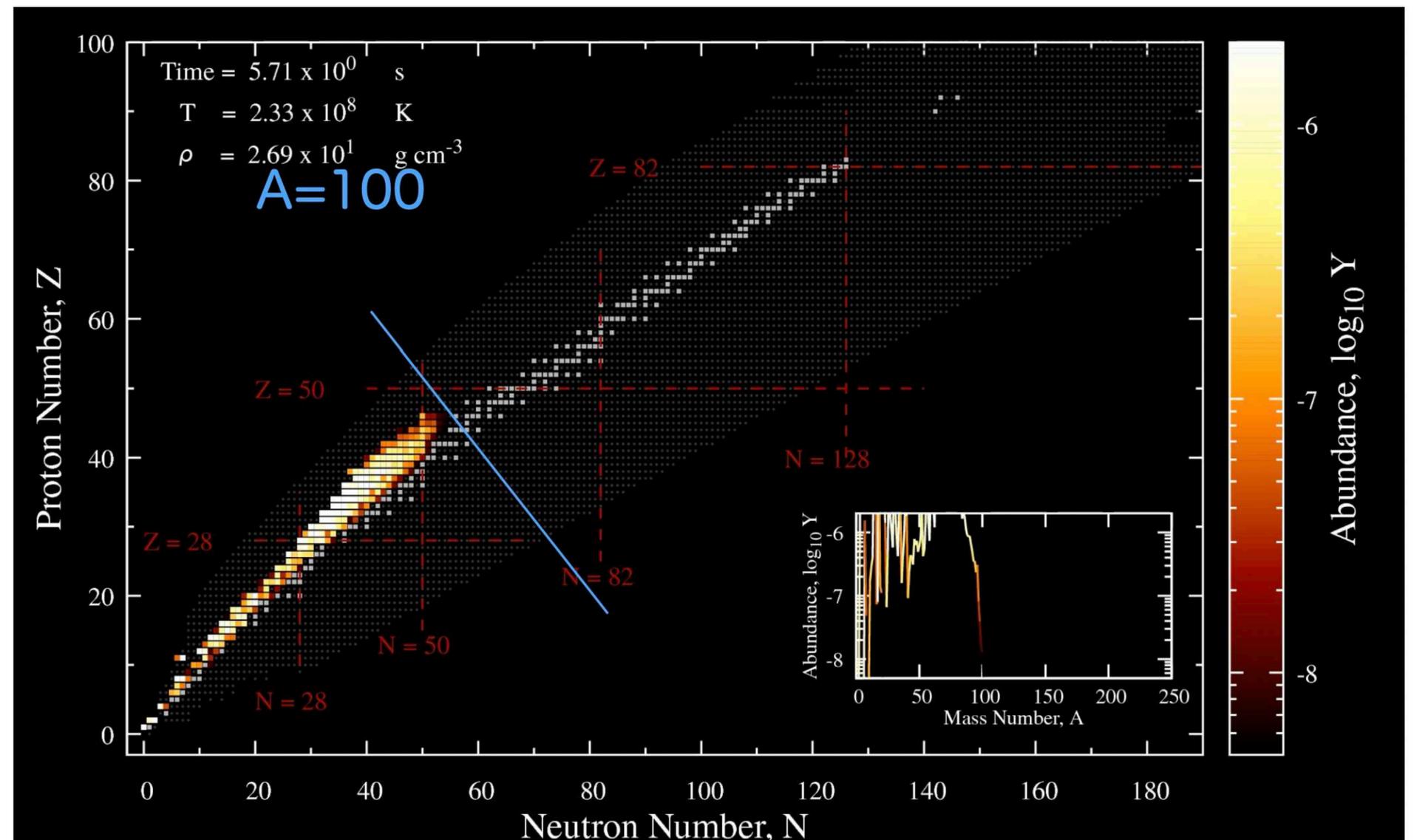
νp プロセス元素合成

超新星の最深部 (^{56}Ni 生成より内側) は、陽子過剰 \rightarrow 速い陽子捕獲:

\rightarrow ^{56}Ni と pree proton の系



典型的な νp プロセスの進行 ($Y_e \sim 0.6$)



現実的モデルで達成可能?

\rightarrow どこまで到達するか未解明

\rightarrow 標準の超新星で鉄より重い

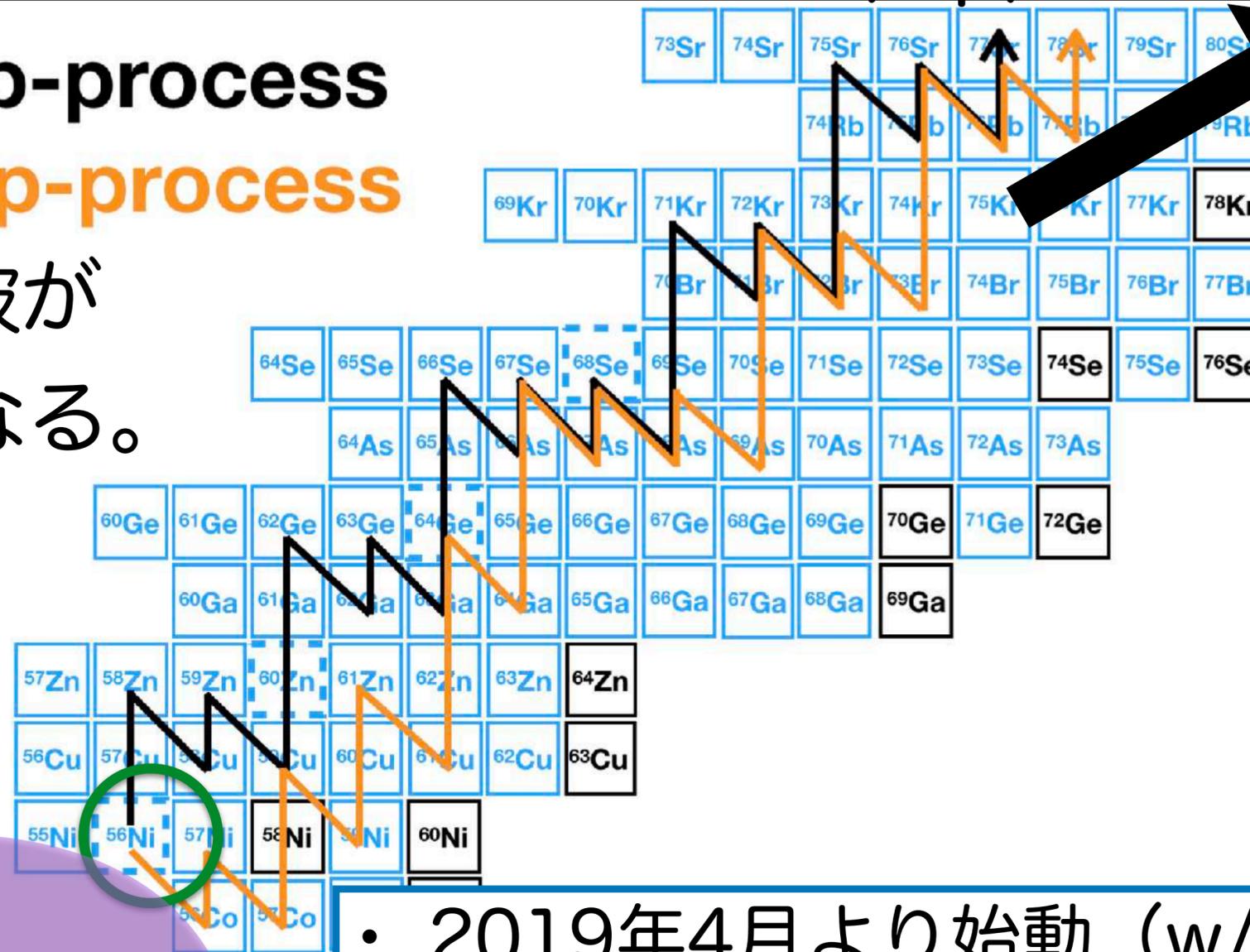
元素を作る主要なプロセス

序盤：トリプル α と中盤： $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ のインパクト

↑ **rp-process**
↑ **vp-process**

^{56}Ni からの突破が
rpプロセスと異なる。

中盤



終盤?

92Mo/94Mo比
NN+2019参照

種核生成

(トリプル α により駆動)

序盤

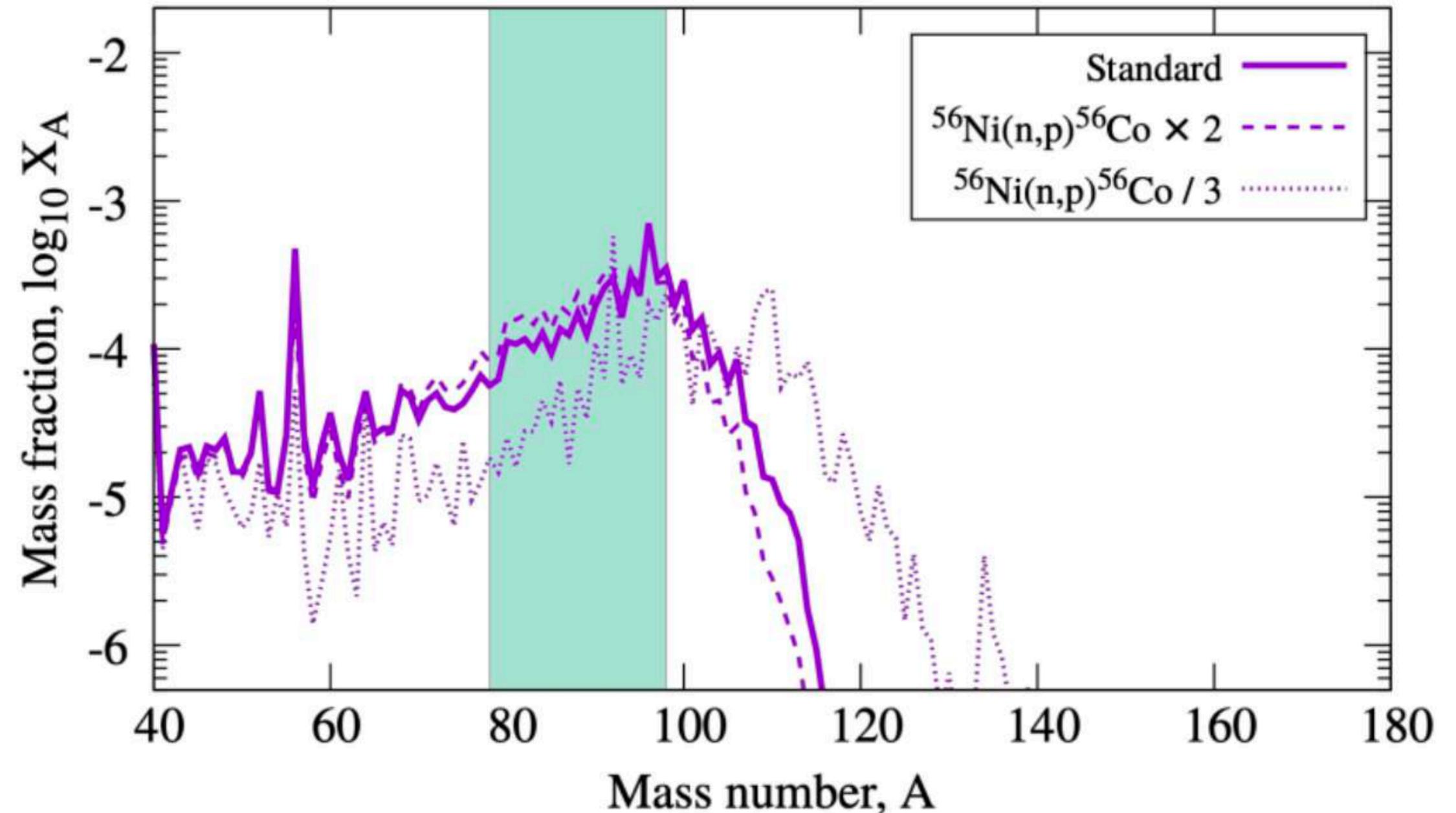
- 2019年4月より始動 (w/ 鈴木大介 理研→東大)
代理反応による測定： $^{56}\text{Ni}(d,p)$ で ^{57}Ni を生成
- 2019年12月 理研RIBF PAC採択
- 2020年度に測定実験
- . . .

Impacts of $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$

不定性の影響

92,94Mo などの生成量が問題になる。

→ 数倍の違い



coming soon

experimental determination of $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$

by the surrogate method: RIKEN-CNS at RIBF (Li, Suzuki+NN, in prep.)

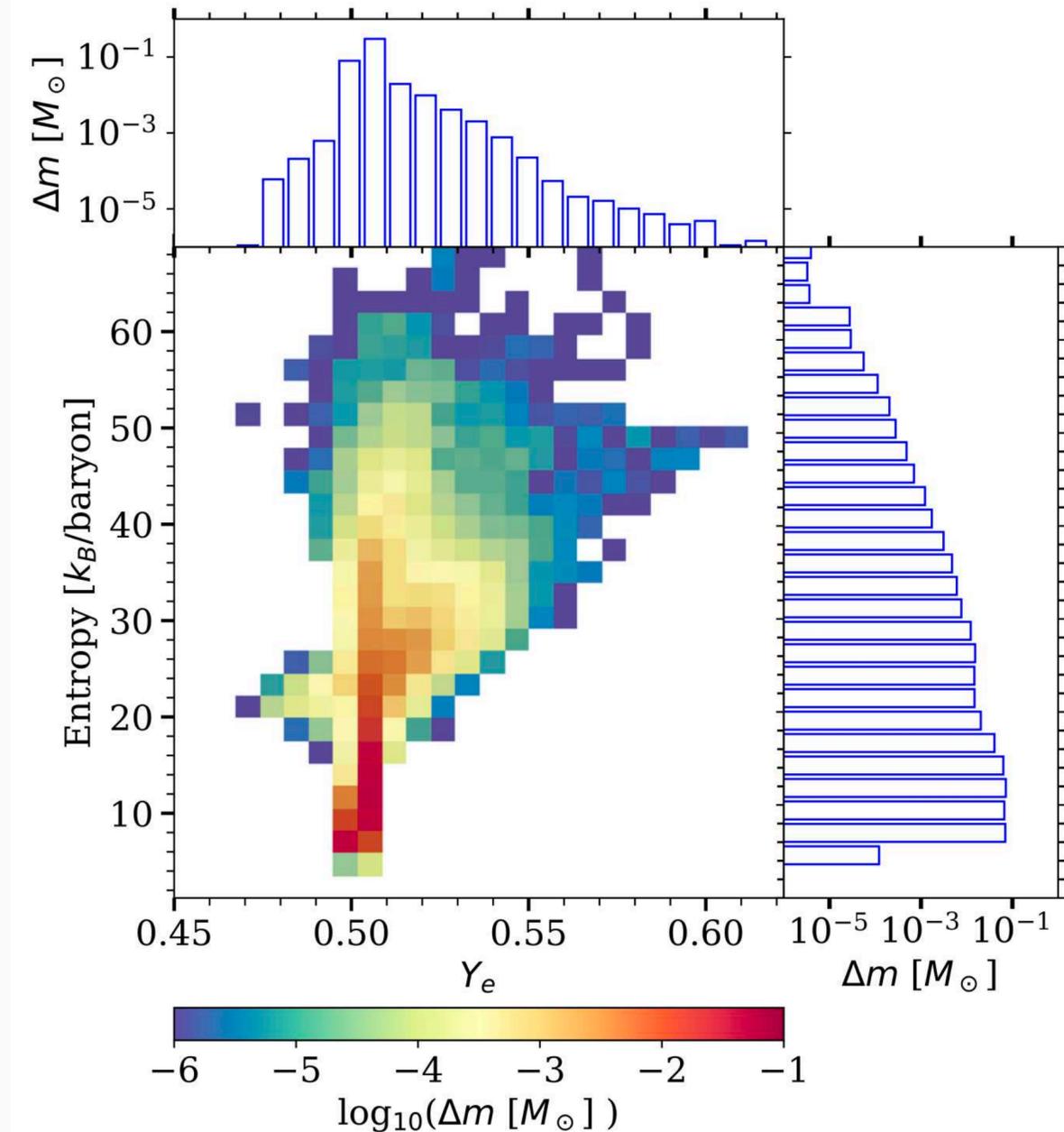
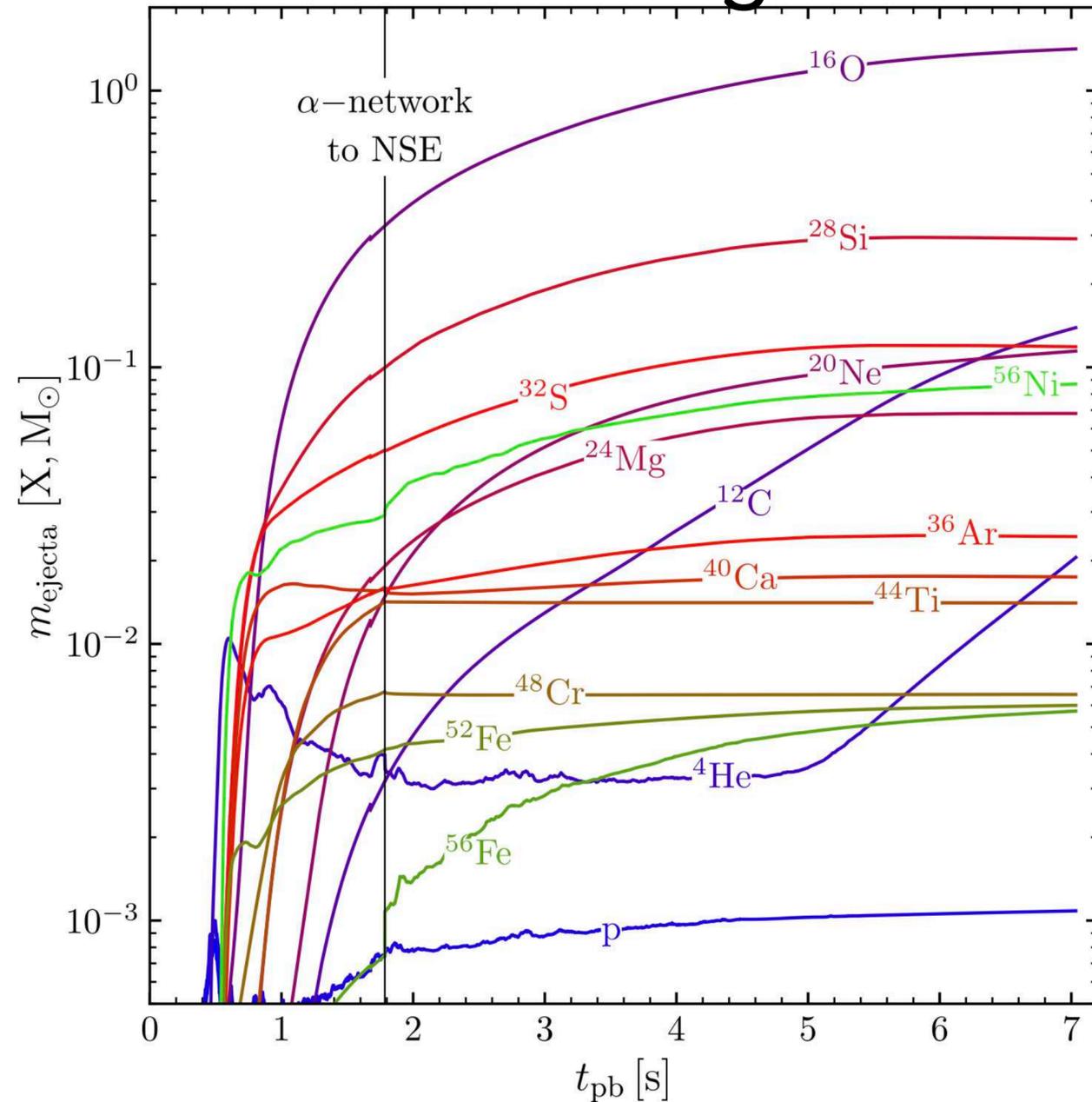
^{56}Ni production in proton-rich ejecta?

→ 諏訪さんトーク

^{56}Ni production in NDWs? (in proton-rich)

Bolling+2021

Sieverding+2023



まとめ

1. 重力崩壊型超新星の爆発的元素合成

- ・観測で重要な放射性核種の生成で重要な反応（不定性のある）
- ・とくに重要な放射性核種
 - ・ ^{56}Ni : 「重要反応」はなし。しかし、 ^{57}Ni の生成には重要反応あり
 - ・ ^{44}Ti は、やはり爆発メカニズムの影響が大きい。

2. 超新星爆発での $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ の重要性和インパクト

- ・ νp プロセスにおいて重要反応
 - ・実験の精度の範囲で決まりつつある ($A > 80$ のp核の生成に重要)
- ・また、超新星の光度曲線で重要な ^{56}Ni にも影響か？