

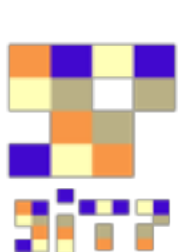
核反応の不定性が νp プロセスに与える影響

西村 信哉

京都大学・基礎研

共同研究者

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



YITP
YUKAWA INSTITUTE FOR
THEORETICAL PHYSICS



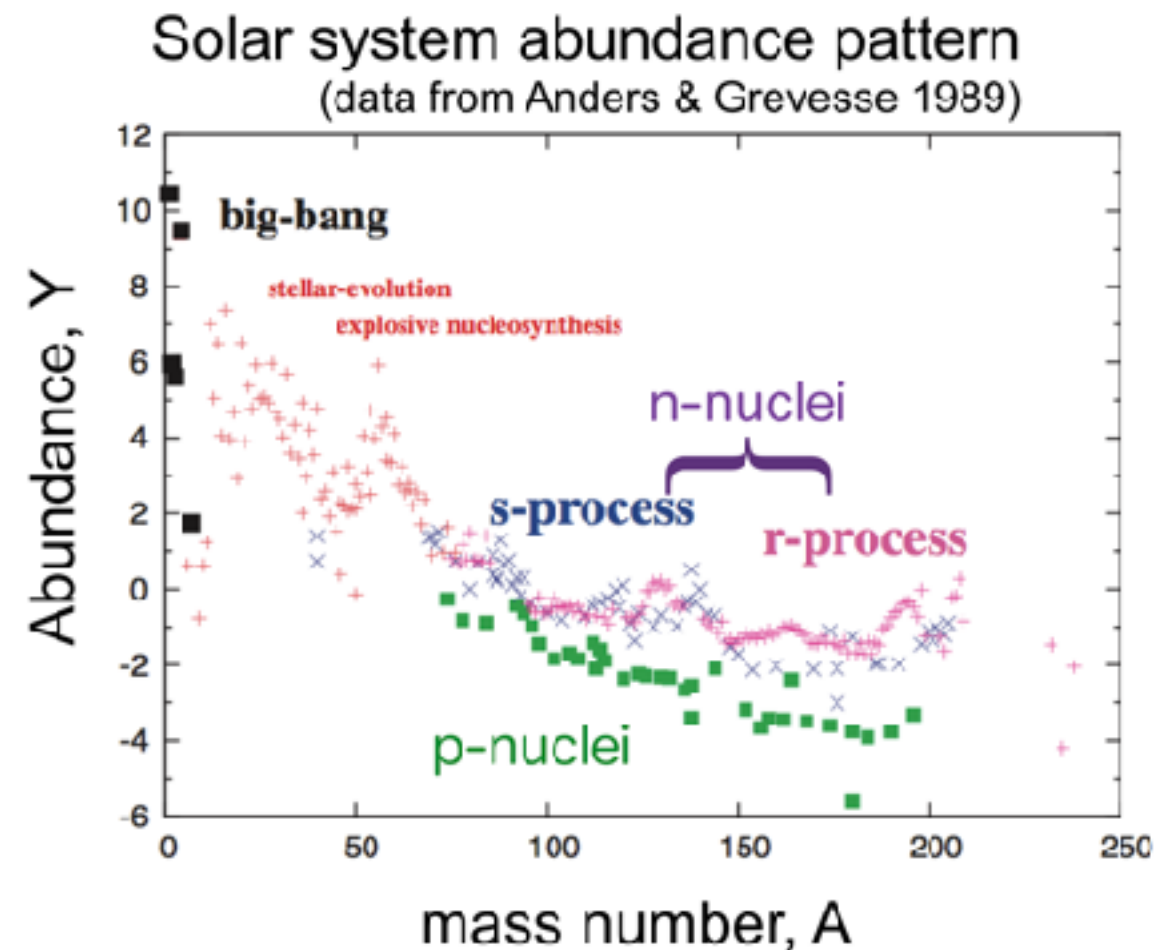
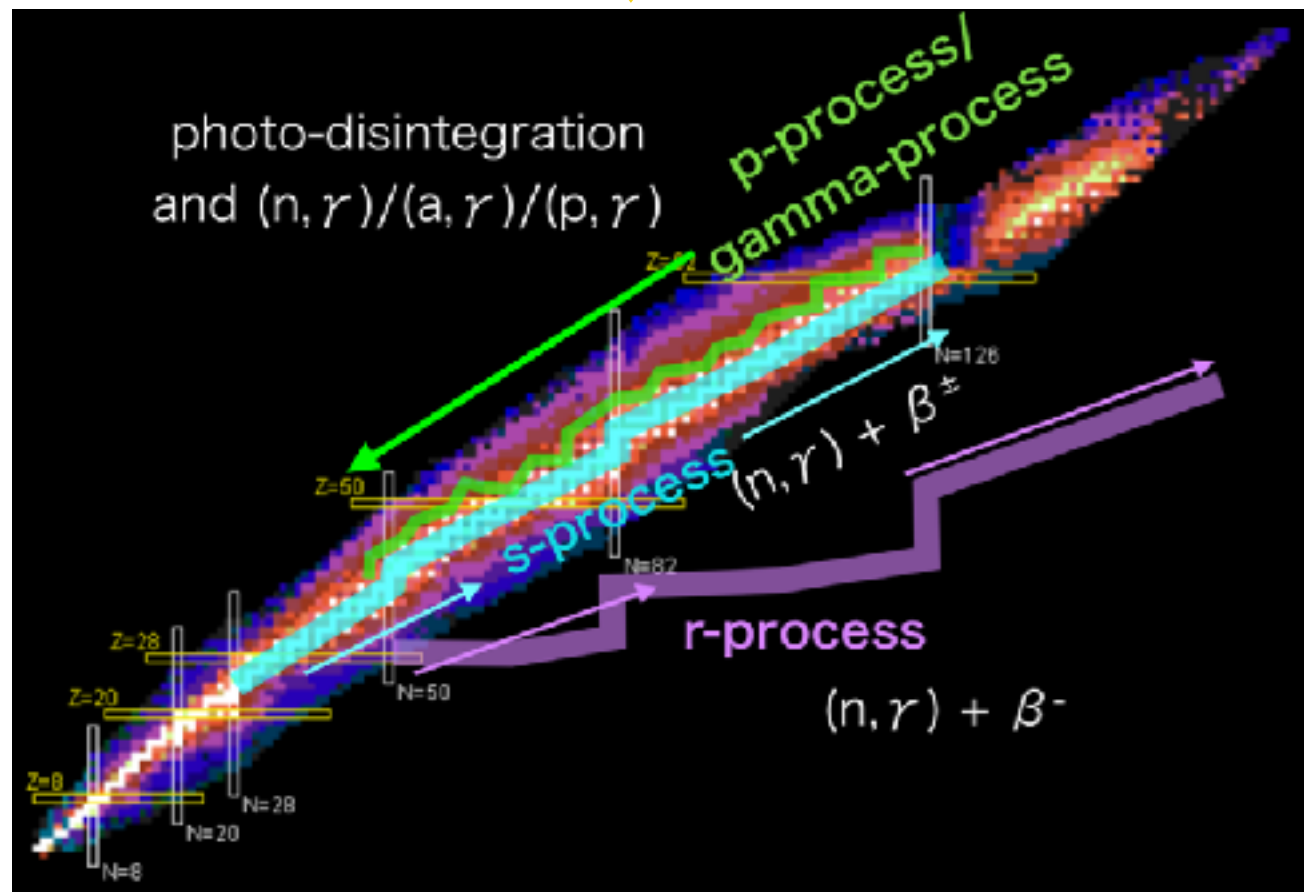
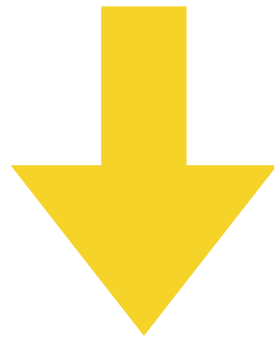
京都大学
KYOTO UNIVERSITY



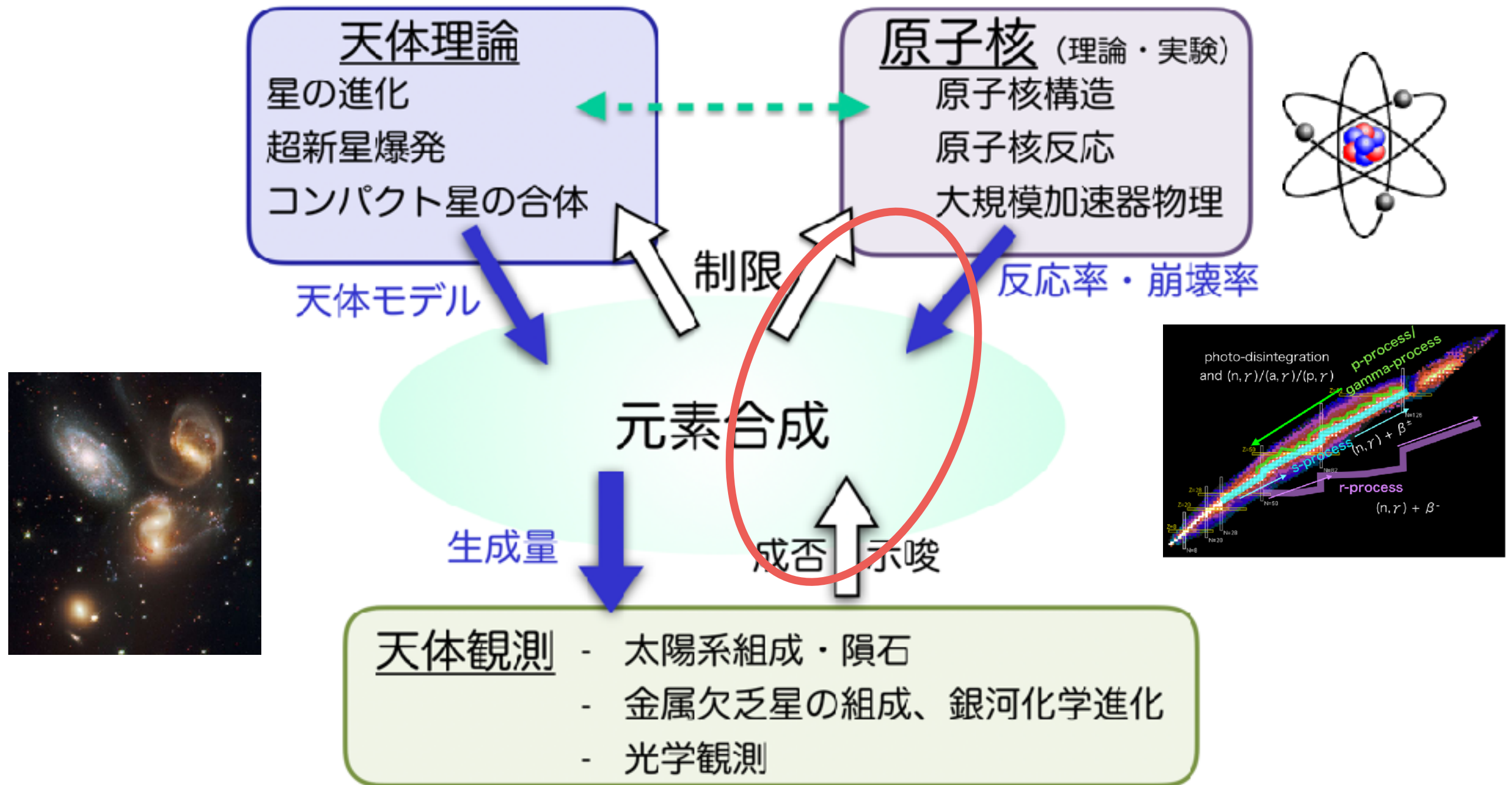
計算基礎科学連携拠点
Joint Institute for
Computational Fundamental Science



核反応の不定性が 「重元素合成」に与える影響



元素合成を軸にミクロとマクロをつなぐ



- 原子核の不定性が元素合成に与える影響
- (天体) 観測量に対して重要な反応・崩壊率の決定
今後詳細に研究すべき

これまでの研究対象

・sプロセス

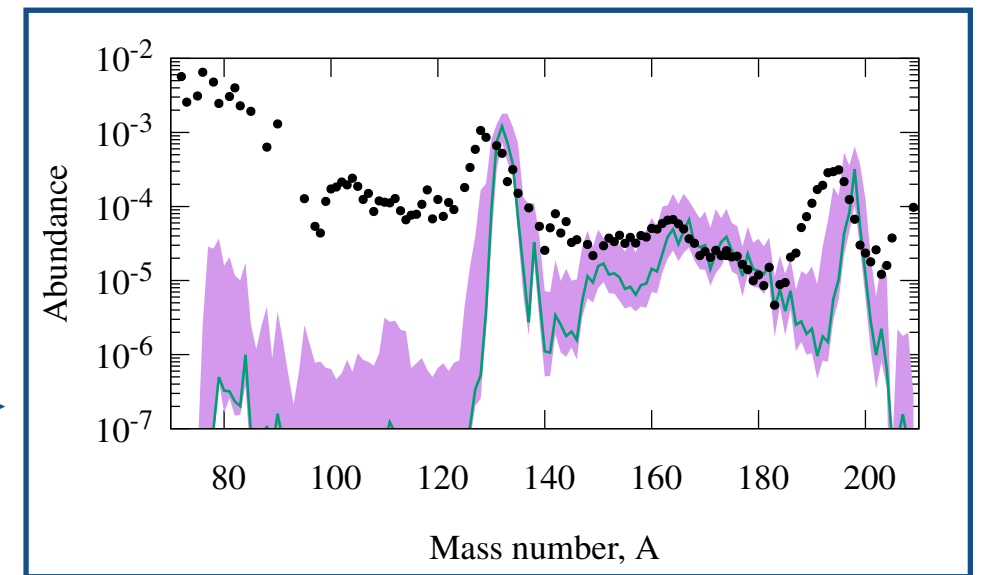
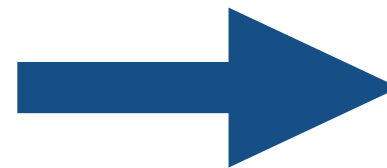
- ・安定核線上の中性子捕獲と β 崩壊
- ・weak s: 大質量星 (NN+2017)
- ・main s: 小質量星 (Cescutti, Hirsch, NN+2018)

・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)
- ・重力崩壊型超新星 (Rauscher, NN+2016)
- ・熱核反応型 (Ia型) 超新星 (NN+2018)

・ ν pプロセス (本研究)

・rプロセス (準備中)



不定性大

文献

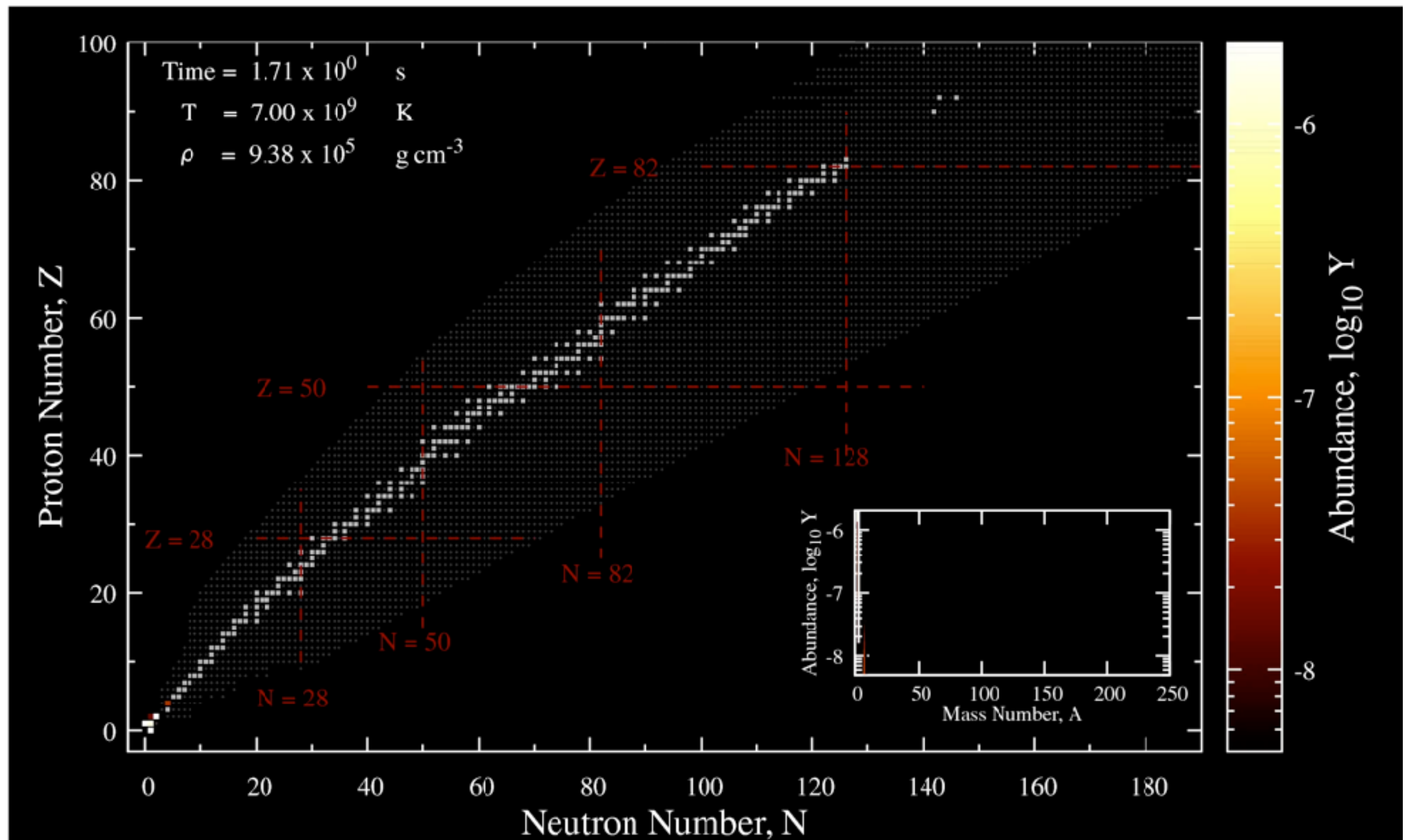
- Rauscher, NN+2016, MNRAS 463
- NN+2017, MNRAS 469
- NN+2018, MNRAS 474
- Cescutti, Hirschi, NN+2018, MNRAS 478

Contents

- ・ イントロのその前に：
- ・ イントロ：p核の起源と ν pプロセス
- ・ 研究内容：核反応の不定性の ν pプロセスへの影響
 - ・ 天体モデル： ν pプロセスの簡易モデル
 - ・ 不定性解析：核反応の不定性とその影響
- ・ 計算結果：
 - ・ ν pプロセス核の重要反応リスト
 - ・ （種核生成プロセスで重要な反応）
- ・ まとめと展望

イントロ：p核の起源と ν pプロセス

vpプロセスとは



ν pプロセスとは

- ・一部の鉄族元素や「軽いp核」の起源
- ・超新星コアのニュートリノが関与
→ 爆発メカニズムへの「制限」

・天文学

- ・天体サイトが未解明・超新星のコア付近の進化に直結

・隕石

- ・天然同位体比の解明（太陽系、太陽系外）

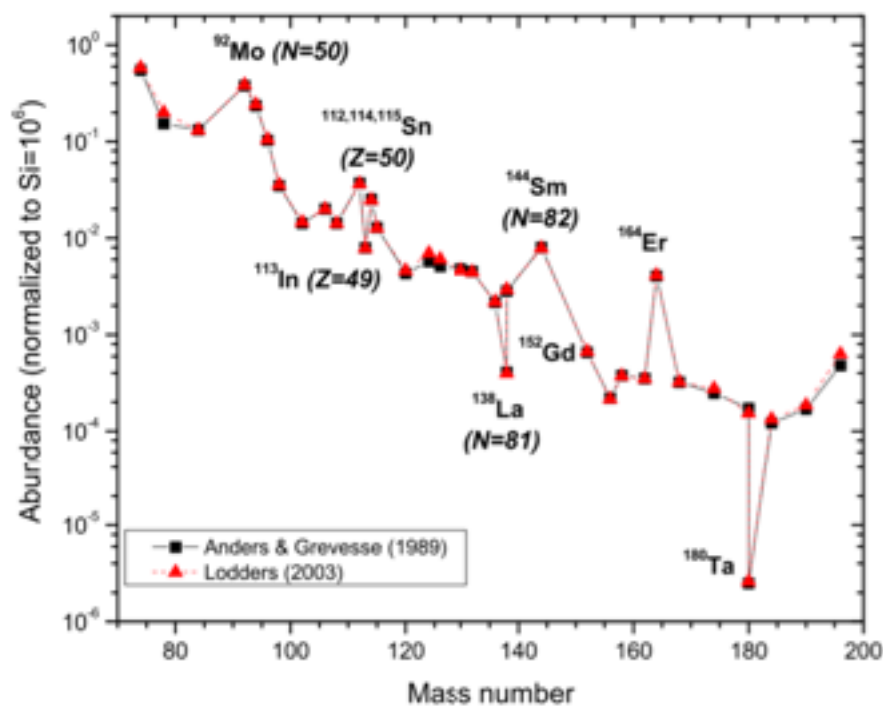
・原子核物理

- ・鉄より重い陽子過剰核（実験的に得られる）の核反応
 - ・質量等原子核の基本量→実験による検証
 - ・不安定核の反応率理論（モデル）の検証

p核の起源：p-rich (n-deficient) 核の存在

- ・35種類の“陽子過剰”安定核
- ・存在量は希少（大部分が同位体比で1%以下）
- ・中性子捕獲では生成されない？
(sプロセス経路から陽子過剰側に離れている)

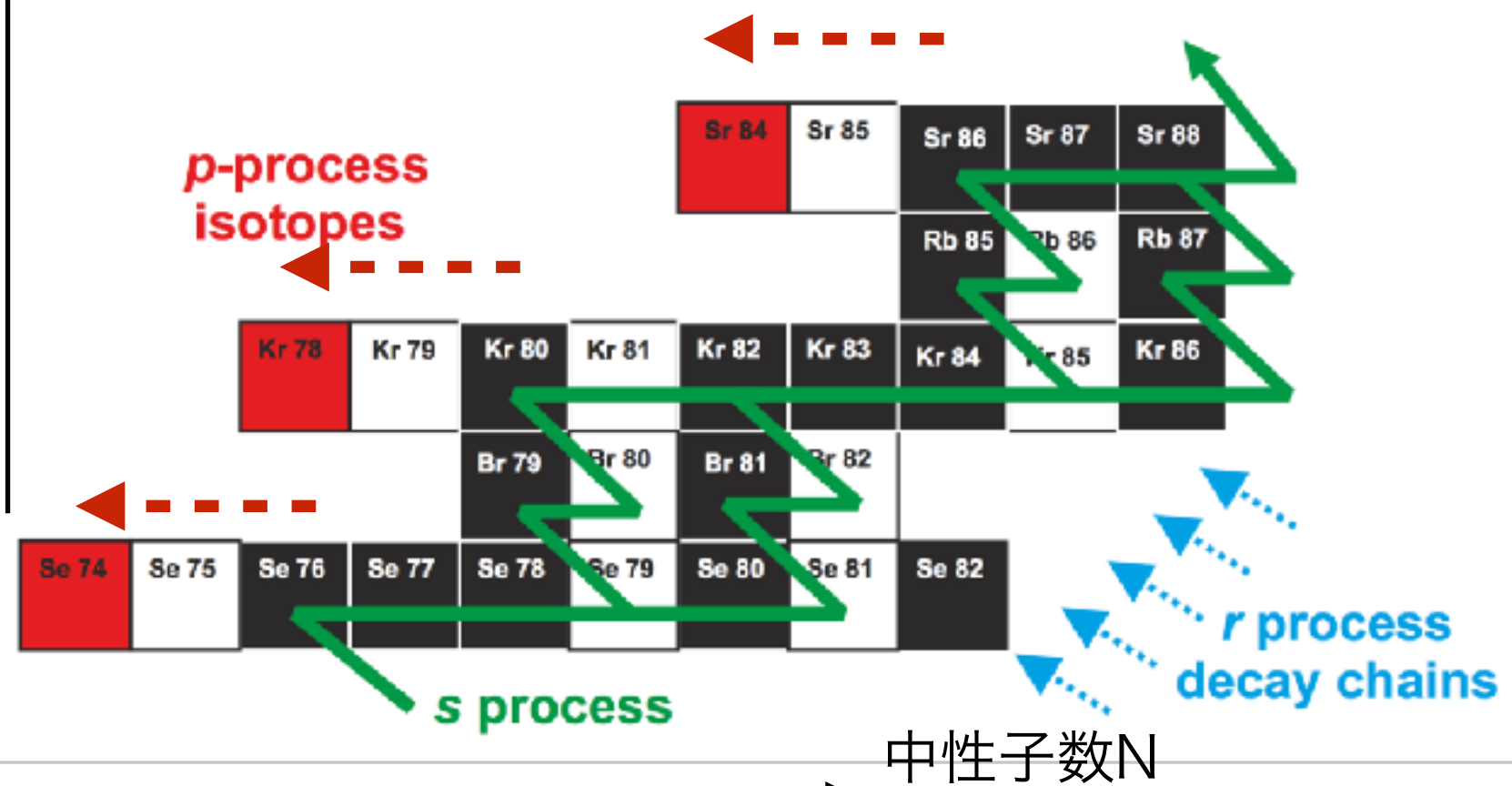
solar abundances



Rauscher+ (2013)

陽子数Z

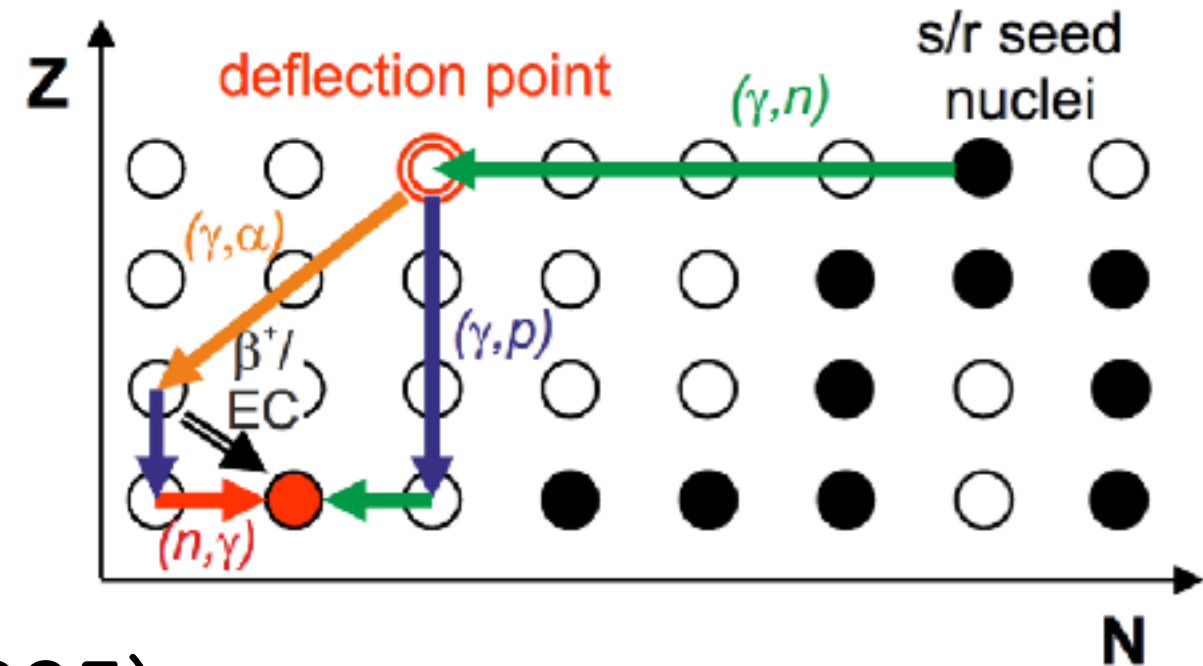
p-rich stable nuclei



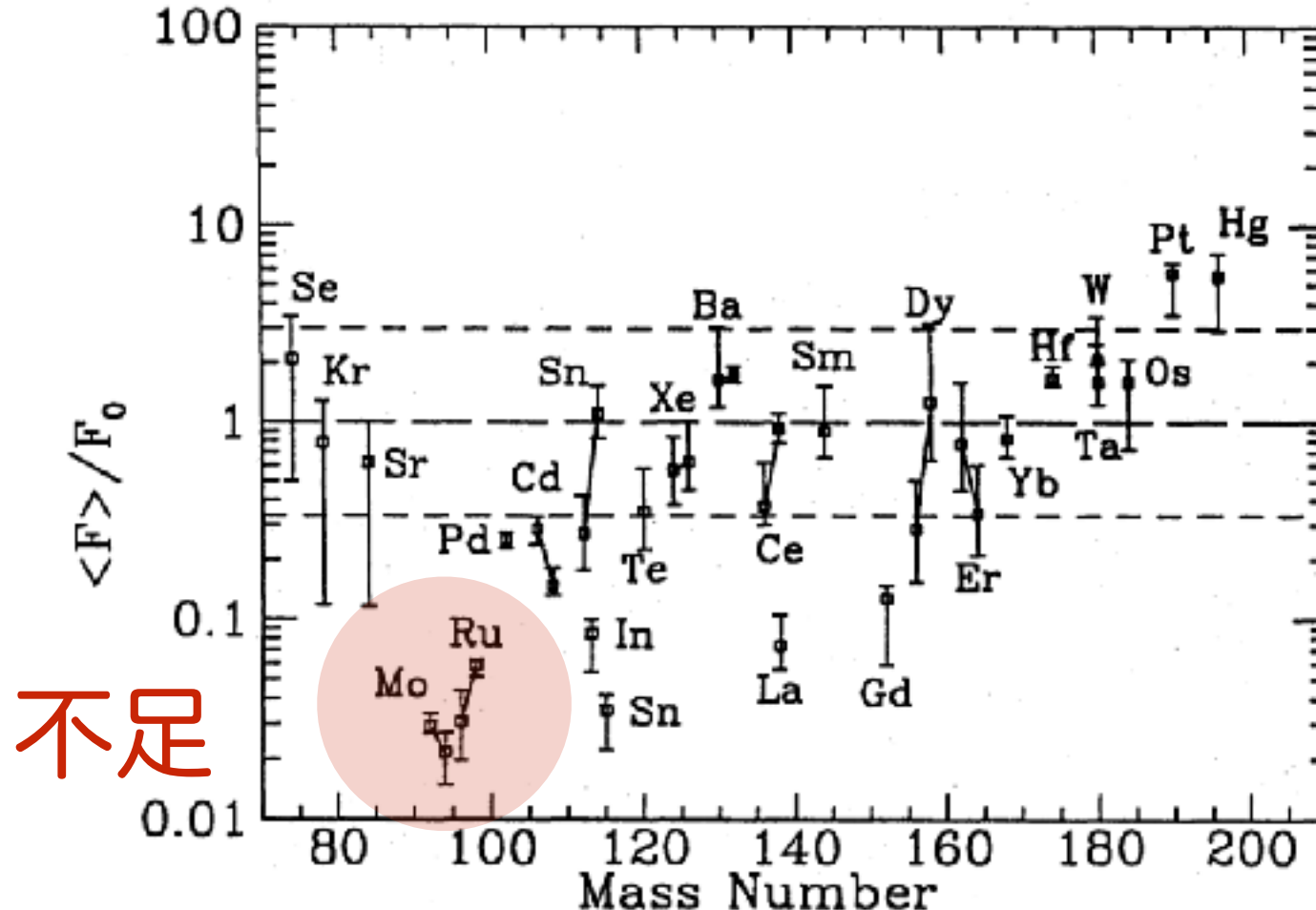
reaction flow

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 ($T_9 = 2\text{--}3$ GK)
- ・超新星爆発による衝撃波伝搬
 - ・酸素・ネオン層 ($\sim 10,000\text{km}$)



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)

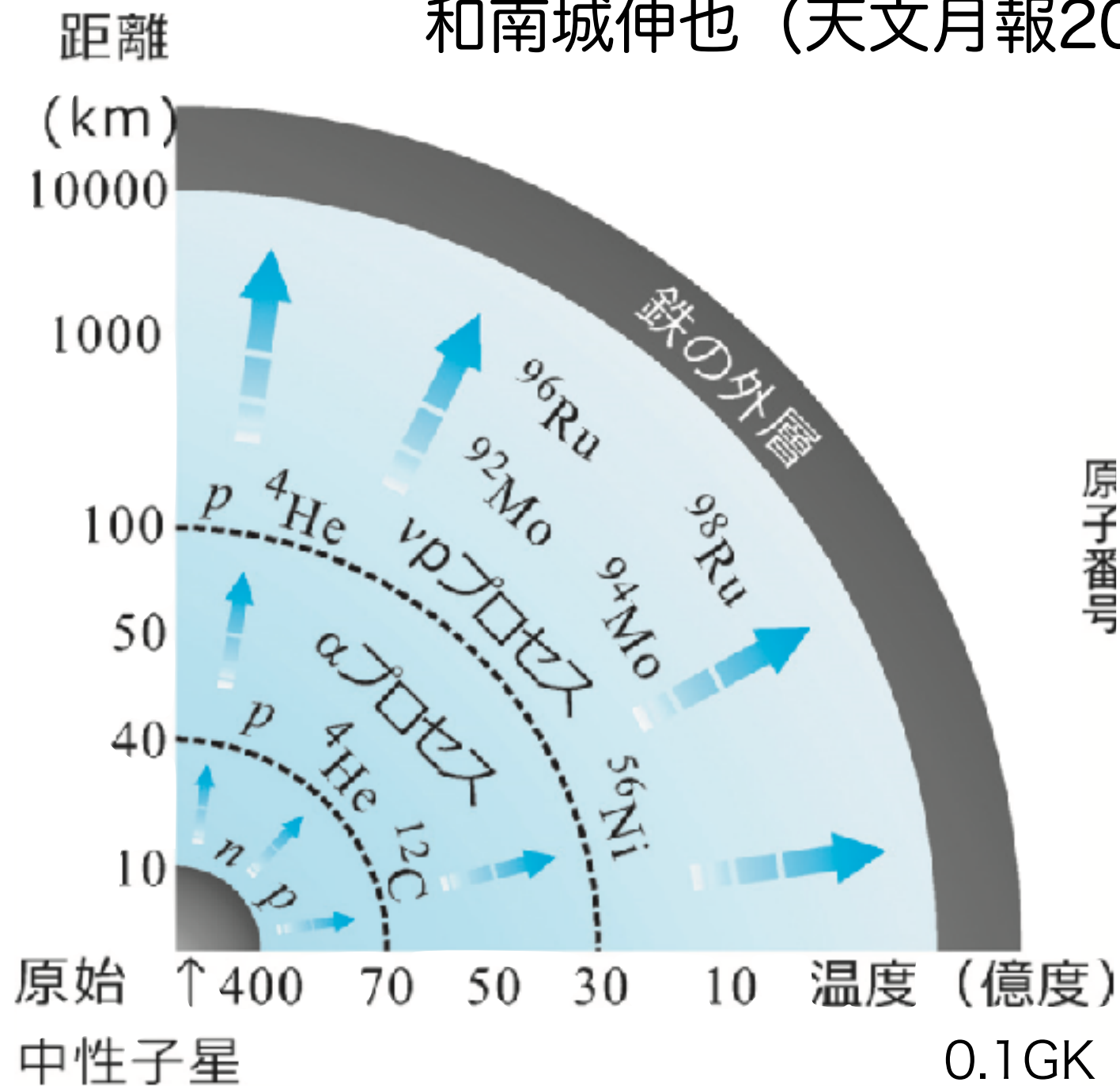
p核の起源：p-rich (n-deficient) 核の存在

- (歴史的) pプロセス (B²FH)
 - 超新星爆発中にpを生成し、s, r核から生成；実現不可能
- ガンマプロセス (gプロセス)
 - 大部分 (30核種) の起源だが、いくつかは生成量不足
- sプロセス (やrプロセス)
 - p過剰側への (僅かな) ブランチ；
 ^{164}Er , ^{152}Gd , ^{180}Ta (^{113}In , ^{115}In も可能性あり)
- ν プロセス
 - 超新星時のニュートリノによる近傍核の破砕； ^{138}La , ^{180}Ta
- (古典的) rpプロセス
 - X線バースト天体 (中性子星への水素の降着)
での「速い陽子捕獲」；化学進化への寄与なし
- ν pプロセス
 - 超新星コア付近 (などの) での陽子過剰物質
での速い陽子捕獲； $^{92, 94}\text{Mo}$, $^{94, 96}\text{Ru}$ ；軽いp核の起源？

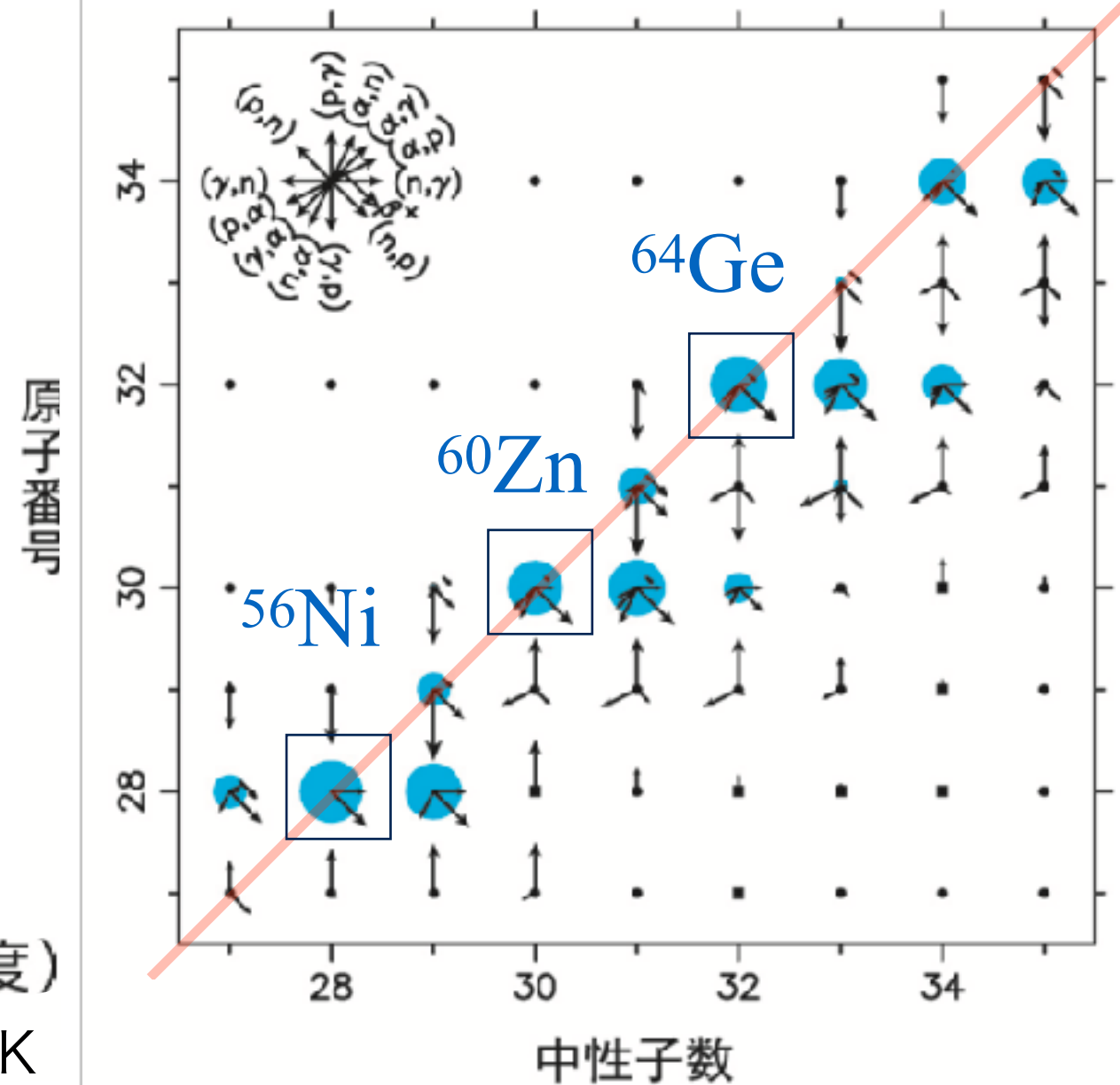
νp プロセス: ニュートリノ反応によるrpプロセス

和南城伸也（天文月報2009年1月）

α 核



reaction rates @2.5GK



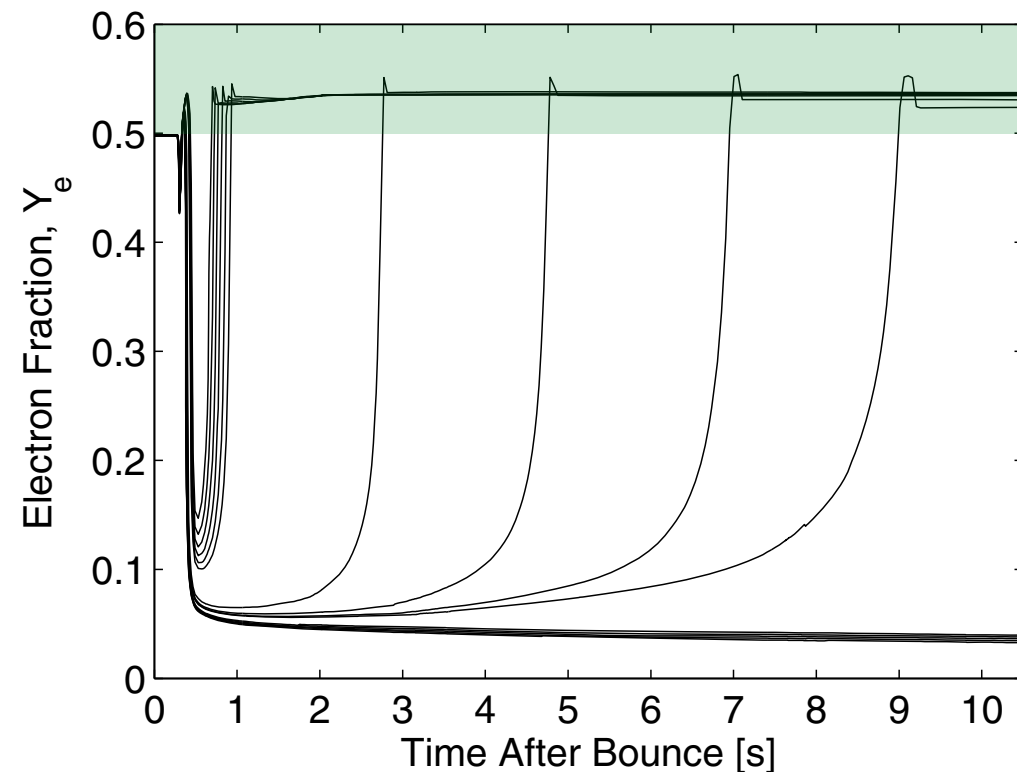
- 超新星の陽子過剰な環境
- 速い陽子捕獲によりより重い元素を生成する
- 種核は爆発的元素合成で作られた鉄族元素 (^{56}Ni)

原始中性子星からのニュートリノ駆動風

詳細な物理過程を考慮した超新星爆発シミュレーション
(1次元球対称) で原始中性子星の進化を計算

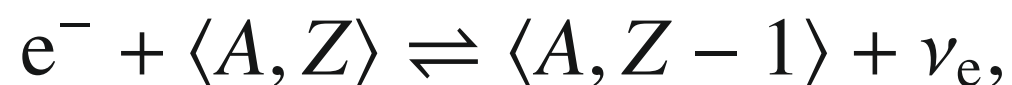
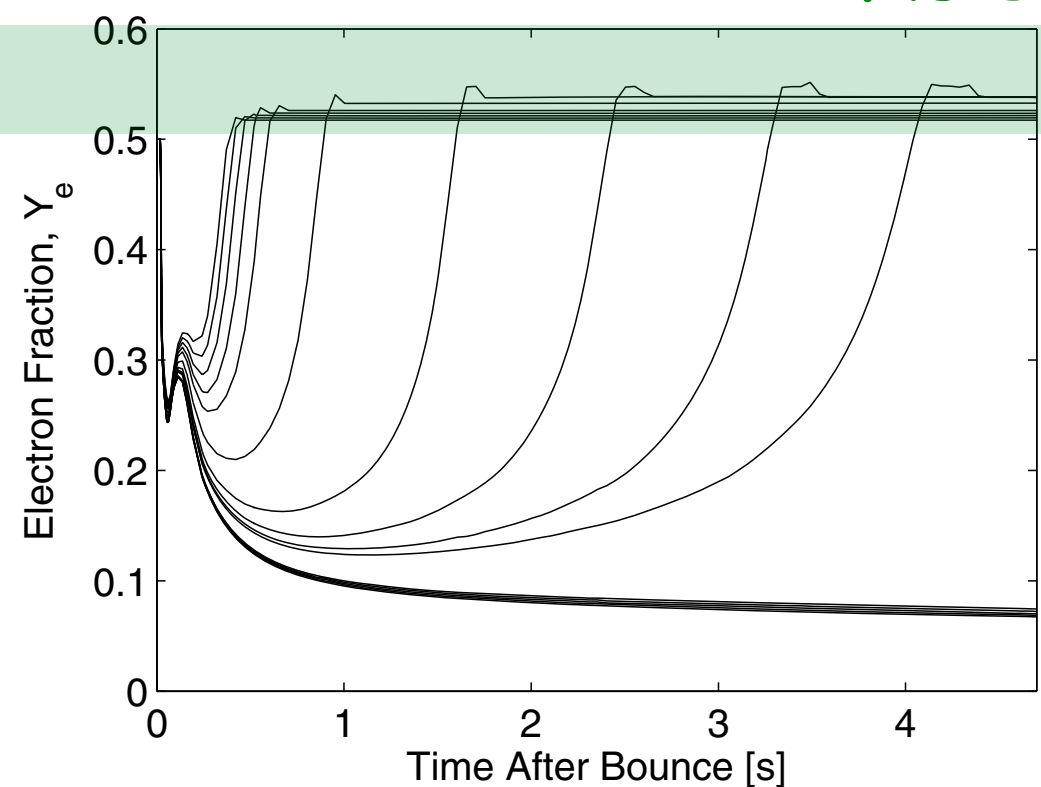
Fischer et al. 2010

親星：10.8 M $\odot$



親星：8.8 M $\odot$

陽子過剰



伝統的にrプロセスサイト
として期待されていたが、
むしろ陽子過剰であった

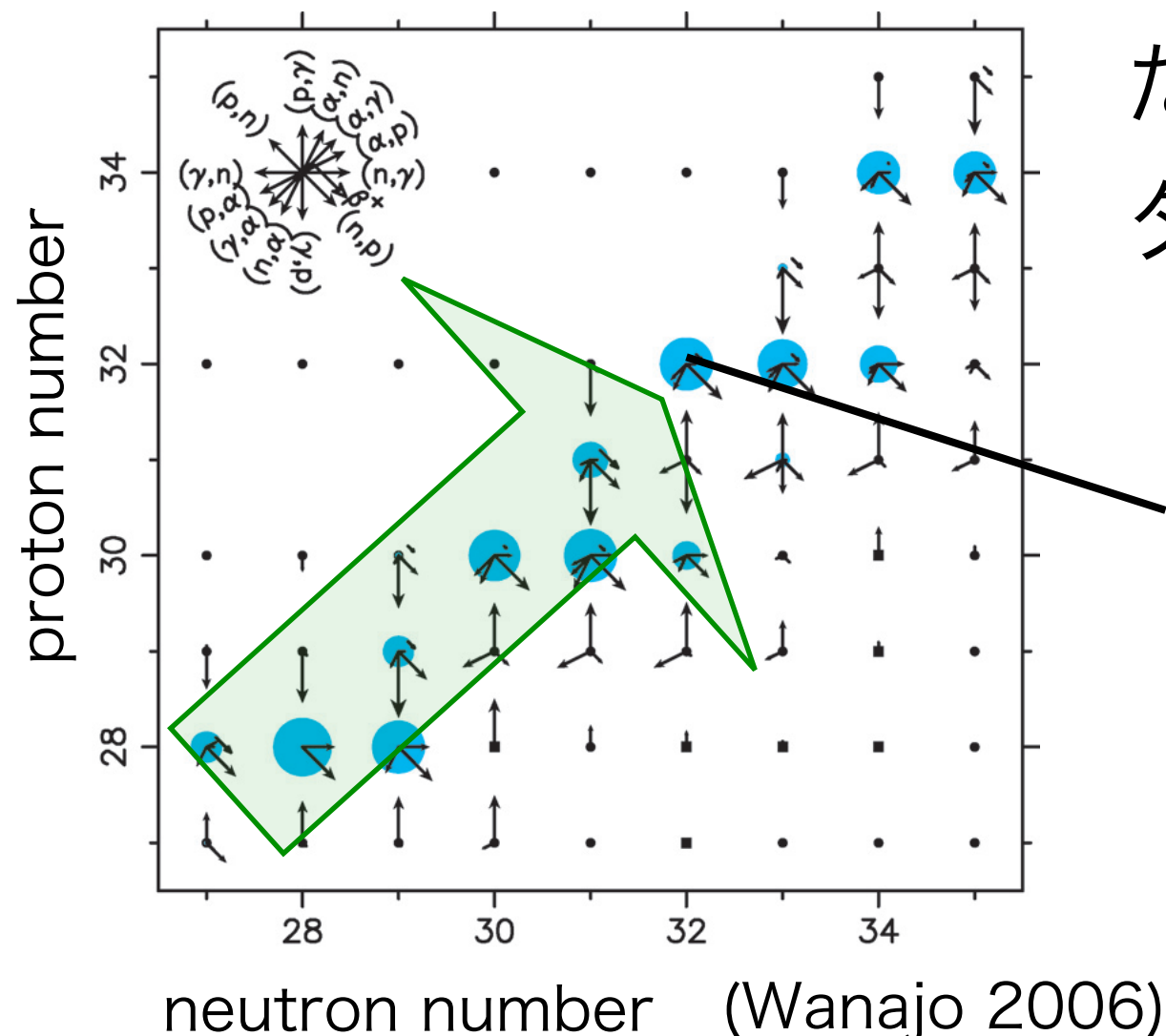
“ νp プロセス”元素合成

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 ($Z=N=32$)

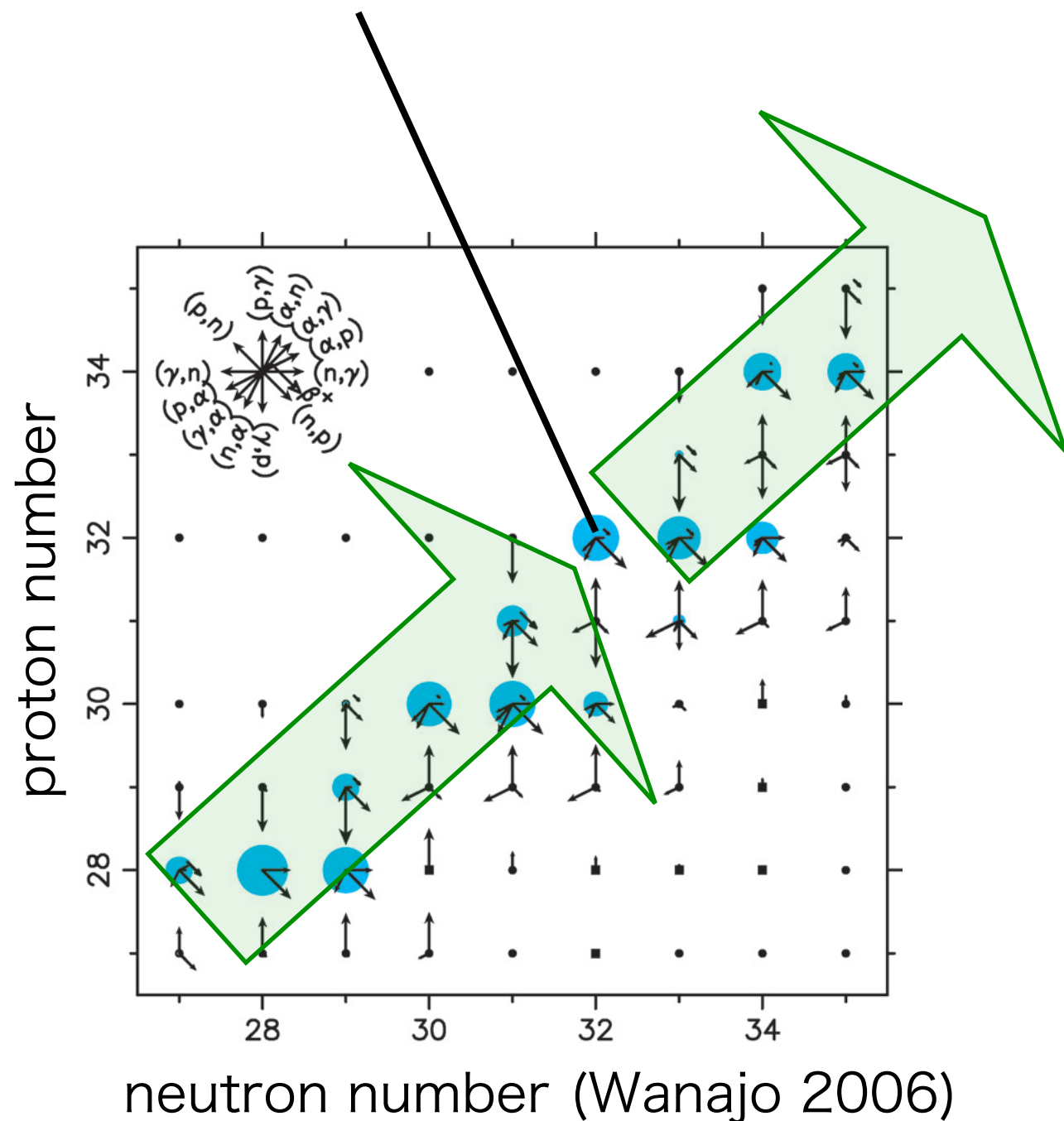
半減期 $\tau_{\beta} \sim 1$ 分

$\Rightarrow$ 元素合成の流れが止まる

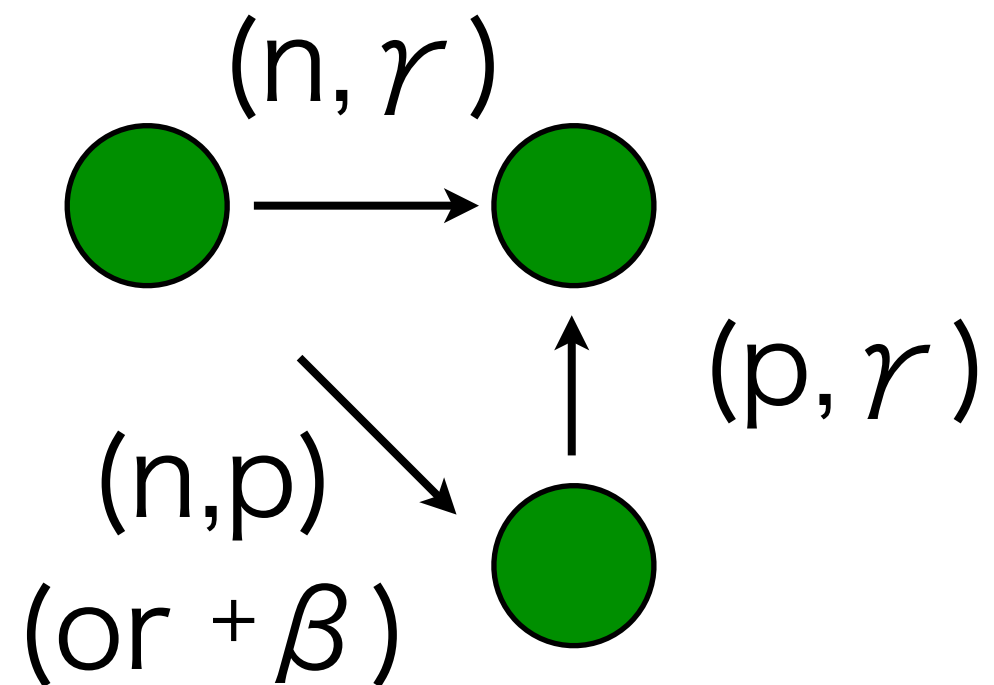
“ νp プロセス”元素合成

中性子捕獲により迂回する

↑ ニュートリノ捕獲に起因

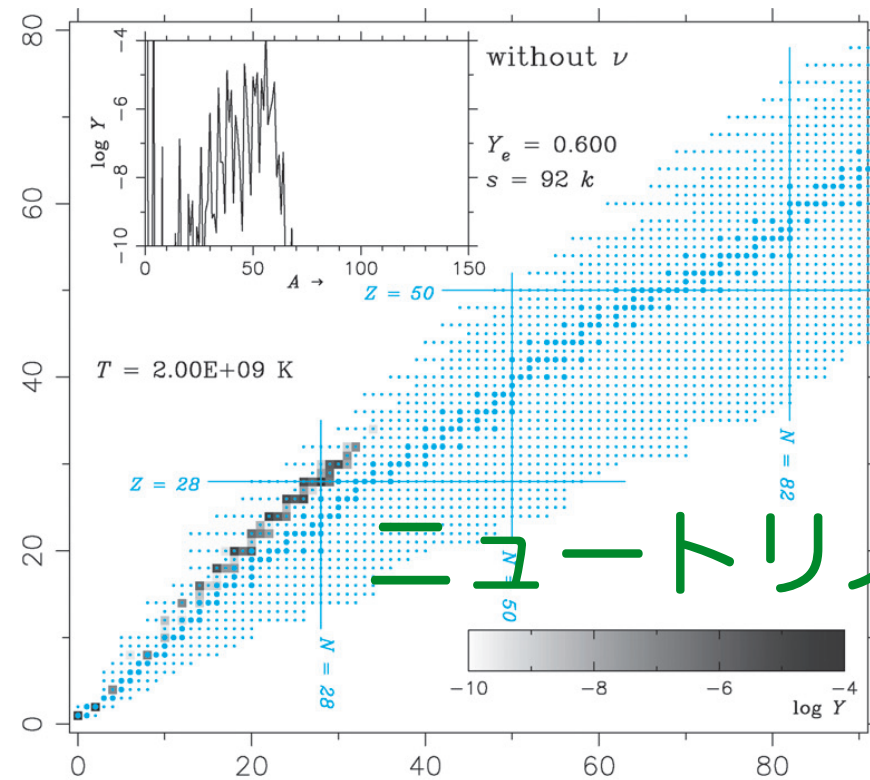


neutron source

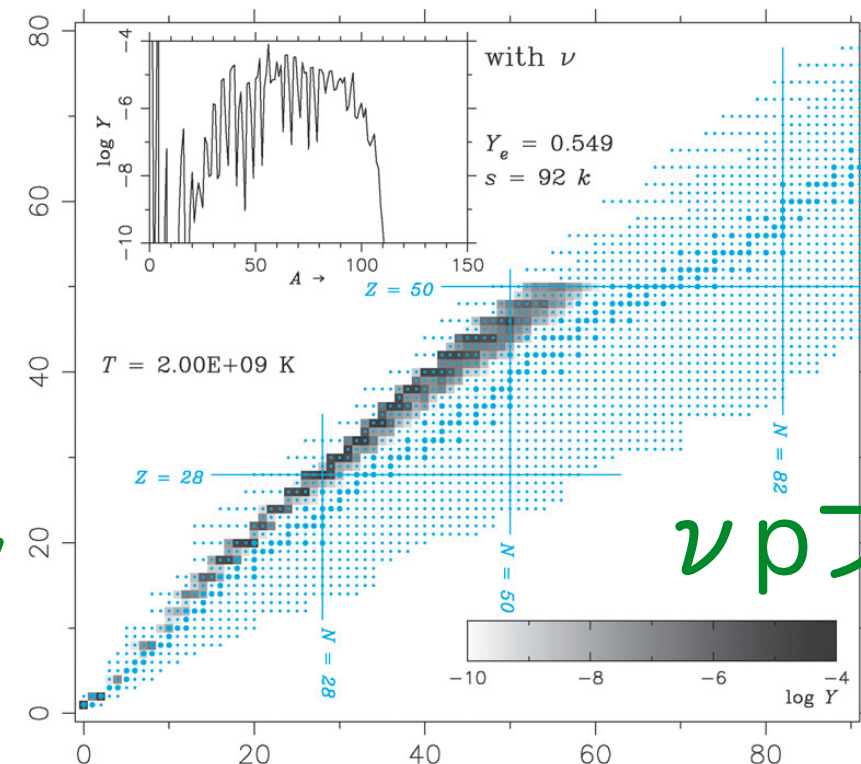


“ ν p-process” (neutrino induced rp-process)

Wanajo 2006 (ニュートリノ駆動風)

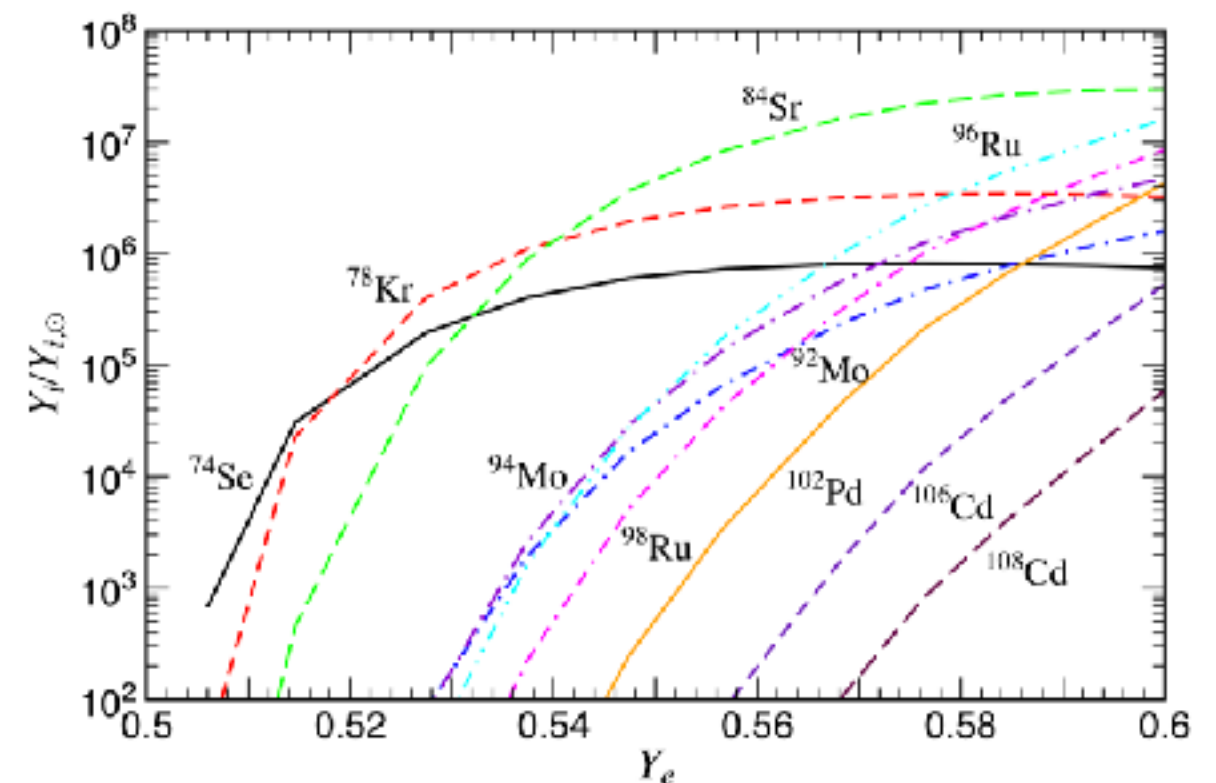
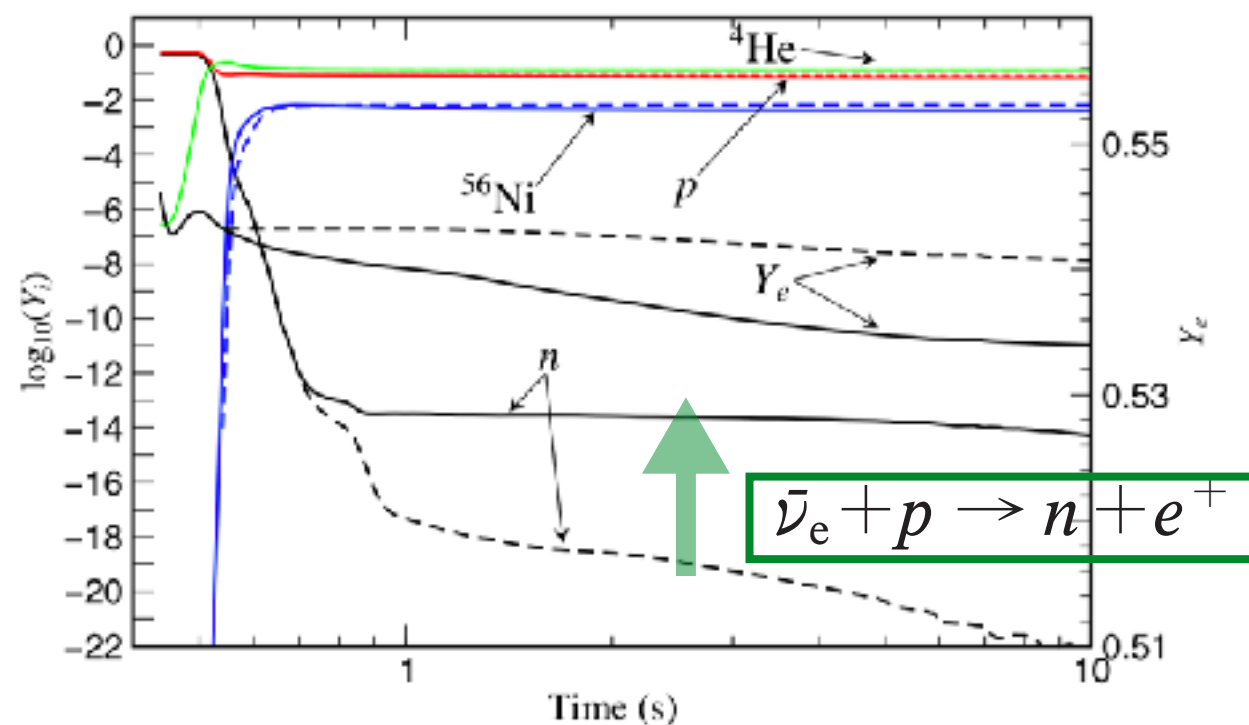


ニュートリノなし



ν pプロセス

Fröhlich et al. PRL 2006 (超新星のp-rich ejecta)



“ ν プロセス”元素合成

梅田 & 吉田によるレビュー@第一回研究会

Neutrino元素合成 (ν -Process)

超新星ニュートリノ

→ 原始中性子星から $N_\nu \sim 10^{58}$

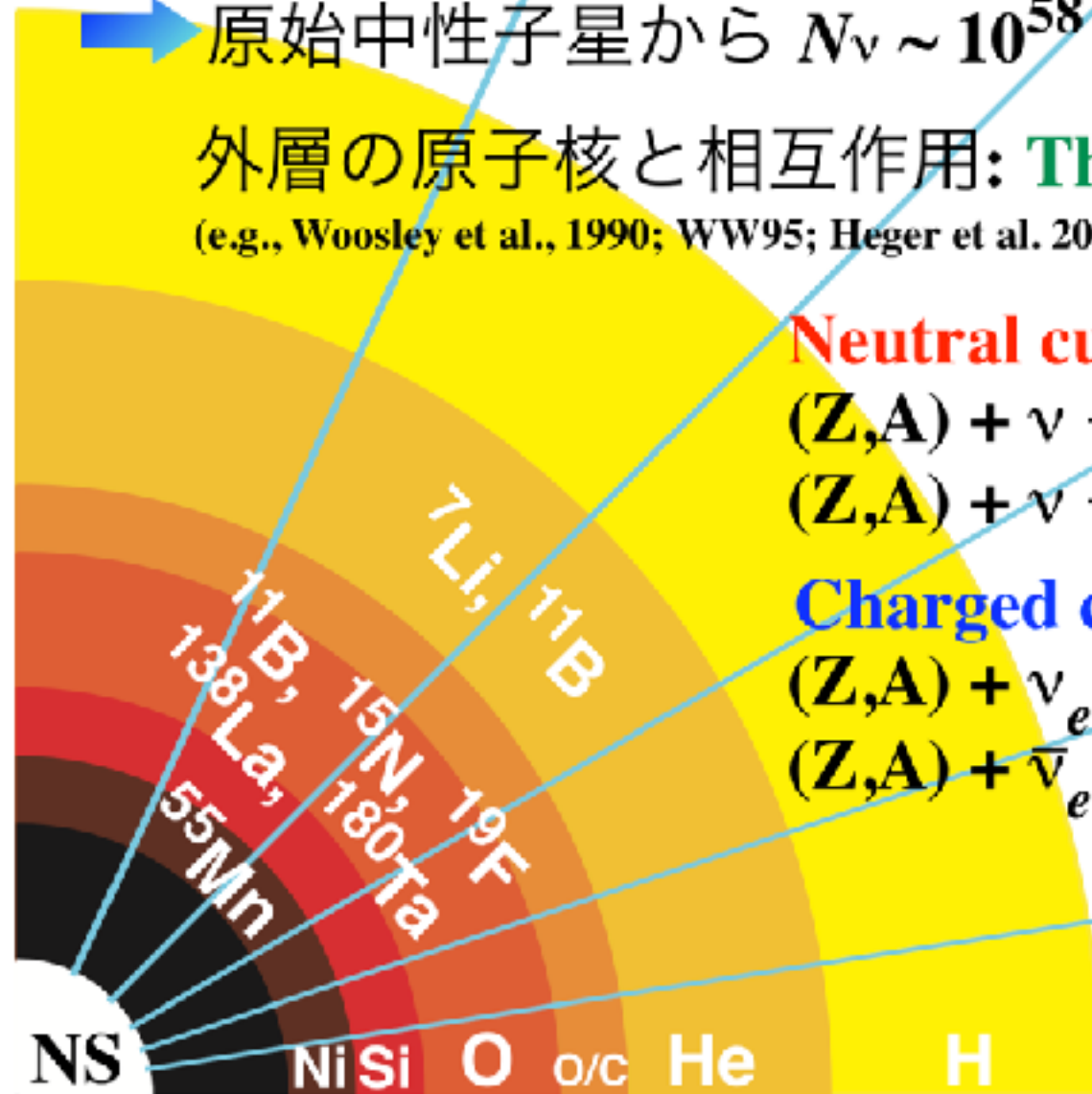
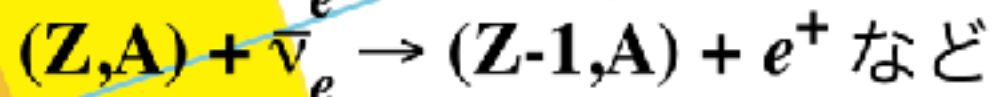
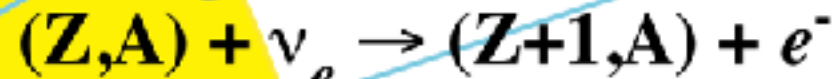
外層の原子核と相互作用: **The ν -process**

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

Neutral current反応



Charged current反応



超新星ニュートリノが外層の元素（星の進化や爆発時に生成）当たり、
近傍の元素を作る → 他のプロセスではできない希少な核

ν pプロセスとは

- ・一部の鉄族元素や「軽いp核」の起源
- ・超新星コアのニュートリノが関与
→ 爆発メカニズムへの「制限」

よく確立は
されていない
天体モデルの不定性
の方が大きい??

・天文学

- ・天体サイトが未解明・超新星のコア付近の進化に直結

・隕石

- ・天然同位体比の解明（太陽系、太陽系外）

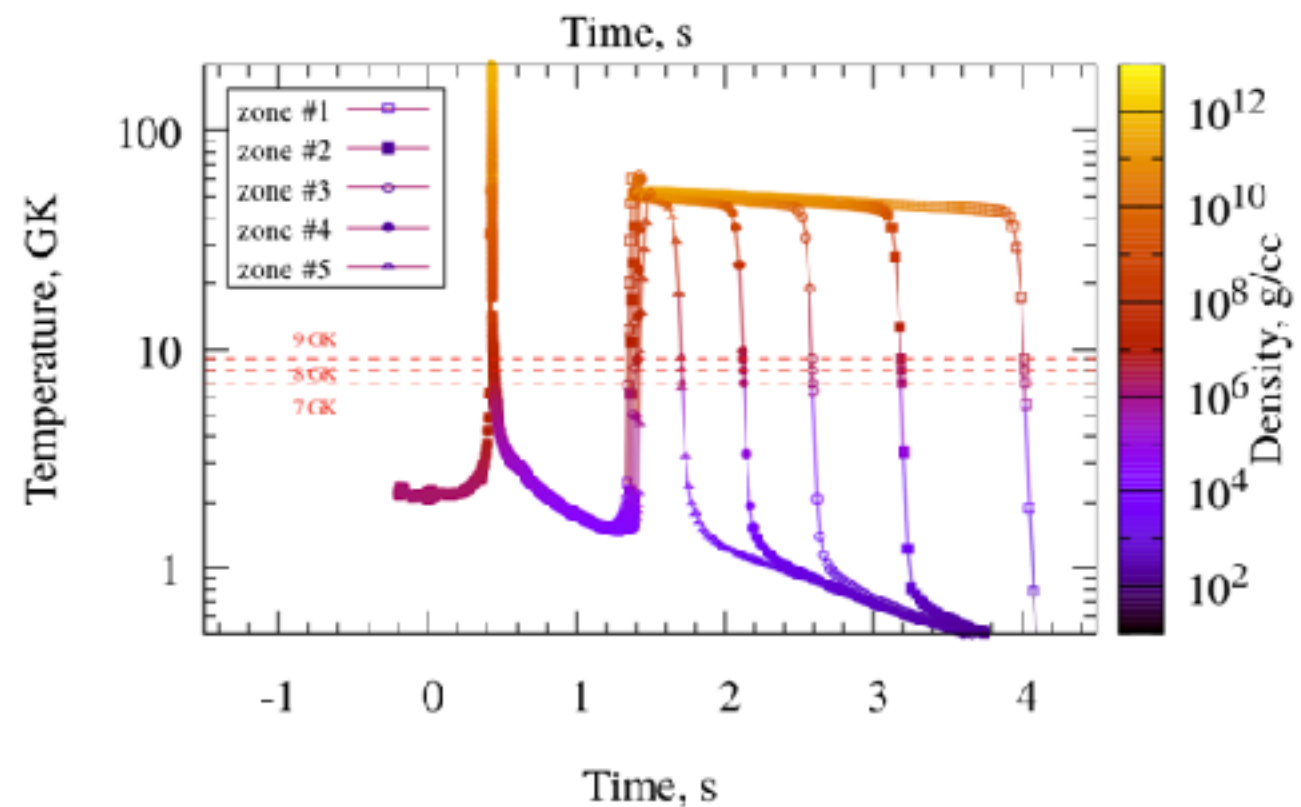
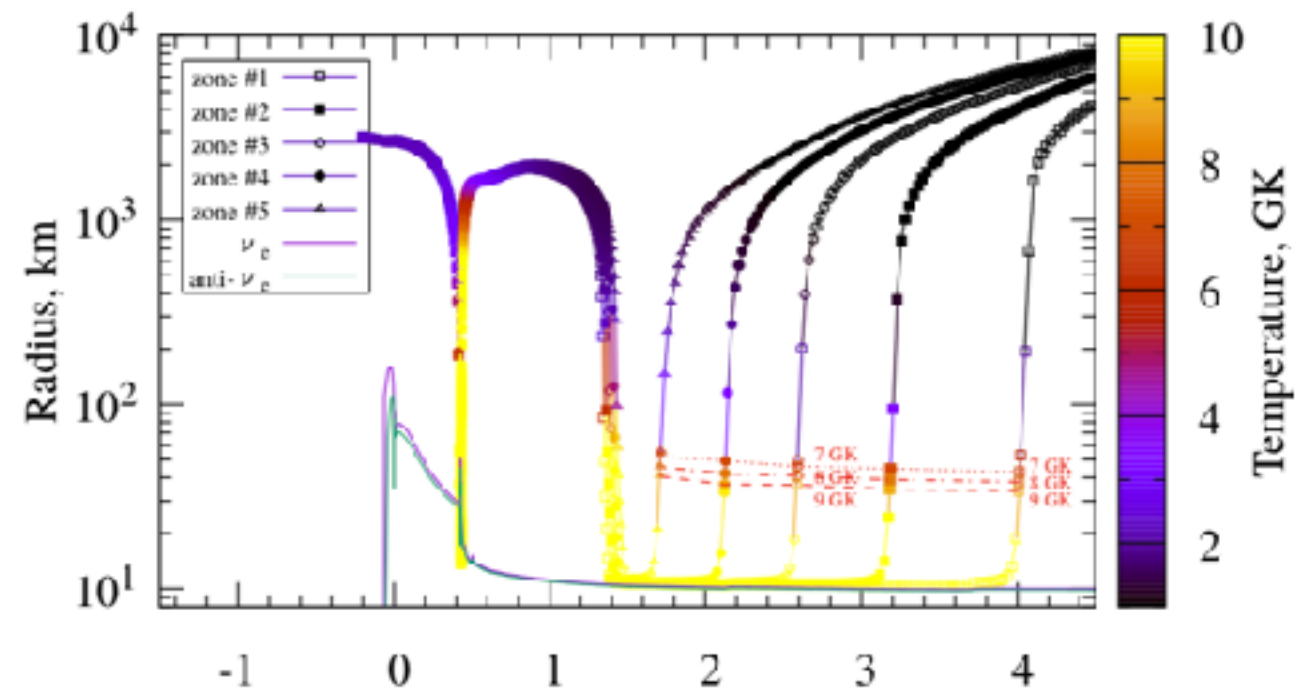
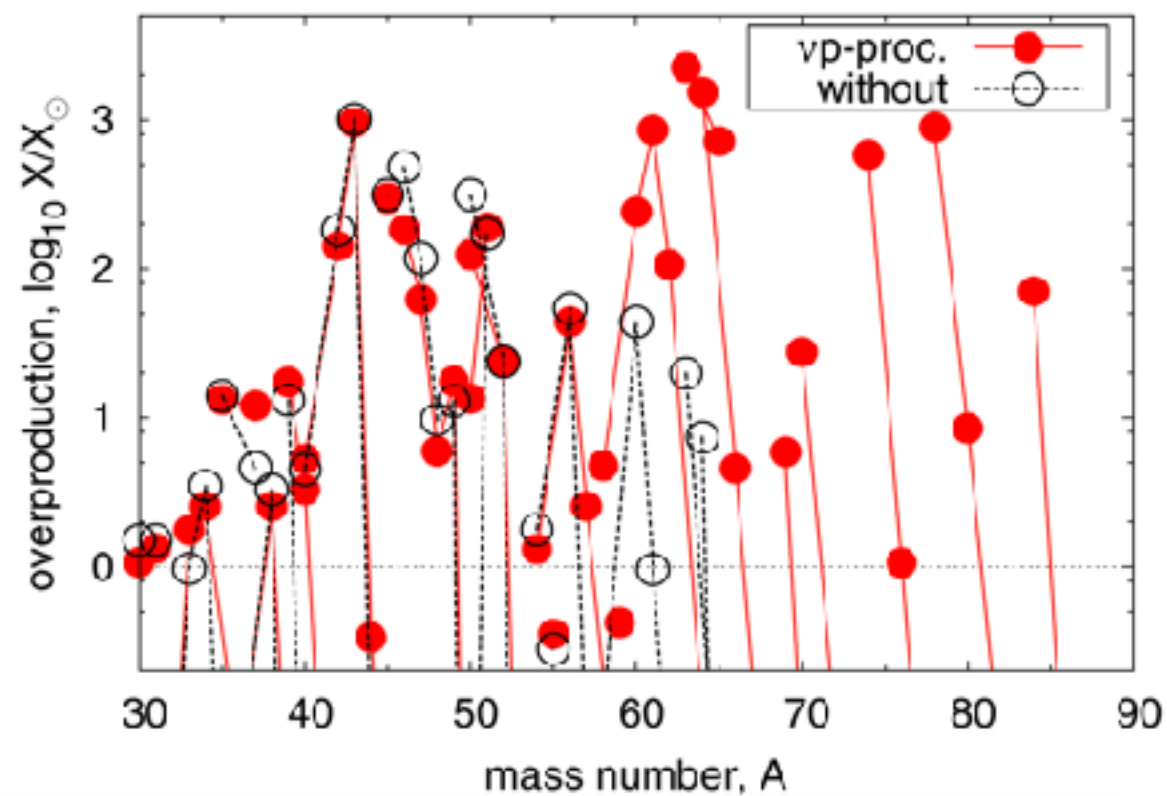
・原子核物理

- ・鉄より重い陽子過剰核（実験的に得られる）の核反応
 - ・質量等原子核の基本量→実験による検証
 - ・不安定核の反応率理論（モデル）の検証

核反応の不定性の νp プロセスへの影響

天体モデル

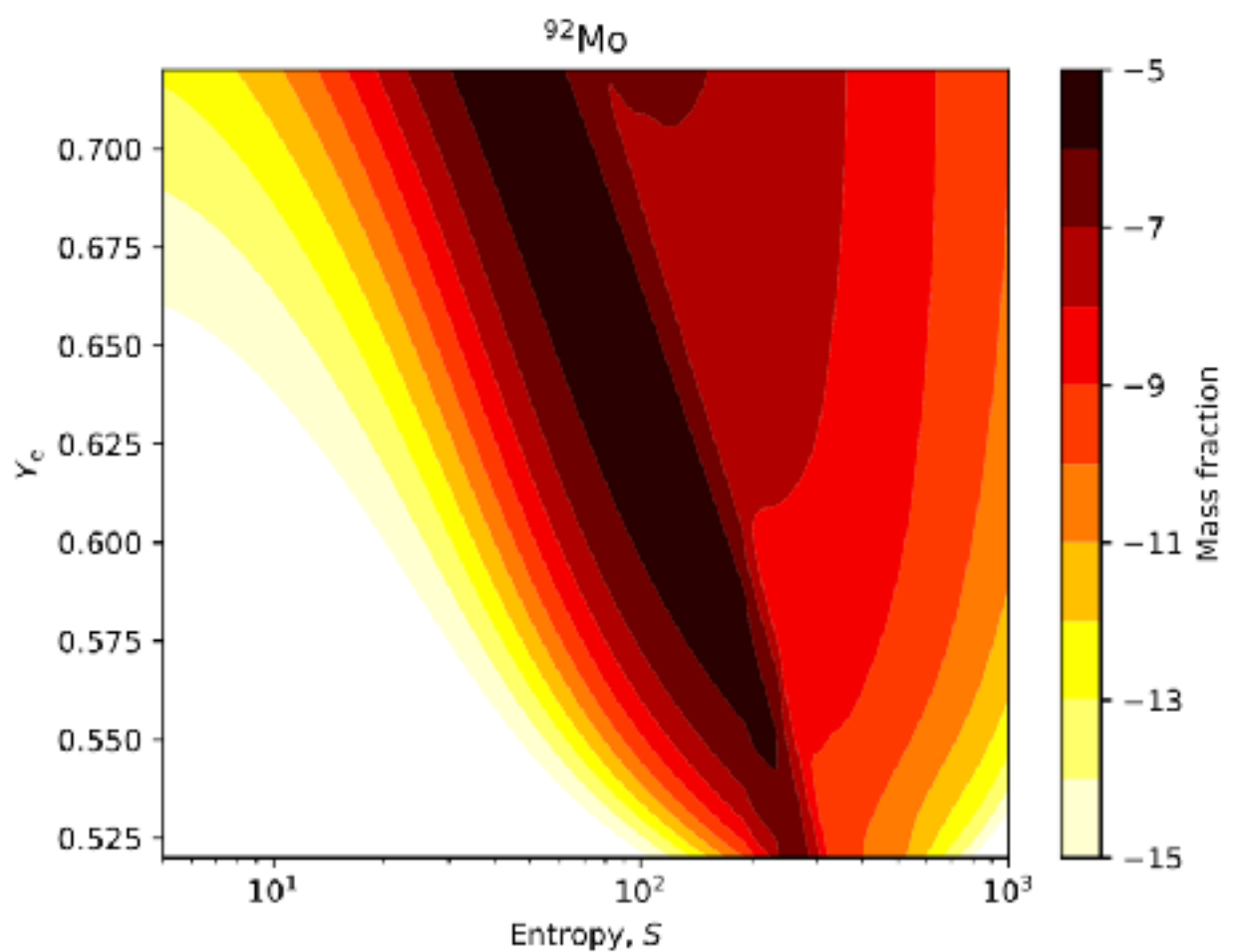
NN+2012をベースに
YeとSを手で与える
(超新星爆発シミュレーション
はT.Fischerによる)



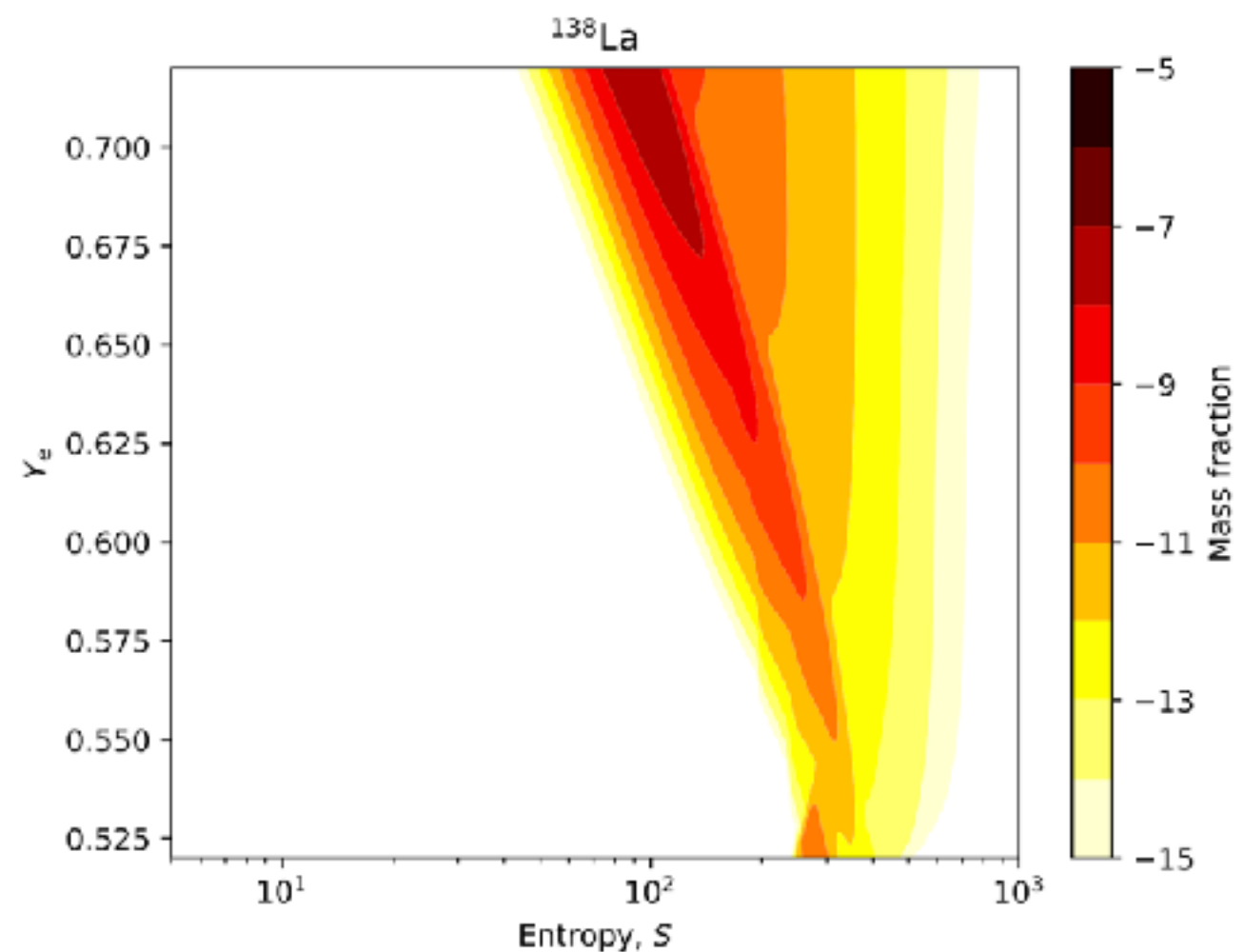
天体モデル

Ye-Sの組み合わせ (61x201)

軽いp核



中間のp核



天体モデル

ν pプロセスの強度

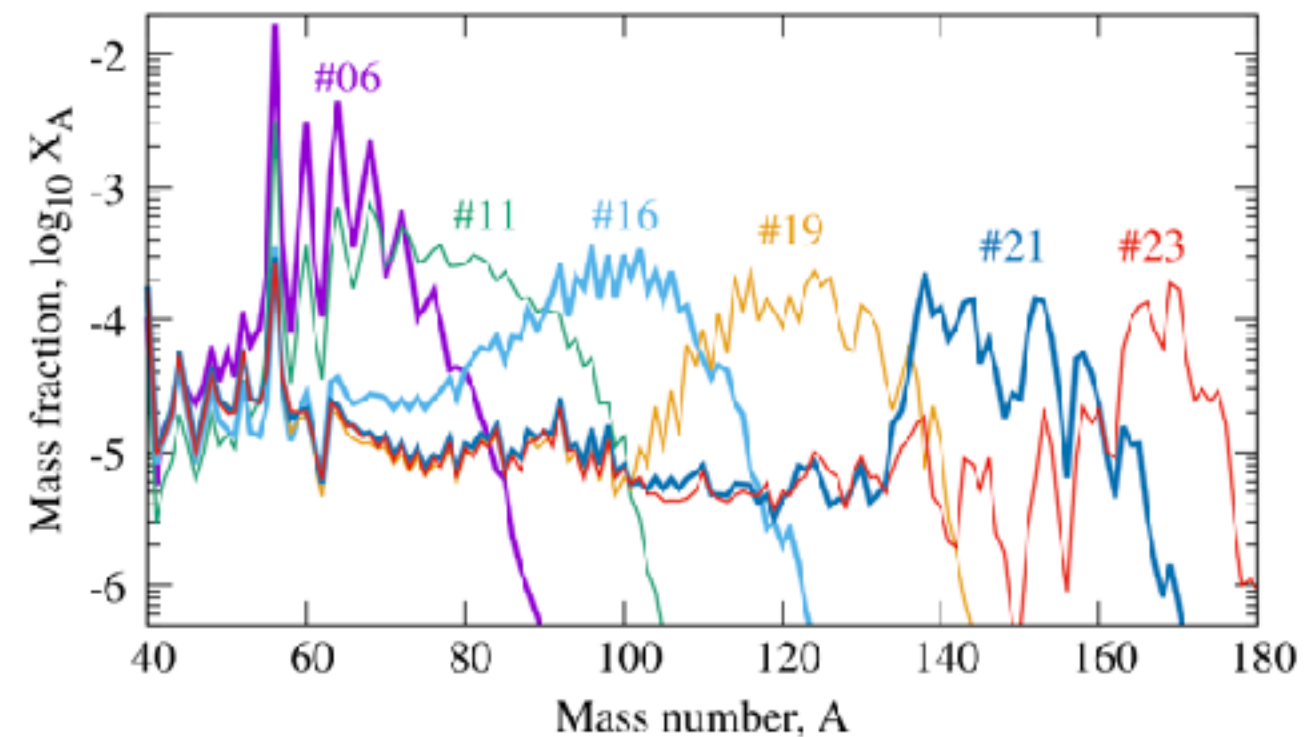
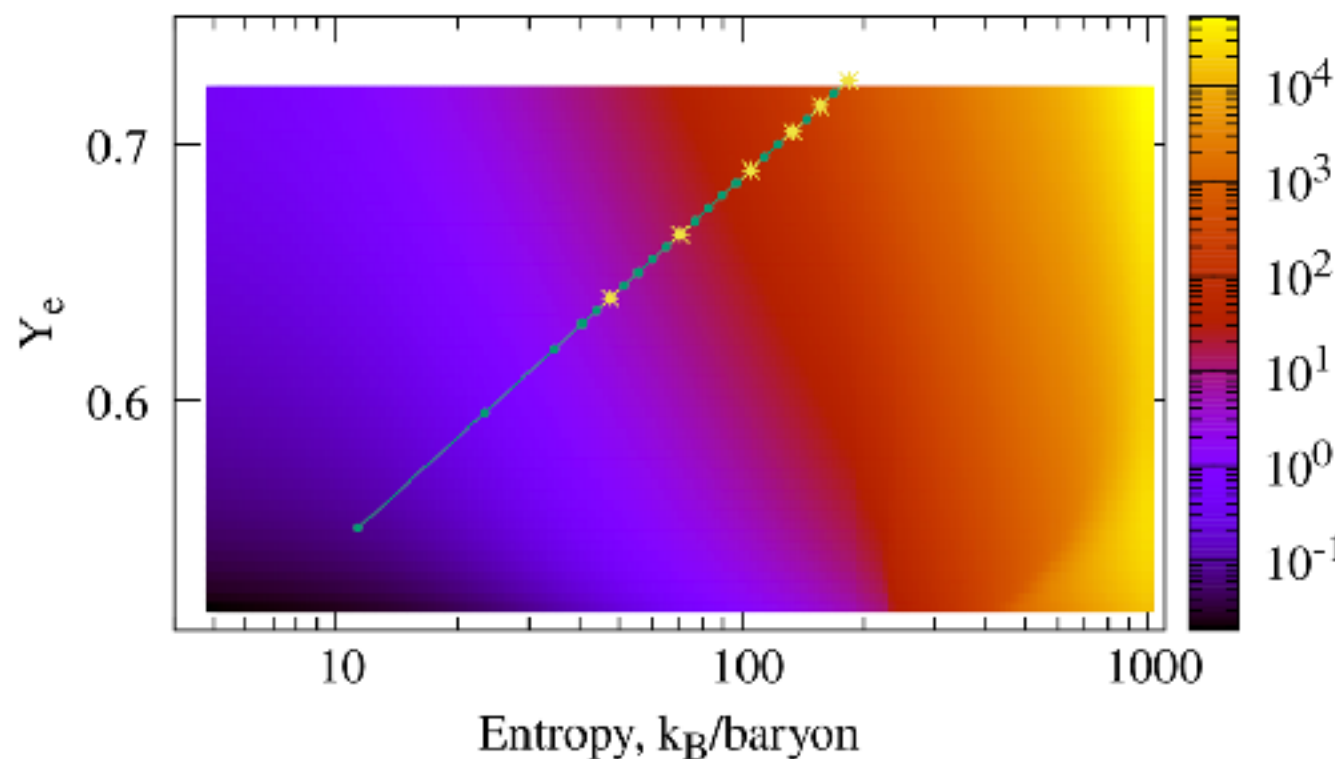
$$\Delta_n \equiv \frac{Y_p}{Y_h} n_{\bar{\nu}_e} = \frac{Y_p}{Y_h} \int_{T_9 \leq 3} \lambda_{\bar{\nu}_e} dt$$

Y_p : 陽子数比

Y_h : 重元素数比

$n_{\bar{\nu}_e}$: 中性子生成数比

(ニュートリノ吸収)



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

モンテカルロ元素合成：ストラテジー



天体環境

・天体モデル

- ・星の進化、超新星爆発のモデルなど
- ・多次元流体力学計算など

核反応ネットワーク

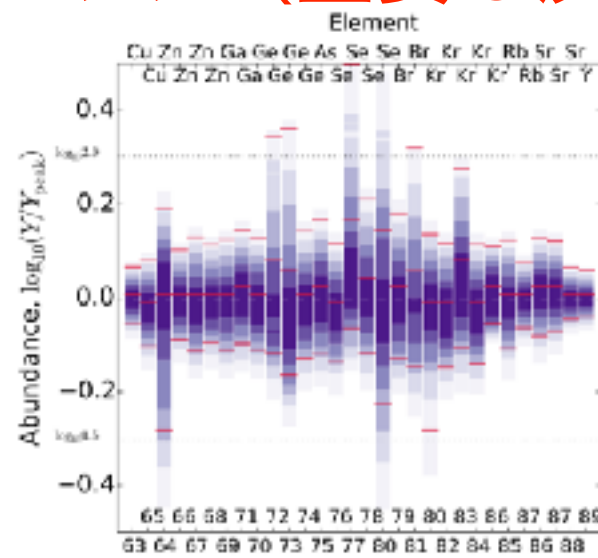
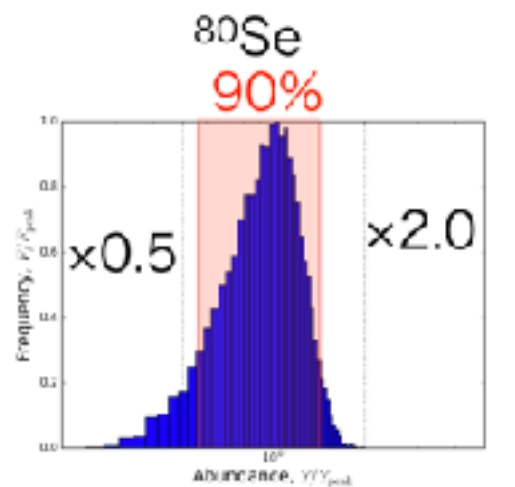
・元素合成

- ・重元素の核反応
- ・ベータ崩壊など

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）



モンテカルロ元素合成コード

・コード概要

- ・ PizBuin MC-drive
(by Rauscher, NN etc)
- ・ a simple “Brute-force” approach
- ・ **parallelized by OpenMP** for shared memory architectures
(was used in Cosmos @Cambridge)

・核反応ネットワーク

- ・ **Network solver:**
 - WinNet: the latest Basel network, Winteler+, 2012
- ・ **Reaction rates:**
 - Reaclib: (Rauscher & Thielemann 2000)
 - **T-dependent beta-decay** (Takahashi & Yokoi 1987, Goriely 1999)
- ・ **T-dependent uncertainty:**
 - Provided by Reaclib format, based on Rauscher 2012



Piz Buin (mountain)

Large-scale MC calculations

for shared memory systems

- Fortran + **OpenMP**
- parallelized well
- optimized code/matrix library for large shared memory computers (multi threads)
- Computer resources

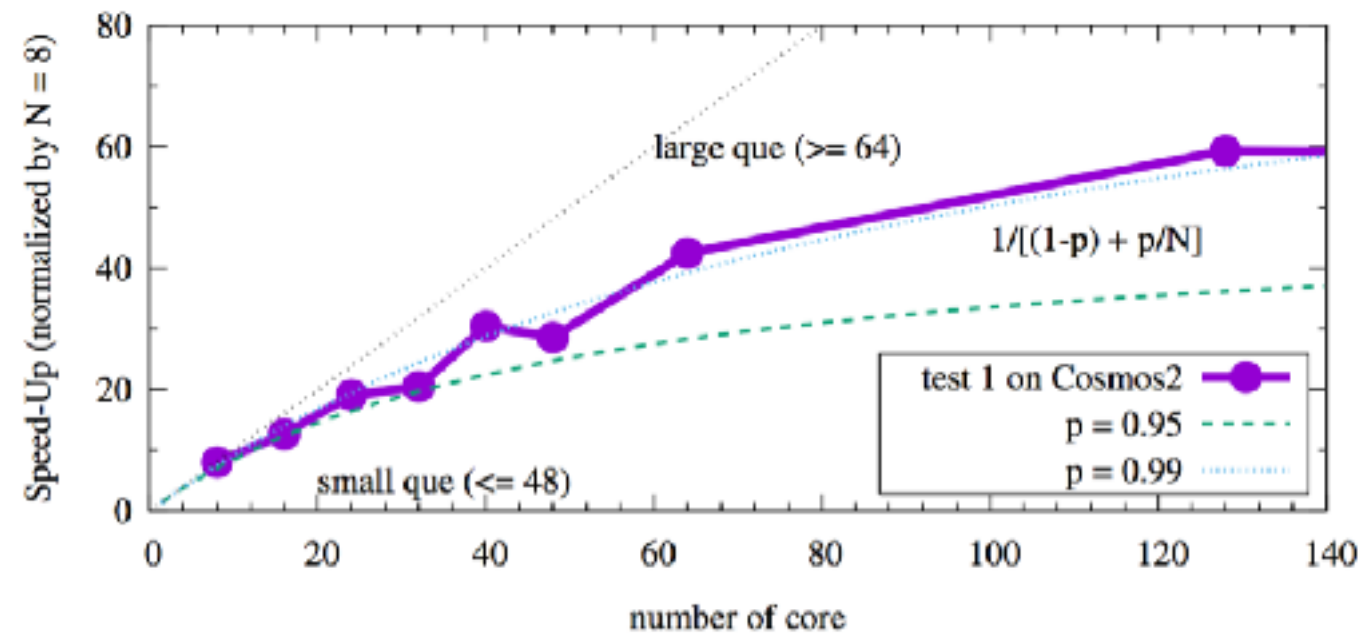
numascale



Shyne cluster
@Keele (ERC)

DiRAC

performance tests of matrix solvers
on shared memory system



Cosmos2 @Cambridge
(UK DiRAC facility, STFC)



νp プロセスにおける反応率の不定性

Reaction	$U_{\text{th}}^{\text{hi}}$	$U_{\text{th}}^{\text{lo}}$
(n, γ)	2.0	2.0
(p, γ)	2.0	3.0
(p,n)	2.0	3.0
(α , γ)	2.0	10.0
(α ,n)	2.0	10.0
(α ,p)	2.0	10.0

$U_{\text{th}}^{\text{hi}}$: upper limit

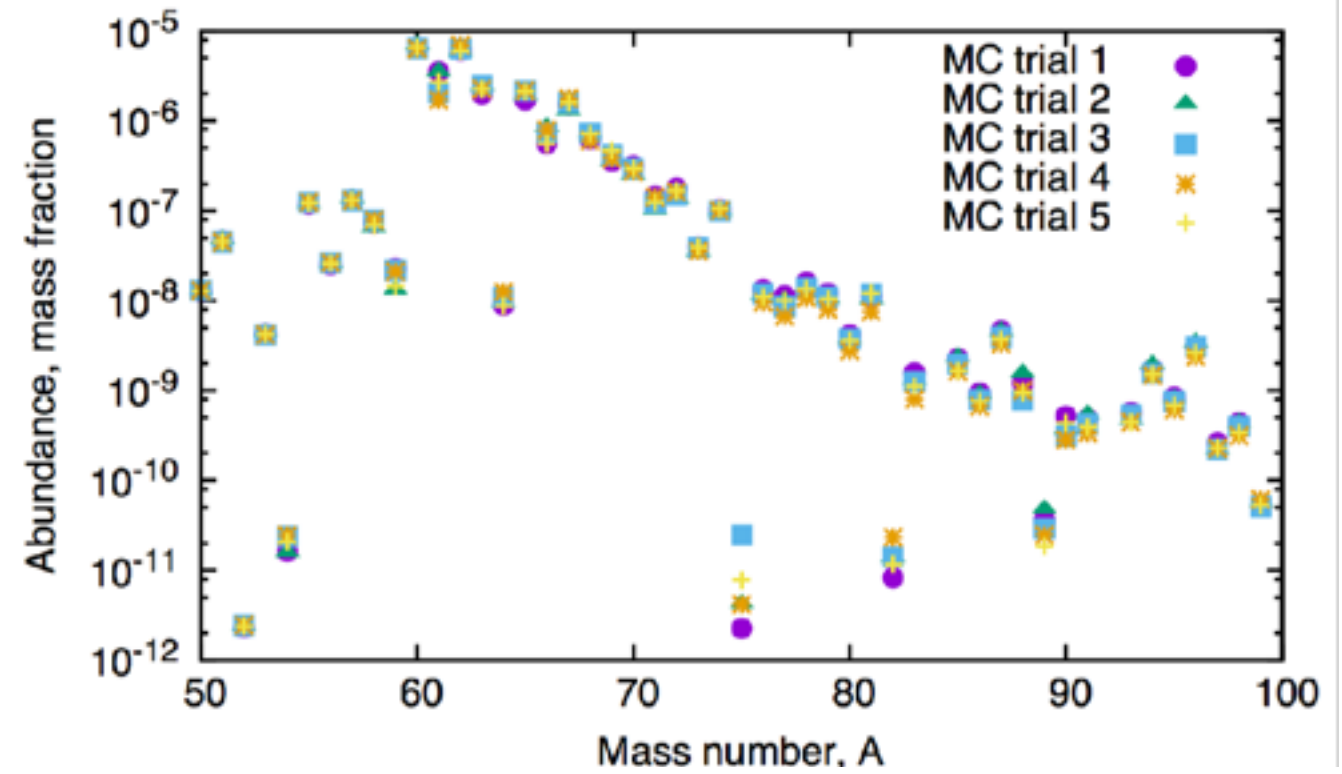
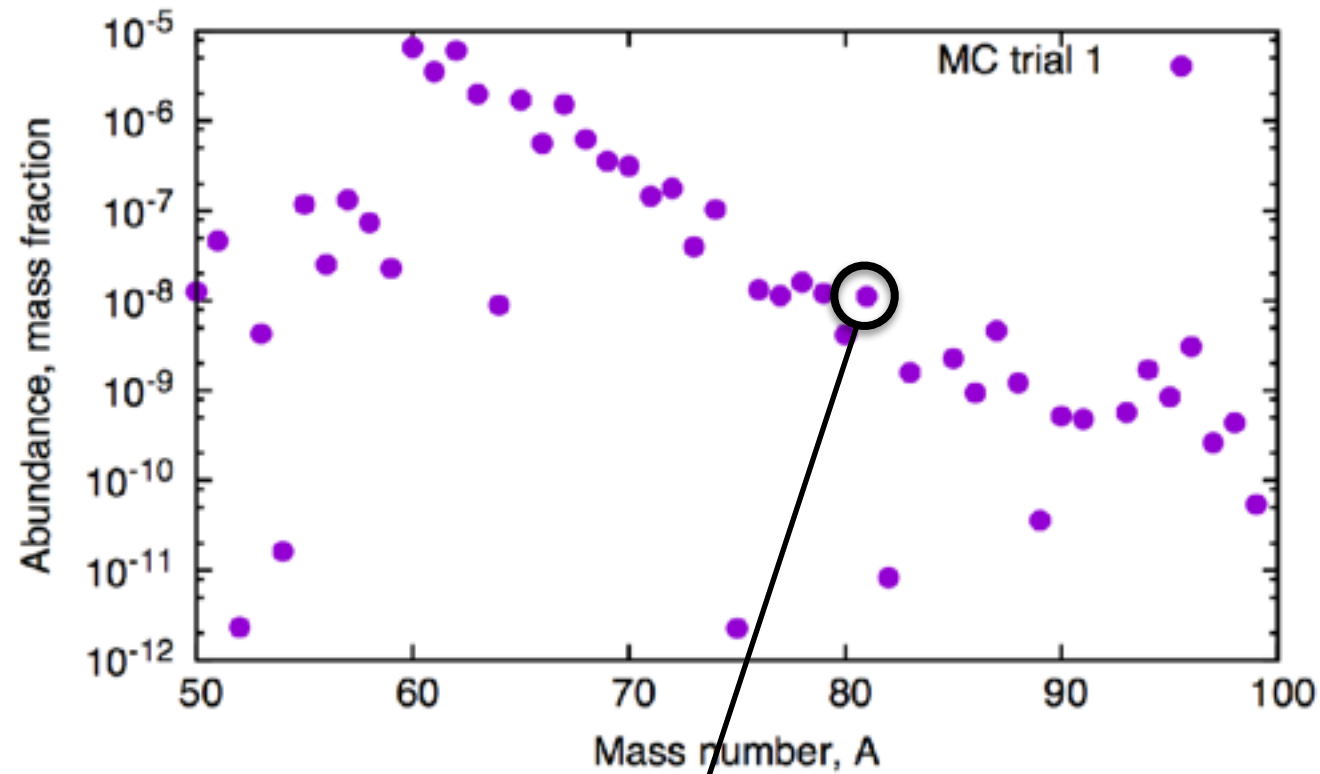
$U_{\text{th}}^{\text{lo}}$: lower limit

- ・ 反応の種類ごとに上限と下限を決める
- ・ 1回の試行（元素合成計算）ごとに異なる反応率のセットを用いる
- ・ 全ての反応率をバラバラに変化させる

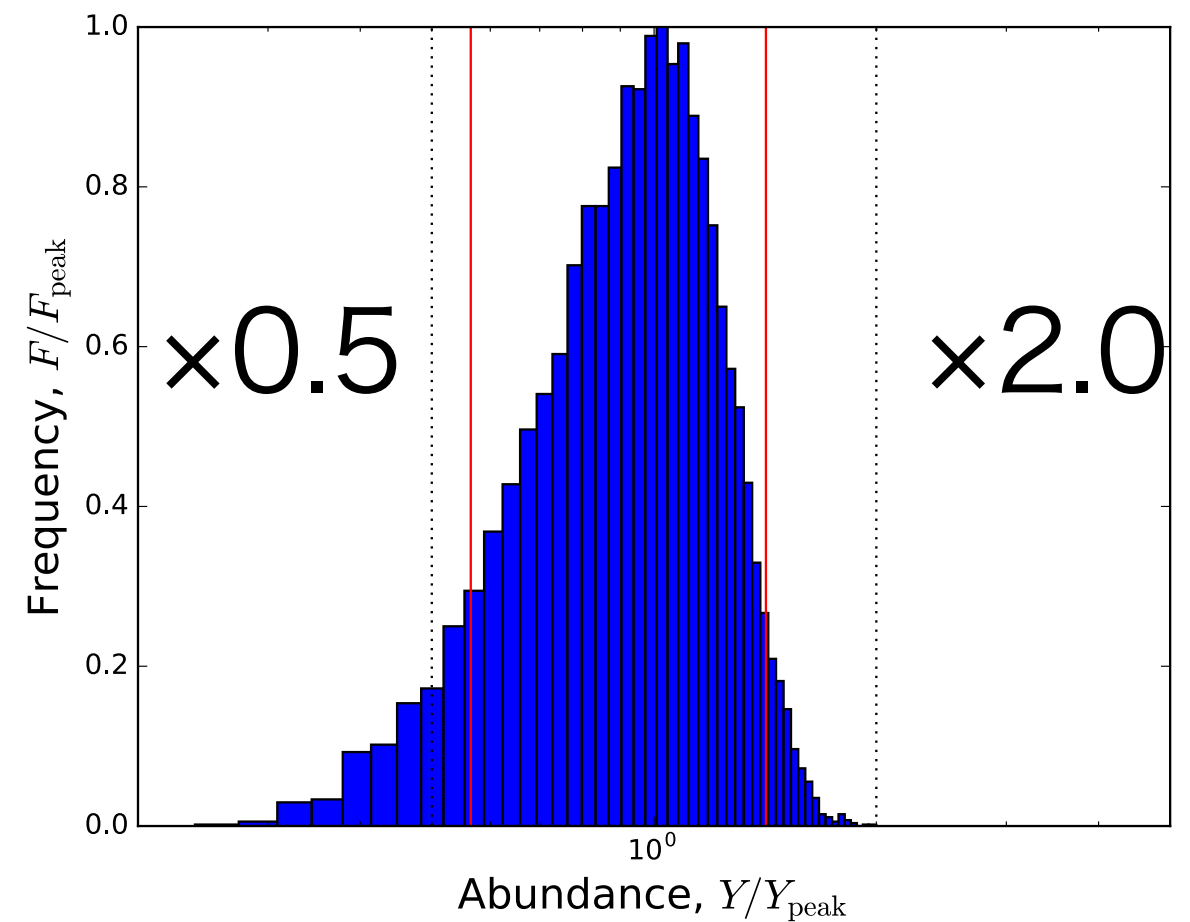
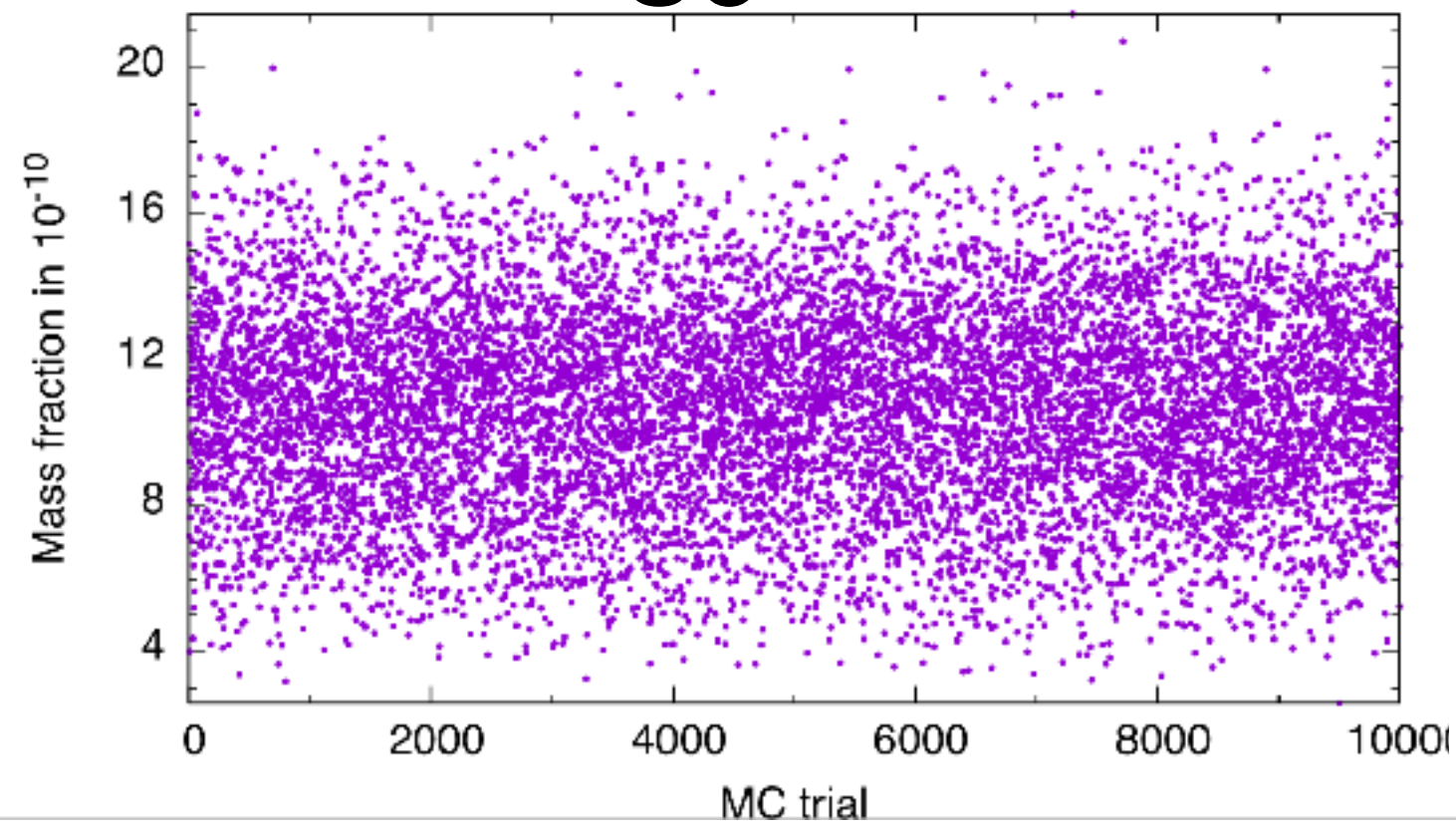
※実験ベースの反応率は、多少凝った取り扱いをする（sプロセスの場合：NN+2017）が、今回は関係なし

モンテカルロ元素合成計算

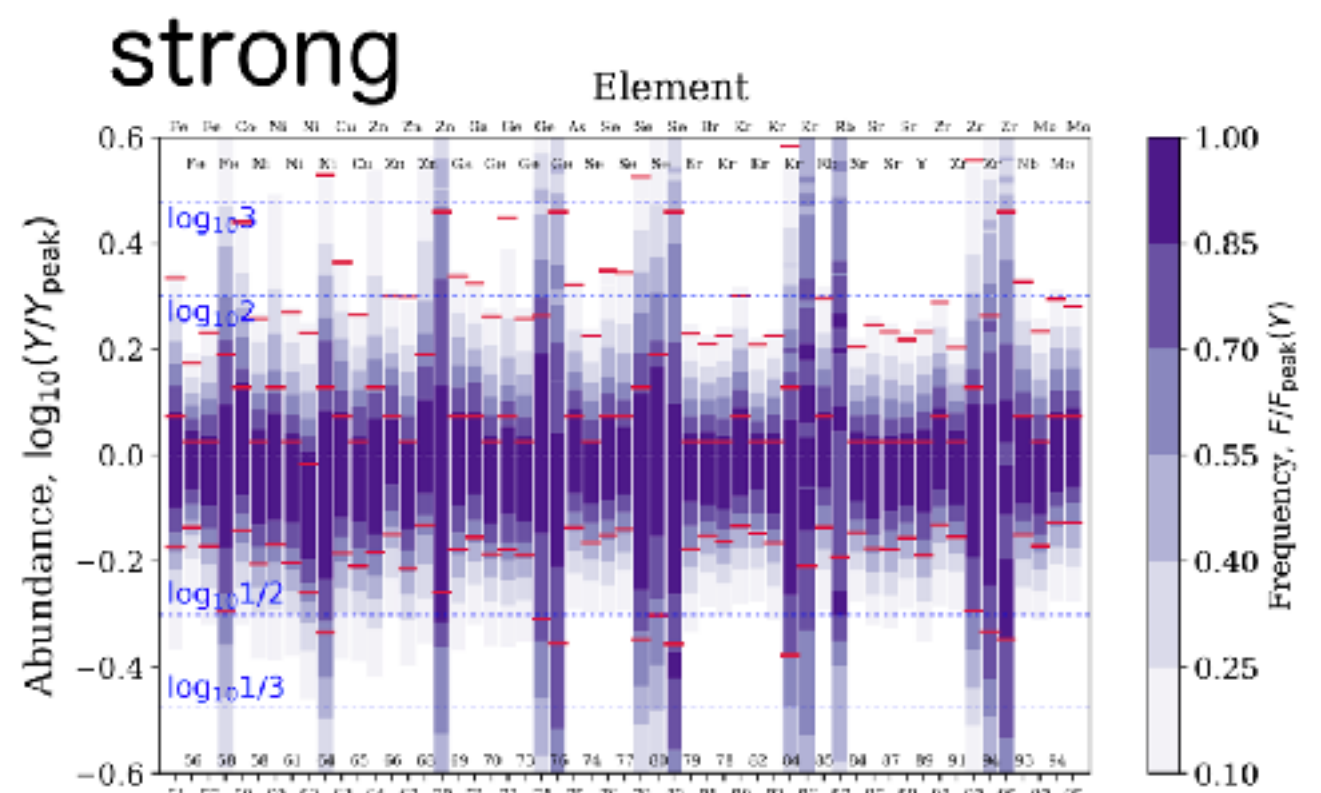
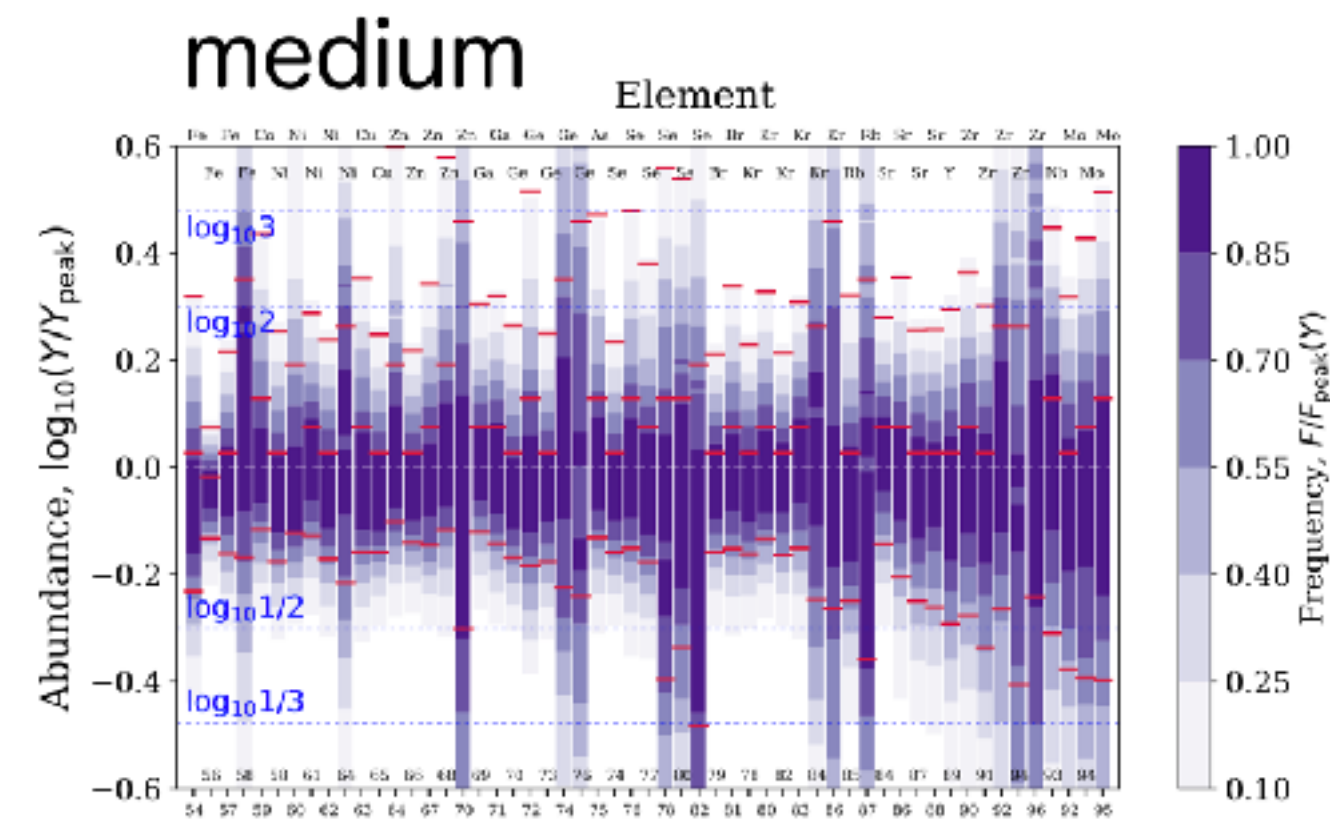
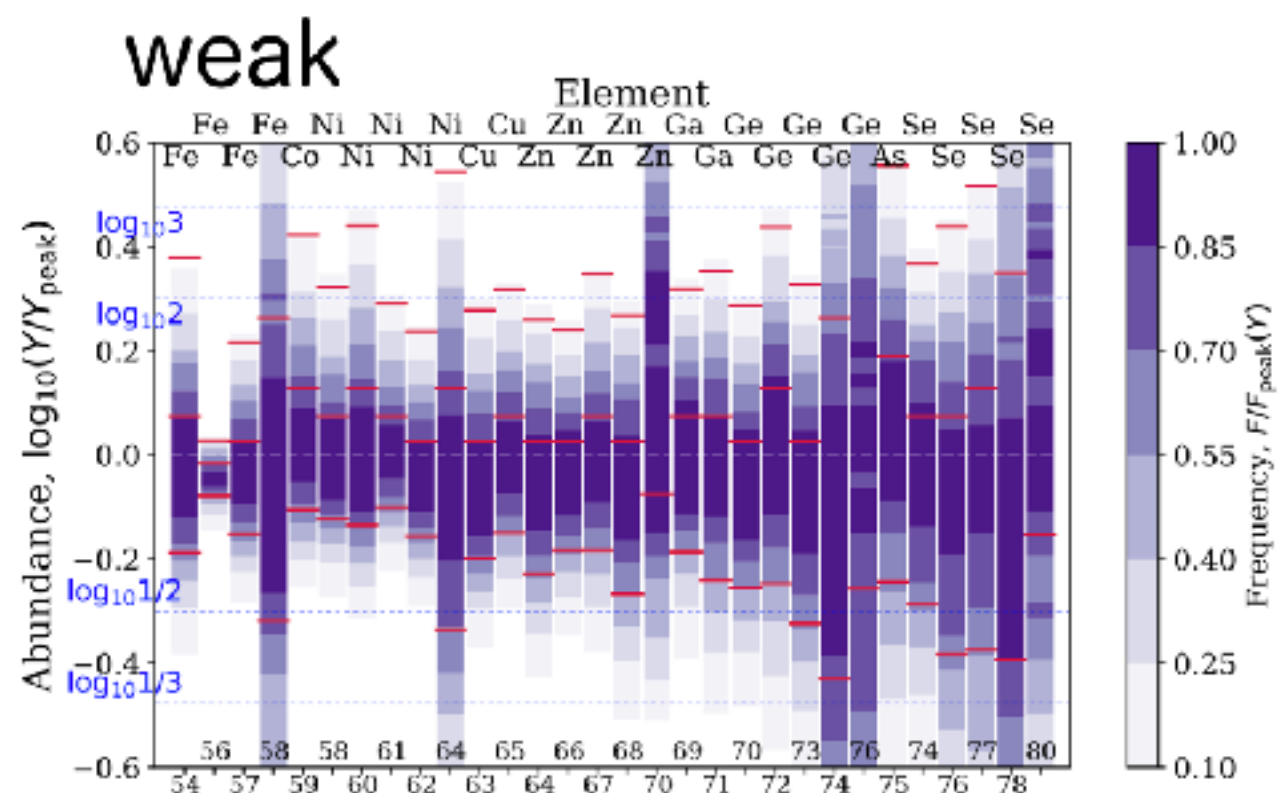
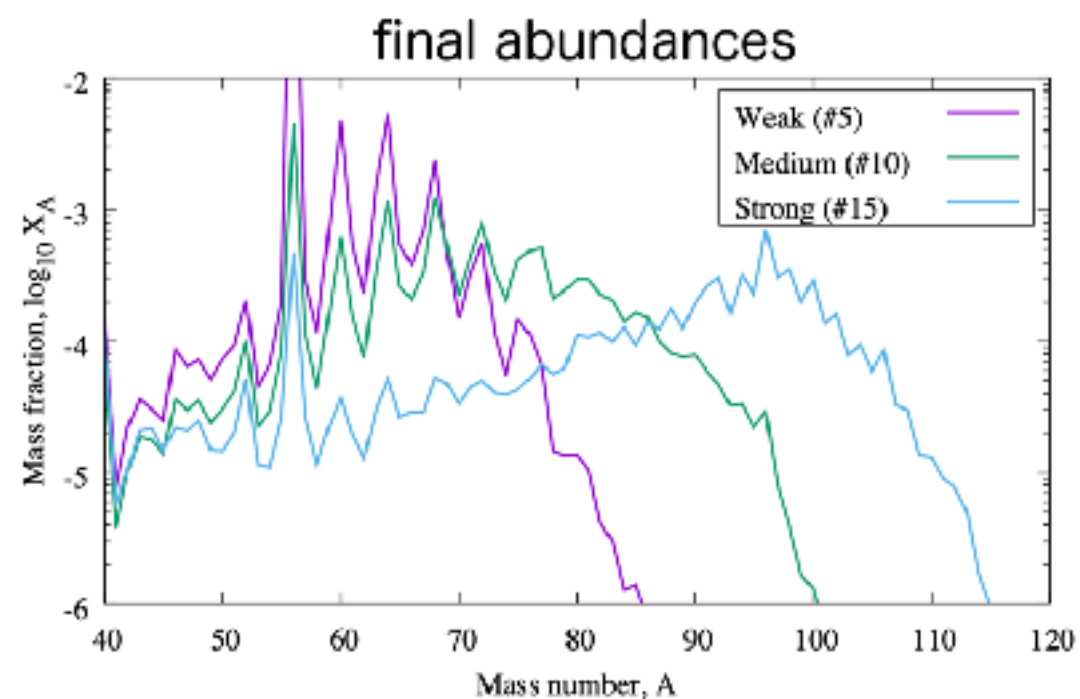
※例はsプロセス



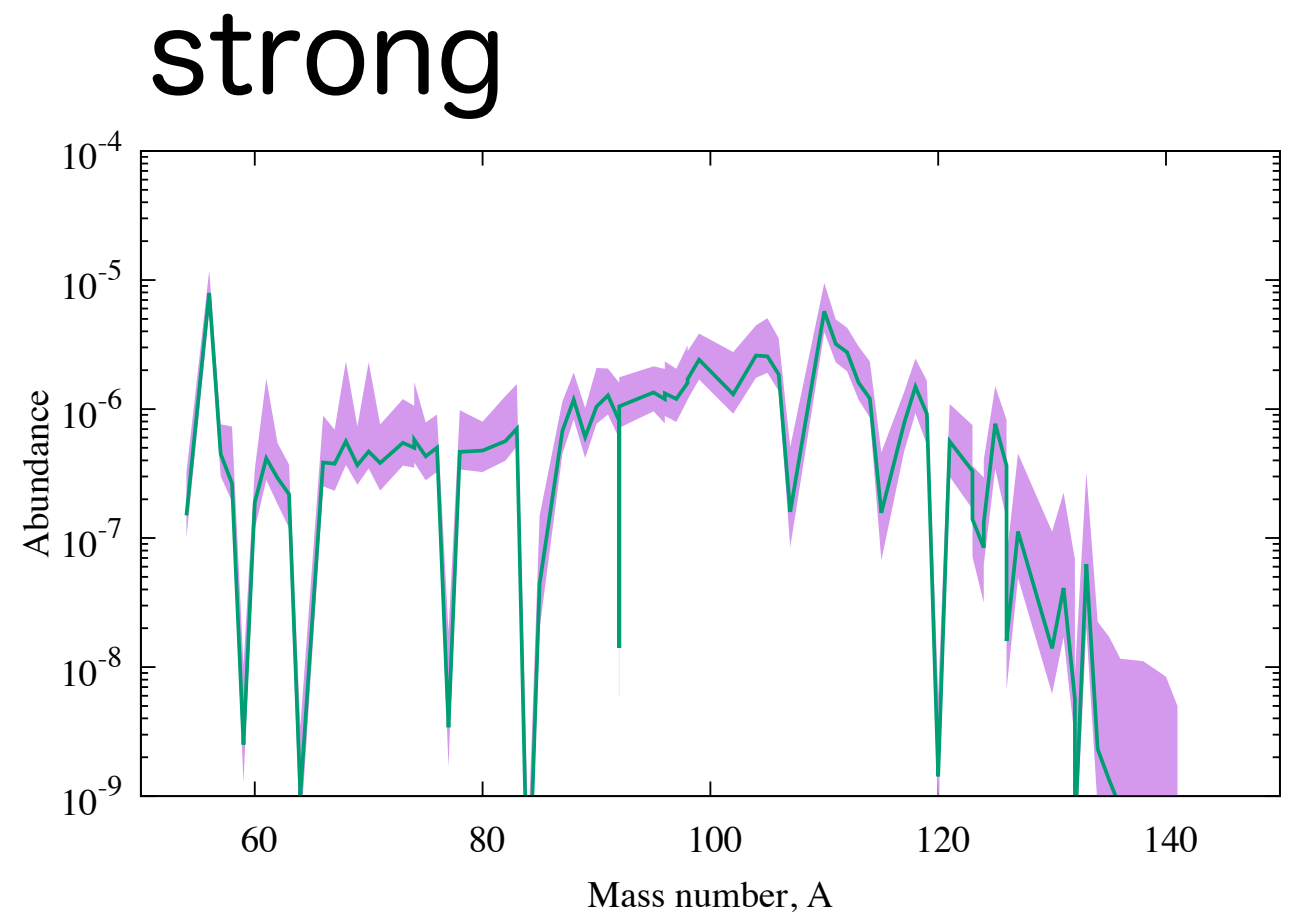
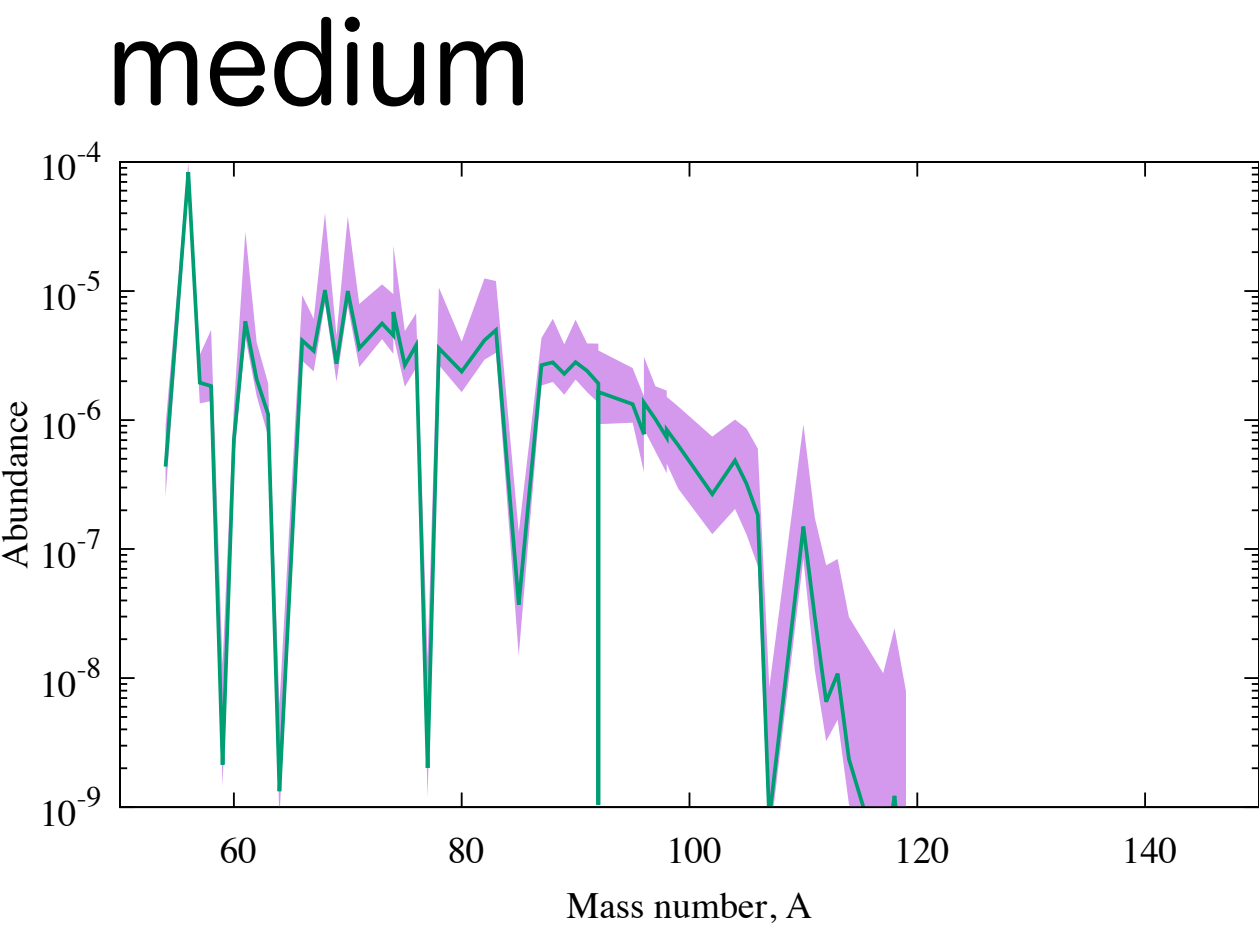
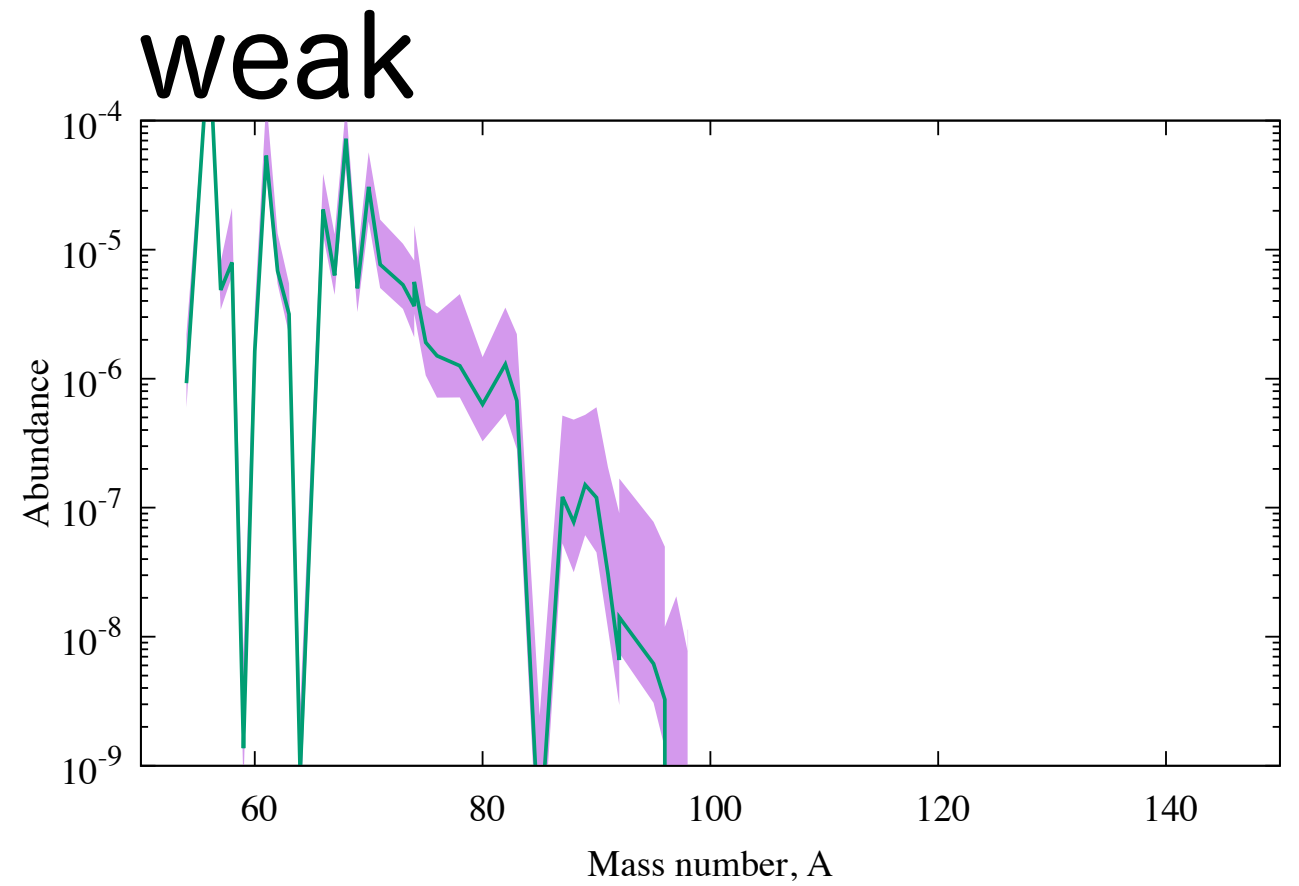
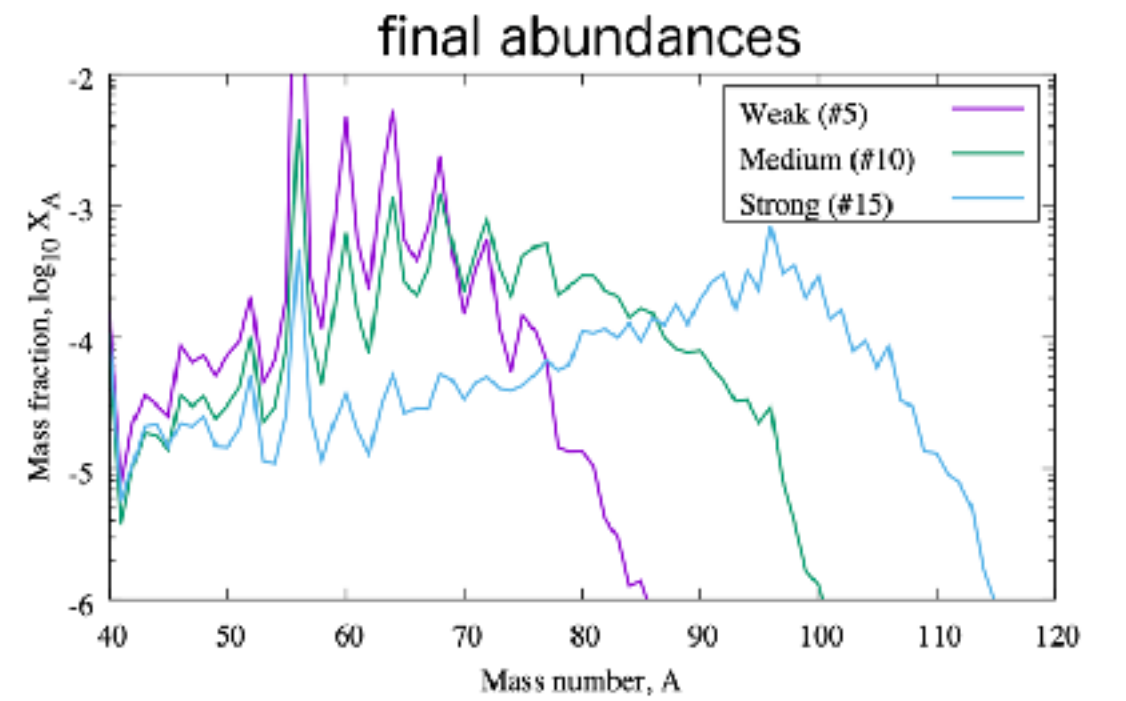
^{80}Se



ν pプロセスでの結果



ν pプロセスでの結果



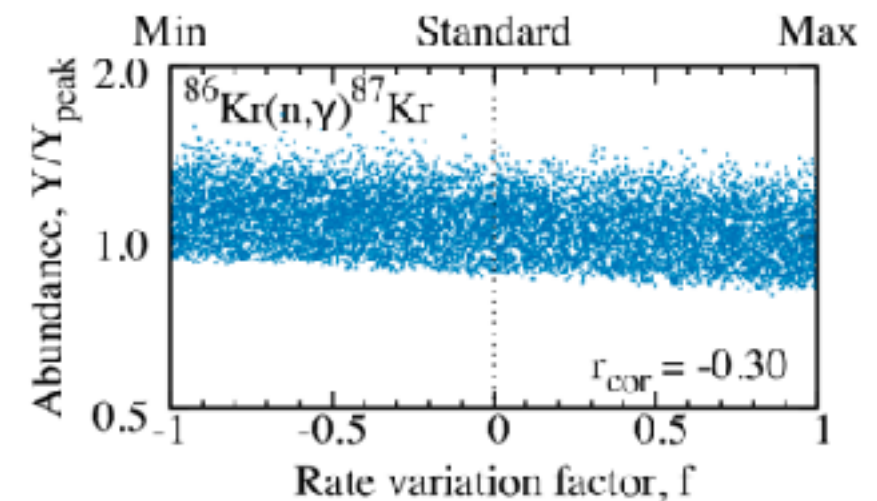
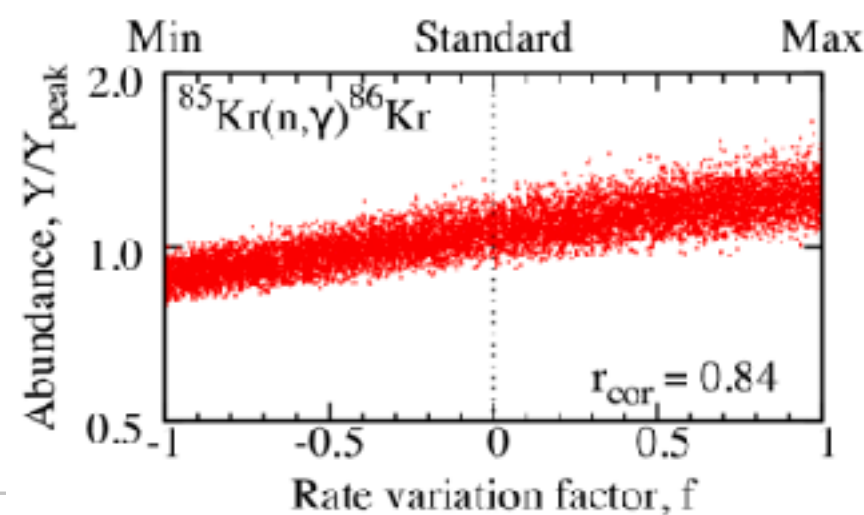
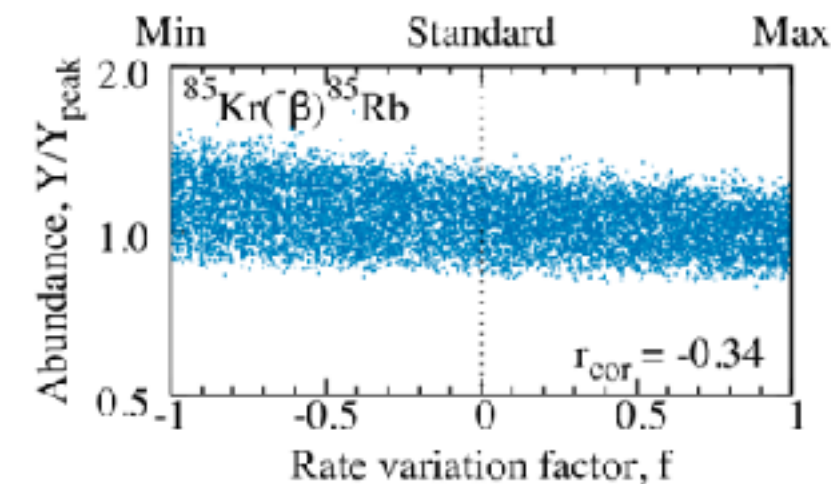
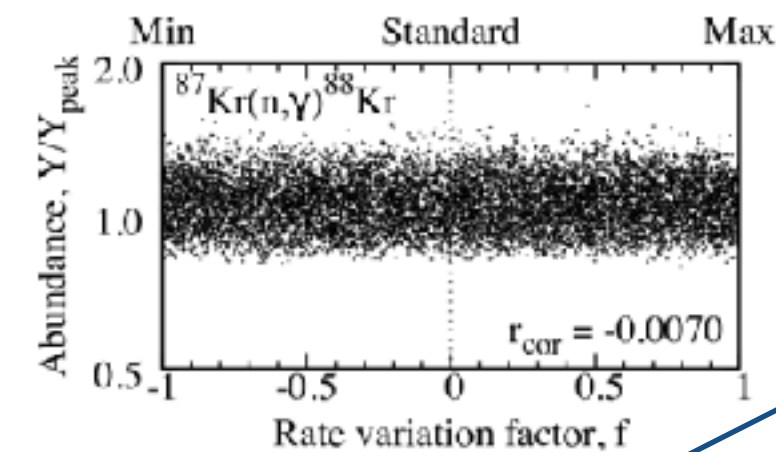
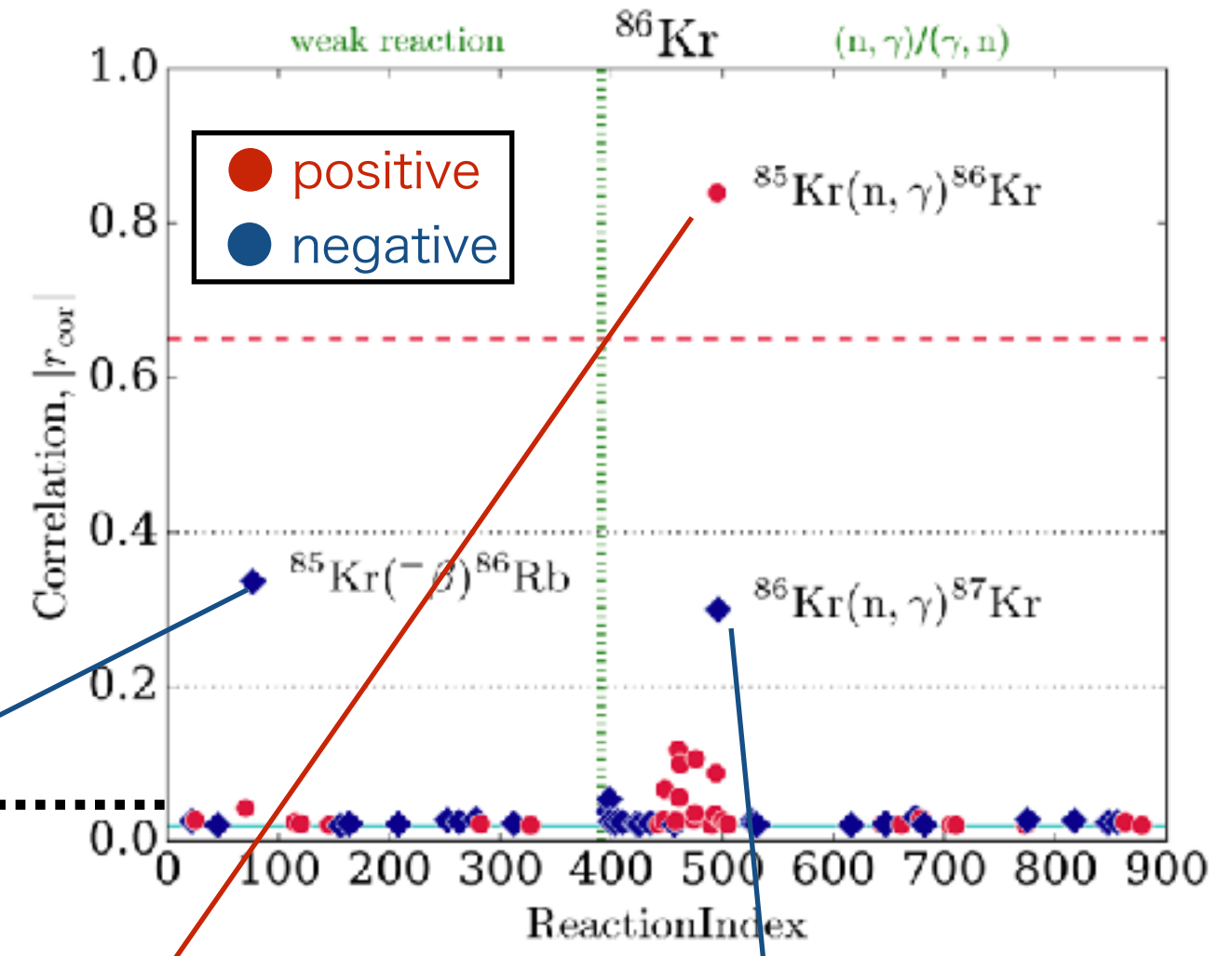
相関係数による選別

※例はsプロセス

Pearson's coefficient

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

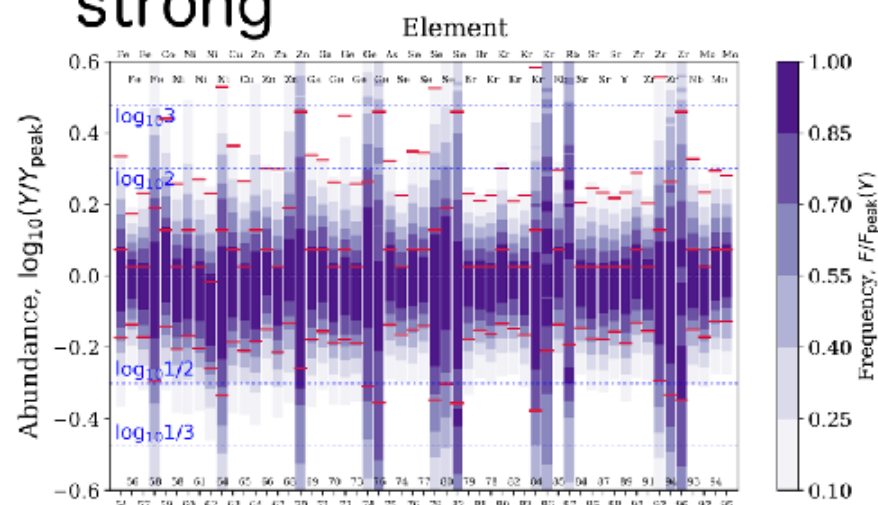
$|r| > 0.65 \rightarrow$ “strong”



重要な反応の探索

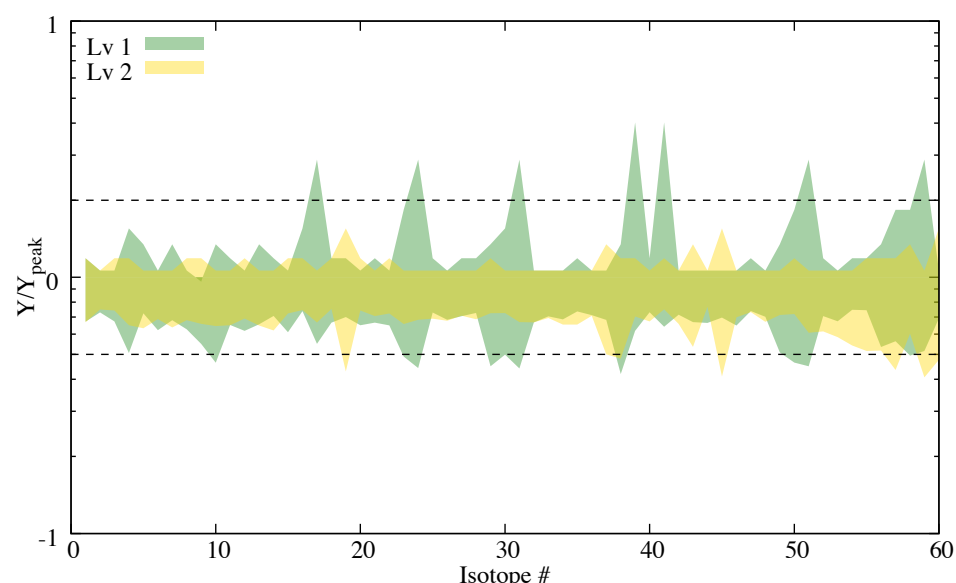
strong (Lv1)

strong



Lv1 → Lv2

$|r| > 0.65$ を除外



Nuclide	Reaction	$r_{\text{cor}}(\text{Weak})$	$r_{\text{cor}}(\text{Medium})$	$r_{\text{cor}}(\text{Strong})$
^{56}Fe	$^{57}\text{Co} + p \leftrightarrow n + ^{57}\text{Ni}$	0.67 (Lv3)		
^{56}Fe	$^{56}\text{Ni} + \alpha \leftrightarrow p + ^{59}\text{Cu}$		0.66 (Lv2)	
^{57}Fe	$^{57}\text{Ni} + p \leftrightarrow \gamma + ^{58}\text{Cu}$	-0.73 (Lv2)	-0.70 (Lv3)	
^{59}Co	$^{59}\text{Zn} + e^+ \leftrightarrow ^{59}\text{Cu}$	-0.90 (Lv3)		
^{59}Co	$^{59}\text{Cu} + p \leftrightarrow \gamma + ^{60}\text{Zn}$	-0.73 (Lv2)	-0.81 (Lv3)	
^{59}Co	$^{59}\text{Cu} + p \leftrightarrow n + ^{59}\text{Zn}$	-0.67 (Lv1)		
^{58}Ni	$^{58}\text{Cu} + p \leftrightarrow \gamma + ^{59}\text{Zn}$	-0.77 (Lv1)	-0.68 (Lv1)	
^{60}Ni	$^{57}\text{Co} + p \leftrightarrow n + ^{57}\text{Ni}$	-0.70 (Lv3)		
^{60}Ni	$^{59}\text{Cu} + p \leftrightarrow n + ^{59}\text{Zn}$		-0.78 (Lv2)	
^{60}Ni	$^{60}\text{Cu} + p \leftrightarrow n + ^{60}\text{Zn}$	-0.88 (Lv1)	-0.86 (Lv1)	-0.78 (Lv1)
^{61}Ni	$^{60}\text{Cu} + p \leftrightarrow \gamma + ^{61}\text{Zn}$	0.68 (Lv2)		
^{61}Ni	$^{61}\text{Zn} + p \leftrightarrow \gamma + ^{62}\text{Ga}$	-0.77 (Lv1)	-0.71 (Lv2)	
^{62}Ni	$^{62}\text{Zn} + p \leftrightarrow \gamma + ^{63}\text{Ga}$		-0.70 (Lv3)	
^{63}Cu	$^{63}\text{Ga} + p \leftrightarrow \gamma + ^{64}\text{Ge}$		-0.74 (Lv2)	
^{63}Cu	$^{63}\text{Ga} + p \leftrightarrow n + ^{63}\text{Ge}$		-0.65 (Lv1)	
^{64}Zn	$^{64}\text{Ga} + p \leftrightarrow n + ^{64}\text{Ge}$	-0.75 (Lv1)	-0.86 (Lv1)	-0.75 (Lv1)
^{67}Zn	$^{67}\text{As} + p \leftrightarrow \gamma + ^{68}\text{Se}$	-0.75 (Lv2)	-0.67 (Lv1)	
^{68}Zn	$^{68}\text{As} + p \leftrightarrow n + ^{68}\text{Se}$	-0.83 (Lv2)	-0.84 (Lv1)	-0.75 (Lv1)
^{69}Ga	$^{69}\text{Se} + p \leftrightarrow \gamma + ^{70}\text{Br}$	-0.75 (Lv3)		
^{71}Ga	$^{71}\text{Br} + p \leftrightarrow \gamma + ^{72}\text{Kr}$	-0.71 (Lv3)	-0.67 (Lv3)	
^{70}Ge	$^{70}\text{Se} + p \leftrightarrow \gamma + ^{71}\text{Br}$	-0.65 (Lv3)	-0.66 (Lv1)	-0.65 (Lv2)
^{72}Ge	$^{72}\text{Br} + p \leftrightarrow n + ^{72}\text{Kr}$	-0.69 (Lv3)	-0.78 (Lv1)	-0.66 (Lv1)
^{73}Ge	$^{73}\text{Kr} + p \leftrightarrow \gamma + ^{74}\text{Rb}$		-0.65 (Lv3)	
^{75}As	$^{75}\text{Rb} + p \leftrightarrow n + ^{75}\text{Sr}$		-0.68 (Lv1)	
^{74}Se	$^{74}\text{Kr} + p \leftrightarrow \gamma + ^{75}\text{Rb}$		-0.70 (Lv2)	
^{76}Se	$^{76}\text{Rb} + p \leftrightarrow n + ^{76}\text{Sr}$		-0.74 (Lv1)	
^{77}Se	$^{77}\text{Rb} + p \leftrightarrow n + ^{77}\text{Sr}$		-0.75 (Lv1)	
^{78}Kr	$^{78}\text{Sr} + p \leftrightarrow \gamma + ^{79}\text{Y}$		-0.65 (Lv2)	
^{80}Kr	$^{80}\text{Sr} + n \leftrightarrow \gamma + ^{81}\text{Sr}$			-0.65 (Lv2)
^{80}Kr	$^{80}\text{Y} + p \leftrightarrow n + ^{80}\text{Zr}$		-0.66 (Lv3)	
^{85}Rb	$^{85}\text{Nb} + p \leftrightarrow n + ^{85}\text{Mo}$		-0.65 (Lv3)	
^{94}Mo	$^{94}\text{Ru} + p \leftrightarrow \gamma + ^{95}\text{Rh}$			-0.65 (Lv3)
^{97}Tc	$^{97}\text{Rh} + n \leftrightarrow \gamma + ^{98}\text{Rh}$			-0.70 (Lv1)

重要反応リスト (全) 1

Nucleus	Reaction	#01	#02	#03	#04	#05	#06
⁵⁶ Fe	⁵⁷ Co + p ↔ n + ⁵⁷ Ni					0.67 (Lv3)	
⁵⁶ Fe	⁵⁶ Ni + α ↔ p + ⁵⁹ Cu				0.78 (Lv3)		
⁵⁷ Fe	⁵⁶ Ni + p ↔ γ + ⁵⁷ Cu	0.65 (Lv3)					
⁵⁷ Fe	⁵⁷ Ni + p ↔ γ + ⁵⁸ Cu	-0.67 (Lv3)	-0.65 (Lv1)	-0.75 (Lv2)	-0.74 (Lv2)	-0.73 (Lv2)	-0.65 (Lv1)
⁵⁹ Co	⁵⁹ Zn + ↔ ⁺ e + ⁵⁹ Cu	-0.94 (Lv3)			-0.92 (Lv3)	-0.90 (Lv3)	-0.88 (Lv3)
⁵⁹ Co	⁵⁹ Cu + p ↔ γ + ⁶⁰ Zn				-0.70 (Lv2)	-0.73 (Lv2)	-0.75 (Lv2)
⁵⁹ Co	⁵⁹ Cu + p ↔ n + ⁵⁹ Zn				-0.67 (Lv1)	-0.67 (Lv1)	-0.68 (Lv1)
⁵⁸ Ni	⁵⁸ Zn + ↔ ⁺ e + ⁵⁸ Cu	-0.72 (Lv3)	-0.69 (Lv3)				
⁵⁸ Ni	⁵⁷ Cu + p ↔ γ + ⁵⁸ Zn	0.69 (Lv2)	0.69 (Lv2)				
⁵⁸ Ni	⁵⁸ Cu + p ↔ γ + ⁵⁹ Zn	-0.67 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.79 (Lv1)	-0.78 (Lv1)	-0.77 (Lv1)	-0.77 (Lv1)
⁶⁰ Ni	⁵⁹ Cu + p ↔ γ + ⁶⁰ Zn	0.67 (Lv2)					
⁶⁰ Ni	⁵⁷ Co + p ↔ n + ⁵⁷ Ni		-0.65 (Lv3)	-0.68 (Lv2)	-0.66 (Lv2)	-0.70 (Lv3)	
⁶⁰ Ni	⁵⁶ Ni + α ↔ p + ⁵⁹ Cu				-0.66 (Lv3)		
⁶⁰ Ni	⁶⁰ Cu + p ↔ n + ⁶⁰ Zn		-0.74 (Lv1)	-0.83 (Lv1)	-0.87 (Lv1)	-0.88 (Lv1)	-0.88 (Lv1)
⁶¹ Ni	⁶⁰ Cu + p ↔ γ + ⁶¹ Zn	0.78 (Lv3)	0.75 (Lv2)	0.72 (Lv2)	0.69 (Lv2)	0.68 (Lv2)	0.66 (Lv2)
⁶¹ Ni	⁶⁰ Zn + p ↔ γ + ⁶¹ Ga	0.67 (Lv2)					
⁶¹ Ni	⁶¹ Zn + p ↔ γ + ⁶² Ga	-0.65 (Lv1)	-0.74 (Lv1)	-0.78 (Lv1)	-0.77 (Lv1)	-0.77 (Lv1)	-0.77 (Lv1)
⁶² Ni	⁶² Zn + p ↔ γ + ⁶³ Ga	-0.80 (Lv3)	-0.87 (Lv3)	-0.90 (Lv3)	-0.65 (Lv3)		-0.66 (Lv3)
⁶² Ni	⁶² Ga + p ↔ γ + ⁶³ Ge	-0.71 (Lv2)	-0.69 (Lv2)	-0.65 (Lv2)	-0.66 (Lv3)		
⁶³ Cu	⁶³ Ge + ↔ ⁺ e + ⁶³ Ga	-0.82 (Lv3)	-0.75 (Lv3)				
⁶³ Cu	⁶³ Ga + p ↔ γ + ⁶⁴ Ge	-0.71 (Lv2)	-0.71 (Lv2)				
⁶³ Cu	⁶⁰ Cu + p ↔ n + ⁶⁰ Zn	0.73 (Lv1)	0.67 (Lv1)				
⁶⁴ Zn	⁶⁰ Cu + p ↔ n + ⁶⁰ Zn	0.90 (Lv1)	0.88 (Lv1)	0.69 (Lv1)			
⁶⁴ Zn	⁶⁴ Ga + p ↔ n + ⁶⁴ Ge				-0.69 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.79 (Lv1)
⁶⁷ Zn	⁶⁷ As + p ↔ γ + ⁶⁸ Se	-0.69 (Lv2)	-0.72 (Lv2)	-0.78 (Lv2)	-0.77 (Lv2)	-0.75 (Lv2)	-0.65 (Lv1)
⁶⁸ Zn	⁶⁴ Ga + p ↔ n + ⁶⁴ Ge	0.77 (Lv1)	0.74 (Lv1)	0.73 (Lv1)			
⁶⁸ Zn	⁶⁸ As + p ↔ n + ⁶⁸ Se				-0.78 (Lv2)	-0.83 (Lv2)	-0.70 (Lv1)
⁶⁹ Ga	⁶⁹ Se + p ↔ γ + ⁷⁰ Br			-0.68 (Lv3)	-0.74 (Lv3)	-0.75 (Lv3)	-0.73 (Lv2)
⁶⁹ Ga	⁶⁸ As + p ↔ n + ⁶⁸ Se	0.67 (Lv2)	0.65 (Lv3)	0.65 (Lv2)			
⁷¹ Ga	⁷¹ Br + p ↔ γ + ⁷² Kr				-0.70 (Lv3)	-0.71 (Lv3)	-0.73 (Lv2)
⁷¹ Ga	⁶⁸ As + p ↔ n + ⁶⁸ Se	0.66 (Lv2)					
⁷⁰ Ge	⁷⁰ Se + p ↔ γ + ⁷¹ Br					-0.65 (Lv3)	-0.68 (Lv2)
⁷⁰ Ge	⁷⁰ Br + p ↔ γ + ⁷¹ Kr						-0.71 (Lv3)
⁷² Ge	⁶⁸ As + p ↔ n + ⁶⁸ Se	0.77 (Lv2)					
⁷² Ge	⁷² Br + p ↔ n + ⁷² Kr					-0.69 (Lv3)	-0.77 (Lv2)
⁷³ Ge	⁷³ Kr + p ↔ γ + ⁷⁴ Rb						-0.68 (Lv3)
⁷⁵ As	⁷² Br + p ↔ n + ⁷² Kr	0.67 (Lv3)					
⁷⁵ As	⁷⁵ Rb + p ↔ n + ⁷⁵ Sr						-0.67 (Lv3)

重要反応リスト (全) 2

Nucleus	Reaction	#07	#08	#09	#10	#11	#12
⁵⁶ Fe	⁵⁹ Cu + p ↔ γ + ⁶⁰ Zn						-0.65 (Lv3)
⁵⁶ Fe	⁵⁶ Ni + α ↔ p + ⁵⁹ Cu	0.66 (Lv3)	0.69 (Lv3)	0.66 (Lv3)	0.66 (Lv2)	0.67 (Lv2)	0.68 (Lv2)
⁵⁷ Fe	⁵⁷ Ni + p ↔ γ + ⁵⁸ Cu	-0.66 (Lv1)	-0.65 (Lv1)	-0.66 (Lv2)	-0.70 (Lv3)	-0.70 (Lv3)	-0.69 (Lv3)
⁵⁹ Co	⁵⁹ Zn + e ↔ ⁵⁹ Cu	-0.83 (Lv3)	-0.76 (Lv3)				
⁵⁹ Co	⁵⁹ Cu + p ↔ γ + ⁶⁰ Zn	-0.77 (Lv2)	-0.77 (Lv2)	-0.78 (Lv3)	-0.81 (Lv3)	-0.81 (Lv3)	-0.80 (Lv3)
⁵⁹ Co	⁵⁹ Cu + p ↔ n + ⁵⁹ Zn	-0.67 (Lv1)	-0.66 (Lv1)	-0.66 (Lv2)			
⁵⁸ Ni	⁵⁸ Cu + p ↔ γ + ⁵⁹ Zn	-0.75 (Lv1)	-0.74 (Lv1)	-0.71 (Lv1)	-0.68 (Lv1)	-0.70 (Lv3)	-0.66 (Lv3)
⁶⁰ Ni	⁵⁹ Cu + p ↔ n + ⁵⁹ Zn			-0.75 (Lv2)	-0.78 (Lv2)	-0.74 (Lv2)	-0.68 (Lv2)
⁶⁰ Ni	⁶⁰ Cu + p ↔ n + ⁶⁰ Zn	-0.88 (Lv1)	-0.88 (Lv1)	-0.87 (Lv1)	-0.86 (Lv1)	-0.85 (Lv1)	-0.84 (Lv1)
⁶¹ Ni	⁶⁰ Cu + p ↔ γ + ⁶¹ Zn	0.66 (Lv2)	0.66 (Lv2)				
⁶¹ Ni	⁶¹ Zn + p ↔ γ + ⁶² Ga	-0.75 (Lv1)	-0.72 (Lv1)	-0.69 (Lv1)	-0.71 (Lv2)	-0.67 (Lv2)	-0.65 (Lv2)
⁶² Ni	⁶² Zn + p ↔ γ + ⁶³ Ga	-0.67 (Lv2)	-0.68 (Lv2)	-0.69 (Lv3)	-0.70 (Lv3)	-0.70 (Lv3)	-0.69 (Lv3)
⁶² Ni	⁶² Ga + p ↔ γ + ⁶³ Ge	-0.81 (Lv3)	-0.80 (Lv3)				
⁶³ Cu	⁶³ Ga + p ↔ γ + ⁶⁴ Ge			-0.77 (Lv3)	-0.74 (Lv2)	-0.77 (Lv3)	-0.75 (Lv3)
⁶³ Cu	⁶³ Ga + p ↔ n + ⁶³ Ge		-0.65 (Lv3)	-0.67 (Lv2)	-0.65 (Lv1)	-0.67 (Lv2)	-0.65 (Lv2)
⁶⁴ Zn	⁶³ Ga + p ↔ n + ⁶³ Ge						-0.65 (Lv2)
⁶⁴ Zn	⁶⁴ Ga + p ↔ n + ⁶⁴ Ge	-0.82 (Lv1)	-0.84 (Lv1)	-0.86 (Lv1)	-0.86 (Lv1)	-0.85 (Lv1)	-0.85 (Lv1)
⁶⁷ Zn	⁶⁷ As + p ↔ γ + ⁶⁸ Se	-0.66 (Lv1)	-0.66 (Lv1)	-0.67 (Lv1)	-0.67 (Lv1)	-0.66 (Lv1)	-0.67 (Lv3)
⁶⁸ Zn	⁶⁸ As + p ↔ n + ⁶⁸ Se	-0.76 (Lv1)	-0.80 (Lv1)	-0.82 (Lv1)	-0.84 (Lv1)	-0.85 (Lv1)	-0.84 (Lv1)
⁶⁹ Ga	⁶⁹ Se + p ↔ γ + ⁷⁰ Br	-0.71 (Lv2)	-0.68 (Lv2)				
⁷¹ Ga	⁷¹ Br + p ↔ γ + ⁷² Kr	-0.72 (Lv2)	-0.68 (Lv2)	-0.67 (Lv2)	-0.67 (Lv3)		
⁷⁰ Ge	⁷⁰ Se + p ↔ γ + ⁷¹ Br	-0.69 (Lv2)	-0.69 (Lv2)	-0.65 (Lv1)	-0.66 (Lv1)	-0.68 (Lv1)	-0.70 (Lv1)
⁷⁰ Ge	⁷⁰ Br + p ↔ γ + ⁷¹ Kr	-0.71 (Lv3)	-0.67 (Lv3)				
⁷² Ge	⁷² Br + p ↔ n + ⁷² Kr	-0.66 (Lv1)	-0.73 (Lv1)	-0.77 (Lv1)	-0.78 (Lv1)	-0.79 (Lv1)	-0.79 (Lv1)
⁷³ Ge	⁷³ Kr + p ↔ γ + ⁷⁴ Rb	-0.68 (Lv2)	-0.69 (Lv2)	-0.65 (Lv2)	-0.65 (Lv3)		
⁷⁵ As	⁷⁵ Rb + p ↔ n + ⁷⁵ Sr	-0.72 (Lv2)	-0.75 (Lv2)	-0.67 (Lv1)	-0.68 (Lv1)	-0.67 (Lv1)	-0.65 (Lv1)
⁷⁴ Se	⁷⁴ Kr + p ↔ γ + ⁷⁵ Rb	-0.67 (Lv2)	-0.70 (Lv2)	-0.70 (Lv2)	-0.70 (Lv2)	-0.66 (Lv2)	-0.67 (Lv3)
⁷⁶ Se	⁷⁶ Rb + p ↔ n + ⁷⁶ Sr	-0.72 (Lv2)	-0.67 (Lv1)	-0.72 (Lv1)	-0.74 (Lv1)	-0.73 (Lv1)	-0.71 (Lv1)
⁷⁷ Se	⁷⁷ Rb + p ↔ n + ⁷⁷ Sr	-0.69 (Lv3)	-0.75 (Lv2)	-0.72 (Lv1)	-0.75 (Lv1)	-0.74 (Lv1)	-0.71 (Lv1)
⁷⁸ Kr	⁷⁸ Sr + p ↔ γ + ⁷⁹ Y			-0.66 (Lv3)	-0.65 (Lv2)		
⁸⁰ Kr	⁸⁰ Y + p ↔ n + ⁸⁰ Zr				-0.66 (Lv3)		
⁸⁵ Rb	⁸⁵ Nb + p ↔ n + ⁸⁵ Mo				-0.65 (Lv3)	-0.67 (Lv2)	-0.65 (Lv3)
⁸⁶ Sr	⁸⁶ Nb + p ↔ n + ⁸⁶ Mo					-0.66 (Lv3)	

重要反応リスト (全) 3

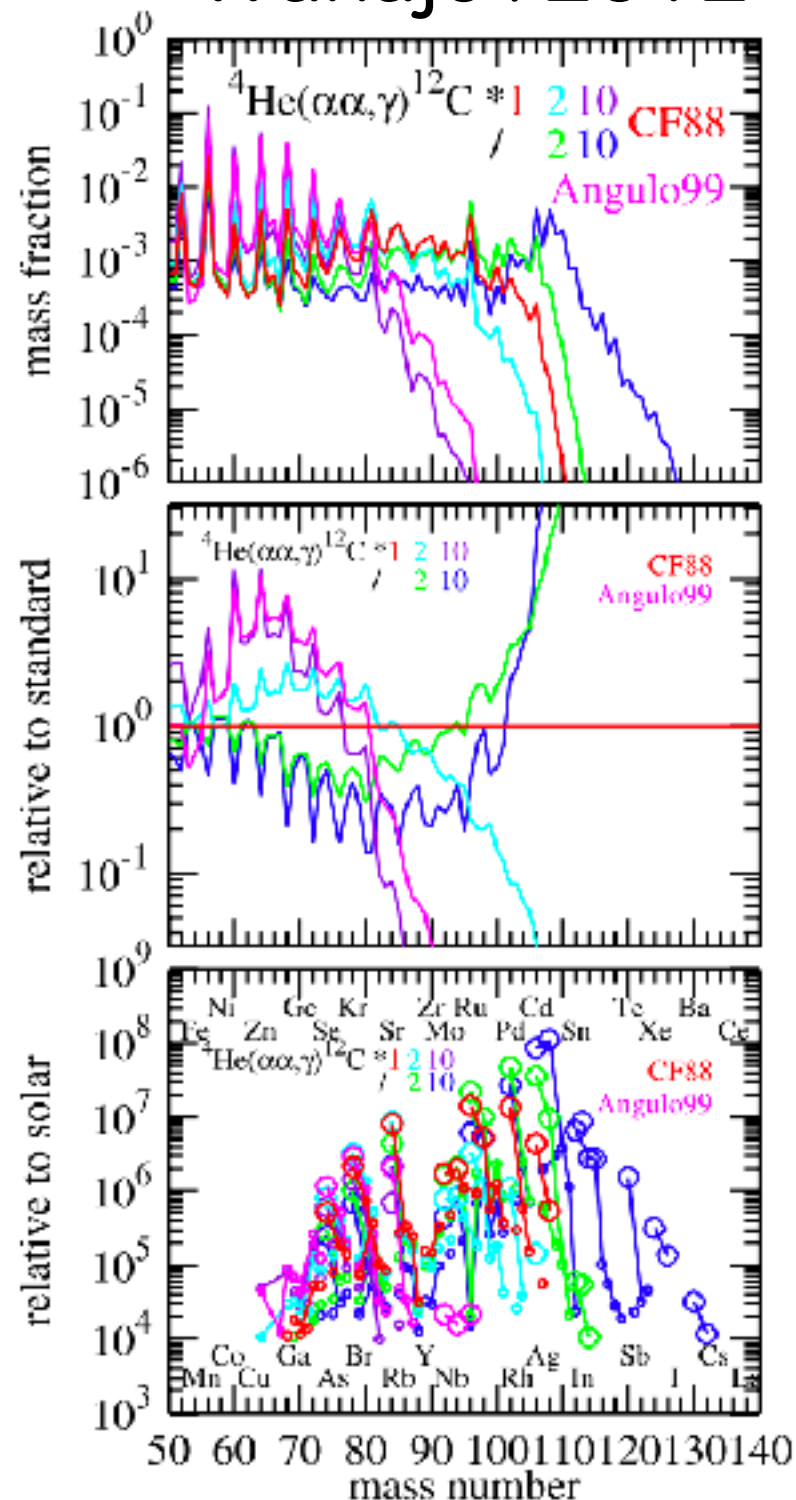
Nucleus	Reaction	#13	#14	#15	#16	#17	#18
⁵⁶ Fe	⁵⁹ Cu + p ↔ γ + ⁶⁰ Zn	-0.65 (Lv3)					
⁵⁶ Fe	⁵⁶ Ni + α ↔ p + ⁵⁹ Cu	0.67 (Lv2)	0.65 (Lv2)				
⁵⁷ Fe	⁵⁷ Ni + p ↔ γ + ⁵⁸ Cu	-0.66 (Lv3)					
⁶⁰ Ni	⁵⁹ Cu + p ↔ n + ⁵⁹ Zn	-0.66 (Lv3)					
⁶⁰ Ni	⁶⁰ Cu + p ↔ n + ⁶⁰ Zn	-0.82 (Lv1)	-0.81 (Lv1)	-0.78 (Lv1)	-0.75 (Lv1)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

ひとまずは、（初の）重要反応リストができた
→ 今後も反応率の不定性、天体モデルの両者を
洗練させてアップデートしたい

トリプル α 反応のインパクト

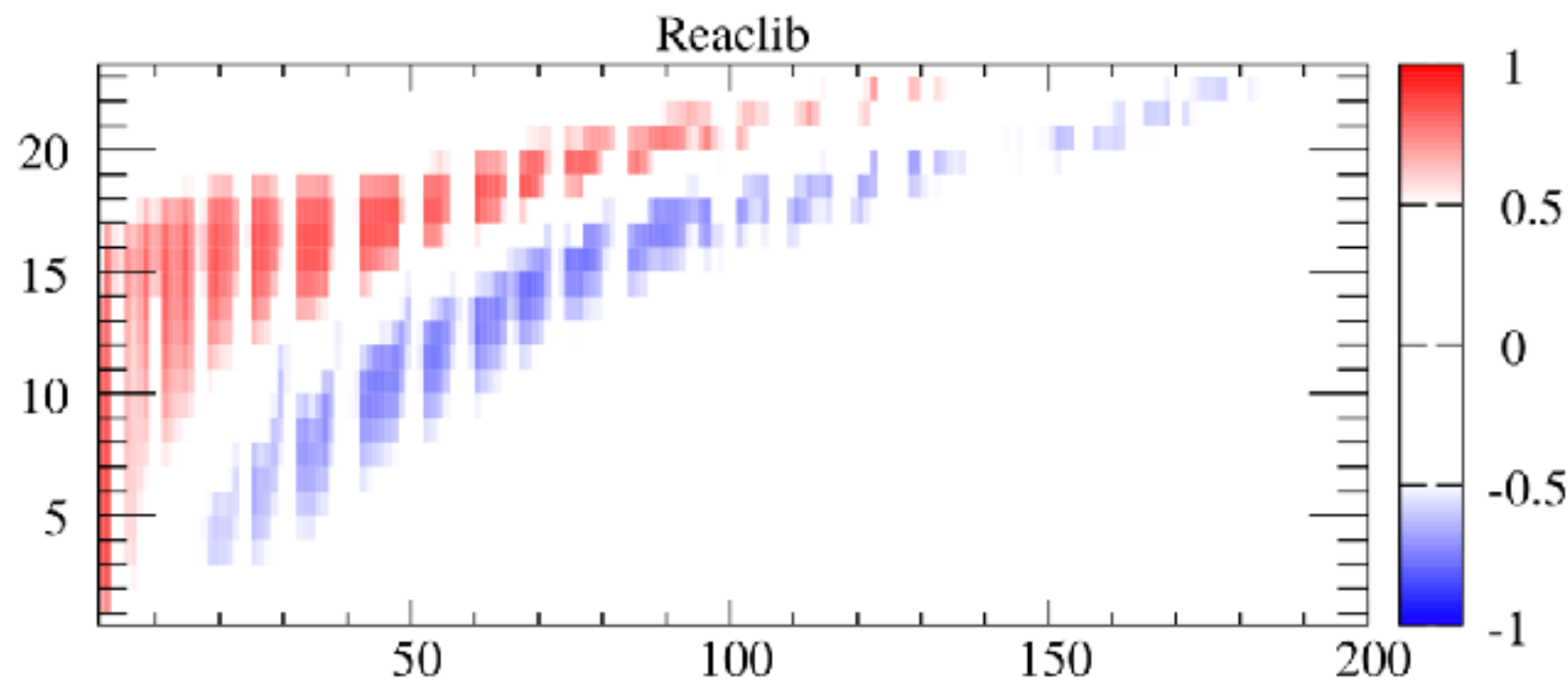
種核生成の起点 (核子 $\rightarrow A>12$ 核へ)

Wanajo+2012



モンテカルロ計算と解析による
相関係数 r_{cor} ($|r|>0.65$ が重要)

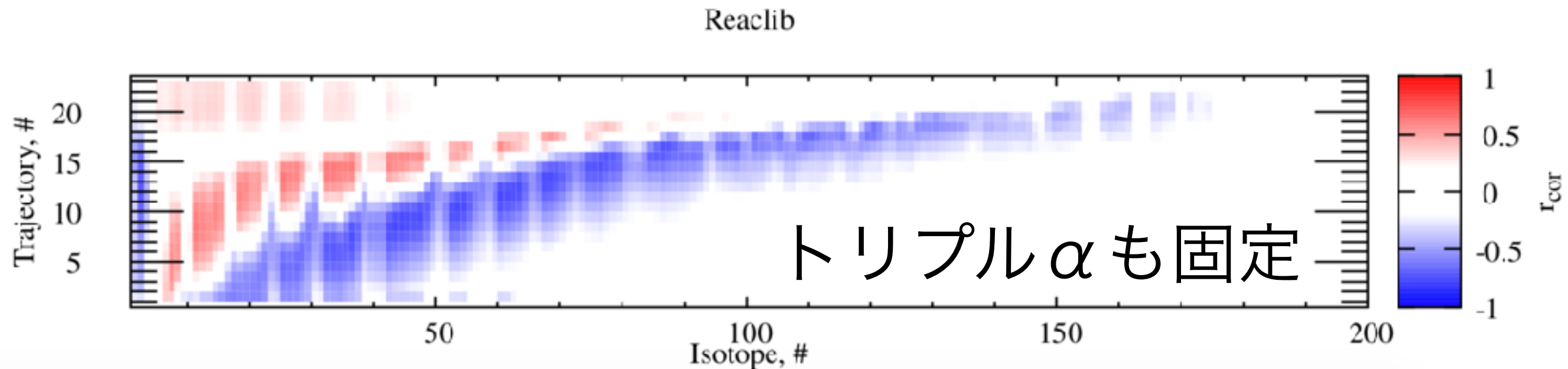
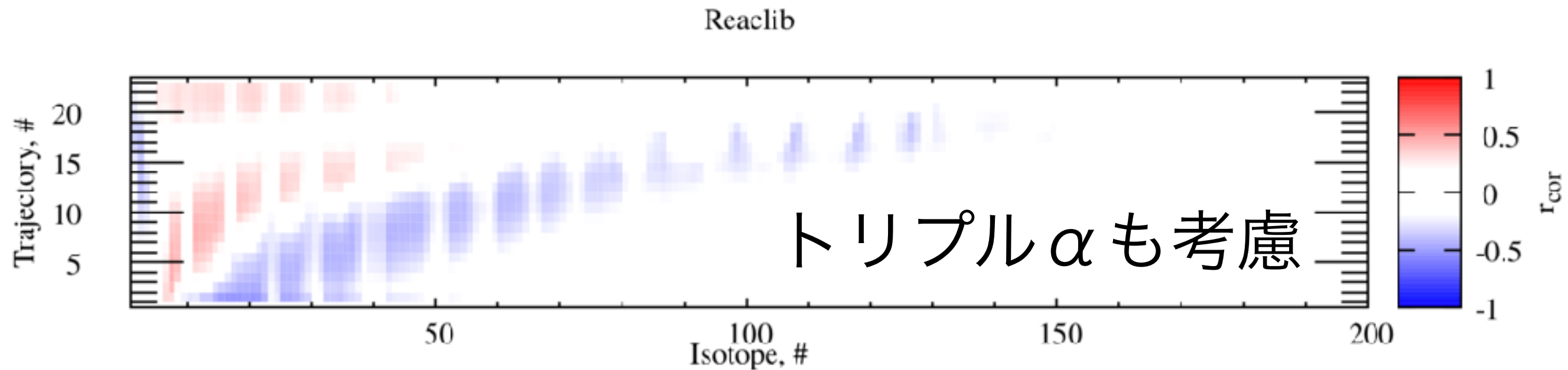
ウィンドモデル#



生成核# (軽い核から重い核へ)

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

モンテカルロ計算と解析による
相関係数 r_{cor} ($|r| > 0.65$ が重要)



まとめ

- ・典型的な νp プロセスの天体モデルを構築
 - ・超新星中心部のejectaで起こりうる様々な νp プロセスパターンを再現する。
- ・核反応の不定性
 - ・種核生成 ($A \geq 12$) :
 - トリプル α , $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$ など (“既知”の重要反応)のインパクトを確認
 - 以下、種核生成に対する不定性は無視
 - ・ νp プロセス生成核 ($A \geq 56$) :
 - ・核反応に由来する元素合成の不定性を評価
 - ・「今後改善すべき」反応・崩壊率のリストを作成
 - 元素合成のメインパス上の $(n,p)/(g,p)$ が重要

今後の課題

- ・核反応の不定性の取り扱いを洗練
 - ・より現実的な元素合成の不定性評価
 - ・重要反応リストの更新
- ・元素合成から超新星モデルへ？
 - ・現実的なモデル（YeとS分布）での νp プロセス
 - ・超新星モデルの不定性 vs 核反応の不定性
 - ・ νp プロセスから超新星の物理への「制限」??