

# 中性子星を考慮したバーストモデル に基づいたrpプロセスの再検討 に向けて

西村 信哉

理化学研究所

Collaboration with

土肥 明 (九州大/理研)、橋本 正章 (九州大)、野田常雄 (久留米工大)、  
長瀧重博 (理研) + MC 元素合成コラボレーション

# Contents

- Introduction

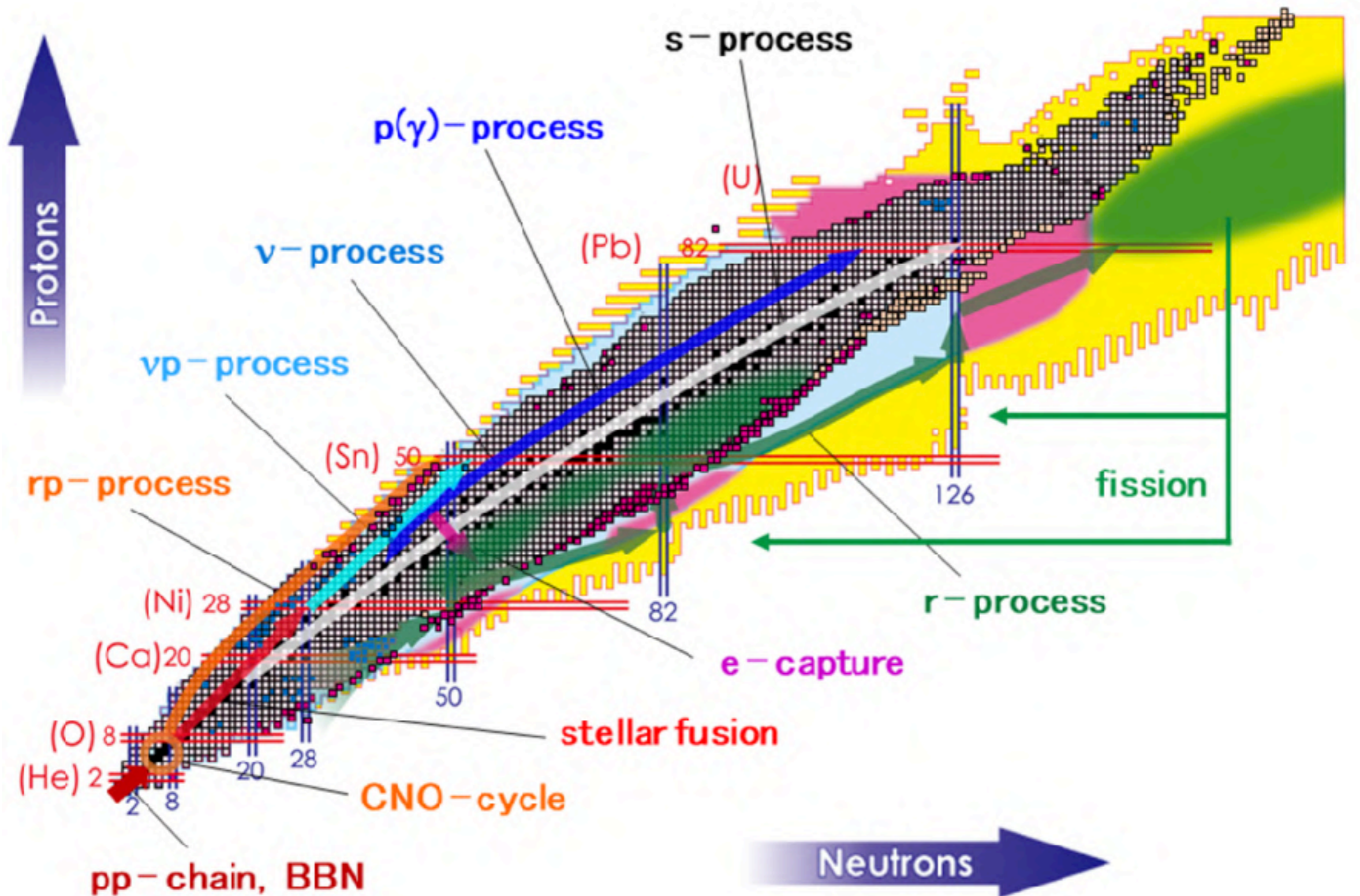
- 鉄よりも重い元素を作る元素合成
- 核反応率の不定性と元素合成

- rpプロセスの不定性と“key”反応率

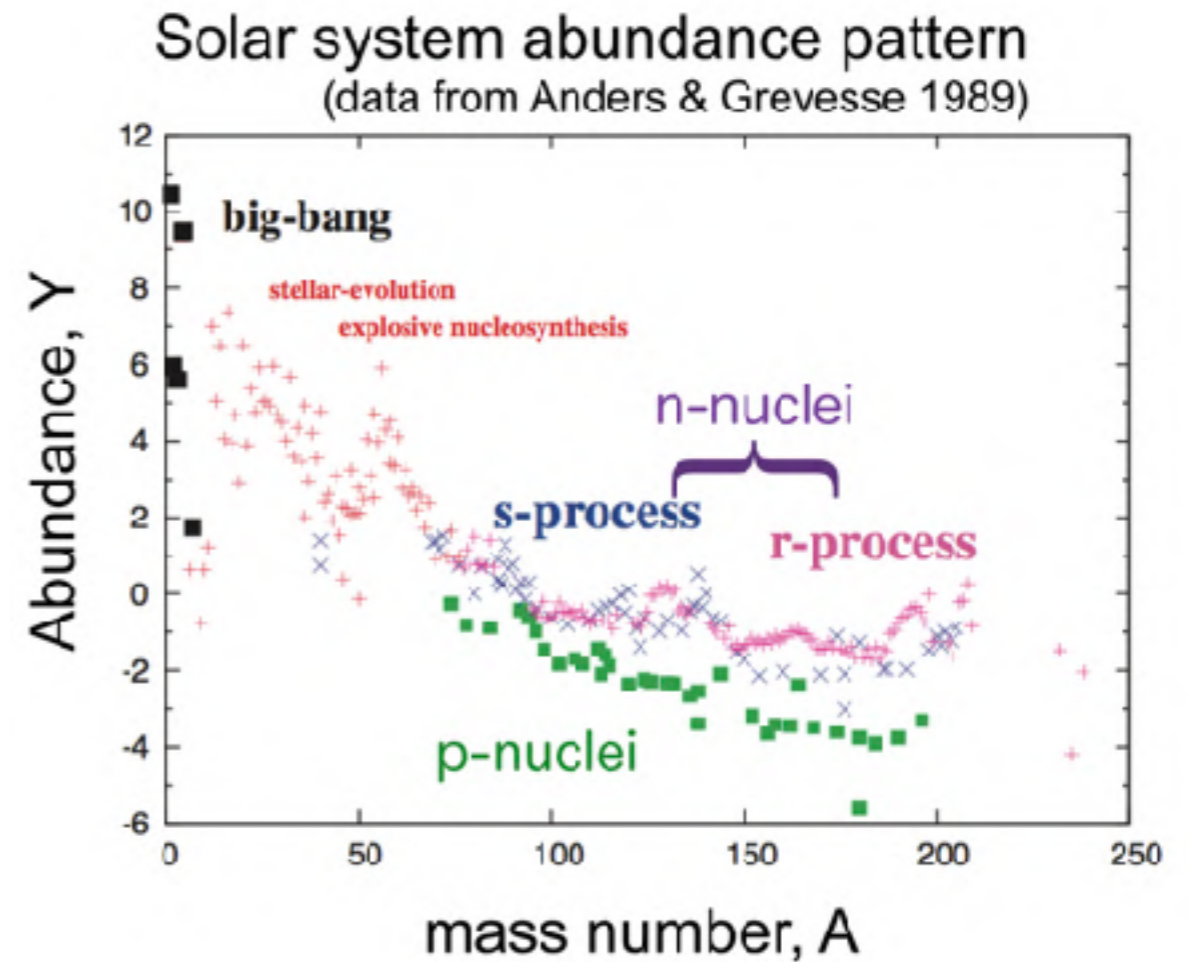
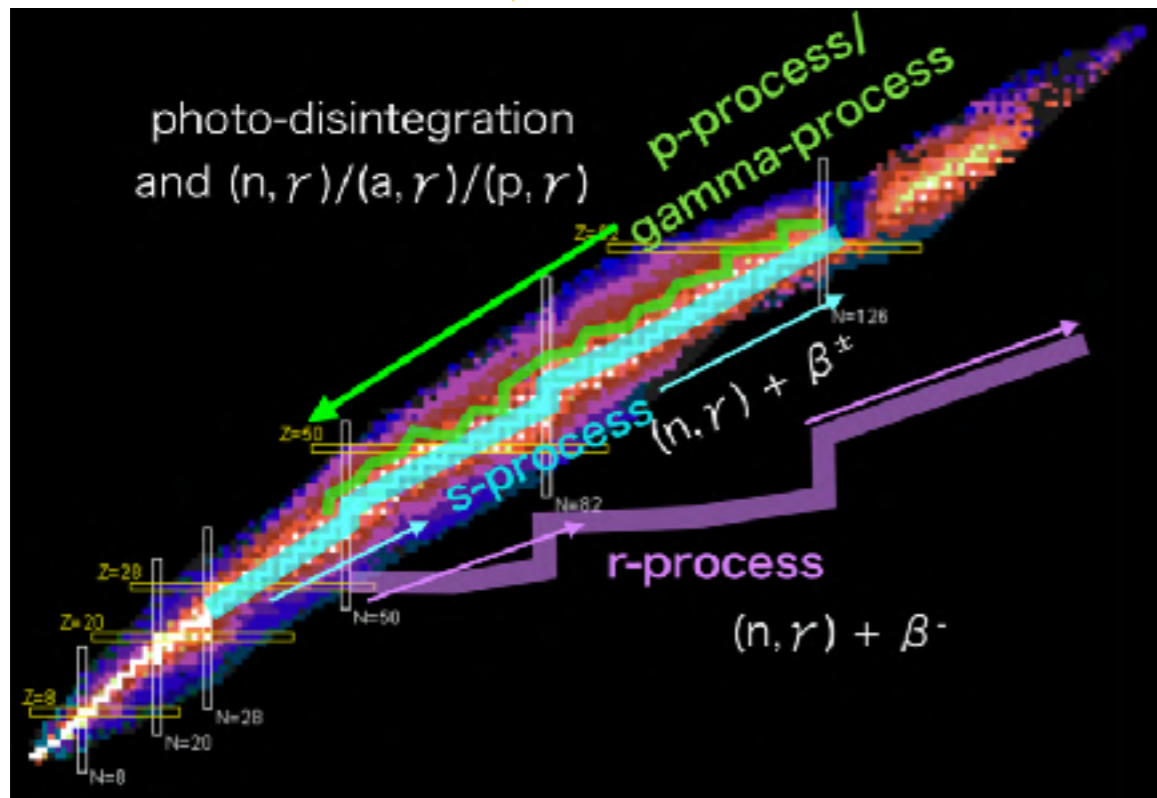
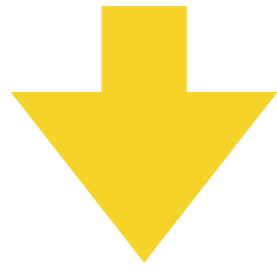
- 方法：1 zoneモデル+ポストプロセス
- 結果
  - 生成物の不定性
  - key reactions

- まとめ

# 核図表と宇宙の元素合成



# 核反応・崩壊率の不定性が 「重元素合成」に与える影響



## 共同研究者

T. Rauscher (Basel/Hertfordshire), R. Hirschi (Keele),

G. Cescutti (INAF), A. St. Murphy (Edinburgh) and guest authors

# これまでの我々の研究対象

## ・sプロセス

・安定核線上の中性子捕獲と $\beta$ 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」とも)

・陽子過剰不安定核の様々な捕獲反応 (+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)

## ・ $\nu$ pプロセス

・重力崩壊型超新星コア (NN+2019)

・rプロセス → (準備中)

・rpプロセス → 本研究



不定性大

## 文献

- Rauscher, NN+2016, MNRAS 463

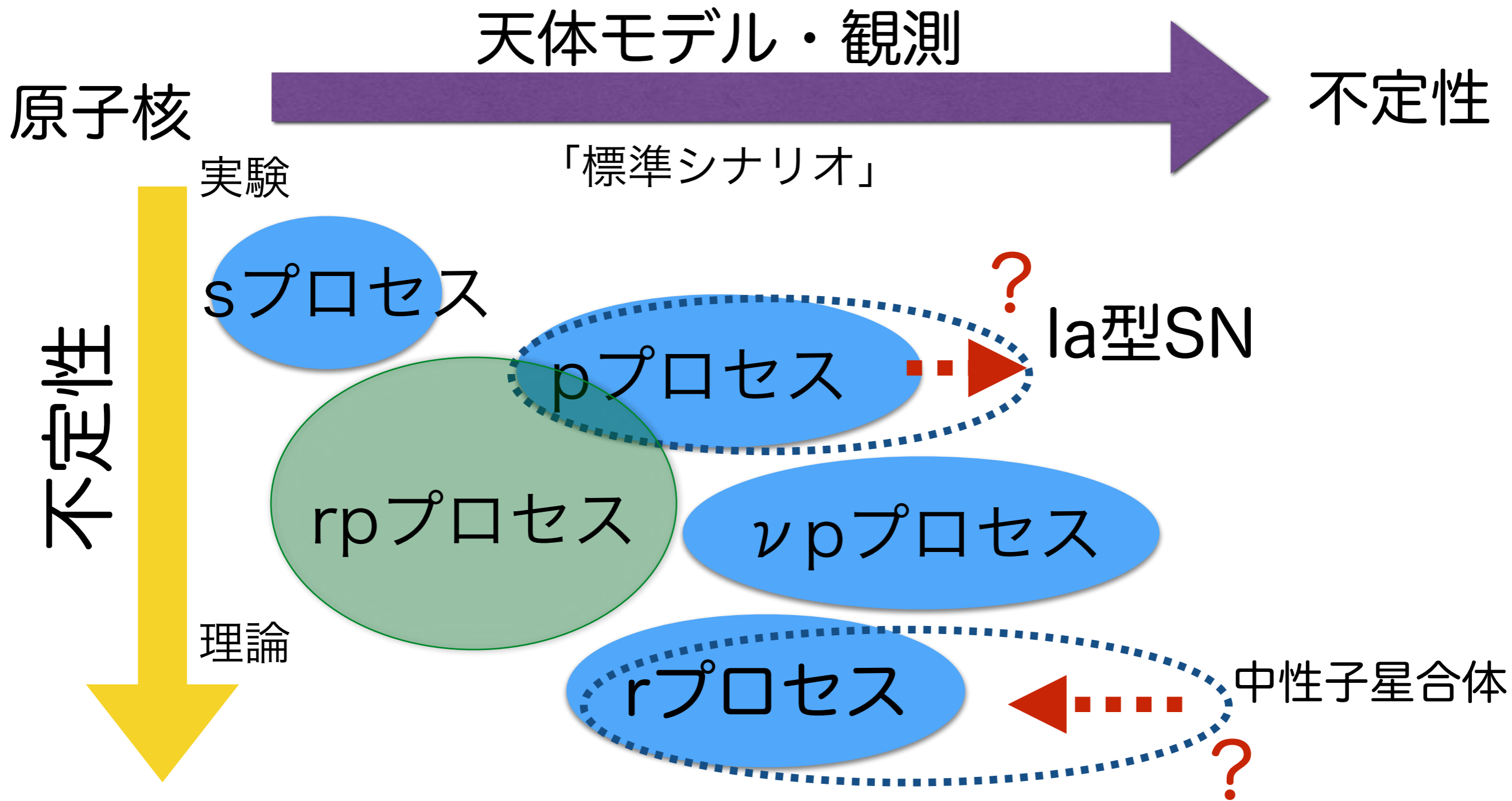
- NN+2018, MNRAS 474

- NN+2019, MNRAS 489

- NN+2017, MNRAS 469

- Cescutti, Hirschi, NN+2018, MNRAS 478

# これまでの研究対象



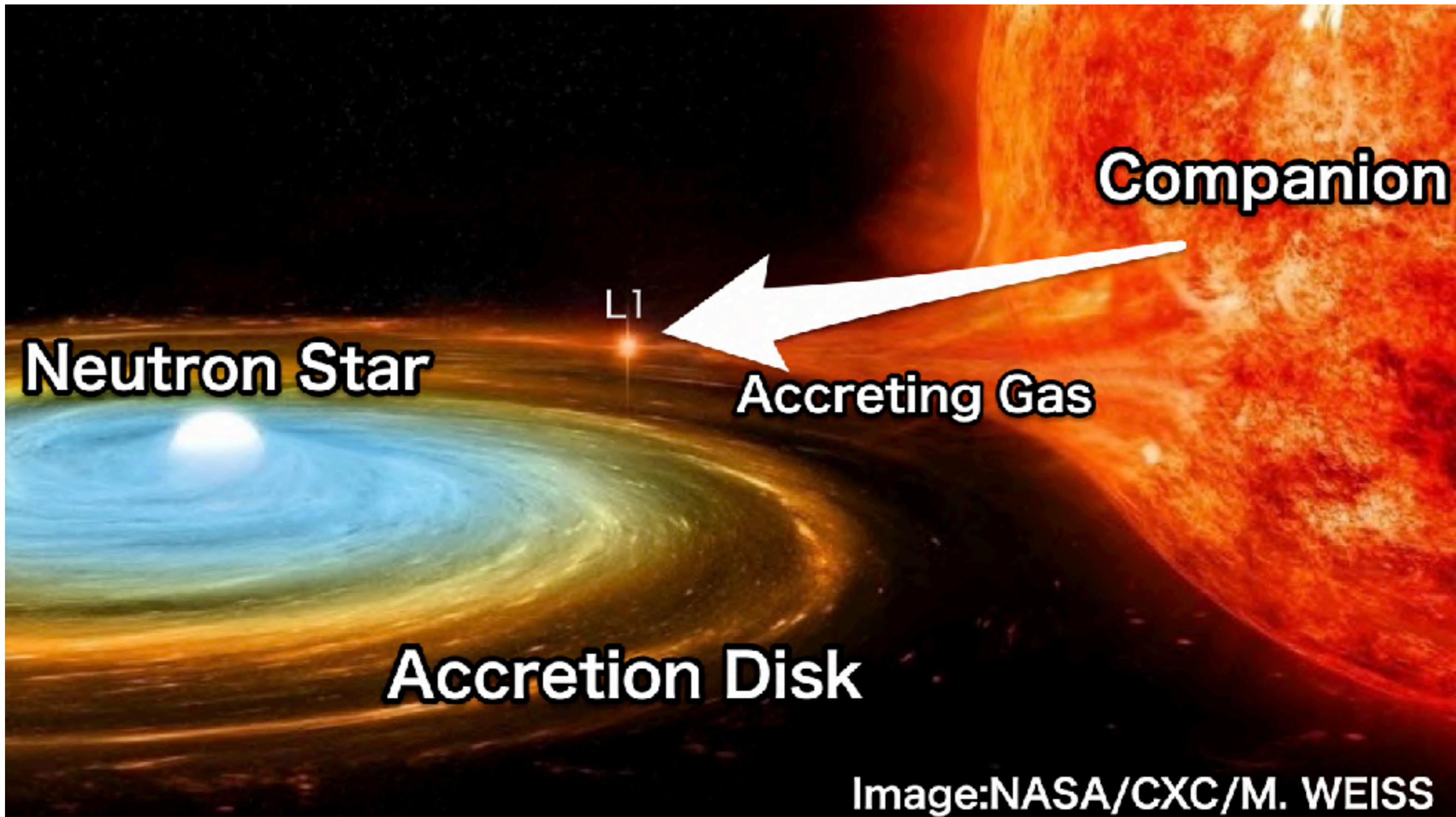
※ 「観測により反応率を制限」 「反応率測定により宇宙の謎を解明」系の研究は、片方の軸によってないと成り立ちにくい？

**X線バーストでのrpプロセス：**

**核反応率の不定性の影響と重要な反応率**

# X線バースト

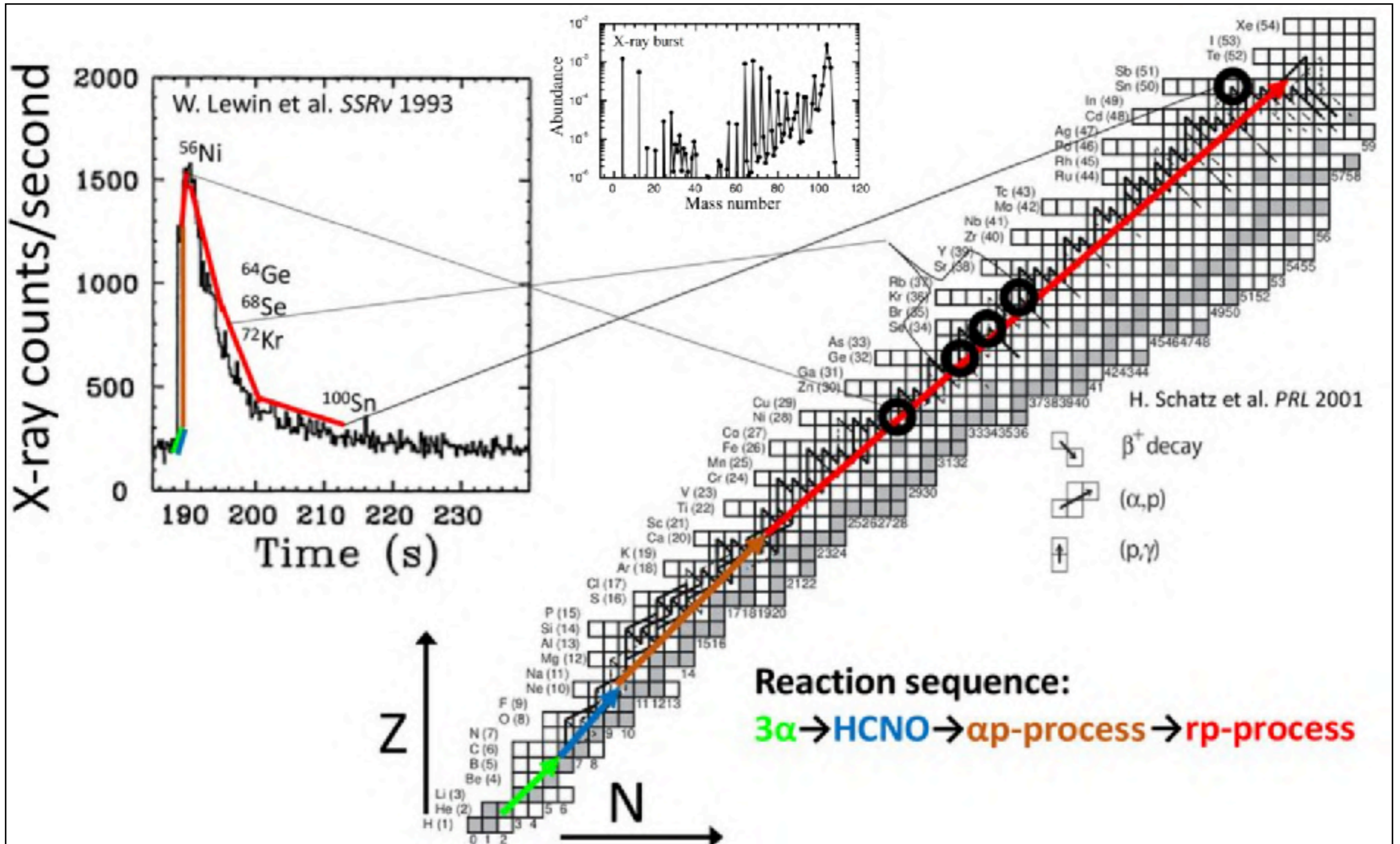
土肥さんスライド





# rpプロセス

土肥さんスライド



Meisel+(2018)

# rpプロセス核反応の不定性



by Rauscher (arXiv:1412.6990)

## 天体環境

### • X線バーストモデル

- 中性子星の物理（状態）、連星パラメタ、降着物質の組成など

### • Nuclear burnings in the stellar interior

- 主の核燃焼反応: triple- $\alpha$ , hot-CNO, ...
- rpプロセス上で光度曲線に影響を与える反応

## 元素合成計算

## モンテカルロ

### • 元素合成

- (n,g)/(p,g)/(a,g)反応
- ベータ崩壊

### 観測量の不定性

- 生成物
- 光度曲線

フィードバック (key 反応率)

# モンテカルロ元素合成コード

- Monte-Carlo framework

- PizBuin MC-driver

- (developed by Rauscher, NN, Hirschi)

- a simple “Brute-force” approach

- **parallelized by OpenMP** for shared memory architectures

- (paralleled easily, but harder debugging. . .)



Piz Buin (mountain)

- Nuclear Reaction network

- **Network solver:**

- WinNet: the latest Basel network, Winteler+, 2012

- **Reaction rates:**

- Reaclib: (Rauscher & Thielemann 2000)

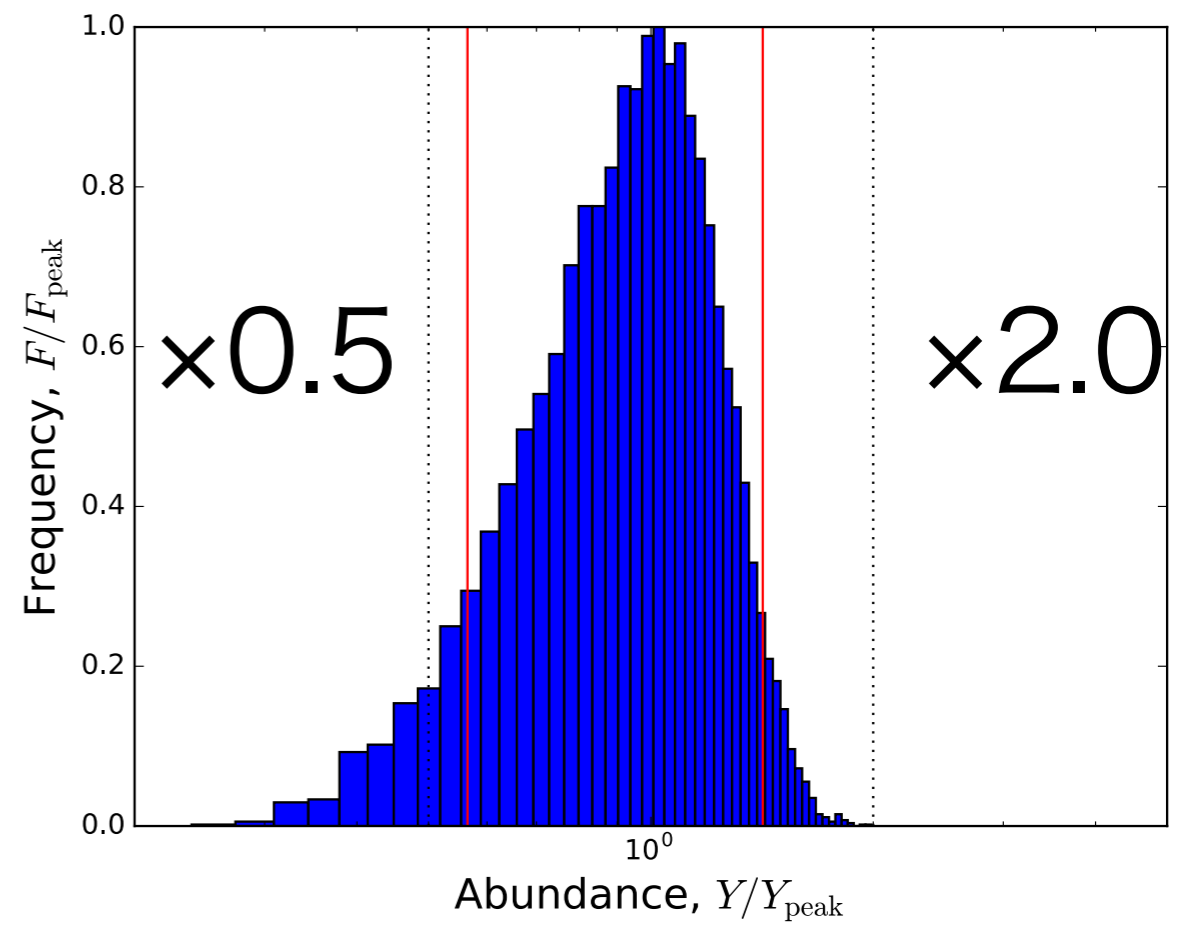
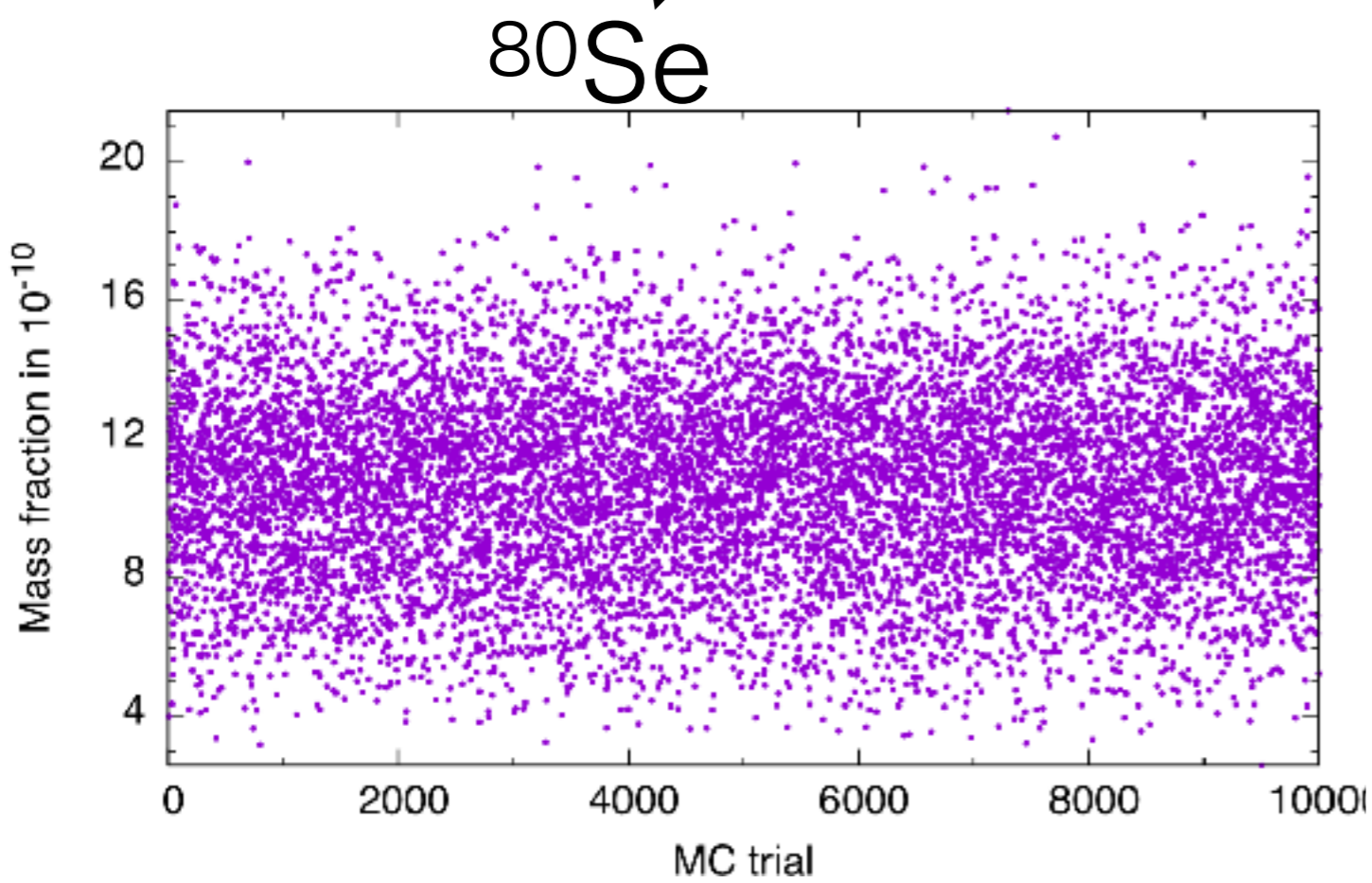
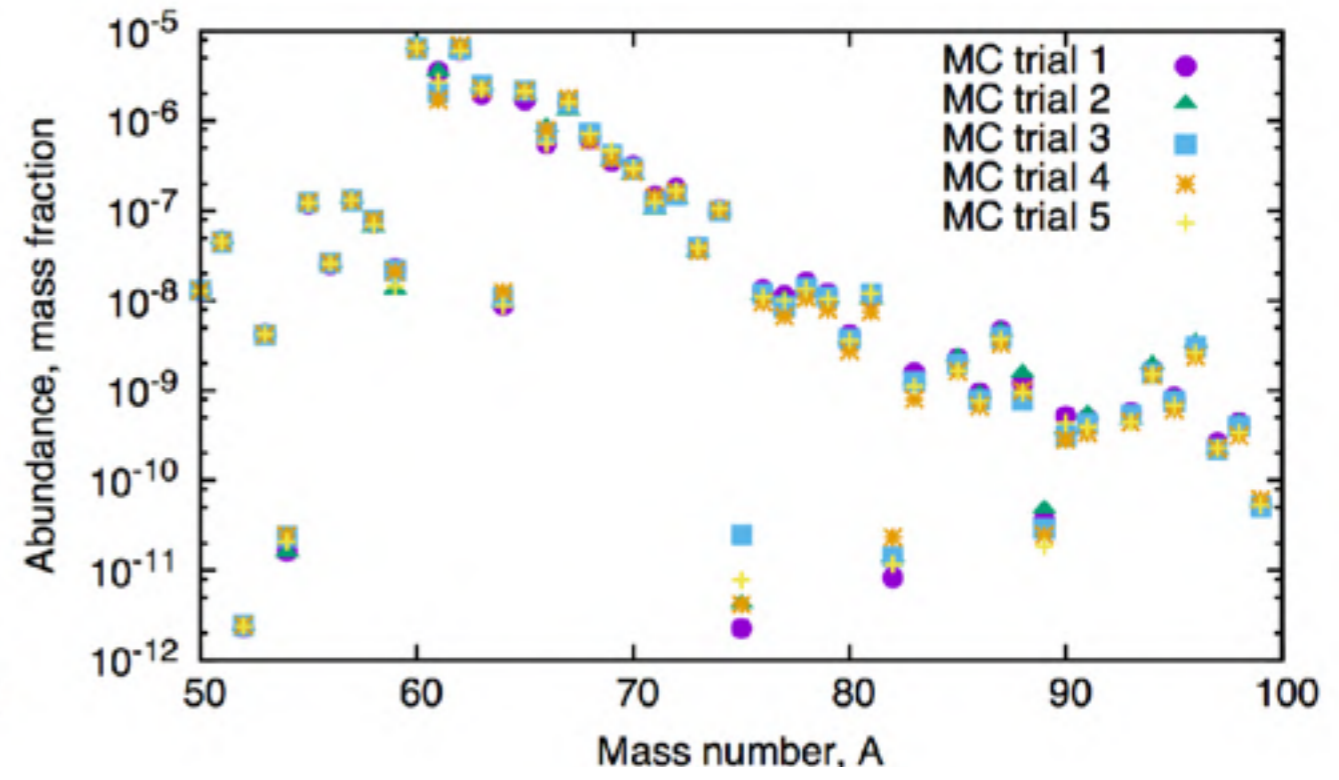
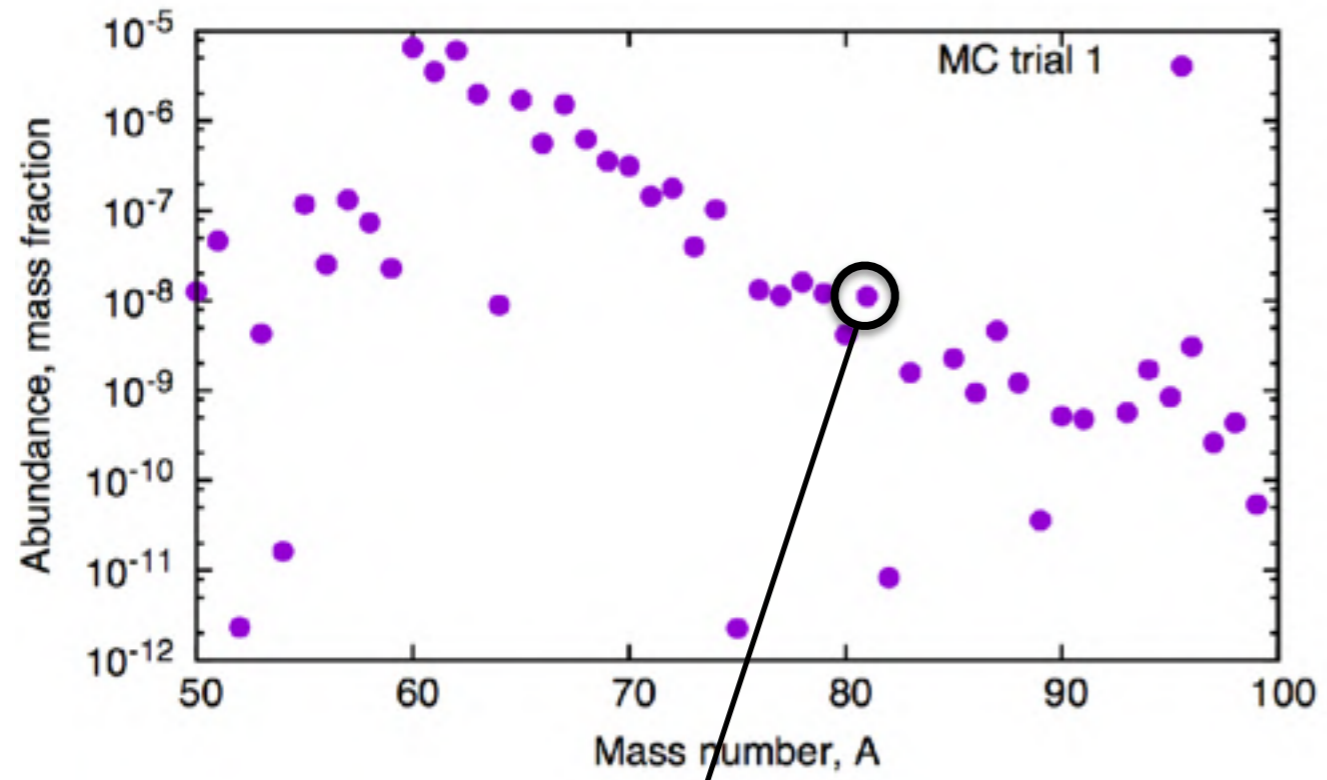
- **T-dependent beta-decay** (Takahashi & Yokoi 1987, Goriely 1999)

- **T-dependent uncertainty:**

- Provided by Reaclib format, based on Rauscher 2012

# モンテカルロ元素合成計算

※例はsプロセス



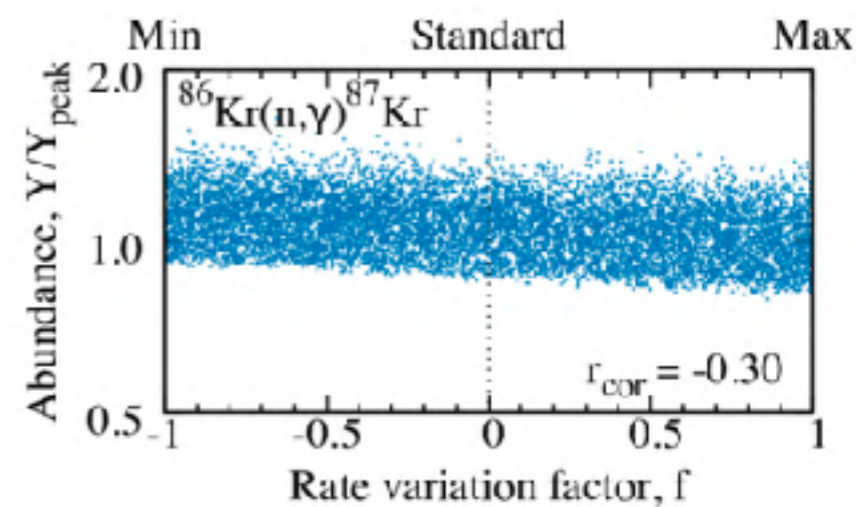
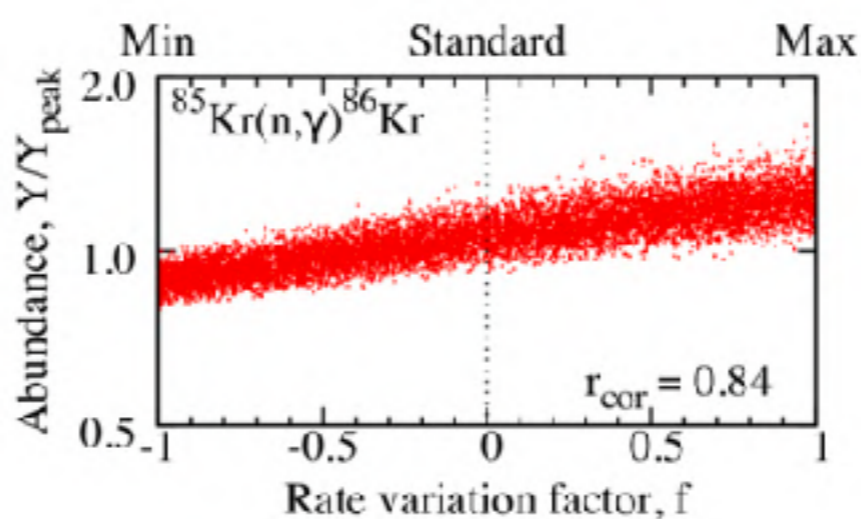
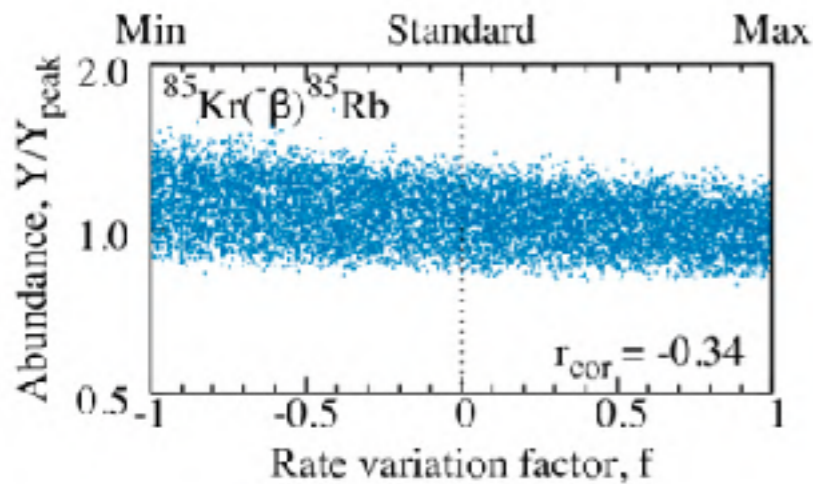
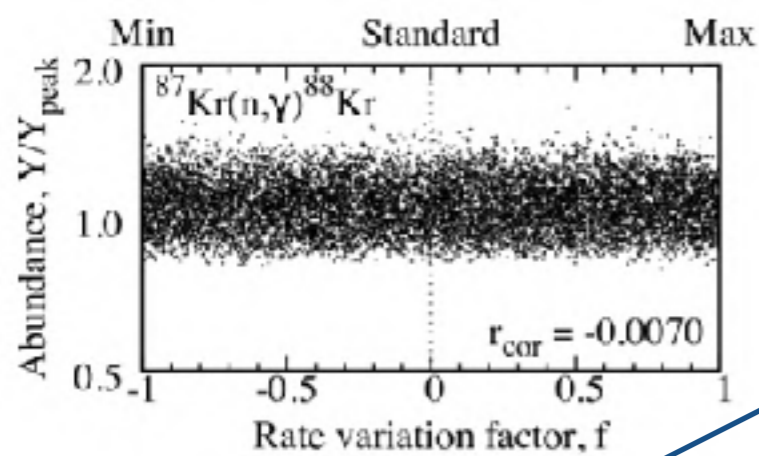
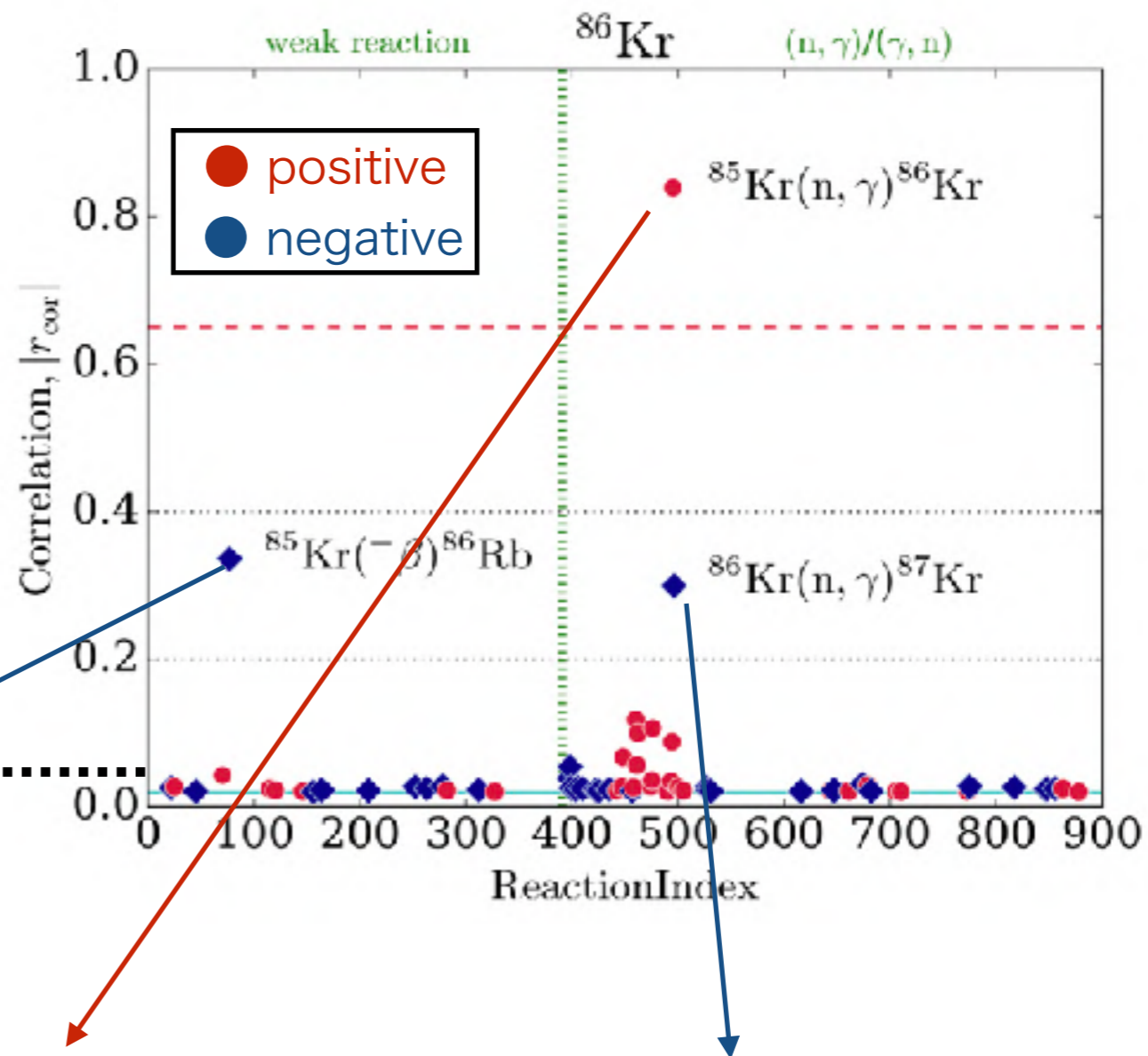
# “相関係数”による選別

※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”



# “key reaction”のリスト

※例はsプロセス

条件にあう「重要な反応・崩壊率」をまとめる

(sプロセスの場合ほとんど生成物に隣接する中性子捕獲)

Table 1: The key neutron-capture reactions for the weak s-process. Key  $(n, \gamma)$  reactions are listed with their correlation factors  $r_{\text{cor},0}$  for each key “product” nucleus. Only the target nucleus for the involving neutron capture is shown in the column of “ $(n, \gamma)$ -target”.

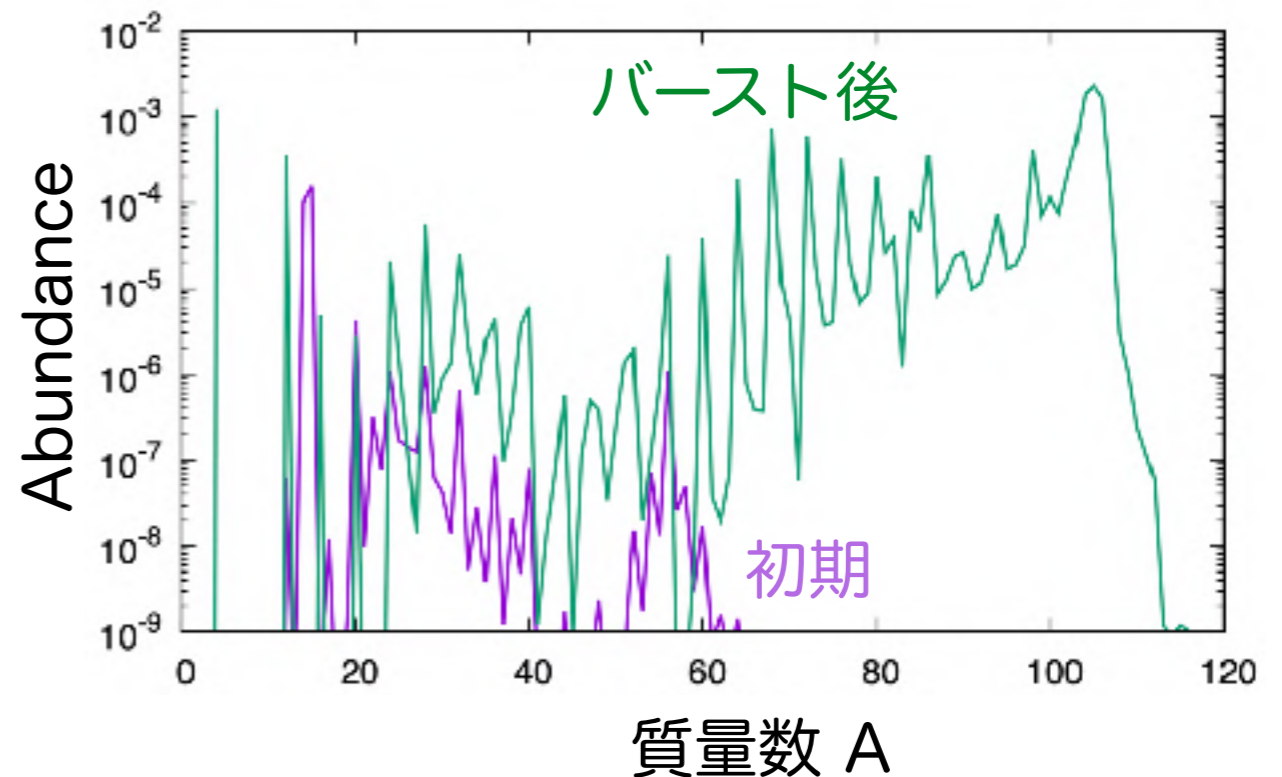
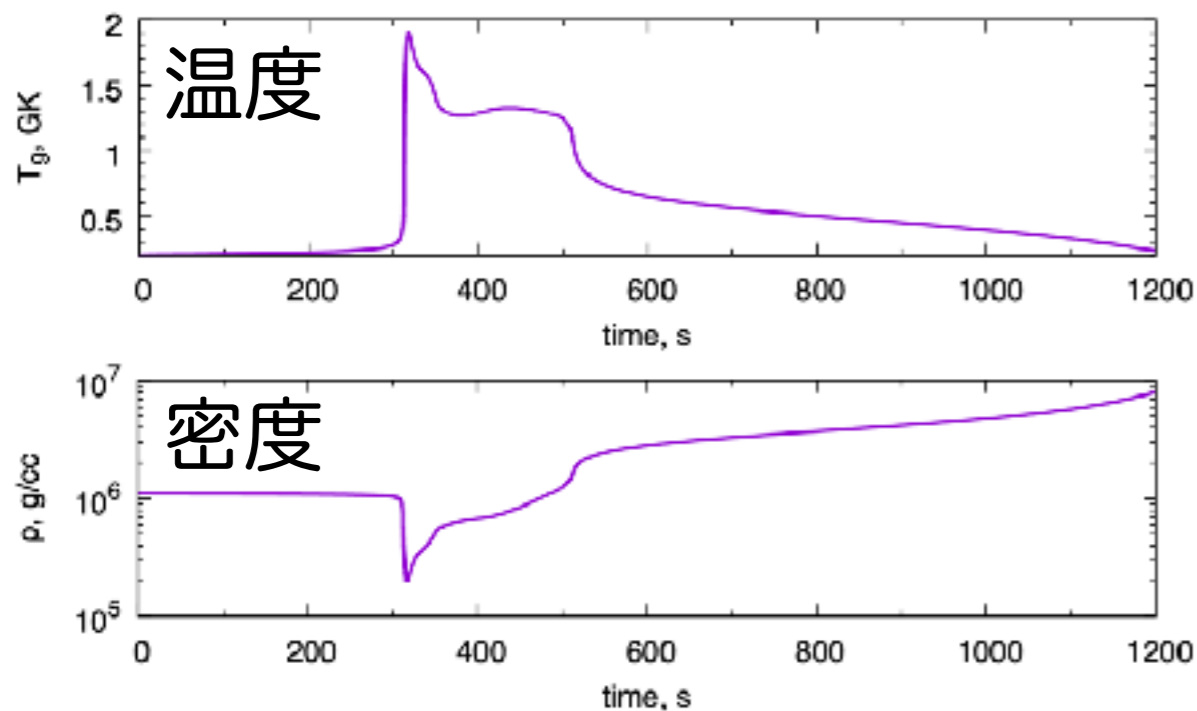
Product	$^{67}\text{Zn}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}$	$^{77}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$	$^{81}\text{Kr}$	$^{83}\text{Kr}$	$^{85}\text{Kr}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{67}\text{Zn}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}$	$^{77}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$	$^{81}\text{Br}$	$^{83}\text{Kr}$	$^{86}\text{Kr}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.67	-0.85	-0.84	-0.86	-0.71	-0.80	-0.76	0.84

Table 2: Key neutron-capture reactions for the main s-process. The columns are the same as Table 1.

Product	$^{69}\text{Ga}$	$^{71}\text{Ga}$	$^{70}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}$	$^{75}\text{As}$	$^{76}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$	$^{79}\text{Se}$	$^{79}\text{Se}$	$^{80}\text{Se}$	$^{81}\text{Br}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{69}\text{Ga}$	$^{71}\text{Ga}$	$^{70}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}$	$^{75}\text{As}$	$^{76}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$	$^{79}\text{Br}$	$^{80}\text{Kr}$	$^{80}\text{Se}$	$^{81}\text{Br}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.78	-0.89	-0.87	-0.93	-0.97	-0.86	-0.89	-0.97	-0.94	-0.90	-0.96	-0.74
Product	$^{84}\text{Kr}$	$^{85}\text{Kr}$	$^{85}\text{Kr}$	$^{85}\text{Rb}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}$	$^{88}\text{Sr}$	$^{89}\text{Y}$	$^{90}\text{Zr}$	$^{92}\text{Zr}$	$^{93}\text{Zr}$	$^{94}\text{Zr}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{84}\text{Kr}$	$^{86}\text{Kr}$	$^{87}\text{Rb}$	$^{85}\text{Rb}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{89}\text{Y}$	$^{90}\text{Zr}$	$^{92}\text{Zr}$	$^{93}\text{Nb}$	$^{94}\text{Zr}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.98	0.88	0.86	-0.86	-0.94	-0.92	-0.65	-0.83	-0.88	-0.92	-0.97	-0.85
Product	$^{96}\text{Mo}$	$^{97}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}$	$^{99}\text{Tc}$	$^{100}\text{Ru}$	$^{102}\text{Ru}$	$^{103}\text{Rh}$	$^{104}\text{Pd}$	$^{106}\text{Pd}$	$^{107}\text{Pd}$	$^{108}\text{Pd}$	$^{109}\text{Ag}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{96}\text{Mo}$	$^{97}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}$	$^{99}\text{Ru}$	$^{100}\text{Ru}$	$^{102}\text{Ru}$	$^{103}\text{Rh}$	$^{104}\text{Pd}$	$^{106}\text{Pd}$	$^{107}\text{Ag}$	$^{108}\text{Pd}$	$^{109}\text{Ag}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.94	-0.87	-0.94	-0.91	-0.92	-0.86	-0.95	-0.97	-0.96	-0.80	-0.96	-0.79
Product	$^{115}\text{In}$	$^{115}\text{In}$	$^{121}\text{Sb}$	$^{126}\text{Te}$	$^{127}\text{I}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{133}\text{Cs}$	$^{134}\text{Ba}$	$^{136}\text{Ba}$	$^{137}\text{Ba}$	$^{138}\text{Ba}$	$^{139}\text{La}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{115}\text{In}$	$^{115}\text{Sn}$	$^{121}\text{Sb}$	$^{126}\text{Te}$	$^{127}\text{I}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{133}\text{Cs}$	$^{134}\text{Ba}$	$^{136}\text{Ba}$	$^{137}\text{Ba}$	$^{138}\text{Ba}$	$^{139}\text{La}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.97	-0.65	-0.92	-0.68	-0.92	-0.97	-0.89	-0.85	-0.88	-0.84	-0.65	-0.88
Product	$^{159}\text{Tb}$	$^{165}\text{Ho}$	$^{166}\text{Er}$	$^{167}\text{Er}$	$^{168}\text{Er}$	$^{169}\text{Tm}$	$^{181}\text{Ta}$	$^{187}\text{Os}$	$^{192}\text{Pt}$	$^{194}\text{Pt}$	$^{200}\text{Hg}$	$^{205}\text{Pb}$
$(n, \gamma)$ -target	$^{159}\text{Tb}$	$^{165}\text{Ho}$	$^{166}\text{Er}$	$^{167}\text{Er}$	$^{168}\text{Er}$	$^{169}\text{Tm}$	$^{181}\text{Ta}$	$^{187}\text{Os}$	$^{192}\text{Pt}$	$^{194}\text{Pt}$	$^{200}\text{Hg}$	$^{205}\text{Tl}$
$r_{\text{cor},0}$	-0.80	-0.68	-0.81	-0.78	-0.86	-0.90	-0.84	-0.86	-0.89	-0.90	-0.67	-0.87

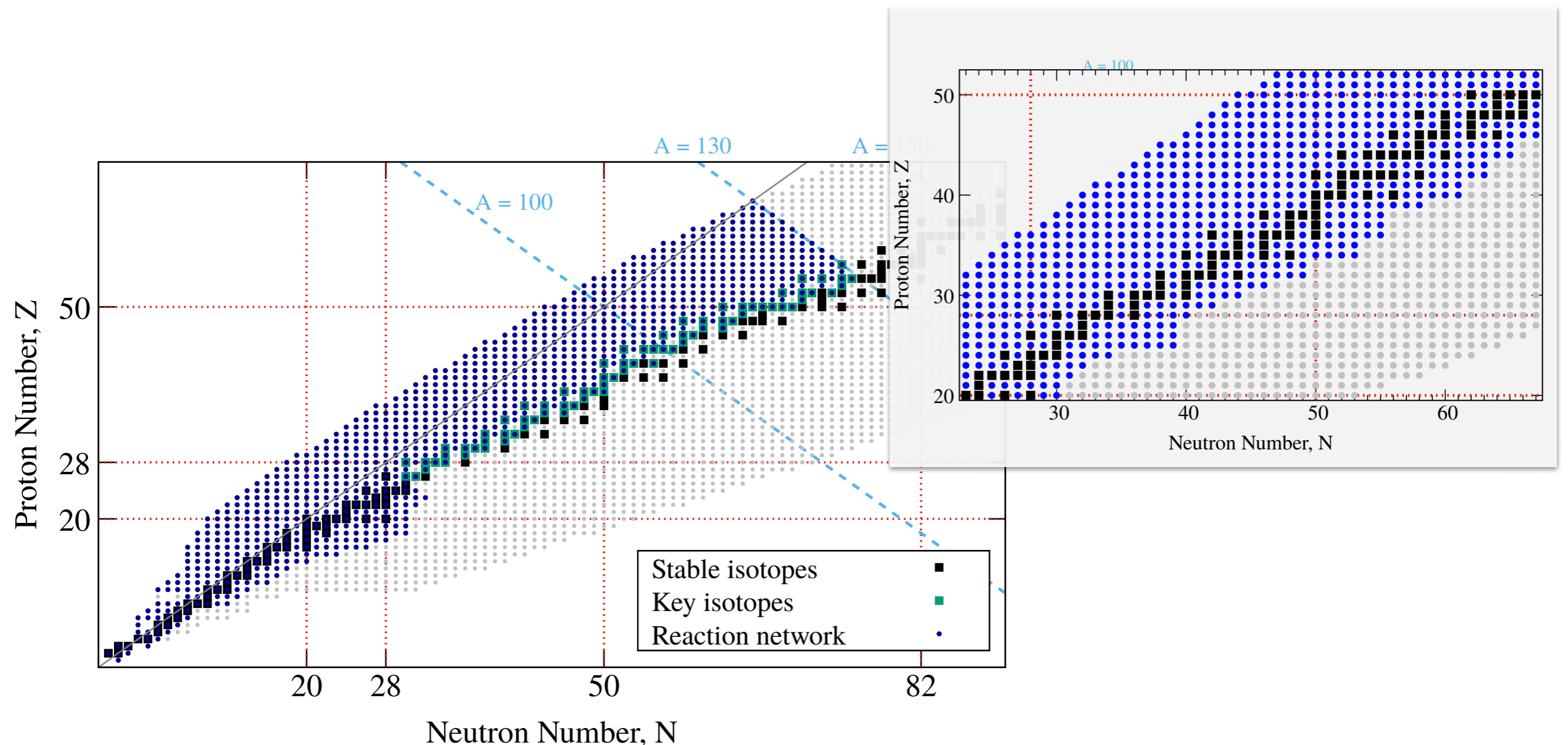
# 方法：X線バーストの1 zone モデル

- ・rpプロセスの「典型的」な物理環境を再現: “0D”モデル
- ・複雑な解析を行うベース
  - ・より「現実的」なモデルからは否定されるが、
  - ・元素合成の解析では、割と便利に使われたりする。
- ・ここでは代表的なものを使用
  - ・Schatz et al. (2001)など、rpプロセスが強いもの



# 方法：(full) 核反応ネットワーク

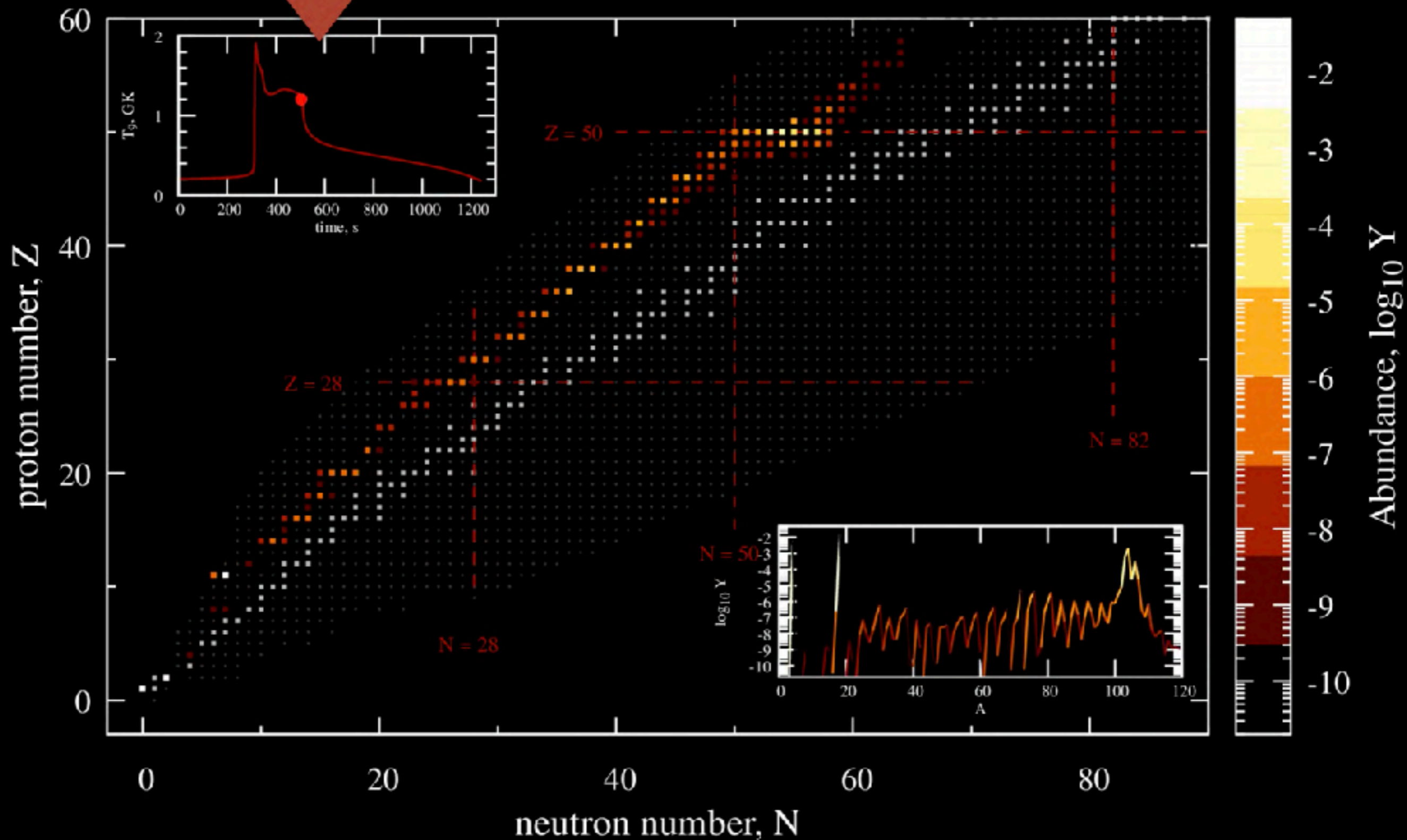
- 全核種：1042核種 (陽子過剰,  $A < 130$ )
- 全核反応：6349反応
- 生成核種：Fe以上の112核種
  - 今回、軽い元素への影響は考慮せず (これまでの研究の名残)





# 温度 rpプロセスの時間発展

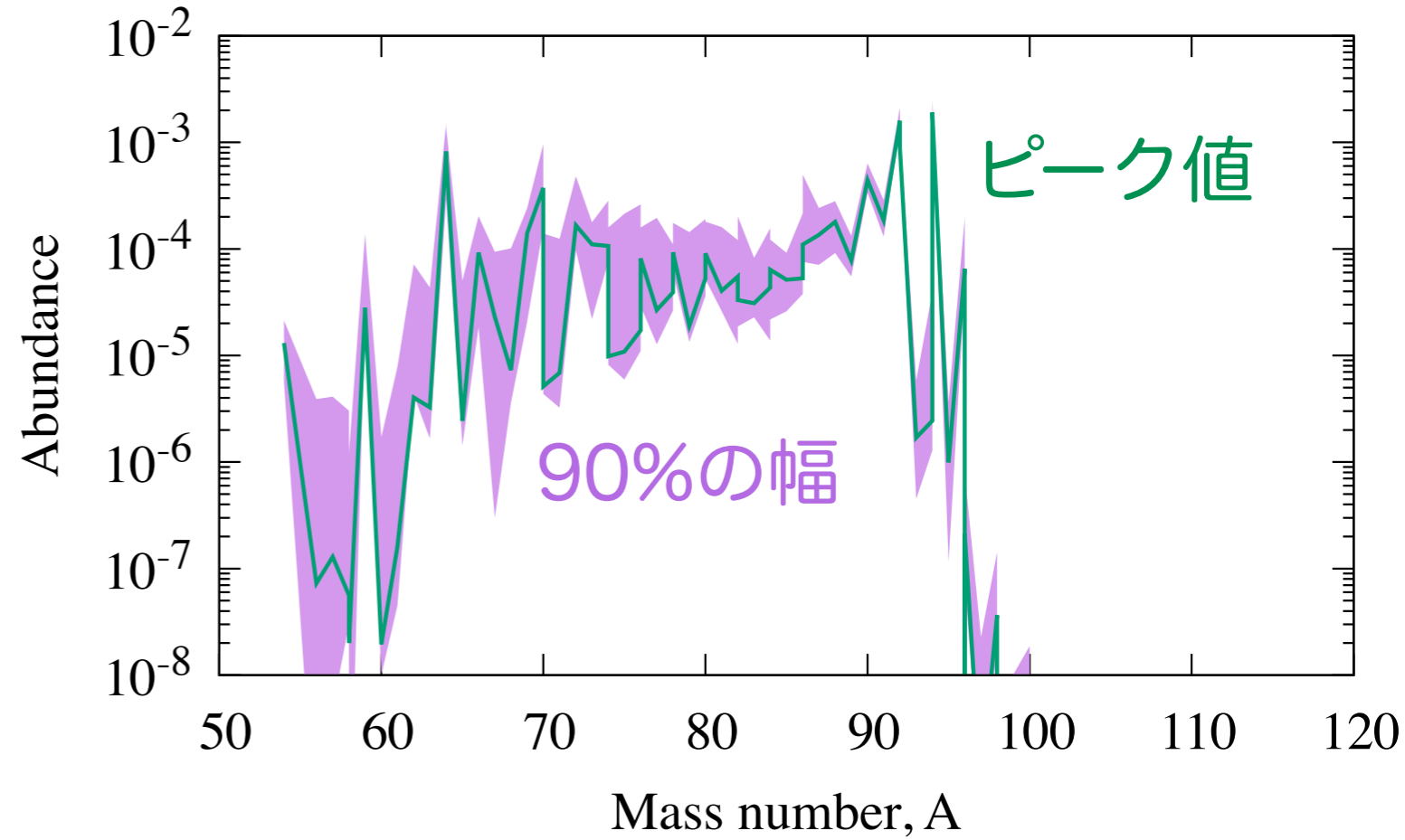
温度



# rpプロセスの生成物の不定性

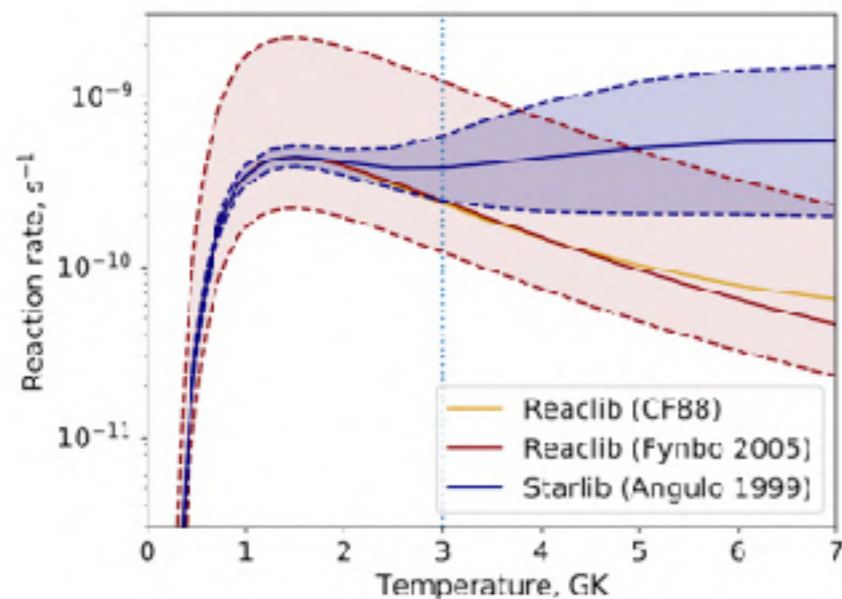
## 反応率の不定性 (理論)

Reaction	upper	lower
(n, $\gamma$ )	2.0	2.0
(p, $\gamma$ )	2.0	3.0
(p,n)	2.0	3.0
( $\alpha$ , $\gamma$ )	2.0	10.0
( $\alpha$ ,n)	2.0	10.0
( $\alpha$ ,p)	2.0	10.0

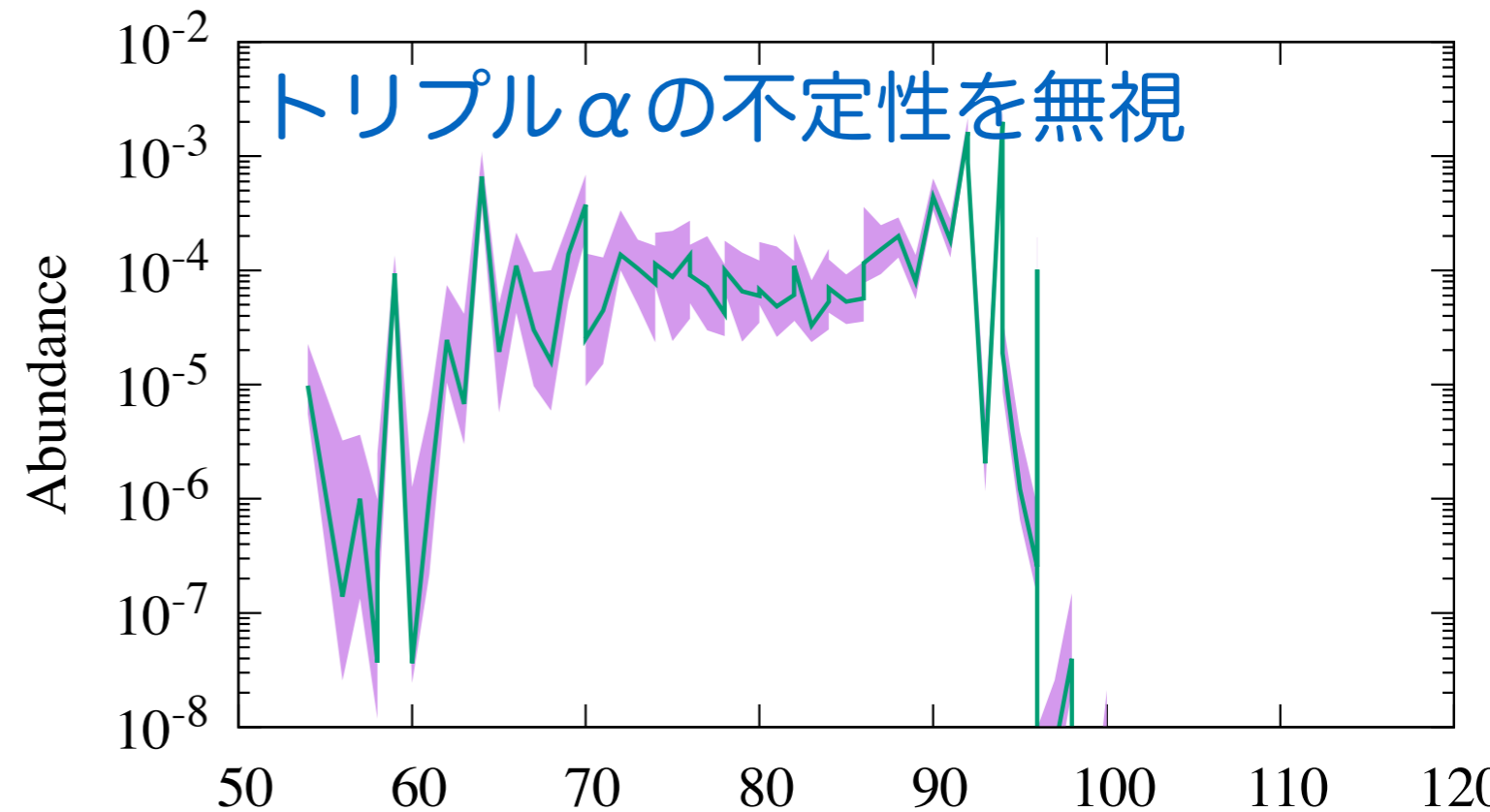


## トリプル $\alpha$ の不定性

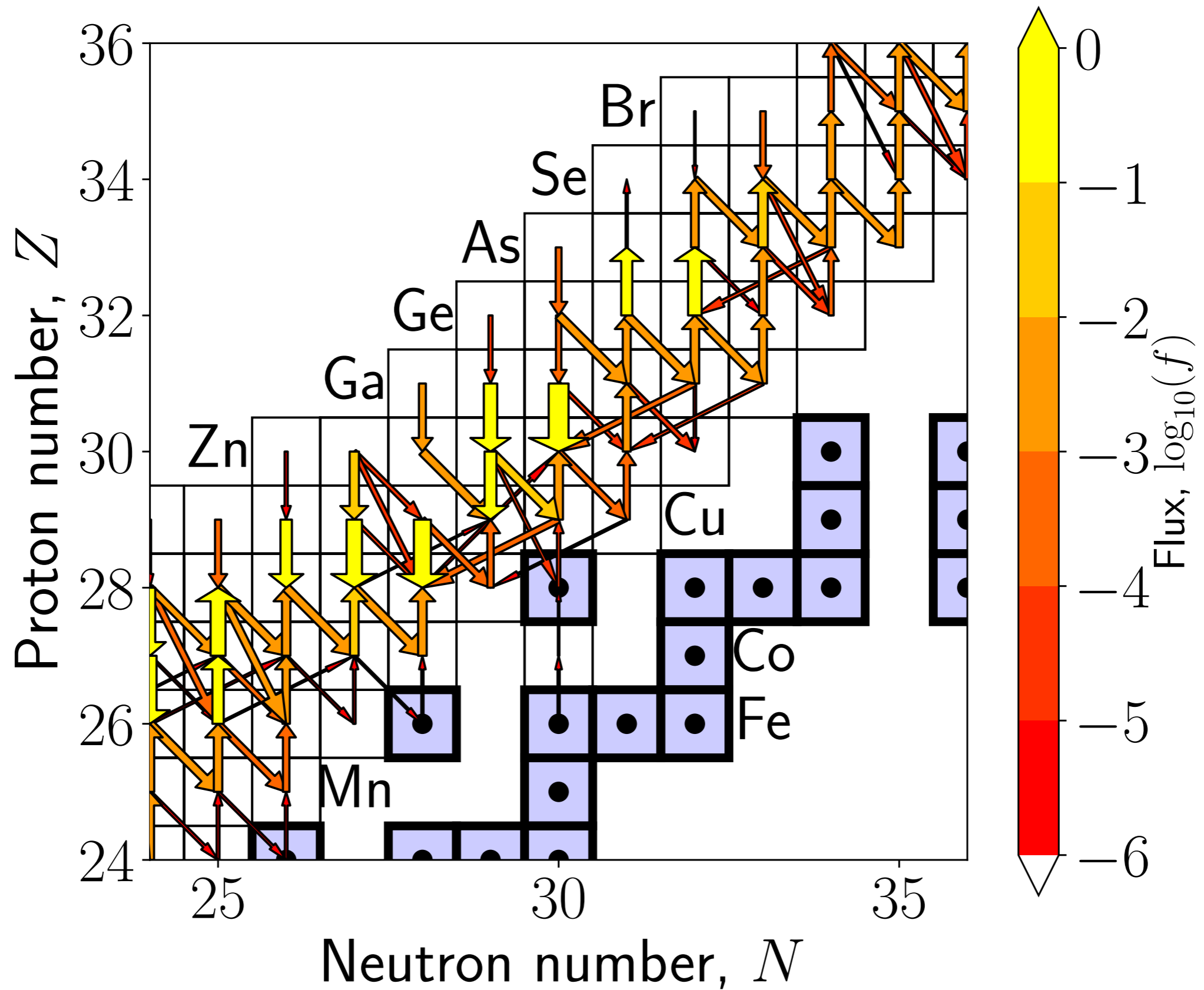
Reaclib (Fynbo)を  
ベースに  $\times 2 - 1/2$



NN+2019



# rpプロセス：元素合成のflow



# 先行研究：rpプロセスの“key reactions”

Cyburt et al. (2016), ApJ  
 不定性を個別の反応ごとに振る

生成物

## 光度曲線への感度

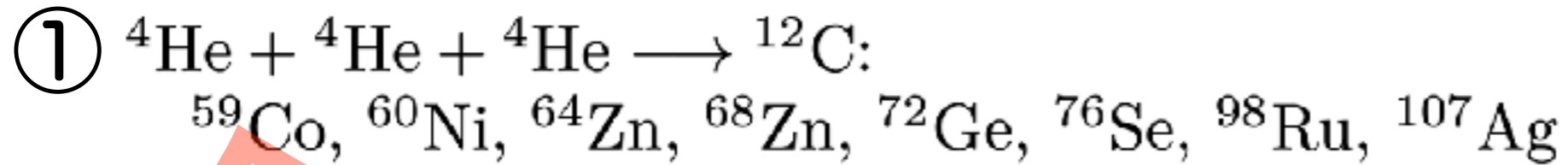
Table 1  
 Reactions that Impact the Burst Light Curve in the Single-zone X-Ray Burst Model

Rank	Reaction	Type <sup>a</sup>	Sensitivity <sup>b</sup>	Category
1	$^{56}\text{Ni}(\alpha, p)^{59}\text{Cu}$	U	12.5	1
2	$^{60}\text{Cu}(\beta, \gamma)^{60}\text{Zn}$	D	12.1	1
3	$^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$	D	7.9	1
4	$^{30}\text{S}(\alpha, p)^{33}\text{Cl}$	U	7.8	1
5	$^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$	U	5.3	1
6	$^{61}\text{Ga}(\beta, \gamma)^{62}\text{Ge}$	D	5.0	1
7	$^{23}\text{Al}(\beta, \gamma)^{23}\text{Si}$	U	4.8	1
8	$^{27}\text{P}(\beta, \gamma)^{27}\text{S}$	D	4.4	1
9	$^{63}\text{Ga}(\beta, \gamma)^{64}\text{Ge}$	D	3.8	1
10	$^{60}\text{Zn}(\alpha, p)^{63}\text{Ga}$	U	3.6	1
11	$^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$	D	3.5	1
12	$^{56}\text{Ni}(\beta, \gamma)^{57}\text{Cu}$	D	3.4	1
13	$^{32}\text{S}(\alpha, p)^{35}\text{Cl}$	U	2.8	1
14	$^{38}\text{S}(\alpha, p)^{41}\text{Cl}$	U	2.7	1
15	$^{31}\text{Cl}(\beta, \gamma)^{32}\text{Ar}$	U	2.7	1
16	$^{39}\text{K}(\beta, \gamma)^{39}\text{Ca}$	U	2.5	2
17	$^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$	D	2.3	2
18	$^{25}\text{Si}(\alpha, p)^{26}\text{P}$	U	1.9	2
19	$^{37}\text{Cu}(\beta, \gamma)^{37}\text{Zn}$	D	1.7	2
20	$^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$	U	1.6	3
21	$^{24}\text{Si}(\alpha, p)^{27}\text{P}$	U	1.4	3
22	$^{22}\text{Mg}(\beta, \gamma)^{22}\text{Al}$	D	1.1	3
23	$^{65}\text{As}(\beta, \gamma)^{66}\text{Se}$	U	1.0	3
24	$^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$	U	1.0	3
25	$^{46}\text{Sc}(\beta, \gamma)^{46}\text{Ti}$	D	0.9	3
26	$^{34}\text{Ar}(\beta, \gamma)^{34}\text{K}$	D	0.8	3
27	$^{47}\text{Mn}(\beta, \gamma)^{47}\text{Fe}$	D	0.8	3
28	$^{33}\text{Ca}(\beta, \gamma)^{33}\text{Sc}$	D	0.8	3

Table 4  
 Reactions that Impact the Composition in the Single-zone X-Ray Burst Model

Count	Reaction	Max. Ratio <sup>a</sup>	Affected Mass Numbers with Mass Fraction $> 10^{-4}$	
			max	$> \times 10$ change
1	$^{12}\text{C}(\beta, \gamma)^{12}\text{N}$	6	16	16
2	$^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)^{18}\text{Ne}$	4	15	15
3	$^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$	7	16	16, 20-21
4	$^{17}\text{F}(\alpha, p)^{22}\text{Ne}$	2	21	21
5	$^{19}\text{F}(\beta, \gamma)^{19}\text{Ne}$	3	19	18-19, 21
6	$^{19}\text{F}(\alpha, p)^{23}\text{Ne}$	2	23	18, 21, 23
7	$^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{23}\text{Na}$	7	19	18-19, 21, 24, 57
8	$^{20}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{24}\text{Mg}$	6	20	20, 24
9	$^{22}\text{Ne}(\alpha, p)^{25}\text{Mg}$	4	27	16, 21, 25, 27
10	$^{22}\text{Ne}(\beta, \gamma)^{22}\text{Mg}$	4	23	23
11	$^{24}\text{Mg}(\alpha, p)^{28}\text{Al}$	20	23	21, 23-27, 57
12	$^{24}\text{Mg}(\beta, \gamma)^{24}\text{Al}$	2	23	23
13	$^{24}\text{Al}(\beta, \gamma)^{24}\text{Si}$	4	27	16, 19, 21, 24, 26-28, 46, 57, 70, 74, 81-82
14	$^{24}\text{Al}(\alpha, p)^{28}\text{Si}$	2	24	24
15	$^{26}\text{Al}(\beta, \gamma)^{26}\text{Si}$	6	27	27
16	$^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{32}\text{P}$	3	18	18-21, 46, 57, 70, 73-75, 78, 82, 86
17	$^{28}\text{Si}(\beta, \gamma)^{28}\text{P}$	3	27	27
18	$^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{32}\text{P}$	2	28	28
19	$^{27}\text{P}(\beta, \gamma)^{27}\text{S}$	2	26	26
20	$^{27}\text{P}(\alpha, p)^{30}\text{S}$	2	28	28
21	$^{27}\text{P}(\beta, \gamma)^{27}\text{S}$	4	29	29
22	$^{30}\text{P}(\beta, \gamma)^{30}\text{S}$	3	31	31
23	$^{36}\text{S}(\alpha, p)^{40}\text{Cl}$	2	19	18-19
24	$^{36}\text{S}(\beta, \gamma)^{36}\text{Cl}$	3	18	18-21, 46, 57, 70-71, 73-75, 77-78, 81-83, 86
25	$^{36}\text{S}(\alpha, p)^{40}\text{Cl}$	6	31	31, 33
26	$^{36}\text{Cl}(\beta, \gamma)^{36}\text{Ar}$	5	32	32-33
27	$^{36}\text{Cl}(\alpha, p)^{40}\text{Ar}$	4	33	33
28	$^{36}\text{Ar}(\beta, \gamma)^{36}\text{K}$	7	35	35-37
29	$^{36}\text{Ar}(\alpha, p)^{40}\text{K}$	4	36	36
30	$^{39}\text{K}(\beta, \gamma)^{39}\text{Ca}$	5	36	36
31	$^{39}\text{K}(\alpha, p)^{43}\text{Ca}$	6	37	37
32	$^{39}\text{K}(\beta, \gamma)^{39}\text{Ca}$	3	40	40
33	$^{40}\text{Ca}(\beta, \gamma)^{40}\text{Sc}$	6	40	40, 42-46
34	$^{40}\text{Ca}(\alpha, p)^{44}\text{Ti}$	10	41	41
35	$^{40}\text{Ca}(\beta, \gamma)^{40}\text{Ti}$	3	42	42, 43
36	$^{40}\text{Ti}(\beta, \gamma)^{40}\text{V}$	8	43	43-45
37	$^{40}\text{Ti}(\alpha, p)^{44}\text{V}$	2	44	44
38	$^{40}\text{V}(\beta, \gamma)^{40}\text{Cr}$	7	44	44-45
39	$^{40}\text{V}(\alpha, p)^{44}\text{Cr}$	6	45	45-46
40	$^{40}\text{V}(\beta, \gamma)^{40}\text{Cr}$	2	46	46
41	$^{40}\text{Cr}(\beta, \gamma)^{40}\text{Mn}$	8	47	47
42	$^{40}\text{Cr}(\alpha, p)^{44}\text{Mn}$	3	48	48
43	$^{40}\text{Mn}(\beta, \gamma)^{40}\text{Fe}$	10	48	48
44	$^{40}\text{Mn}(\alpha, p)^{44}\text{Fe}$	7	49	49
45	$^{40}\text{Mn}(\beta, \gamma)^{40}\text{Fe}$	3	50	50-51
46	$^{40}\text{Fe}(\beta, \gamma)^{40}\text{Co}$	2	51	51
47	$^{40}\text{Fe}(\alpha, p)^{44}\text{Co}$	5	51	51
48	$^{40}\text{Fe}(\beta, \gamma)^{40}\text{Co}$	7	52	52
49	$^{40}\text{Fe}(\alpha, p)^{44}\text{Co}$	3	53	53
50	$^{40}\text{Fe}(\beta, \gamma)^{40}\text{Co}$	3	54	54
51	$^{40}\text{Co}(\beta, \gamma)^{40}\text{Ni}$	5	53	53
52	$^{40}\text{Co}(\alpha, p)^{44}\text{Ni}$	10	53	53
53	$^{40}\text{Co}(\beta, \gamma)^{40}\text{Ni}$	10	54	54
54	$^{40}\text{Co}(\alpha, p)^{44}\text{Ni}$	10	55	55
55	$^{40}\text{Ni}(\alpha, p)^{44}\text{Cu}$	7	24	56 12, 16, 21, 23, 24, 34, 36, 39, 42, 44, 46, 50, 52, 54, 57, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 73-75, 77-78, 80-85

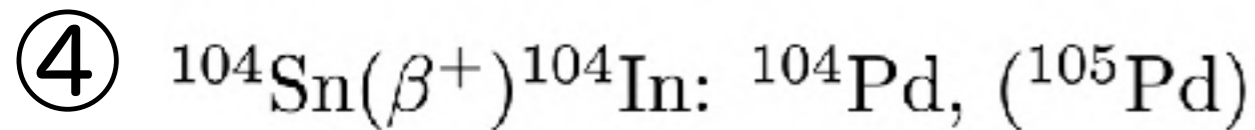
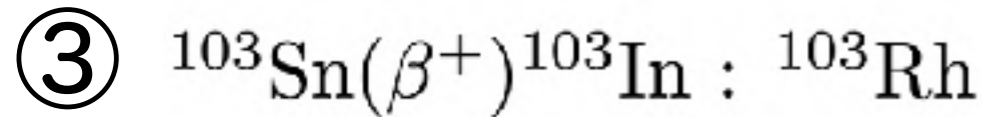
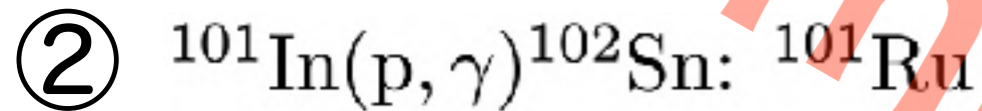
# rpプロセスの“key reactions”



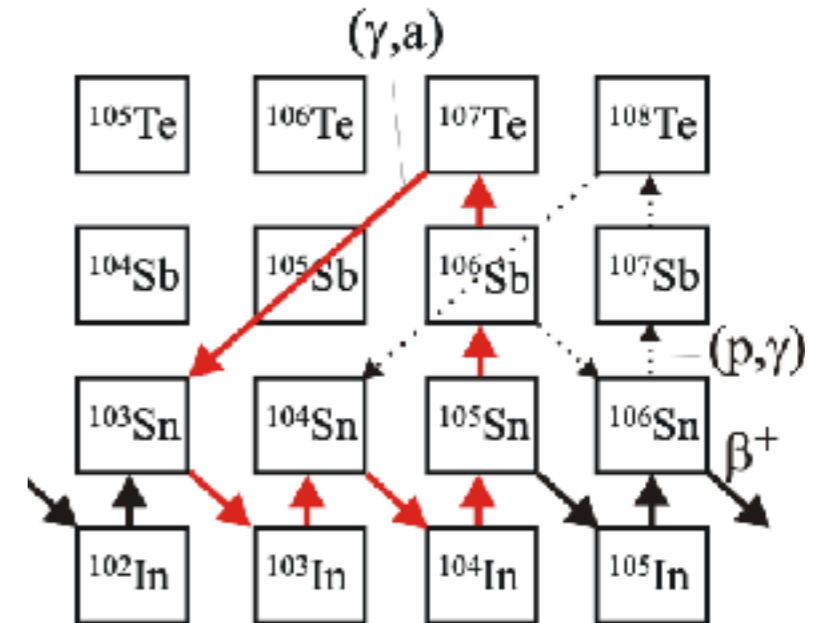
${}^{57}\text{Fe}$	${}^{58}\text{Ni}$	${}^{61}\text{Ni}$	${}^{62}\text{Ni}$	${}^{63}\text{Cu}$	${}^{65}\text{Cu}$	${}^{66}\text{Zn}$	${}^{67}\text{Zn}$	${}^{69}\text{Ga}$	${}^{71}\text{Ga}$	${}^{70}\text{Ge}$
${}^{73}\text{Ge}$	${}^{75}\text{As}$	${}^{74}\text{Se}$	${}^{77}\text{Se}$	${}^{79}\text{Br}$	${}^{81}\text{Br}$	${}^{78}\text{Kr}$	${}^{80}\text{Kr}$	${}^{82}\text{Kr}$	${}^{83}\text{Kr}$	${}^{86}\text{Sr}$
${}^{87}\text{Sr}$	${}^{88}\text{Sr}$	${}^{89}\text{Y}$	${}^{91}\text{Zr}$	${}^{92}\text{Mo}$	${}^{94}\text{Mo}$	${}^{96}\text{Ru}$	${}^{100}\text{Ru}$	${}^{105}\text{Pd}$	${}^{109}\text{Ag}$	${}^{108}\text{Cd}$

$$|r_{\text{cor}}| > 0.4$$

※ hot-CNOなど他の軽元素の反応率の影響はあるが相対的に小さい。



The Sn-Sb-Te cycle



トリプル $\alpha$ が支配的→元素合成の起点

天体モデルの性質と競合する（いわゆる、

エネルギーソースの反応）ので、分離する工夫が必要？

しかし、rpプロセスの「観測量」としては、  
 X線バーストの光度曲線がより重要？

# まとめ

## • X線バーストにおけるrpプロセス

- 経路上の核反応の不定性が大きい

## • モンテカルロ元素合成による解析

- 1 zoneモデルでのポストプロセス
- 不定性を定量的に評価し、“key reactions”を同定
  - トリプル $\alpha$ ：rpプロセスの根元→広範囲のインパクト
  - rpプロセスの終点付近（SnSbTeサイクル）

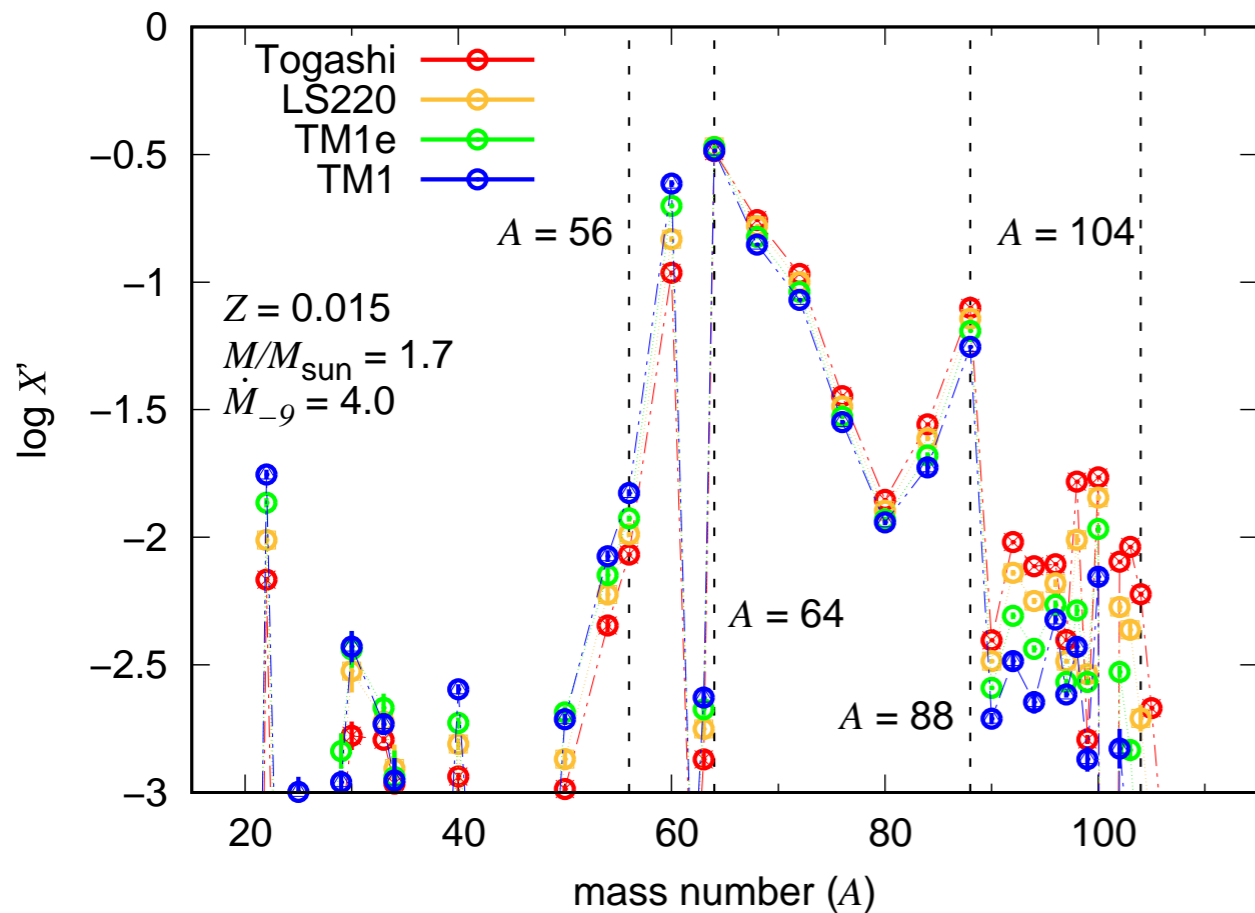
## • 今後の課題

- 「生成物」だけではなく、光度曲線との関連を
- ポストプロセスの枠を外せるか？
  - X線バーストモデル計算とカップル

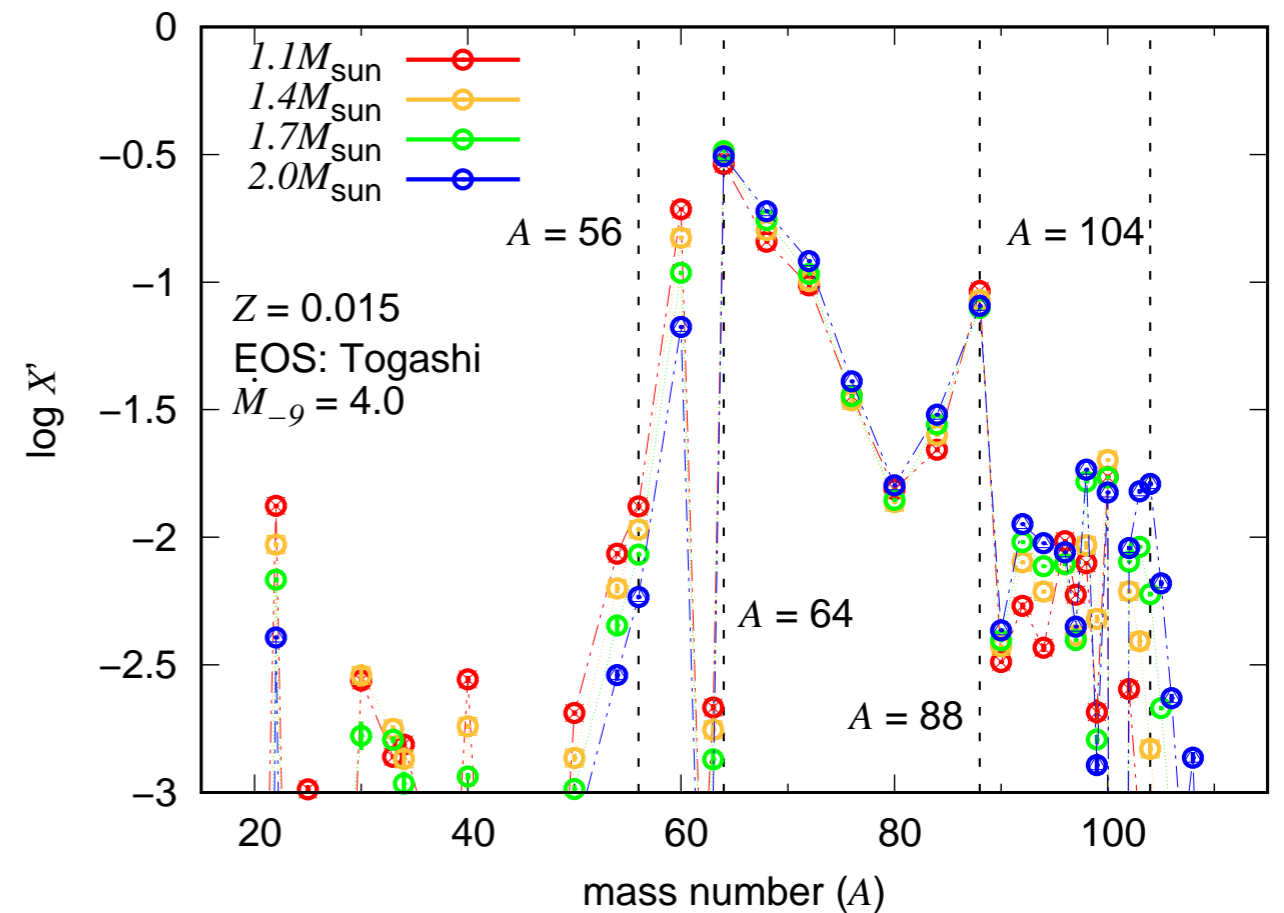
# 「中性子星を考慮したバーストモデル」に向けて

- 1D X線バーストモデルの結果 (Dohi, NN et al.)
- 元素合成は近似ネットワークで計算 (88核種)  
→ 土肥さんトーク

## 異なる状態方程式



## 異なる中性子星の質量



→ 中性子星の物理量によって変わらうる。