

# rプロセス元素合成における 原子核反応・崩壊の役割

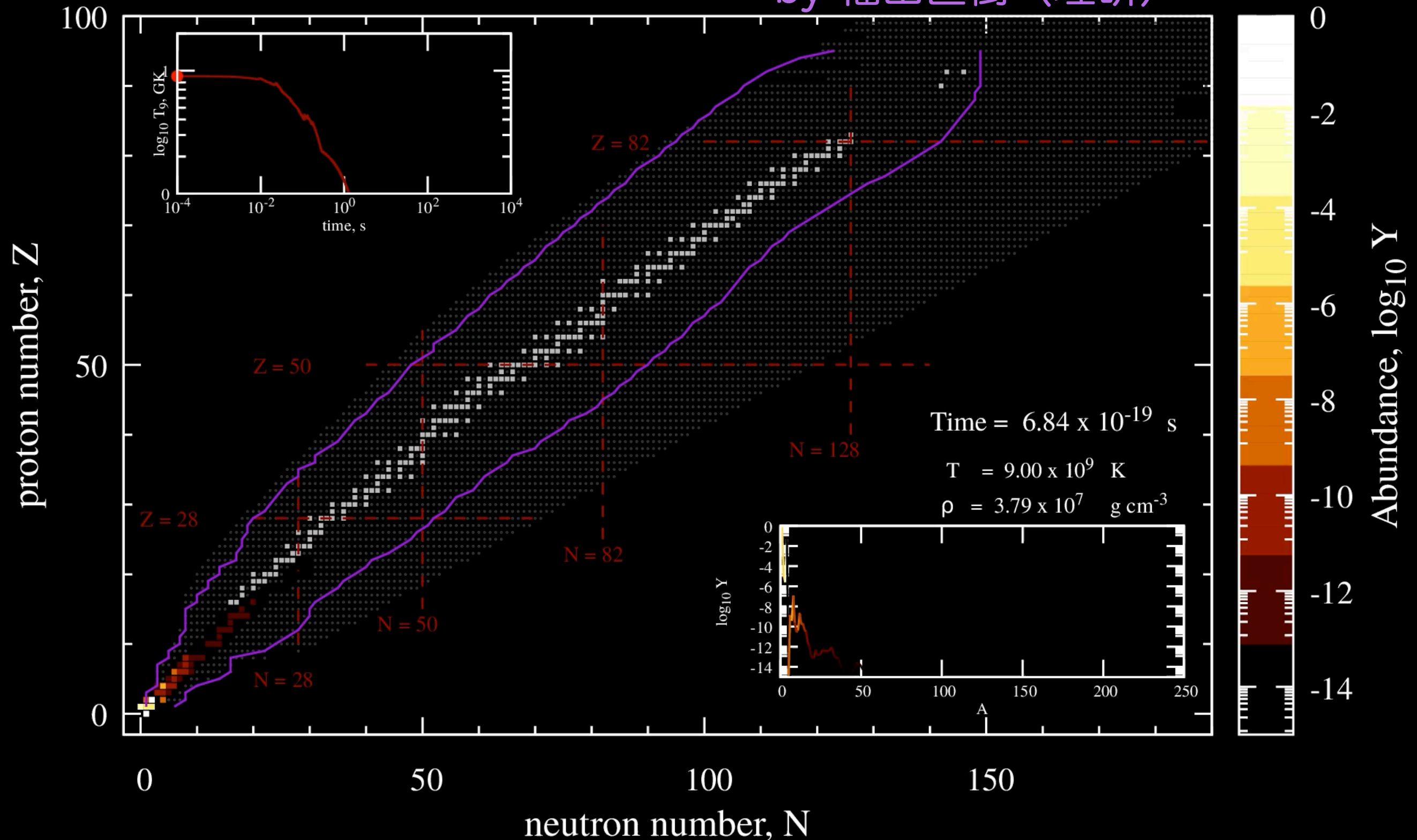
西村 信哉（京大・基研）

N. Nishimura (YITP, Kyoto)

# rプロセス元素合成シミュレーション

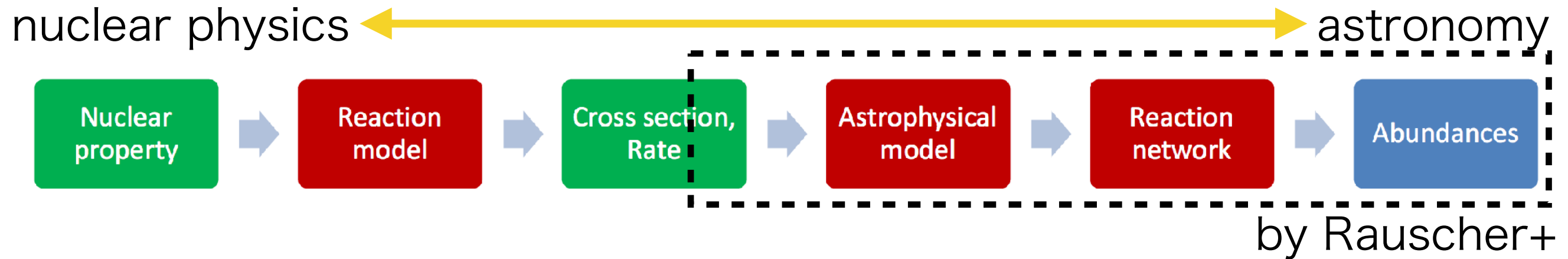
RIBFで生成可能な核 ( $1e-4$  pps)

by 福田直樹 (理研)



※非常に中性子過剰な場合 (核分裂サイクル)

# 元素合成における「不定性」の伝搬



## astrophysical models (condition)

### • Stellar (structure) evolution models

- mass, metallicity, dynamics: convection, rotation and magnetic fields, single/binary stars etc.

fixed ←

## Connecting uncertainties

### Network calculation

- Nucleosynthesis
  - (n,g) reaction
  - beta-decay

### Monte-Carlo simulation

uncertainty in the final abundances

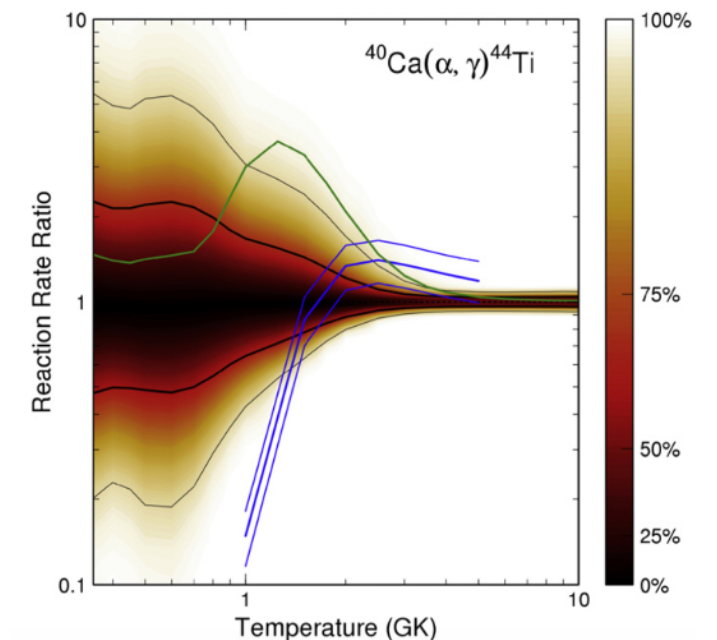
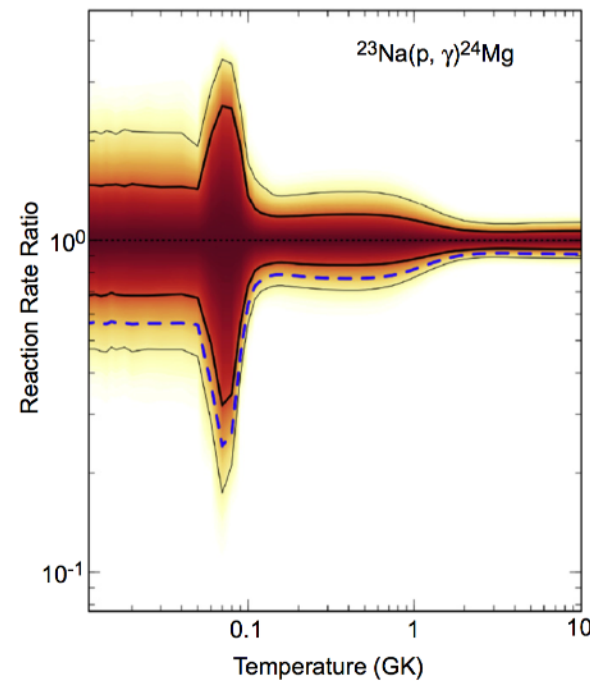
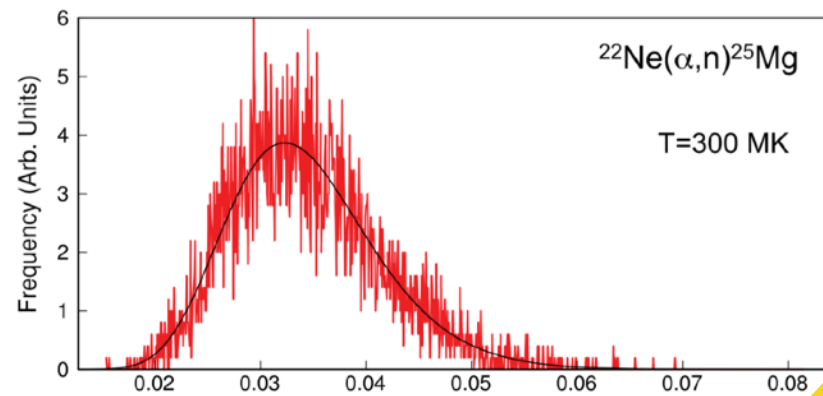
feedback (find key reaction/decay)

# Nuclear physics uncertainty in reaction rates

unknown rates for “key-reactions”

We know reactions that have impacts on nucleosynthesis, but we poorly know the value of reaction (cross section) rates

Iliadis+ 2015



our goal

unknown “key-reactions”

- heavy elements nucleosynthesis?
- a lot of reactions are involved
- “important reactions” are actually unknown

# 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 $\beta$ 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 (NN+2019, MNRAS submitted)

## ・rプロセス → 本研究 (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

- NN+2019, MNRAS (submitted)



# Monte-Carlo network code

- 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

# T-dependent uncertainty: (n,γ) & β-decay

## (n,γ) reactions

- [Experimental rates](#)

- base rates: KADoNiS v0.3 (Dillmann+, 2009)

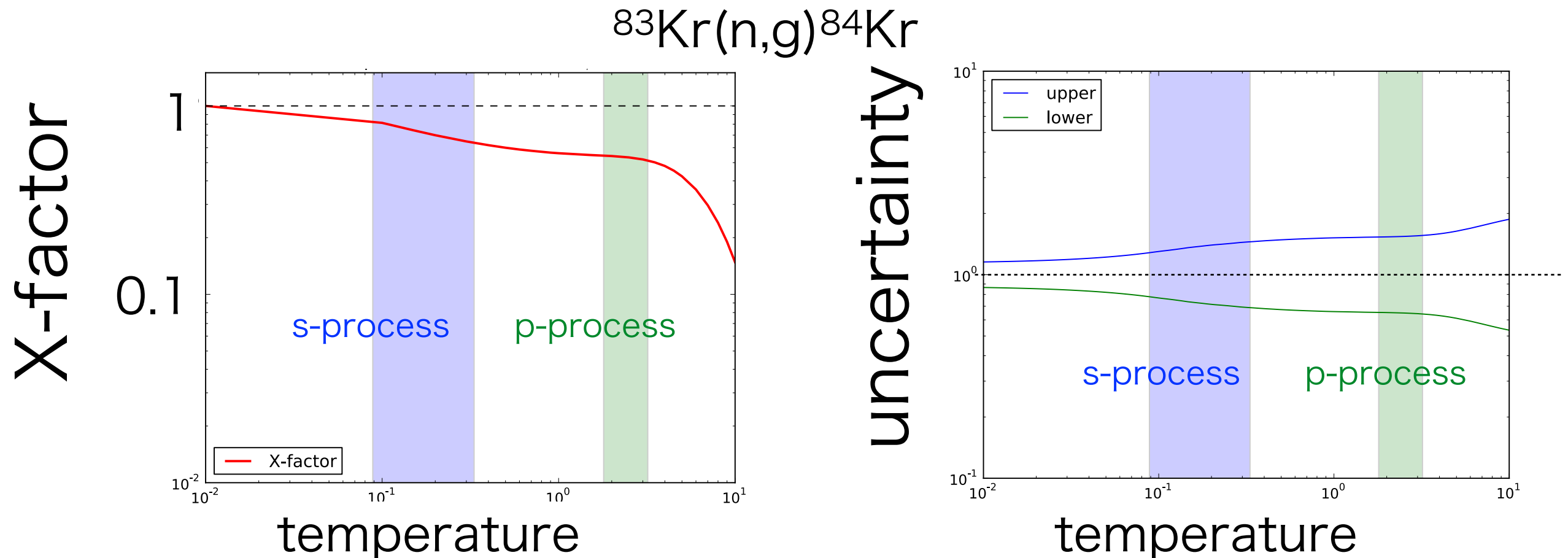
- consider both g.s. and e.s. (Rauscher, ApJ, 775, 2011)

$$U(T) = U_{\text{g.s.}} X + U_{\text{e.s.}} (1 - X)$$

β-decay: a similar method using partition functions

(See, NN+2016)

with uniform random distribution



# rプロセスにおける反応率の不定性

安定核に近い核に関する反応率

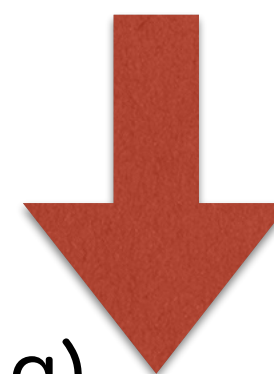
(実験的に存在が確認)

Reaction	$U_{th}^{hi}$	$U_{th}^{lo}$
(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

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

$U_{th}^{lo}$  : 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



rプロセス領域

- ・反応率 (n,g)

$$U_{hi} = 50; U_{lo} = 1/50$$

- ・ $\beta$ 崩壊（理論値）

$$U_{hi} = 20; U_{lo} = 1/20$$

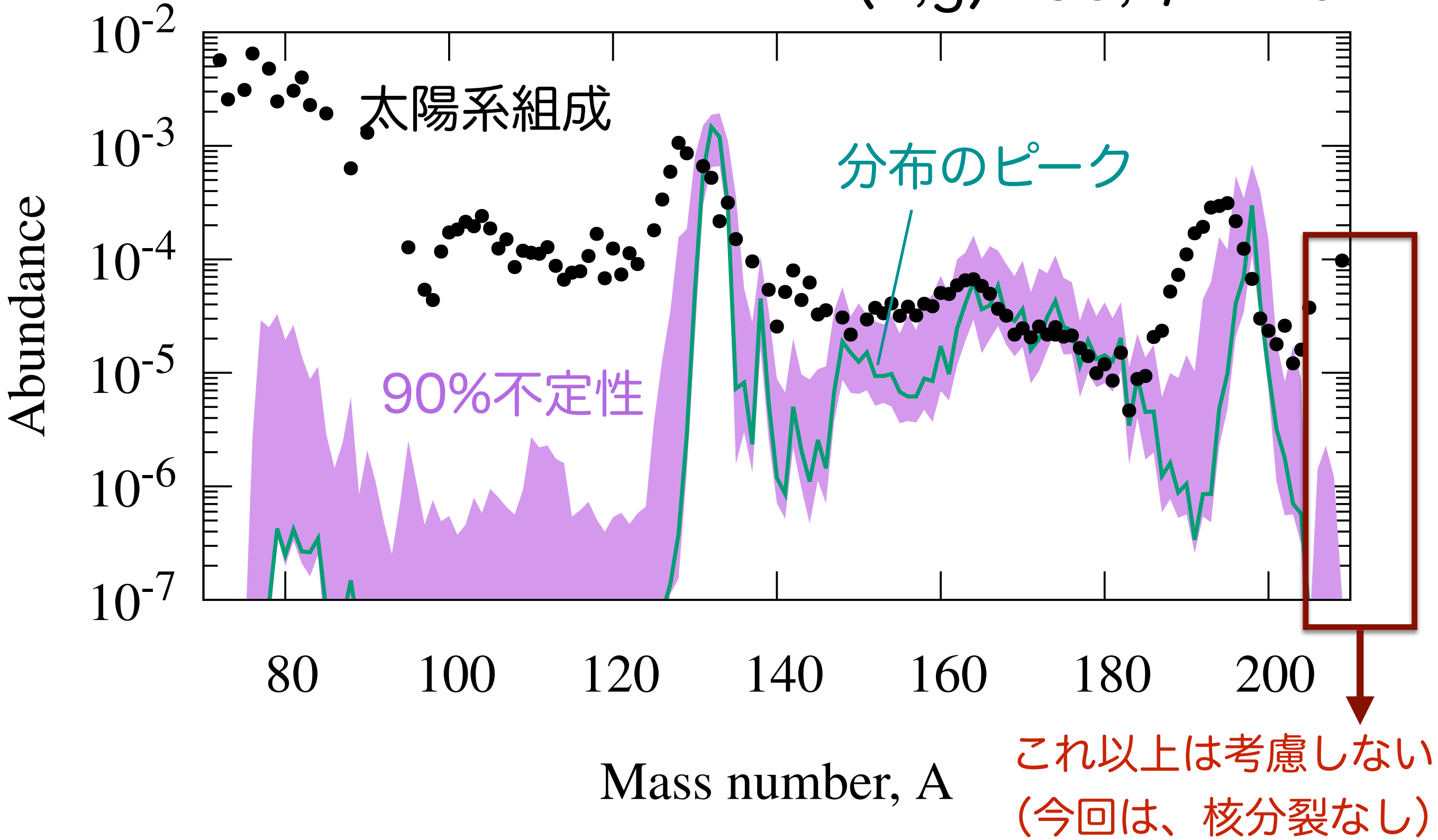
※実験ベースの反応率は、多少凝った取り扱いをする

(sプロセスの場合：NN+2017) が、今回は関係なし



# 中性子捕獲・ $\beta$ 崩壊の影響

(n,g) x50,  $\beta$  x20



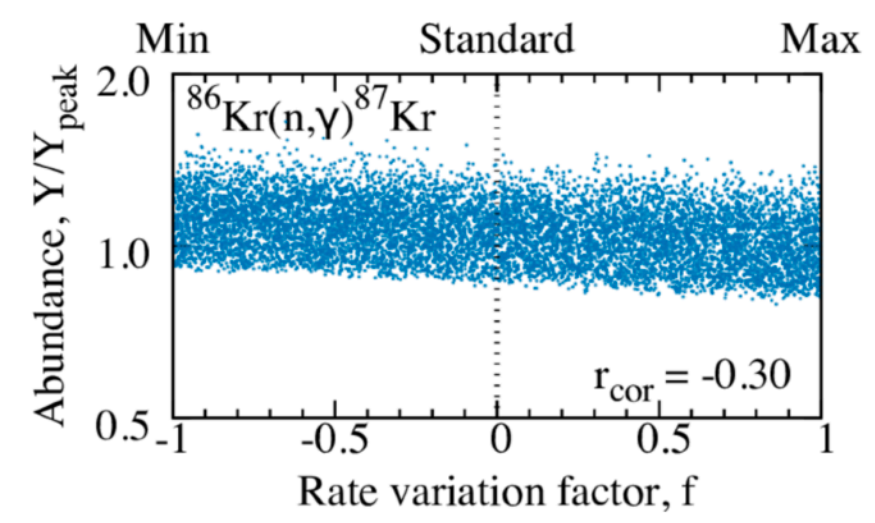
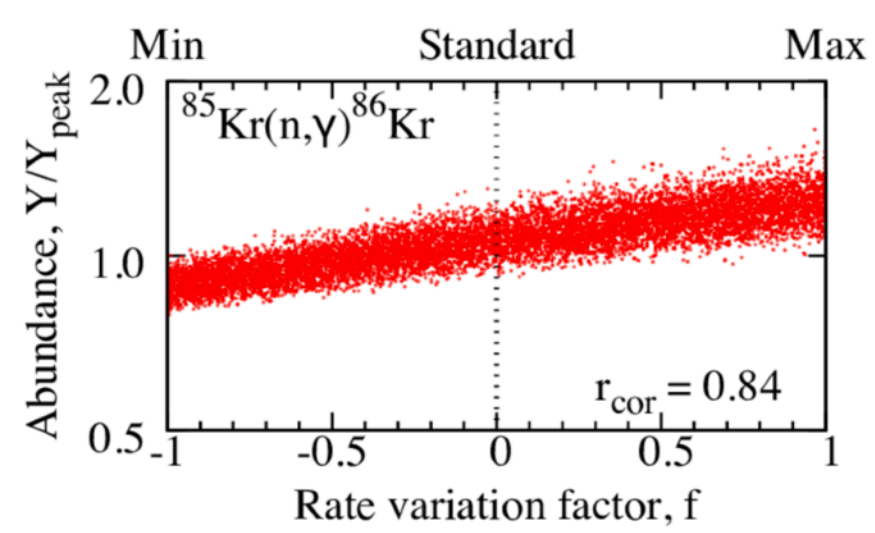
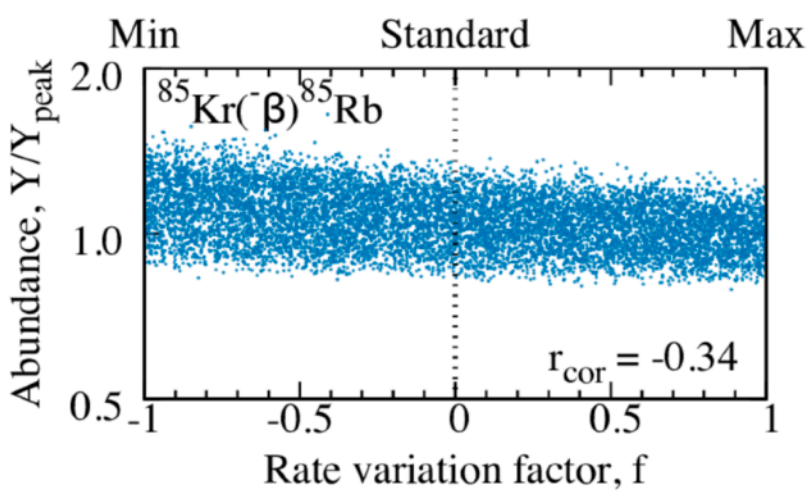
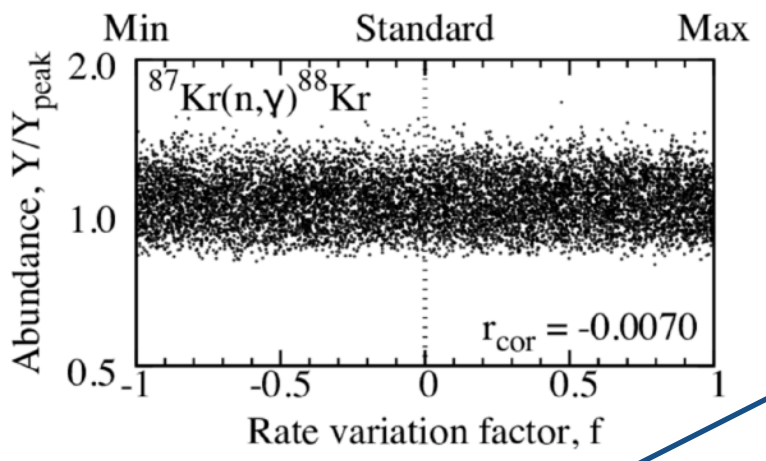
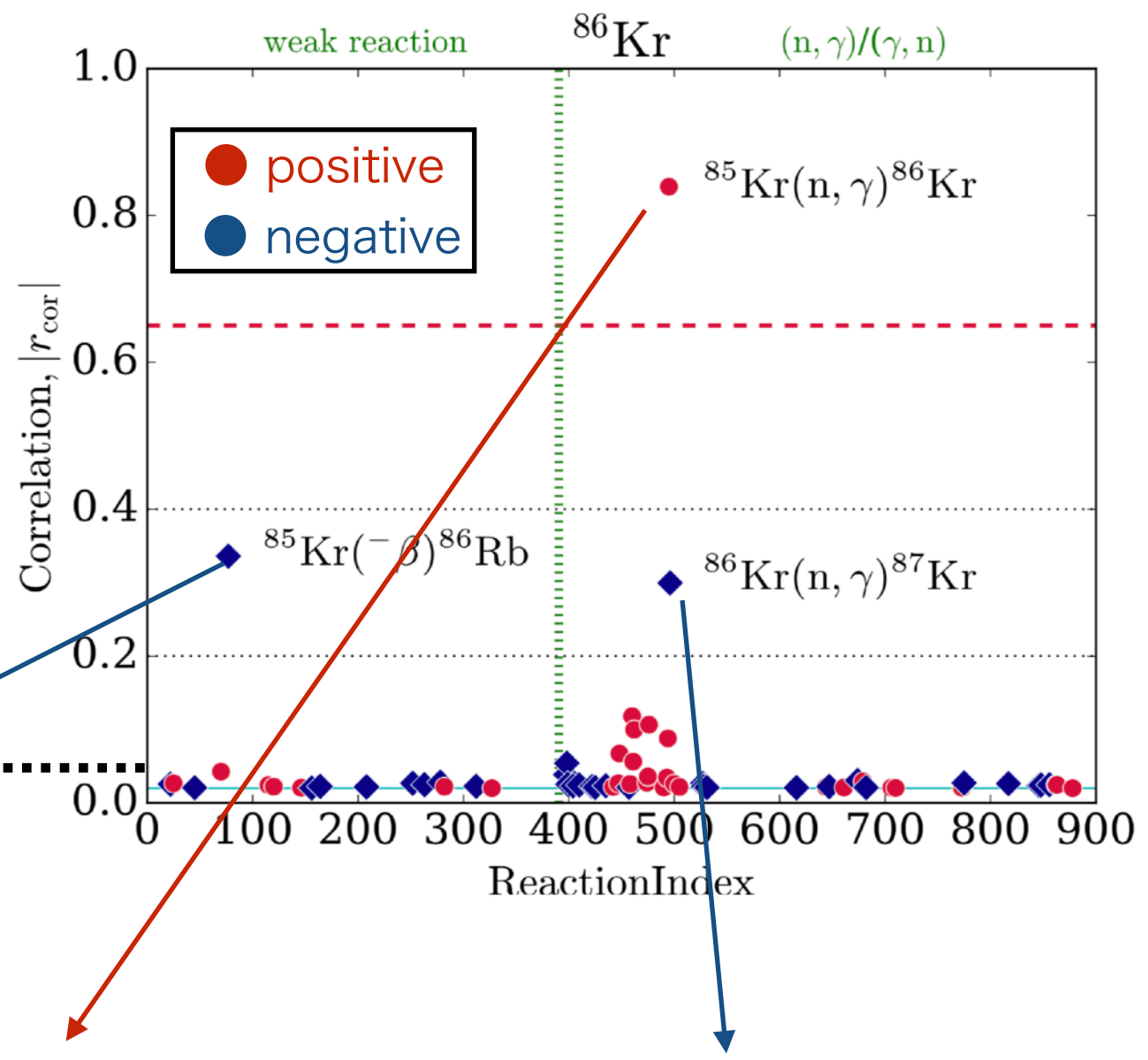
# 相関係数による選別

※例はsプロセス

## Pearson's coefficient

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

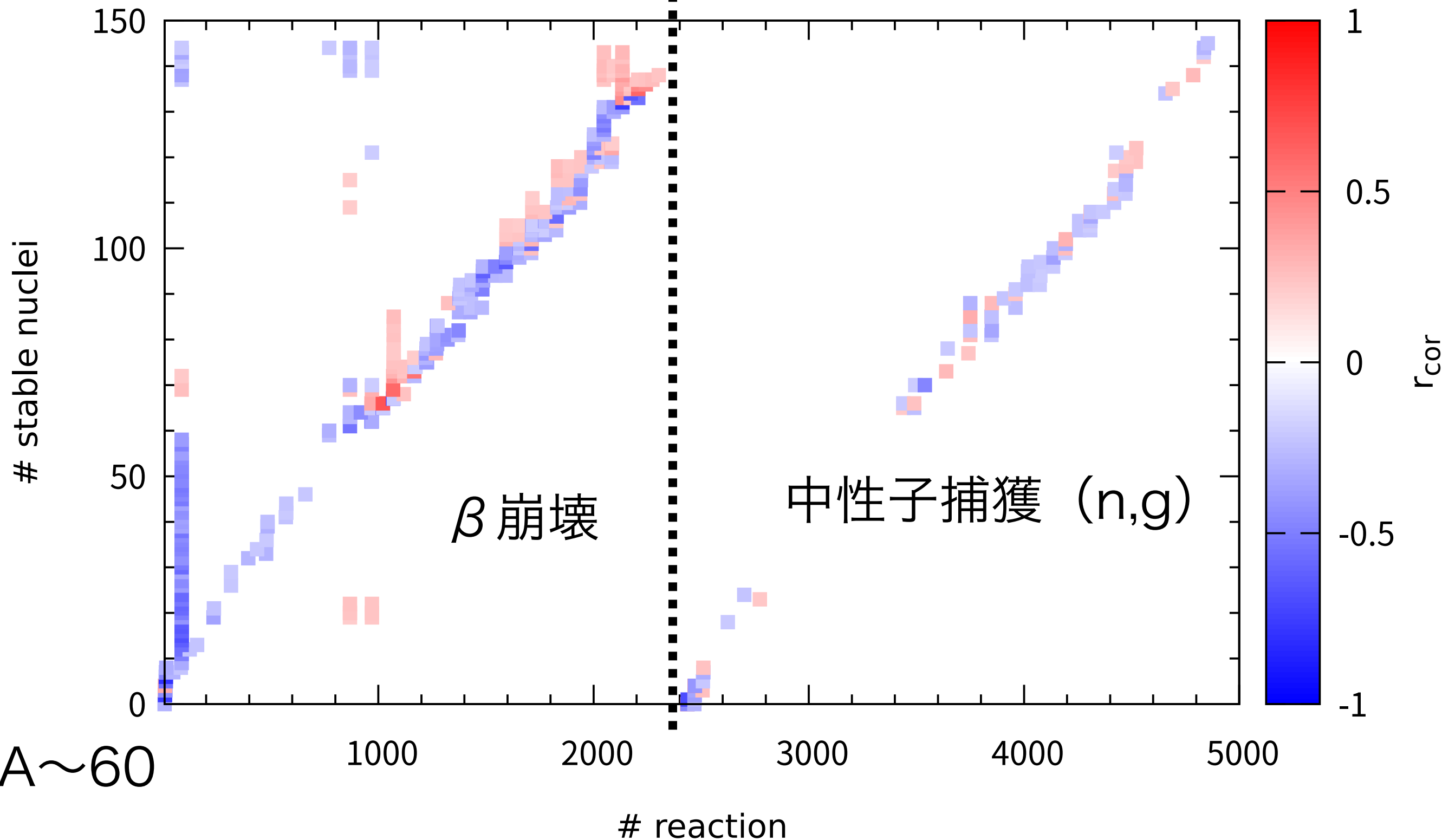
$|r| > 0.65 \rightarrow$  “strong”



# 「反応・崩壊率」と「生成物」の組み合わせ

146 x 4897通り

A~210



A~60

反応・崩壊率

# 重要な反応率：rプロセス

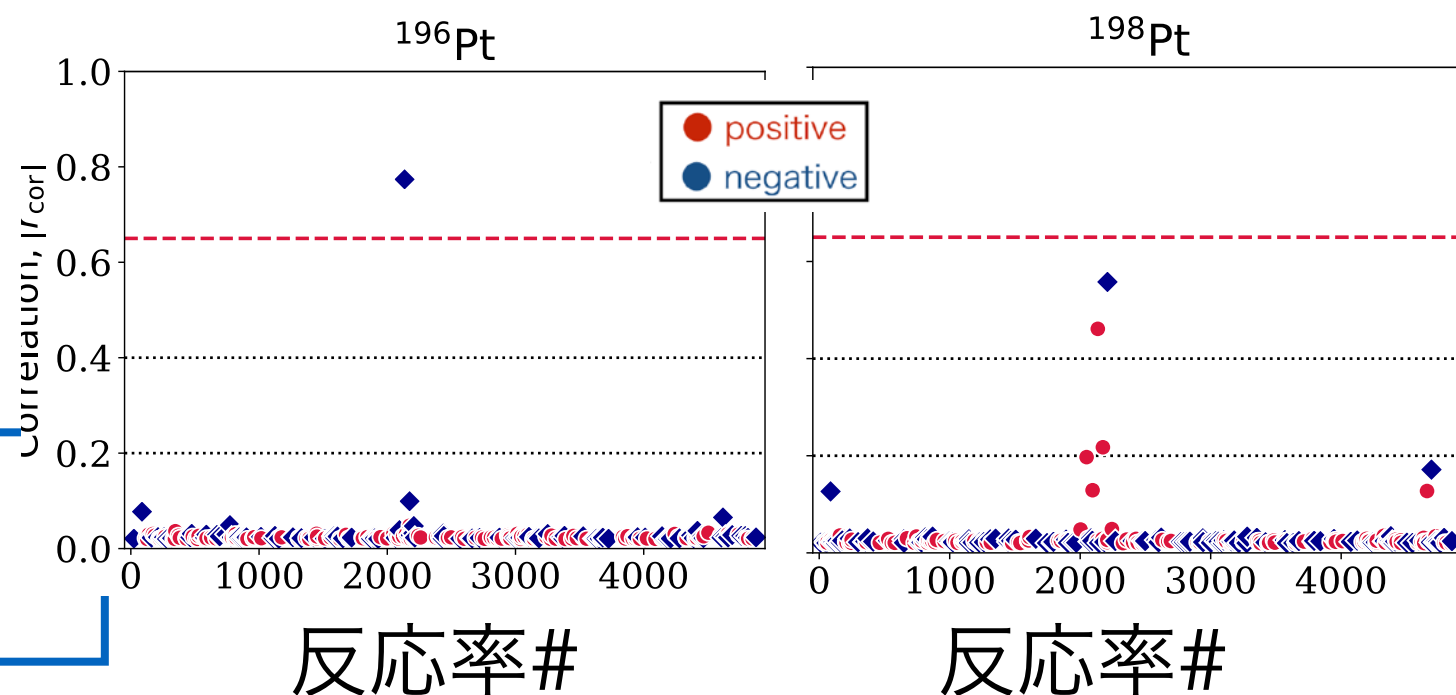
関係する反応率 (n捕獲と $\beta$ 崩壊) 4897個

同様の手法で重要な反応を選別

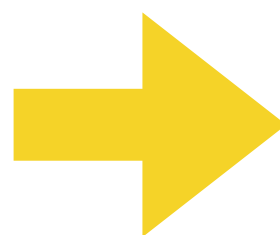
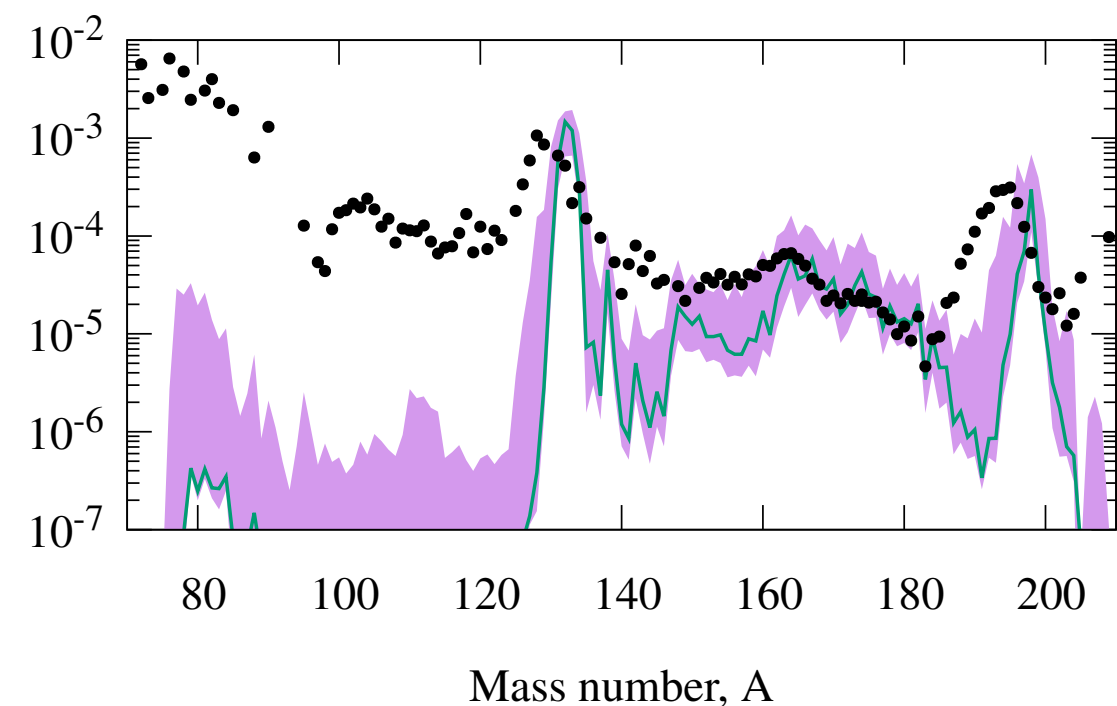
$\beta$ 崩壊： $^{130}\text{Cd}$ ,  $^{134}\text{In}$

$^{134}\text{Sn}$ ,  $^{196}\text{Yb}$ ,  $^{197}\text{Lu}$

→ 際立ったものは少ない  
(単体モデルの不定性に負ける)

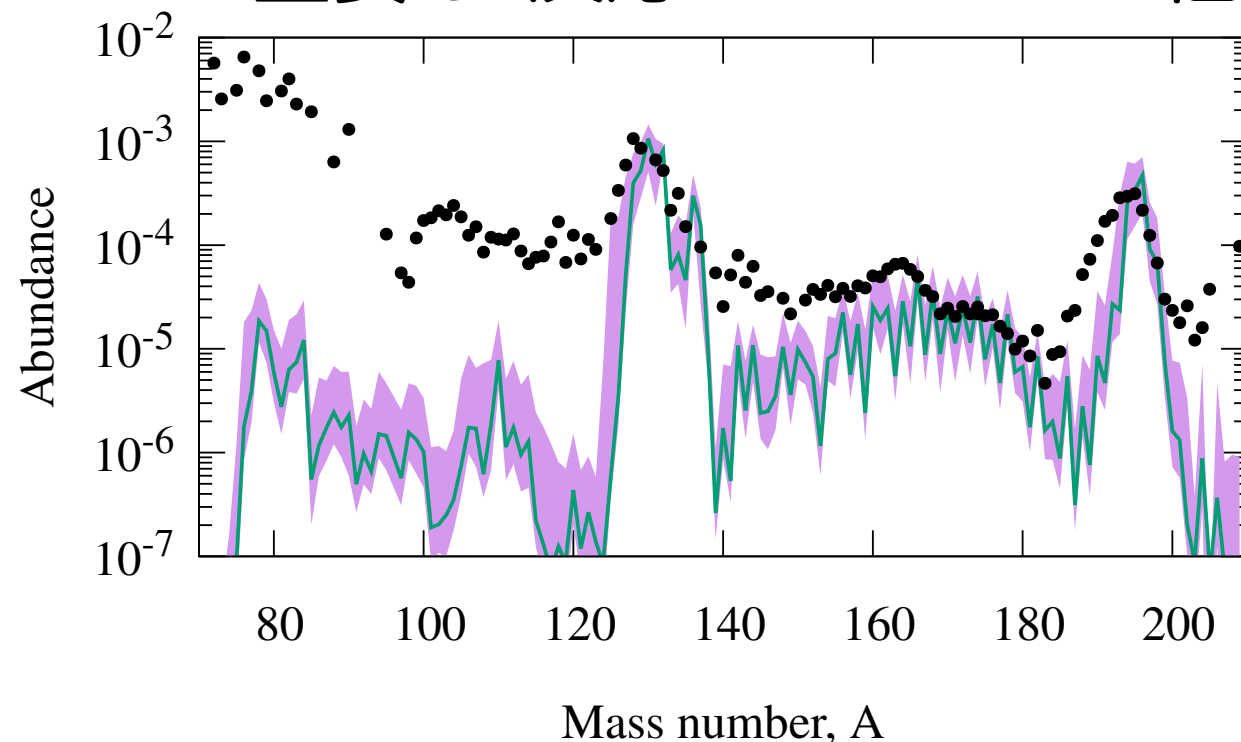


選別した357個の反応率を固定  
(主に $\beta$ 崩壊)



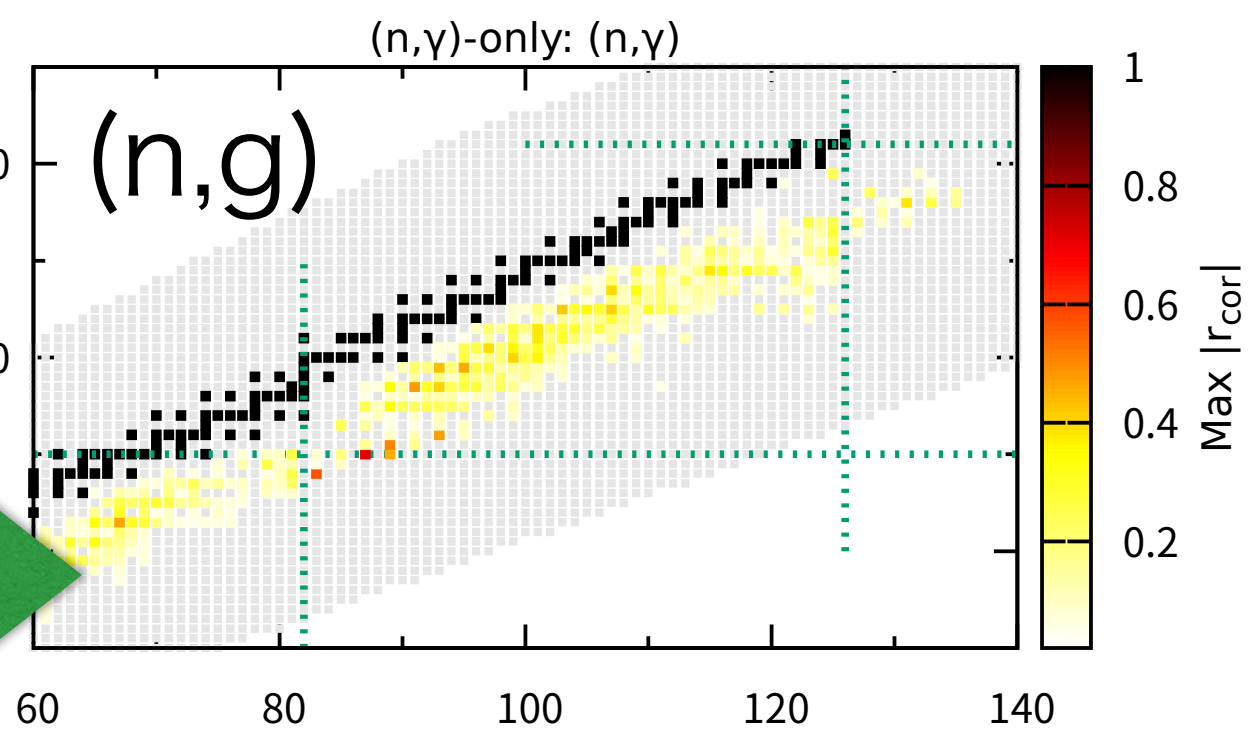
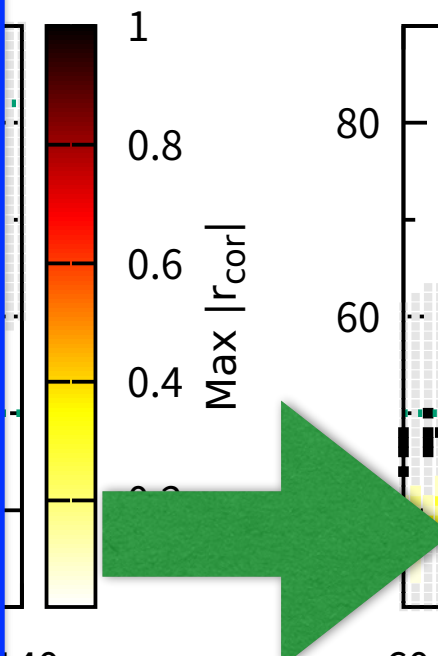
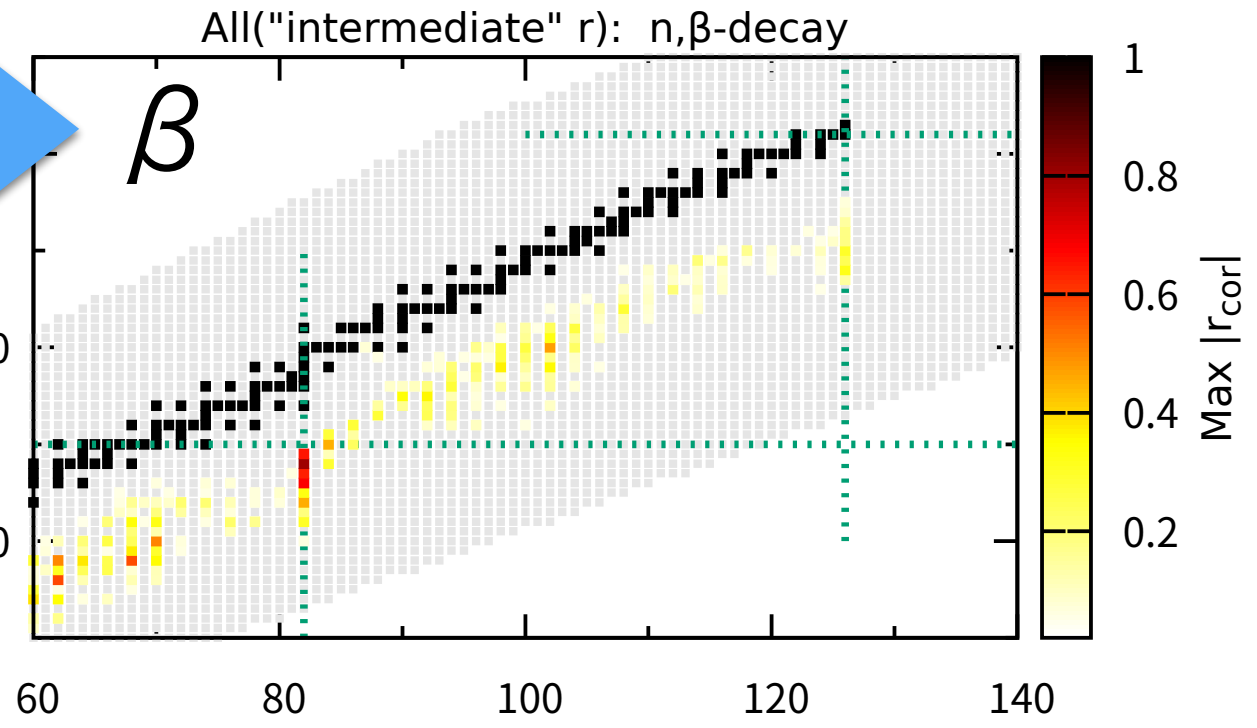
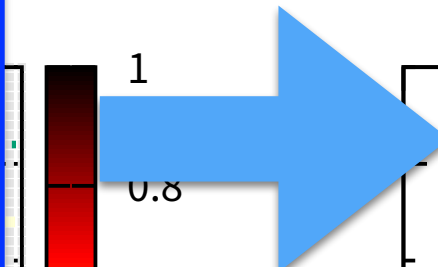
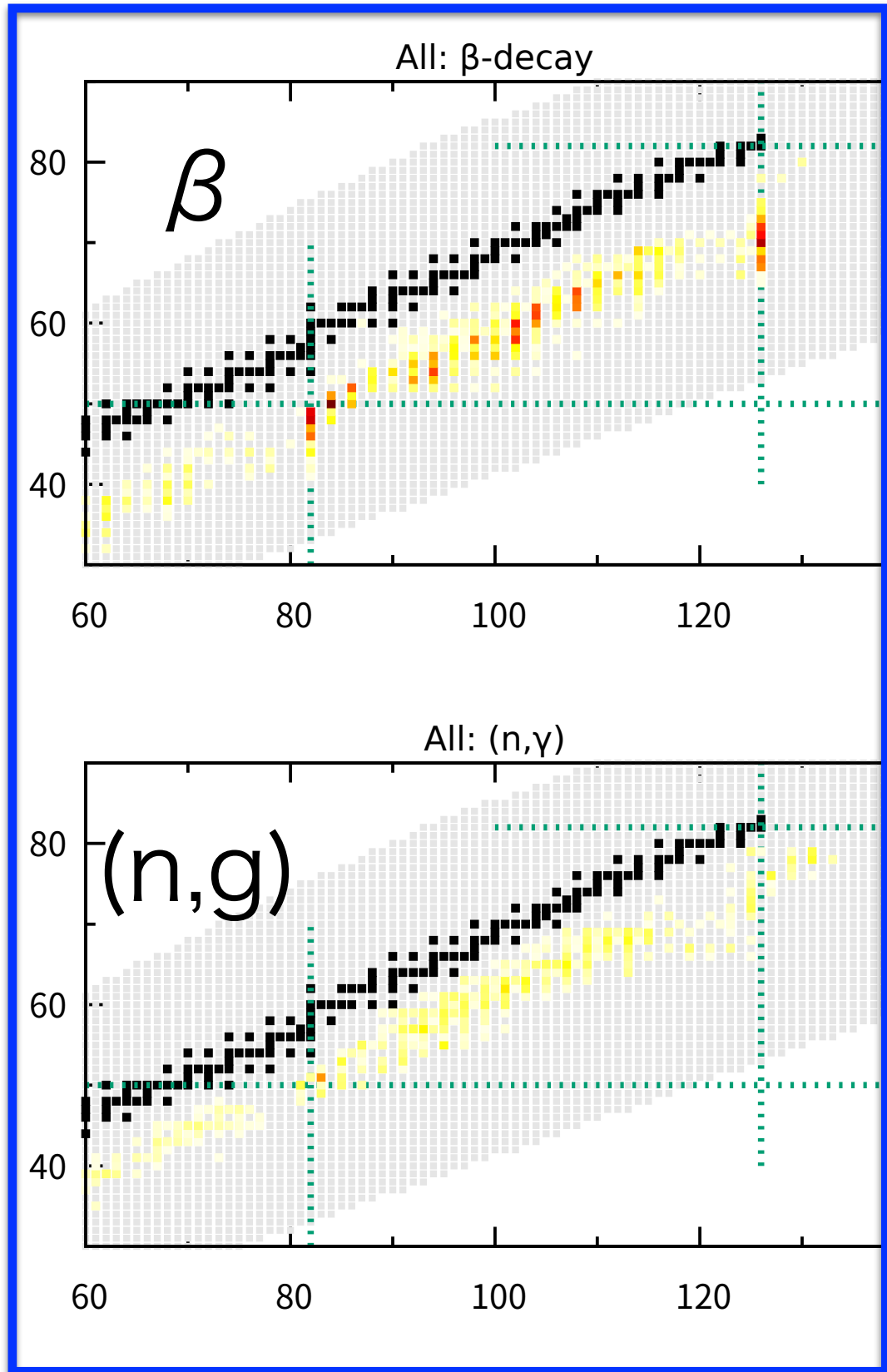
不定性は減少

“重要な”反応→さらに572個



# $\beta$ 崩壊と(n,g)の”インパクト”

異なる天体シナリオ(NN+2017)  
(less中性子過剰)

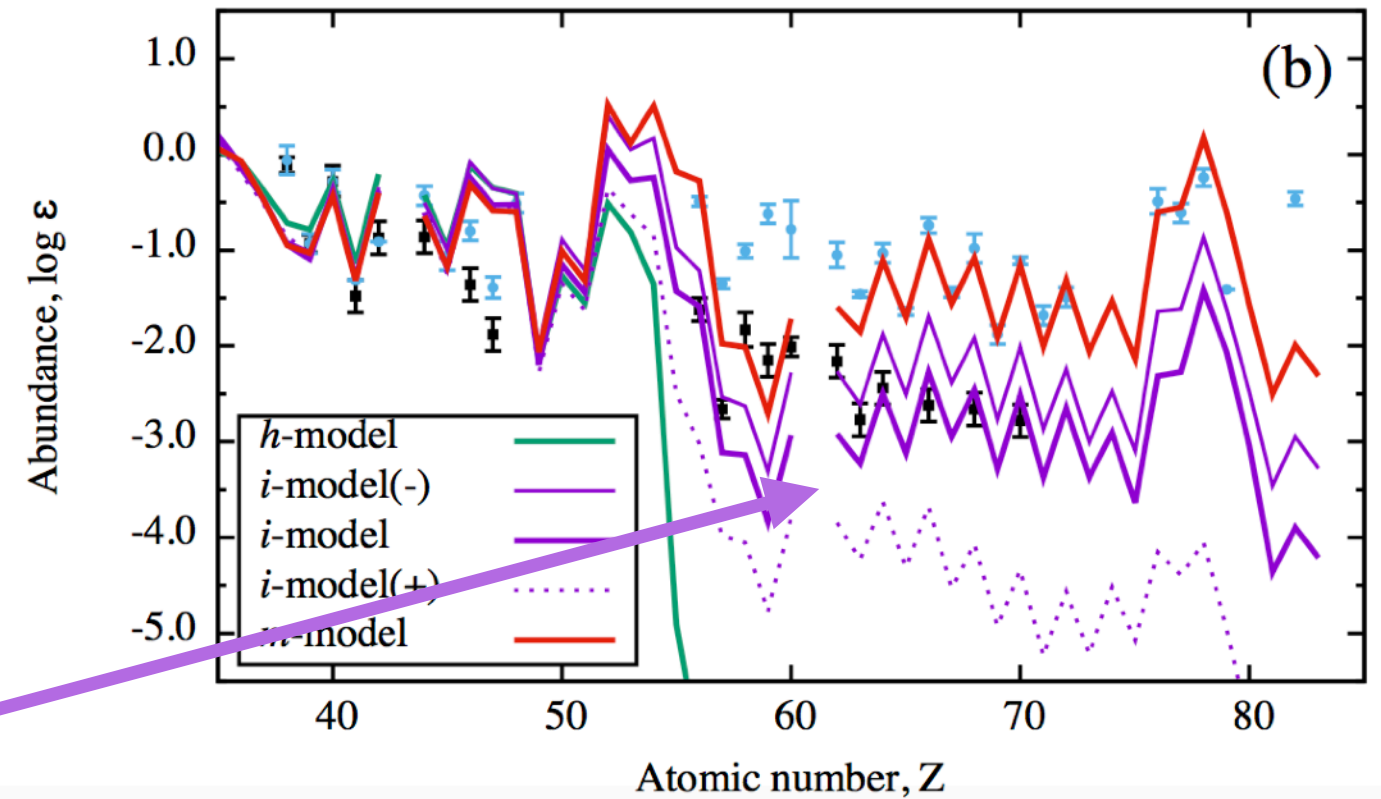
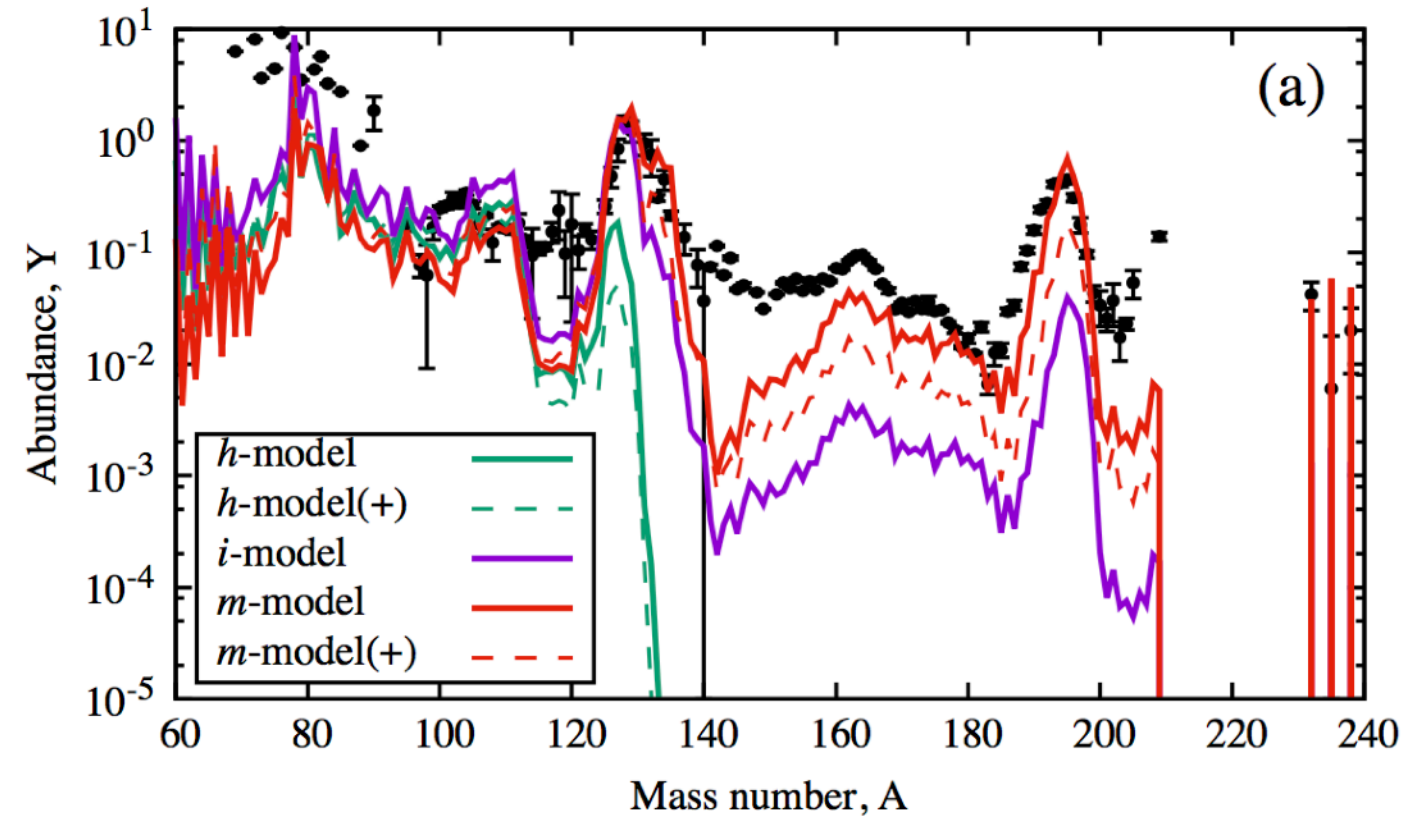
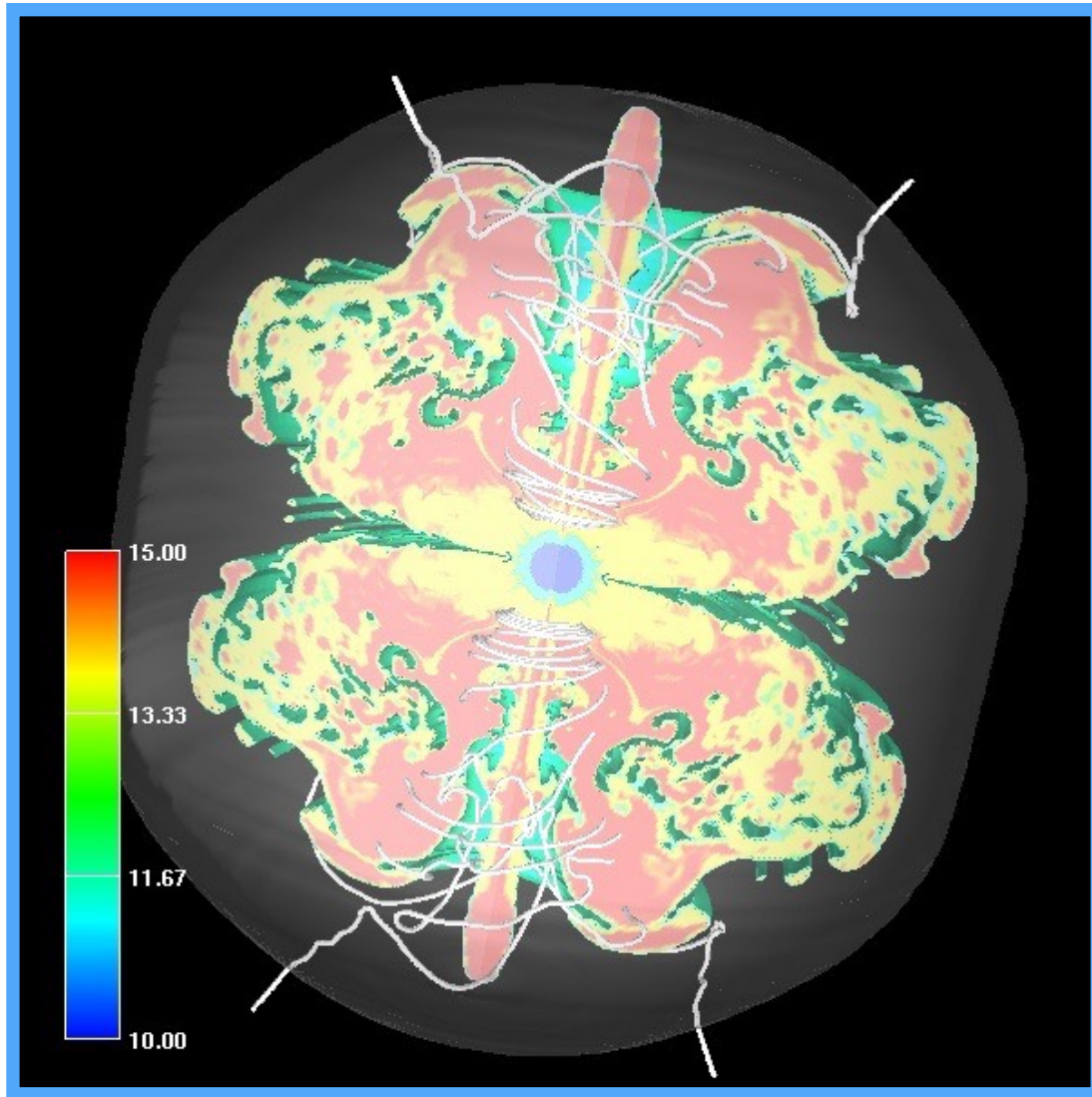


$\beta$ 崩壊の影響なし



# 強磁場超新星でのrプロセス (を含む元素合成)

NN+(2017)



“intermediate” rプロセス

# まとめ

## ・多様なrプロセス天体シナリオ

- ・観測・理論の発展により「標準理論」の構築は進んでいる
  - ・キロノヴァの観測 → 熱源としての崩壊過程の重要性
- ・天体環境パラメタの不定性
  - 今後精密化していくだろう（重力波が牽引）
- ・銀河化学進化の進展や問題提起もあり

## ・核物理 (input) の影響 (モンテカルロ元素合成による解析)

- ・rプロセス計算の多くは理論予言
- ・グローバルなパターン形成への影響は、天体モデルのファクターが大きいですが、ローカルには核反応の影響
- ・ただし、中性子魔法数 (rプロセスピーク) 付近の核は天体モデルの不定性に準じる
- ・「重要反応率リスト」の作成は困難であるが、核理論の予言値検証は、今後、大いにやっていける。