

宇宙におけるrプロセス元素の起源と進化： マルチメッセンジャー天文学と 加速器実験をつなぐ

Nobuya Nishimura

CNS (Center for Nuclear Study), U. of Tokyo / ABBL, RIKEN



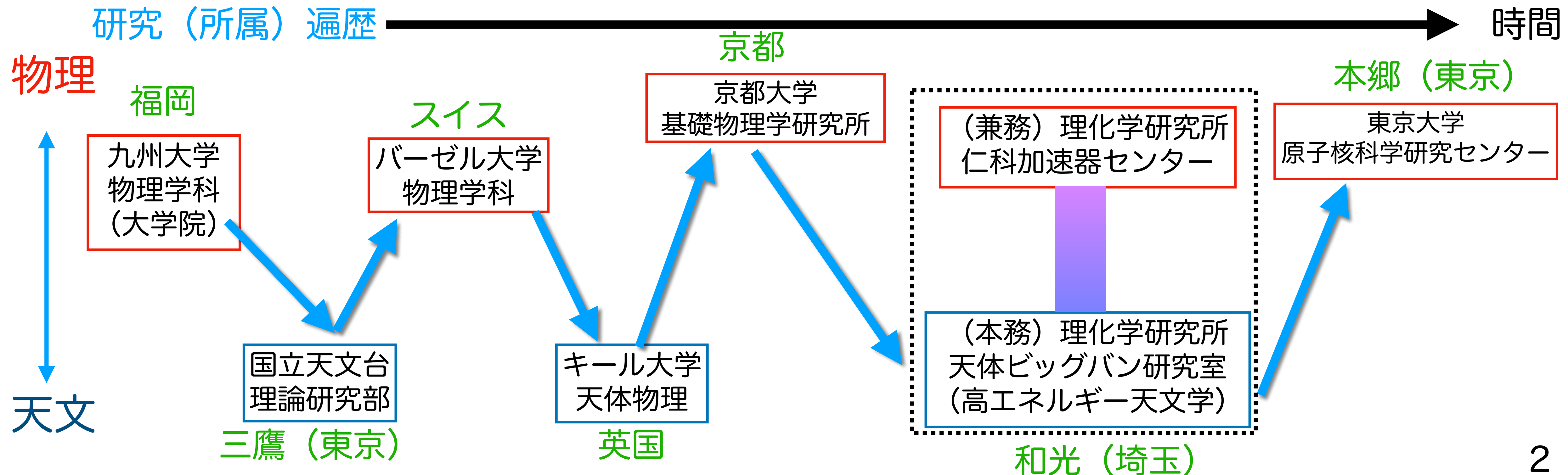
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



自己紹介

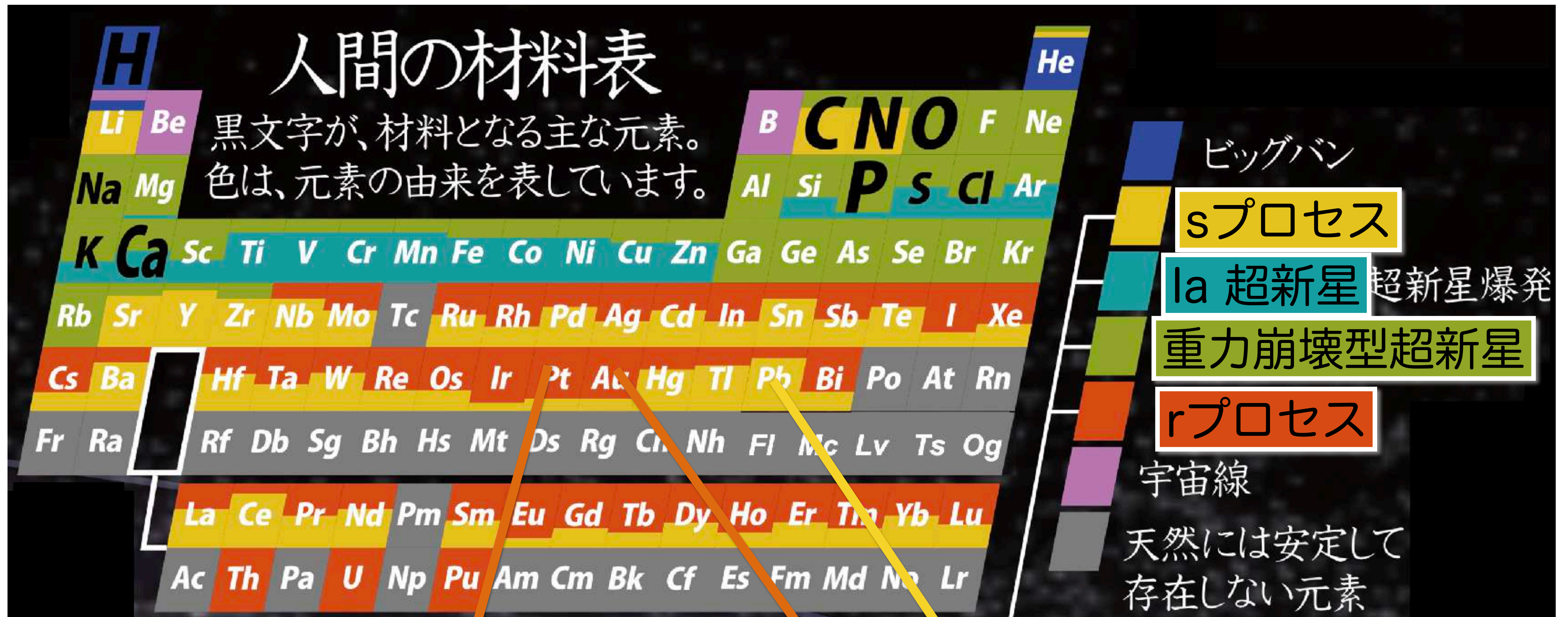
- ・西村 信哉（にしむら のぶや）：佐賀県生まれ（九州大学院卒）
- ・現職：東京大学・原子核科学研究センター：特任研究員
- ・専門分野：宇宙核物理、高エネルギー天文学、元素合成、突発天体

興味を中心 → 我々の宇宙の元素の起源と進化を解明



元素の周期表と宇宙での起源

一家に一枚「宇宙図2018」より抜粋 (<https://www.mext.go.jp/stw/series.html>)



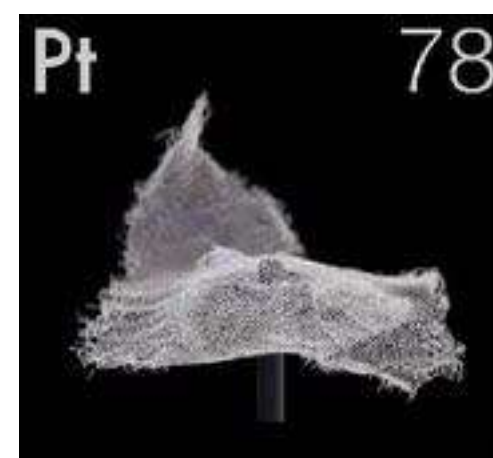
プラチナ

金

鉛

「世界で一番美しい
元素図鑑」

セオドア・グレイより



rプロセス



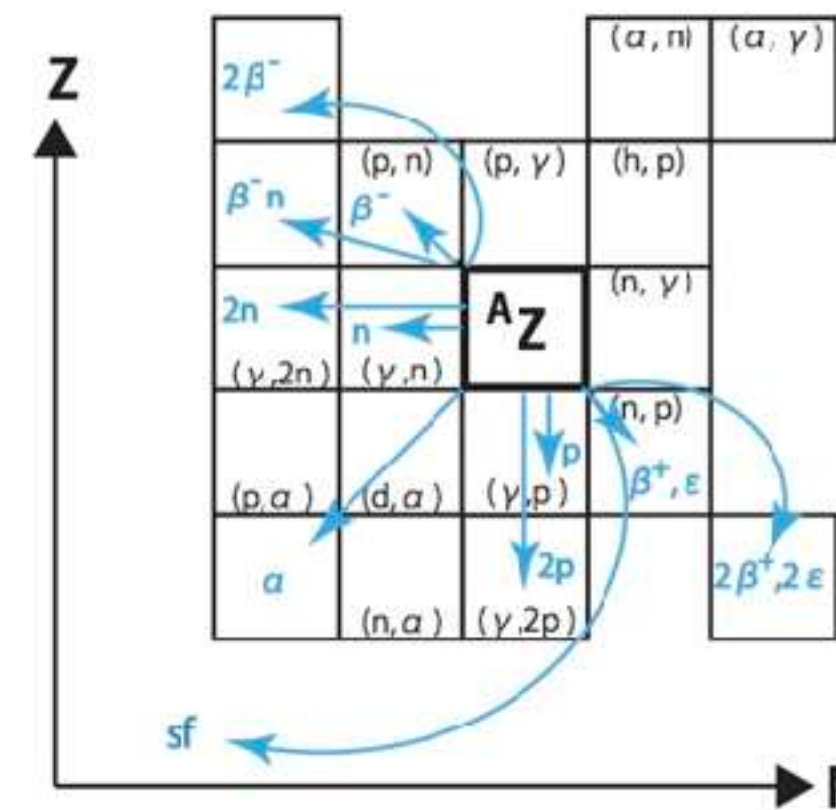
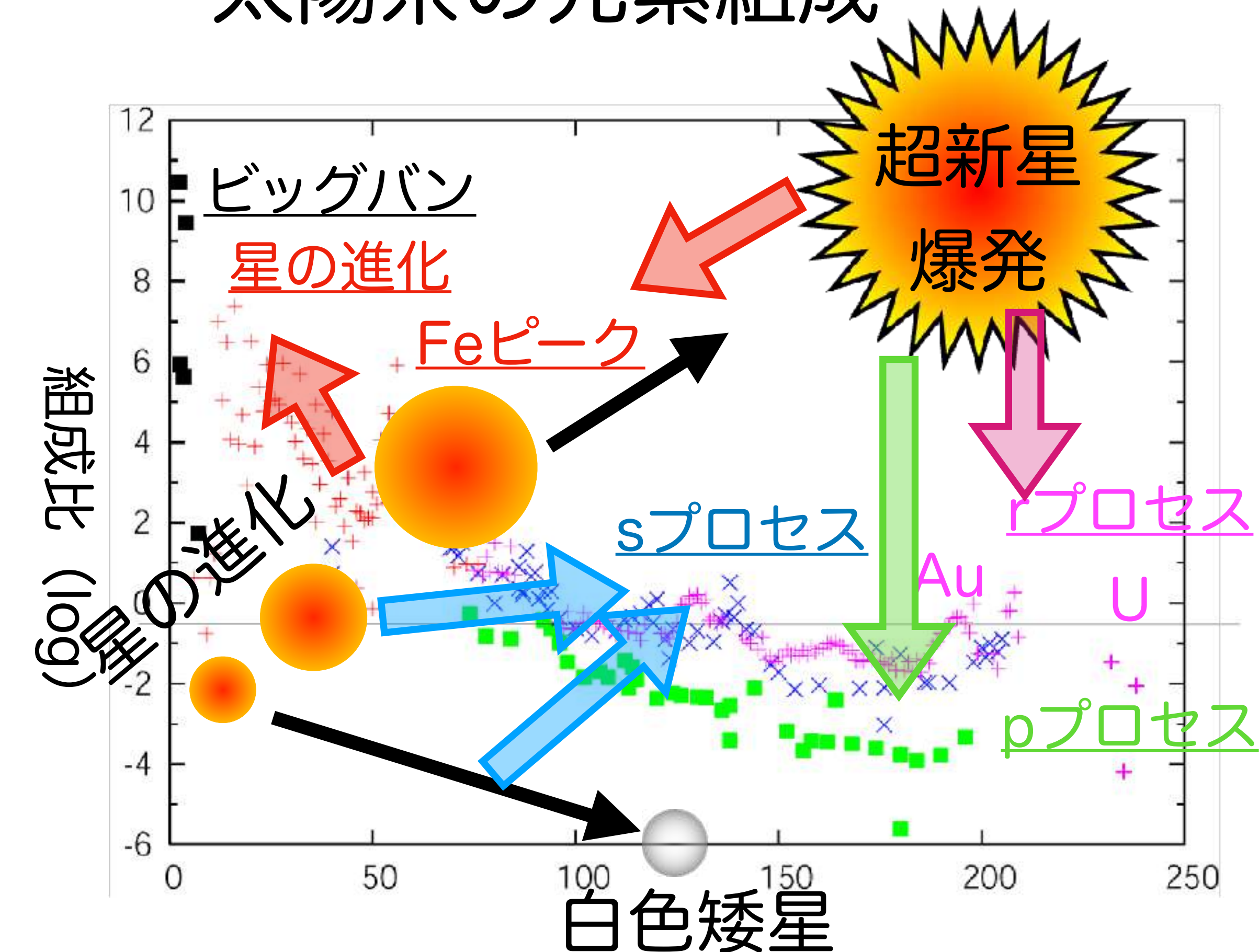
sプロセス

鉄より重い元素の起源

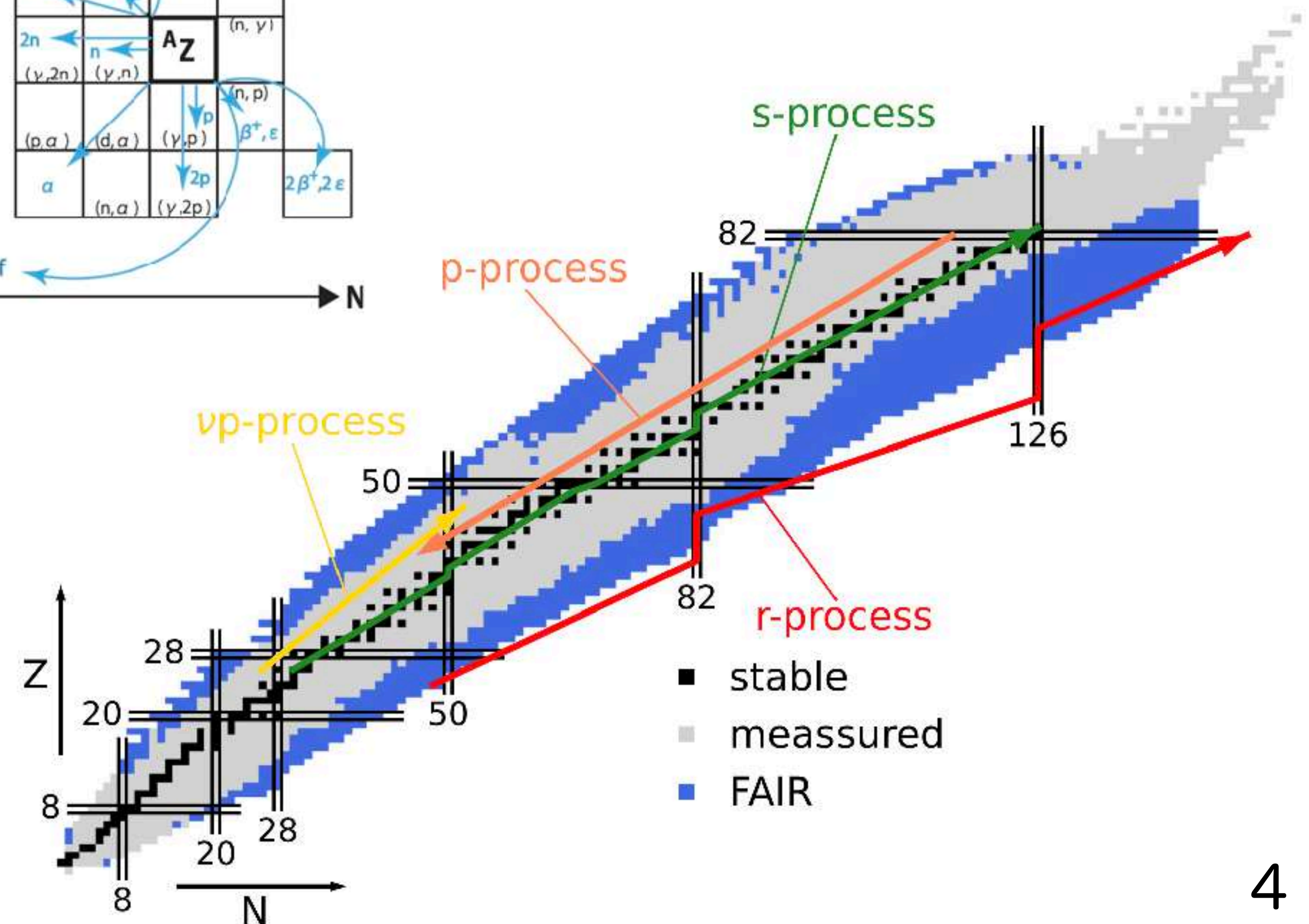
- ・鉄より重い元素（核種）：3つのグループ（s, r, p 核）に分類
- ・それぞれに対して別種の元素合成プロセスが提案。

（s/rプロセス、pプロセス（+rp/ ν pプロセスなど）、サブクラスも存在）

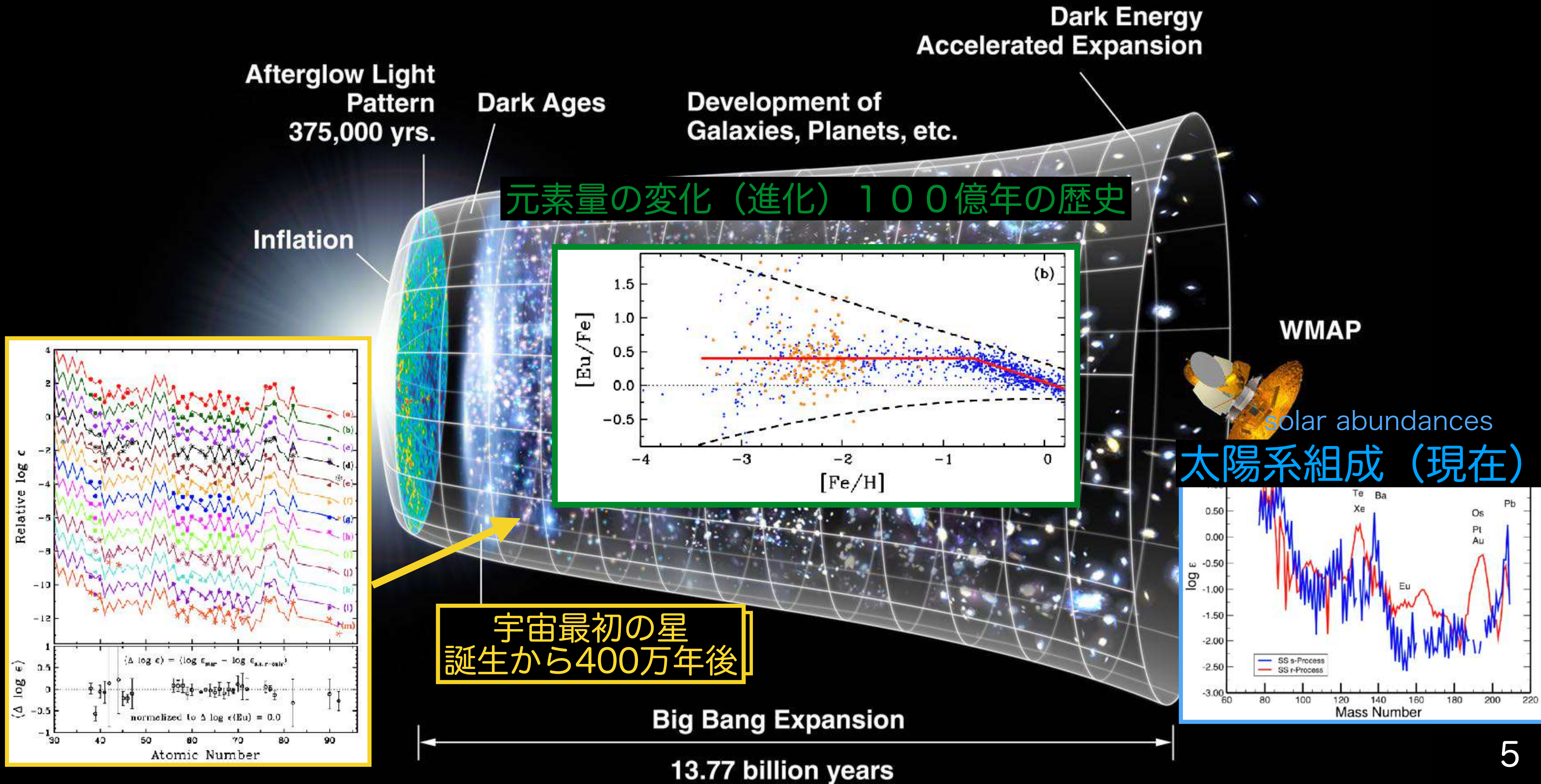
太陽系の元素組成



Arcones & Thielemann (2023)

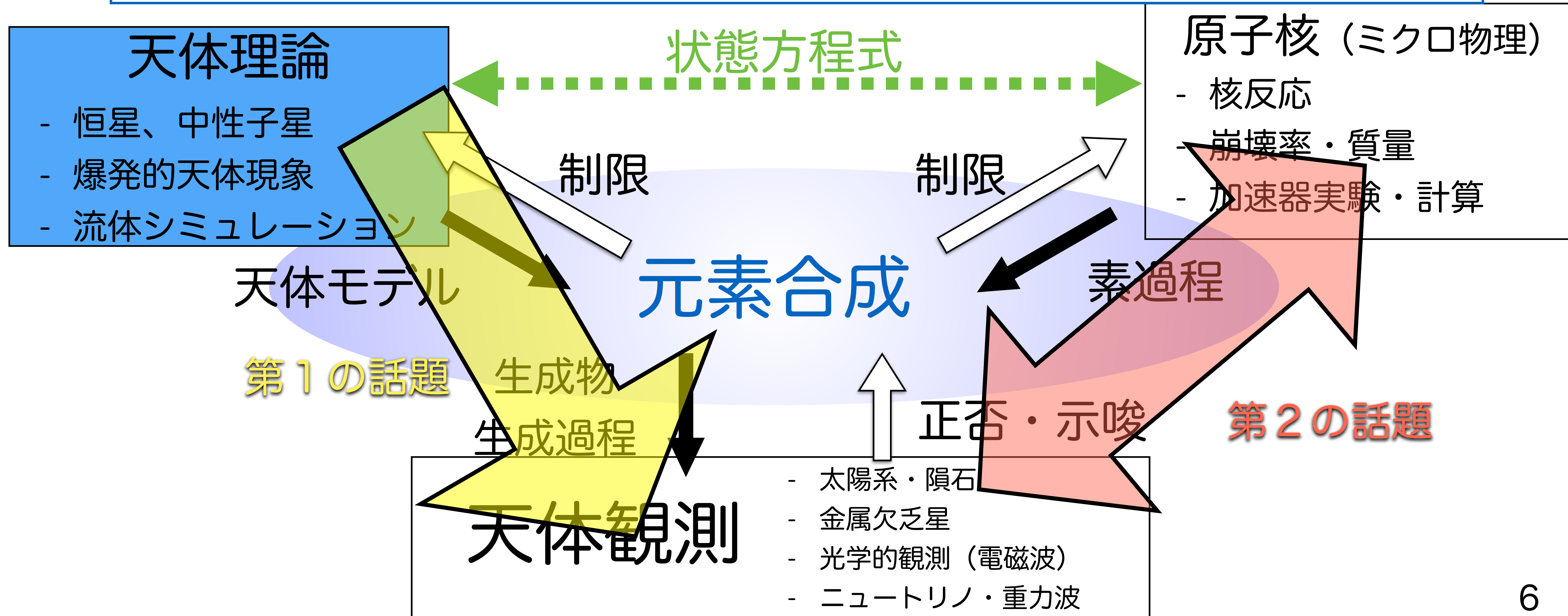


宇宙（銀河）の進化と元素合成（rプロセス）



rプロセス研究の周辺分野への広がり

- ・西村は、（rプロセス）宇宙の元素合成が専門
→ 下図：「元素合成」を中心とした研究領域の見方
- ・原子核物理の「使う」立場（原子核研究へのフィードバックも）



話の構成

- ・ 導入：「元素の起源と進化」

1. 連星中性子星の合体とrプロセス

- ・ 重力波の観測と電磁波対応天体キロノヴァ
- ・ 中性子星合体の「光」とrプロセス元素合成

2. 宇宙の元素合成から加速器実験へ

- ・ モンテカルロ元素合成による成果と今後

キーワード：多様性（＝「複雑化」）
→ 複雑なものをいかに解くか？取り組むか

お題：宇宙核物理とJAEA（先端研）の研究可能性

宇宙核物理と原子力工学：応用原子核

1. rプロセス元素の起源

中性子捕獲による元素合成プロセス

速い中性子捕獲＋ベータ崩壊による元素合成

① 電荷のない中性子を捕獲

→ 重い原子核を作る

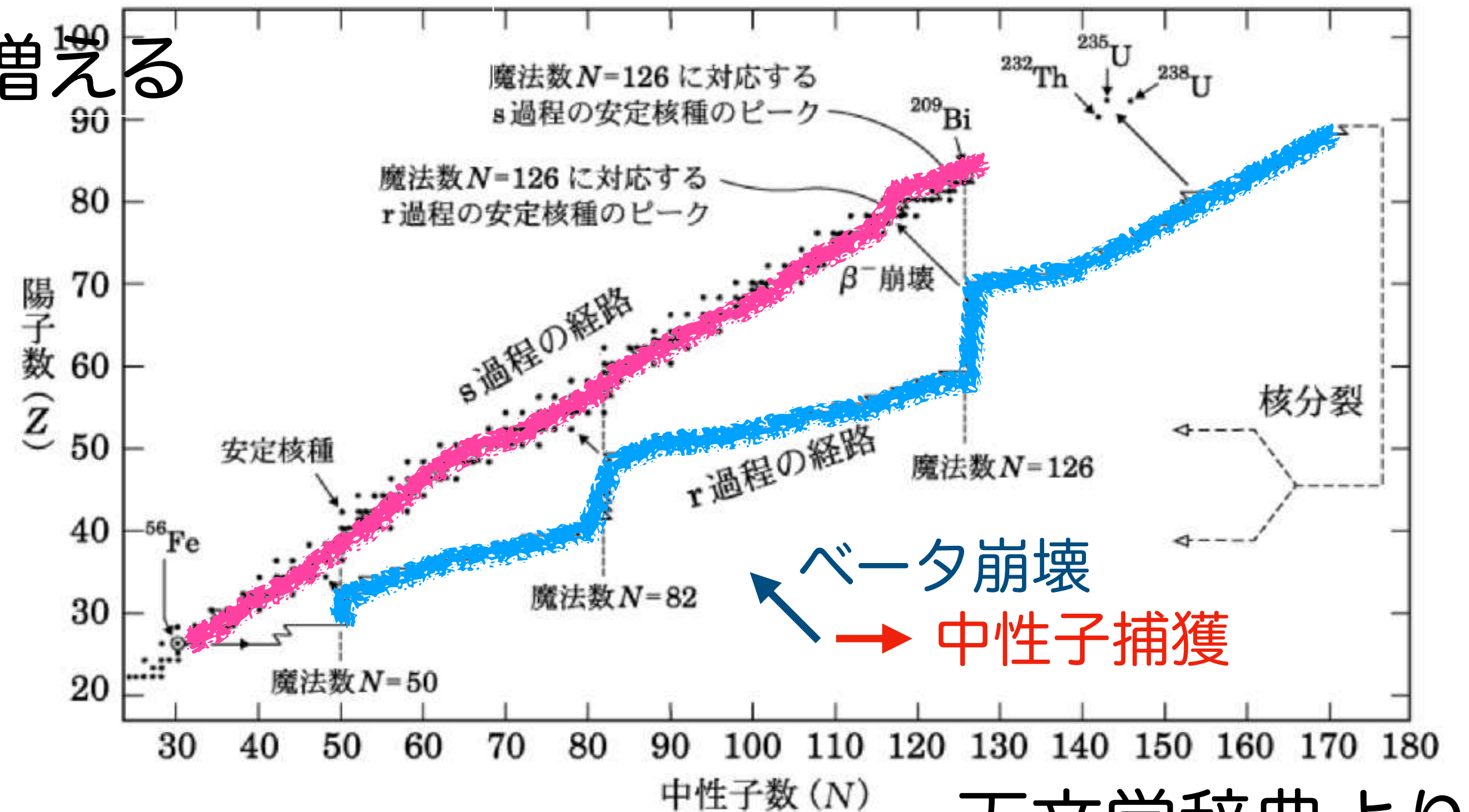
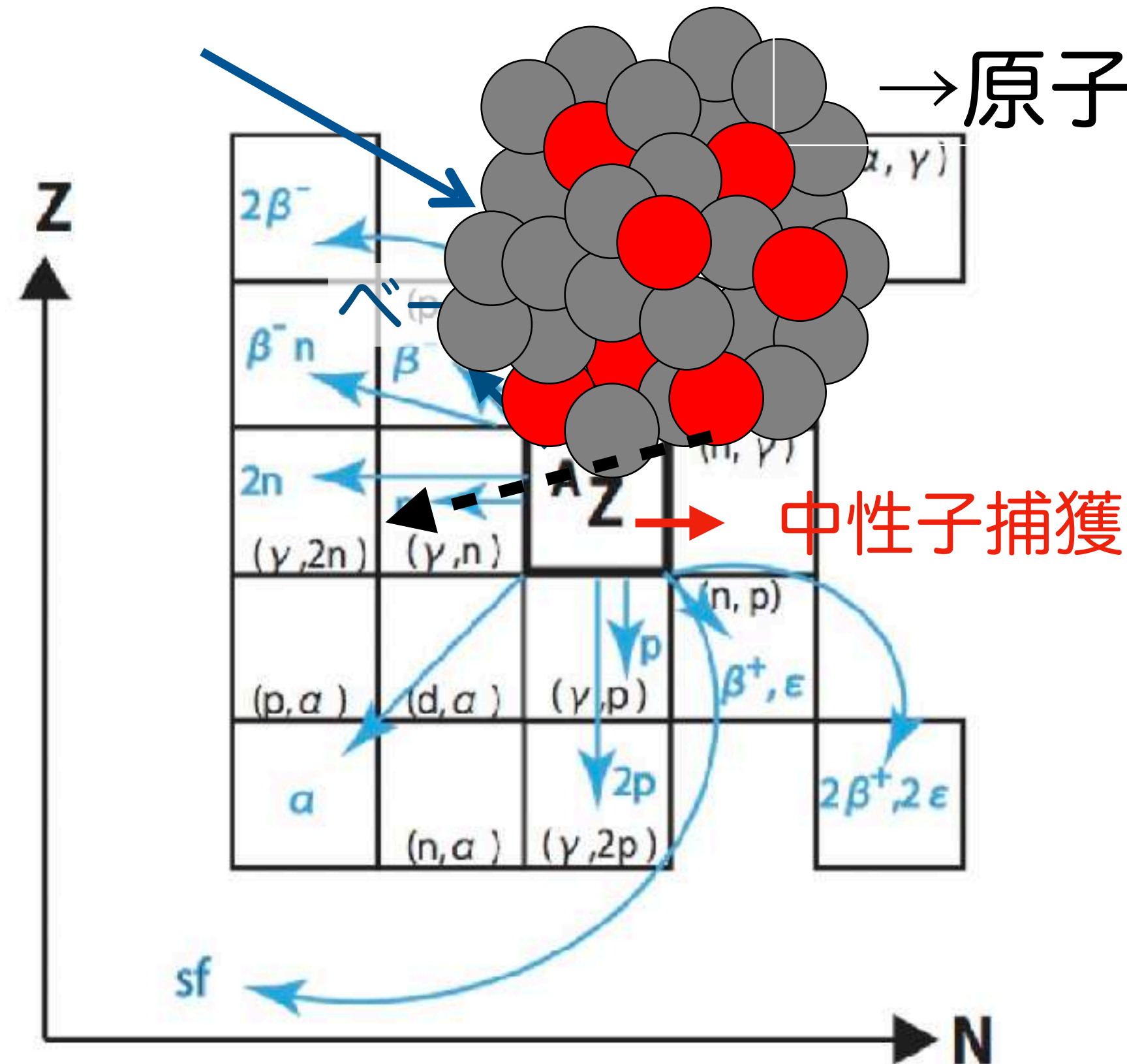
② 生成された (中性子過剰)

不安定核が β 崩壊する

→ 原子番号が増える

中性子捕獲が遅い：sプロセス

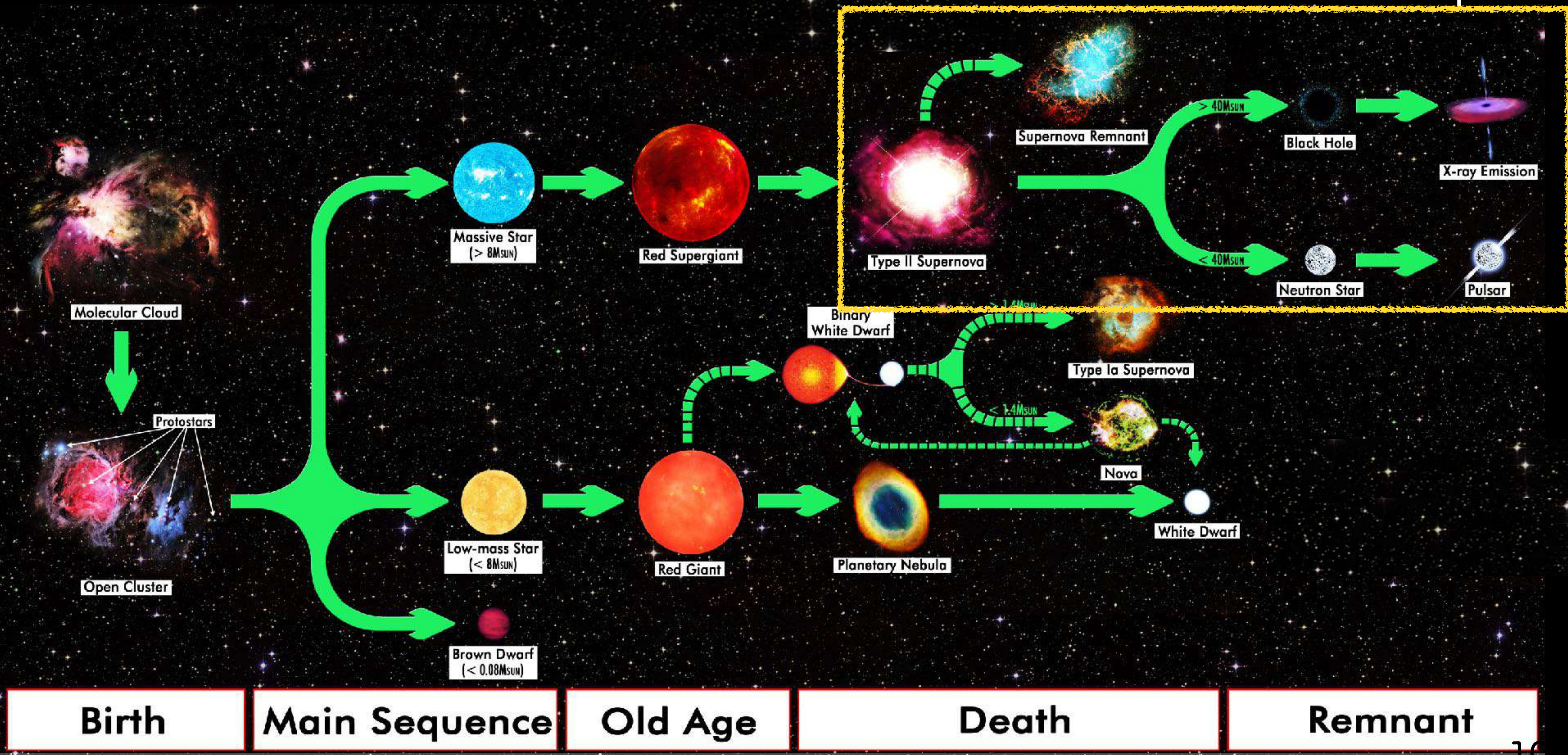
中性子捕獲が速い：rプロセス



天文学辞典より

rプロセスが起こる天体現象？

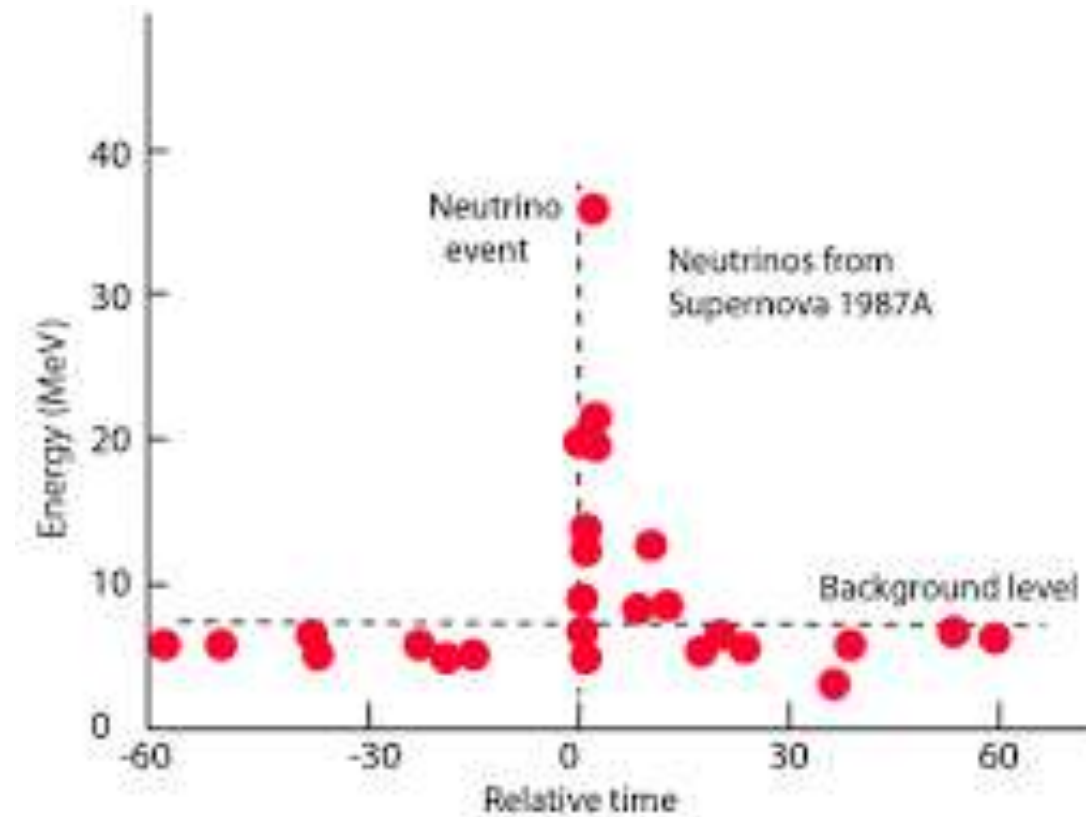
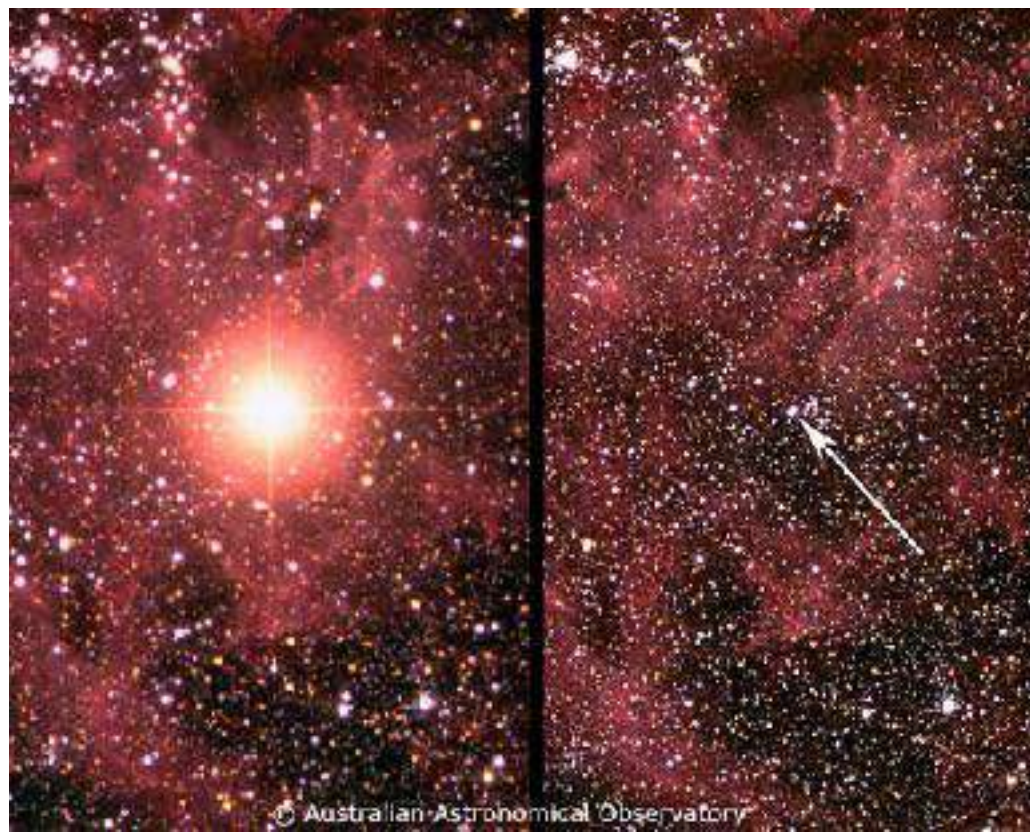
illustration: wikipedia



rプロセス天体とマルチメッセンジャー観測

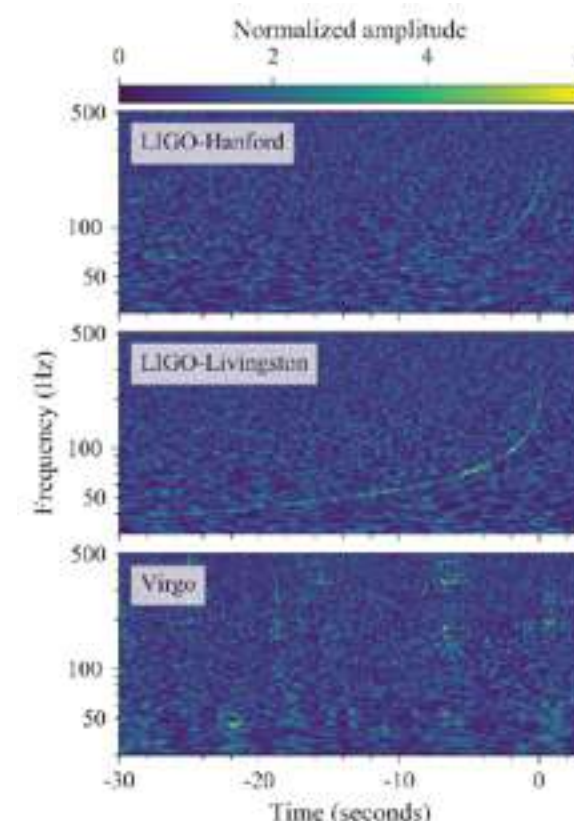
rプロセス元素の天体をめぐる研究は、実は、マルチメッセンジャー天文学
(多波長、多粒子観測) と深い関係にある

超新星爆発 → SN1987Aの観測



カミオカンデによる
ニュートリノ観測

中性子星合体 → GW170817の観測



LIGO/Virgoによる
重力波観測

rプロセスが起こる天体現象？

重力崩壊型超新星

- ・直接観測なし
- ・理論的に困難
- ・十分に中性子過剰にならない

大質量星
($10 > M_{\text{sun}}$)

超新星爆発

原始中性子星

ニュートリノ駆動風

連星中性子星合体

重力波と電磁波での「観測」
(GW170817)

中性子星 中性子星

中性子星連星

中性子星

ブラックホール

(長期進化)

(長期進化)

合体

rプロセスと元素合成

基礎方程式

$$\dot{y}_i = \frac{dy_i}{dt} = \sum_j N_{ij} \lambda_j y_j + \sum_{j,k} N_{ijk} \rho N_{Av} \langle j, k \rangle y_j + \sum_{j,k,l} N_{ijkl} \rho^2 N_{Av}^2 \langle j, k, l \rangle y_j + \dots$$

熱核反応率（反応断面積） & 天体環境（温度と密度の変化）

1 体^j (崩壊)
(1 体→複数も含む)
β崩壊, e⁺/e⁻ 捕獲
(実は、核分裂も)

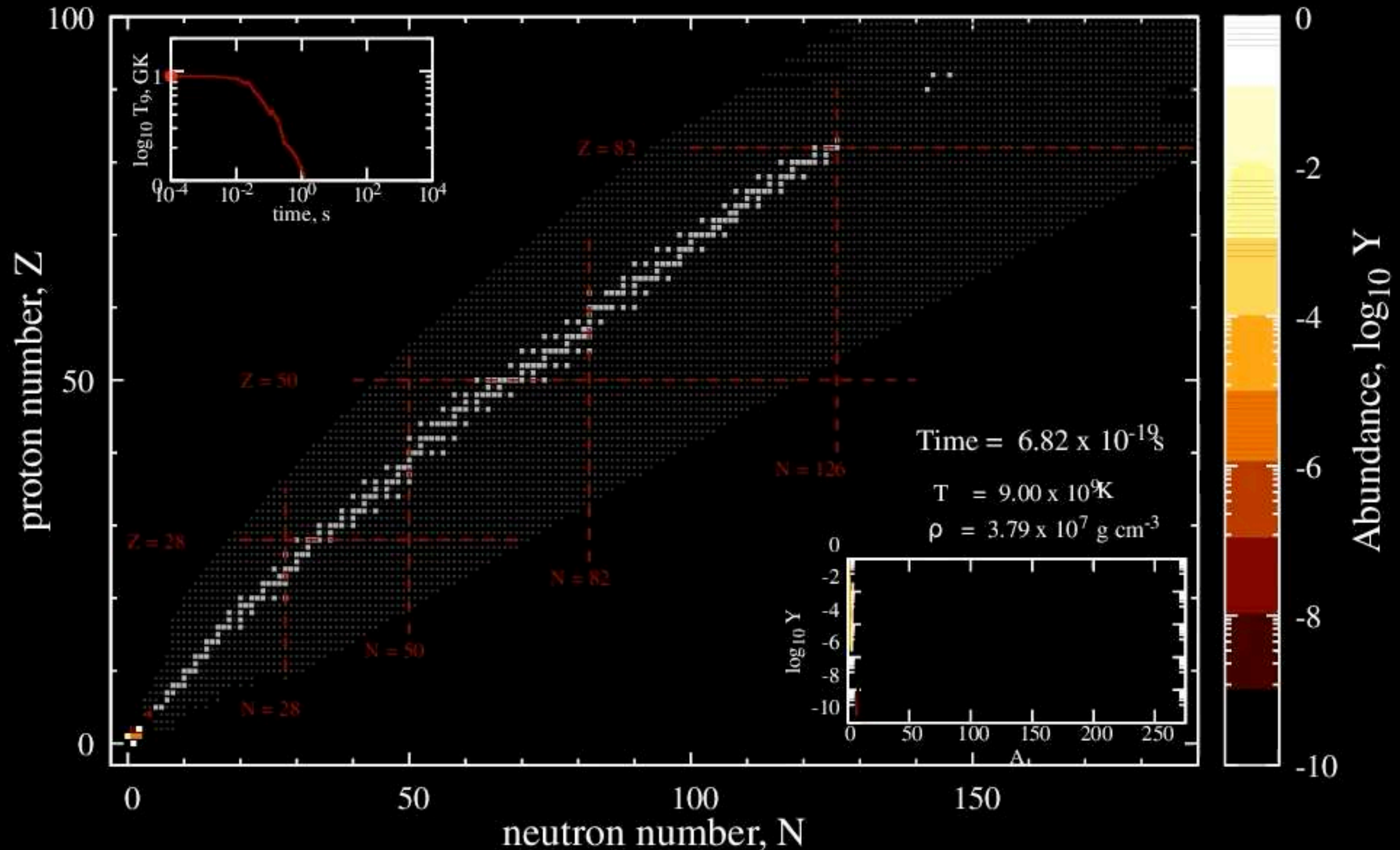
2 体の反応
(2 → 2 も含む)
主たる核反応
中性子励起崩壊など

3 体反応
(3 → 1, 3 → 2)
天体環境では、
トリプルαのみ

現実的天体環境

- ・元素合成は、エネルギー生成（現象）を伴うので、本来、流体力学とカップル
→ エネルギー方程式に核エネルギーの項が入る ← 反応方程式
- ・（特にrプロセス）元素合成が起こる前の環境も追いかける必要がある
→ 物質の中性子化など、高温で核反応がfreezeして、弱反応（レプトン）が支配する領域

rプロセスと元素合成

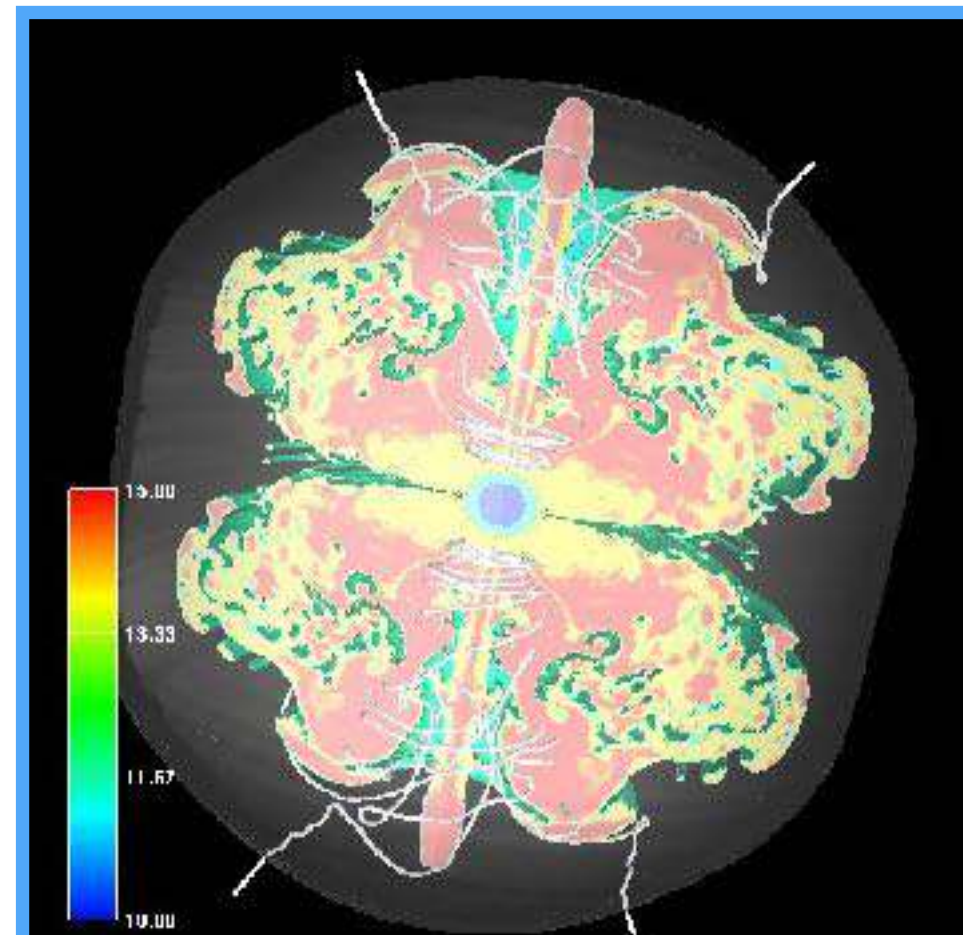


磁気駆動型超新星でのrプロセス

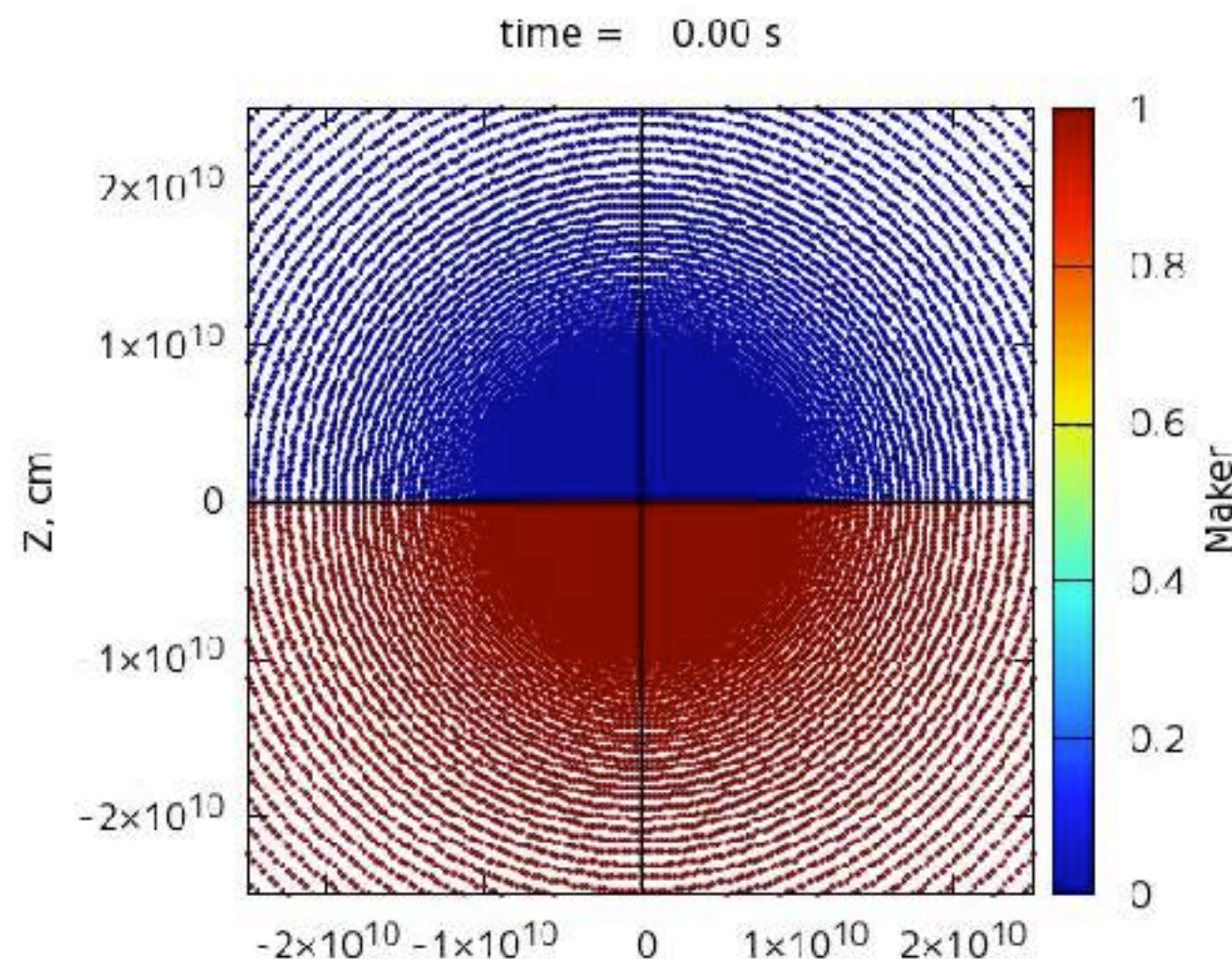
- ・強磁場の超新星シナリオでrプロセスが起こるか？
- ・現実的モデルでrプロセスを計算する初めてのケース

N. Nishimura et al., ApJ 810:109 (2015), N. Nishimura et al., ApJL 836:L21 (2017)

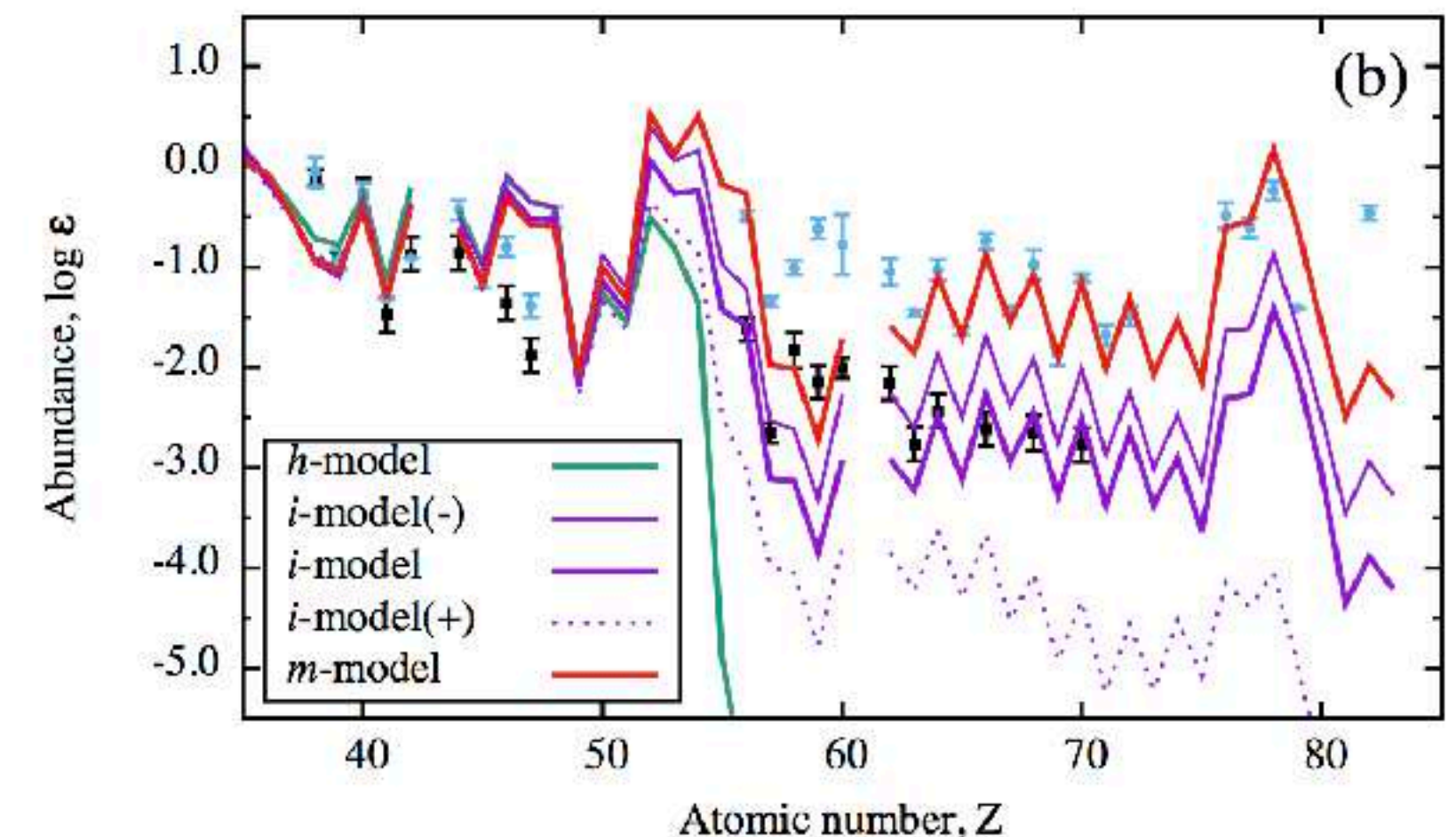
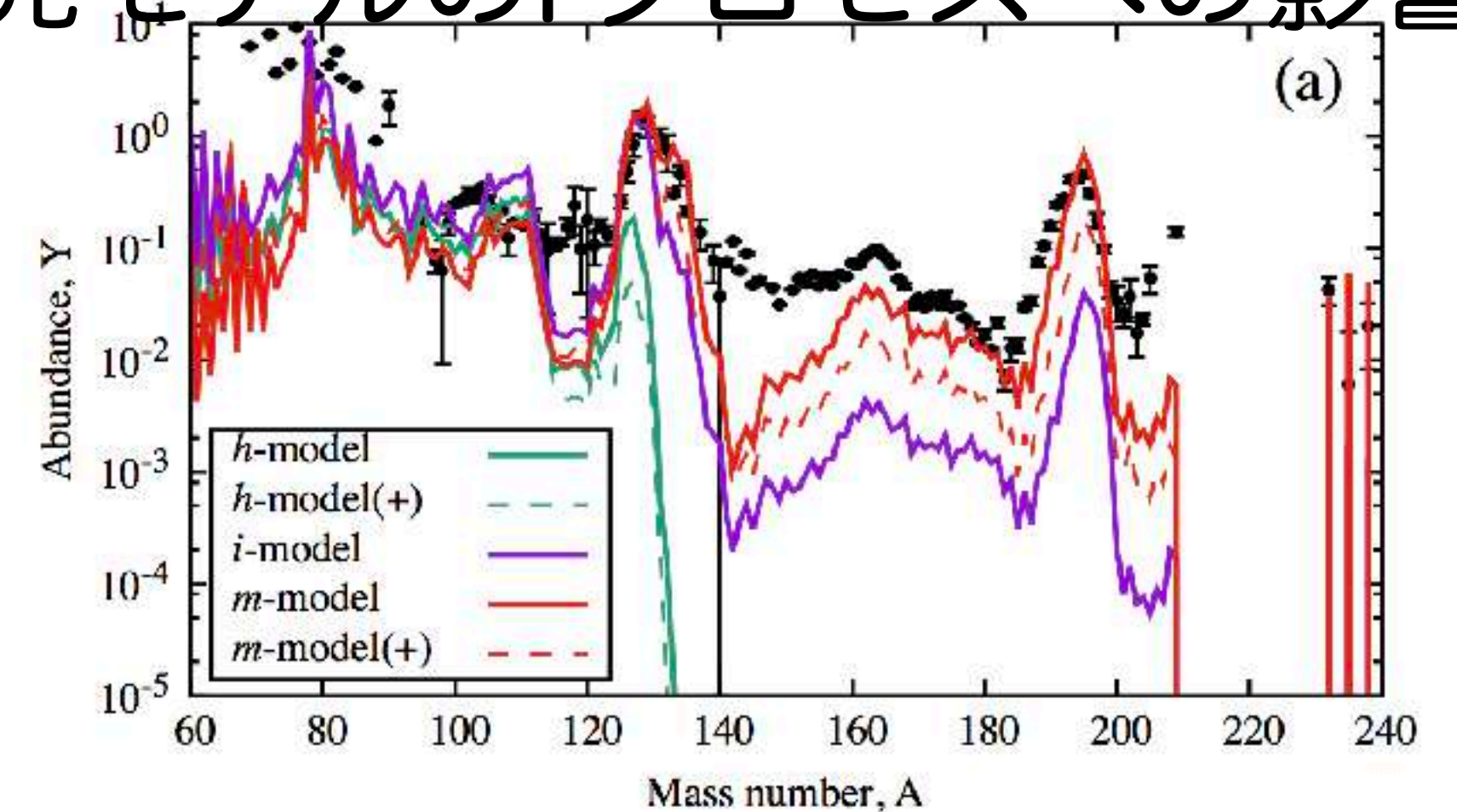
爆発モデルのrプロセスへの影響



天体シミュレーション



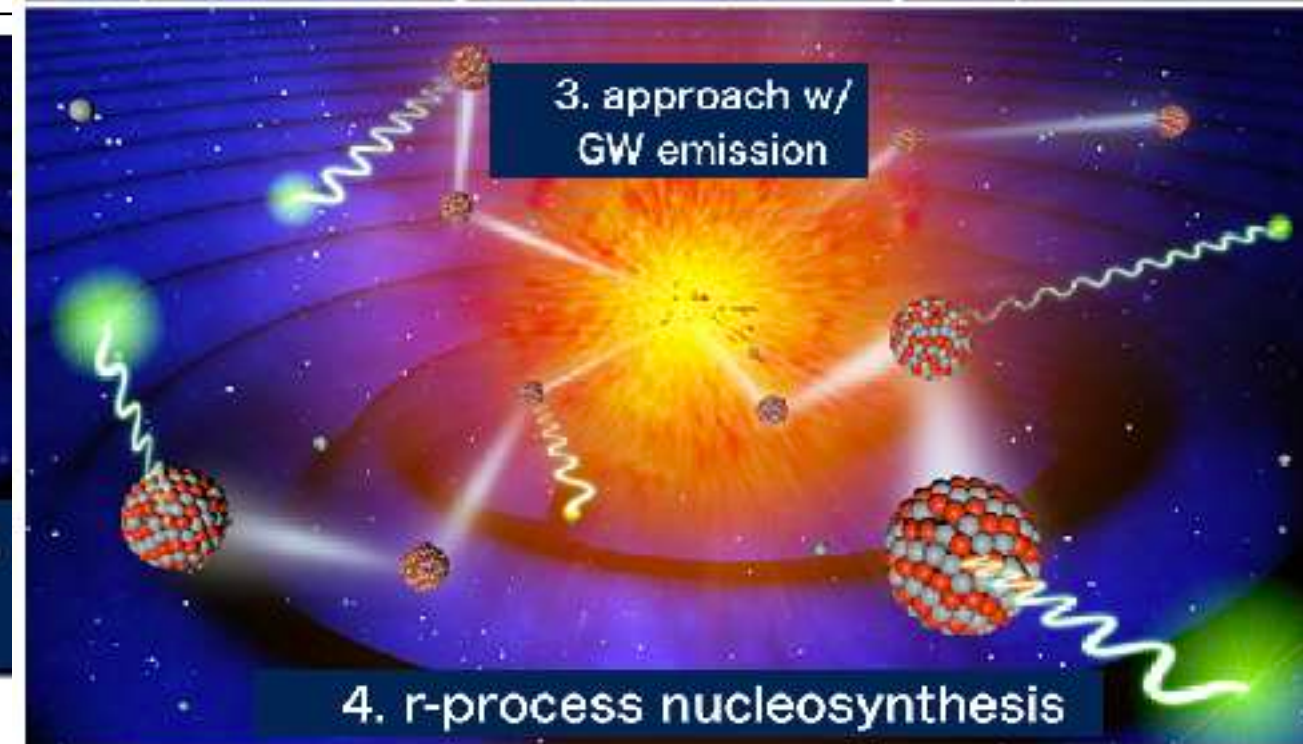
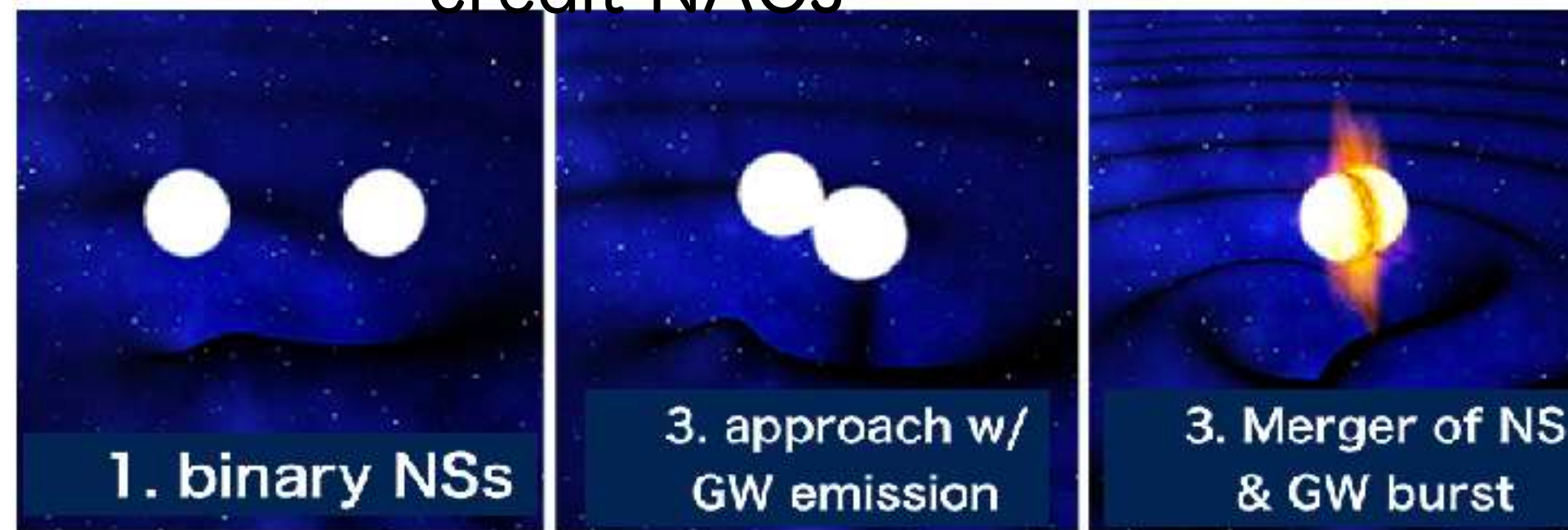
ジェット爆発
に沿った元素合成



rプロセス天体：中性子星合体の「観測」

連星中性子星合体からの重力波 GW170817 (2017年8月17日)と同時観測 「キロノヴァ」の
 エネルギー源は？ → 中性子過剰核の放射性崩壊 (e.g, β , α & 核分裂) 最初の発見 (8月17日)
 (rプロセス中の大量中性子過剰核の崩壊) から徐々に減光 (21日)

credit NAOJ



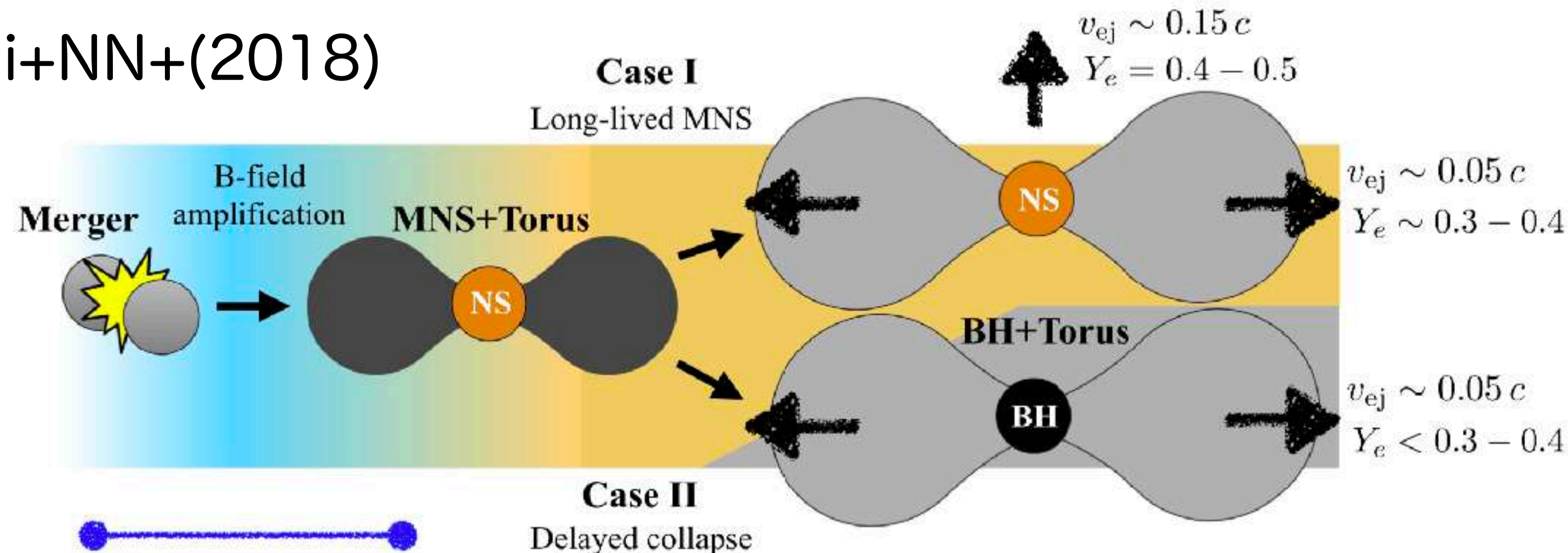
NGC4993 (39.5Mpc)



天体シナリオの理解が一気に進む

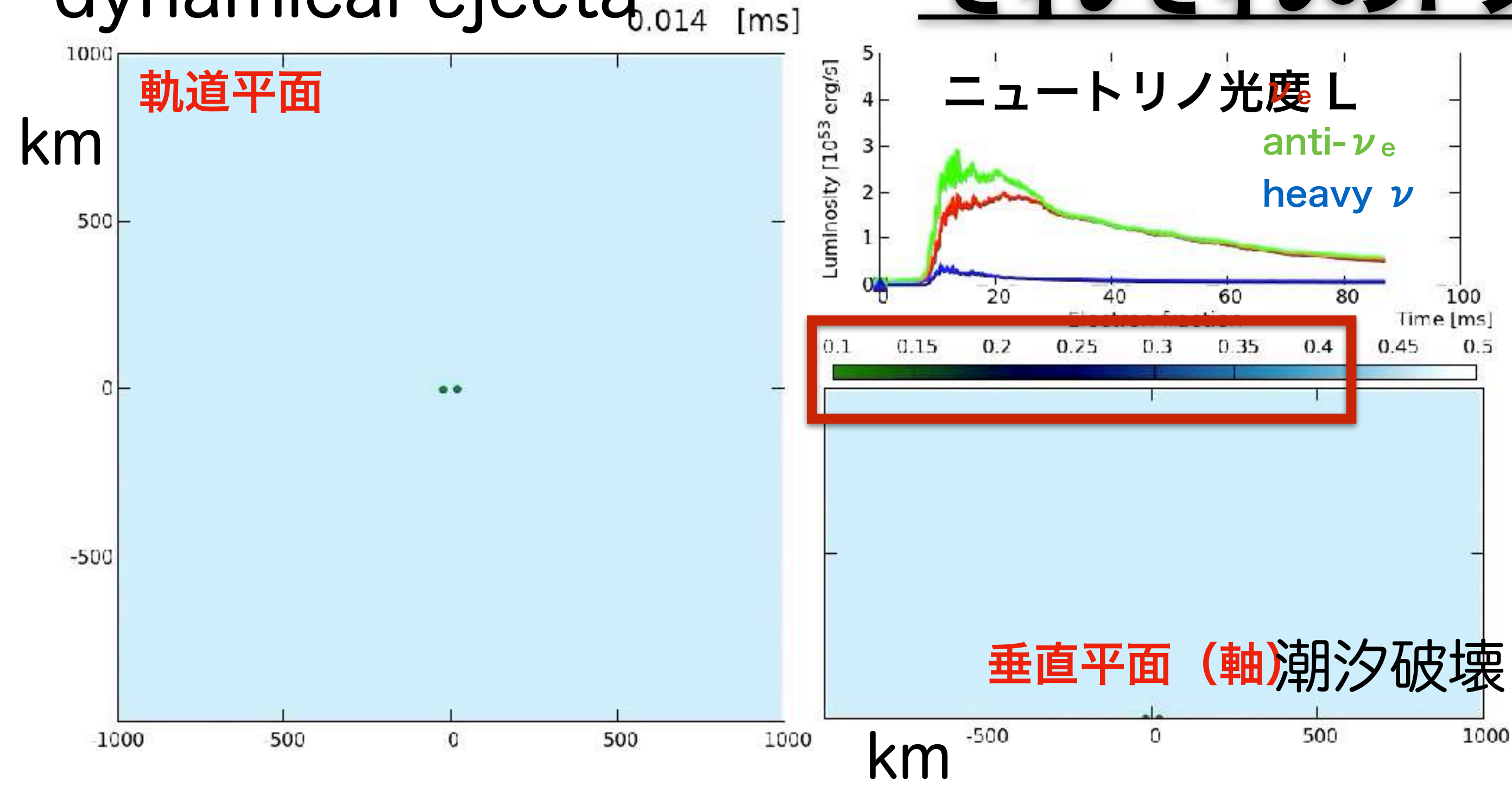
By Magellan telescope; Drout+2017, Science

Fujibayashi+NN+(2018)

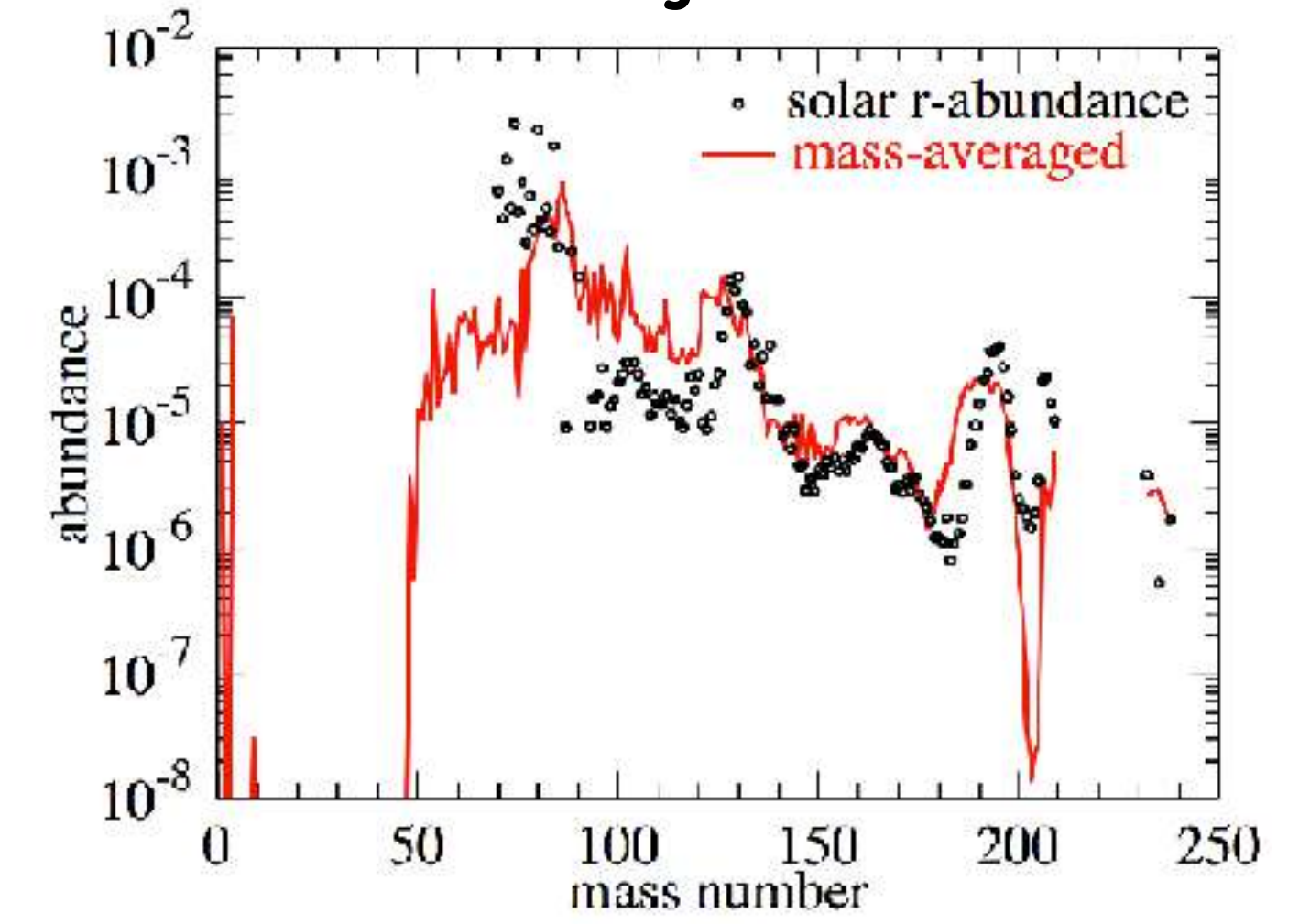


dynamical ejecta

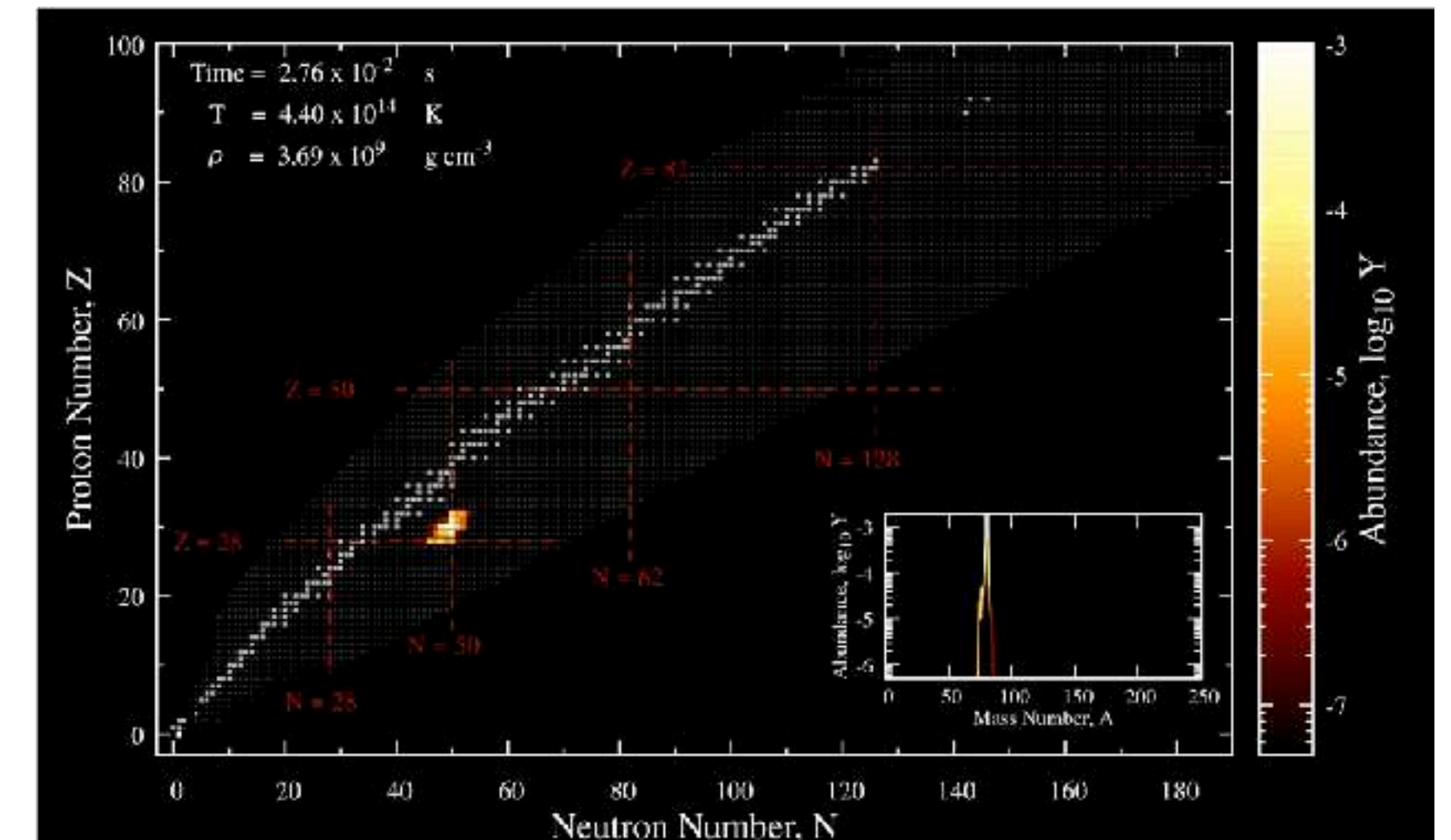
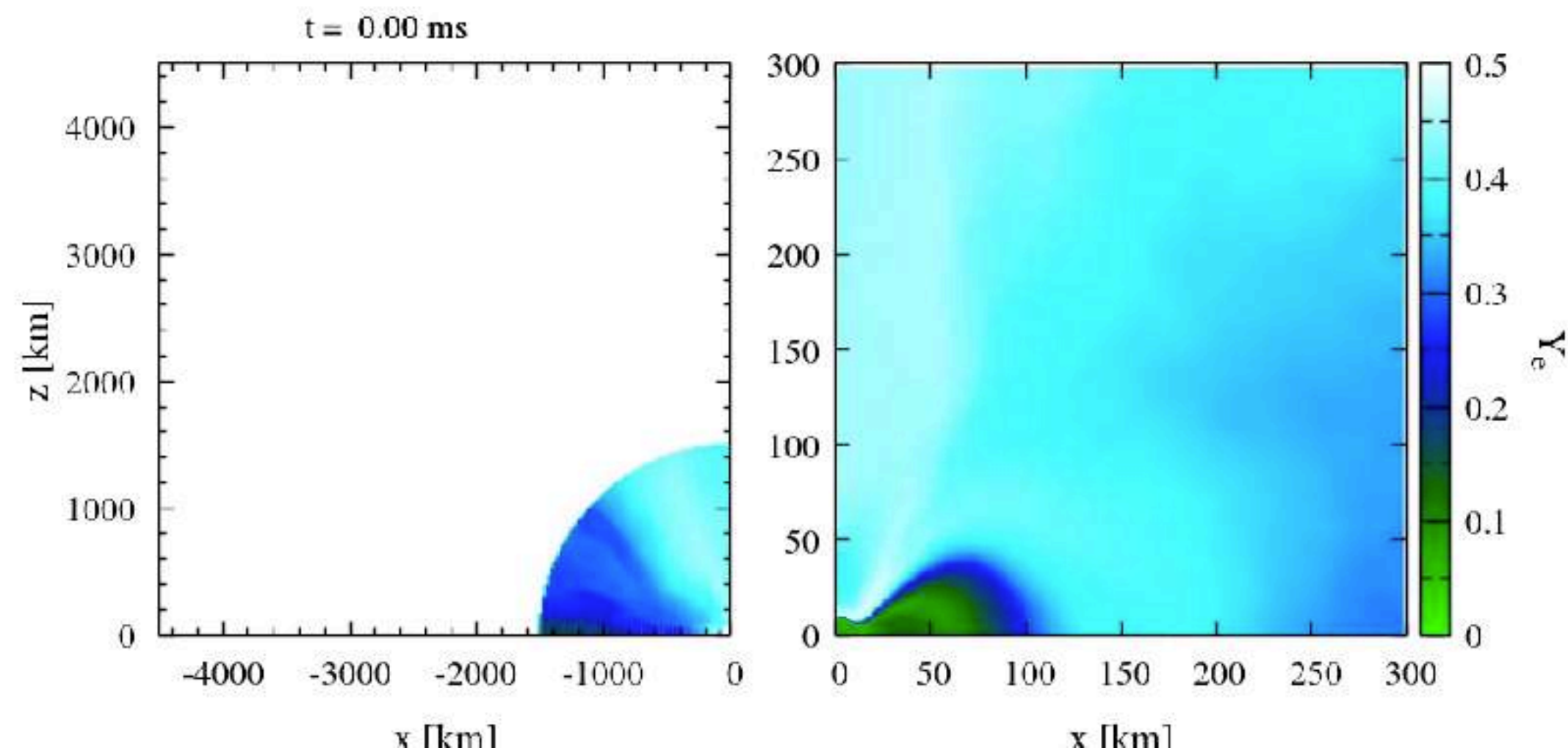
それぞれのrプロセス



Wanajo+NN+2014

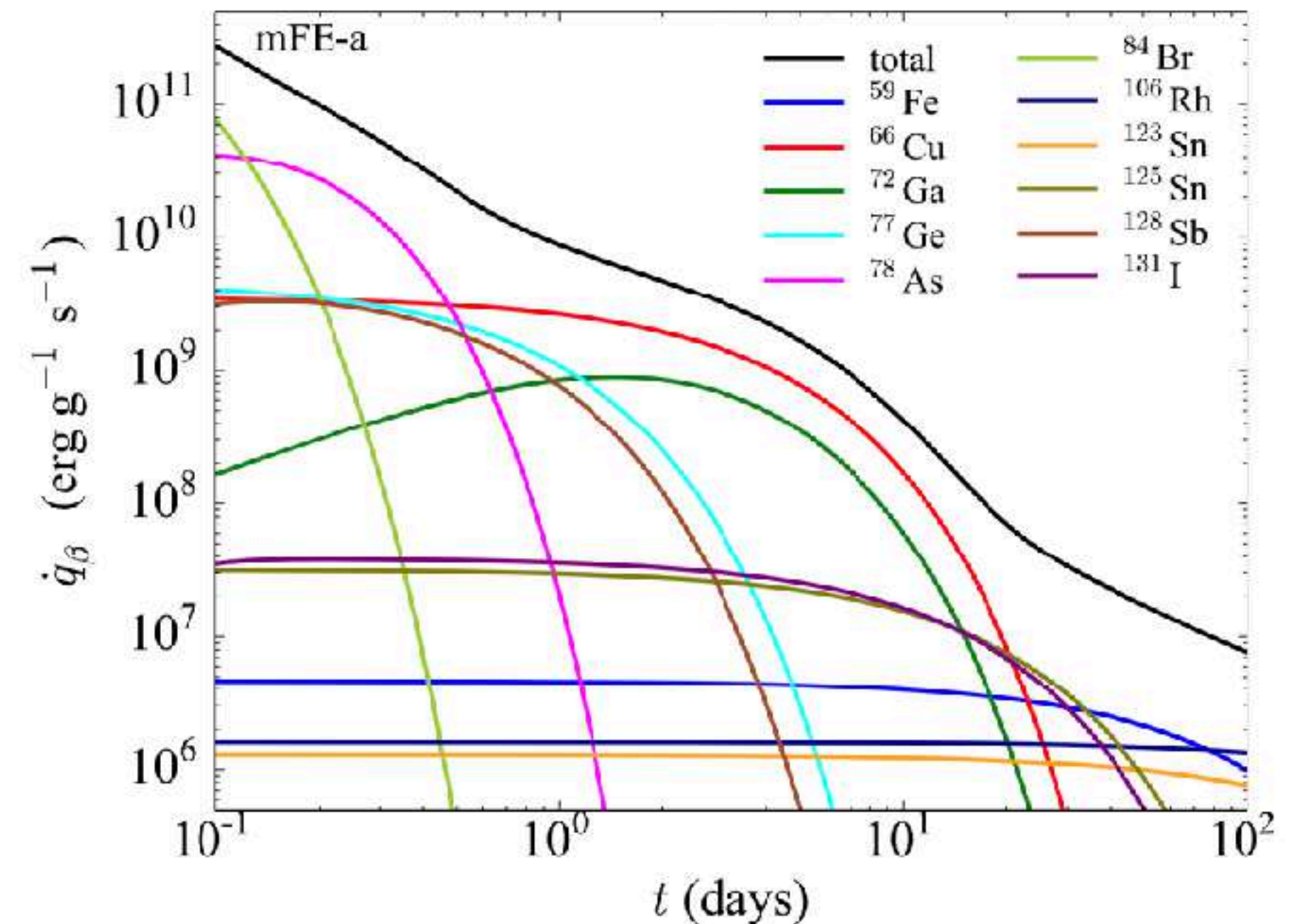
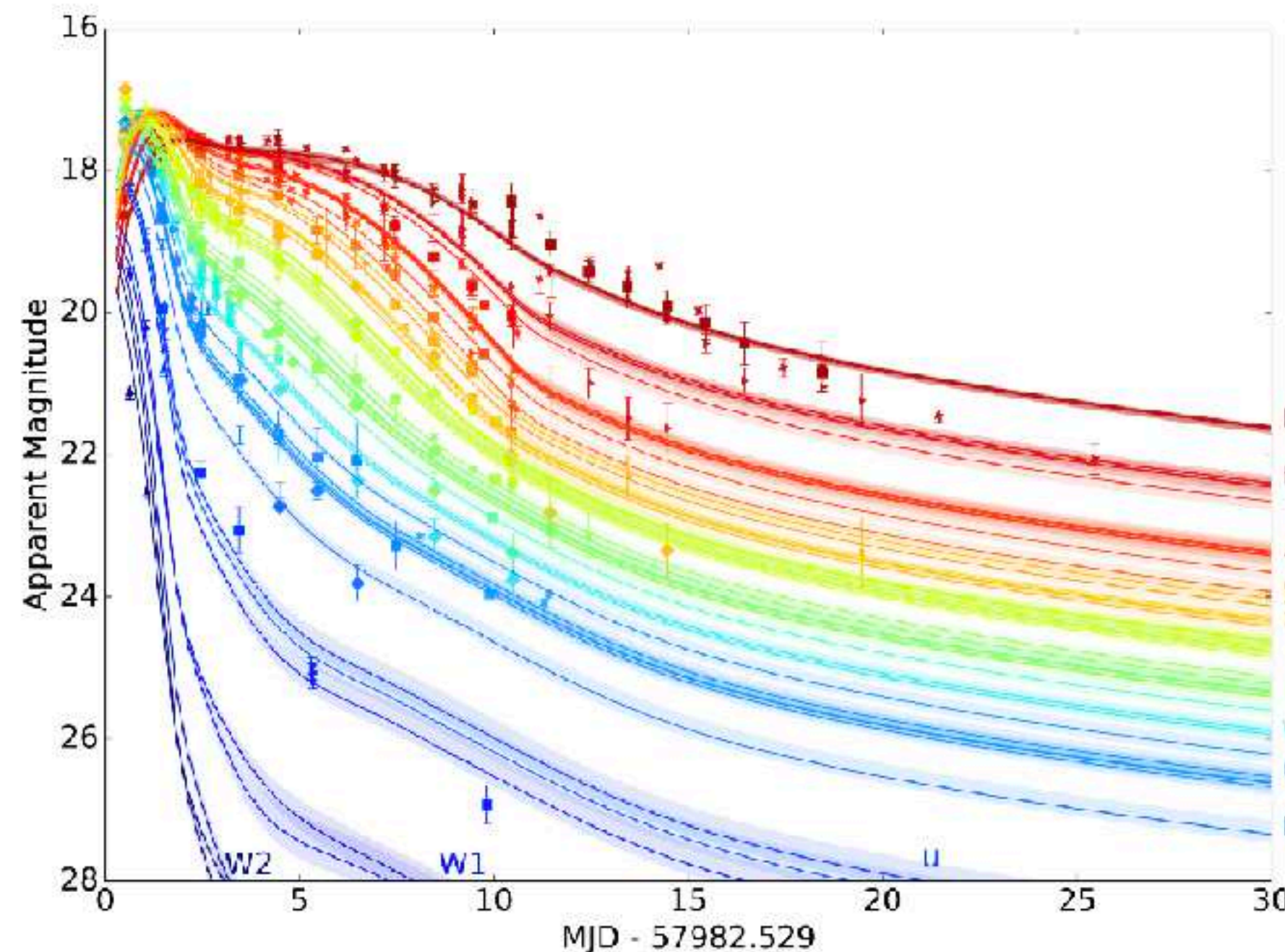


post-merger ejecta



連星中性子星合体の意義：多様化、複雑化

- ・天体モデル（理論）の観測的な検証が可能になった。
 - ・あえて言えば、rプロセス天体現象の初めての検証
- ・現象の新発見 → 説明すべき事柄の増加（サイエンスとして進歩）
 - ・元素組成→逆に、詳細な元素組成データは得られないが、（Sr Laの存在）
- ・光度曲線の時間進化
 - ・どの崩壊が効くか？



rプロセス：多様化する銀河化学進化

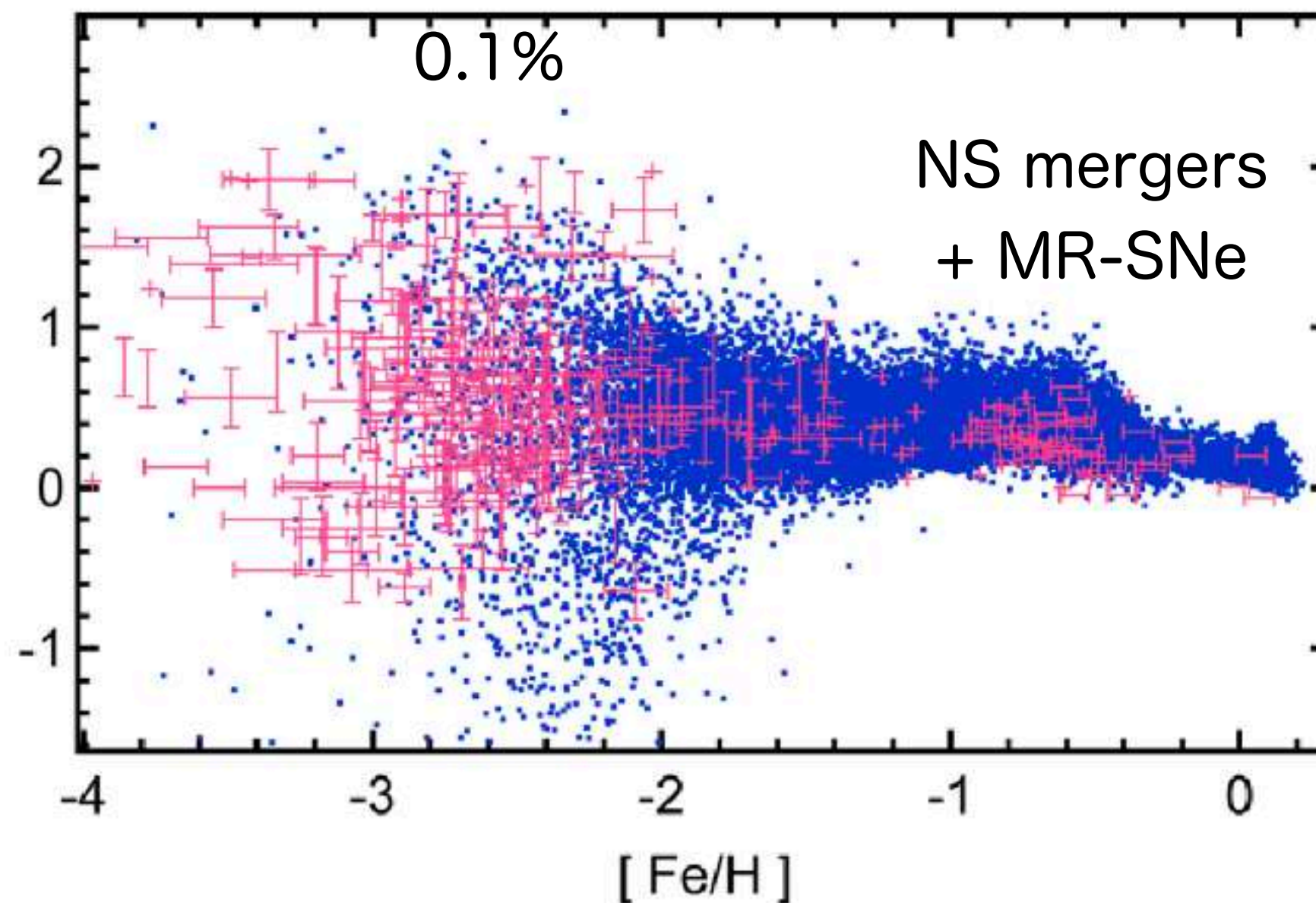
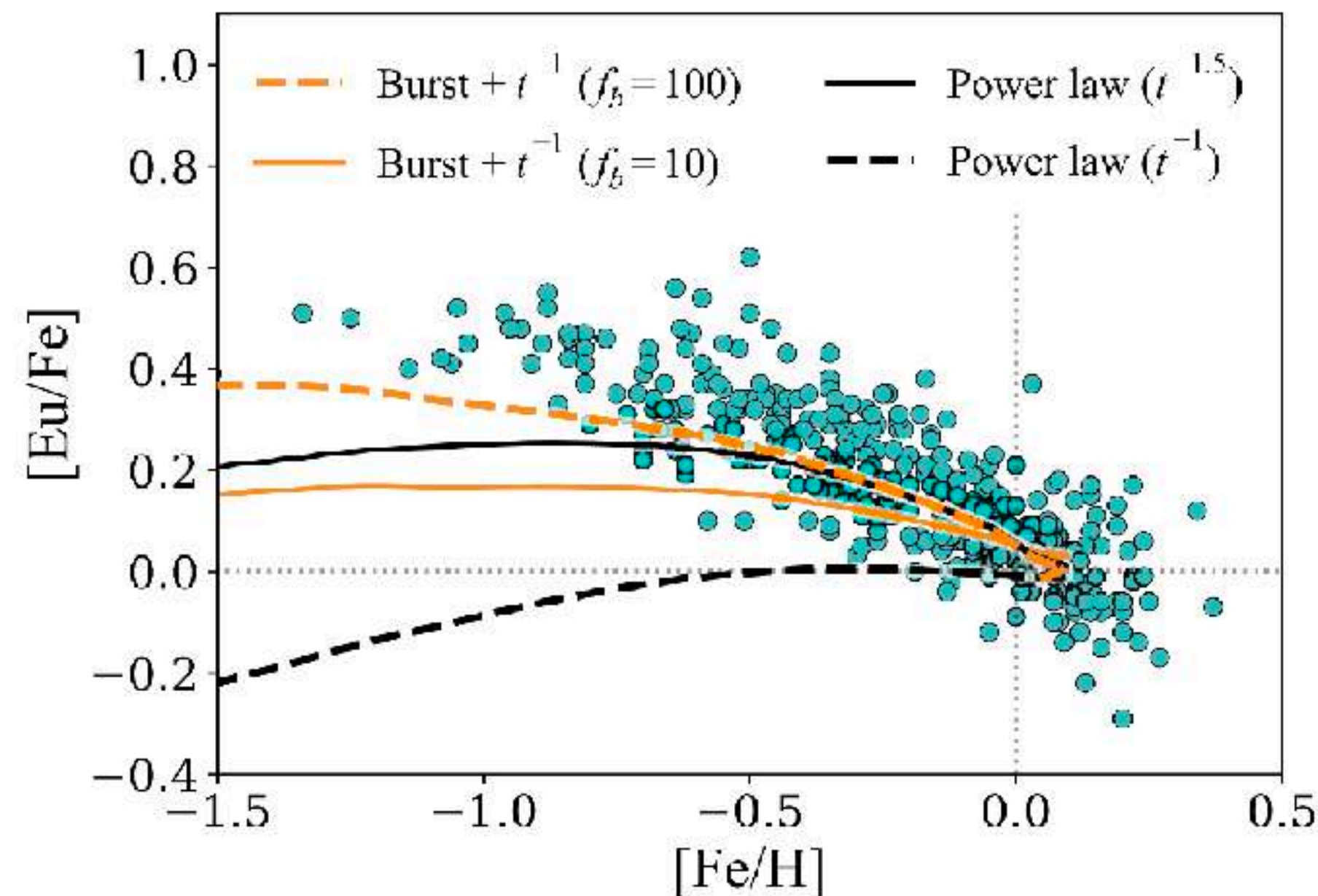
中性子星合体だけでrプロセス元素（Euなど）の銀河化学進化を説明できるか？

→ 短い遅延時間（最初のイベントが起こるタイミング） or 他の天体

GW170817 後に網羅的な銀河科学進化の研究 (Côté+2018など)

やはり標準的な遅延時間では説明不可? (Côté+2018)

→ 単一の天体イベントではなく、複数が必要?



磁気駆動型超新星
(MR-SNe) など
希少な超新星を仮定

Wehmeyer+(2015,2019)

rプロセス：複雑化した上での原子核物理

- ・「まだ1例」？ → 「また別の観測で常識が変わる？」
より統計が貯まる知見に対して「一般性がより確立」と「多様性」の増加
- ・例：銀河の化学進化
 - ・rプロセス元素は連星中性子星合体が主体
→ 大筋は良い（一般性）しかし、銀河の初期の存在など説明できない点も指摘。

rプロセス元素合成と核分裂

核理論のinputを洗練

動力学計算による中性子過剰核の核分裂の予言の試み
2021-2023年、基盤B（代表：西村）

with 田中翔也（科研費ポスドク）

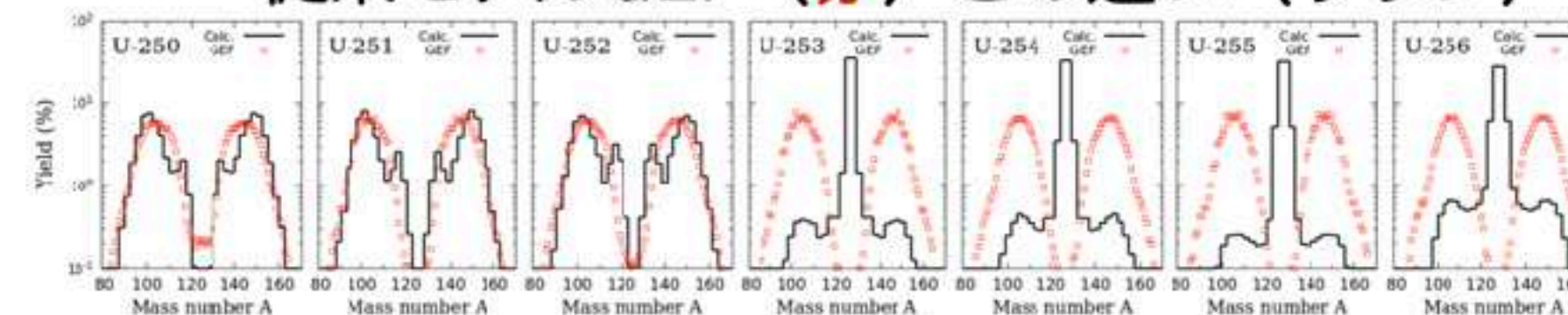
Tanaka, NN, Minato 2023, PRC

今年度は、中性子過剰ウランへの計算の拡張
と整理（NN+, prep.）（事前計算 by 田中）



rプロセス計算に拡張、適用

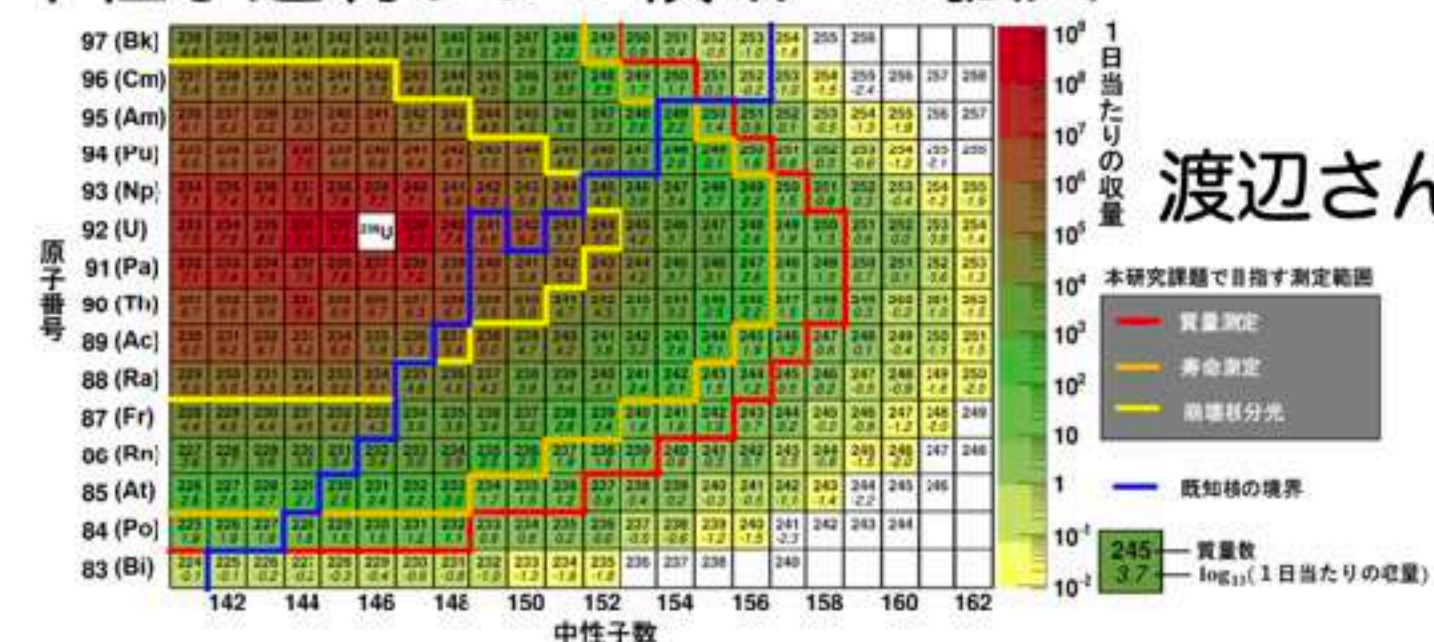
従来モデルGEF（赤）との違い（ウラン）



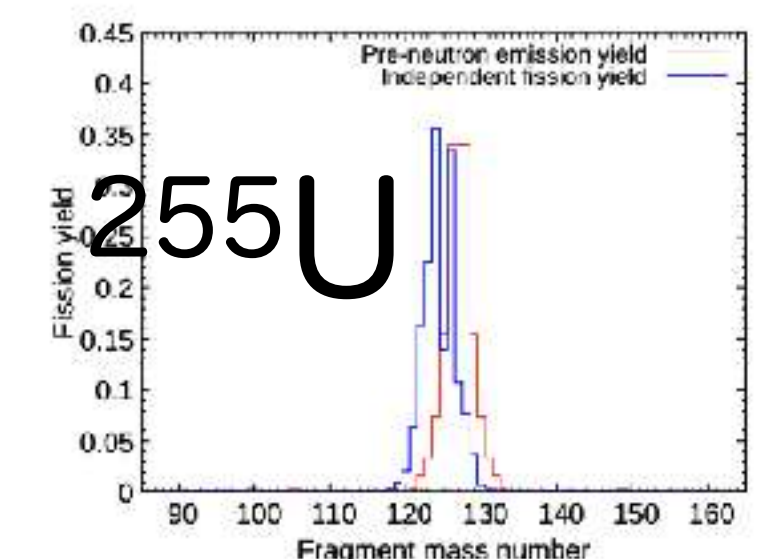
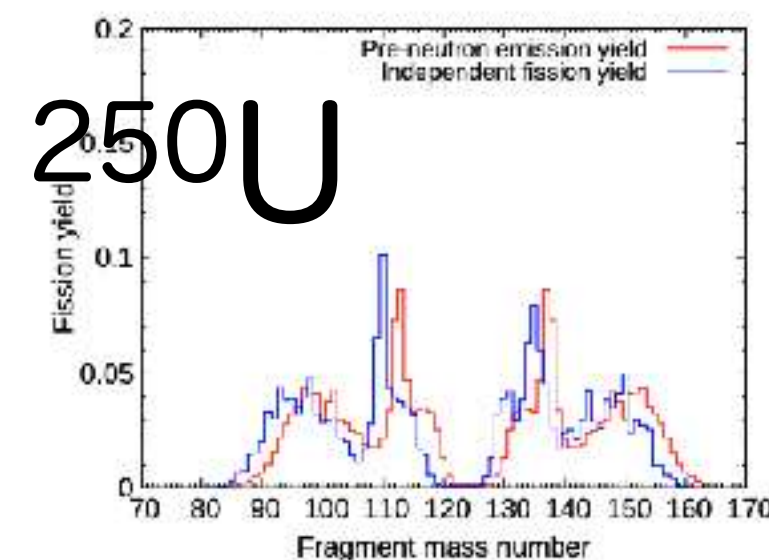
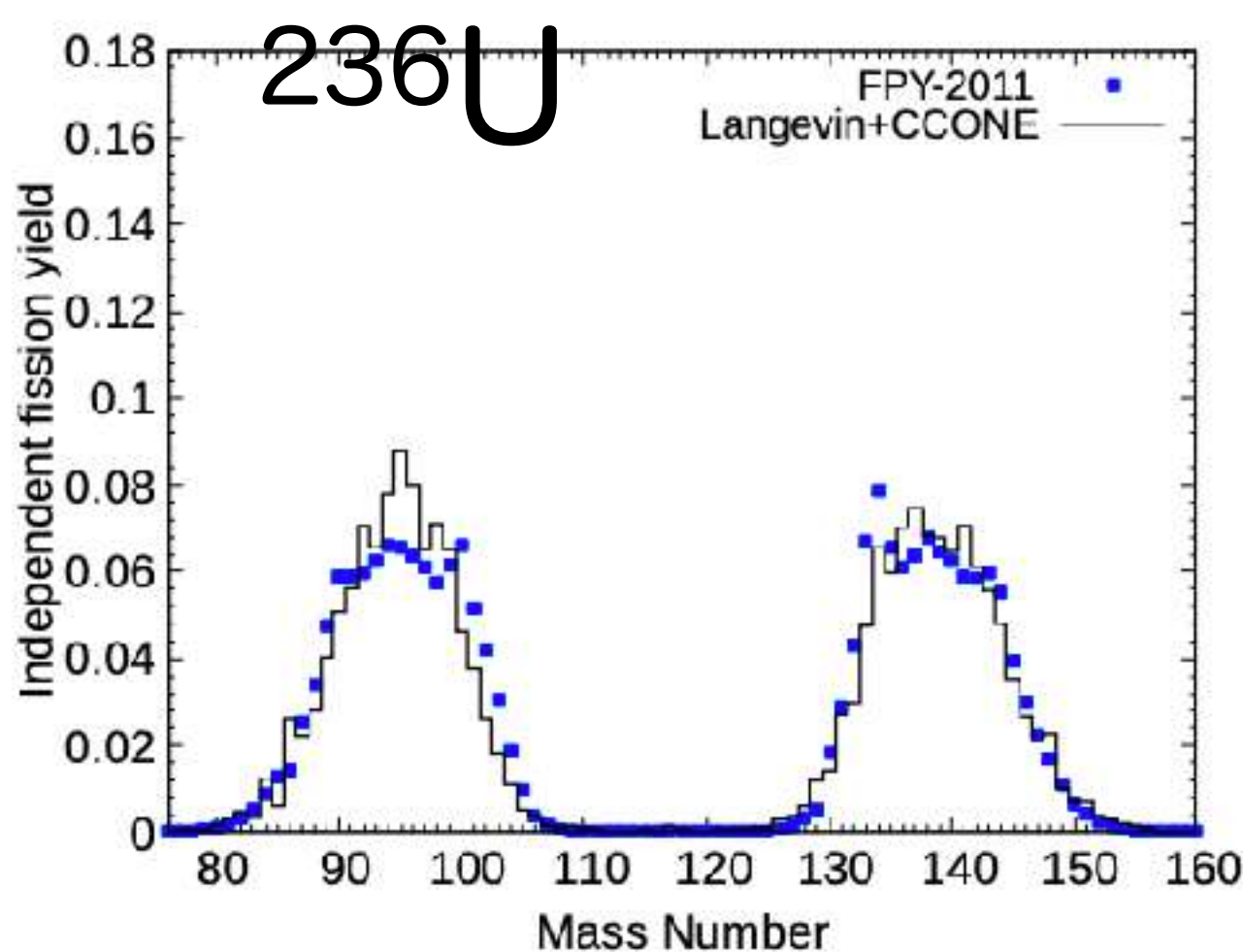
→ rプロセスへの影響

将来実験（KISS II by KEK & RIKEN）

中性子過剰ウラン領域への拡大



渡辺さん（KEK）

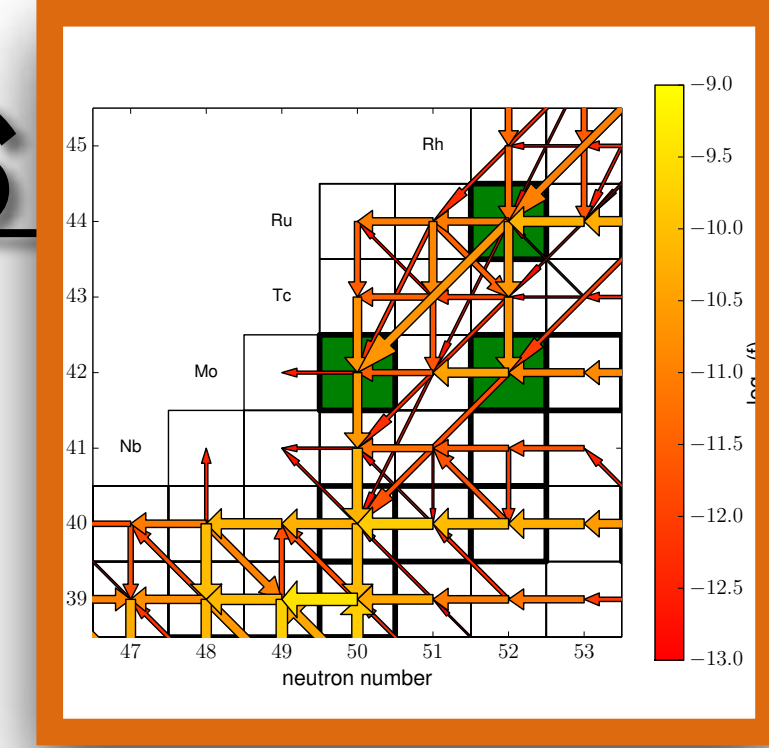
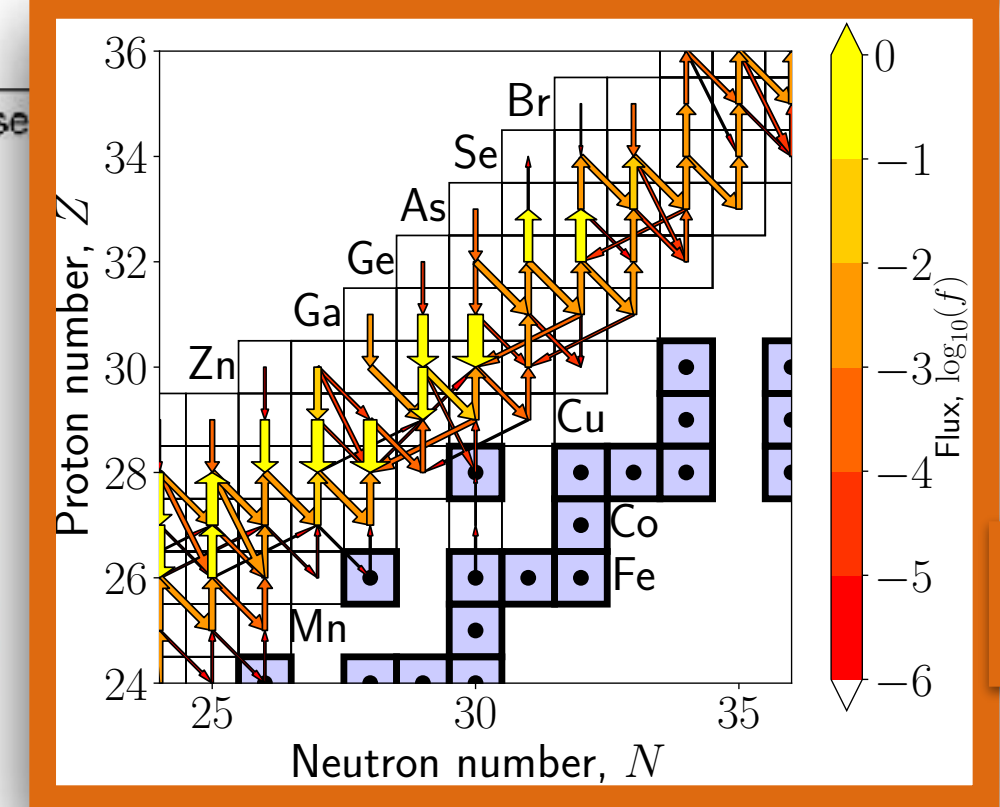
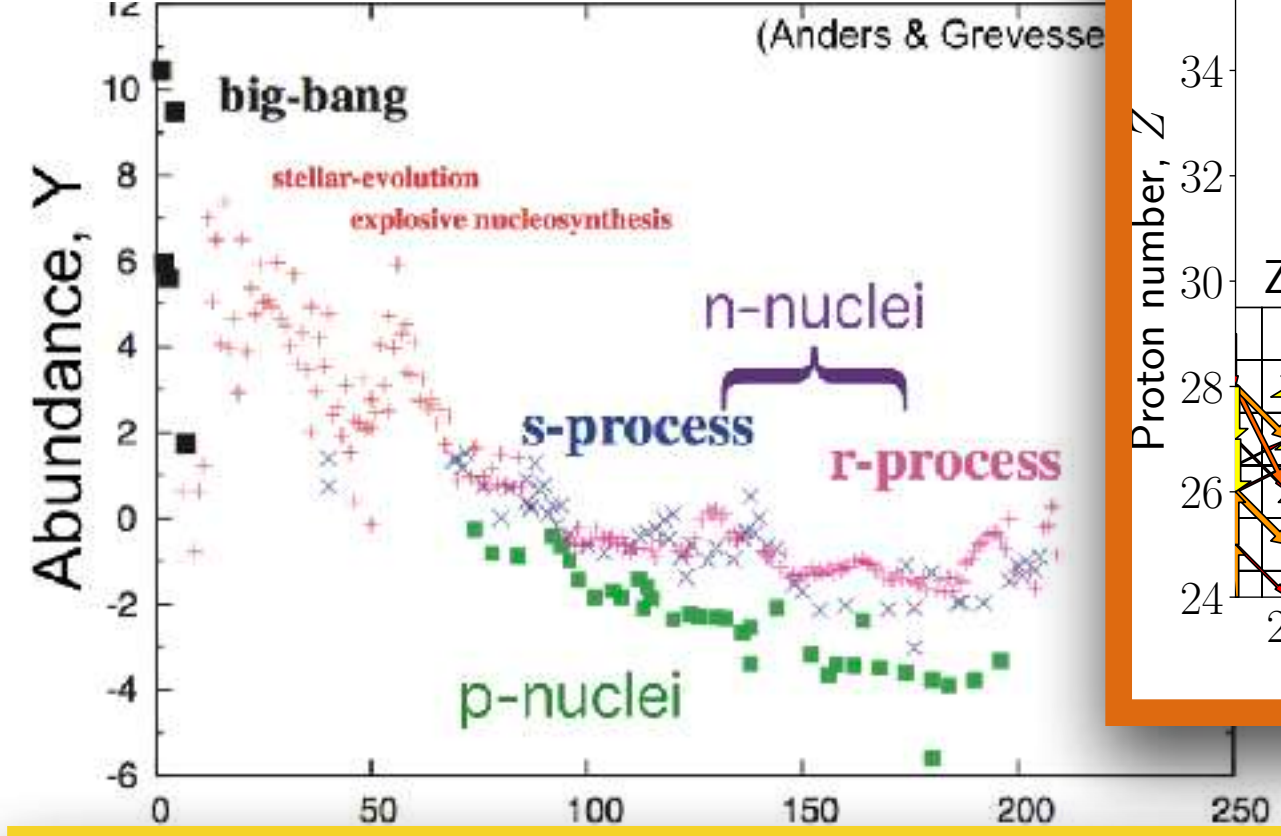


2. 宇宙の元素合成から 加速器実験へ

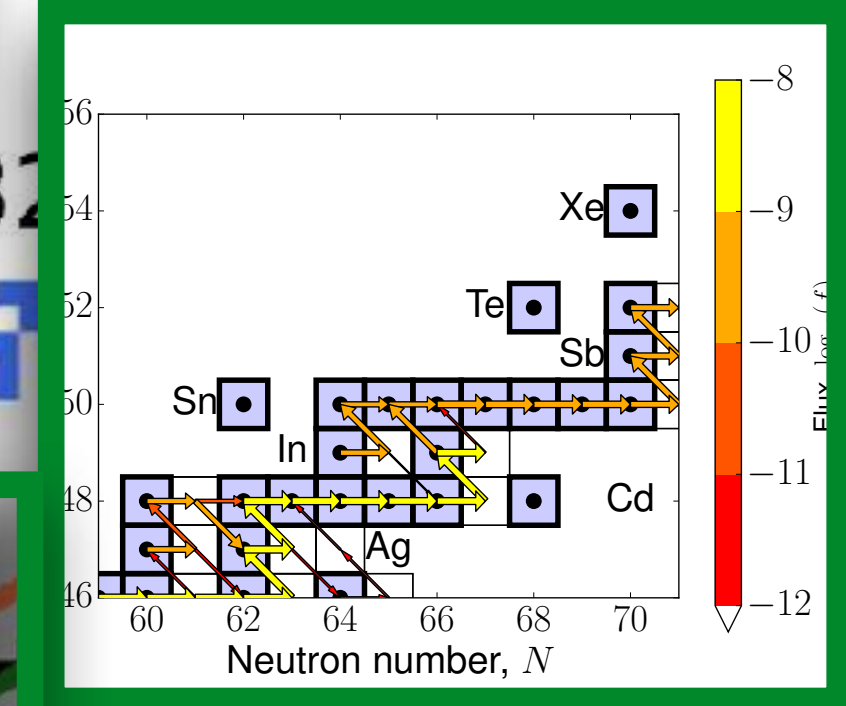
宇宙にお

の起源

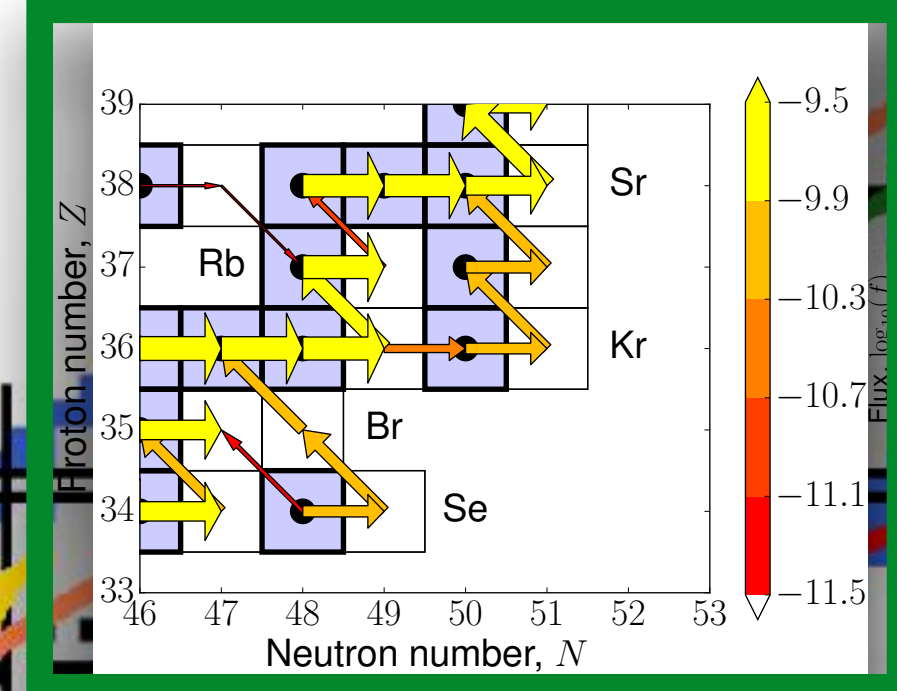
太陽系組成



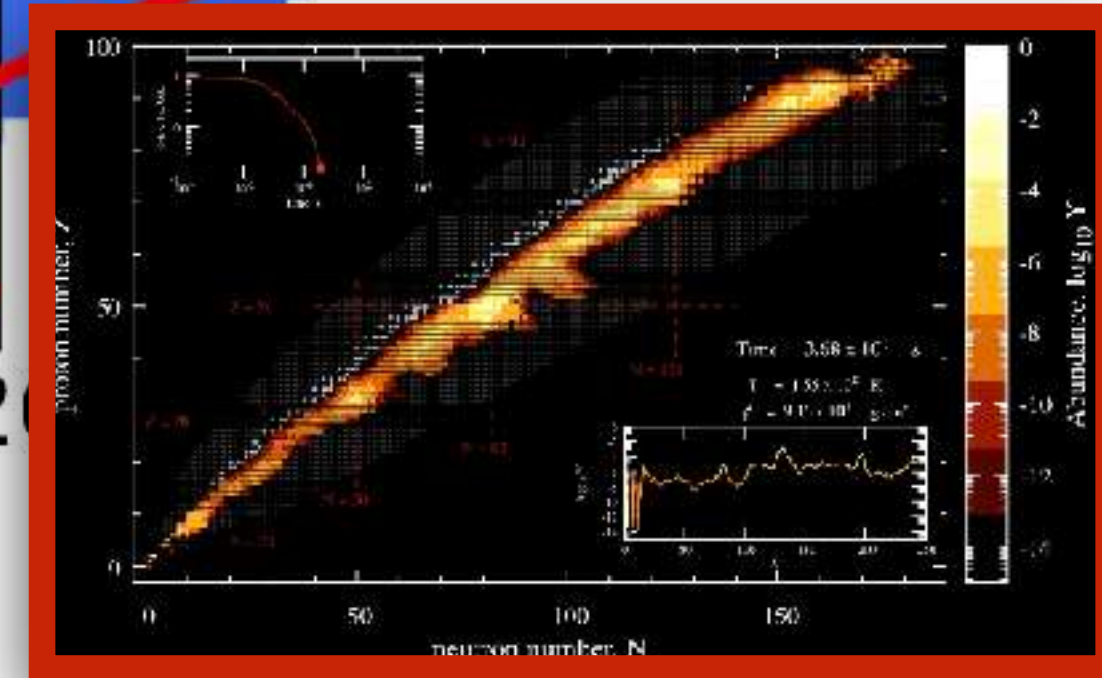
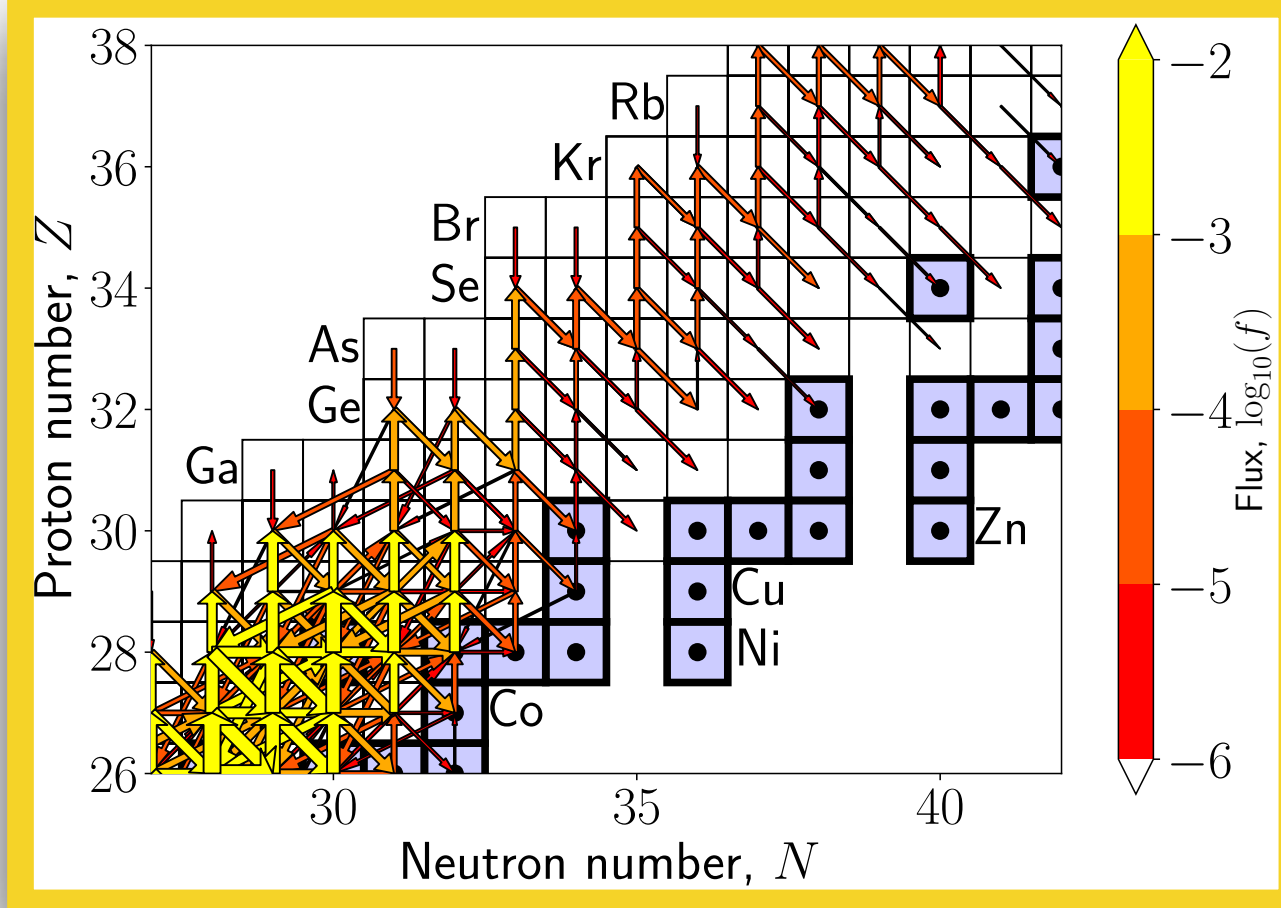
s-process



p-process

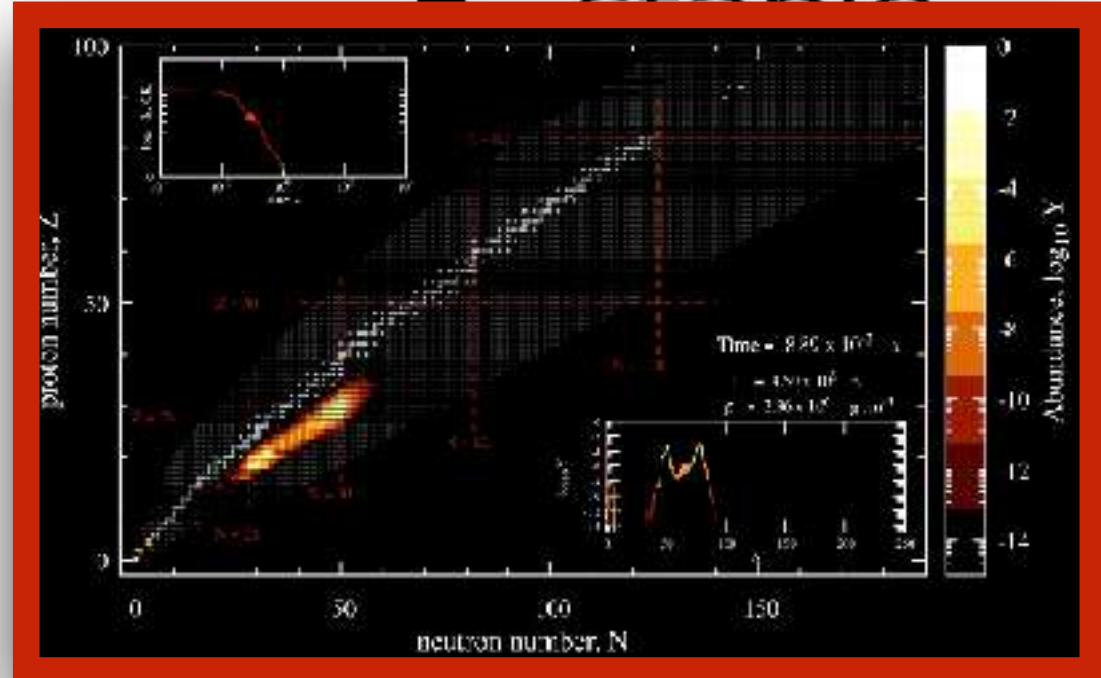
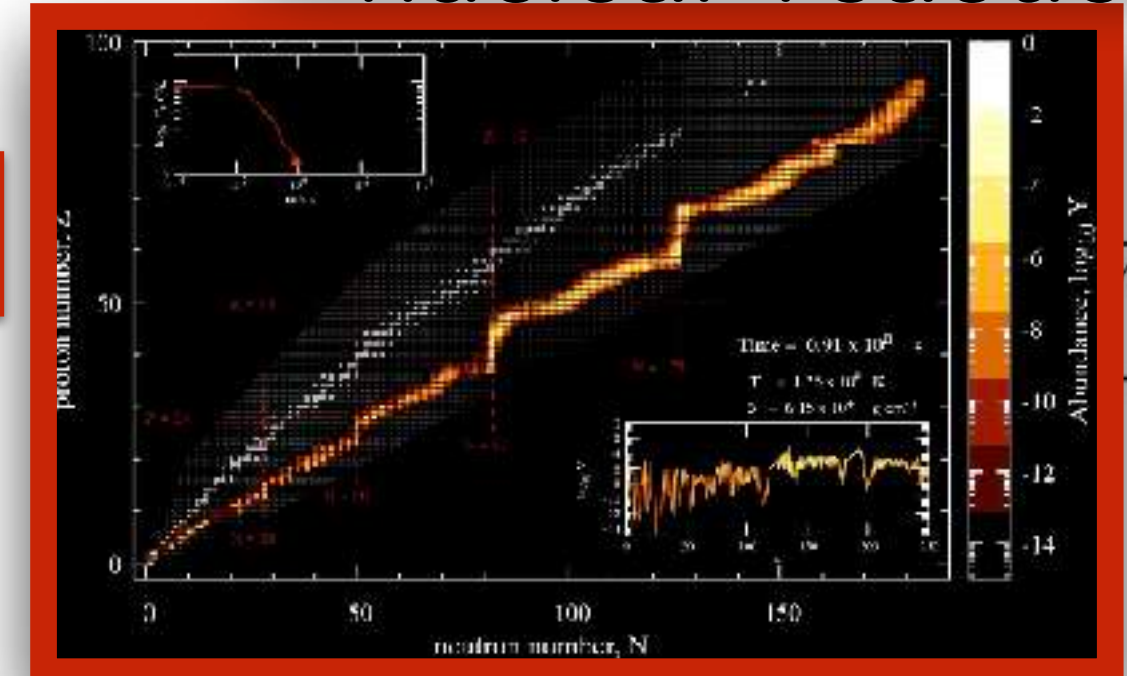


vp-process

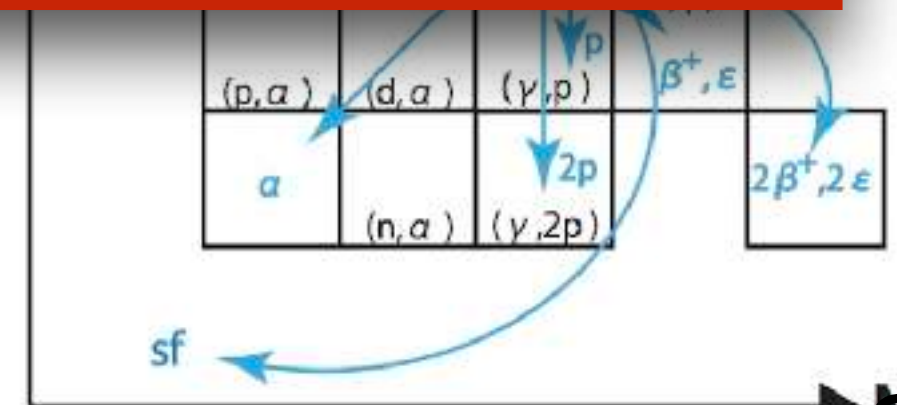


nuclear reactions

r-process



Arcones & Thielemann (2023)

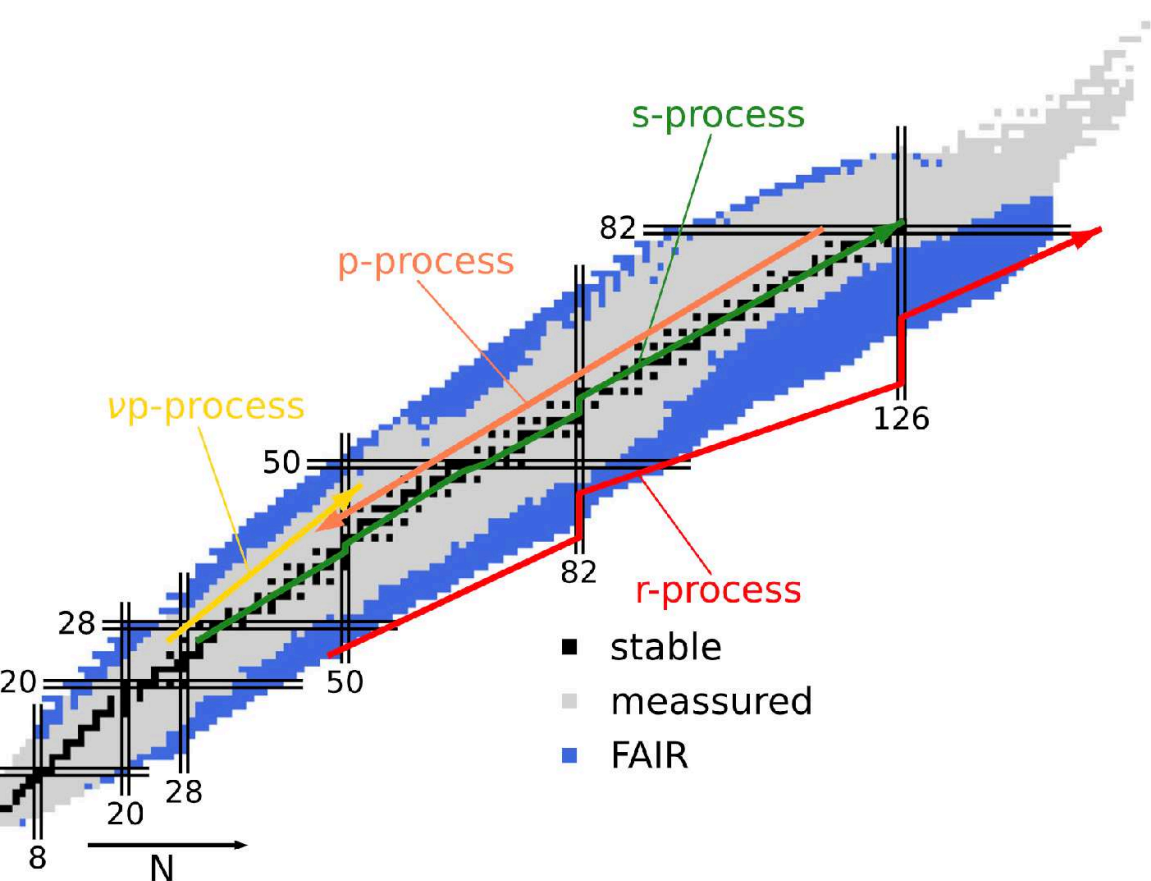


宇宙の元素合成で重要な反応率

反応や崩壊の不定性

モンテカルロ＋統計解析

天文学の観測量

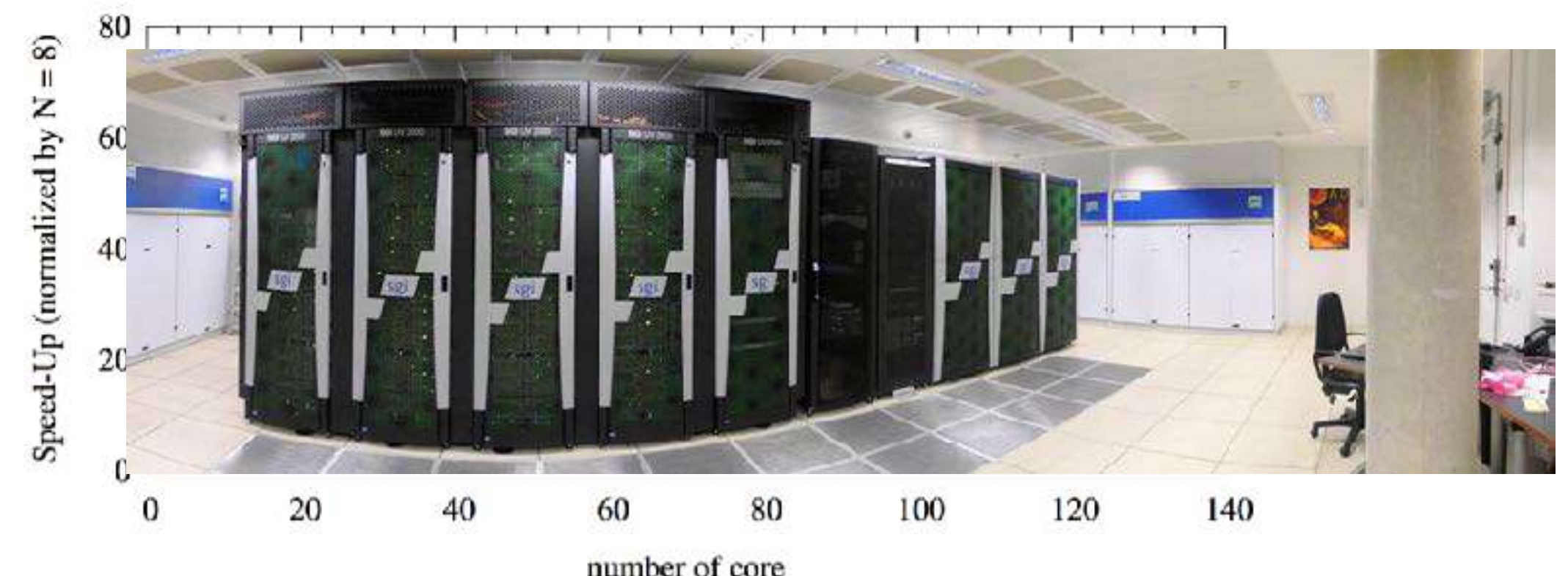


元素合成における
反応率の“sensitivity”

MC-Winnet：モンテカルロ元素合成

- ・反応率を不定性の幅でランダムに振って計算を繰り返す＝モンテカルロ
- ・影響の評価 & 重要な反応率 (by統計解析)
- ・共有メモリのマシン (OpenMP)

numascale



実験の挑戦

- ・sプロセス : (2) 弱い s (\rightarrow n_TOF (CERN) experiments), (4) メイン s
- ・pプロセス : (1) 重力崩壊型超新星, (3) Ia 型超新星
- ・ ν pプロセス : (5) 原始中性子星風 \rightarrow RIBF実験 さらに?

(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

sプロセス

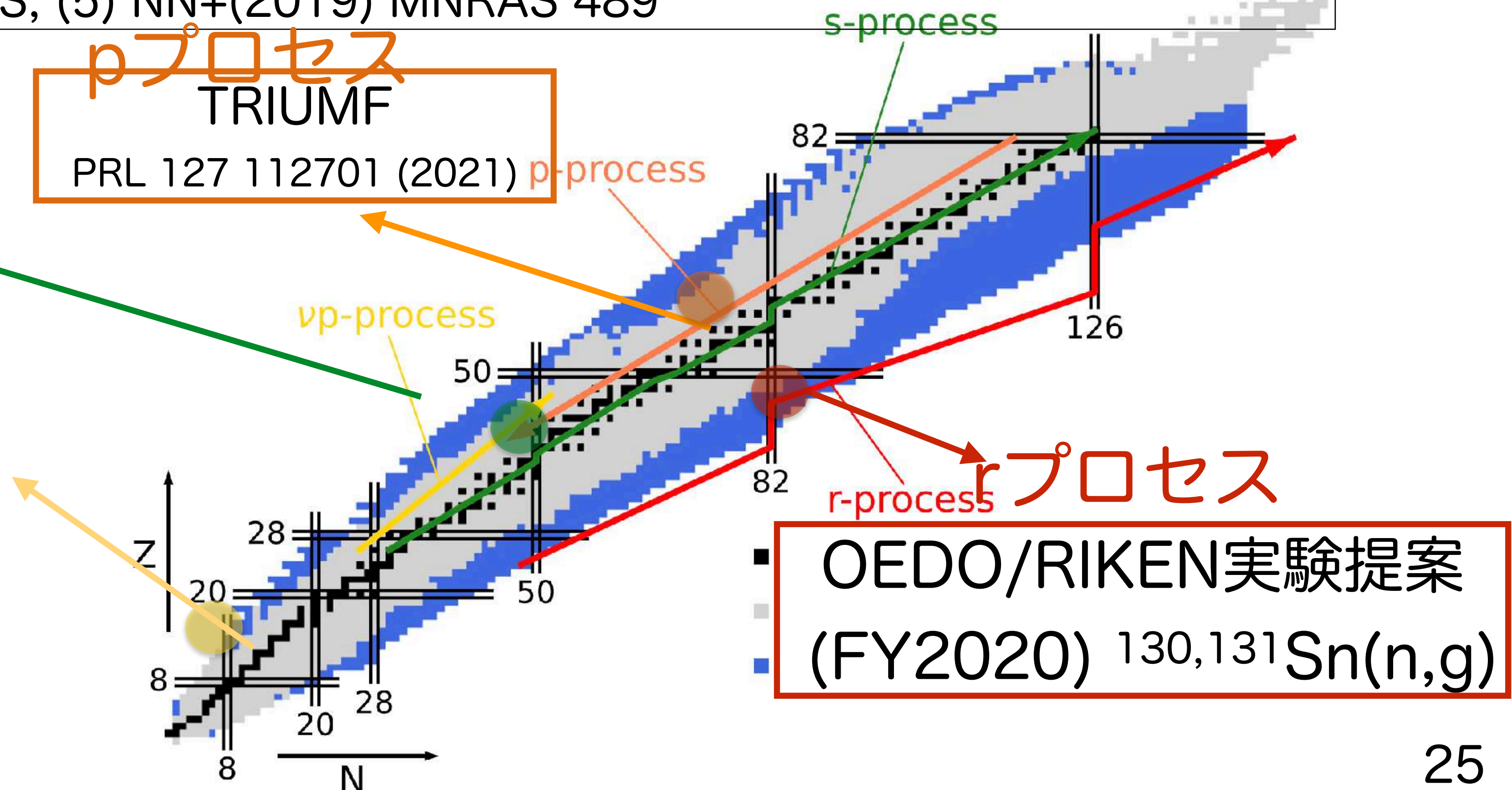
n_TOF (CERN) 実験提案
 ^{68}Zn , $^{77,78}\text{Se}$ (n,g)
(CERN INTC 2017-038)

pプロセス

TRIUMF
PRL 127 112701 (2021)

ν pプロセス

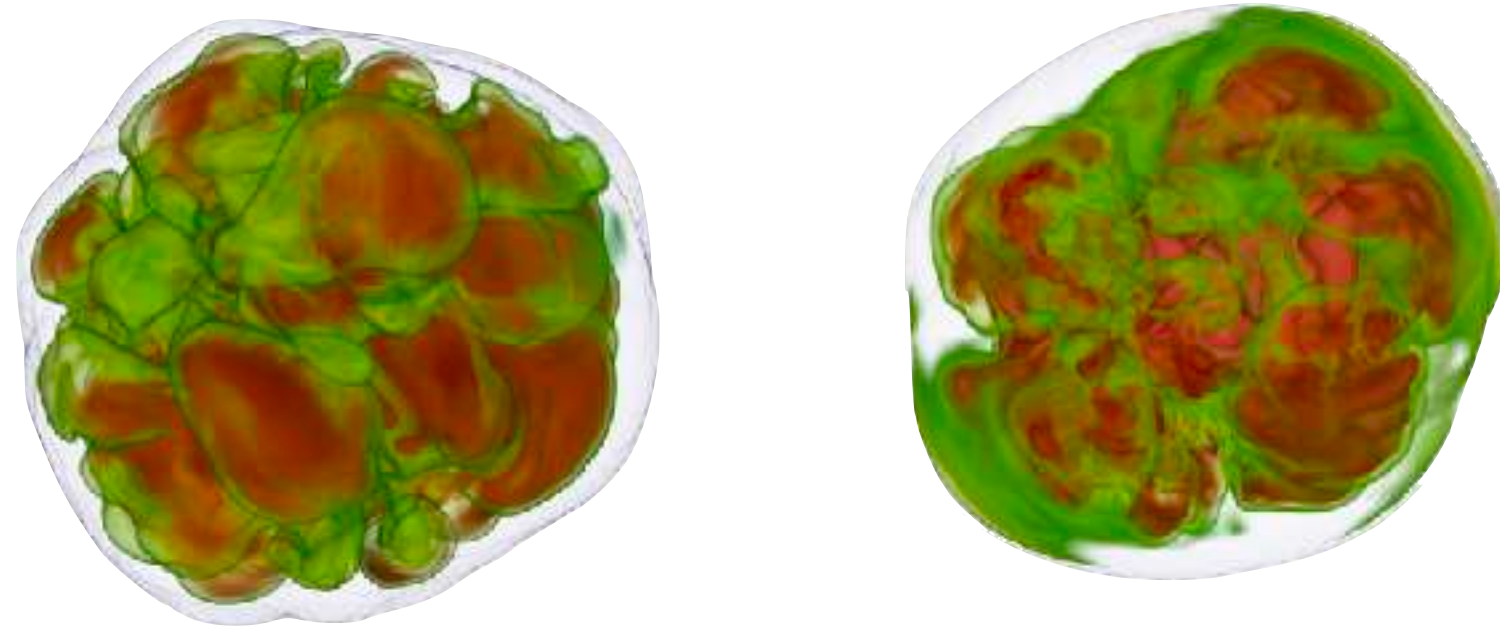
OEDO/RIKEN 実験提案
(FY2020) $^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$



超新星での νp プロセス元素合成



ニュートリノ加熱による爆発 (エントロピー) νp プロセス (陽子過剰 $Y_e \sim 0.6$ のモデル)

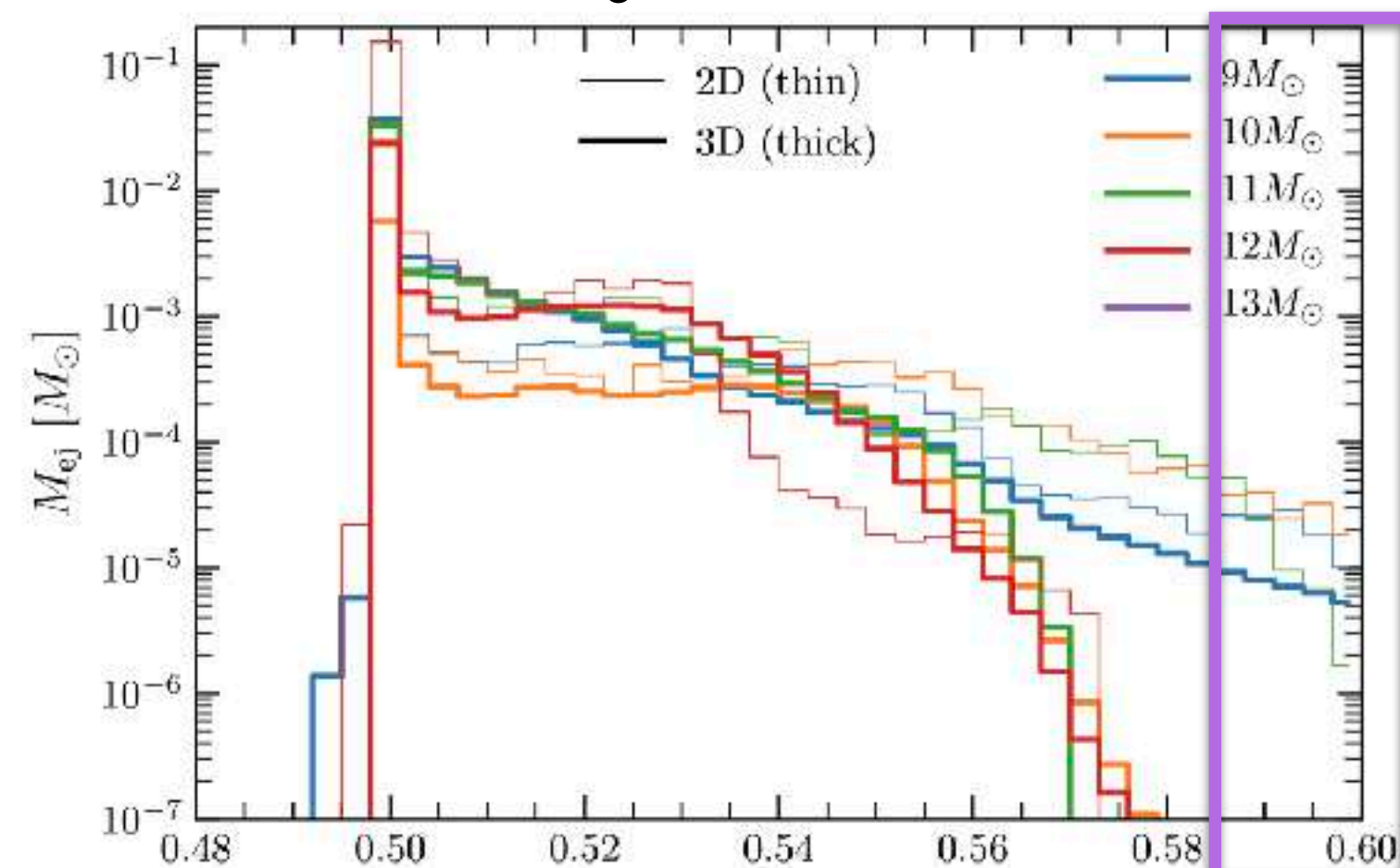


400 km

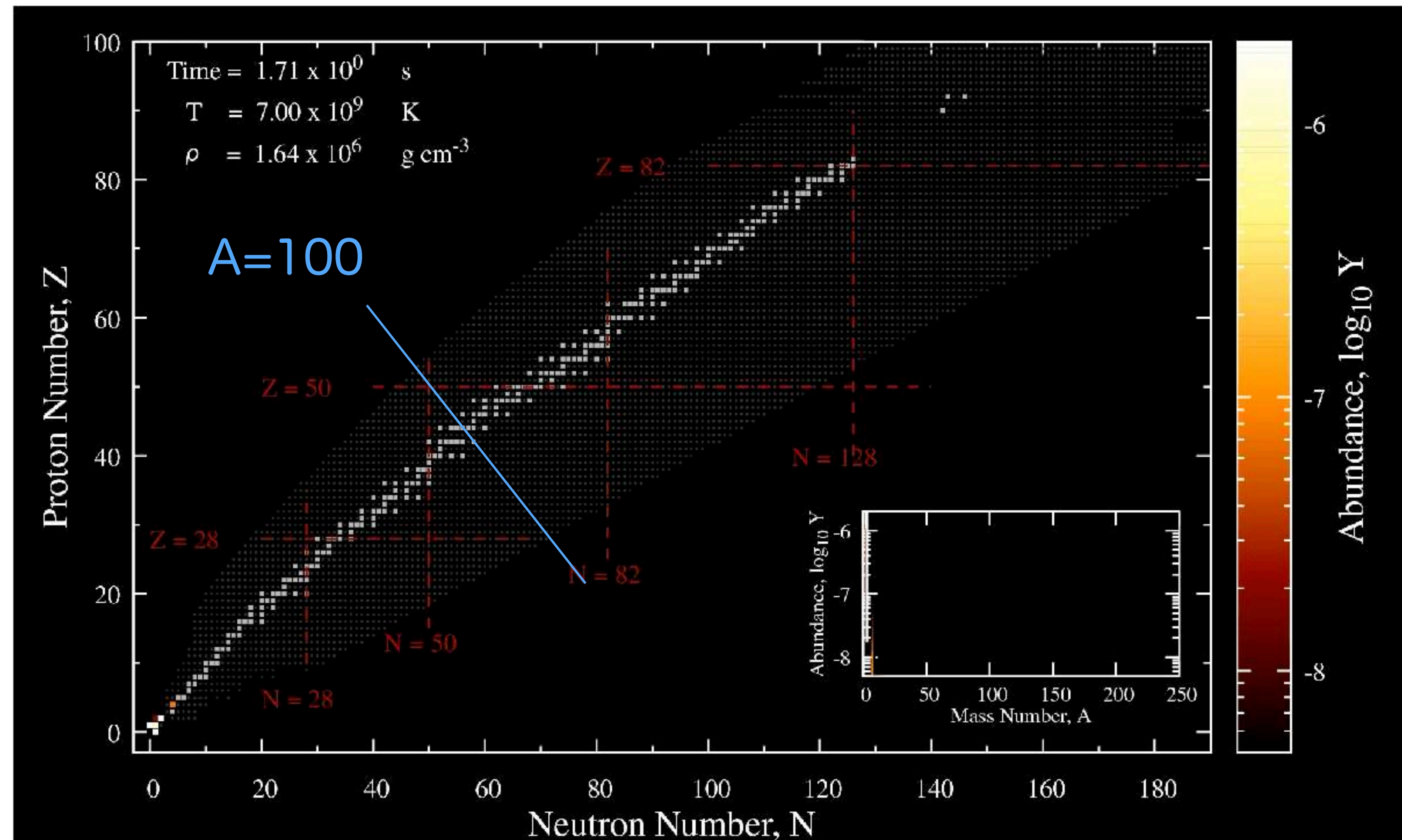
6000 km

放出物質は陽子過剰に

$$Y_e > 0.6$$



$$Y_e \sim Y_p$$



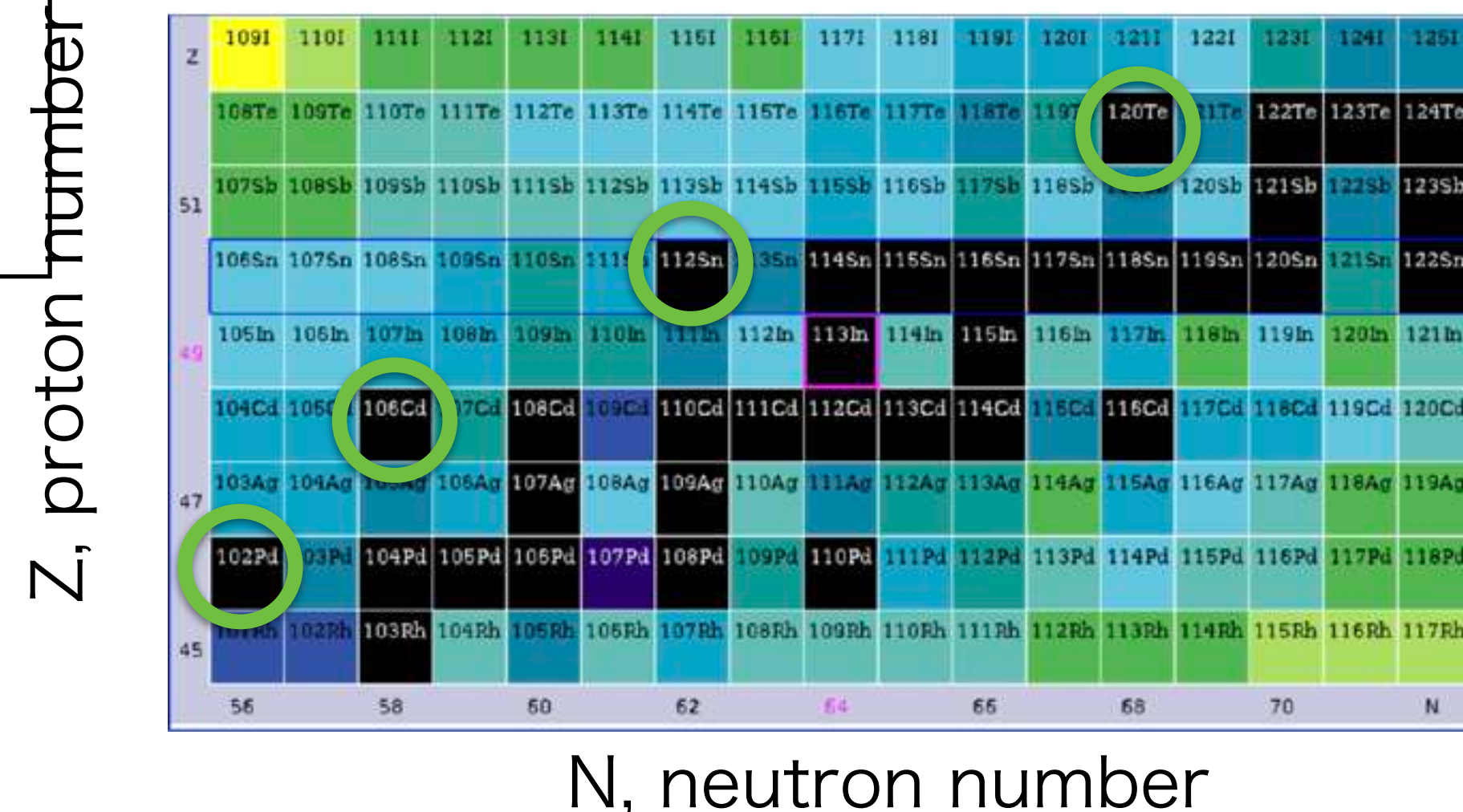
太陽系モリブデン同位体比問題

- Mo : 元素の中でp核の比率が最も多い
- 太陽系組成 : 同位体比 (Lodders 2003):

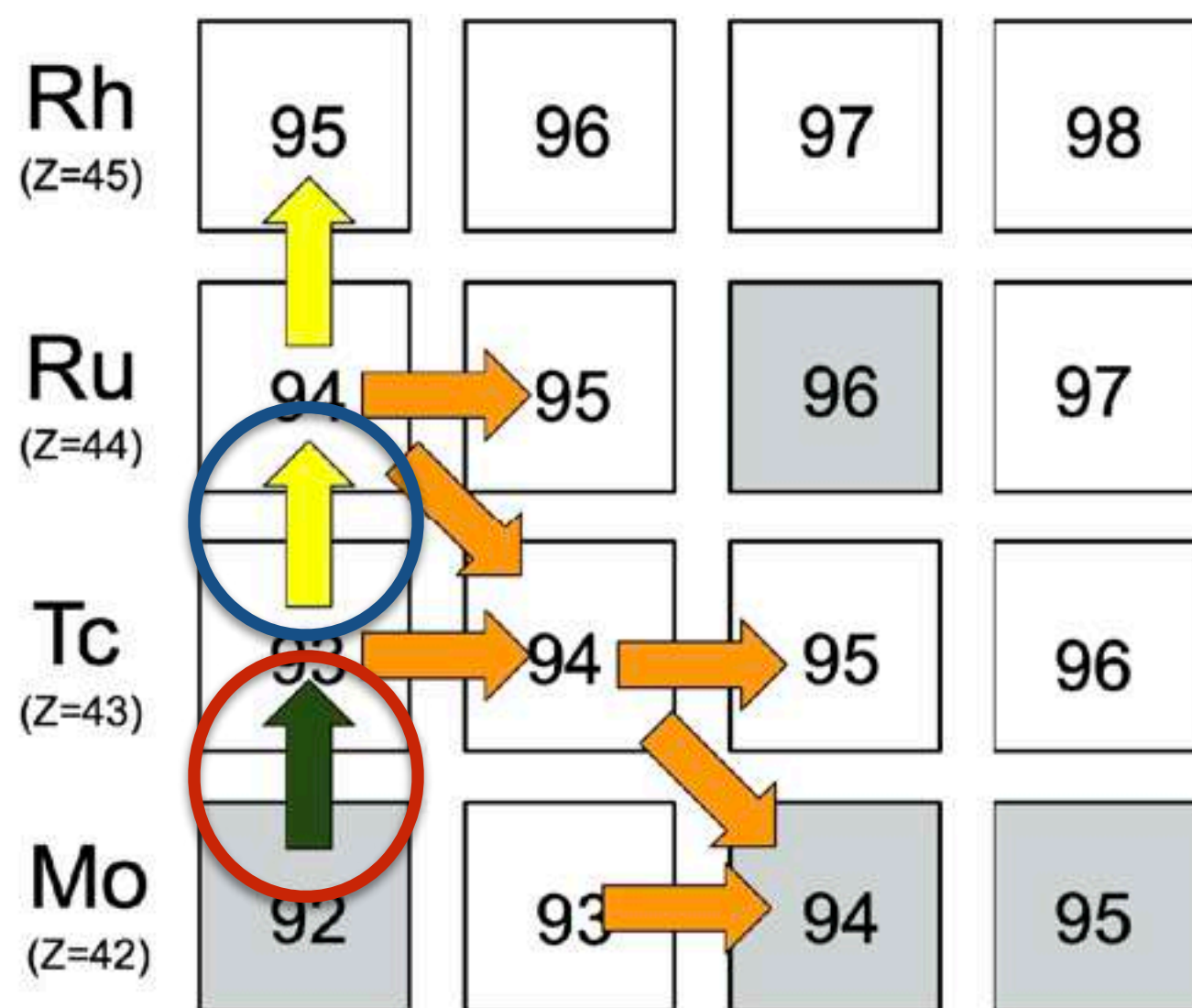
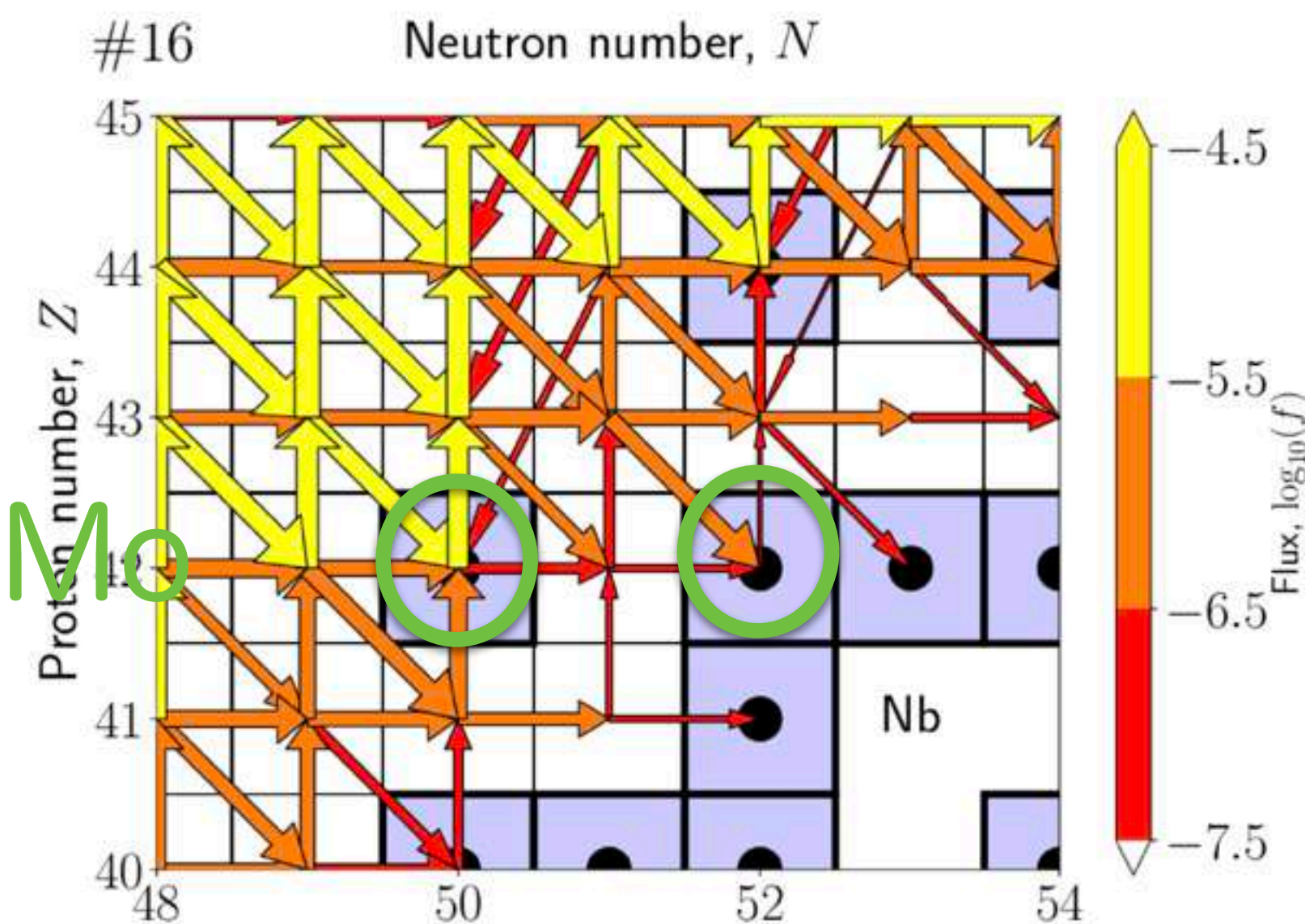
$$^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo} = 1.6$$

- νp プロセス :
 - 質量の不定性では解決不可能 (Xing+2018)
 - 核反応の不定性? : $0.67 < ^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo} < 2.79$

p核 (陽子過剰/中性子欠乏)



NN+2019



最重要 : $^{92}\text{Mo}(p,g)^{93}\text{Tc}$
(次点: $^{93}\text{Tc}(p,g)^{94}\text{Ru}$)

まとめ

• 宇宙における元素の起源

- 宇宙核物理：元素の起源を解明（← 天体と原子核の知識を駆使）

1. rプロセス元素合成と起源天体

- 爆発天体での元素合成、鉄より重い元素（金、プラチナ、ウラン）を作る
- 中性子過剰不安定核の β 崩壊、核分裂、中性子捕獲が重要（不定性大）
- 天文学的には、最近の観測（GW170817）による新しい研究パラダイム
- 今後も、多様化する課題設定において核物理の役割は重要：核分裂など

2. 宇宙の元素合成から加速器実験へ

- 宇宙の元素合成の複雑化→「MC元素合成」の開発とスタートダッシュ成功
 - s、r、p、 ν p、rpプロセス → 実験とのコラボレーション
 - 一つの例：モリブデン問題を ν pプロセス解決する実験の提案