

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



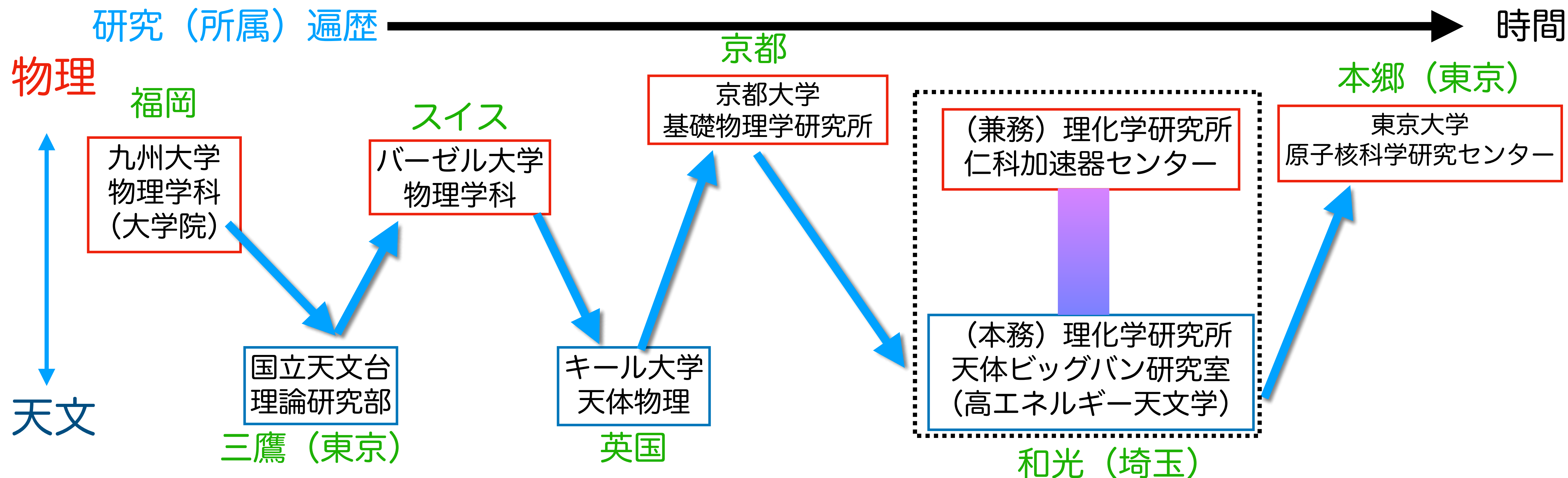
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



自己紹介

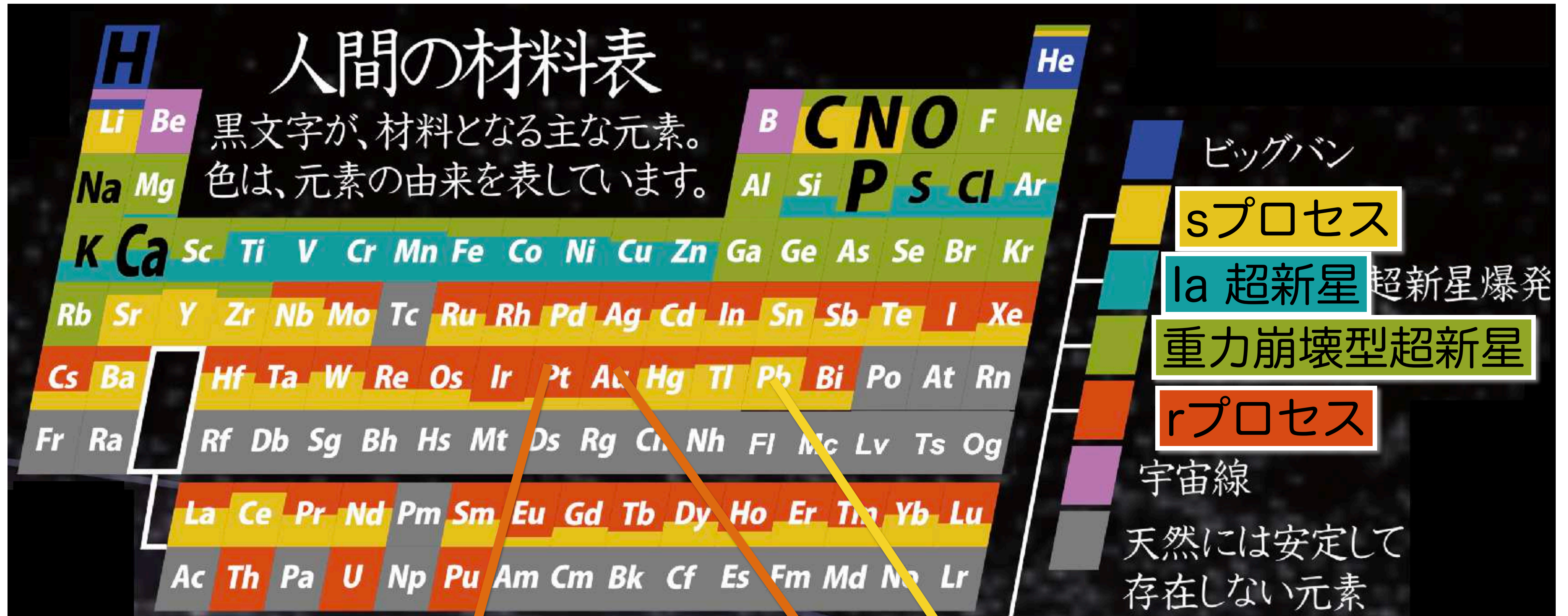
- ・西村 信哉（にしむら のぶや）：佐賀県生まれ（九州大学院卒）
- ・現職：東京大学・原子核科学研究センター：特任研究員
- ・専門分野：宇宙核物理、高エネルギー天文学、元素合成、突発天体

興味を中心 → 我々の宇宙の元素の起源と進化を解明

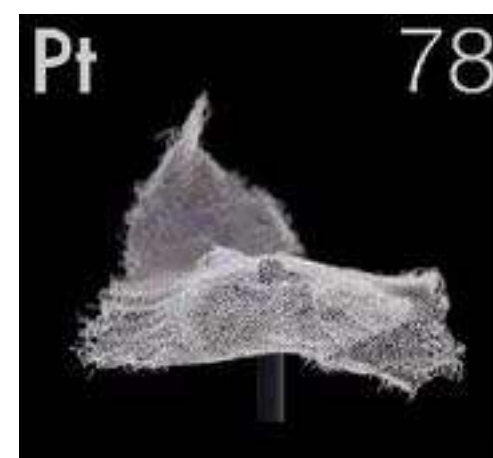


元素の周期表と宇宙での起源

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

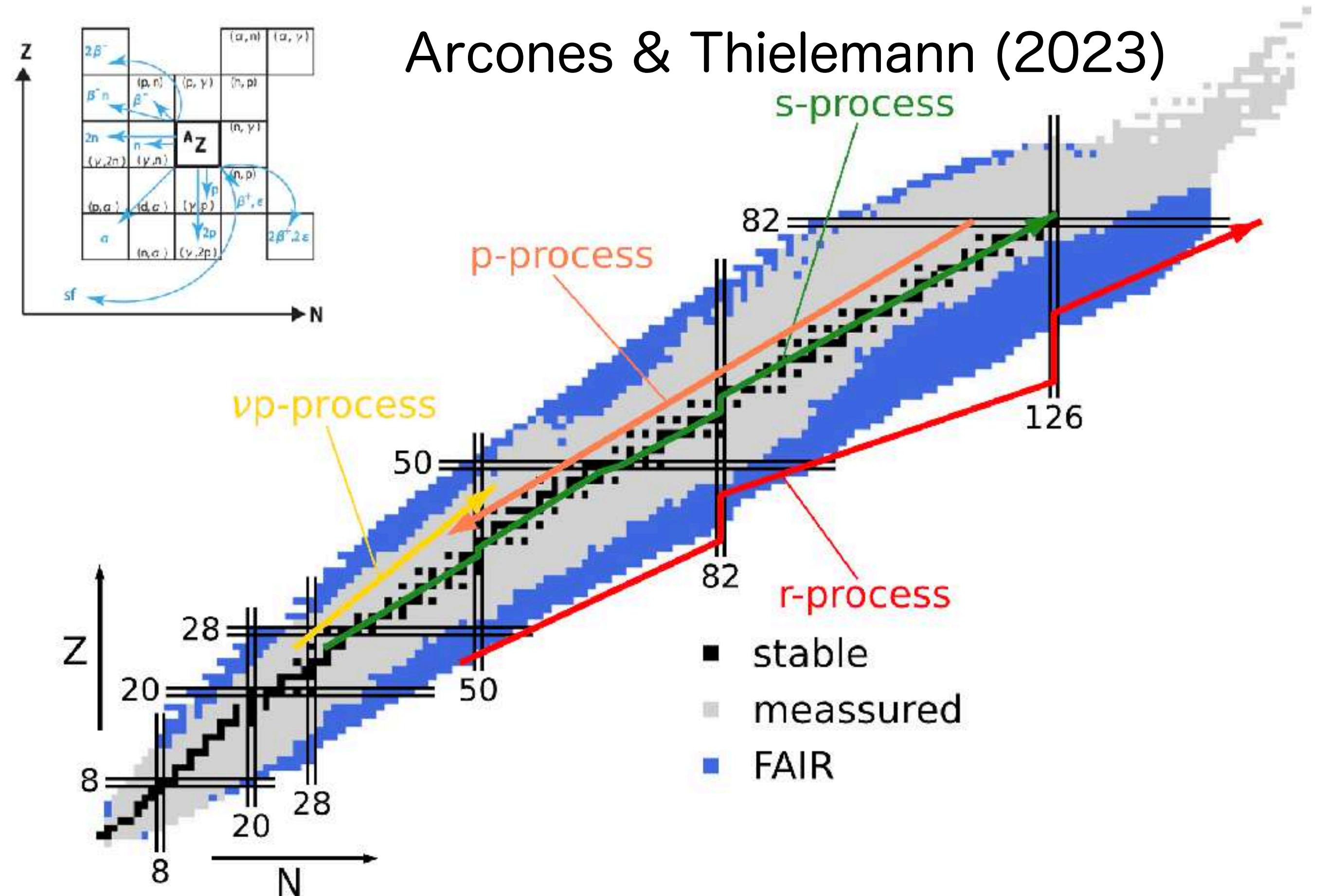
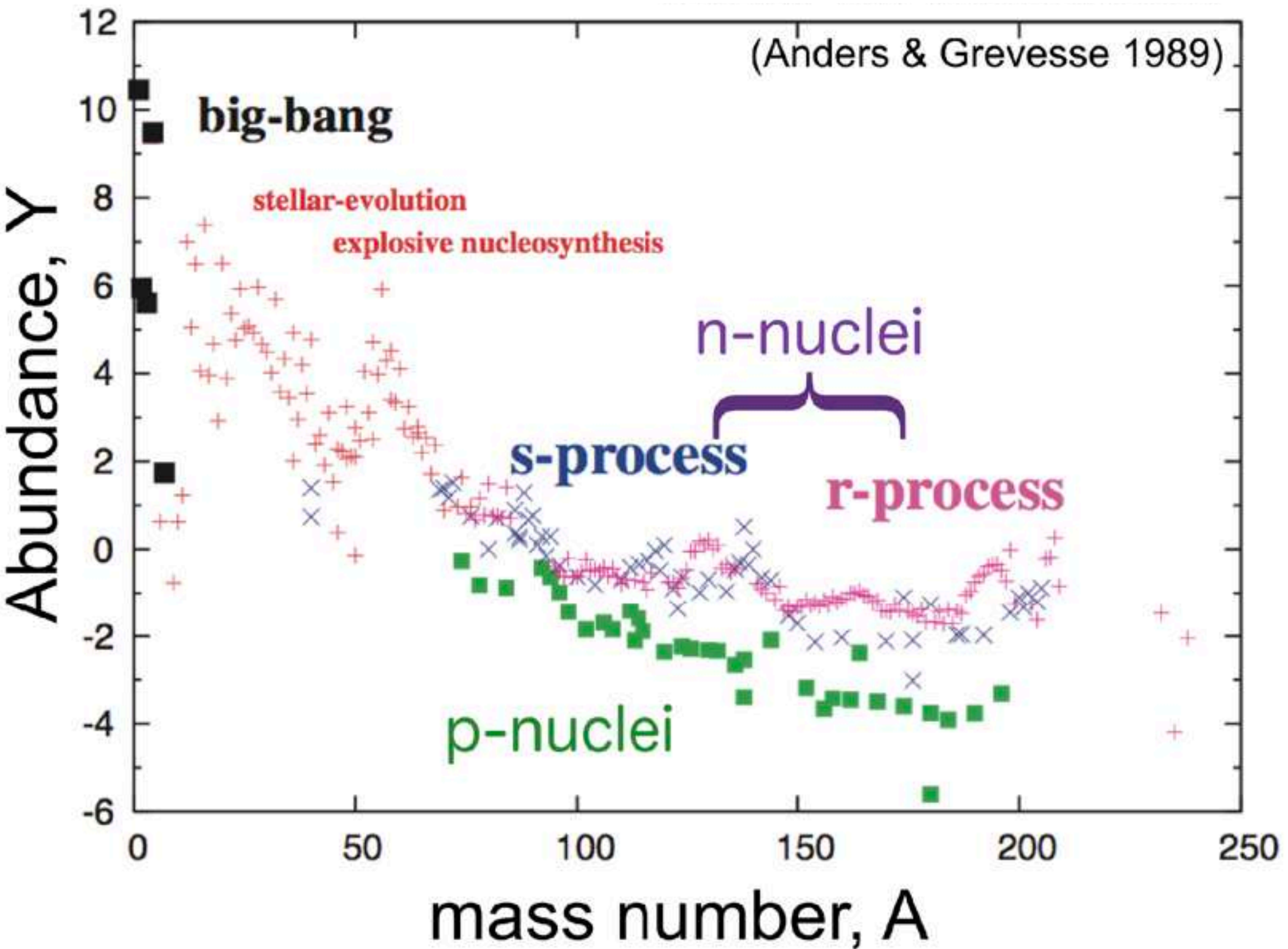
rプロセス

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



宇宙（銀河）の進化と元素合成（rプロセス）

Afterglow Light
Pattern
375,000 yrs.

Dark Ages

Development of
Galaxies, Planets, etc.

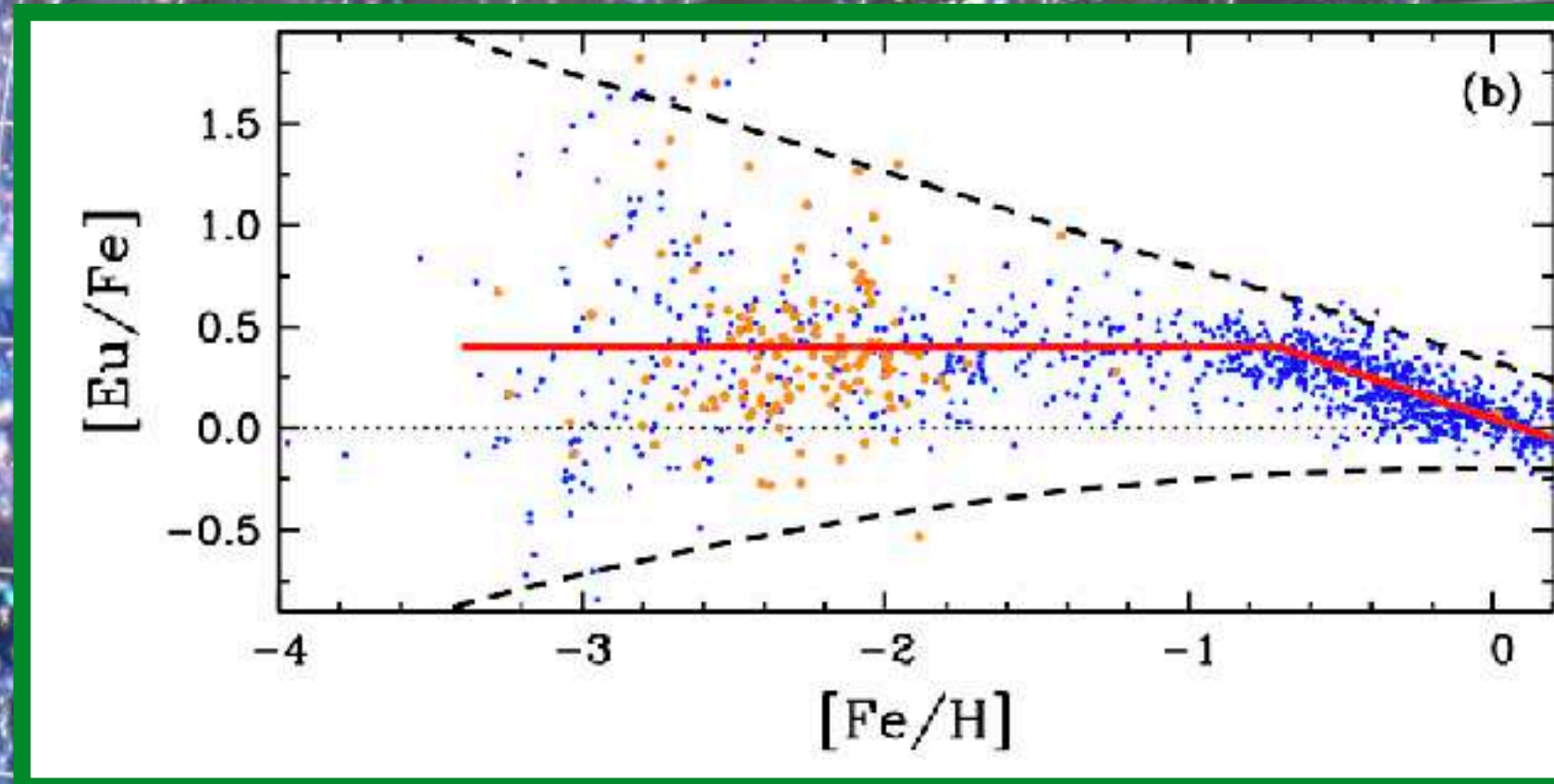
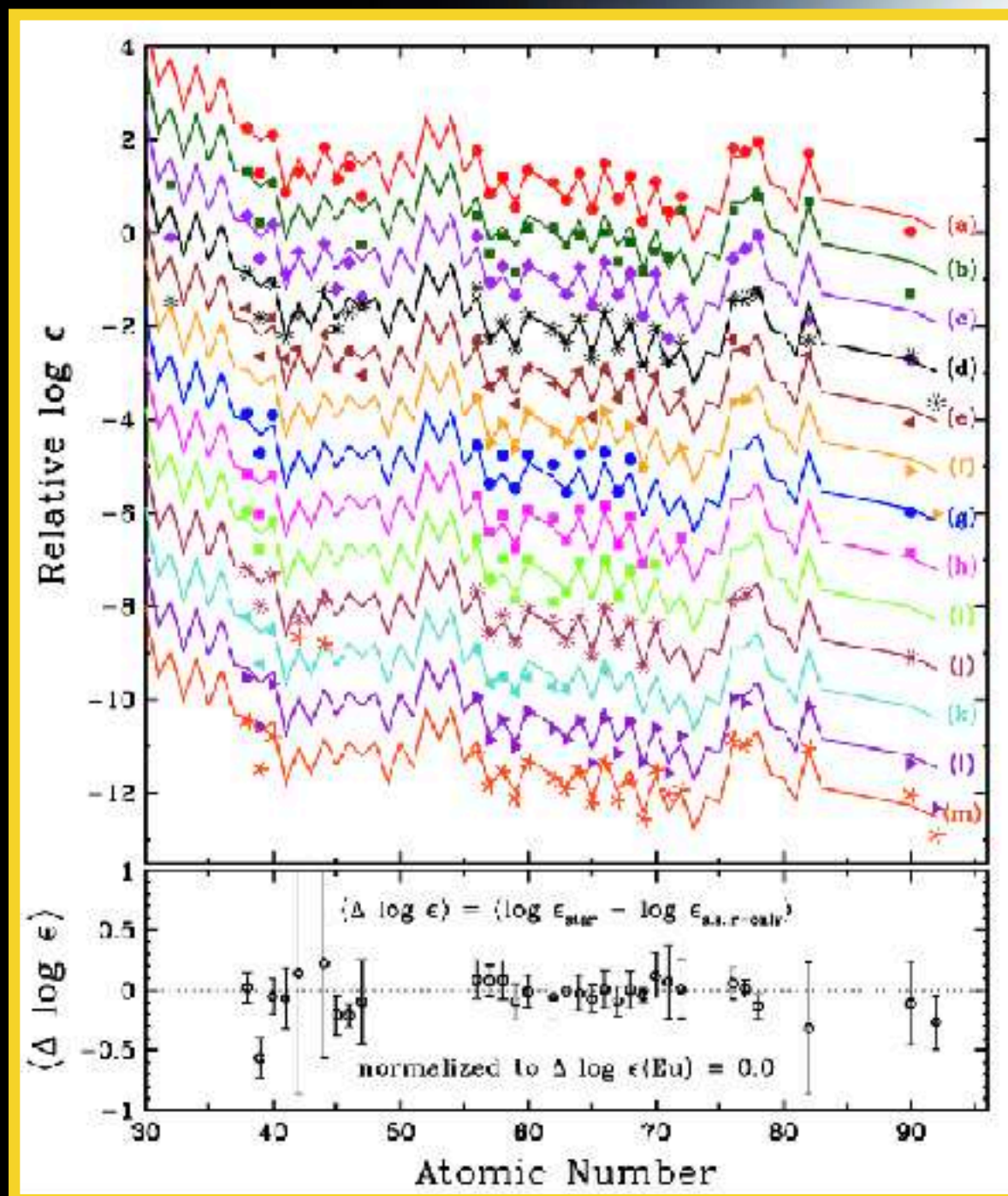
Dark Energy
Accelerated Expansion

Inflation

元素量の変化（進化）100億年の歴史

WMAP

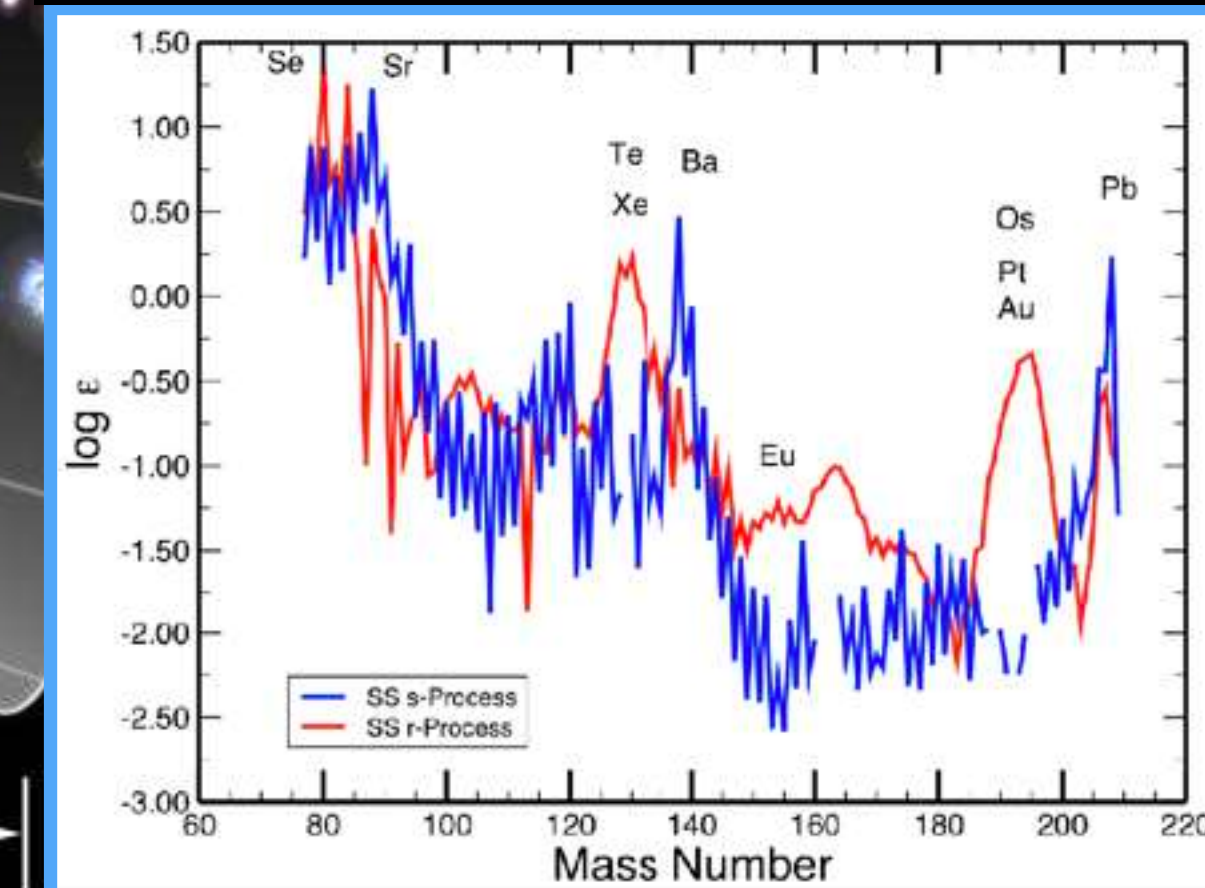
太陽系組成（現在）



宇宙最初の星
誕生から400万年後

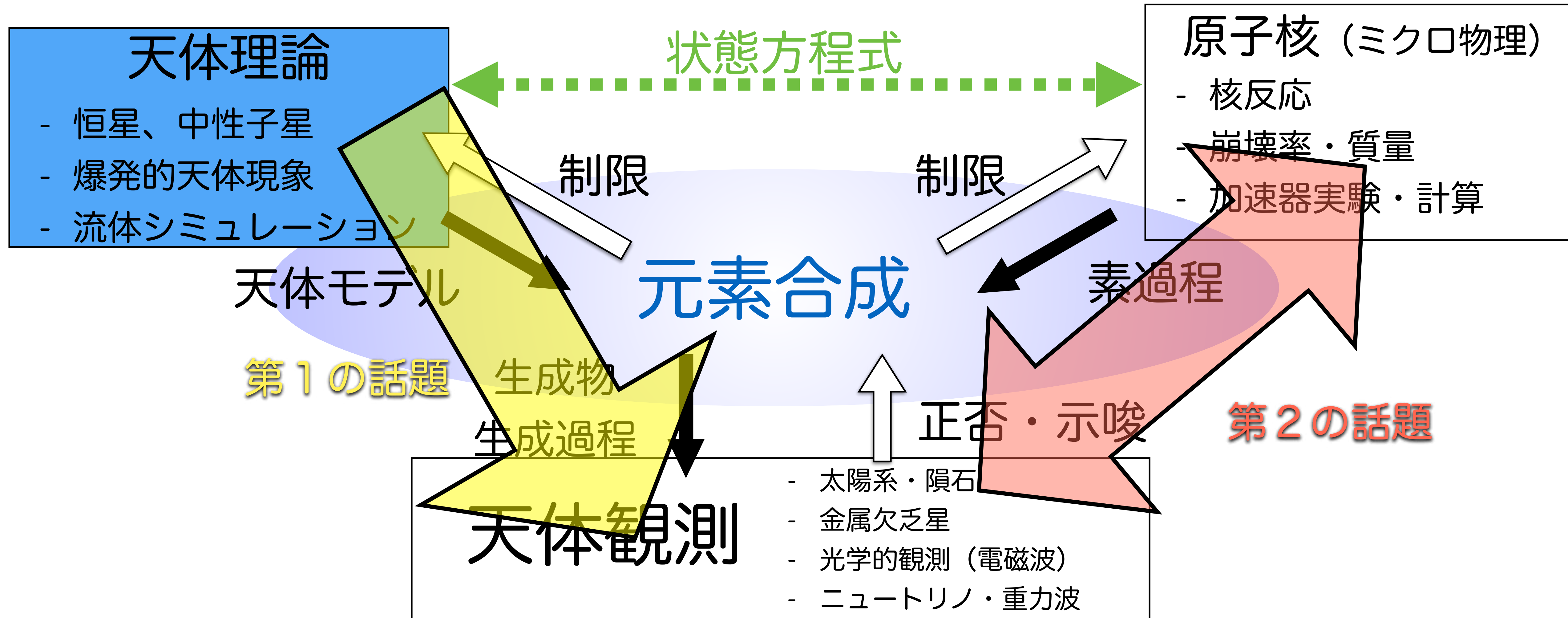
Big Bang Expansion

13.77 billion years



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

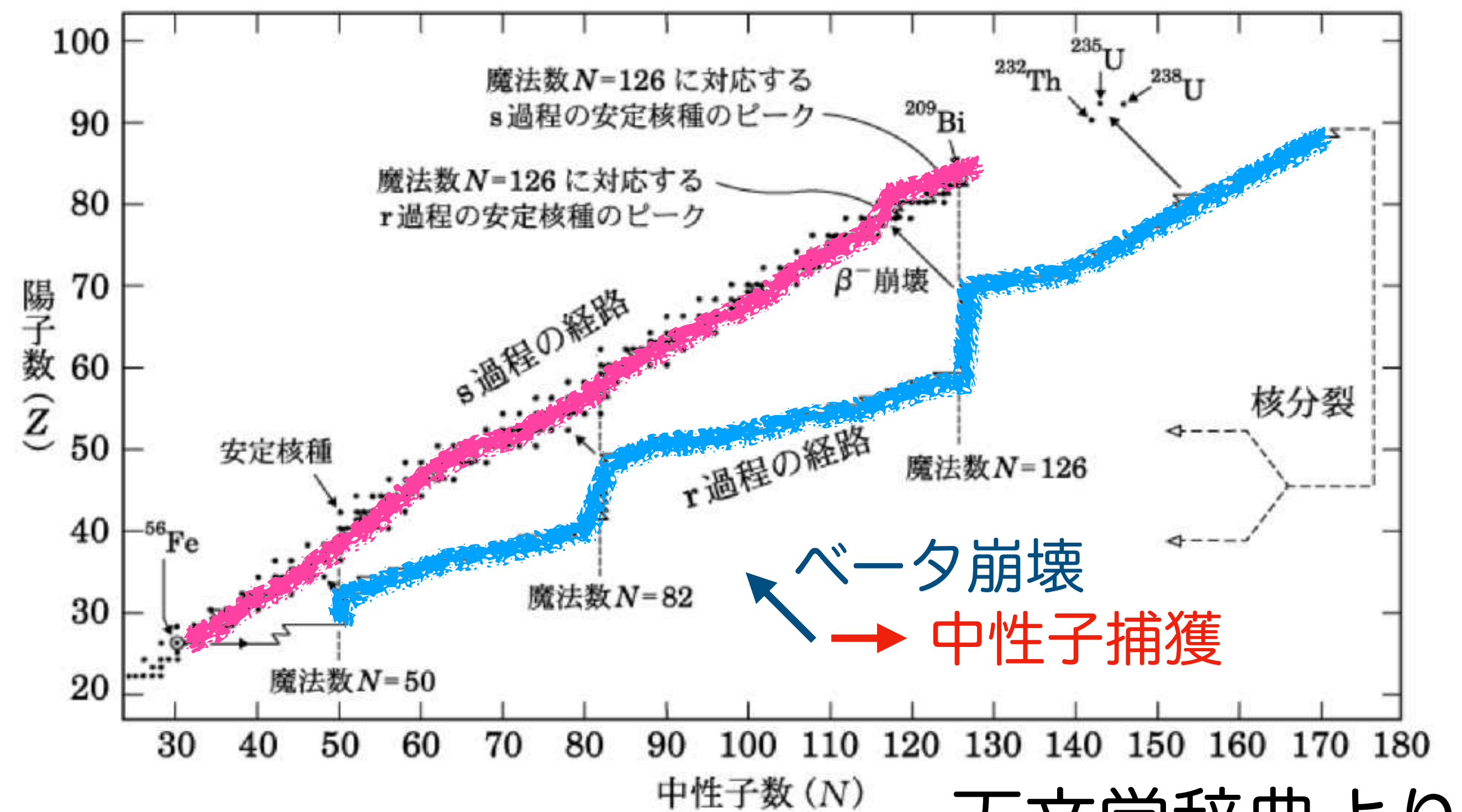
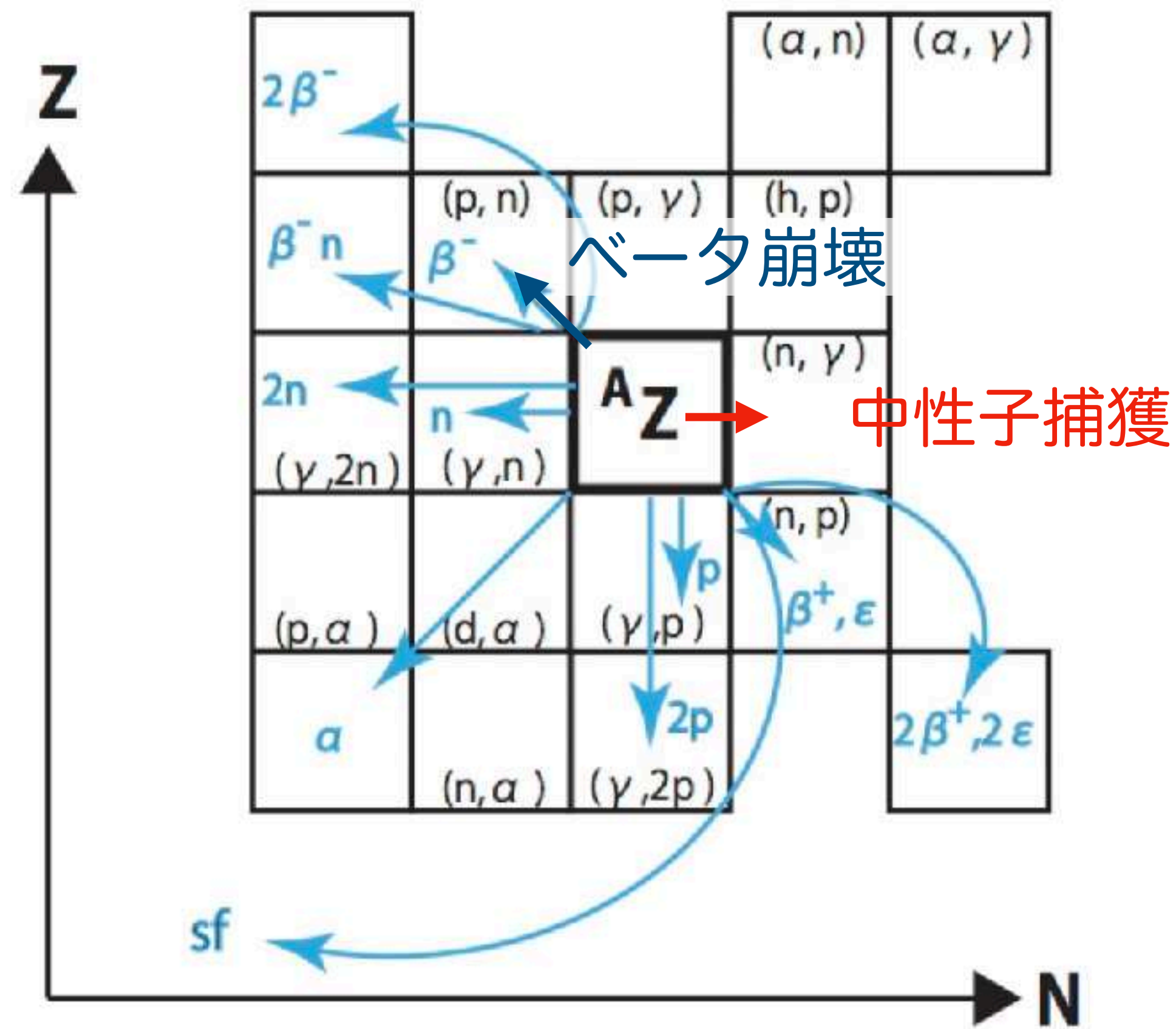
宇宙核物理と原子力工学：応用原子核

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

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

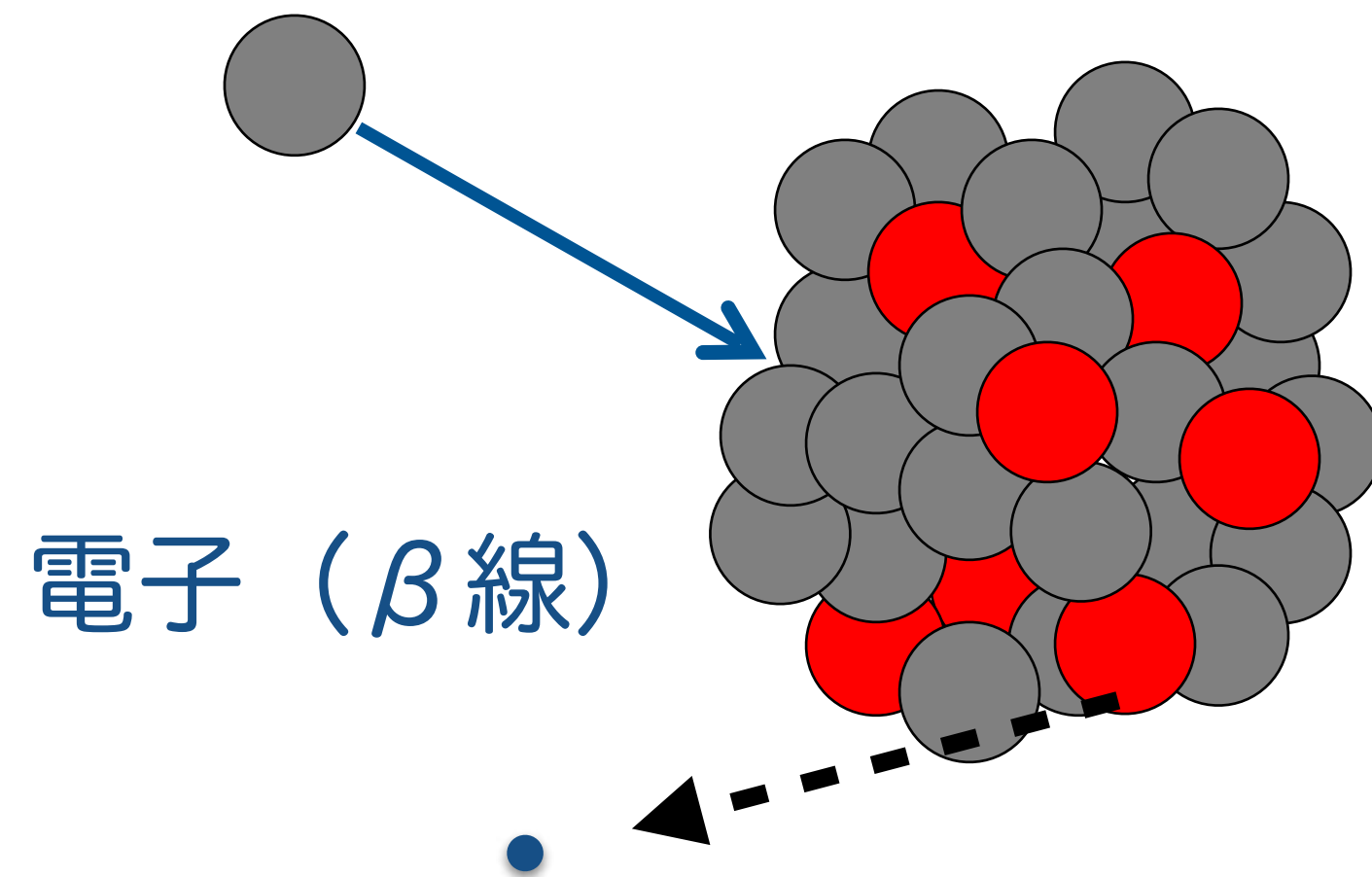


天文学辞典より

重い元素を作るレシピ：中性子捕獲過程

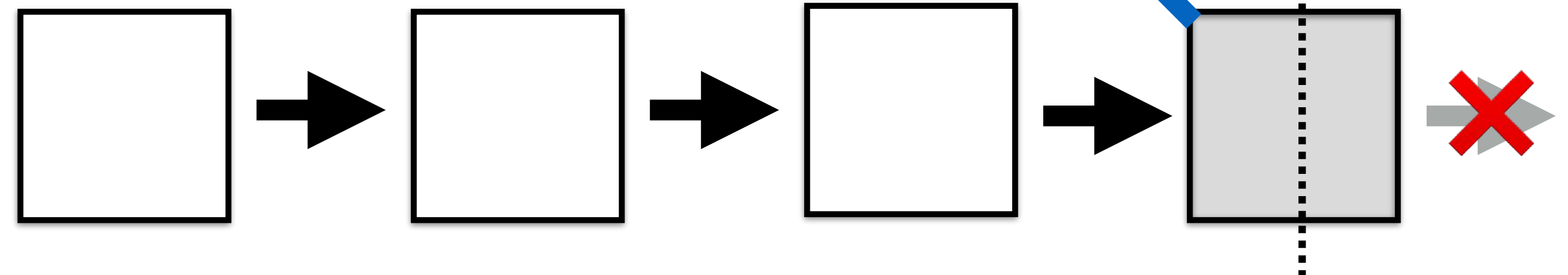
速い中性子捕獲＋ベータ崩壊による元素合成

- ① 電荷のない中性子を捕獲
→ 重い原子核を作る

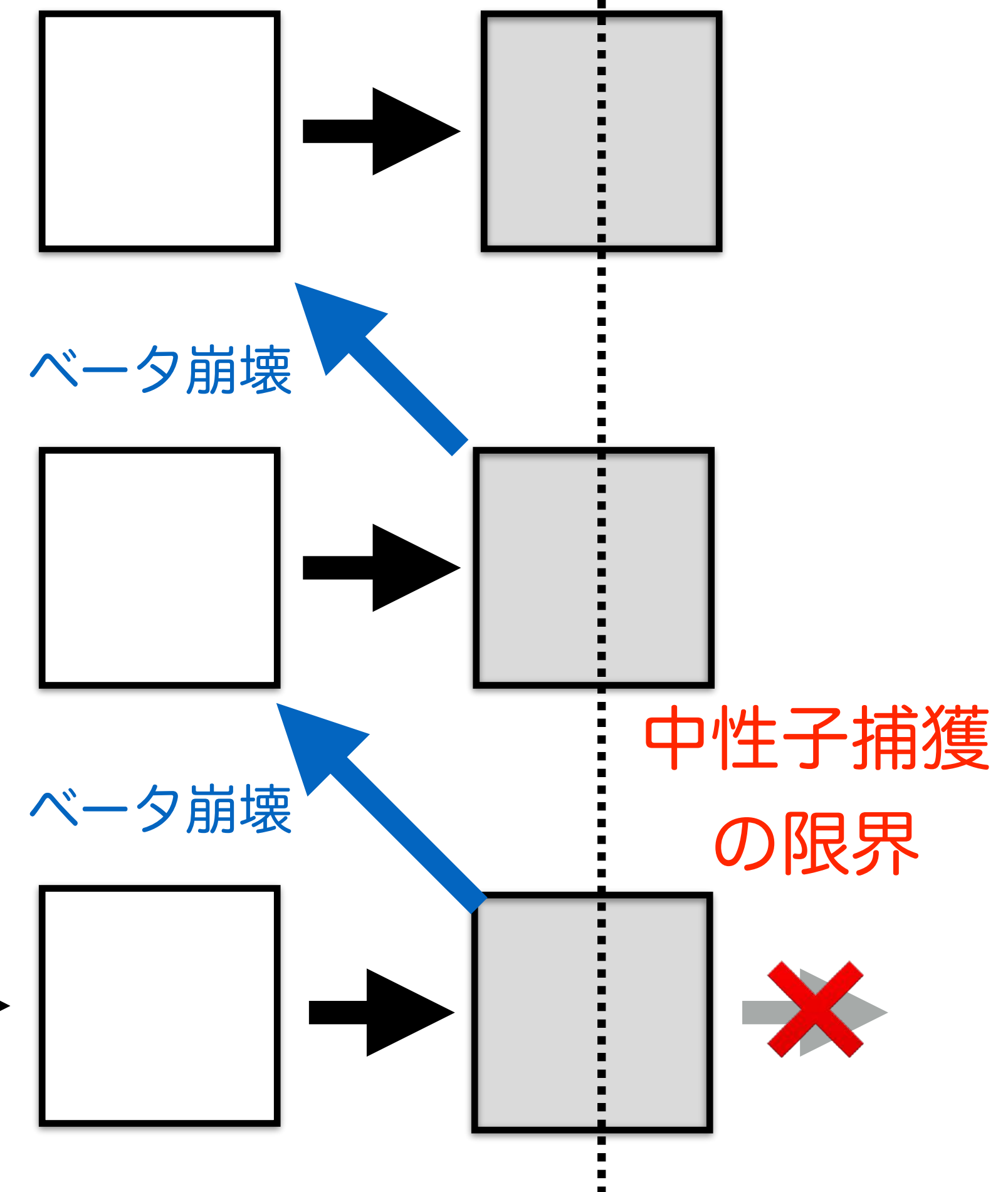


- ② 生成された (中性子過剰)
不安定核がβ崩壊する
→ 原子番号が増える

中性子捕獲＋β崩壊
の連鎖により重い元
素を作る

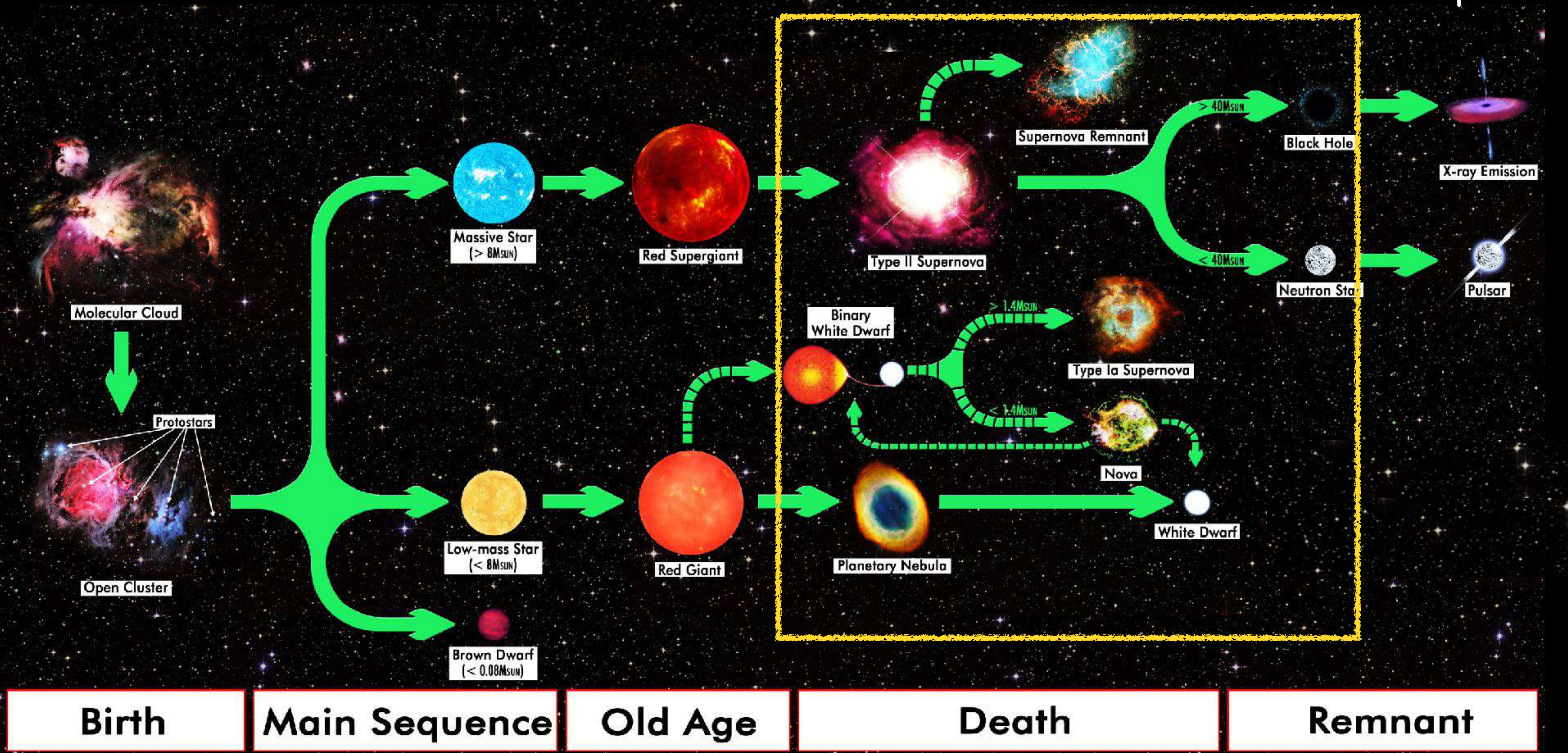


魔法数 (安定)



星のライフサイクル

illustration: wikipedia

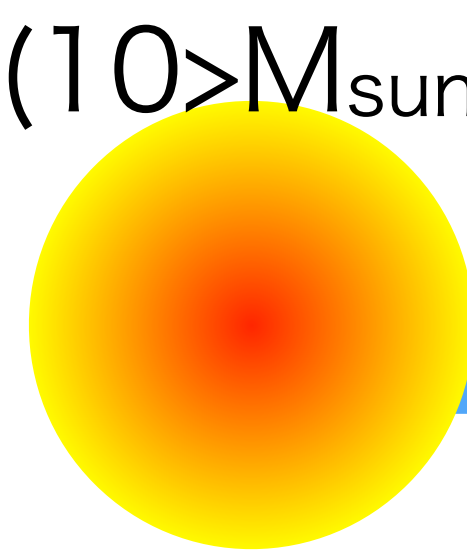


rプロセスが起こる天体現象？

重力崩壊型超新星

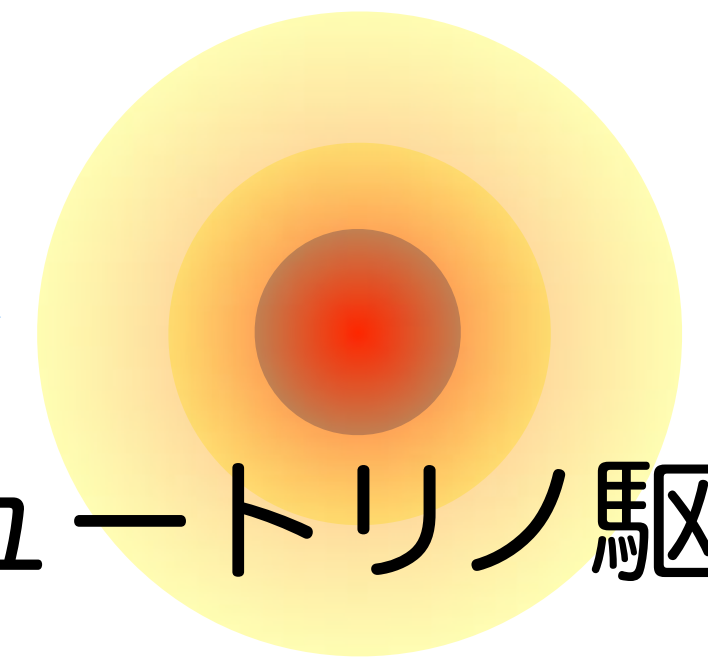
- ・直接観測なし
- ・理論的に困難
- ・十分に中性子過剰にならない

大質量星
($10 > M_{\text{sun}}$)



超新星爆発

原始中性子星

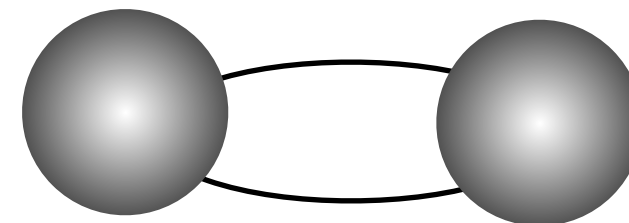


ニュートリノ駆動風

連星中性子星合体

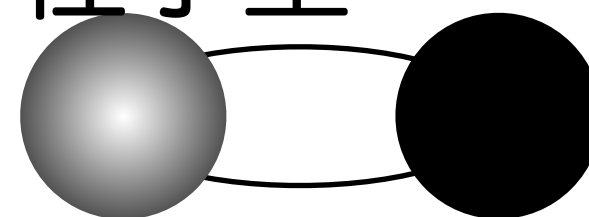
重力波と電磁波での「観測」
(GW170817)

中性子星 中性子星



中性子星連星

中性子星

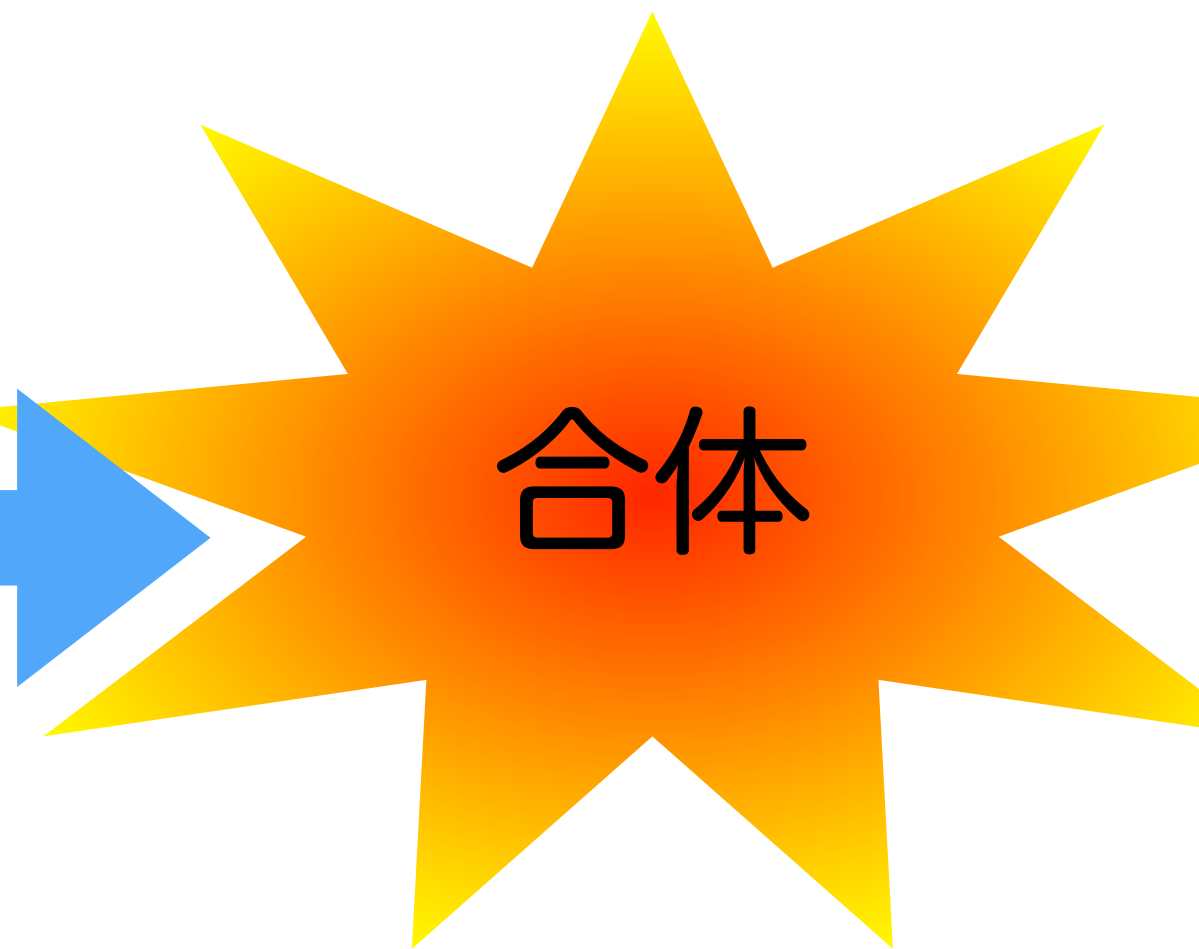


ブラックホール

(長期進化)

(長期進化)

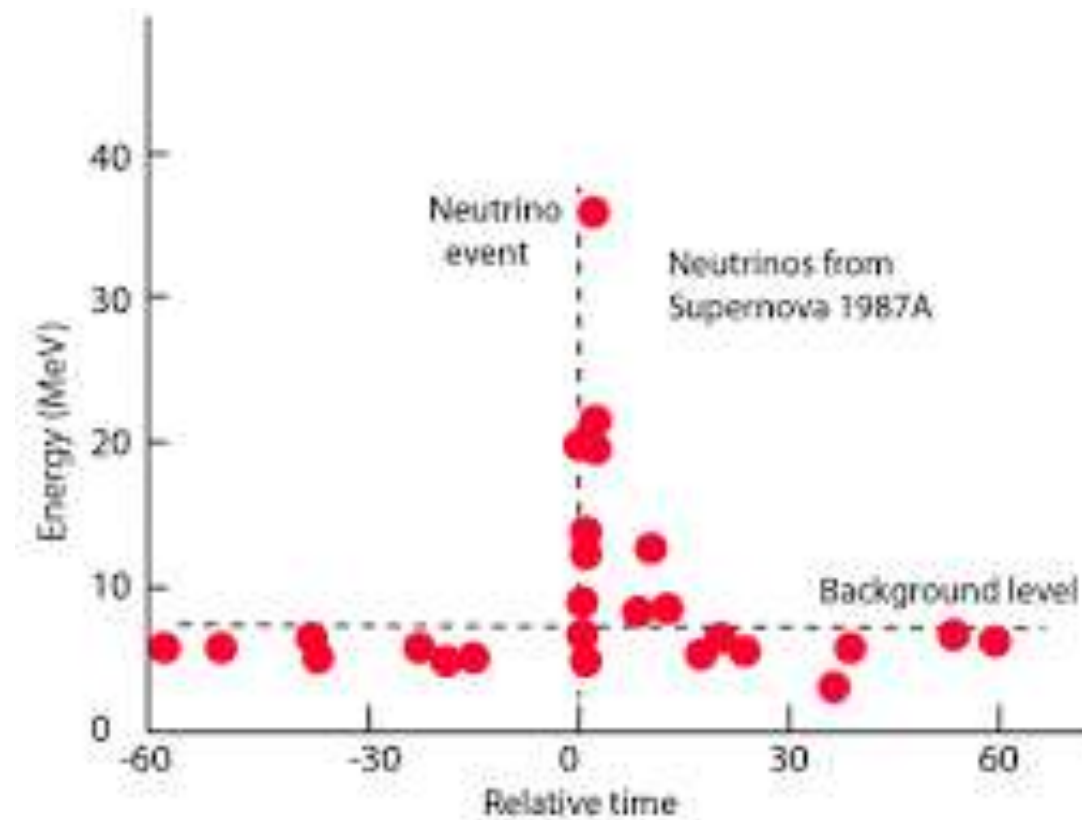
合体



rプロセス天体とマルチメッセンジャー観測

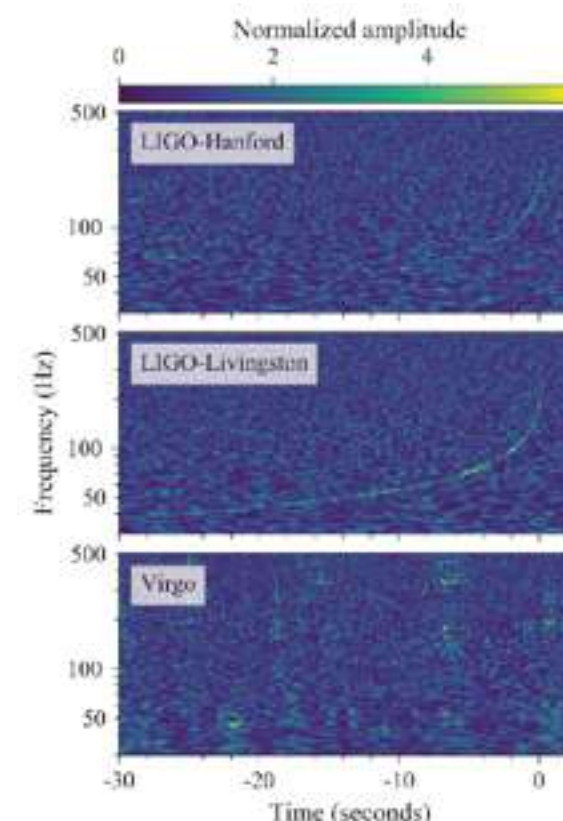
rプロセス元素の天体をめぐる研究は、実は、マルチメッセンジャー天文学（多波長、多粒子観測）と深い関係にある

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プロセスと元素合成

- Ordinary differential eqs. for the change of $y_i(t)$ (the number fraction i th nucleus)
- The time variation $\dot{y}_i \sim \Delta y / \Delta t$ (finite difference) causes thermonuclear reaction (decay) rates
- In the astrophysical environments (fluids), the abundances are also changed by advection.
But, the timescale of nuclear reactions can be small. (Lagrangian description is convenient.)

basic equations

thermonuclear reaction rate & astrophysics (temperature and density)

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

1 body (decay)

β -decay, e^+/e^- capture
(and fission)

2-body reaction

(incl. $2 \rightarrow 2$)

main nuclear reactions

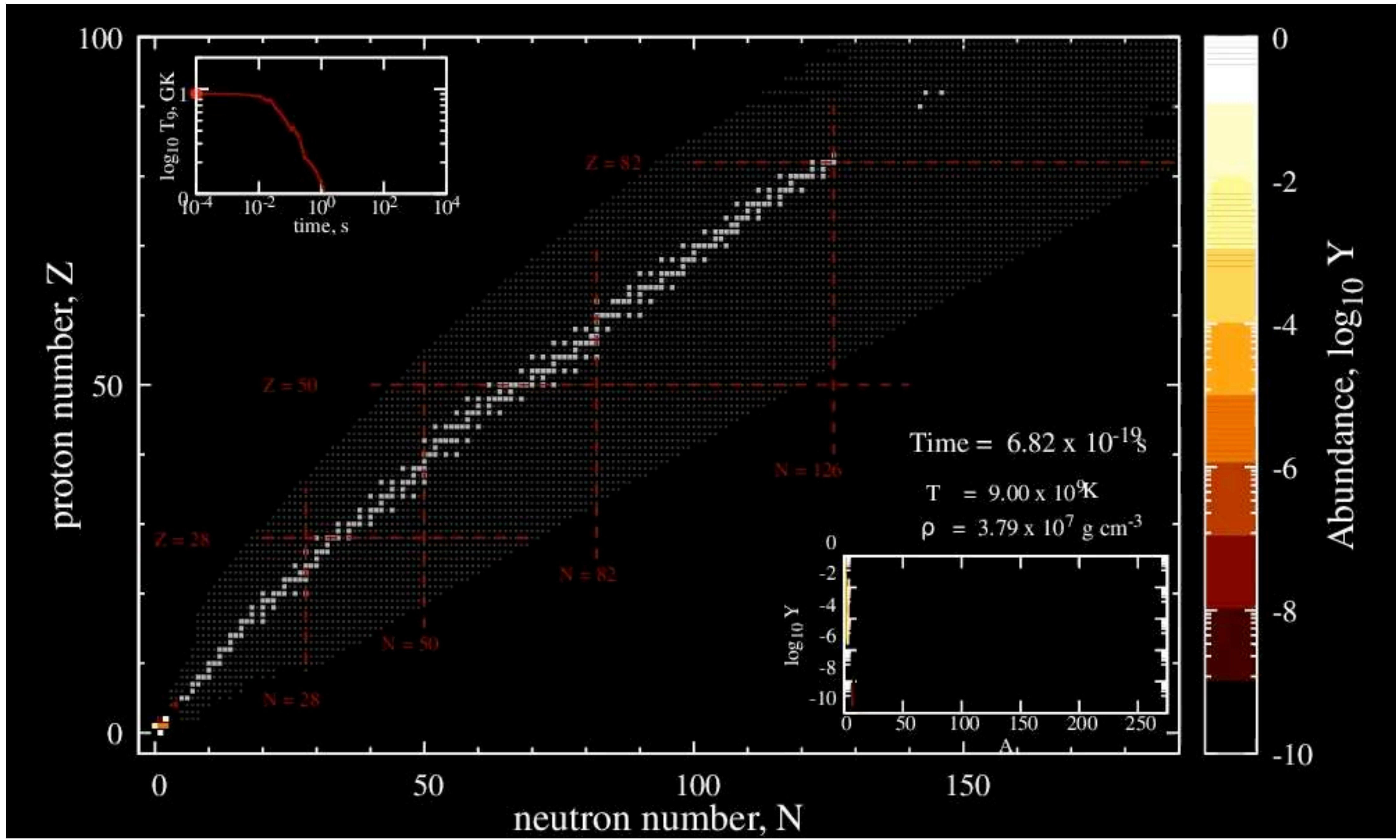
n-induced decay

3-body reaction

($3 \rightarrow 1$, $3 \rightarrow 2$)

triple- α , (α, α, n)

rプロセスと元素合成

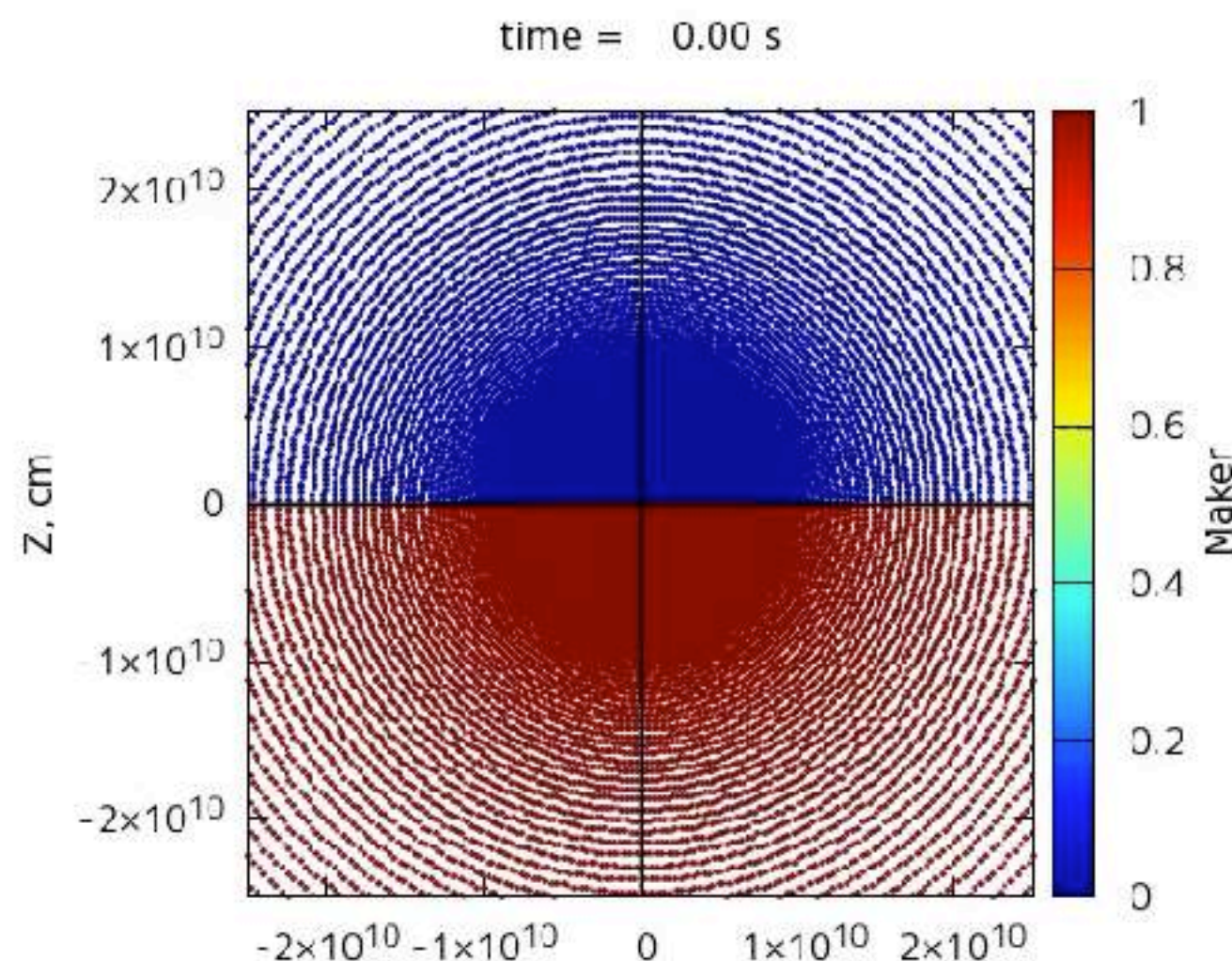
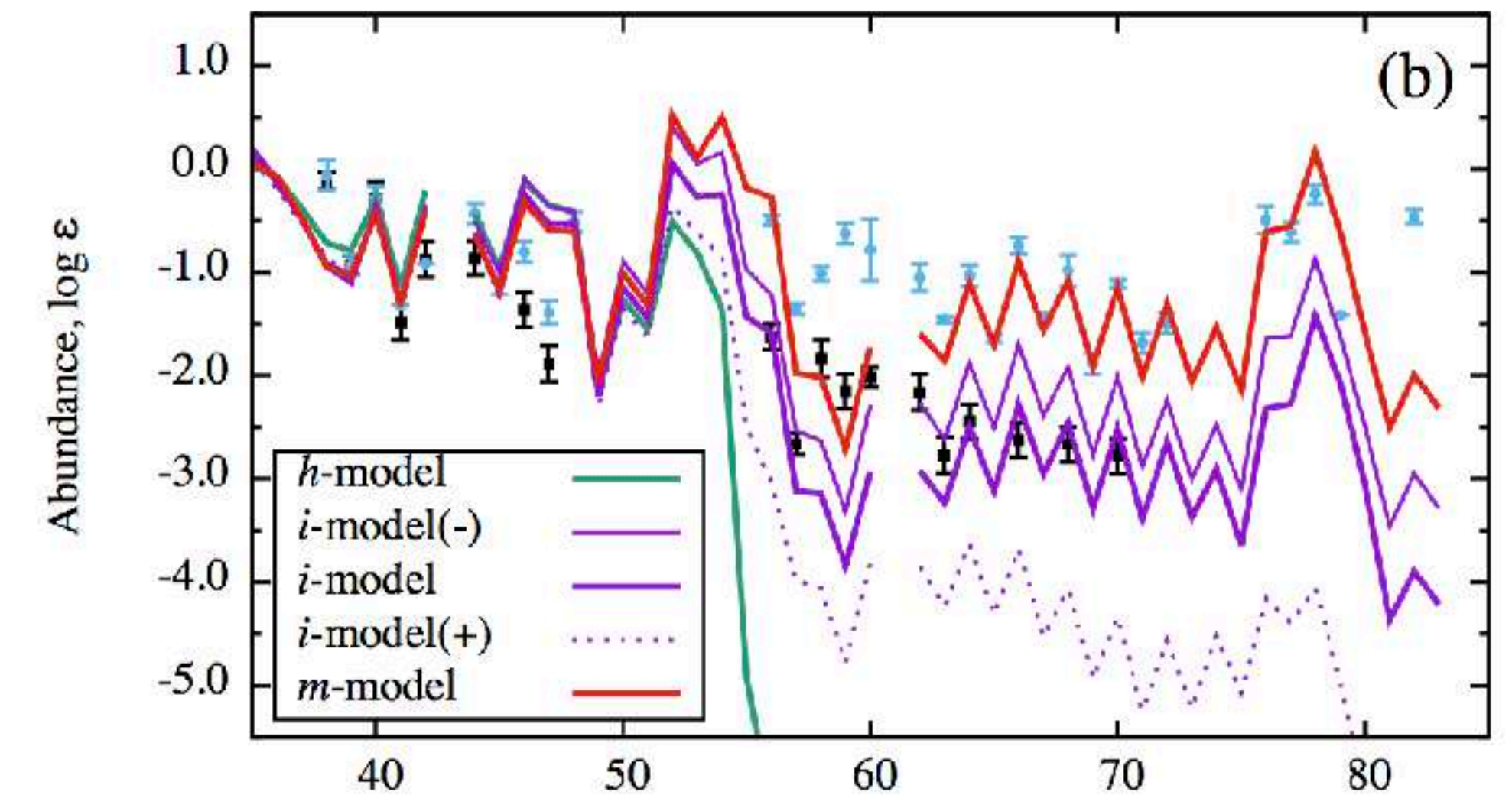
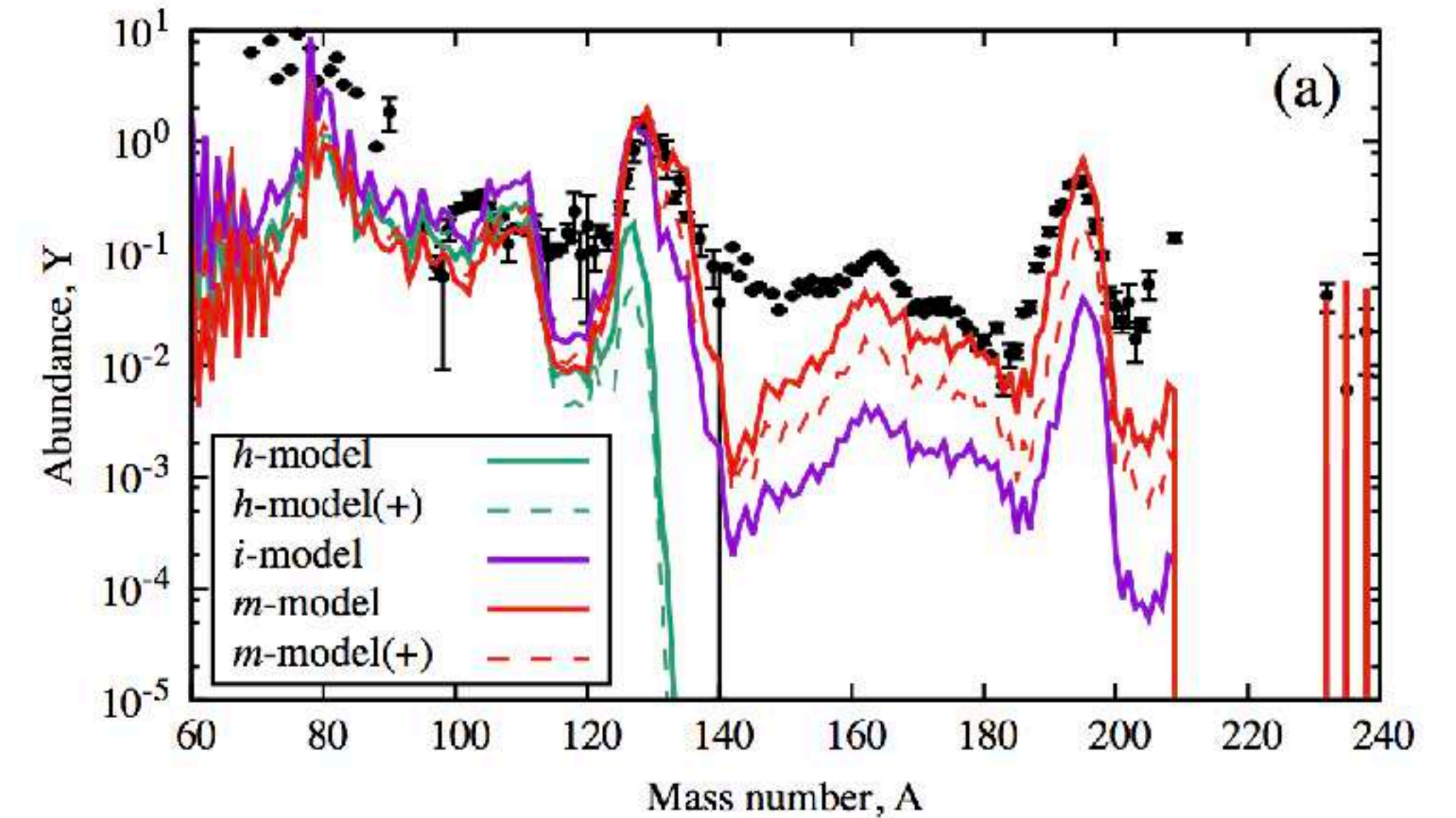
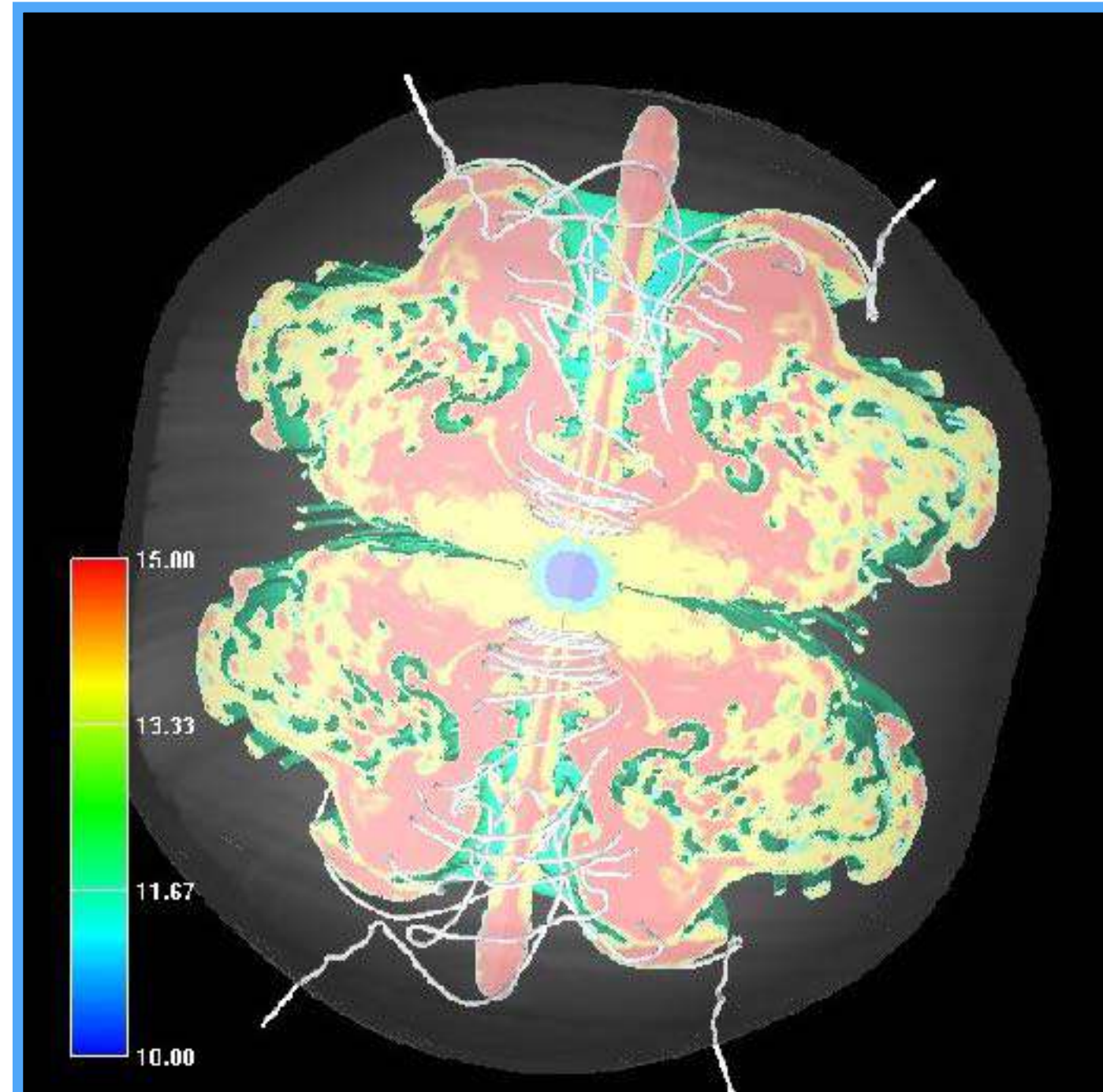


現実的天体モデルでのrプロセス

NN+(2015, 2017)

天体シミュレーション

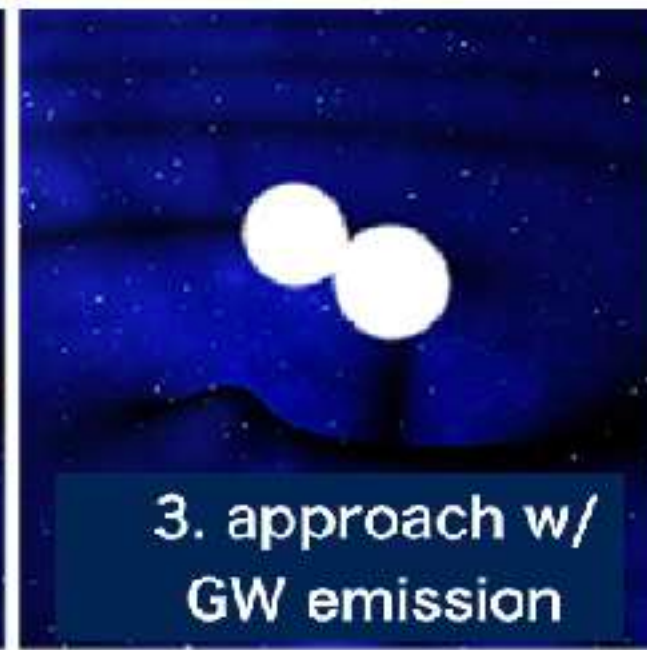
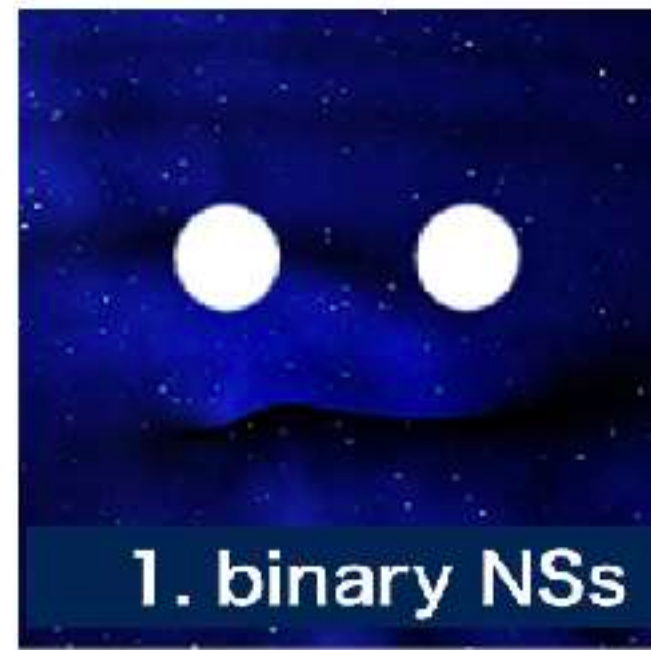
爆発モデルのrプロセスへの影響



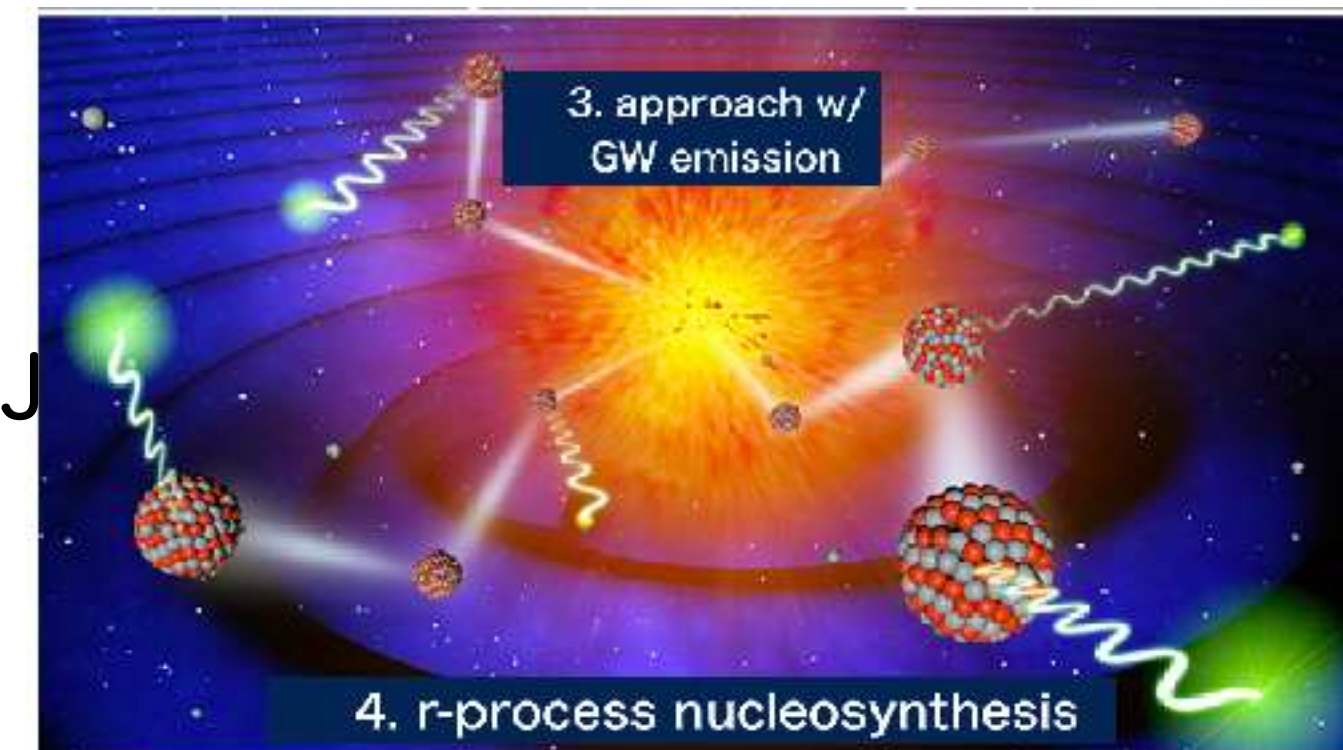
ジェット爆発
に沿った元素合成

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
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)
(rプロセス中の大量中性子過剰核の崩壊)



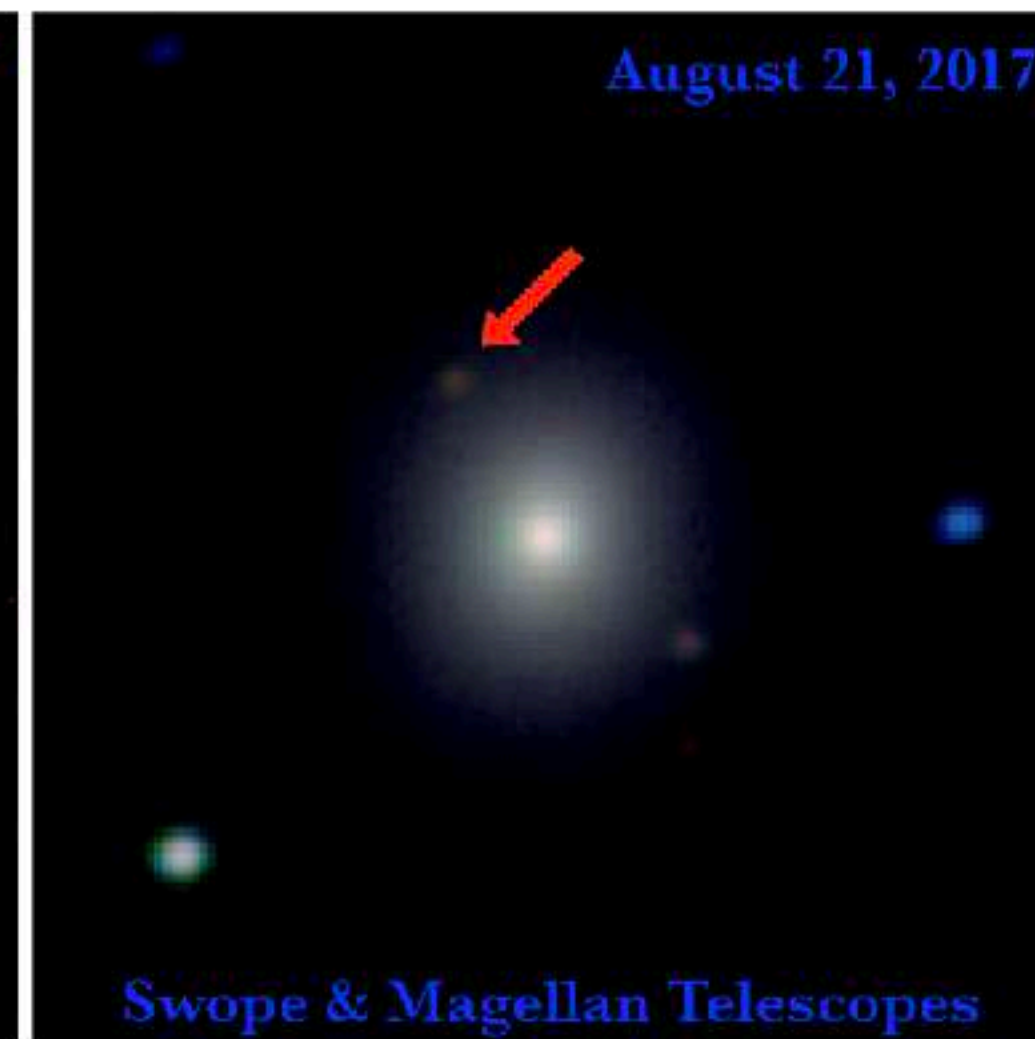
credit NAOJ



天体シナリオの理解が一気に進む

NGC4993 (39.5Mpc)

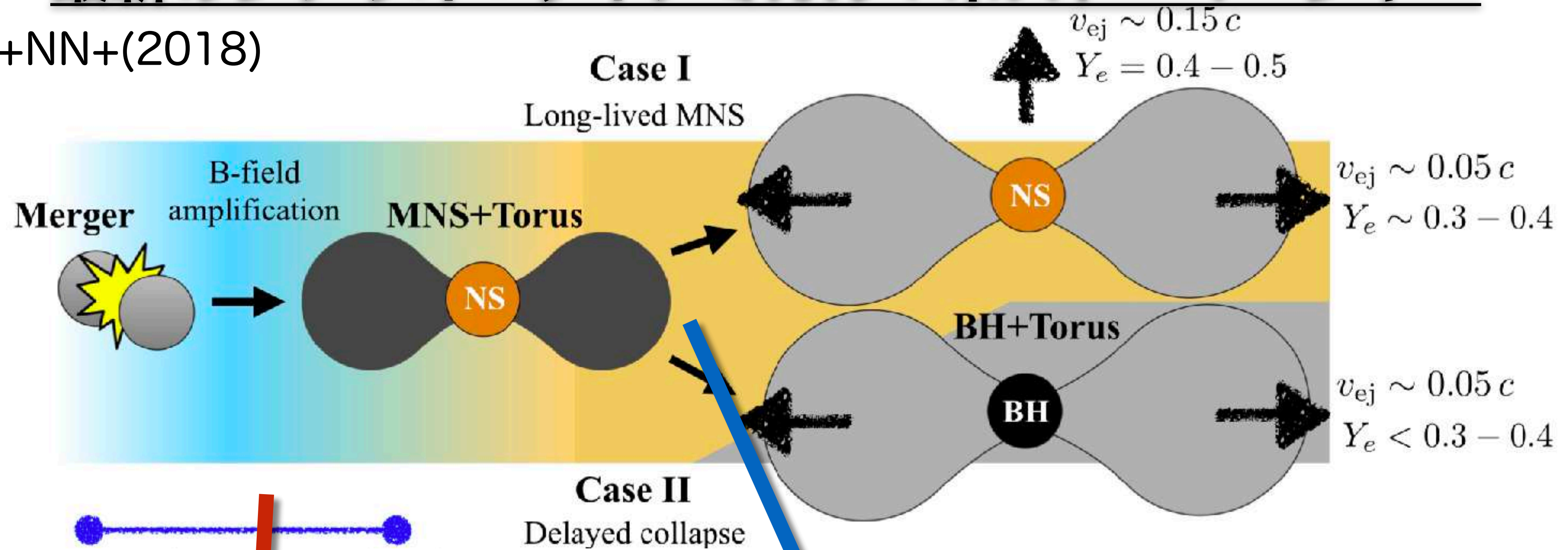
「キロノヴァ」の光
最初の発見 (8月17日)
から徐々に減光 (21日)



By Magellan telescope; Drout+2017, Science

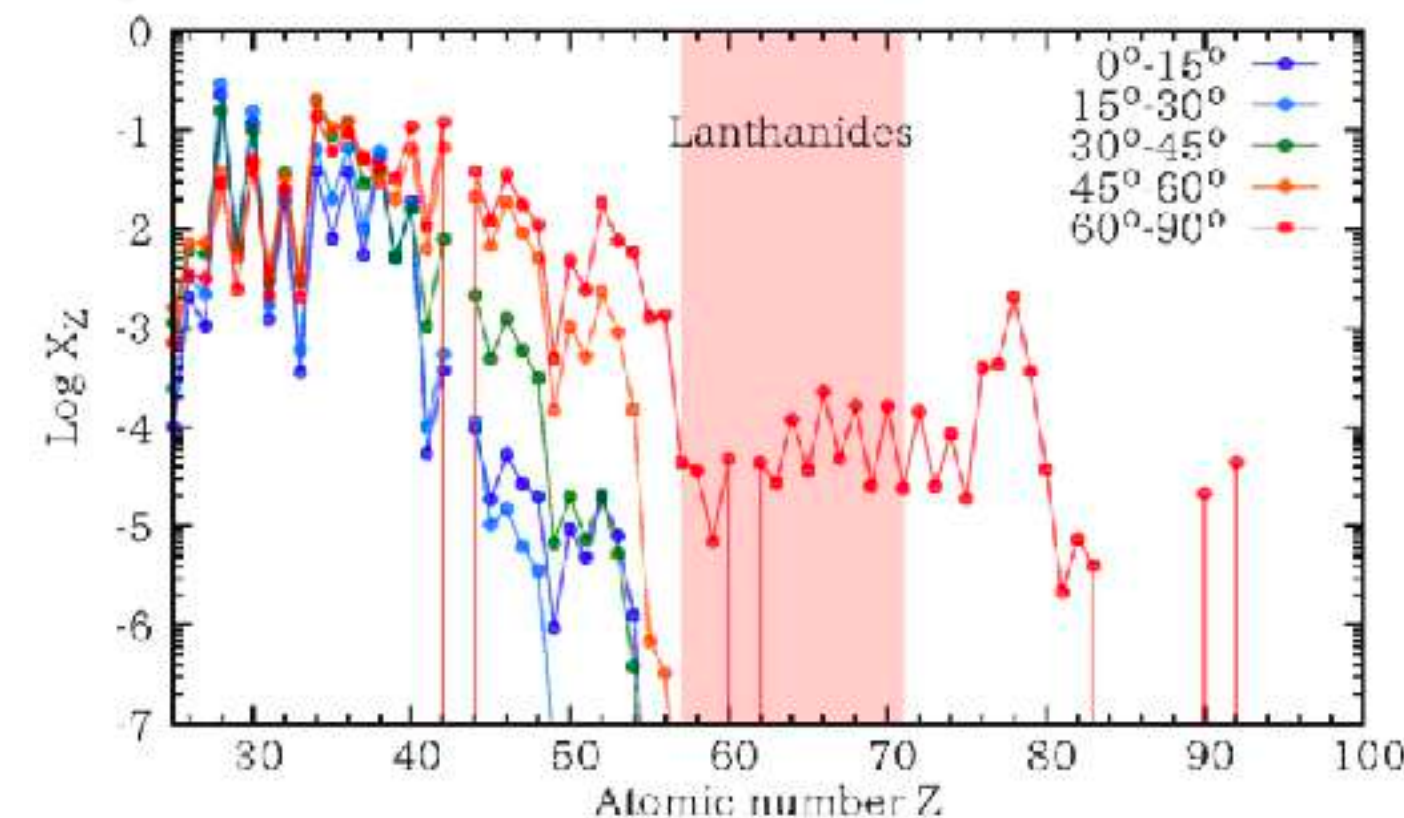
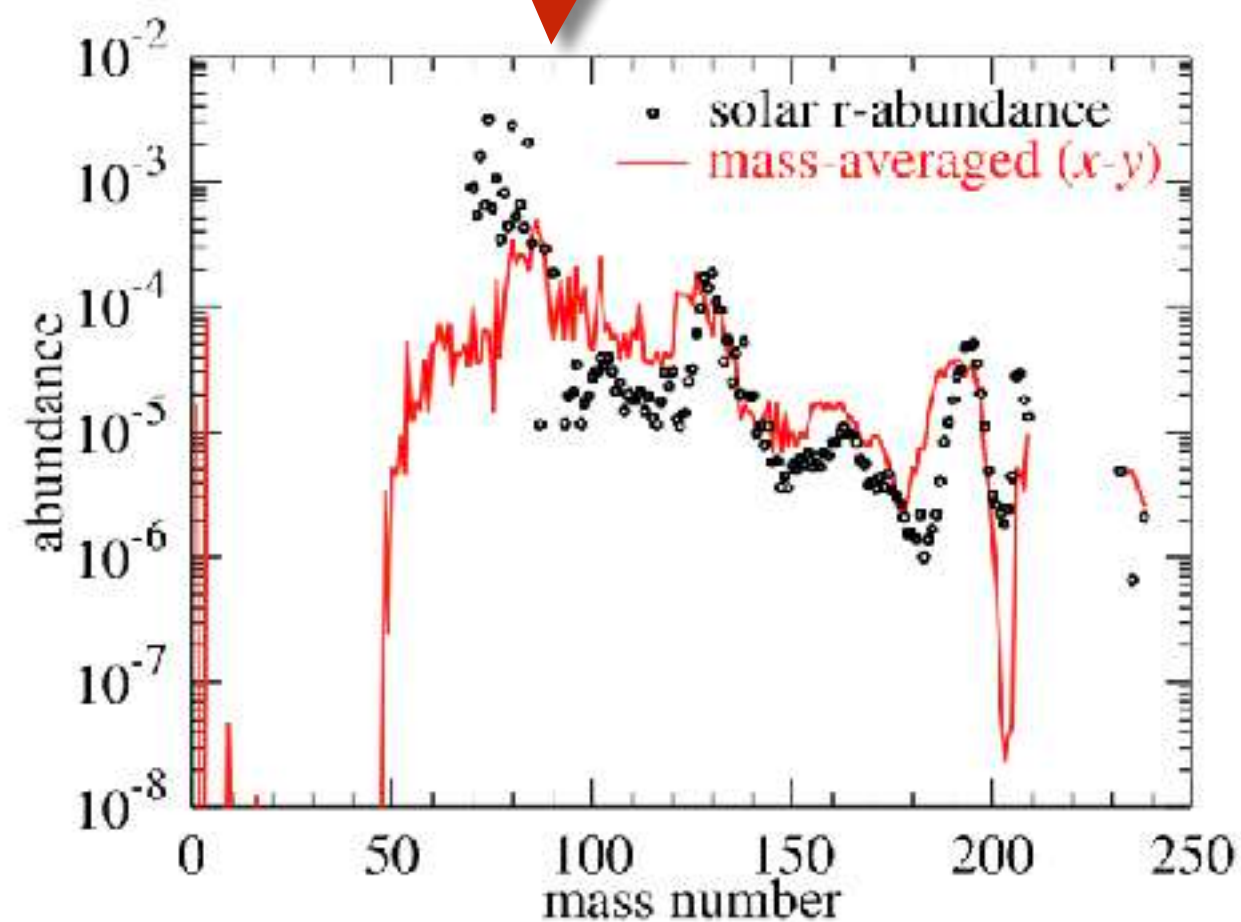
最新のシナリオ：ダイナミカル+ポスト・マージャー

Fujibayashi+NN+(2018)



ポスト・マージャー（合体）

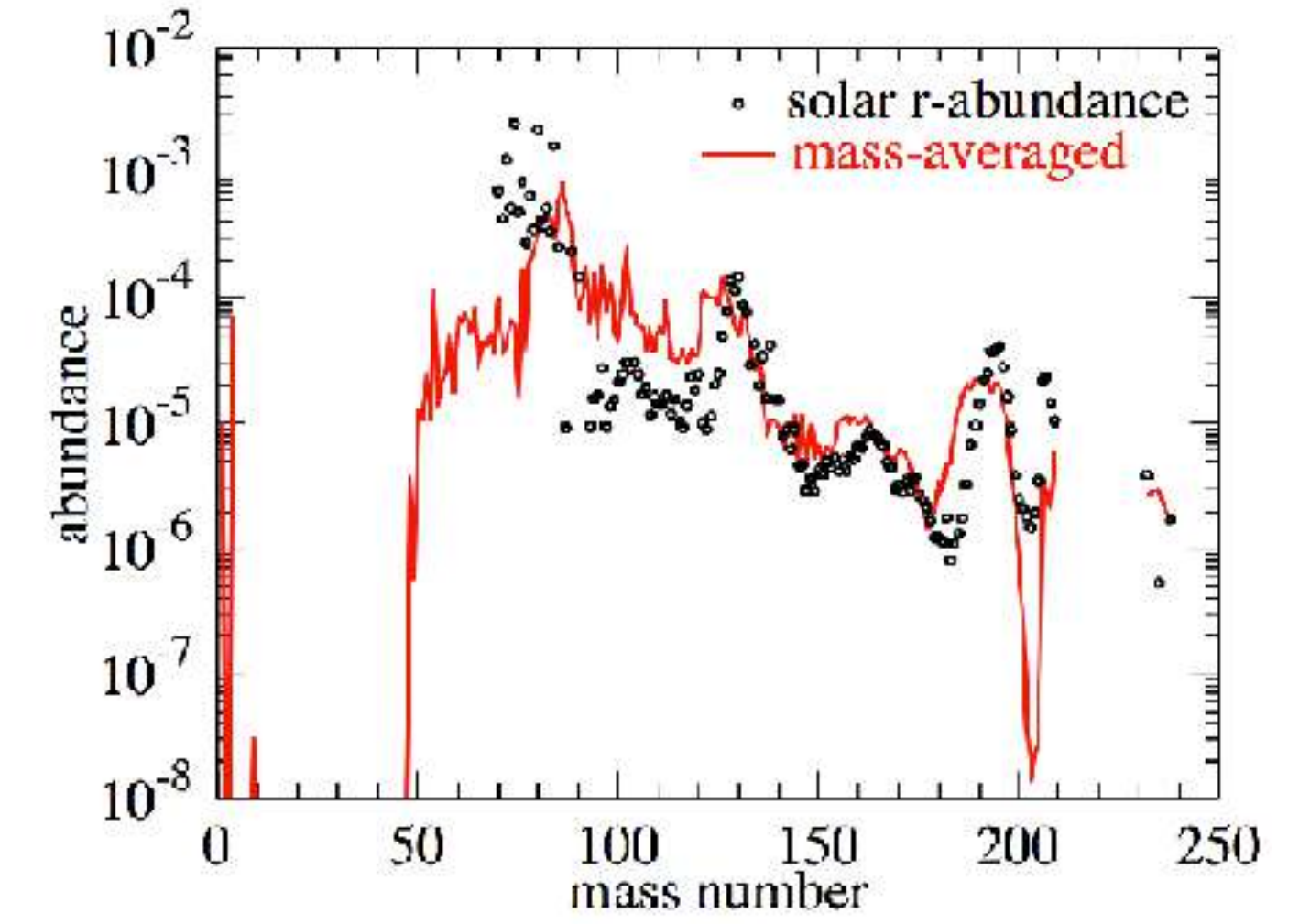
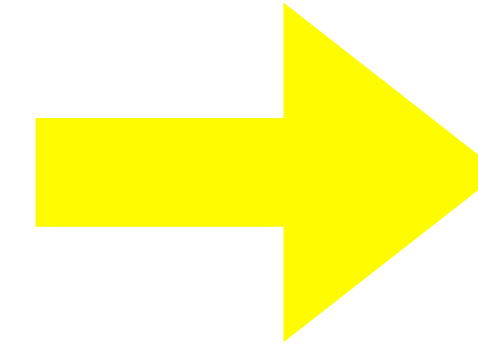
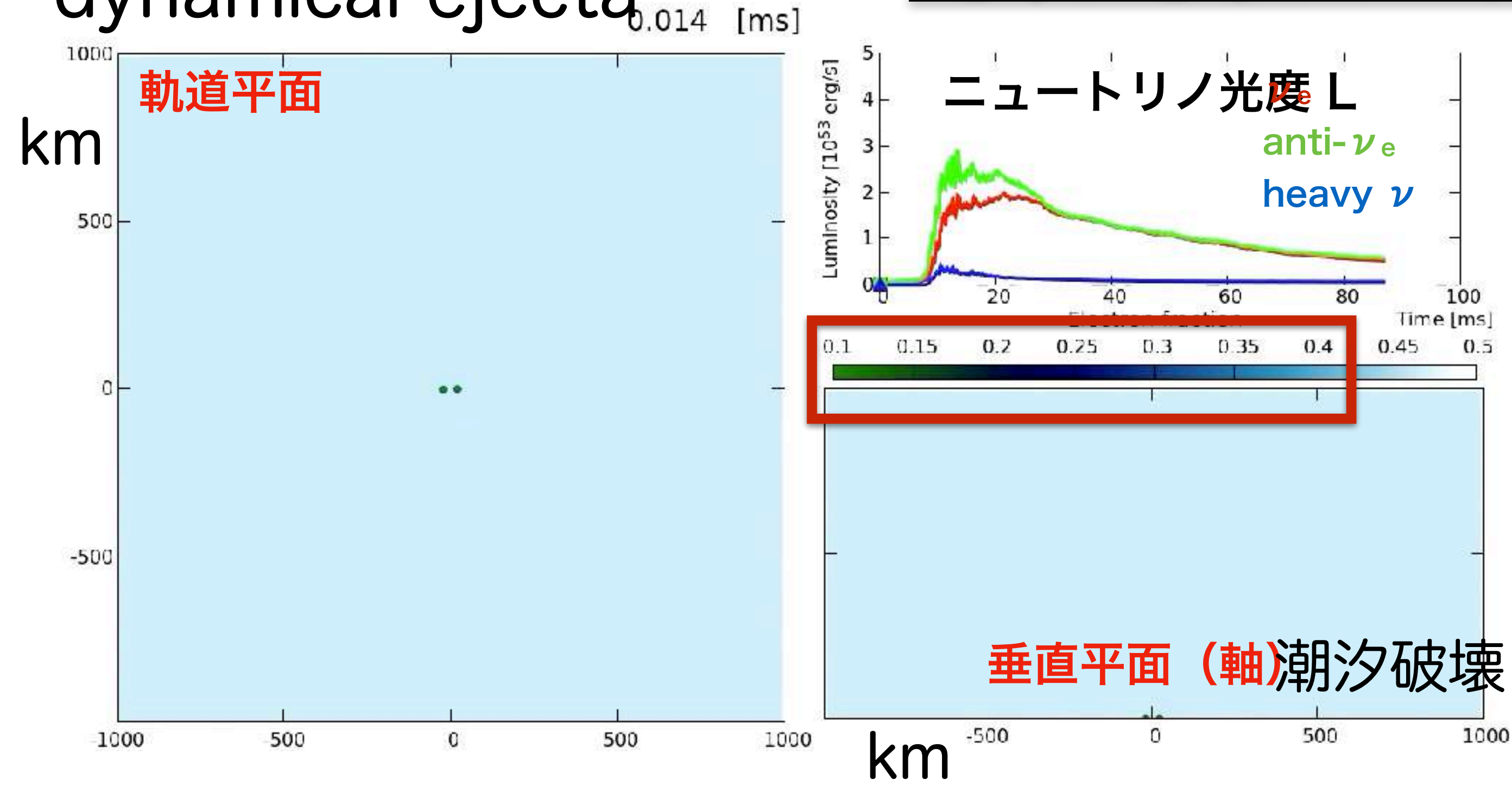
「ダイナミカル」
な質量放出



軽いrプロセス核
(ランタノイド欠乏)
ランタノイド元素：
 $Z = 57 - 71$

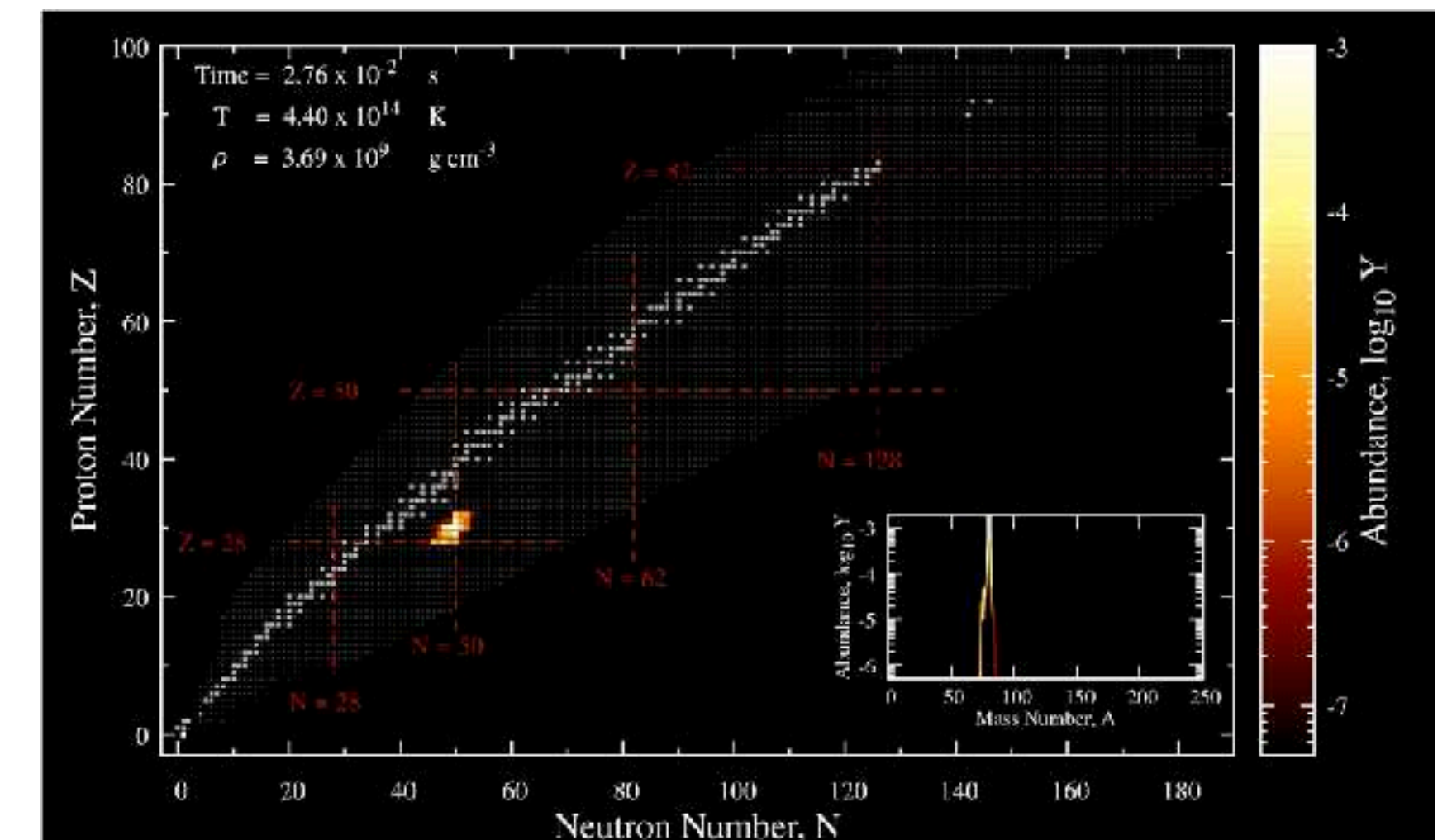
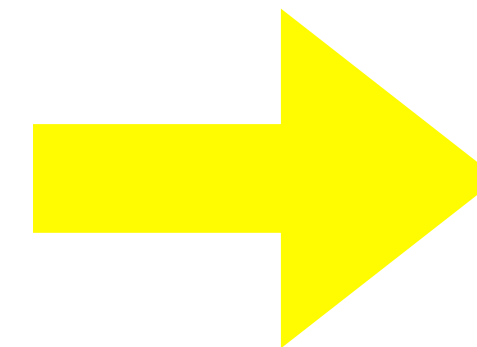
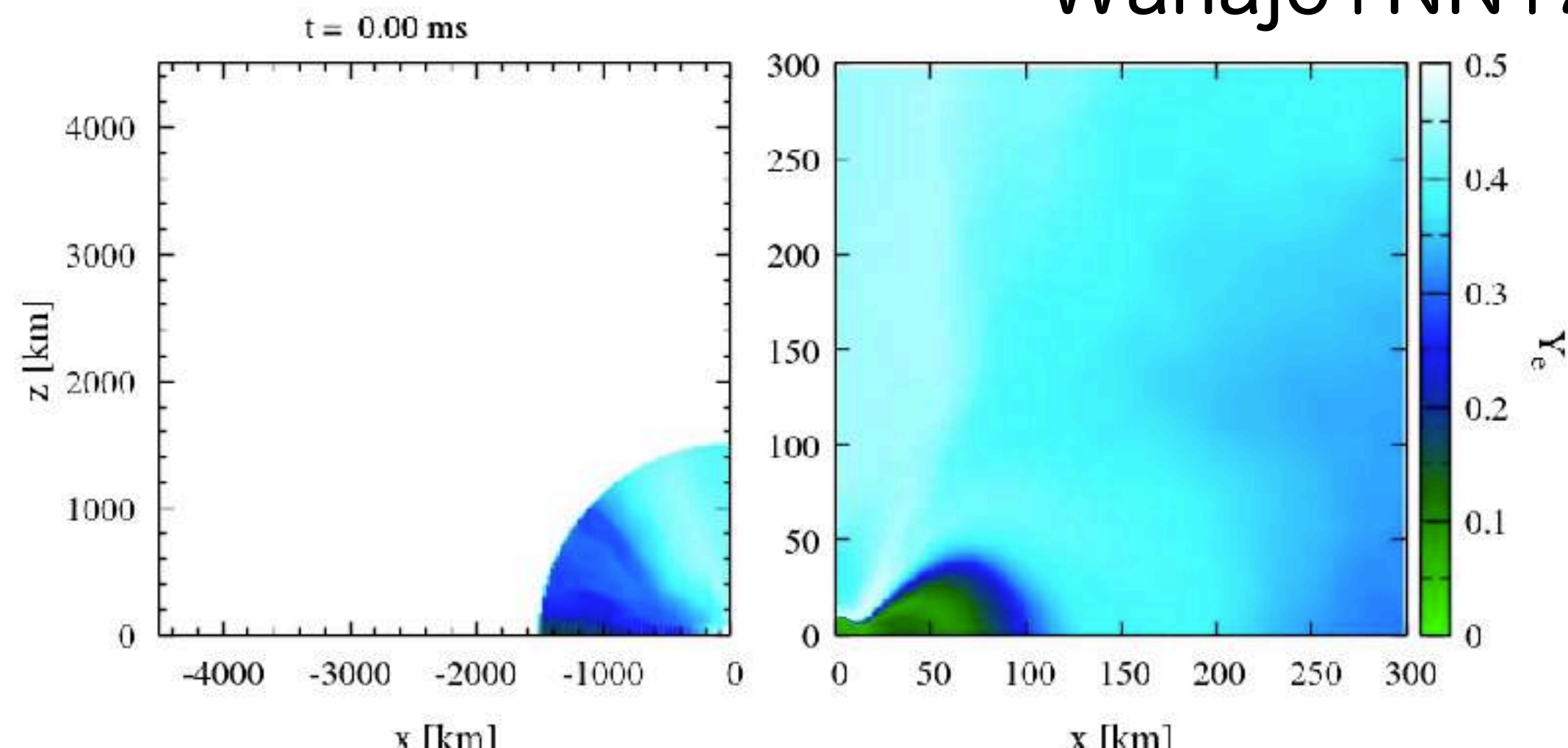
dynamical ejecta

それぞれのrプロセス

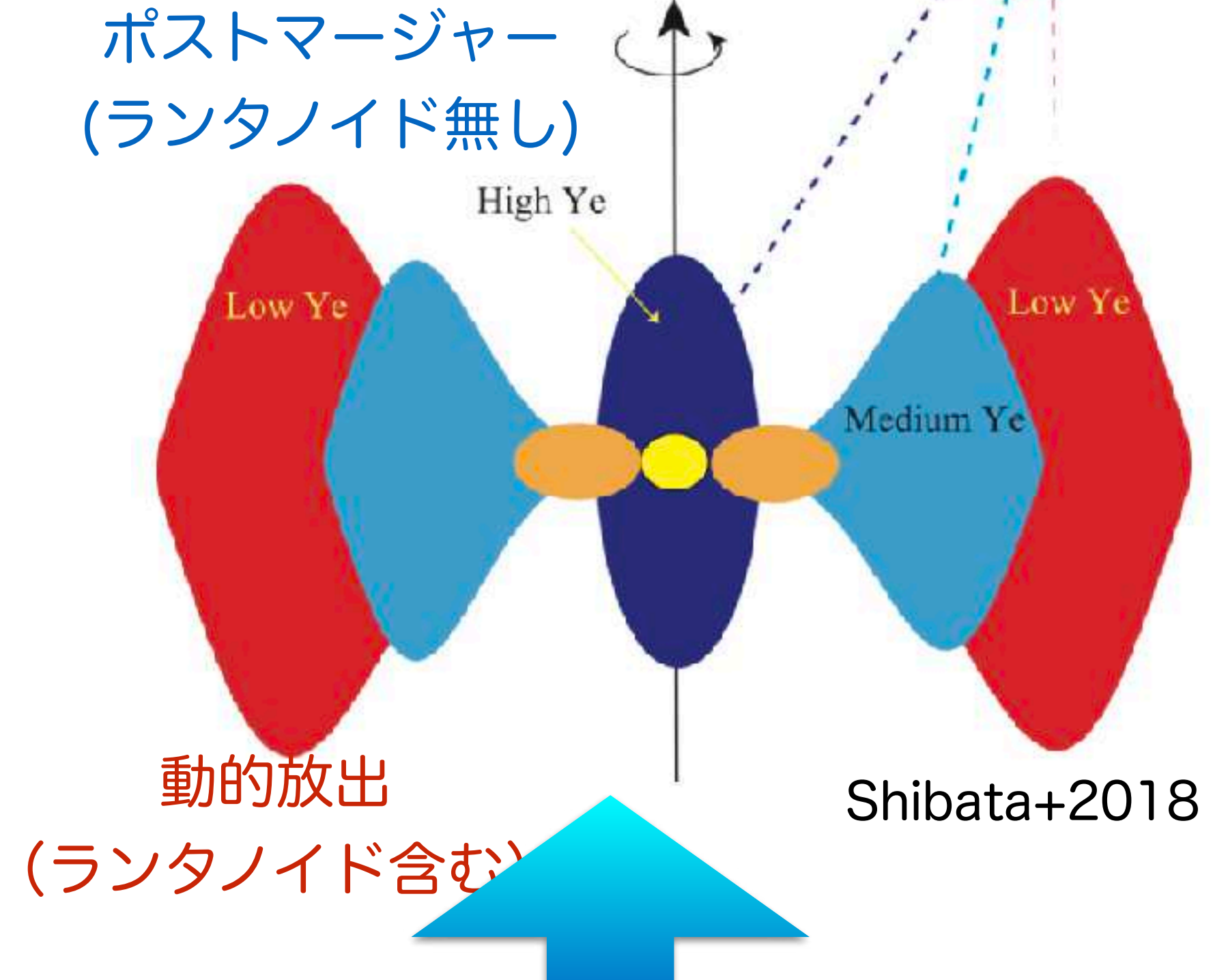
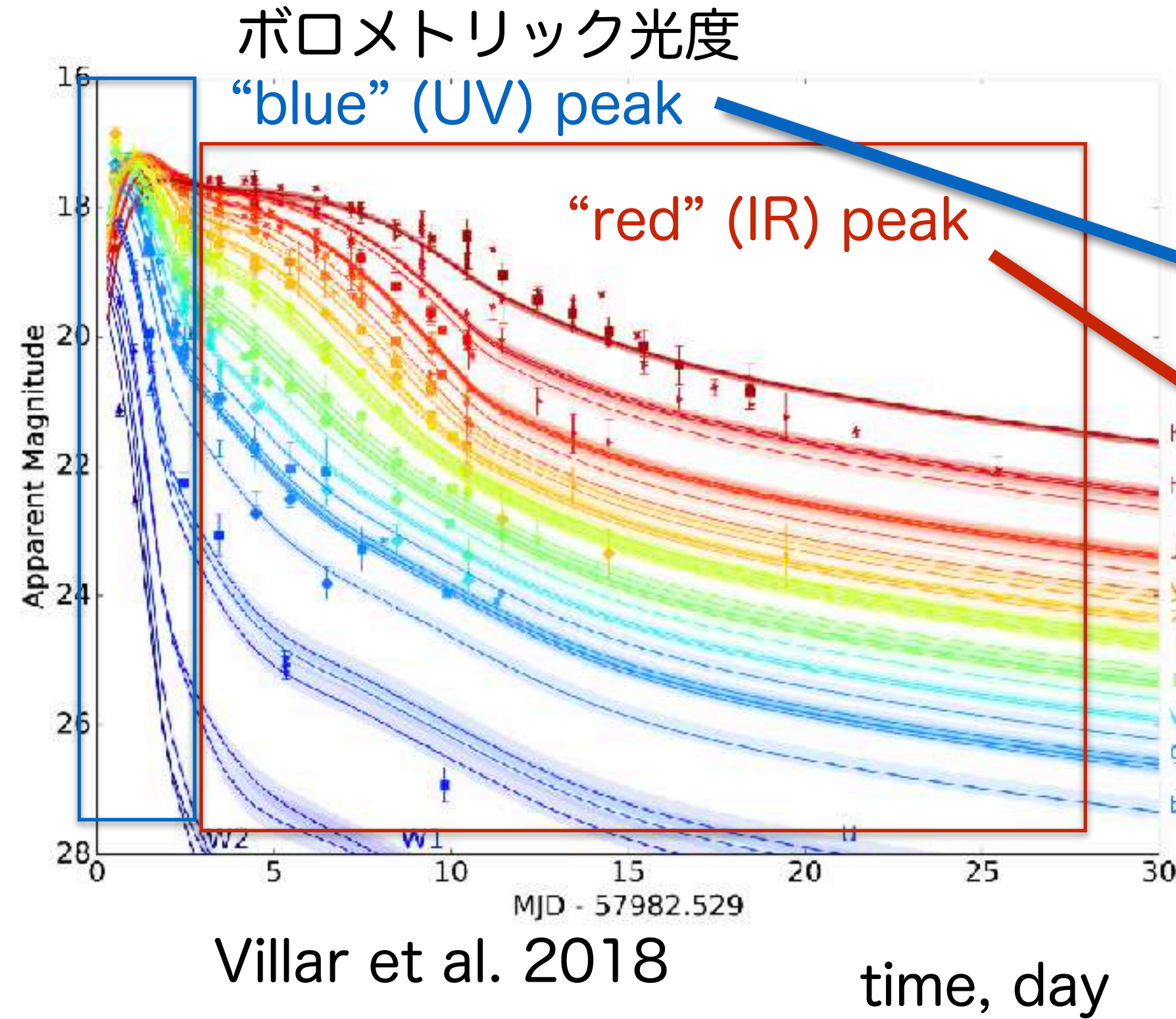


post-merger ejecta

Wanajo+NN+2014

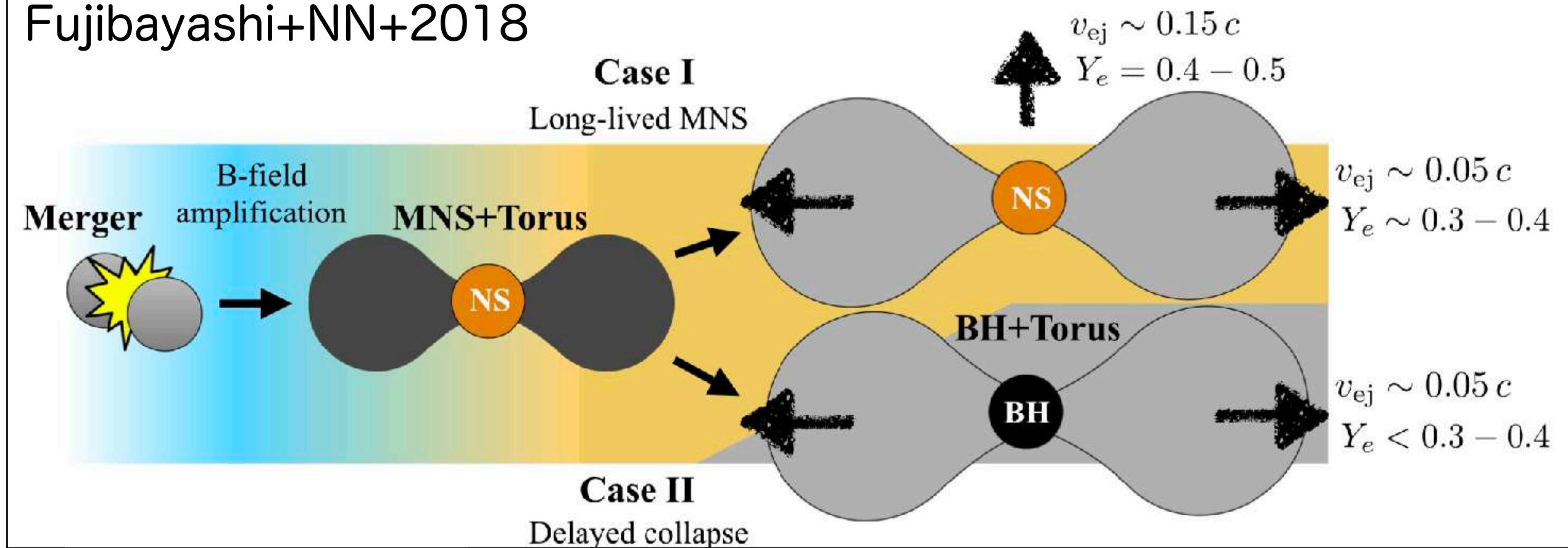


キロノヴァ(AT2017gfo) 光度曲線：青から赤へ



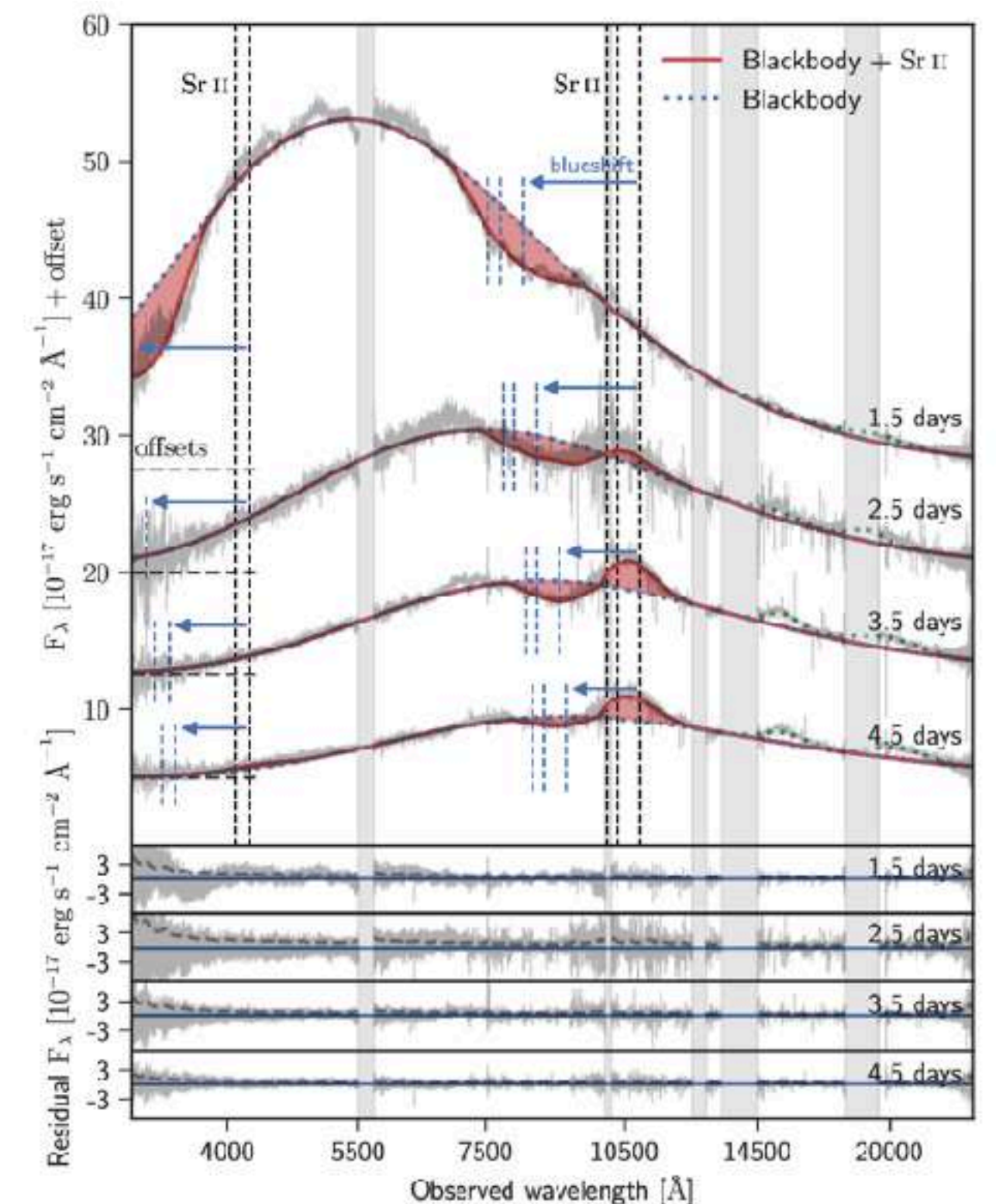
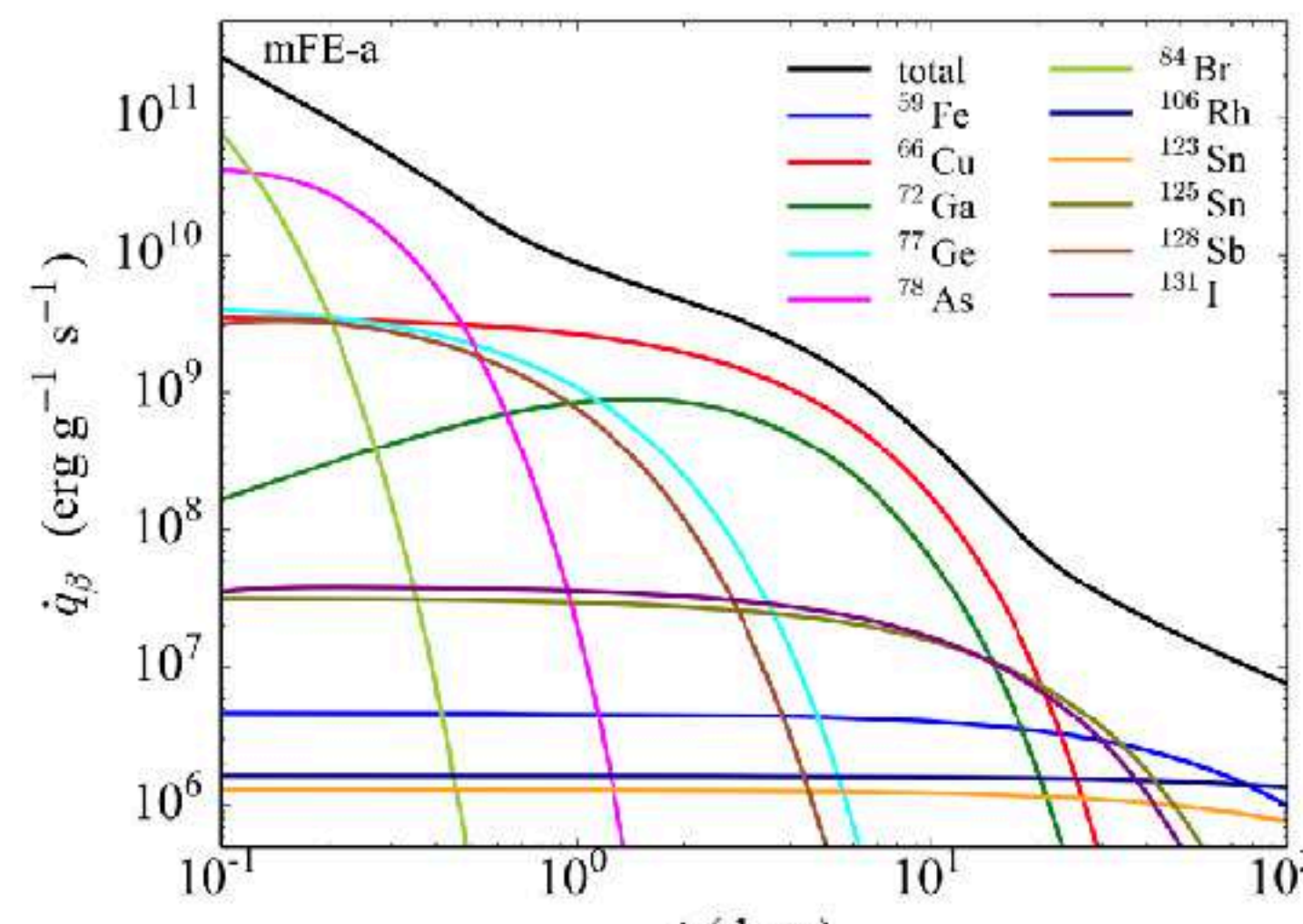
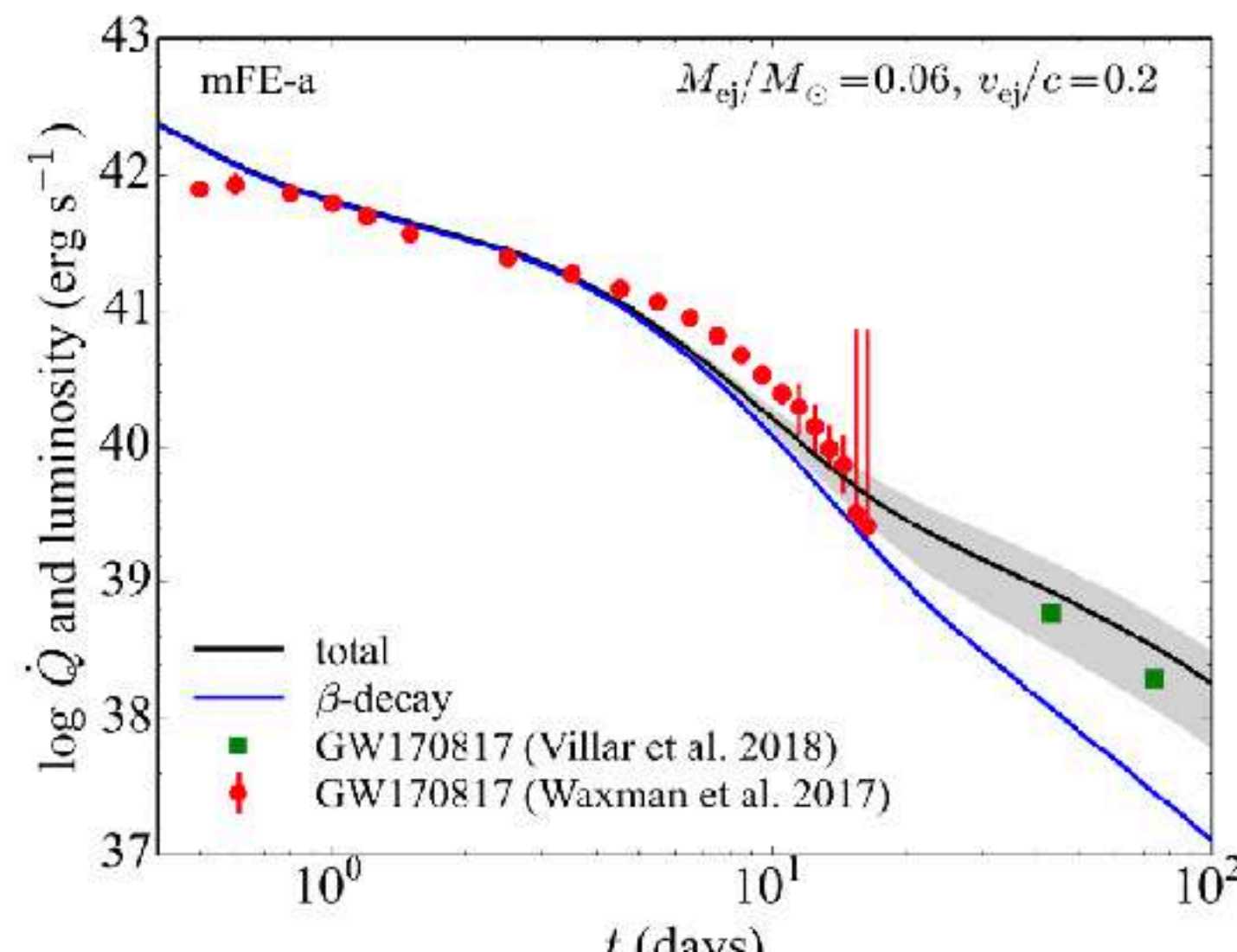
連星中性子星合体のシナリオ
(合体・放出シミュレーション)

Fujibayashi+NN+2018



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。
 - ・厳しく言えば、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

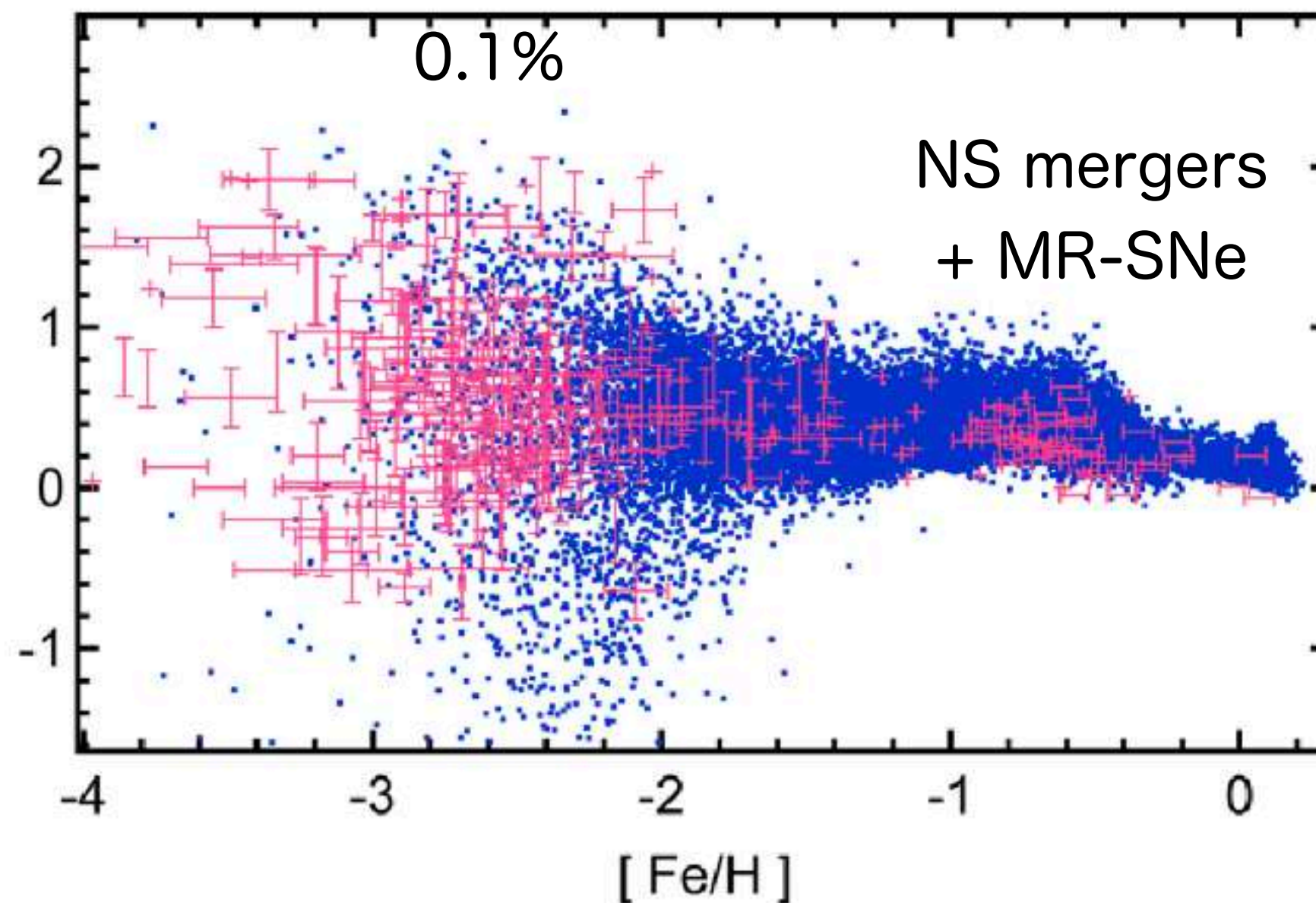
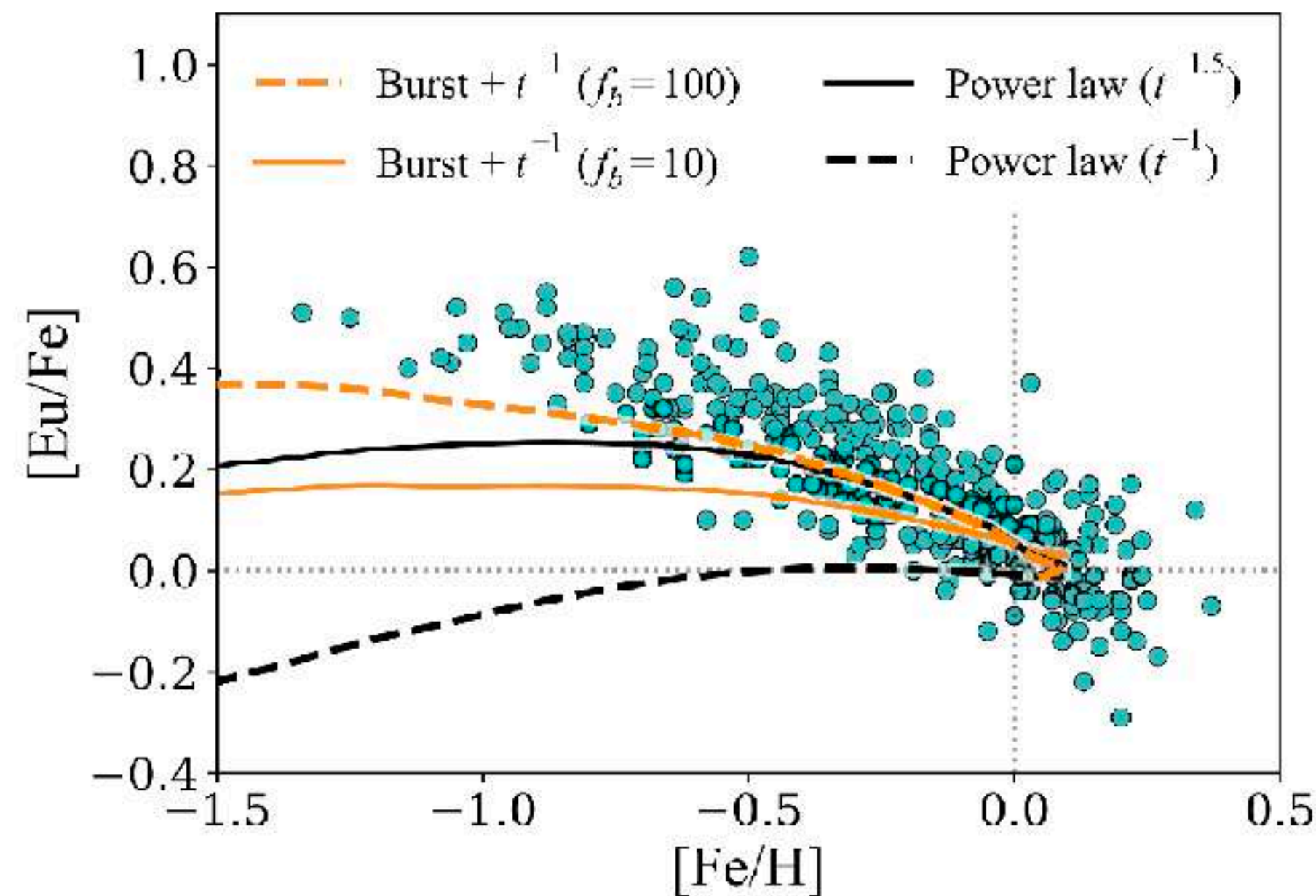
中性子星合体だけでrプロセス元素（Euなど）の銀河化学進化を説明できるか？

→ 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

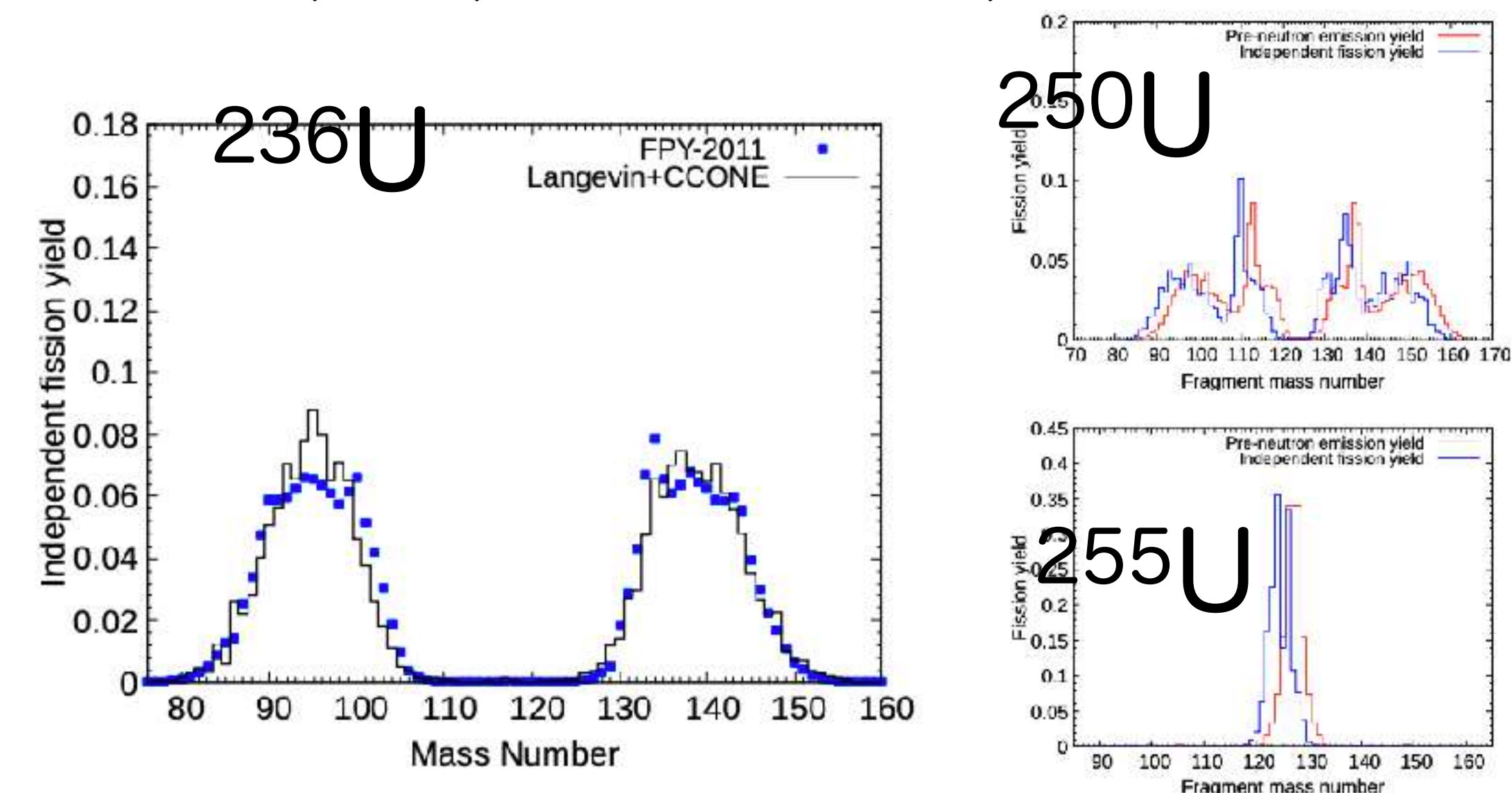
- ・「まだ1例」？ → 「また別の観測で常識が変わる？」
より統計が貯まる知見に対して「一般性がより確立」と「多様性」の増加
- ・例：銀河の化学進化
 - ・rプロセス元素は連星中性子星合体が主体
→ 大筋は良い（一般性）しかし、銀河の初期の存在など
説明できない点も指摘。

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

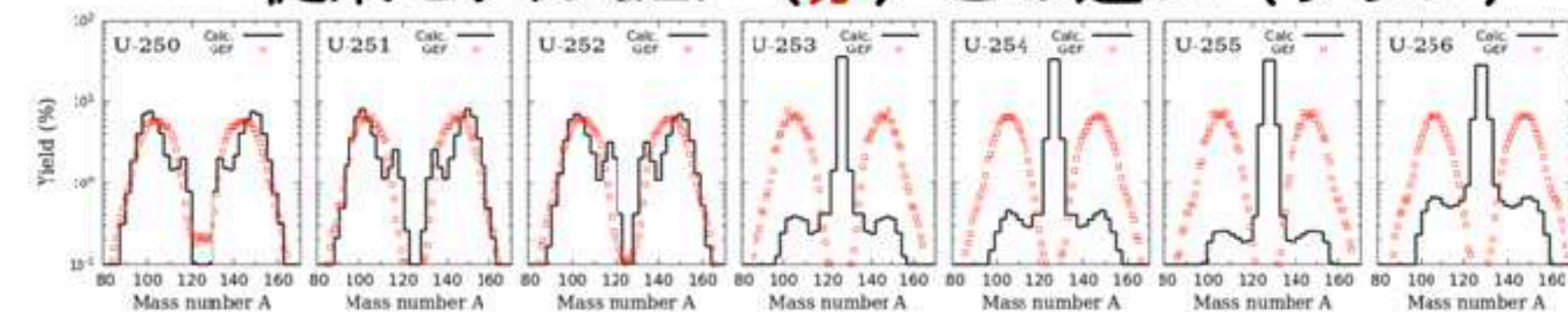


今年度は、中性子過剰ウランへの計算の拡張と整理（NN+, prep.）（事前計算 by 田中）



rプロセス計算に拡張、適用

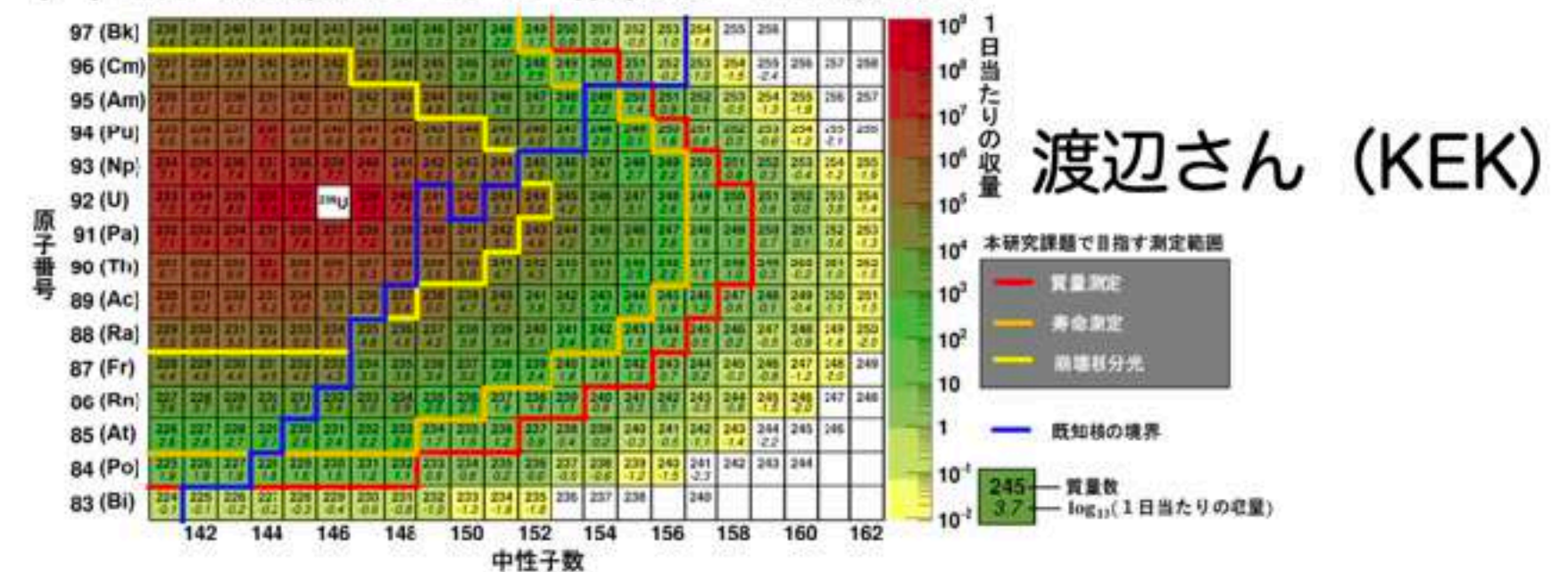
従来モデルGEF（赤）との違い（ウラン）



→ 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

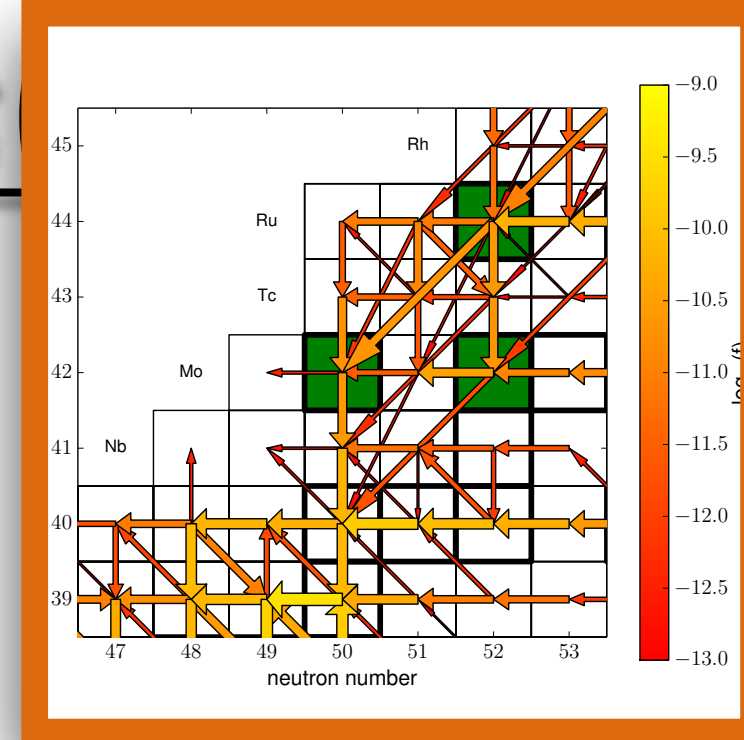
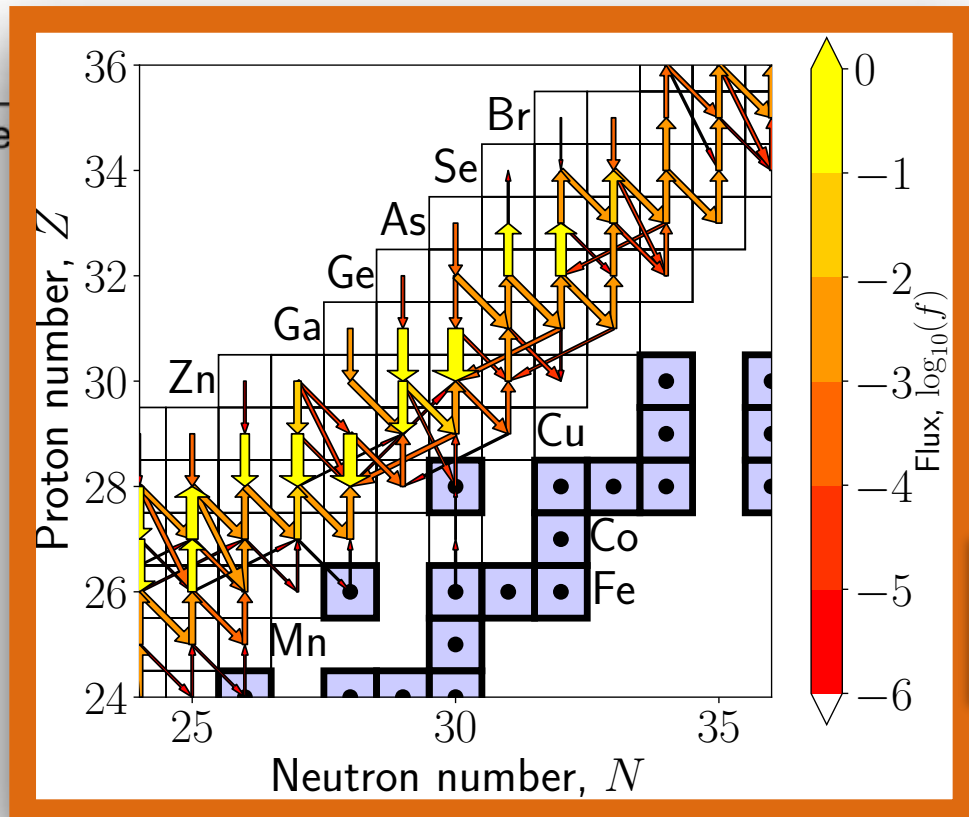
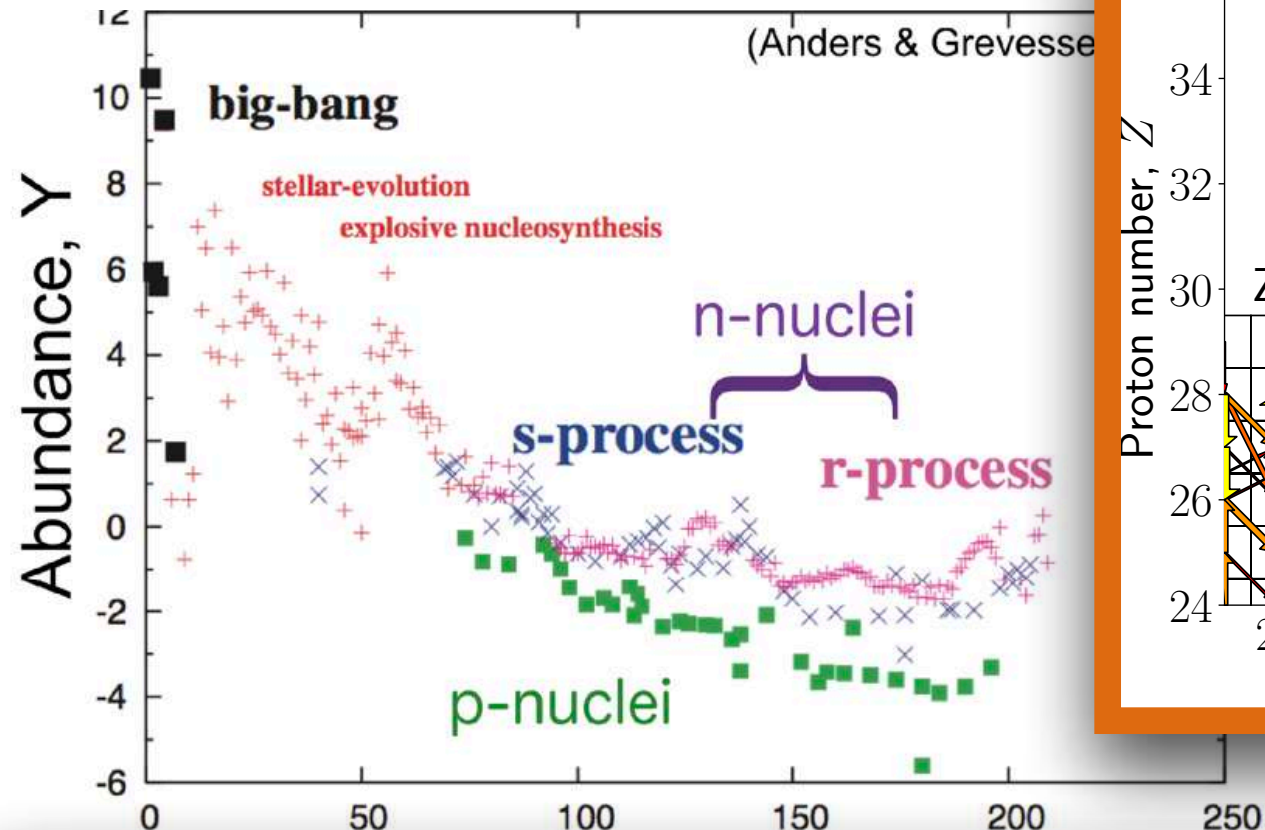


2. 宇宙の元素合成から 加速器実験へ

宇宙にお

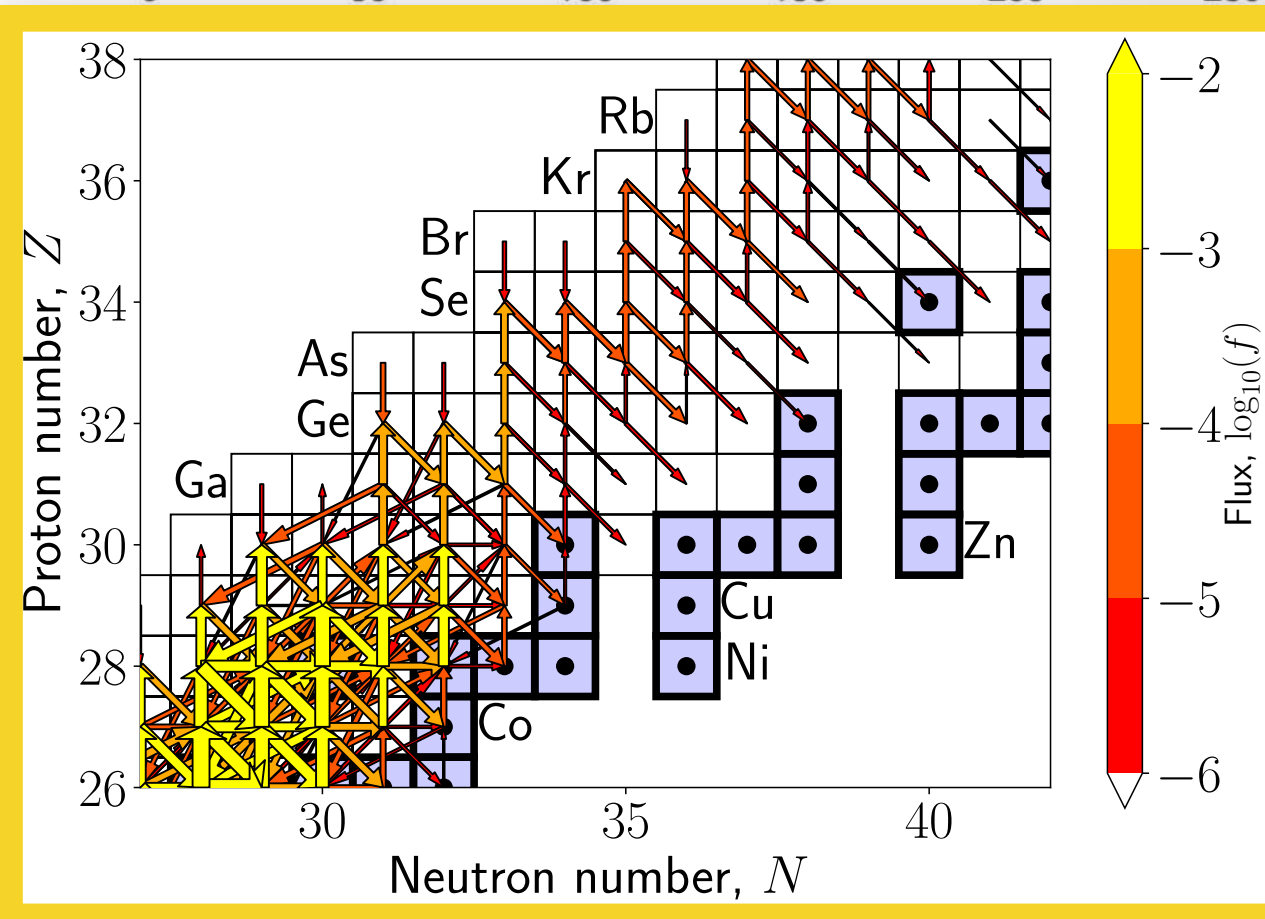
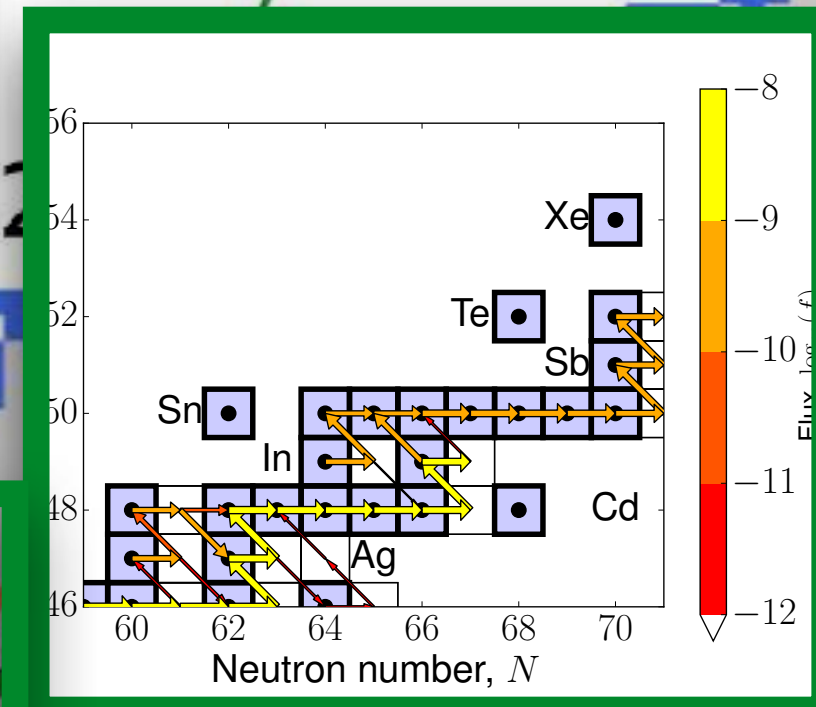
の起源

太陽系組成

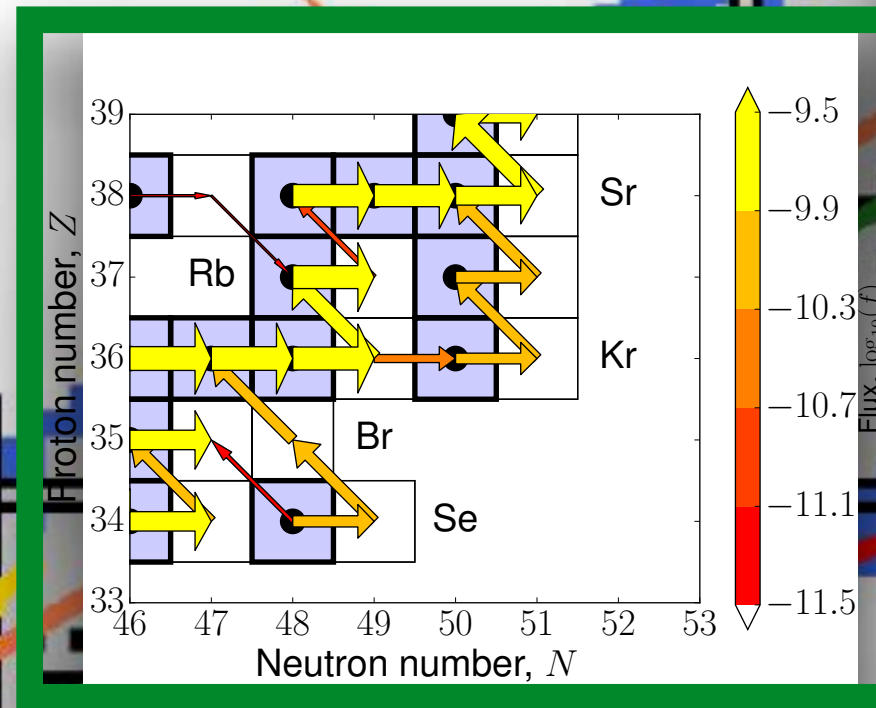


s-process

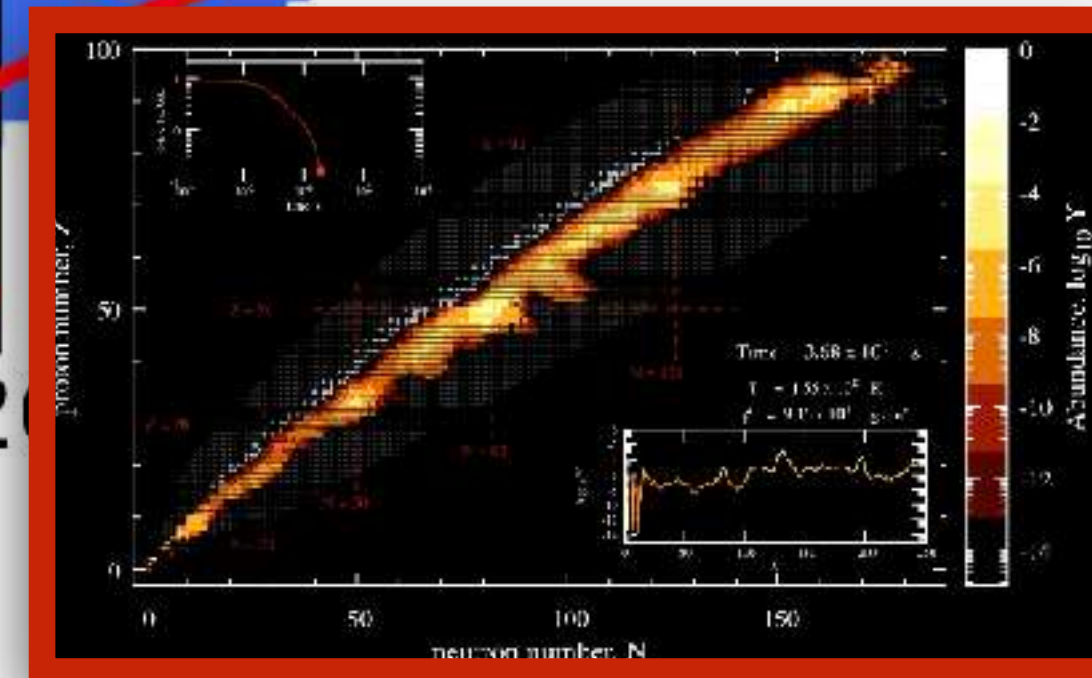
p-process



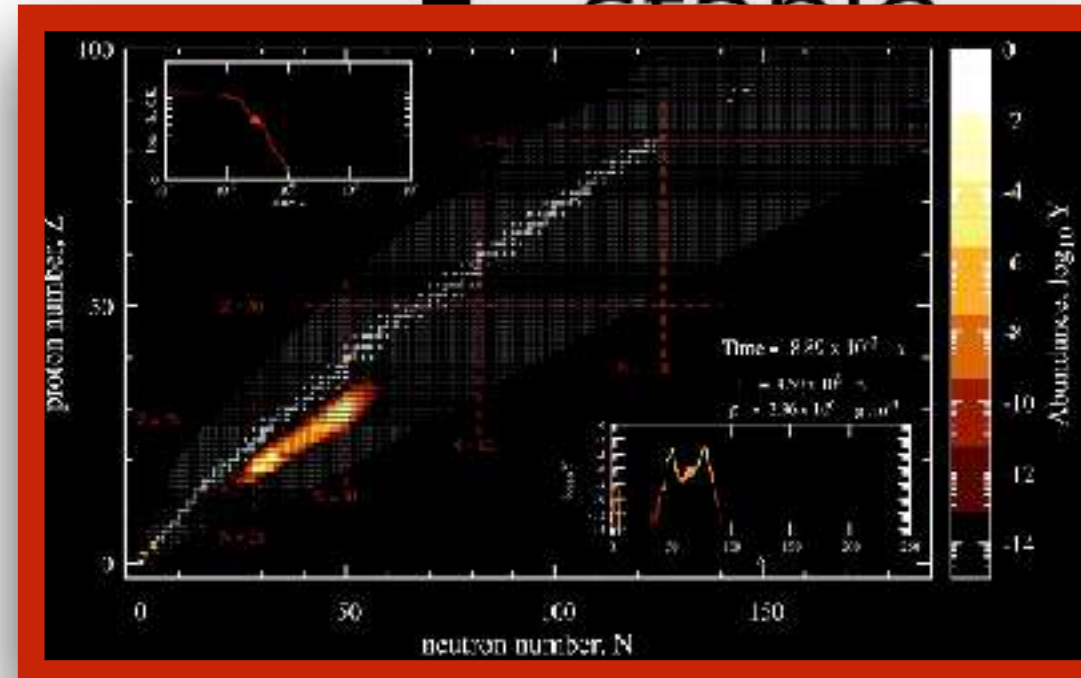
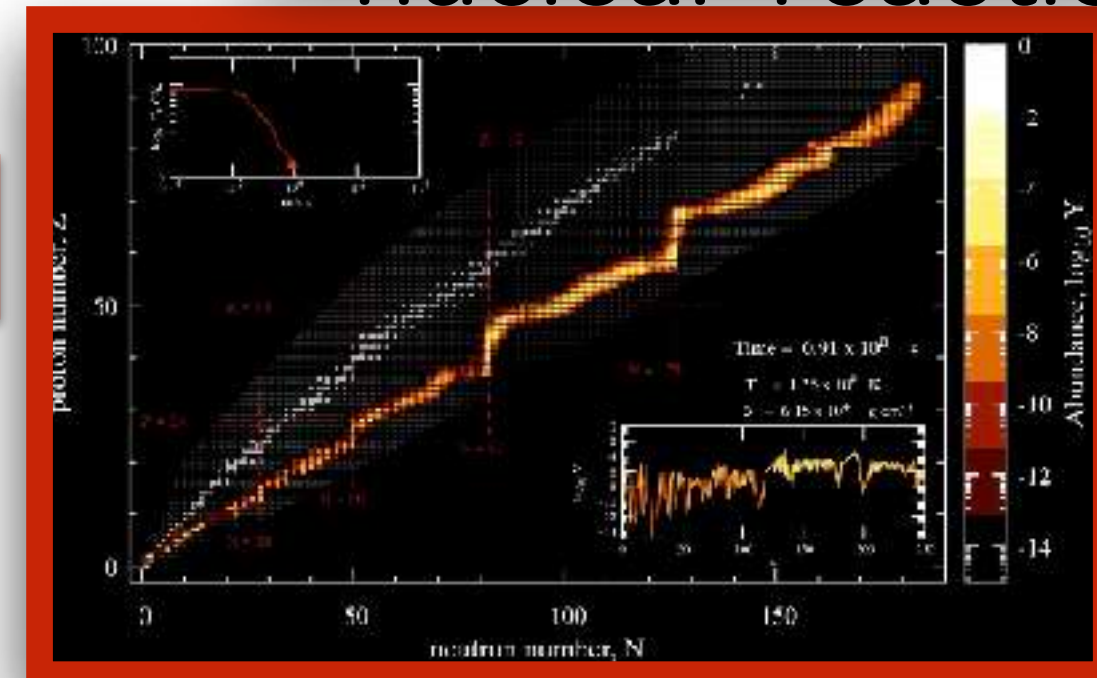
vp-process



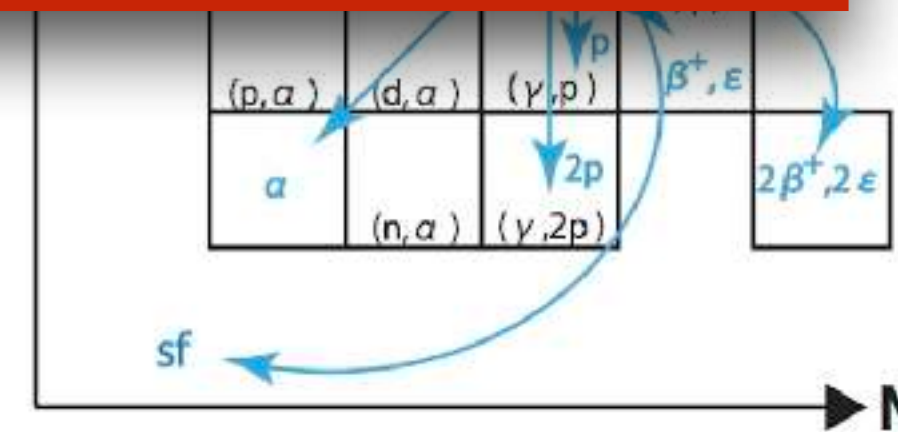
r-process



nuclear reactions



Arcones & Thielemann (2023)



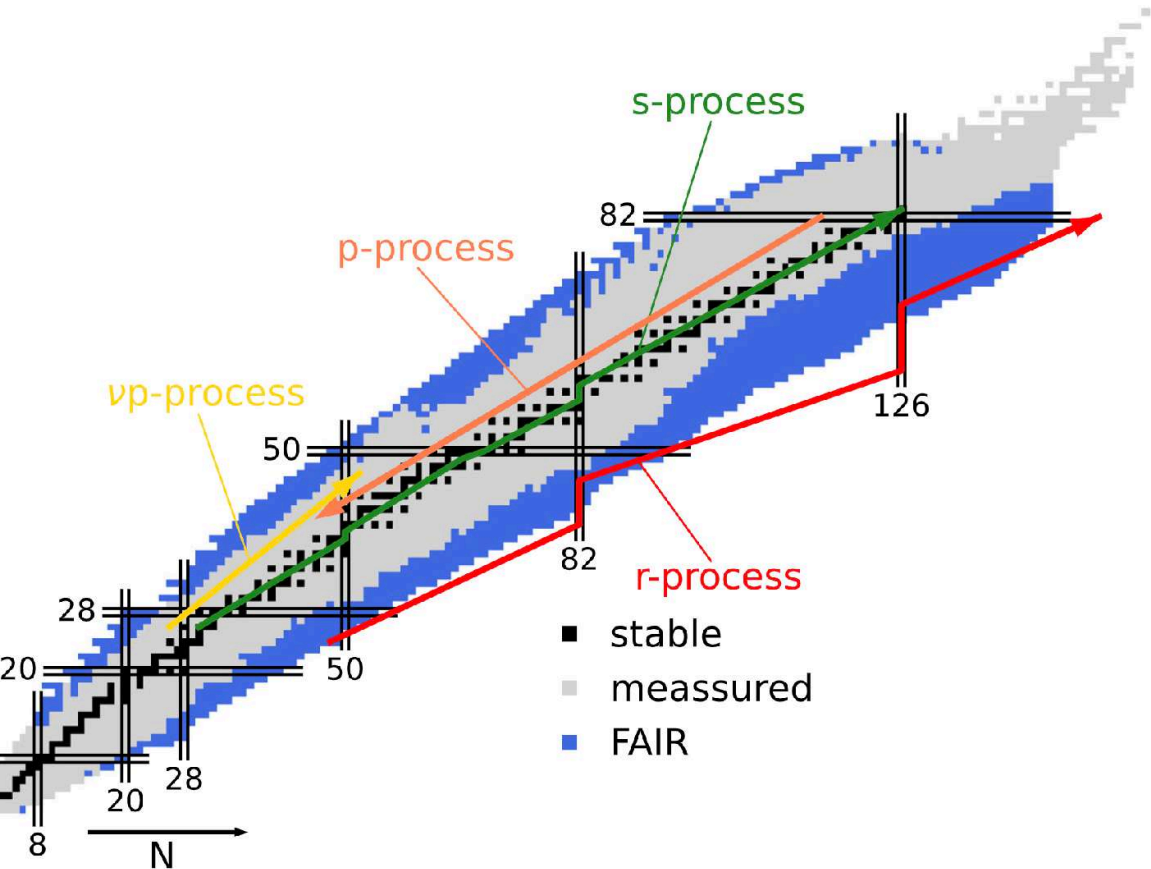
宇宙の元素合成で重要な反応率

我々の方法

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



“sensitivity” study
on nucleosynthesis?

- ・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

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

モンテカルロ元素合成

- Monte-Carlo framework

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

- 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



Piz Buin (mountain)

大規模モンテカルロシミュレーション

for shared memory systems

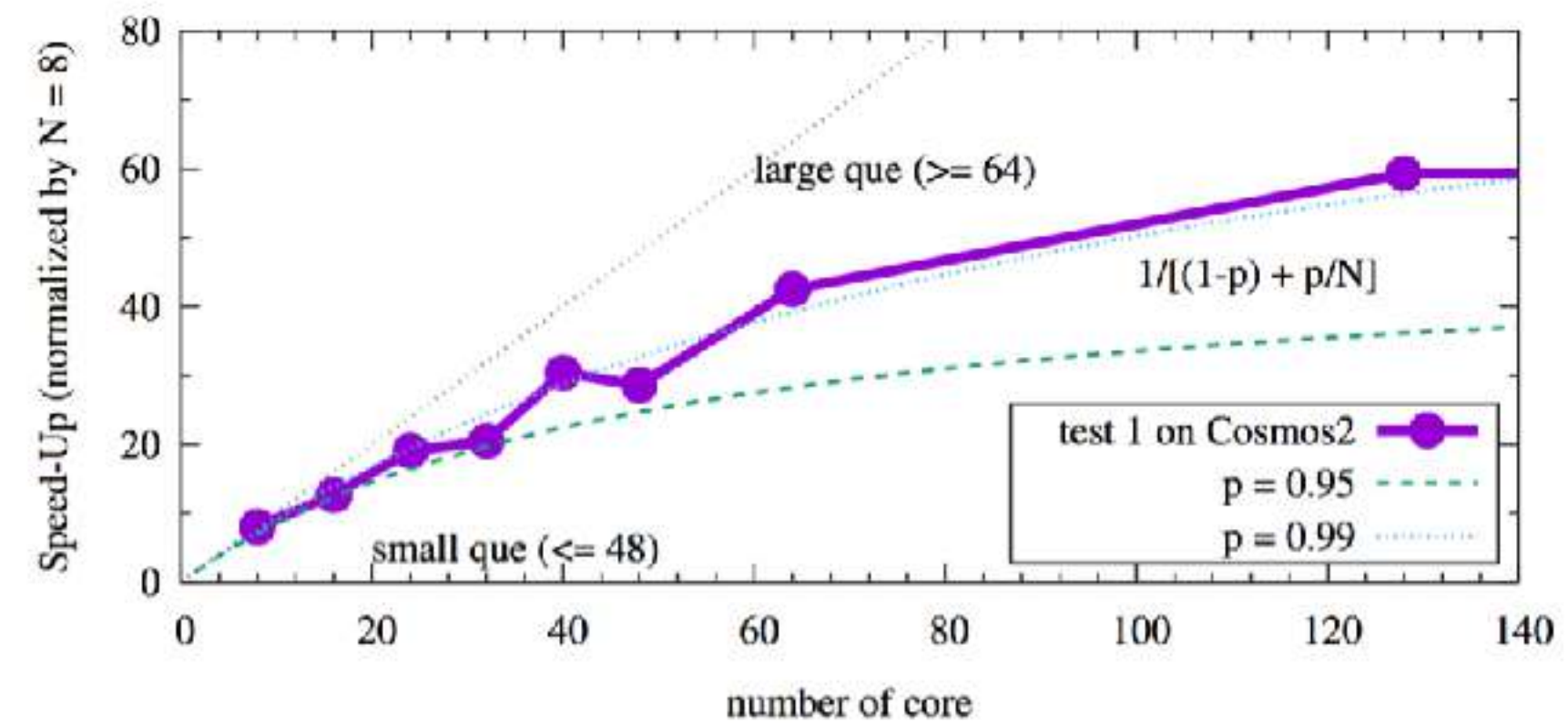
- Fortran + **OpenMP**
- parallelized well
- optimized code/matrix library for large shared memory computers (multi threads)
- Computer resources

numascale



Shyne cluster
@Keele (ERC)

performance tests of matrix solvers
on shared memory system



Cosmos2 @Cambridge
(UK DiRAC facility, STFC)



実験の挑戦

sプロセス

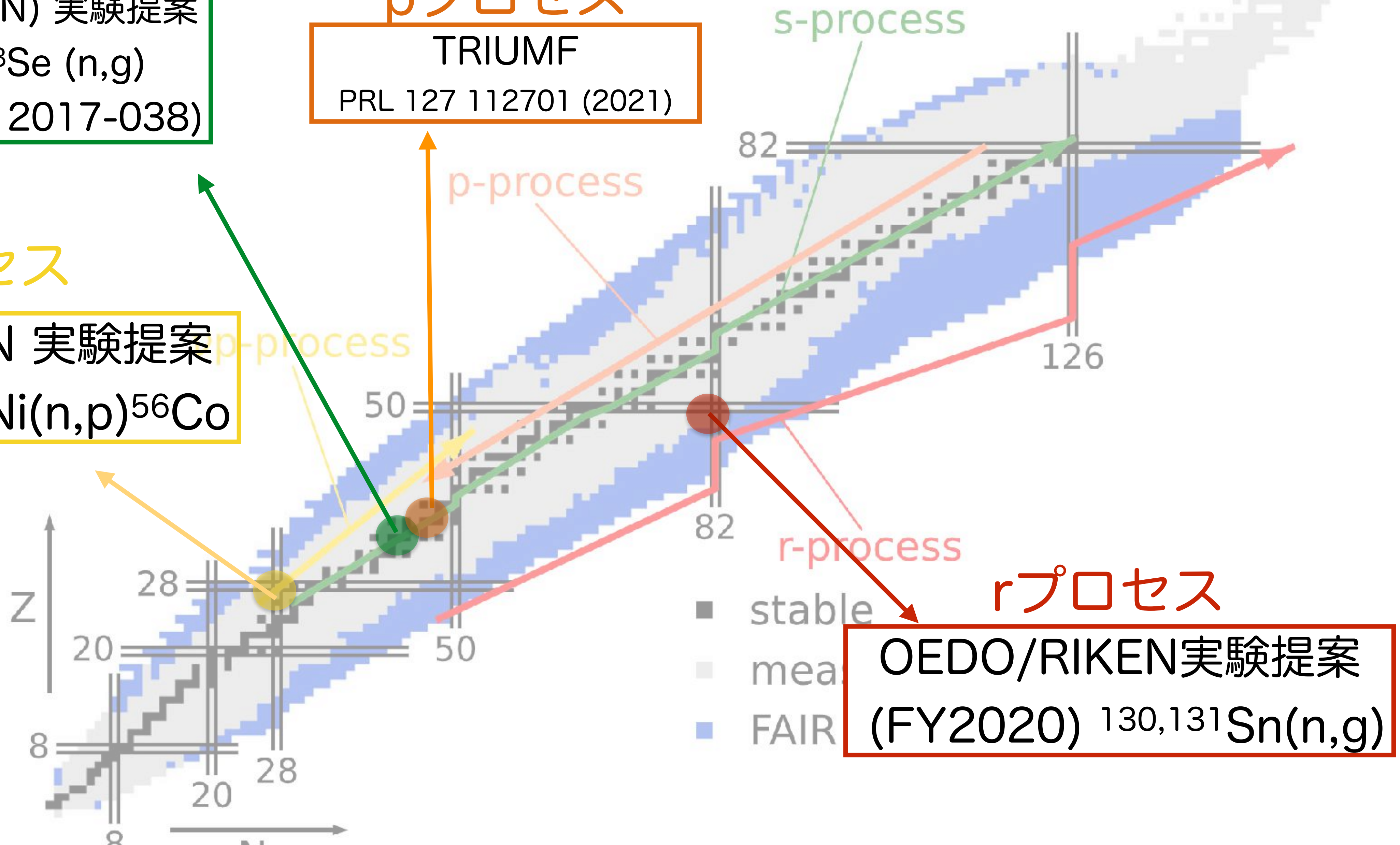
n_TOF (CERN) 実験提案
 ^{68}Zn , $^{77,78}\text{Se}$ (n,g)
(CERN INTC 2017-038)

pプロセス

TRIUMF
PRL 127 112701 (2021)

ν pプロセス

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



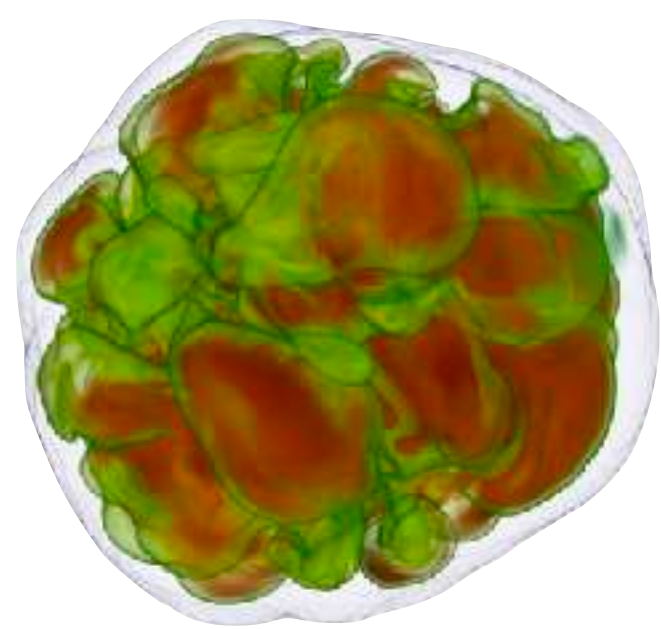
rプロセス

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

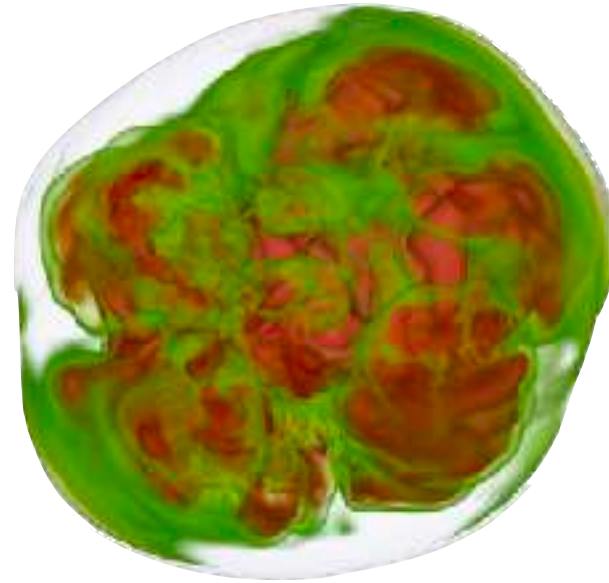
超新星での νp プロセス元素合成



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)



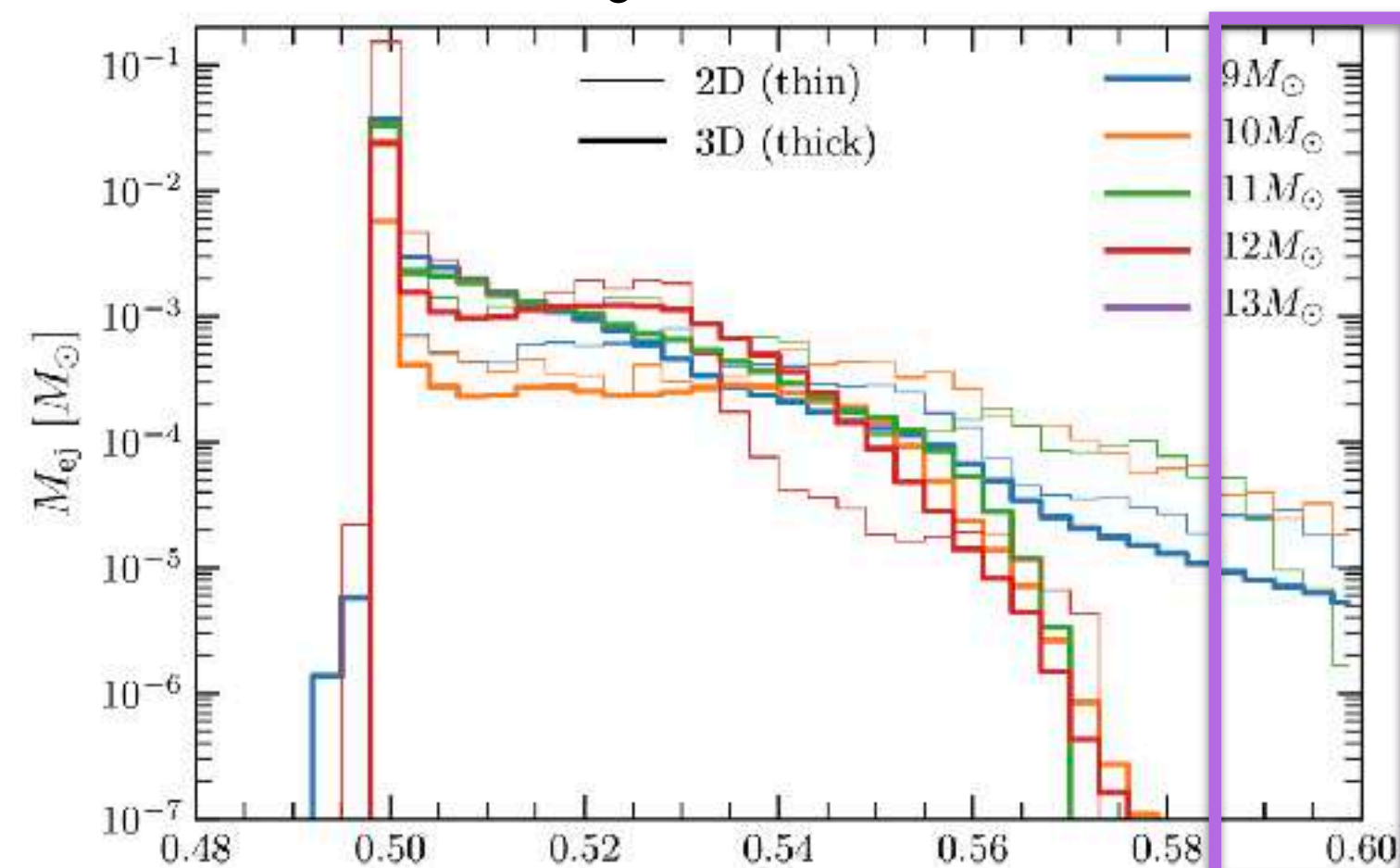
400 km



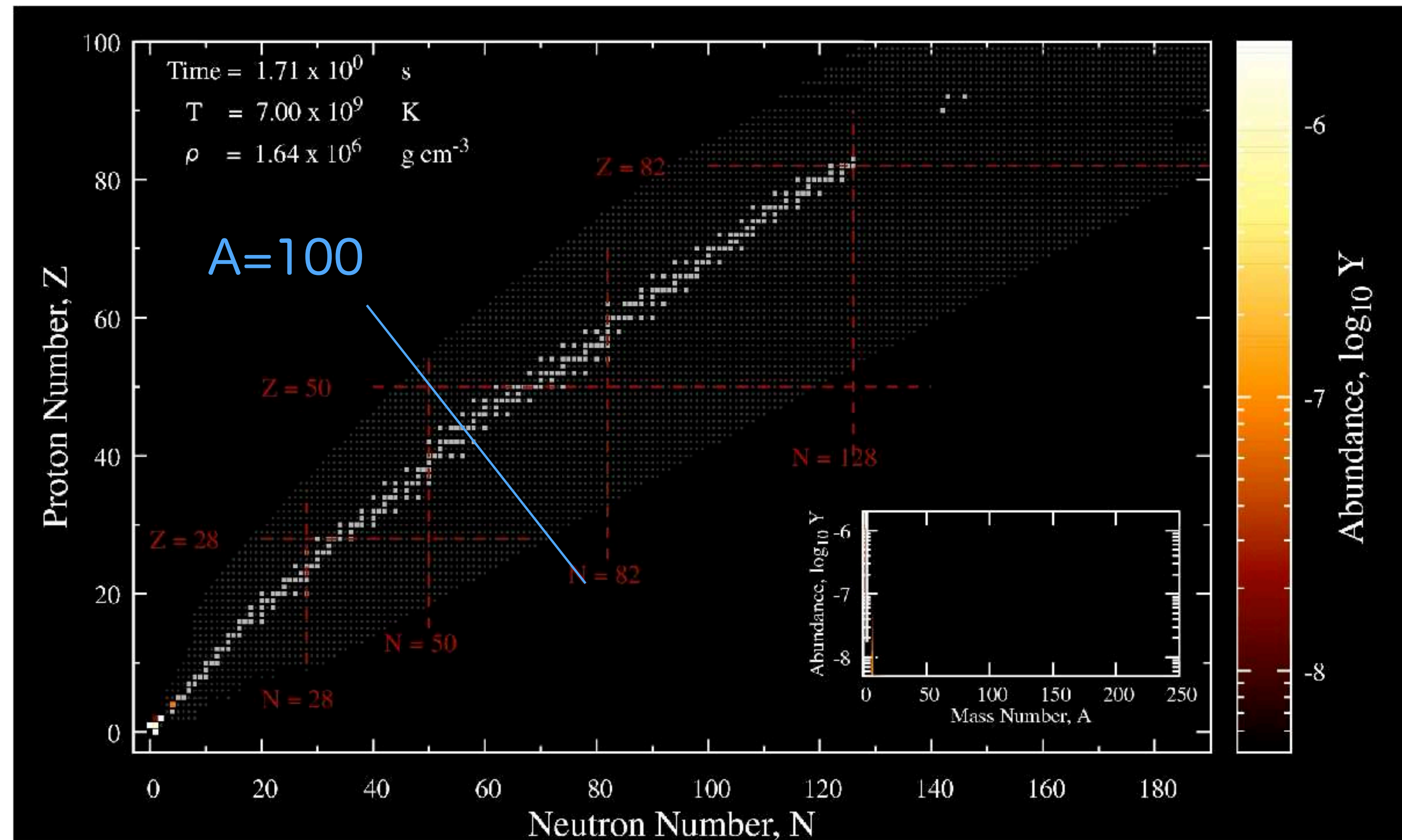
6000 km

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):

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

- ν p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? : $0.67 < ^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo} < 2.79$

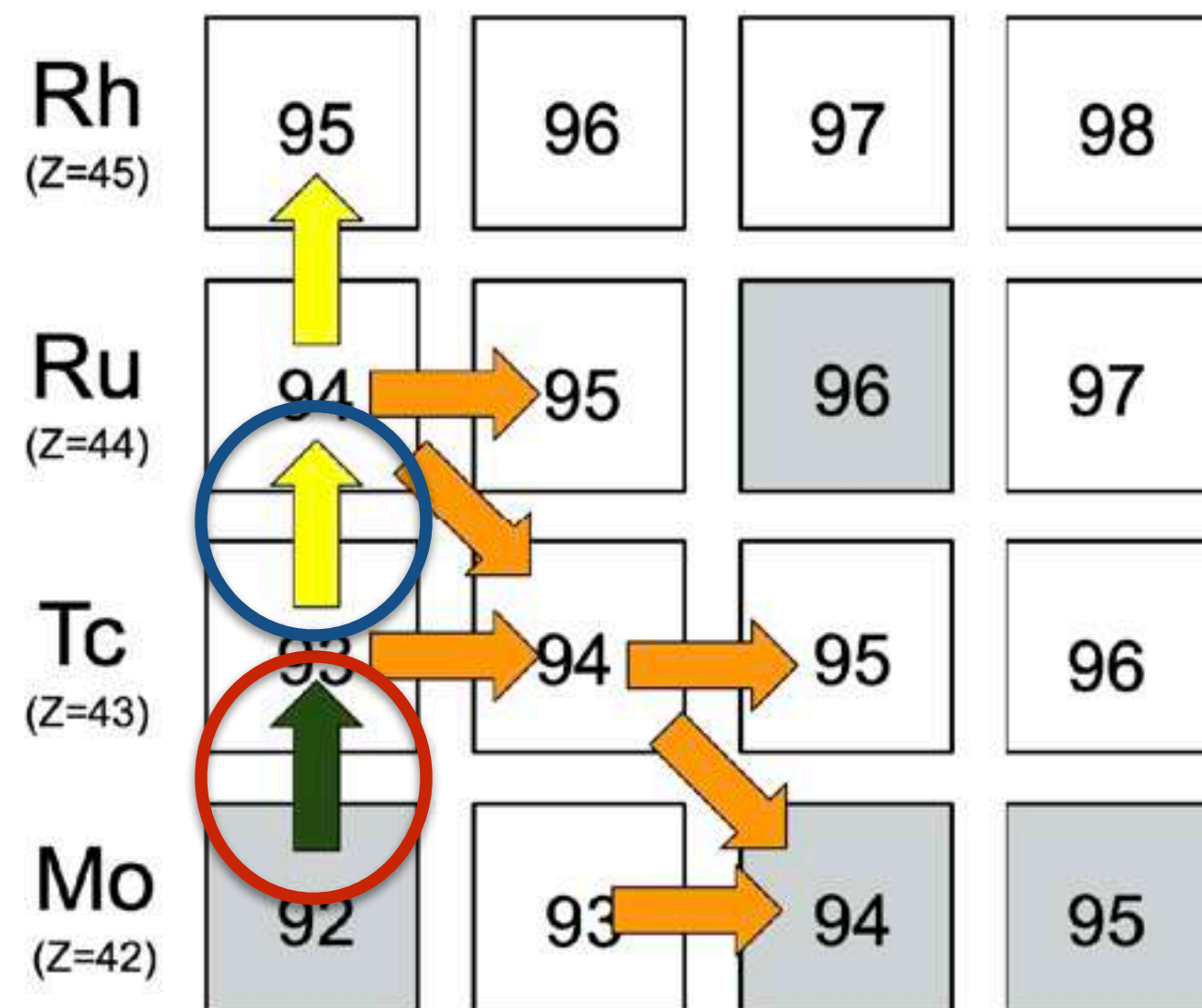
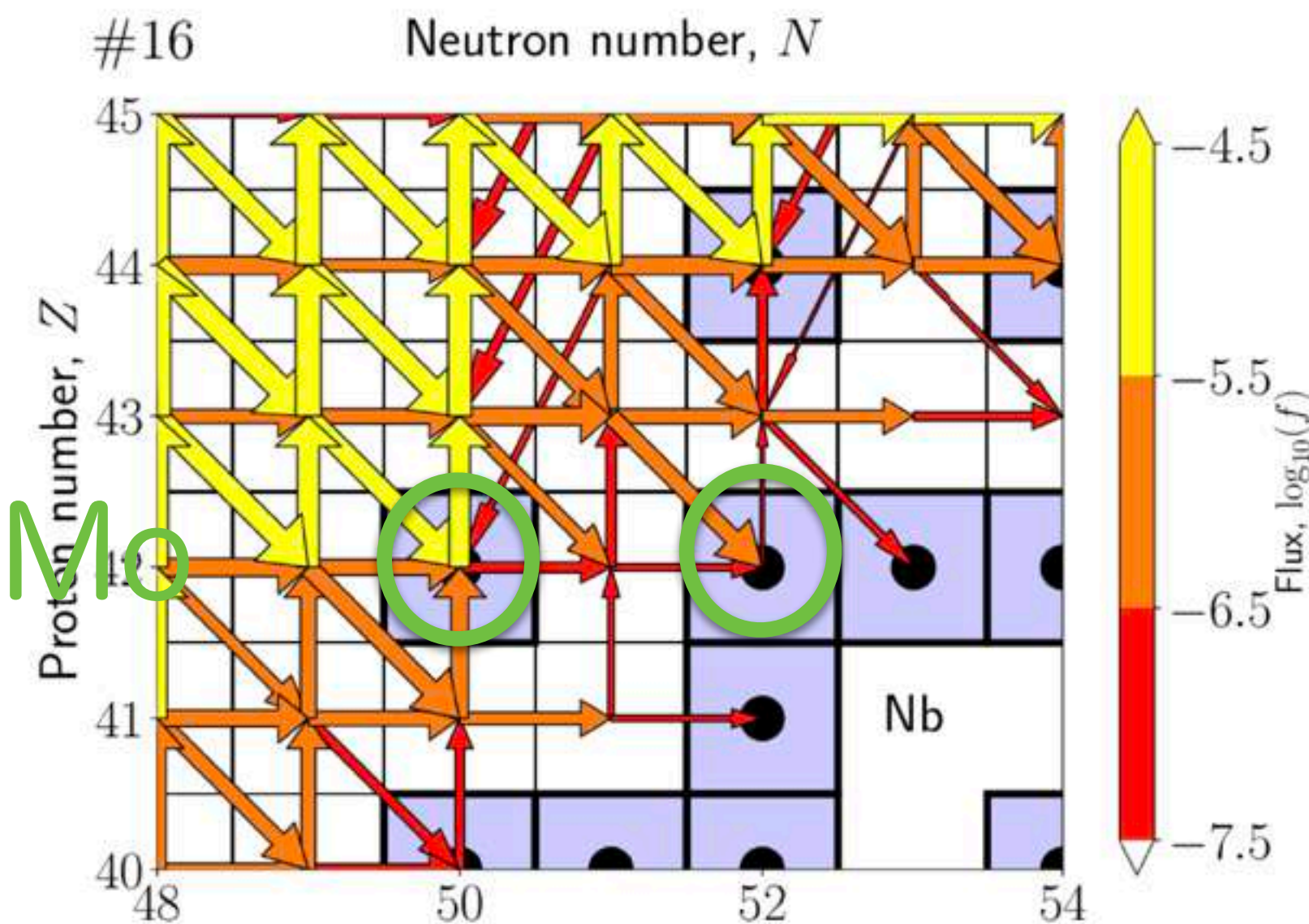
Z, proton number

p核 (陽子過剰/中性子欠乏)



N, neutron number

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