

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

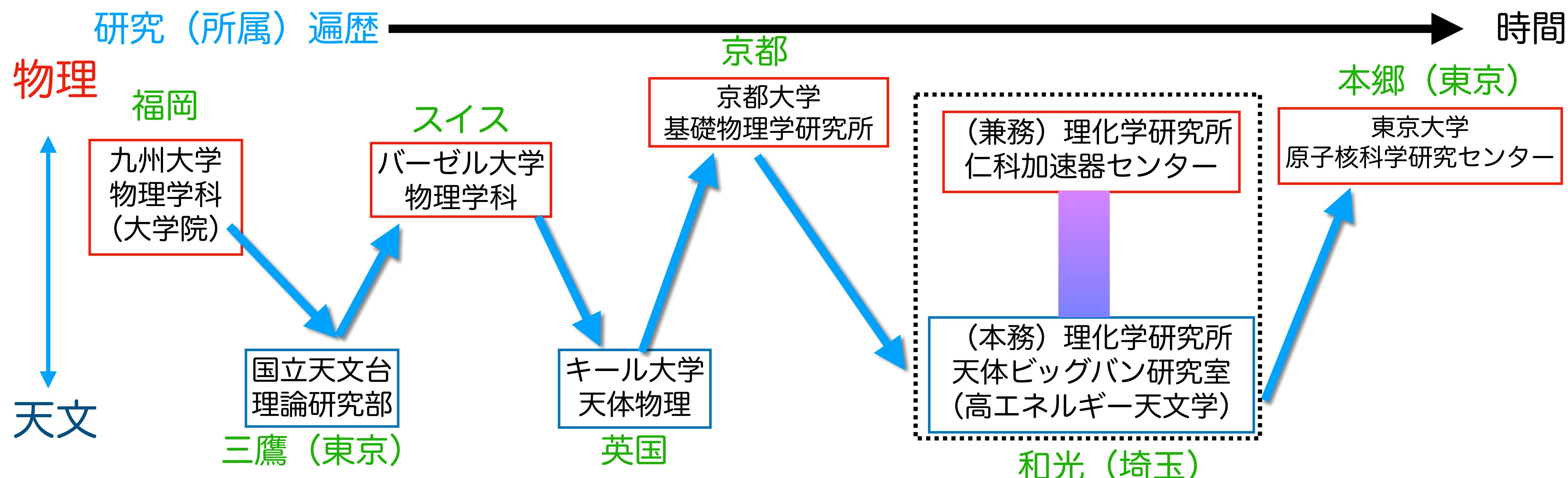


科 研 費
KAKENHI

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

興味の中心 → 我々の宇宙の元素の起源と進化を解明

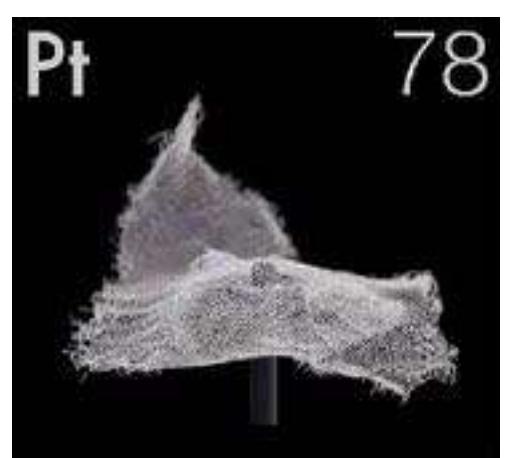


元素の周期表と宇宙での起源

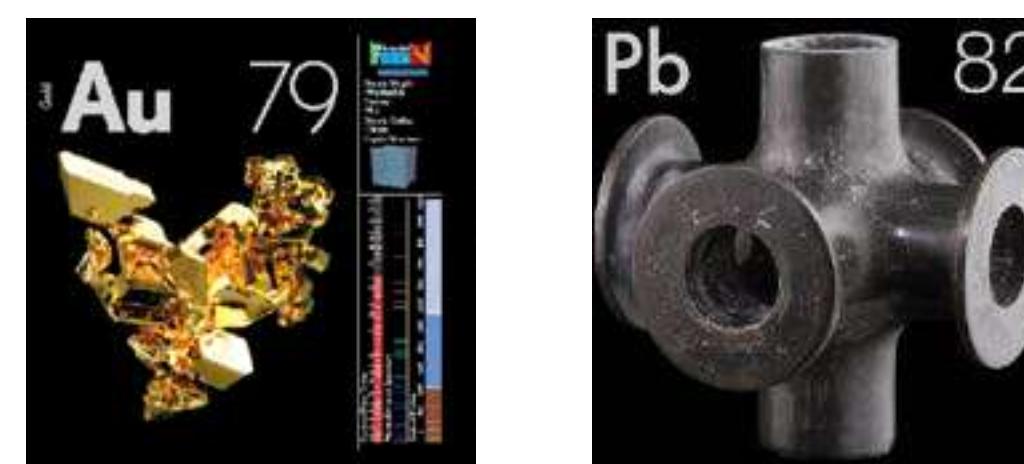
一家に一枚「宇宙図2018」より抜粋 (<https://www.mext.go.jp/stw/series.html>)



「世界で一番美しい
元素図鑑」
セオドア・グレイより



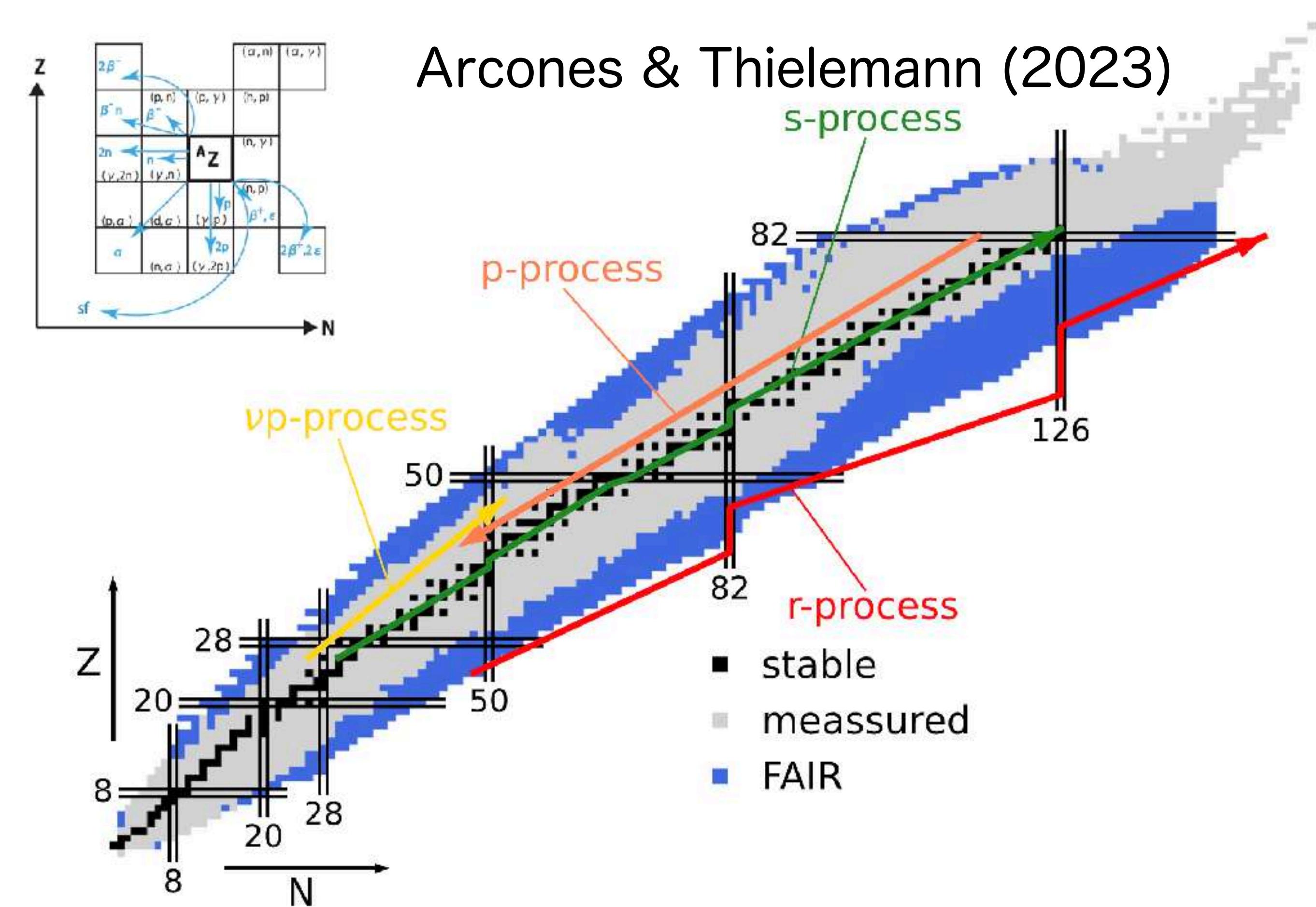
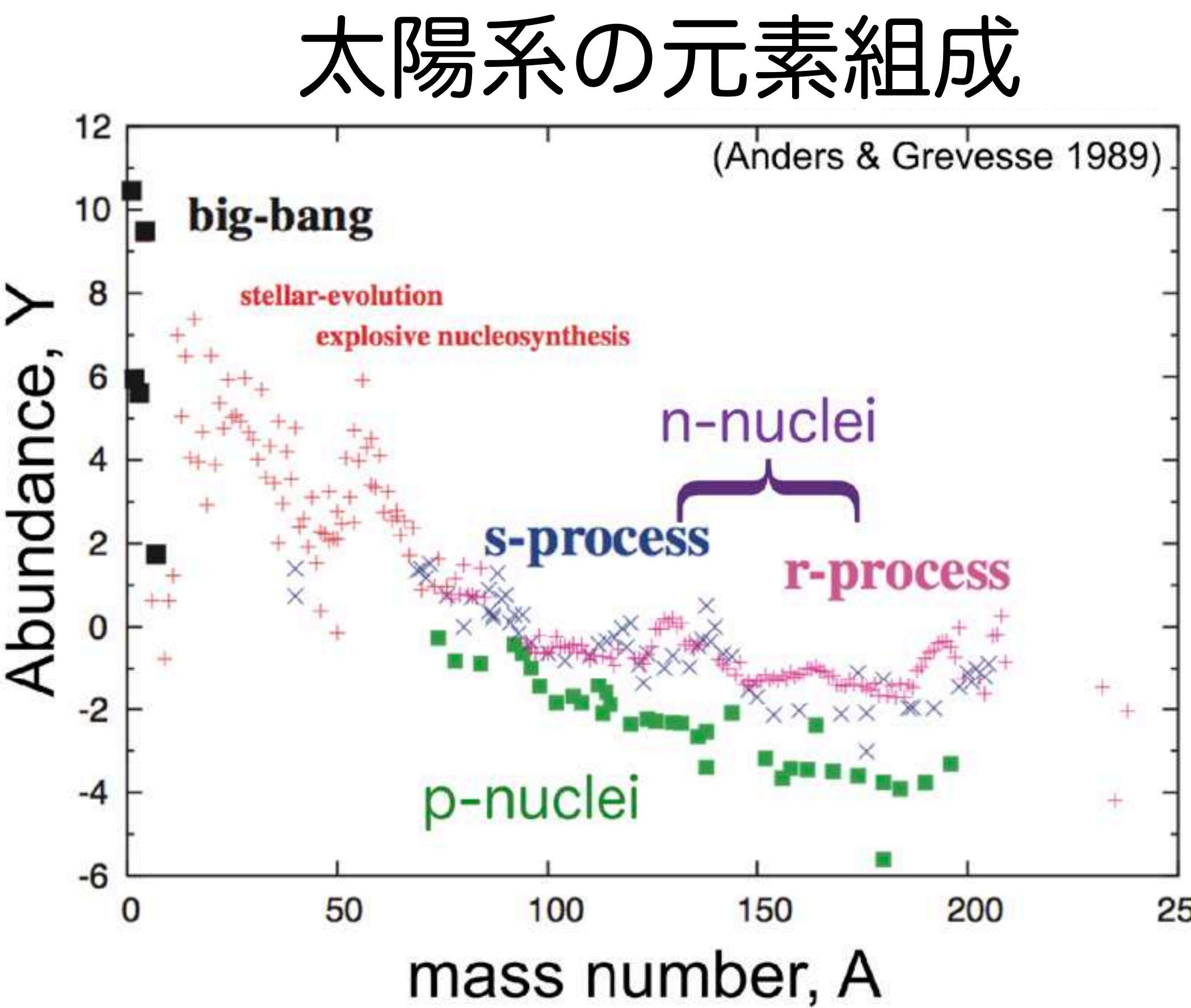
rプロセス



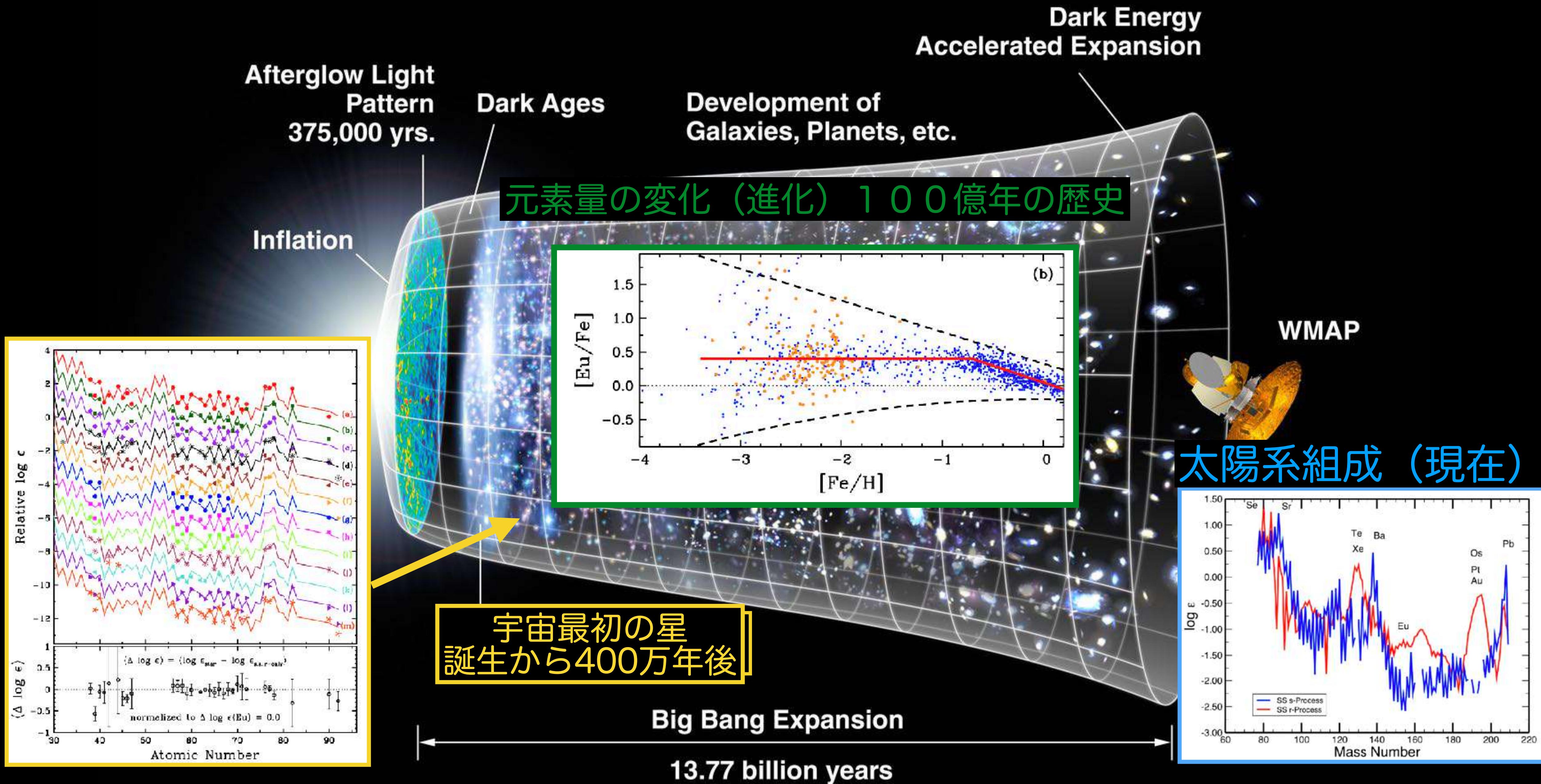
sプロセス

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/νpプロセスなど)、サブクラスも存在)



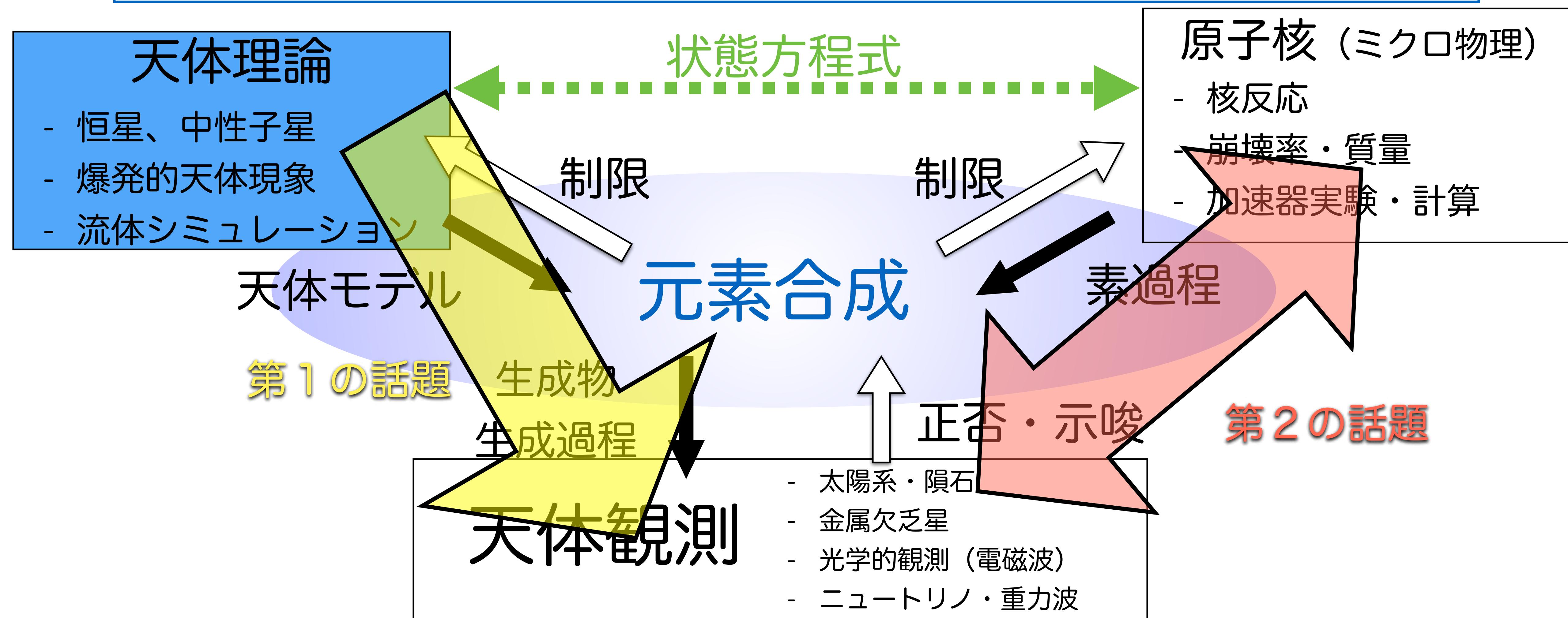
宇宙（銀河）の進化と元素合成（rプロセス）



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
- ・まとめ

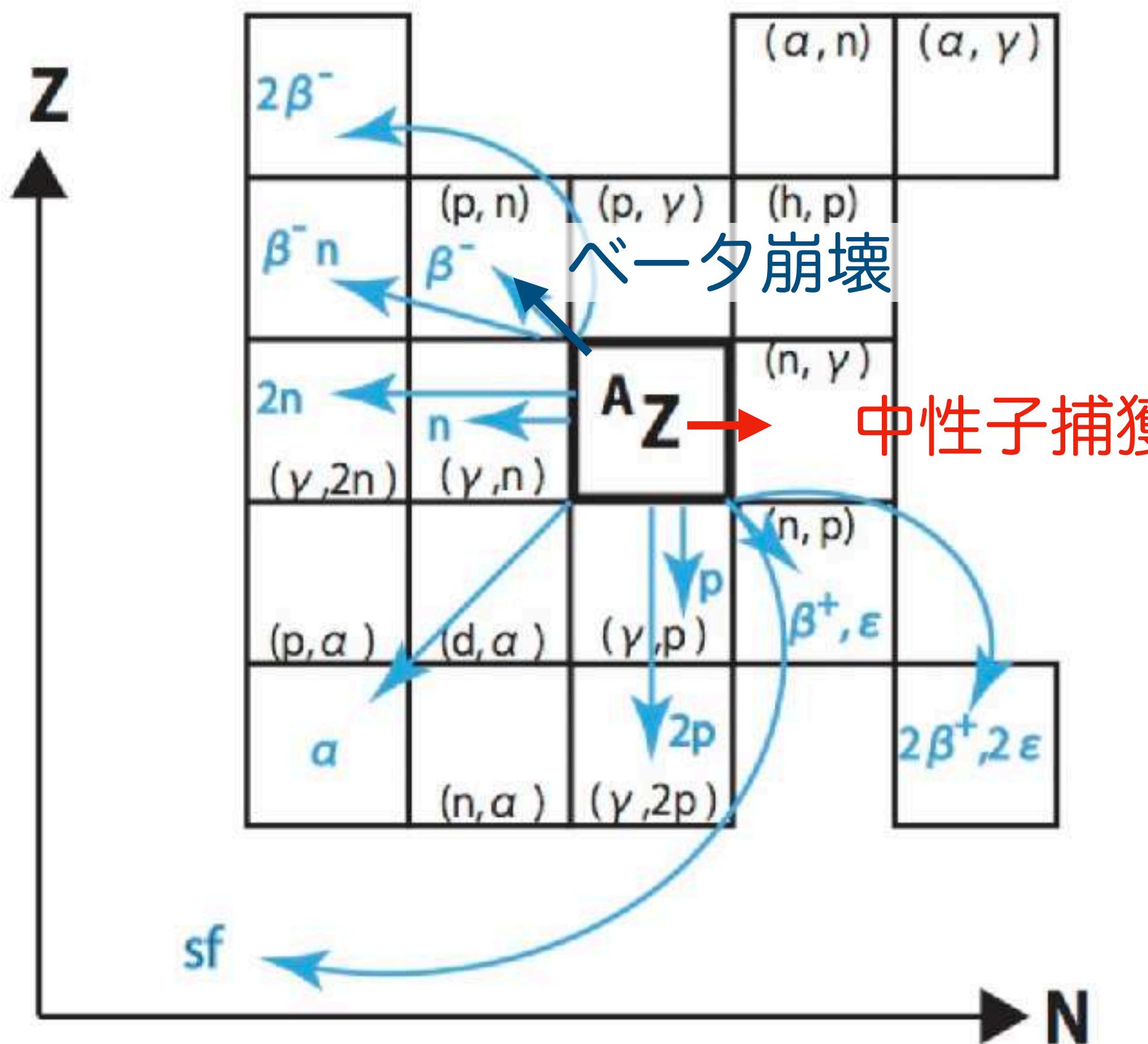
キーワード：多様性 (=「複雑化」)
→ 複雑なものをいかに解くか？取り組むか ()

お題：宇宙核物理とJAEA（先端研）の研究可能性

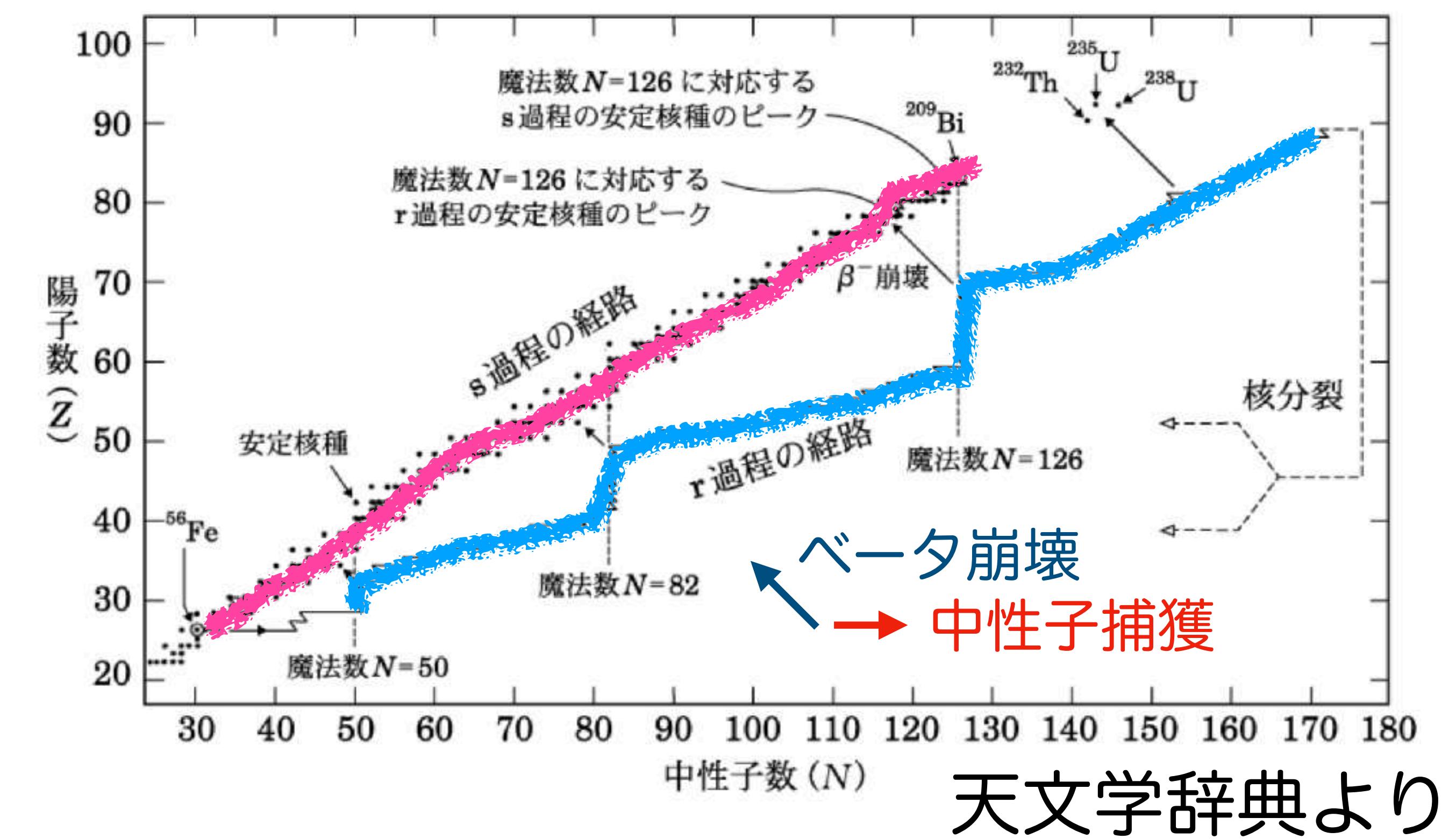
宇宙核物理と原子力工学：応用原子核

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

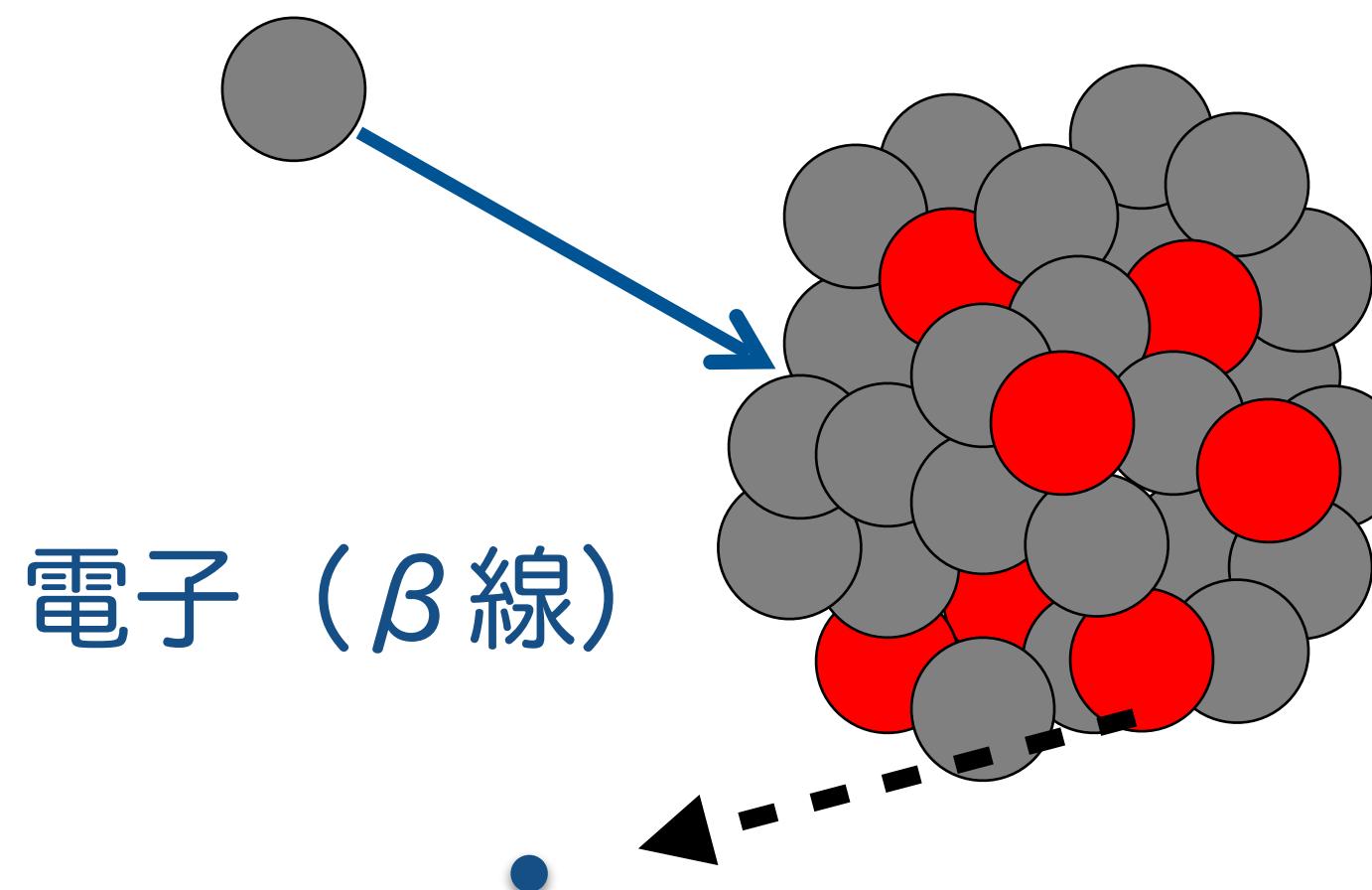


重い元素を作るレシピ：中性子捕獲過程

速い中性子捕獲 + ベータ崩壊による元素合成

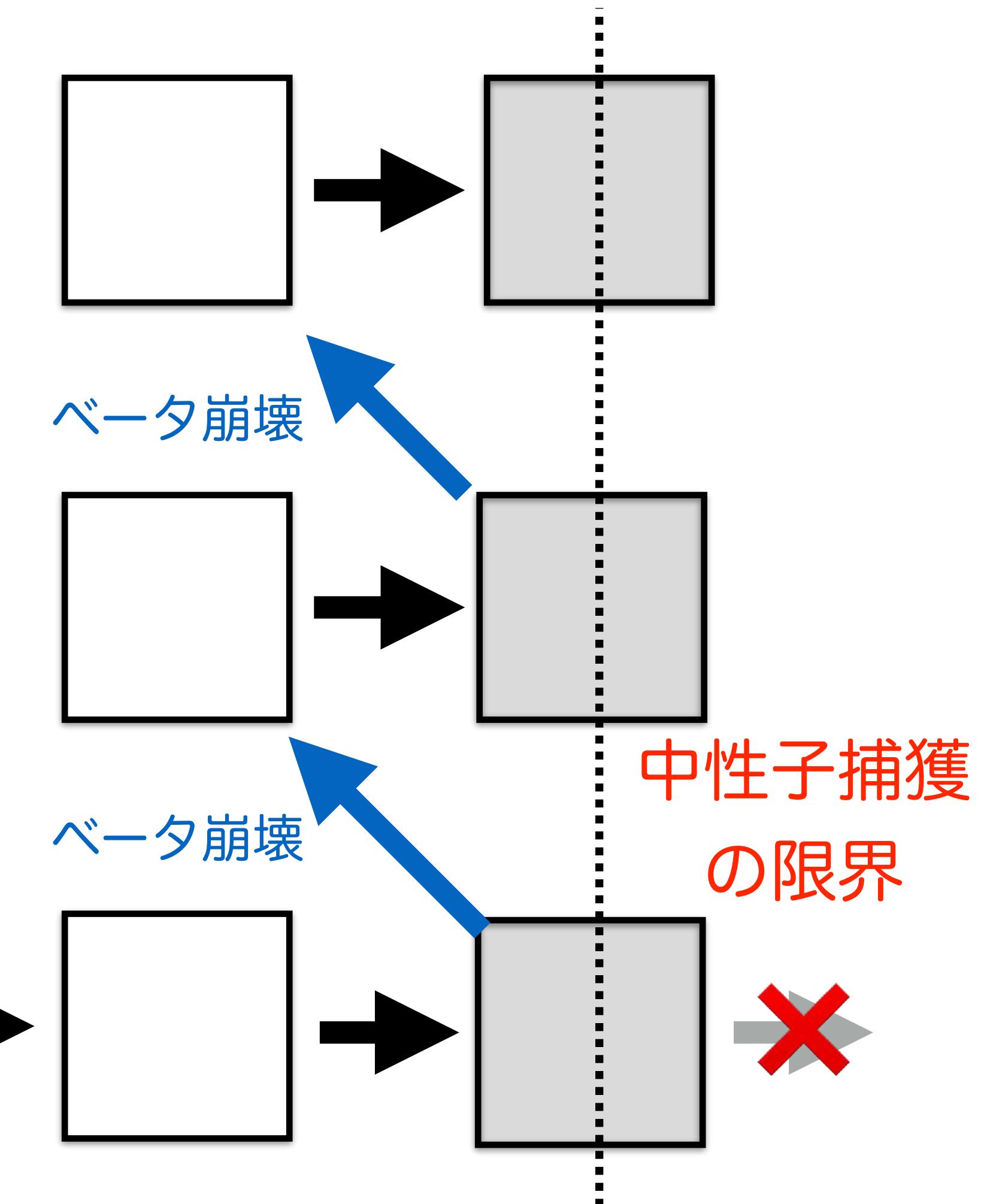
中性子捕獲 + β 崩壊の連鎖
により重い元素を作る

- ① 電荷のない中性子を捕獲
→ 重い原子核を作る



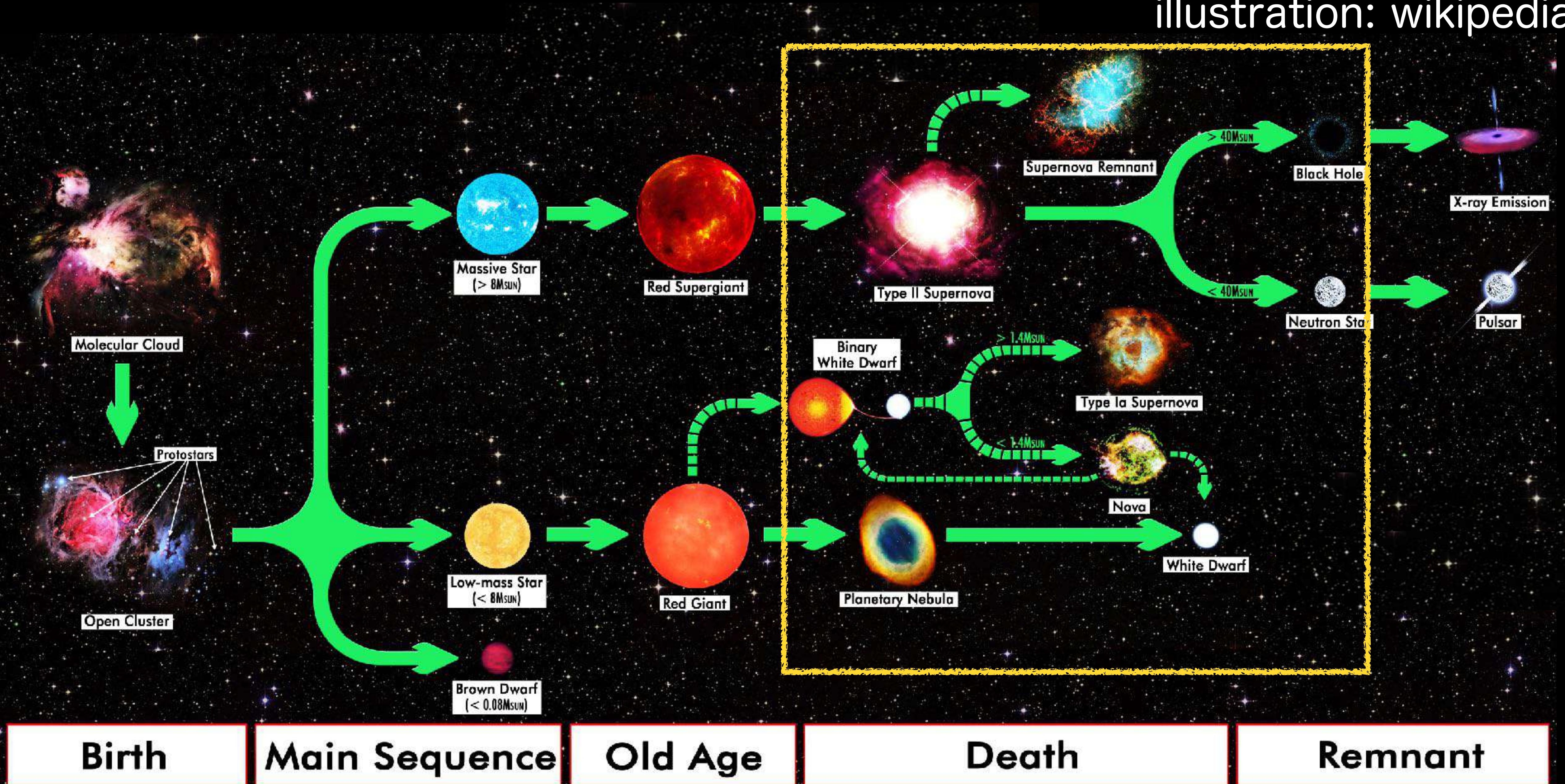
- ② 成長された（中性子過剰）
不安定核が崩壊する
→ 原子番号が増える

魔法数 (安定)



星のライフサイクル

illustration: wikipedia



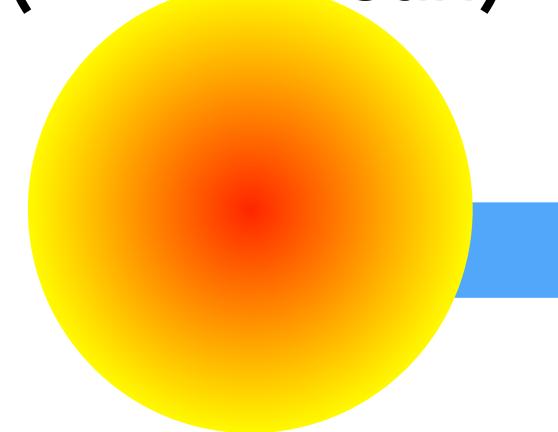
rプロセスが起こる天体现象？

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

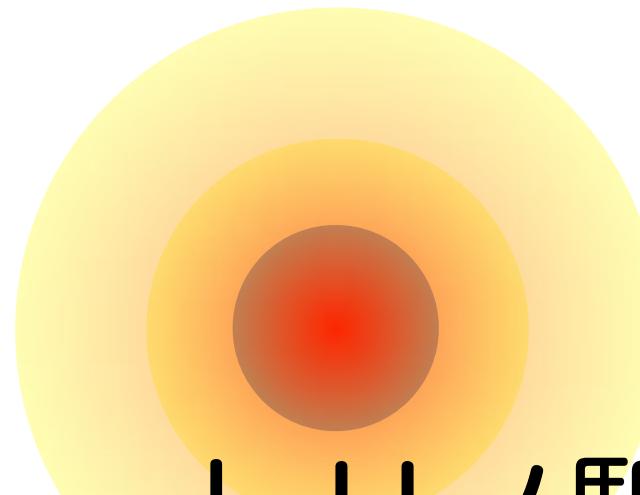
大質量星

($10 > M_{\text{sun}}$)



超新星爆発

原始中性子星

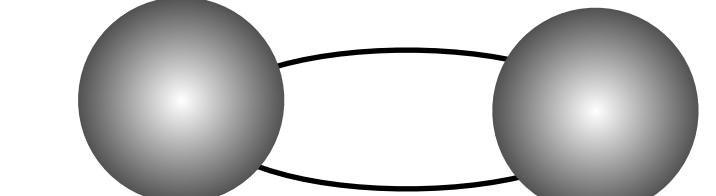


ニュートリノ駆動風

連星中性子星合体

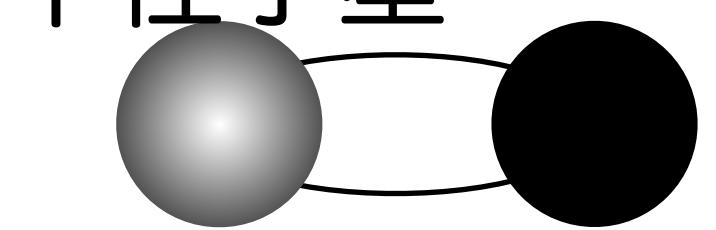
重力波と電磁波での「観測」
(GW170817)

中性子星 中性子星



中性子星連星

中性子星



(長期進化)

(長期進化)

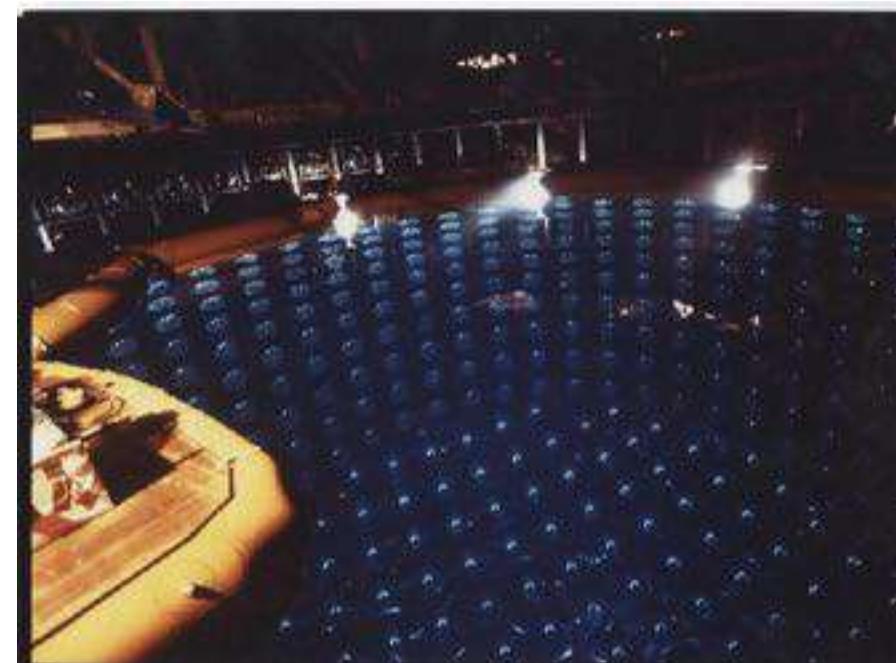
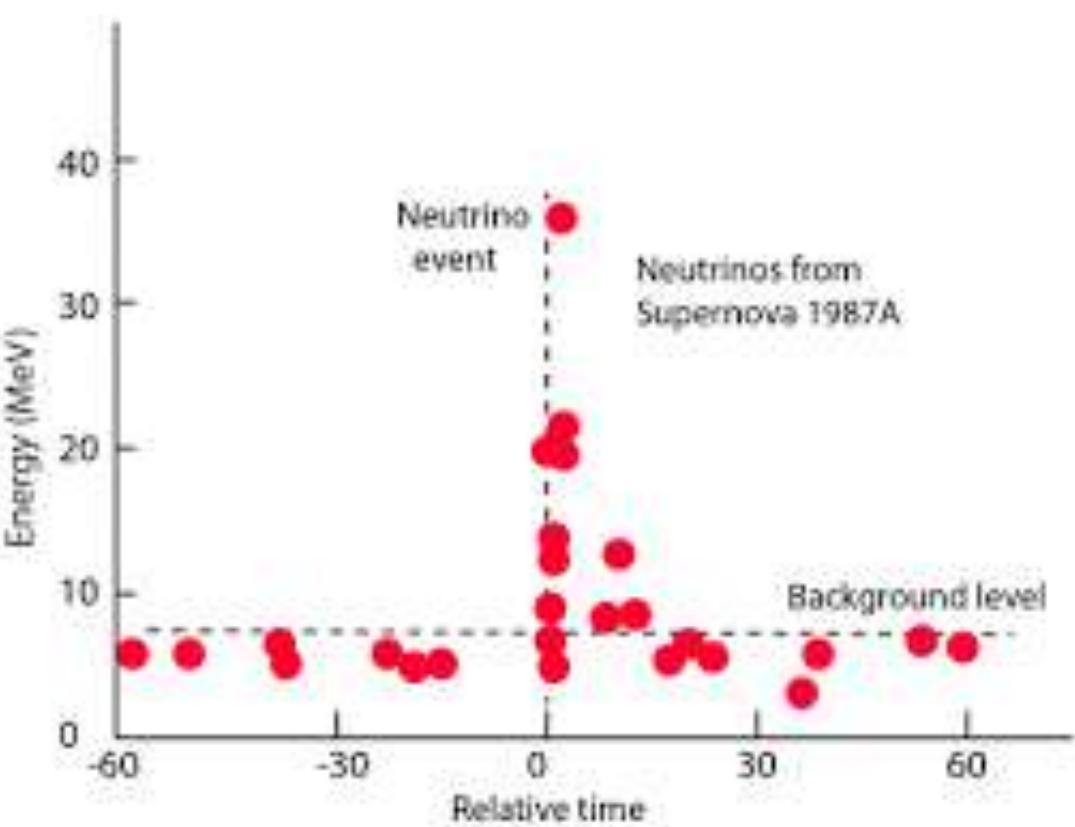
合体

ブラックホール

rプロセス天体とマルチメッセンジャー観測

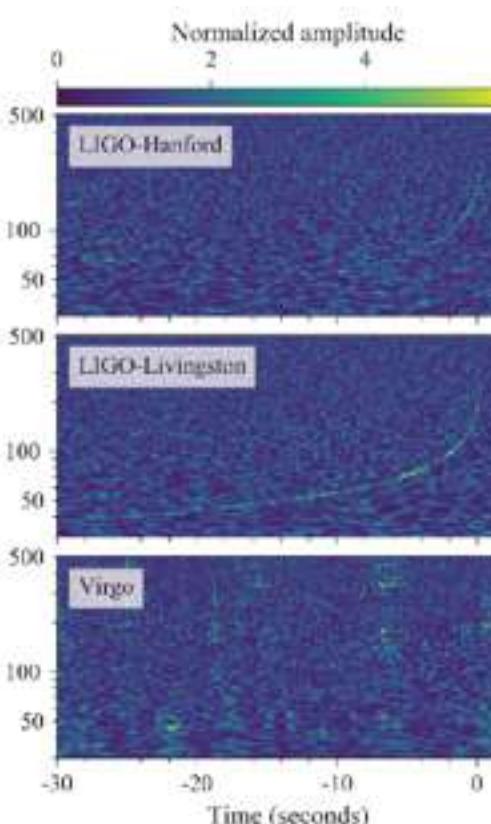
rプロセス元素の天体をめぐる研究は、実は、マルチメッセンジャー天文学
(多波長、多粒子観測) と深い関係にある

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)

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

1 body (decay)

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

2-body reaction

(incl. $2 \rightarrow 2$)

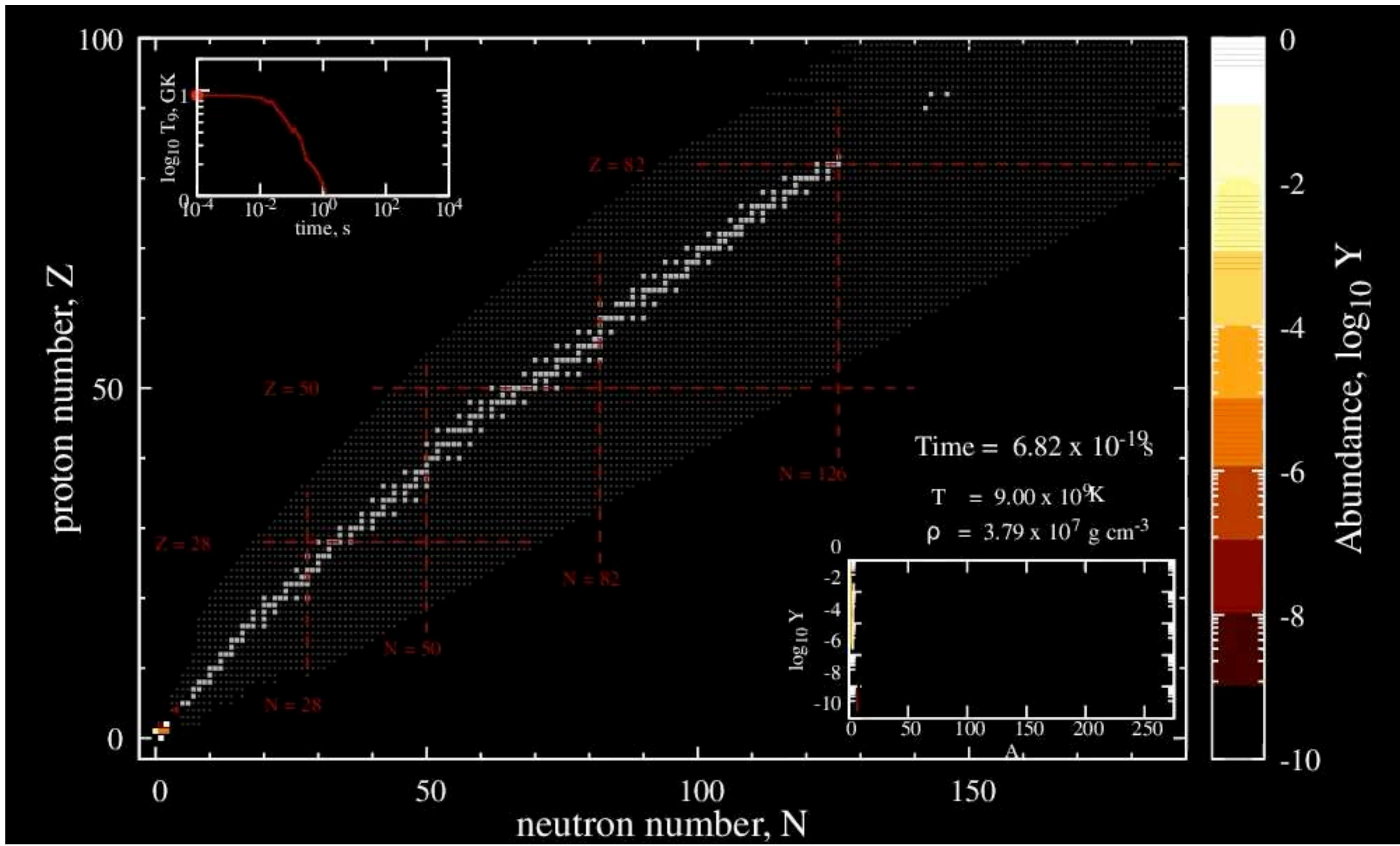
main nuclear reactions
 n -induced decay

3-body reaction

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

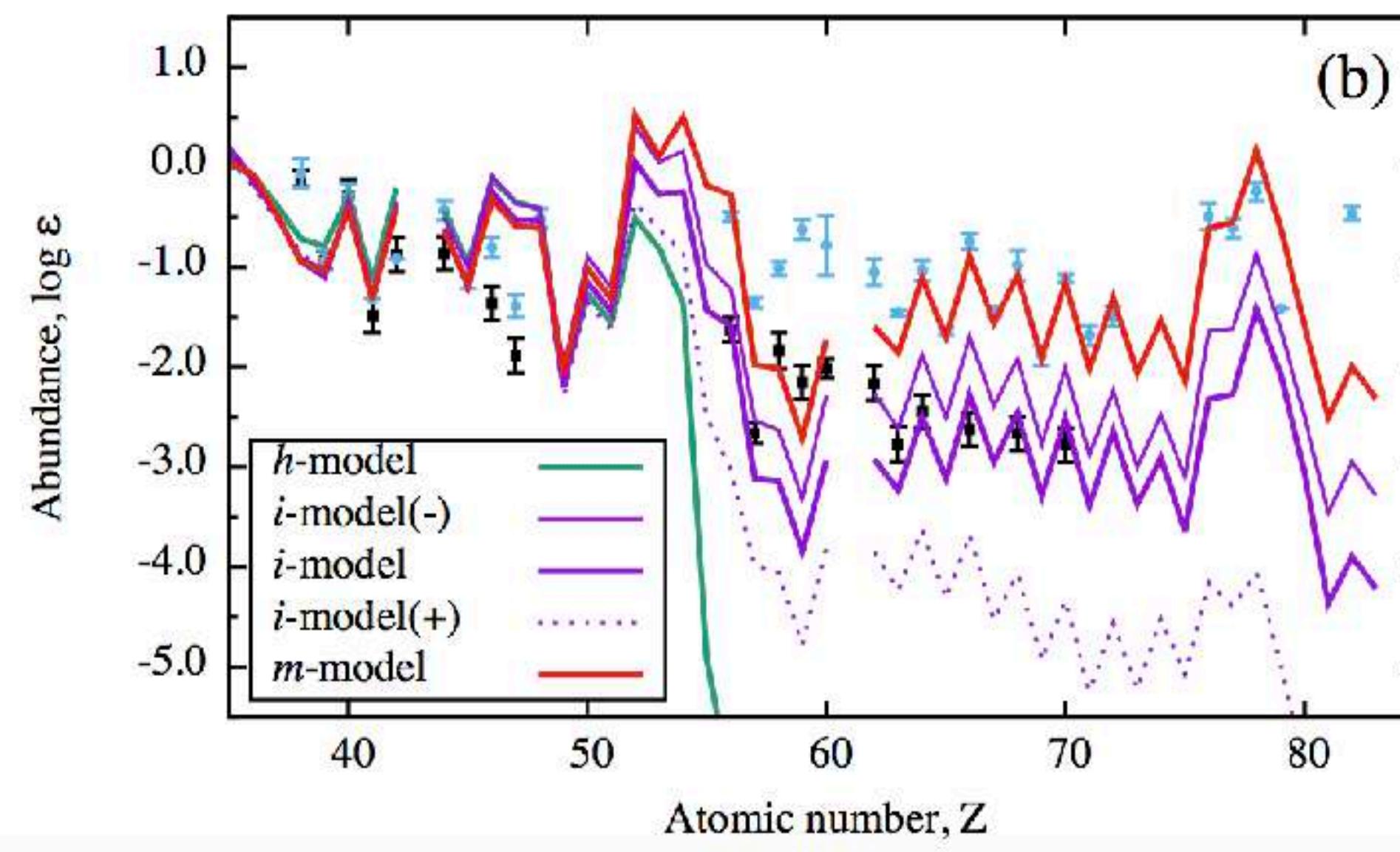
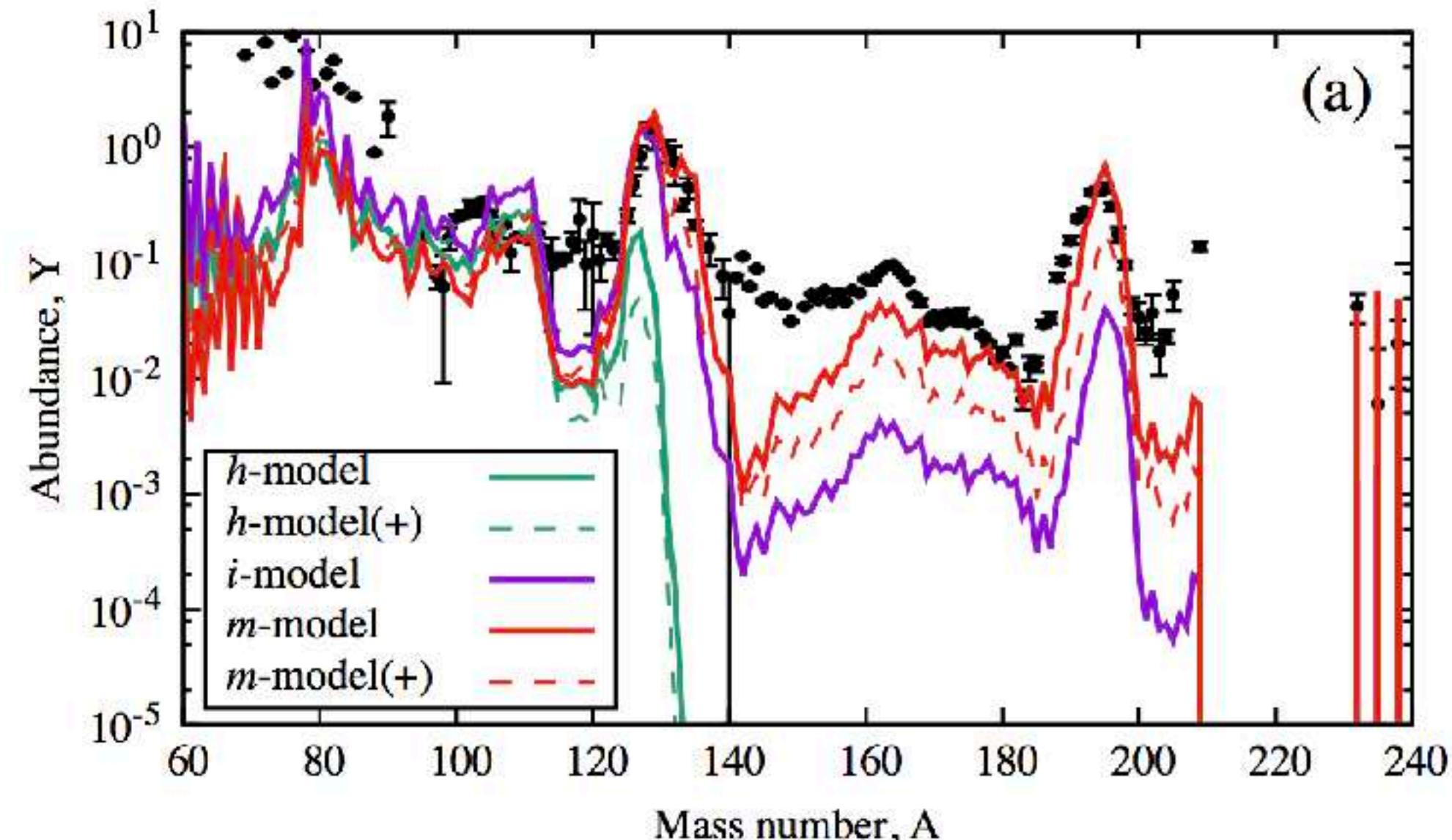
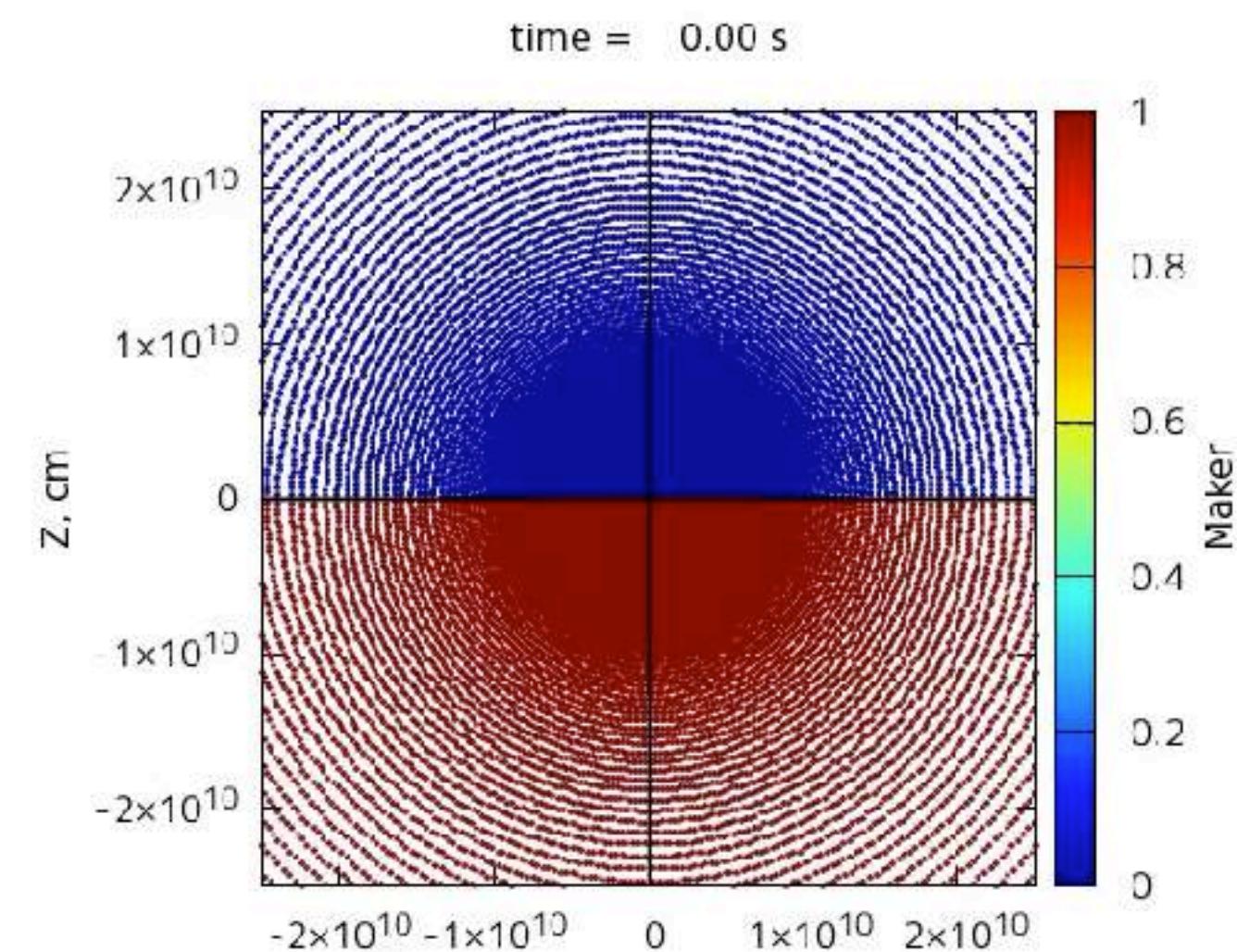
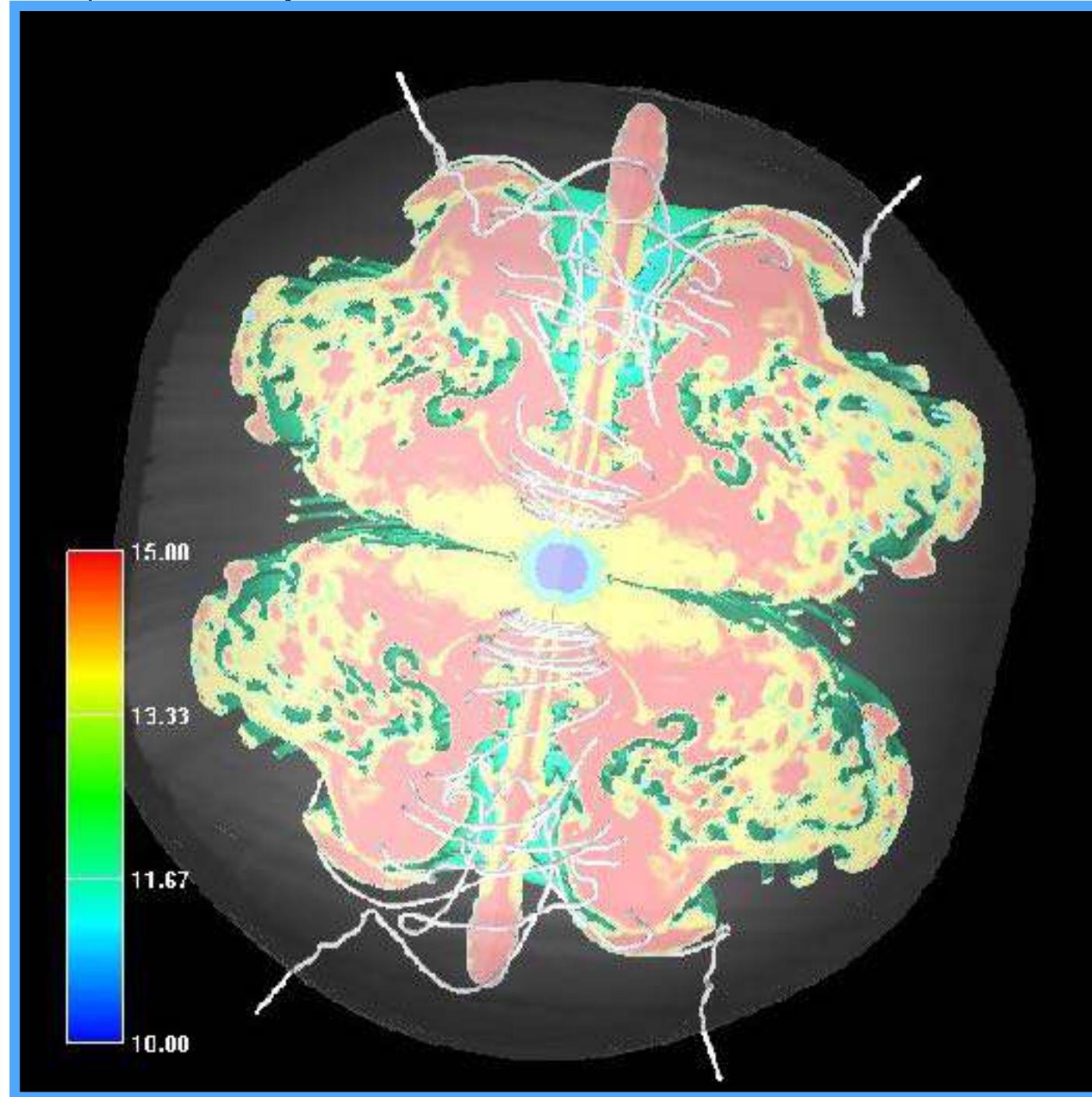
triple- α , (α, α, n)

rプロセスと元素合成



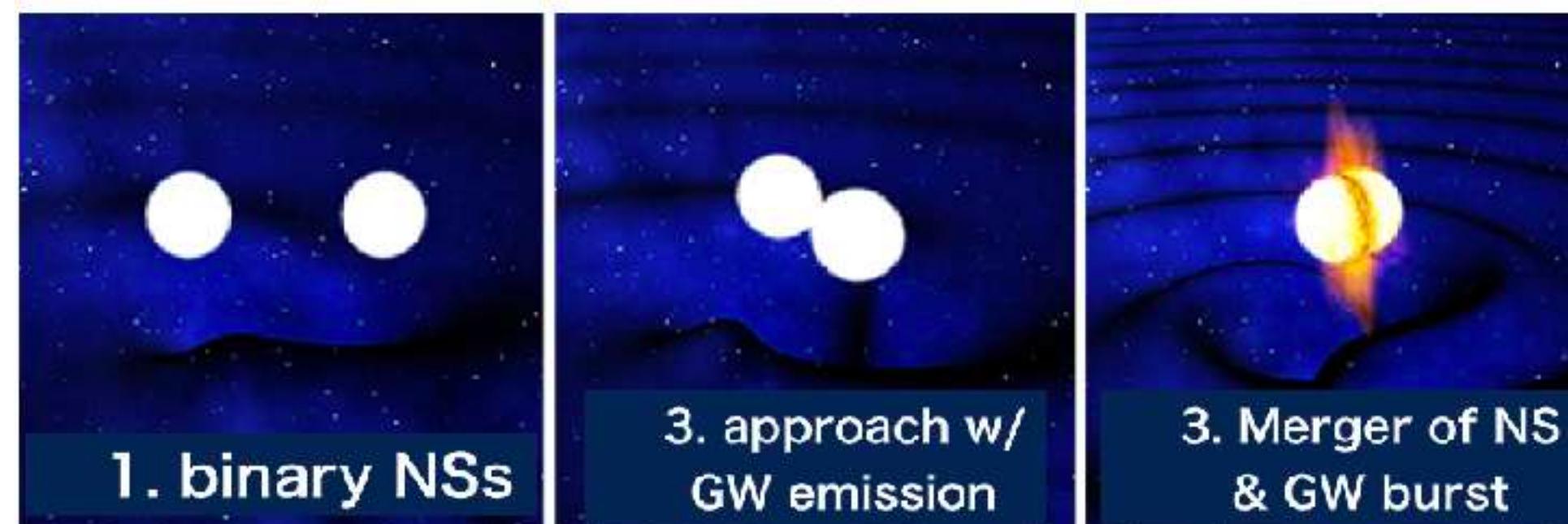
現実的天体モデルでのrプロセス

NN+(2015, 2017)

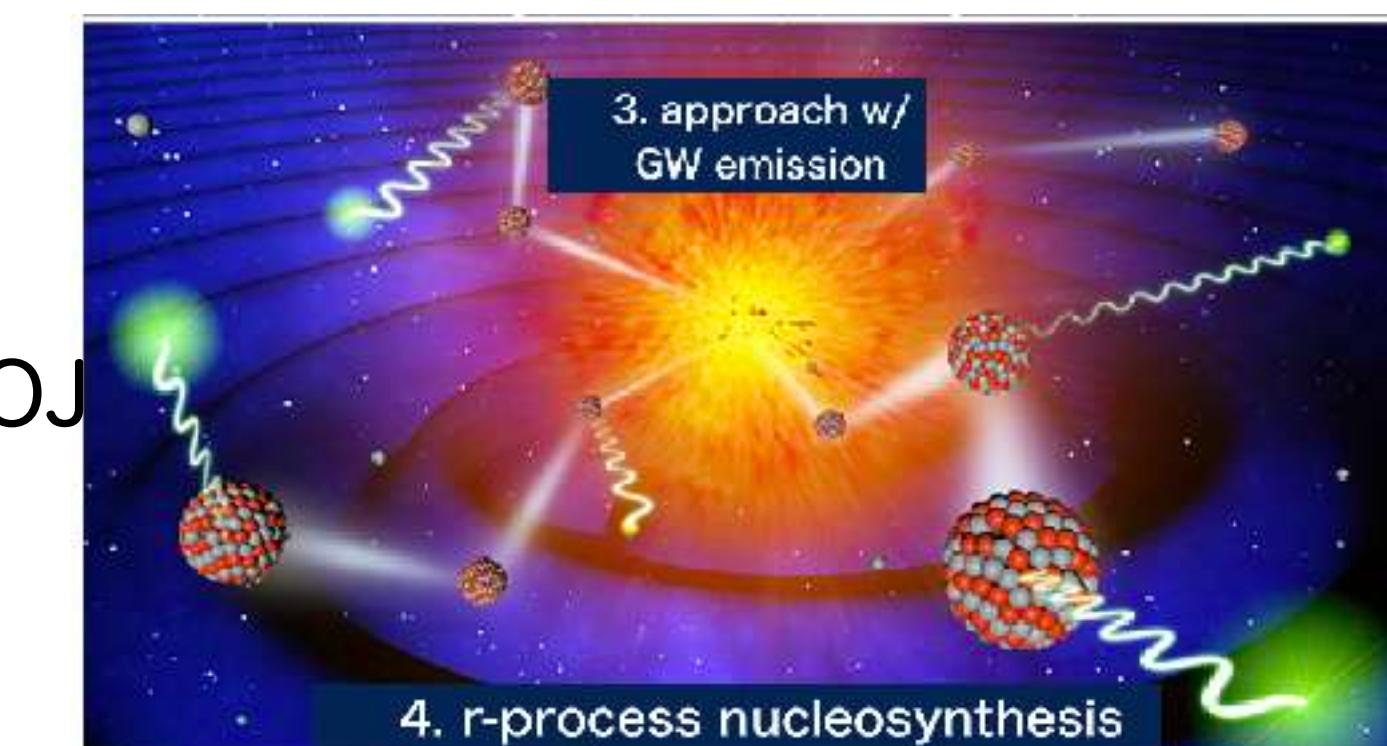


rプロセス天体：中性子星合体の「観測」

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)



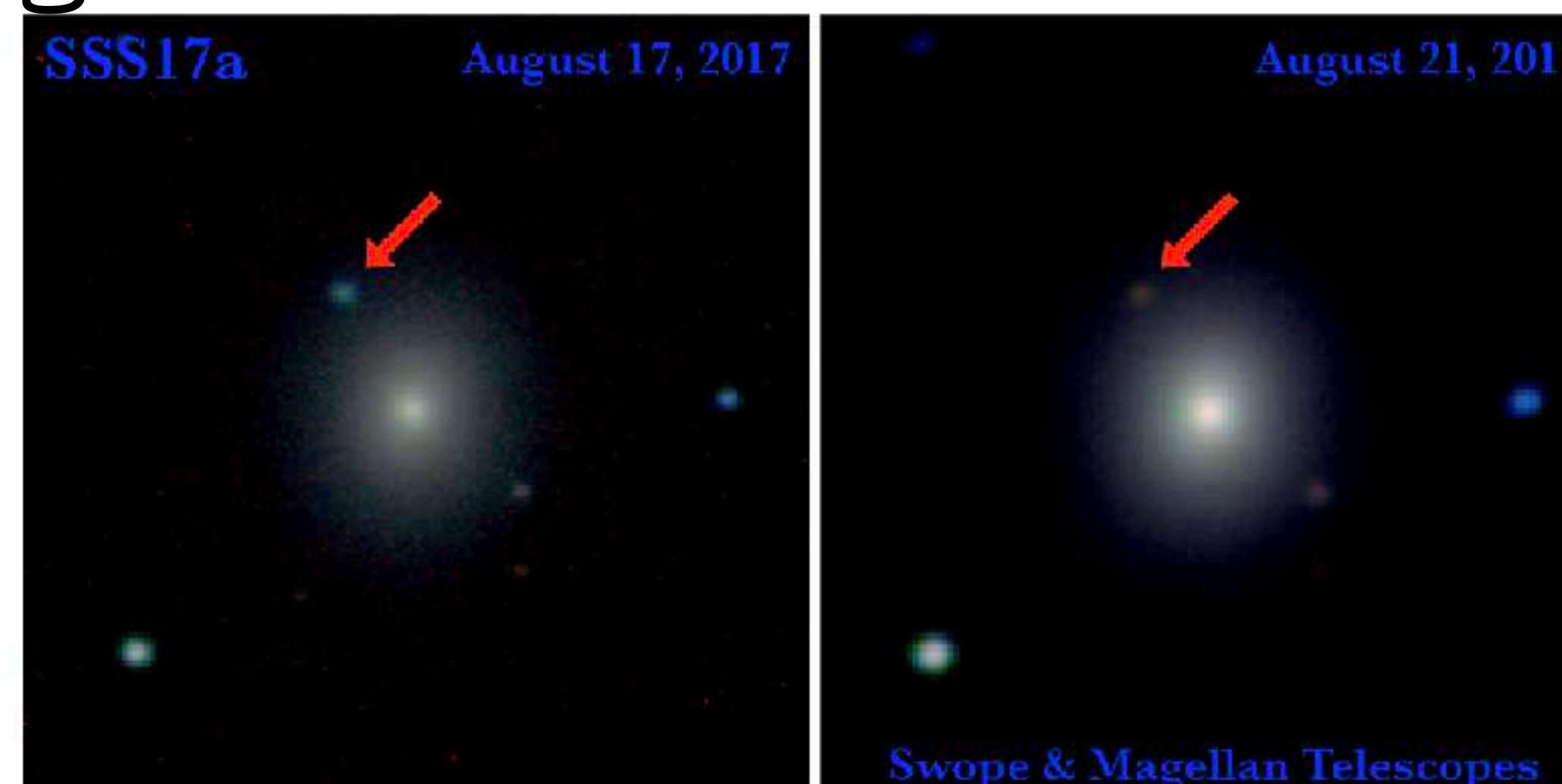
credit NAOJ



天体シナリオの理解が一気に進む

NGC4993 (39.5Mpc)

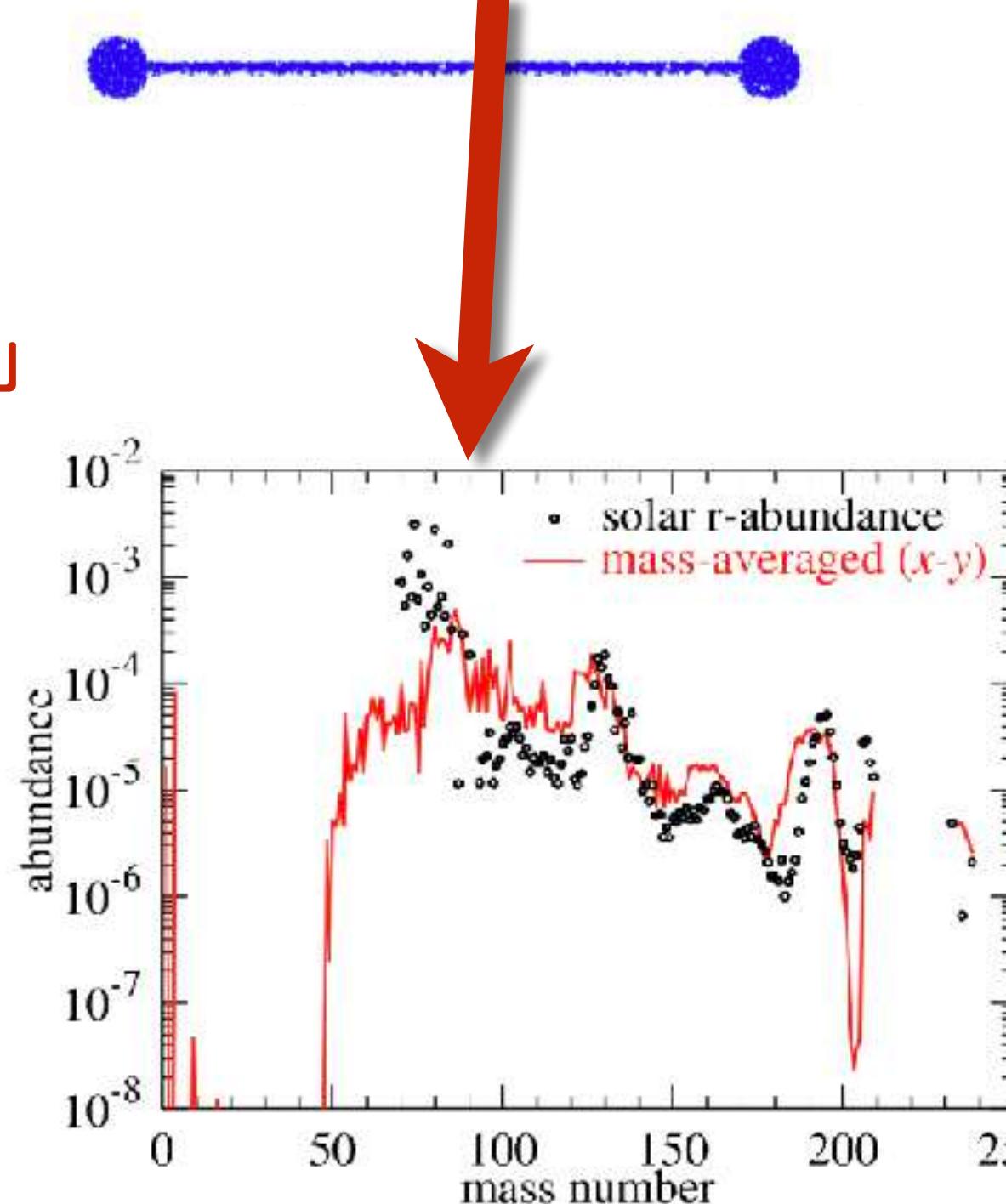
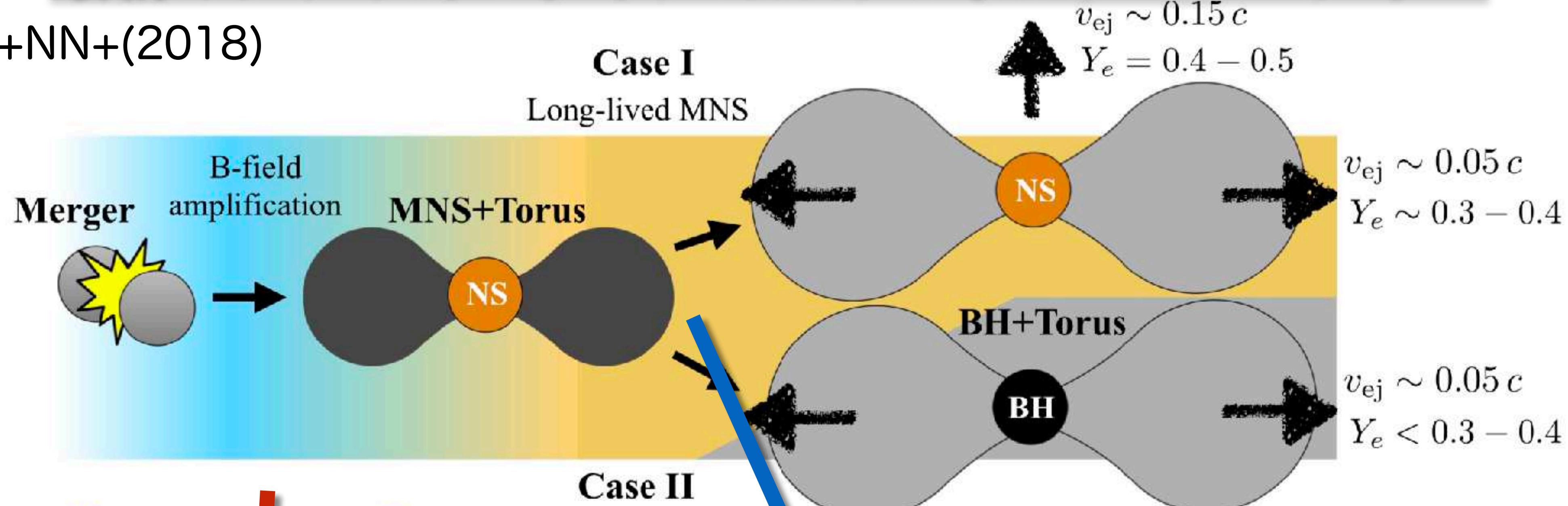
「キロノヴァ」の光
最初の発見 (8月17日)
から徐々に減光 (21日)



By Magellan telescope; Drout+2017, Science

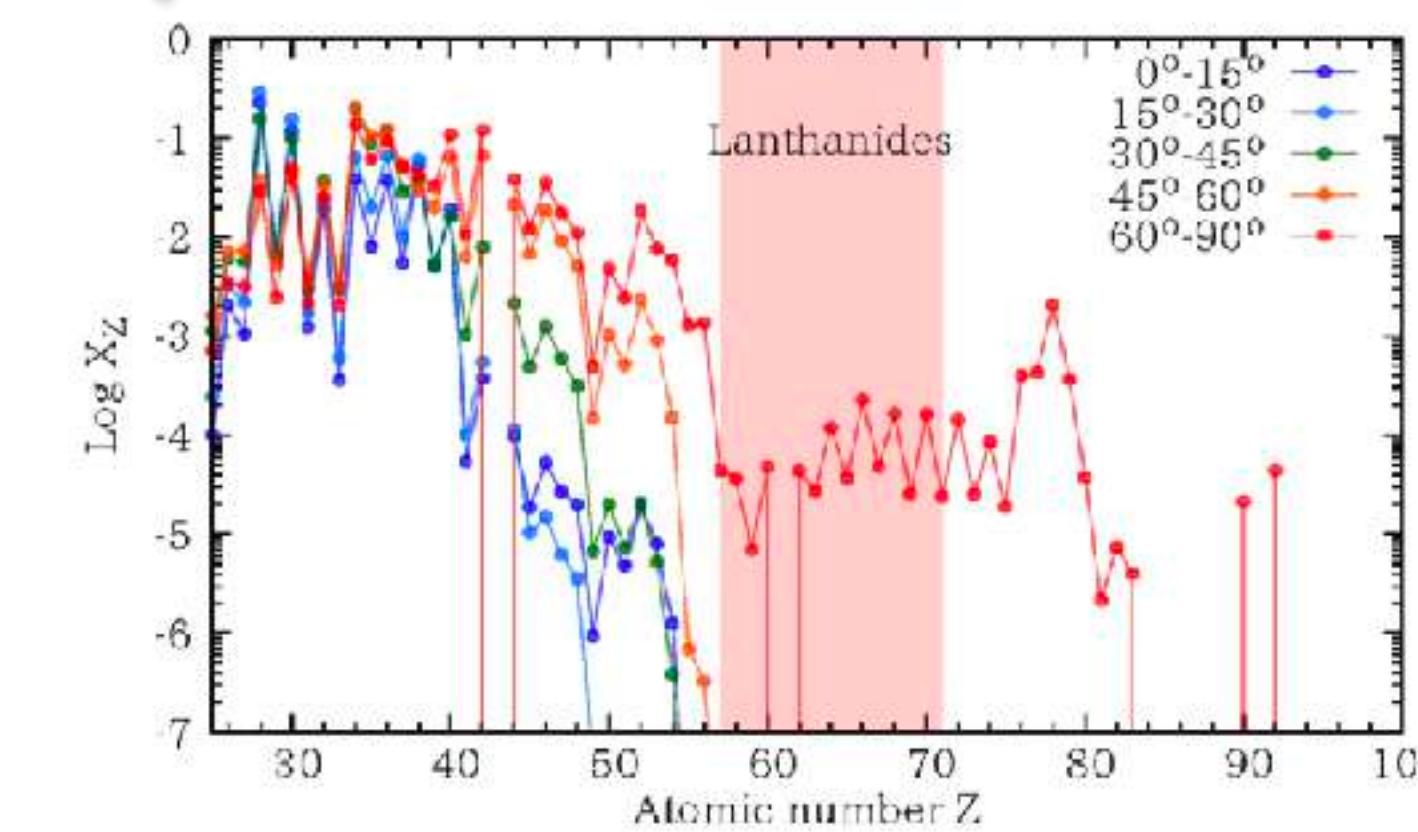
最新のシナリオ：ダイナミカル+ポスト・マージャー

Fujibayashi+NN+(2018)



「ダイナミカル」
な質量放出

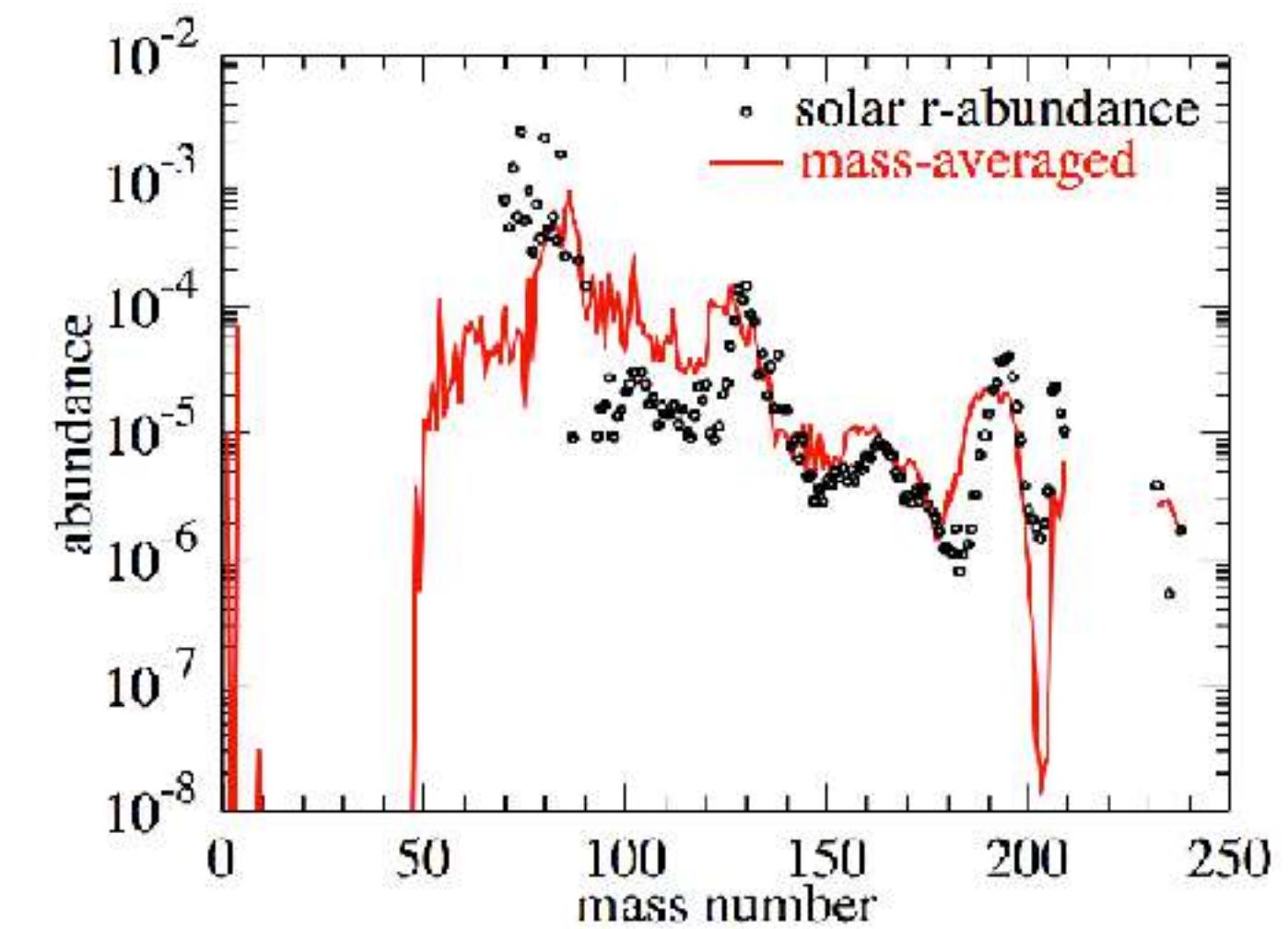
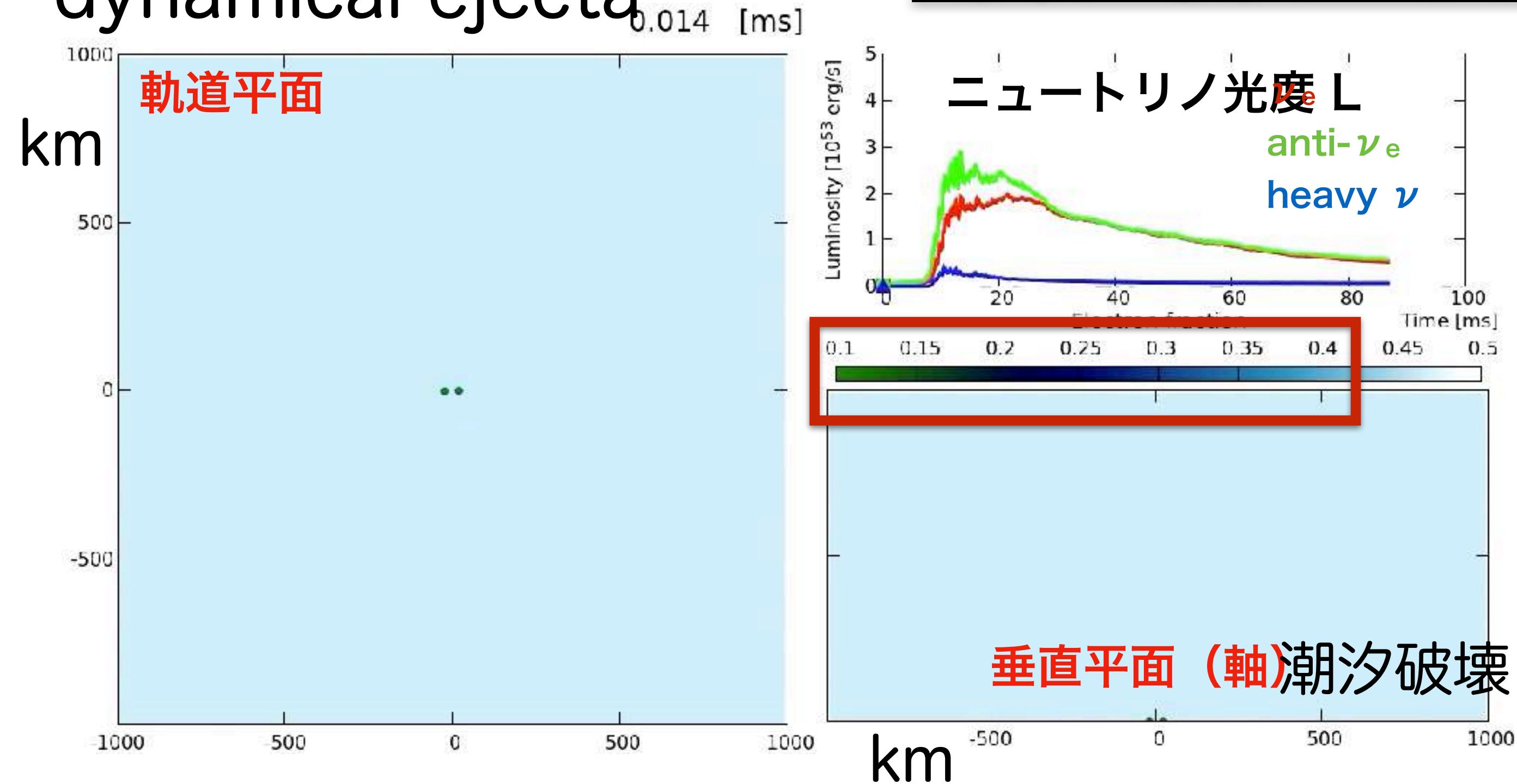
ポスト・マージャー（合体）



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

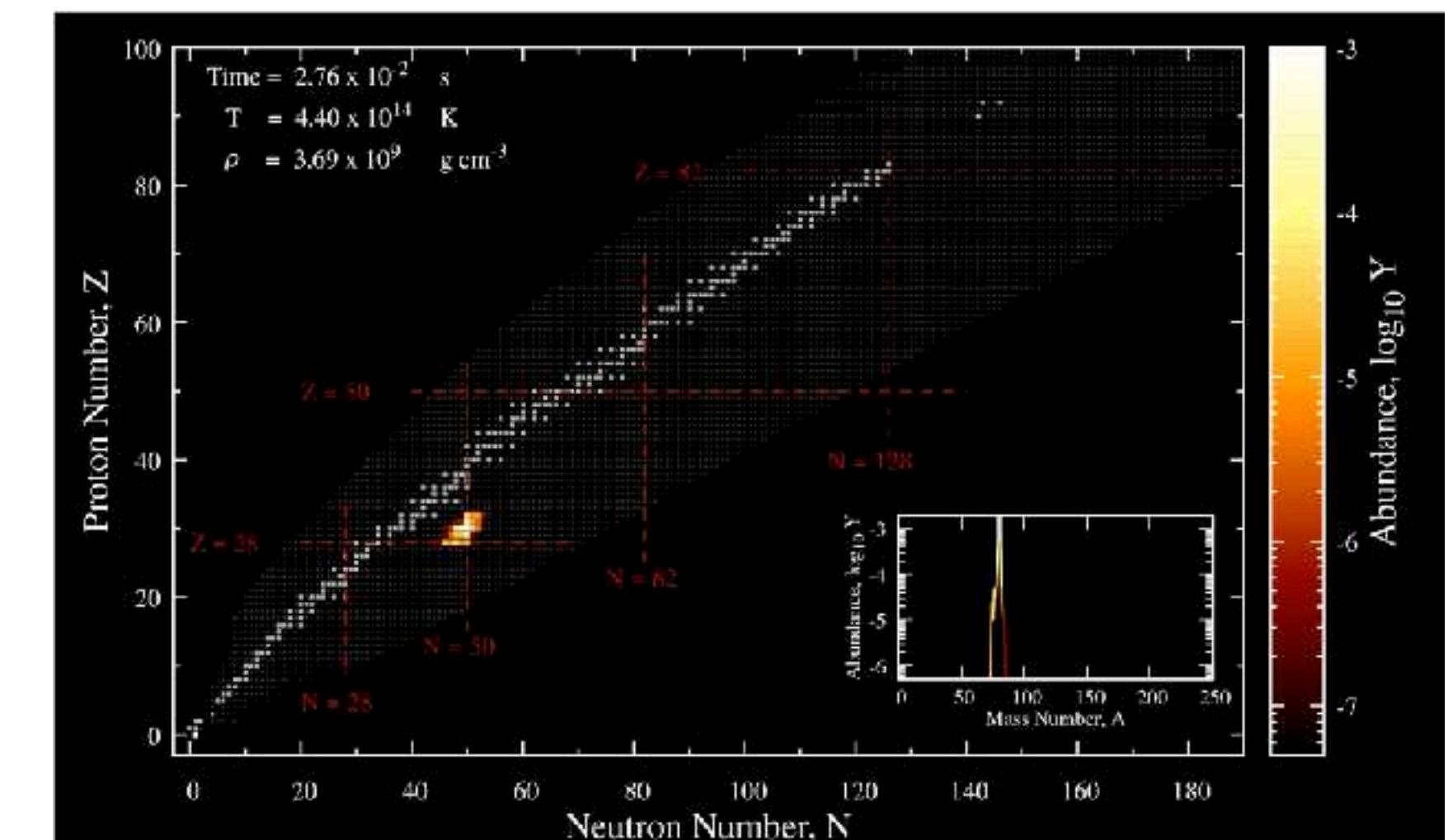
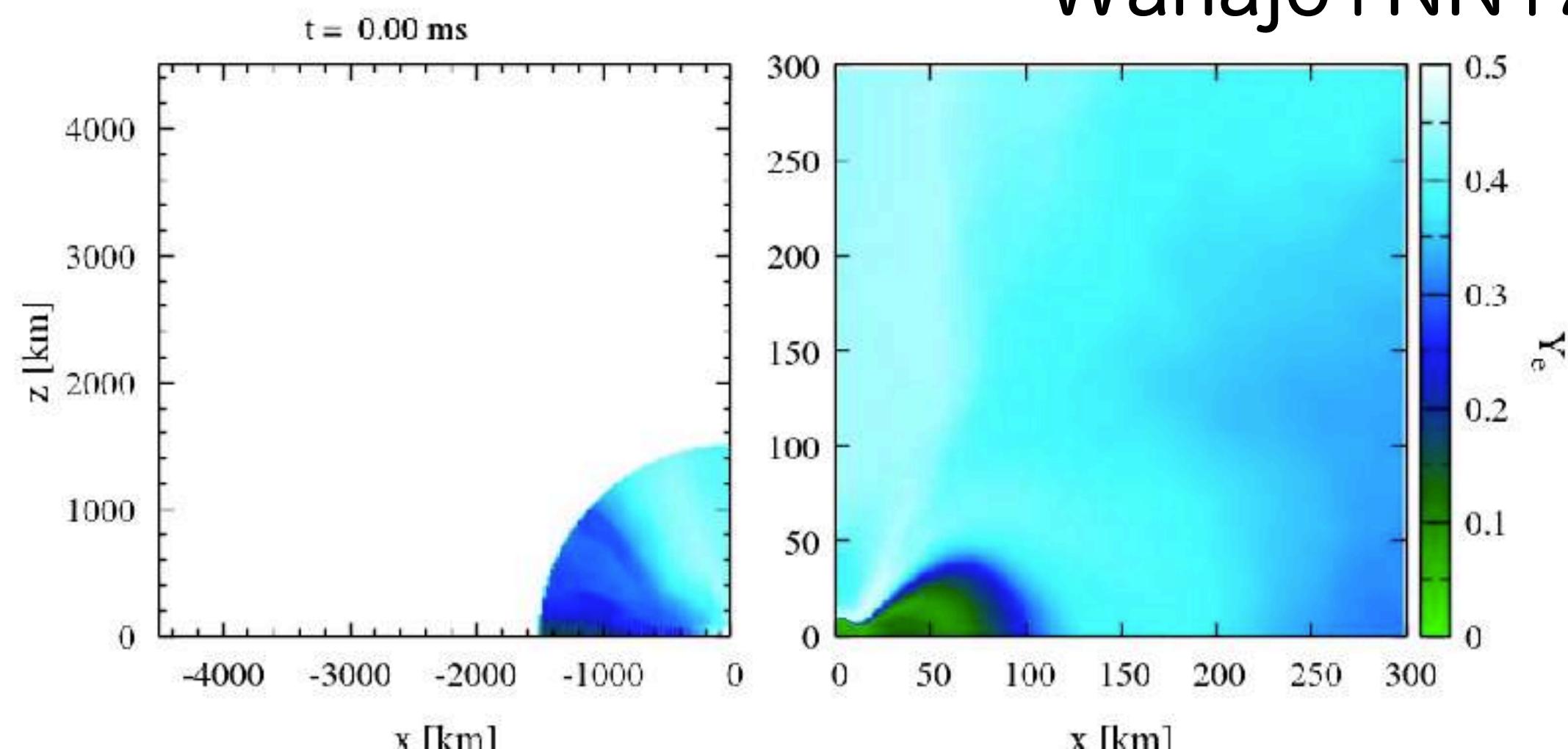
dynamical ejecta

それぞれのrプロセス

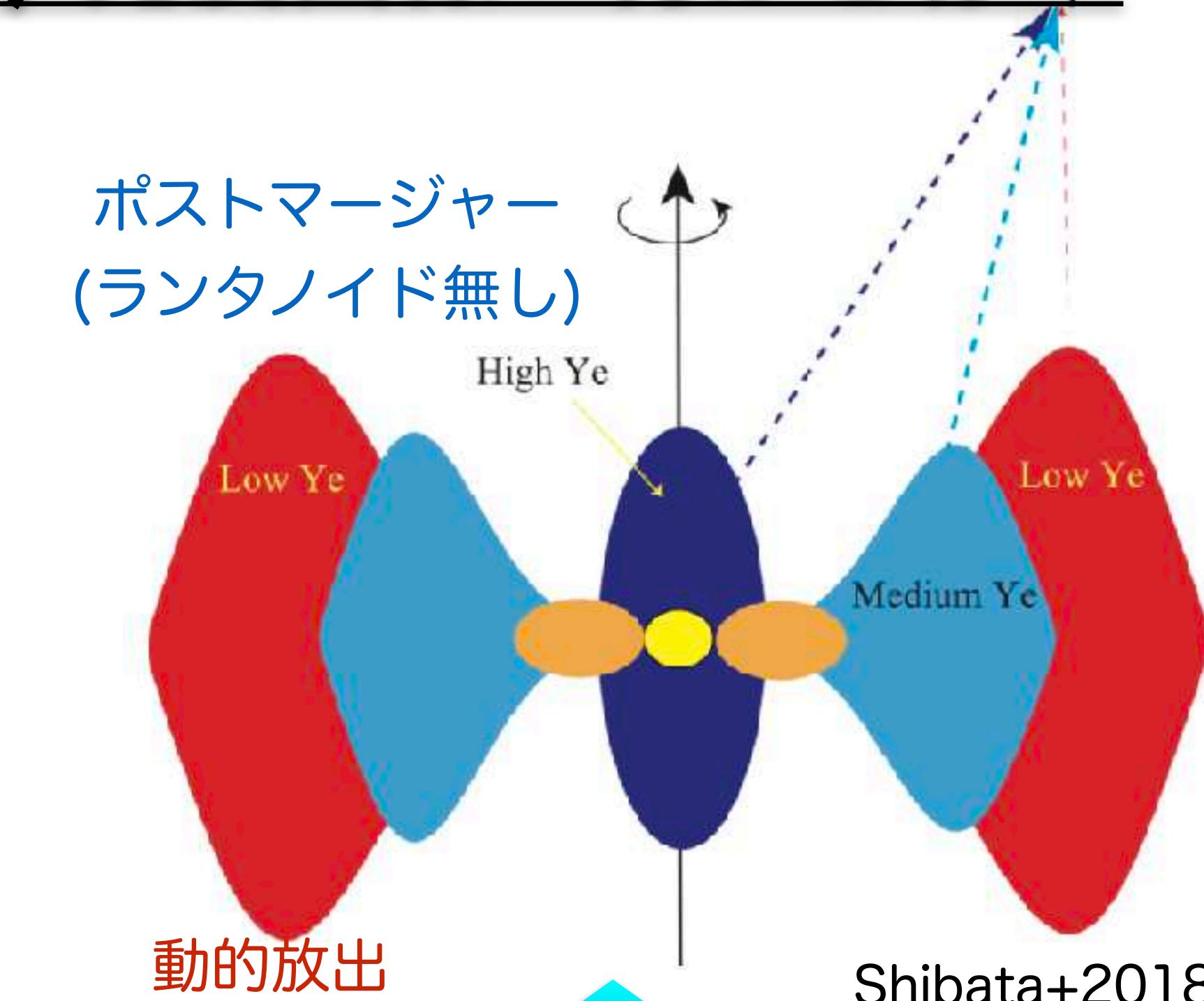
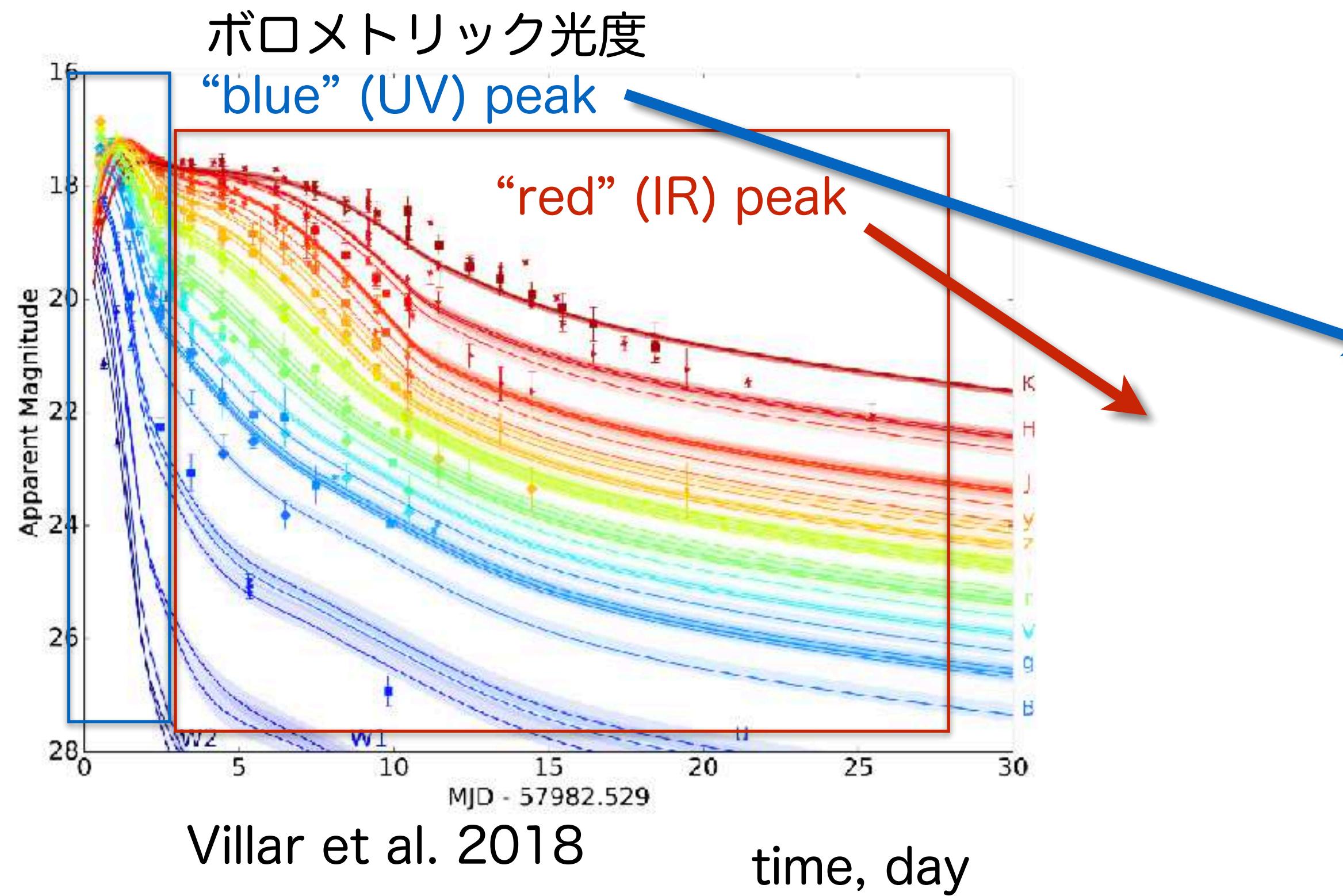


post-merger ejecta

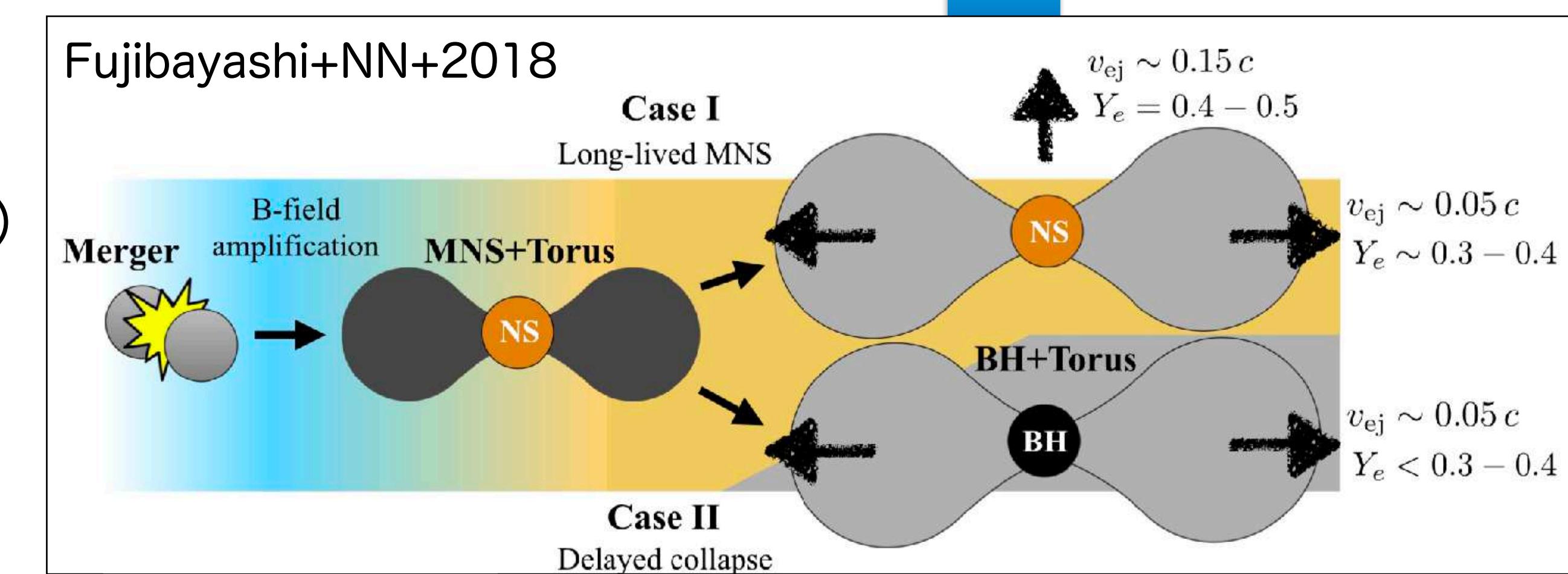
Wanajo+NN+2014



キロノヴァ(AT2017gfo) 光度曲線：青から赤へ

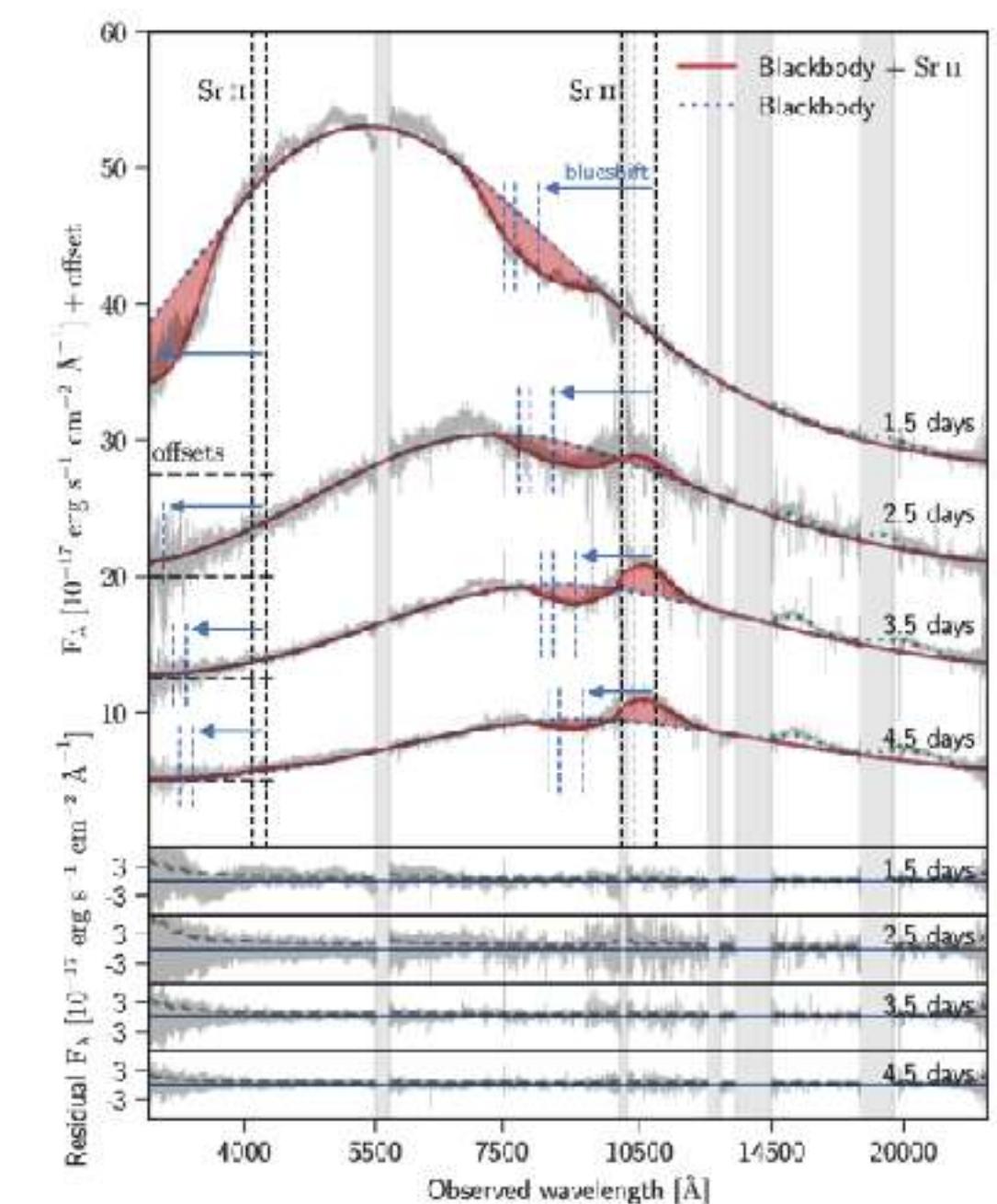
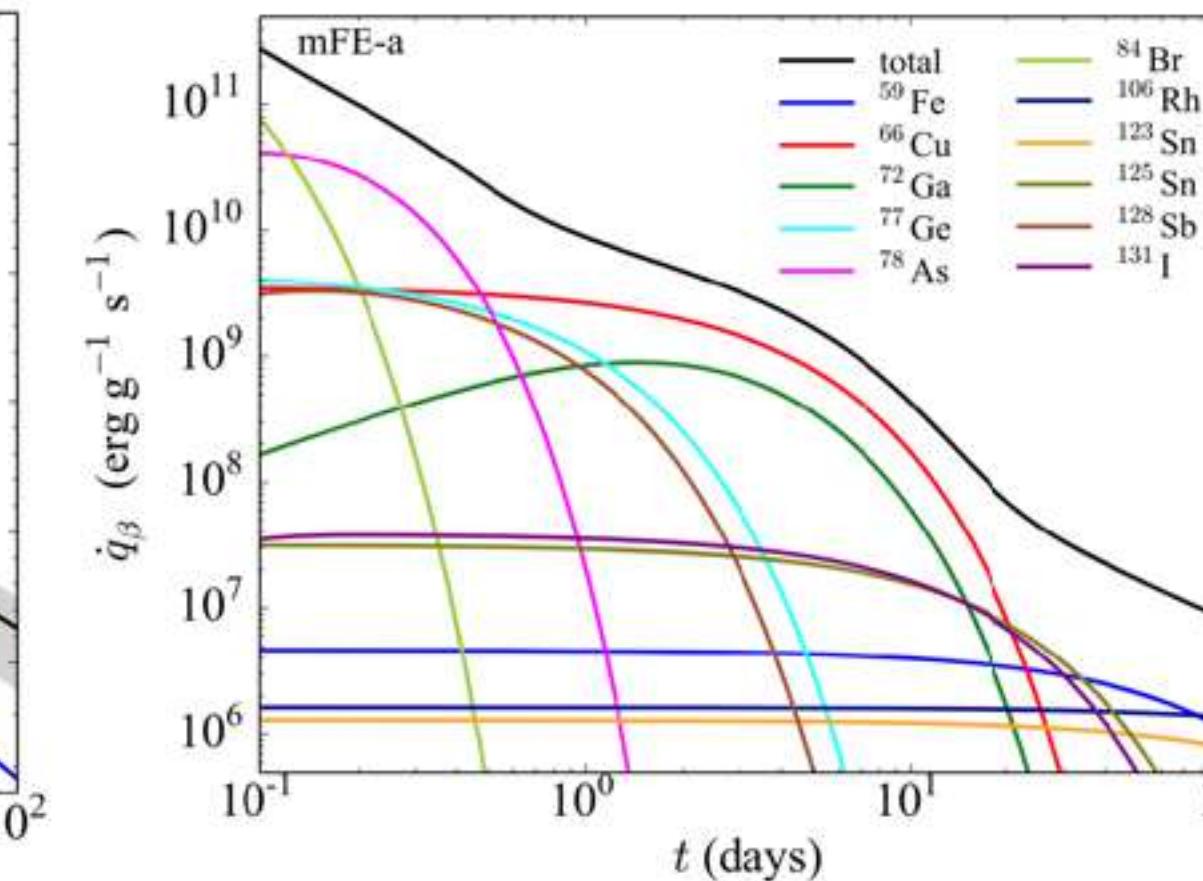
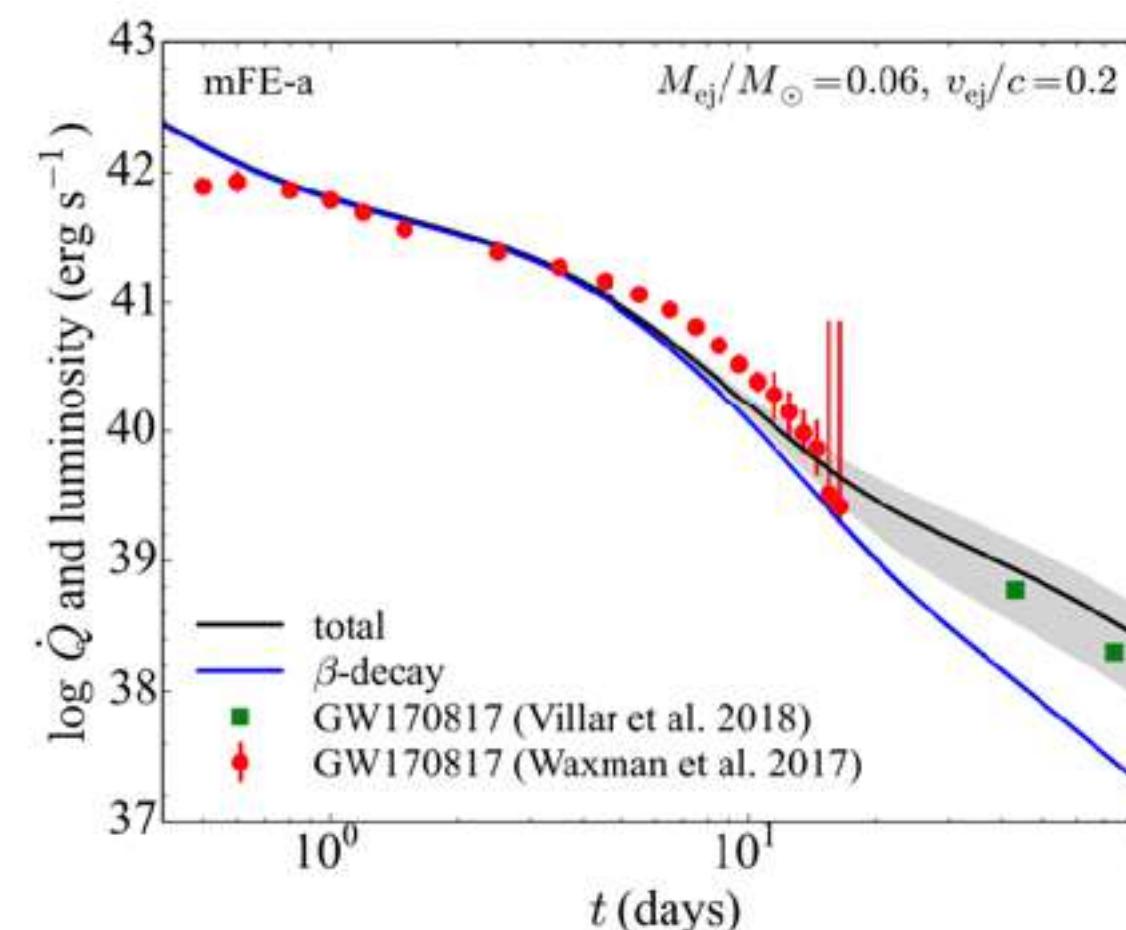


連星中性子星合体のシナリオ
(合体・放出シミュレーション)



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プロセス天体现象の初めての検証
- ・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
 - ・ああああああああ
 - ・どの崩壊が効くか？



rプロセス：多様化する銀河化学進化

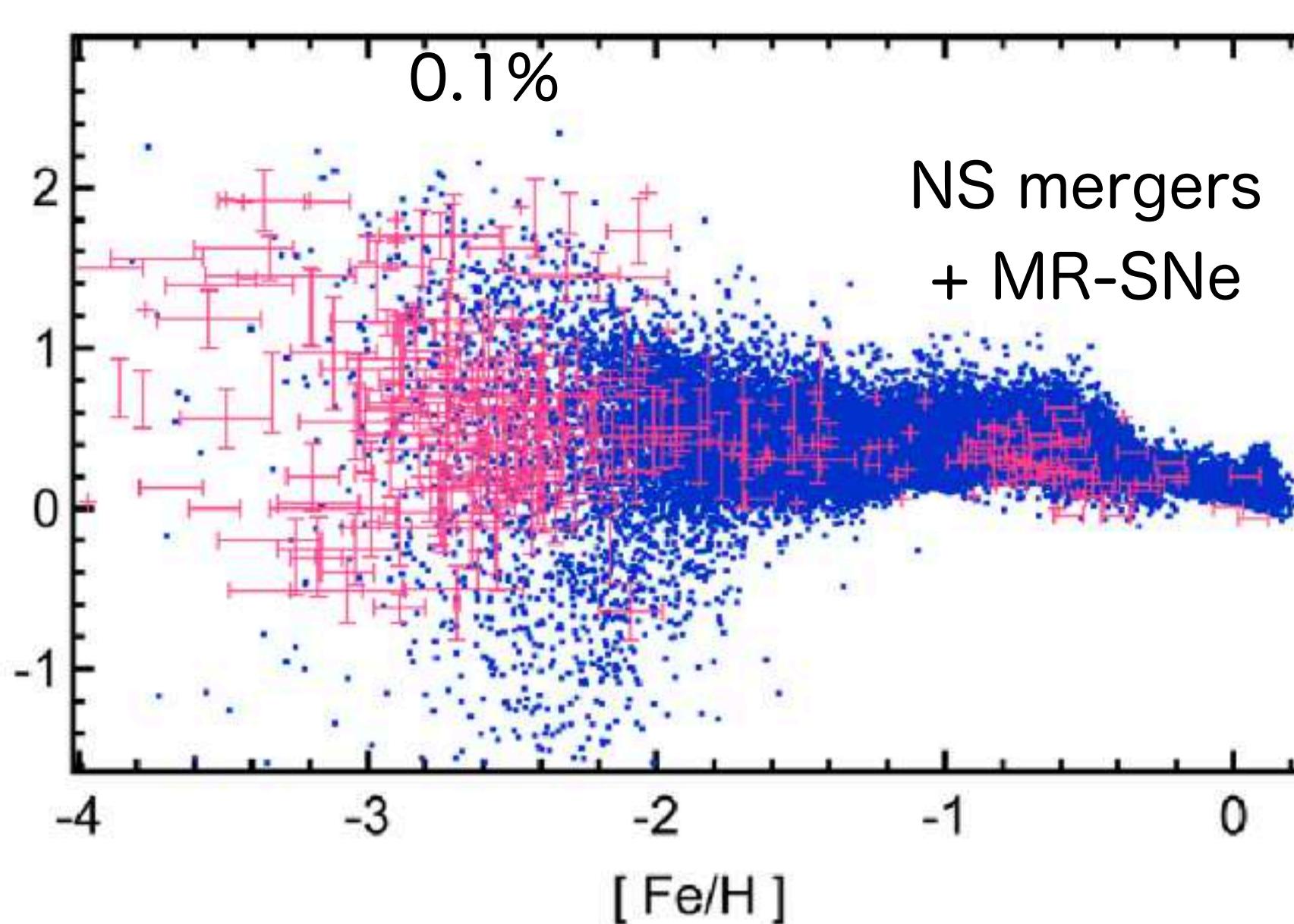
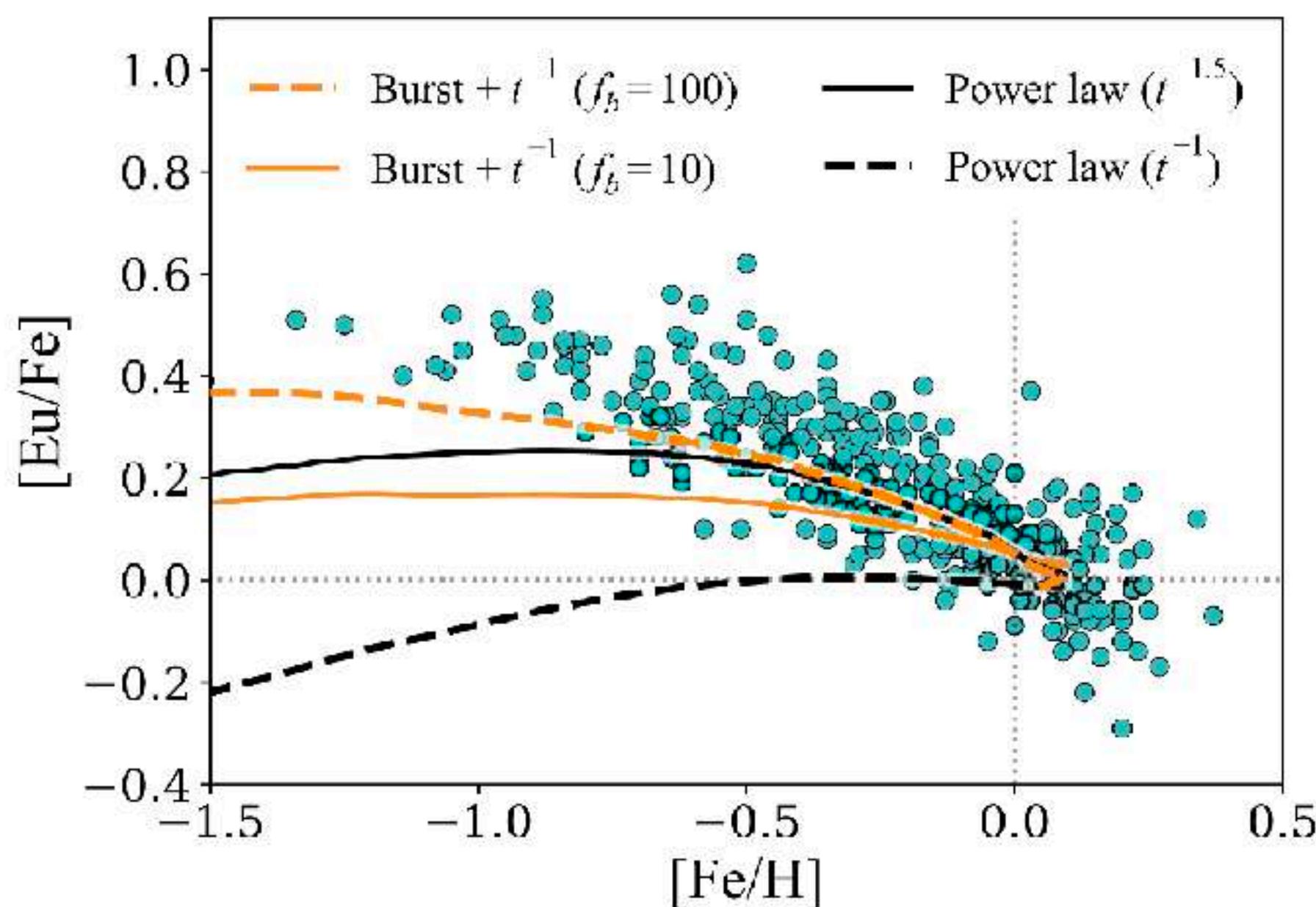
中性子星合体だけでrプロセス元素 (Euなど) の銀河化学進化を説明できるか?

→ 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

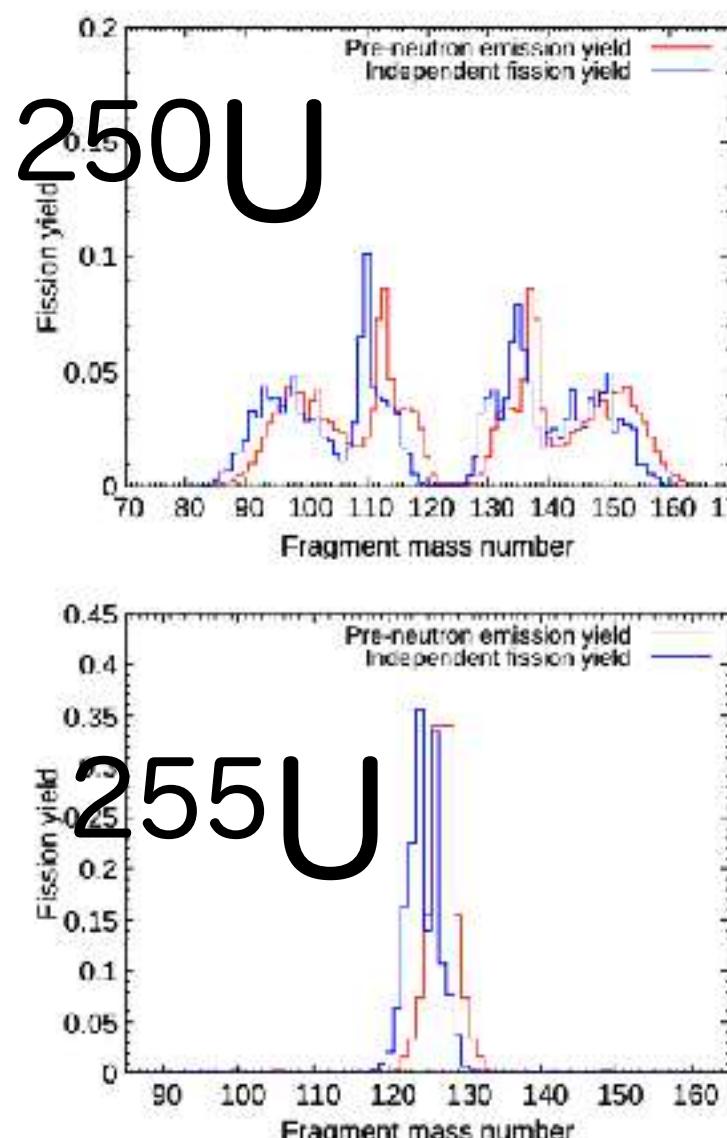
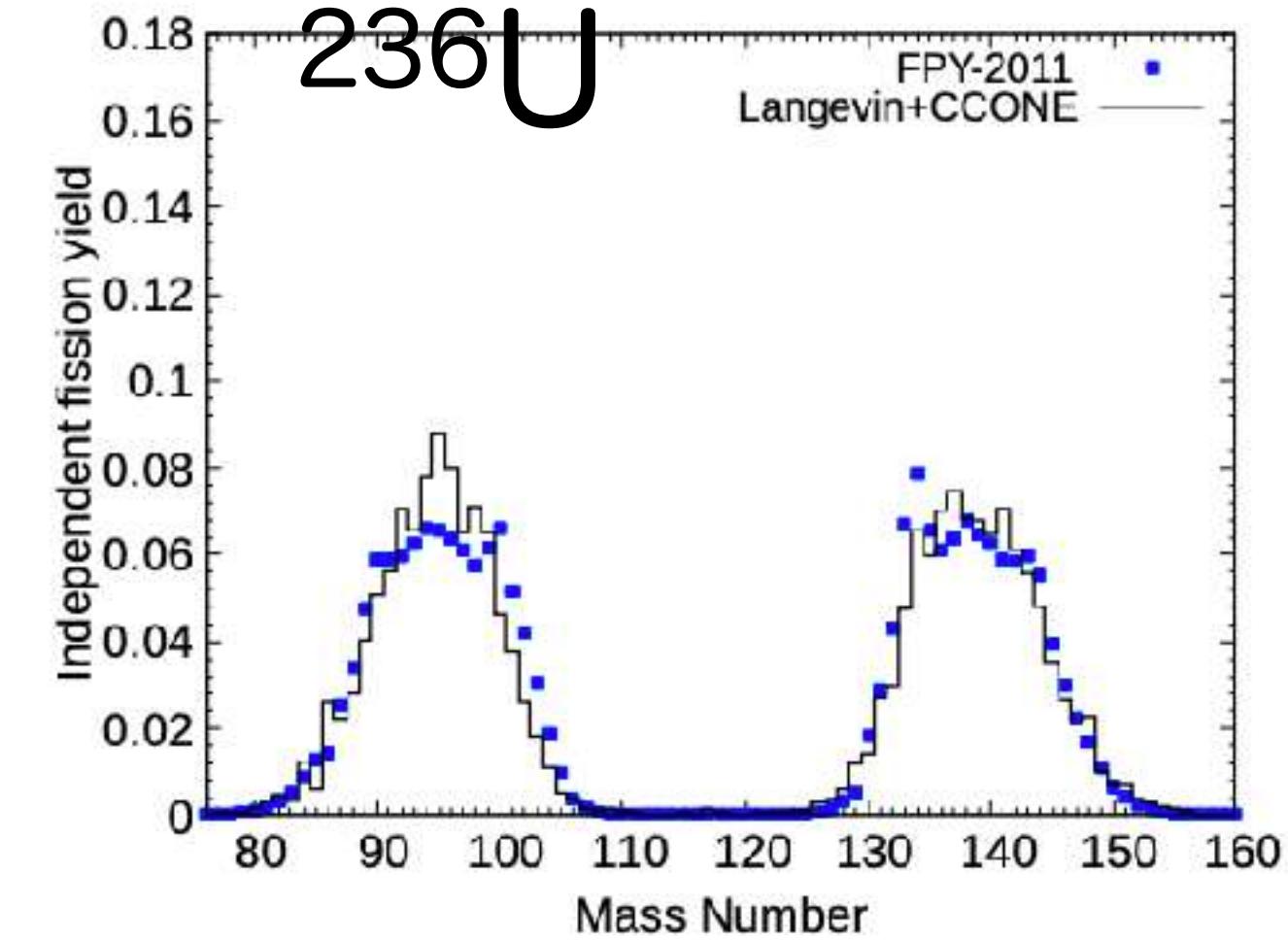
核理論のinputを洗練

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（科研費ポストドク）

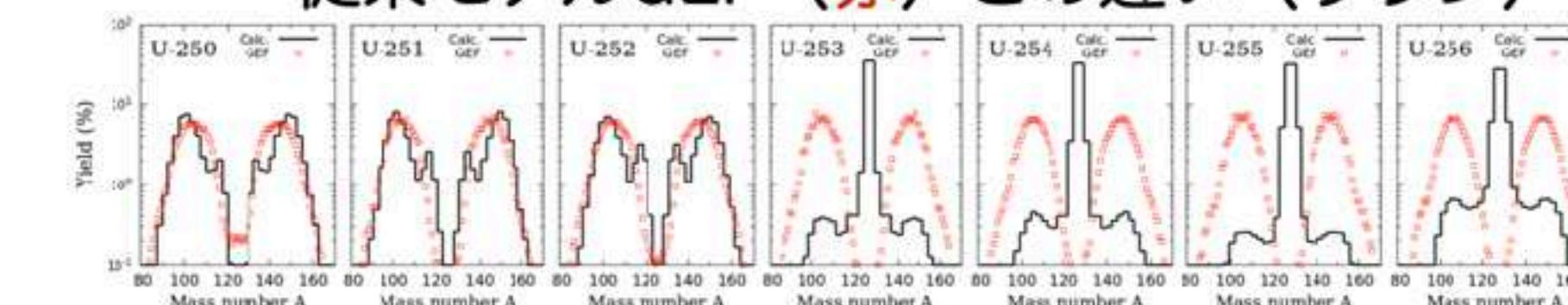
Tanaka, NN, Minato 2023, PRC



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

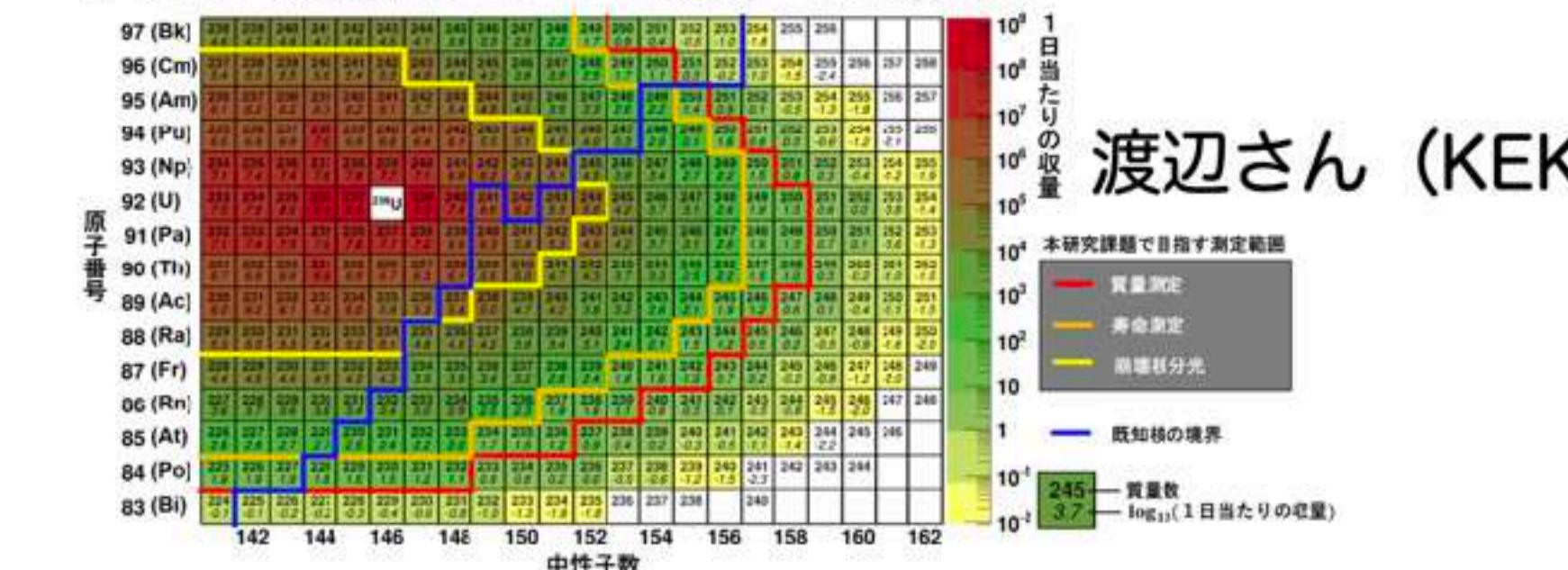
従来モデルGEF (赤) との違い (ウラン)



→ 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



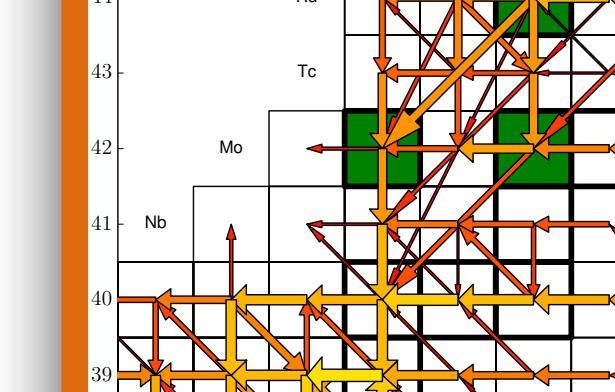
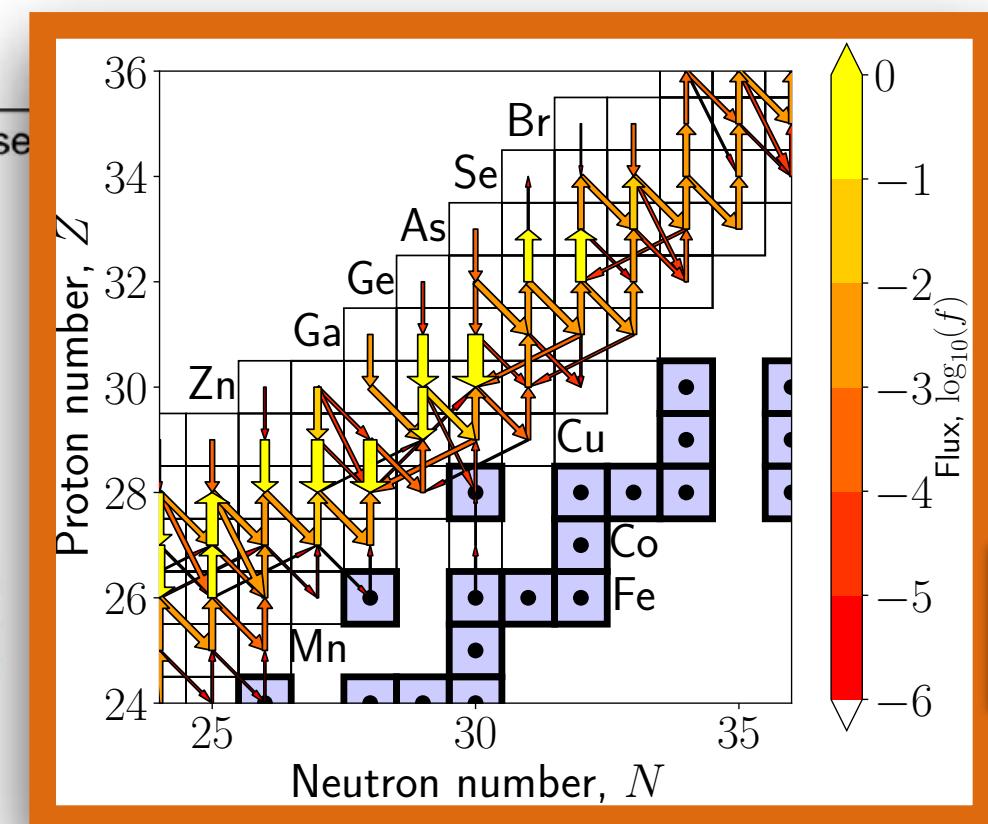
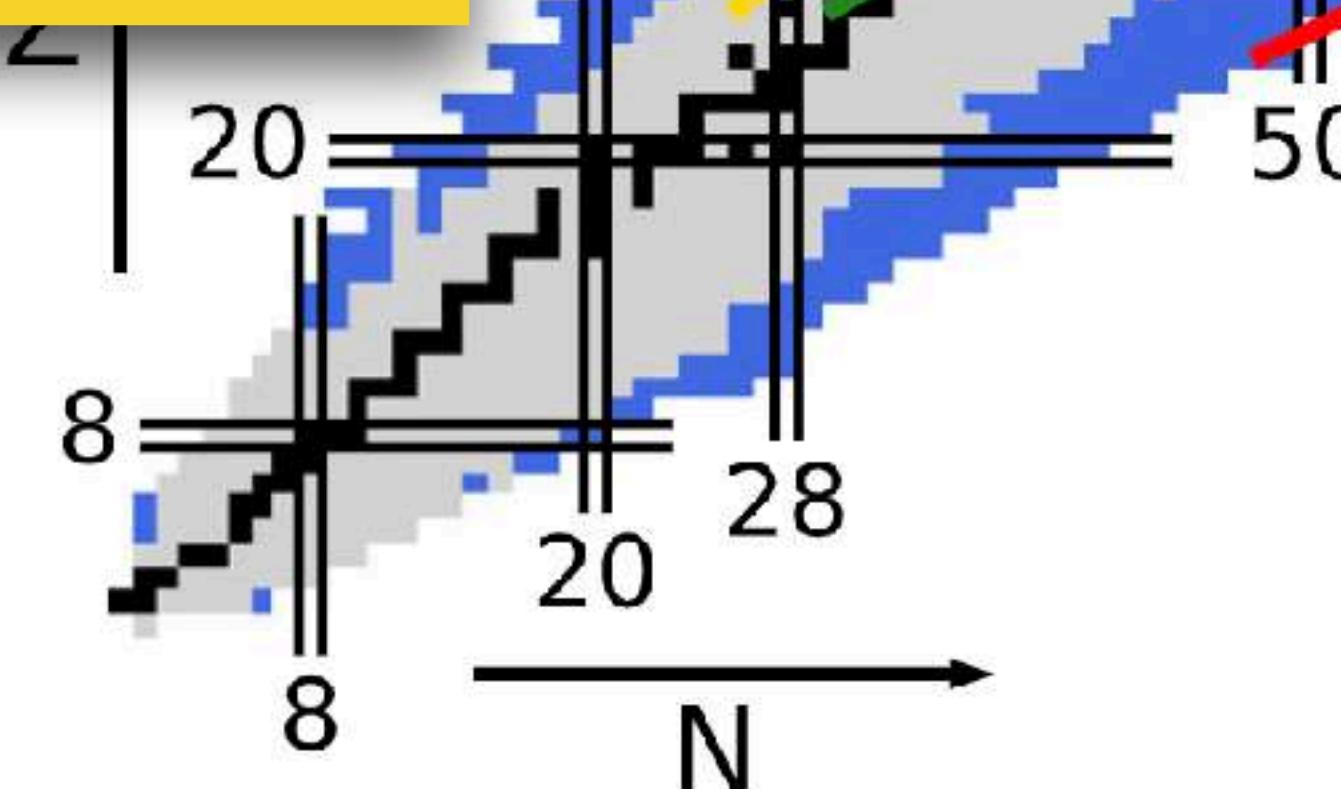
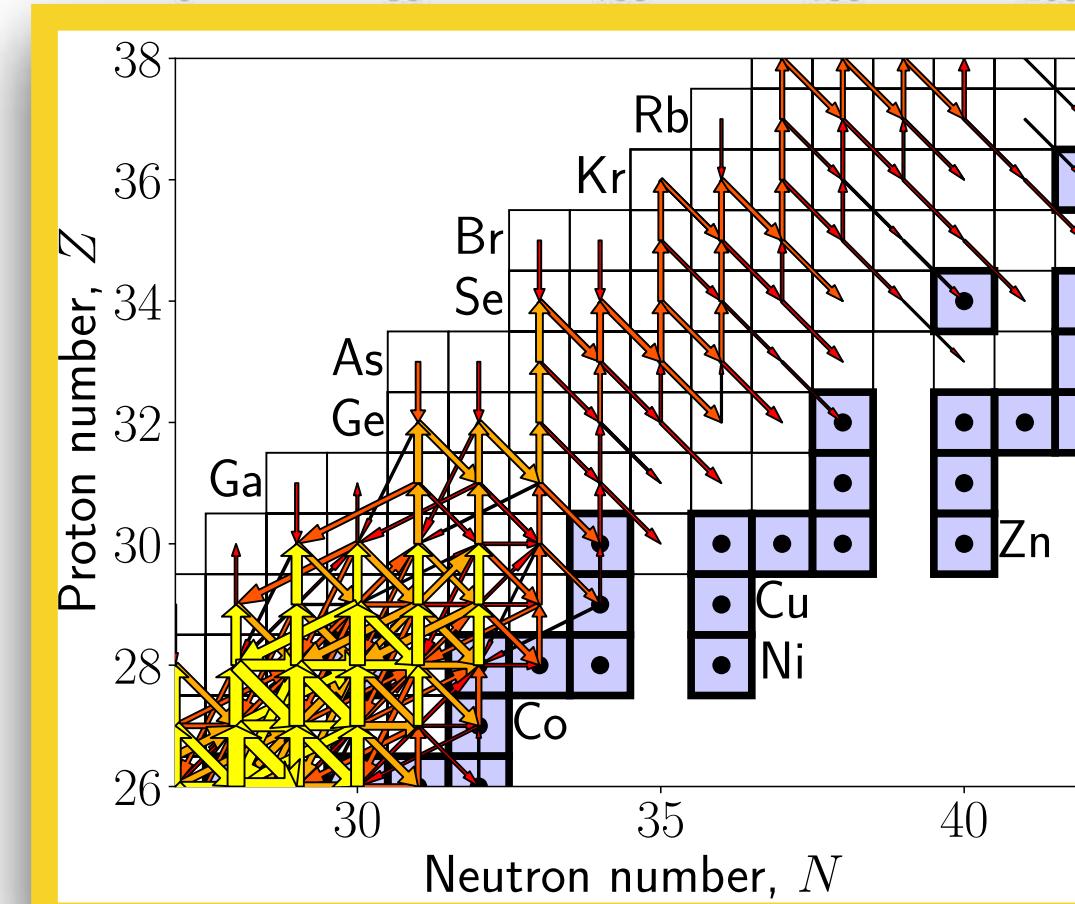
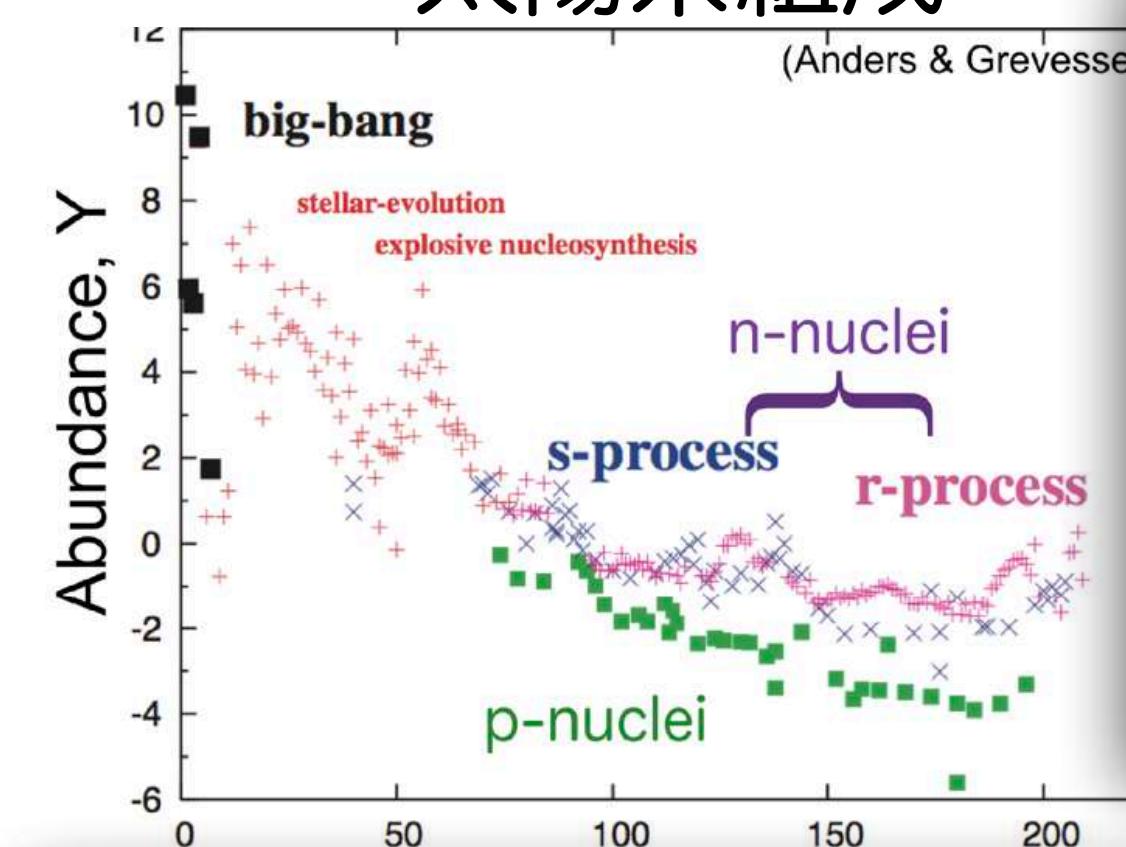
渡辺さん (KEK)

2. 宇宙の元素合成から

加速器実験へ

宇宙における元素の起源

太陽系組成



p-process

s-process

v_p-process

50

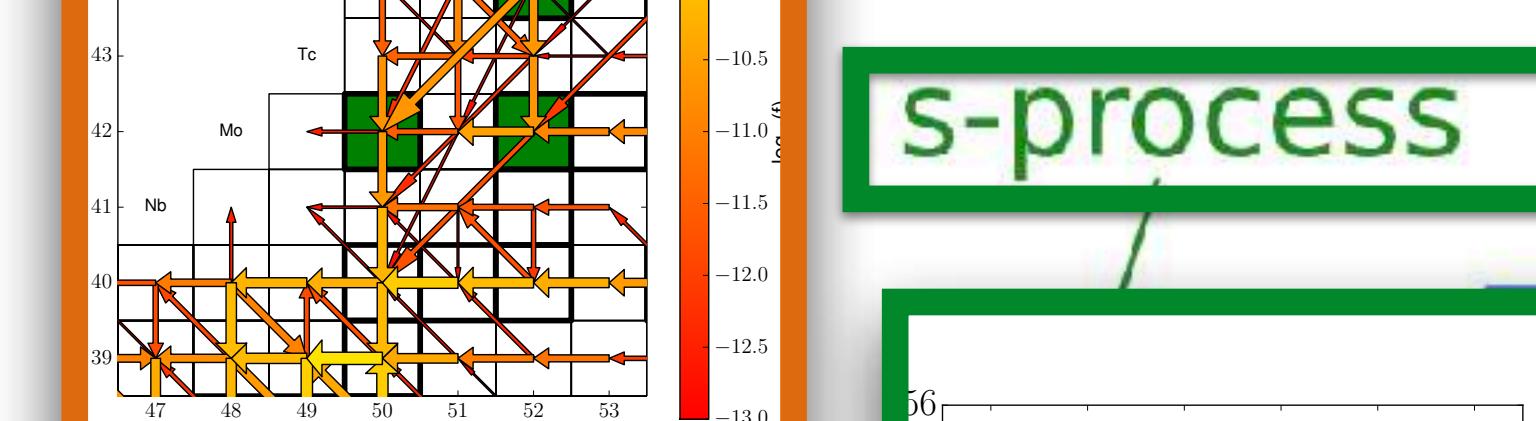
82

12

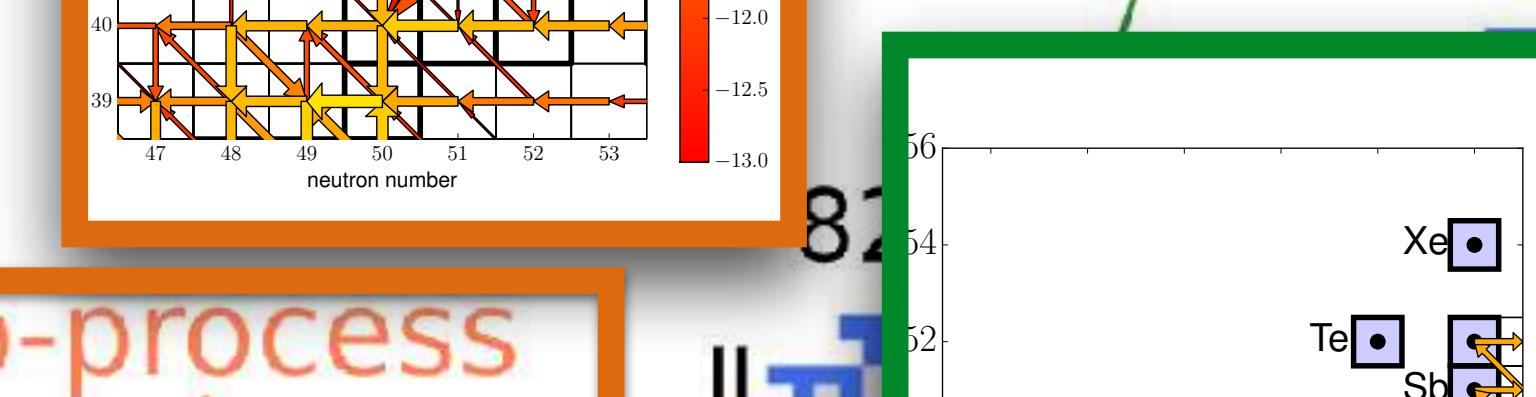
stable

ended

sf



s-process



p-process

s-process

v_p-process

50

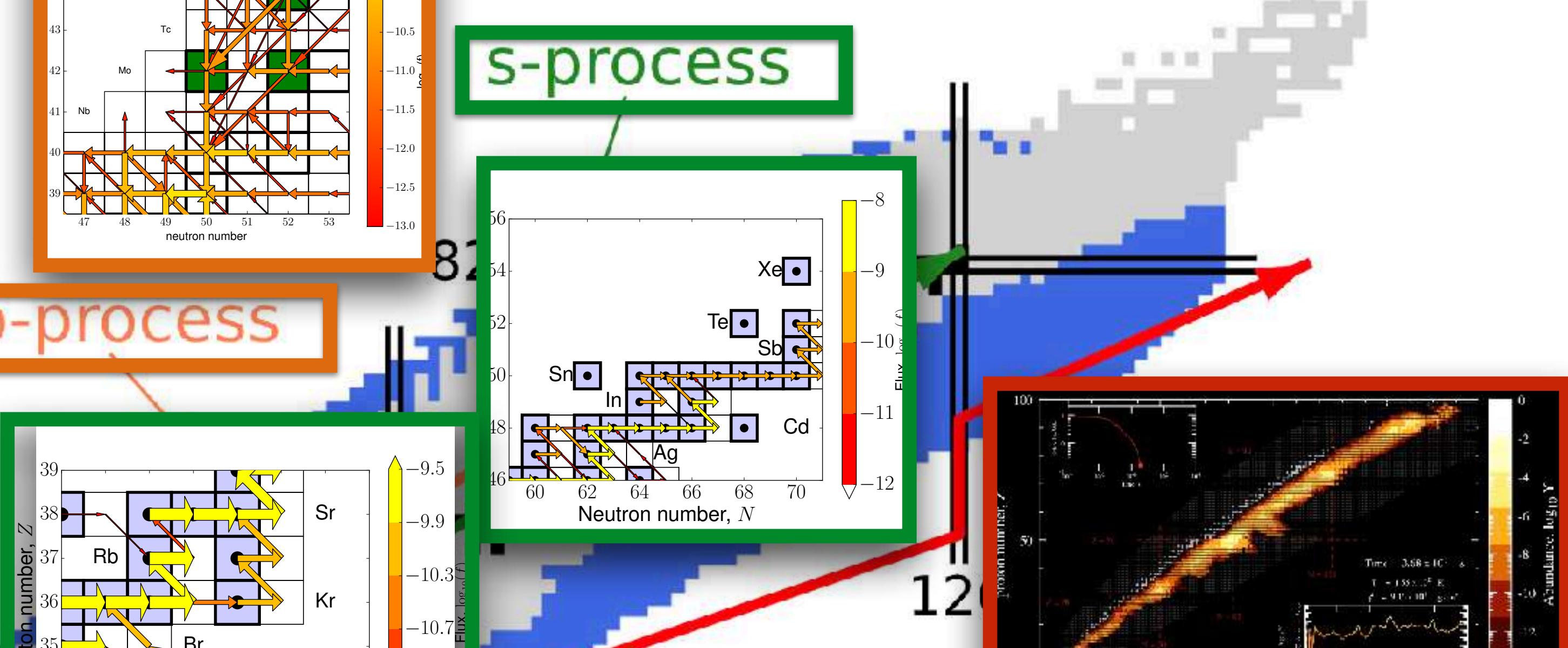
82

12

stable

ended

Arcones & Thielemann (2023)



r-process

nuclear reactions

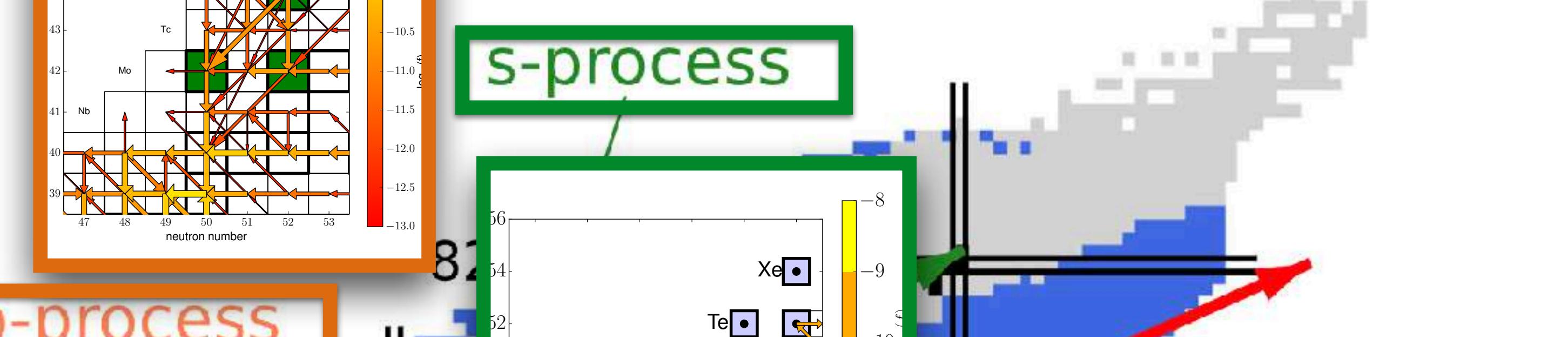
12

stable

ended

sf

Arcones & Thielemann (2023)



s-process

p-process

v_p-process

50

82

12

stable

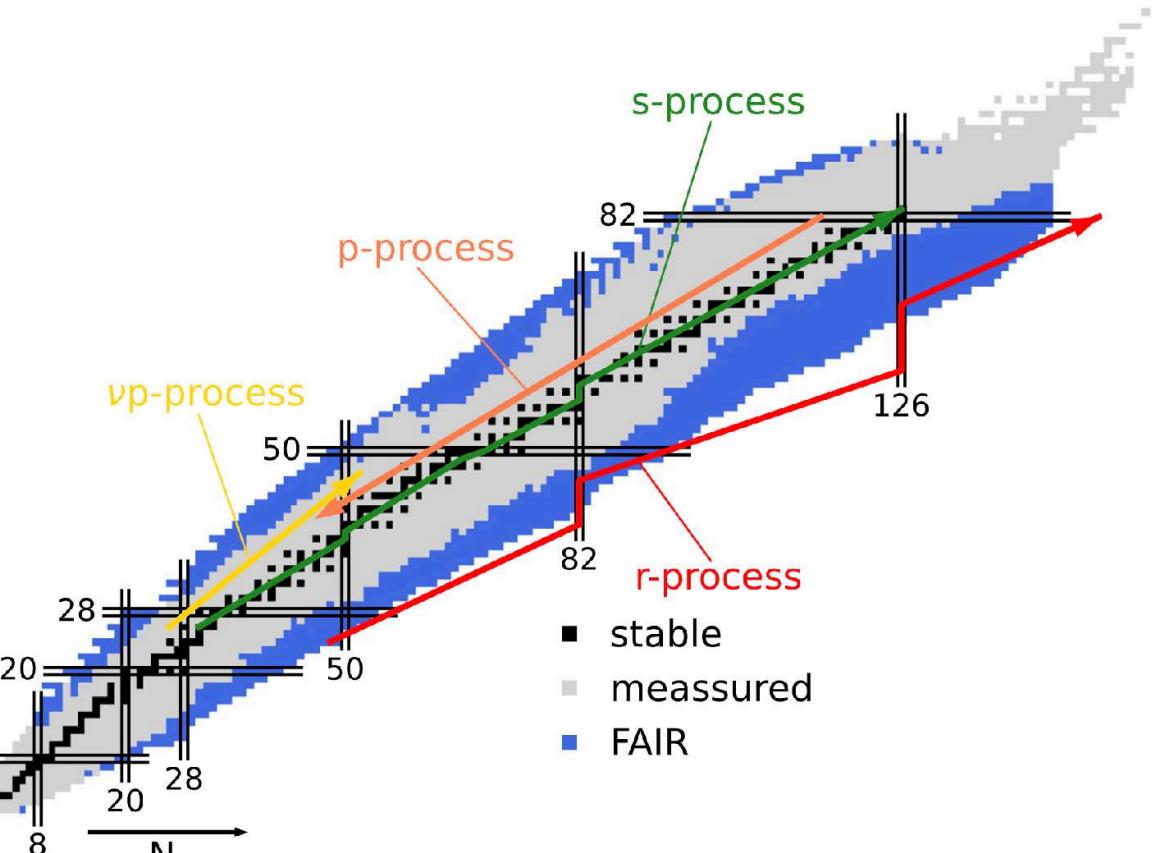
ended

sf

Arcones & Thielemann (2023)

Arcones & Thielemann (2023)

宇宙の元素合成で重要な反応率



“sensitivity” study
on nucleosynthesis?

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

- ・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
- ・ νp 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

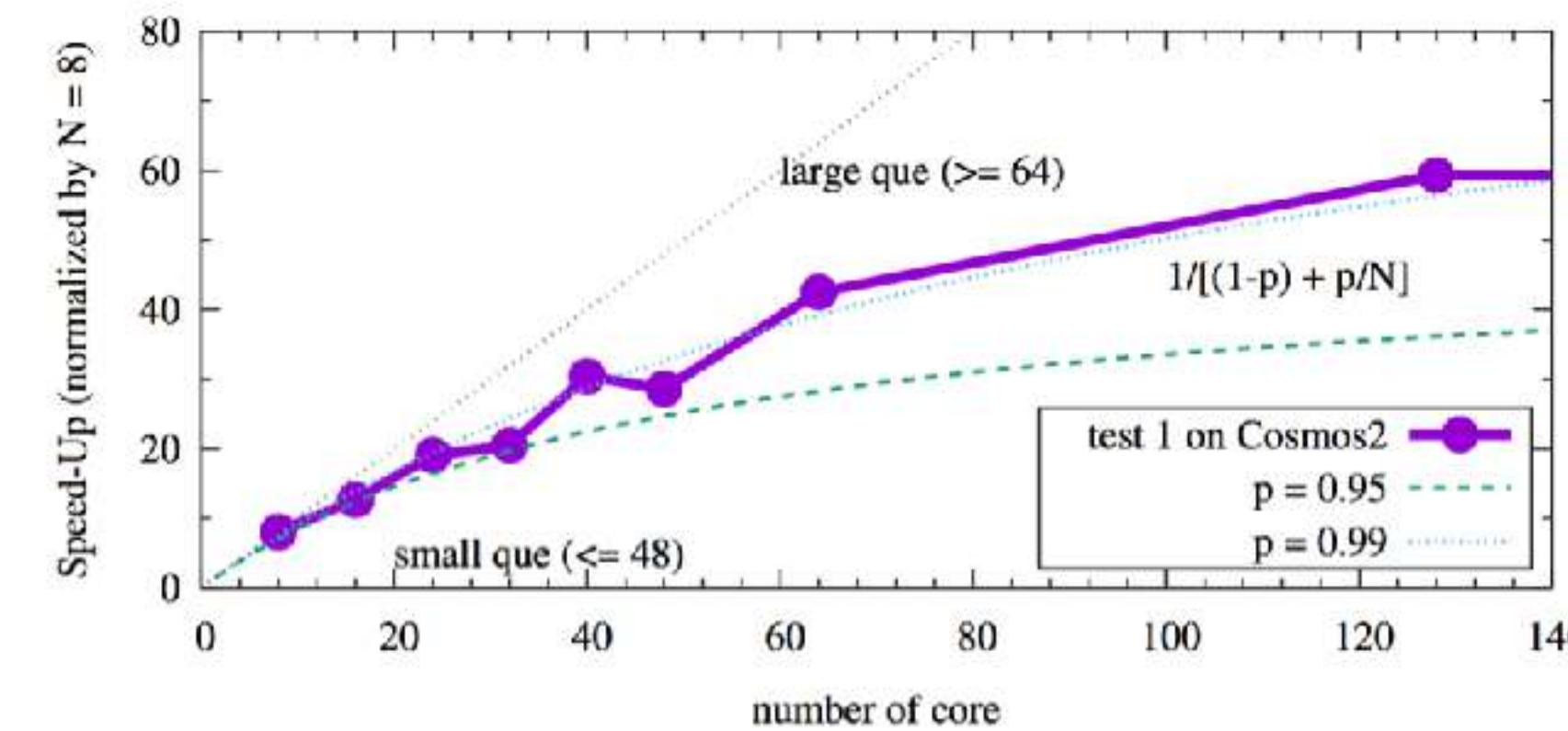
- Fortran + OpenMP
- parallelized well
- optimized code/matrix library
for large scared memory
computers (multi threads)
- Computer resources

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

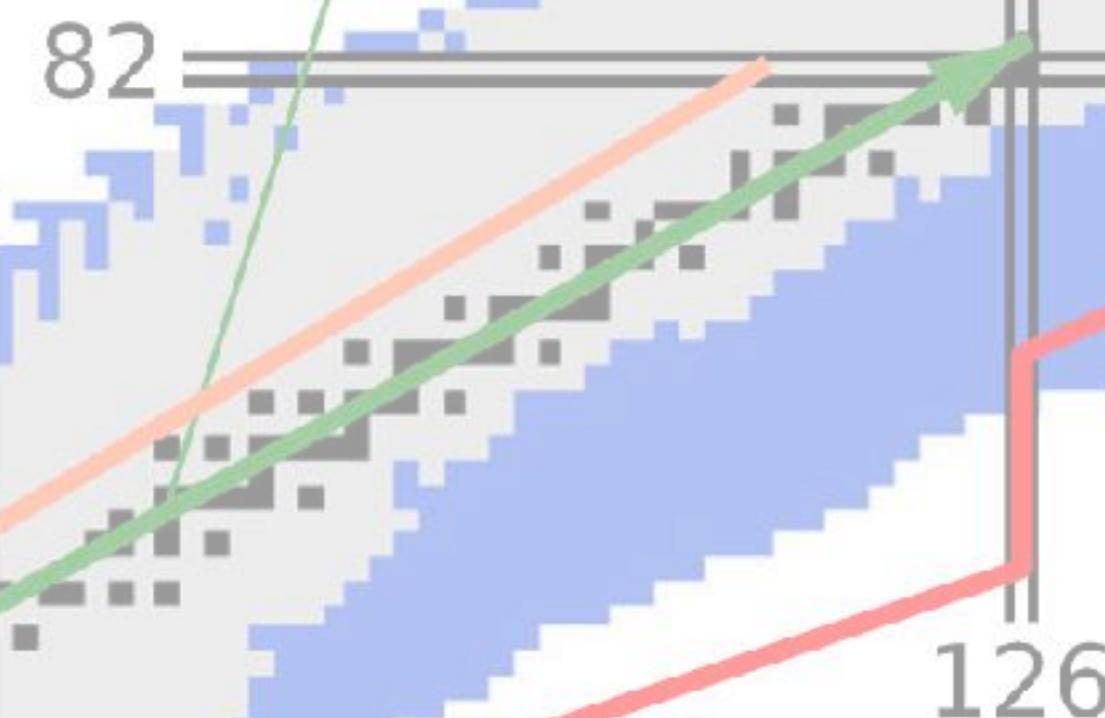
νp プロセス

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

pプロセス

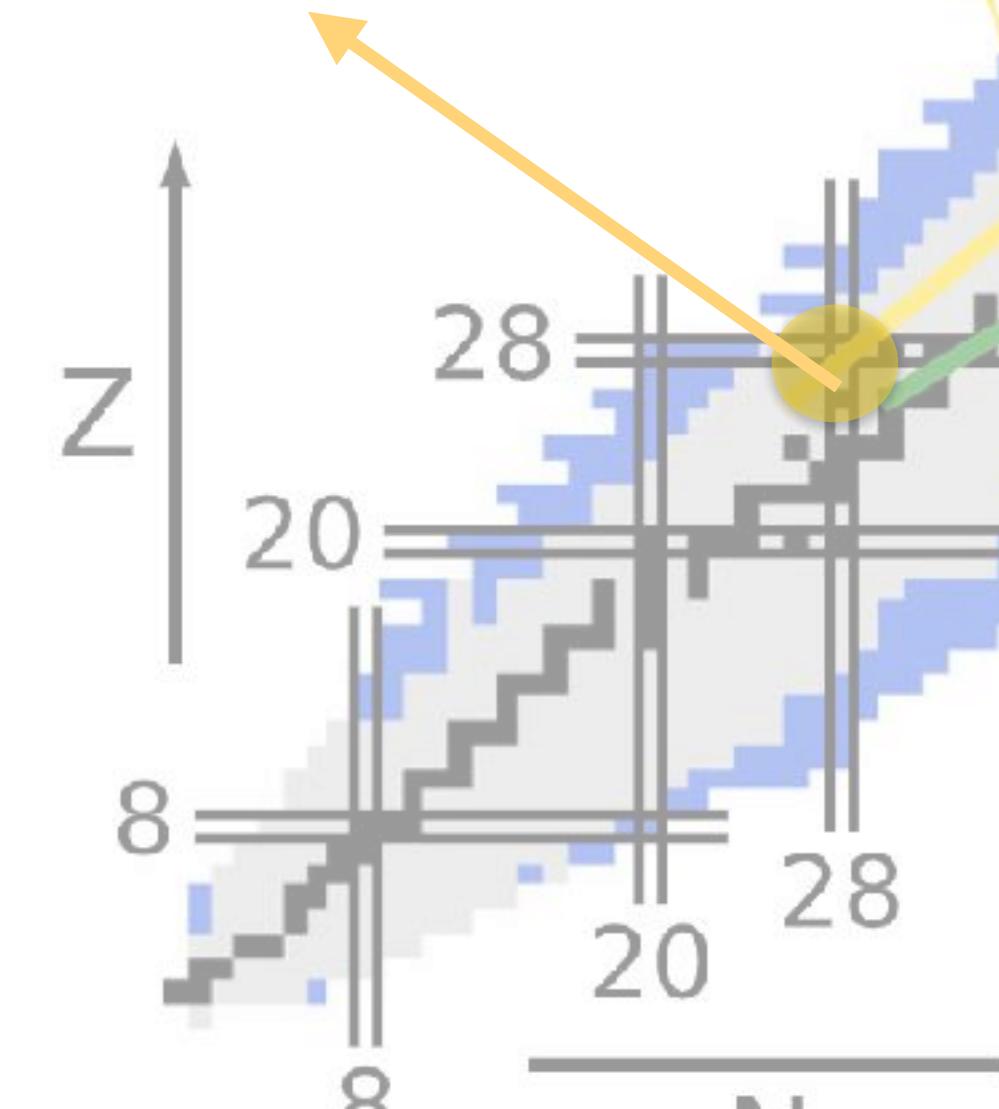
TRIUMF
PRL 127 112701 (2021)

s-process



p-process

p-process



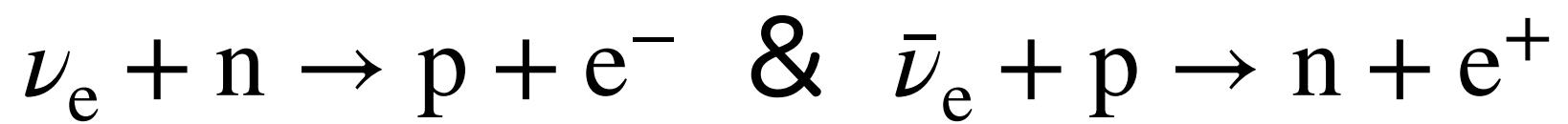
r-process

- stable
- meas
- FAIR

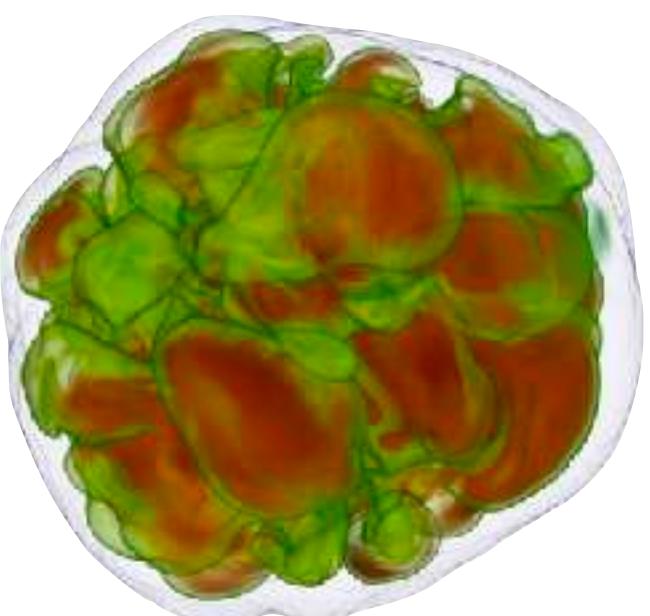
rプロセス

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

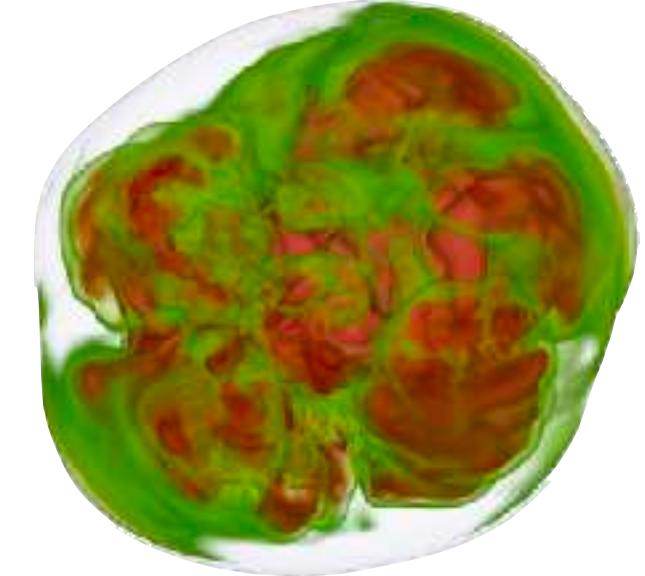
超新星での νp プロセス元素合成



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)



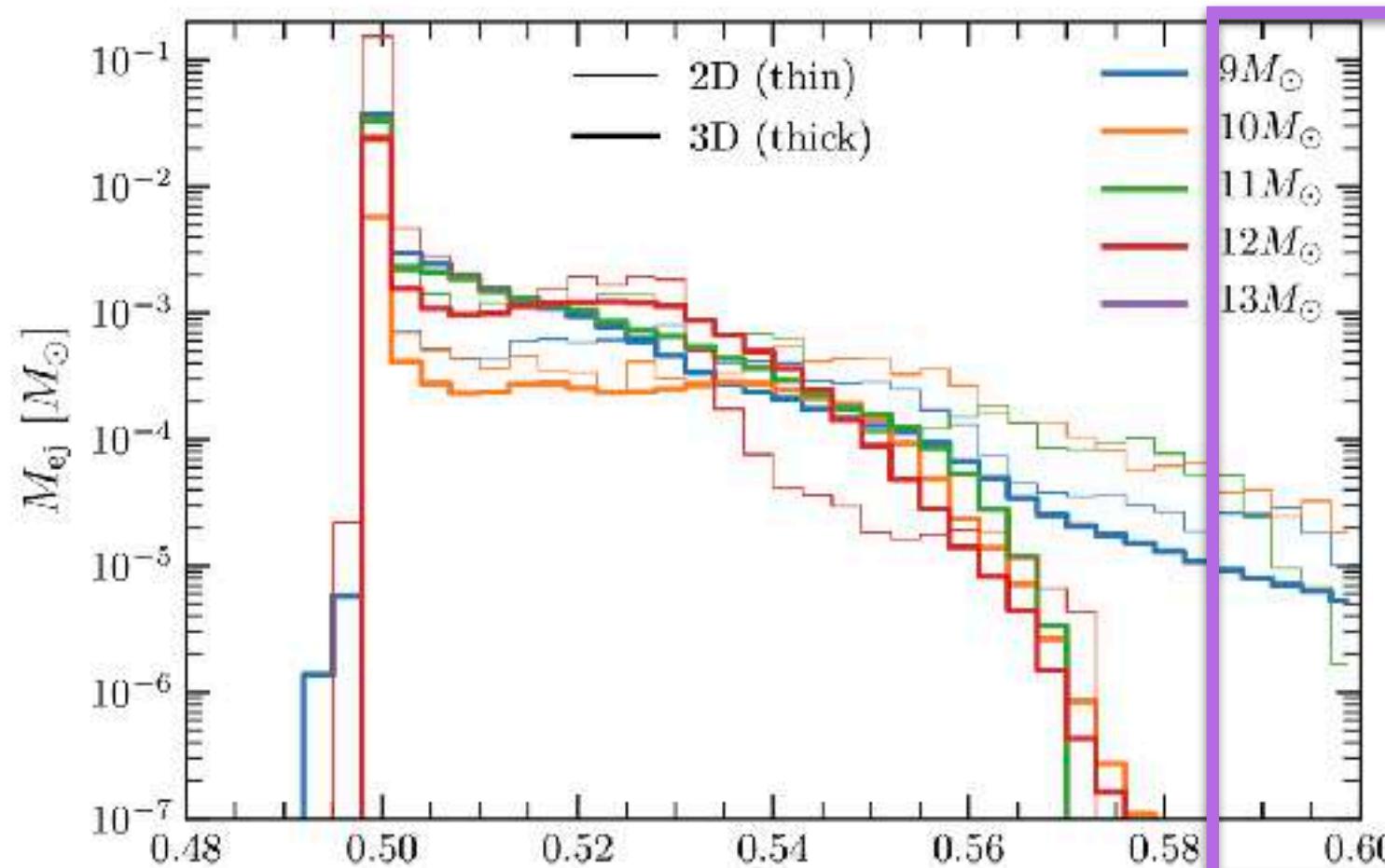
400 km



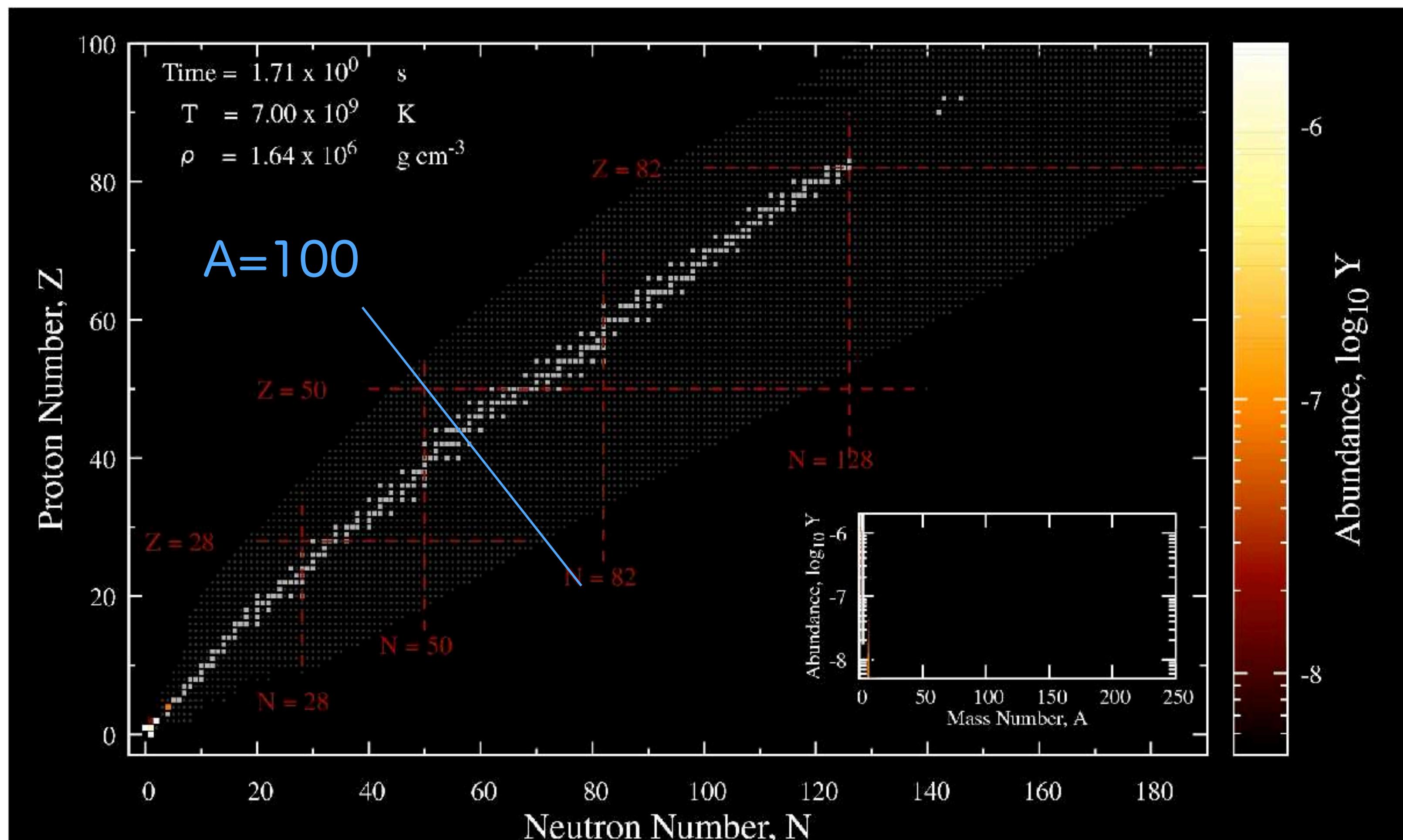
6000 km

放出物質は陽子過剰に

$Y_e > 0.6$



$Y_e \sim Y_p$

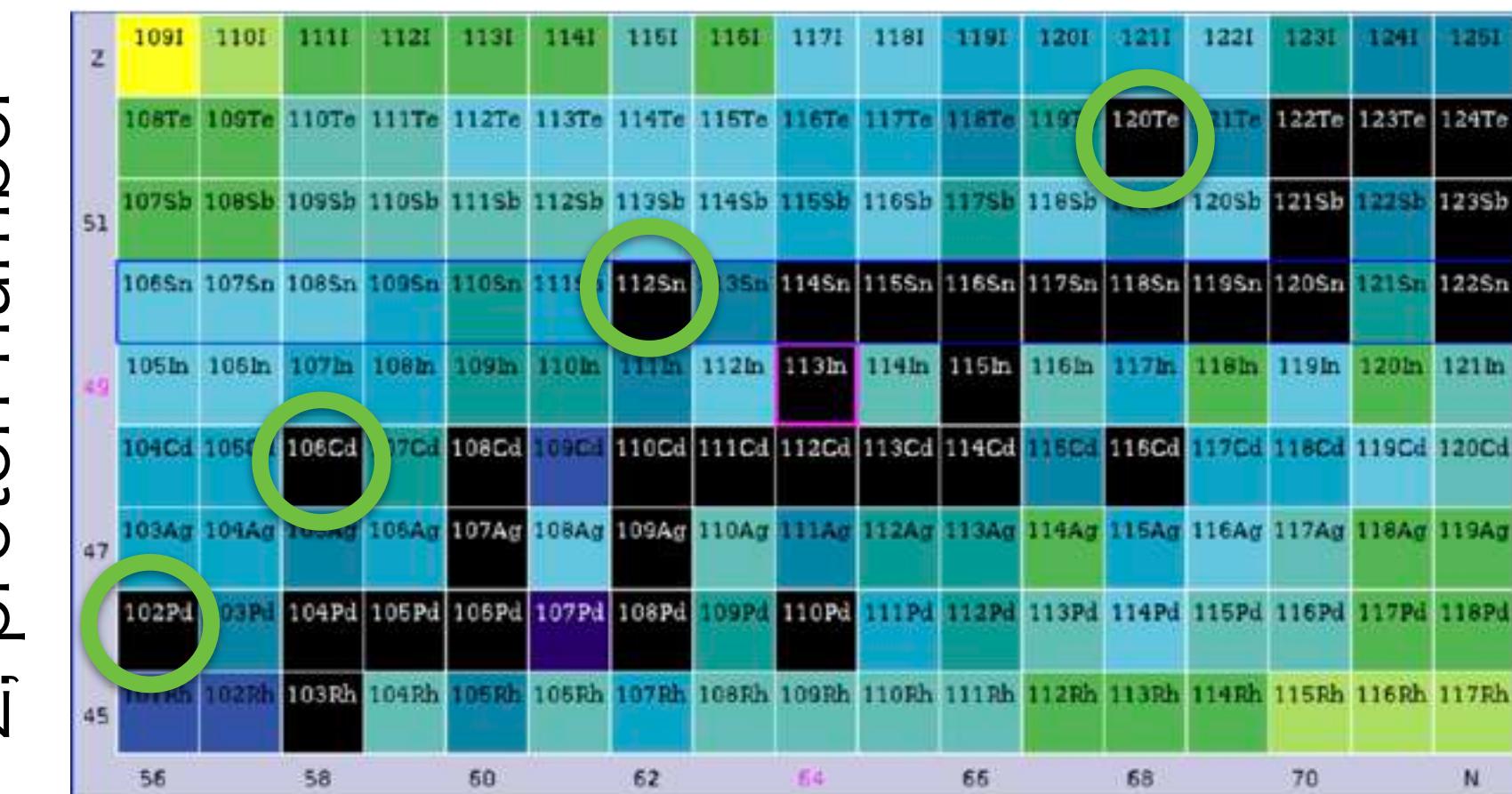


太陽系モリブデン同位体比問題

3-5種類のp核 (陽子過剰 or 中性子)

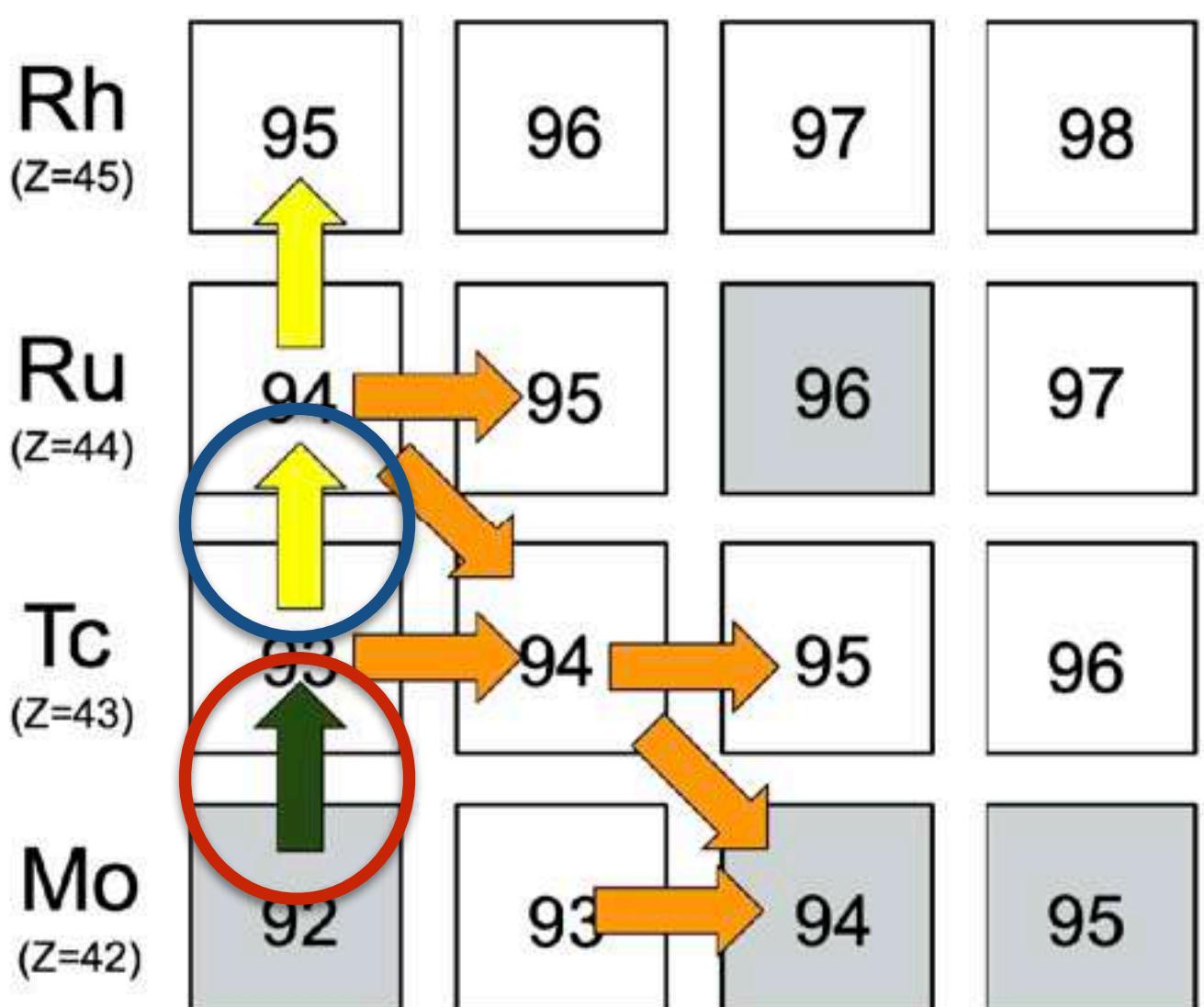
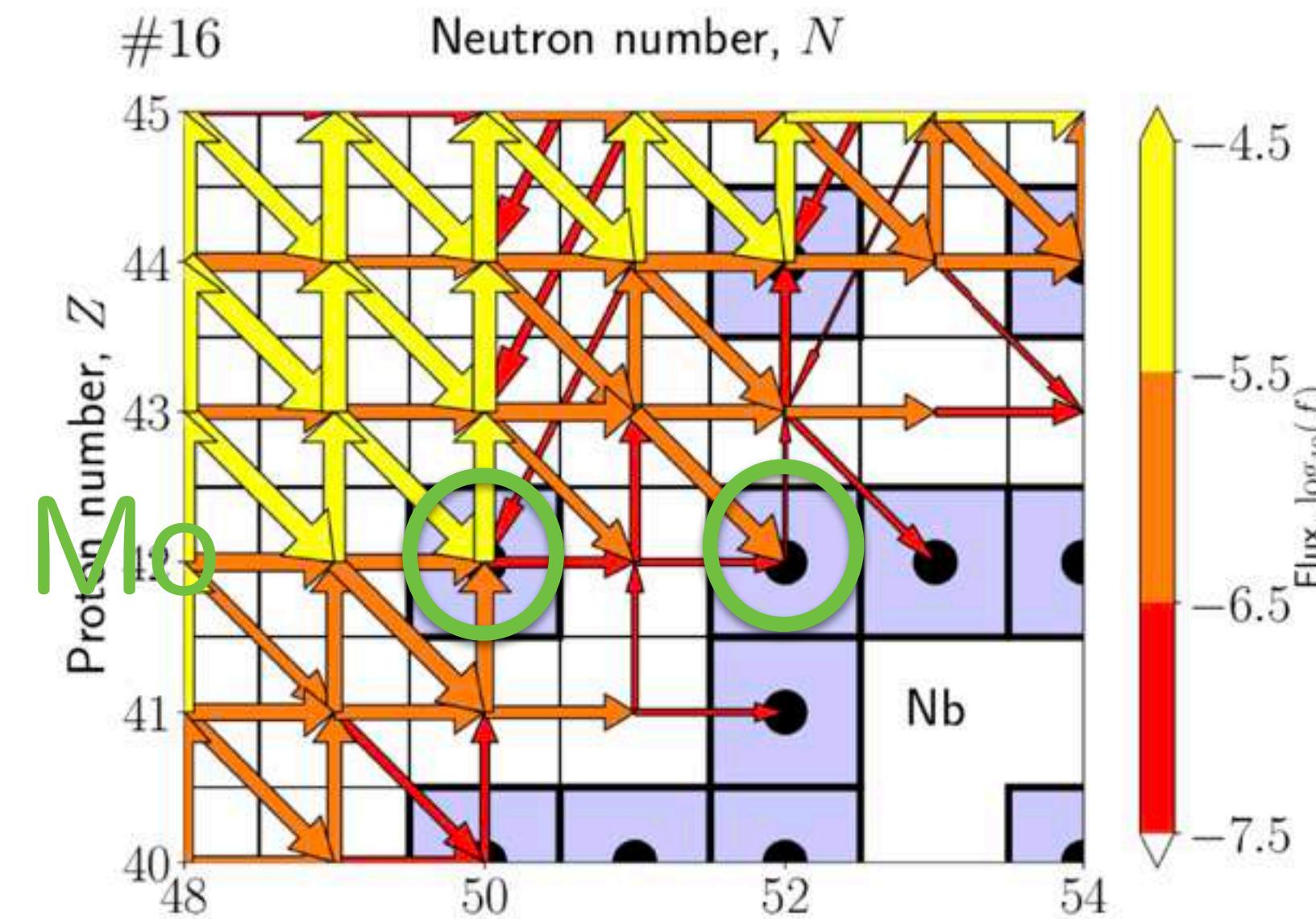
太陽系組成：同位体比 (Lodders 2003): /⁹⁴Mo
⁹²Mo/⁹⁴Mo = 1.6

- νp プロセス：質量測定の影響?
 → まだ低い ⁹²Mo/⁹⁴Mo (Xing+2018)
- 核反応の不定星?
 • → ある天体環境で $0.67 < {}^{92}\text{Mo}/{}^{94}\text{Mo} < 2.79$ (西村+2019)

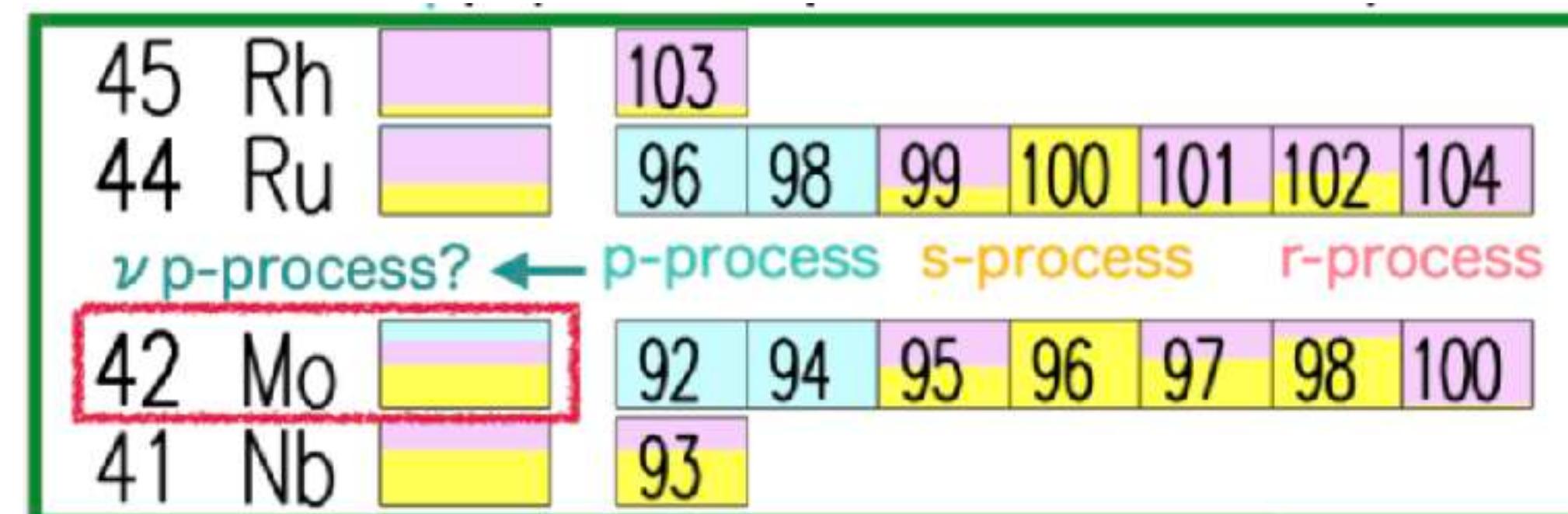


N, neutron number

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

1. 宇宙における元素の起源

- ・宇宙に存在する多様な元素は宇宙の天体现象を起源とする
- ・宇宙核物理では、天体と原子核の知識を駆使して元素の起源を解明する

2. rプロセス元素合成と起源天体

- ・原子核物理だけではなく、しっかりと天文学の研究課題である。
- ・多様化している
- ・今後も、多様化した課題設定において原子核物理の役割も

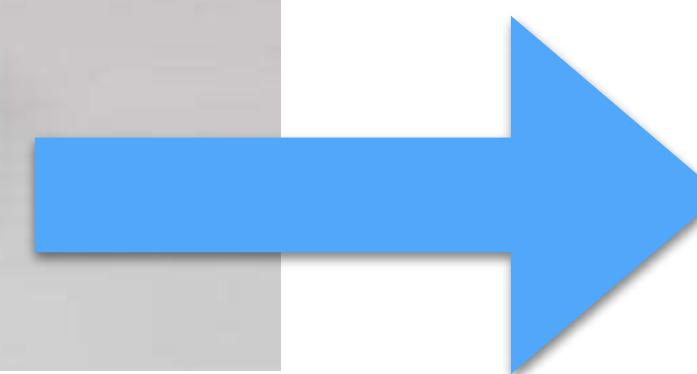
3. 宇宙の元素合成から加速器実験へ

- ・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、 νp 、rpプロセス → 実験とのコラボレーション
 - ・一例：モリブデン問題を νp プロセス解決する実験の提案

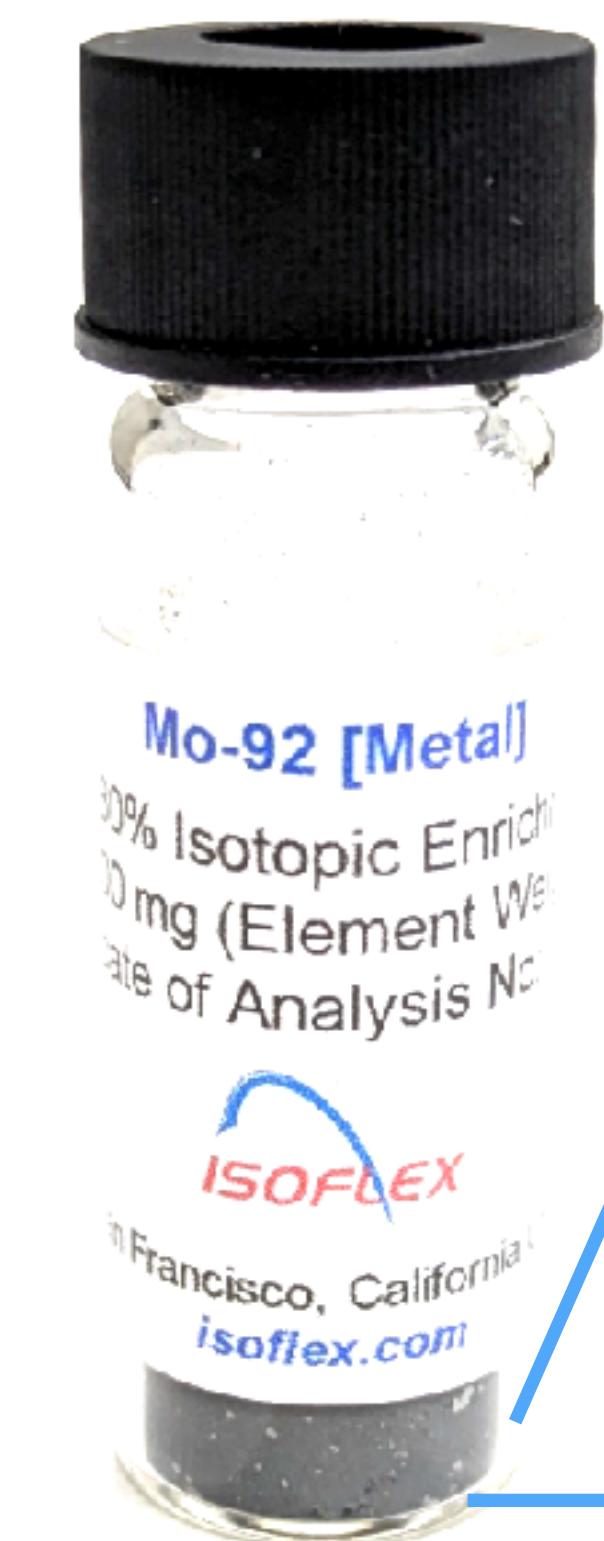
現状

^{92}Mo を購入

Moの結晶 (Mo-92 14.84 %)



Mo-92 のつぶ (99.80 %)



FY2025: 1. ターゲット作成: ^{92}Mo の薄膜 $< 2 \text{ mg/cm}^2$

(学生さんの力も借りて? JAEAなどでの専門家??)

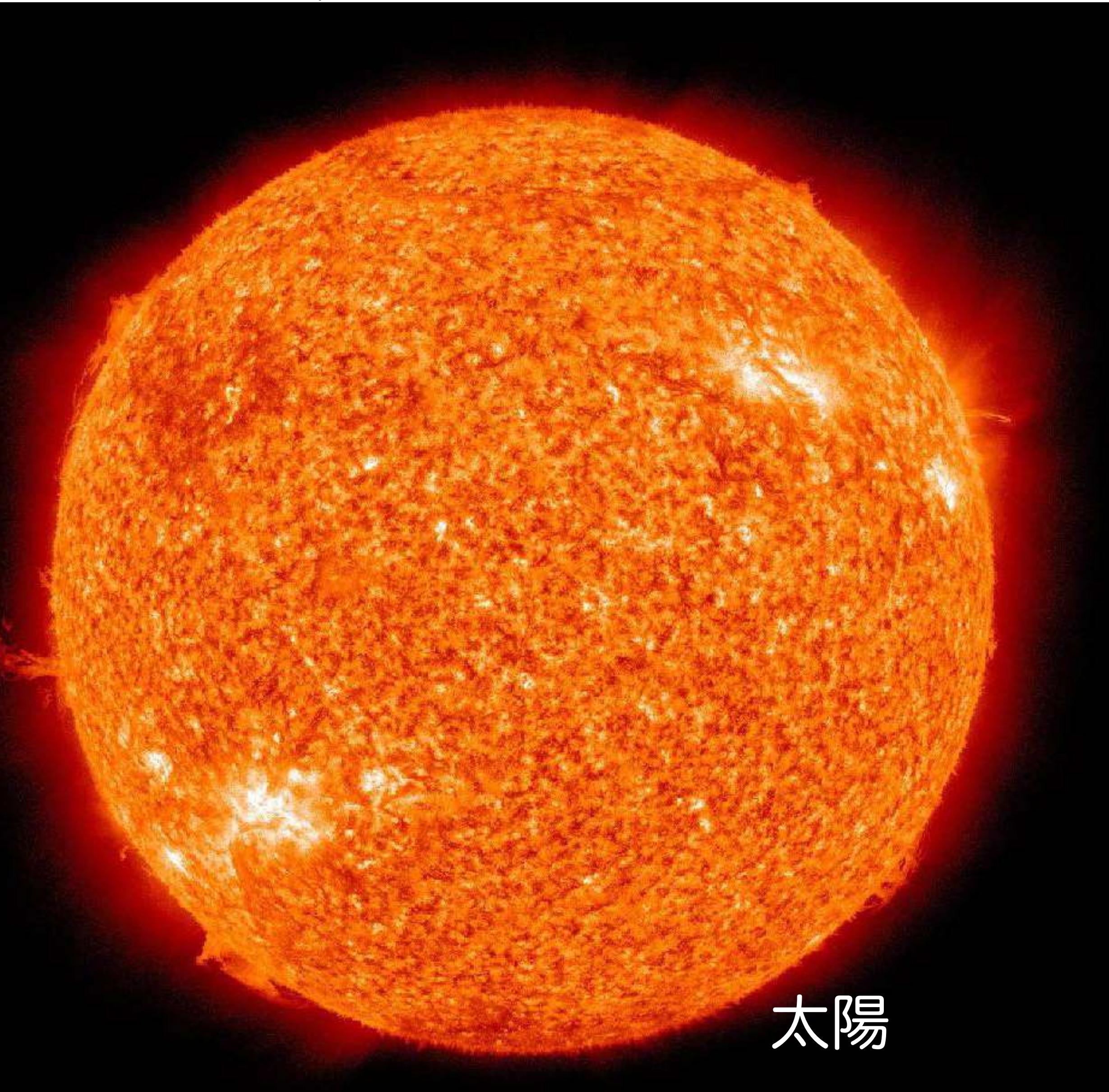
2. 陽子照射実験: ペレトロン加速器 (東京科学大) など

1. 元素合成のしくみ

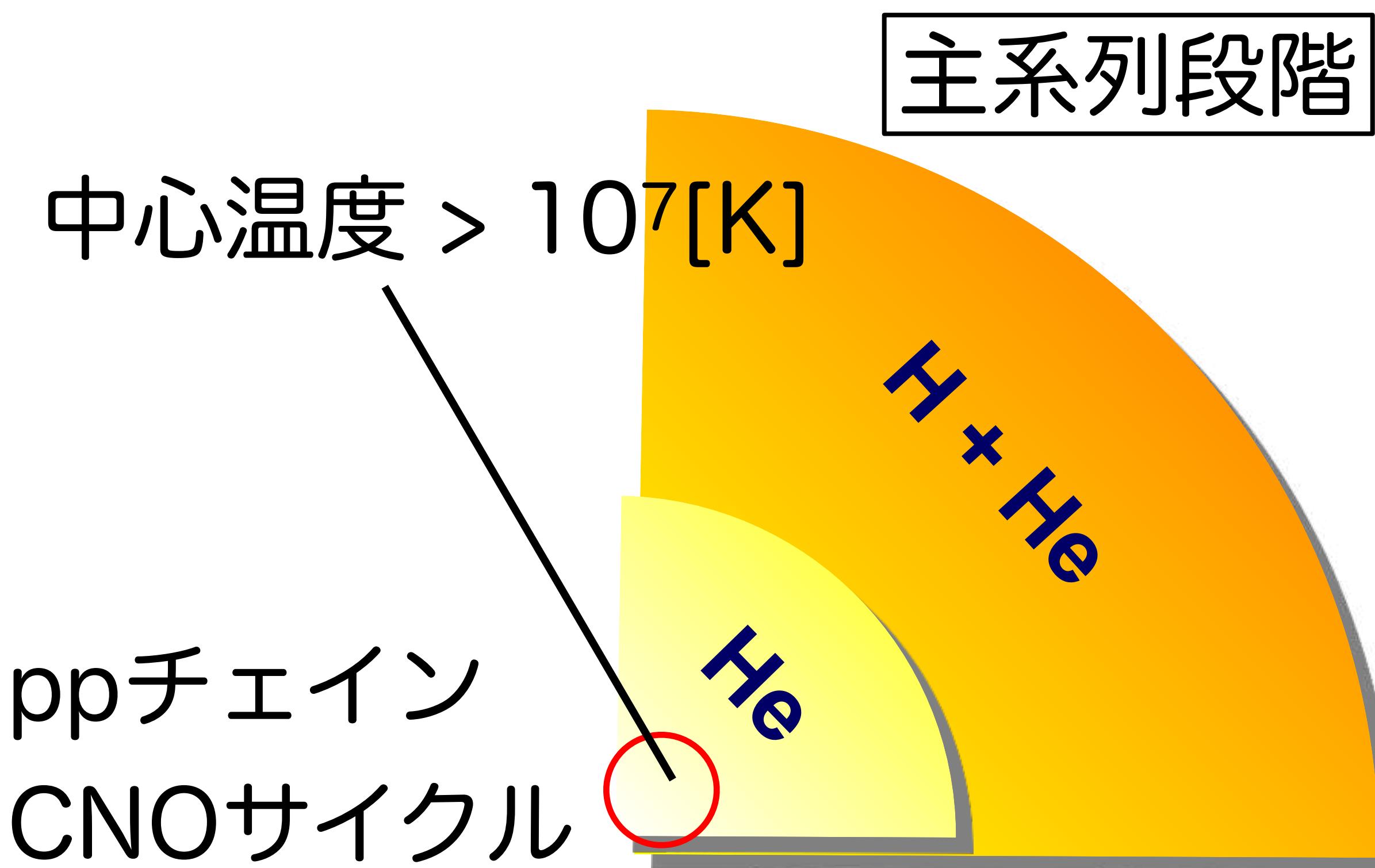
- ・星はなぜ輝くのか？
- ・超新星はなぜ輝くのか？
- ・中性子星合体はなぜ輝くのか？

星はなぜ輝くのか？

(太陽のような) 星はなぜ輝くか？



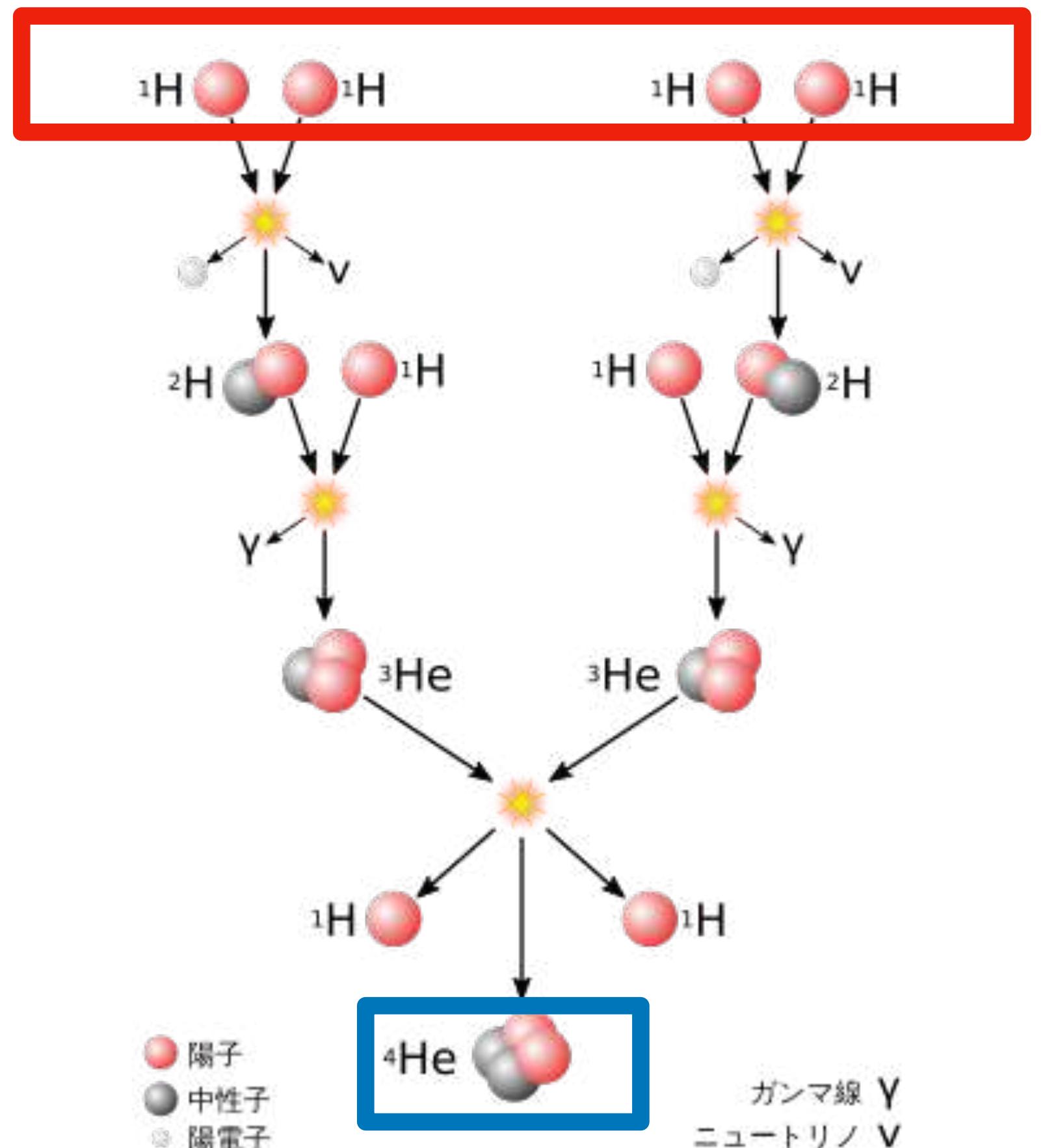
内部が高温状態で光が出る
→ 内部にエネルギー源



星の燃焼：水素からヘリウム

pp-連鎖（チェーン）

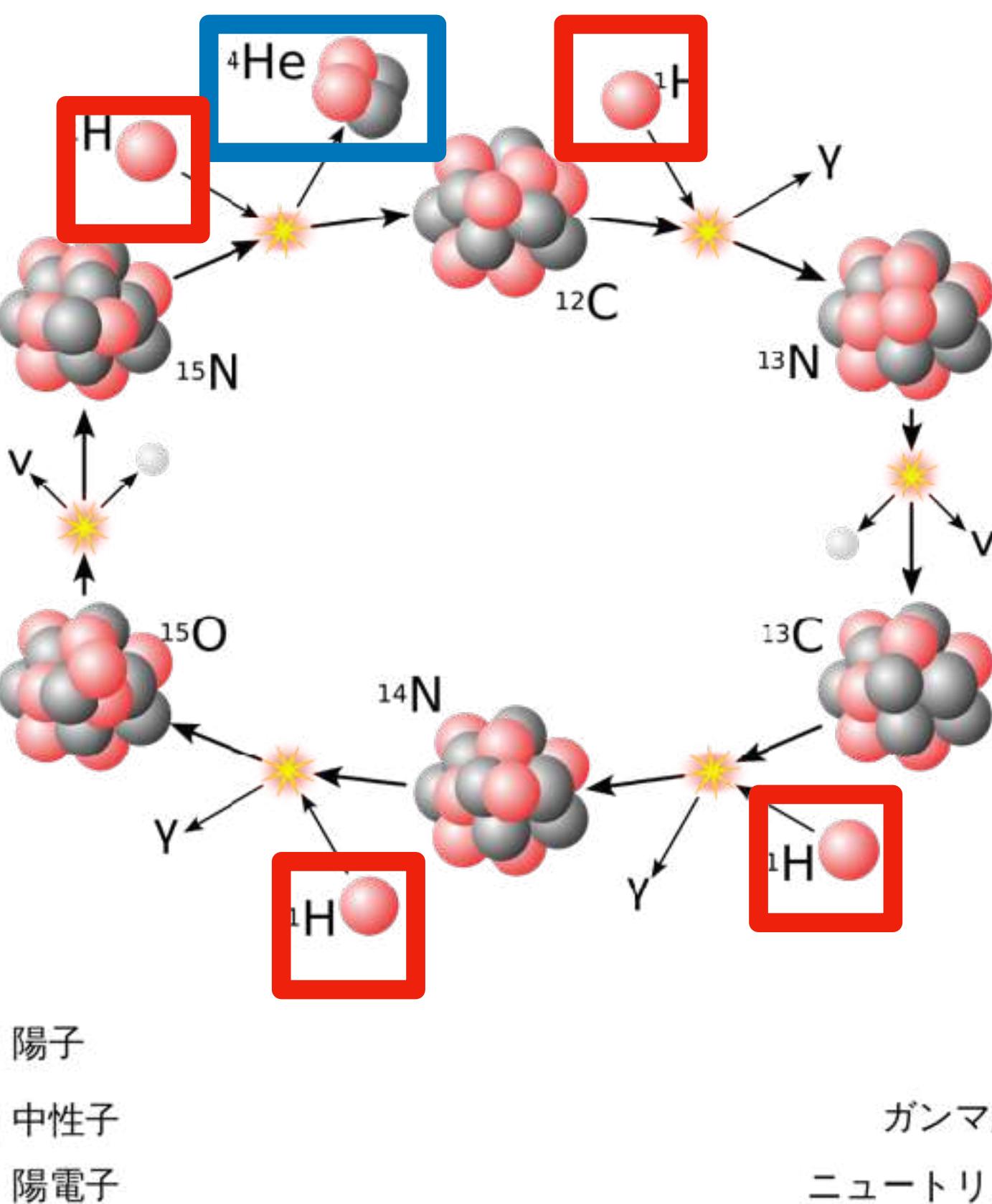
水素からヘリウム



CNOサイクル

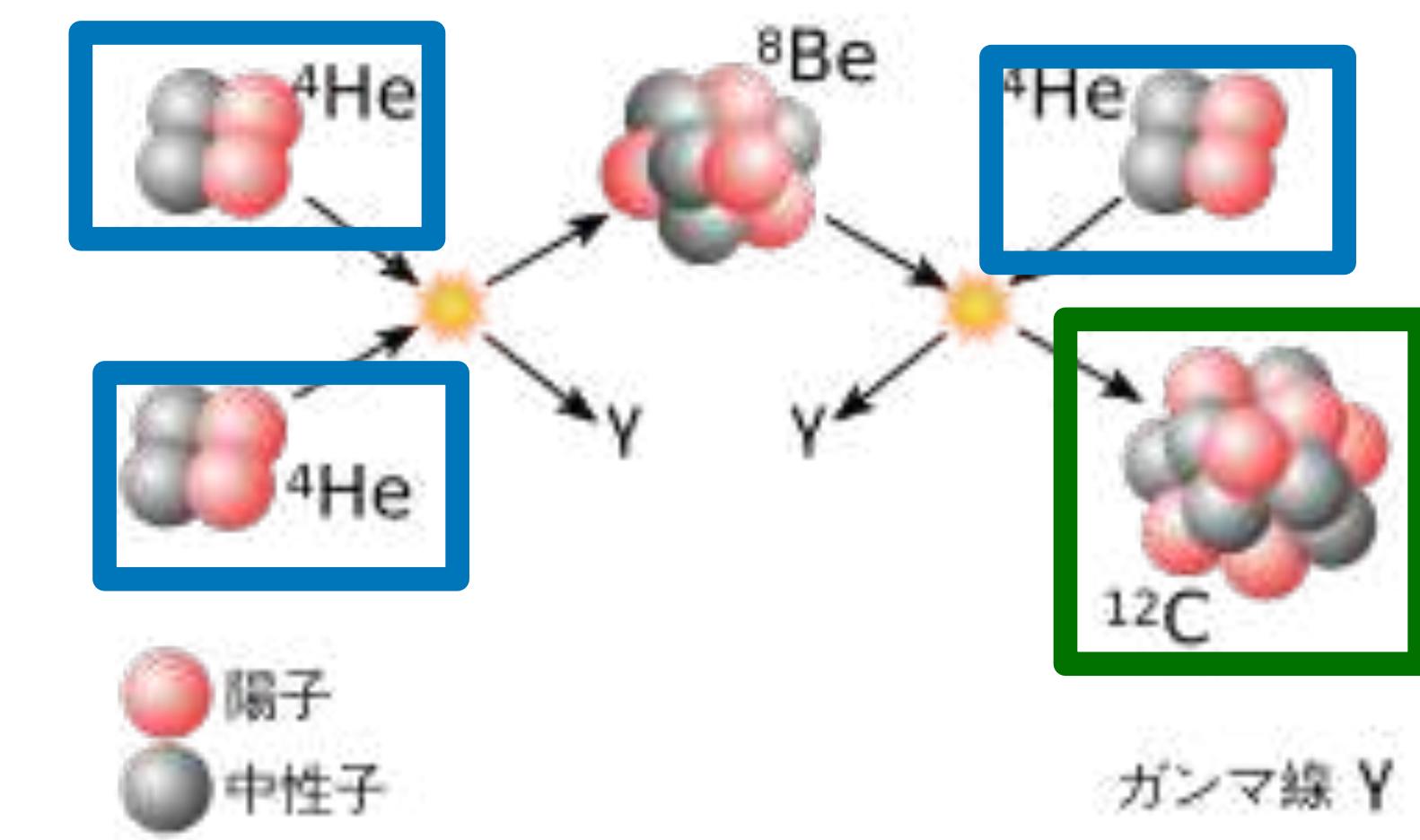
(触媒反応)

水素からヘリウム



次の段階

ヘリウムから炭素

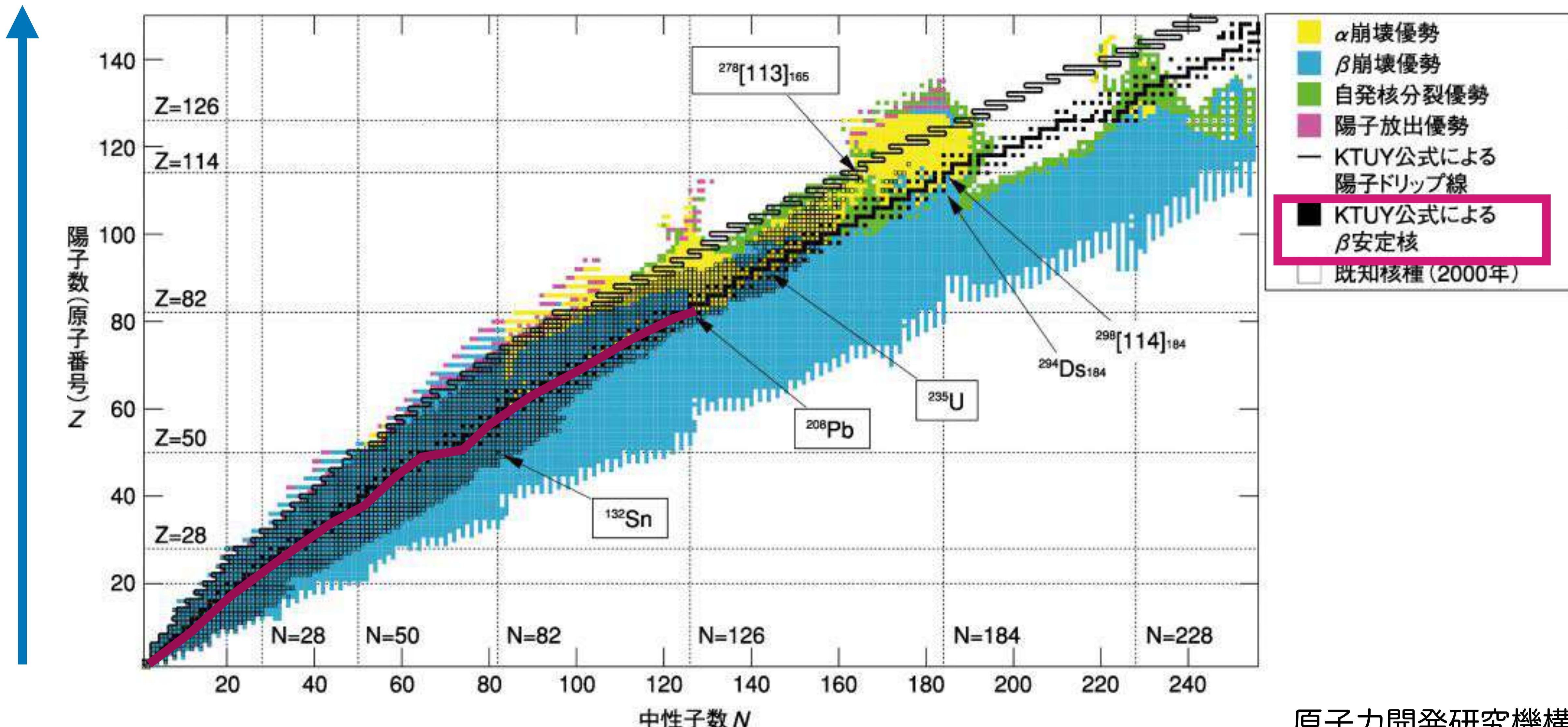


核融合 = 星のエネルギー源 かつ 重い元素を（新たに）作る

核図表と元素

元素の周期表

小浦寛之 (JAEA)

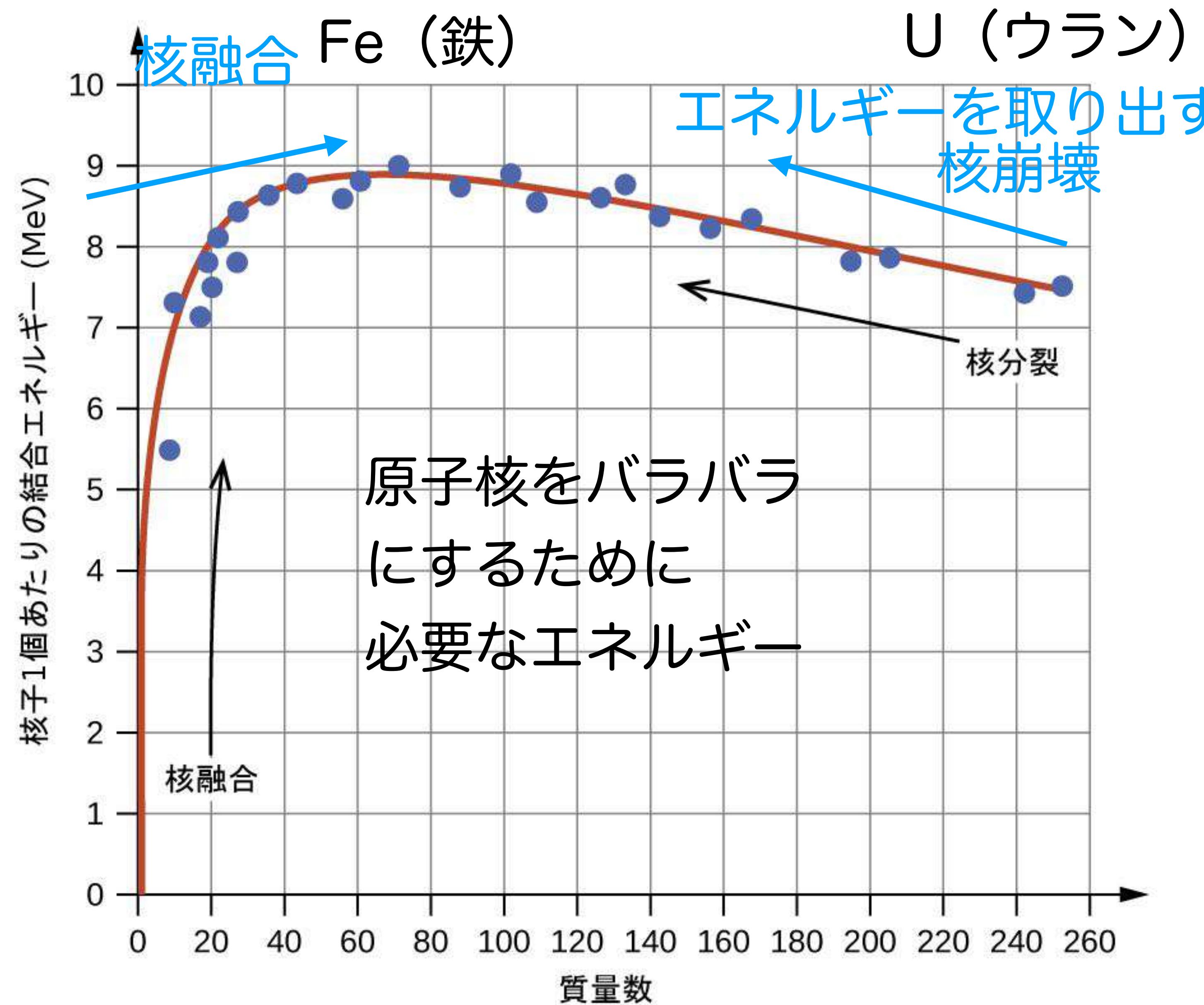


原子力開発研究機構

原子核が持つエネルギー

エネルギーを取り出す

核融合 Fe (鉄)



U (ウラン)

エネルギーを取り出す
核崩壊

核分裂

原子核をバラバラ
にするために
必要なエネルギー

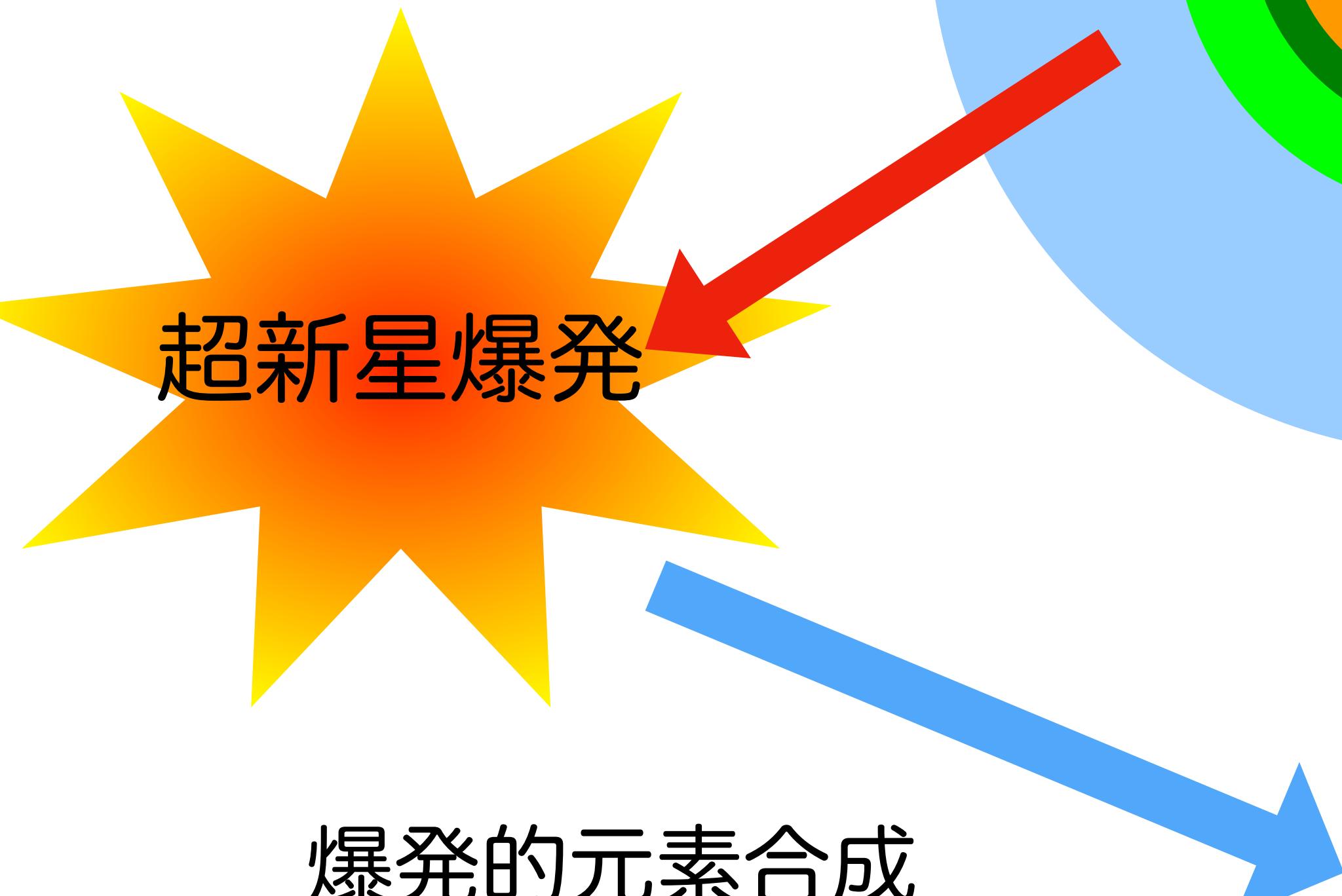
核融合

ハイゼンベルクの谷レゴ
(理研仁科センター)



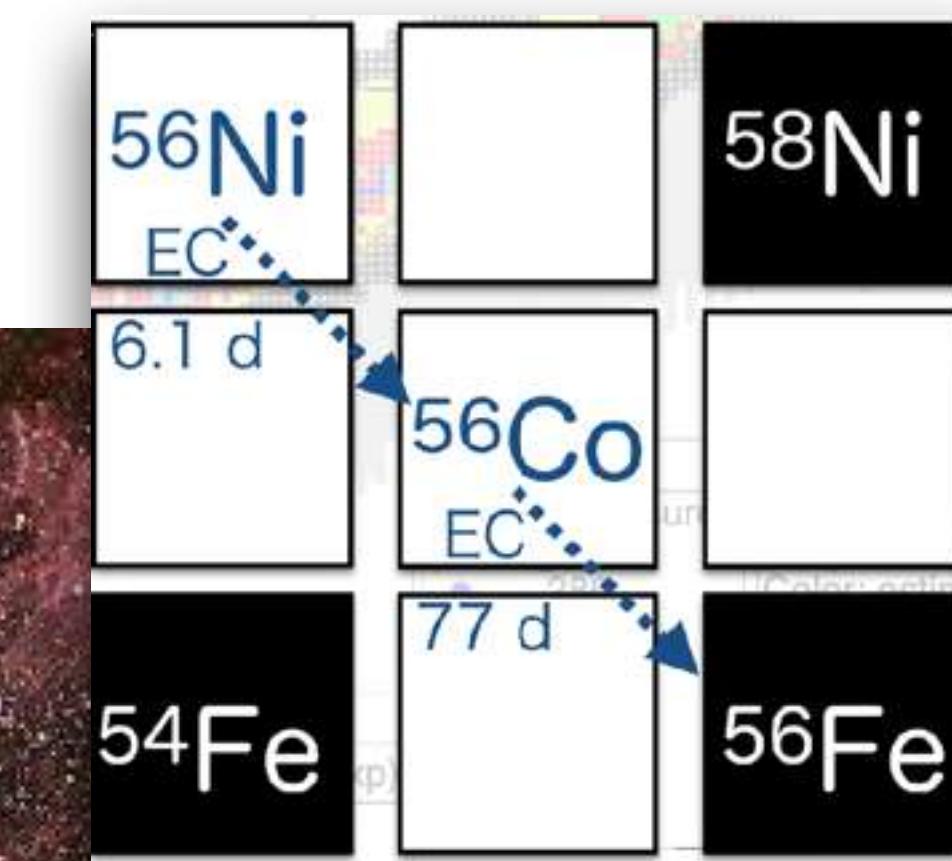
星の進化の元素合成：超新星はなぜ輝くか？

より重い星は、
より高い中心温度に進化



大質量星 ($> 10 M_{\odot}$)

- ・核反応によるエネルギー生成
(=星の明るさ)
- ・核燃焼の生成物 (“灰”) が
さらに燃え、重い元素を作る。
($H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow O \rightarrow \dots \rightarrow Fe$)



放射性崩壊

爆発的元素合成
(鉄属の放射性同位体)

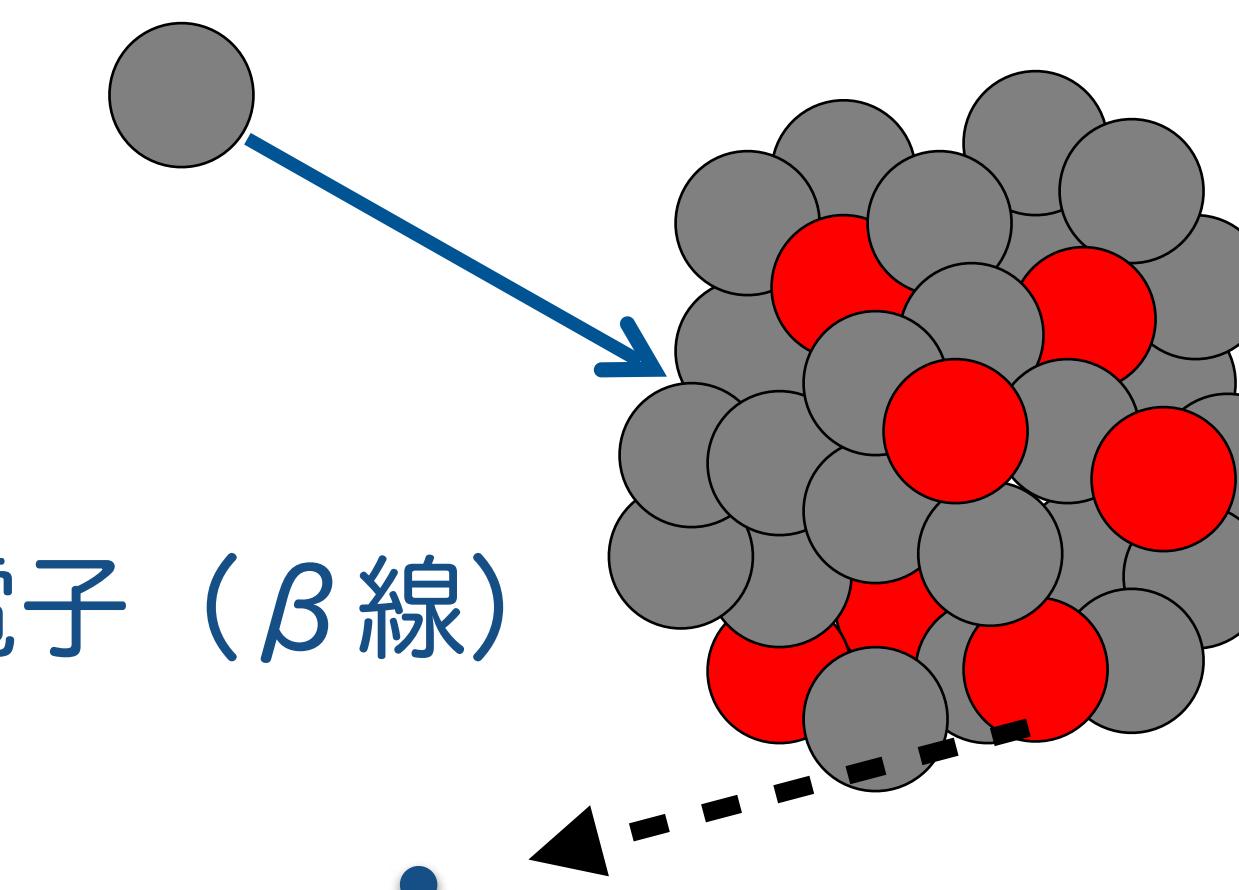
重い元素を作るレシピ：中性子捕獲過程

重い核同士をぶつけ
ても、多量の陽子
(=プラス電荷) に
より強いクーロン力
で反発する

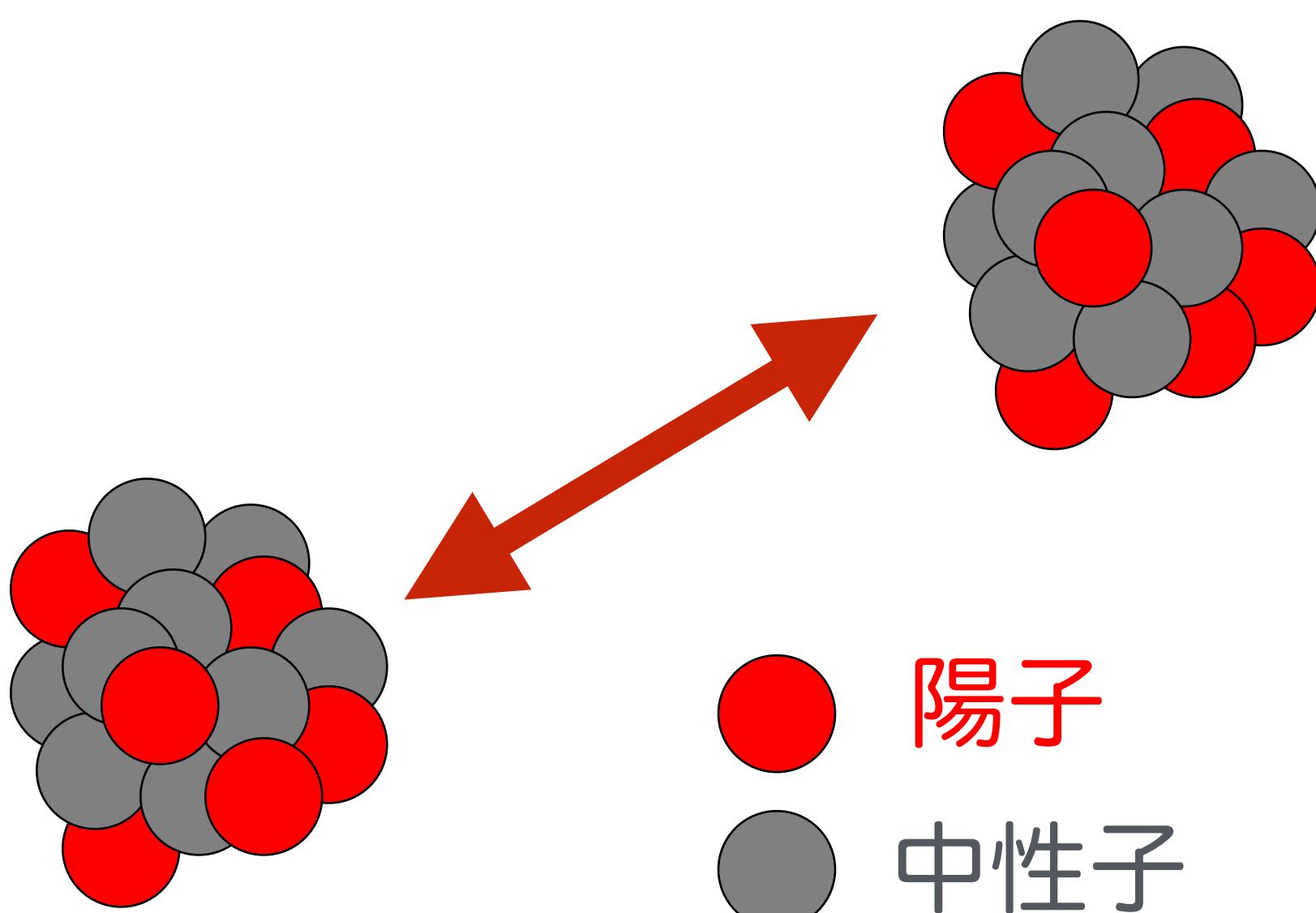


中性子捕獲 + β 崩壊の連鎖
により重い元素を作る

- ① 電荷のない中性子を捕獲
→重い原子核を作る

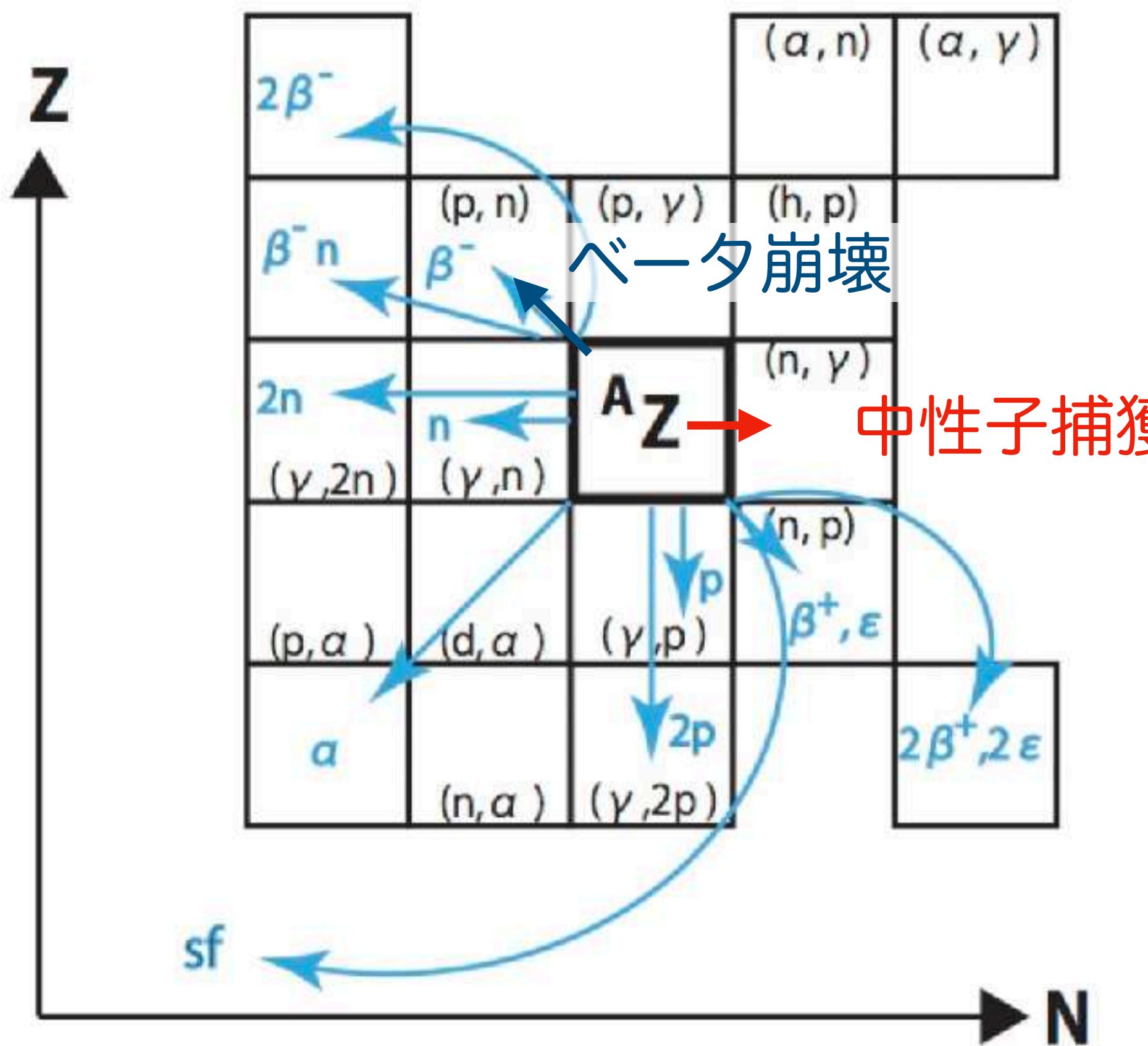


電子 (β 線)

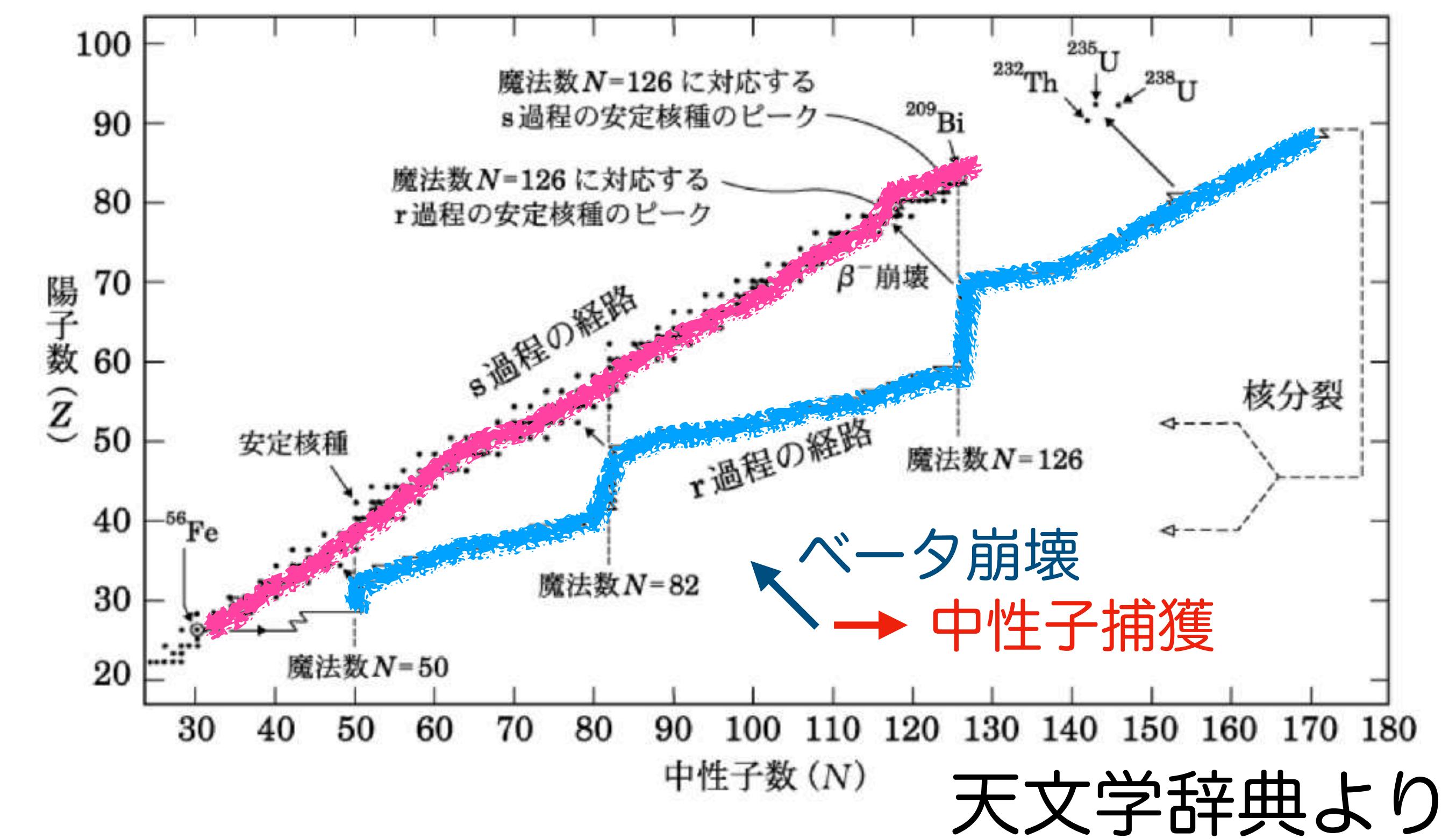


- ② 生成された（中性子過剰）
不安定核が β 崩壊する
→原子番号が増える

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



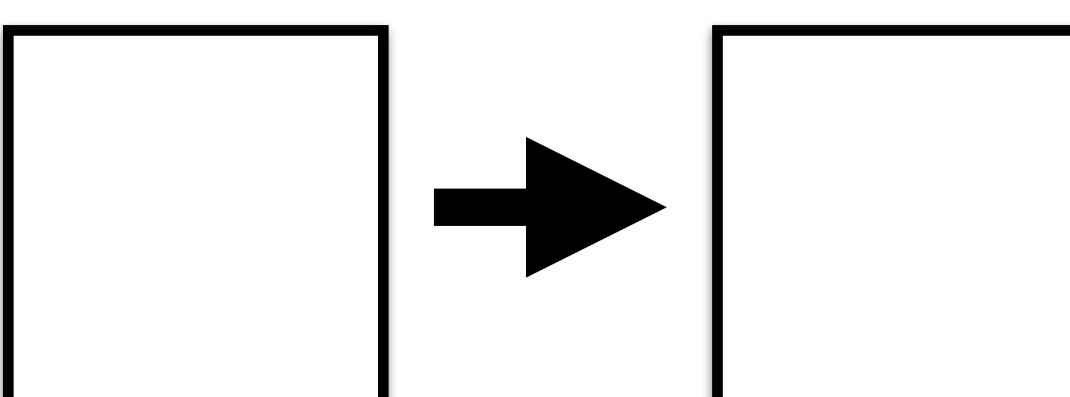
宇宙の鍊金術：rプロセス元素合成

速い中性子捕獲 + ベータ崩壊による元素合成

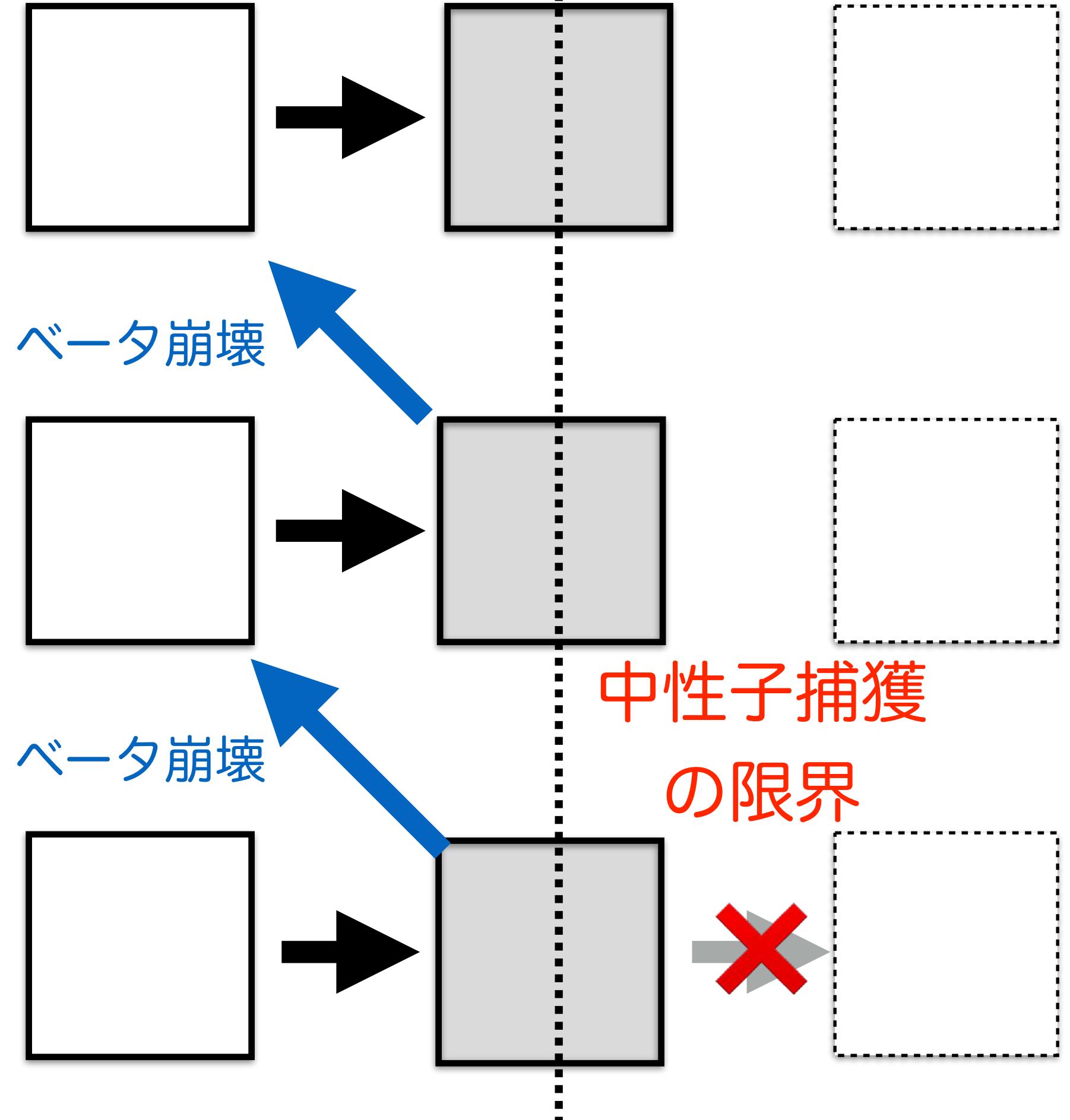


生成過程のイメージ（動画）

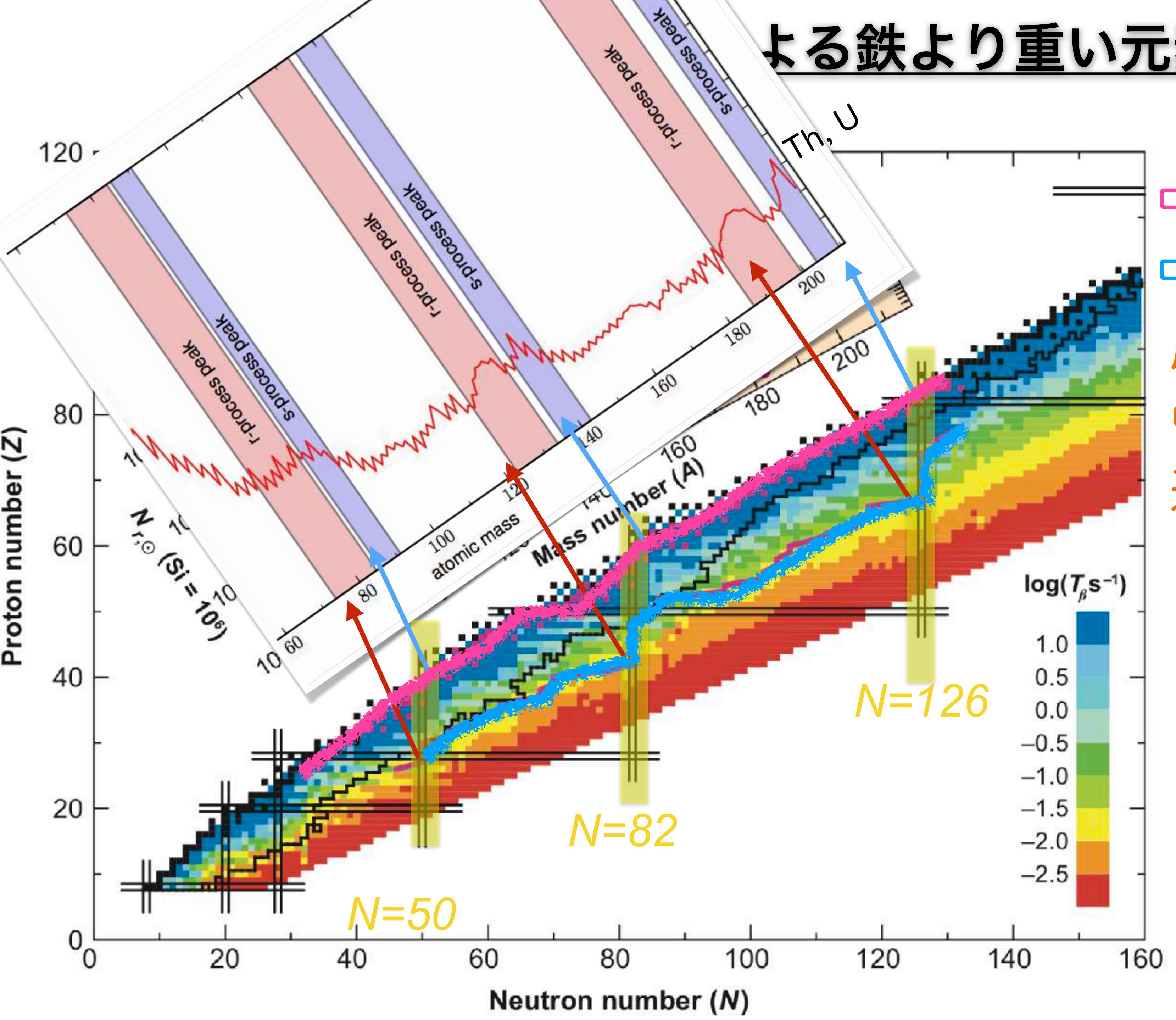
（作成：和田智秀）



魔法数（安定）



による鉄より重い元素の合成：



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
原子核の「魔法数」 特定の
中性子（陽子）数の原子核は
近傍より非常に安定
(複雑だが周期的な性質)



中性子捕獲による元素の合成：



これらが起こる天体现象は？

- ・中性子は原子核外では不安定ですぐに陽子に崩壊（半減が10分ほど）
→ 天然では中性子を「作る」源が必要

① 星の核反応

- ・星の進化中に起こる $^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{25}\text{Mg} + n$ や $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ の反応
- ・中性子が多めの軽い原子核に α 粒子（ヘリウム4原子核）が衝突し中性子を叩き出す
- ・少しずつ中性子を吸収し、ゆっくりと進行（星の一生の時間）：sプロセス

② 超新星爆発（中性子星の形成）や中性子星同士の合体

- ・中性子星：中性子の塊のような天体
- ・形成過程：超新星爆発（物質の極端な爆縮過程）： $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- ・中性子星の破壊：中性子星連星（片方がブラックホールでも）の衝突
- ・「中性子の塊」の物質が大規模に短時間で放出（～数秒）：rプロセス

光の波長に応じた望遠鏡・衛星



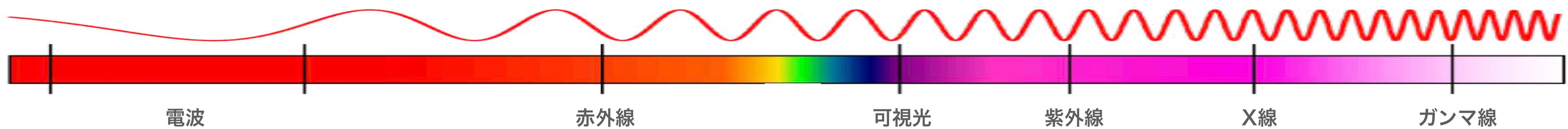
アルマ望遠鏡(電波): 国立天文台 あかり衛星(赤外線): JAXA



すばる望遠鏡(可視光): 国立天文台



すざく衛星(X線): JAXA



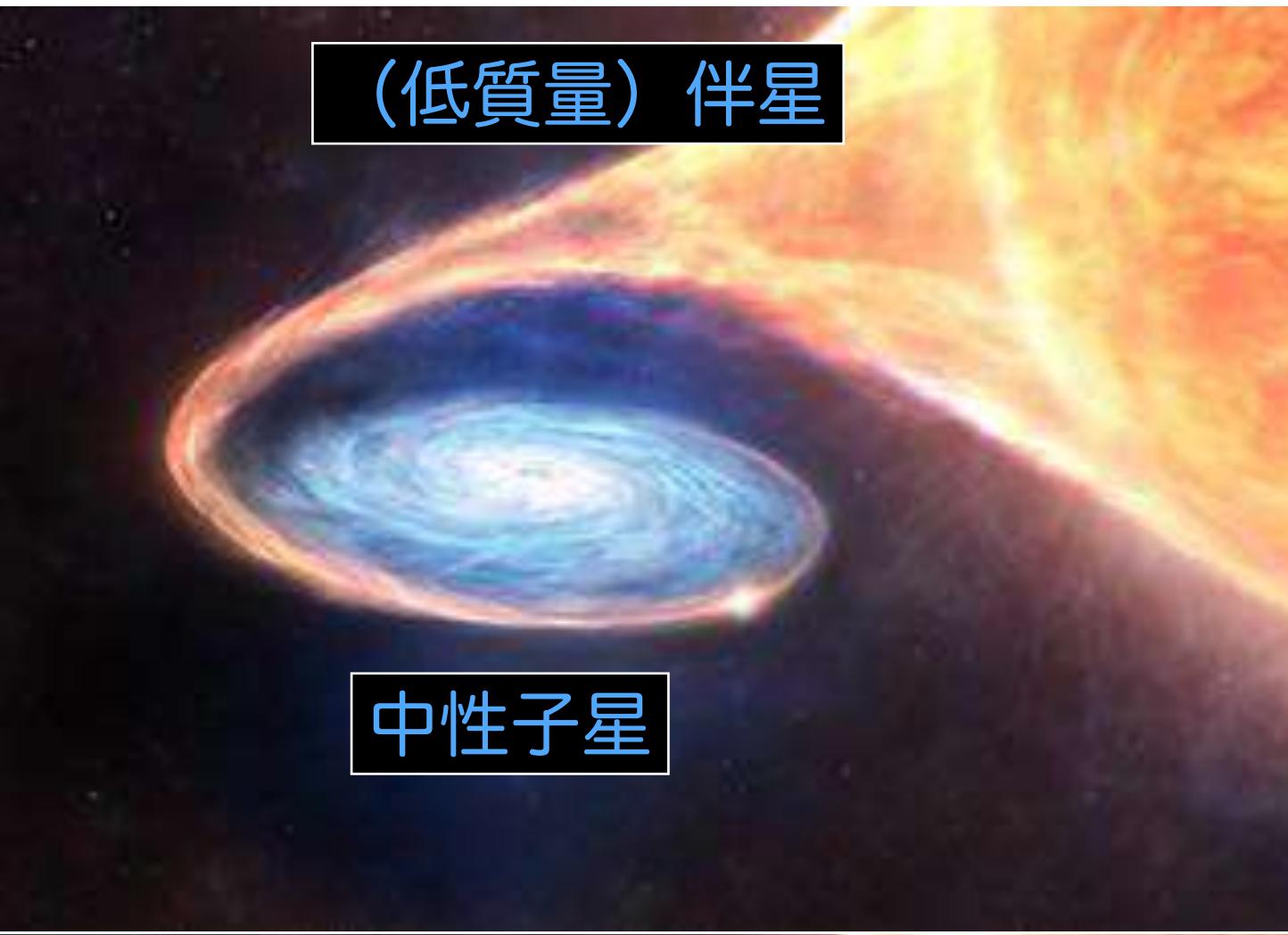
- ・地上では可視光や電波
- ・宇宙（観測衛星）では、赤外線、X線やガンマ線など
→ 多波長による同時観測
- ・さらに、ニュートリノや重力波など電磁波以外のシグナルも
→ マルチメッセンジャー（多粒子）天文学



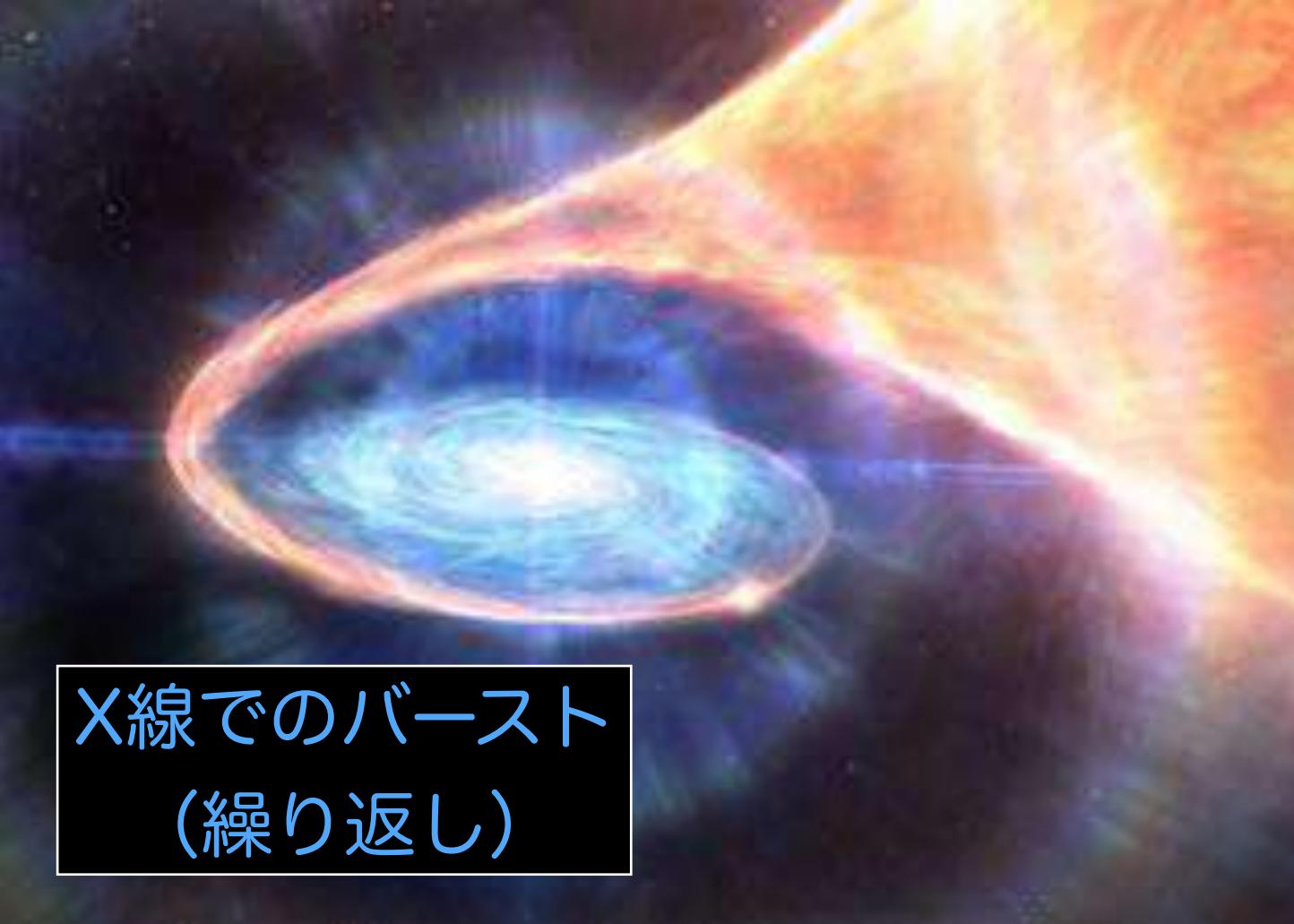
X線バーストでの元素合成

X線バーストイメージ

(低質量) 伴星



中性子星



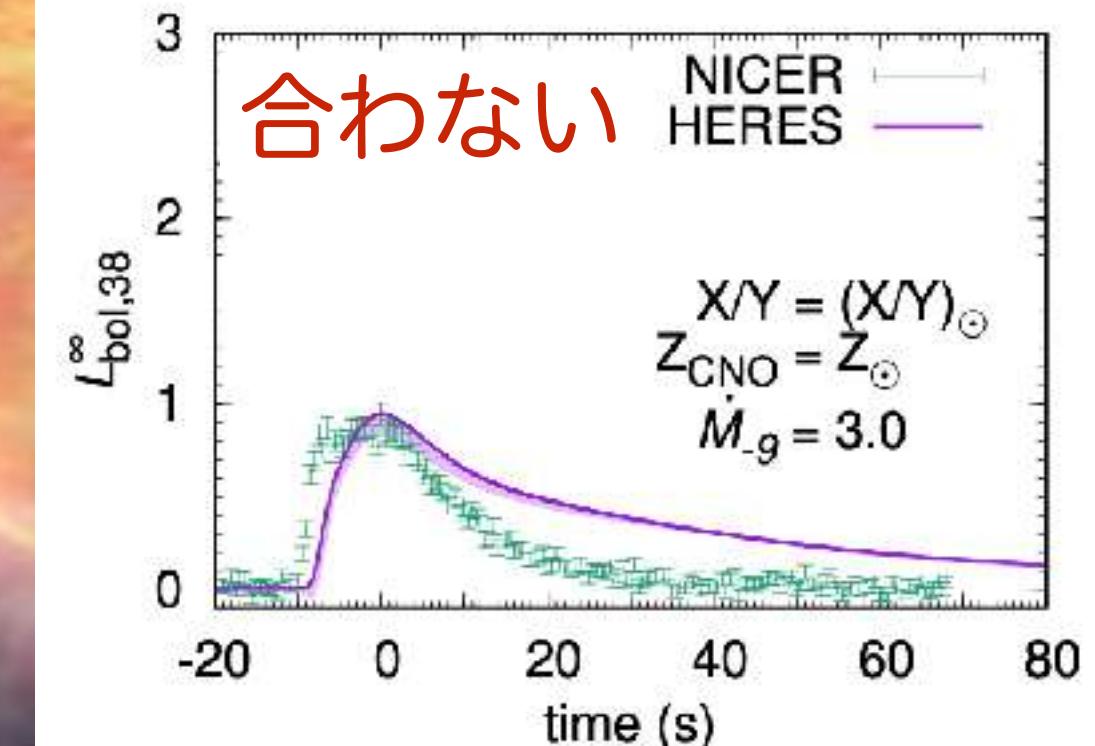
X線でのバースト
(繰り返し)

最近の成果 (with 観測グループ) :

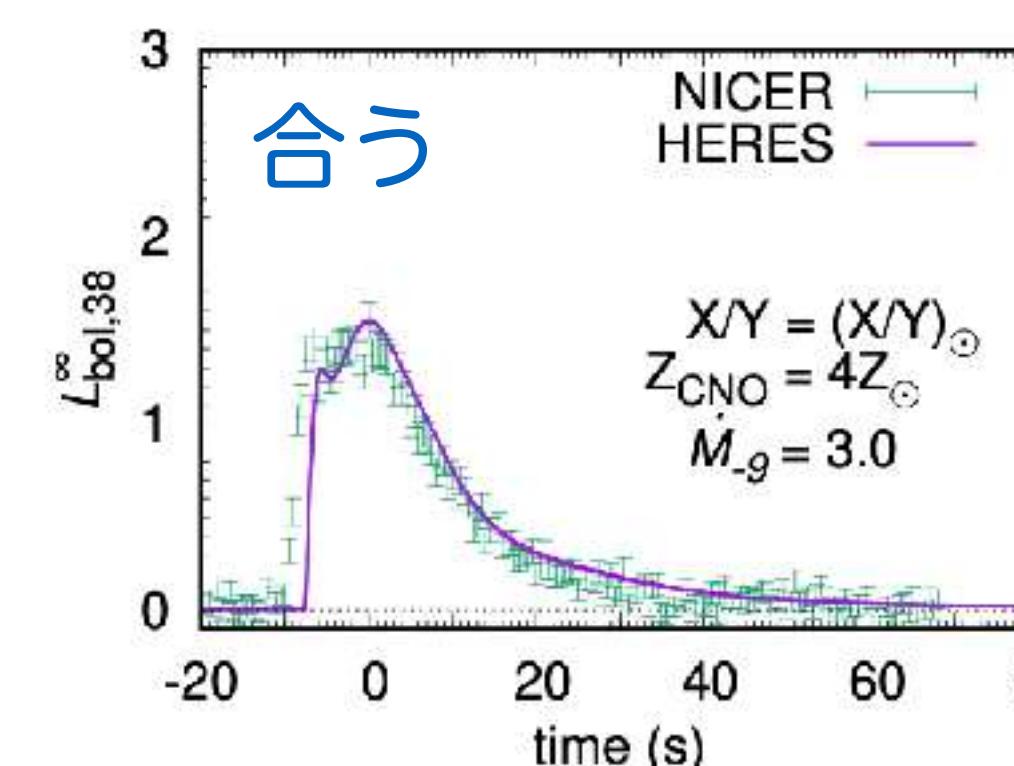
- SRGA J144459.2—604207での“clocked” X線バースト (2-3月)
- 理研のX線観測チーム (NinjaSat) と密に連携し、結果を解釈。
 - 観測論文 : Takeda+NN+(2025), PASJ (in press.)
 - 理論論文 : Dohi, NN, Hirai+(2025), PASJ (in press.)

X線光度曲線による「伴星の組成診断」

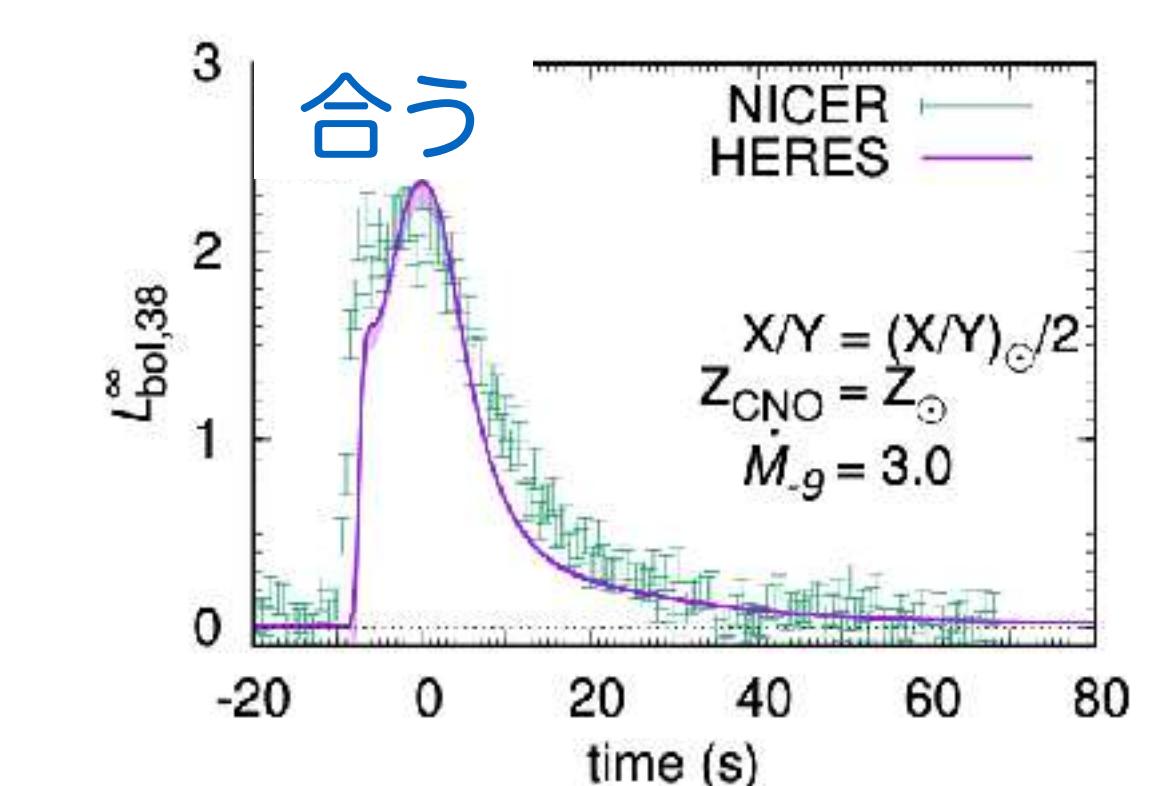
太陽組成



高金属量



低水素 (高He)



まとめてプレスリリース準備中

NinjaSatチーム (玉川研)

+理論 (西村、土肥、平井)

・高金属 → 太陽組成の4倍：銀河中心（バルジ）からやってきた？

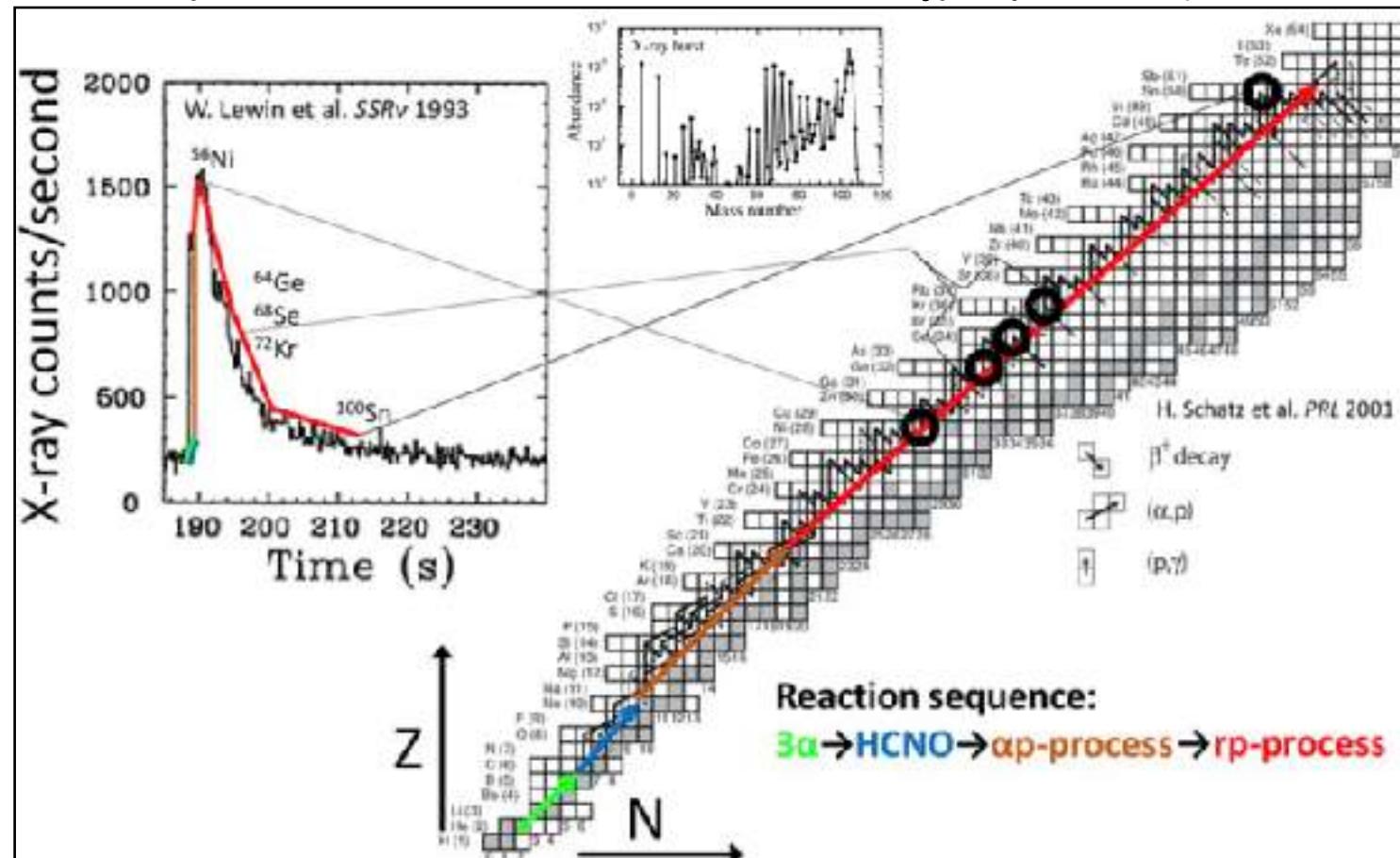
・低水素 (高 He) → 星の外層 (水素) が削れてHe層が露わに

→ 実は、伴星は $2 - 2.5 M_\odot$ の中質量星である！

(↑最近の連星進化理論の結果と合わせて解釈)

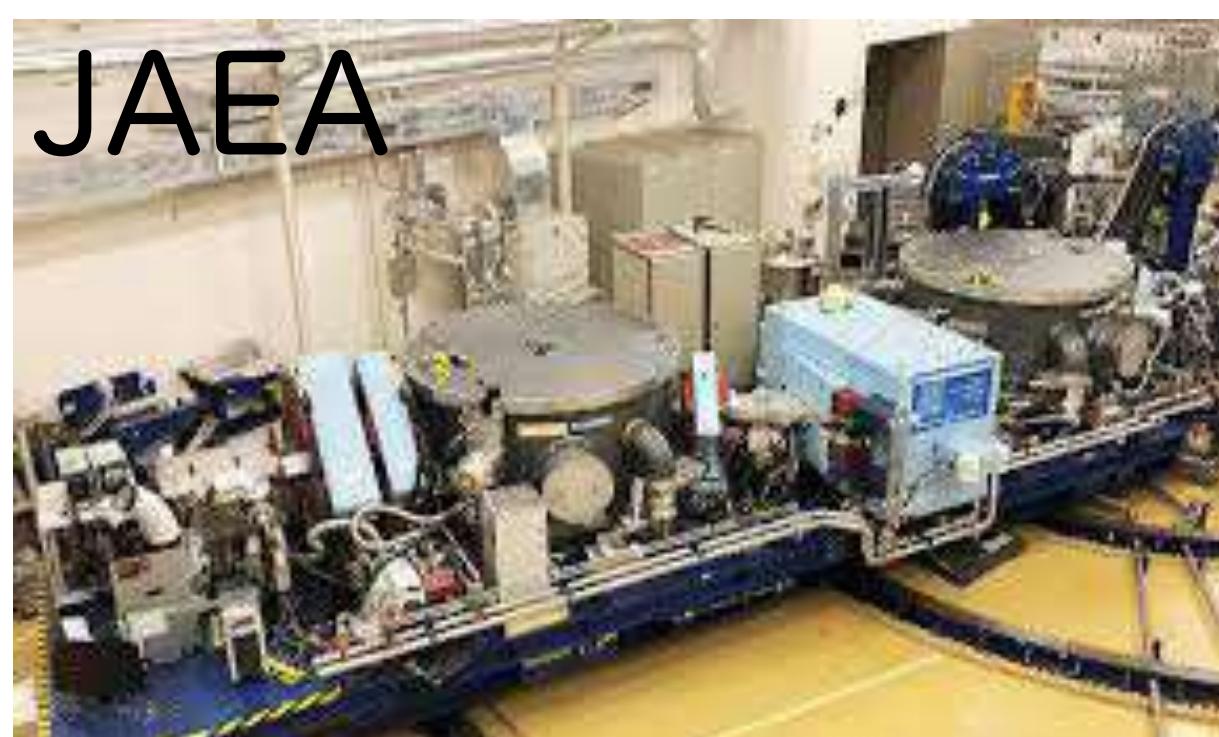
X線バーストでの元素合成

X線バーストの核燃焼



Meisel+(2018)

加速器



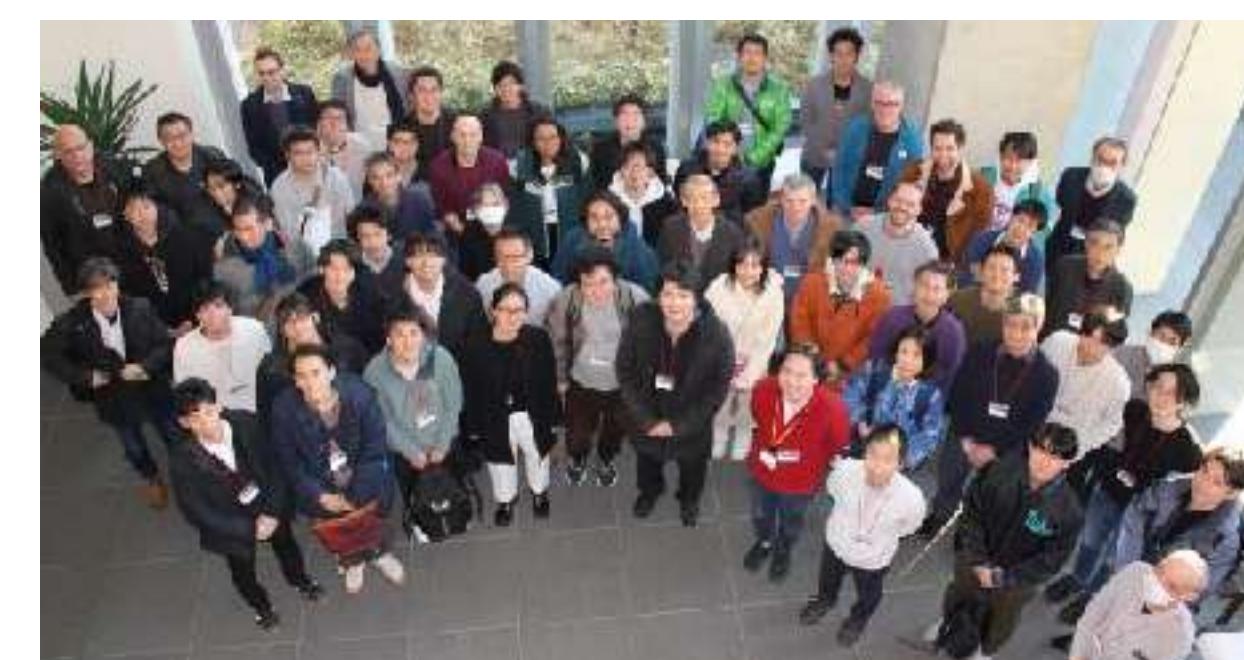
進行中・今後：

- ・さらにNinjaSat 観測 (MAXI J1752—457)
 - ・スーパーバーストではないか? (Aoyama+NN+, in prep.)
 - ・バースト後の冷却期を捉えたという主張
- ・CRIB実験 (w/ 大川、山口、早川)：
 - ・ $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$ の測定 → 元素合成へのインパクト
 - ・(西村のモンテカルロ元素合成コード)
 - ・今後の反応率の impact study もアップデートの必要あり

天体観測と加速器実験ともに有益なコラボレーションができる。
→ 「理論チーム」としての存在感（必要性）を示したい。

基研研究会「Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars」1月27-30日@京都大学

- ・基研、IRenaによる財政支援 (CNSも後援)
- ・10カ国ほどから90名以上の参加



重要な反応率： νp プロセス

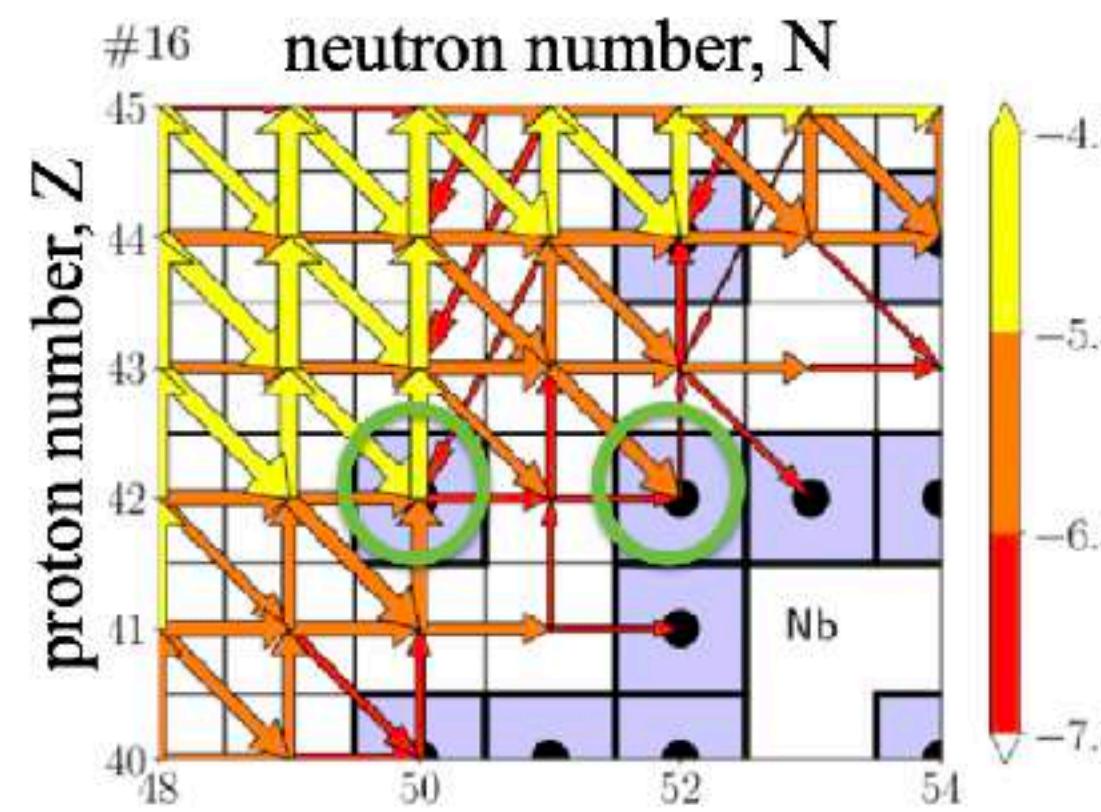
• Mo の生成量： $^{92}\text{Mo}(\text{p},\text{g})^{93}\text{Tc}$

- $^{92}\text{Mo}/^{94}\text{Mo}$ の決定に対して重要な反応（天文学的問題）：Mo問題の解決の鍵となる？
- 2021年：実験計画（する意思）を開始（by 西村） 鈴木大介氏（東京大/理研）
- 2022—2023年：
 - 理研の内部競争資金への申請へ（非PI向け、2年で300万円）
→ 採択（FY2024–2025）

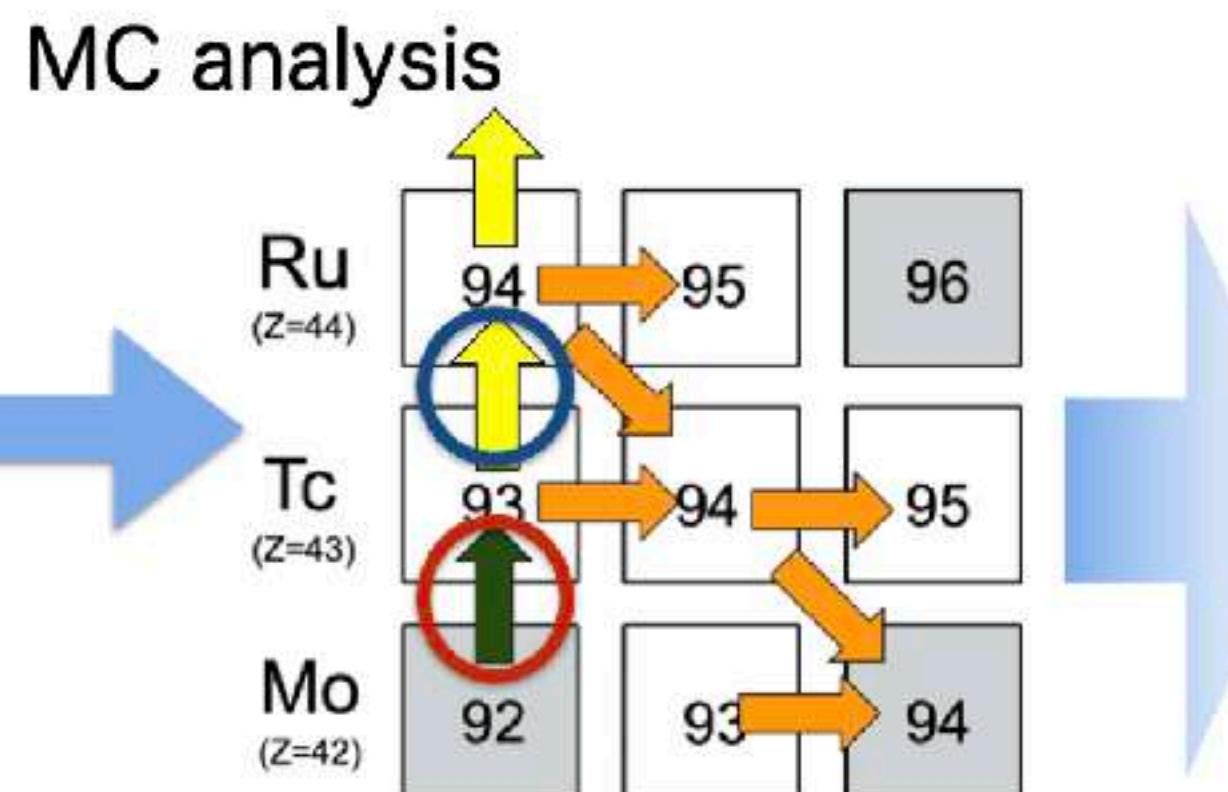
実験提案分書

東京科学大のペレトロン加速器
の使用を想定

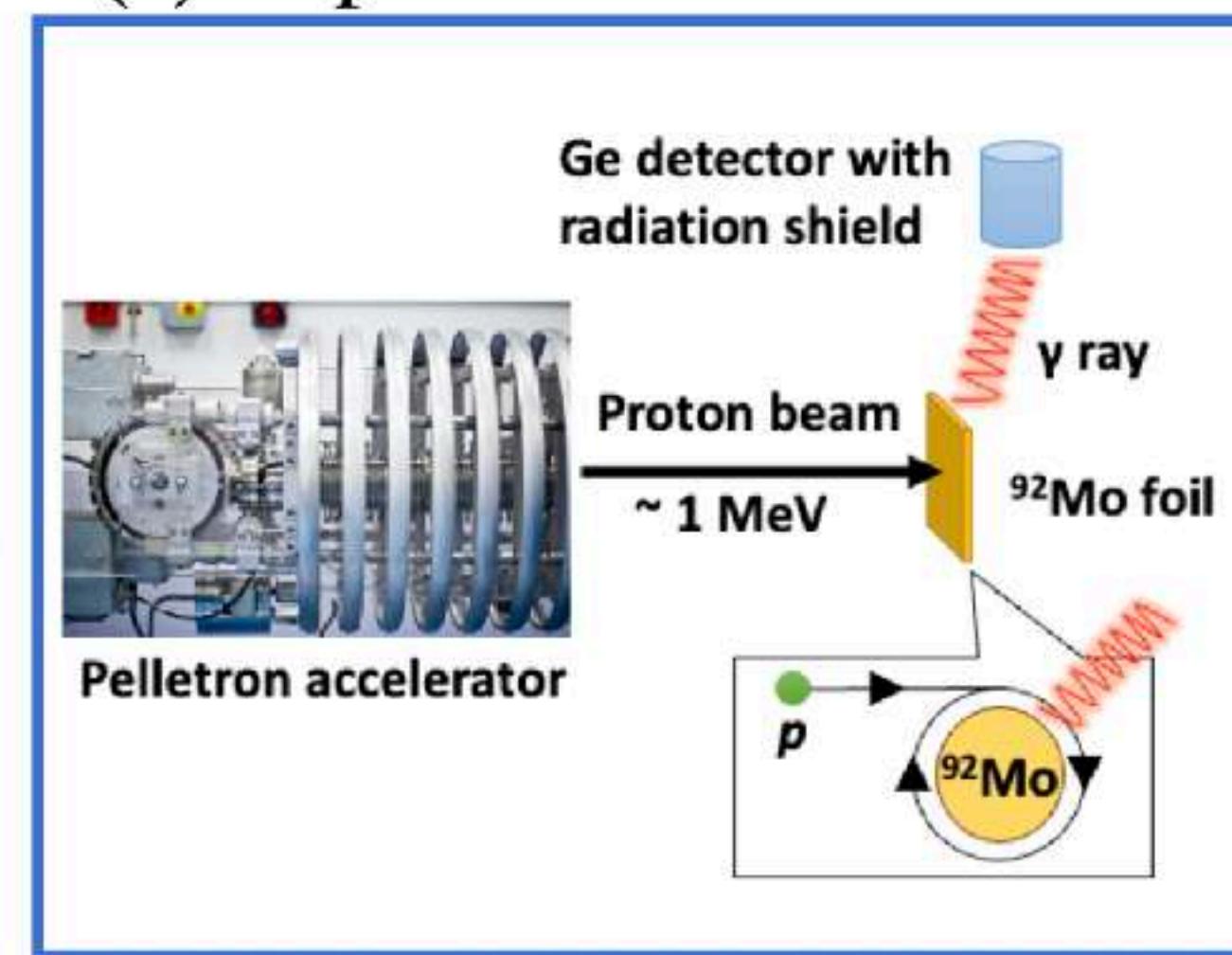
(a) Nucleosynthesis



(b) Key reactions



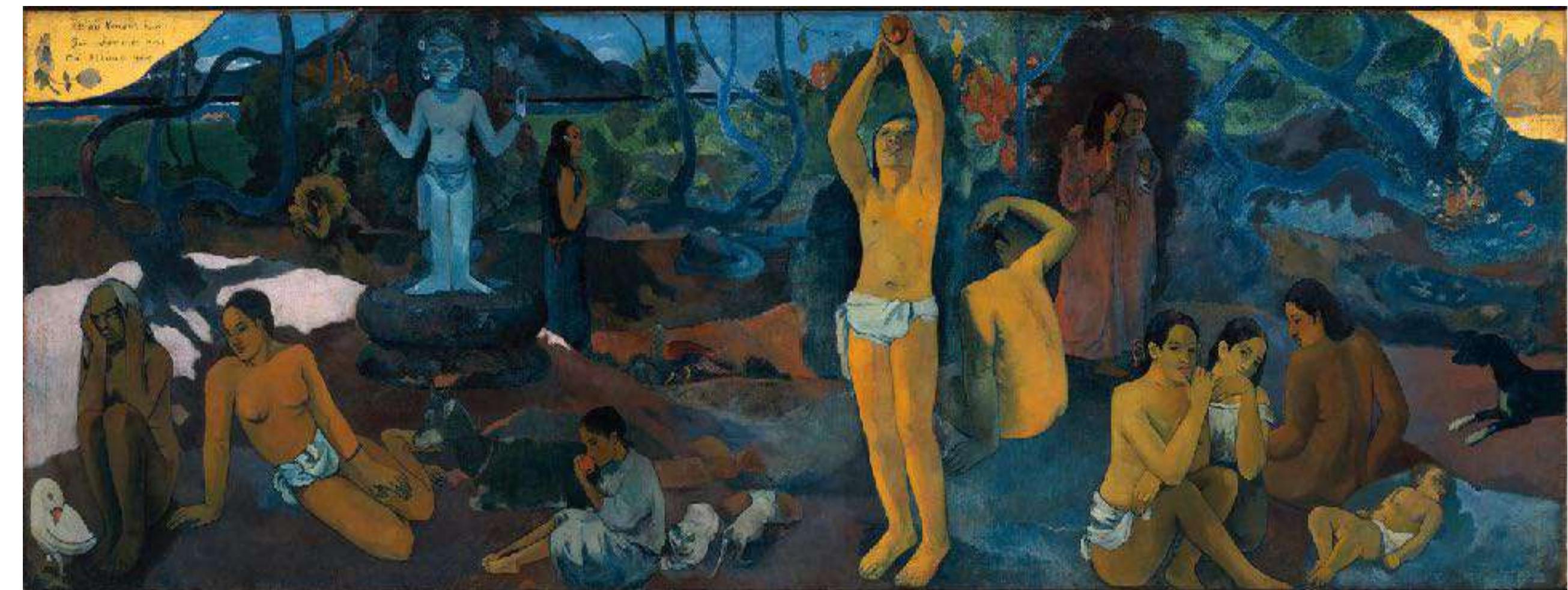
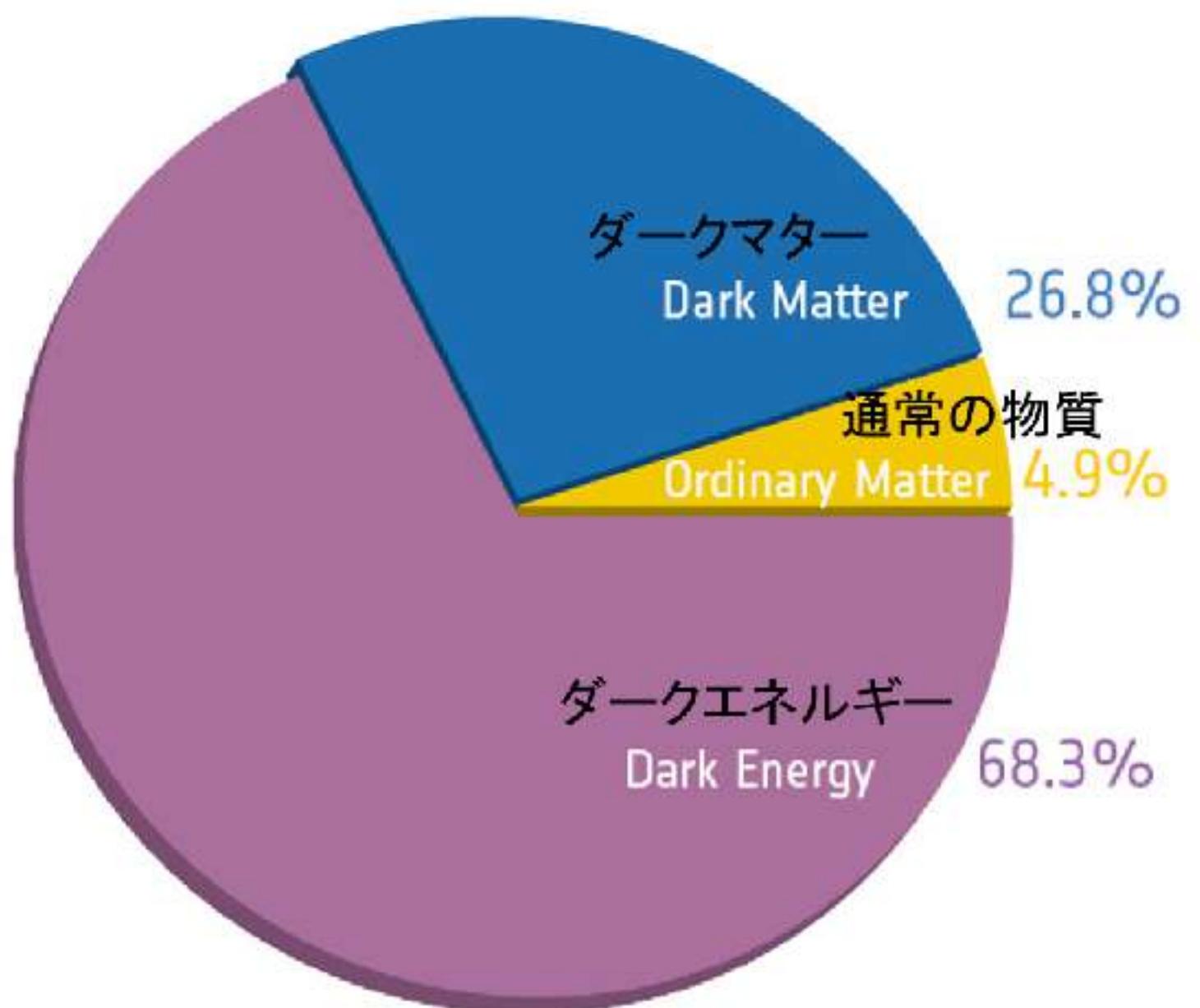
(c) Experiment



宇宙核物理のモチベーション

- ・宇宙の科学（天文学）としての魅力
- ・原子核（原子核変換：反応・崩壊）の性質を観る天然の「実験場」
- ・原子核物理・原子力工学に対する宇宙からの動機づけ

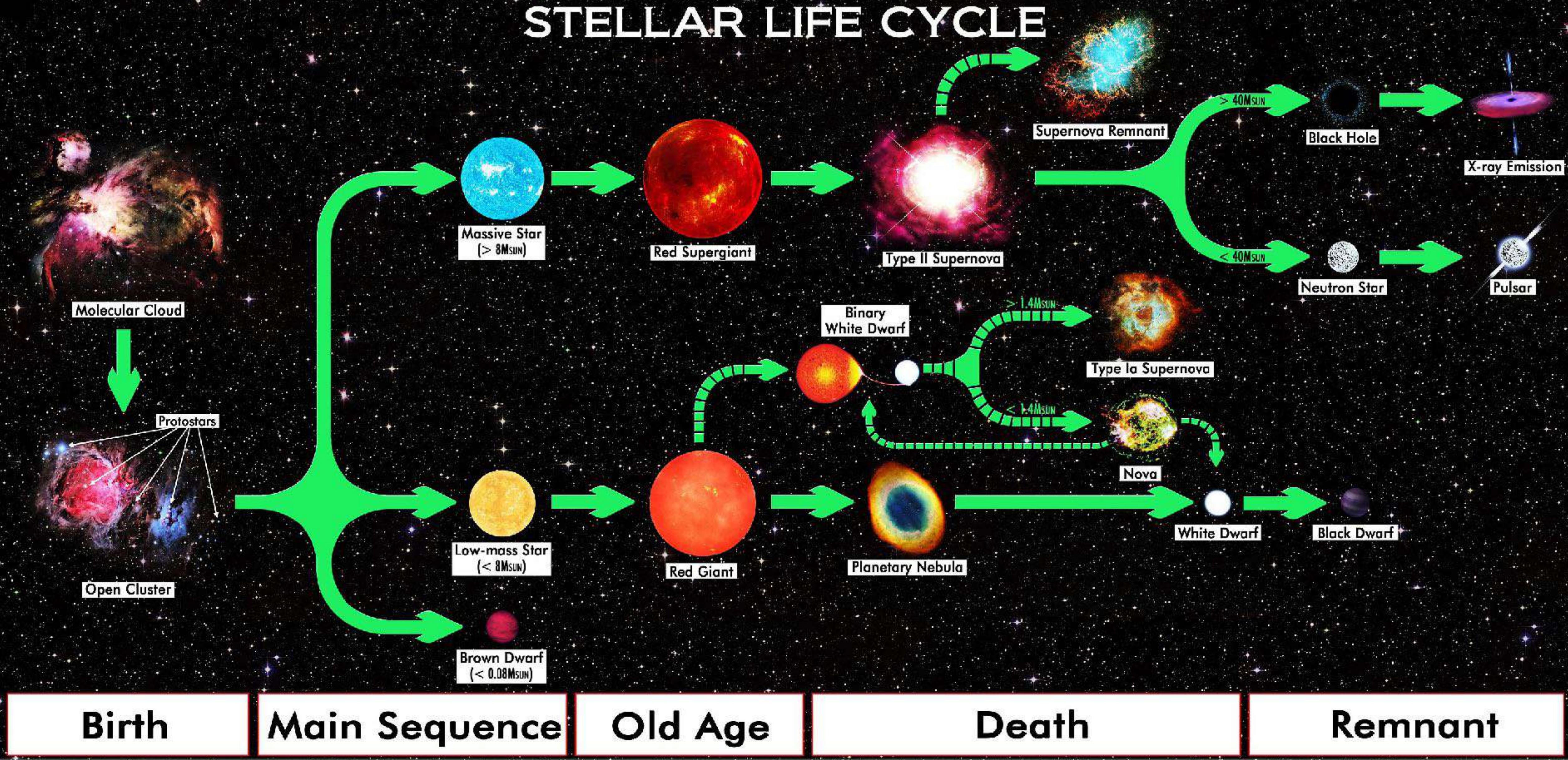
「我々はどこから来たのか 我々は何者か
我々はどこへ行くのか」 ゴーギャン
→ 「物質」の観点から説明



バリオンに着目→宇宙の「一部」なのかもしれない。
しかし、我々自身（生命）、身の回りの物質、地球・・・。
すべて物質の世界。物質から生命への入口も「元素」

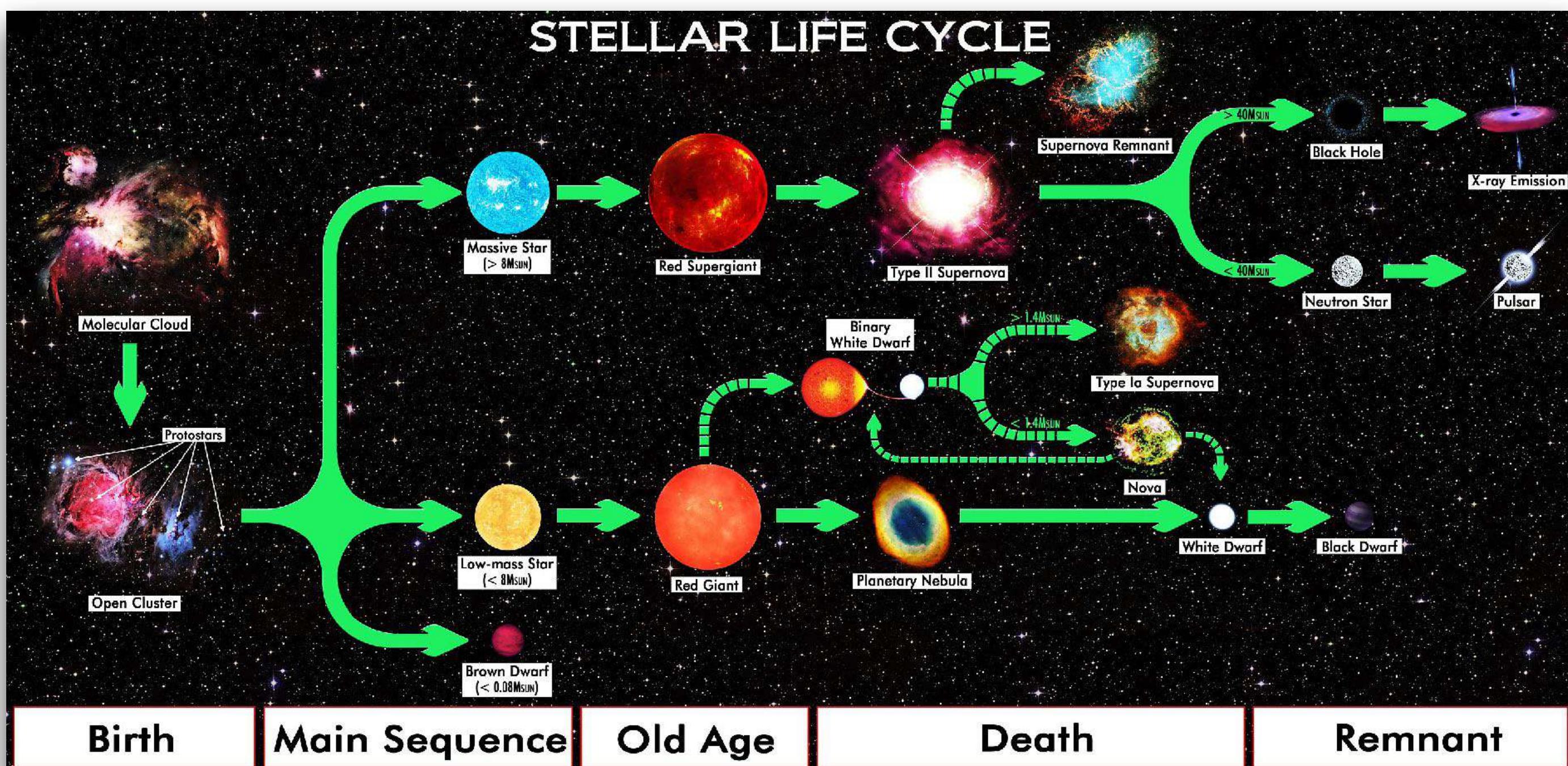
星のライフサイクル

STELLAR LIFE CYCLE



銀河（宇宙）と物質進化

星のライフサイクル



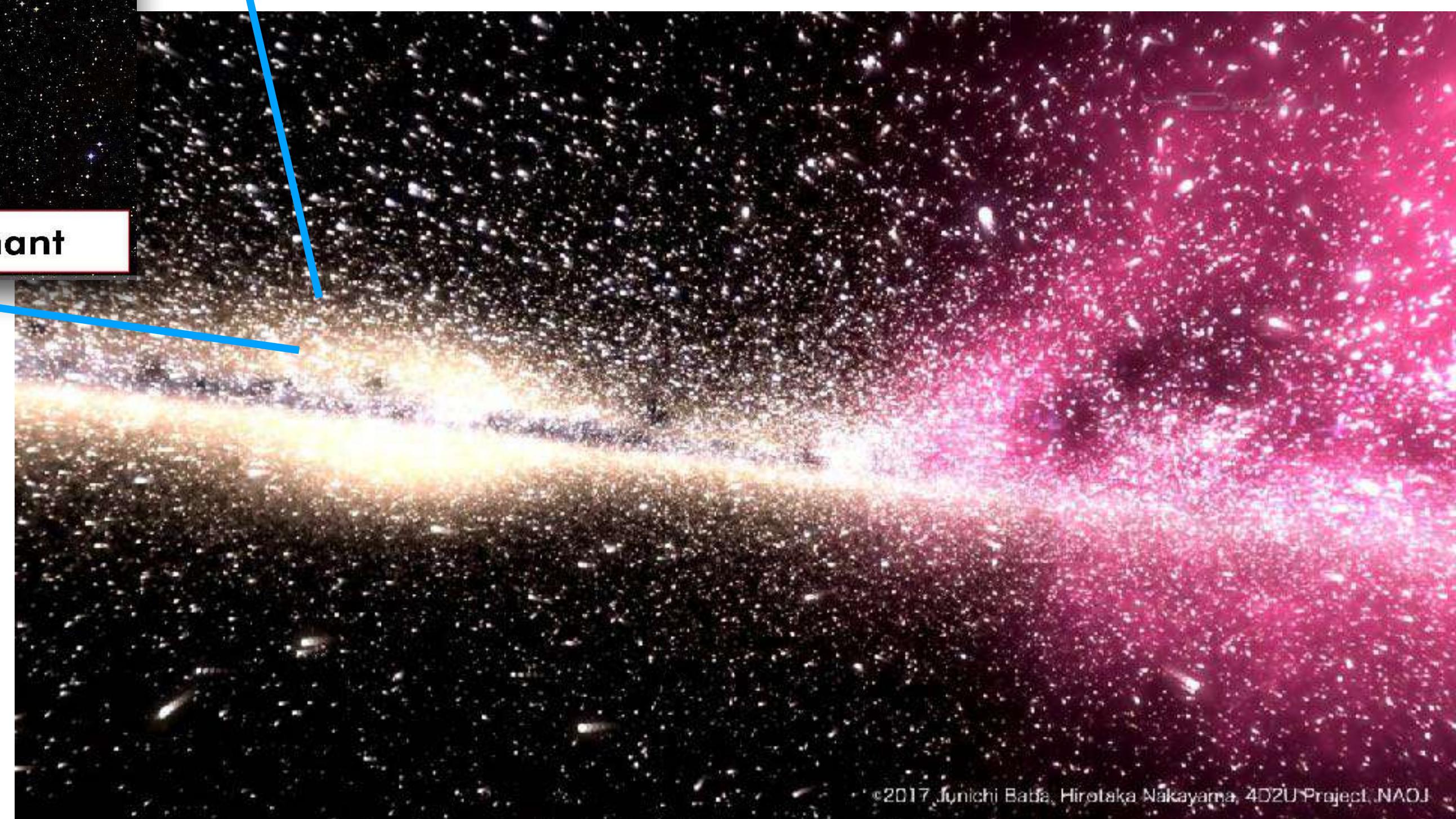
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト

@4D2UNAOJ・チャンネル登録者数 3280人・55本の動画

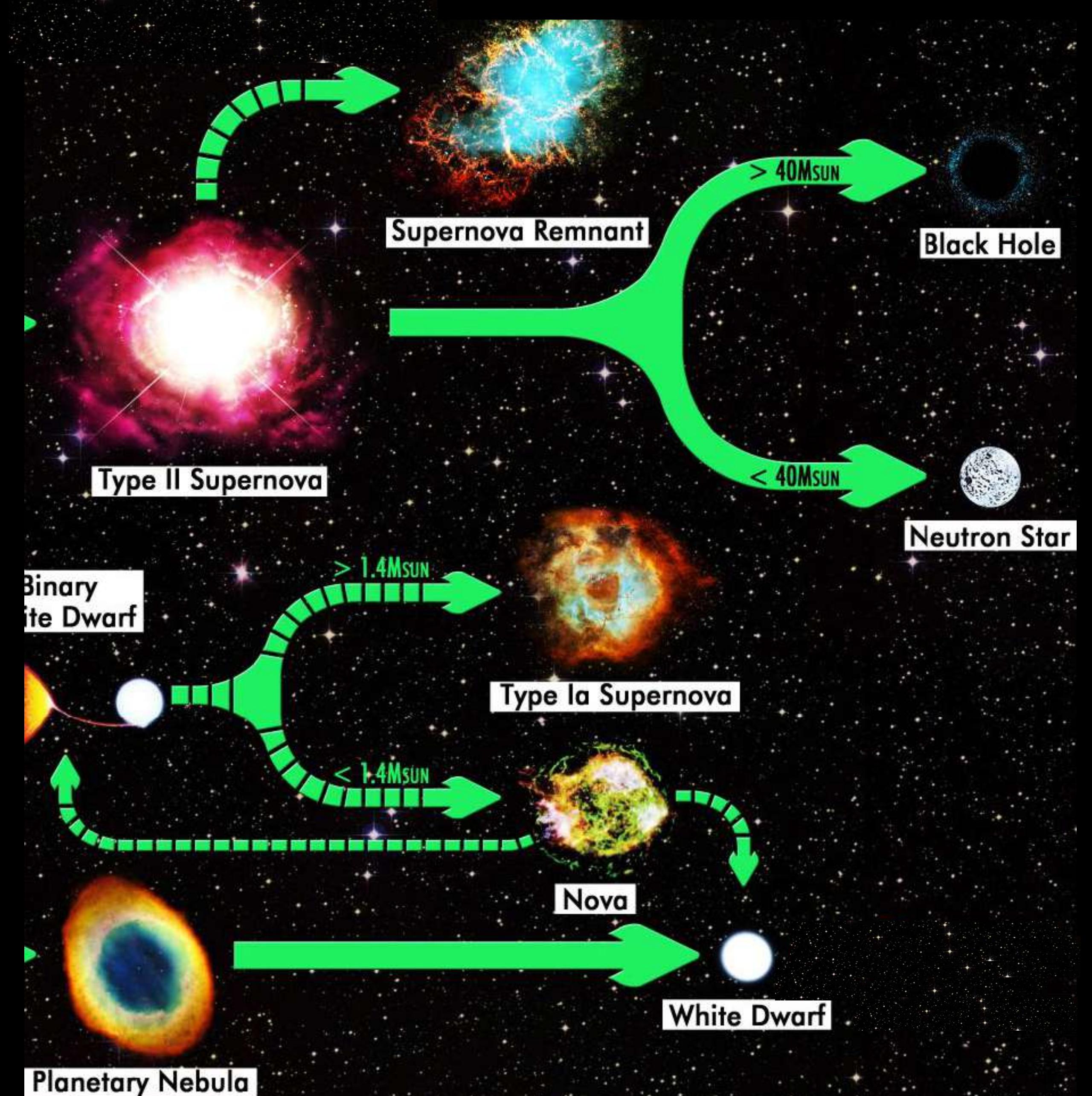
このチャンネルの詳細 >

チャンネル登録

天の川銀河
(シミュレーション)

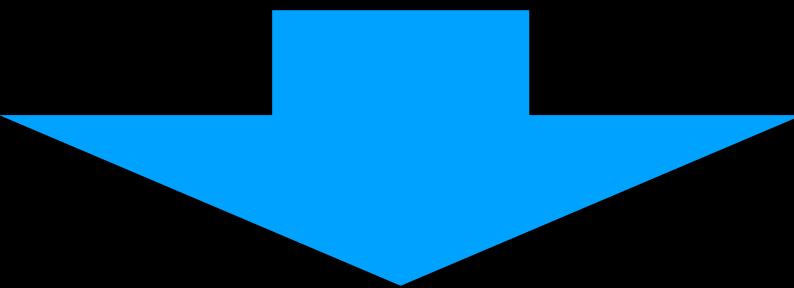


星の死？：第二の人生

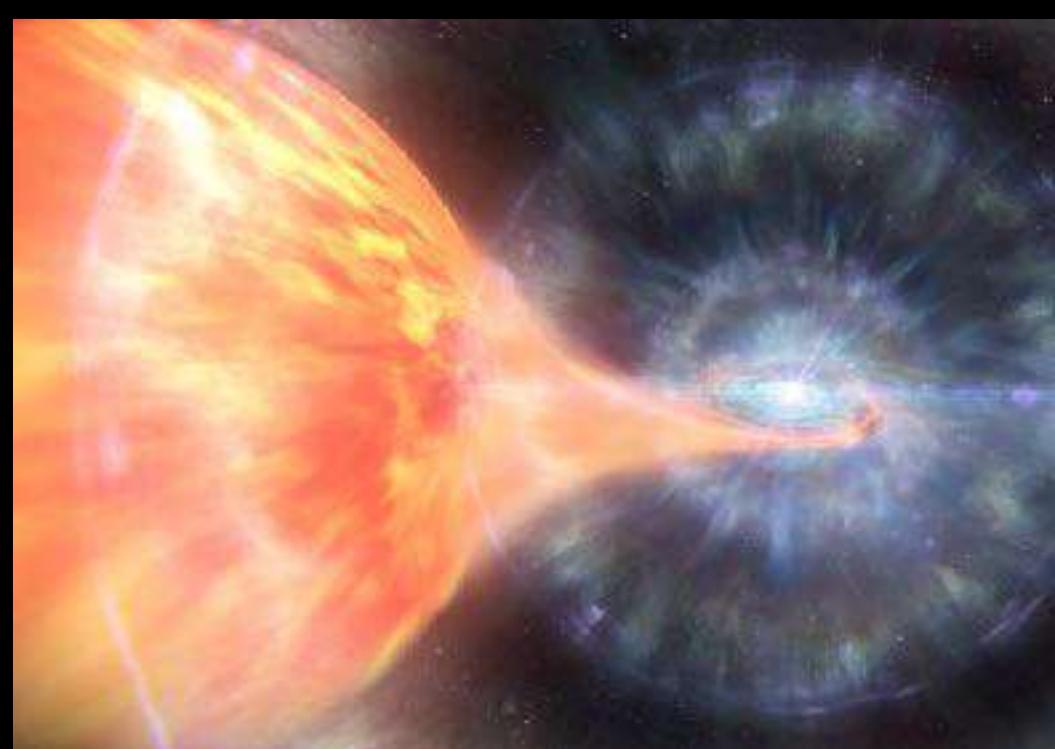


高密度天体

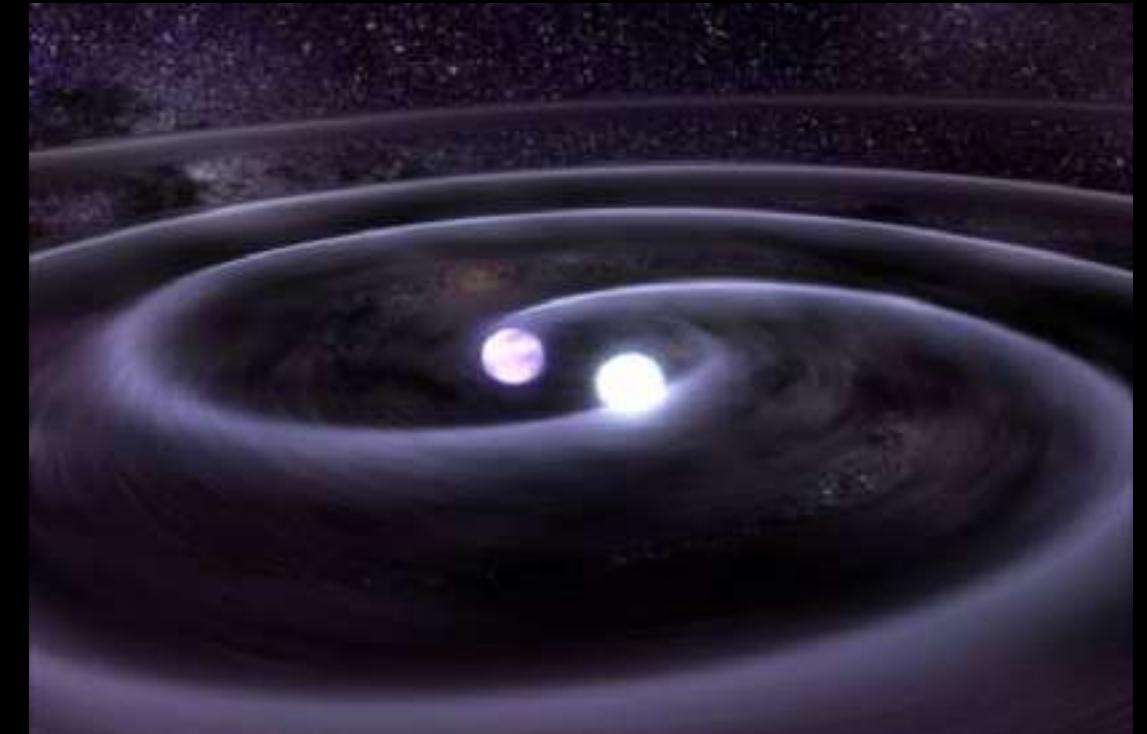
- ・白色矮星
- ・中性子星
- ・ブラックホール



- ・熱的な進化 (核物質・エキゾチック物質)
- ・連星の進化

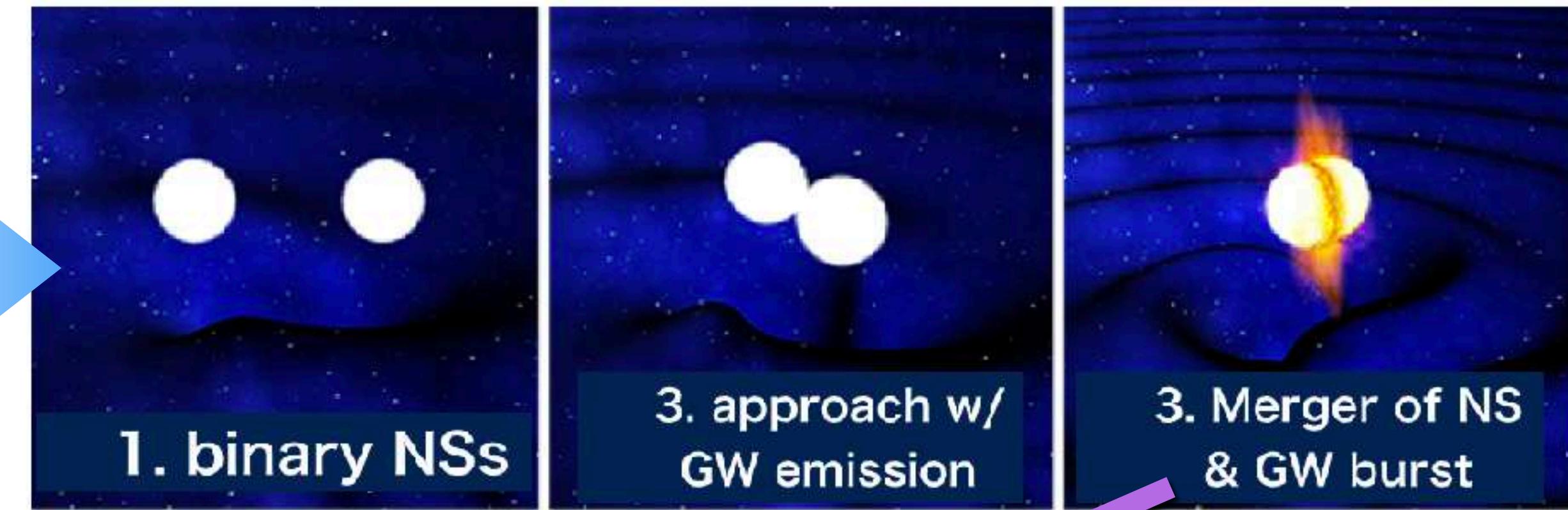
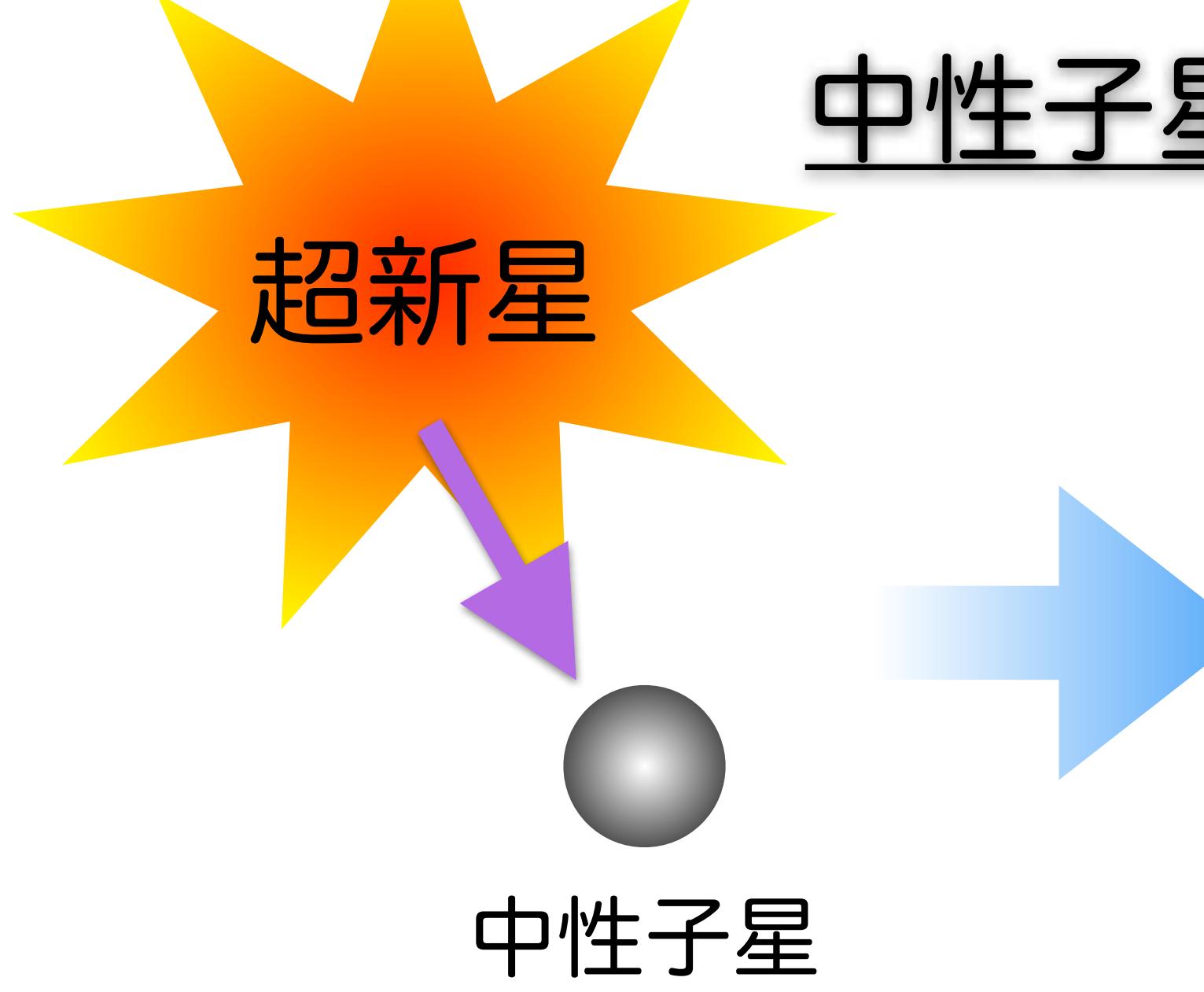


credit: RIKEN

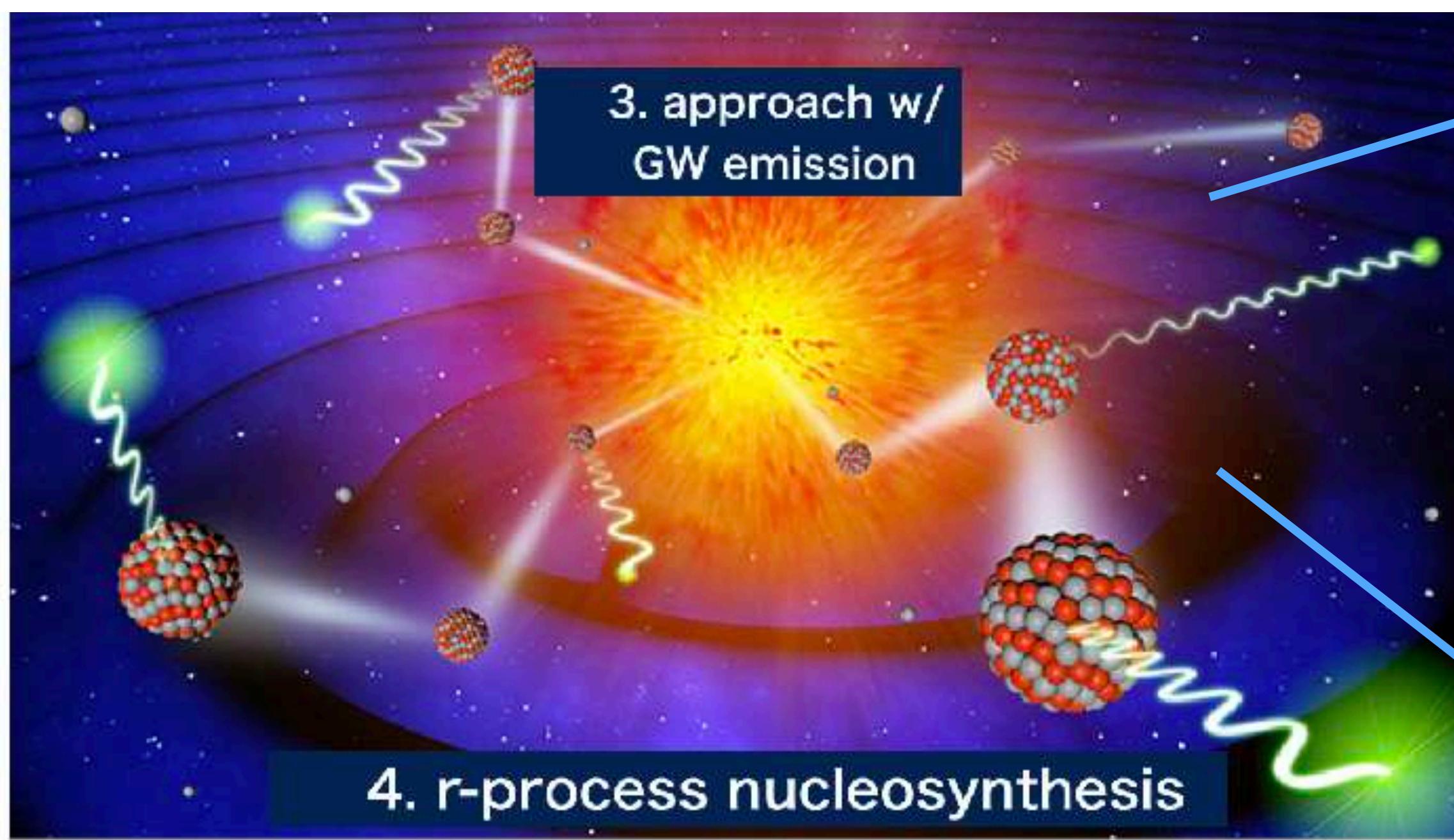


credit: NASA

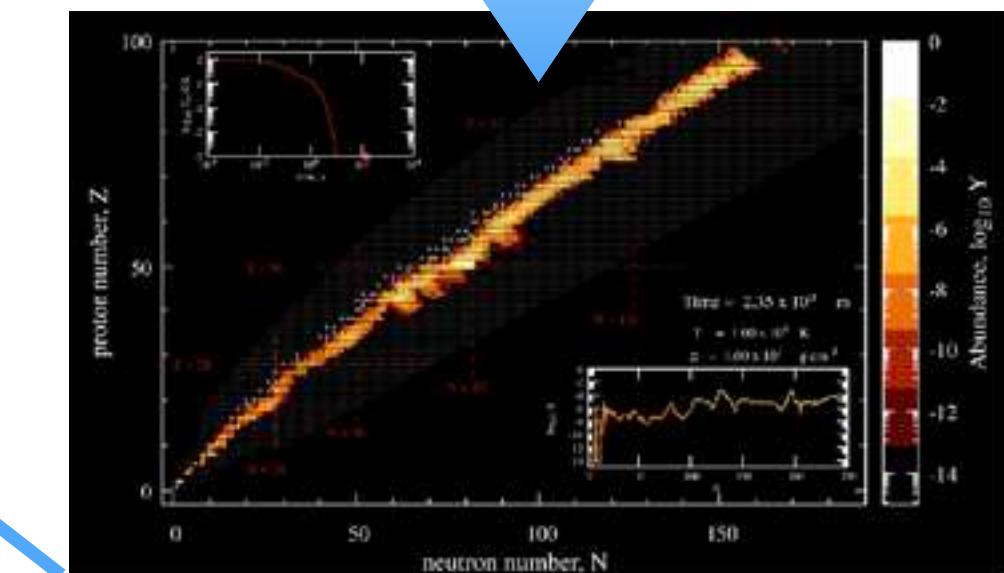
中性子星合体と「キロノヴァ」



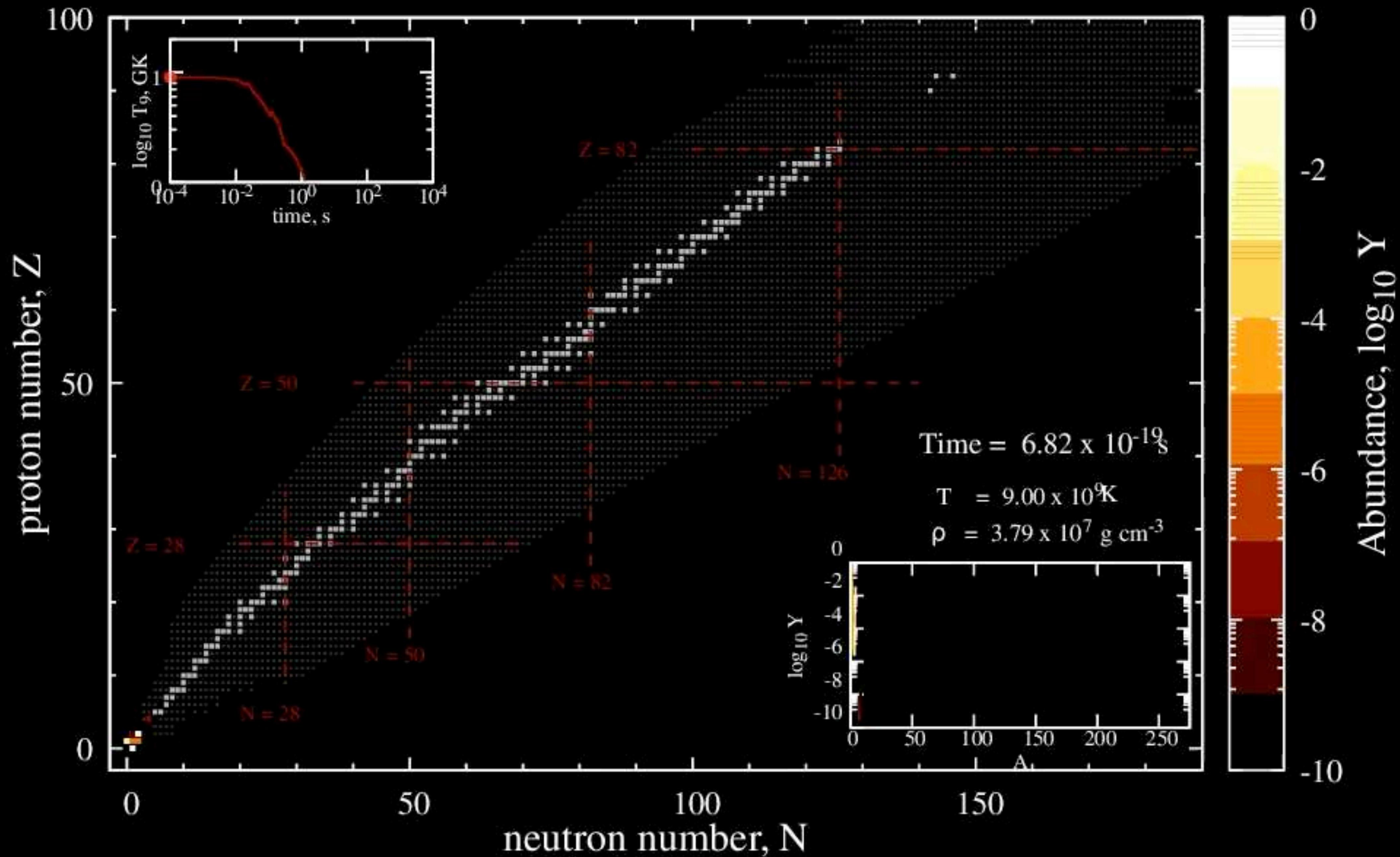
©NAOJ



*r*プロセスによる
中性子過剰核の崩壊



rプロセスのシミュレーション



ポスト・マージャーでの質量放出

Y_e : electron fraction (緑: 重い核、青: 軽い核)

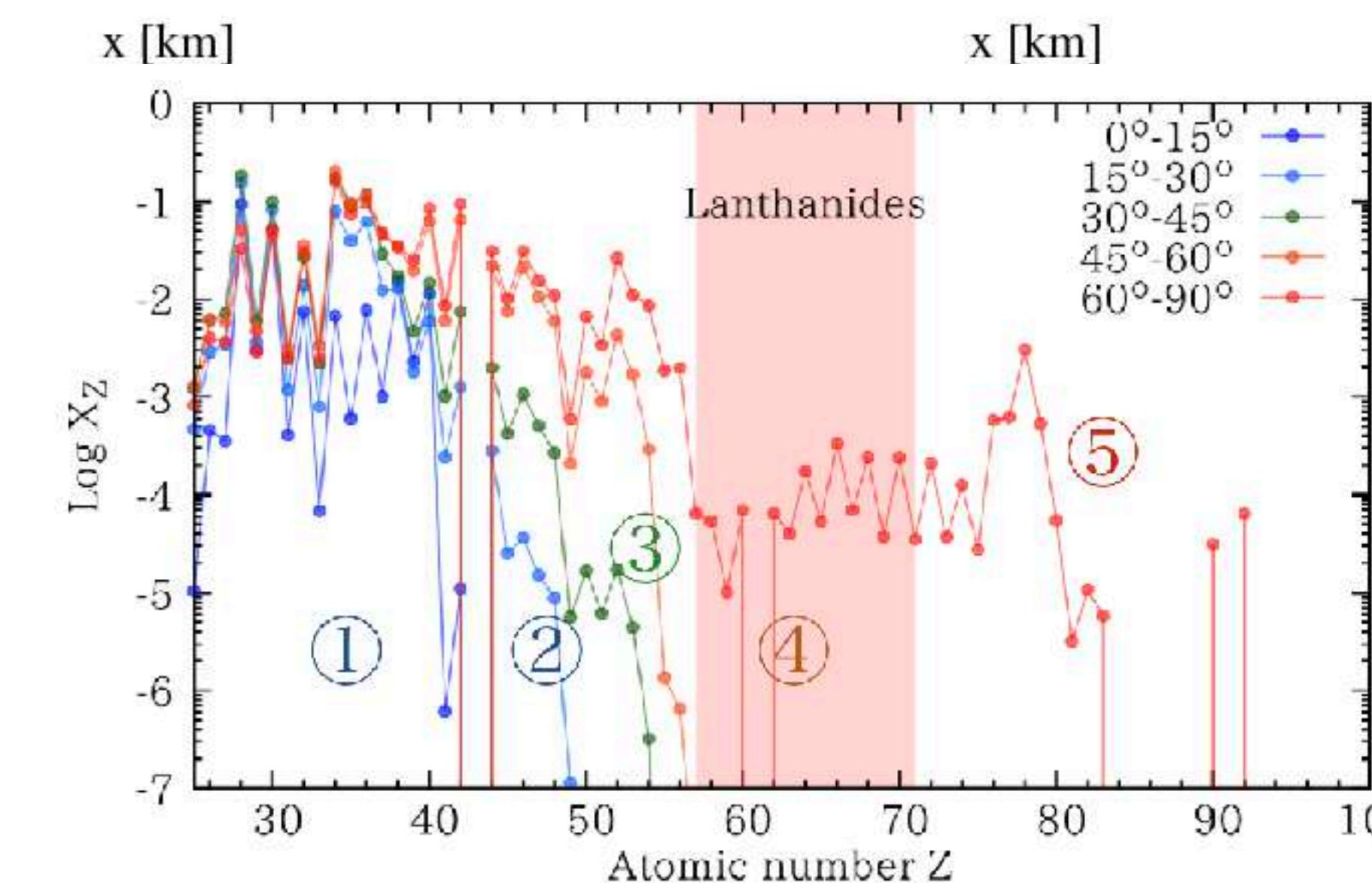
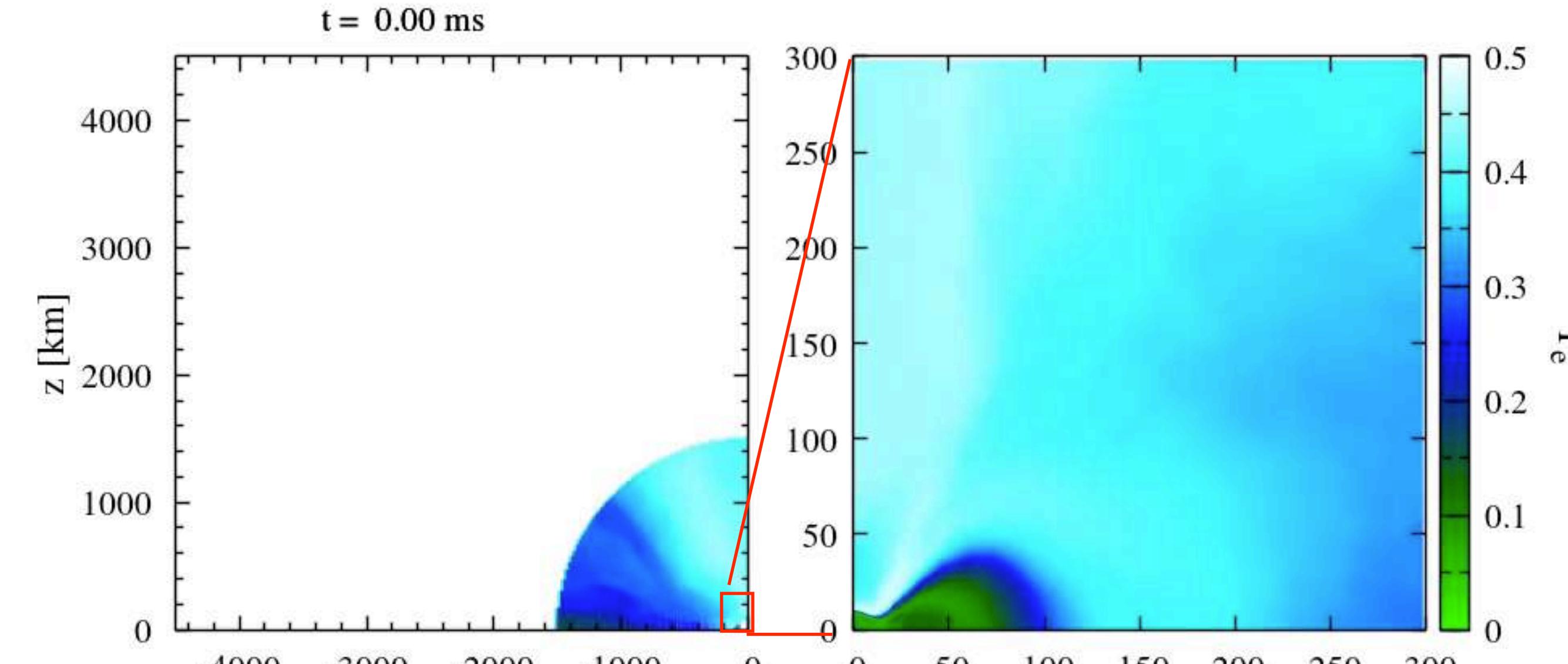
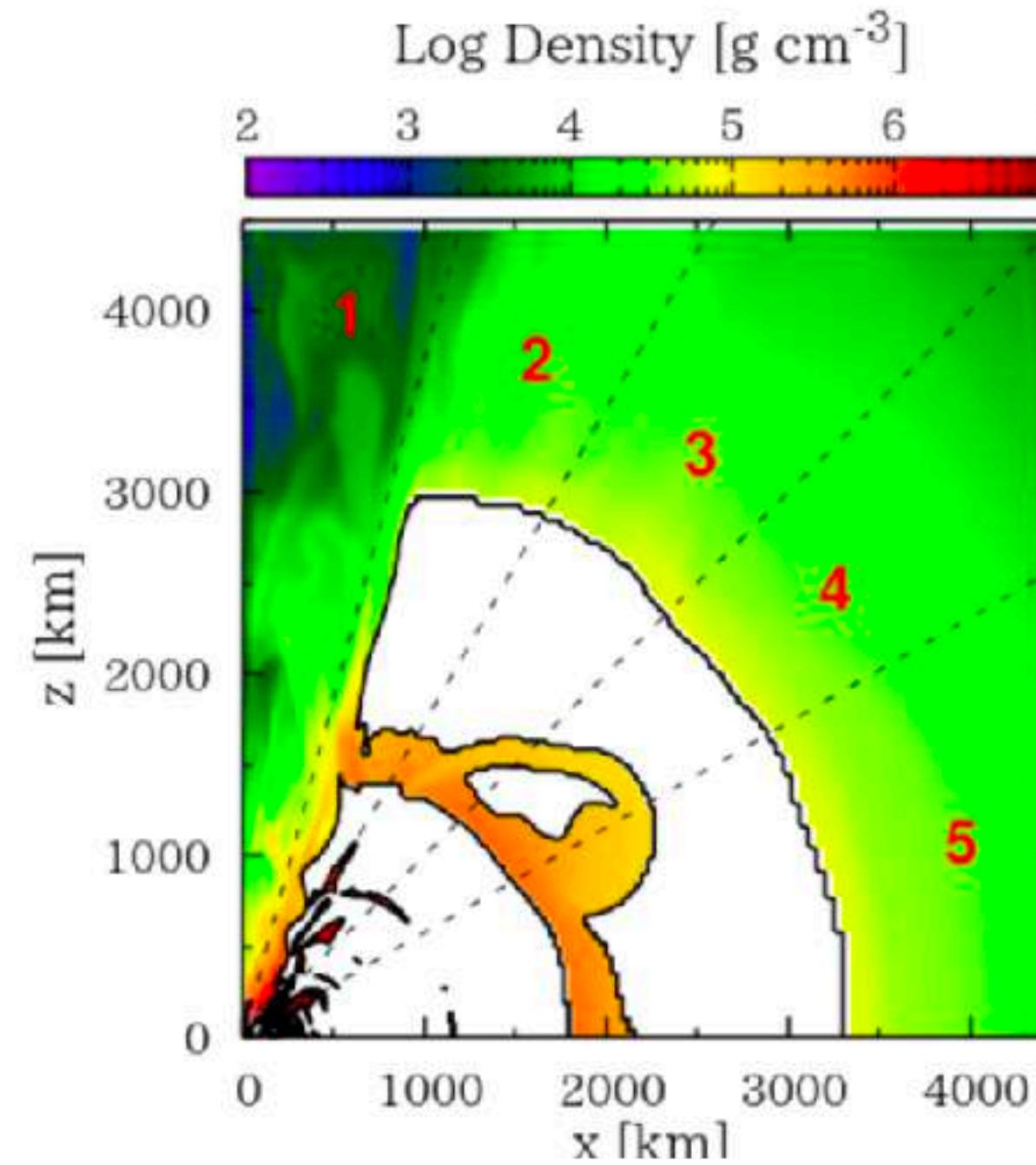
ポスト・マージャー放出

Y_e の進化

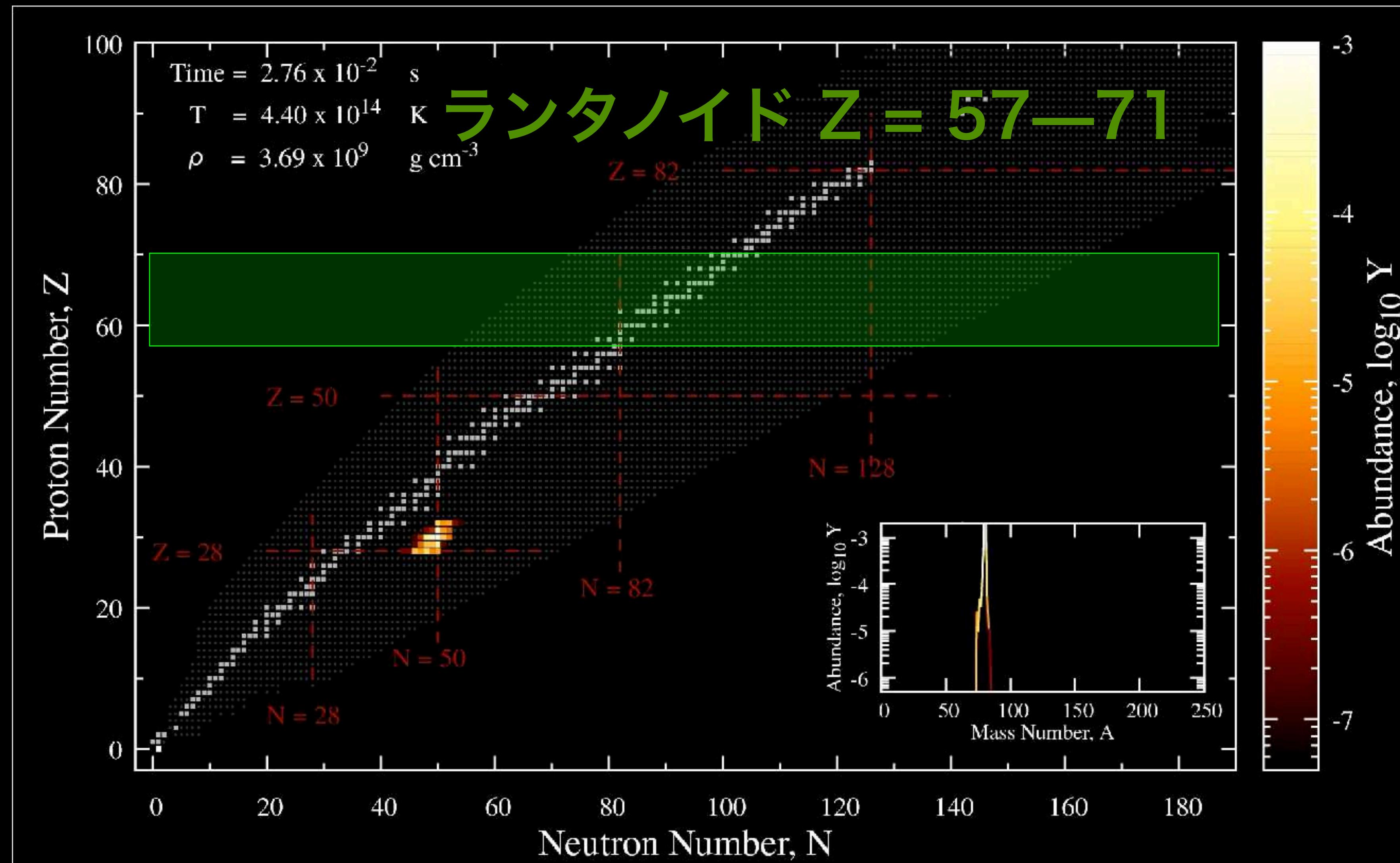
2D一般相対論的流体

シミュレーション

(Fujibayashi+NN+2018)

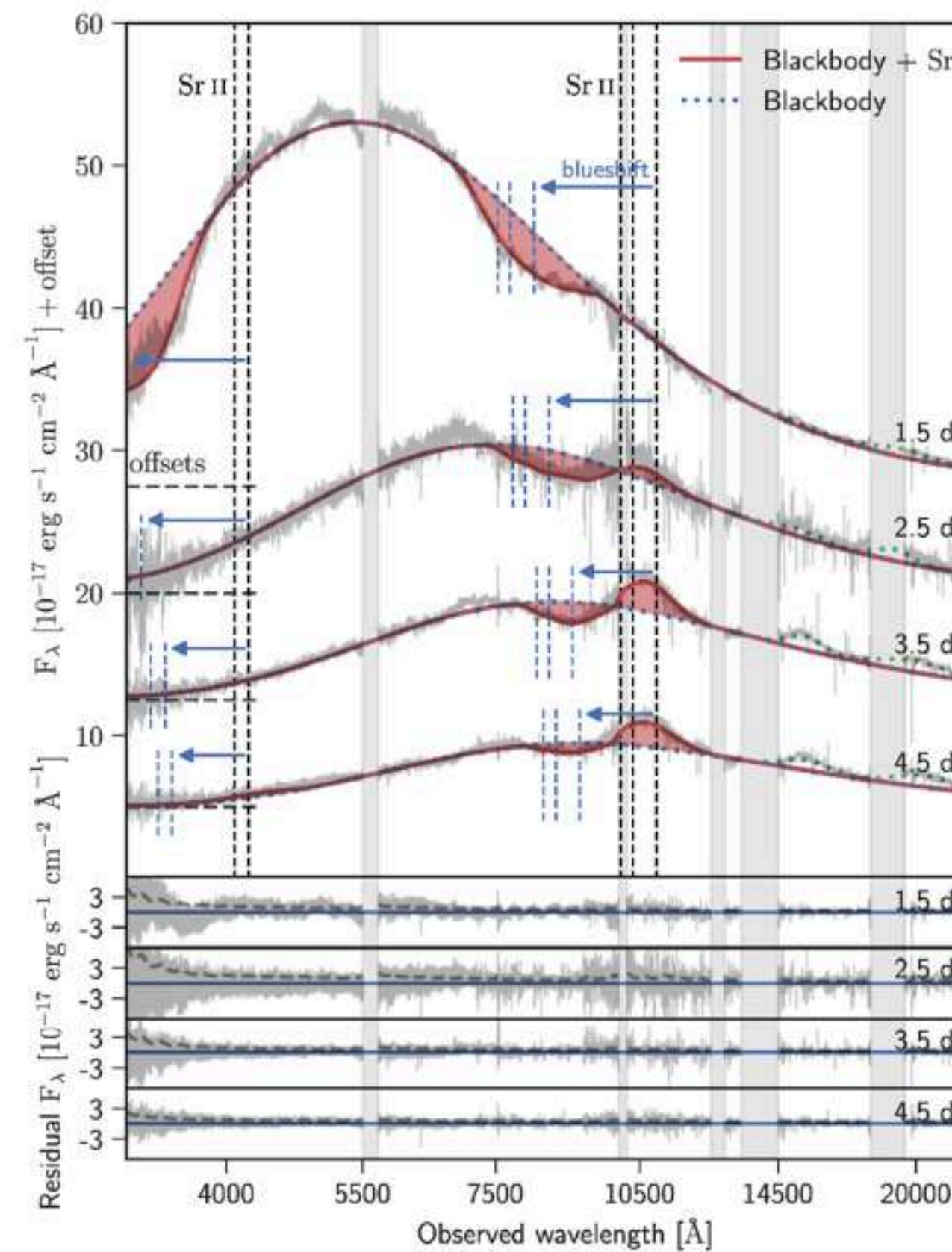


弱い r プロセスのシミュレーション



キロノヴァ「残骸」

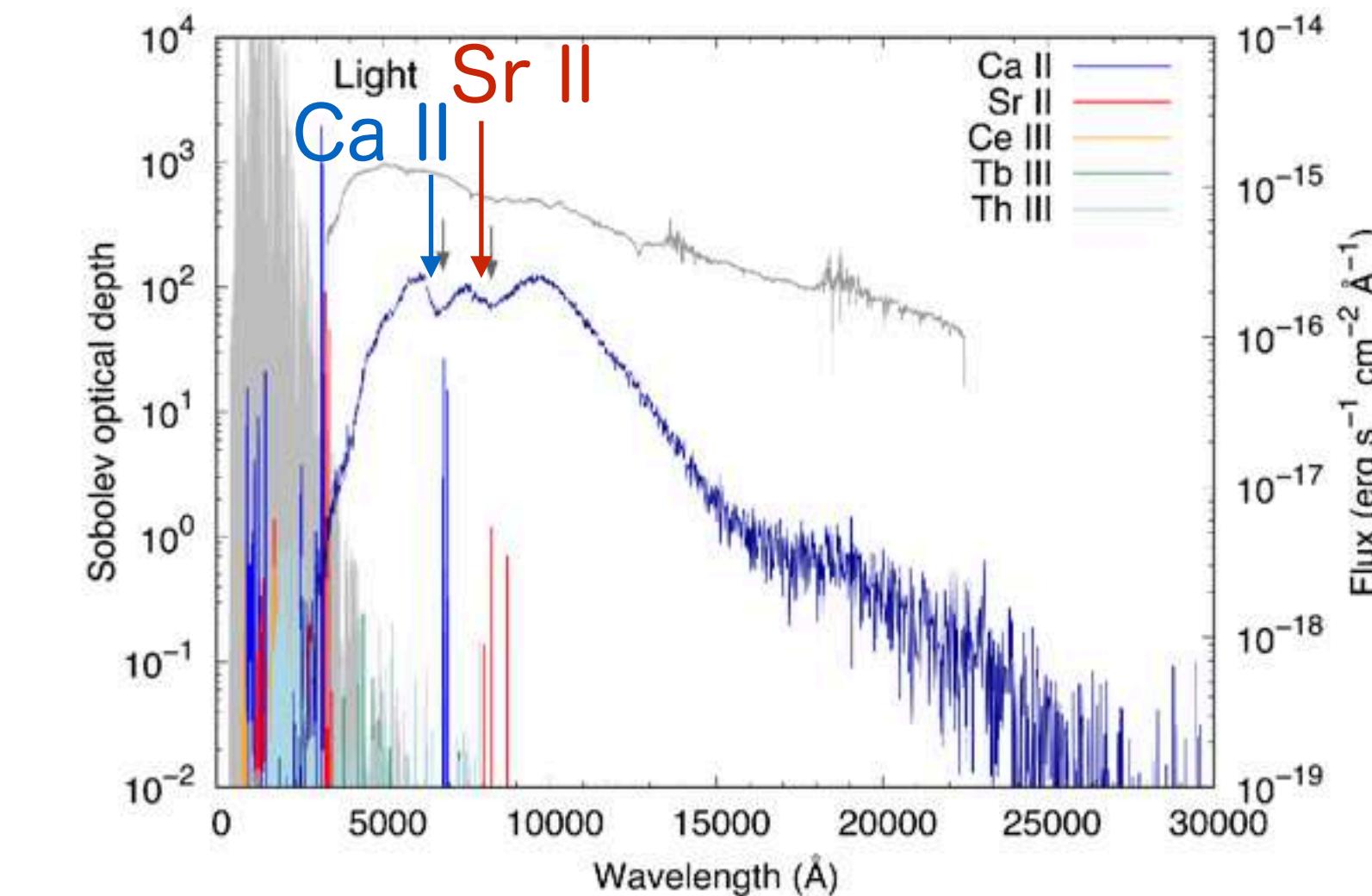
キロノヴァの「残骸」
にて Sr ($Z=38$) が発見
→ 鉄より重い元素が
primary に生成



Watson+2019 Nature

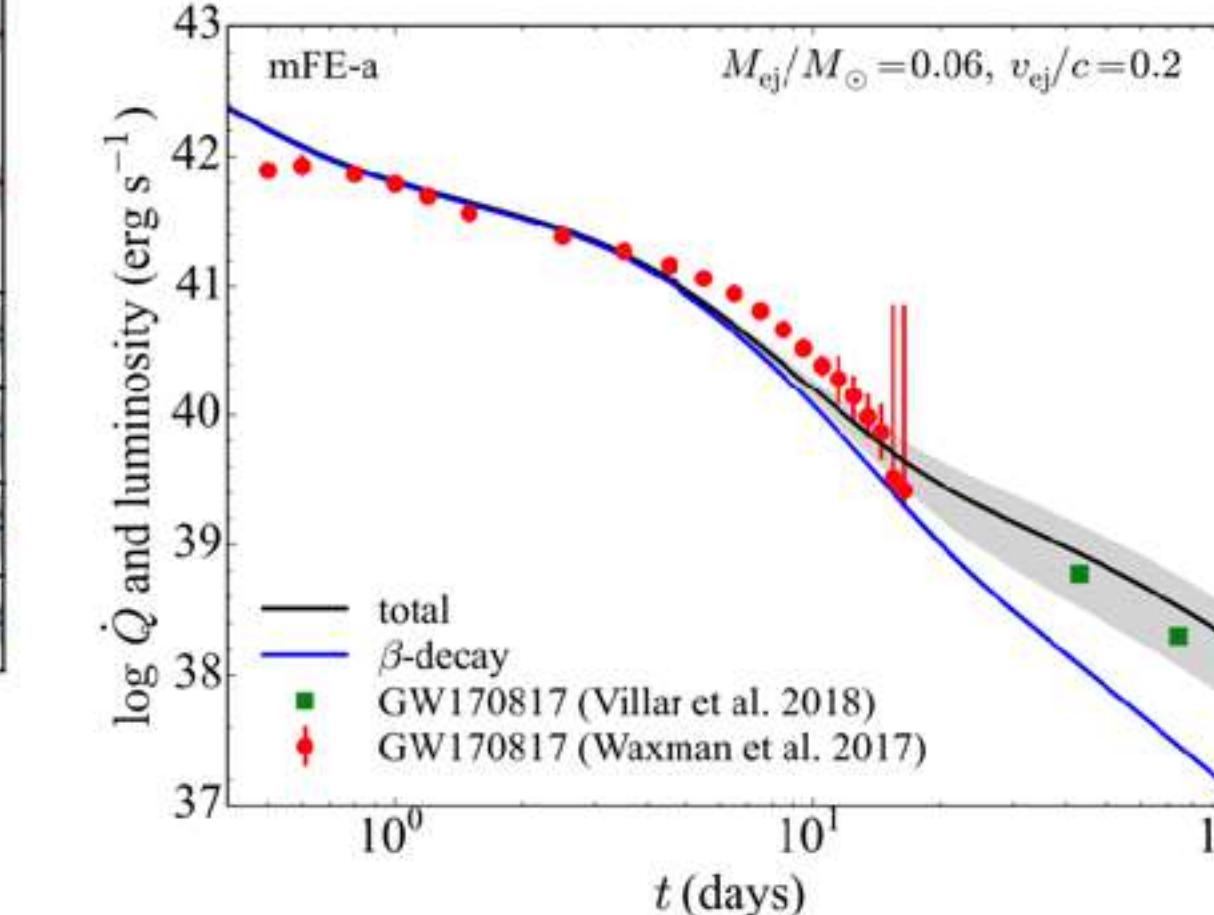
他の元素も同定できるか？

理論的な研究 (Domoto+2021)



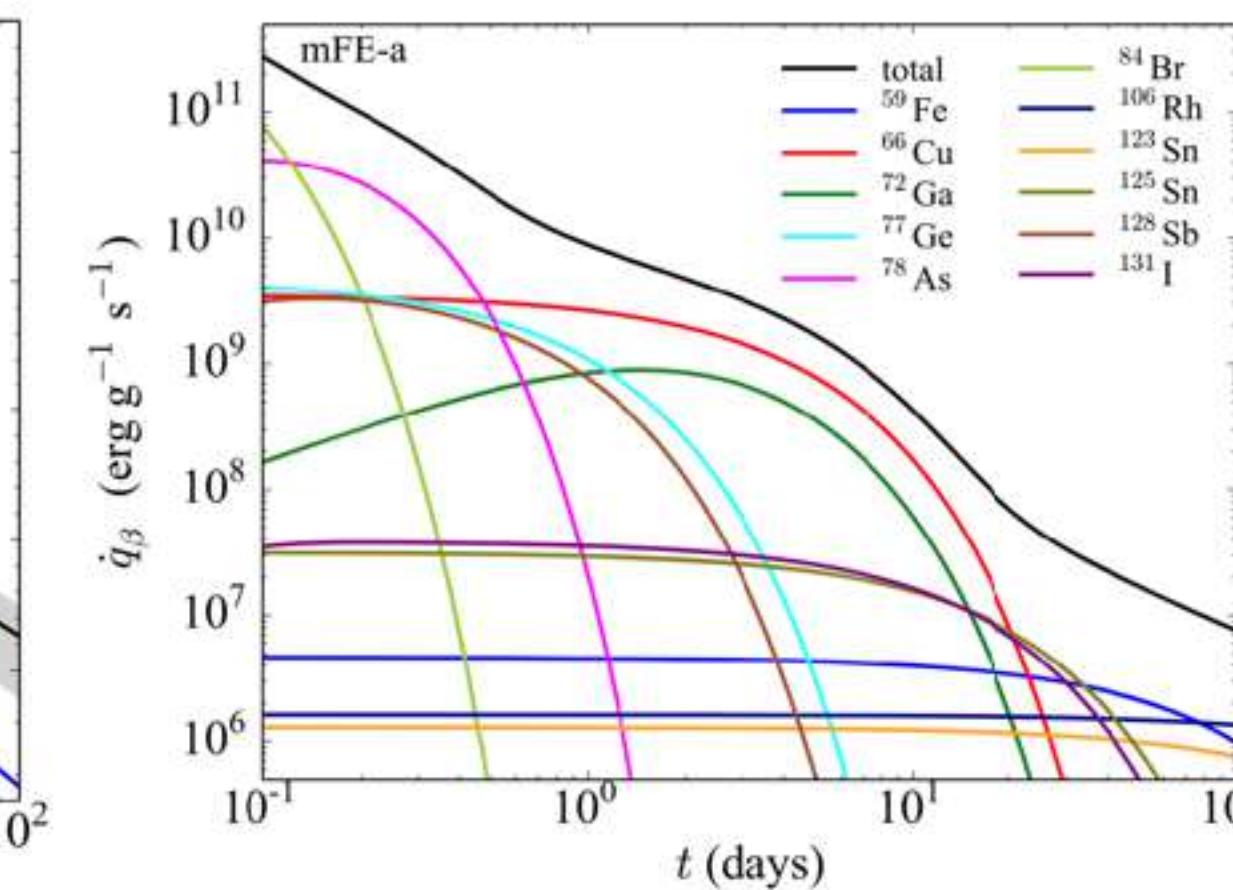
生成元素の光度曲線への影響

(Wanajo2018)



ベータ崩壊

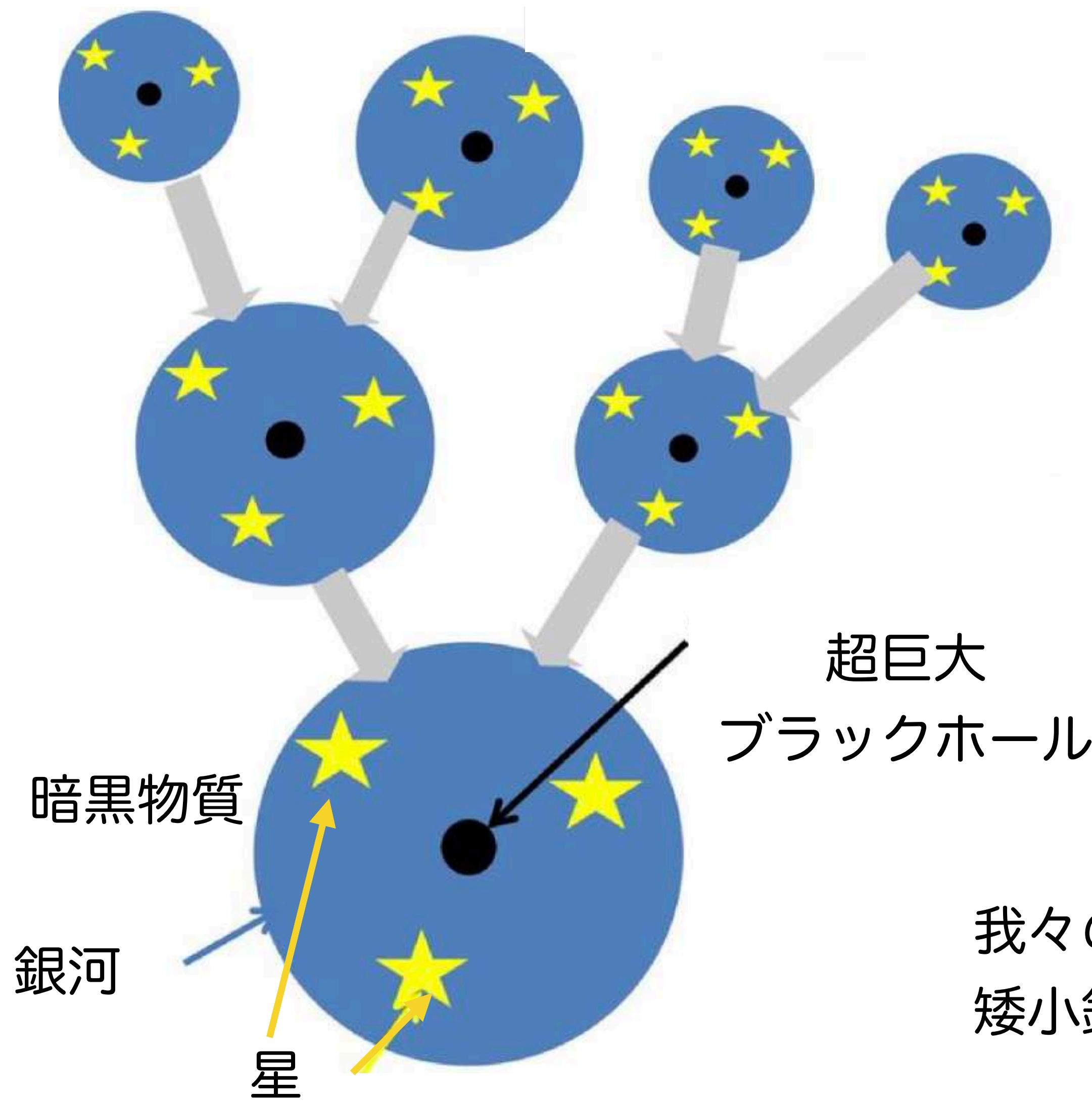
どの核種が卓越？



銀河の進化

銀河系星のシミュレーション

階層的構造形成

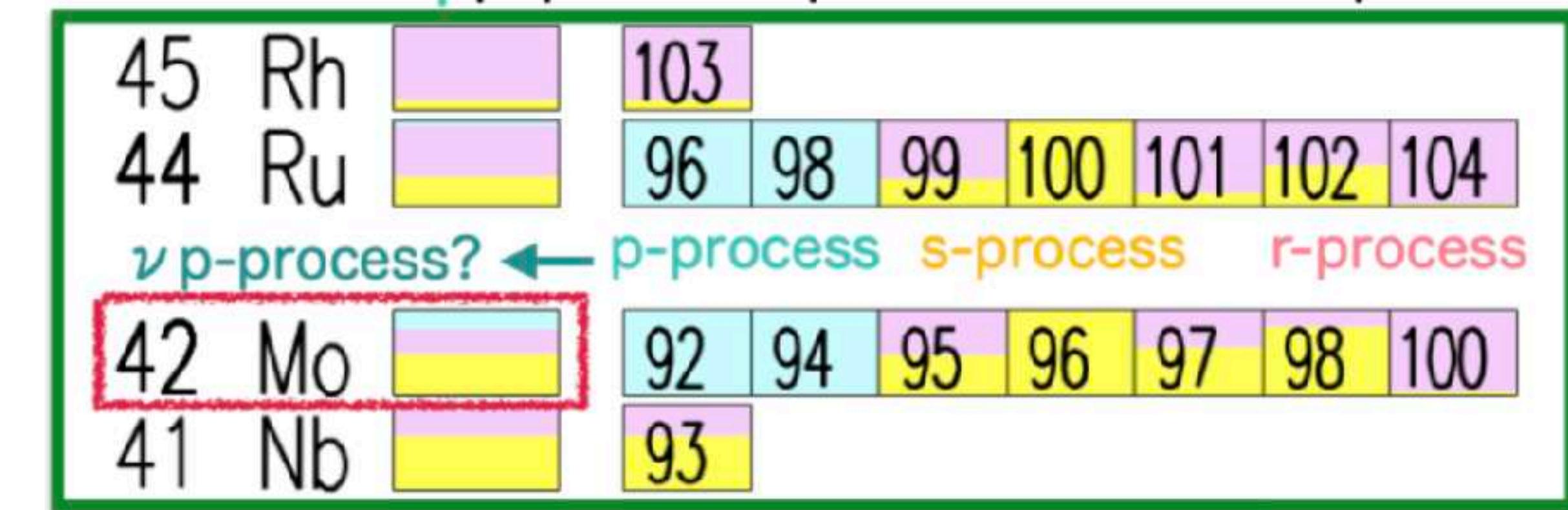
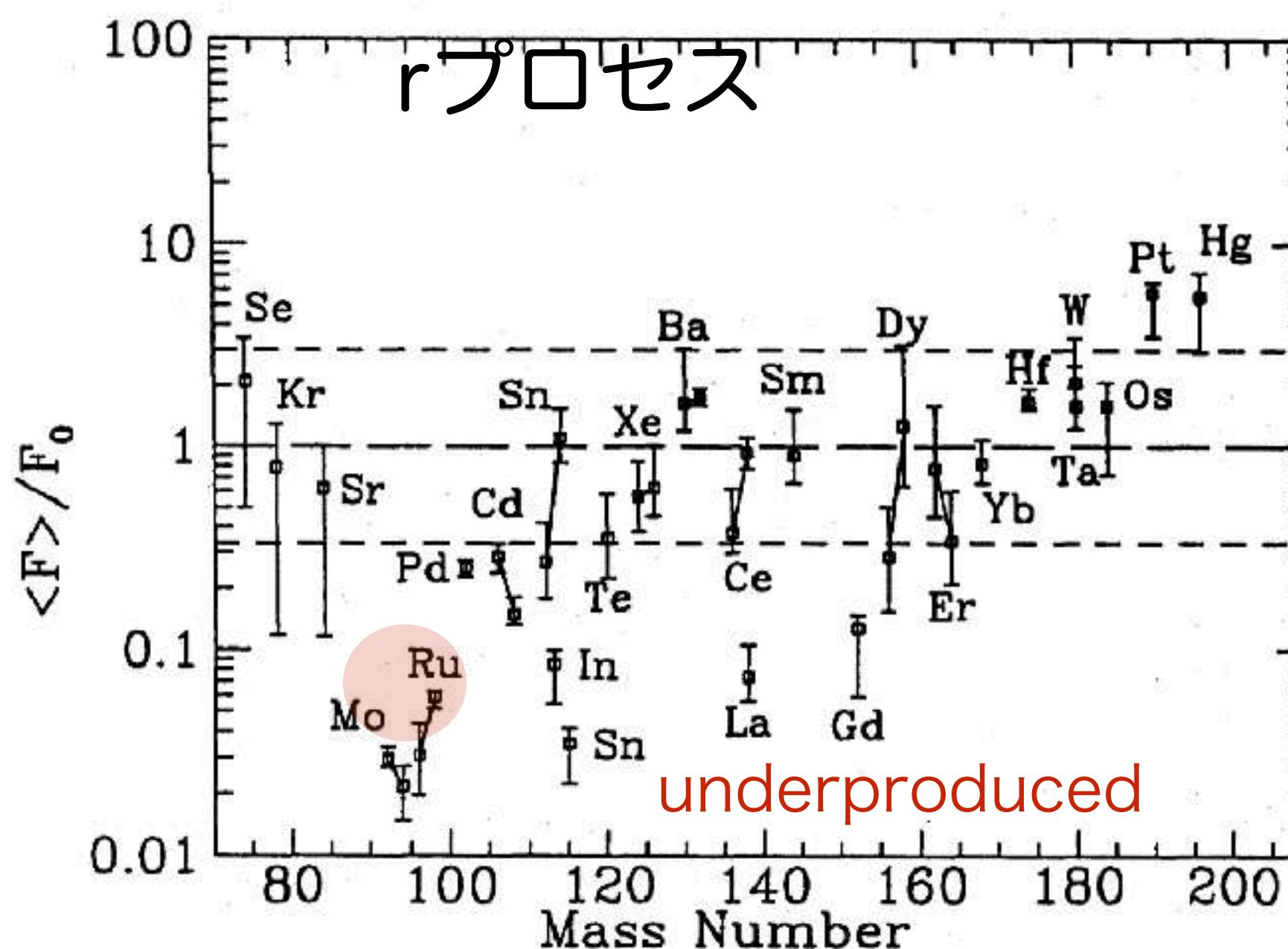
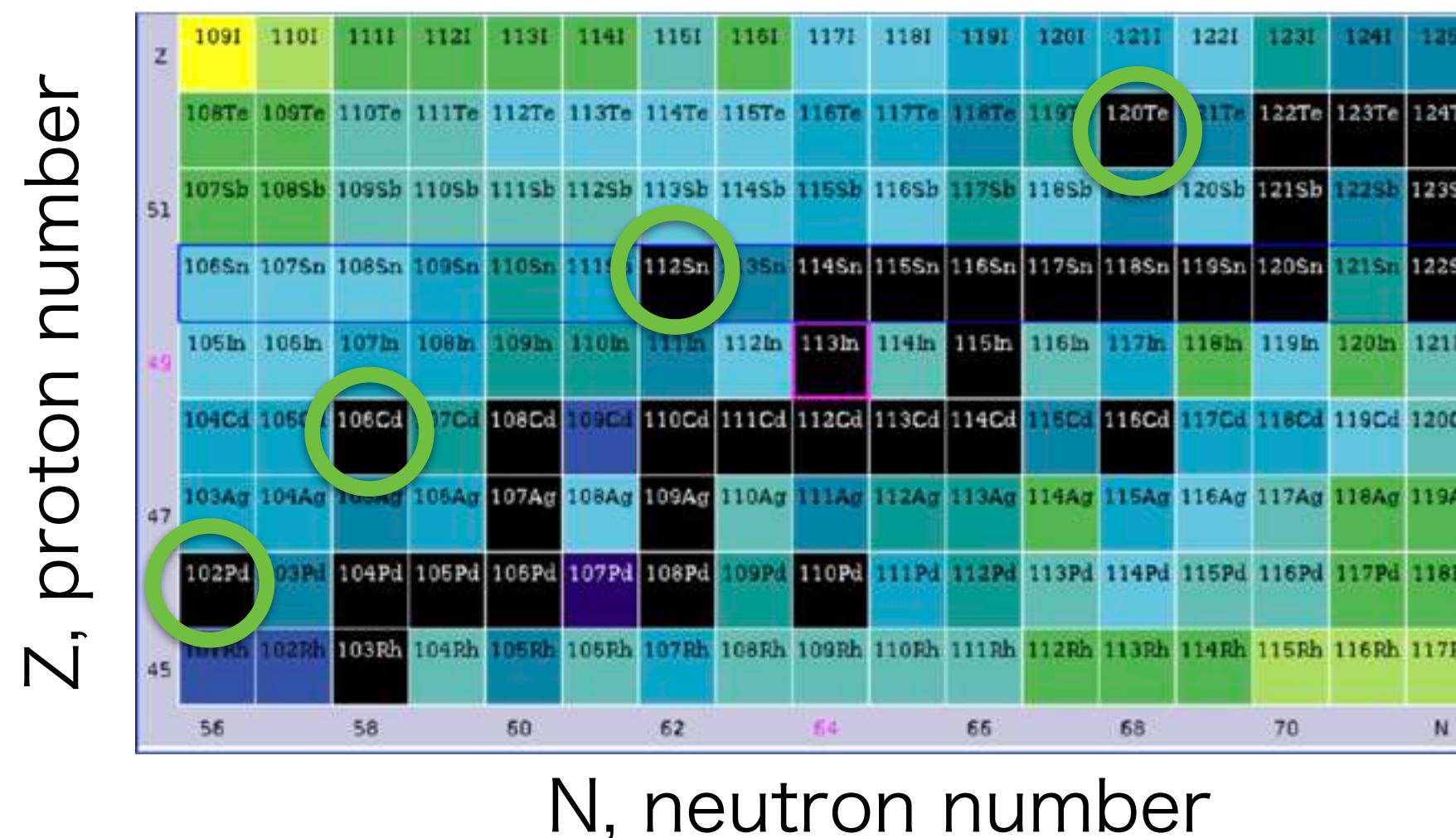


Takeda, Nukatani, Saito (2007)

我々の銀河も約100億年前に
矮小銀河（ガイア＝エンケラドス）と合体している

モリブデン問題 (軽いp核)

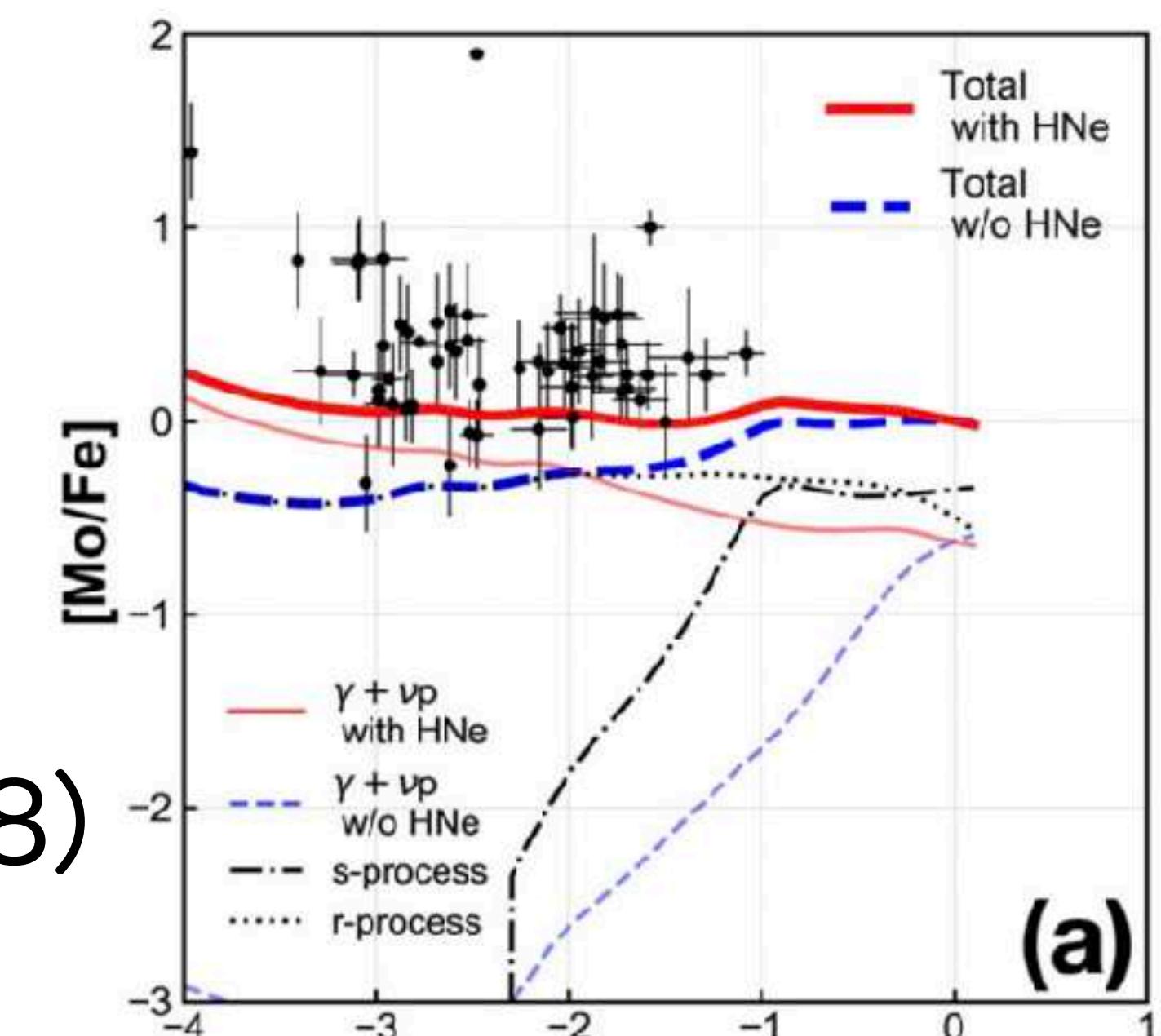
3 5種類のp核 (陽子過剰 or 中性子不足)



Sasaki+(2022)

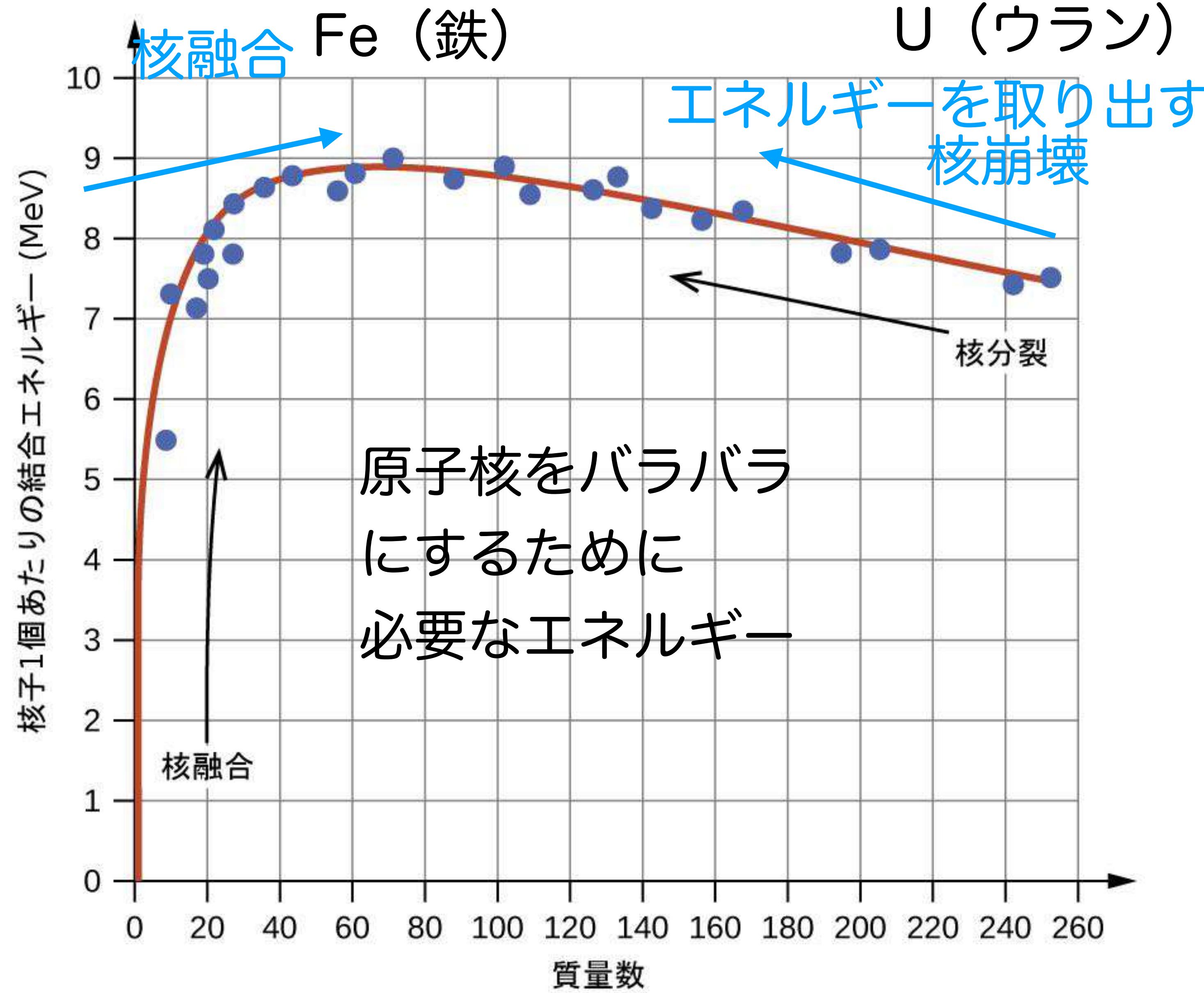
ν pプロセス同位
体の銀河化学進化

(または、Travaglio+2018)



原子核が持つエネルギー

エネルギーを取り出す



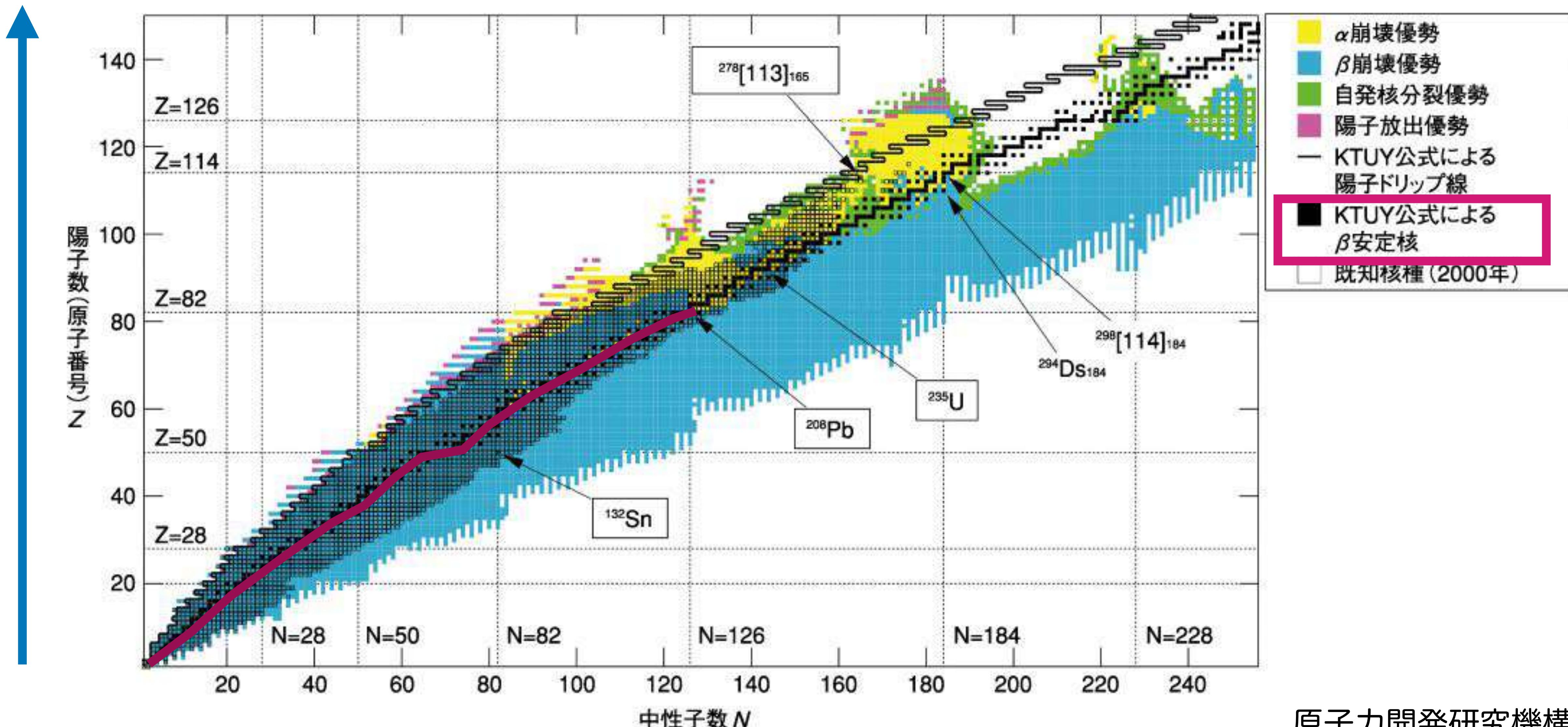
核図表ブロック



核図表と元素

元素の周期表

小浦寛之 (JAEA)



原子力開発研究機構