

重元素の起源を宇宙に探る

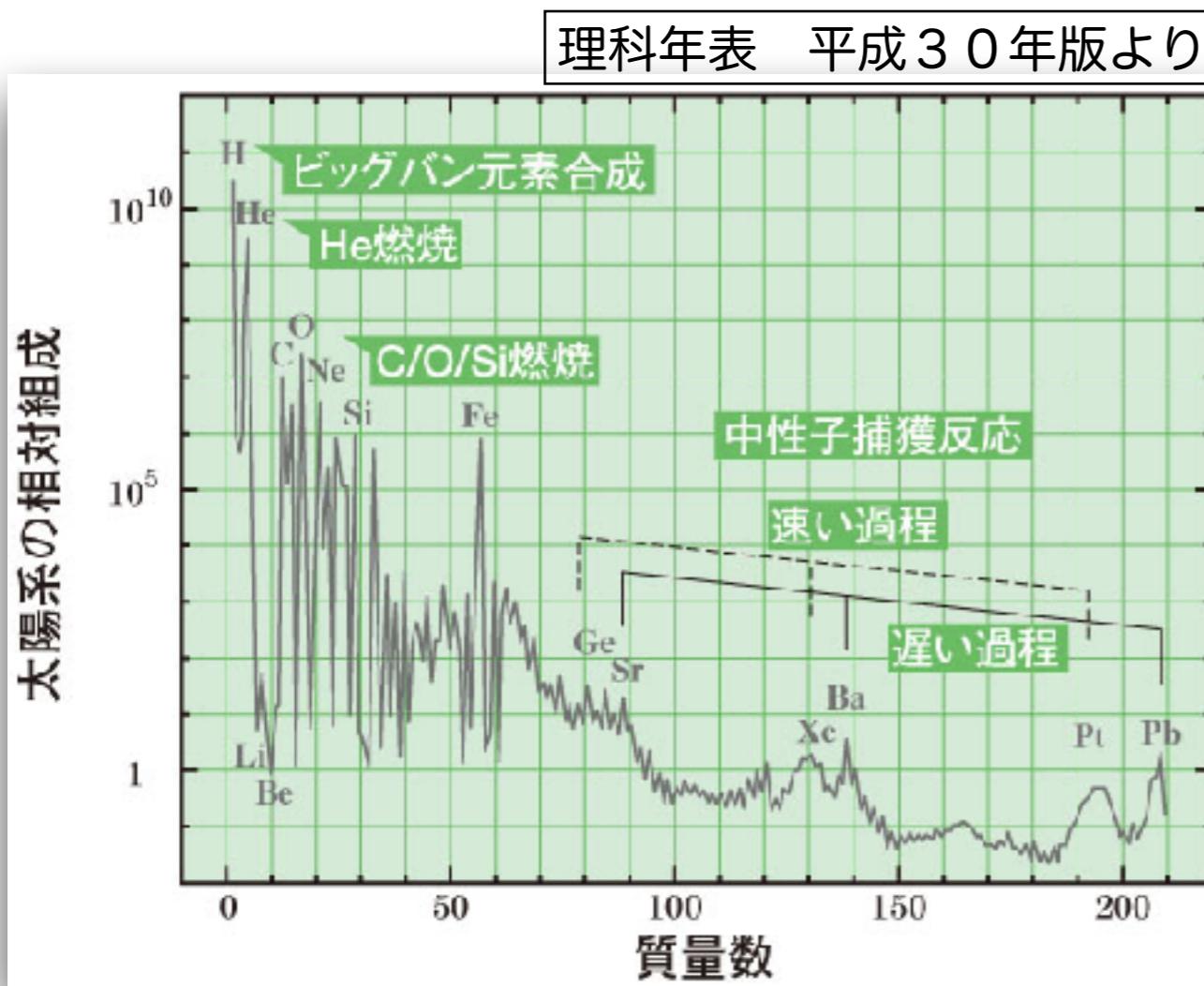


西村 信哉
(京都大学・基礎物理学研究所)

目次

- 背景：宇宙における元素の起源
- 手法：コンピュータの中で元素を「作る」
- 研究：重元素の起源の謎を解く
 - ①Sプロセス：星の進化での元素合成
 - ②Pプロセス：星の爆発での元素合成
 - ③Rプロセス：金やウランを作る元素合成
- 総まとめ

背景：宇宙における元素の起源



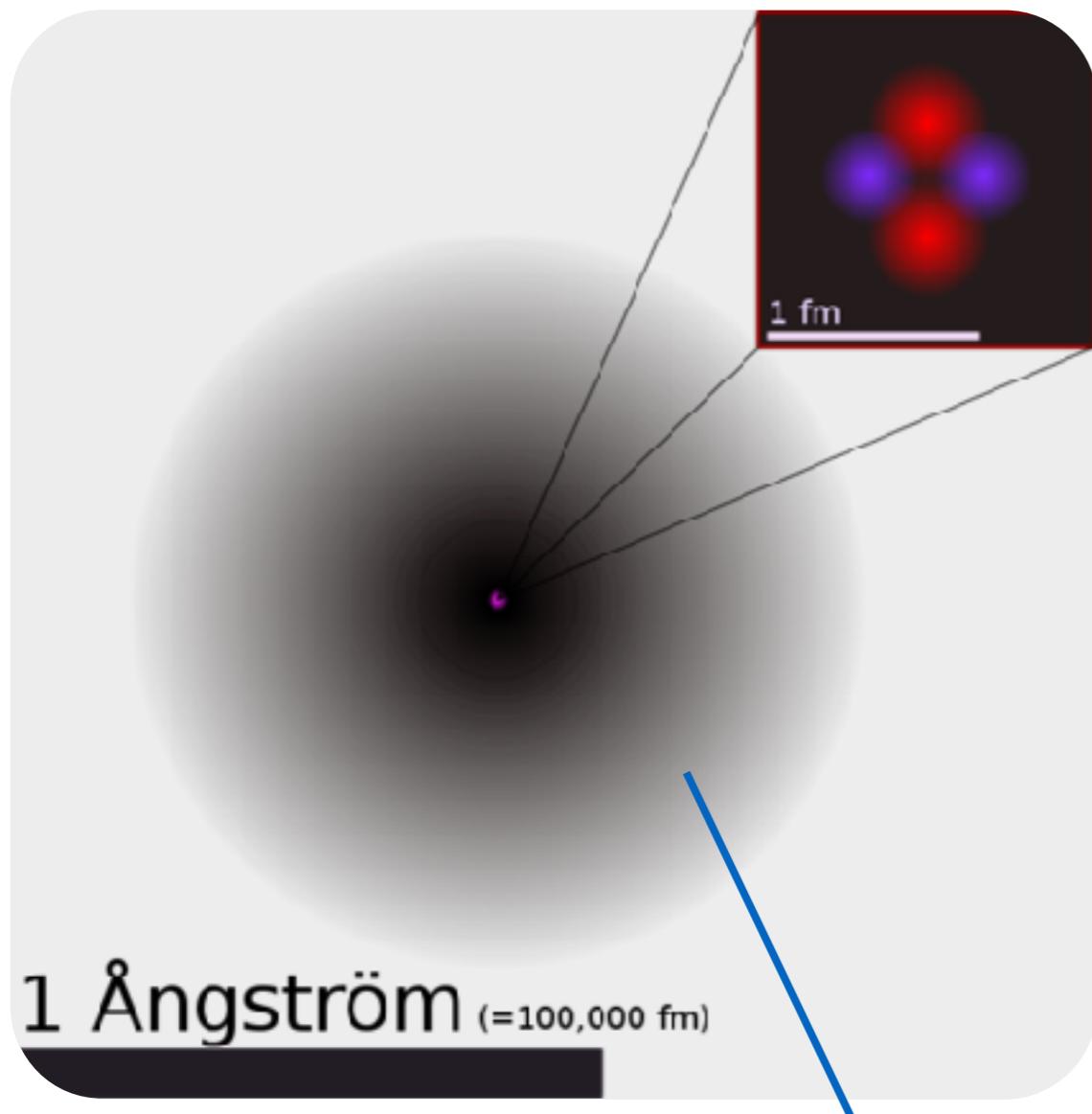
- 多様な特徴あるパターン
→ 様々な天体现象が起源
 - ピークなどの特徴
→ 複数の天体现象の
- ↓
- 様々な天体现象に関係する

- 水素 (H) など軽元素
 - ビッグバン元素合成 (宇宙の始まり)
- ヘリウム (He) 、炭素 (C) 、酸素 (O) 、シリコン (Si)
 - 星の進化での核融合 (⇒ 星の光のエネルギー源)
- 鉄 (^{56}Fe) のピーク
 - 星の爆発 (超新星) で生成 (⇒ 爆発の燃えかす)

物質の微細構造：物質から原子へ、そして原子核へ

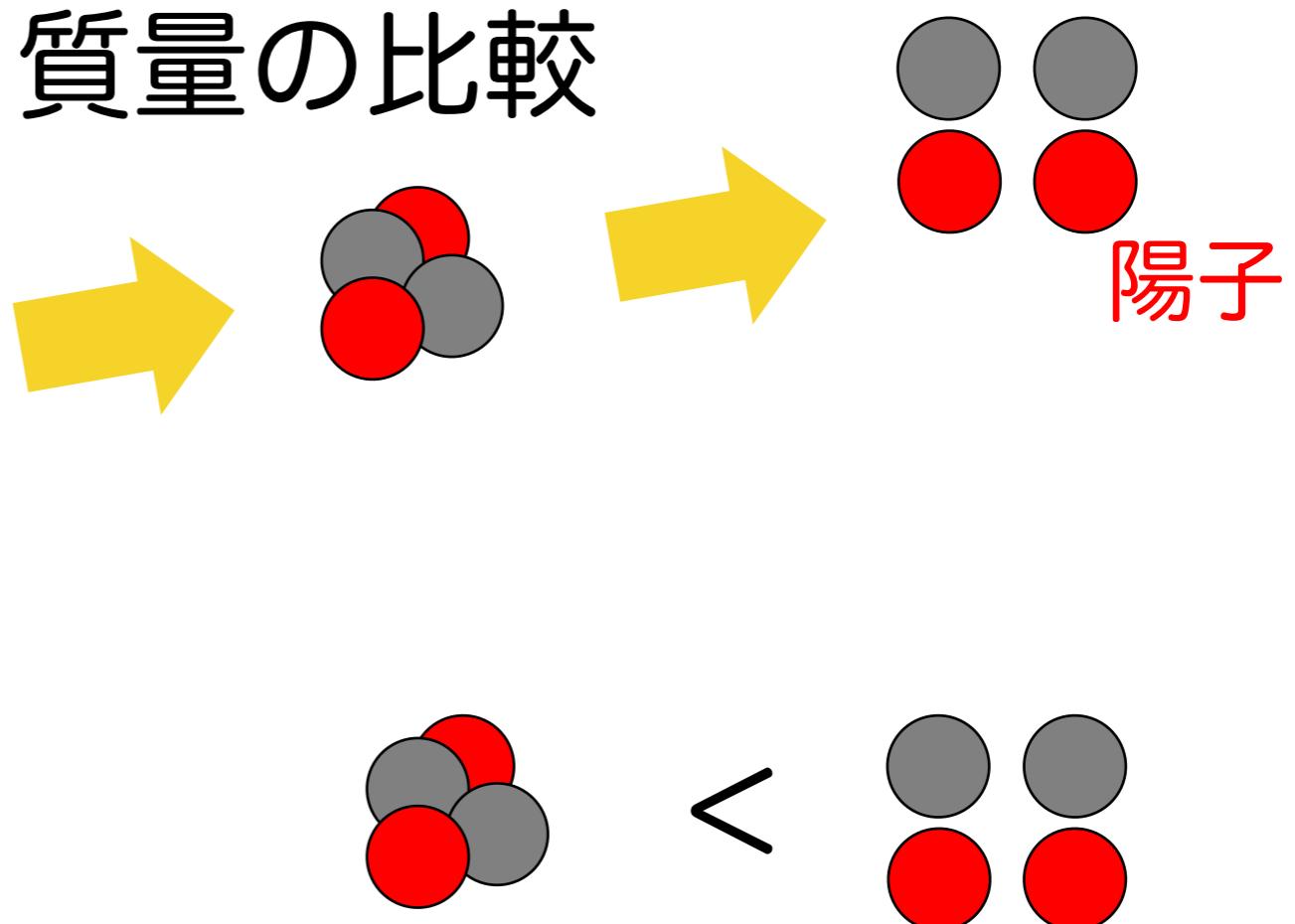
中性子

ヘリウム原子



Wikipediaより

質量の比較



4個の核子（陽子+中性子）
の方が、ヘリウム4原子核
よりも重い

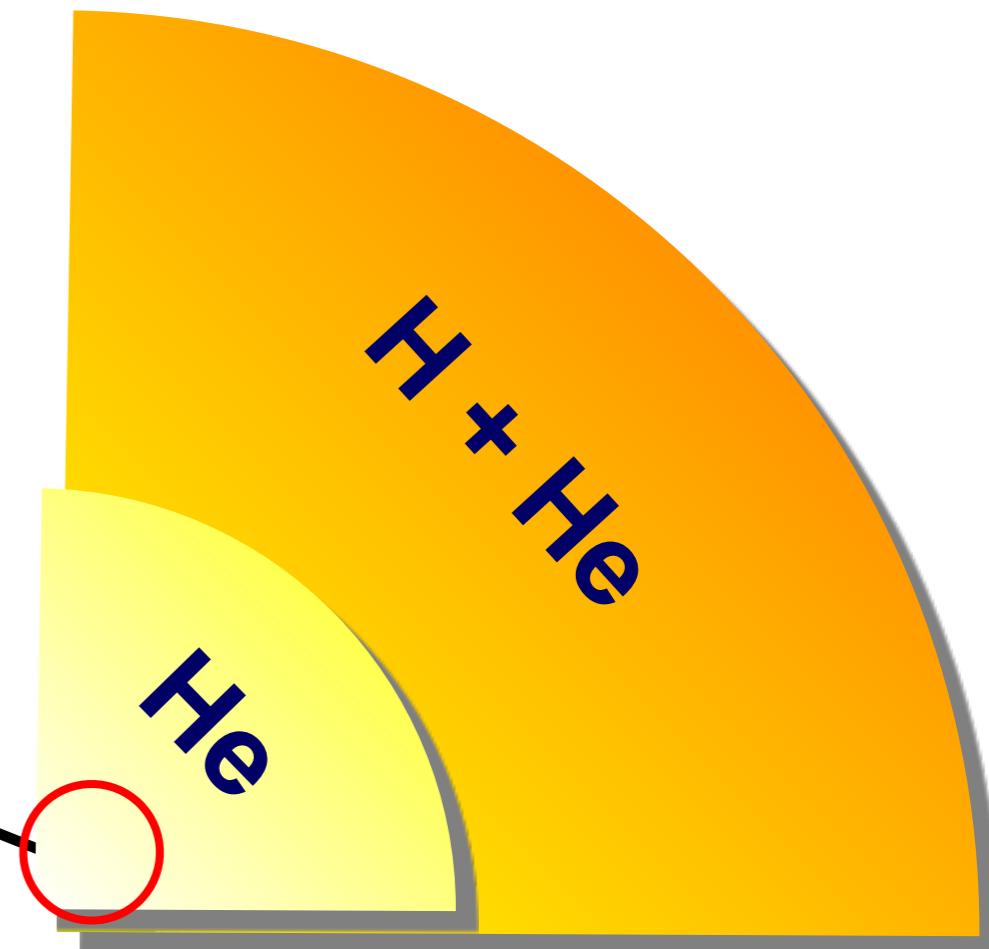
2個分の電子が
「雲状」に分布する

星の核燃焼プロセス：水素燃焼

主系列段階

中心温度 $> 10^7$ [K]

pp チェイン
CNO サイクル

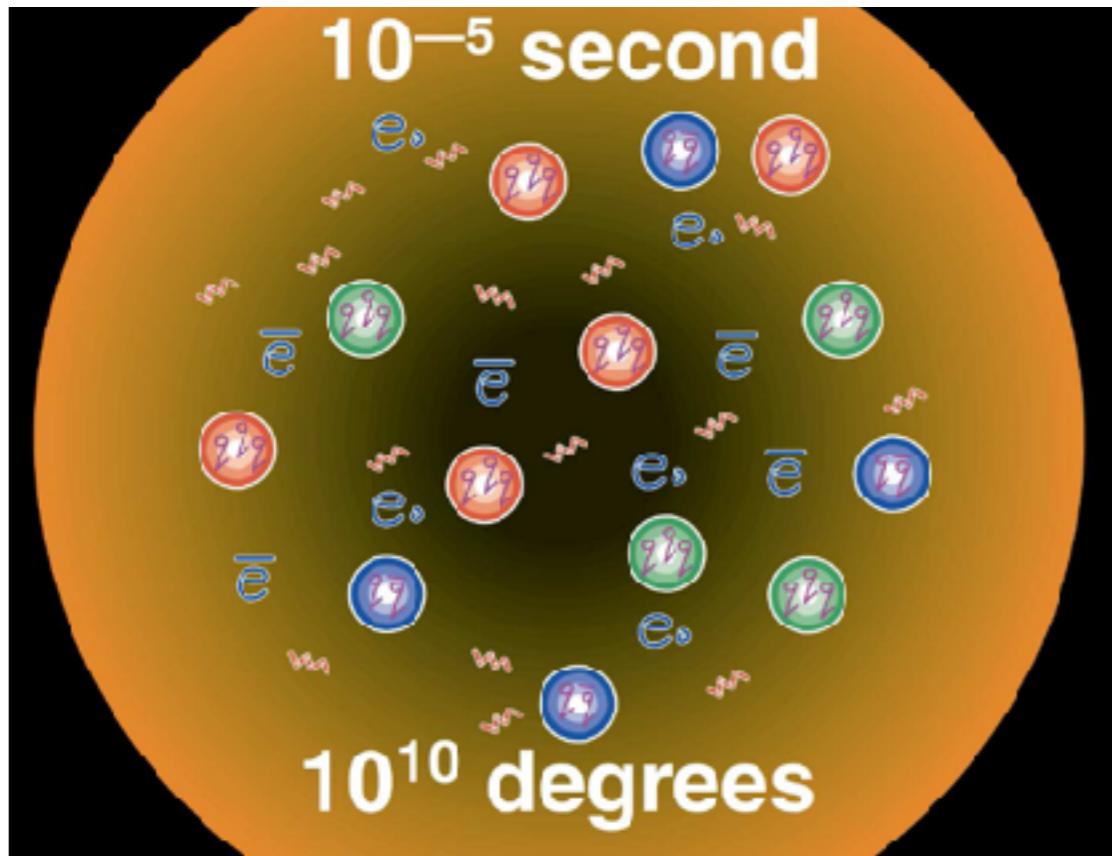


星の断面

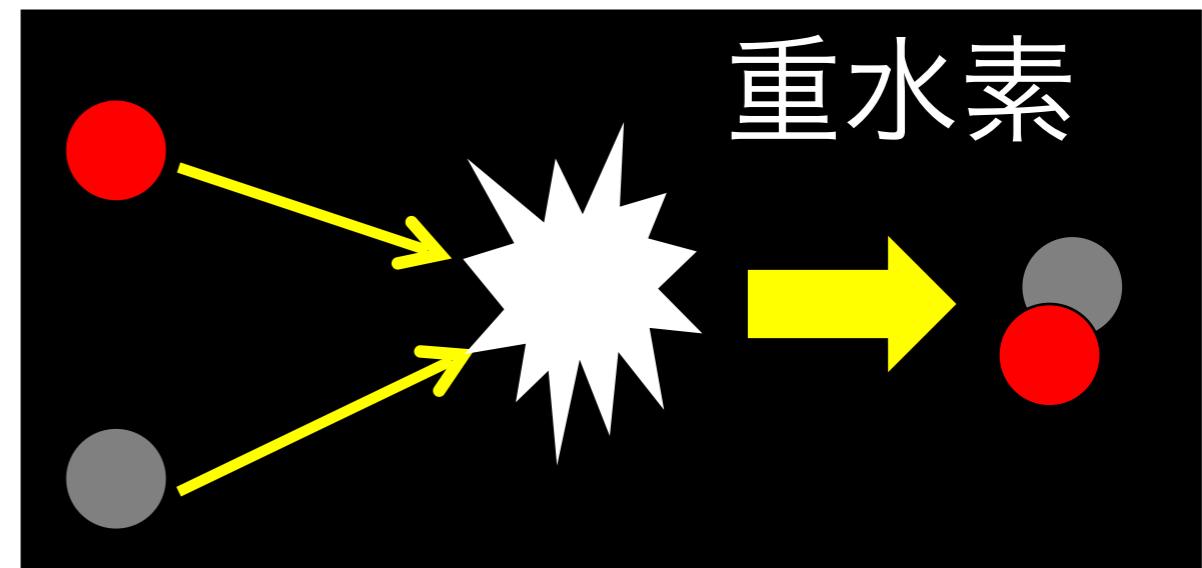
^1H から ^4He を生成していく。

水素からヘリウムができるまでのレシピ

最初はバラバラ

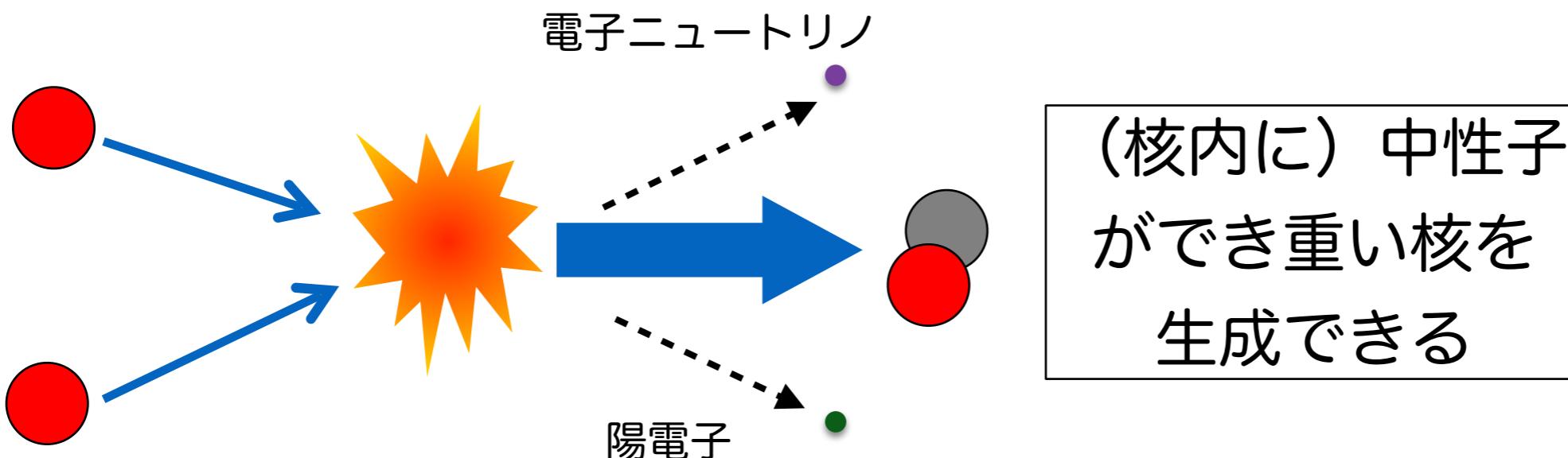


● 陽子
● 中性子

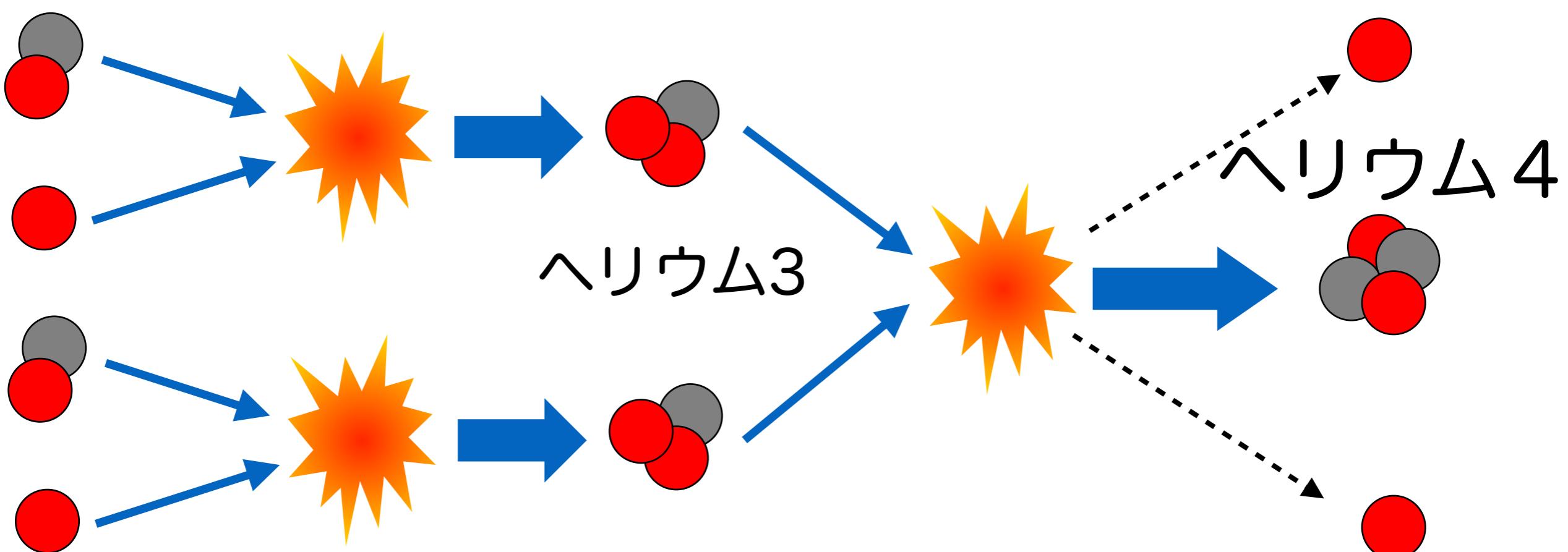


水素からヘリウムを作るレシピ：pp-チェイン

2つの水素から重水素ができる



pp-チェイン：重水素からヘリウムを作る一例

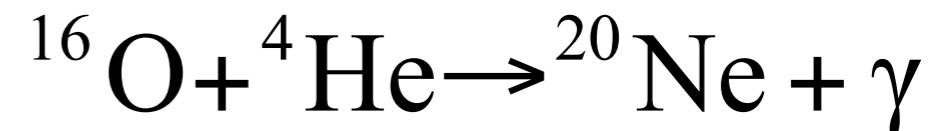
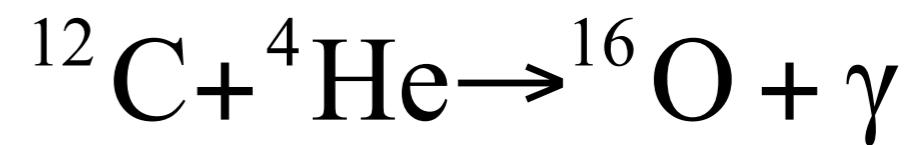
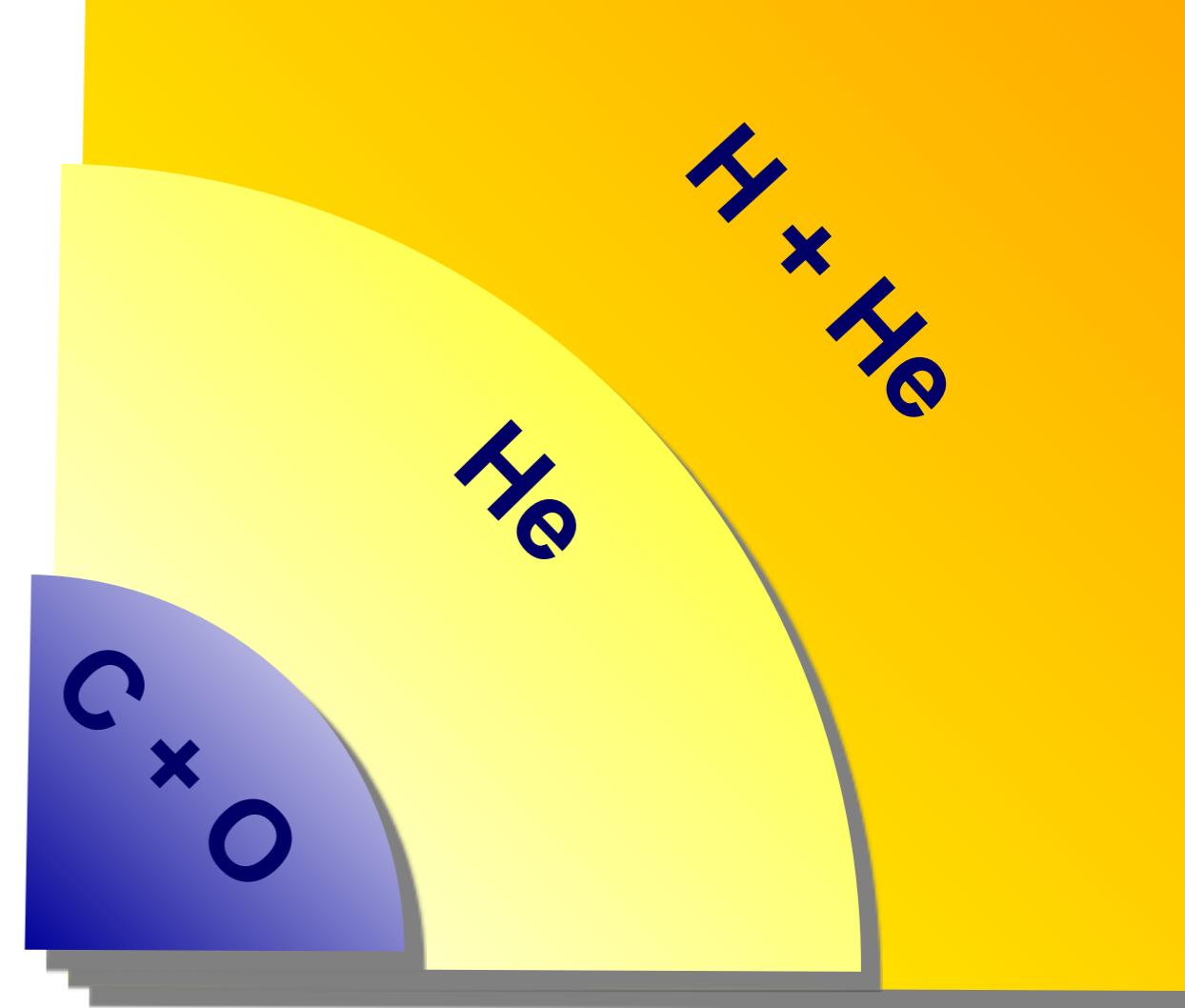


重い元素を作るプロセス

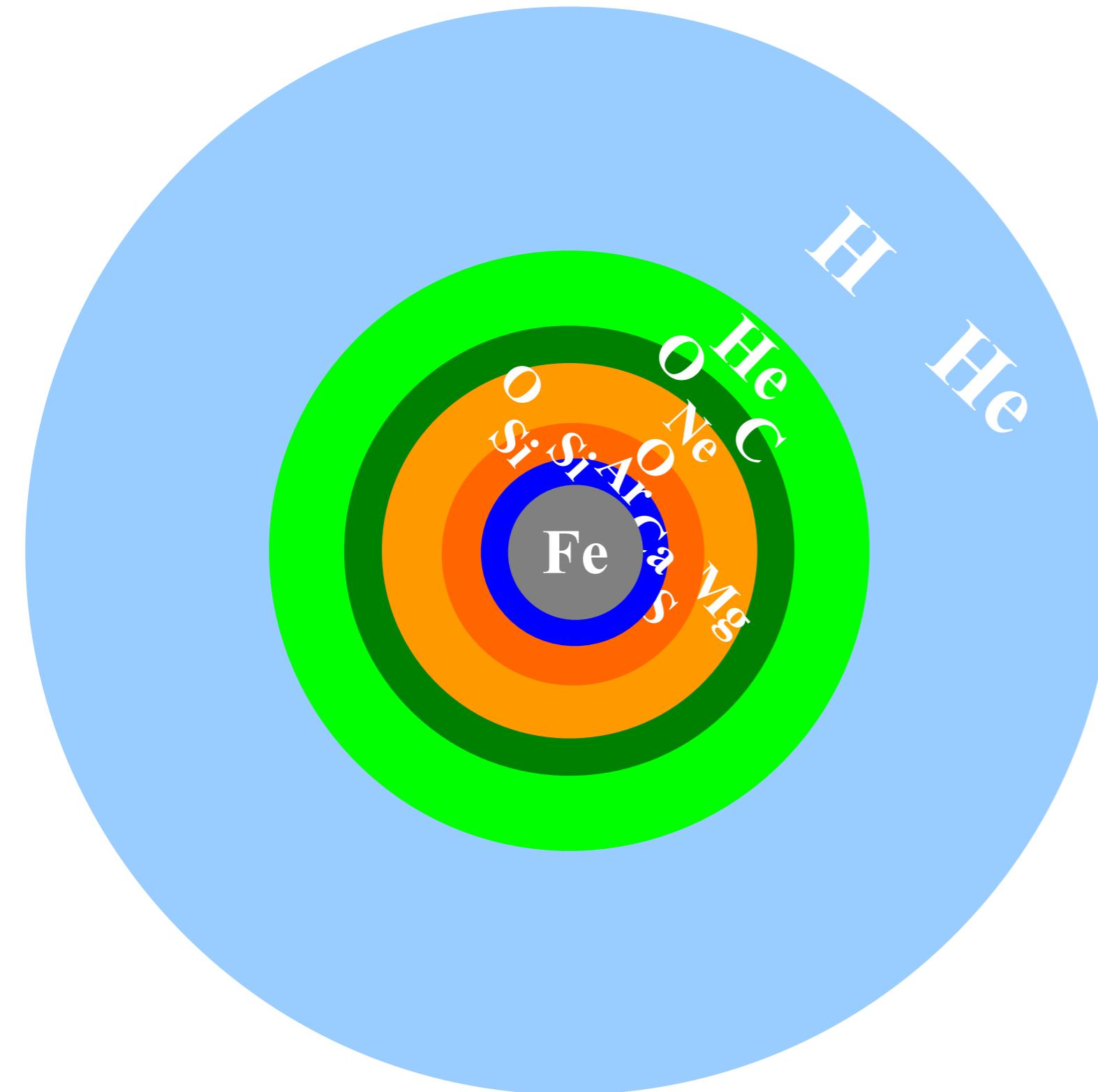
ヘリウム燃焼段階

中心温度>10⁸[K]

ヘリウム3つ→炭素
ヘリウム+炭素→酸素
ヘリウム+酸素→ネオン



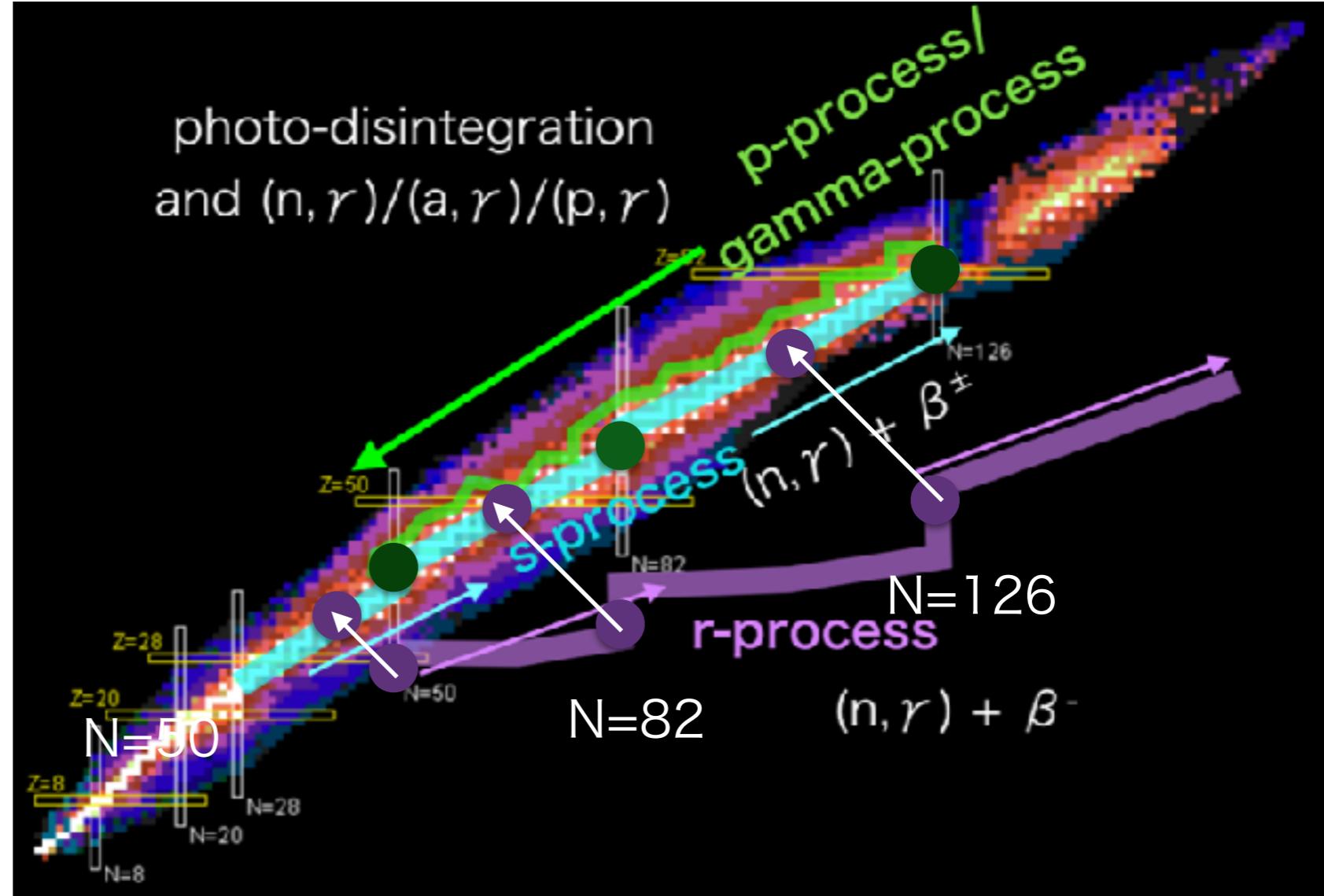
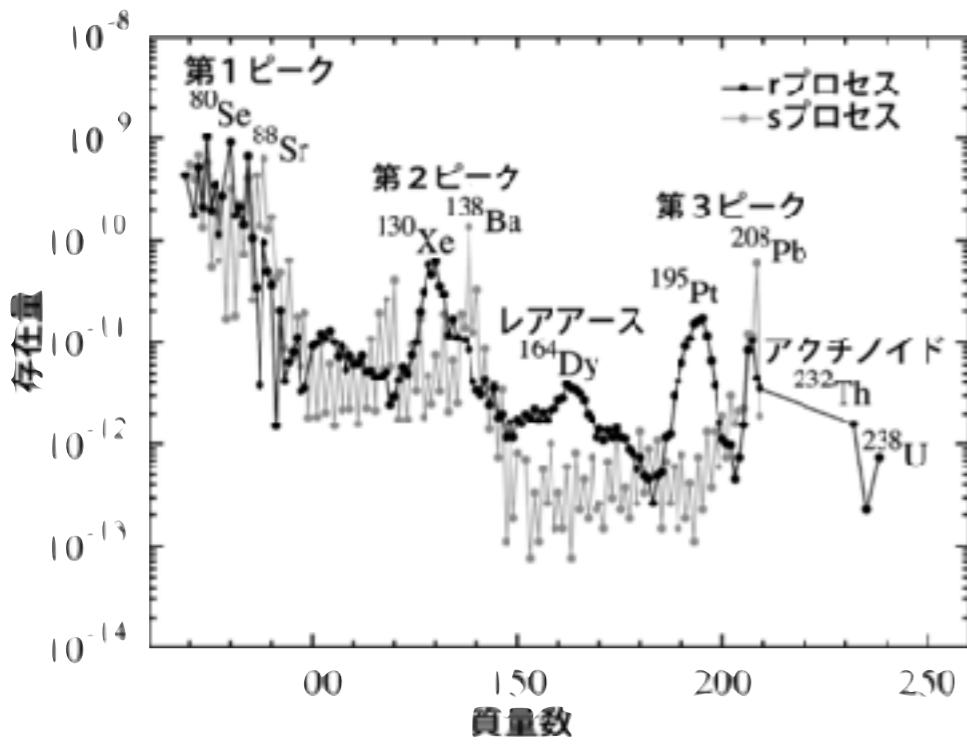
重い星ほど進化は進む



大質量星 (>10太陽)

中心で核反応を起こし
次々と重い元素を生成
たまねぎ構造をつくる

鉄よりも重い元素の起源



核融合で作るには、強い電気的な反発力を超えなければならず、星の進化の核燃焼プロセスでは作れない。

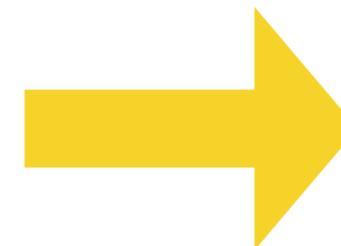
→ 星のエネルギー源となるわけではなく、逆にエネルギー注入が必要

→ 天体现象の中で、エネルギー源としては現れない。

理解の鍵：観測される元素のパターンが原子核の安定性に対応

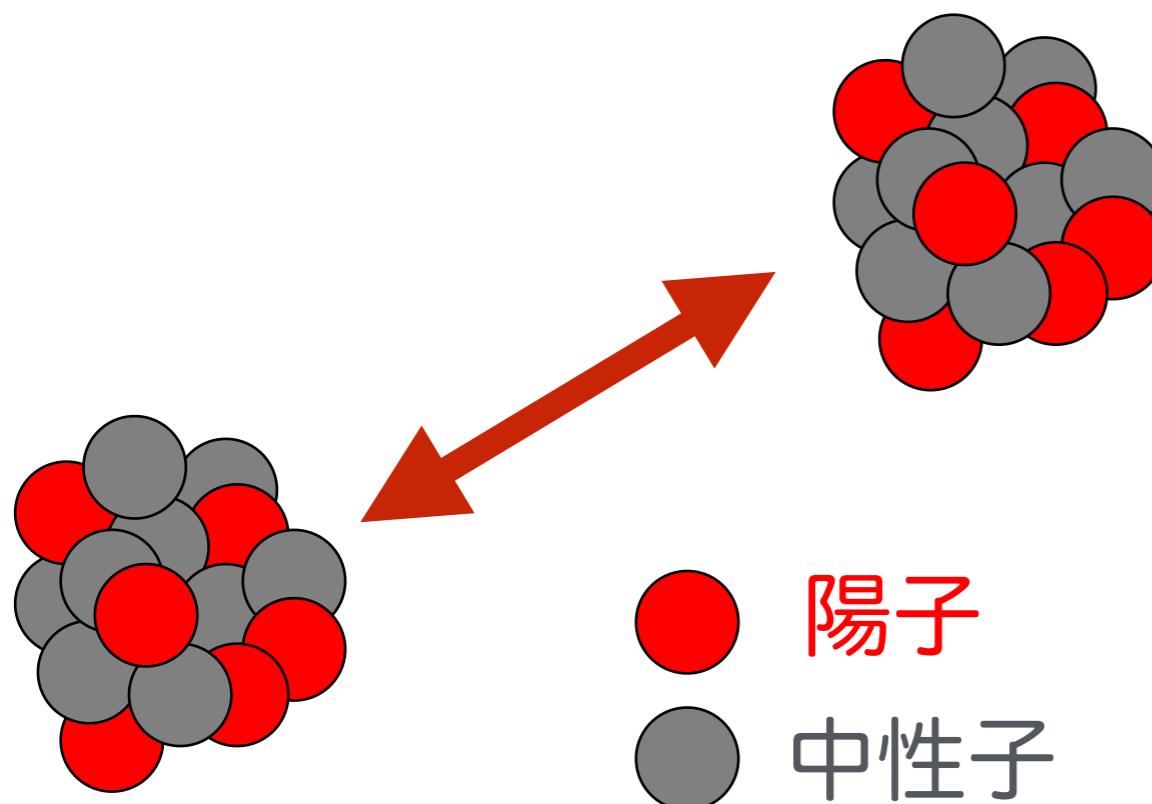
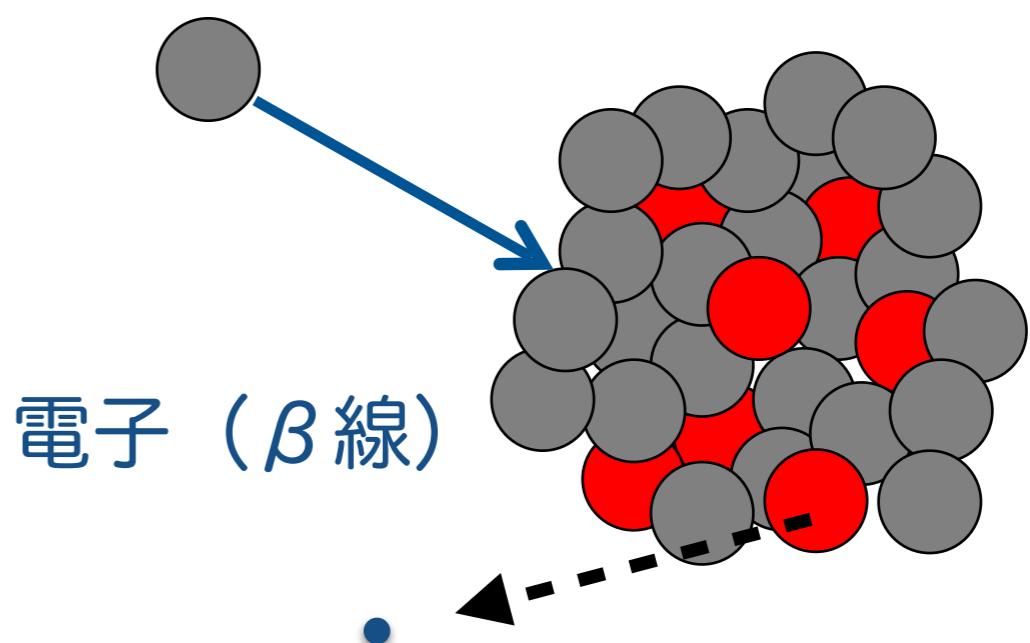
鉄よりも重い元素のレシピ

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



- 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

鉄よりも重い元素のレシピ

重い核同士の融合反応は自然には起こらない
→いかにしてこの問題を回避（迂回）するか？

- 1、電荷のない粒子（粒子）をどんどんぶつける
 - Sプロセス（ゆっくりと）
 - Rプロセス（速く）
- 2、すでに存在する重い元素を壊す（！）
 - Pプロセス（光分解過程）

限られた天体環境で起こる。特定するためには、原子核と天文学の知識を動員する必要がある。

手法：コンピュータの中で元素を「作る」

- 天体现象（星の進化、超新星爆発など）の時間発展に沿って元素の変化「解く」
- 道具：核反応ネットワーク
 - 関係する全ての原子核（5000核種以上）
 - 原子核反応（数万）の情報
 - 原子核実験+理論計算
- 天体モデルでの元素合成進化
 - 天体シミュレーションと共に元素の進化を「解く」
 - 核反応ネットワーク計算

元素合成の基礎方程式：核反応ネットワーク

i番目の元素の存在量 Y_i の進化を表す常微分方程式
(Y_j の時間変化 = 関係する反応確率の総和)

$$\frac{dY_i}{dt} = \sum_j N_{ij} \lambda_j Y_j + \sum_{j,k} N_{i,j,k} \rho N_{Av} \langle j, k \rangle Y_j Y_k + \sum_{j,k,l} N_{i,j,k,l} \rho^2 N_{Av}^2 \langle j, k, l \rangle Y_j Y_k Y_l + \dots$$

反応・崩壊確率
(原子核の性質)

1体：崩壊など

2体反応

3体反応

全パターンの和

※化学反応などでも同様の式になる

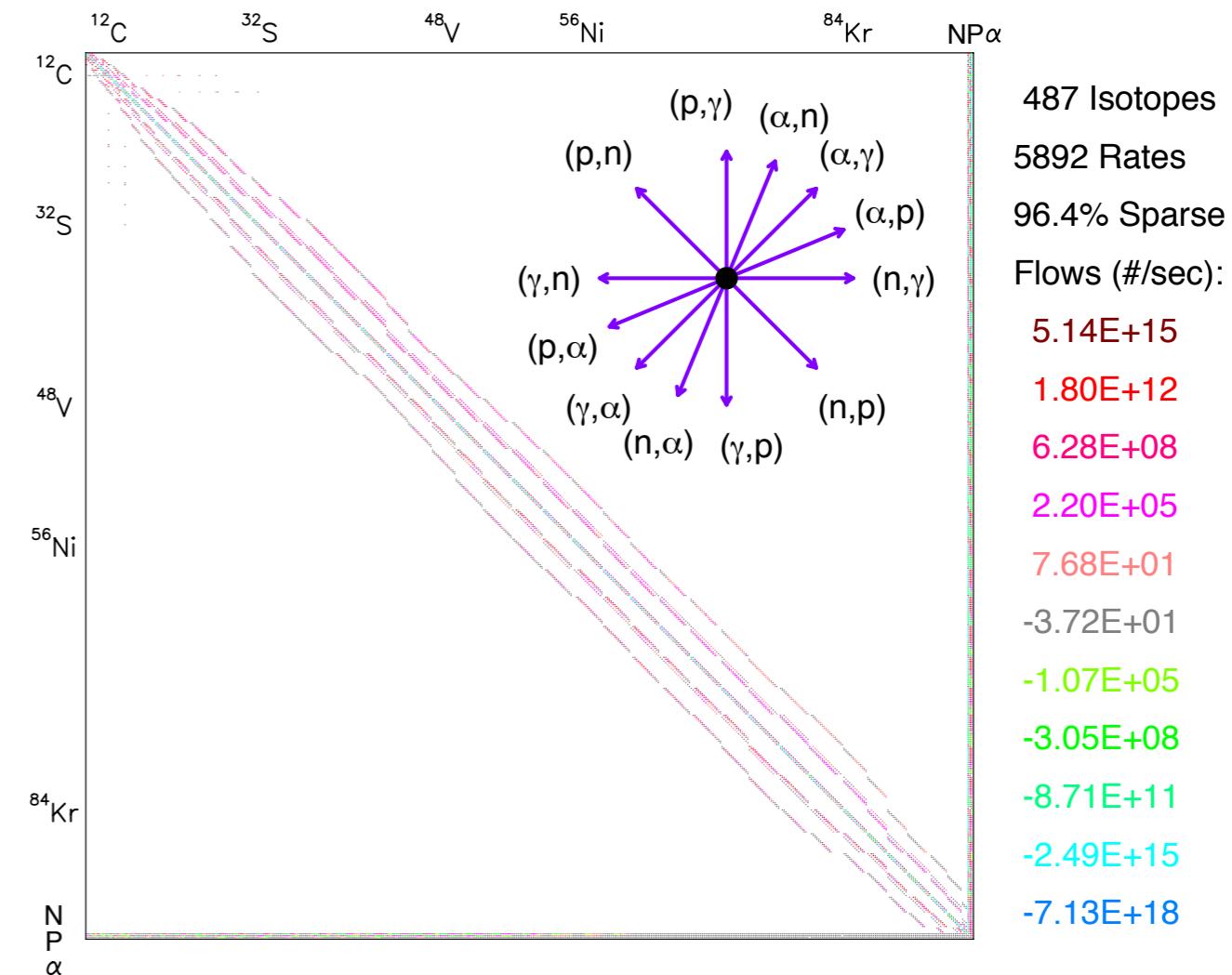
数値解法：連立方程式

対角成分だけが値を持つような行列（=疎行列）になる。
(基準の原子核から、近傍の核が作られる確率が高い。)

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \cdots + a_{3n}x_n = b_3 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{array} \right.$$

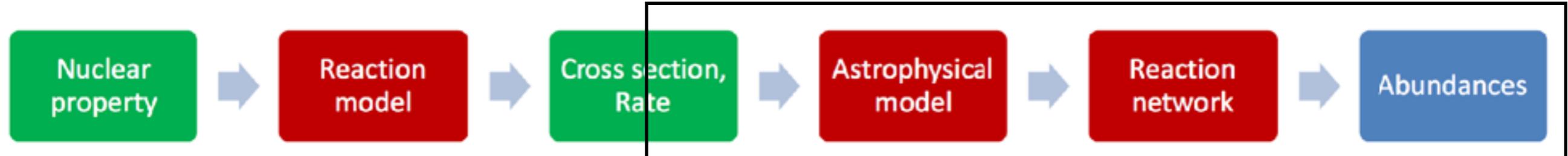


$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$



<http://cococubed.asu.edu> より

モンテカルロ元素合成：PizBuin (Sプロセス)



天体環境

図：T. Rauscher (arXiv:1412.6990)

- ・星の構造・進化のモデル
 - ・質量、金属組成、「ダイナミクス」：対流、回転、磁場
 - ・単独星か、連星をなすか？
- ・メインの核燃焼プロセス
 - ・核融合過程: トリプル α , $^{12}\text{C}(\text{a},\text{g})^{16}\text{O}$, ...
 - ・中性子源: $^{22}\text{Ne}(\text{a},\text{n})^{25}\text{Mg}$, ...

核反応ネットワーク

モンテカルロ計算

核反応ネットワーク

- ・核反応の不定性
- ・中性子捕獲
- ・ベータ崩壊

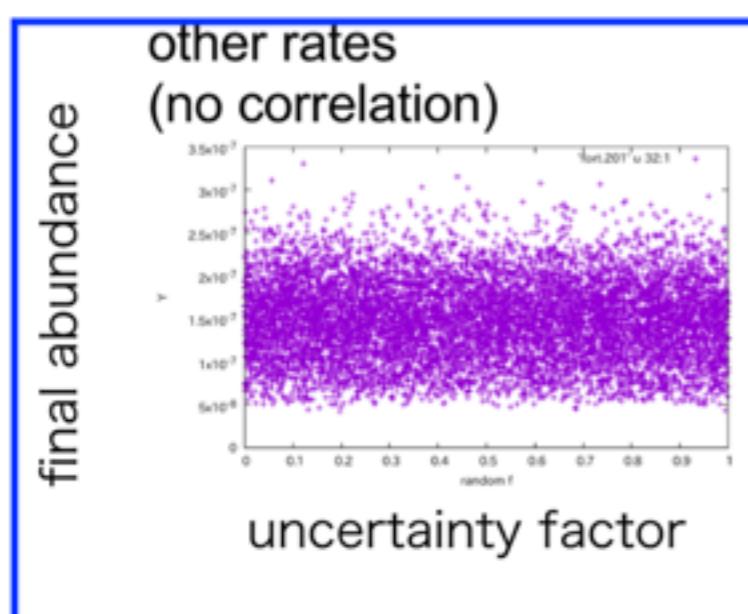
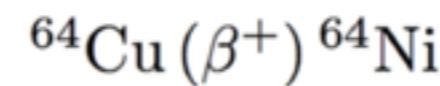
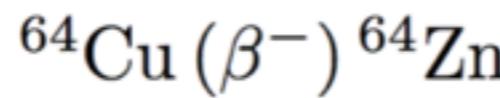
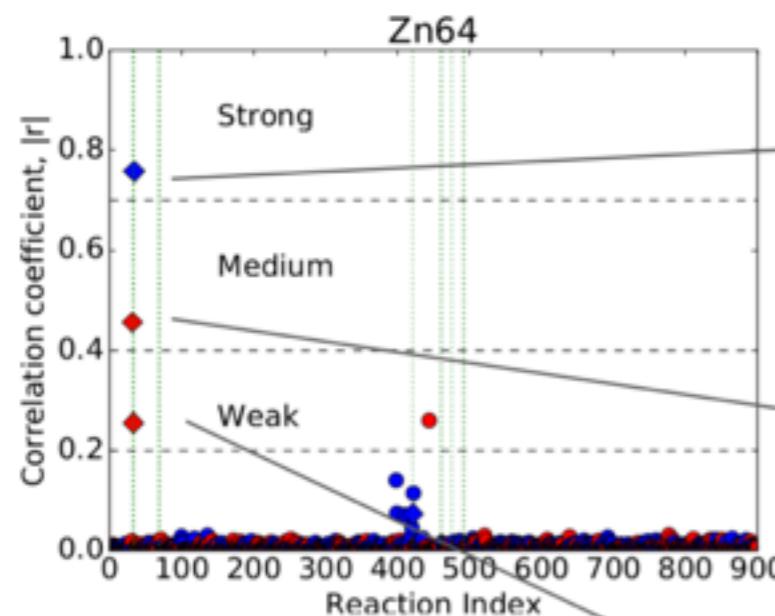
元素合成の理論予言
と観測値との比較

フィードバック (重要な反応)

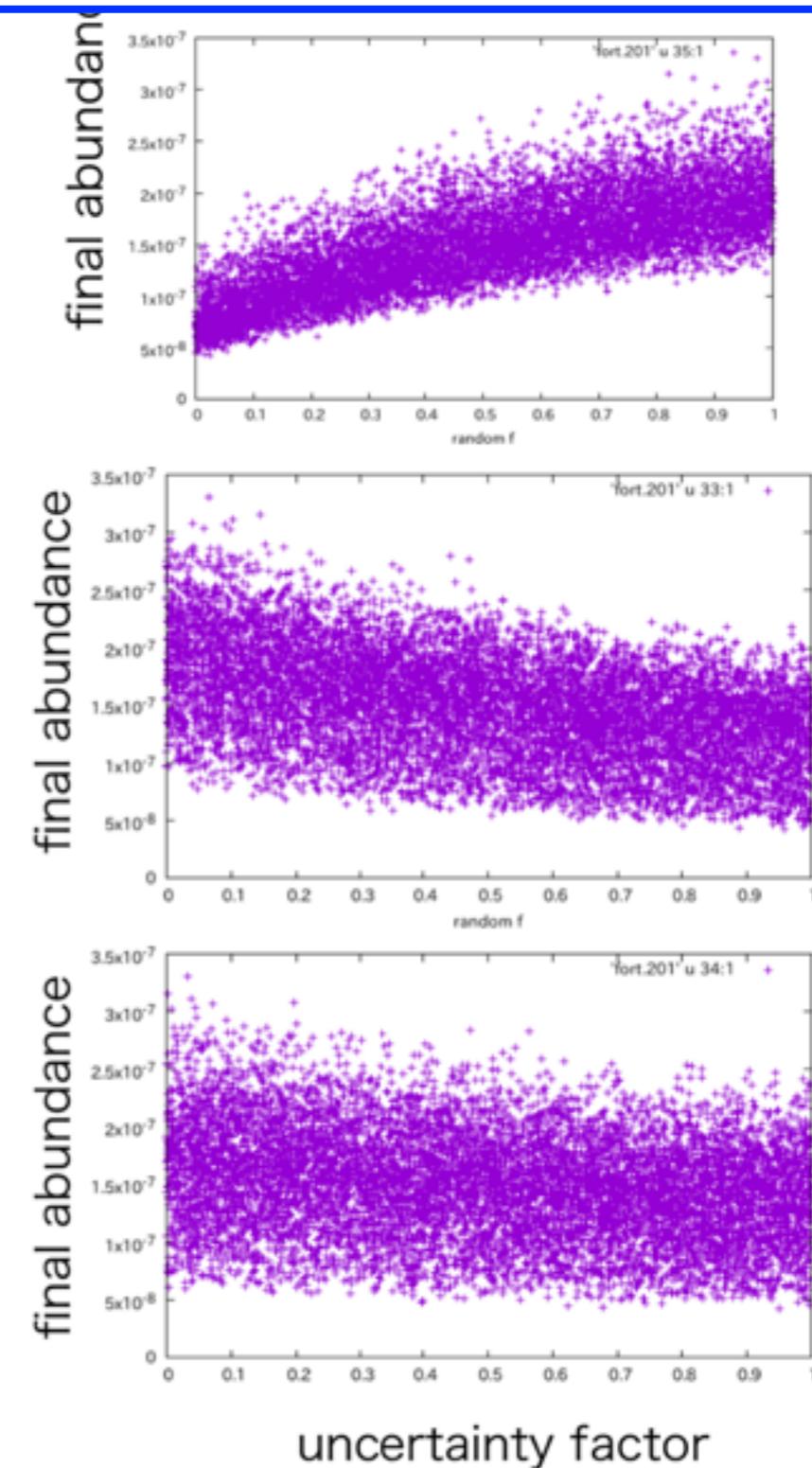
モンテカルロの結果を解析

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

Blue: positive; red: negative



other rates
(no correlation)



no correlation

元素合成とコンピュータ

粗いとする天体现象と元素合成過程の多数の組み合わせで、必要な計算機資源は千差万別。

$$\begin{aligned} \text{計算コスト} = \\ (\text{天体モデル}) \times (\text{元素合成}) \times (\text{モンテカルロ}) \end{aligned}$$

例：普通のパソコンを使う場合

- ① Sプロセスの計算：
簡単なモデルと1回の元素合成計算：約1分
- ② Sプロセスの計算（モンテカルロ）：
簡単なモデルと1回の元素合成計算：約1週間
- ③ Rプロセスの計算：
多次元シミュレーションモデル：約1年
- ④ Rプロセス多次元
多次元 × モンテカルロ：約10,000年？？？

研究課題①：星の進化での元素合成 (Sプロセス)

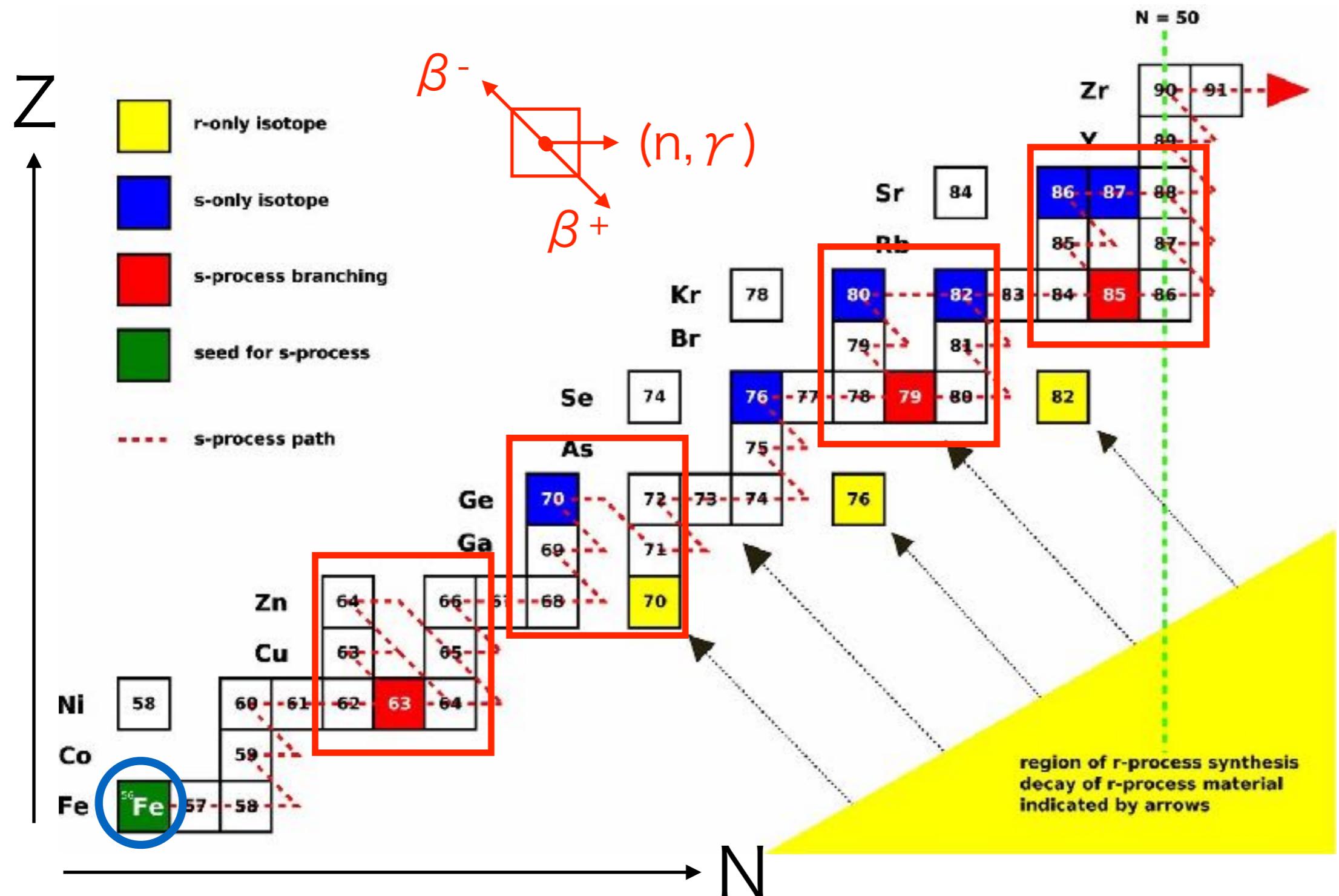
星の進化でのSプロセス

- 元素合成の予言能力（理論の不定性）をチェック
(原子核 → 天文学への応用)
- 未決定で重要な核反応は何か?
(天文学 → 原子核物理への問題提起)

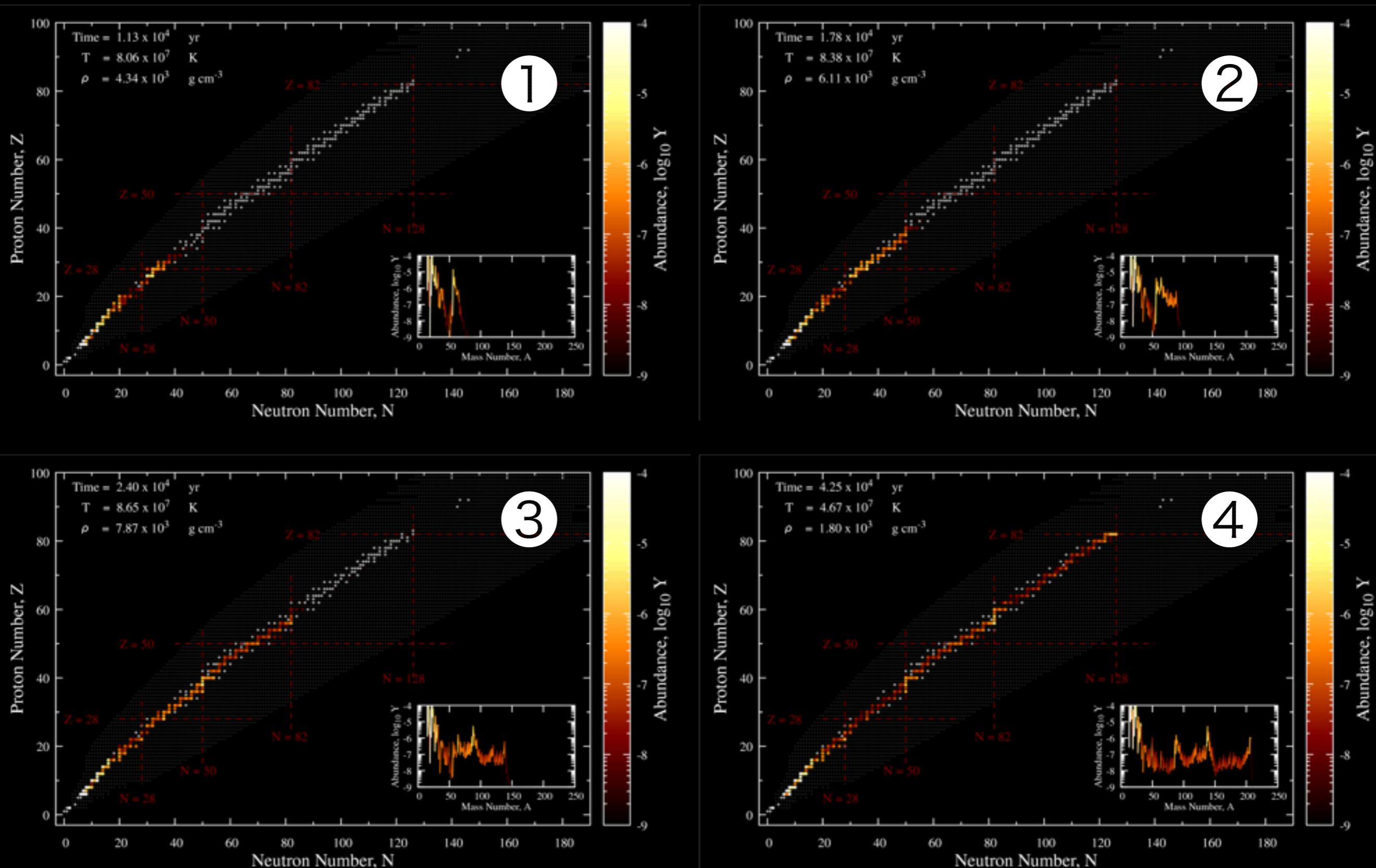
計算機：比較的軽い計算なので、(イギリスの)共同研究者のグループのPCクラスターを使用する。デスクトップPCでもギリギリ実行可能であるが、長時間待つ必要があり、多数のモデル(パターン)を計算する場合には向かない。

Sプロセスの基礎

- ・星の燃焼過程で中性子をゆっくり捕獲する。
(地球上の原子炉の環境に近い。ただし、数百万年以上)



Sプロセス：元素合成の進行



問題点・計算セットアップ

どのような天体シナリオで起こるか（星の進化）、どのような元素の生成パターンになるのか、基本的な部分は分かっている。そのため、様々な関連する研究でも理論値が応用される。従って、より精密な理論予言値の計算をこなすことが求められる。

目標：Sプロセスの理論計算の精度を調べる。さらに、不確定の原因となる物理過程（核反応）を個別に特定する。

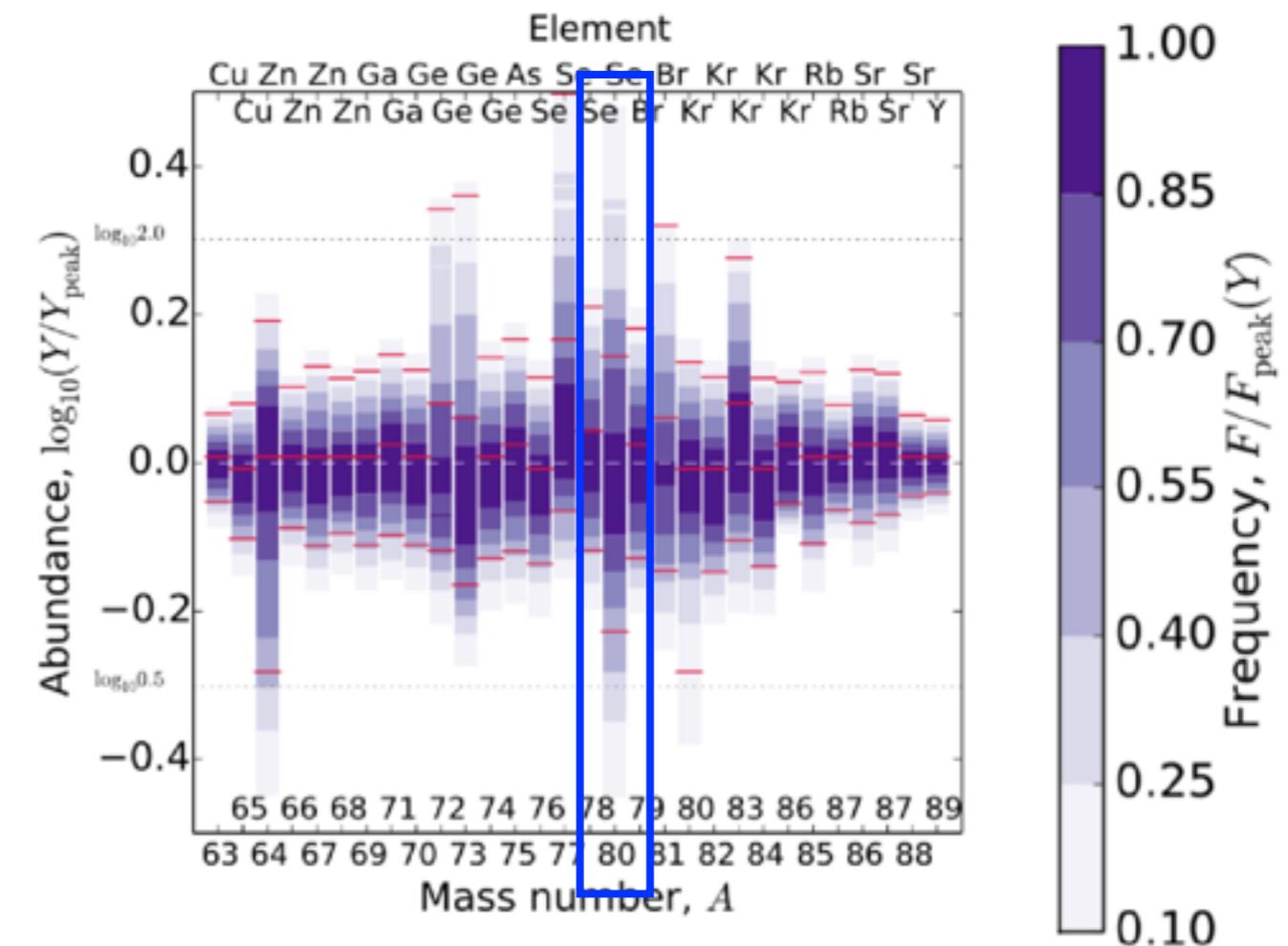
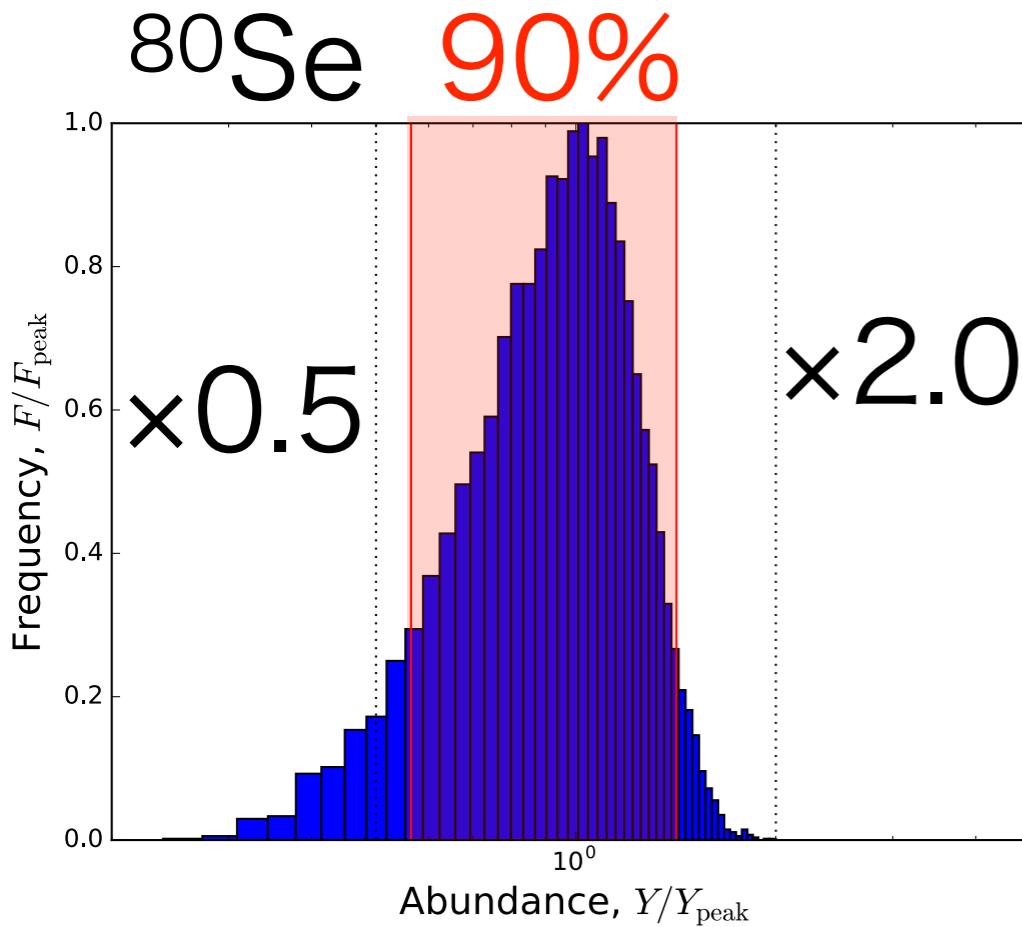
天文学 → 理論計算値をどれだけ信じているのか？

原子核物理 → 対象となる反応が多く複雑で、どれが重要かすぐには決められない。実験にはコスト（加速器、人的資源）がかかるため、まずは数値シミュレーションで候補を絞る。

PCクラスター
@英國キール大学



Sプロセスの不定性



反応率をランダムに変化させるモンテカルロ計算により、元素合成結果が変化しうる範囲の分布を決定。

- 理論の予言能力をチェック
- 特に、2倍の幅で未決定なものも存在

重要な反応率のリスト

考えている反応率（900種類）と主要なSプロセス核（200種類）の全ての組み合わせ（180,000通り）をチェックして、重要な反応のみを選別。

対象の元素

“一軍”の反応率 “二軍”の反応率

Nuclide	$r_{\text{cor}, 0}$	$r_{\text{cor}, 1}$	$r_{\text{cor}, 2}$	Key rate Level 1	Key rate Level 2	Key rate Level 3	X_0 (8, 30 keV)	Weak rate (8, 30 keV)
^{64}Zn	0.76			$^{64}\text{Cu}(\beta^-)^{64}\text{Zn}$				1.30, 1.36
^{67}Zn	-0.46	<u>-0.73</u>		$^{67}\text{Zn}(n, \gamma)^{68}\text{Zn}$				e^- capture
^{72}Ge	-0.67			$^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$			1.00, 1.00	
^{73}Ge	-0.85			$^{73}\text{Ge}(n, \gamma)^{74}\text{Ge}$			1.00, 1.00	
^{74}Ge	-0.84						0.88, 0.81	
^{75}As	-0.44	-0.54	<u>-0.67</u>				$^{74}\text{Ge}(n, \gamma)^{75}\text{Ge}$	1.00, 1.00
^{77}Sc	-0.50	-0.59	<u>-0.70</u>				$^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$	1.00, 1.00
^{78}Sc	-0.86			$^{77}\text{Sc}(n, \gamma)^{78}\text{Sc}$			1.00, 1.00	
^{80}Se	-0.71			$^{78}\text{Sc}(n, \gamma)^{79}\text{Sc}$			1.00, 1.00	
	0.38	<u>0.68</u>			$^{80}\text{Br}(\beta^-)^{80}\text{Kr}$		1.00, 1.00	1.31, 4.70
	-0.76				$^{68}\text{Zn}(n, \gamma)^{69}\text{Zn}$			1.31, 4.70
	0.27	<u>0.73</u>			$^{80}\text{Br}(\beta^+)^{80}\text{Sc}$			e^- capture
	0.16	0.44	<u>0.88</u>		$^{79}\text{Br}(n, \gamma)^{80}\text{Br}$			
^{79}Br	-0.64	<u>-0.73</u>					1.00, 1.00	
^{81}Br	-0.80			$^{81}\text{Kr}(n, \gamma)^{82}\text{Kr}$			1.00, 0.98	
^{83}Kr	-0.76			$^{83}\text{Kr}(n, \gamma)^{84}\text{Kr}$			0.81, 0.74	
^{84}Kr	-0.49	-0.65	<u>-0.76</u>				$^{84}\text{Kr}(n, \gamma)^{85}\text{Kr}$	1.00, 1.00
^{86}Kr	<u>0.84</u>			$^{85}\text{Kr}(n, \gamma)^{86}\text{Kr}$			1.00, 1.00	
	-0.30	<u>-0.70</u>			$^{86}\text{Kr}(n, \gamma)^{87}\text{Kr}$		1.00, 1.00	
	-0.34	<u>-0.62</u>	<u>-0.90</u>				$^{85}\text{Kr}(\beta^-)^{85}\text{Rb}$	1.30, 1.30
^{87}Rb	-0.56	-0.65	<u>-0.95</u>				$^{87}\text{Rb}(n, \gamma)^{88}\text{Rb}$	1.00, 1.00

研究課題①：星の進化での元素合成 (Sプロセス)

超新星でのPプロセス

- 元素合成の予言能力（理論の不定性）をチェック
- 未決定で重要な核反応は何か？
- 以上が、複雑な天体モデルが対象でも可能か？
(多次元モデルでのモンテカルロ元素合成の検証)

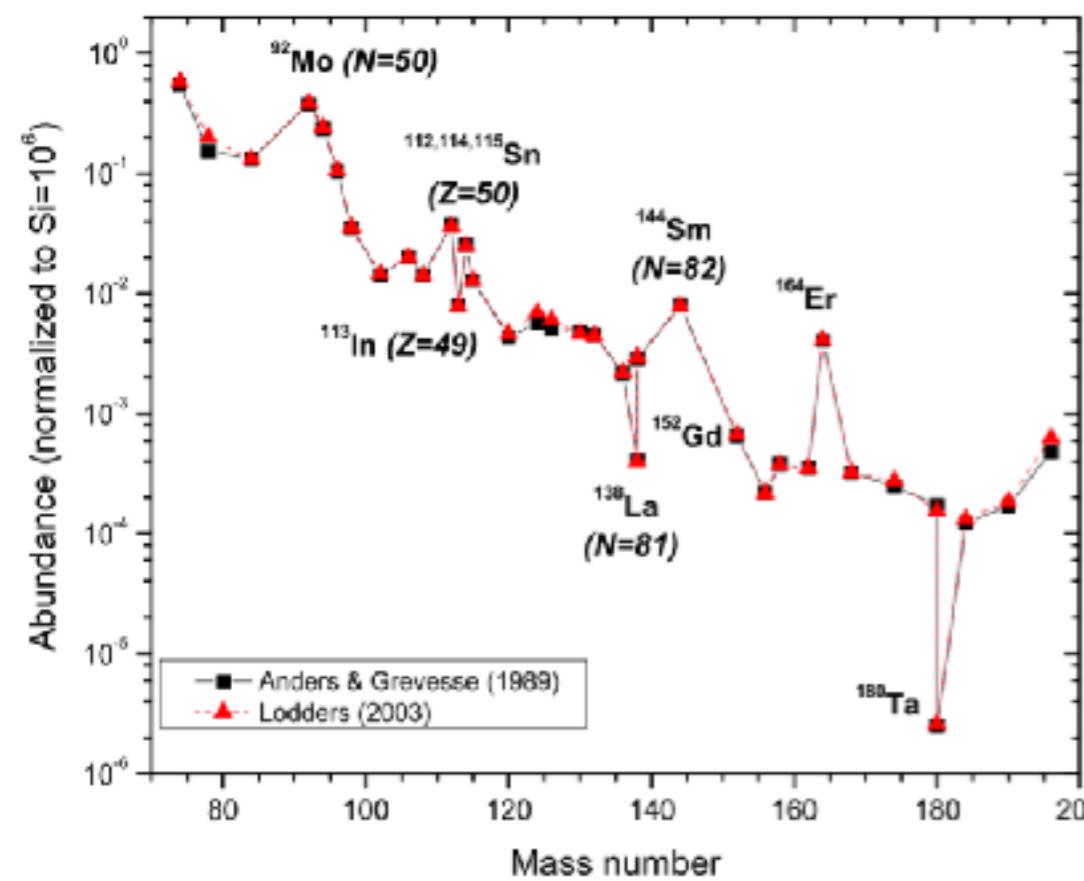
計算機：天体モデル（多次元の超新星爆発計算）と元素合成過程が共に複雑になり、スペコンなど大規模な計算機環境が必要になる。計算コード開発の相性のよさから、ケンブリッジ大学の共有メモリ型のスペコンを用いる。

Pプロセス（ガンマ・プロセス）

超新星爆発の環境で重い核を「壊す」（光分解）

- ・原子核が高温の環境で発生するガンマ線（高エネルギーの光）を吸収し、中性子、陽子、 α 粒子など軽い粒子を放出する。
- ・粒子を放出した原子核は近傍の少し軽い核に変換し（光分解）、さらに、放出された粒子が再び別の形で吸収される。

太陽系組成



陽子過剰核

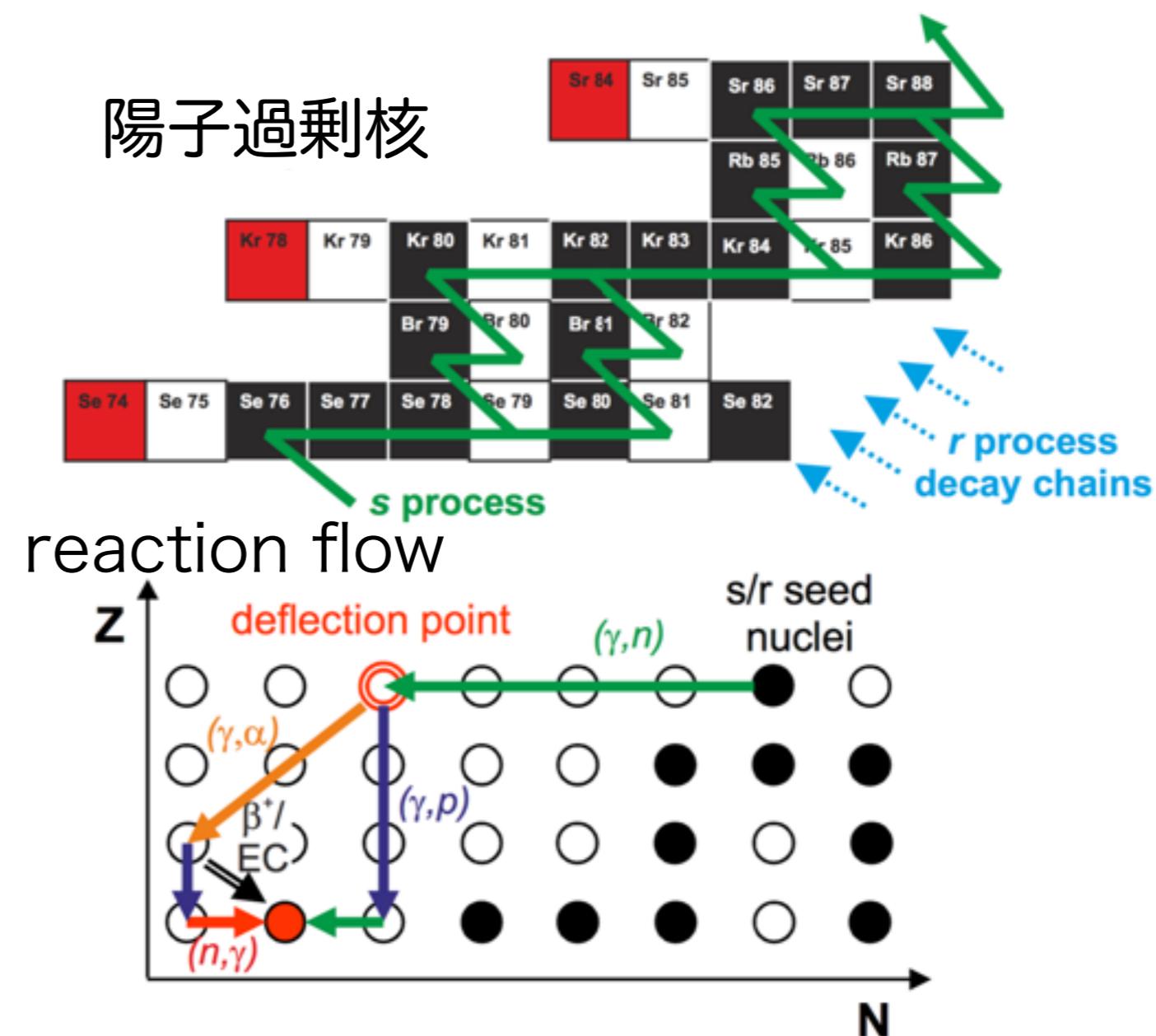


図 : Rauscher+2013

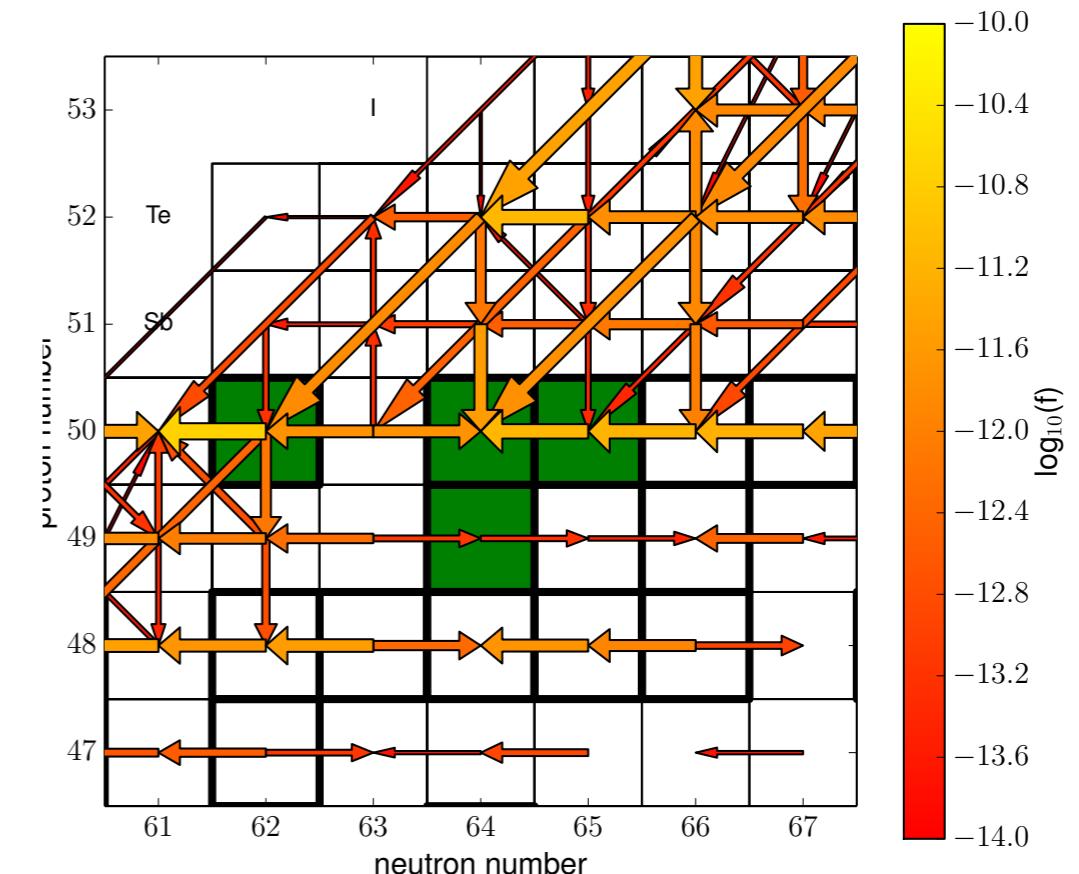
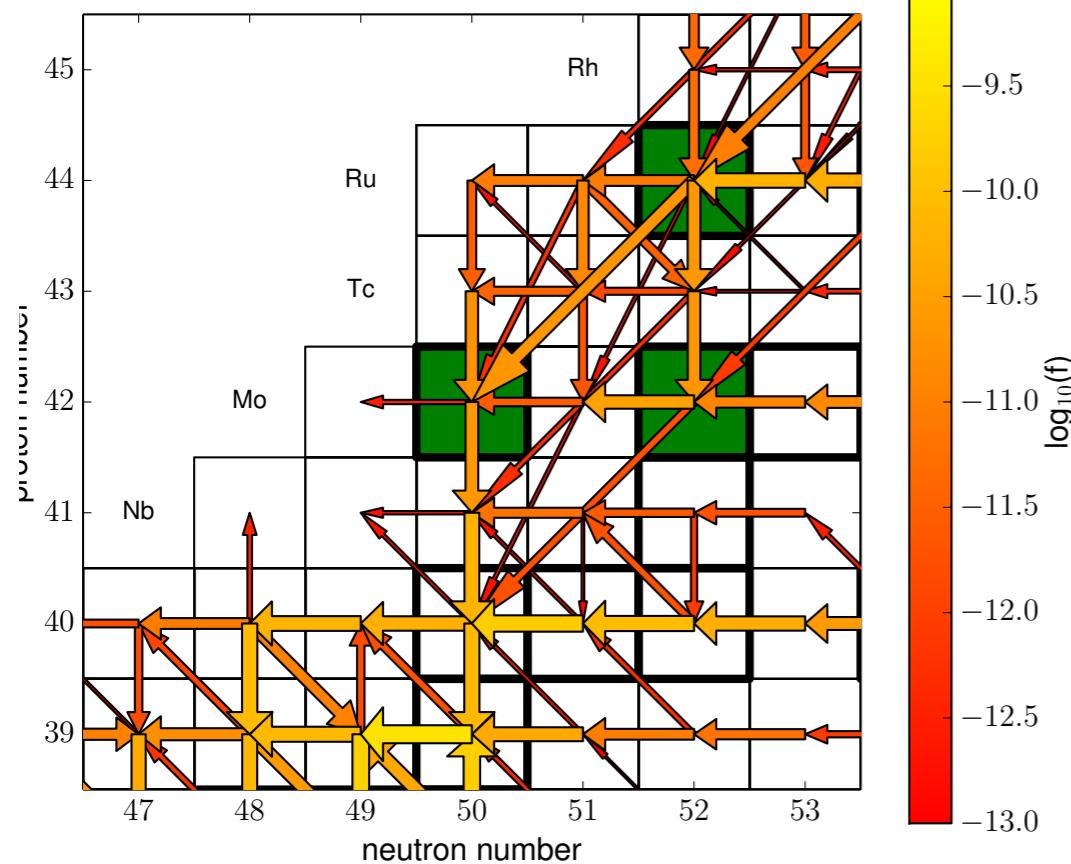
Pプロセス（ガンマ・プロセス） ^{114}Sn など中間の核

超新星爆発の環境で原子核が壊れる

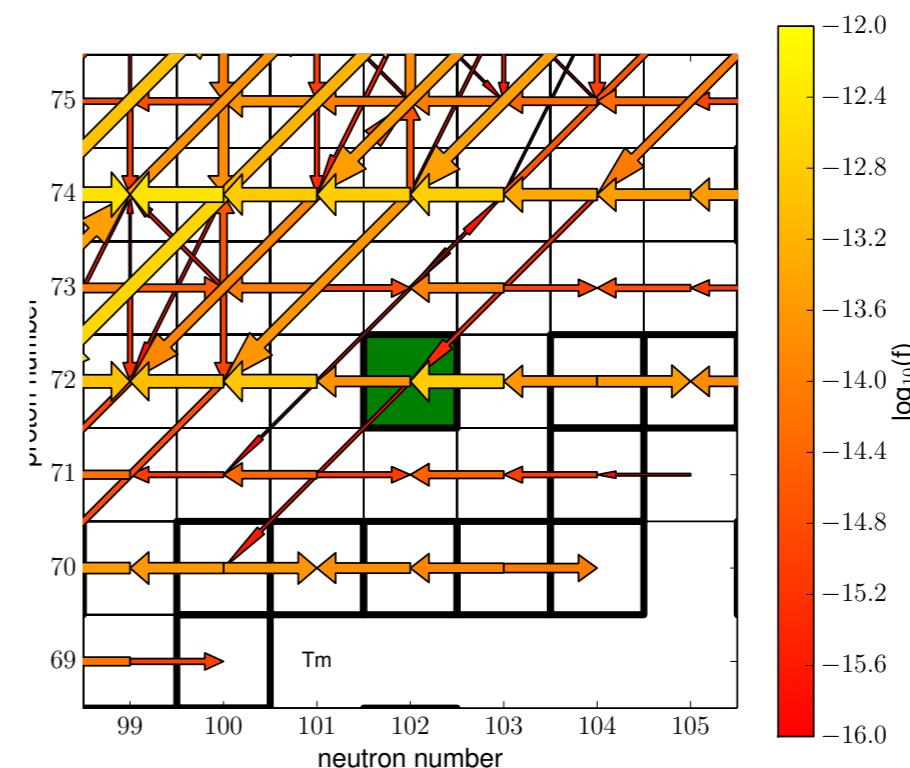
(光分解)

→ 原子核は色々な壊れ方をするので、元素合成経路が複雑（幅広い）

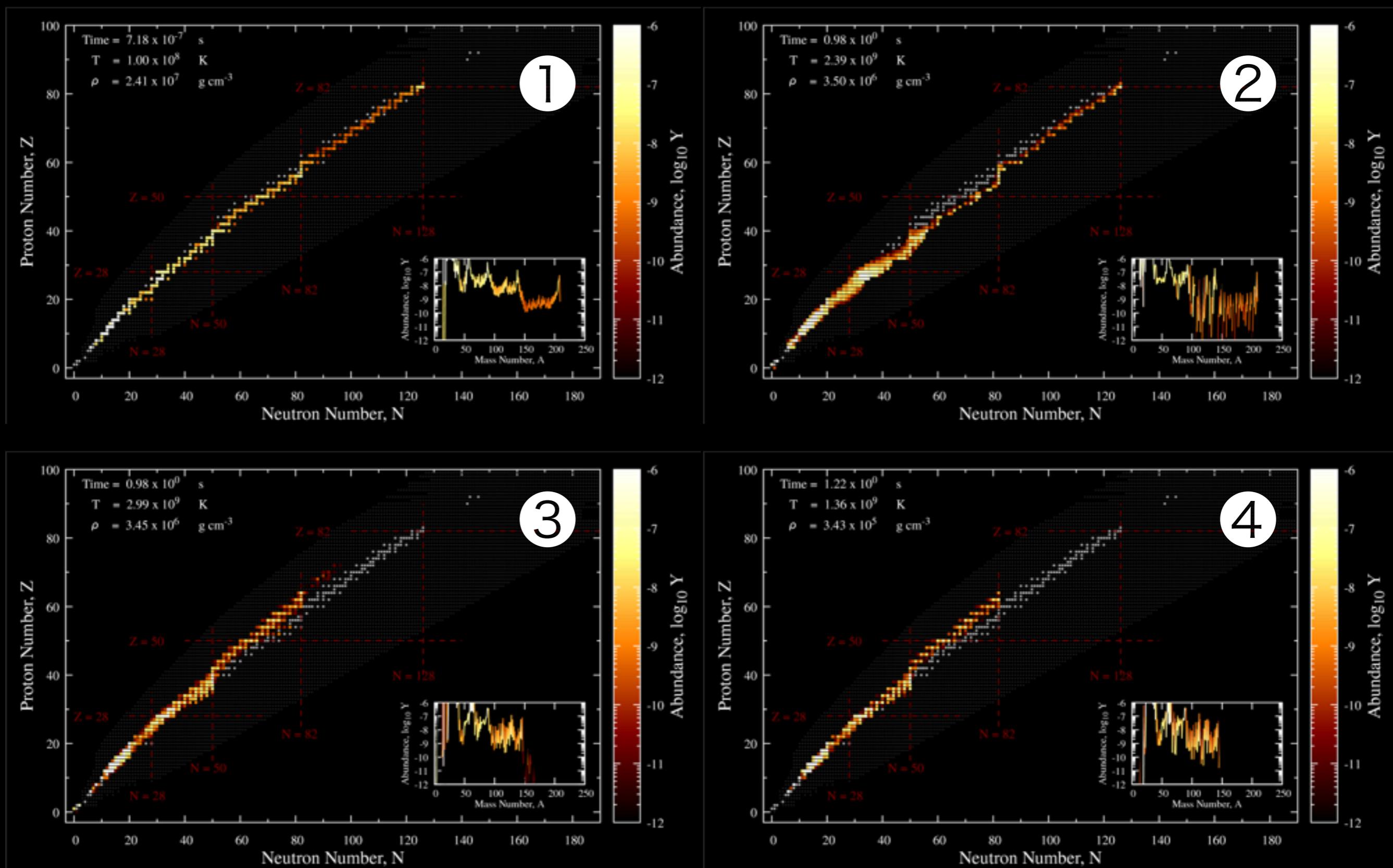
^{92}Mo など軽い核



^{174}Hf など重い核



Pプロセス：元素合成の進行



問題点・計算セットアップ

Pプロセスの候補となる超新星爆発モデルは提案されているが、完全には決定していない、かつ、Pプロセスの元素合成過程自体がSプロセス（やRプロセス）よりも複雑である。

目標：実際にPプロセスがどのように起こっているのかシミュレートし、重要な核反応率を特定する。

Pプロセスの新しいシナリオ：核燃焼型超新星でのPプロセスの元素合成モンテカルロ計算。

→スーパーコンピュータとしては中規模の部類だが、

スパコンとしては、中規模の部類だが、コードの改良が必要でなく、使いやすい。

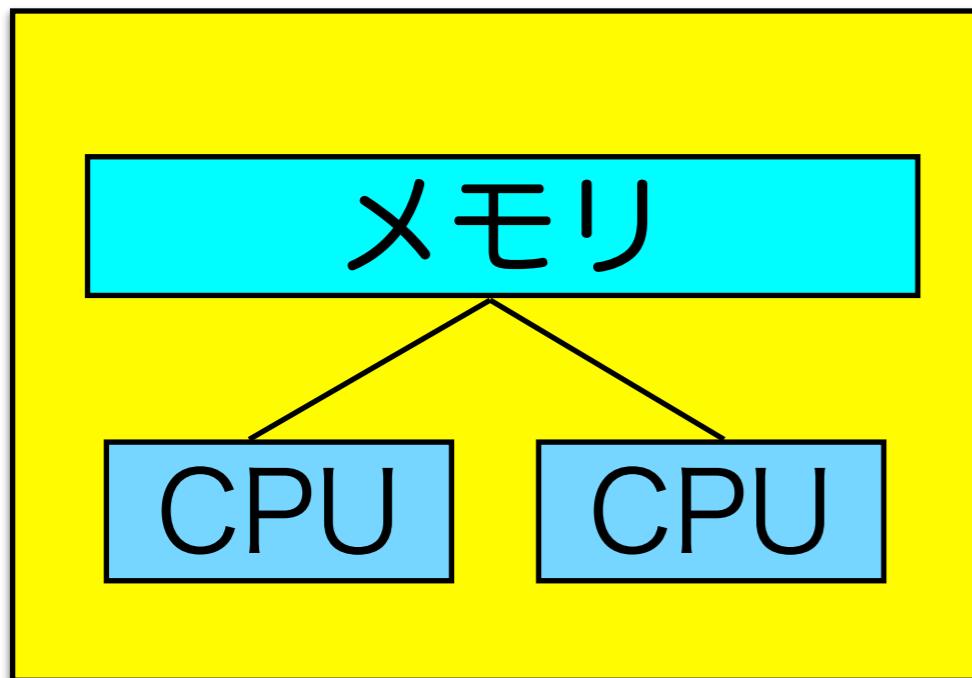
→ただし、1年ほどかかった。

コスモス2（ケンブリッジ大学）

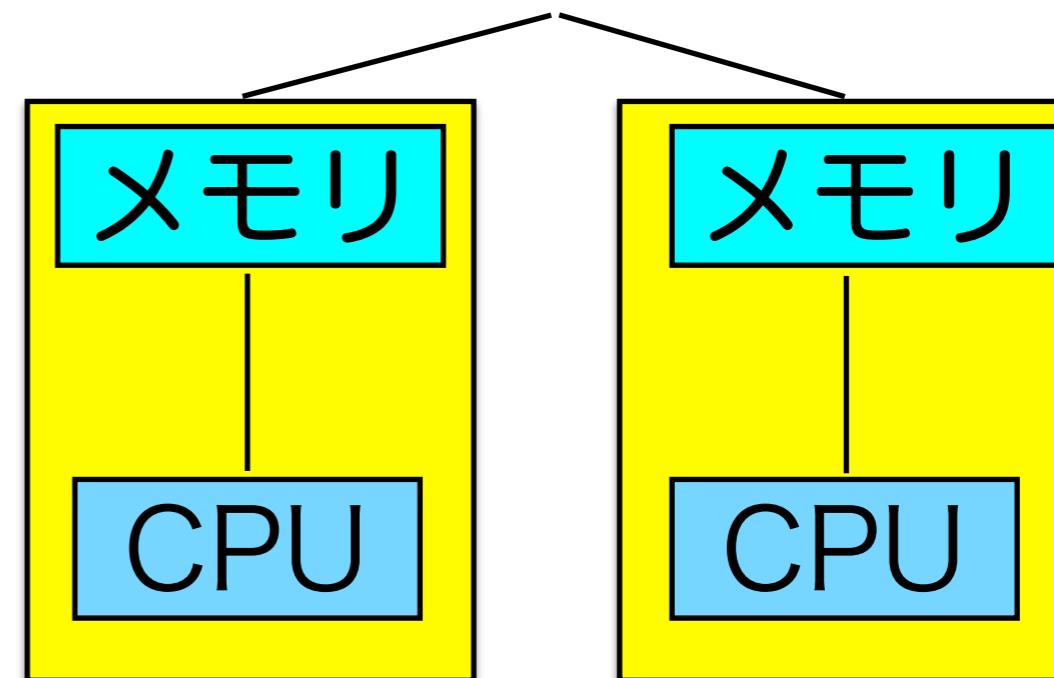


共有メモリマシン

共有型



分散型 ネットワーク



最近のパソコンは（規模の小さい）共有メモリのCPU
→ 共有メモリマシンは「巨大なデスクトップPC」

共有型

CPUを作業する人、メモリを働く場所に例える：

共有メモリ：1箇所の大きな作業場所で多人数が働く

メリット：仕事の振り分けが速い

デメリット：大きな作業場所の確保に制限がある。

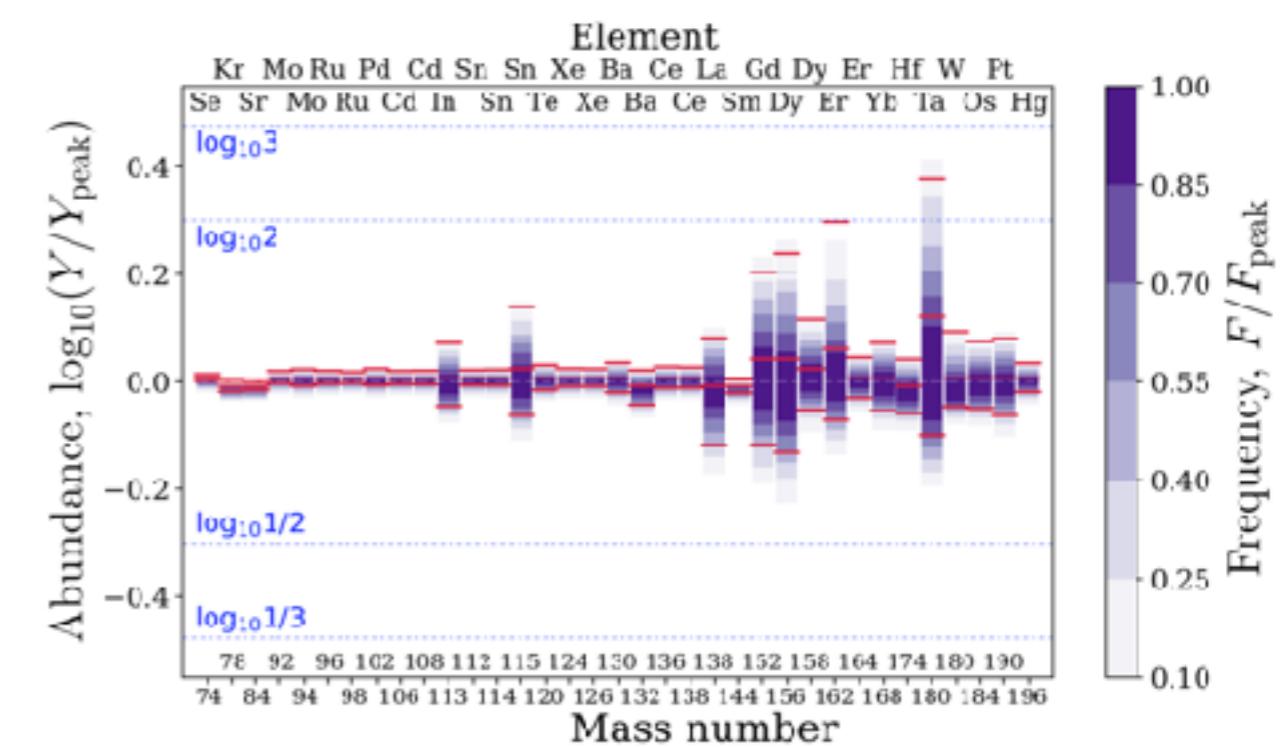
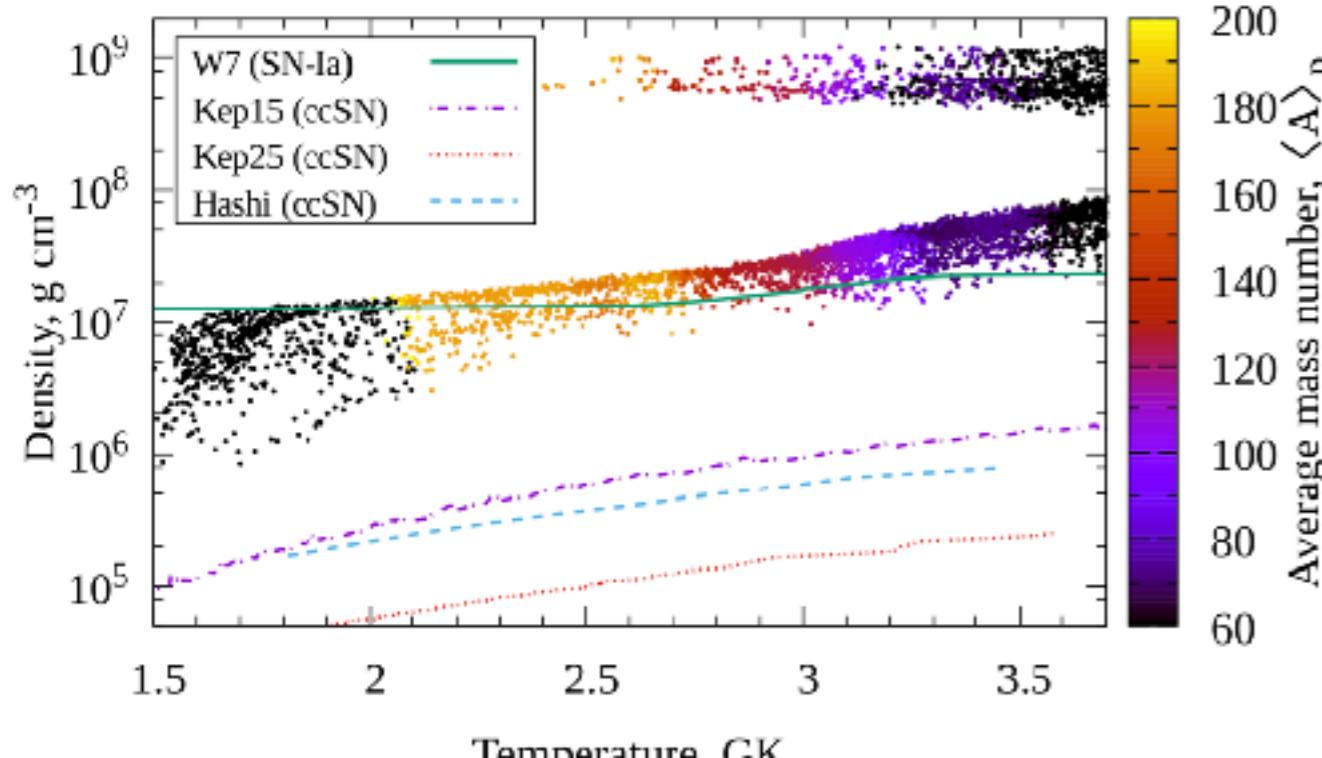
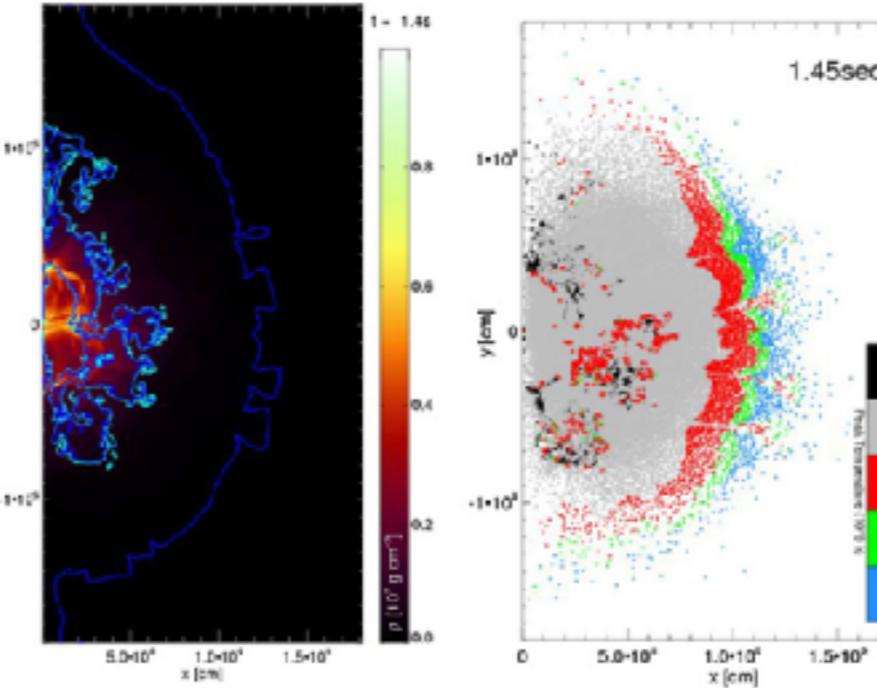
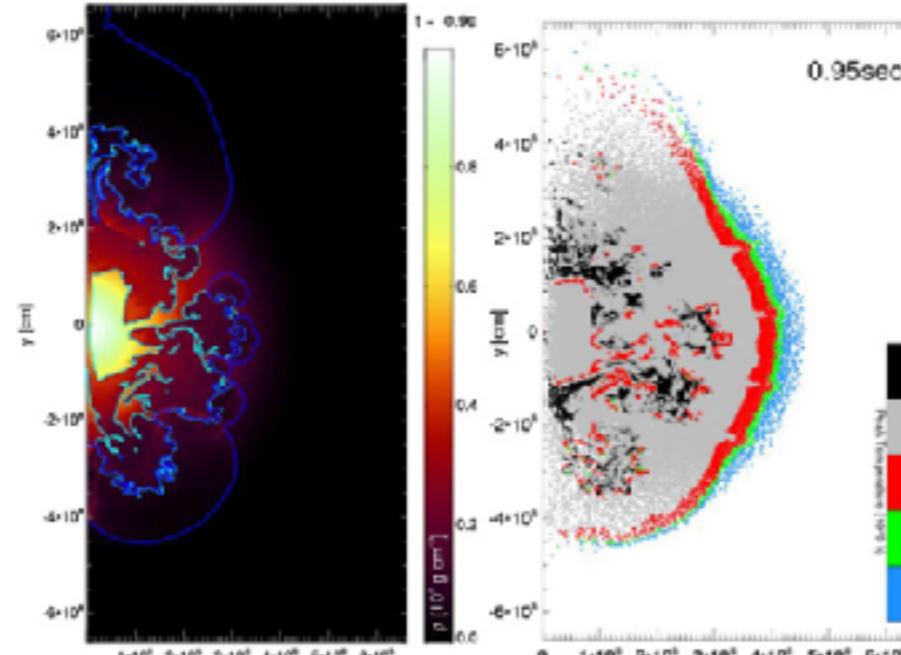
分散メモリ：多数の小さい作業場所で大人数が独立に働く

メリット：より多くの作業人数、作業場所の拡張が容易

デメリット：作業の振り分けが複雑になり、時間もかかる。

核燃焼型超新星

近年Pプロセスの候補として提案された核燃焼型超新星。多次元燃焼流体計算が必要で、核燃焼過程が複雑。加えて、もともとのPプロセスの複雑さもあり、モンテカルロ元素合成計算の計算量も増大。



研究課題③：金やウランの起源 (Rプロセス)

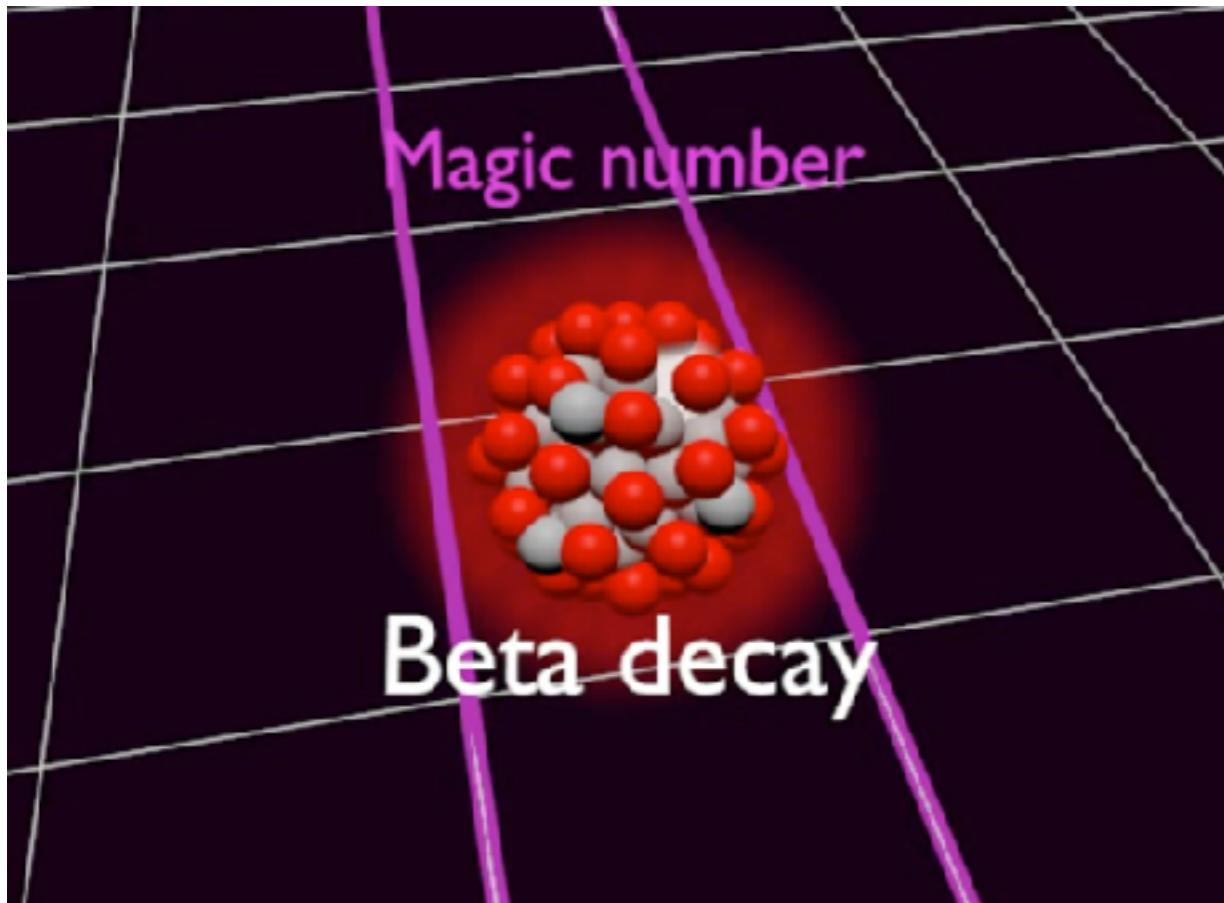
中性子星合体でのRプロセス

- Rプロセス元素合成を行う。
- 現在のシミュレーションは正しいか？
 - できる元素のパターンと観測の比較
 - 「キロノヴァ」の観測

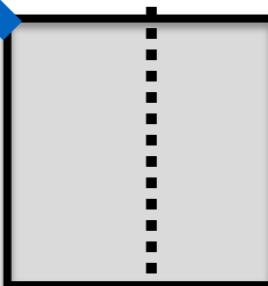
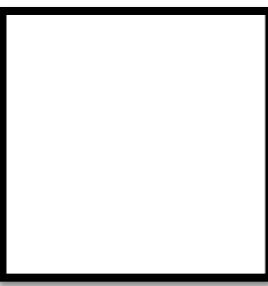
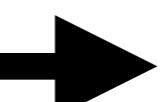
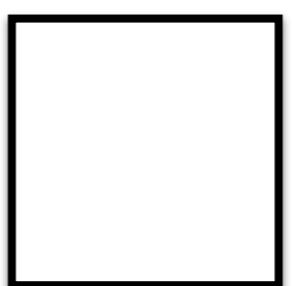
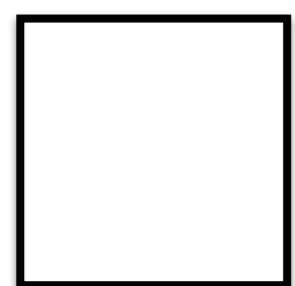
計算機：「京」や「アテルイ」（国立天文台）で計算された中性子星合体モデルをもとに元素合成計算を行う。元素合成の計算は、「計算サーバ」（国立天文台）を使用し、多数のモデルを同時に独立に走らせる。元素合成モンテカルロによる反応率の解析は今後の課題である。

宇宙の鍊金術：Rプロセス元素合成

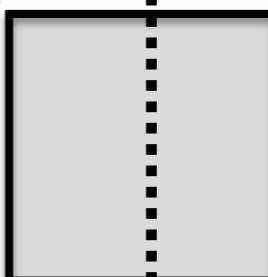
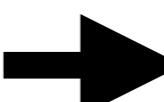
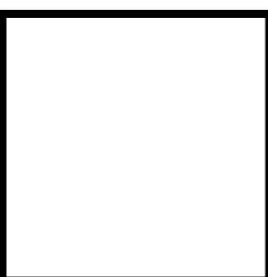
速い中性子捕獲+ベータ崩壊による元素合成



生成過程のイメージ（作成：和田智秀）

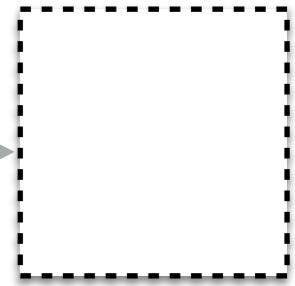


ベータ崩壊

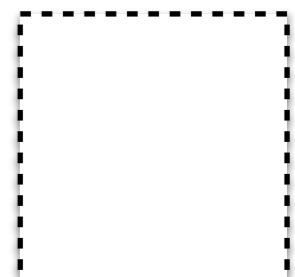
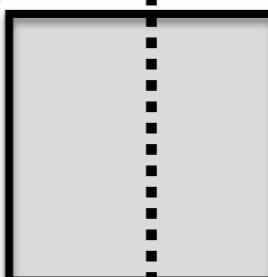
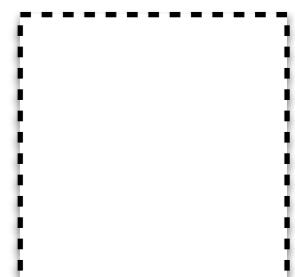
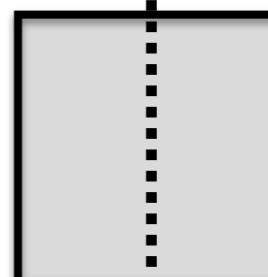


ベータ崩壊

中性子捕獲
の限界



魔法数（安定）



宇宙の鍊金術：Rプロセス元素合成

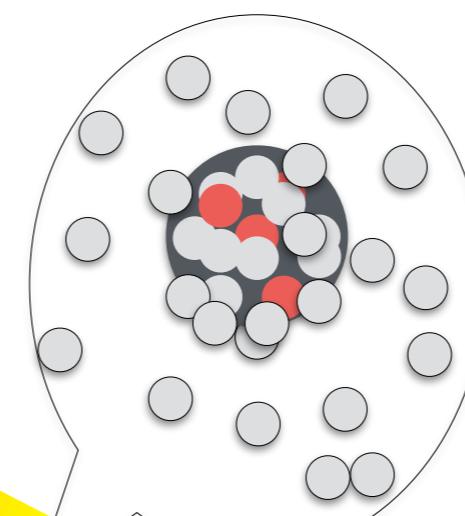
速い中性子捕獲により重い元素を生成

「中性子星」

による爆発現象

高温

③種核が中性子を捕獲
→質量数Aが増える

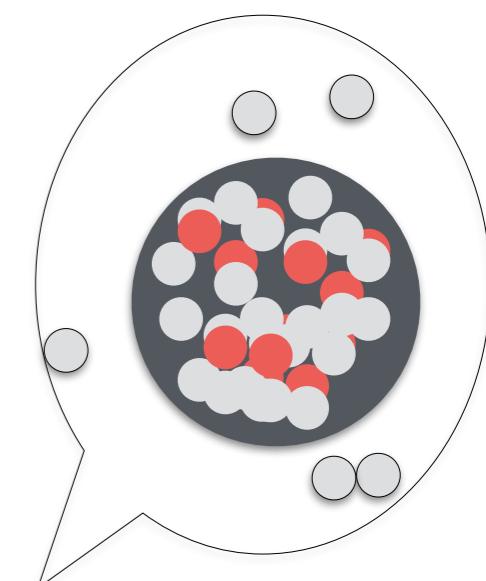
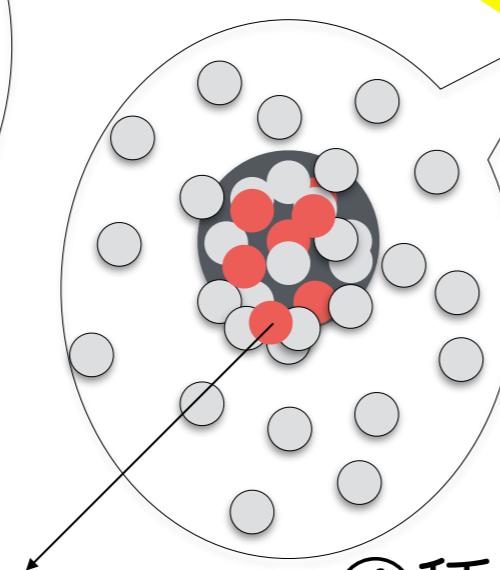
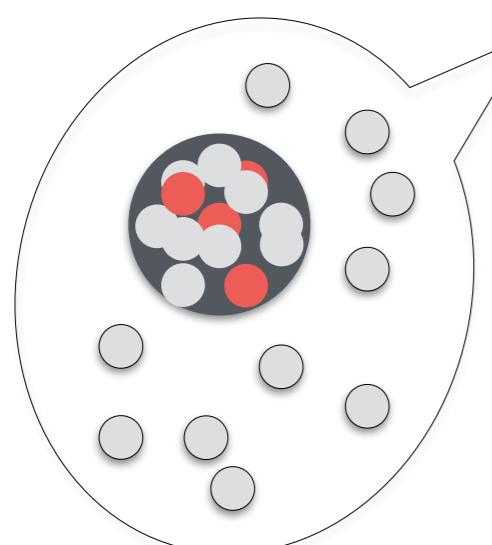


③と④は同時進行
で繰り返す

②種核を生成

低温

④種核がベータ崩壊
→陽子数Zが増える



Rプロセス天体现象の候補

大質量星

超新星

主要な源？

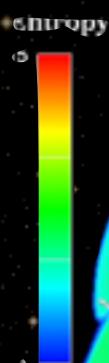
中性子星連星

中性子星-ブラックホール

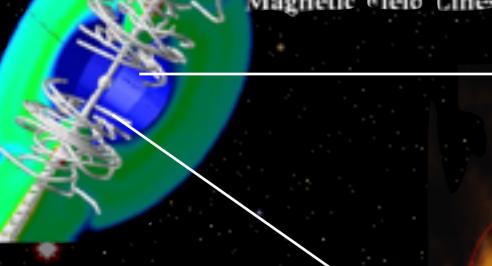
合体

磁気駆動超新星

B12B1.00



Magnetic field lines



マグネター

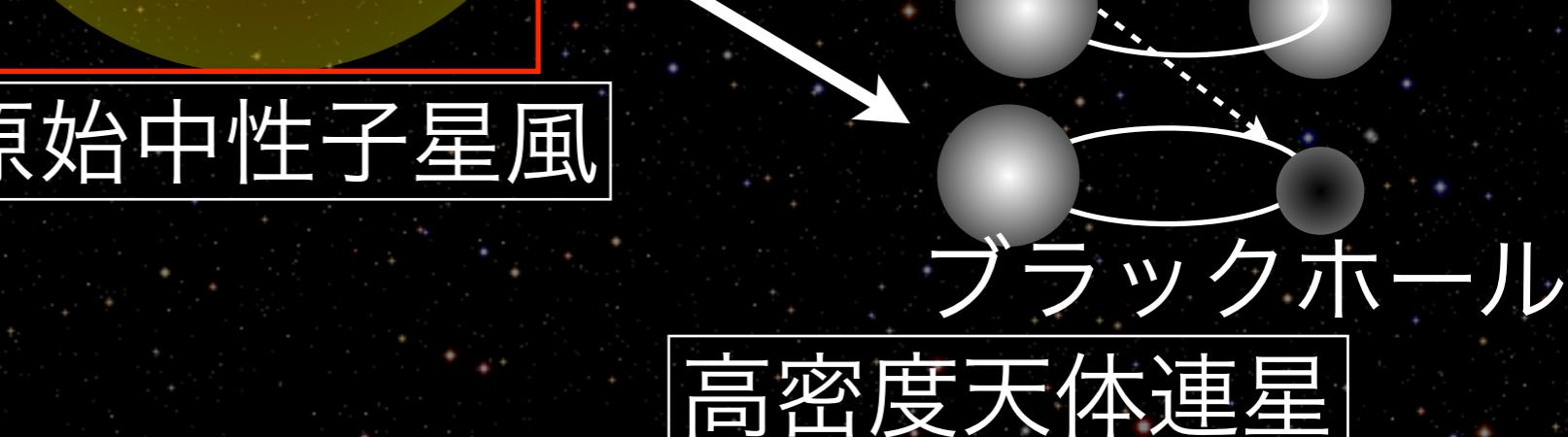
原始中性子星風

中性子星

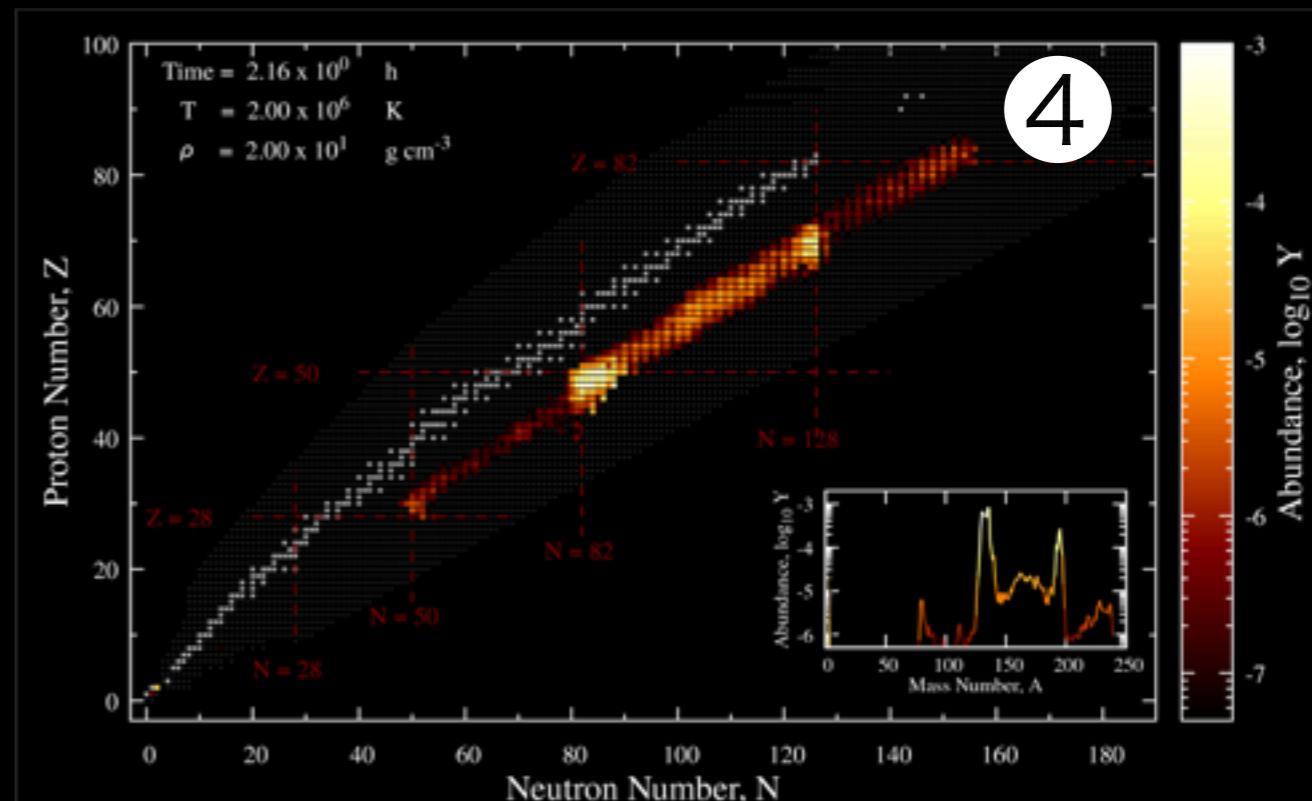
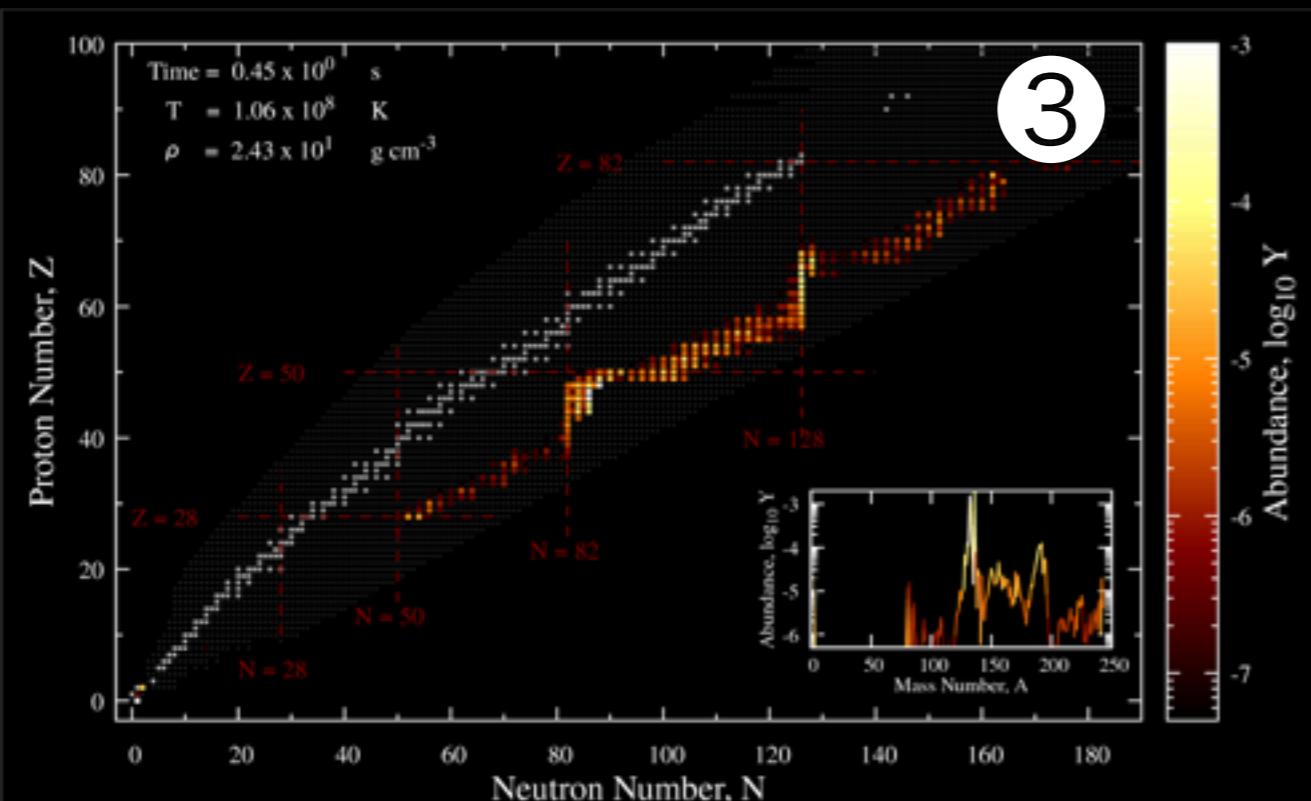
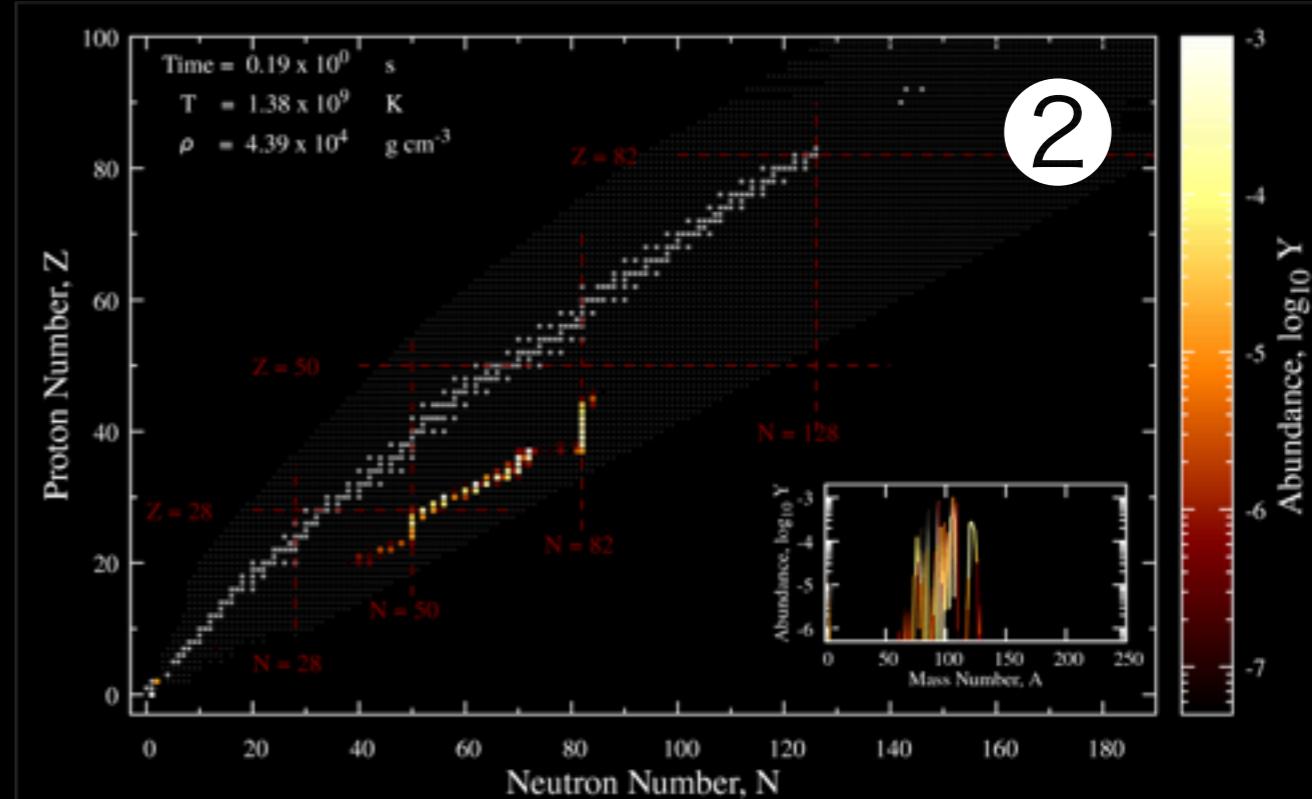
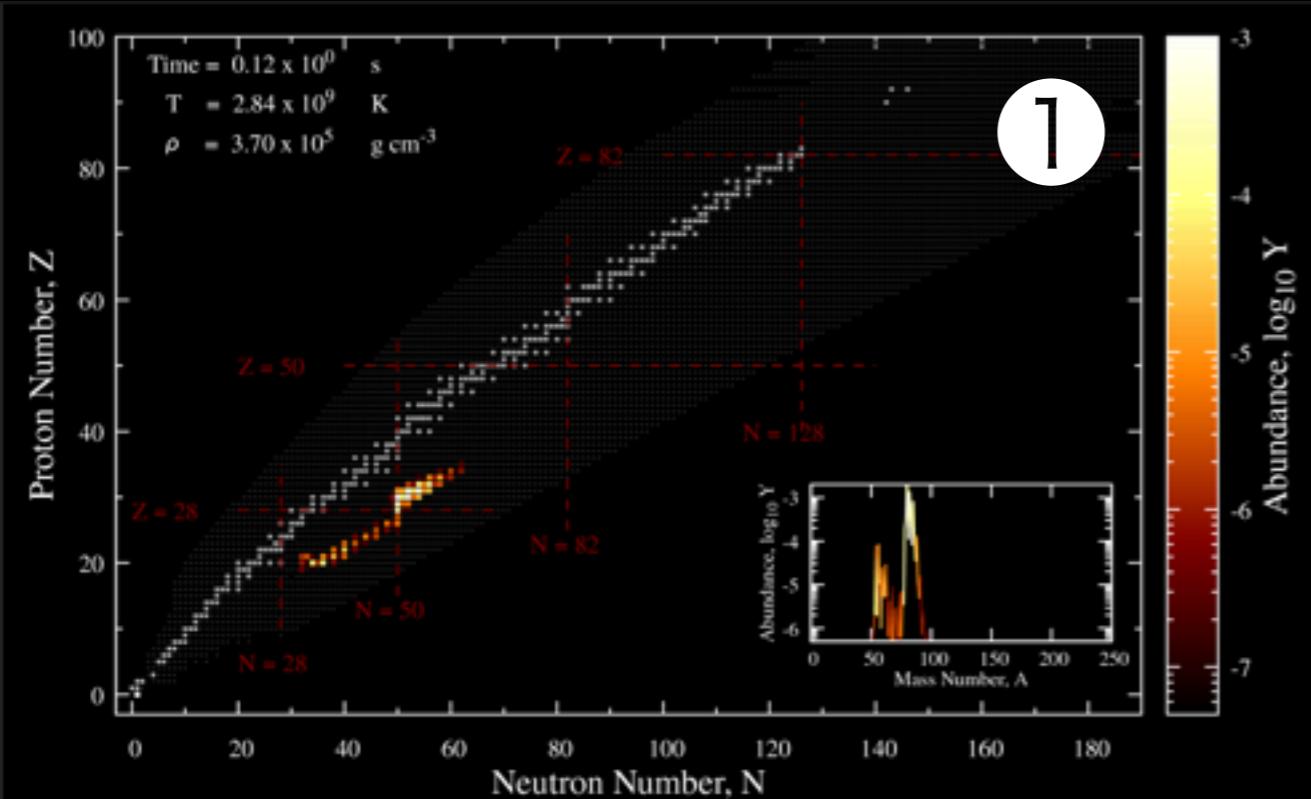
中性子星

ブラックホール

高密度天体連星



Rプロセス：元素合成の進行



問題点・計算セットアップ

中性子星合体によるRプロセス元素合成の予言には、大規模な数値計算に基づく流体モデルが不可欠。

目標：「京」コンピュータで計算された中性子星合体の一般相対論的なシミュレーションの後期進化を追い、そこで起こるRプロセスを精密に計算し、「キロノヴァ」シナリオを検証する。

- 中性子星同士をぶつけてどのように壊れるか。（「京」）
- ぶつかった後にどのように元素が生成され、とんでいくか？
 - 流体計算（アテルイ、共同研究者：藤林翔氏による）
 - 元素合成計算（計算サーバ）

「京」コンピュータ



アテルイ（国立天文台）

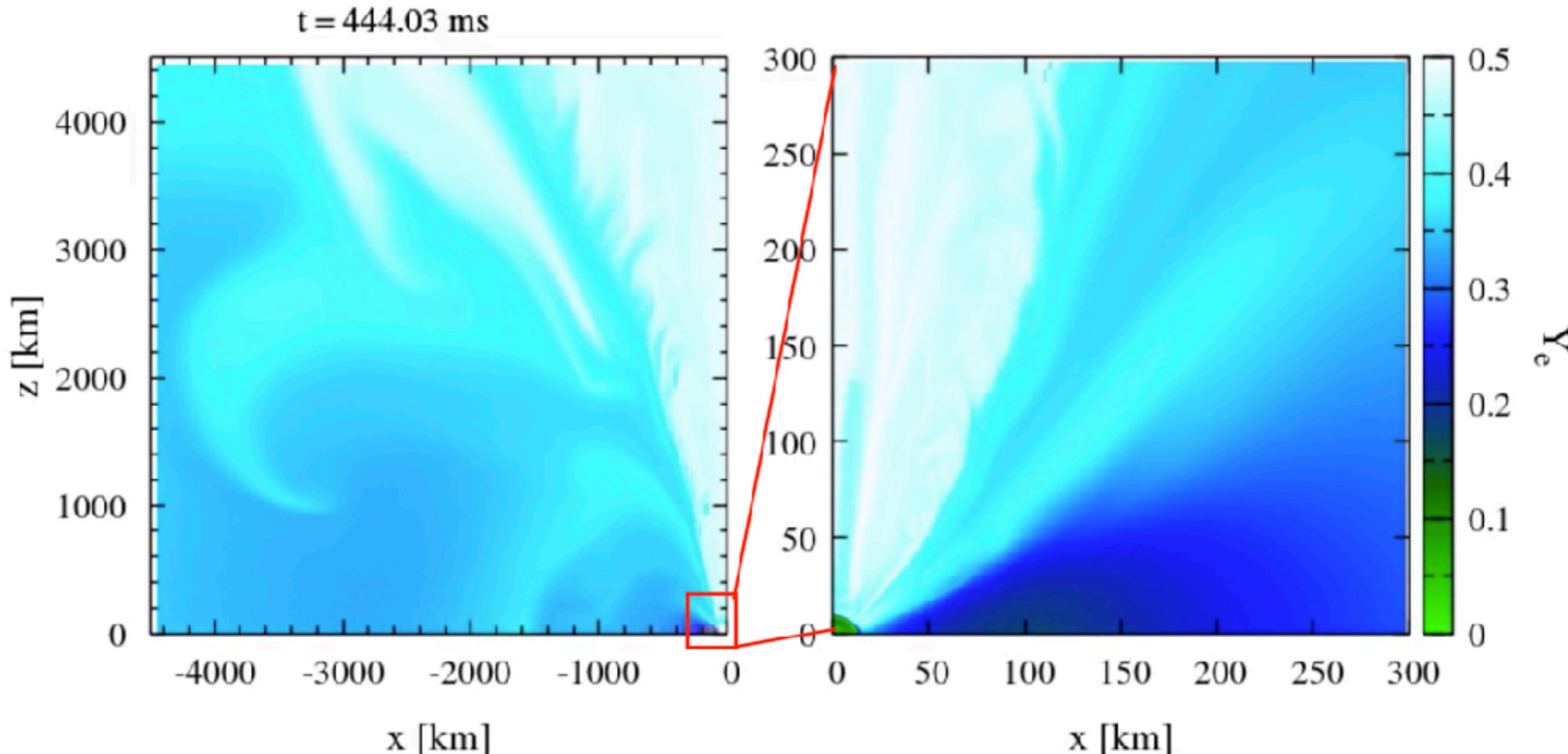


計算サーバ（国立天文台）



中性子星合体：合体後の進化

Ye : 電子比 (緑 : 重い元素、 青 : 軽めの元素)



数値シミュレーション
by 藤林翔 (京大)

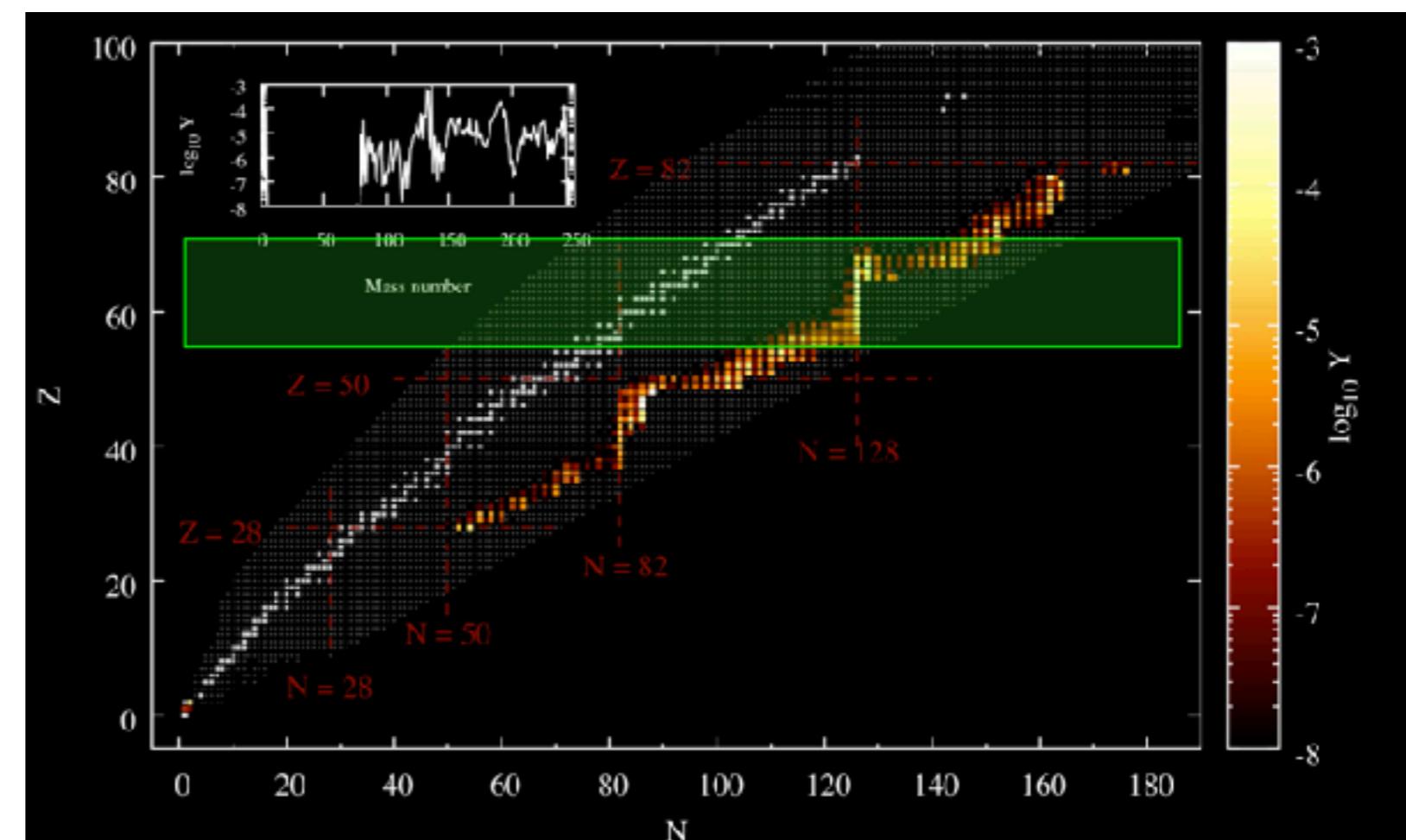
Rプロセスの流れ

ランタノイド

$Z = 57 - 71$

強く中性子過剰 ($Y_e = 0.1$)

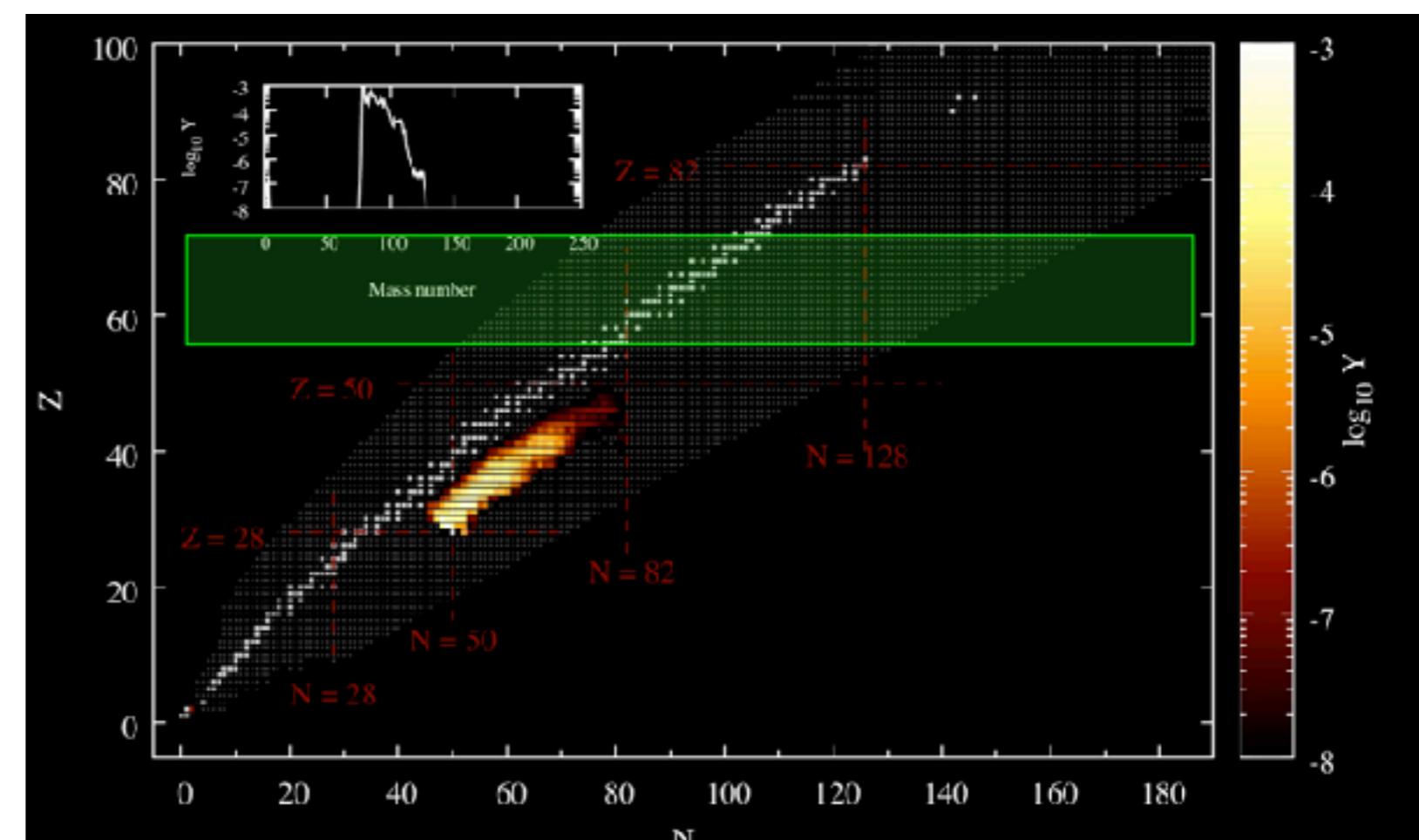
- ランタノイドが多い
- 光が通りにくい
- 「キロノヴァ」の赤い成分に対応



少し中性子過剰 ($Y_e > 0.3$)

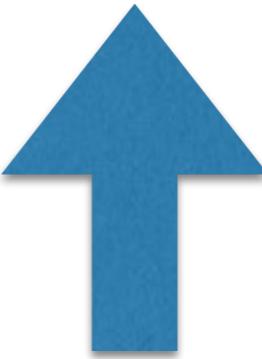
- ランタノイドが少ない
- 光が通りやすい
- 「キロノヴァ」の青い成分に対応

ポストマージャー
の放出物はこちらに対応



Rプロセスの謎の完全解明に向けて

- 中性子星合体モデル
 - より現実的なモデル、パラメター数の実行
 - 共同研究者による実行だが、元素合成の立場から要求を考慮



- 「モンテカルロ」元素合成
 - より大規模な計算機が必要（分散メモリ型のスパコン）
 - MPIなどによる計算プログラムの書き換えと実行テスト
 - 可能な問題設定と必要な計算時間・マシンの見積もり
アテルイ（国立天文台）などで検証
必要なら「京」、「ポスト京」での実行課題を検討

総まとめ：

計算機の発達により、複雑な天体现象に対しても元素合成の予言が可能になった。また、原子核反応に起因する不定性の見積もりも可能になり、どの程度予言が正しいかの保証もできるようになった。

1.Sプロセス：理論の精密性を検証し、解く鍵となる反応を特定し、実験計画の提案につながった。

2.Pプロセス：流体シミュレーション

3.Rプロセス：キロノヴァの流体モデルを元に、生成される元素組成が「青い」光に対応することを確認。

→しかし、多くの未確定の原子核の性質に依存する。
モンテカルロ元素合成による検証と原子核物理の精度の向上が重要。