

中性子星合体における R-process元素の存在量分布 の研究

東京理科大学理工学研究科物理学専攻

萩亮太（修士1年）

鈴木英之

加藤ちなみ

超新星ニュートリノ研究会(2022/01/06)

研究の概要

- R-process: 鉄以上の元素の約半分を合成する過程
- 中性子星合体がr-processのサイトとして示された。
- 中性子星合体のdynamical ejectaにおいて、初期条件(T, ρ, Y_e)を与えることで、どのように元素組成が変化するかを調べている。
- 特に太陽系に存在するU, Thなどの強いr-processの元素合成に着目。
- r-java(GUI, open source code, <http://quarknova.ca/>)で計算している。

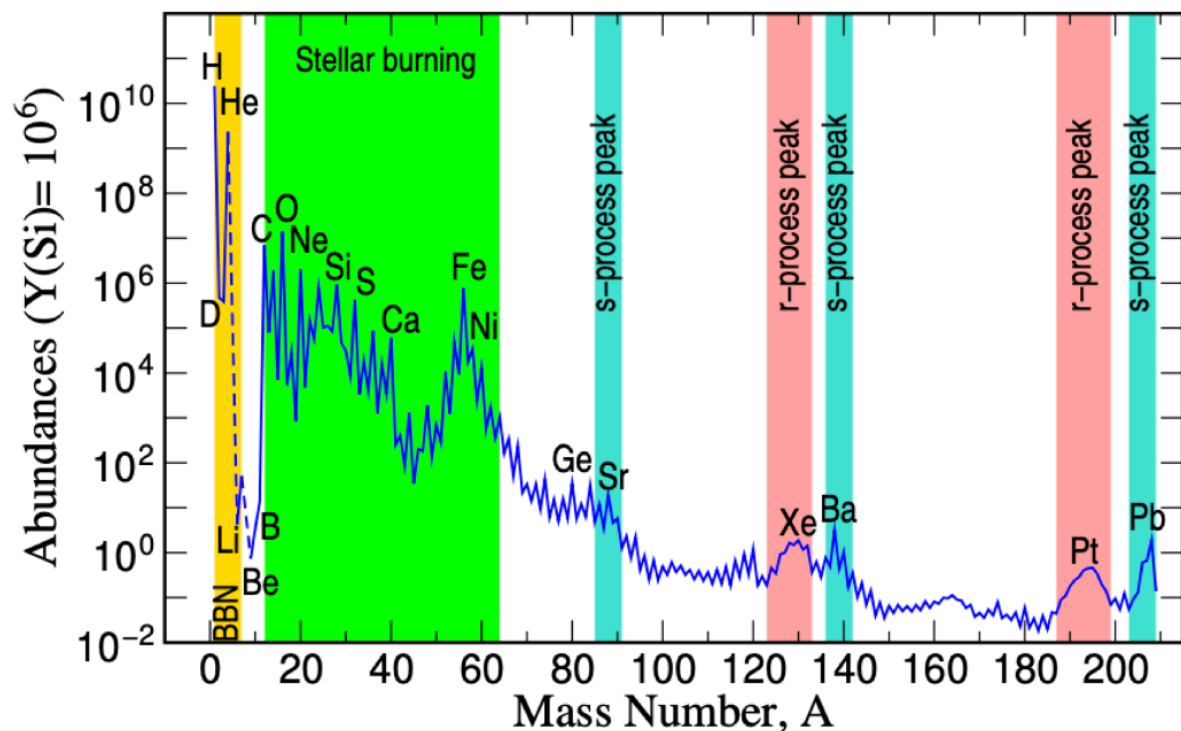


Fig.1 Abundance of element and their isotopes in the solar system.
(By arXiv:1901.01410v3 [astro-ph.HE] 1 Feb 2021)

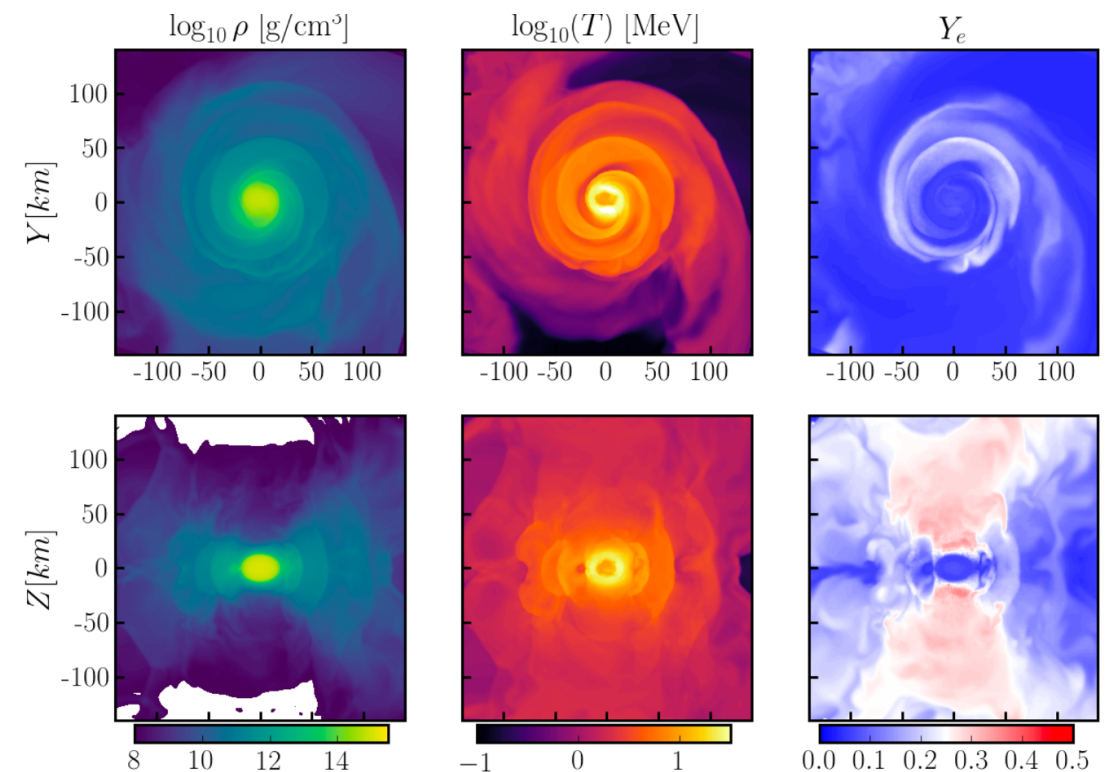


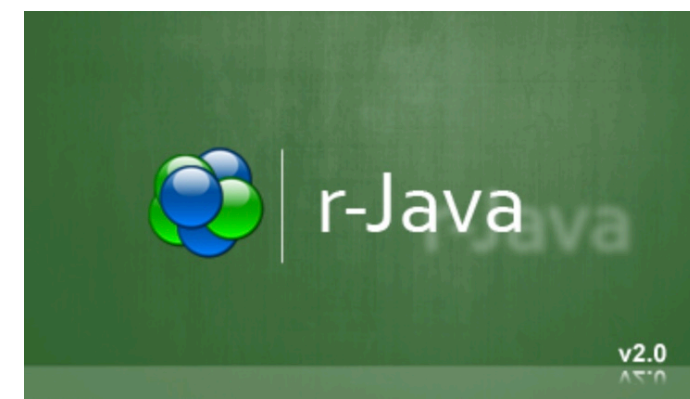
Fig.2 Snapshot of NSM simulation by [Francois 2020]
(arxiv : 08089vs)

目的

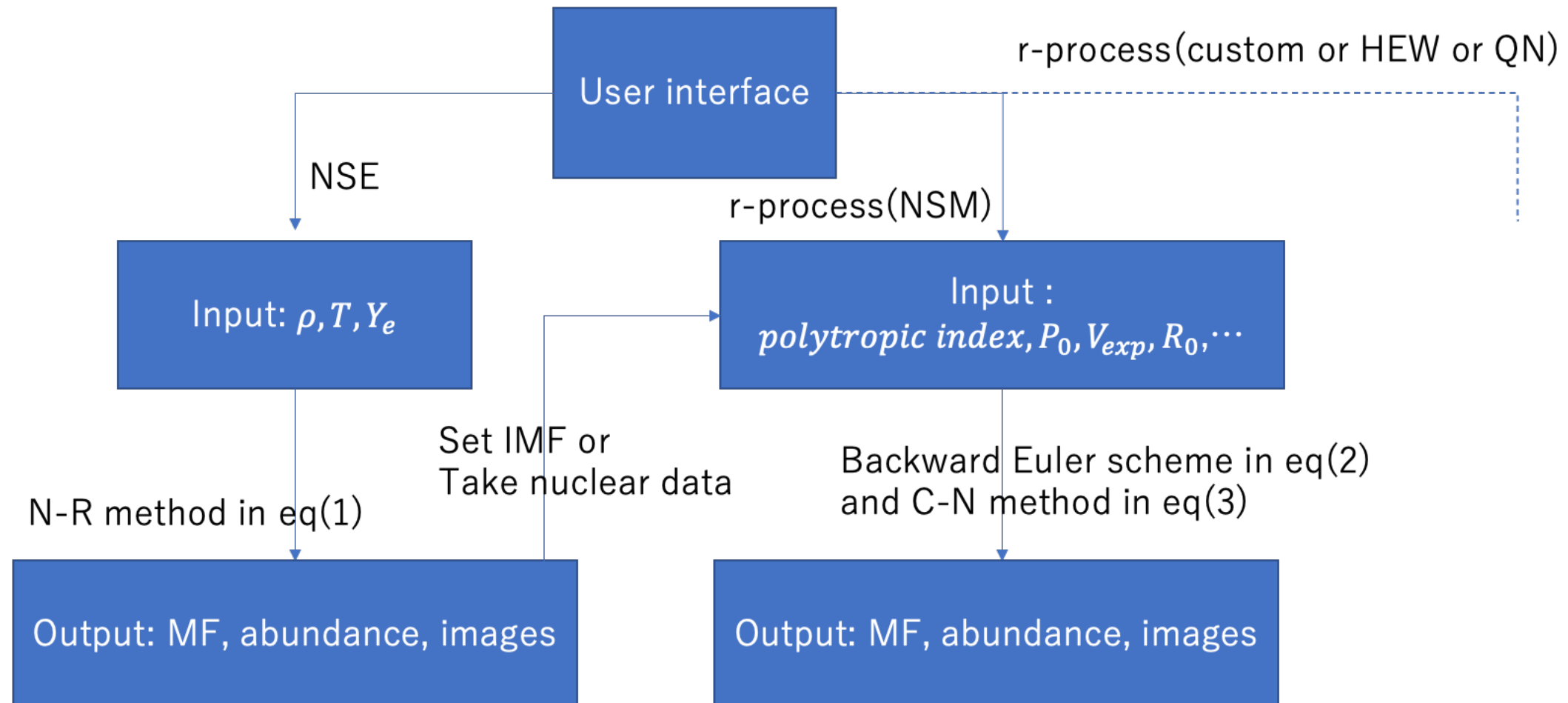
- さまざまな初期条件や、温度や密度の時間変化のもとでのNSMにおけるr-process元素合成をシミュレーションすること。
- どのような条件で、どれほどの頻度でNSMが起こること、現在の太陽系などの元素組成分布が再現できるのかを調べる。

計算方法

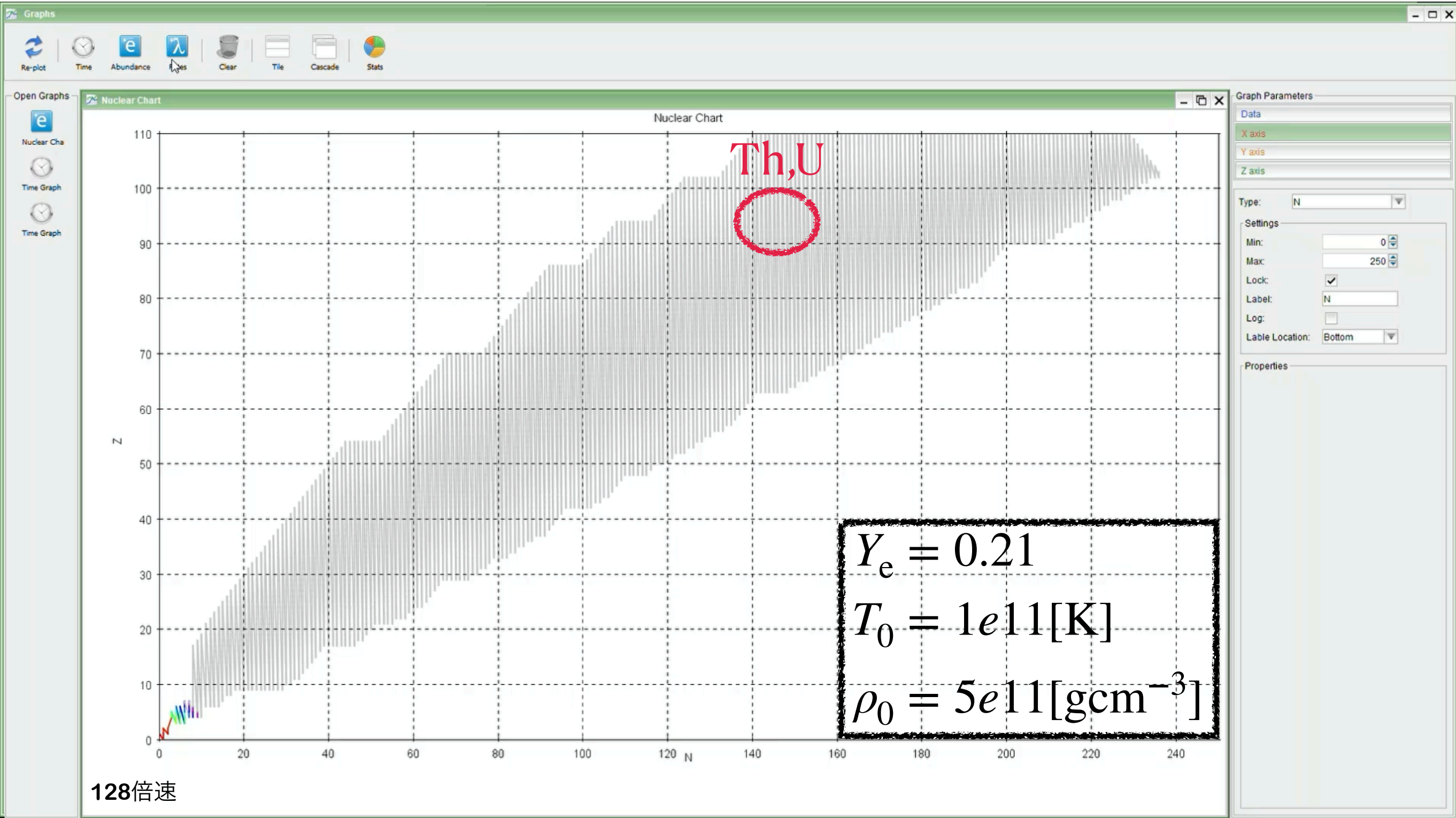
R-java



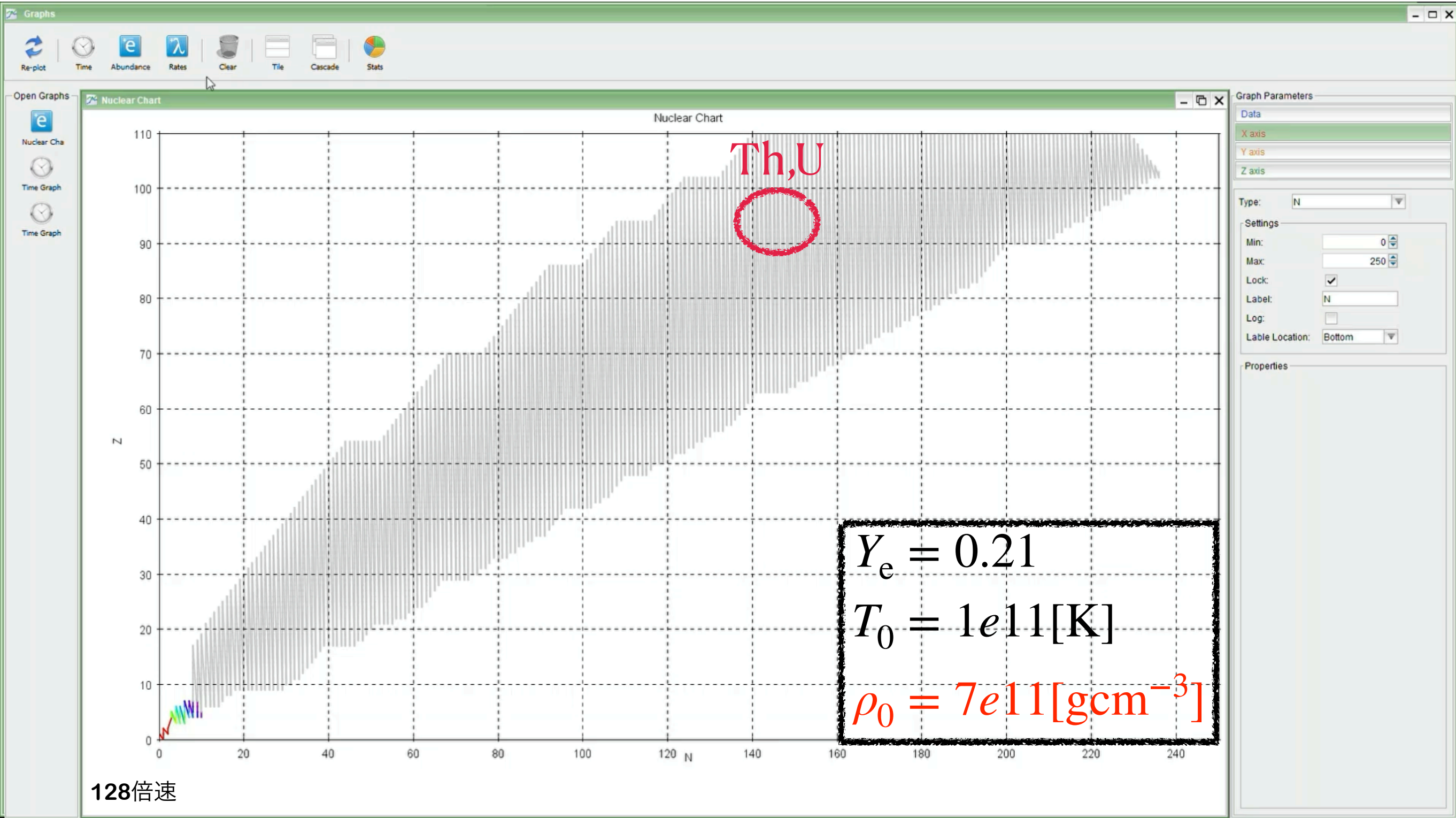
R-java : open source code, GUI (<http://quarknova.ca/>)



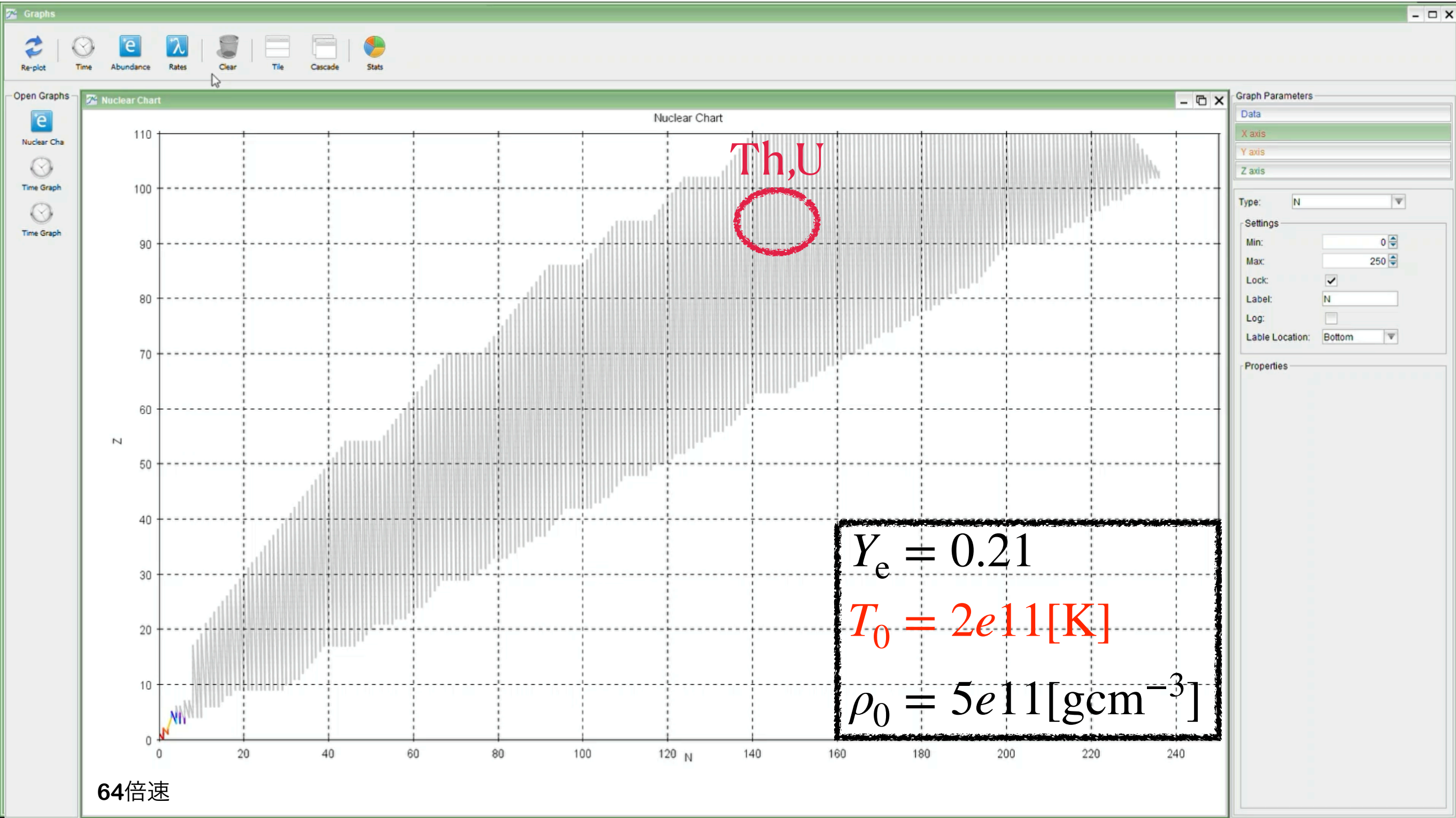
シミュレーション結果



シミュレーション結果



シミュレーション結果



Color Map

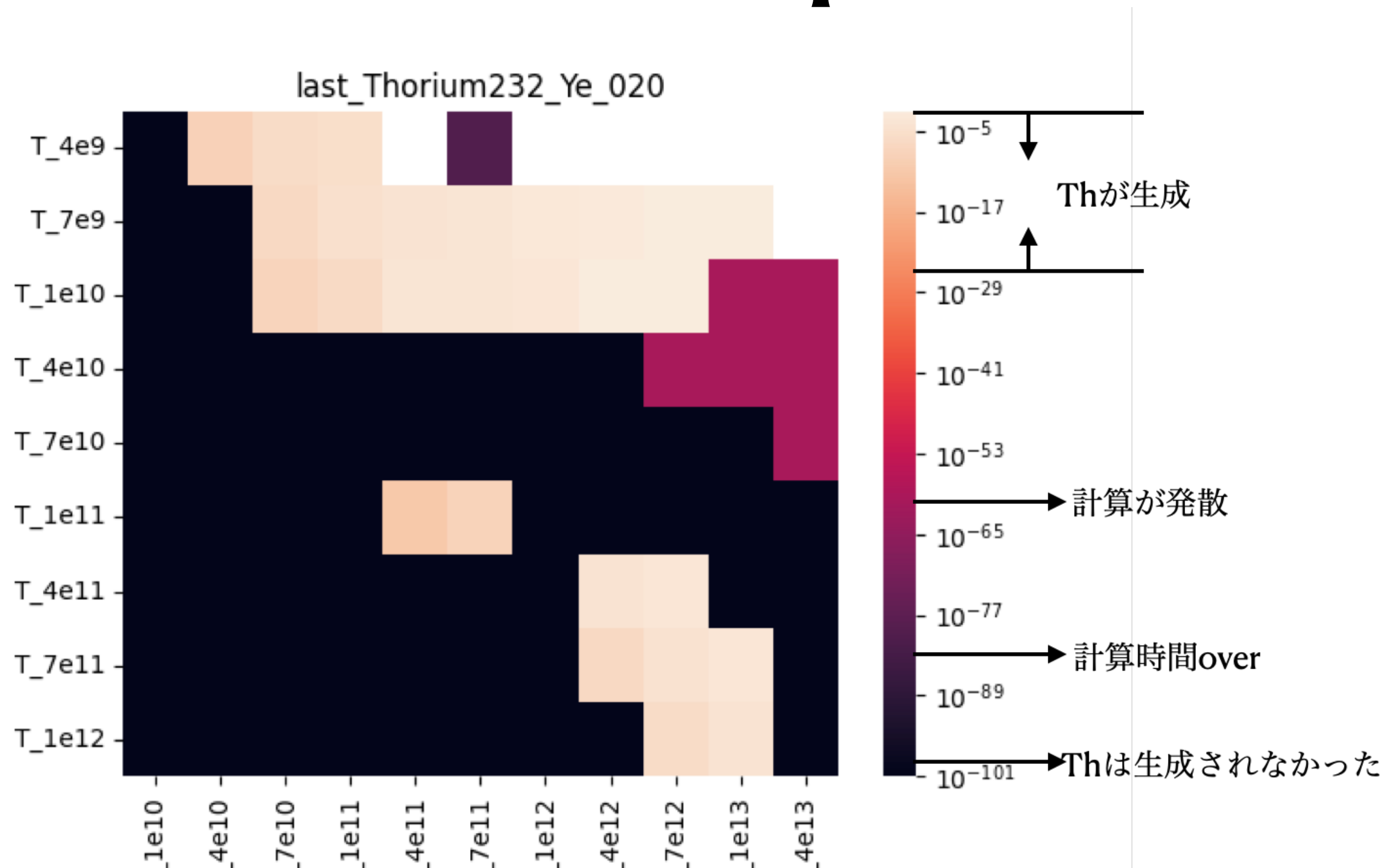


Fig.12 The colormap showing the final abundance of Th232 by initial conditions.

Color Map

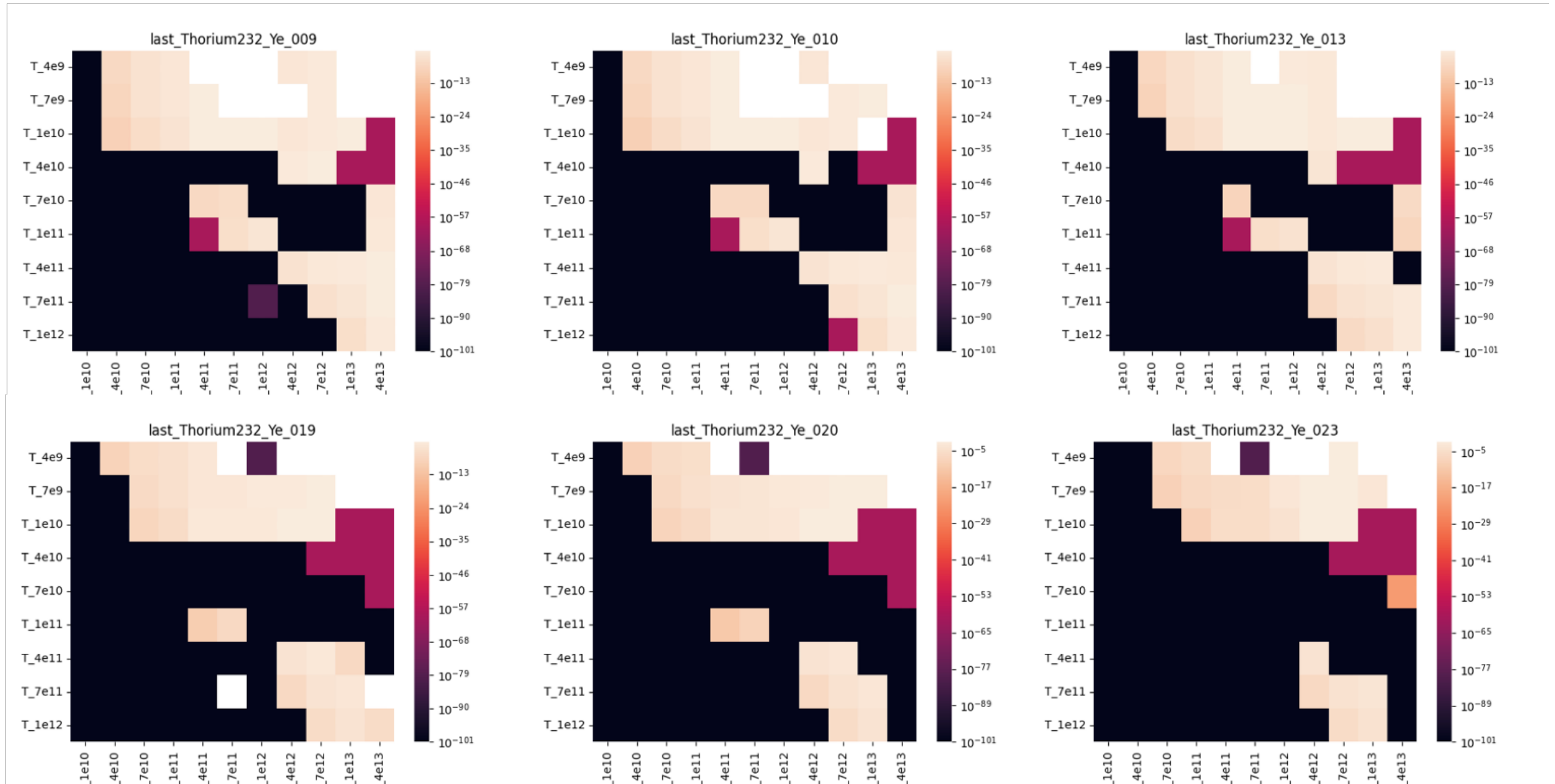


Fig.3 Final MF of Th by Initial T and ρ at each Y_e

考察

Th,Uができる条件

$$Y_n/Y_{\text{seed}}$$

種核に対してどれだけの中性子がいるのか。

例) ${}^4\text{He} \rightarrow {}^{232}\text{Th}$ となるには

$232 - 4 = 228$ 個の中性子が必要

$$Y_n/Y_{\text{seed}} > 228$$

一般的に r-process で重元素を作るには

$$Y_n/Y_{\text{seed}} > (\text{その元素の質量数})$$

であれば十分。

どの条件でも Th, U が
できなくなってしまう。

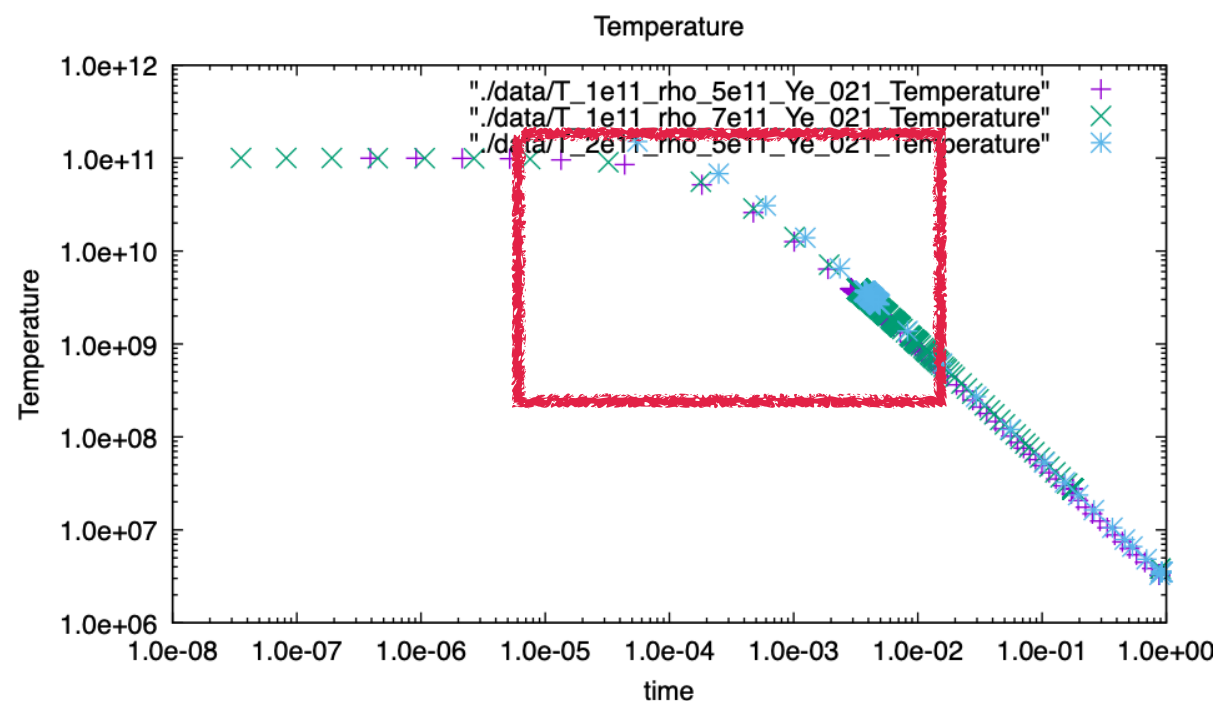
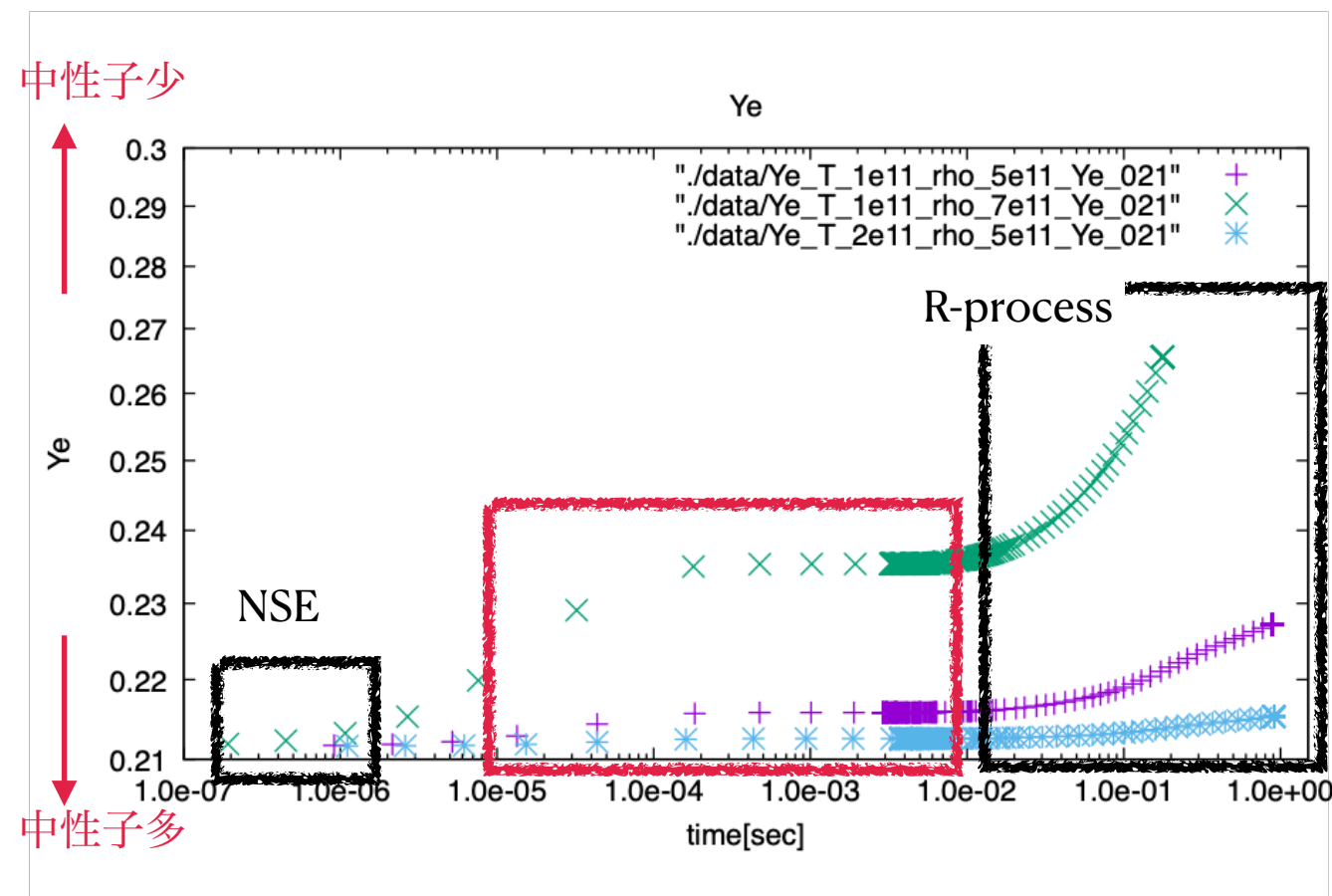
具体的な元素合成の時間発展を見してみる。

初期条件	Th, U 生成の有無	NSE 時の Y_n/Y_{seed}
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 1e11$ $\rho_0 = 5e11$	○	3.58
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 1e11$ $\rho_0 = 7e11$	×	3.53
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 2e11$ $\rho_0 = 5e11$	×	3.54

x

考察

Th,Uができる条件



- Y_e の時間変化を見てみると停滞している領域がある。
 - 同時刻での温度が低下しているのも確認できる。
- ↓
- 温度が下がることでNSEから外れていき、種核ができ、 Y_n/Y_{seed} が変わったのでは？
 - このタイミングでの Y_n/Y_{seed} を計算してみる。

考察

Th,Uができる条件

有効

初期条件	Th, U生成の有無	NSE時のYn/Yseed	freezeout領域でのYn/Yseed
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 1e11$ $\rho_0 = 5e11$	○	3.58	471.9 > 232
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 1e11$ $\rho_0 = 7e11$	×	3.53	103.9 < 232
$Y_e = 0.21$ $T_0 = 2e11$ $\rho_0 = 5e11$	×	3.54	85.5 < 232

今後の方針

ejectaの分布

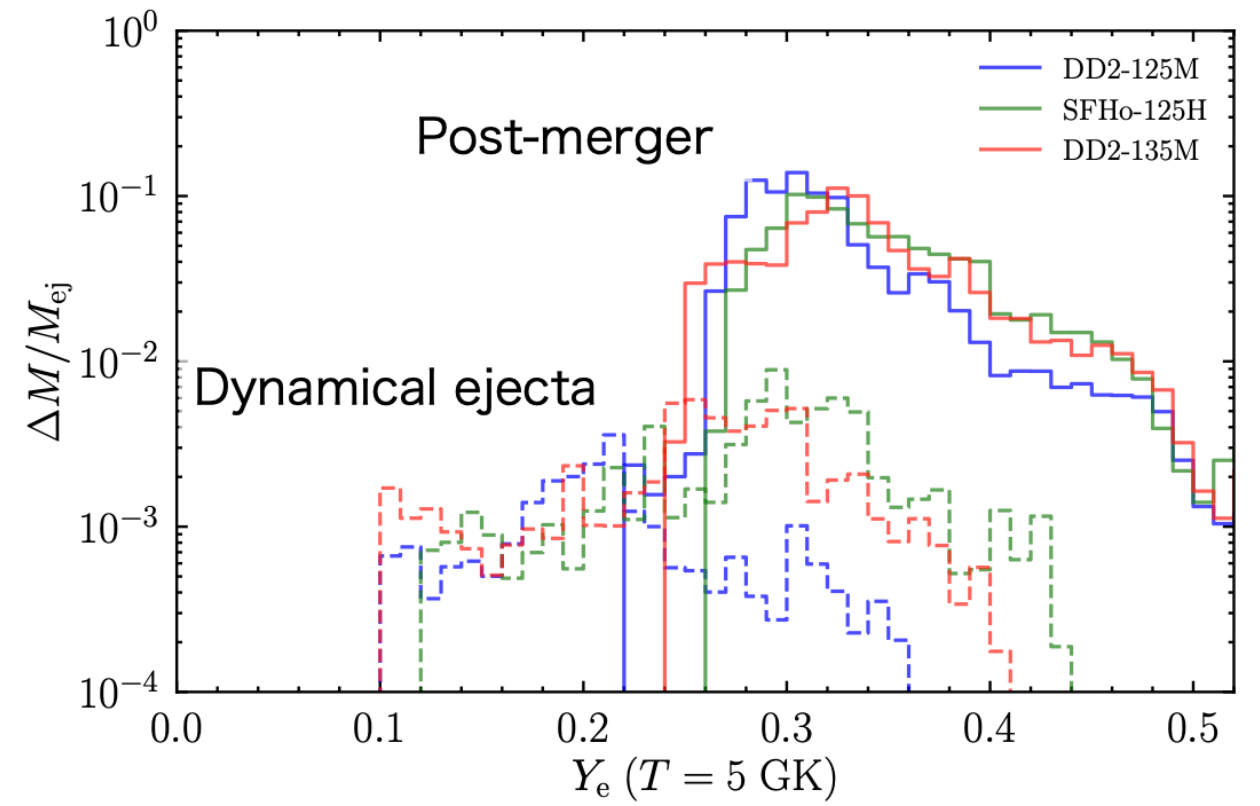
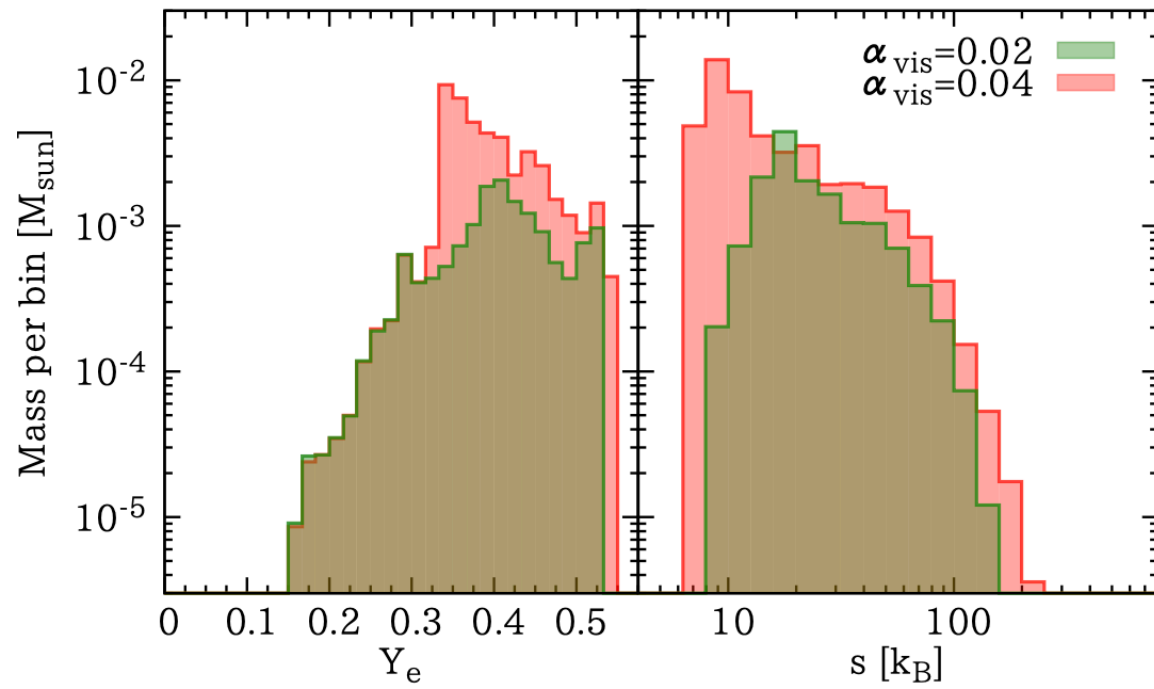
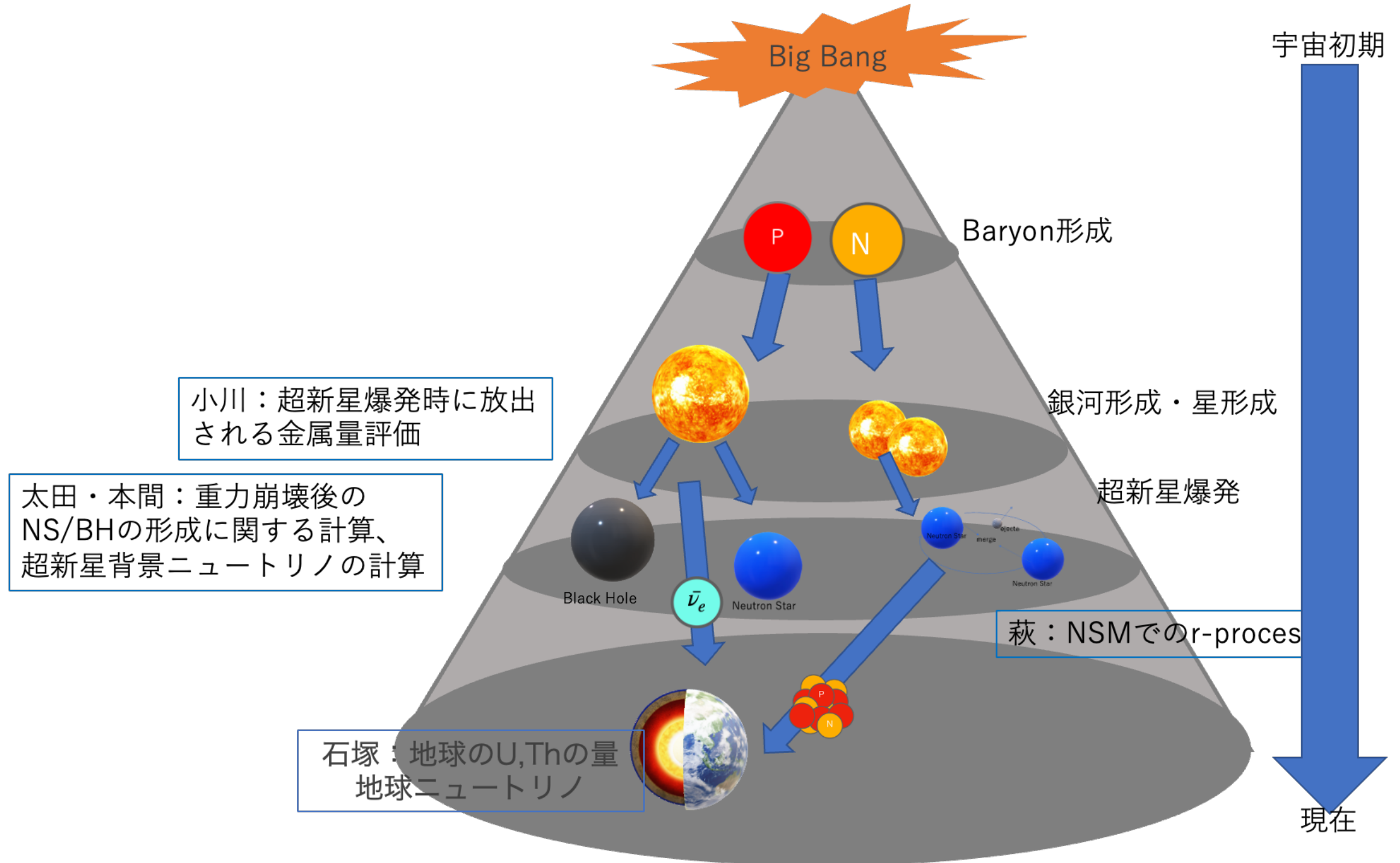


Figure 14. Mass histogram of the ejecta as a function of Y_e (left) and s/k_B (right) at $t = 2.8$ s. The distributions of the electron fraction (left panel) and the specific entropy (right panel) are plotted. The red and green curves denote the results for the models DD2-135135-0.04-H and DD2-135135-0.02-H, respectively.

Population synthesis :

宇宙の歴史の中で、星の集団の進化を簡略的に求める方法。

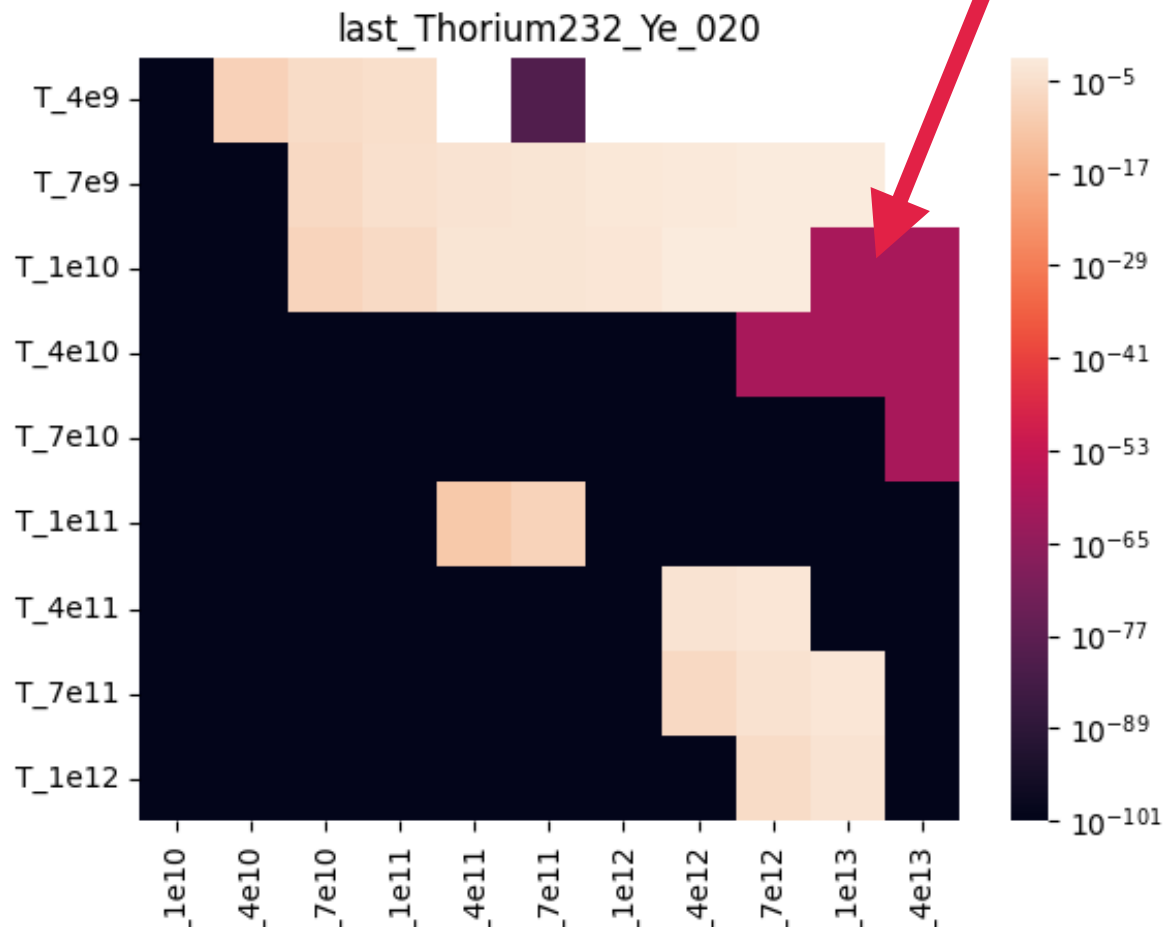


まとめと今後の展望

- U, Thがどれだけできるのかというのを初期条件別にシミュレーションして調べている。
- 今後はこの結果を太陽系などの元素組成分布や1回のNSMで作られる量などについて比較を行なっていく。
- Population Synthesisに組み込むことを目標としている。
- Post merger ejectaについても同様に計算に組み込むことを考えている。

Colormap

Red :計算が発散している領域について



計算方法 各time stepでの組成分布

- 計算を減らすために以下のようにする。
- ある同位体鎖において隣接する2つの同位体の存在比は中性子分離エネルギー S_n を用いて、

$$\frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} = n_n \frac{g(Z, A+1)}{2g(Z, A)} \left(\frac{A+1}{A} \right) \left(\frac{2\pi\hbar^2}{\mu kT} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{S_n(Z, A+1)}{kT} \right)$$

- $Y(Z_i) = \sum_j Y(Z_i, A_{i,j})$ と定義すると、上記の式からpopulation係数を用いて、

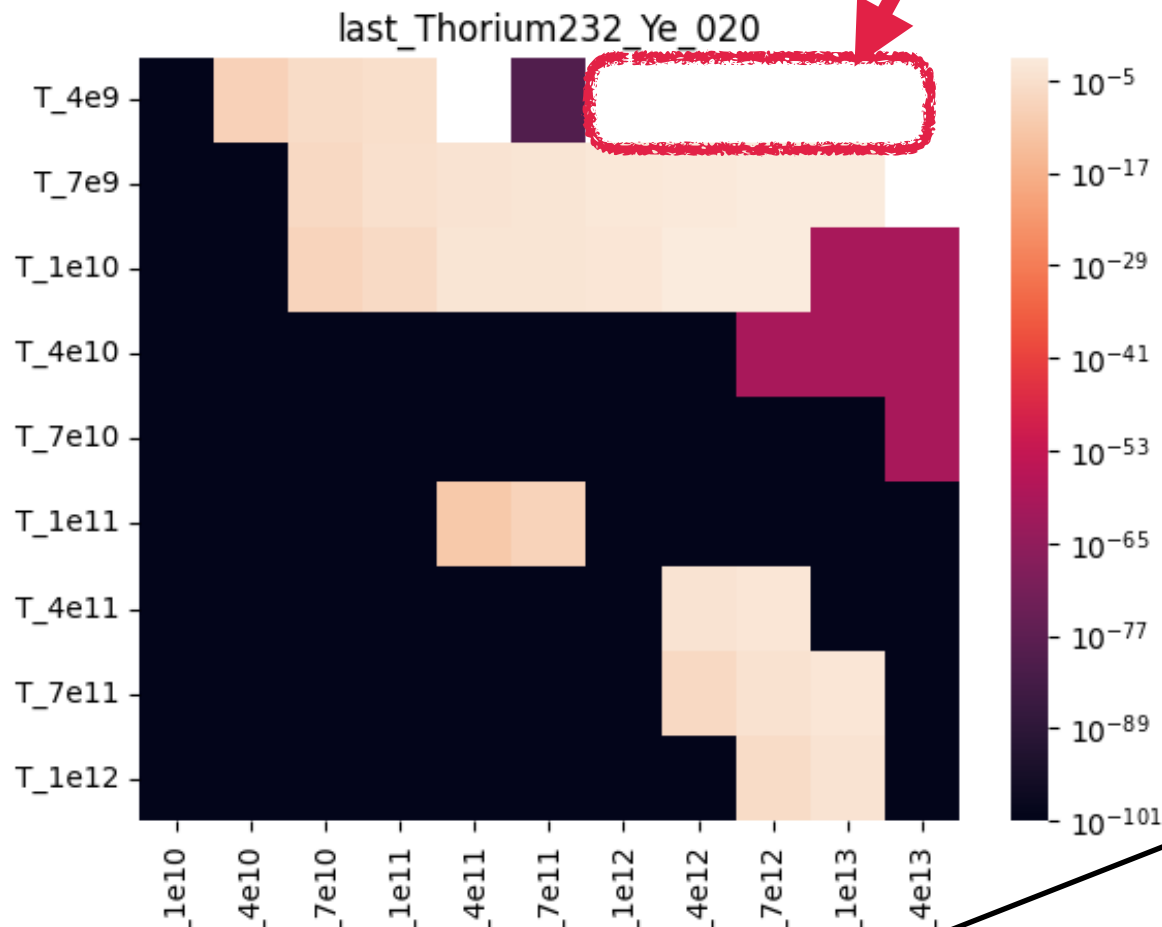
$$Y(Z, A) = P(Z, A)Y(Z)$$

x

上式より同位体鎖において隣り合う元素の存在量を計算しているため、発散するMFが出てきてしまう。

Colormap

White : NSEが計算できない領域について



計算方法

初期条件（元素組成分布）の決め方

- NSMの合体直前では非常に高温 ($T \geq 6 \times 10^6 \text{K}$) では、光子や自由中性子、自由陽子、原子核がプラズマ状態にあり、核統計平衡(NSE)が成り立つ。 (μ :chemical potential)

$$Z_i \mu_p + N_i \mu_n = \mu_i$$

- 粒子がMaxwell-Boltzman統計に従うとすると、粒子数密度は

$$n_i = g_i \left(\frac{2\pi k T m_i}{h^2} \right)^{-3/2} \exp \left(\frac{\mu_i + B_i}{kT} \right)$$

- 質量保存 $\sum_i A_i Y_i = 1$, 電荷保存 $\sum_i Z_i Y_i = Y_e$, $\left(Y_i = \frac{n_i}{\rho N_A} \right)$ より

$$\begin{cases} \sum_i A_i n_i(\mu_p, \mu_n) - \rho N_A = 0 \\ \sum_i Z_i n_i(\mu_p, \mu_n) - Y_e \rho N_A = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- これを与えられた T, ρ, Y_e において μ_p, μ_n について解くことでNSEでの存在量分布が得られる。

解として出てきた μ_p, μ_n について平衡となる μ_i が存在しないため。