

連星中性子星合体後の系からの質量放出

藤林翔 (基研)

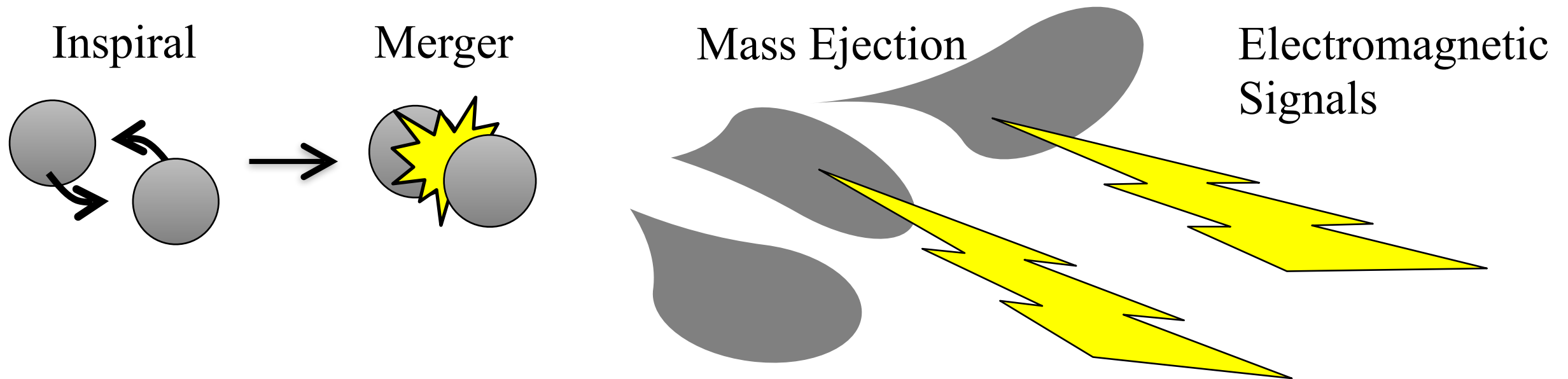
木内建太, 西村信哉, 柴田大 (基研)

関口雄一郎(東邦大)

SF et al. 17 ([arXiv:1711.02093](https://arxiv.org/abs/1711.02093))

Macronova/Kilonova

Li & Paczynski 98, Metzger + 10



- 連星中性子星：重力波の放出により接近→合体
- 合体に伴う質量放出
- 放出物質中での不安定元素の合成（r-process）
- 不安定核の崩壊によるエネルギー供給での放射

Macronova/kilonova (合体後 ~ 1–10 日, optical–NIR)

Macronova/Kilonovaを特徴づける量

○ 鍵となる量：放出物質の質量, 速度, オパシテイ Li & Paczynski 98, Metzger et al. 10

M v κ

$$t_{\text{peak}} \sim 10 \text{ days} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2 / \text{g}} \right)^{1/2}$$

$$L_{\text{peak}} \sim 10^{41} \text{ erg/s} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right) \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2 / \text{g}} \right)^{-1/2}$$

$$T_{\text{peak}}^{\text{eff}} \sim 2 \times 10^3 \text{ K} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right)^{1/4} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/8} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{-1/8} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2 / \text{g}} \right)^{-3/8}$$

v (大) or κ (小) \longrightarrow Time scale (短)
Luminosity (大)
Effective Temperature (大)

Macronova/Kilonovaを特徴づける量

- 鍵となる量：放出物質の質量, 速度, オパシテイ Li & Paczynski 98, Metzger et al. 10

M v κ

$$t_{\text{peak}} \sim 10 \text{ days} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{1/2}$$

$$L_{\text{peak}} \sim 10^{41} \text{ erg/s} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right) \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{-1/2}$$

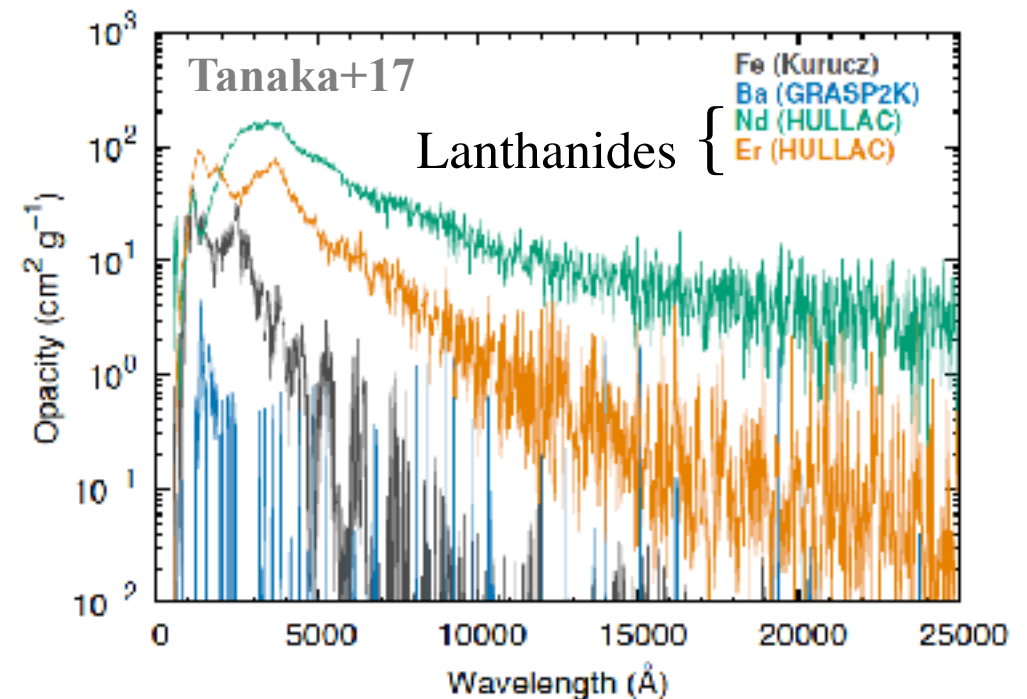
$$T_{\text{peak}}^{\text{eff}} \sim 2 \times 10^3 \text{ K} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right)^{1/4} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/8} \left(\frac{M}{0.01 M_{\text{solar}}} \right)^{-1/8} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{-3/8}$$

- ランタノイド (Z=57-71の元素) が混ざるとオパシテイが上がる

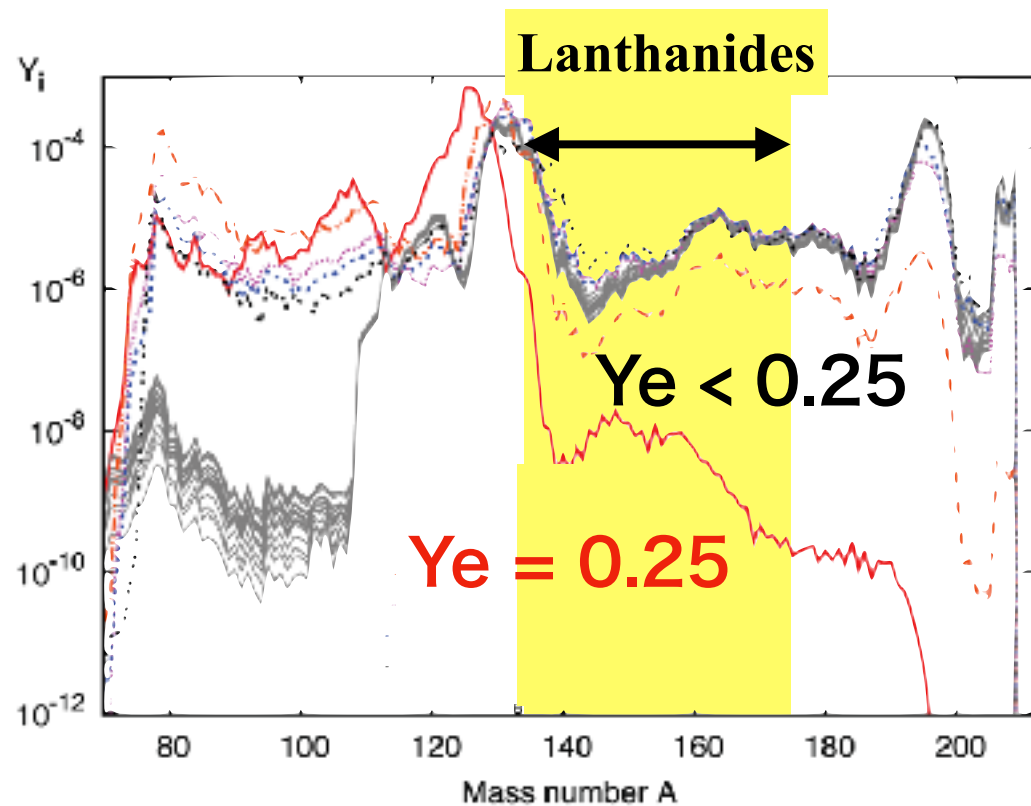
Kasen et al. 13, Tanaka & Hotokezaka 13

ランタノイド質量比 $X_{\text{lan}} \sim 10^{-2}$

→ $\kappa \sim 10 \text{ cm}^2/\text{g}$



放出物質中のランタノイド



Korobkin et al. 12 (For dynamical ejecta)

○ ランタノイド生成の鍵となる量：

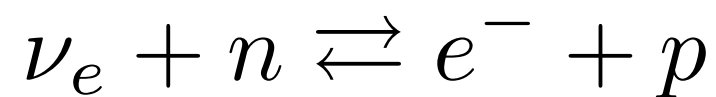
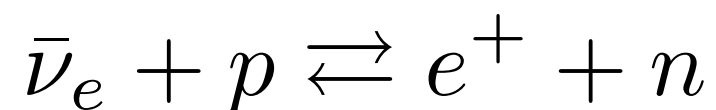
$$\text{Electron fraction } Y_e = \frac{n_e}{n_B} = \frac{n_p}{n_n + n_p}$$

$Y_e < 0.5 \leftrightarrow$ 陽子数 < 中性子数

$Y_e > 0.25$

→ ランタノイドが生成されにくい

◎ 関係する反応：



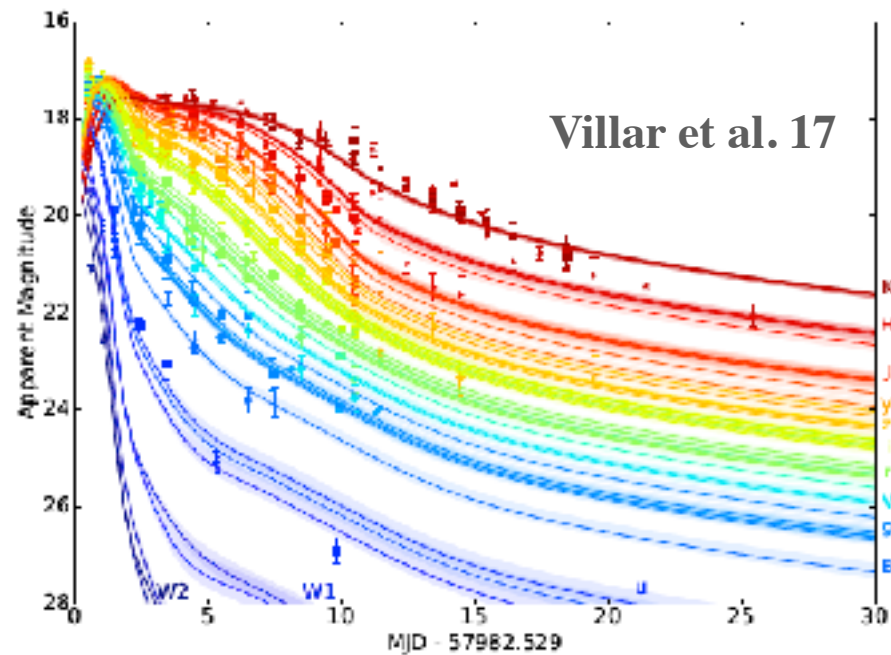
Y_e が上昇する環境：

1) Neutrino fluxが大きい

2) High temperature (e^+ -capture)

GW170817に付随した電磁波シグナル (AT 2017gfo)

○ Optical - NIR light curve



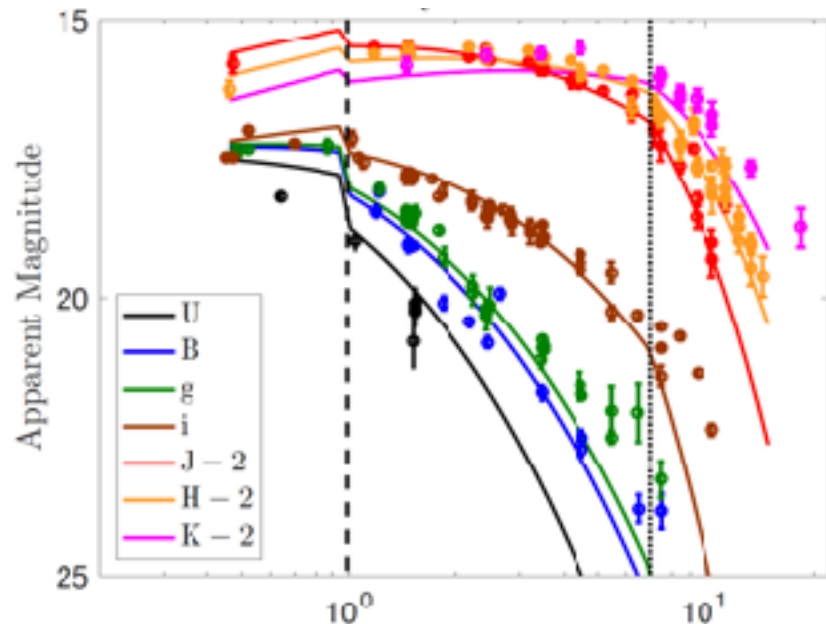
Villar et al. 17

- Macronova/Kilonova modelで無矛盾

“赤い”成分 : $M_{ej} \sim 0.03-0.04 M_{sun}$ ($v \sim 0.1 c$)
(Lanthanide-rich, $\kappa \sim 1-10 \text{ cm}^2/\text{g}$)

“青い”成分 : $M_{ej} \sim 0.01-0.02 M_{sun}$ ($v \sim 0.3 c$)
(Lanthanide-poor, $\kappa \sim 0.1-1 \text{ cm}^2/\text{g}$)

Cowperthwaite et al. 17, Villar et al. 17



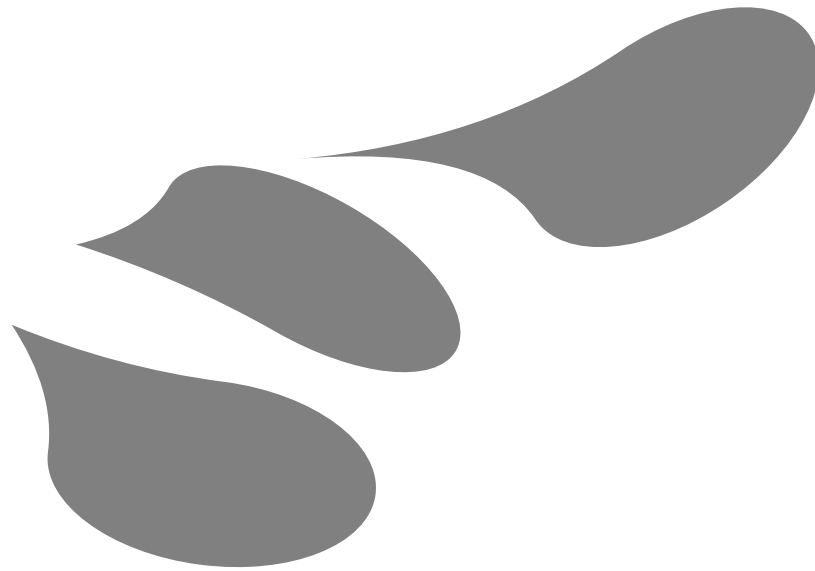
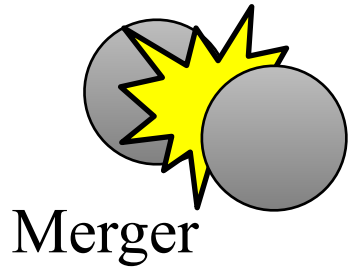
合体からの時間 (日)

単一成分でも $\kappa \sim 0.3 \text{ cm}^2/\text{g}$, $M_{ej} \sim 0.05 M_{sun}$ かつ
速度分布が適切に (0.15-0.3 c) あれば良い

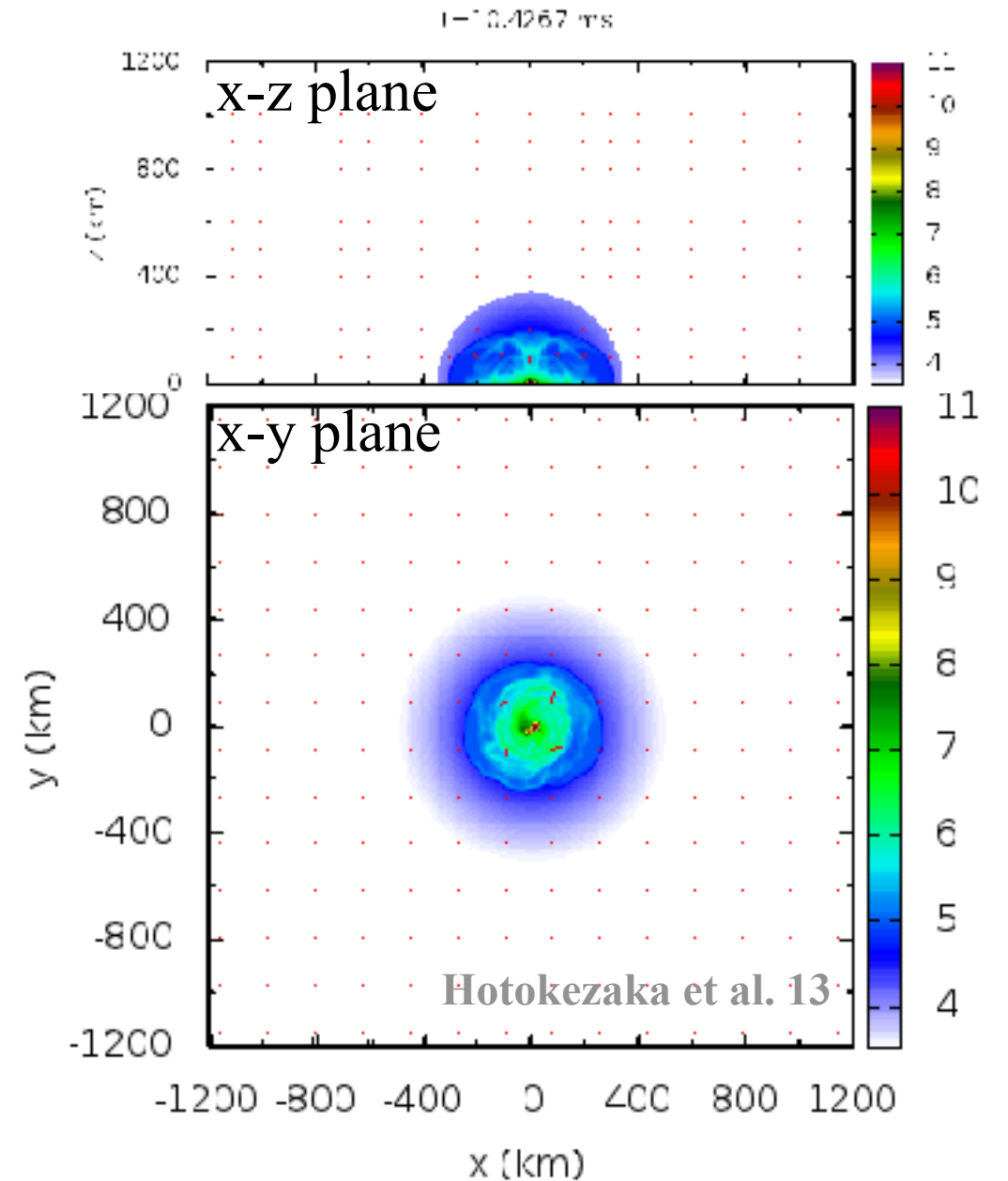
Waxman et al. 17

これらの成分はどの過程で出た放出物質なのか？

Dynamical Mass Ejection

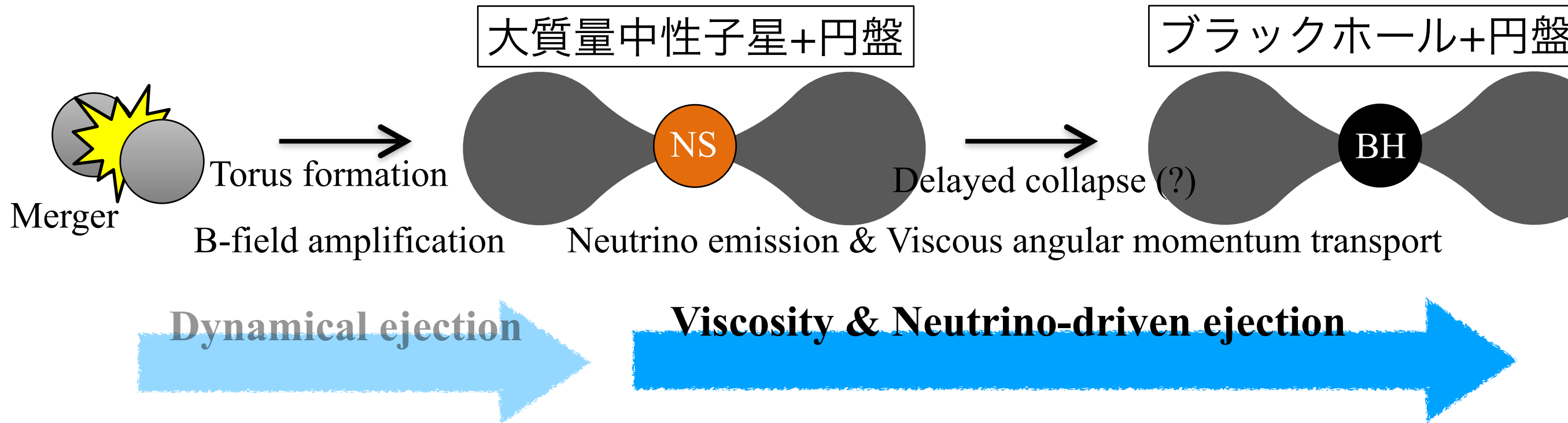


- 潮汐力, 衝撃波加熱による放出
- 放出される質量 : $0.001-0.01 M_{\text{sun}}$
- $Y_e = 0.05-0.5$



- 観測を説明するために必要な質量 (合計 $\sim 0.05 M_{\text{sun}}$)
を放出するのは難しい
- 特に、“青い”成分 ($\kappa = 0.1-1 \text{ cm}^2/\text{g}$)

連星中性子星合体後の系からの質量放出

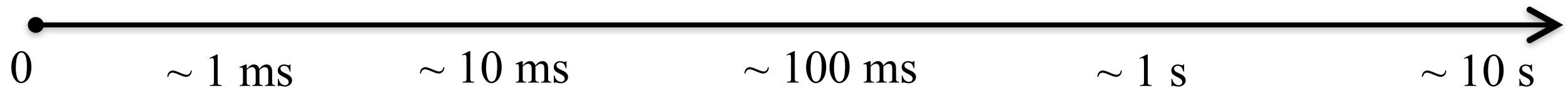


ニュートリノ&粘性による加熱

場合によってはDynamical ejecta ($\lesssim 0.01 M_{\odot}$) の量を上回る

Fernandez & Metzger 13, Metzger & Fernandez 14, Perego et al. 14

Siegel et al. 17, Lippuner et al. 17, SF et al. 17



合体後の経過時間

Our Research

観測と比較して合体の描像を抜き出すため、
合体後の系からの放出物質の現実的モデルを作りたい

- Ejecta properties (質量, Y_e , 速度)
- Morphology

そのために…

- 一般相対論
- ニュートリノ輻射輸送・反応
- 粘性による加熱・角運動量輸送

を考慮した、合体後の系の長時間 ($> \text{second}$)

シミュレーションを行った

Method

◎ Strategy

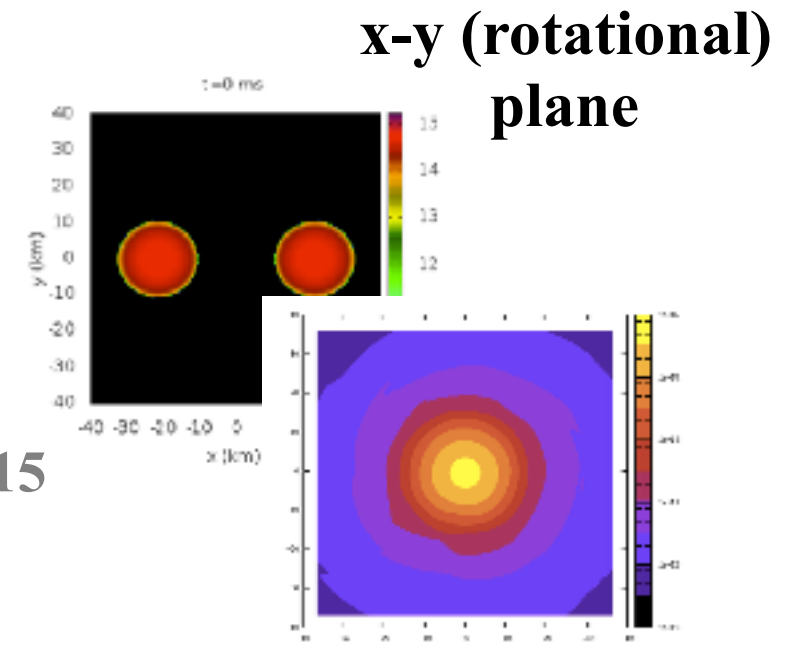
i) 連星中性子星合体：

3次元数値相対論計算でシミュレーション

Sekiguchi et al. 15

状態方程式：DD2 Banik et al. 14

(→ 合体後残るのは大質量中性子星)



Method

◎ Strategy

i) 連星中性子星合体：

3次元数値相対論計算でシミュレーション

Sekiguchi et al. 15

状態方程式：DD2 Banik et al. 14

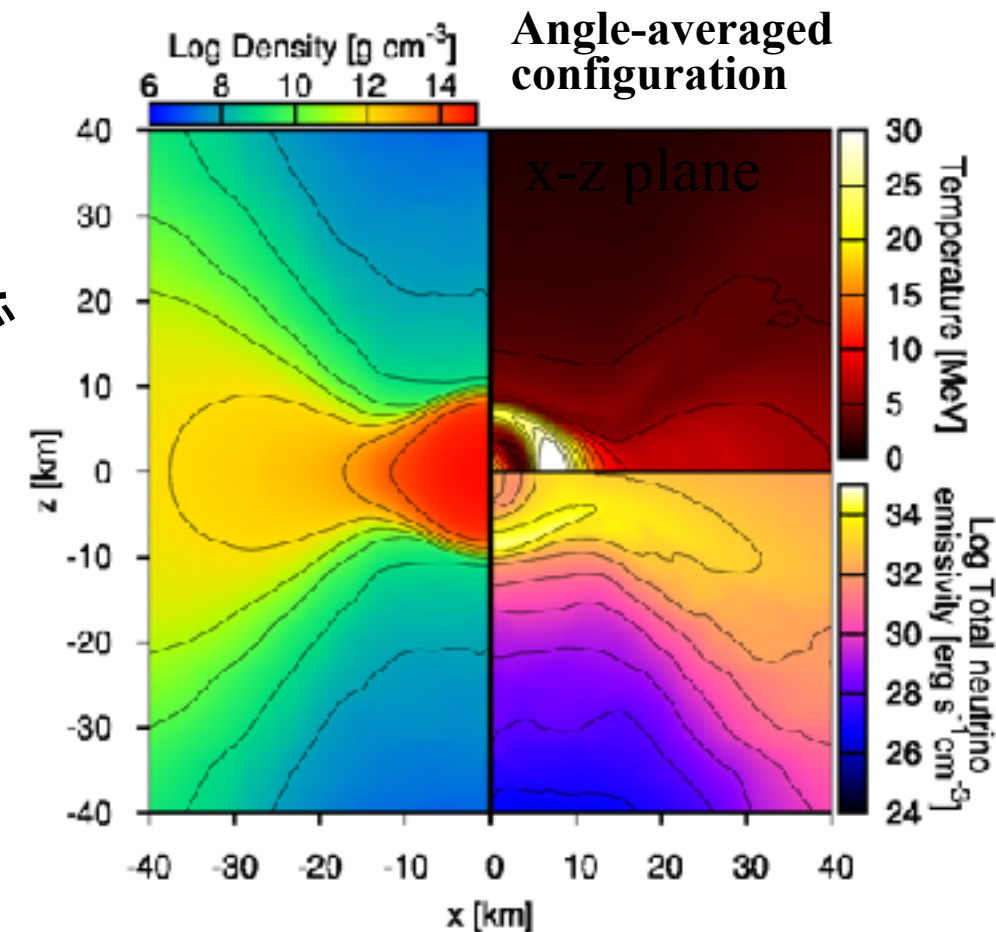
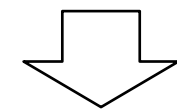
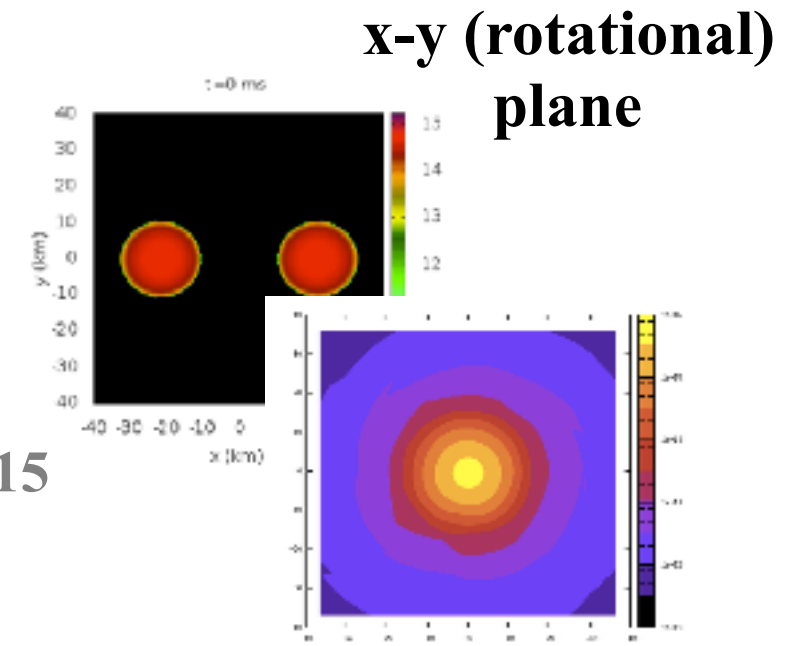
(→ 合体後残るのは大質量中性子星)

合体して~50 ms後、ほぼ軸対称になった
流体配位を回転軸周りに角度平均

→ 軸対称2次元流体配位

ii) それを初期条件とし、軸対称2次元で
一般相対論シミュレーションを行う

~ 2-3秒の長時間計算で質量放出を追う



Method

◎ Basic Equations

- 一般相対論的ニュートリノ輻射輸送粘性流体方程式

- Einstein's equation
- Neutrino radiation transfer equation

Leakage+ scheme incorporating Moment formalism

Thorne 81, Shibata et al. 11

- Viscous hydrodynamics equation

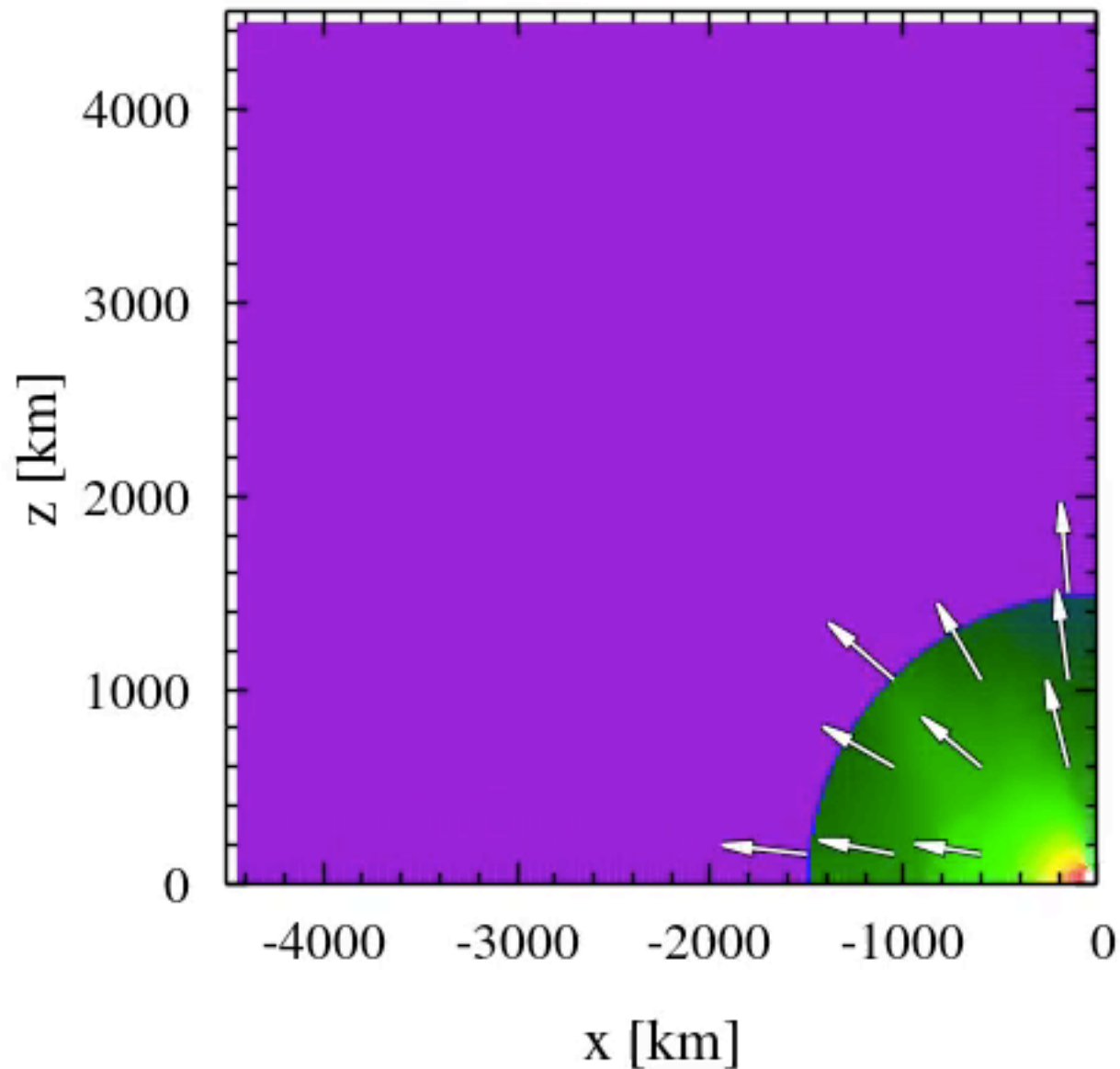
MHD乱流の結果有効的に生じる粘性を考慮 Israel & Stuart 79,
Shibata et al. 17, Shibata & Kiuchi 17

Shakura-Sunyaev “alpha” parametrization : $\nu = \alpha \cdot c_s H_{\text{tur}}$

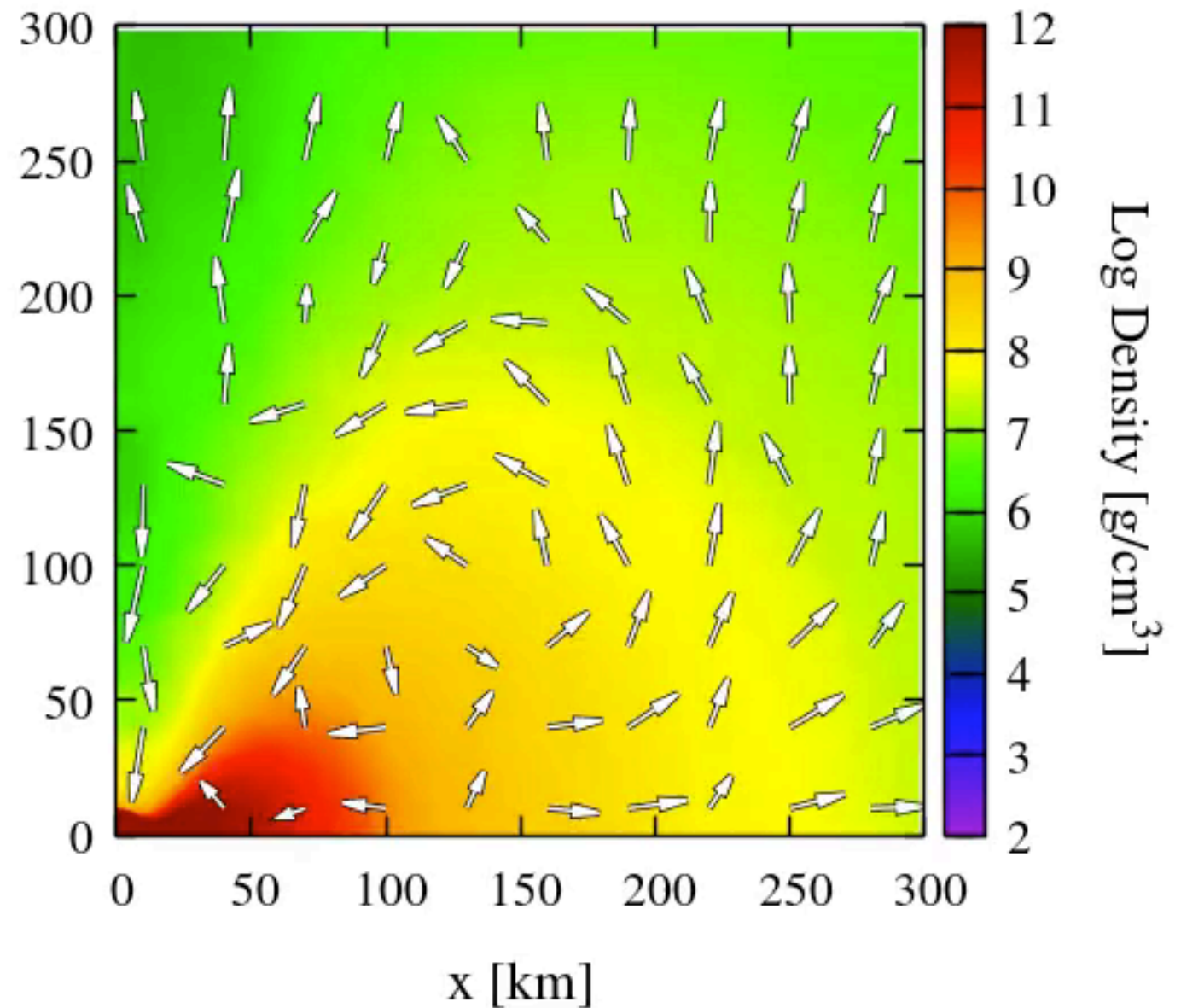
モデル : $\alpha = 0, 0.01, 0.02, \mathbf{0.04}$

Dynamics for $\alpha = 0.04$ model

t = 0.00 ms



Density structure in meridian plane



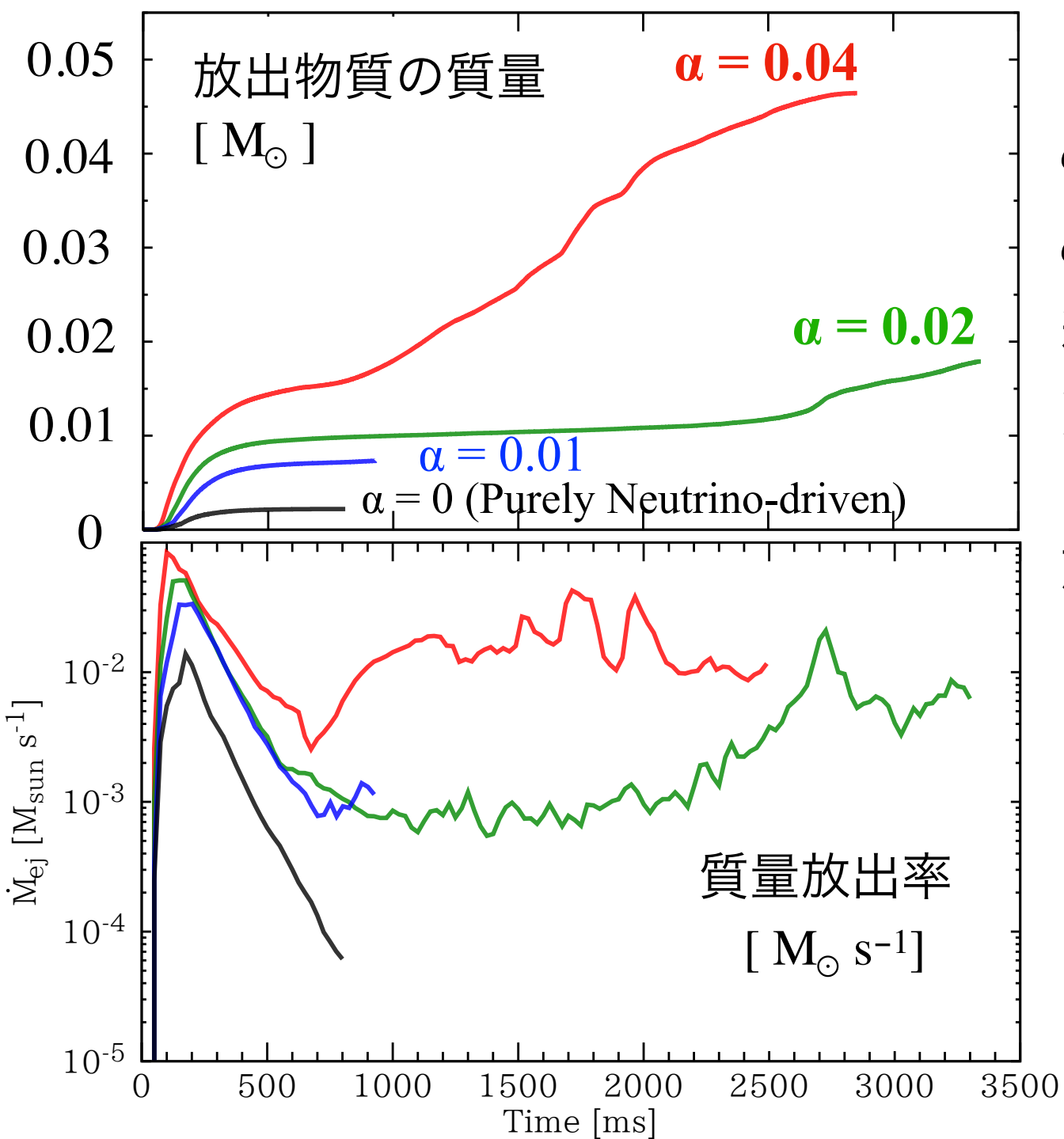
トラス:

徐々に広がり、
系から放出される

質量放出:

~ 10 ms : 衝撃波による放出
その後、粘性加熱による放出

早期 ($t < 0.5$ s) の質量放出



$\alpha = 0.04$: $t < 0.5$ s & $t > 1$ s での強い質量放出

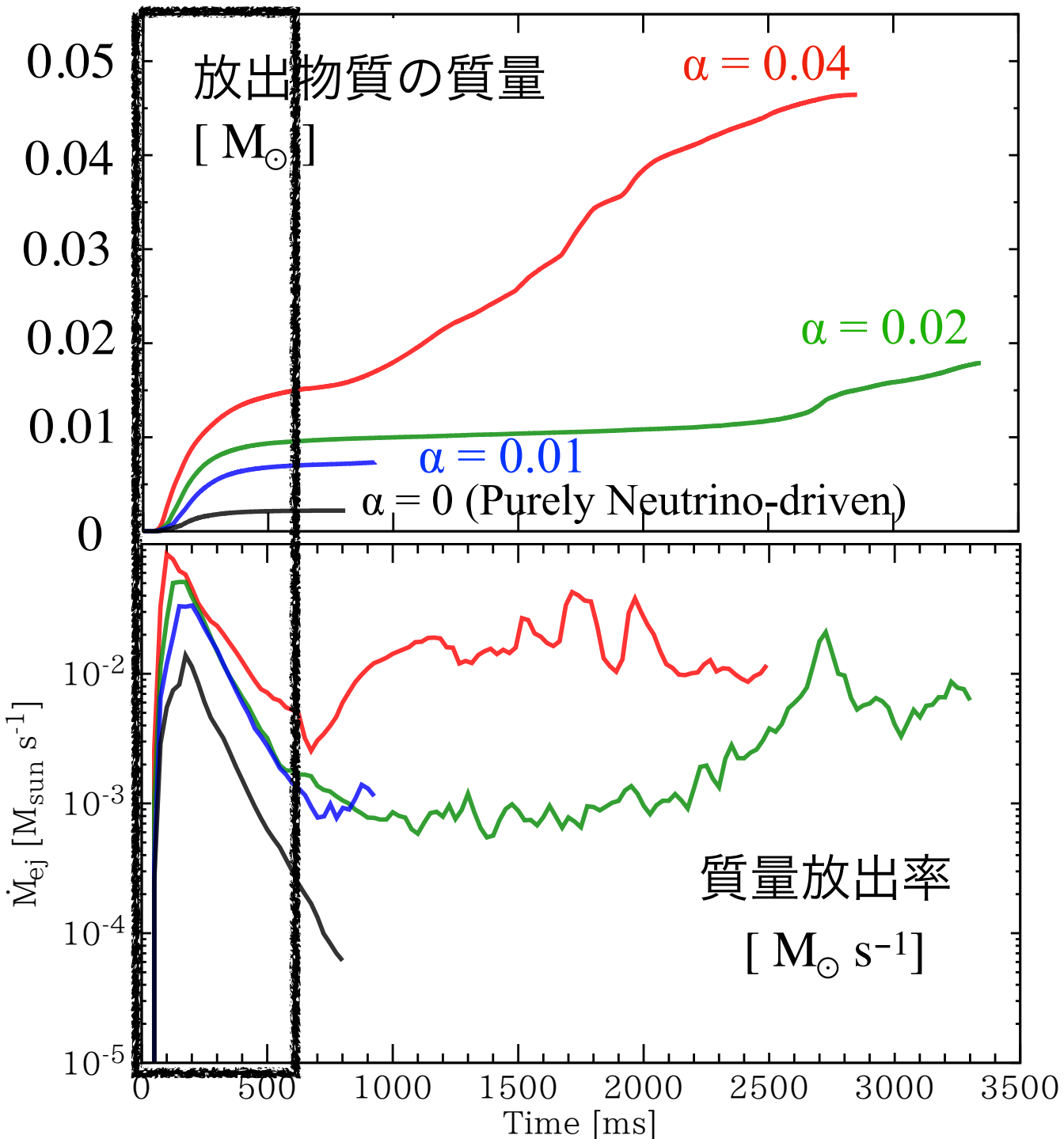
$\alpha = 0.02$: $t < 0.5$ s では同じ傾向

粘性が小さくても

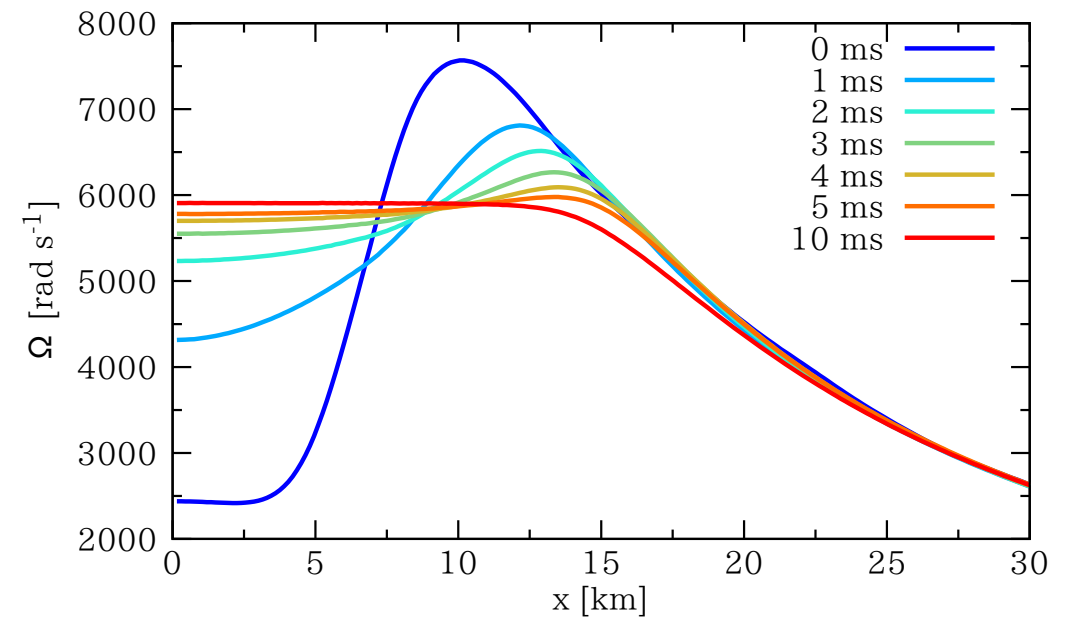
late-timeの質量放出は遅れるものの存在

放出物質の質量 : $0.05 M_{\text{sun}}$ になり得る

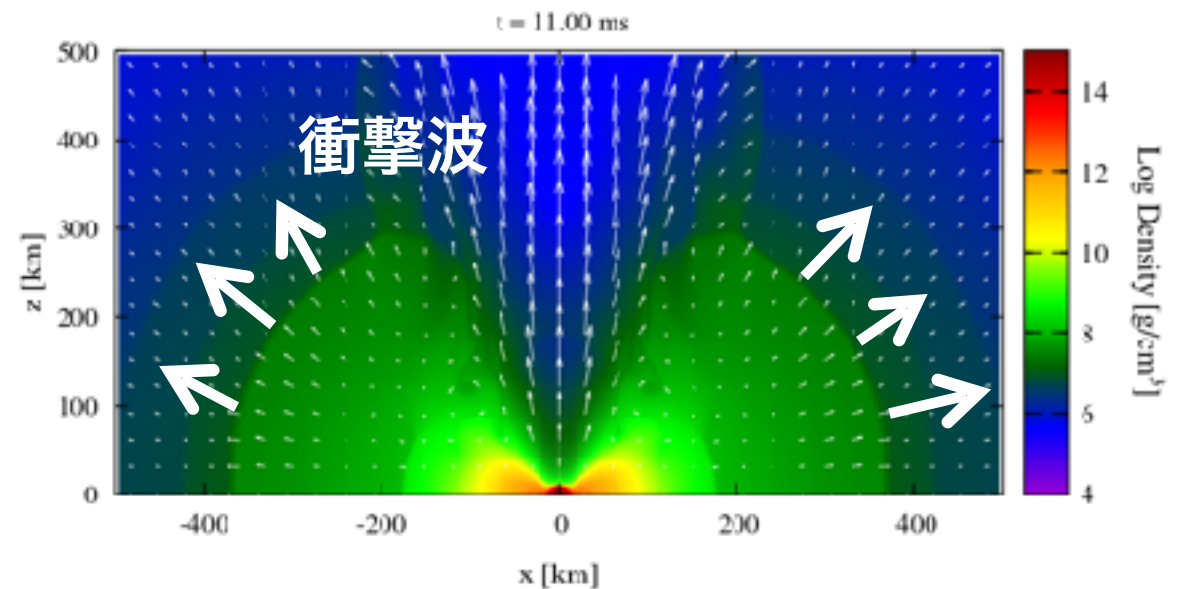
早期 ($t < 0.5$ s) の質量放出



赤道面での角速度構造



差動回転は~数msで剛体回転へ
(大質量中性子星の中の粘性の影響)

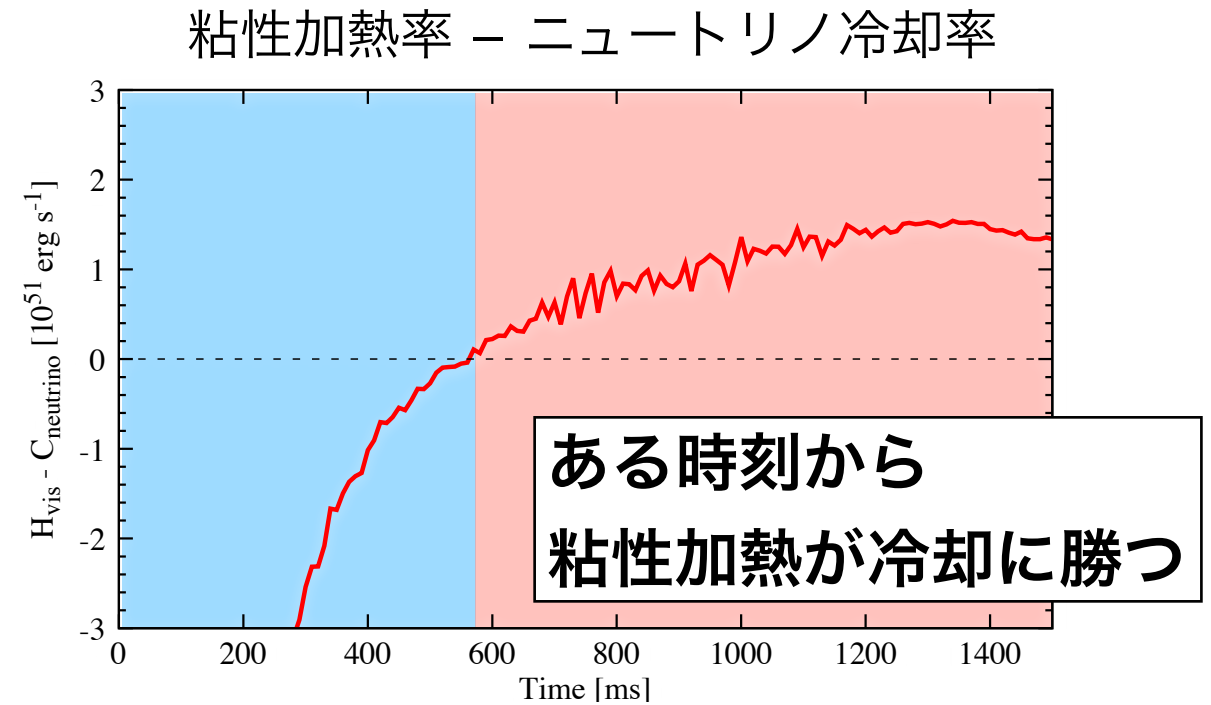
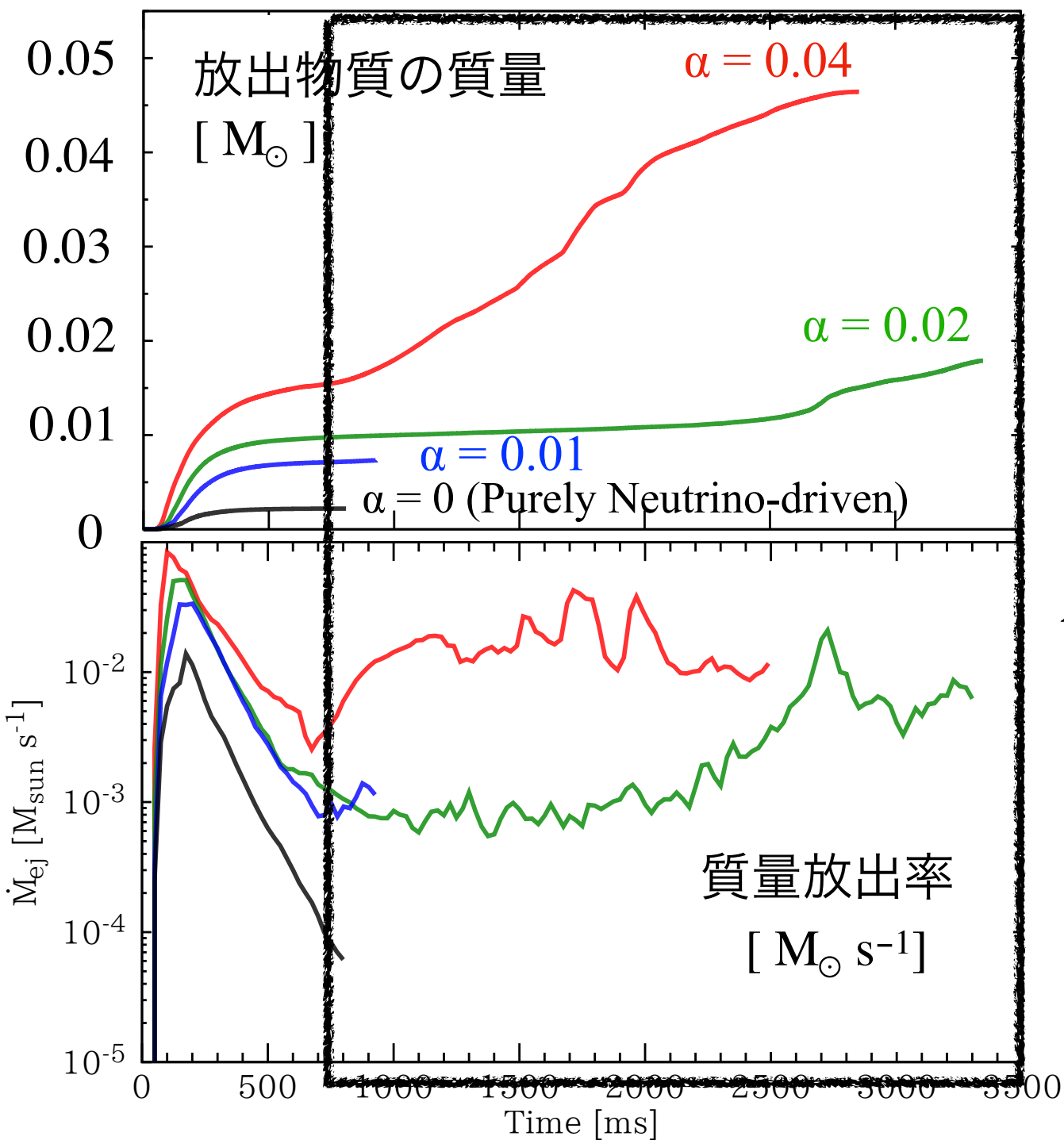


中性子星の平衡形状の変化

→ 中性子星表面で密度波が生じ、伝播するうちに衝撃波となる

→ トーラスの外側の物質 (Dynamical ejectaのなり損ない) が履かれて放出される

後期 ($t > 0.5$ s) の質量放出



$t > 0.5$ s : 粘性加熱 > ニュートリノ冷却
 トーラスの物質 : 粘性のタイムスケール (~ 1 s)
 で膨張・放出される

質量放出率 :
 (加熱率) / (トーラスのbinding energy)

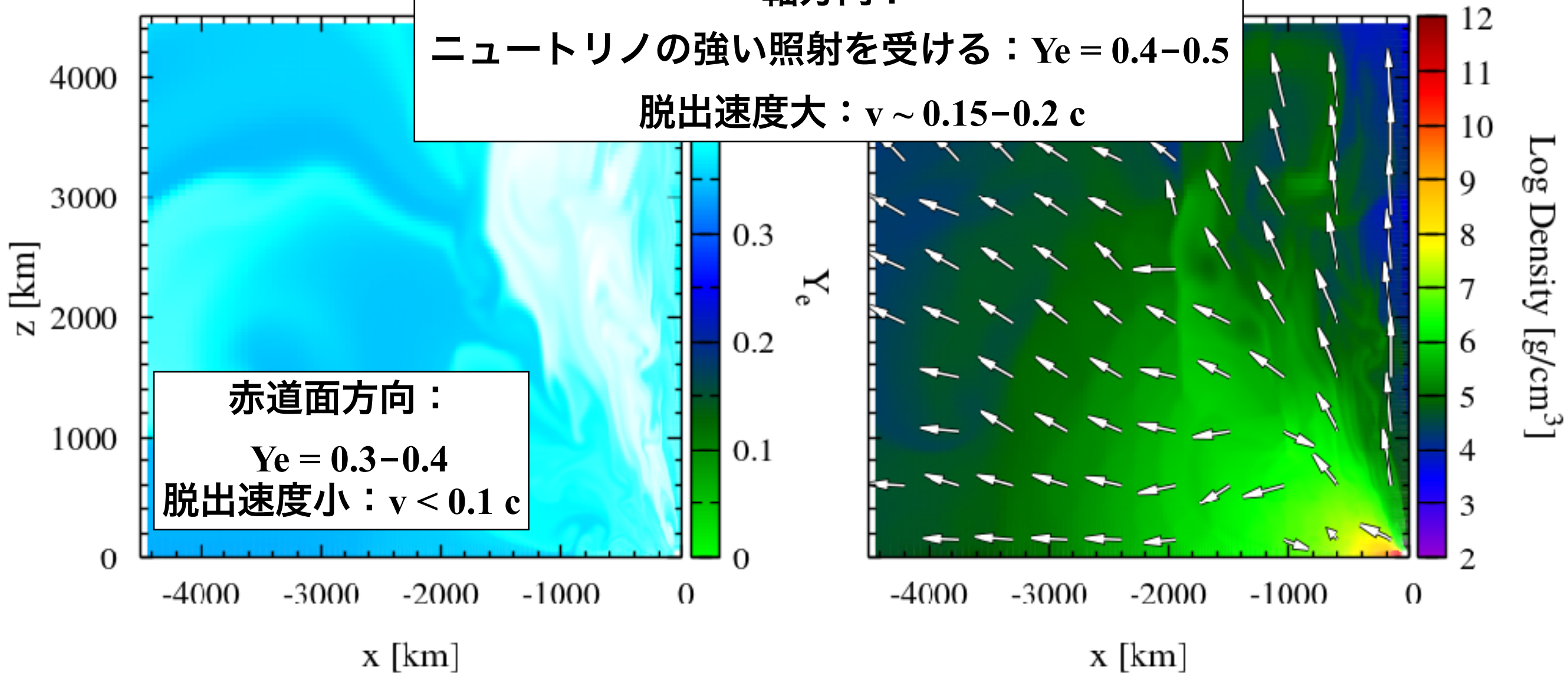
$$\dot{M}_{\text{ej}} \sim \frac{\mathcal{H}_{\text{torus}}}{GM_{\text{MNS}}/r}$$

$$\sim 10^{-2} M_{\odot} \text{ s}^{-1} \left(\frac{\mathcal{H}_{\text{torus}}}{10^{51} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{M_{\text{MNS}}}{2.6 M_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{r}{100 \text{ km}} \right)$$

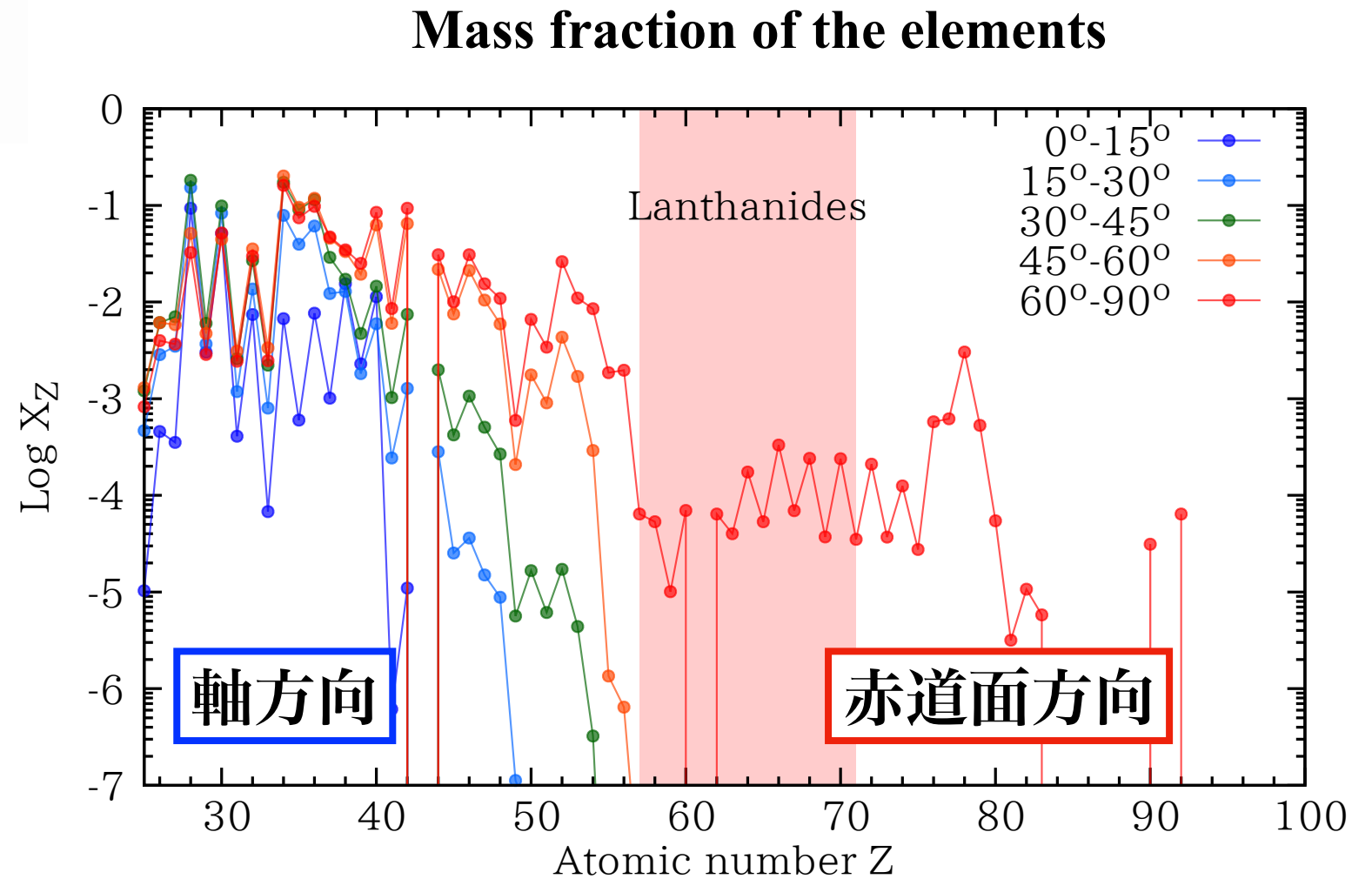
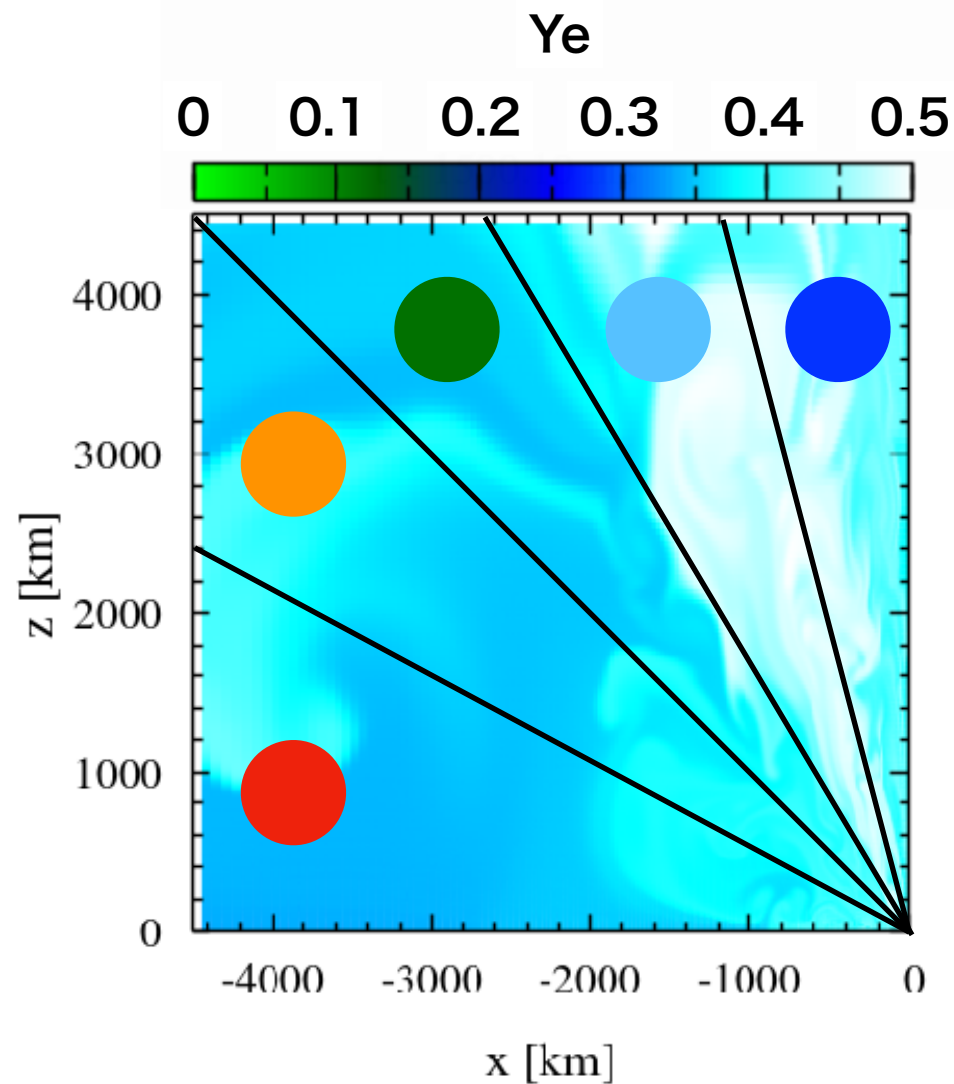
放出物質のElectron Fraction (Y_e)

Ye distribution

Density distribution



(大質量中性子星+トーラスからの) 放出物質の元素組成



大質量中性子星+トーラス系からの放出物質中にはほぼランタノイドが存在しない

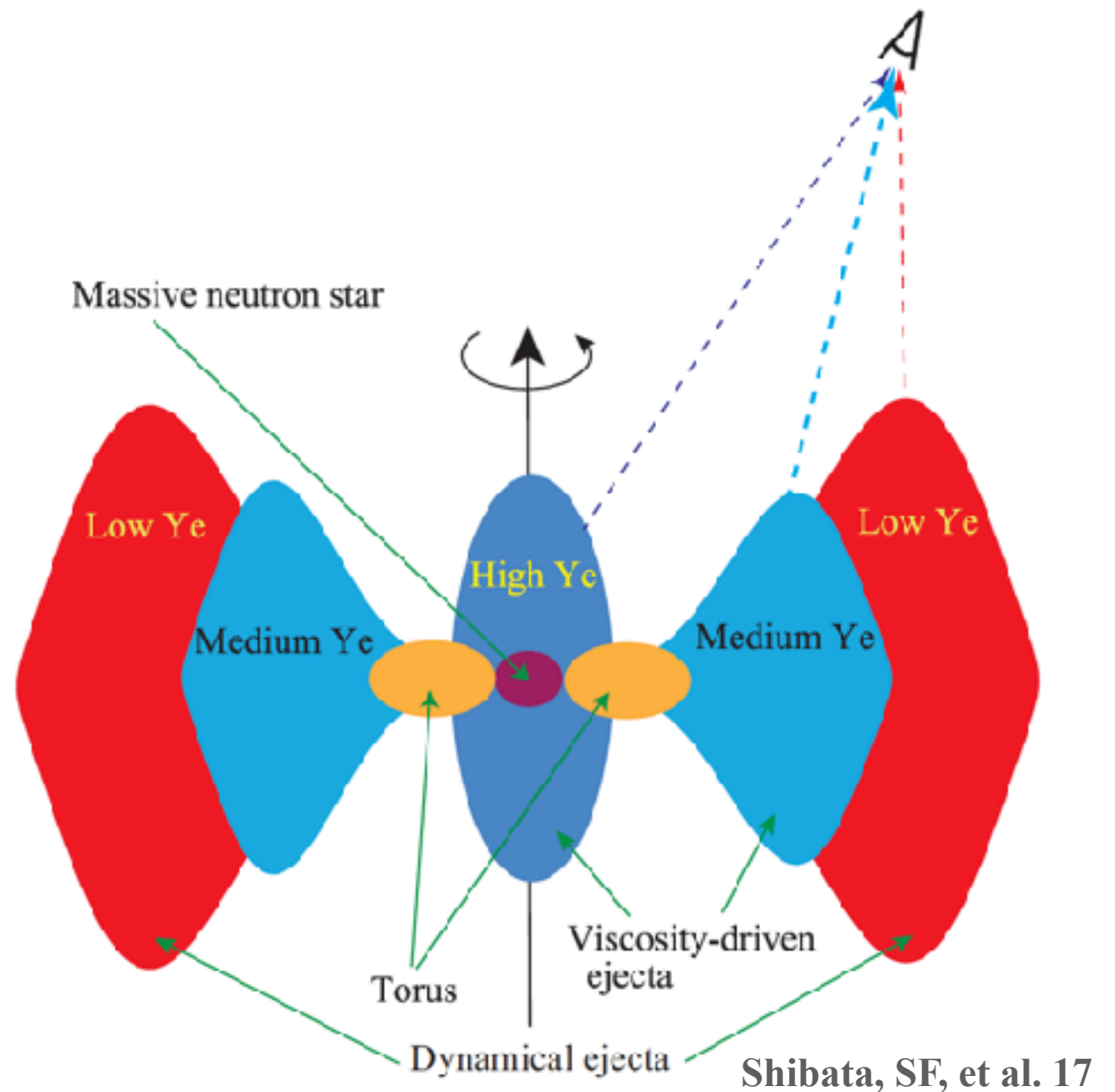
→ (オパシティが小さいことから)

この放出物質からは早く進化する (直ぐ明るくなり、暗くなる)

波長の短い ("青い") 電磁波シグナルが期待される

GW170817に付随した電磁波天体について

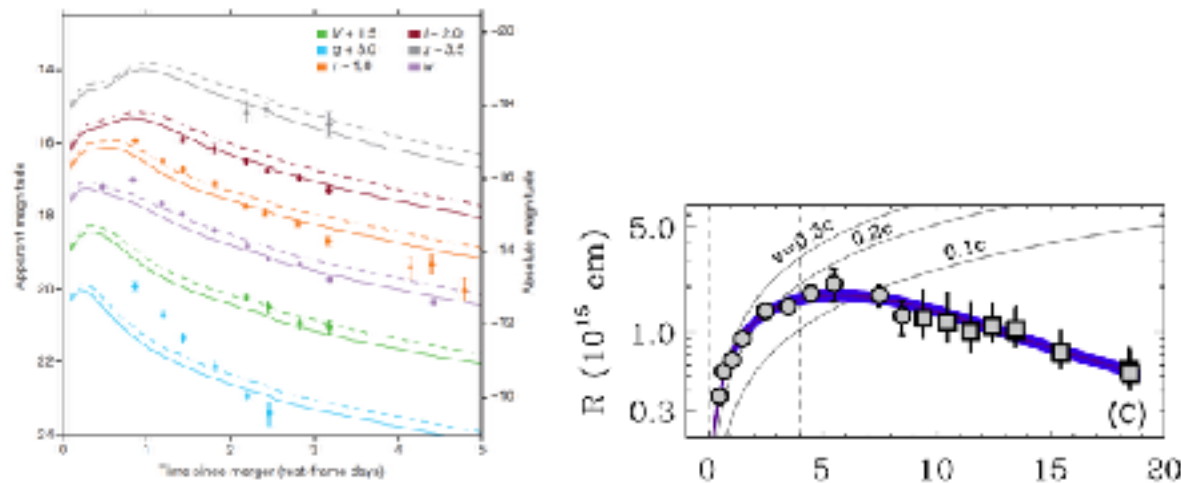
- ニュートリノの照射により、粘性加熱で放出される物質 ($> 0.01 M_{\text{sun}}$) は $Y_e = 0.3-0.4$.
- この放出物質からの電磁波シグナルを Dynamical Ejectaに邪魔されない角度 ($\theta < 45^\circ$)から見ると、GW170817に付随して見つかった短期間 ($< 5 \text{ days}$) の UV-Opticalの放射を説明できる可能性がある。



GW170817に付随した電磁波シグナルとの比較

○ AT 2017gfoの早期のLight curve

Cowperthwaite+17, Arcavi+17, Villar+17, Drout+17



シンプルなモデルの

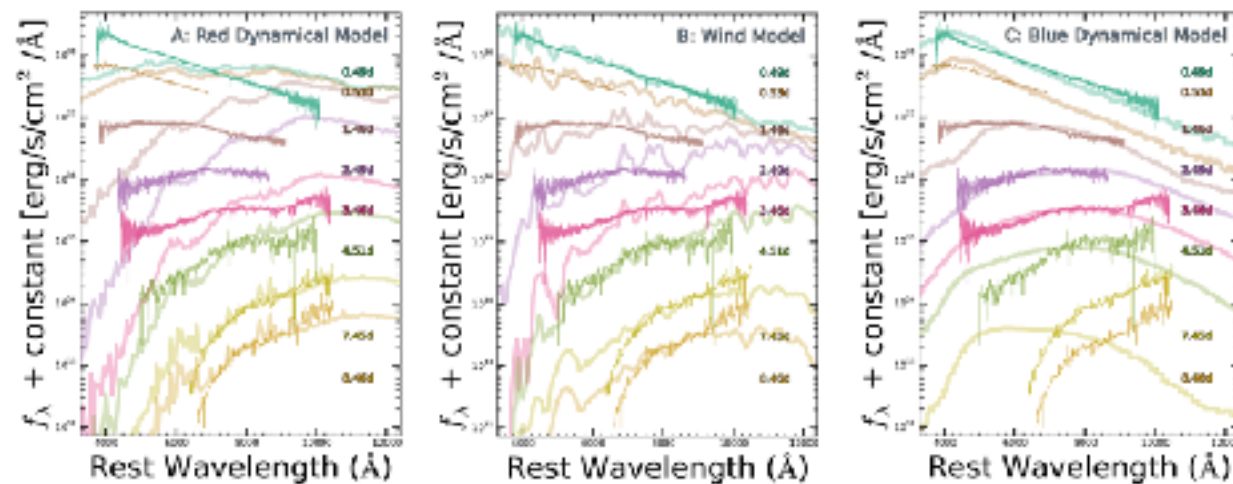
ベストフィット : $V_{ej} \sim 0.3 c$

早期の光球半径から

見積もられる速度 : $\sim 0.3 c$

○ 早期のスペクトル Shappee et al. 17, Kasen et al. 17

Lanthanide-rich $\sim 0.2 c$ Lanthanide-poor $\sim 0.03 c$ Lanthanide-poor $\sim 0.3 c$



構造が無く滑らか

→ 速い速度 ($> 0.1 c$) を持つ

Ejectaからの放射を示唆

↔ 粘性による放出物質は遅い ($< \sim 0.1 c$)

粘性によって放出された物質を何らかで加速させないといけない

Summary

- 連星中性子星合体の結果できる大質量中性子星+トーラス系からの質量放出を、長時間 (~数sec) シミュレーションで調べた
 - 大質量中性子星の平衡形状の変化が質量放出に寄与しうる
 - $t \gtrsim 1\text{s}$ では粘性加熱による質量放出が激しく起こる
 - Y_e が大きいいため、放出物質はLanthanide-poor
- 観測で示唆されている、オパシティの小さな成分を説明し得る (ただし、速度が足りないことも示唆される)
- Future prospects
 - 連星系の質量、質量比、中性子星のEOSの依存性
 - (中性子星→ブラックホール)-トーラス系からの質量放出
 - 異方性を加味した光の輻射輸送計算