

連星中性子星からの放出物質の 長期進化とキロノヴァ

川口恭平

東京大学 宇宙線研究所

Collaborator:

藤林翔(AEI), 和南城伸也(AEI), 柴田大 (AEI/京都大学), 田中雅臣 (東北大学)

高エネルギー宇宙物理学研究会 2020

2020.12.14

Kilonova/Macronova

- **Kilonova/macronova :**

中性子星連星合体に伴う電磁波対応天体の一つ

- 連星合体の際、中性子星の物質の一部が
系外へ放出される

- 放出された中性子過剰な物質内部では、
r-process 元素合成 が起こると考えられている

→合成された放射性重元素の崩壊を
熱源とした可視赤外線で明るい電磁波放射 :

kilonova/macronova

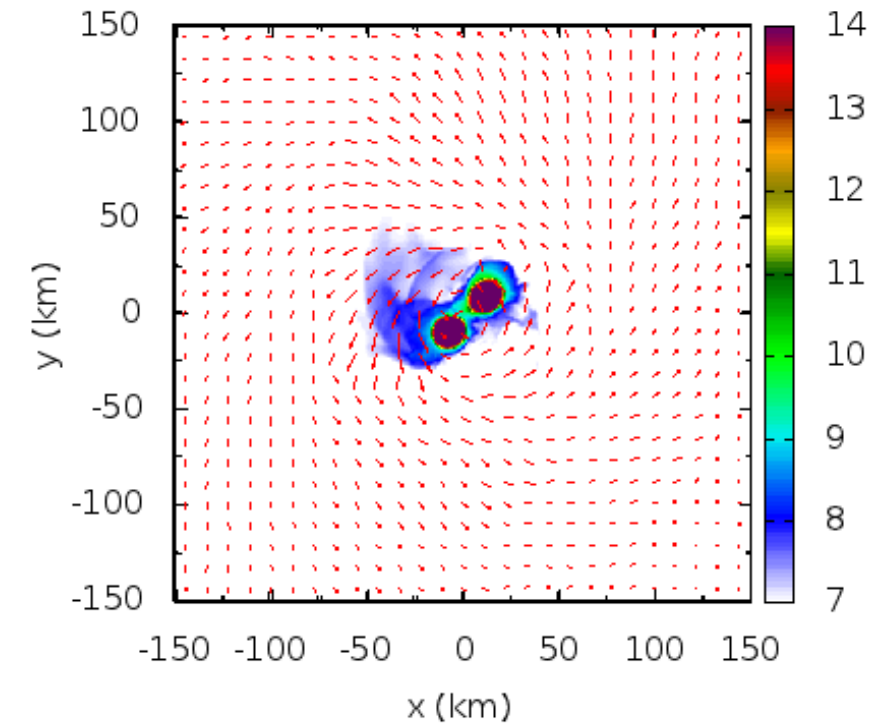
Li & Paczyński 1998, Kulkarni 2005,
Metzger et al. 2010 ...

- 母銀河の決定, 放出物質の性質,
合体・合体後の系の進化の情報

- GW170817の重力波の観測と同時に
キロノヴァの理論的光度曲線と
よく一致する電磁波天体が可視赤外線波長域で観測。

- イベントの母銀河(NGC4993)が決定。

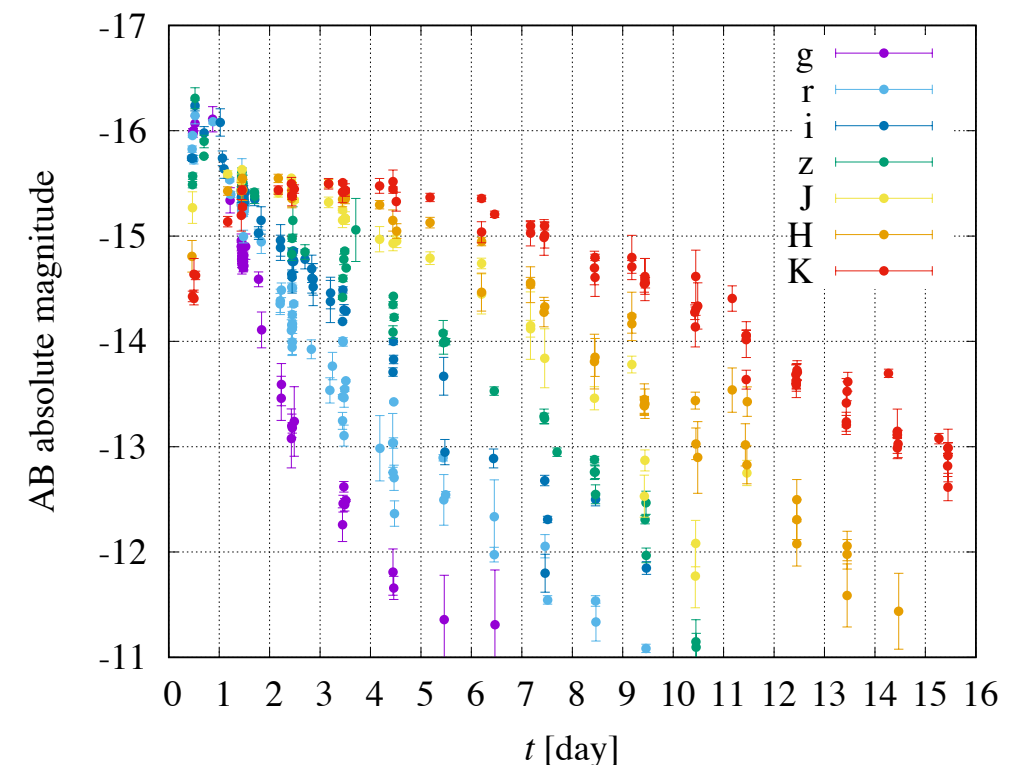
Ref: K. Hotokezaka et al. 2013



GW170817:AT2017gfo

Data: Summarized in Villar et al. 2017

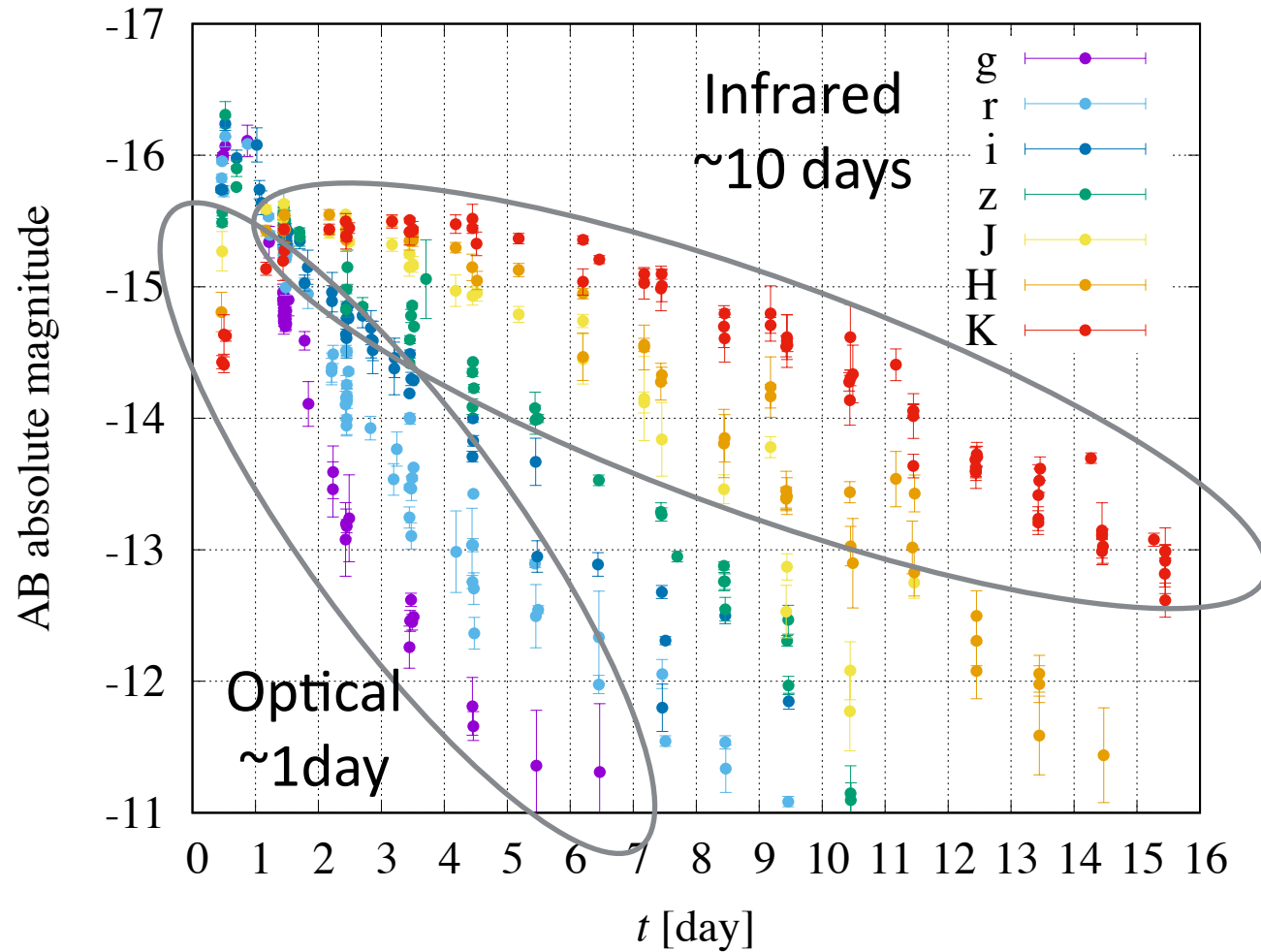
D=40 Mpc



GW170817:多成分のejectaによるkilonova

Data: Summarized in Villar et al. 2017

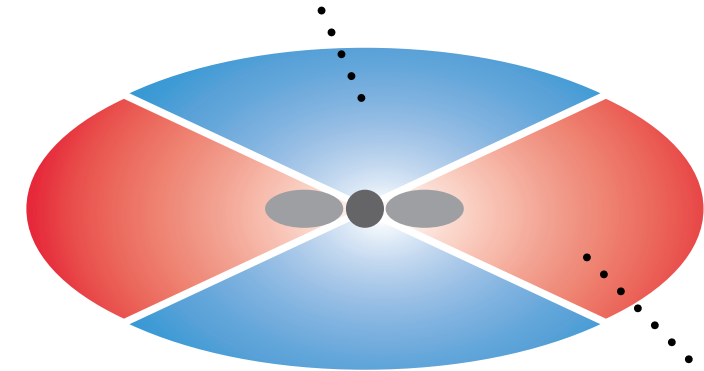
D=40 Mpc



ref) Masaomi's slide

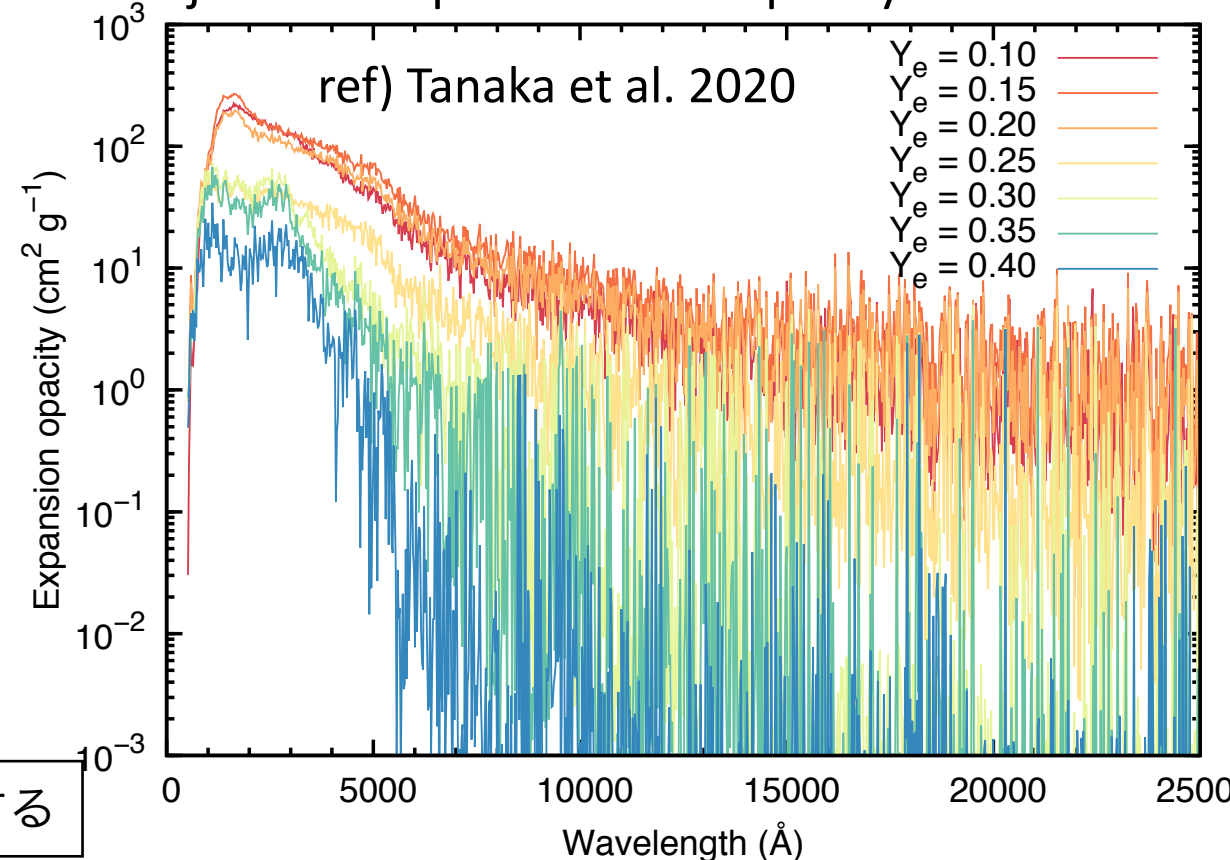
$$Y_e = \frac{[e]}{[p] + [n]}$$

Blue (High- Y_e , lanthanide-free)



Red (Low- Y_e , lanthanide-rich)

ejecta Y_e dependence of Opacity



- GW170817で観測された可視赤外線電磁波対応天体(AT2017gfo)は多成分のejectaからなるkilonovaの光度曲線とconsistent

(e.g., Kasliwal et al. 2017, Cowperthwaite et al. 2017, Kasen et al. 2017, Villar et al. 2017)

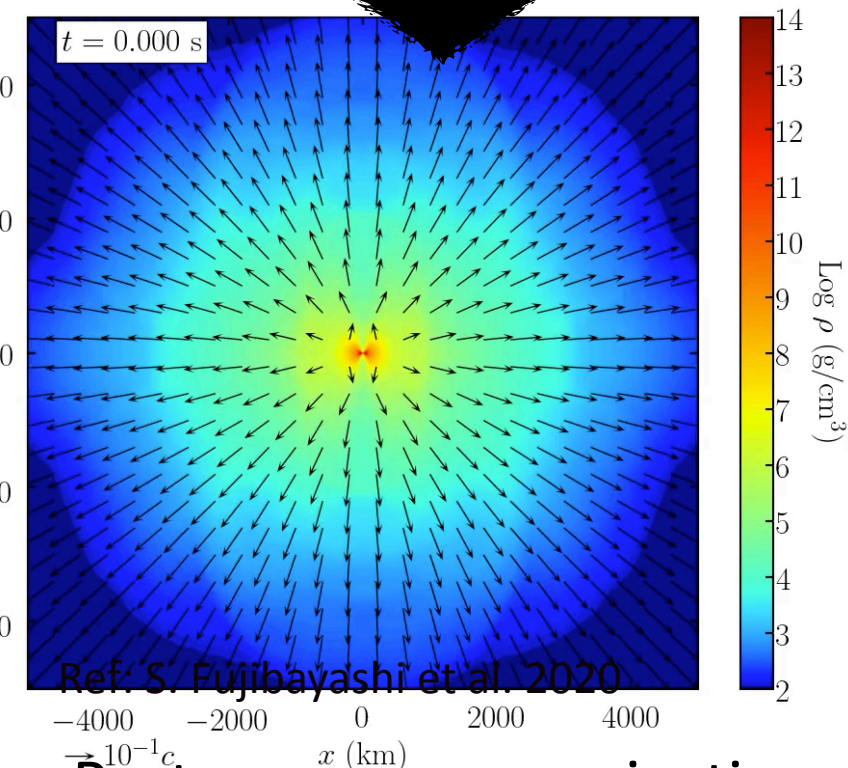
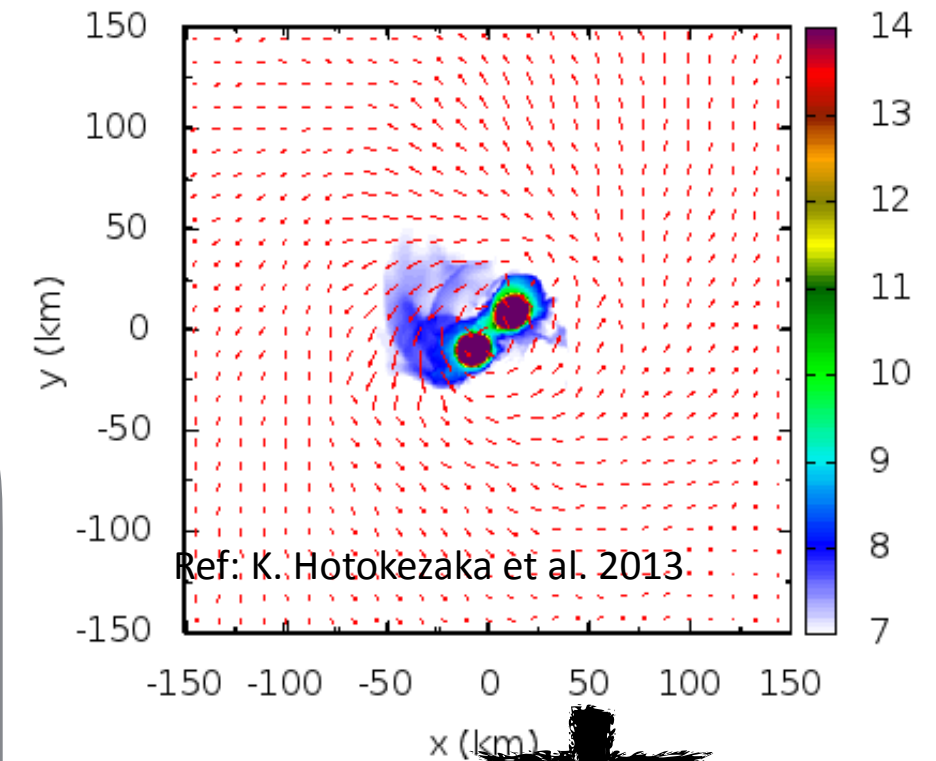
- ~1dayで明るい可視光(blue)成分
 - ex) lanthanide-free ejecta (~0.01 M_{sun} , opacity ~0.1-1 cm^2/g)
- +~10daysで明るい赤外線(red)成分
 - ex) lanthanide-rich ejecta (~0.04 M_{sun} , opacity ~10 cm^2/g)

ejectaの中性子(非)過剰度 Y_e がlanthanideの有無/opacityを大きく左右する

数値シミュレーションによる放出物質の研究

Dynamical mass ejection

@merger
 $t = 9.1824 \text{ ms}$



Post-merger mass ejection
@after merger

- 連星合体の数値相対論シミュレーションによって様々な機構による放出物質の理解が進んでおり、それらの結果に基づいたkilonova光度曲線予測も盛んに研究されている。

• Dynamical mass ejection

- 連星の合体時、星の衝突衝撃波や非軸対象な物質配置に伴う重力トルクによる物質放出：

• lanthanide-rich ejecta

(e.g., Hotokezaka et al. 2013, Bauswein et al. 2013, Sekiguchi et al. 2016, Radice et al. 2016, Dietrich et al. 2017, Bovard et al. 2017)

• Post-merger mass ejection

合体後形成されたMassive NSやBH+torusからの物質放出：
magnetic fields / effective viscosity / neutrino heating

- 放出時間スケール：

<~0.1 s-> lanthanide-rich, >~1 s lanthanide-free

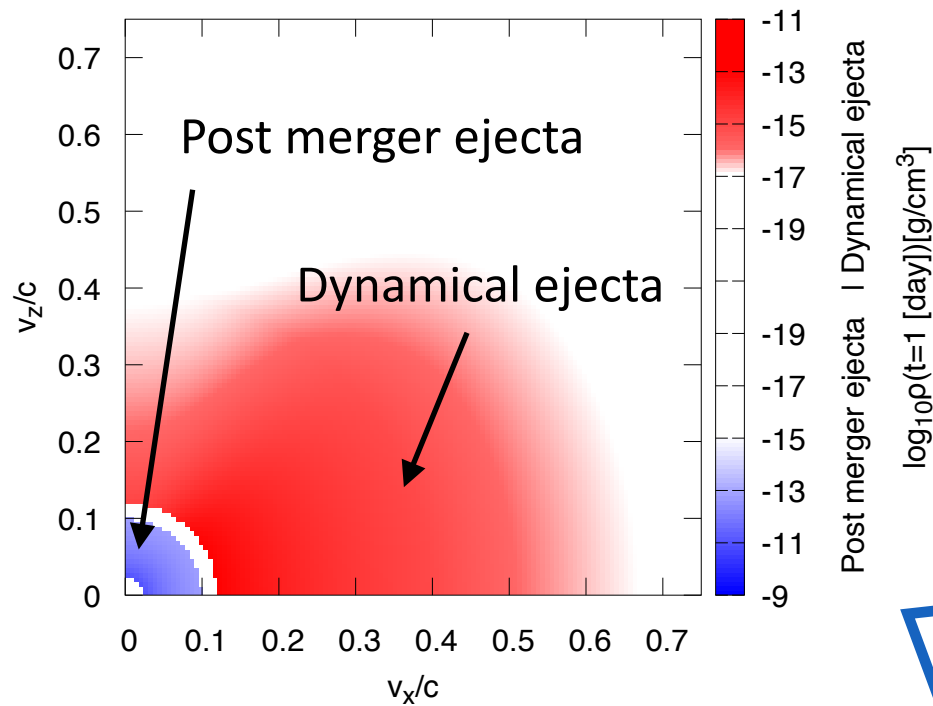
(e.g., Dessart et al. 2009, Metzger & Fernández 2014, Perego et al. 2014, Just et al. 2015, Shibata et al. 2017, Lippuner et al. 2017, Fujibayashi et al. 2018, Siegel et al. 2018, Fernandez et al. 2018, Christie et al. 2019, Fujibayashi et al. 2020)

放出物質分布の長期的進化

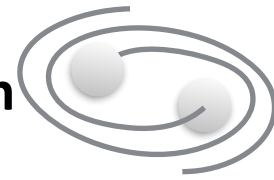
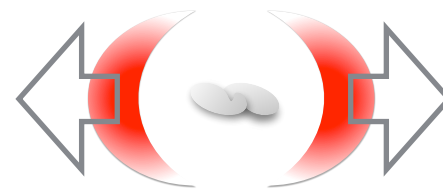
単純化されたEjectaモデル
(これまでの研究)

Ejecta間の相互作用

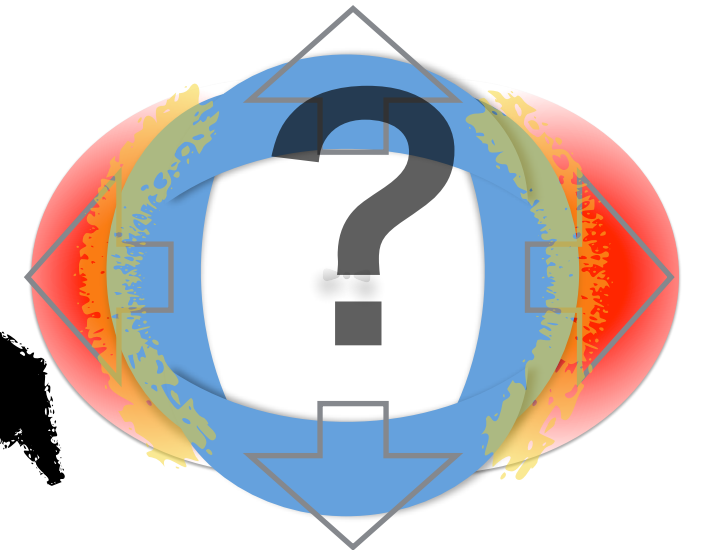
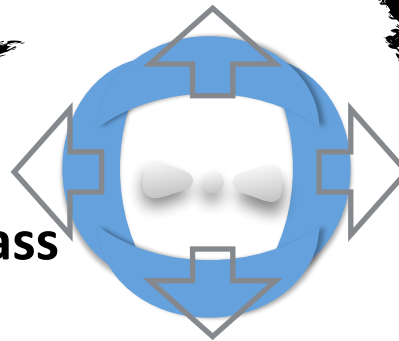
Density profile



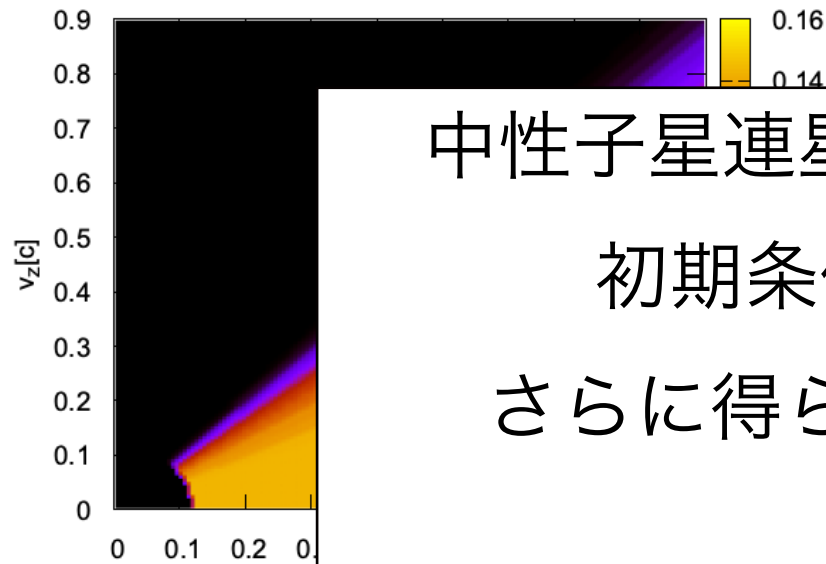
Dynamical mass ejection
@merger



Post-merger mass ejection
@after merger



Lanthanide fraction



Ejecta形成・放出:

$t < \sim 10 \text{ s.}$

中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションの結果を

初期条件にしてejectaの長期流体的進化を調べ、

さらに得られたejecta profileを元に輻射輸送計算を行い

kilonova光度曲線の性質を調べた

ly
ase

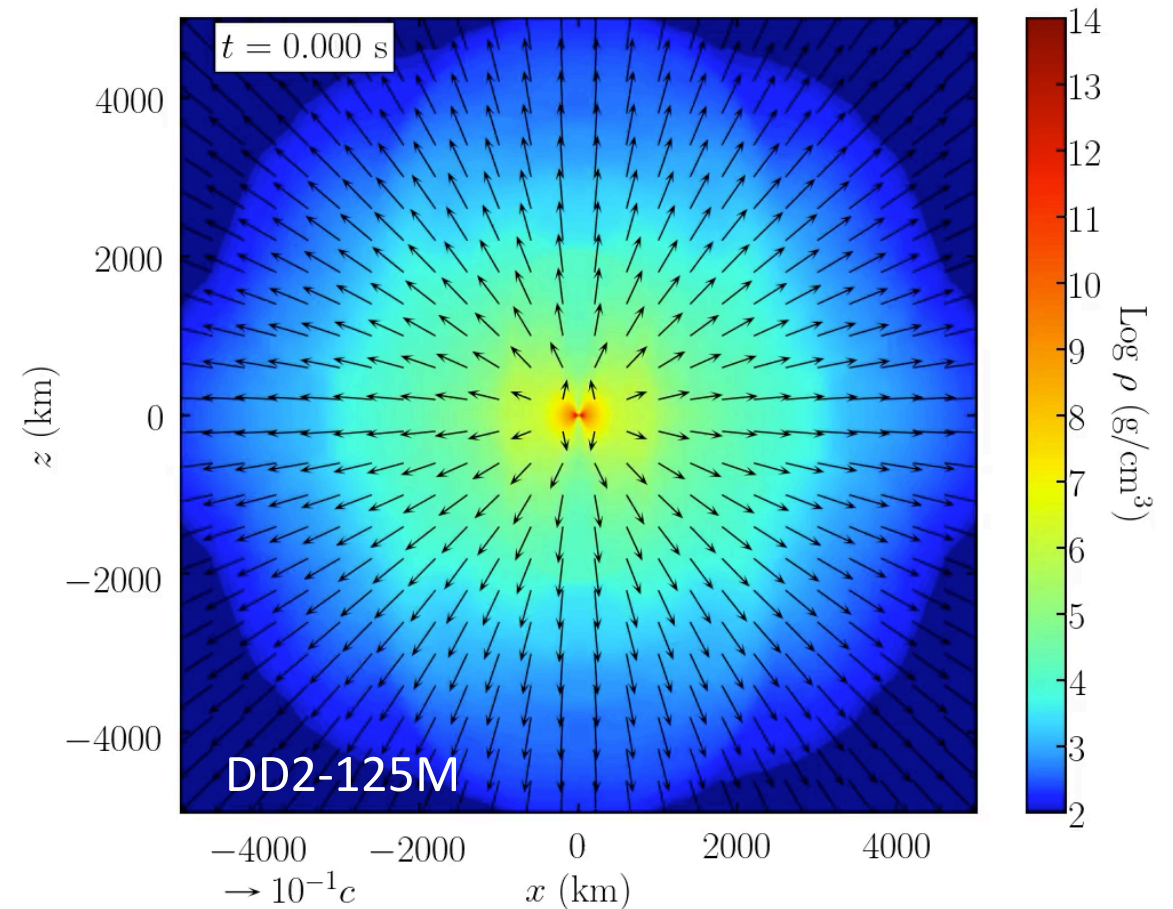
hydrodynamical simulation

Setup:

Hydrodynamical simulation

- 球座標軸対称流体コード
(Schwarzschild metric, $M_{\text{ADM}}=2.46M_{\text{sun}}$)
 - r方向は非一様、 θ には一様メッシュ (r:1024, θ :128)
- Fujibayashi et al. 2020のBNS mergerのoutflow data
(dynamical+post merger ejecta)
をinner boundary (=8000km)からinjection
 - モデルDD2-125M: 1.25 Msun-1.25 Msun**
DD2 EOS (13.1 km@1.25Msun)
合体後remnant massive NSが~8s以上残り続ける
*remnant massive NSが残り続ける場合、
EOSや総質量にかかわらず似た性質の放出物質となる
(see Fujibayashi et al. 2020)

GR-viscous-vR-HD BNS merger simulation

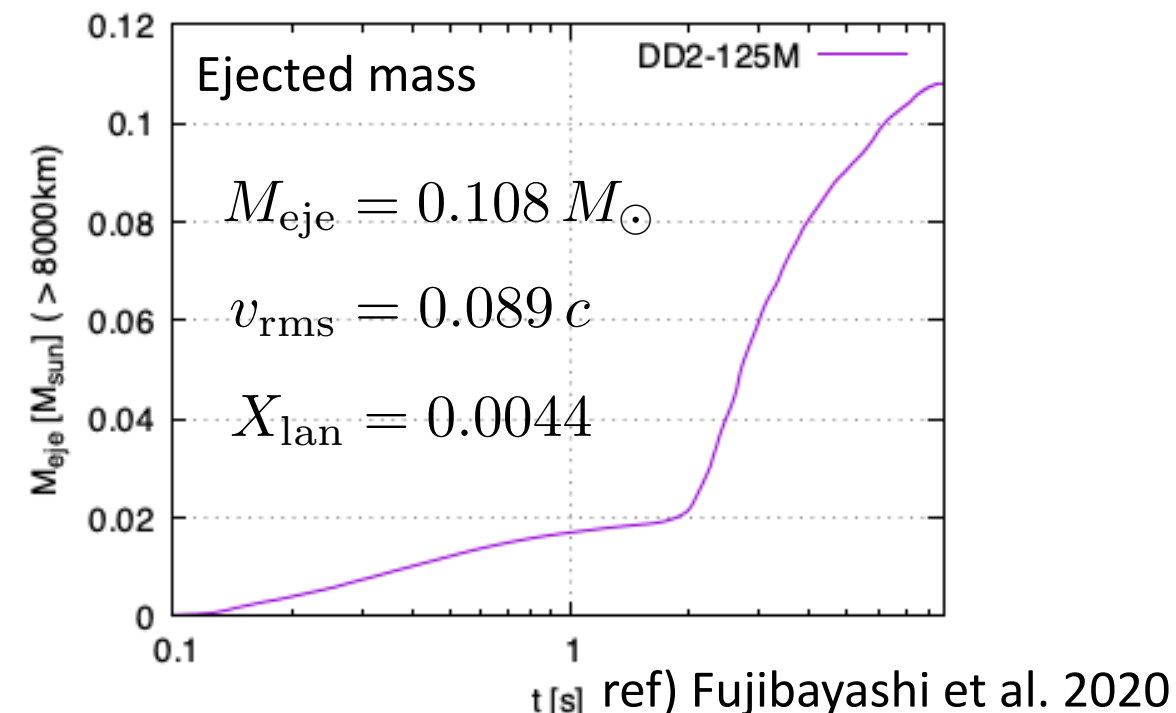


- 同時にinjection timeとangleの情報を移流させることで
各流体素片がいつの時刻、いつの角度から
入ったものなのか遡れるようにしている

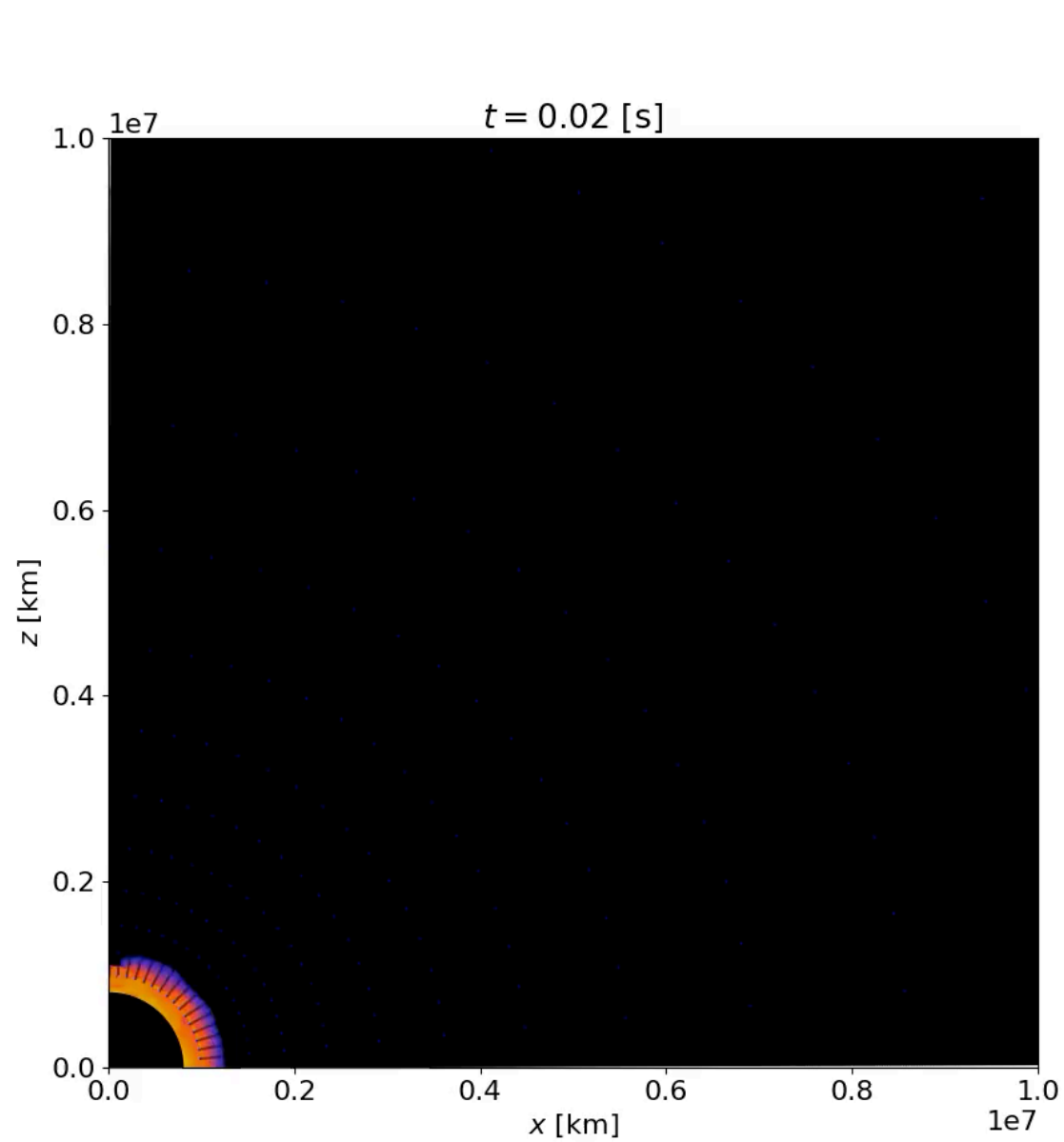
$$\partial_t (\rho_* Q) + \partial_i (\rho_* Q v^i) = 0. \quad (Q = t_{\text{in}} \text{ or } \theta_{\text{in}})$$

- injection timeとangleから元素合成のテーブルを
参照してradioactive heatingを考慮

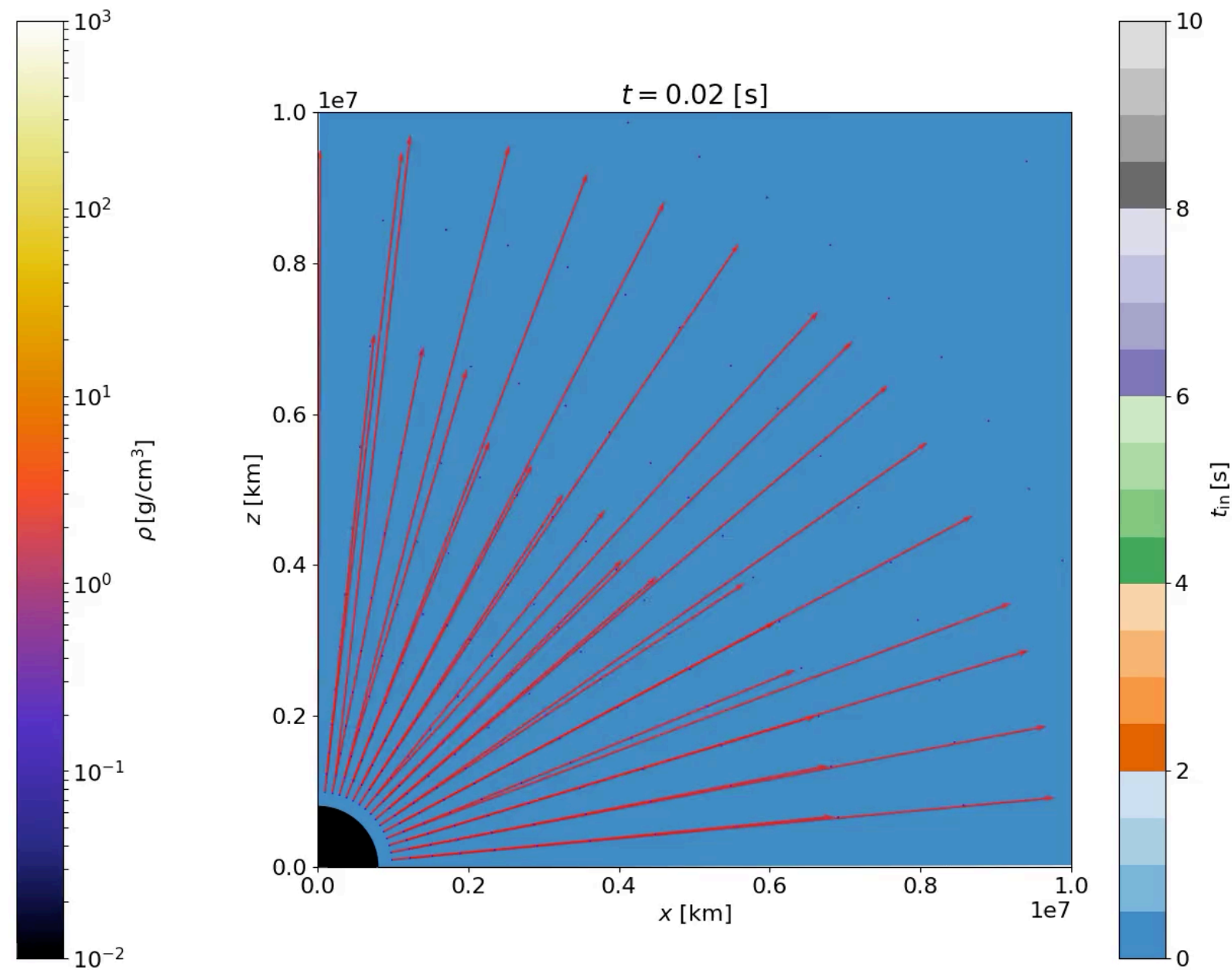
- EOSは理想気体 ($\Gamma=4/3$) を使用



シミュレーション結果

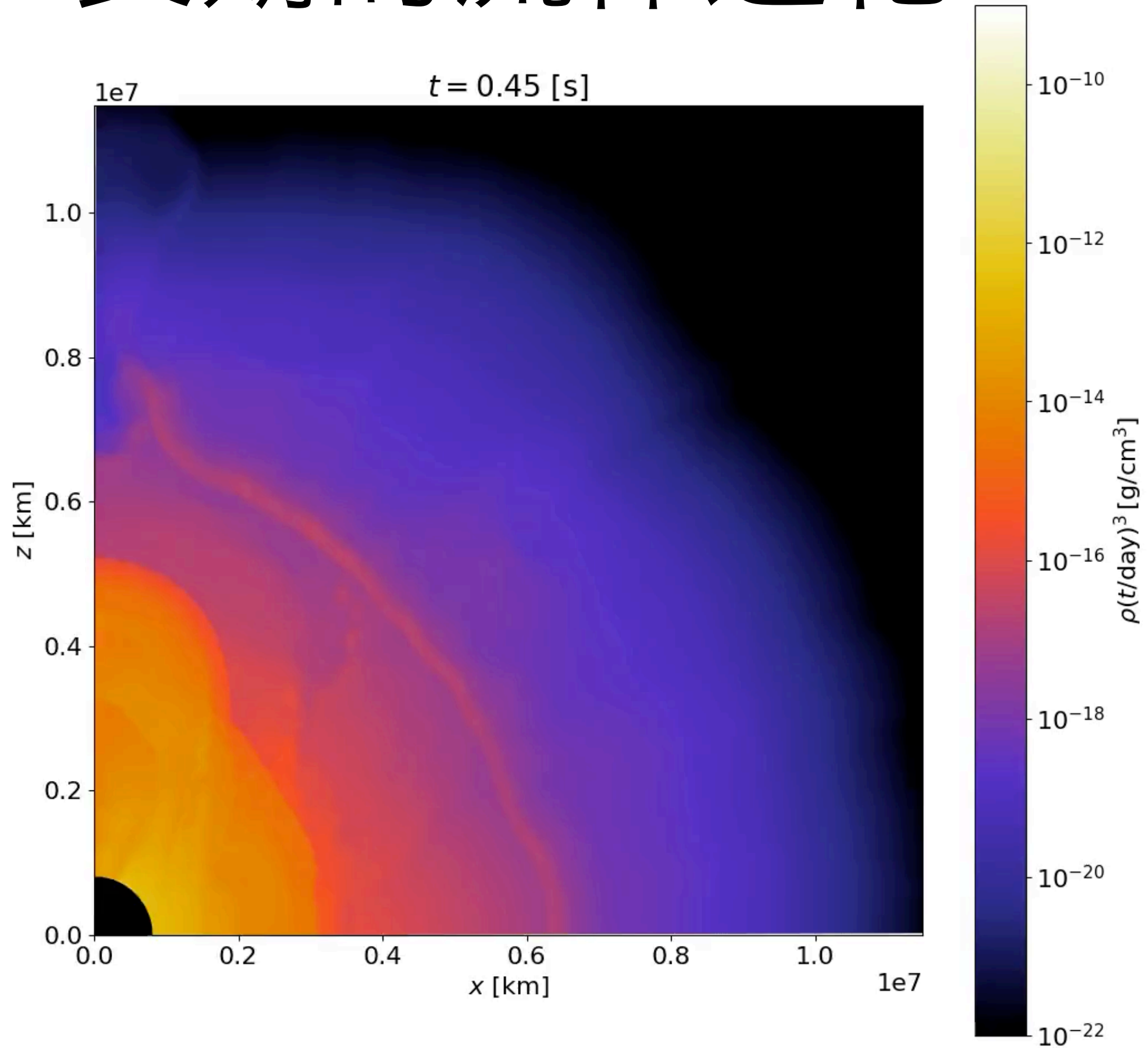


Density

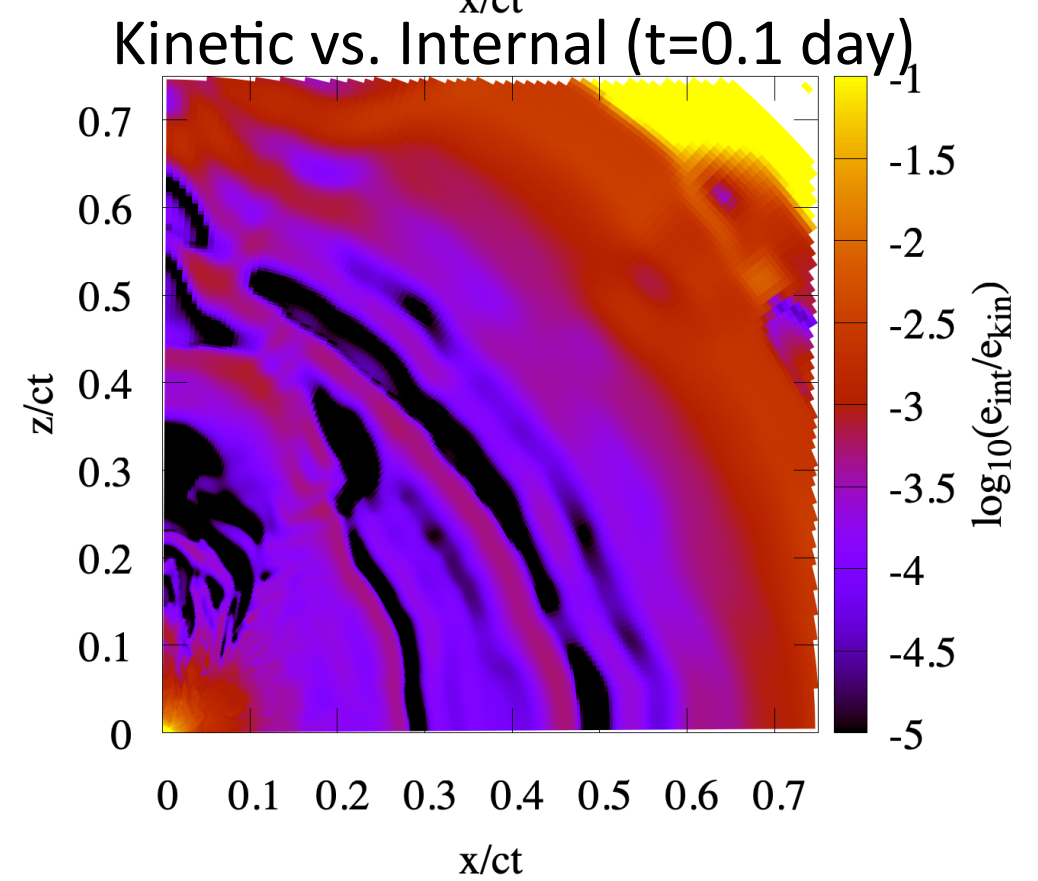
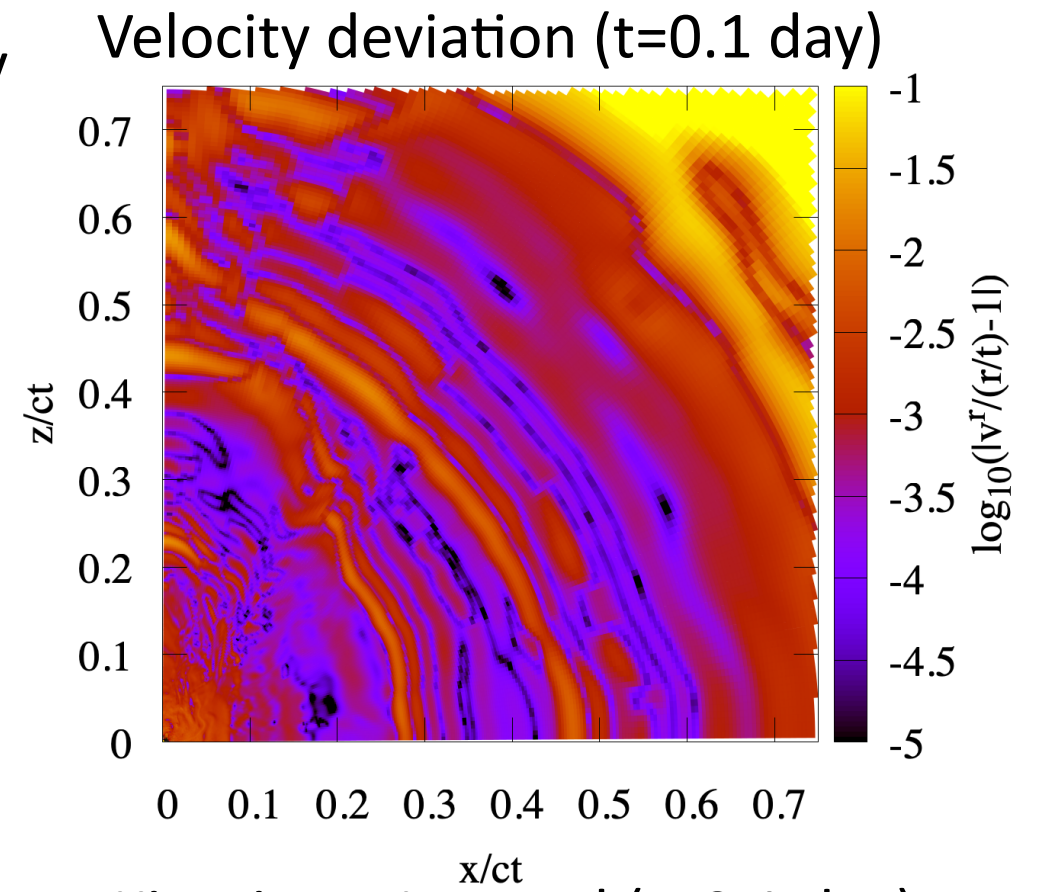
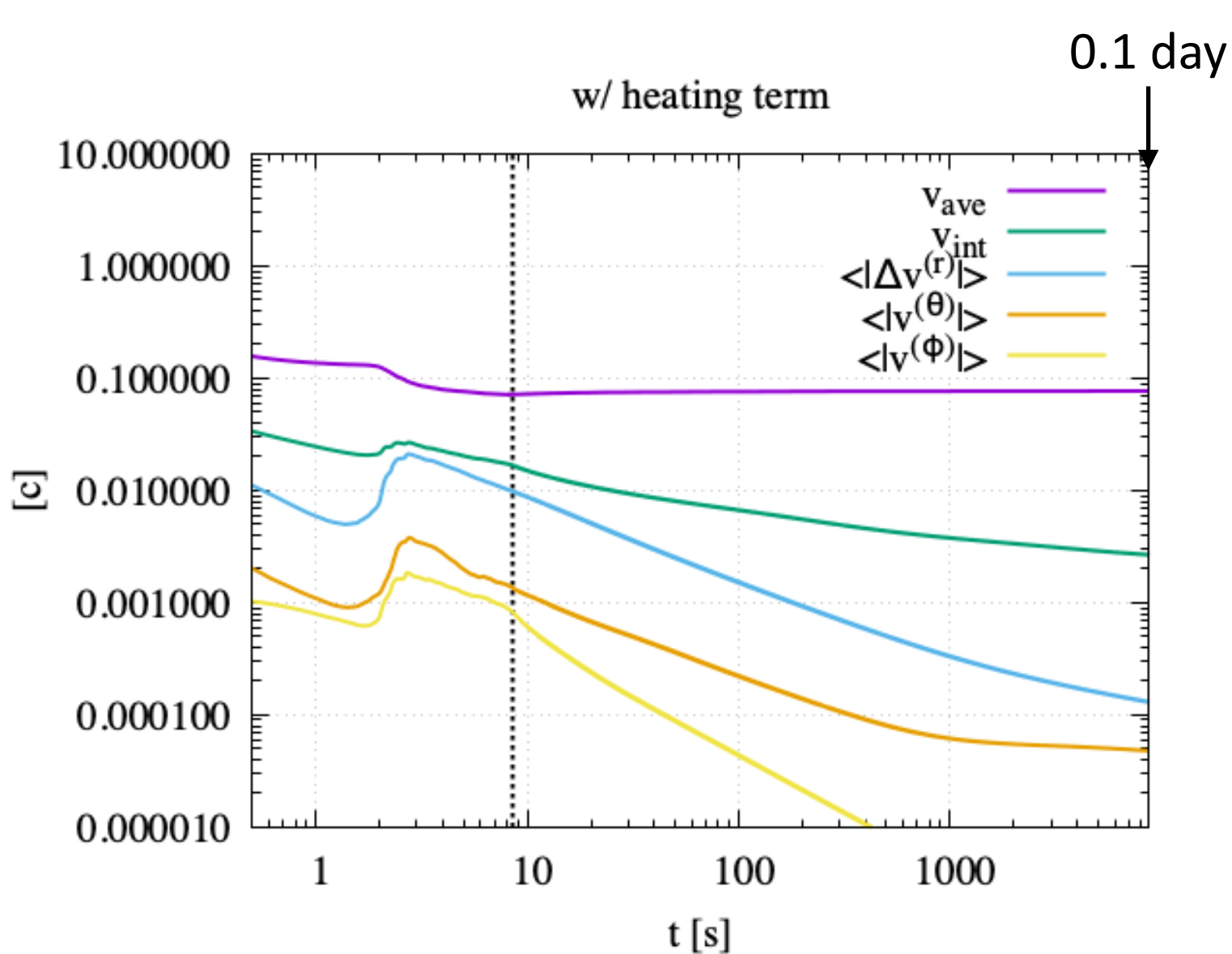


Time of injection

長期的流体進化



Homologous expansion



$$v_{ave} = \sqrt{2 \frac{\int_{v^{(r)} \geq 0} e_{kin} dx^3}{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* dx^3}}$$

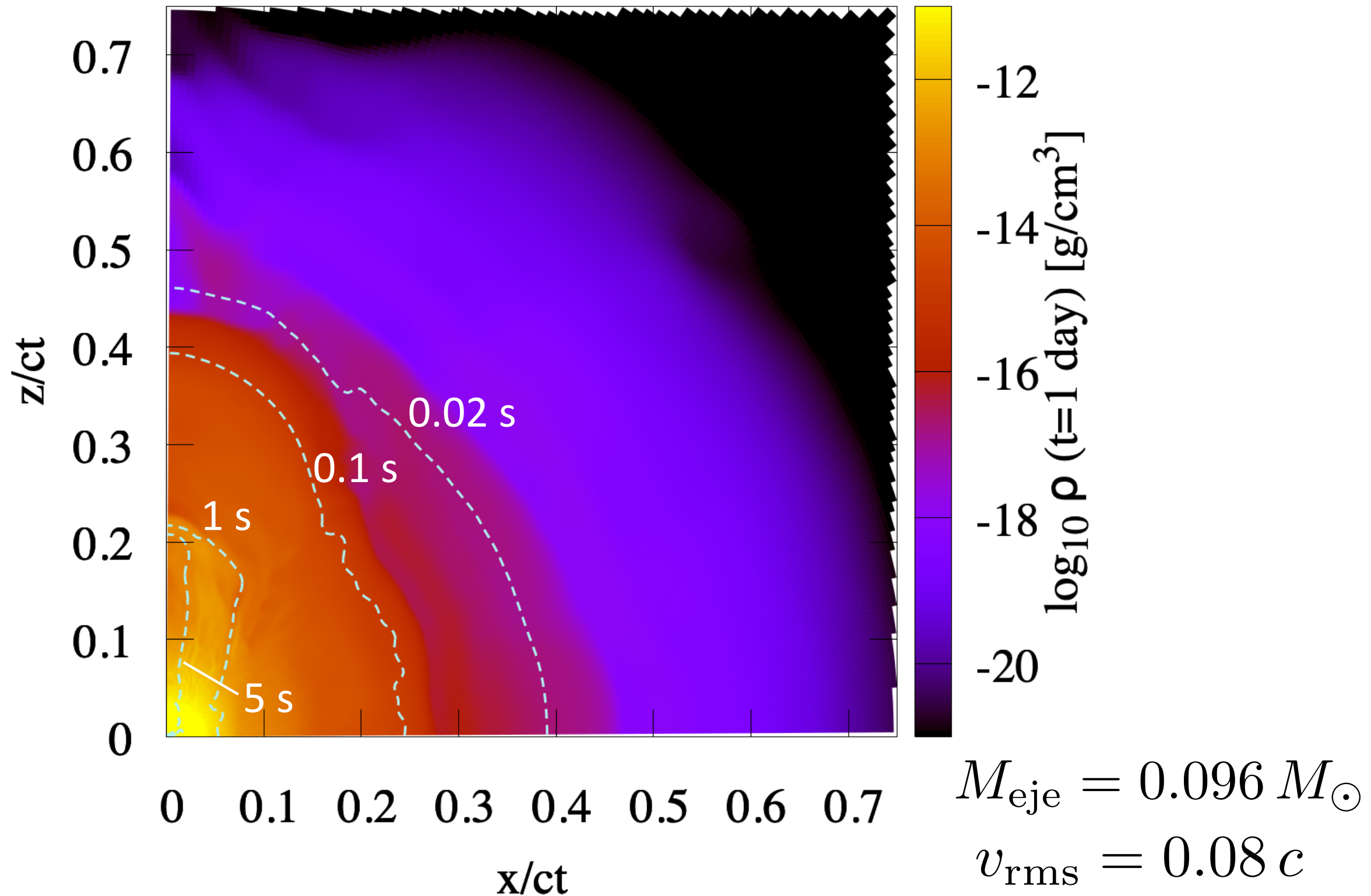
$$v_{int} = \sqrt{2 \frac{\int_{v^{(r)} \geq 0} e_{int} dx^3}{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* dx^3}}$$

$$\langle |\Delta v^{(r)}| \rangle = \frac{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* w |v^{(r)} - r/t| dx^3}{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* dx^3}$$

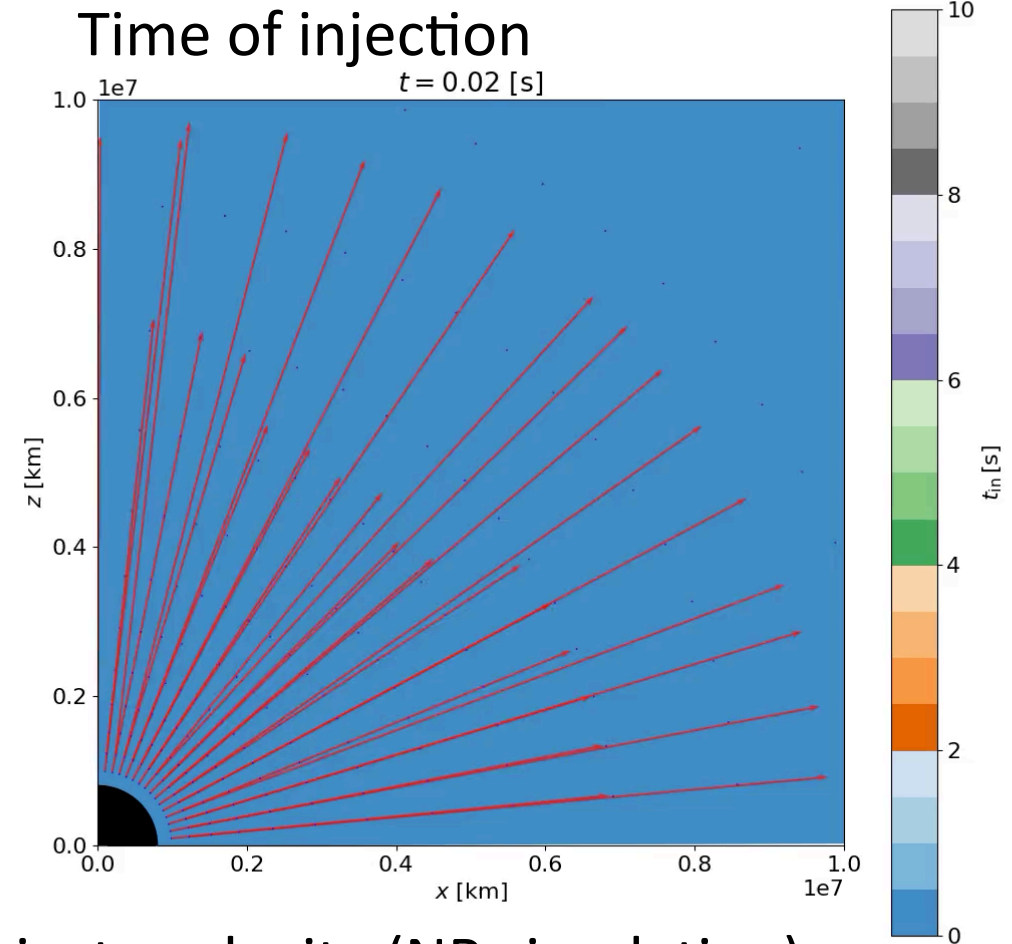
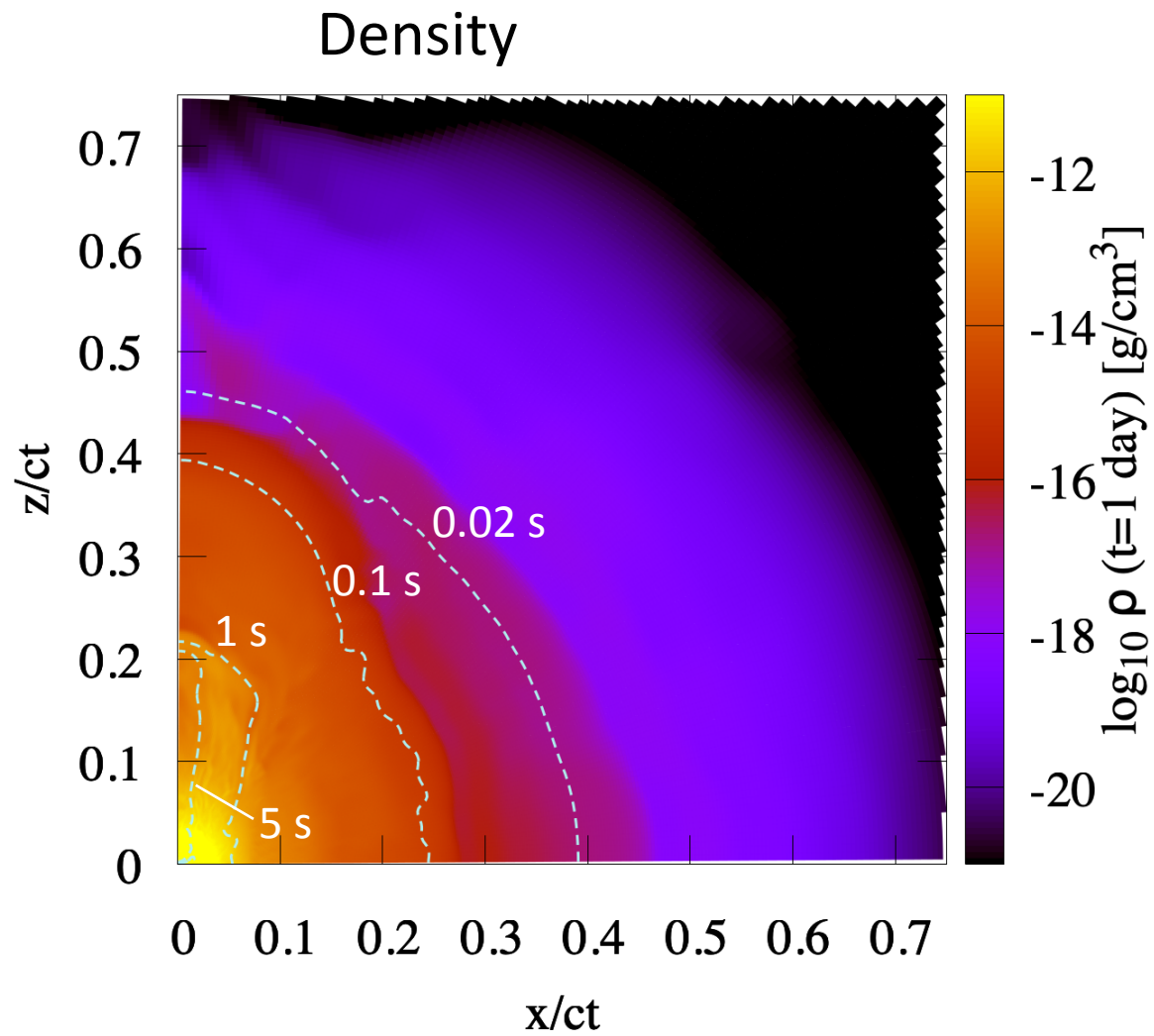
$$\langle |v^{(\theta)}| \rangle = \frac{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* w |v^{(\theta)}| dx^3}{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* dx^3}$$

$$\langle |v^{(\phi)}| \rangle = \frac{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* w |v^{(\phi)}| dx^3}{\int_{v^{(r)} \geq 0} \rho_* dx^3}$$

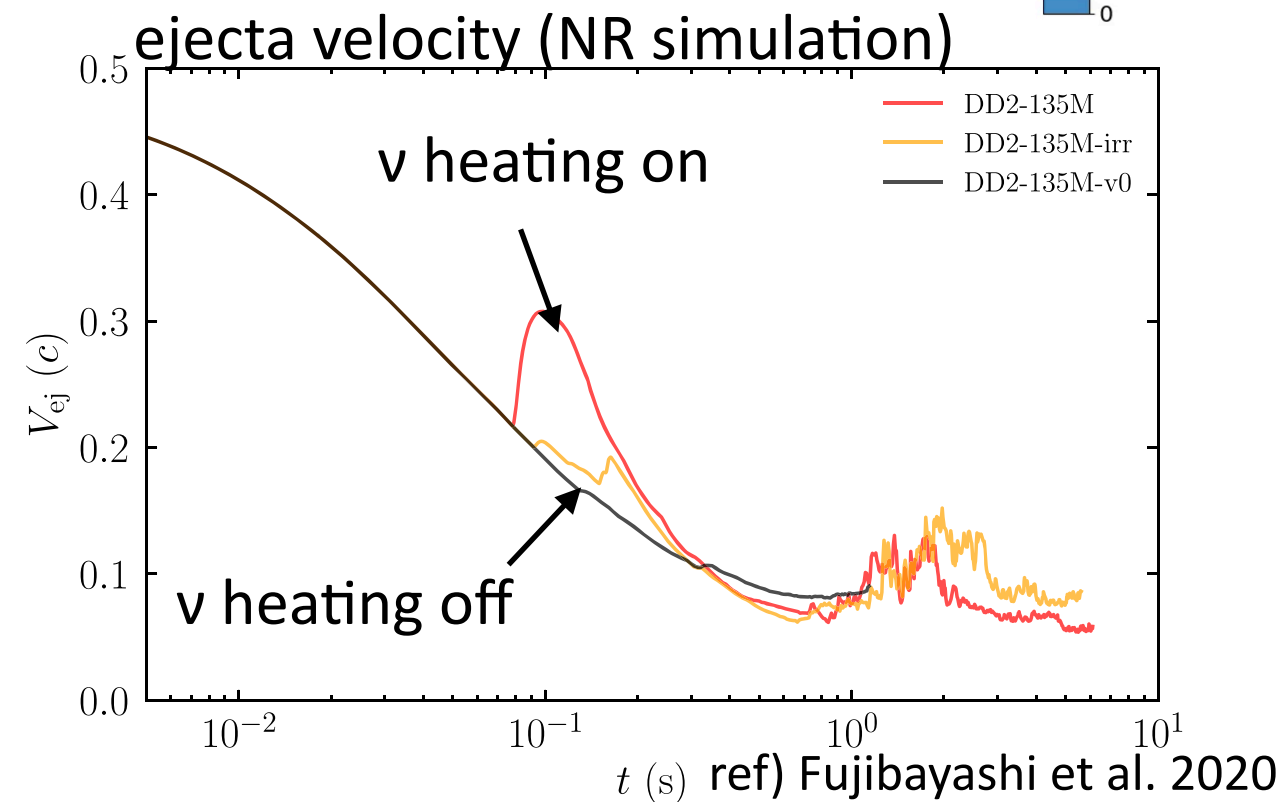
密度分布 (t=0.1 day)



密度分布 : Prolate shape

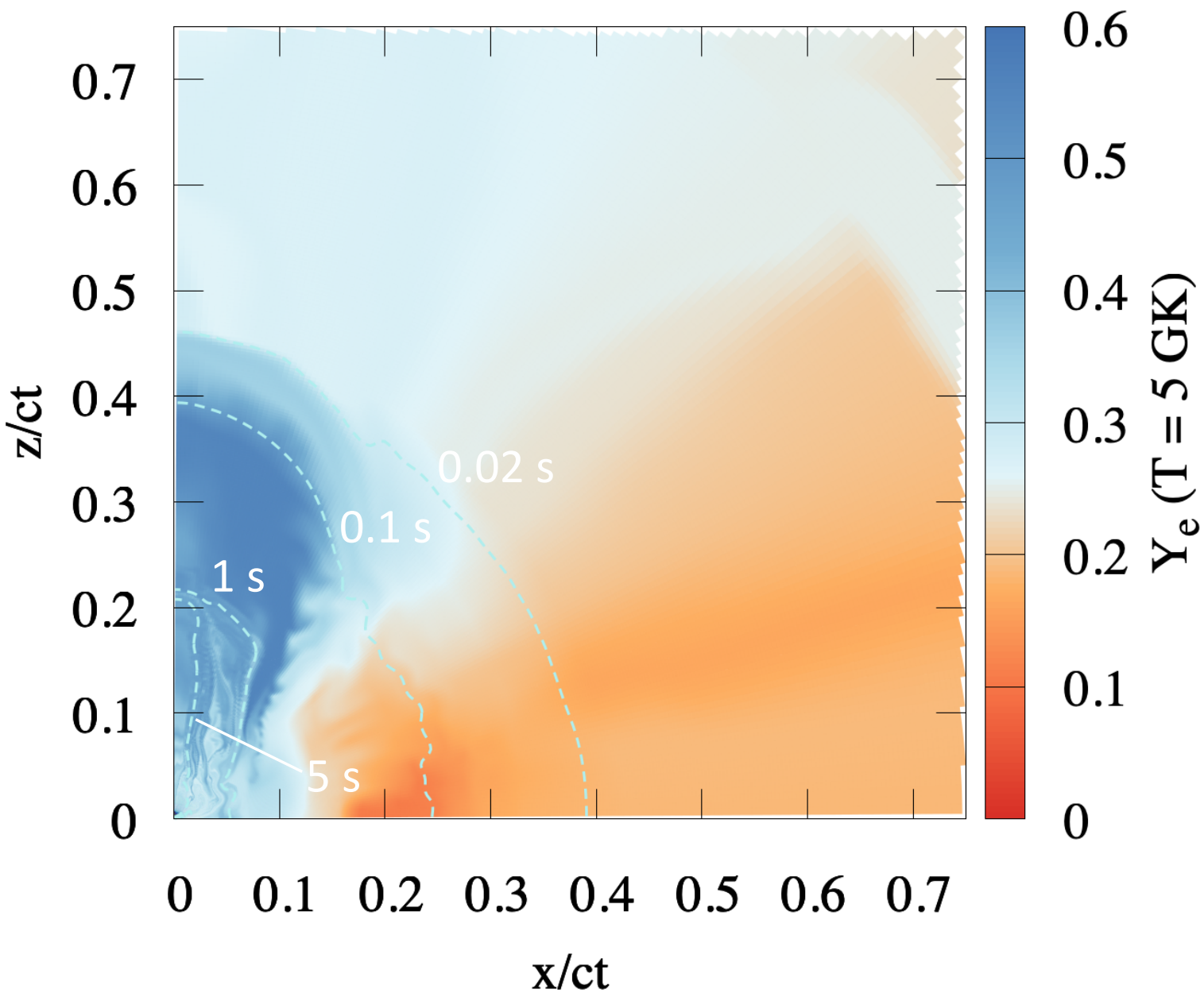


- 1秒以降に注入されている成分が質量では支配的。
- 密度分布はprolateな形状を示す：
- remnant MNSからの ν irradiationによる polar方向のejecta速度のenhancementが効いている



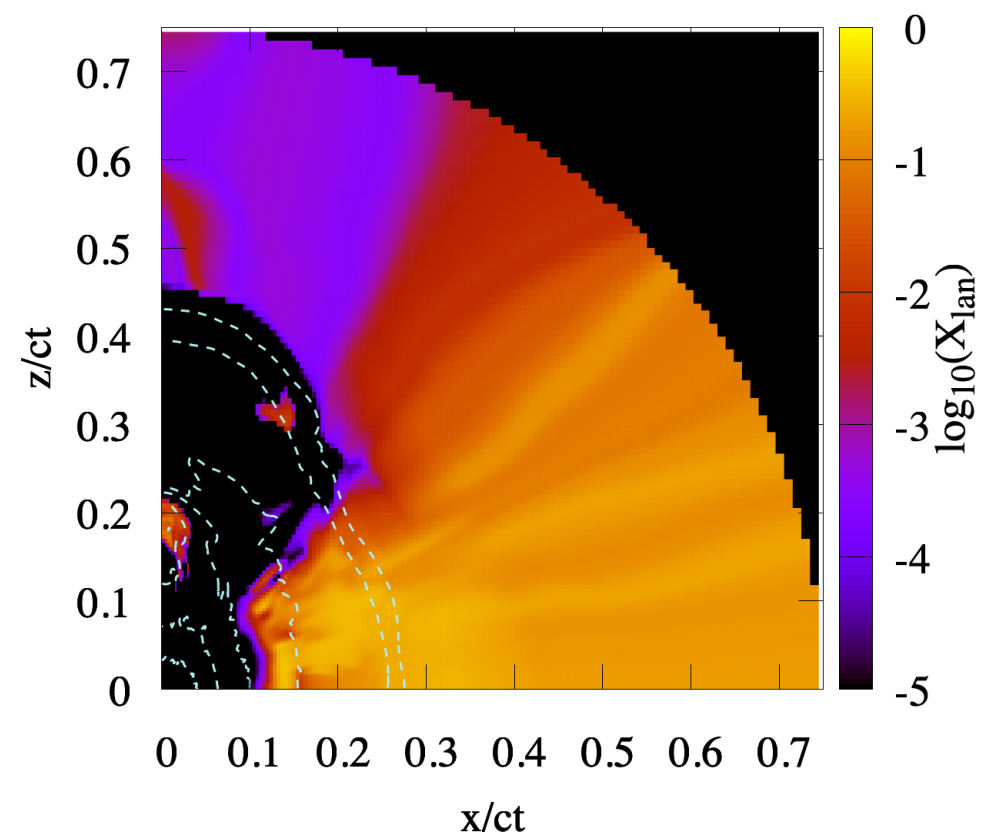
Ye/Lanthanide分布

Ye@ T=5GK

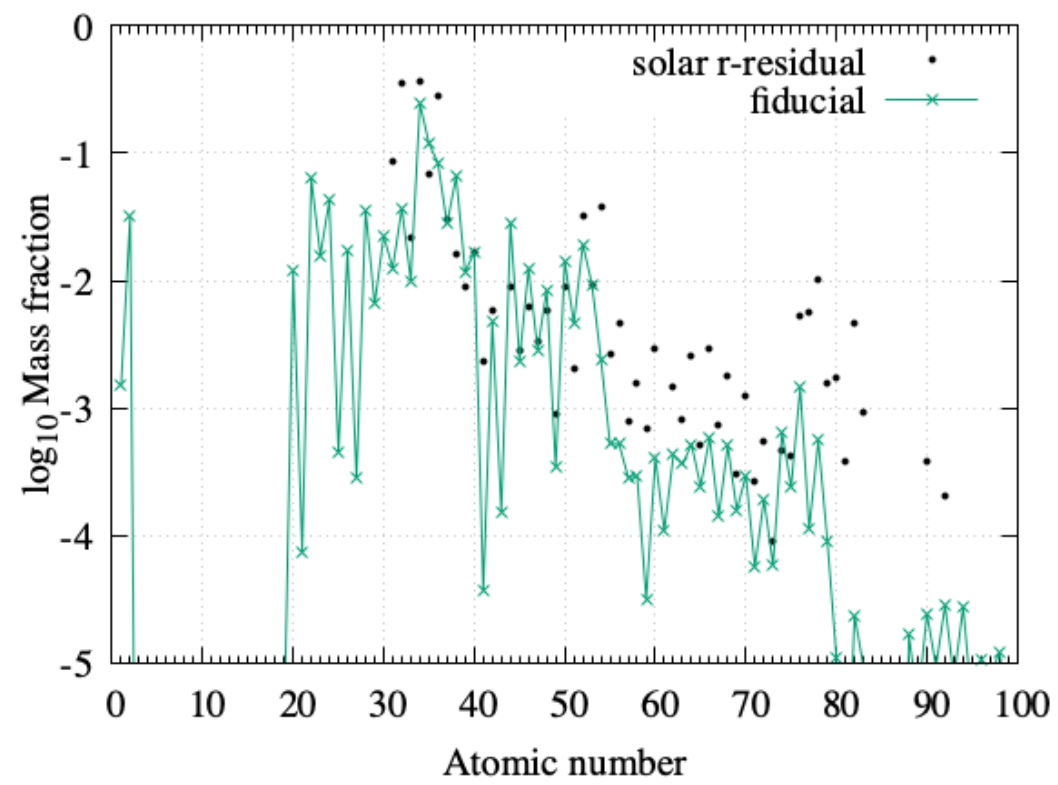


$$X_{\text{lan}} = 0.0045$$

Lanthanide mass fraction



Element abundances

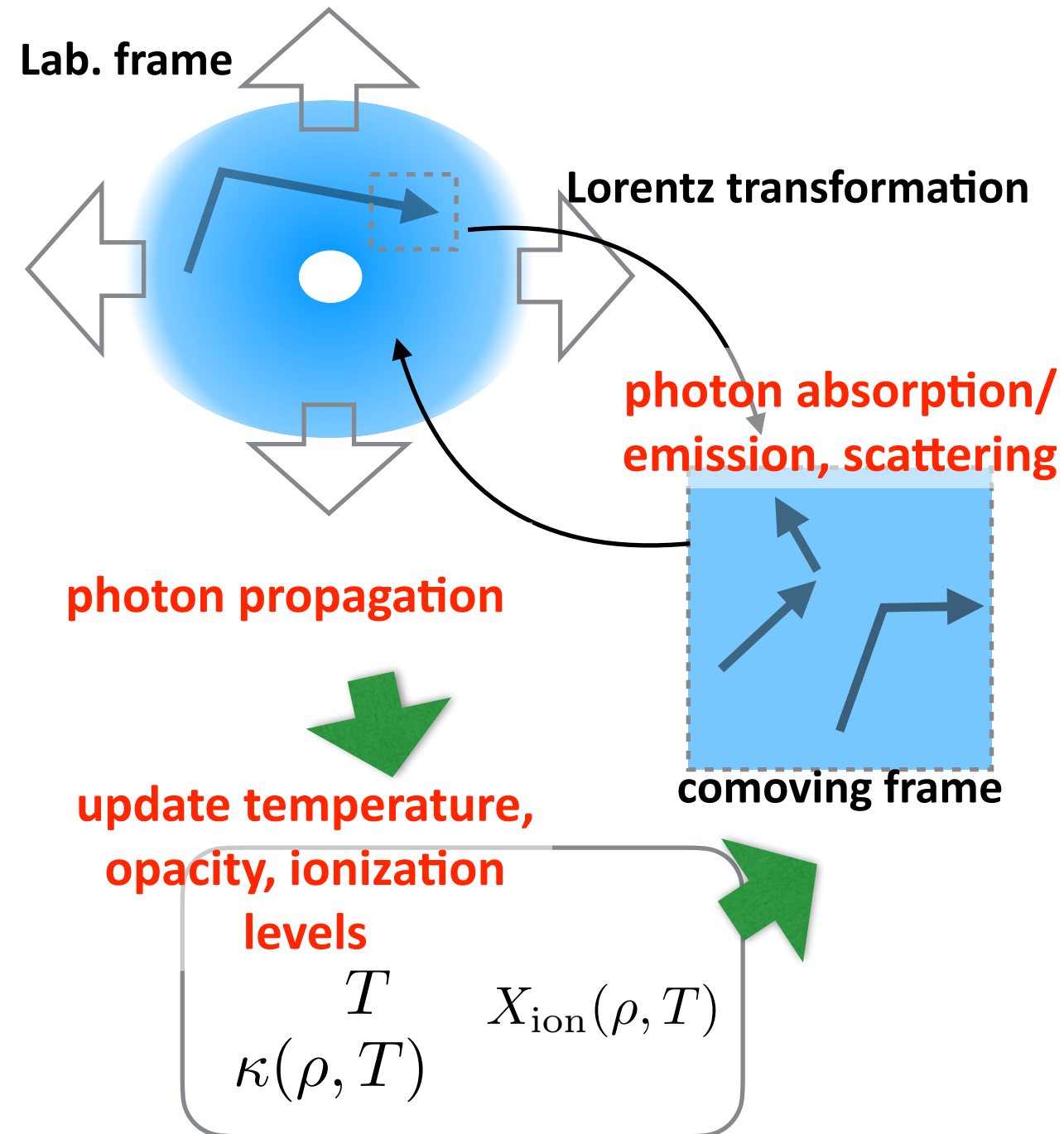


Radiative transfer simulation

Setup:

Radiative transfer simulation

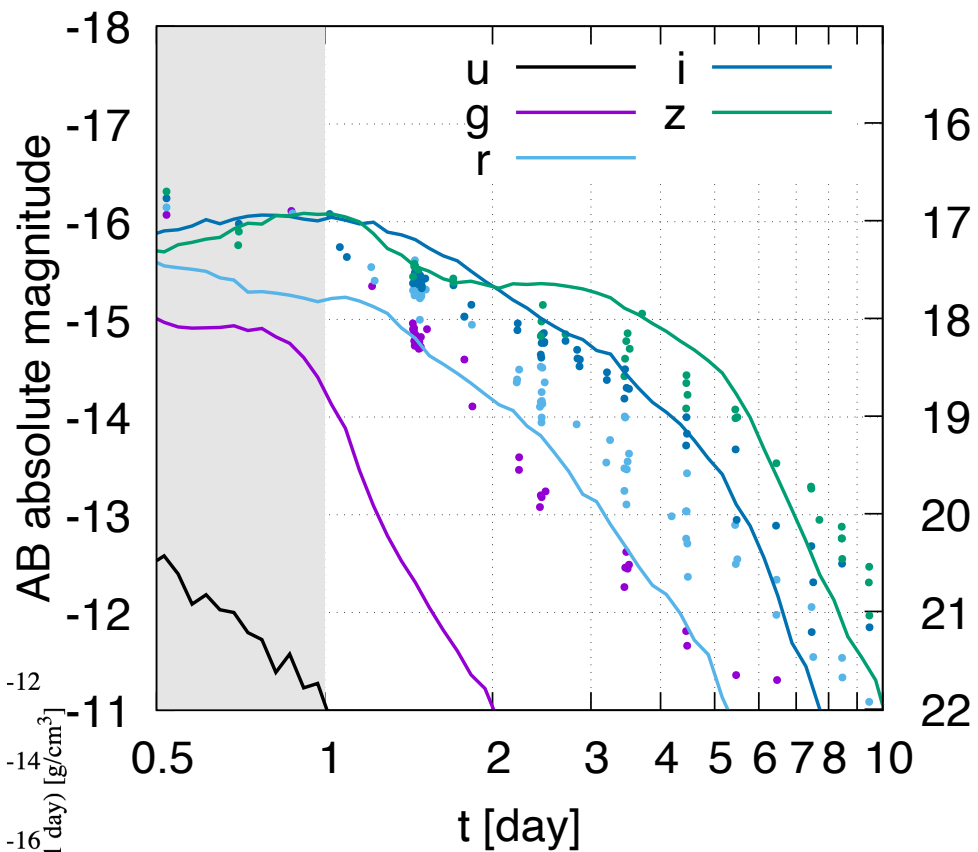
- 多波長モンテカルロ 輻射流体計算コード
(M. Tanaka et al. 2013, 2014, 2017, Kawaguchi 2018, 2020)
 - 0.1 dayから30dayまでの光度曲線を計算
- Hydro計算の $t=0.1$ dayにおけるスナップショットを homologous expansion を仮定して使用
 - Hydro計算で得られた流体の internal energy を 初期時刻の温度、photon energy に使用
- 各点の元素組成、heating rate は 各流体素片の injection time, angle を参照して 元素合成のデータから決定。
 - heating rate には Barnes et al. 2016 の thermalization efficiency の表式を使用。
- line list は $Z=26\sim 92$ については Tanaka et al 2020 のもの、 $Z<26$ については Kurucz & Bell 1995 を使用。
(3階電離イオンまでのラインを考慮)
- 原子の励起・イオン化状態は radiation energy density から決まる温度に対する LTE を仮定 (Saha の式で決める)



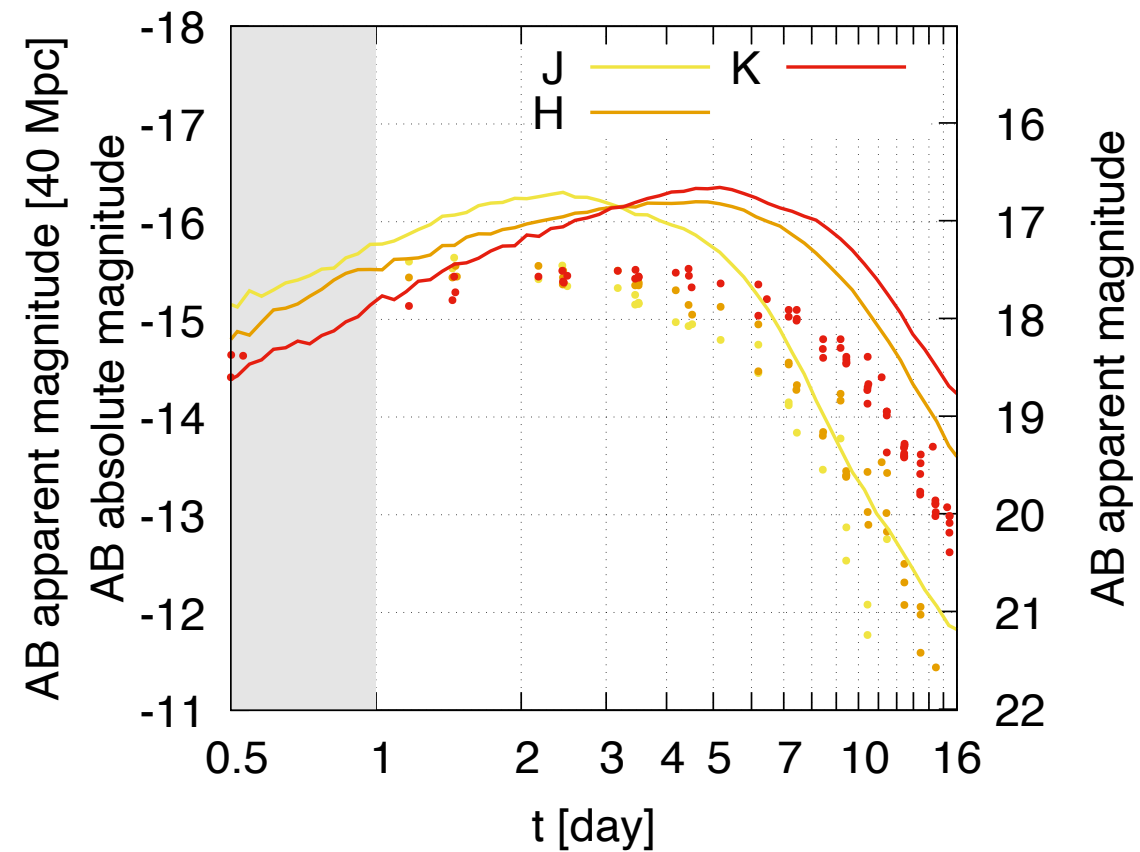
BroadBand magnitudes

Data points: GW170817/AT2017gfo (Villar et al. 2017)

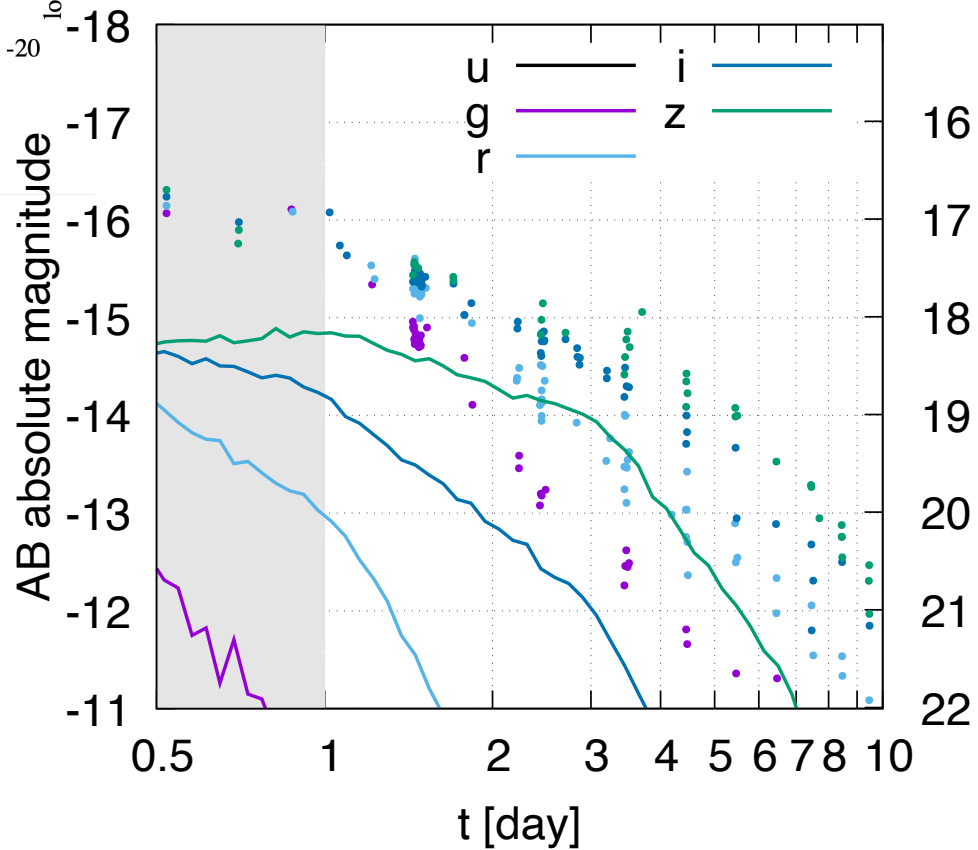
$0^\circ \leq \theta < 20^\circ$



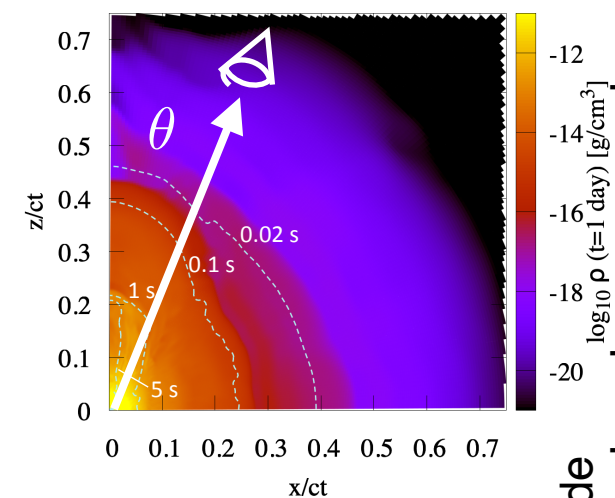
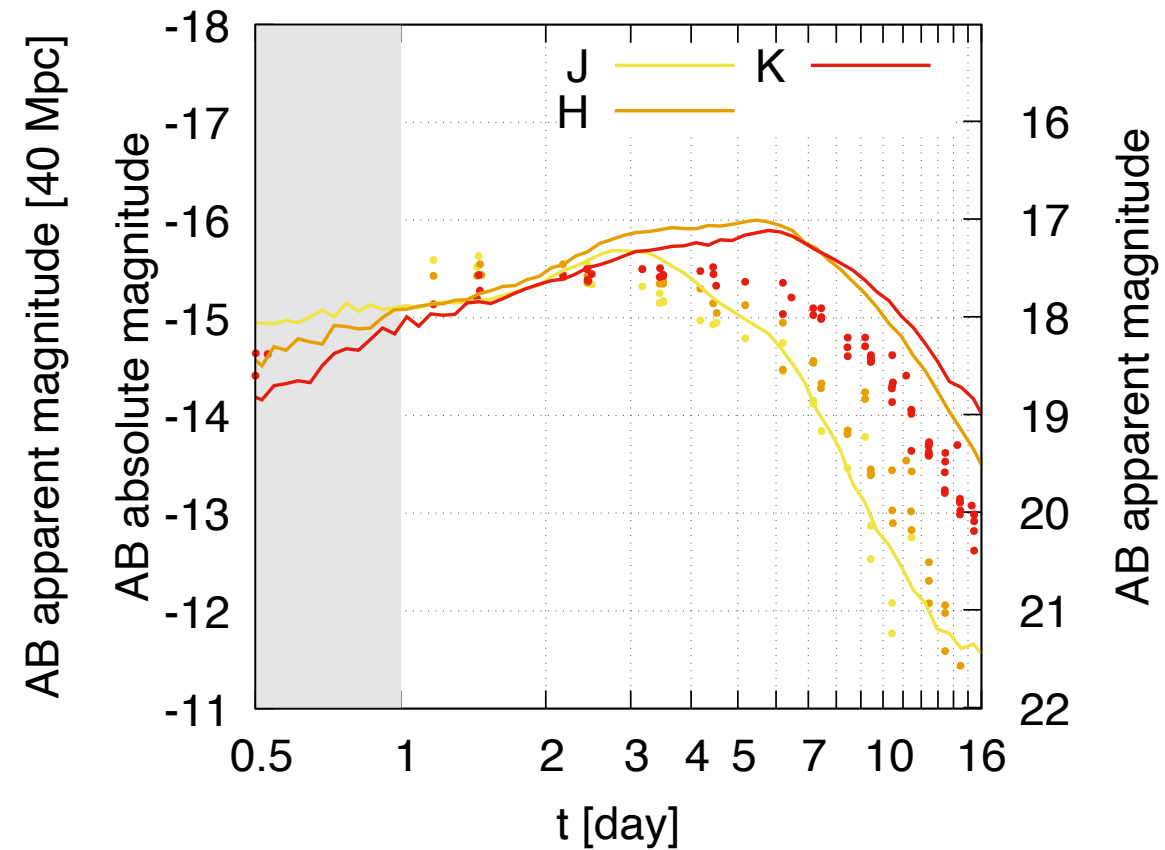
$0^\circ \leq \theta < 20^\circ$



$86^\circ \leq \theta < 90^\circ$



$86^\circ \leq \theta < 90^\circ$

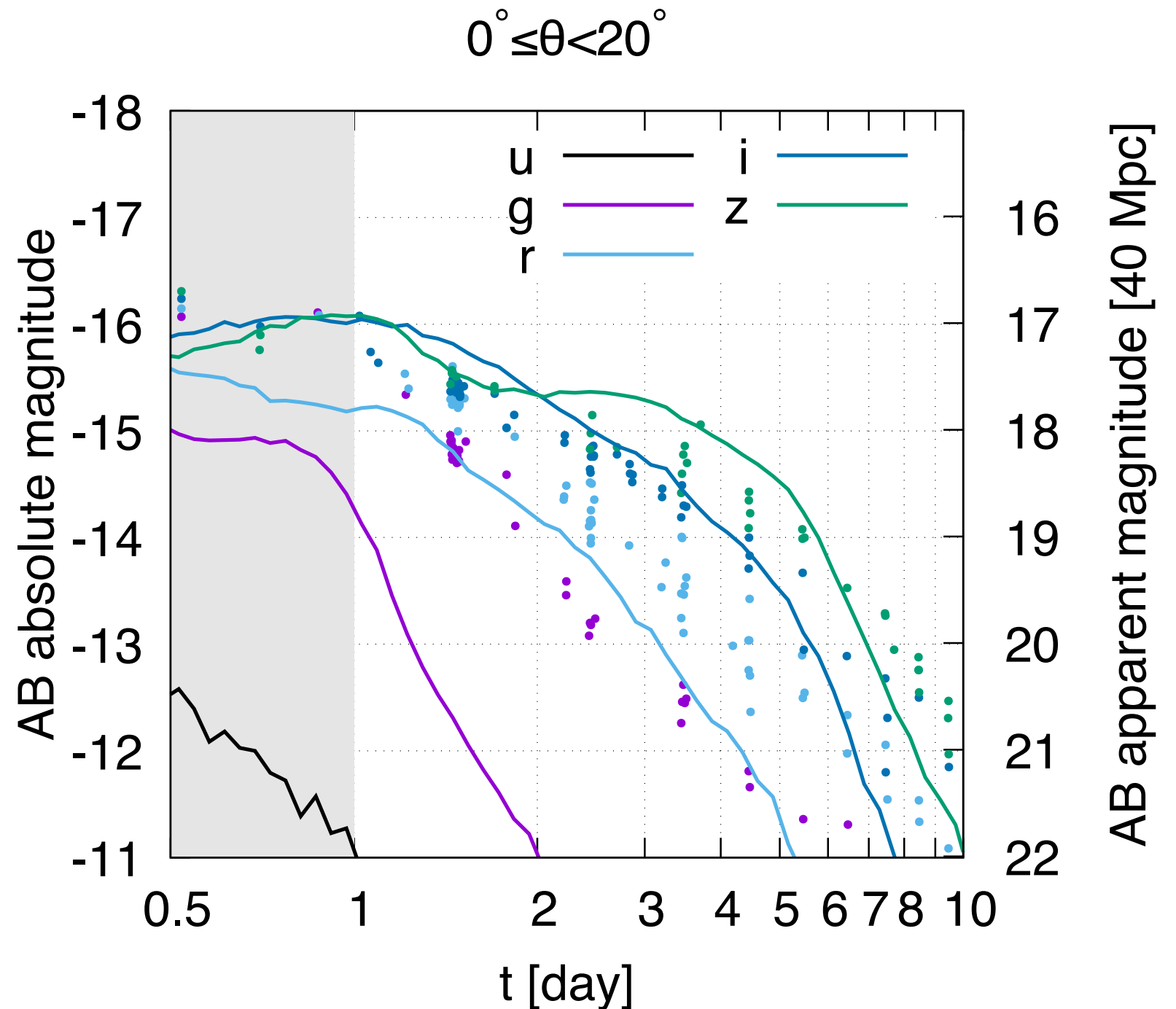
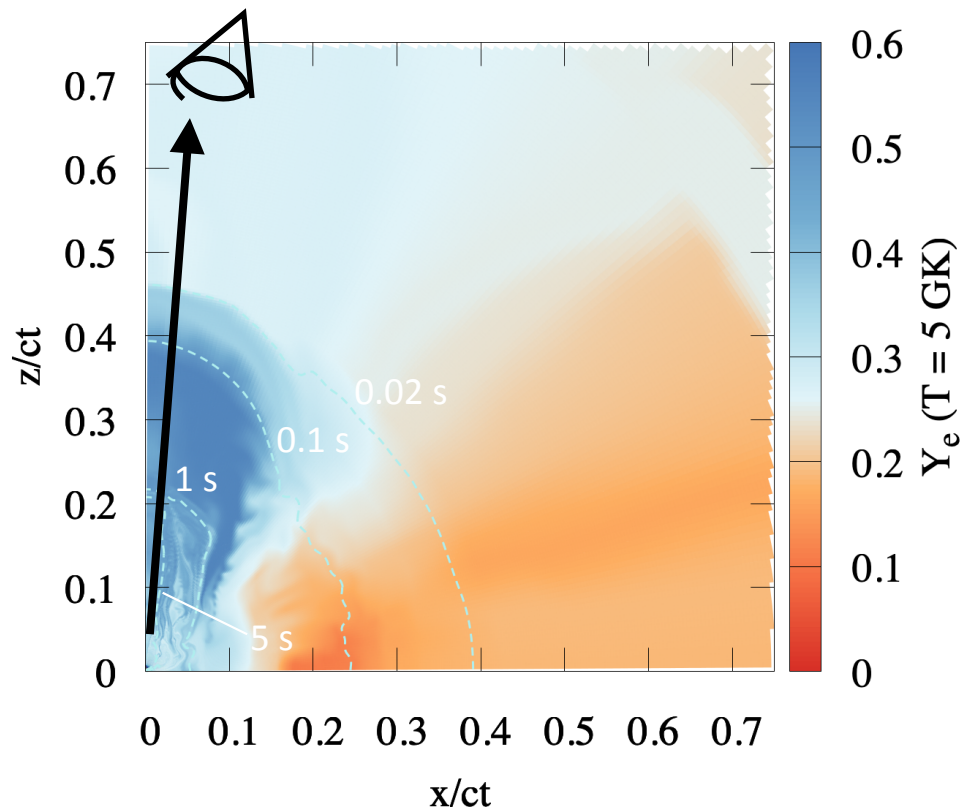


Polar方向はHigh-Ye/lanthanide free。
 だけど青く (optical で明るく) ない！

$$M_{\text{eje}} = 0.096 M_{\odot}$$

$$v_{\text{rms}} = 0.08 c$$

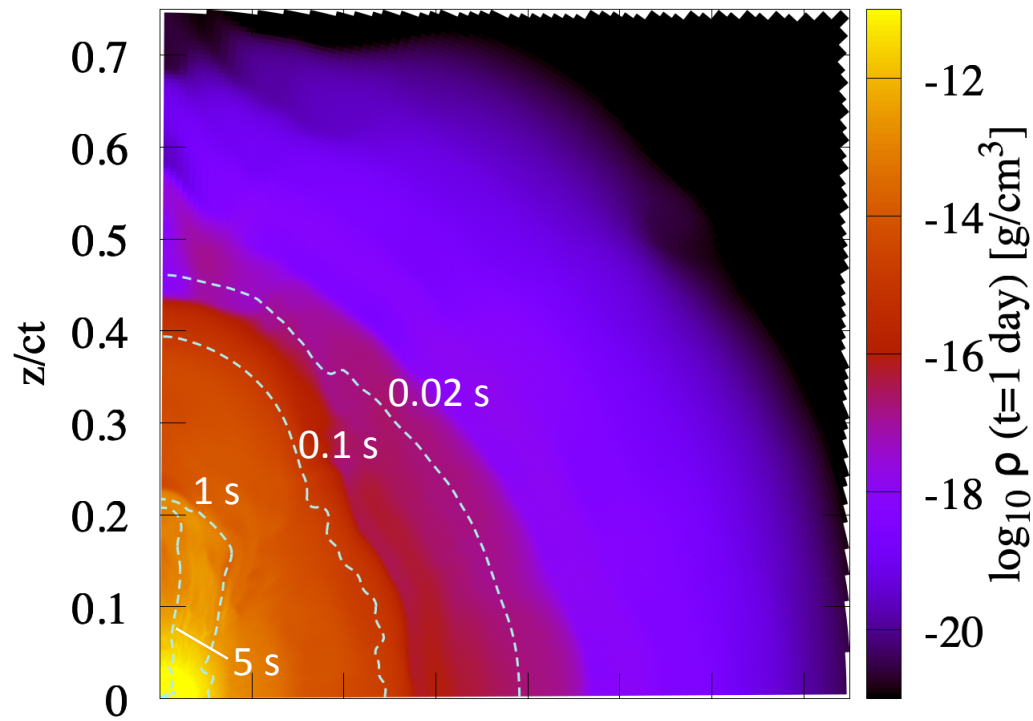
$$X_{\text{lan}} = 0.0045$$



- Polar方向にはHigh-Ye(lanthanide free)でejecta質量も十分あるにもかかわらず GW170817/AT2017gfoよりもoptical (g,r-band)で暗い

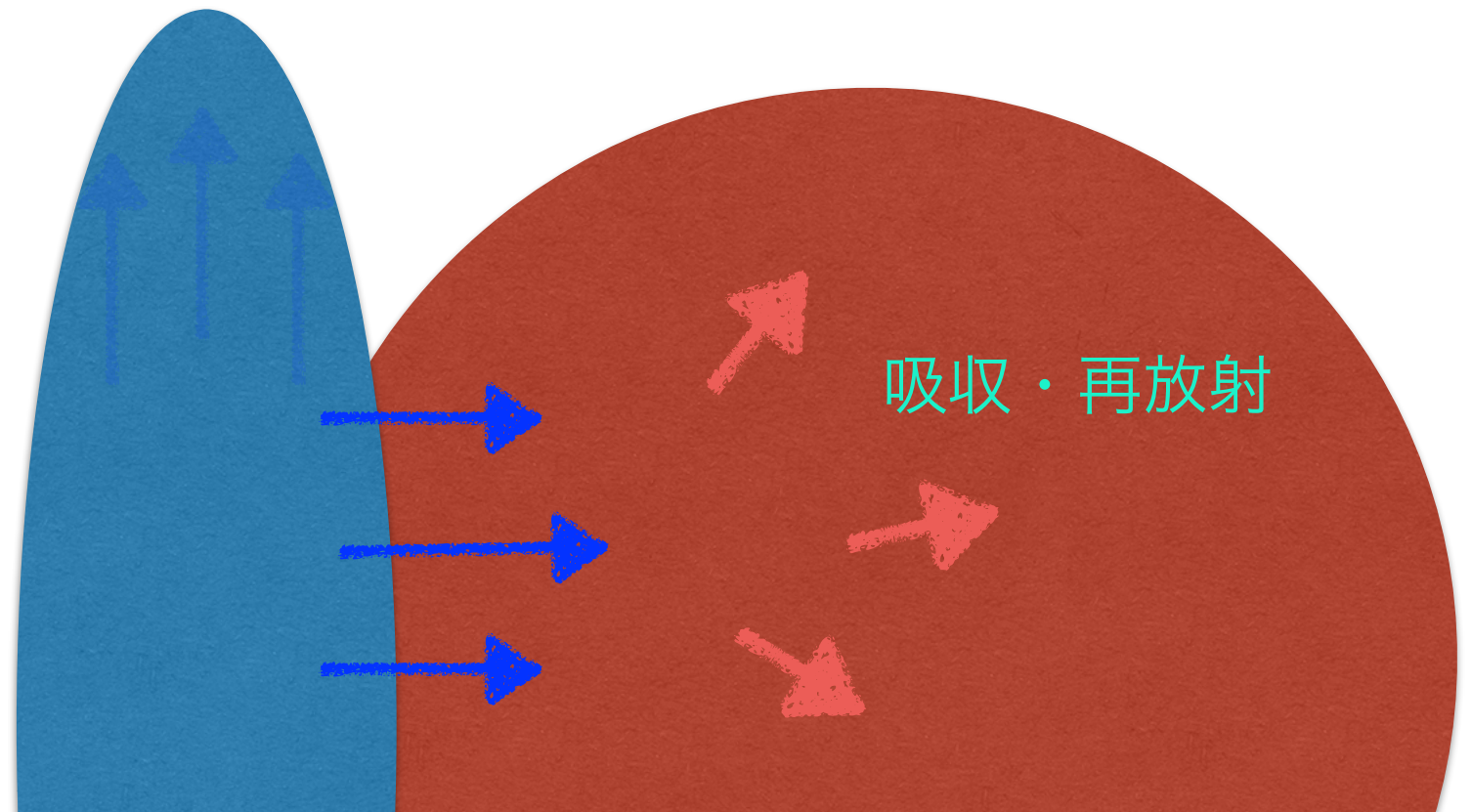
理由 1 : Prolate shape

Density

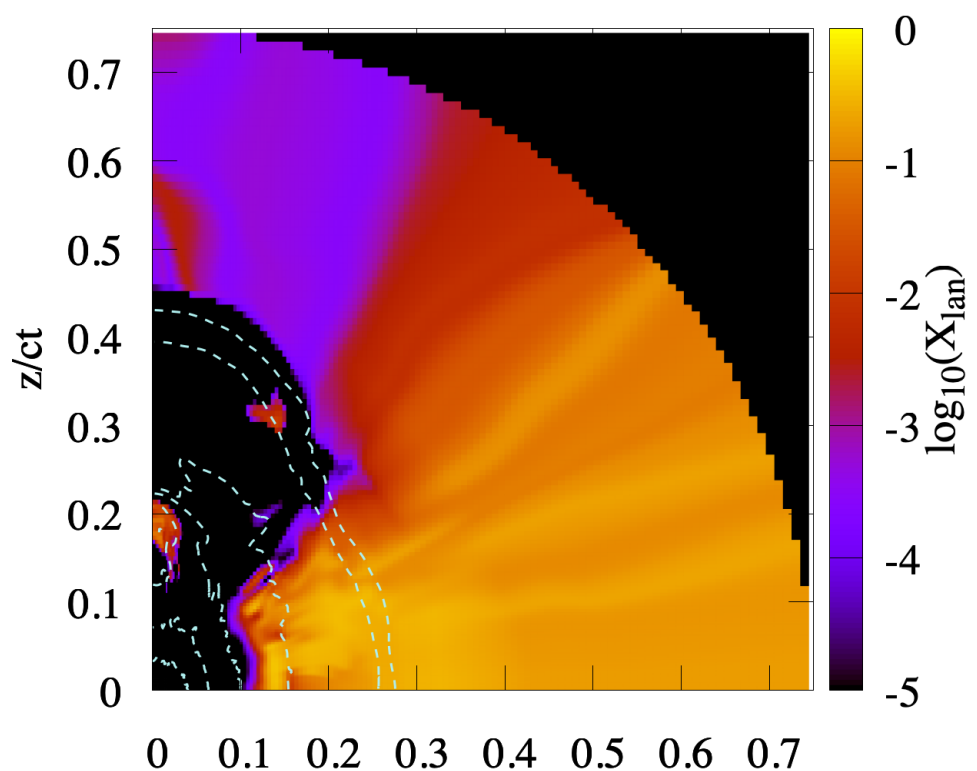


polar方向

diffusion time: long



Lanthanide mass fraction



equatorial 方向

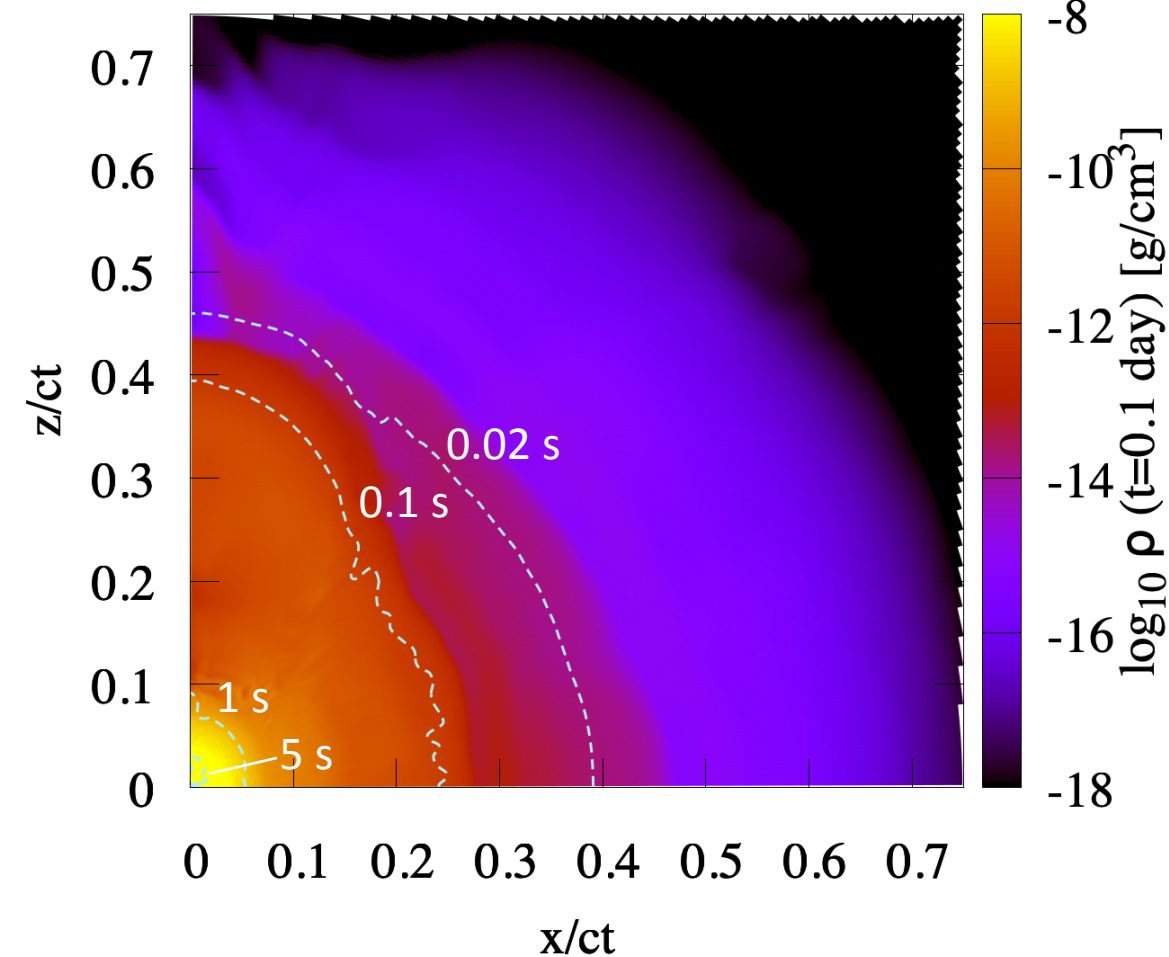
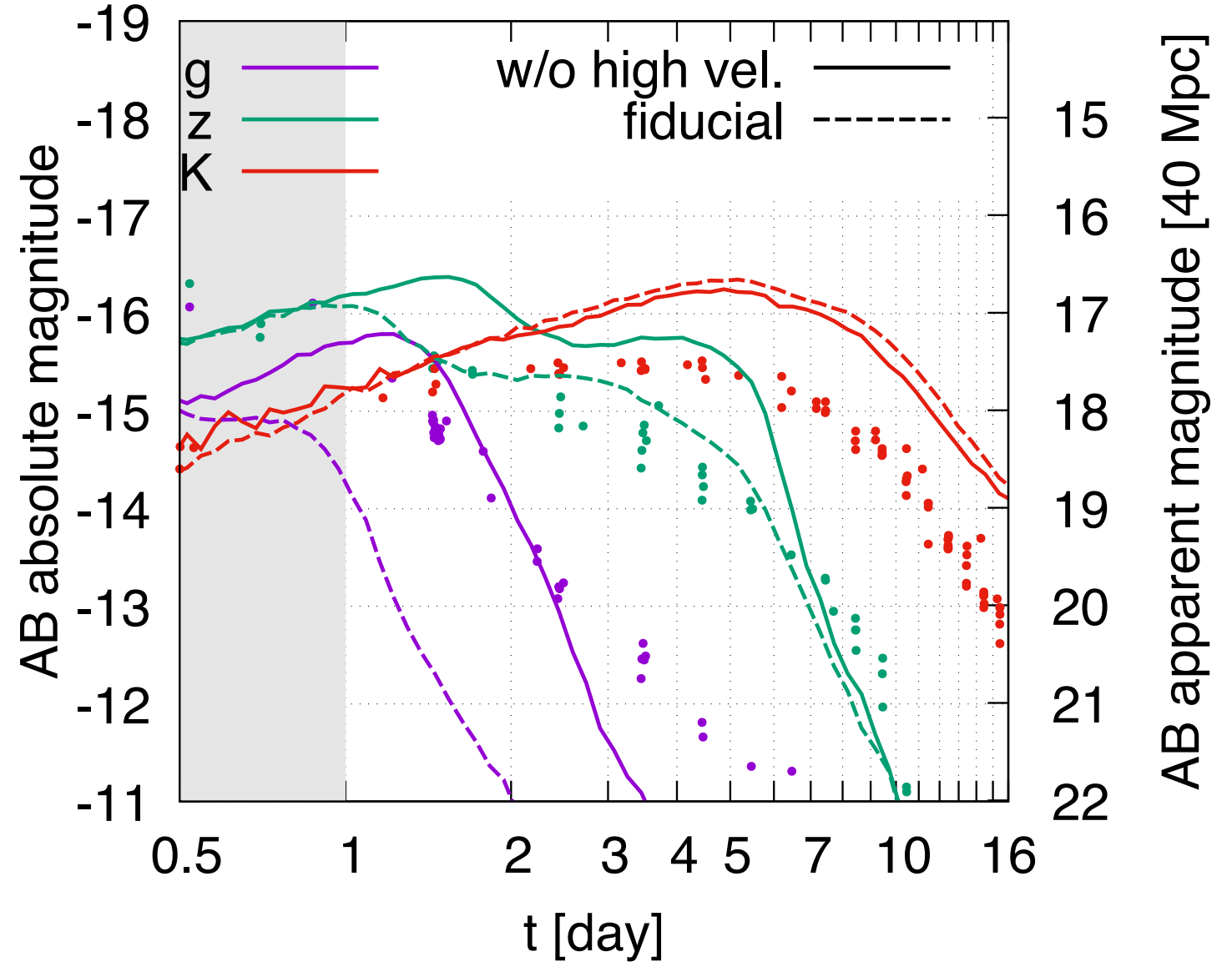
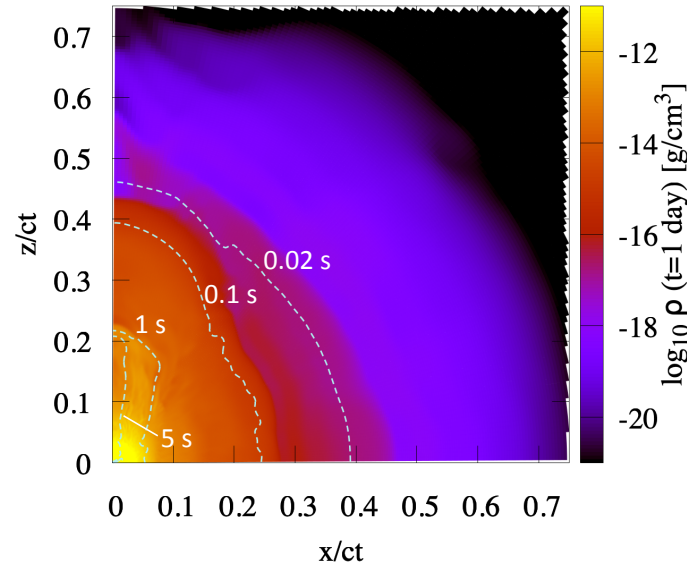
diffusion time: short

equatorial region
lanthanide-rich
diffusion time: long

- Prolateな形状のため中心領域からのphotonはequatorial方向によりdiffuseする
- →equatorial方向にあるlanthanide-richな領域に効率的に吸収されてしまう

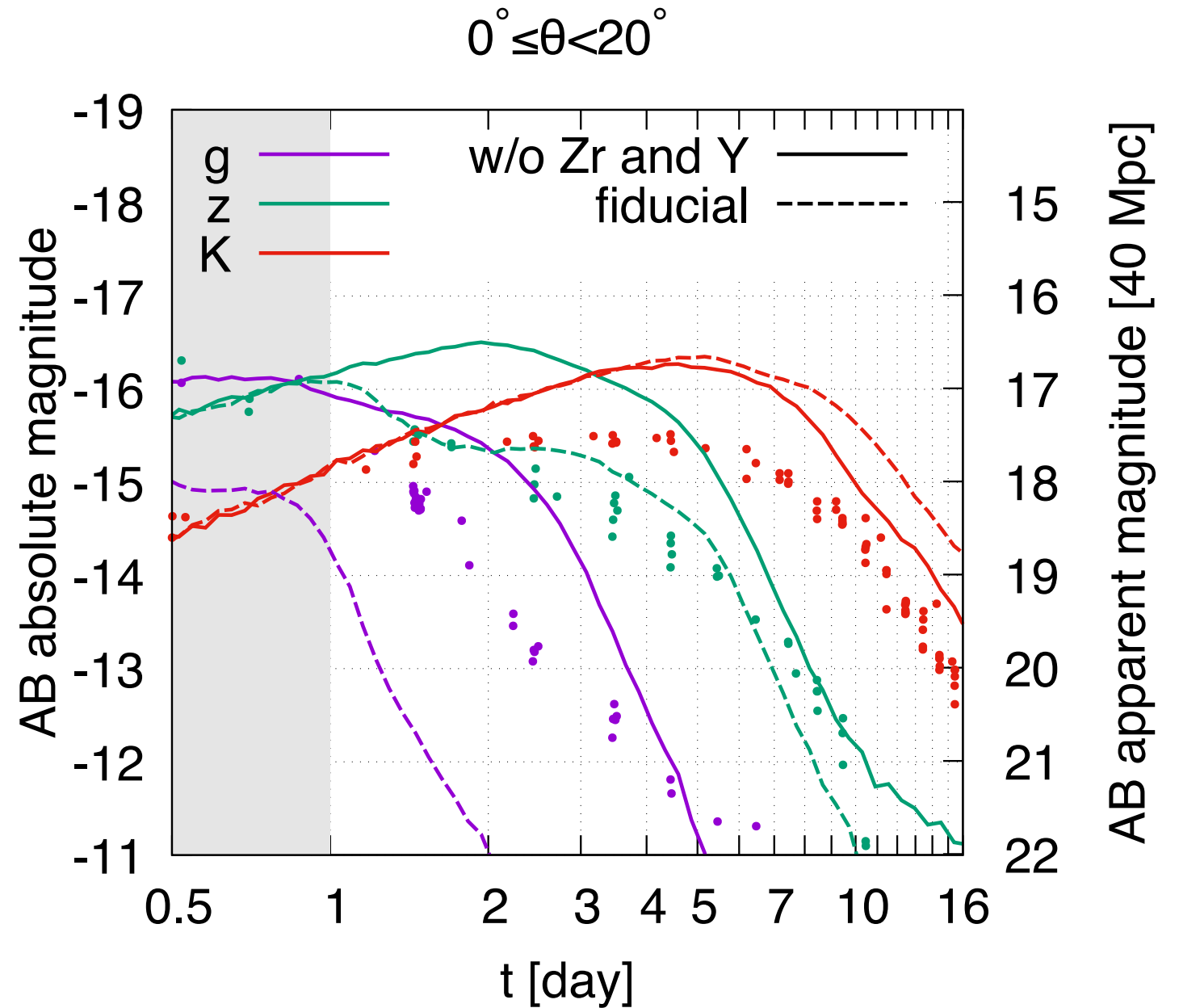
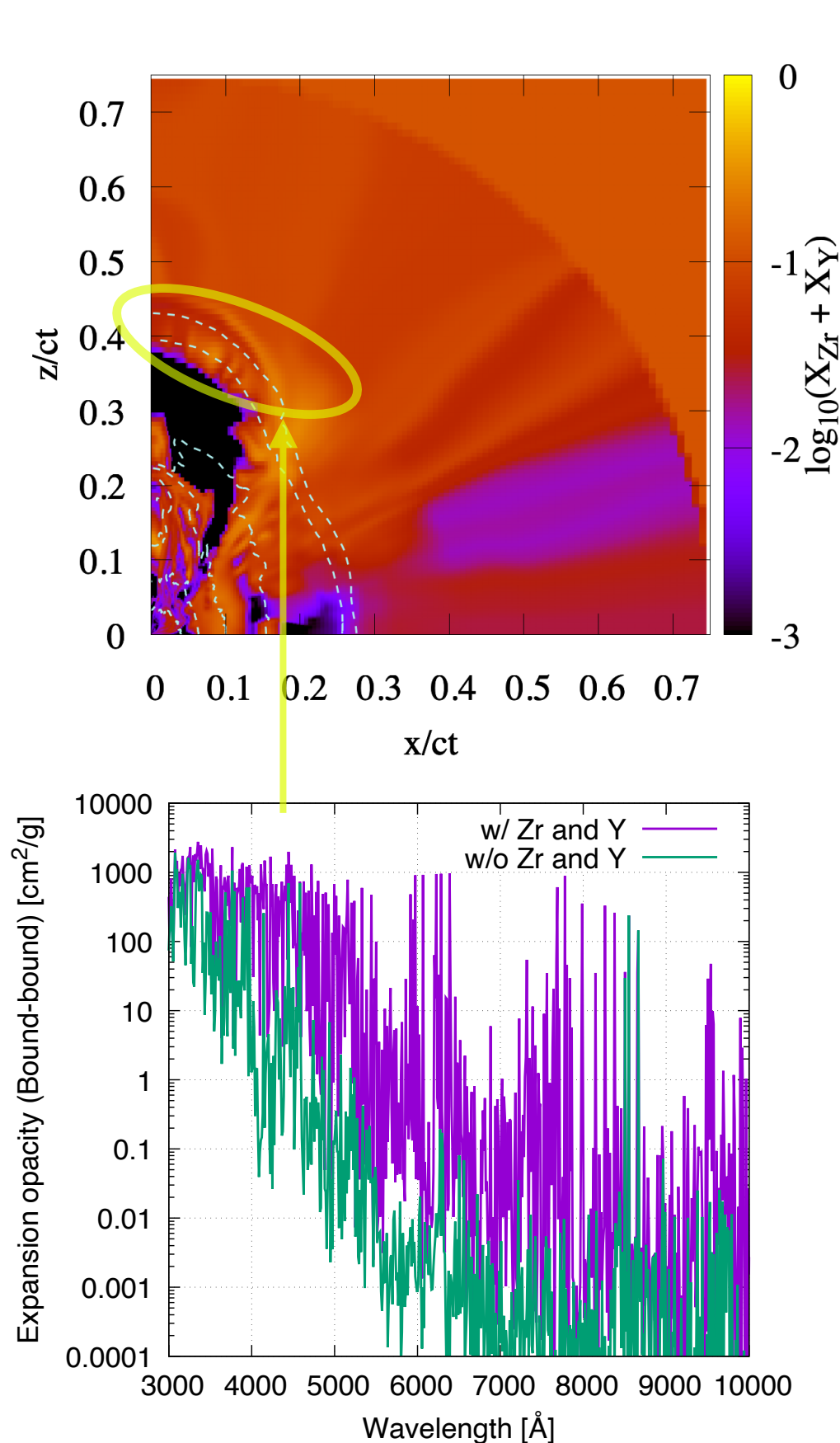
Polar方向のoutflowを途中で切った場合

$0^\circ \leq \theta < 20^\circ$



- 200ms以降Polar方向($\theta < 30^\circ$)のoutflowを止めたモデルでは中心の構造がsphericalになり
- polar方向にもphotonがより抜けるようになりoptical photonが増える

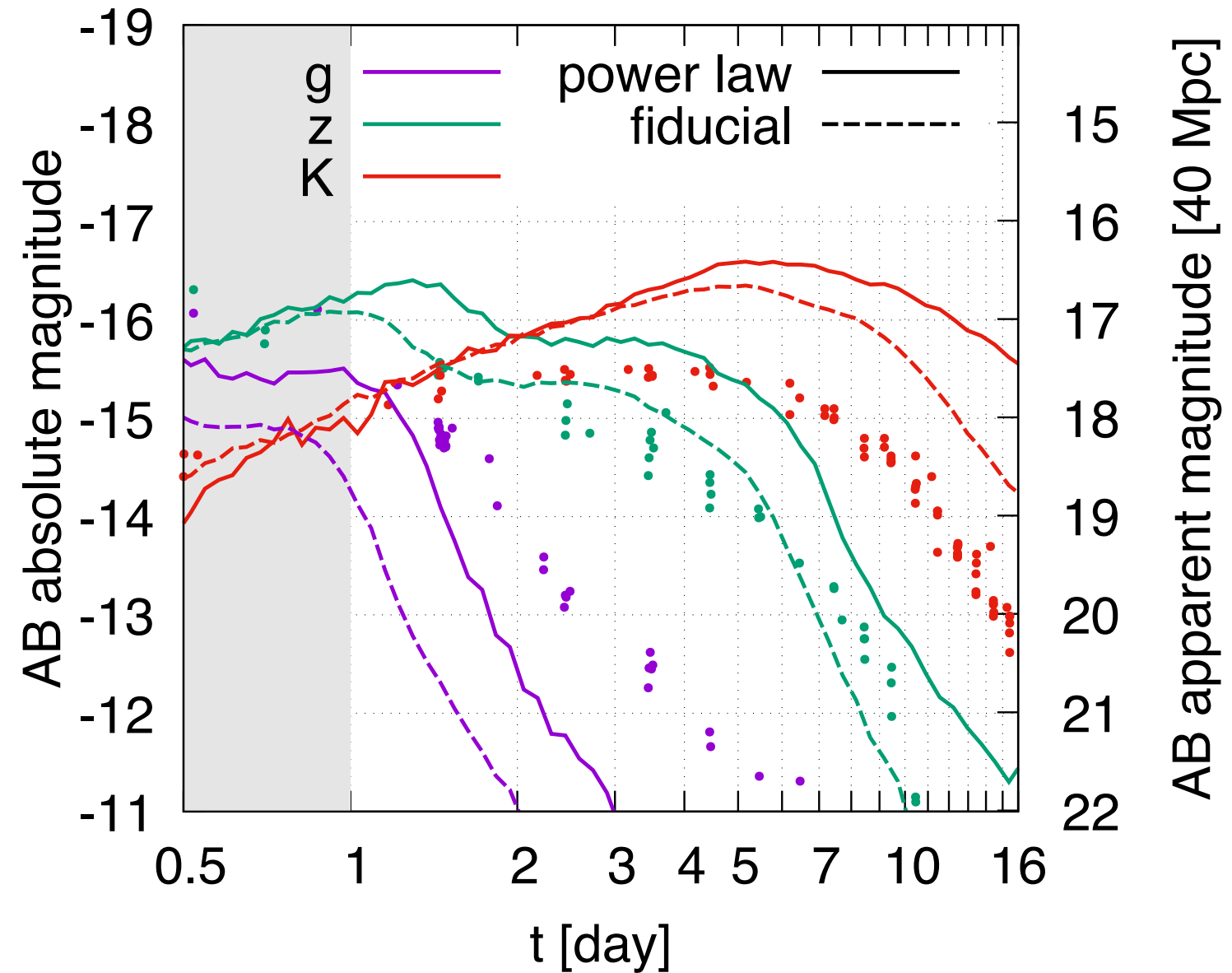
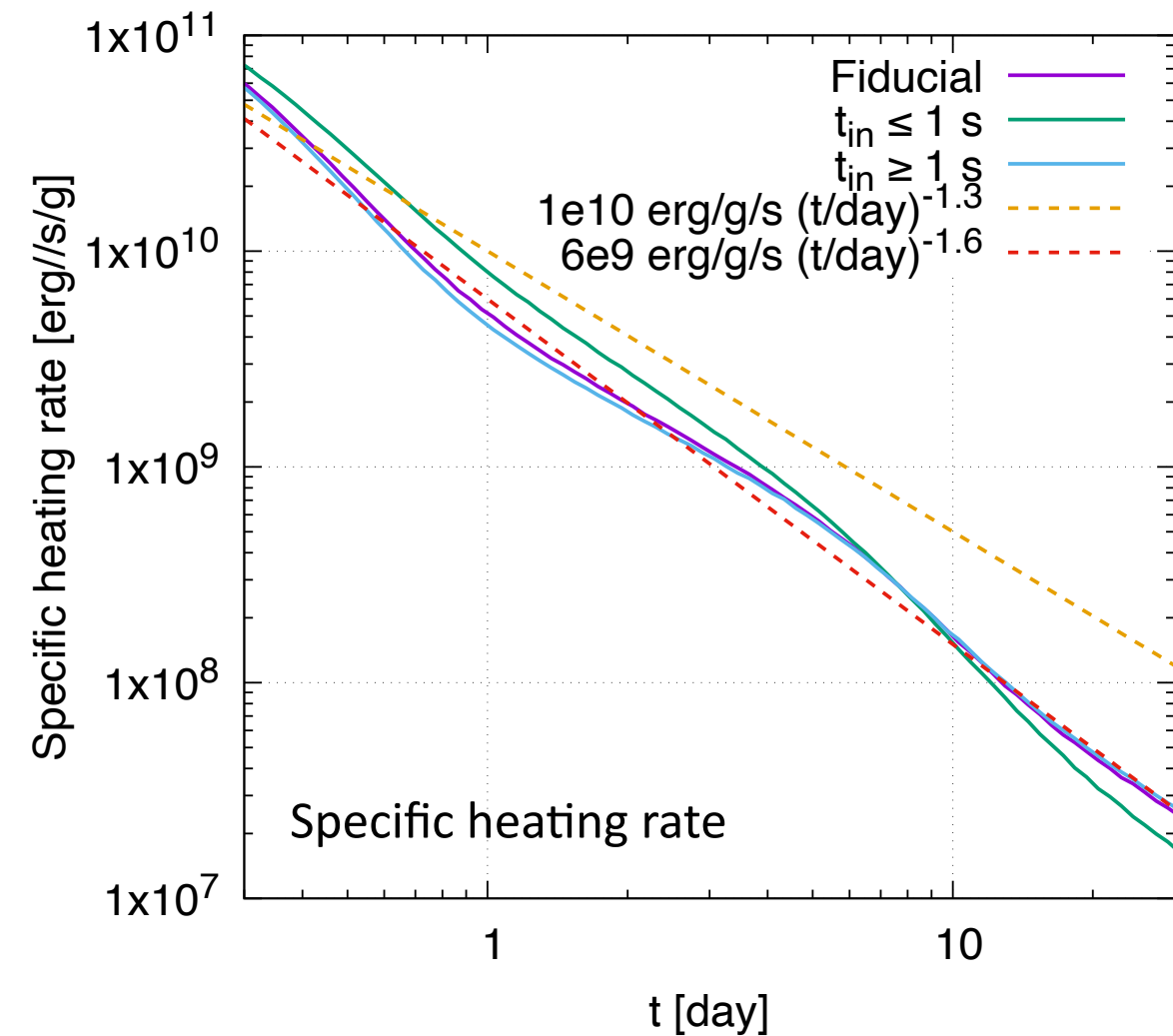
理由 2 : 1st peak元素のopacity



- 1st r-process peak元素であるZr($Z=40$)やY($Z=39$)がpolar high velocity edgeに多く存在
ZrやY (d-shell element) はoptical photonに対するopacityに大きく寄与する

理由 3 : low heating rate

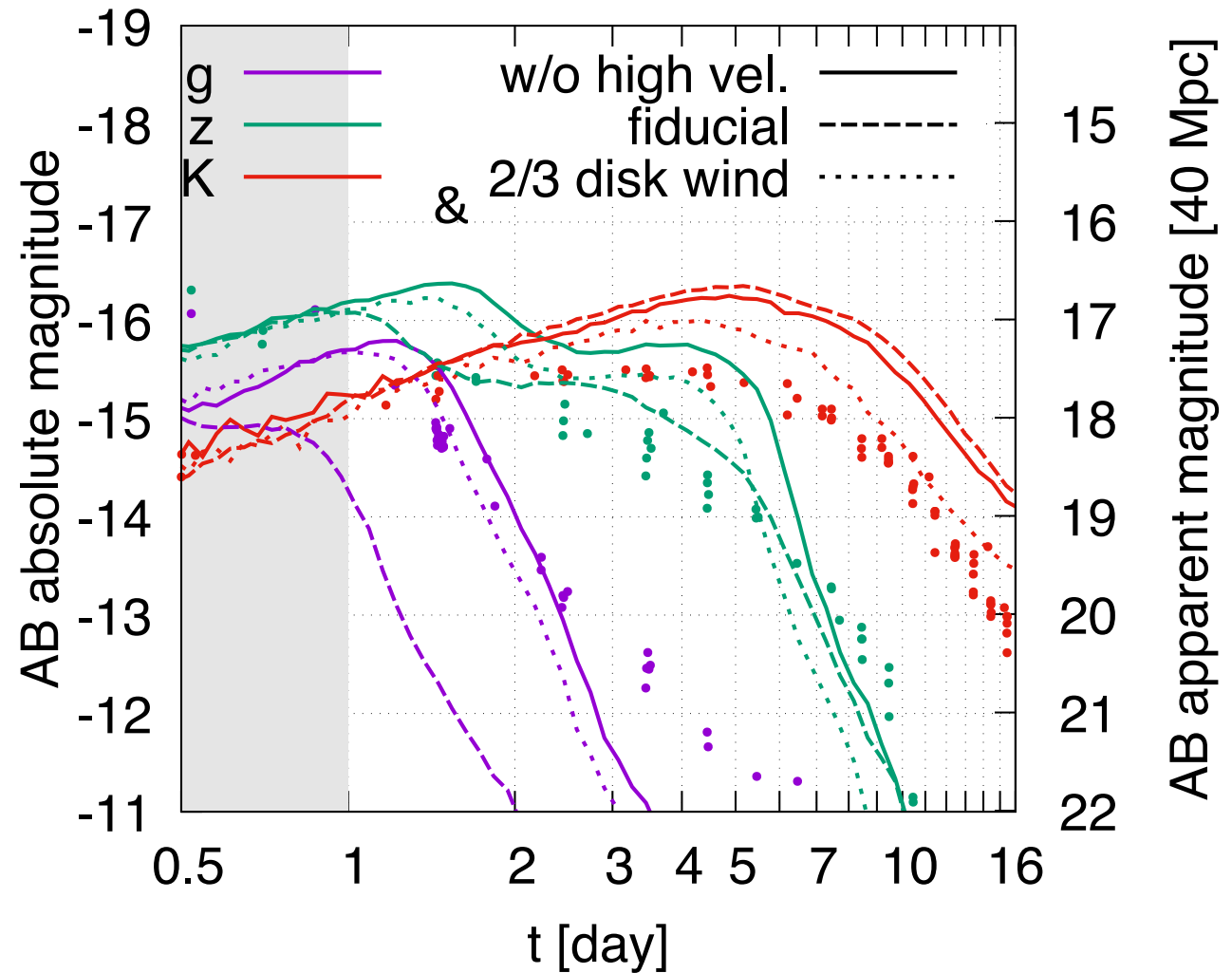
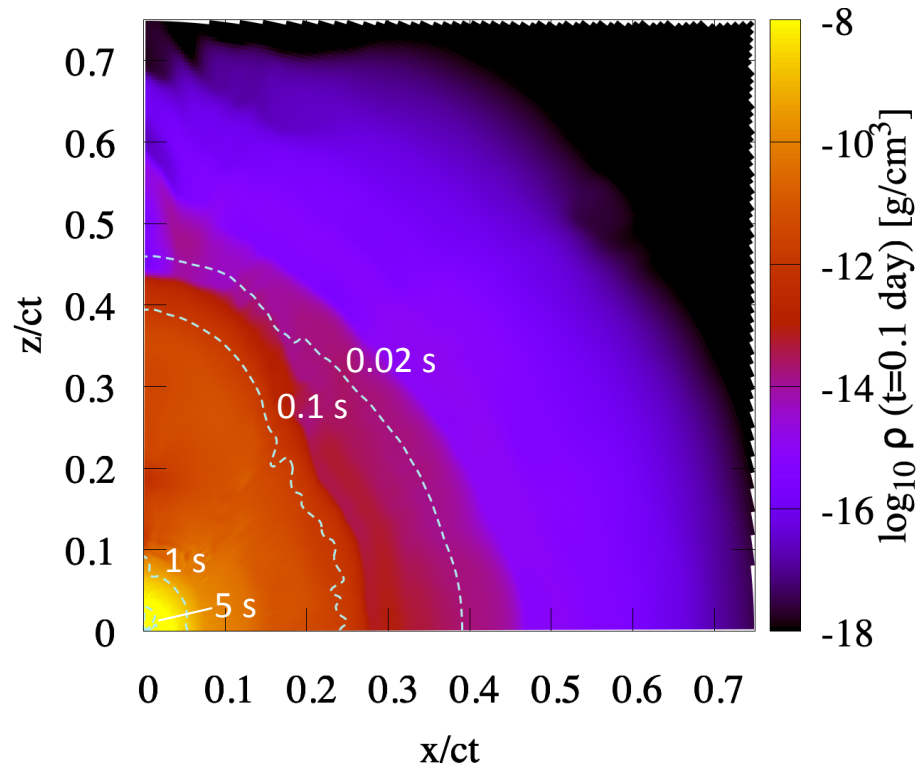
$0^\circ \leq \theta < 20^\circ$



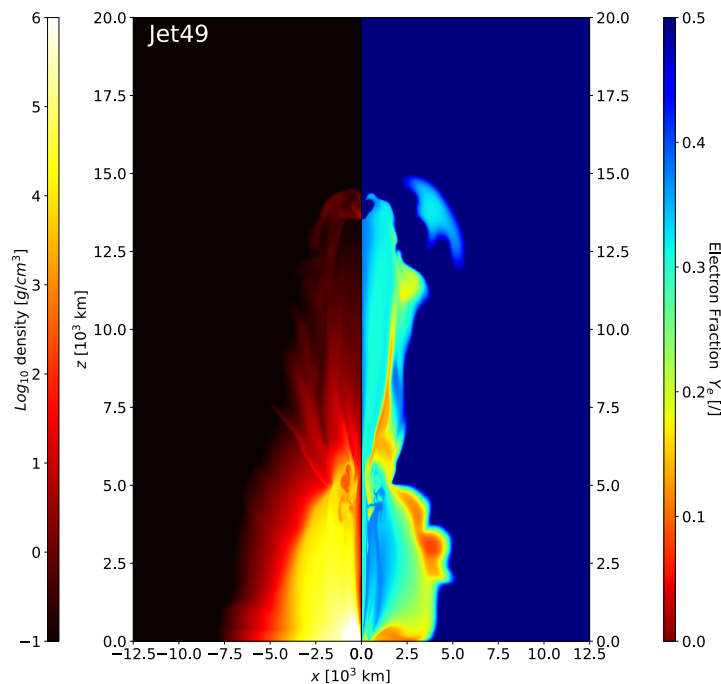
- High-Yeになると熱源となる放射性同位元素種の生成がへり、
ejectaの加熱率が十分r-processが起こった場合(Low Ye, ~ 10 erg/g/s (t/day)^{-1.3})に比べ小さくなる

Comparison with AT2017gfo

$0^\circ \leq \theta < 20^\circ$



ref) Nativi et al. 2020



- opticalで明るい成分の存在はremnant Massive NSがBHにcollapseしたことを示唆しているかもしれない：
 - ν irradiationがsuppressされることでpolar方向のhigh velocity成分が小さくなり、optical成分がenhanceされる
 - collapseしない場合時と比べてdisk windの量も少し減少し、赤外線成分の超過も抑えられる
- 相対論的ジェットに伴うcocoonによってZrやYといったopacity sourceが吹き飛ばされて明るくなる可能性も (see also Nativi et al. 2020)

まとめ

- 中性子星連星合体の数値相対論シミュレーション(DD2-125M, Fujibayashi et al. 2020)の結果を用いて、放出物質の長期流体進化を調べた。
 - 放出物質（特に質量で支配的な $<0.2 c$ ）は**prolateな形状**を示す
← v irradiationによるpolar方向の物質の加速が要因の一つ
- 得られた放出物質密度・元素分布・加熱率を用いて、輻射輸送計算を行い、kilonova光度曲線を予測、その性質を調べた。
- **Polar方向はHigh-Ye (lanthanide-free)であるが、その方向からみたemissionは必ずしもblue（可視光波長）で明るくならない：**
 - prolateな放出物質形状による赤道面方向へよりphotonがdiffuse、lanthanide-richな領域に効率的に吸収
 - 比較的大きなopacityを持つ1st r-process peak元素（Y, Zr）による吸収
 - High-Yeな物質の加熱率の低さ
- remnant MNSが短い時間スケール（ $\sim 0.1s$ ）BHへcollapseした場合、polar方向の物質が加速（prolateな形状の原因）が抑制されると考えられる
→**GW170817/AT2017gfoで観測された明るいoptical成分の存在は remnant MNSがBHへcollapseしたことを示唆しているかもしれない**