

2010年度第40回天文天体物理若手 夏の学校

超新星残骸中の流体不安定性 による物質混合

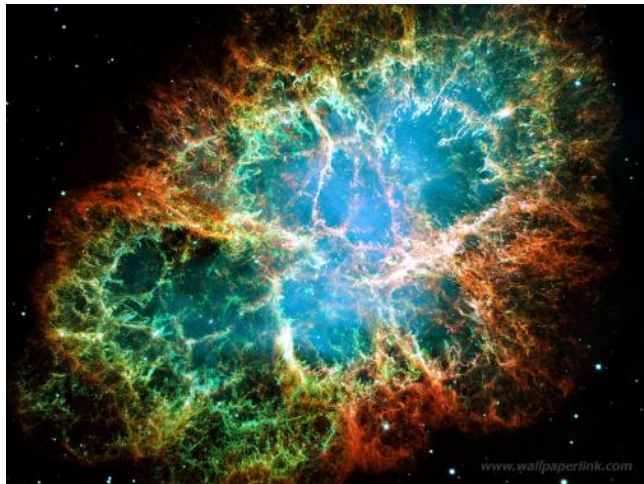
松尾 康秀、橋本正章、小野勝臣 (九州大学)

超新星残骸

< 超新星残骸 >

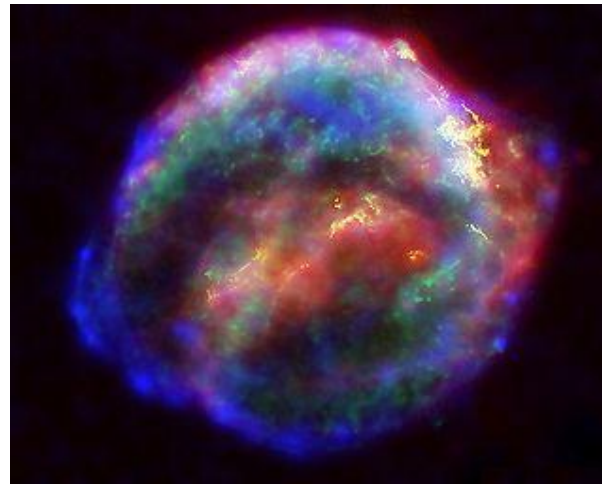
星の外層が超新星爆発により吹き飛ばされ、爆発の際の衝撃波によって星周物質を加熱し、輝いている天体。

かに星雲



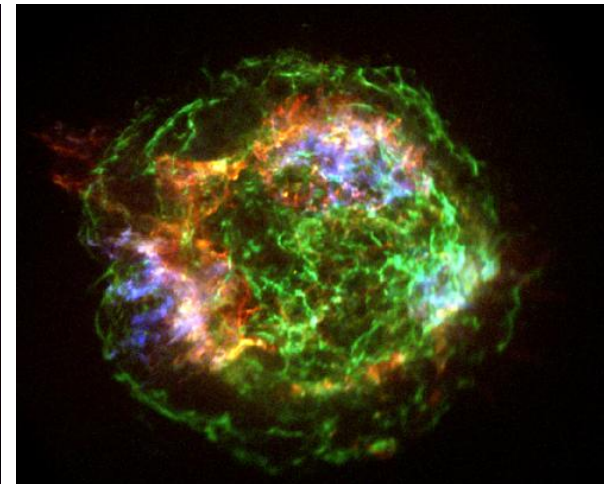
<http://www.spacetelescope.org/Images/large/heic0515a.jpg>

Kepler



http://apod.nasa.gov/apod/image/0410/kepler_CxoHstSt_comb.jpg

Cas A



Hwang et al. 2004

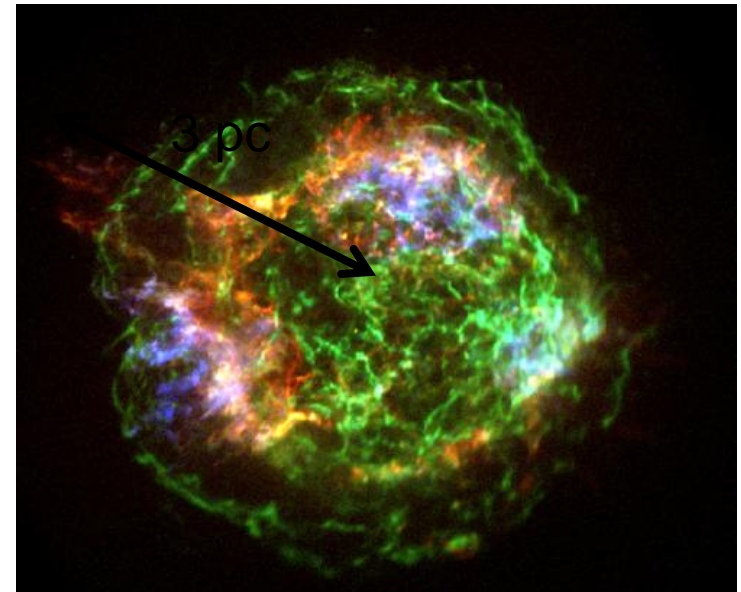
超新星残骸Cassiopeia A (Cas A)

<超新星残骸 Cassiopeia A>

- ・距離 : 3.4 kpc (Reed et al.1995)
- ・大きさ : 2~3 pc
- ・年齢 : 330年程度 (Fesen 2006)

- ・爆発エネルギー・・・ 2×10^{51} erg
- ・Forward shock の位置
2.5 ± 0.2 pc
- ・Reverse shock の位置
1.6 ± 0.2 pc
- ・Jet状の構造が見られる
- ・Type IIbの爆発

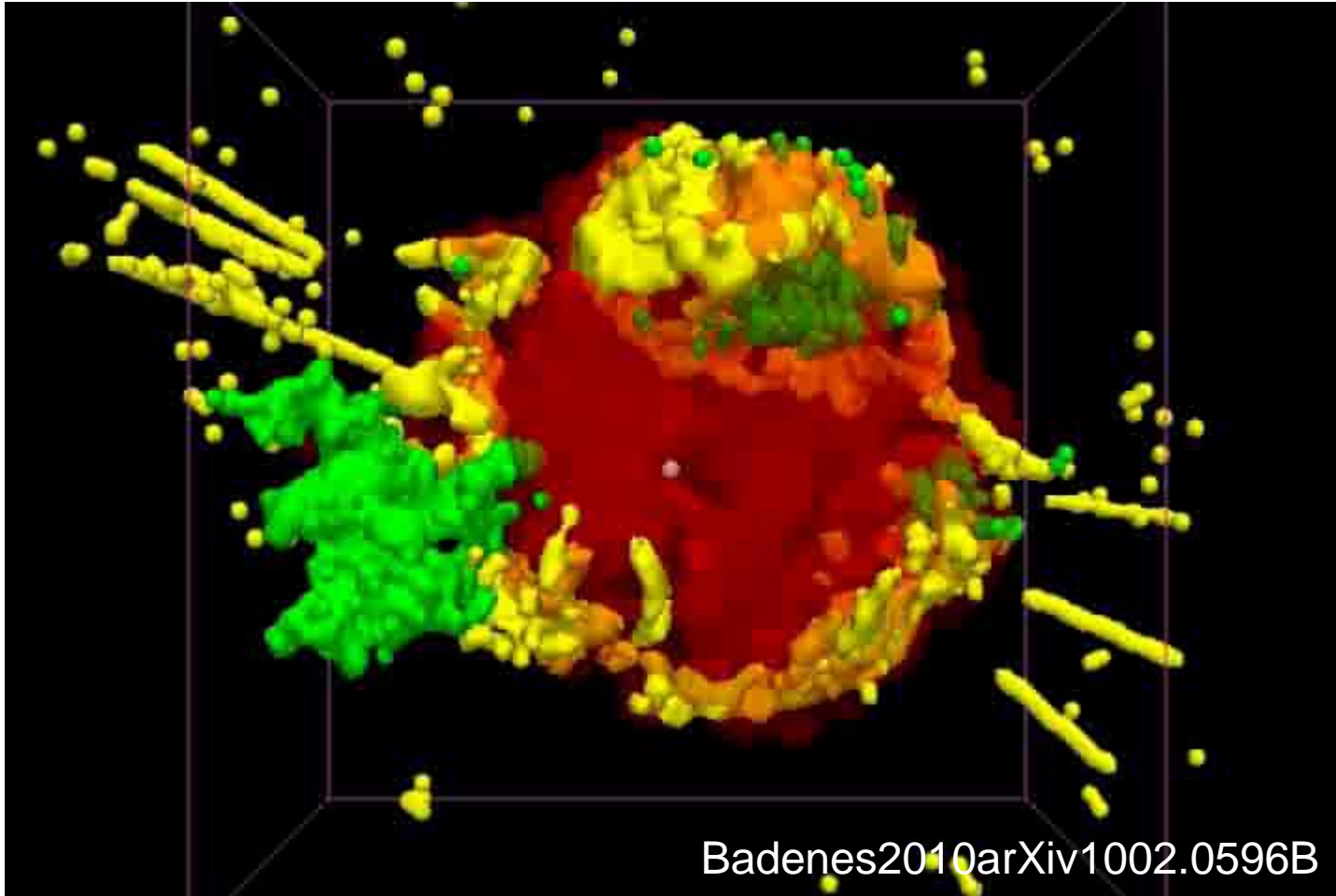
Cas A (X線)



Hwang et al. 2004

超新星残骸の元素分布

Cas A (X線衛星 Chandra)



黄色: Si、Ar
緑: Fe

Motivation

現在の研究状況は・・・

<観測>

- ・超新星残骸の3次元的な元素分布も明らかになりつつある

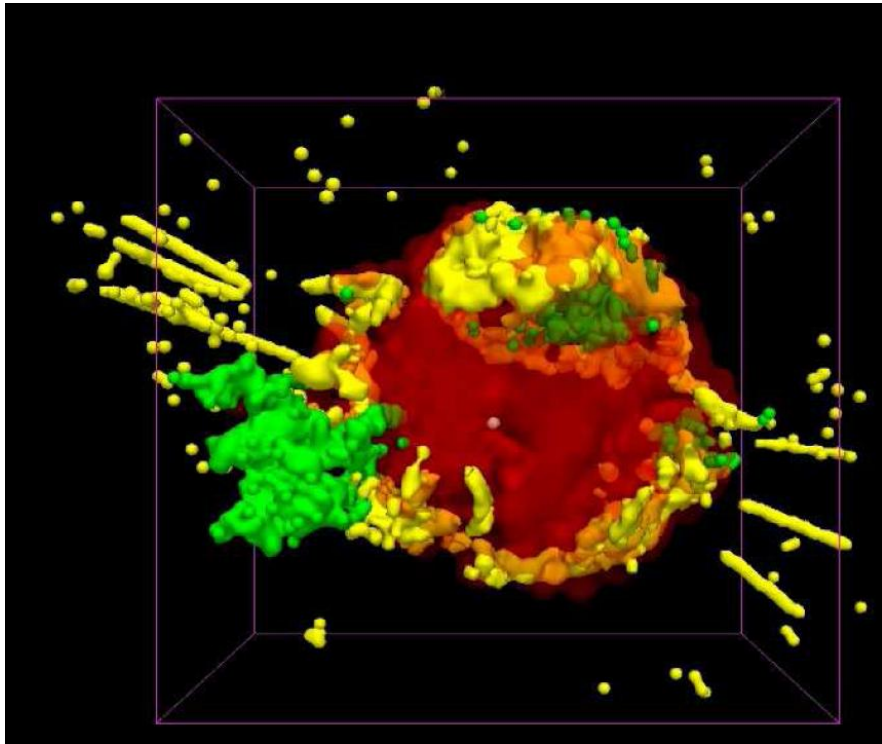
<理論>

- ・元素分布の議論はほとんどされていない。

- ・我々は超新星残骸の重元素分布を議論する。

Fe、Siの物質混合

Cas A (X線衛星Chandra)



Feの方がSiよりも**外側**にある領域がある。(Vink et al. 2004)



FeとSiの強く混合を受けた

赤: unshocked ejecta

黄色: Si、Ar

緑: Fe

Fe, Siの物質混合メカニズムの候 補

<Rayleigh-Taylor不安定性>

- ・地球上では軽い流体の上に重たい流体を乗せたような状態で起こる

<SASI (Standard Accretion Shock Instability) >

- ・衝撃波がFe coreで停滞しているときに発達する

本研究では・・・

爆発直後から超新星残骸形成まで(330年間)のシミュレーションを行い、Rayleigh-Taylor不安定性によってFe、Siの反転が起こるかどうかが確かめる。

流体の基礎方程式

<基礎方程式系>

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} + \nabla P + \rho\nabla\Phi = 0$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) + P\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$$

<状態方程式>

・光球面の内側(密度の高いところ)

$$P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}} = \frac{R}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4$$

$$e = \frac{3}{2} P_{\text{gas}} + 3P_{\text{rad}}$$

・光球面の外側(密度の薄いところ)

$$P = P_{\text{gas}} = \frac{R}{\mu} \rho T$$

$$e = \frac{3}{2} P_{\text{gas}}$$

<Code>

Zeus2D (Stone & Norman 1992)

超新星爆発シミュレーション

<次元>

- ・1D及び2Dシミュレーション

<解像度>

- ・1000(r) × 100(θ)

<初期モデル>

- ・6M_☉ He core (Hashimoto 1995)

+

薄いH外層(0.08M_☉)

+

Stellar wind

<超新星爆発>

- ・熱エネルギーを注入して爆発を再現

<核反応ネットワーク>

- ・13核種

(⁴He, ¹²C, ¹⁶O, ²⁰Ne, ²⁴Mg, ²⁸Si, ³²S,
³⁶Ar, ⁴⁰Ca, ⁴⁴Ti, ⁴⁸Cr, ⁵²Fe, ⁵⁶Ni)

<Main Parameter>

- ・Wolf-Rayet星であった時間 T_{WR}

T_{WR} = 0 yr, 2000yr

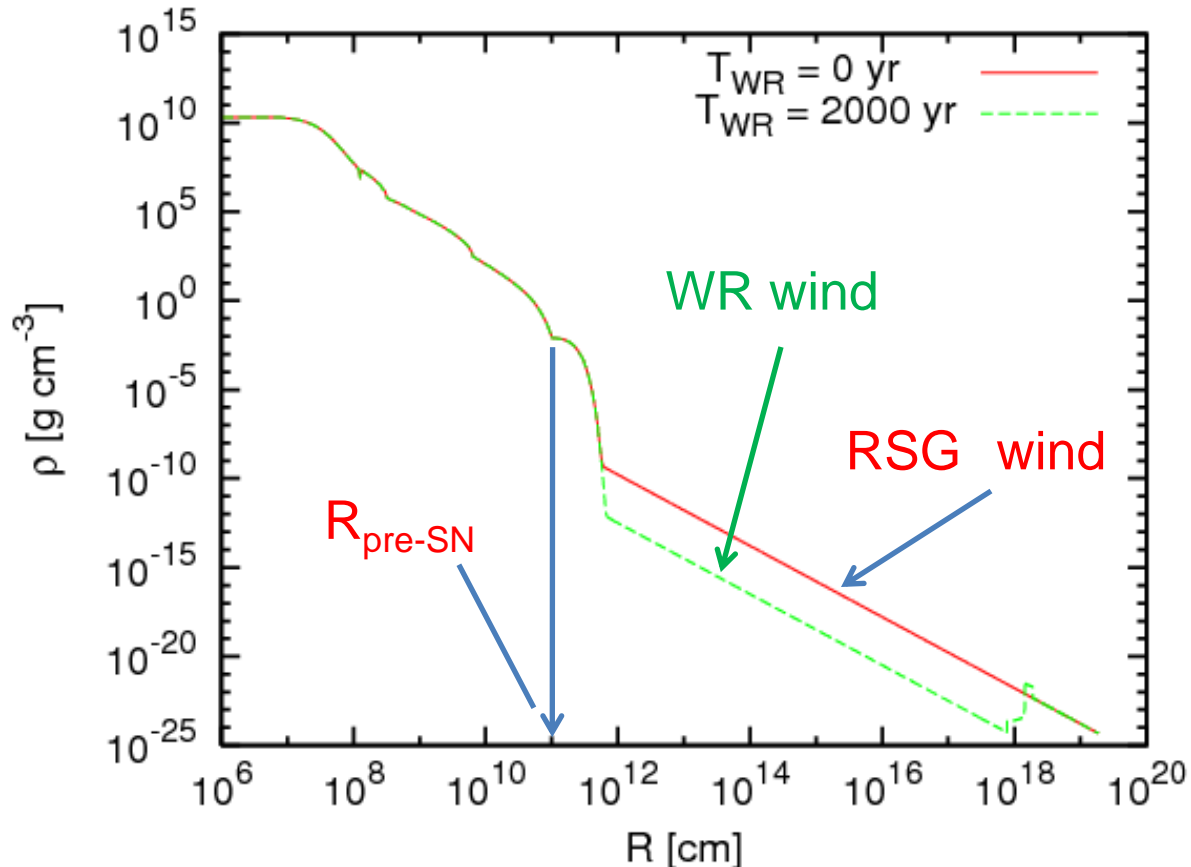
- ・Input Energy E

E = 4 (2,3) × 10⁵¹ erg

初期モデルの密度構造

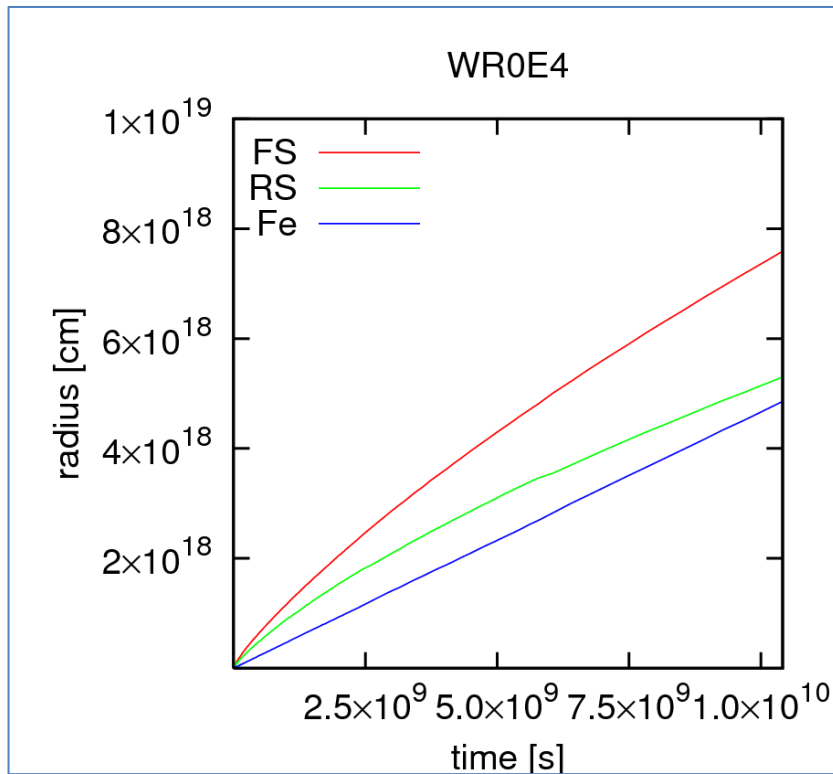
<Parameter>

WR星であった期間： T_{WR}

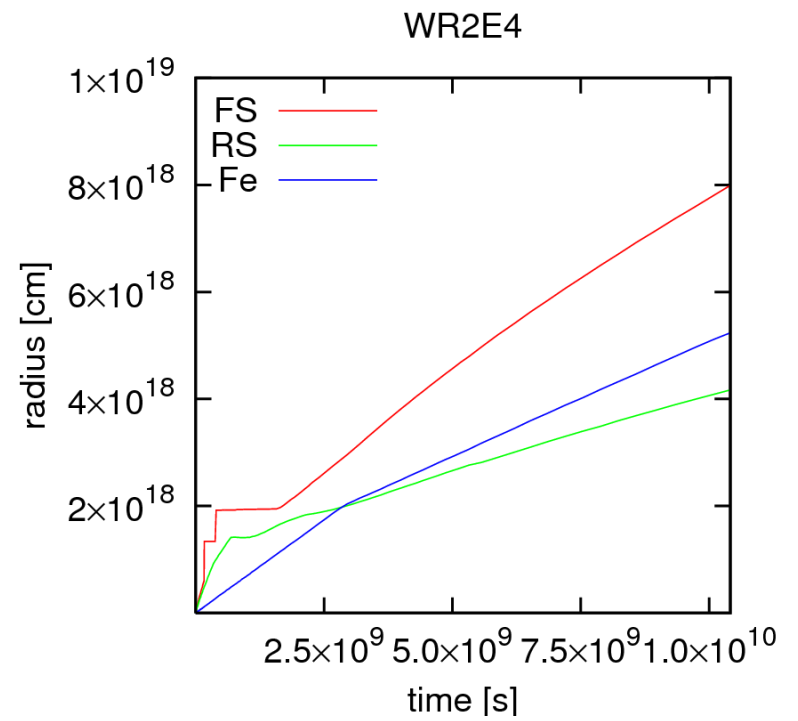


Results(1D)

$T_{WR} = 0$ yr

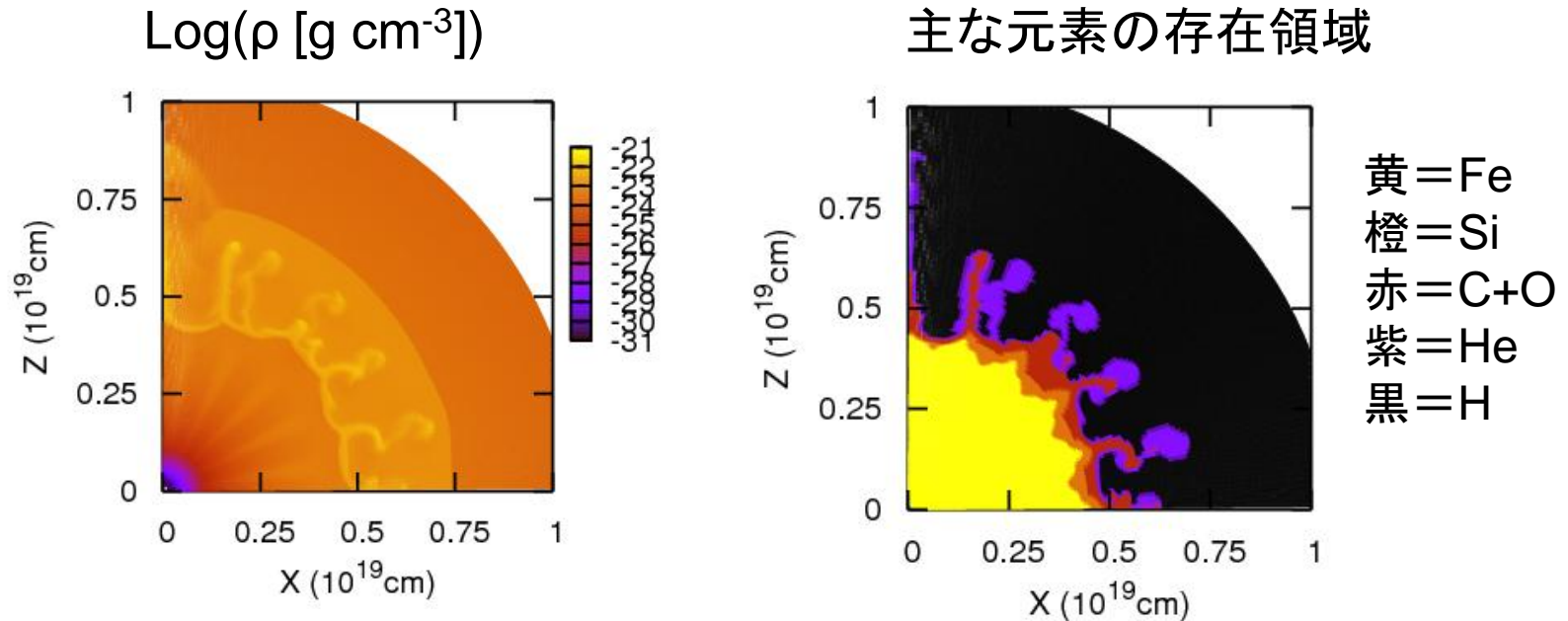


$T_{WR} = 2000$ yr



Results (2D、 $T_{WR} = 0$ yr)

330年後の密度と主な元素の存在領域



Fe、Siは混合を受けていないが、Oは混合を受けている。

➡ $T_{WR} = 2000$ yrのモデルであれば、混合する可能性あり

結論

- ・ $T_{WR} = 0$ yr の場合は、Fe、Siは混合を受けないが、C、Oは強く混合を受ける。
- ・ $T_{WR} = 2000$ yrの場合はより早くFeがreverse shockと衝突するため、早く混合を受け、FeがSiよりも外側に分布しうる。

Future work

<流体不安定性による物質混合>

- ・ $T_{WR} = 2000 \text{ yr}$ のモデルでの計算
- ・より高解像度なシミュレーションを行うことが必要
- ・3DでのRayleigh-Taylor不安定性シミュレーション
- ・SASI(Standing Accretion Shock Instability)を考慮

<非球対称爆発に起因する物質混合>

- ・Cas Aは非球対称な(Jet-likeな)爆発であるとして知られている。
 —————> 非球対称な爆発による混合の可能性

<星周物質との相互作用による物質混合>

- ・RSG wind や WR wind には不定性がある
 —————> より多くの星周物質モデルでのシミュレーション