

2011年12月28日 超新星と数値シミュレーション

重力崩壊型超新星爆発による 衝撃波と星周物質との相互作用

松尾康秀（九大理）

＜共同研究者＞

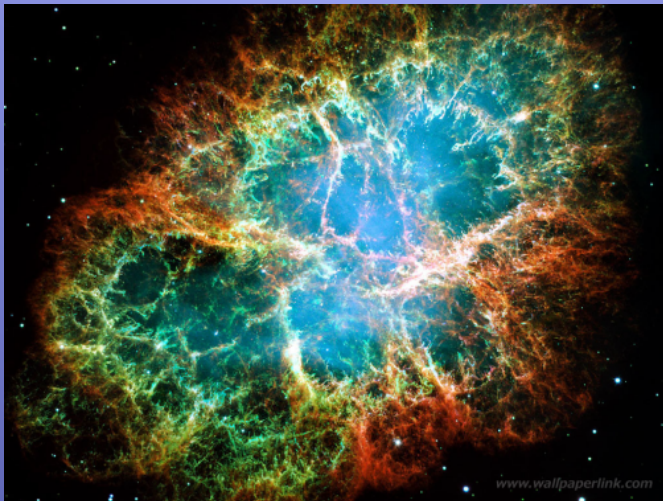
橋本正章（九大理）、
長滝重博、小野勝臣（京大）、固武慶（国立
天文台）、山田章一（早大理）、山下和之
（山梨大学）

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



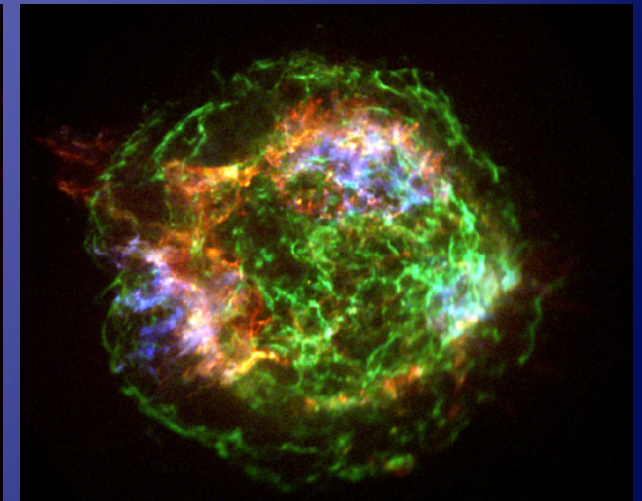
[http://
www.spacetelescope.org/
Images/large/heic0515a.jpg](http://www.spacetelescope.org/Images/large/heic0515a.jpg)

Kepler



[http://apod.nasa.gov/apod/
image/0410/
kepler_CxoHstSst_comb.jpg](http://apod.nasa.gov/apod/image/0410/kepler_CxoHstSst_comb.jpg)

Cas A



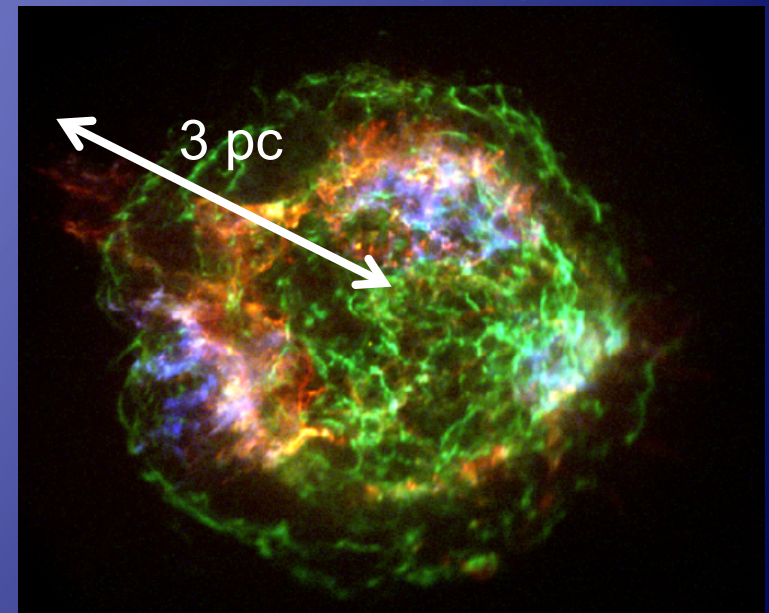
Hwang et al. 2004

超新星残骸Cassiopeia A

<超新星残骸 Cassiopeia A>

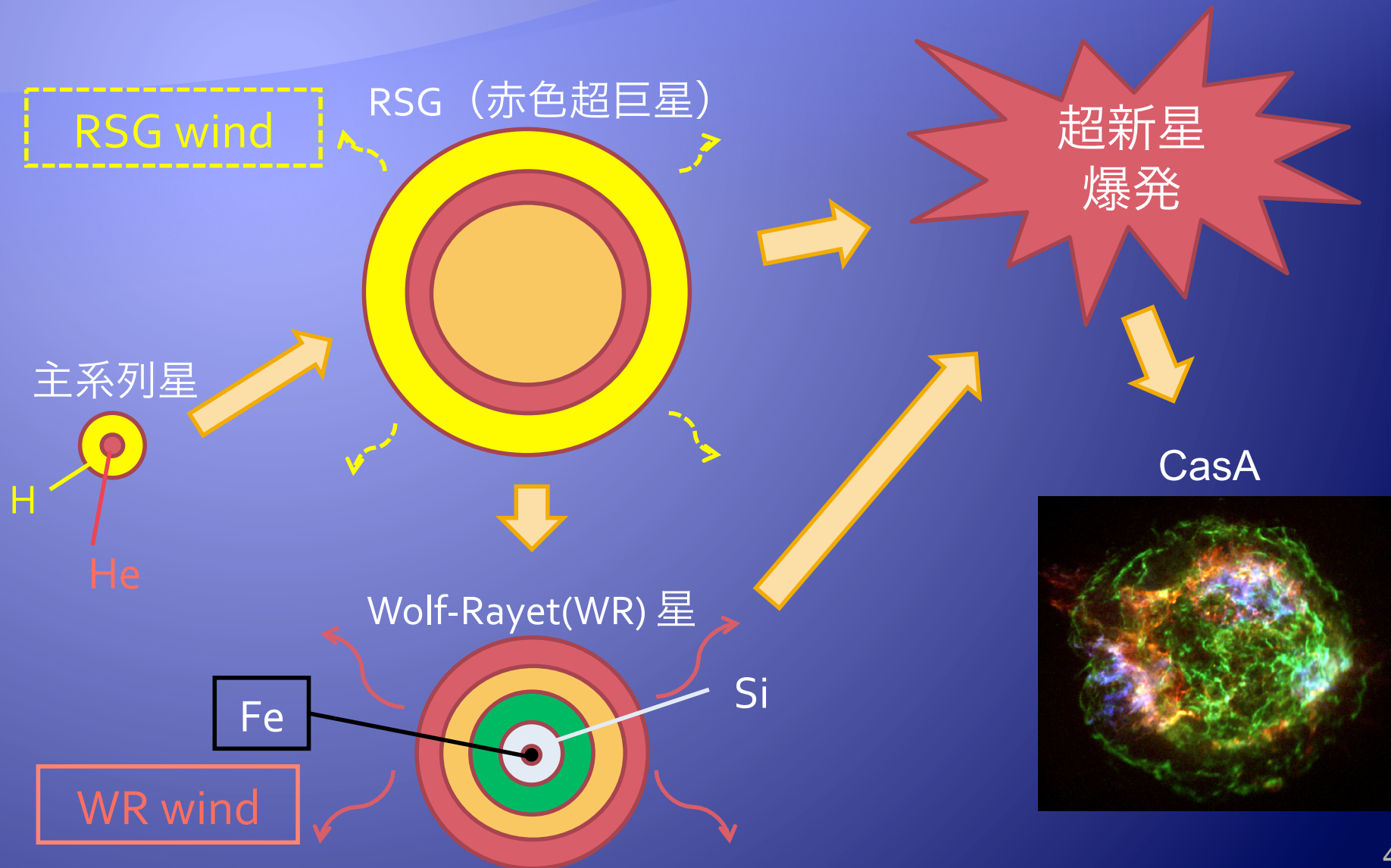
- 距離 : 3.4 kpc (Reed et al.1995)
- 大きさ : 2~3 pc
- 年齢 : 330年程度 (Fesen 2006)
- IIb型超新星爆発 (Krause et al.2008)
- Jet状の構造が見られる
- Forward shock --- $2.5 \pm 0.2 \text{ pc}$
- Reverse shock --- $1.6 \pm 0.2 \text{ pc}$
(Gothelf 2001)
- 親星 : $20 \sim 35 M_{\odot}$
(eg. Chevalier & Oishi 2003,
Yong et al. 2006)

Cas A (X線)



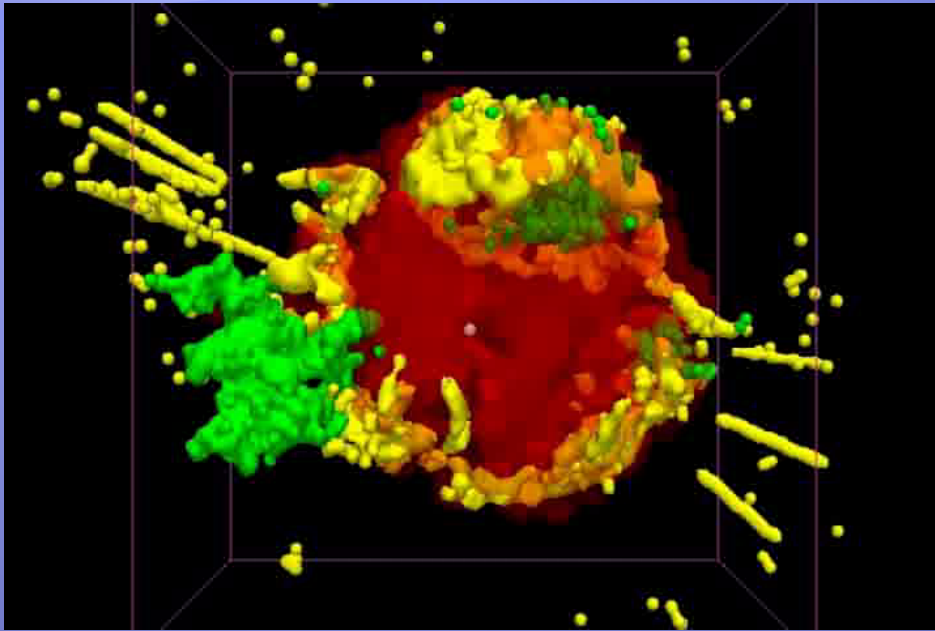
Hwang et al. 2004

超新星残骸の形成シナリオ



超新星残骸の分布

Cas A (X線衛星Chandra)



赤: unshocked ejecta

黄色: Si、Ar

緑: Fe

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

球対称爆発だと、FeはSiよりも内側に分布する。



FeとSiの強く混合を受けた

Badenes 2010

研究目的

<観測>

- ・ほとんどの超新星は非常に遠方で起こるため、有益な情報を引き出すことが困難.
- ・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
(Vink et al.2004, Badenes 2010)

<シミュレーション>

- ・これまであまり議論されていない.
- ・超新星残骸から超新星爆発の情報を引き出すことはできるのか？

<研究目的>

- ・超新星爆発～残骸形成のシミュレーションを行い、超新星残骸観測からどのような超新星爆発の情報が得られるのかを調べた.

流体の基礎方程式

<基礎方程式系>

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

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

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

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

$$\Phi_p = -\frac{GM_p}{R_{\min}}$$

$$\frac{DX_i}{Dt} = R_i^+ - R_i^-$$

<状態方程式>

・光球面の内側(光球内)

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

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

・光球面の外側(光球外)

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

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

初期モデル

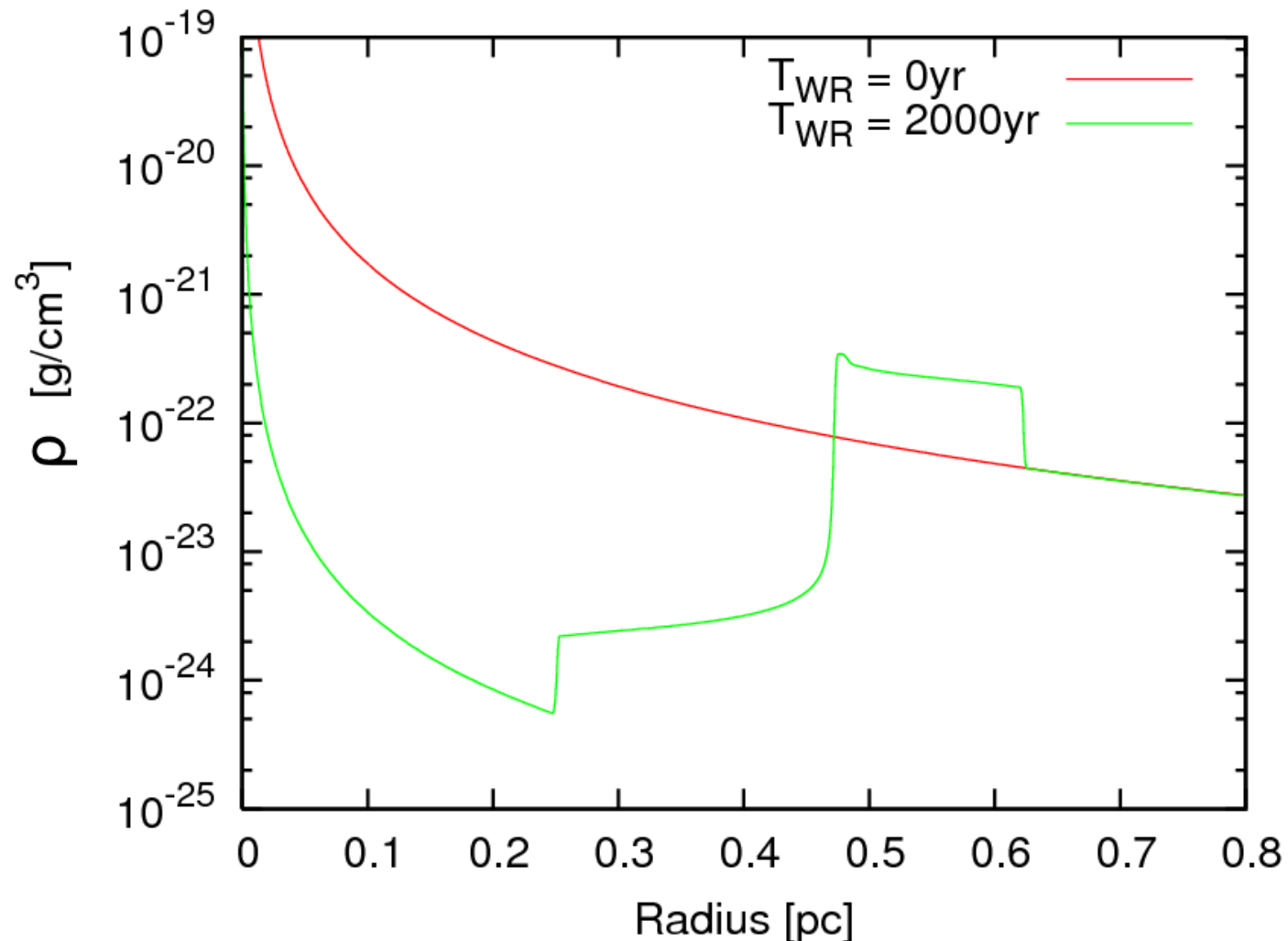
< 先行研究 >

- 親星 : $20 \sim 35 M_{\odot}$ (at ZAMS)
(eg. Chevalier & Oishi 2003, Yong et al. 2006, Fesen & Becker 1991)
- 星周物質 : 親星の恒星風
 - Cas Aの親星の進化:
赤色超巨星 (RSG) $\rightarrow$ Wolf-Rayet (WR) 星 (Krause et al. 2009)
 - WR星であった時間 $T_{WR} < 3480 \text{ yr}$ (Schure et al. 2008)

< 初期モデル >

- 親星 : $6 M_{\odot}$ He core (Hashimoto 1995) ($25 M_{\odot}$ at ZAMS)
- 星周物質 : RSG wind ($T_{WR}=0 \text{ yr}$)
RSG + WR wind ($T_{WR}=2000 \text{ yr}$)

星周物質モデル



シミュレーション方法

<Code>

- ・Zeus2D
(Stone & Norman 1992)

<次元>

- ・2D計算

<解像度>

- ・2D: 1000(r)×100(θ)

<摂動>

$$\delta V_r(r) = \varepsilon V_r(r) \cos(20\theta)$$

$$\varepsilon = 0.1$$

<超新星爆発>

- ・熱エネルギーを注入して爆発
- ・Input Energy --- パラメータ

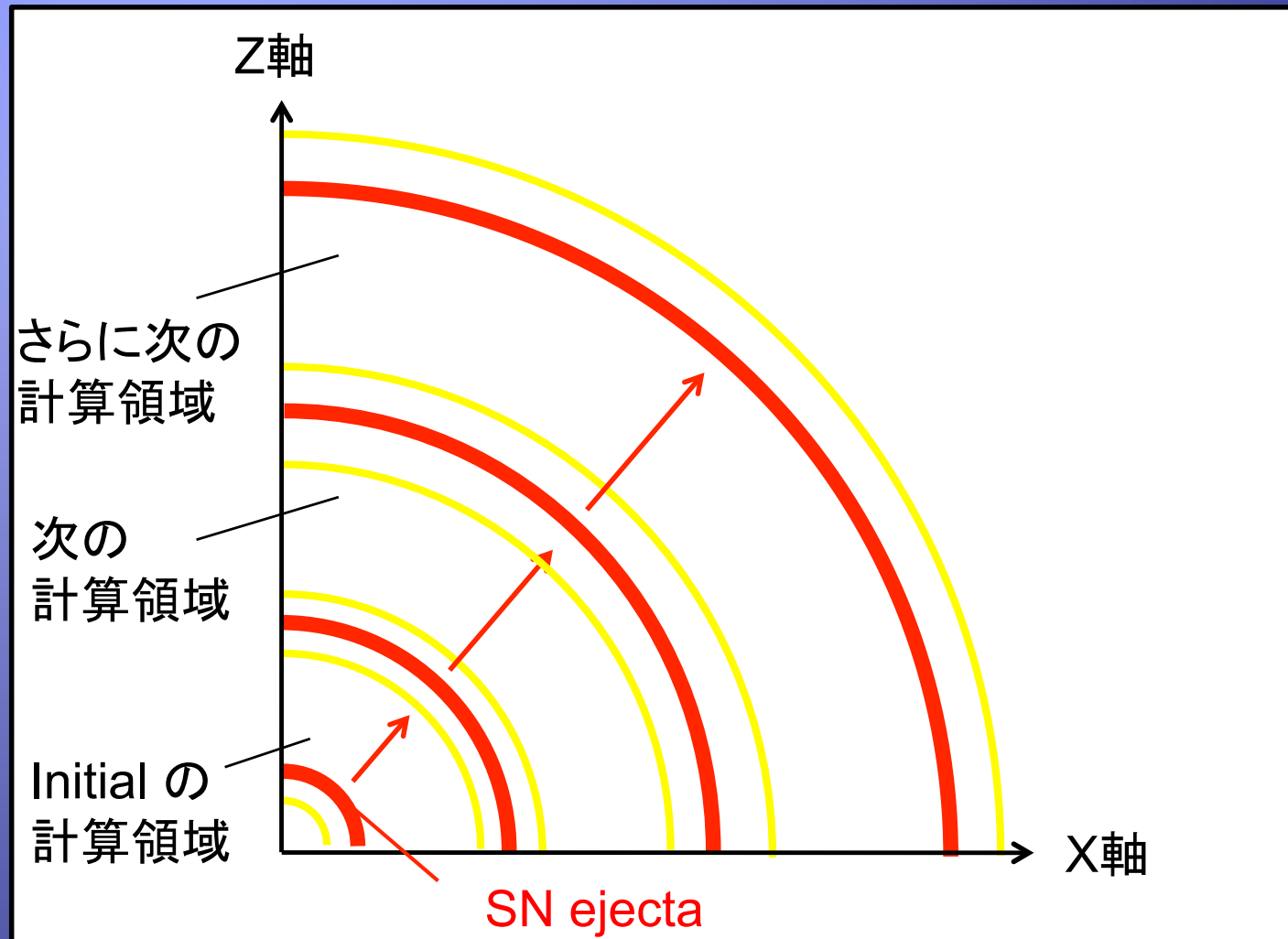
爆発直後から330年(Cas Aの年齢)まで計算を行った。

<核反応ネットワーク>

- ・ $T > 5 \times 10^9$ K
NSE(原子核種の統計的平衡)
- ・ $T < 5 \times 10^9$ K
alpha-network (Müller 1986)

超新星爆発～超新星残骸形成

・どのようにして爆発から330年間計算するのか？



球対称シミュレーション結果

初期モデル	T_{WR}	$E(10^{51} \text{ erg})$
WR0E2	0	2
WR0E3	0	3
WR0E4	0	4
WR2E2	2000	2
WR2E3	2000	3
WR2E4	2000	4

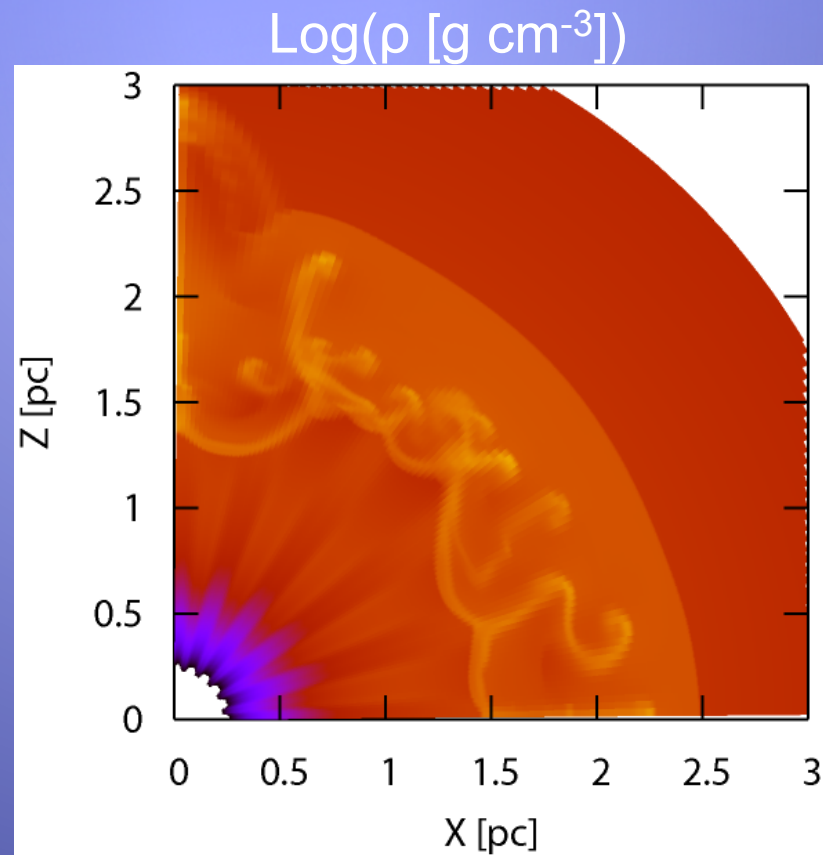
$R_{fs}(\text{pc})$	$R_{rs}(\text{pc})$
1.8	1.3
2.1	1.6
2.5	1.7
1.9	1.0
2.3	1.2
2.6	1.3

観測	2.5 ± 0.2	1.6 ± 0.2
----	---------------	---------------

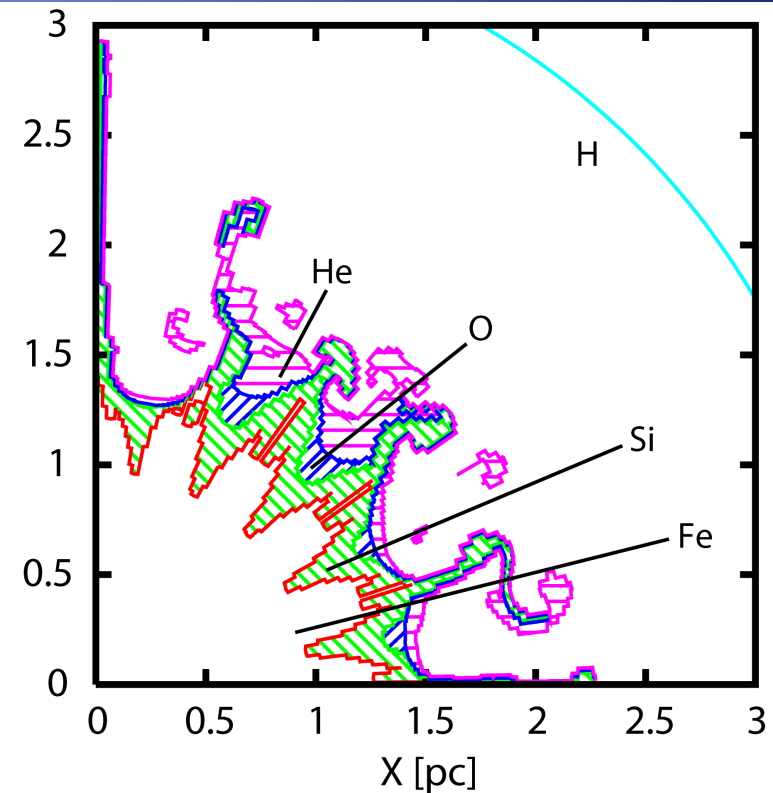
球対称シミュレーションでは $T_{WR}=0 \text{ yr}$ $E = 4 \times 10^{51} \text{ erg}$ の初期モデルが観測を説明できる。

結果 $\sim T_{WR} = 0$ 年 $\sim$

330年後の密度と主な元素の存在領域



主な元素の存在領域

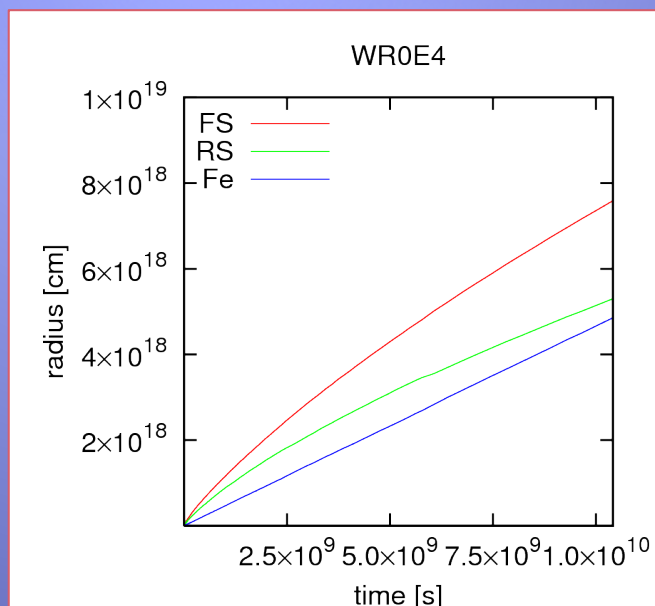


He、O、Si、は混合を受けているがSi、Feは混合を受けていない。

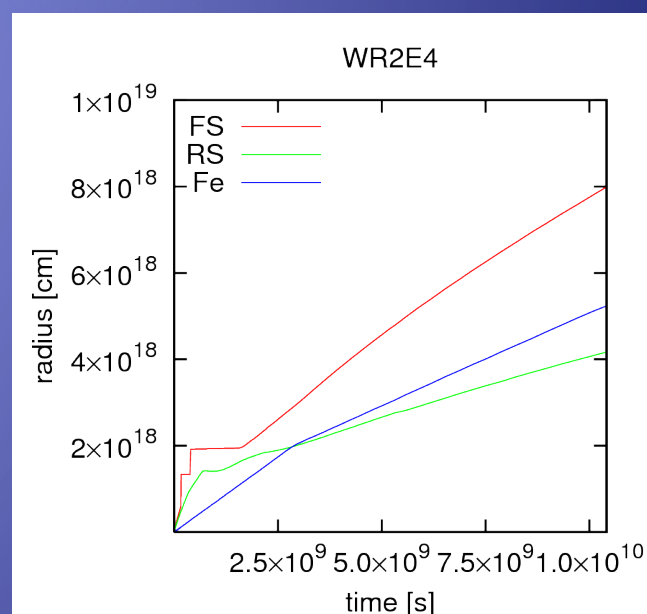
結果

<1Dシミュレーション>

$T_{WR} = 0 \text{ yr}$



$T_{WR} = 2000 \text{ yr}$



WR windを含んでいるモデルは、Fe-Si表面がReverse shockと衝突している



Fe、Siの物質混合が期待できる。

まとめ

<行ったこと>

- ・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、超新星残骸観測からどのような超新星爆発の情報が得られるのかを調べた.

<結果>

- ・超新星残骸Cassiopeia Aでみられる元素分布を再現するためには、WR windを考慮したモデルの方が有利.



超新星残骸形成のシミュレーションから親星の情報を引き出せる？

- ・より広いパラメータ空間での計算が必要

Future work

<流体計算>

- ・ $T_{WR} = 2000 \text{ yr}$ のモデルでの2D計算
- ・より高解像度な計算
- ・3DでのRayleigh-Taylor不安定性シミュレーション

<非球対称爆発>

- ・SASI(Standing Accretion Shock Instability)の効果は？
- ・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。

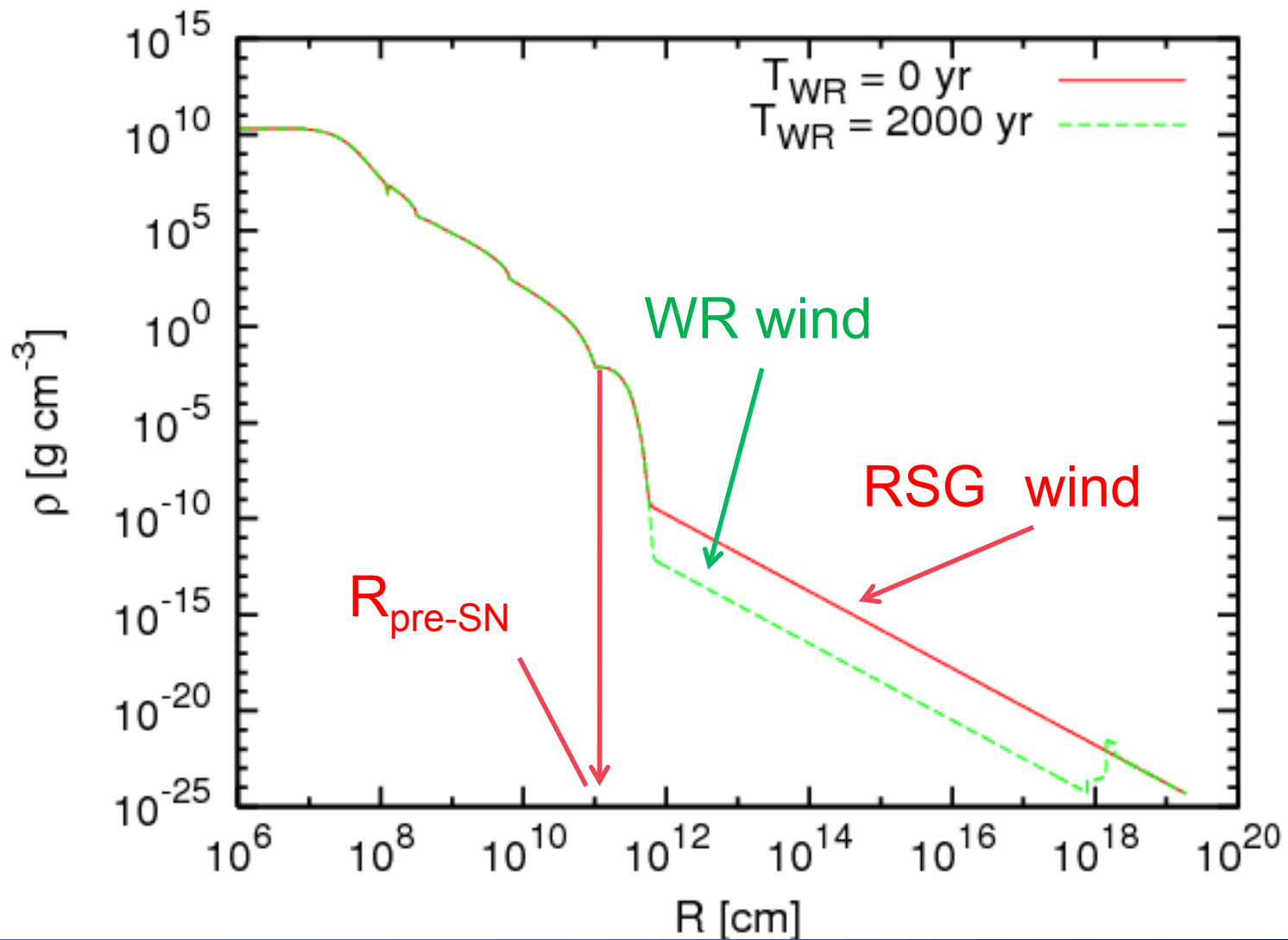
➡ 非球対称な爆発による混合の可能性

<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

初期モデル



本研究の流れ

1. 初期モデルの作成

- ・親星: $6M_{\odot}$ He core (Hashimoto 1995)
- ・星周物質の情報: 親星の恒星風であると考えられる。
 - ・Cas Aは (RSG)赤色超巨星 → WR(Wolf-Rayet)星 と進化 (Krause et al. 2009)
- ・これらを考慮するため、星周物質計算(恒星風の計算)を行い、親星のモデルと合わせて、初期モデルとする。

2. 超新星爆発～超新星残骸形成シミュレーション

- ・超新星爆発を第一原理計算に基づいて行うことは困難。
 - 本研究では、爆発エネルギーを注入することで超新星爆発を起こす。
- ・元素分布の時間進化を流体力学に従って計算し、Fe, Siの分布を調べる。

球対称シミュレーション結果

初期モデル	T_{WR}	$E(10^{51} \text{ erg})$
WR0E2	0	2
WR0E3	0	3
WR0E4	0	4
WR2E2	2000	2
WR2E3	2000	3
WR2E4	2000	4

$R_{fs}(\text{pc})$	$R_{rs}(\text{pc})$
1.8	1.3
2.1	1.6
2.5	1.7
1.9	1.0
2.3	1.2
2.6	1.3

観測	2.5 ± 0.2	1.6 ± 0.2
----	---------------	---------------

球対称シミュレーションでは $T_{WR}=0 \text{ yr}$ $E = 4 \times 10^{51} \text{ erg}$ の初期モデルが観測を説明できる。

恒星風の計算

- ・恒星風の計算については球対称で行った。

1) RSG wind で計算領域を満たしておく

$$\rho(r) = \frac{\dot{M}_{\text{RSG}}}{4\pi v_{\text{RSG}} \left(\frac{1}{r}\right)^2} \approx 2 \times 10^{-23} \left(\frac{1\text{pc}}{r}\right)^2 \text{ g/cm}^3$$

$$v_{\text{RSG}} = 4.7 \text{ km/s}$$

$$T_{\text{RSG}} = 10^3 \text{ K}$$

(Hirschi et al.2004)

2) 内側から下記のパラメーターで流体力学の方程式に従って流す。

$$\dot{M}_{\text{WR}} = 9.7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$$

$$v_{\text{WR}} = 1.7 \times 10^3 \text{ km/s}$$

$$T(r) = 10^4 \text{ K}$$

(Nugis & Lamers 2000)

