

## Section 10.

# 超新星爆発のメカニズム

### 10.1 核爆発型超新星

### 10.2 重力崩壊型超新星



対になって  
存在する星

白色矮星

HARDY

David A. Hardy



# 「核爆発」

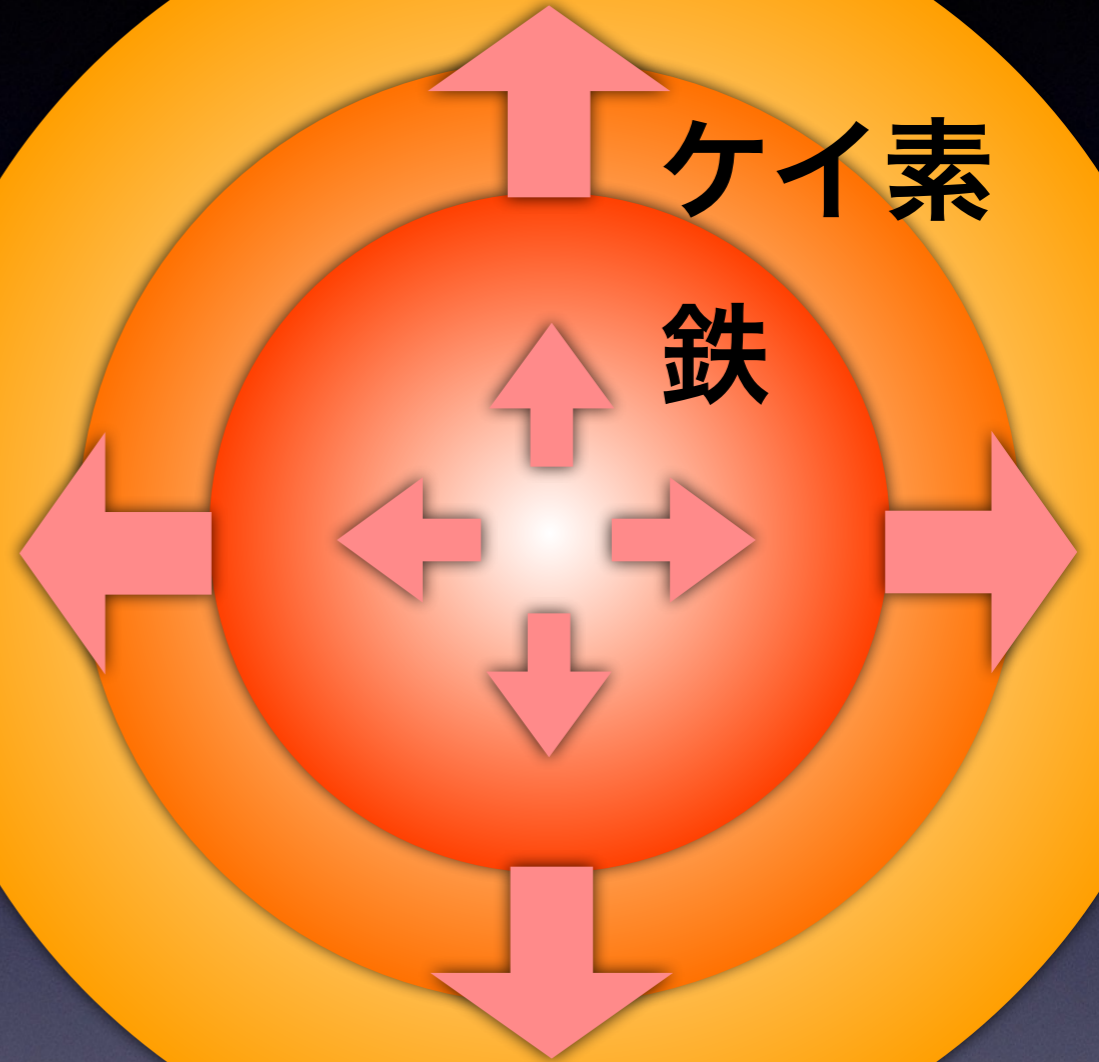
炭素

酸素



ケイ素

鉄



# 超新星爆発！





# 核爆発型超新星

普通の星の場合は核融合が起きることでバランスしている

白色矮星はなぜ核融合で爆発するのか？

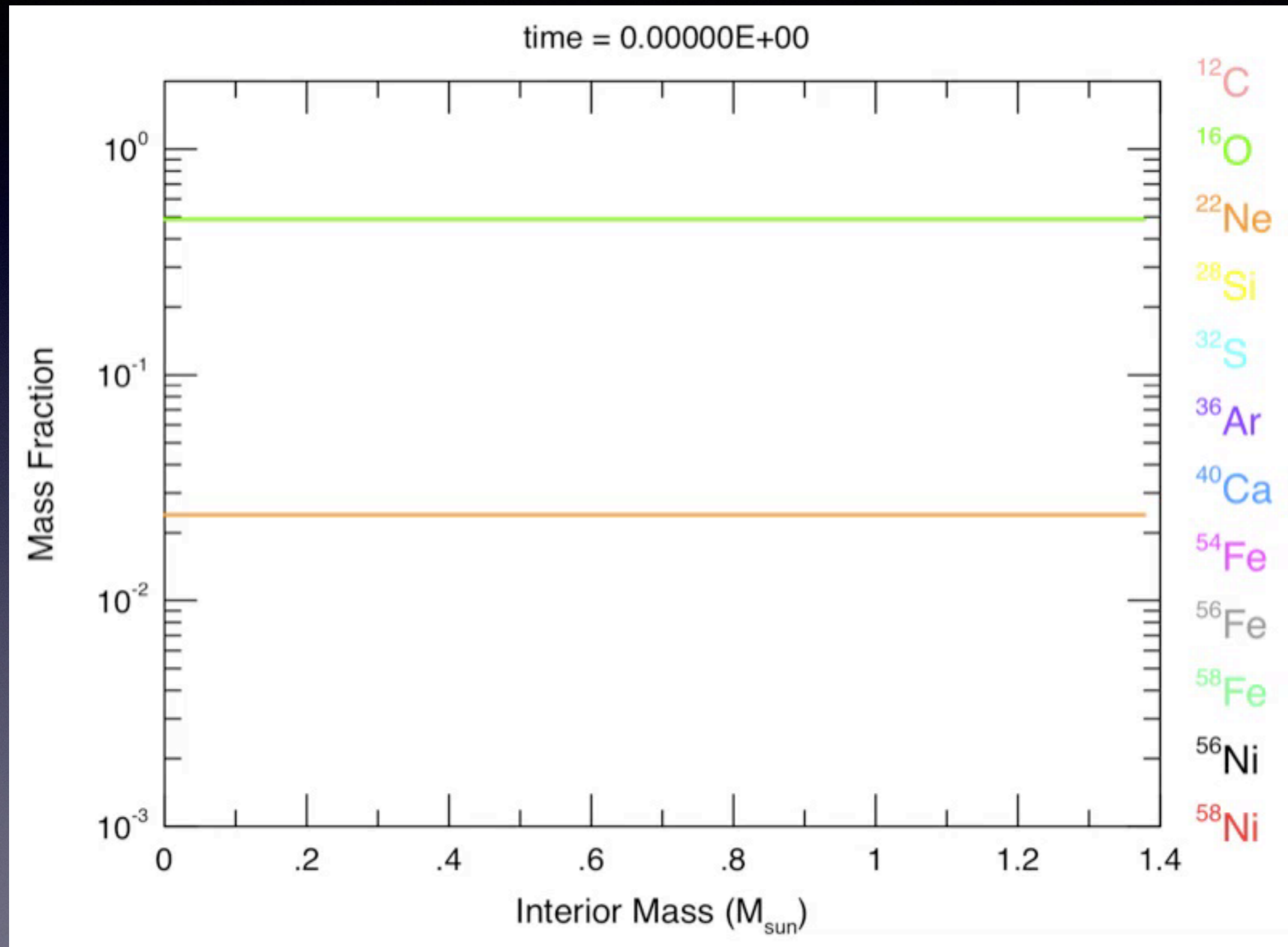


# 白色矮星の爆発

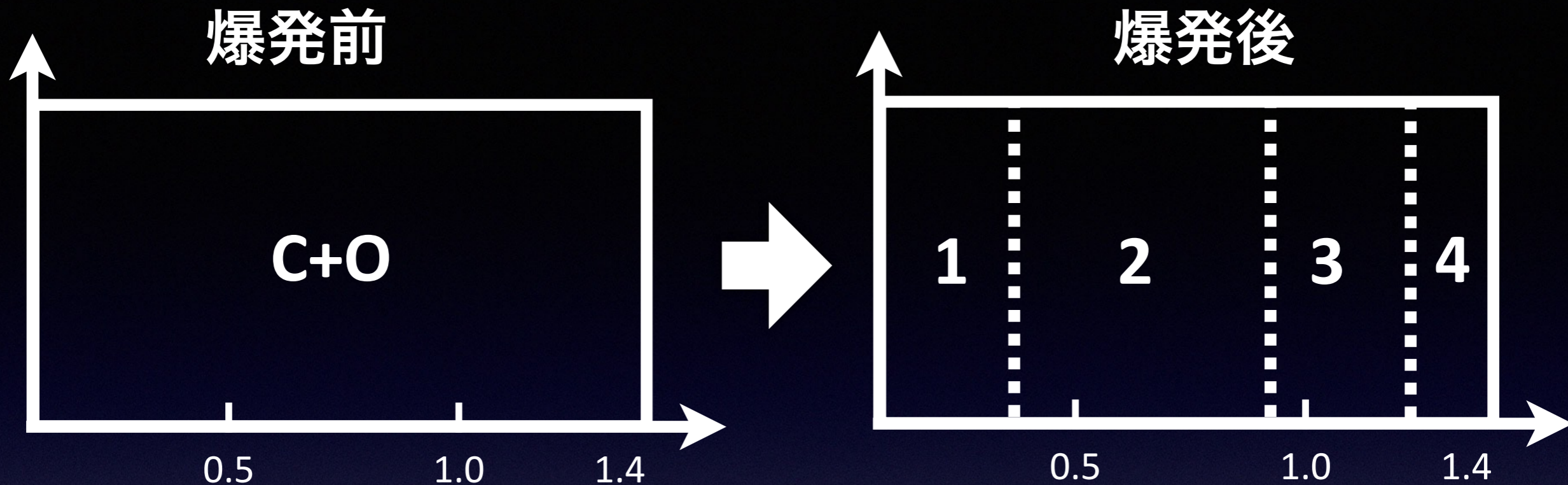
元素の質量割合

内側

外側







領域	温度 (K)	密度 (g cm <sup>-3</sup> )		主な元素
1	(7-9) x 10 <sup>9</sup>	10 <sup>8-9</sup>	NSE + 電子捕獲	<sup>56</sup> Fe, <sup>54</sup> Fe, <sup>58</sup> Ni
2	(5-7) x 10 <sup>9</sup>	10 <sup>7-8</sup>	NSE	<sup>56</sup> Ni
3	(4-5) x 10 <sup>9</sup>	<10 <sup>7</sup>	不完全ケイ素燃焼	<sup>28</sup> Si, <sup>32</sup> S, <sup>40</sup> Ca
4	< 4 x 10 <sup>9</sup>	<10 <sup>7</sup>	不完全酸素燃焼	<sup>16</sup> O, <sup>24</sup> Mg

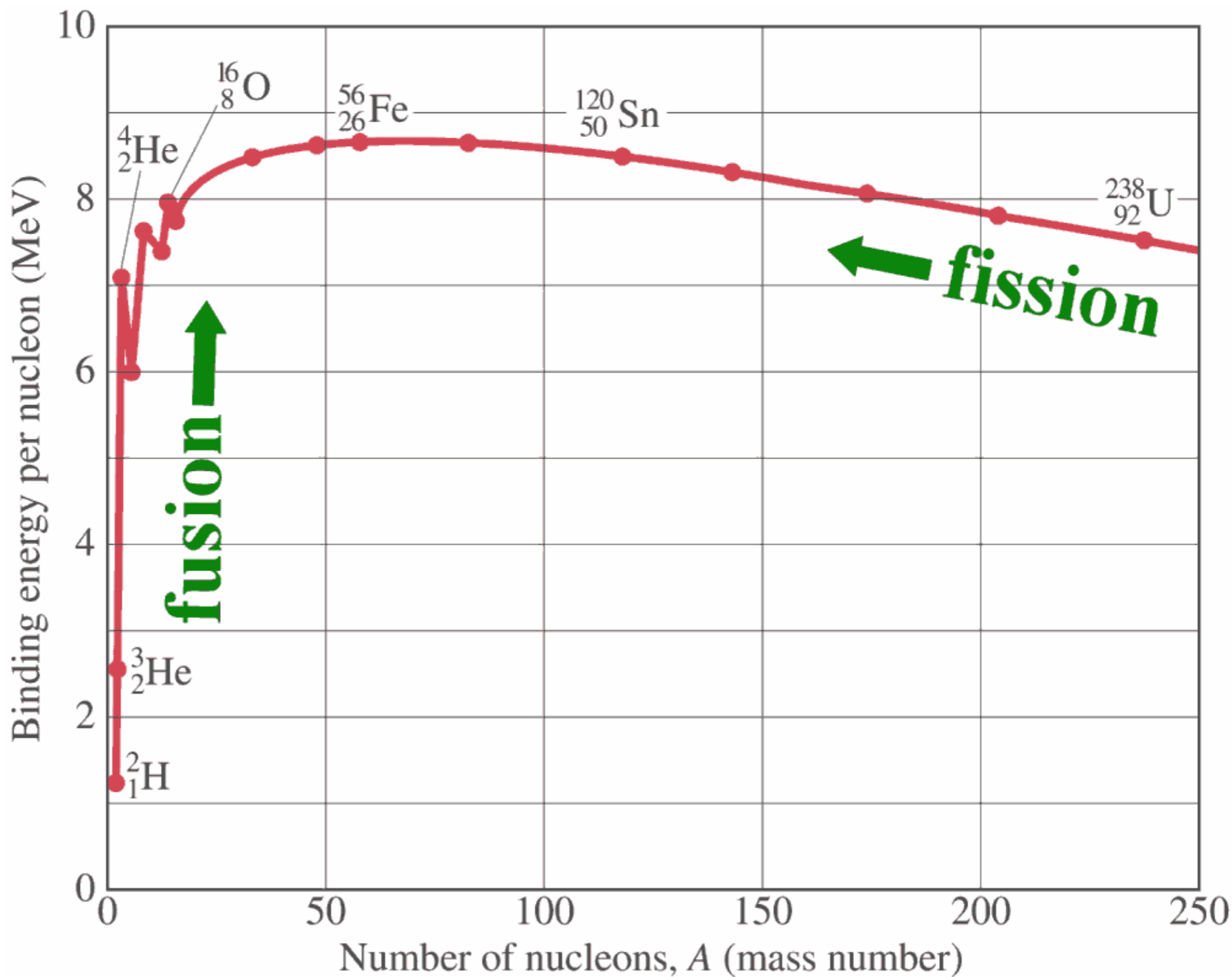
\*NSE = nuclear statistical equilibrium (核統計平衡)



核爆兇型  
超新星



太陽



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

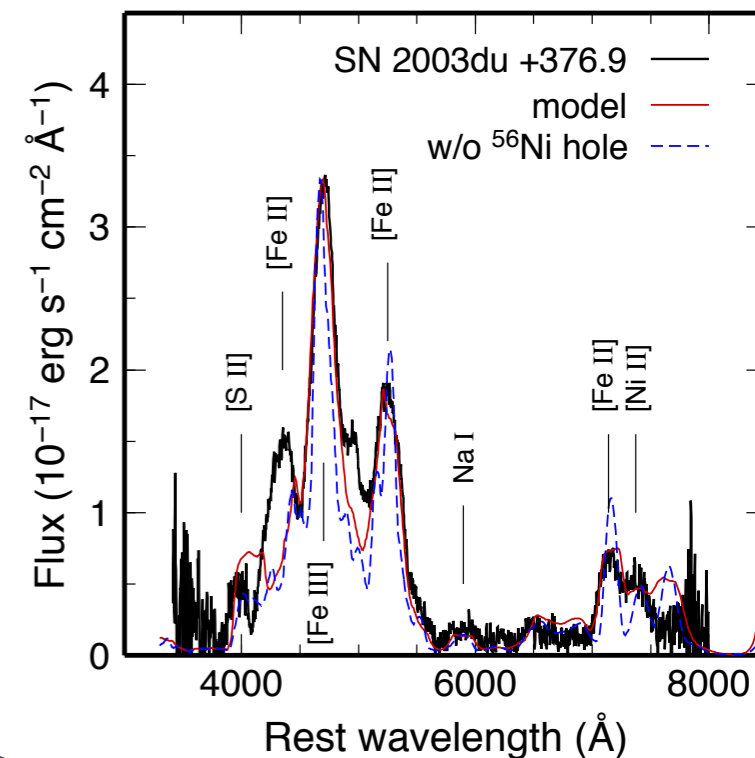
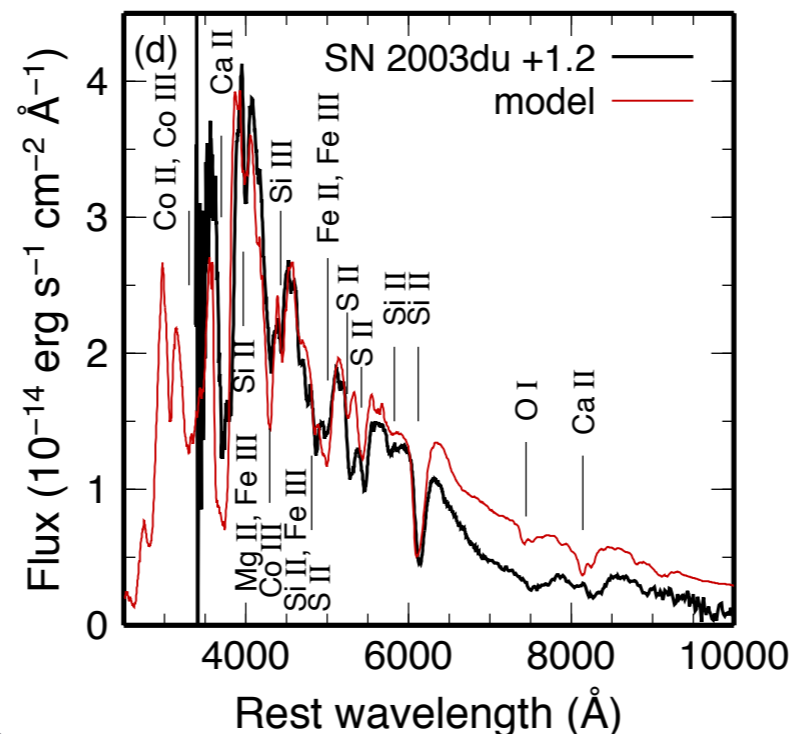
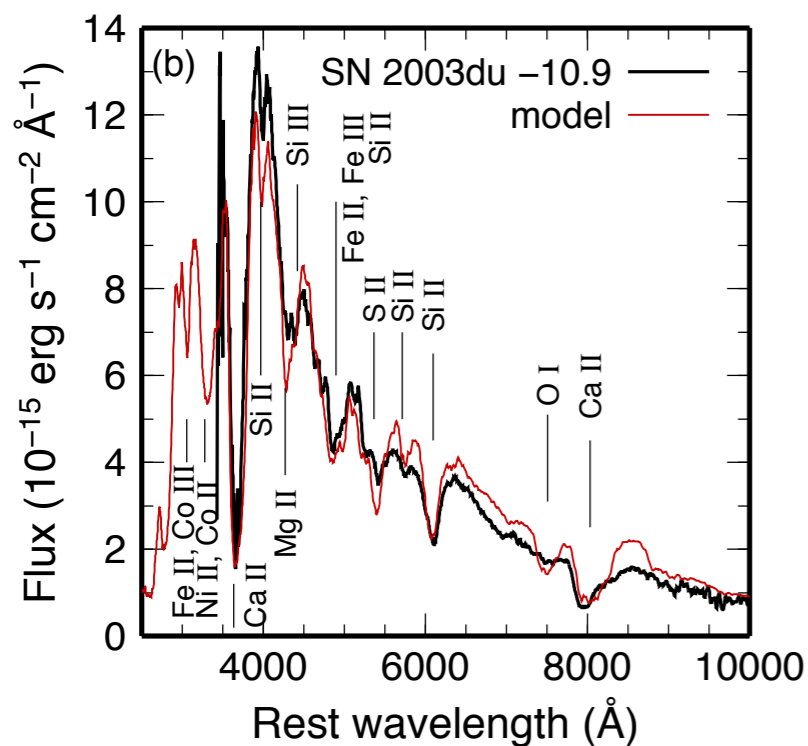
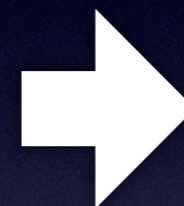
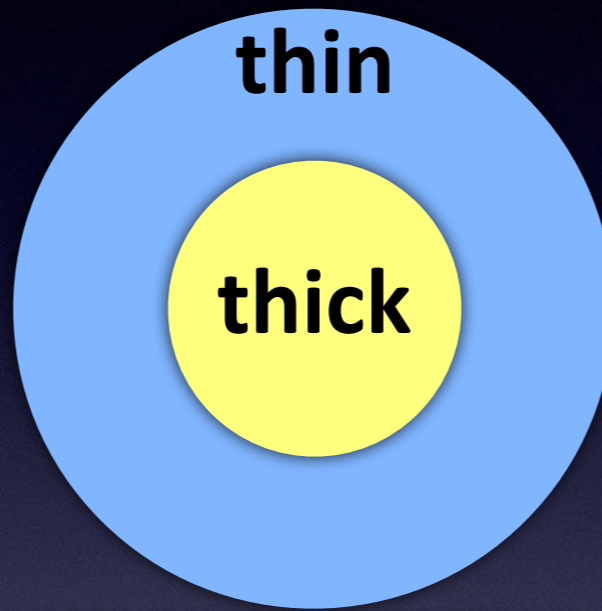
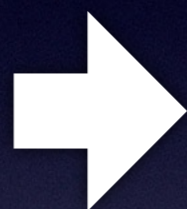


# 観測から超新星の元素組成を探る

爆発数日後

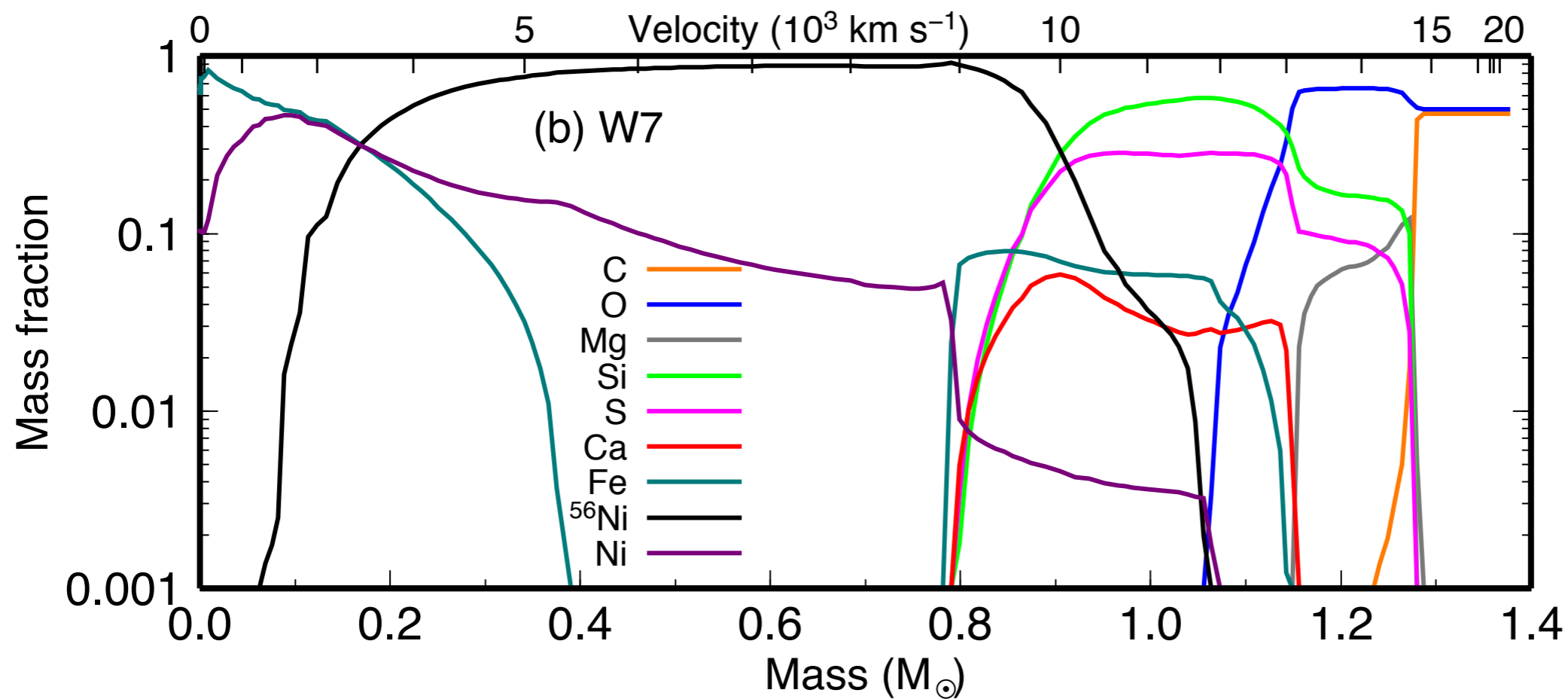
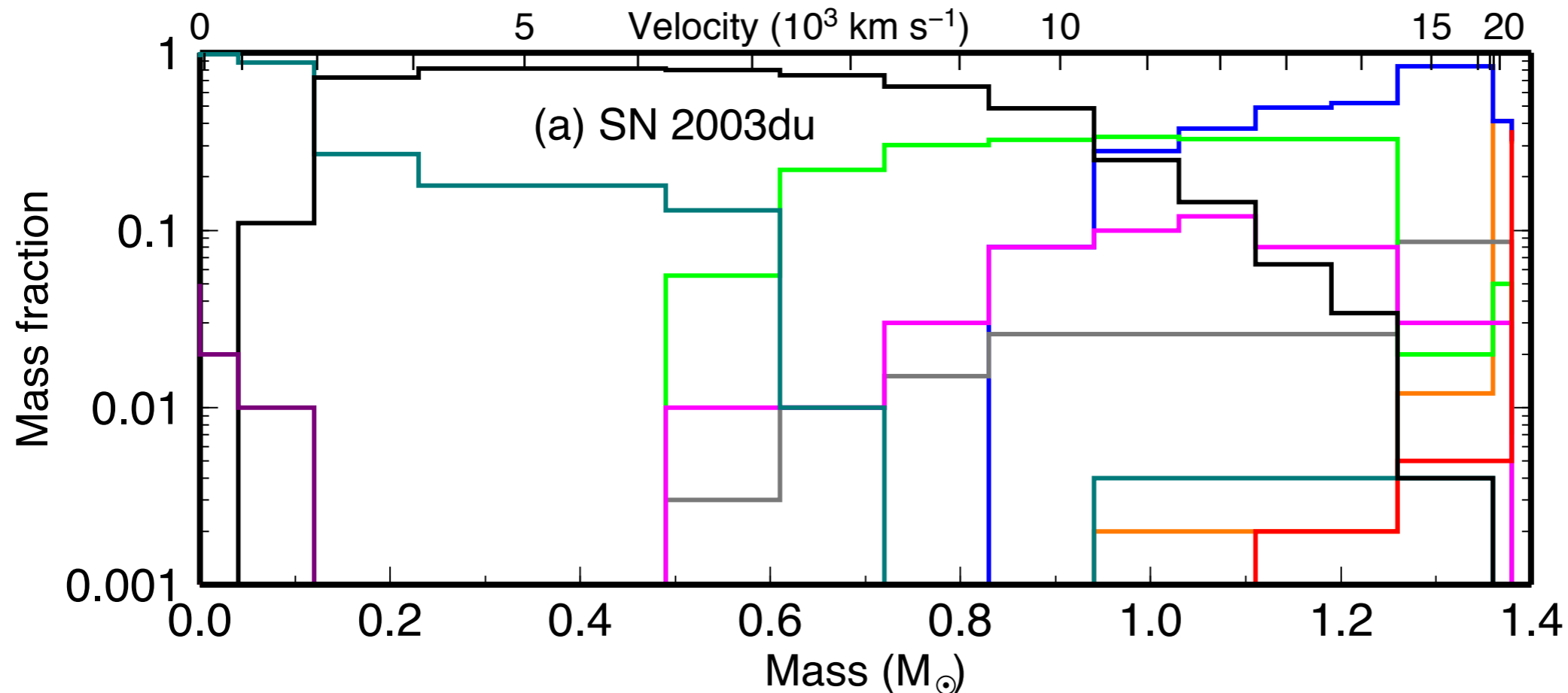
爆発20日後

爆発1年後





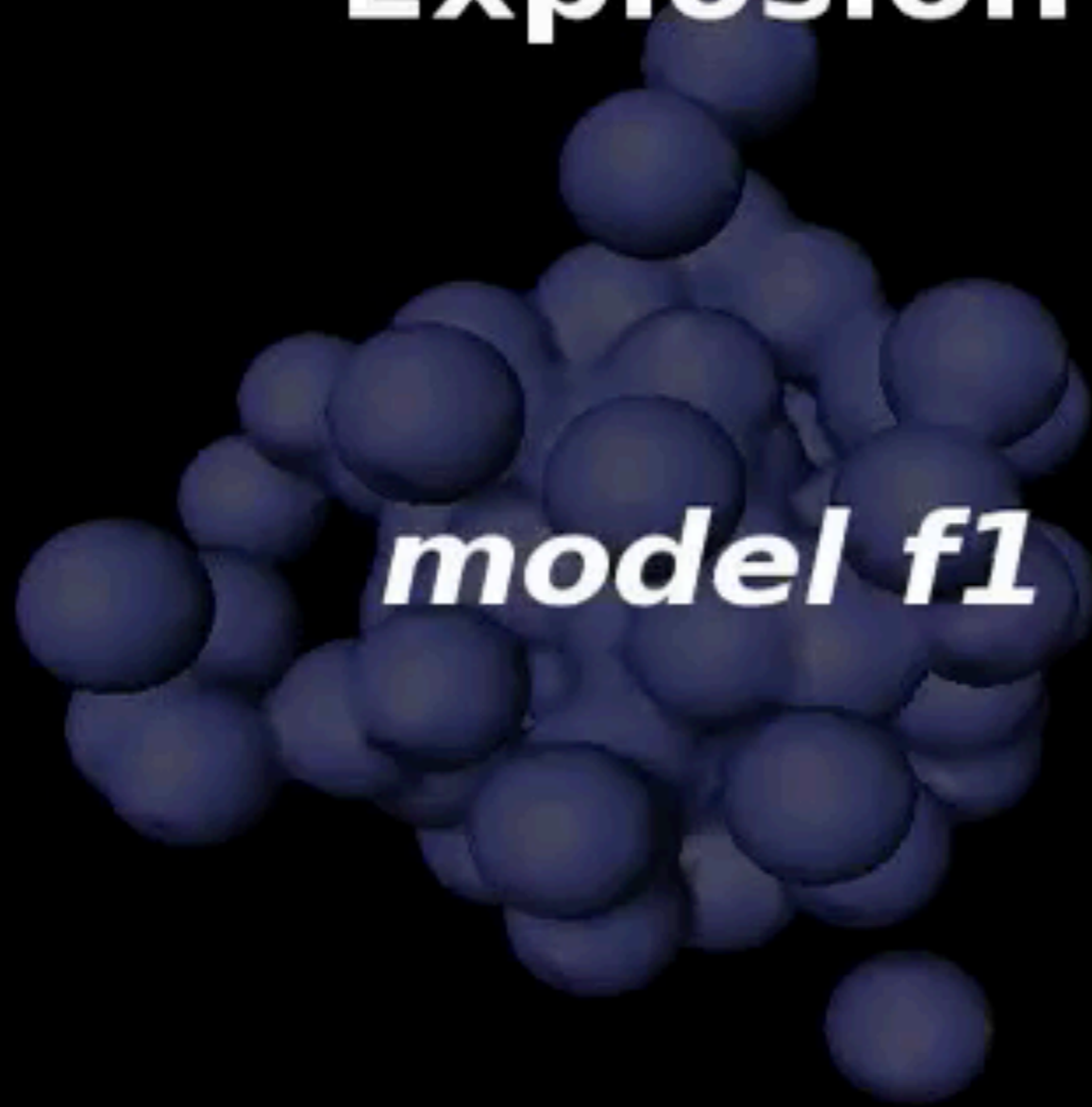
観測



理論



# Thermonuclear Supernova Explosion



*model f1*



(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004



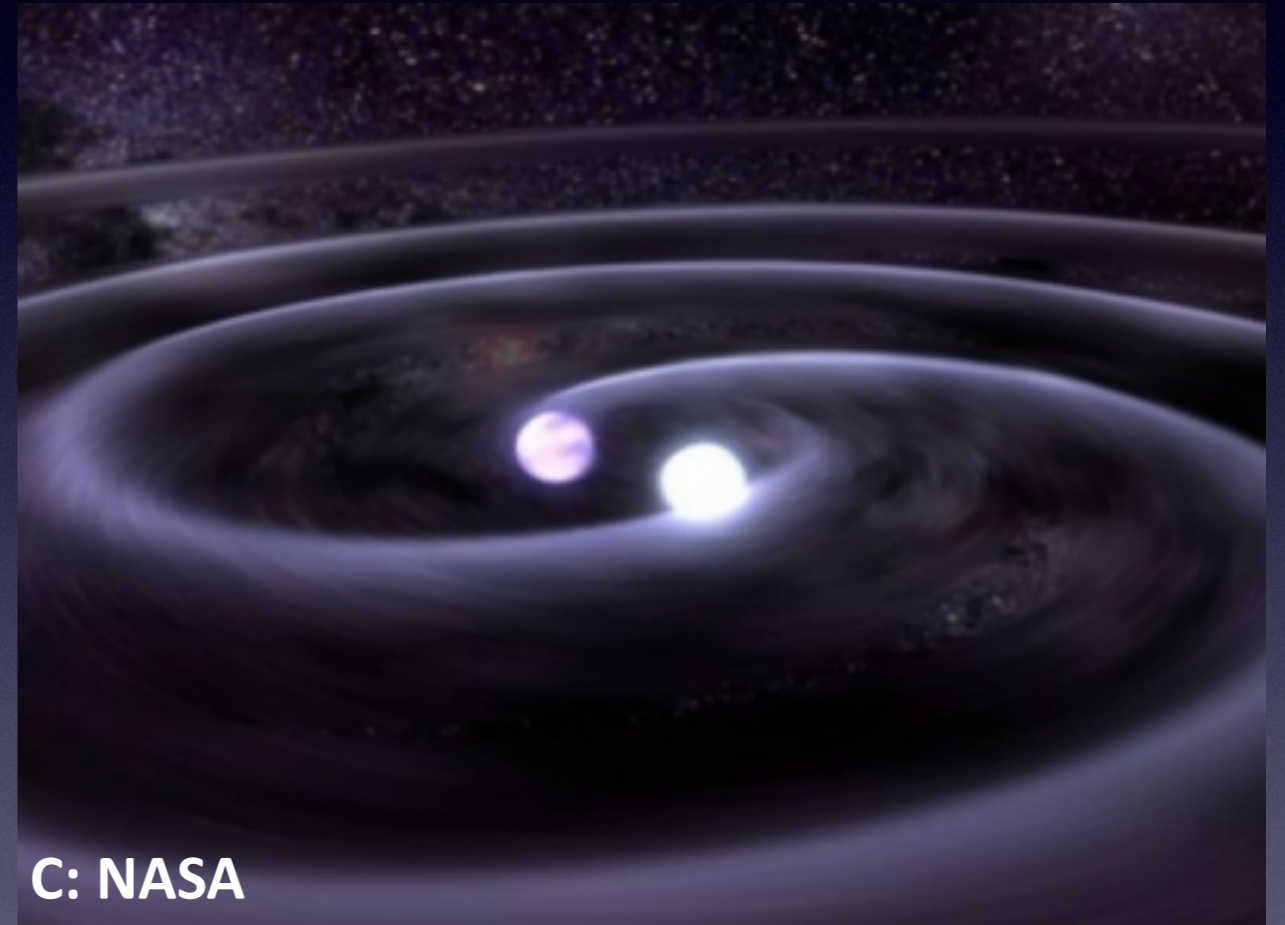
# 白色矮星をどう太らせるか？

普通の星から降着

2つの白色矮星が合体



single degenerate  
(SDシナリオ)



double degenerate  
(DDシナリオ)

未だ論争中



# 核爆発型超新星：まとめ

- チャンドラセカール限界に近い白色矮星の核爆発

- 核融合反応 => 縮退圧が優勢のため核反応が暴走

- 爆発的元素合成

- 約0.8 Msunの鉄族元素( $^{56}\text{Ni}$  &  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ) > 重力崩壊型

- 約0.4 Msunの中間質量元素 ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ )

- 親星の進化経路

- Single degenerate (SDシナリオ) or double degenerate (DDシナリオ)

- 研究のホットトピック



## Section 10.

# 超新星爆発のメカニズム

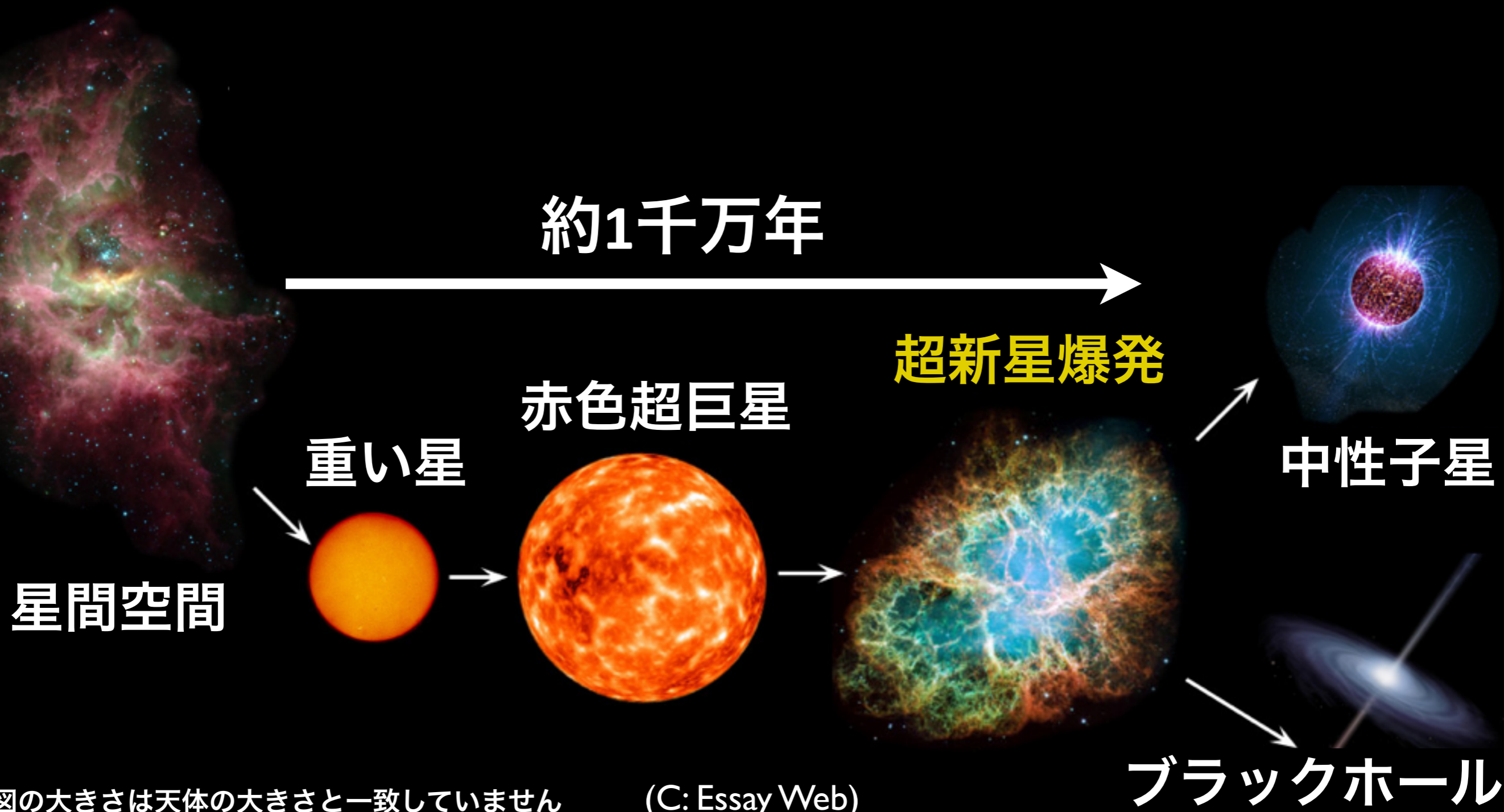
### 10.1 核爆発型超新星

### 10.2 重力崩壊型超新星



# 1. 重い星の場合

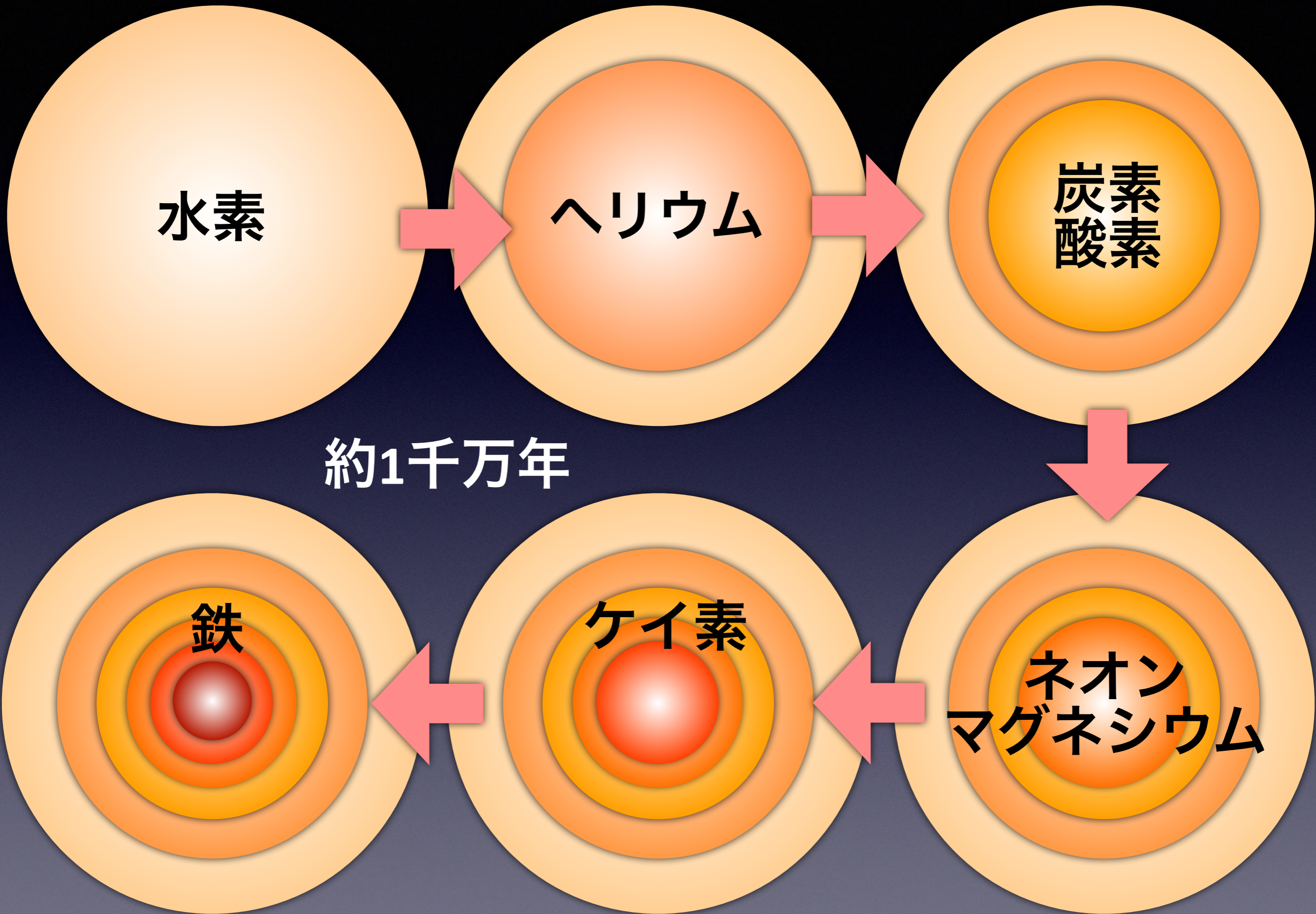
\* 太陽の10倍以上



図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)



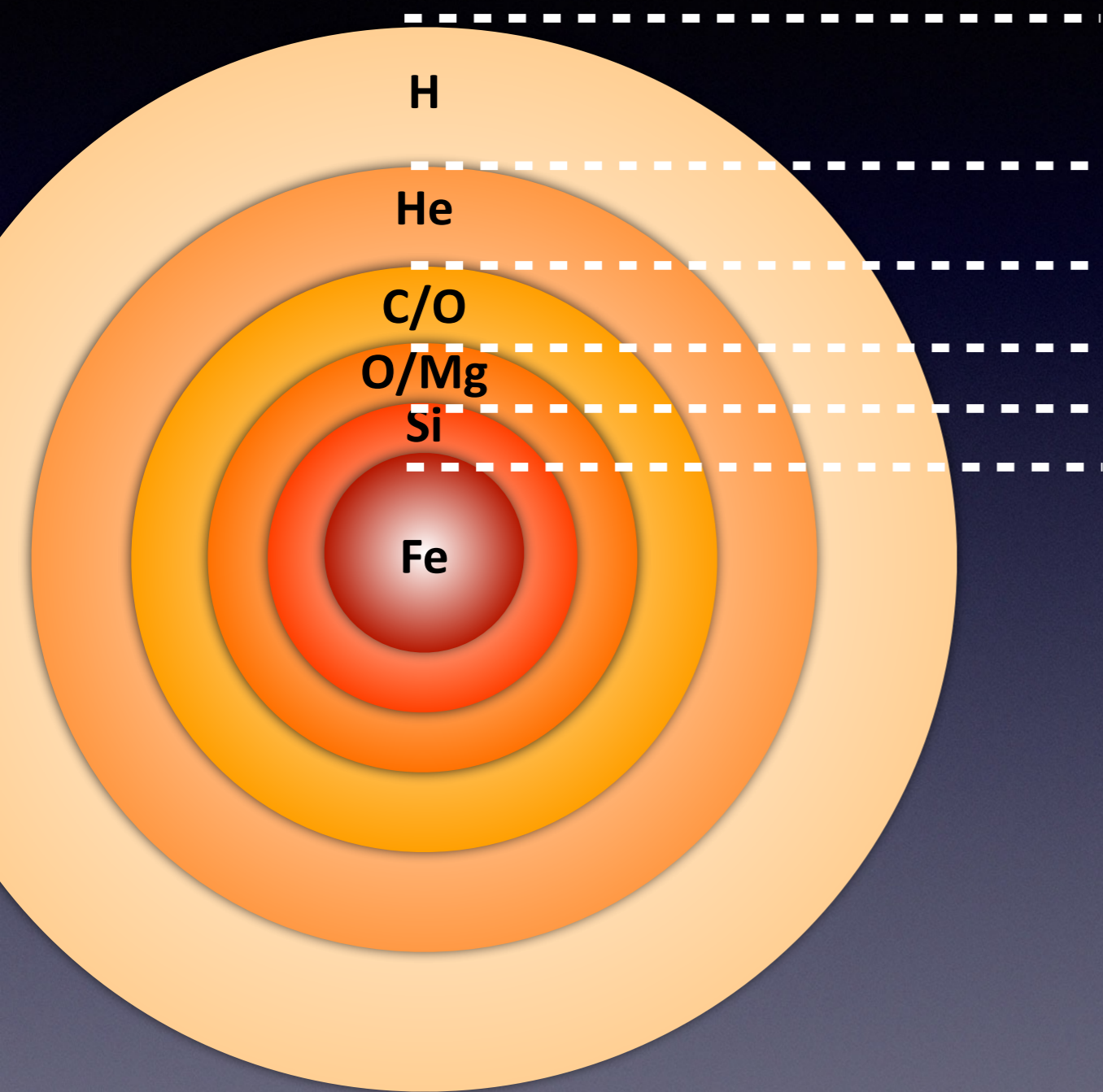


図の大きさは天体の大きさと一致していません



# 20太陽質量の場合

(重力崩壊直前は約16太陽質量)



質量 (太陽質量)	半径 (太陽半 径)	中心に落ちる までの時間 (秒)
16	1000	$3 \times 10^7$ (1yr)
6	0.5	300
5	0.2	50
4	0.08	20
2	0.005	1
1.5	0.003	0.1

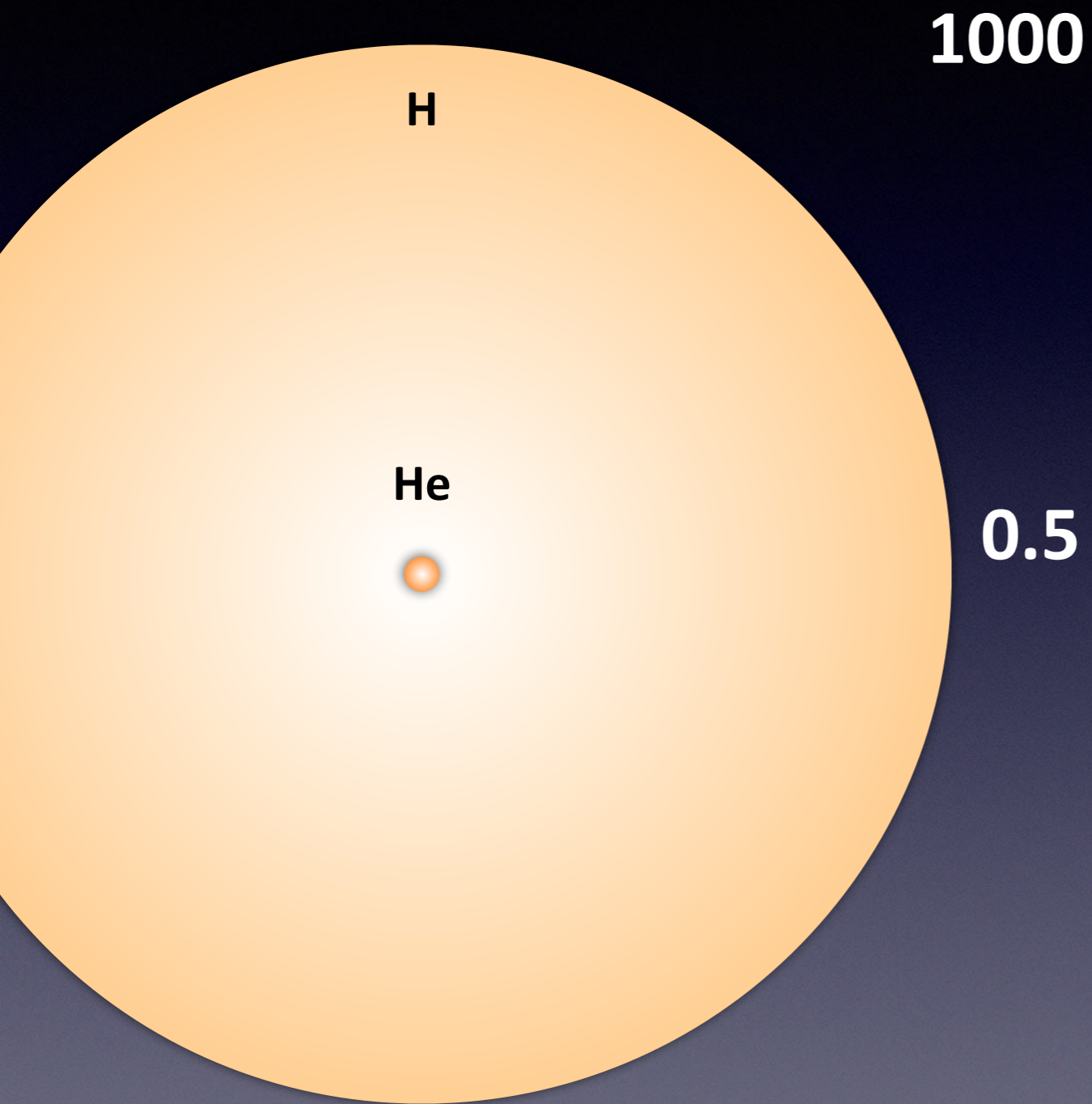
太陽半径 =  $7 \times 10^{10}$  cm

鉄コア半径  $\sim 0.003 \times 7 \times 10^{10}$  cm  
 $\sim 2 \times 10^8$  cm  $\sim 2,000$  km



# 実際のイメージ

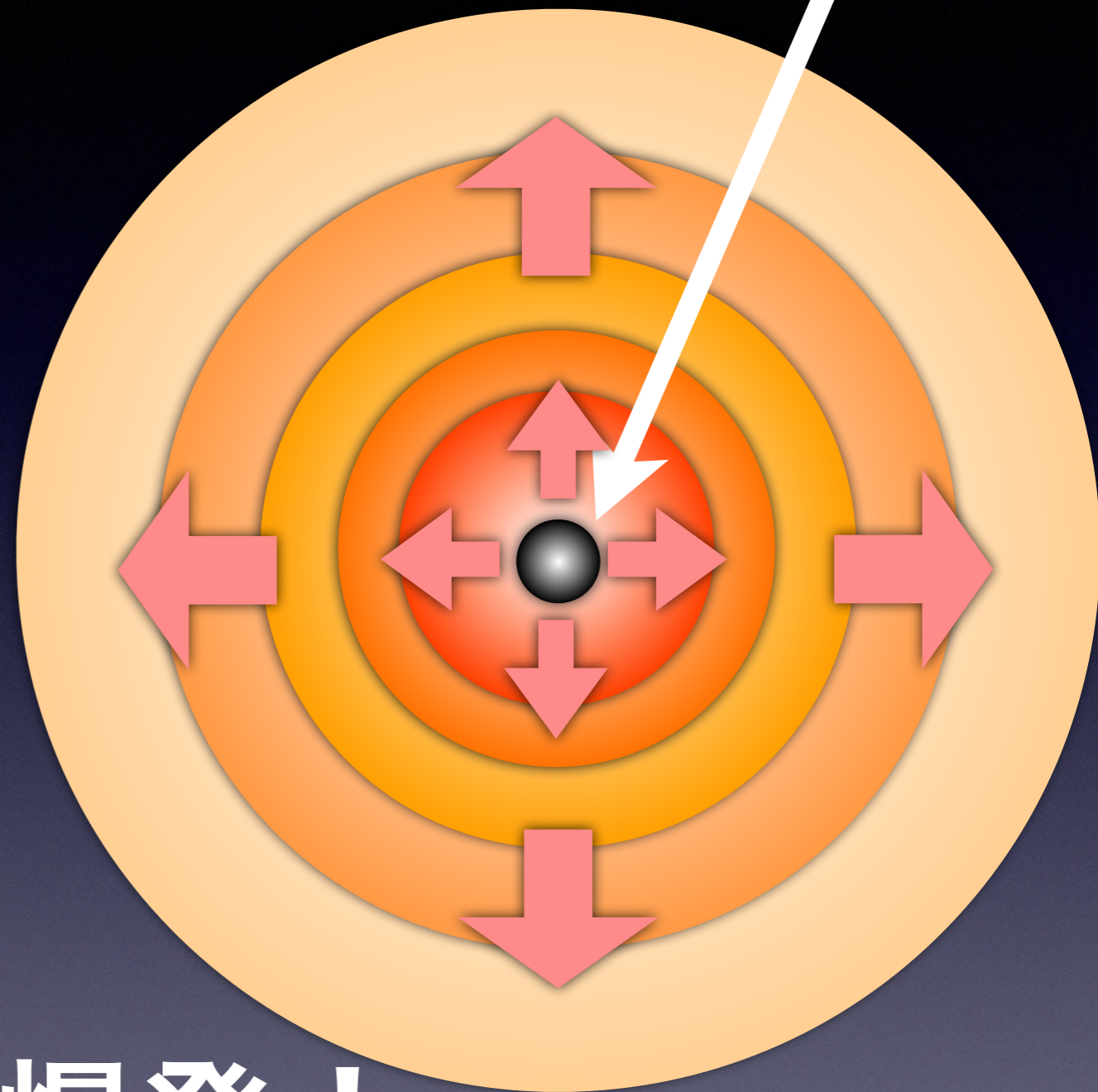
(本当はもっと極端)





# 「重力崩壊」

中性子星

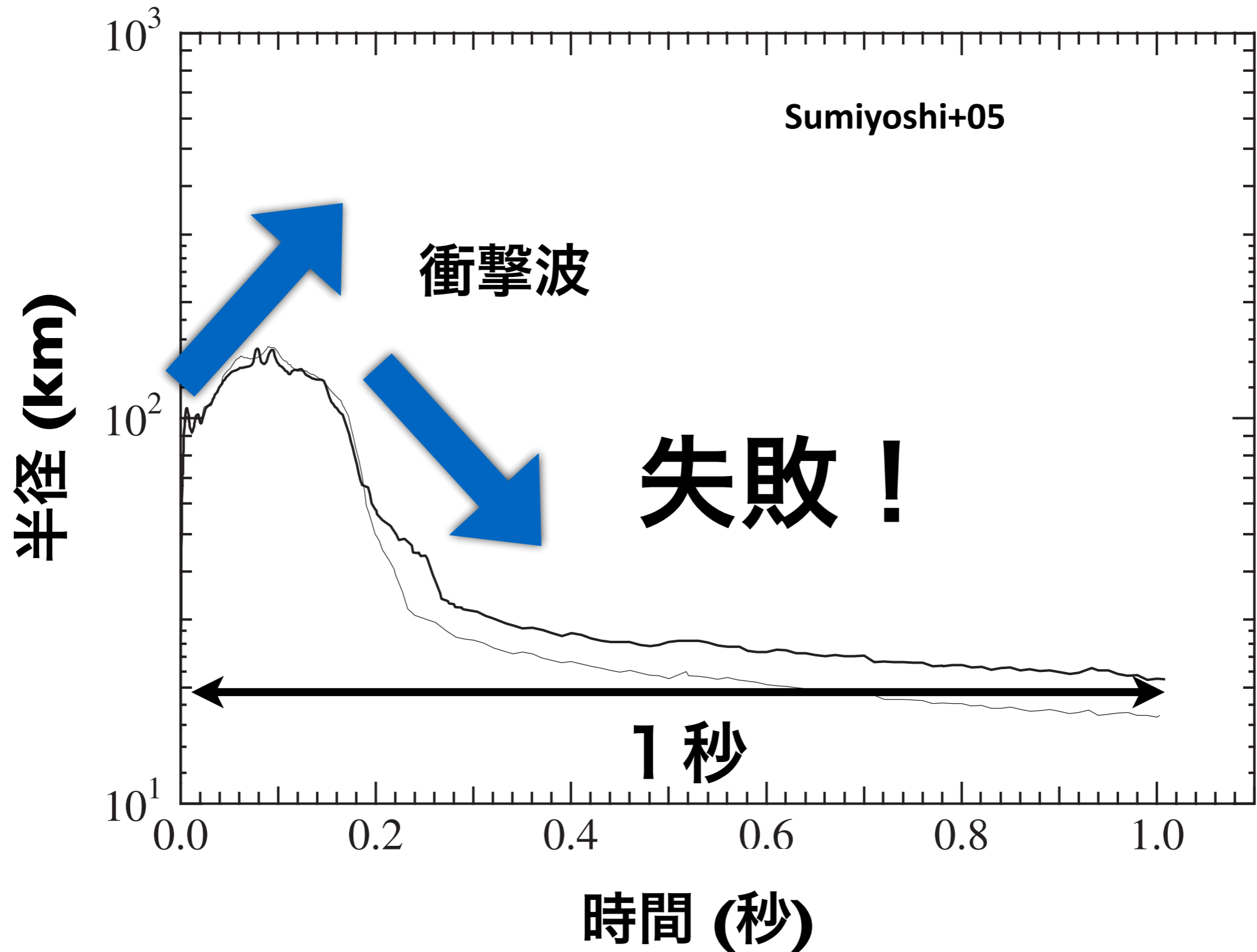


## 超新星爆発！

何がおきて、どうやって爆発するのか？



# コンピュータシミュレーションの結果 (1次元球対称を仮定)







# 重力崩壊型超新星

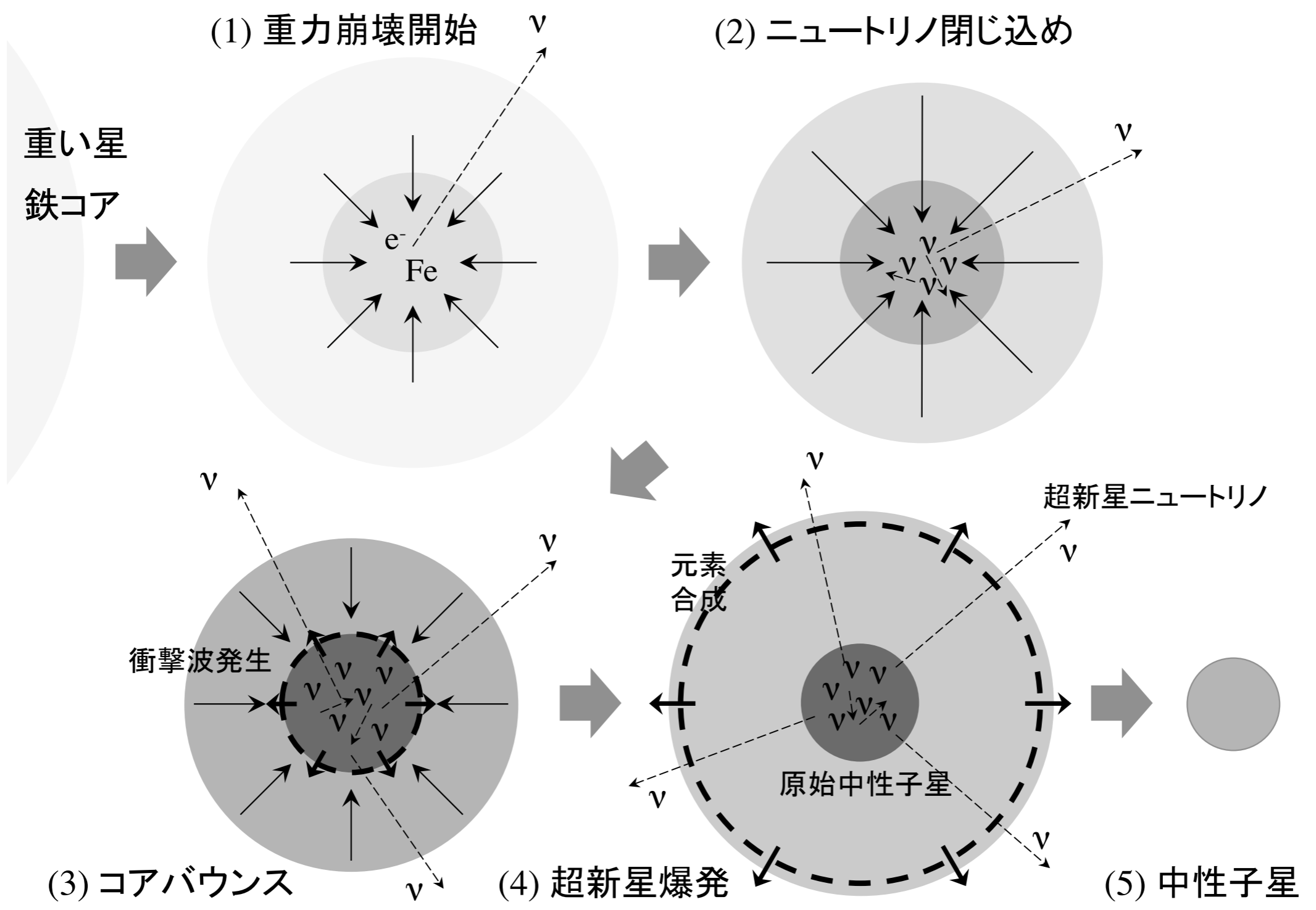
星の一生の最期に何が起きるのか？

膨大なエネルギーはどこから？

なぜ爆発するのか？

なぜ爆発は「難しい」のか？





(c) 原子核から読み解く超新星爆発の世界  
住吉光介さん著



# アメリカのグループの結果

A. Burrows

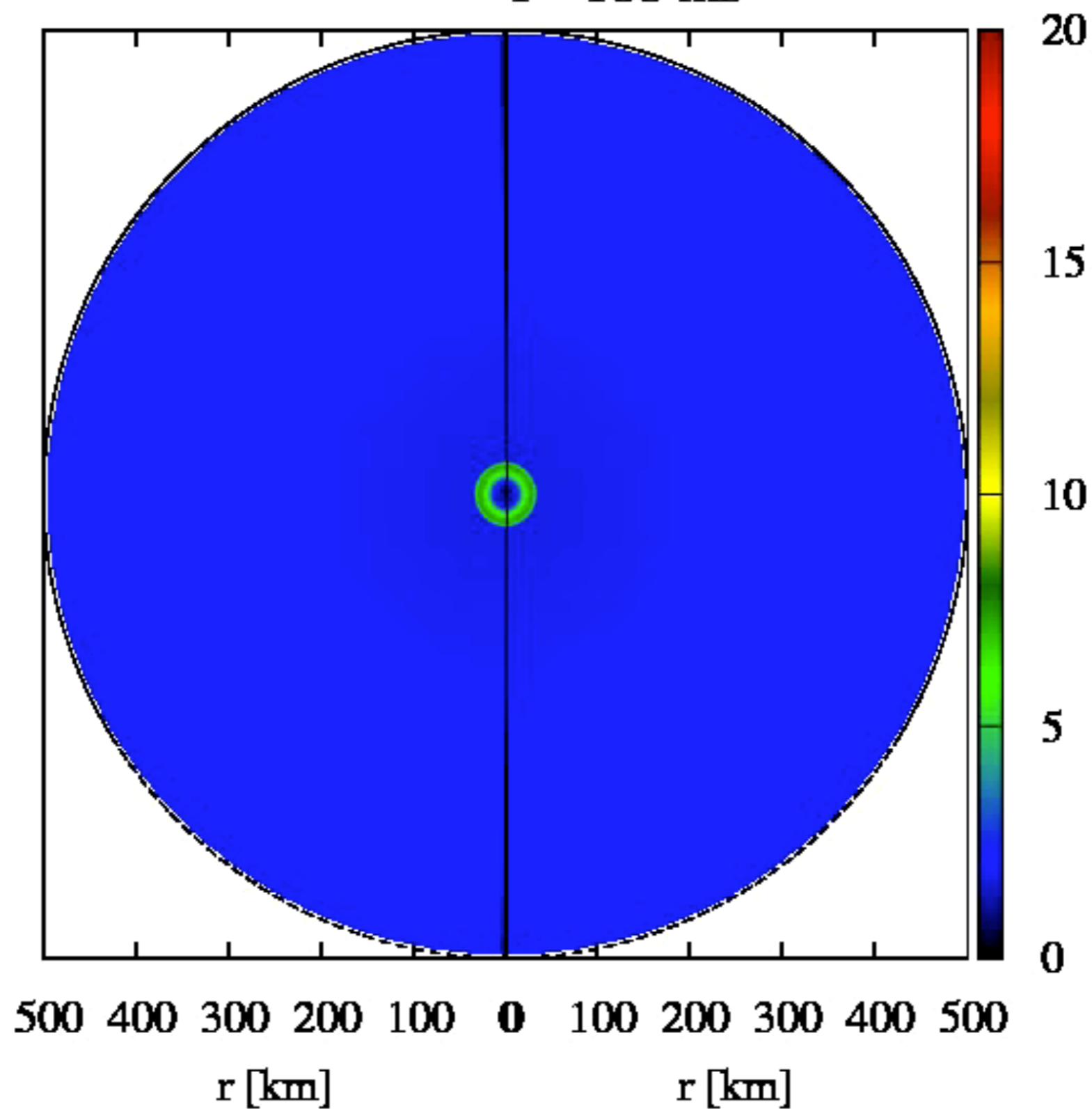
**S20.0 ENTROPY**  
**LEA VELOCITY**  
Time = -168.0 ms  
Radius = 500.00 km



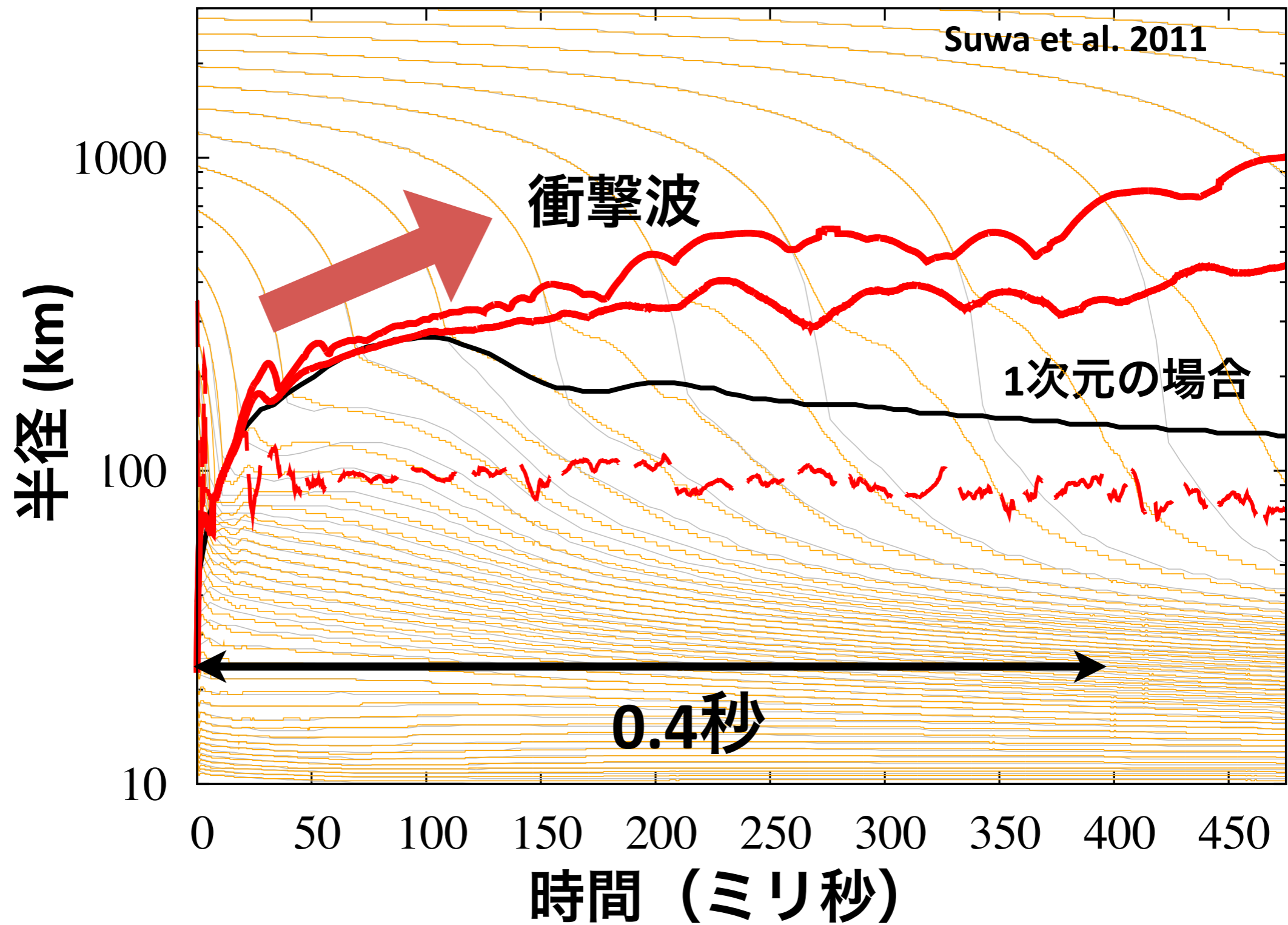
# 日本のグループの結果

Suwa et al. 2011

$T = 188 \text{ ms}$







まだ  $E \sim 10^{50}$  erg (1桁足りない)

現代宇宙物理学の最大の謎の1つ



# 超新星SN 1987A

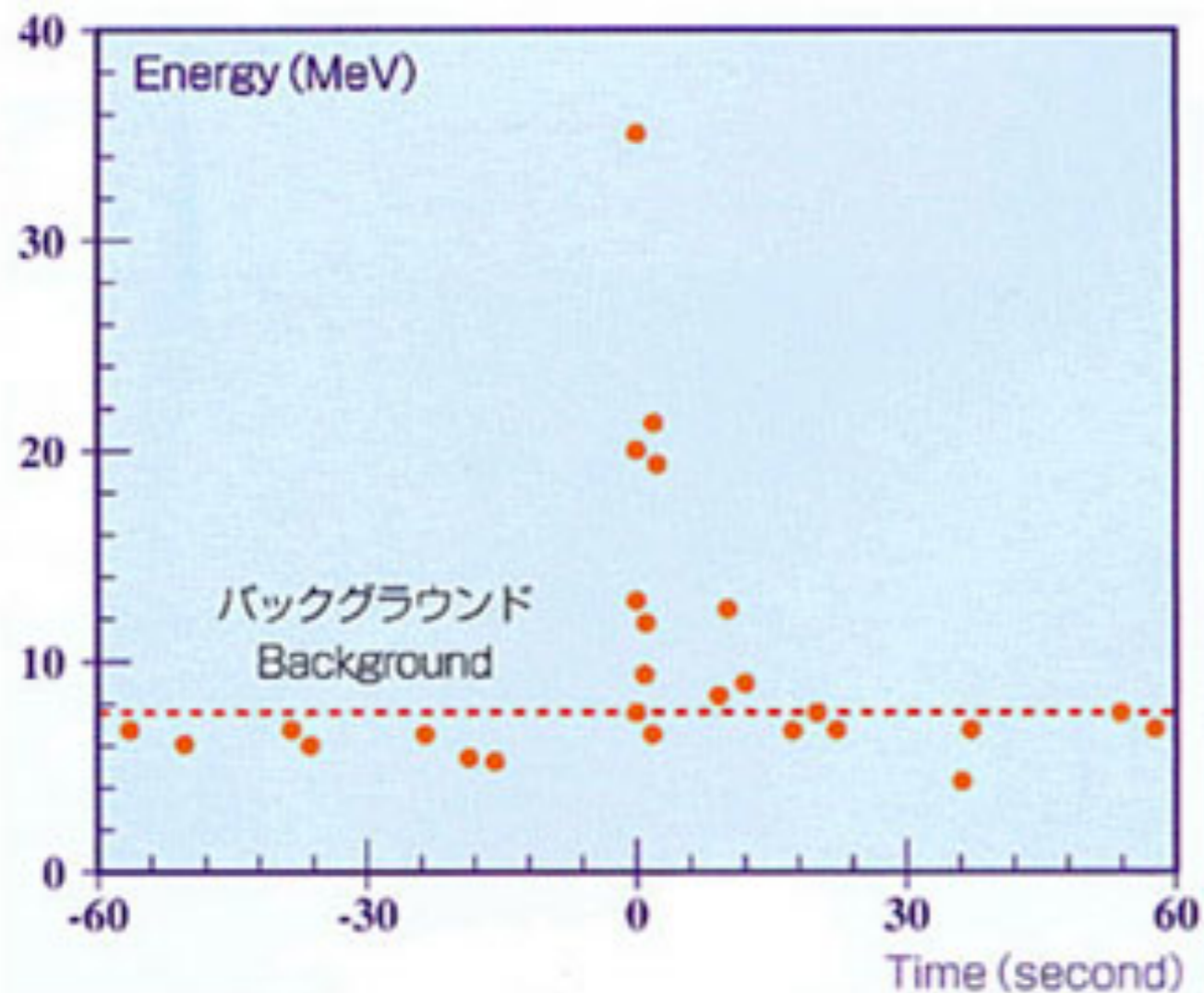
最近100年で最も近い超新星

(銀河系のとなり、大マゼラン雲、50 kpc)

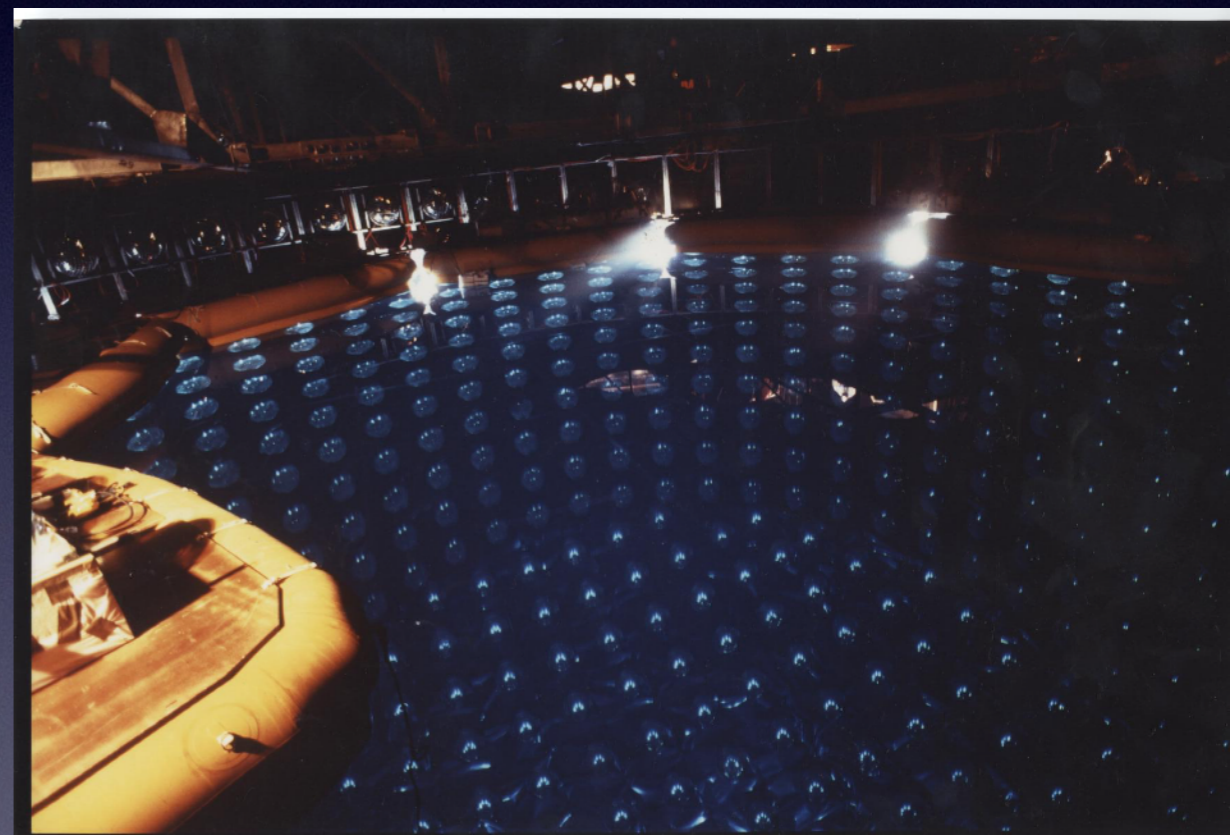




# SN 1987Aから ニュートリノを検出

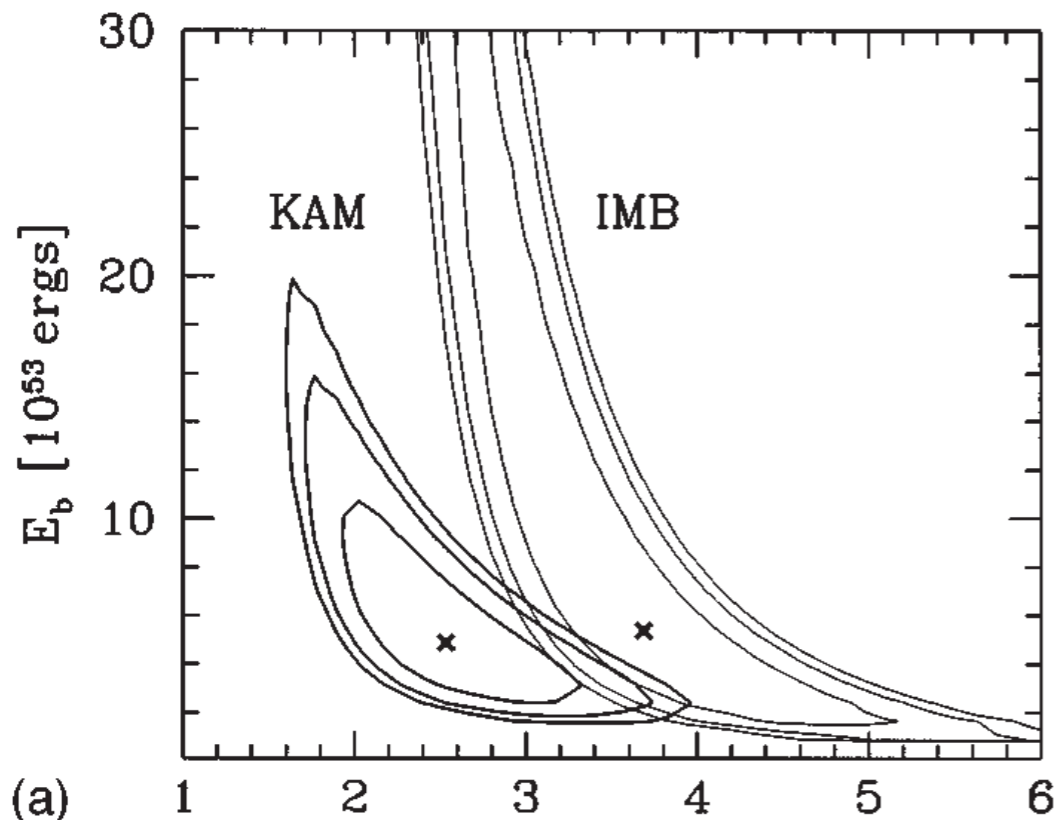


カミオカンデ

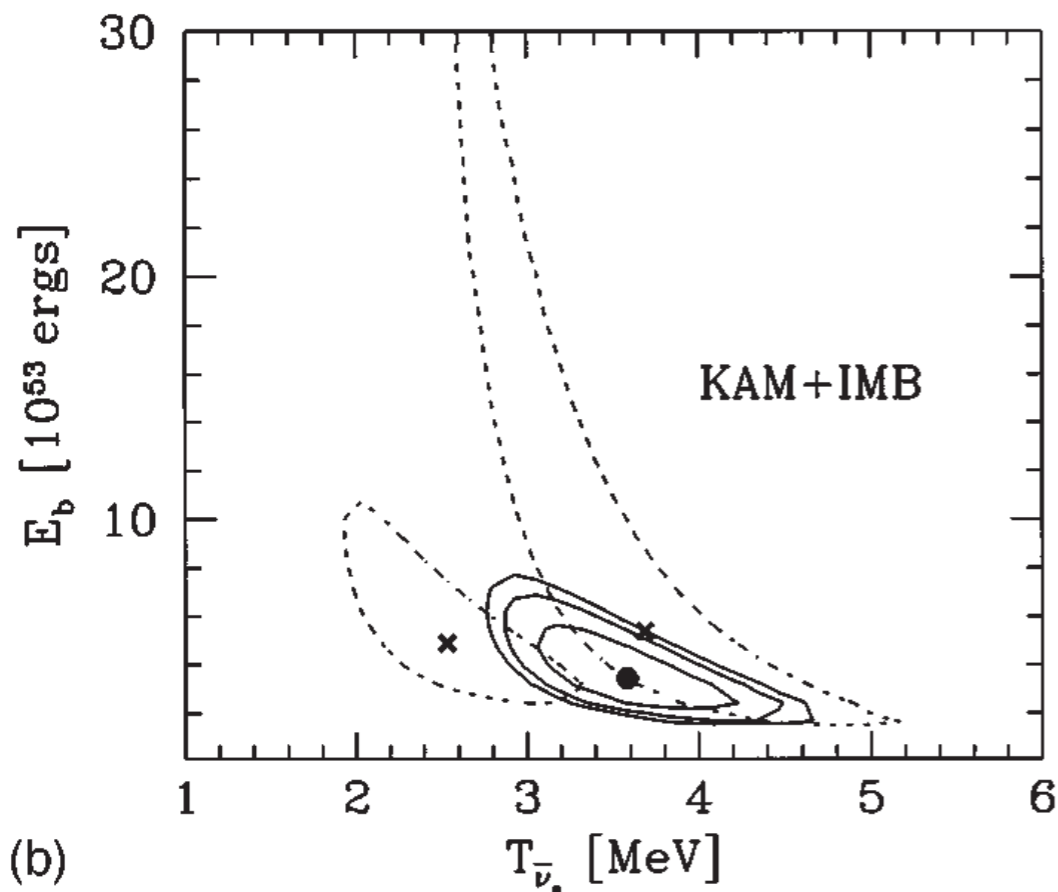


(C) ICRR





(a)



(b)

$E_{\nu} \sim 10^{53}$  ergが確認された！  
 $\Rightarrow$  ニュートリノ加熱  
 メカニズムの基礎

\* Observed energy  
 (anti electron neutrino) x 6



# レポート課題 5

カミオカンデで11イベントのニュートリノが観測された。

5a. 地球に届いた反電子ニュートリノのフラックスが

$f \sim 10^{10}$  個/cm<sup>2</sup>程度であることを示せ。

5b. SN 1987Aがニュートリノとして放出した

総エネルギーを概算せよ。

ただし、以下の仮定をして良い

\* カミオカンデの有効体積 2 kton

\* 主な反応は水分子中の陽子との反応 (反応断面積 $\sigma \sim 10^{-41}$  cm<sup>2</sup>)で、

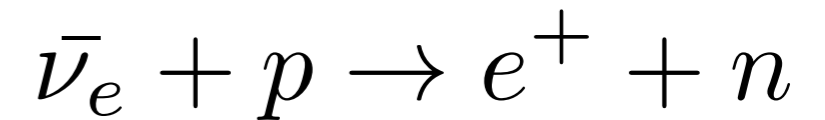
検出されるのは全て反電子ニュートリノ

\* 観測されたニュートリノのそれぞれのエネルギーは10 MeV

\* 超新星からはすべての(6種類の)フレーバーのニュートリノが

同数放出された

\* 大マゼラン雲までの距離 50 kpc





# 重力崩壊型超新星：まとめ

- **大質量星の進化の最後**
  - 電子捕獲と鉄の光分解により暴走的に重力崩壊
- **爆発のメカニズム**
  - 重力崩壊 => バウンス => 衝撃波停滞  
=> ニュートリノ加熱
  - SN 1987Aからのニュートリノが検出された
  - 詳細な爆発メカニズムは未だ解明されていない
- **爆発時に新たな元素を合成**
  - $^{56}\text{Ni}$  => 超新星の熱源
  - 親星で作った元素とともに星間空間へ放出



# Appendix



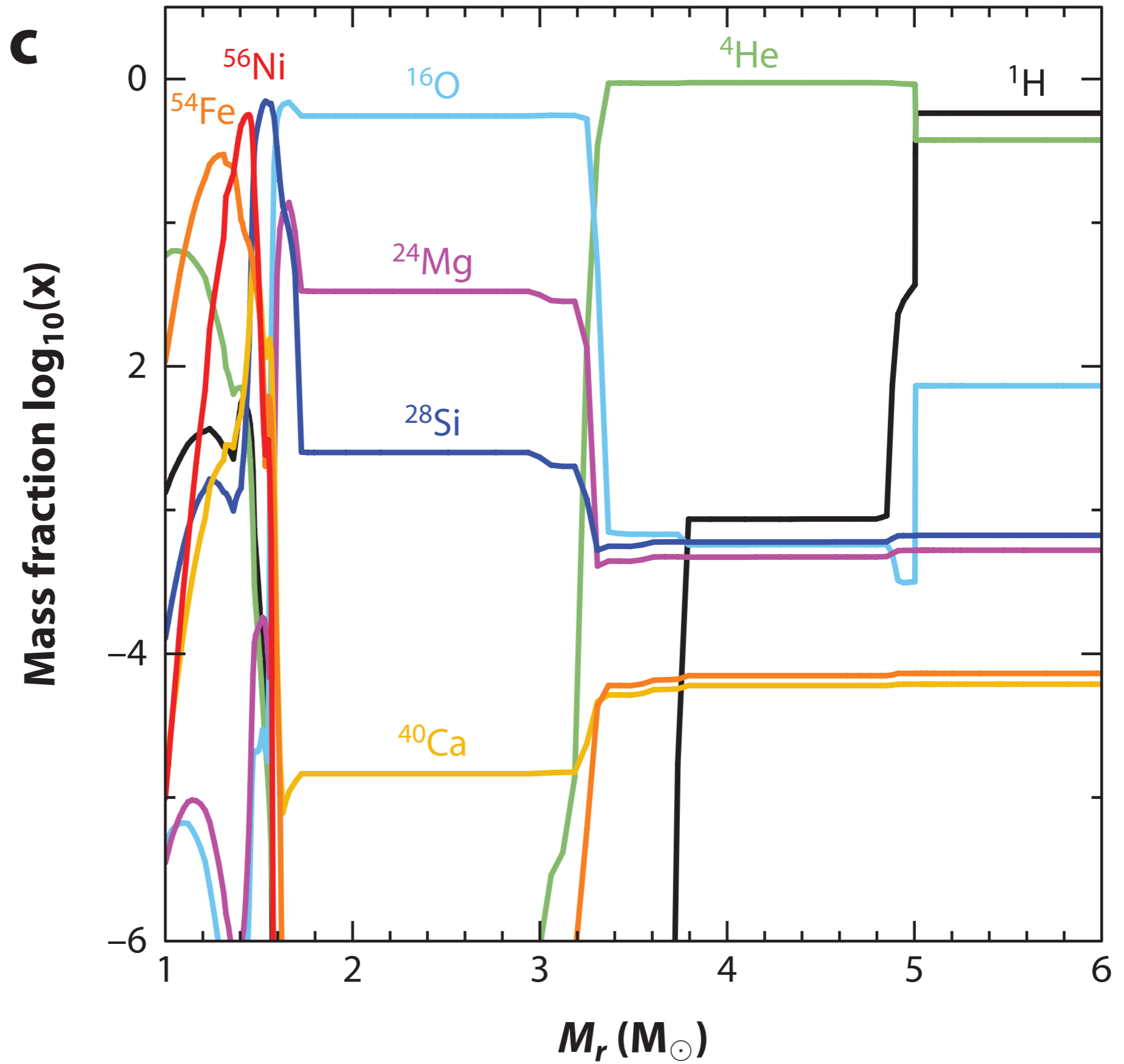
# 「爆発的元素合成」

衝撃波にされされた高温物質中の元素合成  
星の中の元素合成より圧倒的に短い時間  
=> より高い温度が必要

名称	主な生成元素	燃焼温度	星の中の場合
爆発的炭素・ネオン燃焼	O, Mg, Si, Ne	$2 \times 10^9$ K	$0.7 \times 10^9, 1.5 \times 10^9$
爆発的酸素燃焼	O, Si, S, Ar, Ca	$3-4 \times 10^9$ K	$\sim 3 \times 10^9$
不完全ケイ素燃焼	Si, S, Fe, Ar, Ca	$4 \times 10^9$ K	
完全ケイ素燃焼	Fe, He, Ni, Zn, Co	$5 \times 10^9$ K	$\sim 4 \times 10^9$



# 爆発前





爆発後

