

# Section 11.

## 超新星爆発

11.1 重力崩壊型超新星

11.2 宇宙の元素の起源



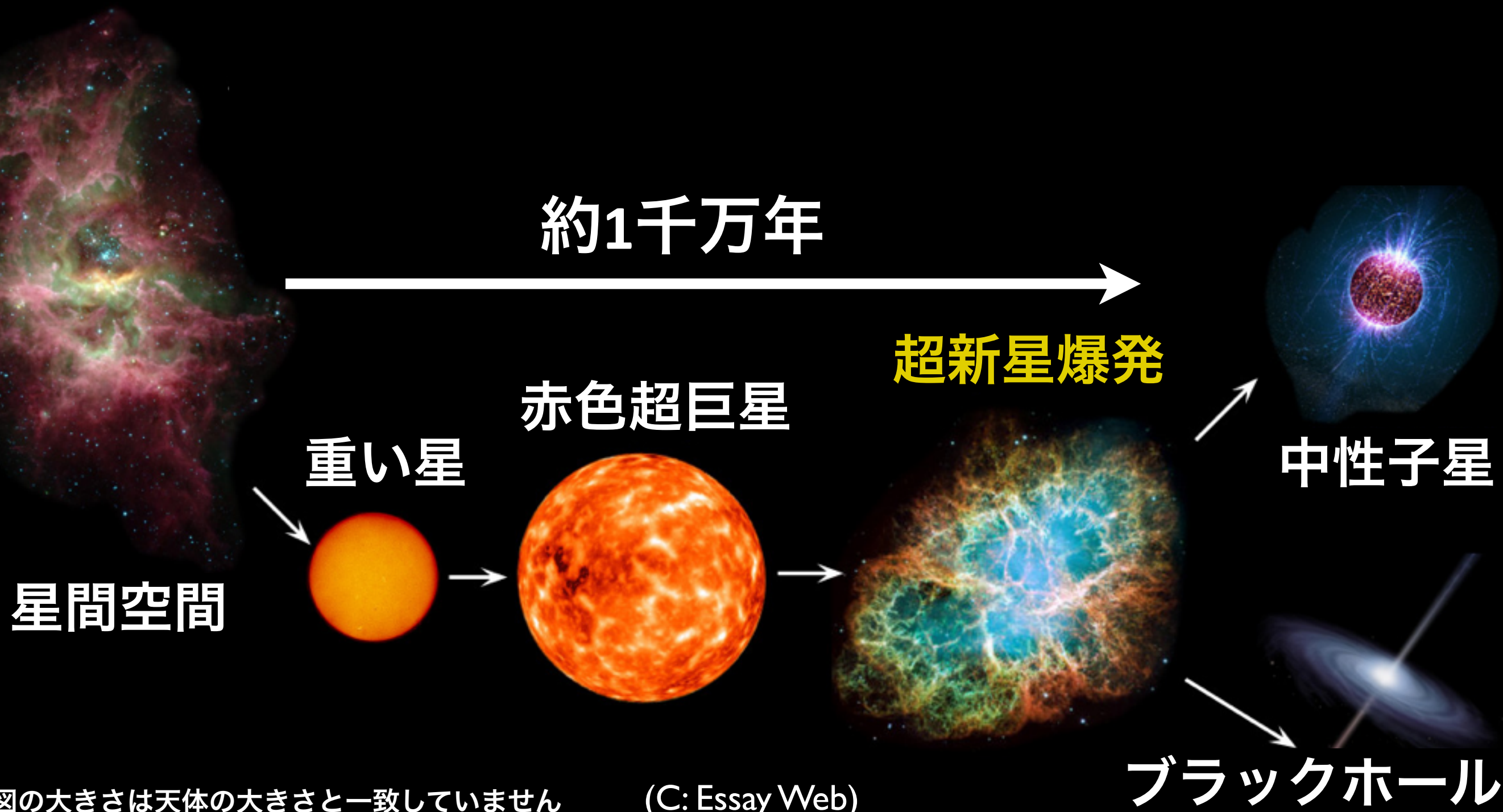
# さまざまな疑問を**物理**を使って理解しよう

- 星の中はどうなっているの？
- なぜ重い星の方が大きいのか？
- なぜ星は明るく輝くのか？
- なぜ重い星の方が明るいのか？
- なぜ星は「進化」するのか？
- なぜ質量で星の運命が変わるのか？
- **なぜ星は星でいられるのか？**
- **なぜ一部の星は爆発するのか？**
- ...



# 1. 重い星の場合

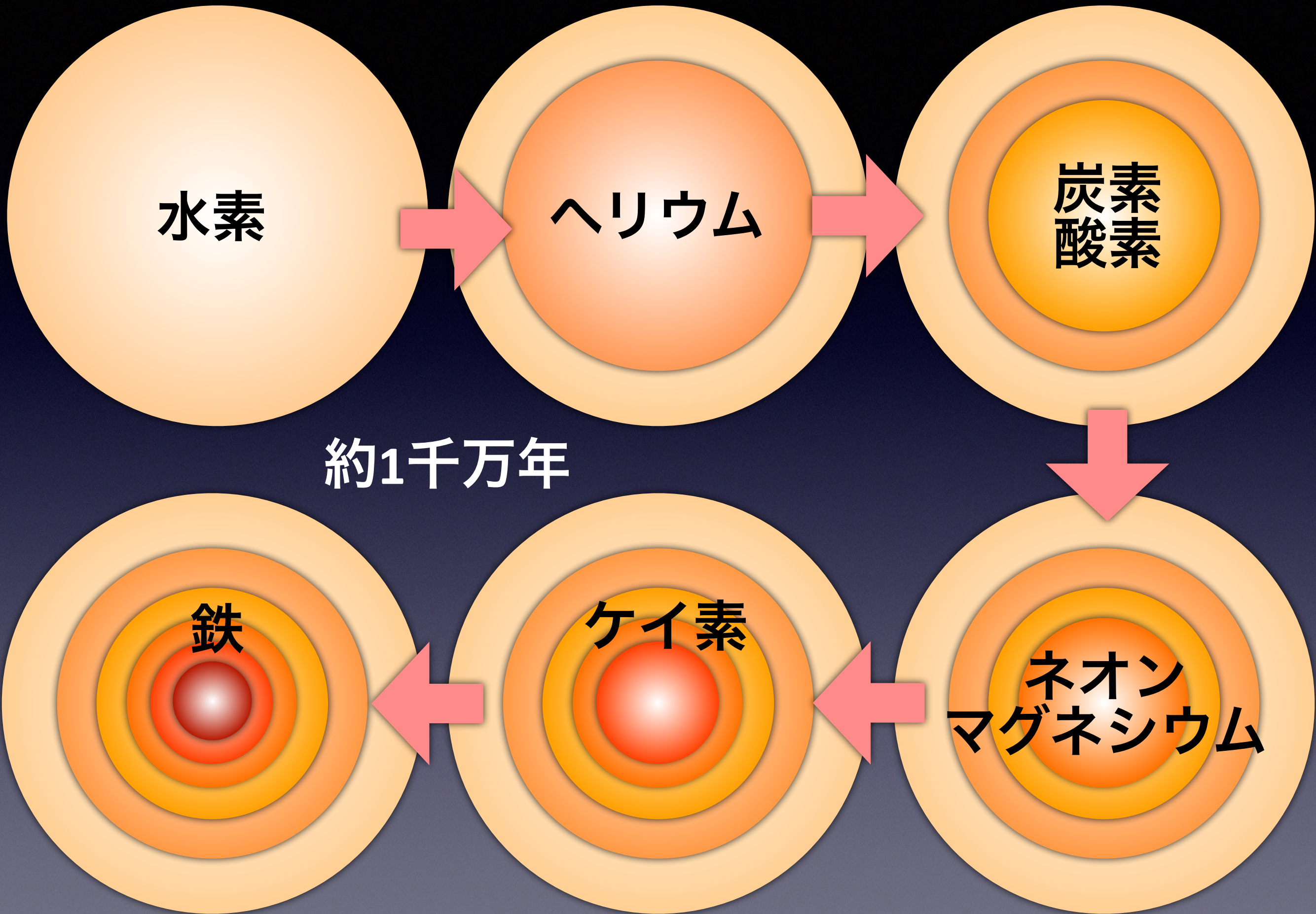
\* 太陽の10倍以上



図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)



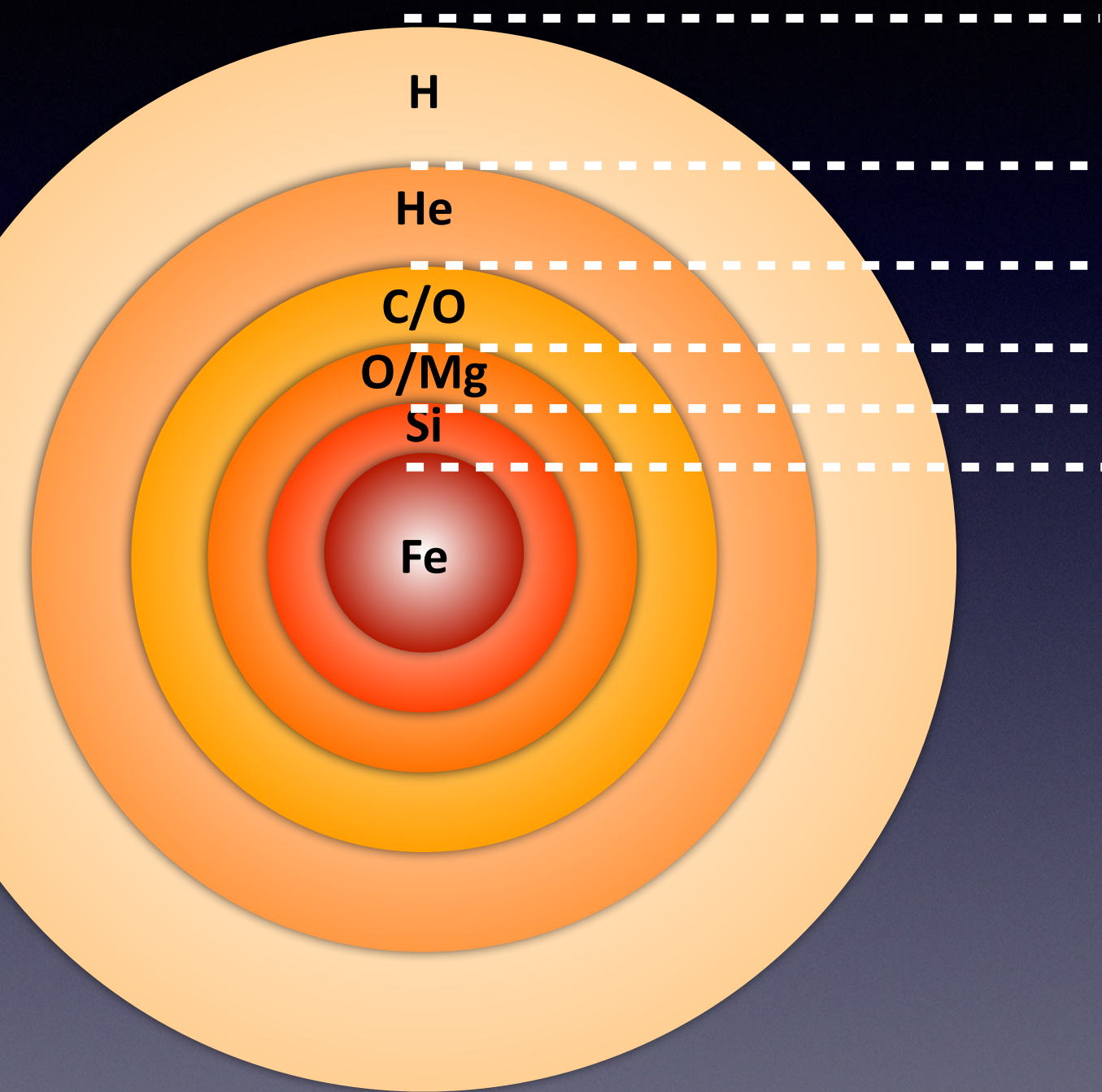


図の大きさは天体の大きさと一致していません



# 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

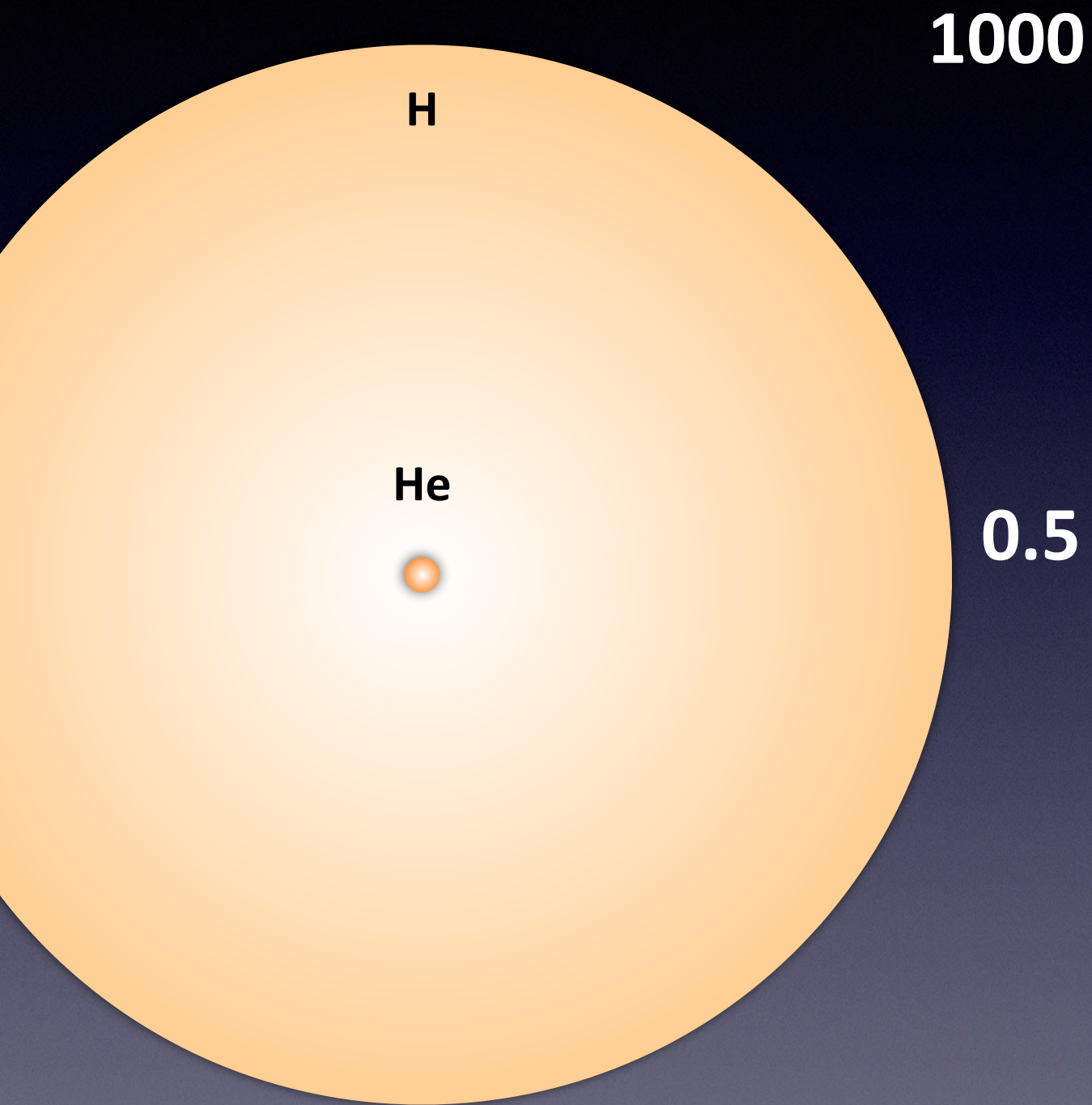
太陽半径 =  $7 \times 10^{10}$  cm

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

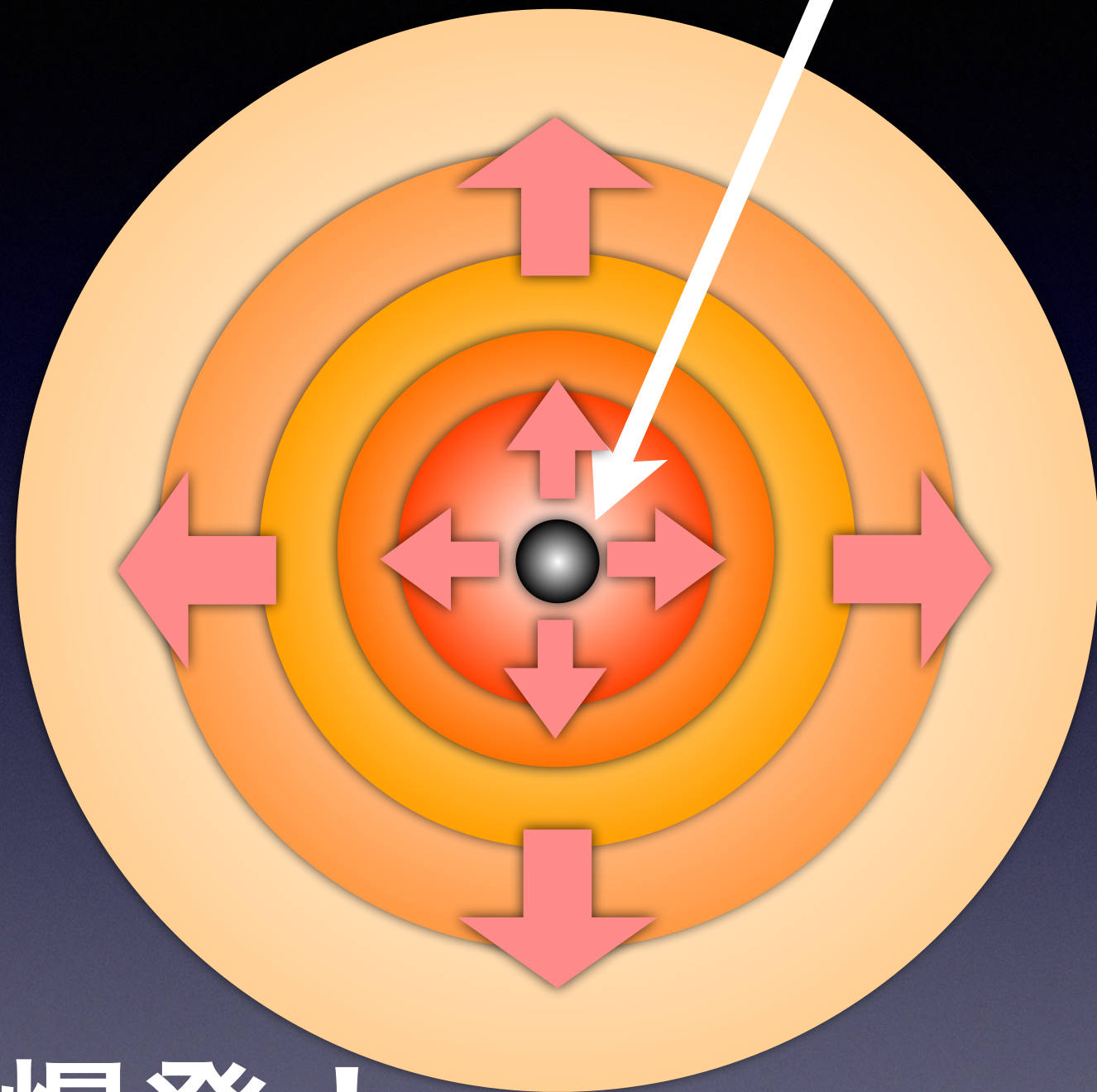
(本当はもっと極端)





# 「重力崩壊」

中性子星

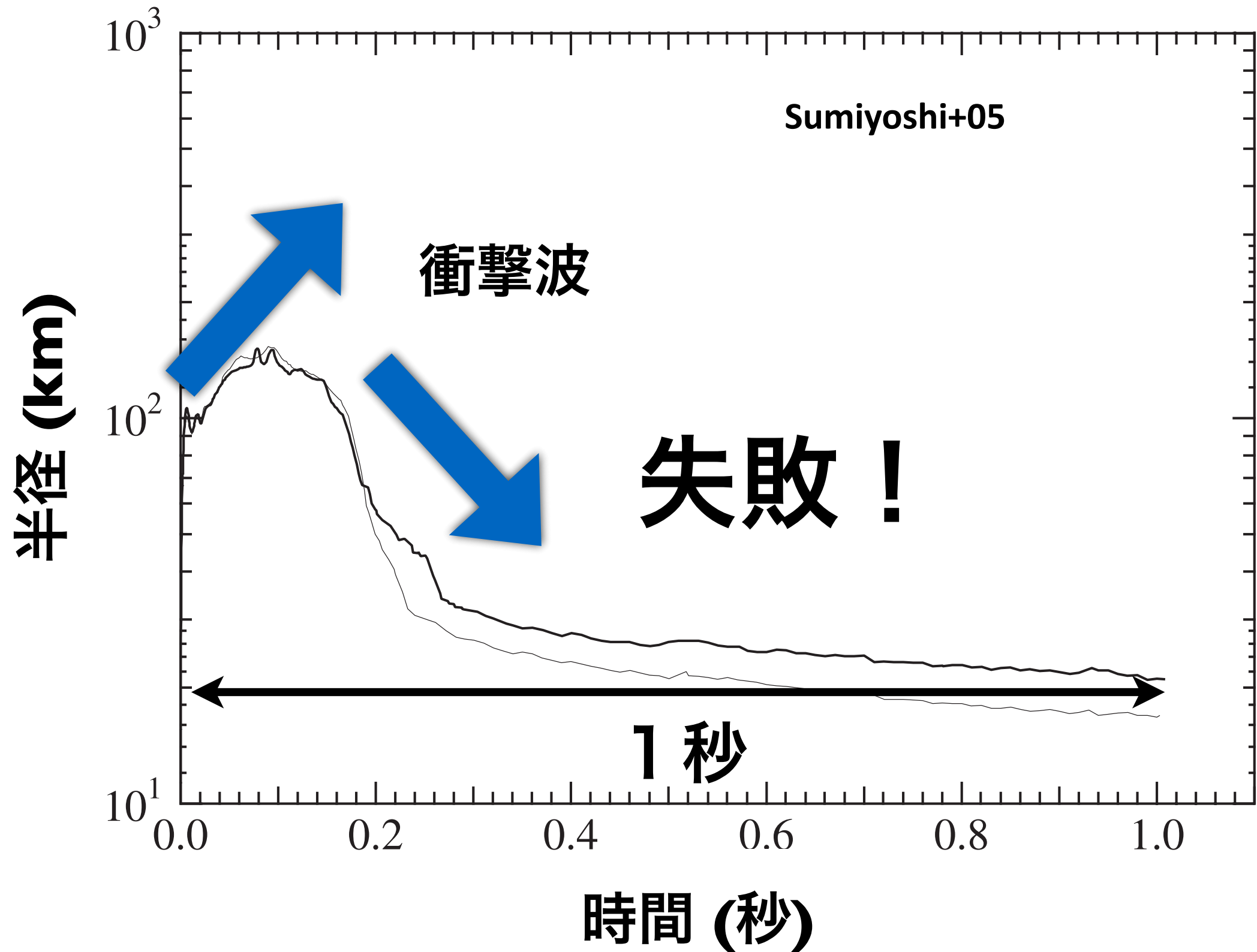


## 超新星爆発！

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？

なぜ重力崩壊が起きるのか？

膨大なエネルギーはどこから？

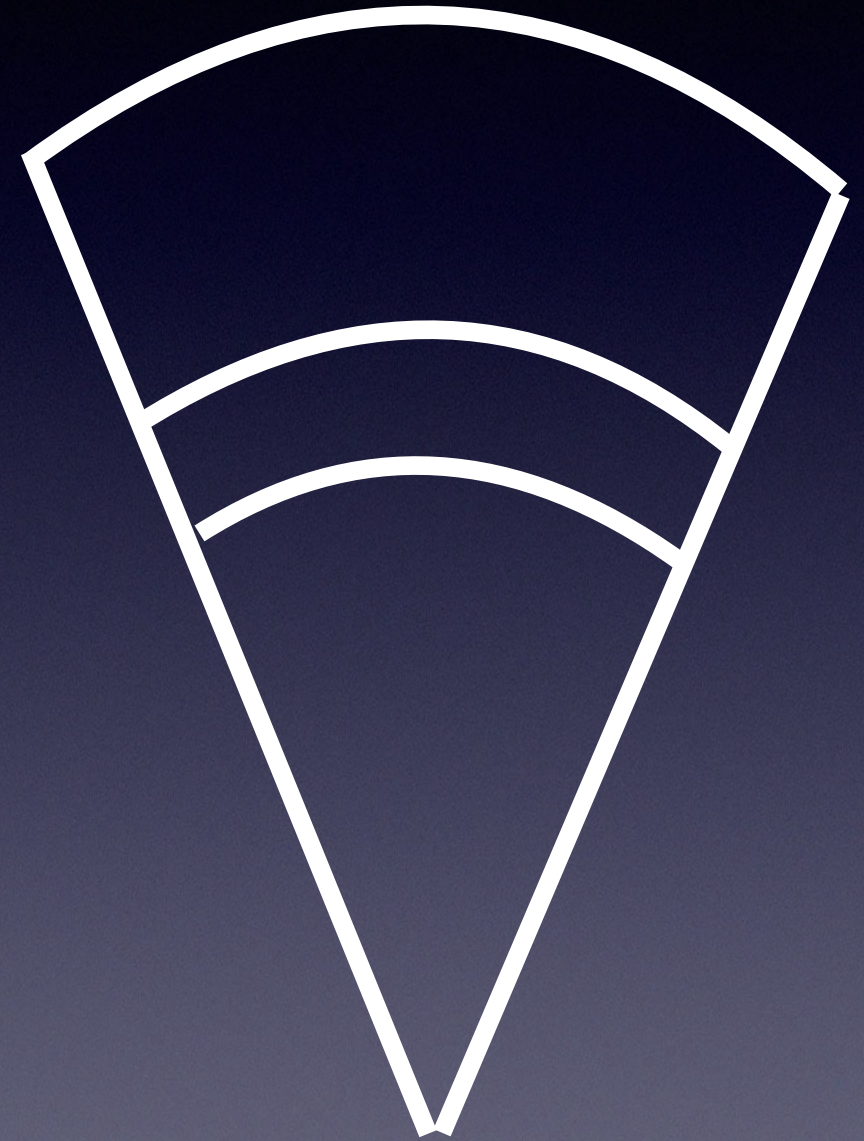
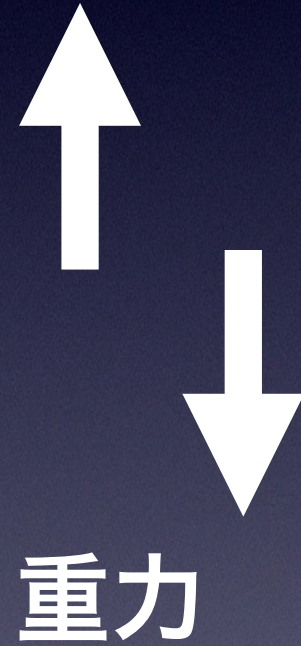
なぜ爆発するのか？

なぜ爆発は「難しい」のか？



# 星の中の静水圧平衡

圧力勾配



力は釣り合っている  
だけどそれは「安定」？



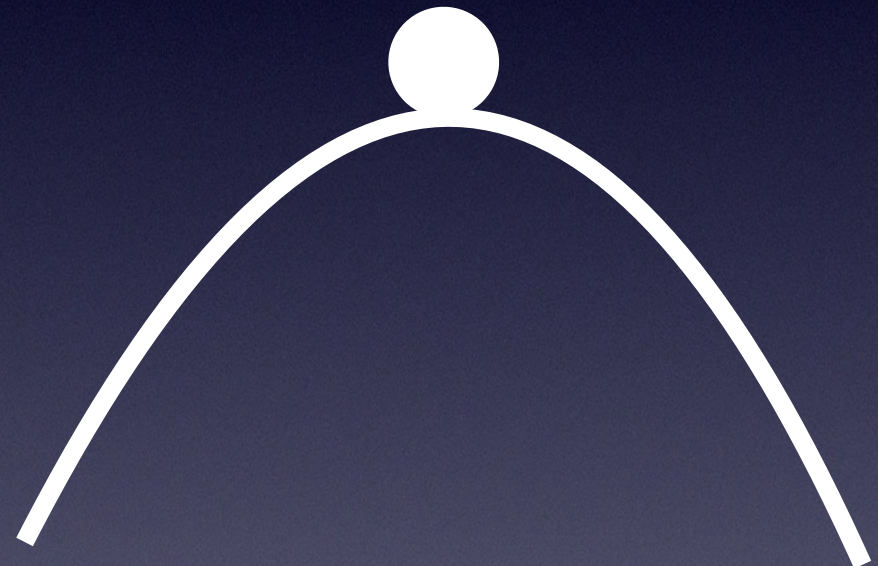
# 力学的安定性

安定



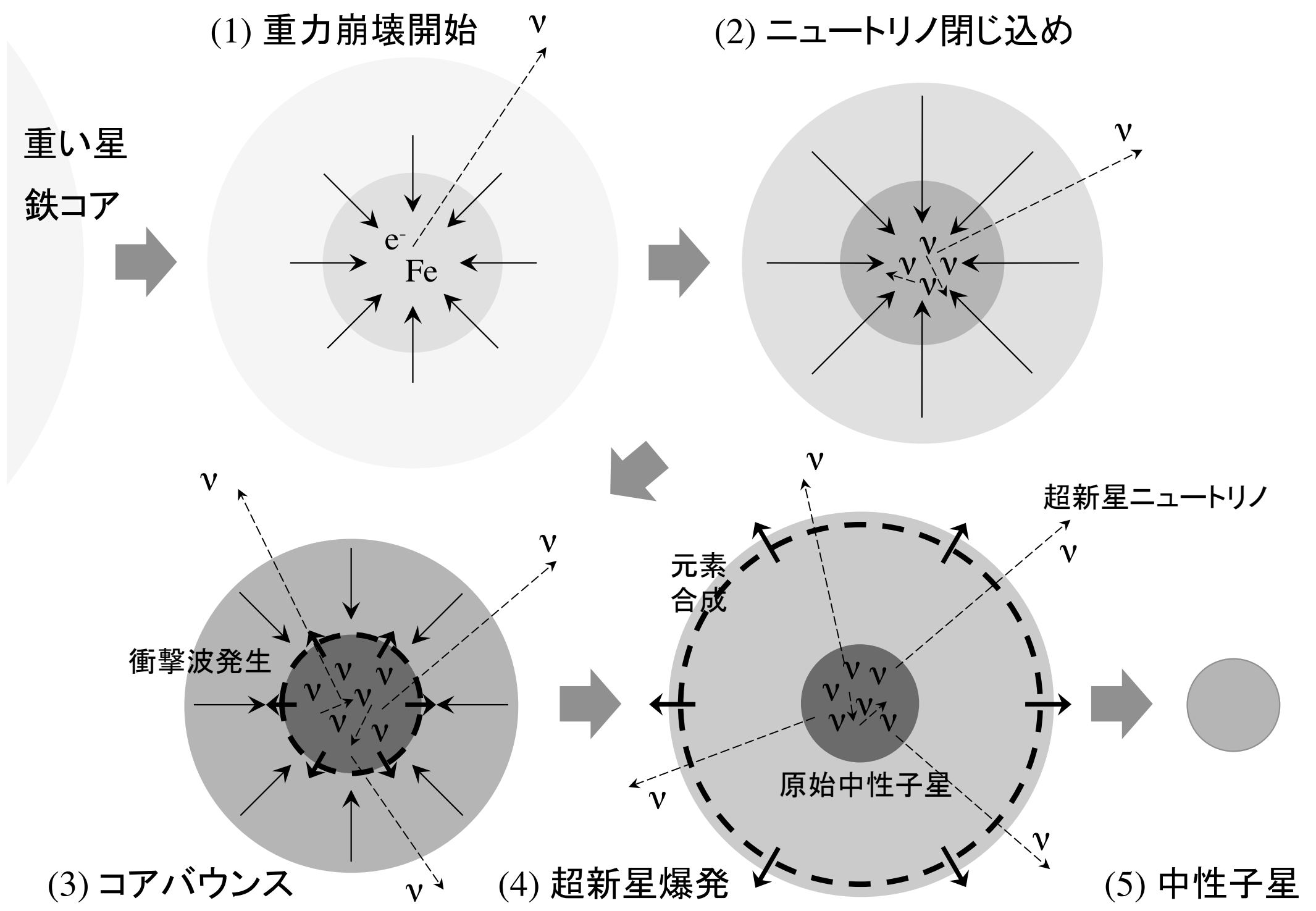
擾乱を与えても  
元の位置に戻る

不安定



擾乱を与えると  
成長する





(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

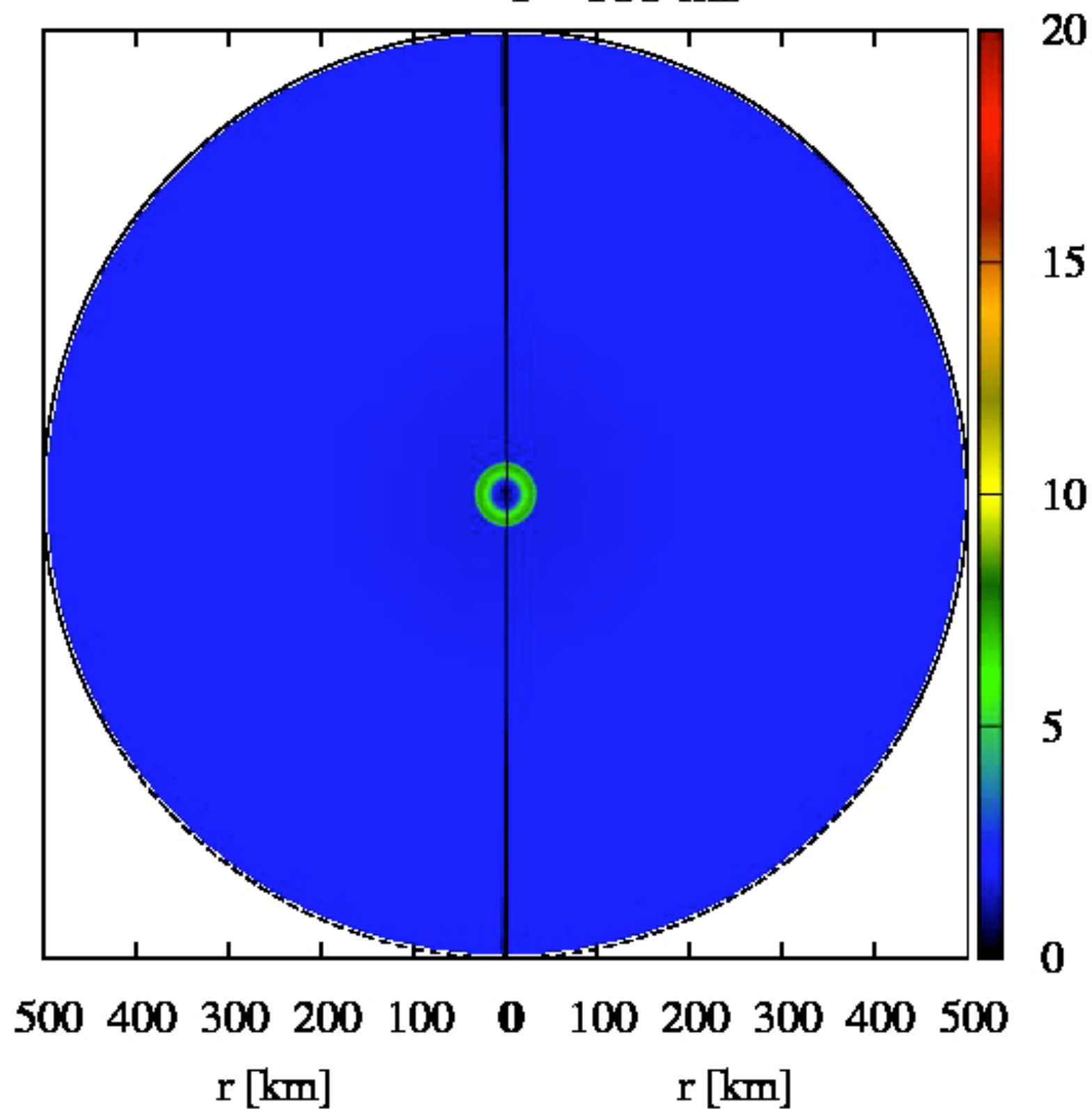
**S20.0 ENTROPY**  
**LEA VELOCITY**  
Time = -168.0 ms  
Radius = 500.00 km



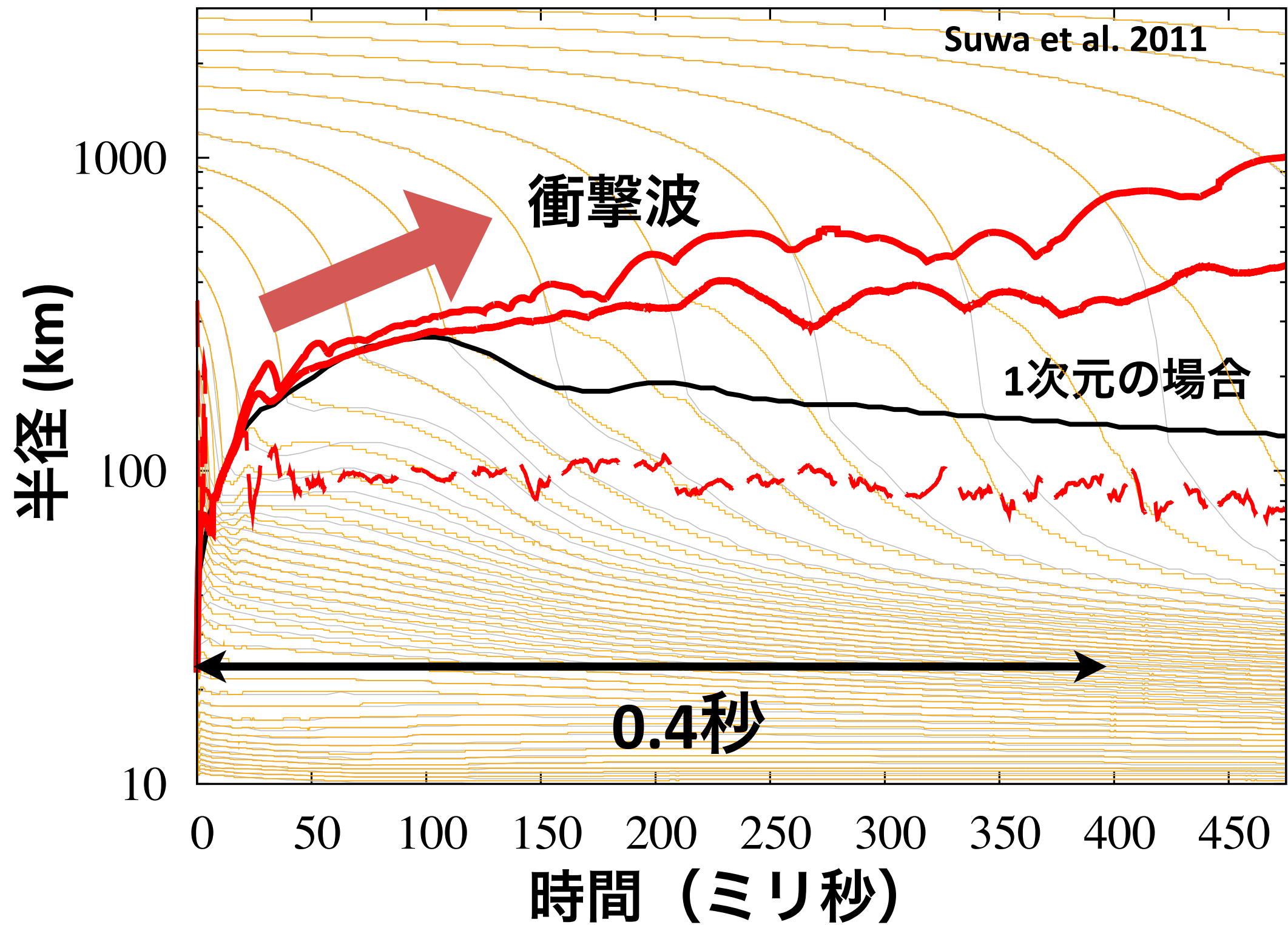
# 日本のグループの結果

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

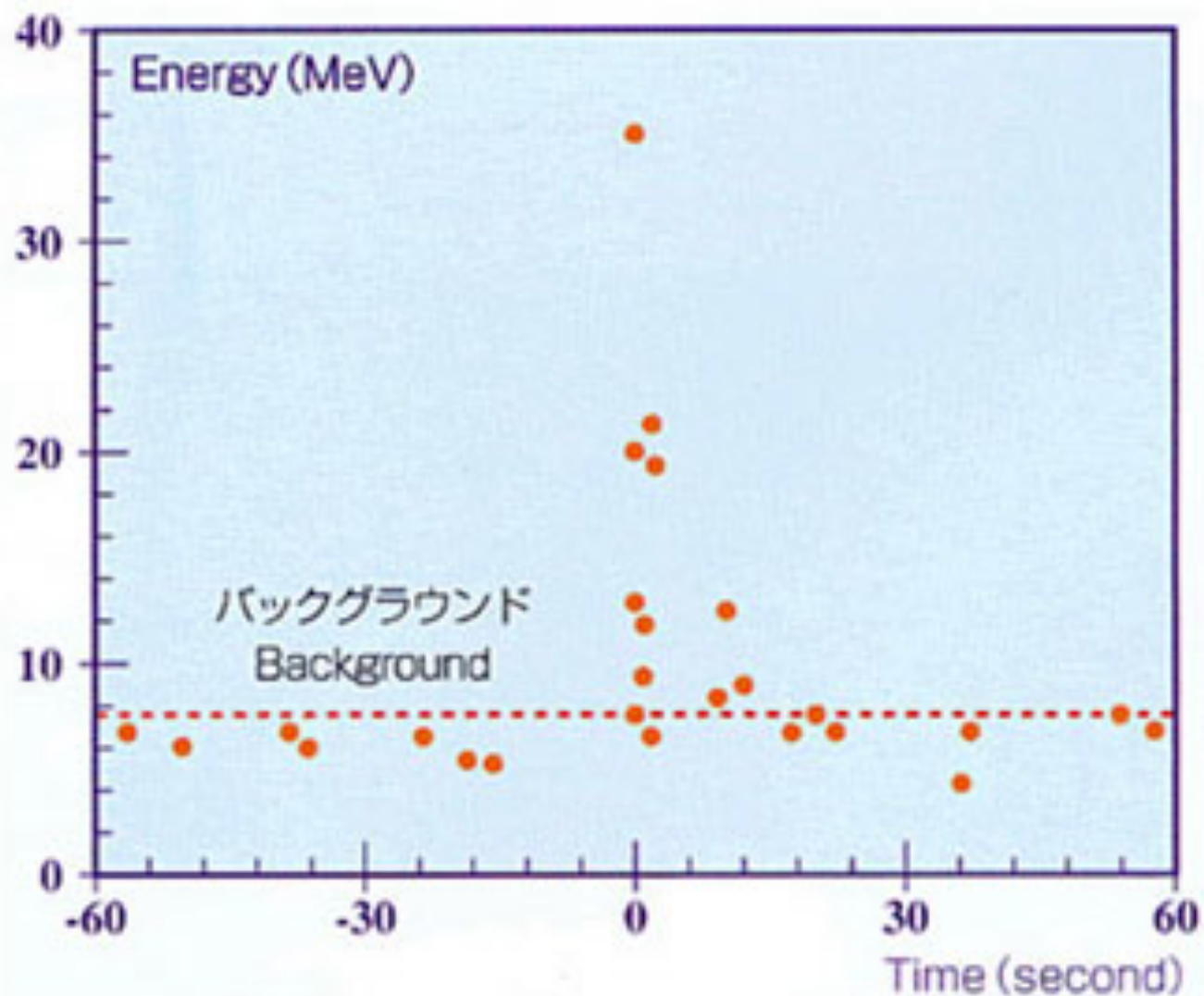
最近100年で最も近い超新星

(銀河系のとなり、大マゼラン雲、50 kpc)

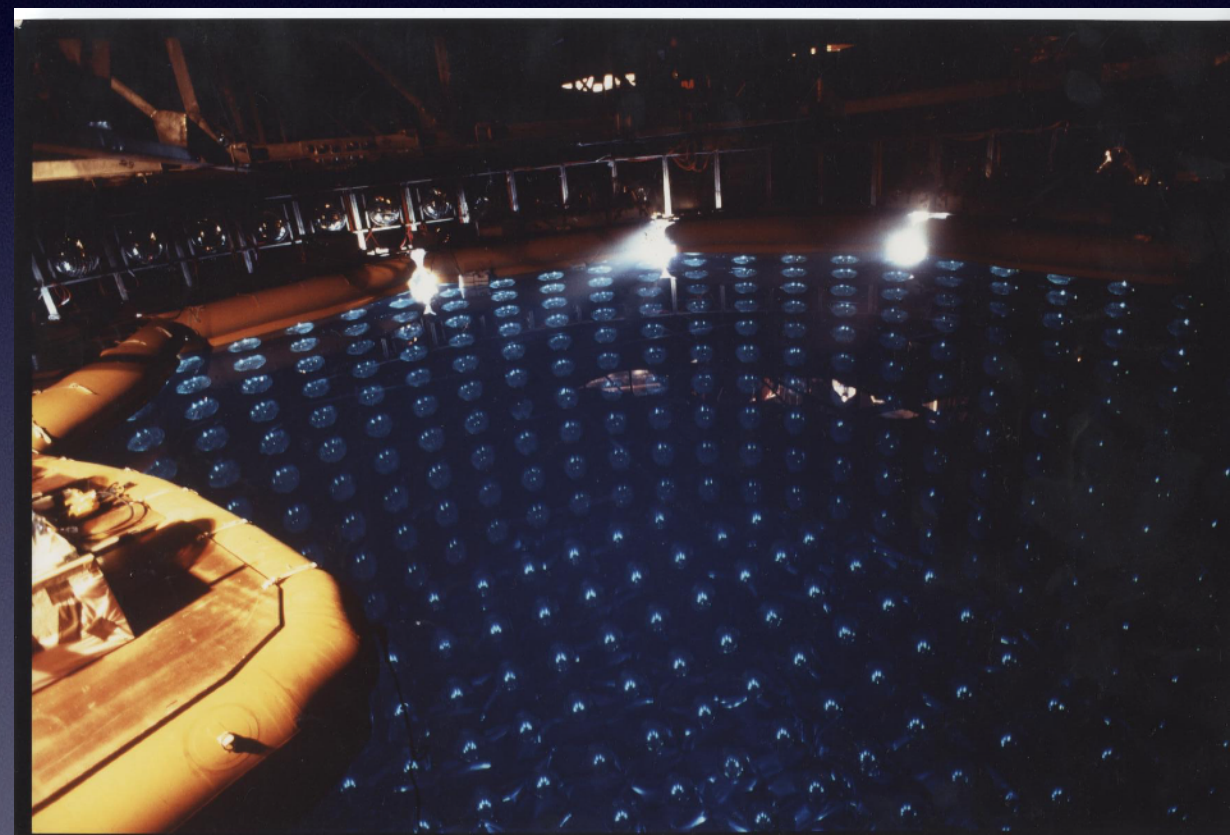




# SN 1987Aから ニュートリノを検出

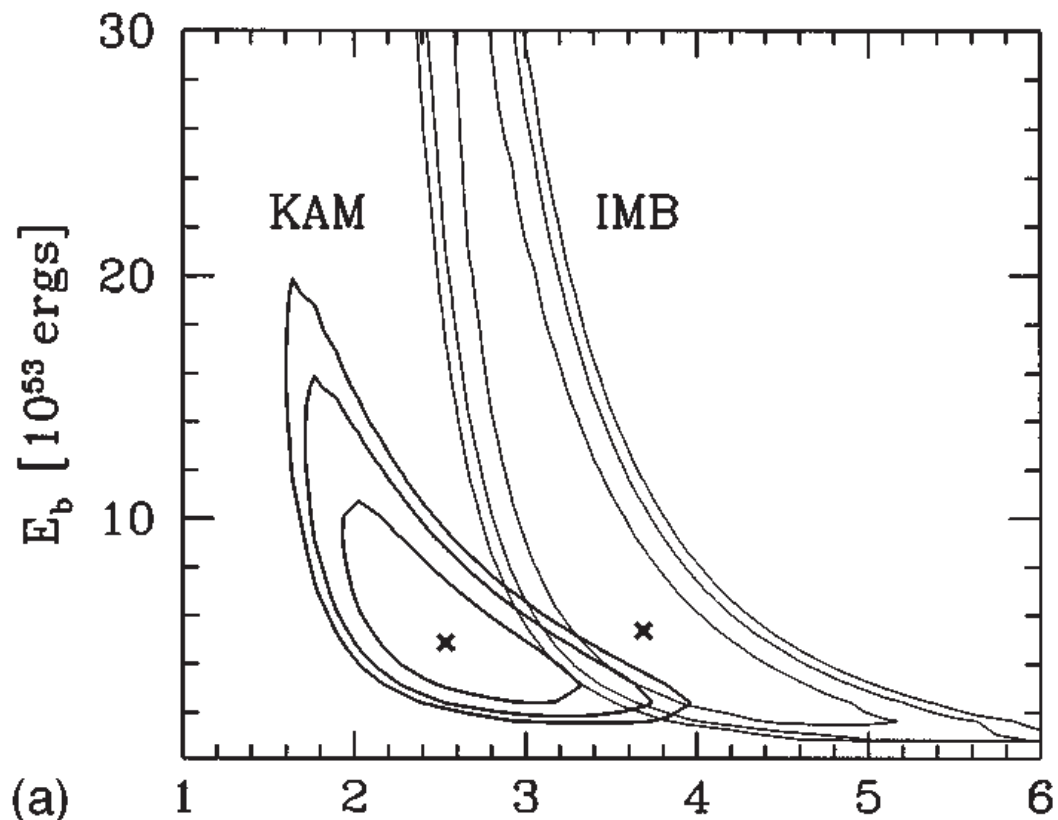


カミオカンデ

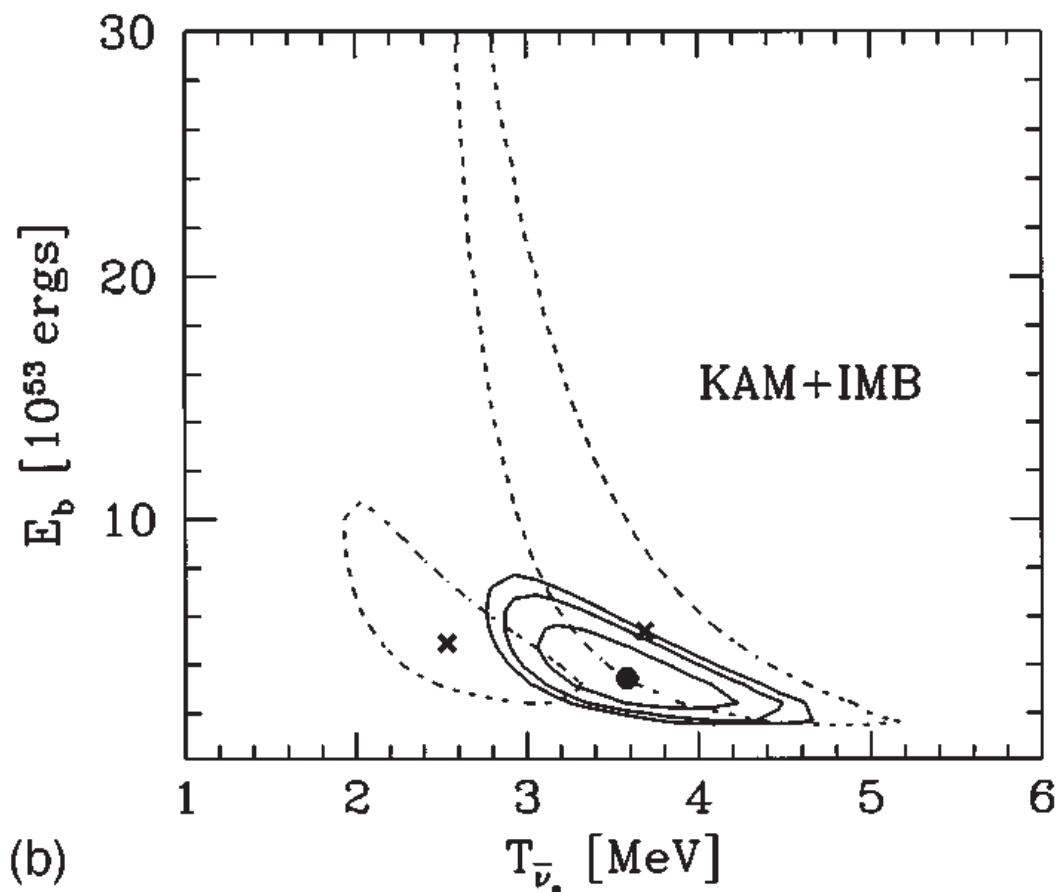


(C) ICRR





(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



# まとめ

- **星の力学的安定性**

- 力学的に安定な条件 adiabatic index  $\gamma > 4/3$   
(密度上昇に対して、圧力が十分に上がる)
- 通常の星は安定：理想気体  $\gamma = 5/3$
- 中立安定 ( $\gamma = 4/3$ )：輻射、超相対論な縮退電子
- 不安定 ( $\gamma < 4/3$ )：吸熱反応など

- **重力崩壊型超新星**

- 電子捕獲と鉄の光分解により暴走的に重力崩壊 (力学的不安定)
- 重力崩壊 => バウンス => 衝撃波停滞 => ニュートリノ加熱
- エネルギー源：重力エネルギー  
=> 一部がニュートリノによって外層に渡される (SN 1987A)
- 詳細な爆発メカニズムは未だ解明されていない



# Section 11.

## 超新星爆発

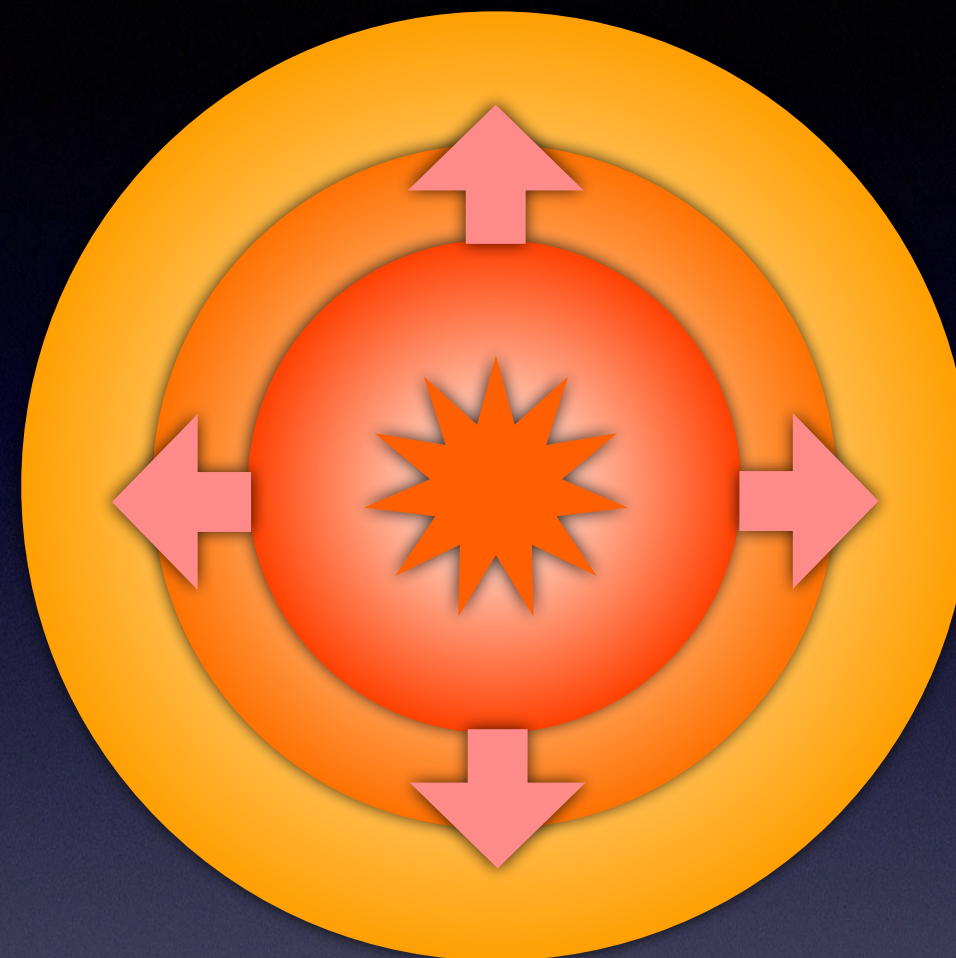
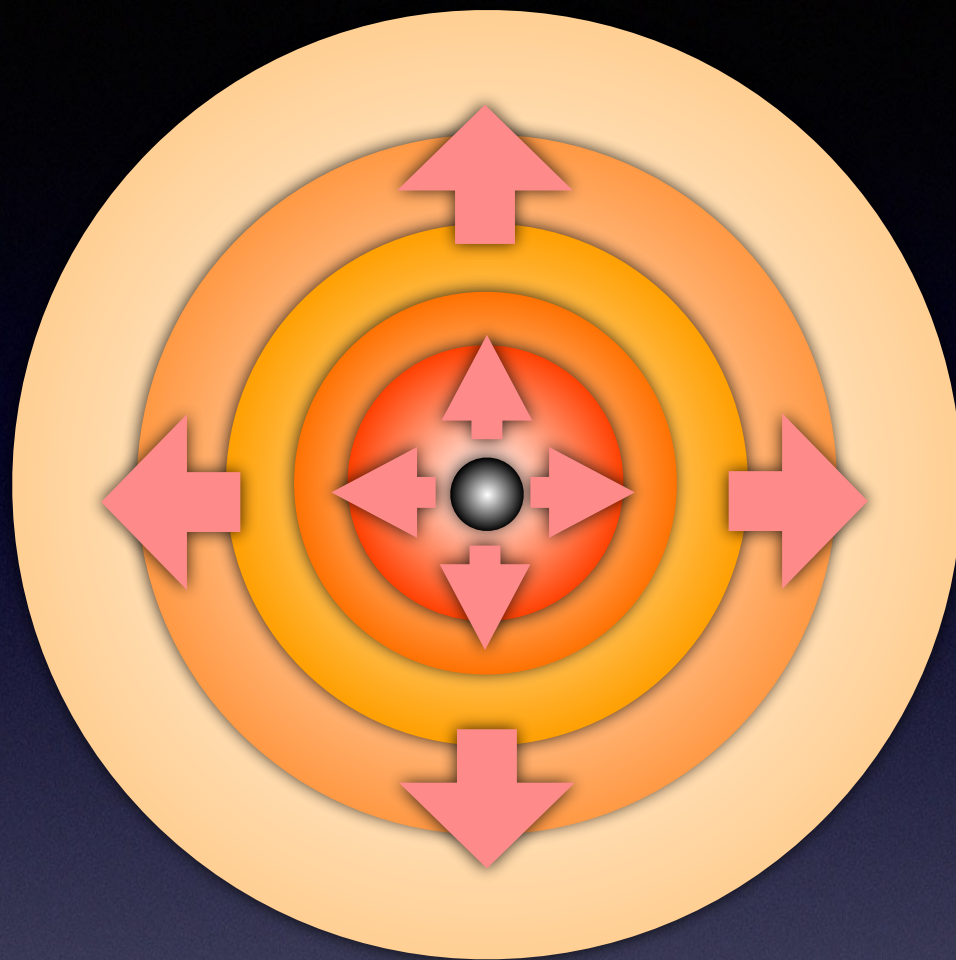
11.1 重力崩壊型超新星

11.2 宇宙の元素の起源



# 「重力崩壊型」超新星

# 「核爆発型」超新星



親星

大質量星  
短寿命

小・中質量星（連星）  
長寿命

放出元素

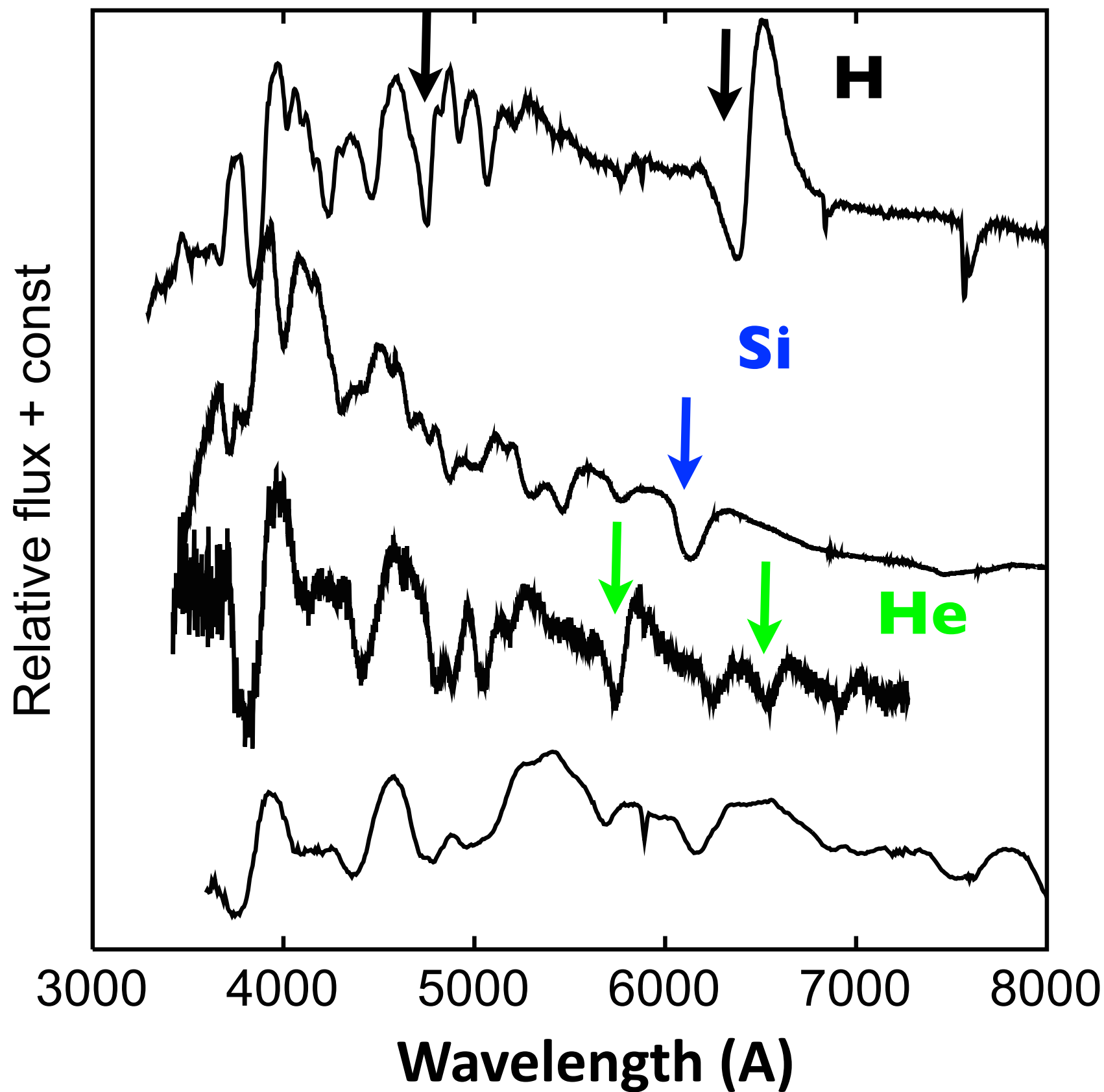
主に親星の元素  
(O, Mg, Caなど)

爆発時に合成する元素  
(Si, Ca, Feなど)

私たちの身の回りの元素は星の中や超新星爆発で作られた

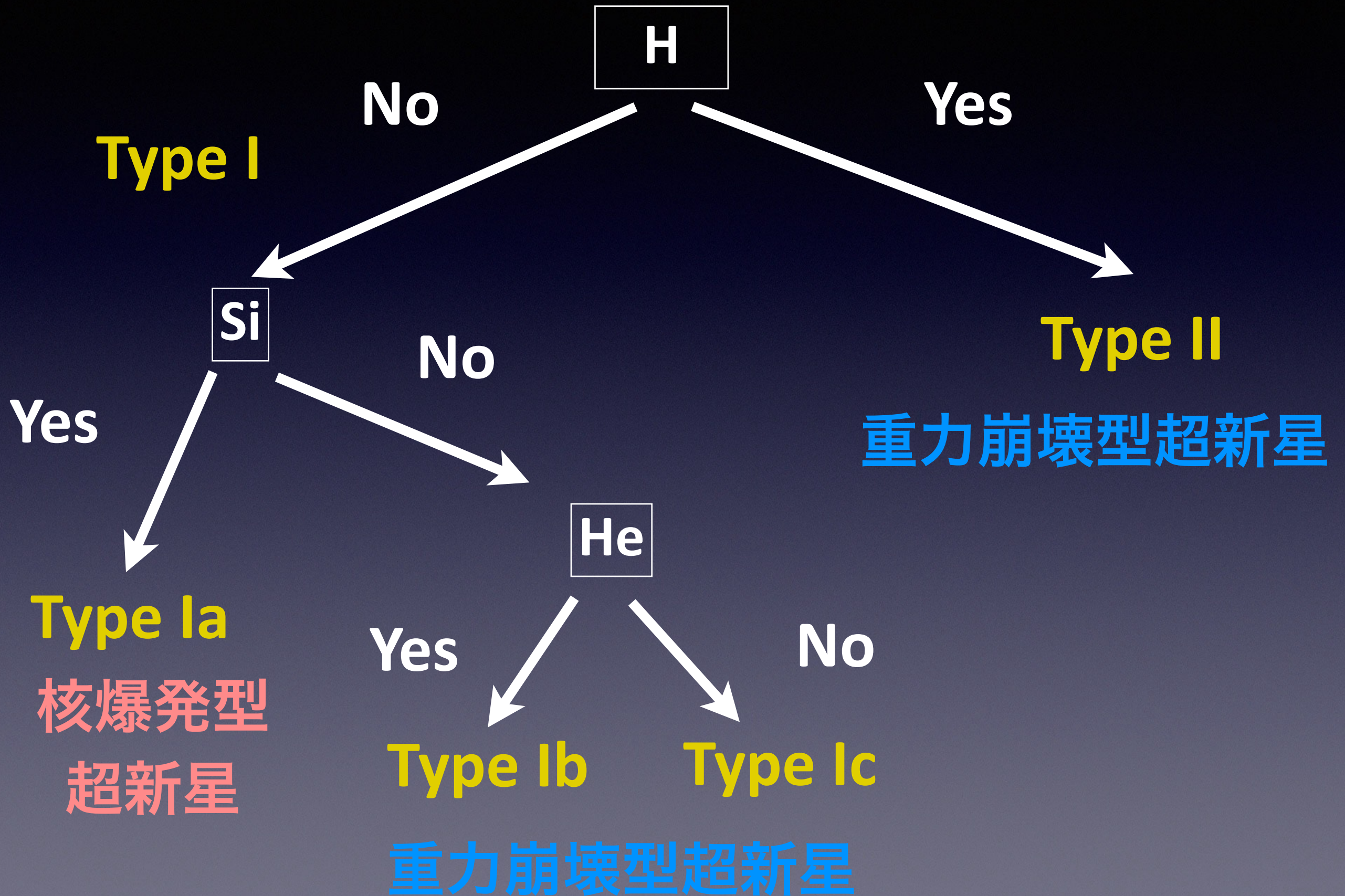


# 超新星爆発のスペクトル





# 超新星の分類





# 宇宙の「化学」進化

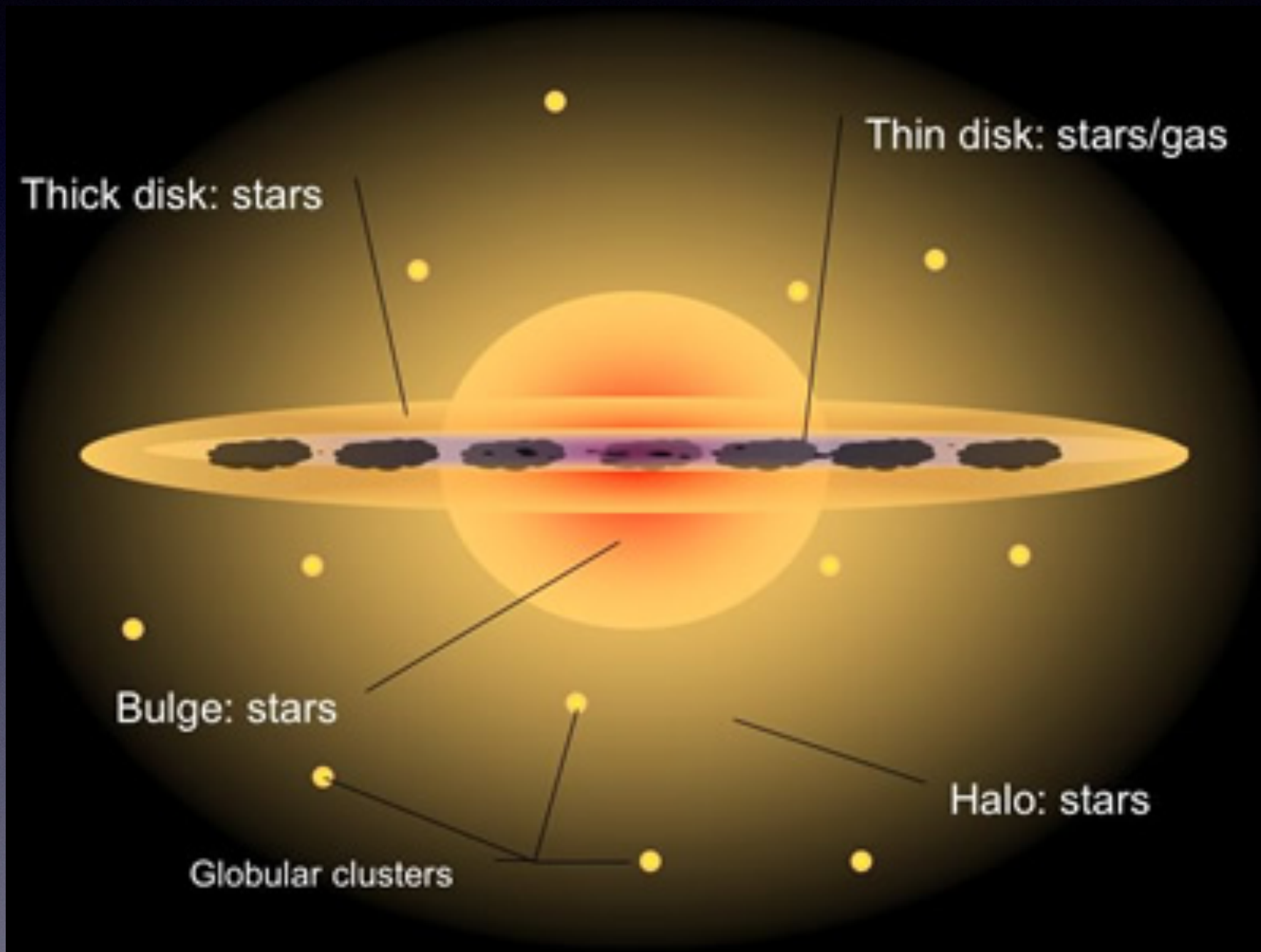


最近生まれた星の方がMg/Fe比が低い



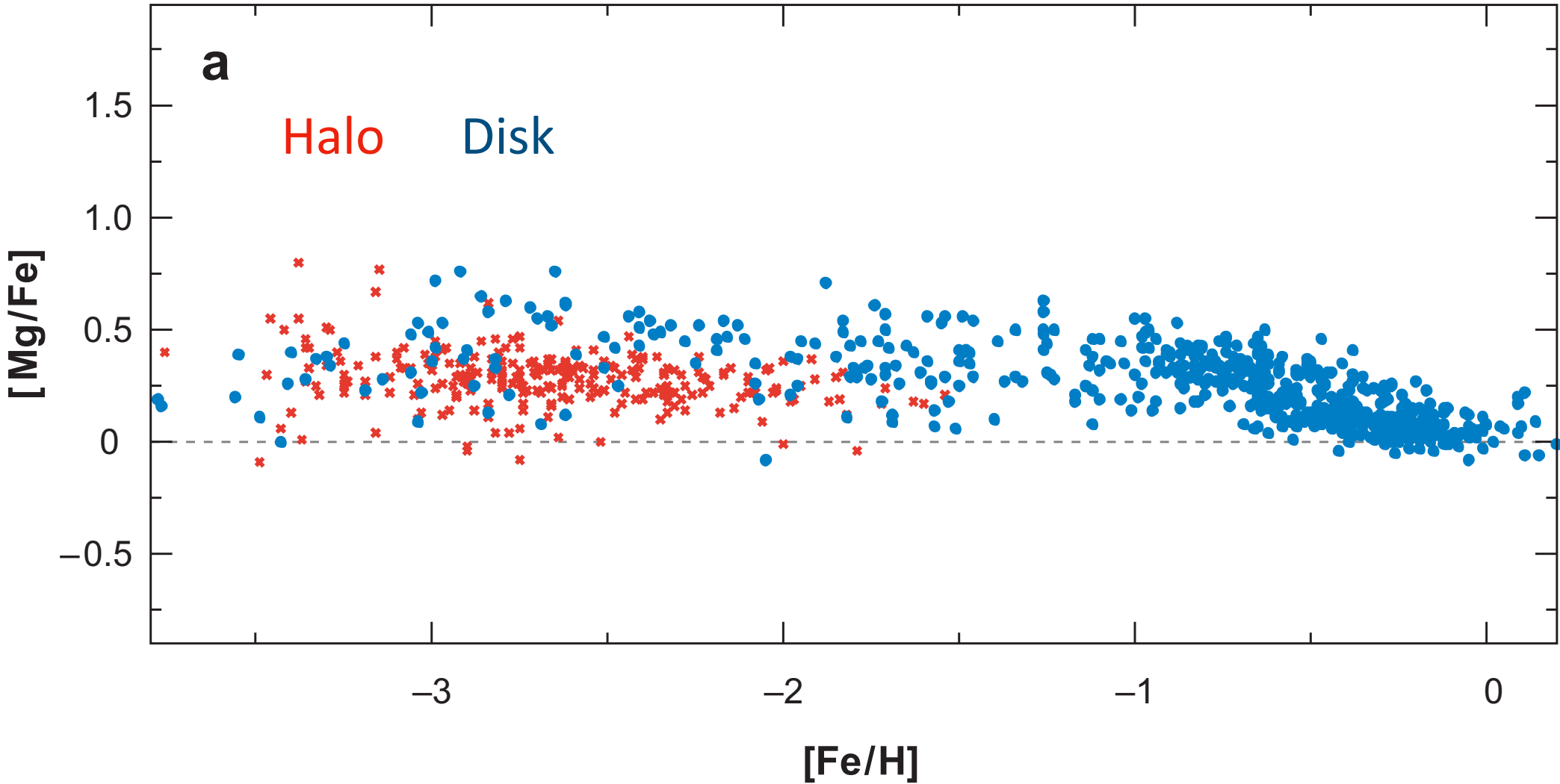
# 銀河系

過去の元素合成・放出の  
歴史を反映している  
「銀河考古学」





# 銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



Sneden+08



Ia型超新星の方がdelay timeが長い



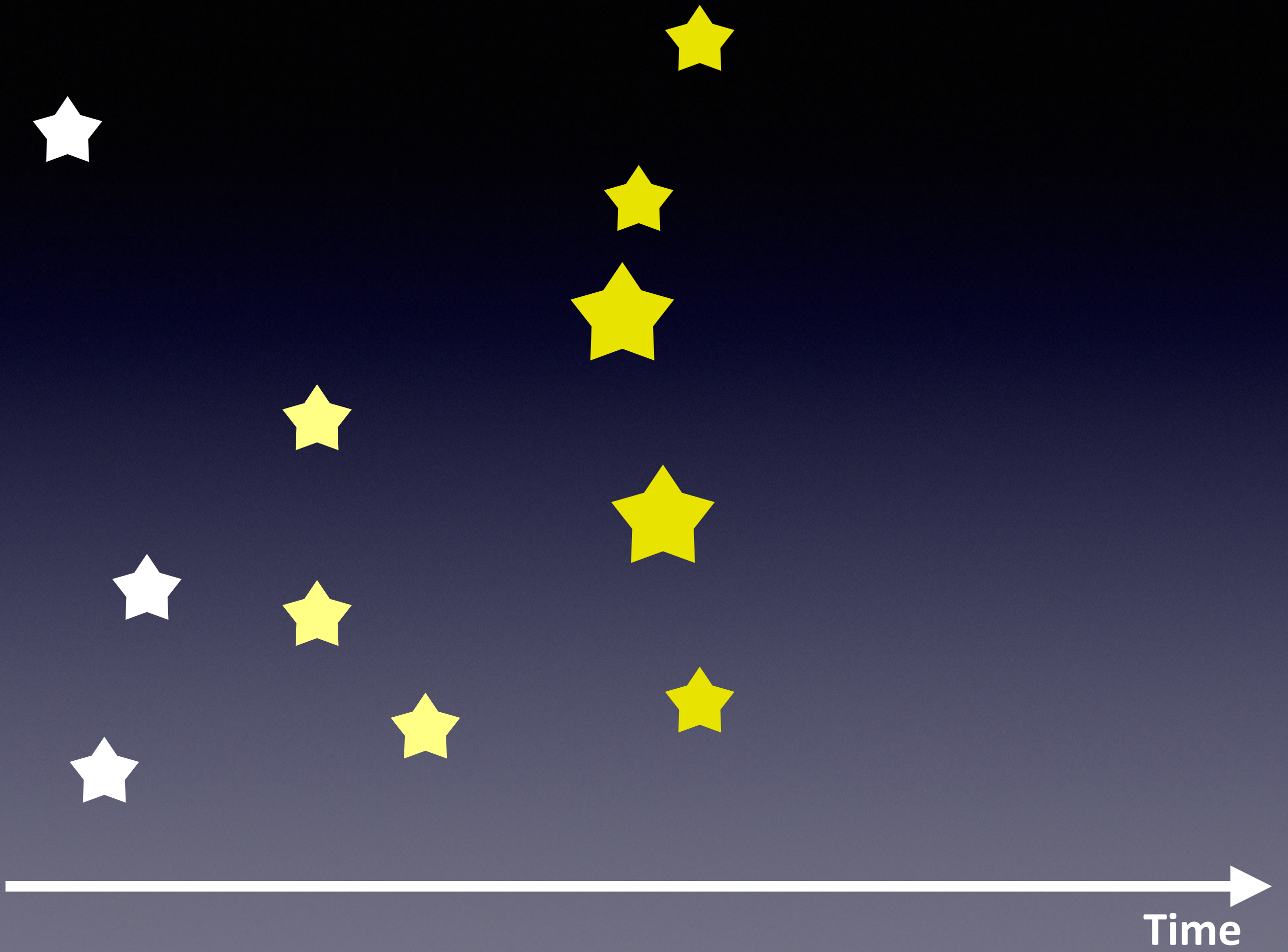


Time





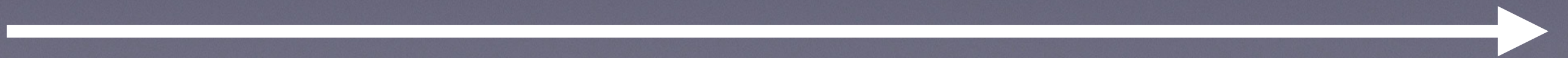












Time



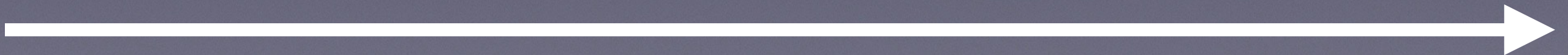








[Fe/H]



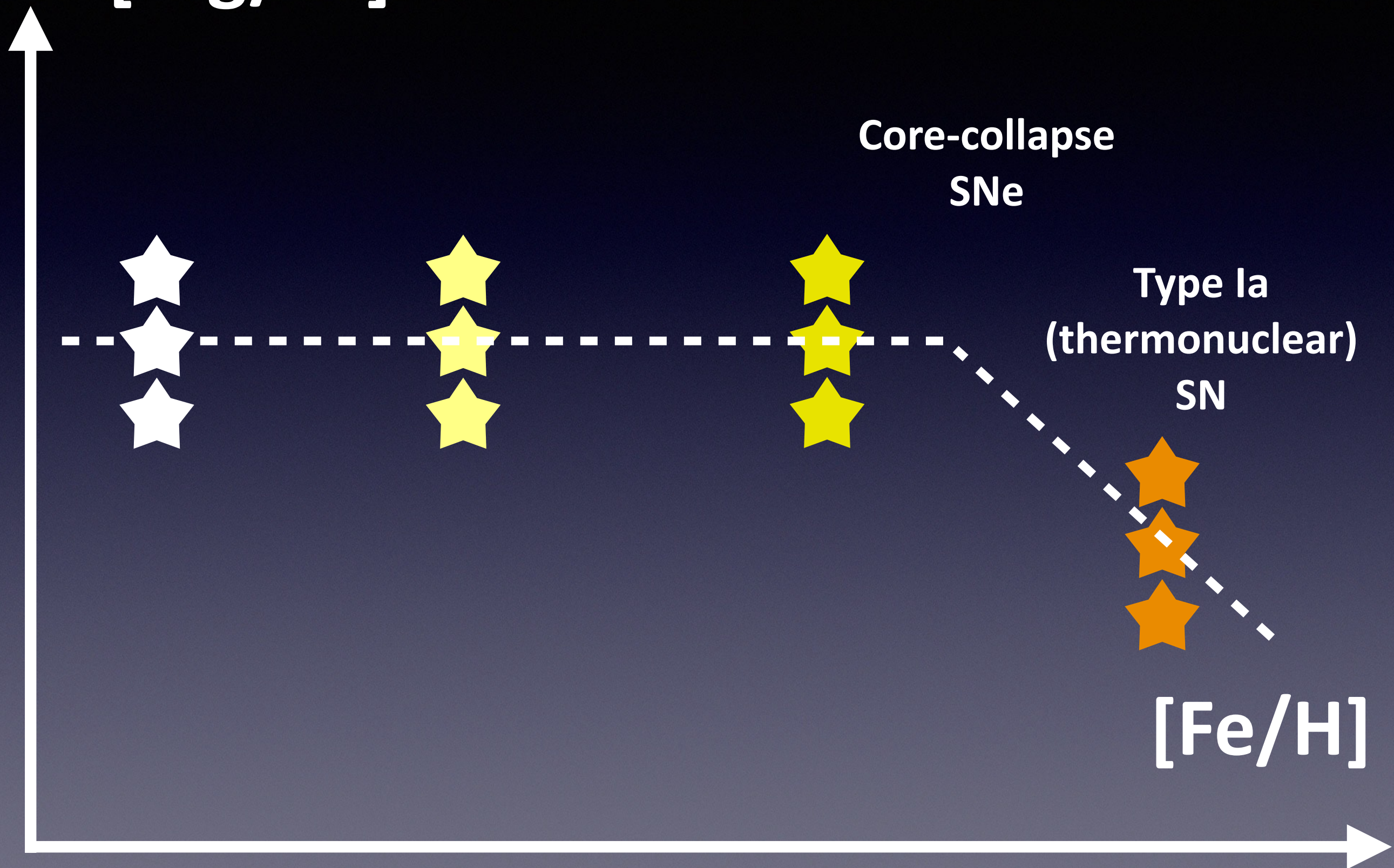


[Mg/Fe]

Core-collapse  
SNe

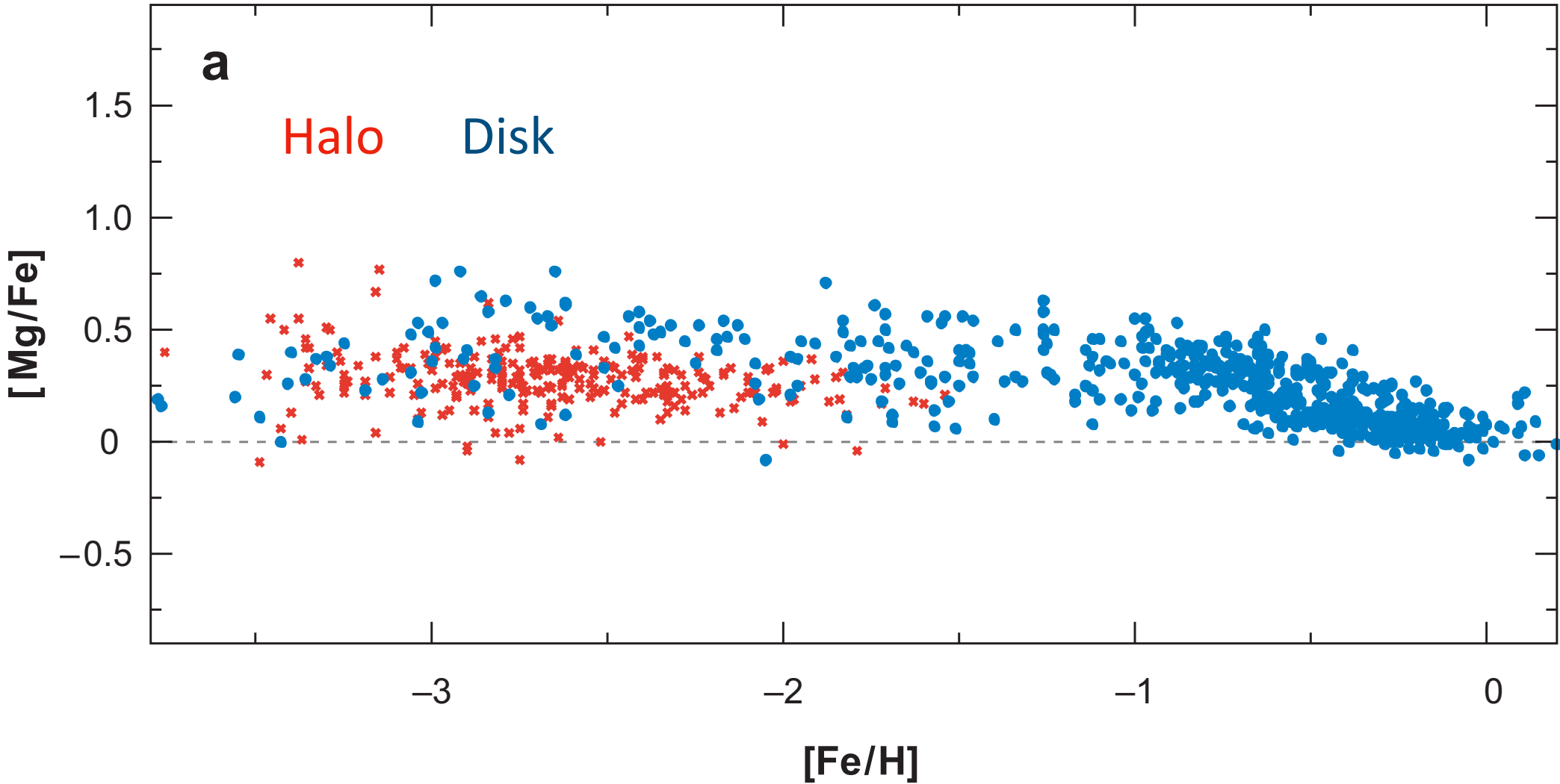
Type Ia  
(thermonuclear)  
SN

[Fe/H]





# 銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



Sneden+08



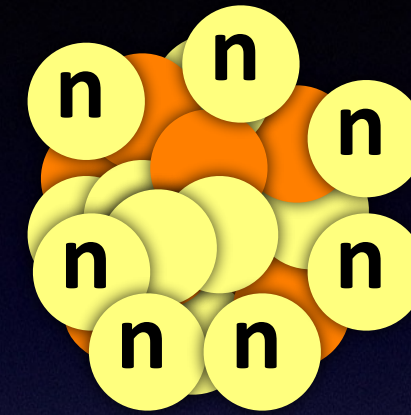
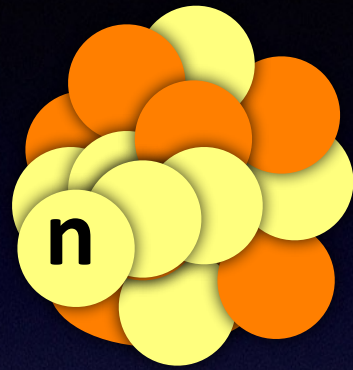
Ia型超新星の方がdelay timeが長い



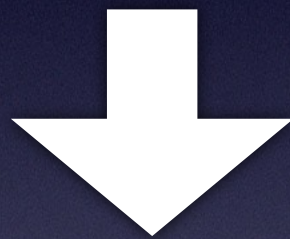
# 鉄より重い元素 = 中性子捕獲反応

s (slow) プロセス

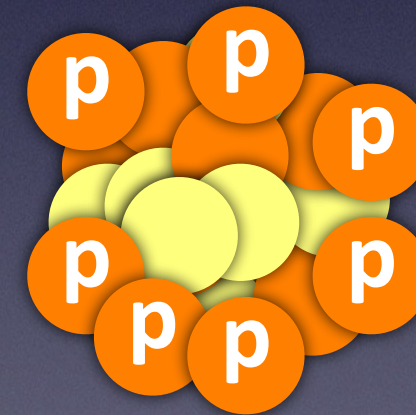
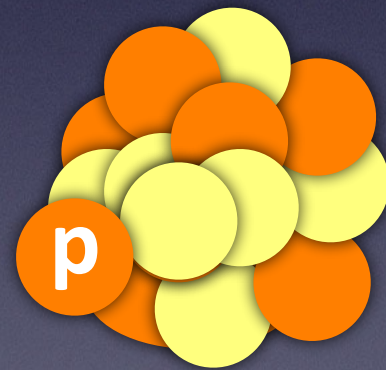
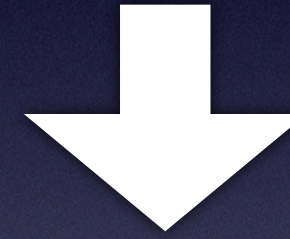
r (rapid) プロセス



崩壊



崩壊



Ba, Pb, ...

AGB星

Au, Pt, U, ...

超新星?? 中性子星合体?



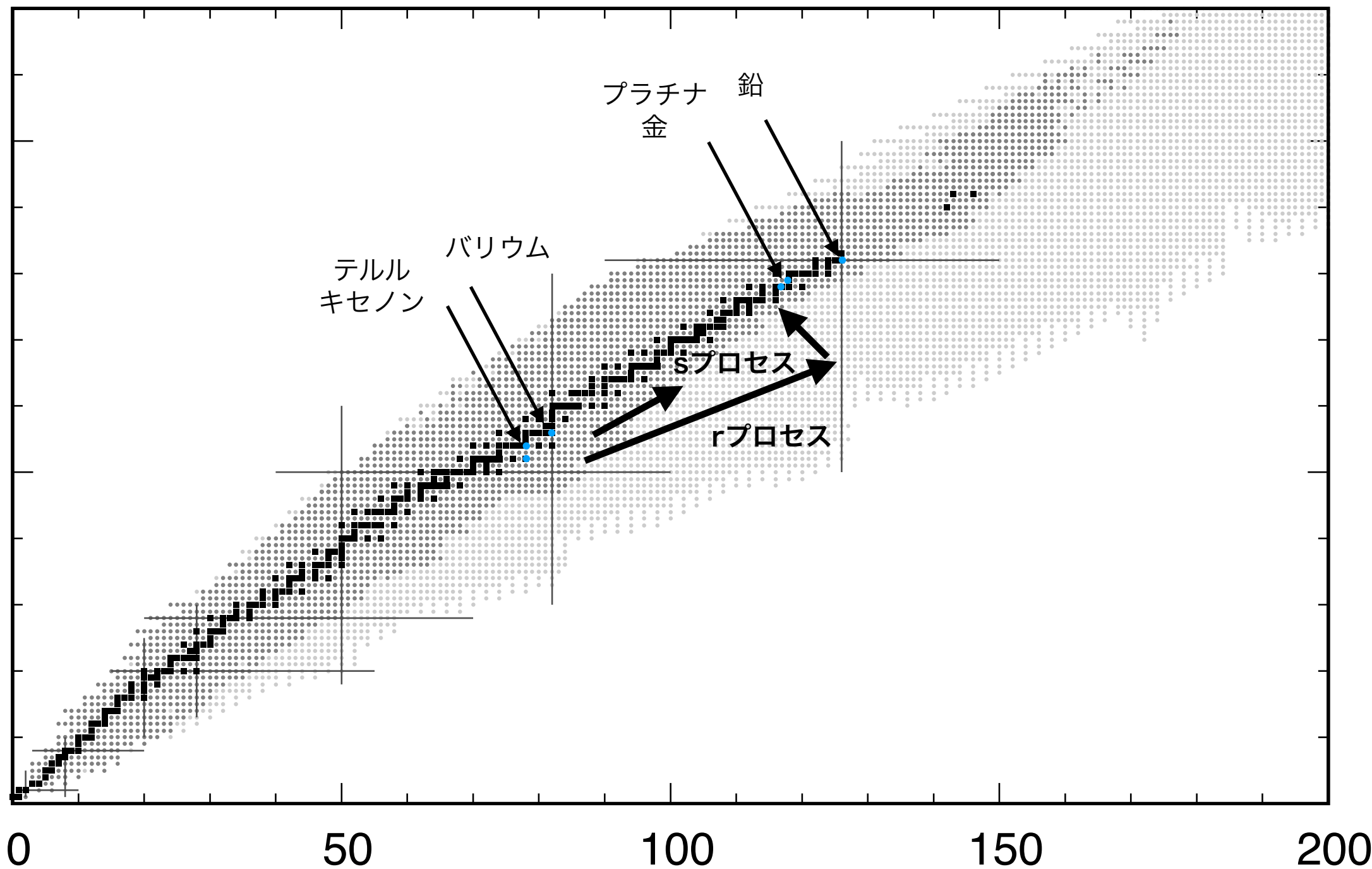
# 核図表

Proton number 陽子数

100

50

0



プラチナ 鉛  
金

テルル  
キセノン

バリウム

sプロセス

rプロセス

Neutron number 中性子数

0

50

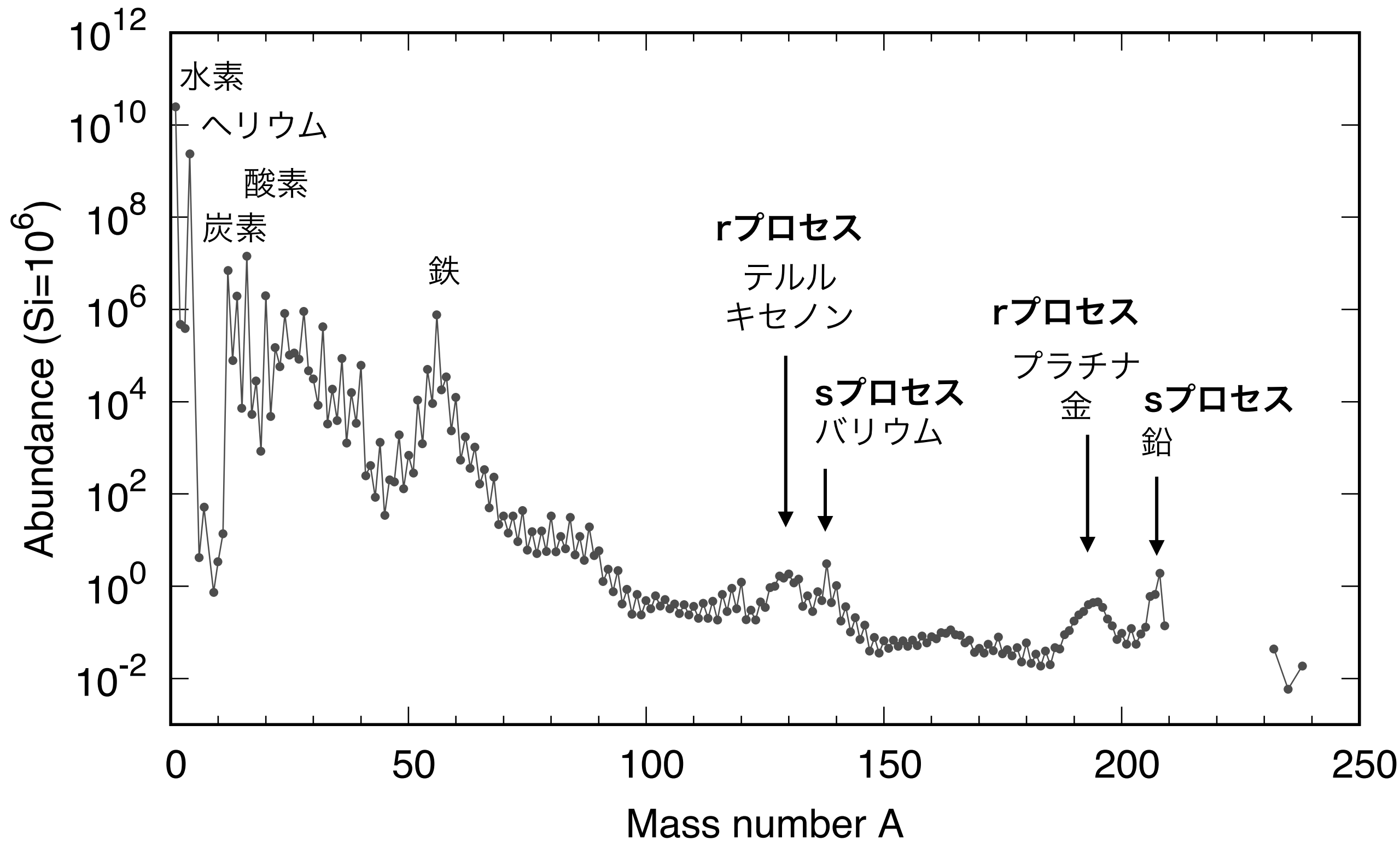
100

150

200



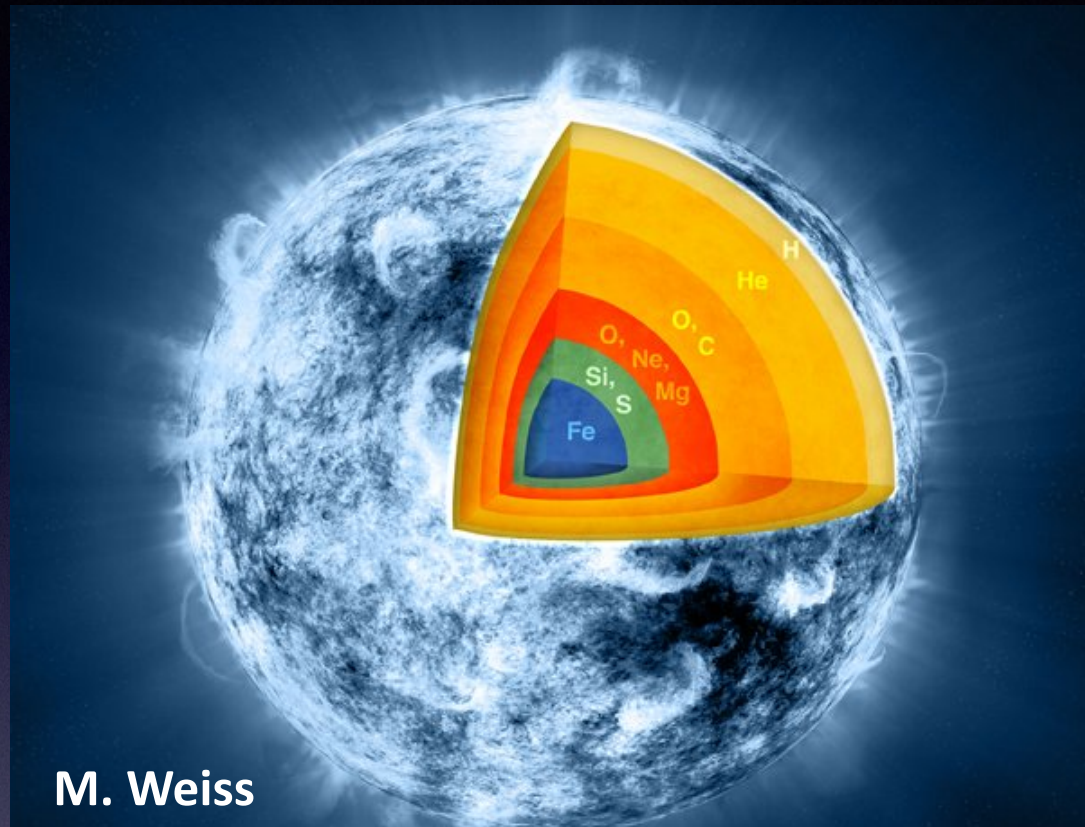
# 宇宙の元素組成 (質量数)



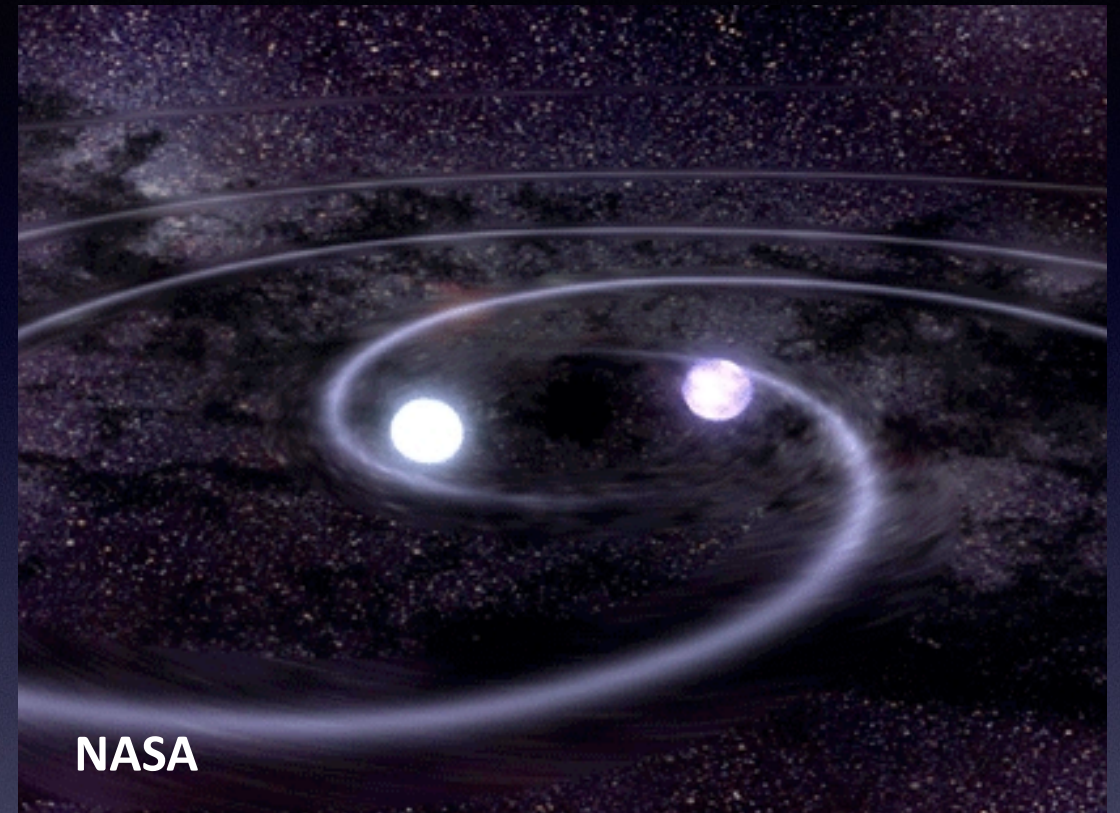


# rプロセス元素の起源天体

## 超新星



## 中性子星合体



宇宙で起きていることは確実  
(1つの銀河で100年に1回)



rプロセスを起こすの  
は難しいか？

rプロセスは起きる  
宇宙でどれくらい起きている？  
一回でどれくらい元素を作る？  
(重力波+電磁波で測られ始めた)

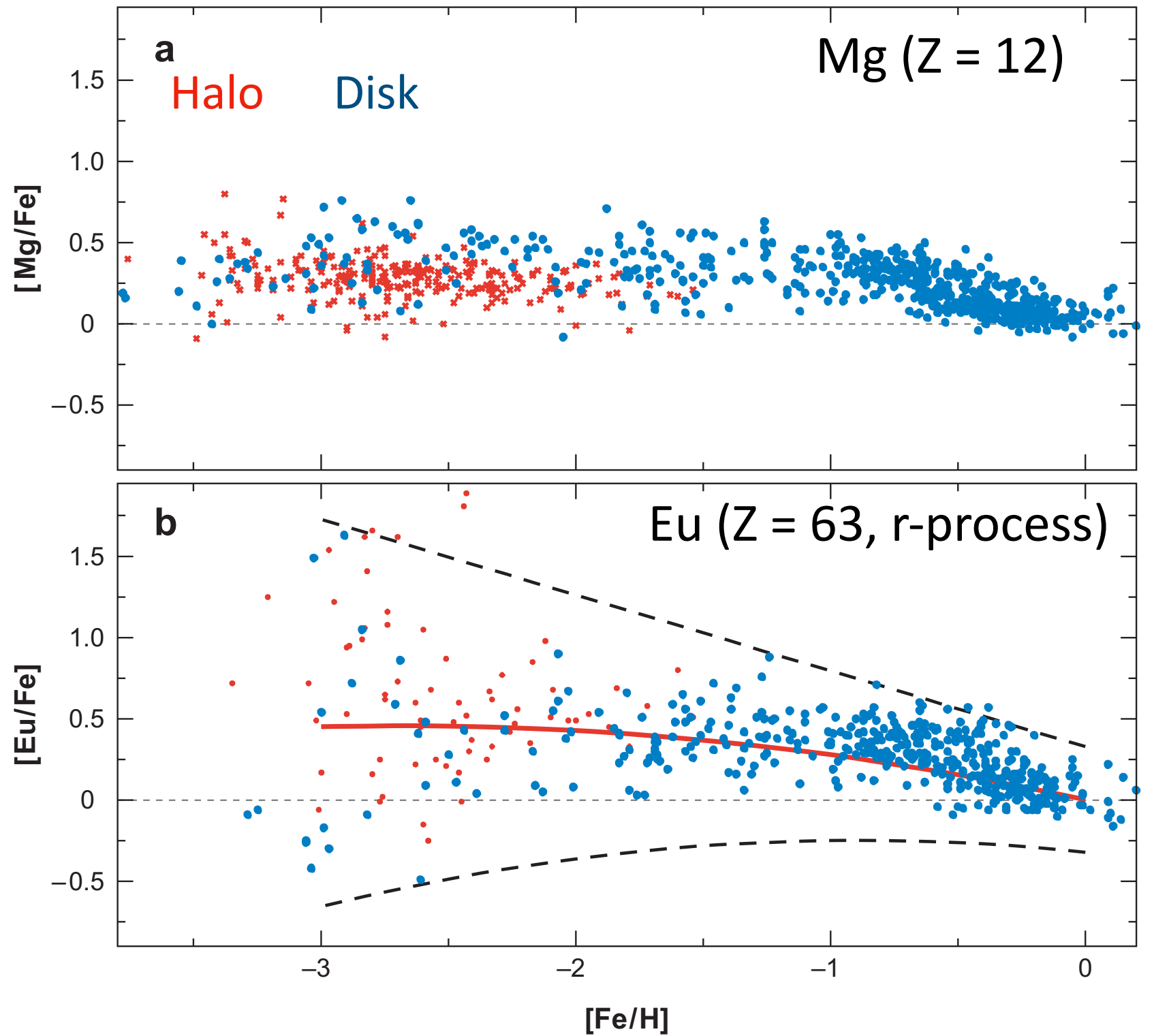


# 銀河系の星の組成比 (r-process)

## r-process元素

- Mgよりもばらつき大
- => 重力崩壊型超新星
- よりもレアな天体

Sneden+08





# 元素の起源と宇宙の化学進化：まとめ

- 元素の起源

- ビッグバン元素合成: H, He, Li

- 宇宙線による破砕反応: Li, Be, B

- 恒星内部: C-Fe

(AGB星、重力崩壊型超新星、核爆発型超新星)

- 中性子捕獲:  $> \text{Fe}$

s-process: 低・中質量星 (AGB星)

r-process: 中性子星合体 or 超新星

- 銀河系の星の観測による検証



# さまざまな疑問を**物理**を使って理解しよう

- 星の中はどうなっているの？
- なぜ重い星の方が大きいのか？
- なぜ星は明るく輝くのか？
- なぜ重い星の方が明るいのか？
- なぜ星は「進化」するのか？
- なぜ質量で星の運命が変わるのか？
- なぜ星は星でいられるのか？
- なぜ一部の星は爆発するのか？
- ...



# この講義の目標

- これまで学んできた物理を総合的に用いて、  
恒星の性質と進化を理解する
- 天文学研究を行うのに必要な恒星進化論の基礎を理解する

3年間物理を頑張った人へのご褒美  
物理を使って、宇宙を生き生きと理解する



# 恒星物理学II (7セメ)

熱力学

3セメ

統計力学

5,6セメ

力学

1,2セメ

電磁気学

2,3セメ

宇宙物理学  
天体物理学

流体力学

4セメ

原子核物理学

7セメ

量子力学

4,5セメ

相対論

4,7セメ



# レポート課題 5

1. 宇宙に存在する様々な天体のサイズと質量を調べて、  
2次元平面に書き込む
2. 以下などをやってみて、考察する
  - 原子と原子核も書き込む
  - 一定密度の線を引いてみる
  - ブラックホールの線を引いてみる (相対論)
  - 不確定性原理の限界線を引いてみる (量子力学)
  - ...