

Section 11.

超新星爆発

11.1 重力崩壊型超新星

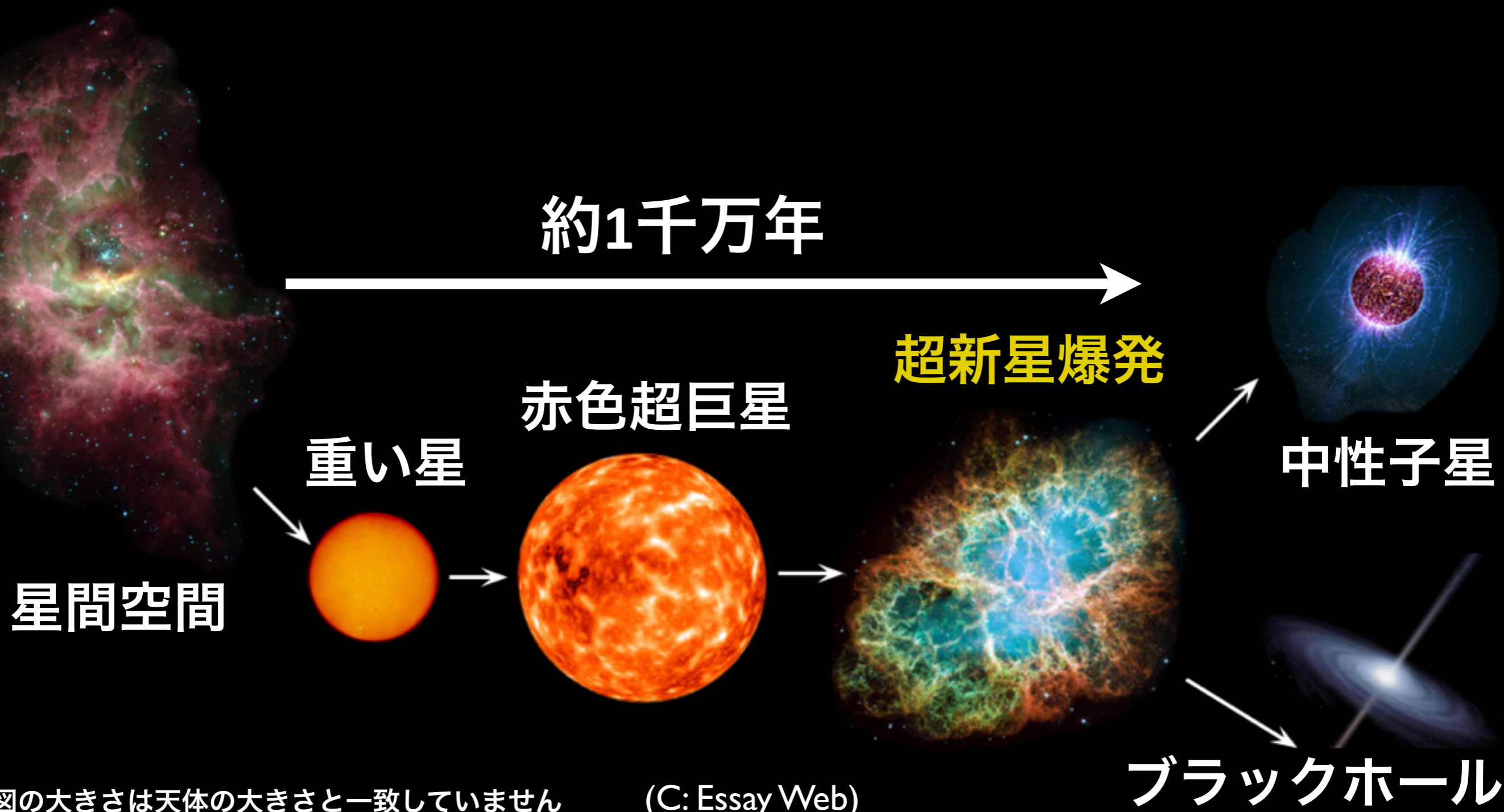
11.2 宇宙の元素の起源

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？
- なぜ星は明るく輝くの？
- なぜ重い星の方が明るいなの？
- なぜ星は「進化」するの？
- なぜ質量で星の運命が変わるの？
- **なぜ星は星でいられるの？**
- **なぜ一部の星は爆発するの？**
- ...

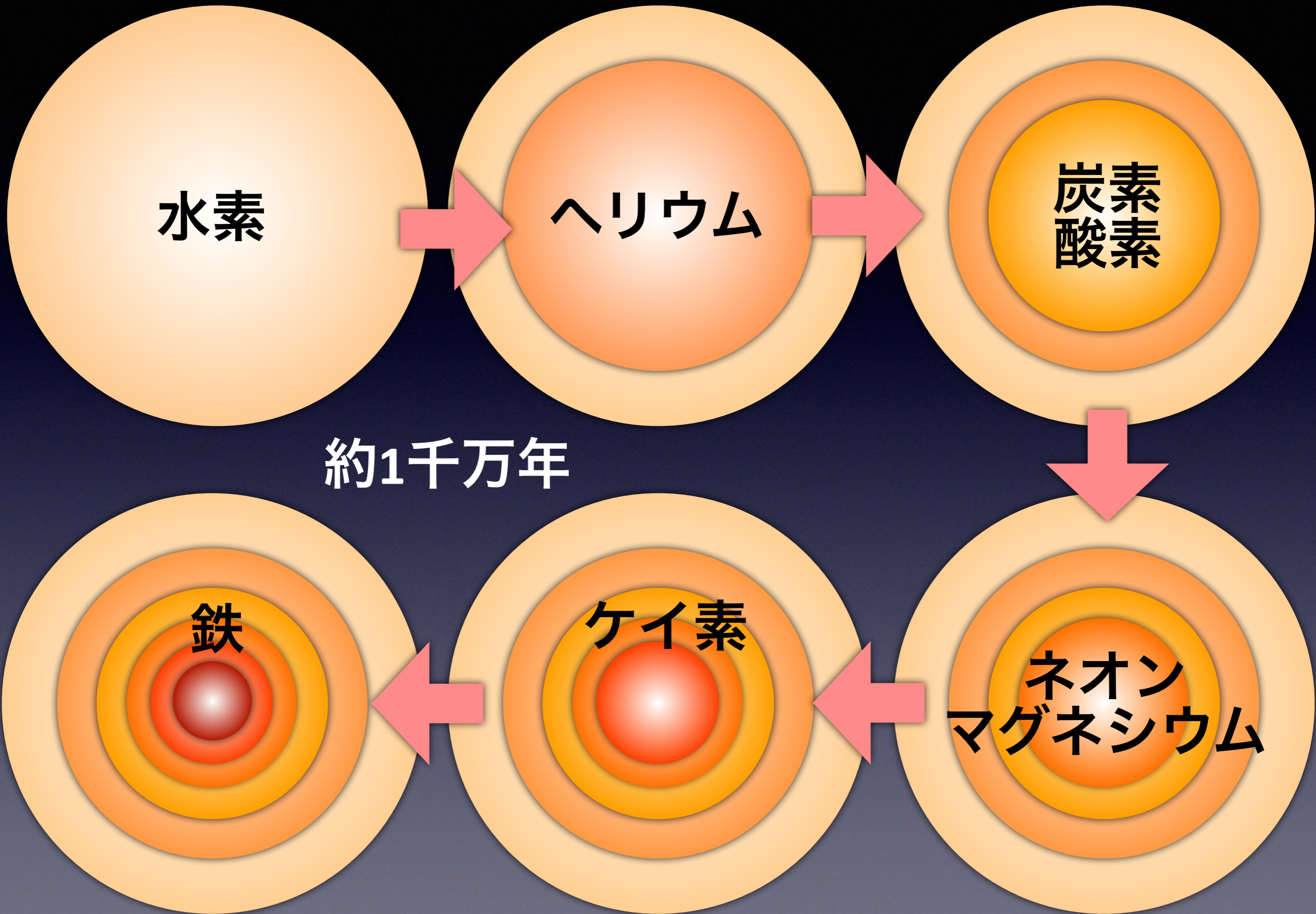
1. 重い星の場合

* 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

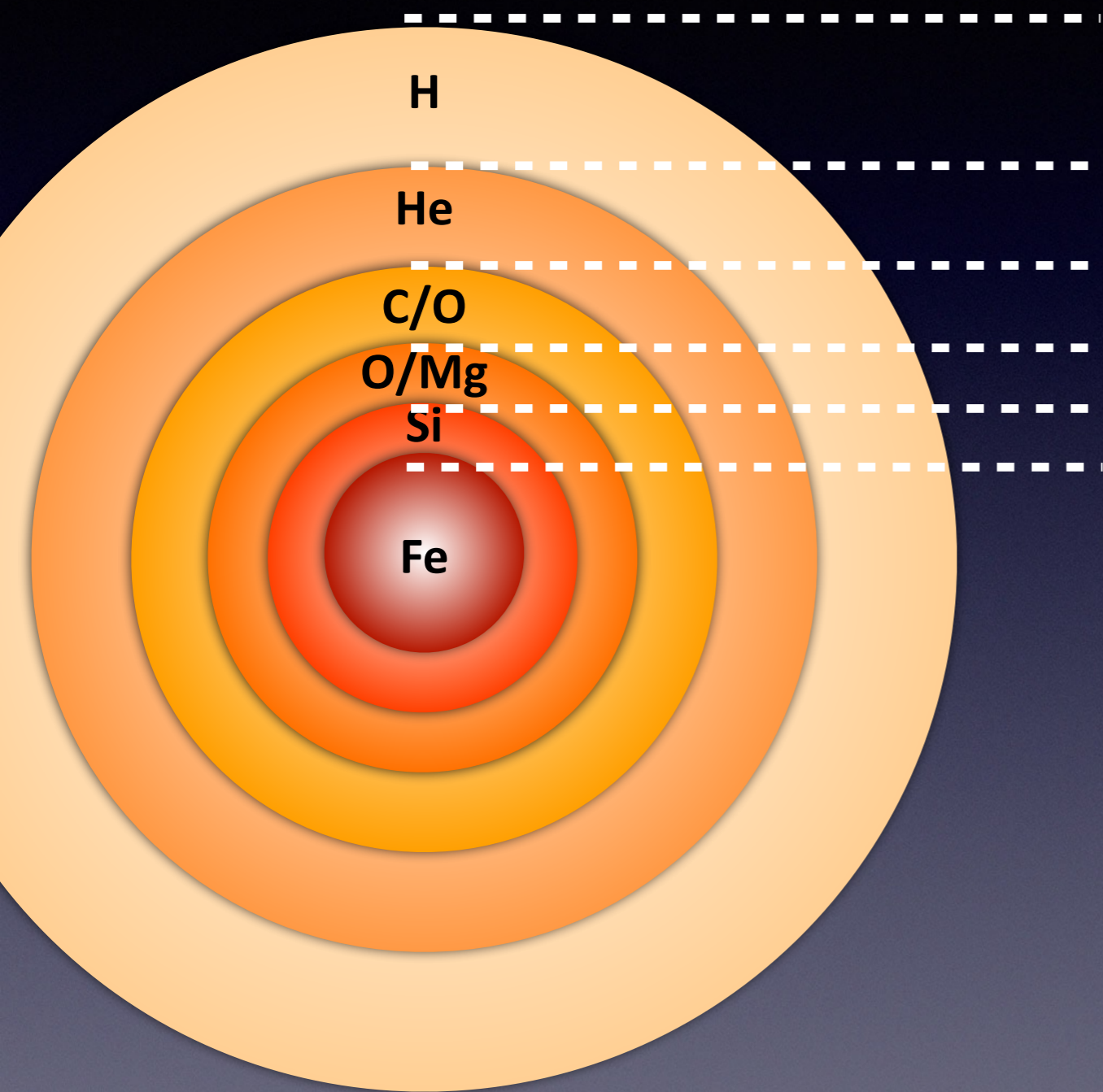
(C: Essay Web)



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)



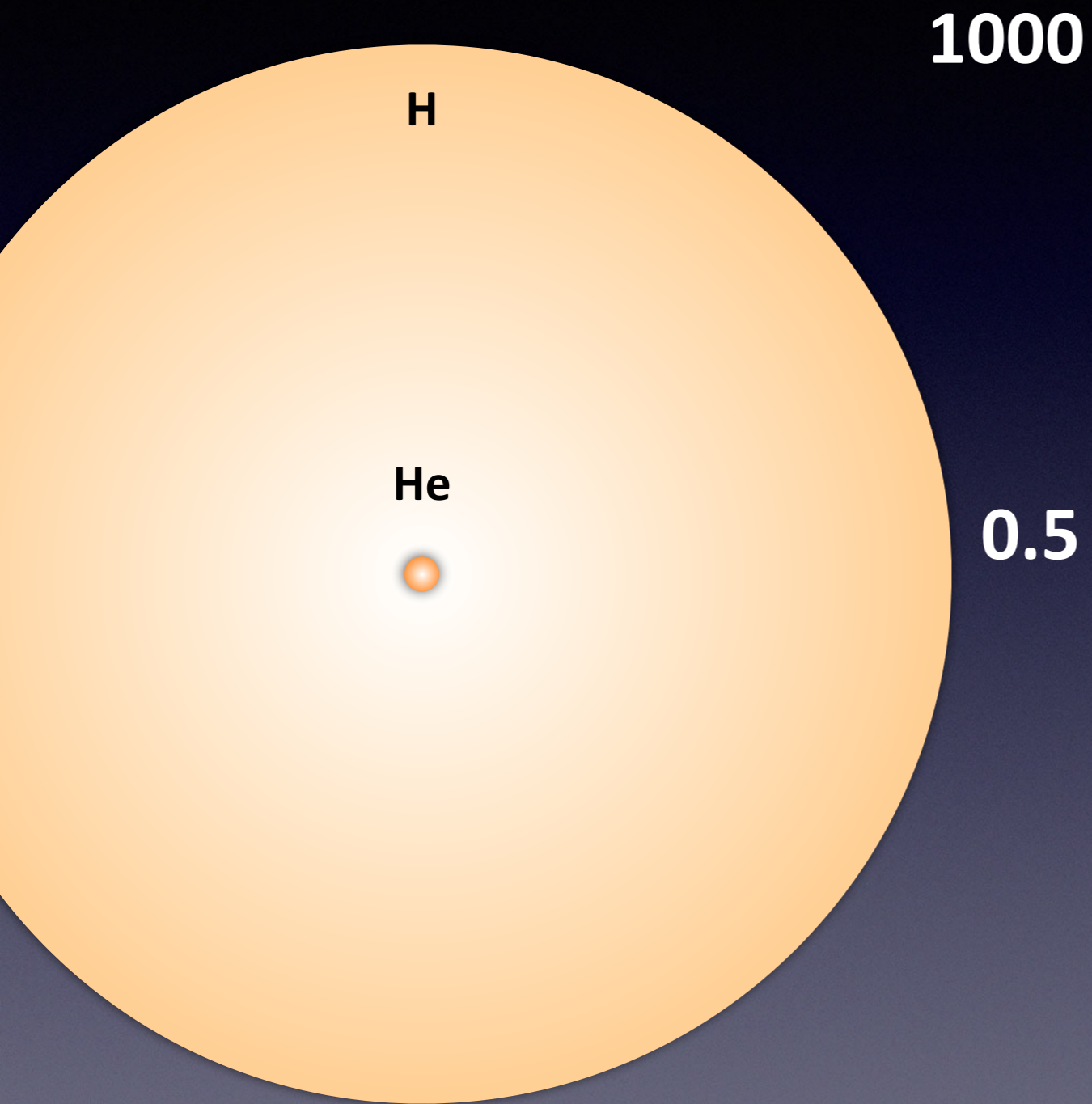
質量 (太陽質量)	半径 (太陽半 径)	中心に落ちる までの時間 (秒)
16	1000	3×10^7 (1yr)
6	0.5	300
5	0.2	50
4	0.08	20
2	0.005	1
1.5	0.003	0.1

太陽半径 = 7×10^{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

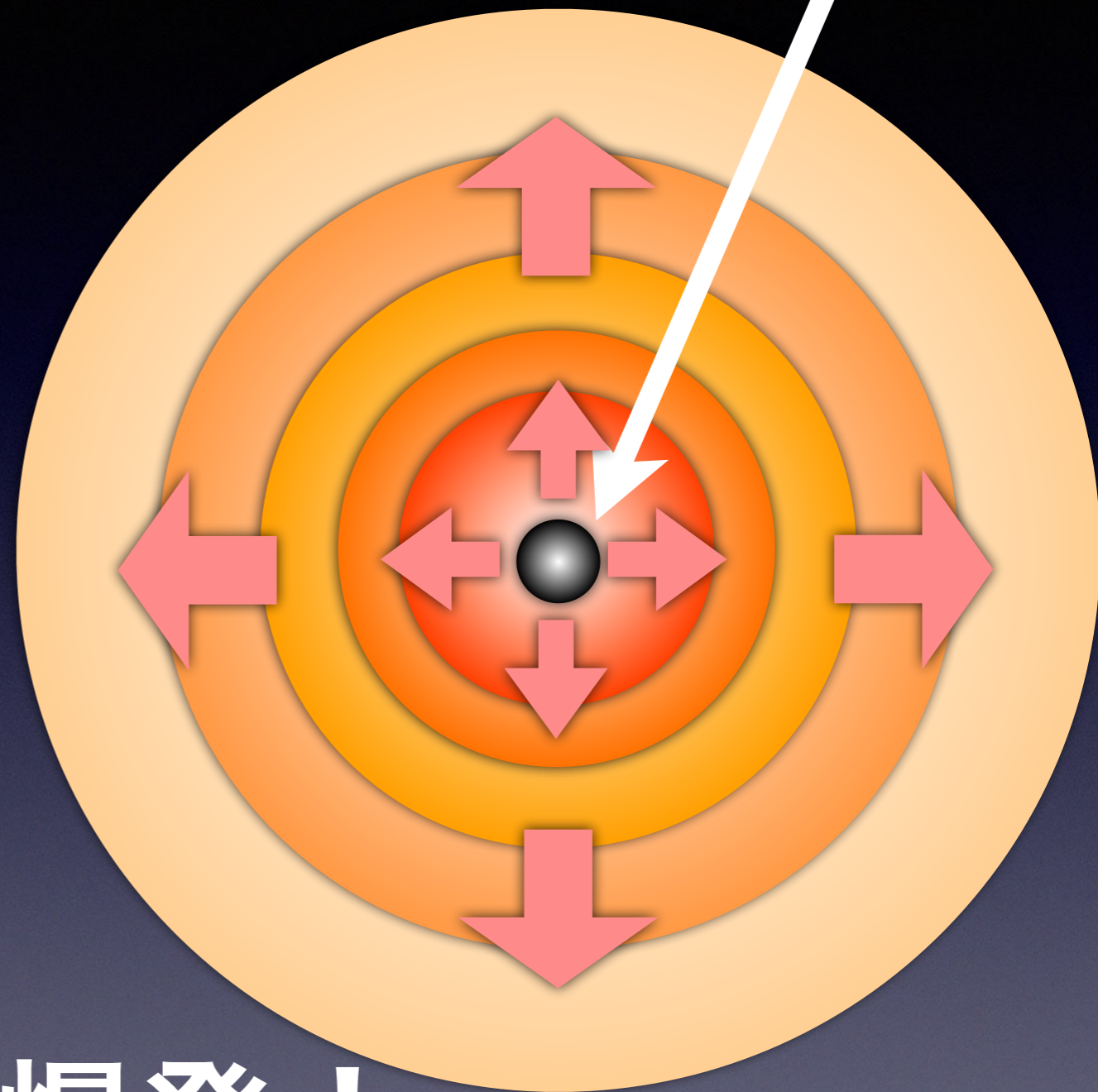
実際のイメージ

(本当はもっと極端)



「重力崩壊」

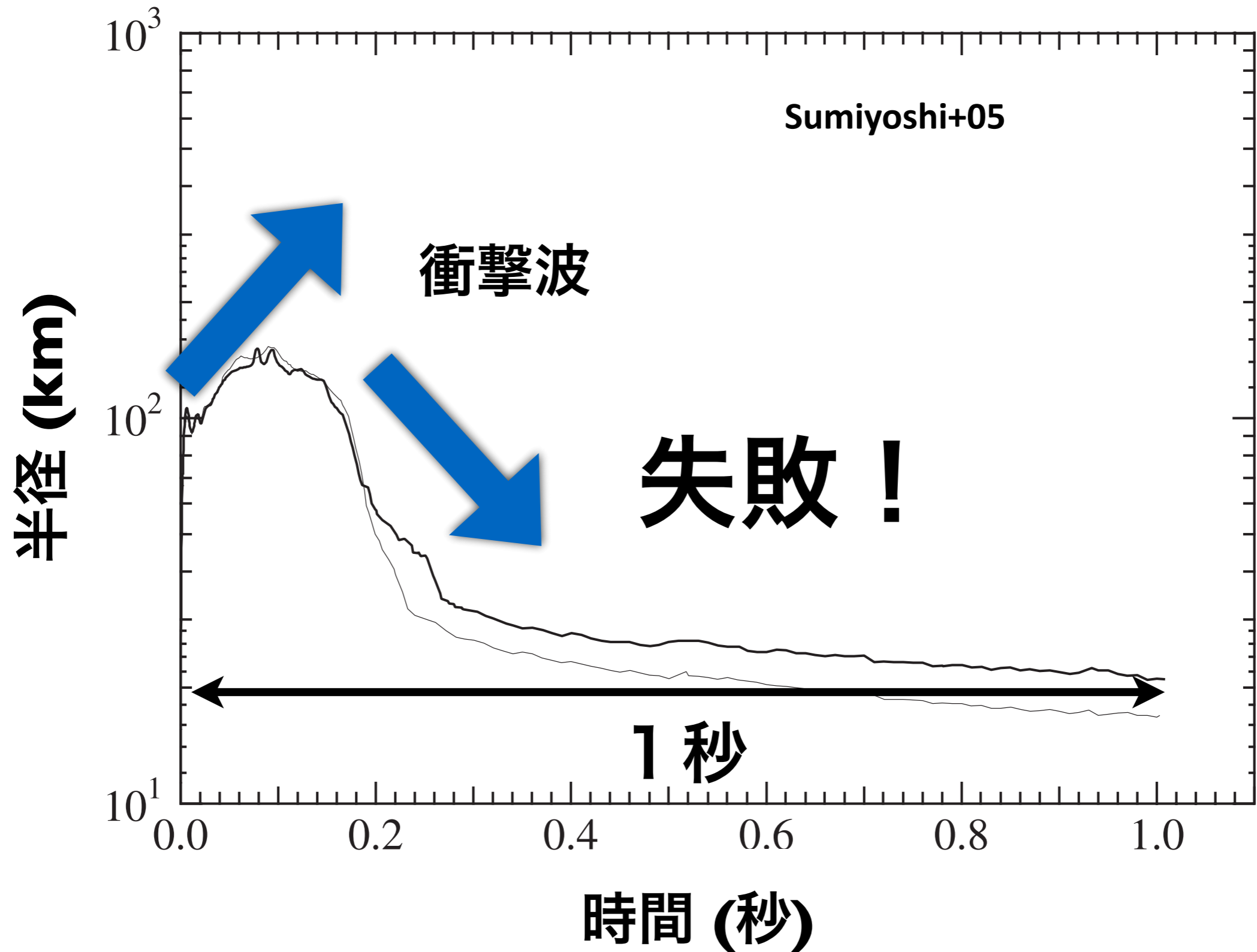
中性子星



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

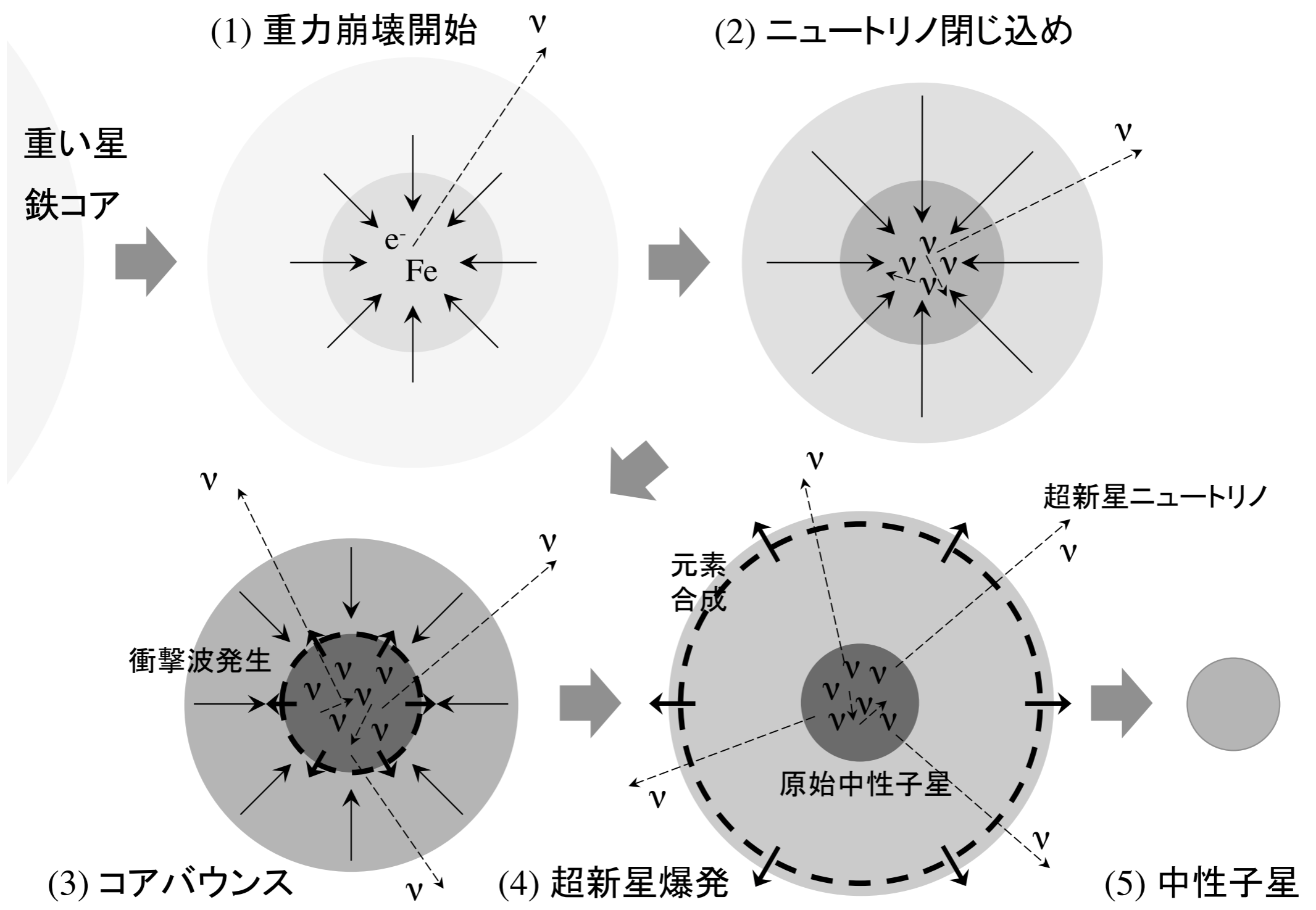
星の一生の最期に何が起きるのか？

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？



(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

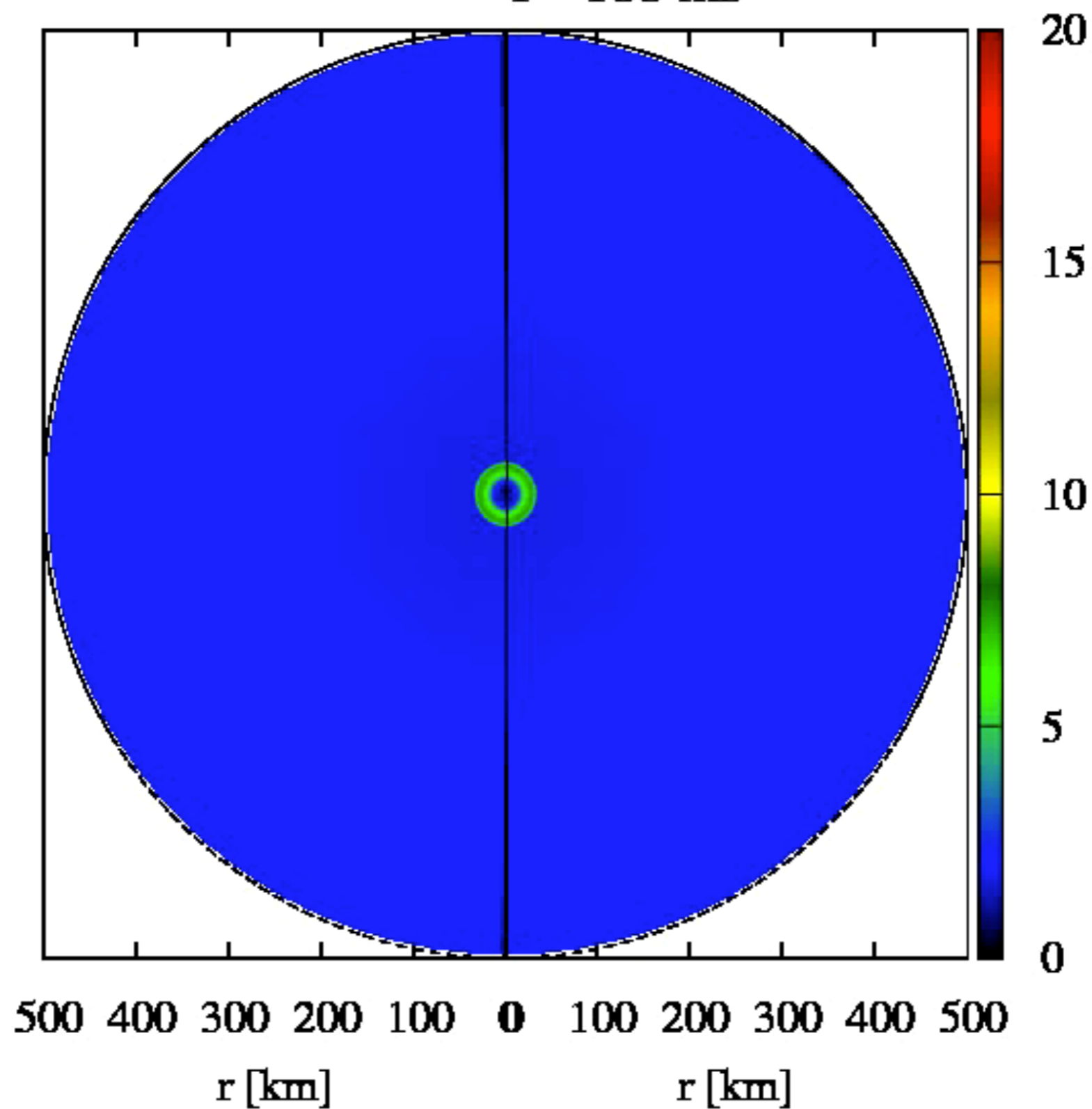
A. Burrows

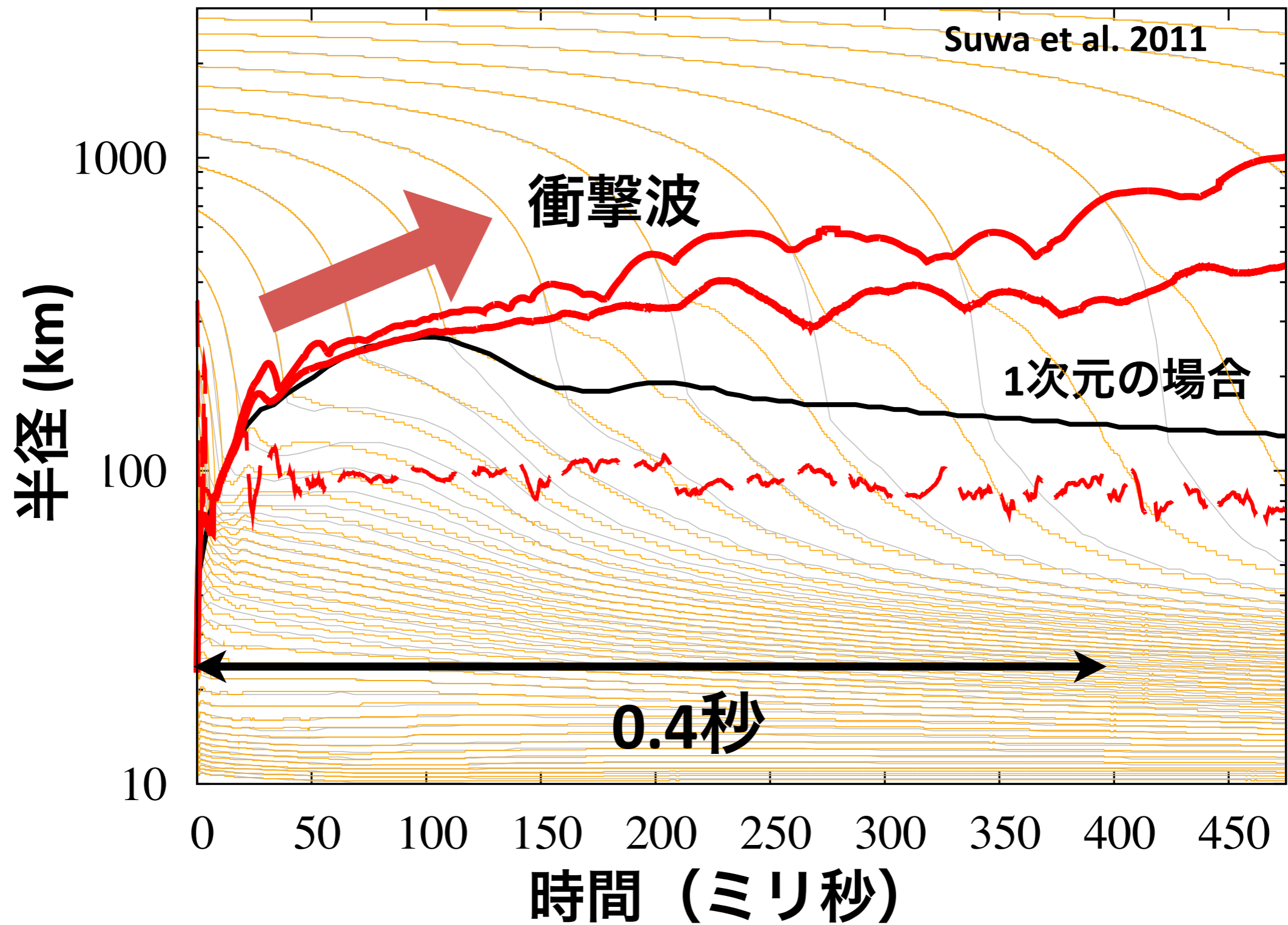
S20.0 ENTROPY
LEA VELOCITY
Time = -168.0 ms
Radius = 500.00 km

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

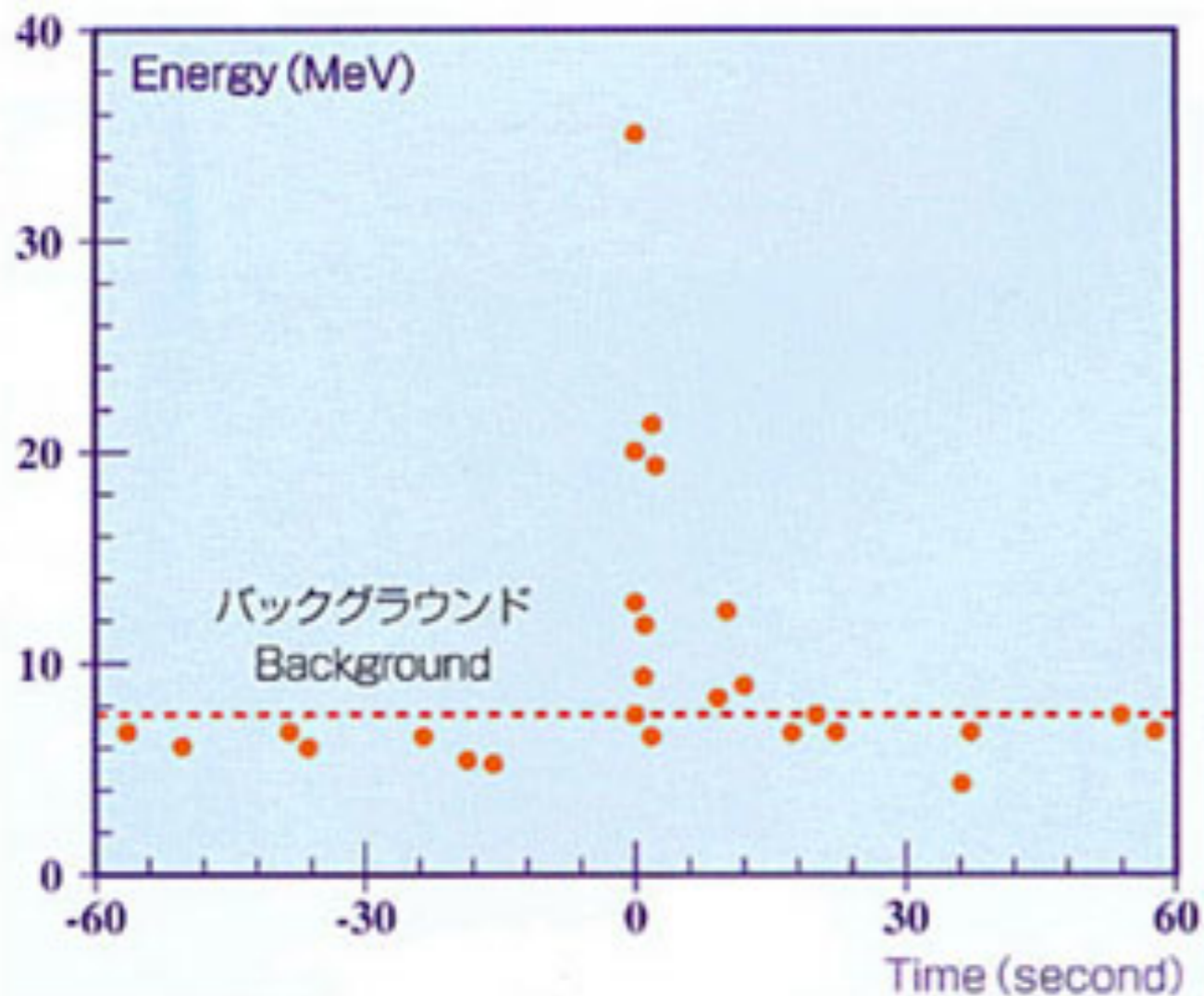
超新星SN 1987A

最近100年で最も近い超新星

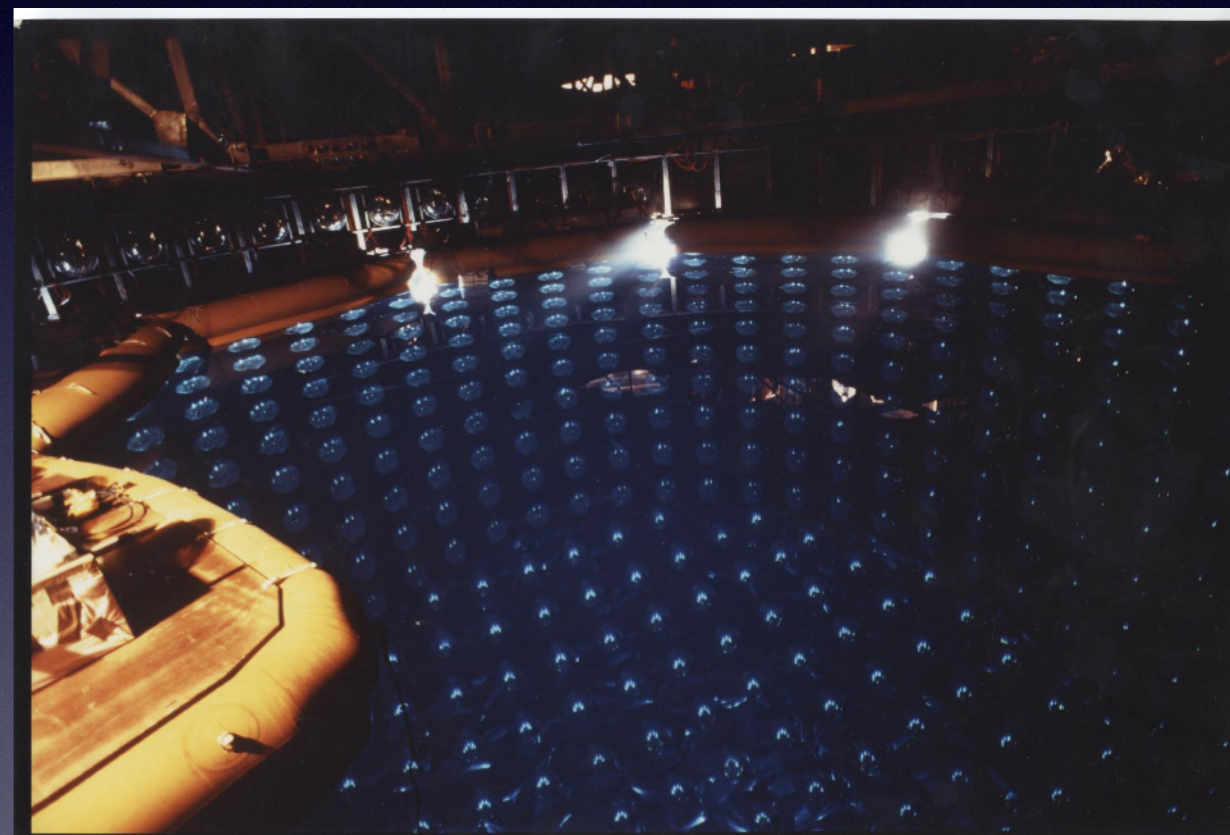
(銀河系のとなり、大マゼラン雲、50 kpc)



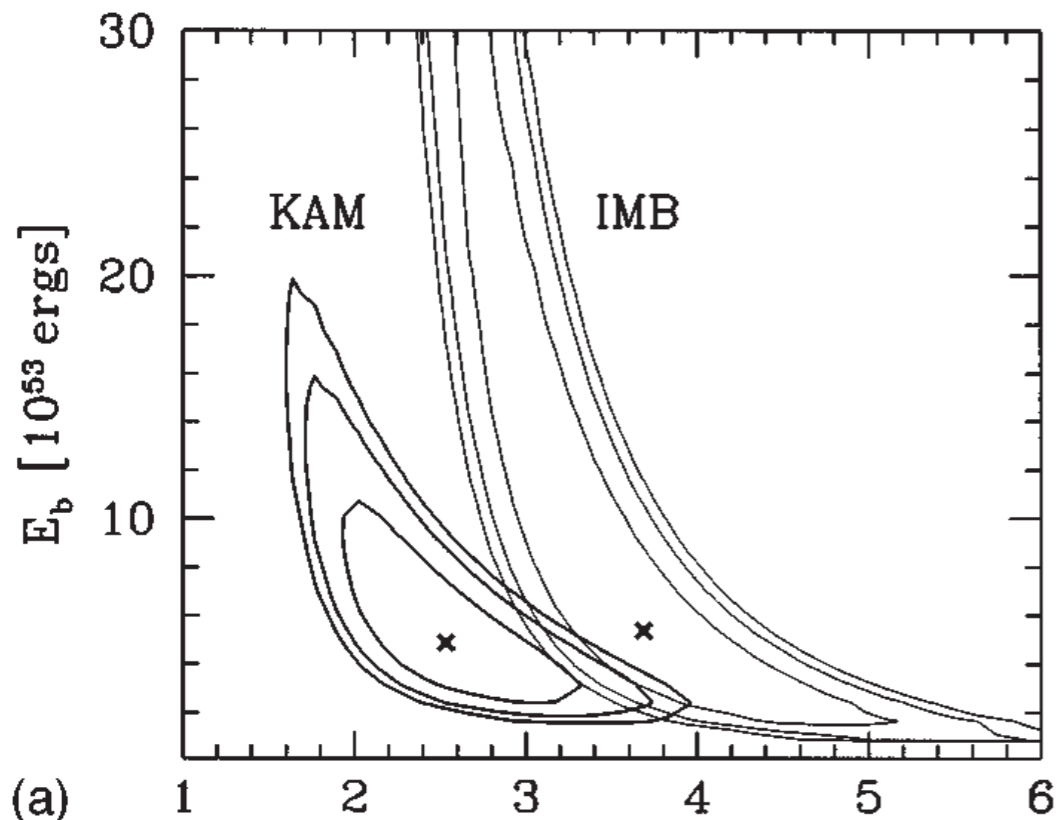
SN 1987Aから ニュートリノを検出



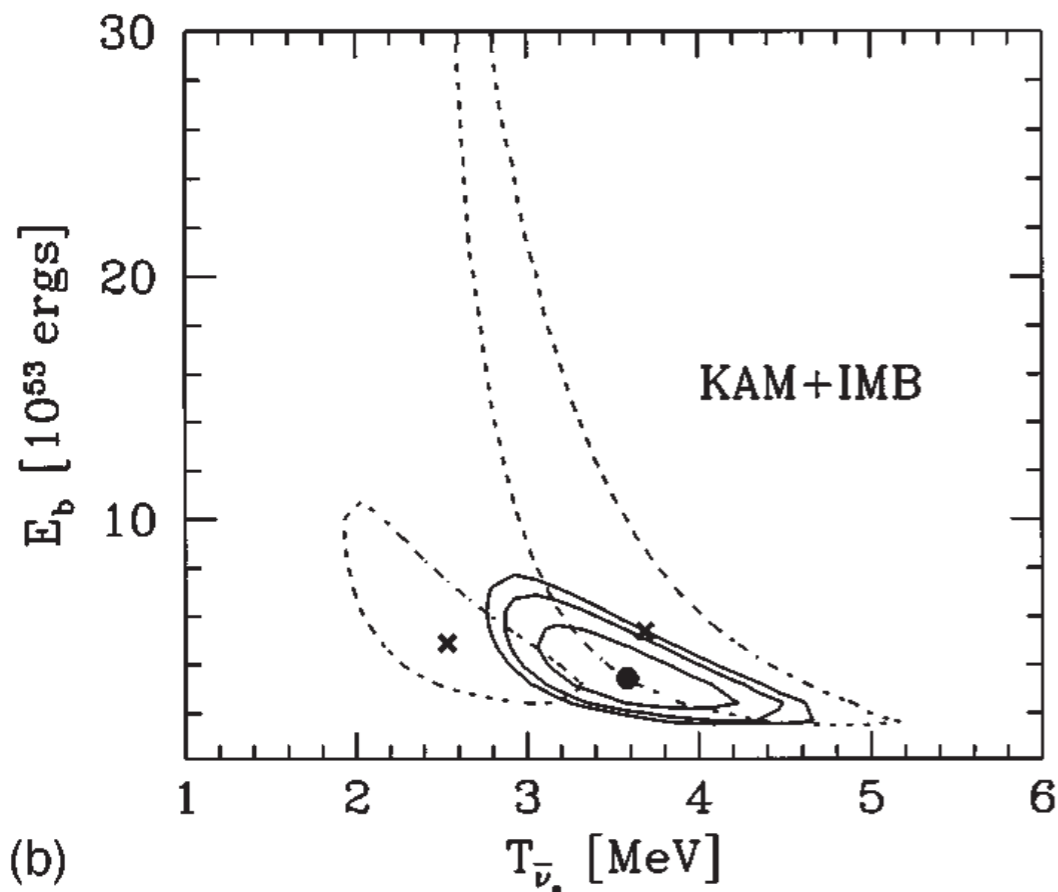
カミオカンデ



(C) ICRR



(a)



(b)

$E_{\nu} \sim 10^{53}$ ergが確認された！

=> 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

● 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

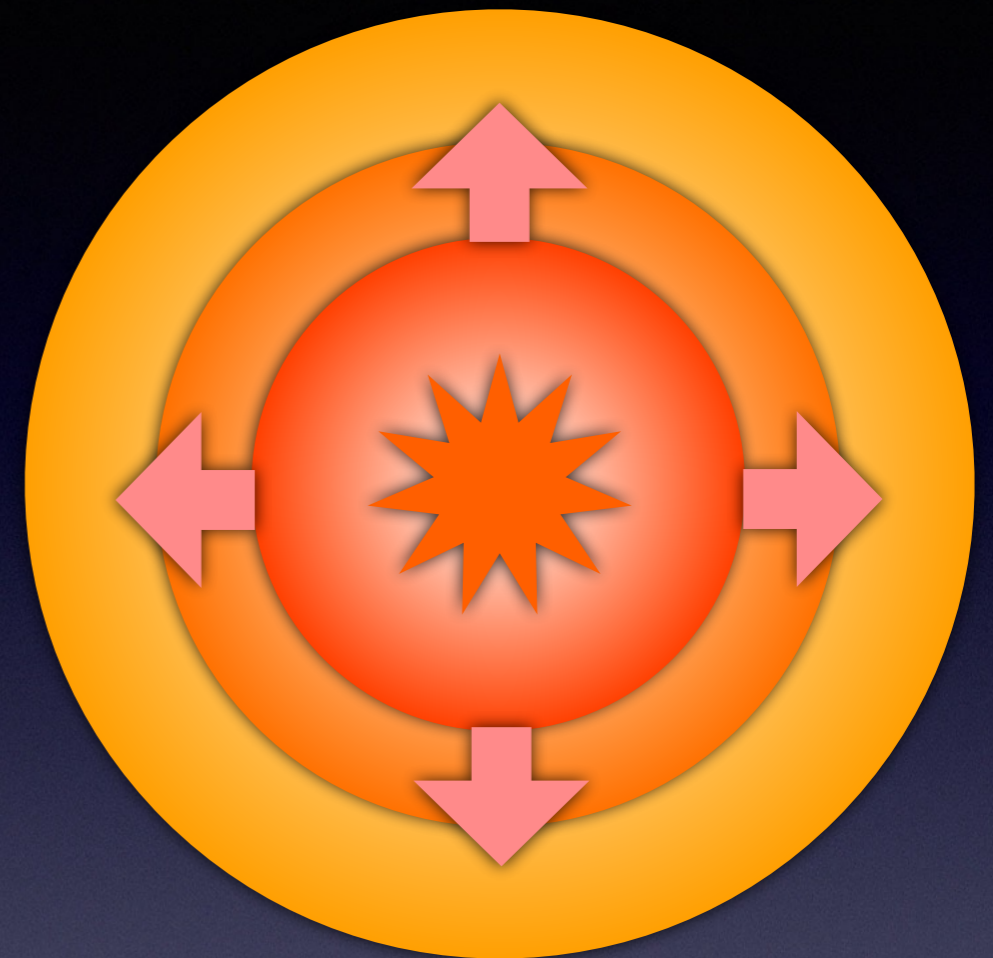
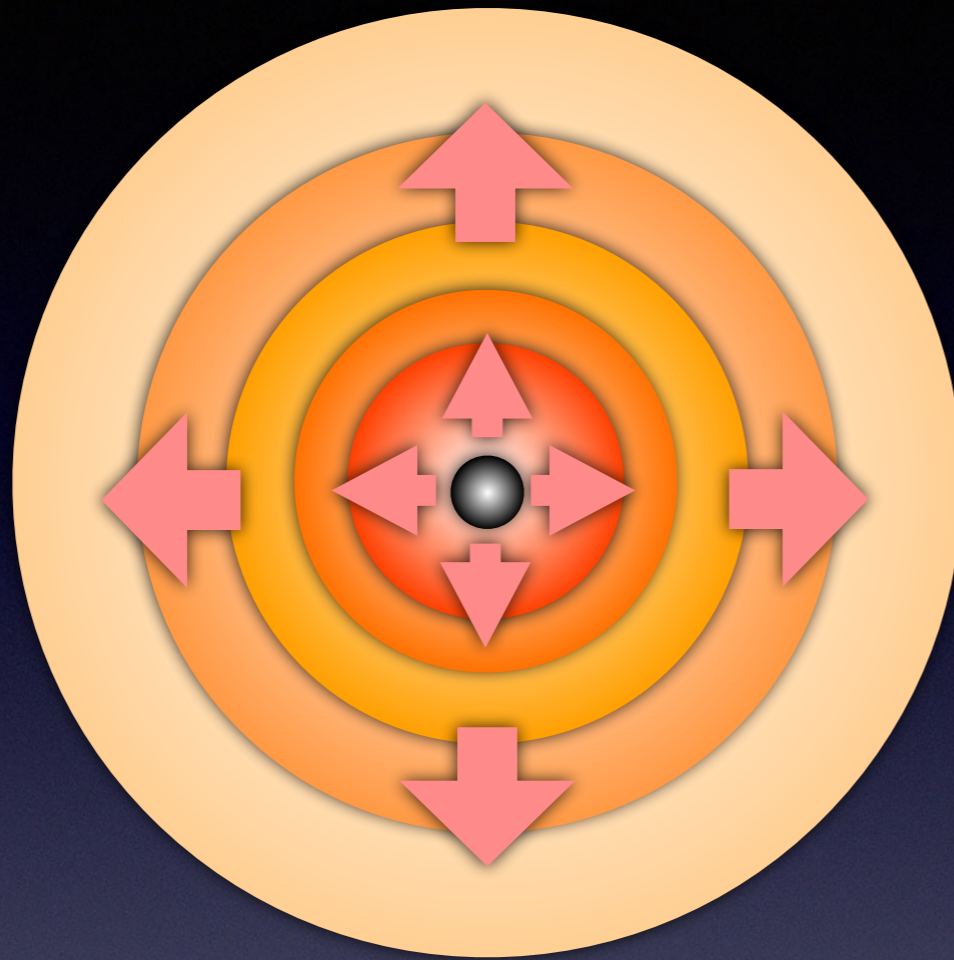
Section 11. 超新星爆発

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

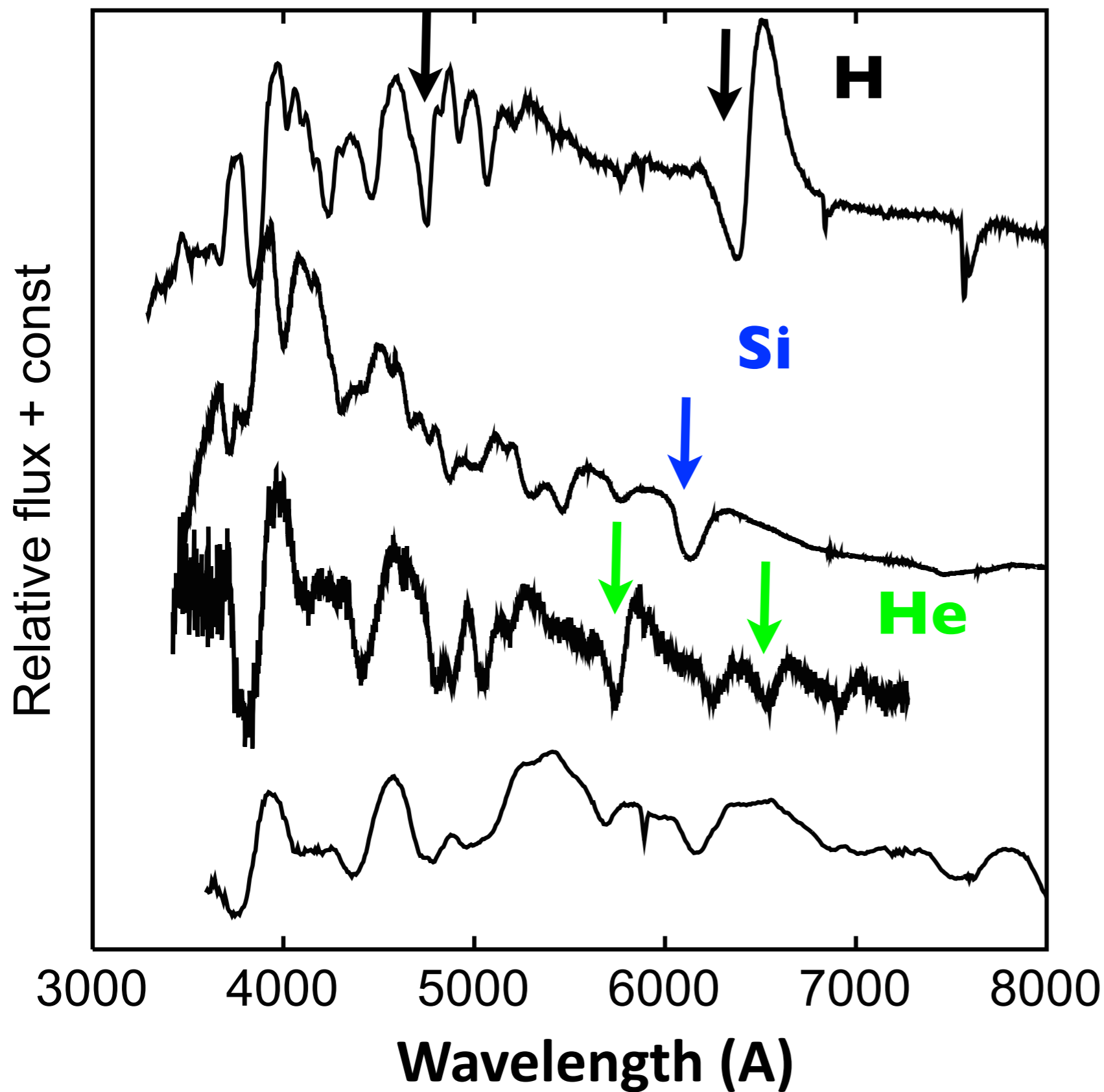
放出元素

主に親星の元素
(O, Mg, Caなど)

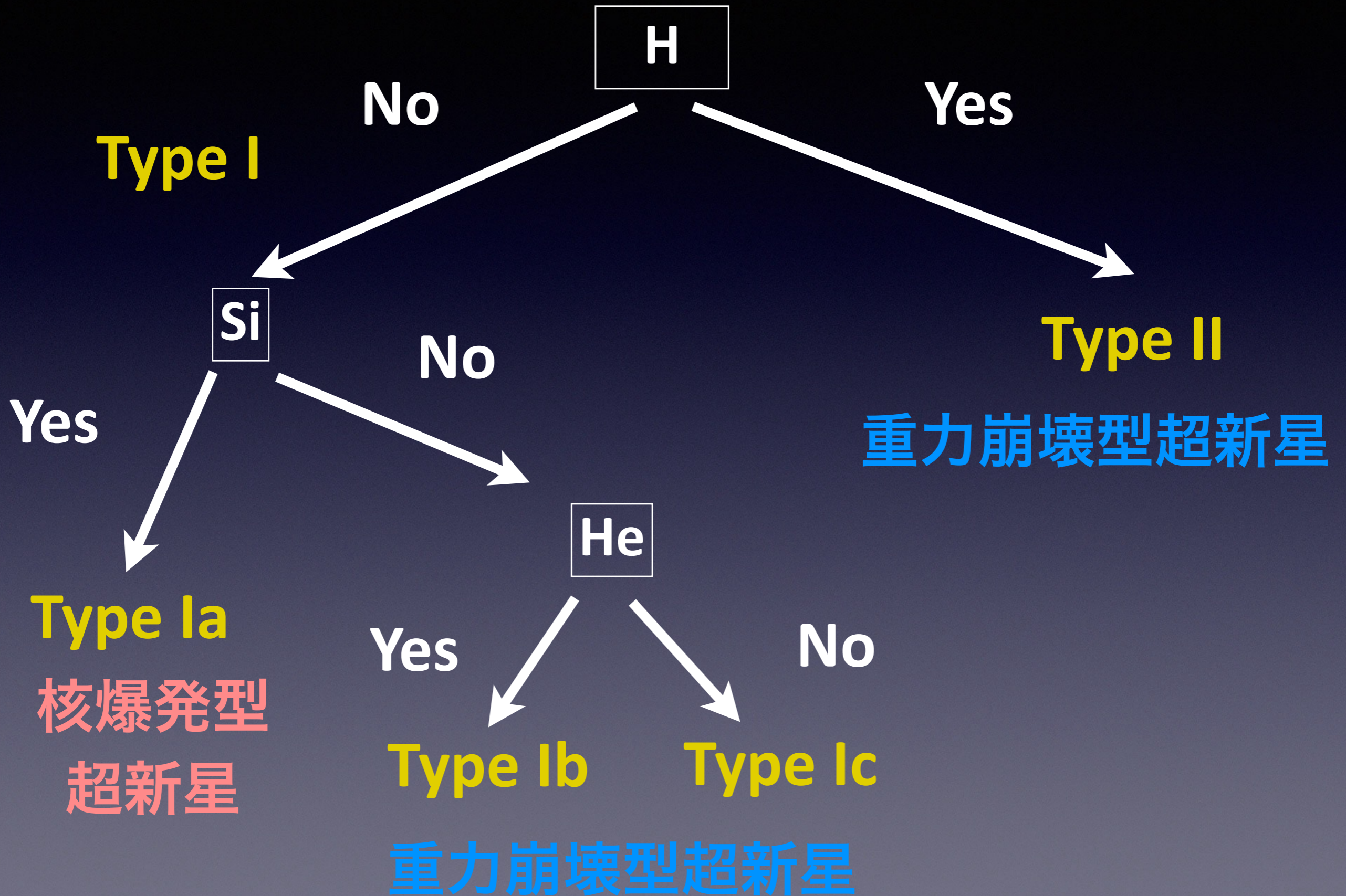
爆発時に合成する元素
(Si, Ca, Feなど)

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



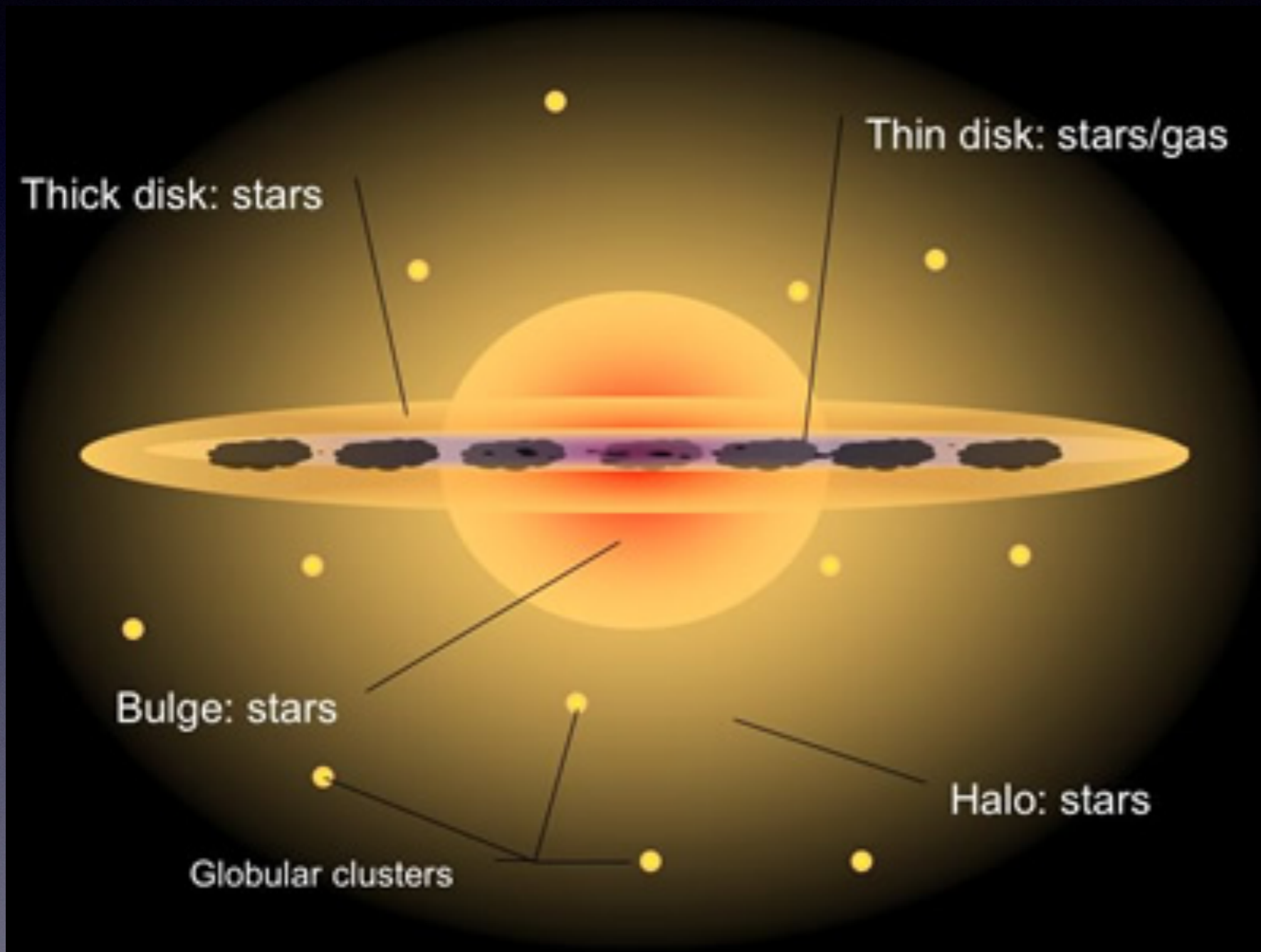
宇宙の「化学」進化



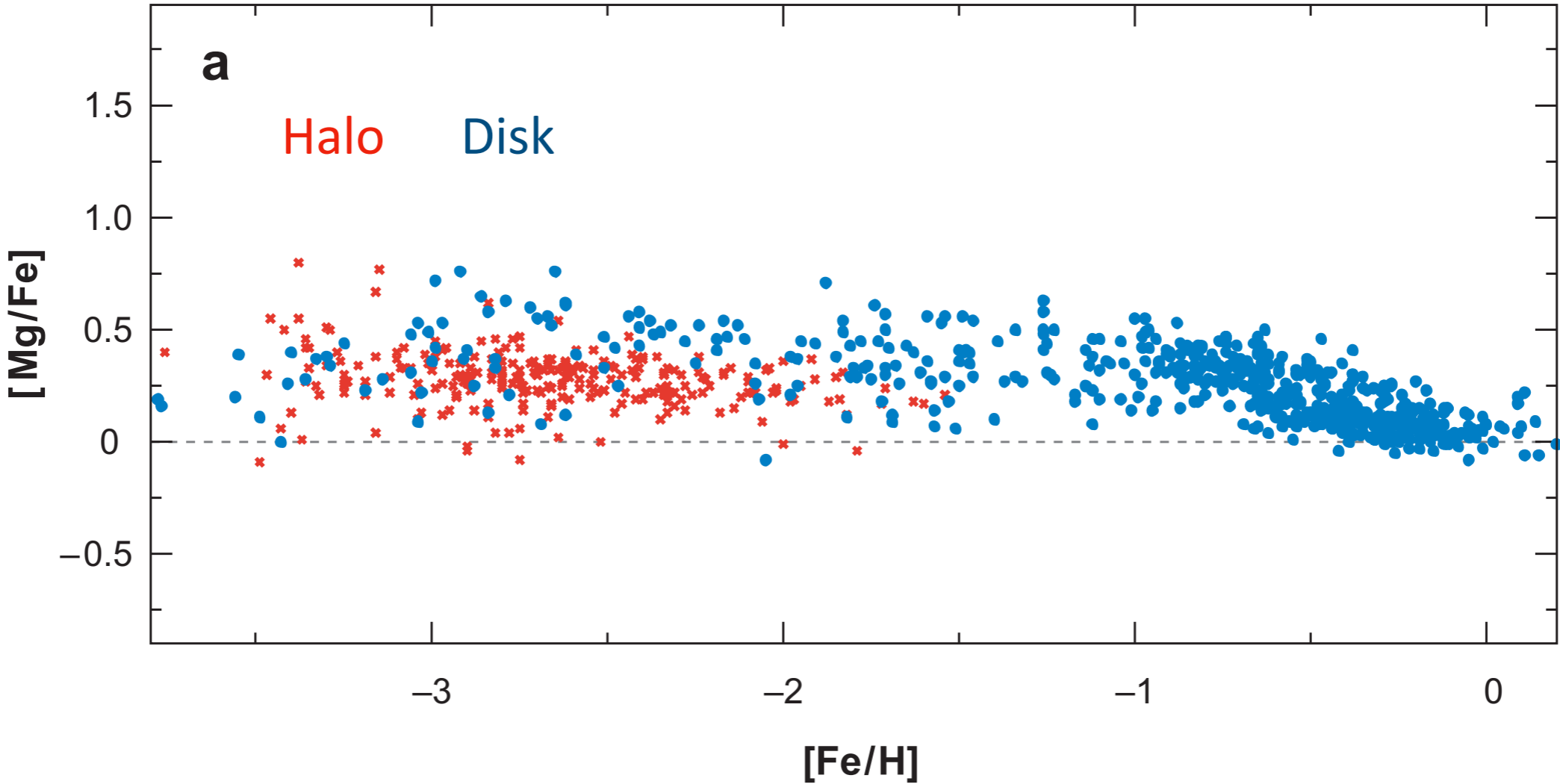
最近生まれた星の方がMg/Fe比が低い

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

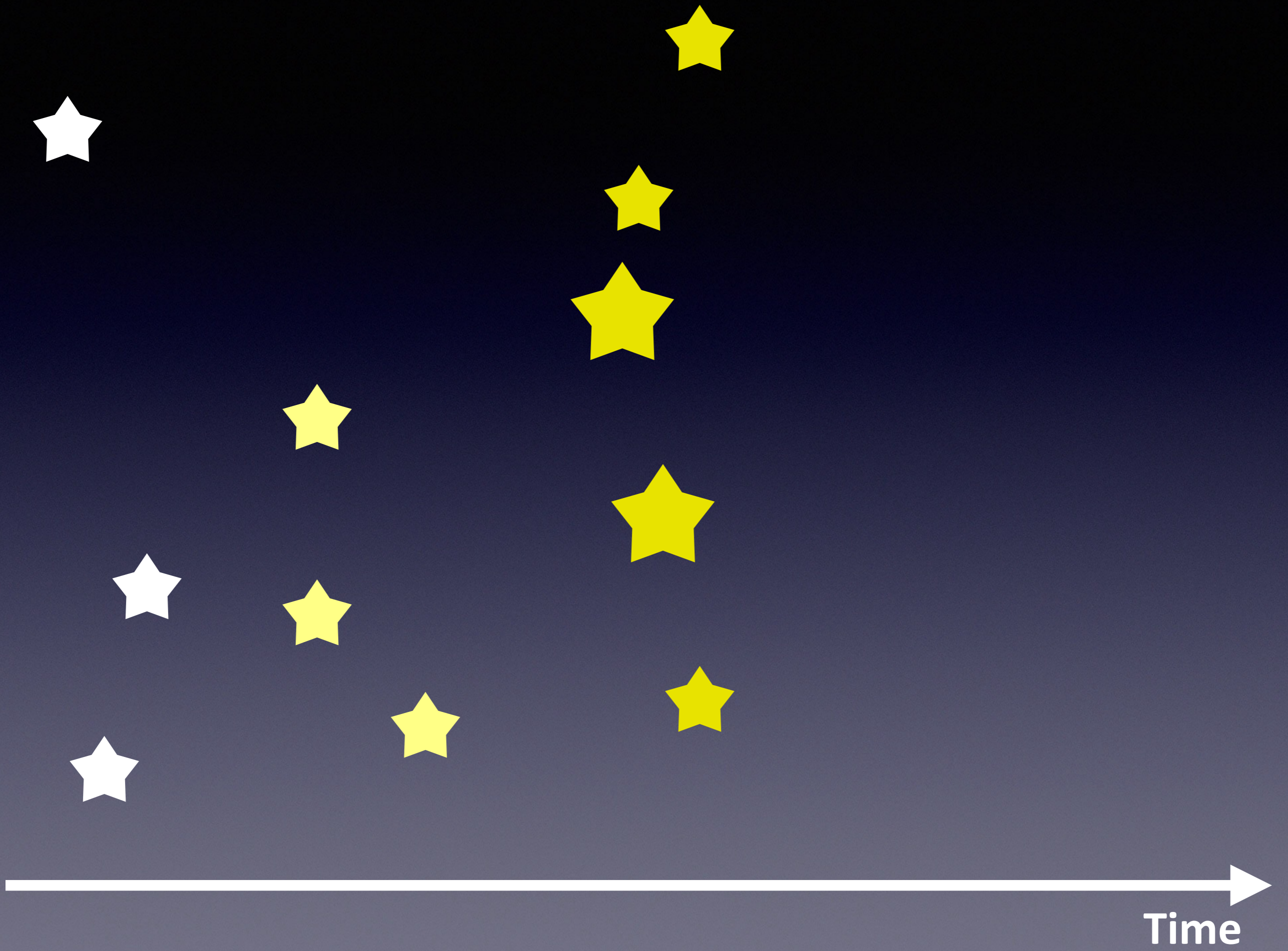


Ia型超新星の方がdelay timeが長い



Time









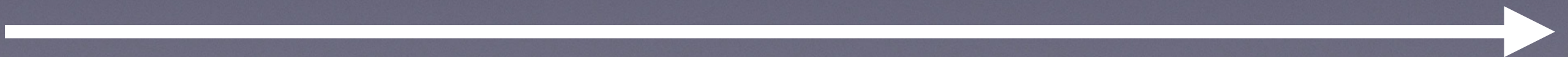
Time







[Fe/H]

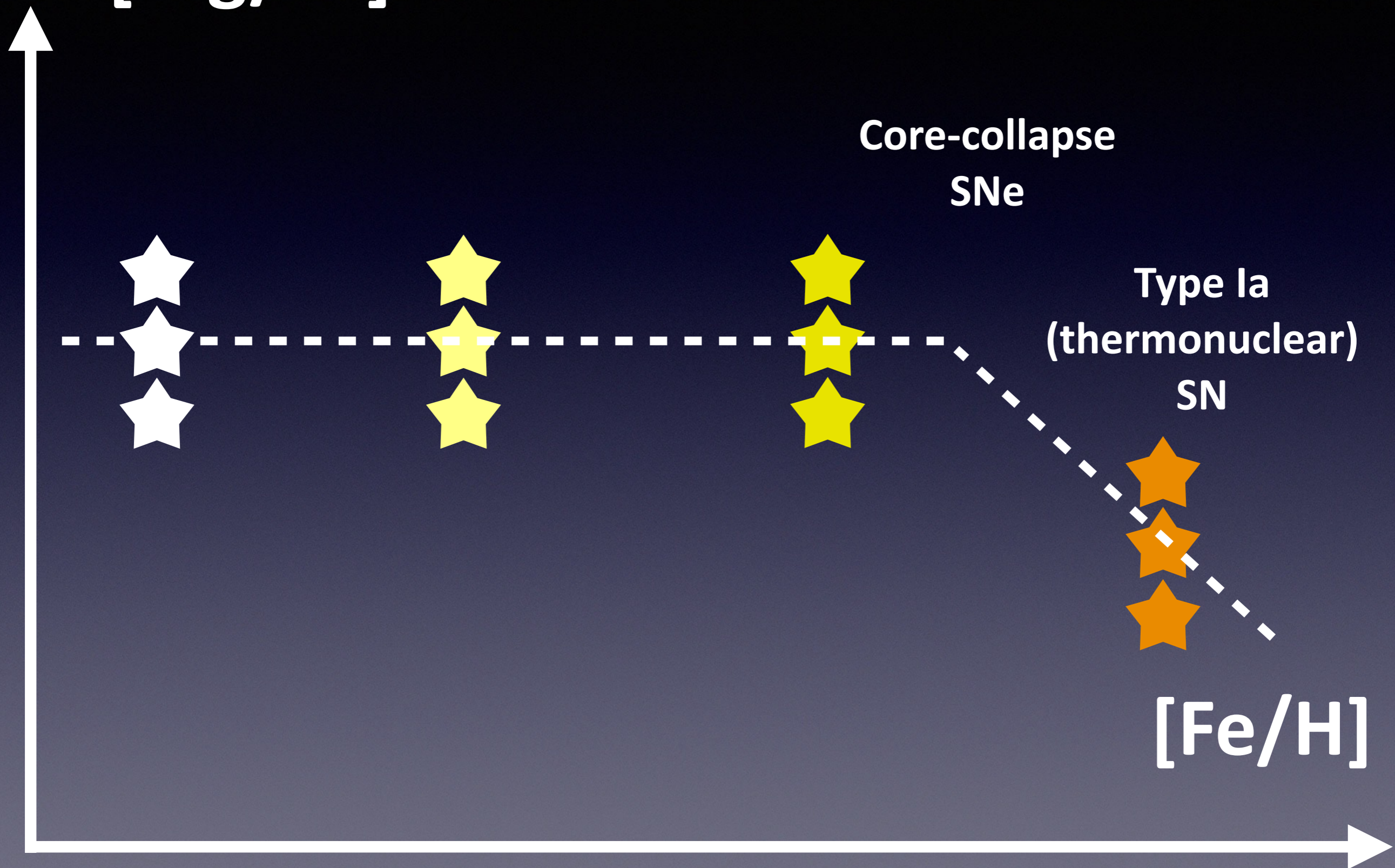


[Mg/Fe]

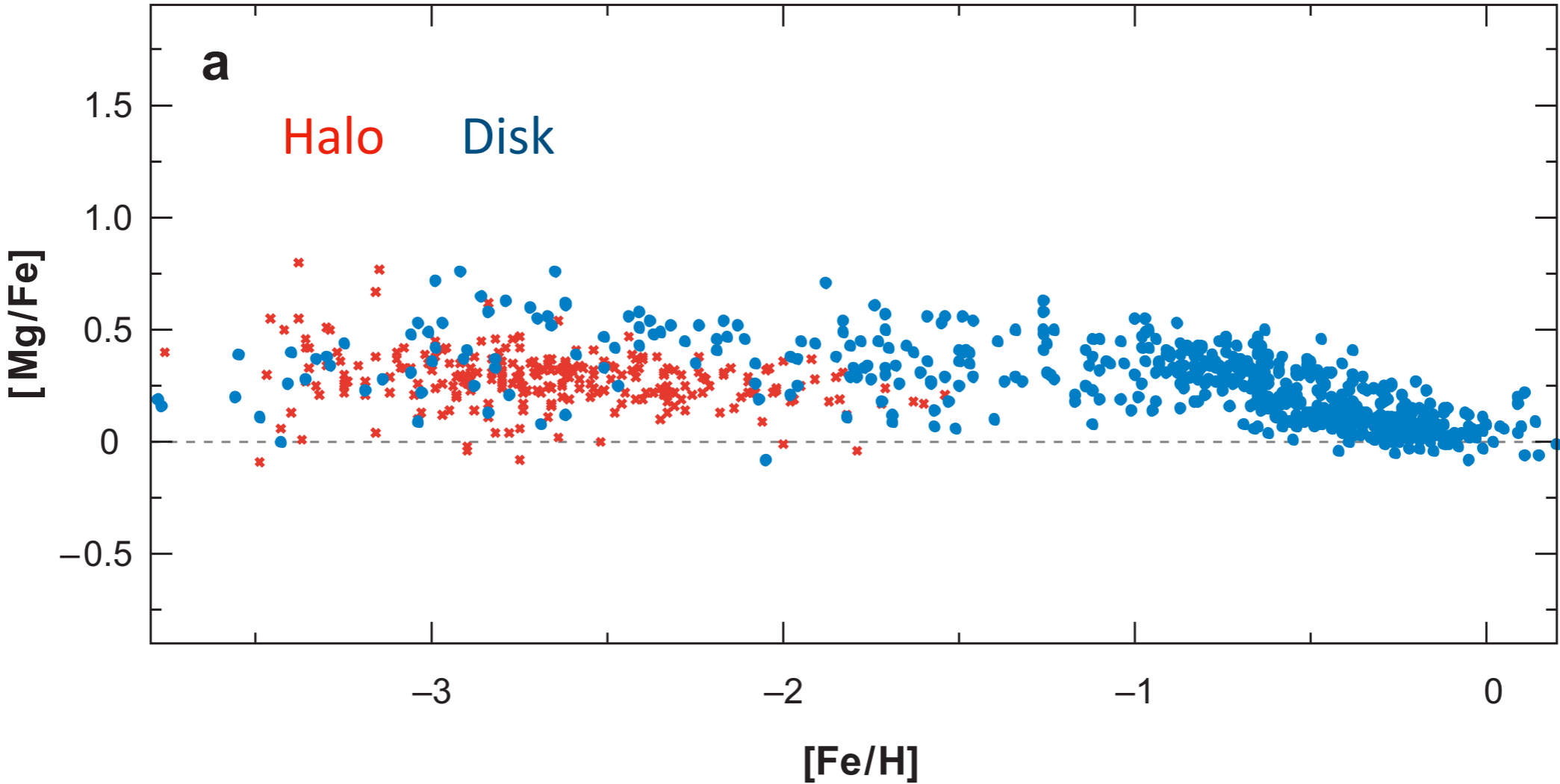
Core-collapse
SNe

Type Ia
(thermonuclear)
SN

[Fe/H]



銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



Sneden+08

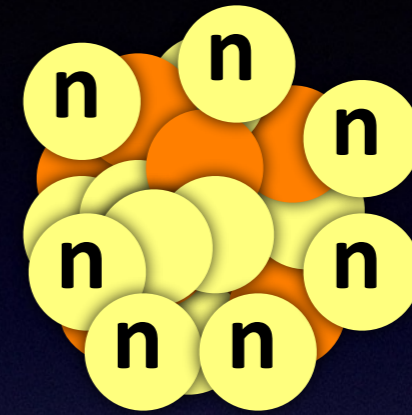
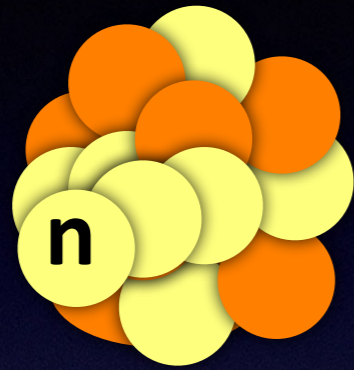


Ia型超新星の方がdelay timeが長い

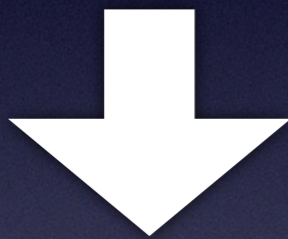
鉄より重い元素 = 中性子捕獲反応

s (slow) プロセス

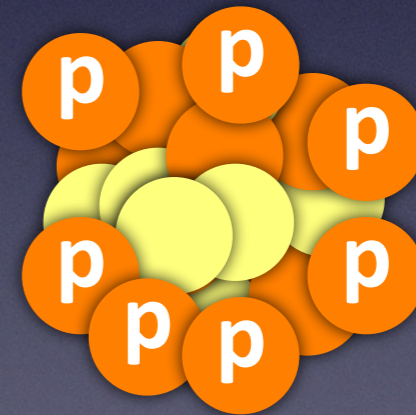
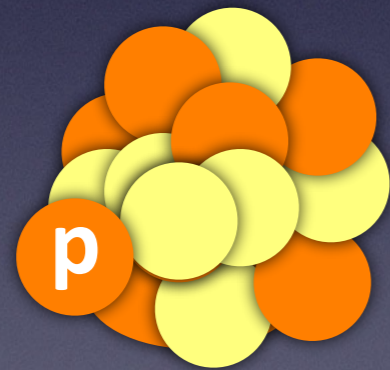
r (rapid) プロセス



崩壊



崩壊



Ba, Pb, ...

AGB星

Au, Pt, U, ...

超新星?? 中性子星合体?

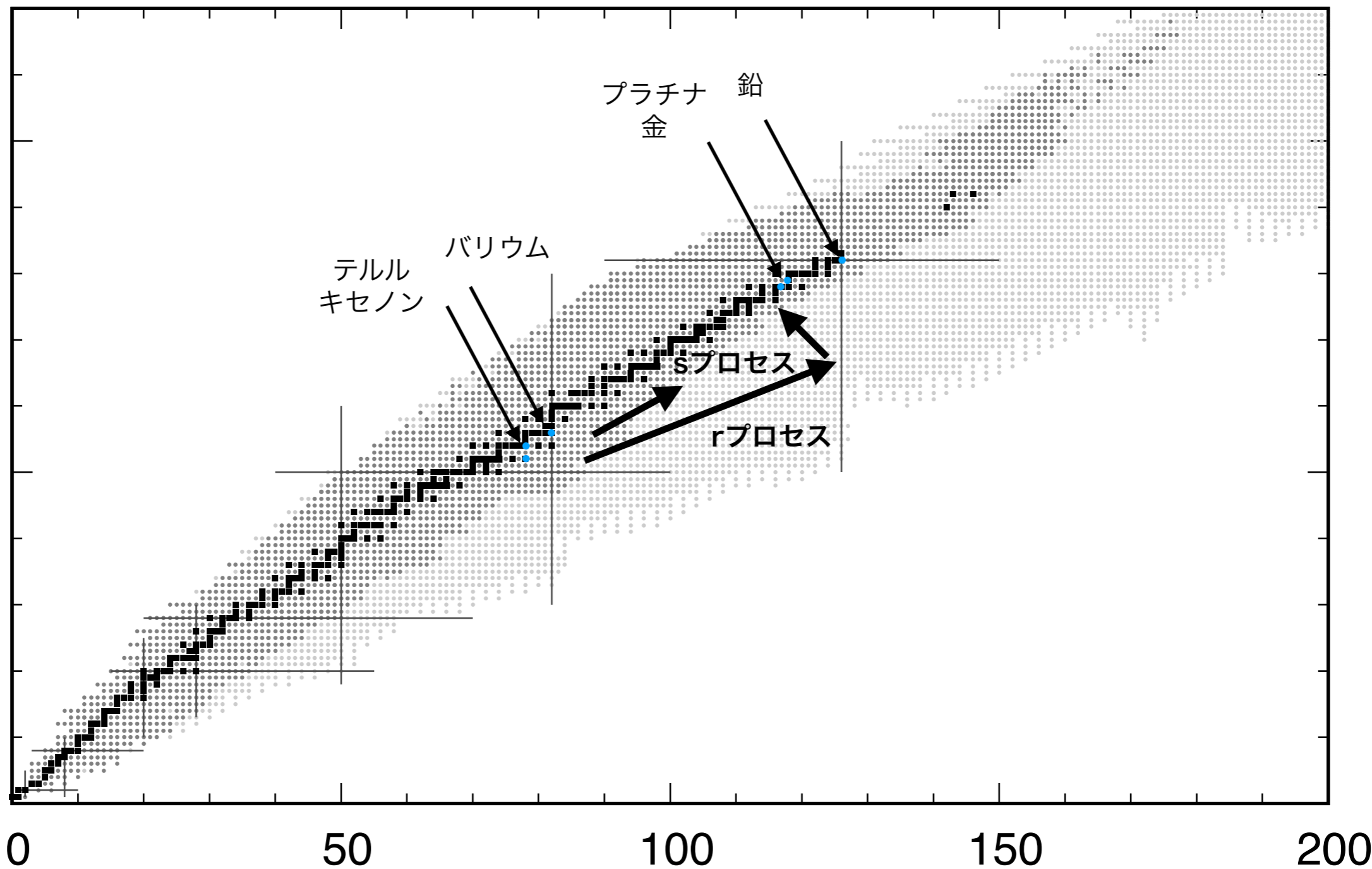
核図表

Proton number 陽子数

100

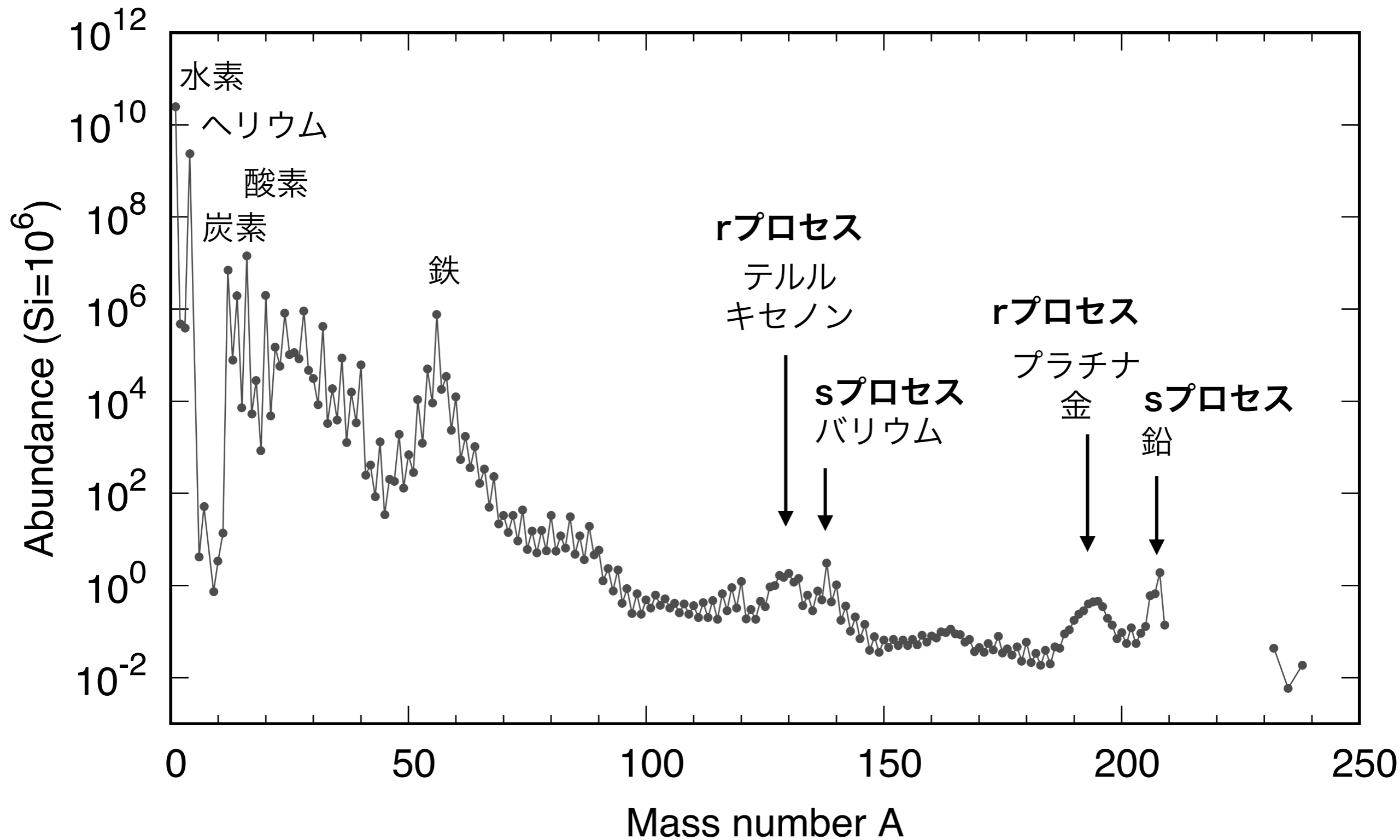
50

0



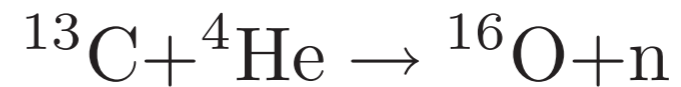
Neutron number 中性子数

宇宙の元素組成 (質量数)

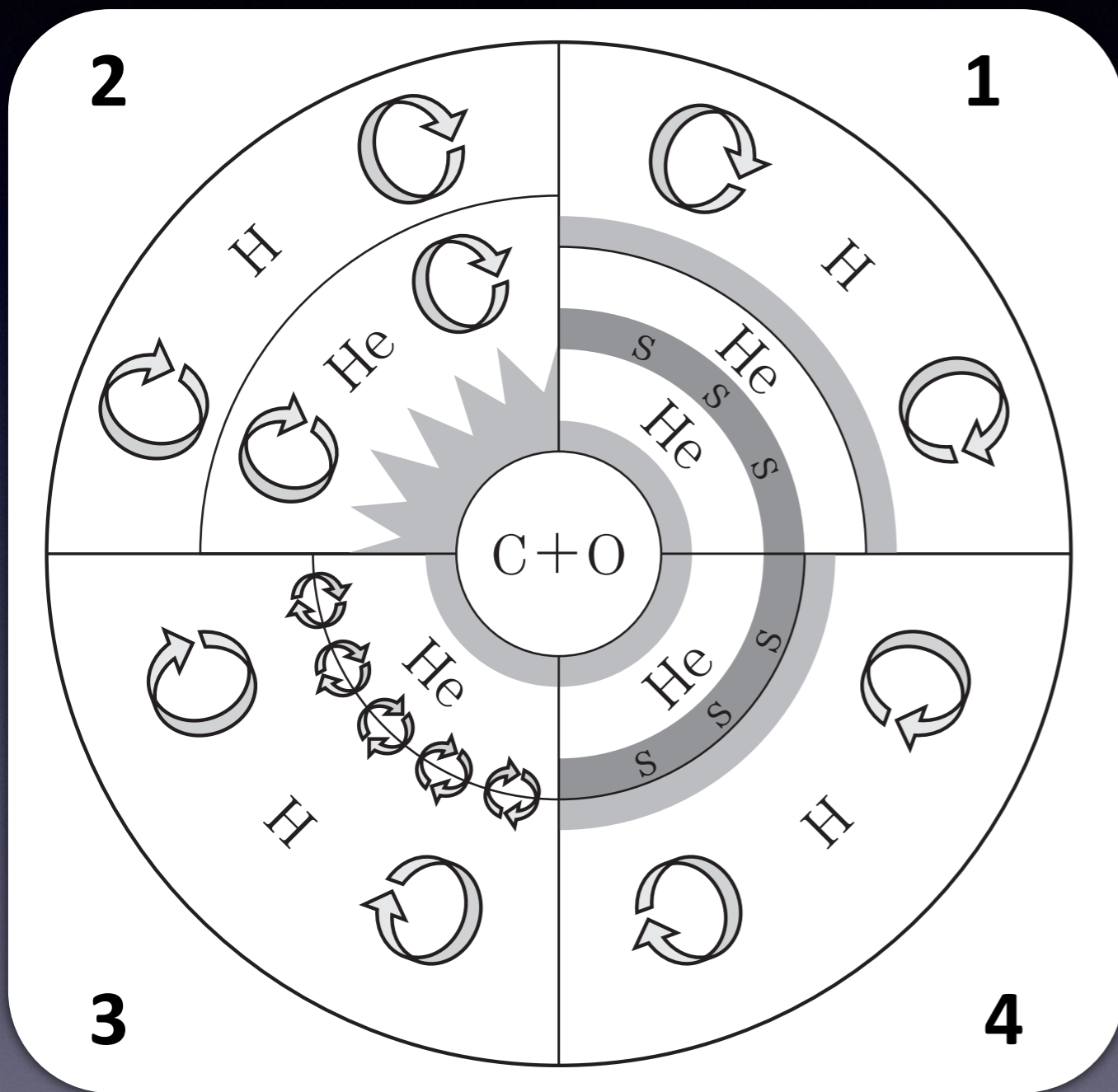


低質量星におけるs-process

中性子を作る主なプロセス



$T > 8 \times 10^7 \text{ K}$



1 He層とH層の底で殻燃焼

2 Heが多くなる

=> 暴走的反応 (フラッシュ)

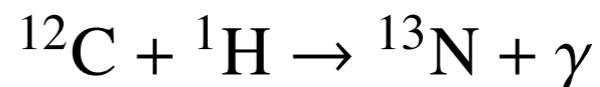
3 対流が発達 => 外層が混ざる

+ ヘリウム層に水素を供給

4 ヘリウム層で以下の反応

^{13}C ができる => 4He と反応

=> 中性子 (s-process)

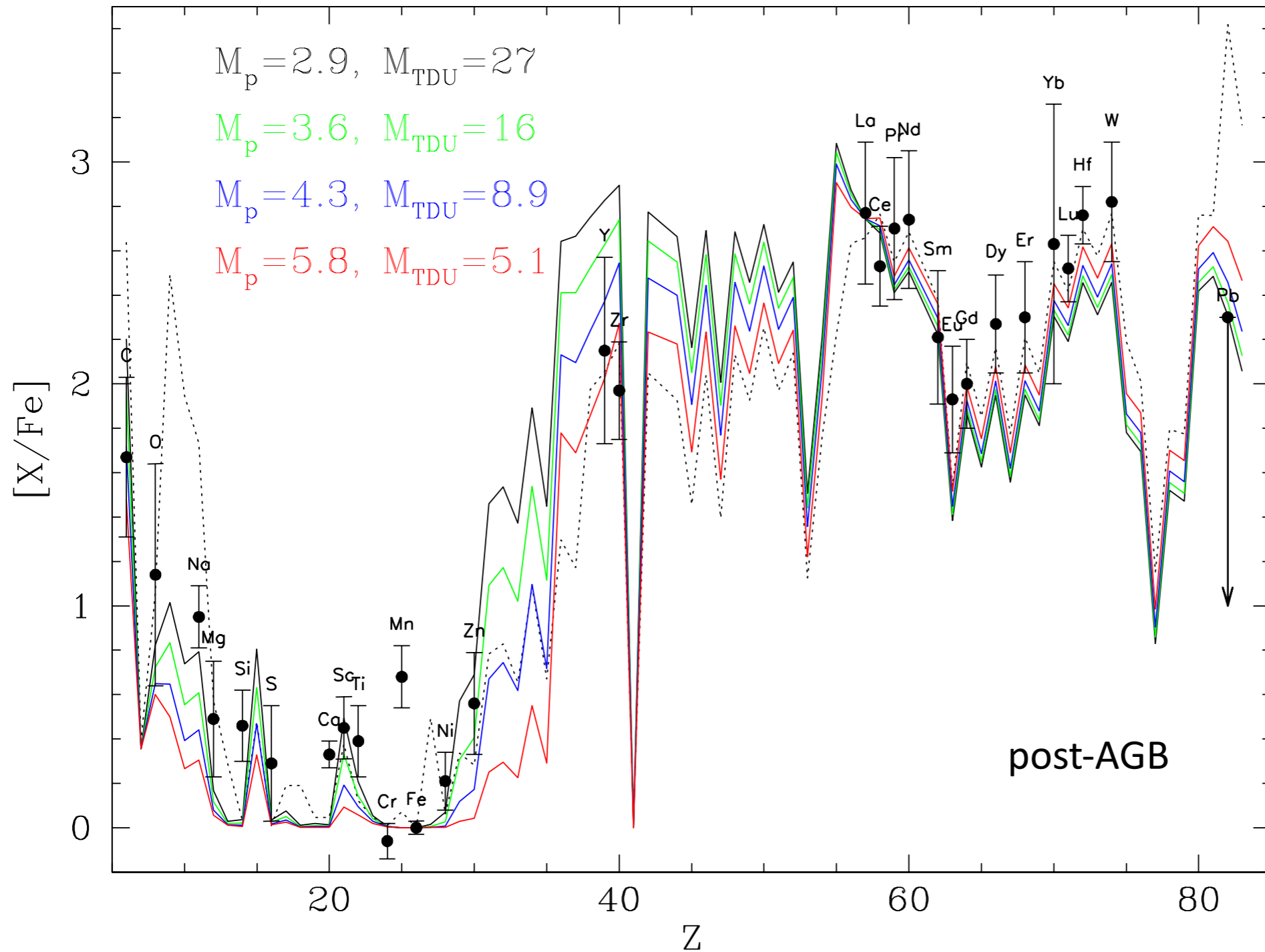


元素はいかにつくられたか (岩波書店)

観測からの制限

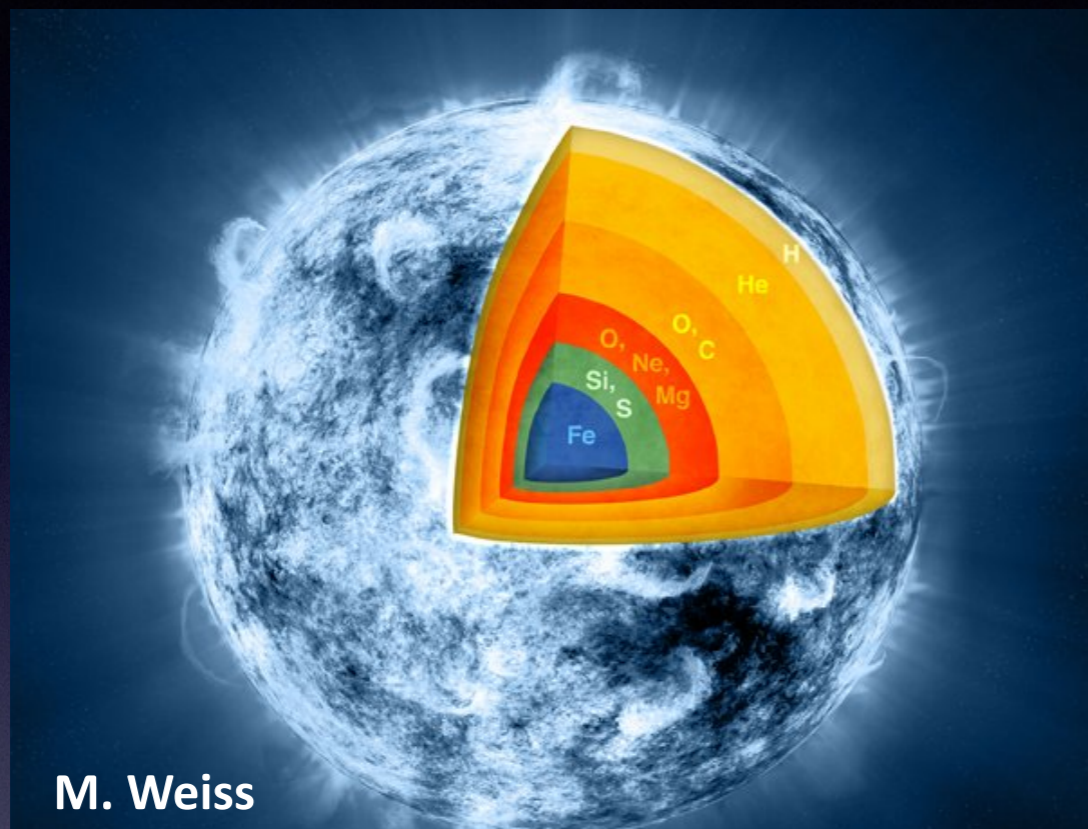
最初の証拠

Tc (Z = 43, 安定核種がない元素)
(Merrill 1952)

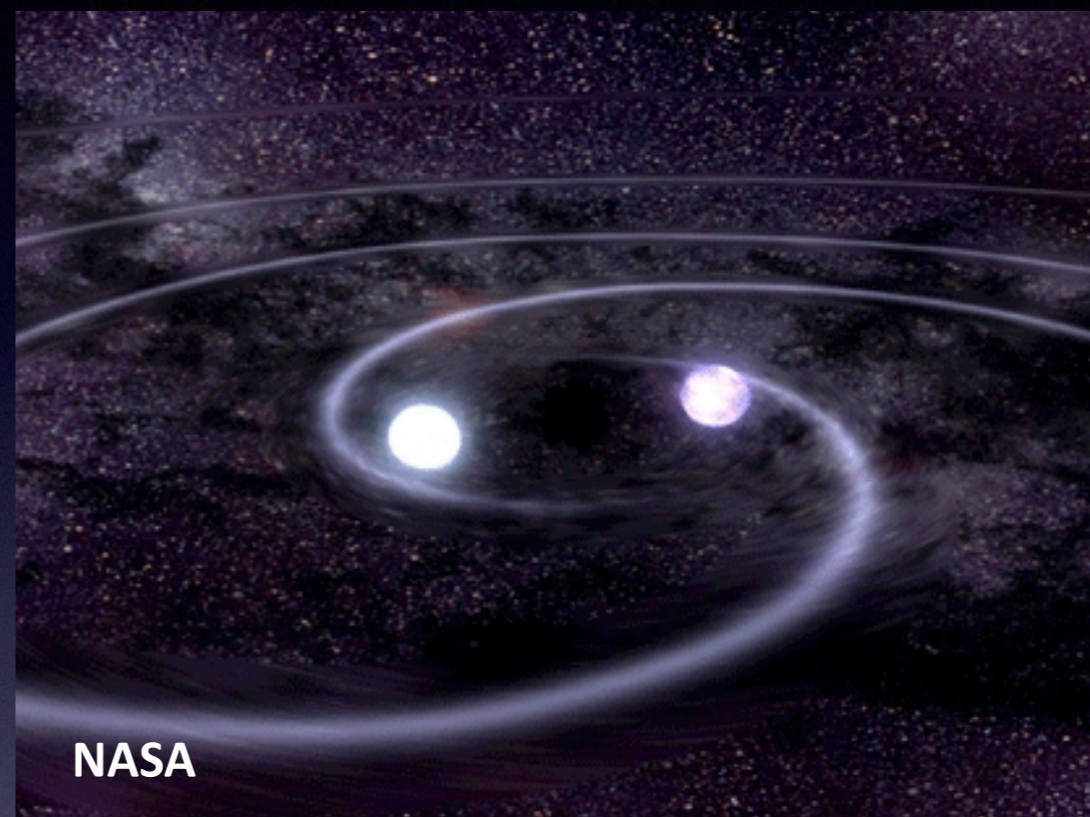


rプロセス元素の起源天体

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？

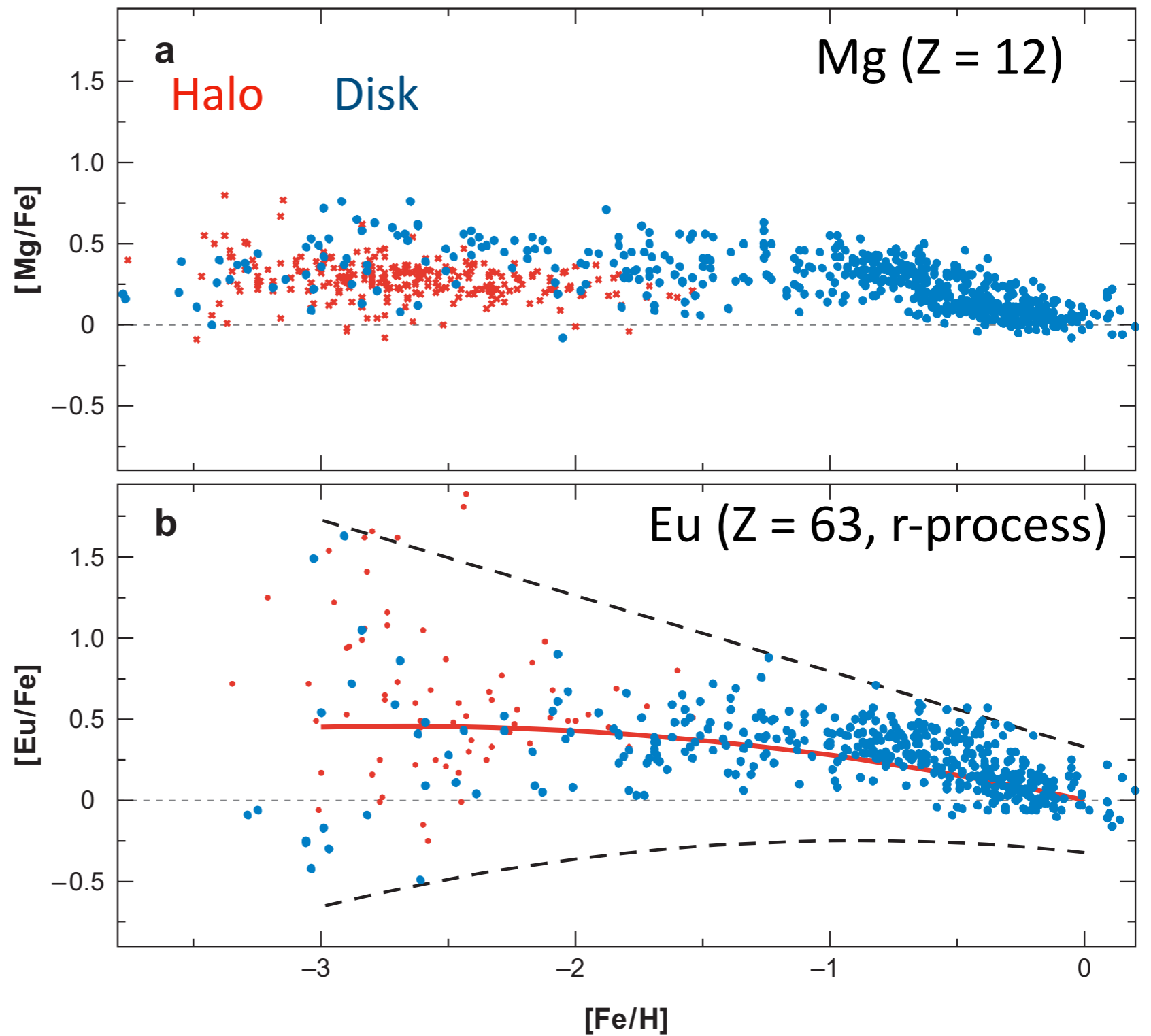
rプロセスは起きる
宇宙でどれくらい起きている？
一回でどれくらい元素を作る？
(重力波+電磁波で測られ始めた)

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

Snedden+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)
 - ...