

Section 12.

超新星爆発

12.1 重力崩壊型超新星

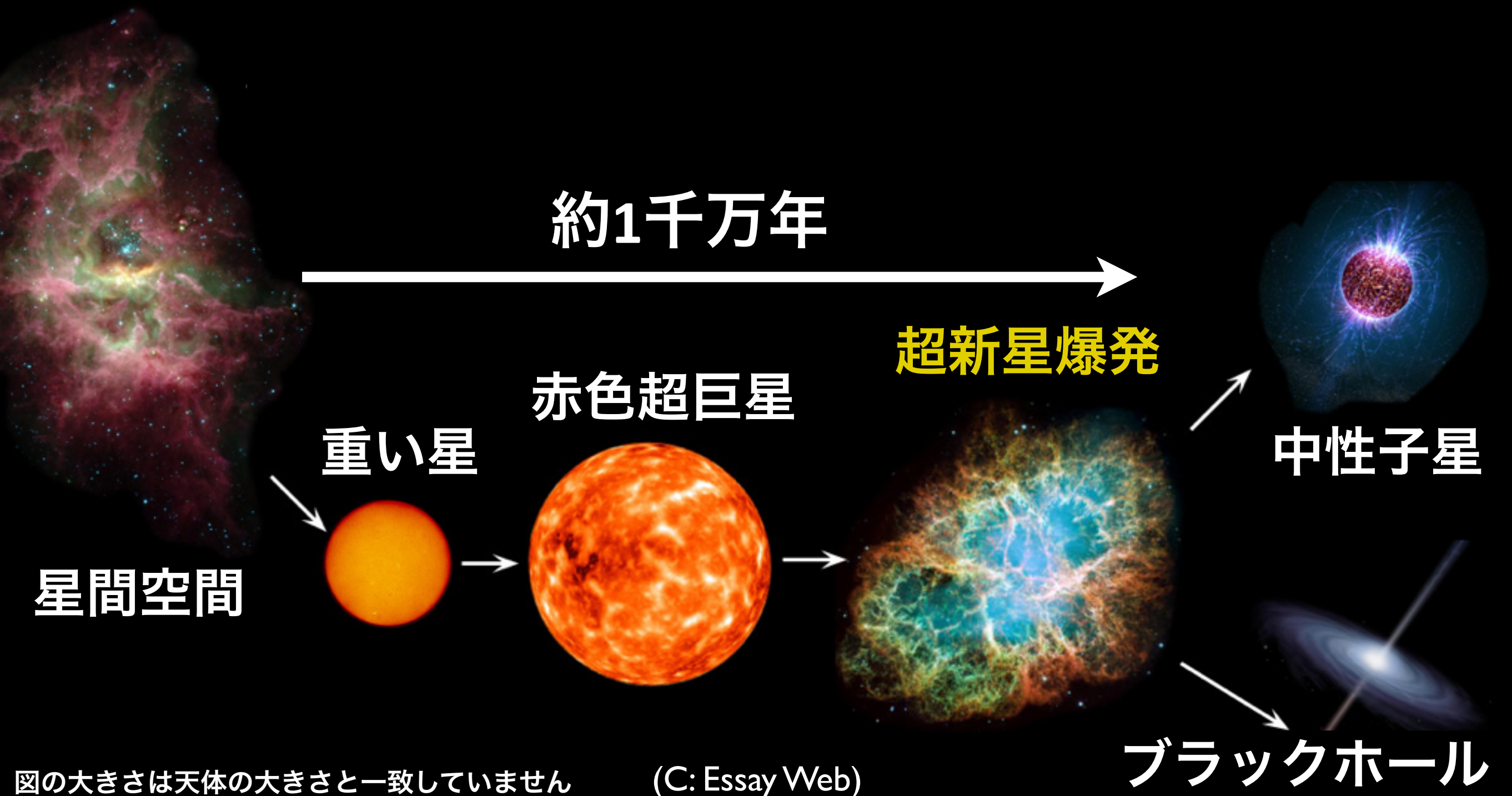
12.2 宇宙の元素の起源

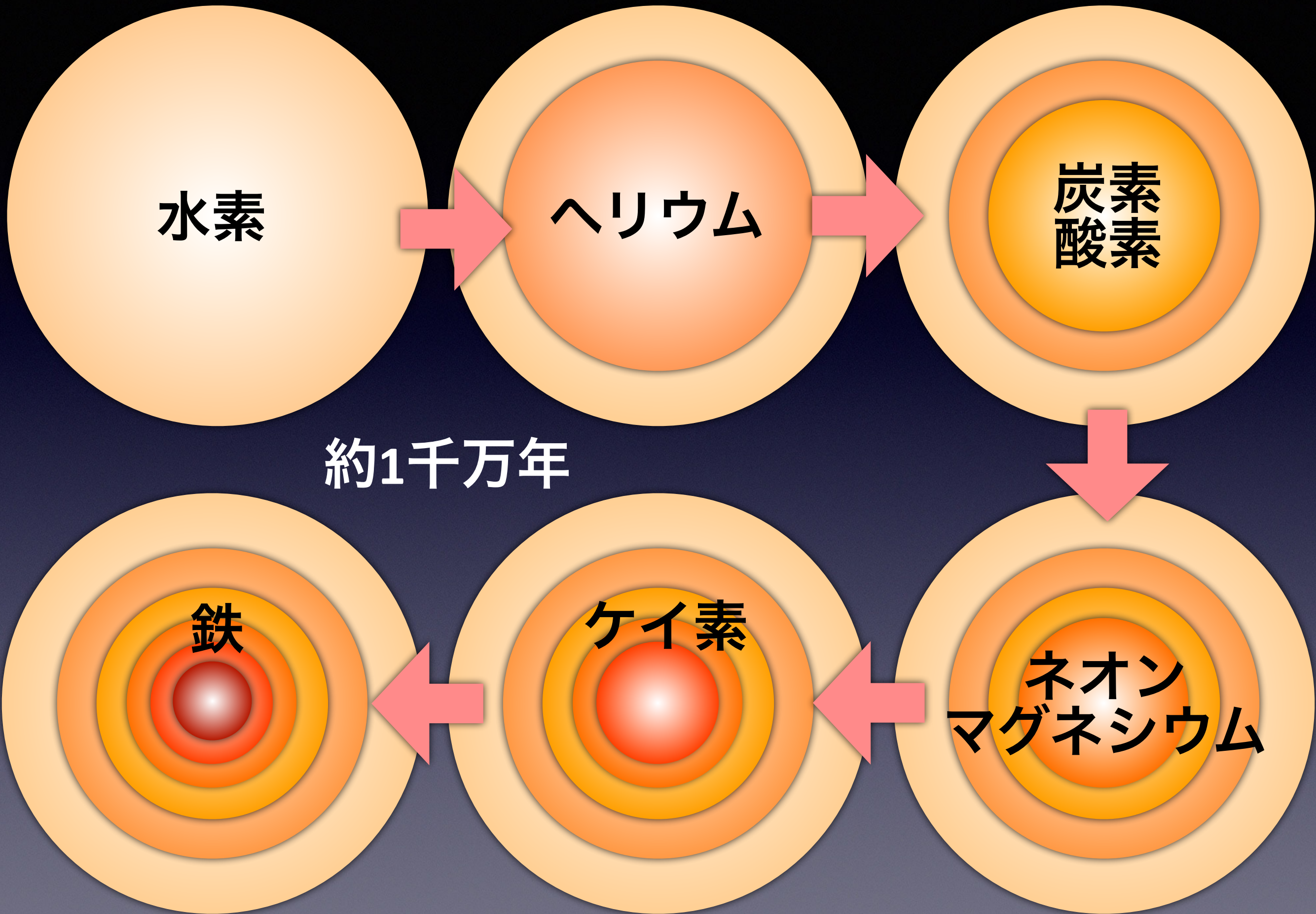
さまざまな疑問を**物理**を使って理解しよう

- 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

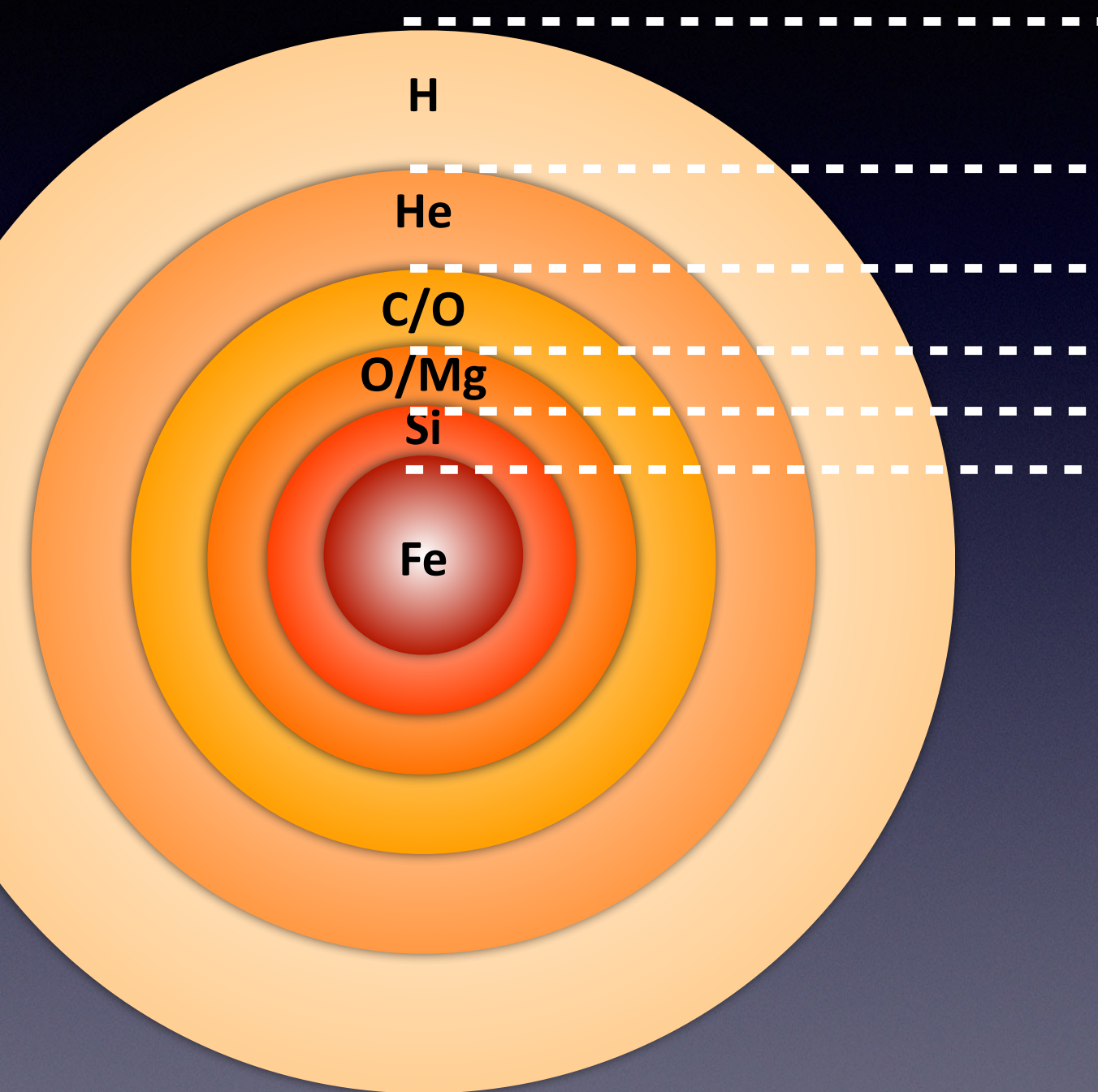




約1千万年

20太陽質量の場合

(重力崩壊直前は約16太陽質量)



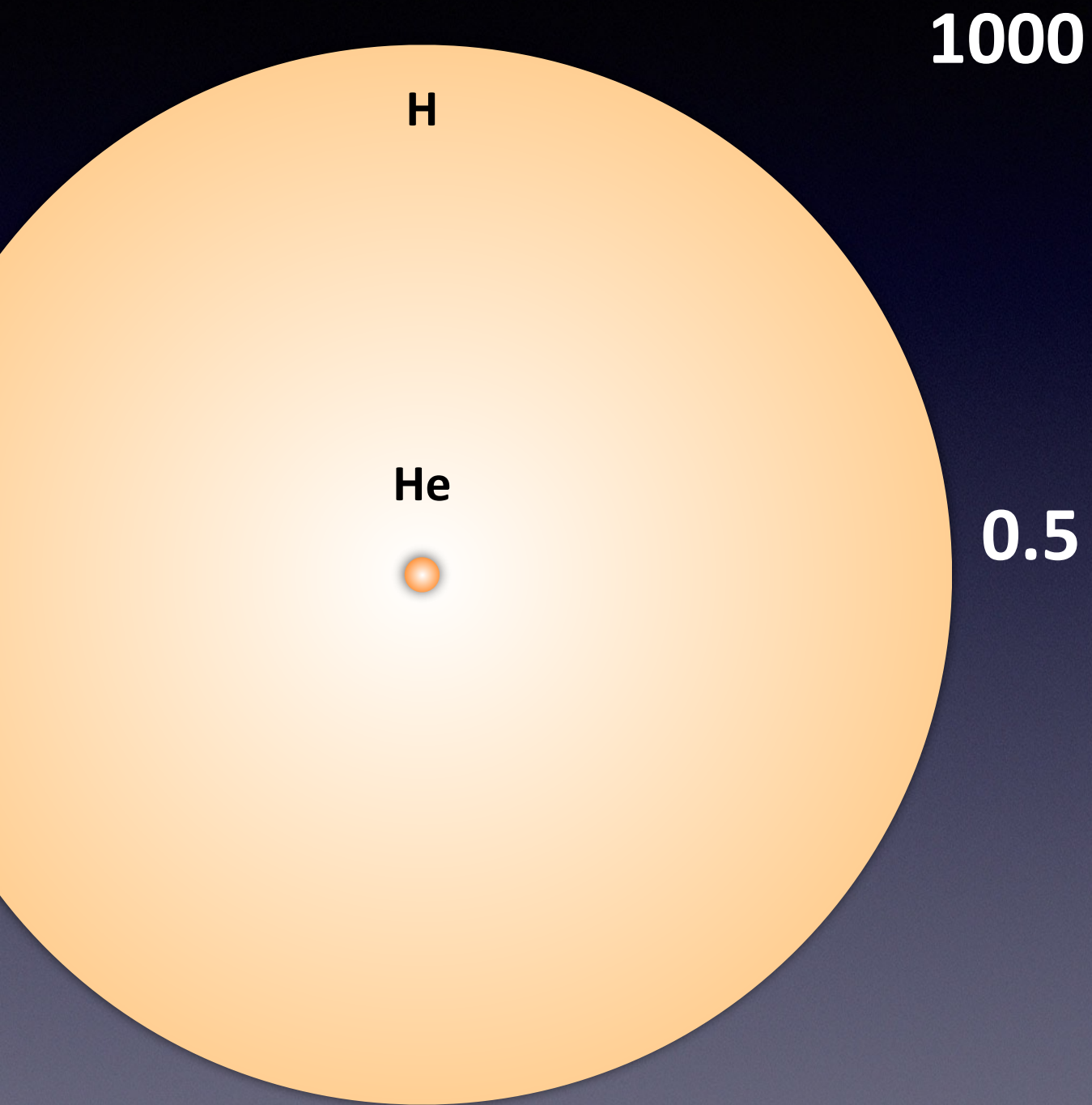
質量 (太陽質量)	半径 (太陽半 径)	中心に落ちる までの時間 (秒)
16	1000	3×10^7 (1yr)
6	0.5	300
5	0.2	50
4	0.08	20
2	0.005	1
1.5	0.003	0.1

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

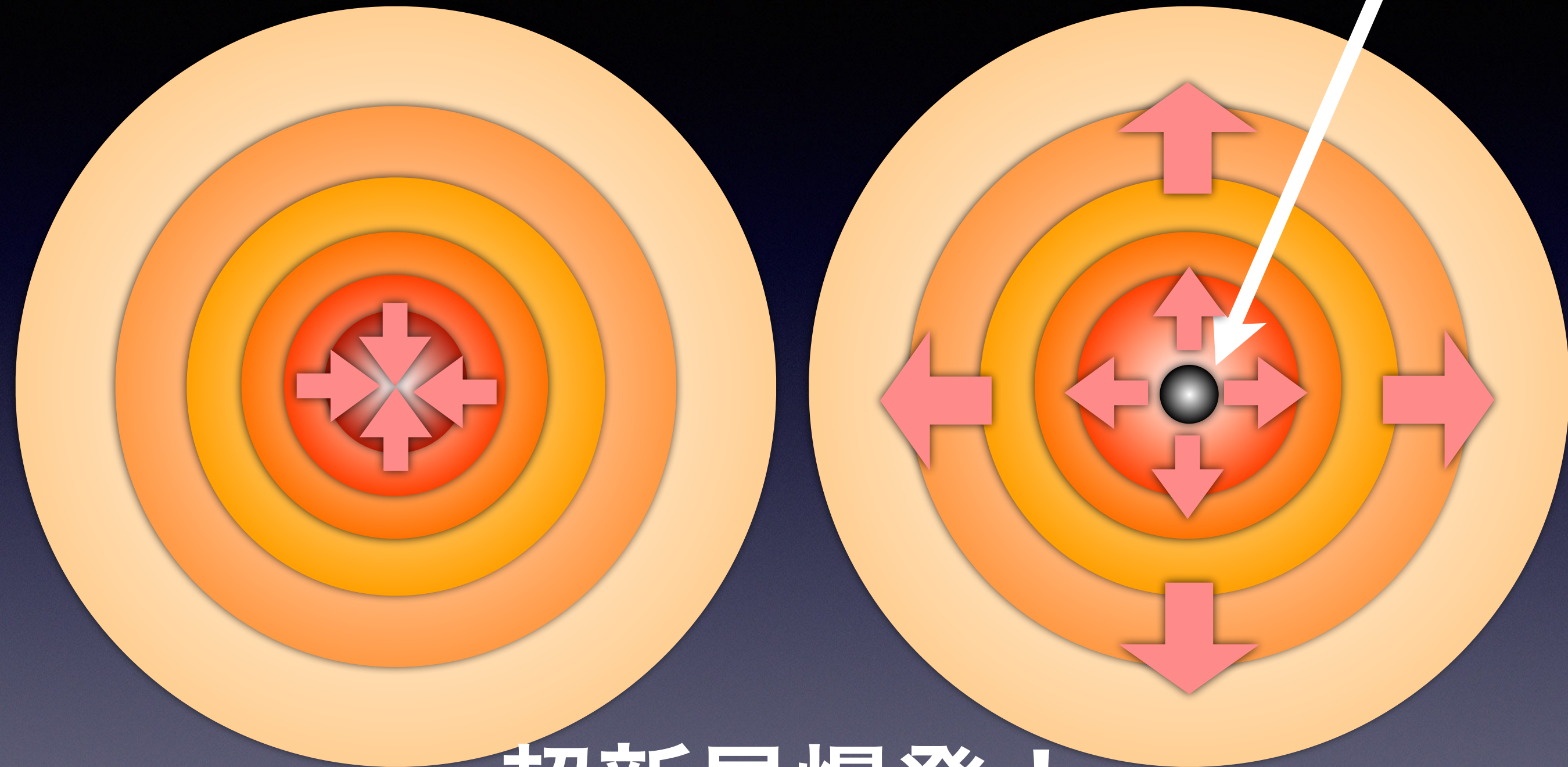
実際のイメージ

(本当はもっと極端)



「重力崩壊」

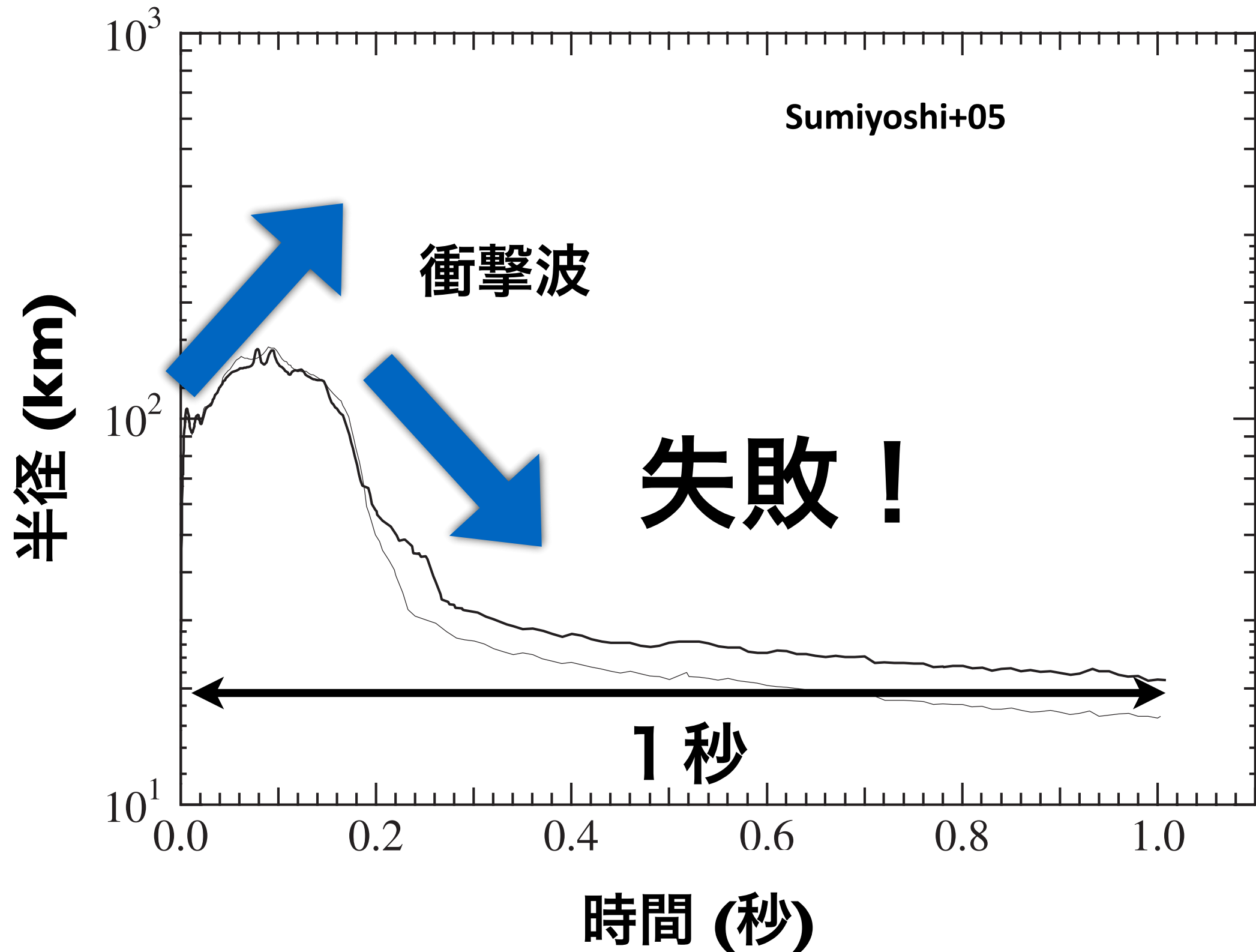
中性子星



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？

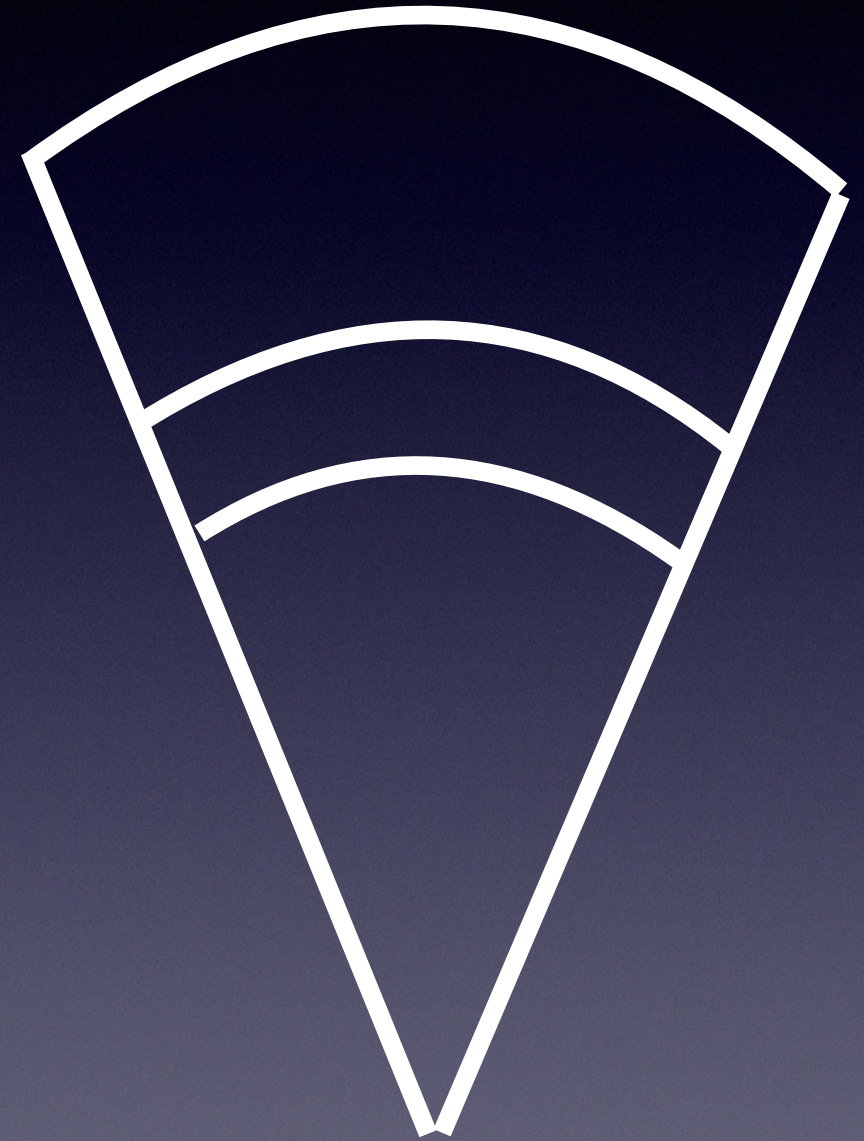
なぜ爆発するのか？
なぜ爆発は「難しい」のか？

星の中の静水圧平衡

圧力勾配



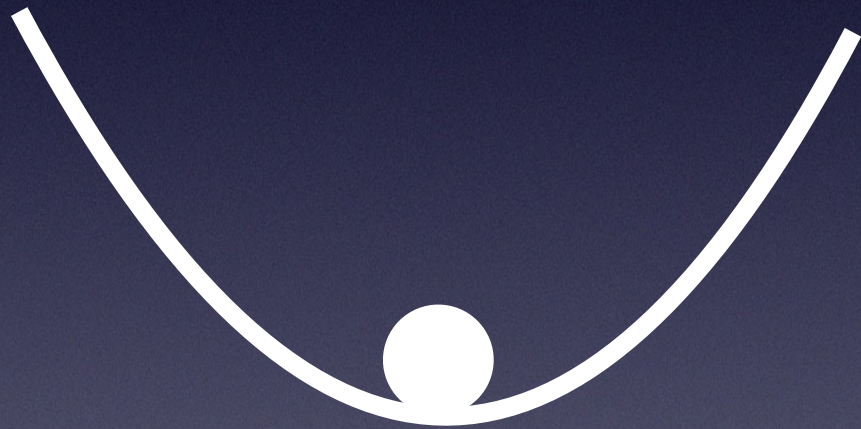
重力



力は釣り合っている
だけどそれは「安定」？

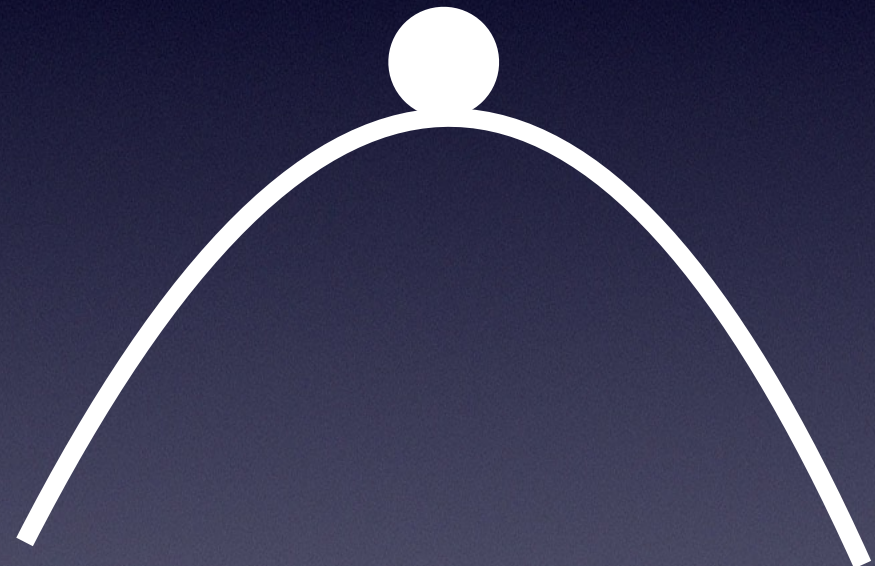
力学的安定性

安定

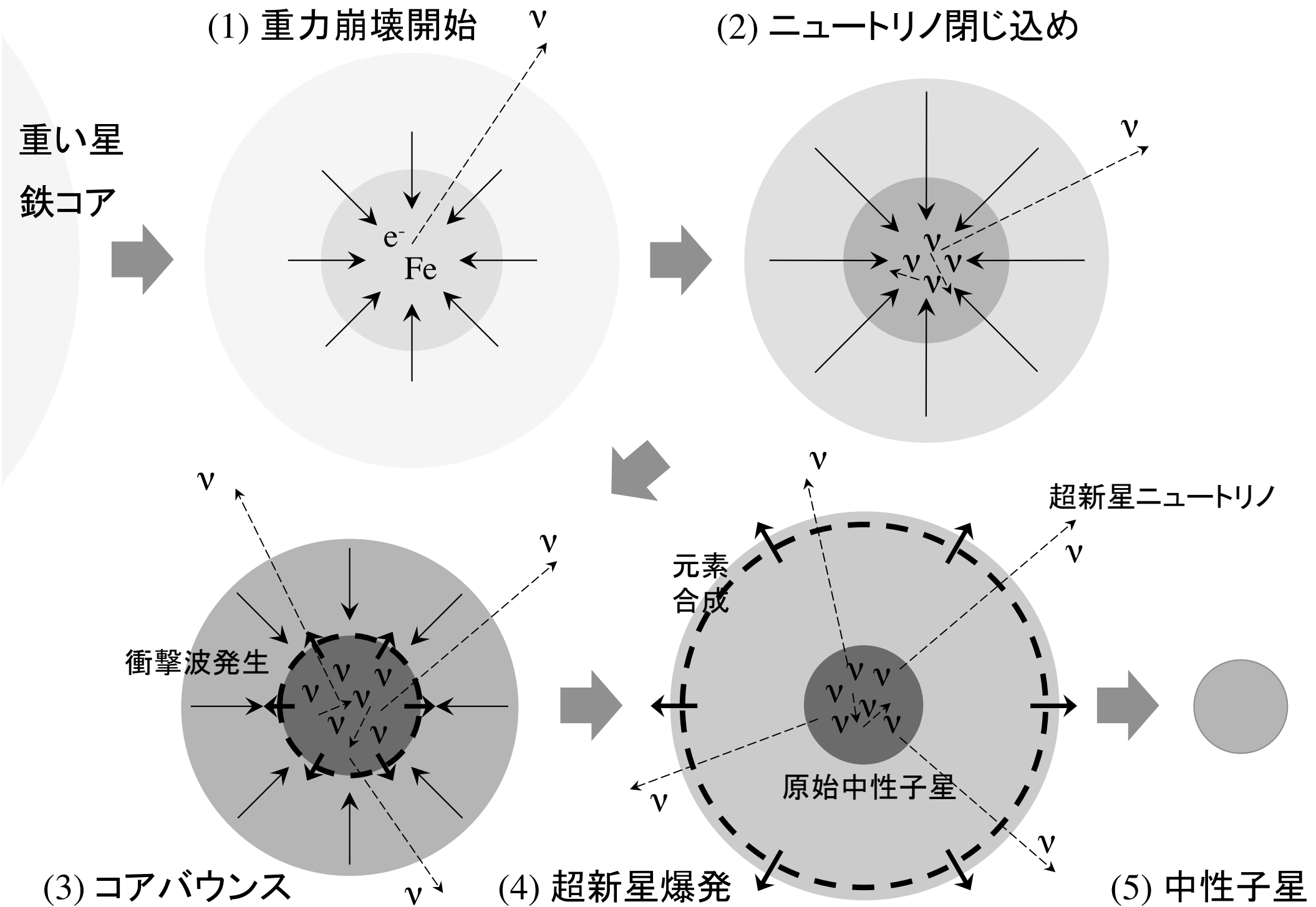


擾乱を与えても
元の位置に戻る

不安定



擾乱を与えると
成長する



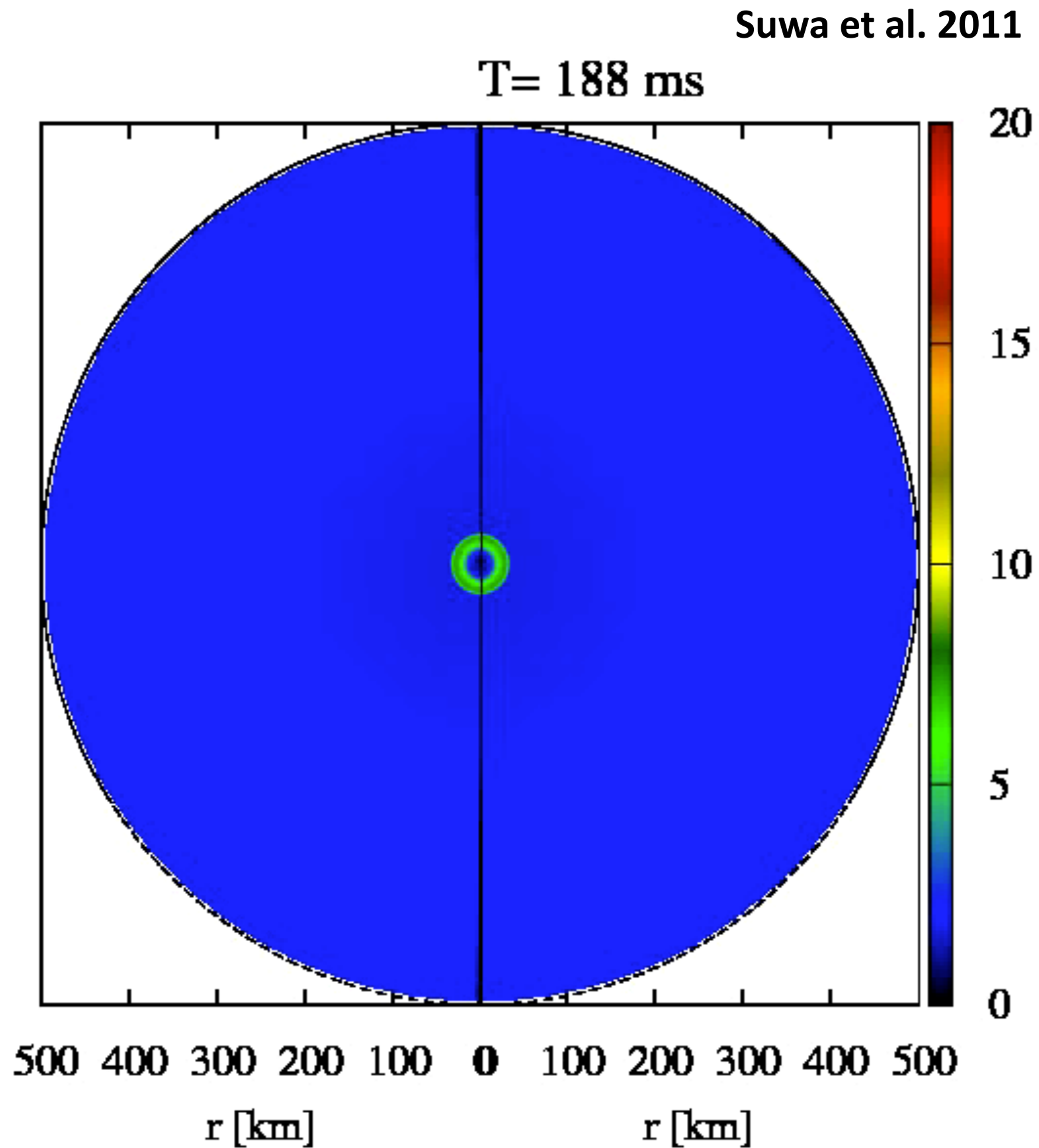
(c) 原子核から読み解く超新星爆発の世界
住吉光介さん著

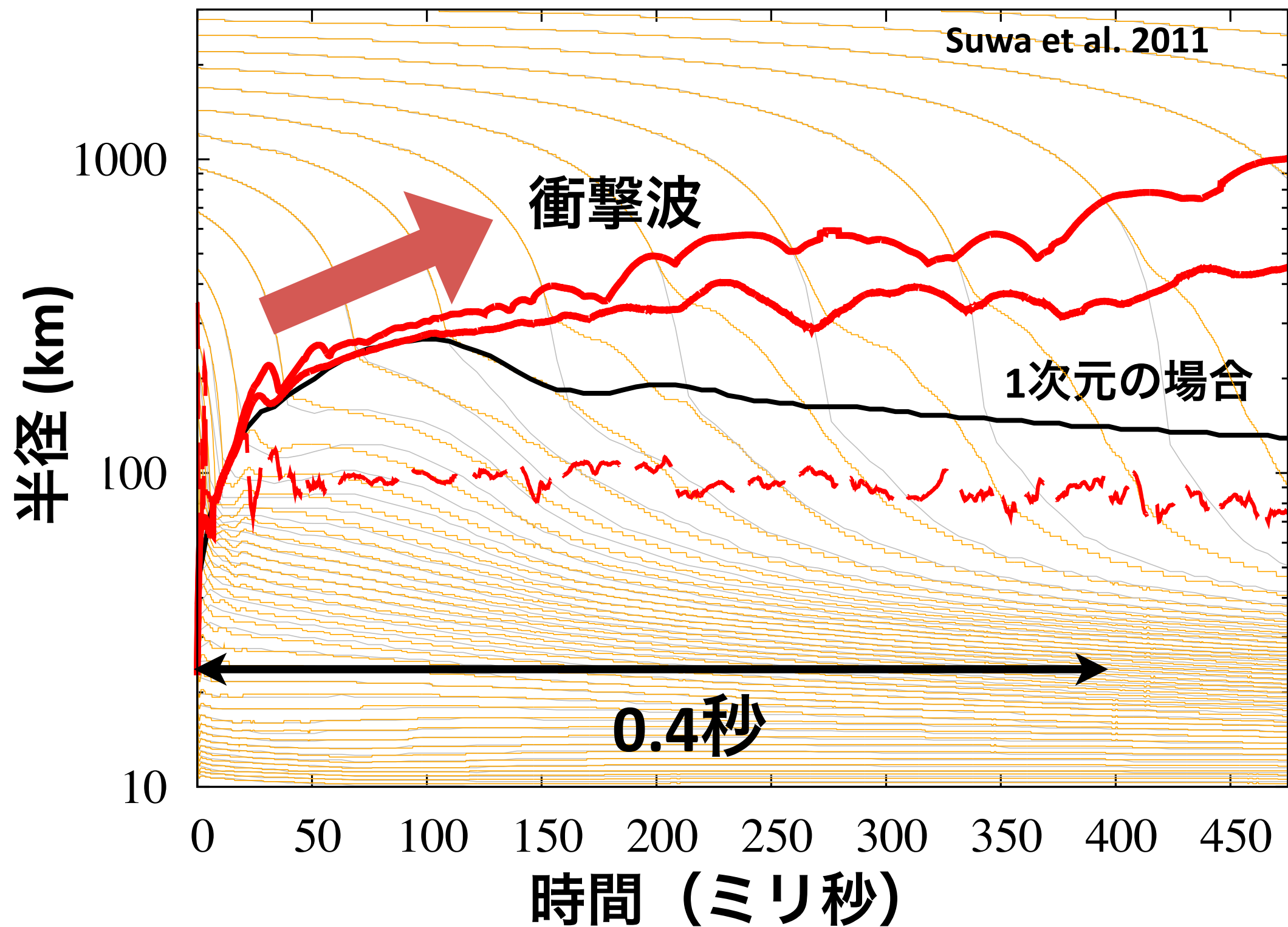
アメリカのグループの結果

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





まだ $E \sim 10^{50}$ erg (1桁足りない)

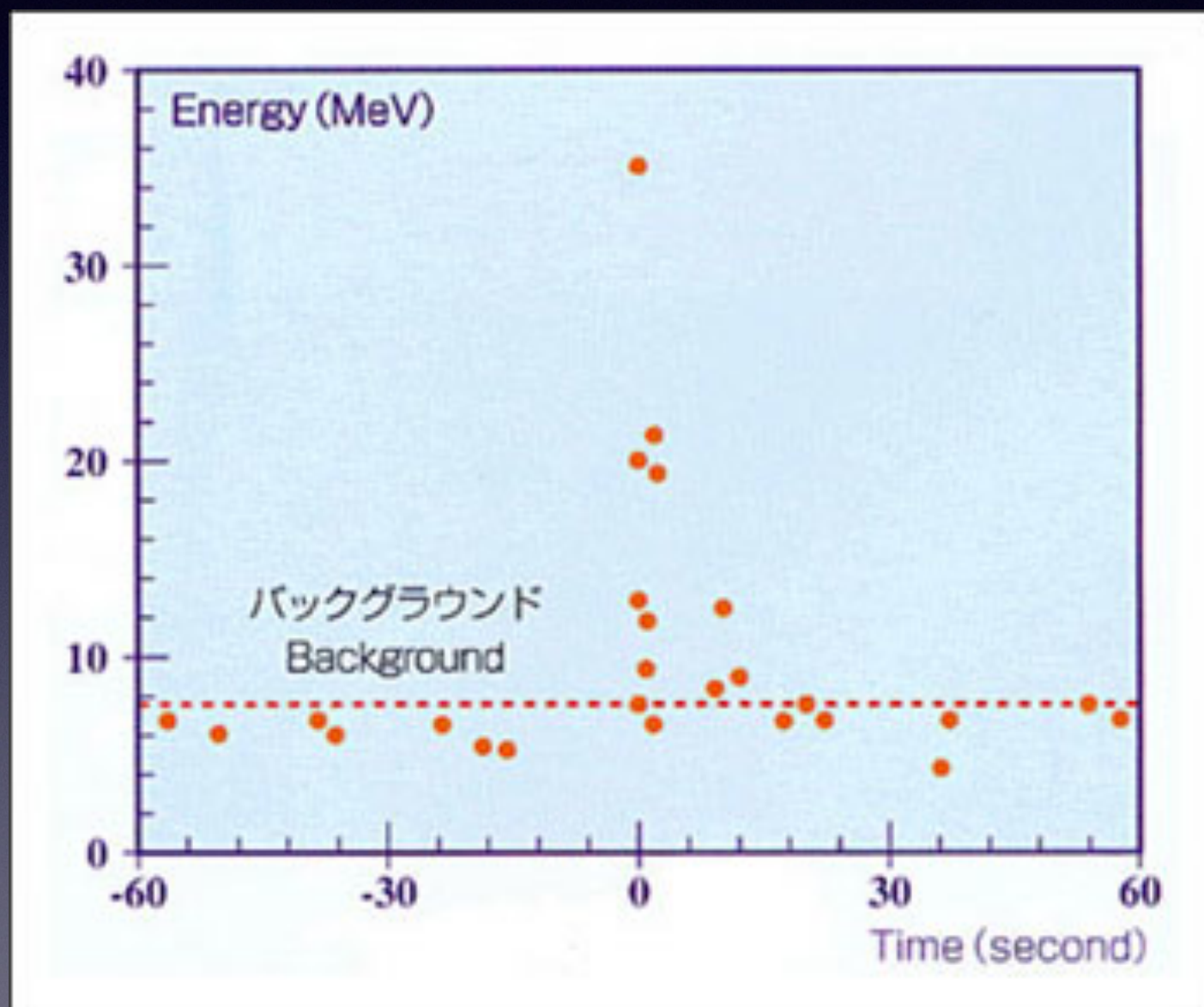
現代宇宙物理学の最大の謎の1つ

超新星SN 1987A

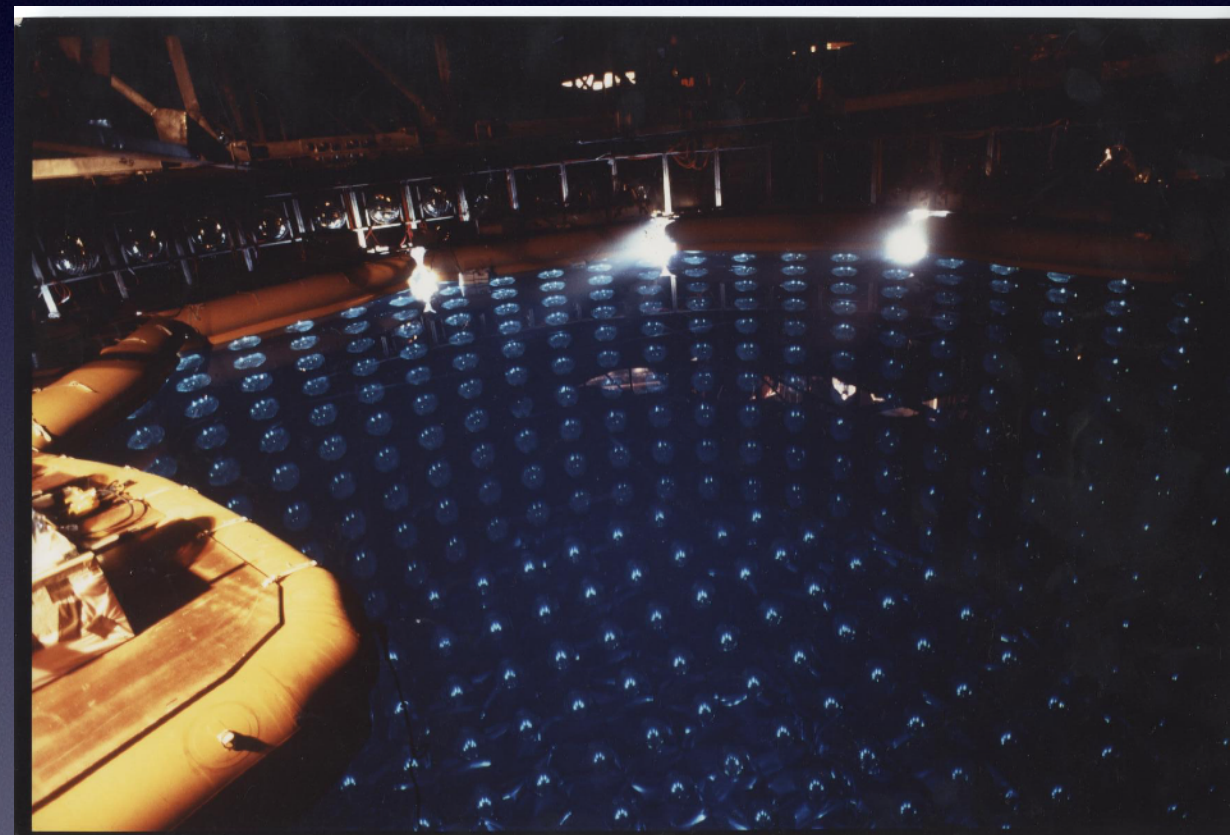
最近100年で最も近い超新星
(銀河系のとなり、大マゼラン雲、50 kpc)



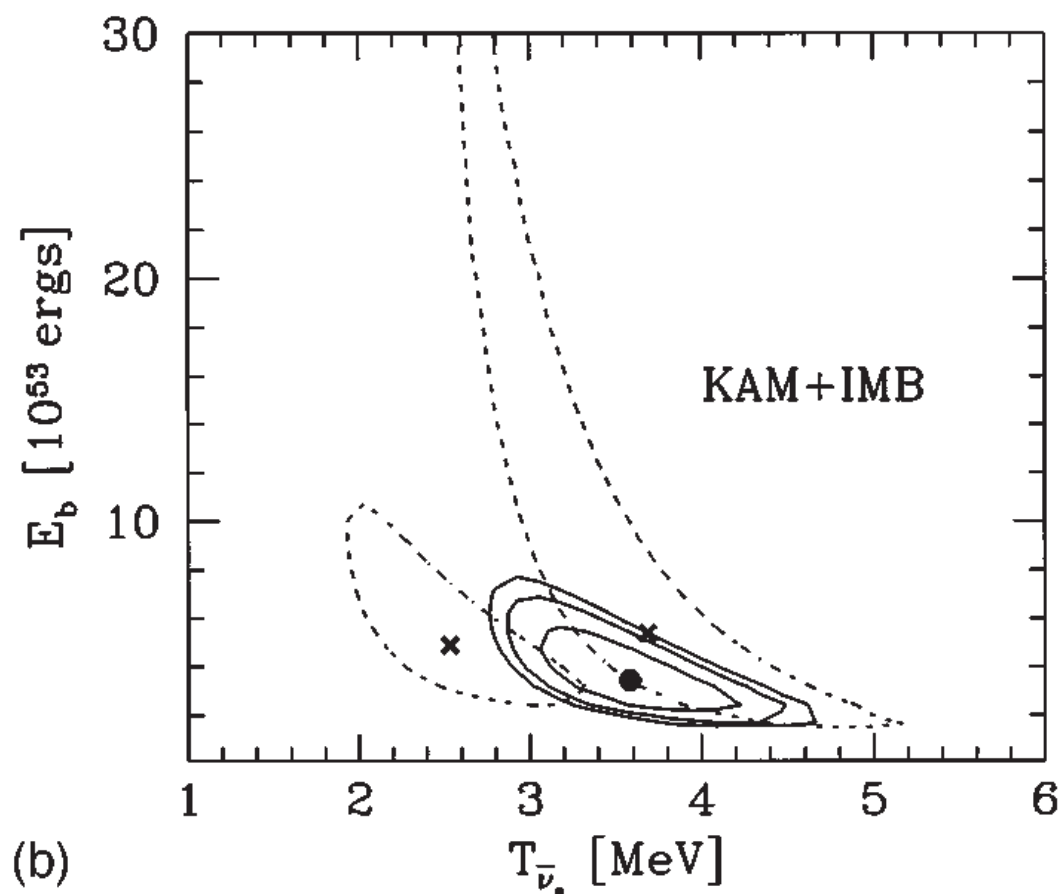
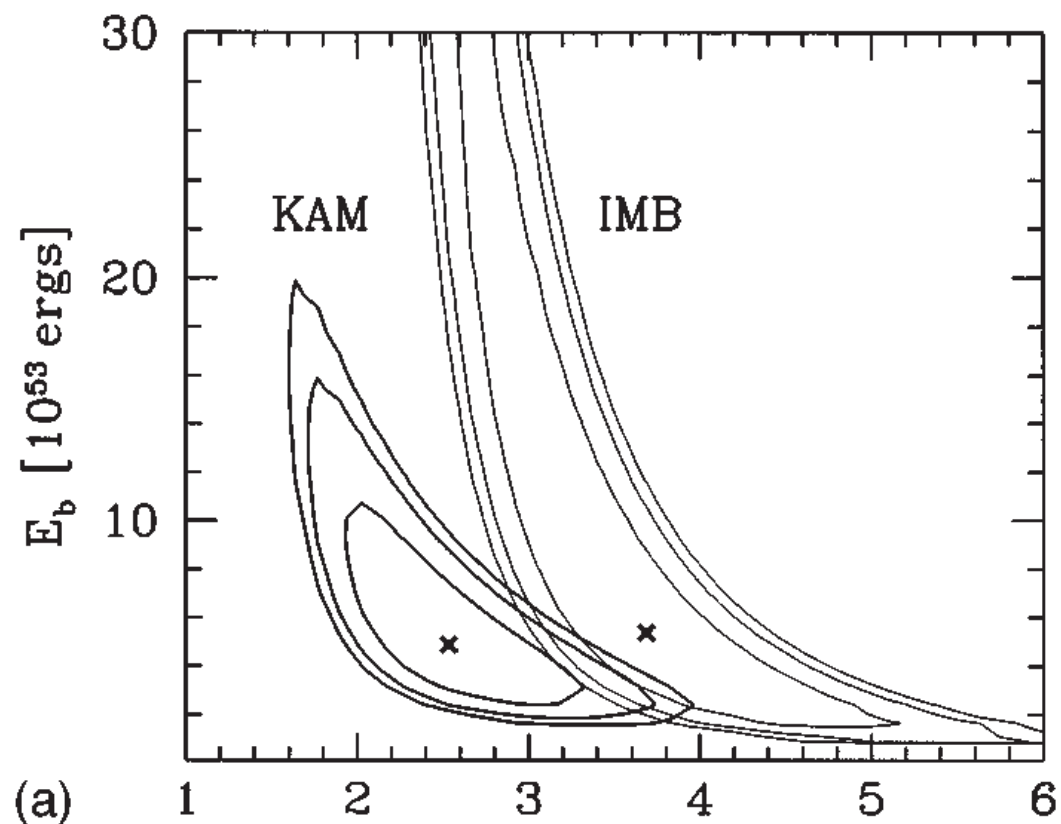
SN 1987Aから ニュートリノを検出



カミオカンデ



(C) ICRR



$E_{\text{nu}} \sim 10^{53}$ 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

- 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 $\Rightarrow$ バウンス $\Rightarrow$ 衝撃波停滞 $\Rightarrow$ ニュートリノ加熱
- エネルギー源：重力エネルギー
 $\Rightarrow$ 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 12.

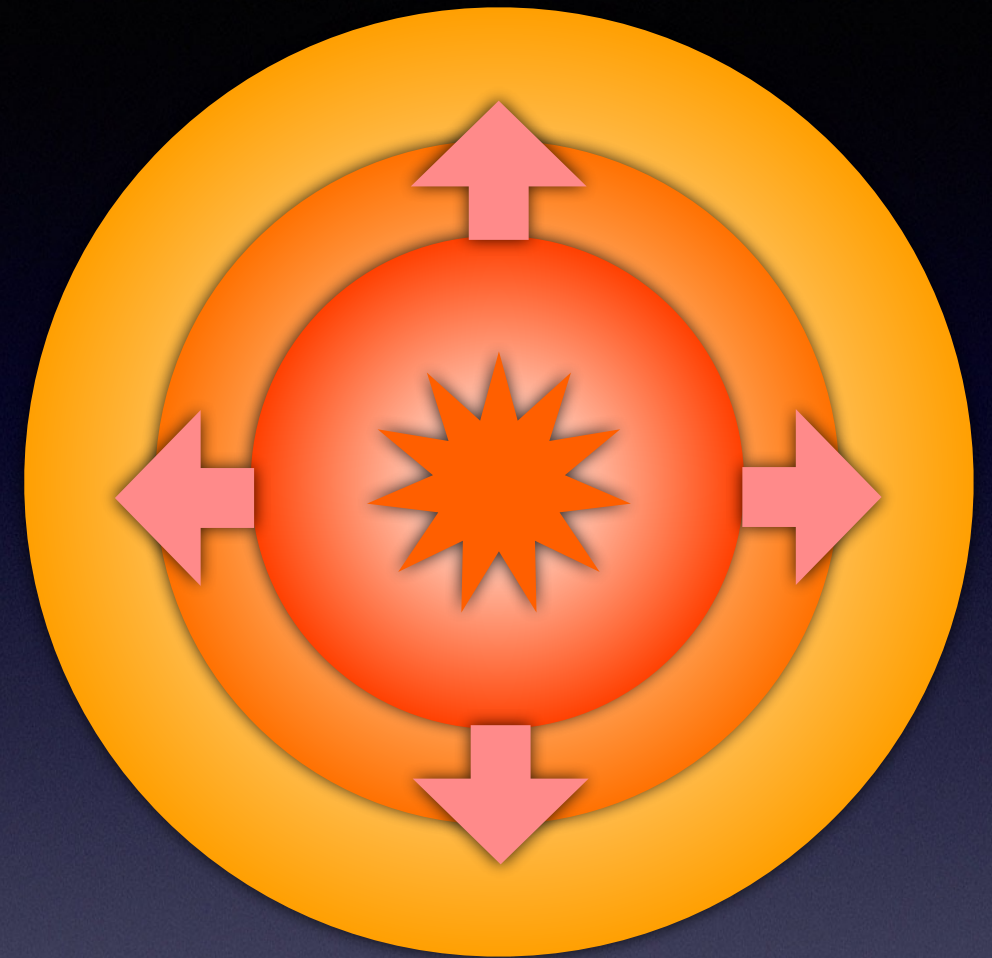
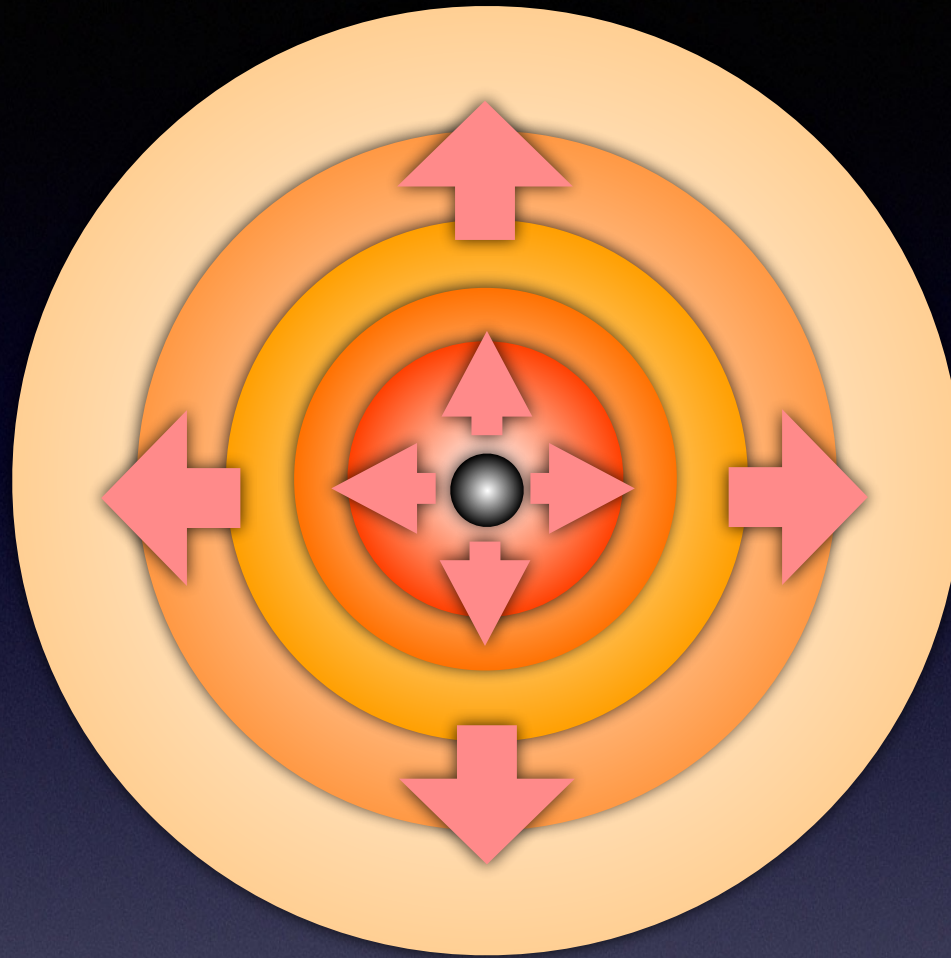
超新星爆発

12.1 重力崩壊型超新星

12.2 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

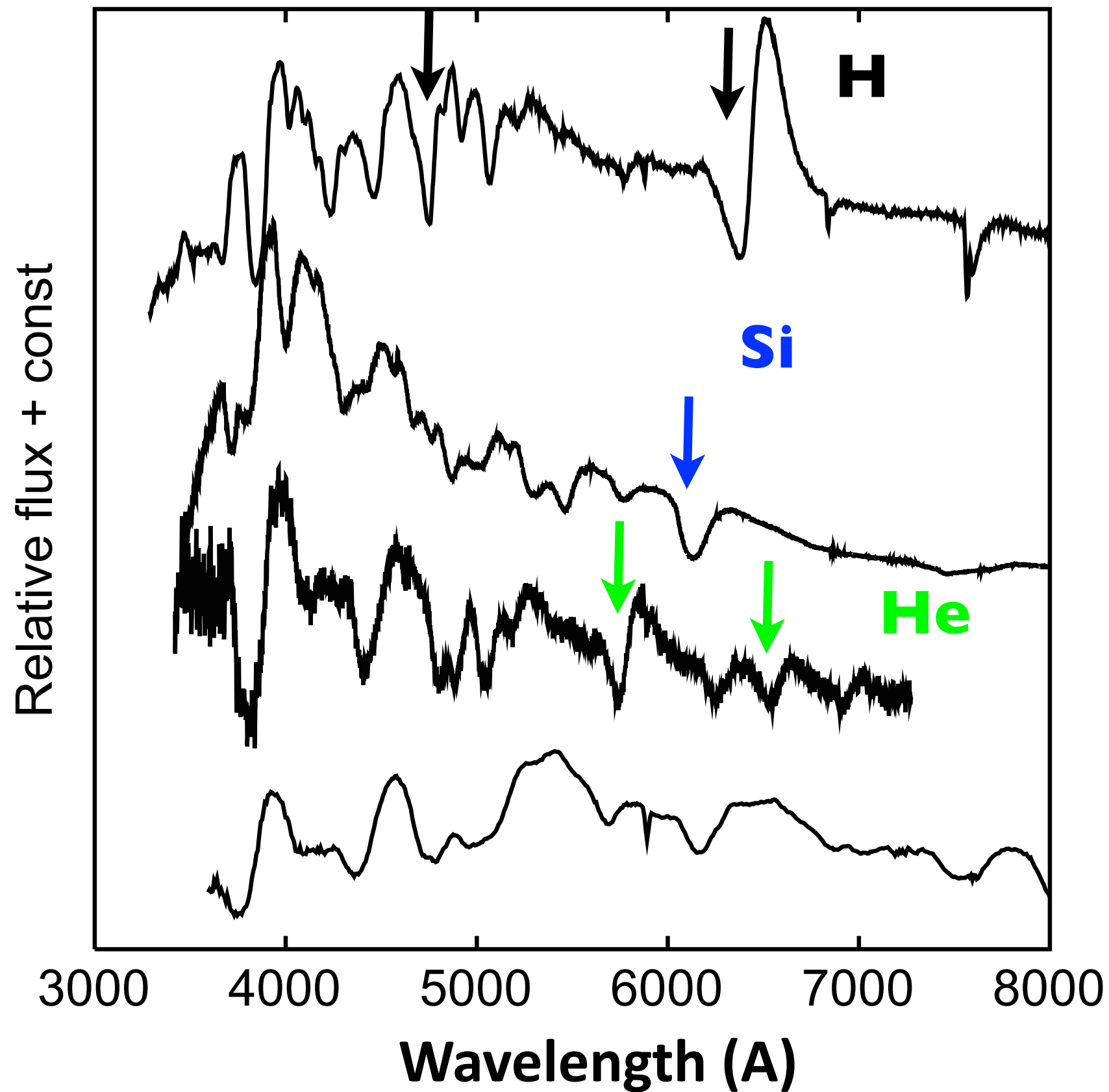
放出元素

主に親星の元素
(O, Mg, Caなど)

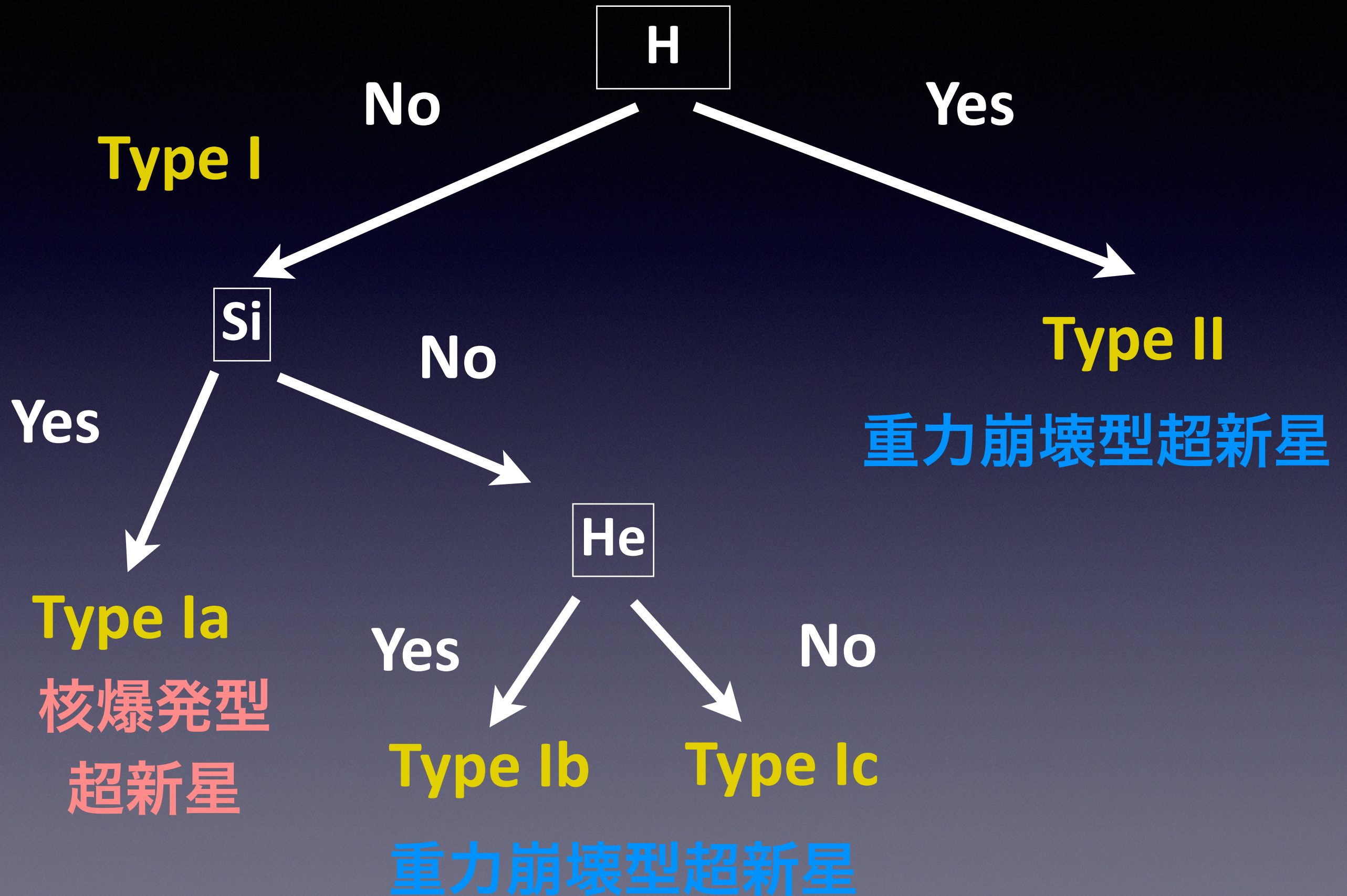
爆発時に合成する元素
(Si, Ca, Feなど)

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

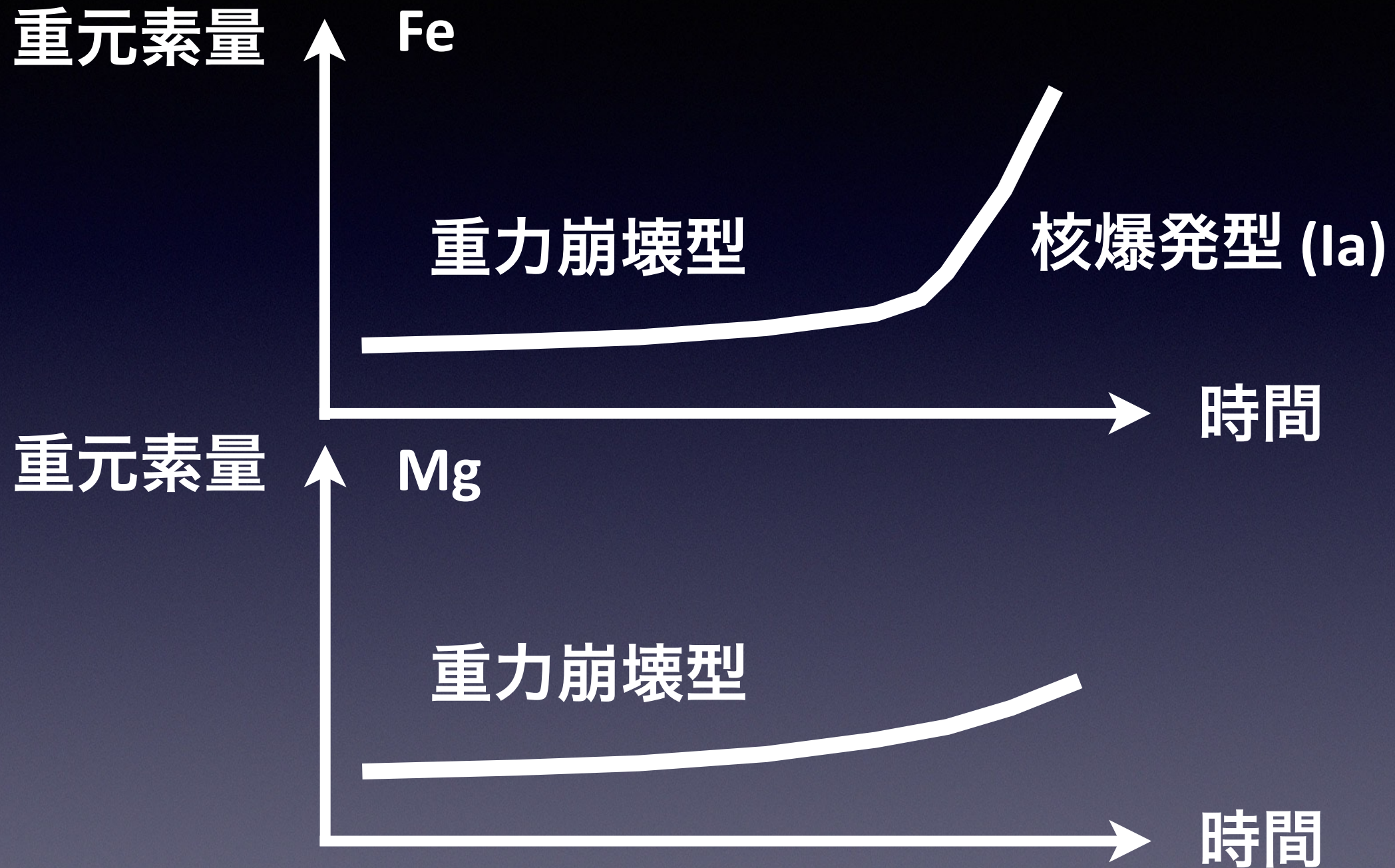
超新星爆発のスペクトル



超新星の分類



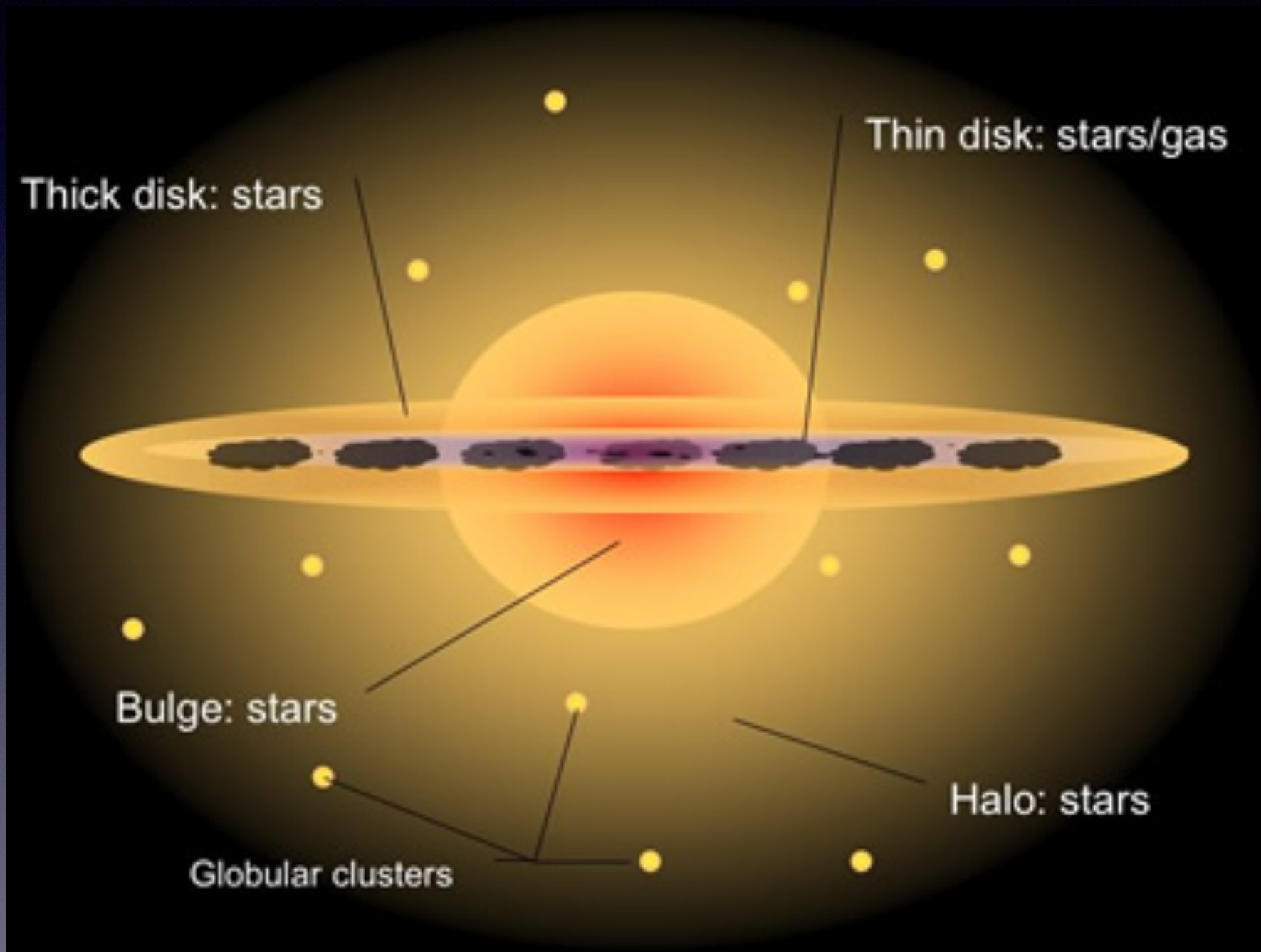
宇宙の「化学」進化



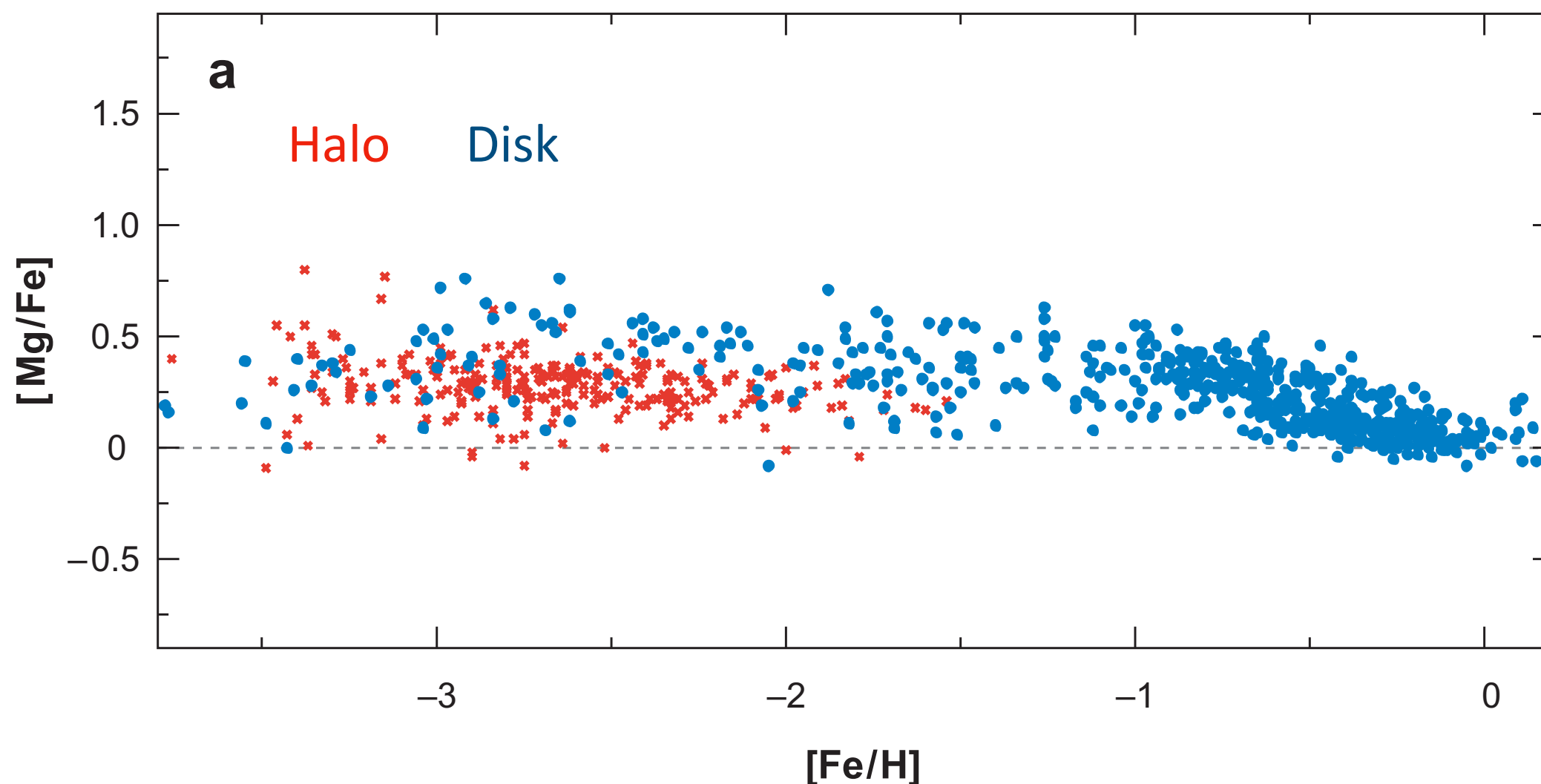
最近生まれた星の方がMg/Fe比が低い

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

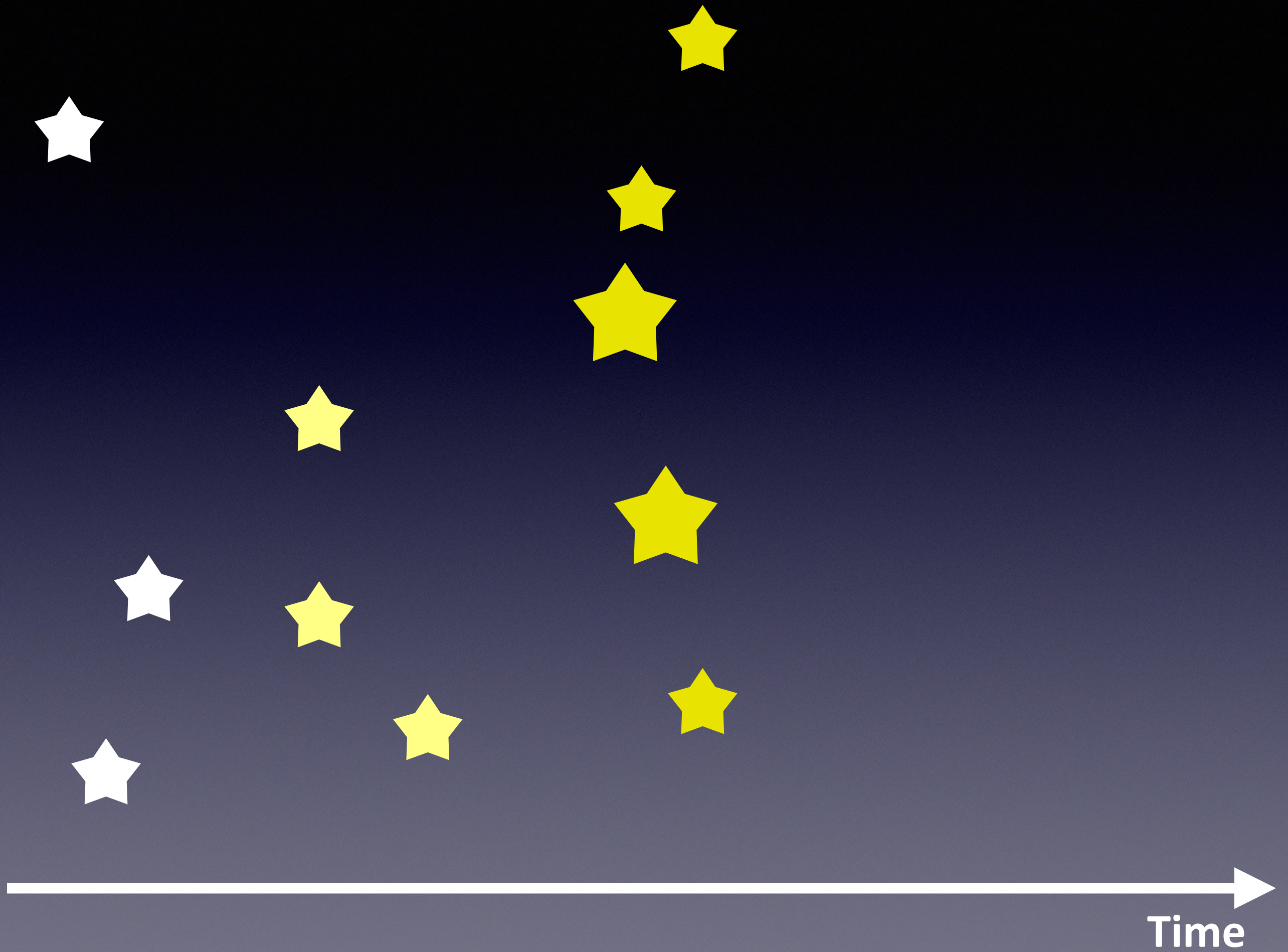
時間

Ia型超新星の方がdelay timeが長い



Time





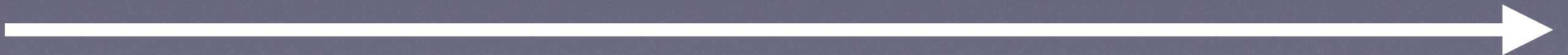








[Fe/H]

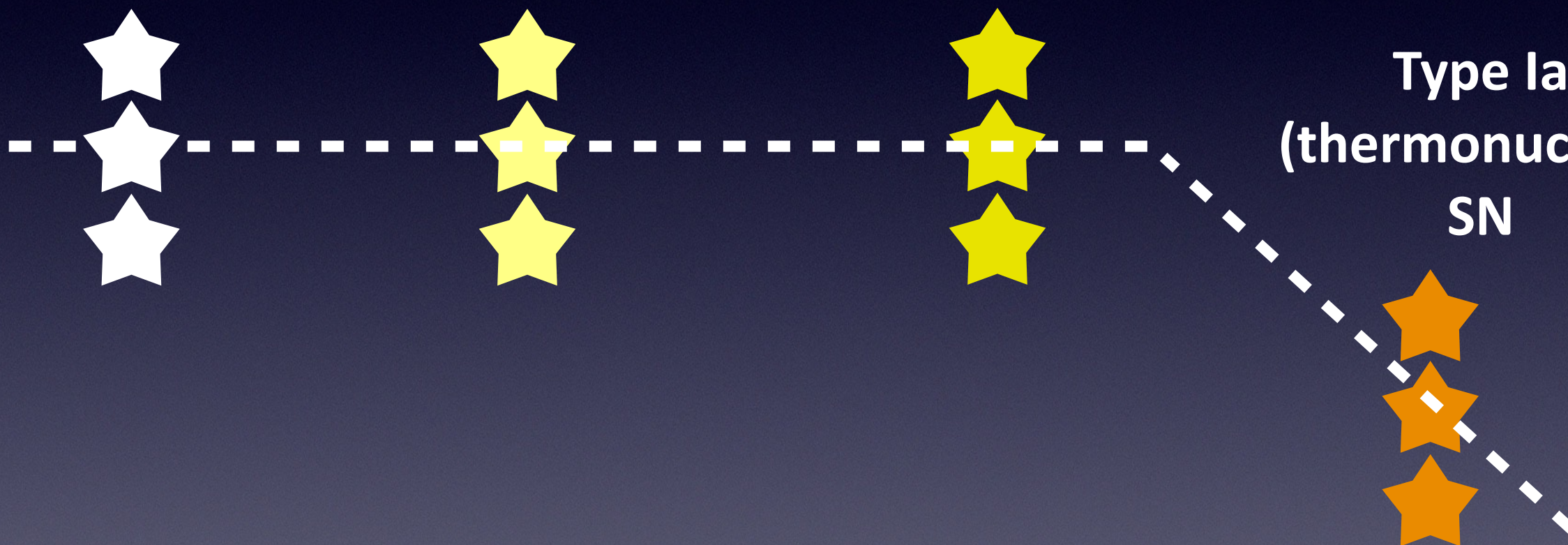


$[Mg/Fe]$

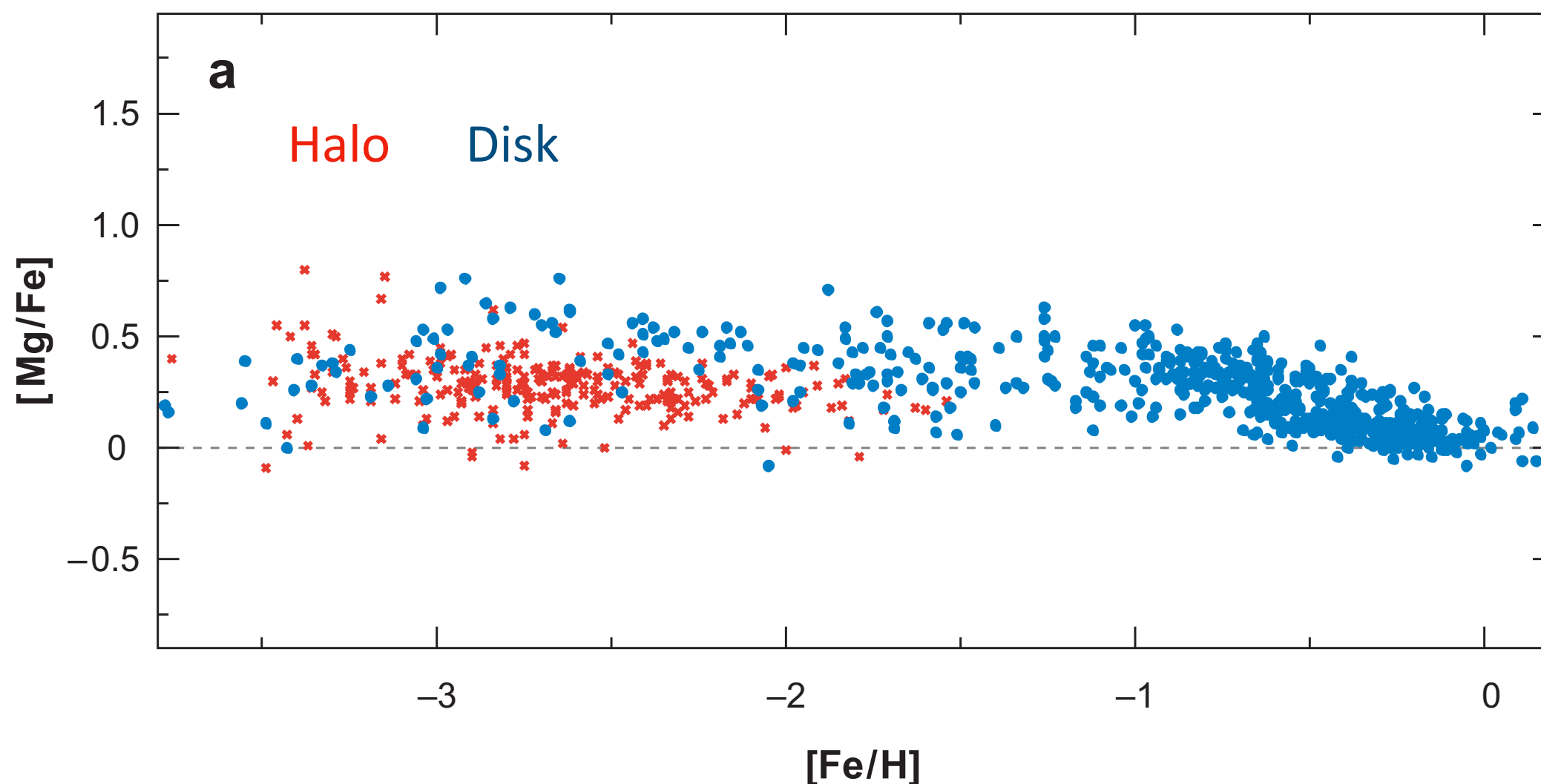
Core-collapse
SNe

Type Ia
(thermonuclear)
SN

$[Fe/H]$



銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



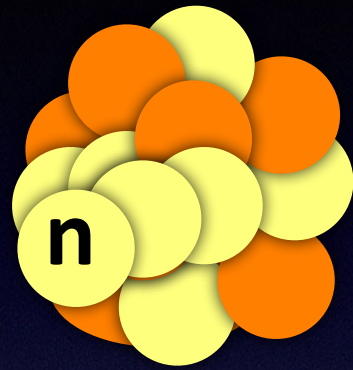
Sneden+08

時間

Ia型超新星の方がdelay timeが長い

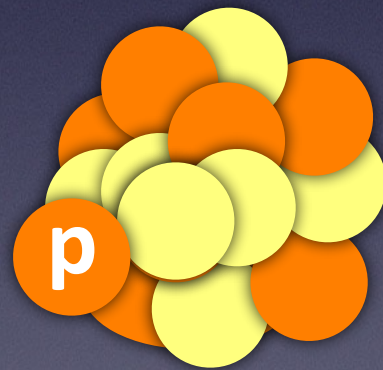
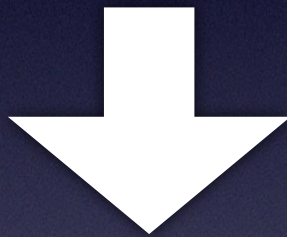
鉄より重い元素 = 中性子捕獲反応

s (slow) プロセス



● 陽子
● 中性子

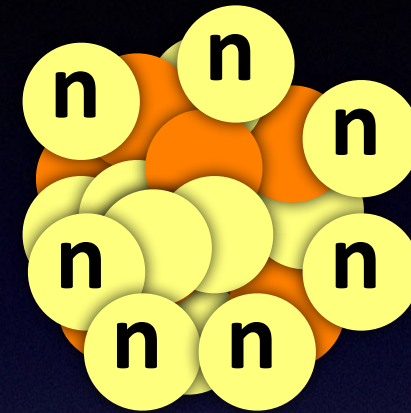
崩壊



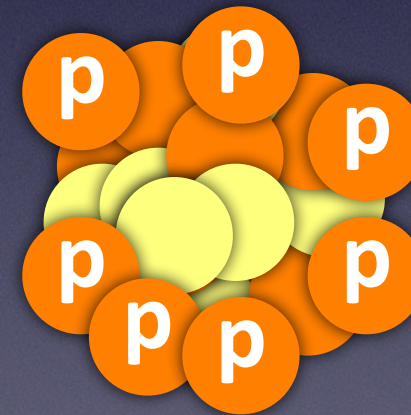
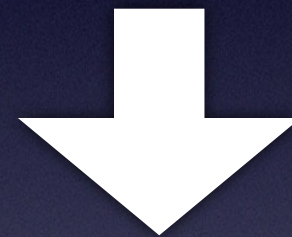
Ba, Pb, ...

AGB星

r (rapid) プロセス



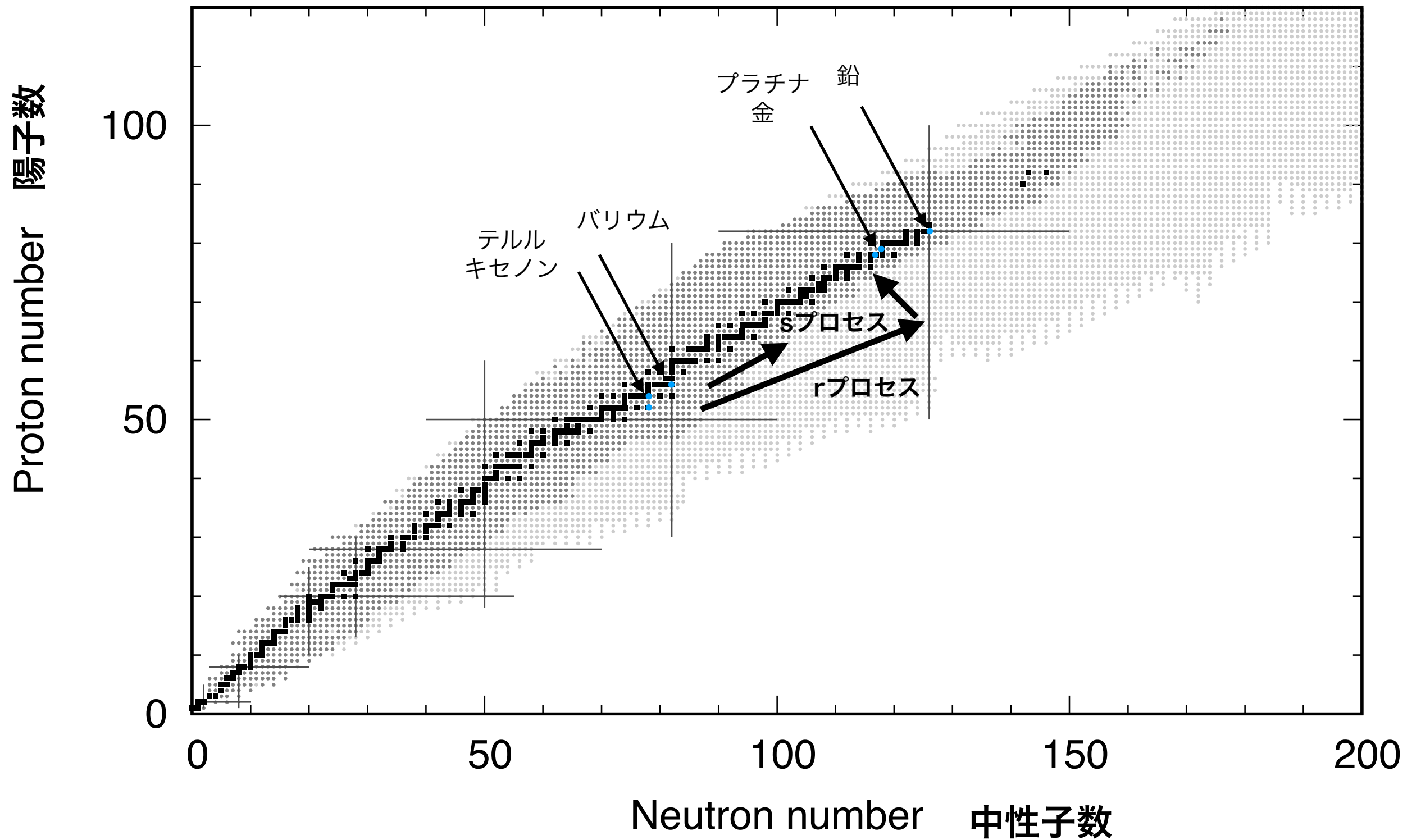
崩壊



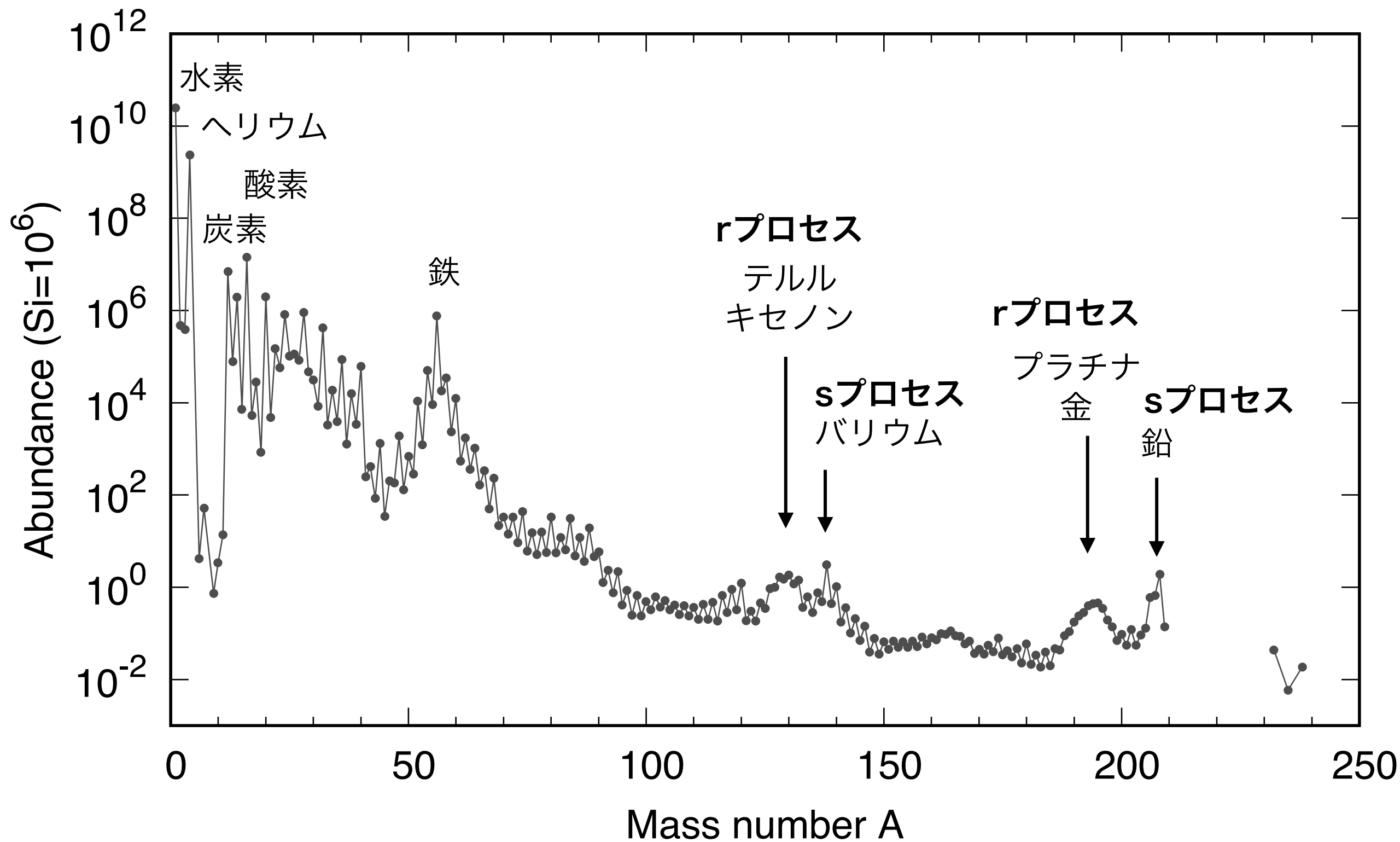
Au, Pt, U, ...

超新星?? 中性子星合体?

核図表

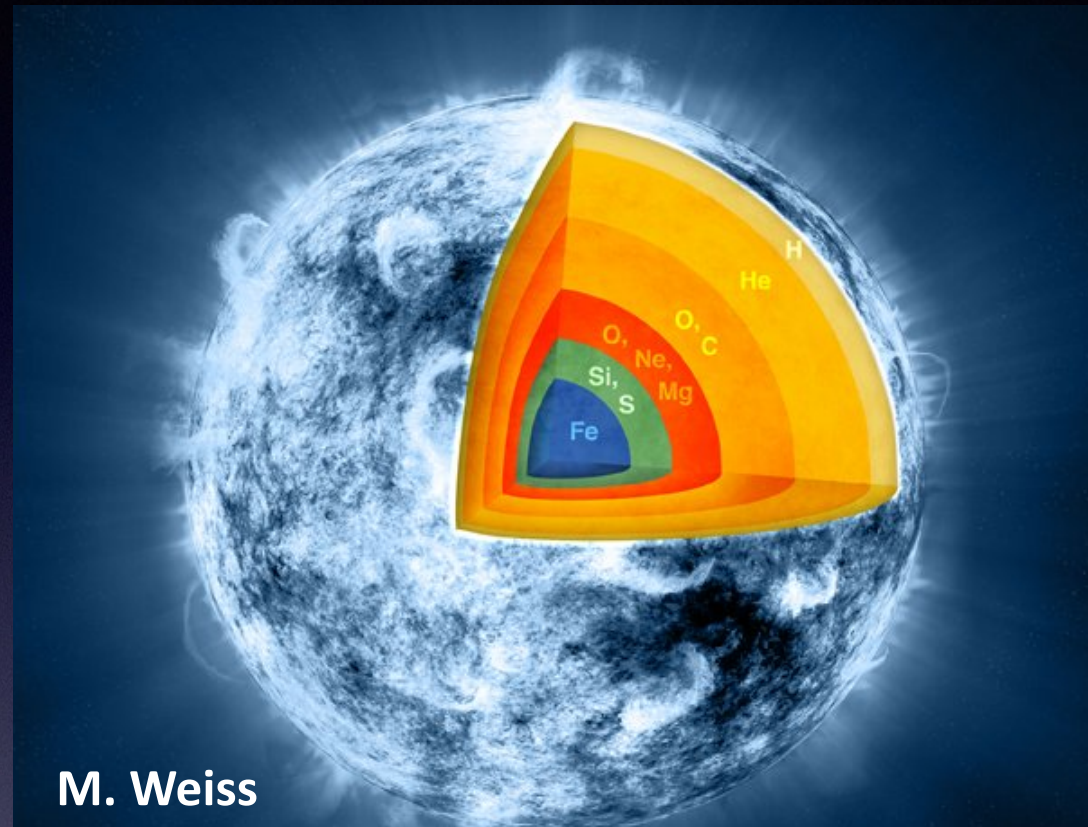


宇宙の元素組成 (質量数)

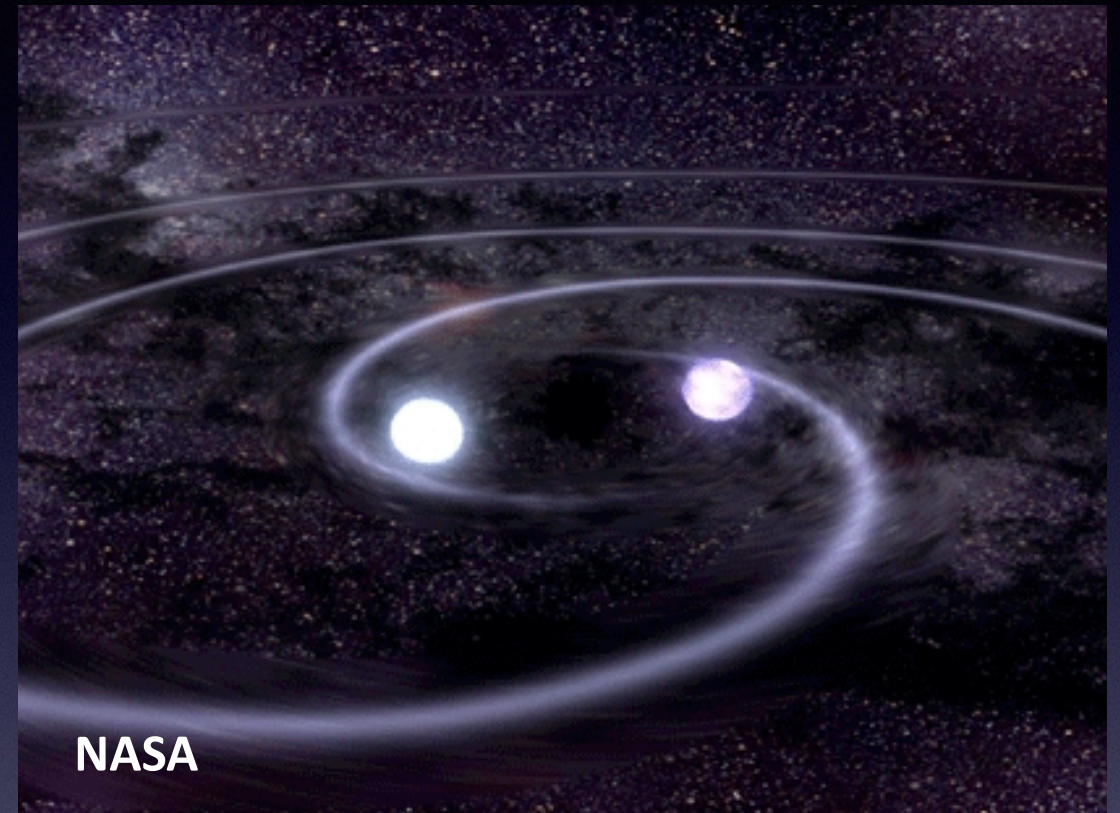


rプロセス元素の起源天体

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？

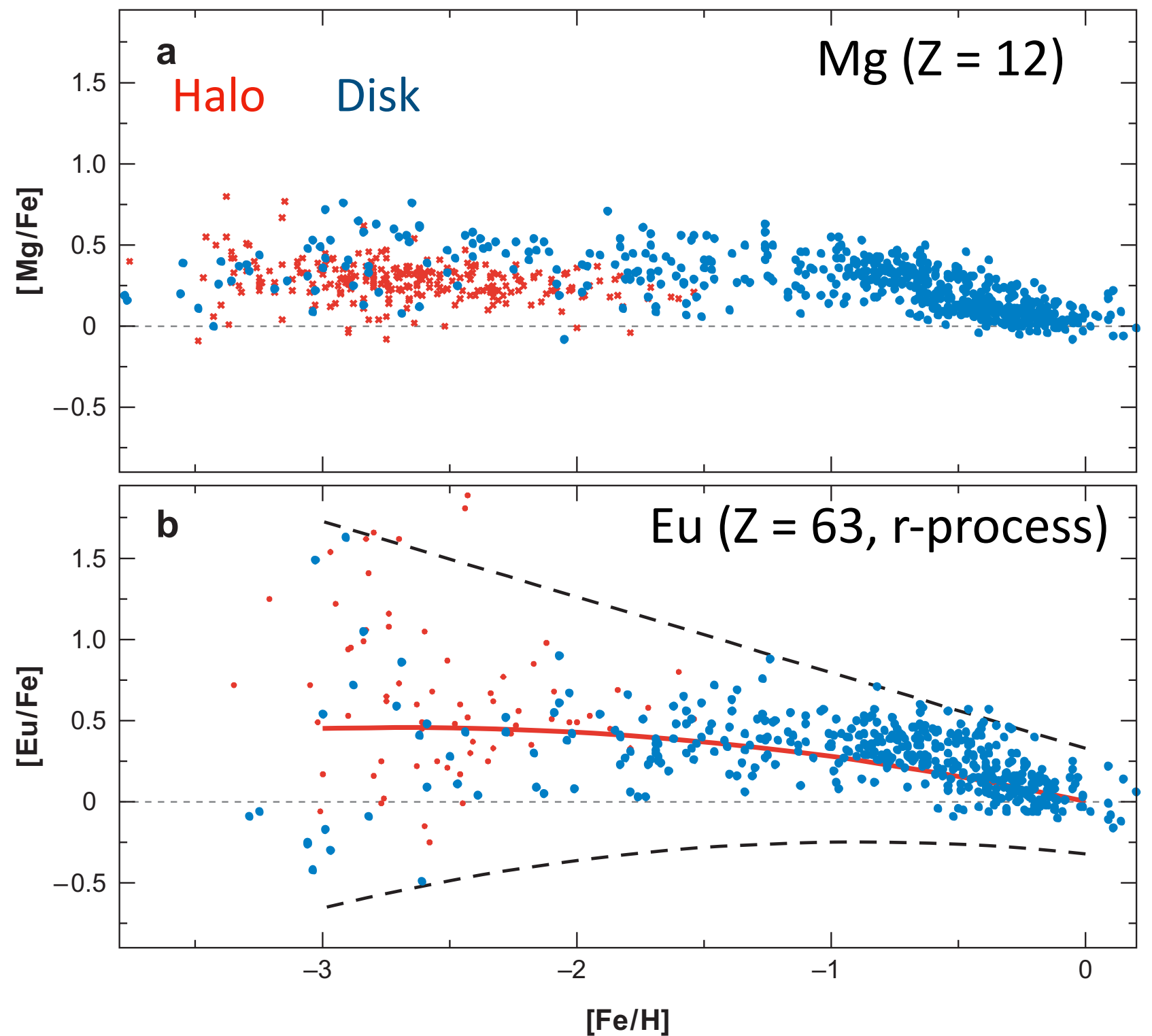
rプロセスは起きる
宇宙でどれくらい起きている？
一回でどれくらい元素を作る？
(重力波＋電磁波で測られ始めた)

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？
- なぜ星は明るく輝くの？
- なぜ重い星の方が明るい？
- 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？
- ...

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