

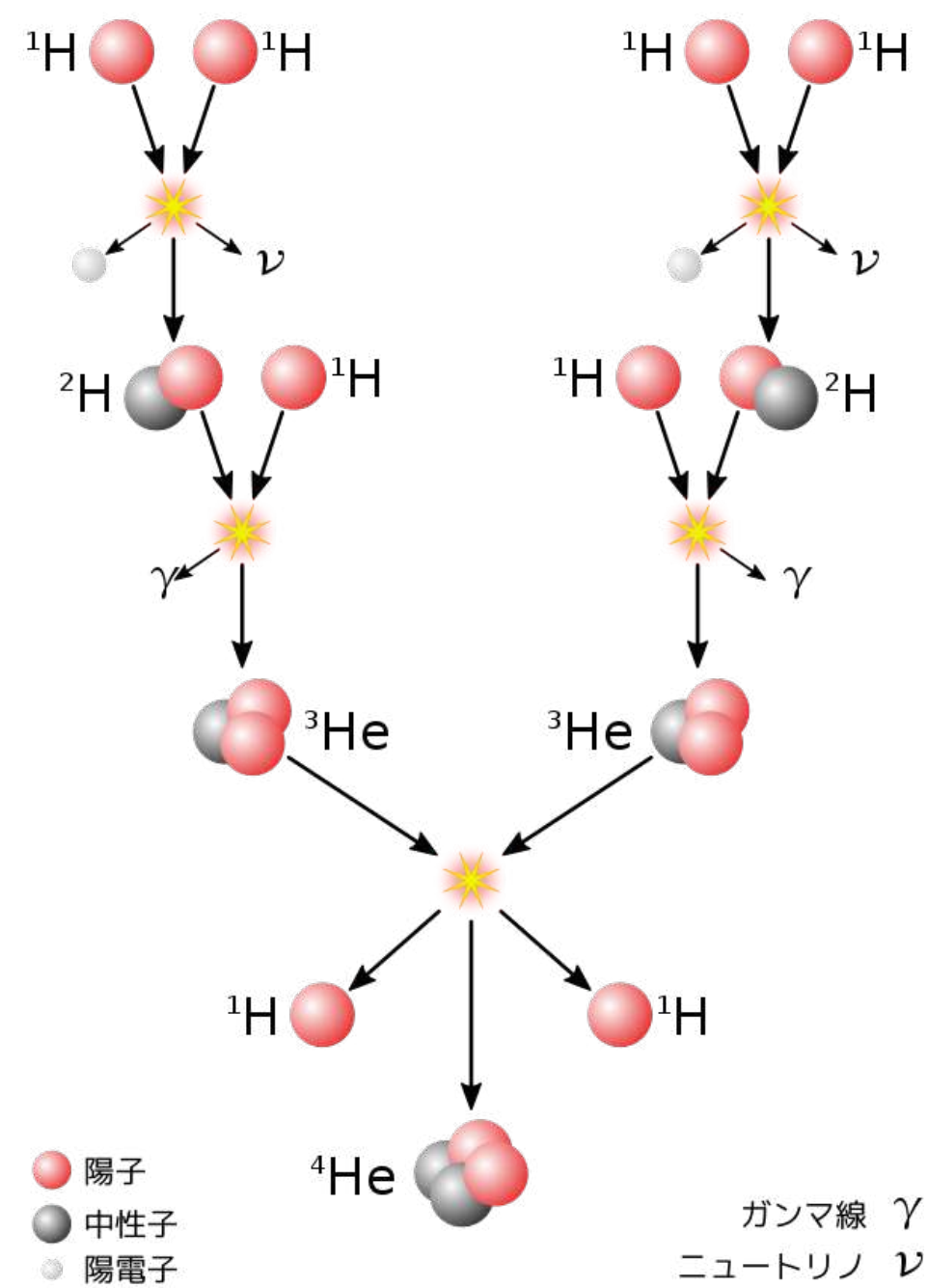
宇宙物理学特論

コンパクト天体の形成と
重力崩壊型超新星爆発

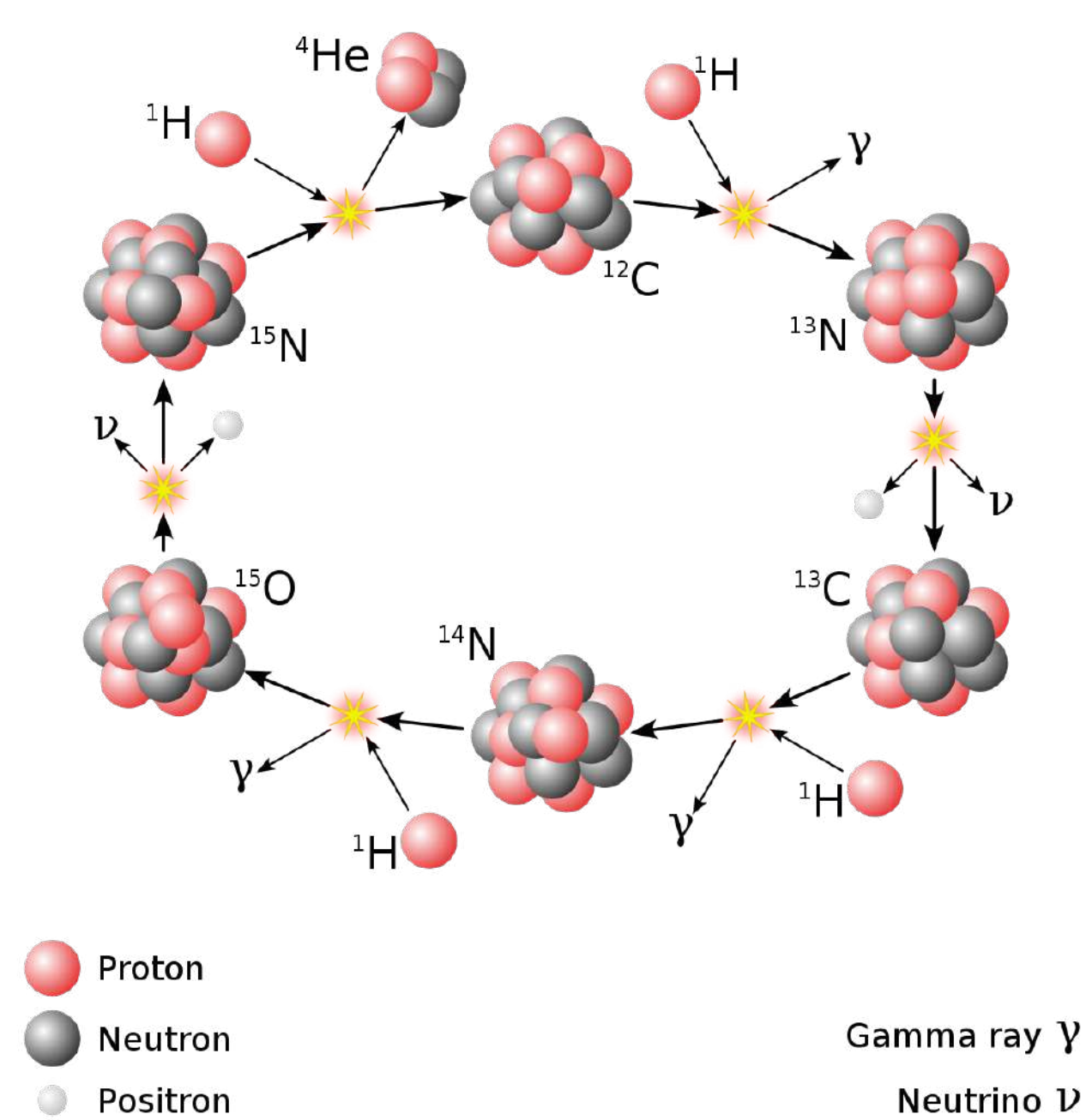
大質量星の最終段階：鉄コアの形成

主系列星

pp chain



CNO cycle

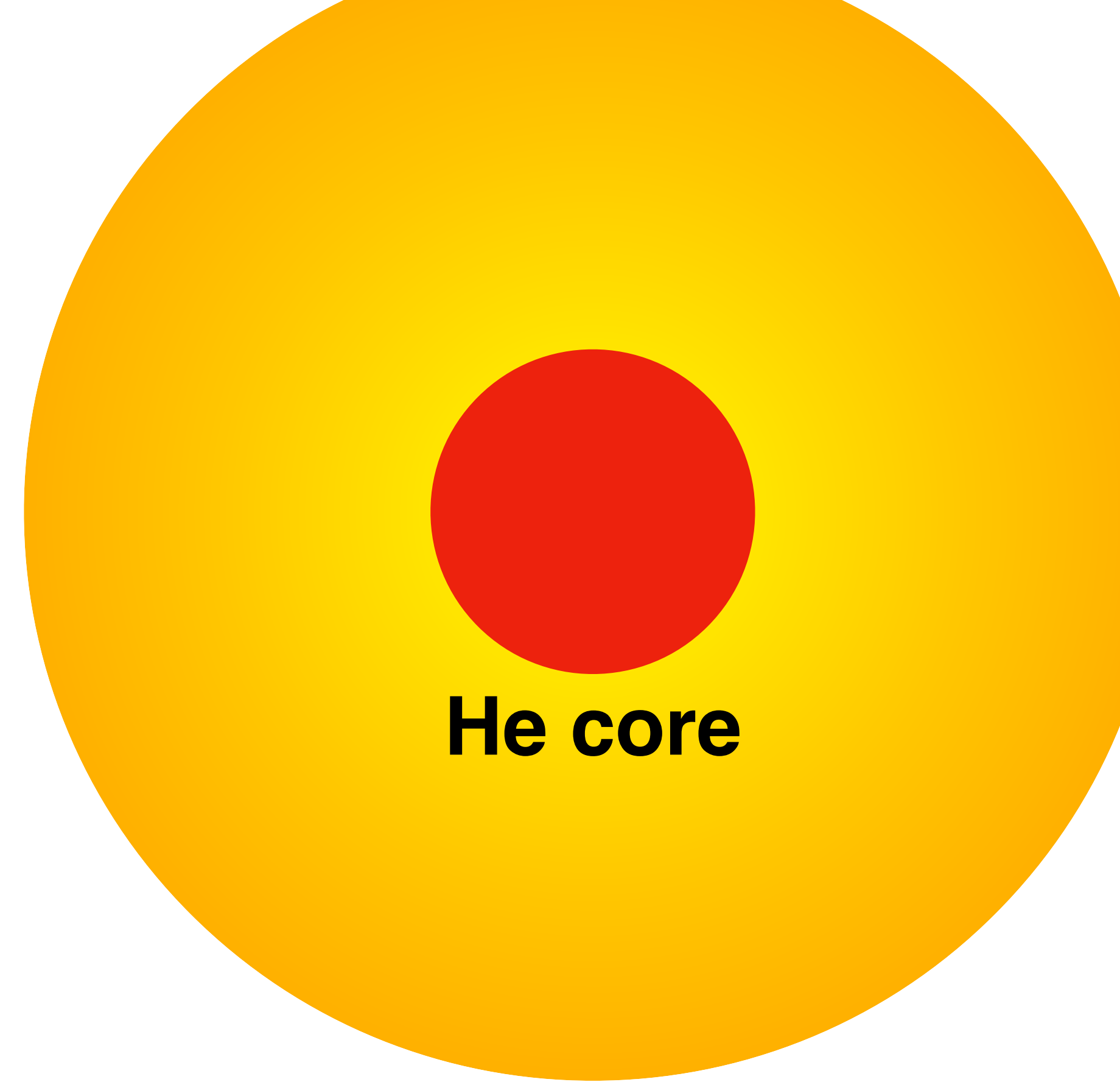


大質量星の最終段階：鉄コアの形成

主系列星 最終段階

He core を形成し、その質量が
シェーンベルグ=チャンドラセカール限界
を超えると...

コアが収縮 & 外層膨張

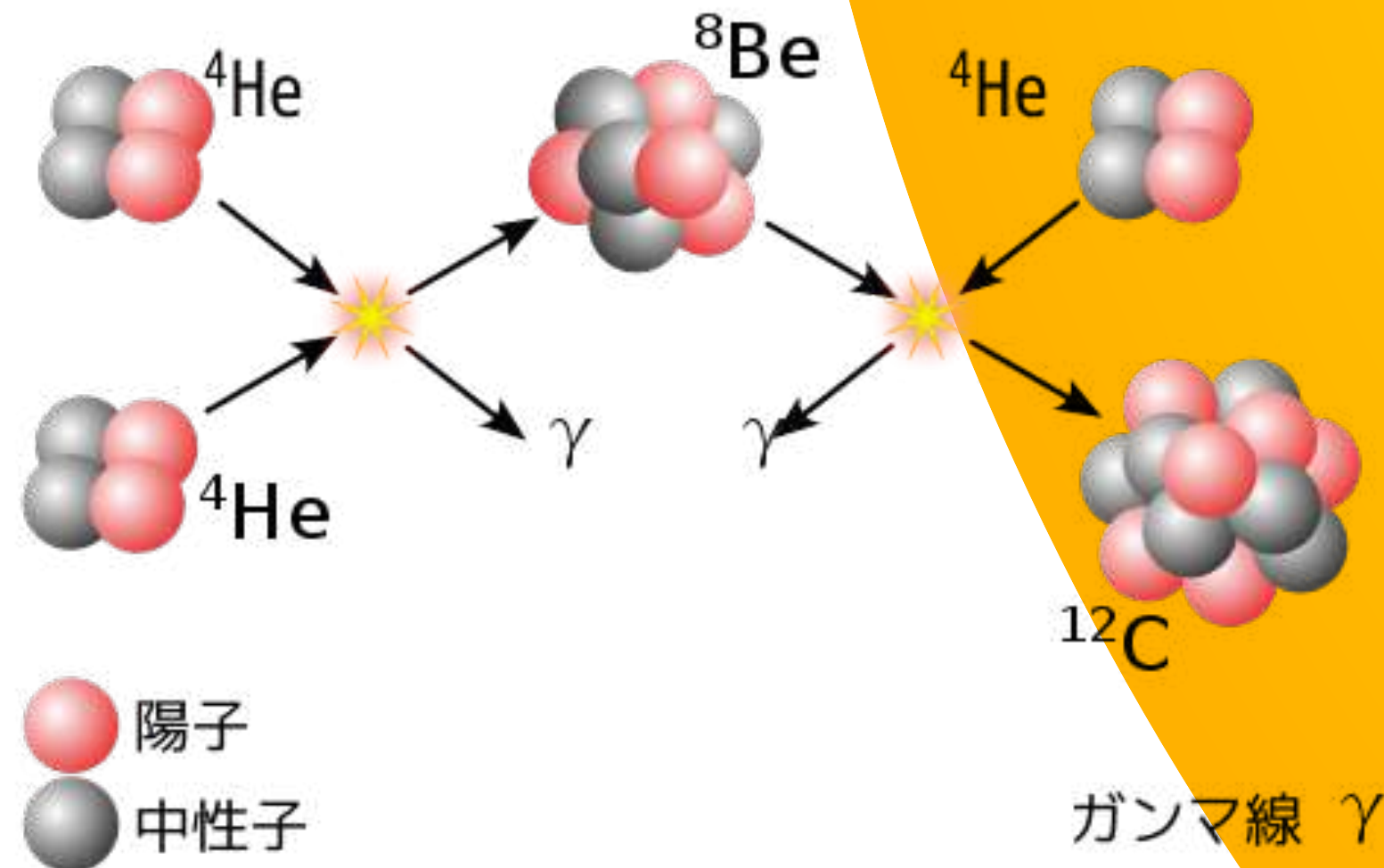


大質量星の最終段階：鉄コアの形成

赤色超巨星

He core の中心で He 燃焼着火

Triple alpha 反応: $3 \times {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$



${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ 反応

He burning

主な生成物 $\rightarrow$ C, O

He core

注意: 大きさは不正確

膨張した水素外層

大質量星の最終段階：鉄コアの形成

赤色超巨星

CO core を形成し, その後は同様に
C 燃焼, O 燃焼, Si 燃焼が続き...



膨張した水素外層

大質量星の最終段階：鉄コアの形成

H-burning shell

主な生成物→ He

He-burning shell

主な生成物→ C, O

C-burning shell

主な生成物→ O, Ne

O-burning shell

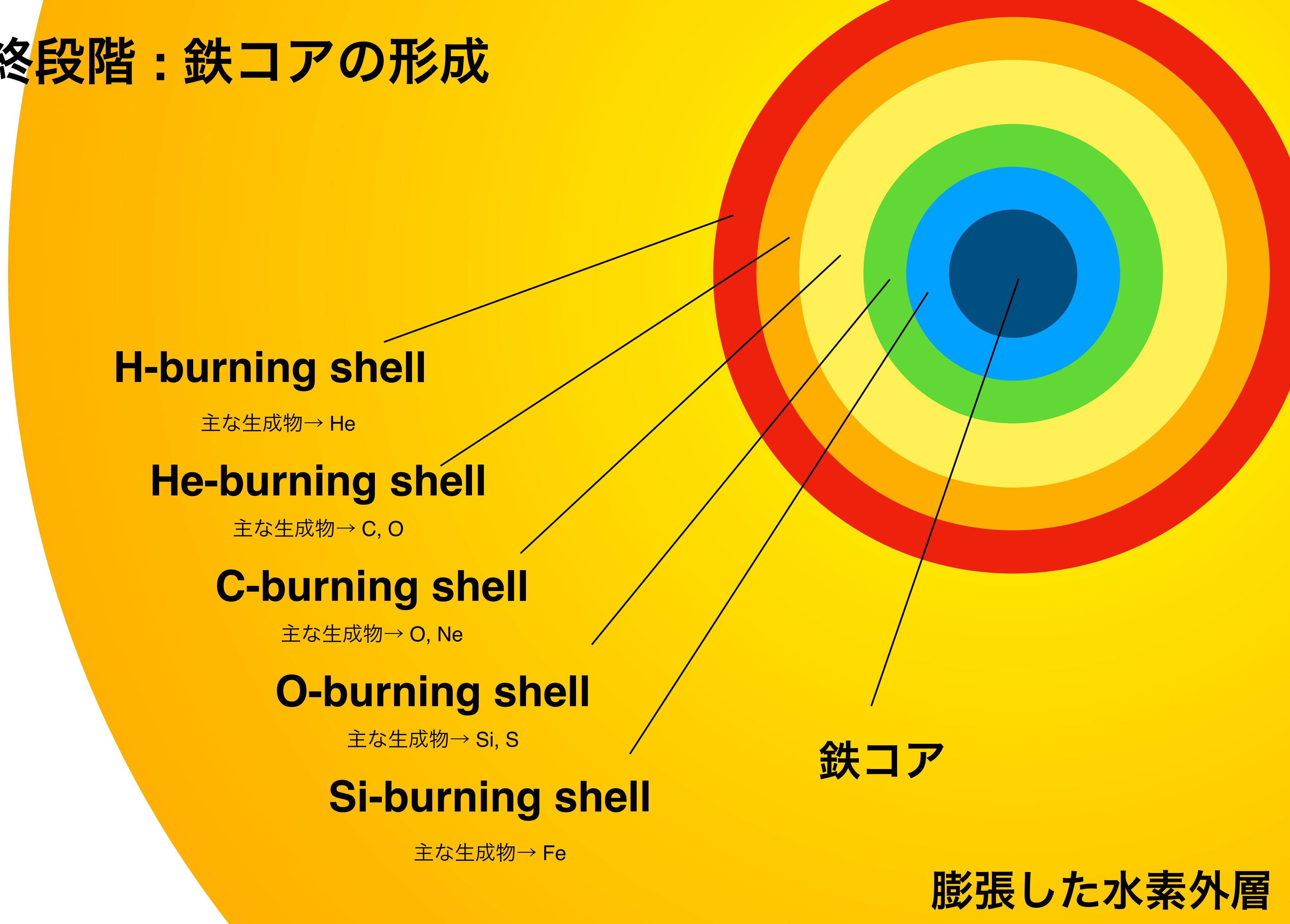
主な生成物→ Si, S

Si-burning shell

主な生成物→ Fe

鉄コア

膨張した水素外層



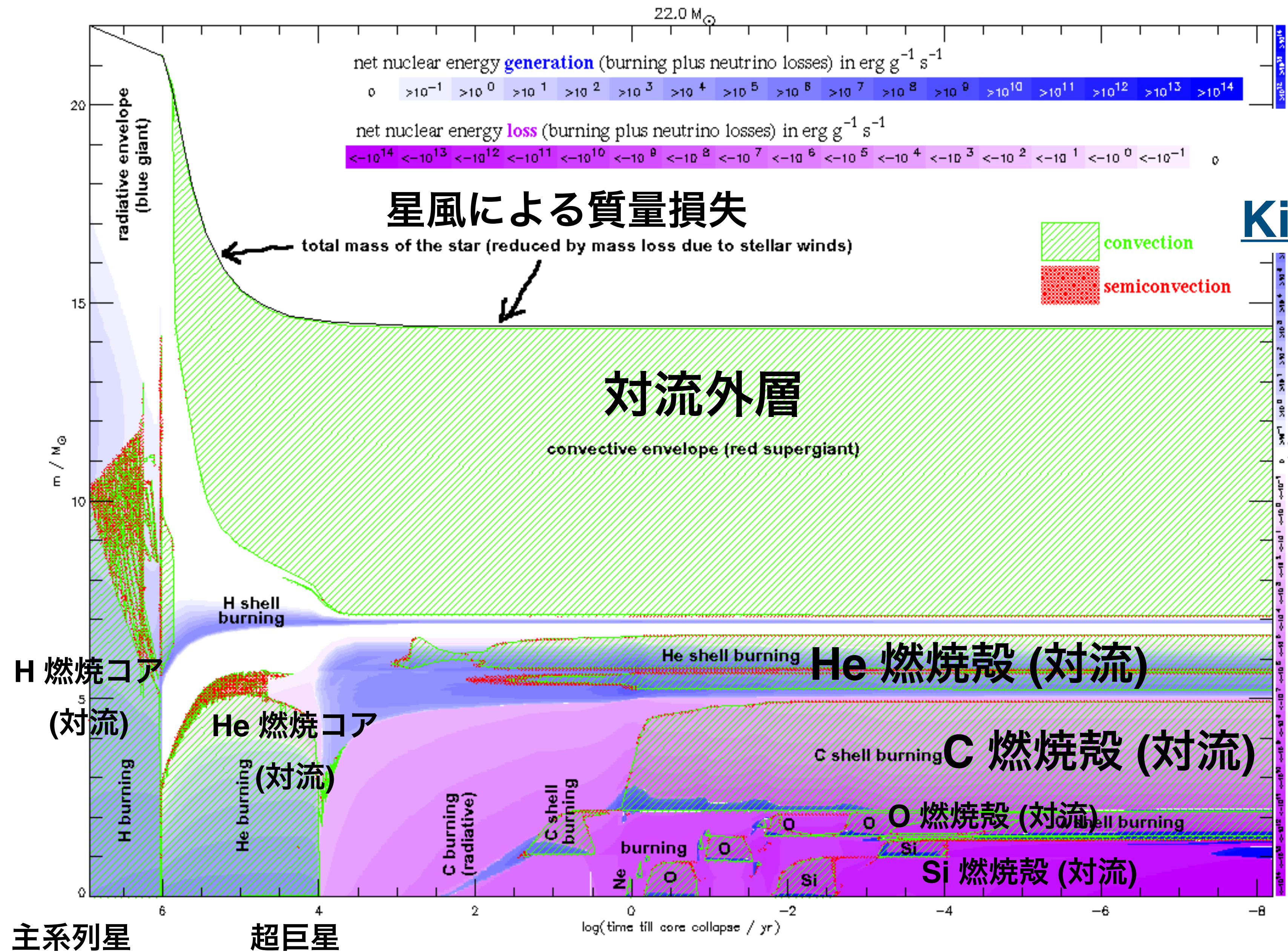
大質量星の最終段階：鉄コアの形成

大質量星 (> 10 太陽質量) は進化の最終段階で
中心に鉄コアを形成 $\Rightarrow$ 玉ねぎ構造形成



膨張した水素外層

大質量星の最終段階：鉄コアの形成



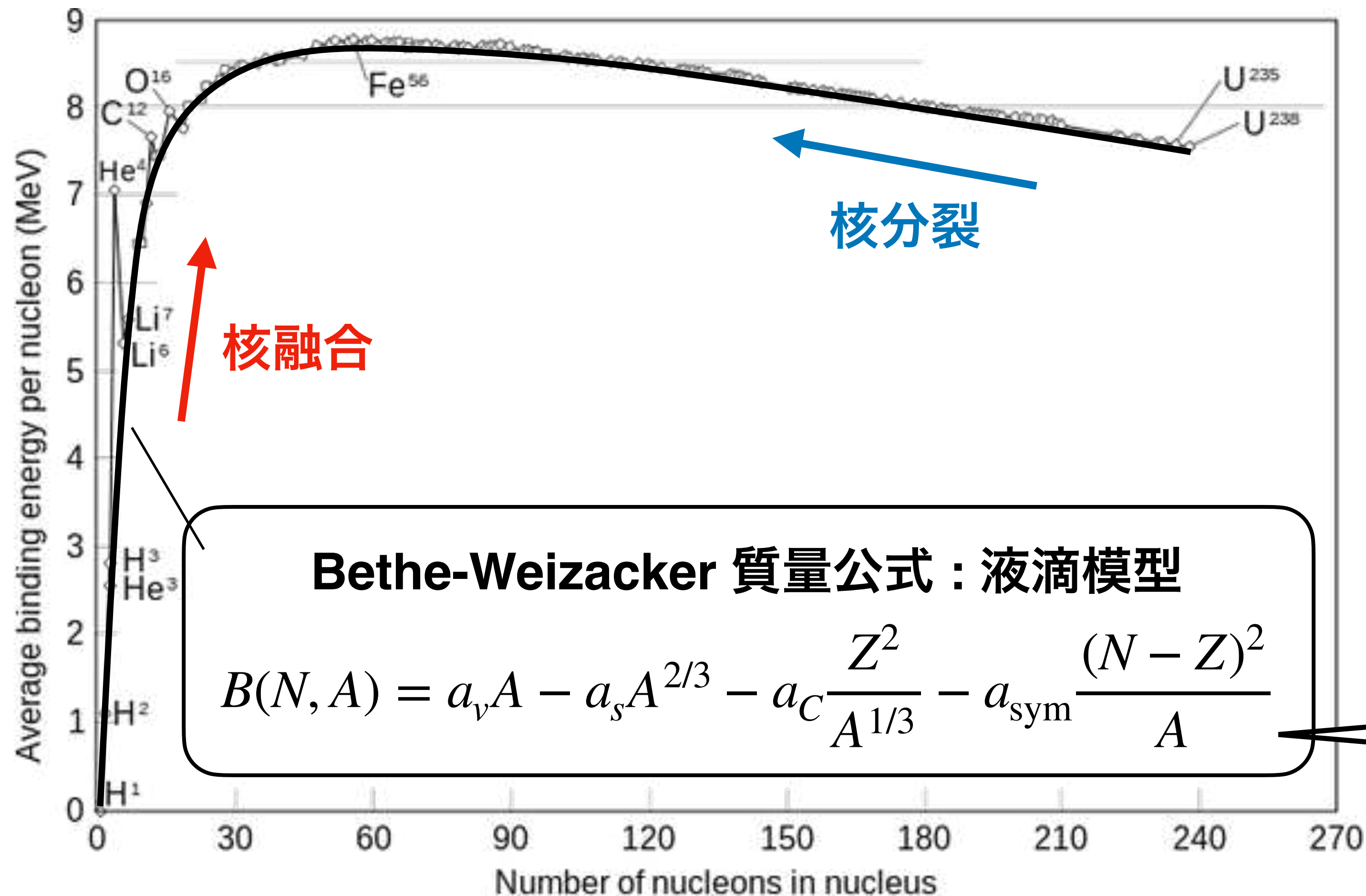
ある星の一生は

Kippenhahn diagram

を見ると分かる

鉄コアの重力崩壊 ⇒ コンパクト天体形成 & 超新星爆発

鉄は宇宙で一番安定な元素 ⇒ これ以上核融合できずに潰れる



1. 体積項

$$a_v A$$

結合エネルギーは核子の総数 (体積) に比例

2. 表面項

$$a_s A^{2/3}$$

表面付近の核子は少ない数の核子と相互作用

3. クーロン項

$$a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

クーロン力による反発力

4. 対称項

$$a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

核物質と相互作用する核子のエネルギー

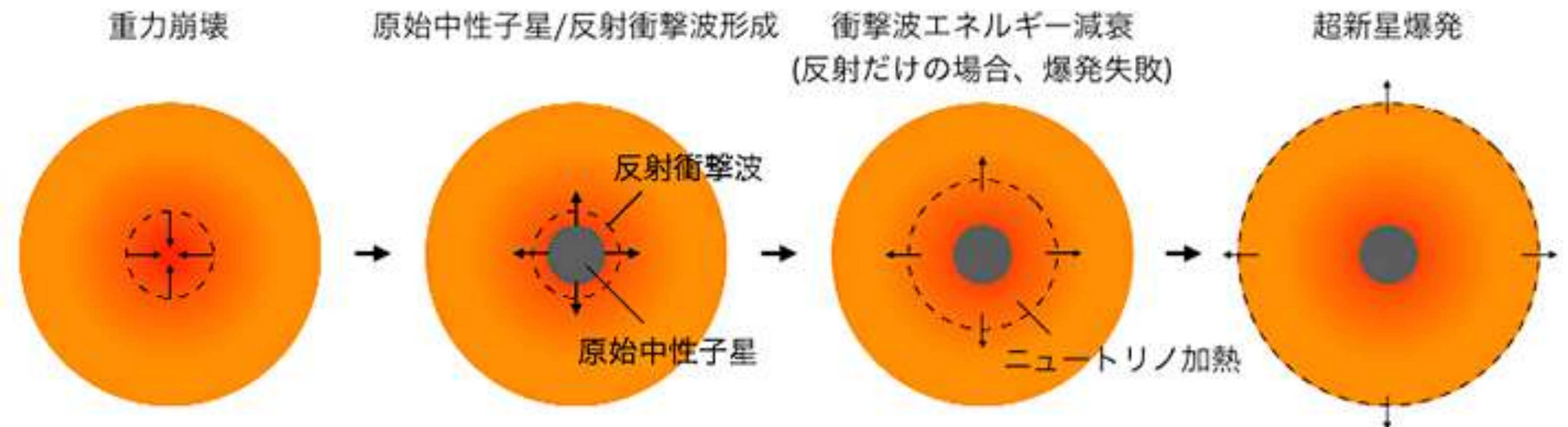
星を爆発させるまでの話

(超新星爆発メカニズムの理論)

重力崩壊型超新星の爆発シナリオ

中心領域の鉄コアが崩壊し、解放された重力エネルギーで爆発

鉄の光分解 (吸熱反応) $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n - 124.4 \text{ MeV}$ + 電子捕獲で中性子数増



中心にできる硬い物質 (中性子星) で落下物が跳ね返る ⇒ 外側へ衝撃波

2000年代以前「物理シミュレーションで爆発を再現できない」

大質量星の爆発メカニズム = 宇宙物理学上の未解決問題

動画

DENJIRO Sensei

全ボールの重力エネルギーが
外側の軽いボールへ
⇒ 元の高さより高く跳ね上がる (爆発)

スーパーボールを高く飛ばすには??

<https://www.youtube.com/watch?v=zjXgjxtDv1A>

重力崩壊型超新星に必要な物理過程

1. ニュートリノ加熱
2. 非対称性
3. 親星の内部構造

2000年代以降、ようやく爆発するシミュレーションが可能に

重力崩壊型超新星に必要な物理過程

1. ニュートリノ加熱

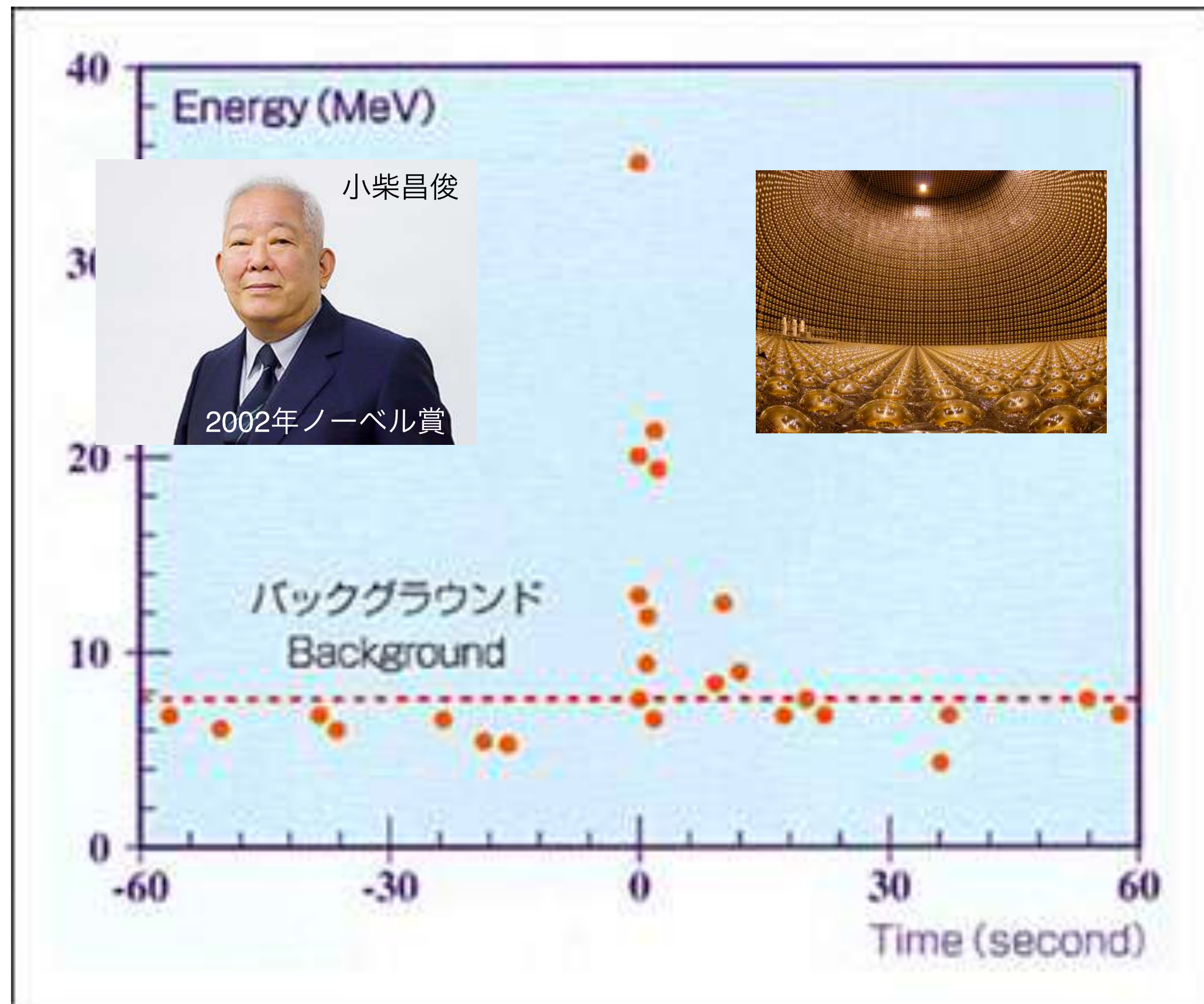
2. 非対称性

3. 親星の内部構造

2000年代以降、ようやく爆発するシミュレーションが可能に

爆発エンジンとして最重要 「超新星ニュートリノ」

素粒子的反応 (弱い相互作用) が $\sim 10^{34}$ g もの巨大物質を吹き飛ばす主要因



重力崩壊時のエネルギーはニュートリノに持ち去られる

$$E_g \approx 3 \times 10^{53} \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right) \text{ erg}$$

⇒ 中性子星の質量程度の重力エネルギー解放

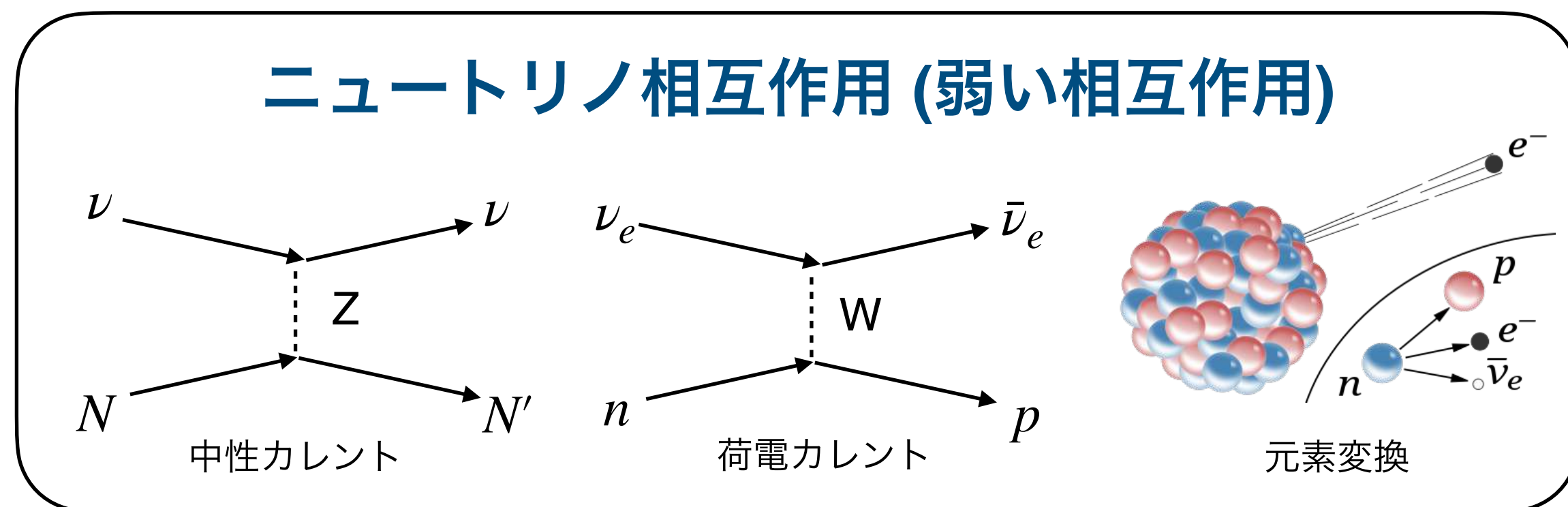
重力崩壊型超新星の典型的な爆発エネルギー

$$E_{\text{exp}} \approx 1 \times 10^{51} \text{ erg}$$

ニュートリノ総エネルギーの 約1% で爆発可能

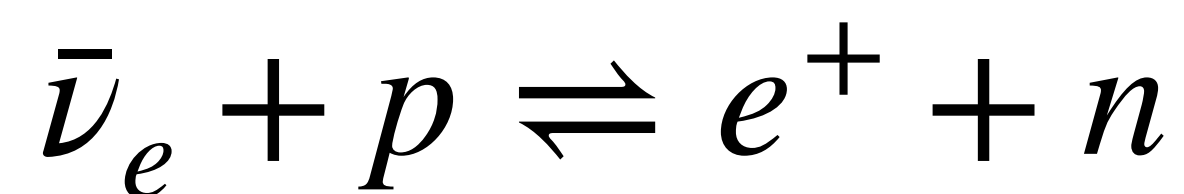
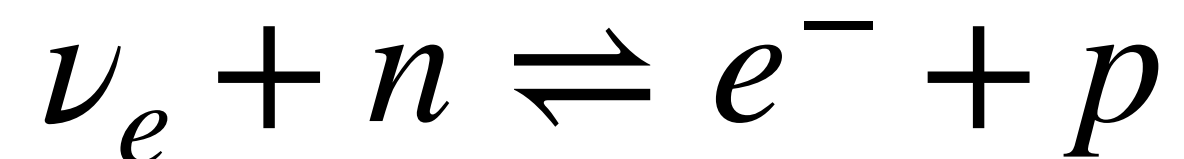
ニュートリノと物質の相互作用

ニュートリノが物質にエネルギーを渡すためには物質と「相互作用」が必要



超新星内部で特に重要な反応

荷電カレント



中性カレント



Akimoto, Yuki @ higgstan

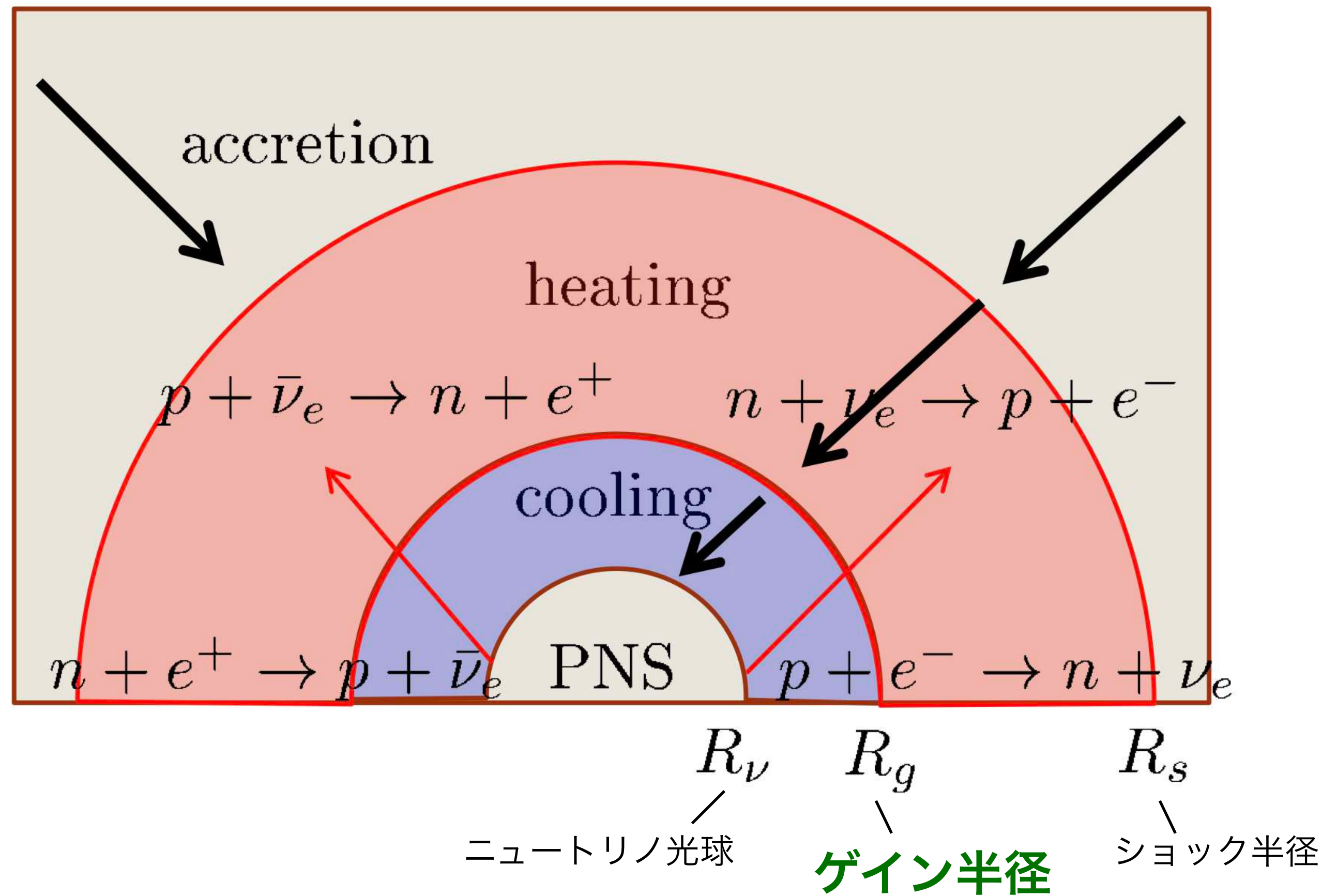
核子に吸収される“**荷電カレント**”反応

核子に散乱される“**中性カレント**”反応

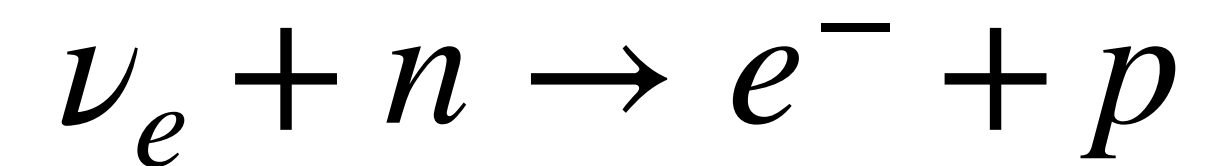
μ, τ 粒子は電子より遥かに重いので、
荷電カレントはほぼ無視できる

ニュートリノ加熱機構

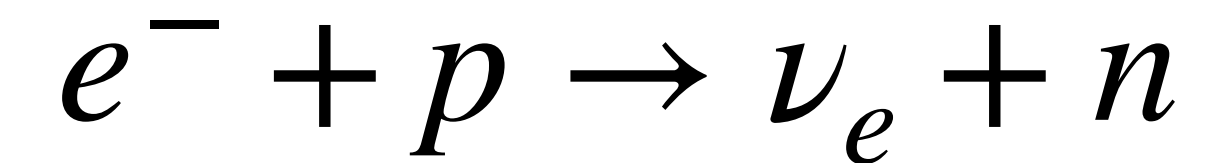
常に上から物が降ってくる状況で、ニュートリノからエネルギーを与えて爆発



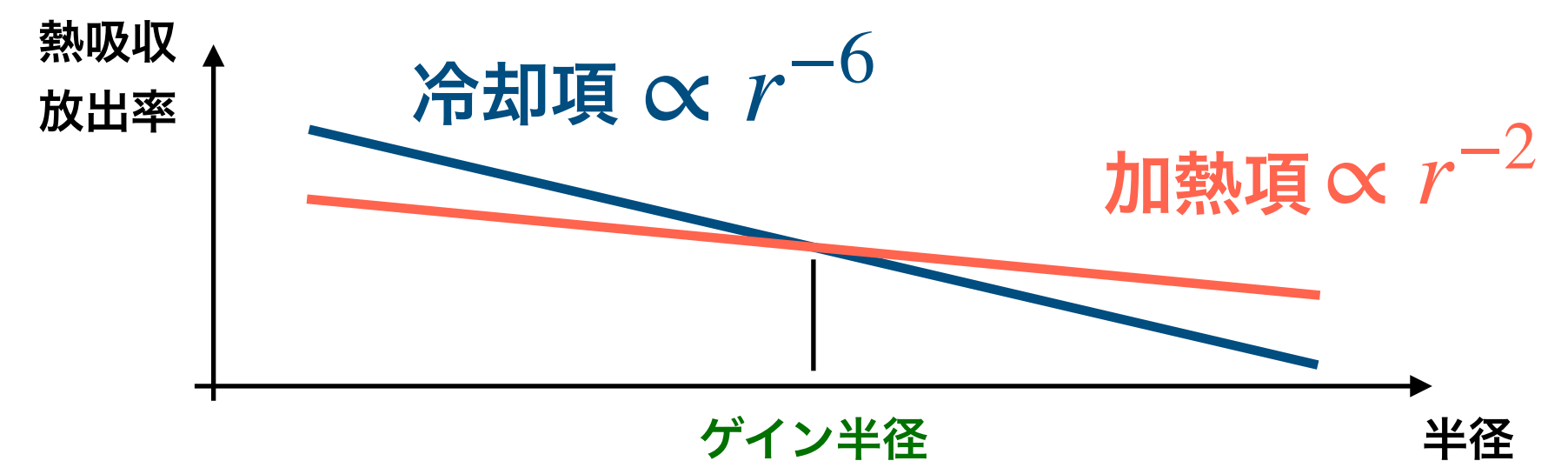
加熱項 $\propto r^{-2}$



冷却項 $\propto r^{-6}$



内側ではニュートリノによるエネルギーの持ち去り(冷却)、ある半径 (= **ゲイン半径**) からニュートリノによる加熱が優勢になる

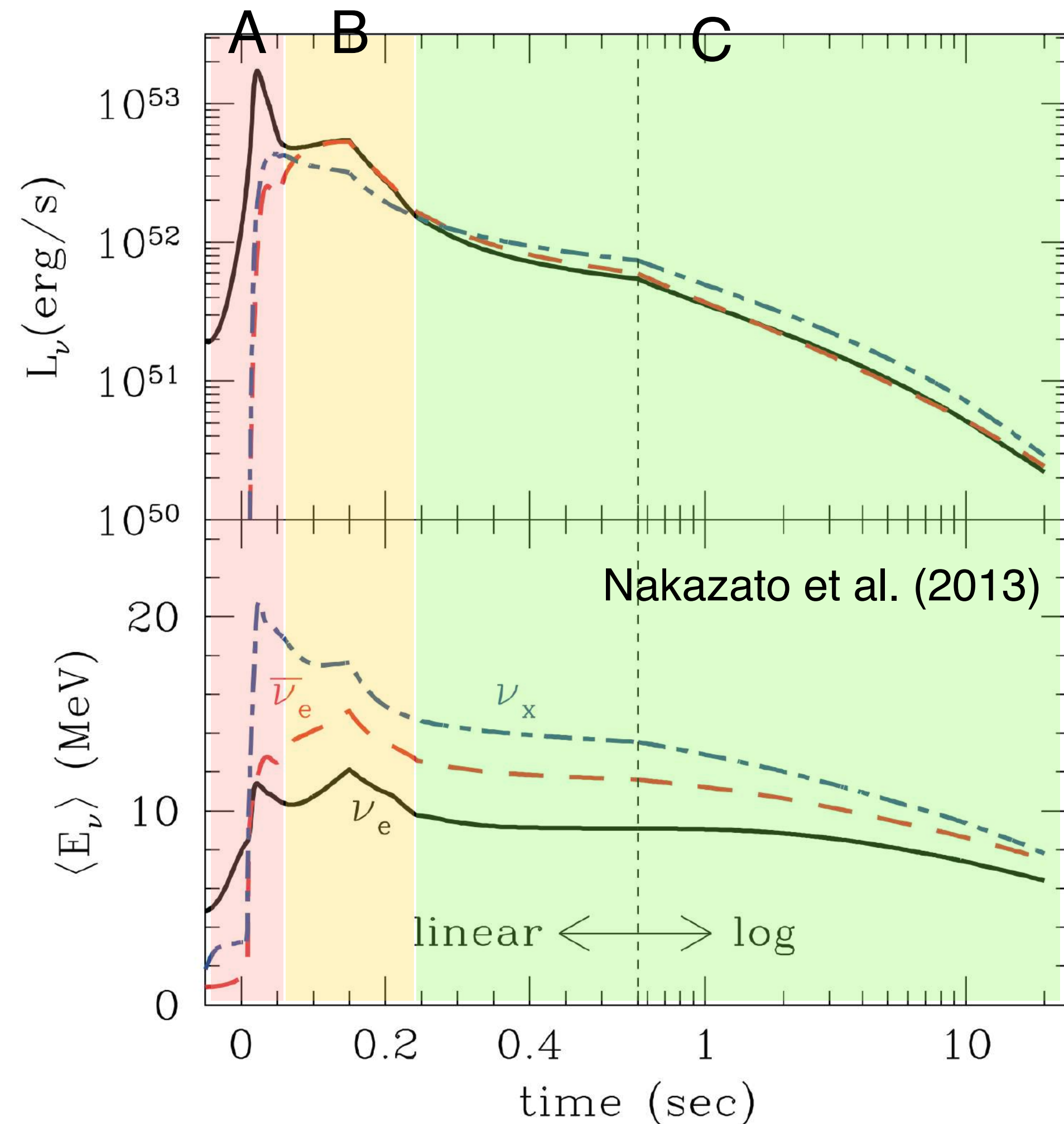


参考資料「超新星シミュレーション」滝脇知也

https://www.lowbg.org/ugnd/workshop/groupC/sn20170304/files/6_takiwaki.pdf

超新星ニュートリノの温度と光度曲線

どんなエネルギーのニュートリノが、どれだけの時間放出されるか？



A. 中性子化バースト ~0 (10 ms)

衝撃波が原子核を砕き、陽子による電子捕獲で電子ニュートリノ

B. 降着フェーズ ~0 (100 ms)

物質降着によるエネルギーで原始中性子星が加熱、熱的なプロセスで全てのフレーバーのニュートリノ放出

C. 冷却フェーズ ~0 (10 s)

衝撃波伝搬後、降着がやみ、ニュートリノ放出量や平均エネルギーが下がる

フレーバーによる温度の違いは、光球面の違い

電子を関与する反応がより低密度の領域まで起きるので
電子ニュートリノの平均エネルギーは他と比べ低くなっている

重力崩壊型超新星に必要な物理過程

1. ニュートリノ加熱

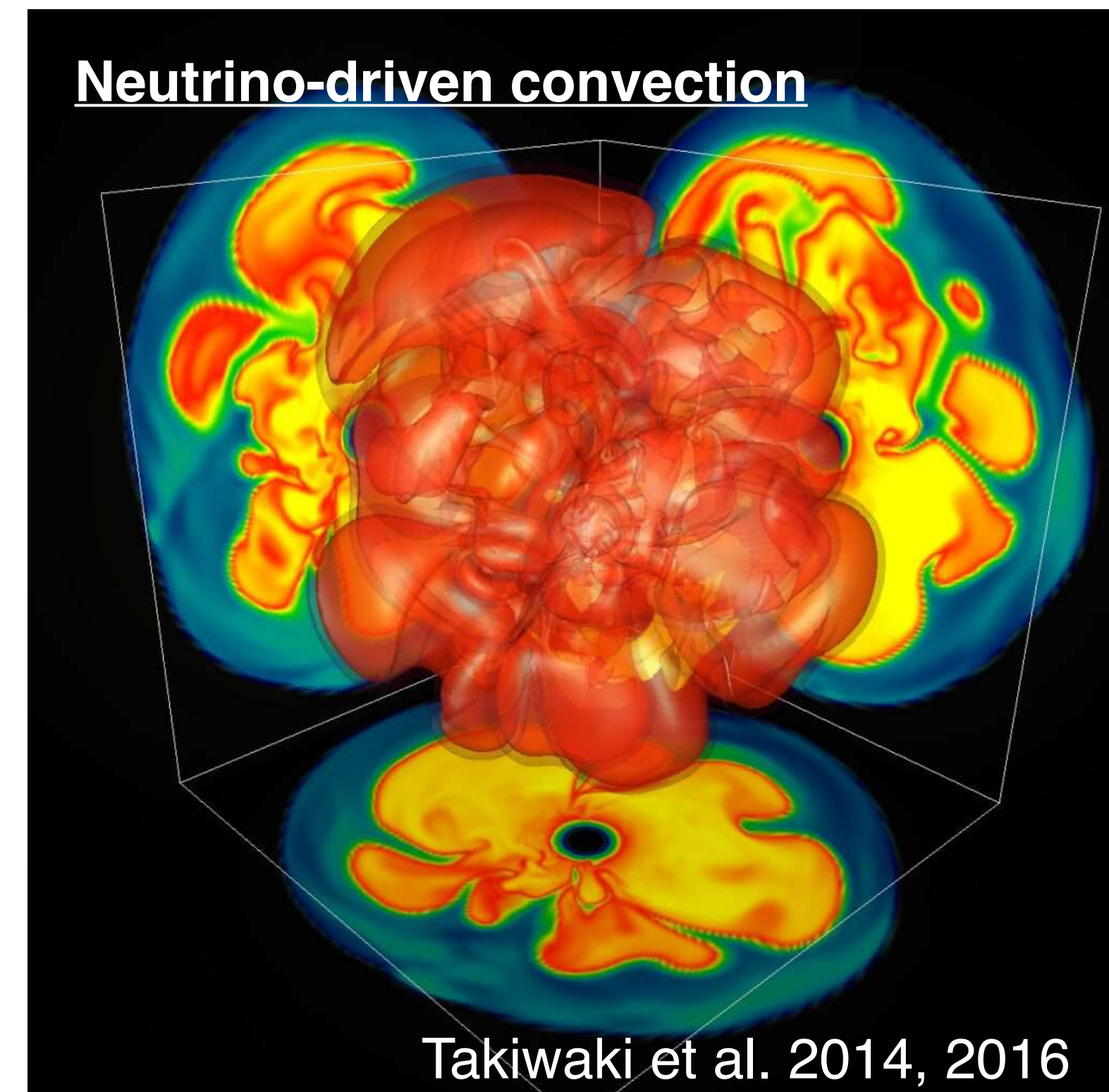
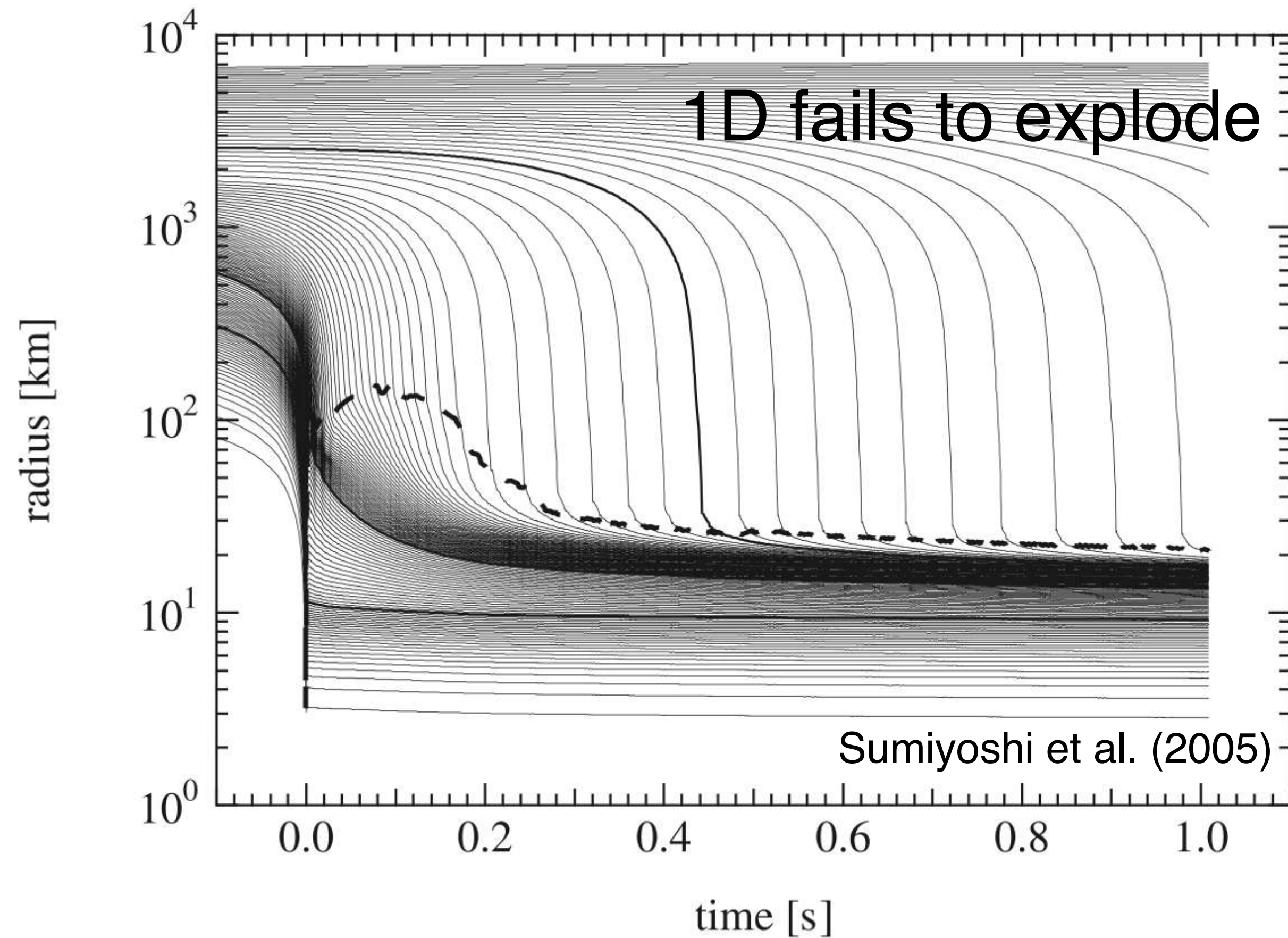
2. 非対称性

3. 親星の内部構造

2000年代以降、ようやく爆発するシミュレーションが可能に

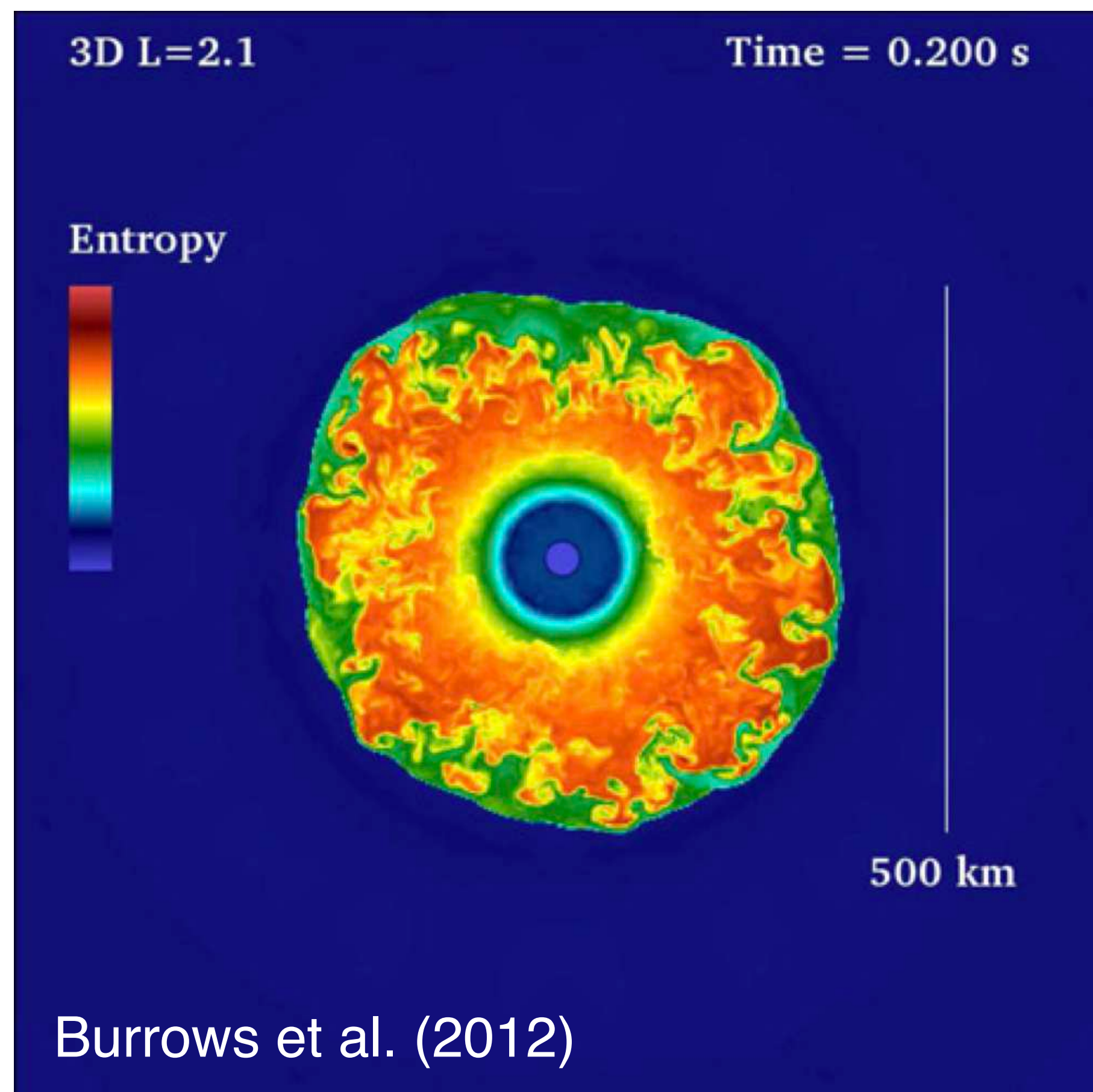
1次元理論計算では、爆発を再現できない

どれだけ厳密にニュートリノ輸送を計算しても爆発できない



ニュートリノ加熱効率を上げる多次元的な効果を取り入れが重要

多次元的効果の例：対流不安定性 (ニュートリノ駆動型対流)



星の内部の対流と話は同じ

Schwarzschild criterion

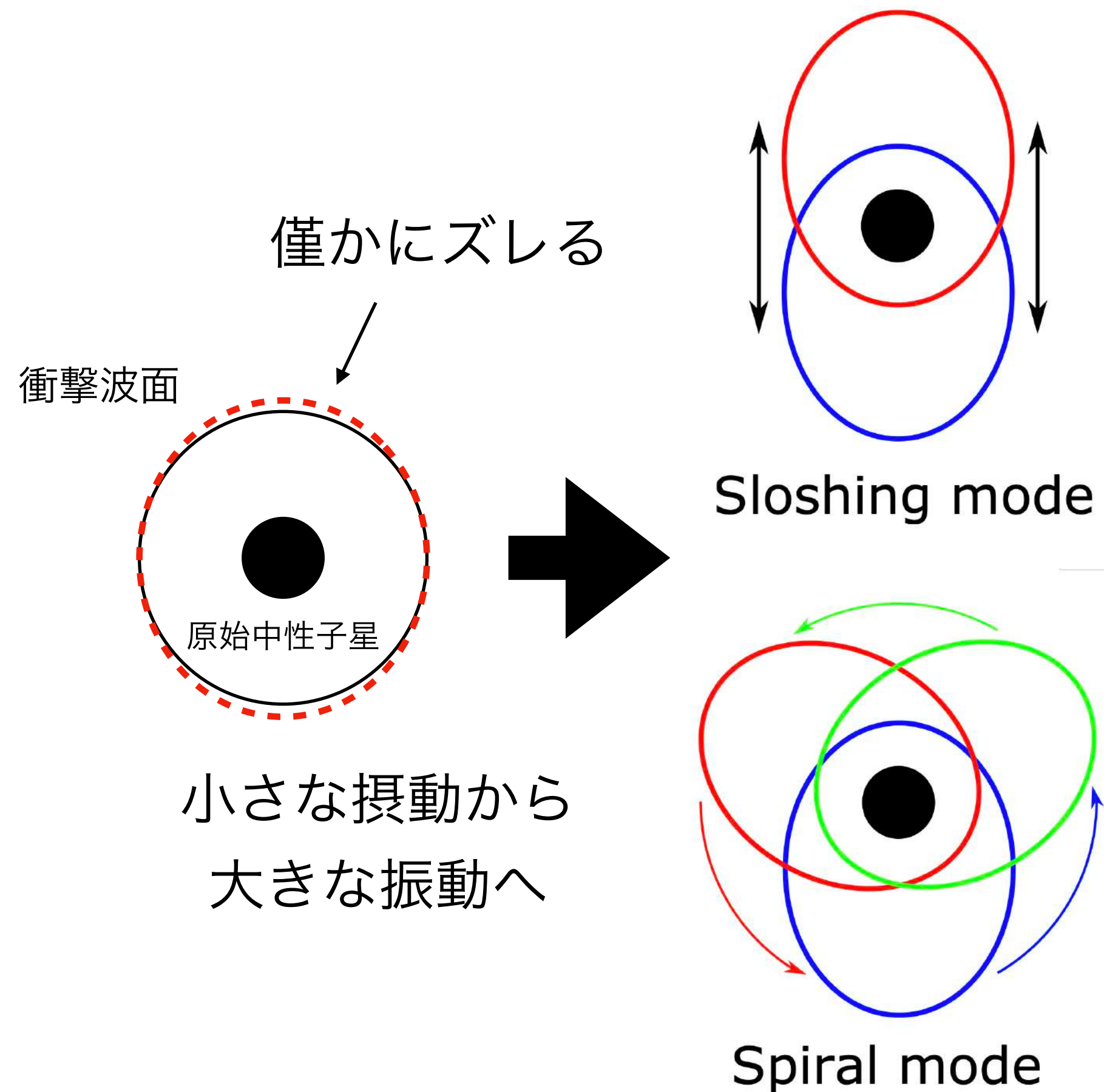
$$\left(\frac{d \ln T}{d \ln p} \right)_{\text{ad}} < \left(\frac{d \ln T}{d \ln p} \right)$$

ニュートリノ加熱で温度勾配が急になった時

「熱くて軽いものは上昇し、冷たく重いものは下降する」

衝撃波面で小さなスケールの泡状構造が浮力で持ち上がり、衝撃波を後押し

多次元的效果の例：Standing Accretion Shock Instability (SASI)



Foglizzo et al. (2012), Physical Review Letters

Shallow water analog of shocks in stellar explosions.

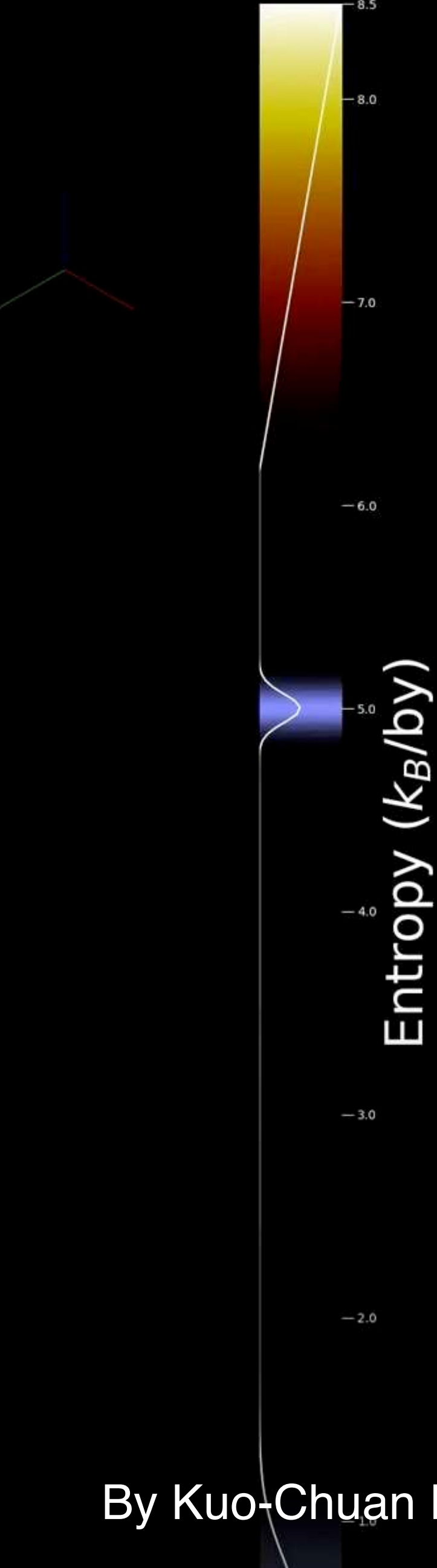
<https://www.youtube.com/watch?v=S-7a7ID7aWU>

衝撃波面が**大きなスケールで振動**する不安定性 ⇒ ニュートリノ加熱効率上げる

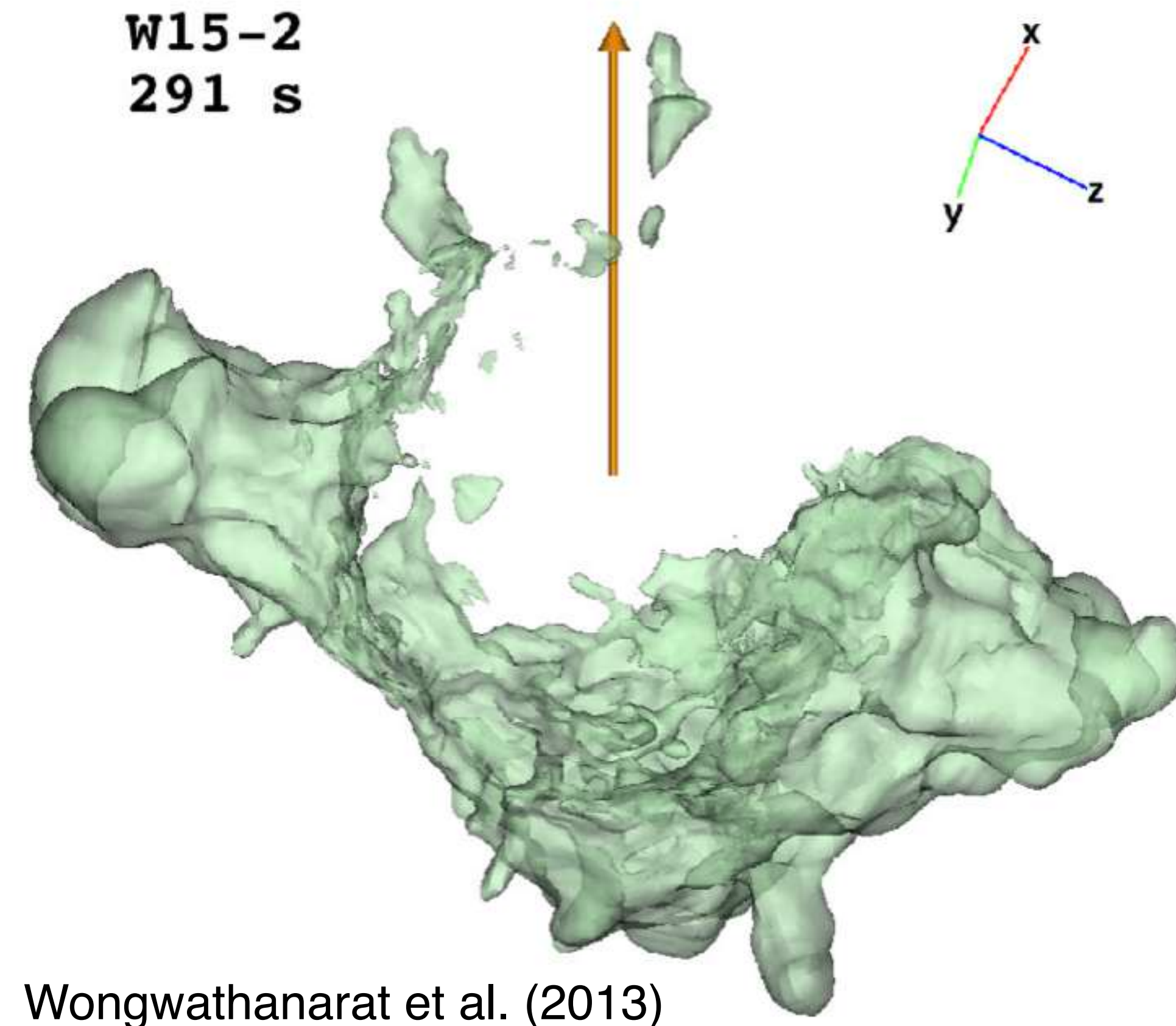
Time = 3.9 (ms)

多次元シミュレーション 動画

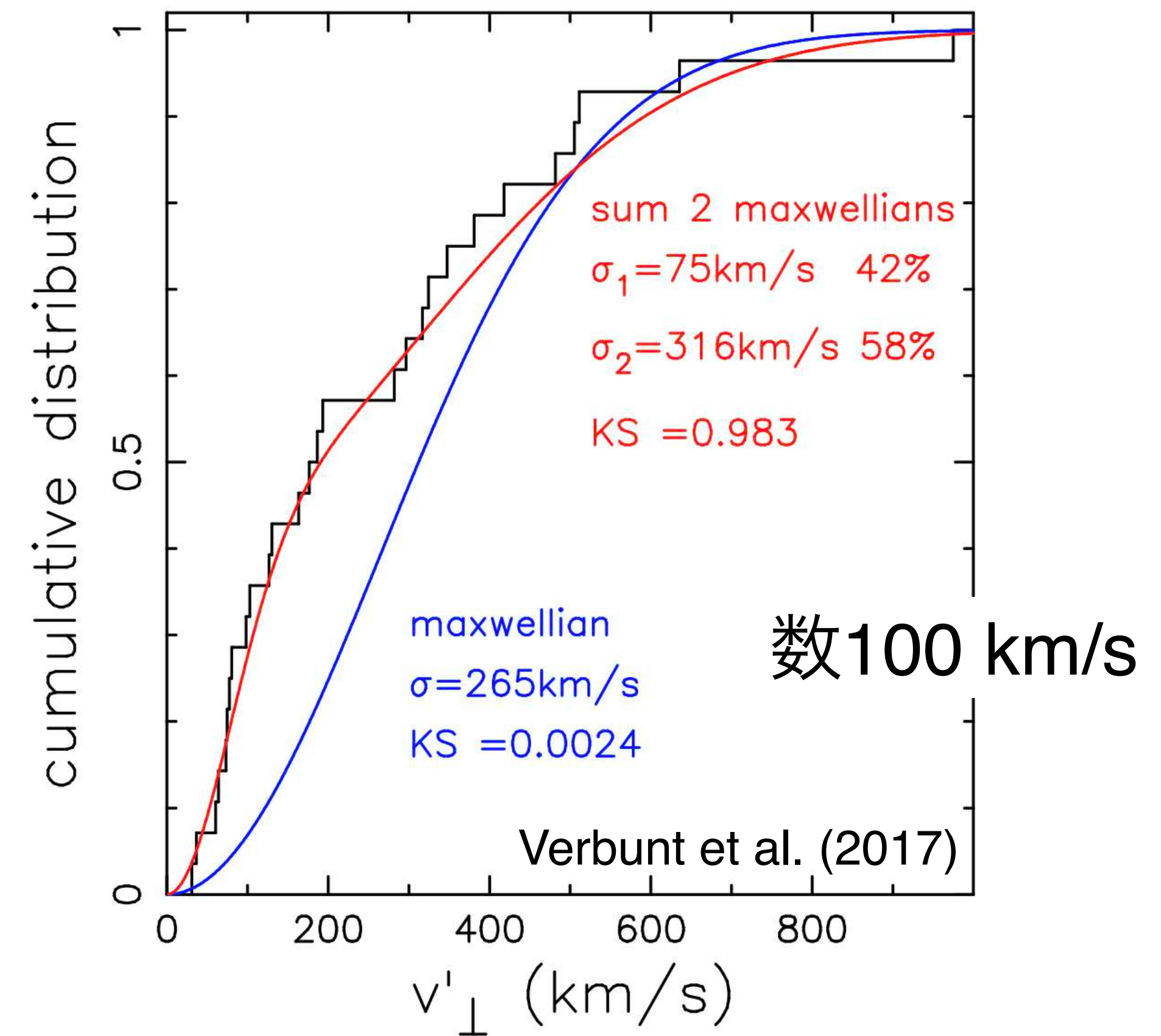
A 20 solar mass



爆発の非対称性と Neutron Star Kick



銀河系内のパルサー移動速度



非対称な偏った爆発が、中性子星を反対側へ蹴る (kick) $\Rightarrow$ 系内パルサーの速度起源？

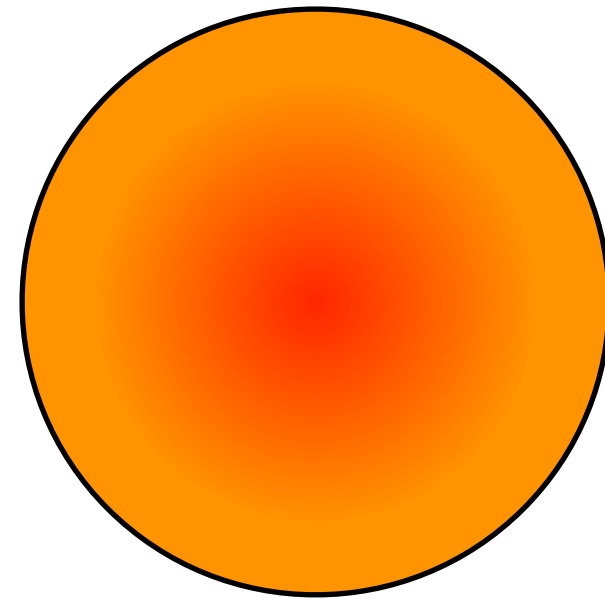
重力崩壊型超新星に必要な物理過程

1. ニュートリノ加熱
2. 非対称性
3. 親星の内部構造

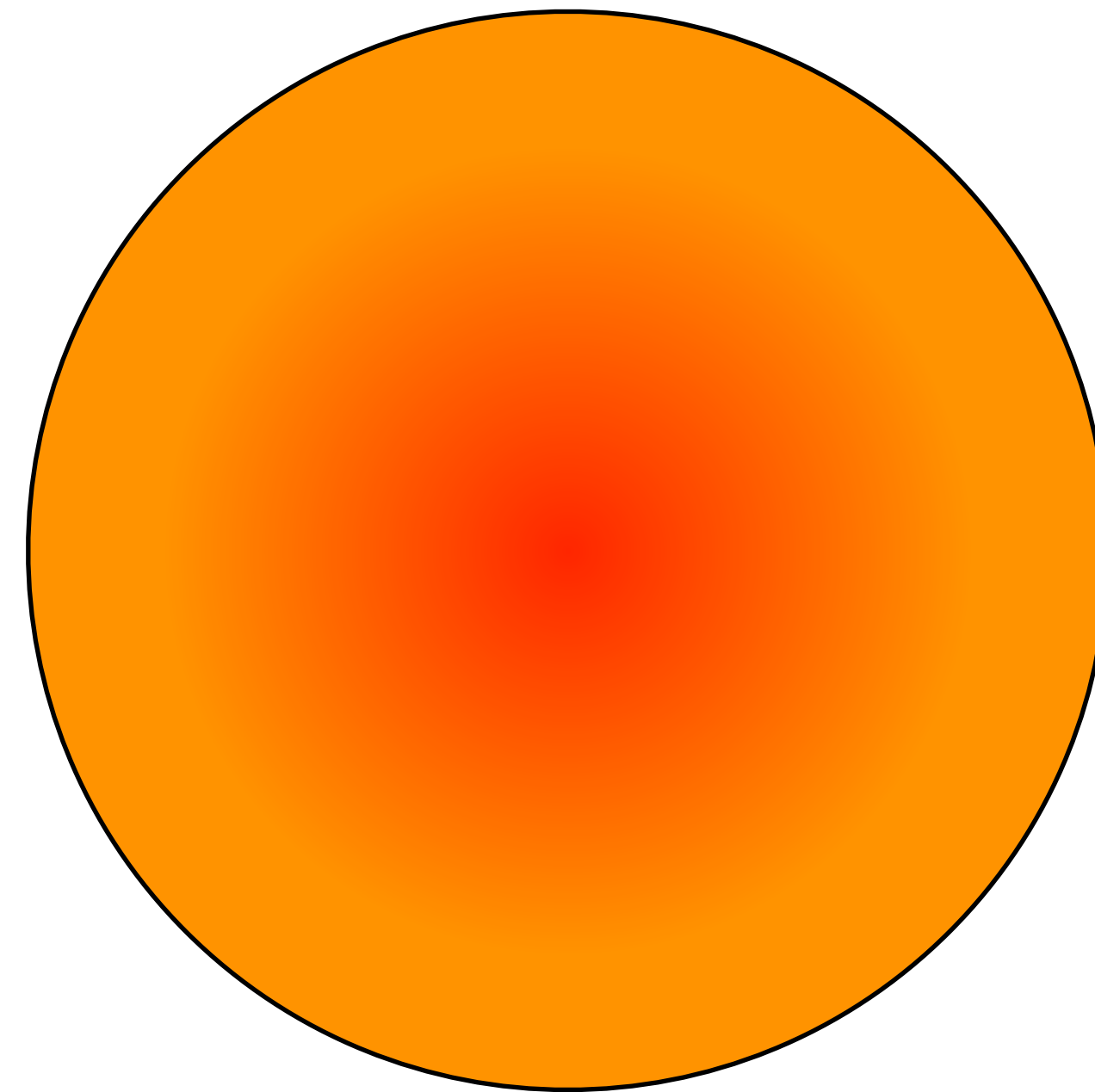
2000年代以降、ようやく爆発するシミュレーションが可能に

疑問 「どんな星が爆発して、どんな星が爆発失敗するか？」

小さい星



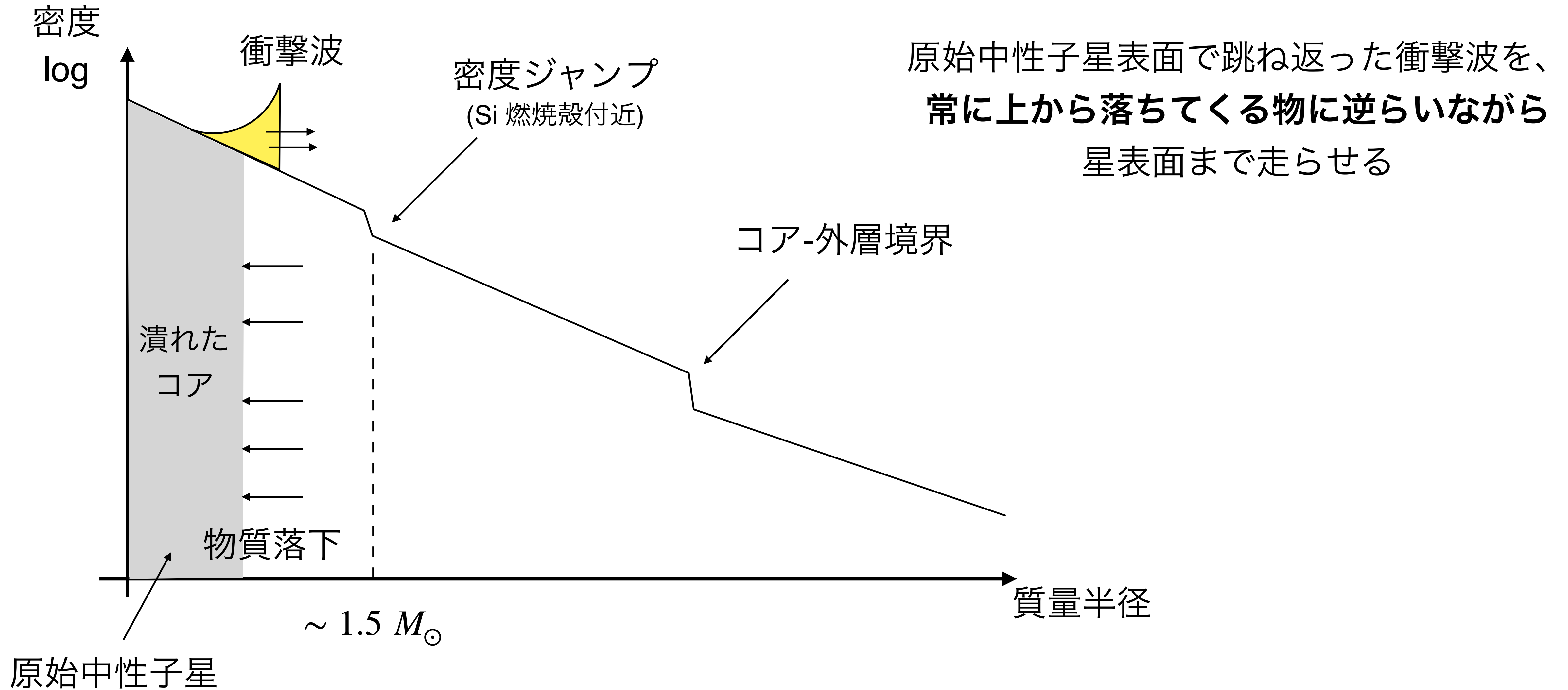
大きい星



例えば同じ質量だとして、どっちが爆発しやすいでしょう？

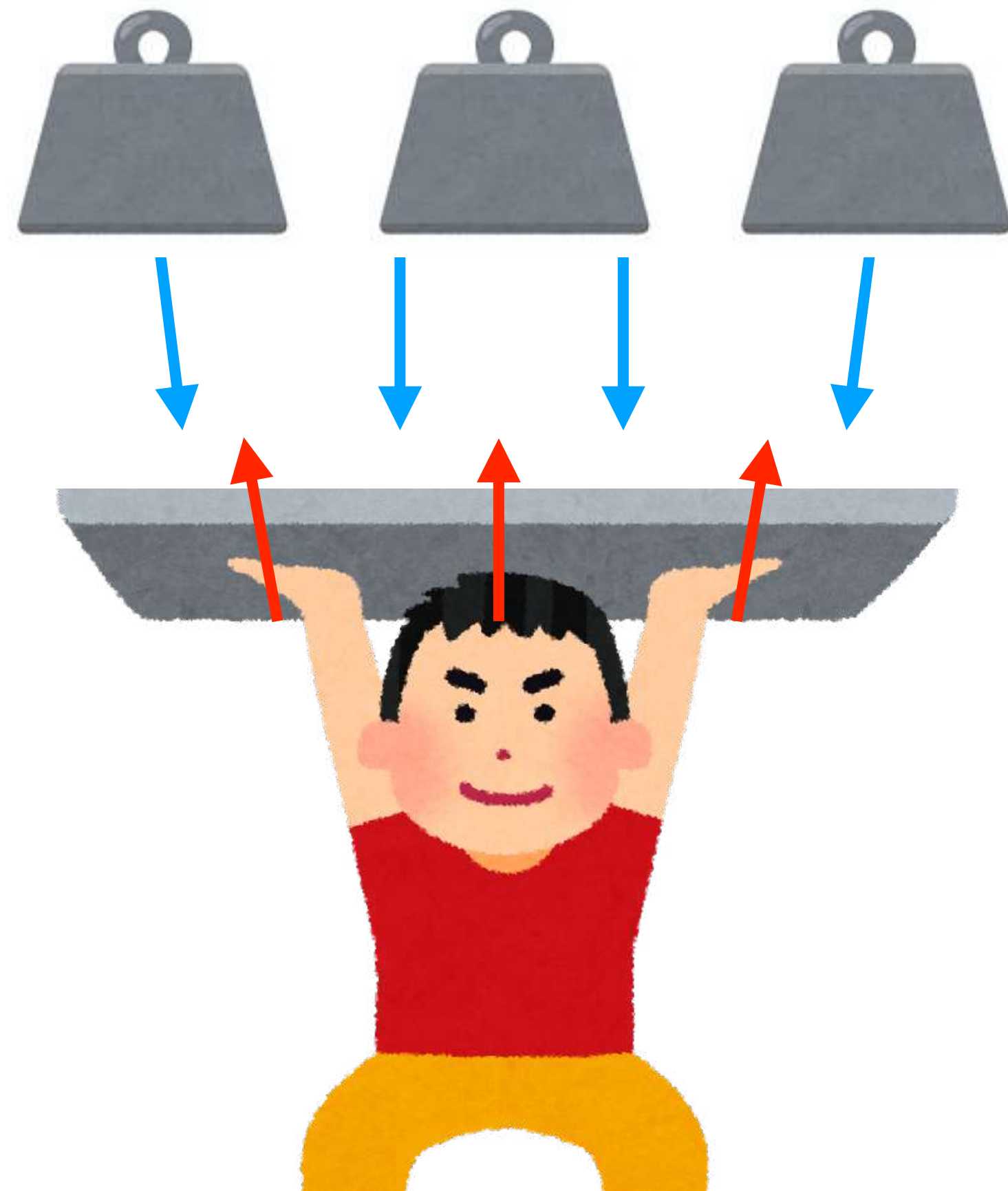
⇒ 星の内部構造にヒントがありそう

大質量星を爆発させるとはどういうことか？



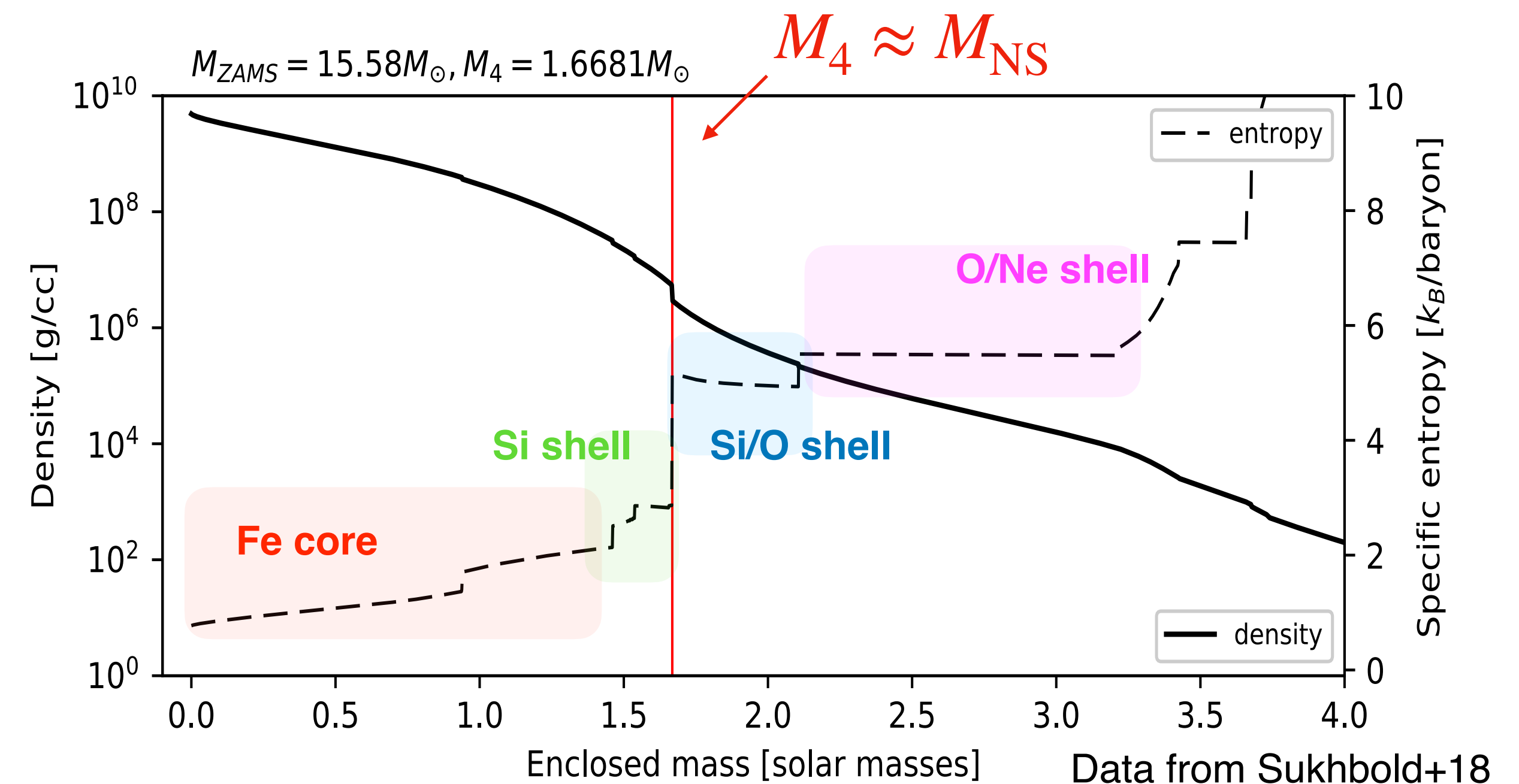
星の内部構造と衝撃波伝搬: 衝撃波の出発地点

ラム圧 (質量降着)



熱的圧力 (ニュートリノ加熱)

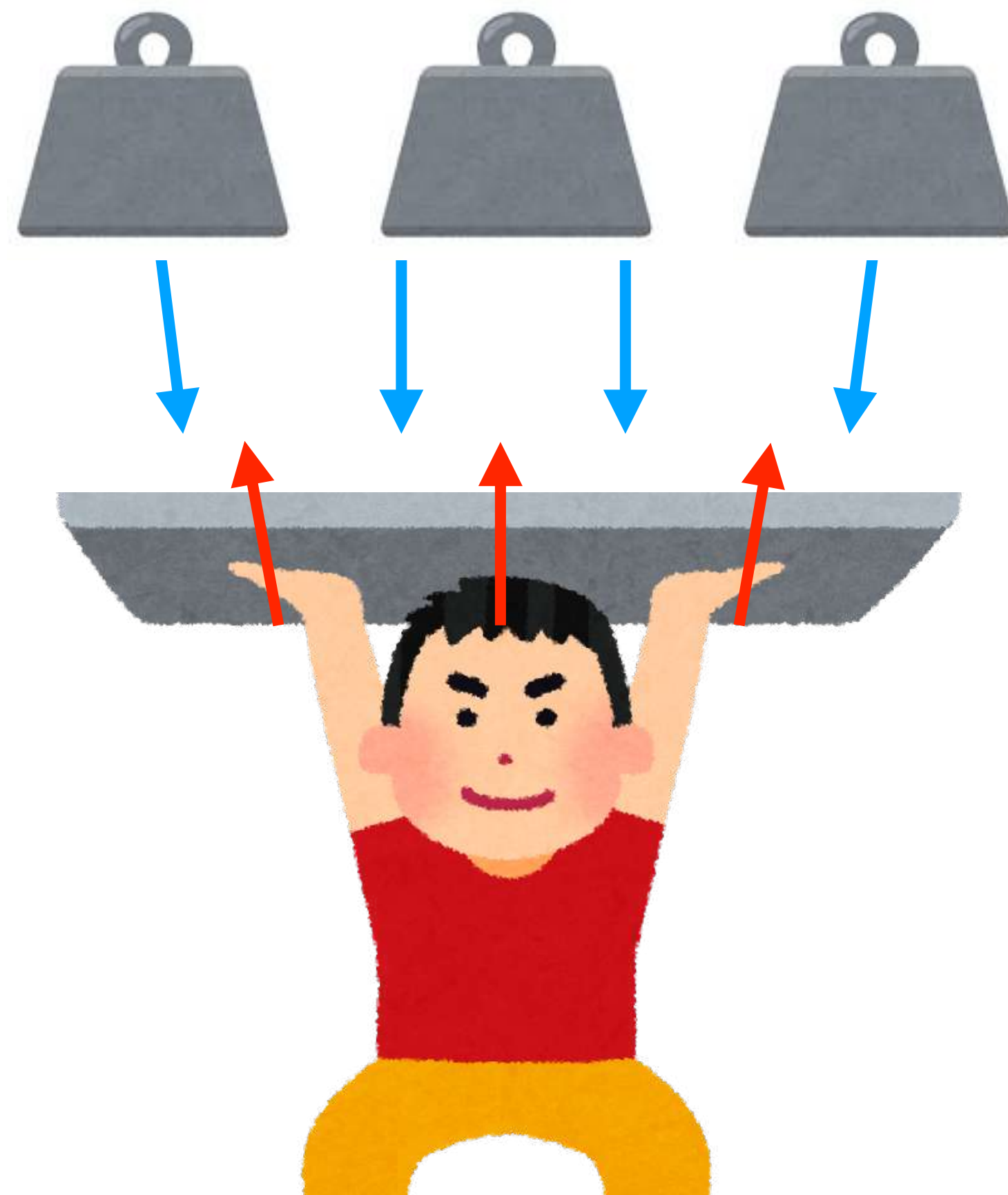
爆発する星の初期状態



Si-Si/O 層の境界付近に密度ジャンプ

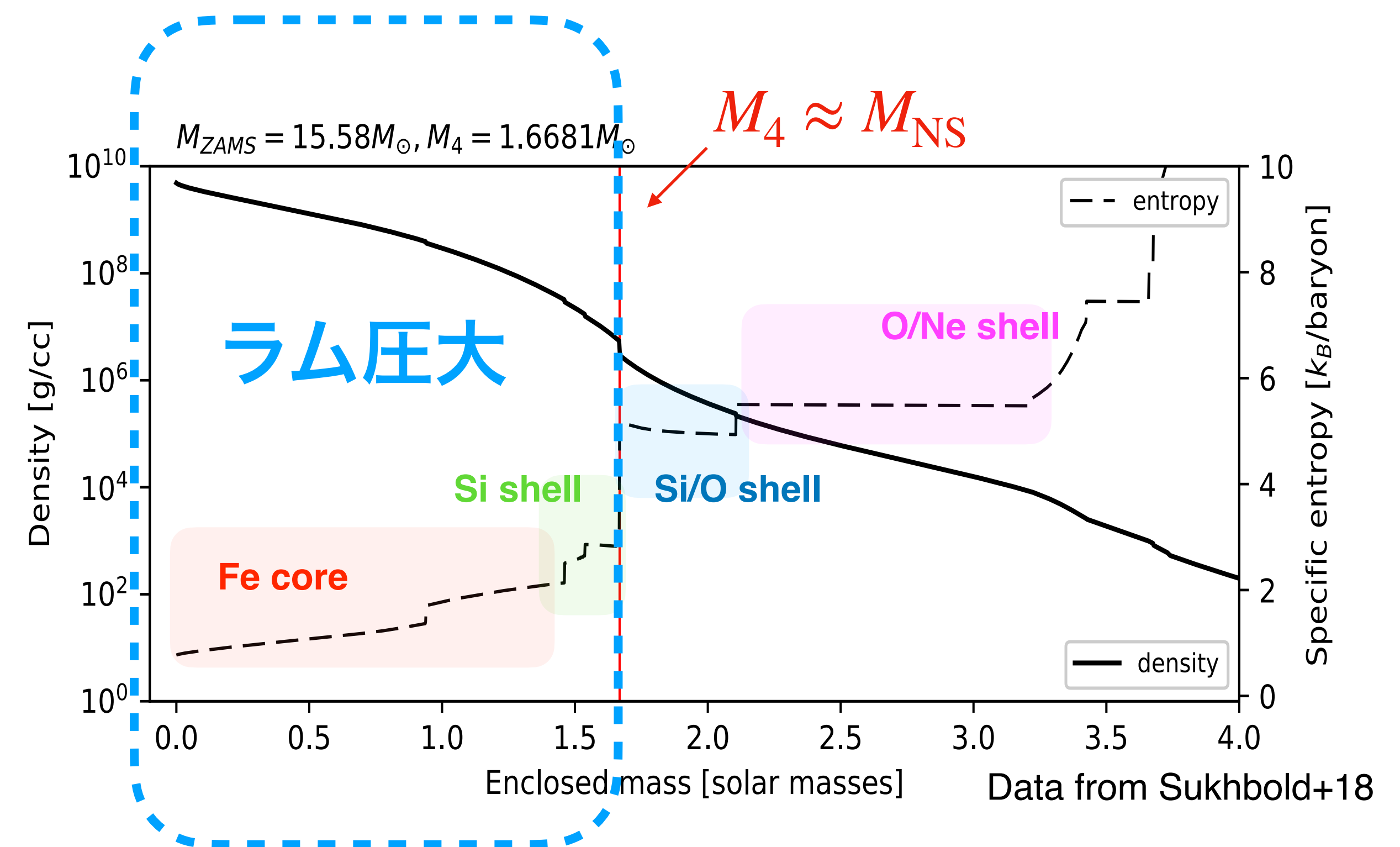
星の内部構造と衝撃波伝搬: 衝撃波の出発地点

ラム圧 (質量降着)



熱的圧力 (ニュートリノ加熱)

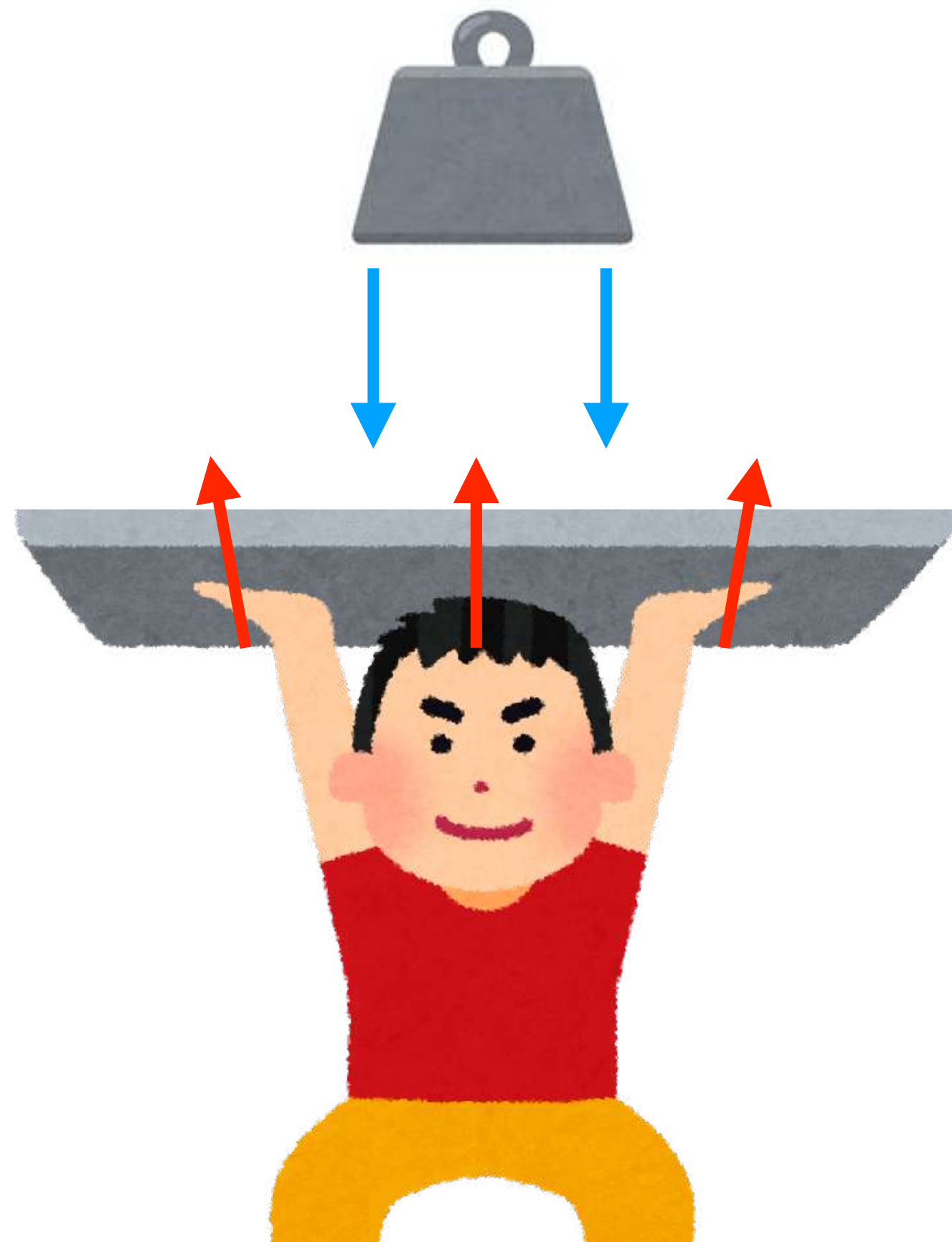
爆発する星の初期状態



Si-Si/O 層の境界付近に密度ジャンプ

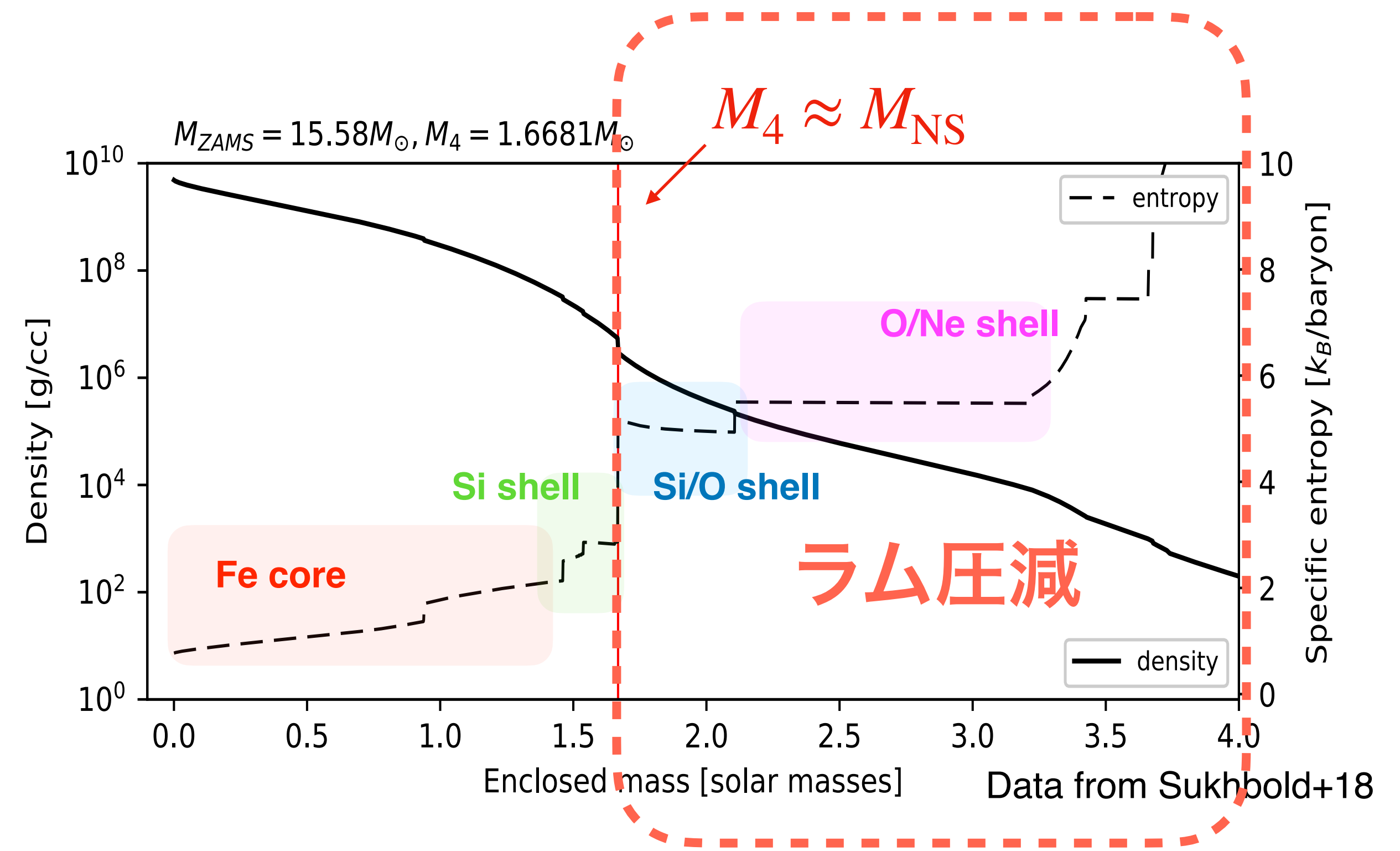
星の内部構造と衝撃波伝搬: 衝撃波の出発地点

ラム圧 (質量降着)



熱的圧力 (ニュートリノ加熱)

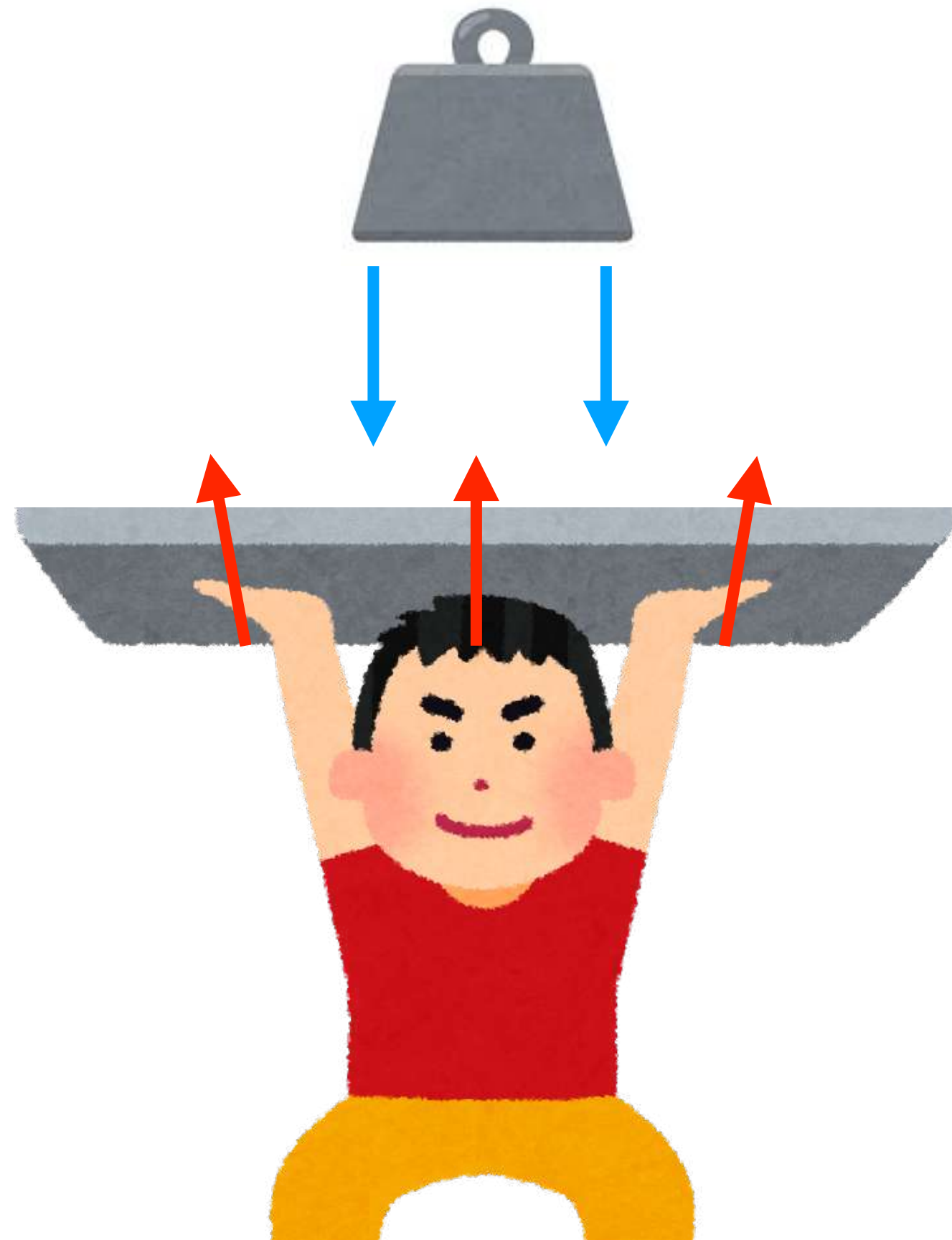
爆発する星の初期状態



Si-Si/O 層の境界付近に密度ジャンプ

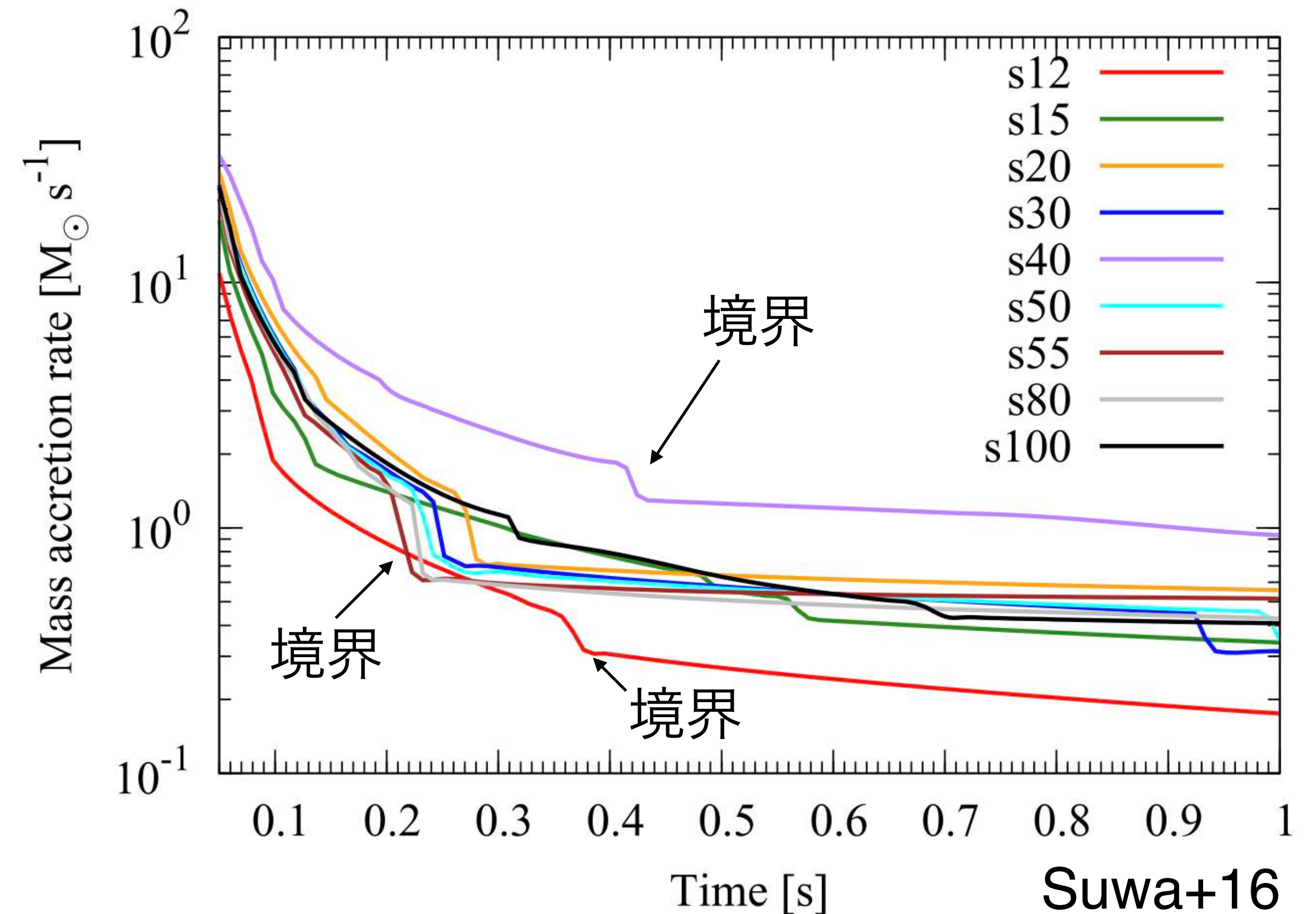
星の内部構造と衝撃波伝搬: 衝撃波の出発地点

ラム圧 (質量降着)



熱的圧力 (ニュートリノ加熱)

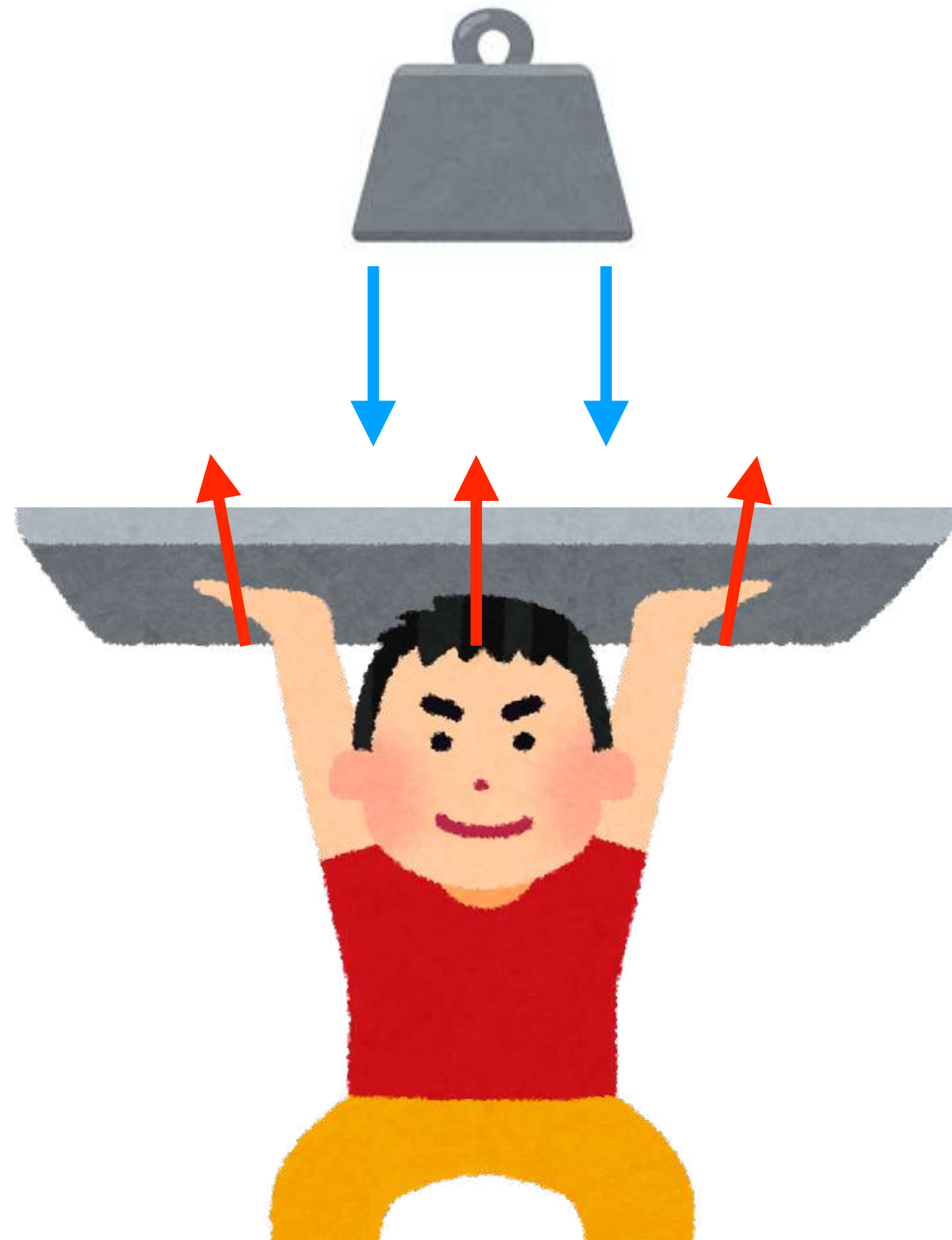
質量降着量の時間進化



境界過ぎると降着量激減

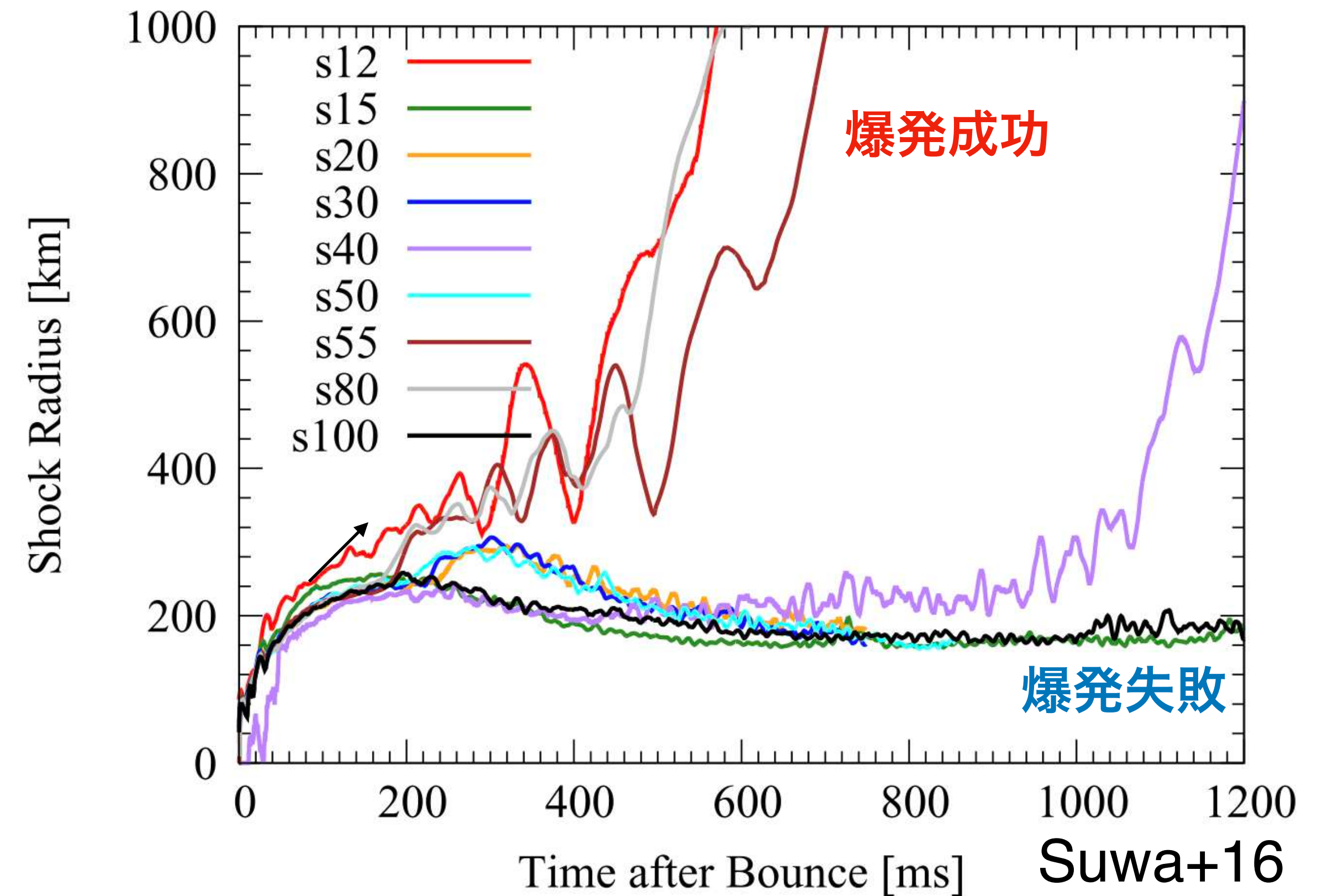
星の内部構造と衝撃波伝搬：衝撃波の出発地点

ラム圧 (質量降着)



熱的圧力 (ニュートリノ加熱)

衝撃波の時間進化



境界過ぎた後、衝撃波の復活 & 爆発！

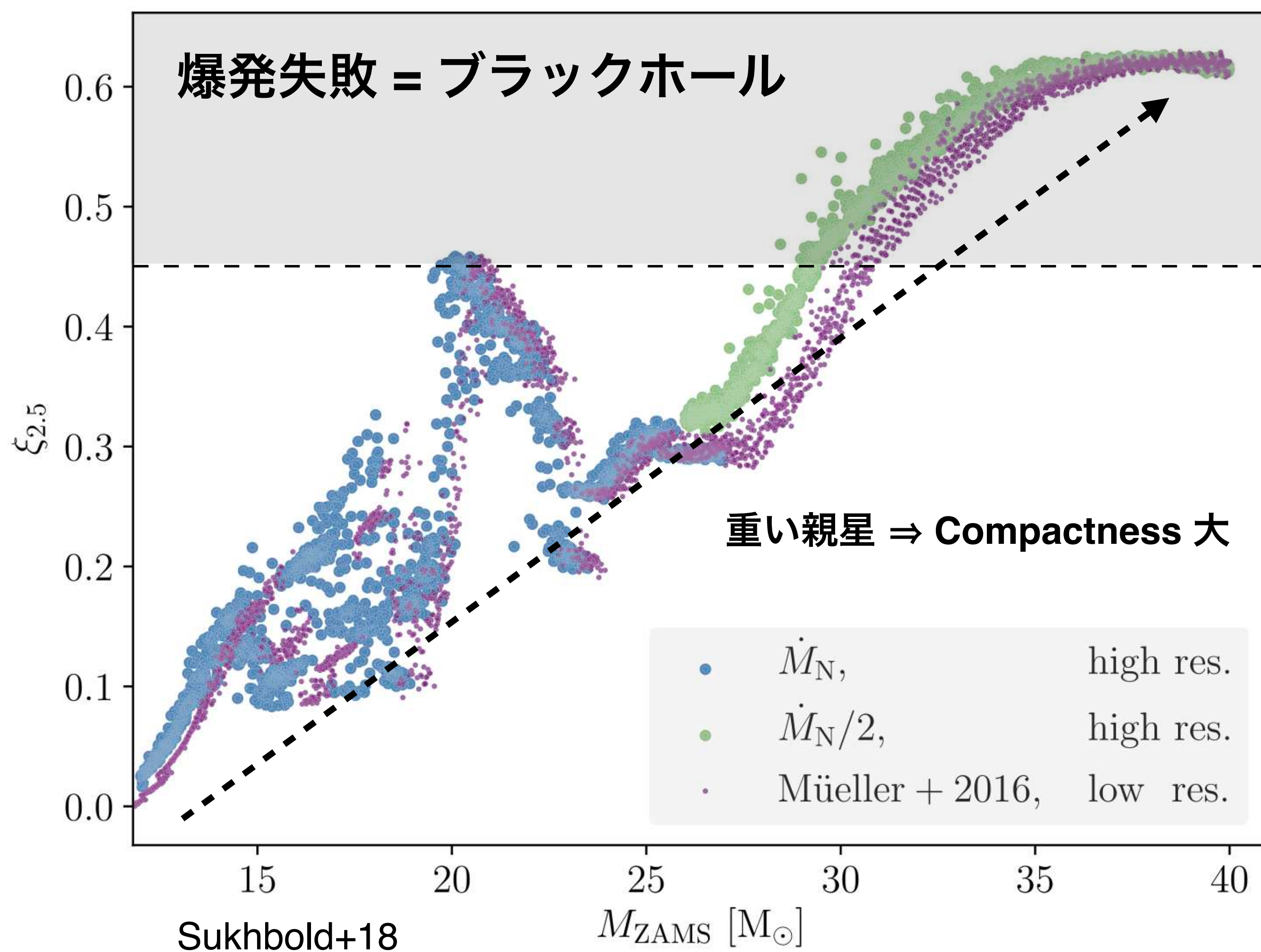
星の内部構造から爆発可能性が議論できる？

1. ニュートリノ加熱 ⇒ ニュートリノ光度
($\approx$ 中性子星質量)
2. 非対称性
3. 親星の内部構造 ⇒ 密度ジャンプ位置

最近の理解 「中性子星半径 $\approx$ 密度ジャンプ位置」

⇒ 大質量星の死に際の内部構造が重要

内部構造の指標 ① : Compactness



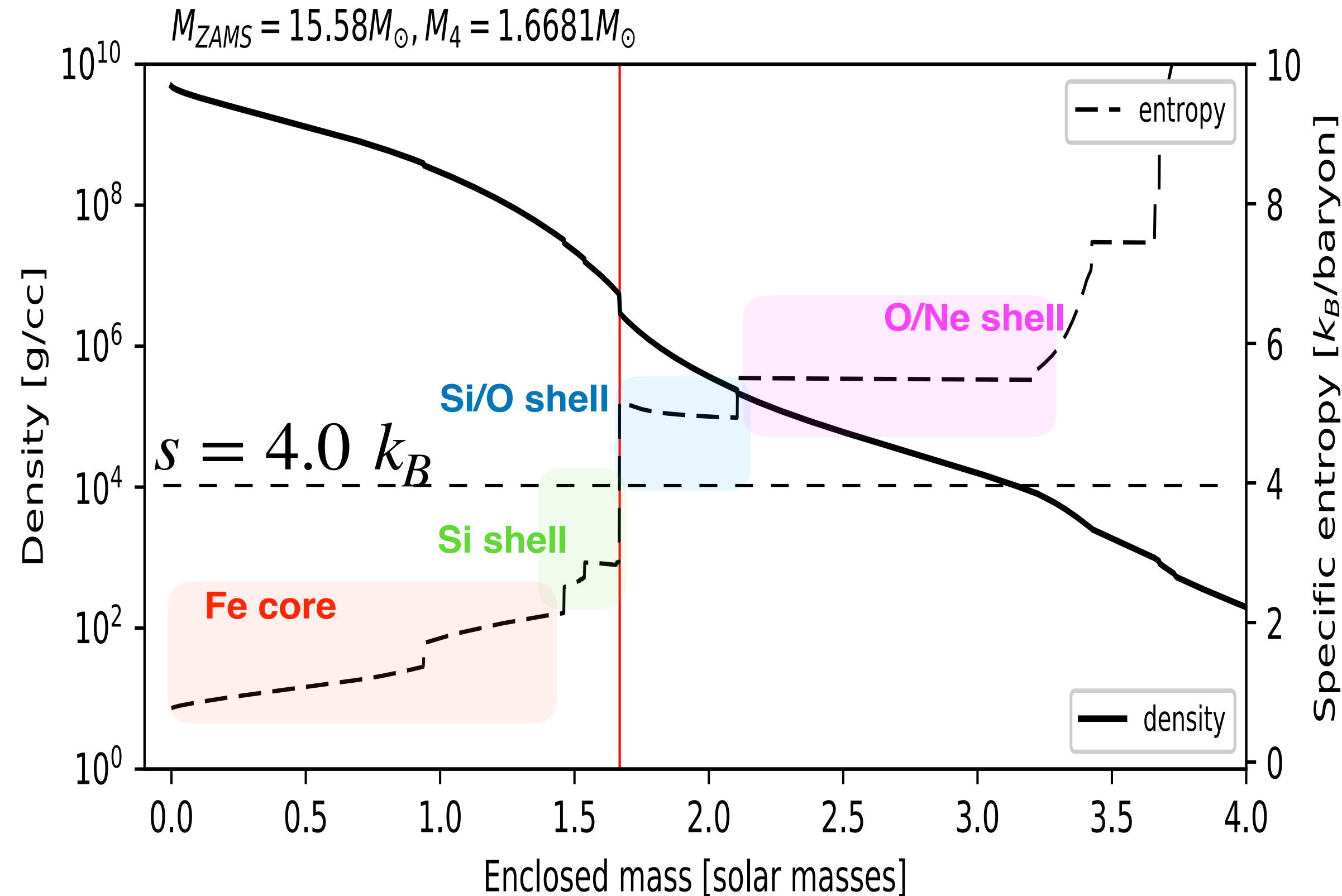
Compactness が大き過ぎると爆発
失敗して、ブラックホールへ

Compactness parameter

$$\xi_M = \frac{\overset{\text{ある質量が}}{M'/M_\odot}}{\underset{\text{どれだけの半径に収まっていますか?}}{R(M_{\text{bary}} = M)/1000 \text{ km}}} \Big|_{t_{\text{bounce}}}$$

Compactness だけだと実際には爆発
に必要な条件を絞りにくい
 $\Rightarrow M_4$ & μ_4 (次のページ)

内部構造の指標 ② : M_4 & μ_4



M_4 : 内部での密度ジャンプ位置

$$s = 4.0 k_B$$

を超える質量 $\Rightarrow$ 衝撃波スタート地点

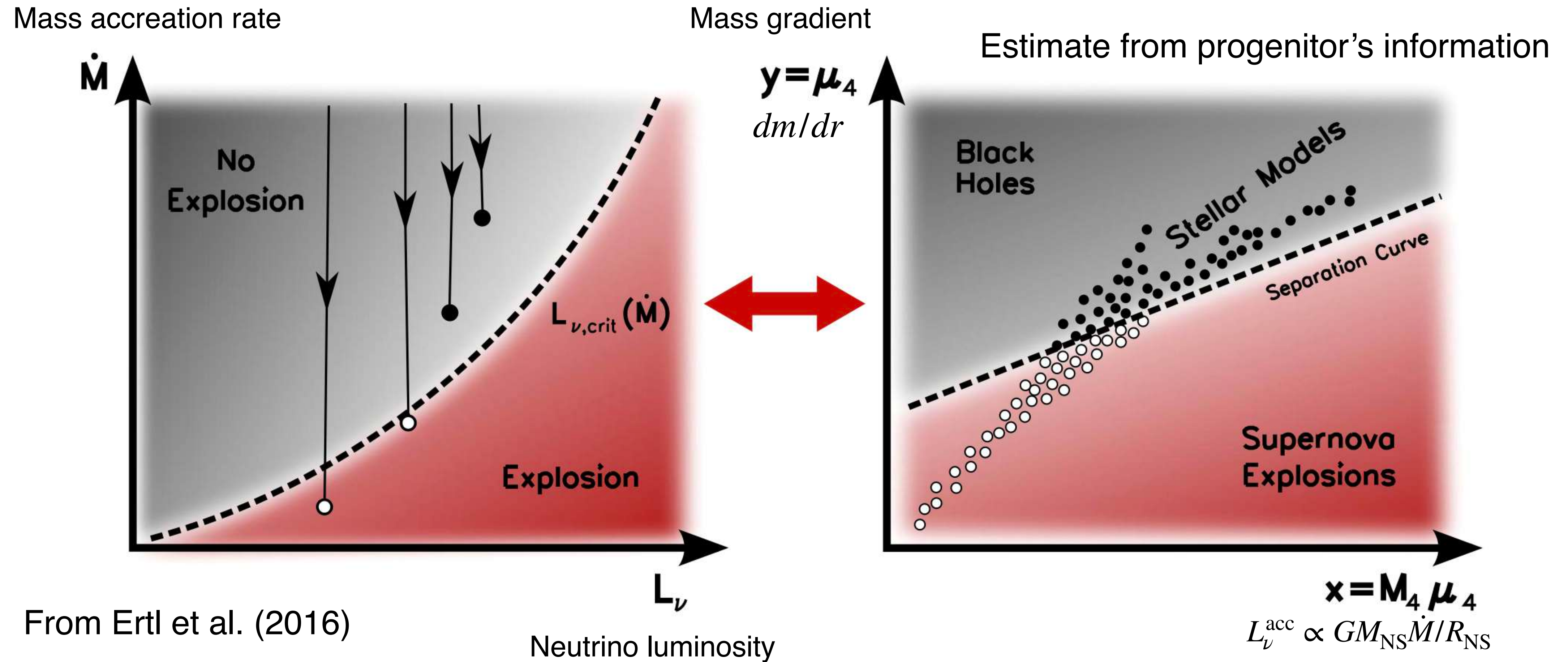
μ_4 : 密度ジャンプ位置での質量勾配

$$\mu_4 = \frac{dm/M_{\odot}}{dr/1000 \text{ km}}$$

質量降着率 ($\approx$ ラム圧) へ影響

これらの組み合わせで、爆発のしやすさをより詳細に議論できる

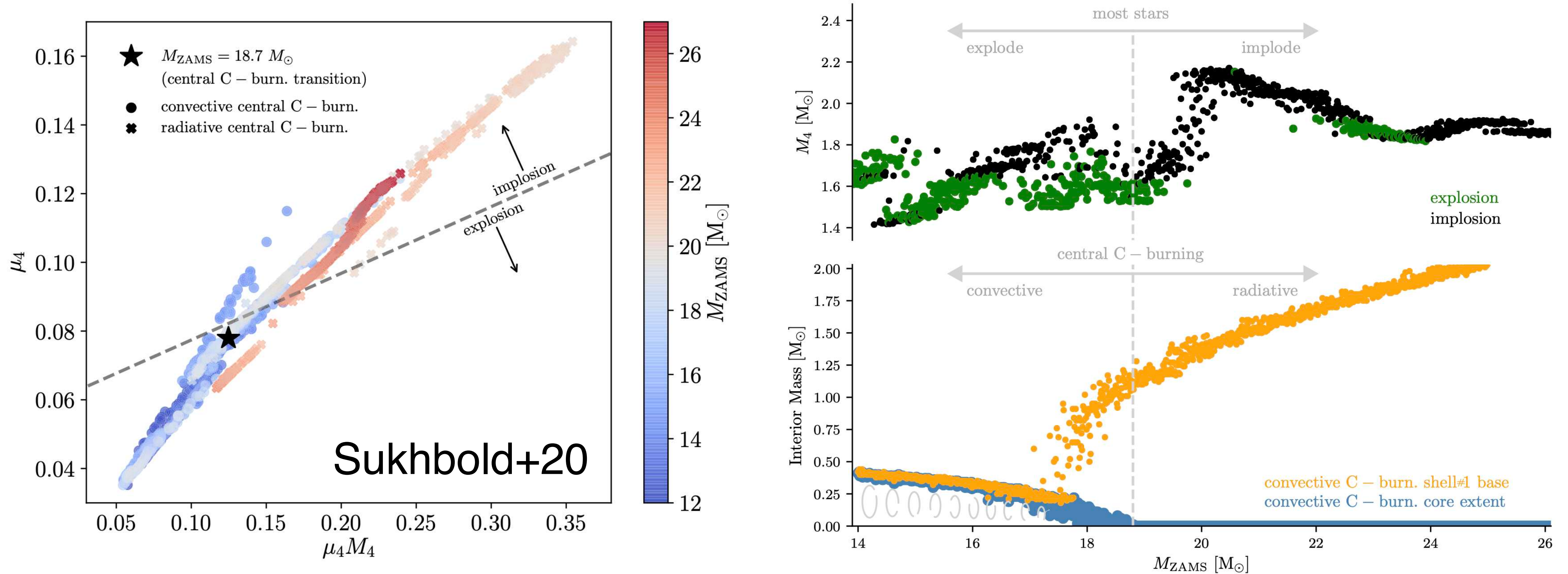
M_4 & μ_4 : ニュートリノ光度と質量降着率の指標



低い $\dot{M}$ と 高い L_{ν} で超新星爆発は起きやすい $\Rightarrow$ 爆発直前の構造で推定可能

M_4 & μ_4 : ニュートリノ光度と質量降着率の指標

実際に、親星モデルから爆発可能性を議論した例



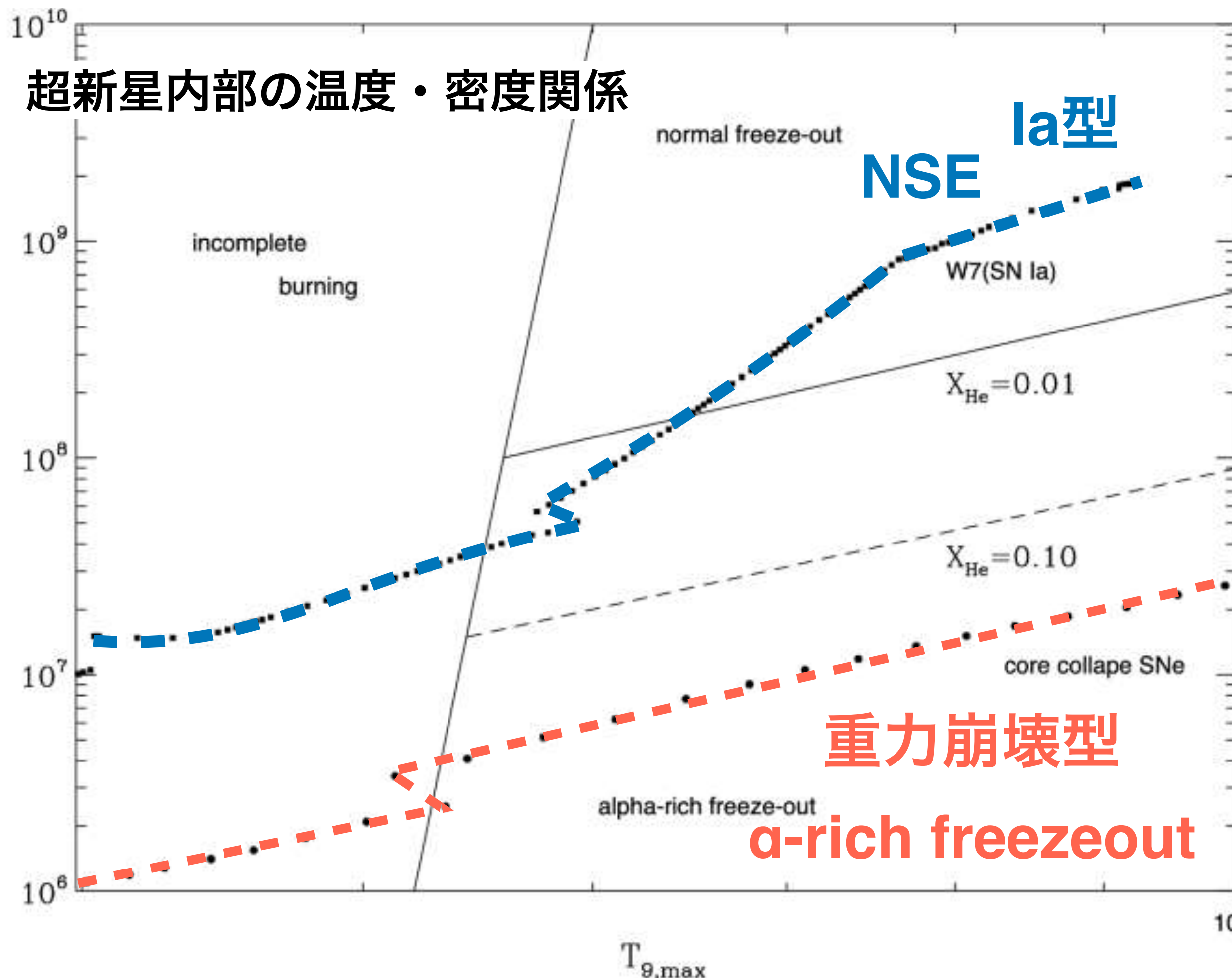
注意: 通常の星は内部構造を測れないので、あくまで理論の話

星を爆発させた後の話

(元素合成理論、超新星・超新星残骸観測)

重力崩壊型超新星の“爆発的”元素合成

鉄 (^{56}Ni) の合成を特徴づけるのは爆発的 Si 燃焼 (= α -rich freezeout)



重力崩壊型の場合、桁違いに低密度

エントロピー(T^3/ρ)が高い環境
(= 高温・低密度)

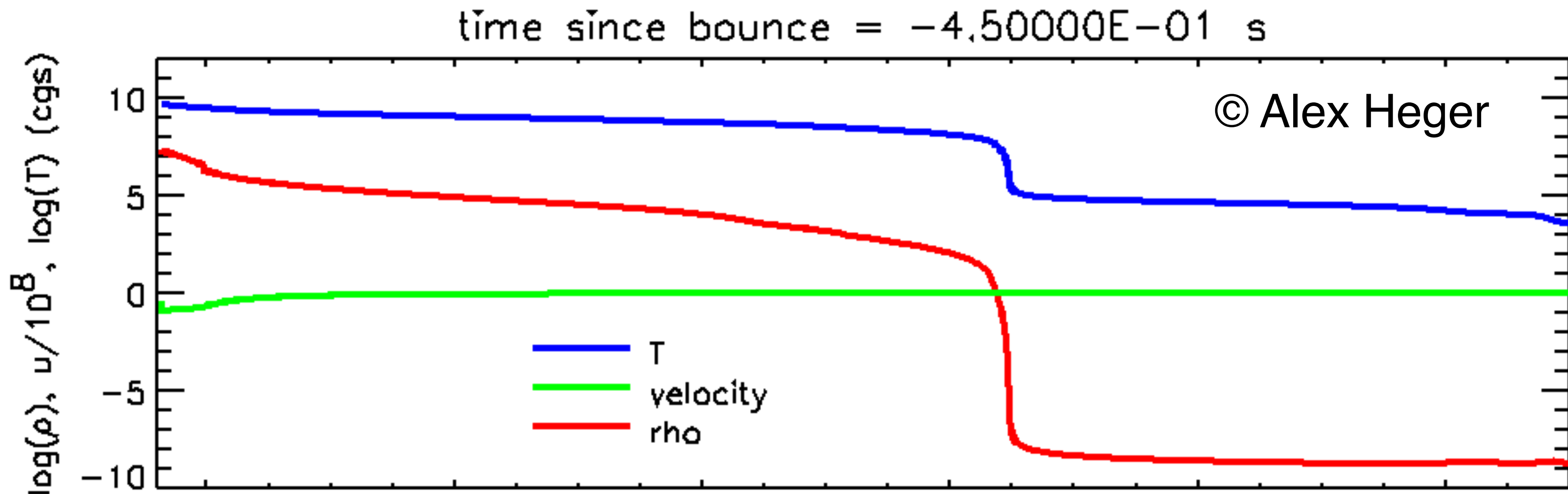
→ α 捕獲過程の進みが遅い

通常の NSE とは組成も変わり

“ α -rich freezeout” と呼ぶ

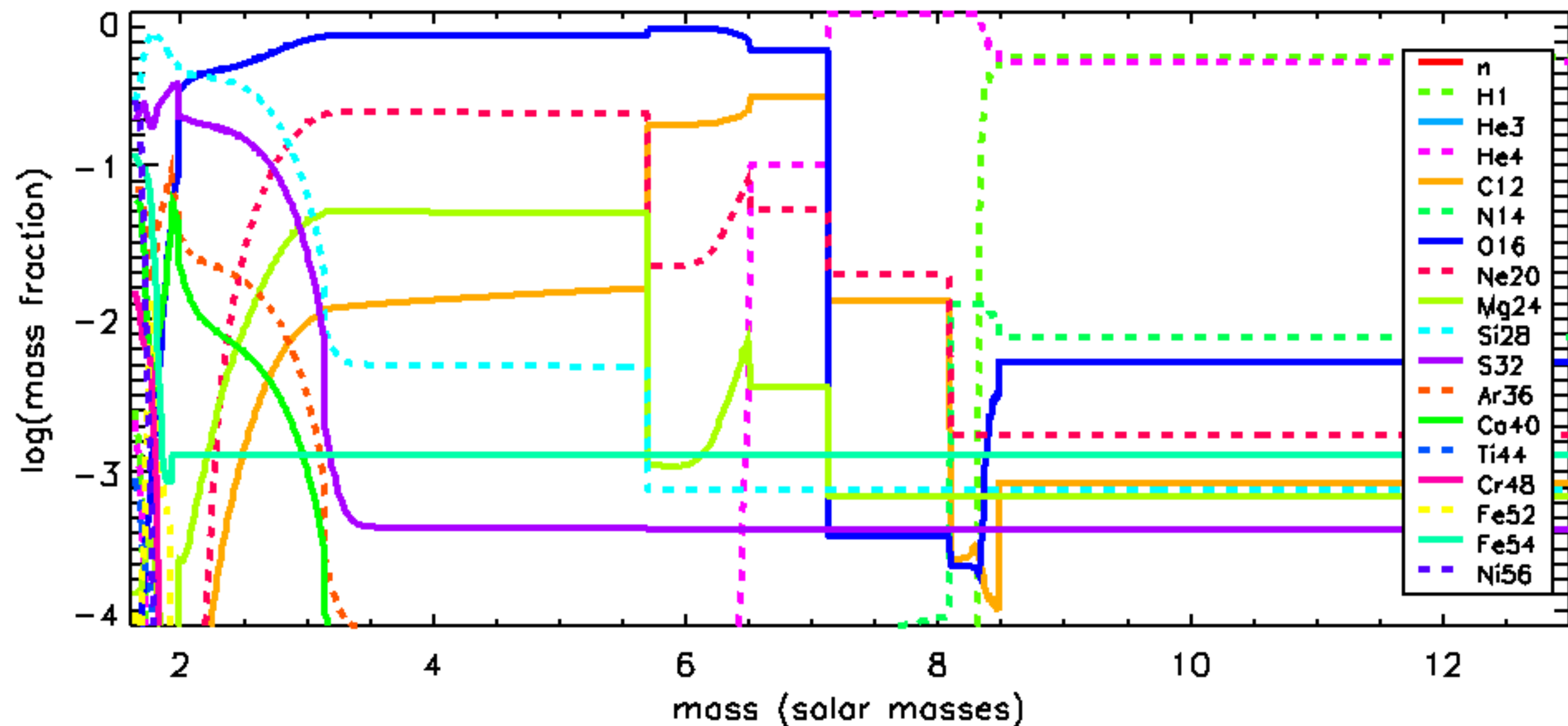
代表的な合成同位体

^{56}Ni , ^{44}Ti (鉄になる手前の元素増加)



衝撃波が通過すると
⇒ 爆発的元素合成

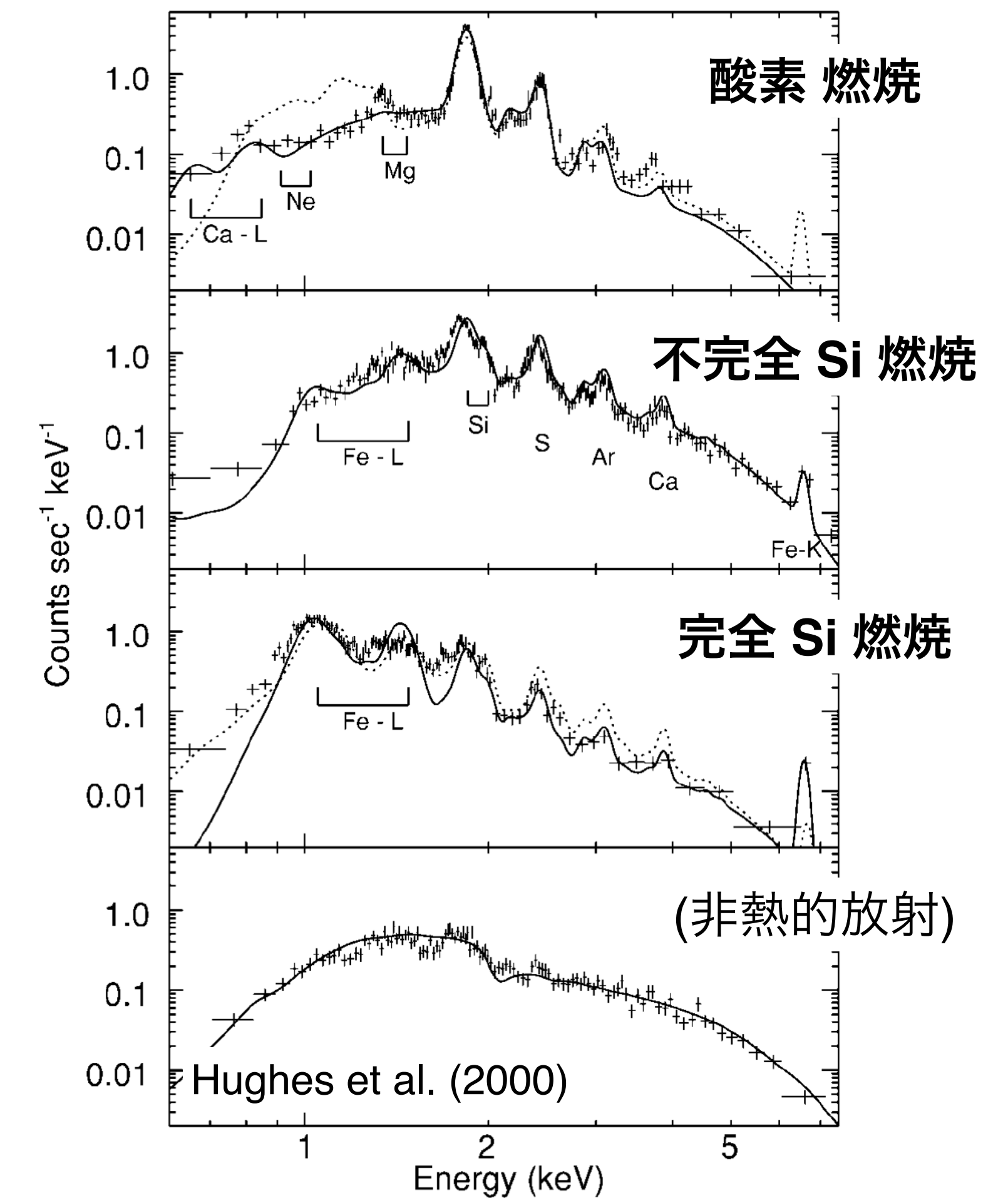
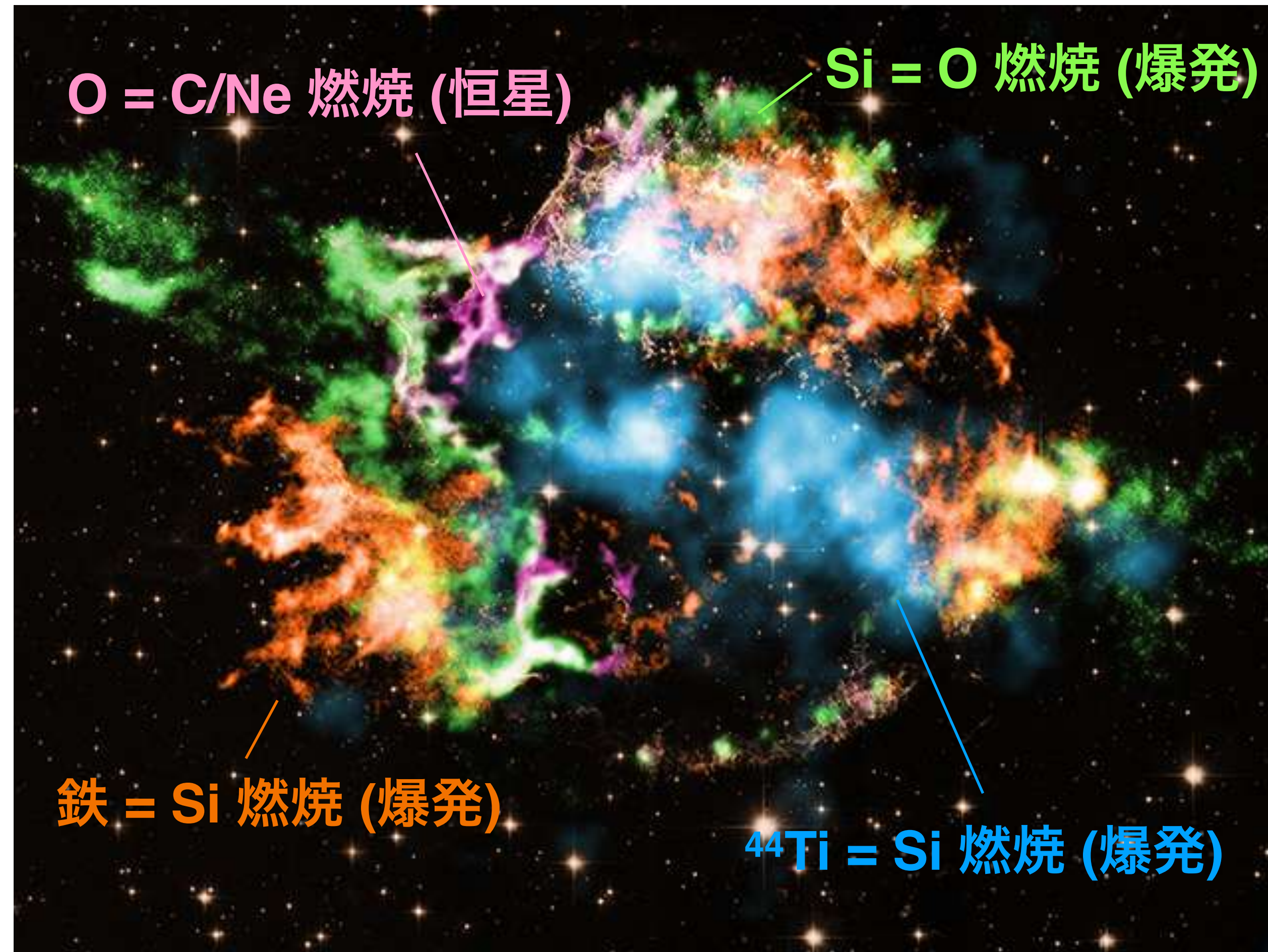
一次元シミュレーション
の場合、爆発しないので
衝撃波を手で与える



爆発的元素合成で新たな
元素が合成される領域は
中心のごく僅か

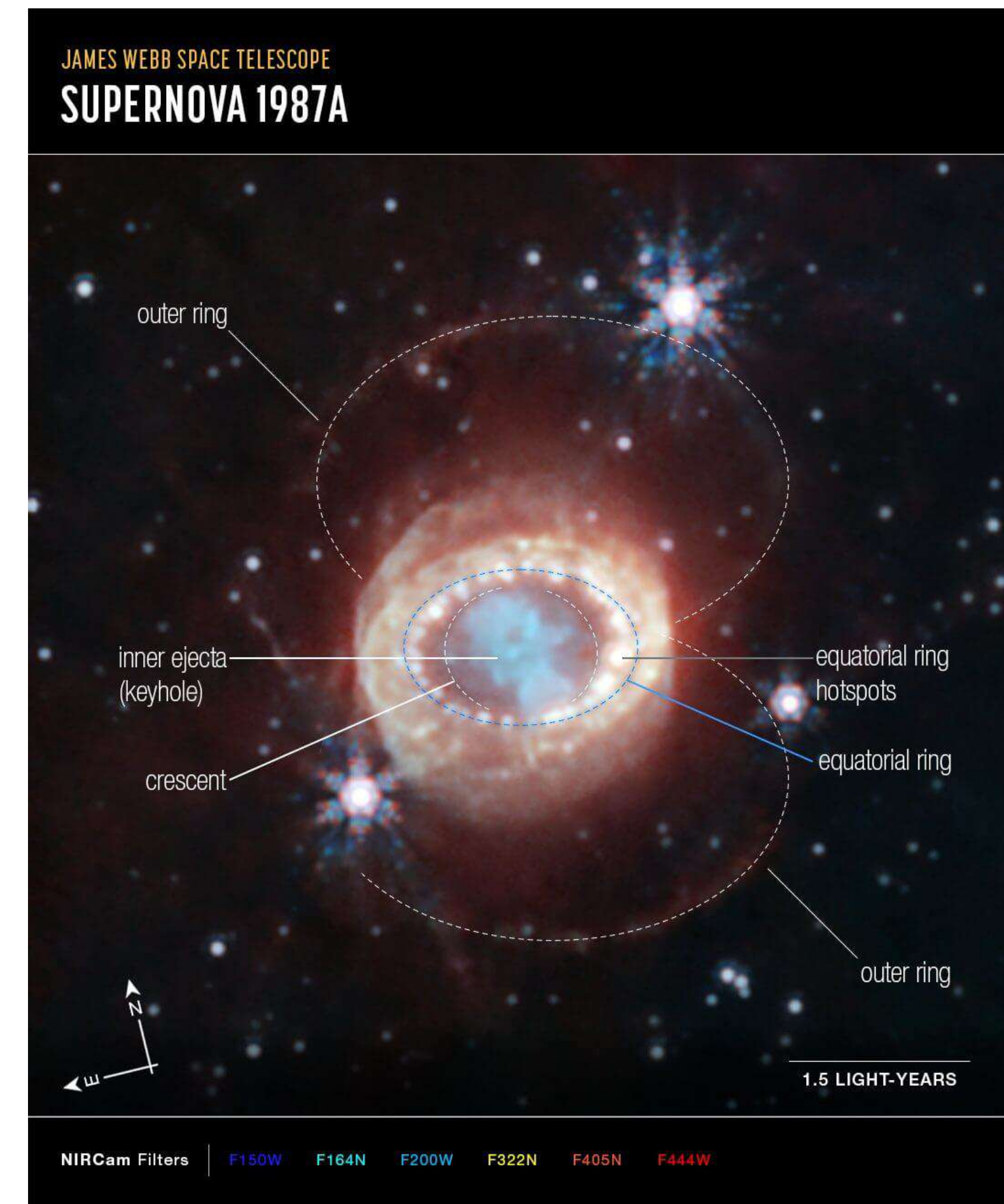
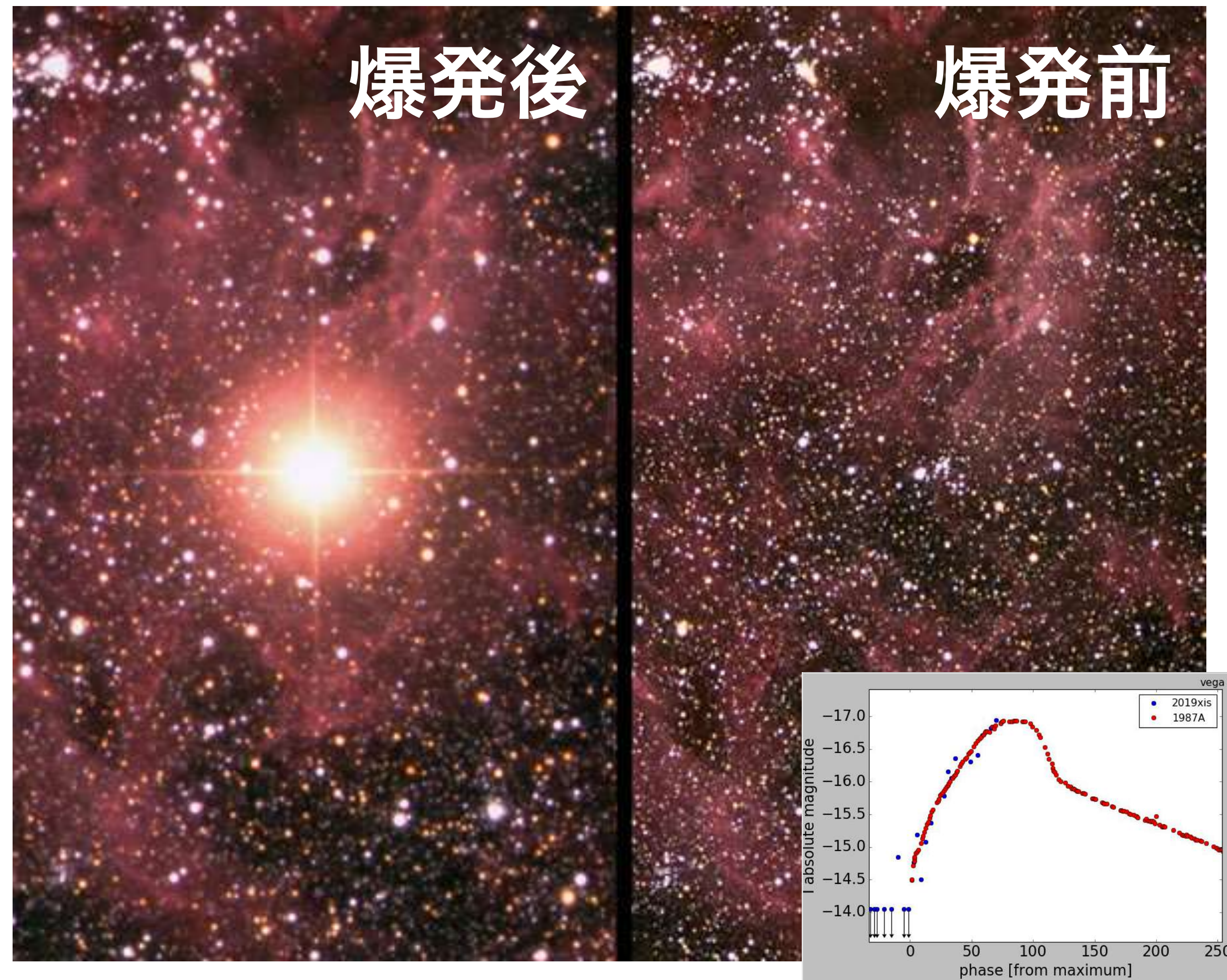
- 爆発エネルギー
 - 親星の組成 & 構造
 - どこから衝撃波
- などで結果が変わる

重力崩壊型超新星の爆発的元素合成の観測的検証



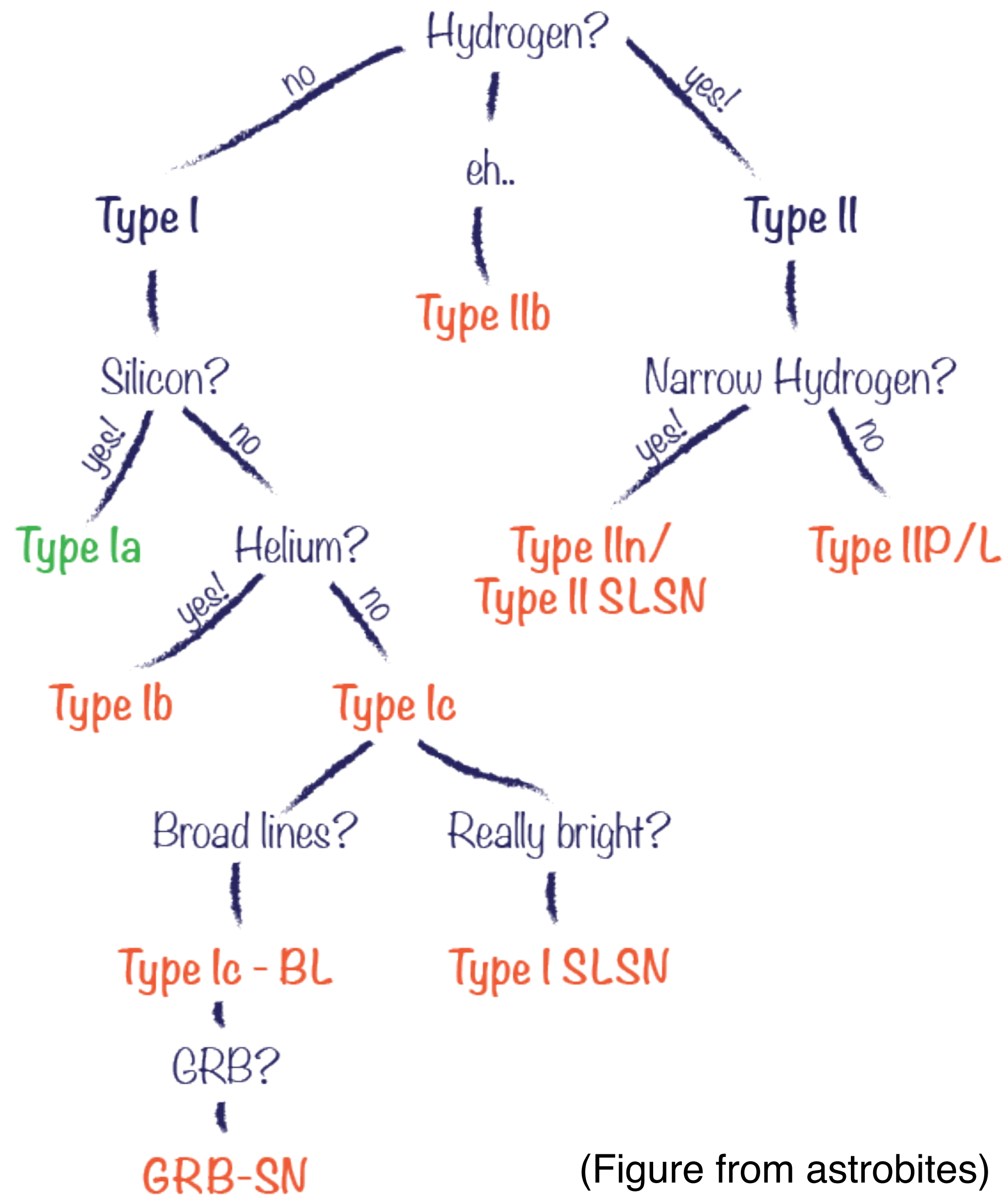
観測から、天体内部や超新星爆発による核融合反応を議論可能

重力崩壊型超新星の観測例：超新星 1987A



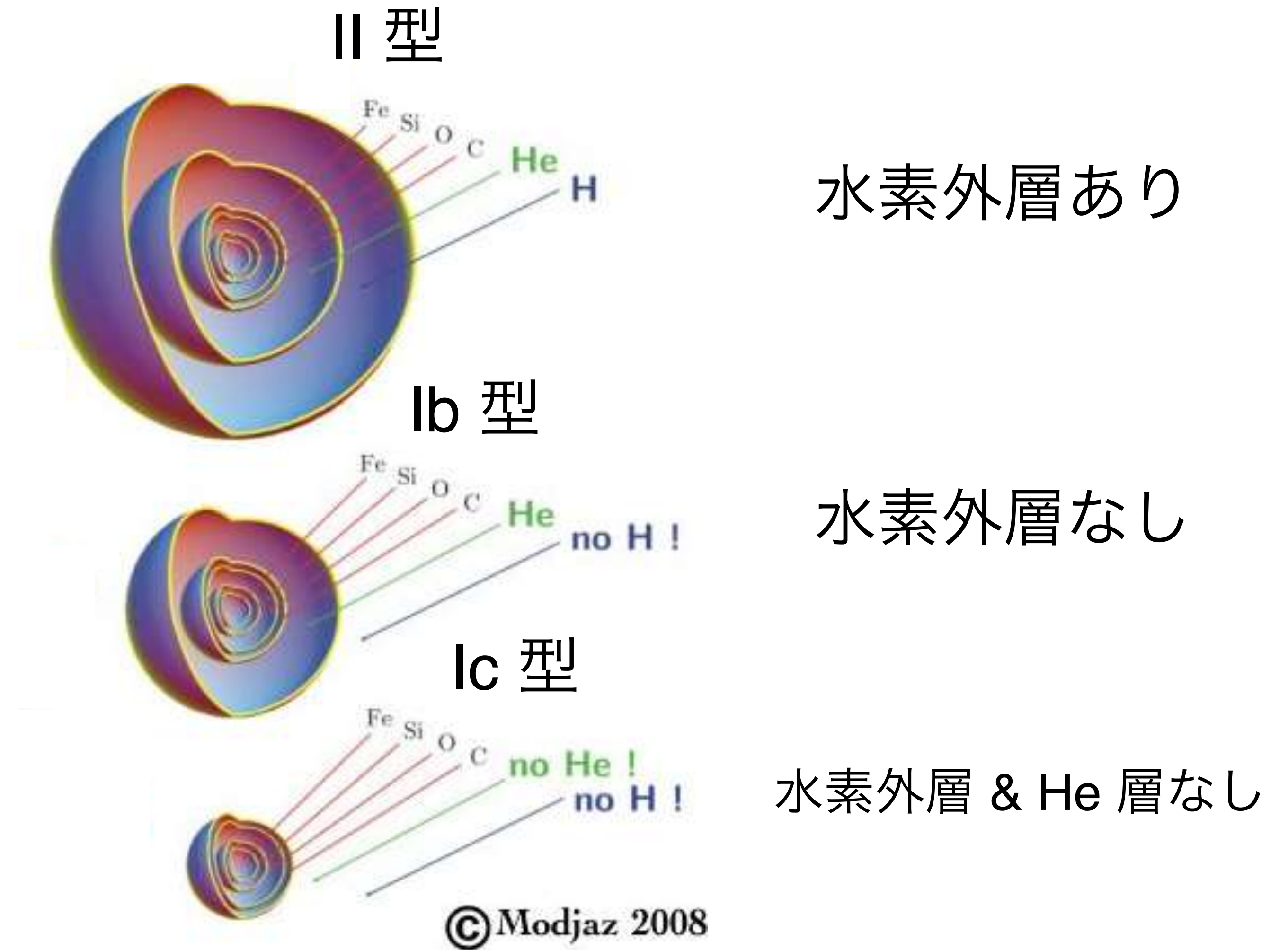
カミオカンデのニュートリノ検出 (ノーベル賞) で有名な天体で、現在では広がった構造を持つ

The Supernova Zoo



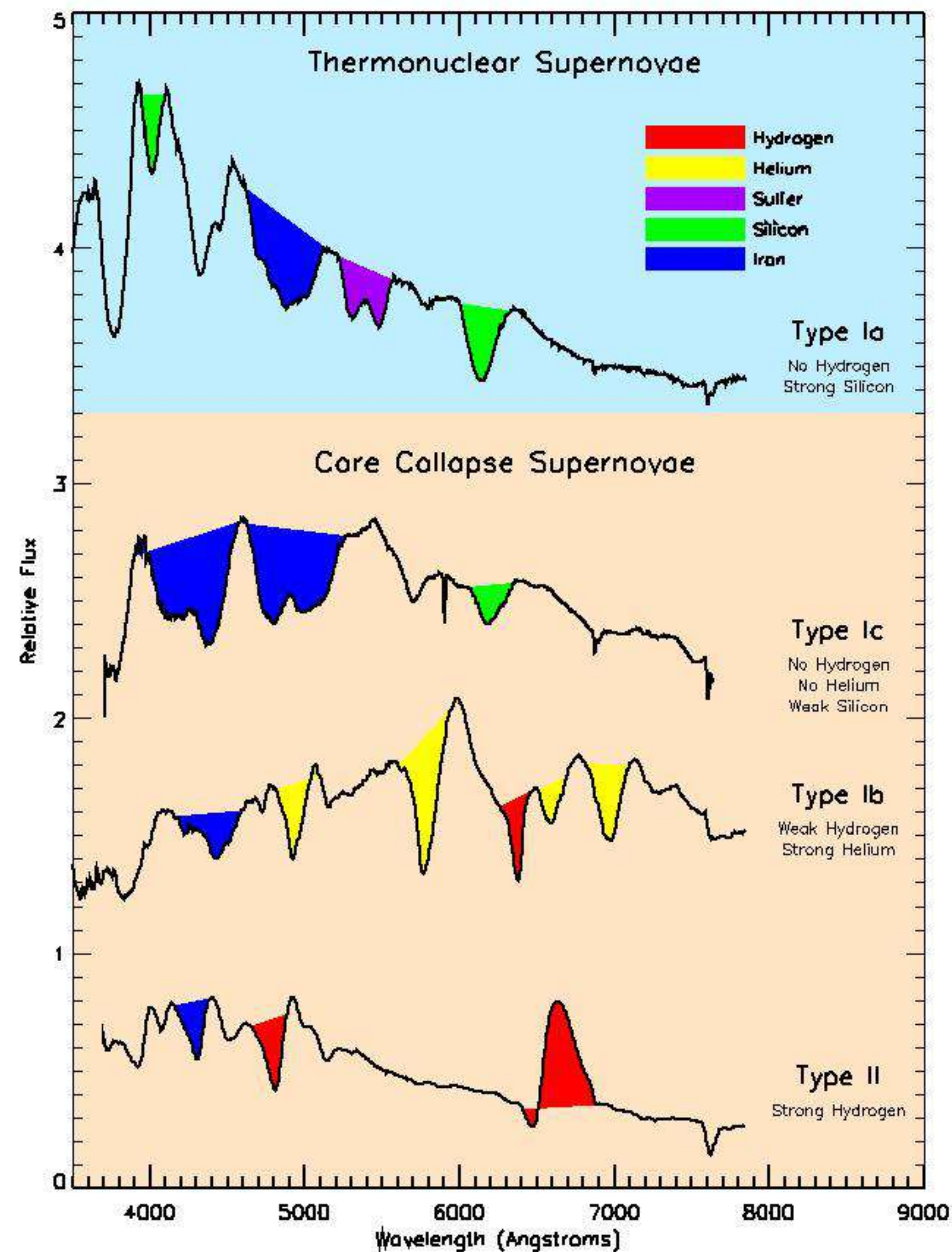
(Figure from astrobites)

超新星の分類・多様性

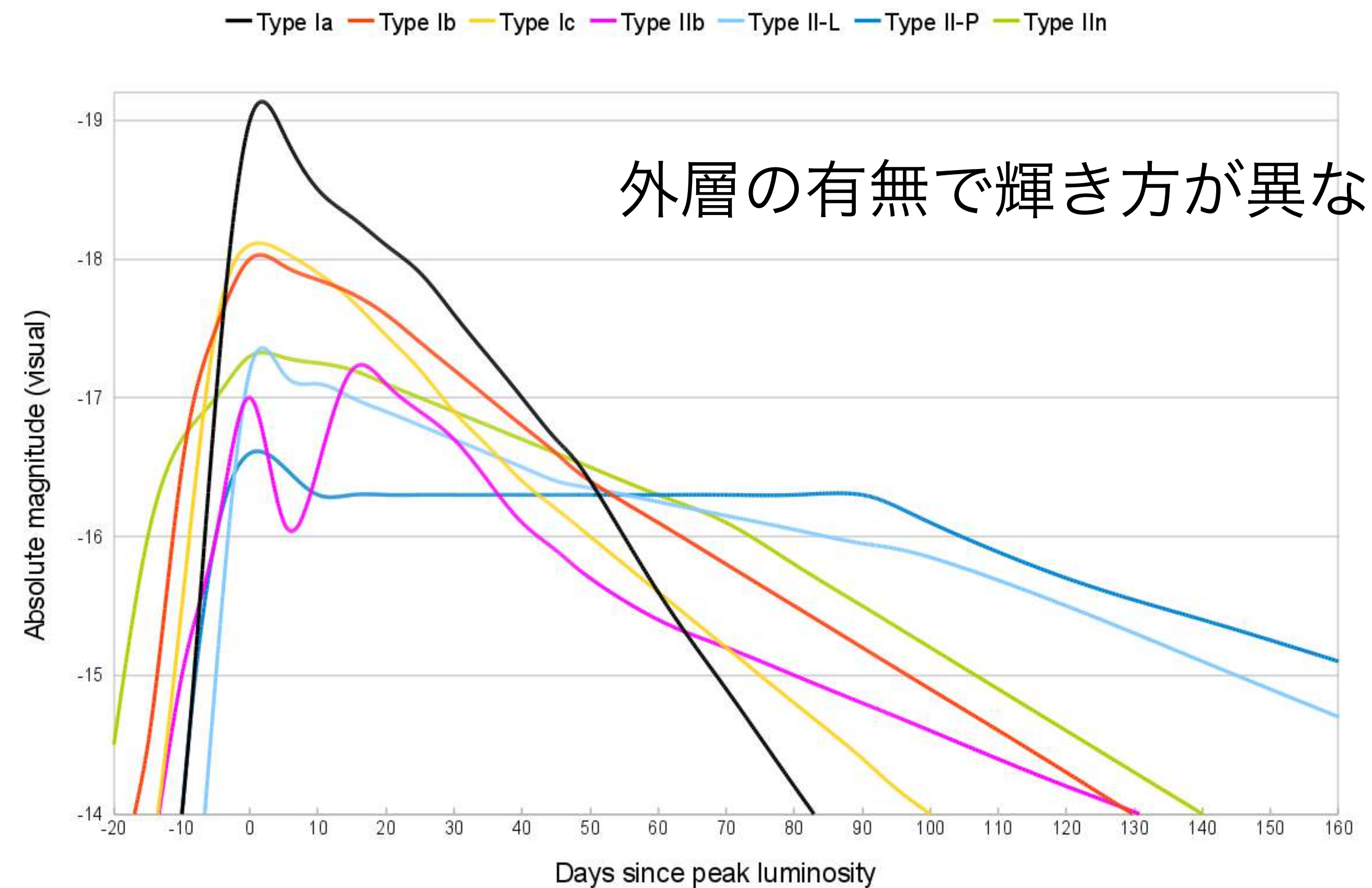


基本的には外層の有無 (+明るさ) の違い

重力崩壊型 超新星の多様性が観測からどう分かるか？



スペクトル分光と光度曲線 (明るさの時間変化)



外層の有無は、星の死に際の状態の情報

なぜ、外層が剥がれている場合があるのか？



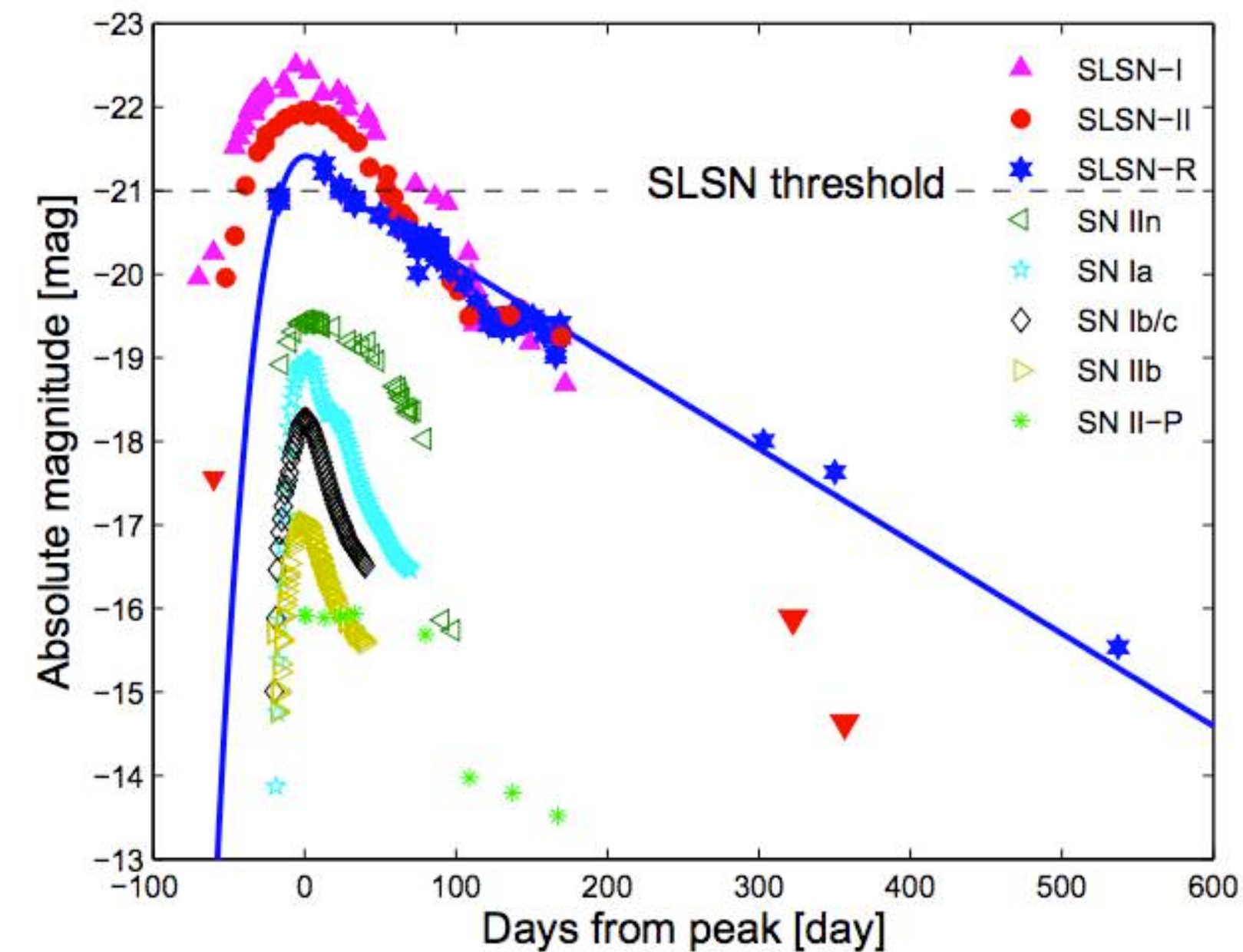
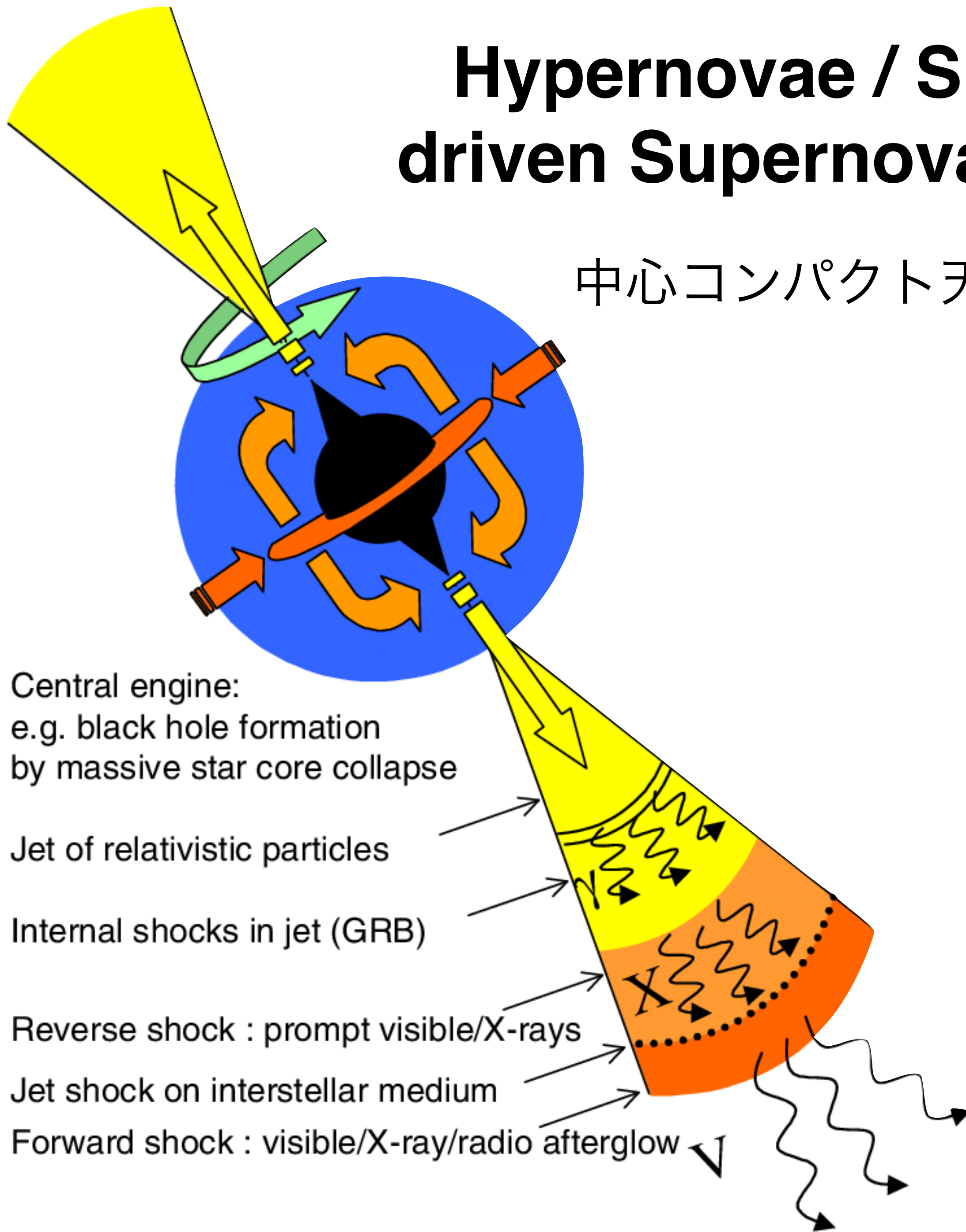
基本的にはこの二つのパターンで、外層がない状態で超新星になる場合がある

特殊な重力崩壊型超新星の例

1. 中心天体で明るい超新星 (明るい)
2. 衝突で明るい IIn 型超新星 (明るい)
3. 電子捕獲型超新星 (暗い)
4. Ultra-stripped 超新星 (暗い)
5. Failed Supernova (爆発失敗)

Hypernovae / Super Luminous Supernovae / Jet-driven Supernovae / Long Gamma-ray Burst*/ FBOT

中心コンパクト天体 (ブラックホールや中性子星) の影響で明るい

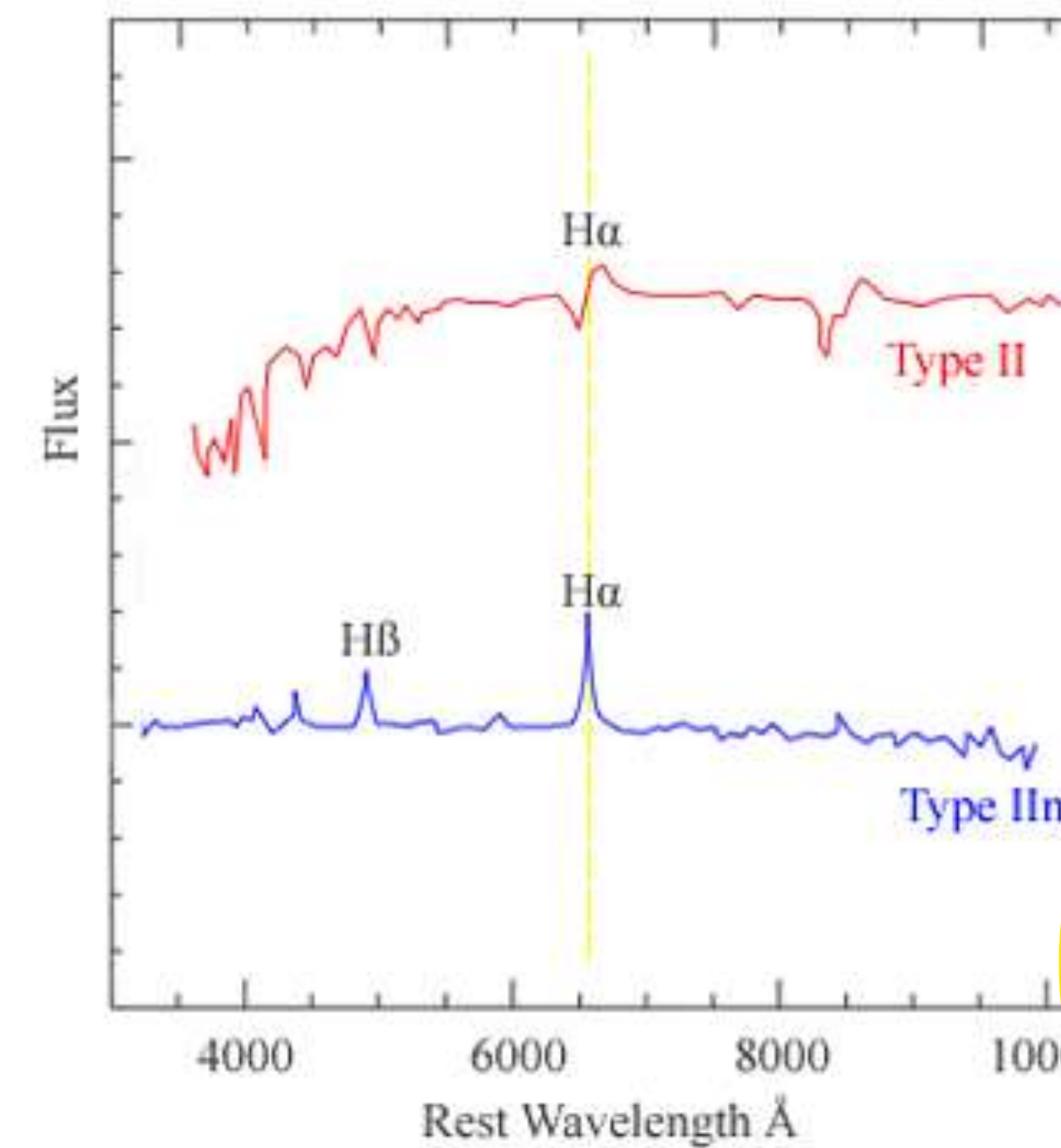


- 中心の回転ブラックホールへの質量降着
- 中心の強磁場中性子星の回転エネルギー

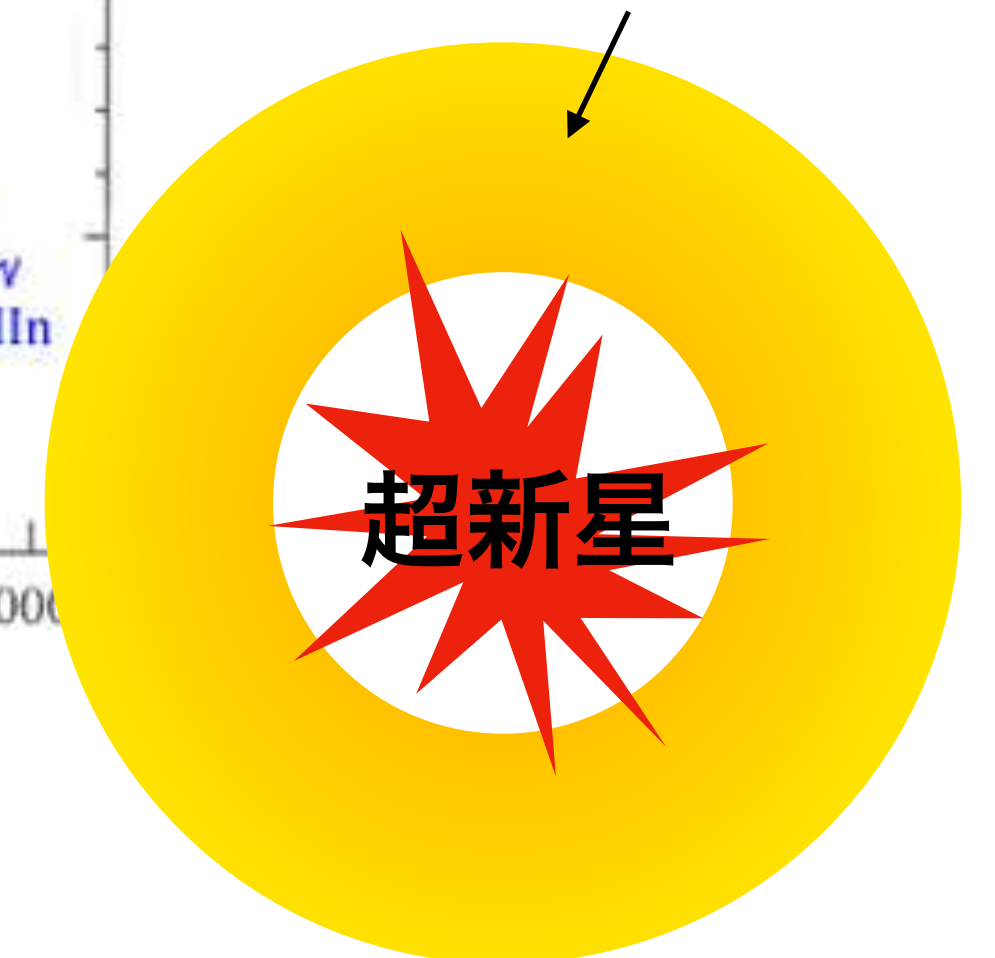
*Short Gamma-ray Burst は中性子星合体起源と考えられている

中心起源ではなさそうで明るい $\Rightarrow$ IIn 型超新星

星の手前の大量の物質と衝突して明るい (衝突駆動？な明るさ)



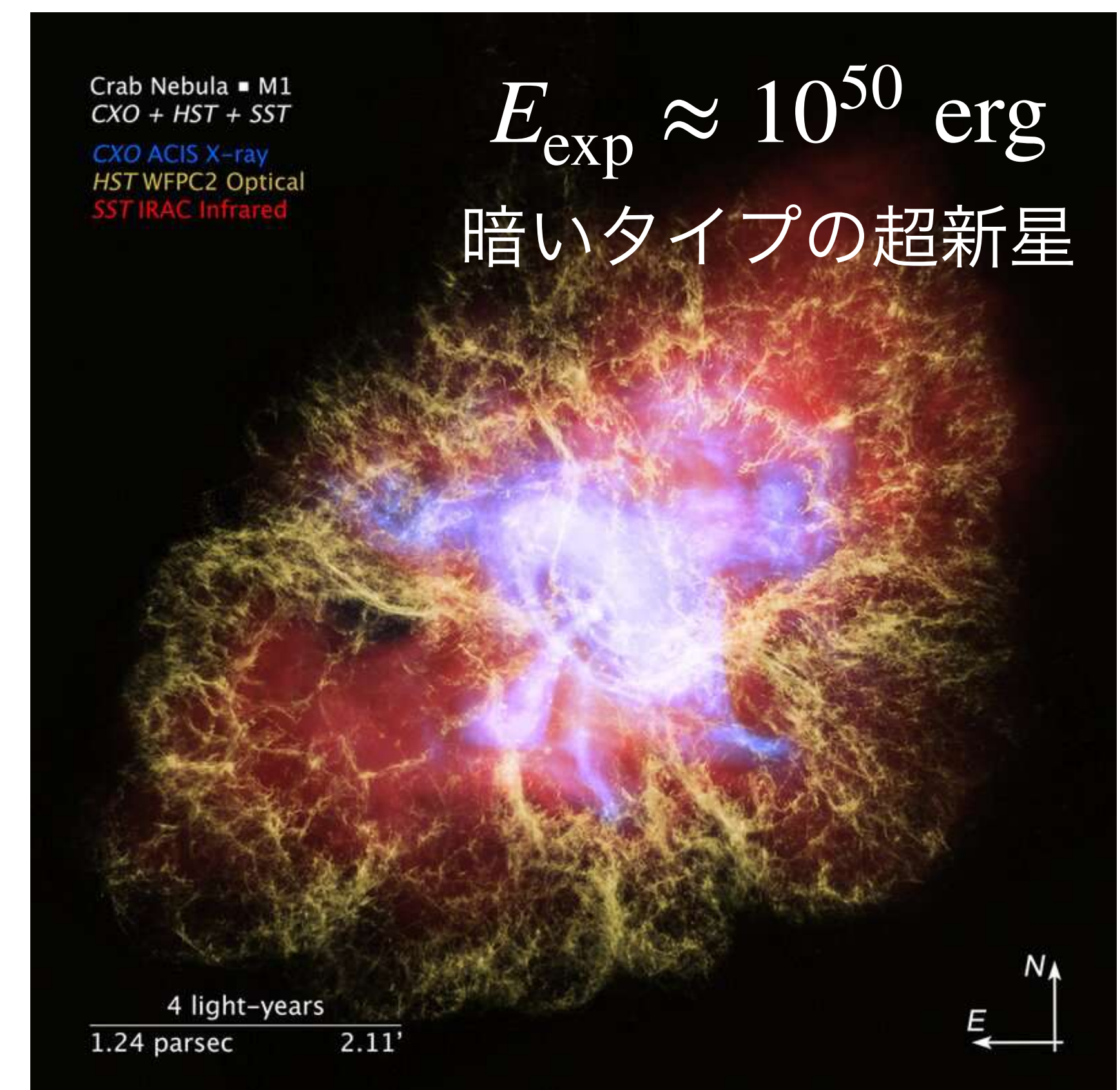
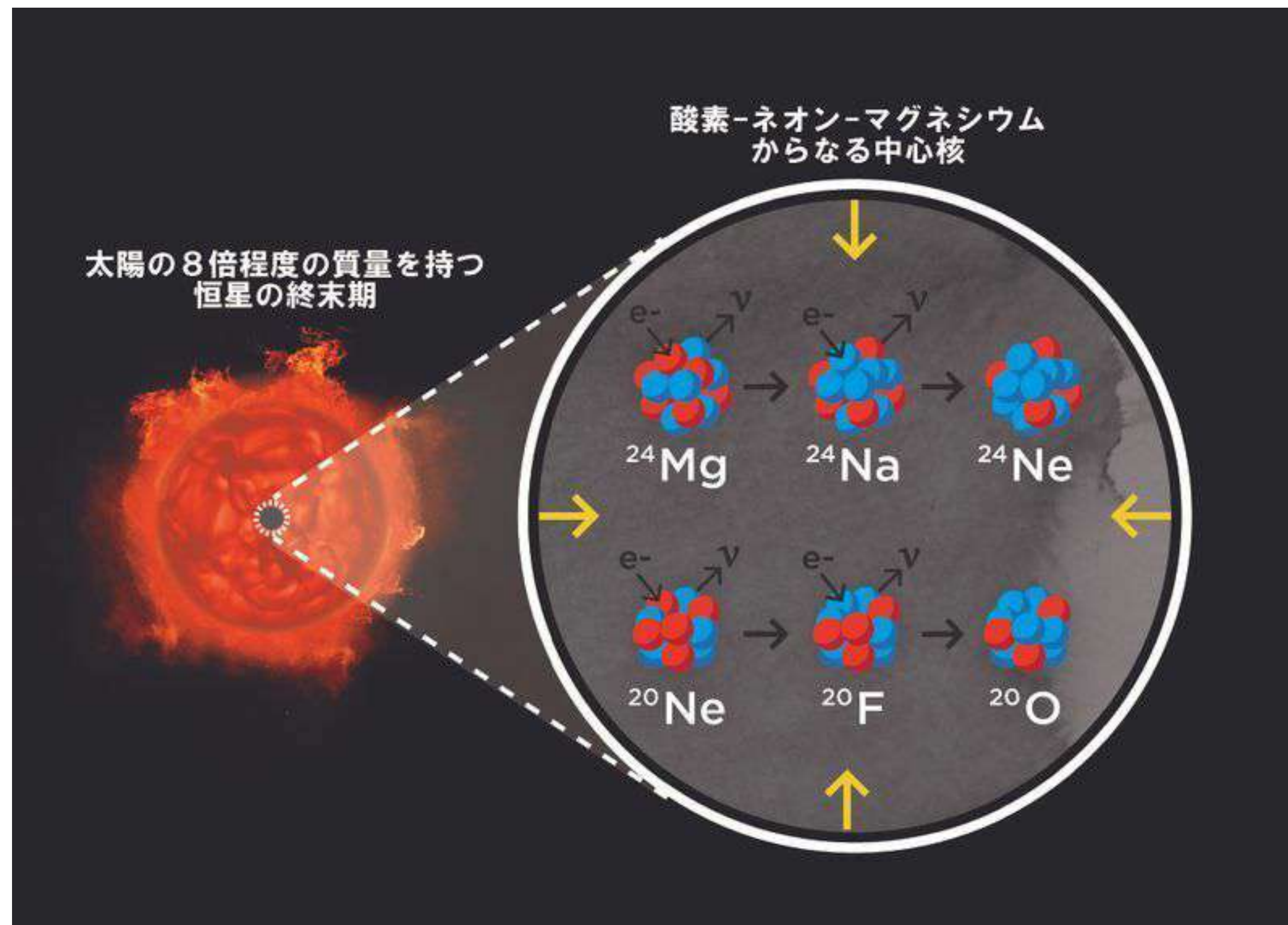
手前に濃い分厚い
星周物質



大質量星の死に際に、原因
不明の大規模な質量放出？

電子捕獲型超新星

鉄コアを作れなかった大質量星 (~8-10 太陽質量) の最期



鉄の光分解ではなく、電子捕獲で中性子星へ崩壊：かに星雲がその候補

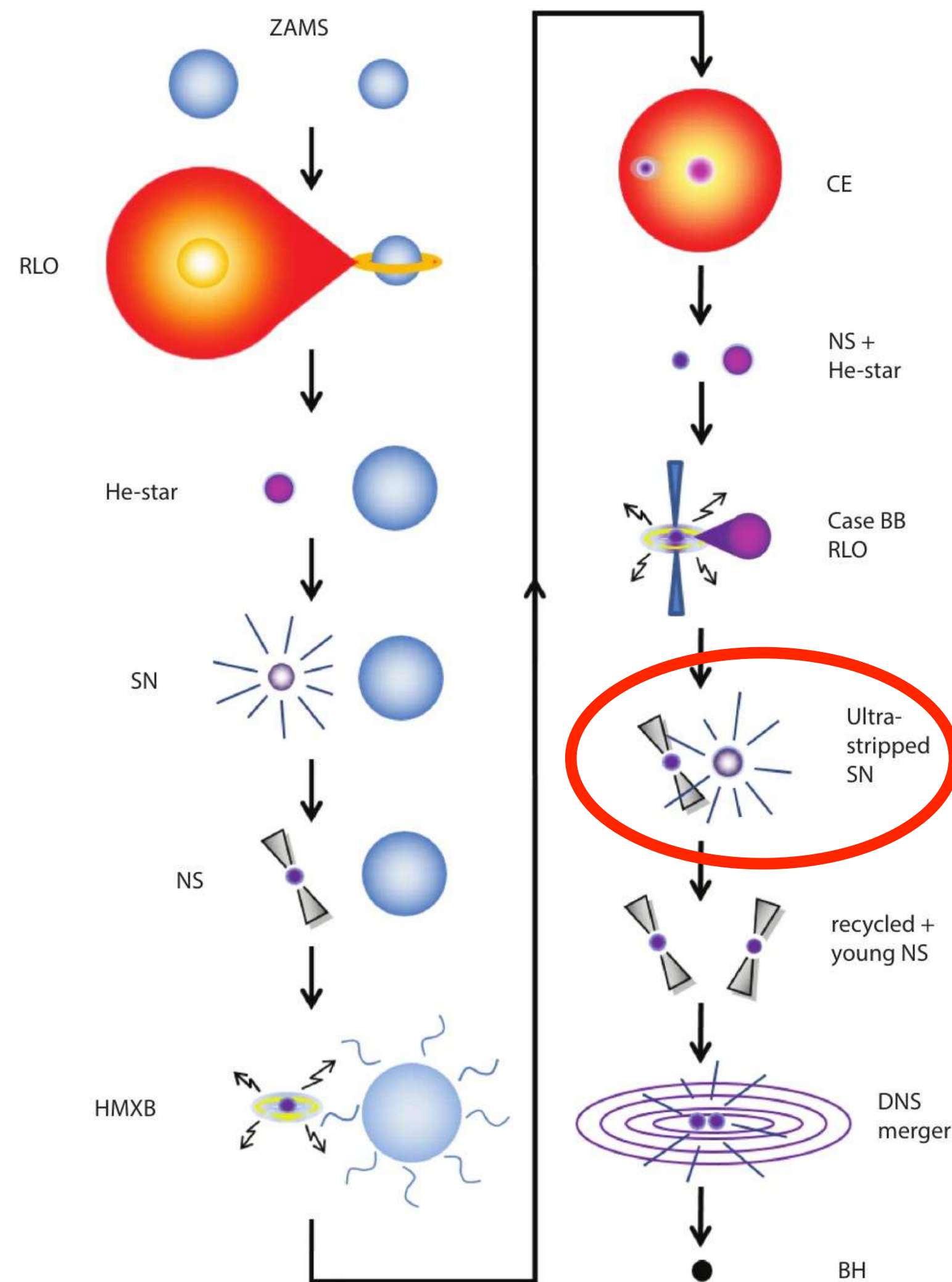
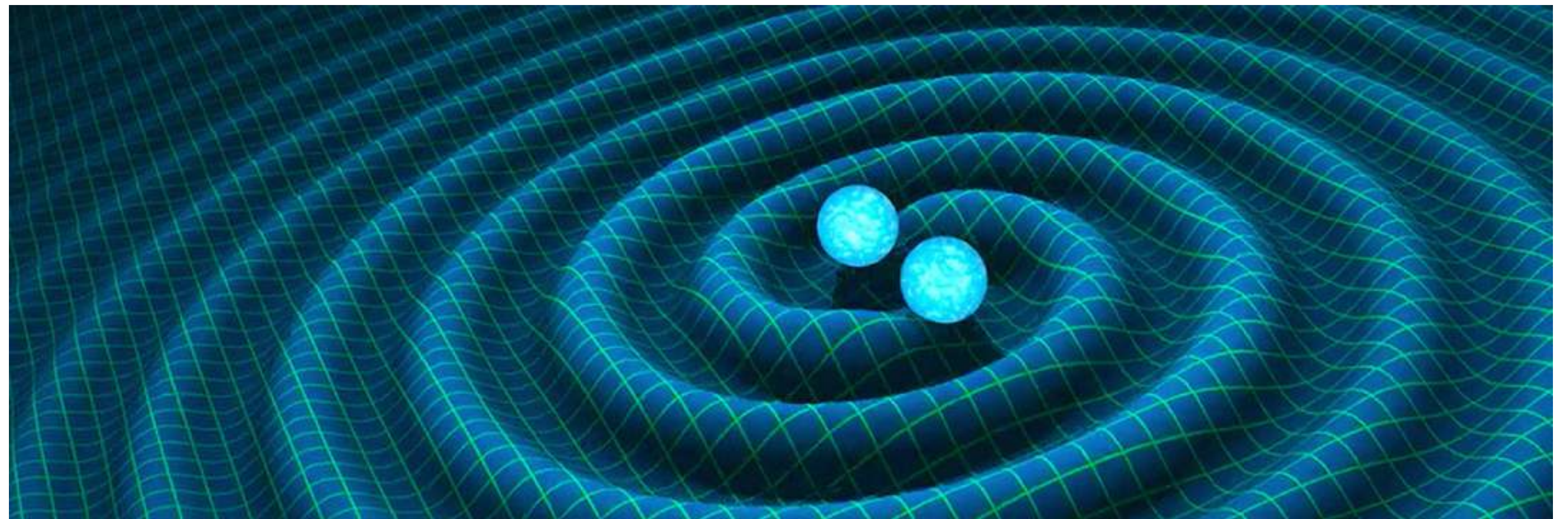


Figure 1.1. Formation model of a close double neutron star (DNS) system as final product of the evolution of a massive close binary. The DNS system may eventually merge and leave a solitary BH remnant. The same model, scaled up to higher initial stellar masses, is one of the main scenarios to explain the formation of double BHs (see Chapters 10, 12, and 15). After Tauris et al. (2017).

Ultra-stripped Supernovae

重力波源「連星中性子星」の作り方に関連



コアまで剥ぎ取られている
⇒ “Ultra-stripped”

爆発で放出される物質質量
と爆発エネルギー

$$M_{\text{ej}} < 1 M_{\odot}$$

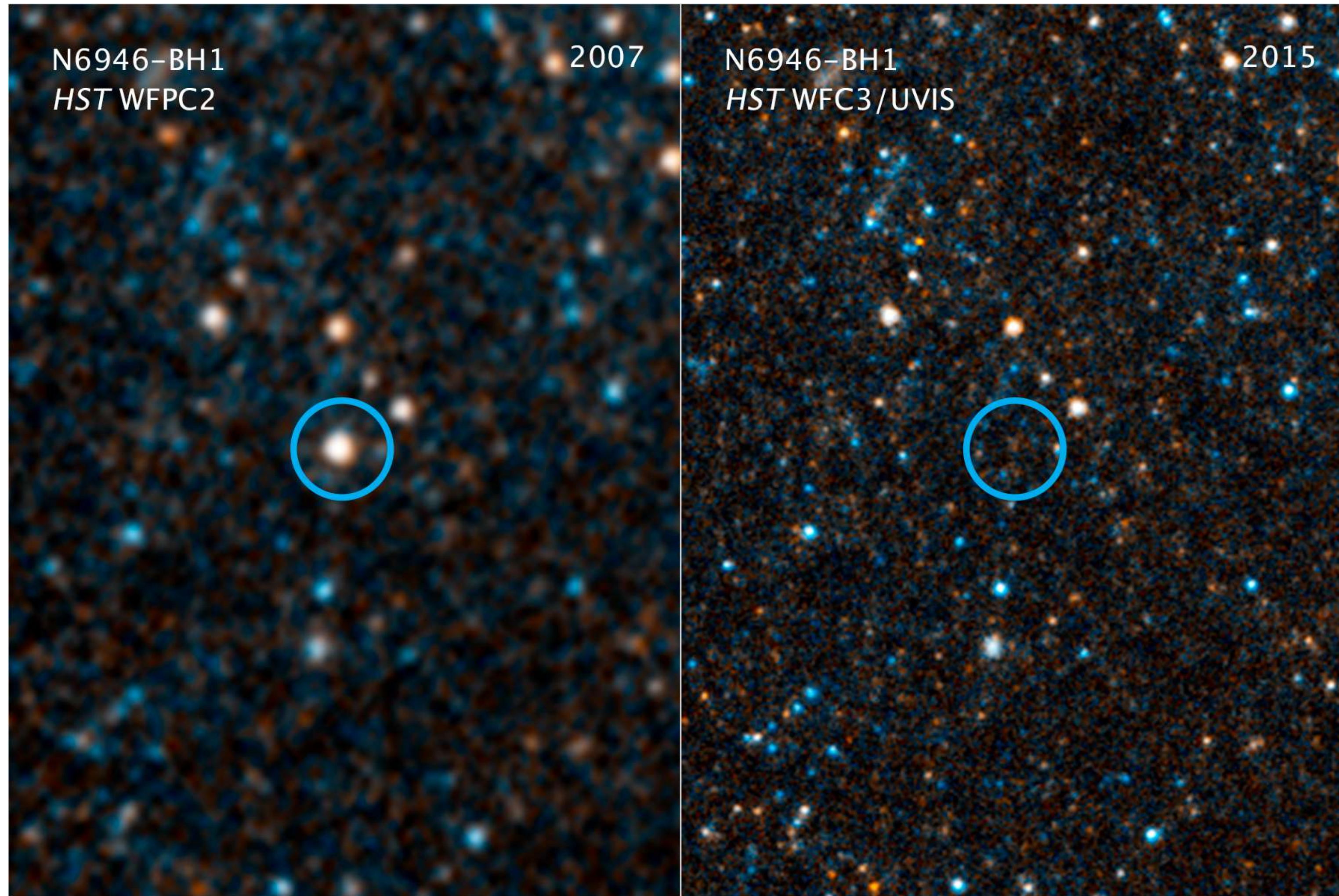
$$E_{\text{exp}} \approx 10^{50} \text{ erg}$$

中性子星

C/Oコア

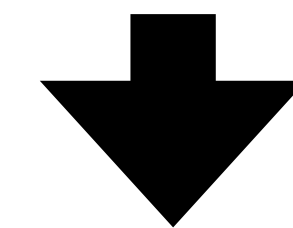
暗いタイプの超新星

Failed Supernovae : 爆発失敗 & ブラックホール形成？



$\sim 10^6$ 個の赤色超巨星 in 10 Mpc

$\sim 10^6$ yr : 赤色超巨星が死ぬまで



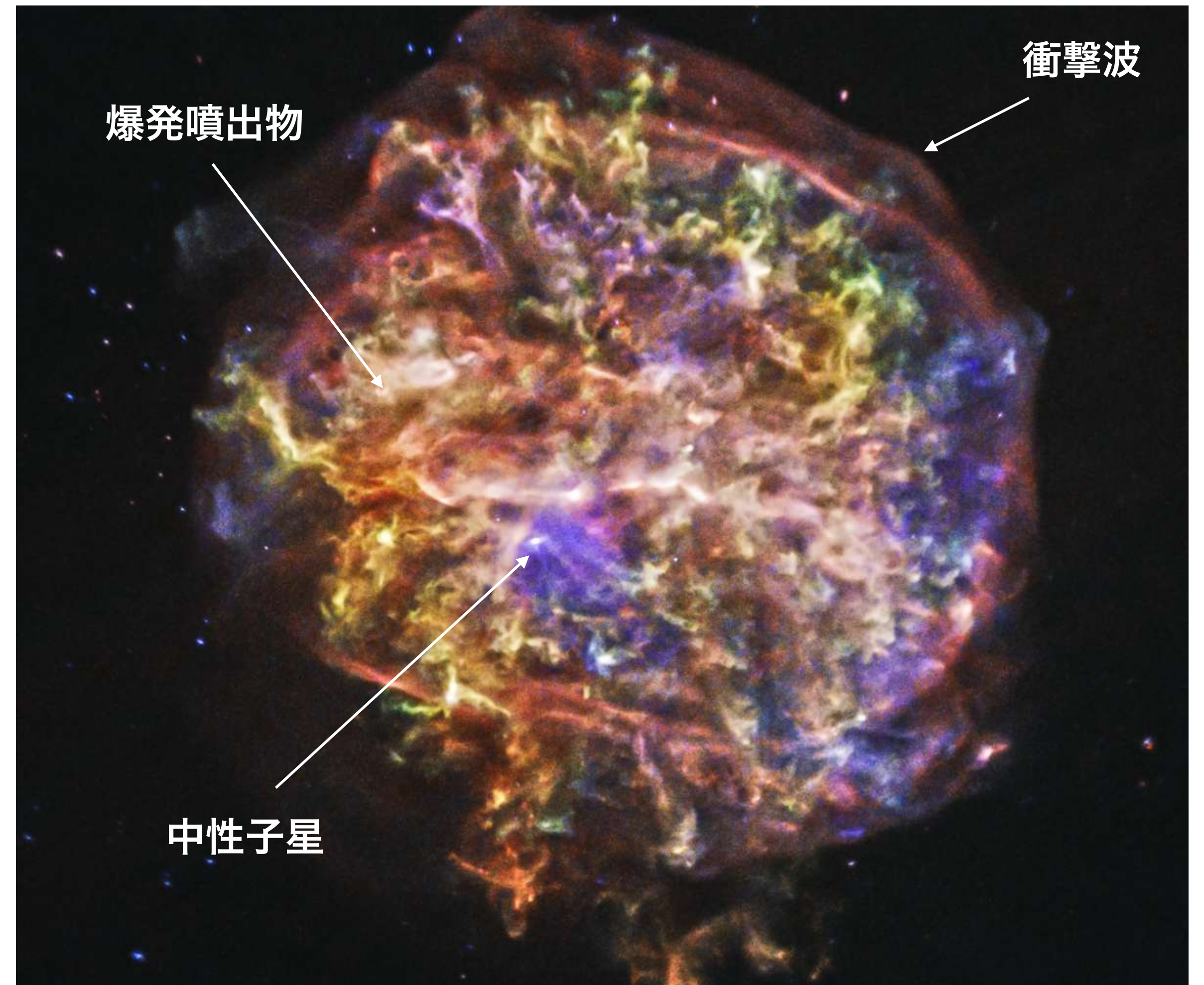
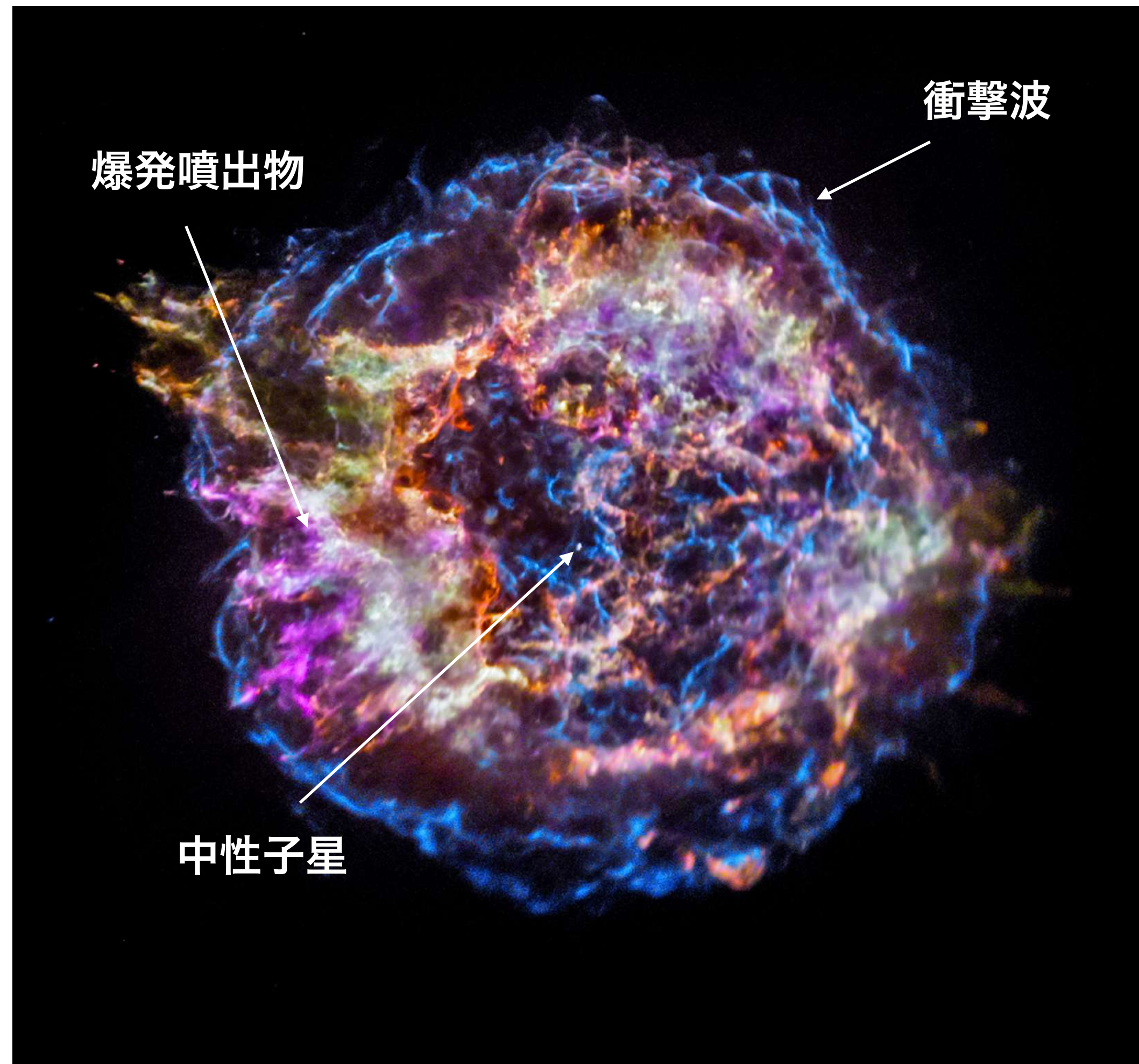
死ぬ星 ~ 1 個/yr

10年単位でモニターし続ければ、
10個単位で星の死に方の調査可能

消えた星!?! $\Rightarrow$ BH 形成!?!

~ 18 - 25 太陽質量の赤色超巨星が
数年のうちに消失

重力崩壊型超新星の“残骸”の観測



超新星は“点源”だが、超新星残骸では空間構造がわかる