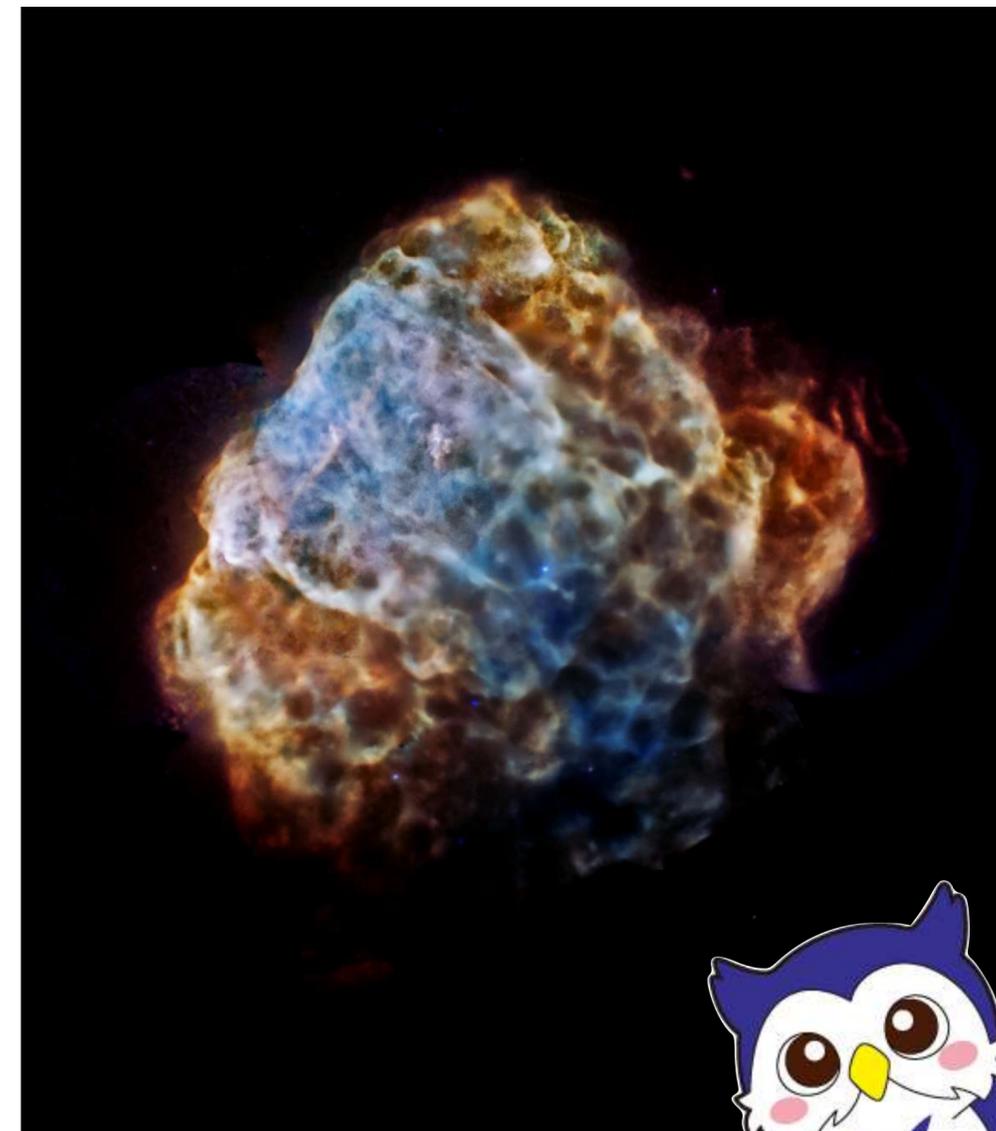


# X線観測で探る超新星残骸と星の進化のつながり

酸素が豊富な超新星残骸たち



2026/3/9 超新星ニュートリノ研究会

佐藤寿紀 (明治大学)

今日の主役  
「カシオペア座A」

Si-rich Jet

$^{44}\text{Ti}$

Counter Jet

NS

kick

Fe-rich plume

# 超新星“残骸”の面白さ

- 中性子星が見える
- 放射性同位体
- 様々な元素とその分布

超新星残骸が絡むテーマ

コンパクト天体

恒星進化

超新星機構

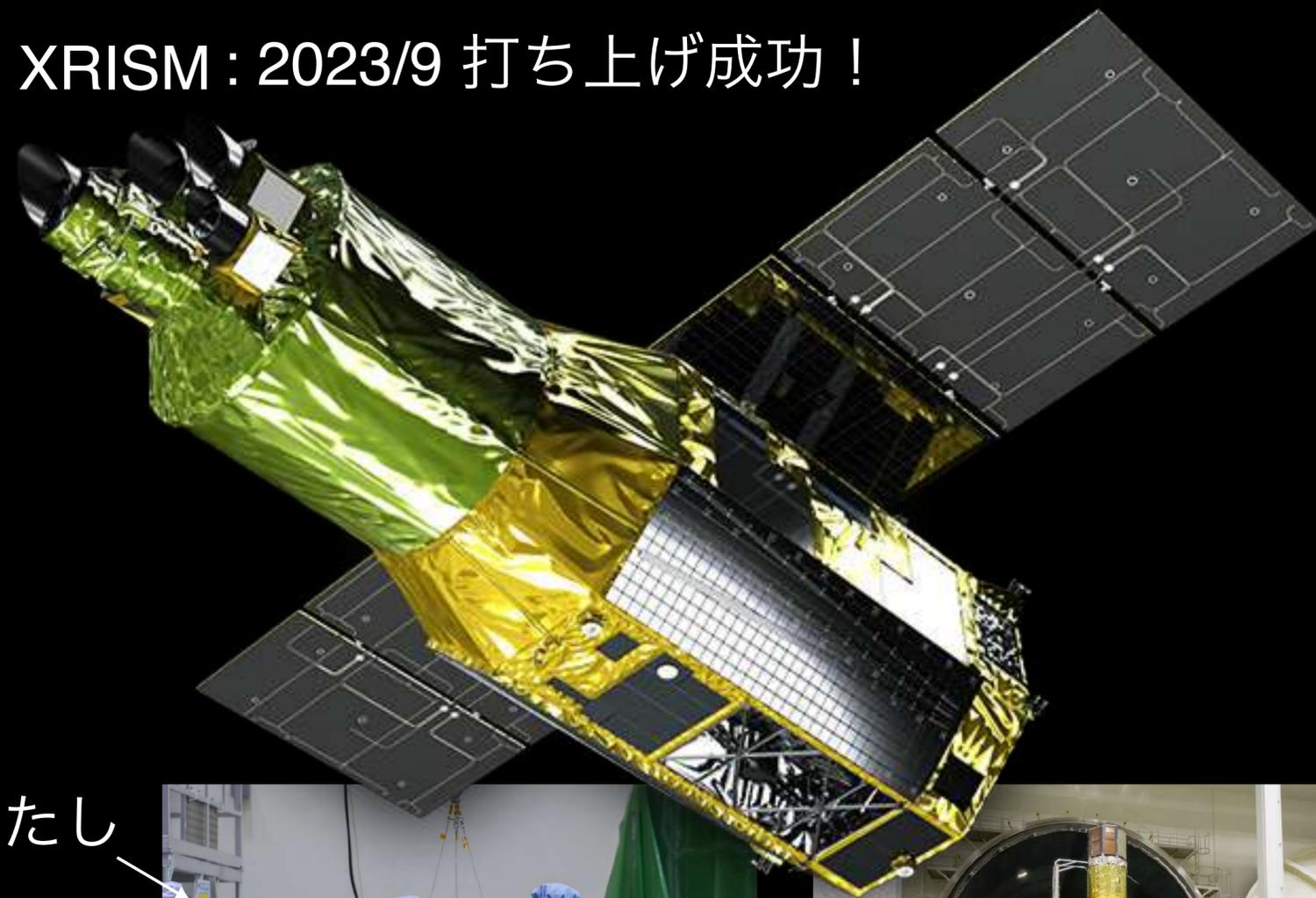
原子核反応

## 天体物理の幅広いトピック！

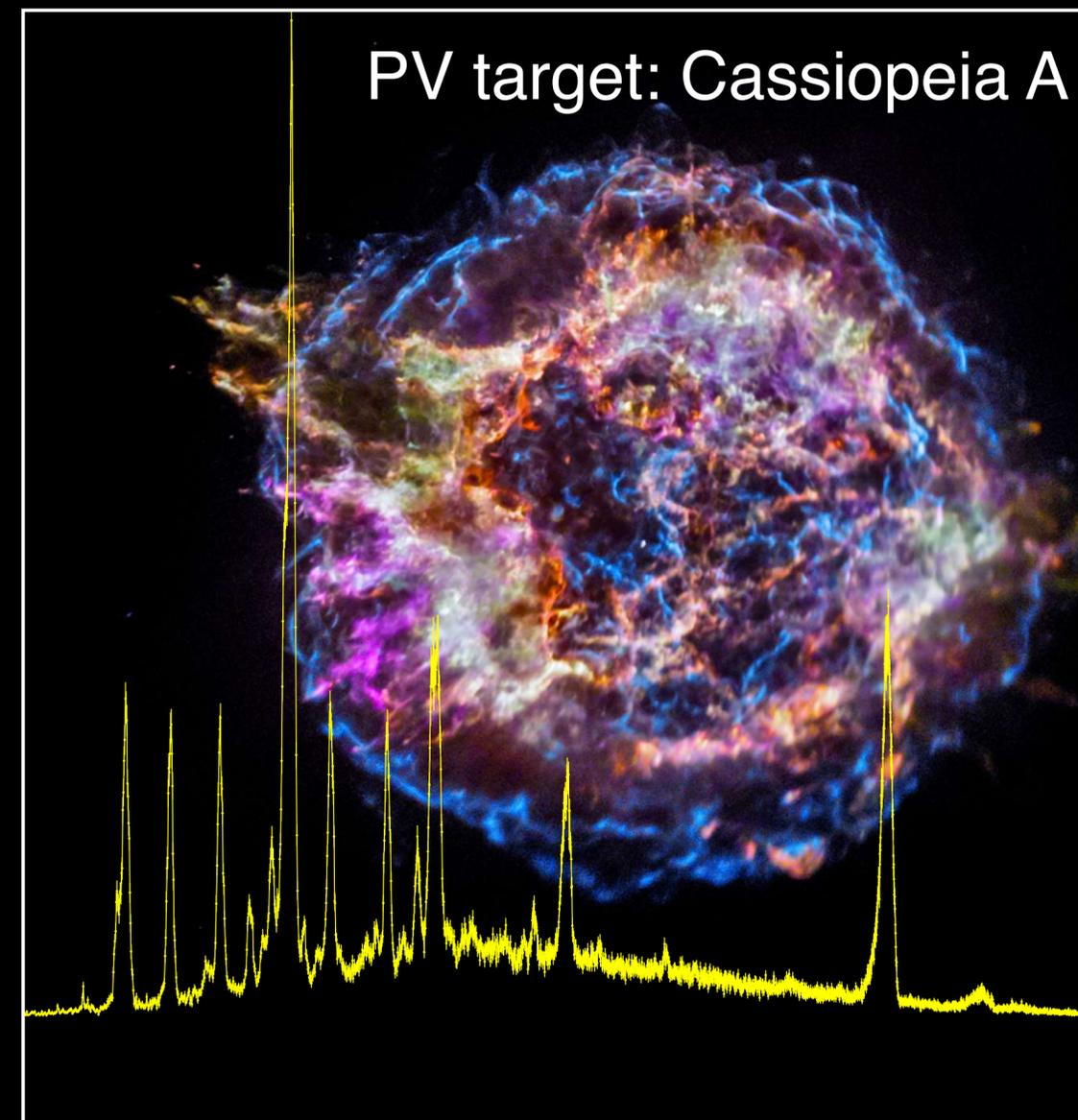
ニュートリノ関連もぜひやりたい

# XRISM 衛星の精密X線観測と元素合成

XRISM: 2023/9 打ち上げ成功!



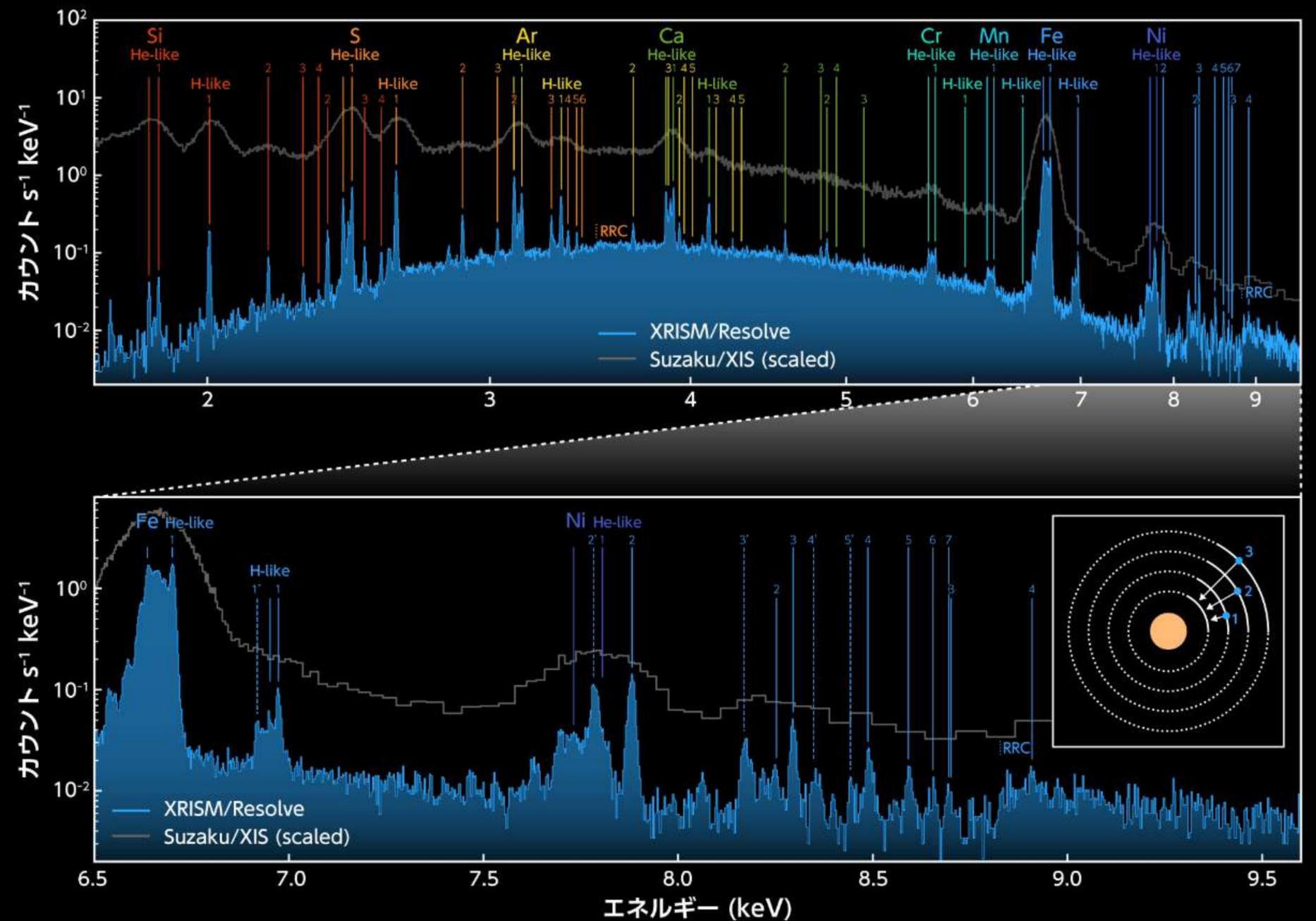
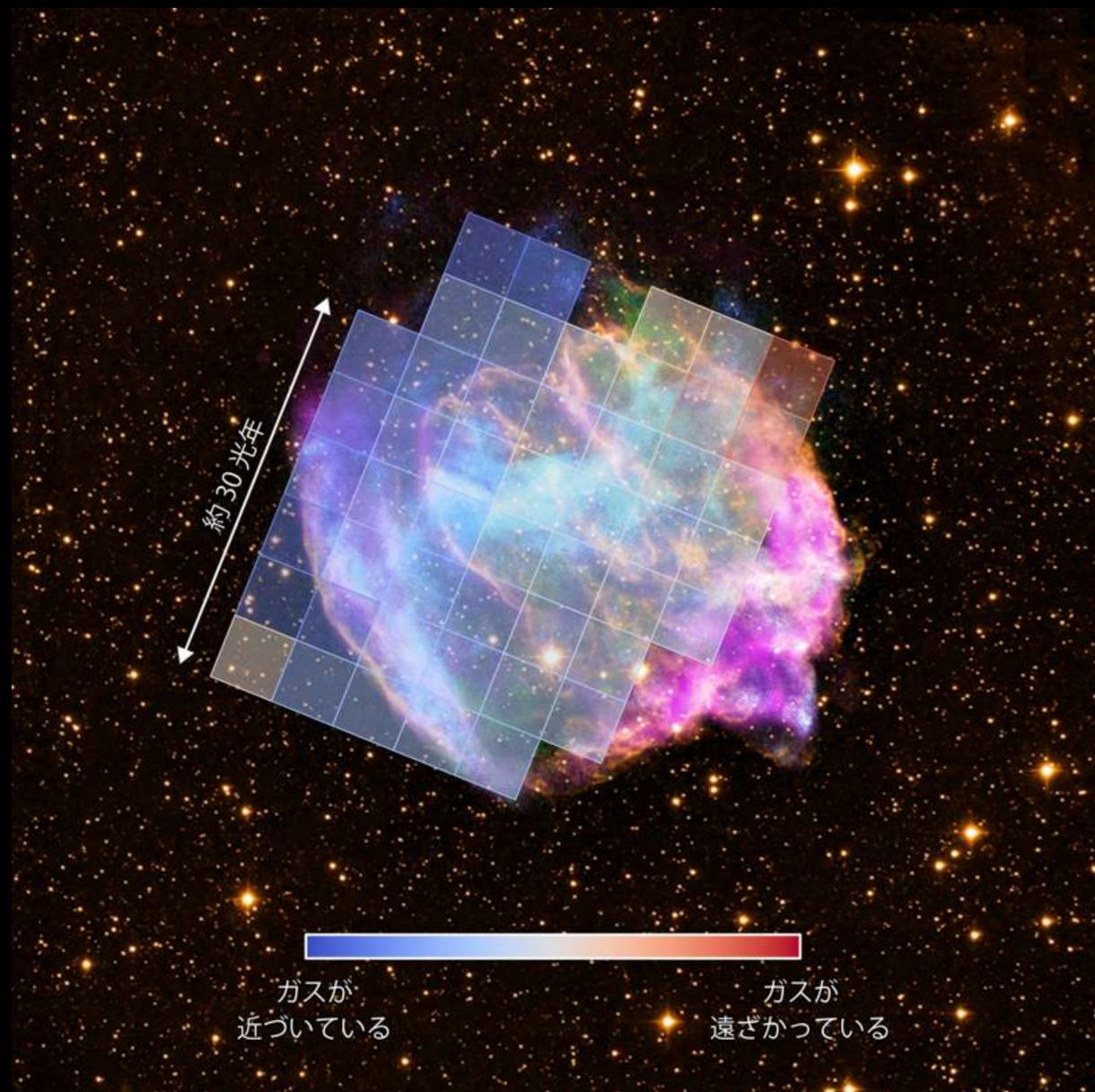
わたし



T. Sato is the sub-leadear

ぜひ、恒星・超新星物理開拓の新たなツールとして活躍させたい!

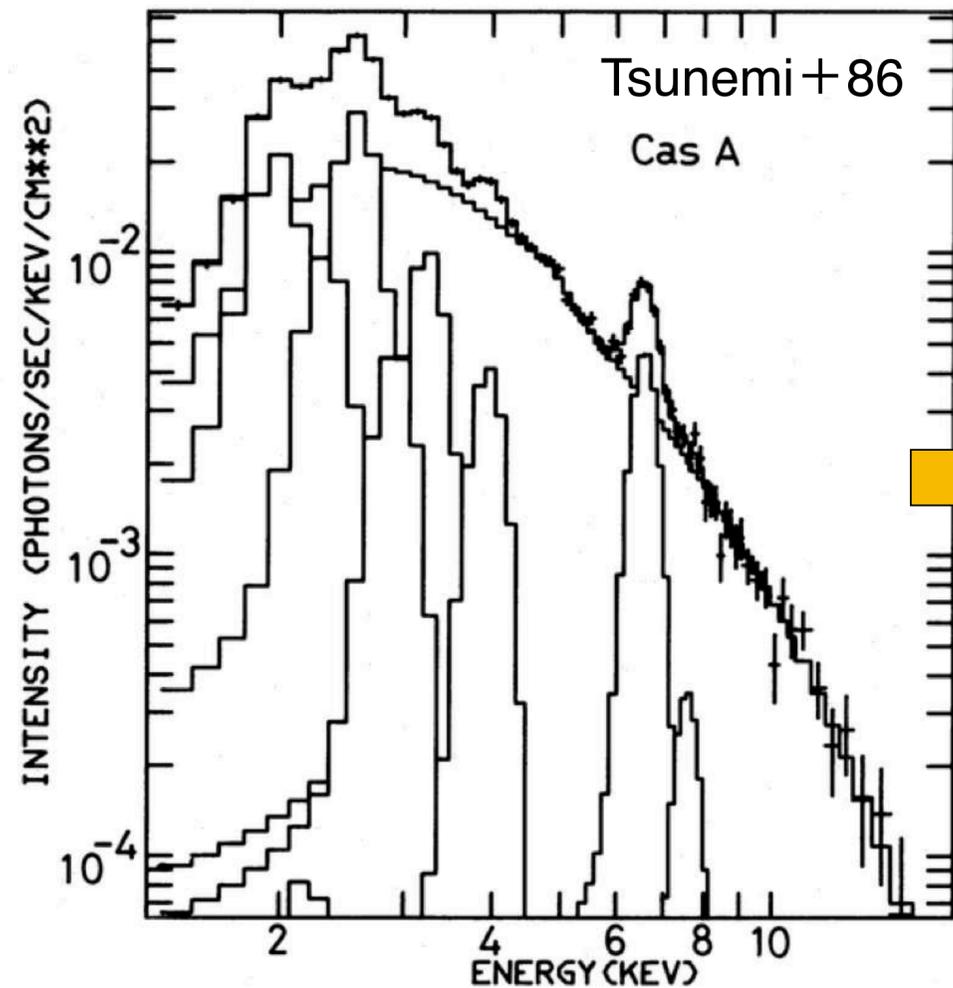
# XRISM 衛星の精密X線観測と元素合成



# X線による超新星残骸観測の変貌

~1980年代

ガス検出器 (比例計数管)

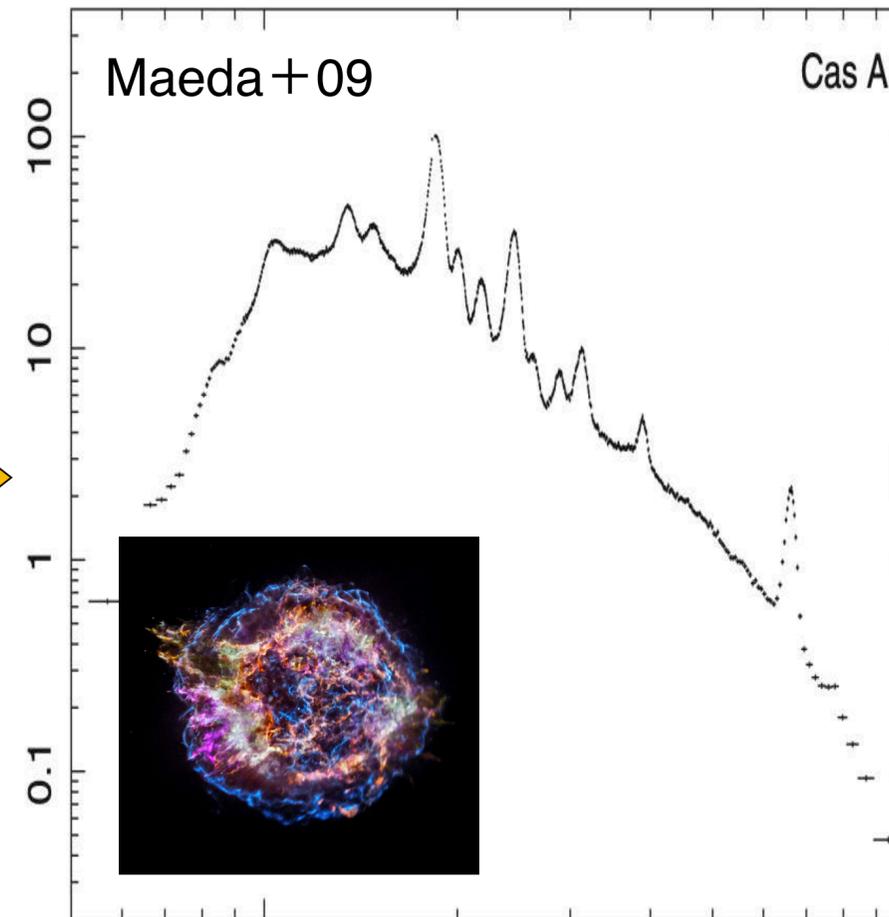


高温プラズマの理解

(非平衡プラズマの物理)

~2000年代

X線CCD

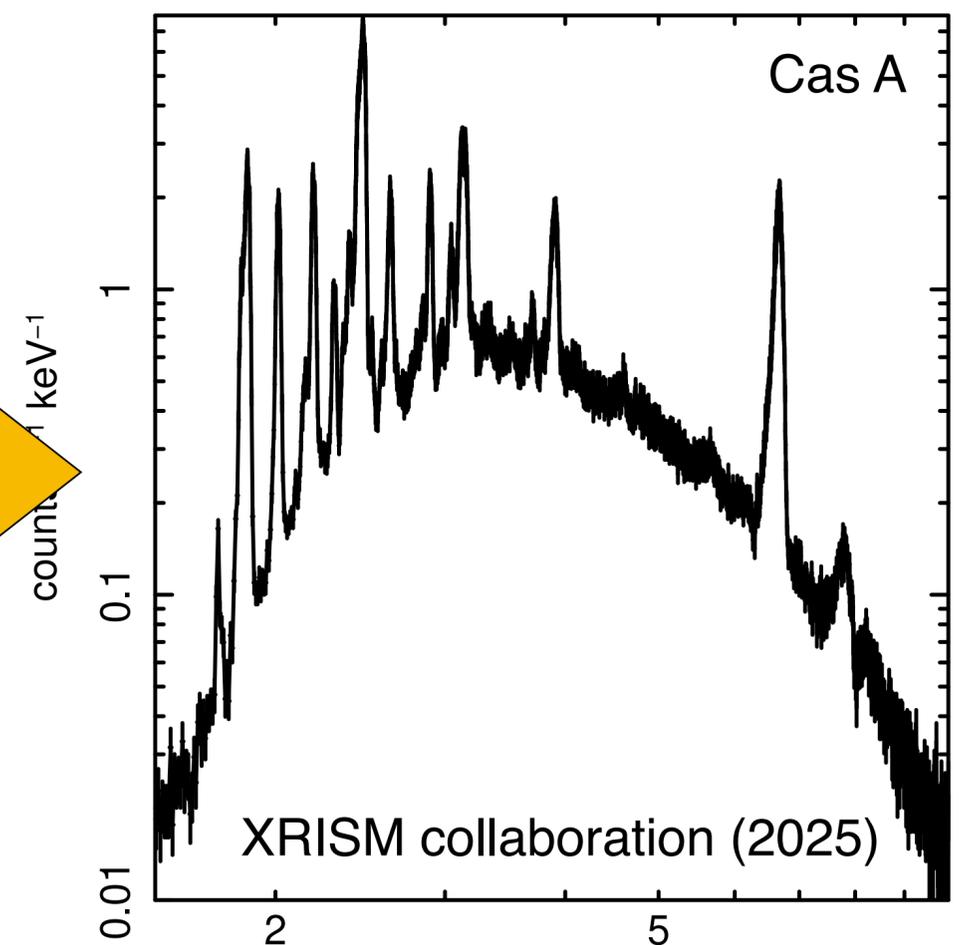


$\alpha$  元素の量とマップ

(超新星分類/超新星ダイナミクス/粒子加速)

~2020年代

X線マイクロカロリメータ



微細な輝線構造の分解

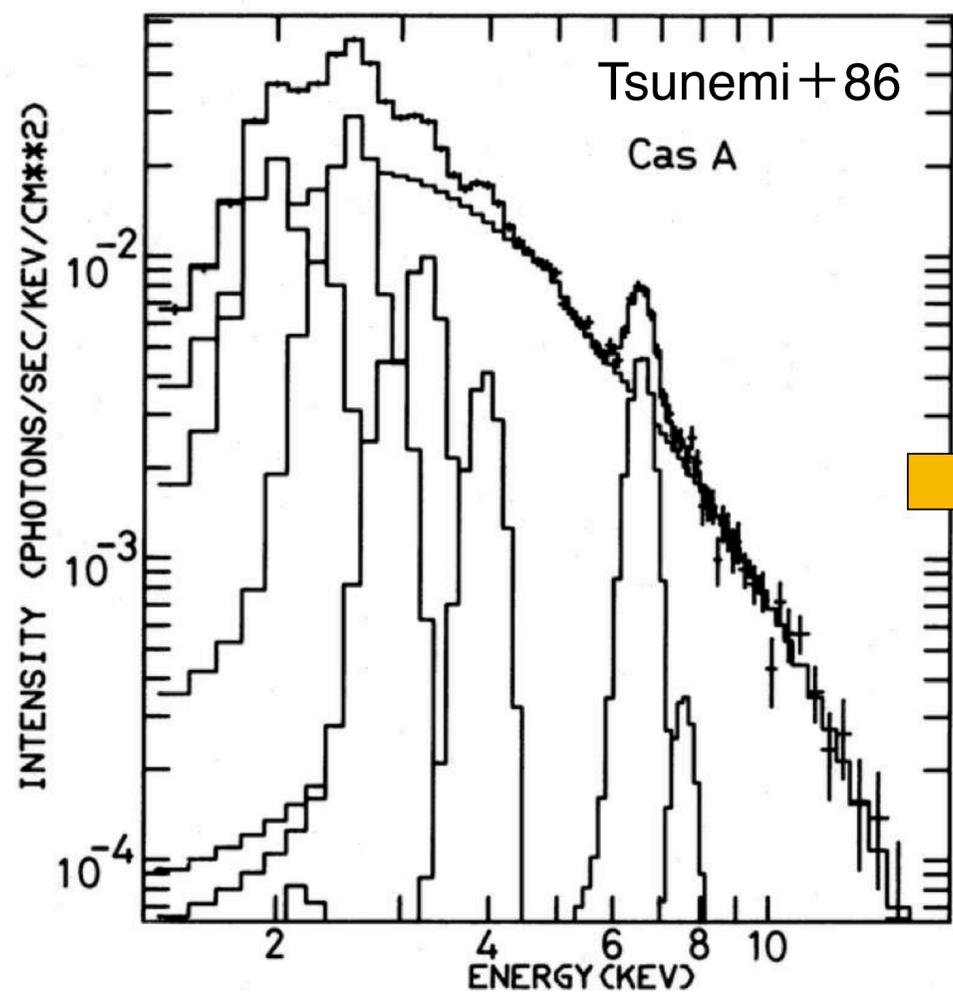
(希少元素の合成過程 & 天体物理)

# X線による超新星残骸観測の変貌

今まさにここ

~1980年代

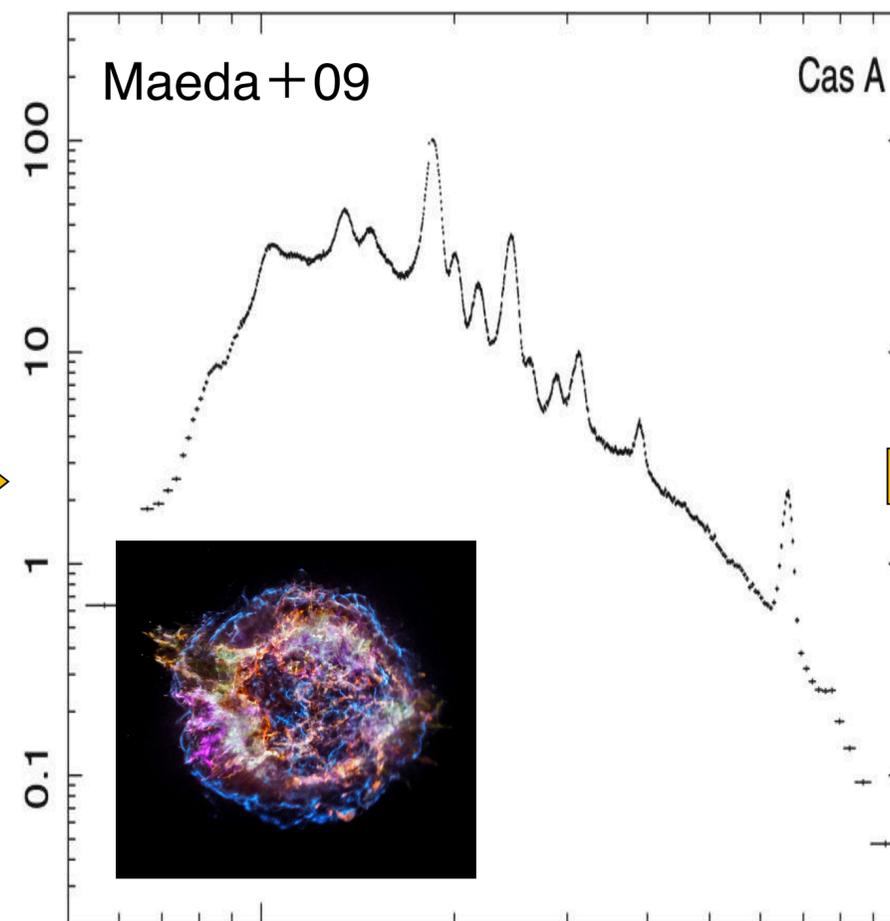
ガス検出器 (比例計数管)



高温プラズマの理解  
(非平衡プラズマの物理)

~2000年代

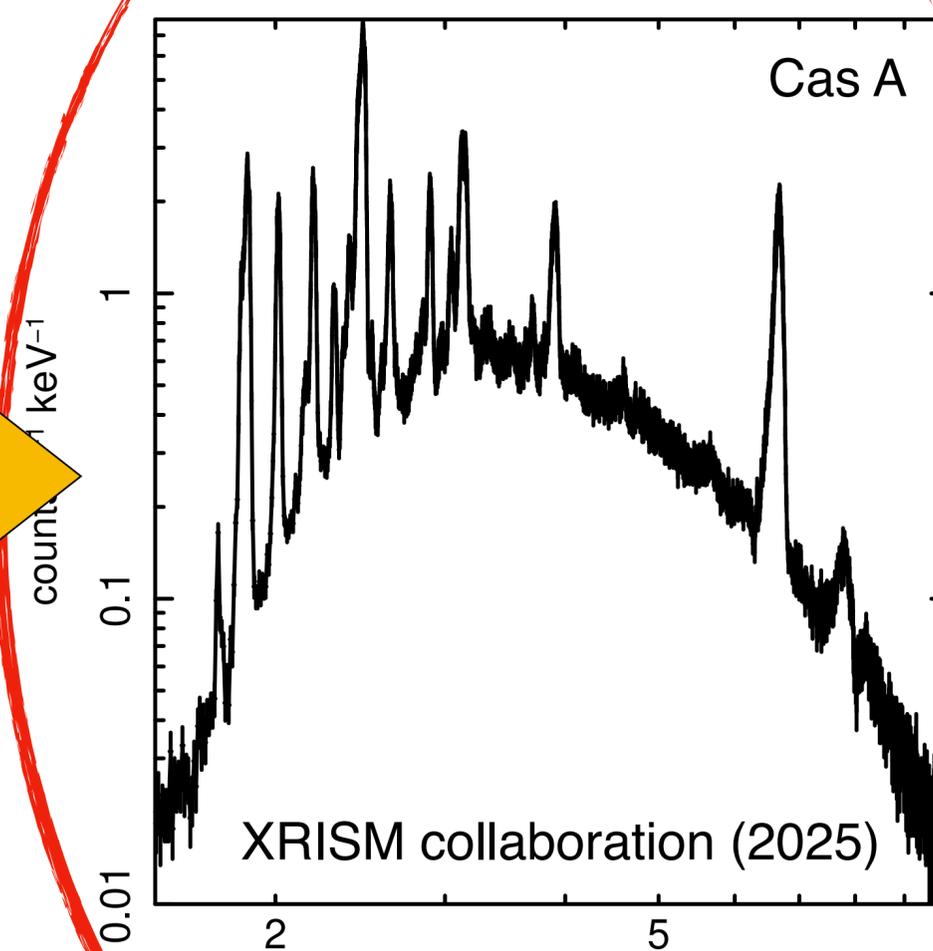
X線CCD



$\alpha$  元素の量とマップ  
(超新星分類/超新星ダイナミクス/粒子加速)

~2020年代

X線マイクロカロリメータ



微細な輝線構造の分解  
(希少元素の合成過程 & 天体物理)

そんな今だからこそ **“超新星残骸”** を使った  
ニュートリノ加熱機構に関わる恒星 & 超新星メカニズムの話題

**本日の話題 ① 大質量星の後期進化と内部構造**

**本日の話題 ② 超新星残骸で超新星ニュートリノ！？**

「X線残骸観測 ↔ ニュートリノ ↔ 恒星・超新星」

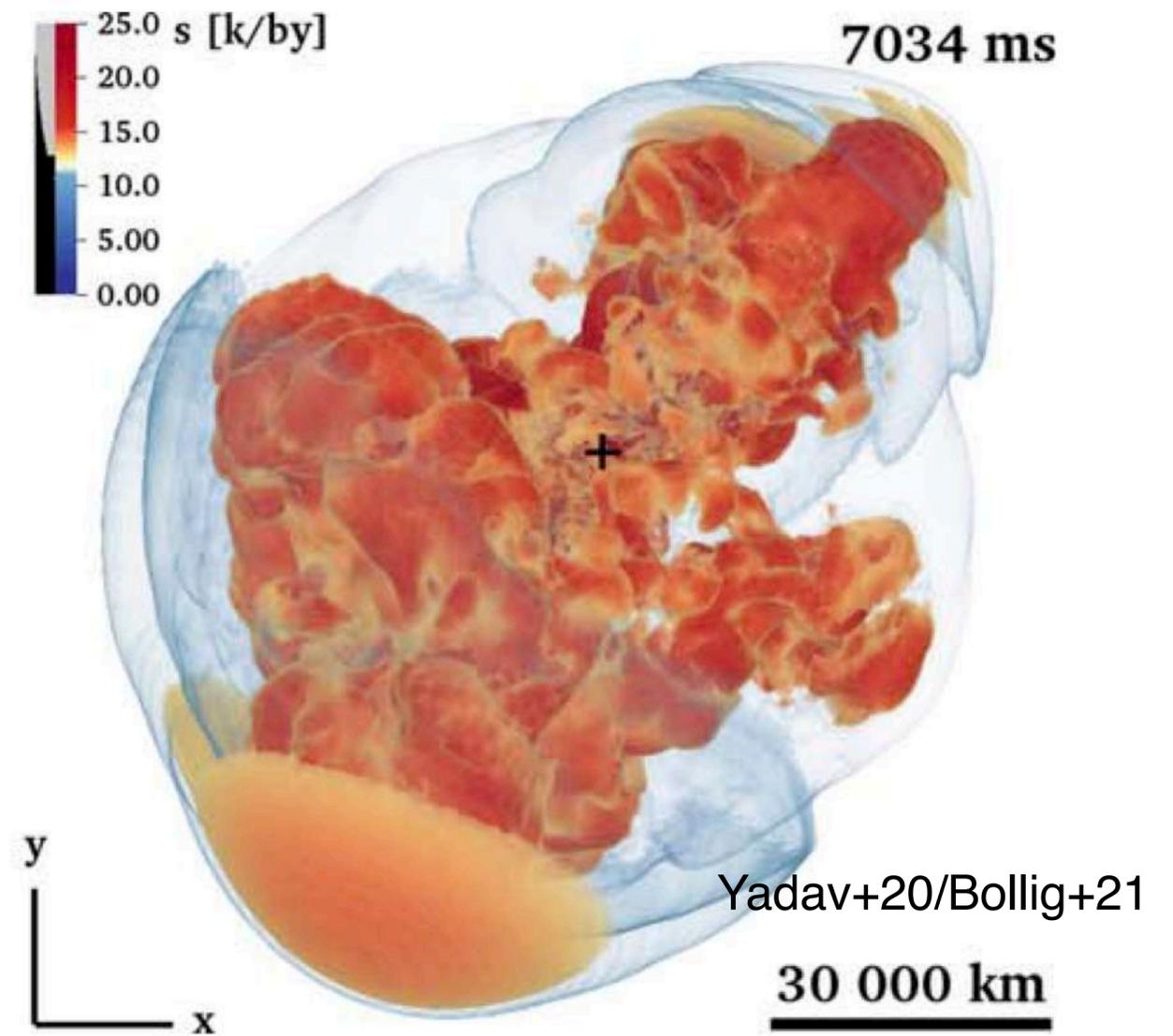
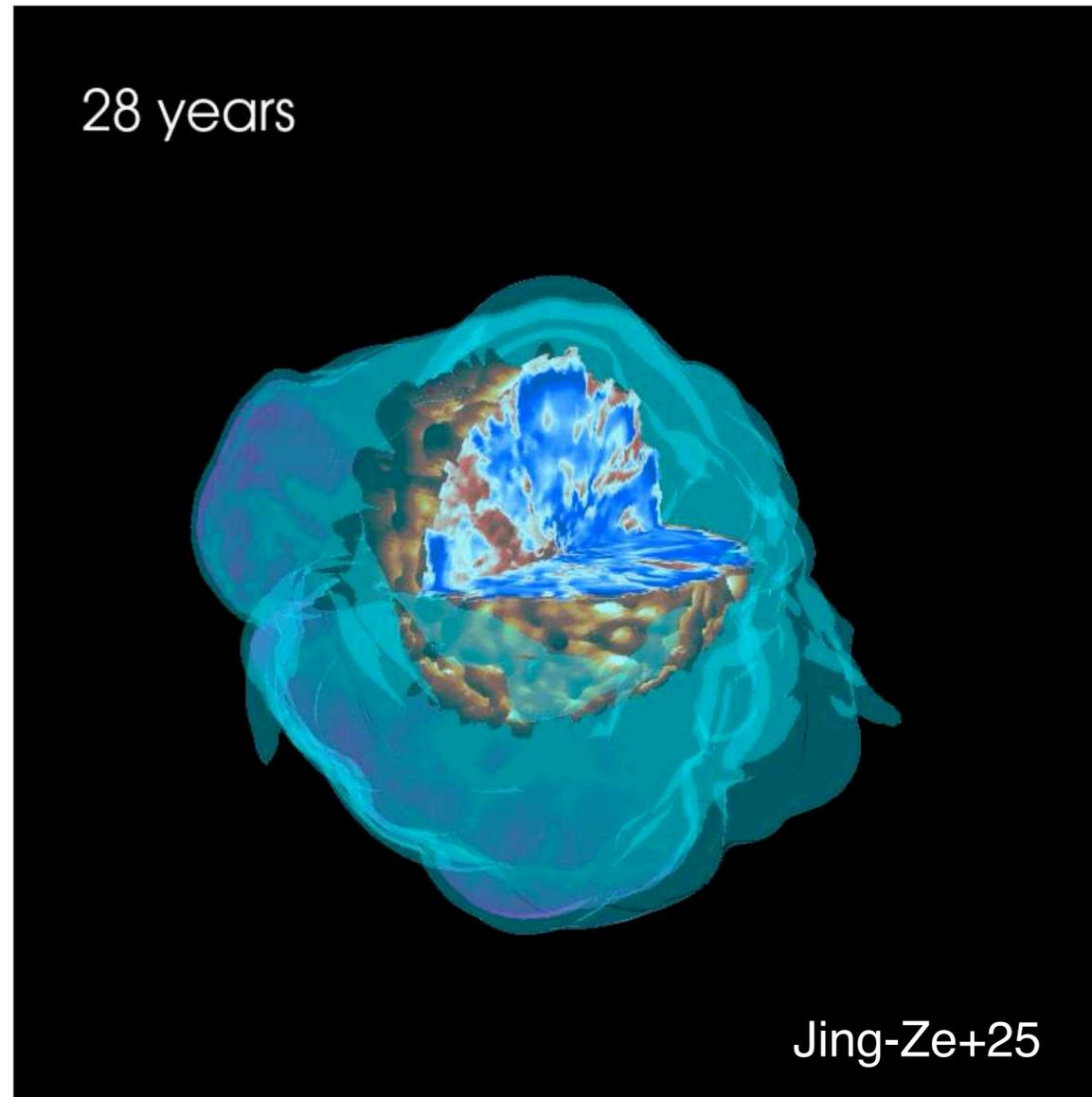
→ 🔥 この辺を繋いでいきたい 🔥

# 本日の話題 ①: 大質量星の後期進化と内部構造

特に、死に際の数十年の間に星の内部で起きている核燃焼過程は多方面で重要

大規模/非対称な質量損失

非対称な内部が非対称な爆発へ



このような観測的検証の難しい恒星情報を観測側から検証していきたい

# 大質量星の最終段階：鉄コアの形成まで

赤色超巨星

He core の中心で He 燃焼着火

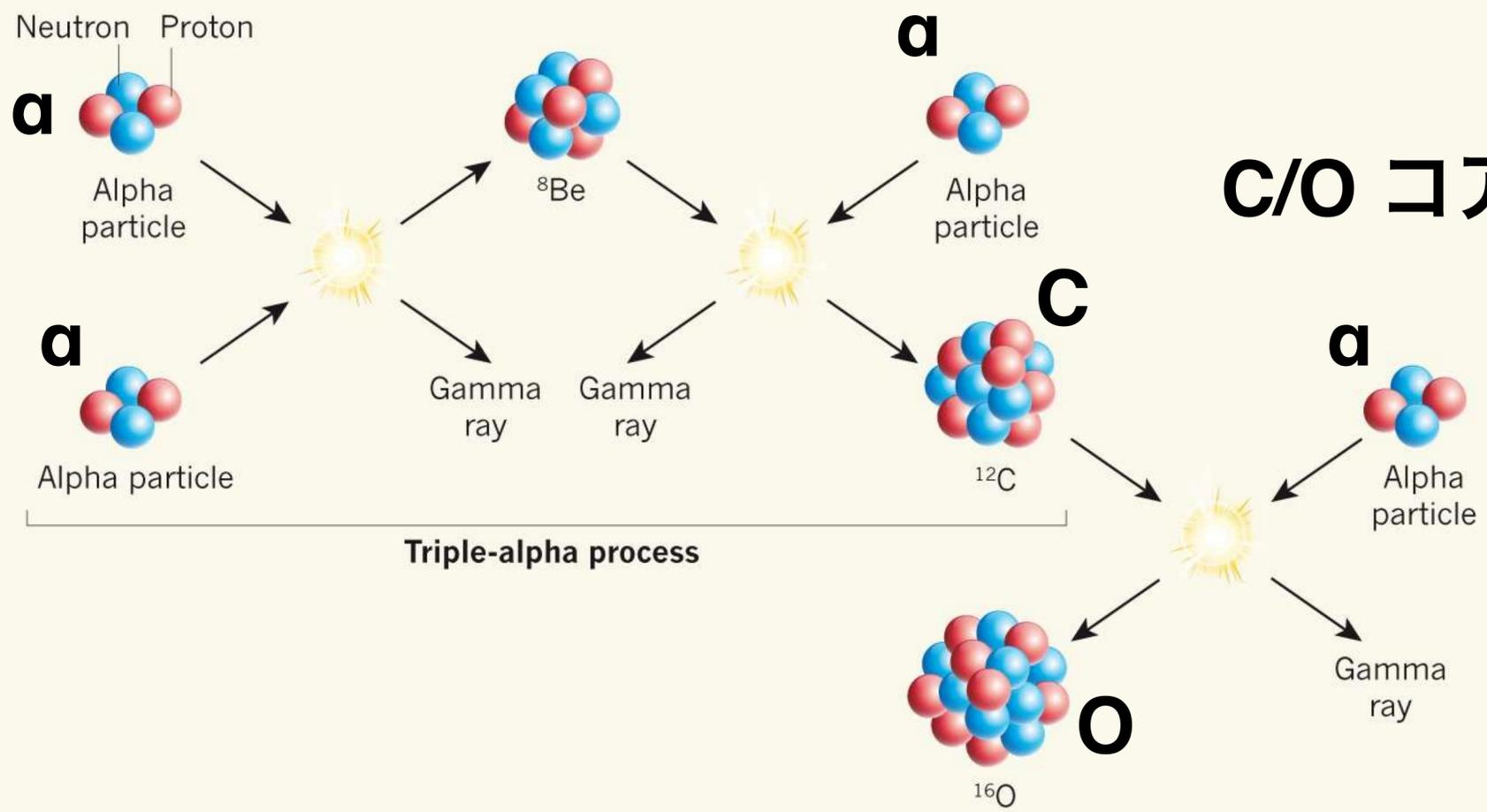


He burning

主な生成物→ C, O

He core

注意: 大きさは不正確

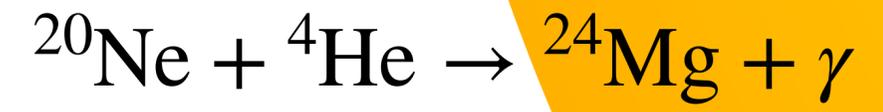
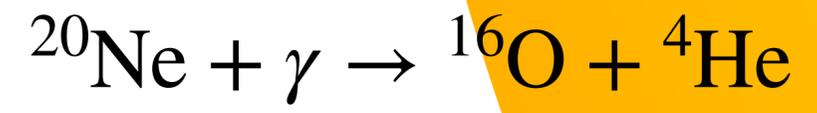


膨張した水素外層

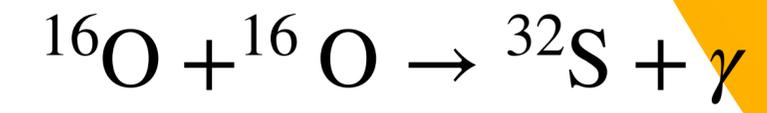
# 大質量星の最終段階：鉄コアの形成まで

赤色超巨星

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



O/Ne/Mg 層形成

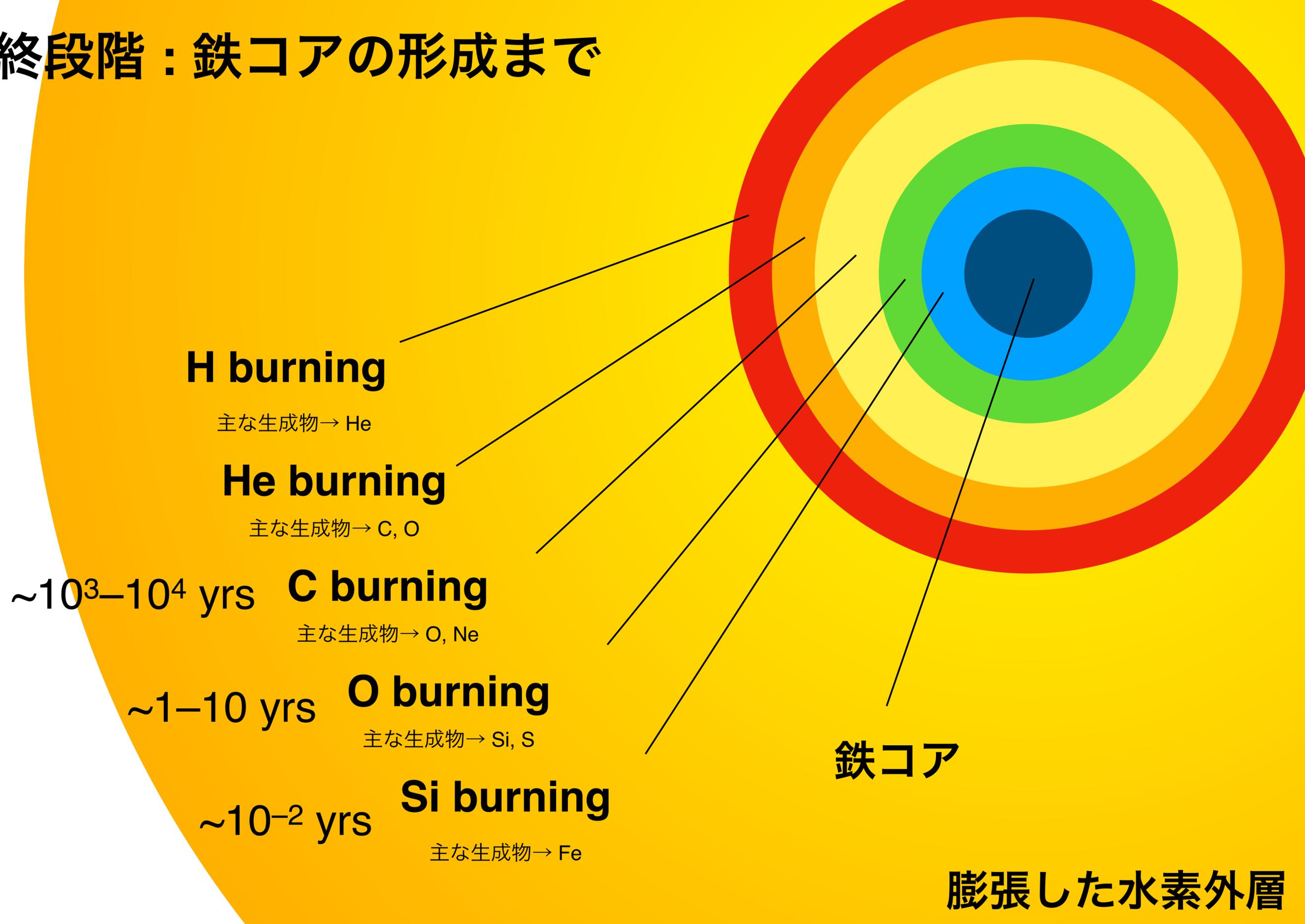


Si 層形成



膨張した水素外層

# 大質量星の最終段階：鉄コアの形成まで



**H burning**

主な生成物 → He

**He burning**

主な生成物 → C, O

$\sim 10^3 - 10^4$  yrs **C burning**

主な生成物 → O, Ne

$\sim 1 - 10$  yrs **O burning**

主な生成物 → Si, S

$\sim 10^{-2}$  yrs **Si burning**

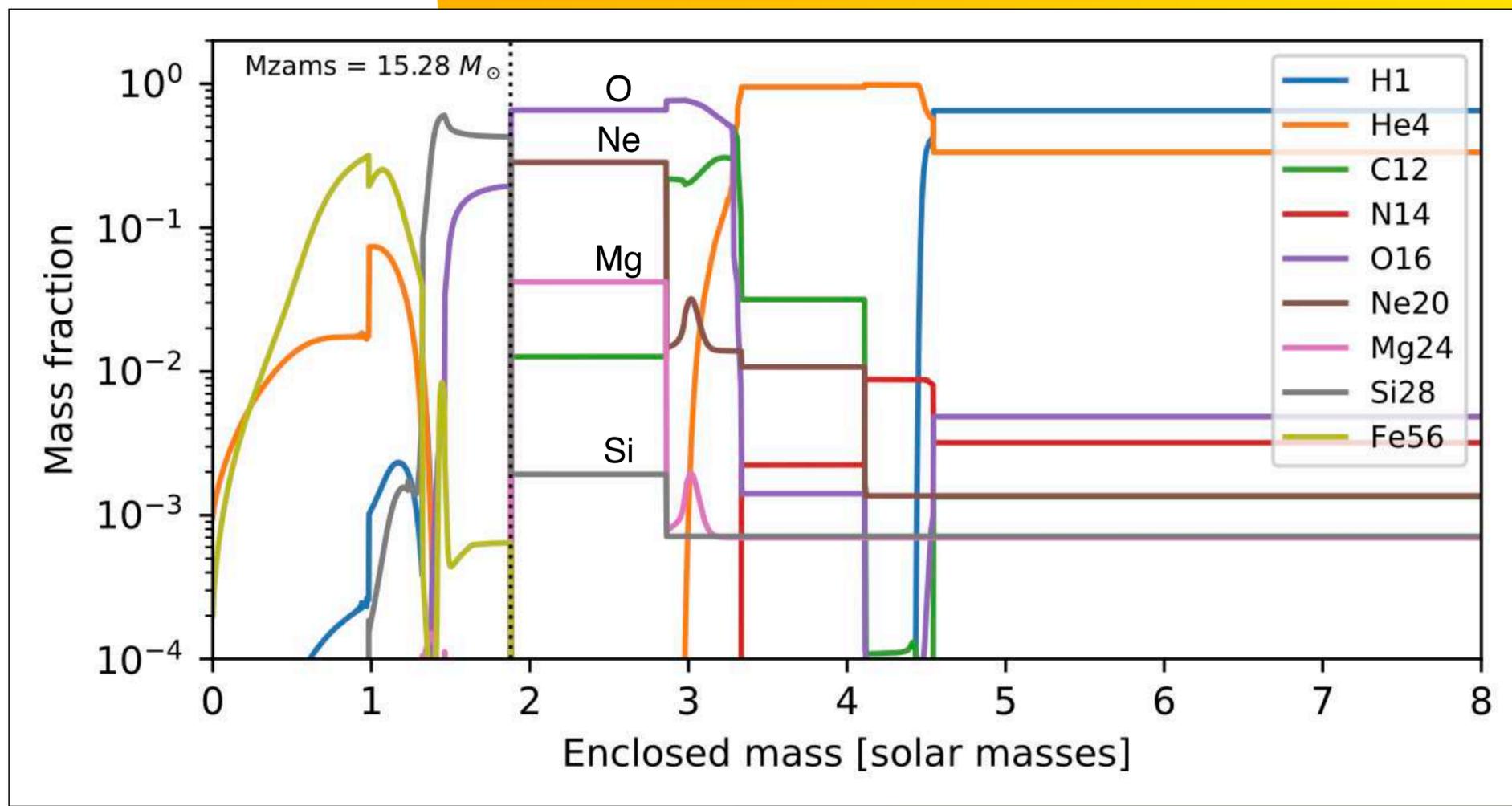
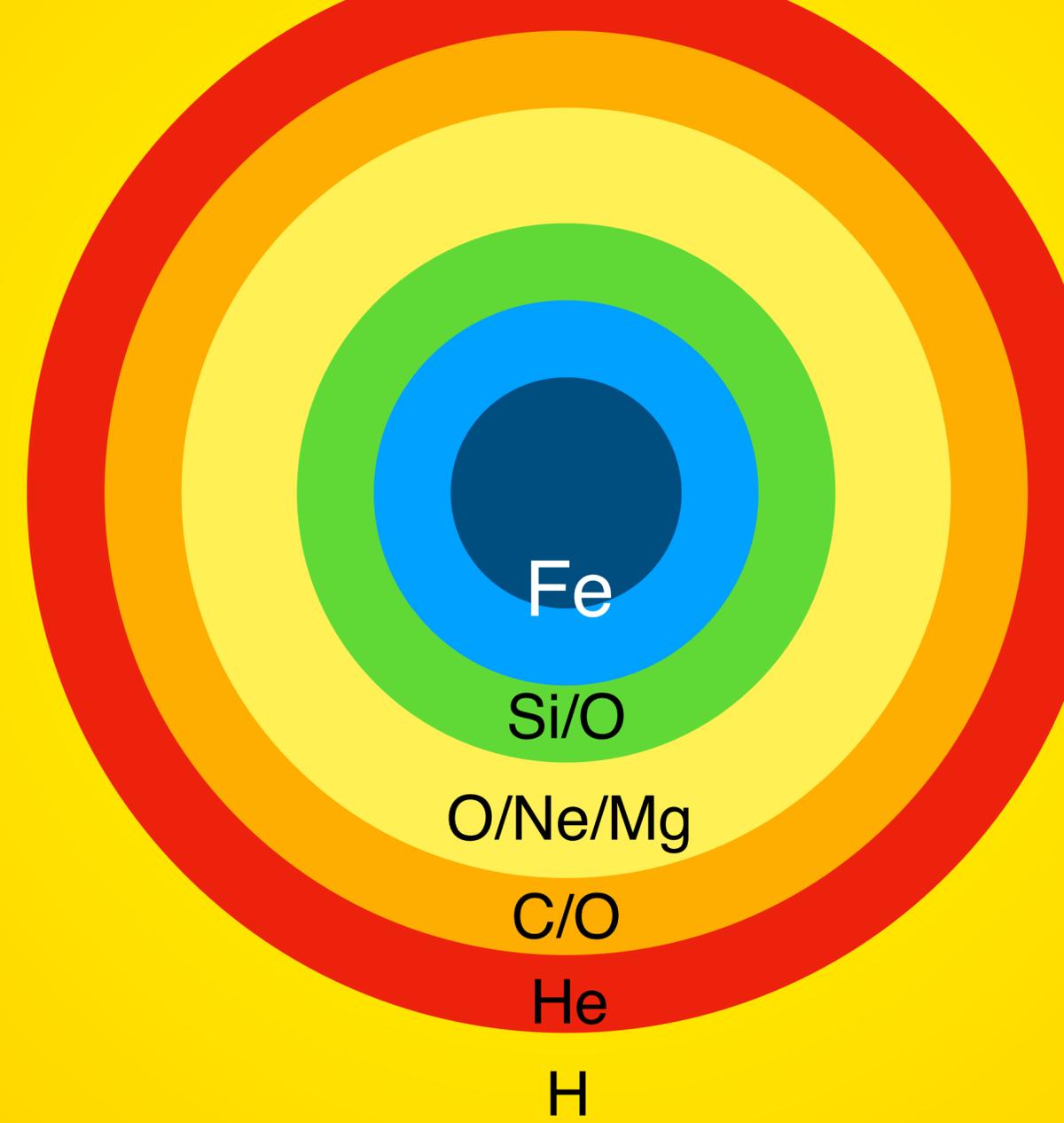
主な生成物 → Fe

鉄コア

膨張した水素外層

# 大質量星の最終段階：鉄コアの形成まで

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 ⇒ 玉ねぎ構造形成



膨張した水素外層

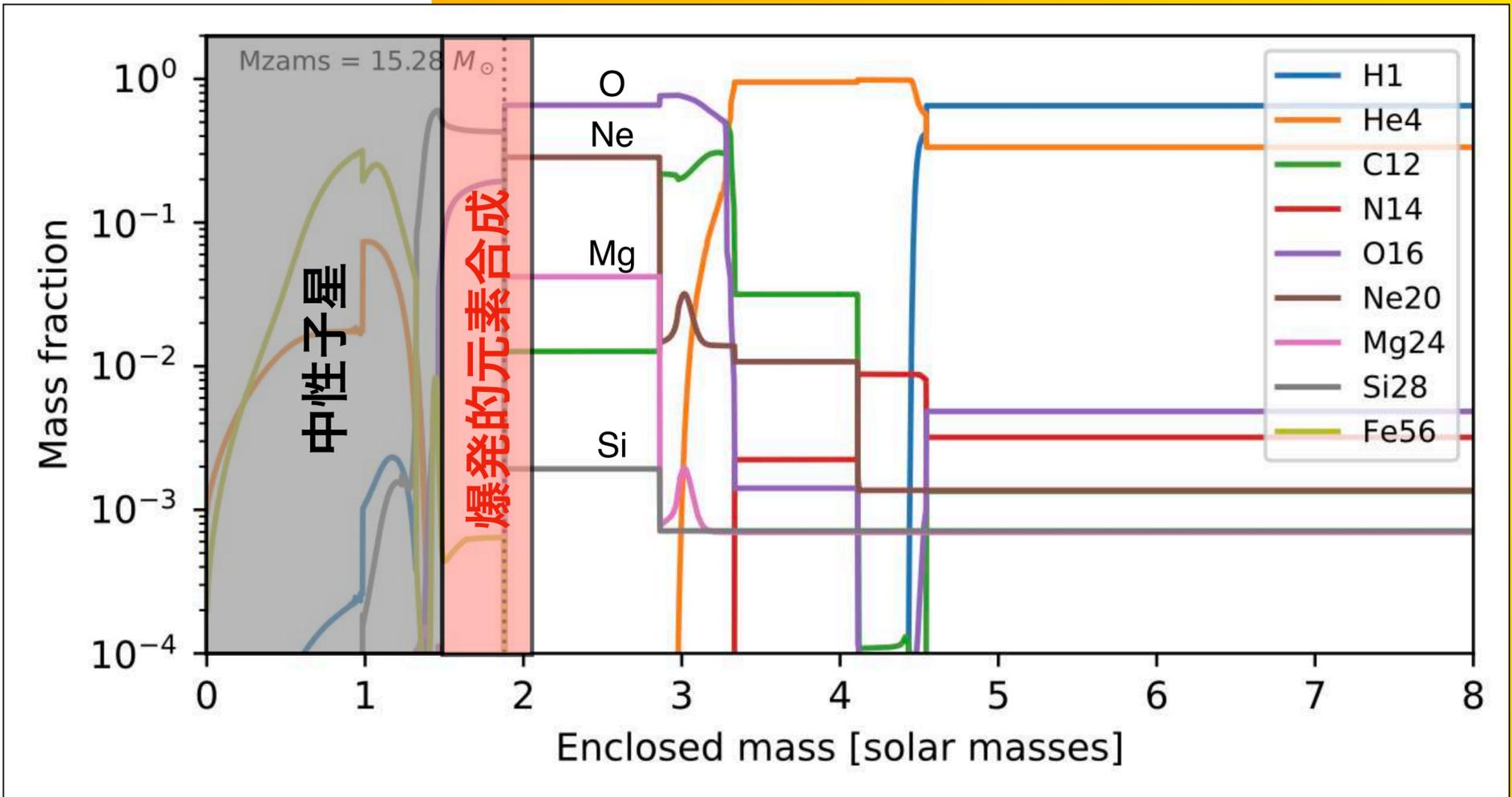
# 大質量星の最終段階：重力崩壊 & 超新星

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 ⇒ 玉ねぎ構造形成

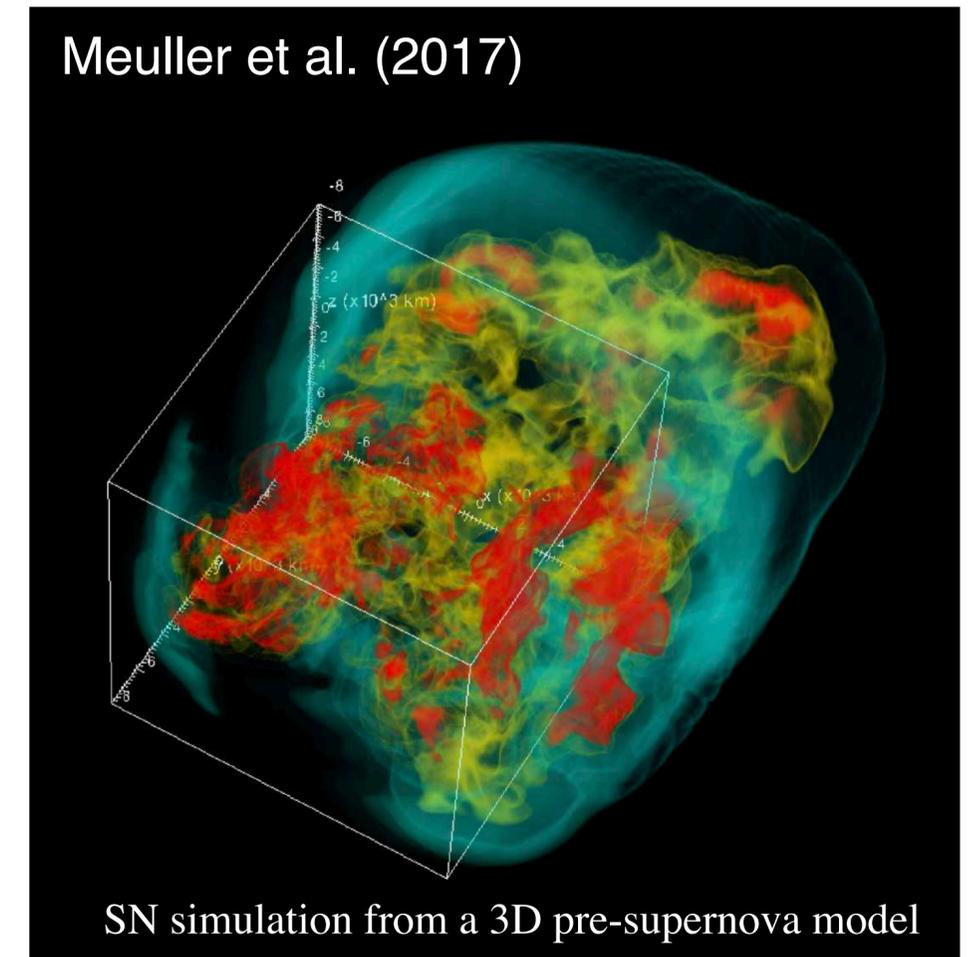
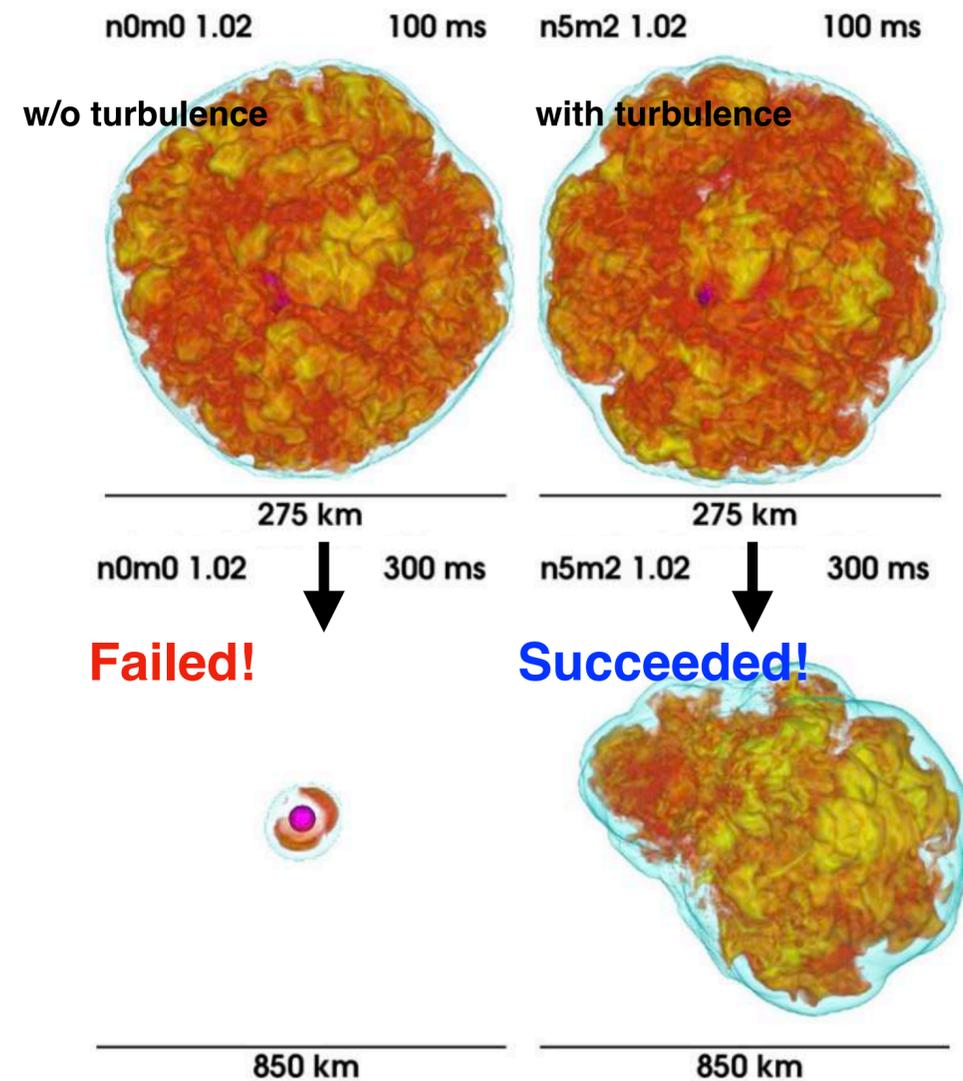
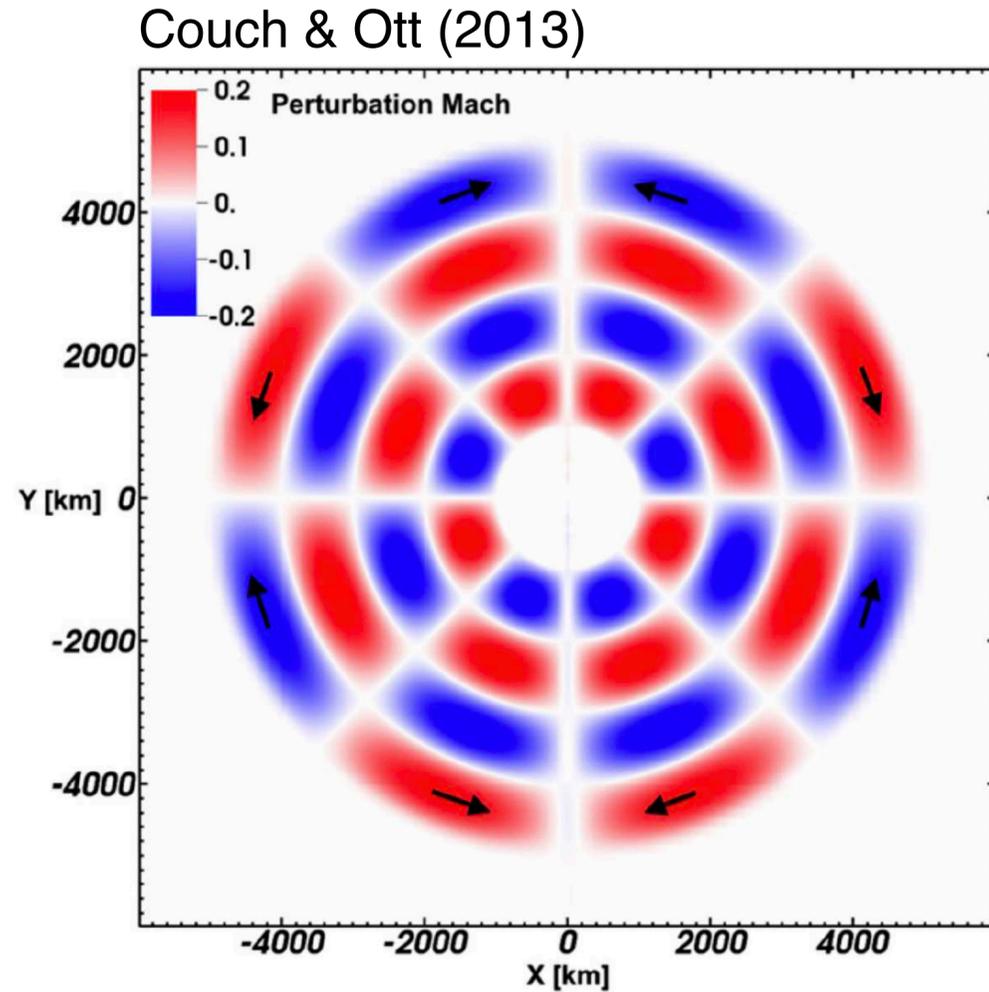


O/Ne/Mg は恒星内部由来！

膨張した水素外層



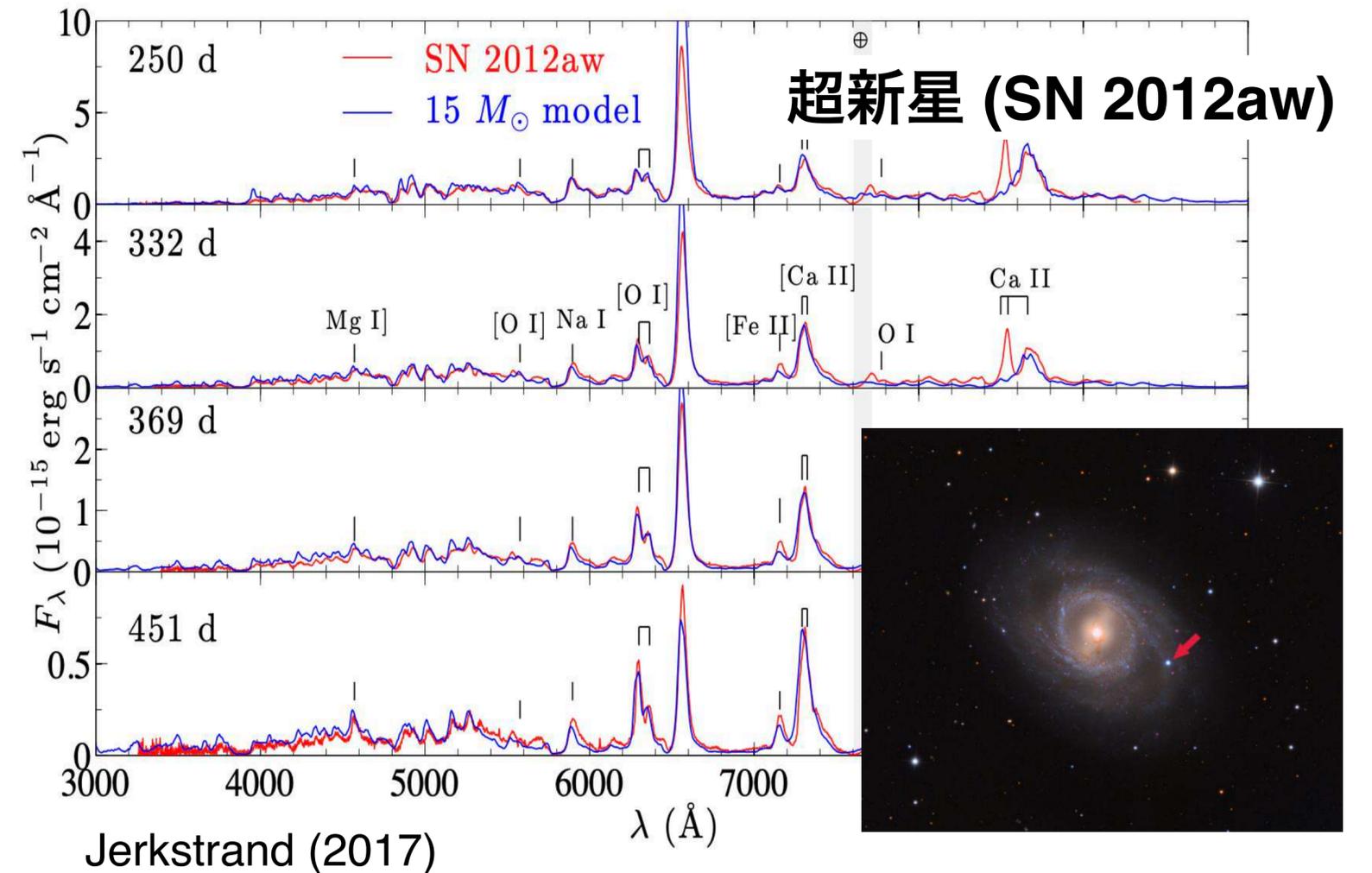
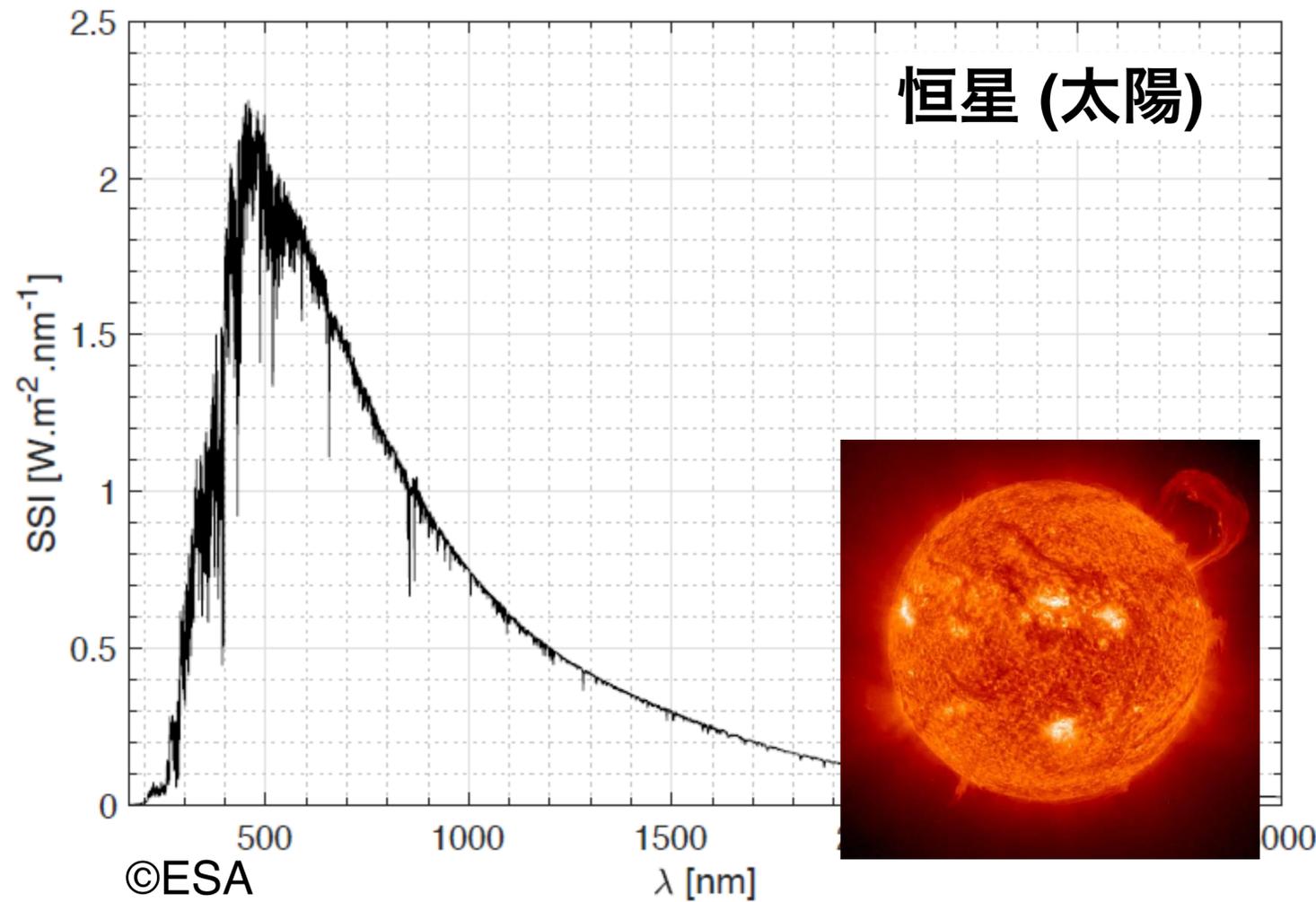
# 恒星内部構造のニュートリノ駆動爆発への影響



シェル燃焼対流は超新星衝撃波伝播時の初期摂動として重要

# しかし、恒星内部の観測は難しい

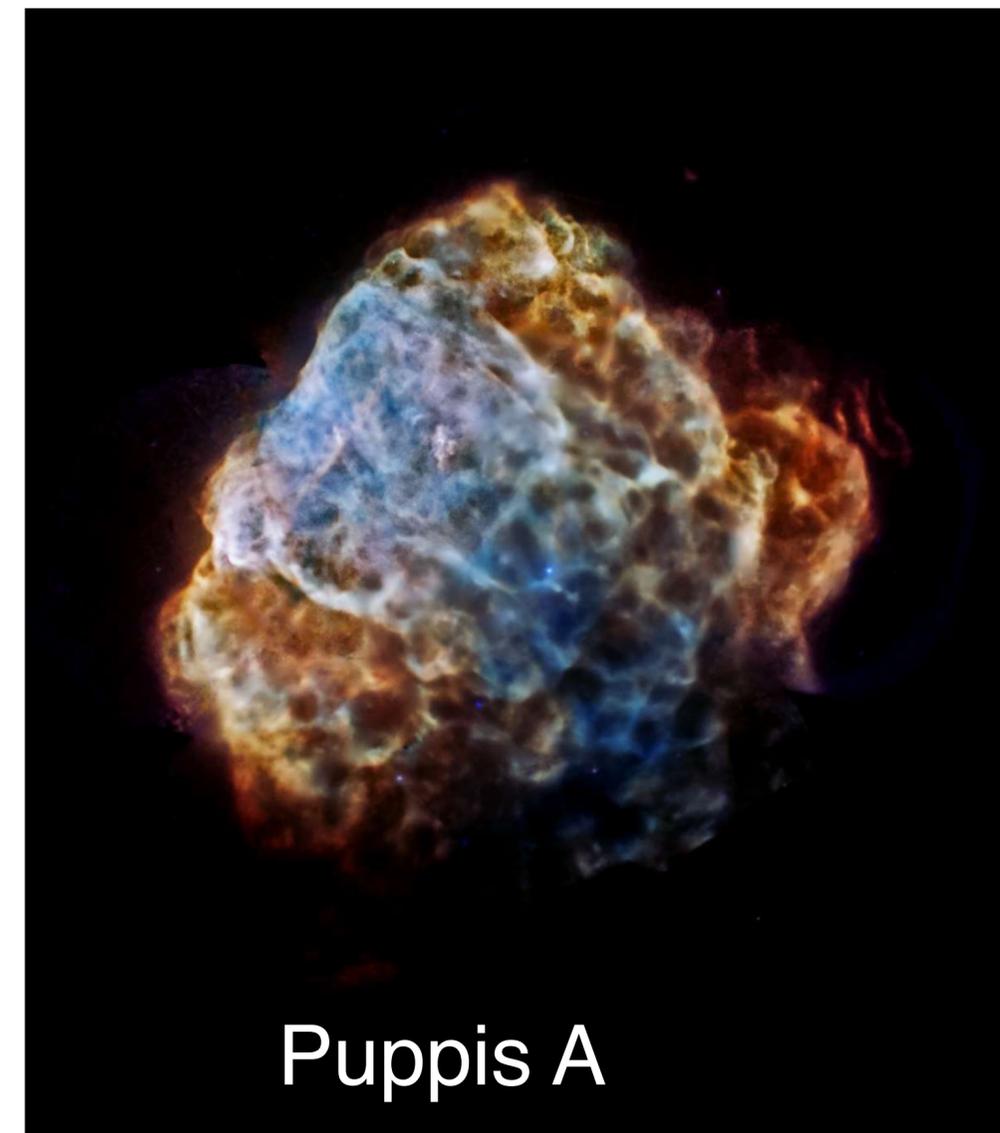
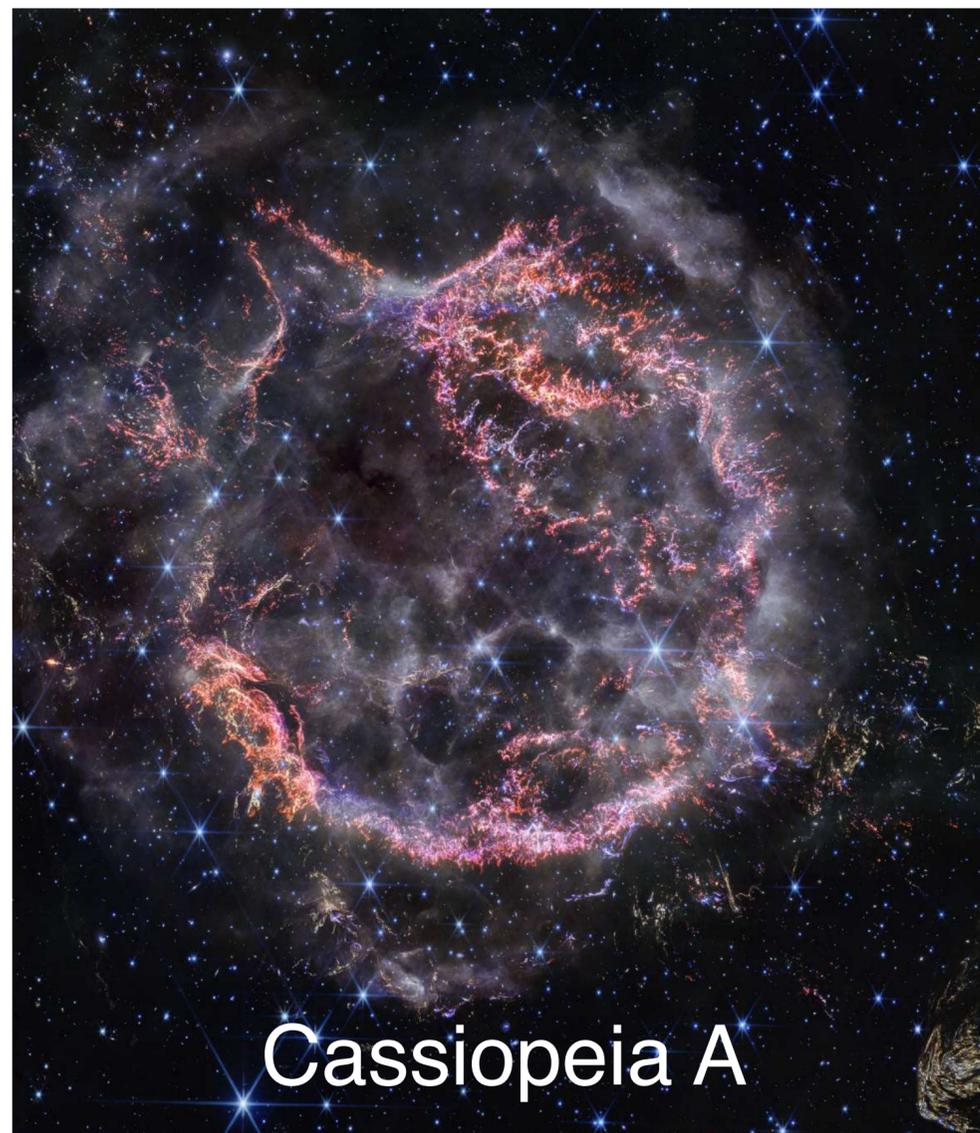
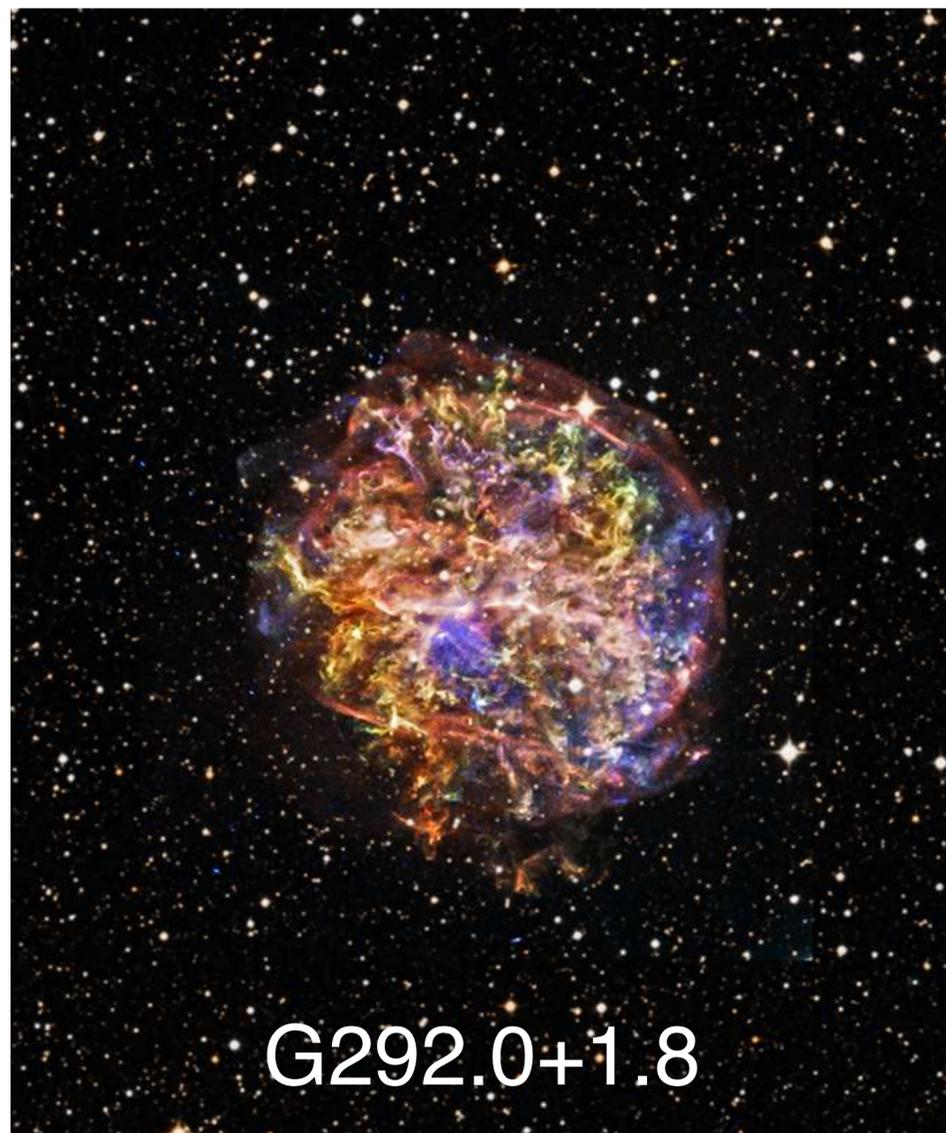
恒星は表面しか見えない & 超新星の後期スペクトルで見える元素も限定的



星の内側の物質だけ取り出せると嬉しいが、そんな都合の良いことできる？

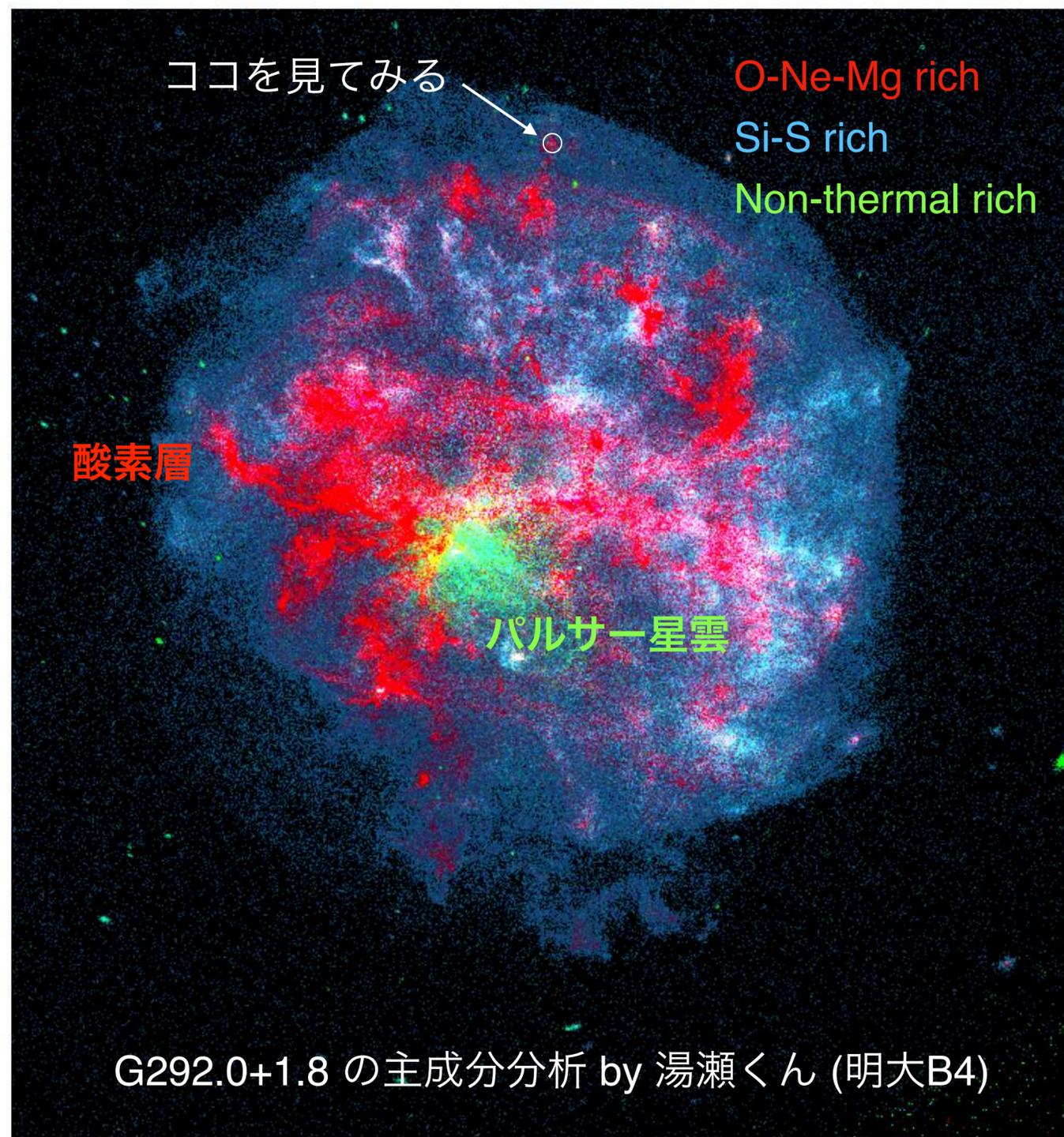
# そこで、酸素リッチな銀河系内の超新星残骸たち

超新星残骸なら空間的に広がった構造から酸素層 (恒星元素合成の現場) の調査ができるはず！



3サンプルのみだが、本質的な情報を引き出すには十分 (個人的思想です)

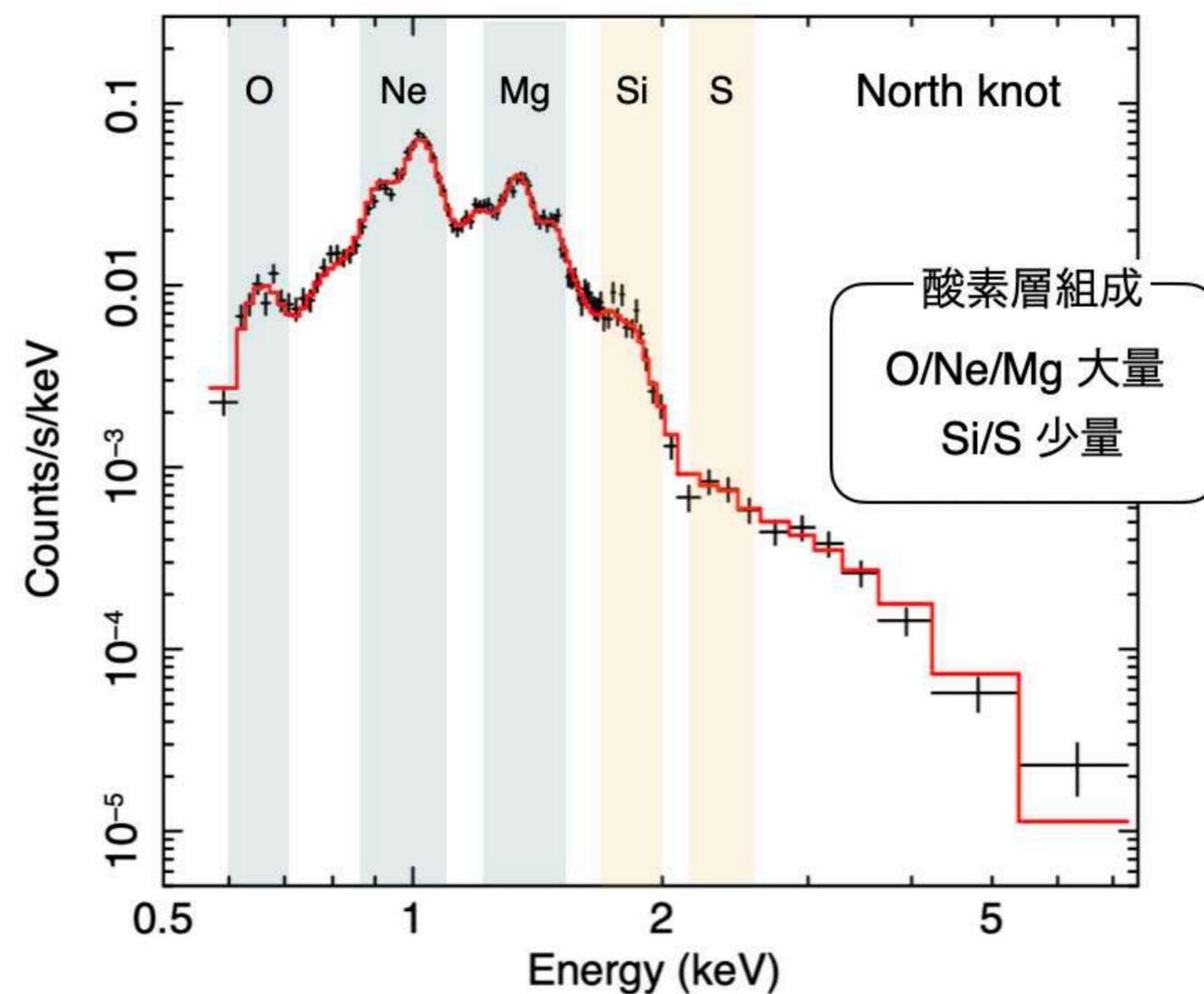
# 観測例: 特定の燃烧層 (酸素層) の元素組成をX線観測から求める



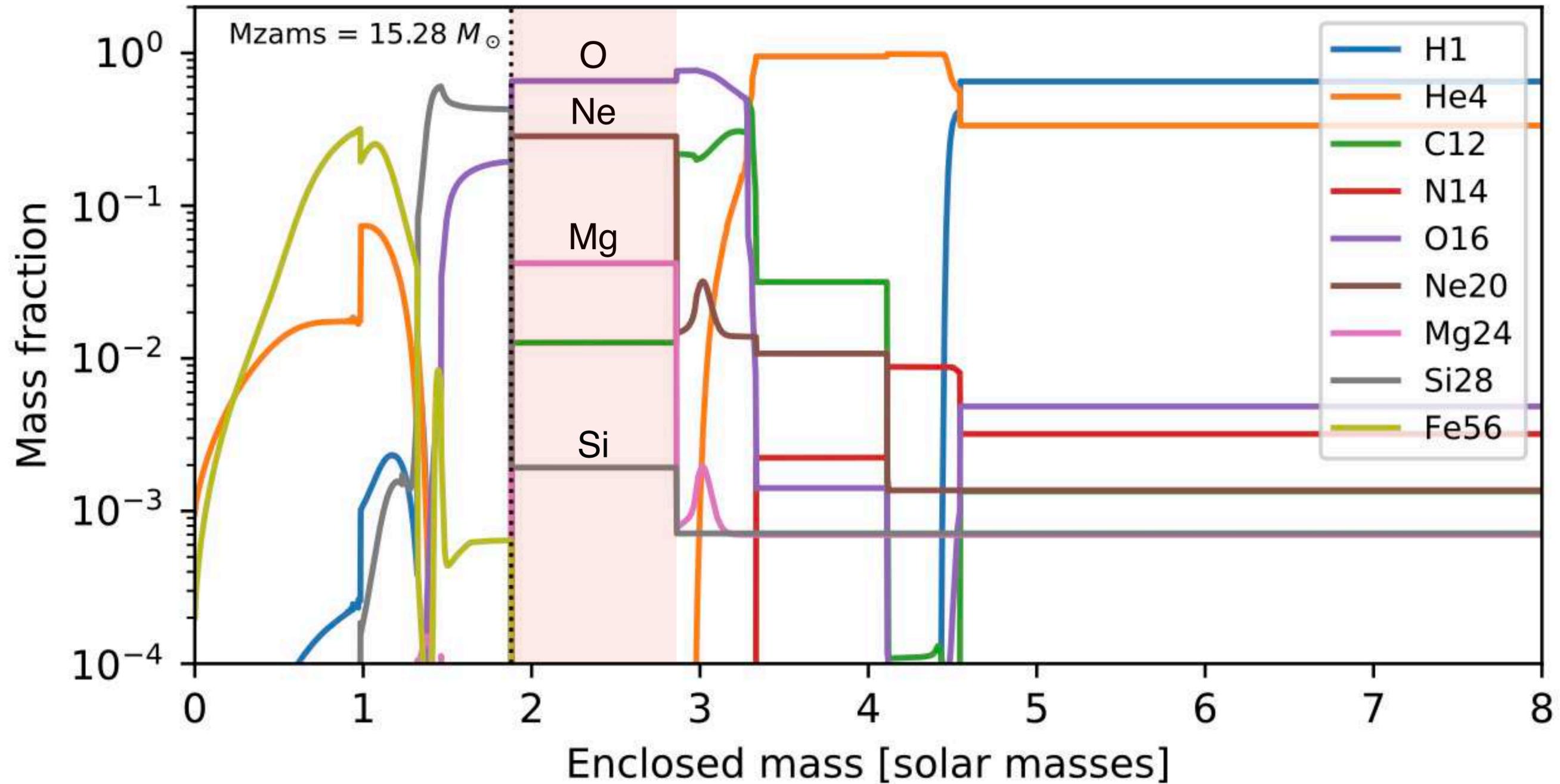
恒星の“解剖”ができるのが超新星残骸

特定領域のX線分光 → 元素組成決定

質量比  $\text{Si/O} \sim 10^{-2}$   $\text{Ne/O} \sim 2 \times 10^{-1}$   $\text{Mg/O} \sim 4 \times 10^{-2}$



# 酸素層の元素組成が教えてくれる恒星時代の情報は？



O/Ne/Mg 比 → C燃烧前の C/O 比やO燃烧/C燃烧の融合で大きく変化

# 超新星残骸を使ってやりたい恒星段階・超新星の元素合成

- シェル燃焼/シェルマージャーと元素合成 (本日メイン)

Oシェル/Cシェル融合で O/Ne/Mg/Si 比が変化 + 軽い Odd-Z 元素増加

- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  の観測的制限 / 回転・連星の影響

C/O 比の変化が O/Ne/Mg 比に影響を！ (With 明大B4 久保くん/湯瀬くん)

- weak s-process の観測的検証

酸素層内で Ni/Fe or Co/Fe 比が測れると検証可能？

- 爆発的元素合成 & ニュートリノ元素合成 (本日メイン)

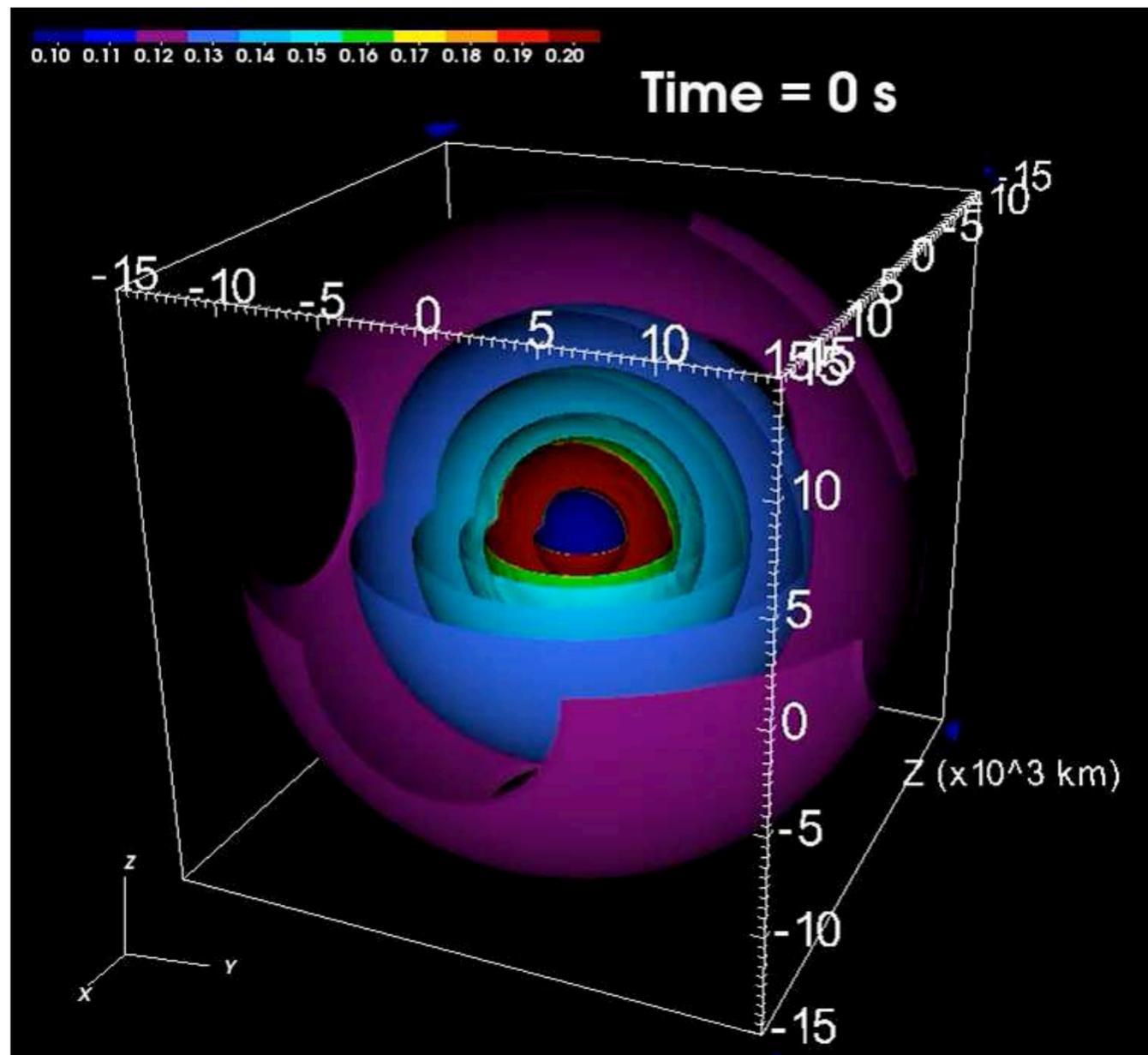
$\alpha$ -rich freezeout

v-process/vp-process

これら全てをX線観測でやっていきたい

# 大質量星後期: 酸素燃焼過程は激しい

激しい核燃焼によって大規模な対流構造を作り出す & 重力崩壊時にまで影響



Yoshida et al. (2021)

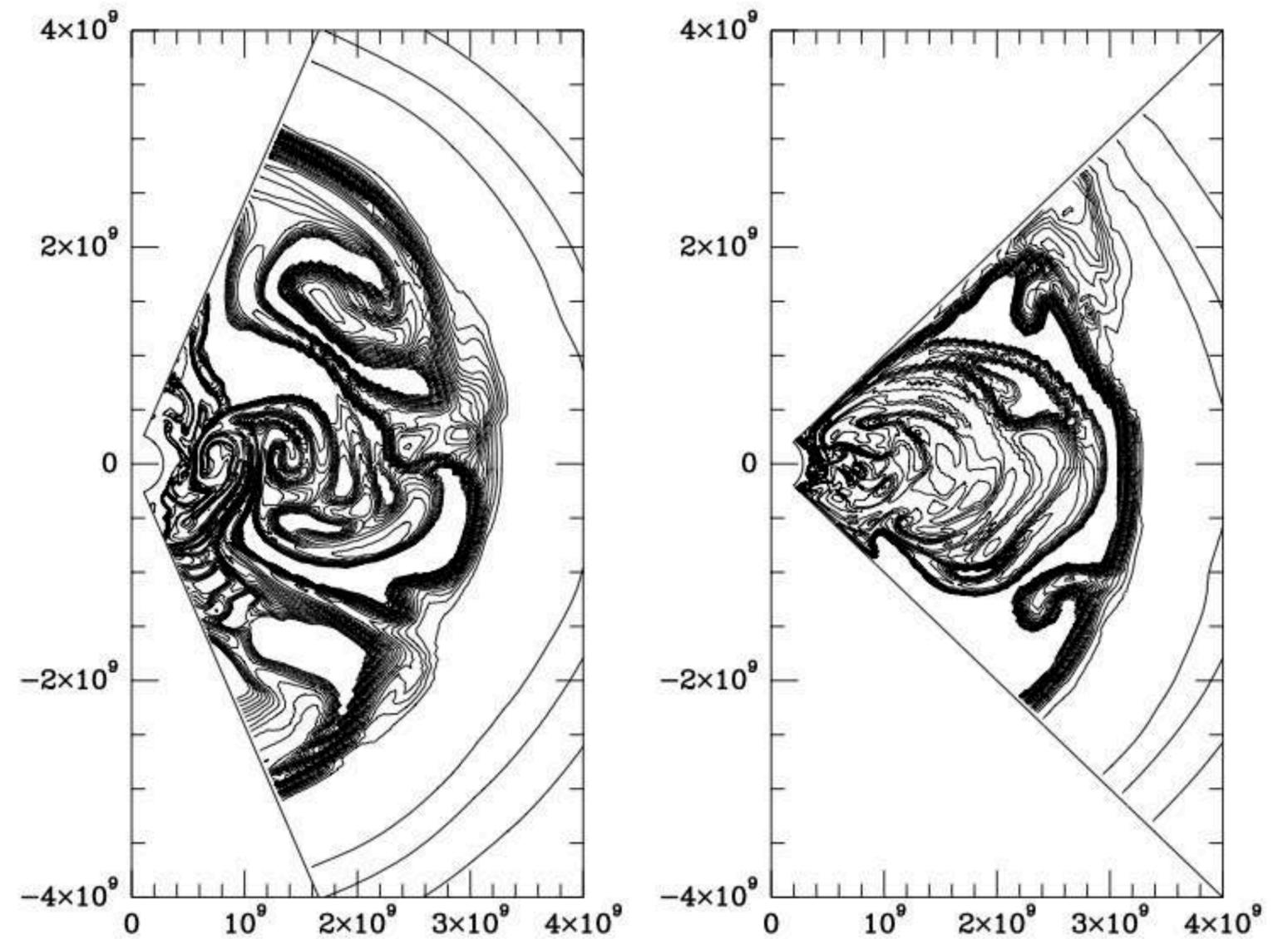


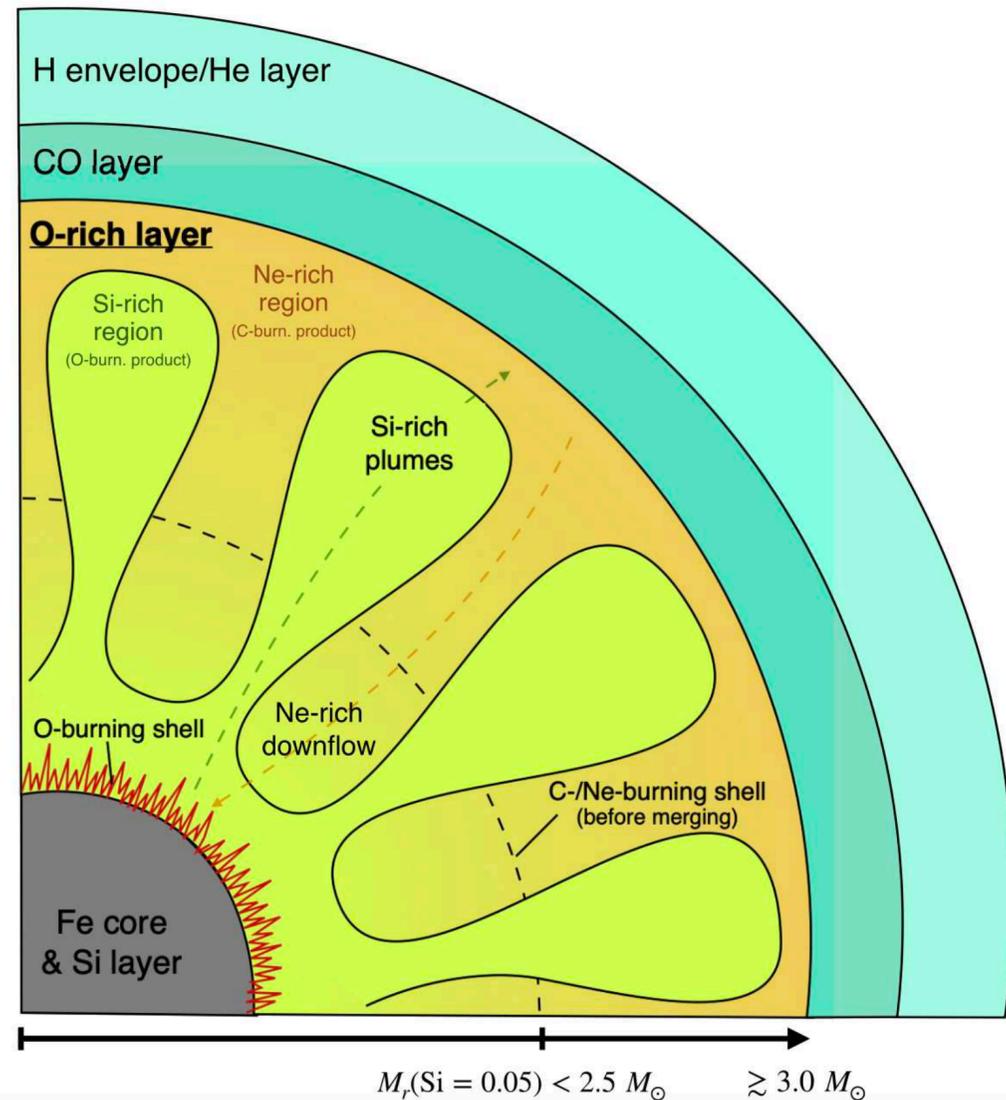
FIG. 14.—Abundance contours for  $^{12}\text{C}$  for models D, B, E, and C, as in Fig. 13. See Table 1

Bazan & Arnett (1998)

# 破壊的シェル燃焼過程「シェルマージャー」とその重要性

重力崩壊直前 (数日から数時間前) の激しい酸素燃焼が元素の層構造“玉ねぎ構造”を破壊

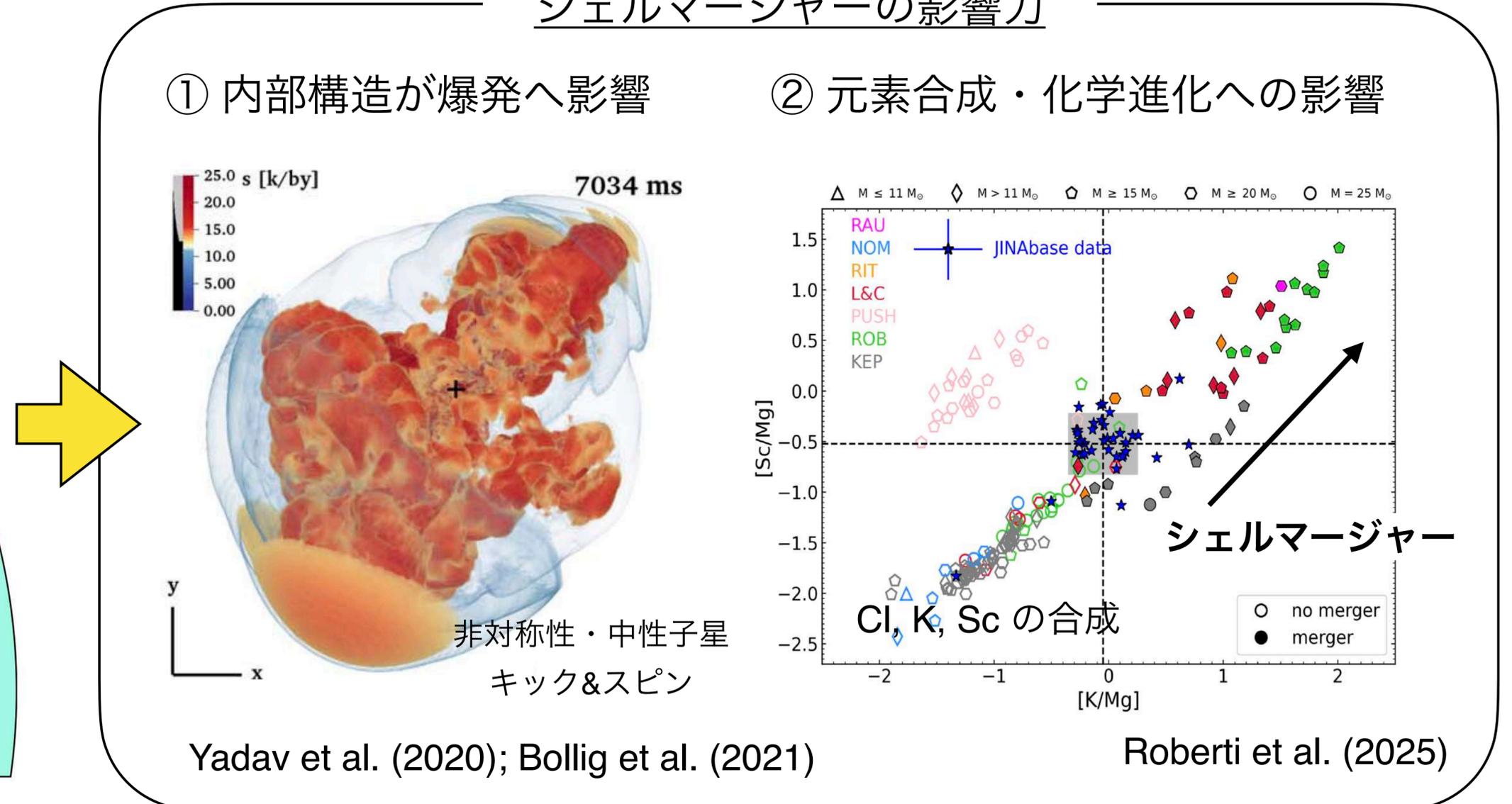
シェルマージャー概略図



シェルマージャーの影響力

① 内部構造が爆発へ影響

② 元素合成・化学進化への影響



Yadav et al. (2020); Bollig et al. (2021)

Roberti et al. (2025)

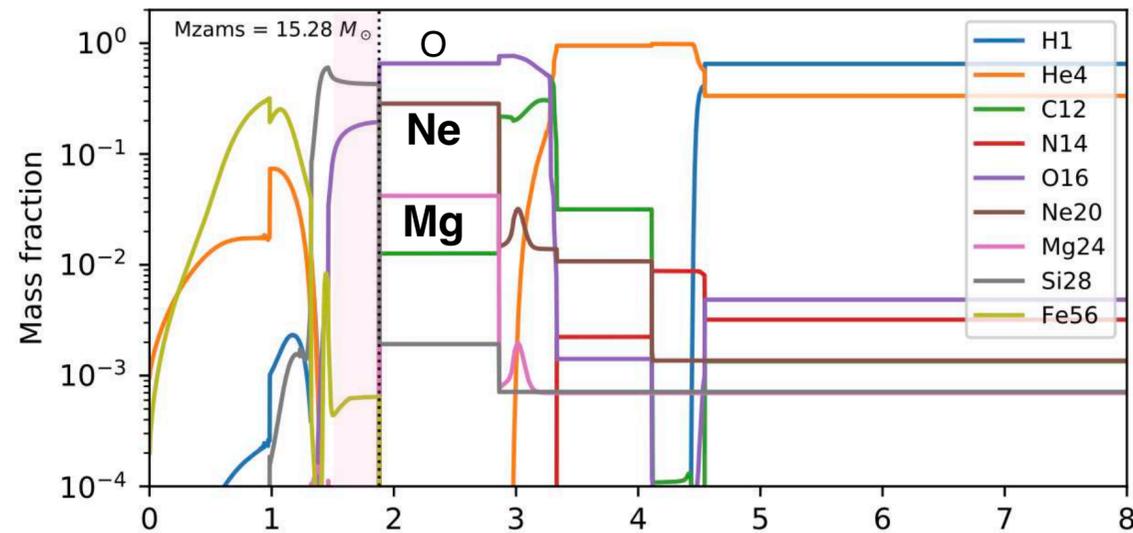
恒星内部の構造・元素分布を大きく変える → 本研究: 観測から議論できるのでは?

# Q. シェルマージャーを観測的に議論するには？

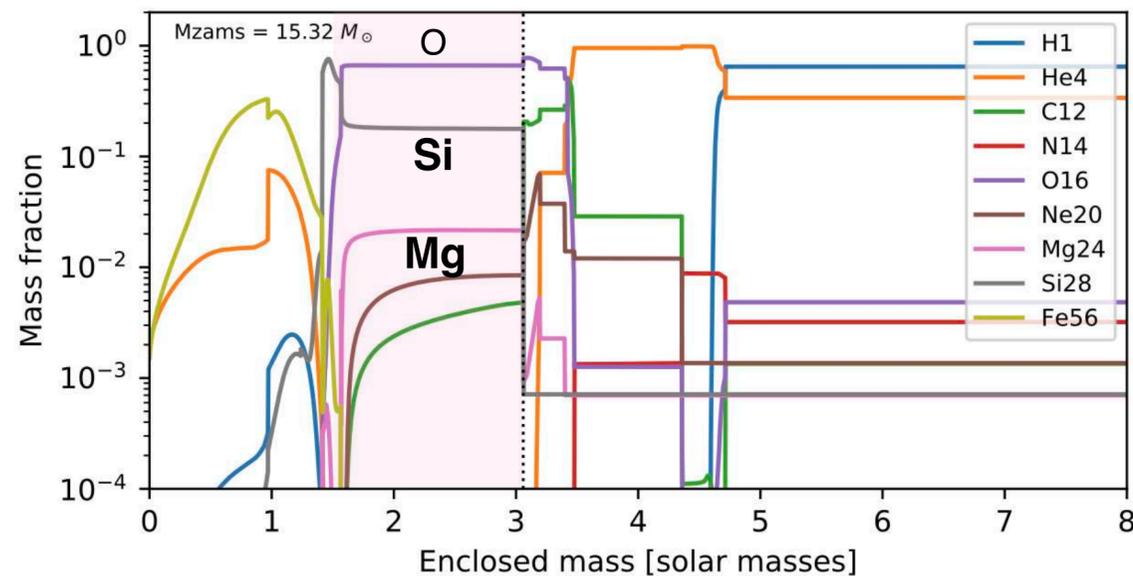
A. 恒星内部の酸素層の元素組成を調べられると区別可能

星内部元素組成

シェルマージャー無し



シェルマージャー有り

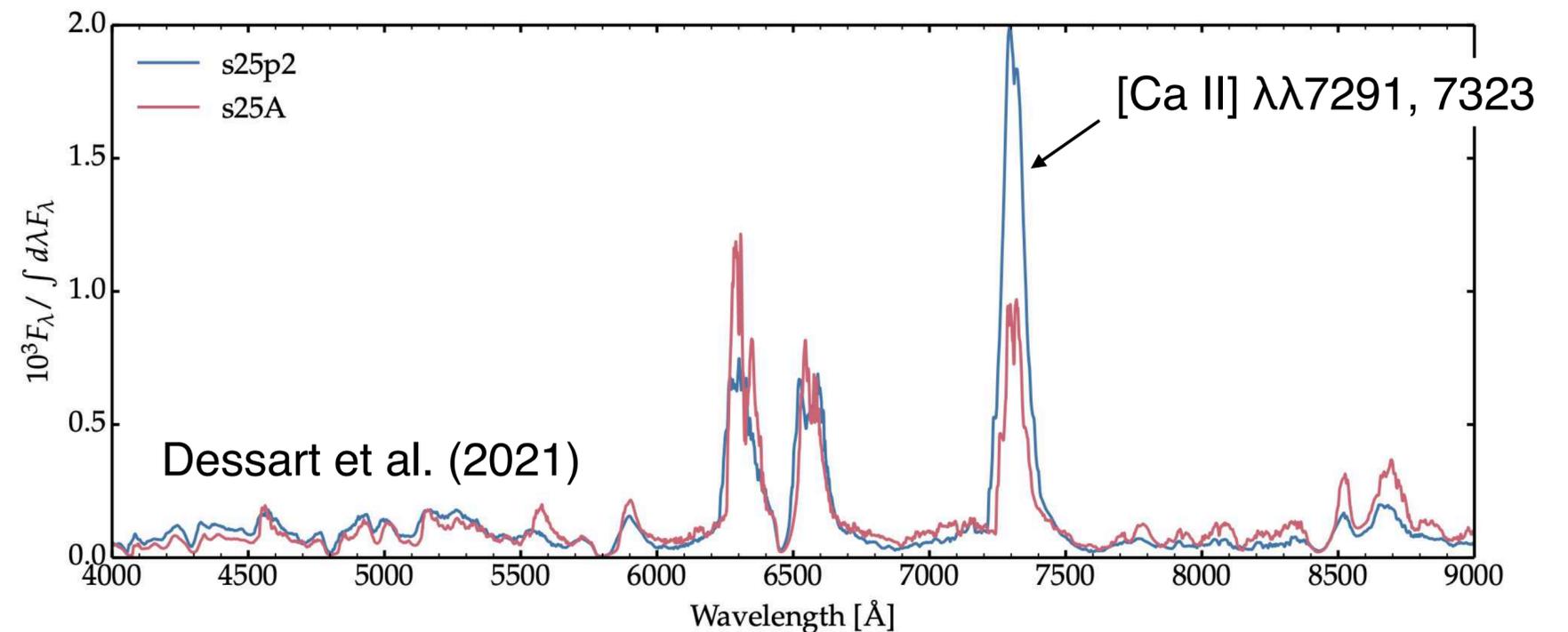


From Sukhbold et al. (2018)

シェルマージャーを経験した酸素層の特徴

- C/Ne 燃焼領域 (O/Ne/Mg 層) へ O 燃焼物質 (Si/S/Ar/Ca) が漏れ込む
- 結果として、O/Ne 層が O/Si 層へ変化 + odd-Z 元素の合成量も増加

超新星の場合、nebula-phase spectra で議論可能 (理論予測)



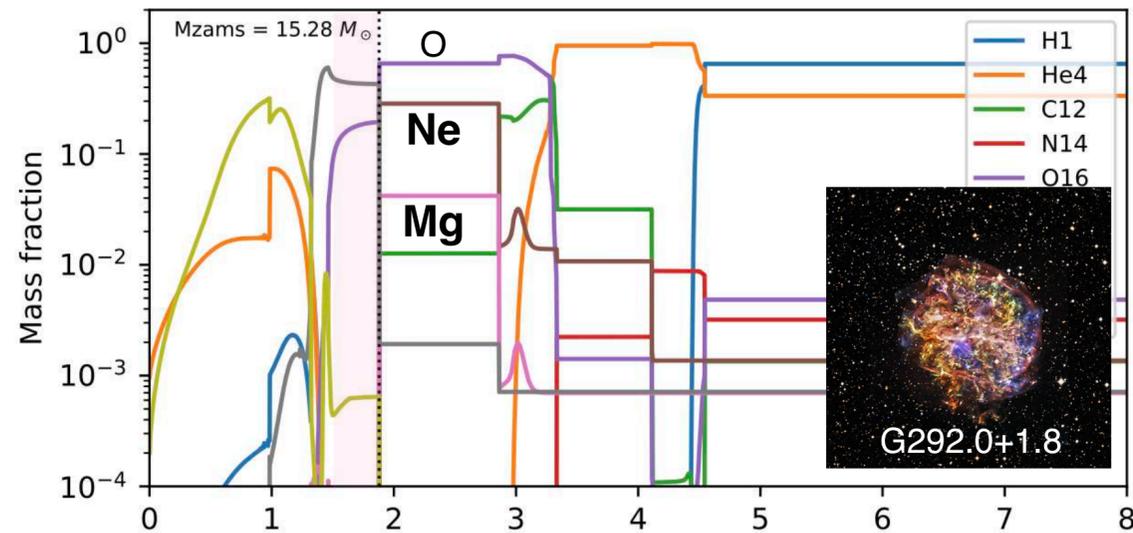
**本研究: 残骸なら特定の酸素層物質を抽出できる？**

# Q. シェルマージャーを観測的に議論するには？

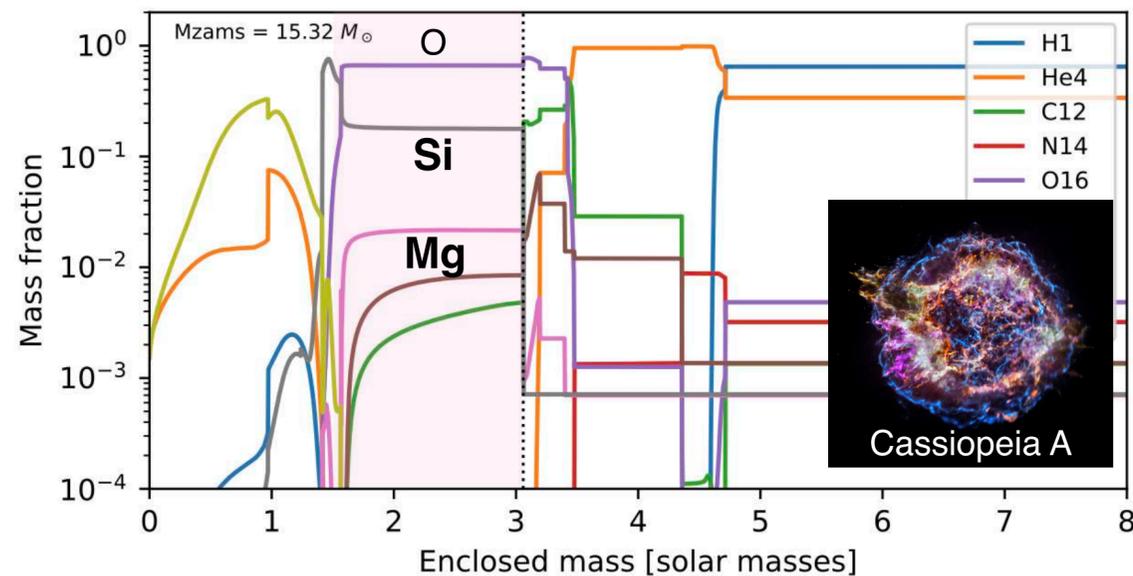
A. 恒星内部の酸素層の元素組成を調べられると区別可能

星内部元素組成

シェルマージャー無し



シェルマージャー有り

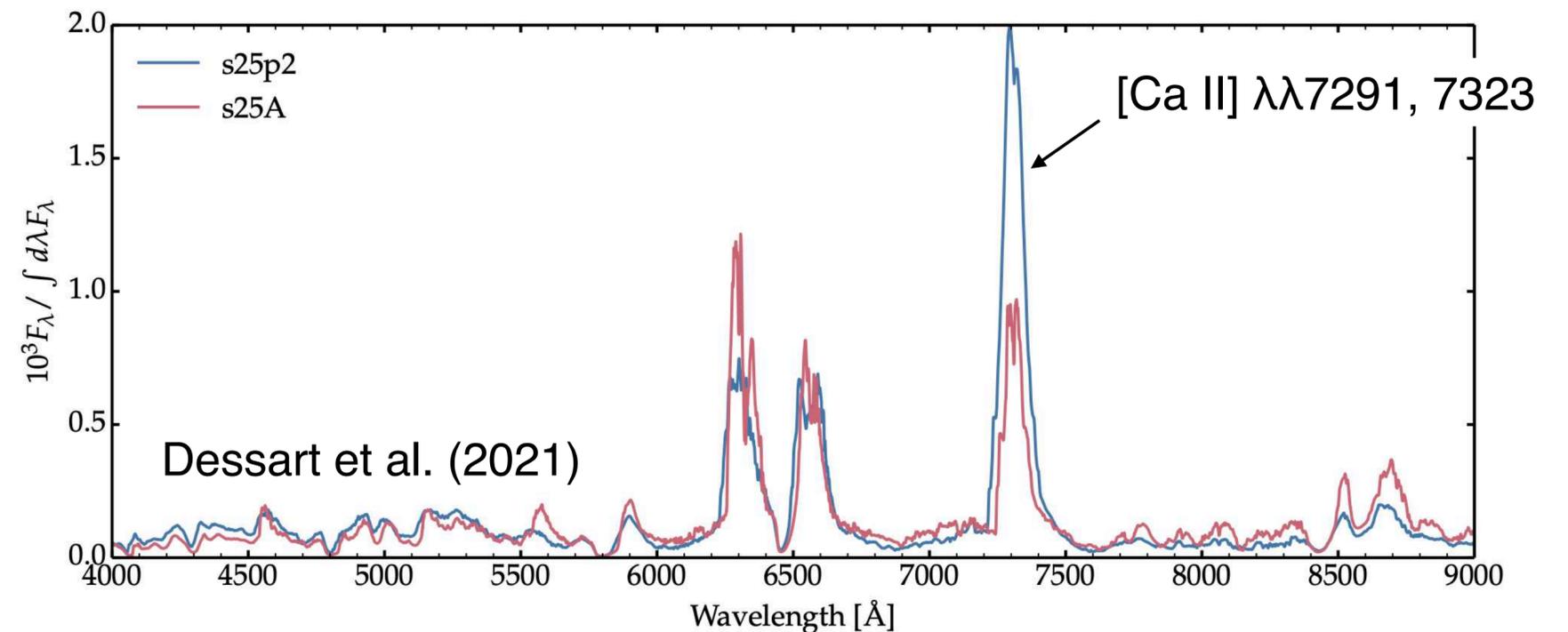


From Sukhbold et al. (2018)

シェルマージャーを経験した酸素層の特徴

- C/Ne 燃焼領域 (O/Ne/Mg 層) へ O 燃焼物質 (Si/S/Ar/Ca) が漏れ込む
- 結果として、O/Ne 層が O/Si 層へ変化 + odd-Z 元素の合成量も増加

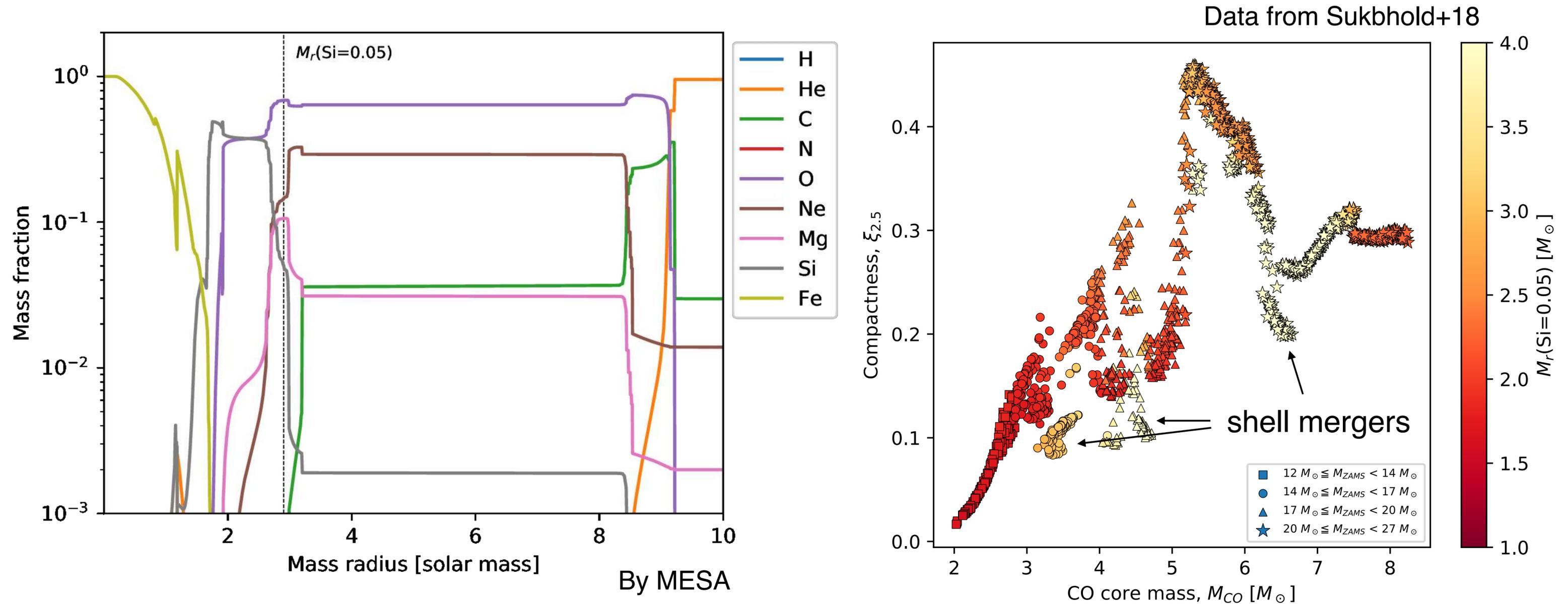
超新星の場合、nebula-phase spectra で議論可能 (理論予測)



**本研究: 残骸なら特定の酸素層物質を抽出できる？**

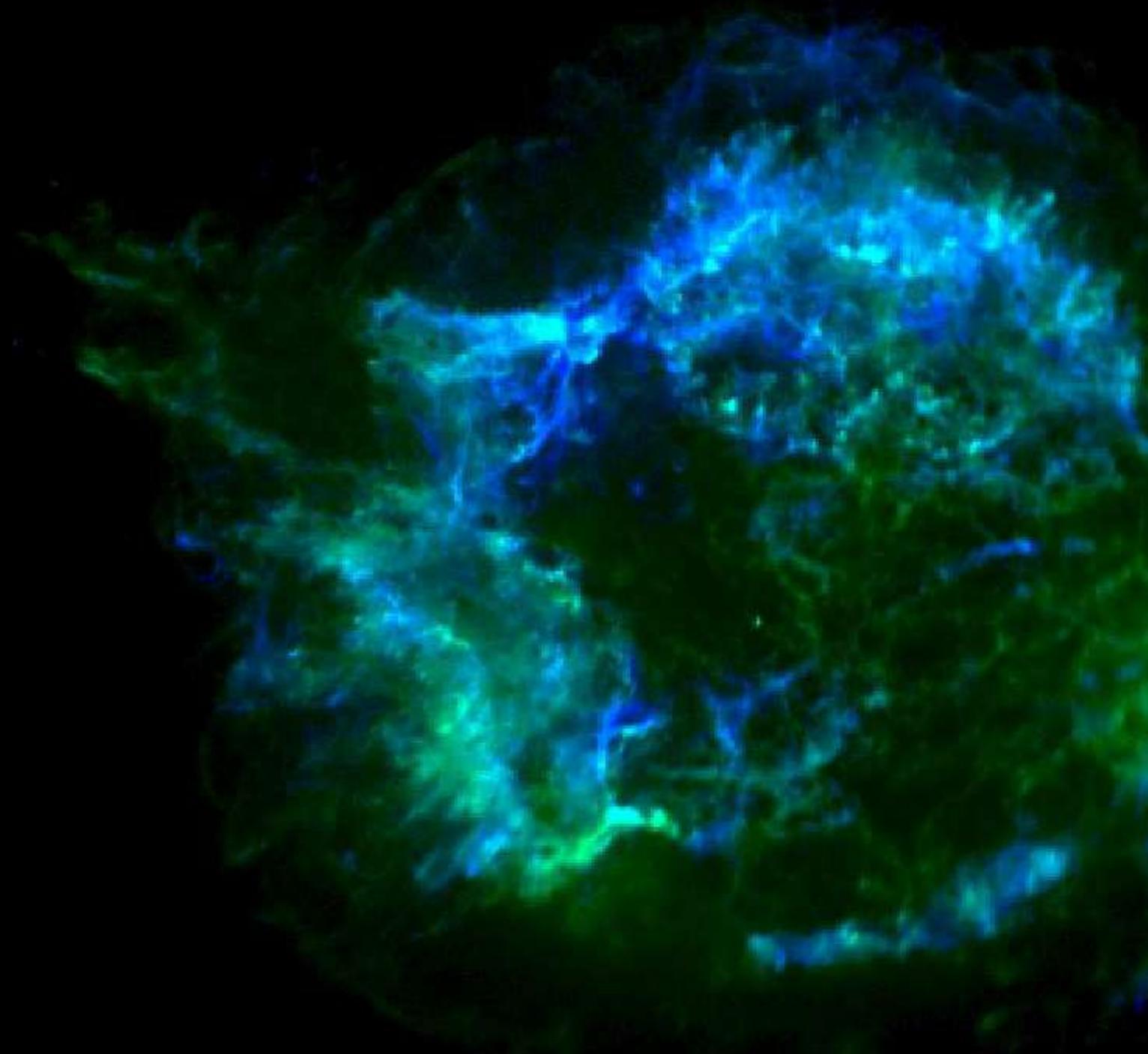
# 一次元恒星モデルを使ったシェルマージャーの分類

恒星内部で“Si 半径” (= O 燃焼領域) が大きく広がる → 内部構造が大きく変化



シェルマージャー現象は、恒星の爆発可能性にも大きな影響を与える？

# カシオペア座A内の酸素 (恒星由来) の分布



## Chevalier & Kirshner (1979)

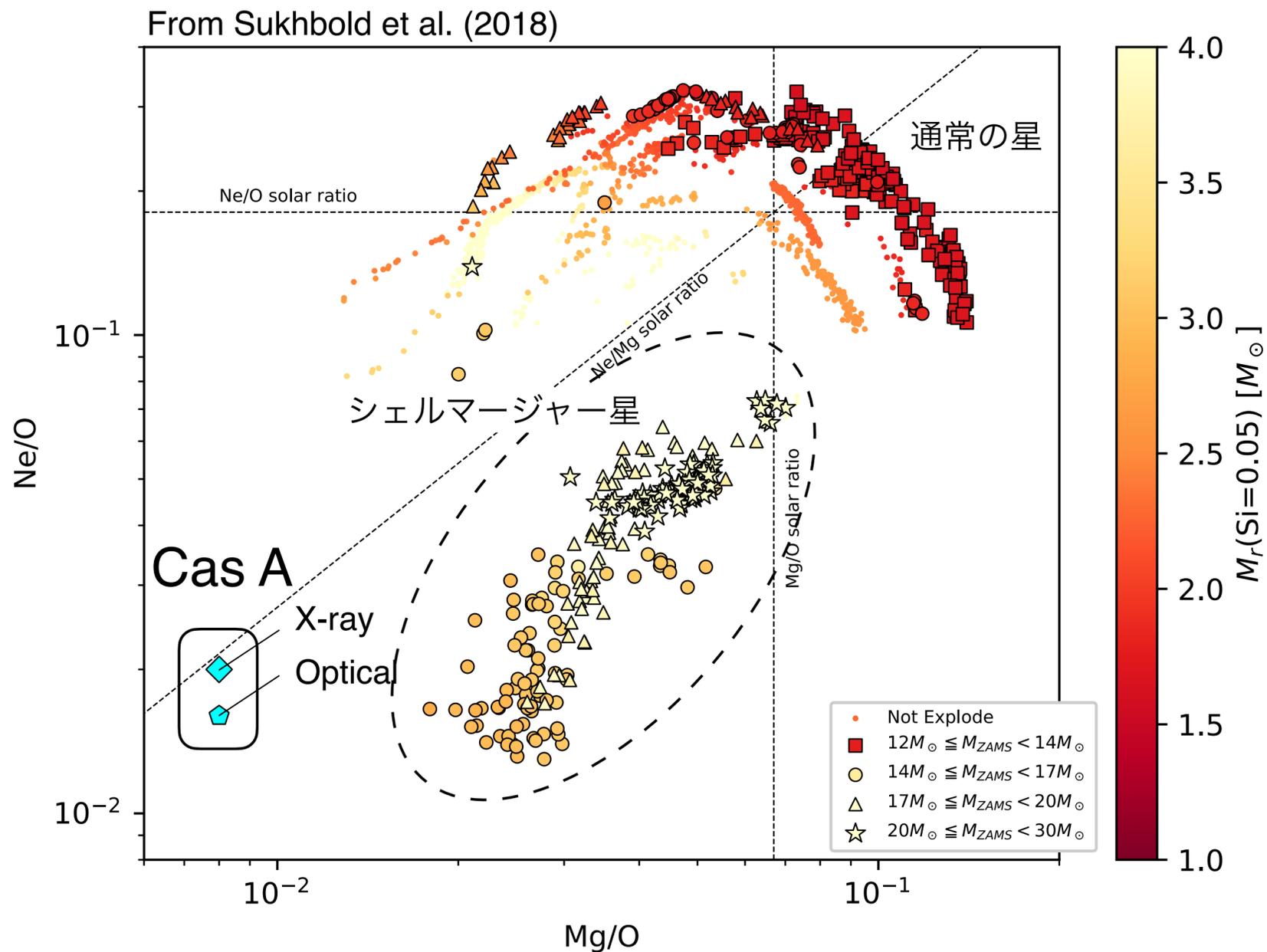
In comparing the observed abundances with nucleosynthesis calculations, it is now clear that the comparison should be with individual layers within a stellar model. The models of Weaver, Zimmerman, and Woosley (1978) give this information in detail for stars of mass  $15 M_{\odot}$  and  $25 M_{\odot}$ . However, the mass of the Cas A progenitor is not known, so we do not know whether the comparison is appropriate. The information given by Weaver, Zimmerman, and Woosley (1978) is for the supernova progenitor star at the end of its hydrostatic burning phases. It has been assumed that no mass loss occurred. On the other hand, the progenitor of Cas A does appear to have undergone considerable mass loss. Despite these problems, we proceed with the comparison of theory with observation. One property of the nucleosynthesis calculations is that at the end of hydrostatic burning, the O-rich region is quite distinct from the "Si" (Si group) rich region. The amount of mass with substantial amounts of both O and "Si" is very small. However, the observations of Cas A indicate that most of the emitting regions contain substantial amounts of both O and "Si."

1970年代から同様の指摘

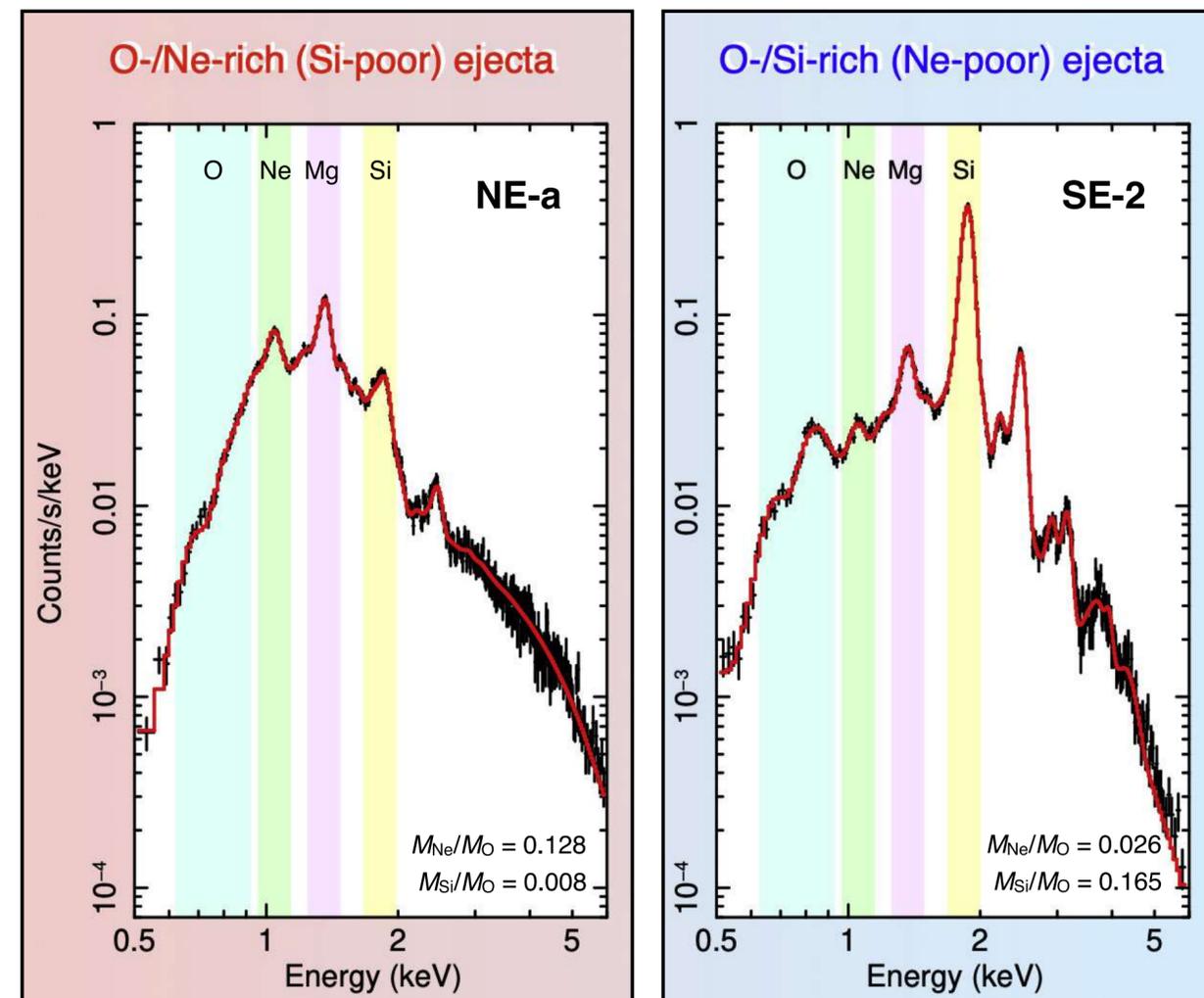
酸素 (青) と シリコン (緑) が大部分で共存 → シェルマージェー的

# カシオペア座Aの親星内のシェルマージャーの観測的証拠

残骸全域で極端に低い  $\text{Ne/O} \approx 0.1$  solar by 可視光・X線観測 → 他の現象での説明は困難



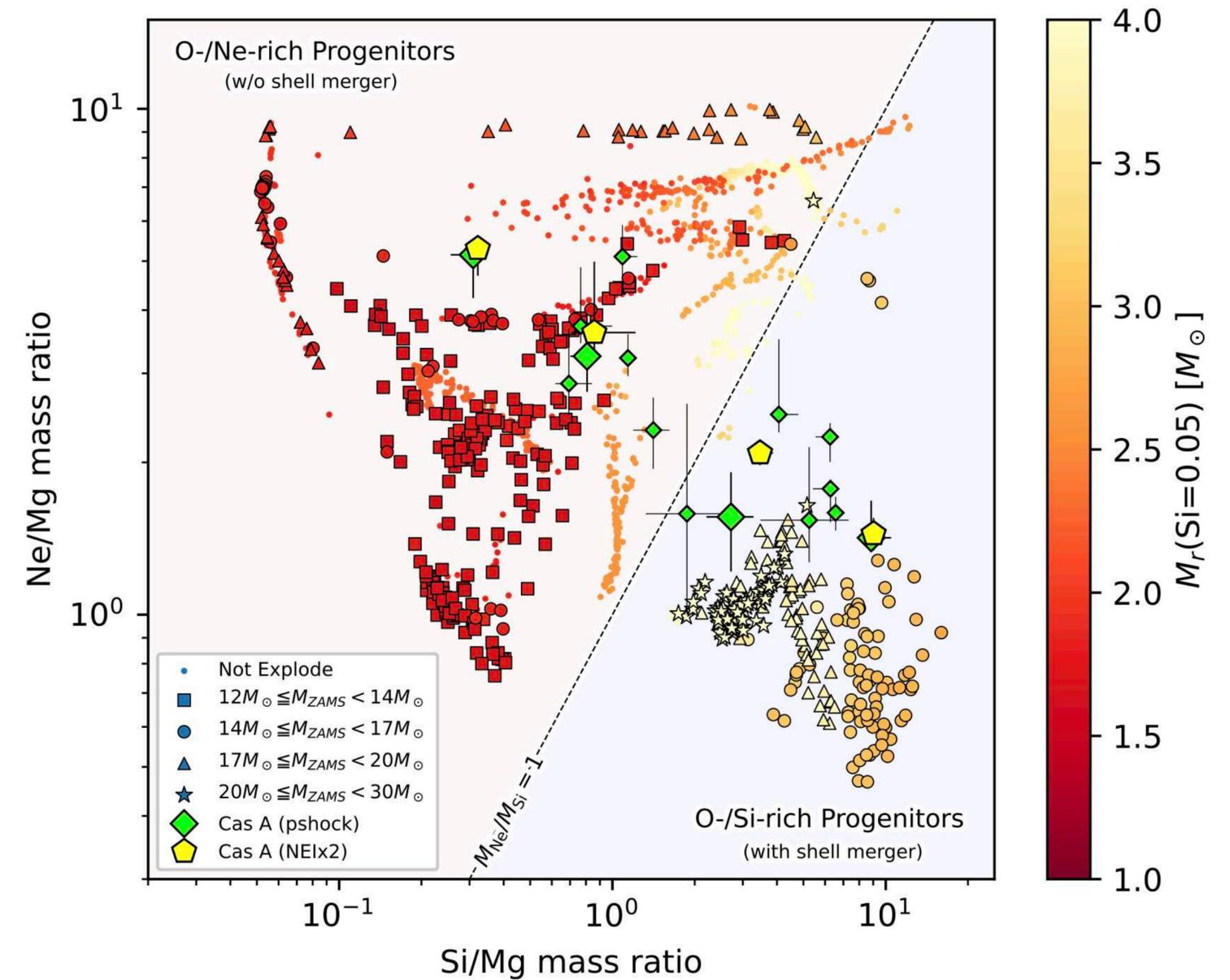
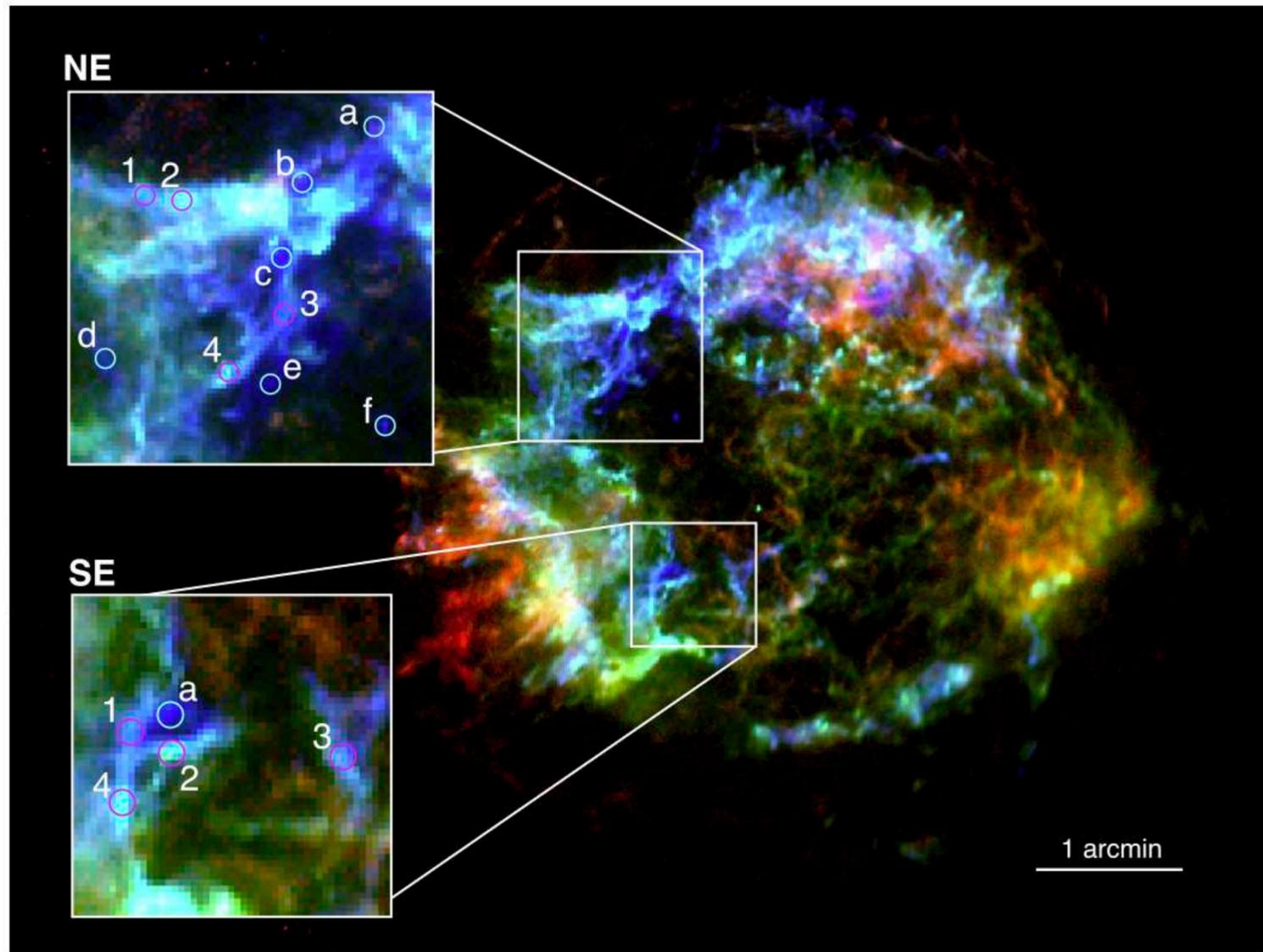
酸素リッチ構造の元素組成は領域で異なる (次ページ)



豊富な odd-Z 元素の観測もシェルマージャー支持 (後のスライドで紹介)

# シェルマージャーによる不均一な物質混合

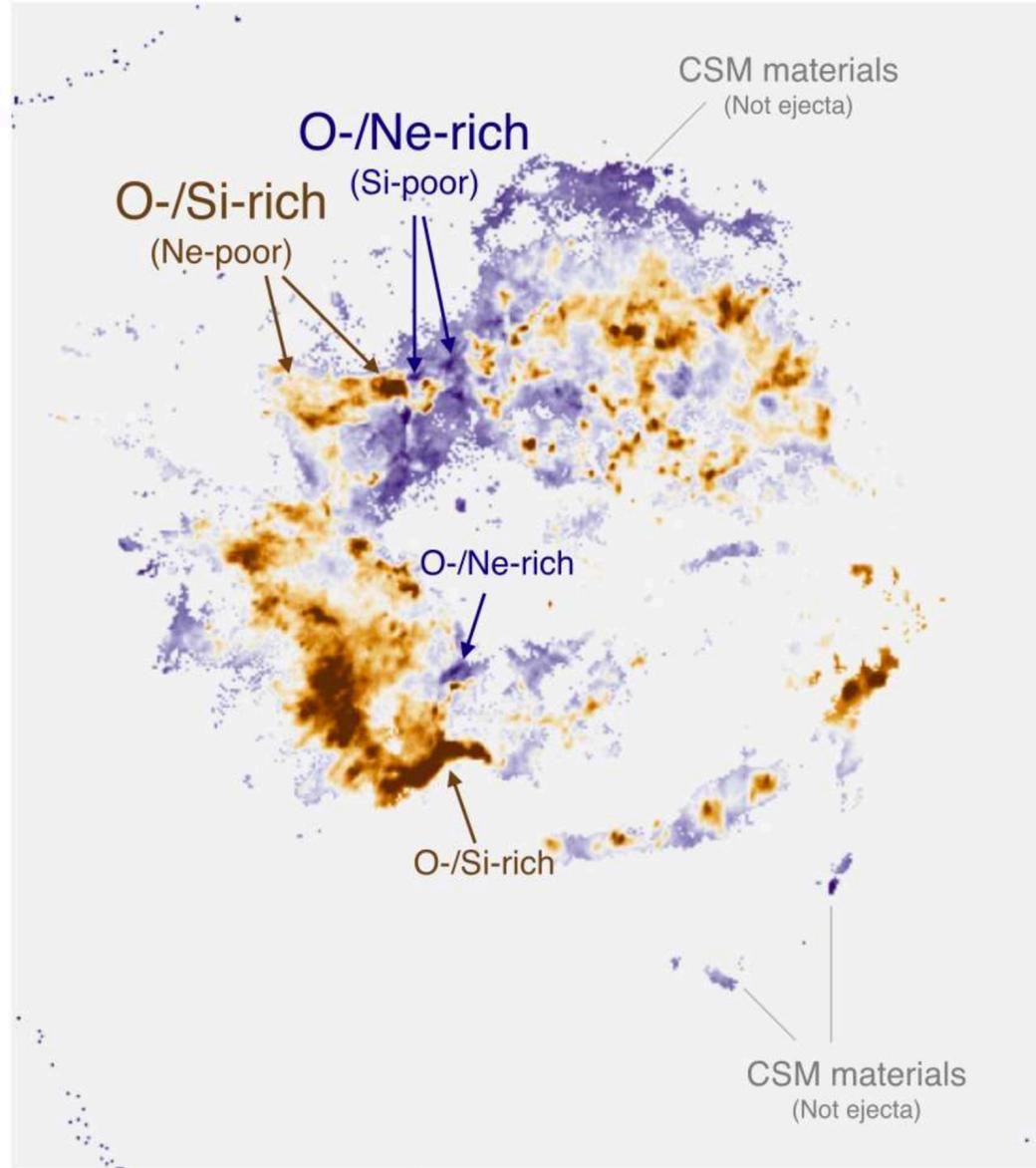
酸素・シリコンの混合比に“ムラ”が存在 → 物質が混ざりきらない短い時間スケール  $\lesssim 10^4$  s



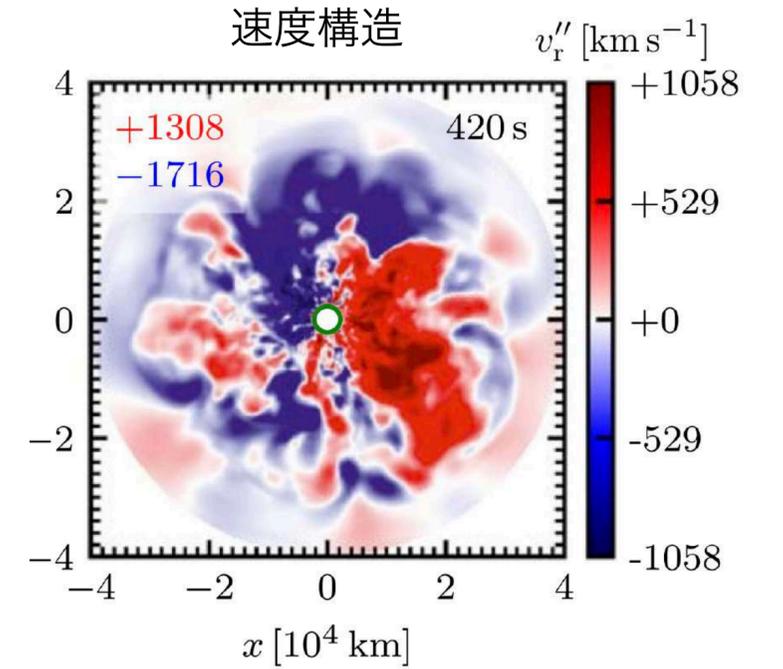
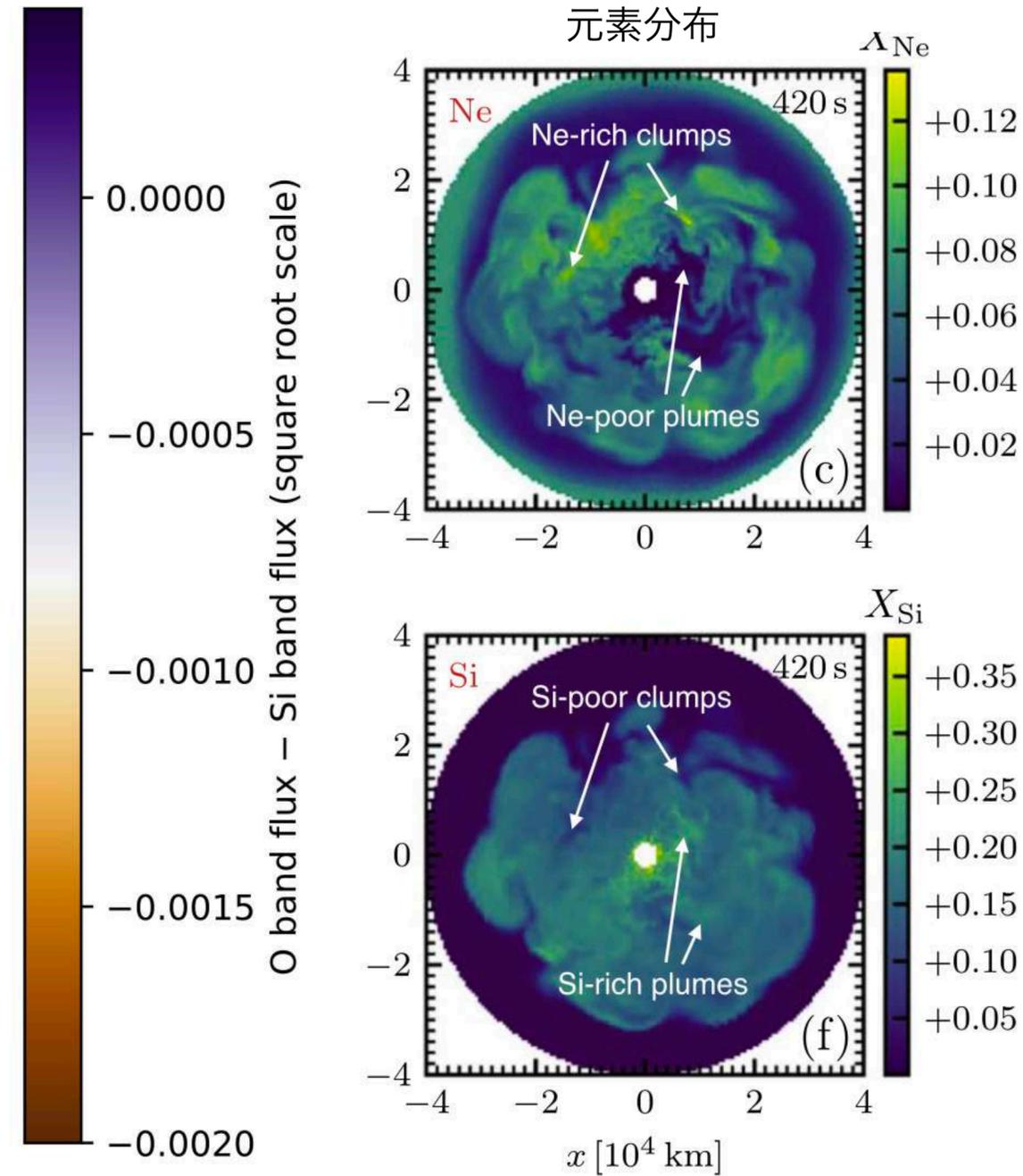
Cas A の親星の内部構造 (元素・密度・速度構造) が非対称だった証拠 → **超新星非対称性のタネ**

# シェルマージャーによる不均一な物質混合

**観測:** O/Si- and O/Ne-rich 構造の可視化



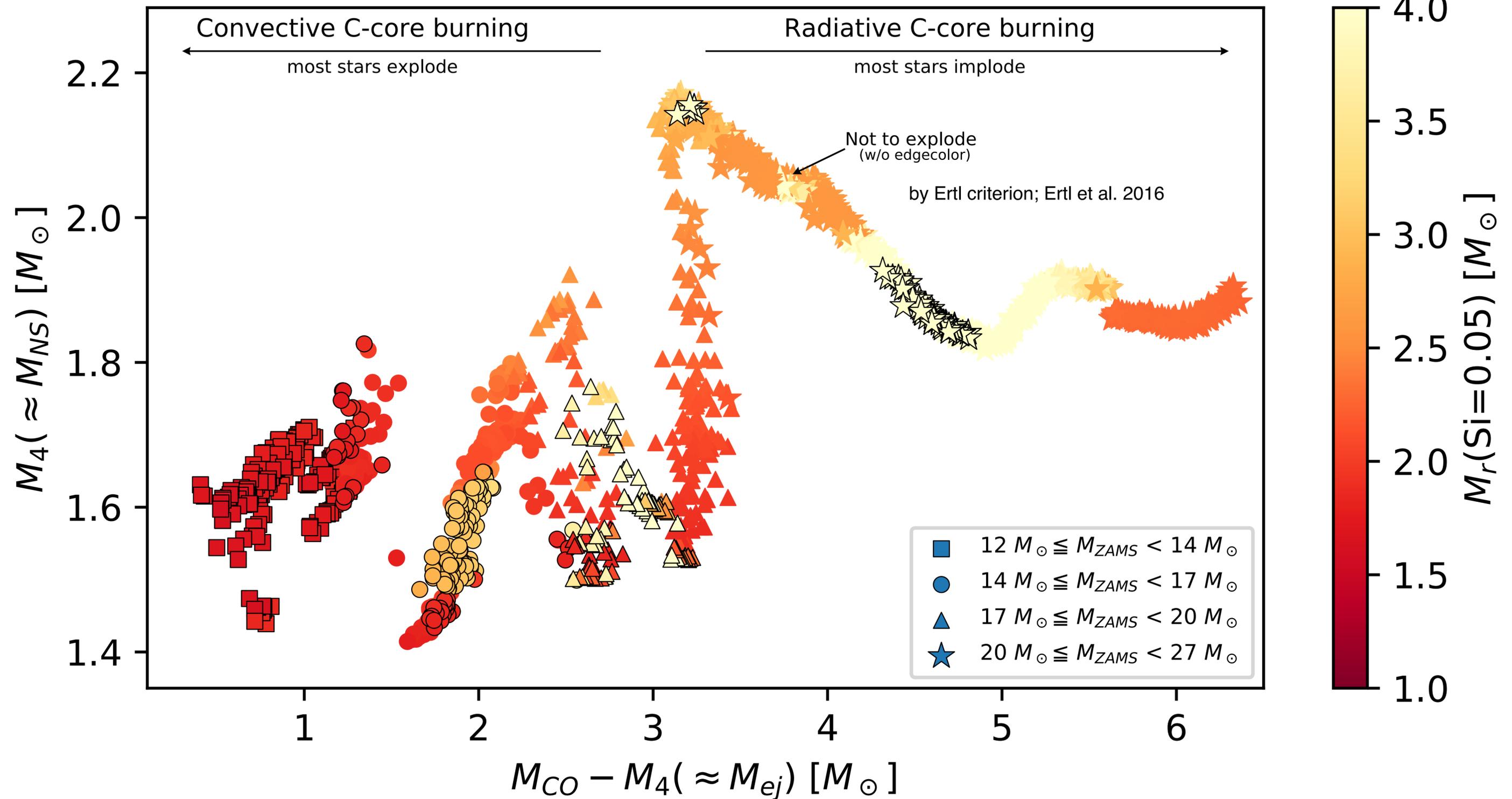
**理論:** 3D シェルマージャーモデル (19 太陽質量) by Yadav et al. (2020)



- 残骸構造と比べると小さいスケールで組成ムラが存在
- 多次元恒星モデルでも、同様に小さいスケールのムラが確認できる (継続時間にも依存)
- 組成ムラよりも速度ムラの方が大局的な構造を持つ?

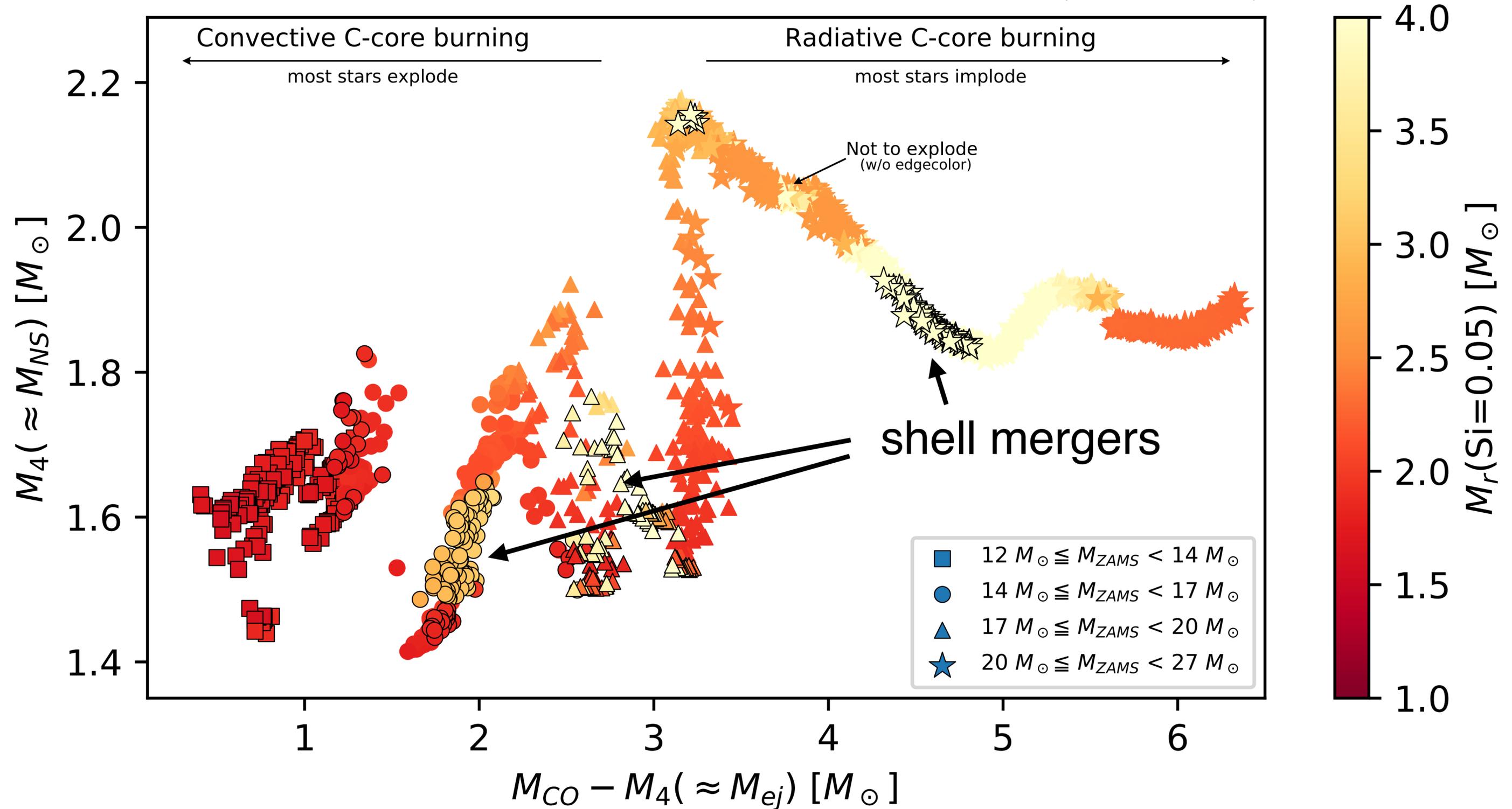
# 親星の内部構造の比較

Made from data in Sukbhold+18 (see also Sukbhold+20)



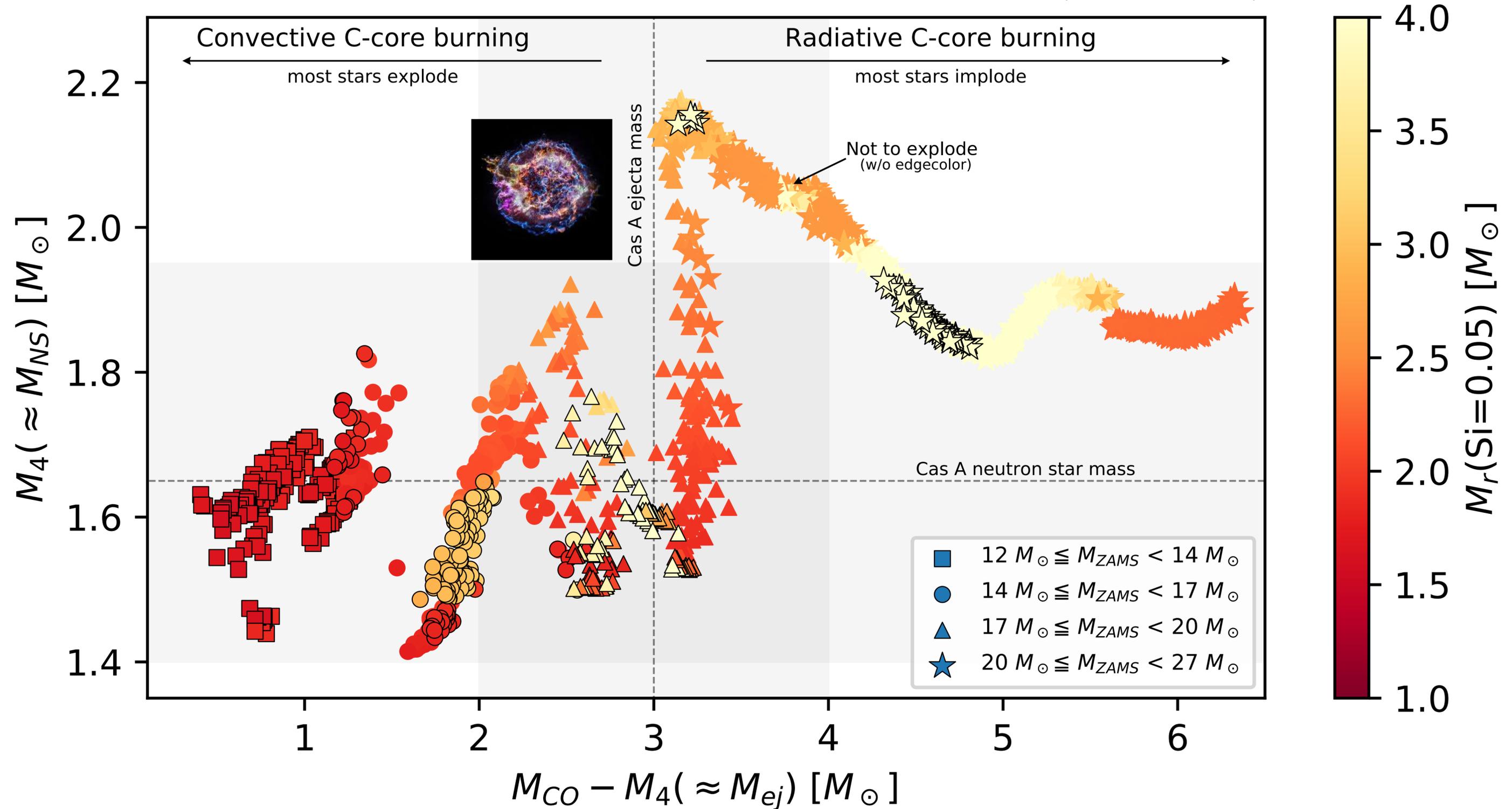
# 親星の内部構造の比較

Made from data in Sukbhold+18 (see also Sukbhold+20)



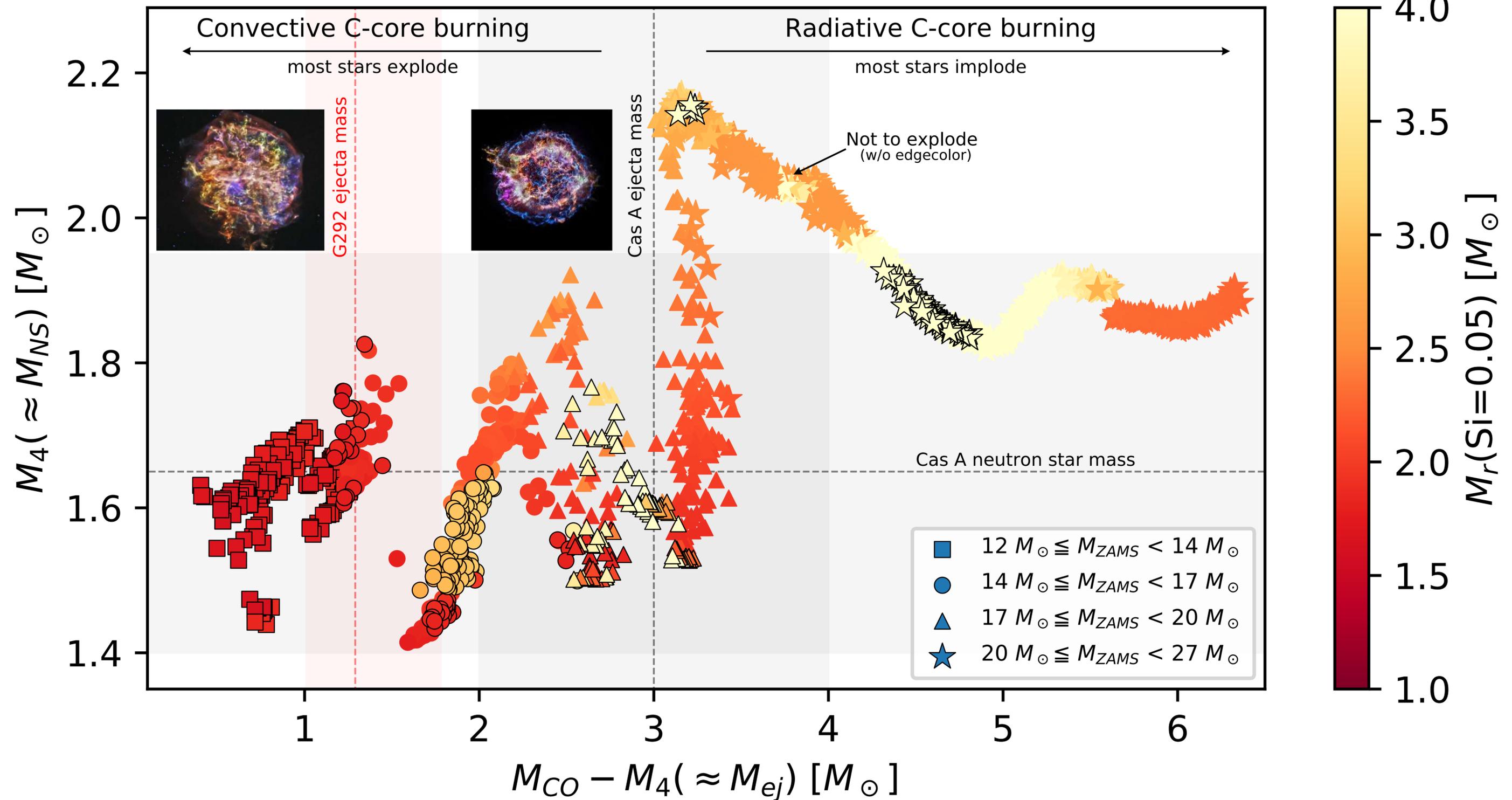
# 親星の内部構造の比較

Made from data in Sukbhold+18 (see also Sukbhold+20)

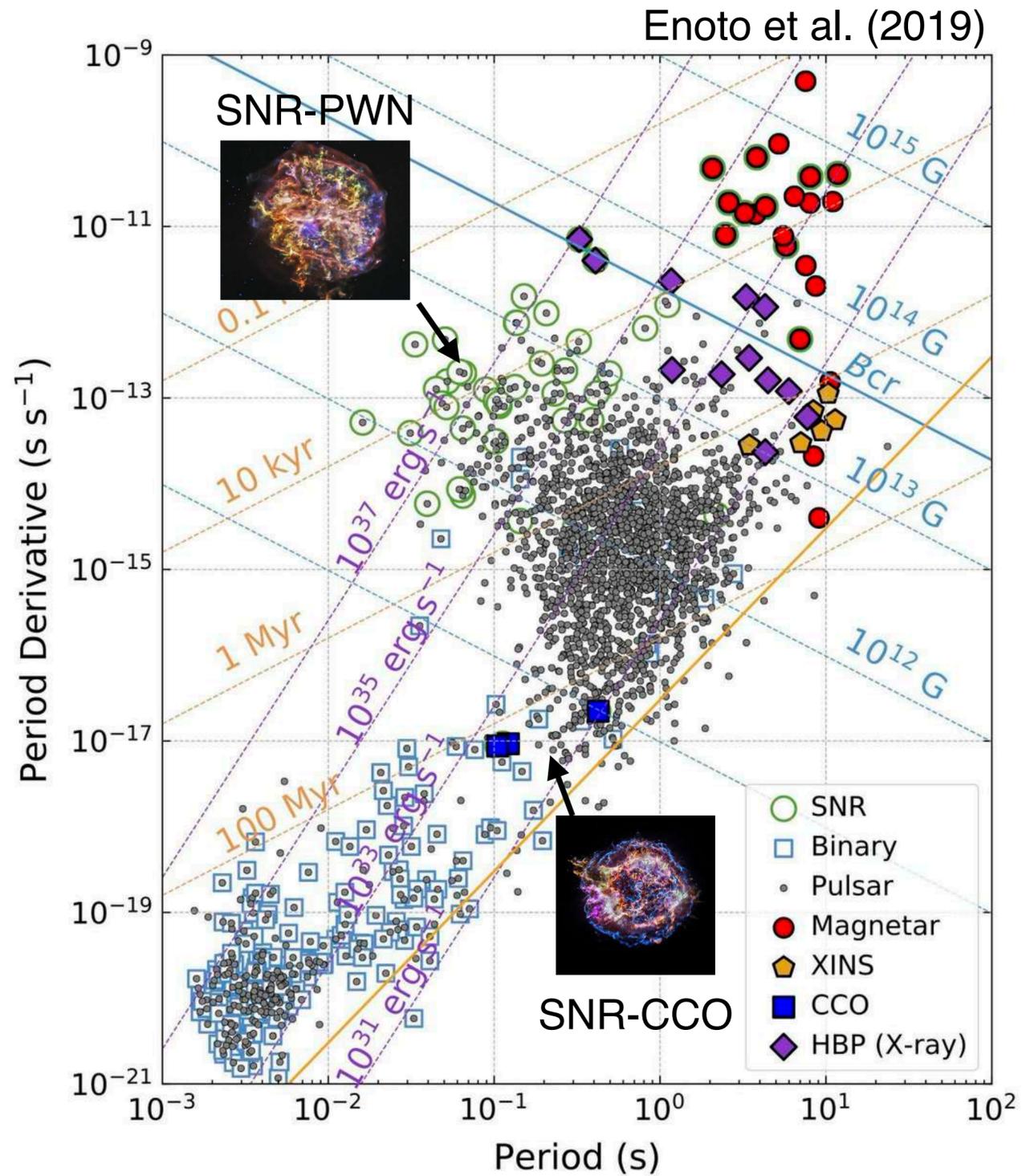


# 親星の内部構造の比較

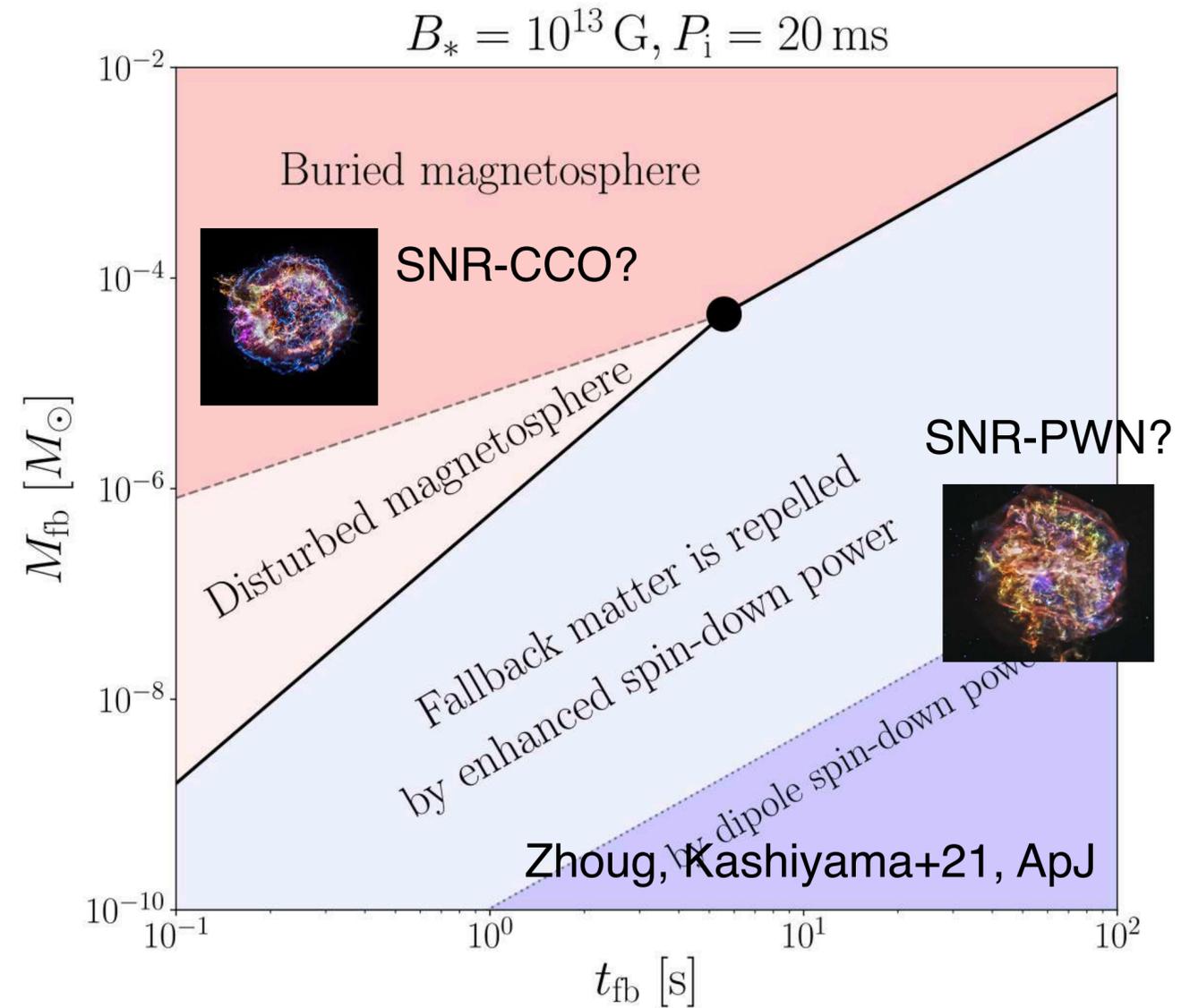
Made from data in Sukbhold+18 (see also Sukbhold+20)



# 星の内部構造がコンパクト天体形成に影響与えてたり...?



例えば、CCO 形成への影響などは？

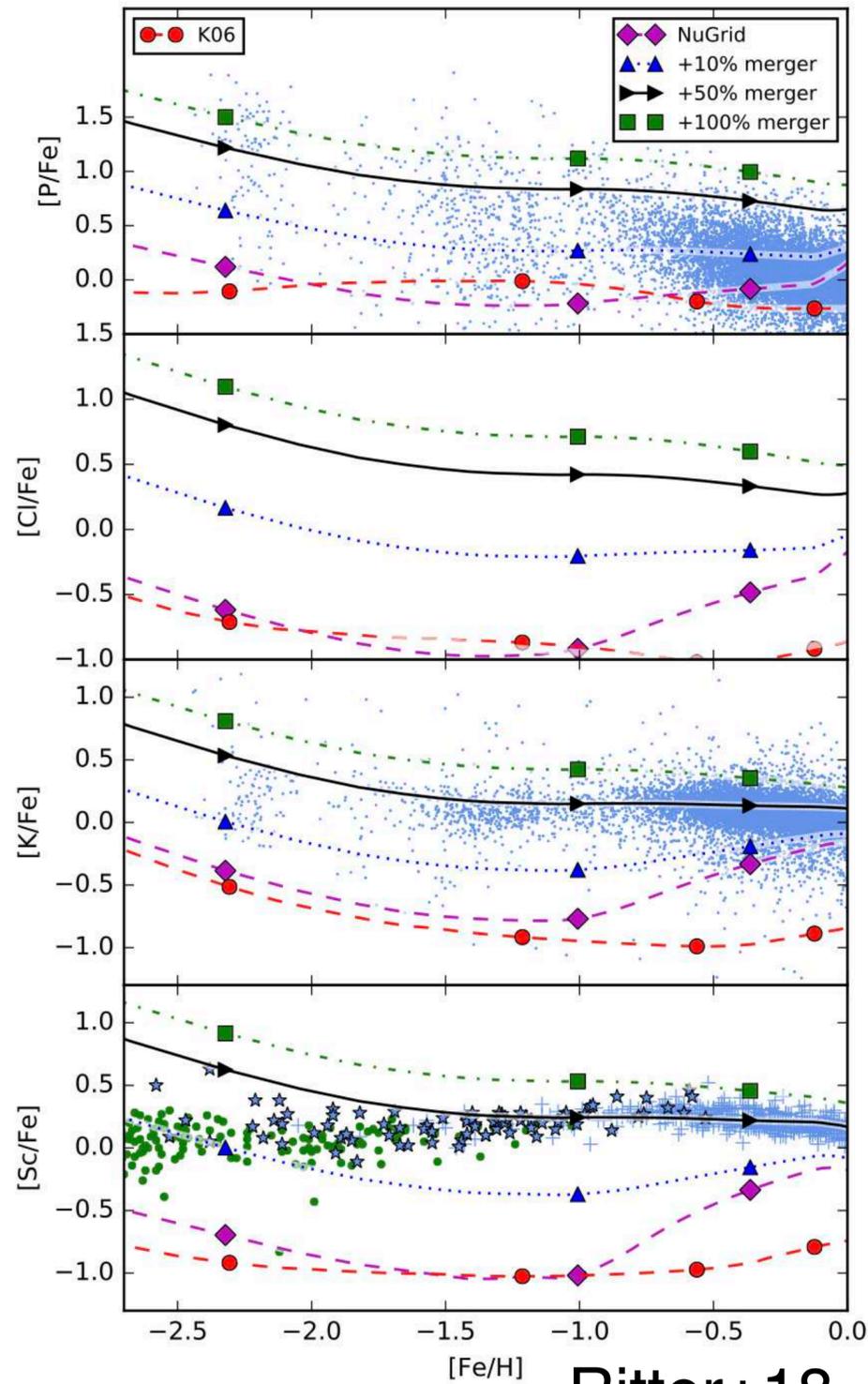


爆発時の fallback rate に、内部構造の影響は無いだろうか？

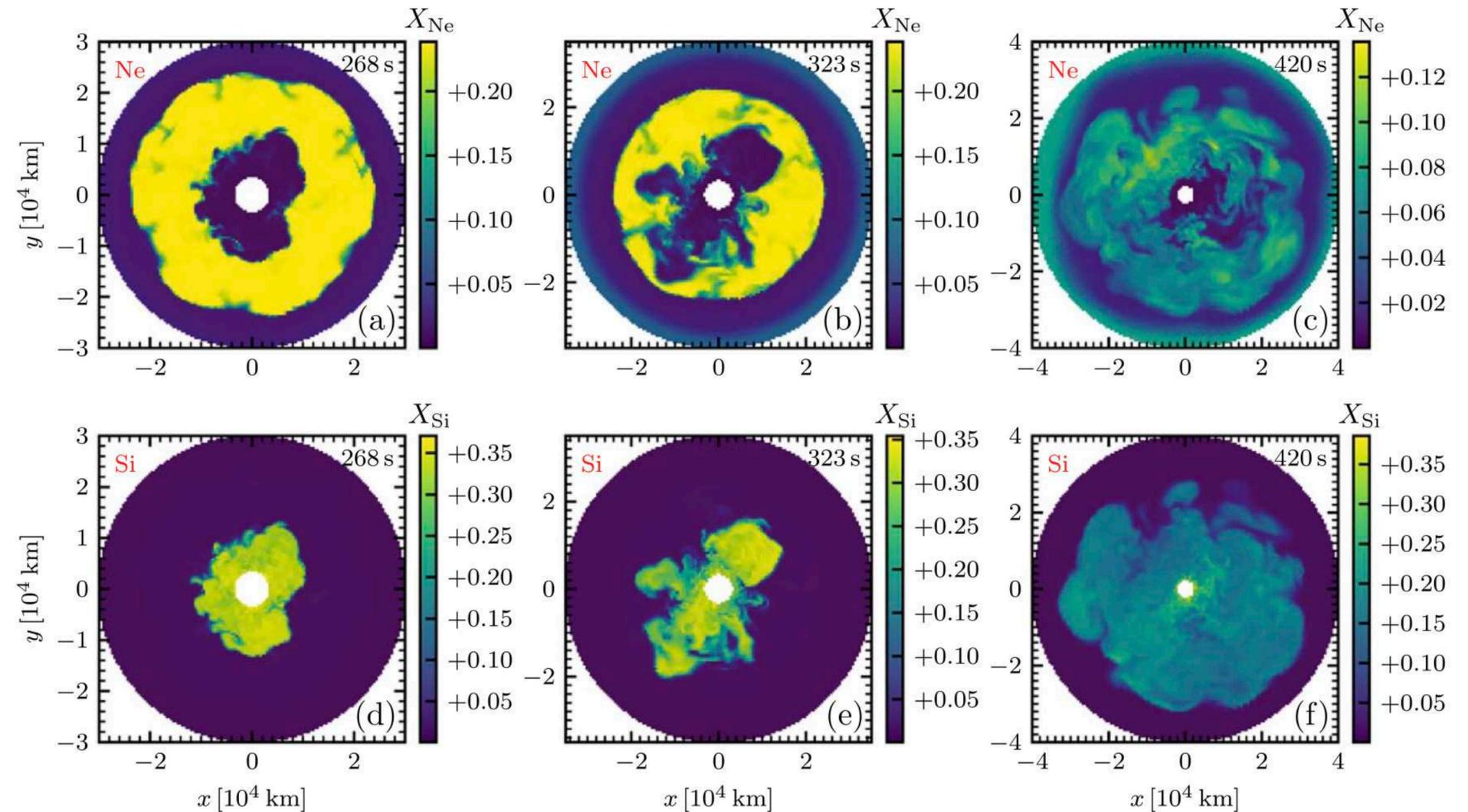
# シェルマージャーのもう一つ重要な元素合成: 軽い odd-Z 元素

## 化学進化モデルで説明難しい odd-Z 元素 (P, Cl, K, Sc) が強化

シェルマージャーで C 燃焼領域の物質が O 燃焼領域へ  
 → 何かしらの  $(\gamma, p)$  or  $(\gamma, n)$  が強化され  $^{38}\text{Ar}(p, \gamma)^{39}\text{K}$  のような経路が増える

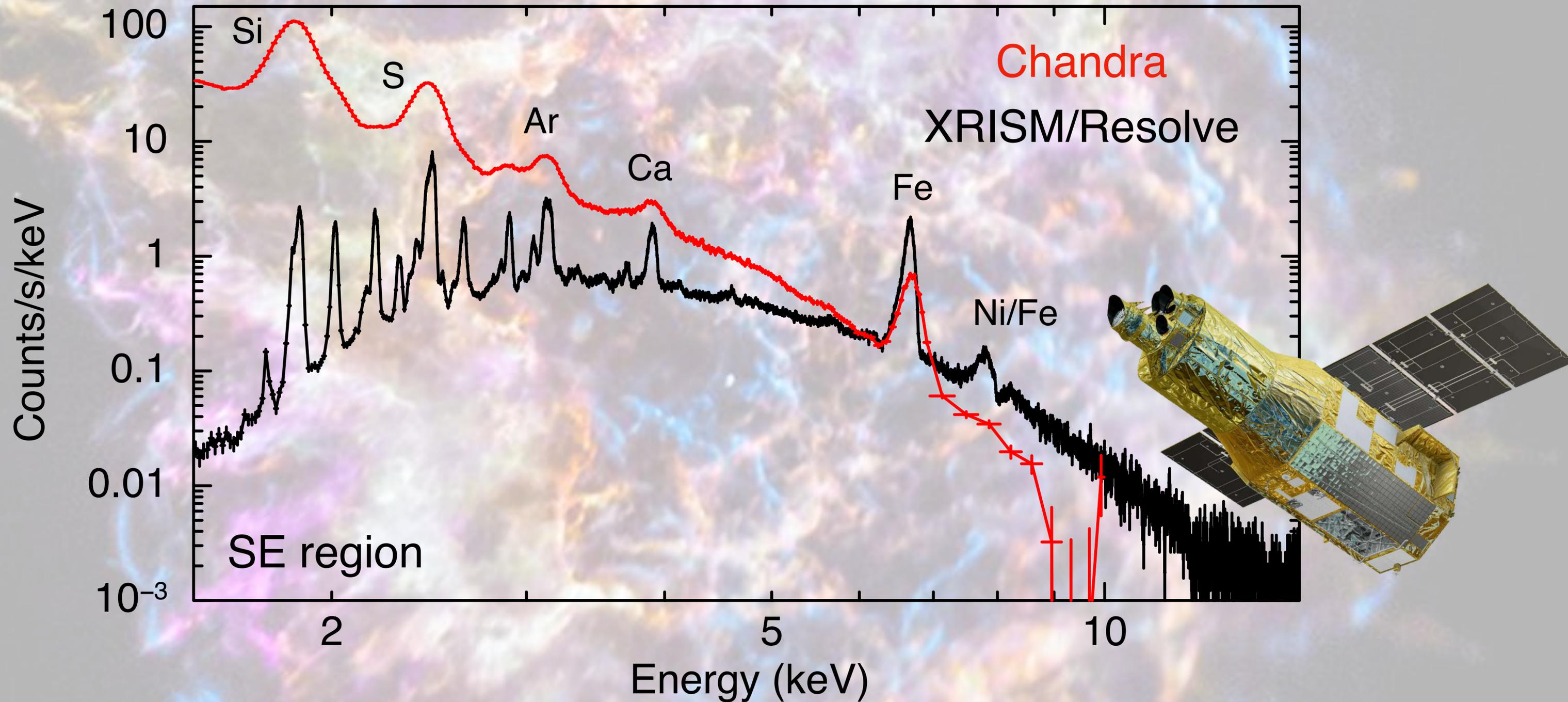


Ritter+18



Yadav+20

# XRISM 衛星による超新星残骸 Cassiopeia A 観測！

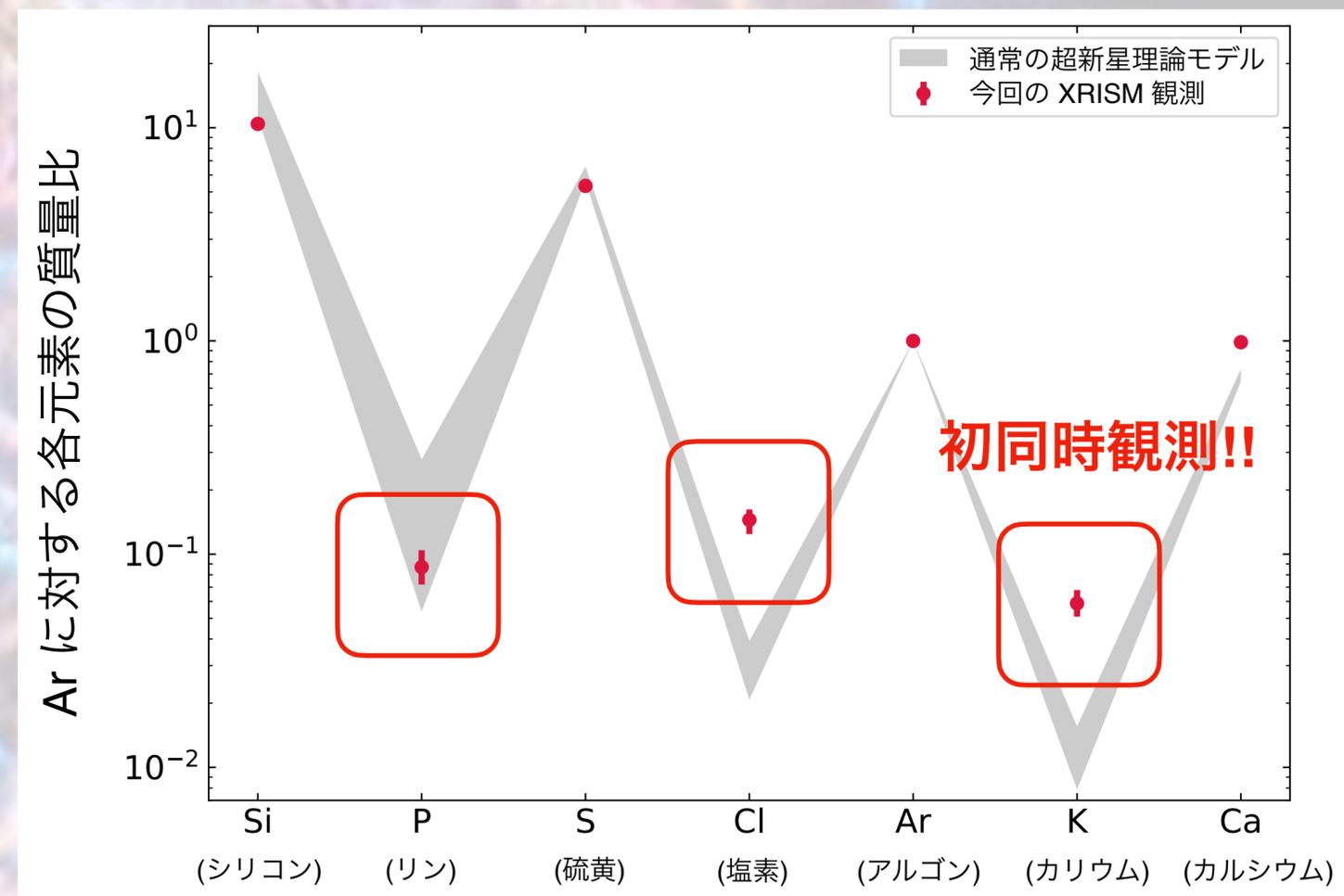
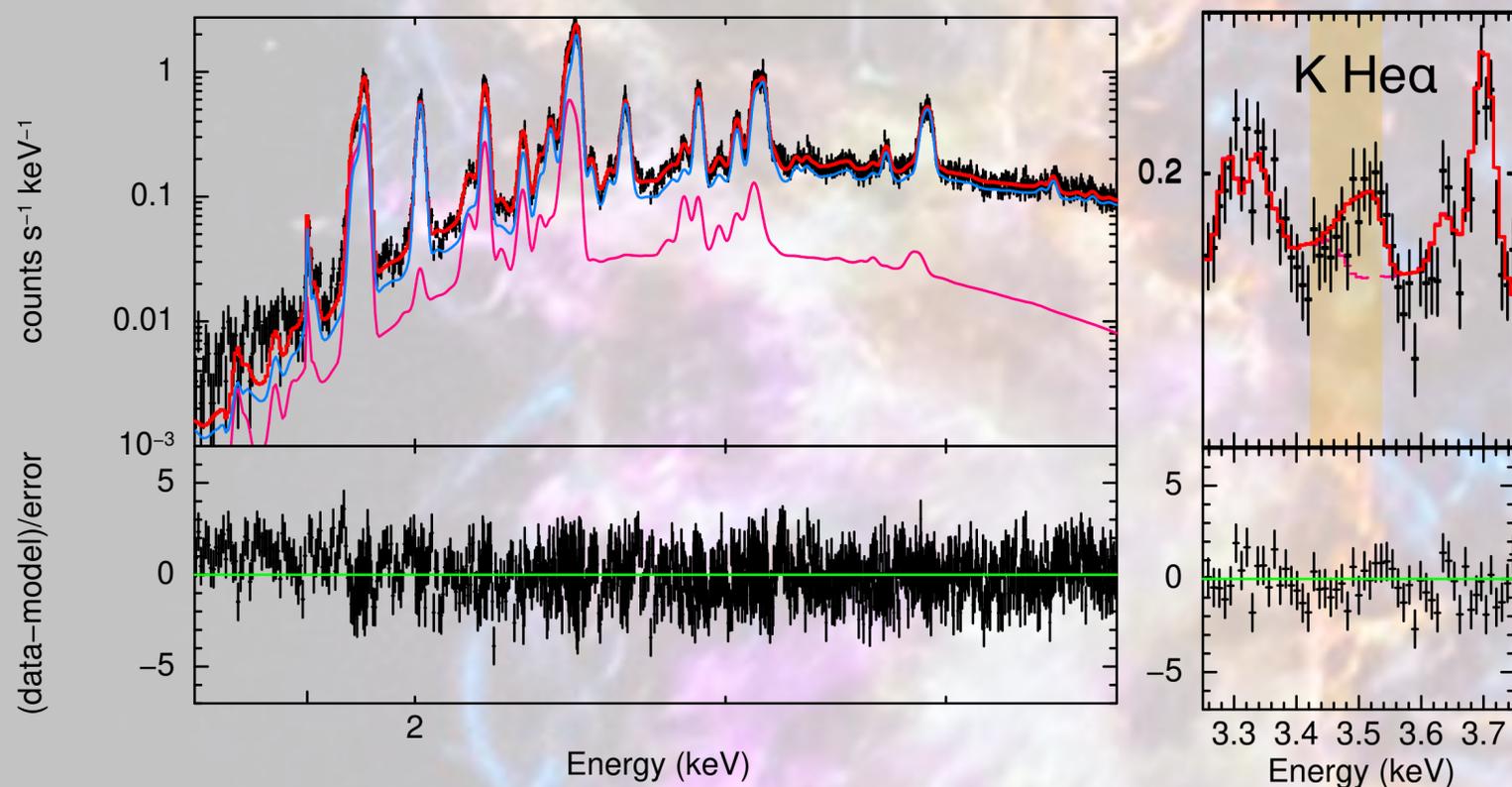


X線マイクロカロリメータの精密X線分光によって、より詳細な元素測定が可能に！

# 希少元素の観測: odd-Z 元素 (P, Cl, K) の観測と解釈

XRISM で超新星爆発 (残骸) から初めて P, Cl, K を観測することに成功!!

精密X線分光から組成比決定

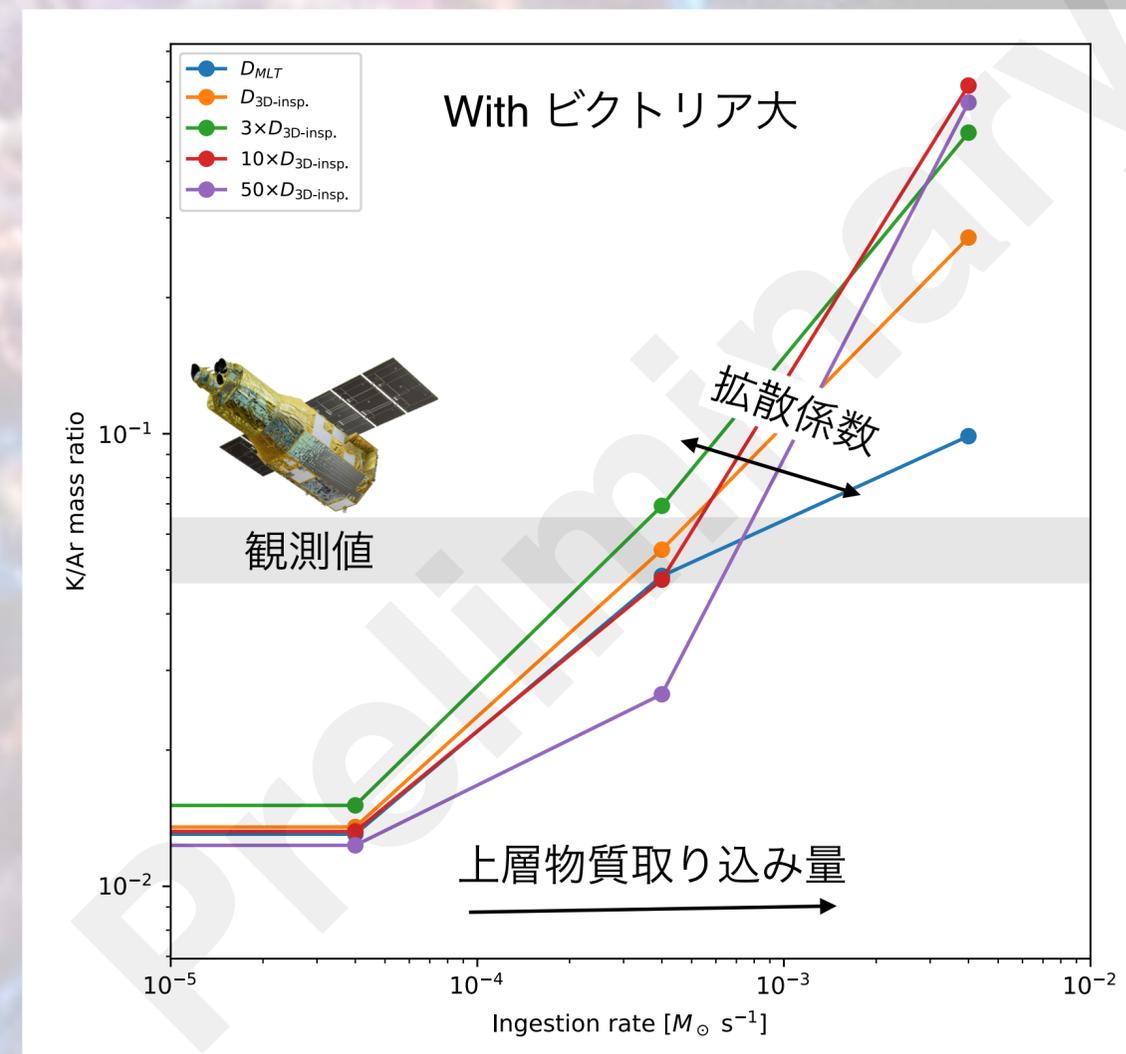
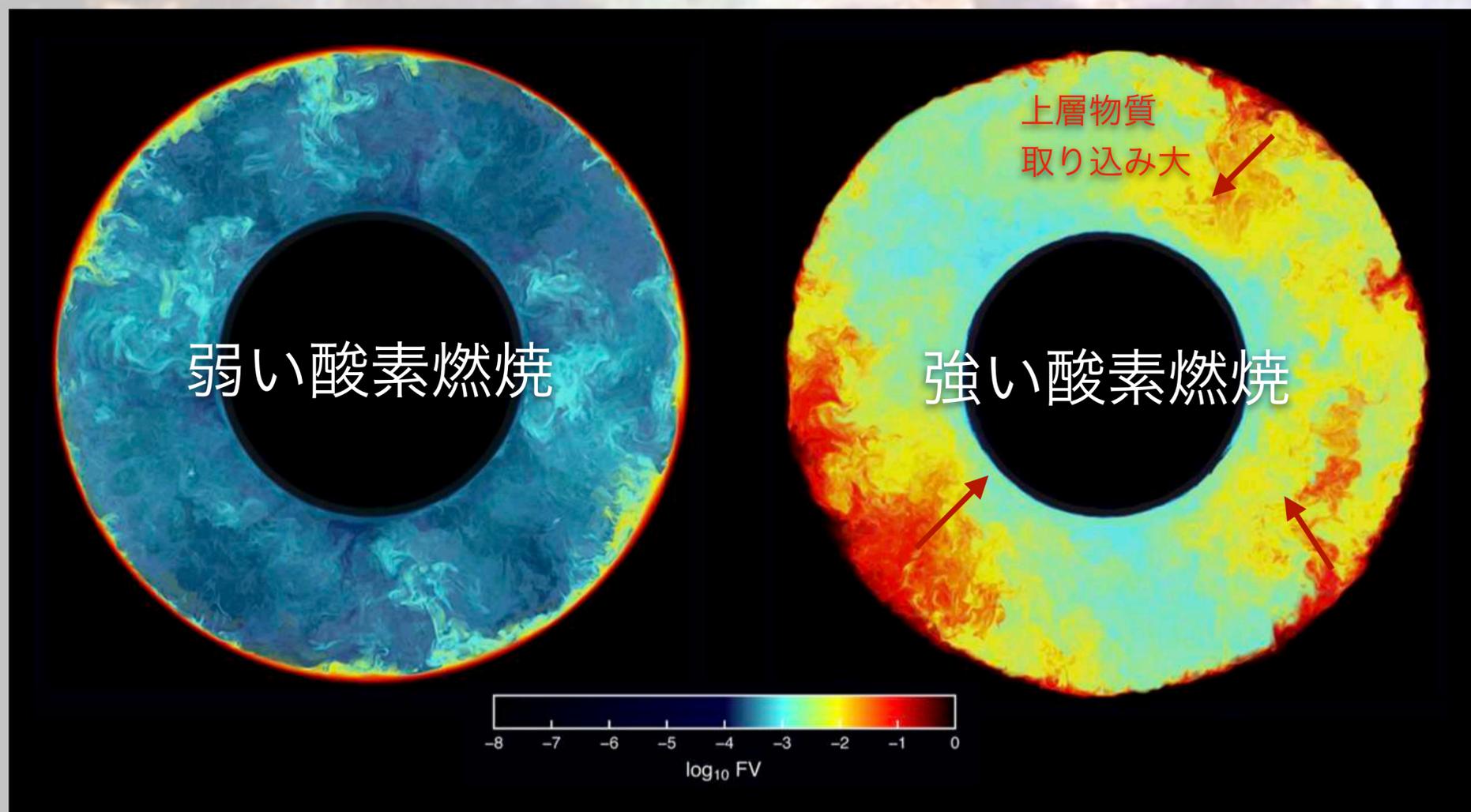


XRISM collaboration (T. Sato, K. Matsunaga, H. Uchida) et al. (2025), Nature Astronomy

シェルマージャー/回転/連星などの恒星活動無しでは説明できない元素量

# 希少元素の観測: odd-Z 元素 (P, Cl, K) の観測と解釈

対流パラメータ (拡散係数 & 上層取り込み量) の違いが odd-Z 合成量を変化



現実の星で、どのような対流混合を経験したかで観測量は変化 → 観測から制限可能か？

(現在、京大 松永くんがビクトリア大で訪問研究中)

# JWST 観測もシェルマージャーを支持

(O, Ne, Mg, Ar, K 輝線の強度比の変化は、X線観測を支持)

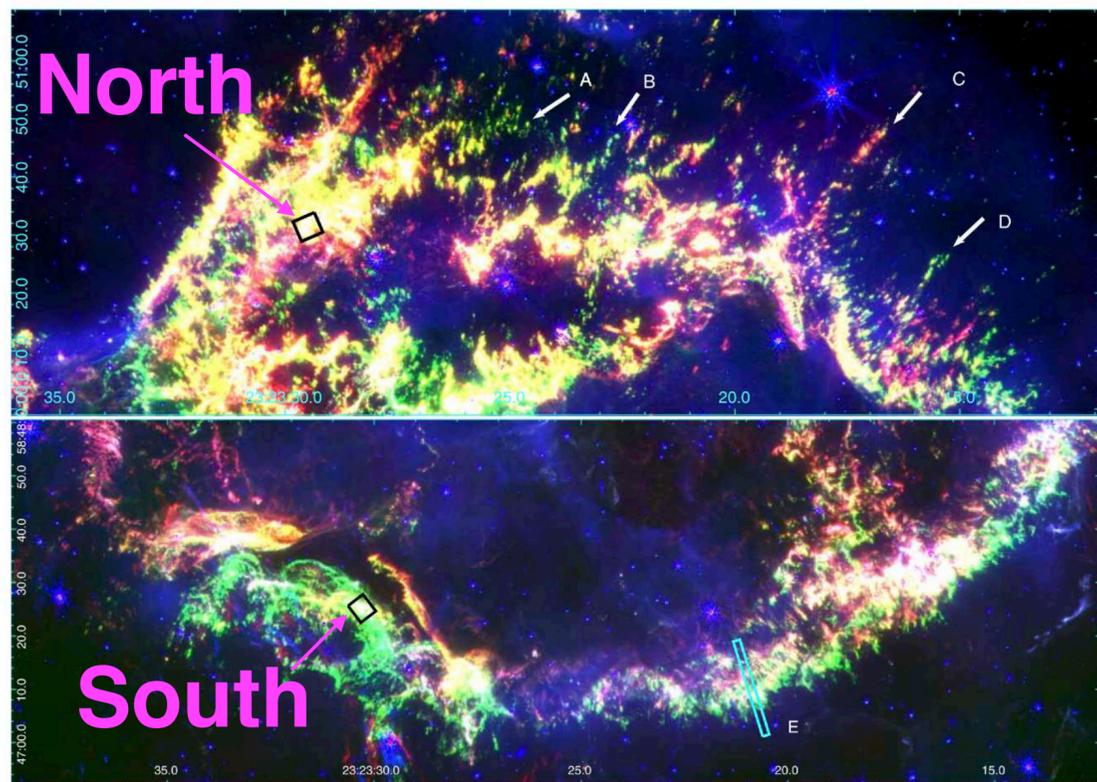
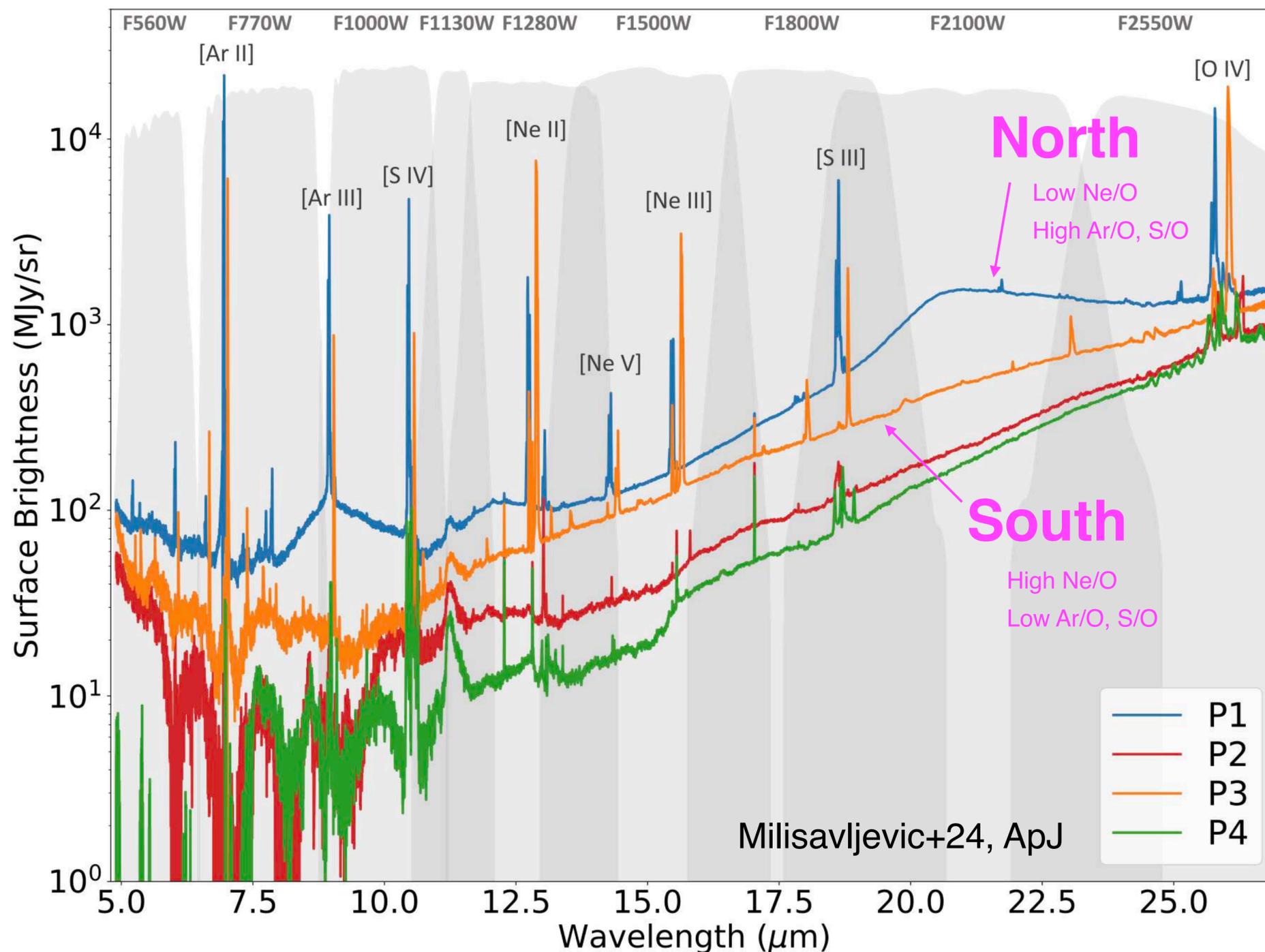
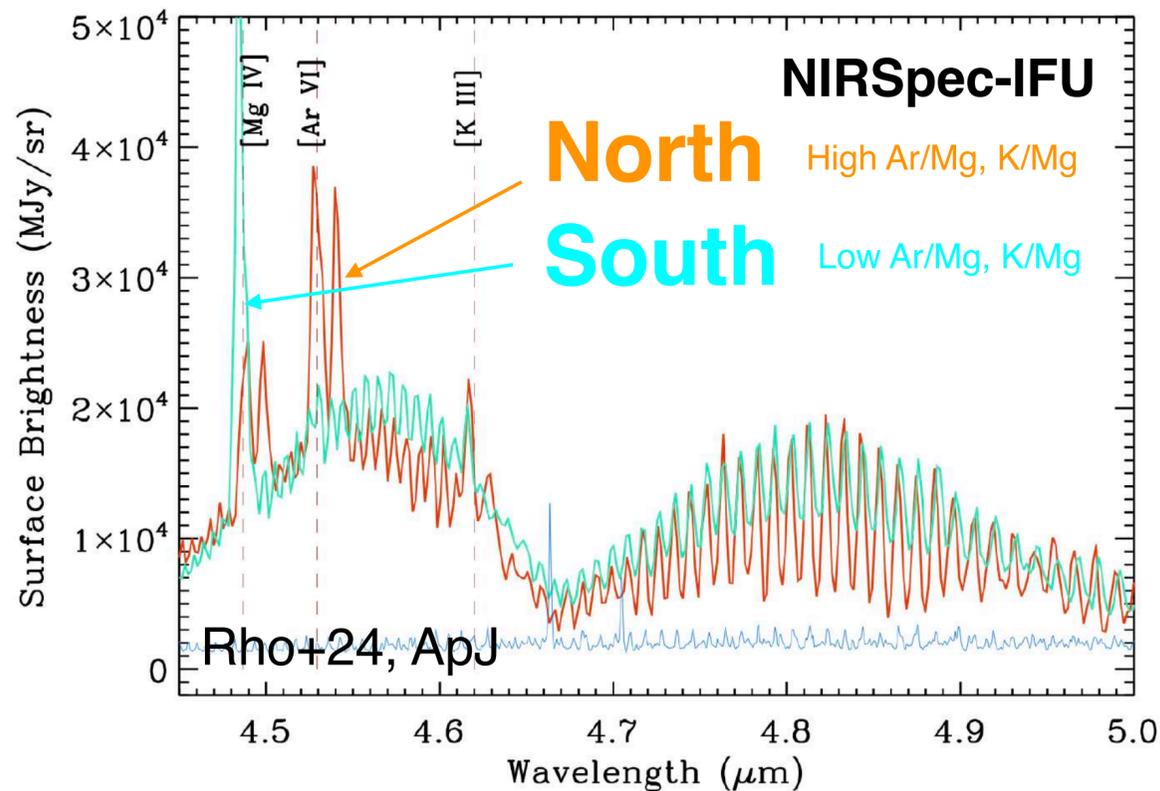


Figure 3. Zoomed-in images of Figure 2 on the northern (top) and southern (bottom) shells. The NIRSpect-IFU FOVs are marked as black squares on the JWST three-color images. The arrows point to the filaments showing CO excess emission (in green, marked as A, B, and D) and Ar ejecta excess (in red, marked as C). The slit (box E, in cyan) is cut through the southern shell where a radial profile is obtained in Figure 7.

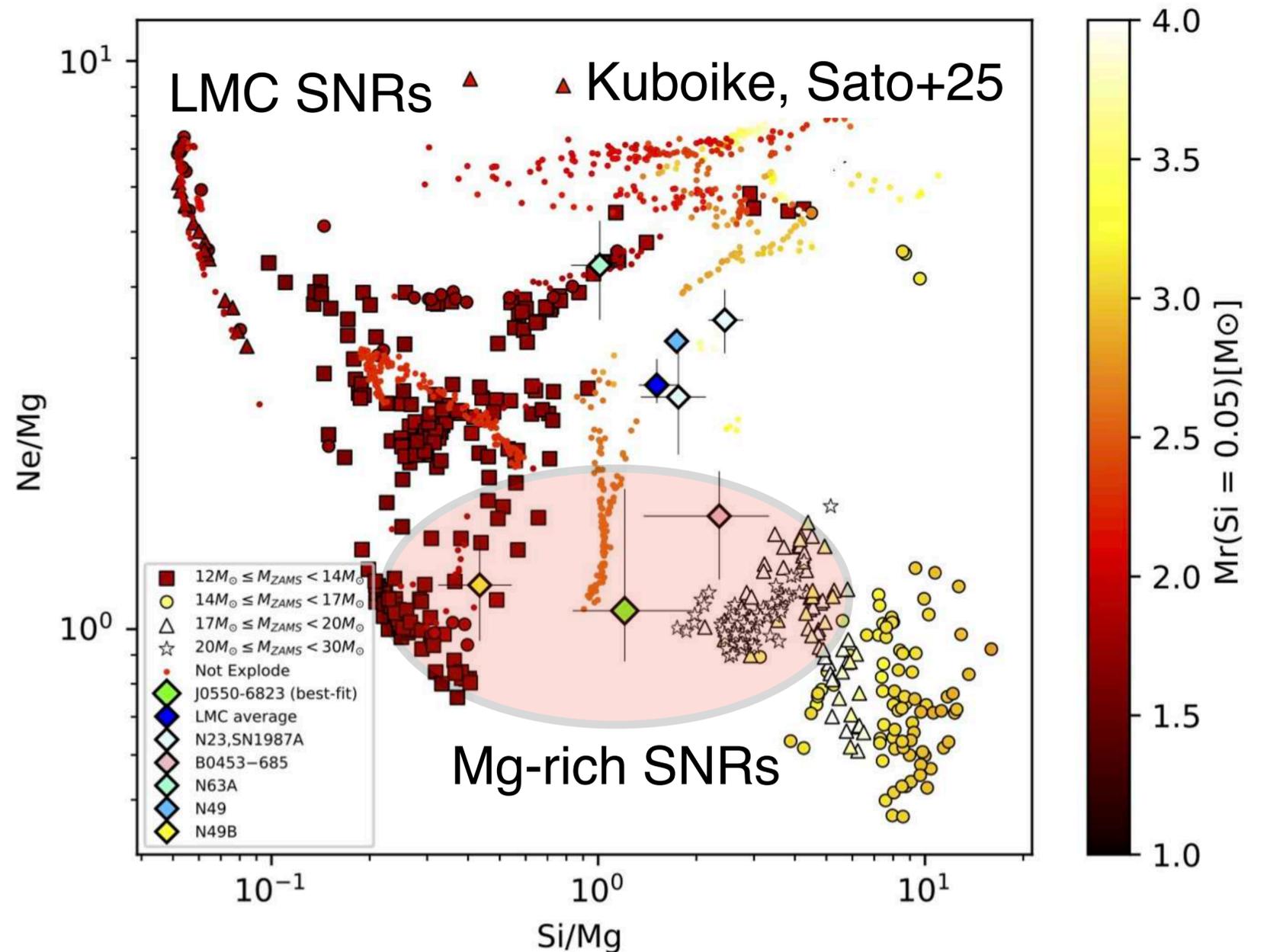
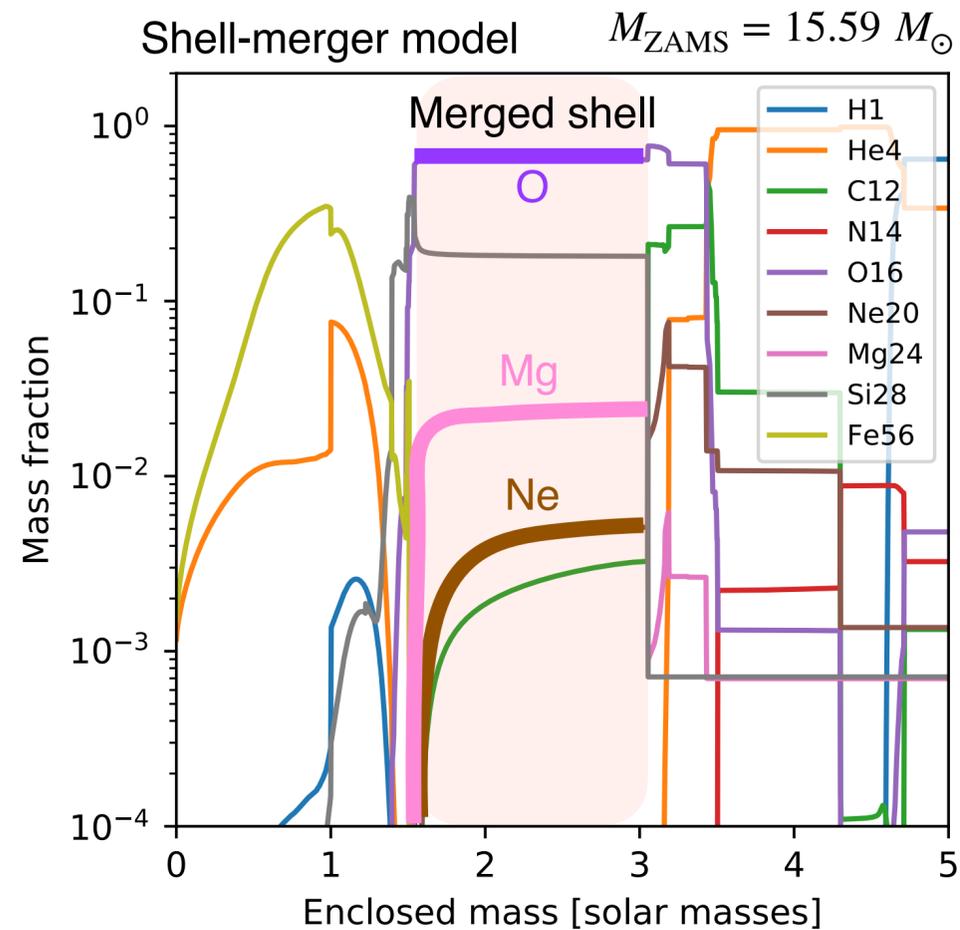


# シェルマージャーは化学進化を説明できる？

次の疑問「どれだけの星がこのような内部活動性を？」 → Mg-rich SNRs が面白そう

## シェルマージャー星

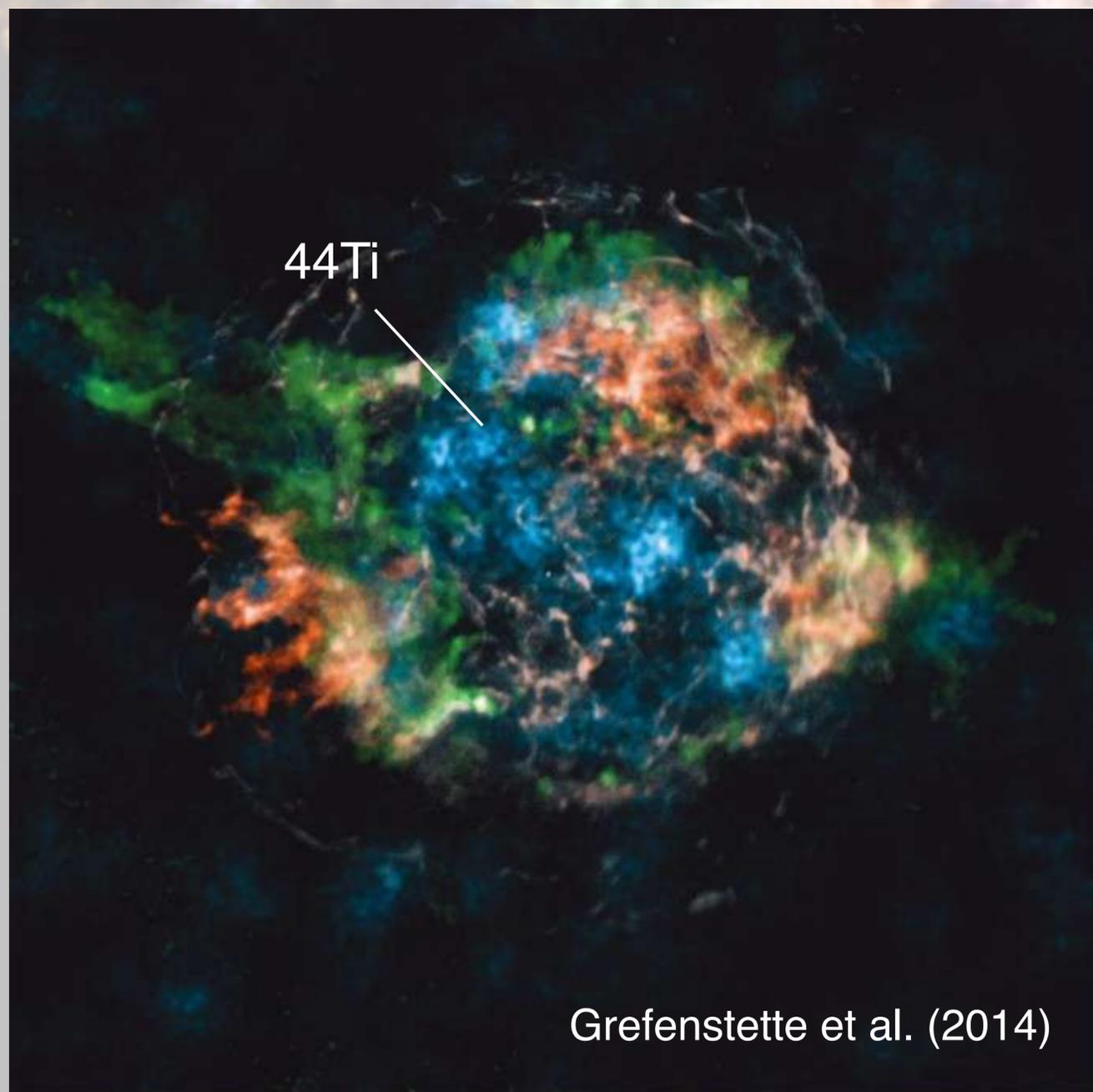
→ Mg-rich (Ne-poor) な組成



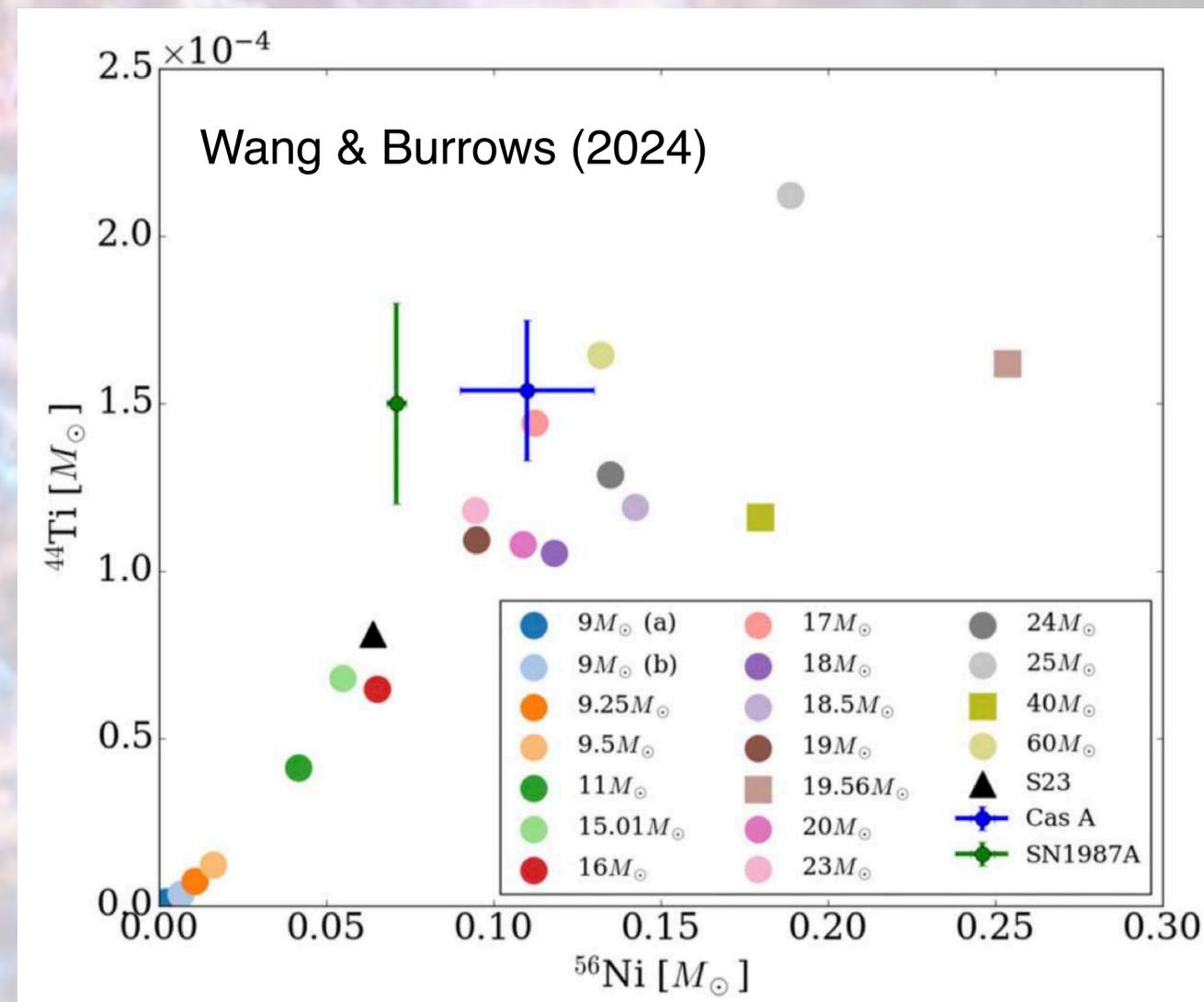
~10-40% 未満の星がシェルマージャーを経験？ → これだけでは少ない？ まだまだ課題は多そう？

# シェルマージャーは $^{44}\text{Ti}$ 合成量も変える

$^{44}\text{Ti}$  合成量は爆発中心の理解に重要 (後半の話に関連)



Cas A, SN 1987A の合成量は大きい



Neutrino-driven winds の長時間計算は重要そう

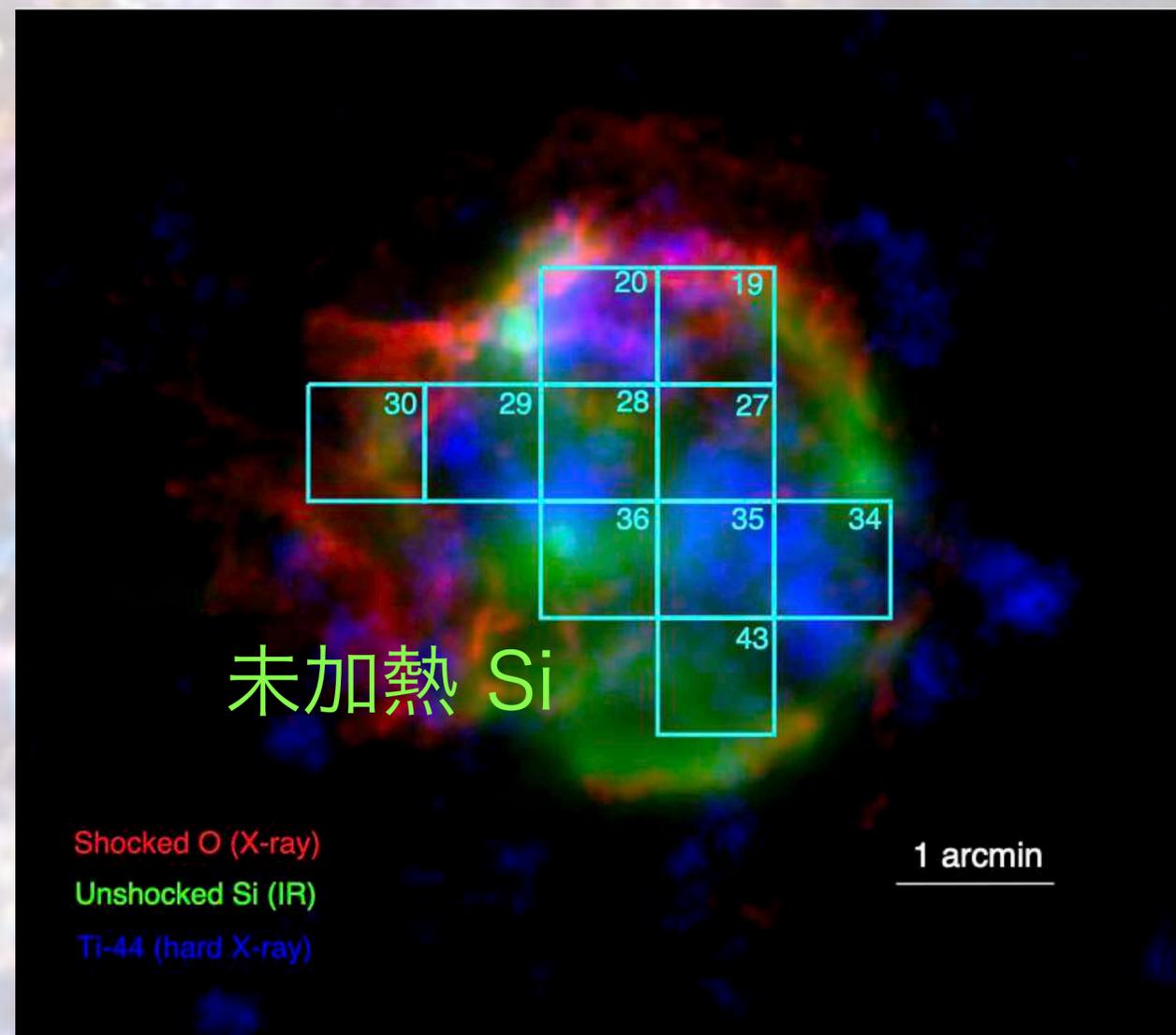
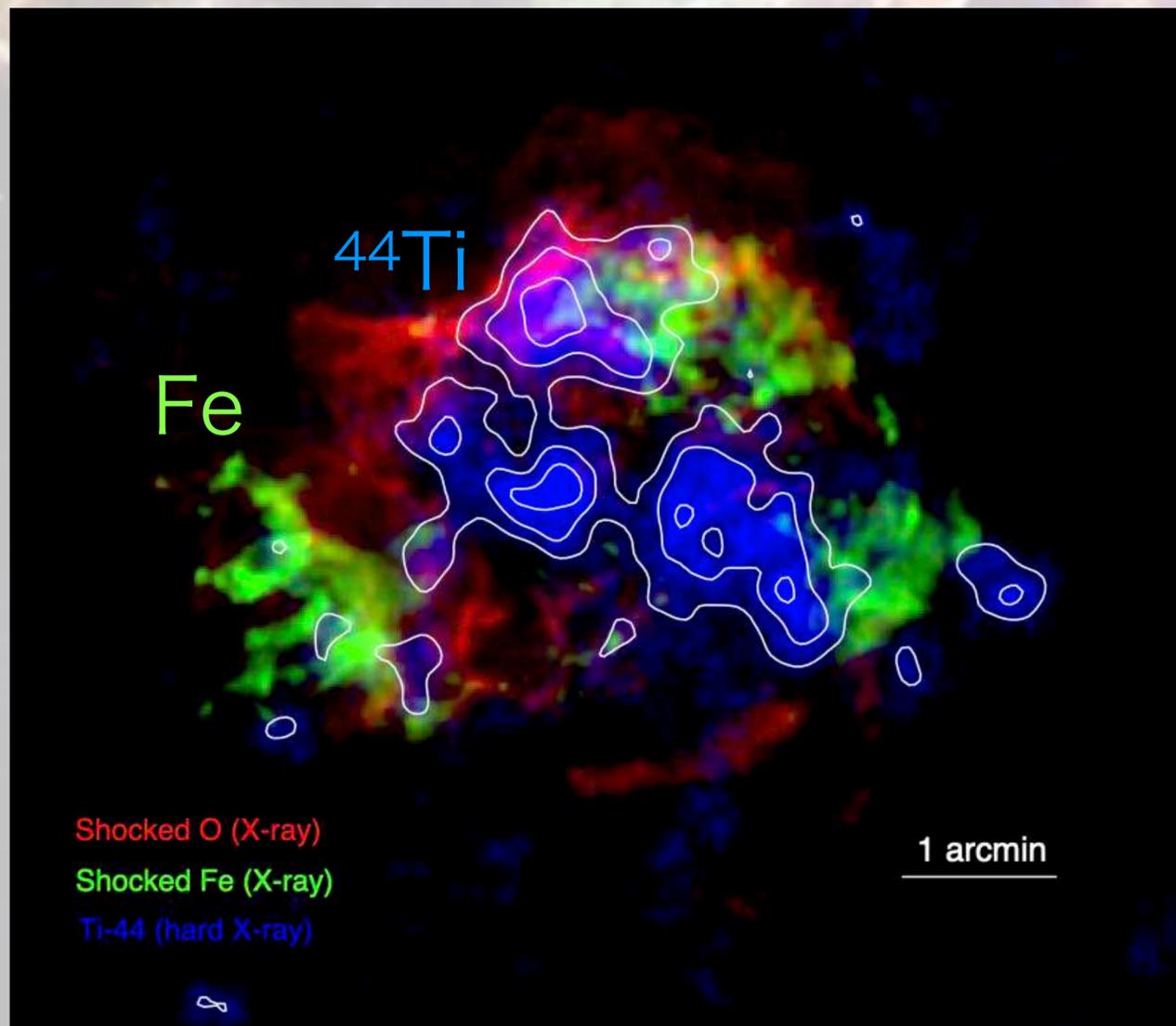
# シェルマージャーは $^{44}\text{Ti}$ 合成量も変える

Pre-supernova O-C shell mergers could produce more  $^{44}\text{Ti}$  than the explosion

JOSHUA ISSA <sup>1,2</sup> AND FALK HERWIG <sup>1,2</sup>

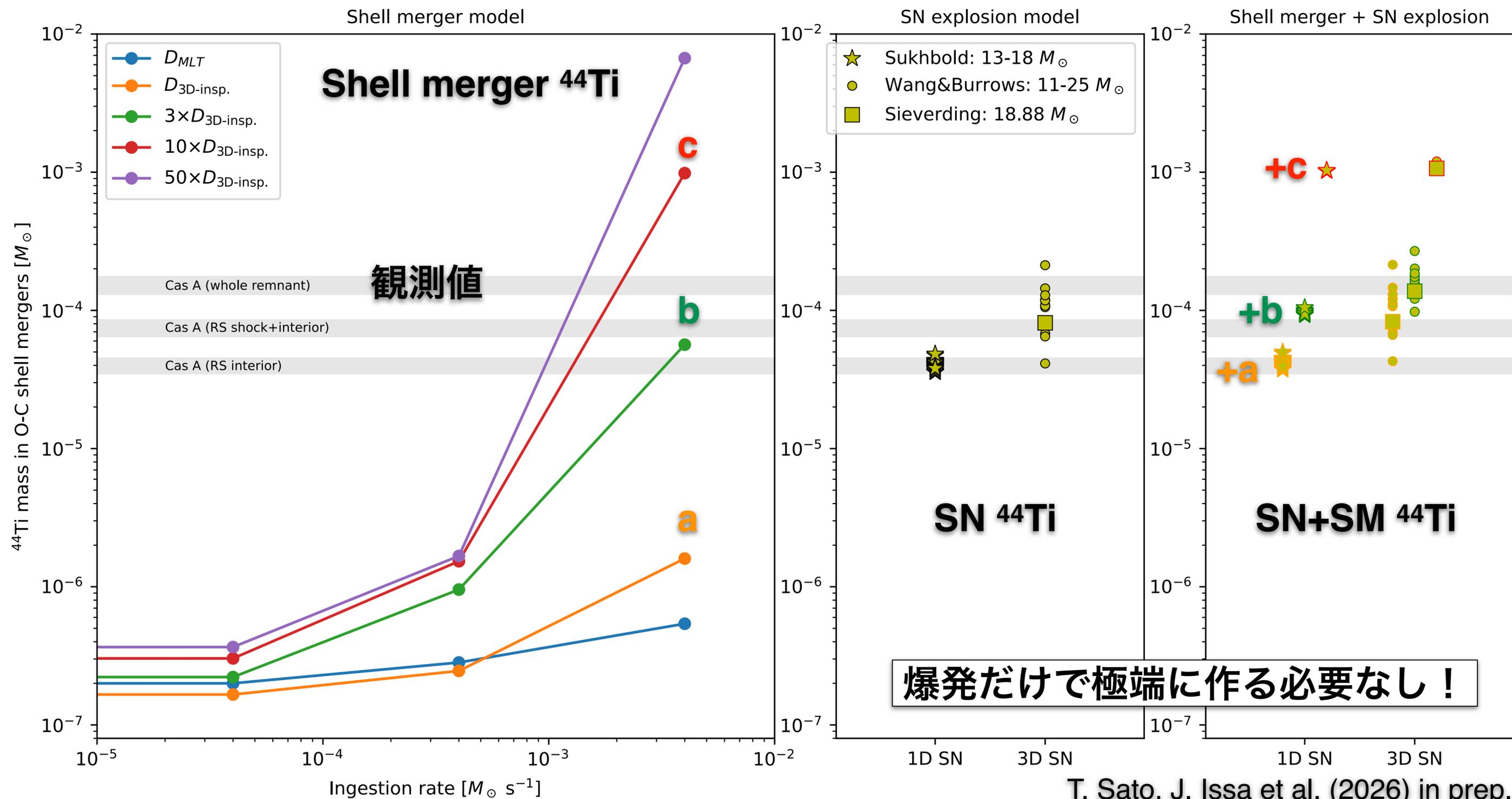
arXiv: 2512.17705

最近の理論研究: シェルマージャーでも  $^{44}\text{Ti}$  作れそう



鉄と $^{44}\text{Ti}$  は反相関 & unshocked ejecta (O, Si がメイン) と相関  
→ Cas A シェルマージャーしてるなら恒星由来とも解釈できるのでは？

# シェルマージャーは $^{44}\text{Ti}$ 合成量も変える



# 本日の話題 ①: 大質量星の後期進化と内部構造

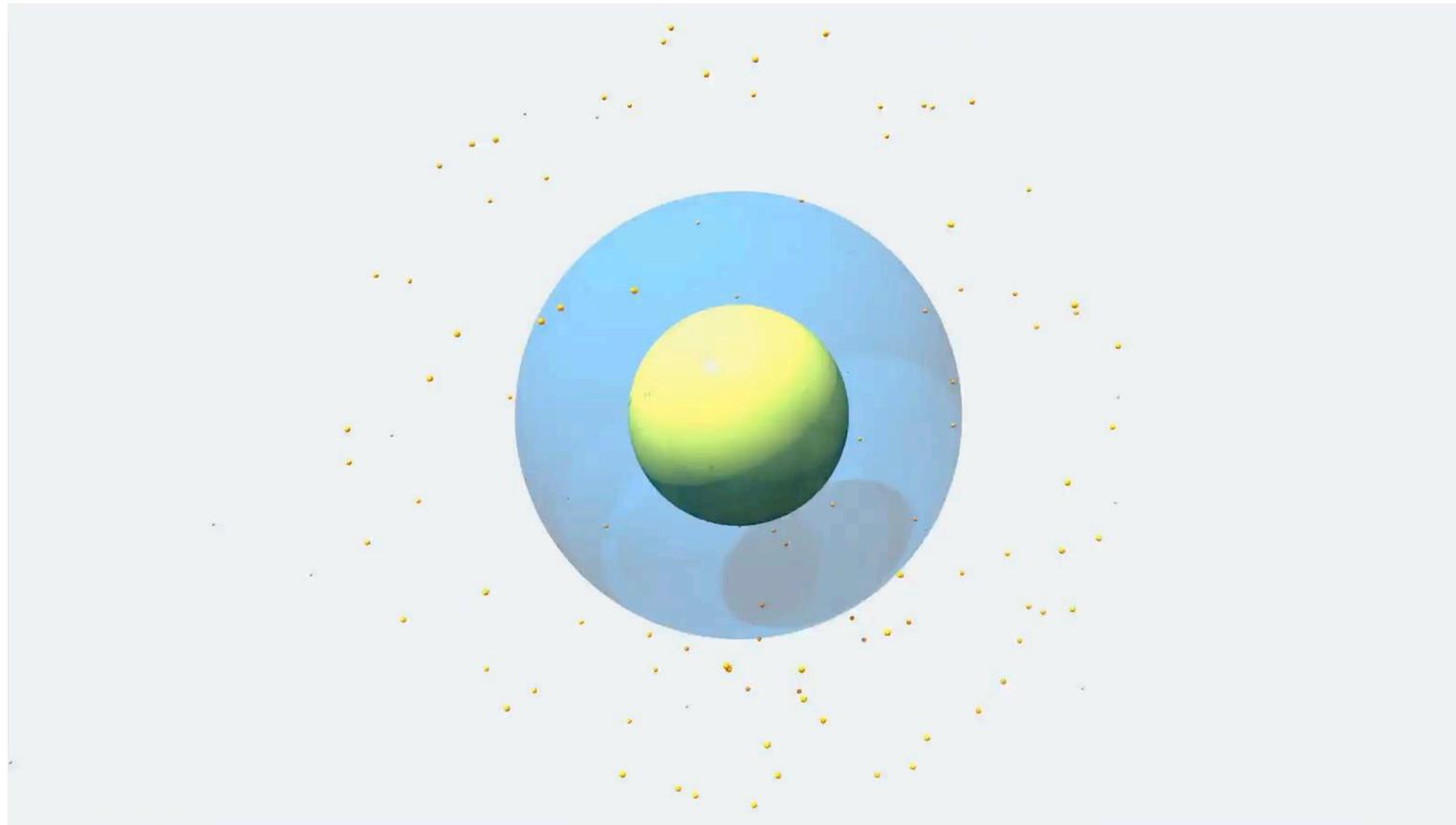
## まとめ

- 恒星最終段階はニュートリノ駆動超新星へも影響 (理論予測)
- 有名天体「カシオペア座A」でシェルマージャー (観測成功)
- 奇数番目元素の合成過程や非対称爆発への影響 (これから)
- 非対称超新星の指標  $^{44}\text{Ti}$  の解釈も再考が必要 (これから)

# 本日の話題 ②: 超新星残骸で超新星ニュートリノ?

重力崩壊型超新星の心臓部の未知の物理情報を探るのにニュートリノは最適

超新星衝撃波がニュートリノ加熱によって降着する物質に反して膨張する様子



Adam Burrows & David Vartanyan (2021), Nature

ニュートリノは爆発メカニズム(ニュートリノ加熱)の肝だが観測例は少なく議論が難しい

観測的な制限が求められているもの

## 1. ニュートリノ光度や放射の非対称性

$$E_\nu \approx E_{\text{binding}} \approx 1.5 \times 10^{53} (M/M_\odot)^2 \text{ erg}$$

中心天体形成の物理

## 2. ニュートリノ温度 (内部での拡散・閉じ込め)

$$T_{\nu_e} \approx 3.2 \text{ MeV} < T_{\bar{\nu}_e} \approx 4 \text{ MeV} < T_{\nu_x, \bar{\nu}_x} \approx 6 \text{ MeV}$$

観測的証拠少

## 3. ニュートリノ振動

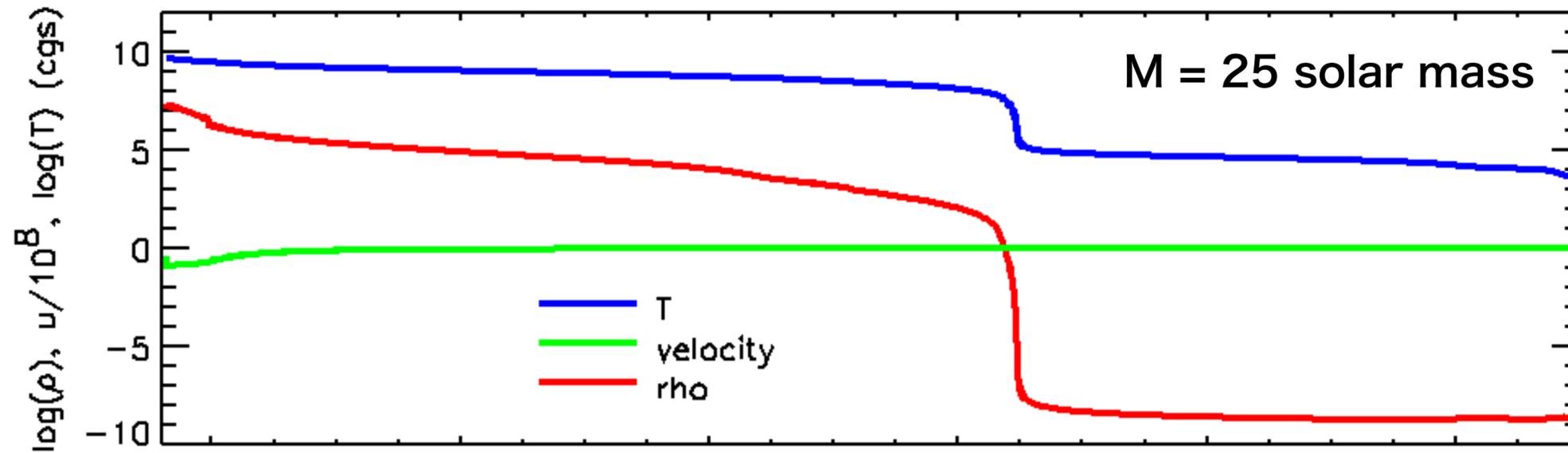
各フレーバ間の遷移で、電子ニュートリノ温度が高めに(加熱にも影響?)

一方で、その高い透過力の影響で、検出は非常に困難で詳細な物理の議論は難しい  
(例: SN 1987A = 11個@カミオカンデ、TXS 0506+056 = 1個@IceCube)

# 重力崩壊型超新星の爆発中心での元素合成

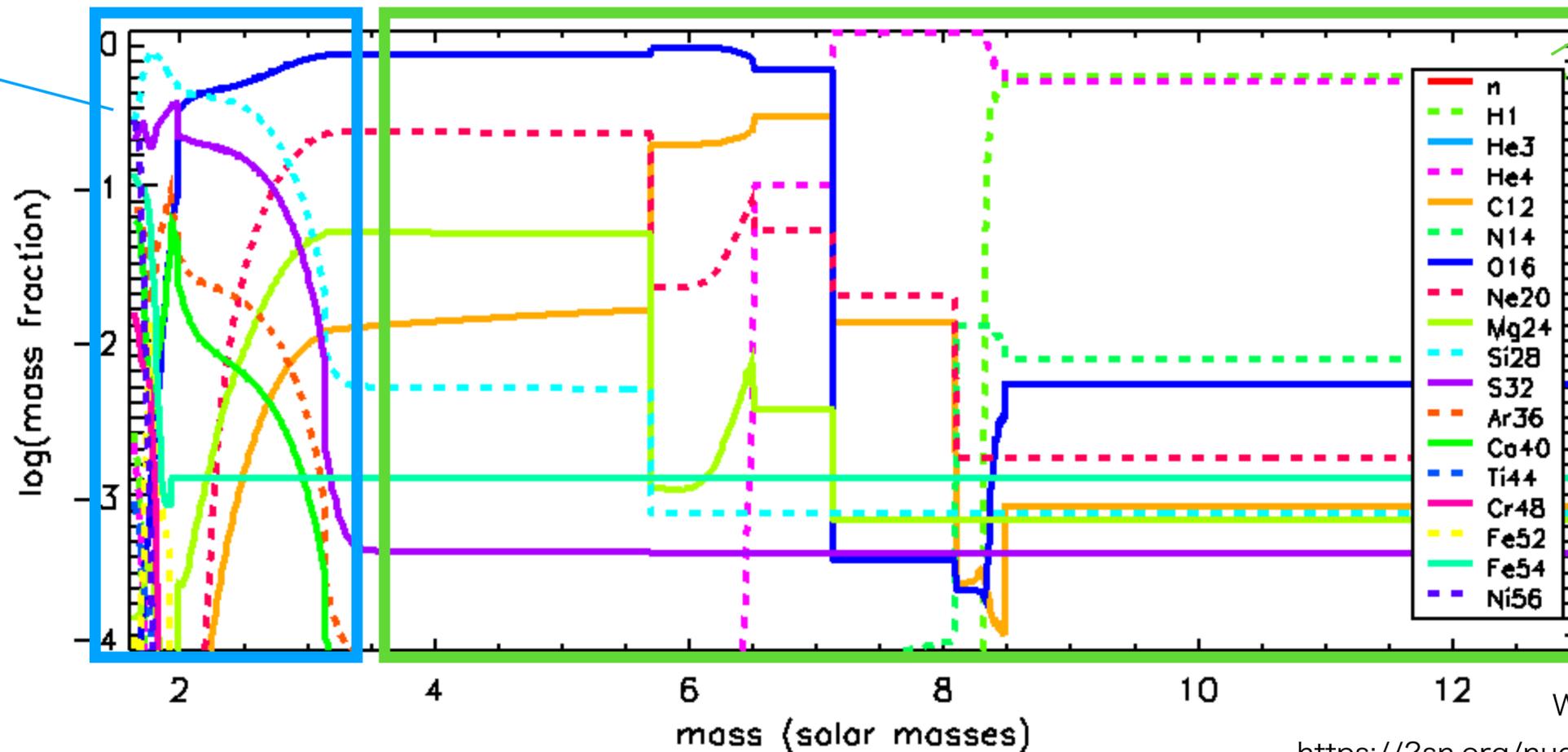
time since bounce =  $-4.50000E-01$  s

M = 25 solar mass



Explosive nucleosynthesis (SN explosion)

Hydrostatic nucleosynthesis (Stellar evolution)

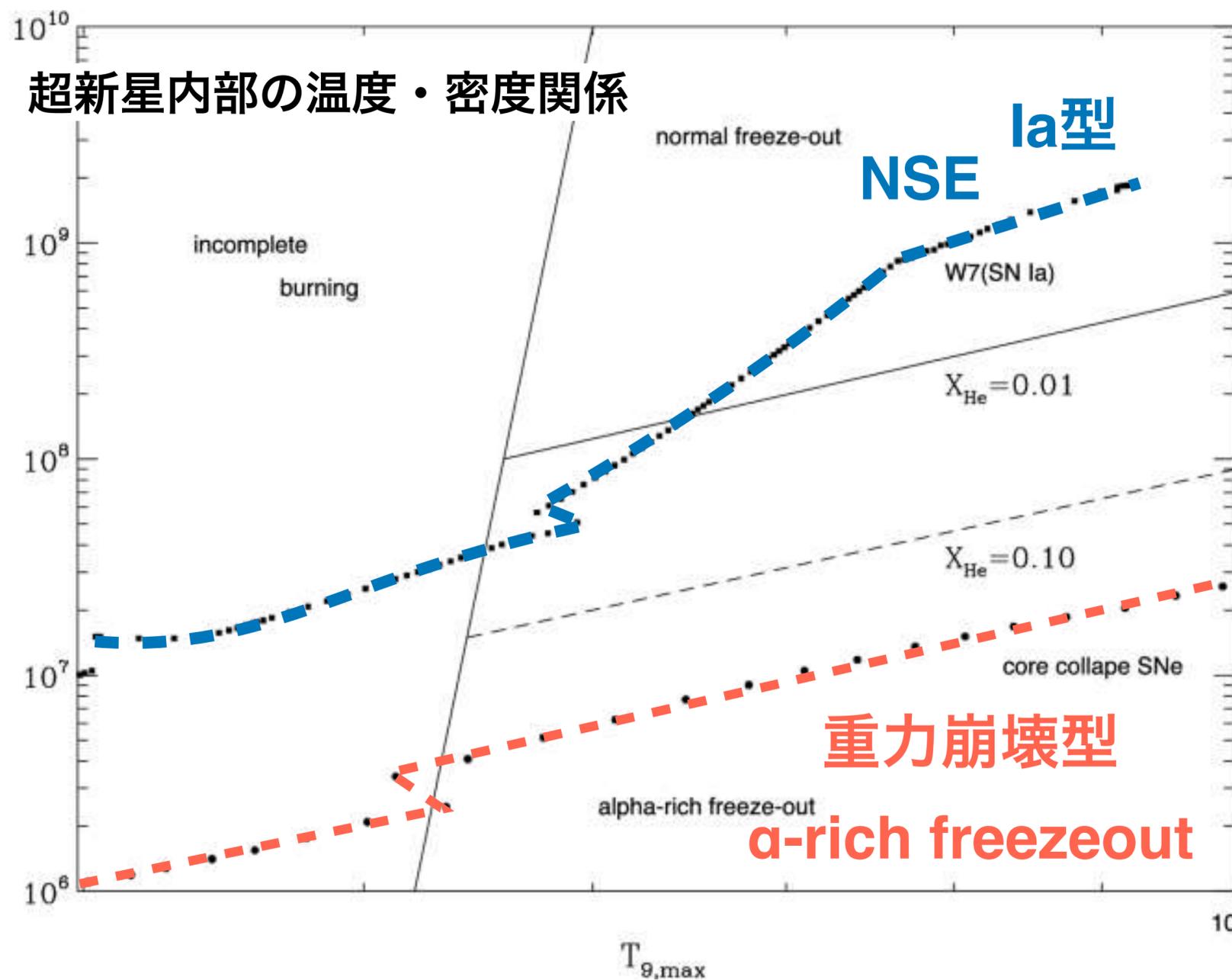


Woosley & Heger (2007)

<https://2sn.org/nucleosynthesis/movie/s25a28d-bulk.gif>

# 重力崩壊型超新星の爆発中心での元素合成

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



重力崩壊型の場合、桁違いに低密度

エントロピー ( $T^3/\rho$ ) が高い環境  
(= 高温・低密度)

→ 低密度で重核形成が進まず、 $\alpha$ が残る

通常の NSE とは組成も変わり

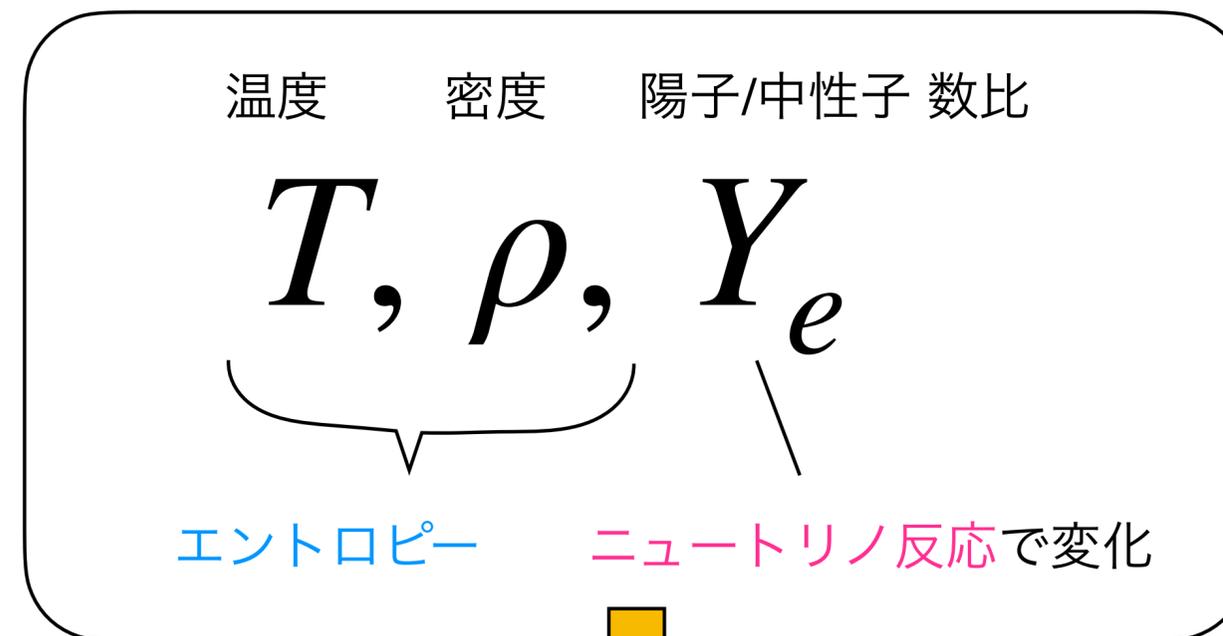
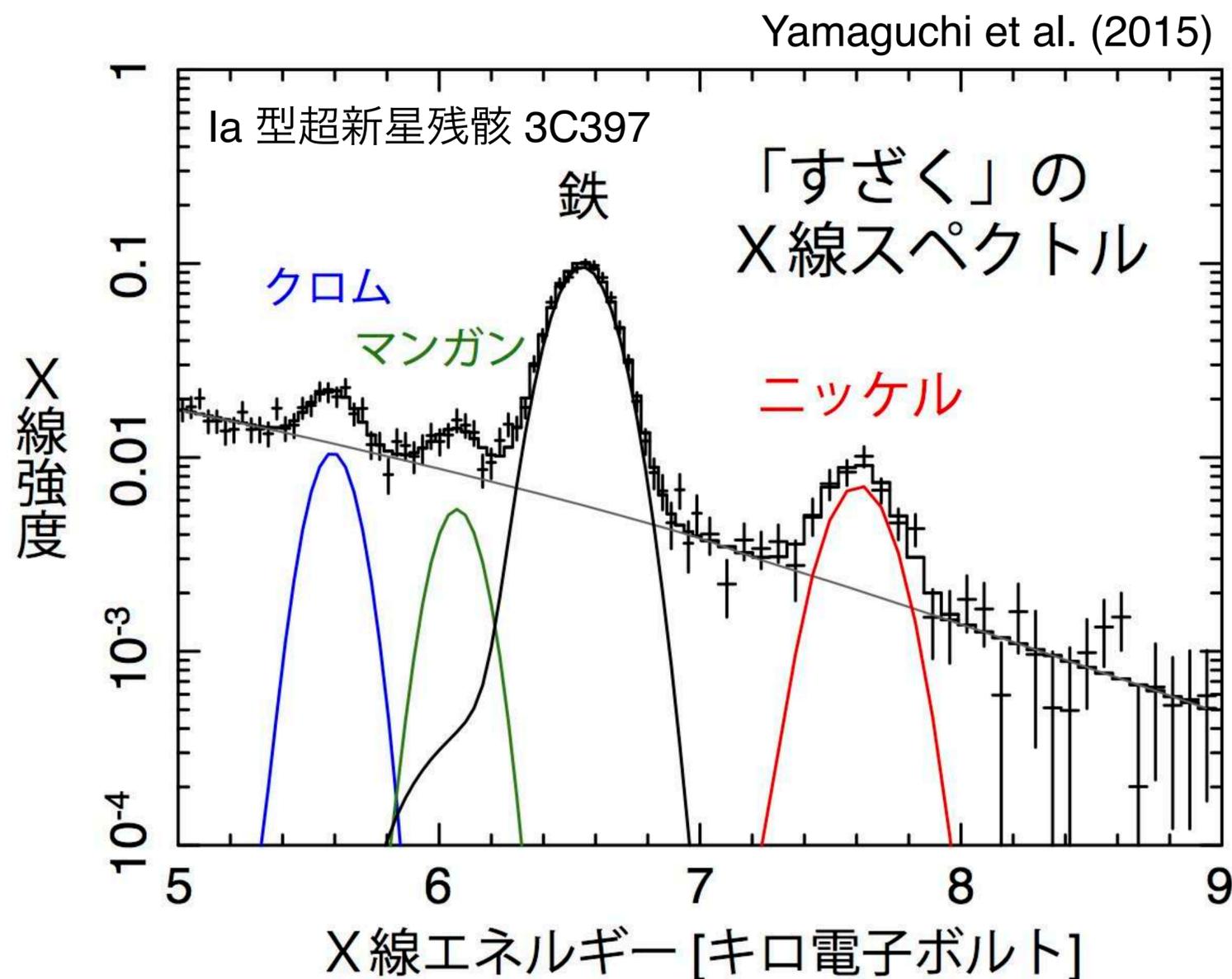
“ $\alpha$ -rich freezeout” と呼ぶ

代表的な合成同位体

$^{56}\text{Ni}$ ,  $^{44}\text{Ti}$  (鉄になる手前の元素増加)

# 重力崩壊型超新星の爆発中心での元素合成

X線による鉄族元素観測がこの“爆発中心”の環境を特徴づける



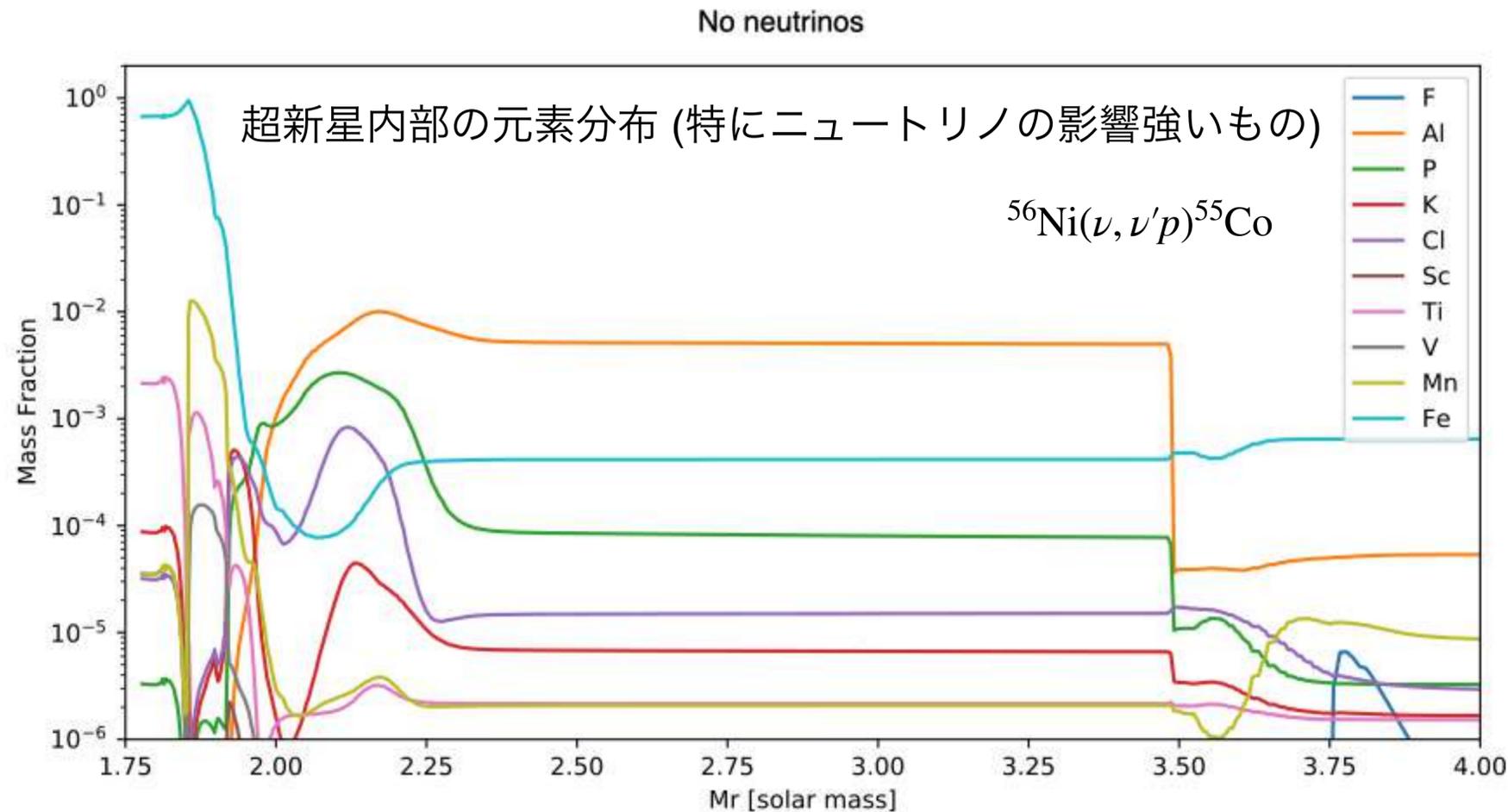
鉄周辺の元素量が変化

Ti, Cr, Mn, Fe, Ni

元素観測から“爆発中心”の理解へ

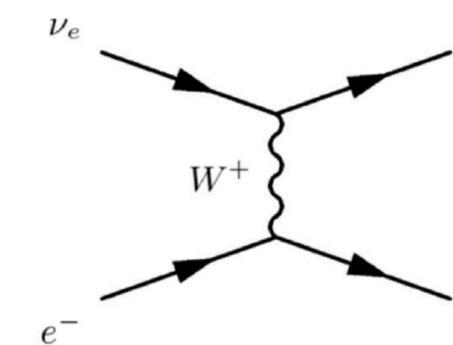
# 元素は天然のニュートリノ検出器？

ニュートリノを大量に浴びた元素は、異なる元素へ変換 → 希少元素(特に odd-Z )の合成量増加

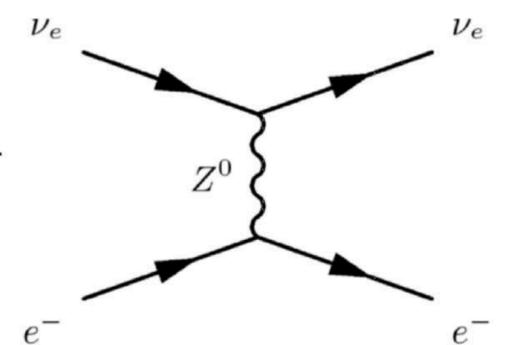


## ニュートリノ相互作用

荷電カレント反応



中性カレント反応



荷電カレント反応：反応の前後で電荷が変わる

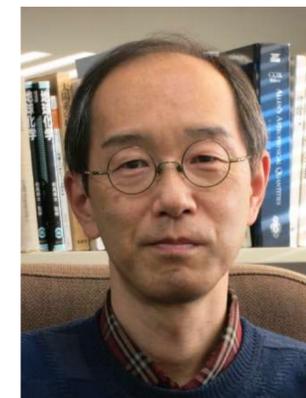
中性カレント反応：反応の前後で電荷が変わらない

Total neutrino energy ~ gravitational binding energy of the compact object

$$E_\nu \approx E_{\text{binding}} \approx 1.5 \times 10^{53} (M/M_\odot)^2 \text{ erg}$$

( $\sim 3 \times 10^{53}$  erg @ 1.4 Msun,  $\sim 6 \times 10^{53}$  erg @ 2 Msun)

奇数元素は、まさにXRISM(カロリメータ)で観測可能なフロンティア！



吉田さん@京大

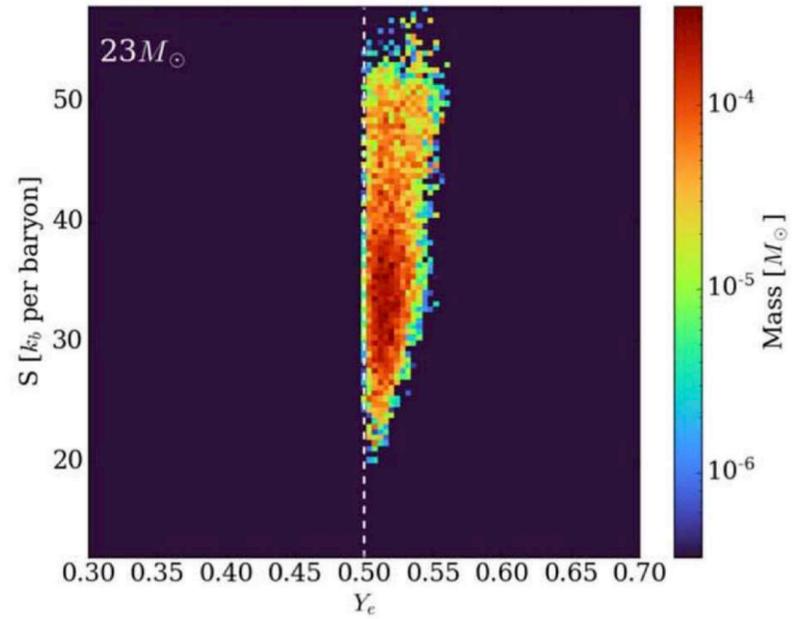
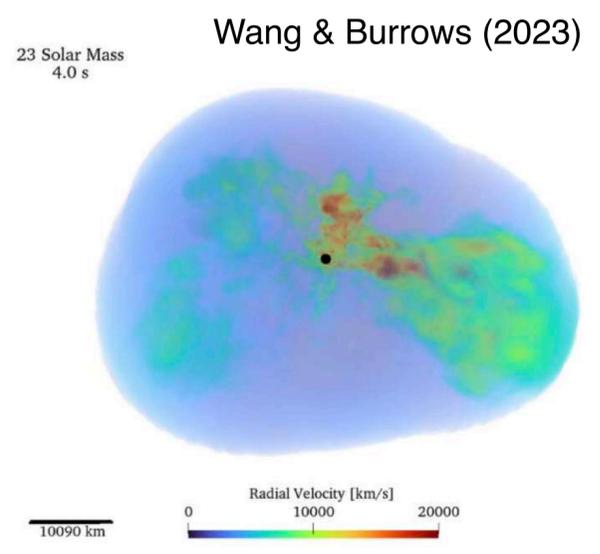
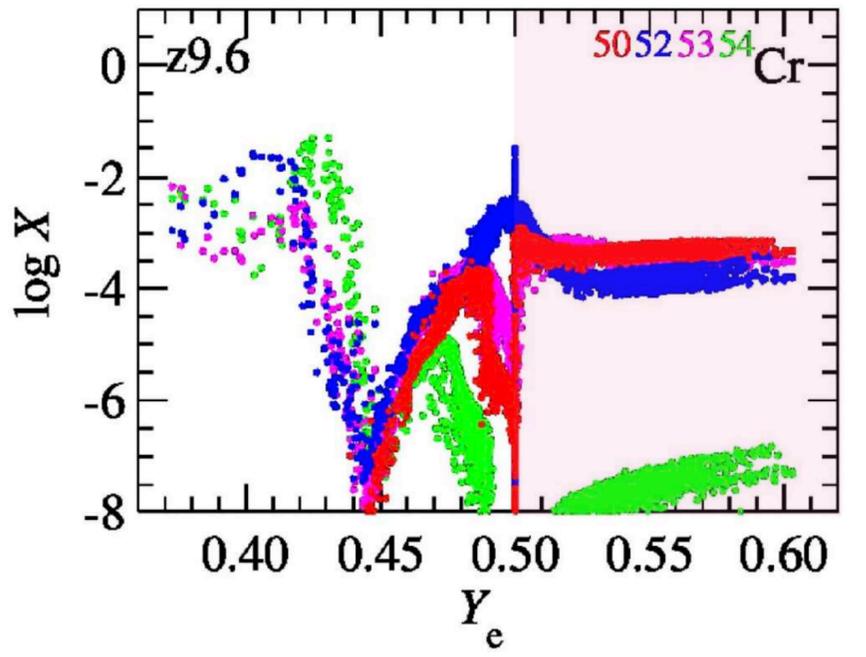
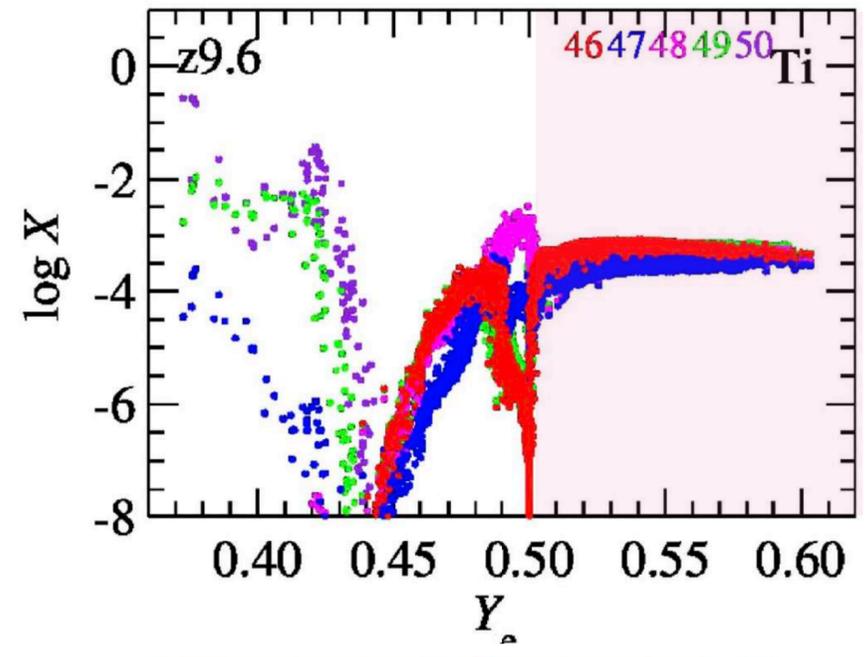
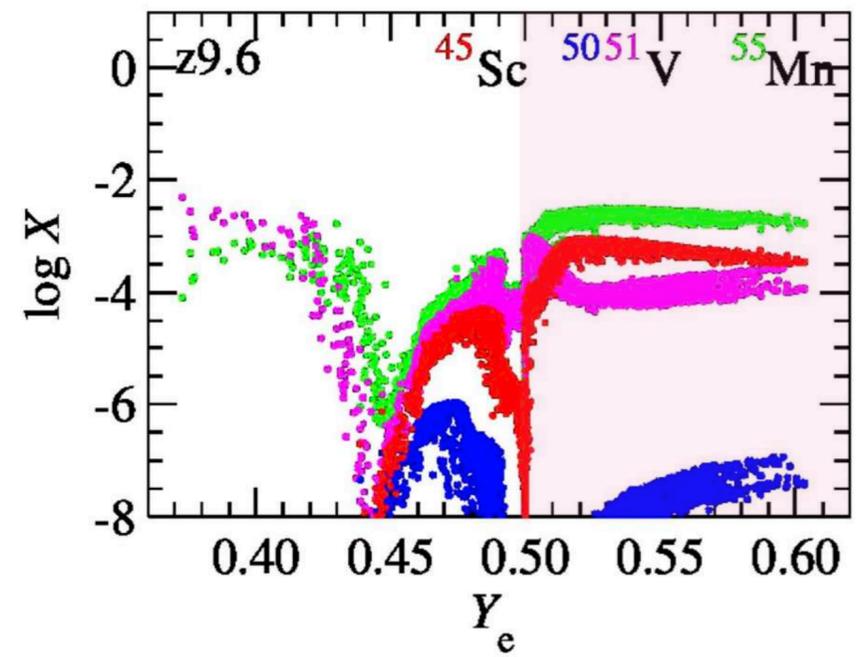
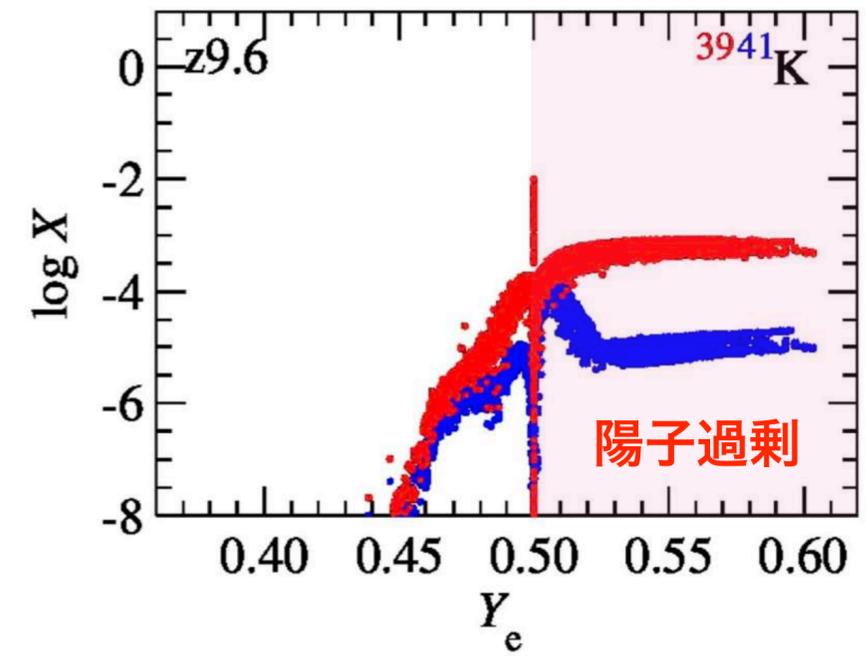


梅田さん@東大

# 元素は天然のニュートリノ検出器？

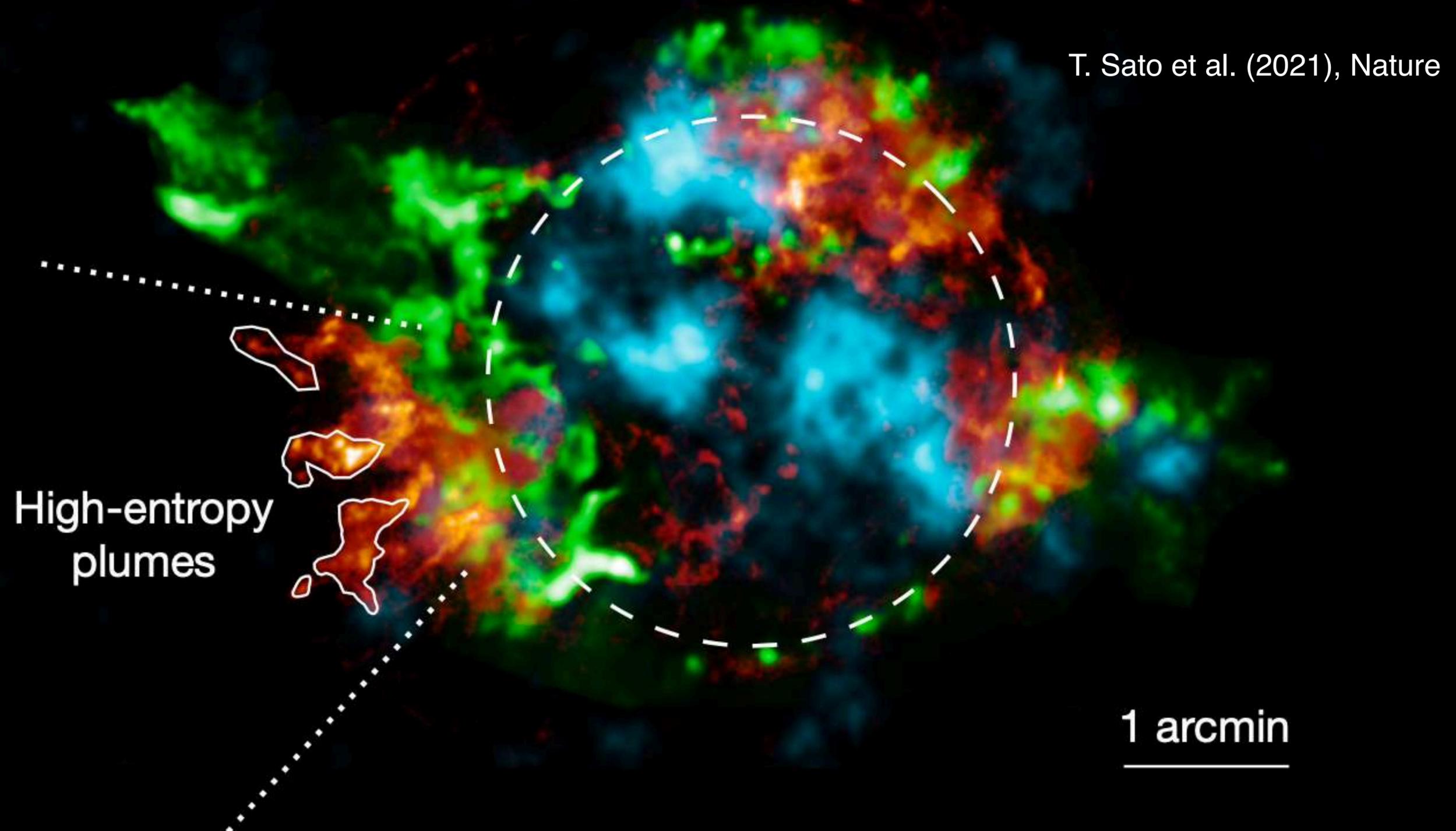
ニュートリノを大量に浴びた元素は、異なる元素へ変換 → 希少元素(特に odd-Z )の合成量増加

Wanajo et al. (2018)



ニュートリノに炙られた“陽子過剰”な爆発噴出物も検証できる？

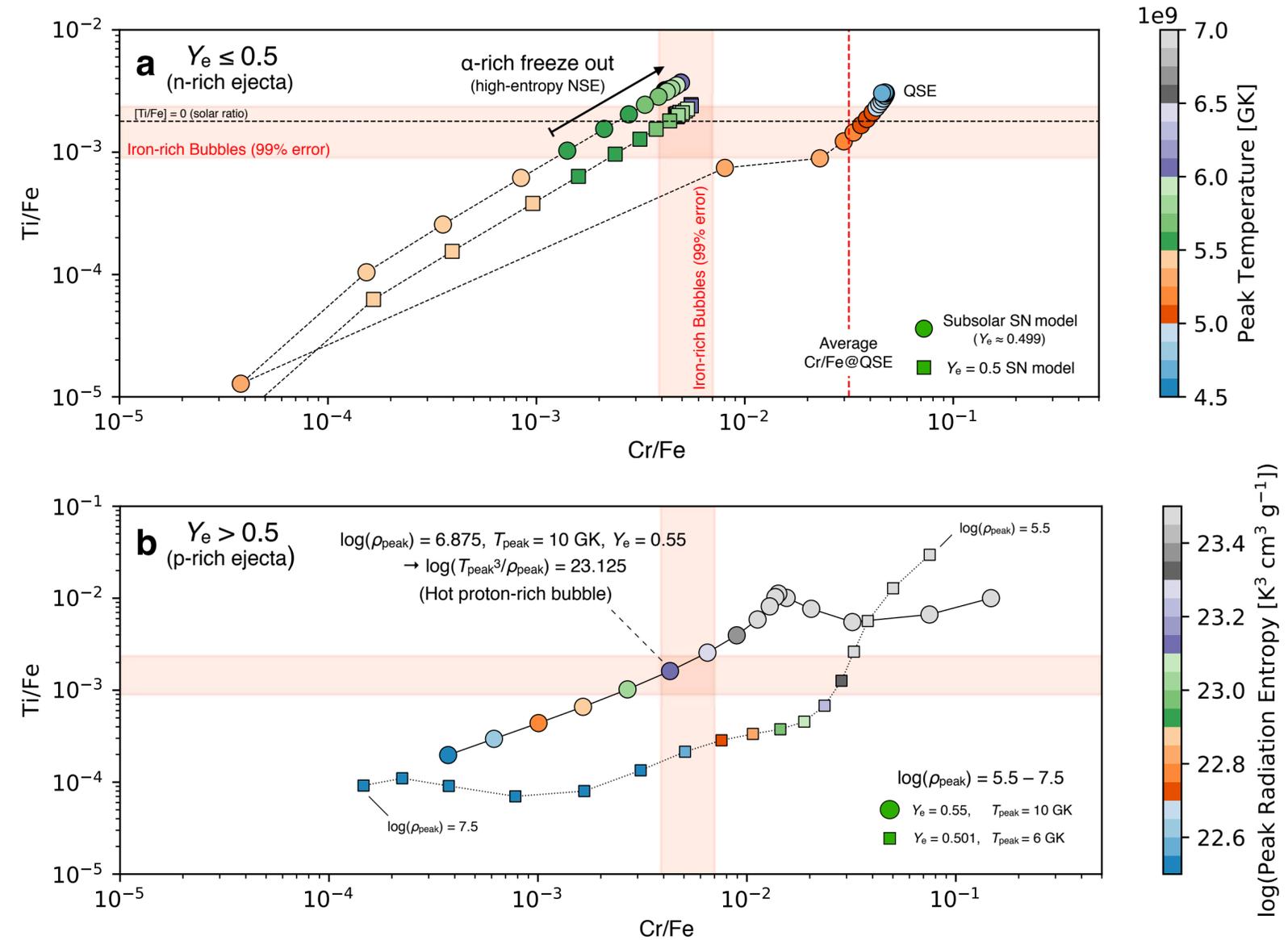
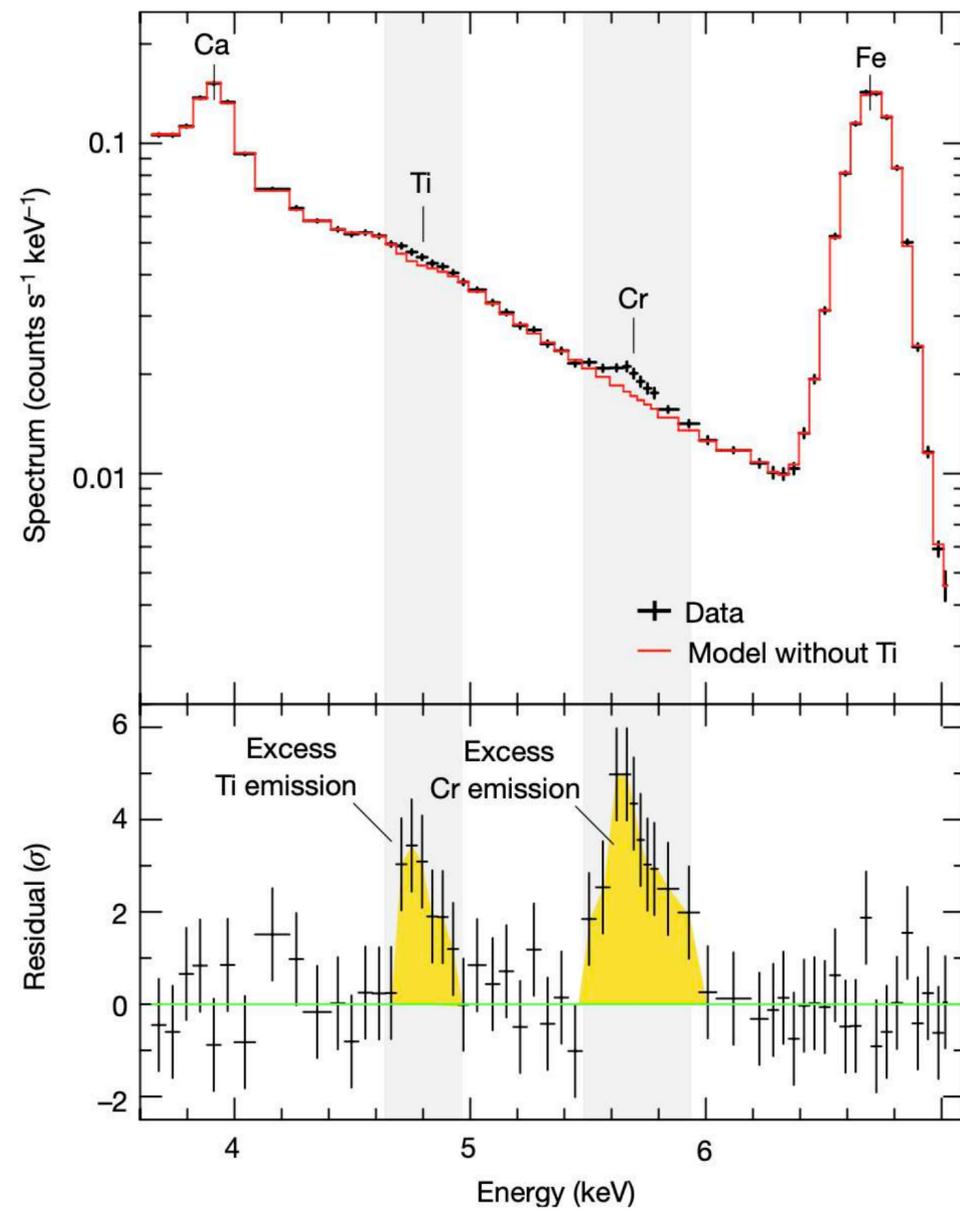
# カシオペア座Aの面白い構造 → 剥き出しの鉄リッチ構造



鉄は爆発中心で合成 → この構造の元素組成は爆発中心環境を反映するはず

# エントロピーを特徴づける安定 Ti, Cr の発見

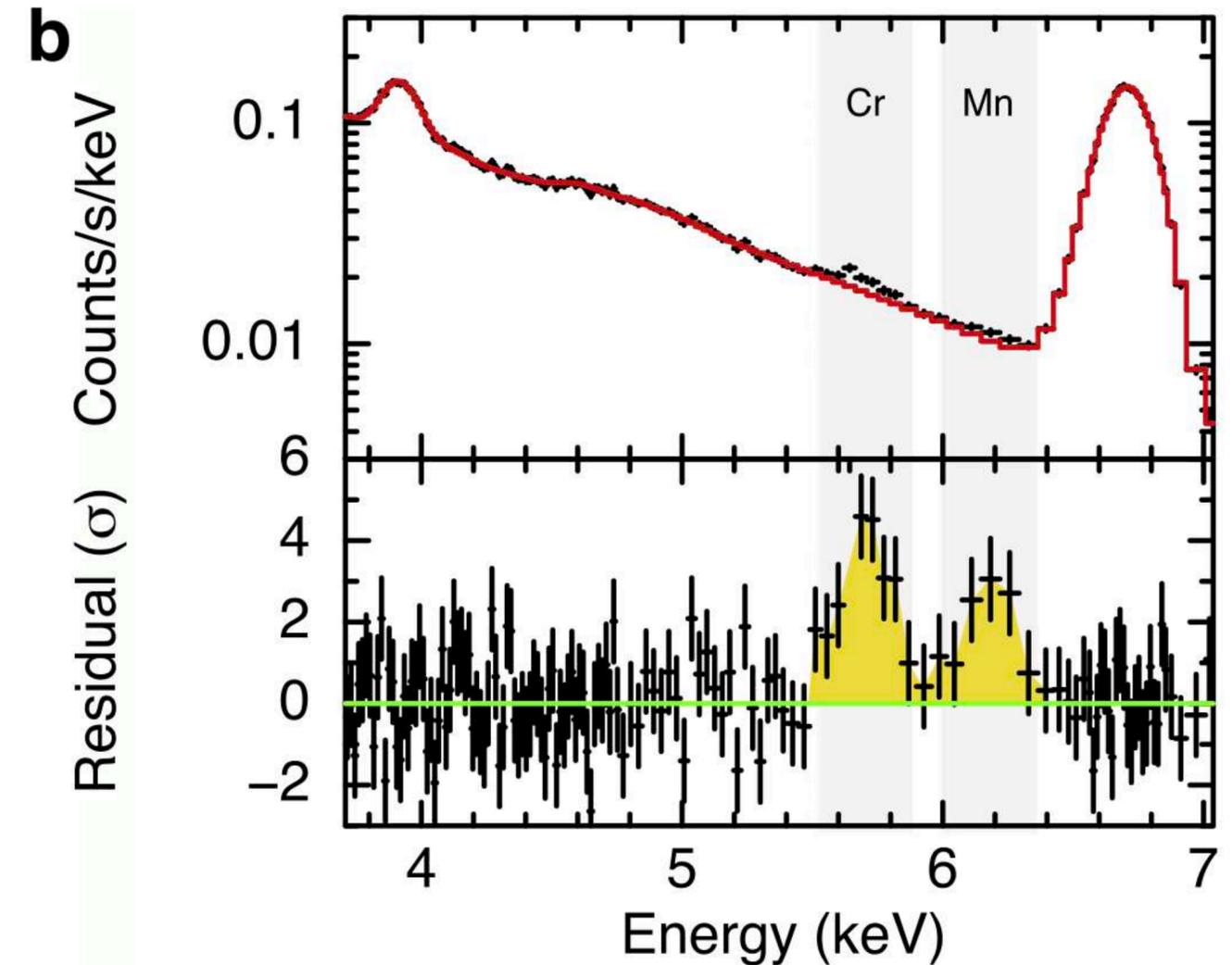
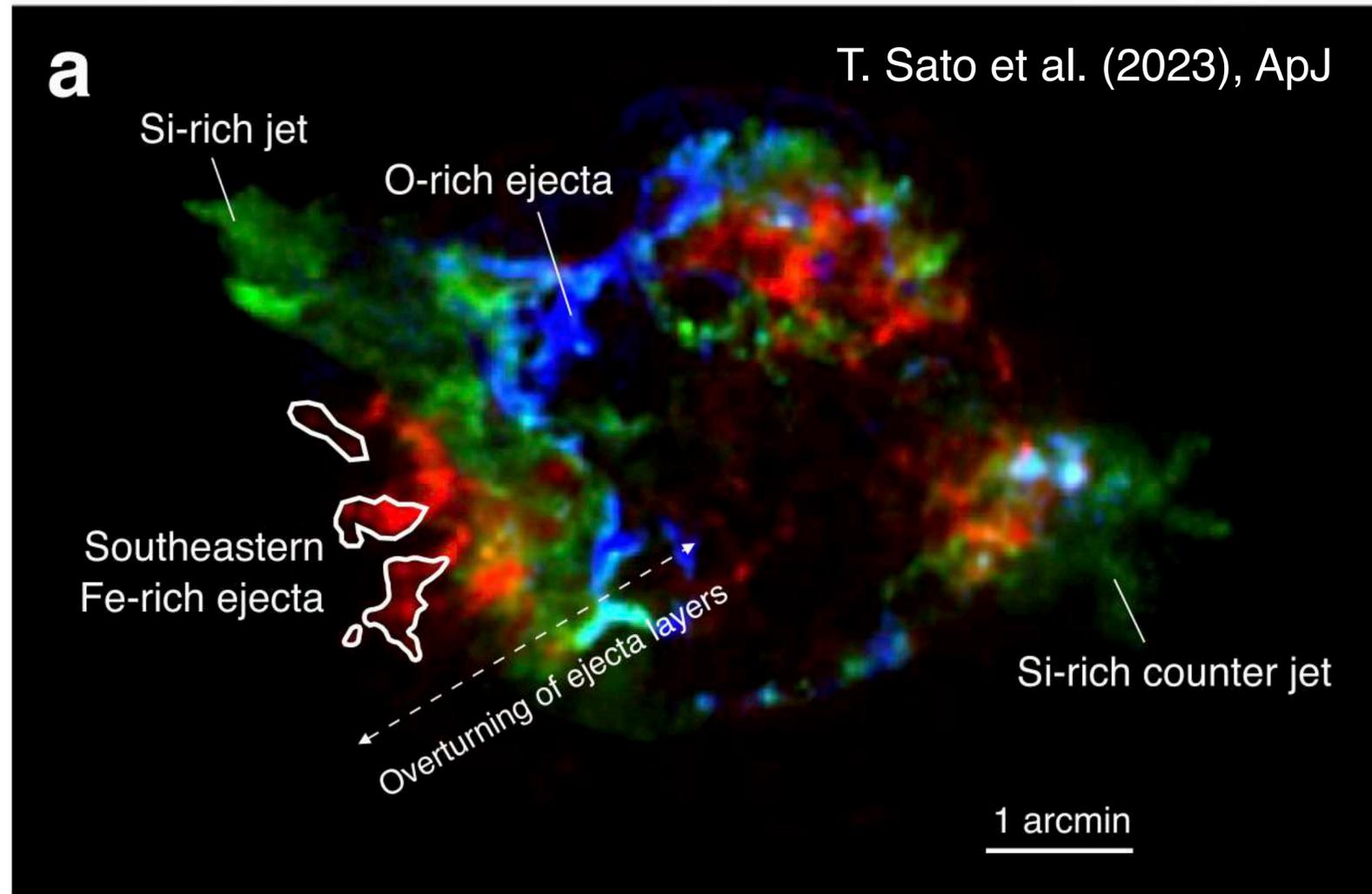
観測量 Ti/Fe, Cr/Fe は  $\alpha$ -rich freezeout 起源を支持し、 $Y_e \geq 0.5$  の方が合う



しかし、X線CCD では Ti 輝線が完全に分離できない (XRISMへ期待 ①)

# ニュートリノ反応に関係するだろう Mn の発見

Mn は  $Ye < 0.5$  の  $\alpha$ -rich freezeout でほとんど作れないはずだが...

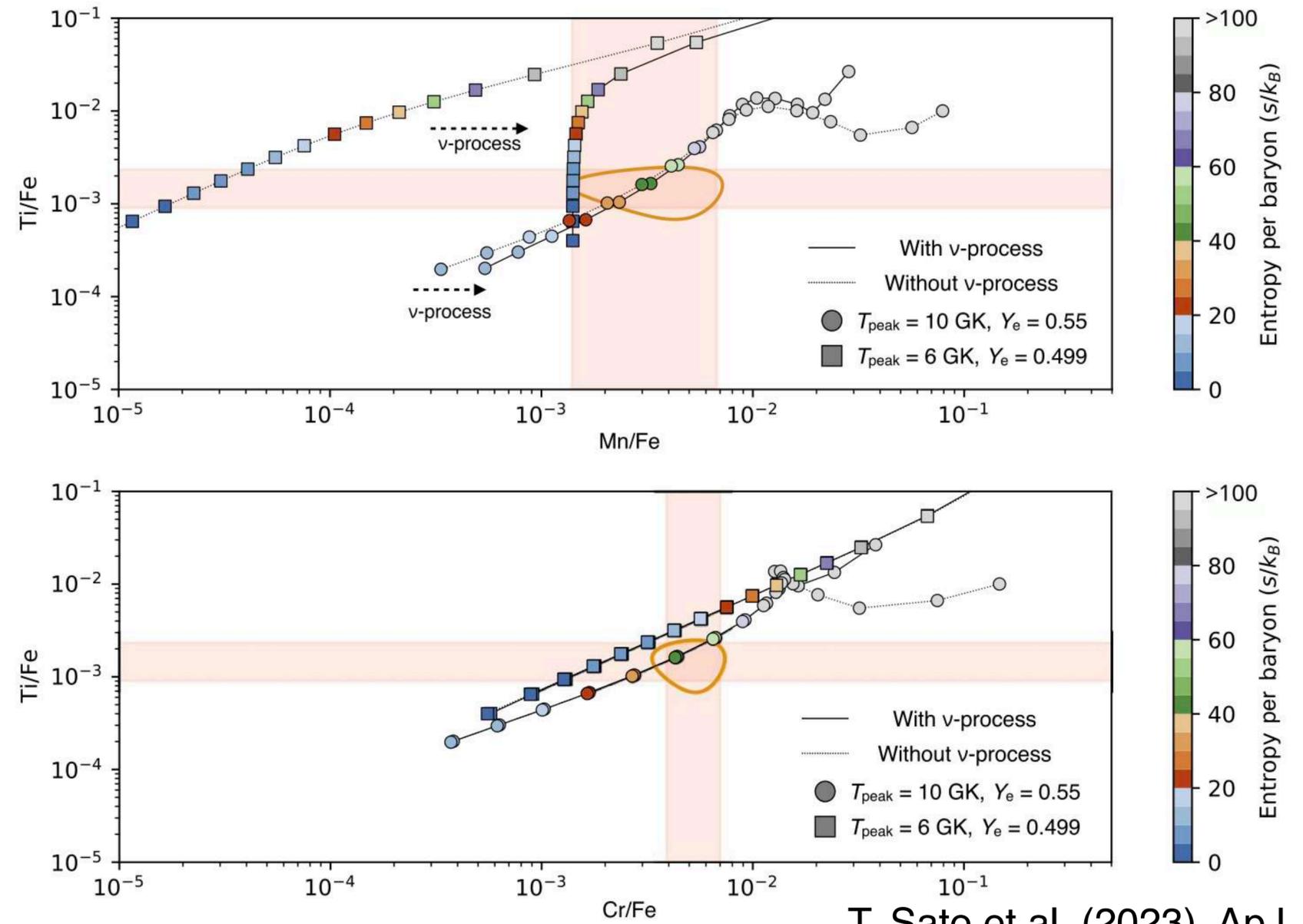
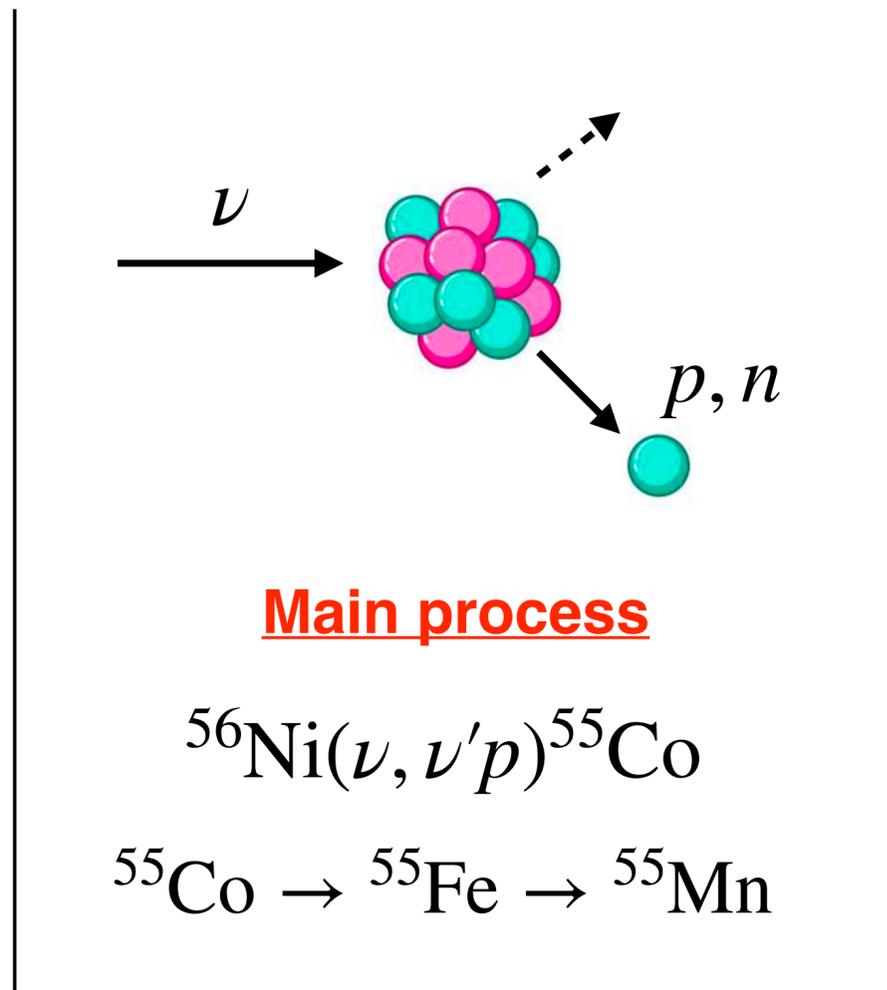


同じく鉄リッチ構造に Mn を発見！ → ニュートリノ反応で説明できる？

# ニュートリノ反応に関係するだろう Mn の発見

観測量 Mn/Fe は  $\nu$ -process or 陽子過剰環境 ( $\nu p$ -process) で説明可能！

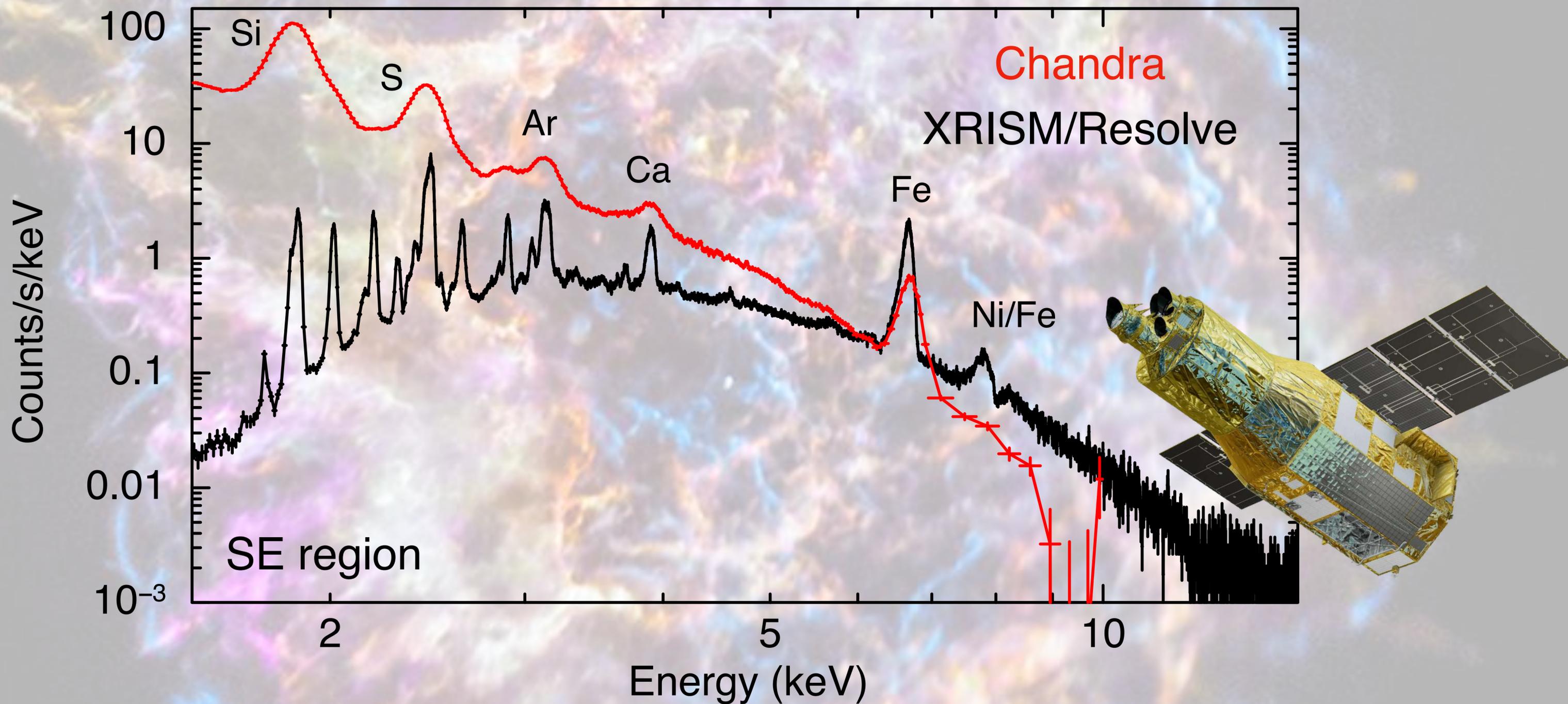
$\nu$ -process : neutrino spallation



T. Sato et al. (2023), ApJ

しかし、Mn 輝線もX線CCDでは信頼度低い (XRISMへ期待 ②)

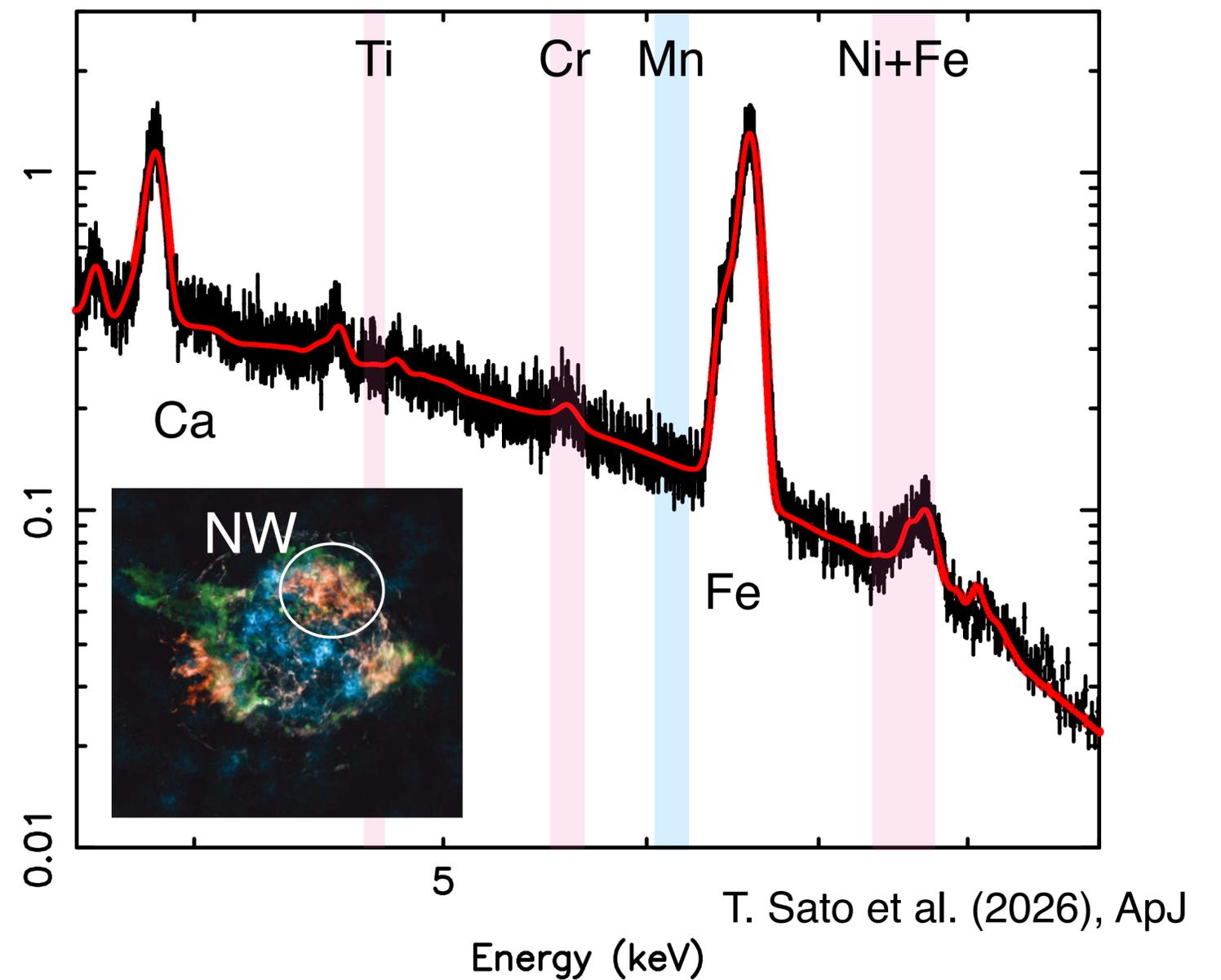
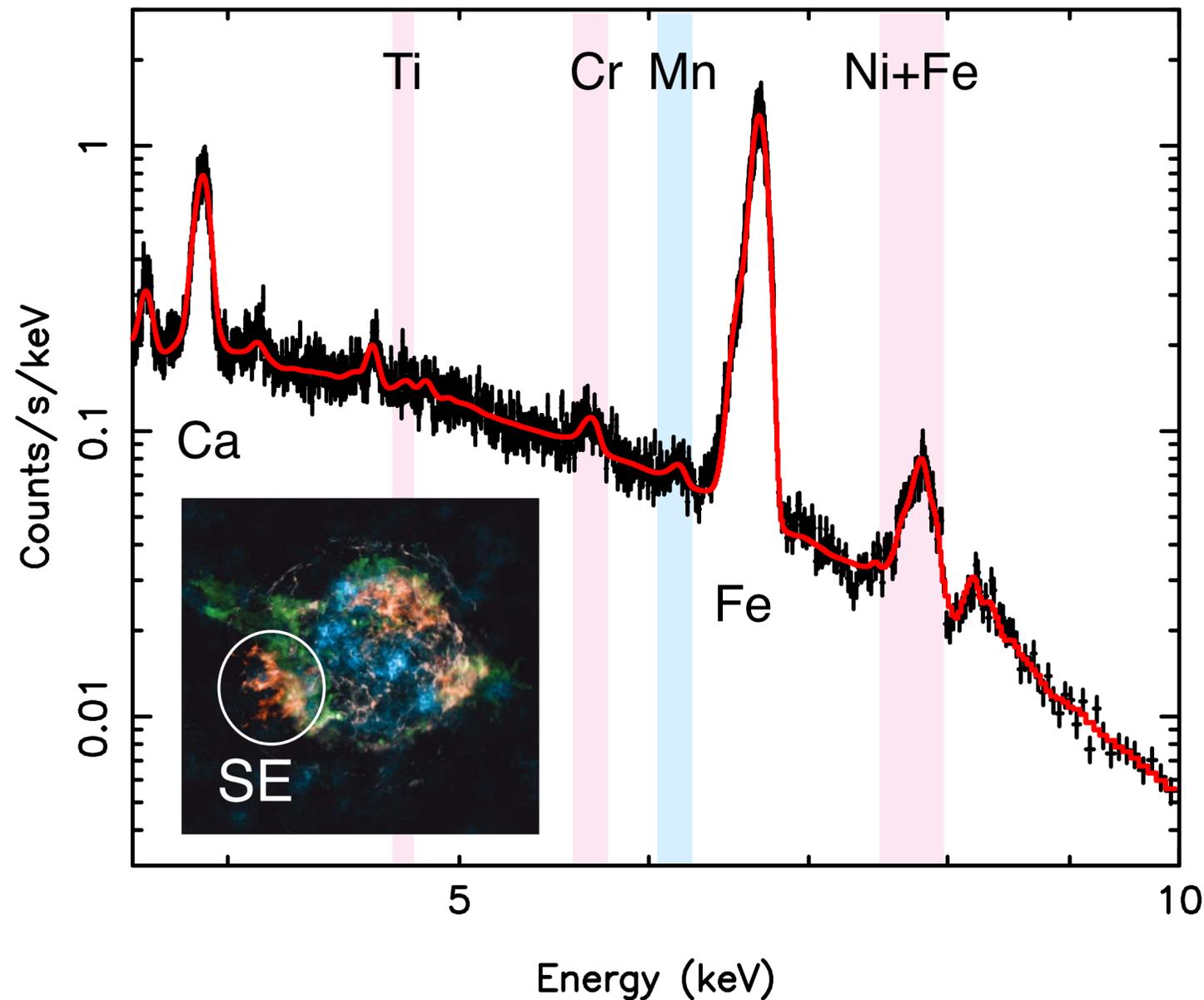
# では、XRISM ではどう見えるか？



① Ti 輝線はありそう! (まだ  $\sim 3\sigma$  程度) + ② 新たな非対称性の発見

# XRISM 衛星による“驚き”の発見

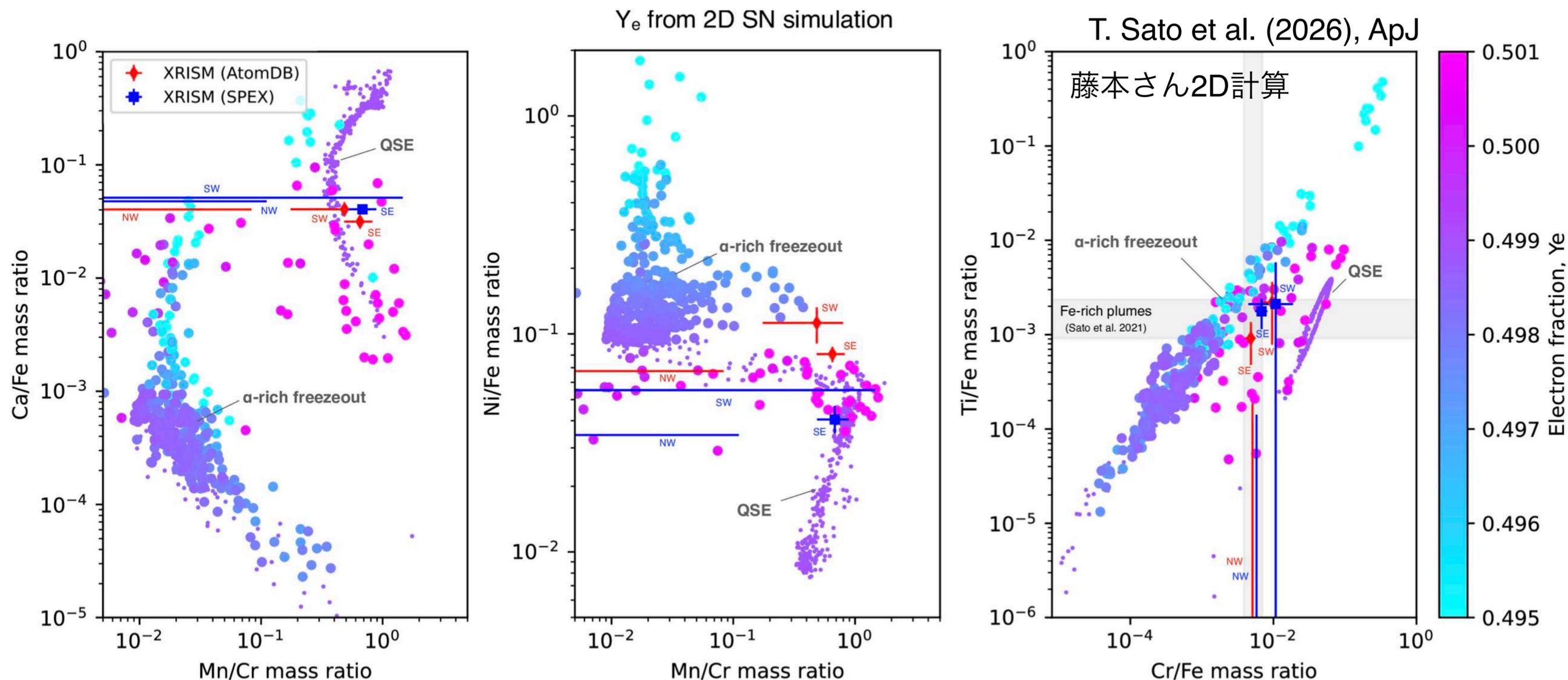
領域によって **Ti, Cr, Mn, Ni** の組成比 が異なる ⇒ 鉄族の非対称分布 (初)



特に、Mn の存在量が領域によって大きく異なる (→ニュートリノに関わる非対称性?)

# XRISM 衛星による“驚き”の発見

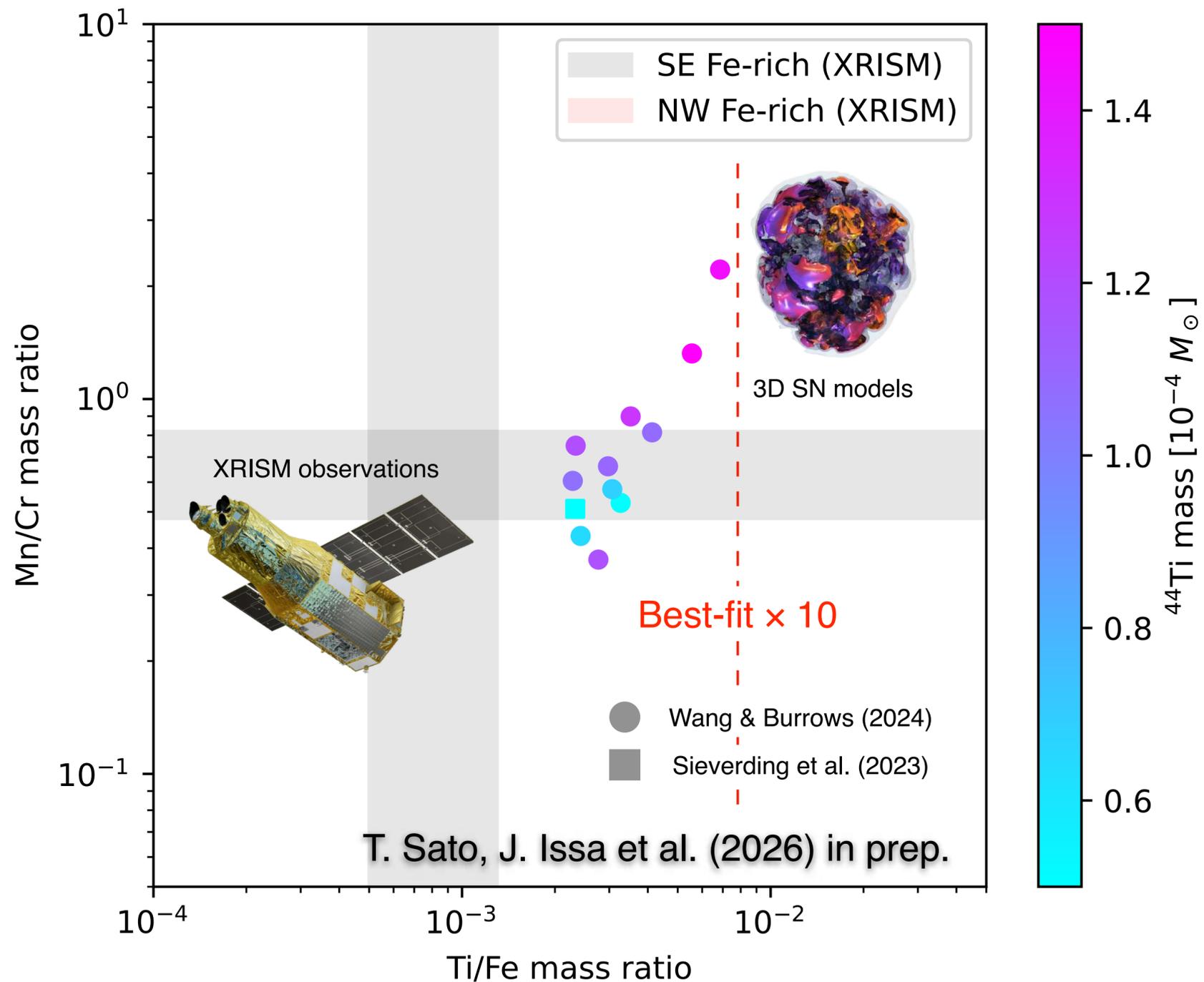
領域によって **Ti, Cr, Mn, Ni** の組成比が異なる ⇒ 鉄族の非対称分布 (初)



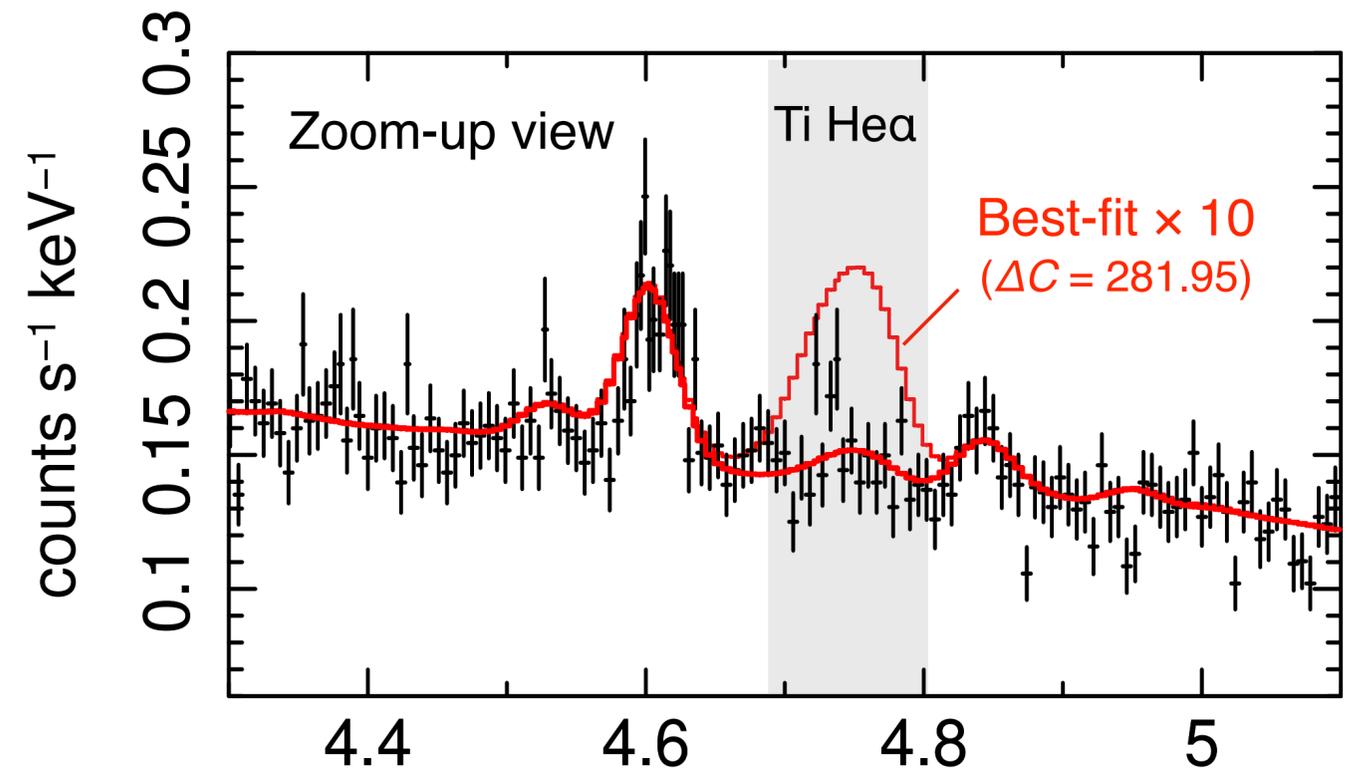
2D 超新星と比較 → 全体的に“陽子過剰”寄りの組成だと説明しやすい

# XRISM 衛星による“驚き”の発見

でも、極端に陽子過剰 & 高エントロピーな環境は否定される？



- 陽子過剰 wind は  $^{46}\text{Ti}$  等の安定 Ti の合成量も増加 (一部は  $^{44}\text{Ti}$  へ)
- 同様に、 $^{55}\text{Mn}$  も増加

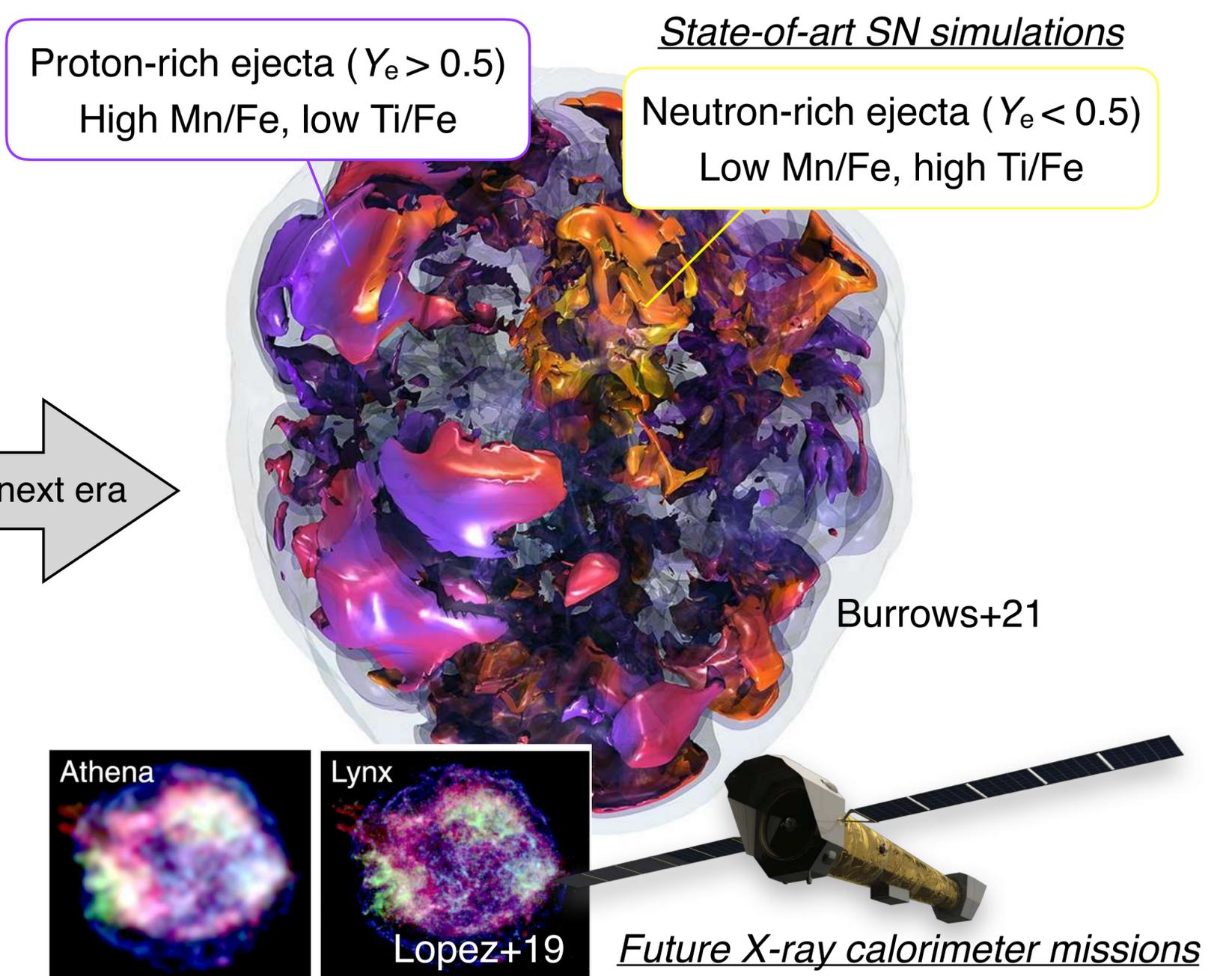
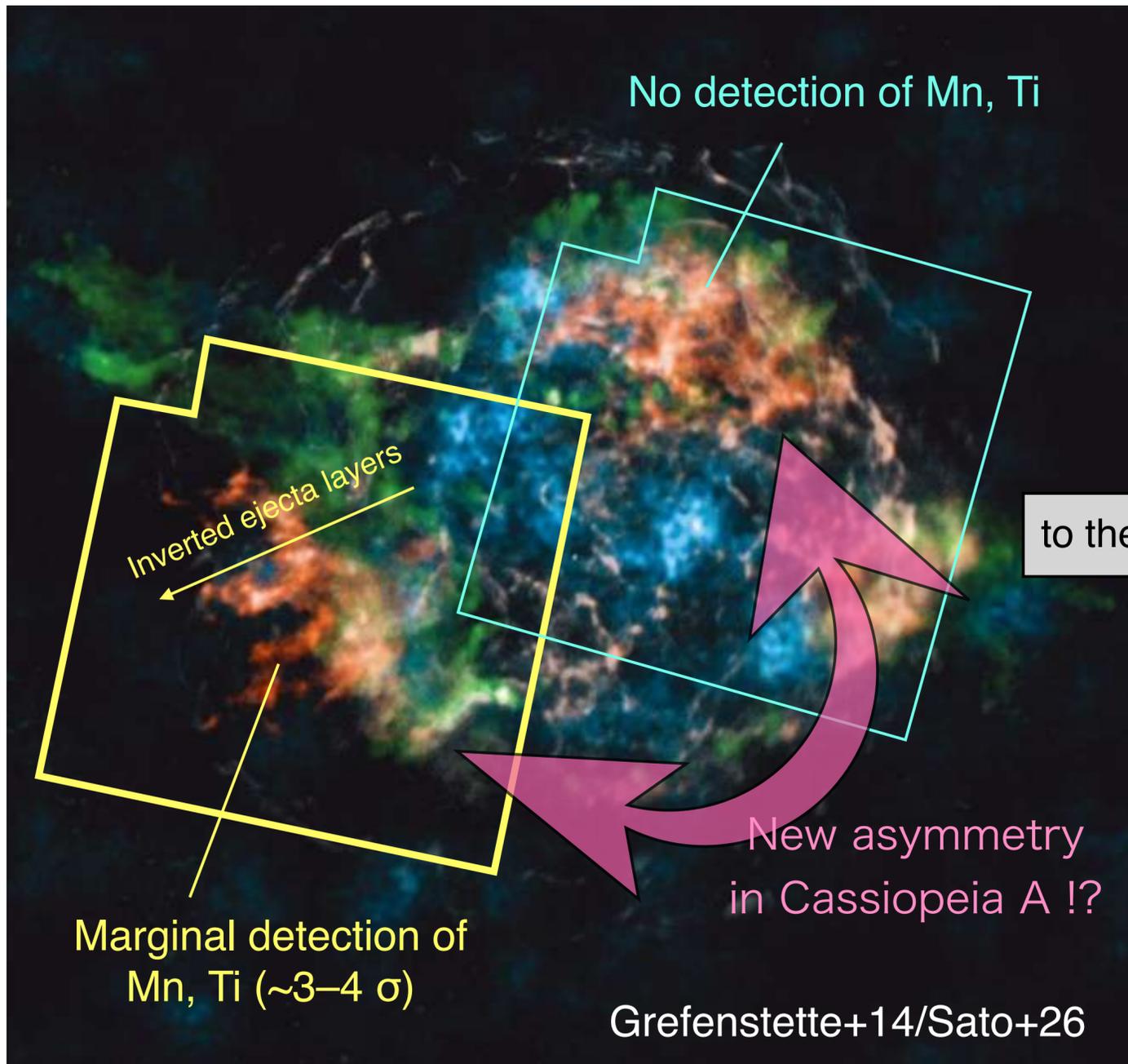


XRISM で一部のモデルは棄却できそう

# ニュートリノ駆動超新星の非対称性の“発見”から“理解”へ

**SN Science until 2020's**  
“Finding asymmetries”

**Future SN Science in 2030–2040's**  
“Understanding asymmetries”



# 本日の話題 ②: 超新星残骸で超新星ニュートリノ！？

## まとめ

- 希少元素は天然のニュートリノ検出器
- 有名天体「カシオペア座A」の鉄族組成が測られ始めた
- ニュートリノ反応を考えると解釈しやすい結果
- 今後の超新星シミュレーションとの比較に期待

# ご清聴ありがとうございました

XRISM 時代に“**超新星残骸**”を使った

ニュートリノ加熱機構に関わる恒星 & 超新星メカニズムの話題

本日の話題 ① 大質量星の後期進化と内部構造

本日の話題 ② 超新星残骸で超新星ニュートリノ！？

「X線残骸観測 ↔ ニュートリノ ↔ 恒星・超新星」

→ 🔥 この辺を繋いでいきたい 🔥