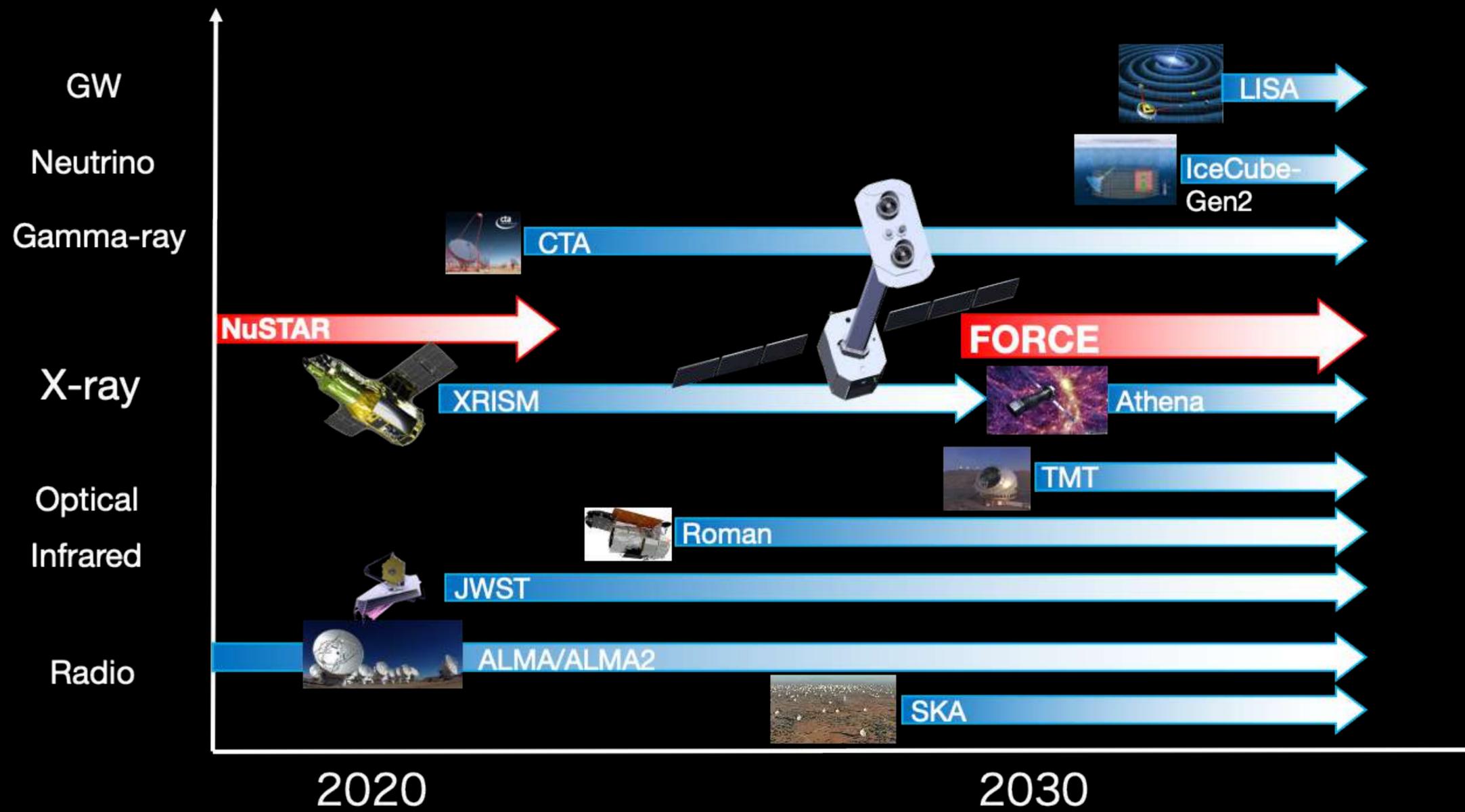


# 超新星残骸を用いた元素合成研究とFORCE衛星による将来展望

高エネルギー現象で探る宇宙の多様性I

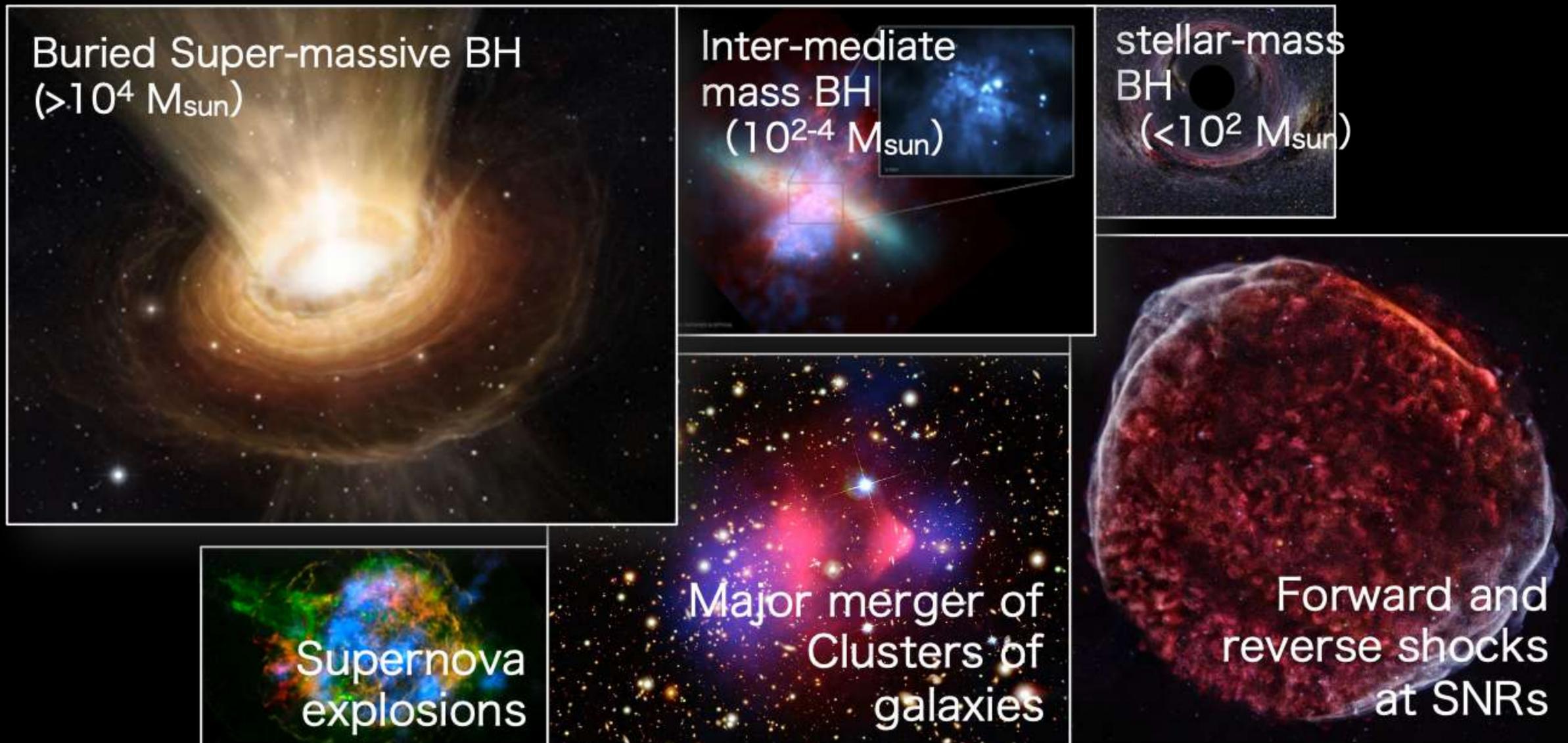


# FORCE衛星：マルチメッセンジャー時代の唯一の広帯域X線ミッション



- 2030年代は他波長・他手段の大型計画が出揃う時期であり、FORCEはその時期において唯一の広帯域X線ミッション
- 科学目標として掲げる「BHの成長と銀河進化に与える影響の理解」においては可視・赤外のミッション、および、重力波観測とのシナジー、「非熱的エネルギーの生成機構と総量の理解」においては電波・ガンマ線観測とのシナジー、そして、「星の進化と爆発機構の理解」については理論計算・重力波観測・ニュートリノ観測とのシナジーを期待

# FORCE 衛星の科学目標

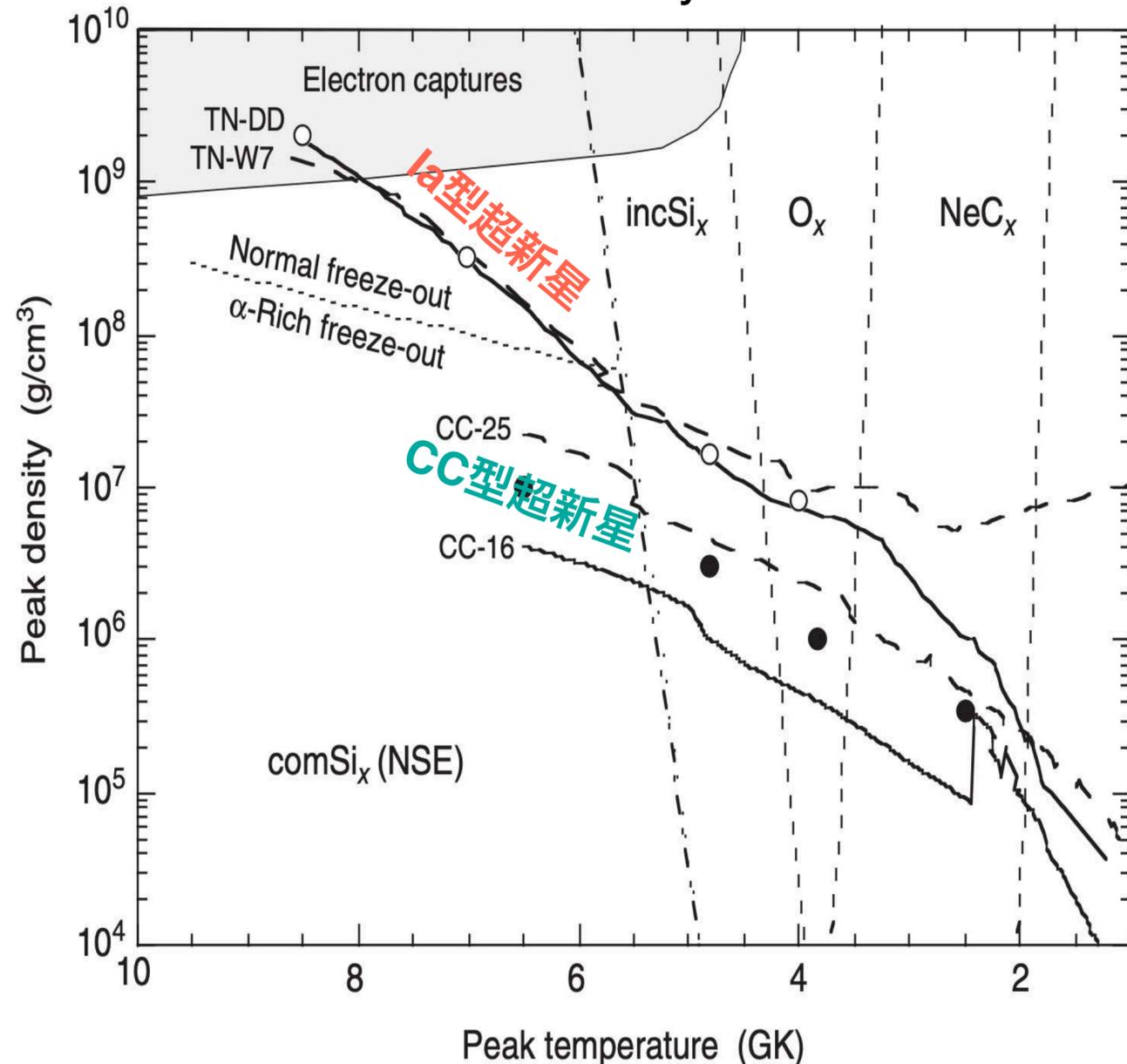


1. ブラックホールがどのように進化し、銀河進化にどのように影響を及ぼすのか?
2. 非熱的エネルギーがどのように生みだされ、宇宙をどのように満たしているのか?
3. 星がどのように終末を迎え、どのように爆発するのか? **本日のトピック**

# 超新星最深部での元素合成 → 貴重な爆発中心の物理情報

特に、Si 燃焼(NSE,  $T_{\text{peak}} > 5.5 \text{ GK}$ )で合成される**鉄族元素**には爆発機構に関連する物理が詰まっている

“Nuclear Physics of Stars” より



近年(数年)、超新星残骸を使った鉄族元素合成研究が大きく進歩

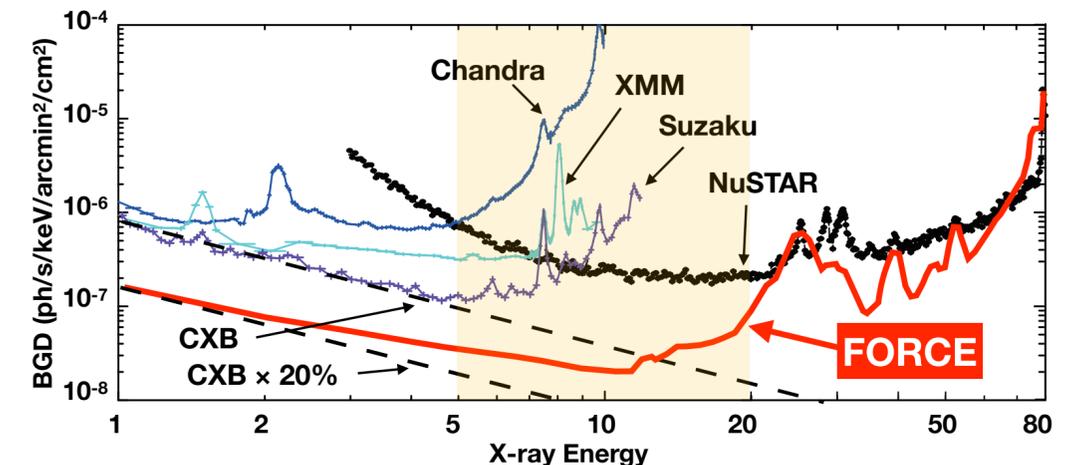
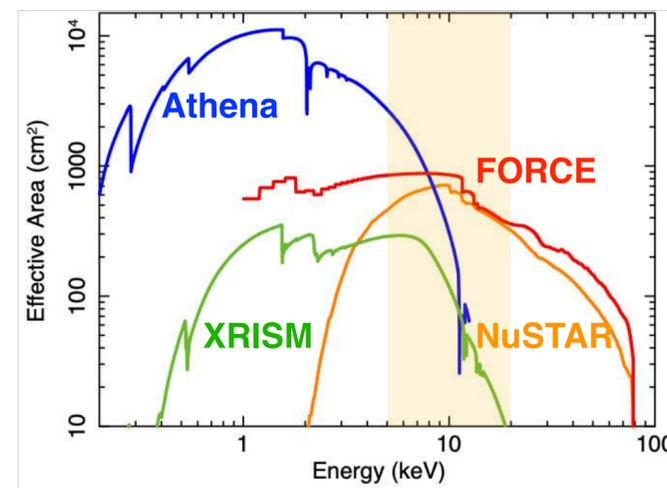
## ① Ia型超新星

→ チャンドラセカール質量付近での電子捕獲過程

## ② 重力崩壊型超新星

→ α-rich freezeout、ニュートリノ相互作用の検証

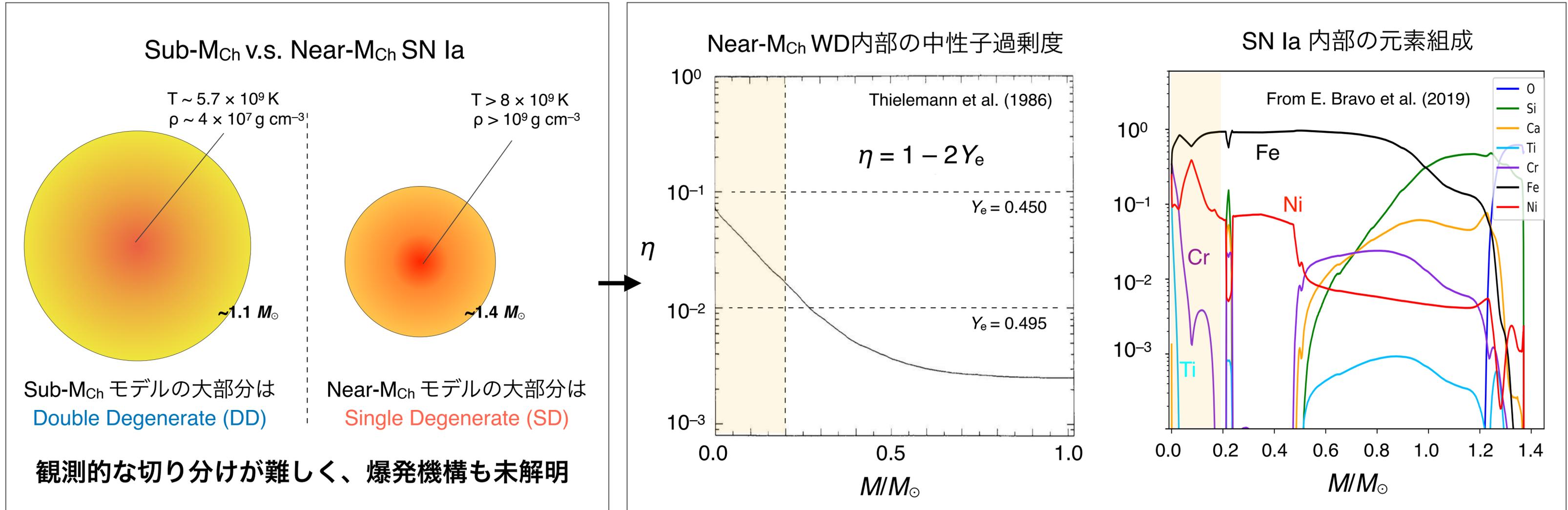
FORCE衛星は、この鉄帯域(~5–10 keV)で世界一の感度を誇る!!



日本独自のサイエンスを発展 + マルチメッセンジャー天文学への貢献も期待

# 近年の超新星残骸のX線観測を用いた超新星最深部での元素合成研究

① Ia型超新星 → 白色矮星内部での電子捕獲過程 (爆発前のWD質量に関連)



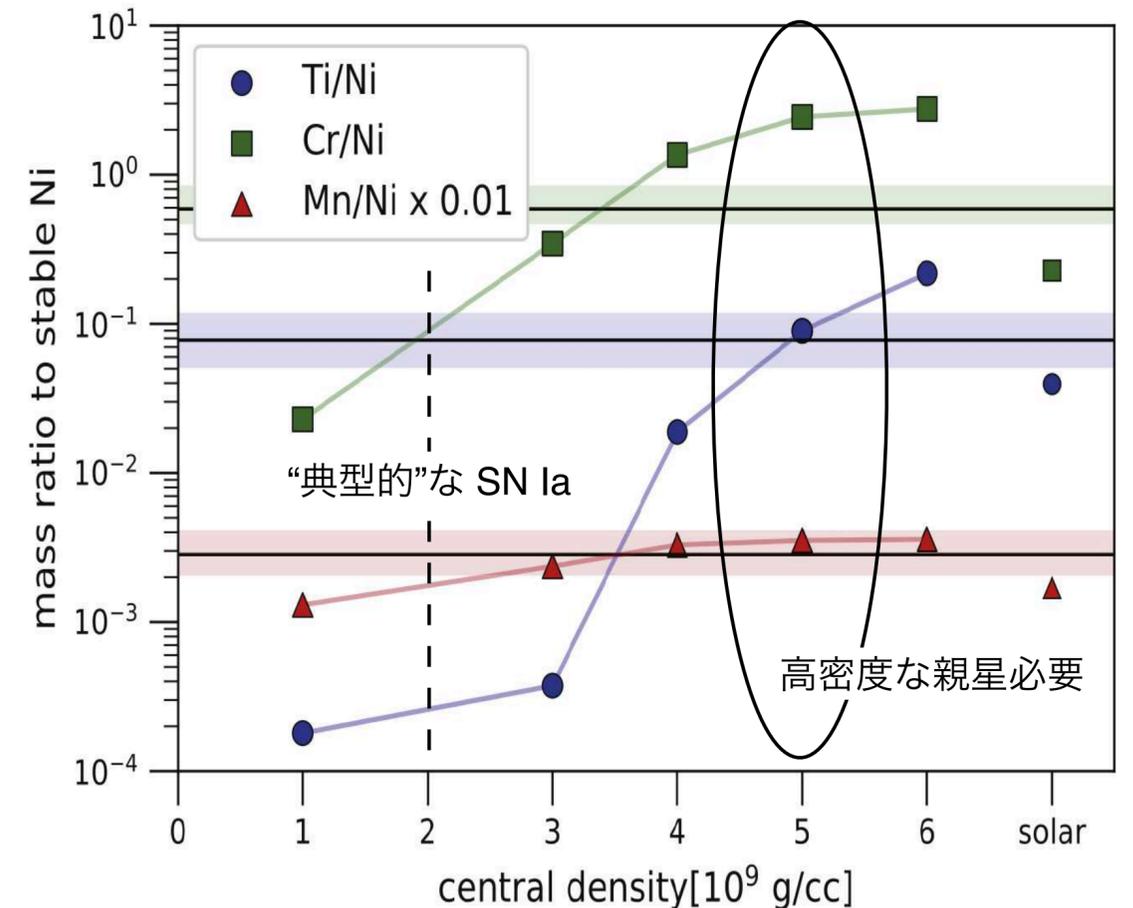
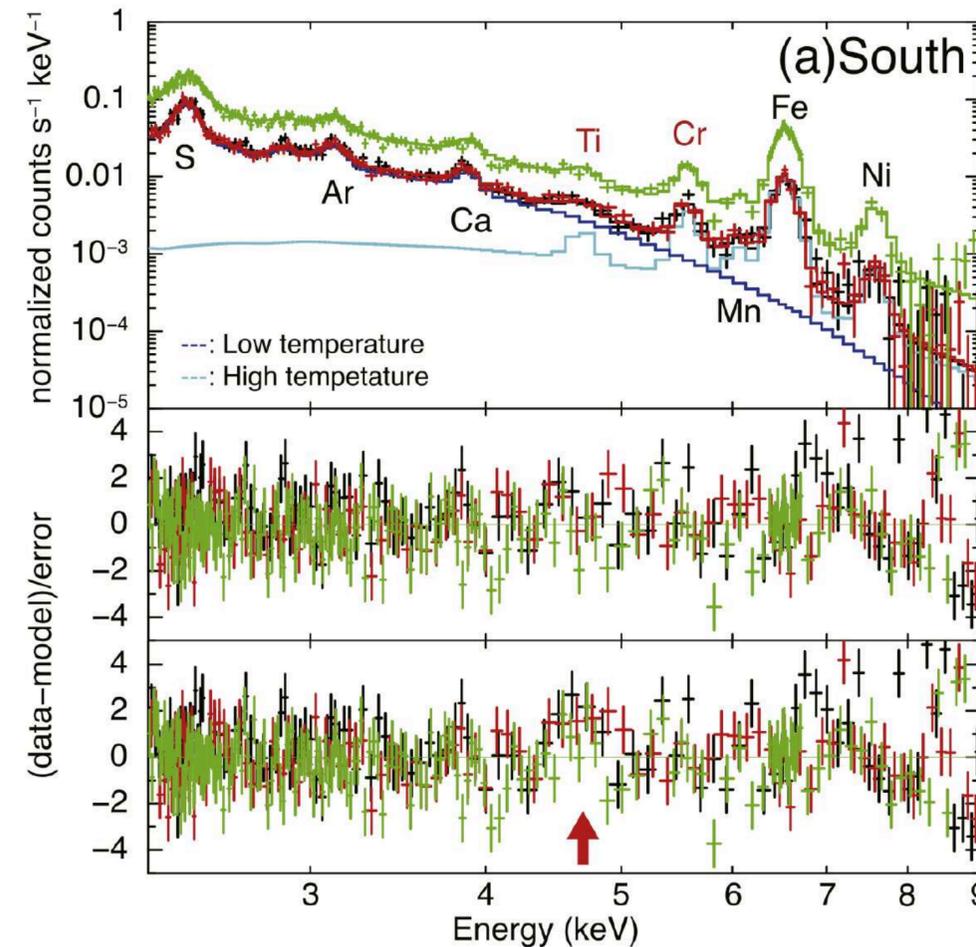
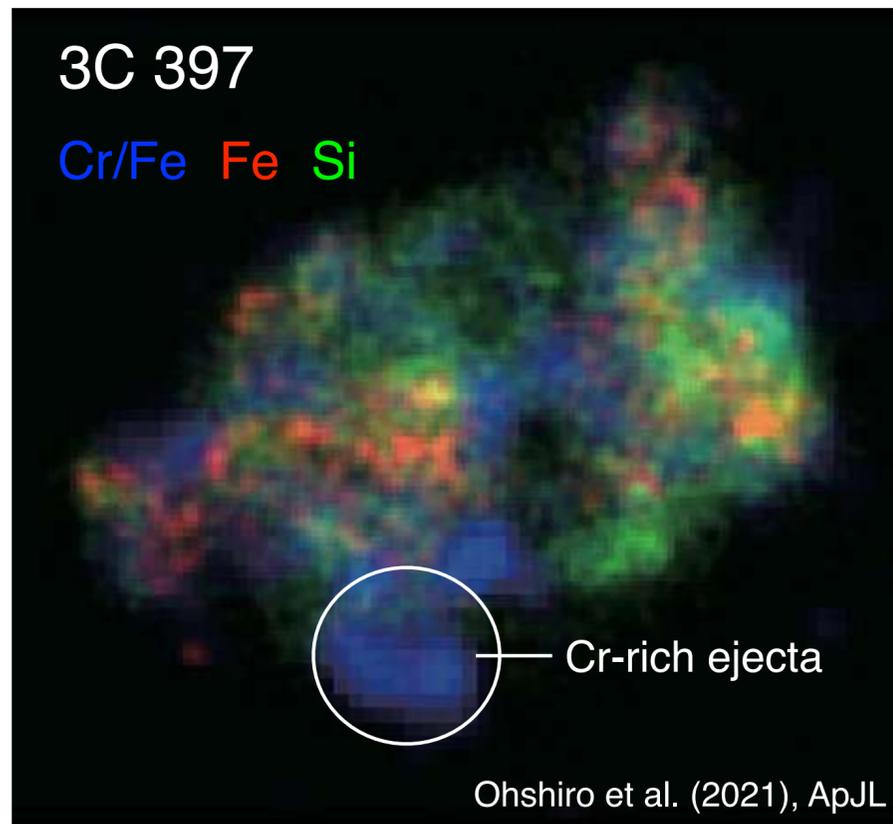
Near- $M_{\text{Ch}}$  SN Ia 中心部では、中性子過剰元素  $^{58}\text{Ni}$  ( $Y_e \sim 0.483$ ),  $^{54}\text{Cr}$  ( $Y_e \sim 0.444$ ),  $^{50}\text{Ti}$  ( $Y_e = 0.44$ ) の合成量が急上昇  
 → これらの元素の観測から爆発時の最終質量(中心密度)の推定が可能になり、爆発機構の理解にも繋がる

**Reference:** Yamaguchi et al. (2015), ApJL; Hitomi Collaboration (2017), Nature; Sato et al. (2020), ApJ; Ohshiro et al. (2021), ApJL

# 近年の超新星残骸のX線観測を用いた超新星最深部での元素合成研究

① Ia型超新星 → 白色矮星内部での電子捕獲過程 (爆発前のWD質量に関連)

Ia型超新星残骸内に  $^{54}\text{Cr}$  ( $Y_e \sim 0.444$ ),  $^{50}\text{Ti}$  ( $Y_e = 0.44$ ) が豊富な爆発中心からの噴出物を発見



元素組成から中心密度  $\sim 5 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3}$  の Near- $M_{\text{Ch}}$  SN Ia で説明可能 → SN Ia の中心密度推定に初めて成功!

**観測的に未知の物理パラメータ(中心密度 = 最終質量)が推定可能になった**

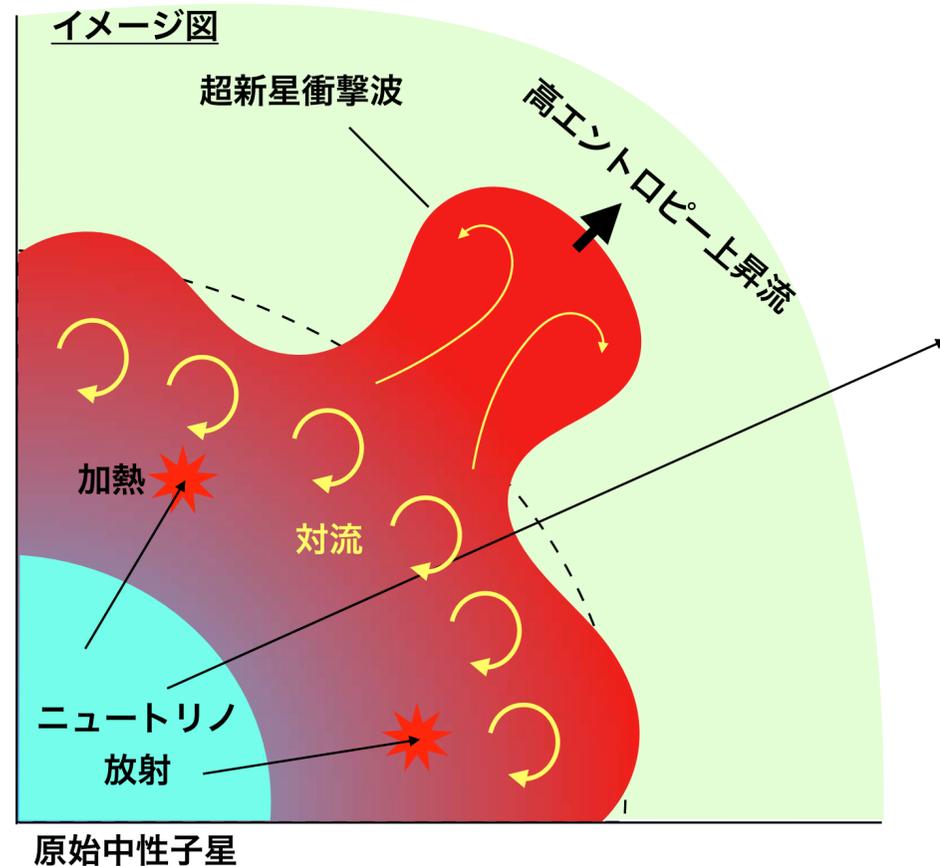
Reference: Yamaguchi et al. (2015), ApJL; Hitomi Collaboration (2017), Nature; Sato et al. (2020), ApJ; Ohshiro et al. (2021), ApJL

# 近年の超新星残骸のX線観測を用いた超新星最深部での元素合成研究

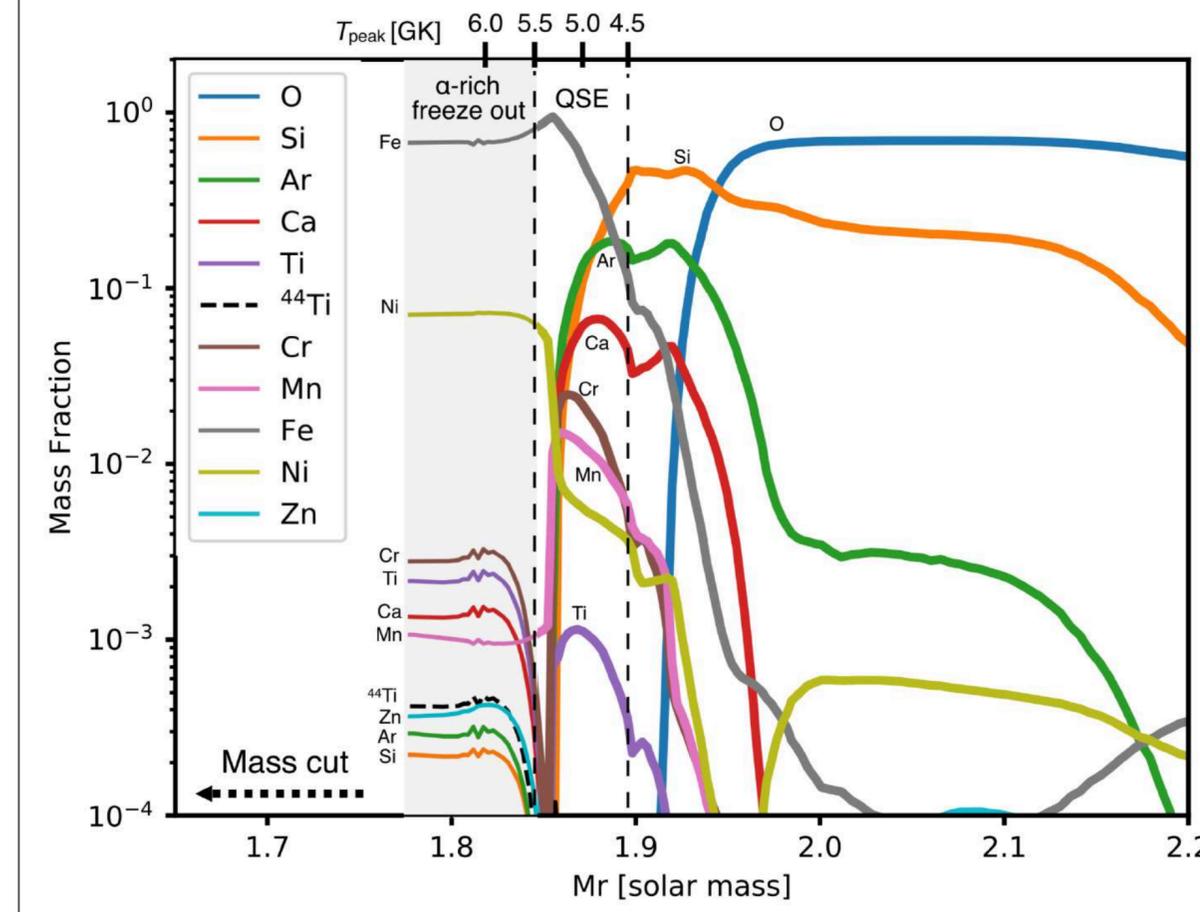
② 重力崩壊型超新星 → 超新星エンジン周辺の物理パラメータの推定

爆発中心の重要な物理過程：ニュートリノ加熱、SASI など → 観測情報がほとんどない

ニュートリノ加熱で生み出される非対称性 (対流)



重力崩壊型超新星の元素合成



Si 燃焼層 (最深部  $T_{\text{peak}} > 5$  GK)

組成が非常に少ないパラメータで決定

$T_{\text{peak}}, \rho_{\text{peak}}, Y_e$   
と熱的時間進化

↓  
元素の組成が決まれば未知の物理  
パラメータ (エントロピー,  $Y_e$ ) を  
推定できる

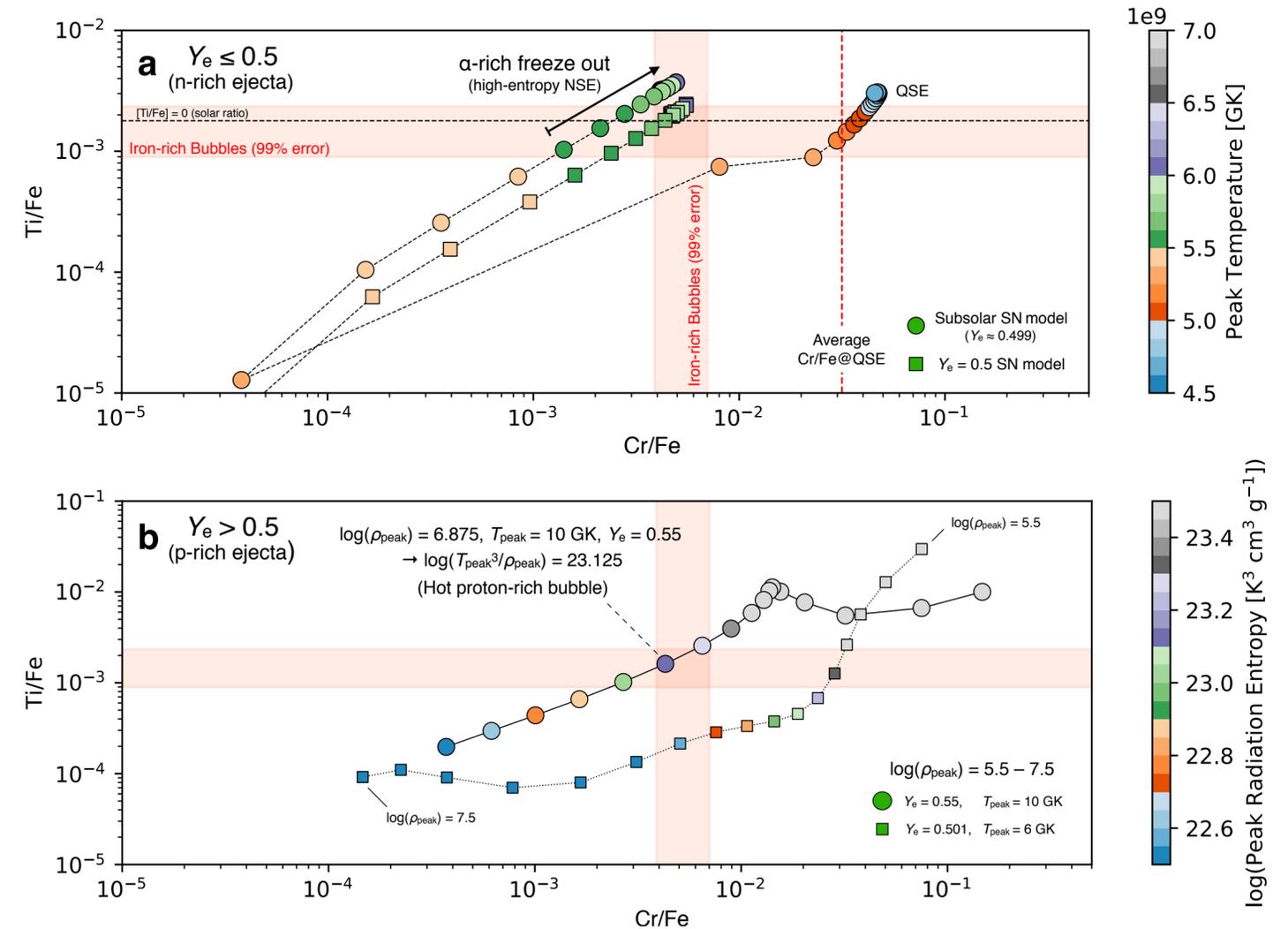
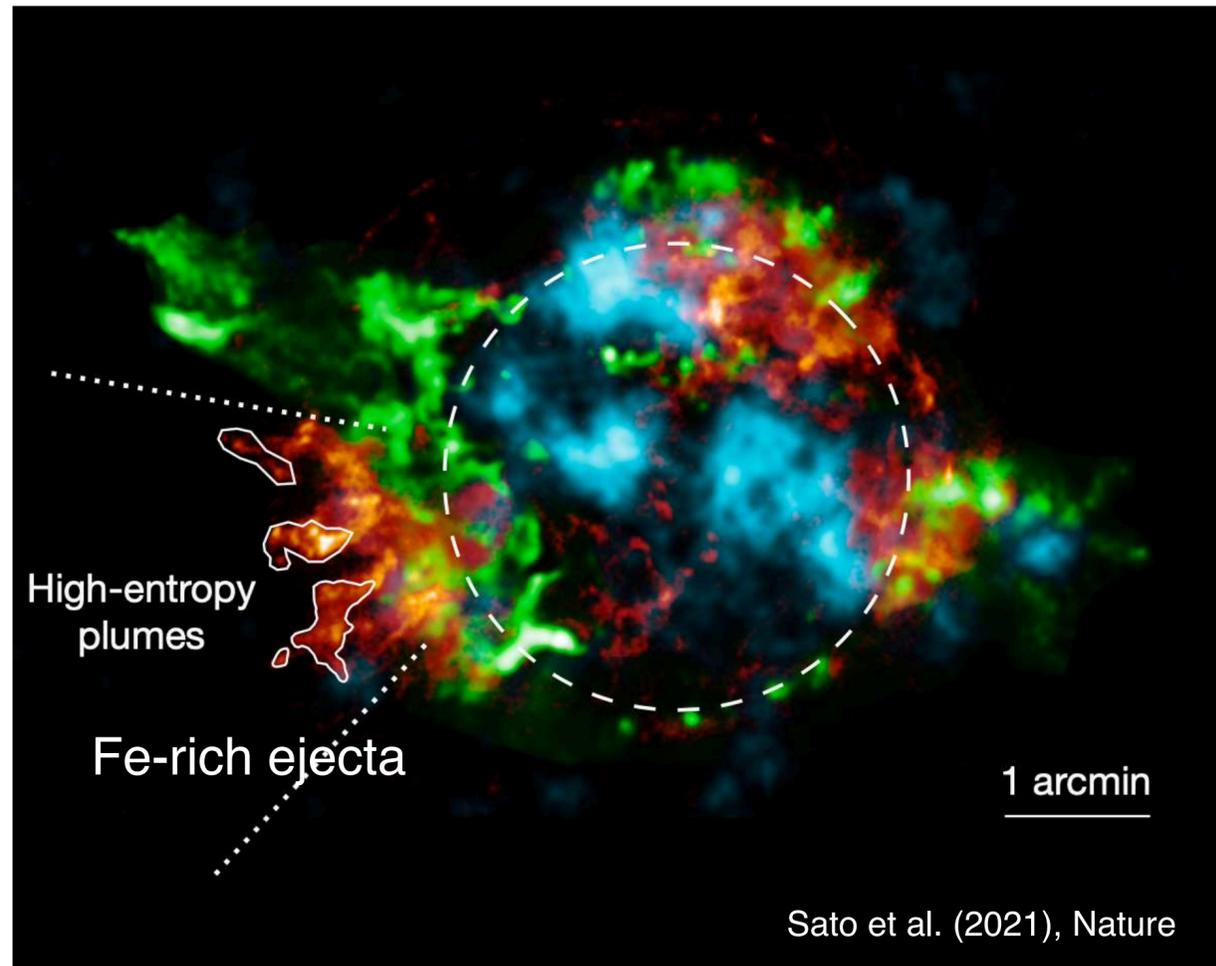
残骸内の希少元素 (Ti, Cr, Mn, Ni) 観測から、対流型超新星エンジンに関する物理量を抽出可能

$\alpha$ 元素 Ti (=  $^{48}\text{Cr}$ ) や Cr (=  $^{52}\text{Fe}$ ) はエントロピーに、中性子過剰元素 (例えば Ni) は  $Y_e$  に、Mn はニュートリノ元素合成に感度あり

Reference: Sato et al. (2020), ApJ; Sato et al. (2021), Nature; Sato et al. in prep.

# 近年の超新星残骸のX線観測を用いた超新星最深部での元素合成研究

## ② 重力崩壊型超新星 → 超新星エンジン周辺の物理パラメータの推定



希少元素(Ti, Cr, Fe)観測からニュートリノ加熱由来の高エントロピー上昇流と結論づけた

**爆発機構に関わる未知の物理パラメータ (エントロピー,  $Y_e$ ) が推定可能になった**

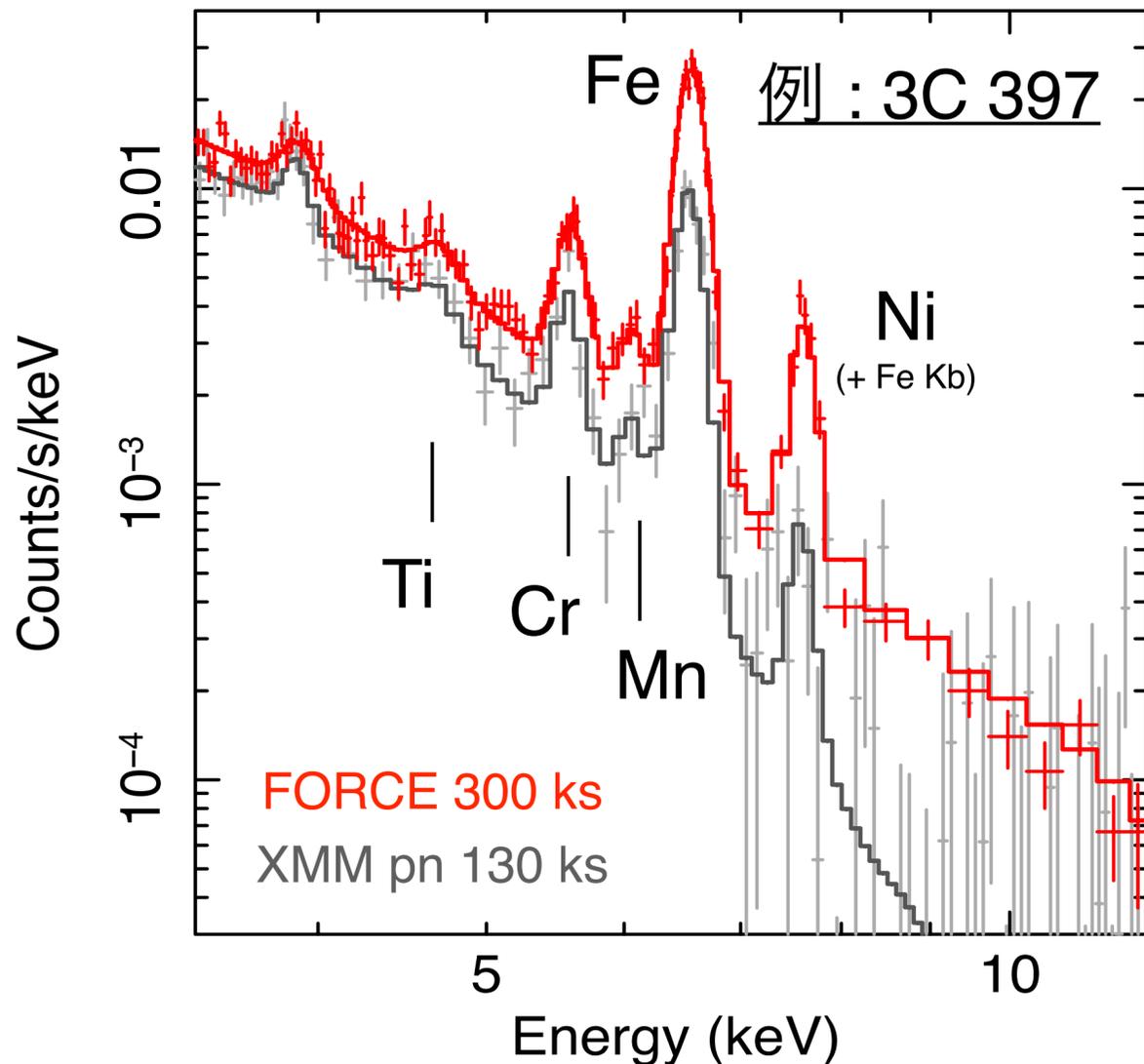
Reference: Sato et al. (2020), ApJ; Sato et al. (2021), Nature; Sato et al. in prep.

# FORCE衛星による鉄族元素研究への将来展望

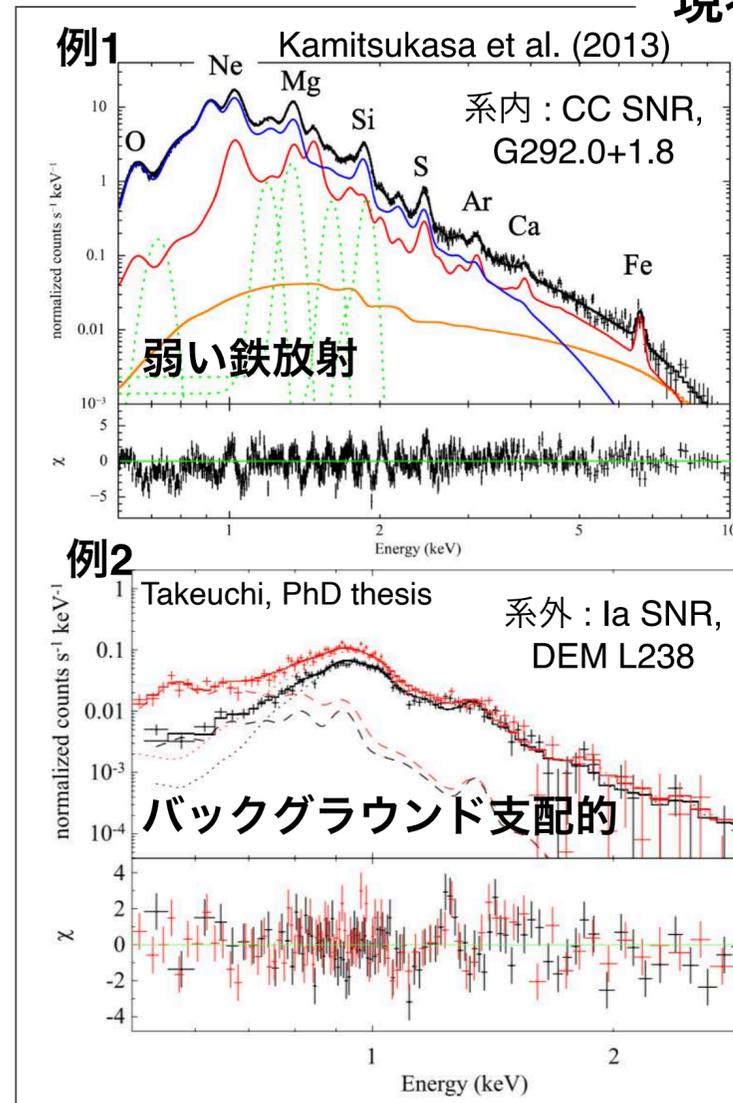
現在、これらの研究が可能になっているのは、la型/CC型ともに系内に1サンプルずつのみ  
 そこで、FORCEの大有効面積 + 低バックグラウンド(現行の1-2桁落ち) + 十分な輝線分解能力を活かして

**サンプル増加** (系内だけでなく系外も) & **希少元素マッピング**

FORCE 観測スペクトルの予測



現状の鉄族観測の問題点



**鉄族の輝線観測はそもそも難しい**

(鉄が検出されているサンプル < 30 @ 系内&系外)

- 若いと大部分の鉄が加熱されていない
- 古いと冷えて、鉄を叩けない

→ 鉄輝線が弱いものが多い (観測の窓が狭い)

**例1:** 系内で鉄は見えていても、放射が弱く、他の鉄族が見えていないものが多い

**例2:** 系外(LMC/SMC)超新星残骸はバックグラウンドに埋もれ鉄まで見えていないものが多い

**結論: 感度を上げるしか手段がない**

→ FORCEで系統的な議論が初めて可能に?

# FORCE衛星のマルチメッセンジャー天文学への貢献

2030年代に突発天体の硬X線フォローアップ観測ができる唯一の天文台

突発天体の元素合成と非熱的放射を探るユニークなツール

## FORCE が観測出来る核ガンマ線/電子捕獲X線

@ 6.4 keV :  $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  decay ( $^{56}\text{Ni}$ )

鉄の総量の見積もり

@ 14 keV :  $^{57}\text{Co}$  decay ( $^{57}\text{Ni}$ )

鉄の総量との比較で内部の  $Y_e$  推定

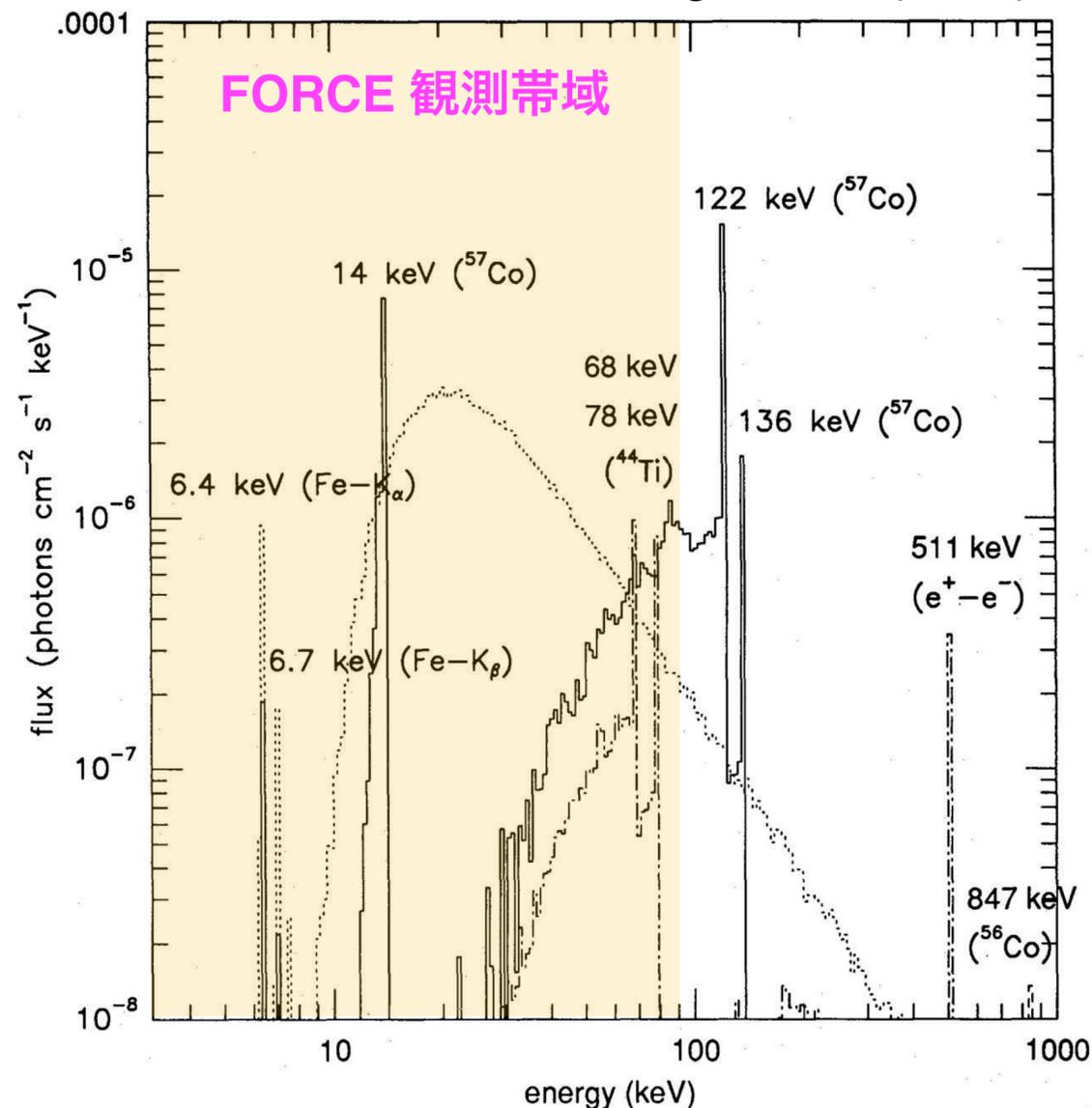
@ 68, 78 keV :  $^{44}\text{Ti}$  decay

CC型 : 爆発の非対称性/エントロピー

Ia型 : He shell detonation (Double Detonation)

超新星フォローアップ観測で様々な物理情報を取得可能

Kumagai et al. (1993)



# 超新星残骸を用いた元素合成研究とFORCE衛星による将来展望：まとめ



May the *force* be with your science

- FORCE衛星はマルチメッセンジャー天文学時代の唯一の広帯域X線天文台
- 近年、発展が著しい超新星残骸を用いた鉄族元素合成研究において、世界最高感度を誇る
- ここ数年で Ia 型超新星の中性子過剰化過程の検証、重力崩壊型超新星の爆発中心部のパラメータ推定が可能になっており、FORCEでは系外のサンプルも含めて系統的に議論できる可能性あり
- マルチメッセンジャー時代に、核ガンマ線/電子捕獲X線や硬X線放射のフォローアップ観測に貢献

**FORCE 計画に参加してくださる方を募集中です。  
以下に御気軽に連絡を!!**

[nghxt-jimu@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:nghxt-jimu@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

サイエンス検討に貢献してくださる理論家の方も歓迎します！