

超新星残骸のX線観測で探る星の爆発機構 + 雑談

立教大学 佐藤 寿紀

自己紹介

出身大学：首都大学東京 (現 都立大)

2018/03 超新星残骸観測で博士号

指導教官 大橋隆哉 (首都大, 銀河団), 石田學 (ISAS, 白色矮星)



2018/04~ 理研 基礎特 @ 玉川研

2018/07~ NASA/GSFC

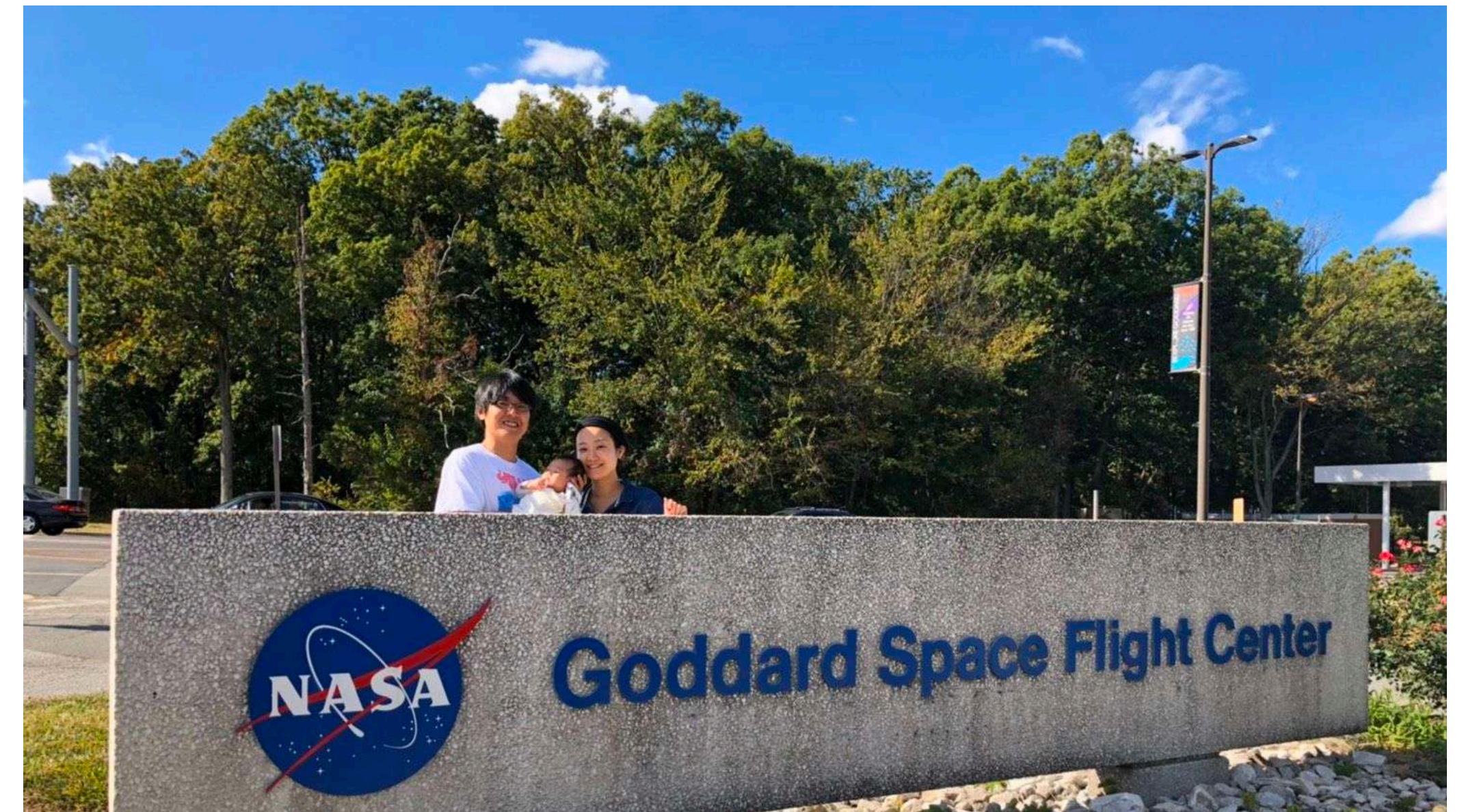
(XRISM望遠鏡、 γ 線TES気球、残骸研究)



2021/04~ 立教大 助教 @ 山田研

(XRISM、TES実験、残骸研究)

2018/7~2020/12 米国



専門: 超新星残骸の観測研究

X線望遠鏡の開発

はじめに

星間現象というよりは**超新星爆発**に関連する最近の残骸研究を紹介します

- 自分の周りではあまりやられていなかったテーマとそれがどうやって生まれてきたのかを雑談も含めて紹介 (レビュー的な講演ではない)
- 実は、ポストクになった瞬間は自分の研究テーマを全く面白いと思えず、研究テーマの設定にかなり悩んでいた → でも、ちょっとしたきっかけが重なって心から面白いと思えるテーマに出会えた
- 自分の場合、人と話している・議論している時、新しいテーマに出会う頻度が高く、それらの研究が本当に楽しかった (コミュ力は高くない)

こんな話も共有しながら、新たな研究に出会うきっかけ作りの参考になると嬉しいです

1. イントロ：超新星残骸のX線観測

雑談①：M1の秋に研究テーマを変えた話

2. 重力崩壊型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談②：理論研究者に相談しに行った話、雑談③：Nature に投稿した話

3. Ia 型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談④：ドライブ中の雑談きっかけで論文を書いた話

1. イントロ：超新星残骸のX線観測

雑談①：M1の秋に研究テーマを変えた話

2. 重力崩壊型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談②：理論研究者に相談しに行った話、雑談③：Nature に投稿した話

3. Ia 型超新星の爆発機構と残骸観測

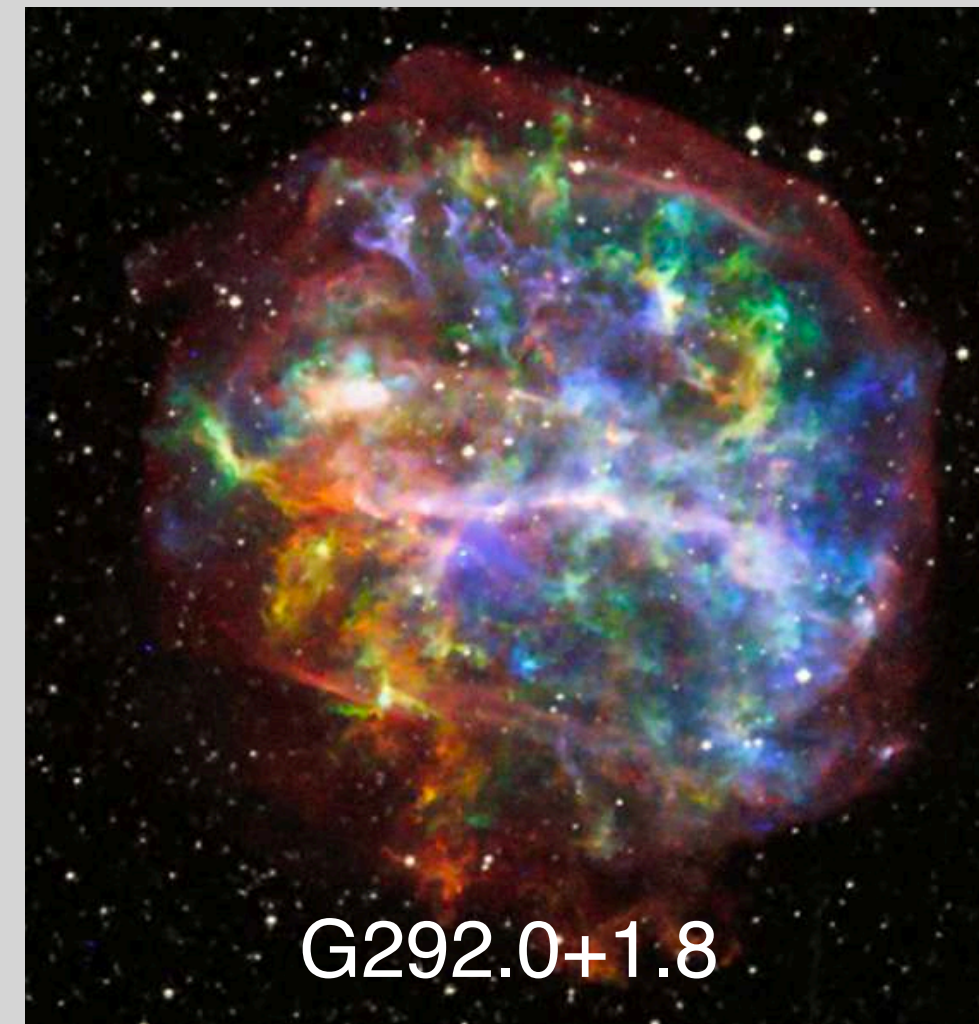
雑談④：ドライブ中の雑談きっかけで論文を書いた話

X線による超新星残骸観測

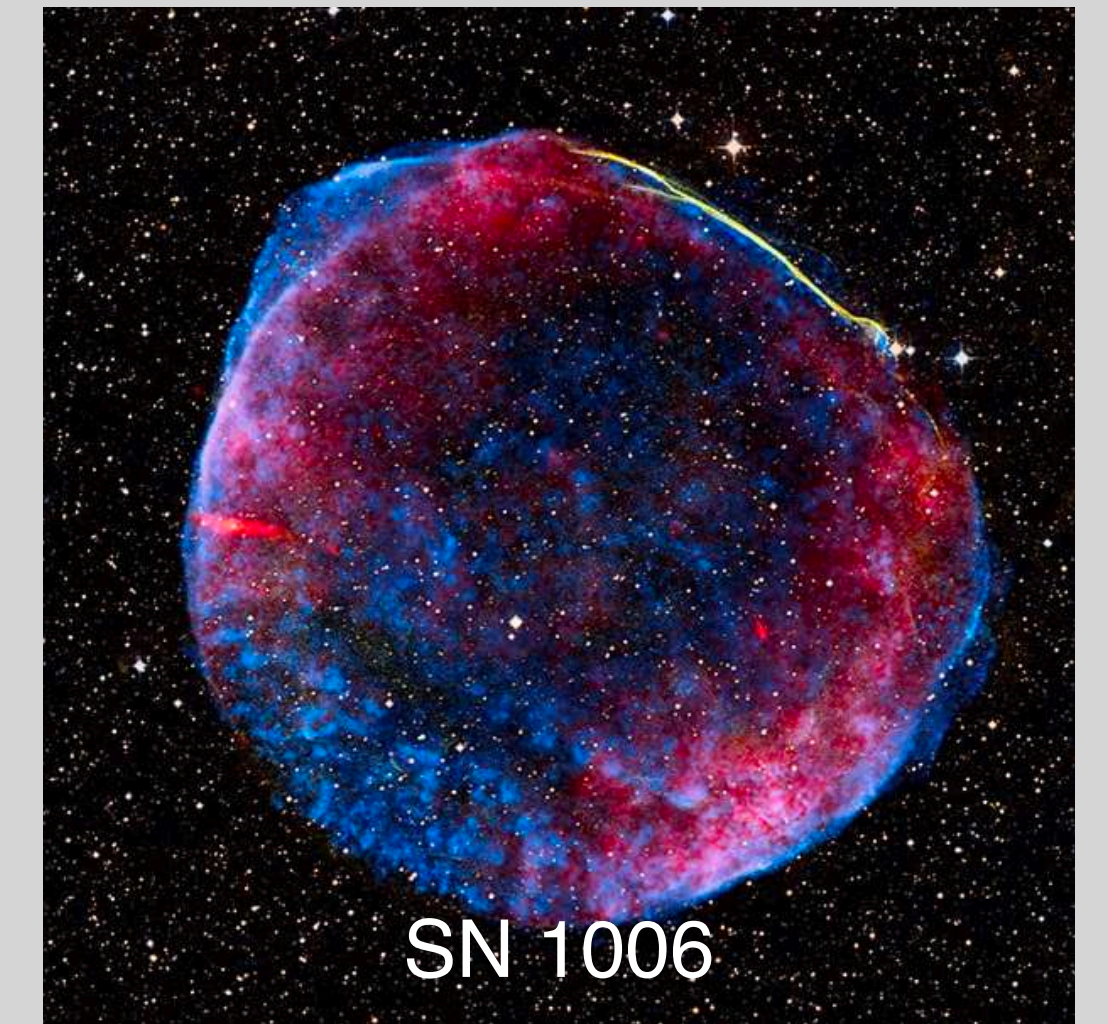
衝撃波で高階電離した**元素**からのX線とその**分布**を調査可能

→ 電波可視赤外の超新星観測とは独立した情報を取得できる

II型超新星: 大質量星の重力崩壊型超新星



Ia型超新星: 白色矮星の核暴走爆発



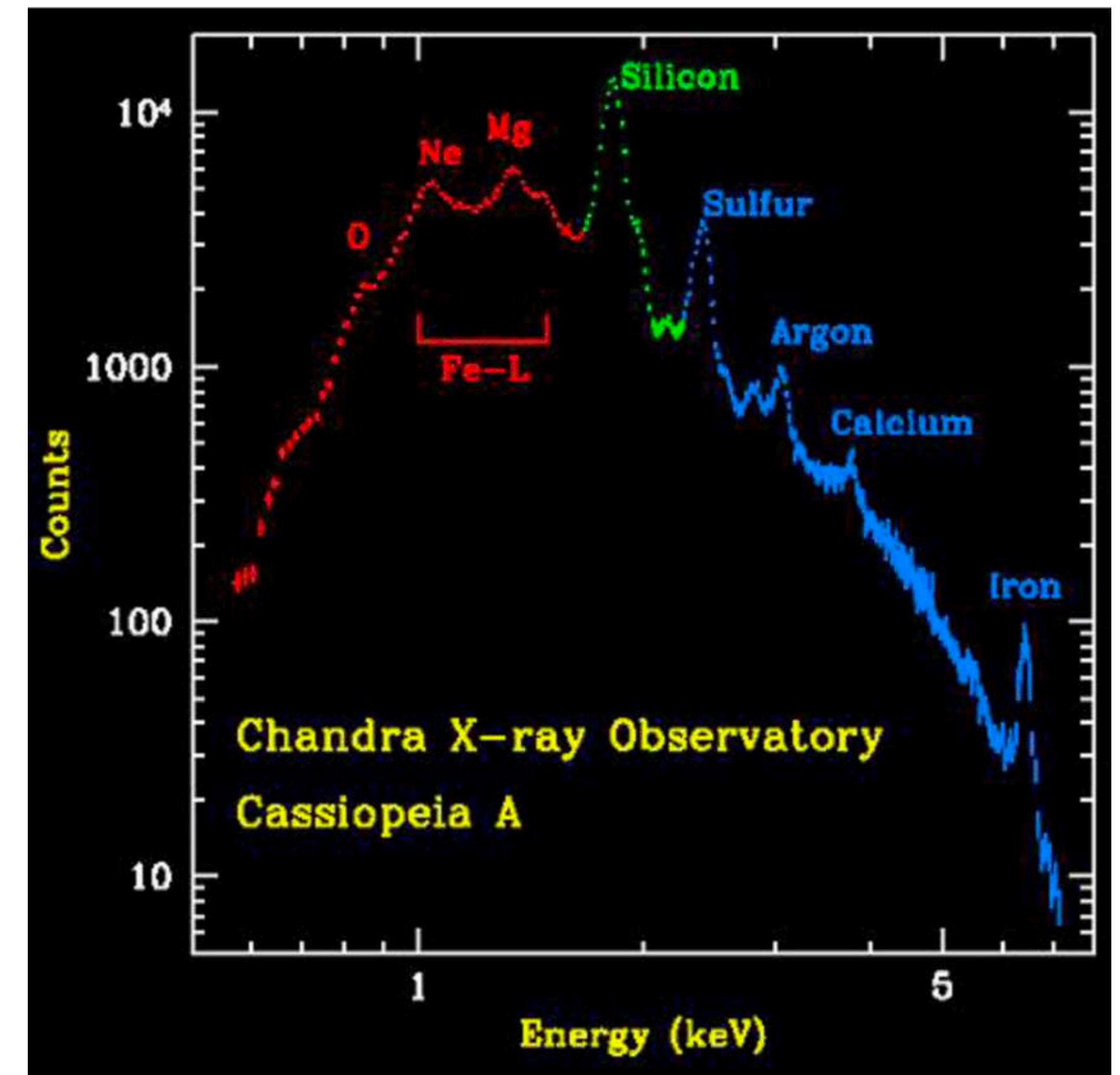
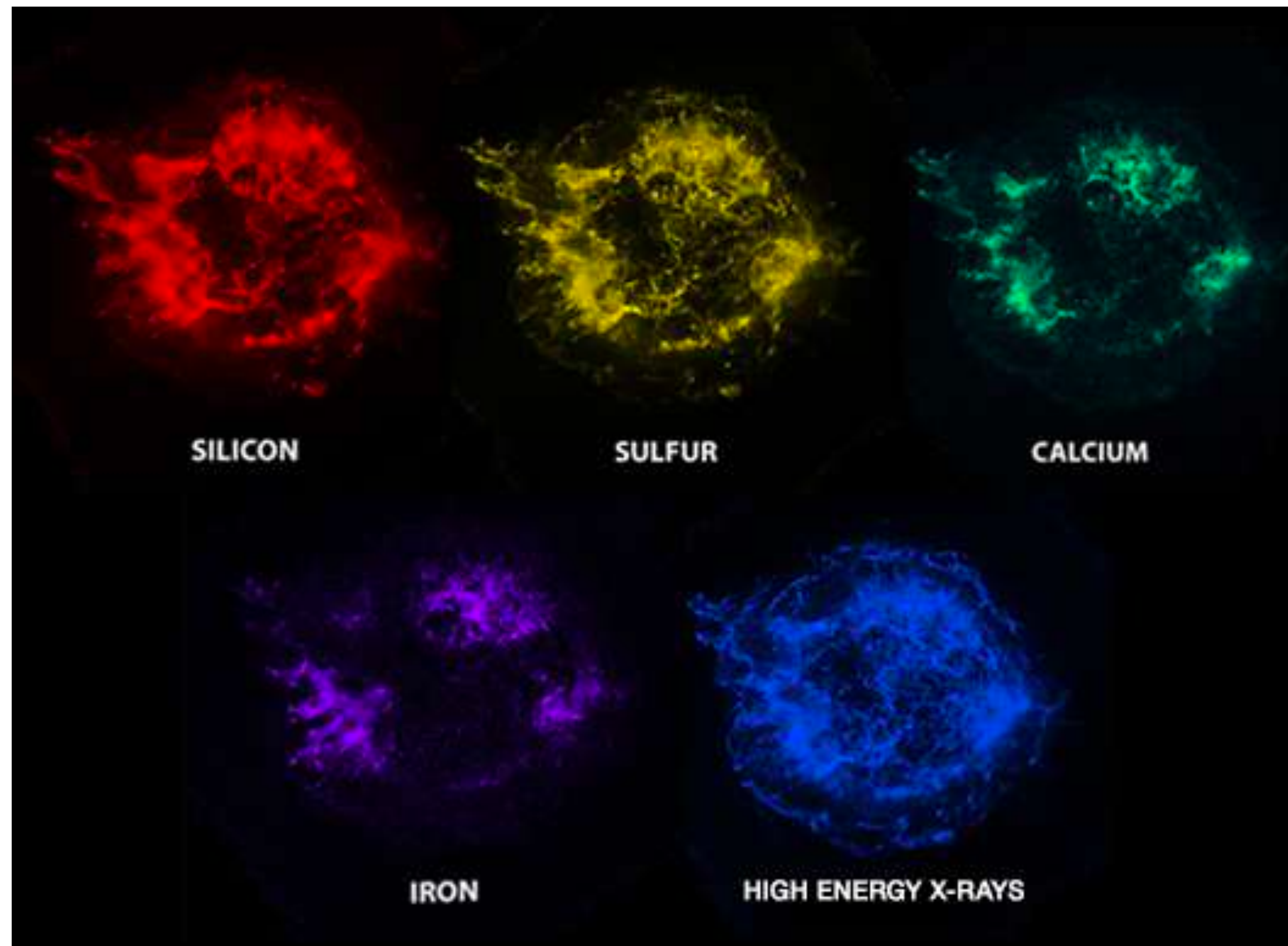
銀河系内に300個程度存在 → 一方で、X線で明るいののは15-6個程度 (Ia/CCは半々)

X線による超新星残骸観測 (どんな情報が得られる?)

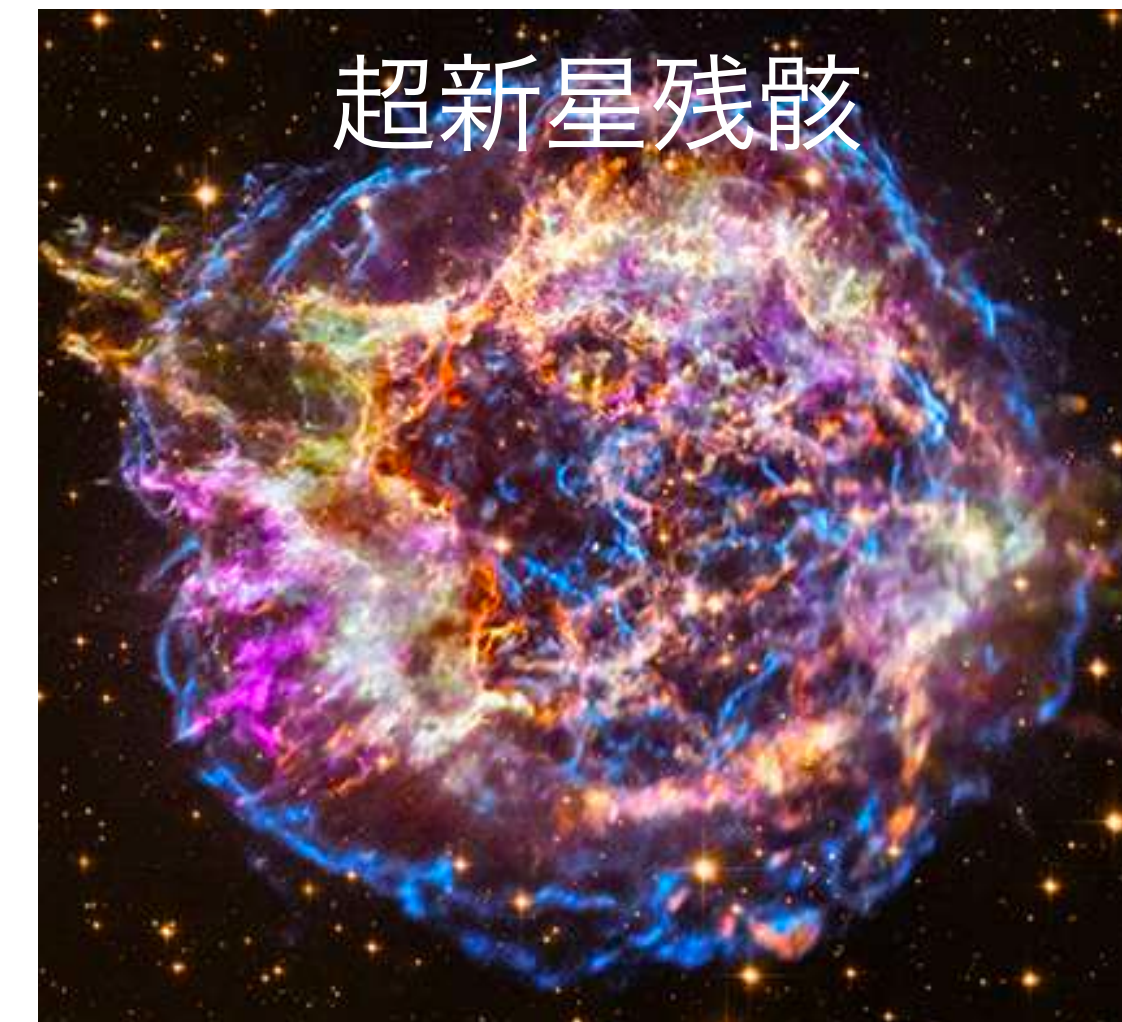
超新星残骸はX線を放射している高温プラズマ (温度 ~ 1 keV 程度)

元素の空間分布 (元素拡散の非対称性)

X線スペクトル (温度、電離度、元素量)



超新星/超新星残骸の観測の違い



サンプル数	年間数百個発見	系内に15-6個 (増えない)
超新星分類	観測すれば分かる	Light echo があれば詳細な分類も可 (Ia/CC ぐらいであれば観測で切り分け可)
得られる画像	点源	広がった天体
ライバル	多い	少ない

超新星と超新星残骸を繋ぐような研究が少しずつ発展してきている

雑談①：M1の秋に研究テーマを変えた話

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

銀河面上からの軟 X 線背景放射の研究

佐藤 寿紀 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

Abstract

我々は低輝度で広がった軟 X 線ソース (<1 keV) に対しこれまでにない感度を誇る X 線天文衛星 *Suzaku* を駆使し、銀河面領域の軟 X 線背景放射の分光特性を系統的に調べた。結果、これまでに良く知られている軟 X 線背景放射成分に加え、そのエネルギースペクトル中に銀河面特有の放射成分の存在を検出した。また、この”超過”成分の温度は $0.6\sim 1.3$ keV を示し、平均温度としては ~ 0.9 keV 程度、その intensity は $1\sim 5\times 10^{-14}$ $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 程度で各々 factor 2, 5 倍程度のばらつきがあることも明らかにした。予想される空間密度と温度から、その起源としては active binary や主系列星などが考えられる。

実は M1 の秋まで違うネタをやっていました
(夏の学校もそのネタで参加: 左図)

その後色々あって、研究のモチベーションが
落ちている時に、助教の人が飲み会の席で話
していた「超新星残骸」に興味が出てくる
→ 相談/ネタ乗り換え → 面白いし合ってそう!!

あの時研究テーマを変えてよかったと心から思っています

教訓: 研究テーマの合う合わない、指導者の合う合わないは仕方ないので、早めに相談しましょう。
まずは、相談に乗ってくれる人を探してみましょう。少しぐらい遠回りしても大丈夫です。

1. イントロ：超新星残骸のX線観測

雑談①：M1の秋に研究テーマを変えた話

2. 重力崩壊型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談②：理論研究者に相談しに行った話、雑談③：Nature に投稿した話

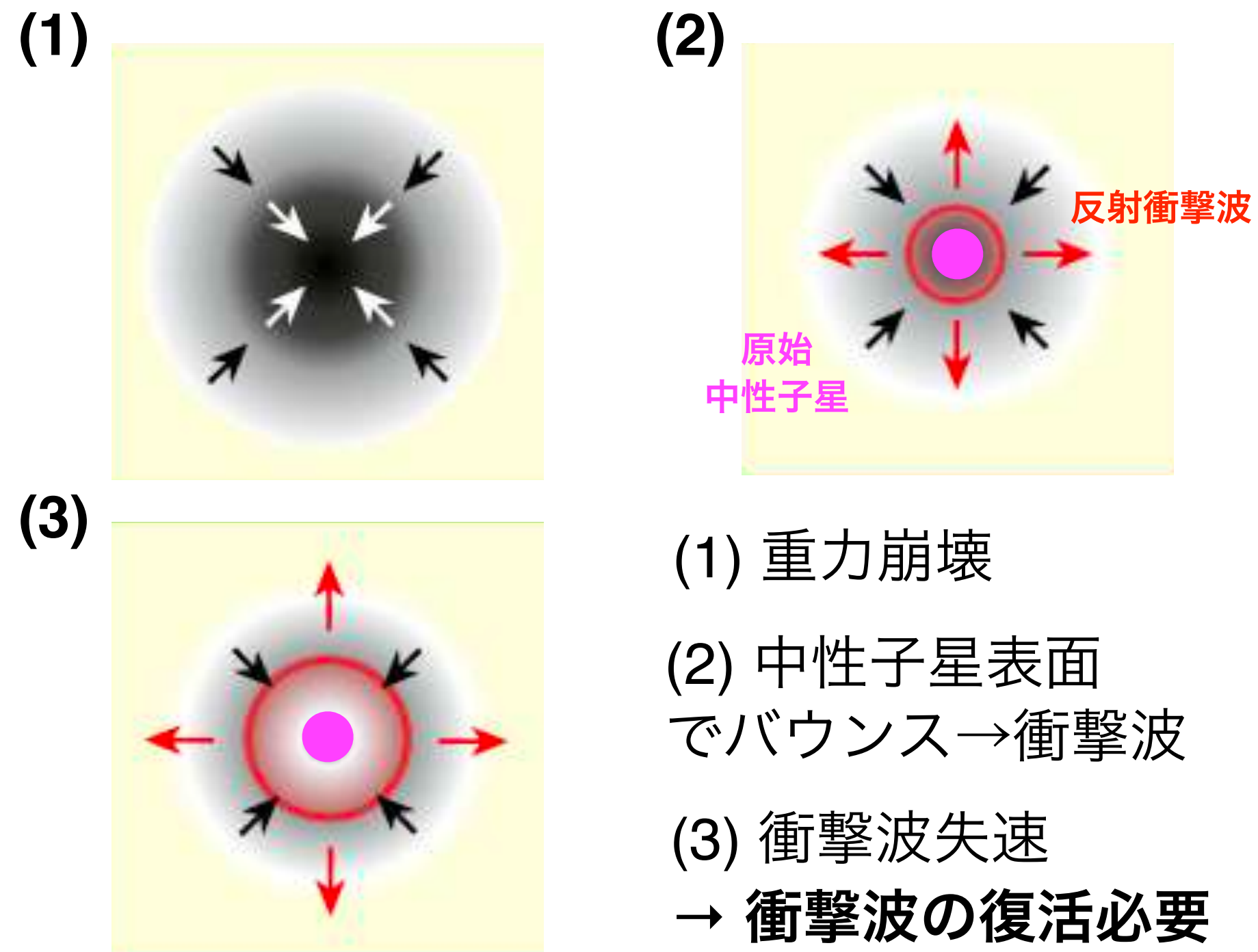
3. Ia 型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談④：ドライブ中の雑談きっかけで論文を書いた話

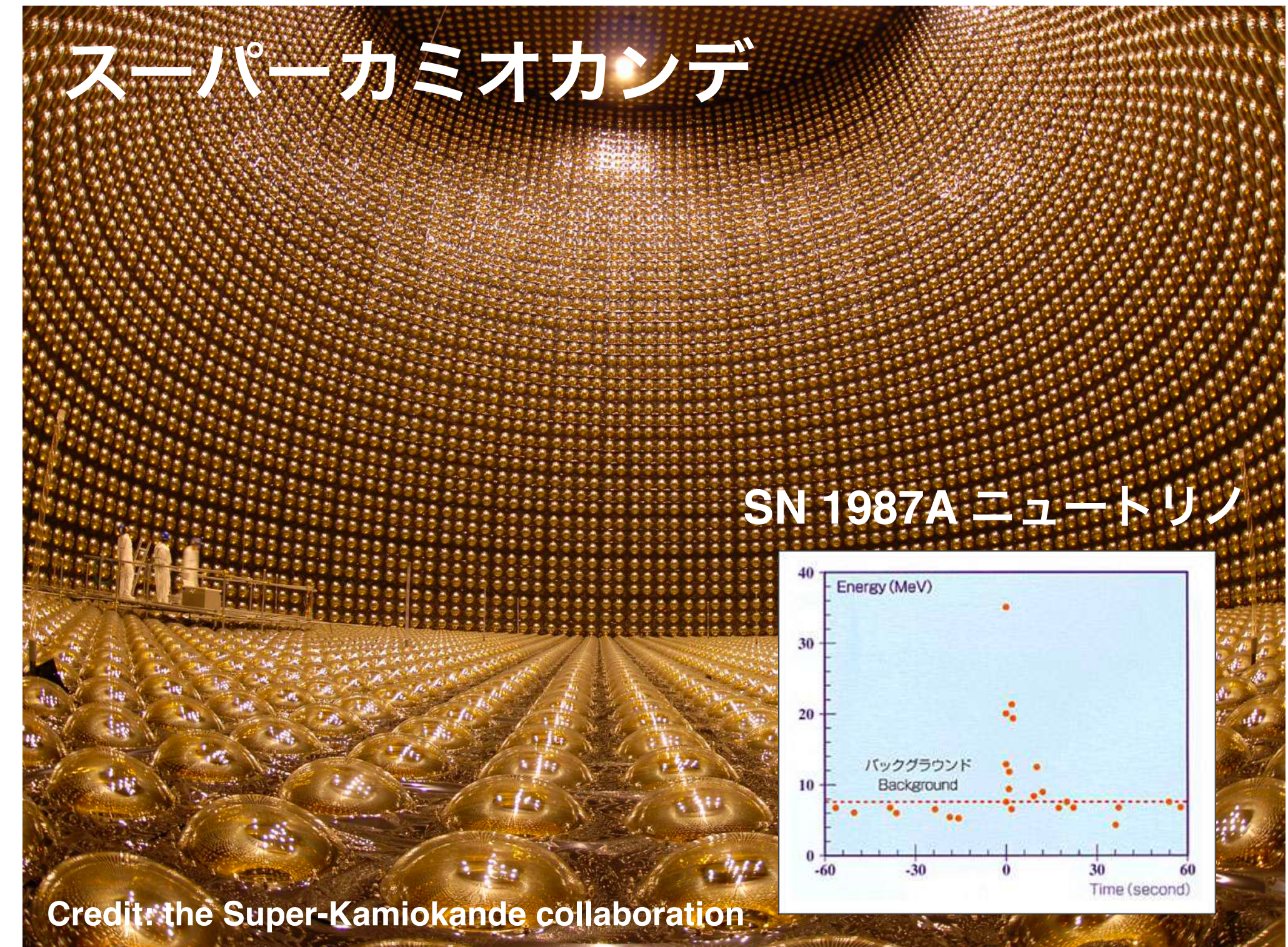
研究背景: 重力崩壊型超新星の爆発機構 = 宇宙物理学の超難問

長年、理論計算で爆発を再現することができなかった...

重力崩壊超新星の爆発機構



スーパーカミオカンデ

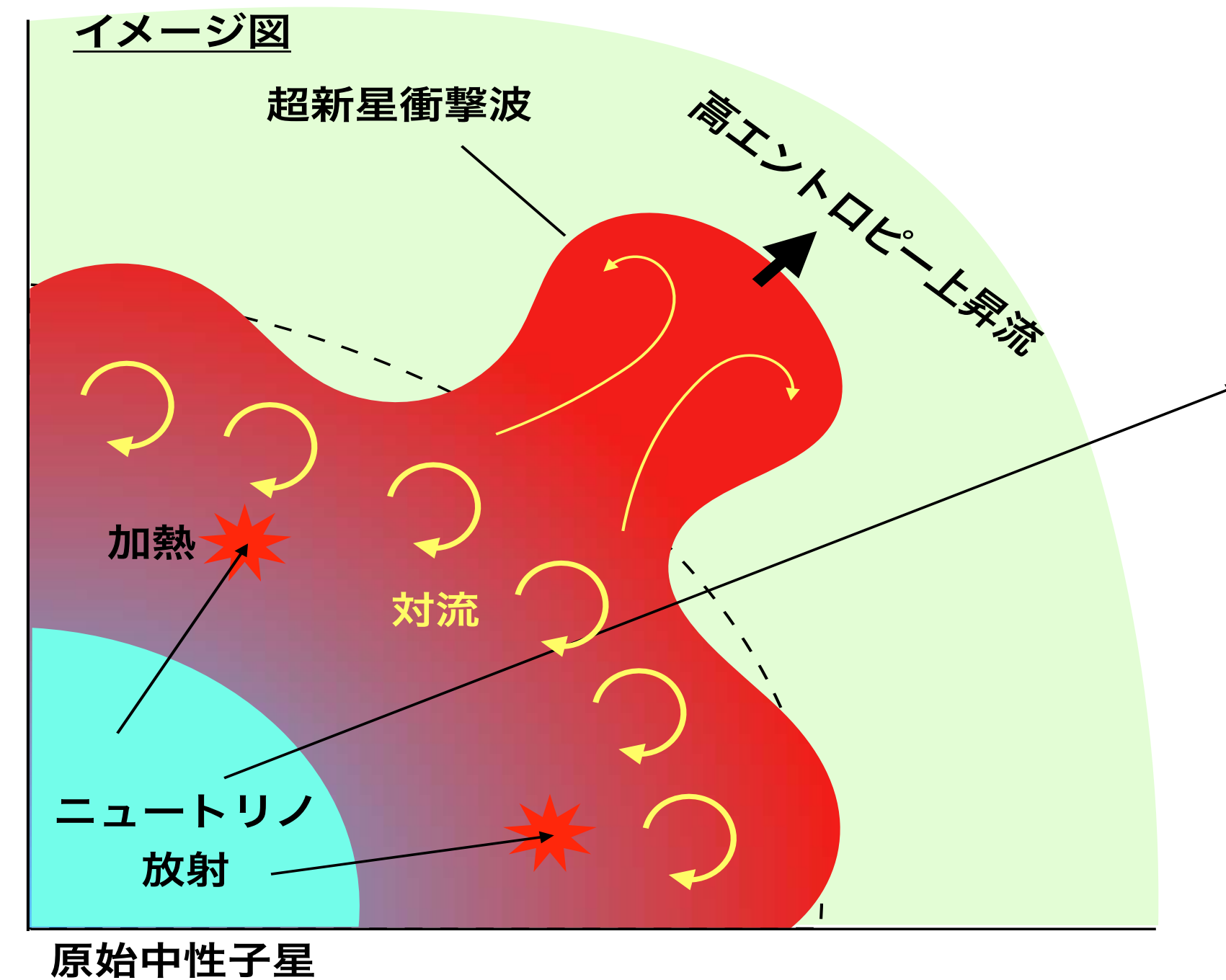
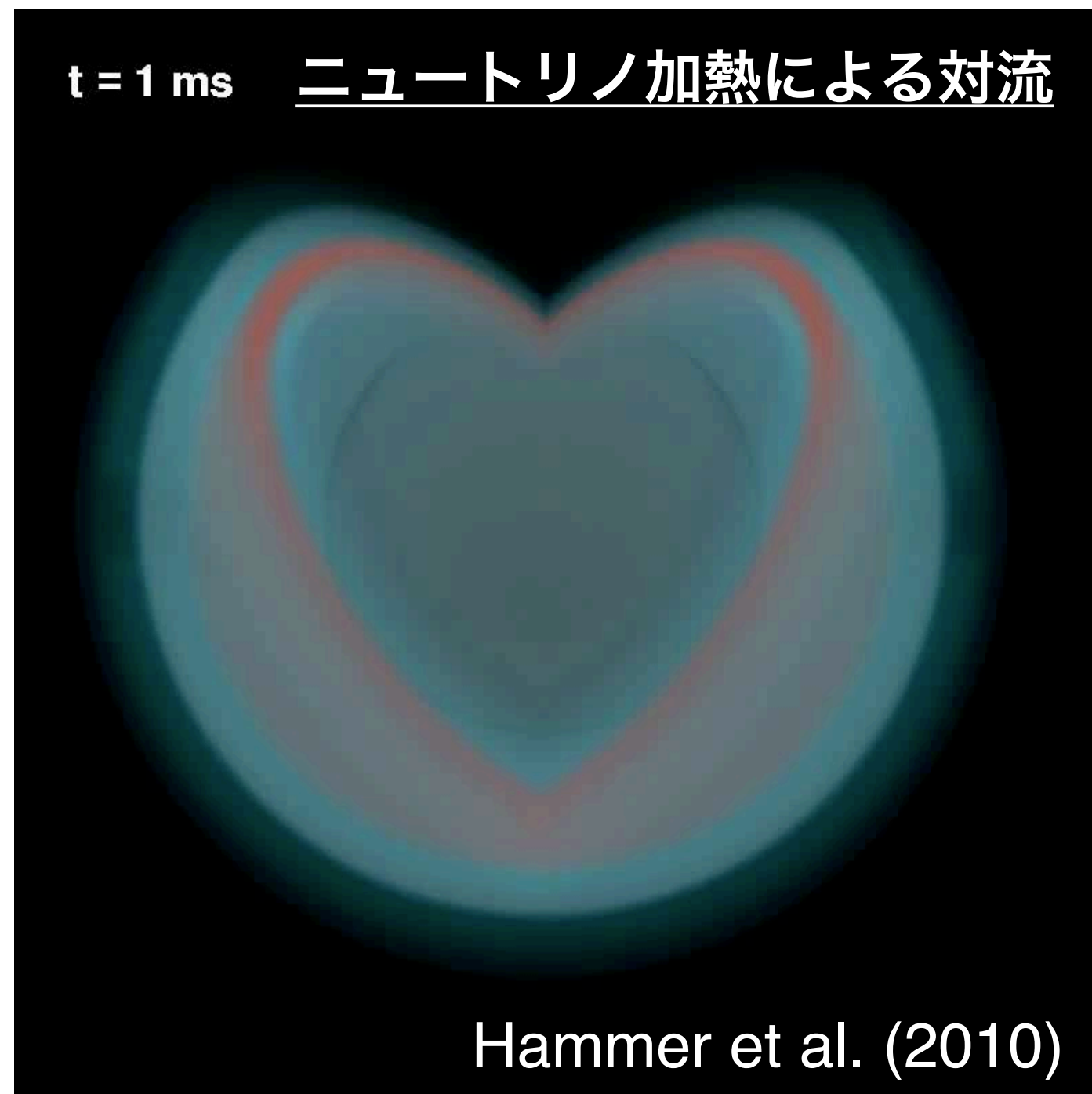


SN 1987A からのニュートリノ観測で大きく前進: ノーベル賞

→ 重力崩壊型超新星 爆発機構理論の大枠の完成

研究背景: 重力崩壊型超新星の爆発機構 = 宇宙物理学の超難問

計算技術の発展によって、近年複数のグループで爆発の再現に成功



最重要メカニズム: ニュートリノ加熱による対流型超新星エンジン

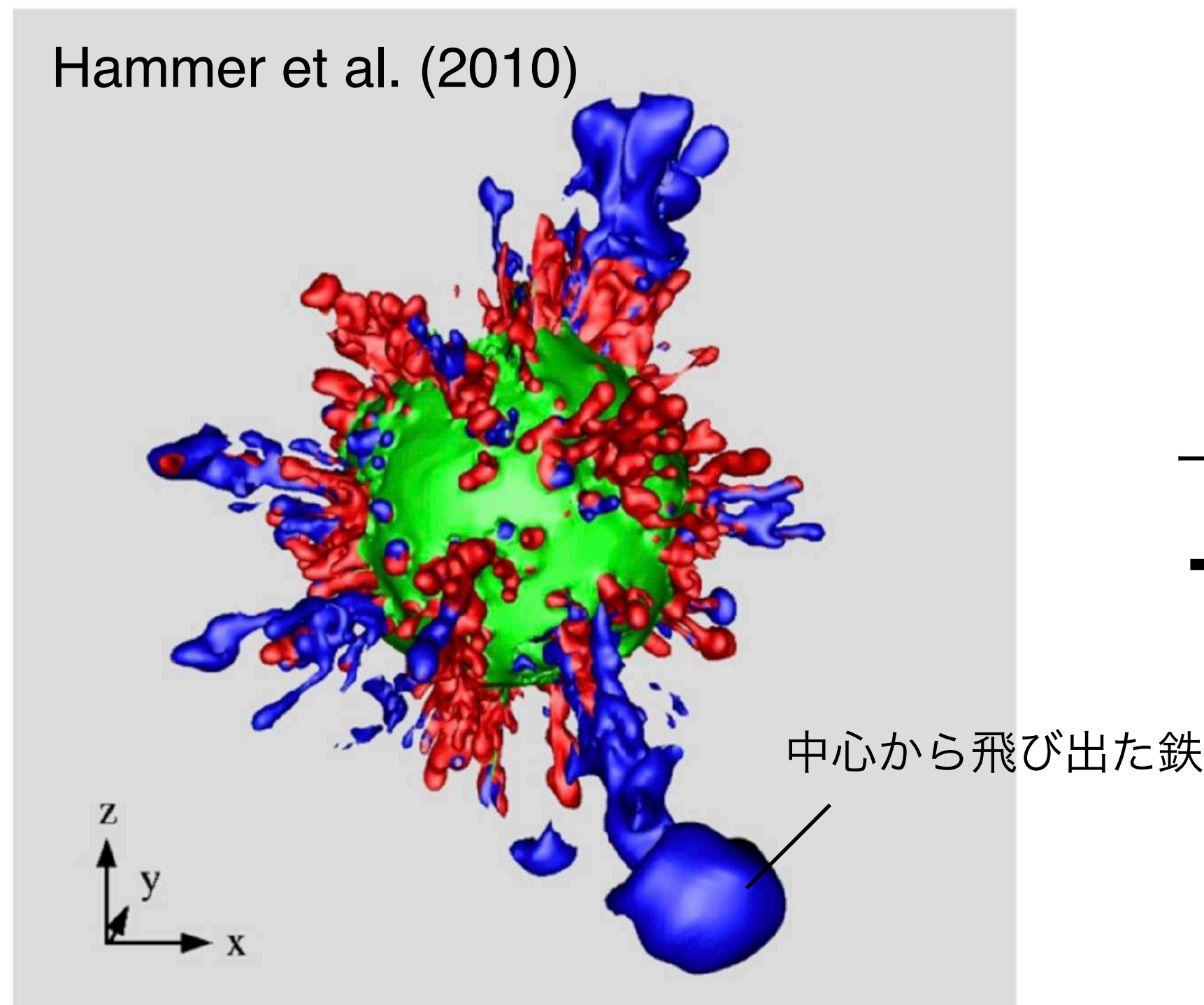
高エントロピー(高温・低密度)の上昇する泡構造が衝撃波を加速

しかし、この超新星エンジンの観測的証拠は無い

(カミオカンデの11個の超新星ニュートリノ観測だけでは不十分だった)

研究の着眼点: ニュートリノ加熱で作られる構造と元素

ニュートリノ加熱は、爆発中心で対流を生み出し、
高エントロピー(高温+低密度) + **鉄(中心部で合成)が豊富** な上昇流を作るはず！



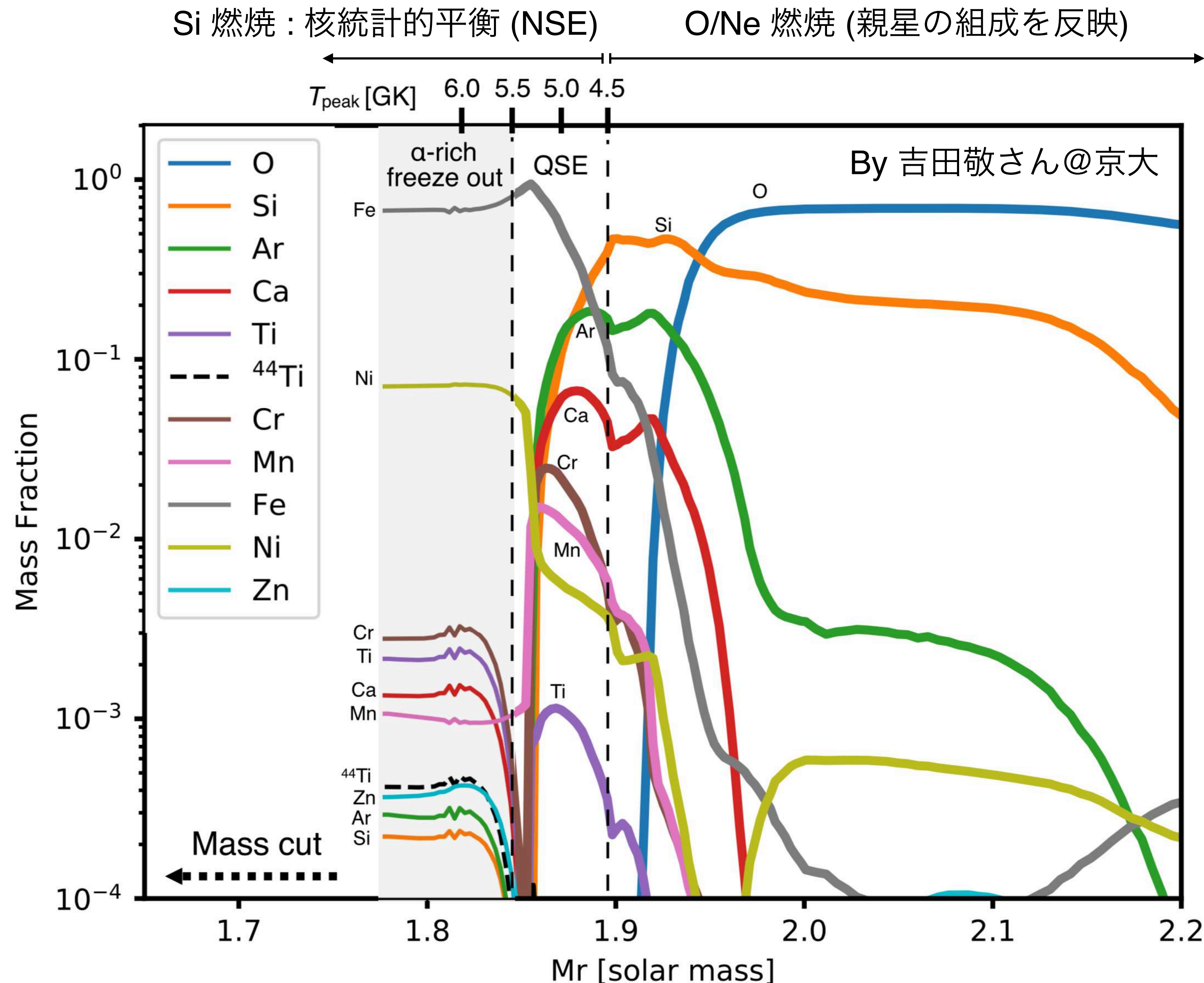
一方で...



独自の新たな視点 超新星ニュートリノ + 元素合成 + 超新星残骸

これらに着目した研究は世界でもやられていない → 基盤構築に向け勉強と試行錯誤

重力崩壊型超新星の元素合成: 理論との協力+勉強



親星の進化を追う必要があり、元素合成
のアウトプットにも多くの不定性が...
(この辺は Ia 型超新星と大きく異なる)

一方で、Si 燃焼層の組成は

$$T_{\text{peak}}, \rho_{\text{peak}}, Y_e$$

と熱的時間変化のみで決定

非常に少ない物理量で組成が決定される

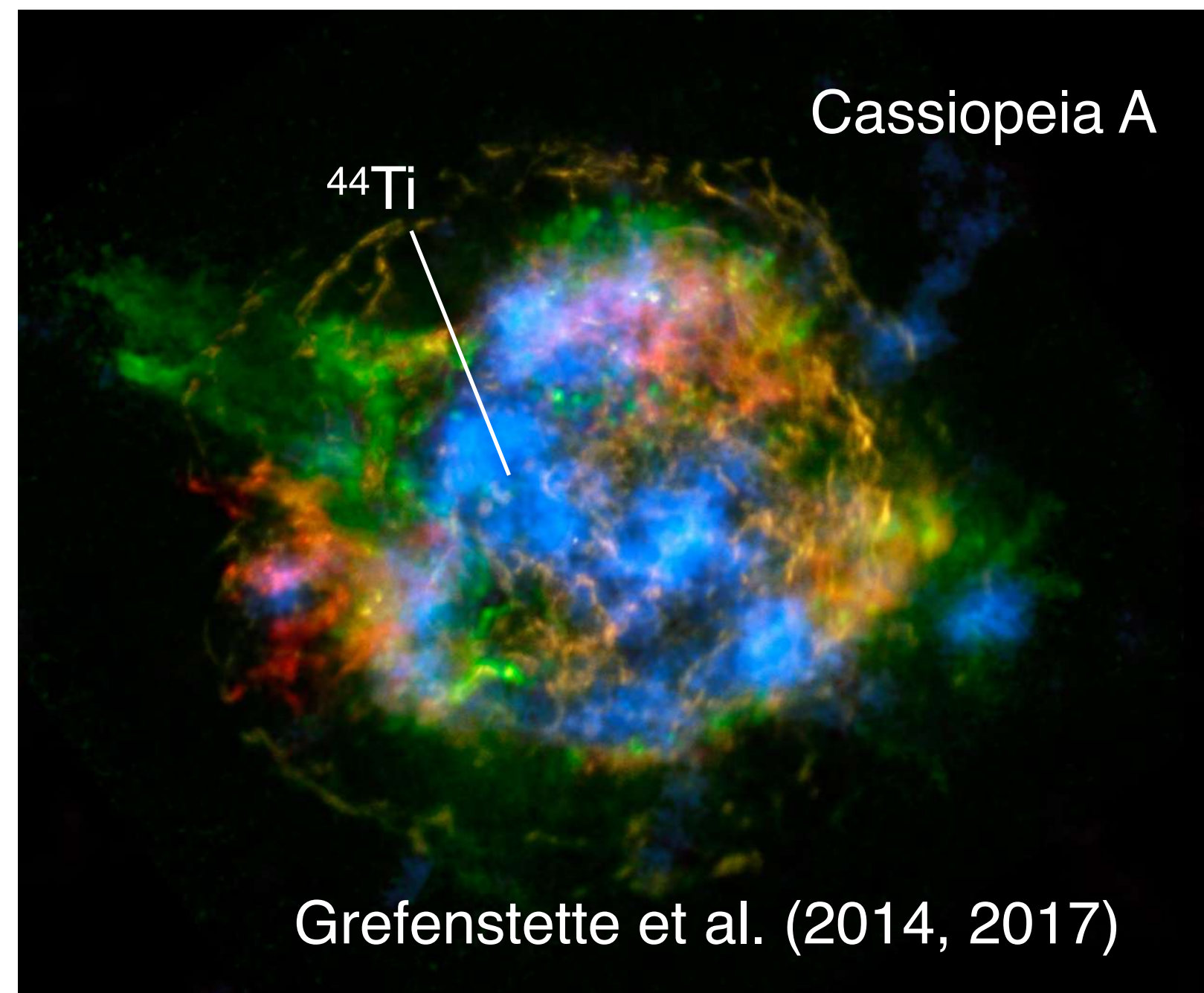
もし、内部の組成が分かれば、
爆発中心部の物理パラメータは推定しやすい

**超新星残骸を使って爆発中心部の
活動性を議論できる？**

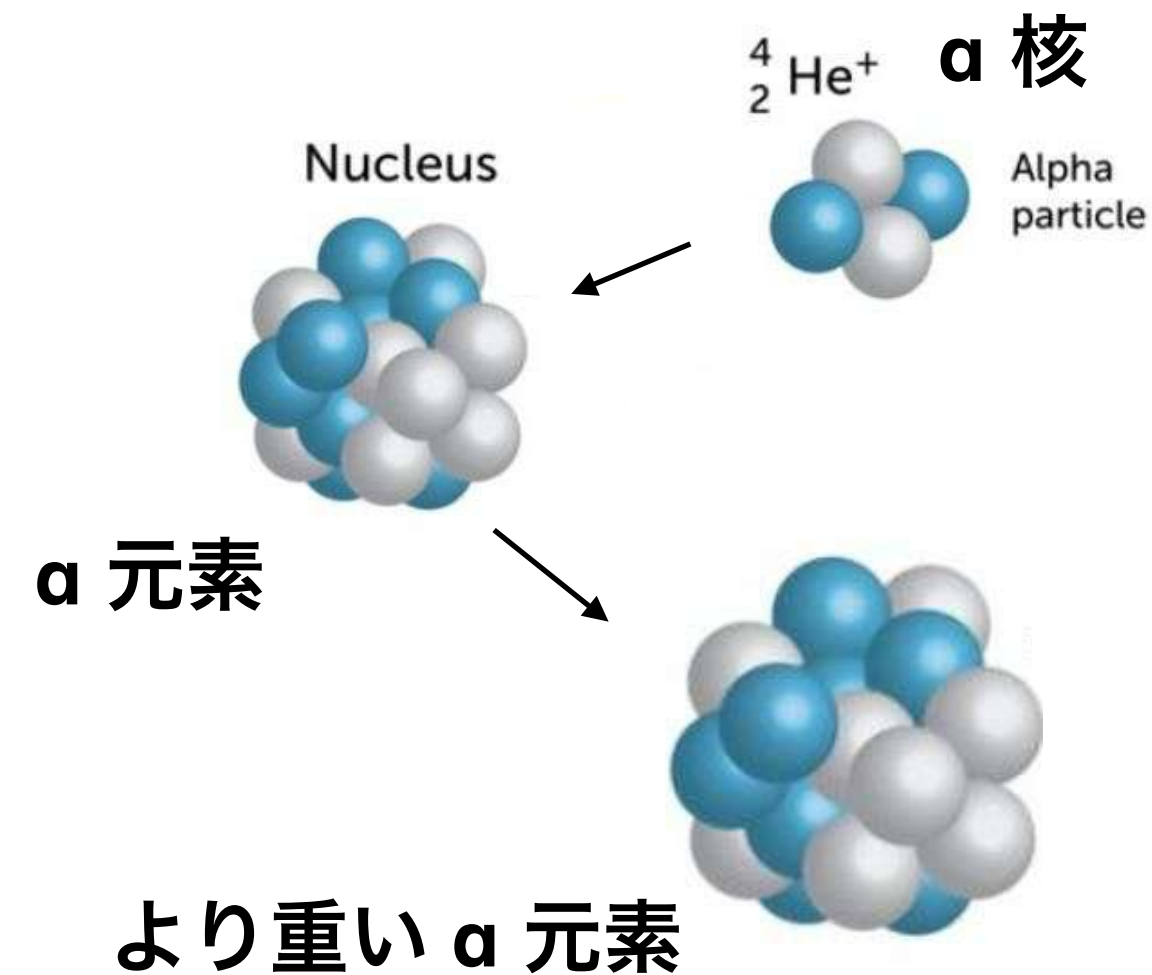
α -rich freezeout: 重力崩壊型超新星の爆発中心周辺の元素合成

α 核捕獲で出来る中間質量元素 (^{44}Ti , ^{48}Cr , ^{52}Fe) は、合成環境 (温度・密度とそれらの時間変化) で合成量変化

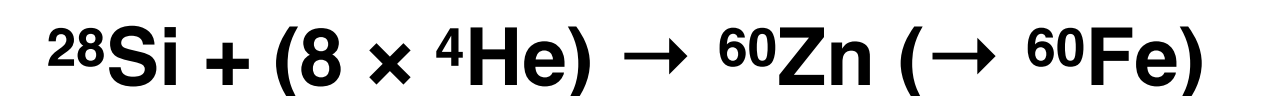
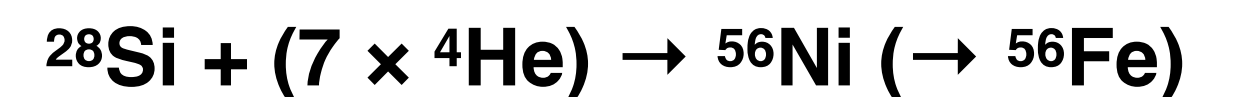
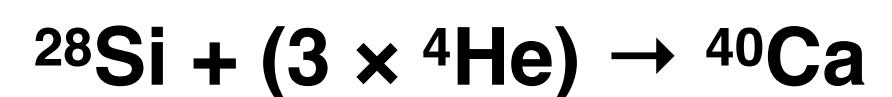
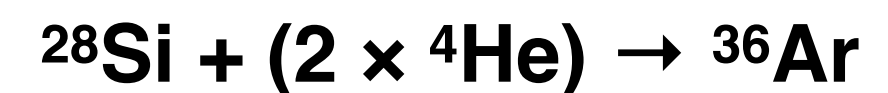
^{44}Ti 観測: これまで唯一の α -rich freezeout の検証方法



(^{44}Ti 観測論文: Nature $\times$ 3, Science $\times$ 1)



α 核が豊富な環境
(高エントロピー/高い爆発エネルギー)
 $\rightarrow$ ^{44}Ti , ^{48}Cr , ^{52}Fe , ^{64}Ge 増加



^{44}Ti は比較的長寿命の放射性元素 $\rightarrow$ 超新星/超新星残骸から直接観測

^{44}Ti 以外の α 元素も非対称性やエントロピー(中心部の活動性)に感度があるはず!

$\rightarrow$ 実際に、超新星残骸で検証できないか?

雑談②：理論研究者に相談しに行った話

こんな研究誰もやっていないし、計算も自分じゃできない

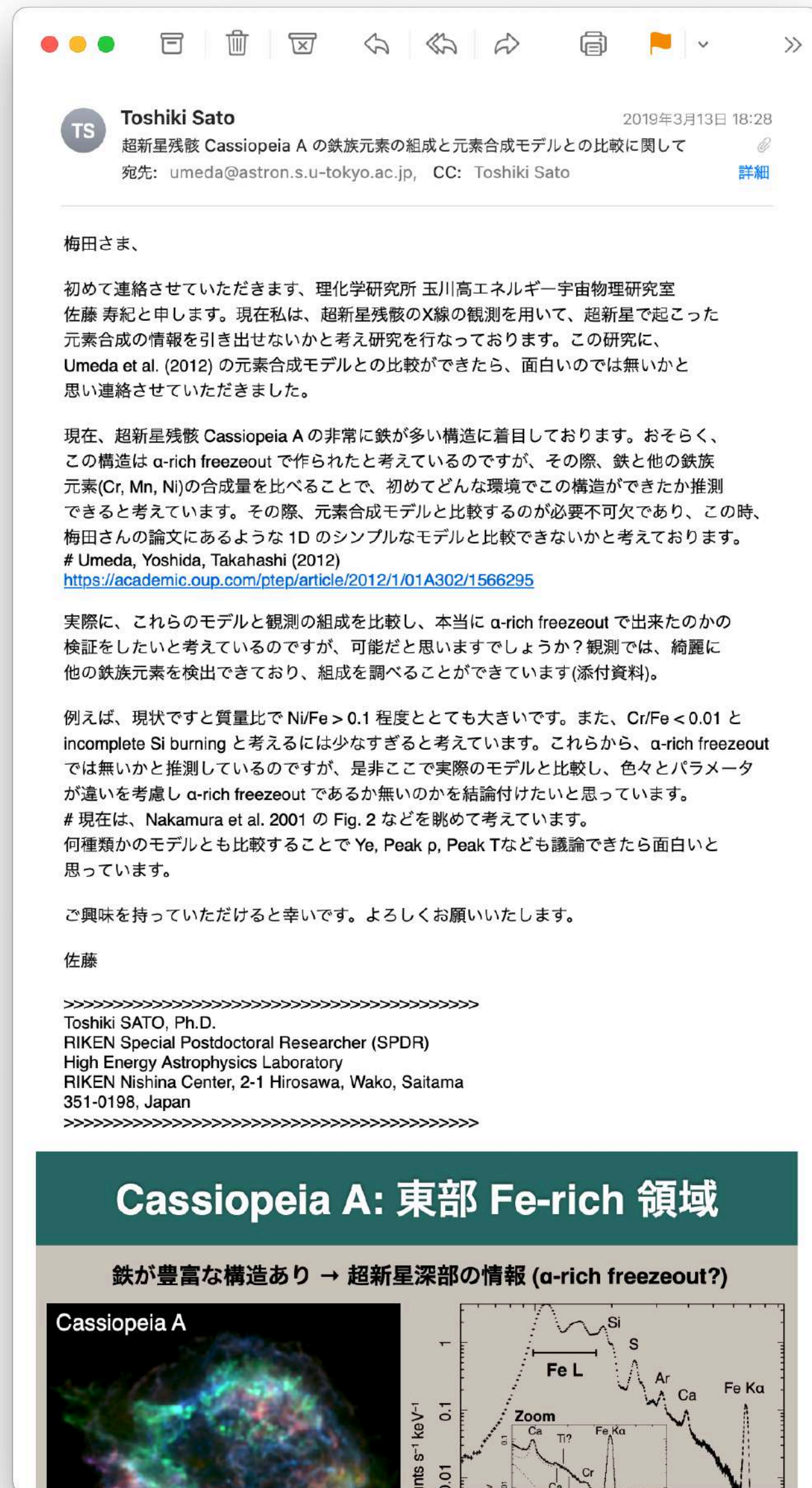
- とりあえず、専門家(当時一度もお会いしたことがない状態)と議論してみようと思って右のメールを書く (2019/03/13)
- 直接会って議論 (2019/04/04) → お互いの専門の違い+自分の知識不足もあって、話が噛み合わなく、最初は議論もまとまらない

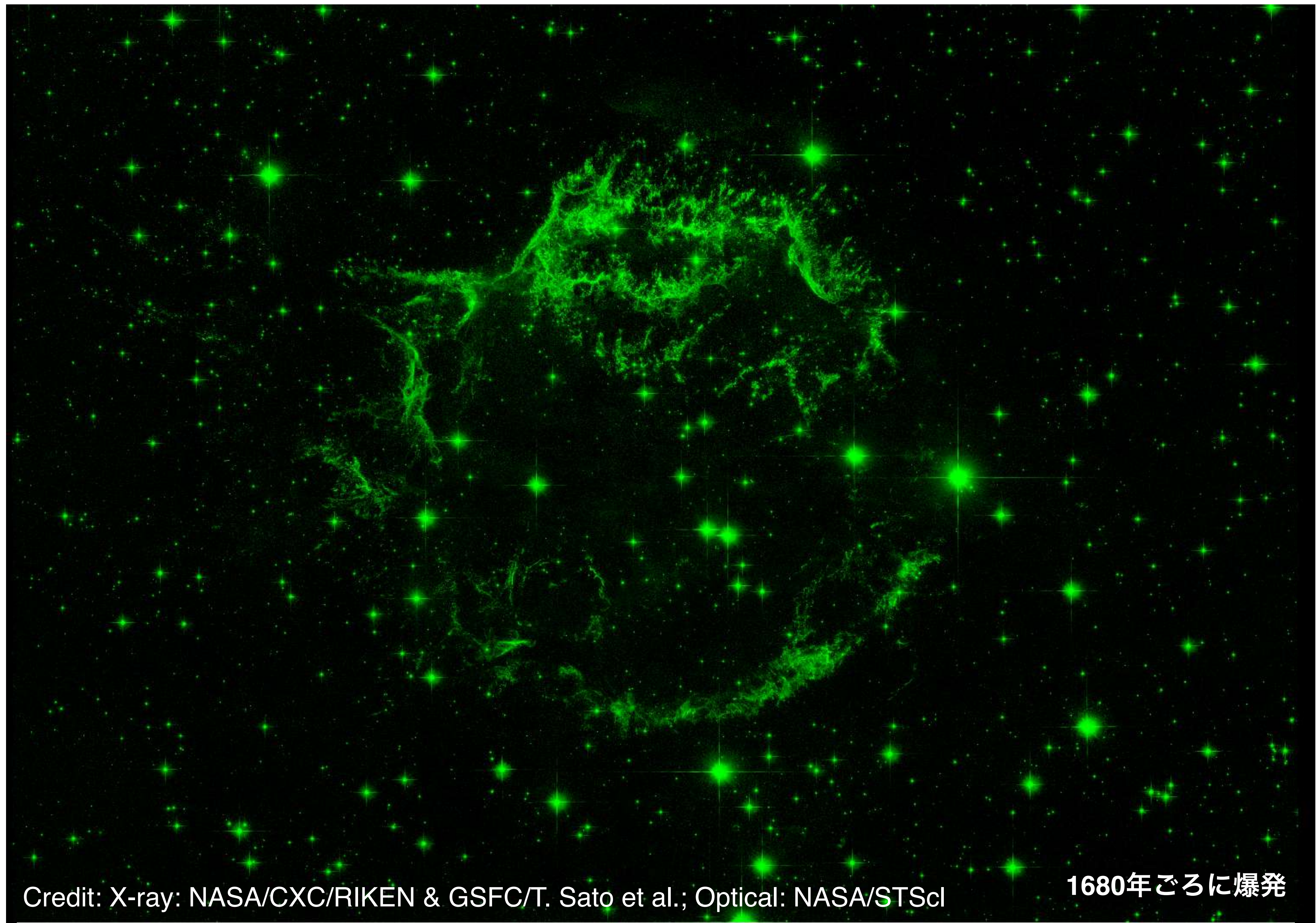
ここから先が、本当に楽しかった！(多分、人生で一番楽しかった)

- 一年ぐらい、とにかく勉強と結果の整理。得た知識と結果の一部で最初の目的とは違う論文を書いてみる (Sato et al., 2020, Cas A 論文)
- 知識が増えると「見ていたはずのデータ」に「見えていなかった解釈」が乗っかってくる。これが最高に楽しい。
- 結局、2019年に相談したネタは、2021年に Nature 論文に！ずっと自分の中で引っかかっていた結果が、最終的には一つの綺麗な解釈に。

教訓: 自分一人で全て解決できるのはもちろん素晴らしいが、少し分野の離れた専門家に助けてもらおうと研究の幅が一気に広がる時もある

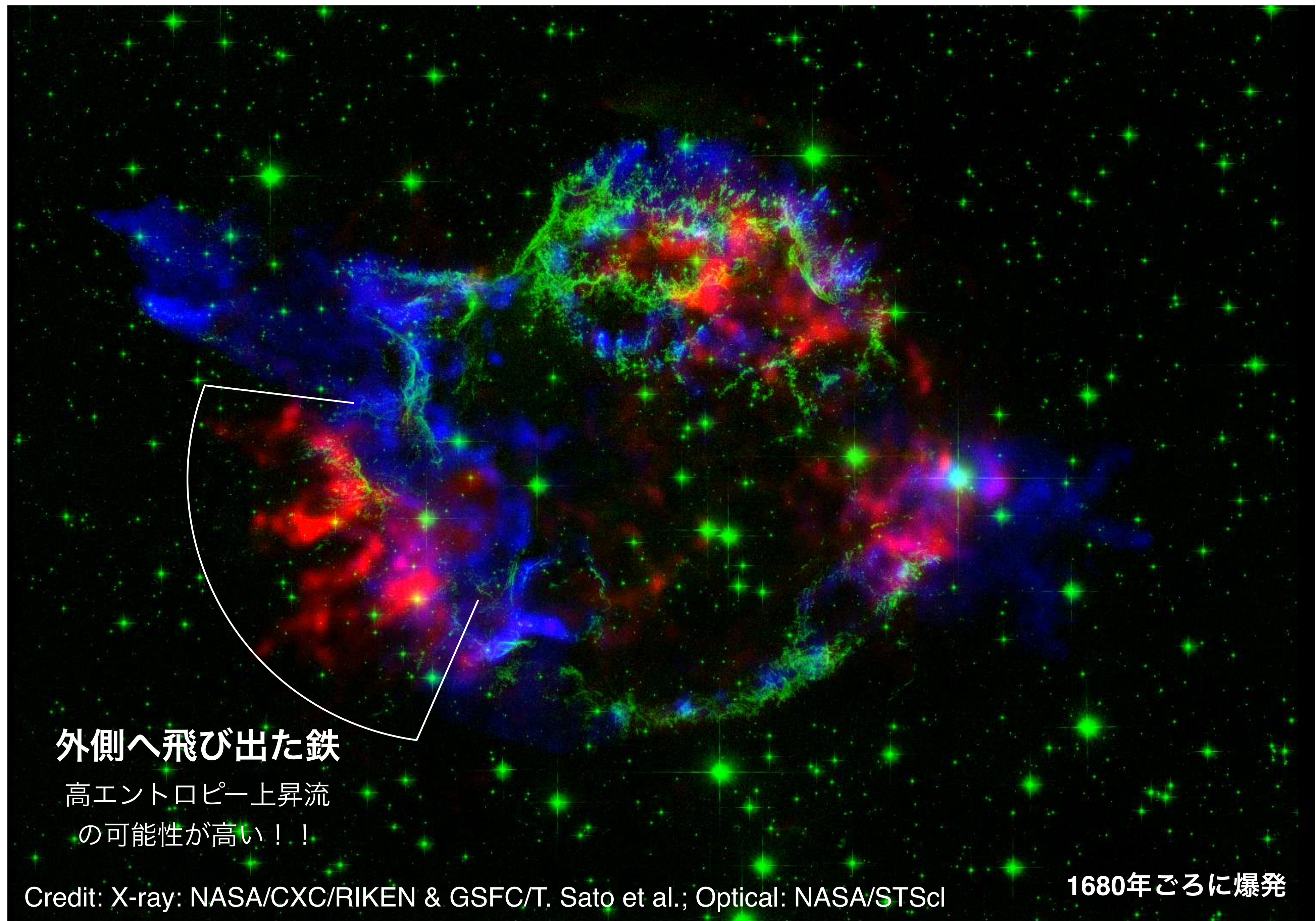
(これには自分がやりたい事とちゃんと向き合う事も大事)





Credit: X-ray: NASA/CXC/RIKEN & GSFC/T. Sato et al.; Optical: NASA/STScI

1680年ごろに爆発



外側へ飛び出た鉄

高エントロピー上昇流
の可能性が高い！！

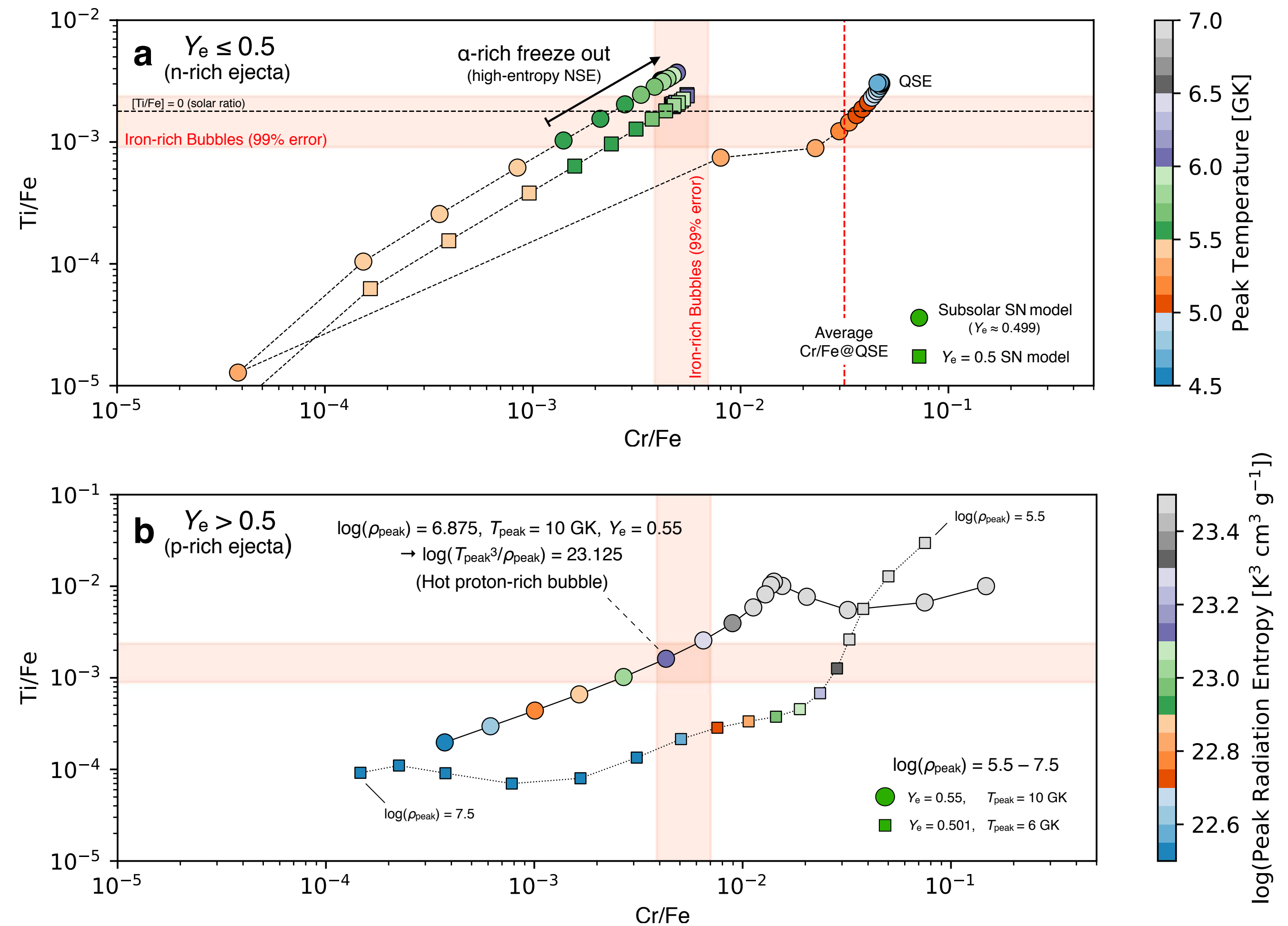
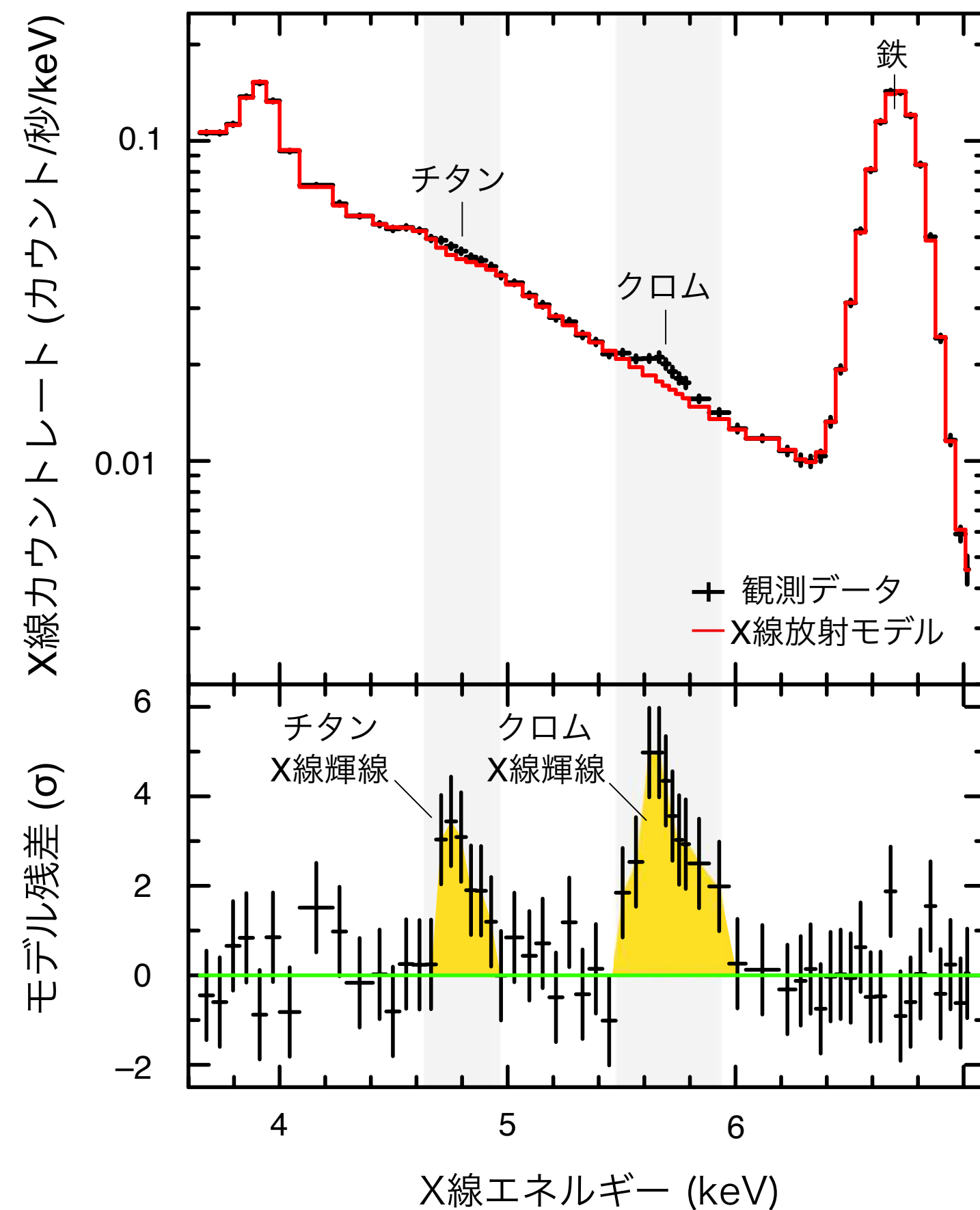
Credit: X-ray: NASA/CXC/RIKEN & GSFC/T. Sato et al.; Optical: NASA/STScI

1680年ごろに爆発

飛び出た構造内の希少元素を初測定+理論と比較

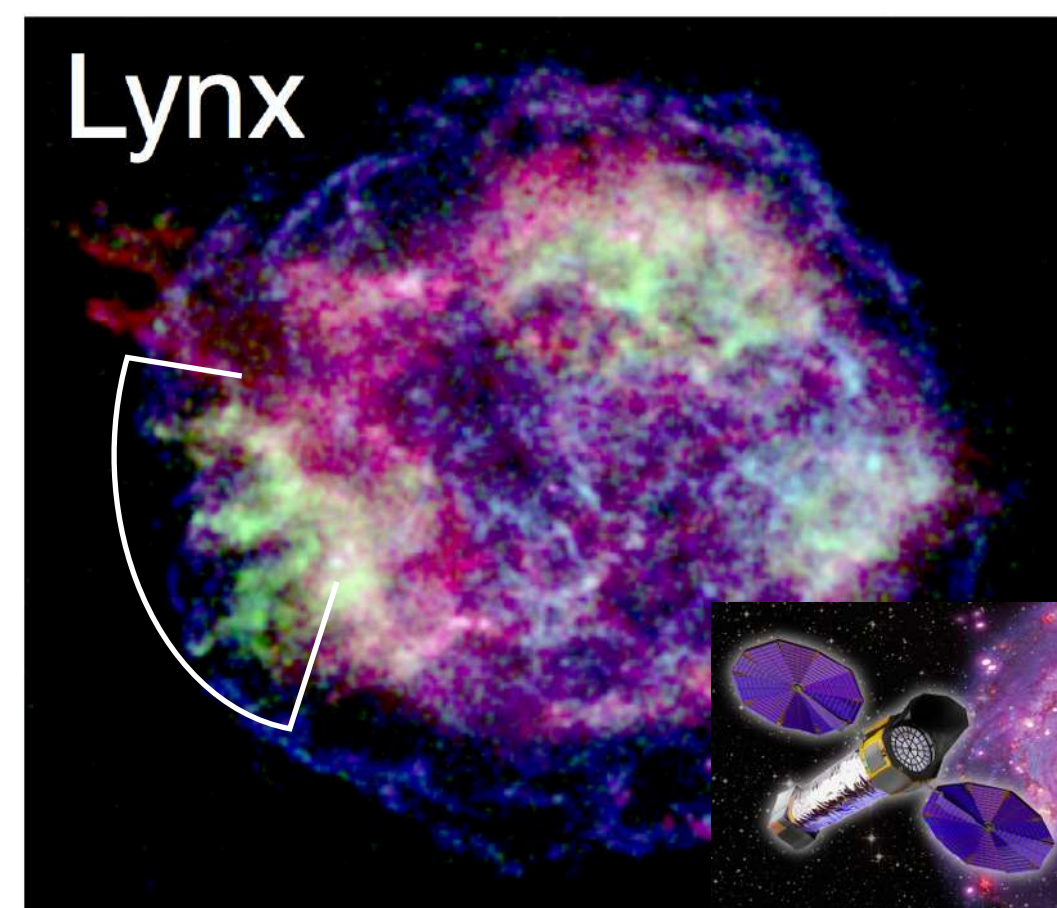
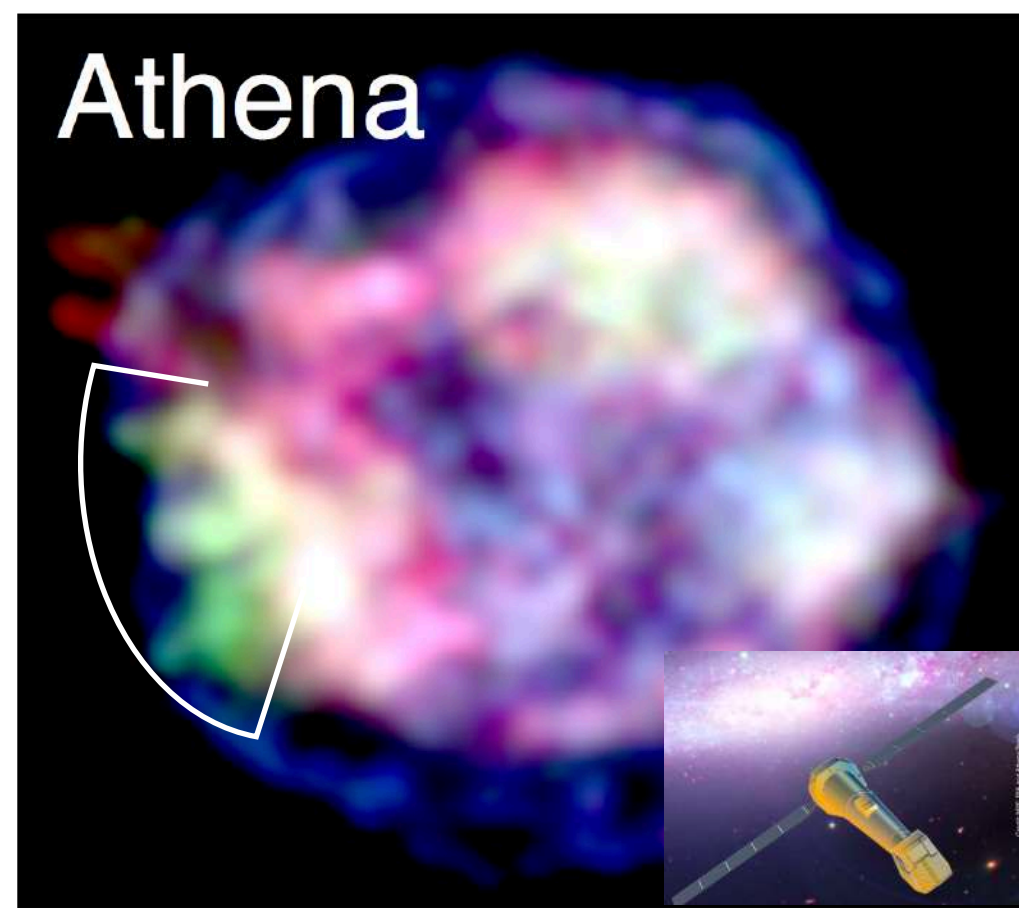
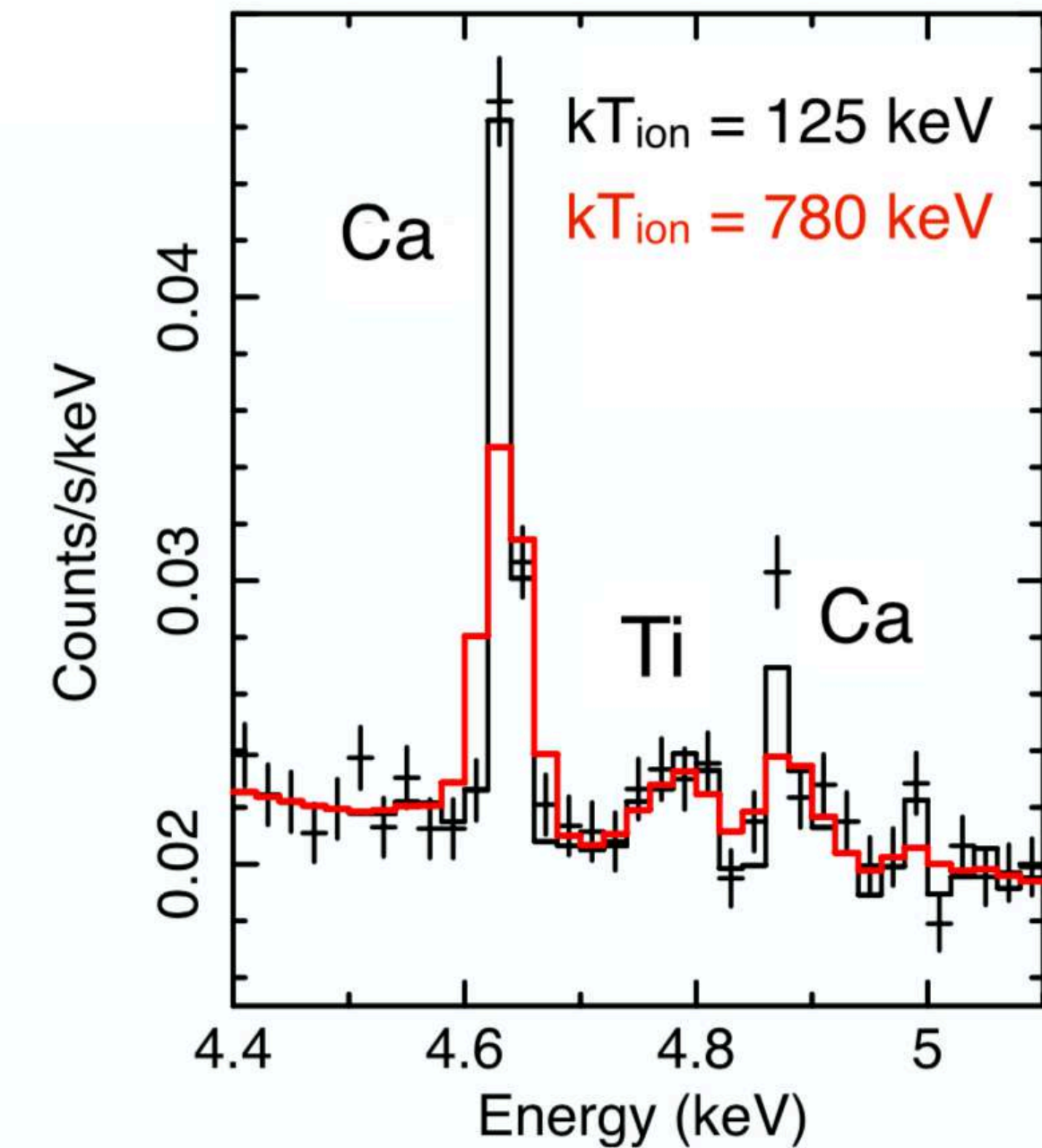
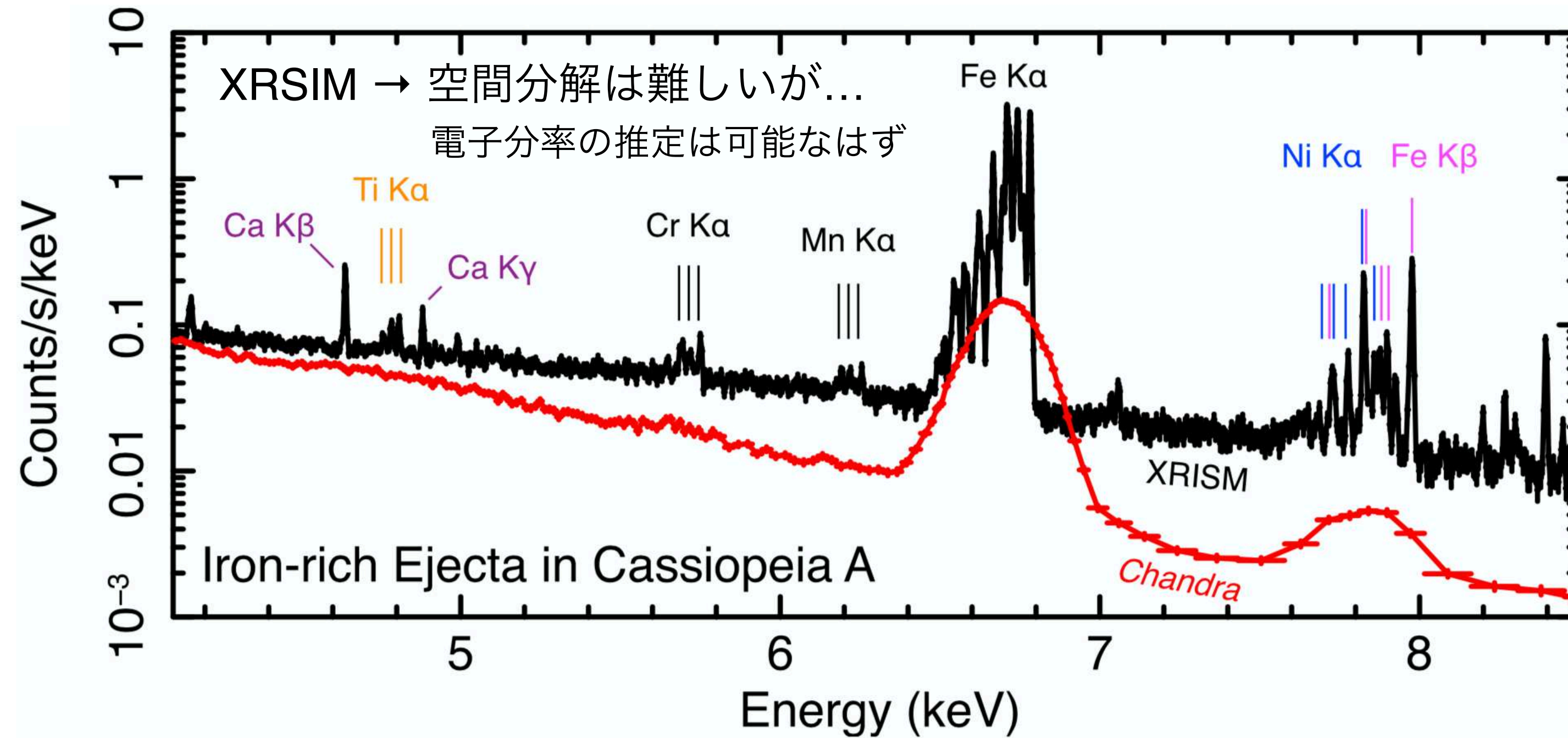
高エントロピー環境下で生成された証拠となるチタン、クロムを構造内に発見！

鉄が豊富な構造からチタン、クロムの発見



日米の理論・観測の共同研究チームの力を合わせ、初めてニュートリノ加熱の痕跡を発見

今後: XRISM → Athena/Lynx 時代に更に面白くなるはず！



2030年代以降に議論が期待できる課題

1. 電子分率/エントロピーの空間分布
2. odd-Z 元素の検出 (陽子過剰やニュートリノ過程に関連)
3. 原始中性子星からのニュートリノ放射の非対称性やニュートリノ振動の影響など詳細な物理

雑談③：Nature に投稿した話

元々は Nature Astronomy 投稿予定だったが、共著者が本誌を目指してみようと言ってくれた

詳しくは、ブログにまとめています (<https://toshikisato.wixsite.com/mysite/blog>)



- 2020/07/09 エディターに問い合わせ (**Cover Letter 最重要**)
- 2020/07/15 論文投稿
- 2020/08/21 リジェクト！！(再投稿可能)
- 2020/12/20 再投稿
- 2021/01/27 ほぼ受理 (reviewer は受理)
- 2021/02/03 再投稿
- 2021/02/24 正式な受理
- 2021/04/08 出版日決定 & 表紙候補のお知らせ
- 2021/04/22 出版

Cover letter の内容も査読内容(これは Nature で)も全て公開してます！

1. イントロ：超新星残骸のX線観測

雑談①：M1の秋に研究テーマを変えた話

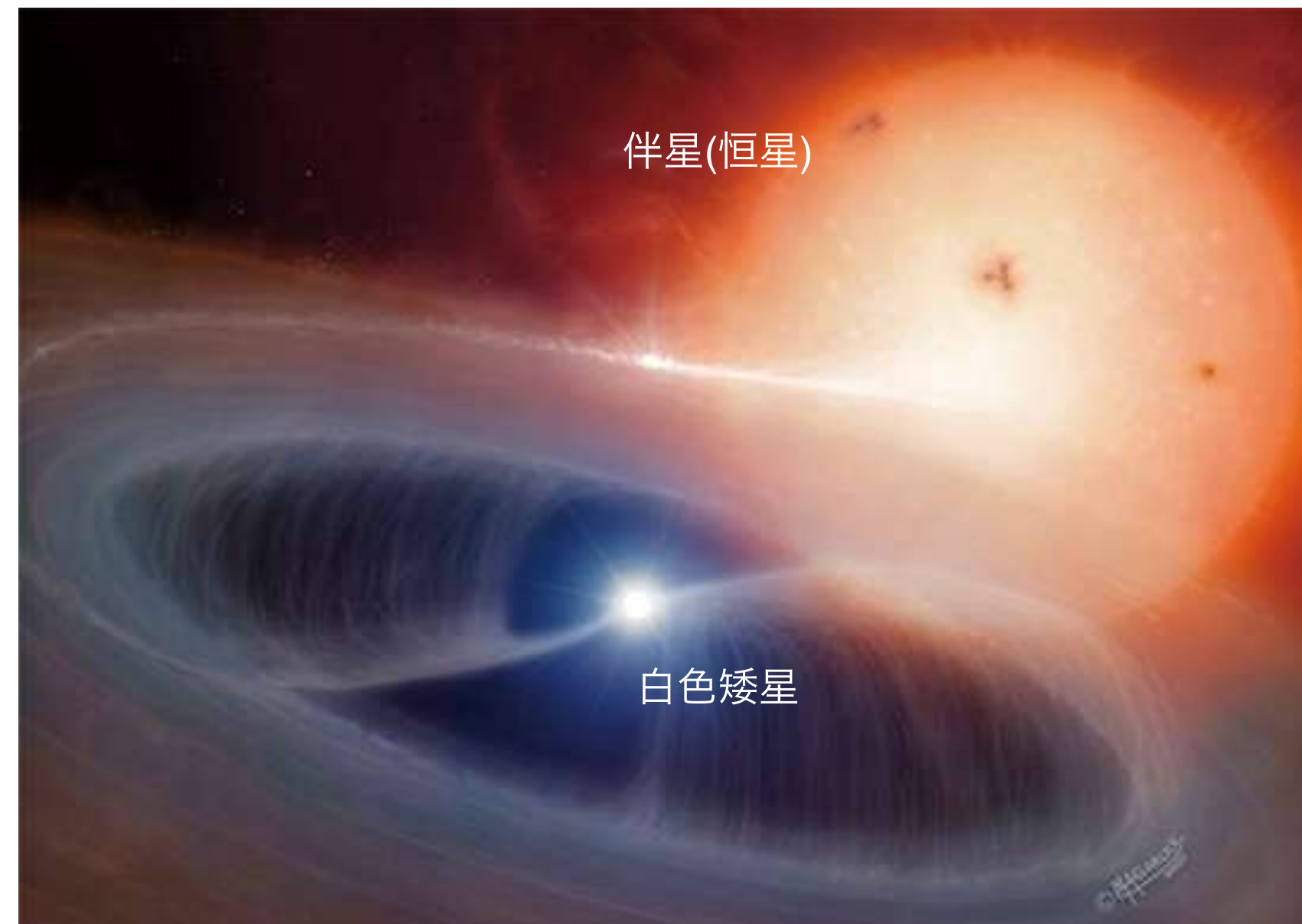
2. 重力崩壊型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談②：理論研究者に相談しに行った話、雑談③：Nature に投稿した話

3. Ia 型超新星の爆発機構と残骸観測

雑談④：ドライブ中の雑談きっかけで論文を書いた話

Ia型超新星 = 白色矮星の核暴走型超新星



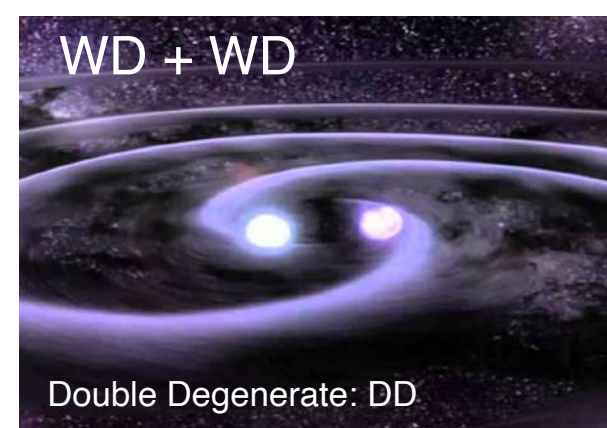
- 宇宙膨張測定 of 標準光源
- 宇宙の鉄の主要供給源

古典的な Ia 型超新星の爆発メカニズム

1. 白色矮星の質量がチャンドラセカール限界に近づく ($\sim 1.4 M_{\text{sun}}$)
2. 中心領域で核燃焼が開始
3. 熱核暴走 $\rightarrow$ Ia型超新星

爆発機構には未だ謎が多く、今後も様々な観測的検証が必要

1. 親星はどんな系で爆発？



2. 最終的な質量は？

Chandrasekhar mass?
or
Sub-Chandrasekhar mass?

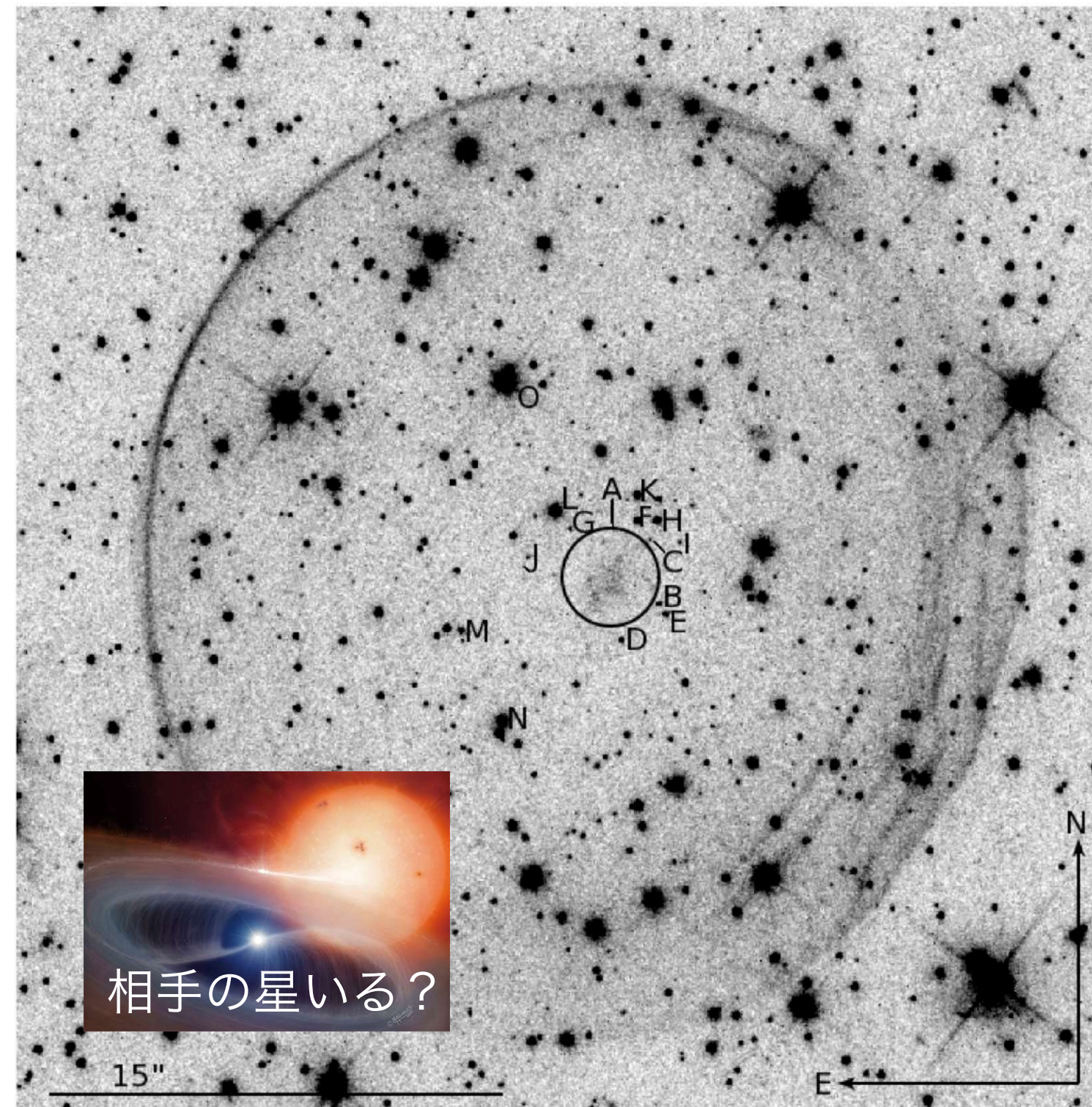


3. どのように核燃焼波が伝搬？

Detonation?
Deflagration?
Deflagration-Detonation?

Ia型超新星の爆発機構に関わる残骸研究

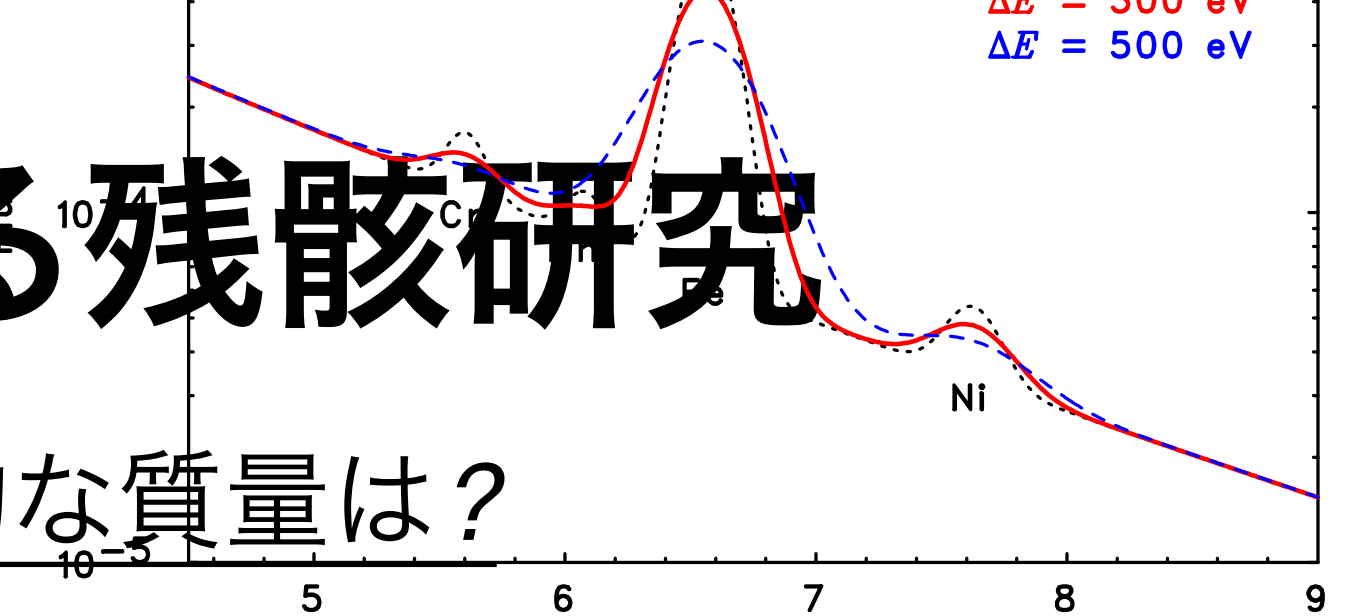
1. 親星はどんな系で爆発？



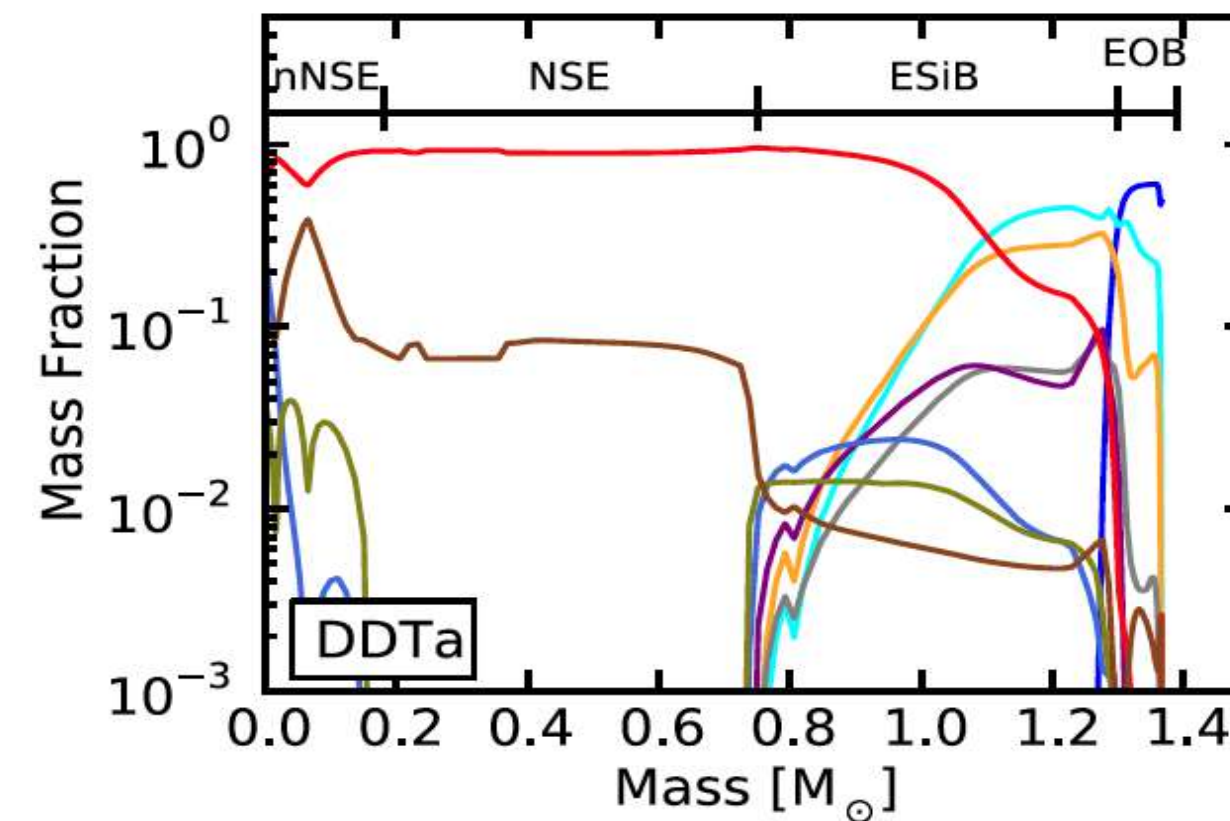
Ruiz-Lapuente et al. (2004); Schaefer & Pagnotta (2012) など

- 爆発中心で伴星探し → 強い証拠は無い

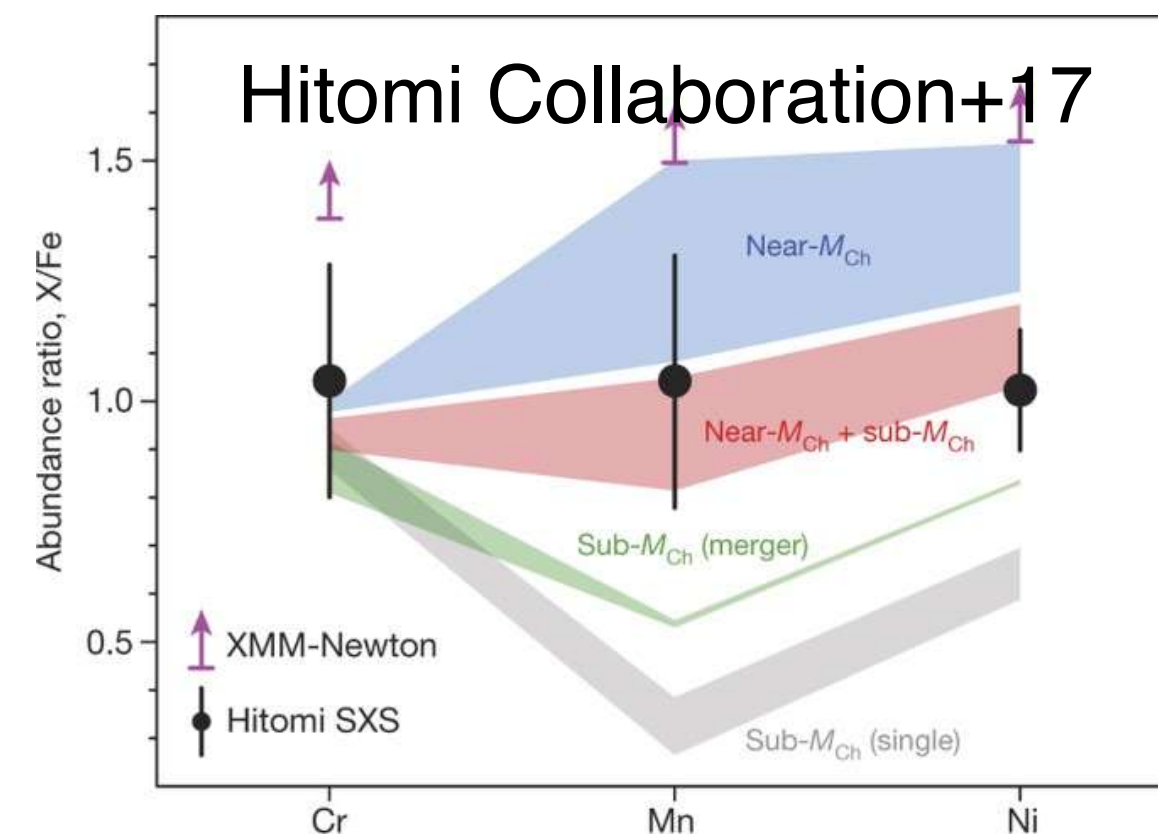
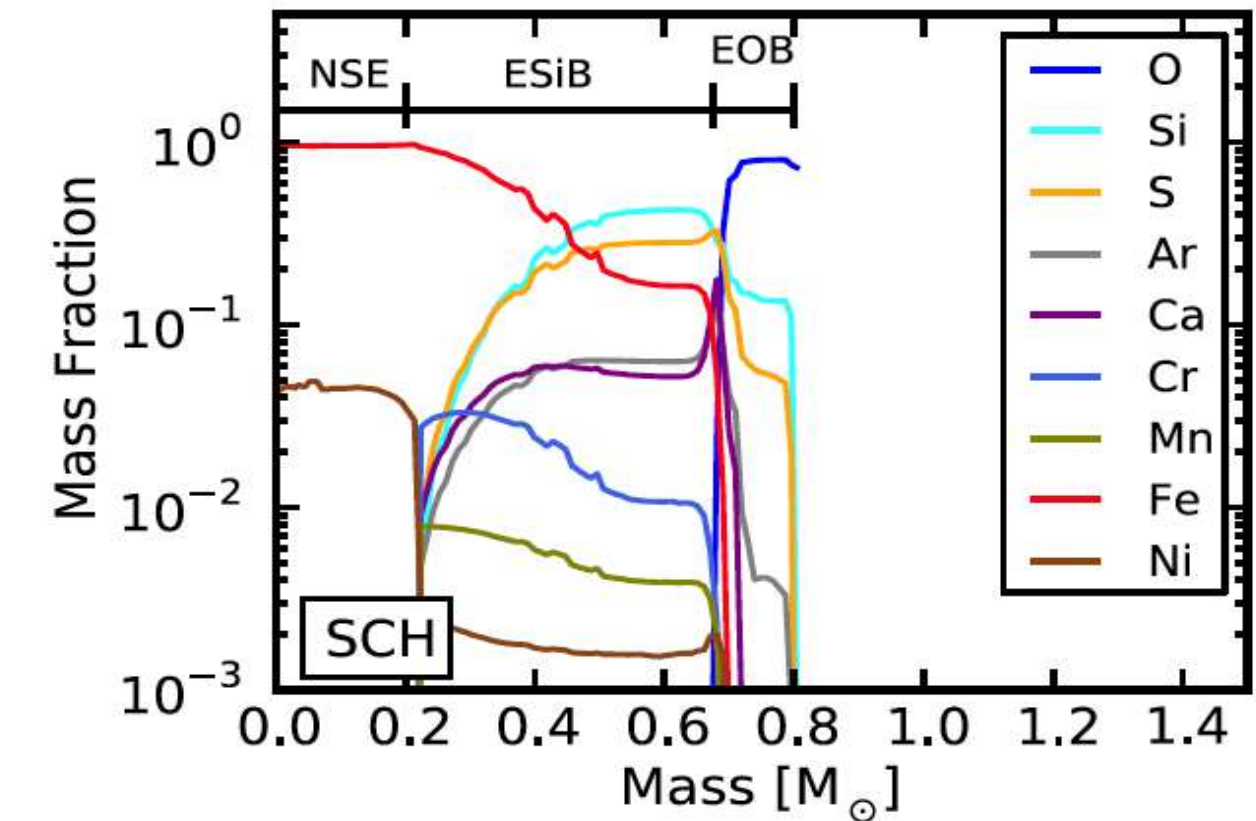
2. 最終的な質量は？



Ia型超新星元素合成モデル: near- M_{Ch}



Ia型超新星元素合成モデル: sub- M_{Ch}

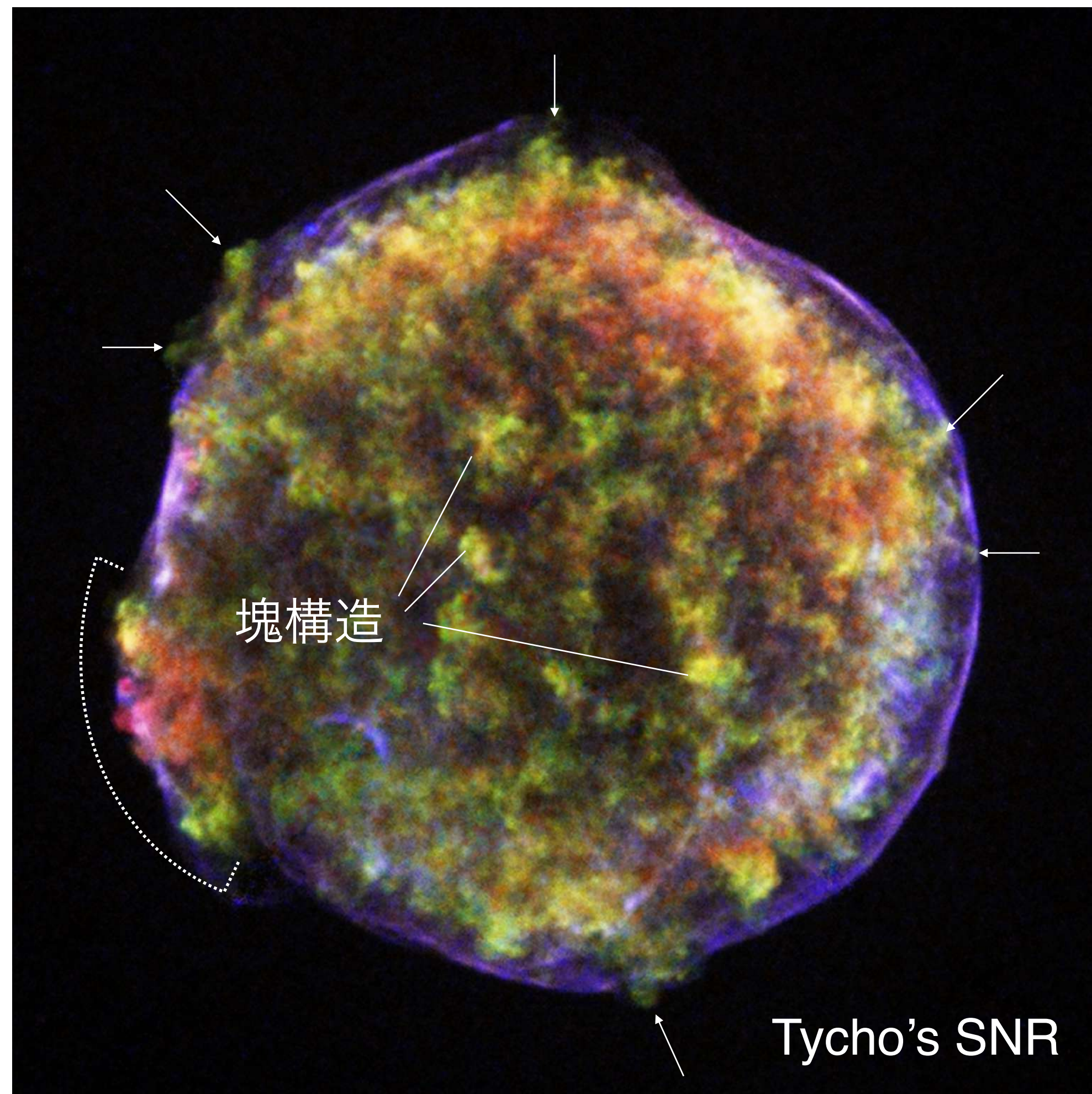


- 元素组成的に near- M_{Ch} SN Ia の残骸を発見 (Yamaguchi+15, Oshiro+21)
- 銀河団の元素組成を説明するためには、near- M_{Ch} /sub- M_{Ch} SN Ia どちらも必要 (Hitomi Collaboration+17)

3. どのように核燃焼波が伝搬？ → 残骸構造から何か言えないか？ (今回紹介する内容)

Ia型超新星残骸の塊構造の形成過程：核燃焼波の伝搬？

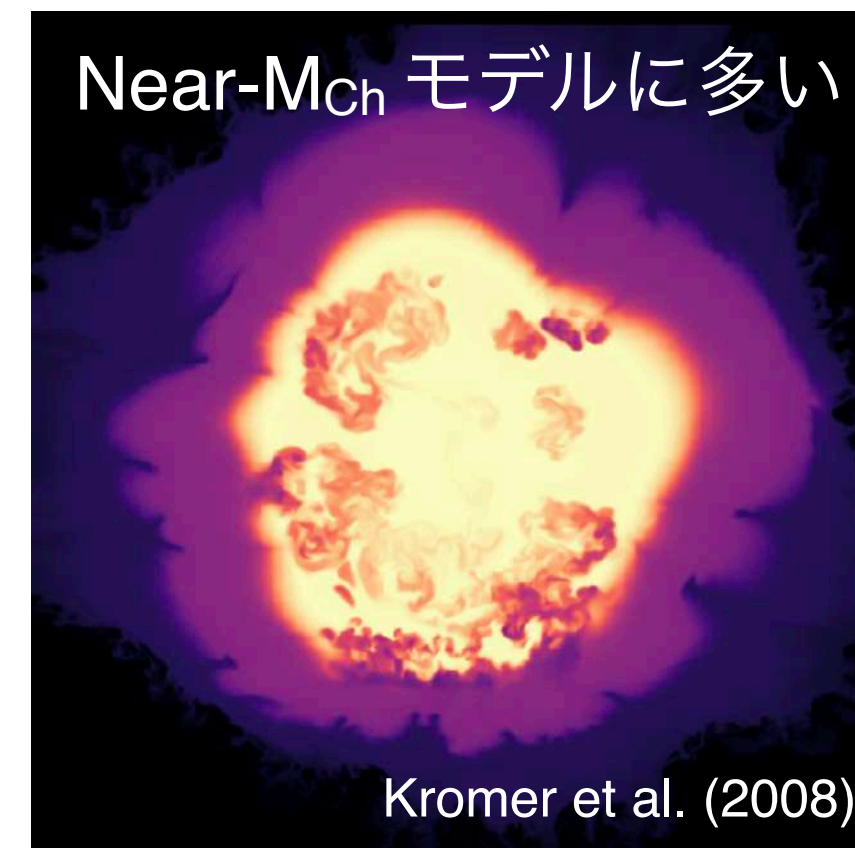
Ia型超新星の残骸にはボコボコとした塊構造がみられる → 核燃焼波の伝搬過程で形成？残骸成長中の不安定性？



Deflagration (亜音速)

伝搬時の流体的不安定性でボコボコした構造が成長できる

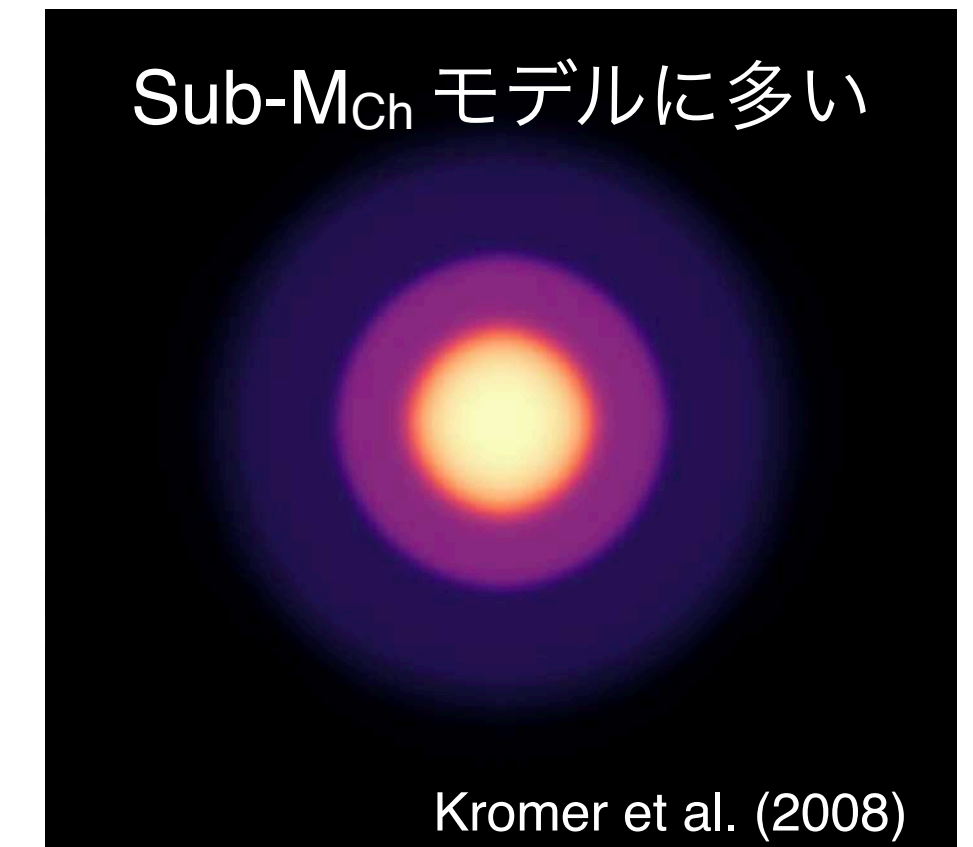
Near- M_{Ch} モデルに多い



Detonation (超音速)

構造が成長する前に衝撃波が星表面に達する

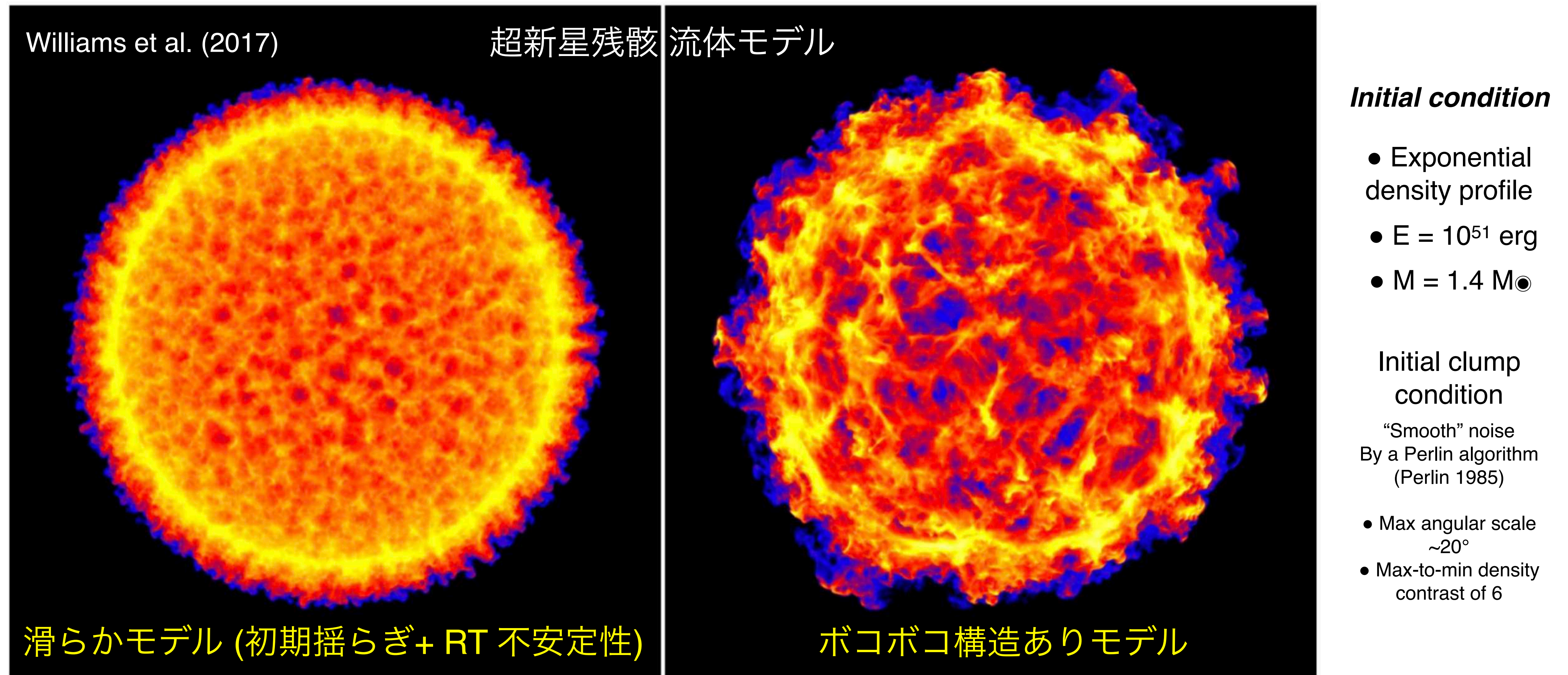
Sub- M_{Ch} モデルに多い



超新星残骸の構造を定量的に評価する方法があれば、この燃焼プロセスに観測的に制限を与えられる？

どうやって構造の特徴量を抽出できるか？

Ia型超新星残骸の塊構造の形成過程：核燃焼波の伝搬？



運動学的性質はほぼ変わらないが、見た目が全然違う

直接残骸の構造と比較できる手法が必要 → 全く新しい手法を開発

雑談④：ドライブ中の雑談きっかけで論文を書いた話

2018年11月: アメリカに訪問してきた日本の共同研究者(当時 統計数理研究所)との雑談が論文に

初 my car (2003年製 Toyota Rav 4)



帰国時 \$300



IADからの高速



私「せっかく一週間の訪問なんで、何かしませんか？」

：

私「そう言えば、残骸のボコボコあるんですが、これを
定量的に評価出来ませんかね...？」

共同研究者「Persistent homology はどうでしょう？」

結局「**ジーナス統計**」を使う事にして、その週に試してみる
→ なんかうまくいきそう！

~1ヶ月：試し解析 + ~2ヶ月：勉強/方針決め + ~2ヶ月：最終解析/論文執筆 = ~5ヶ月

2019年3月に論文投稿 → 同年5月に受理

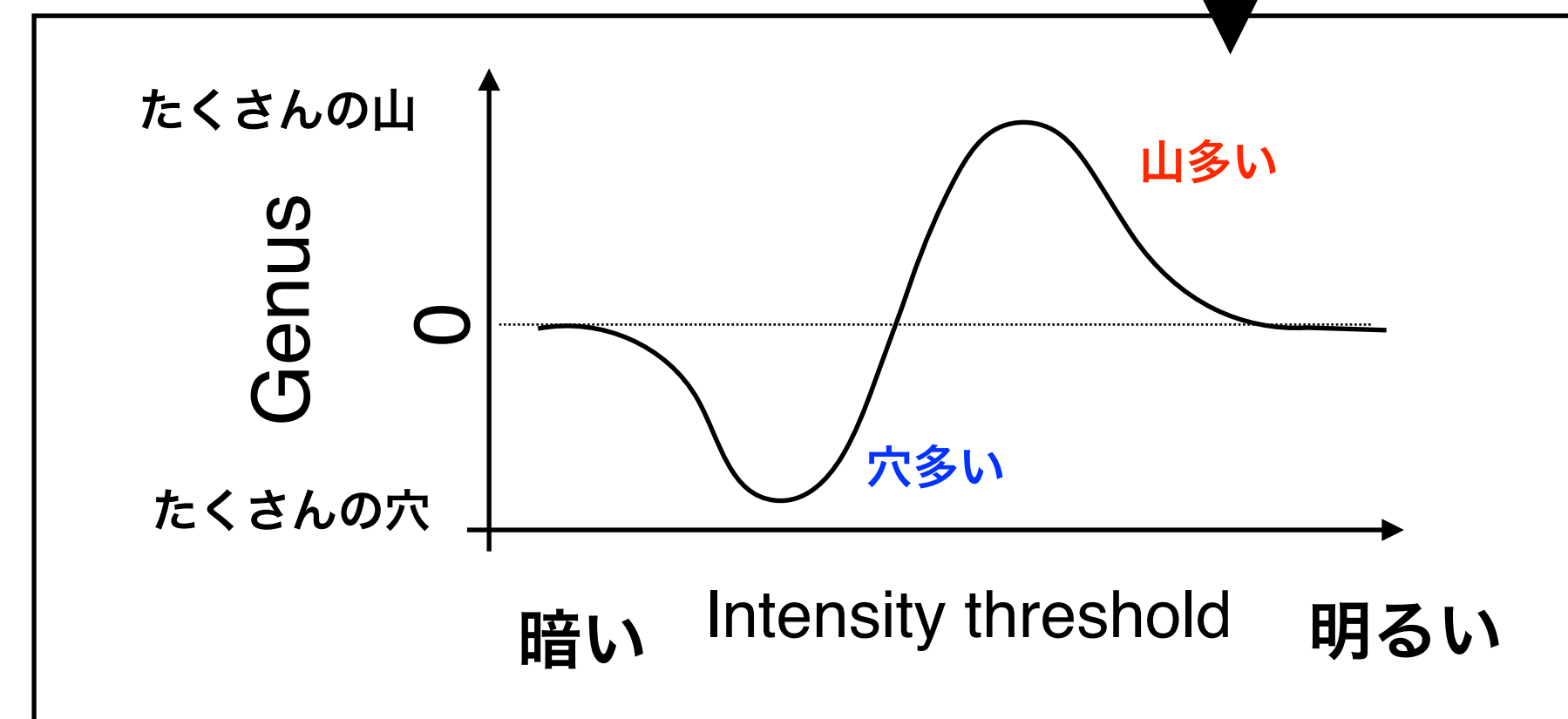
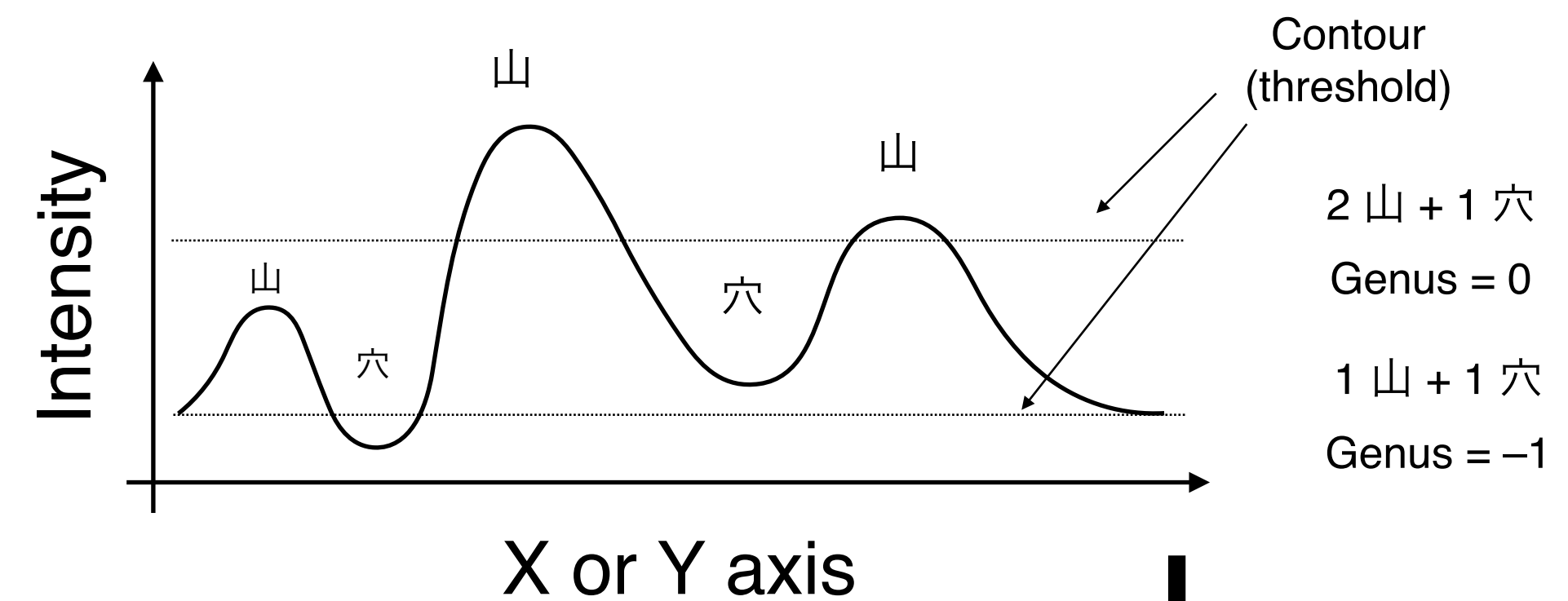
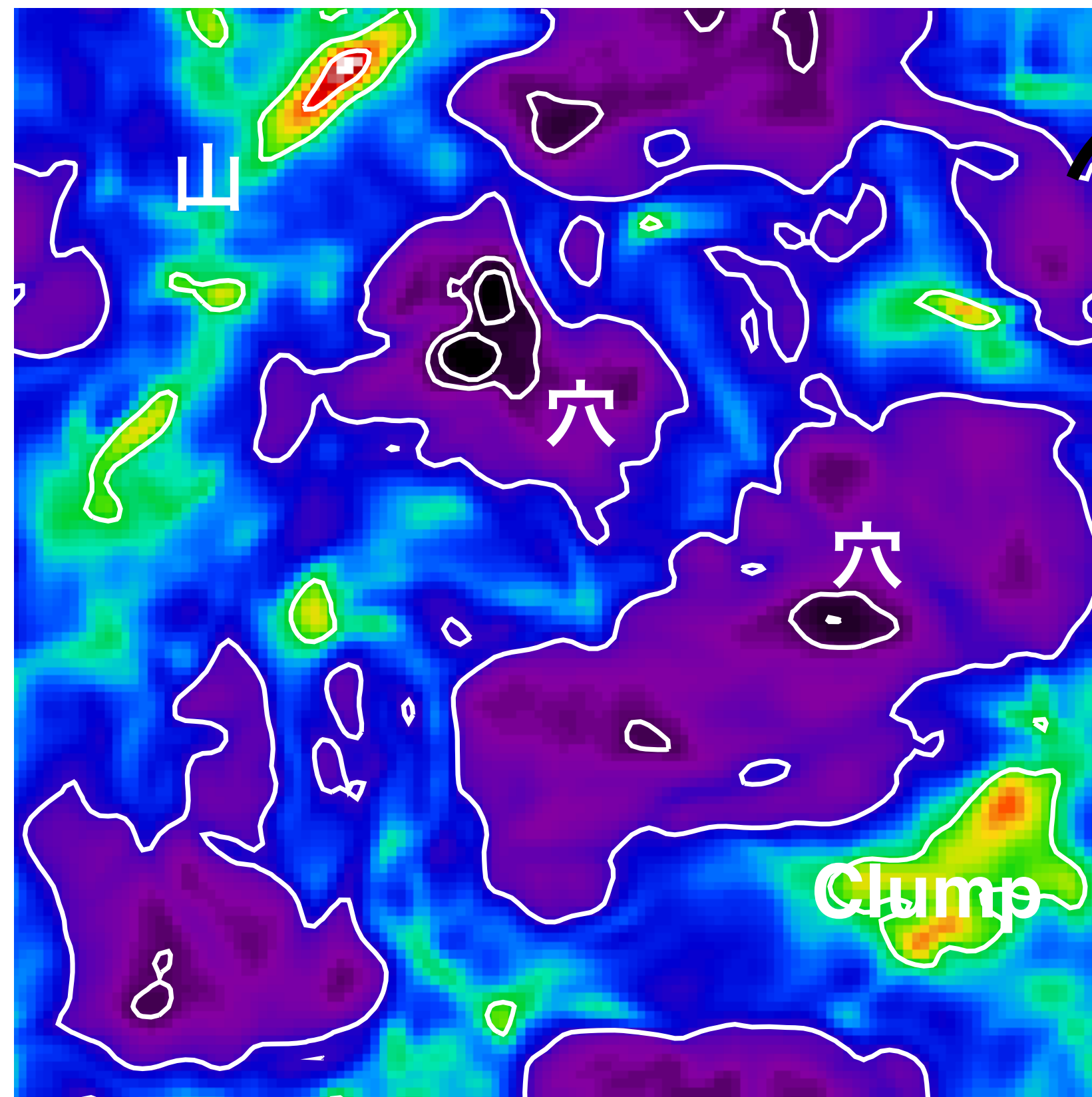
教訓: 何気ない雑談が論文テーマになったりする

天文月報 2020年4月号 “超新星残骸へのジーナス統計の適用 – Ia型超新星はボコボコしている？” に詳細

ジーナス統計とは？

宇宙の大規模構造のトポロジーを解析する手法の一つ (Gott et al. 1986 など)

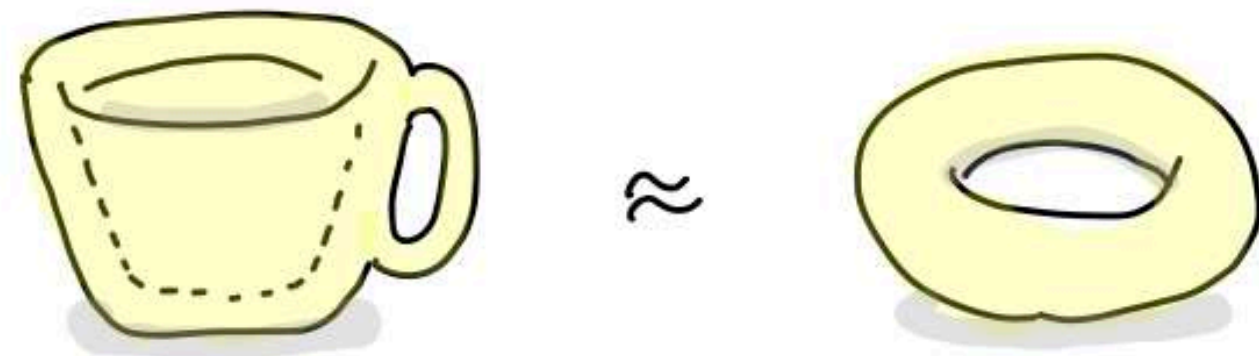
二次元面の場合は、等高線を引いてできる一塊の構造(山か穴か)を数えていく



この曲線に構造の特徴

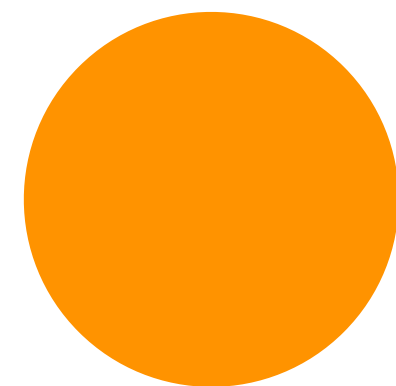
ジーナス統計 = トポロジカル解析手法 : Genus の定義

トポロジーの話でよくある説明

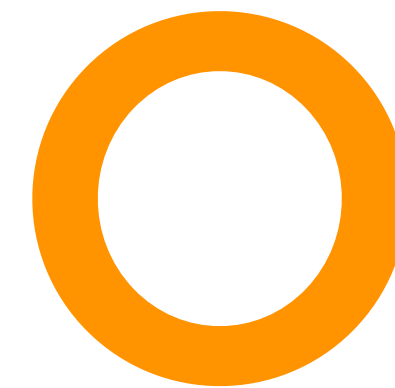


マグカップとドーナツが同じ？

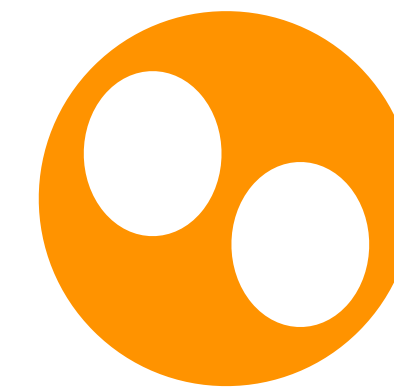
Genus = 0



Genus = -1

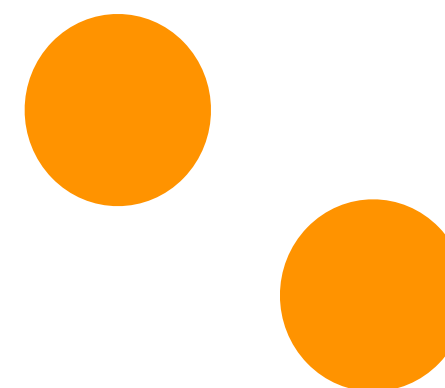


Genus = -2

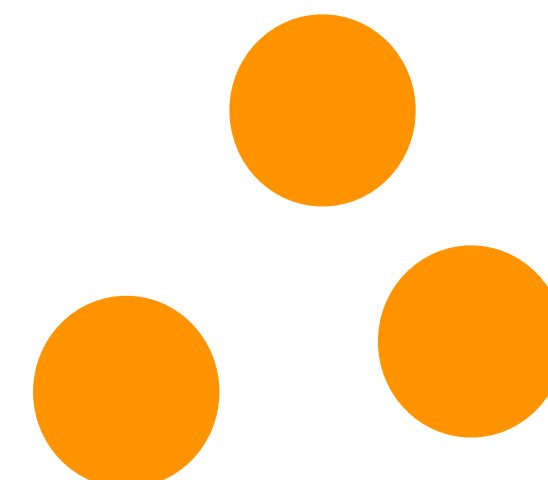


...

Genus = +1



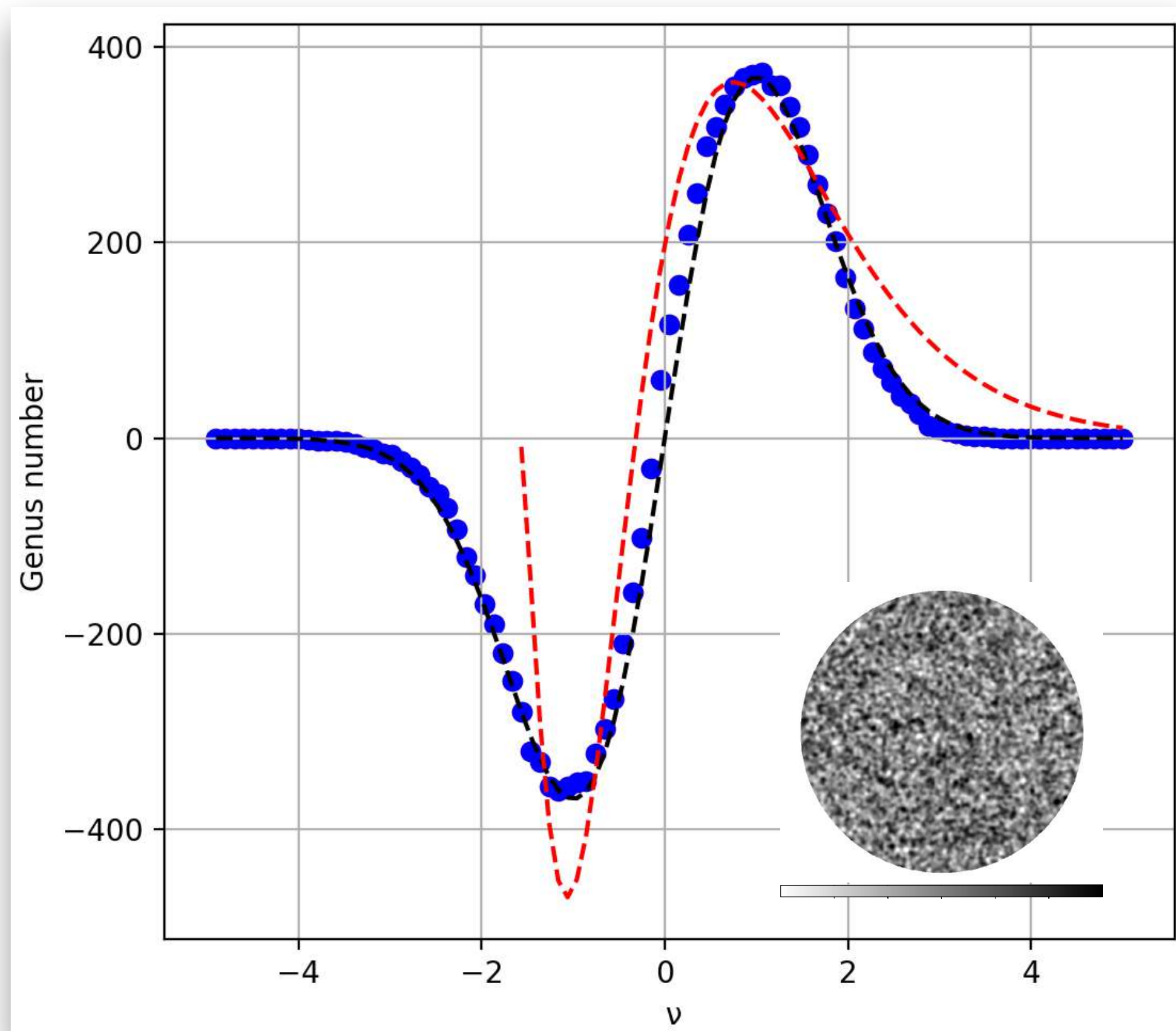
Genus = +2



...

ジーナス統計の重要な特徴

ランダムな場は解析的に表現できる！(大規模構造の非ガウス性の議論とかに便利)



We use a python module for calculating the genus curves (Kock+17)
Available at <https://github.com/Astroua/TurbuStat>

解析解の例 (Coles 1988)

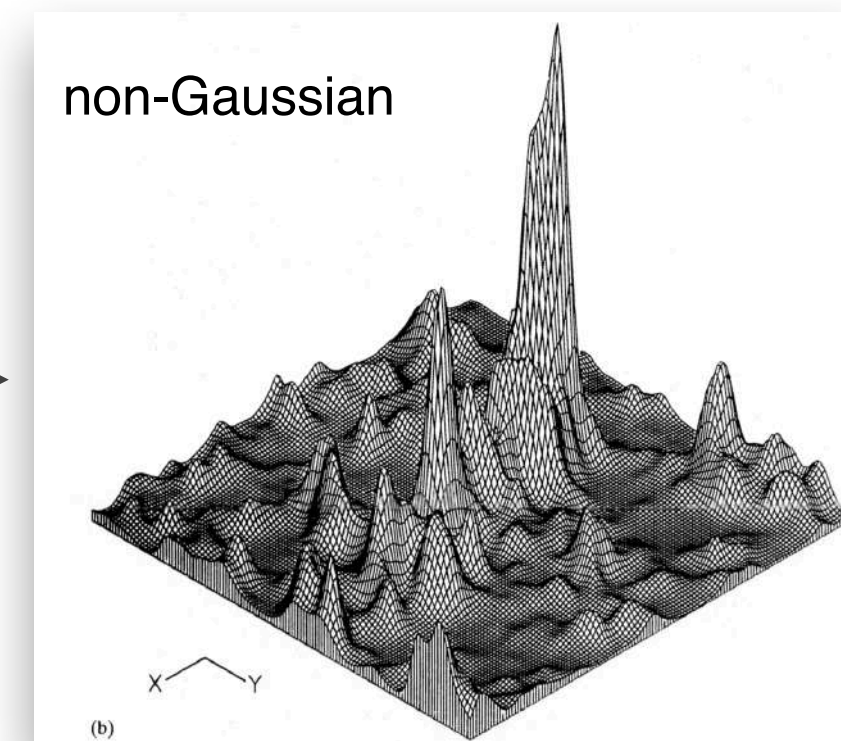
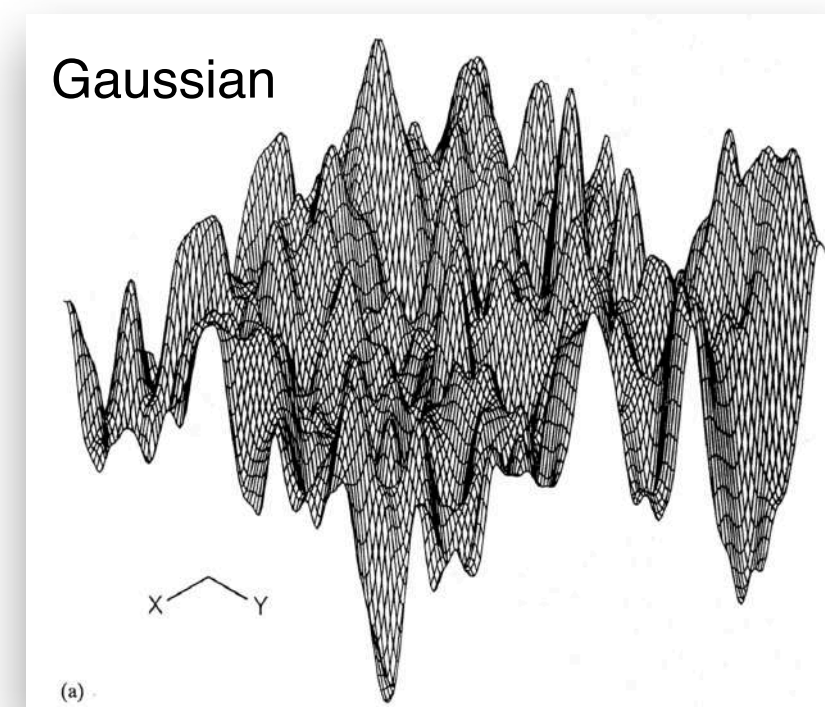
A 領域の面積
 θ_c コヒーレンス角

Random Gaussian distribution

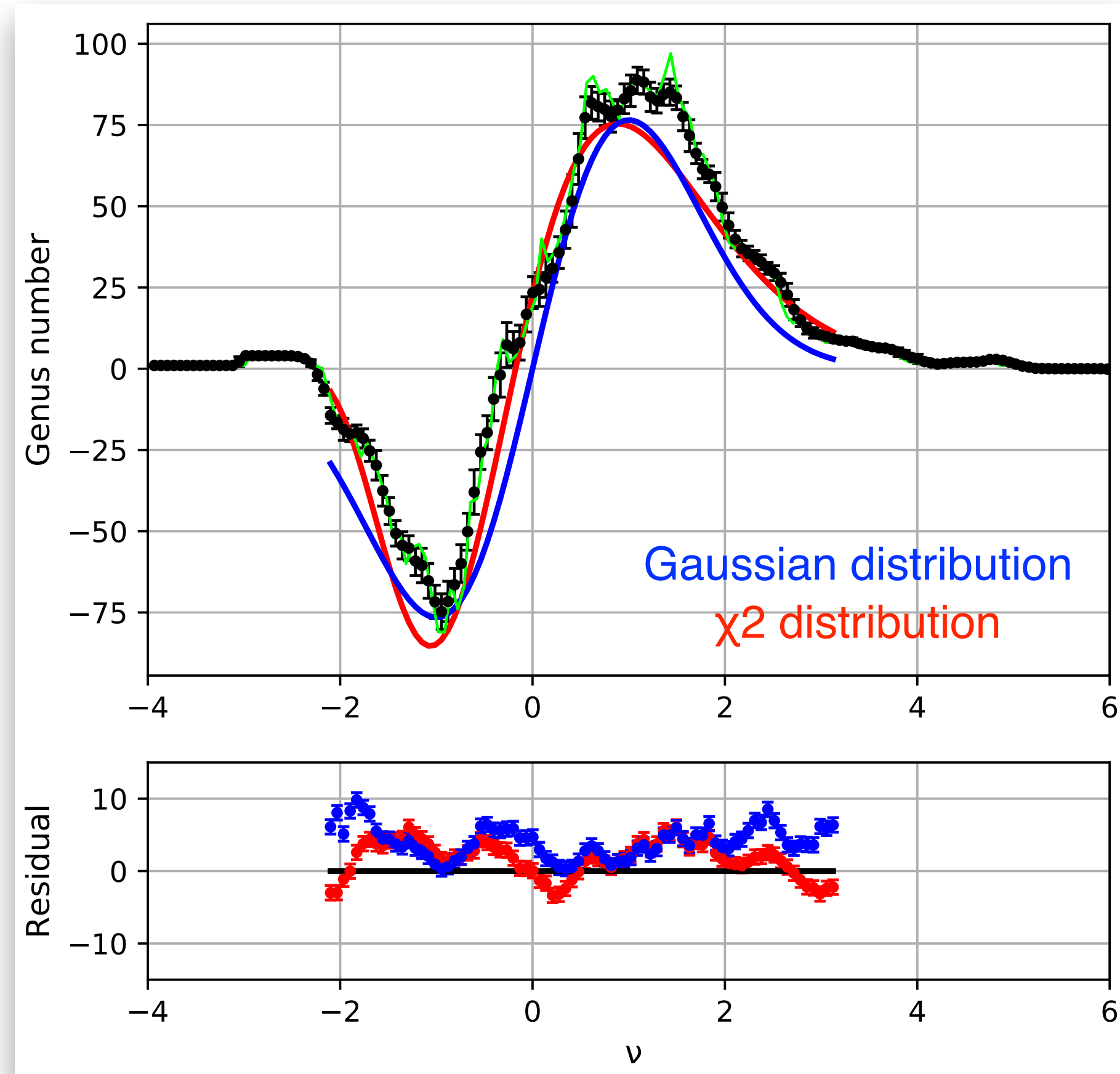
$$G(\nu) = \frac{A}{(2\pi)^{3/2} \theta_c^2} \nu \exp\left(-\frac{\nu^2}{2}\right)$$

Random χ^2 distribution

$$G(u) = \frac{A}{2 \Gamma(n/2) (2\pi)^{3/2} \theta_c^2} [u - (n - 1)] \exp\left(-\frac{u}{2}\right)$$



超新星残骸のジーナス曲線



観測データ = 歪んだジーナス曲線

1. 0 を通らない
2. 高い閾値でゆっくり減少

非ガウス分布の方が合う (= シンプルじゃない)

唯一のパラメータ: コヒーレンス角 θ_c

(構造間の距離 ~ 構造のサイズ感)

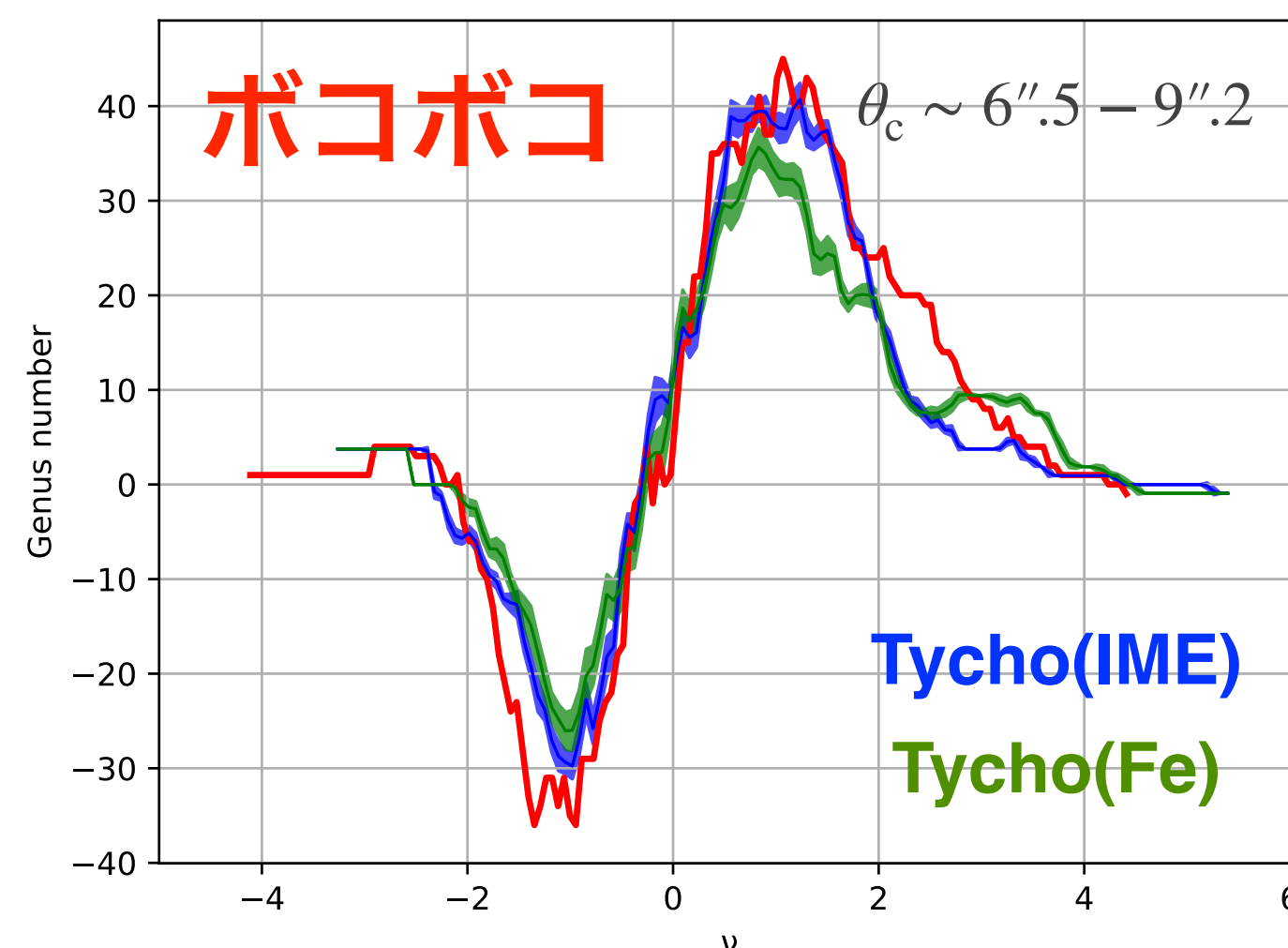
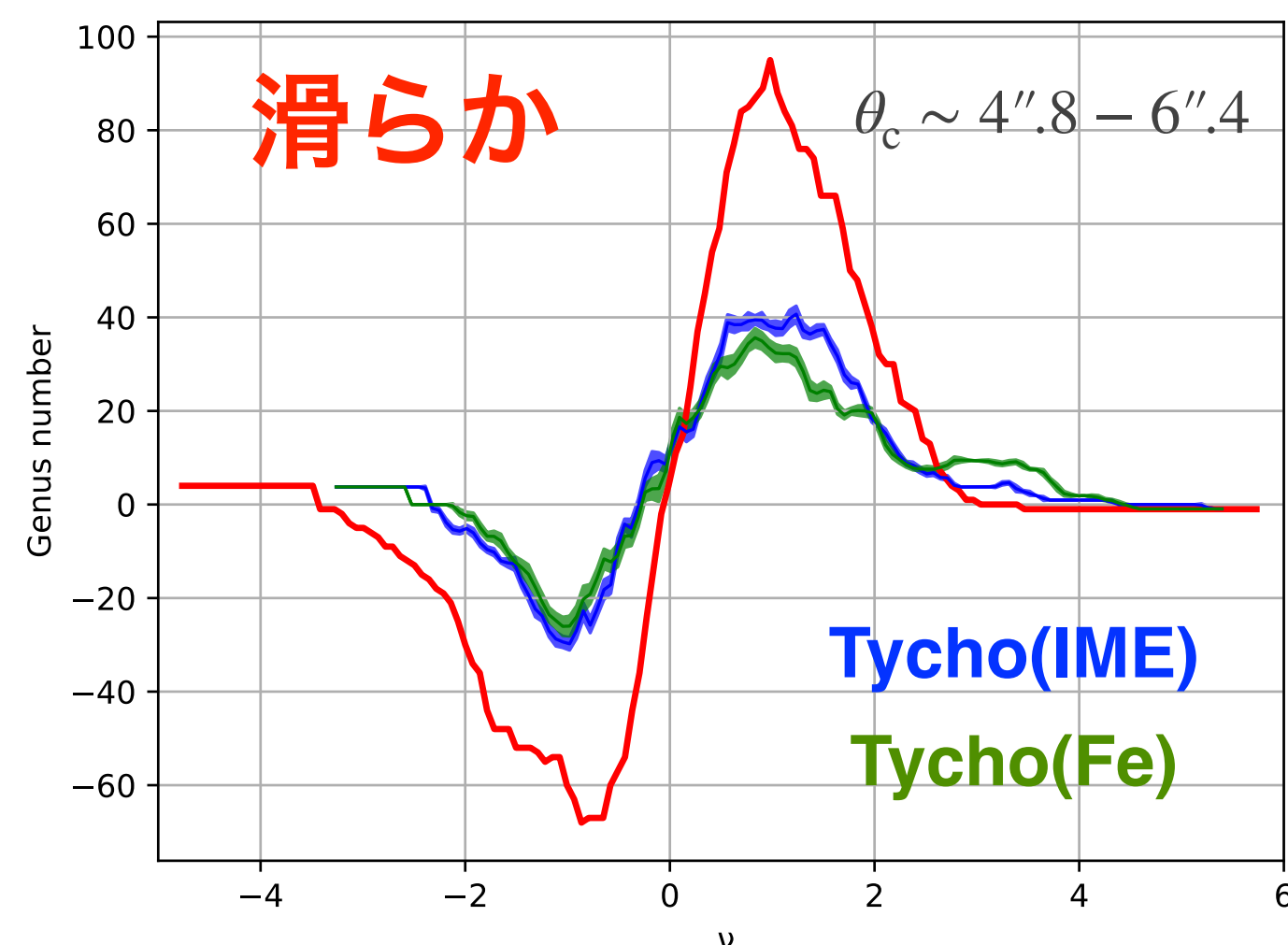
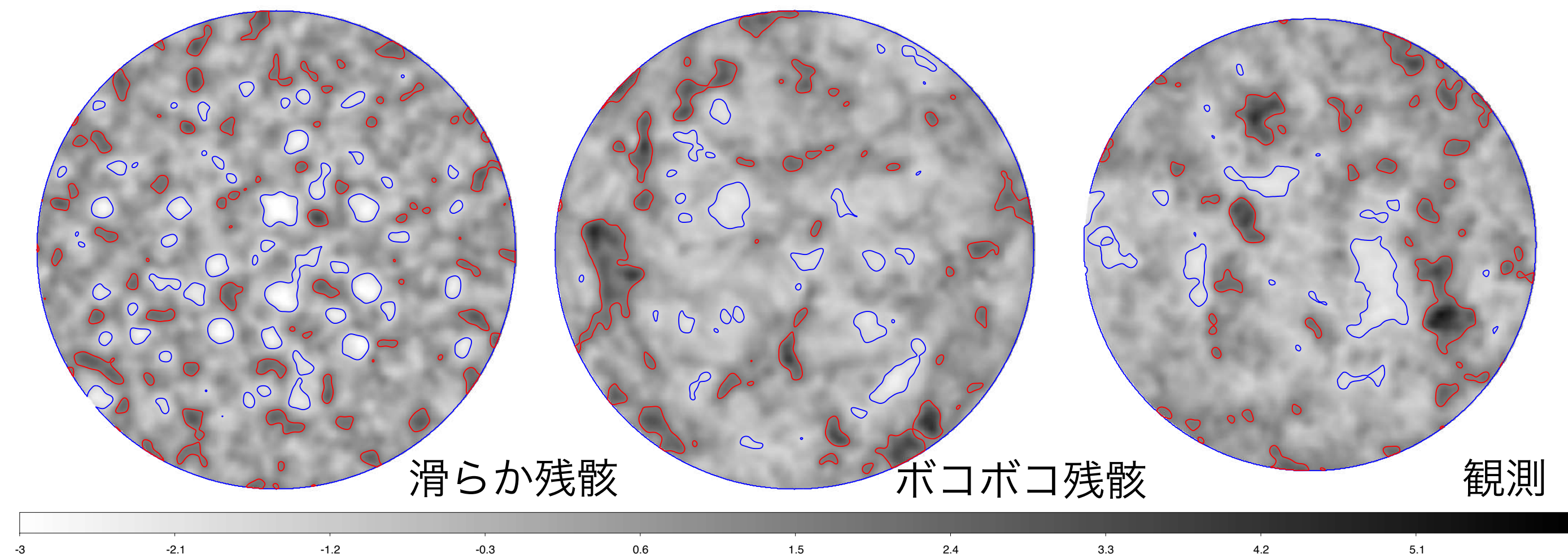
$$\theta_c \sim 6'' - 9'' \text{ (2 - 4 \% of SNR radius)}$$

大きい (or 小さい) θ_c = 大きい (or 小さい) 構造

→ 小さい (or 大きい) Genus 数

流体モデルと比較して、構造の形成過程を制限できる？

ジーナス曲線を観測と流体モデルで比較



一目瞭然！ボコボコが合う！

- 滑らか残骸モデルでは、RT instability で作られる構造は小さく多い
- 爆発した段階で、そこそこ大きいボコボコ構造が出来ていれば、観測をうまく説明できる

ボコボコ構造を作るのは、ゆっくりと核
燃焼波が伝搬する **Deflagration** が必要？

流体モデルの仮定の違いで色々この辺の
解釈は変わり得る

それでも、ジーナス統計は有用

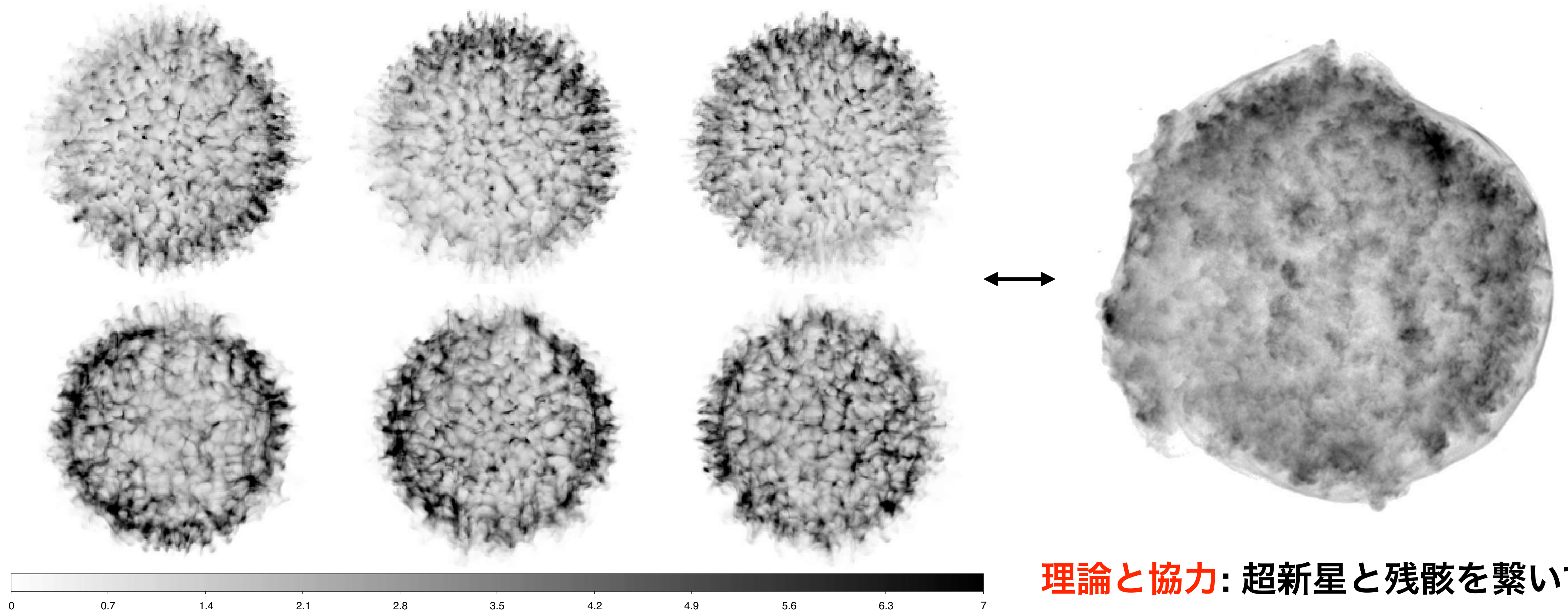
理論-観測の比較研究の基盤完成！

(詳細は Sato et al. 2019, ApJ)

将来的には、爆発モデルの詳細な物理へ

様々な Ia 型超新星残骸モデル By Gilles Ferrand @ RIKEN

着火点数の違い/燃焼波の違い/最終質量など
様々なパラメータの残骸モデルと比較できる



Ferrand et al. (2019) → Genus 論文とほぼ同時に登場し、その頃からコラボスタート

理論と協力: 超新星と残骸を繋いで、
爆発機構を制限できるか？

まとめ

超新星残骸は、超新星と比べるとサンプル数は限られているものの、近くにあるため元素の分布と組成を同時に測ることができる。これが、超新星の爆発機構を議論する上で強力なツールになる。

重力崩壊型超新星の残骸では、新たな元素が見え始め、爆発中心の物理に迫れるようになって来ている。将来の精密X線分光でより詳細の物理に迫れそう。

Ia 型超新星の残骸では、超新星-残骸を繋げるような理論モデルが登場し始め、観測との比較も進み、爆発機構研究が加速していきそう。

新しいテーマを生み出す際、装置開発・観測・理論の分野を問わない協力研究が有用