

Solar Abundance Ratios of the Iron-Peak Elements in the Perseus Cluster

Hitomi Collaboration (2017), Nature, 551, 478

山口 弘悦 (気持ちだけ参加)

NASA/GSFC, University of Maryland

Special thanks to: Kyoko Matsushita, Shinya Nakashima

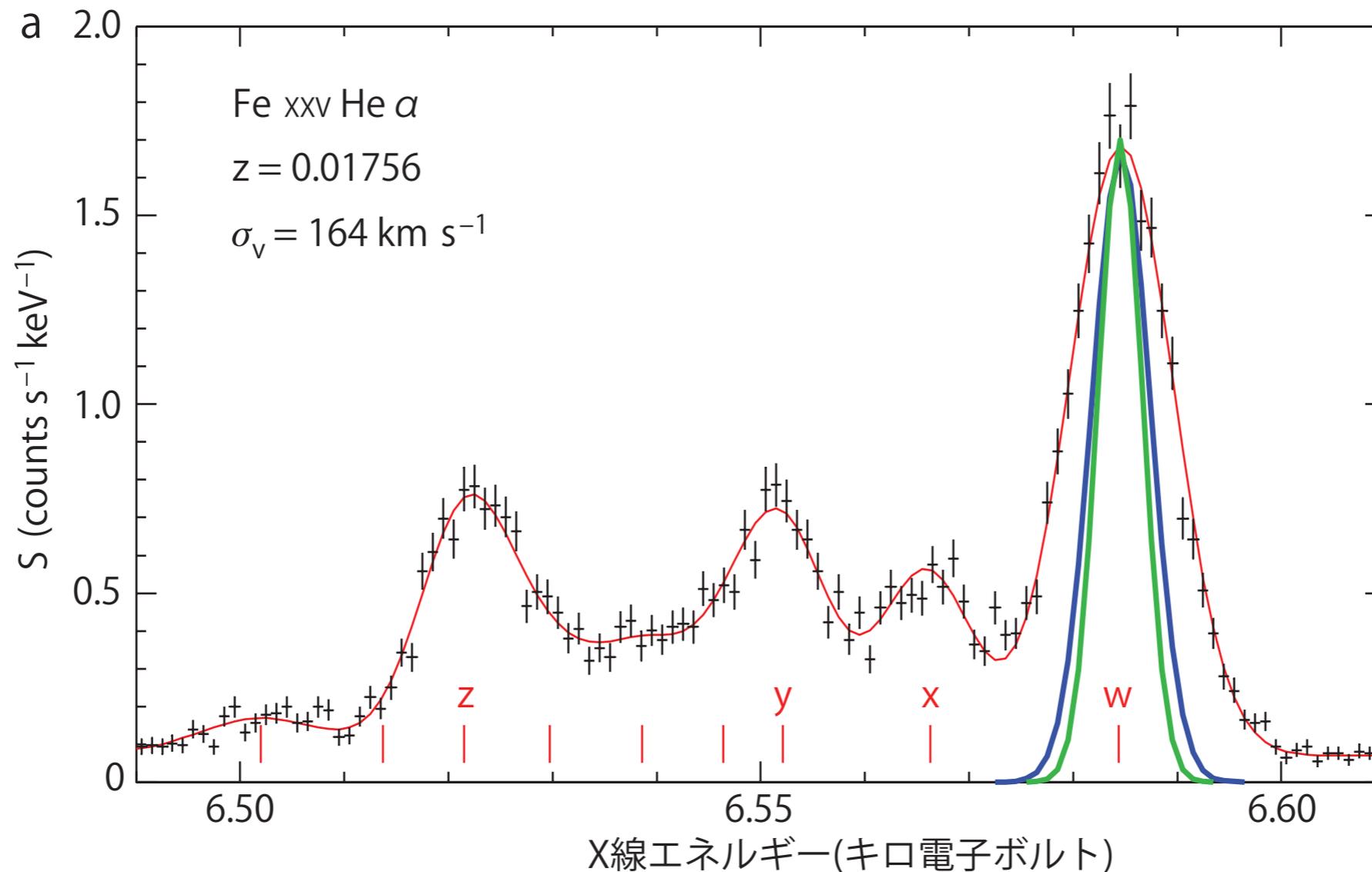
Aurora Simionescu, Michael Loewenstein

今日のお話のハイライト

- 初の“非分散精密X線分光”銀河団観測
- 鉄族元素 (Cr, Mn, Ni) の組成を正確に測定
- 太陽系化学組成の普遍性を示した
- Ia型超新星の性質に強い制限を与えた
- **Ia型超新星にまつわる最新の話題**

ひとみ 1本目の論文

Hitomi Collaboration 2016, Nature, 535, 117



「力学的性質」に着目：鉄輝線幅から乱流速度を制限

今回は「化学的性質」着目します

銀河団の化学的性質

ICM = 始原ガス (H, He) + 恒星が生成した重元素

総質量は構成銀河(星)の数十倍

→ 現在の宇宙の平均的な化学組成とみなせる

太陽組成が宇宙の平均である必然性は全くない



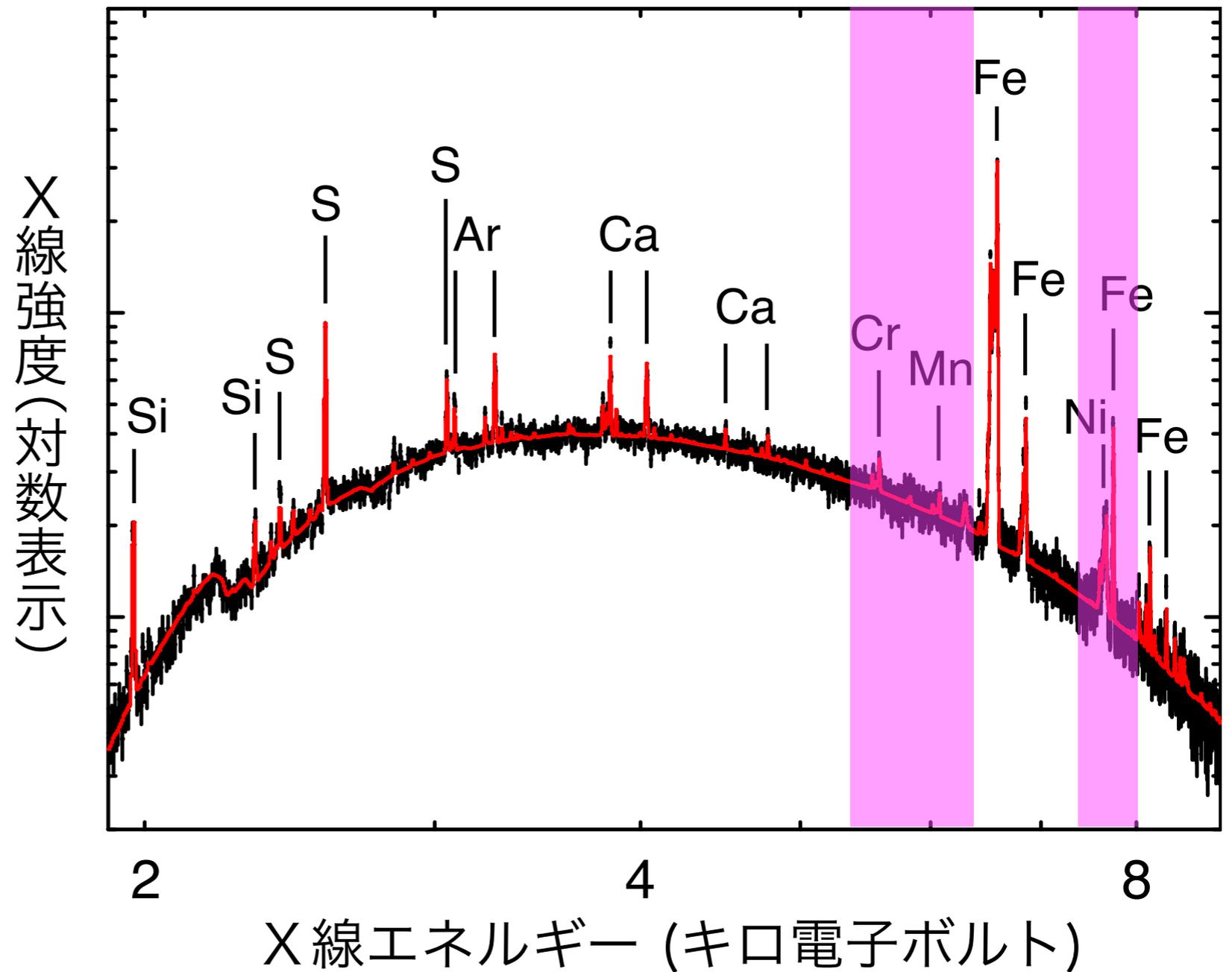
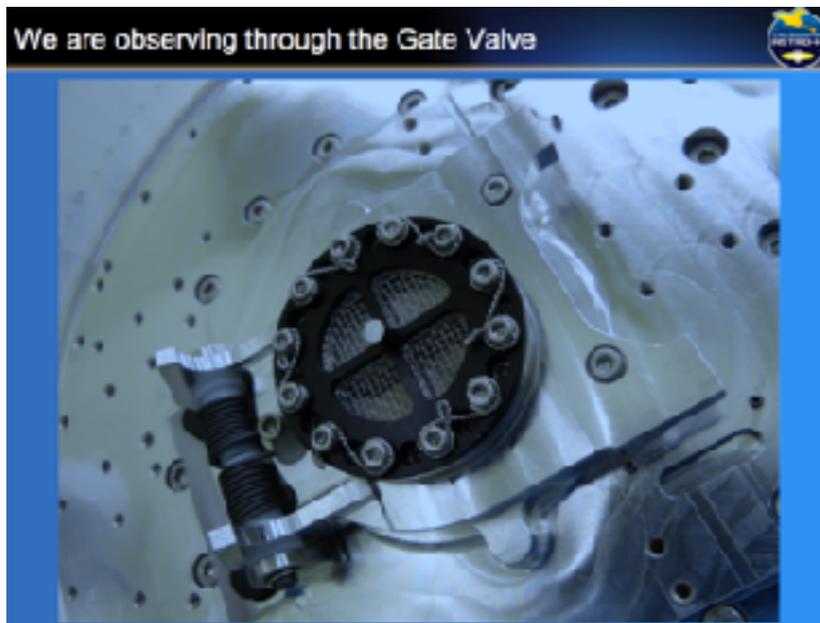
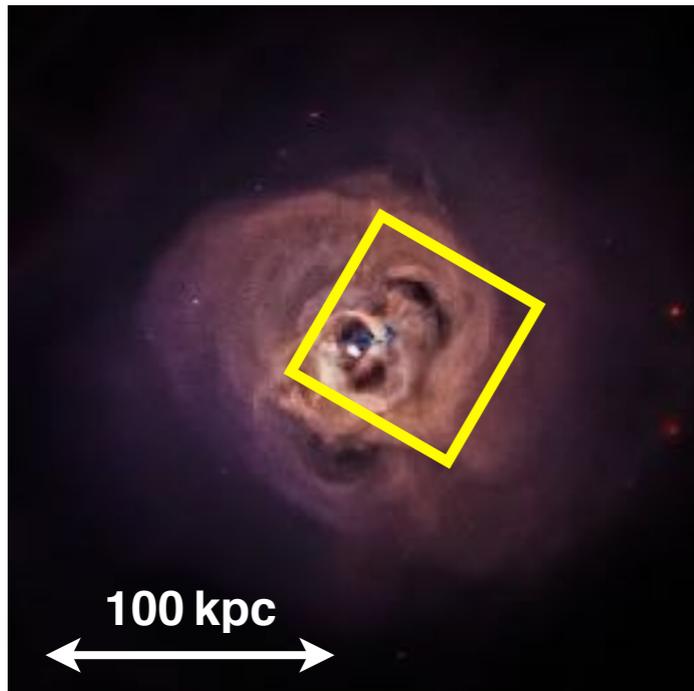
楕円銀河
(銀河団の主要メンバー)

渦巻銀河 (天の川)

古い

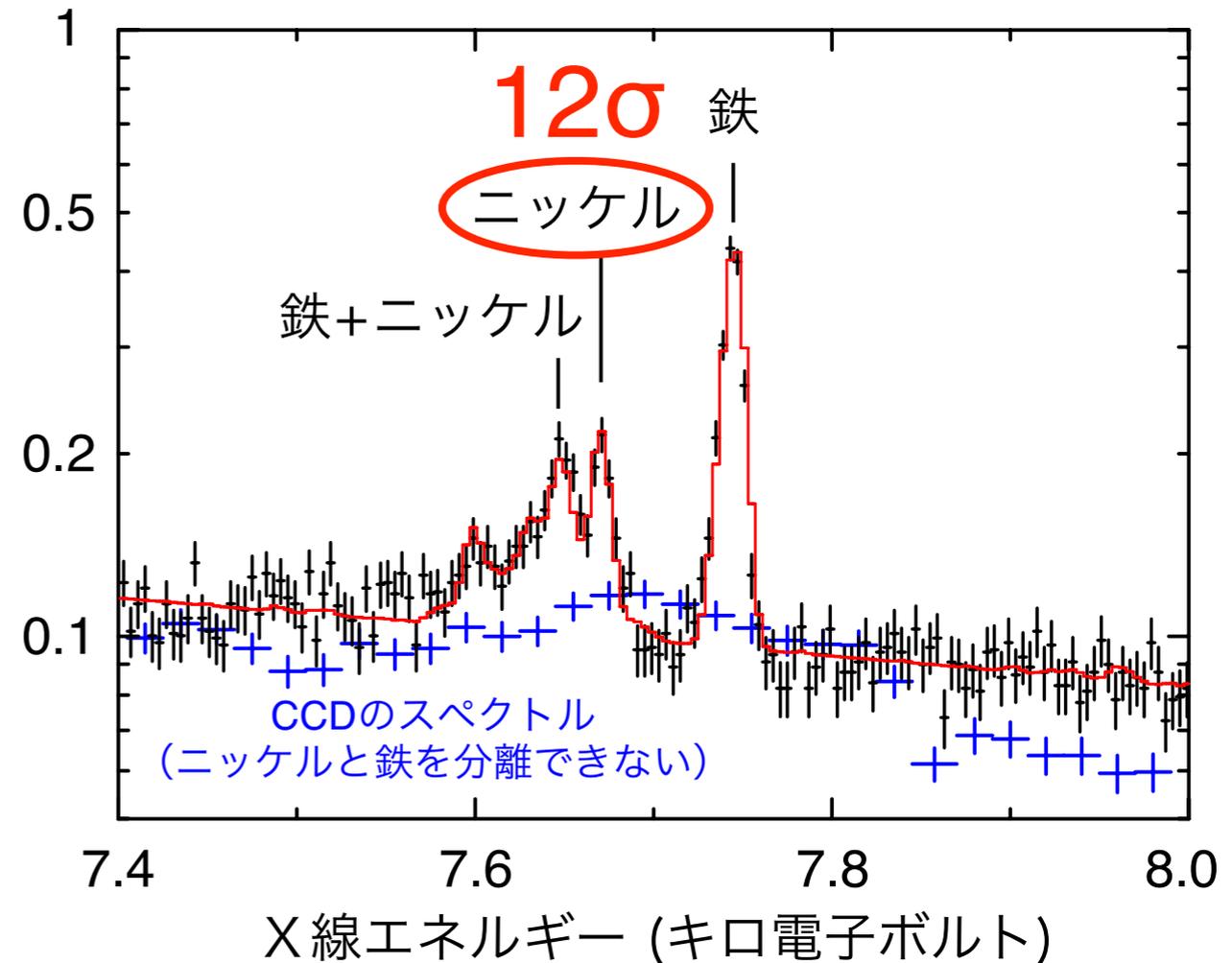
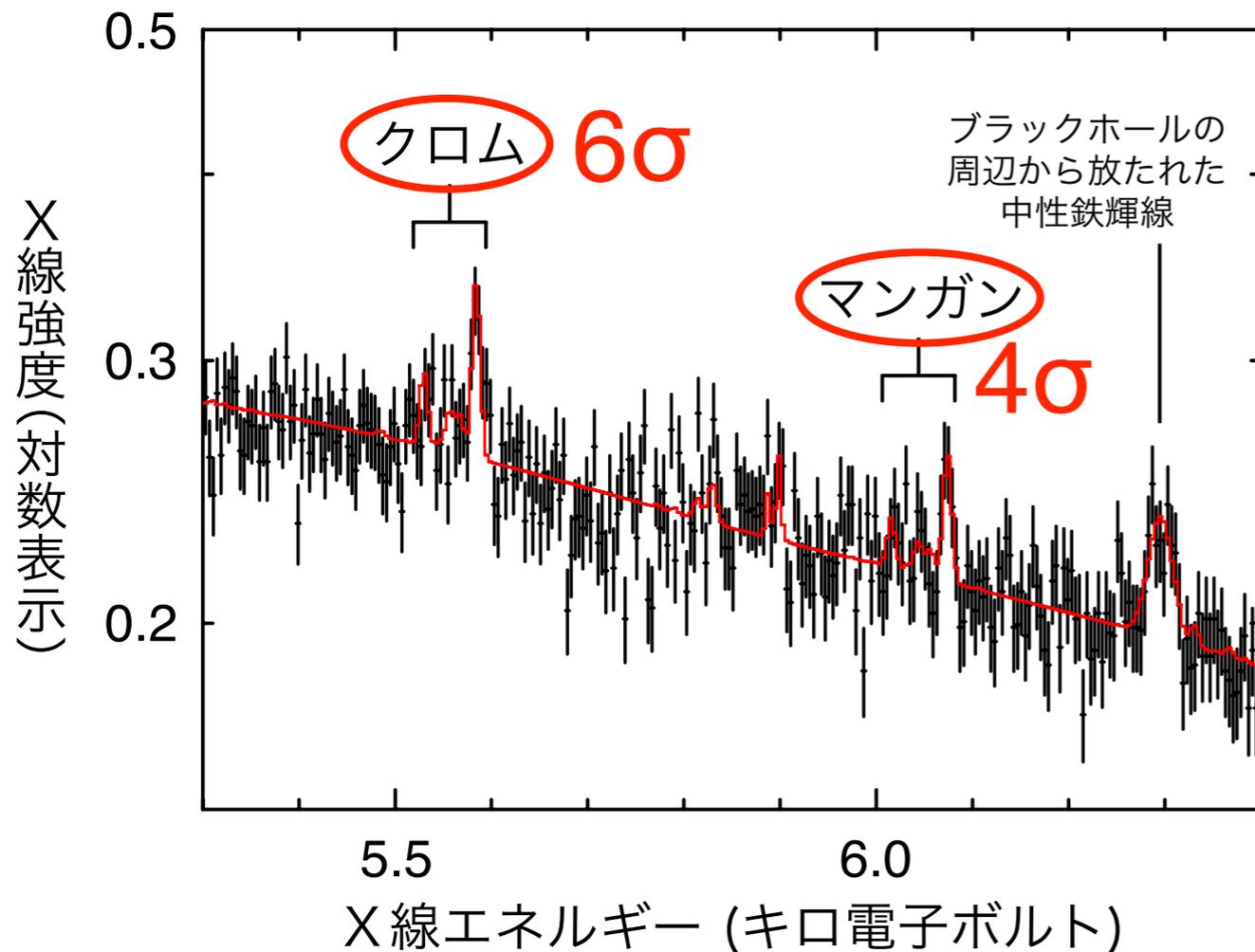
若い

ペルセウス座銀河団のスペクトル



ケイ素からニッケルに至る元素の特性X線を検出

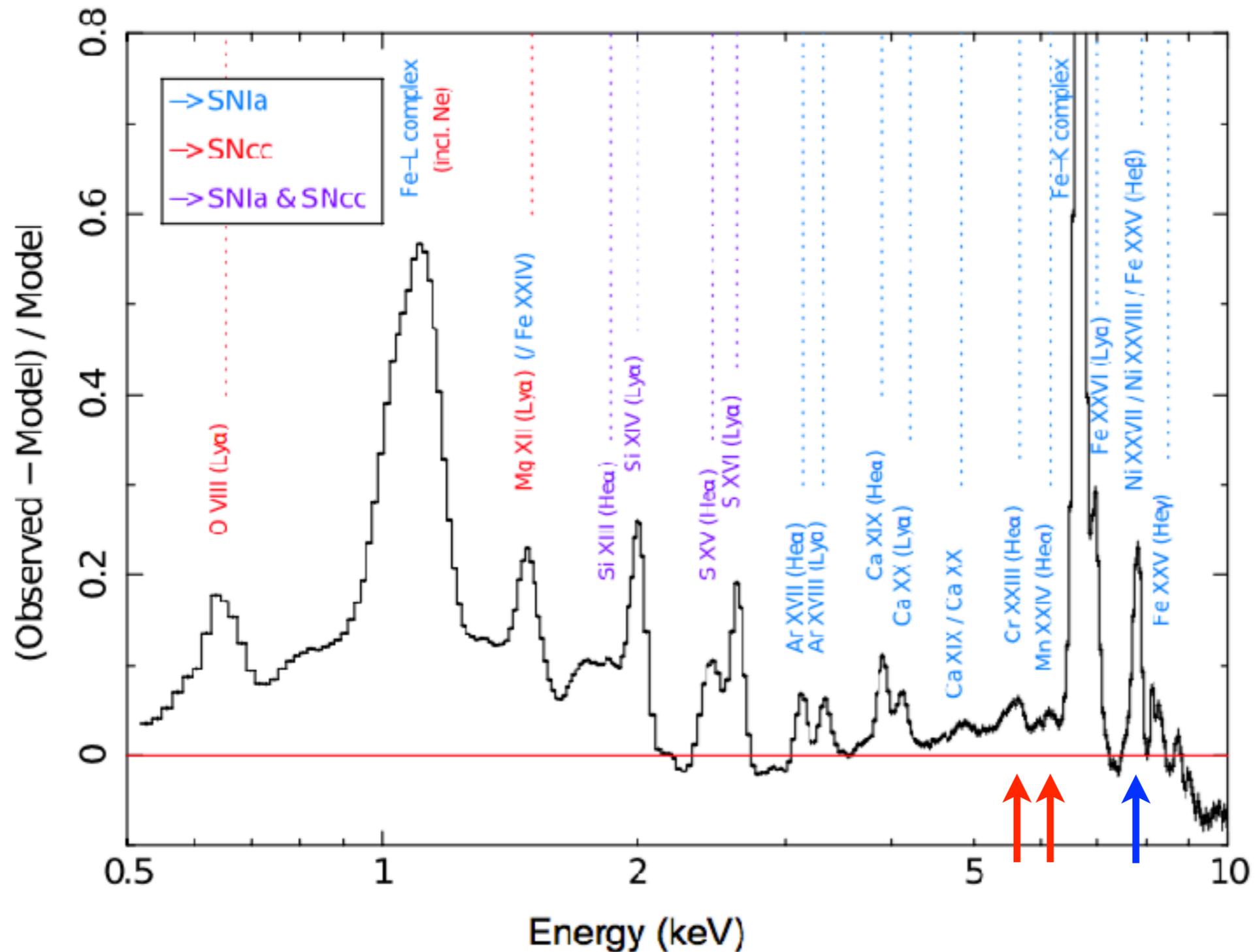
希少鉄族元素 (Cr, Mn, Ni) の検出



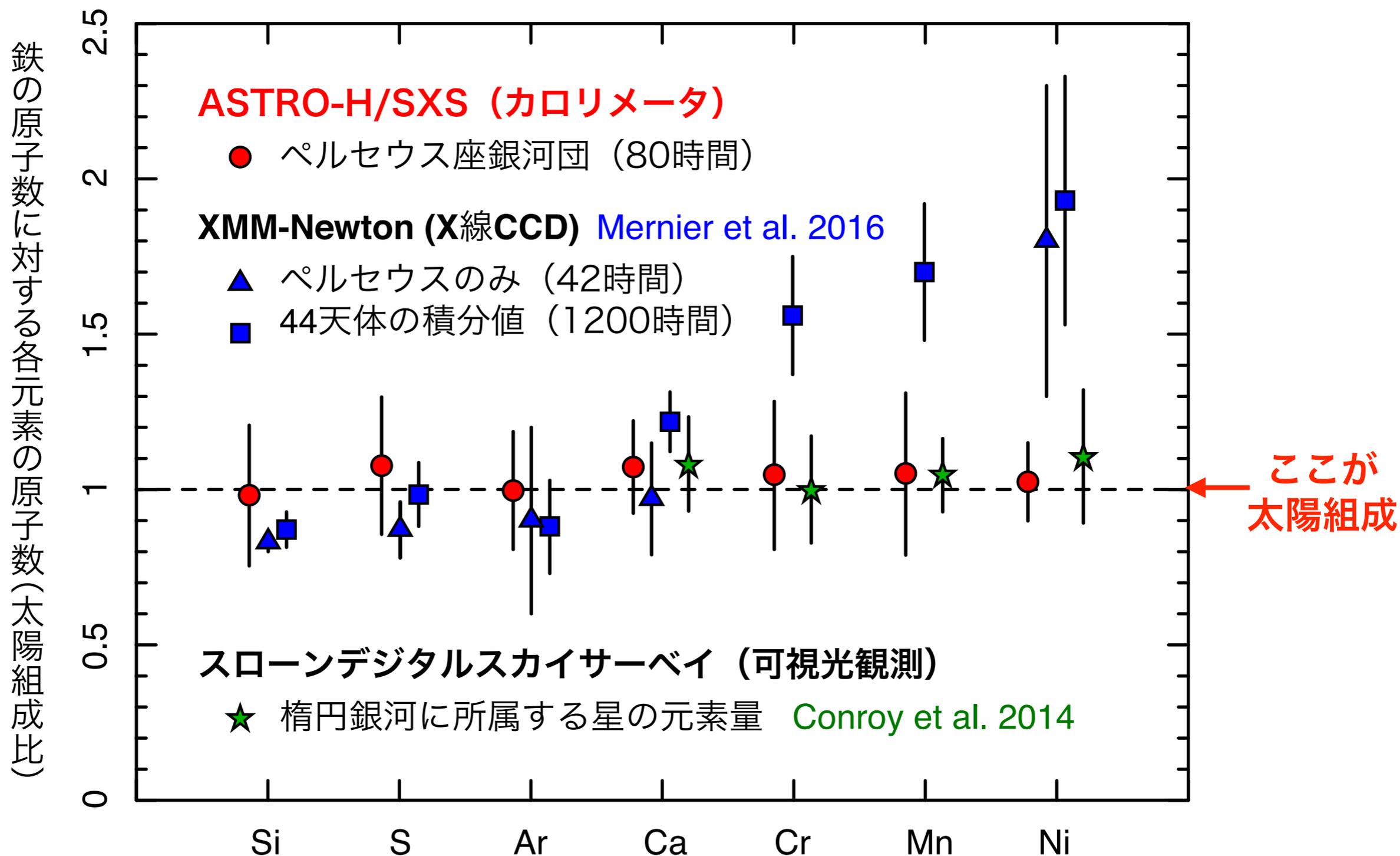
カロリメータの優れた分光能力により、単一天体で
初めてこれらの元素量を測定できるように

ひとみ直前の“Best Effort”

XMM EPICで44天体をスタック解析 (Mernier+2016)



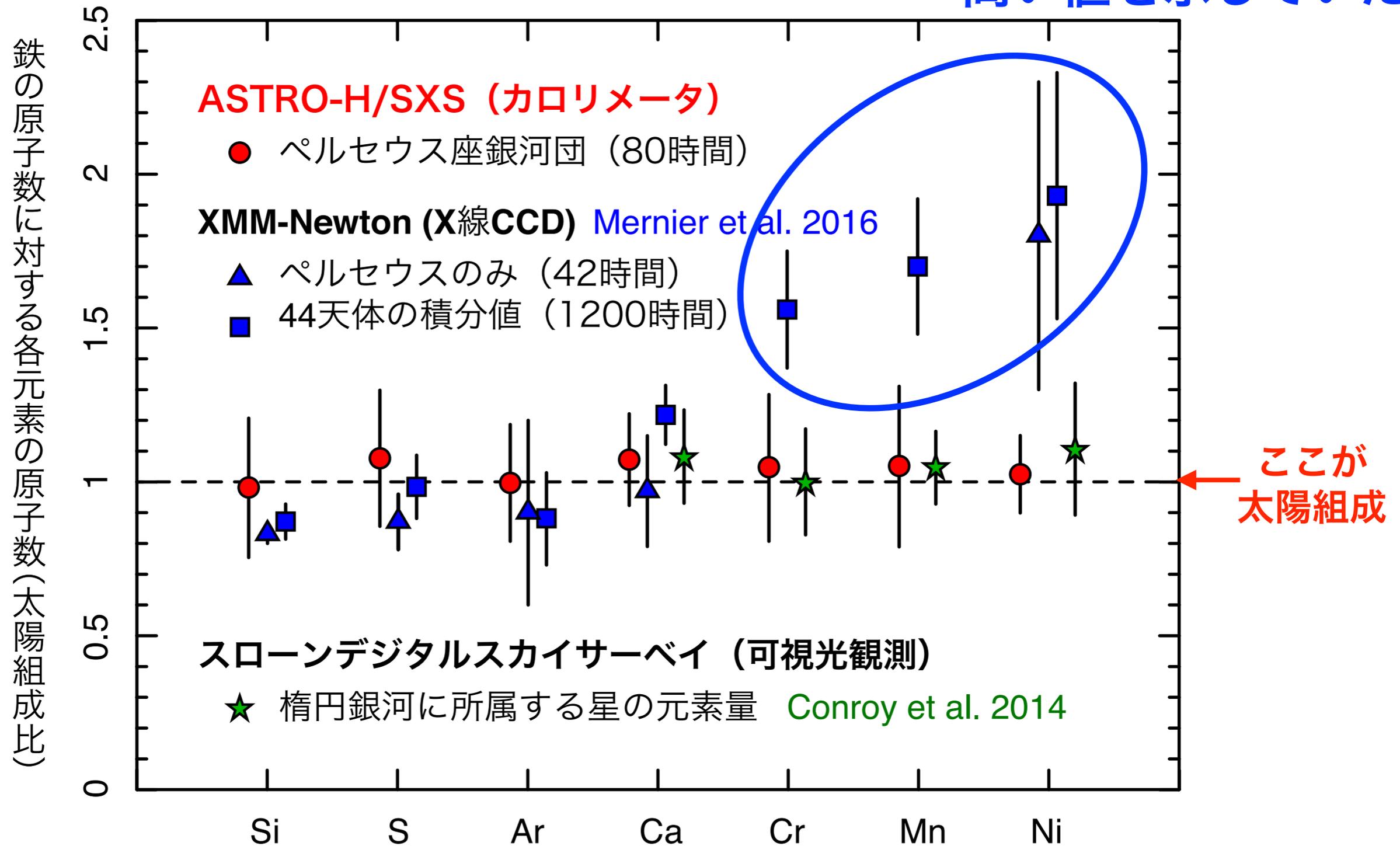
元素量測定結果



ひとみの結果は太陽組成と完全に一致

元素量測定結果

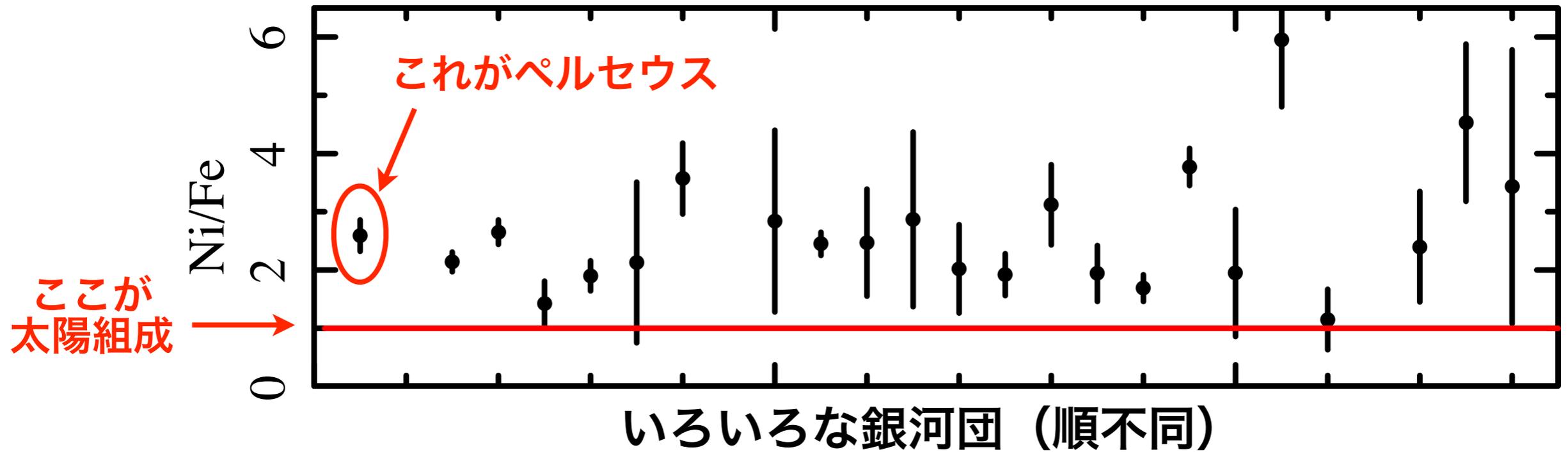
過去のX線観測は
高い値を示していた



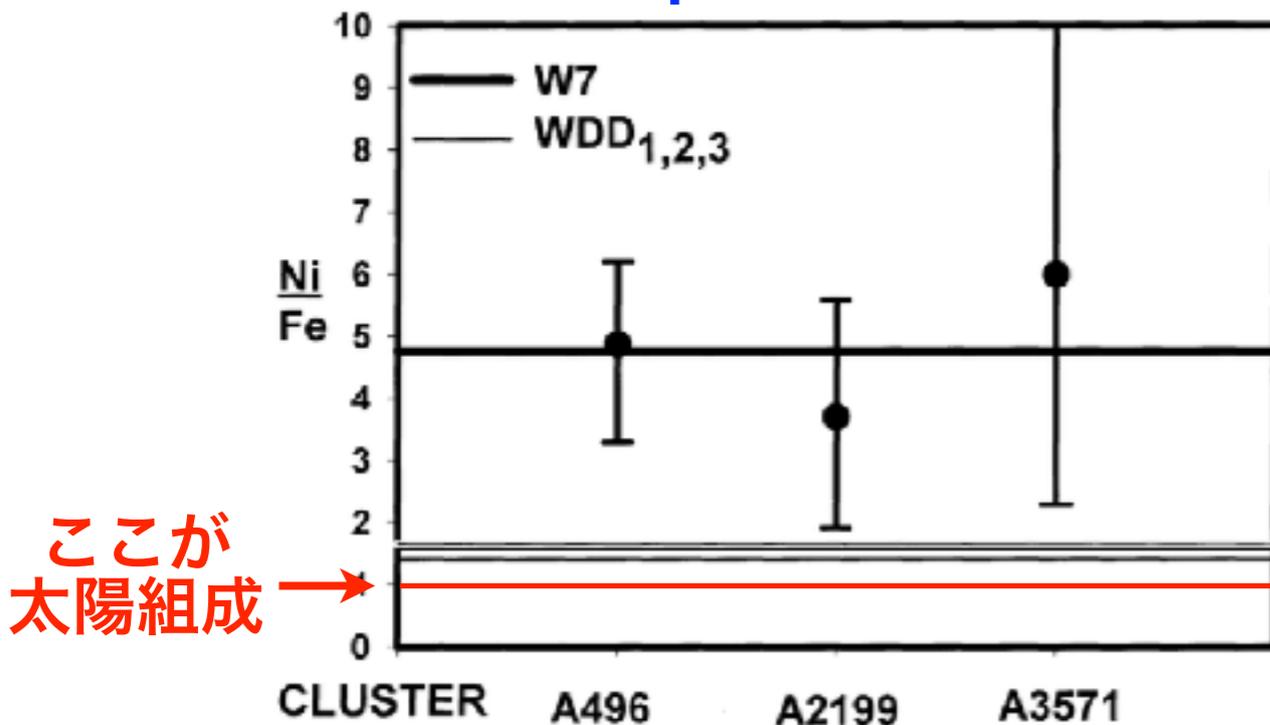
ひとみの結果は太陽組成と完全に一致

過去の Ni/Fe比測定 (CCDの結果)

De Grandi & Molendi 2009



Dupke et al. 2000



過去の測定では軒並み
太陽組成より高いNi/Fe比
**太陽系化学組成の普遍性
をX線で初めて確認**

ここまでのまとめ

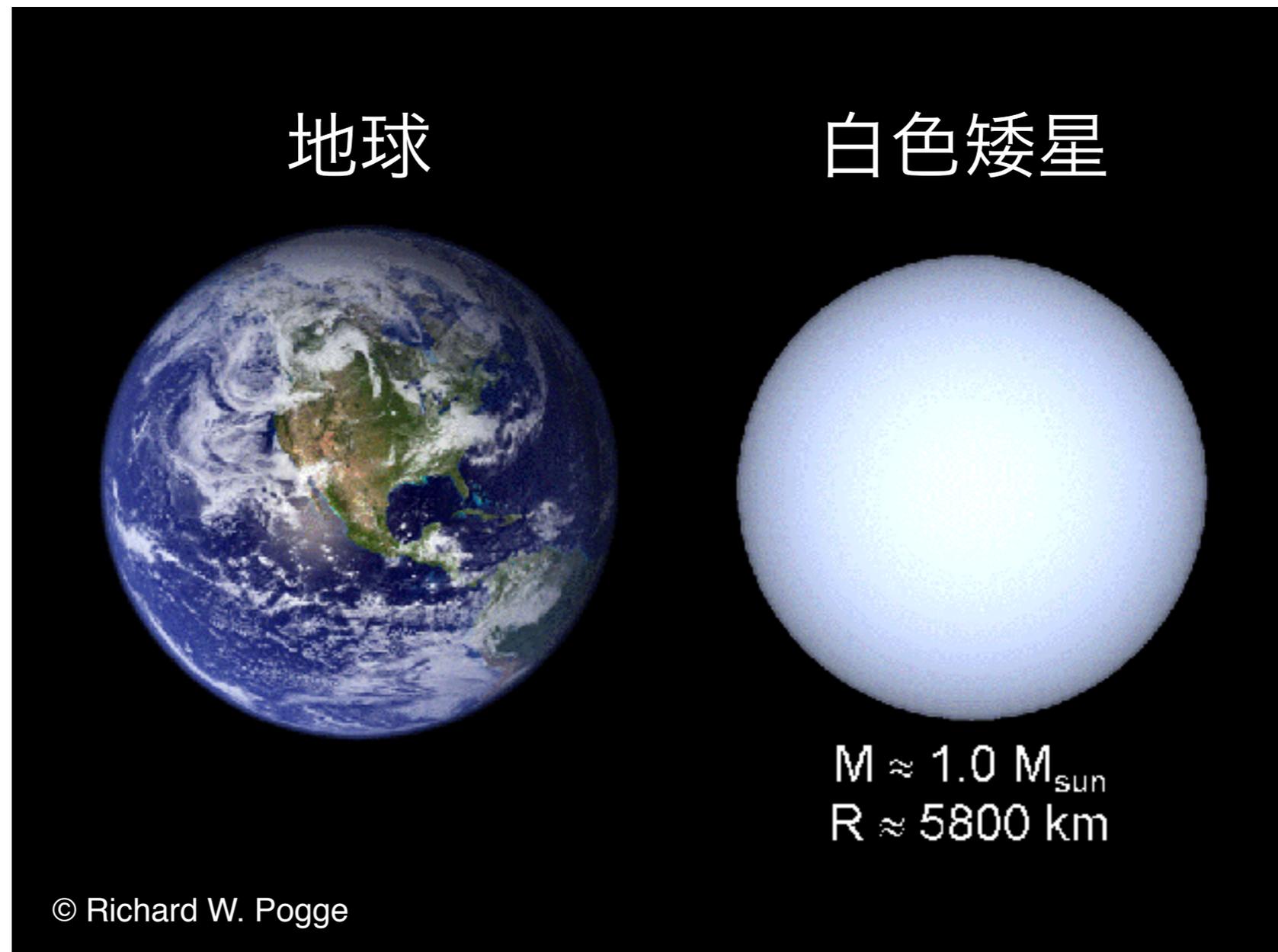
- ・ 銀河団ガスは宇宙の平均的な化学組成
 - ・ 太陽組成に完全一致 (鉄族元素では初)
 - 太陽系の化学組成は普遍的！
-

鉄族元素：何が重要か

- Ia型(核燃焼型)超新星が主要生成源
 - = “宇宙の標準光源” ・ 距離測定の指標
 - 宇宙の加速膨張を発見 (2011年ノーベル物理学賞)

Ia型超新星 = 白色矮星の爆発

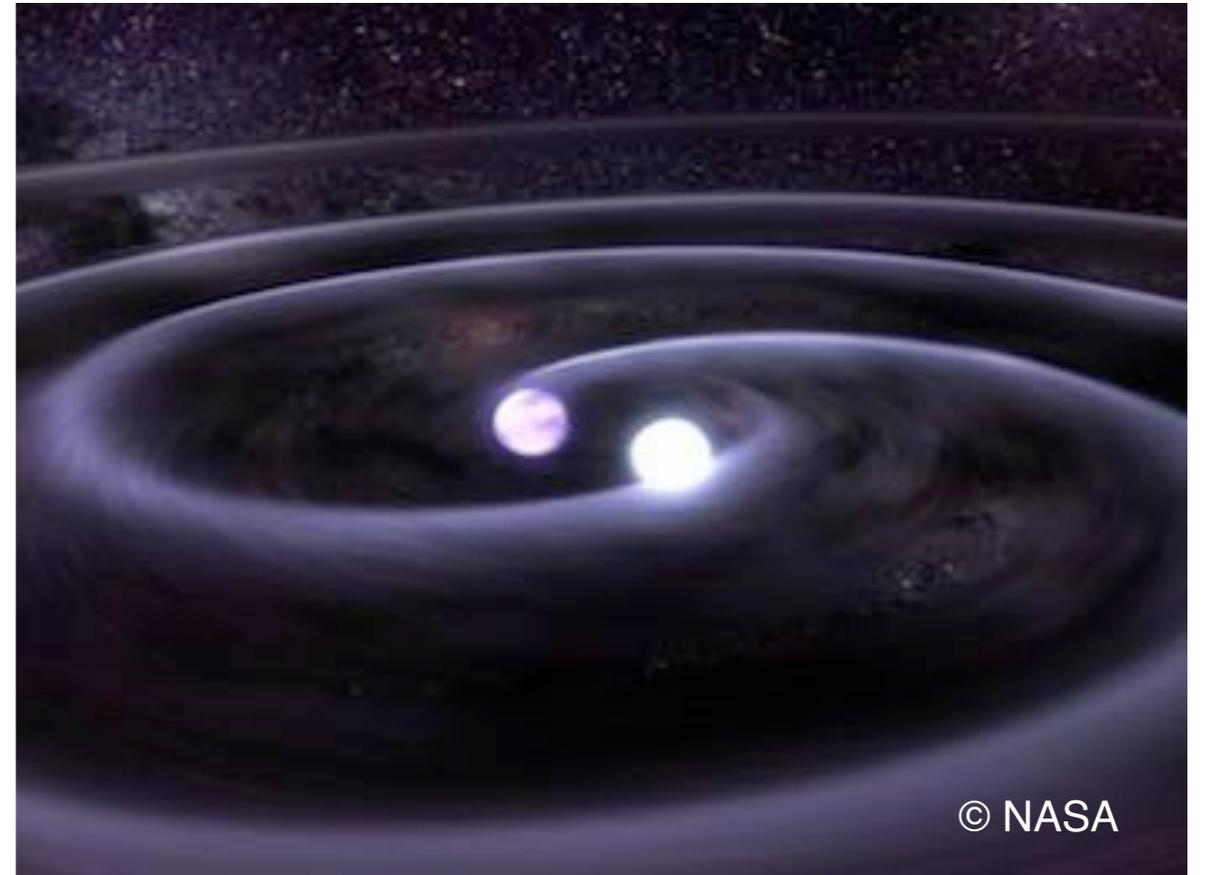
標準的な恒星($M \approx 6M_{\odot}$)の成れの果て



電子の縮退圧が強い自己重力を支える

Ia型超新星にまつわる問題

爆発に至る経路・爆発時の質量が不明



限界質量 (M_{Ch}) で爆発？

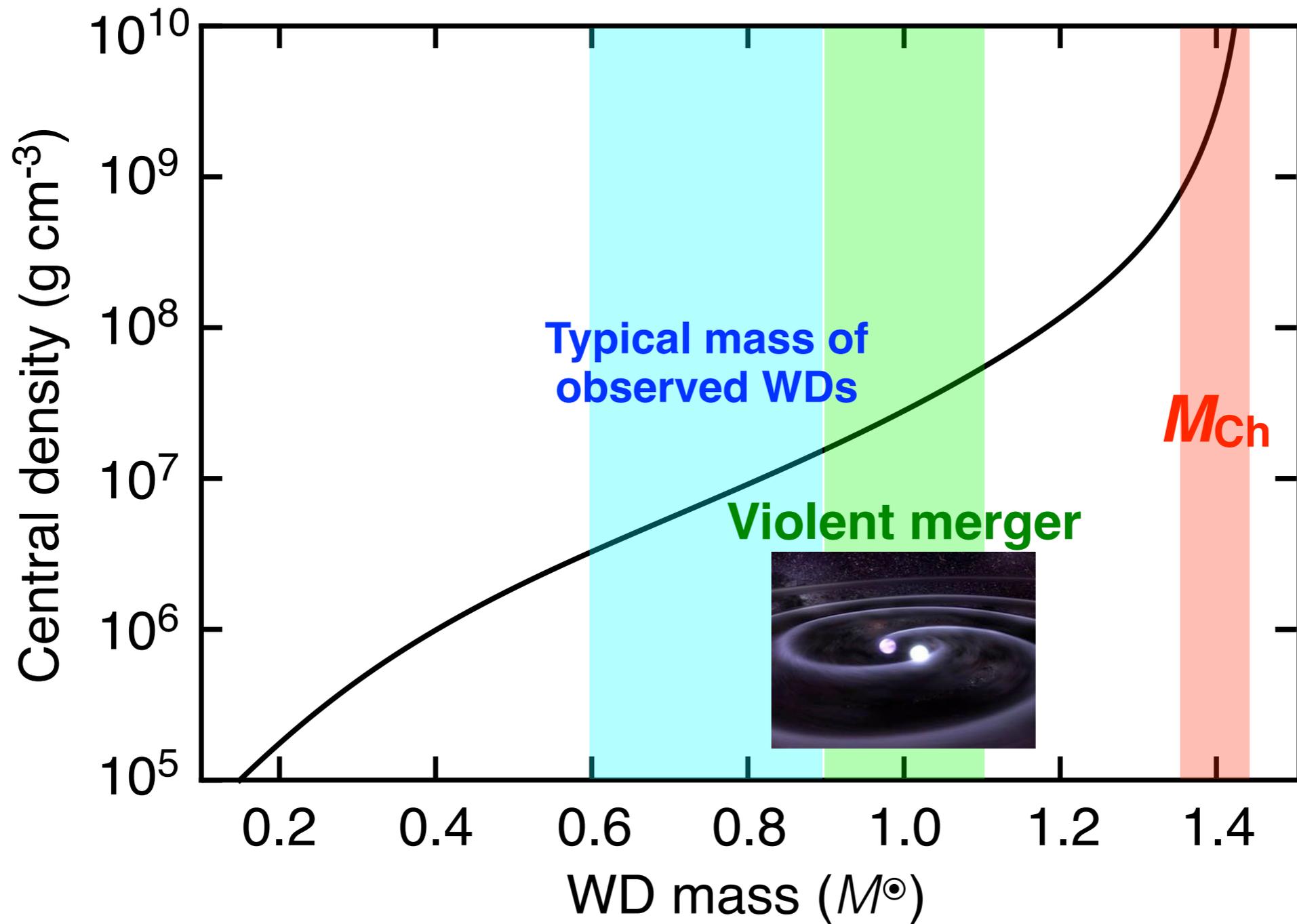
伴星からの質量降着

sub- M_{Ch} でも構わない

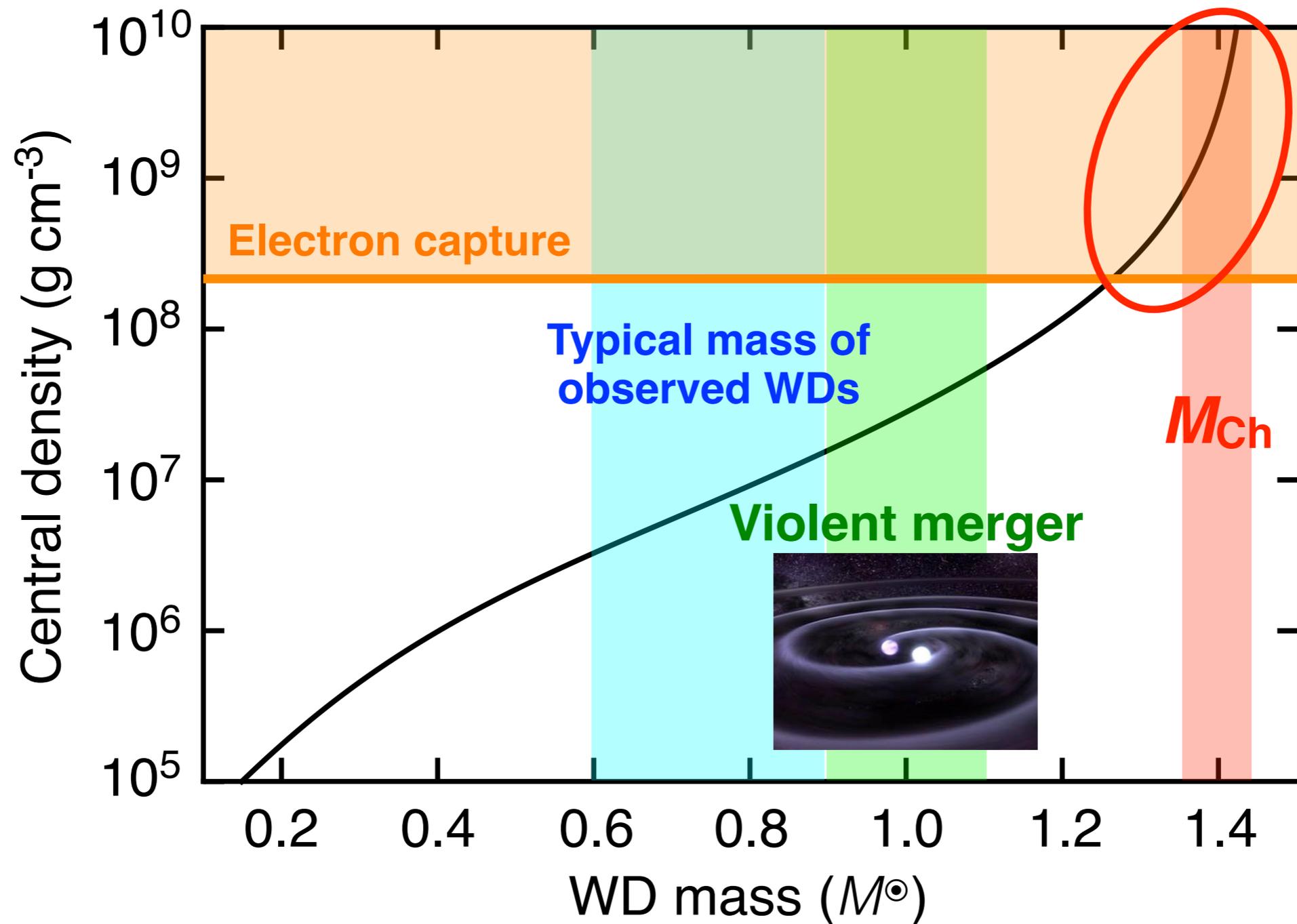
e.g., 白色矮星の合体

質量を制限できるのが 鉄族元素の組成

なぜ？

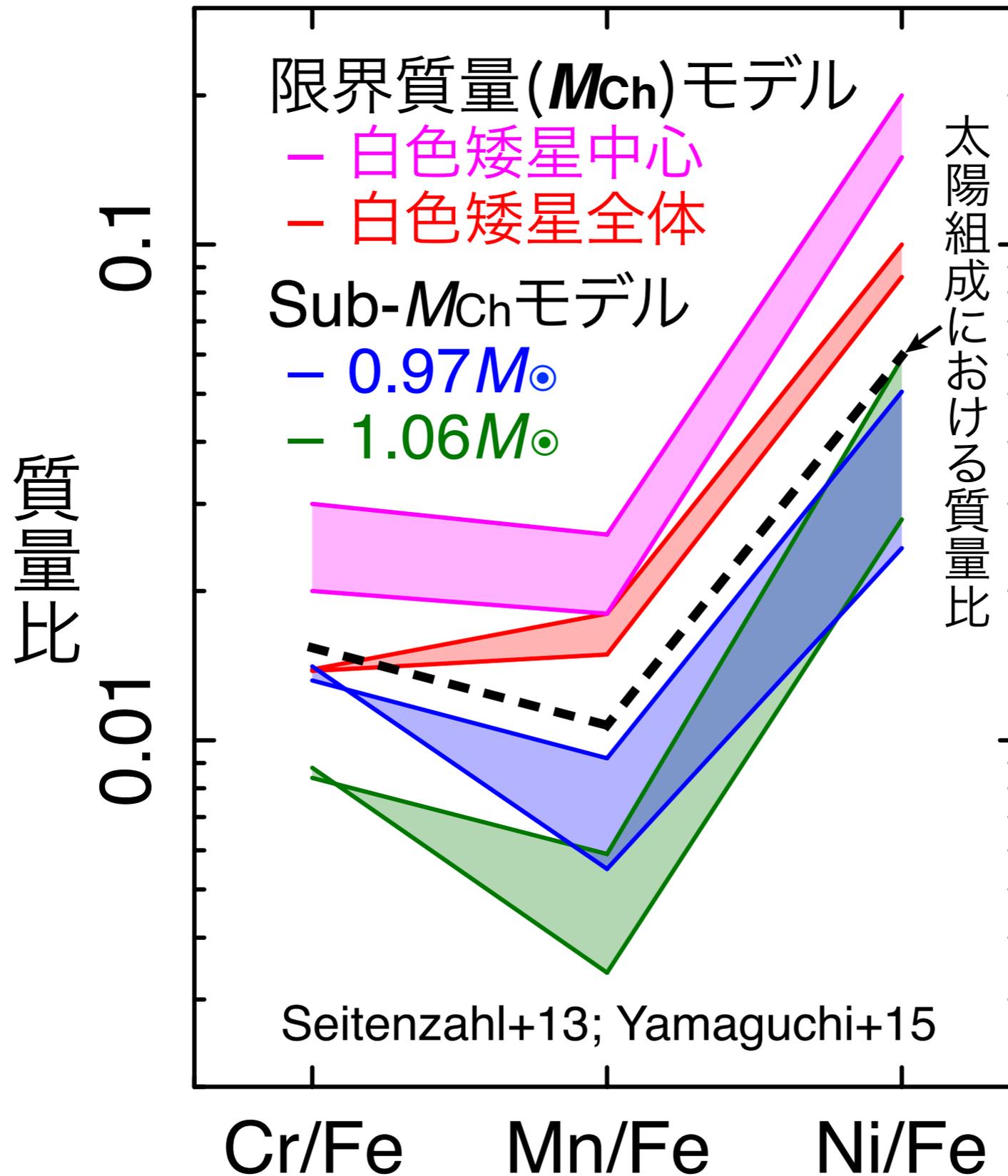


なぜ？



電子捕獲反応: $p + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$ ($\sim M_{\text{Ch}}$ WDのみ)
中性子過剰核 ^{55}Co (^{55}Mn), ^{58}Ni が効率的に生成

理論計算の一例



銀河団中の鉄族元素

- 限界質量(M_{Ch}) と sub- M_{Ch} の寄与率を宇宙スケールで制限・比較できる。
- 銀河のタイプ（星形成率など）に依存？
 - 宇宙論にとっても重要なテーマ

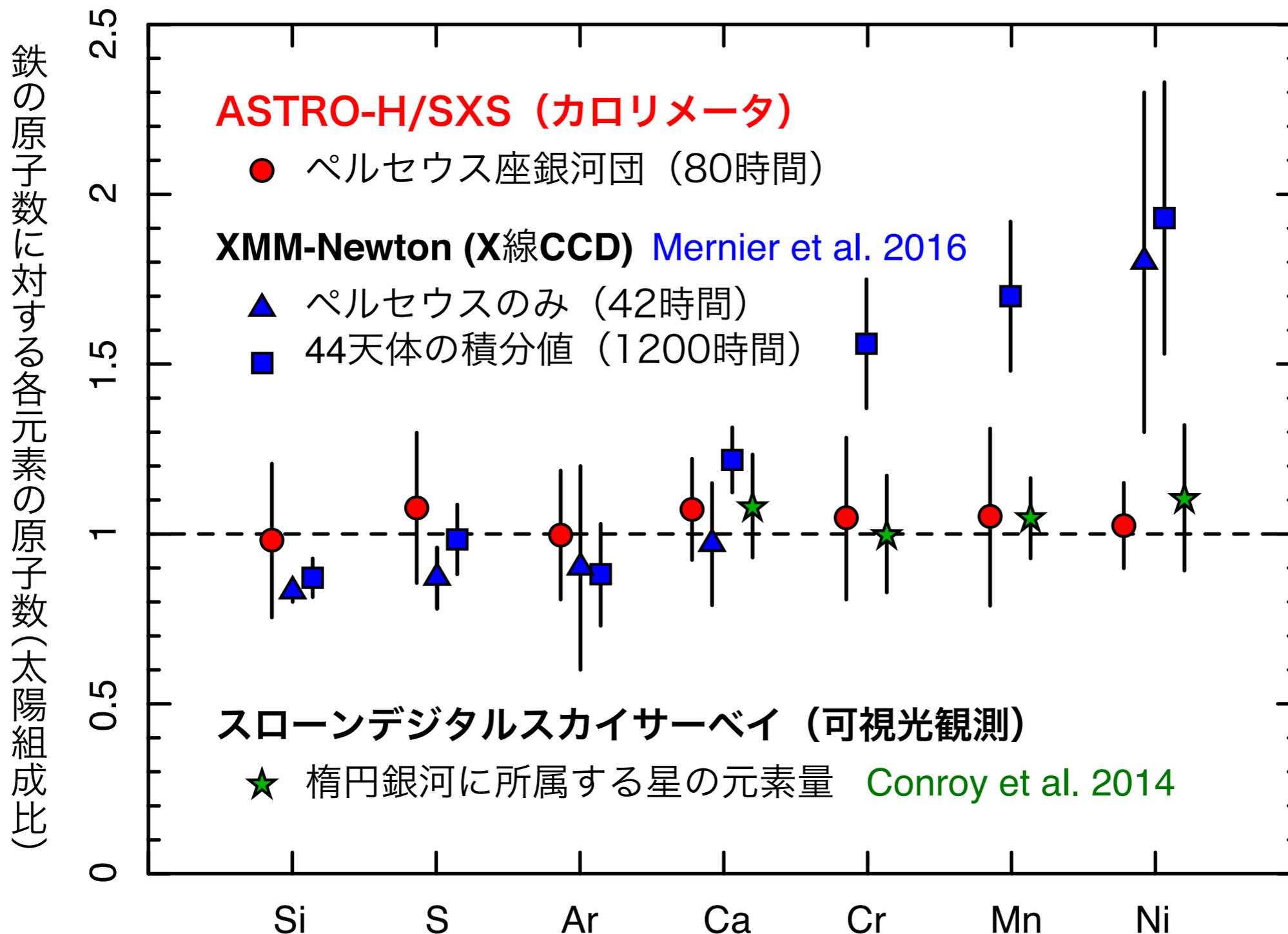
過去の銀河団観測 = 高い Ni/Fe, Mn/Fe 比

→ Ia型超新星の性質は太陽近傍と異なる？

事実であれば重大な問題。

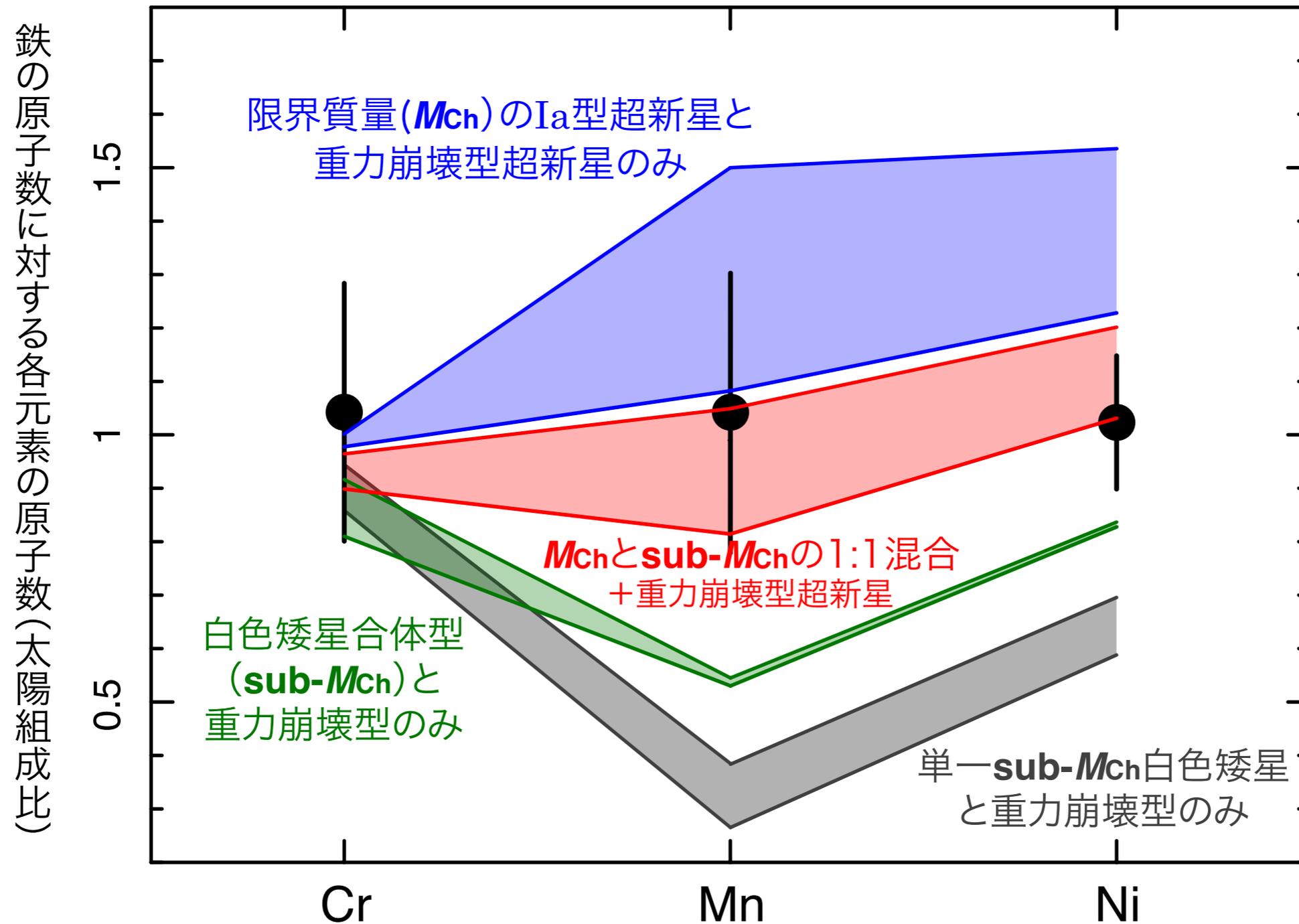
しかし従来の観測は分光能力が足りなかった

ひとみの結果が意味するところ



Ia型超新星の平均的性質は宇宙で普遍的

超新星元素合成モデルとの比較



M_{Ch} , sub- M_{Ch} 両方の寄与を示唆 (1:1程度?)

大事なものは将来の系統観測

今回の成果は幸いにして *Nature* 誌に掲載されるに至りましたが、データ量も少なく、科学的には小さな一歩に過ぎません。

論文に示した“解釈”の部分が一人歩きするのではなく、カロリメータ検出器の実力とX線天文学の今後の指針を示すメッセージとして受け取っていただけることを著者の一人として切に願っています。

(JAXA記者会見用スライド初稿より)

大事なのは将来の系統観測

今回の成果は幸いにして *Nature* 誌に掲載されるに至りましたが、データ量も少なく、科学的には小さな一歩にとどまらず、

論文に示した人歩きするのではなく、検出器の実力とX線天文学の今後の指針を示すメッセージとして受け取っていただけれることを著者の一人として切に願っています。

検閲

(JAXA記者会見用スライド初稿より)

Ia型超新星にまつわる 最新の話題

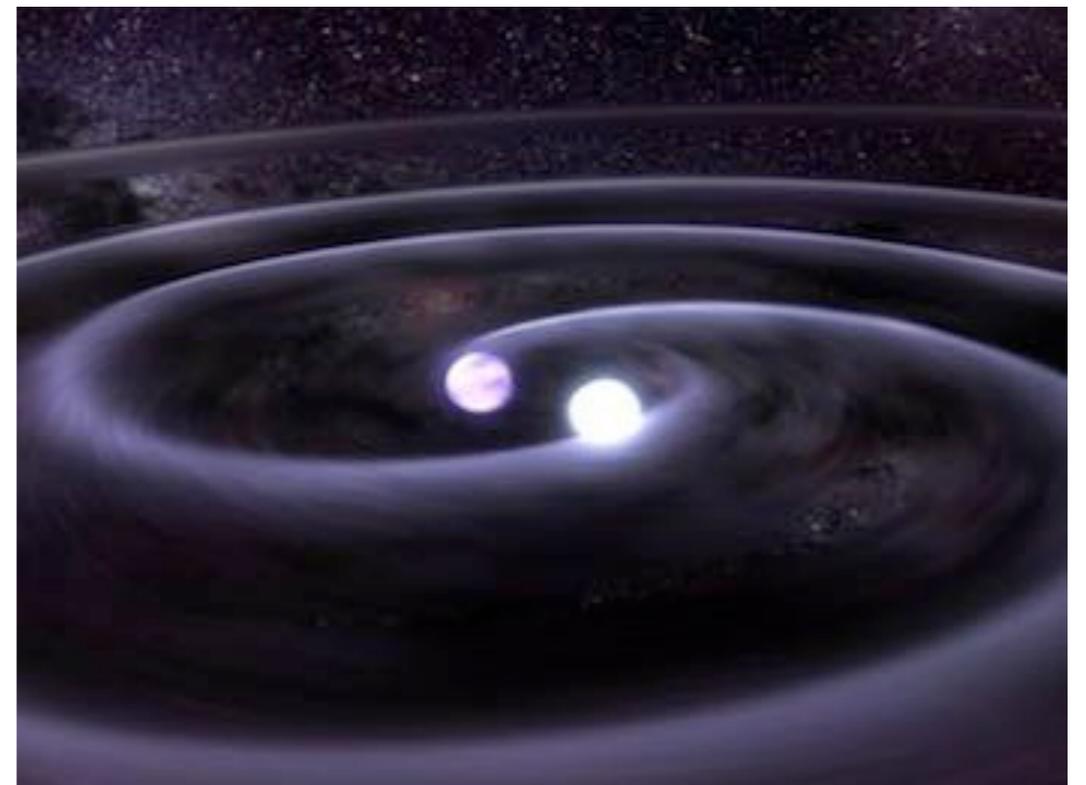
参考：第30回理論懇シンポジウム (2017.12.25-27)

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/meeting/rironkon2017/>

共著者からよくされた質問

- “Sub- M_{Ch} ” っていう場合、合体前の単一質量を指すの？ それとも合体後の合計質量を指すの？
- 単一白色矮星の平均質量が $\sim 0.7M_{\odot}$ だから
2つ合わせて大体 M_{Ch} になるんじゃないの？

その疑問にお答えします



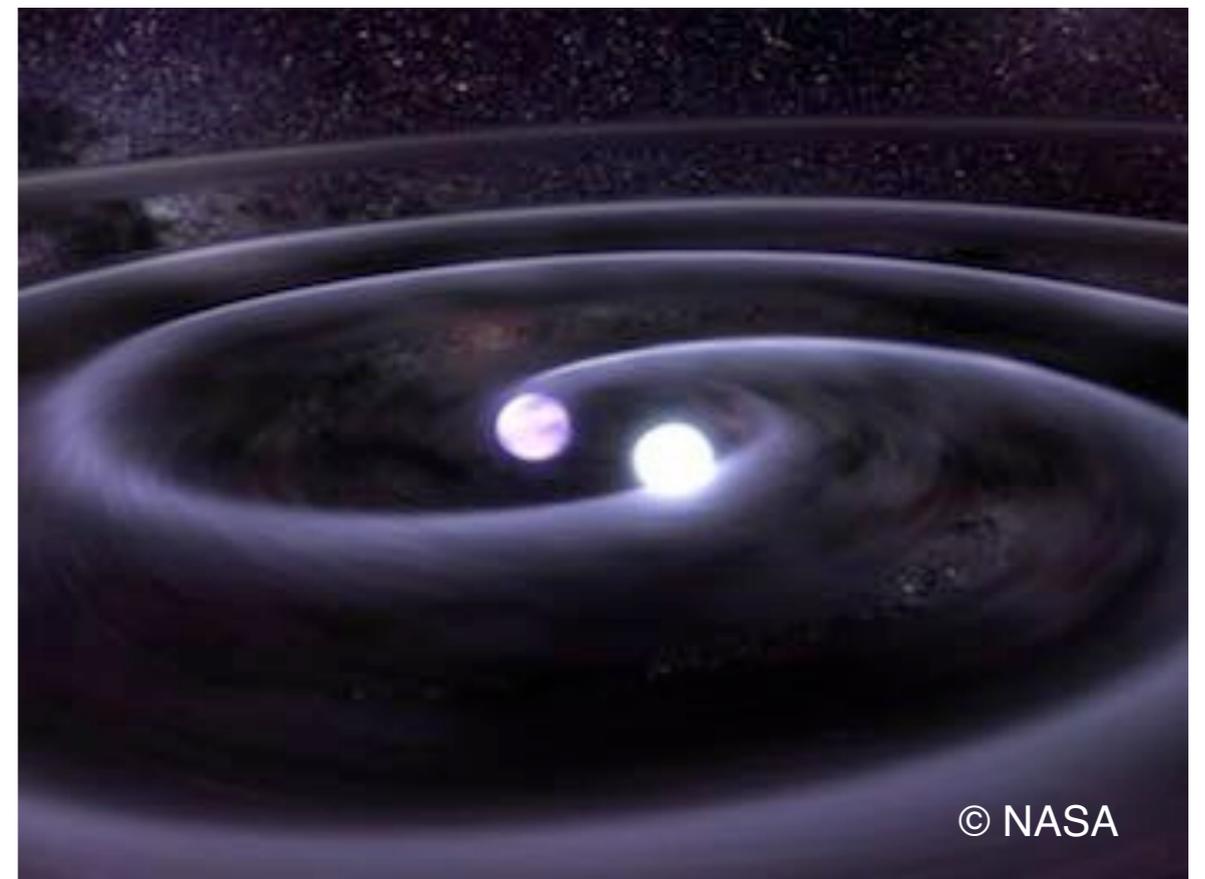
有名な SN Ia 親星問題ですが...

質量降着シナリオ
(Single Degenerate)



⇓
 $\sim M_{\text{Ch}}$

白色矮星合体シナリオ
(Double Degenerate)



⇓
 $\text{sub-}M_{\text{Ch}}$

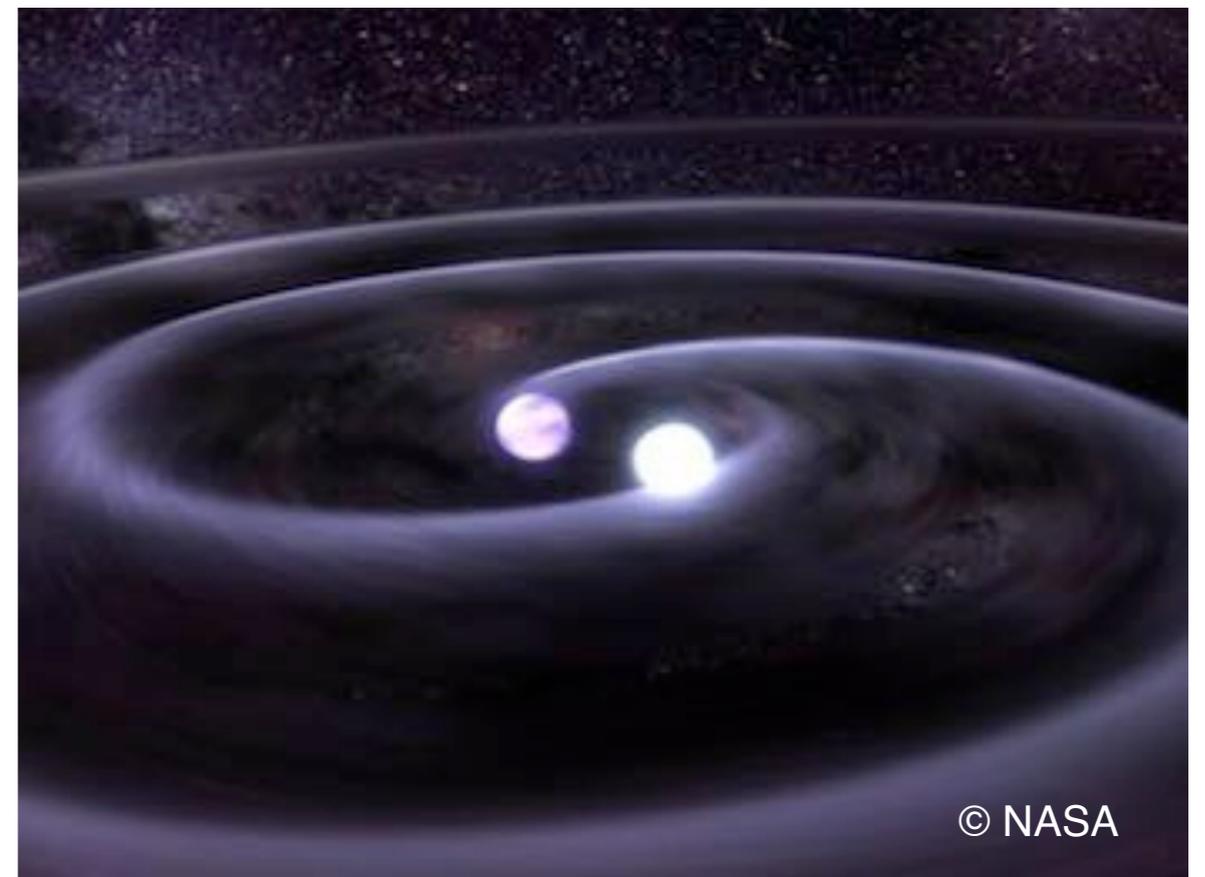
厳密に言うと...

質量降着シナリオ
(Single Degenerate)



~~II~~
 $\sim M_{\text{Ch}}$

白色矮星合体シナリオ
(Double Degenerate)



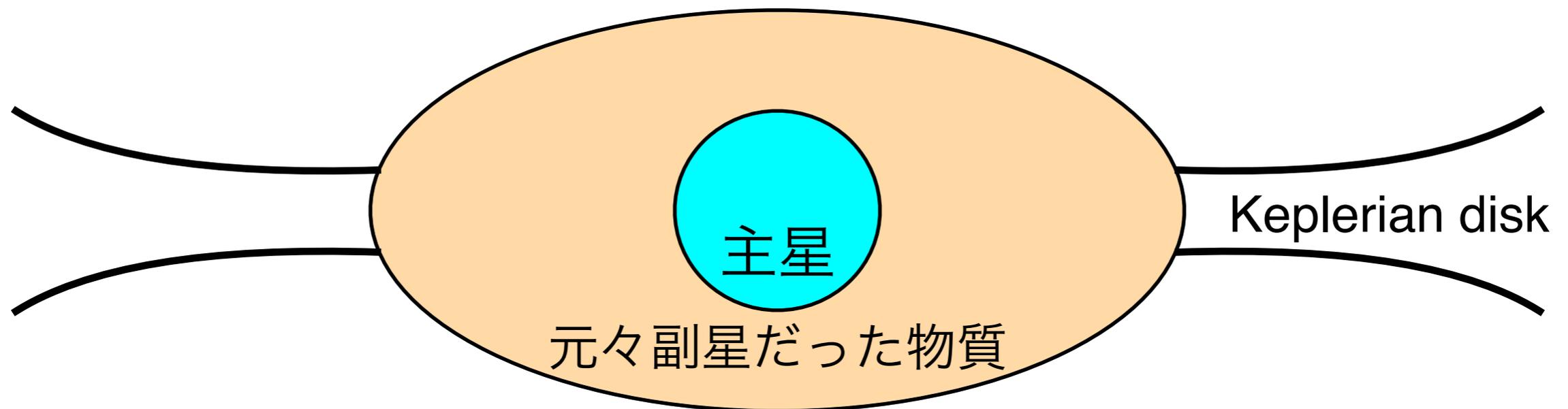
~~II~~
sub- M_{Ch}

白色矮星合体(DD)シナリオの変遷

① 1980頃~2000年過ぎまで：

“Classical DD” (e.g., Webbink 1984)

当初は「2つ合わせて $> M_{\text{Ch}}$ 」だと思われていた
→ 副星成分の速い降着 ($\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$)

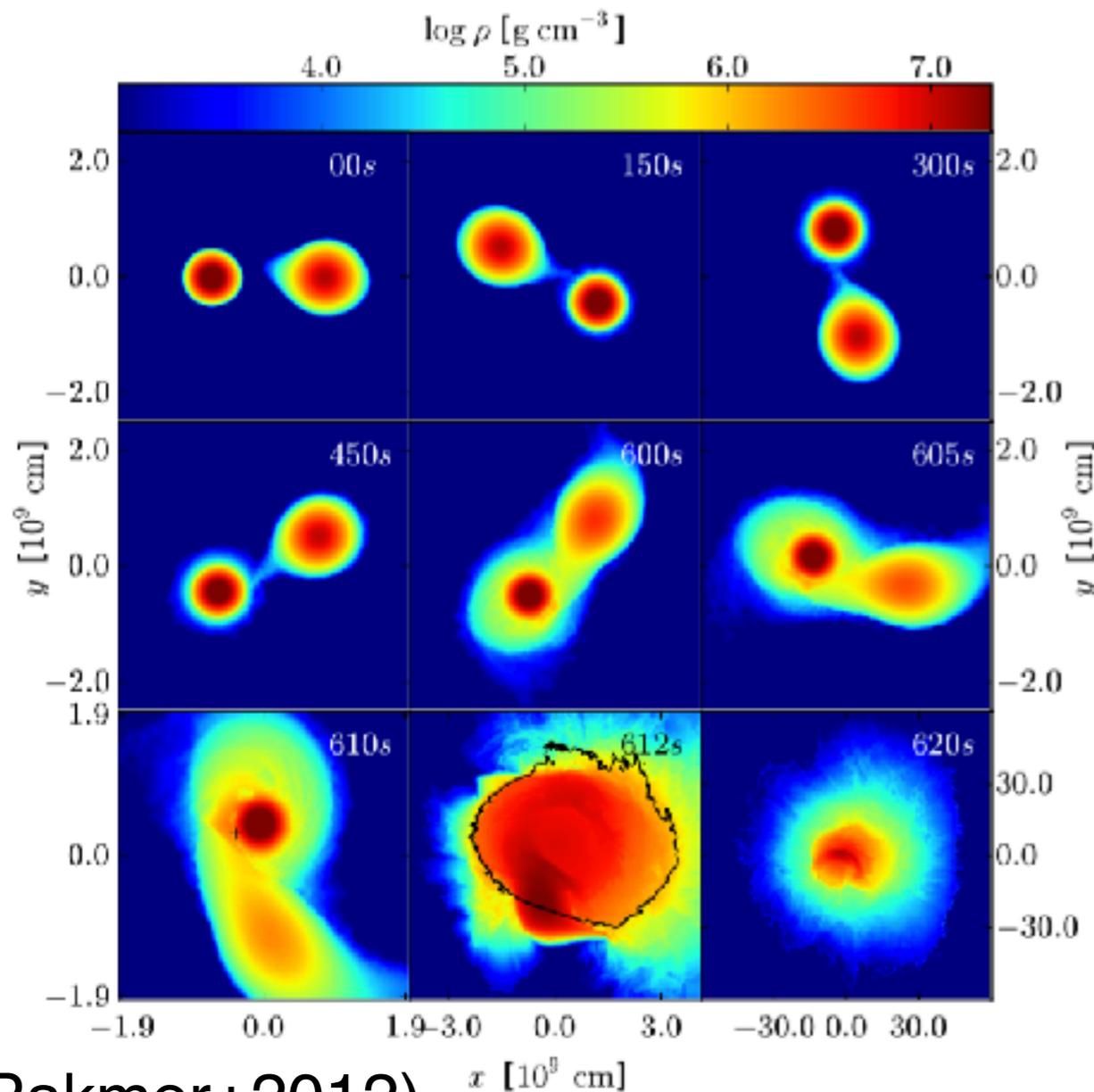


O-Ne-Mg WD を経て中性子星に崩壊 (Saio+1985)

白色矮星合体(DD)シナリオの変遷

② 2000年過ぎ~つい最近まで：

“Violent merger” (e.g., Pakmor+2010, 2012)



合体開始後 ~100 s で爆発
SNの明るさや元素合成は
主星の質量で決まる。

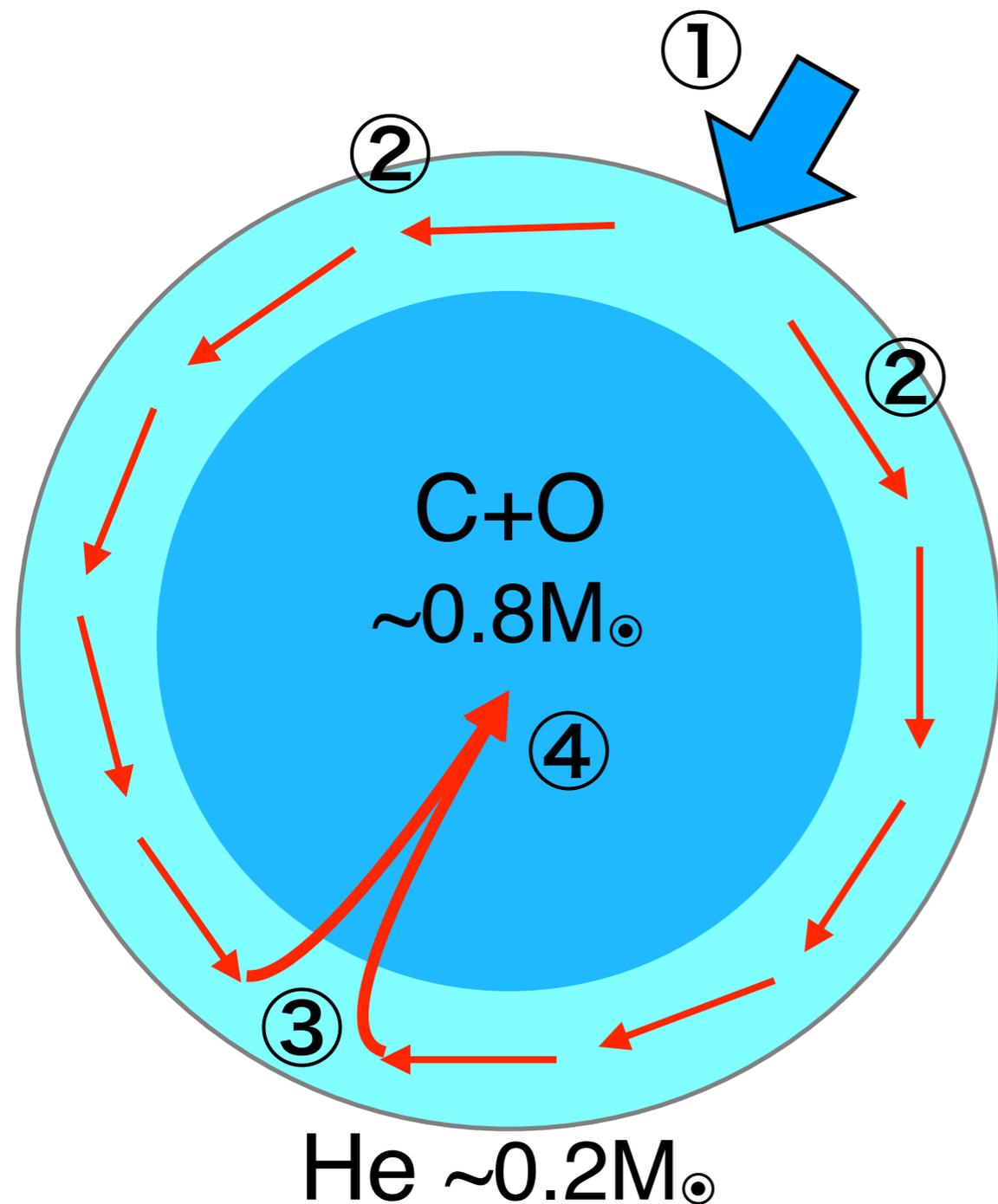
標準的な明るさの SN Ia は
主星 $\sim 1.1M_{\odot}$, 副星 $\sim 0.9M_{\odot}$

→ SN rate の説明困難

→ イジェクタ総質量 $\sim 2M_{\odot}$

白色矮星合体(DD)シナリオの変遷

質量降着(SD) sub-M_{ch} 説



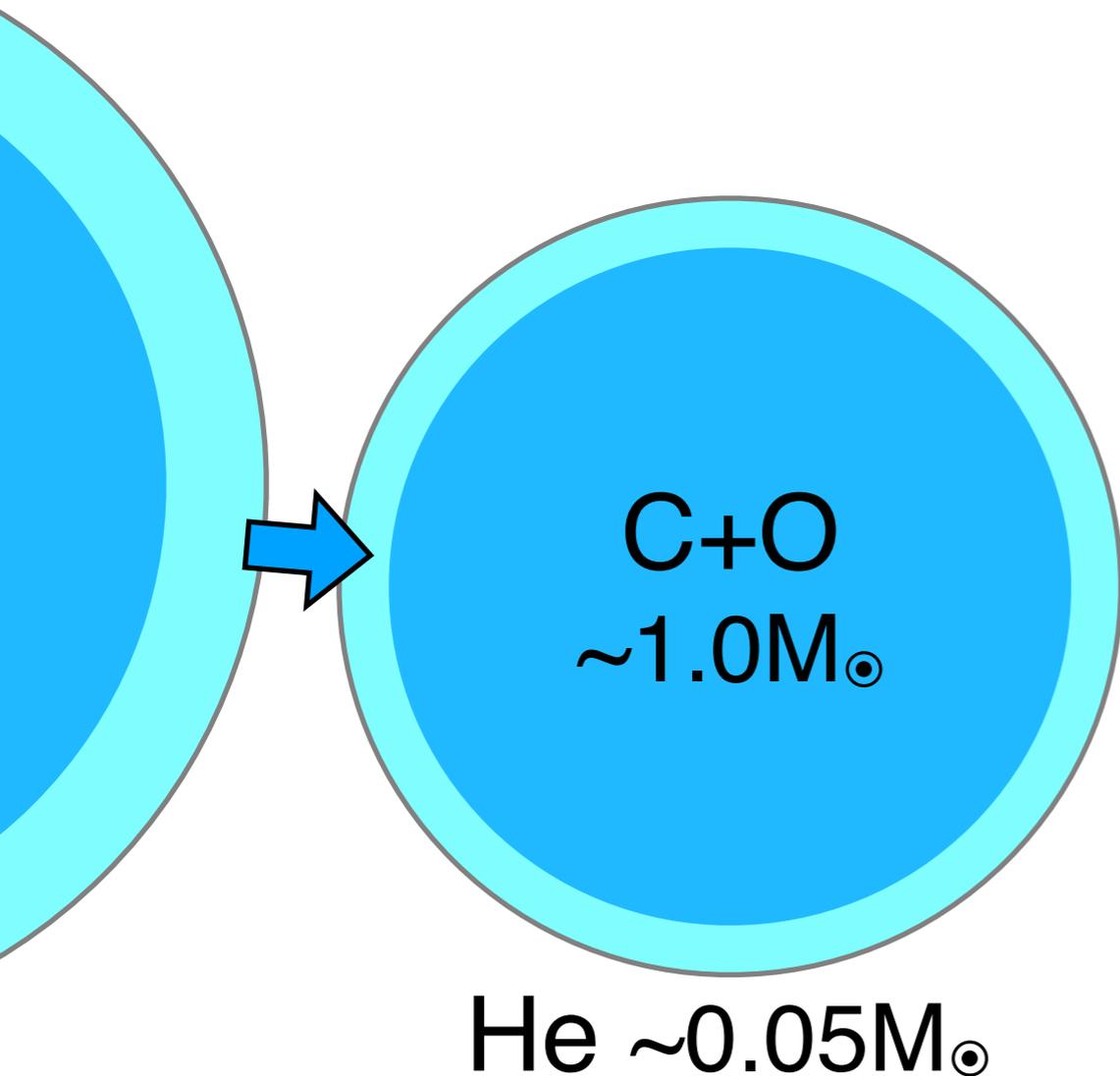
“Double detonation”
(e.g., Woosley+2010)

- ① 非縮退伴星から物質降着
→ He detonation開始
- ② He層を燃焼波が伝播
- ③ 着火点の裏側で収束、
COコアに侵入
- ④ WD中心からCO燃焼開始
→ WD全体が爆発

白色矮星合体(DD)シナリオの変遷

③ 最新理論 (DDの完成形?)

“Dynamically-driven double degenerate double detonation” (DDDDDD: e.g., Shen+2018)



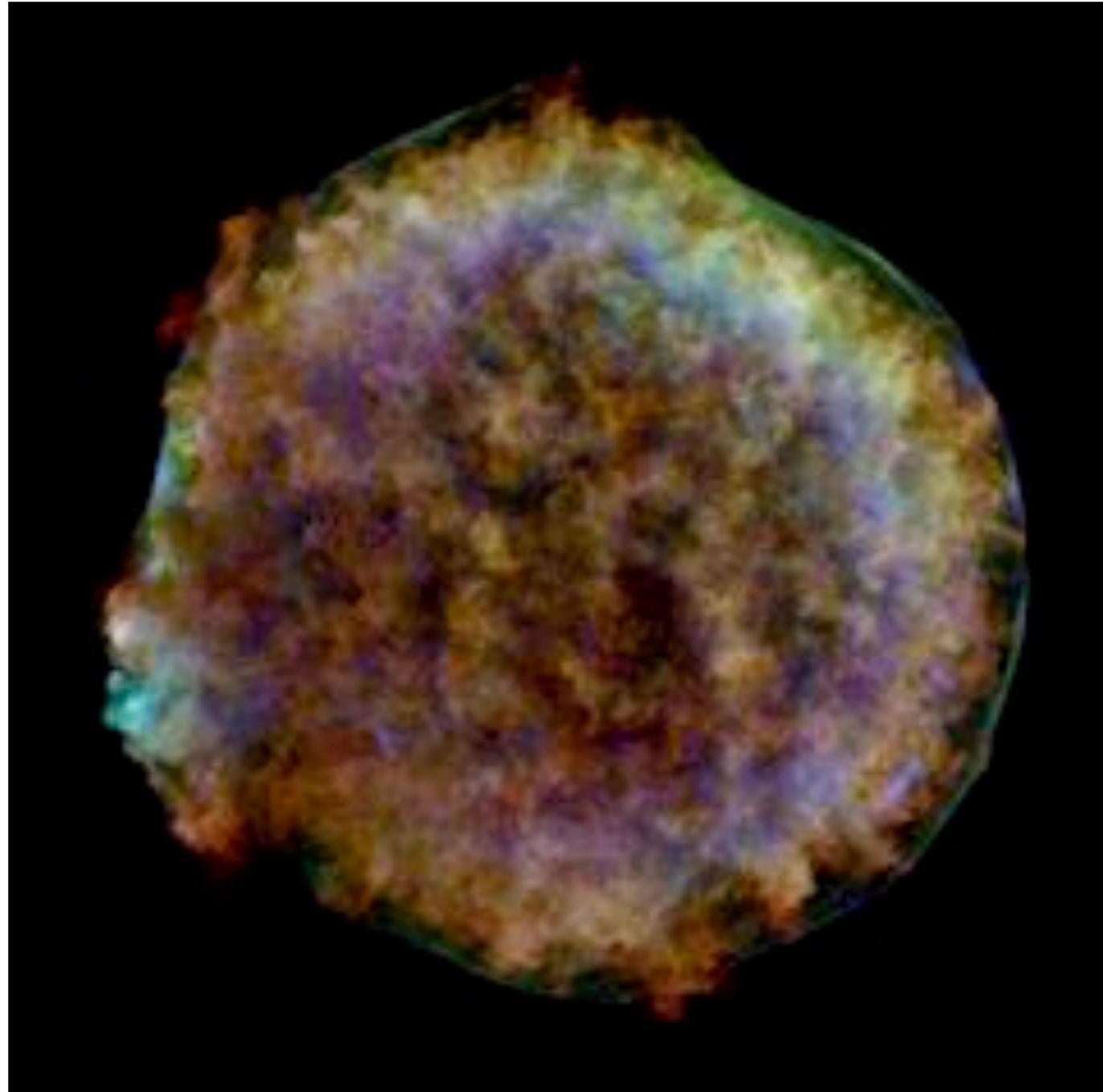
C+O WDもHeの薄皮を持つ

SDのdouble detonationと同じ原理で主星が爆発

副星(WD)は残存

→ イジェクタも sub- M_{Ch}

従来のDDシナリオの諸問題も解決



球対称なイジェクタ分布も説明できる

というわけで...

- “Sub- M_{Ch} ”って言った場合、合体前の単一質量を指すの？ それとも合体後の合計質量を指すの？
 - (現在では) 合体前の主星単一質量が正解。
但し時々例外あり。内容をよく読むべし。
- 単一白色矮星の平均質量が $\sim 0.7M_{\odot}$ 。だから
2つ合わせて大体 M_{Ch} になるんじゃないの？
 - そもそも2つが完全に合体するわけではないので、合計質量は意味を持たない。

まとめ

- ペルセウス座銀河団の元素組成を精密測定
- 太陽組成に一致 (鉄族元素では初)
- Ia型超新星の平均的性質・ポピュレーションは母銀河のタイプによらなさそう
(将来の系統観測が必須)
- Ia型超新星の理解はここ数年で著しく進展
- XARMでは天体カテゴリの枠にとらわれない有益な情報共有・共同研究を促進したい

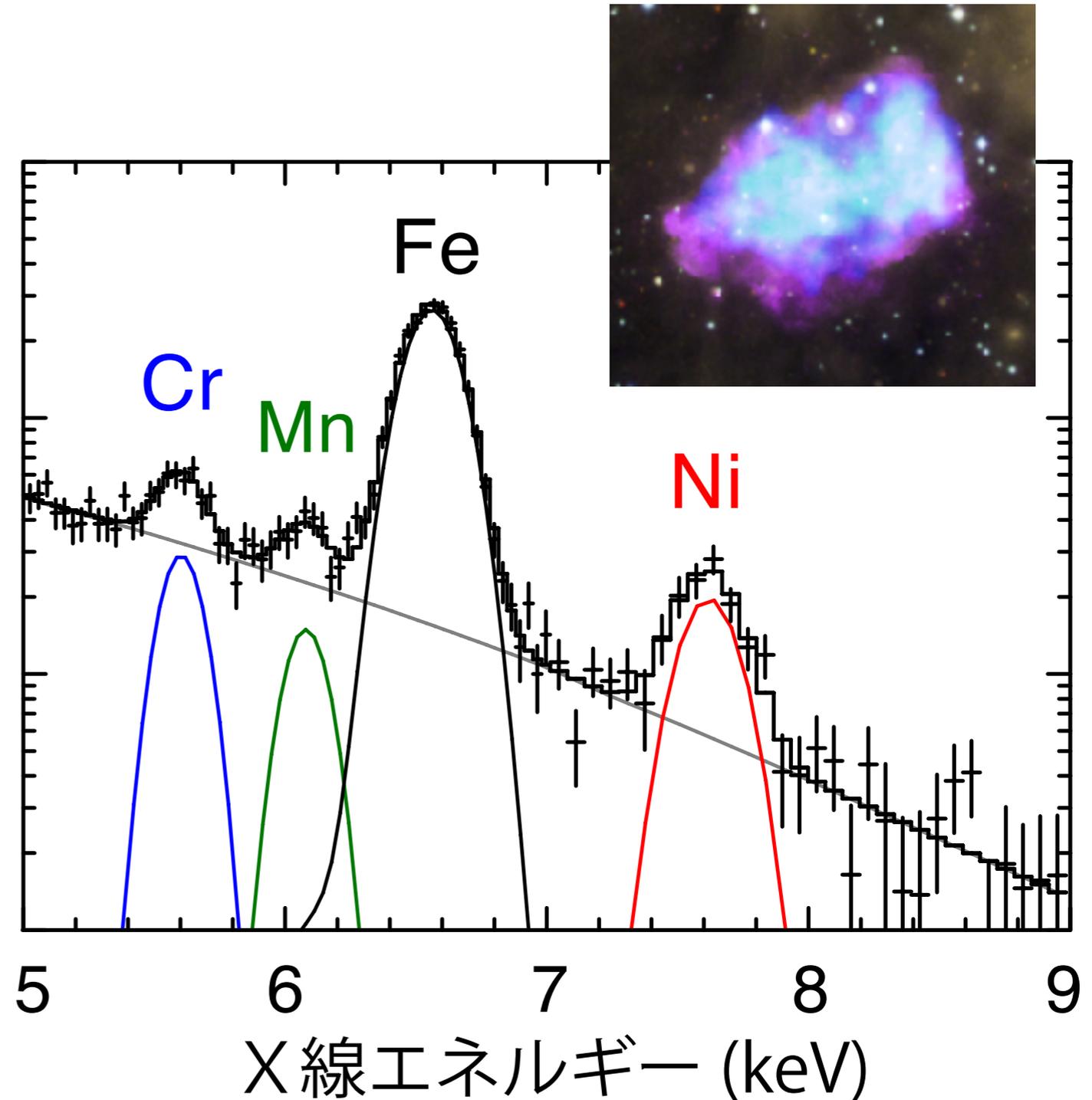
「1:1」は信じないで！

Ia型超新星残骸 3C 397:

M_{Ch} にしても異様に高い
Ni/Fe, Mn/Fe比
(Yamaguchi+2015)

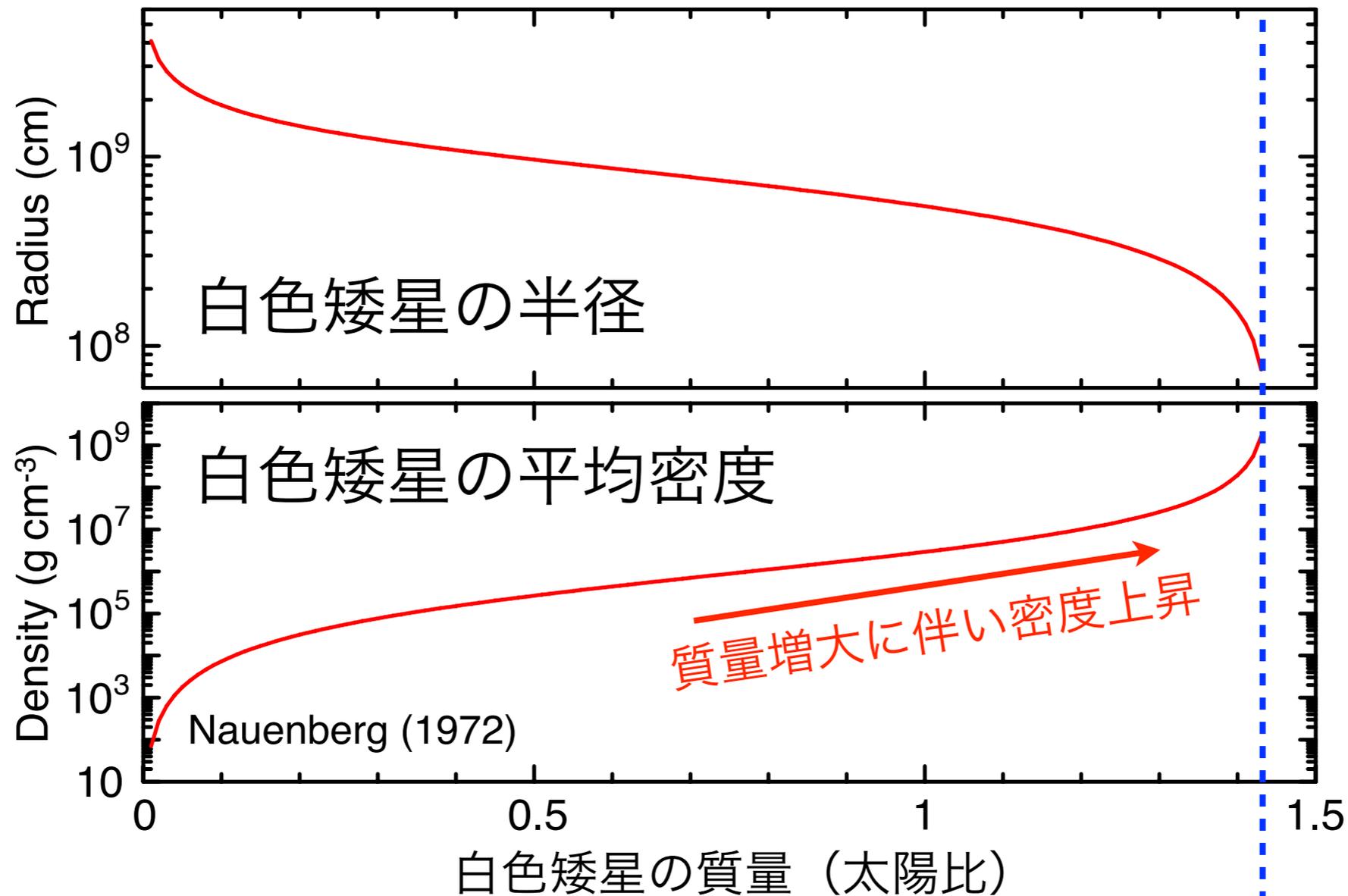
$\sim M_{\text{Ch}}$ WD の中心密度は
従来の想定 ($2 \times 10^9 \text{ g/cm}^3$)
より2~3倍高い？

(Dave+2017, Leung &
Nomoto 2017)



Ia型超新星にまつわる問題

爆発に至る経路・爆発時の質量が不明

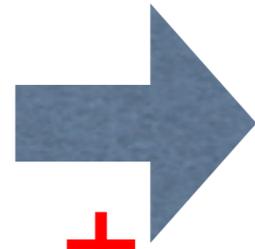
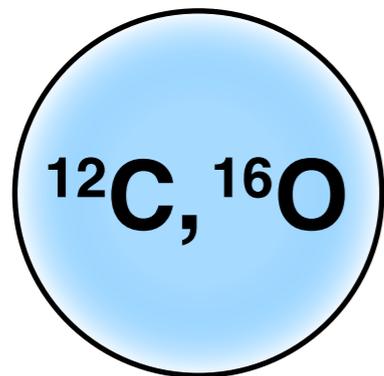


チャンドラセカール限界質量 (M_{Ch})

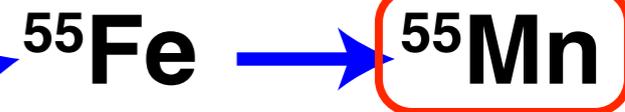
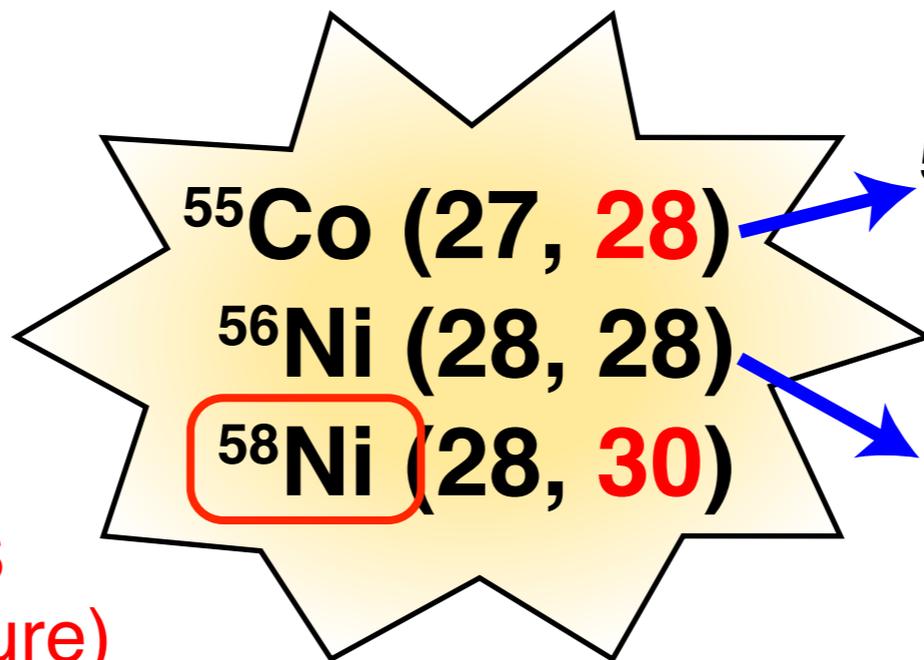
→ 自己重力に耐えきれず爆発？

Ia型超新星の元素合成

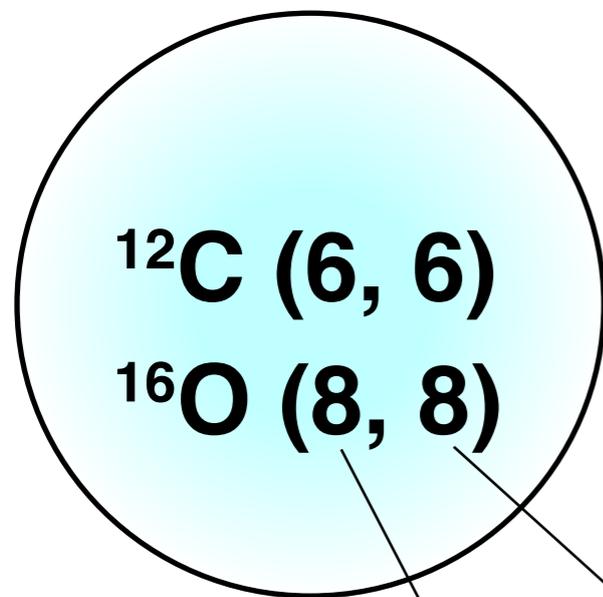
near- M_{Ch}



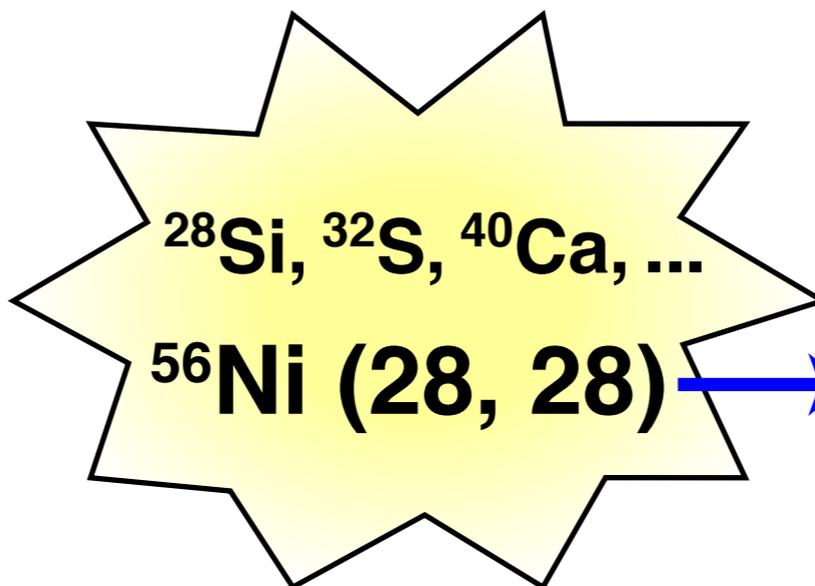
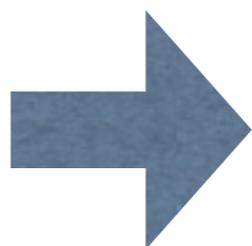
+
neutrons
(electron capture)



sub- M_{Ch}

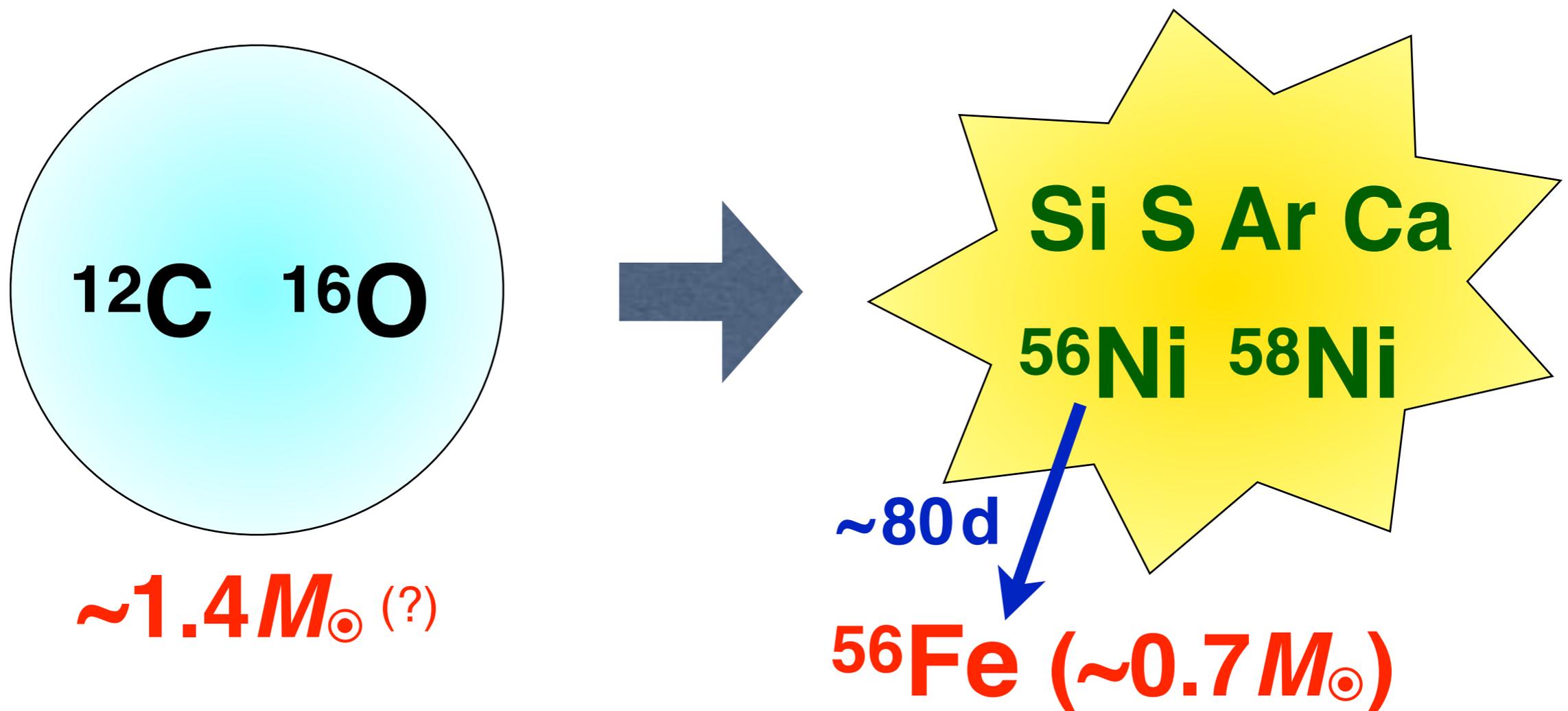


proton# neutron#



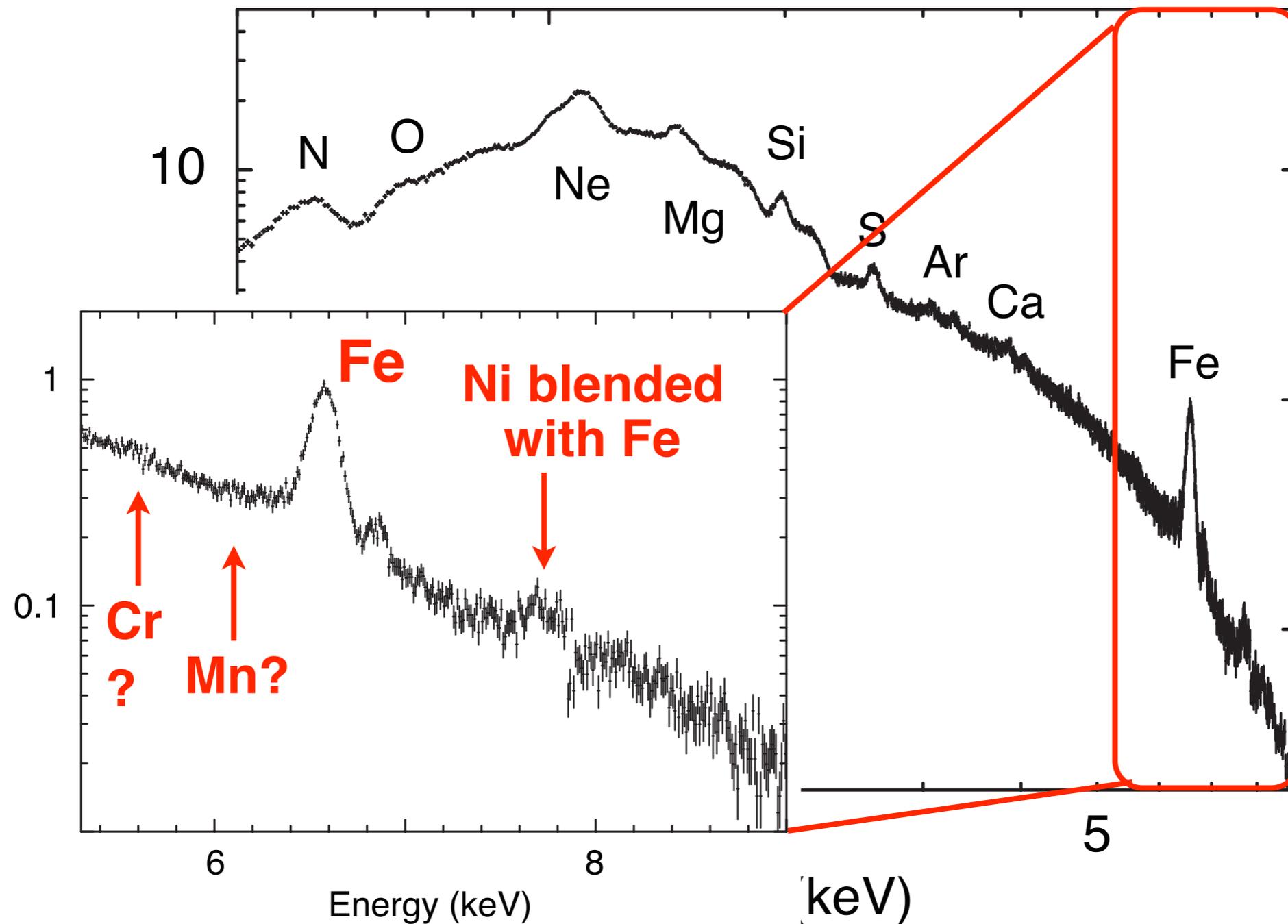
Ni/Fe や Mn/Fe が判別の鍵

Explosive nucleosynthesis



Regime	Physical conditions	Main products (after nuclear decays, leftover fuel in brackets)
Explosive C-Ne burning	$T \lesssim 3.2 \text{ GK}$ (1 GK = 10^9 K)	[C, Ne], O, Ne, Mg, Si
Explosive O burning	$3.2 \lesssim T \lesssim 4.5 \text{ GK}$	[O], Si, S
Explosive Si burning	$4.5 \lesssim T \lesssim 5.5 \text{ GK}$	[Si, S], Ar, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni
NSE	$T \gtrsim 5.5 \text{ GK}$, $\rho \lesssim 10^8 \text{ g cm}^{-3}$	Fe, Ni
n-rich NSE	$T \gtrsim 5.5 \text{ GK}$, $\rho \gtrsim 10^8 \text{ g cm}^{-3}$	Cr, Mn, Fe, Ni

従来(CCD)の銀河団研究



- CrやMnの検出は限定的 (Tamura+09, Mernier+16)
- 強い輝線(O/Si/Fe)から SN Ia/cc比の導出(Sato+07)