

# X線スーパーバーストに対する 炭素燃焼の核反応率の影響

土肥 明（広大・理研）

共同研究者

谷口億宇（香川高専）、西村信哉（理研）、祖谷元（理研）、木村真明（北大・理研）

RIBFミニワークショップ 「星の進化と爆発天体における核反応の物理」 on 2023/02/20

# [RIBF ULIC MiniWS039] 星の進化と爆発天体における核反応の物理

20-21 February 2023  
RIKEN Wako campus  
Asia/Tokyo timezone

Overview

Call for Abstracts

Registration

Timetable

Participant List

## 【趣旨】

星の進化や爆発現象において、核反応は主要なエネルギー源であり、ここで起こる元素変換は宇宙の物質進化の歴史を理解する上で重要である。爆発天体での元素合成では不安定核が関わるため、その解明にRIBF実験の役割は大きい。しかし、宇宙の元素合成では膨大な種類の反応が関与するため、実験計画の策定には現実の天体環境でのそれぞれの反応の役割を理解する必要がある。また、断面積の小さい反応も含むことから、その包括的な解明には理論計算も必要となる。

本会では、超新星爆発やX線バーストでの爆発的要素合成（速い陽子捕獲要素合成を含む）に着目し、軽めの不安定核から特に鉄より重い陽子過剰核まで、宇宙物理の研究で重要な核反応について、現状の原子核実験や理論の知見に基づいて将来の実験計画の方向性を議論する。

- 不安定核を含む原子核の構造や反応機構
- 星の燃焼過程や爆発天体での元素合成に関する天体核反応

# 導入

# X線バースト (XRB)

Companion

L1

Accreting Gas

Neutron Star

Accretion Disk

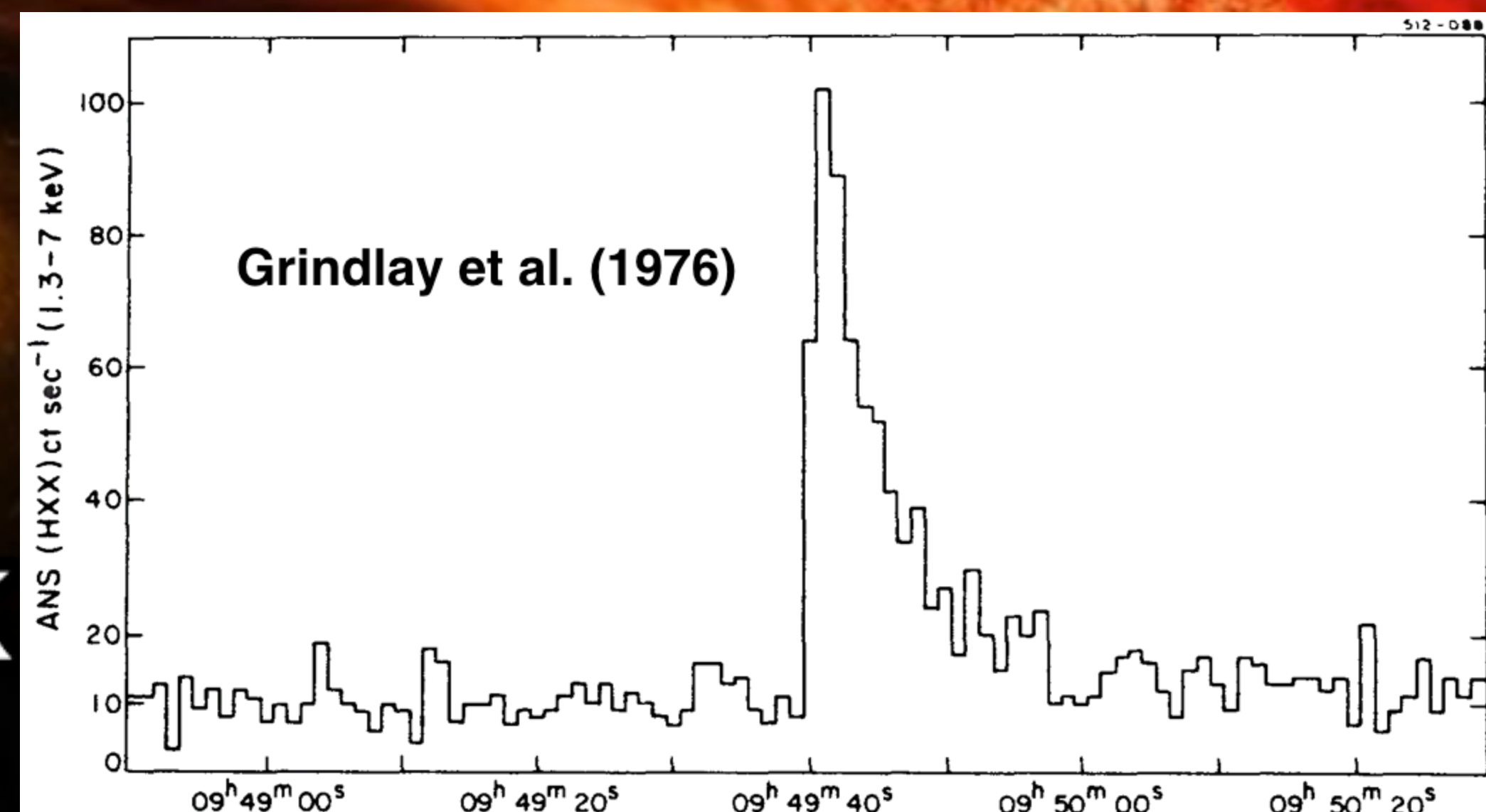


Image:NASA/CXC/M. WEISS

# スーパーバースト (SB)

For reviews, see e.g., Iwakiri et al., PASJ 73, 1405 (2021)

- 観測からわかっていること

XRBの継続時間 $\tau$  (或いはエネルギー) が通常の約1000倍

- 推測されていること

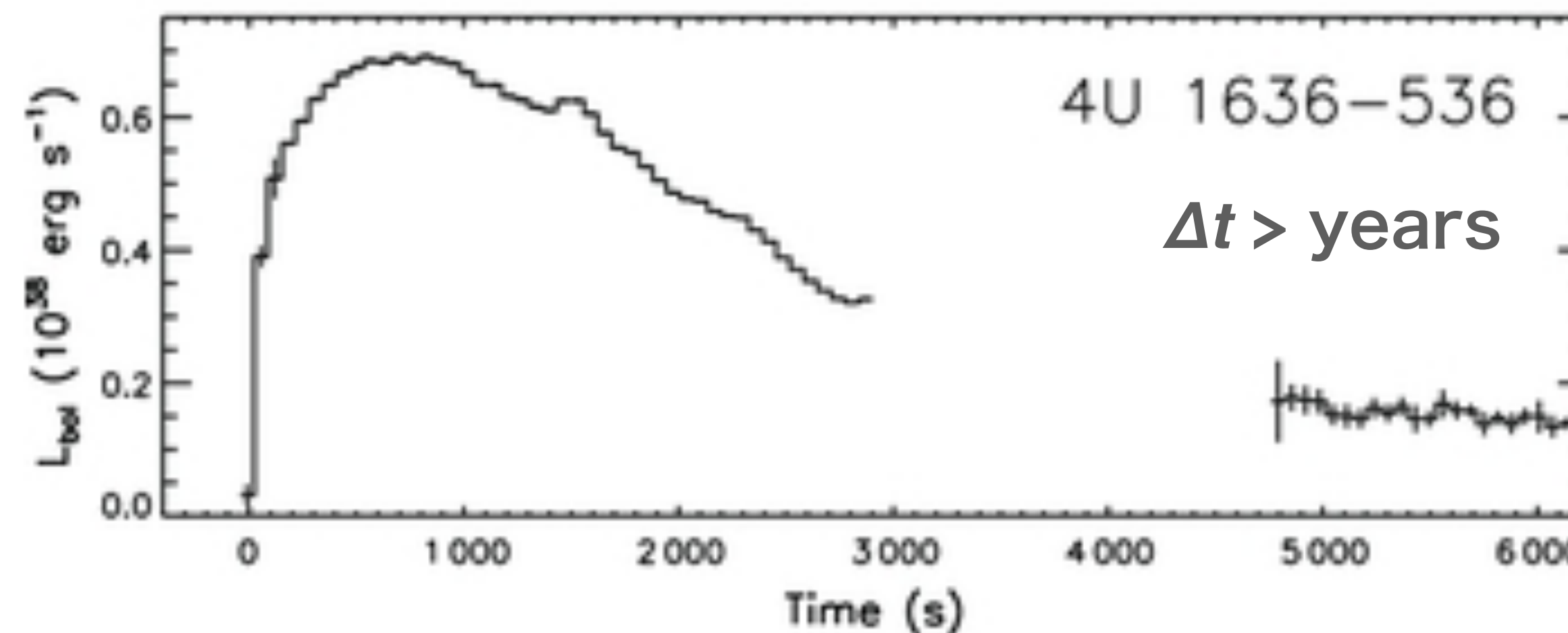
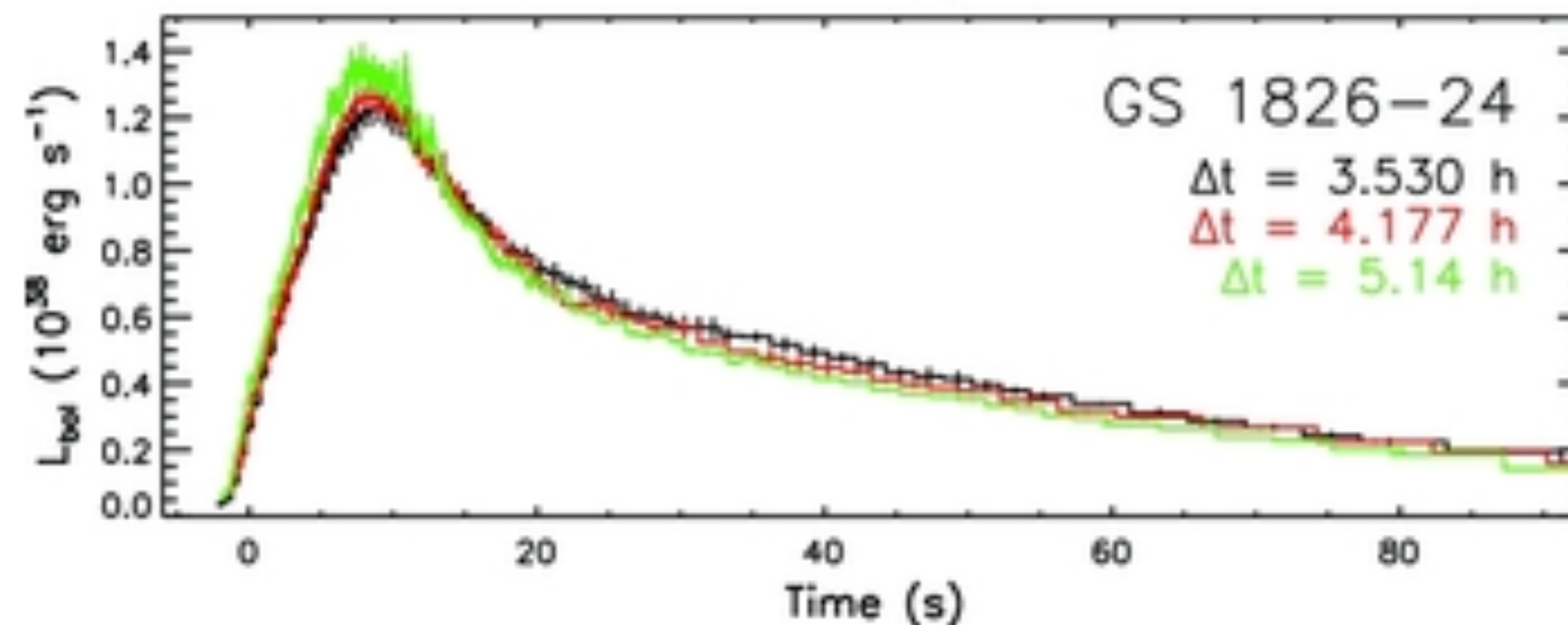
Cumming & Bildsten ApJ 559, L127 (2001)

Cumming ApJ 595, 1077 (2003)

再帰時間 ( $\Delta t_{SB}$ ) が年オーダー

燃料は $^{12}\text{C}$  (通常はHやHe)

\* Heがゆっくり堆積して厚みを増した状態で爆発したという Intermediate Duration Burst説もあり



Galloway & Keek ASSL 461, 209 (2021)

# 再帰時間 $\Delta t$ に着目したSBの議論

XRBの光度曲線の大部分は、様々な元素合成による熱で支配されるので複雑。

しかし、 $\Delta t$ に関しては $\tau \ll \Delta t$ より燃料（SBの場合は $^{12}\text{C}$ ）点火時の性質で決まる。

## ○ 重要なパラメータ

①  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ の反応率 ← 核物理で決まる

② 燃料の圧力 $P_c$ 、その割合 $X_c$

Cumming, ApJ 595, 1077 (2003)

Cumming et al., ApJ 646, 429 (2006)

③ 降着率  $\dot{M}_9 \equiv \dot{M}/(10^{-9}M_\odot \text{ yr}^{-1})$

④ 中性子星 (NS) の状態方程式 (EOS) ・ 温度 ← 核物理で決まる

## 本研究の目的

核子相互作用の不定性が $\Delta t_{\text{SB}}$ に及ぼす影響を調べる。

# H/He混合燃焼を トリガーとするXRFBに関して

# SBの発生シナリオとXRBプロファイル 1

``H`` : 太陽系likeな組成

``C`` : C-Feプラズマ ( $X_C=0.2$ )

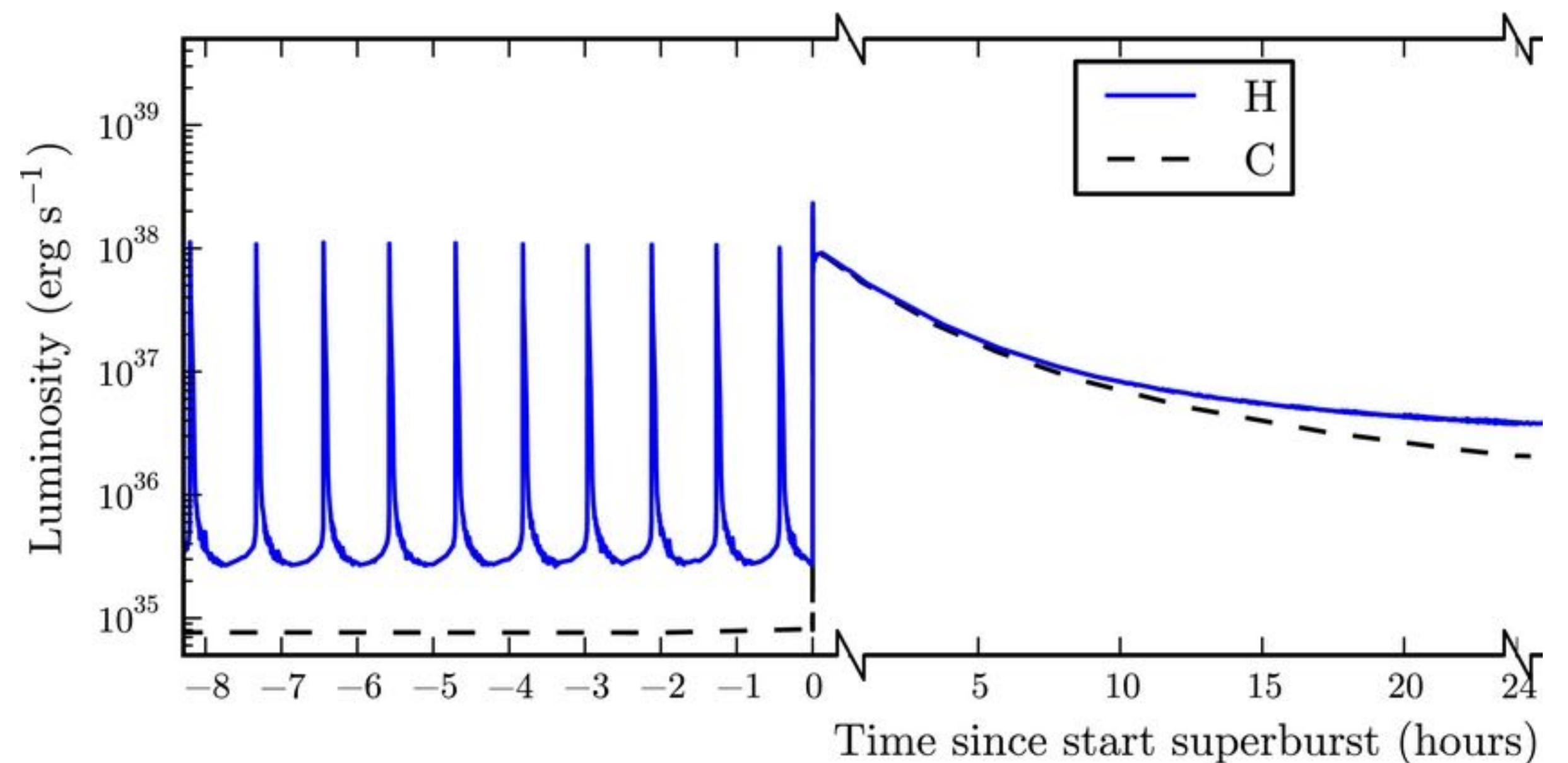
Keek & Heger ApJ 743,189 (2011) for ``C`` model

1. 通常のXRBで $3\alpha$ が発生でC生成  
成→対流でNS内部に侵入

議論に必要なもの：通常のH/He混合燃焼

XRBプロファイル (multi-zoneモデル)

2. 数千～数万発のXRBで点火する  
ほどのCが奥に生成 → SB

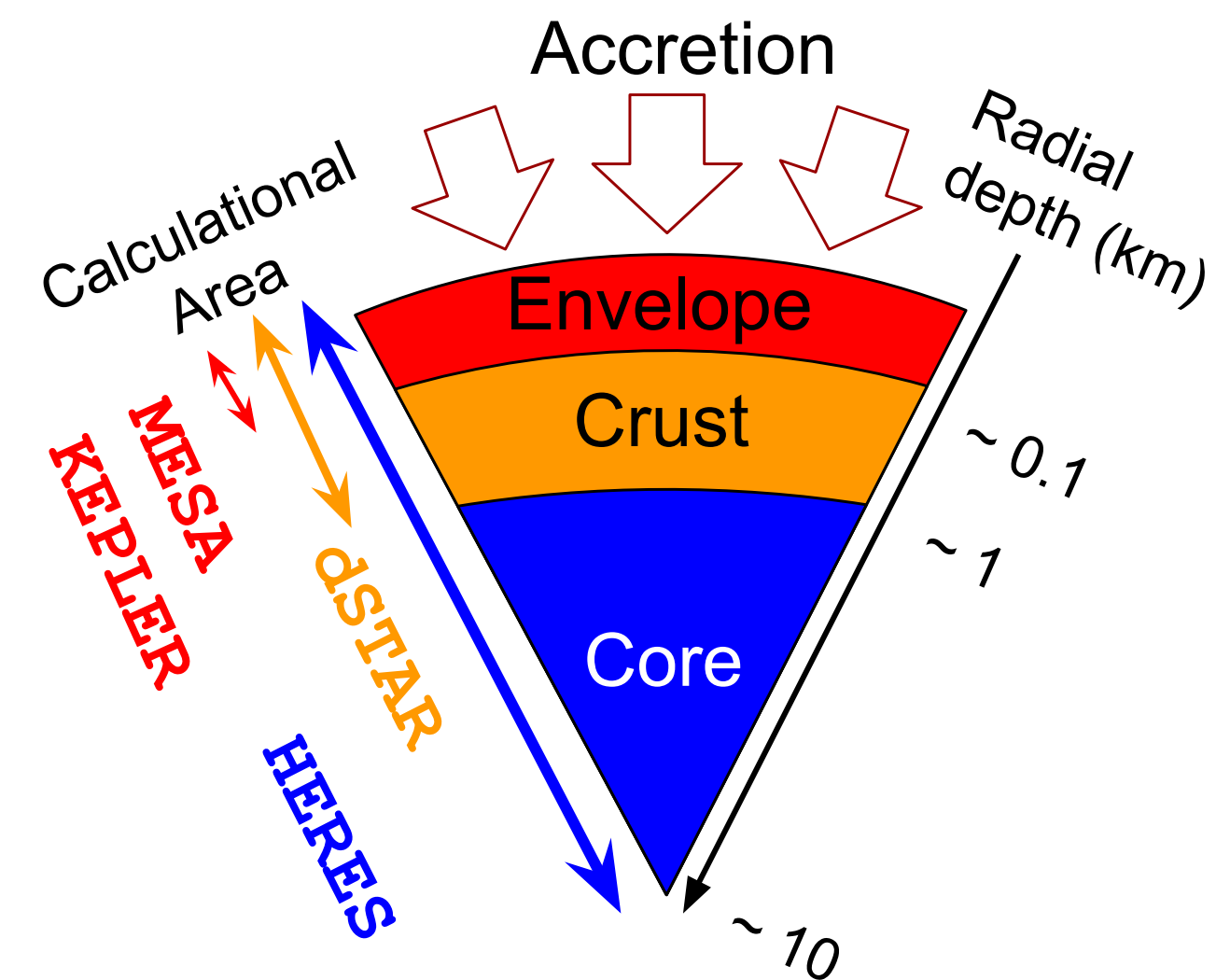


Keek, Heger, in't Zand, ApJ 752,150 (2012)



# Multi-zone XRB モデル : HERES

HERES : Hydrostatic Evolution of Relativistic Stars



核燃焼や対流を含むNSの熱的進化の計算モデル

AD et al., PTEP 2020, 033E02 (2020)

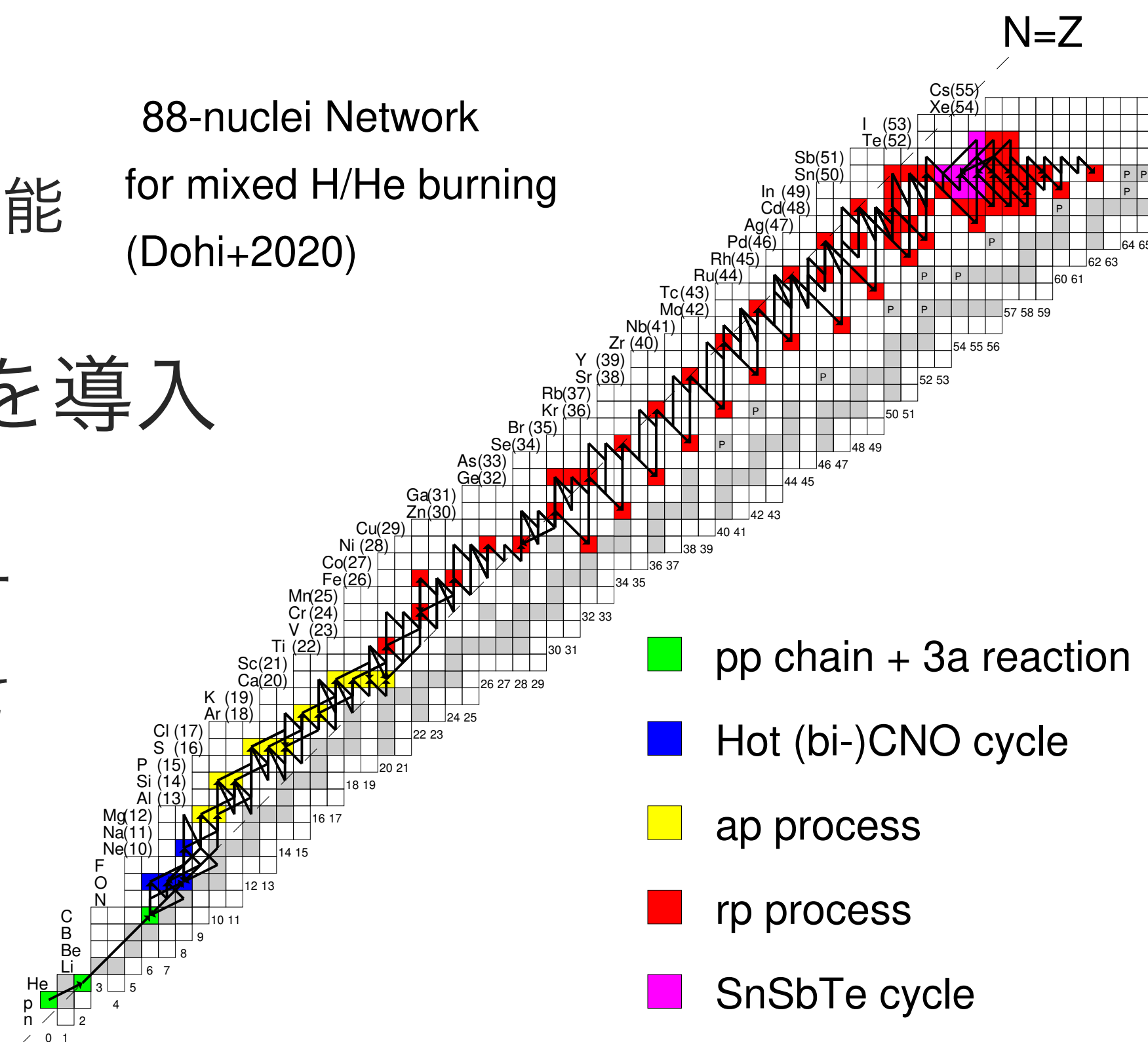
- 初のNS全体を計算領域としたXRBコード

NSの物理 (EOS、 $\nu$ 冷却、クラスト加熱) を直接組み込むことが可能

Guoqing+AD+Nishimura et al., submitted

- H/He燃焼用88核種近似ネットワーク (APRX3) を導入

88-nuclei Network  
for mixed H/He burning  
(Dohi+2020)



XRBのproton-richな元素合成 (rp processなど) を大まかにカバー

(Pure He燃焼やC燃焼に由来する核種をほとんど組み込んでいないが、現在APRX4として

これらを組み込んだ106核種の近似ネットワークを構築中)

# XRBの光度曲線を記述する物理

## ○ よく調べられてきたパラメータ

- 降着率（観測難）、組成（特に金属量 $Z_{\text{CNO}}$ ）

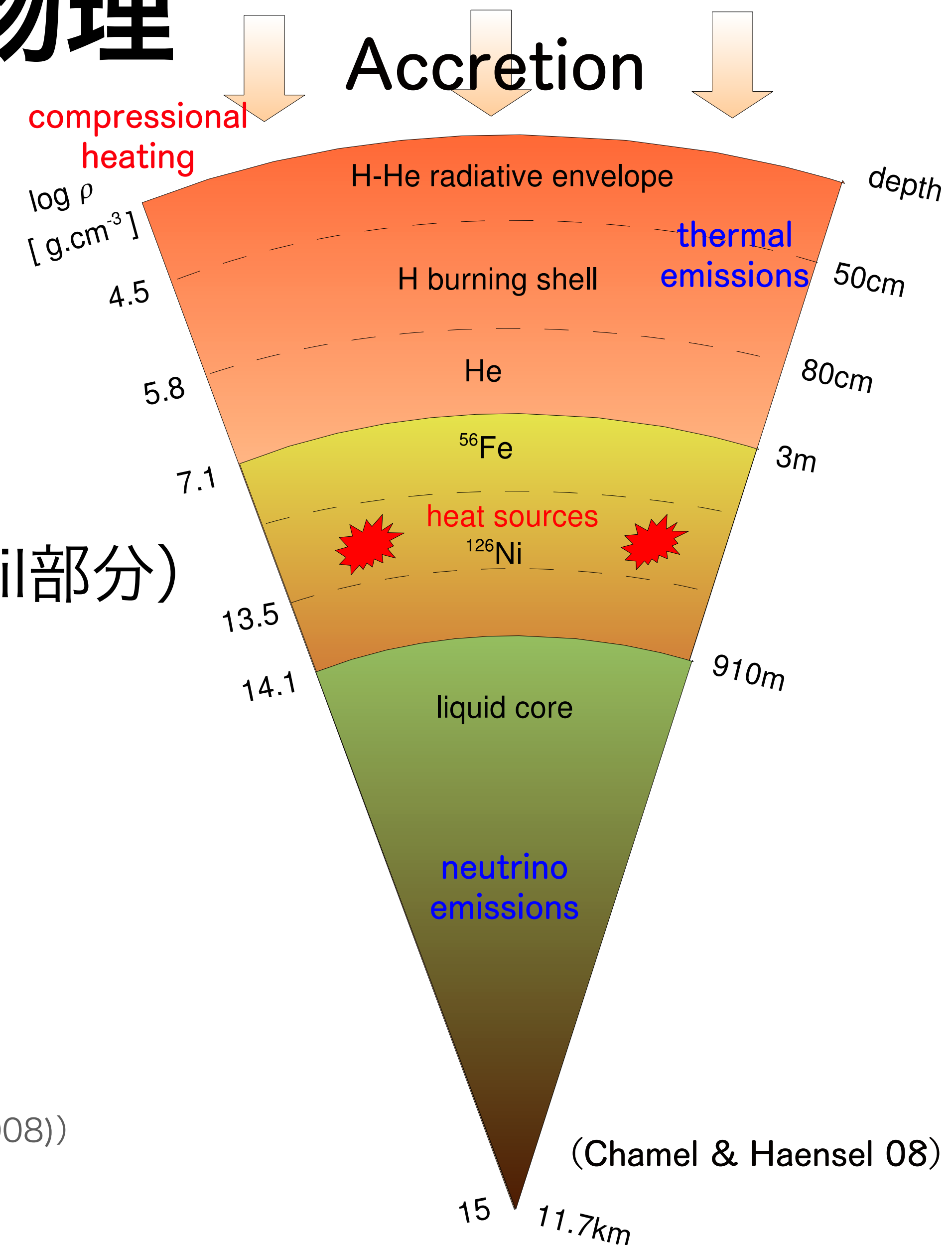
最近のIXPEのX線偏向観測で、（実際の降着率に影響する）  
X線連星の軌道傾斜角が初めて測定されるといった進展あり  
(Fiamma et al., ApJ 943, 129 (2023))

- 反応率不定性（ $\alpha$ p過程: 光度上昇、rp過程: tail部分）

## ○ あまり調べられていなかった物理

- NSの構造（EOSと質量）
- NSの温度（クラスト加熱、 $\nu$ 冷却）

クラスト加熱モデルは不定性が小さいので今回固定 (Haensel & Zdnick, A&A 480, 459 (2008))



(Chamel & Haensel 08)

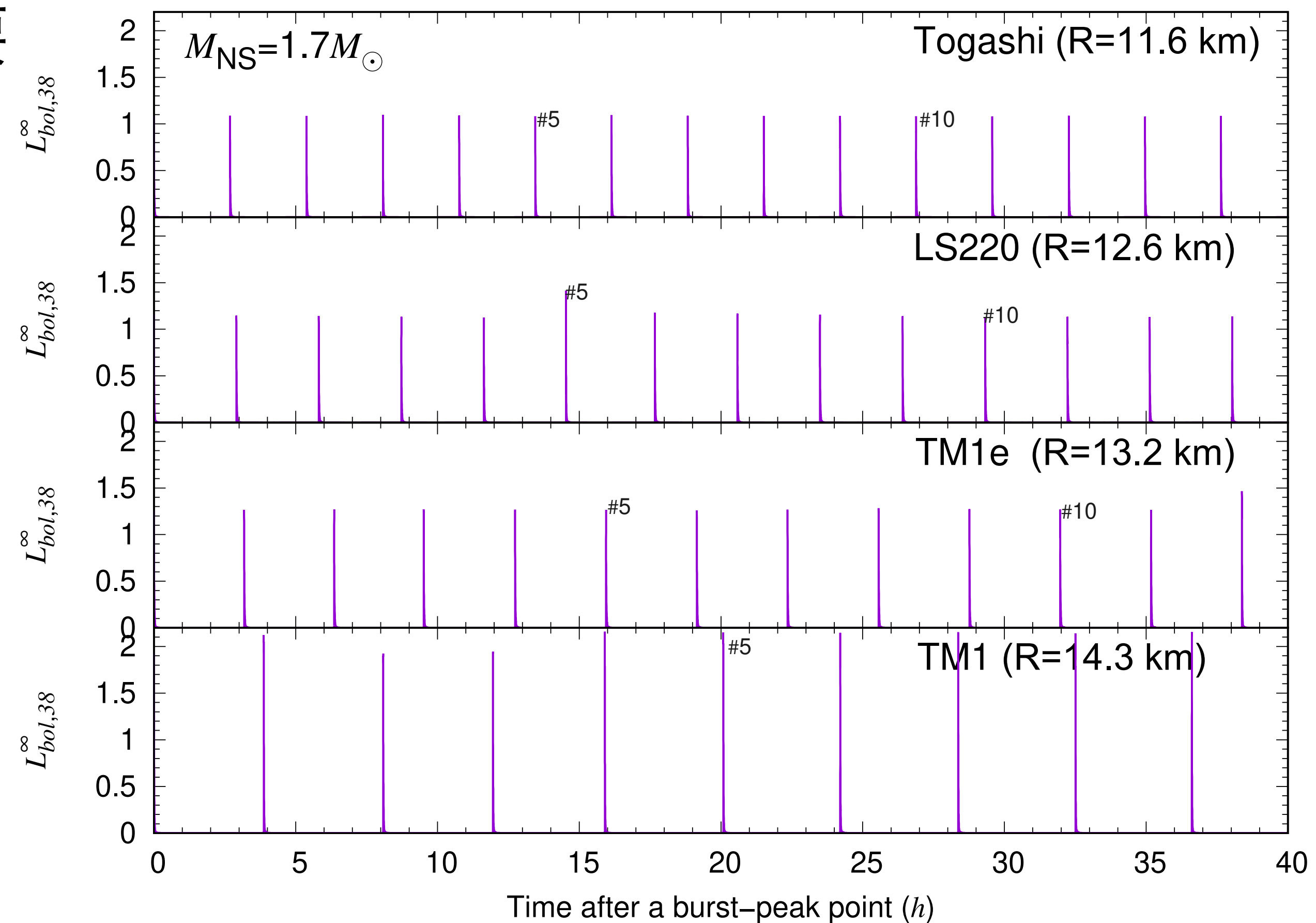
# NSのEOSのXRBへの影響

- 燃焼層のみを考慮したOne-zoneモデルにおいて、単位表面積あたりに必要な燃料の量（柱密度）は

$$\sigma = g_s / P_{\text{ign}} \quad g_s : \text{表面重力、} P_{\text{ign}} : \text{点火圧力}$$

Fujimoto, Hanawa, Miyaji, ApJ 247, 268 (1981)

- 硬いEOSほど $g_s$ が小さくなり、少ない燃料でH/Heが燃え出す。したがって、再帰時間やピーク光度が上昇



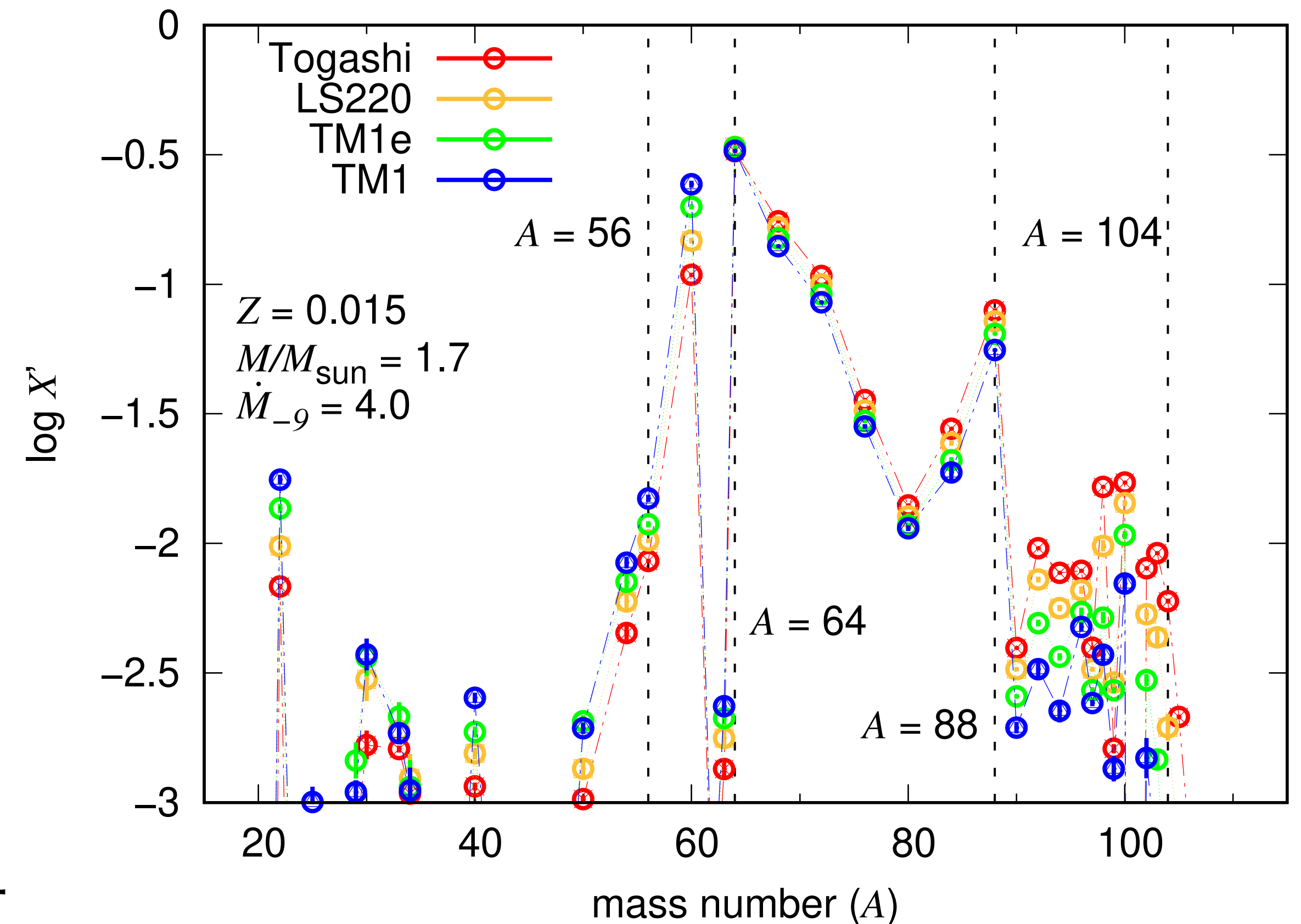
# NSのEOSのXRBへの影響

- 燃焼層のみを考慮したOne-zoneモデルにおいて、単位表面積あたりに必要な燃料の量（柱密度）は

$$\sigma = g_s / P_{\text{ign}} \quad g_s : \text{表面重力、} P_{\text{ign}} : \text{点火圧力}$$

Fujimoto, Hanawa, Miyaji, ApJ 247, 268 (1981)

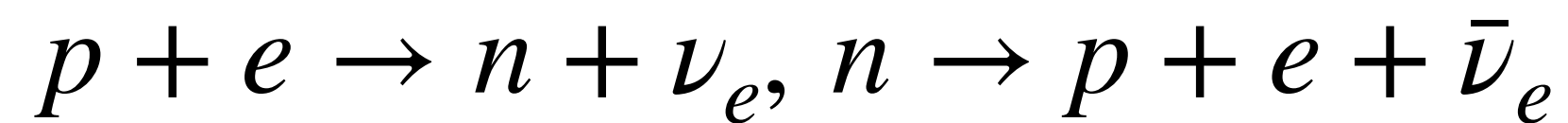
- 硬いEOSほど $g_s$ が小さくなり、少ない燃料でH/Heが燃え出す。したがって、再帰時間やピーク光度が上昇
- 元素合成にも影響：柔らかいEOSの方がH richでrp過程が進む。



AD, Nishimura et al., in preparation

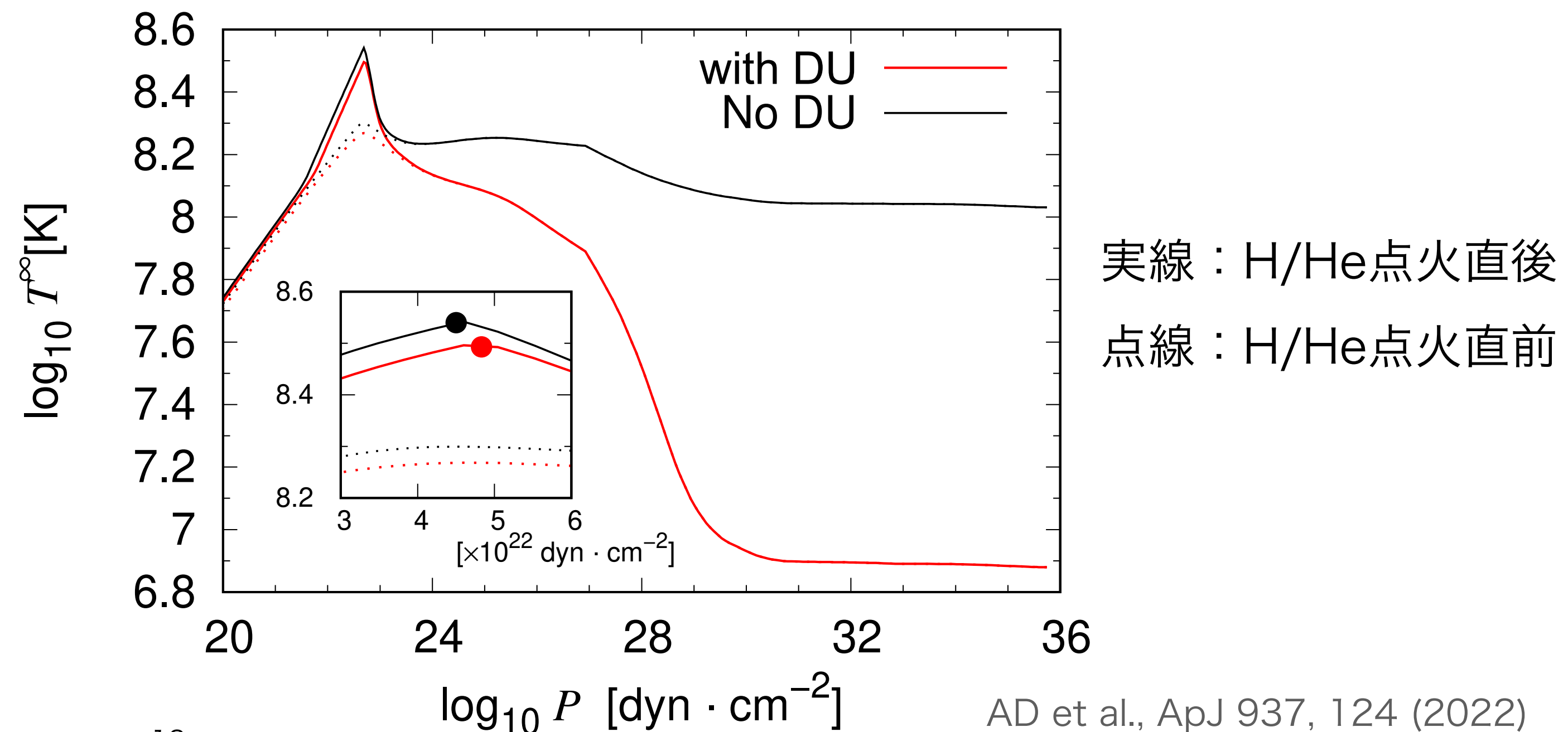
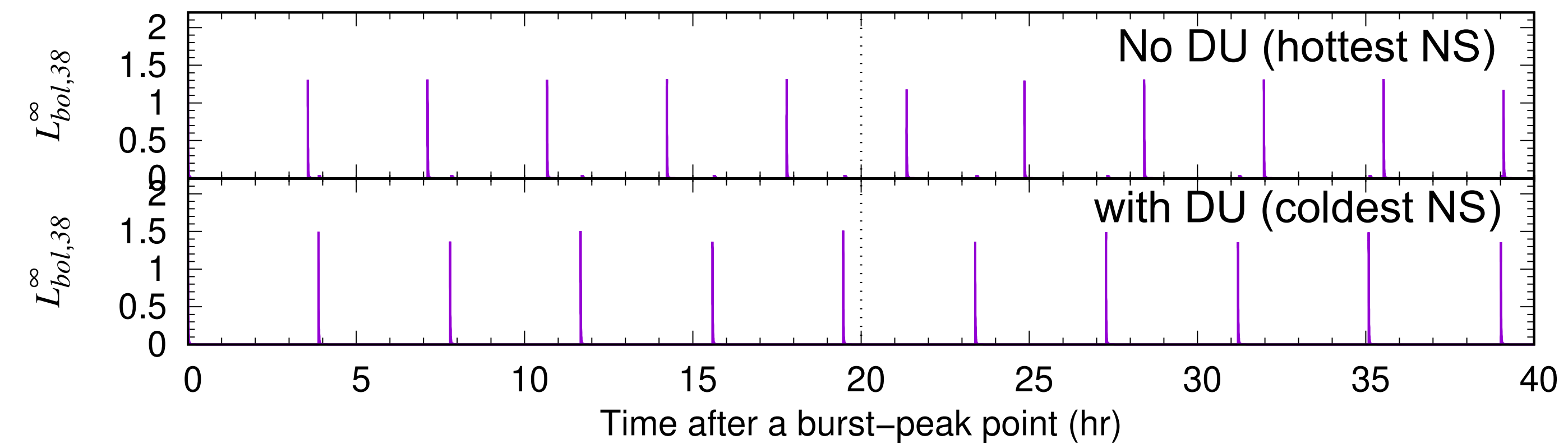
# NS内部の $\nu$ 冷却過程のXRBへの影響

- 陽子の割合が1/9以上NS内部に存在すると、強い $\nu$ 冷却過程である核子直接ウルカ過程 (DU)



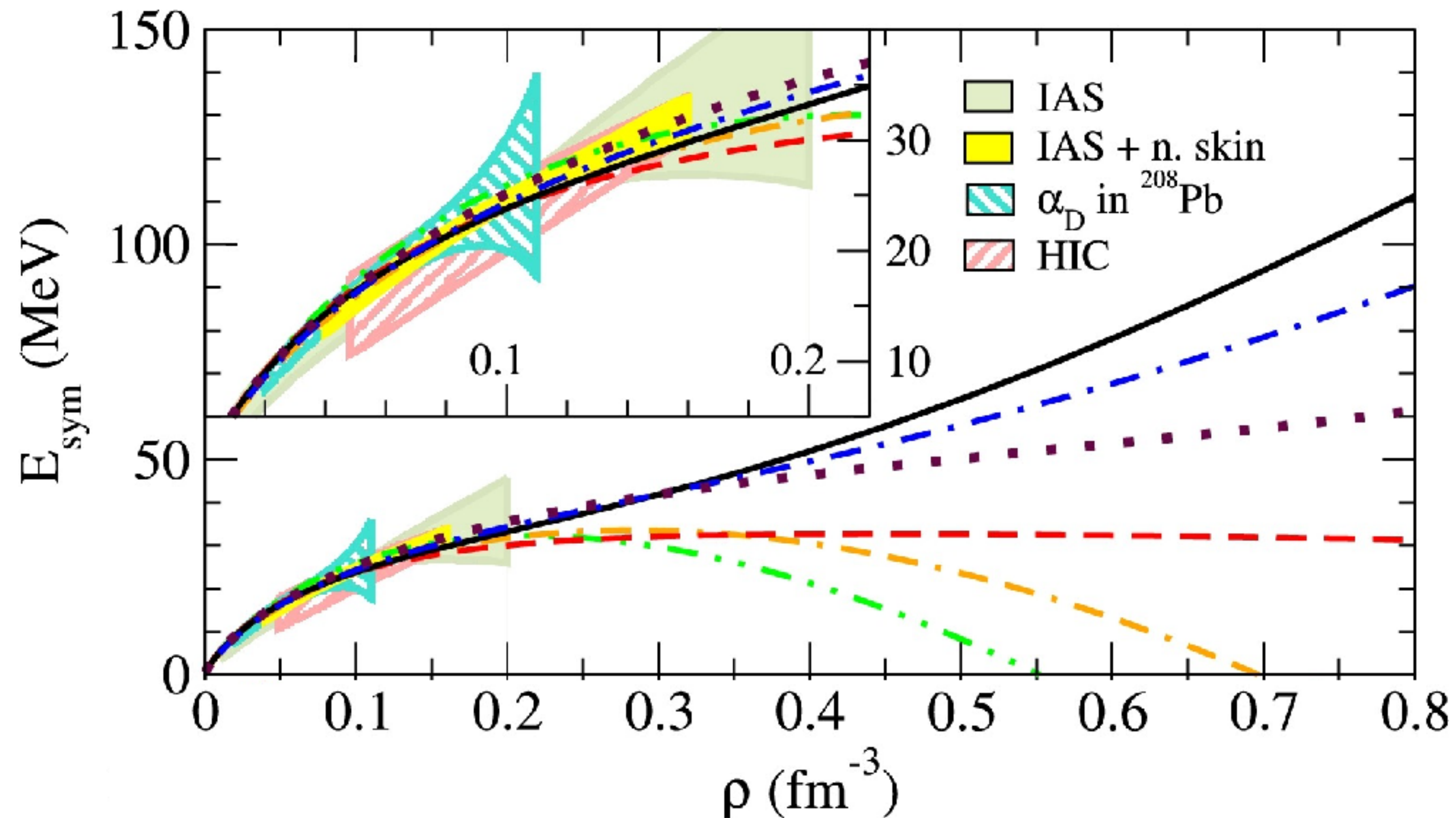
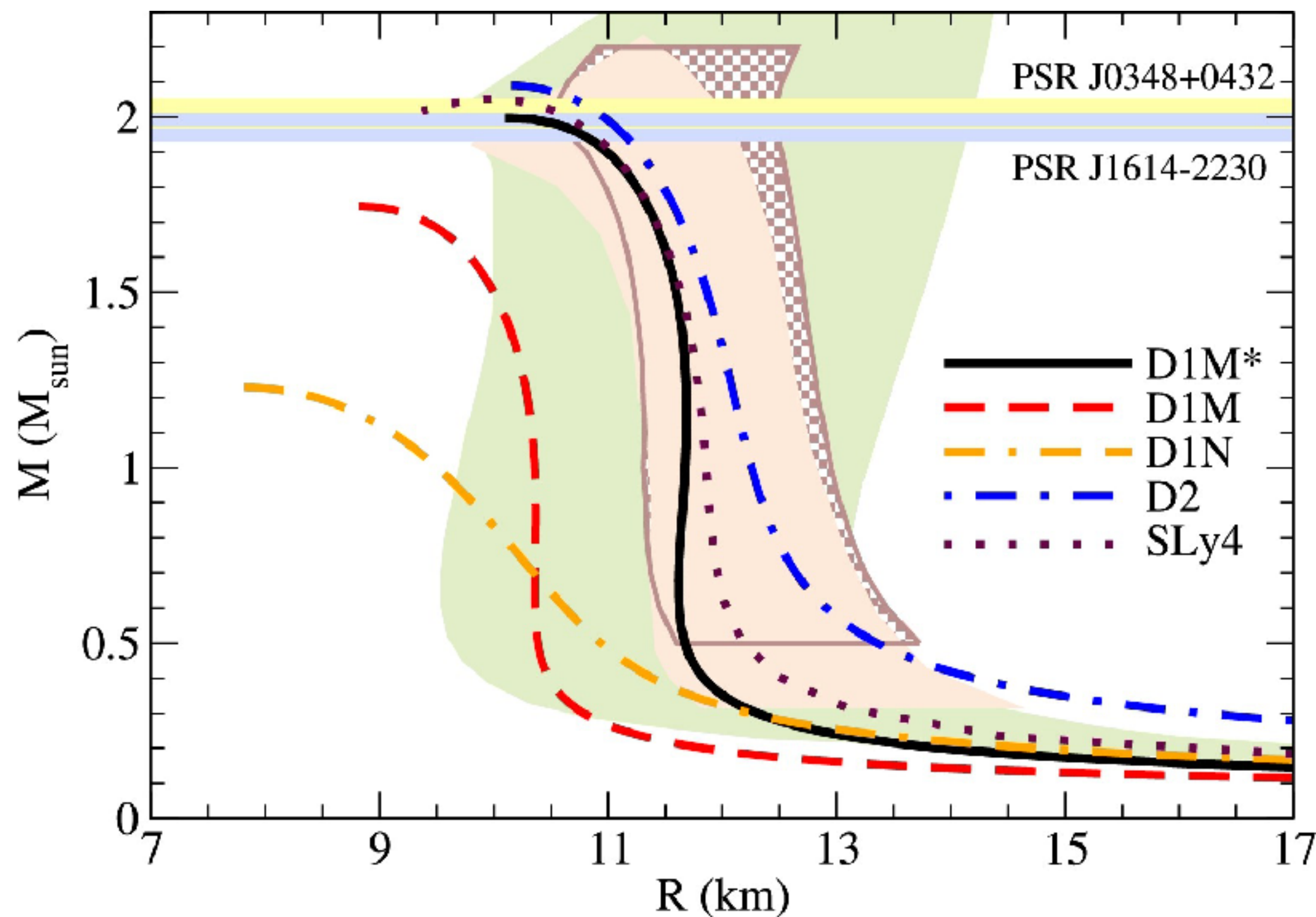
が働き、NSの温度を下げる。

- $P_{\text{ign}}$  が20%程度大きくなる。結果、再帰時間やピーク光度も同じだけ上昇



実線：H/He点火直後  
点線：H/He点火直前

# 今回用いるEOS: SLY4 (Skyrme) , D1M\* (Gogny)



・ MRはあまり変わらない。最大質量は $2M_{\odot}$ 以上

Gonzalez-Boquera et al., PLB 779, 195 (2018)

・ 高密度での対称エネルギーはD1M\*が大きい  
 → DUが $1.96M_{\odot}$ 以上の重いNSで発生

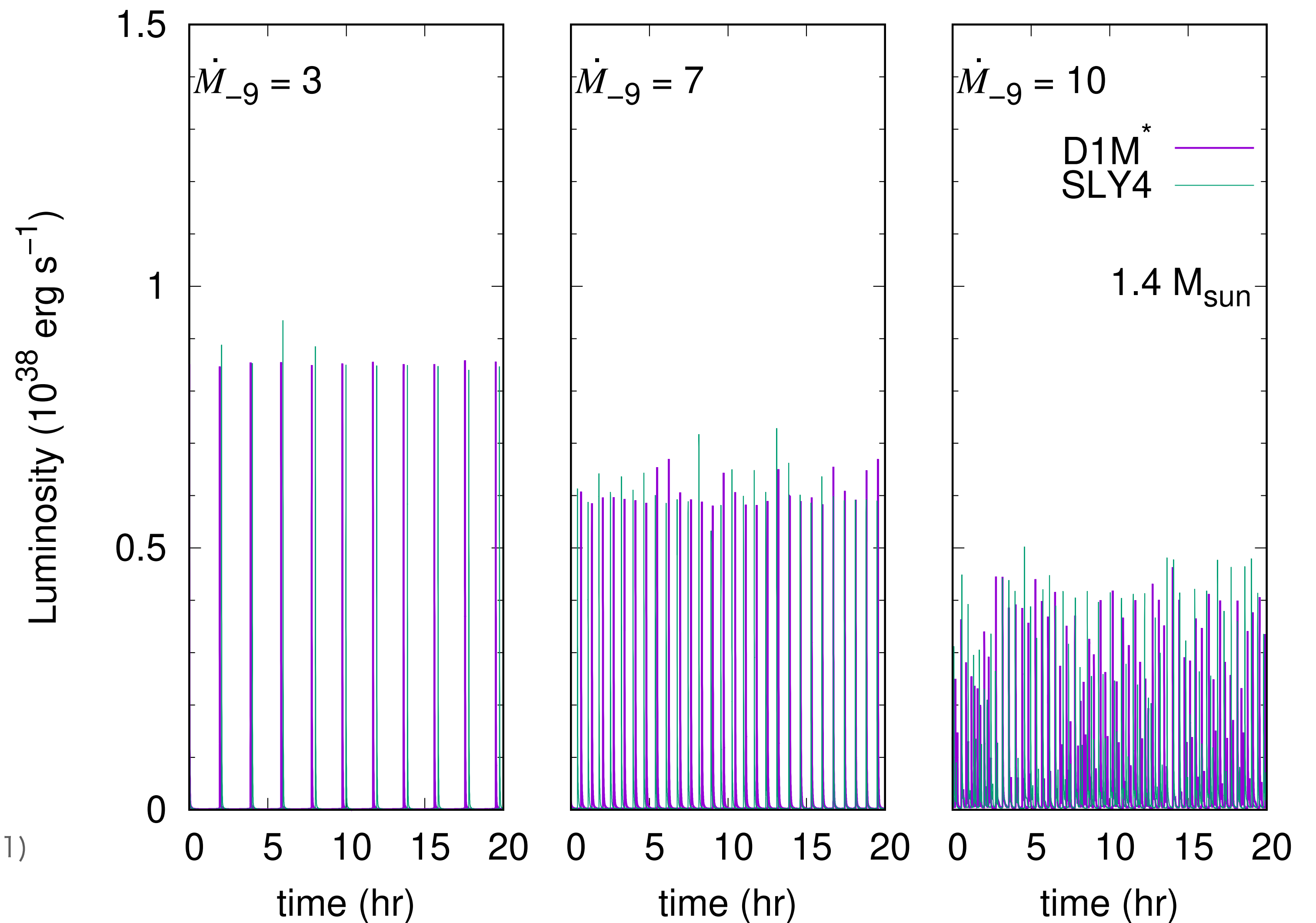
# H/He混合XRBの光度曲線

今回のXRB計算の初期組成は、  
水素73.6%、ヘリウム25.4%、金属1%で固定

In case of  $1.4M_{\odot}$

- SLY4とD1M\*で光度は変わらない。
- XRBのキーパラメータである表面重力・ $\nu$ 冷却プロセスが変わらないため。

AD et al., ApJ 923, 64 (2021)



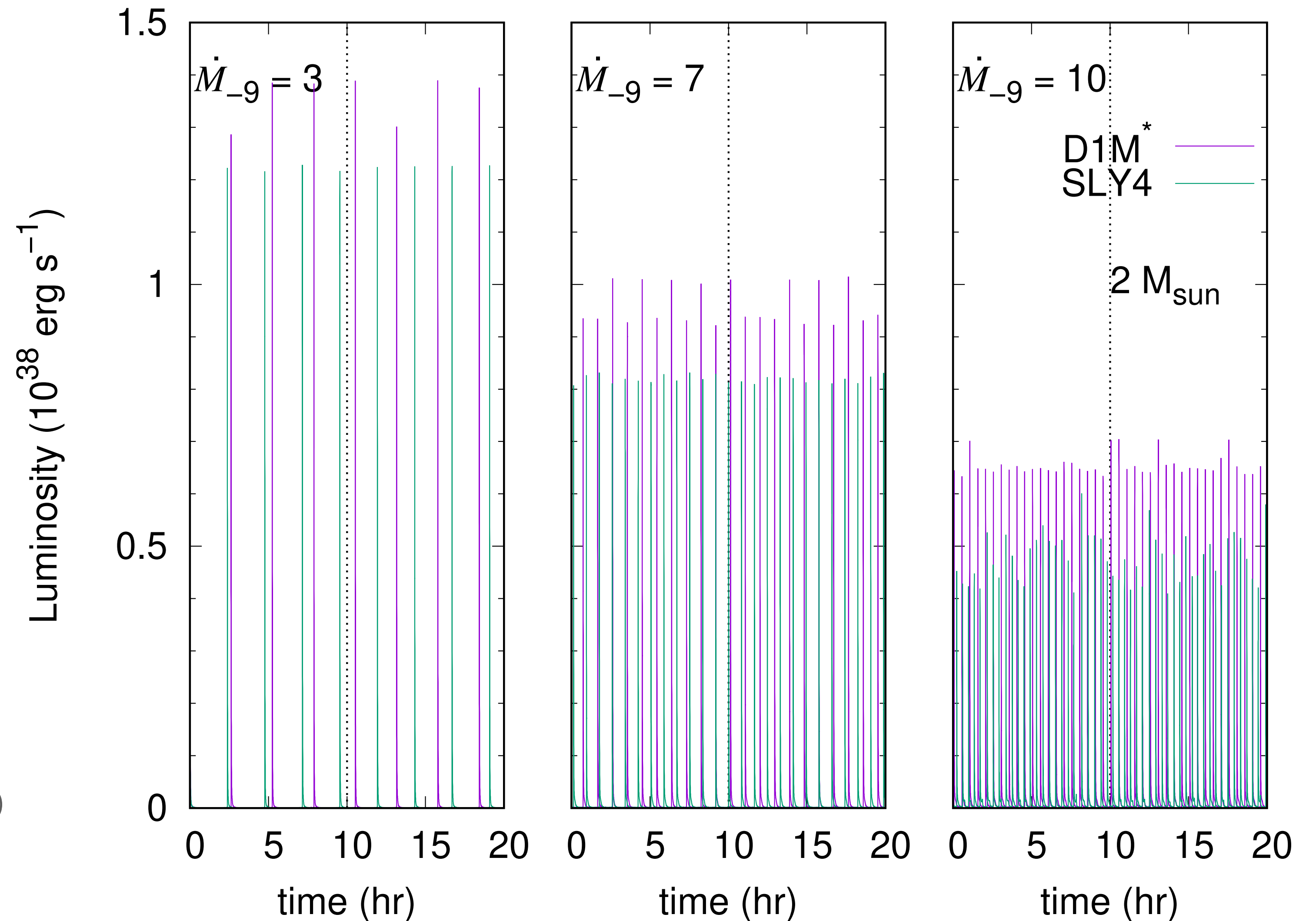
# H/He混合XRBの光度曲線

今回のXRB計算の初期組成は、  
水素73.6%、ヘリウム25.4%、金属1%で固定

In case of  $2M_{\odot}$

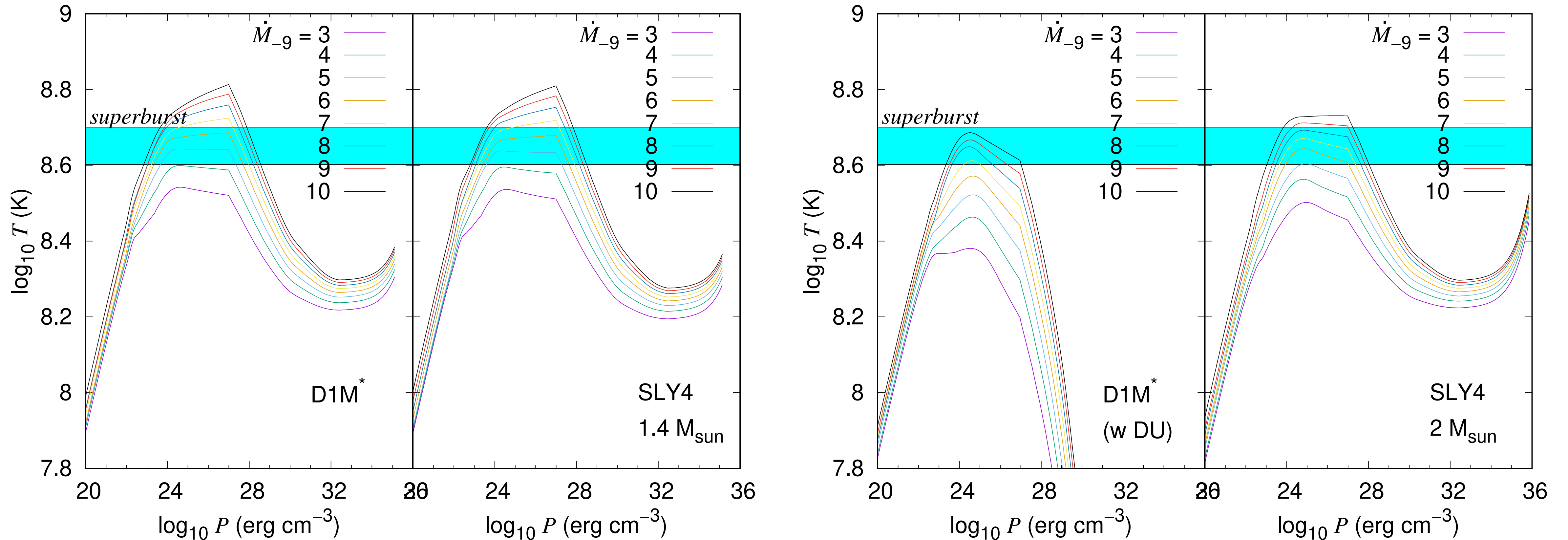
- DUが起こるD1M\*の方が、20%ほど再起時間、光度が高くなる。
- これまでの先行研究と consistent

AD et al., ApJ 937, 124 (2022)





# H/He混合燃焼直前の温度プロファイル



2 Msunのみ顕著な違い：DUが効くD1M\*ではSLY4よりもSBになりにくい。

\* SBの典型的な発生温度: 0.4 - 0.5 GK

# SBへの応用

# SBの発生シナリオとXRBプロファイル2

“H” : 太陽系likeな組成

“C” : C-Feプラズマ ( $X_C=0.2$ )

## 1. 通常のXRBで $3\alpha$ が発生でC生成 成→対流でNS内部に侵入

議論に必要なもの : 通常のH/He混合燃焼

XRBプロファイル (multi-zoneモデル)

## 2. 数千～数万発のXRBでCが奥に 大量に堆積 → C燃焼 → SB

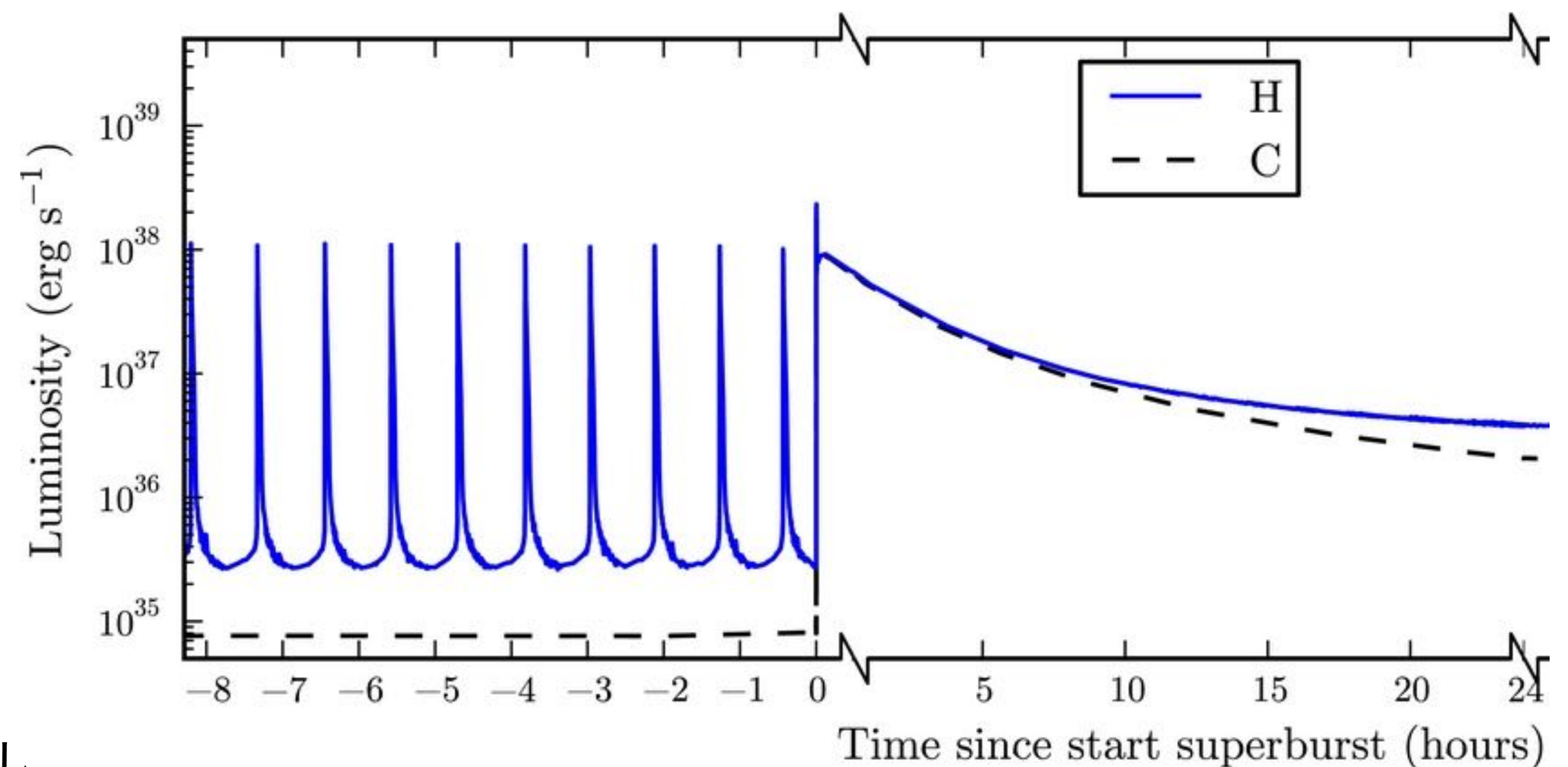
議論に必要なもの : C燃焼のXRBプロファイル

Keek, Heger, in't Zand, ApJ 752,150 (2012)

Hashimoto, Kuromizu et al., J. Astrophys. 2014, 817986 (2014)

Eric Britt & Ed Brown, private communication

$^{12}\text{C}$ の燃焼条件 (one-zoneモデル、 $X_C$ はフリーパラメータ)



Keek, Heger, in't Zand, ApJ 752,150 (2012)

# One-Zone XRBモデルとパラメータ

- Plane-parallel 近似  $P_C = g_s \sigma$

$\sigma$  : 柱密度

- 基本的には、 $^{12}\text{C}$ の点火条件

$\epsilon_{^{12}\text{C}+^{12}\text{C}}$  : C燃焼のnetエネルギー生成率

$$\left. \frac{d\epsilon_{^{12}\text{C}+^{12}\text{C}}(P, T)}{dT} \right|_{P_C} = \left. \frac{d\epsilon_{\text{rad}}(P, T)}{dT} \right|_{P_C}$$

$\epsilon_{\text{rad}}$  : 放射によるエネルギー損失率 (Opacityに依存)

Fujimoto, Hanawa, Miyaji, ApJ 247, 268 (1981)

Fushiki & Lamb, ApJ 323, L55 (1987)

を満たす  $(P_C, T_C)$  の点火曲線を求める。

- $(\rho, T)$  と  $P$  の関係は (n drip近傍も含め) Timmes EOSを使用

Timmes & Swesty, ApJS 126, 501 (2000)

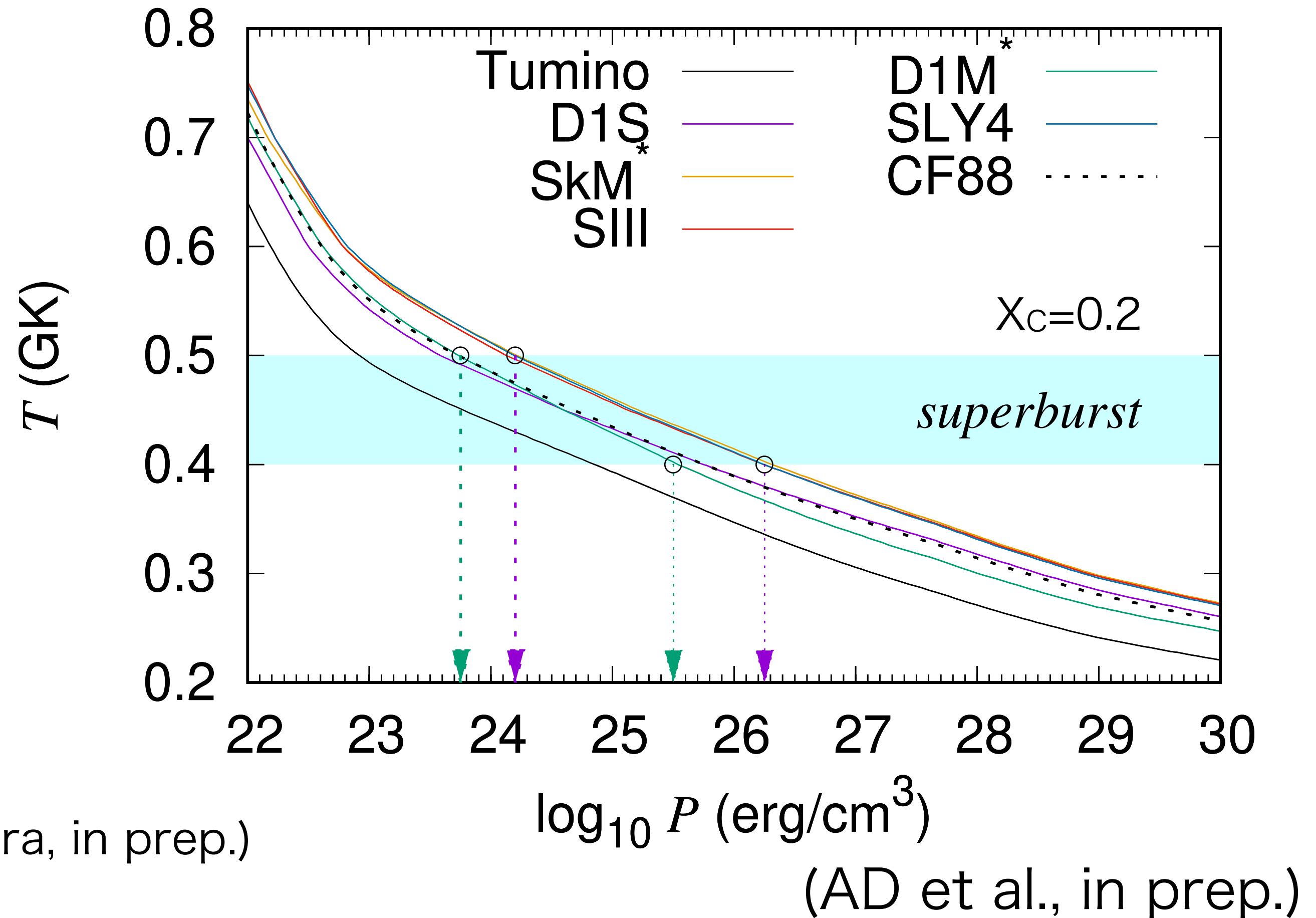
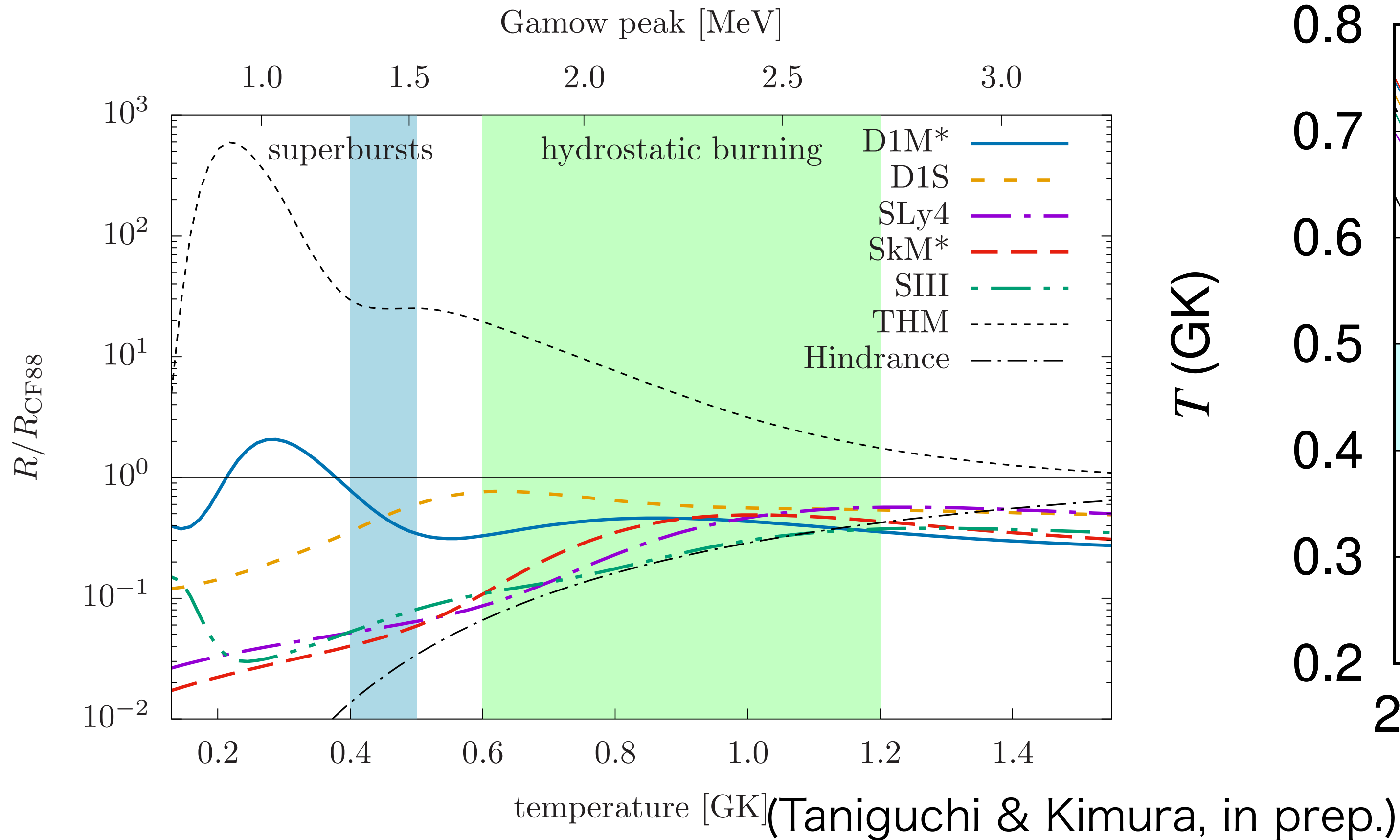
- Opacityは、放射と電子を考慮。Impurityはゼロにした。

Schatz et al., ApJ 524, 1014 (1999)

Potekhin, Pons, Page, SSRv 191, 239 (2015)

- 割合が  $X_C:1-X_C$  の C-Fe プラズマを考える。

# $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応率の違いと点火曲線



今回着目しているSLY4とD1M\*では、反応率が1桁程度異なる。

→ 点火圧力 $P_c$  ( $\propto \Delta t_{sb}$ ) がlogで0.5-0.8ぐらい変化

# X<sub>c</sub>に関して

A. X<sub>c</sub>は本来長時間のXRB計算で得られる。それによれば、X<sub>c</sub>が0.1前後らしい

Keek, Heger, in't Zand, ApJ 752,150 (2012)

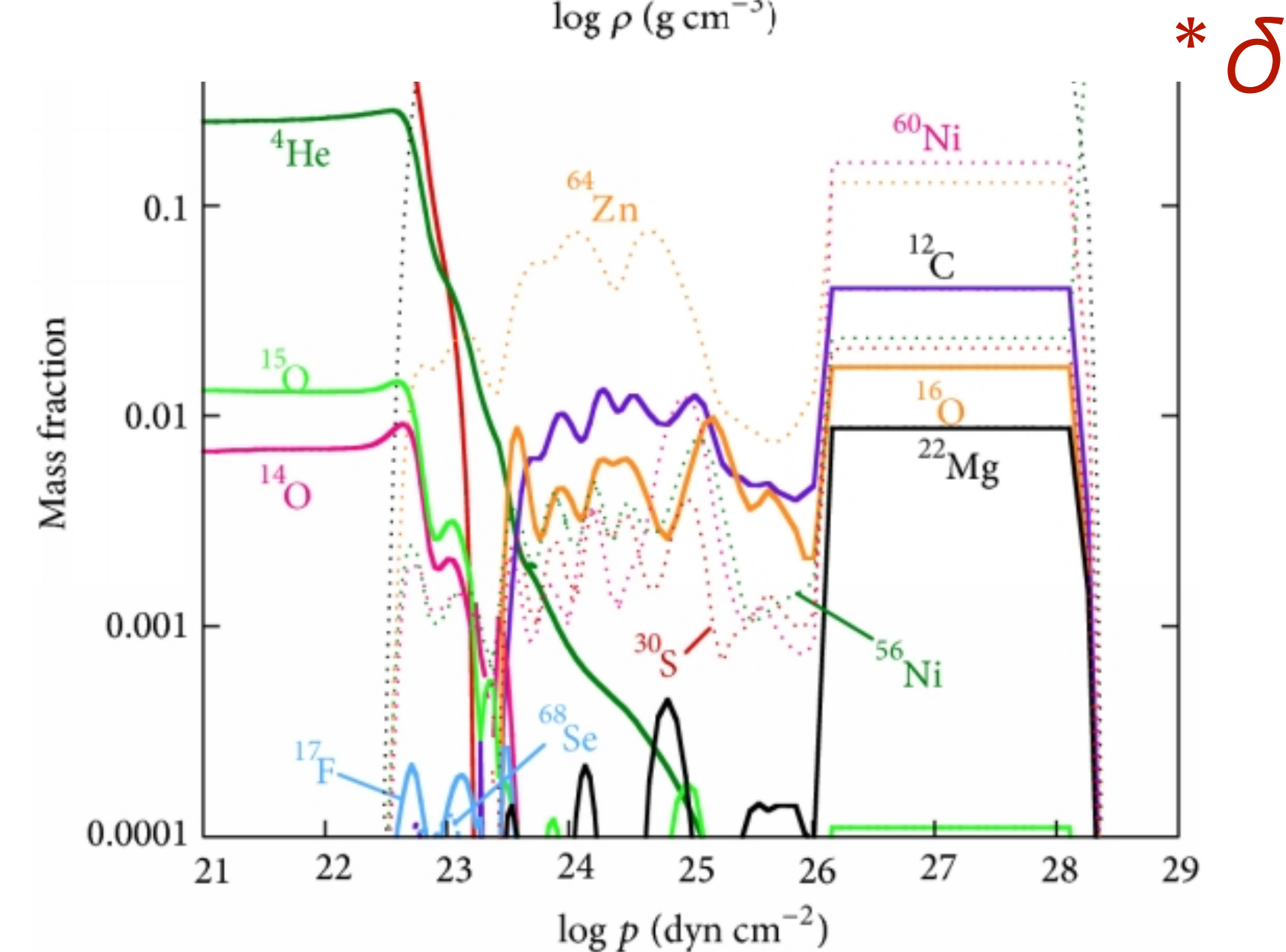
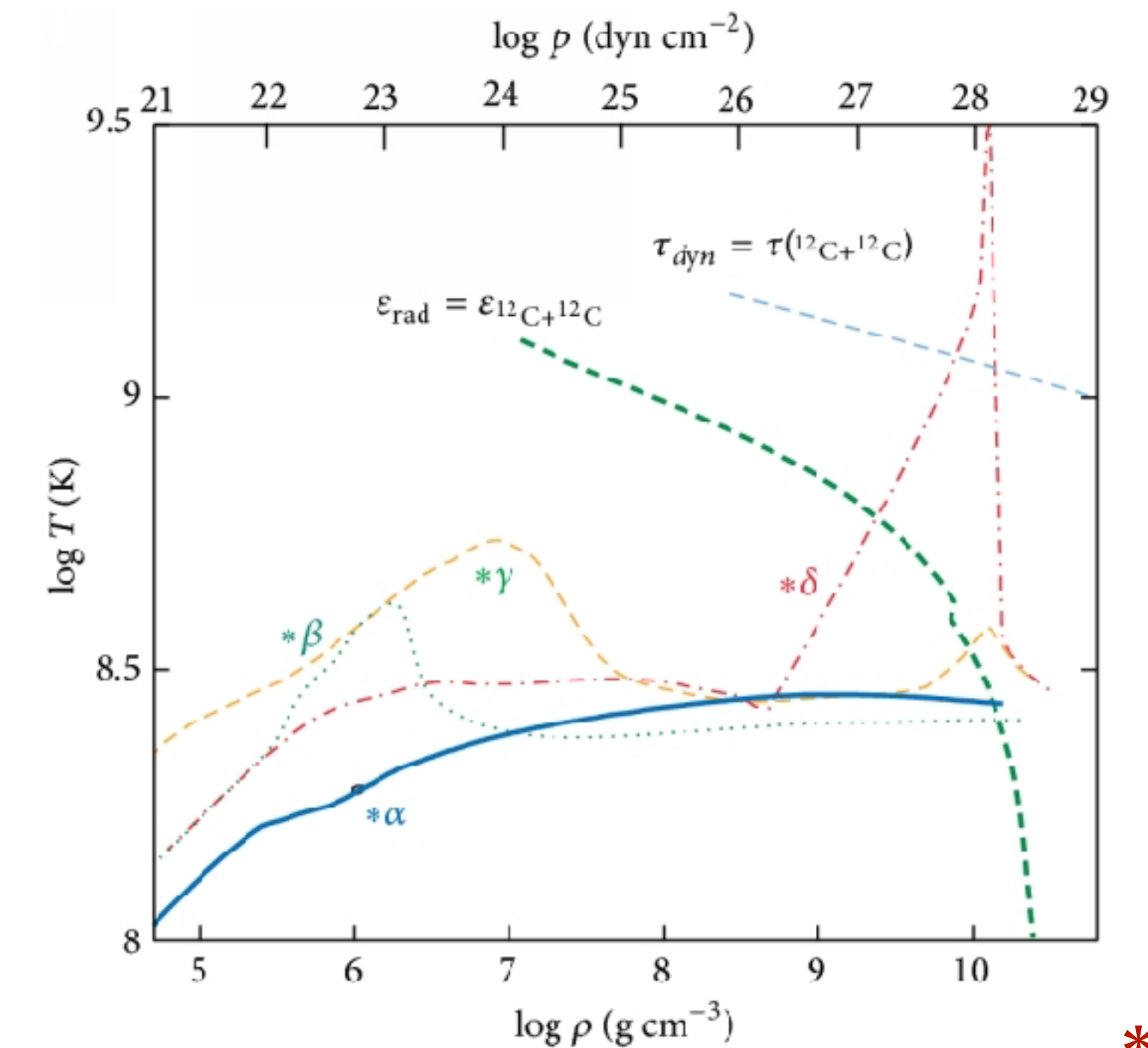
Hashimoto, Kuromizu et al., J. Astrophys. 2014, 817986 (2014)

Eric Britt & Ed Brown, private communication

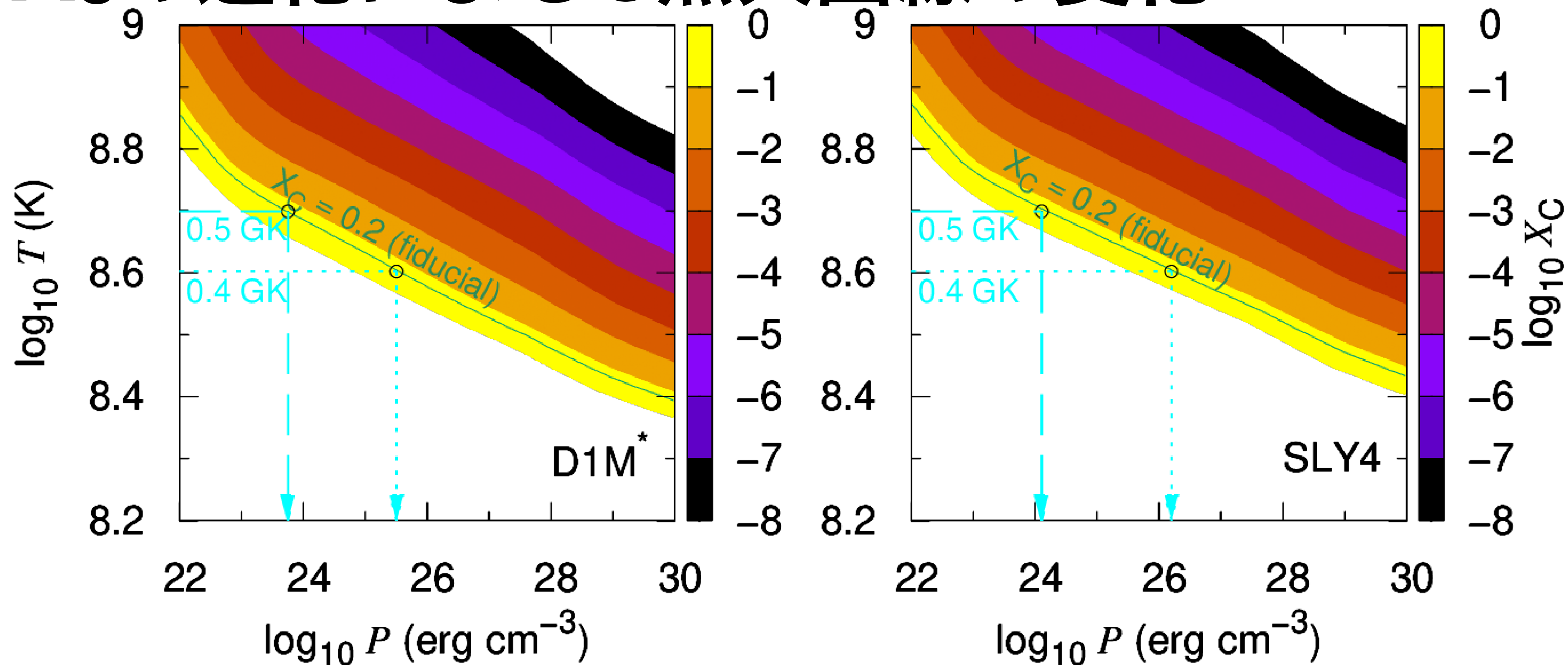
B. 観測されたSB天体 4U 1820-30のエネルギー10<sup>42</sup> ergを再現する炭素燃焼率を生み出すためには、X<sub>c</sub> = 0.08-0.2

Cumming ApJ 595, 1077 (2003)

• AとBより、大体0.1のオーダー付近のX<sub>c</sub>の値がSBのシナリオに適するとみなしてよい。



# $X_c$ の進化によるC点火曲線の変化



多数回のXRBで $X_c$ の値が上がるため点火曲線は左下方方向に進化する。

よって、NSの温度構造と接した時を本当のC点火とみなすべき

結果：まだ未出版なため省略



# まとめ

- 観測されているXRBの光度曲線のモデリングに、NSのEOSの不定性や $\nu$ 冷却 (DU) は重要な物理になりうる。
- 核模型の不定性 (SLY4,D1M\*) が与えるSB影響について調べた。
- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ の反応率は両者で1桁違うため、同じ点火温度、XCで点火圧力 ( $\propto \Delta t_{\text{SB}}$ ) が1桁程度違ってくる。SB天体の降着率の値にsensitive
- 今後：Pure HeバーーストやSB、更には (n-richな?) OやNeがトリガーとされているハイパーバーースト計算も可能な近似ネットワークの構築

ハイパーバーースト：Page et al., ApJ 933, 216 (2022)