

宇宙の化学進化



酸素など重い元素を供給 H, He (+ Li)

現在の宇宙の構成要素である元素の合成歴を知るには、星や超新星を知る必要がある

更に元素供給 新たな星が誕生







宇宙のレシピ:宇宙の化学進化

『なぞとき宇宙と元素の歴史』

誕生直後はベータ平衡、0.1 MeV 以下から合成開始し Li, Be 程度まで



膨張とともに温度・密度が低下し、これ以上重い元素は作れない

ビックバン元素合成

銀河系内のたくさんの星の表面の組成 (データは NuPyCEE/stellab から)



宇宙のレシピ:宇宙の化学進化

星の観測から元素汚染の歴史を紐解く

宇宙のレシピ:宇宙の化学進化



星の観測から元素汚染の歴史を紐解く:星の何を観測しているの?

●星の光を観測した際、星の内部の情報は得られない (光学的に厚いので)

●星の表面を光が抜けてきた際の"吸収線"に着目し、 **表面にある元素の**量を測定している

● 星の表面の元素組成は、その星を作った時の周囲の **ガスの組成**(周辺環境)を反映している

● 金属量 (周囲のガス内の元素量) が大きい星は吸収線 が多く、金属量が小さい星は吸収線が少ない

宇宙のレシピ:宇宙の化学進化

星の観測から元素汚染の歴史を紐解く:星の何を観測しているの?



Spectra of Stars with Different Metal Content

宇宙のレシピ:宇宙の化学進化

星の観測から元素汚染の歴史を紐解く



天の川銀河内の元素供給歴は大まかに理解されているが、うまい作り方が分からない元素もかなりある → XRISM でこの辺を開拓できると楽しいが、<u>測るだけで面白いことは既に大体やられている</u>

Kobayashi et al. (2011) など





la型超新星内部の元素組成



元素で爆発や恒星進化の物理を議論できる → **合成される過程をもっと詳しく知ろう!**

まずなぜ、Ia型超新星が鉄が多く、重力崩壊型超新星が酸素が多いのか? la型は爆発的元素合成、CC型は恒星進化中の元素合成を反映

重力崩壊型超新星内部の元素組成



どのように元素が合成されるかを具体的に見ていきましょう

(1)



小中質量星/la型超新星の元素合成と宇宙への元素供給 ② 大質量星/重力崩壊型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

 H burning, T ~ 1.5×10⁷ K 生成物: He, N by pp chain & CNO cycle 	低温
• He burning, T ~ 1.5×10 ⁸ K 生成物: C, O by Triple a & ¹² C+a	
 C, Ne burning, T ~ (7–15)×10⁸ K 生成物: O, Ne, Mg 	
• O burning, T ~ 2.5×10 ⁹ K 生成物: Si	
 Si burning, T ~ 4×10⁹ K 生成物: Fe 	▼高温

爆発環境・恒星内部環境に依存して異なる元素が合成





小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



① 小中質量星/la型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



①小中質量星/Ia型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

小中質量星(~0.8–8 M₀)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



①小中質量星/Ia型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

小中質量星(~0.8–8 M₀)の進化 → C, N や s-process 元素の供給





小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給





①小中質量星/Ia型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

小中質量星(~0.8–8 M_☉)の進化 → C, N や s-process 元素の供給



小中質量星(~0.8–8 M₀)の進化 → C, N や s-process 元素の供給

CNO cycle, Triple α, s-process 領域からの元素の "汲み上げ" → N, C, Sr-Y-Zr など供給



①小中質量星/Ia型超新星の元素合成と宇宙への元素供給

s-process とは ⇒ 恒星進化中に起こる "遅い中性子捕獲過程"



(後半でもう少し詳しくやります)

la 型超新星の爆発的元素合成 (復習)



CO 組成をほぼ燃やして、大部分を鉄に変換: Near-M_{Ch} と Sub-M_{Ch} で鉄族供給量が異なる

① 小中質量星/la型超新星の元素合成と宇宙への元素供給



Ia型超新星の爆発機構の解明や宇宙の化学進化の理解に鉄族元素の測定が重要

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

白色矮星の爆発「Ia型超新星」研究の最近の発展例:Near-M_{Ch}/Sub-M_{Ch} どっちも必要



















初期宇宙を元素組成を特徴づけるのは、大質量星内部で合成された O/Ne/Mg の供給



- - $t_{MS} \propto M^{-2.5}$
- ~3000万年 @ 10 *M*⊙



原始中性子星

α捕獲反応 ²⁸Si → ³²S → ³⁶Ar →

爆発中心の物理: ニュートリノ相互作用と非対称性 (対流や様々な不安定性)

|背景:爆発には、ニュートリノによる加熱機構が必要| → しかし、この観測的検証が困難

特徴: ニュートリノ加熱による対流構造が生み出す 高エントロピー構造

エントロピー(T³/p)が高い環境 (= 高温・低密度) → 元素合成過程 (α 捕獲) の進みが遅い

$$40$$
Ca $\rightarrow 44$ Ti $\rightarrow 48$ Cr $\rightarrow 52$ Fe $\rightarrow 56$ Ni

エントロピーが高いと鉄になりきれない元素(Ti, Cr)の量が増える → <u>爆発中心の物理状態の情報</u> Reference: Nagataki et al. (1997), ApJ; Sato et al. (2021), Nature など







Ti, Cr で爆発の非対称性、F (K, Sc, V) や Mn, Ni などでニュートリノ相互作用を議論可能

爆発中心の物理: ニュートリノ相互作用と非対称性 (対流や様々な不安定性)









③ 鉄より重い元素はどこから?



③ 鉄より重い元素はどこから?

③ 鉄より重い元素はどこから?

まず、s-process: main s-process と weak s-process がある



Not confirmed from a single star/SN

r-process とは別に、main/weak のどちらの s-process も化学進化を追う上で必要

③ 鉄より重い元素はどこから?



つけて徐々に重い元素へ

初期金属量が高い方が有利だが、 回転等の効果で、初期宇宙でも 効率よく進めることも可能





③ 鉄より重い元素はどこから? r-process: 速い中性子捕獲 = たくさん中性子が必要 = 中性子星が絡む



中性子星に近い所から中性子を汲み上げる



中性子星合体の際に中性子を一気にくっ付ける



③ 鉄より重い元素はどこから?

r-process: 速い中性子捕獲 = たくさん中性子が必要 = 中性子星が絡む

© Wanajo Shinya

ビックバン後、星の活動で宇宙は豊かに ●O/Ne/Mgの供給は大質量星で宇宙初期から ●鉄族の供給は la 型超新星の爆発的元素合成 ● 鉄より重い元素は、s-process/r-process

まとめ