# 銀河シミュレーションで探る 元素の起源と銀河進化

## 平居 悠 (Hirai, Yutaka) 理化学研究所 計算科学研究センター 粒子系シミュレータ研究チーム 基礎科学特別研究員











## 多様な元素・生命に満ち溢れる現在の宇宙 はどのように形成されたのか?

## 銀河形成を理解する 銀河進化史の指標: 星の元素組成:星が生まれた時点での元素量を反映 星の動力学的性質:銀河の合体・潮汐作用の履歴







## ・銀河の構造/分類と銀河形成シナリオ

・元素合成

・銀河の化学進化





## ・銀河の構造/分類と銀河形成シナリオ

- ・元素合成
- ・銀河の化学進化
- ・銀河系形成と今後の展望



## 銀河の構造















## 委任意 矮小不規則銀河 (dwarf irregular galaxy, dlrr)



矮小楕円体銀河

10<sup>7</sup> M<sub>☉</sub>

Fornax

Bullock & Boylan-Kolchin 2017, ARA&A, 55, 343

## (Dwarf spheroidal galaxy, dSph)

### 超低光度矮小銀河 (Ultrafaint dwarf galaxy, UFD)















frame rest-

redshift

## 現在の銀河を観測 (銀河考古学/近傍宇宙論)

#### 星の元素組成 →<br /> 星が生まれた時点での元素量



#### 星の動力学的性質 →銀河の合体・潮汐作用の履歴





## ELSシテリプ



#### 軌道内質量の急激な増加

#### 軌道離心率增加

銀河系は自由落下に より1億年程度で形 成された?



## SZシナリオ



外側ハローで金属量勾配 がない 球状星団の年齢にばらつき

恒星集団の合体により10億 年以上かけて形成された





階層的構造形成シナリオを支持



# より小さい構造の合体降着により銀河が成長するという



## ・銀河の構造/分類と銀河形成シナリオ

・元素合成

・銀河の化学進化

・銀河糸形成と今後の展望



### 銀河内での物質循環











### 星の元素組成には銀河の 化学進化史が刻まれている









National Aeronautics and Space Administration SUPERNOVA SUPERSHELL BLACK HOLE **BLACK HOLE TYPE II SUPERNOVA** NEUTRON STAR BLUE GIANT . TYPE II SUPERNOVA TYPE IA SUPERNOVA WHITE DWARF PLANETARY NEBULA **RED GIANT** WHITE DWARF RED DWARF BROWN DWARF

TIME







宇宙と元素の歴史」講談社, 2020 (https://gendai.ismedia.jp/articles/-/70228) 和南城伸也「なぞとき

## 大質量星/重力崩壊型超新星爆発における元素合成

### He C+O

#### O+Ne

### $8-10 M_{\odot}$

 $> 10 M_{\odot}$ 

### 炭素燃焼 Mg, Neなどを合成 酸素燃焼 Si, Pなどを合成





電子捕獲型超新星爆発



H He C+O O+Ne Si Si Fe

原子核統計平衡 鉄族元素合成

鉄コア重力崩壊型超新星爆発









## 炭素・酸素の暴走的核融合 >5×109 K \_ 原子核統計平衡



# la型超新星爆発における元素合成





鉄より重い元素の合成

## 日准行戰運過程

 $t_{\beta}$ :  $\beta$ 崩壊の時間スケール,  $t_{h}$ : 中性子捕獲の時間スケール slow neutron-capture process (s-process)  $t_{\beta} < t_{n}$  $t_{\beta} > t_n$ 



# rapid neutron-capture process (r-process)

## Sプロセス起源天体

### 漸近巨星分枝星 (Asymptotic giant branch stars, AGB)

観測的証拠 <sup>99</sup>Tcの検出 Merrill 1952, ApJ, 116, 21

sプロセス中性子源: <sup>13</sup>C (*a*, **n**) <sup>16</sup>O, <sup>22</sup>Ne (*a*, **n**) <sup>25</sup>Mg

©NASA



#### 回転大質量星 (Rotating massive stars, RMS)







# rプロセス元素の起源天体候補

#### 重力崩壞型超新星爆発





#### 連星中性子星合体

Image credits: 4D2U/NAOJ



### **重力崩壊型超新星爆発におけるrプロセス** ニュートリノで爆発する場合、中性子がニュートリノを吸収( $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ )する ため、質量数110以上の重い元素まで合成するには中性子過剰度が不十分



rプロセスを起こせるのは、強磁場と回転で爆発する場合など、ごく限られた場合のみ (e.g., Nishimura et al. 2017 ApJL, 836, L21)



# 連星中性子星合体でのrプロセス



中性子過剰な放出物を多く含み、トリウムやウランなど、質量数100を 超える元素も合成できる



### 連星中性子星合体GW170817でのストロンチウムの検出



Day 1.17-1.70

Day 7.17-7.70

Utsumi et al. 2017, PASJ, 69, 6



## 隕石と海洋堆積物に残されたrプロセス合成イベントの痕跡



隕石と海洋堆積物の rプロセス元素 (244Pu)量

rプロセス元素合成イベ ントは、頻度が低く、1 回の元素合成量が多いこ とを示唆











宇宙と元素の歴史」講談社, 2020 (https://gendai.ismedia.jp/articles/-/70228) 和南城伸也「なぞとき



## ・銀河の構造/分類と銀河形成シナリオ

・元素合成

・銀河の化学進化

・銀河糸形成と今後の展望



### 星の元素組成—分光観測 $[A/B] = \log_{10}(N_A/N_B) - \log_{10}(N_A/N_B)_{\odot}$



©NASA

#### Extremely metalpoor star

#### Hyper metal-poor star

©NAOJ





### **銀河の化学進化** [Fe/H] :時間と共に増加 [元素/Fe] :元素の起源・

古い星

( )





#### [元素/Fe]:元素の起源・星間空間への元素の混合過程を反映

## 銀河中の星の元素組成(例:Mg)

#### 時間スケール



## 鉄より重い元素の観測値 (銀河系)

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

起源天体は未だ不明 銀河の化学進化を計算することで制限できる

![](_page_35_Picture_3.jpeg)

![](_page_35_Picture_4.jpeg)

## 化学動力学進化シミュレーション 銀河の化学進化と動力学進化を同時に計算

超新星残骸

©NASA

超新星爆発など

![](_page_36_Picture_2.jpeg)

©NAOJ

Gas Column Density [log M <sub>sun</sub> kpc <sup>-2</sup> ]					DM Column Density (log Msun			
4.2	5.0	5.7	6.5	7.2	5.0	5.9	6.8	
A China Maria	1944 3	Tit -	a Bech		W.S. R.	19-23	and a	
				111-13				
				Sec.				
				Sec. 2				
				Set 1				
\$ . A.								
						s		
4.4	5.2	6.0	6.8	7.6	-2.0	-1.4	-0.8	

Temperature [log K]

Gas Metallicity [log Z  $_{\odot}$ ]

![](_page_36_Picture_7.jpeg)

![](_page_36_Picture_8.jpeg)

![](_page_36_Picture_9.jpeg)

### N体/SPH コードASURA (Saitoh et al. 2008; 2009)

- ・ 星形成モデル (e.g., Okamoto et al. 2003; 2005; Saitoh et al. 2008)
- ・加熱冷却関数 (Cloudy, Ferland et al. 2013)
- ・超新星爆発フィードバック (Hopkins et al. 2018)
- ・化学進化ライブラリ (CELib, Saitoh 2017) - 鉄コア重力崩壊型超新星爆発,ハイパーノバ (yield: Nomoto et al. 2013, 質量範囲: 13–40  $M_{\odot}$ , ハイパーノバ: 5% of 20–40  $M_{\odot}$ )
  - 電子捕獲型超新星爆発 (yield: Wanajo et al. 2018, 質量範囲: Doherty et al. 2015)
  - 回転大質量星 (yield: set F, Limongi & Chieffi 2018, Vrot = 150 kms<sup>-1</sup>)
  - 連星中性子星合体 (yield: Wanajo et al. 2014, 遅延時間分布: t1)
  - la型超新星爆発 (yield: N100, Seitenzahl et al. 2013, 遅延時間分布: t1)

- AGB星 (yield: Cristallo et al. 2009, 2011, 2015) ・元素の拡散 (Hirai & Saitoh 2017)

## 初期条件一孤立した矮小銀河モデル

e.g., Hirai et al. 2017, MNRAS, 466, 2474

![](_page_38_Picture_2.jpeg)

7×10<sup>8</sup> M<sub>☉</sub> 138億年時点での星質量 3×10<sup>6</sup> M<sub>☉</sub> 粒子数: 3×10<sup>5</sup> 重力ソフトニング長:7.8 pc

![](_page_38_Figure_4.jpeg)

![](_page_38_Picture_5.jpeg)

## 矮小銀河の亜鉛組成 (計算値)

![](_page_39_Figure_1.jpeg)

Hirai et al. 2018, ApJ, 855, 63

## 電子捕獲型超新星爆発の放出物

## [Fe/H] < --3で[Zn/Fe] > 0の星を 形成

[Zn/Fe]比の[Fe/H] > -1.5での 分散はみられない

![](_page_39_Picture_6.jpeg)

## [Sr/Fe] vs. [Fe/H]

AGB+NSM: 銀河系の平均値を 説明するには不足

AGB+NSM+ECSN:

- [Fe/H] < -3からECSNが寄与</li>
- ・ ECSNの 質量 範囲に 依存

AGB+NSM+ECSN+RMS:

[Sr/Fe]比を増加させる

AGB+NSMだけでは足り ず、ECSN・RMSの寄与 が必要

![](_page_40_Figure_8.jpeg)

## [Sr/Ba] vs. [Fe/H]

#### SAGA database (Suda et al. 2008; 2017)

![](_page_41_Figure_2.jpeg)

- Milky Way
- Bootes I
- + Canes Venatici I
- Carina
- Coma Berenices
- 💧 Draco
- ដ Fornax
- 🗰 🛛 Grus I
- Hercules
- Horologium I
  - LeolV
- Pisces II
- Reticulum II
- Sculptor
- Segue1
- Sextans
- Triangulum II
- Tucana II
- Tucana III
- Ursa Major II

### [Fe/H] < -2で 分散

### SrとBaの起源天体 は同一でないこと を示唆

![](_page_41_Picture_25.jpeg)

## [Sr/Ba] vs. [Fe/H]

[Sr/Ba]に富んだ星: ECSN由来

モデルC: [Sr/Ba]過剰 →ECSNの親星質量範囲は  $\Delta M < 1 M_{\rm Sun}$ 

![](_page_42_Figure_3.jpeg)

#### Hirai et al. 2019, ApJ, 885, 33

ECSN: 電子捕獲型超新星爆発, RMS: 回転大質量星

Canes Venatici I Canes Venatici II Canes Venatici I Canes Venatici II

## 矮小銀河のrプロセス元素 (計算値)

ន

8

9

#### Hirai et al. 2015, ApJ, 814, 41

![](_page_43_Figure_2.jpeg)

## 矮小銀河では、化学進化が 遅い ([Fe/H] = -3から-2ま で10億年程度)

### 合体時間1億年の中性子星 合体でも観測値を説明可能

![](_page_43_Picture_5.jpeg)

![](_page_44_Picture_0.jpeg)

## ・銀河の構造/分類と銀河形成シナリオ

・元素合成

・銀河の化学進化

・銀河糸形成と今後の展望

![](_page_44_Picture_5.jpeg)

#### 彩内側/ 内側ハローの大部分は過去に降着した矮小銀河由来

![](_page_45_Figure_1.jpeg)

![](_page_45_Picture_2.jpeg)

![](_page_45_Figure_3.jpeg)

## レクチル座II矮小銀河--rプロセス元素に富んだ銀河

![](_page_46_Figure_1.jpeg)

![](_page_46_Picture_3.jpeg)

# rプロセス元素に富んだ星の起源

### 円盤星とは異なる軌道 400 $1^{-5}$ 200 $1^{-5}$ 200 -300 $V_{\phi}$ (km s<sup>-1</sup>)

Roederer et al. 2018, AJ, 156, 179

rプロセス元素に富んだ星は過去に銀河系に降着した矮小銀河で形成された可能性

#### 矮小銀河と似た元素組成

![](_page_47_Figure_5.jpeg)

Xing et al. 2019, Nature Astronomy

![](_page_47_Picture_7.jpeg)

## 銀河形成シミュレーションの分解能

![](_page_48_Figure_1.jpeg)

# 最小の矮小銀河( $m_* \sim 10^3 M_{\odot}$ ) まで分解できるシミュレー ションを行うことが銀河系形 成理解の鍵となる 個々の星を分解したシミュ

レーション

![](_page_48_Picture_5.jpeg)

### **ASURA**/ BRIDGE

Hydrodynamics+*N*-body (Tree) Saitoh et al. 2008, PASJ, 60, 667; Saitoh et al. 2009, PASJ, 61, 481; Fujii et al. 2007, PASJ, 59, 1095

![](_page_49_Picture_5.jpeg)

### **CELib**

Saitoh 2017, AJ, 153, 85 Hirai et al. 2020, arXiv: 2005.12906

## 銀河形成コード ASURA+FDPS

粒子情報

**FDPS** 

領域分割 粒子交換 相互作用計算

Iwasawa et al. 2016, PASJ, 68, 54; Namekata et al. 2019, PASJ, 70, 70

![](_page_49_Picture_13.jpeg)

相互作用カーネル自動生成

PIKG

野村さん講演 (CPSセミナー, 2020年6月16日)

## 星を持つ星の割合の金属量依存性

#### 惑星を持つ星の割合と金属量の関係

![](_page_50_Figure_2.jpeg)

比較的金属量の多い星はいつ・どこでできたのか?

![](_page_50_Figure_4.jpeg)

![](_page_50_Picture_6.jpeg)

![](_page_51_Figure_1.jpeg)

# 銀河内で星団はどのよう

SIRIUS project (Hirai et al. 2020, arXiv: 2005.12906)

### 星団で生まれた星での 惑星形成は?

![](_page_51_Picture_5.jpeg)

## 民との

・星の化学動力学的性質には、元素の起源、銀河の進化史が刻まれている ・鉄より重い元素の合成には、連星中性子星合体、電子捕獲型超新星爆発 などが重要な役割を果たしている

・銀河の化学進化を計算することにより、元素の起源、銀河の進化史を明 らかにすることができる

・高分解能な銀河形成シミュレーションは、銀河形成から惑<u>星形成まで統</u> 一的な理解を得る上で必須のツールとなりうる

![](_page_52_Picture_5.jpeg)