A Census of Sun's Ancestors and their Contributions to the Solar System Chemical Composition

2024/6/26 山口未沙

F. Fiore, F. Matteucci, E. Spitoni, M. Molero, P. Salucci, D. Romano and A. Vasini (2024) https://arxiv.org/abs/2406.08036

【アブスト】

太陽系の化学組成に寄与した様々な種類の星や天体現象 (超新星、新星、白色矮星、中性子星合体、ブラックホール) の割合と発生回数を、太陽近傍 (=太陽を中心とした幅2kpcの環状領域と定義) について計算。その結果、宇宙誕生時から太陽系の形成に至るまで ($t = 0 \sim 9.2$Gyr) に誕生・死滅し、その化学組成に寄与した星（0.8～100$M_\odot$）のうち、93.00%は0.8～8$M_\odot$の星を起源とする単星の白色矮星だった。 残りの 0.64% は SNe Ia、0.40% は新星系 、5.24%は中性子星、0.73%はBH だった。また、太陽金属量12+log(Fe/H)= 7.50 ± 0.04 dex の星は 3.1732·10^{7}個であり、特に太陽はそれらの中で2.6092·10^{7}番目にできたことを示唆。

【ゴール】

太陽系のように生命を宿すことができる第2、3・・・の惑星系が太陽系近傍にどれだけ存在していそうか理論予測する。

【オリジナリティ】

two-infall model を用いて、尚且つ多種類の天体現象の発生頻度を考慮して、MWの化学進化を元素ごとに解いた。

【ロジック】

1回目に primordial gas のinfallで galactic halo と thick disk 形成、2回目のprimordial gas の infall (3.25Gyr後にスタート) で thin disk 形成するというtwo-infall modelに基づき、Kroupa IMF 、SFRにケニカット-シュミット則を導入して、ワンゾーンモデルで各元素iごとに化学進化を解いた。outflowはない。

$$\dot{G}_i(R,t) = -\psi(R,t)X_i(R,t) + \dot{G}_{i,inf}(R,t) + \dot{E}_i(R,t),$$: 各元素iの基礎方程式

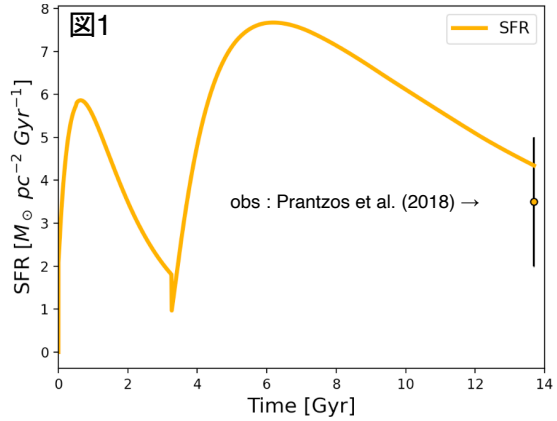
$$\dot{G}_{i,inf}(R,t) = AX_{i,inf}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \theta(t-t_{max})BX_{i,inf}e^{\frac{t-t_{max}}{\tau_2}}$$: gas infall rate

$\tau_1 = 1$ Gyr(thick diskへのaccretionのタイムスケール),
$\tau_2 = 7$ Gyr(thin diskへのaccretionのタイムスケール),
$t_{\max} \simeq 3.25$ Gyr(2回目のinfallが始める時刻)

$X_{i,\mathrm{inf}}$: primordial gas中の元素iの割合

A, B はそれぞれ、現在のMW の thick disk とthin disk の表面密度を再現するように設定

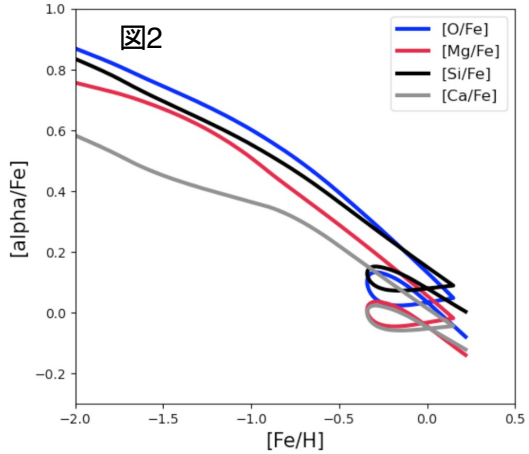
Brown dwarf $(< 0.1\ M_\odot)$, very small stars $(0.1\ M_\odot - 0.8 M_\odot)$, low and intermediate mass stars $(0.8\ M_\odot - 8.0\ M_\odot)$, White dwarfs in binary systems (Type Ia SNe or novae), massive stars $(8 - 10 M_\odot)$, massive stars $(10\ M_\odot - M_{\mathrm{Wolf-Rayet}})$ Type II SNe, merging of compact object を考慮



◆結果と議論：

- 図1 : 予測される太陽近傍におけるSFRの時間進化。太陽近傍の面積~10^8pc^{2}かけると $\int_{0.0}^{9.2\,\mathrm{Gyr}} \psi(t)\,dt = 51\ M_\odot pc^{-2}$. ↑(stellar remnantを含む)

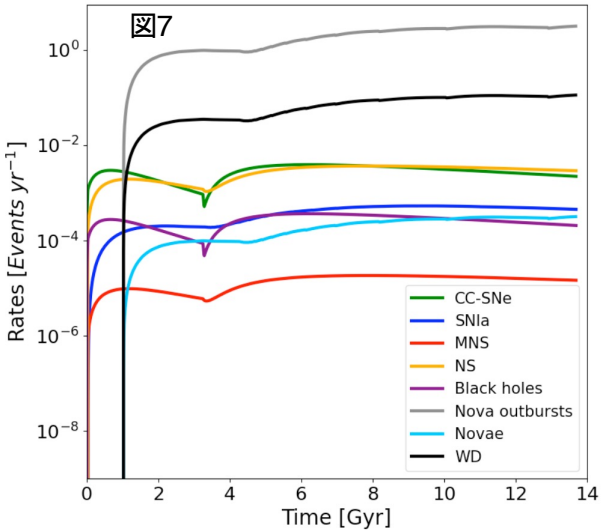
- 図2 : 予測される [Fe/H] vs [α元素 (O, Mg, Si, Ca) / Fe] abundance rations

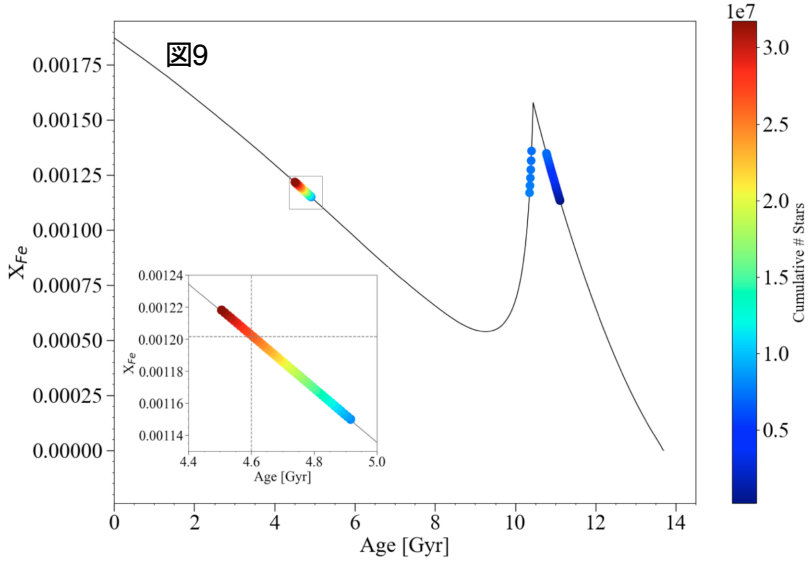


[Fe/H] ~ -1 辺りにkneeが見られる。これは、 α元素 はSNe II からの放出が多いが、時間が経つにつれSNeIa が効いてきてFe が多くなってきていることの現れ。ループはtwo-infall現象の間に発生する星形成のギャップによるもの。

- 図7 : 地球近傍における全ての種類の星・天体現象の発生頻度の時間進化、 - 図9 : 地球近傍における Age (look back time では?) vs Feの質量比X_{Fe}

【コメント】様々な天体現象・星の発生頻度をSFRとIMFから単純に導出しているが、そこにSNe feed backや高エネルギー輻射の影響も入れるとどうなるだろう。





色分けされた点で、太陽と同じ物理的・化学的性質を持つ星の累積数が、
← 4.6±0.1Gyr前までの初期から形成されたことを強調。破線は4.6Gyr前に生まれた太陽に対して予測される鉄の質量割合。

横軸、 look back time では?

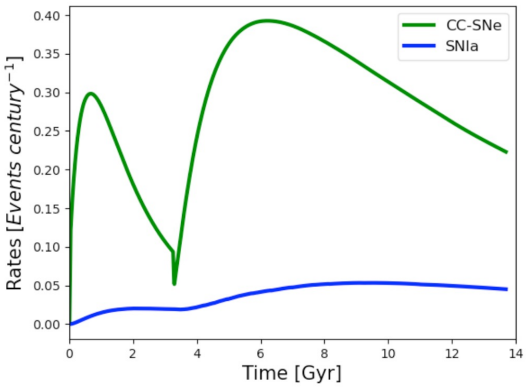


Fig. 3. Predicted rate of core-collapse (green line) compared to that of Type Ia supernovae (blue line) in the solar vicinity.

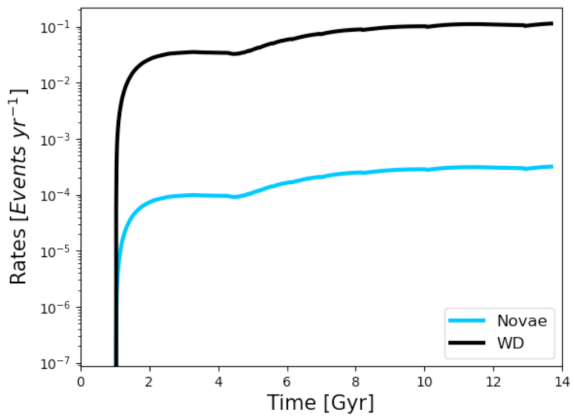


Fig. 4. Comparison of the rate of formation of nova systems and white dwarfs, in the solar vicinity.

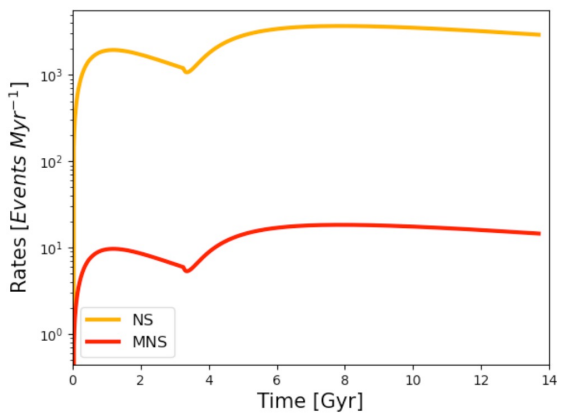


Fig. 5. Rates of neutron star (NS, yellow line) formation and merging neutron star (MNS, red line) predicted by our chemical evolution model for the solar vicinity.

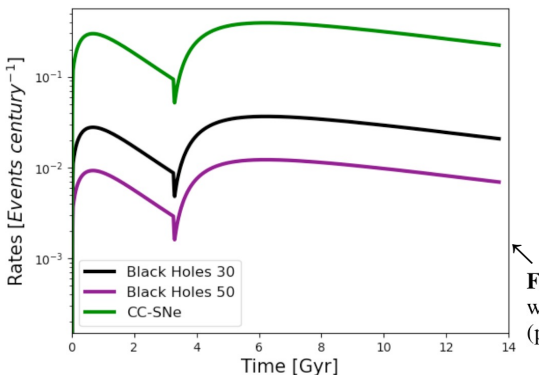


Fig. 6. Comparison between the rate of black holes that come from stars with masses ≥ 30 $M_\odot$ (black line) and from stars with masses ≥ 50 $M_\odot$ (purple line) with CC-SNe (green line), in the solar vicinity.

太陽近傍における宇宙開闢から太陽系形成に至るまでに起きた各eventの発生回数の結果 →

- **Number of Type Ia supernovae**: 2.87 *millions*
- **Number of core-collapse supernovae**: 26.47 *millions*
- **Number of white dwarfs**: 423.88 *millions*
- **Number of nova systems**: 1.8 *millions*
- **Number of nova outbursts**: $1.8 \cdot 10^4$ *millions*
- **Number of neutron stars**: 23.5 *millions*
- **Number of merging neutron stars**: 0.11 *millions*
- **Number of black holes** ($M \geq 30\ M_\odot$) : 2.46 *millions*
- **Number of black holes** ($M \geq 50\ M_\odot$) : 0.82 *millions*

Table 1. Comparison between observational data relative to SN rates (Cappellaro & Turatto 1997) compared with model results. We can see that all theoretical values are consistent with observational data. In the first column there are the observed rates, in the second column the predicted ones and in the third column are the computed total numbers of SNe exploded from the beginning up to the formation of the Solar System.

	Observational Data (whole disc, present-day)	**Rates** (whole disc, present-day)	**Numbers** (solar vicinity, 9.2 Gyr of evolution)
SNeIa	0.43 $SNe/century$	0.45 $SNe/century$	2.87 *million*
CC-SNe	1.93 $SNe/century$	2.23 $SNe/century$	26.47 *million*

Table 2. Comparison between observational data about nova outburst s (Della Valle & Izzo 2020) and model results relative to the rates of formation of WDs, nova systems and nova outburst rate. The legenda is like in Table 1. We note that the observed rates of formation of WDs and nova systems are not available, so only the theoretical values are shown. We can see that both values computed for nova outbursts are consistent with observational data.

	Observational Data (whole disc, present-day)	**Rates** (whole disc, present-day)	**Numbers** (solar vicinity, 9.2 Gyr of evolution)
Nova systems	–	0.0031 $events/yr$	1.18 *million*
Nova outbursts	$25 - 30$ $events/yr$	31 $events/yr$	11.8 *billion*
White dwarfs	–	1.11 $events/yr$	423 *million*

Table 3. Comparison between observational data relative to the MNS rate in the Milky Way (Kalogera et al. 2004) and model results for neutron star formation and MNS rate. We can see that the computed value for the MNS rate is consistent with observational data and results by Molero et al. (2021). Notice that these values were obtained with $\alpha_{NS} = 0.005$

	observational Data (whole disc, present-day)	**Rates** (whole disc, present-day)	**Numbers** (solar vicinity, 9.2 Gyr of evolution)
Neutron Stars	–	29261 $events/Myr$	23.15 *million*
MNS	$83^{+209.1}_{-66.1}$ $events/Myr$	146 $events/Myr$	0.11 *million*

Table 4. Comparison between different model results about the number of black holes with $M_{BH} \geq 30$ $M_\odot$ and $M_{BH} \geq 50$ $M_\odot$ as a percentage of massive stars.

Black holes	$M_{BH} \geq 30\ M_\odot$	$M_{BH} \geq 50\ M_\odot$
Percentage	9.14%	3.00%
Number	2.46 *million*	0.82 *million*