

銀河系における亜鉛の化学進化 Chemical Evolution of Zinc in the Galaxy

Saito, Takada-Hidai, Honda, & Takeda
PASJ, Vol. 61, 549–561 (2009)

比田井昌英、齋藤雄二(東海大学)、
本田敏志(ぐんま天文台)
竹田洋一(国立天文台)

1. 目的

亜鉛の化学進化に関する新たな知見を得る。

- (1) 銀河系における亜鉛組成の観測的な振舞い(化学進化)を明らかにする。
- (2) 観測された亜鉛の化学進化を説明する理論モデルの検証を行う。

2. 観測データ

- $-4.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$ の領域のデータ
- LTE 解析による組成値 ⇒ 各文献値をそのまま採用。

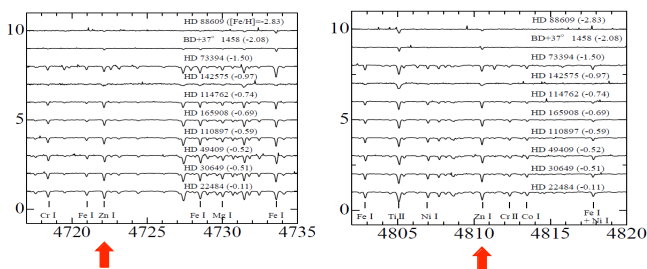
- (1) 我々のデータ:
岡山天体物理観測所 HIDES 高分散分光観測 2003年10月–2005年4月
35 星... Halo star 15
Thick disk + Transition star 13
Thin disk star 7
- (2) 文献データ: 10件
Aoki et al (2005, 2007) Primas et al. (2000)
Cayrel et al (2004) Ecuivillon et al (2004)
Gratton et al (2003) Johnson (2002)
Mishenina et al (2002) Nissen et al (2007)
Snedden et al (1991)
小計 399 星
総計 434 星 (重複あり)

Table 1. Basic data of sample stars.

Star	Spectral Type	σ (mas)	$E(B-V)$	V	M_{bol}	$V-K$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	Reference ^a K_s $[\text{Fe}/\text{H}]$	Population
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
HD 2655	G8IIfc	2.11	0.065	7.32	-1.15	2.25	-2.68	1.5	Halo
HD 6268	G0	1.94	0.017	8.09	-0.91	2.38	-2.36	1.6	Thick
HD 6831	G8III	4.25	0.096	6.75	-0.88	2.94	-0.79	2.5	Halo
HD 17948	F4V	37.78	0.006	5.59	3.47	1.13	-0.29	1.7	Thin
HD 21581	G0	4.27	0.078	8.70	1.33	2.29	-1.73	1.8	Thick
HD 22484	F8IV-V	72.89	0.006	4.29	3.48	1.39	-0.11	5.7	Thin
HD 25532	F8IV-V	4.39	0.090	8.20	0.95	1.97	-1.46	4.9	Thick
HD 29274	G8/9IIIfc	0.66	0.202	8.33	-3.86	3.49	-1.81	1.6	Halo
HD 30649	G1V-VI	33.44	0.006	6.94	4.35	1.50	-0.51	1.10	Thick
HD 42552	G0	7.54	0.059	8.00	1.96	1.91	-1.29	1.8	Halo
HD 49499	G8V	19.96	0.011	7.92	4.22	1.57	-0.52	1.11	Thick
HD 59984	F5V	33.40	0.005	5.90	3.34	1.42	-0.87	1.7	Thin
HD 73394	G8IIfc	2.18	0.027	7.70	-1.22	2.74	-1.49	1.12	Halo
HD 74462	G8IV	1.55	0.050	8.69	-0.97	2.64	-1.56	1.6	Halo
HD 78050	G0	2.66	0.034	7.68	-0.56	2.13	-1.08	1.13	Halo
HD 88699	G8IIfc	0.63	0.009	8.59	-2.94	2.58	-2.83	1.5	Halo
HD 97560	G0	3.13	0.014	7.88	-0.11	1.87	-1.17	1.13	Halo
HD 103936	G8IIfc	0.72	0.028	8.19	-3.34	3.14	-1.20	1.11	Halo
HD 105346	G8IIfc	1.96	0.021	8.61	-0.23	1.94	-1.27	1.6	Thick
HD 108976	F8V	12.68	0.008	8.56	3.90	1.16	-0.45 [†]	1.1	Thin
HD 108977	G0V	57.57	0.002	5.95	4.58	1.49	-0.59	1.10	Thick
HD 114762	F8V	24.65	0.007	7.30	4.07	1.49	-0.74	1.10	Thick
HD 115444	K0	3.55	0.012	8.96	1.28	2.35	-2.77	1.9	Transition
HD 126167	F8V	64.66	0.001	4.47	3.44	- [†]	-0.41	10	Thin
HD 142575	F8V	6.56	0.036	8.60	2.46	1.09	-0.97	1.13	Thick
HD 153358	G0	23.04	0.006	7.28	3.91	1.47	-0.67	1.10	Transition
HD 165908	F5V	63.88	0.003	5.05	3.92	- [†]	-0.69	1.5	Thin
HD 206739	G0V	0.69	0.053	8.56	-2.81	2.53	-1.58	1.6	Halo
HD 207978	F8IV-V	36.15	0.007	5.52	3.17	1.19	-0.55	1.7	Thin
HD 216143	G5	3.14	0.037	7.80	-0.31	2.65	-2.09	1.5	Halo
HD 221170	G2IV	2.80	0.118	7.67	-1.35	2.83	-2.03	1.5	Thick
HD 232078	K3IIfp	1.61	0.293	8.57	-2.20	4.65	-1.54	2.6	Thick
HD 233991	G8IIfc	0.41	0.017	8.80	-3.50	2.19	-1.58	1.6	Halo
HD +30 2611	G8III	3.45	0.016	9.13	-2.39	3.04	-1.49	1.9	Halo
HD +37 1458	G0	5.78	0.059	8.92	2.29	1.83	-2.08	1.5	Halo

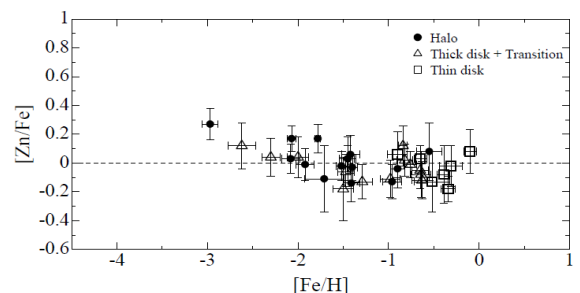
^a 1. 2MASS Two Micron All Sky Survey), 2. Alonso et al. (1986), 3. Blackwell & Lynas-Greg (1994), 4. Alonso et al. (1994), 5. Takada-Hidai et al. (2005), 6. Baran et al. (2000), 7. Takada-Hidai et al. (2002), 8. Pilchowski et al. (1993), 9. Pilchowski et al. (1996), 10. Edvardsson et al. (1993), 11. Yoon et al. (2001), 12. Alonso et al. (1996), 13. Yoon et al. (2004).
[†] $(b-p) = 0.254$ and $c_1 = 0.80$ were adopted from Hauck & Mermilliod (1998).
[‡] $(b-p) = 0.256$ and $c_1 = 0.322$ were adopted from Hauck & Mermilliod (1998).
[§] This value was estimated by our iterative calculation of the initial abundance of $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.43$ adopted from Chiba & Beers (2000).

2.1. Zn I 4722Åと4810Å 吸収線観測例(HIDES)



3. 亜鉛の振る舞い

(1) 我々のHIDES データ



結果(1)

- (1) $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ において、thick disk star はthin disk star 同
じ振る舞いを示す。 $[\text{Zn}/\text{Fe}] \sim 0$ に分布。

従来の振る舞いと合致しない。

特に $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$ dex付近で

- thick disk は $[\text{Zn}/\text{Fe}] > 0$ 傾向, ~ 0.1 dex程度の超過
- thin disk は $[\text{Zn}/\text{Fe}] \sim 0$ に分布傾向あり

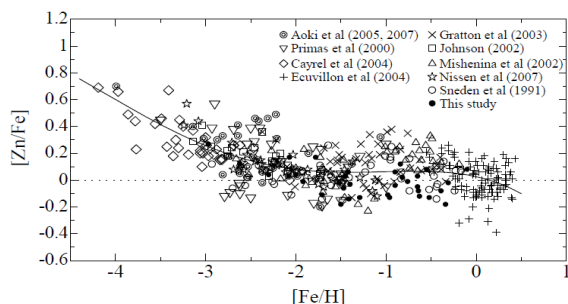
＜より大規模サンプルで確認すること＞

- (2) 全体的には、 $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ において、従来の結果と合致
して、 $[\text{Zn}/\text{Fe}] \sim 0$ で平坦な傾向を示す。
- (3) $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2$ において平坦から増加傾向に転ずることが
示唆される。=> 確認できず。

(2) 全体の傾向

我々+10文献=11データセットに基づく 434 星

(2.1) best fit = 4次多項式



(2.2) $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.5$ dex bin における 平均値と 1σ 分散(error bar)

• Table 6 のデータを赤色の誤差棒付きドットで示した。

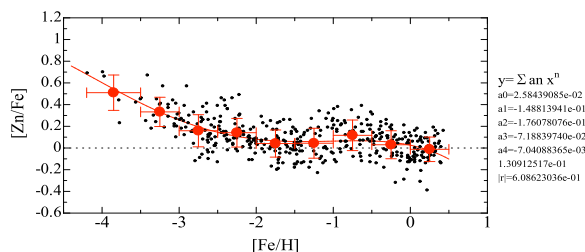


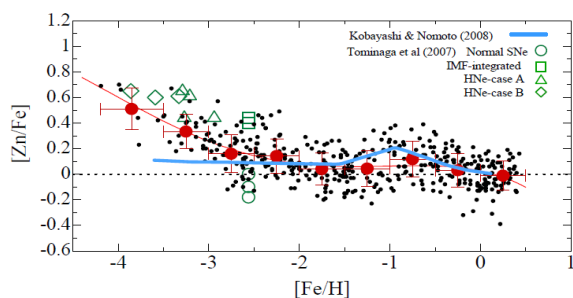
Table 6. Average values of $[\text{Zn}/\text{Fe}]$, their standard deviations, scatters estimated as the difference of maximum and minimum values of $[\text{Zn}/\text{Fe}]$, and the number of stars in each range of $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Range	Average	Std. Dev.	Scatter	No. of Stars
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$-4.2 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.5$	0.510	0.163	0.47	8
$-3.5 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$	0.333	0.135	0.57	23
$-3.0 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$	0.159	0.148	0.70	53
$-2.5 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$	0.141	0.132	0.60	65
$-2.0 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.5$	0.041	0.125	0.49	55
$-1.5 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$	0.044	0.138	0.57	52
$-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.5$	0.117	0.141	0.52	49
$-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.0$	0.030	0.129	0.63	68
$0.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$	-0.012	0.113	0.58	61

結果(2.1—2.2)

- 1) $-4.2 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$
金属度増加と共に減少する。
分散 = 0.6—0.7 dex 他領域より大きい分散
- 2) $-2.0 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$
平坦な傾向 ... 平均値 ~ 0.07 dex
従来結果と合致する。
- 3) $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.5$
超過傾向を示す。 $+0.12$ dex 新たな確認
- 4) $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$
緩やかな減少傾向 ... $+0.07$ dex $\rightarrow 0$

(3) 観測と理論の比較



結果(3)

1) $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ (EMP星)領域:

- ZnはHN($M > 20M_{\odot}$)により**爆発的合成過程**で形成される。
⇒ 完全ケイ素燃焼

- 混合降着モデル(ジェット状SNに対応)の組成は、観測値とよく一致し、**組成の分散は、それぞれのHN 観星質量と爆発エネルギーの多様性**に対応する。⇒ SN爆発星形成モデルを支持
⇒ 星間物質の急速混合の要請は必ずしも必要ではない。

- 観測された分散(0.6-0.7dex)は、組成決定誤差(0.1~0.15dex)を考慮すると、有意に大きいとは言えない。⇒ Tominaga et al (2007) と、混合されているとする Cayrel et al (2004) の主張の両方に矛盾しない。

2) $-3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2$ (VMP 星)領域:

- 標準的SN、HNの生成物をSalpeter IMF重率積分した組成は、**観測と一致する。**

- $-3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$ では、観測された分散: 0.7 → 0.5 dex
この変化が本当であれば、Argast et al (2000) の示唆が妥当である。
⇒ 星間物質は $-3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2$ で未混合から混合状態へ遷移する。

3) $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ 領域:

- ZnはSNIとHNにより生成・放出される。
⇒ **metallicity effect** により $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5$ より増加する。

- **$[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ でSNIaが発生し始める。** <= **Metallicity effect**
⇒ 鉄がZnの生成量を凌駕



$[\text{Zn}/\text{Fe}]$ は **$[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ でピーク後、**
減少して太陽値へ向かう。

- SNIa のモデルは、Single-Degenerate (SD) シナリオが合理的である。
(SD scenario: MS + WD or RG + WD)

4. まとめ

1) $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$:

0.1 dex 以上の超過を示し、金属度増加とともに減少する。この振る舞いは種族IIIのcore-collapse SN II あるいは HNモデルに基づく化学進化モデルで説明できる。亜鉛はcomplete Si-burningで形成される。

2) $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$:

平坦な傾向を示すが、 $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$ で有意な超過を示す。

振る舞いは、SNI、HN、SNIa に基づく化学進化モデルで説明される。特に、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ 付近のピークはmetallicity effect とSNIaのSD(WD+MS or RG 連星)シナリオを組み込んだ化学進化モデルにより説明できる。

亜鉛は大質量星のHe, C-burning におけるweak s-processで形成される。