“Tracing the formation of the Milky Way through ultra metal-poor stars”
Sestito, et al. 2018, astro-ph/1811.03099 (Submitted to MNRAS)

GAゼミ@181120　担当：田中幹人

【アブスト】

GAIA DR2のデータも使って、これまで発見されてきたUltra Metal Poor (UMP) starsの起源は何なのか（起源というよりは銀河系のどの構造に所属しているのか）を統計的に推定する研究。41個のUMPのうち、17個はinner halo、12個はouter halo、残りの12個はMW plane。とくにMW planeの12個についてはより詳しい起源を議論。

【ゴール】

既に発見されているUMP星の起源を探る。

【オリジナリティ】

GAIAのデータ（proper motion、色）を加えたところ。
→軌道が求まって、haloやdiskなどどこに属している星かが分かる。

【ロジック】

データ：[Fe/H] < –4.0のUMP stars。
- 論文 → $[\mathrm{Fe/H}]$, $[\mathrm{C/Fe}]$, v_r, T_{lit}, $\log(\mathrm{g})_{lit}$
- GAIA DR2 →

the dereddened G_0, BP_0 and RP_0 magnitudes, proper motion μ_α, μ_δ and the parallax ϖ

推定する物理量：

- 距離：MESA/MIST isochronesとGAIAの測光データを使ったphotometricな尤度，固有運動を使ったastrometricな尤度、そして事前分布は、haloだけ、thick disk＋haloの2種類を適用してベイズ推定。
- 有効温度と表面重力：距離で使ったphotometricな尤度を、isochronesから見積もられるTとlog(g)にした尤度に変更し、後は距離の時と同じでベイズ推定。
- 軌道：推定した距離と、GAIA DR2の固有運動から、(vr, vα, vδ)の確率分布をもとめる。それと銀河系のポテンシャルを使って、galpy（Bovy15）で軌道をもとめる。銀河系ポテンシャルは、power-law、cutoff bulge、宮本・永井ポテンシャルディスク、NFW dark matter haloを合わせたMWPotential14を適用。

推定した軌道から予測する41個のUMPの起源：

- 17個：inner halo、遠銀点が、30kpcより小さい星として定義。
- 12個：outer halo、遠銀点が、30kpcより大きい星として定義。
- 12個：MW plane、|Z| < 3.0kpc の星として定義。

→haloの4つが銀河面に垂直方向の軌道で、内3つがSagittarius Streamのシミュレーションと一致。

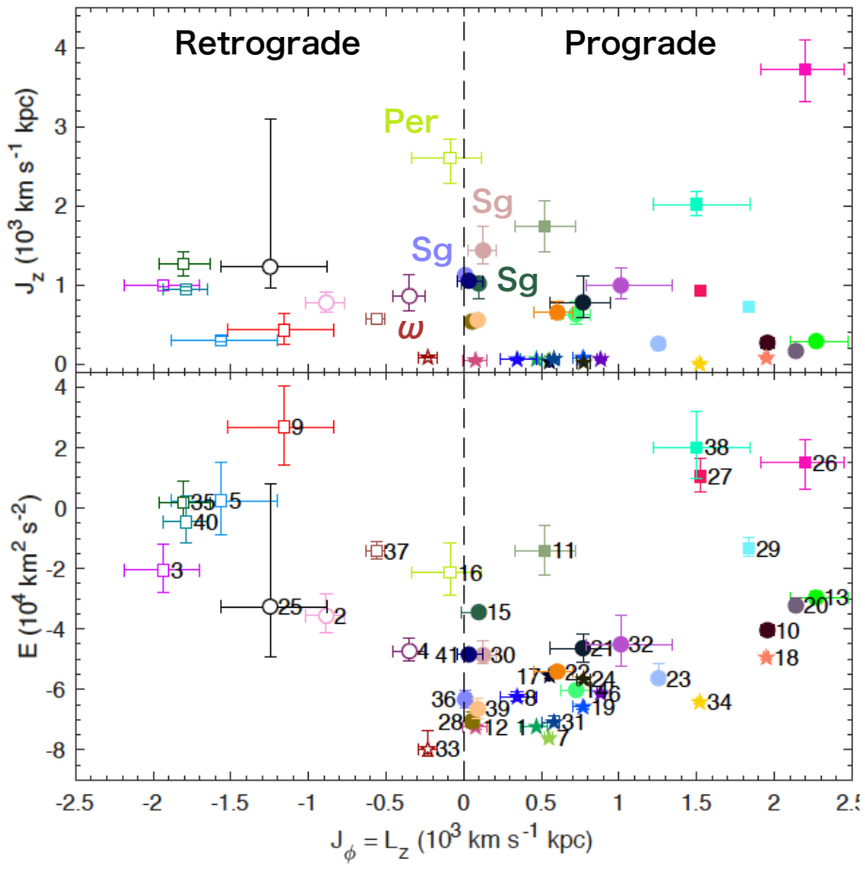
12個のMW plane軌道の星の起源

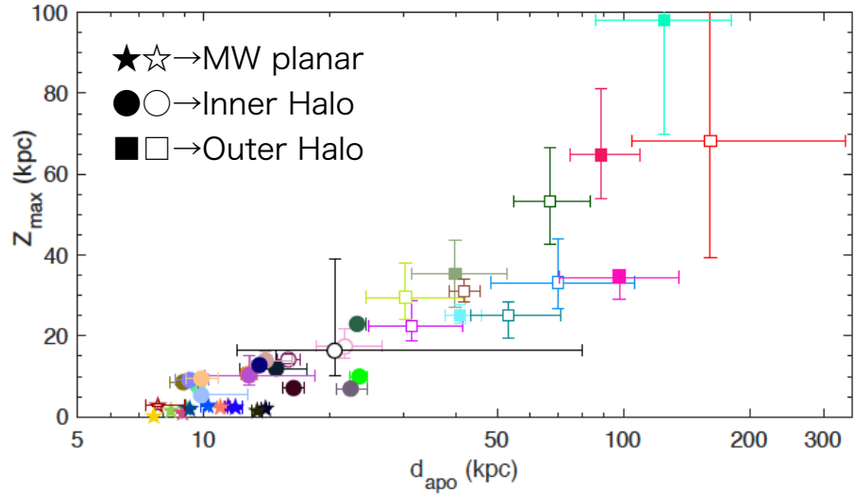
9個がLz > 0でprograde, 2つがcircular orbit、残り1つがretrogradeで、inner haloの軌道に近く、ωCenと繋がりがあるかも？→11個がLz>0なのは確率的にランダムではない。

△シナリオ1：HI diskが出来た後、MW diskで形成した。
→ HIがすでにenrichされ、well-mixedされてるからなさそう。UMP星を作るためのpristine gasはすでにこの時代には存在してないだろう。さらに、これらの星のほとんどがeccentric orbitなのは、遠心力でサポートされたガス円盤で形成した可能性を否定する。

○シナリオ2：massive矮小銀河のaccretion。
→ 宇宙論的シミュレーションから、merger eventがdiskとalignedされることもあり、その結果、disk内のstellar populationで、merger debrisかもしれない（Gomez+17）。
→ または、simulated MW-like disk銀河のdisk starの5-20%は、in situで形成されていない代わりに、co-planar orbitで今まさに壊された衛星銀河からのaccretion（Scannapieco+11）。

○シナリオ3：proto-MWのbuilding blocks。（2と何が違うかよくわからないけど、MWの大本となる銀河？）
宇宙論的シミュレーションによると、z=5より前にできた星は、現在銀河系中心から10kpc以内にいる。





【コメント】

inner halo、outer halo、MW planeの分け方が意図的なので、イマイチUMP星の本当の起源が何なのか分からん。
→定義が間違ってたら破綻する議論。

前ページの図のマークに対応→

Table 1

Identifier	α_{J2000} (deg)	δ_{J2000} (deg)	[Fe/H] (dex)	$\delta_{[Fe/H]}$ (dex)	[C/Fe] (dex)	$\delta_{[C/Fe]}$ (dex)	v_r (km s^{-1})	δ_{v_r} (km s^{-1})	T_{lit} (K)	$\delta_{T_{lit}}$ (K)	log(g)$_{lit}$ (dex)	$\delta_{log(g)_{lit}}$ (dex)	E(B-V) (mag)	Binarity	References
SDSS J0023+0307	5.80834363858	3.13284420892	< -6.6	–	< 2.0	–	−110	9	6140	132	4.8	0.6	0.028	N	Aguado et al. (2018)
HE 0044-3755	11.6508144643	−37.6593210379	−4.19	–	−0.3	–	48.3	2.5	4800	100	1.5	0.1	0.010	N	Cayrel et al. (2004)
HE 0057-5959	14.9749409617	−59.7249294278	−4.08	–	0.86	–	375.64a	1	5257	–	2.65	–	0.016	N	Norris et al. (2007), Norris et al. (2013)
HE 0107-5240	17.3714810637	−52.4095009821	−5.5	0.2	3.85	–	46.0a	2.0	5100	150	2.2	0.3	0.011	Ya	Christlieb et al. (2004)
HE 0134-1519	24.2724039774	−15.0729979538	−4.0	0.2	1.00	0.26	244	1	5500	100	3.2	0.3	0.016	N	Hansen et al. (2015)
SDSS J014036.21+234458.1	25.1509195676	23.7495011637	−4.0	0.3	1.1	0.3	−197a	1	5703	100	4.7	0.3	0.114	Ya	Yong et al. (2013)
BD+44 493	36.7072451683	44.9629239592	−4.3	0.2	1.2	0.2	−150.14	0.63	5430	150	3.4	0.3	0.079	N	Ito et al. (2013)
HE 0233-0343	39.1241380137	−3.50167460698	−4.7	0.2	3.48	0.24	64	1	6300	100	3.4	0.3	0.022	N	Hansen et al. (2015)
BPS CS 22963-0004	44.1940476203	−4.85483952327	−4.09	0.15	0.40	0.23	292.4	0.2	5060	42	2.15	0.16	0.045	N	Roederer et al. (2014)
SDSS J030444.98+391021.1	46.1874375223	39.1725764233	−4.0	0.2	0.7	–	87	8	5859	13	5.0	0.5	0.111	N	Aguado et al. (2017)
SMSS J031300.36-670839.3	48.2515614545	−67.1442601577	< -6.53	–	4.5	0.2	298.5a	0.5	5125	–	2.3	–	0.032	N	Keller et al. (2014), Nordlander et al. (2017)
HE 0330+0148	53.158696449	1.96666957231	−4.0	0.1	2.6	–	−33.6a	1	4100	200	5.2	0.1	0.094	Y	Plez, Cohen & Meléndez (2005)
HE 0557-4840	89.6636087844	−48.6658029727	−4.8	0.2	1.65	–	211.9	0.8	4900	100	2.2	0.3	0.037	N	Norris et al. (2007)
SDSS J081554.26+472947.5	123.976115075	47.4965559814	< -5.8	–	>5.0	–	−95	23	6215	82	4.7	0.5	0.063	N	Aguado et al. (2018)
SDSS J092912.32+023817.0	142.301366238	2.63806158906	−4.97	–	< 3.91	–	388.3	10.4	5894	–	3.7	–	0.053	Y	Bonifacio et al. (2015), Caffau et al. (2016)
SDSS J094708.27+461010.0	146.784471294	46.1694746754	−4.1	0.2	1.0	0.4	−5	12	5858	73	5.0	0.5	0.013	N	Aguado et al. (2017)
HE 1012-1540	153.722814524	−15.9314366402	−4.17	0.16	2.2	–	225.8a	0.5	5230	32	2.65	0.2	0.061	N	Roederer et al. (2014)
SDSS J102915+172927	157.313121378	17.4910907404	−4.99	0.06	<0.7	–	−35	4	5850	100	4.0	0.2	0.023	N	Caffau et al. (2011)
SDSS J103402.70+070116.6	158.511301205	7.02129528322	−4.01	0.14	–	–	153	3	6270	–	4.0	–	0.02	N	Bonifacio et al. (2018)
SDSS J103556.11+064143.9	158.983818359	6.6955582264	< -5	–	3.08	–	−45	6	6262	–	4	–	0.024	N	Bonifacio et al. (2015)
SDSS J105519.28+232234.0	163.830333515	23.3761158455	−4.00	0.07	<0.7	–	62	4	6232	28	4.9	0.1	0.015	N	Aguado et al. (2017)
SDSS J120441.38+120111.5	181.172452065	12.019865284	−4.34	0.05	<1.45	–	51	3	5917	–	3	–	0.024	N	Placco et al. (2015)
SDSS J124719.46-034152.4	191.831114232	−3.69791795379	−4.11	0.18	<1.61	–	84	6	6332	–	4	–	0.022	N	Caffau et al. (2013b)
LAMOST J125346.09+075343.1	193.44189217	7.89526036289	−4.02	0.06	1.59	–	78.0	0.4	6030	135	3.65	0.16	0.025	N	Li et al. (2015)
SDSS J131326.89-001941.4	198.3620349838832	−0.3281488686298	−4.7	0.2	2.8	0.3	268	4	5525	106	3.6	0.5	0.024	Y	Allende Prieto et al. (2015), Frebel et al. (2015), Aguado et al. (2017)
HE 1310-0536	198.379940261	−5.87014820763	−4.2	0.2	2.36	0.23	113.2	1.7	5000	100	1.9	0.3	0.037	N	Hansen et al. (2015)
HE 1327-2326	202.524748159	−23.6971386187	−5.96	–	3.78	–	64.4a	1.3	6200	100	3.7	0.3	0.066	N	Frebel et al. (2008)
HE 1424-0241	216.668044499	−2.90763517546	−4.05	–	<0.63	–	59.8	0.6	5260	–	2.66	–	0.055	N	Norris et al. (2013), Cohen et al. (2008)
SDSS J144256.37-001542.7	220.734907425	−0.26188939275	−4.09	0.21	<1.59	–	225	9	5850	–	4	–	0.036	N	Caffau et al. (2013a)
Pristine221.8781+9.7844	221.878064787	9.78436859397	−4.66	0.13	<1.76	–	−149.0	0.5	5792	100	3.5	0.5	0.020	N	Starkenburg et al. (2018)
SDSS J164234.48+443004.9	250.643694345	44.5013644484	−4.0	0.2	0.55	0.0	−136	4	6280	150	5.0	0.3	0.011	N	Aguado et al. (2016)
SDSS J173403.91+644633.0	263.516273652	64.7758235012	−4.3	0.2	3.1	0.2	−258	13	6183	78	5.0	0.5	0.028	N	Aguado et al. (2017)
SDSS J174259.67+253135.8	265.748669215	25.526636261	−4.8	0.07	3.6	0.2	−221.93	10.0	6345	–	4	–	0.055	N	Bonifacio et al. (2015)
2MASS J18082002-5104378	272.083464041	−51.0771900644	−4.07	0.07	< 0.5	–	16.54	0.12	5440	100	3.0	0.2	0.101	Y	Meléndez et al. (2016) Schlaufman, Thompson & Casey (2018)
BPS CS 22891-0200	293.829490257	−61.7067706698	−4.06	0.15	–	–	131	10	4490	33	0.5	0.1	0.068	N	Roederer et al. (2014)
BPS CS 22885-0096	305.213220651	−39.8917320574	−4.21	0.07	–	–	−248	10	4580	34	0.75	0.15	0.048	N	Roederer et al. (2014)
BPS CS 22950-0046	305.368323431	−13.2760006492	−4.12	0.14	–	–	111	10	4380	32	0.5	0.1	0.054	N	Roederer et al. (2014)
BPS CS 30336-0049	311.348055352	−28.7099758468	−4.04	0.09	−0.28	0.31	−236.6	0.8	4827	100	1.5	0.2	0.054	N	Lai et al. (2008)
HE 2139-5432	325.676864649	−54.3119357441	−4.02	–	–	–	105a	3	5457	44	2.0	0.2	0.017	Ya	Norris et al. (2013)
HE 2239-5019	340.611864594	−50.0669213083	−4.2	0.2	<1.7	–	368.7	0.5	6100	100	3.5	0.3	0.010	N	Hansen et al. (2015)
HE 2323-0256	351.62419731	−2.66612144628	−4.38	0.15	–	–	−125.8a	0.3	4630	34	0.95	0.13	0.043	N	Roederer et al. (2014)

1 SDSS J0023+0307
2 HE 0044-3755
3 HE 0057-5959
4 HE 0107-5240
5 HE 0134-1519
6 SDSS J014036.21+234458.1
7 BD+44 493
8 HE 0233-0343
9 BPS CS 22963-0004
10 SDSS J030444.98+391021.1
11 SMSS J031300.36-670839.3
12 HE 0330+0148
13 HE 0557-4840
14 SDSS J081554.26+472947.5
15 SDSS J092912.32+023817.0
16 SDSS J094708.27+461010.0
17 HE 1012-1540
18 SDSS J102915+172927
19 SDSS J103402.70+070116.6
20 SDSSJ103556.11+064143.9
21 SDSS J105519.28+232234.0
22 SDSS J120441.38+120111.5
23 SDSS J124719.46-034152.4
24 LAMOST J125346.09+075343.1
25 SDSS J131326.89-001941.4
26 HE 1310-0536
27 HE 1327-2326
28 HE 1424-0241
29 SDSS J144256.37-001542.7
30 Pristine 221.8781+9.7844
31 SDSS J164234.48+443004.9
32 SDSS J173403.91+644633.0
33 SDSS J174259.67+253135.8
34 2MASS J18082002-5104378
35 BPS CS 22891-0200
36 BPS CS 22885-0096
37 BPS CS 22950-0046
38 BPS CS 30336-0049
39 HE 2139-5432
40 HE 2239-5019
41 HE 2323-0256