

文章编号: 1000-8349(2005)04-0346-09

银河系厚盘恒星的年龄 - 金属度关系

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 对太阳邻域内银河系盘星、特别是厚盘恒星年龄 - 金属度关系的研究进展作了较为详细的回顾和评述; 说明目前对盘星是否确实存在年龄 - 金属度关系还存在争议, 而厚盘恒星可能存在这种关系。同时指出, 要得出明晰的结论, 在观测资料的基础上取得合理的恒星样本至关重要。

关键词: 天体物理学; 年龄 - 金属度关系; 综述; 银河系; 银盘; 厚盘

中图分类号: P156 **文献标识码:** A

1 引 言

对于任何一种涉及星系形成和演化的模型来说, 一个重要的内容就是要说明星族的化学演化。许多研究工作表明, 同时利用本地矮星的运动学和元素丰度资料, 便可以对银河系化学演化模型从观测上加以约束, 从而使模型得以精化^[1~6]。在这一点上, 对化学演化的理解主要源自对太阳邻域内恒星的研究, 这是因为近距恒星才能提供比较可靠的观测资料。鉴于太阳邻域恒星的性质对正常星系而言具有一定的代表性, 因而有关的研究结果对于解释其他星系的一些问题同样具有重要的意义。另一方面, 为了进一步改进星系形成和演化模型, 需要考虑的重要因素不仅只是恒星的元素丰度和运动学状态, 而且还应该考虑恒星的年龄, 这就是说需要讨论恒星的各种性质随年龄的变化情况^[2,7~9]。有鉴于此, 在最近的 20 多年中, 关于银盘恒星是否存在年龄 - 金属度关系 (AMR) 的问题引起了人们广泛的注意。

众所周知, 随着时间的推移, 诞生恒星的星际介质中的化学元素会因大质量恒星的星风、特别是超新星爆发的作用而表现为某种增丰过程, 或者说星际介质中重元素的丰度会越来越高。因此, 近期形成的恒星应该比早期形成的恒星有较高的金属度。理论上说, 只要选取一个有代表性的恒星样本, 通过观测取得恒星的年龄和金属度, 就可以导出样本恒星的年龄 - 金属度关系。当然, 实际情况可能比较复杂, 比如还应该顾及无污染气体的内落和恒星位置的变化等因素; 不过这些因素原则上可以通过理论模型加以考虑。因此, 观测到的年龄 - 金属度关系可以对任何星系化学演化模型提供很强的约束。

收稿日期: 2005-03-07; 修回日期: 2005-05-17

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10333020)

1980 年, Twarog^[10,11] 最早对银盘恒星的年龄 - 金属度关系进行了比较系统的研究, 他发现太阳邻域内的盘族恒星存在明显的年龄 - 金属度关系。嗣后, 其他人的一些研究结果也证实了 Twarog 的结论^[12,13]。然而, Edvardsson 等人^[2] 在 1993 年的一项工作对此提出了否定的意见, 他们认为没有明确的证据可以说明太阳邻域内银盘恒星存在年龄 - 金属度关系, 并得到 Feltzing 等人^[14] 的支持, 后者认为所发现的年龄 - 金属度关系是由于选择效应而引起的一种虚假现象, 实际上这种关系并不存在。最近, Bensby 等人^[15,16] 的研究表明, 对银河系中的厚盘恒星来说, 很可能确实存在某种年龄 - 金属度关系。

2 银盘恒星年龄 - 金属度关系的发现

为了正确认识银河系的演化史, 20 世纪 70 年代以来, 人们从理论和观测两个方面做了大量的工作。然而, 鉴于理论模型的不断复杂化, 而观测所能提供的约束条件相对有限, 银河系化学演化的图像并不明晰。在这种情况下, 一些天文学家试图对理论模型补充一个重要的观测约束, 以改进对银河系演化的认识, 这就是通过观测来找出太阳邻域内恒星的年龄 - 金属度关系^[17~22]。遗憾的是, 结果并不令人满意。McClure 和 Tinsley^[23] 指出, 人们所确定的金属度 $[Fe/H]$ 随时间的变化趋势也许是不真实的, 很可能是各类误差 (其中包括选择效应和测光数据的不确定性) 造成的假象。

在这种情况下, Twarog^[10,11] 指出, 银盘恒星 (而不是一般意义上的场星) 的年龄 - 金属度关系可以对银河系演化的理论模型提供重要的约束, 而要确定是否存在这种关系, 最可靠的方法需要用到 $uvby$ 和 $H\beta$ 测光资料, 它们可以用来导出 $[Fe/H]$ 、 $\lg T_e$ (有效温度) 和 M_{bol} (绝对热星等), 同时还要用理论等龄线来进行分析。当然, 对于这类研究工作来说, 首先必须选定合理的、有足够容量的观测样本。

为了确定足够精确的银盘天体的年龄 - 金属度关系, 观测样本需要满足两个最基本的要求: (1) 样本天体的演化应该足够缓慢, 它们在银盘形成之时就已开始, 现在仍然存在, 因而可以观测到; (2) 对于不同年龄的样本天体, 都可以比较容易地估计出它们的年龄和金属丰度。显然, 疏散星团可以很好地满足这两个条件。但是, 疏散星团的数目太少, 特别是最年老的疏散星团为数甚少, 这对于确定它们的年龄 - 金属度关系是很不利的。另一方面, 疏散星团距离太阳比较远, 容易受到银河系丰度梯度的影响^[21,24,25], 从而有可能得出虚假的结果。因此, 只能利用盘场星 (特别是 F 型星^[10]) 作为观测样本进行研究。

为了取得 $uvby$ 和 $H\beta$ 测光资料, 并且保证资料的精度、均匀性和无偏性, Twarog 利用了 Gronbech 和 Olsen 编撰的星表, 该星表给出了赤纬 $+10^\circ$ 以北、星等 m_v 亮于 6.5 mag、光谱型早于 G0 的全部恒星的 $uvby$ 和 $H\beta$ 测光数据^[26,27], 共 2742 颗。光谱型和光度级则取自 Michigan 星表^[28]。此外, 作者还在 CTIO 利用 61 cm 和 91 cm 望远镜作了必要的补充测光观测。在剔除了变星和双星之后, 共有约 1300 颗光谱型为 A5~G5、光度级为 III~V 的盘星样本。用以确定恒星年龄的模型取自 Ciardullo 和 Demarque^[29] 的工作, 并由此得出一系列等龄线。金属丰度的范围取 $Z = 0.001 \sim 0.040$, 相邻等龄线的金属丰度间隔为 0.003, 而氮丰度 Y 则分别取以下 3 种不同的情况: 0.20、0.30 以及在 0.20 和 0.30 之间按 $Y = 0.20 + 3.333(Z - 0.001)$ 规律变化。

在详细考虑了样本恒星的选取以及若干有关的改正因素之后, Twarog^[11] 由 329 颗 F 型矮星所得出的结论是, 无论氦丰度 Y 取何值, 在恒星年龄 130 亿年到太阳年龄这 80 亿年时间段内, 盘星的金属度从 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.00$ 增加到 -0.03 , 而在这段时间之后则基本保持不变, 或者略有增加, 具体情况取决于 Y 的数值, 最近形成的恒星的金属度约为 $+0.10$ 。

Twarog 之后, 一些作者在他的样本的基础上, 对盘星的年龄 - 金属度关系作了进一步的讨论。但由于选取最后分析用样本的不同, 以及确定等龄线和金属度方法上的差异, 结论不尽一致^[12,30~32]。如 Carlberg 等人^[30] 得出了非常平坦的年龄 - 金属度关系, 而 Meusinger 等人^[12] 所得到的结果则与 Twarog 很类似。

上述工作所用的金属度和等龄线年龄是由测光方法取得的, 尽管精度相对较低, 但可供分析的样本容量比较大, 由此所取得的称为测光年龄 - 金属度关系。另一条途径是通过分光方法来研究恒星的金属度, 从而确定分光年龄 - 金属度关系。例如, Lee 等人^[34] 采用了由 Cayrel de Strobel 等人^[33] 的星表中所给出的金属度, 确定了 559 颗盘星的分光年龄 - 金属度关系, 他们的结论与 Twarog 是基本一致的。

Lachaume 等人^[35] 和 Rocha-Pinto 等人^[36] 通过另一条途径来研究盘星的年龄 - 金属度关系, 他们提出利用恒星的色球活动水平来确定晚型星的年龄, 要比由等龄线所确定的年龄更为准确。他们首先从 Olsen^[37~39] 的测光星表以及 Soderblom^[40] 和 Henry 等人^[41] 的色球活动巡天结果中挑出 729 颗公共星, 然后又由是否有 Hipparcos 视差、日心距、视 V 星等、色球活动性等判据剔除了其中的 177 颗恒星, 最后得到 552 颗晚型矮星样本。经过详细分析所得出的结论是, 样本恒星的平均金属度在过去的 120~150 亿年内至少增加了 0.56 dex, 而且这种表征年龄 - 金属度关系的变化是时间的平滑函数^[36], 从而独立地证实了 Twarog 的结论。

3 对盘星年龄 - 金属度关系的争议

Twarog 发现、并被后人所证实的银盘恒星的年龄 - 金属度关系很快引起人们的注意。鉴于问题的复杂性, 特别是观测表明在富金属恒星中既有年轻恒星也有年老恒星, 不同的结论和争议也就随之而来, 如 Edvardsson 等人^[2]、Carraro 等人^[42]、Chen 等人^[43]、Feltzing 和 Gonzalez^[44] 以及 Feltzing 等人^[14] 的工作都对盘星的年龄 - 金属度关系提出了异议。

Edvardsson 等人^[2] 用于研究年龄 - 金属度关系的样本是 189 颗近距 F 型和 G 型盘场星, 所用的是分光方法。他们认为研究结果清楚地表明, 在银盘的生存时期 (100 多亿年) 内, 恒星金属度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 随年龄变化的斜率是非常平坦的, 几乎没有什么增高, 而且在所有年龄段上恒星金属度的弥散度都很大, 其数值 (0.2 dex 左右甚至更大) 可以与当时和目前形成的恒星金属度之差相当, 而且无法用观测误差和分析方法来加以解释, 因为这两个因素引起的金属度的弥散度不会超过 0.1 dex。Edvardsson 等人还进一步讨论了不同银心距恒星的年龄 - 金属度关系, 结果发现只有对那些在太阳银心距 (8 kpc) 附近诞生的恒星似乎存在这种关系, 而对位于这一银心距范围之内或以外的恒星情况就不是这样了。据此, 他们认为关于在盘星的年龄和金属度之间存在明确关系的观念是缺乏根据的; 另一方面, 金属度与银心距的关系则也许说明了在银河系内的不同位置上, 星际介质的化学增丰过程并不是均匀的。

2001 年 Feltzing 等人^[14] 用大样本恒星来研究它们的测光年龄 - 金属度关系, 他们从

Hipparcos 星表挑选了 5828 颗太阳邻域内的矮星和亚矮星, 恒星视差的相对误差小于 25%, 恒星的年龄来自演化迹线, 而金属度则由 Strömgren uvby 测光数据求得, 后者取自 Hauch 和 Mermilliod^[45] 编撰的星表。研究表明, 样本恒星并未呈现 Twarog 所发现的年龄 - 金属度关系, 在年龄 - 金属度图上恒星的分布相当弥散, 特别是确实存在一些年老的富金属星, 从而证实了 Edvardsson 等人的结论。这项工作所用的恒星样本要比以往所有研究的恒星样本大 10 倍以上, 其结果应该更具有说服力。

为了说明他们的结果与 Twarog 发现的年龄 - 金属度关系的不一致, Feltzing 等人^[14] 在他们的工作中对选择效应作了详细的讨论, 其中主要是星等和有效温度。Twarog^[11] 样本只包含了视星等 m_v 亮于 6.5 mag 的亮星, 而 Feltzing 等人样本中的恒星至少要比这暗 3 mag, 尽管前者已就星等的不完备性从理论上作了改正, 但后者显然能更好地反映银盘的实际情况。另一方面, Twarog 通过模拟计算发现, 选取样本时恒星有效温度的截断判据不会影响到所导出的年龄 - 金属度关系。但是, Feltzing 等人的大样本研究表明, 随着截断有效温度的降低, 对恒星年龄 - 金属度图的样式会有很大的影响。因此, 他们认为 Twarog 所发现的年龄 - 金属度关系不是真实的规律, 而是由视星等和有效温度的选择效应造成的假象。

4 厚盘恒星的年龄 - 金属度关系

1983 年 Gilmore 和 Reid^[46] 发现了银河系厚盘, 人们开始认识到银盘是由两个不同的成分——薄盘和厚盘所组成的, 它们的总体运动学状态明显不同; 这一发现很快引起天文学家的广泛关注。就目前所知, 厚盘恒星的平均金属度约为 -0.6 dex^[47], 标高为 800~1300 pc^[48,49]; 作为比较, 薄盘恒星的平均金属度则在 -0.1 dex 左右, 标高 100~300 pc^[46,50]。最近的一些工作进一步表明, 薄盘恒星和厚盘恒星在元素丰度上表现出有不同的变化趋势^[4,5,51~55]。上述研究引出了一个值得注意的问题, 那就是在以 Edvardsson 和 Feltzing 等人为代表的工作中, 没有发现太阳邻域内的盘星存在年龄 - 金属度关系, 是否起因于星族效应, 即样本恒星并非属于单一的星族, 它们实际上是两个 (甚至两个以上) 星族恒星的混合体, 而不同的星族自然应该有着不同的元素增丰史。例如, 一些研究表明, 就 α 元素而言, 厚盘恒星明显表现出因 Ia 型超新星爆发对星际介质造成的元素增丰过程, 而相对来说薄盘的化学演化较为平静^[5,6,55]。正是鉴于对上述问题的考虑, Bensby 等人^[15,16] 最近就厚盘恒星可能存在的年龄 - 金属度关系作了研究。

关于厚盘恒星样本的选取, Bensby 等人采用了以下步骤:

(1) Hipparcos 星表中视差测定相对误差小于 25%, 且有视向速度发表的全部恒星, 共约 12600 颗, 其中视向速度取自 Barbier-Brossat 等人^[56] 于 1994 年编撰的视向速度表。

(2) 为保证取得较为可靠的恒星年龄和金属度, 对样本恒星在 CM 图中的位置作了限制, 即样本中不应包括绝对 V 星等 $M_v > 6$ 或者 $M_v < 0$, 以及色指数 $(B - V) > 1$ 或 $(B - V) < 0$ 的恒星。

(3) 运动学判据。假设太阳邻域内不同星族恒星相对本地静止标准在银道直角坐标系中的空间运动速度分量 (U, V, W) 分别服从不同的三维正态分布, 然后便可以计算每一颗恒星属于薄盘 (D)、厚盘 (TD) 或晕 (H) 这 3 个不同星族的概率 $P_i (i = D, TD, H)$, 以及每一颗恒星的

所谓“相对概率” TD/D 和 TD/H 。相对概率的含意是,如果对某一颗恒星有 $TD/D = 10$,则该星为厚盘恒星的可能性是属于薄盘恒星可能性的10倍。 P 的计算公式为

$$P = X \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma_U^2} - \frac{(V - V_{\text{asym}})^2}{2\sigma_V^2} - \frac{W^2}{2\sigma_W^2}\right), \quad (1)$$

其中

$$k = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma_U\sigma_V\sigma_W} \quad (2)$$

为归一化参数, $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W)$ 是速度弥散度, V_{asym} 为非对称流, 而 X 则是太阳邻域内每一星族恒星数在恒星总数中所占的比例。 $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W)$ 和 V_{asym} 的数值取自文献 [5]。 X 为观测值, 就厚盘族恒星来说, 不同作者所得到的结果并不完全一致, 大致范围为 2%~15% [46,49,50,57~59], Bensby 等人经分析后取 $X_{\text{TD}} = 0.10$, $X_{\text{D}} = 0.90$ 和 $X_{\text{H}} = 0.0015$ 。

有了以上的参数值, 便可以利用 (1)、(2) 式就每一颗恒星计算相应的概率和相对概率 TD/D 和 TD/H 。Bensby 等人取满足条件 $TD/D > 2$ 和 $TD/H > 1$ 作为选择厚盘恒星的运动学判据, 共得到 295 颗样本星。

(4) 为了导出恒星的金属度 $[\text{Fe}/\text{H}]$, 需要用 Strömgen 测光资料进行定标。根据 Hauch 和 Mermilliod [45] 的工作, 在上述 295 颗厚盘恒星中, 有 229 颗已发表有 Strömgen 测光资料, 这 229 颗恒星便构成最后用于分析的厚盘恒星样本, 它是依据纯运动学判据选定的。

表 1 和图 1 给出了不同金属度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 样本恒星组的平均年龄 [16], 表 1 中还同时列出了在取更严格的运动学判据 ($TD/D > 10$) 时所得出的相应值。不难看出, 随着金属度的增大恒星年龄逐渐减小。图 2 是不同金属度恒星在 CM 图中的分布和理论等龄线的位置, 金属度自左向右减小, 恒星的年龄则随金属度的减小而增大 [16]。由这些分析结果可以看出, 对于太阳邻域内的厚盘恒星来说, 很可能存在某种年龄 - 金属度关系, 即使取更严格的运动学判据 ($TD/D > 10$), 年龄随金属度而变化的总体趋势仍然保持不变。

表 1 不同金属度恒星的年龄变化 [16]

[Fe/H]	[α /Fe]	$TD/D > 2$						$TD/D > 10$		
		N	Age/Gyr			N	Age/Gyr			
			1/4	1/2	3/4		1/4	1/2	3/4	
-0.90	+0.35	25	8.7	13.6	15.9	19	11.5	14.0	16.6	
-0.80	+0.35	39	11.5	13.5	16.2	31	12.5	13.5	16.0	
-0.70	+0.35	61	11.5	13.2	16.2	47	11.8	13.6	16.5	
-0.60	+0.35	65	11.1	13.0	15.0	44	11.2	13.0	14.9	
-0.50	+0.35	71	9.3	12.1	14.0	46	9.5	11.5	14.0	
-0.40	+0.30	58	8.7	11.7	13.5	39	8.5	11.2	13.8	
-0.30	+0.20	62	8.0	10.8	12.8	32	8.1	10.7	12.6	
-0.20	+0.15	60	7.4	9.5	10.5	26	7.8	9.6	10.6	
-0.10	+0.10	56	5.5	7.7	9.8	22	7.0	8.8	10.5	
0.00	+0.03	35	4.5	8.1	10.1	14	6.5	9.7	10.5	

注: 表中每一组包含了表列金属度 ± 0.15 dex 的所有恒星。

显然, 对于这类研究来说, 样本恒星的“纯度”至关重要。Bensby 等人^[16]经过仔细的分析发现, 在他们取 $TD/D > 2$ 所得到的厚盘恒星样本中仍然有可能混入一些薄盘恒星, 这就是他们把选择厚盘恒星的运动学判据取为更严格的 $TD/D > 10$, 并再次进行讨论的原因, 而结果仍然是基本一致的, 从而说明太阳邻域内的厚盘恒星很可能确实存在年龄 - 金属度关系。如果上述结果能最后得以确认, 那么厚盘恒星形成过程的时间尺度最长可达 50 亿年, 厚盘中 Ia 型超新星保持峰值爆发率的时间尺度为 30~40 亿年, 这支持了厚盘因早期银河系与伴星系的并合而形成的观点, 而薄盘在这之前就已存在了。

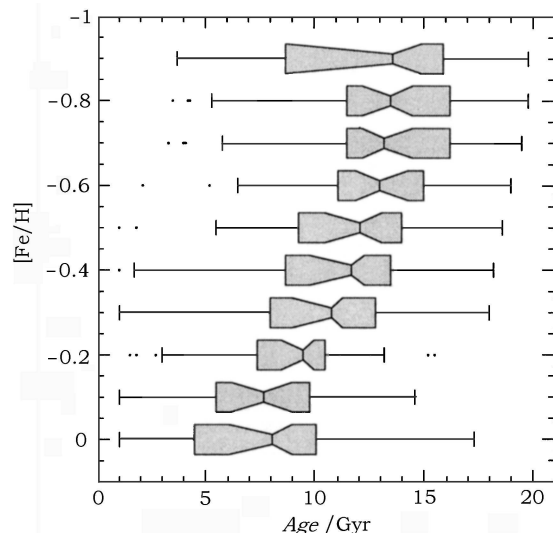


图 1 表 1 数据的图示形式^[16]

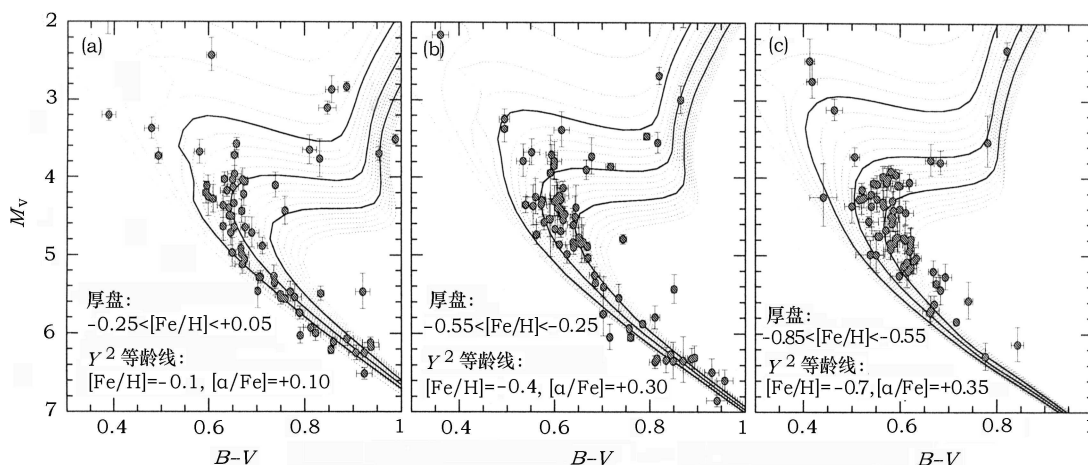


图 2 不同金属度恒星在 CM 图上的分布^[16]

金属度自左向右减小。图中的粗曲线表示年龄为 50、100、150 亿年的等龄线。

5 总结和讨论

银河系太阳邻域内恒星的年龄 - 金属度关系对研究银河系化学演化有着重要的意义, 有关的讨论已经有 30 多年的历史, 其间经历了从研究一般的场星, 到银盘恒星, 再进而到厚盘恒星的细化过程。就目前的状况来看, 对一般的银河系场星并不存在年龄 - 金属度关系, 对银盘恒星来说结论尚未取得一致, 而对厚盘恒星年龄 - 金属度关系的探讨才刚刚开始, 初步研究表明这种关系有可能存在。由上述讨论可知, 在探讨银河系恒星的年龄 - 金属度关系时,

有两个问题特别重要:

(1) 样本恒星的合理选取, 包括样本的容量、“纯度”和覆盖范围。鉴于观测资料的限制, Bensby 等人^[16]用于研究厚盘恒星的样本仅有 229 颗恒星, 样本容量较小, 他们亦意识到了这一点, 但经过分析认为这一样本具有代表性, 并不存在系统性偏差。至于晕星混入盘星样本、或者薄盘恒星混入厚盘恒星样本所引起的样本“纯度”问题实际上是不可能完全避免的, 只能通过一定的方法力求减小它的影响。另一方面, 样本恒星在星等和银面距上的覆盖范围大小取决于观测资料。比如, 厚盘恒星在银道面附近恒星中所占的比例很小, 只有在银面距 1.5 kpc 以远处才会明显超过薄盘恒星。正如 Bensby 等人^[16]所指出的那样, 必须在更大的银面距范围上取得容量更大的厚盘恒星样本, 并且在精确确定样本恒星的金属度和年龄之后, 才能更明确地证实厚盘恒星是否存在明晰的年龄 - 金属度关系。

(2) 分析用的方法。就厚盘恒星的年龄 - 金属度关系而言, Bensby 等人力图用纯运动学判据来选取样本恒星的作法是合理的。但是, 他们在应用方程 (1)、(2) 计算概率和相对概率时, 方程中的所有参数却采用了从别的样本所得到的结果, 这些参数包括不同星族恒星的速度弥散度 ($\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$)、非对称流 V_{asym} 、每一星族恒星数在恒星总数中所占的比例 X 等。显然, 这样做理论上是不够严格的。更好的做法是应该通过合理的途径, 从被研究恒星本身来确定不同星族相应的各个参数, 然后再由 (1) 和 (2) 式来确定各别恒星属于某一星族的概率。

鉴于银河系不同星族恒星的年龄 - 金属度关系对于建立银河系化学演化模型, 以及对于探索星系化学演化过程有着重要的意义, 随着观测资料的累积和分析方法的改进, 可以预期在不远的将来天体物理学家对这一问题的研究将会取得更为明确的结论。

参考文献:

- [1] Chiappini C, Romano D, Matteucci F. MNRAS, 2003, 339: 63
- [2] Edvardsson B, Andersen J, Gustafsson B *et al.* A&A, 1993, 275: 101
- [3] Feltzing S, Gustafsson B. A&AS, 1998, 129: 237
- [4] Feltzing S, Bensby T, Lundström I. A&A, 2003, 397: L1
- [5] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2003, 410: 527
- [6] Reddy B E, Tomkin J, Lambert D L *et al.* MNRAS, 2003, 340: 304
- [7] Raiteri C M, Villata M, Navarro J F. A&A, 1996, 315: 105
- [8] Pilyugin L S, Edmunds M G. A&A, 1996, 313: 792
- [9] Berczik P. A&A, 2000, 348: 371
- [10] Twarog B A. ApJS, 1980, 44: 1
- [11] Twarog B A. ApJ, 1980, 242: 242
- [12] Meusinger H, Stecklum B, Reimann H-G. A&A, 1991, 245: 57
- [13] Rocha-Pinto H J, Maciel W J, Scalo J *et al.* A&A, 2000, 358: 850
- [14] Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R. A&A, 2001, 377: 911
- [15] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2003, 410: 527
- [16] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2004, 421: 969
- [17] Eggen O J. Vistas Astron., 1970, 12: 367
- [18] Powell A L T. MNRAS, 1972, 155: 483
- [19] Clegg R E S, Bell R A. MNRAS, 1973, 163: 13
- [20] Mayor M. A&A, 1974, 32: 321
- [21] Mayor M. A&A, 1976, 48: 301

- [22] Perrin M N, Hejlesen P M, Cayrel de Strobel G *et al.* A&A, 1977, 54: 779
- [23] McClure R D, Tinsley B M. ApJ, 1976, 208: 480
- [24] Janes K A. ApJS, 1979, 39: 135
- [25] Peralta M J C. A&A, 1975, 45: 87
- [26] Gronbech B, Olsen E H. A&AS, 1976, 25: 213
- [27] Gronbech B, Olsen E H. A&AS, 1977, 27: 443
- [28] Houk N, Cowley A P. Michigan Catalog of Spectral Types, Vol. 1, Ann Arbor: University of Michigan, 1975
- [29] Ciardullo P, Demarque P. Transaction of the Astronomical Observatory of Yale University, New Haven; Astronomy Observatory, 1977: 33
- [30] Carlberg R G, Dawson P C, Hsu T *et al.* ApJ, 1985, 294: 674
- [31] Ann H B, Kang Y H. Journal of the Korean Astronomical Society, 1985, 18: 79
- [32] Marsakov V A, Shevaley Yu G, Suchkov A A. Ap&SS, 1990, 172: 51
- [33] Cayrel de Strobel G, Bentolila C, Hauck B *et al.* A&AS, 1985, 59: 145
- [34] Lee S W, Ann H B, Sung H. Journal of the Korean Astronomical Society, 1989, 22: 43
- [35] Lachaume R, Domonik C, Lanz T *et al.* A&A, 1999, 348: 89
- [36] Rocha-Pinto H J, Maciel W J, Scalo J *et al.* A&A, 2000, 358: 850
- [37] Olsen E H. A&AS, 1983, 54: 55
- [38] Olsen E H. A&AS, 1993, 102: 89
- [39] Olsen E H. A&AS, 1994, 104: 429
- [40] Soderblom D R. AJ, 1985, 90: 2103
- [41] Henry T J, Soderblom D R, Donahue R A *et al.* AJ, 1996, 111: 439
- [42] Carraro G, Ng Y K, Portinari L. MNRAS, 1998, 296: 1045
- [43] Chen Y Q, Nissen P E, Zhao G *et al.* A&AS, 2000, 141: 491
- [44] Feltzing S, Gonzalez G. A&A, 2001, 367: 253
- [45] Hauch B, Mermilliod M. A&AS, 1998, 129: 431
- [46] Gilmore G, Reid N. MNRAS, 1983, 202: 1025
- [47] Wyse R F G, Gilmore G. AJ, 1995, 110: 2771
- [48] Reylé C, Robin A C. A&A, 2001, 373: 886
- [49] Chen B. ApJ, 1997, 491: 181
- [50] Robin A C, Haywood M, Créze M *et al.* A&A, 1996, 305: 125
- [51] Fuhrmann K. A&A, 1998, 338: 161
- [52] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2004, 415: 155
- [53] Reddy B E, Tpmkin J, Lambert D L *et al.* MNRAS, 2003, 340: 304
- [54] Prochaska J X, Naumiv S Q, Carney B W *et al.* ApJ, 2000, 120: 2513
- [55] Mashonkina L, Gehren T. A&A, 2001, 376: 232
- [56] Barbier-Brossat M, Petit M, Figon P. A&AS, 1994, 108: 603
- [57] Buser R, Rong J, Karaali S. A&A, 1999, 348: 98
- [58] Chen B, Stoughton C, Smith J A *et al.* ApJ, 2001, 553: 184
- [59] Soubiran C, Bienaymé O, Siebert A. A&A, 2003, 398: 141

Age-Metallicity Relation of Stars in the Galactic Thick Disk

ZHAO Jun-liang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: A historic progress on recent studies of whether there is a possible age-metallicity relation of stars in the Galactic disk, especially in the Galactic thick disk, is reviewed in some details. It is shown from investigations given by different authors during last more than 20 years that there are some conflicting conclusions on the age-metallicity relation of stars in the Galactic disk. Still, there is a possible age-metallicity relation for stars in the Galactic thick disk. It is pointed out that the key to accurate determination of the age-metallicity relation of stars is how to obtain reasonable, big enough samples of the stars on the basis of more observational data available.

Key words: astrophysics; age-metallicity relation; review; Milky Way galaxy; Galactic disk; thick disk

* * * * *

《天文学进展》关键词的选用规则

关键词是学术论文进入流通和引用的窗口。规范关键词的选择有利于检索和引用。按中国科协学会学术部《关于在中国科协系统科技期刊中规范关键词选择的决定》，《天文学进展》要求发表在本刊的所有学术论文，必须在摘要后列出不少于4个关键词，但不应多于10个。其顺序如下：

第一个关键词为该文主要工作或内容所属二级学科名称。

第二个关键词为该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词为该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等，此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文，此处不写被研究的方法名称，而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个及以后的关键词为在前三个关键词中没有出现的，但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称，或者在题目中出现的作者认为重要的有利于检索和文献利用的名词。

例如《核纪年法确定银河系年龄的研究进展》论文的关键词可选为：天体物理学；银河系年龄；综述；核纪年法；恒星；中子俘获元素；丰度。

《天文学进展》编辑部

2005年12月