

文章编号: 1000-8349(2008)02-0244-13



## 银盘恒星的年龄 — 金属丰度关系研究

梁 波<sup>1</sup>, 李 冀<sup>1</sup>, 曹藏文<sup>1</sup>, 范纬世<sup>1</sup>, 赵 刚<sup>2</sup>

(1. 河北师范大学, 物理科学与信息工程学院 石家庄 050016; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

**摘要:** 该文回顾了恒星的 AMR(年龄 — 金属丰度关系) 研究的历史, 评述了研究的现状; 介绍和比较了确定恒星年龄和金属丰度的有关方法; 分析和讨论了最近有关 AMR 研究的 4 个大样本工作, 分别利用每两样本之间的共同样本星, 详细比较了它们分别给出的恒星年龄、金属丰度和 AMR; 结果表明样本的选择效应以及确定恒星年龄和金属丰度的方法或采用参数的不同都会影响 AMR。通过比较选取了恒星年龄比较一致且金属丰度精度相对较高的 2 个样本, 分别包括 4 007 和 1 042 颗恒星, 用纯运动学标准确定了各自的星族成分, 分别讨论了薄盘和厚盘恒星的 AMR, 结果显示厚盘恒星的存在明显的 AMR, 而薄盘恒星的 AMR 不如厚盘那么明显。也提出了进一步研究 AMR 需要开展的几项工作。

**关键词:** 天体物理学; 年龄 — 金属丰度关系; 银河系; 薄盘; 厚盘; 恒星

**中图分类号:** P144.1      **文献标识码:** A

### 1 引 言

根据恒星形成和演化理论以及元素核合成理论, 银河系中的金属元素是多代恒星演化核合成的结果, 当恒星演化终结时就以超新星的形式爆发, 将其产生的金属元素散布到空间与星际介质相混合, 作为下一代恒星的物质组成部分, 这样多代恒星演化的结果使得新近形成的恒星比过去形成的恒星的金属丰度较高。从理论上讲, 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丰度, 就可以导出样本恒星的 AMR(Age-Metallicity Relation, 年龄 — 金属丰度关系)。观测到的 AMR 可以对任何星系化学演化模型提供很强的约束。那么, 实际观测结果是否支持 AMR 的存在? 近 30 年来人们不懈地从观测上探讨这个有关银河系化

**收稿日期:** 2007-08-20; **修回日期:** 2007-12-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10778616, 10433010, 10673002)

学演化的基本问题, 但鉴于问题的复杂性, 如样本的选择效应、样本的纯度以及确定恒星年龄和金属丰度的不同方法, 不同的观测往往给出不同的 AMR 结果, 因此恒星的 AMR 至今仍在讨论和争议之中。

20 世纪 70 年代以来, 天文学家主要是通过观测太阳邻域内的恒星, 分析得到恒星的年龄和金属丰度, 试图给银河系的化学演化模型提供一个观测约束。有些研究工作发现太阳邻域内恒星存在 AMR<sup>[1,2]</sup>; 但有的研究<sup>[3]</sup>认为 AMR 也许不是真实存在的, 很可能是各类误差造成的假象。1980 年, Twarog<sup>[4,5]</sup>利用挑选的 1 006 颗 F 型矮星组成的样本对银盘恒星的 AMR 进行了比较系统的研究, 发现太阳邻域内的盘族恒星存在明显的 AMR。然而, 1985 年 Carlberg 等人<sup>[6]</sup>重新分析了 Twarog 的样本, 却得出非常平坦的 AMR。1991 年, Meusinger 等人<sup>[7]</sup>用不同于 Twarog 的方法确定其样本星的年龄和金属丰度, 得出与 Twarog 类似的结论。

随着观测技术的提高和观测数据的不断增加, 特别是观测到大量年老的富金属星的存在, 使人们对银盘恒星的 AMR 的存在产生了异议。1993 年, Edvardsson 等人<sup>[8]</sup>选取太阳附近 189 颗 F 型和 G 型矮星样本, 未发现存在明显的 AMR, 主要是金属丰度随年龄变化的弥散较大, 该弥散无法用观测误差加以解释。1998 年, Ng 和 Bertelli<sup>[9]</sup>对 Edvardsson 等人<sup>[8]</sup>的样本重新进行了处理, 得出存在 AMR, 但斜率很小约为 0.07 dex/Ga 的结果。2000 年, Chen 等人<sup>[10]</sup>分析了 90 颗 F 和 G 型矮星的化学丰度, 并利用恒星演化的等年龄线方法分析得到这些恒星的年龄, 结果未发现明显的 AMR。然而, 2000 年 Rocha-Pinto 等人<sup>[11]</sup>(RP00)利用恒星色球活动水平估算恒星的年龄, 得出 AMR 的变化是时间的平滑函数, 表明存在明显的 AMR, 再次证实了 Twarog<sup>[4,5]</sup>的结论。2001 年, Feltzing 等人<sup>[12]</sup>(F01)利用依巴谷卫星数据分析了 5 828 颗矮星或亚矮星的年龄和金属丰度, 得到了与 Edvardsson 等人<sup>[8]</sup>一致的结果, 再次表明太阳邻域恒星可能不存在明显的 AMR。2002 年, Ibukiyama 和 Arimoto<sup>[13]</sup>(IA02)分析了太阳附近 1 658 颗恒星的 AMR, 并考虑了星族效应对 AMR 影响, 指出由于薄盘和厚盘恒星的金属丰度都存在的较大弥散, 而且这一弥散远大于金属丰度的观测误差, 因此认为太阳附近恒星不存在 AMR。2004 年, Nordstrom 等人<sup>[14]</sup>(N04)分析了太阳附近约 14 000 颗恒星的年龄和金属丰度, 得出与 F01 一致的结论, 即不存在年龄 - 金属丰度的相关关系。有关 AMR 详细的历史回顾还可参见综述文献<sup>[15]</sup>。

鉴于恒星 AMR 问题的重要性和目前仍存在的争议, 有必要就这一问题进行详细的讨论。本文第 1 章介绍了确定恒星年龄和金属丰度的有关方法。第 2 章综合分析了最近有关 AMR 研究的 4 个大样本工作, 比较了不同样本的恒星年龄、金属丰度和 AMR。第 3 章, 选取了恒星年龄比较一致且金属丰度精度相对较高的 2 个样本, 分别包括 4 007 和 1 042 颗恒星, 用纯运动学标准确定了恒星的星族成分, 分别讨论了薄盘和厚盘恒星的 AMR。第 4 章是总结和展望。

## 2 确定金属丰度和年龄的方法

### 2.1 确定金属丰度的方法

天体物理中一般把所有重于氦的元素的整体丰度称为金属丰度。从实际观测角度来讲,

并不是所有元素的化学丰度都是已知的,而确定铁元素丰度相对而言比较容易,因此金属丰度一般用铁丰度来表征。铁丰度一般用铁原子数密度与氢原子数密度比值的对数与太阳的相应值之差  $[\text{Fe}/\text{H}]$  来表示,即  $[\text{Fe}/\text{H}] = \lg[N(\text{Fe})/N(\text{H})]_{\text{star}} - \lg[N(\text{Fe})/N(\text{H})]_{\text{sun}}$ 。

确定恒星的金属丰度主要有两种方法:一种是测光方法,就是利用标准 *uvby-H $\beta$*  测光系统观测得到的  $(b-y)$ ,  $m_1$ ,  $c_1$ ,  $\beta$  等指数,根据经验公式得到恒星的铁丰度<sup>[16]</sup>,这样得到的金属丰度一般称为测光金属丰度;另一种是分光方法,就是利用观测到的恒星光谱结合恒星大气模型分析得到恒星的铁元素丰度<sup>[8]</sup>,这样得到的金属丰度一般称为分光金属丰度。分光金属丰度通常比测光金属丰度更为精确,但在样本容量上前者不如后者大。1993年,Edvardsson<sup>[8]</sup>首先对这两种方法得到的金属丰度进行了比较,发现两种方法获得的铁丰度基本一致,但对于富金属星来说测光方法得到的金属丰度偏高。后来的大样本研究进一步表明测光和分光得到的金属丰度在误差范围内符合得很好<sup>[9,12]</sup>,IAO2的研究也表明测光 AMR 和分光 AMR 是一致的。

## 2.2 确定恒星年龄的方法

恒星年龄是表征恒星形成和演化的一个基本参数,如何精确确定恒星年龄一直是天体物理研究中的一个非常重要的基本问题,但由于影响恒星年龄确定的因素很多,要精确地确定恒星年龄实际上是一个非常复杂的问题,实际操作时要考虑很多因素。目前确定恒星年龄的方法很多,如等年龄线法<sup>[8,12-14,17,18]</sup>、色球活动法<sup>[11,17,19]</sup>、自转周期法<sup>[17,20]</sup>、轨道参数法<sup>[17,21]</sup>、核纪年法<sup>[22]</sup>等。而对于银盘恒星来说,确定其年龄的基本方法主要有以下两种。

第一种方法是等年龄线法,即利用等年龄线 (isochrone) 确定恒星的年龄。等年龄线法源于赫罗图,它利用恒星结构和演化理论得到一系列代表不同年龄和不同质量的恒星演化的等年龄线,根据观测得到的恒星有效温度、绝对星等和  $[\text{Fe}/\text{H}]$  等参数,通过插值计算而得到恒星的年龄。但由于选用的恒星结构和演化理论不同,得到的等年龄线也会存在差异,目前普遍采用的等年龄线有 5 组: VandenBerg<sup>[23,24]</sup>, Bertelli<sup>[25]</sup>, Pols<sup>[26]</sup>, Padova<sup>[27]</sup>, Yonsei-Yale<sup>[28]</sup>。在确定恒星的年龄时若采用的等年龄线不同,那么所得到的恒星年龄也会有差异。等年龄线法的优势在于应用范围广,光谱型 B9-G5 内的恒星都能用此方法确定年龄。特别是对于那些演化明显偏离零龄主序带的恒星,用等年龄线法能得到较为准确的年龄。但对于还没有开始演化的年轻恒星以及刚进入零龄主序演化带的晚型恒星 (G 型和 K 型矮星),用这种方法得到的恒星年龄是不可靠的,因为在零龄主序上所有的等年龄线都聚集在一起。

第二种方法是色球活动法,即利用恒星色球活动水平 ( $\lg R'_{\text{HK}}$ ) 确定恒星的年龄。这种方法最早是 1963 年 Wilson<sup>[29]</sup> 提出来的,1972 年 Skumanich<sup>[30]</sup>、1987 年 Barry<sup>[31]</sup> 等人、1990 年 Eggen<sup>[32]</sup>、1991 年 Soderblom 等人<sup>[34]</sup> 先后对这种方法进行了研究。Soderblom 等人<sup>[34]</sup> 依据前人的研究成果即恒星的色球活动水平随时间变的越来越弱 (或者表述为年轻恒星的色球活动水平比年老恒星高),从而给出了直接利用确定 ( $\lg_{10} R'_{\text{HK}}$ ) 恒星的年龄的关系。后来 Rocha-Pinto 等人<sup>[19]</sup> 认为恒星的元素组成不同,用色球活动法确定的恒星年龄也不同,因此对 Soderblom 等人<sup>[34]</sup> 的关系进行了修正,并给出修正的关系。色球活动法的优势在于确定年轻恒星和晚型恒星的年龄比等年龄线法更为准确<sup>[17,19]</sup>。对于那些色球活动小的年老恒星,用这种方法确定的年龄不准确。实际上,这种方法不完全独立,对其他方法尤其是等年龄线法有一定的依赖。

### 3 银盘恒星 AMR 研究现状

理论上讲, 不论采用什么样的方法, 对同一颗星应该得到一致的年龄, 实际上由于确定年龄的复杂性, 使得不同方法或者即使方法相同但采用的参数 (有效温度、表面重力等) 不同对同一颗星给出的年龄也不尽相同, 这使得 AMR 的研究变得异常复杂, 不同的作者或者不同的样本可能给出完全不同的 AMR。这里我们仅讨论近年来的几个大样本工作, 比较不同作者给出的恒星年龄和金属丰度, 并选取他们共同的样本星来分别比较各自给出 AMR。

#### 3.1 样本介绍

目前有关盘星 AMR 的研究很多, 但要得到比较可信的结果必须依赖于大样本的分析。为此我们选取了以下近几年的 4 个大样本研究工作:

(1) 2000 年 Rocha-Pinto 等人<sup>[11]</sup>的工作, 选用 552 颗晚型矮星样本, 经过详细分析结果表明太阳邻域中存在 AMR, 并且发现 AMR 是时间的平滑函数, 样本恒星的平均金属丰度在过去的 12~15 Ga 内至少增加了 0.56 dex, 而金属丰度的平均弥散仅为 0.13 dex。

(2) 2001 年 Feltzing 等人<sup>[12]</sup>的工作, 样本选自依巴谷星表 (ESA1997)。选取标准为有 *uvby* 测光指数,  $0.25 \leq (b - y) \leq 0.59$ , 视差的相对误差小于 25%, 且去除可能是双星的样本, 这样选取了年龄较为精确的 5 828 颗恒星, 结果发现存在相当数量的年老的富金属星, 并且在任何年龄处金属丰度的弥散都比由观测造成的误差大。因此, 他们认为太阳附近恒星可能不存在 AMR, 由于用到的样本比以往都大, 结果似乎更具说服力。

(3) 2002 年 Ibukiyama 和 Arimoto<sup>[13]</sup>的工作, 样本选自一系列有关 [Fe/H]、*uvby*-H $\beta$  和视向速度的星表。选择那些依巴谷视差精度高于 10% 且非双星和变星的恒星, 经选取样本包含 1 658 颗矮星。依据恒星空间速度的切向分量 (*V* 速度) 和恒星离开银道面的最大距离 ( $z_{\max}$ ) 划分出 1 382 颗薄盘星, 229 颗厚盘星, 47 颗晕星。结果表明由于金属丰度的弥散较大, 薄盘恒星的平均金属丰度从 14 Ga 到 1 Ga 基本保持不变, 厚盘恒星也未发现明显的 AMR, 且金属丰度弥散比薄盘恒星较大, 他们认为此弥散为银河系形成和演化的本质特征。

(4) 2004 年 Nordstrom 等人<sup>[14]</sup>的工作, 给出太阳附近约 14 000 颗 F、G 型矮星的各种参量, 包括恒星的年龄、金属丰度、运动学和轨道参数等。该样本是目前最大的观测样本, 几乎包含了距太阳 40 pc 以内所有的矮星。N04 的结果表明在所有年龄范围内, 恒星的平均金属丰度基本保持不变, 且 [Fe/H] 的弥散远大于观测误差 (0.1 dex), 同时发现存在相当数量的年老的富金属星, 这再次证实了 F01 的结论。

#### 3.2 不同样本金属丰度的比较

上述 4 个样本的金属丰度基本上是由测光色指数确定的, 而且多采用 Schuster 和 Nissen<sup>[16]</sup> 的定标关系。不同的是 RP00 对红化较大 ( $(b - y) \geq 0.599$ ) 的恒星采用了 Olsen 等人<sup>[35]</sup> 确定的定标关系, 同时对有色球活动的恒星, 在确定金属丰度时再增加一个改正量; IA02 样本中 400 多颗恒星的金属丰度是由分光方法确定的, 它们来源于 2001 年 Strobel 等人<sup>[35]</sup> 的星表; 而 N04 先对 Schuster 和 Nissen<sup>[16]</sup> 的定标关系进行了修正, 再用修正后的定标关系确定恒星的金属丰度。

图 1 分别给出了 4 个不同样本两两之间共同恒星金属丰度的比较。从图 1 中可以看出对于同样的样本, 不同作者给出的金属丰度总体上符合得比较好, 尤其是 RP00-IA02、IA02-N04

两组样本的金属丰度在观测误差范围内基本一致,如图 1(b)、(f) 所示。但也存在着系统偏差,主要表现为 F01 与其他 3 个样本相比金属丰度偏高,如图 1(a)、(d)、(e) 所示,偏差的根源在于 F01 使用的是没有经过修正的 Schuster 和 Nissen<sup>[16]</sup> 的定标关系。

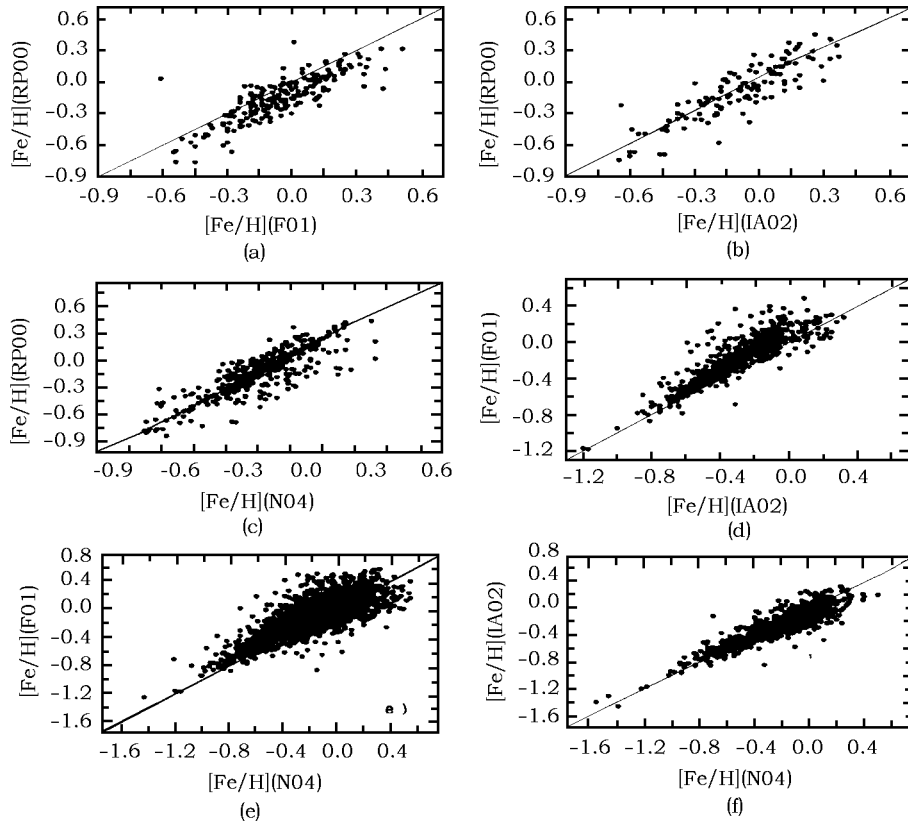


图 1 4 个样本的金属丰度比较

通过上述确定恒星金属丰度的过程看出, N04 依据改正后的定标关系得到的金属丰度最为精确,其结果与 Edvardsson 等人<sup>[8]</sup> 和 Chen 等人<sup>[37]</sup> 的分光金属丰度相比较,平均偏差仅分别为 0.02 dex 和 0.00 dex<sup>[14]</sup>。

### 3.3 不同样本的年龄比较

RP00 样本星的年龄分别由两种方法确定,子样本 RP001 的年龄是用色球活动法确定的,包含 471 颗恒星;子样本 RP002 的年龄是利用 VandenBerg 等人<sup>[23]</sup> 的等年龄线来确定的,恒星的数目为 730。

F01 样本星的年龄是利用 Hurley 等人<sup>[38]</sup> 基于 Pols 等人<sup>[26,38]</sup> 的等年龄线给出的恒星演化方程确定的,这套演化方程除了少数几个点之外都是解析的。Feltzing 等人<sup>[12]</sup> 假设全部样本星都只处于主序、赫氏间隙和第一巨星分支这 3 个演化阶段,目的是为了去除主序回绕阶段使赫罗图上的每个观测点对应唯一的年龄和质量,并假定恒星的最大年龄为 15 Ga。

IA02 样本星的年龄同样是用等年龄线方法确定的,只不过这里采用的是 Yonsei-Yale<sup>[28]</sup> 的等年龄线。这套等年龄线对应的金属丰度范围为  $Z = 0.00001 \sim 0.08$ , 年龄范围为 1 Ga 到

20 Ga, 年龄间隔为 1 Ga。

N04 样本星的年龄也是用等年龄线方法确定的, 但采用的是 Padova<sup>[27]</sup> 的等年龄线, 而且采用贝叶斯概率方法估算恒星的年龄, 有关贝叶斯概率方法的详细描述见文献 [39]。

根据估算恒星年龄方法的不同可以将这些样本分为两类: 色球活动法 (RP001), 等年龄线法 (RP002, F01, IA02, N04)。这些不同样本两两之间共同恒星的年龄比较见图 2—4。

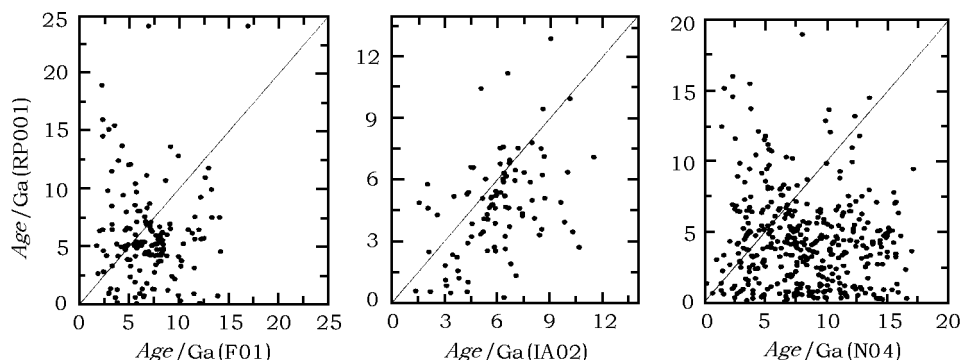


图 2 RP001 与 F01、IA02 和 N04 共同样本星的年龄比较

图 2 分别为 RP001 与 F01、IA02 和 N04 共同样本星的年龄比较, 从中看出用色球活动法确定的恒星年龄与用等年龄线法确定的恒星年龄存在较大的偏差。如 RP001 与 N04 的比较可以看出, 对用等年龄线法确定的恒星年龄小于 5 Ga 的年轻恒星样本来说, 色球活动法确定的恒星年龄明显偏大, 而对用等年龄线法确定的恒星年龄大于 5 Ga 的恒星样本来说, 色球活动法确定的恒星年龄又明显偏小, 这与 Feltzing 等人<sup>[12]</sup> 分析的结果相同。但正如 Feltzing 等人<sup>[12]</sup> 所说, 对于处于零龄主序上年龄小于 1 Ga 的恒星来说, 由于所有的等年龄线都聚集在一起, 色球活动法确定恒星年龄是对等年龄线法的有益补充, 但对那些色球活动小的年老恒星, 用色球活动法确定的年龄是不可靠的。

图 3 分别为 RP002 与 F01、IA02、N04 共同样本星的比较, 由图可以看出 RP002 用等年龄线法确定的恒星年龄与 F01 和 N04 基本一致, 但弥散较大, 与 IA02 的年龄相比明显偏大。

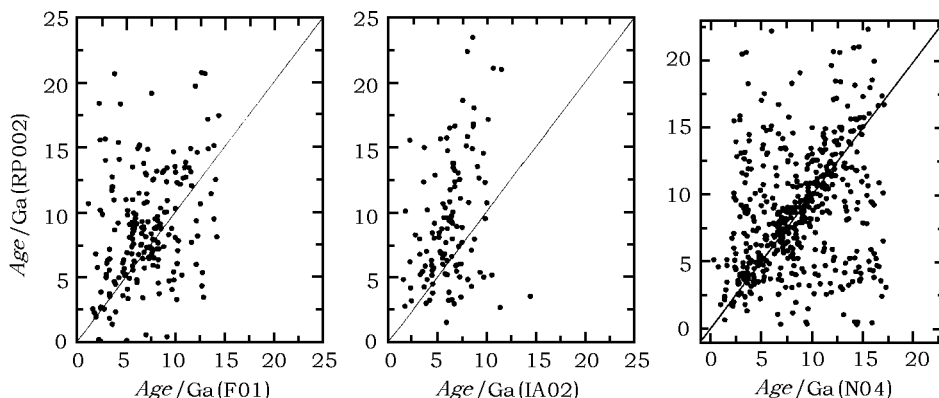


图 3 RP002 与 F01、IA02、N04 共同样本星的年龄比较

图 4 为 F01、IA02 和 N04 相互之间共同样本星的年龄比较。从中看出, 对于年龄小于 6 Ga 的恒星, 这 3 个样本给出的年龄非常一致, 但对年龄大于 7 Ga 的恒星, IA02 的年龄比 F01 和 N04 的年龄偏小。在整个年龄范围内, F01 与 N04 的大部分样本星的年龄符合得很好, 不同的是 F01 确定的年老恒星数目较多, 而 N04 对于部分恒星年龄的确定比 F01 确定的更老, 超过了 F01 设定的年龄上限 15 Ga。

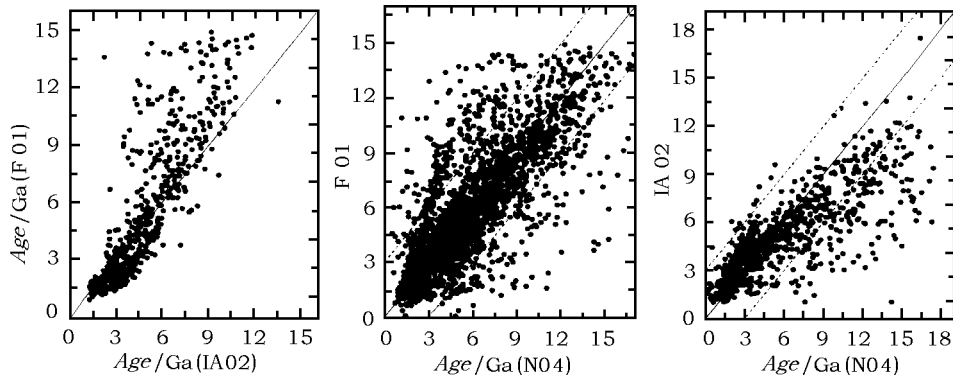


图 4 F01、IA02 和 N04 相互之间共同样本星的年龄比较

两条平行虚线之间的样本为年龄相差 3 Ga 以内的恒星

从上面的比较看出, 即使对于同样的恒星样本, 由于确定恒星年龄的方法不同或者采用的等年龄线不同, 得到的恒星年龄不尽一致。

### 3.4 共同样本的 AMR 比较

前面已经介绍了上述 4 个大样本工作都认为太阳附近恒星不存在 AMR。由于不同样本相互之间存在一些共同的恒星, 我们可以分别取它们两两之间包含的共同星作为观察样本, 分别考察不同工作给出的这些样本的 AMR, 限于篇幅这里只给出包括最大恒星数的 N04 与其他 3 个样本之间共同恒星的 AMR, 如图 5—7 所示。其中年龄和金属丰度分别取自所标注的文献, 图中直线是最小二乘线性拟合的结果。

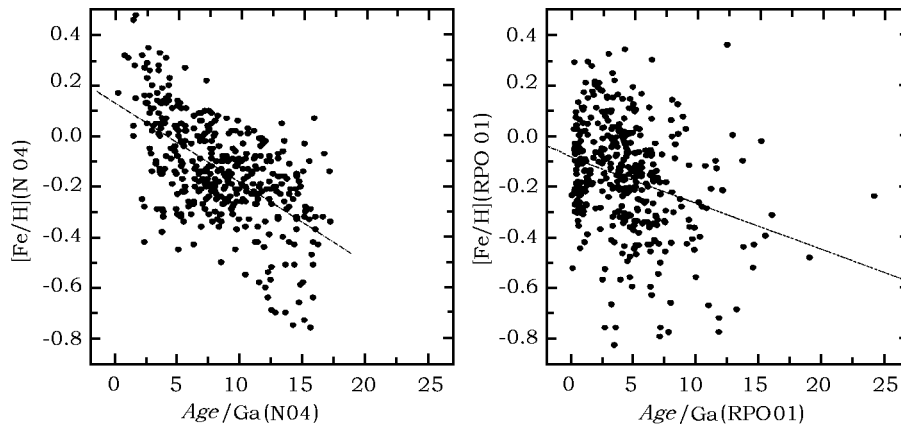


图 5 N04 和 RP001 共同恒星的 AMR

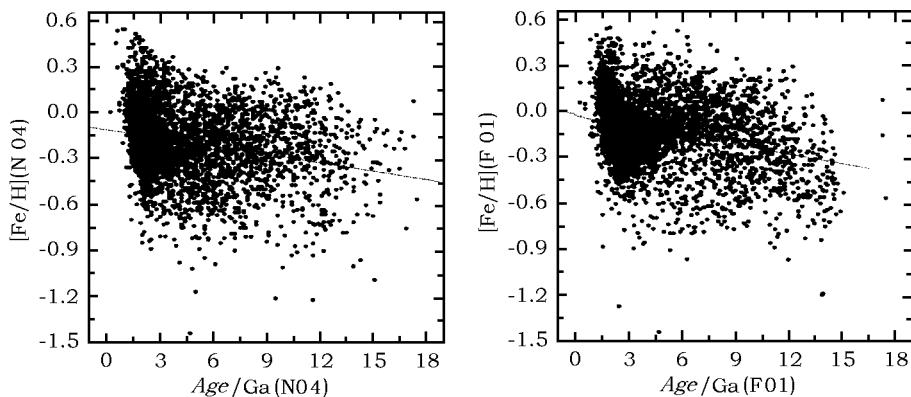


图 6 N04 和 F01 共同恒星的 AMR

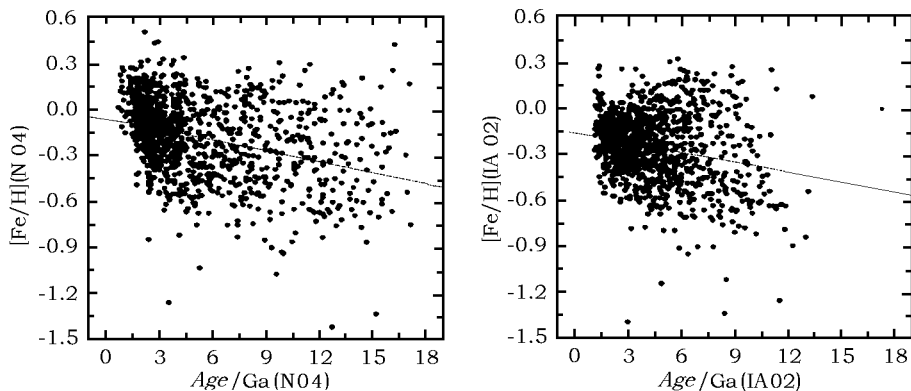


图 7 N04 和 IA02 共同恒星的 AMR

综合比较图 5—7 给出的 AMR, 可以看出:

(1) 即使对于相同的恒星样本, 也可能由于不同作者确定恒星年龄与金属丰度的方法不同, 使得同一颗星的恒星年龄和金属丰度也不一致, 得到不同的 AMR, 如图 5 所示。

(2) AMR 存在严重的样本选择效应。也就是说, 由于选取样本不同也会得到完全不同的 AMR。如图 5—7 中的左图所示, 3 个不同的子样本都取自 N04, 计算恒星年龄和金属丰度的方法完全一样, 但给出的 AMR 却不尽相同, 这显然是由于样本选择的不完备性造成的。

(3) 如果选取样本的容量足够大 (比如说至少包含 4 000 颗恒星) 且具备较好的空间完备性 (覆盖各天区)、年龄完备性 (包括各年龄段恒星) 和金属丰度完备性 (金属丰度覆盖范围较大), 即使不同样本之间的恒星年龄与金属丰度有一定的差异, 也可能得到相同的 AMR。如图 6 所示 F01 和 N04 共同样本的 AMR, 虽然 F01 给出的金属丰度偏高, 而且两者给出恒星年龄也不完全一致, 但由于两者公共样本包含 4 000 多颗恒星, 且各自的样本完备性都较好, 从线性拟合的结果来看两者的 AMR 基本一致。

#### 4 不同星族的 AMR

近年来关于恒星 AMR 的研究又有新的进展。2004 年, Bensby 等人分析了 102 颗厚盘



恒星的年龄和金属丰度, 结果表明厚盘恒星存在明显的 AMR<sup>[18,40]</sup>。由此可见样本的“纯度”可能是影响 AMR 分析的又一个主要因素, F01 和 N04 这两个大样本不支持 AMR 的原因可能是由于未考虑星族效应, 使不同星族恒星混在一起加大了年龄和金属丰度的弥散造成的。因此, 有必要确定样本星的星族成分, 进一步研究不同星族恒星的 AMR 的关系。

#### 4.1 样本的选取和星族的划分

为得到比较可信的 AMR, 应尽可能排除样本的选择效应, 而且要使样本的容量尽可能大, 因此我们分别选取由 F01 与 N04 的共同星组成的样本 A 和由 IA02 与 N04 的共同星组成的样本 B, 就以这两个相对较大的样本作为我们的研究对象。同时, 为尽可能减少不同作者给出的恒星年龄不一致对分析 AMR 的影响, 我们对样本 A 和 B 的成员从年龄上加以限制, 只选取那些由不同作者给出的恒星年龄比较一致(差值在  $\pm 3.0$  Ga 以内)的共同星, 如图 4 中两条平行虚线之间的部分恒星。而且, 考虑到不同演化模型确定恒星年龄时的偏差, 分析 AMR 时最终采用的恒星年龄为两个文献给出的年龄的平均值。这样的限制虽然减少了样本的容量, 但最终得到的样本 A 和 B 的恒星数目分别为 4 007 和 1 042, 仍不失为一个较完备的样本, 而且这种年龄限制使得恒星年龄在估值上更加一致和准确<sup>[17]</sup>, 因此这种做法是比较合理的。分析样本 A 和 B 的 AMR 时统一采用 N04 给出的金属丰度, 因为我们从前面关于不同样本金属丰度的比较可以看出, N04 的金属丰度是比较准确的, 这样做也使对 AMR 的分析有一个一致的金属丰度标准。

星族的划分也是一个比较复杂的问题, 不同的划分方法给出的结果也会有所不同<sup>[41]</sup>。由于不同星族恒星具有明显不同的运动学特征, 比较而言, Bensby 等人<sup>[42]</sup>用纯运动学判据划分星族成分的方法是比较合理的<sup>[15]</sup>, 而且被后来的许多工作<sup>[43-46]</sup>所采用。因此, 我们采用 Bensby 等人<sup>[42]</sup>划分星族成分的方法和判据。首先计算每颗星属于薄盘(D)、厚盘(TD)和晕(H)这 3 个不同星族的概率  $P_i (i = D, TD, H)$ , 再计算每颗星的相对概率  $TD/D$  和  $TD/H$  (相对概率的含意是如果某一颗星的  $TD/D = 10$ , 则该星属于厚盘星的可能性是属于薄盘星可能性的 10 倍)<sup>[15]</sup>, 最后选取  $TD/D < 0.1$  且  $TD/H > 1$  的恒星为薄盘星;  $TD/D > 2$  且  $TD/H > 1$  为厚盘星;  $TD/H < 0.1$  为晕星。对处于  $0.1 < TD/D < 2$  和  $0.1 < TD/H < 1$  的过渡恒星, 再依据 IA02 利用  $V$  速度划分星族的标准确定其星族成分, 即  $V \geq -62 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  为薄盘,  $-182 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} \leq V \leq -62 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  为厚盘,  $V < -182 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  为晕星。这样从 A 样本中得到 146 颗厚盘星, 3 856 颗薄盘星。从样本 B 中得到 70 颗厚盘星, 970 颗薄盘星。由于晕星的年龄和金属丰度的误差更大, 而且样本 A、B 中晕星数目很少, 所以不对晕星进行分析。

#### 4.2 不同星族恒星的 AMR

##### 4.2.1 薄盘恒星的 AMR

图 8 分别给出了 A、B 两个样本中薄盘恒星的 AMR, 由数据分布及其线性拟合结果可见, A、B 样本都表明薄盘恒星年龄和金属丰度存在微弱的相关性, 但金属丰度和年龄在 AMR 分布范围内都存在较大的弥散, 而且弥散度远大于金属丰度的观测误差 (0.1 dex) 和恒星年龄的误差 (3 Ga), 金属丰度的弥散度随恒星年龄的变大有所增加。样本 A 和 B 得出薄盘恒星的平均年龄为  $(3.95 \pm 2.62)$  Ga, 这与 2005 年 Bensby 等人<sup>[40]</sup>给出的薄盘平均年龄  $(4.3 \pm 2.6)$  Ga 基本一致, 薄盘恒星的平均金属丰度为  $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{mean}} = -0.18 \pm 0.21$ , 与 Bartašiūtė 等人<sup>[47]</sup>给出的平均金属丰度  $-0.15 \pm 0.255$  基本一致。

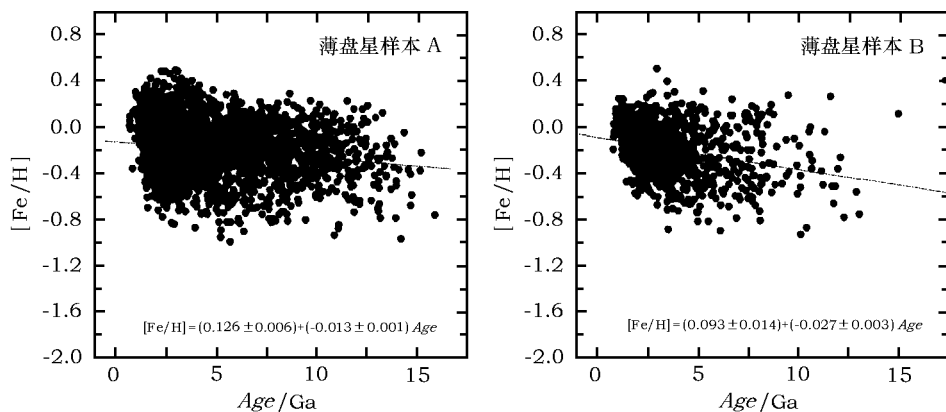


图 8 薄盘恒星的 AMR 图

#### 4.2.2 厚盘恒星的 AMR

图 9 为样本 A、B 给出的厚盘恒星的 AMR 及其线性拟合的结果, 从中可以清楚看出厚盘恒星存在比较明显的 AMR。样本 B 的 AMR 比样本 A 更为明显, 这再次表明样本选择效应对 AMR 的影响。从图 9 可看出在年龄小于 10 Ga 区间, 金属丰度的弥散度为 0.9~1.2 dex, 在年龄大于 10 Ga 的区间, 金属丰度的弥散随年龄增大而变小。整体来看厚盘与薄盘的弥散度基本相同, 这与 IA02 认为厚盘比薄盘弥散更大的结论不同。

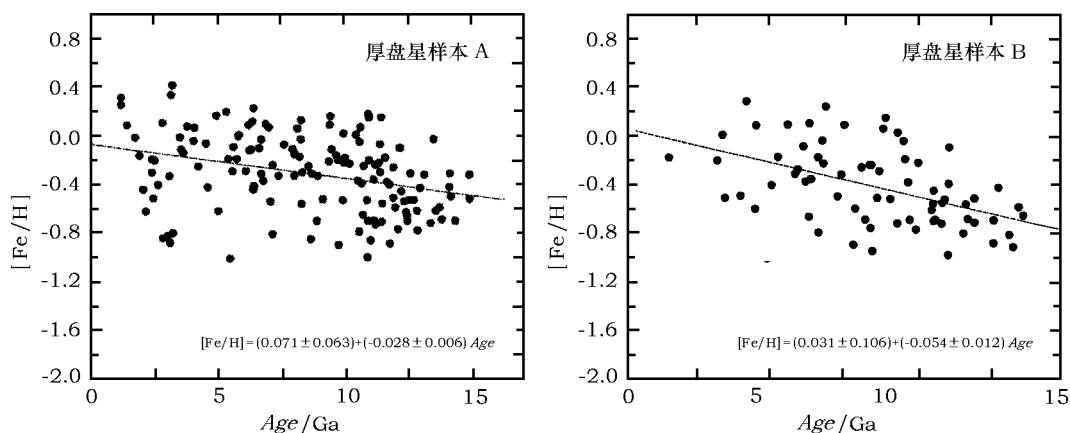


图 9 厚盘恒星的 AMR 图

厚盘恒星存在比较明显的 AMR 的结果与 Bensby 等人<sup>[40,42]</sup>的结论一致。A、B 样本给出的厚盘恒星的平均年龄分别为 8.48 Ga、8.62 Ga, 两者综合得出银河系厚盘恒星的平均年龄为  $(8.52 \pm 3.42)$  Ga, 与 2005 年 Bensby 等人<sup>[40]</sup>给出的厚盘平均年龄  $(9.7 \pm 3.1)$  Ga 一致。A、B 样本综合得出厚盘星的平均金属丰度为  $-0.36 \pm 0.33$ , 这与 Bell<sup>[41]</sup>给出的平均金属丰度  $-0.35$  完全一致, 也正好处于 Bartasiūtė 等人<sup>[47]</sup>给出的厚盘星的平均金属丰度范围  $(-0.3 \sim -0.4)$  之内, 但比 Soubiran 等人<sup>[50]</sup>给出的平均金属丰度  $-0.5$  偏高。

总之, 我们选取的 A、B 两个不同样本都表明银河系薄盘和厚盘中存在 AMR。整体而

言, 薄盘与厚盘星的金属丰度沿 AMR 弥散都很大, 两者弥散度基本一致, 但拟合结果显示厚盘恒星的 AMR 比薄盘更明显。因为在研究中我们已经考虑了影响 AMR 的各个因素, 采取不同措施尽量降低了样本的选择效应、恒星年龄以及金属丰度的系统偏差和星族效应对 AMR 的影响, 我们认为这个结论是相对客观的。

## 5 总 结

前面我们对银盘恒星的 AMR 进行了较为详细的分析和讨论, 总结上述结果可以得到如下几条结论。

(1) 银河系厚盘恒星存在比较明显的 AMR, 但薄盘恒星的 AMR 相对较弱。

(2) 薄盘和厚盘恒星的金属丰度相对于 AMR 的弥散度都远大于观测误差, 尽管两者弥散度大小基本上一致, 但薄盘金属丰度的弥散度随恒星年龄的增加有变大的趋势, 厚盘金属丰度的弥散度随恒星年龄的增加却有变小的趋势。厚盘恒星比薄盘恒星年老且金属丰度较低, 薄盘的平均年龄约为 4 Ga, 平均金属丰度约为  $-0.18$ ; 厚盘的平均年龄约为 9 Ga, 平均金属丰度约为  $-0.36$ 。

(3) 银盘恒星的 AMR 与确定年龄和金属丰度的方法密切相关, 即使选取相同的样本, 由于不同方法得到的恒星年龄与金属丰度的差异, 得到的 AMR 也可能不同。

(4) 银盘恒星的 AMR 存在样本选择效应。若选取的样本不同, 即使采用同样的方法和相关参数确定恒星的年龄和金属丰度, 得到的 AMR 也可能完全不同。

(5) 银盘恒星的 AMR 还受星族效应的影响。把不同星族的恒星混合在一起来分析 AMR, 可能会扭曲了真实存在的 AMR, 得不到确切的 AMR。

上述结论虽然只是基于目前几个大样本的结果分析得到的, 但由于考虑了影响 AMR 的各个因素, 且选取 A、B 两个具有一定代表性的不同样本, 因此所得结果相对来说还是具有一定的普遍意义的。但鉴于影响 AMR 的因素较多, 要得到确切的 AMR 还需要对此进行更进一步的研究, 今后的研究工作应从以下几个方面着手。

(1) 选取更加完备的恒星样本, 包括样本的容量、“纯度”和年龄及金属丰度的覆盖范围<sup>[15]</sup>。尤其要增加厚盘恒星的样本, 正如 Bensby 等人<sup>[18]</sup>所说, 必须在更大的银道距范围内取得容量更大的恒星样本, 在精确确定样本恒星的年龄和金属丰度之后, 才能更明确地证实银盘恒星是否存在明晰的 AMR。这项工作可以利用我国即将建成的 LAMOST 望远镜来实现, 特别是 LAMOST 可以观测距离太阳大约 4 kpc 范围以内、极限视星等为 16 mag 的上百万颗 F、G 型矮星<sup>[50]</sup>, 这样就可以使样本更加完备。

(2) 改进确定恒星年龄的方法, 提高年龄计算的精度。这包括提高恒星有关参数(色指数、视差、星等、有效温度等)的观测和计算精度, 选用更加合理的恒星演化模型准确估算恒星的年龄, 对于年轻的恒星用色球活动法进行改正等。

(3) 提高恒星金属丰度的精度, 比如采用精度更高的分光金属丰度。这也正好是 LAMOST 观测目标的一部分, 可以用其拍摄的中等分辨率( $R = 10\,000 \sim 15\,000$ )恒星光谱, 由分光方法得到恒星的金属丰度, 从而建立起完备和准确的  $[\text{Fe}/\text{H}]$  数据库。

## 参考文献:

- [1] Powell A L T. MNRAS, 1972, 155: 483
- [2] Clegg R E S, Bell R A. MNRAS, 1973, 163: 13
- [3] McClure R D, Tinsley B M. ApJ, 1976, 208: 480
- [4] Twarog B A. ApJS, 1980, 44: 1
- [5] Twarog B A. ApJ, 1980, 242: 242
- [6] Calberg R G, Dawson P C, Hsu T, et al. ApJ, 1985, 294: 674
- [7] Meusinger H, Sreclum B, Reimann H-G. A&A, 1991, 245: 57
- [8] Edvardsson B, Andersen J, Gustafsson B, et al. A&A, 1993, 275: 101
- [9] Ng Y K, Bertelli G. A&A, 1998, 329: 943
- [10] Chen Y Q, Nissen P E, Zhao G, et al. A&A, 2000, 353: 722
- [11] Rocha-Pinto H J, Maciel W J, Scalo J, et al. A&A, 2000, 358: 850
- [12] Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R. A&A, 2001, 377: 911
- [13] Ibukiyama A, Arimoto N. A&A, 2002, 394: 927
- [14] Nordström B, Mayor M, Andersen J, et al. A&A, 2004, 418: 989
- [15] 赵君亮. 天文学进展, 2005, 23(4): 346
- [16] Schuster W J, Nissen P E. A&A, 1989, 221:65
- [17] Lachaume I R, Dominik C, Lanz T, et al. A&AS, 1999, 348: 897
- [18] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2004, 415: 155
- [19] Rocha-Pinto H J, Maciel W J. MNRAS, 1998, 298: 332
- [20] Kawaler S D. ApJ, 1989, 343: 165
- [21] Barry D C. ApJ, 1988, 334: 436
- [22] 李冀, 赵刚. 天文学进展, 2003, 21(1): 70
- [23] Vandenberg D A. ApJS, 1985, 58: 711
- [24] Vandenberg D A, Swenson F J, Rogers F J, et al. ApJ, 2000, 532: 430
- [25] Bertelli G, Bressan A, Chiosi C, et al. A&AS, 1994, 106: 275
- [26] Pols O R, Schroder K-P, Hurley J R, et al. MNRAS, 1998, 298: 525
- [27] Girardi L, Bressan A, Bertelli G, et al. A&AS, 2000, 141: 371
- [28] Yi S, Demarque P, Kim Y-C, et al. ApJS, 2001, 136: 417
- [29] Wilson O C. ApJ, 1963, 138: 832
- [30] Skumanich A. ApJ, 1972, 171: 565
- [31] Barry D C, Cromwell R H, Hege E K. ApJ, 1987, 315: 264
- [32] Eggen O J. PASP, 1990, 102: 166
- [33] Wielen R. A&A, 1977, 60: 263
- [34] Soderblom D R. AJ, 1990, 100: 204
- [35] Olsen E H. A&AS, 1983, 54: 55
- [36] Cayrel de Strobel G, Soubiran C, Ralite N. A&AS, 2001, 373: 159
- [37] Chen Y Q, Nissen P E, Zhao G, et al. A&AS, 2000, 141: 491
- [38] Hurley J R, Pols O R, Tout C A. MNRAS, 2000, 315: 543
- [39] Jørgensen B R, Lindegren L. A&A, 2005, 436: 127
- [40] Bensby T, Teltzing S, Lundström I, et al. A&AS, 2005, 433: 185
- [41] 曹藏文. 硕士研究生论文. 河北师范大学图书馆, 2007
- [42] Bensby T, Feltzing S, Lundström I. A&A, 2003, 410: 527
- [43] Zhang H W, Gehren T, Butler K, et al. A&A, 2006, 457: 645
- [44] Zhang H W, Zhao G. A&A, 2006, 449: 127
- [45] Abia C, Mashonkina L. MNRAS, 2004, 350: 1127
- [46] Mishenina T V, Soubiran C, Kovtyukh V V, et al. A&A, 2004, 418: 551

- [47] Bartašiūtė S, Aslan Z, Boyle R P, et al. *Baltis Astronomy*, 2003, 12: 539  
[48] Bell D J. *PASP*, 1996, 108: 2003  
[49] Soubiran C, Bienayme O, Siebert A. *A&A*, 2003, 398: 141  
[50] 侯金良, 陈力, 常瑞香, 等. *国家天文台台刊*, 2004, 1(1): 16

## Study on the Age-metallicity Relation of Disk Stars of the Galaxy

LIANG Bo<sup>1</sup>, LI Ji<sup>1</sup>, CAO Cang-wen<sup>1</sup>, FAN Wei-shi<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>

(1. *College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China;*

2. *Nation Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)*

**Abstract:** The age-metallicity relation (AMR) of the Galactic disk stars is a fundamental issue to study the formation and evolution of the Galaxy. However, whether is there a relation between ages and metallicities for stars in the solar neighbourhood is still in debated. Some works support the existence of AMR, some others think that the AMR is a false trend. In the study presented here we will address the question of a relation between ages and metallicities for stars that are kinematically belong to the thin disk and thick disk. At first, we reviewed the history of studies on AMR. Then we introduced the methods of determining the ages and metallicities of stars. Thirdly, we choose four large sample works, which includes 552, 5 828, 1 658, and 14 000 stars respectively, to investigate the AMRs of common stars between these samples. At last, we selecte two subsamples A and B by means of presenting consistent ages for common stars from two samples of three large sample works, and the stellar population membership of each star is identified using pure kinematics criterions. As a result, subsample A includes 3 856 thin disk stars and 146 thick disk stars, subsample B includes 970 thin disk stars and 70 thick disk stars. Our results confirm the correlation between ages and metallicities for thick disk stars, but this correlation is very weak for thin disk stars due to the scatter of metallicities along the AMR, and this scatter seems to be substantially larger than that can be explained by observational errors. Our results also show that the stellar AMR is affected by many factors, such as the sample selection effect and the stellar population effect as well as the uncertainties of stellar ages and metallicities. So that to derive more truthful age-metallicity relations, an unbiased stellar sample with more accurate ages and metallicities are required in future studies.

**Key words:** astrophysics; age-metallicity relation; Galaxy; thin disk; thick disk; stars