

银河系金属丰度及其演化研究新进展

张 华 伟^{1,2,3} 赵 刚²

(1. 北京大学地球物理系 北京 100871)

(2. 中国科学院北京天文台 北京 100012)

(3. 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)

摘 要

银河系的银盘、银晕、核球的平均金属丰度为 -0.2 , -1.6 , -0.2 。年龄 - 金属丰度关系给出了银河系形成和演化的线索。为了解释观测的年龄 - 金属丰度关系及其弥散, 银河系化学演化模型必须考虑恒星轨道运动、非瞬时混合等机制。

关键词 金属丰度 — 银河系结构 — 年龄 - 金属丰度关系

分类号 P156

1 引 言

20 世纪 50 年代, 由于理论和观测的巨大进步, 使得人们把银河系的结构、运动学、化学丰度及年龄联系在一起, 因而确定了不同星族的存在及其性质。1962 年 Eggen 等人的工作首次给出了银河系演化的模型 (ELS)^[1]。他们发现与金属丰度相关的紫外超 $\delta(U-B)$ 与恒星轨道偏心率、角动量及垂直于银道面方向运动速度之间的关系, 并由此提出: 银河系是由快速坍缩的气体形成的, 这些气体具有初始的金属丰度, 近似球对称, 具有初始密度涨落。在坍缩过程中由于气体的压缩形成恒星, 此时其金属丰度为零或很小, 由于坍缩的动量, 其运动轨道是高度径向的。接着因为角动量守恒, 气体旋转速度加快, 从而造成径向坍缩不可能像旋转角速度方向的坍缩那样快, 通过云与云之间的碰撞耗散能量, 气体最后成为一个扁平而快速旋转的盘。在气体被压缩的过程中, 恒星继续形成, 但这时星际物质 (ISM) 已经被早期形成恒星的核反应产物污染了, 重元素丰度增加, 造成形成的恒星的金属丰度也较高。这些后来形成的恒星的轨道是规则的圆轨道。

Searle^[2] 提出一种完全不同的银晕形成的图像, 认为银晕是由大量独立的质量团块 ($\approx 10^8 M_{\odot}$) 演化形成, 这些质量团块的金属丰度取决于超新星爆发的情况。

ELS 和 Searle 的模型发表以后, 一些对扩展宇宙中引力团块的 N 体模拟工作也提出了银河系的形成和演化的图像, 认为恒星系统通过合并形成更大的系统。现在, 我们还不能得

出银河系是由已经存在的恒星系统通过合并形成的结论，即使银晕是通过这样的过程形成的，但银盘却不可能就是这样。

银河系形成和演化的历史决定了银盘、银晕、核球内恒星的金属丰度、运动学参数、年龄具有不同的分布。金属丰度随银河系年龄的演化情况，即年龄 - 金属丰度关系 (AMR) 反映了在过去的演化历史中金属元素的形成情况，对建立银河系化学演化模型提出了限制。

2 银河系结构和金属丰度

近十几年中，为了进一步确定银河系的结构和演化，人们做了很多的观测工作，这些观测工作主要有以下三种类型：

(1) 选择性巡天 (selected surveys)：根据运动学和化学丰度特征来判断太阳附近恒星的星族组成。

(2) 示踪巡天 (tracer surveys)：采用星团或亮星 (巨星) 作为示踪物，判断离太阳较远距离处的银河系星族组成。

(3) 定点巡天 (in situ surveys)：为了避免示踪观测的选择效应，另外一种研究高银纬处星族组成的方法是直接研究星族的主要成份 — 主序星，这种方法最主要的限制是观测的极限星等。

随着观测资料的丰富和理论工作的深入，对银河系结构及其金属丰度分布就有了一些更新的认识^[3~5]。

2.1 银盘

在早期对太阳 25pc 以内 G 型矮星的研究表明贫金属 G 型矮星的数目要比简单模型所预言的少^[6,7]，这就是众所周知的 G 矮星问题。简单模型假设化学演化是在一个封闭系统中进行的，恒星从星际介质中形成，在恒星中一部分轻元素被转化为重元素。在恒星演化的晚期，构成恒星的物质一部分返回星际介质，一部分封闭在长寿命的小质量恒星和恒星遗迹中 (中子星、黑洞等)，不再参与化学演化，返回到星际介质中的物质瞬时分散到全部区域，从而使各处始终是均匀的^[6~8]。

G 矮星问题有多种解释^[9]，但贫金属气体下落到银盘上是最好的解释。在这种图像下，为了符合观测的金属丰度分布规律，原始盘的质量最多只是现在盘质量的 5%，其余的则为几十亿年中下落的质量。考虑到物质下落的模型有多种^[10~14]，在这些模型中银晕中的热气体是下落气体的主要来源，因为现在发光的银晕物质质量只有银盘质量的百分之几，而且银盘 + 银晕的金属丰度分布仍然存在贫金属星数量比简单模型所预言的少的困难^[15]。Tosi 认为金属丰度为 $0.1Z_{\odot}$ 的气体下落也可以解释观测到的银盘金属丰度分布规律^[16]，但 $Z = 0.4Z_{\odot}$ 气体的下落被观测排除了。

近 10 年很多有关恒星计数、运动学、金属丰度的研究中，金属丰度一般由紫外超^[17]、uvby β 测光^[18]、低信噪比光谱^[19,20] 得到，由这些资料可以得到银河系的结构组成。1995 年，Wyse 和 Gilmore 提出^[21]，这些数据最好的拟合是相互重叠的厚盘和薄盘：其中厚盘的平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$ ，范围在 $-0.2 \sim -1.4$ 之间；薄盘的平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.25$ ，范围为 $+0.2 \sim -0.8$ 。还有一些工作认为厚盘存在延伸到 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2 \sim -3$ 的贫金属尾^[22~24]。典型的恒星计数模型的结果认为厚盘和薄盘恒星数量的比例为百分之几^[2]。

2.2 银晕

银晕不存在严重的 G 矮星问题^[25~27], 银晕金属丰度范围从 -4 到比太阳值略低, 平均值为 -1.6^[22,28]。Hartwick 注意到银晕中低的金属丰度, 认为银晕中的金属产量远小于银盘或者银晕失去其气体, 使恒星形成较少^[28]。比较好的解释是在银晕化学演化完成之前银晕失去其部分气体, 这些气体进入银河系的中心, 是核球质量的主要来源^[29]。

恒星金属丰度的下限是多少? 是否存在零金属丰度的恒星? 这些都是具有挑战性的课题。现在虽然还没有找到大爆炸后形成的第一代恒星, 但天文学家已经给它取好了名字: 星族 III。

Bond 采用物端棱镜的方法对 5000 平方度天区内 B 星等亮于 11.5mag 及全天一半天区内 B 星等亮于 10.5mag 的恒星进行了研究, 但只找到了三个 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$ 的恒星^[30,31]。从 1978 年开始, Beers 等人使用施密特望远镜配合物端棱镜进行了巡天 (BPS 巡天)^[32,27], 其极限 B 星等为 16mag, 天区达到 7500 平方度, 现在已经找到 10000 个极端贫金属星的候选者, 但后续的有缝光谱证认工作进行较慢。比起 Bond 的工作, BPS 巡天有了很大的进展, 发现 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$ 的恒星已经超过 100 个, 最低的接近 -4.0。除了以上系统的巡天工作, 还有几个极端贫金属星被发现, 巨星 CD-38 245 已经被发现多年, 但它仍是已知金属丰度最低的恒星之一 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -4.01$)^[33]。

为了解释现在尚未找到星族 III 的观测事实, 人们提出了许多不同的模型。Doom 等人提出在大质量 O 型星完成 SNII 型超新星爆发前有很大数量的小质量恒星形成, 因而具有大爆炸化学丰度^[34]。文献 [41] 估算, 在 BPS 巡天全部完成后应该能找到 1~2 颗星族 III 恒星。

另一种观点认为在零金属丰度情况下不可能形成质量小于 $0.9M_{\odot}$ 的小质量星, 因此, 今天已经不可能观测到星族 III 恒星^[35](同样地随时间演化的初始质量谱 (如 Top-heavy) 亦可能解释该问题)。Lin 和 Murray 反对前一种观点, 认为在零金属丰度条件下, 小质量恒星形成率虽然很小, 但不为零^[36]。现在最主要的问题是在零金属丰度条件下, 恒星形成的情况缺乏观测证据。

Cayrel 认为, 在形成银河系的原始星云坍缩过程中, 在其中心区域形成大质量恒星, 大质量恒星超新星爆发产生的激波诱发形成大量的小质量恒星, 因此虽然小质量恒星和大质量恒星同属于第一代恒星, 但是已经被污染了, 称为“脏”的星族 III (Dirty Pop. III)^[37]。

另外, 还有一种不同的模型, 认为真正的星族 III 恒星会在几十亿年的轨道运动中被富金属的星际介质污染^[38,39]。反对的人认为吸积率远小于质量流失率^[40], 还有人认为吸积的物质会被对流带到恒星内部。

总结以上讨论, 找到真正的星族 III 恒星的希望并没有破灭, 但最早形成的小质量恒星被星风或 SN II 型超新星爆发污染的可能性也是存在的^[41]。

2.3 核球

早期对核球的研究都集中在银纬 -4° 的 Baade 窗口的恒星。通过测光和低分辨率光谱工作, 人们发现大多数核球巨星都是富金属的^[42,43]。Geisler 和 Friel 使用 Washington CCD 光度计测光得到 314 个核球内的红巨星的金属丰度, 发现平均后的 $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.17 \pm 0.15$ ^[44], 与 Rich^[45] 的结果符合得很好, 但他们还发现了很多贫金属的恒星, 其数量与简单模型的预言值符合。

当 McWilliam 和 Rich 首次对核球恒星进行高分辨率光谱化学分析时, 惊奇地发现核球

恒星金属丰度值比太阳附近值略小^[46]。他们对 Rich^[45] 的结果进行了修正, 得到核球中平均 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.25$, 略小于太阳附近红巨星的 -0.17 , 同时贫金属恒星的数目比太阳附近多。

这样的结果是出人意料的, 因为核球应该是下落物质最后存放的地方, 这只能解释为大部分的下落是很快发生的, 或者类似矮星系, 气体在落到核球之前已经被耗尽。

3 银河系金属丰度的演化

恒星的年龄 - 金属丰度关系记录了在银河系演化过程中恒星形成处星际物质金属丰度演化的情况, 可以提供恒星形成和银河系化学演化的信息。年龄 - 金属丰度关系中的金属丰度一般用铁丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 来表征, 但氧丰度 $[\text{O}/\text{H}]$ 可能是更好的“时钟”^[47], 因为氧是最丰富的金属元素, 而且星际介质中氧大部分由 SN II 型超新星爆发形成, 时标较短, 铁由 SN II 型和 SN Ia 型超新星爆发两种机制形成, 时标不同。现在采用 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 作为金属丰度表征的一个重要原因是恒星大气中 $[\text{O}/\text{H}]$ 比 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 更难准确确定。

3.1 恒星年龄的确定

恒星年龄的确定有几种办法。太阳的年龄为 $4.6 \pm 0.1 \text{ Gyr}$ ^[48], 是通过不稳定核素的衰变测定的。对其它恒星的年龄测量一般是基于恒星演化模型的, 把理论计算的结果同观测数据相比较。这样得到的年龄存在一定的不确定性, 即使是确定得比较好的疏散星团和球状星团的年龄也可能有较大的误差, 这是因为在恒星演化过程中有一些物理机制没有被考虑^[49]。采用不同的恒星演化模型和采用不同的方法得到的恒星年龄存在一定的差异。Edvardsson 等人^[50]的工作采用 Van den Berg^[51]的等时线, 在 $(\log T_{\text{eff}}, \Delta M_{\text{v}})$ 图上确定恒星的年龄。Ng 和 Bertelli^[52]对同样的样本采用 Bertelli 等人^[53]的等时线, 在 $(\log T_{\text{eff}}, M_{\text{v}})$ 图上确定恒星的年龄, Bertelli 等人^[53]的模型采用了最新的不透明度表。这两项工作得到的恒星年龄存在一定的差异, Ng 和 Bertelli^[52]得到的结果在老龄区 ($t > 4 \text{ Gyr}$) 比 Edvardsson 等人^[50]系统偏大, 而在 $t < 4 \text{ Gyr}$ 时轻微偏小。Ng 和 Bertelli^[52]还发现恒星距离的不确定性是造成年龄误差的重要原因, 只有距离的精度高于 5%, 得到的年龄才是可信的。

另外一种方法测量恒星年龄是通过放射性元素衰变 (例如 U 到 Th) 的衰变率的测量, 这种方法也与模型有关, 在确定银河系形成的最初阶段的时间上存在一定的不确定性。

3.2 年龄 - 金属丰度关系 (AMR)

3.2.1 太阳近邻恒星

Twarog^[54]首先发现太阳近邻恒星存在年龄 - 金属丰度关系, 该工作采用 uvby β 测光的方法得到年龄和金属丰度, 结果表明金属丰度随年龄的减小而增加, 在 13 ~ 5Gyr 之间增加很快, 而在 5Gyr 之前增加比较缓慢。Carlberg 等人^[55]采用不同的恒星演化模型对 Twarog^[54]的样本进行了重新处理, 排除样本中的一些低金属丰度恒星, 得到的年老恒星的平均金属丰度相对较高, 这样, 在大年龄处的年龄 - 金属丰度关系比较平缓, 表明银盘的演化是从较高的初始金属丰度开始的。Meusinget 等人^[56]也对 Twarog^[54]的样本进行了重新处理, 采用新的金属丰度定标关系和恒星大气模型, 得到的结果与 Twarog^[54]的结果十分接近。

Edvardsson 等人^[50]的样本包括 189 颗 F 型和 G 型矮星, 采用高分辨率光谱分析的方法确定金属丰度, 借助 uvby β 测光确定年龄, 发现年龄 - 金属丰度关系与 Twarog^[54]、Meusinget 等人^[56]的结果虽相符, 但存在大的弥散。Ng 和 Bertelli^[52]对 Edvardsson 等人^[50]的样本

的年龄进行了重新处理, 得到的年龄 - 金属丰度关系的斜率约为 $0.07 \text{dex} \cdot \text{Gyr}^{-1}$ 。

以上这些研究都表明年龄 - 金属丰度关系 (特别是在 $t < 10 \text{Gyr}$ 时) 存在很大的弥散。这样大的弥散可能有一部分是研究样本的选择效应造成的^[57], 但也一定有其内在的原因。造成这样的弥散有很多种可能性, 例如银河系存在径向的金属丰度分布、形成恒星的气体的不均匀性、由外部进入气体吸积的各向不均匀性、具有不同年龄 - 金属丰度关系各星族成份的叠加。这些因素都能导致年龄 - 金属丰度关系的弥散, 这对用银河系化学演化模型解释观测得到的年龄 - 金属丰度关系是不利的。

3.2.2 疏散星团

采用疏散星团确定年龄 - 金属丰度关系的优点是星团年龄的确定比单个恒星更加可靠, 但也存在一些其它问题, 主要是星团的金属丰度随银心距和垂直方向标高不同而变化。

对疏散星团的金属丰度和年龄的一些研究表明^[57], 在银盘上没有明显的年龄 - 金属丰度关系, 任何年龄处的金属丰度弥散都是相当大的, 一些十分年老的疏散星团的金属丰度接近甚至大于太阳金属丰度, 例如 NGC6791 的年龄为 10Gyr ^[59], 而 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx +0.2 \sim +0.3$ ^[60]。

Carraro 等人^[58]的工作对一批疏散星团的年龄、金属丰度、银心距 R 、垂直方向标高 z 进行了多变量分析, 得到沿银河系的径向平均金属丰度有 $-0.09 \text{dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 的变化规律, 而且这个值随年龄的变化不大, 在垂直银盘的平均金属丰度的变化规律为 $-0.25 \text{dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 。在对金属丰度进行 $-0.09 \text{dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 的径向修正后得到的疏散星团年龄 - 金属丰度关系与近邻恒星的结果相符合。

4 银河系化学演化模型

传统的银河系化学演化模型都采用瞬时混合和各向同性稳定流入假设, 所以不能解释观测得到的年龄 - 金属丰度关系的弥散。为解释这样大的弥散, 近年的一些银河系化学演化模型考虑了下面一些可能的机制:

4.1 恒星轨道运动

分子云的扩散、银盘上的密度波、卫星星系的流入等因素都可以使恒星远离其诞生处, 这样诞生于不同位置的恒星到达太阳邻近位置使得相同年龄恒星的金属丰度存在一定的弥散。对盘族恒星年龄和轨道运动速度弥散的观测结果可以证明这种机制是存在的^[61]。Francois 和 Matteucci^[62]的化学演化模型中讨论了这种机制的效应。Edvardsson 等人^[50]的工作得到了精确的运动学参数, 并对恒星轨道运动的影响进行了讨论, 但即使是具有相同运动学参数的子样本中金属丰度的弥散仍然很大, 说明除恒星轨道运动之外还有其它机制存在。

4.2 非瞬时混合

造成非瞬时混合的机制有两种, 一是恒星核合成的产物释放到邻近的区域, 在没有充分混合的情况下形成新的恒星, 另一种是外界贫金属气体的流入触发在短于充分混合的时标内形成恒星。单独考虑这两种机制中的一种都不能解释观测事实, 必须同时考虑两种机制。

Reeves 认为恒星形成区内超新星爆发可以形成显著的化学元素丰度空间分布不均匀性^[63], 但 Edmunds 研究了这样事件的发生几率, 认为银盘是充分混合的^[64]。White 和 Audouze^[65]扩展了 Lynden-Bell^[12]银河系化学演化模型, 得到非均匀稳态演化的解析解, 认为不均匀程度取决于两个重要的混合参数: (1) 与恒星形成事件产生的单位质量富金属物质混合的银盘

物质的平均质量；(2)与单位质量内流物质混合的银盘物质的平均质量。

现有的银河系化学演化模型一般都考虑化学演化的不均匀性^[66~68]，都采用了 Twarog^[54] 的年龄-金属丰度关系和 Edvardsson 等人^[50] 的弥散。Pilyugin 和 Edmunds^[67] 考虑了导致不均匀性的两种机制，其中之一是恒星形成区 (HII 区) 中的富金属气体维持 3×10^7 yr 之后同周围的银盘气体瞬时混合。HII 区本身自丰富的假设可以解释氧丰度随时间变化的弥散，但不能解释铁丰度的弥散，因为星际物质中的大部分铁元素是由 SN Ia 超新星形成的，其前身星的寿命约为 1 Gyr，远长于自丰富的时间尺度。Pilyugin 和 Edmunds^[67] 认为 HII 区的自丰富使得氧丰度 (来源于 SN II 超新星，时间尺度短得多) 随时间变化的弥散应该大于铁丰度的弥散，而观测得到的氧和铁的丰度的弥散都很大的结果表明不均匀性存在其它来源。

Pilyugin 和 Edmunds^[67] 认为偶发的气体内流可以解释年龄和铁、氧丰度关系中大的弥散。如果内流气体的下落在时间和空间上都是不规则的，银盘气体在达到太阳丰度后会有相当部分被下落气体“稀释”成低金属丰度。在这样的条件下，形成的恒星的氧丰度和铁丰度的弥散应是相同的，因为“稀释”对所有的核素都是相同的。如果是这样，内流气体不可能是纯粹的氢气体，否则“稀释”会导致在 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1$ 时也保持太阳丰度比例，而这在实际中并未观测到，那么，内流气体应该来源于银晕，其 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1$ 。

Raiteri 等人^[68] 发展了一套研究银河系化学演化的 N 体流体动力学模拟的方法，这种方法可以得到类似 Twarog^[54] 的年龄-金属丰度关系，金属丰度的弥散很大，而且预言在全部金属丰度范围内 $[\text{O}/\text{Fe}]$ 有显著的弥散，可以据此对这个模型进行检验。但这个模型也存在一些问题，例如贫金属恒星出现的几率过高。

4.3 不同星族成份的叠加

不同星族成份 (银晕、厚盘、薄盘、核球) 具有不同的年龄-金属丰度关系，叠加在一起可以使金属丰度有一定的弥散。Pardi 等人^[69] 考虑银晕、厚盘、薄盘同时进行演化，这些恒星的叠加使得年龄-金属丰度关系存在一定的弥散，但其弥散小于观测结果。不同星族成份叠加的机制对解释年龄-金属丰度关系弥散不会起很大作用，因为恒星计数工作表明厚盘和银晕的贡献很小，事实上，贫金属盘族恒星数量与其它盘族恒星的比例为 0.9%，而银晕与银盘恒星数量的比例为 $1/1500$ ^[70]。因此，造成年龄-金属丰度弥散的主要原因应来自银盘内部，而其它银河系成份的叠加影响不大。

5 总结和展望

银河系的化学演化是银河系研究的重要方面，从中可以得到银河系形成和演化过程的一些重要信息。经过几十年的观测和理论研究，现在已经建立了一些银河系化学演化的模型，基本可以解释观测得到的恒星各种化学元素丰度的情况。但是，银河系化学演化方面仍然存在相当多的问题没有解决、例如 $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ 的极端贫金属恒星的元素丰度情况、星族 III 恒星是否存在、初始质量函数 (IMF) 是否随时间演化、可能的恒星爆发形成阶段对银河系化学演化的影响、银河系环境的不均匀性与年龄-金属丰度关系 (AMR) 弥散的关系等。

为了解决上述问题，进一步的观测和理论工作都是十分必要的。在观测方面，需要对银河系不同区域内不同金属丰度的大量恒星进行精确化学元素丰度测定，以了解银河系环境的不均匀性；另外，需要寻找更低金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -4$) 的恒星，从而了解银河系形成初期的

情况。在理论方面, 恒星演化和核合成理论需要进一步完善, 明确混合、对流、星风等过程对恒星演化和核合成过程的影响, 超新星爆发的物理机制、极端贫金属情况下的恒星形成和演化过程也需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *Ap. J.*, 1962, 136: 748(ELS)
- 2 Searle L. In: Tinsley B M, Larson R B eds. *The Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, New Haven: Yale University Press, 1977, 219
- 3 Majewski S R. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1993, 31: 575
- 4 赵君亮, 束成钢. *天文学进展*, 1993, 11(3): 224
- 5 束成钢, 赵君亮. *天文学进展*, 1993, 11(3): 236
- 6 Van den Bergh S. A. J., 1962, 67: 486
- 7 Schmidt M. *Ap. J.*, 1963, 137: 758
- 8 Searle L, Sargent W L W. *Ap. J.*, 1972, 173: 25
- 9 Audouze J, Tinsley B M. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1976, 14: 43
- 10 Larson R B. *M.N.R.A.S.*, 1974, 166: 585
- 11 Larson R B. *M.N.R.A.S.*, 1976, 176: 31
- 12 Lynden-Bell D. *Vistas Astron.*, 1975, 19: 299
- 13 Clayton D D. *Ap. J.*, 1985, 288: 569
- 14 Clayton D D. *M.N.R.A.S.*, 1988, 234: 1
- 15 Worthey G, Dorman B, Jones L A. A. J., 1996, 112: 948
- 16 Tosi M. *Astron. Astrophys.*, 1988, 197: 47
- 17 Sandage A, Fouts G. A. J., 1987, 93: 74
- 18 Nissen P E, Schuster W J. *Astron. Astrophys.*, 1991, 251: 457
- 19 Carney B W, Laird J B, Latham D W et al. *A. J.*, 1987, 94: 1066
- 20 Jones J B, Wyse R F G, Gilmore G. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1995, 107: 632
- 21 Wyse R F G, Gilmore G. *A. J.*, 1995, 110: 2771
- 22 Norris J, Ryan S. *Ap. J.*, 1991, 380: 403
- 23 Beers T C, Sommer-Larson J. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 96: 175
- 24 Pagel B E J, Tautvaisiene G. *M.N.R.A.S.*, 1995, 276: 505
- 25 Laird J, Rupen M P, Carney B et al. *A. J.*, 1988, 96: 1908
- 26 Pagel B E J. In: Beckman J E, Pagel B E J eds. *Evolutionary Phenomena in Galaxies*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989. 201
- 27 Beers T C, Preston G W, Shectman S A. *A. J.*, 1992, 103: 1987
- 28 Hartwick F D A. *Ap. J.*, 1976, 209: 418
- 29 Wyse R F G, Gilmore G. *A. J.*, 1992, 104: 144
- 30 Bond H E. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1980, 44: 517
- 31 Bond H E. *Ap. J.*, 1981, 248: 606
- 32 Beers T C, Preston G W, Shectman S A. *A. J.*, 1985, 90: 2089
- 33 McWilliam A, Preston G W, Sneden C et al. *A. J.*, 1995, 109: 2757
- 34 Doom C, de Greve P, de Loore C. *Ap. J.*, 1985, 290: 185
- 35 Truan J W, Cameron A G W. *Astron. Astrophys. Space. Sci.*, 1971, 14: 179
- 36 Lin D N C, Murray S D. *Ap. J.*, 1992, 394: 523
- 37 Cayrel R. *Astron. Astrophys.*, 1986, 168: 81
- 38 Yoshii Y. *Astron. Astrophys.*, 1981, 97: 280
- 39 Yoshii Y, Mathews G J, Kajino T. *Ap. J.*, 1995, 447: 184
- 40 Vauclair S, Chabonnei C. *Astron. Astrophys.*, 1995, 295: 715
- 41 Cayrel R. *Astron. Astrophys. Rev.*, 1996, 7: 217

- 42 Whitford A E, Rich R M. *Ap. J.*, 1983, 274: 723
 43 Frogel J A, Whitford A E. *Ap. J.*, 1987, 320: 199
 44 Geisler D, Friel E. A. J., 1992, 104: 128
 45 Rich R M. A. J., 1988, 95: 828
 46 McWilliam A, Rich R M. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 91: 749
 47 Wheeler J C, Sneden C, Truran J W Jr. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1989, 27: 289
 48 Wasserburg G J, Papanastassiou D A, Tera F *et al.* *Philos. Trans. R. Soc. London A*, 1977, 285: 7
 49 Guzik J A, Willson L A, Brunish W H. *Ap. J.*, 1987, 319: 957
 50 Edvardson B, Andersen J, Gustafsson B *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1993, 275: 101
 51 Vandenberg D A. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1985, 58: 711
 52 Ng Y K, Bertelli G. *Astron. Astrophys.*, 1998, 329: 943
 53 Bertelli G, Bressan A, Chiosi C *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1994, 106: 275
 54 Twarog B A. *Ap. J.*, 1980, 242: 242
 55 Carlberg R G, Dawson P C, Hsu T *et al.* *Ap. J.*, 1985, 294: 674
 56 Meusinger H, Reimann H G, Stecklum B. *Astron. Astrophys.*, 1991, 245: 57
 57 Friel E D. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 381
 58 Carraro G, Ng Y K, Portinari L. *M.N.R.A.S.*, 1998, 296: 1045
 59 Tripicco M J, Bell R A, Dorman B *et al.* *A. J.*, 1995, 109: 1697
 60 Montgomery K A, Janes K A, Phelps R L. A. J., 1994, 108: 585
 61 Wielen R, Dettbarn C, Fuchs B *et al.* In: Barbuy B, Renzini A eds. *The Stellar Populations of Galaxies*, IAU Symp. 149, Angra dos Reis, Brazil, 1991, Dordrecht: Kluwer, 1992: 81
 62 Francois P, Matteucci F. *Astron. Astrophys.*, 1993, 280: 136
 63 Reeves H. *Astron. Astrophys.*, 1972, 19: 215
 64 Edmunds M G. *Astrophys. Space. Sci.*, 1975, 32: 483
 65 White S D M, Audouze J. *M.N.R.A.S.*, 1983, 203: 603
 66 Pilyugin L S, Edmunds M G. *Astron. Astrophys.*, 1996, 313: 783
 67 Pilyugin L S, Edmunds M G. *Astron. Astrophys.*, 1996, 313: 791
 68 Raiteri C M, Villata M, Navarro J F. *Astron. Astrophys.*, 1996, 315: 105
 69 Pardi M C, Ferrini F, Matteucci F. *Ap. J.*, 1994, 444, 207
 70 Ng Y K, Bertelli G, Chiosi C *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 65

New Progress in Galactic Metallicity and its Evolution

Zhang Huawei^{1,2,3} Zhao Gang²

(1. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

(2. Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(3. Beijing Astrophysics Center, jointly sponsored by the Chinese Academy of Sciences and Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The average values of metallicity in the disk, the halo, and Galactic bulge are -0.2 , -1.6 , and -0.2 dex respectively. The age-metallicity relation (AMR) provides useful clues about the Galactic formation and evolution. In order to explain observed AMR and its scatter, mechanisms of diffusion of stellar orbits and non-instantaneous mixing must be considered in Galactic chemical evolution models.

Key words metallicity—Galaxy: structure—age-metallicity relation