

文章编号: 1000-8349(2007)01-0022-14

星系金属丰度的研究进展 (II): 光度—金属丰度关系

梁艳春¹, HAMMER Francois², 邓李才¹, 赵 刚¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. GEPI, Observatoire de Paris-Meudon, 92195 Meudon, France)

摘要: 金属丰度与星系光度是星系的重要特征参量, 研究它们之间的关系有助于理解星系中恒星质量与金属成分的累积过程。评述了星系的光度—金属丰度关系的最新研究进展, 包括对近邻星系、中等红移星系 ($0.4 < z < 1$) 及高红移星系 ($z > 2$) 的研究结果。由于观测样本跨越较宽的宇宙学时标, 可以由此来探讨这一关系的演化过程, 从而帮助理解星系演化的整体图景。

关键词: 天体物理学; 星系; 综述; 金属丰度; 光度—金属丰度关系

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引 言

梁艳春等人 (2006)^[1] 已经详细介绍了估计星系金属丰度的方法及其定标。本文重点评述一个表征星系演化的重要关系: 光度 L 与金属丰度 $12+\lg(\text{O}/\text{H})$ 的关系 (也可以简写为 $L-Z$ 或 $M-Z$ 关系, M 为星等)。恒星成分的总质量和气相金属丰度是表征星系演化状态的 2 个基本特征参量, 前者反映已形成的恒星锁定气体的成分, 后者反映恒星在演化过程中重新释放气体及星系与周围环境的气体交换。理解这 2 个参量在不同宇宙学时标的特征及它们之间的关系, 是理解星系中恒星形成过程的关键, 对了解不同质量星系中恒星和金属成分的累积过程提供重要的参考价值。有关的研究已经取得很大进展, 获得了银河系内及其他近邻星系大样本 HII 区及河外星系整体的光度—金属丰度关系的观测资料: 如 Zaritsky 等人 (1994)^[2]; 特别是最近的一些巡天项目, 如 SDSS(Sloan Digital Sky Survey)^[3]、2dFGRS(Two Degree Field Galaxy Redshift Survey)^[4]、KISS(KPNO International Spectroscopic Survey)^[5,6] 等。随着望远镜观测能力的提高及多波段观测手段的发展, 人们已获得越来越多的中等红移 ($0.4 < z < 1$) 及高红移 (如 $z > 2$ 的 Lyman Break Galaxies, LBGs) 星系的光度—金属丰度关系的观测结

收稿日期: 2005-07-12; **修回日期:** 2006-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10403006、10433010、10573022、10333060、10521001)

果, 为理解星系的光度和金属丰度随红移的演化提供了第一手资料。

本文的第 2、3 章分别介绍了近邻星系的光学 B 波段, 及近红外 J、H、K 波段的光度与金属丰度关系的观测结果; 第 4 章简要介绍了近邻星系的质量-金属丰度关系的研究进展; 第 5 章介绍了中等红移及高红移星系的相关研究结果, 讨论了星系的光度-金属丰度关系随红移的演化; 第 6 章给出结论与展望。

由于星系的光度与所采用的宇宙学模型有关, 下面给出光度-金属丰度关系式时, 一般均表明其所采用的宇宙学参数。对于星等测光系统, 大部分工作采用 Johnson 系统, 但也有一些采用 AB 系统 (如 Liang 等人 (2004)^[7,8]、Lilly 等人 (2003)^[9])。对 AB 系统与 Johnson 系统的转换 (如 $B_{AB} = B - 0.17$) 可参见 Lilly 等人 (1995)^[10] 的文章。将不同研究结果进行比较时, 需要归一到相同的宇宙学模型及相同的星等系统。梁艳春等人 (2006)^[1] 已讲到, 可以有多种方法来估计星系的金属丰度, 不同方法得到的丰度值不尽相同, 文中比较不同星系的光度-金属丰度关系时, 并没有将金属丰度归一到相同的定标方法。还需要注意的是, 比较不同红移星系的光度-金属丰度关系时, 需要对星等进行 K 改正, 将观测到的来自不同红移星系的的不同发射波段的能谱归算到相同的能区。Hogg 等人 (2002)^[11] 给出了 K 改正的基本定义和计算方程。

2 光学波段: 近邻星系的 M_B - Z 关系

星系的光度 (质量)-金属丰度关系可作为一个敏感的探针来检验星系的演化过程。星系的光度 (质量)-金属丰度关系的提出始于 Lequeux 等人 (1979)^[12] 对一些不规则及蓝致密矮星系的研究, 发现了它们的质量与金属丰度之间存在正相关。考虑到测量星系 (尤其对于矮星系这样的系统) 动力学质量存在不确定性, 随后的工作多是讨论 B 波段绝对星等与金属丰度的关系。Skillman 等人 (1989)^[13] 及 Richer 和 McCall (1995)^[14] 先后建立了不规则星系的 M_B - Z 关系。随后, 相关研究被扩展到旋涡星系^[2,15,16], 甚至椭圆星系^[17]。还有一些工作研究了星暴核星系^[18]、UV^[19] 及发射线^[5,6] 选的星系 M_B - Z 关系。特别是目前的一些巡天项目, 如 2dF、KISS、SDSS 等, 提供了大样本近邻星系的光度 (质量)-金属丰度关系的观测资料^[3,4,20-24]。这些研究结果表明, 星等范围约在 10 mag、金属丰度范围约在 2 dex 内的星系的光度 (质量) 和金属丰度之间存在一定相关性, 而且这种相关性与环境和形态无关^[25,26]; 从不规则星系到旋涡星系, 再到椭圆星系的整个哈勃序列的星系均表现出一定程度的 L - Z 相关性^[27,28]。这里我们只讨论有恒星形成活动的星系, 下面基本按发表的时间顺序及星系类型列出一些星系的 $\lg(\text{O}/\text{H})$ 对 M_B 的相关公式。

2.1 不规则星系

Skillman 等人 (1989)^[13] 测得 7 个矮不规则星系中 20 个 H II 区的 O/H 丰度值, 并得到它们的 M_B - Z 关系:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = -0.153M_B + 5.50. \quad (1)$$

样本的星等和金属丰度范围分别为 $-19.0 < M_B < -10.5$ 和 $7.2 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.4$ 。对丰度的测量, 有一部分样本是采用电子温度 T_e 方法, 大多数是采用 R_{23} 方法。

Richer 和 McCall (1995)^[14] 得出 21 个矮不规则星系的光度-金属丰度关系, 对于 $-19 < M_B < -15$ 等的样本星系拟合出一个线性关系:

$$12 + \lg(O/H) = -0.147(\pm 0.029)M_B + 5.67(\pm 0.48). \quad (2)$$

这与 Skillman 等人 (1989)^[13] 得到的关系很相似。其样本星系的 O/H 丰度是由电子温度方法测得的, 范围为 $7.25 < 12 + \lg(O/H) < 8.5$ 。

Shi 等人 (2005)^[29] 也获得了 72 个蓝致密星系的光度-金属丰度的相关关系。样本的星等范围为 $-22 < M_B < -13$, 金属丰度为 $7.5 < 12 + \lg(O/H) < 9.1$ 。他们选取的宇宙学模型为 $H_0 = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

2.2 旋涡星系和不规则星系的联合样本

Kobulnicky 和 Zaritsky (1999, KZ99)^[30] 对一些已发表的近邻星系数据, 包括一些旋涡星系和不规则星系, 总结出其 M_B-Z 关系。拟合得到的 $12 + \lg(O/H)$ 与 M_B 关系的斜率为 $(-0.144 \pm 0.003) \text{ dex} \cdot \text{mag}^{-1}$ 。整个样本的范围是 $7.3 < 12 + \lg(O/H) < 9.6$ 和 $-22.5 < M_B < -11.5$, 选取的宇宙学参数是 $H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。如果只考虑近邻旋涡星系样本 (取自 ZKH^[2] 和 Kennicutt(1992)^[31,32]), 拟合得到的 M_B-Z 关系为

$$12 + \lg(O/H) = -0.108(\pm 0.040)M_B + 6.637(\pm 0.841)。$$

2.3 UV 选的星系及近邻 HII 星系

Contini 等人 (2002)^[19] 给出 68 个 UV 选的星系 ($z < 0.4$) 的金属丰度, 并利用文献中的 HII 星系资料, 得出一个线性结合关系:

$$12 + \lg(O/H) = -0.173(\pm 0.01)M_B + 5.195(\pm 0.177). \quad (3)$$

样本的星等范围为 $-22 < M_B < -15$, 中值为 $M_B = -18.8$, 宇宙学模型为 $H_0 = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。金属丰度的范围大致为 $7.7 < 12 + \lg(O/H) < 9.0$ 。样本星系的金属丰度是采用文献 [33] 中的两分支的金属丰度定标关系再由 R_{23} 估计得到的。

2.4 KISS₁

对于大样本星系巡天的工作, 一个非常有意也是自然会做的工作是测量目标星系的金属丰度, 并且往往由于样本比较大, 会得到一定的统计意义。Melbourne 和 Salzer (2002)^[5] 得到了 519 个 KISS 发射线星系的光度-金属丰度关系:

$$12 + \lg(O/H) = -0.267(\pm 0.009)M_B + 3.60(\pm 0.20). \quad (4)$$

样本星系的星等范围是 $-21 < M_B < -12$, 金属丰度的范围为 $7.5 < 12 + \lg(O/H) < 9.4$ 。若考虑星系内部消光对星等的影响, 采用消光率 $A_B = 4.0E(B-V)$, 则样本星系的 M_B-Z 关系被修正为

$$12 + \lg(O/H) = -0.24(\pm 0.006)M_B + 4.059(\pm 0.17). \quad (5)$$

计算中采用 $H_0 = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

2.5 KISS₂

Salzer 等人 (2005)^[6] 扩大了文献 [5] 中的样本, 得到 765 个 KISS 发射线星系的光度-金属丰度关系 ($-21 < M_B < -16$, 采用 $H_0 = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$)。下面分别列出 Salzer 等人

(2005)^[6] 采用两个丰度定标公式^[1,34,35] 并在考虑及忽略星系内部吸收的影响的两种情况得出的拟合结果:

$$12 + \lg(O/H) = -0.280M_B + 3.319, \quad (\text{EP84定标}), \quad (6)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.222M_B + 4.180, \quad (\text{KBG定标}), \quad (7)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.253M_B + 3.759, \quad (\text{EP84定标, 考虑内部吸收}), \quad (8)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.200M_B + 4.559, \quad (\text{KBG定标, 考虑内部吸收}). \quad (9)$$

由两个 O/H 丰度定标关系得出的结果会导致约 0.3 dex 的差别。整体样本的金属丰度范围约为 $7.5 < 12 + \lg(O/H) < 9.5$ 。

2.6 2dFGRS

利用 2dFGRS 的资料, Lamareille 等人 (2004)^[4] 研究了 6 387 个低红移 ($z < 0.15$) 的恒星形成星系的光度-金属丰度关系, 得出:

$$12 + \lg(O/H) = -0.274(\pm 0.005)M(b_j) + 3.45(\pm 0.09). \quad (10)$$

样本的星等范围是 $-22 < M(b_j) < -13$, 其中 $b_j = B - 0.304(B - V)$ 。宇宙学模型采用: $H_0 = 71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $\Omega_M = 0.27$ 。如果考虑星系内部消光对星等的影响, 样本星系的光度-金属丰度会有略微的修改。

利用 2dFGRS 星系中的 r_F 波段 ($r_F = R + 0.163(V - R)$) 测光资料, Lamareille 等人 (2004)^[4] 也得到了样本星系的 R 波段光度-金属丰度关系:

$$12 + \lg(O/H) = -0.249(\pm 0.004)M(r_F) + 3.72(\pm 0.08). \quad (11)$$

样本星系的金属丰度的范围大致为 $7.3 < 12 + \lg(O/H) < 9.2$ 。不过他们是采用等值宽度 R_{23} 的方法并采用 K99^[33] 的定标关系来估计星系的金属丰度的, 原因是 2dF 巡天工作中没有进行流量定标。

2.7 SDSS

基于 SDSS-DR2 的大样本资料, Tremonti 等人 (2004)^[3] 拟合得出约 53 400 个 $z \approx 0.1$ 的恒星形成星系的光度-金属丰度关系:

$$12 + \lg(O/H) = -0.185(\pm 0.001)M_B + 5.238(\pm 0.018). \quad (12)$$

选取的宇宙学模型是: $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $\Omega_M = 0.3$ 。其金属丰度是基于 Charlot 和 Longhetti 等人 (2001)^[36] 的光致电离模型而同时拟合多条发射线, 然后选取最可几分布而得到的。金属丰度的大致范围为 $8.0 < 12 + \lg(O/H) < 9.5$ 。

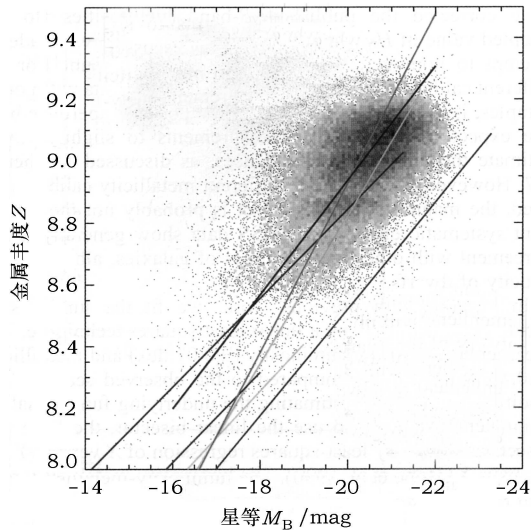


图 1 近邻星系的光度与金属丰度的关系^[3]

黑色小点是 SDSS-DR2 的样本星系, 约 53 400 个

金属丰度, 将旋涡星系与矮不规则星系相比时这一趋势尤为明显。采用不同的金属丰度定标关系^[1]及是否考虑星系内部消光, 而得出的星系的光度-金属丰度关系有所不同, 线性拟合的斜率及零点也不尽相同。当然, 拟合结果也和星系样本本身有关, 如极限星等的深度是否足以包含很多的暗弱星系等。有很多解释来探讨观测到的星系的金属成分与光度的相关趋势。一种解释认为, 平均而言, 矮星系中将气体转化为恒星的效率都比较低, 因而在演化过程中产生的重元素自然会比较少; 第二种可能的解释是, 不同质量、不同金属丰度的星系中恒星诞生所遵循的 IMF 不尽相同。但是由于观测到一些矮星系正在活跃地形成恒星(又称蓝致密矮星系), 以上两种解释均被提出疑问。还有一种解释是小质量星系的引力势阱比较浅, 与大质量星系相比更容易丢失掉超新星爆发抛入星际介质中的金属成分, 这一机制也可以解释观测到的盘星系的金属丰度梯度。Mac Low 和 Ferrara (1999)^[37]所作的解析和数值模拟结果均表明: 质量 $M_g > 10^7 M_\odot$ 的星系丢失物质的效率很低, 而当星系低于某一临界质量(大致相当于一个 $M_B = -12$ mag 的星系的质量)时, 星系将会通过热的星系风丢掉其金属成分的重要部分, 只留下大部分冷的周围气体进入下一代恒星形成。通过超新星驱动的星系风所丢失的物质会随着星系本身质量的不同而不同, 比如, 矮星系会丢掉其大部分的金属成分, 而大的旋涡星系只丢掉很少一部分。

3 NIR 波段: 近邻星系的 M_J , M_H , M_K - Z 关系

近红外波段受消光影响比 B 波段小, 而且更能反映出恒星成分的质量, 尤其是 K 波段。由于观测条件的限制, 有关星系的近红外波段的光度与金属丰度的关系的观测资料并不多。

基于 2MASS 资料, Salzer 等人 (2005)^[6] 获得了约 400 个 KISS 星系的 J、H、K 波段的星等, 得到了样本星系的 M_J , M_H , M_K - Z 关系(选取 $H_0 = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$), 结果如下:

Tremonti 等人 (2004)^[3] 比较了上述工作给出的近邻星系的光度-金属丰度的关系, 并与 SDSS-DR2 的观测资料相比较(见图 1, 文中所有图的标目 $Z = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})$)。可以看出, 绝大多数 SDSS 星系是富金属 ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.5$)、高光度 ($M_B < -18$ mag) 的星系。在这一范围内, 与其他工作(如 2dF^[4]、KISS^[5,6]、KZ99^[30]等)得出的 L - Z 关系很相似。有趣的是, 在给定金属丰度, UV 选的星系比其他“正常”星系亮约 2~3 mag, 表明这些 UV 选的星系可能正在发生很强的星暴, 从而降低了其质光比。那些矮不规则星系确实是低金属丰度、低光度的系统, 与 2dF 和 KISS 巡天所发现的低光度星系很相似。

以上给出的一些近邻星系的基本趋势是, 光度越大(质量越大)的星系一般具有更高的

1) 当采用 EP84^[34] 的 $R_{23} - O/H$ 定标关系时, O/H 对 M_J , M_H , M_K 的拟合关系分别为

$$12 + \lg(O/H) = -0.215M_J + 4.056, \quad (13)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.215M_H + 3.911, \quad (14)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.212M_K + 3.919, \quad (15)$$

2) 当采用 KBG^[35] 定标时, 分别为

$$12 + \lg(O/H) = -0.200M_J + 4.130, \quad (16)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.201M_H + 3.977, \quad (17)$$

$$12 + \lg(O/H) = -0.195M_K + 4.029, \quad (18)$$

比较式 (13)–(18) 可见, 星系的 M_J , M_H , M_K 与金属丰度之间存在着一定的相关关系, 而且斜率随波长的增加而减小, 这可以理解为 (至少部分可理解为) 是由于星系内部消光的影响。而观测数据的弥散随着波长的增加而降低, 表明内部消光实际上也影响着观测资料的弥散。Liang 等人 (2006)^[38] 曾基于 SDSS 发射线星系的 $[NII]/[OII]$ 比值讨论了内部消光对星系数据弥散的严重影响。

另外, 基于 2MASS 的 K 波段观测资料, Liang 等人 (2006)^[39] 由 Jansen 等人 (2000)^[40,41] 的近邻星系样本的 K 波段星等, 得到了其 $M_K - Z$ 关系: $M_K = -9.51 \times (12 + \lg(O/H)) + 60.23$ 。Saviane 等人 (2004,2005)^[42,43] 研究了一个小样本的玉夫星系群星系的 H 波段光度和金属丰度, 指出两者之间似乎也存在相关关系。Lilly 等人 (2003)^[9] 获得了一个中等红移样本星系的 J 波段的光度-金属丰度关系, 由于只采用了一个常数消光值 $A_V = 1$, 可能会过高估计某些星系的金属丰度, 尤其对于那些消光严重的亮红外星系^[8]。以上 3 项工作由于样本比较小, 均没有给出相关的拟合公式。总之, 这些工作表明, 近红外波段也同样存在光度与金属丰度之间的相关关系, 表明质量越大的星系, 其金属丰度越高。

4 近邻星系的质量 - 金属丰度关系

星系的质量-金属丰度关系可以更直接地表征星系的质量与金属成分的累积过程, 进而表征星系的形成和演化过程。星系恒星成分的质量一般不能直接从光度得到, 因为星系的质光比 M/L 与星系的恒星形成历史及金属丰度均有关, 比如, 星系的光度对连续形成恒星和过去 1~2 Ga 期间是否有星暴发生很敏感。一般的方法是, 依据对恒星形成历史和金属丰度的估计得到星系的质光比, 再由光度估计出星系恒星成分的质量^[44–46]。现在可以由光学颜色来估计星系的 M/L , Bell 等人 (2003)^[47] 给出了由 SDSS 的颜色及 $B - V$, $B - R$ 颜色来估计相应波段质光比的解析公式, 已被广泛采用。

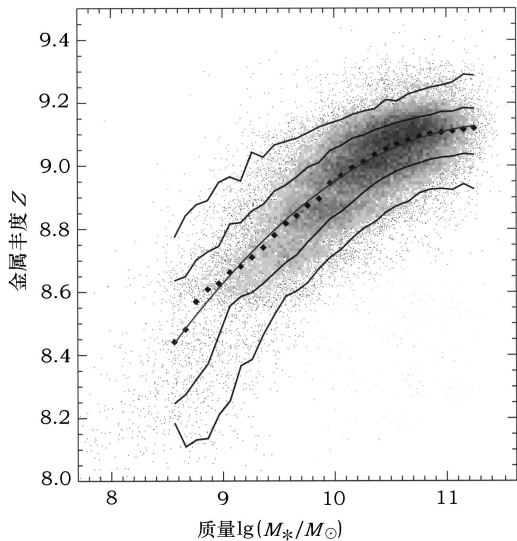


图2 SDSS 星系的质量-金属丰度关系^[3]

Tremonti 等人 (2004)^[3] 研究得到了 53 400 个 SDSS-DR2 恒星形成星系的恒星质量与金属丰度的关系 (见图 2)。在 SDSS 的 ugriz 测光系统中, z 波段 ($\lambda \approx 8900 \text{ \AA}$) 最接近近红外波段, 可由 z 波段星等估计出星系的恒星成分质量。但实际上 z 波段的质光比并不是常数, 变幅可能会达到 10^[3]。他们根据样本星系在 $D_n(4000) - H\delta_A$ 关系图上的位置^[48] 得到星系的恒星形成状况, 对星系的恒星形成历史给出一定的限制。再结合 Monte Carlo 模拟的结果得到星系的质光比, 然后得出恒星成分的总质量。最后, 他们给出样本星系的质量-金属丰度关系的拟合公式:

$$12 + \lg(O/H) = -1.492 + 1.847 (\lg M_*) - 0.08026 (\lg M_*)^2, \quad (19)$$

式中, M_* 代表星系恒星成分的质量。实际的资料点弥散在拟合曲线两边, 对于给定的星等, $12 + \lg(O/H)$ 值分布在 ± 0.4 dex 的范围内 (图 2 中心实线是对黑色方块所表示的中值点的二次多项式拟合, 另外内外两对实线分别包含 68% 和 95% 的数据点)。

由于近红外的 K 波段星等受尘埃的影响较 B 星等小很多, 而且是与恒星成分 (并非仅与亮的新生恒星) 的总质量更为直接相关, 所以 K 波段光度是估计星系恒星成分总质量的一个比较好的参量^[44,49,50]。Bell 等人 (2003)^[47] 采用 2MASS 的 K 波段资料重新估计了部分 SDSS 星系 (Early Data Release, EDR) 的恒星质量, 其结果与 Tremonti 等人 (2004)^[3] 得到的估计值很相似。值得注意的是, 当比较不同研究结果中的质量时, 应将其归一化到相同的初始质量函数及相同的宇宙学模型。

5 中等红移及高红移星系的光度 (质量)-金属丰度关系

星系的光度 (质量)-金属丰度关系可以检验星系的演化过程。一般来讲, 星系的金属丰度会随时间单调增加 (除非包含有大尺度的原初气体内落或气体的外流等), 但对短时标内的恒星形成过程造成的瞬时变化并不十分敏感。星系的光度随恒星的瞬时形成过程会明显增加并随后降低。

随着观测设备和观测能力的提高, 对星系光度-金属丰度关系的研究逐渐扩展到中等红移及高红移星系, 虽然与近邻星系的上万个样本相比, 目前观测到的中等红移及高红移星系的样本很少, 但仍然为研究星系的光度-金属丰度关系随宇宙学时标的演化提供了重要的信息。一个基本的问题是, 在中等红移和高红移处, 星系的光度-金属丰度关系是否与低红移星系相一致。基于目前对宇宙恒星形成过程的理解, 宇宙恒星形成率密度在过去更高 (红移等于 1 以

前可能为常数, 但弥散很大)^[51-54], 而宇宙中整体的金属丰度在早期更低。如果星系中存在更多的导致恒星形成的原初气体, 则应该可以期望星系在给定的金属丰度显得更加明亮。因而在光度-金属丰度关系图上, 高红移或中等红移的星系样本应该会系统地偏离近邻星系, 反映出宇宙中星系的演化过程。不过, 如果引力势及星风抛射物质的“反馈”过程等局域影响比较明显, 超新星爆发会调控恒星形成及化学增丰过程, 则星系的光度-金属丰度关系应该与宇宙学时标无关。

5.1 光度-金属丰度关系

对中等红移星系的光度-金属丰度关系的研究, 近年来取得了很大进展。很多工作均发现, 中等红移星系的光度与金属丰度之间同样存在一定的关系。与近邻星系相比, 在相同光度时, 中等红移星系的金属丰度偏低; 而在相同质量时, 其光度偏高。例如, Liang 等人 (2004)^[8] 获得了 20 多个 $0.4 < z < 1$ 的亮红外星系的 M_B - Z 关系, 发现这些遥远的亮红外星系比相同光度的近邻星系的金属丰度约低一半, 即 $\lg(O/H)$ 约低于 0.3 dex; Maier 等人 (2004)^[55] 获得了 15 个 $0.4 < z < 0.9$ 的星系的 M_B - Z 关系, Maier 等人 (2005)^[56] 及 Maier 等人 (2006)^[57] 也分别测得了 30 个 $0.47 < z < 0.92$ 的星系 (对 Lilly 等人 (2003)^[9] 的部分样本的重新研究) 和 5 个 $z \approx 1.4$ 的恒星形成星系的 M_B - Z 关系, 结果也表明, 与低红移星系相比, 这些中等红移星系表现出一种演化效应, 其金属丰度一般比相同光度的低红移星系更低; Kobulnicky 等人 (2003)^[58] 测得 Deep Groth Strip Survey (DGSS) 中 64 个中等红移星系的光度-金属丰度关系, 如图 3 所示。他们发现, 在 $z \approx 0.6 \sim 0.82$ 范围内的样本星系比近邻

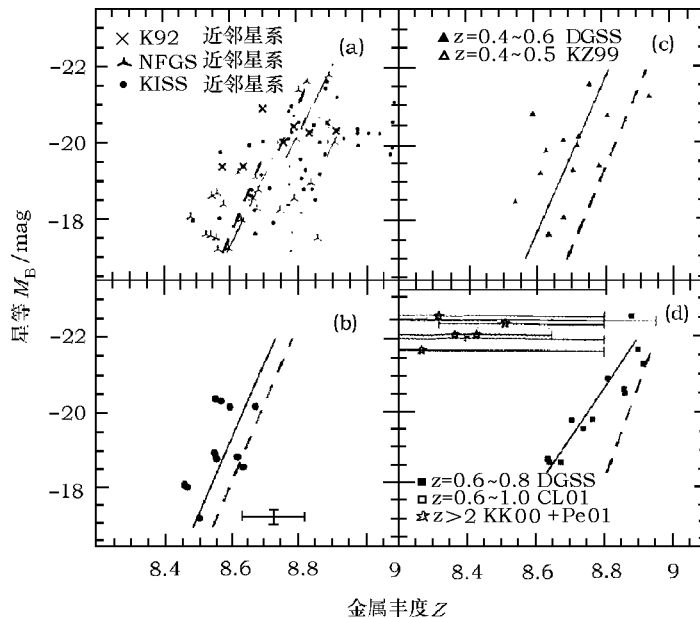


图 3 不同红移范围内的星系的光度-金属丰度关系^[58]

(a) 为近邻星系样本^[31,32,40,41]; (b) 为红移在 0.2~0.4 范围内的样本星系; (c) 红移范围是 0.4~0.6;

(d) 红移范围是 0.6~0.8, 左上角处的星状点为高红移的 LBGs^[61,62]

的场星系 ($z < 0.1$, 取自文献 [31,32,40,41]) 亮约 2.4 mag, 而在给定光度, 这些星系比近邻星系的金属丰度低约 0.15 dex (40%); Kobulnicky 和 Kewley (2004) [59] 也测得了 GOODS 北场中 204 个发射线星系的 M_B - Z 关系, 发现在 $-21.5 < M_B < -18.5$ 范围内的星系, 红移从 $z = 1$ 到 $z = 0$, 其 O/H 丰度增加 28%(约 0.14 dex)。不过 Kobulnicky 等人 (2003,2004) [58,59] 的工作是基于发射线的等值宽度, 原因是无法对其光谱进行流量定标, 这可能会造成一定的偏差 [39]。图 3(b) 中可以增加 4 个方向的箭头分别表示一些物理过程 (垂直向上表示星系的并合及星暴, 水平向右表示以恒定的恒星形成率形成恒星, 垂直向下表示纯粹变暗及水平向左表示贫金属物质的内落) 导致星系的光度和金属丰度的变化。在星系的演化过程中, 如果不考虑原初气体的内落, 星系整体的金属丰度会逐渐升高。

也有一些工作认为, 中等红移星系的光度-金属丰度关系与近邻星系差别不大。如, KZ99 [30] 发现 14 个红移为 $0.1 < z < 0.5$ 的发射线星系的 M_B - Z 关系与近邻的旋涡星系和不规则星系所遵循的关系一致, Liang 等人 (2004) [7] 研究的 16 个 $z \approx 0.2$ 的 Canada-France Redshift Survey (CFRS) 发射线星系的 L - Z 关系也与近邻星系相一致。造成这一很小差别的原因之一可能是这些样本星系的红移值并不很高, 接近于低红移星系 (如 SDSS 的 $z \approx 0.1$)。Lilly 等人 (2003) [9] 及 Carollo 和 Lilly (2001) [60] 认为: 一些 CFRS 样本星系的 M_B - Z 关系与近邻星系很相似, 造成这一很小差别非常可能的原因是由于无法估计星系的尘埃消光, 研究者选取了常数消光 $A_V = 1$, 可能由此会过低估计 [O II] 发射线的流量, 过高估计星系的金属丰度, 尤其对于那些尘埃消光严重的亮红外星系 (在 Lilly 的样本中约占 1/3), 可能会高估 $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ 约 0.3 dex (50%)。

图 4 给出了一个中等红移 ($0.4 < z < 1$) 亮红外星系样本的光度-金属丰度关系, 取自 Liang 等人 (2004) [8]。图 3 相比, 这些亮红外星系的光度更高, 一方面可能是本身就选取了高光度星系样本, 另一方面, 与可能是这些 ISO 选的遥远的亮红外星系确实是大质量系统

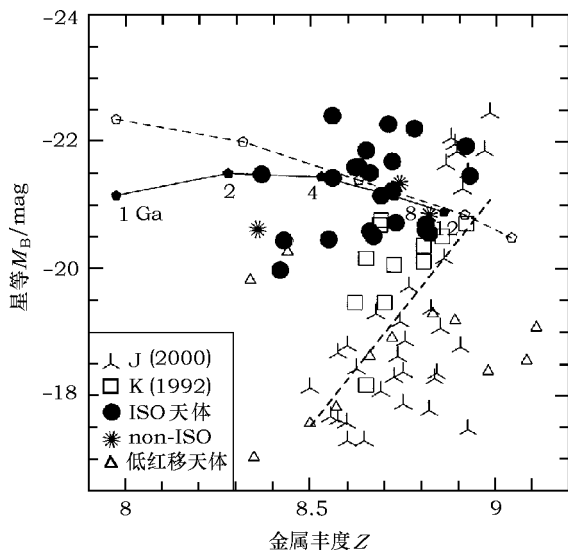


图 4 中等红移亮红外星系与低红移星系的光度-金属丰度关系 [8]

(Franceschini 等人 (2003) [61] 也发现中等红移亮红外星系的质量为 $10^{11} M_{\odot}$) 且正在发生星暴, 以很高的恒星形成率 ($SFR \approx 50 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 形成恒星 [53]。虽然这一样本跨越的星等范围比较窄, 不能与光度更低的星系联合呈现出清晰的中等红移处星系的光度-金属丰度关系, 但一个明确的结果是: 与近邻星系相比, 这些中等红移星系的金属丰度明显低于相同质量的近邻星系的金属丰度, 约低于 0.3 dex。图 4 中点 2 由 PEGASE2 化学演化程序计算出的星系的化学及光度演化 [58]。采用的是“封闭”模型, 代表总质量为 $10^{11} M_{\odot}$ 的星系系统的演化。实线和虚线分别代表内落时标为 5 Ga 和 1 Ga 的模型。

这些化学演化模型及前文所讨论的对图 3(b) 中的箭头所描述的过程均表明, 从红移 $z \approx 0.7$ 到现今的演化过程中, 这些星系的金属成分逐渐增加, 达到近邻星系的金属丰度, 具体的物理过程会是大质量恒星的超新星爆发、W-R 星的星风物质抛射及 AGB 星的星风质量损失等。

LBGs($z \approx 3$) 是高红移宇宙中的恒星形成星系。Pettini 等人 (2001, Peló) [62] 研究了 5 个 LBGs 的光度-金属丰度关系, Kobulnicky 和 Koo (2000, KK00) [63] 研究了 2 个 $z > 2$ 高红移星系的光度和金属丰度, 图 3(d) 中的星状点给出了这些 LBGs 所在的位置及其金属丰度的不确定性。结果表明, 这些 $z \approx 3$ 的 LBGs 明显偏离近邻星系和中等红移星系的光度-金属丰度关系, 即使考虑到丰度的不确定性, LBGs 的 O/H 丰度仍然低于相同光度的近邻星系的丰度值。可能的解释是整个金属丰度-光度关系在高红移处与低红移处存在偏离, 也可能表明 LBGs 的质光比与近邻正常星系相比明显更低, 是比近邻 HII 区更为极端的例子 [62]。

上述结果表明, 在中等红移宇宙中星系的光度和金属丰度之间同样存在着一定的相关关系, 即光度较低的星系的金属丰度也相对较低, 高红移星系的相关资料较少, 没有显示出明显的趋势。一个自然的问题是, 星系的光度-金属丰度关系是否会随时间演化。Kobulnicky 等人 (2003) [58] 对图 3 采用了一种直接的解释: 这些发射线星系会经历一定的光度演化, 从 $z \approx 0.8$ 到现今宇宙, 星系的光度演化约为 $\Delta M_B = 1 \sim 3$ mag, 而从 $z \approx 3$ 到现今宇宙, 约为 $\Delta M_B = 3 \sim 4$ mag; 另一种解释是, 当给定光度, $z \approx 0.8$ 处的发射线星系的金属丰度比目前的星系低, 约为后者的 1/2。图 3(d) 还表明, 将 $z \approx 0.6 \sim 0.8$ 的样本星系与近邻星系相比, 光度更低的星系 ($M_B > -19$) 对近邻样本的偏离更大, 而高光度的星系 ($M_B \approx -22$ mag) 与近邻星系比较接近。Kobulnicky 和 Kewley (2004) [59] 增加了一些 $z=0.8 \sim 1.0$ 的星系, 也得出相似的结论。其 $L-Z$ 关系的斜率随红移的演化可能意味着在中等红移宇宙中, 已经形成一些大质量、富金属的星系, 这能对星系形成的“downsizing”模型 [64] 提供一定的支持, 此模型主要认为, 大质量星系先形成, 在比较晚的时候, 主要是红移 $z < 1$ 以来, 宇宙中的恒星形成主要集中在低光度星系中。不过, 有很多工作 [44,65,66] 对红移等于 1 以来大质量星系的重要的质量累积过程提供了证据, 在一定程度上支持了宇宙形成的“hierarchical”(逐级成团)模型 [67]。图 3 还表明, 红移在 0.2~0.6 范围内的星系的 $L-Z$ 关系斜率并没有表现出与近邻星系明显的不同, 实际上, 图 4 中金属丰度接近于近邻星系的中等红移星系为数很少, 其他星系的金属丰度明显低于相近光度的近邻星系的丰度值。高红移星系的金属丰度也明显低于近邻星系。我们还需要更多的观测资料来比较不同红移处星系的光度-金属丰度关系, 从而得出更清晰的图像。

无论星系的光度-金属丰度关系的斜率是否随红移变化, 有一点是肯定的: 中等红移及高红移星系的金属丰度明显低于相同光度的近邻星系的金属丰度, 红移在 $0.4 < z < 1$ 范围内的星系一般比近邻星系的金属丰度低约 28% [59]、40% [58] 或 50% [8]。在随后的演化过程中, 这些星系将会合成相应比例的金属成分。

5.2 质量-金属丰度关系

有关中等红移及高红移星系的质量-金属丰度关系的观测资料并不很多。最近, Liang 等人 (2006) [39] 获得了 34 个中等红移 ($z \approx 0.65$) 星系的相关资料; Savaglio 等人 (2005) [46] 也获得了 69 个中等红移 ($z \approx 0.7$) 星系的质量-金属丰度关系; 结果均表明, 在相同质量时, 这些中等红移星系比近邻星系的金属丰度更低, 其 $\lg(\text{O}/\text{H})$ 可能约 0.4 dex [39]。Shapley 等人

(2003) [68] 通过近红外光谱测得 7 个 $2.1 < z < 2.5$ 的恒星形成星系的 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 线比, 再采用文献 [69,70] 中的定标关系得到其金属丰度。其宽带颜色表明这些 K_s 亮 ($K_s \leq 20.0$) 的样本星系大多已经形成了超过 $10^{11} M_\odot$ 的恒星质量。在给定质量, 这些 $z \approx 2.3$ 的星系有着比近邻星系

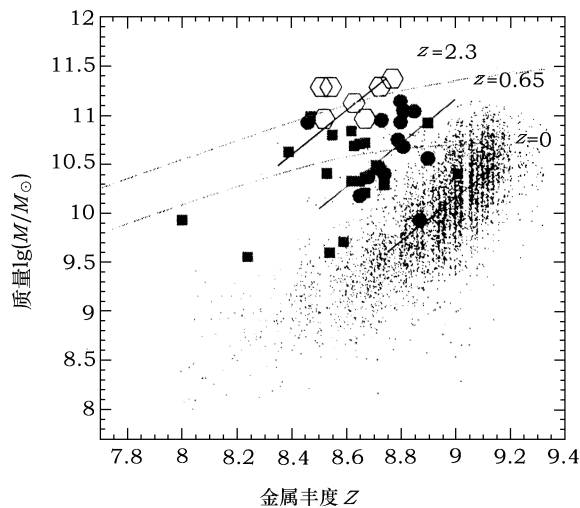


图 5 中等红移、高红移星系与近邻 SDSS 星系 (小点) 的质量-金属丰度关系 [39]

图 5 中 3 条实线也可以比较合理地表示中等红移及高红移星系对近邻星系的偏离。其含义为, 如果不考虑斜率的变化, 直接将大质量的近邻 SDSS 星系的金属丰度分别降低约 0.4 dex 和 0.7 dex, 也能够比较好地解释中等红移 $z \approx 0.65$ 和高红移 $z \approx 3$ 的星系的质量-金属丰度关系的观测结果。同样, 无论斜率随红移演化与否, 有一点是肯定的, 即这些中等红移和高红移星系的金属丰度明显低于相同质量的近邻星系, 它们将在随后的演化过程中合成这些金属成分。更多的观测资料将有助于更深地理解这一问题。

6 结论与展望

本文评述了星系的光度-金属丰度关系和质量-金属丰度关系的最新研究进展, 包括近邻星系、中等红移 ($0.4 < z < 1$) 及高红移 ($z > 2$) 星系的观测结果。结果表明, 星系的光度与金属丰度之间存在着明显的相关, 一般是光度越高 (质量越大), 则金属丰度越高, 特别是旋涡星系与矮星系相比时这一趋势非常明显, 表明这些星系有着不同的恒星形成历史。中等红移及高红移星系的光度与金属丰度关系明显偏离近邻星系的结果, 在给定的光度 (或质量), 其 $\lg(\text{O}/\text{H})$ 比近邻星系分别低约 0.4 dex 和 0.7 dex, 说明这些更高红移处的星系需要在随后的演化过程中合成其相当部分的金属成分。随着越来越多的大口径、高分辨率观测设备的投入使用, 特别是空间多波段观测设备的投入运行, 必定会提供越来越丰富的观测资料, 为深入研究星系的形成与演化提供更为充分的条件。

致谢 衷心感谢审稿人提出许多有价值的建议, 使文章结构更为合理, 内容更加丰富, 对某些部分的描述更为准确。非常感谢邹振隆老师和新宇的仔细阅读及提出的宝贵意见和建议。

系更低的金属丰度 (约 0.7 dex)。图 5 表明了高红移和中等红移星系对近邻星系的偏离, 显示了星系的质量-金属丰度关系随红移的明显的演化, 这些高红移和中等红移的星系会在随后的演化过程中合成其相当部分的金属成分。

星系的质量-金属丰度关系的斜率是否随红移演化仍是个难题。文献 [46] 中图 13 所示, 一些中等红移 ($z \approx 0.7$) 星系的质量和金属丰度与一些 SDSS 的近邻星系很一致, 即中等红移处已经形成了一定的大质量富金属星系。不过他们的这些样本星系大多是取自文献 [9], 可能过高估计了某些星系的金属丰度 (由于选取了单一常数的消光修正 $A_V=1$, 见 5.1 节)。

参考文献:

- [1] 梁艳春, Hammer F, 邓李才, 等. 天文学进展, 2006, 4: 335.
- [2] Zaritsky D, Kennicutt R C, Huchra J P. *ApJ*, 1994, 420: 87.(ZKH)
- [3] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. *ApJ*, 2004, 613: 898.(SDSS)
- [4] Lamareille F, Mouhcine M, Contini T, et al. *MNRAS*, 2004, 350: 396. (2dF)
- [5] Melbourne J, Salzer J J. *AJ*, 2002, 123: 2302. (KISS₁)
- [6] Salzer J J, Lee J C, Melbourne J, et al. *ApJ*, 2005, 624: 661. (KISS₂)
- [7] Liang Y C, Hammer F, Flores H, et al. *A&A*, 2004, 417: 905.
- [8] Liang Y C, Hammer F, Flores H, et al. *A&A*, 2004, 423: 867.
- [9] Lilly S J, Carollo C M, Stockton A N. *ApJ*, 2003, 597: 730.
- [10] Lilly S J, Le Fevre O, Crampton D, et al. *ApJ*, 1995, 455: 50.
- [11] Hogg D W, Baldry I K, Blanton M R, et al. 2002, astro-ph/0210394.
- [12] Lequeux J, Peimbert M, Rayo J F, et al. *A&A*, 1979, 80: 155.
- [13] Skillman E D, Kennicutt R C Jr, Hodge P W. *ApJ*, 1989, 347: 875.
- [14] Richer M G, McCall M L. *ApJ*, 1995, 445: 642.
- [15] Garnett D R, Shields G A. *ApJ*, 1987, 317: 82.
- [16] Vila-Costas M B, Edmunds M G. *MNRAS*, 1992, 259: 121.
- [17] Brodie J P, Huchra J P. *ApJ*, 1991, 379: 157.
- [18] Coziol R, Doyon R, Demers S. *MNRAS*, 2001, 325: 1081.
- [19] Contini T, Treyer M A, Sullivan M, et al. *MNRAS*, 2002 330: 75.
- [20] Telles E, Terlevich R. *MNRAS*, 1997, 286: 183.
- [21] Garnett D R, Shields G A, Skillman E D, et al. *ApJ*, 1997, 489: 63.
- [22] Hidalgo-Gamez A M, Olofsson K. *A&A*, 1998, 334: 45.
- [23] Pilyugin L S, Ferrini F. *A&A*, 2000, 354: 874.
- [24] Lee J C, Salzer J J, Melbourne J. *ApJ*, 2004, 616: 752.
- [25] Vilchez J M. *AJ*, 1995, 110: 1090.
- [26] Mateo M L. *ARA&A*, 1998, 36, 435.
- [27] Garnett D R. *ApJ*, 2002, 581: 1019.
- [28] Pilyugin L S, Vilchez J M, Contini T. *A&A*, 2004, 425: 849.
- [29] Shi F, Kong X, Li C, et al. *A&A*, 2005, 437: 849.
- [30] Kobulnicky H A, Zaritsky D. *ApJ*, 1999, 511: 118. (KZ99)
- [31] Kennicutt R C Jr. *ApJS*, 1992, 79: 255. (K92)
- [32] Kennicutt R C Jr. *ApJ*, 1992, 388: 310. (K92)
- [33] Kobulnicky H A, Kennicutt R C Jr, Pizagno J L. *ApJ*, 1999, 514: 544. (K99)
- [34] Edmunds M G, Pagel B E J. *MNRAS*, 1984, 211: 507. (EP84)
- [35] Kennicutt R C Jr, Bresolin F, Garnett D R. *ApJ*, 2003, 591: 801.
- [36] Charlot S, Longhetti M. *MNRAS*, 2001, 323: 887.
- [37] Mac Low M, Ferraræ A. *ApJ*, 1999, 513: 142.
- [38] Liang Y C, Yin S Y, Hammer F, et al. *APJ*, 2006, 652: 257.
- [39] Liang Y C, Hammer F, Flores H. *A&A*, 2006, 447: 113.
- [40] Jansen R A, Franx M, Fabricant D, et al. *ApJS*, 2000, 126: 271.
- [41] Jansen R A, Fabricant D, Franx M, et al. *ApJS*, 2000, 126: 331.
- [42] Saviane I, Riegerbauer R, Held E V, et al. *IAU. Sym.217*, 2004, 200.
- [43] Saviane I, Held E V, Ivanov V, et al. *IAU Coll. 198*, 2005, 202.
- [44] Hammer F, Flores H, Elbaz D, et al. *A&A*, 2005, 430: 115.
- [45] Glazebrook K, Abraham R G, McCarthy P J, et al. *Nature*, 2004, 430: 181.
- [46] Savaglio S, Glazebrook K, Le Borgne D, et al. *ApJ*, 2005, 635: 260.

- [47] Bell E F, McIntosh D H, Katz N, et al. *ApJS*, 2003, 149: 289.
- [48] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M. *MNRAS*, 2003, 341: 33.
- [49] Charlot S. The next generation space telescope. 34th Liege Astrophysics Coll., Noordwijk: ESA SP-429, 1998: 135.
- [50] Bell E F, de Jong R S. *MNRAS*, 2000, 312: 497.
- [51] Madau P, Ferguson H C, Dickinson M E, et al. *MNRAS*, 1996, 283: 1388.
- [52] Lilly S J, Le Fevre O, Hammer F, et al. *ApJ*, 1996, 460: L1.
- [53] Flores H, Hammer F, Thuan T X, et al. *ApJ*, 1999, 517: 148.
- [54] Hopkin A M. *ApJ*, 2004, 615: 209.
- [55] Maier C, Meisenheimer K, Hippelein H. *A&A*, 2004, 418: 475.
- [56] Maier C, Lilly S J, Carollo M, et al. *ApJ*, 2005, 634: 849 .
- [57] Maier C, Lilly S J, Carollo M, et al. *ApJ*, 2006, 639: 858.
- [58] Kobulnicky H A, Willmer C N A, Phillips A C, et al. *ApJ*, 2003, 599: 1006.
- [59] Kobulnicky H A, Kewley L J. *ApJ*, 2004, 617: 240.
- [60] Carollo C M, Lilly S J. *ApJ*, 2001, 548: 153. (CL01)
- [61] Franceschini A, Berta S, Rigopoulou D, et al. *A&A*, 2003, 403: 501.
- [62] Pettini M, Shapley A E, Steidel C C, et al. *ApJ*, 2001, 554: 981. (Pe01)
- [63] Kobulnicky H A, Koo D C. *ApJ*, 2000, 545: 712. (KK00)
- [64] Cowie L L, Songaila A, Hu E M, et al. *AJ*, 1996, 112: 839.
- [65] Drory N, Bender R, Feulner G, et al. *ApJ*, 2004, 608: 742.
- [66] Drory N, Salvato M, Gabasch A, et al. *ApJ*, 2005, 619: L131.
- [67] Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A, et al. *MNRAS*, 1999, 307: 529.
- [68] Sharply A E, Erb D K, Pettini M, et al. *ApJ*, 2004, 612: 108.
- [69] Pettini M, Pagel B E J. *MNRAS*, 2004, 348: L59.
- [70] Denicolo G, Terlevich R, Terlevich E. *MNRAS*, 2002, 330: 69.

The Methods and Study Progress about Estimating Metallicities of Galaxies(II): Luminosity–Metallicity Relation

LIANG Yan-chun ¹, HAMMER Francois ², DENG Li-cai ¹, ZHAO Gang ¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. GEPI, Observatoire de Paris-Meudon, 92195 Meudon, France)

Abstract: The luminosity-metallicity ($L-Z$) relation (stellar mass-metallicity, mass- Z , relation) is one of the fundamental parameters of galaxies, and can trace the assembly history of metals and stellar masses in the galaxies. We review the study progress about the $L-Z$ and mass- Z relations of galaxies, including the local, the intermediate- z ($0.4 < z < 1$) and the high- z ($z > 2$) galaxies. Since the observations extend to a wide cosmic time scale, this can help to understand and the evolutionary process of the $L-Z$ relations of galaxies, hence to understand the whole evolutionary scenario of galaxies.

In Sect.2, we introduce the relations between B band absolute magnitudes and metallicities (M_B-Z) of nearby galaxies, including the irregular, the spiral galaxies, the UV-selected and nearby HII galaxies, the KISS sample, the 2dFGRS sample, and the SDSS galaxies. We present some of the important formulas of such relations. In Sect. 3, we present the study about the relationship

between near-infrared J, H, K band absolute magnitudes and metallicities of nearby galaxies. The majority is the result of 400 KISS galaxies obtained from 2MASS. We also mention the M_K - Z relations of a small sample of distant luminous infrared galaxies. In Sect.4, we specially introduce the relations between stellar mass and metallicities of nearby star-forming galaxies derived from the SDSS database. All these results show that the more luminous (massive) galaxies are more metal-rich generally. The luminosity correlates with metallicity over 10 magnitudes in luminosity and 2 dex in metallicity, with indication that the relationship may be environmental and morphology free.

In Sect.5, we introduce the L - Z (mass- Z) relations of the intermediate- z and high- z galaxies. With the increasing ability of observations, more and more distant galaxies have been obtained their L - Z (mass- Z) relations, such as the intermediate- z ($0.4 < z < 1$) luminous infrared galaxies, the galaxies selected from GOODS, CFRS, DGSS fields, and the high- z ($z \approx 3$) LBGs. These results show that there exists one L - Z (mass- Z) relation in the distant universe, where the less luminous galaxies may have lower metallicities generally. Especially, comparing the L - Z (mass- Z) relations of these distant galaxies with those of the local ones, it shows that the distant ones are more metal-deficient than the local ones at a given luminosity or stellar mass, i.e. the galaxies with $0.4 < z < 1$ are about 0.14–0.4 dex more metal-deficient, and the galaxies with $z > 2$ are about 0.56–0.7 dex more metal-deficient relatively. They should produce these important parts of their metals in the consequent evolutionary process. The conclusions and prospects are given in Sect.6.

Key words: astrophysics; galaxies; review; metallicities; luminosity(stellar mass)-metallicity relations