文章编号: 1000-8349(2010)03-255-13

述评

低面亮度星系的观测特性

仲国虎 [1,2,3,4]，梁艳春 [1,2]，邓李才 [1,2]，张 波 [1,4]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100012; 2. 中国科学院 光学重点实验室，北京 100012; 3. 中国科学院 研究生院，北京 100049; 4. 河北师范大学 物理科学与信息工程学院，石家庄 050016)

摘要: 光学、近红外、红外、紫外、射电等波段及 CO 的观测研究表明，低面亮度星系是相对没有充分演化的系统，气体成分比例较高，金属丰度和恒星形成率较低。这样的星系为研究星系的形成和演化提供了新的资料和证据。主要阐述了低面亮度星系的观测特性，包括探测与搜寻、选择效应对观测研究的影响、低面亮度星系的划分、星系的颜色和星族特征、星系的演化和恒星形成、金属丰度、数密度及光度密度；最后，介绍了几个特殊的低面亮度星系。

关 键 词: 星系；低面亮度；星族特征

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引 言

天空背景和相对较暗的面亮度影响了人们对低面亮度星系的探测、发现及特征的研究。因而很长时间以来，低估了它们对近邻宇宙星系星族的贡献。随着 CCD 深场探测及现代数字巡天的开展，天文学家对低面亮度星系的光学、近红外、紫外及射电等波段和 CO 进行了深入的观测研究，其中包括面源测光、H I 气体和质量分布、金属丰度、恒星形成率、星族特征、自转曲线 [1,2] 等。探测到了许多不同类型的低面亮度星系，发现它们对于理解星系的整体特征非常重要 [3−5]，如 (1) 光度函数，尤其是在暗端 [6]； (2) 低质量星系的空间分布，这可以检验暗物质宇宙学对于大尺度结构的预言 [7]； (3) 低气体面密度环境下的恒星形成过程 [8]； (4) 相互作用在星系演化过程中的作用； (5) 重子物质密度及星系的形成和演化 [9] 等。而且对低面亮度星系本身的研究也非常有意义，如星族、金属丰度、恒星形成历史、星系的形成和演化等。另外，这类星系与高面亮度星系有何不同，它们是否有着不同的演化历史，它们所处的

收稿日期: 2009-09-11； **修回日期:** 2010-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 (973)(2007CB815404, 2007CB815406)；国家自然科学基金资助项目 (10933001, 10973006, 10973015, 10673002)；中国科学院国家天文台青年人才基金资助项目

环境有何不同？这些问题对星系形成环境的研究具有重要意义。

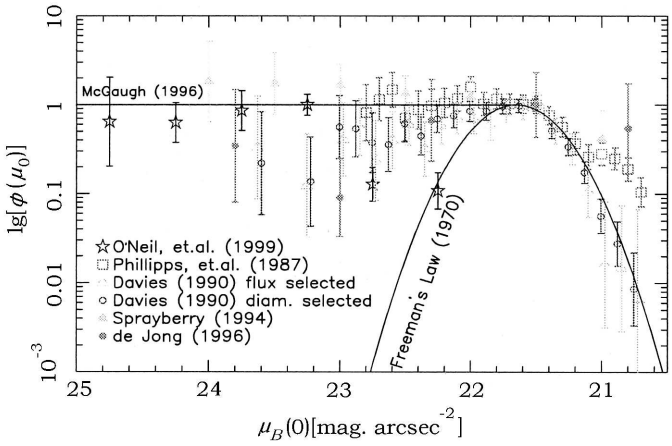

图 1 星系数密度和 B 波段中心面亮度关系图 [5]

实线是 Freeman 规则给出的面亮度分布，水平线是 McGaugh 等人 [12] 对数据拟合的结果 [13] 。

Zwicky [10] 首次注意到天光背景限制了人们探测星系的种类，并推测有低面亮度星系存在。在 Freeman [11] 研究的 36 个盘星系中，有 28 个 B 波段中心面亮度值在一个很窄的范围内： $\mu_0(B) = (21.65 \pm 0.3\ )\mathrm{mag{\cdot}arcsec^{-2}}$ ，人们称之为 Freeman 规则。图 1(O'Neil [13]) 的实线显示了 Freeman 规则，而许多面亮度更低的星系是在之后的研究中逐渐被发现的。Disney [14] 认为 Freeman 规则是选择效应的结果。假如 Freeman 规则是准确的，而且面亮度

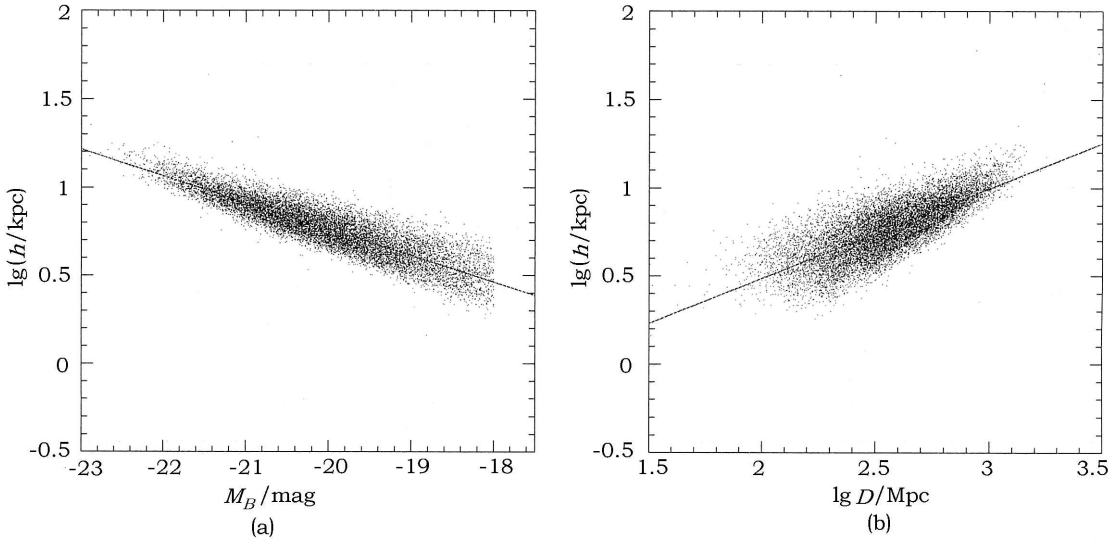

图 2 面亮度相对较低的盘星系 (12282) 标长与光度、距离的关系 [19]

(a) 标长与光度的关系 $\lg h = -0.150(\pm\ 0.0007)M_B - 2.245(\pm\ 0.014)$, (b) 标长与距离的关系 $\lg h = 0.511(\pm\ 0.004)\lg D - 0.536(\pm\ 0.010)$ 。标准偏差分别为 0.070 dex 和 0.10 dex ，实线是对样本星系的最小二乘拟合，相关系数分别为 -0.893 和 0.767 。

分布是一个单峰函数，那么 $\mu_0(B)\geq 23.4$ mag· arcsec^{-2} 的星系就应该不存在，但观测表明它们占 UGC 星表中星系数目的 11% [15] 。 Impey 等人 [16] 认为由于天光背景的影响，导致观测时低面亮度的星系被丢失；由于星系尺度小于观测的角尺度极限，导致观测时暗视星等的星系的丢失；由于难于和恒星区分开来，导致观测时高面亮度和暗视星等的星系的丢失。与 Bergvall 等人 [17] 和 Impey 等人 [18] 的结果一致， Zhong 等人 [19] 从 SDSS–DR4 (The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey) 中选取的大样本面亮度相对较低的盘星系的尺度与光度以及尺度与距离之间的相关关系也说明了选择效应的存在，大尺度的低面亮度星系一般更亮 (图 2(a)) ，在远距离处更容易被探测到 (图 2(b)) ，说明要么是低光度、大尺度的星系没有在观测范围内，要么是这样低面密度的星系非常少。

2　低面亮度星系的划分

对于盘星系，常用于表示盘面亮度的特征量有 [3] ： (1) 中心面亮度 (μ_0) ， (2) 标准等照度线 (一般为 25 mag·arcsec^{-2}) 内的平均面亮度 ($\mu_{\rm iso}$), (3) 半光半径内的平均面亮度 ($\mu_{\rm eff}$) 。在以往的研究中通常选择 B 波段中心面亮度 $\mu_0(B)$ 来定义星系的面亮度。 Freeman 规则的典型值可以作为区分低面亮度和高面亮度星系的参考，把 $\mu_0(B)$ 比 21.65 mag·arcsec^{-2} 更暗的星系定义为低面亮度星系。

然而，在不同的工作中，这一界限并不完全确定。 Impey 和 Bothun [20] 定义低面亮度星系为 $\mu_0(B)$ 比 23.0 mag·arcsec^{-2} 更暗的星系。而一般认为， $\mu_0(B)$ 比 22.0 mag·arcsec^{-2} 更暗的星系为低面亮度星系 [18,21−23] 。 McGaugh [12] 试着更为详细而准确地划分低面亮度星系，$\mu_0(B)$ 在 22.75∼24.5 mag·arcsec^{-2} 之间的星系为低面亮度星系 (LSBG) ，而 $\mu_0(B)$ 在 24.5∼27.0 mag·arcsec^{-2} 之间的星系为甚低面亮度星系 (VLSBG), $\mu_0(B)$ 暗于 27.0 mag·arcsec^{-2} 的星系为极端低面亮度星系 (ELSBG), $\mu_0(B)$ 在 22.0∼22.75 mag·arcsec^{-2} 之间的星系为中等低面亮度星系 (ISBG), $\mu_0(B)$ 在 21.25∼22.0 mag·arcsec^{-2} 之间的星系为高面亮度星系 (HSBG), $\mu_0(B)$ 亮于 21.25 mag·arcsec^{-2} 的星系为甚高面亮度星系 (VHSBG) 。

面亮度临界值也因所研究波段的不同而不同。 Courteau [24] 认为低面亮度星系 R 波段中心面亮度 ($\mu_0(R)$) 上限为 20.08 mag·arcsec^{-2}, Adami 等人 [25] 选取的低面亮度星系就是 $\mu_0(R)$ 暗于 20.08 mag·arcsec^{-2} 的星系。对旋涡星系， 2MASS 近红外 $K_{\rm s}$ 波段中心面亮度 ($\mu_0(K_s)$) 极限约为 20 mag·arcsec^{-2} ，相应于光学 B 波段约为 24 mag·arcsec^{-2} 。 Monnier-Ragaigne 等人 (2003) [26] 将 $\mu_{K_5} > 18.0$ mag·arcsec^{-2} 的星系定义为低面亮度星系，其中 μ_{K_5} 是圆孔径为 $5''$ 时 $K_{\rm s}$ 波段的平均面亮度值。 Jarrett [27] 从 Coma 团和 SA57 团天区选取低面亮度星系时就按照这一标准。

3　搜寻与观测

DDO (David Dunlap Observatory) 数据释放后，人们不断研究低面亮度星系，从光学波段到近红外、红外、紫外波段等。 DDO 星表中，大部分星系质量较小，使人们误认为低面亮

度星系是矮星系。后来的研究表明，低面亮度星系质量覆盖范围很广，因此 DDO 并没有包含全部类型的低面亮度星系。 UGC (Uppsala General Catalog) 包含了一定数量的低面亮度星系 (角尺度限样本)，相对于星等限样本其观测对面亮度不太敏感，星系面亮度 $\mu_0(B)$ 范围在 22~23 mag·arcsec^{-2} 之间。 Romanishin 等人 [28] 从 UGC 中选取了一个角尺度限的低面亮度星系样本进行研究。

Sandage 等人 [29] 给出了对 Virgo 团的巡天观测结果，其中包括了一些相当弥漫的矮星系。Ellis 等人 [30] 在其中发现了更多极其弥漫的星系，说明这样的星系很普遍，只是很大程度上没有被发现。对弥漫星系的成功探测促使了随后一系列新的巡天计划的实施。第一，基于第二次 Palomar 巡天 (POSS-II，其最低面亮度约为 27.5 mag·arcsec^{-2}[15,31])， Binggeli 等人 [32] 利用 POSS-II 发现了几百个形态为 dIm 和 dE 的低面亮度星系；第二，为了与 Virgo 团的结果相比较，而对 Fornax 团进行观测 [33] ；第三，对 UKSchmidt 照相底片进行自动底片扫描分析 (APM)，用一种优化的方法寻找低面亮度星系 [16]，Impey 及其合作者探测到 693 个不同形态的低面亮度场星系，这是当时最大的样本，观测的面亮度值 $\mu_0(B)$ =26 mag·arcsec^{-2}[16]，随后又进行了多方面的研究 [18,34,35] 。

近年来，对低面亮度星系的搜寻、观测研究取得了很大的进步。Sabatini 等人 [36] 在 Virgo 团中观测了 231 个矮低面亮度星系 (dwarf low surface brightness galaxies)，面亮度值 $\mu_0(B)$ 约为 26 mag·arcsec^{-2} 。 Sharina 等人 [37] 用 HST 观测了 57 个矮低面亮度星系， Puzia 和 Sharina [38] 对其样本中 5 个矮低面亮度星系进行了光谱观测研究。 Adami 等人 [25] 在 Coma 团 0.72×0.82 平方度的区域中观测到了 735 个暗低面亮度星系，面亮度值 $\mu_0(B)$ 约为 27 mag·arcsec^{-2} 。Trachternach 等人 [39] 观测了 306 个低面亮度星系 (角尺度限样本，面亮度值 $\mu_0(B)$ 约为 25.2 mag·arcsec^{-2})，其中 148 个是新发现的。 Haberzettl 等人 [40] 在 HDF-S (Hubble Deep Field-South) 0.76 平方度的区域中观测了 37 个低面亮度星系。 O'Neli 等人 [41] 、Villegas 等人 [42] 及 Vorobyov 等人 [43] 分别对 UGC 的 19 、 6 和 4 个低面亮度星系进行了观测研究。 Das 等人 [44] 观测研究了 8 个从 UGC 中选取的巨低面亮度星系 (giant low surface brightness galaxies) 的 X 射线特征。

特别地，现代数字巡天 SDSS 为深入研究低面亮度星系提供了丰富的资料。 Kniazev 等人 [4] 发展了一套算法，试图从 SDSS 观测图像中搜寻低面亮度星系，并用 APM 样本检验其算法。他们在 SDSS-EDR 的 93 个场中找到了 87 个与 Impey 共同的样本，并另外发现了 42 个新的低面亮度星系。 Zhong 等人 [19] 从 SDSS-DR4 的主星系样本中选取了一个大样本面亮度相对较低的面向盘星系 (12282)，获得了许多特征方面的相关性，如尺度与距离、尺度与光度的关系等，同时也选取了一个相应的高面亮度面向盘星系 (18051) 进行比较。 Rosenbaum 等人 [45,46] 分别从 SDSS-EDR 和 SDSS-DR4 选取了 804 和 1978 个低面亮度星系，对其存在环境进行了研究。 Bergvall 等人 [47] 对从 SDSS-DR5 选取的 1 510 个侧向为主的低面亮度星系的恒星晕特征进行了研究。之前， Caldwell 和 Bergvall [48] 已经初步研究了从 SDSS-DR4 中选取的 1 199 个侧向低面亮度星系， Mattsson 等人 [49] 对这些星系的氮、氧丰度及化学演化进行了研究。

另外， O'Neil 等人 (Texas 巡天) [21,22] 首次发现了红低面亮度星系，随后出现了许多对低面亮度星系近红外波段的观测研究。 Knezek 和 Wroten [50] 在 J, H 和 K 波段观测到了低面

亮度星系，但样本较小，且偏重于大质量星系。Bergvall 等人 [17] 在 J, H 和 K 波段观测研究了 14 个蓝低面亮度星系，与光学波段测光相结合的研究表明，许多低面亮度星系的光学特征能在近红外波段被观测到。de Jong [51] 得到了一个更大的近红外旋涡星系样本，但其中只包括很少数量真正的低面亮度星系。Galaz 等人 [52] 获得了一个近红外波段的大样本 (88 个星系)，其中包括了许多正常旋涡星系，但却没有包含大数量的低面亮度星系。Monnier-Ragaigne 等人 [26] 从 2MASS 中选取了一个更大的近红外波段的低面亮度星系样本 (3 800)，此后，他们还分别利用 Arecibo 和 Nancay 射电望远镜对 367 和 334 个低面亮度星系进行了 21 cm H I 观测。

Schombert 等人 [31] 和 Impey 等人 [16] 都没有探测到属于红外 IRAS-PSCz 的低面亮度星系。同样，Zhong 等人 [19] 的大样本面亮度相对较低的盘星系在 IRAS-PSCz 中被探测到的也很少。Hinz 等人 [53] 和 Rahman 等人 [54] 利用 Spitzer 红外望远镜分别对 5 个低面亮度星系和 3 个巨低面亮度星系进行了观测研究。

对低面亮度星系紫外波段的观测可以检验先前在其他波段上的研究结果，还能更准确地估计低面亮度星系的年龄 [55]。Guest Investigator Program 是一个对低面亮度星系 2 000 Å流量探测的工程，但由于一个照相机的失败，最终宣告结束。因此仍不清楚光学波段低面亮度星系是否在紫外波段拥有和正常星系一样的面亮度。后来在深场探测中发现了一些光学波段的低面亮度星系可以在 1 500~2 000 Å探测到。在 Fornax 团中，O'Neil 等人 [56] 在紫外波段探测到了低光度星系。GALEX (Galaxy Evolution Explorer) 卫星为进一步研究低面亮度星系的紫外特征提供了可能，Boissier 等人 [57] 利用 GALEX 释放的紫外波段数据研究了 18 个低面亮度星系的特征。如果用 Zhong 等人 [19] 的样本与 GALEX 释放的数据交叉，会得到一个数目相对更大的低面亮度星系样本的紫外波段信息，进而可研究低面亮度星系的紫外特征。

近来在对邻宇宙的观测中，不断偶然地发现新的低面亮度星系。Karachentsev 等人 [58] 在 Local Group 的边缘发现了一个矮低面亮度星系，Burton 等人 [59] 在 NGC 6946 附近发现了一个低面亮度旋涡星系的伴星系。Liang 等人 [60] 从 SDSS 中偶然发现了一颗新的近邻侧向低面亮度盘星系 SDSS J121810.0+465501.2。

早期对低面亮度星系中 CO 的探测都没有成功 [61,62]。O'Neil [63] 尝试探测红低面亮度星系中的 CO，获得成功，并首次给出了低面亮度星系中 CO 的图像 (仅大质量低面亮度星系有 CO 图像 [64,65])。Matthews 和 Gao [66] 利用 NRAO (The National Radio Astronomy Observatory) 12 m 射电望远镜对 8 个近邻侧向低面亮度旋涡星系的 CO 进行了观测研究。Matthews 等人 [67] 对 7 个侧向低面亮度星系 (其中包括 Malin 2) 进行了 CO 的观测研究。Das 等人 [68] 对 15 个低面亮度星系进行了 CO 的观测研究。

4　低面亮度星系的观测特性

4.1　颜色和星族

一般认为，颜色较蓝和气体成分比例较高是星系团中低面亮度星系的主要特征。Virgo 团和 Fornax 团中 31 个星系的 $B-V$ 颜色 (平均值为 0.58) 和另外 23 个星系的 $V-I$ 颜色 (平

均值为 1.00) 相对都比较蓝。 Bergvall 等人 [69] 认为是由于它们的金属丰度低且缺乏尘埃。但 Adami 等人 [70] 的低面亮度星系中相当一部分星系的尘埃比较多，有 1/3 星系的消光值 A_V 大于 1.5 。因而，低面亮度星系较蓝颜色的原因还不是很清楚。

de Blok 等人 [71] 和 Heller 等人 [72] 研究的 21 个和 29 个低面亮度星系中，都没有红低面亮度星系的存在。而 O'Neil 等人 [22] 的低面亮度星系的颜色从蓝到红覆盖了很大的范围，且首次发现了红低面亮度星系。 Roberts 等人 [73] 的矮低面亮度星系的 $(B-I)$ 颜色及 O'Neil 等人 [41] 的低面亮度星系的 $B-R$ 颜色都覆盖了很大的范围。图 3 是 Zhong 等人 [19] 给出的 SDSS-DR4 的一个大样本 (12282) 面亮度相对较低的面向盘星系的 $U-B$ 与 $B-V$ 颜色关系图，其中实线和虚线是 O'Neil 等人 [22] 给出的对“极蓝”和“极红”低面亮度星系的划分，结果表明，低面亮度星系的颜色从“极蓝”到“极红”覆盖了很大的范围。

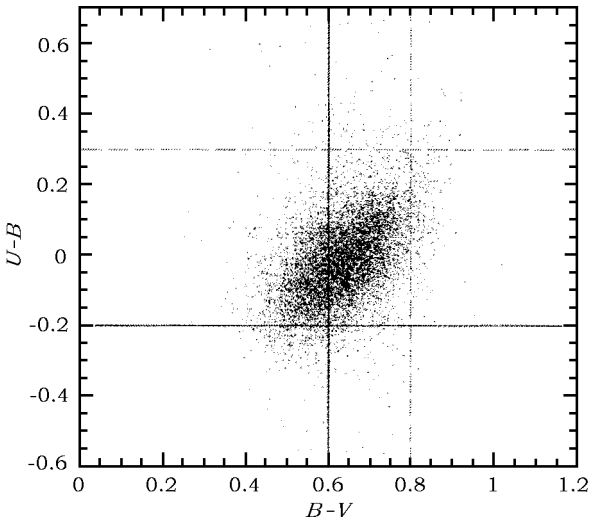

图 3 SDSS-DR4 主星系样本的大样本面亮度相对较低的盘星系 (12282) 的光学颜色 UBV 关系图 [19]
实线和虚线是 O'Neil 等人 [22] 给出的对“极蓝” ($U-B<-0.2$, $B-V<0.6$) 和“极红” ($U-B>0.3$, $B-V>0.8$) 低面亮度星系的划分。

Bell 等人 [74] 认为，蓝和红低面亮度星系是不同类型的星系，蓝低面亮度星系可以用低的且几乎是恒定的恒星形成率来描述，而红低面亮度星系很可能和红化的高面亮度盘有关。 Bell 等人 [75] 认为，蓝低面亮度星系年轻且金属丰度较低，而红低面亮度星系和巨低面亮度星系年老且金属丰度较高，说明红和蓝低面亮度星系有着不同的形态及恒星形成历史。

近红外波段巡天为研究低面亮度星系的颜色和特征提供了更多的信息。 Galaz 等人 [52] 的研究显示，许多先前由光学波段定义为低面亮度的星系在近红外波段观测到核球和高面亮度盘的存在，而且很多光学波段似乎是晚型的星系在近红外波段却有明显的核球。而 Monnier-Ragaigne 等人 [26] 的大样本近红外波段选取的低面亮度星系表明，近红外波段的低面亮度星系也不一定是光学波段的低面亮度星系。

de Blok 等人 [71] 发现晚型低面亮度星系有颜色梯度，越往外部越蓝。 O'Neil 等人 [21]

的结果表明，低面亮度星系内部和外部区域的 $B-V, V-I$ 颜色值大致相同，但是 $U-B$ 颜色有梯度。Bergvall [76] 的样本中光学颜色梯度非常小。Beijersbergen 等人 [17] 核球为主的低面亮度星系和 O'Neil 等人 [41] 的低面亮度星系颜色随半径的增加颜色变蓝。Bell 等人 [74,75] 的结果显示，光学和近红外波段都存在颜色梯度 [35] 。而 Galaz 等人 [77] 研究核球为主的低面亮度星系时发现，21 个星系中有 10 个星系颜色越往内越蓝。这种不是所有低面亮度星系的颜色都有相同梯度的情况，为我们直接观测研究低面亮度星系中年龄梯度的原因提供了机会。

Haberzettl 等人 [40] 的低面亮度星系中，有 7 个星系 $B-V$ 颜色较蓝，$U-B$ 颜色却较红；$B-R$ 颜色较蓝，$U-B$ 颜色却较红。O'Neil 等人 [22] 、Haberzettl 等人 [78] 及 Zhong 等人 [19] 的样本中都显示有此类星系。这类星系可能有不同的恒星形成历史。

4.2 演化和恒星形成

低面亮度星系是宇宙中缓慢演化的代表，其中含有大量的气体 [79] ，说明它们年轻且没有充分演化，尤其是星系盘的演化似乎非常缓慢 [44,80] 。可能是由于低面亮度星系大多存在于含有大量低密度暗物质的晕中，暗物质似乎在每一个半径处都起主导作用 [81,82], 因而暗物质晕的形成决定了低面亮度星系的气体面密度和随后的演化。Sabatini 等人 [36] 认为，潮汐碰撞能有效地触发恒星的形成。而 Sabatini 等人 [83] 及 O'Neil 等人 [84] 的结果显示，低面亮度星系一般处在相对孤立的环境中 [83] 。Rosenbaum 等人 [45,46] 认为，与高面亮度星系相比，低面亮度相对缺乏近邻的伴星系。因而也可能是由于和近邻星系潮汐碰撞几率较小，影响了低面亮度星系的恒星形成和星系演化 [45,46] 。没有这些外部撞击，低面亮度星系将继续着缓慢而被动的演化过程。

低面亮度星系的面密度分布一般低于 Kennicutt [85] 给出的恒星形成面密度临界值 [81,86] ，及 Auld 等人 [87] 给出的 H I 面密度临界值。这在很大程度上影响了有效的恒星形成 [85] 。而且观测到的低面亮度星系多存在于星系数密度较低的环境中 [88] ，动力学时标和盘可能的塌缩时标要比高面亮度星系长，从而延缓了恒星的形成。虽然有些低面亮度星系中有亮的 H I，很可能在外部分子云环境中有恒星形成，但是可能由于温度密度压的增加阻碍了分子云的形成，所以恒星形成率很低。Hoek 等人 [89] 用理论模型估计了低面亮度星系总的恒星形成率 ($SFR^{\rm tot} = SFR^{\rm cont} + SFR^{\rm burst}$) 约为 0.02 到 0.8 $M_\odot \cdot$ a^{-1} 。O'Neil 等人 [41] 及 Boissier 等人 [57] 都认为，低面亮度星系的恒星形成率和恒星形成效率都低于高面亮度星系。

Impey 等人 [18] 的 APM 样本中，30% 的光学光谱都显示有发射线，说明低面亮度星系中有恒星形成 [74] 。Zhong 等人 [19] 的大样本面亮度相对较低的面向盘星系的 60% 都有较强的光学发射线，也说明其中有恒星形成 [90] 。Martin 和 Kennicutt [91] 认为，局部的扰动会暂时增强气体面密度值，使得低面亮度星系中有恒星形成。Galaz 等人 [52] 认为，当低面亮度星系气体面密度短暂超过恒星形成气体面密度极限时，其恒星形成率会急剧增加，短时间内有大量的恒星形成，同时消耗掉更多的气体。

4.3 金属丰度

McGaugh [79] 通过分析样本星系中 H II 区的光谱表明，低面亮度星系氧丰度很低，不及太阳氧丰度的 1/3 [61,81] 。Roennback 和 Bergvall [92] 对 16 个蓝低面亮度星系的光谱观测研究得到其氧丰度为太阳氧丰度的 1/3~1/5 。Burkholder 等人 [35] 也认为低面亮度星系

的氧丰度约为太阳的 1/5，且弥散很大，氧丰度与光度之间符合光度 – 金属丰度关系，但是平均氧丰度低于高面亮度星系。 Mattsson 等人 [49] 的模型结果也表明，低面亮度星系的氧丰度较低。 Liang 等人 [90] 研究了文献 [19] 中列出的大样本星系的光谱特征，结果表明，低面亮度星系的金属丰度 (lg $[O/H]$) 比甚高面亮度星系的金属丰度低 0.3 dex，但高于以前的研究结果 (1/3 $Z_{\odot}$)，这可能是由于样本本身光度更大，或是计算金属丰度的定标方法不同引起的。

Bell 等人 [74] 利用光学 – 近红外双色图研究了 5 个低面亮度星系的星族、年龄及金属丰度等，结果发现红低面亮度星系的金属丰度与太阳金属丰度相近，而蓝低面亮度星系中有恒星形成，但形成率较低。利用同样的方法， Bell 等人 [75] 研究了 26 个低面亮度星系的星族、年龄及金属丰度等，结果发现， K 波段面亮度和光度较低、气体成分比例较高的低面亮度星系较年轻、演化不充分、金属丰度较低；而 K 波段面亮度和光度较高、气体成分比例较低的低面亮度星系相对较年老、演化较充分、金属丰度较高 (与太阳金属丰度相近) 。 Bergmann 等人 [93] 观测研究了 19 个低面亮度星系的光谱，发现其中 4 个星系相对年老，金属丰度为 1/2∼2 倍的太阳金属丰度；一个大质量红低面亮度星系金属丰度高于太阳金属丰度；其他星系中有恒星形成。 Galaz 等人 [77] 利用星系演化的光谱模型研究了 21 个面向有核球的低和高面亮度星系，结果显示，低面亮度星系核球成分的金属丰度低于高面亮度星系，而且核球成分越小，其金属丰度越低。

从较高金属丰度年老的巨星系到较低金属丰度年轻的晚型星系，低面亮度星系的金属丰度覆盖了很大的范围，说明低面亮度星系有多样的恒星形成和演化历史。

4.4 质光比、数密度和光度密度

质光比可以反映星系的演化状态，表征气体转化为恒星的进程。但是动力学方法测定总质光比非常困难，一般不能很好地获得星系的质光比，而假定一个固定的值又会引起人为的误差，因为不同恒星形成历史的星系的质光比是不同的。近红外波段测光得到了弥散相对较小的质光比关系，而且尘埃对近红外波段的影响小于光学波段，这对研究星系的质光比非常有用。与正常的亮旋涡星系一样，低面亮度星系同样遵循 Tully–Fisher 关系 [23] 。 Burkholder 等人 [35] 所选样本的质光比与面亮度之间存在相关关系，他们认为可能是由 W_{50} (H I 轮廓内平均流量的 50% 处的宽度) 与面亮度间的微弱关系引起的，但结果并没有发现质光比和 W_{50} 之间存在相关。

许多观测数据表明，星系尺度与面亮度之间没有相关关系 [22,76] 。依据此假设，McGaugh 等人 [12] 研究显示，当星系面亮度亮于 Freeman 面亮度值时，随着面亮度的增加，数密度下降很快；而当星系面亮度暗于 Freeman 面亮度值时，随着面亮度的减小数密度下降很慢，表明低面亮度星系的数密度相对很大。 Dalcanton 等人 [94] 的结果认为， V 波段中心面亮度暗于 23 mag·arcsec^{-2} 的低面亮度星系的数密度比相同光度或相同尺度的正常星系的数密度更大。 Trachternach 等人 [39] 对 306 个低面亮度星系的研究结果显示，低面亮度星系贡献了近邻星系数密度的 30% 以上。 Zhong 等人 [19] 的大样本面亮度相对较低的星系的面亮度与尺度之间也没有明显的相关关系 (观测效应) ，但是他们的体积限完备子样本却表明，星系的尺度随面亮度变暗而增大 (内禀关系) ，这必将影响光度函数暗端的变化趋势 [12] 。但无论如何，低面亮度星系数目比 Freeman 规则所认为的数目多得多。

McGaugh 等人 [12] 的结果表明，低面亮度星系的数量很多，但是对光度密度的贡献却不是很大，为 10%~30% 。Sprayberry [34] 发现低面亮度星系大约贡献了场星系光度密度的 30% 。Dalcanton 等人 [94] 的大天区 CCD 观测结果认为，与正常星系相比，V 波段中心面亮度暗于 23 mag·arcsec^{-2} 的低面亮度星系对宇宙光度密度贡献大约是 15%~50% ，V 波段中心面亮度暗于 24 mag·arcsec^{-2} 的低面亮度星系对光度密度几乎没有贡献。Zwaan [95] 认为富气体的低面亮度星系对星系光度密度的贡献不会超过 5%±2% 。Hayward 等人 [96] 认为，低面亮度星系对光度密度的贡献小于高面亮度星的贡献。

然而，对低面亮度星系的测光偏差可能导致在观测时很大部分该类星系的丢失 (其中 Dalcanton 等人和 Zwaan 考虑了选择效应) ，因而我们可能低估了低面亮度星系的数密度，而对低面亮度星系数密度的低估可能会影响星系的总光度和光度函数在暗端的趋势 [97] 。

4.5 特殊低面亮度星系

在探测和研究低面亮度星系过程中发现了一些特殊的低面亮度星系，简介如下。

Malin 1 [20,98] ，大尺度巨低面亮度星系，尺度为 55 kpc($H_0 = 100$ km $\cdot$ s$^{-1}\cdot$ Mpc^{-1}) ，具有大质量的星系盘，甚低中心面亮度 ($\mu_0(B)$ 约 25.5 mag·arcsec^{-2}) ，非常大的 H I 质量 ($M_{\rm HI}$ 约为 $10^{11}M_\odot$) ，核球成分占很大比例，有活动星系核，是有 CO 探测的巨低面亮度星系之一 [62] 。

巨低面亮度星系 (如 Malin 2 、 UGC 6614 、 ESO 323-G064 [99]) ，有大而弥漫的盘成分和相当大的核球成分，其金属丰度接近或高于太阳金属丰度，很难按传统的哈勃分类方法来划分它们的形态，但这样的目标很少。

UGC 01922 ，中心有核球，有很强的近红外和射电波段的连续线，是有 CO 探测的巨低面亮度星系 [65] 。

SDSS J140831-000737, 一个有明显旋涡结构的双盘低面亮度星系 (由 Kniazev 等人 [4] 发现) ，它内部和外部盘的面亮度值可以用两个指数函数很好地近似拟合，在 g 波段的面亮度约为 24.5 mag·arcsec^{-2}($R > 15''$) 的地方，内部的旋臂消失。而 Impey [16] 把它划分为 Sb(r) 型星系 (r 表示环状结构) 。

J22324-60520, Haberzettl 等人 [40] 的样本中的一个颜色极红的低面亮度星系，颜色 $U-B$ =0.46 mag, $B-V$ =1.28 mag, $B-R$ =1.99 mag 。

这些特殊的低面亮度星系对于理解星系的恒星形成历史有重要意义。

5 总结与展望

在过去的几十年中，人们不断搜寻、观测研究低面亮度星系 (DDO 、UGC 、POSS-II 、APM 、“Texas” 等) ，获得了许多不同类型的低面亮度星系及一些特殊的低面亮度星系。随着深场 CCD 探测及多波段数据 (光学、近红外、红外、紫外、射电及 X 射线波段等) 的释放，对低面亮度星系许多方面的研究 (包括低面亮度星系的星族特征、自转曲线和暗物质、星系存在的环境、形成和演化、数密度和光度密度、光谱特征等) 都取得了很大的进步。研究发现，低面亮度星系的形态从矮低面亮度星系到巨低面亮度星系，金

属丰度从 5%~20% 太阳金属丰度到接近太阳金属丰度，颜色从极蓝 ($B-V\simeq0.2$) 到极红 ($B-V\simeq1.2$) 都覆盖了很大的范围。低面亮度星系是相对没有充分演化的系统：气体成分比例相对较高，质光比较高，恒星形成率较低，含有大量的暗物质。然而，在许多方面低面亮度星系研究仍存在很多问题，特别是由于选择效应的存在及观测能力的限制，人们还没能完全揭示低面亮度星系的真实面目。现代数字巡天的开展 (如 SDSS 等) 及大口径望远镜、高效率探测设备的建造和投入使用，将使我们对低面亮度星系的观测研究提高到一个新的水平。

致 谢

衷心感谢审稿人提出的非常有价值的建议，使我们的文章更加合理，描述更为准确。

参考文献:

[1] de Naray R K, McGaugh S S, de Blok W J G, et al. ApJS, 2006, 165: 461
[2] Capozziello A, Cardone V F, Troisi A. MNRAS, 2007, 375: 1423
[3] Bothun G, Imepy C, McGaugh S. PASP, 1997, 109: 745
[4] Kniazev A Y, Grebel E K, Pustilnik S A, et al. AJ, 2004, 127: 704
[5] McGaugh S S, Bothun G D, Schombert H M. AJ, 1995, 110: 573
[6] Blanton M R, et al. ApJ, 2005, 631: 208
[7] Peebles P J E. ApJ, 2001, 557: 495
[8] Noguchi M. ApJ, 2001, 555: 289
[9] O'Neil K, Bothun G D, Schombert J. AJ, 2000, 119: 136
[10] Zwicky F., ed. Morphological Astronmy. New York: Springer-Verlag, 1957: 121
[11] Freeman K C. ApJ, 1970, 160: 811
[12] McGaugh S S. MNRAS, 1996, 280: 337
[13] O'Neil K. ASPC, 2000, 215: 178
[14] Disney M J. Nature, 1976, 263: 573
[15] Schombert J M, Bothun G D. AJ, 1988, 95: 1389
[16] Impey C D, Sprayberry D, Irwin M J, et al. ApJS, 1996, 105: 209
[17] Bergvall N, Ronnback J, Masegosa J, et al. A&A, 1999, 341: 697
[18] Impey C D, Burkholder V, Sprayberry D. AJ, 2001, 122: 2324
[19] Zhong G H, Liang Y C, Liu F S, et al. MNRAS, 2008, 391: 986
[20] Impey C, Bothun G. ARA&A, 1997, 35: 267
[21] O'Neil K, Bothun G D, Cornell M. AJ, 1997, 113: 1212
[22] O'Neil K, Bothun G D, Schombert J, et al. AJ, 1997, 114: 2448
[23] Boissier S, Monnier-Ragaigne D, Prantzos N, et al. MNRAS, 2003, 343: 653
[24] Courteau S, de Jong R, Broeils A. ApJ, 1996, 457: L73
[25] Adami C, Scheidegger R, Ulmer M, et al. A&A, 2006, 459: 679
[26] Monnier-Ragaigne D, van Driel W, Schneider S, et al. A&A, 2003, 405: 99
[27] Jarrett T H. The Impact of NIR Sky Surveys on Galactic and Extragalactic Astronomy, Epchtein N, ed. Dordrecht: Kluwer, 1998: 239
[28] Romanishin W, Strom K M, Strom S E. ApJ, 1983, 263: 94
[29] Sandage A, Binggeli B. AJ, 1984, 89: 919
[30] Ellis G, Gray E, Bond H E. PASP, 1984, 96: 283

[31] Schombert J M, Bothun G D, Schneider S E, et al. AJ, 1992, 103: 110
[32] Binggeli B, Tarenghi M, Sandage A. A&A, 1990, 228: 42
[33] Bothun G, Geller M, Huchra J, et al. ApJ, 1992, 395: 349
[34] Sprayberry D, Impey C D, Irwin M J, et al. AJ, 1997, 482: 104
[35] Burkholder V, Impey C, Sprayberry D. AJ, 2001, 122: 2318
[36] Sabatini S, Davies J, van Driel W, et al. MNRAS, 2005, 357: 819
[37] Sharina M E, Puzia T H, Makarov D I. A&A, 2005, 442: 85
[38] Puzia T H, Sharina M E. ApJ, 2008, 674: 909
[39] Trachternach C, Bomans D J, Haberzettl L, et al. A&A, 2006, 458: 341
[40] Haberzettl L, Bomans D J, Dettmar R J, et al. A&A, 2007, 465: 95
[41] O'Neil K, Oey M S, Bothun G. AJ, 2007, 134: 547
[42] Villegas D, Kissler-Patig M, Jordan A, et al. AJ, 2008, 135: 467
[43] Vorobyov E I, Shchekinov Y, Bizyaev D, et al. A&A, 2009, 505: 483
[44] Das M, Reynolds C S, Vogel S N, et al. ApJ, 2009, 693: 1300
[45] Rosenbaum S D, Bomans D J. A&A, 2004, 422: L5
[46] Rosenbaum S D, Krusch E, Bomans D J, et al. A&A, 2009, 504: 807
[47] Bergvall N, Zackrisson E, Caldwell B. MNRAS, 2010, 405: 2697
[48] Caldwell B, Bergvall N. Proceedings of IAU Symposium, 2007, 235: 82
[49] Mattsson L, Caldwell B, Bergvall N. ASPC, 2008, 396: 155
[50] Knezek P M, Wroten J. A&AS, 1994, 185: 1439
[51] de Jong R S. A&A, 1996, 313: 377
[52] Galaz G, Dalcanton J, Infante L, et al. AJ, 2002, 124: 1360
[53] Hinz J L, Rieke M J, Rieke G H, et al. ApJ, 2007, 663: 895
[54] Rahman N R, Howell J H, Helou G, et al. ApJ, 2007, 663: 908
[55] Zackrisson E, Bergvall N, Ostlin G. A&A, 2005, 435: 29
[56] O'Neil K, Bothun G D, Smith E P, et al. AJ, 1996, 112: 431
[57] Boissier S, de Paz A G, Boselli A, et al. ApJ, 2008, 681: 244
[58] Karachentsev I D, Makarova L N, Andersen M I. MNRAS, 1999, 307: L37
[59] Burton W B, Braun R, Walterbos R A M, et al. AJ, 1999, 117: 194
[60] Liang Y C, Hu J Y, Liu F S, et al. AJ, 2007, 134: 759
[61] de Blok W J G, van der Hulst J M. A&A, 1998, 335: 421
[62] Braine J, Herpin F, Radford S J E. A&A, 2000, 358, 494
[63] O'Neil K, Hofner P, Schinnerer E. ApJ, 2000, 545: L99
[64] O'Neil K, Schinnerer E, Hofner P. ApJ, 2003, 588: 230
[65] O'Neil K, Schinnerer E. ApJ, 2003, 588: L81
[66] Matthews L D, Gao Y. ApJ, 2001, 549, L191
[67] Matthews L D, Gao Y, Uson J M, et al. AJ, 2005, 129: 1849
[68] Das M, O'Neil K, Vogel S N, et al. ApJ, 2006, 651, 853
[69] Bergvall N, Östlin G, Pharasyn A, et al. Highlights of Astronomy. Johannes Andersen, ed. UK: Kluwer Academic, 1998: 103
[70] Adami C, Pello R, Umler M P, et al. A&A, 2009, 495: 407
[71] de Blok W J G, van der Hulst J M, Bothun G D. MNRAS, 1995, 274: 235
[72] Heller A B, Brosch N. MNRAS, 2001, 327: 80
[73] Roberts S, Davies J, Sabatini S, et al. MNRAS, 2007, 379: 1053
[74] Bell E, Bower R, de Jong R, et al. MNRAS, 1999, 302: L55
[75] Bell E, Barnaby D, Bower R G, et al. MNRAS, 2000, 312: 470
[76] Beijersbergen M, de Blok W J G, van der Hulst J M. A&A, 1999, 351: 903
[77] Galaz G, Villalobos A, Infante L, et al. AJ, 2006, 131: 2035

[78] Haberzettl L, Bomans D J, Dettmar R J, et al. A&A, 2007, 471: 787
[79] McGaugh S S, Bothun G D. AJ, 1994, 107: 530
[80] Mo H J, Mao S D, White S D M. MNRAS, 1998, 295: 319
[81] de Blok W J G, McGaugh S S, van der Hulst J M. MNRAS, 1996, 283: 18
[82] de Blok W J G, McGaugh S S, Bosma A, et al. ApJ, 2001, 552: L23
[83] Sabatini S, Davies J, Scaramella R, et al. MNRAS, 2003, 341: 981
[84] O'Neil K. IAU Syposium, 2008, 244: 266
[85] Kennicutt R C. ApJ, 1989, 344: 685
[86] Uson J M, Matthews L D. AJ, 2003, 125, 2455
[87] Auld R, de Blok W J G, Bell E, et al. MNRAS, 2006, 366: 1475
[88] Bothun G, Schombert J, Impey C, et al. AJ, 1993, 106: 530
[89] van den Hoek L B, de Blok W J G, van der Hulst J M, et al. A&A, 2000, 357: 397
[90] Liang Y C, et al. http://cn.arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1004/1004.3683v1.pdf, astro-ph/10043683, 2006
[91] Martin C T, Kennicutt R C. ApJ, 2001, 555: 301
[92] Roennback J, Bergvall N. A&A, 1995, 302: 353
[93] Bergmann M P, Jorgensen I, Hill G. AJ, 2003, 125: 116
[94] Dalcanton J J, Spergel D N, Gunn J E. AJ, 1997, 114: 2
[95] Zwaan M A, Briggs F H, Sprayberry D. MNRAS, 2001, 327: 1249
[96] Hayward C C, Irwin J A, Bergman J N. ApJ, 2005, 635: 827
[97] Dalcanton J J, Spergel D N, Gunn J E. AJ, 1997, 482: 695
[98] Barth A J. AJ, 2007, 133: 1085
[99] Coccato L, Swaters R A, Rubin V C, et al. A&A, 2008, 490: 589

Progress on Observational Properties of Low Surface Brightness Galaxies

ZHONG Guo-hu[1,2,3,4], LIANG Yan-chun[1,2], DENG Li-cai[1,2], ZHANG Bo[1,4]

(*1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)*

Abstract: Galaxies with B-band center surface brightness fainter than the value of $\mu_0(B) = (21.65\pm 0.3)$ mag· arcsec^{-2} are defined as low surface brightness (LSB) galaxies, which is so called Freeman law. Because of their low surface brightness and the selection bias of earlier catalogs, this galaxy population was largely missed in the past. However, during the last decades, LSB galaxies have been paid more and more attention as the observational data on them increased. LSBs are important contributors to the galaxy population in both field and clusters. For example, they may comprise up to half of the local galaxy population. It is found that they may play an significant role in the processes of galaxy formation and evolution.

In this paper, we review the main progress on observational properties of LSB galaxies, including the definition of low surface brightness galaxies, searching and observations, colors and stellar populations, galaxies evolution and star formation, metallicities, number density and luminosity density, etc. Some special low surface brightness galaxies are list in the end. The main observational properties of LSB galaxies are as follows.

First, the value of definition of LSB galaxies, based on Freeman law, are different in different studies (e.g. $\mu_0(B) \geq 22.0$ or 23.0 mag· arcsec^{-2}) and in different band of the investigations (e.g. $\mu_{K_5} > 18.0$ mag· arcsec^{-2}).

Second, in the past years, lots of efforts have been made to search LSB galaxies since the publication of DDO catalog. Then some catalogs of LSB galaxies are published, e.g. APM. Especially, thanks to the present modern digital sky surveys, e.g. SDSS, 2MASS, GALEX and so on, the LSB galaxies are studied in multi-wavelength such as from optical to near-infrared, infrared, ultraviolet, radio and X-ray multi-band. Therefore, the researches on LSB galaxies have been greatly improved, since those catalogs have provided much larger sample and much more information for LSB galaxies, and have provided us a much wider window to understand the properties of them.

Third, many aspects about properties of LSB galaxies have been studied by observations, including surface photometry, stellar population, metallicities, star formation, H I distribution, detection and map in CO, rotation curves and the Tully-Fisher relation and so forth. These studies strongly indicate that LSB galaxies are unevolved systems with a low star formation rate (SFR), low metallicities, high number density but small luminosity density, small stellar density, a relatively high gas fraction, and large amounts of dark matter.

Key words: galaxies; low surface brightness; populations