

CDFS 天区中暗蓝星系的测光红移研究*

杜志良^{1,2†}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 从 COMBO-17 数字巡天数据里, 选择了 CDFS (Chandra Deep Field South) 天区中 1 231 个测光红移在 0.1~0.3 之间的暗蓝星系作为样本, 研究了这些星系分别在只有光学波段和光学加近红外波段数据情况下做测光红移得到的红移分布, 以及这些星系在静止参考系下的能谱分布 (Spectral Energy Distributions, SEDs) 特征. 结果表明有 183 个星系在利用光学加近红外波段数据做测光红移时得到的红移大于 1.2, 它们的误差为 0.046, 提高测光的信噪比也有利于区分这类被光学波段误认为低红移的星系. 这些暗蓝星系中高红移星系的观测近红外流量相对于光学流量有上升的趋势, 而低红移星系的观测近红外流量相对于光学流量有下降的趋势.

关键词 星系: 高红移, 方法: 其它诸多方面

中图分类号: P 157; **文献标识码:** A

1 引言

深场巡天是目前从观测上研究河外星系形成与演化的途径, 红移作为一个关键的观测, 证认星系的红移是研究星系演化的基础.

光学深场巡天中探测到数目众多的暗蓝星系^[1], 它们的 B 波段视星等 (AB) 大于 22 等、颜色偏蓝. 然而, Zheng 等^[2] 2006 年在光学深场巡天中发现的近邻矮蓝星系可能存在被高红移的恒星形成星系污染的现象, 这无疑对研究星系的形成和演化产生影响.

暗蓝星系很暗, 接近 10 m 望远镜光谱观测极限, 高红移星系失去了其主要的特征, 因此在光谱红移巡天中很难证认出红移. 由年轻星族贡献的高红移恒星形成星系, 其紫外连续谱与近邻蓝矮星系的光学连续谱接近, 所以只用光学做测光红移也难以区分它们. 系统研究暗蓝星系的特征, 找出其矮星系与遥远恒星形成星系的比列, 及近邻矮星系与遥远恒星形成星系能谱分布的区别, 这会有助于我们改进测光红移测量, 修正对近邻矮星系与遥远恒星形成星系的研究.

CDFS 天区^[3] 已有最深 Spitzer 空间望远镜红外阵列摄像机 (Infrared Array Camera, IRAC) 的红外^[4] 和 HST 的 V 波段、z 波段^[5] 观测, IRAC 的 3.6 μm 、4.5 μm 探测极限为 24.2、24.1 星等, HST 的 V 波段、z 波段探测极限达到 28.3、27.1 星等. Wuyts

2010-05-12 收到原稿, 2010-05-31 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10633040) 资助

† duzhiliang@gmail.com

等^[6]对 CDFS 天区做过从 U_{38} 到 $24\ \mu\text{m}$ 波段的测光红移, 得到的部分高红移星系在只用光学做的测光红移中也被证认成低红移星系, 然而由于使用了远红外数据, 和其他波段交叉证认之后得到这部分的星系总量比较少. 本文从 COMBO-17 数字巡天数据^[7]中选出 CDFS 天区的 1 231 个红移在 $0.1\sim 0.3$ 之间的暗蓝星系, 对这些暗蓝星系分别用光学加近红外共 8 个波段数据及光学 6 个波段数据做测光红移, 获得了这部分星系的红移分布, 并得到它们在静止参考系中的能谱分布.

2 数据和样本

2.1 CDFS 多波段数据

CDFS 天区有多个深场巡天, 包括光学和红外波段的巡天. 本文做测光红移时使用了 MUSYC^[8] (Multiwavelength Survey Yale-Chile) 的 UBVRI 波段数据、GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs) 的 z 波段数据和 IRAC 的 $3.6\ \mu\text{m}$ 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 的数据, 它们的中心波长、波长的宽度、曝光时间、极限星等见表 1.

表 1 CDFS 天区中多波段深场巡天

Table 1 Multiwavelength deep surveys in the CDFS

| Band | $\lambda_c(\mu\text{m})$ | $\Delta\lambda(\mu\text{m})$ | Instru. | Exp.(s) | M_{AB} | Comments |
|--------|--------------------------|------------------------------|---------|---------|----------|-----------------------|
| U | 0.3560 | 0.036 | WFI | 78900 | 26.5 | MUSYC ^[8] |
| B | 0.4600 | 0.097 | WFI | 69420 | 26.9 | MUSYC ^[8] |
| V | 0.5380 | 0.089 | WFI | 104580 | 26.6 | MUSYC ^[8] |
| R | 0.6510 | 0.160 | WFI | 87660 | 26.3 | MUSYC ^[8] |
| I | 0.8670 | 0.147 | WFI | 34560 | 24.8 | MUSYC ^[8] |
| F850LP | 0.9055 | 0.0539 | ACS | 2286 | 27.1 | GEMS ^[5] |
| ch1 | 3.6000 | 0.75 | IRAC | 11000 | 24.2 | SIMPLE ^[4] |
| ch2 | 4.5000 | 1.01 | IRAC | 11000 | 24.1 | SIMPLE ^[4] |

2.2 样本的选择

COMBO-17 数字巡天是 CDFS 天区中众多深场巡天之一, 它观测到天区面积 $31.5' \times 30'$ 内 63 501 个源, 其中分类比较可靠 (R 波段孔径测光视星等 $R_{\text{aper}} < 24$) 的约有 10 000 个星系. 选择其中红移在 $0.1\sim 0.3$ 、R 波段视星等在 $22\sim 24$ 等、U-V 颜色 (Vega) 小于 1 的共 1 231 个星系. 图 1 显示 COMBO-17 星表红移在 $0.1\sim 0.3$ 、U-V 颜色 (Vega) 小于 1 的所有星系 R 波段视星等 (Vega) 的分布, 样本取两虚线的中间部分. 样本的 U-V 颜色 (Vega) 分布如图 2 虚线左边部分, 可以看出大多数星系颜色在 $0\sim 1$ 之间.

2.3 多波段数据交叉认证

COMBO-17 和 MUSYC、GEMS、IRAC 观测覆盖的天区不完全重叠, 同一个源在不同巡天中的坐标也有细微的差别. 把样本的坐标和 MUSYC、GEMS、IRAC 的每一个源的坐标在误差为 4σ 下做交叉认证, 得到一个具有 UBVRI z 、 $3.6\ \mu\text{m}$ 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 共 8 个波段的测光数据、包括 601 个星系的最终样本.

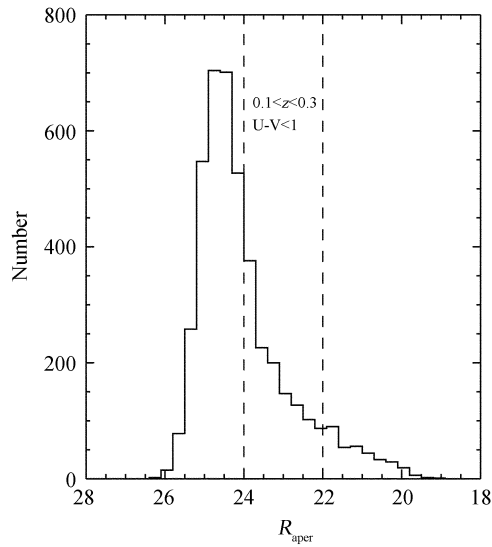


图 1 COMBO-17 星表中红移在 $0.1 \sim 0.3$ 之间的源孔径测光 R 波段视星等 (Vega) 的分布, 样本取其中孔径测光 R 波段视星等在 $22 \sim 24$ 等范围内 (两条虚线间) 的星系

Fig.1 Distribution of R-band aperture magnitude (Vega) for galaxies with $0.1 < z < 0.3$ in COMBO-17 catalogue. The two vertical dashed lines give the luminosity cut for our sample selection ($22 < R_{\text{aper}} < 24$)

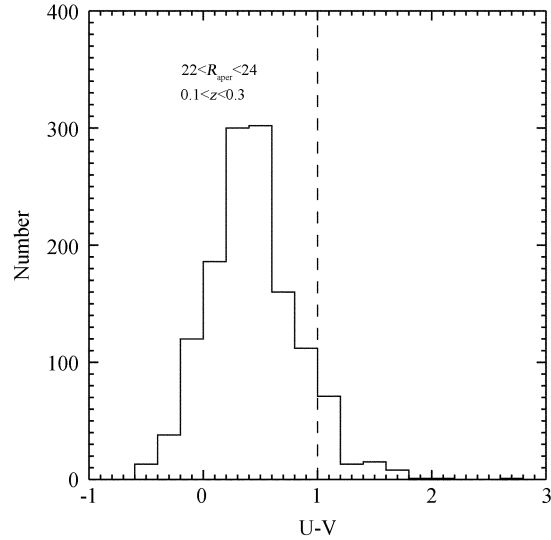


图 2 样本 (虚线左边) 的 U-V 颜色 (Vega) 分布
Fig.2 U-V color (Vega) distribution of our sample (left of the vertical dashed line)

3 红移

3.1 光谱红移

星系的光谱红移是指通过星系光谱中的谱线得到的星系红移. 光谱观测需要较长的曝光时间, 对于多数遥远的星系, 由于超出了光谱观测的极限, 即使使用长时间的观测也很难得到足够信噪比的光谱数据, 所以很难大范围地得到星系的光谱红移. 但是光谱红移的精度较高, 可以用来检验测光红移的精度. CDFS 天区中有很多个光谱红移巡天, 本文用的光谱红移来自 FORS2^[9]、VIMOS^[10]、IMAGES^[11] 及 VVDS^[12] 巡天数据中得到的 2 921 个可靠的星系红移 (表 2), 在误差为 4σ 下做交叉认证后样本中有 120 个星系具有光谱红移, 利用这些星系光谱红移和测光红移, 按误差公式就可以计算出样本测光红移的精度.

3.2 测光红移

测光红移是指利用中波段和宽波段测光数据或者图像得到的红移. 相对光谱红移, 测光红移的效率比较高, 同时由于目前使用的电荷耦合器件 (CCD) 能够得到比分光测量极限暗得多的星系图像, 所以测光红移能够得到更暗星系的红移.

表 2 光谱红移

Table 2 Spectroscopic Redshifts

| Survey | High-quality flag | Number |
|------------------------|-------------------|--------|
| FORS2 ^[9] | A | 462 |
| VIMOS ^[10] | A | 922 |
| IMAGES ^[11] | A | 224 |
| VVDS ^[12] | A | 1313 |

本文做测光红移采用的是 EAZY^[13], EAZY 是一个全新、公开的测光红移程序. 它包括其他一些测光红移方法的优点, 如 Benitez^[14] 的贝叶斯光度优化、Rudnick 等^[15–16] 的模板合并及 Bolzonella 等^[17] 的 Hyperz 算法. 它的默认模板使用星族合成方法得到的星系能谱分布, 另外加上年轻和有尘埃星系的能谱分布, 由于其模板相对于用实际观测得到的星系模板较宽, 加上考虑到星系尘埃的特点, 所以在测量高红移和颜色蓝的星系时有优势, 这正好符合我们研究的要求. 主要计算公式如下:

$$z_{\text{mp}} = \frac{\int zp(z | C, m_0)dz}{\int p(z | C, m_0)dz}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{NMAD}} = 1.48 \times \text{median} \left(\left| \frac{\Delta z - \text{median}(\Delta z)}{1 + z_{\text{spec}}} \right| \right), \quad (2)$$

(1) 式中 $p(z | C, m_0)$ 表示颜色为 C 的星系根据 R 波段星等优化后得到的红移概率分布, z_{mp} 为最佳红移. (2) 式计算误差, 其中 median 表示取中值.

在做测光红移时, 选择了 EAZY 的默认模板、全部模板拟合、模板误差函数以及 R 波段光度优化等.

用上述方法, 对 601 个星系使用 MUSYC 的 UBVRI、GEMS 的 z 波段和 IRAC 的 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$ 共 8 个波段做测光红移. 再利用其中的 120 个光谱红移按 (2) 式计算出测光红移的误差. 由于 MUSYC 的 UBVRI、GEMS 的 z 波段都比 COMBO-17 的探测极限要深, 所以可以用这些更深的光学波段数据做测光红移, 并和 COMBO-17 做比较来检验更高信噪比的观测是否对区分被误证认为低红移的暗蓝星系有帮助.

图 3 显示样本的测光红移和光谱红移比较的结果, 误差只有 0.046. 图中也有少量源的测光红移和光谱红移相差比较大, 同时也在图 4 中表现出来, 这些差别较大的源中除了两个之外其他都是光谱红移为高红移而测光红移证认成低红移的星系. 经检验发现其中只有两个源的观测流量和模板拟合明显不好, 其他的几个拟合情况较好, 也没有发现其测光问题, 是什么原因导致这一现象需进一步研究. 图 4 表示 $\Delta z/(1+z)$ 随光谱红移和孔径测光 R 波段视星等变化分布图. 通常用 $\Delta z/(1+z)$ 检验测光红移的精度, 其中 $\Delta z = z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}}$, 可以看出它随红移分别有两个倾斜的系统偏差, 而且随孔径测光 R 波段视星等增加弥散逐渐增大.

601 个星系的红移分布如图 5 所示. 图中包括了利用更高信噪比光学加近红外波段数据得到的红移分布 (加内斜划线实线直方图)、只用更高信噪比光学波段数据得到的红移分布 (没有加内斜划线实线直方图) 以及 COMBO-17 得到的红移分布 (虚线直方图). 由于星系的 4000 \AA break 这一显著特征在红移大于 1.2 时已经红移到光学波段之外, 高红

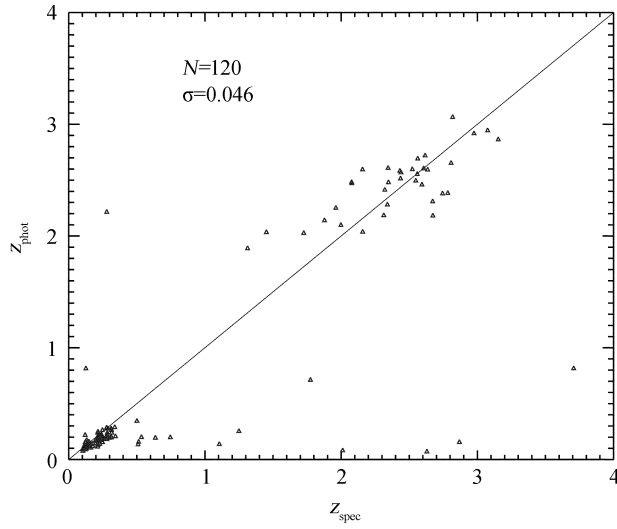


图 3 光学加红外数据的测光红移和光谱红移的对比

Fig.3 Comparison between photometric redshifts obtained by using optical and infrared data and spectroscopic redshifts

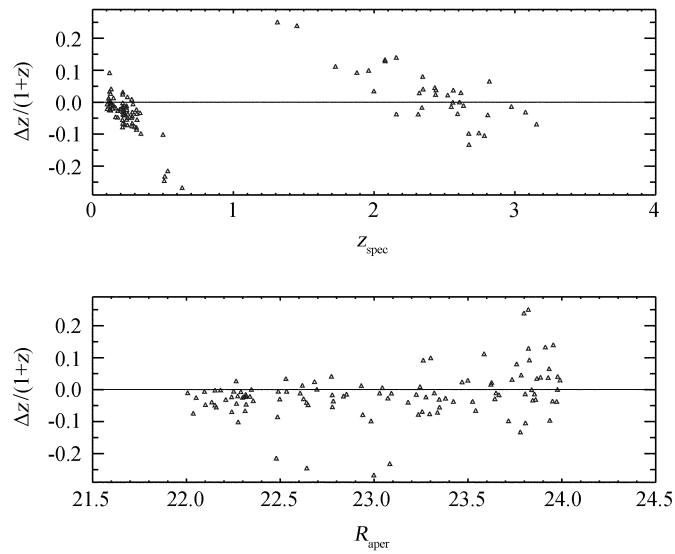


图 4 $\Delta z/(1+z)$ 随光谱红移和孔径测光 R 波段视星等的分布情况

Fig.4 Distributions of $\Delta z/(1+z)$ as a function of spectroscopic redshift and aperture R-band magnitude

移的恒星形成星系的紫外连续谱和近邻矮星系的光学能谱很相似,所以在光学波段很难区分它们. 这些在 COMBO-17 星表中红移在 0.1~0.3 之间的星系,利用光学加近红外数据得到 183 个星系红移大于 1.2, 它们的两个峰值非常明显, 和理论上的结果非常吻合,说明增加近红外波段数据能有效地把高红移的星系区分开来. 同时图 3 还显示测光红移和光谱红移相差比较大的源绝大多数是光谱红移为高红移而测光红移为低红移的星系,说明还有少部分高红移星系没有被证认出来. 只用更高探测极限的光学波段数据得到的红移也得到部分高红移星系, 并且少数和光谱红移的值接近, 说明增加信噪比对区分这类星系也有一定的作用.

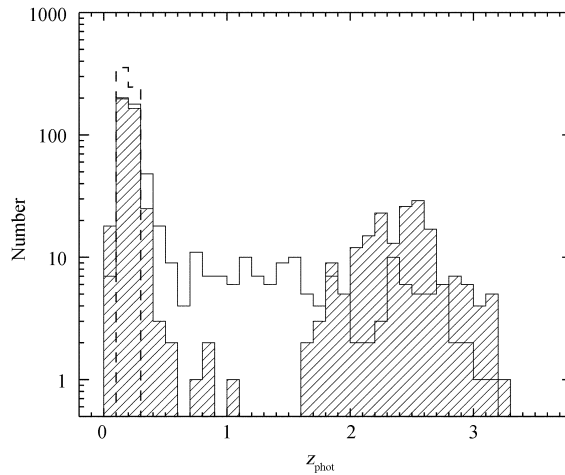


图 5 3 种测光红移样本的分布情况. 有内斜划线的实线直方图是利用光学加近红外数据得到的红移分布, 没有内斜划线的实线直方图是只用更高信噪比光学数据得到的红移分布, 虚线直方图是 COMBO-17 的测光红移分布

Fig. 5 Distributions of three kinds of photometric redshifts. Hatched histogram shows the result inferred by using optical and infrared data, blank histogram with solid line shows the result obtained by only using optical data and dashed histogram shows the result from COMBO-17

4 典型能谱分布

利用前面光学加近红外测光数据及得到的测光红移, 可得这些星系在静止参考系下的能谱分布. 为了清楚显示高红移星系和低红移星系能谱分布的差异, 去掉了 9 个红移在 0.4~1.2 之间的星系, 再把其余的星系按红移分为 0.1~0.4 和大于 1.2 两个组, 然后对每个组按红移和 U-V 颜色 (AB) 的大小分为 4 个小组, 计算出每组中星系在静止参考系下的流量大小, 再根据各组里星系的红移分布, 把每组的流量归一在不同波长处, 从而得到所有星系在静止参考系下的能谱分布. Coleman 等^[18]1980 年从近邻星系样本中得到几种不同类型星系的模板, 这些模板后来使用 Bruzual 等^[19]的模型从 $\lambda = 1400 \sim 10000 \text{ \AA}$ 延展到紫外和红外波段, 选其中的 Im、Scd、Sbc、E 星系模板和上述星系的能谱分布做比较得到的结果如图 6 所示.

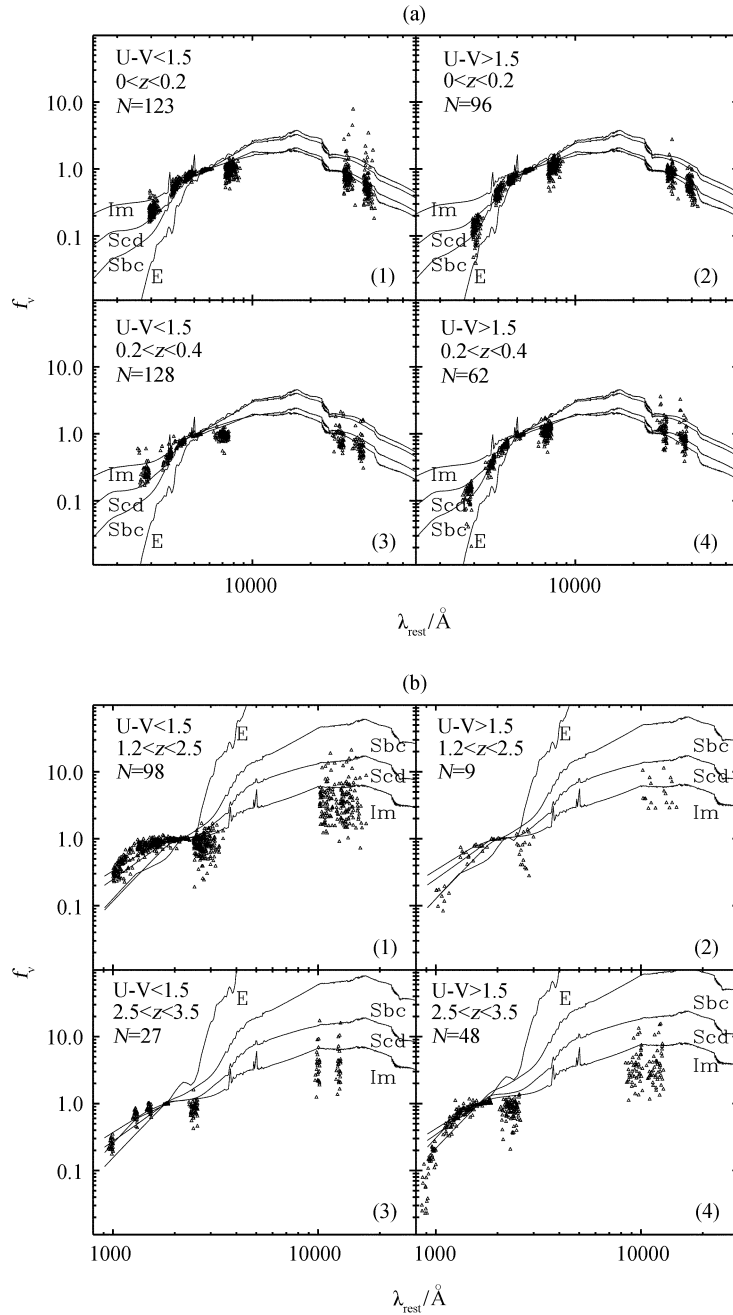


图 6 样本静止参考系的能谱分布. (a) 低红移星系. (1)、(2)、(3)、(4) 中流量分别归一在静止波长等于 5924 \AA 、 5924 \AA 、 5341 \AA 、 5341 \AA . (b) 高红移星系. (1)、(2)、(3)、(4) 中流量分别归一在静止波长等于 2172 \AA 、 2036 \AA 、 1810 \AA 、 1629 \AA

Fig. 6 The rest-frame SEDs of our sample. (a) low-redshift galaxies. The fluxes are normalized to the fluxes at $\lambda = 5924 \text{ \AA}$, 5924 \AA , 5341 \AA and 5341 \AA for panels (1), (2), (3) and (4), respectively. (b) high-redshift galaxies. The fluxes are normalized to the fluxes at $\lambda = 2172 \text{ \AA}$, 2036 \AA , 1810 \AA and 1629 \AA for panels (1), (2), (3) and (4), respectively

图 6(a) 显示这些低红移星系在静止系中光学波段绝大多数处在正常星系范围之内, 其中 (2) 图 (颜色大于 1.5、红移在 0~0.2) 中有少量早型星系, 这可能和模板没有加消光以及模板来自近邻星系有关, 说明这些低红移星系基本上都是恒星形成星系. 图 6(b) 显示波长大于 2 000 Å 时, 这些高红移星系颜色大多数处于不规则星系范围中, 基本上都处在 Sbc 模板以下, 说明这些星系恒星形成率很高, 都是恒星形成星系. 对比图 6(a) 和 (b) 发现, 观测的 3.6 μm 、4.5 μm 波段在低红移星系静止参考系中仍然处在近红外波段, 它们相对观测上的光学波段有下降的趋势. 而观测的 3.6 μm 、4.5 μm 波段在这些高红移星系静止参考系中已经红移到 10 000 Å 左右, 它们相对观测上的光学波段有上升的趋势. 由年轻星族贡献的高红移恒星形成星系, 其紫外连续谱与近邻蓝矮星系的光学连续谱接近, 仅从光学波段数据难以把它们区分, 图 6(a) 和 (b) 对比的结果表明增加近红外波段测光数据能有效地把这两种星系区分开来. 在图 6 中高红移和低红移星系都有个别数据点异常, 经检验为测光问题, 不影响整体能谱分布的形状.

5 结果与讨论

从 CDFS 天区中选择 1 231 个在光学波段被证认为低红移的暗蓝星系中的 601 个星系, 分别做了光学加近红外波段数据和只有光学波段数据的测光红移. 结果表明光学波段证认成近邻的暗蓝星系确实有一部分是高红移的恒星形成星系, 通过增加近红外波段数据能够有效地区分这类高红移恒星形成星系. 另外增加测光的信噪比也对区分这类星系有一定的帮助. 通过这些星系静止参考系的能谱分布可以看出: 高红移星系观测的近红外流量相对于光学流量有上升的趋势, 低红移星系观测的近红外流量相对于光学流量有下降的趋势.

文中只做了 R 波段视星等 (Vega) 在 22~24 等之间的蓝星系的研究, 而更暗的蓝星系是不是和这情况类似, 还有待于进一步检验. 另外, 是什么导致了在使用了近红外数据、它们的观测流量和模板拟合良好的情况下仍然有部分星系的测光红移和光谱红移的差别较大? 未来可以利用增加 HST/WFC3 观测到波长更短的近红外数据^[20] 做进一步的研究.

致谢 在这篇文章的完成过程中, 得到了赵应和博士的指导和帮助, 特此感谢!

参 考 文 献

- [1] Ellis R S. ARA&A, 1997, 35: 389
- [2] Zheng X Z, Bell E F, Rix H W, et al. ApJ, 2006, 640: 784
- [3] Giacomini R, Zirm A, Wang J X, et al. ApJS, 2002, 139: 369
- [4] Damen M, Labbé I, Franx M, et al. ApJ, 2009, 690: 937
- [5] Rix H W, Barden M, Beckwith S V W, et al. ApJS, 2004, 152: 163
- [6] Wuyts S, Labbé I, Schreiber N M, et al. ApJ, 2008, 682: 985
- [7] Wolf C, Meisenheimer K, Kleinheinrich M, et al. A&A, 2004, 421: 913
- [8] Taylor E N, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJ, 2009, 694: 1171
- [9] Vanzella E, Cristiani S, Dickinson M, et al. A&A, 2008, 478: 83
- [10] Popesso P, Dickinson M, Nonino M, et al. A&A, 2008, 494: 443

- [11] Ravikumar C D, Puech M, Flores H, et al. *A&A*, 2007, 465: 1099
- [12] Le Fèvre O, Vettolani G, Paltani S, et al. *A&A*, 2004, 428: 1043
- [13] Brammer G B, van Dokkum P G, Coppi P. *ApJ*, 2008, 686: 1503
- [14] Benitez N. *ApJ*, 2000, 536: 571
- [15] Rudnick G, Franx M, Rix H W, et al. *AJ*, 2001, 122: 2205
- [16] Rudnick G, Rix H W, Franx M, et al. *ApJ*, 2003, 599: 847
- [17] Bolzonella M, Miralles J M, Pelló R. *A&A*, 2000, 363: 476
- [18] Coleman G D, Wu C C, Weedman D W. *ApJS*, 1980, 43: 393
- [19] Bruzual G, Charlot S. *MNRAS*, 2003, 344: 1000
- [20] Windhorst R A, Cohen S H, Hathi N P, et al. *arXiv:1005.2776*

A Research on Photometric Redshifts of Faint Blue Galaxies in the CDFS

DU Zhi-liang^{1,2}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT From the COMBO-17 catalog in the CDFS (Chandra Deep Field South), 1231 faint blue galaxies with photometric redshift $0.1 < z < 0.3$ are selected. The photometric redshifts of this sample have been studied by only using the optical data and by using the optical and infrared data, respectively. The result shows that there are 183 galaxies with redshifts greater than 1.2 when using optical and infrared data to infer the photometric redshifts. This study also shows that increasing the photometric signal-to-noise ratio can also help to improve the precision of the photometric redshift. The rest-frame SEDs (Spectral Energy Distributions) of these galaxies also have been investigated. The observational near-infrared fluxes tend to be larger than the optical fluxes for high-redshift galaxies, while the observational near-infrared fluxes tend to be less than the optical fluxes for low-redshift galaxies.

Key words galaxies: high-redshift, methods: miscellaneous