

文章编号:1671-4229(2023)01-0051-12

早型旋涡星系 M81 (NGC 3031) 光谱 能量分布的空间解析研究

龔俊宇, 毛业伟*

(广州大学 a. 天体物理中心; b. 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 文章利用光谱能量分布 (Spectral Energy Distribution, SED) 拟合对近邻早型旋涡星系 M81 (NGC 3031) 的整体和局部区域进行从远紫外到远红外光谱的建模,旨在探究 M81 星系中的星族和尘埃性质以及它们的空间分布。研究中,收集了来自包括 GALEX、Swift、SDSS、2MASS、WISE、Spitzer 和 Herschel 的空间及地面望远镜/巡天获得的一共 27 个波段的图像数据,并且将所有数据统一成相同的分辨率。通过对 M81 整体和每个像素进行 SED 拟合,得到了 M81 中的星族和尘埃等物理参数及其空间分布。发现 M81 是一个整体年龄约为 9.5 Gyr (十亿年),恒星总质量约为 $3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$ (太阳质量),整体恒星形成率约为 $0.29 M_{\odot}/\text{yr}$,光度约 $4.26 \times 10^{11} L_{\odot}$ (太阳光度),以年老恒星为主的星系。M81 的内部区域(主要由核球主导),包含了星系中最年老星族,其年龄大约为 10 Gyr,恒星形成率低,尘埃消光小;外部区域(盘主导)年龄约为 1 Gyr,年轻和年老恒星共存;星系中最年轻的恒星为 400 Myr (百万年),主要分布在外旋臂中,这里恒星形成率高,尘埃消光严重。这些物理参数的空间分布图分析 M81 的形成和演化历史提供了线索,认为 M81 的核球在宇宙的早期就已经通过碰撞形成,随后吸积伴星的气体产生盘结构,而旋臂结构是由于伴星的引力势能对盘的扰动而产生的最年轻的子结构。通过对 SED 的分析还发现,M81 的年老恒星辐射也会加热尘埃,这将给利用远红外辐射估计恒星形成率带来误差。在后续的研究中,将对 M81 进行形态学解构,从而研究不同子结构中的星族和尘埃性质及其空间分布。

关键词: 测光; 尘埃; 恒星成分; 个源星系 (M81); ISM

中图分类号: P 157 文献标志码: A

A spatially resolved study of spectral energy distributions for the early-type spiral galaxy M81 (NGC 3031)

GONG Jun-yu, MAO Ye-wei*

(a. Astrophysics center; b. School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this work, through spectral energy distribution (SED) fitting, we carry out spectral modeling with the wavelength range from far-ultraviolet to far-infrared for the nearby early-type spiral galaxy M81 (NGC 3031) on a spatially integrated and resolved basis. This paper is aimed at exploring properties of stellar populations and interstellar dust in M81, as well as their spatial distributions. We collected 27-band imaging data obtained from space and ground-based telescopes/surveys including GALEX, Swift, SDSS, 2MASS, WISE, Spitzer and Herschel, and unified all the images into the

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2031106, U2031201)

作者简介: 龔俊宇 (1996—), 男, 硕士. E-mail: gongjunyu@e.gzhu.edu.cn

* 通信作者. E-mail: ywmao@gzhu.edu.cn

引文格式: 龔俊宇, 毛业伟. 早型旋涡星系 M81 (NGC 3031) 光谱能量分布的空间解析研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22 (1): 51-62.

same spatial resolution. By SED fitting not only for M81 as a whole but also its individual pixels, we obtained both global and local parameters relevant to stellar populations and interstellar dust. We find that, M81 is an old galaxy with the mean age ~ 9.5 Gyr, a stellar mass of $\sim 3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$ (solar mass), an instantaneous star formation rate (SFR) of $\sim 0.29 M_{\odot}/\text{yr}$, and a luminosity of $4.26 \times 10^{11} L_{\odot}$ (solar luminosity). The inner area (dominated by the bulge) of M81 contains the oldest stellar population ~ 10 Gyr in the galaxy, with low SFR and a small amount of dust attenuation; the outer area (dominated by the disk) with a mean age ~ 1 Gyr contains both young and old stars; the youngest stars are ~ 400 Myr and mainly located in the spiral arms at large radii, with high SFR and a large amount of dust attenuation. The spatial distribution map of these physical parameters provides clues for the analysis of the formation and evolution history of M81. The bulge of M81 has been formed by merger in the early universe, and then the disk structure has been produced by the subsequent accretion of the gas of the companion galaxy, while the spiral arm structure is the youngest substructure which has been produced by the disturbance of the gravitational potential of the companion galaxy to the disk. With analysis of the SEDs, we also find interstellar dust in M81 can be heated by radiation from old stellar populations, which potentially induce uncertainties into SFR estimates from far-infrared emission. In the next work, we will perform a morphological decomposition of M81 and study stellar populations and interstellar dust in substructures of this galaxy.

Key words: photometry; dust; stellar content; individual (M81); ISM

星系中的重子发光物质有 3 种,分别是恒星、气体和尘埃,这些物质性质及其空间分布与星系自身的形成和演化机制联系非常紧密。在静止参考系中,紫外、光学和近红外波段主要是恒星的辐射所主导,其中,紫外波段主要观测的是大质量的年轻恒星,而光学和近红外波段的观测主要是探测质量较小的年老恒星的辐射,这些辐射为人们研究恒星形成历史、化学丰度等提供主要线索^[1-5]。星系中的星际介质会吸收或散射恒星的辐射,被加热的尘埃会在中红外和远红外波段中提供辐射。因此,尘埃的分布通常与恒星形成有联系,人们也可以利用尘埃来获得不同的星系物理性质^[6-10]。气体被年轻恒星加热而产生的星云发射线也为人们提供恒星形成活动的线索^[11-13]。

为了探寻这些发光物质的性质,光谱观测是人们最常用的研究方法。例如 Kewley 等^[14]利用斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)的光谱数据研究发现,金属丰度校准的选择对质量-金属丰度(M-Z)关系的形状有显著影响,因此,提出在比较不同的光度金属度或 M-Z 关系时,使用相同的金属度校准至关重要。Pozzetti 等^[15]于 2007 年利用光学波段和近红外波段的星系光

谱样本,对星系恒星质量函数进行了测量。Mao 等^[16]于 2018 年对 NGC 2403 进行光谱观测,发现 NGC 2403 的电离程度在大半径处明显下降。但是光谱观测有自身的局限性,一般的光谱观测由于受到仪器的限制,不容易直接获得星系从紫外到远红外这样宽波段范围的光谱,而且对于角尺度大的近邻星系来说,光谱观测每次只能观测到星系的局部区域^[17-19]。

光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)指的是辐射能量与波长或频率的关系,同样也是获取发光物质背后物理性质的方法。SED 与通常的光谱不同,SED 的分辨率要比光谱的分辨率低得多,而覆盖波长会比普通光谱观测要更广。SED 拟合的原理是通过从多波段的观测图像中获取某系统的辐射能量和波长的关系,通过与模型光谱的比对,反推出该系统的物理参数。只要多波段数据的波长覆盖范围足够广,视场足够大,SED 拟合可以很好地补足光谱观测的不足之处,常用于测量不同系统的物理参数。例如 Declair 等^[20]在 2019 年通过空间分辨 SED 拟合对 NGC 628 不同位置的尘埃消光曲线进行测量,发现尘埃的吸收占主导而不是散射。Nersesian 等^[21]于

2019 年对 DustPedia 项目的多波段近邻星系数据库进行 SED 拟合,发现年老恒星的辐射对尘埃加热的贡献也会非常显著,特别是在早型盘星系当中^[22]。Salim 等^[23]于 2016 年对七十万个星系进行 SED 拟合,发现活动星系核的星系可能会对尘埃加热造成中红外恒星形成率 (Star Formation Rate, SFR) 的高估。

M81 是一个近邻旋涡星系,由于相对其他非本星系团的星系来说,M81 距离地球更近,因此更容易获得高质量的多波段图像观测,可以保证 SED 拟合的准确性。Kong 等^[24]于 2000 年对 M81 每个像素进行了简单星族 SED 拟合得到了 M81 物理性质在空间上的分布,不过星系的每个区域都可能叠加了由不同星族的辐射,简单星族的拟合可能无法准确描述星系的辐射。还有许多对 M81 整体的研究,例如 Pérez-González 等^[25]于 2006 年对 M81 进行了整体和部分子区域的 SED 拟合,发现弥散的尘埃与 M81 最近的恒星形成无关。Verstocken 等^[26]利用星族光谱构建 M81 的 3D 辐射转移模型,发现年老恒星对尘埃的加热有很大的贡献。以上这些研究都说明 M81 是一个多复杂系统集合的星系,星系的不同子区可能有着完全不同的物理参数和形成演化机制,若是能测量不同物理参数在空间位置的变化,能帮助人们更好地了解 M81 的形成和演化历史。为此,本研究将利用 SED 拟合软件 CIGALE^[27]对近邻星系 M81 进行整体和空间分辨的 SED 拟合,目的是得到 M81 整体的物理性质及其在空间上的分布。由于本研究涵盖了范围覆盖远紫外到远红外的数据,数据的数量最多,模型的参数空间也更大,因此,能获得更准确的 M81 整体性质以及不同性质在空间上的分布地图。

本文的主要结构如下:第 1 节详细介绍数据来源、图像处理过程和 SED 拟合的模型和参数设置;第 2 节介绍 SED 拟合的结果;随后在第 3 节对结果进行讨论;第 4 节总结本研究以及介绍对后续工作的计划。

1 数据来源、图像处理和 SED 拟合

1.1 多波段图像数据来源

本工作的数据覆盖了远紫外到远红外波段共

27 个波段的图像数据,这些图像分别来自 GALEX, SDSS 2MASS, WISE, Spitzer, Herchel 望远镜。星系演化探测器 (Galaxy Evolution Explorer, GALEX) 于 2003 年,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射的轨道太空望远镜,其观测包括两个波段 (1 350 ~ 1 750 和 1 750 ~ 2750 Å) 的进行成像,目标是用于通过紫外的观测研究宇宙和星系的形成及演化历史^[28]。紫外线/光学望远镜 (The Ultra-Violet/Optical Telescope, UVOT) 是斯威夫特 (Swift) 伽马射线望远镜搭载的 3 种仪器之一,目的是捕捉 170 ~ 600 nm 波段早期伽马射线爆发余晖产生的紫外线和光学光子,以及对这些余晖的长期观测^[29]。SDSS 位于新墨西哥州阿帕奇山顶天文台,是一个使用 2.5 m 口径望远镜进行的红移巡天项目。其成像在宽波长范围 (3 000 ~ 10 600 Å) 内具有良好的图像质量^[30]。2 μm 全天测量 (Two Micron All Sky Survey, 2MASS), 覆盖了近红外 J (1.25 μm)、H (1.65 μm) 和 Ks (2.16 μm) 波段,其目标是描绘全天的红外辐射图,提供星系、星团及太阳系小天体等研究的数据^[31]。宽场红外探测器 (The Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE) 以 3.4、4.6、12 和 22 μm 波长为中心的波段的滤光片,在 2009 年发射后,通过绘制全天的红外地图,为科学家提供了许多远的星系、恒星和小行星的红外数据^[32]。斯皮策太空望远镜 (Spitzer) 是 NASA 发射的红外空间望远镜,于 2003 年发射升空;而红外阵列相机 (The Infrared Array Camera, IRAC) 是 Spitzer 太空望远镜上的 3 个仪器之一,可同时获得 3.6、4.5、5.8 和 8.0 μm 的波段图像,其目标是研究早期宇宙、搜索和研究褐矮星和超新星,研究超亮星系和活动星系核,发现和原行星以及服务其他各种各样的天文研究项目^[33]。斯皮策多波段成像光度计 (The Multiband Imaging Photometer for Spitzer, MIPS) 是 Spitzer 的另外一个仪器,观测波段为 24、70 和 160 μm,用于探测尘埃辐射^[34]。赫歇尔 (Herchel) 望远镜是欧洲航空局 (European Space Agency, ESA) 发射的红外望远镜,观测波段覆盖 60 到 670 μm,旨在研究恒星和星系的起源和演化、太阳系天体大气和表面的化学成分,以及整个宇宙的分子化学,以帮助理解宇

宙的演化^[35-36]。

M81 是非常著名的星系,因此,人们也积累了 M81 在不同望远镜观测下的数据。表 1 详细记录了本工作所用到的数据的细节。图像处理步骤

主要包括银河消光改正、图像的背景扣除、图像的重采样和卷积。本节接下来的内容将会详细描述这些图像处理细节以及 SED 拟合模型和参数选择。

表 1 本工作所用到的所有数据来源的参数统计

Table 1 Parameter statistics of all data used in this work

Telescope	Filter	Central wavelength(\AA)	Pixel scale (arcsec/pixel)	Resolution FWHM(arcsec)	Photometric flux (mJy)
GALEX	FUV	1 516	1.500	4.30	145.47 \pm 6.70
Swift	UVW2	1 928	1.000	2.50	404.05 \pm 11.16
Swift	UVM2	2 246	1.000	2.50	276.97 \pm 7.65
GALEX	NUV	2 267	1.500	5.30	251.12 \pm 6.99
Swift	UVW1	2 600	1.000	2.50	751.20 \pm 20.76
SDSS	u	3 551	0.396	1.30	1 454.90 \pm 29.10
SDSS	g	4 686	0.396	1.30	4 826.90 \pm 48.27
SDSS	r	6 166	0.396	1.30	9 438.72 \pm 94.39
SDSS	i	7 480	0.396	1.30	13 397.11 \pm 133.97
SDSS	z	8 932	0.396	1.30	17 540.77 \pm 175.41
2MASS	J	12 000	1.000	2.00	22 188.98 \pm 386.99
2MASS	H	16 000	1.000	2.00	25 674.54 \pm 501.46
2MASS	Ks	22 000	1.000	2.00	20 820.15 \pm 393.48
WISE	W1	34 000	1.375	6.10	11 664.98 \pm 64.46
Spitzer	IRAC-1	36 000	0.750	1.66	11 854.87 \pm 237.10
Spitzer	IRAC-2	45 000	0.750	1.72	7 093.28 \pm 141.87
WISE	W2	46 000	1.375	6.40	6 438.86 \pm 41.52
Spitzer	IRAC3	58 000	0.600	1.88	7 596.10 \pm 151.92
Spitzer	IRAC4	80 000	0.600	1.98	9 764.76 \pm 195.30
WISE	W3	120 000	1.375	6.50	7 218.11 \pm 79.92
WISE	W4	220 000	1.375	12.00	6 556.16 \pm 72.92
Spitzer	MIPS-1	240 000	2.400	6.00	5 144.79 \pm 102.90
Spitzer	MIPS-2	700 000	4.000	8.00	93 632.24 \pm 9 363.34
Spitzer	MIPS-3	1 600 000	8.000	38.00	325 776.12 \pm 65 155.50
Herchel	PSW	2 500 000	6.000	18.00	175 424.47 \pm 26 315.19
Herchel	PMW	3 500 000	8.000	35.00	86 986.79 \pm 5 467.17
Herchel	PLW	5 000 000	12.000	36.00	36 209.57 \pm 5 436.14

1.2 银河消光改正

银河系内部富含各种各样的星际介质,这些星际介质会散射或吸收银河系外天体的辐射;短波辐射更容易受到这些星际介质的影响,造成河外天体辐射的红化。为了能精确测量河外星系的物理性质,对银河系产生的消光进行改正是有必要的。为此,本文引用 Fitzpatrick^[37]在 1999 年测得

的银河消光模型来进行不同波段图像的银河消光改正,其中,模型选择波段与总消光的比(R_V)为 3.1。Schlafly 等^[38]于 2011 年测得 M81 在 V 波段的银河消光值为 0.220 mag (Magnitude, 星等)。利用消光模型和 V 波段的消光值,即可反推出不同波长的消光值,进而对不同波段的观测数据进行银河消光改正。

1.3 图像背景扣除

不同的望远镜在观测过程中,不可避免地受到暗电流或者仪器发热的影响,这些噪声也会被记录进图像的背景当中,因此,需要对背景进行扣除。部分望远镜在数据公布之前已经做过背景扣除,但是一般用的是单值背景的扣除方法,这种单值背景的扣除方法可能不适用于背景分布不均匀的图像。因此,对这些原本被单值背景扣除方法处理过的图像进行还原,将所有波段的图像都还原成没有被扣除过背景的状态后再进行二维背景拟合和扣除。

遵循 Mao 等^[39]于 2012 年提到的二维背景拟合方法对所有图像的背景进行建模。首先,将所有图像中高于 3 倍背景标准偏差的像素屏蔽在后

续的二维背景拟合的过程外,剩下的像素定义为背景像素。背景可能分布不均匀,但是在局部区域可以看作是均匀的。将每个波段的图像分割成多个矩形局部背景窗口,每个图像的背景窗口大小都可能不同;要求窗口大小应足够大,以包含足够多的背景像素,同时窗口不能延伸到局部区域以外,因此,需要手动调节每个波段的窗口大小。接着利用局部背景平滑的方法来获取局部背景值,具体做法是每个背景像素值都被矩形窗口包围的所有像素值的中值所取代,随后利用双三次插值产生一个和图像分辨率一样的模型背景图像,最后只需要将模型背景从原始观测图像中减去即可完成背景的扣除,见图 1。

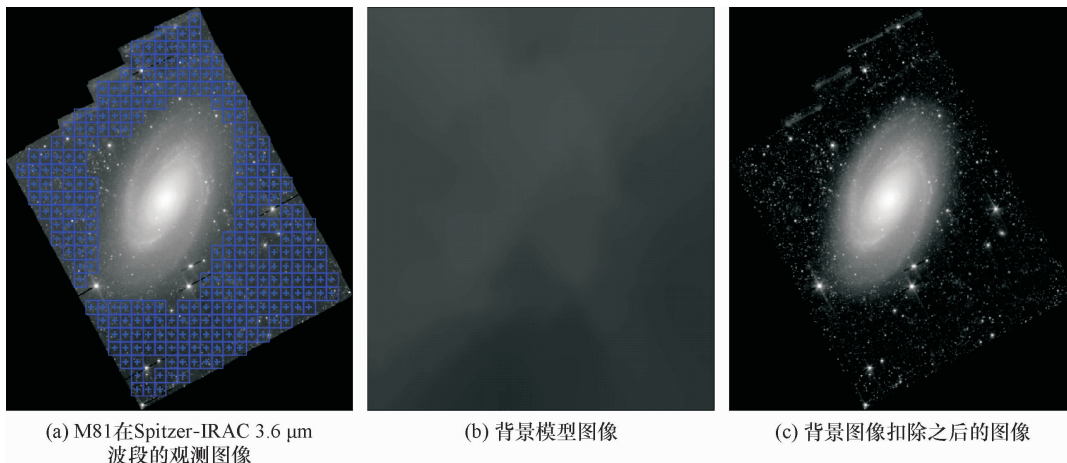


图 1 背景扣除过程的示意图

Fig. 1 Figure of background subtraction process

注:图(a)中蓝色方框表示用于背景模型建模所用到的局部背景的区域,黑色区域是没有观测的区域

图 1 展示了 Spitzer-IRAC 3.6 μm 图像背景扣除的示例。将背景不确定性定义为扣除背景后的所有背景像素值的标准偏差。

1.4 图像的重采样和卷积

如图 1 所示,不同波段的图像有着不同的分辨率和像素尺度,本研究需要对 M81 进行空间分辨的 SED 拟合,也就是要求每个像素都需要进行 SED 拟合,因此需要将所有的图像统一成相同的分辨率和像素尺度。

将图像的像素尺度统一的方法叫图像的重采样(resample),此方法最早来自 Deforest^[40]于 2004 年发表的文章。重采样的原理是将图像的单个像

素值通过平均分配给多个像素或者将多个像素值的和分配给单个像素,达到对齐两个图像像素,统一两个图像的视场以及每个像素观测的空间位置。在所有图像中,像素尺度最大的图像是 Herchel-PLW,因此,对每个图像都用相同的方法将所有扣除了背景的图像统一成与 Herchel-PLW 图像一致的像素尺度。

修改图像的分辨率还需要对图像进行卷积,即需要将统一了像素尺度的图像卷积成相同分辨率的图像。修改图像的分辨率需要对图像卷积一个内核,这个内核是一个使用傅立叶变换的比率在两个点扩散函数(Point Spread Function, PSF)之间

的匹配内核(matching kernel)^[41]。同样地,Herchel-PLW 图像是分辨率最低的图像,因此,将所有图

像都卷积成与 Herchel-PLW 相同的分辨率,见图 2。

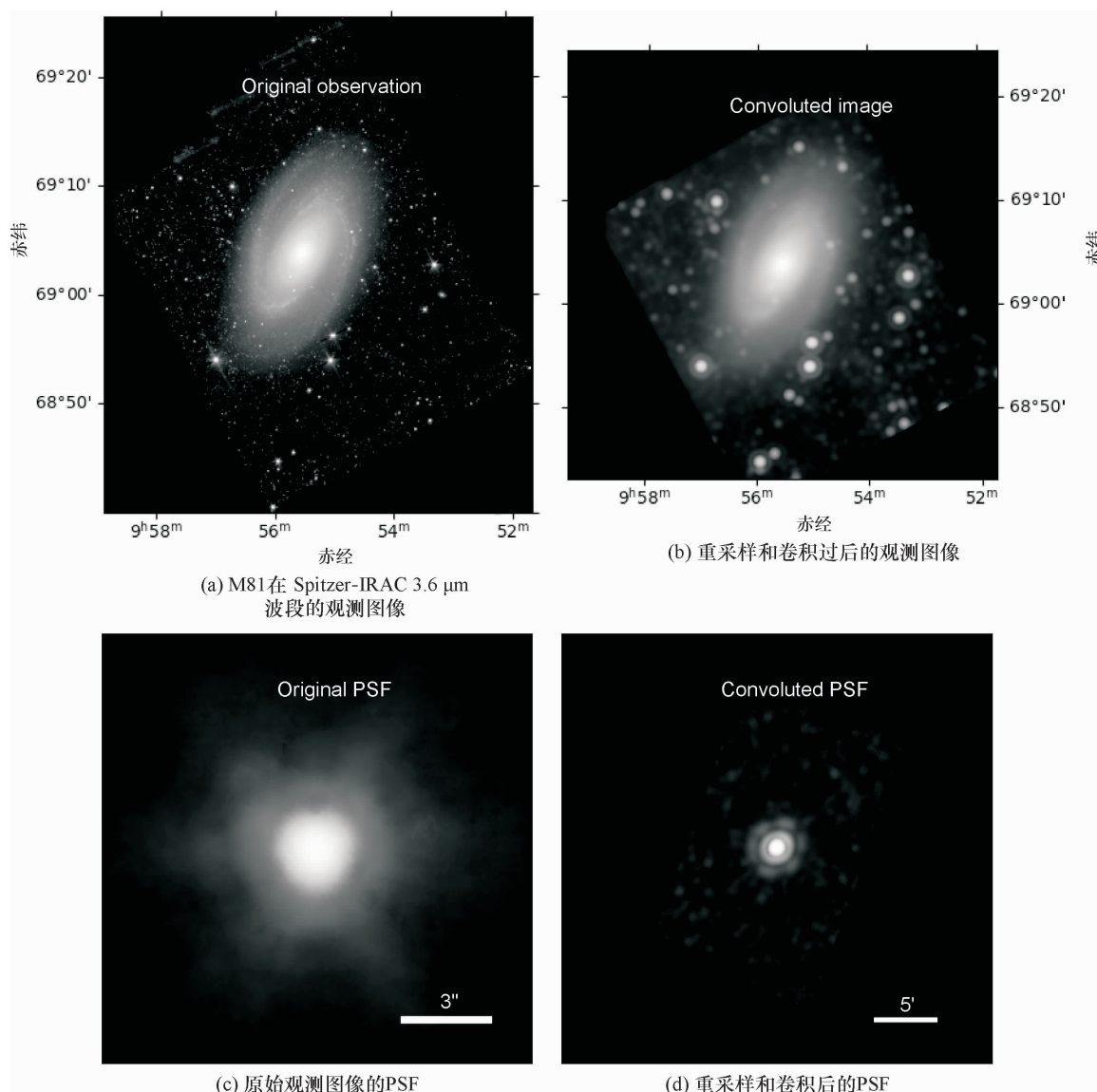


图 2 PSF 卷积示意图

Fig. 2 Figure of PSF convolution

注:横纵坐标表示赤经赤纬

图 2 以 Spitzer-IRAC 3.6 μm 为例,展示了重采样和卷积前后的观测图像及 PSF 图像。

1.5 SED 拟合的模型和参数设置

SED 拟合是本研究的主要研究方法,利用 SED 拟合工具 CIGALE 来对 M81 进行整体和空间分辨的 SED 拟合,也叫像素-像素 SED 拟合。接下来的内容主要描述 SED 拟合原理以及在 SED 拟合中如何选择模型和参数设置。

CIGALE 是一款公共的、优秀的 SED 拟合软

件,其内部集成了用于拟合不同系统的模型和多种望远镜滤光片的响应函数,为人们提供高效准确的 SED 拟合结果。模型的选择是 SED 拟合准确性的基础,其中,模型主要包括星族模型、尘埃模型、气体模型,还有用于计算距离的红移模型。CIGALE 拟合 SED 原理是通过用户指定和输入的模型和参数来计算出相应模型光谱,然后通过分析似然分布(χ^2)得到与用户输入的观测值拟合最好的光谱并输出光谱及其参数。其中,似然分

布計算公式如下:

$$\alpha = \frac{\sum_i f_i \times m_i / \sigma_i^2}{\sum_i m_i^2 / \sigma_i^2} + \frac{\sum_j f_j \times m_j / \sigma_j^2}{\sum_j m_j^2 / \sigma_j^2} \quad (1)$$

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{f_i - \alpha \times m_i}{\sigma_i} \right)^2 + \sum_j \left(\frac{f_j - \alpha \times m_j}{\sigma_j} \right)^2 + \sum_k \left(\frac{f_k - m_k}{\sigma_k} \right)^2 \quad (2)$$

其中, α 表示定標因子, 用於計算光譜的質量或光度。 f_i 和 m_i 分別為觀測和模型的測光流量, f_j 和 m_j 表示觀測和模型廣泛型的物理參數, f_k 和 m_k 分別是觀測和模型的密集型物理參數; σ 表示觀測流量的誤差; 廣泛型物理參數包括質量或光度等隨着擬合可變的自由參數, 密集型物理參數主要是由用戶輸入的參數空間決定。因此, CIGALE 的模型和參數設置得越多就能輸出足夠多不同的光譜, 但是太多的模型和參數的設置可能會加重計算機的計算負擔, 運行時間也會增長, 因此合理地選擇模型和參數能提高擬合的效率。

星族模型主要包括恆星形成歷史 (Star Formation History, SFH) 模型和簡單星族 (Simple Stellar Population, SSP) 模型。SFH 模型能夠很好地描述旋渦星系, 以及最近發生星暴活動或 SFR 下降的星系可變 - 延遲 (flexible-delayed) 模型^[42]; 在空間解析 SED 擬合時, 將星族的模型 e 折疊時間僅設置成 100 Myr (百萬元), 這是因為簡單假設所有星族都遵循一個短時標的星爆後恆星形成率隨時間下降; 星族年齡設置成 251、350、500、700、1 000、1 400、2 000、2 800、4 000、5 500、8 000、10 000 和 13 000 Myr 是為了降低參數之間的步長, 增大參數空間以獲得更準確的星族年齡參數。Bruzual 等^[43] 在 2003 年提到的 SSP 模型, 其中選擇 Chabrier 的初始質量函數模型, 且金屬豐度設置為 0.02 (太陽金屬豐度), 這是 Kong 等^[24] 在 2000 年得到的結果。SFH 和 SSP 模型的其他參數設置都遵循 Nersesian 等^[21] 2019 年的文章。

塵埃模型主要包括塵埃消光模型和塵埃輻射模型。塵埃消光模型選擇考慮了紫外吸收駝峰 (2 175 Å Bump), 是 Calzetti 等^[44] 於 2000 年提出的塵埃消光模型, 參數空間的設置參考 Declair 等^[20] 2019 年的文章。塵埃輻射模型的選擇和參數的設置都遵循 Nersesian 等^[22] 2019 年的文章, 選

擇了 Draine 等^[45] 於 2014 年提到的模型。

最後 CIGALE 只內置了一個由 Inoue^[46] 在 2011 年提出的星云輻射模型, 其參數的設置保留默認值。而紅移模型來自 Meiksin^[47] 2006 年的文章, 在本研究中用於計算距離。

2 SED 擬合結果展示

2.1 M81 整體擬合結果

首先對 M81 的整體做一次 SED 擬合, 目的是得到 M81 整體的性質。將一個包含了複雜多系統的星系當成一個整體是一種簡單的假設, 是用于測量星系整體性質的常用手段。對於星系整體的流量隨波長的关系, 需要提前對每個波段進行孔径測光。使用 Nilson^[48] 1973 年測得的 M81 星系大小作為測光孔径, 以定標誤差和背景不確定性的正交作為誤差棒, 該孔径也記錄在 NASA 河外數據庫 (NED) 中, 孔径中心的赤經赤緯為 RA = 148.888 221°, Dec = 69.065 295°, 長軸為 26 arcmin, 短軸為 14 arcmin, 方向角為 -23° (以正北為 0°, 逆時針為正); 另外人為屏蔽所有孔径內的前景星和 M81 星系中心的 AGN (Active galactic nucleus, 活動星系核), 表 1 記錄了每個波段孔径測光的結果。見圖 3。

圖 3 表示 M81 的整體擬合結果。由圖 3 可見, M81 整體 SED 擬合結果與通過測光得到的觀測值有着很高的匹配程度, 通過卡方檢驗得到模型光譜的預測值與實際觀測值的卡方值為 0.53。SED 擬合給出的結果如下: M81 整體的星族年齡為 9.5 Gyr (十億元)、恆星形成時標為 2.6 Gyr (恆星形成率達到峰值的年齡, 隨後恆星形成率緩慢下降)、恆星質量約 $3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$ (太陽質量)、瞬時恆星形成率約為 $0.29 M_{\odot}/\text{yr}$ 、光度約 $4.26 \times 10^{11} L_{\odot}$ (太陽光度)。以 10 Myr 為年齡分界分為年輕恆星和年老恆星, SED 結果展示年老恆星的质量約為 $3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$, 光度占比約為 95.64%; 年輕恆星的质量約為 $2.72 \times 10^7 M_{\odot}$, 光度占比約為 4.36%。M81 星系內塵埃 V 波段的消光值為 0.17 mag, 2 175 埃駝峰大小與銀河系的值相同 (Amplitude = 3), 塵埃質量約 $2.63 \times 10^8 M_{\odot}$ 、光度約 $4.6 \times 10^{10} L_{\odot}$ 。

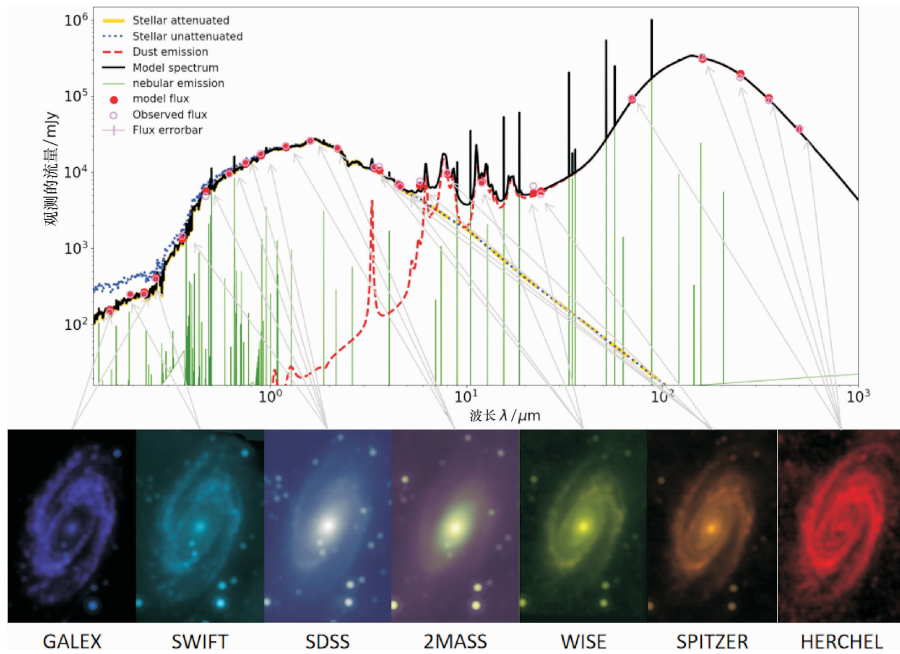


图 3 M81 整体 SED 拟合结果示意图。下行表示每个望远镜的观测图像的示意图

Fig. 3 Figure of M81 integrated SED fitting results. The lower row figure are showing the observed image of each telescope
注:粉红色圆圈和粉色竖线表示通过测光获得的 M81 在各个波段的流量及其误差,其中大部分误差比圆圈符号小,红色实心圆点表示模型光谱预测的 M81 各个波段的流量值,黑色实线表示模型光谱,红色虚线表示尘埃辐射光谱,蓝色虚线表示未消光恒星光谱,黄色虚线表示消光后恒星光谱,绿色线表示星云辐射

2.2 M81 空间分辨 SED 拟合结果

到不同物理参数在空间位置上的分布,见图 4。

对图像的每个像素进行 SED 拟合,目的是得

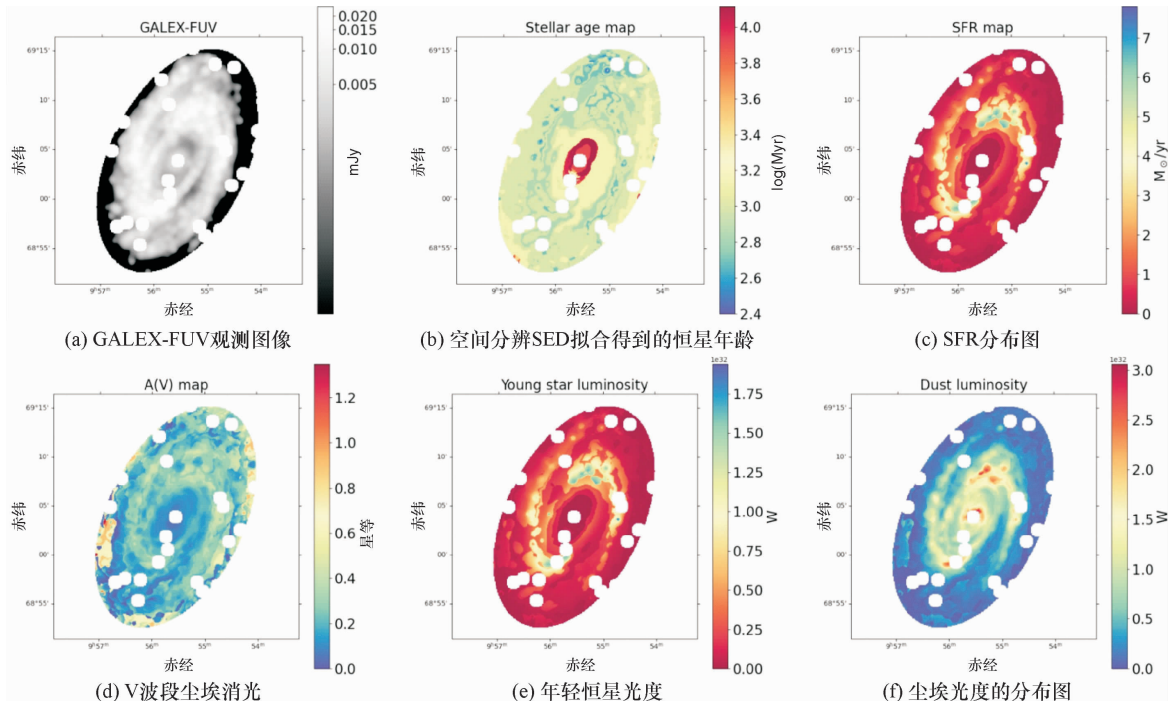


图 4 M81 空间分辨 SED 拟合结果示意图

Fig. 4 Figure of M81 spatial resolution SED fitting results

注:所有的图像都有着相同的物理尺度,纵横坐标分别表示赤经、赤纬,图像中的白色区域表示未参与 SED 拟合的区域

图 4 展示了空间解析 SED 拟合结果,结果显示,不同的星族会分布在 M81 不同的空间位置。这些结果展示了星系内部区域包含了星系中最年老的星族,其年龄大约为 10 Gyr,年龄大约 1 Gyr 相对年轻的恒星主要分布在大半径的星系外部区域上,而最年轻的年龄约为 400 Myr 的恒星则主要分布在 M81 的外旋臂当中。简单假设所有星族都遵循一个短时标的星爆后恒星形成率随时间下降,因此,将所有像素区域的恒星形成时标都设置为 100 Myr。其中,星系的内部区域主要是核球结构主导,外部区域是盘结构的主导。从恒星形成率来看,M81 星系的恒星形成率都相对较低,其中,恒星形成率最高的区域位于 M81 的外旋臂上,而 M81 其他区域都保持着更低的恒星形成率。尘埃消光主要发生在外旋臂当中,消光值约 0.4 mag;而星系其他区域受到尘埃消光的影响相对更小,特别是核球几乎不受尘埃消光的影响。以 10 Myr 作为年轻和年老恒星的年龄分界,空间解析 SED 拟合给出了年轻恒星的主要在旋臂的位置提供自己的光度的贡献。从尘埃分布来看,尘埃的主要分布在 M81 的内外旋臂上,而旋臂间以外区域的尘埃光度相对更低。

3 讨 论

从图 2 的结果展示,M81 内部区域也就是核球区域,是以年老恒星为主导,几乎没有年轻恒星的辐射,颜色较红,恒星形成率低下,受到尘埃消光的影响小。M81 的旋臂间区域同时存在年轻和年老恒星,也会受到相当一部分尘埃消光的影响。而 M81 的外旋臂区域则与核球的性质完全相反,以年轻恒星为主导,恒星形成率是全星系最高的区域,受到严重的尘埃消光。这些结果都能说明 M81 的星族是主要按照不同形态子结构的位置而分布的,这个结果支持了不同形态系统的物理性质及其形成和演化机制不同的图景^[49-51]。

从尘埃光度在空间的分布地图可见,虽然外旋臂聚集了大量的年轻恒星,尘埃消光也相对其他区域更严重,但是尘埃的分布不只是单单分布在外旋臂中,以年老恒星为主导的核球区域也出现了明显的尘埃光度分布。说明了不只是年轻恒星,年老恒星对尘埃的加热也提供了相当一部分

的贡献。红外光度常常用于估计系统的恒星形成率^[52-54];因此,结果警示,若是利用 M81 的红外光度进行恒星形成率估计的话,可能会错误地高估了真实的恒星形成率。

图 4 中各个物理参数的空间分布分析,可以得到 M81 的形成和演化图景。M81 的核球中分布着整个星系最年老的恒星,这些恒星年龄约 10 Gyr,SFR 分布图也表示核球区域已经几乎没有恒星形成活动。因此,M81 的核球可能是在宇宙的早期就已经以碰撞的机制诞生,这种快速剧烈的过程促进了短时间的星爆,耗散大量的气体;随着气体耗散,恒星形成活动停止,直到现在已经几乎没有年轻恒星分布^[55-56]。随着时间的推移 M81 可能会从伴星系中吸收气体,并且将气体安置在核球以外的区域,这种缓慢的吸积作用为恒星形成活动提供了长时间的“养分”,从而可以持续不断地产生恒星,这可能也是盘上共存了年轻和年老恒星的原因,星系外部区域的盘型结构也因此产生^[57-58]。在盘结构成型之后,伴星系的引力势能同样可能会扰动盘上的气体,这种扰动会令盘上的气体聚集,随之产生旋臂结构^[59-61]。

4 总 结

本工作利用 SED 拟合软件 CIGALE,通过整体和局部区域的 SED 拟合对近邻早型旋涡星系 M81 (NGC 3031) 进行远紫外到远红外光谱的建模,旨在探究 M81 星系的星族和尘埃的性质以及它们在空间上的分布。为了保证 SED 拟合的准确性,收集了来自 GALEX、Swift、SDSS、2MASS、WISE、Spitzer 和 Herchel 一共 27 波段的数据,并且将所有数据统一成相同像素尺度和分辨率的图像。通过对 M81 整体和每个像素进行 SED 拟合,得到了一系列 M81 星族和尘埃的性质及其在空间上的分布。

SED 拟合发现 M81 是一个整体以星族年龄为 95 亿年老恒星主导的、恒星质量约 $3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$,瞬时恒星形成率约为 $0.29 M_{\odot}/\text{yr}$,光度约 $4.26 \times 10^{11} L_{\odot}$ 的早型旋涡星系,假设金属丰度为太阳丰度 ($Z = 0.02$),且不随空间变化。其中,年老恒星的质量约为 $3.54 \times 10^{11} M_{\odot}$,光度占比约为

95.64% ; 年轻恒星的质量约为 $2.72 \times 10^7 M_{\odot}$, 光度占比约为 4.36% 。 V 波段的尘埃消光值为 0.17 mag, 2175 埃驼峰大小为 3, 尘埃质量约 $2.63 \times 10^8 M_{\odot}$, 光度约 $4.6 \times 10^{10} L_{\odot}$ 。

空间解析 SED 拟合结果显示 M81 的核球包含了星系中最年老的星族, 其年龄大约为 100 亿年, 恒星形成率低且不受尘埃消光影响; 年龄大约 10 亿年相对年轻的恒星主要分布在大半径的盘上, 且共存了年轻和年老恒星; 而最年轻的年龄约为 4 亿的恒星则主要分布在 M81 的外旋臂当中、恒星形成率高、严重受到尘埃消光影响; 不同的星族主要分布在不同形态的子结构当中。

通过对尘埃辐射 SED 的分析, 得出不只是年轻恒星, M81 的年老恒星的辐射也会对尘埃的加热作出贡献。

各个物理参数的分布图结果可以为推测 M81 的形成和演化提供线索, M81 可能在早期就通过碰撞形成了年老的核球; 后来通过吸收伴星系的气体产生年轻恒星和年老恒星共存的盘结构; 在盘成型之后受到伴星系的引力势能影响产生最年轻的外旋臂结构。

在后续的研究中, 将会对 M81 的核球和盘进行解构, 利用相同的方法对不同的子结构进行整体和空间解析 SED 拟合, 旨在研究不同子结构的星族和尘埃的性质及其在空间上的分布。

致谢 感谢广州大学天体物理物理中心全体老师对本工作的建议。这项研究利用了 NASA/IPAC 河外数据库 (NED) 的数据, 使用了 NASA 的天体物理数据系统 (ADS)。

参考文献:

- [1] Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift universe [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 351: 1151-1179.
- [2] Madau P, Ferguson H C, Dickinson M E, et al. High-redshift galaxies in the Hubble deep field: Colour selection and star formation history to $z \sim 4$ [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1996, 283: 1388-1404.
- [3] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 105 low-redshift galaxies [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2003, 341: 54-69.
- [4] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. The origin of the mass-metallicity relation: Insights from 53,000 star-forming galaxies in the sloan digital sky survey [J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 613, 898-913.
- [5] Kewley L J, Ellison S L. Metallicity calibrations and the mass-metallicity relation for star-forming galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 681, 1183-1204.
- [6] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 500, 525-553.
- [7] Calzetti D, Armus L, Bohlin R C, et al. The dust content and opacity of actively star-forming galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 533: 682-695.
- [8] Draine B T, Li A. Infrared emission from interstellar dust. IV. The silicate-graphite-PAH model in the post-spitzer era [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 657: 810-837.
- [9] Calzetti D, Kinney A L, Storchi-Bergmann T, et al. Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law [J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, 429: 582.
- [10] Li A, Draine B T, et al. Infrared emission from interstellar dust. II. The diffuse interstellar medium [J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, 554: 778-802.
- [11] Steidel C C, Rudie G C, Strom A L, et al. Strong nebular line ratios in the spectra of $z \sim 2-3$ star forming galaxies: First results from KBSS-MOSFIRE [J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 795: 165.
- [12] Moustakas J, Kennicutt R C, Jr, Tremonti C A, et al. Optical spectroscopy and nebular oxygen abundances of the spitzer/SINGS galaxies [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2010, 190: 233-266.
- [13] Pettini M, Kellogg M, Steidel C C, et al. Infrared observations of nebular emission lines from galaxies at $Z \sim 3$ [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 508: 539-550.
- [14] Kewley L J, Ellison S L. Metallicity calibrations and the mass-metallicity relation for star-forming galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 681: 1183-1204.
- [15] Pozzetti L, Bolzonella M, Lamareille F, et al. The VIMOS VLT deep survey. The assembly history of the stellar mass in

- galaxies; From the young to the old universe[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 474: 443.
- [16] Mao Y W, Lin L, Kong X. Internal variations in empirical oxygen abundances for giant H II regions in the galaxy NGC 2403 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 853: 151.
- [17] Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. The seventh data release of the Sloan digital sky survey[J]. *Astronomical Journal Supplement*, 2009, 182:543-558.
- [18] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 1197-1242.
- [19] Sánchez S F, Kennicutt R C, Gil de Paz A, et al. CALIFA, the calar alto legacy integral field area survey. I. Survey presentation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 538: 8.
- [20] Declair M, De Looze I, Boquien M, et al. Revealing the dust attenuation properties on resolved scales in NGC 628 with SWIFT UVOT data[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486, 743-767.
- [21] Nersesian A, Xilouris E M, Bianchi S, et al. Old and young stellar populations in DustPedia galaxies and their role in dust heating[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 624: 80.
- [22] Clark C J R, Verstocken S, Bianchi S, et al. DustPedia: Multiwavelength photometry and imagery of 875 nearby galaxies in 42 ultraviolet-microwave bands[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 609: 37.
- [23] Salim S, Lee J C, Janowiecki S, et al. GALEX-SDSS-WISE legacy catalog (GSWLC): Star formation rates, stellar masses, and dust attenuations of 700,000 low-redshift galaxies[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, 227: 2.
- [24] Kong X, Zhou X, Chen J, et al. Spatially resolved spectrophotometry of M81: Age, metallicity, and reddening maps[J]. *The Astronomical Journal*, 2000, 119: 2745-2756.
- [25] Pérez-González P G, Kennicutt R C J, Gordon K D, et al. Ultraviolet through far-infrared spatially resolved analysis of the recent star formation in M81 (NGC 3031) [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 648: 987-1006.
- [26] Verstocken S, Nersesian A, Baes M, et al. High-resolution, 3D radiative transfer modelling. II. The early-type spiral galaxy M 81 [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 637: 24.
- [27] Boquien M, Burgarella D, Roehlly Y, et al. CIGALE: A python code investigating galaxy emission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 622A: 103.
- [28] Martin D C, Fanson J, Schiminovich D, et al. The galaxy evolution explorer: A space ultraviolet survey mission[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2005, 619:1-6.
- [29] Roming P W A, Kennedy T E, Mason K O, et al. The swift Ultra-Violet/Optical telescope [J]. *Space Science Reviews*, 2005, 120:95-142.
- [30] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m telescope of the sloandigital sky survey [J]. *The Astronomical Journal*, 2006, 131:2332-2359.
- [31] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. The two micron all sky survey(2MASS) [J]. *The Astronomical Journal*, 2006, 131(2):1163-1183.
- [32] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. The wide-field infrared survey explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance [J]. *The Astronomical Journal*, 2010, 140:1868-1881.
- [33] Fazio G G, Hora J L, Allen L E, et al. The infrared array camera (IRAC) for the spitzer space telescope [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154: 10-17.
- [34] Rieke G H, Young E T, Engelbracht C W, et al. The multiband imaging photometer for spitzer (MIPS) [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154: 25.
- [35] Griffin M J, Abergel A, Abreu A, et al. The herschel-SPIRE instrument and its in-flight performance [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, 518: 3.
- [36] Poglitsch A, Waelkens C, Geis N, et al. The photodetector array camera and spectrometer (PACS) on the herschel space observatory [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, 518: 2.
- [37] Fitzpatrick E L. Correcting for the effects of interstellar extinction [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1999, 111:63-75.
- [38] Schlafly E F, Finkbeiner D P. Measuring reddening with Sloan digital sky survey stellar spectra and recalibrating SFD [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 737:103.
- [39] Mao Y W, Kennicutt R C, Jr Hao C N, et al. Characterizing ultraviolet and infrared observational properties for galaxies. I. Influences of dust attenuation and stellar population age [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 757, 52.
- [40] Deforest C E. On re-sampling of solar images [J]. *Solar Physics*, 2004, 219: 3-23.

- [41] Gordon K D, Engelbracht C W, Rieke G H, et al. Common-resolution convolution kernels for space and ground-based telescopes[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123: 1218.
- [42] Ciesla L, Boselli A, Elbaz D. The imprint of rapid star formation quenching on the spectral energy distributions of galaxies [J]. Astronomy & Astrophysics, 2016, 585: 43.
- [43] Bruzual G, Charlot S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 344: 1000-1028.
- [44] Calzetti D, Armus L, Bohlin R. The dust content and opacity of actively star-forming galaxies[J]. The Astrophysical Journal, 2000, 533: 682-695.
- [45] Draine B T, Aniano G, Krause O, et al. Andromeda's dust[J]. The Astrophysical Journal, 2014, 780: 172.
- [46] Inoue A K. Rest-frame ultraviolet-to-optical spectral characteristics of extremely metal-poor and metal-free galaxies [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 415: 2920-2931.
- [47] Meiksin A. Colour corrections for high-redshift objects due to intergalactic attenuation[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 365: 807-812.
- [48] Nilson P. Uppsala general catalogue of galaxies[M]. Uppsala: Astronomiska Observatorium, 1973.
- [49] Simard L, Mendel J T, Patton D R, et al. A catalog of bulge + disk decompositions and updated photometry for 1.12 million galaxies in the Sloan Digital Sky Survey[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 196: 11.
- [50] Hudson M J, Stevenson J B, Smith R J, et al. Colours of bulges and discs within galaxy clusters and the signature of disc fading on infall[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 409: 405-420.
- [51] Head J T C G, Lucey J R, Hudson M J, et al. Dissecting the red sequence: The bulge and disc colours of early-type galaxies in the Coma cluster[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 440: 1690-1711.
- [52] Calzetti D, Kennicutt R C, Engelbracht C W, et al. The calibration of mid-infrared star formation rate indicators[J]. The Astrophysical Journal, 2007, 666: 870-895.
- [53] Chary R, Elbaz D. Interpreting the cosmic infrared background: Constraints on the evolution of the dust-enshrouded star formation rate[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 556: 562-581.
- [54] Inoue A K. Star formation rate from dust infrared emission[J]. The Astrophysical Journal, 2002, 570: 97.
- [55] Kauffmann G. The age of elliptical galaxies and bulges in a merger model[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996, 281: 487-492.
- [56] Hopkins P F, Bundy K, Croton D, et al. Mergers and bulge formation in Λ CDM: Which mergers matter? [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 715: 202-229.
- [57] Sparre M, Springel V. The unorthodox evolution of major merger remnants into star-forming spiral galaxies[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 470: 3946-3958.
- [58] Kormendy J, Kennicutt J, ROBERT C. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2004, 42: 603-683.
- [59] Kormendy J, Norman C A. Observational constraints on driving mechanisms for spiral density waves. [J]. The Astrophysical Journal, 1979, 233: 539-552.
- [60] Carlberg R G, Freedman W L. Dissipative models of spiral galaxies[J]. The Astrophysical Journal, 1985, 298: 486.
- [61] Fujii M S, Baba J, Saitoh T R. The dynamics of spiral arms in pure stellar disks[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 730: 109.

【责任编辑: 陈 钢】