

从远紫外到远红外—— $z=0$ 处L-Galaxies模型下 星系的多波段光谱*

韦莉萍¹ 罗煜^{2,3†} 康熙^{1,2}

(1 浙江大学物理学院天文研究所 杭州 310058)

(2 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(3 国家基础学科公共科学数据中心 北京 100190)

摘要 星系形成的半解析模型是研究星系形成的重要工具,当前主流的半解析模型不仅可以重现许多观测的星系性质,也可以用来预言今后可能的大规模巡天观测结果.使用L-Galaxies半解析模型生成星系的恒星形成历史,考虑尘埃吸收以及再辐射,结合基于SKIRT (Stellar Kinematics Including Radiative Transfer)辐射转移过程的机器学习模型starduster,预测星系的多波段能谱分布.结果显示starduster模型的尘埃消光略微不足,导致在紫外及光学波段亮度略高于观测数据,在更长的红外波段, starduster较好地复现了亮端的星系数目,不过在暗端处稍显不足.同时,把经验的尘埃消光结合红外的能谱模板作为经验模型,也可以得到从远紫外到远红外的光度函数.经验模型表现出良好的尘埃消光效果,并且其总体红外光度函数与观测结果相符.虽然由于模板的观测数据限制,无法完全重现暗端星系的数量,但经验模型能够较好地预测红外各个波段的光度函数.

关键词 星系; 尘埃消光, 多波段, 光度函数, 光谱能量分布

中图分类号: P144; **文献标识码:** A

1 引言

越来越多的观测设备投入使用极大地拓展了获取星系的多波段光谱能量分布(spectral energy distribution, SED)数据的能力.例如,紫外(ultra-violet, UV)波段的星系演化探测器(Galaxy Evolution Explorer, GALEX)、光学波段的斯隆数字巡天项目(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)、近红外(near infrared, NIR)的2 μ m全天巡视(Two Micron All Sky Survey, 2MASS)、中红外(mid-infrared, MIR)的斯皮策空间望远镜(Spitzer Space

Telescope)和韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)、远红外(far infrared, FIR)的赫歇尔望远镜(Herschel Telescope)和亚毫米的麦克斯韦望远镜(James Clerk Maxwell Telescope, JCMT),为我们提供了不同物质、不同时刻宇宙演化的观测数据.

星系多波段SED的观测研究正变得越来越普遍,如近邻宇宙中的GAMA (Galaxy And Mass Assembly survey)^[1]和高红移宇宙中的COSMOS (Cosmic Evolution Survey)^[2]、CANDELS (The Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extra-

2023-06-15收到原稿, 2023-07-28收到修改稿

*国家重点研发课题项目(2022YFA1602903), 空间站科学研究基金项目(CMS-CSST-2021-A03、CMS-CSST-2021-A04), 中央高校基本科研业务费专项资金(226-2022-00216)资助

[†]luoyu@pmo.ac.cn

galactic Legacy Survey)^[3]和DEVILS (The Deep Extra-galactic VISIBLE Legacy Survey)^[4]. 这些工作尝试通过多波段的SED解释星系的演化(详细可参看Conroy在2013年关于星系能谱分布的综述^[5]). 例如, $z = 0$ 时, 紫外到光学波段明亮的星系, 恒星形成活动比较剧烈; 高红移、亮红星系占主导地位^[6-8]. 通过星系的不同波段光谱我们可以推断出各种星系不同物质组分的物理特性, 因此在实际的理论模拟中, 计算每个星系的光谱就显得尤为重要. 反过来, 丰富的星系光谱观测数据也可以对理论模型进行一定的限制.

目前为止, 大多数理论模型都致力于描述星系在光学波段的物理特性, 一方面是因为大部分的星系巡天都是在光学波段, 另一方面因为尘埃吸收和再辐射模型要么粗略不准确, 要么受限于计算资源. 星系形成的半解析模型(semi-analytic model, SAM)很好地描述了在含宇宙学常数的冷暗物质(Λ cold dark matter, LCDM)模型下星系的形成与演化, 提供了一系列星系的物理性质与演化历史, 如恒星质量、核盘质量、核盘尺度、气体质量、气体盘半径以及恒星形成历史(star formation history, SFH)、金属富集历史、超新星反馈、并合过程等^[9-14]. 利用这些结果, 主要是恒星形成历史与金属富集历史, 加上星族合成(stellar population synthesis, SPS)模型, 例如Bruzual和Charlot在2003年的经典工作^[15], 对于给定的恒星初始质量函数(initial mass function, IMF), 同时在指定恒星种群的年龄和金属丰度时, 可以计算对应星系星光的未衰减光谱能量分布. 如果在此基础上结合尘埃消光, 便可获得星系在紫外到光学波段的光度函数. 但如何计算在对应的波长处被吸收的能量, 这部分能量在红外又如何再辐射, 成为能否成功预测星系多波段能谱分布的难点.

目前有两种方式来实现预测星系的多波段能谱分布. 第一种, 考虑具体的星系尘埃分布及性质, 详细计算尘埃的辐射转移过程. 尘埃的辐射转移(radiative transfer, RT)计算模型在最近二十年取得了长足的进展^[16-22]. 如果知道星系的具体恒星分布、尘埃、气体等物理性质, 便可以计算尘埃对辐射的吸收、尘埃加热并辐射可获得星系从紫外

到红外波段的SED. 但不同于星系形成的流体动力学模拟, 半解析模型无法准确给出具体的星系的几何结构, 故我们需要相应的建模的过程, 前人已经做了很多好的尝试^[23-25].

另外一种方法, 利用经验的消光曲线^[26-29]估计消光后的星光能谱并计算尘埃吸收的能量, 假设这部分能量在红外波段完全辐射出来^[30-33], 那么我们可以用观测推导或者观测校正的光谱能量分布模板^[34-37]来描述尘埃辐射波段部分. 过去有很多SAM在经验的消光曲线基础上, 假设光深依赖于星系的金属丰度、观测倾角等参数, 得到紫外到光学波段的SED^[11-12, 30-31, 38-39]. 在观测上, 某个波段的星系光度和总红外光度有一定的关系^[40], 由此这些模板建立了一个以总红外光度为基准的光谱库, 也就是说, 总红外光度决定了红外部分能谱分布的形状. 总而言之, 这两种方法均能较好地预测星系的多波段能谱分布, Fontanot等^[41]将第一种方法应用于MORGANA (Model for the Rise of Galaxies and Active Nuclei) SAM得到的统计结果如光度函数, 与Silva等^[16]利用辐射转移方法的GRASIL (GRAphite-SILicate approach) SAM等进行比较, 结果符合得很好.

本文的目标是预测SAM从远紫外到远红外的光度函数. 为此, 我们利用L-Galaxies的星系形成半解析模型来得到星系恒星的内禀光度分布(不考虑尘埃吸收和辐射), 利用两种不同的模型来模拟尘埃的消光和再辐射. 在第一种模型中, 我们利用基于SKIRT辐射转移模拟^[22]的starduster^[42]模型产生星系多波段SED. 该模型采用机器学习的方法, 在一定程度上不仅减少了计算量, 与观测的数据结果也符合较好; 在第二种模型中, 我们利用经验的尘埃消光曲线在紫外与光学波段进行消光, 且红外部分使用SED模板以期预测完整的多波段光度函数作为经验模型与starduster形成对照. 第2部分, 介绍我们使用的半解析模型以及计算消光和尘埃再辐射的方法; 第3部分, 我们展示了不同波段的光度函数以及与观测比较的结果; 第4、5部分分别是讨论和总结展望.

2 模型描述

2.1 星系形成与星族合成模型

我们使用L-Galaxies在2015年发布的星系形成的半解析模型^[43], L-Galaxies的半解析模型包含了星系形成的诸多演化过程, 诸如气体的辐射冷却、恒星形成、超新星反馈、活动星系核反馈、星系并合、星际介质(interstellar medium, ISM)和星团内介质(intracluster medium, ICM)的金属增丰以及恒星种群的演化等. 此处我们只简单描述该模型的物理过程以及我们所用的物理参数, 详细内容可参见L-Galaxies发展的系列工作^[43–46].

L-Galaxies的星系形成模型, 基于大规模N体宇宙学数值模拟构建的暗晕并合树, 首先为每个坍塌的暗物质晕分配一定比例的重子物质, 考虑到宇宙再电离的影响, 这一比例随红移和暗物质晕的质量大小变化; 随后考虑这些重子物质随暗物质坍塌的过程中被激波加热至位力温度, 然后会辐射冷却下落到暗晕引力势阱中央, 形成冷气体盘. 冷气体盘为恒星的形成提供燃料, 超大质量恒星死亡后的超新星爆发将产生巨大的能量, 并产生重元素释放到周围的介质中. 这些能量会重新加热冷气体, 也可能将部分气体抛射到暗晕外围, 并会在稍后的某个时刻重新下落冷却. 而对于星系中央的超大质量黑洞主要通过并合过程实现冷气体的吸积增长, 也可以通过热气体的静态吸积增长, 进而释放出可以抑制热气体冷却的能量, 这种形式的活动星系核反馈最终会减少大质量星系中的恒星形成. 当卫星星系进入中央星系的位力半径内, 潮汐力会剥离热气体、冷气体和恒星, 冲压剥离也可以去除部分气体, 这些环境效应会对卫星星系, 尤其是大质量星系群/团中的卫星星系的恒星形成起到抑制作用. 除此之外, 随着暗物质晕的并合, 其对应的星系在一定的延迟时间之后也会并合. 若子晕被完全破坏, 它的星系就会在动力摩擦时间后并合进入中央星系触发星暴, 并在中央星系的中间产生一个核球. 另外, 若是星系盘变得足够大以至于动力学不稳定, 那么该星系也会在长期的演化过程中形成一个核球.

恒星星族合成模型是星系形成理论的重要组

成部分, 因为它们将预测的恒星质量、年龄和金属丰度与各种波长的可观测辐射联系起来. 本文我们采用Bruzual和Charlot 2003年的星族合成模型^[15]. 对于每个星系, 我们将其恒星成分分为盘和核球, 分别记录不同年龄和金属丰度的恒星质量. 然后, 我们将此分布与星族合成(stellar population synthesis, SPS)模型^[15]进行卷积, 获得星光的内禀SED.

本文中我们使用L-Galaxies应用在千禧模拟(Millennium Simulation^[47])的暗晕并合树上. 千禧模拟是大规模纯暗物质N体数值模拟, 追踪了边长为 $500 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ (哈勃常数 $H_0 = h \times 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$)的立方体中暗物质在标准冷暗物质宇宙模型下的演化, 暗物质和暗能量对宇宙总能量密度的贡献为 Ω_m 、 Ω_Λ , 其应用的宇宙学参数如下: $\Omega_m = 0.272$, $\Omega_\Lambda = 0.728$, 哈勃常数 $H_0 = 70.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 使用Chabrier 2003年^[48]的IMF.

2.2 含尘埃辐射转移的机器学习模型

机器学习模型starduster^[42]利用半解析模型的恒星形成历史等结果, 给定星系的几何参数, 再利用SKIRT辐射转移程序^[22]模拟尘埃产生衰减和再辐射的物理过程, 产生神经网络的训练数据, 之后便可以根据星系的几何参数和恒星形成历史预测星系的多波段SED. 由于半解析模型不能够准确地给出星系的内部结构, 故我们假设一个星系有着理想的几何结构, 由一个盘、一个核球和一个尘埃盘组成. 作为辐射转移模拟的输入, 星系的密度分布由以下参数形式^[49–50]给出:

$$\rho^{\text{disk}}(r, z) \propto \exp\left(-\frac{r}{r^{\text{disk}}} - \frac{|z|}{h^{\text{disk}}}\right), \quad (1)$$

$$\rho^{\text{bulge}}(r, z) \propto \left(\frac{\sqrt{r^2 + z^2}}{b}\right)^{-q} \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{r^2 + z^2}}{b}\right)^{-1/n_s}\right], \quad (2)$$

$$\rho^{\text{dust}}(r, z) \propto \exp\left(-\frac{r}{r^{\text{dust}}} - \frac{|z|}{h^{\text{dust}}}\right), \quad (3)$$

其中 r 、 z 是极坐标, ρ^{disk} 、 ρ^{bulge} 、 ρ^{dust} 分别是星系盘、核球、尘埃盘的密度分布, r^{disk} 、 r^{bulge} 、 r^{dust} 分别是盘、核球、尘埃盘的半径, h^{disk} 、 h^{dust} 分别

是星系盘、尘埃盘的高度, n_s 是Sérsic指数, q 、 b 是尘埃盘有效半径所对应的合适参数.

而尘埃质量可以通过额外的尘埃演化模型^[51–53]或由观测的尘埃与金属的比率^[54–55]获得. 本文中我们使用Lacey等人2016年工作中的假设尘埃质量 M_{dust} 正比于星系冷气体的金属质量 $M_{\text{metal-cold-gas}}$, 即 $M_{\text{dust}} = 0.334 \times M_{\text{metal-cold-gas}}$ ^[54]. 我们将该模型得到的星系尘埃质量作为星系恒星质量 M_* 的函数, 与Popping等^[51]利用半解析模拟追踪尘埃演化在 $z = 0$ 处的结果(该模拟结果取中位数)几乎一致, 如图1所示, 表明我们对于尘埃质量的假设是合理的. 此外, 因尘埃弥散在冷气体中, 故假设尘埃盘的半径 r_{dust} 与从半解析模型中获取到的冷气体半质量半径尺度^[56]保持一致. 半解析模型的物理结果加上尘埃质量与尘埃盘尺寸等物理参数作为机器学习模型starduster的输入, 我们就可以预测多波长光谱能量分布.

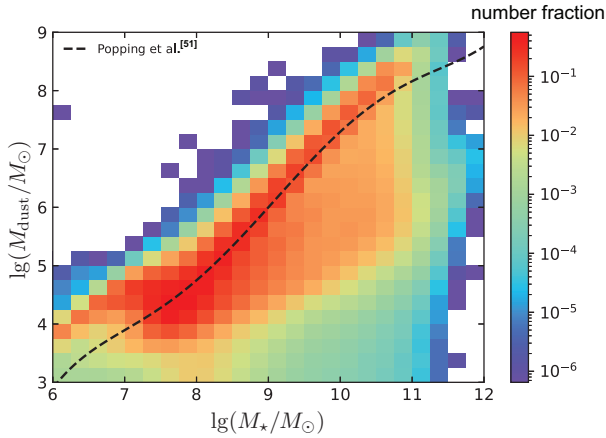


图 1 $z = 0$ 时, 星系尘埃质量随星系恒星质量的分布. 黑色虚线为Popping等^[51]的模拟数据中位数. 结果显示尘埃质量随着恒星质量的增大而增大, 颜色越红表明该处星系数密度越大.

Fig. 1 The dust mass of galaxies as a function of their stellar mass at redshift $z = 0$. The dashed black line is the median fiducial data from Popping et al. ^[51]. The underlying color map shows dust mass becomes larger as stellar mass increases, which indicates that the reddest has the highest number density of the galaxies.

2.3 经验模型

我们使用的另外一个模型是利用半解析模型的恒星形成历史等结果, 结合经验的尘埃消光曲

线, 预测消光后紫外到光学波段的SED, 由此计算得出被尘埃吸收的能量, 尘埃吸收的能量再被转移到红外波段辐射而出, 结合使用红外的SED模板, 进而得到星系的红外波段的光度函数. 我们称这种方法为经验模型.

2.3.1 尘埃消光

在本文中, 我们采用前人的工作^[41, 57], 使用参数化的尘埃消光得到消光后星系的能谱分布, 以下是简要介绍. 该消光方式结合了Devriendt等^[58]对于均匀ISM的假设与Charlot和Fall在2000年的“二成分”模型^[59](以下简称CF2000). 假定星系盘中星际介质的光学深度 $\tau_{\lambda}^{\text{ISM}}$ 随波长变化为:

$$\tau_{\lambda}^{\text{ISM}} = (1+z)^{-1} \left(\frac{A_{\lambda}}{A_V} \right)_{Z_{\odot}} \left(\frac{Z_{\text{gas}}}{Z_{\odot}} \right)^s \times \left(\frac{\langle N_{\text{H}} \rangle}{2.1 \times 10^{21} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-2}} \right), \quad (4)$$

此处尘埃衰减参数定义为尘埃消光后的光度 L_{λ} 和星系内禀光度 L_{λ}^0 之间的比率, 也即星系消光前后的星等 m_{λ} 、 m_{λ}^0 之差, 通常以 A_{λ} 表示该值大小:

$$A_{\lambda} = m_{\lambda} - m_{\lambda}^0 = -2.5 \lg \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}^0}, \quad (5)$$

A_V 表示尘埃衰减在波长5500 Å处的参数. 其中平均氢柱密度我们使用气体百分比 f_{gas} 来定义^[38]:

$$\begin{aligned} \langle N_{\text{H}} \rangle &= 6.8 \times 10^{21} f_{\text{gas}} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-2} \\ &= 6.8 \times 10^{21} \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{gas}} + M_{\star}} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-2}, \end{aligned} \quad (6)$$

一些工作^[13, 30–31, 57]对平均氢柱密度作了更新, 使其正比于冷气体质量除以气体尺度的平方:

$$\langle N_{\text{H}} \rangle = \frac{M_{\text{cold}}}{1.4 m_{\text{p}} \pi (a R_{\text{gas,d}})^2}, \quad (7)$$

$R_{\text{gas,d}}$ 是冷气体的半质量半径长度, 1.4表示氢气的存在, m_{p} 是气体的分子质量, 取 $a = 1.68$ 是为了让 $\langle N_{\text{H}} \rangle$ 代表指数圆盘质量的加权平均柱密度. 根据Guiderdoni等^[38]的结果, 计算光深中的消光曲线取决于气体金属丰度 Z_{gas} , 并基于太阳邻域与大麦哲伦云和小麦哲伦云之间的插值: 对于 $\lambda < 2000$ Å, 参数 $s = 1.35$; 对于 $\lambda > 2000$ Å, $s = 1.6$. 太阳金属丰度 $Z_{\odot}$ 的消光曲线 $\left(\frac{A_{\lambda}}{A_V} \right)_{Z_{\odot}}$ 取自Cardelli等

人1989年的工作^[27], Z_{gas} 表示星系中气体的金属丰度.

基于CF2000的“二成分”模型^[59], 考虑年轻恒星在其诞生云(Birth Clouds, BC)中的衰减, 比恒星诞生云的有限寿命(我们假设等于 10^7 yr)年轻的恒星会受到平均垂直光学深度 $\tau_{\lambda}^{\text{BC}}$ 差异衰减的影响随波长的变化:

$$\tau_{\lambda}^{\text{BC}} = \tau_{\lambda}^{\text{ISM}} \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \left(\frac{\lambda}{5500 \text{ \AA}} \right)^{-0.7}, \quad (8)$$

其中 μ 由随机高斯偏差给出, 平均值为0.3, 标准偏差为0.2, 在0.1和1处被截断. 最后, 为了计算实际的尘埃消光结果, 对每一个星系给一个随机的倾角 θ ,

$$A_{\lambda}^{\text{ISM}} = -2.5 \lg \frac{1 - \exp(-\tau_{\lambda}^{\text{ISM}} \sec \theta)}{\tau_{\lambda}^{\text{ISM}} \sec \theta}, \quad (9)$$

$$A_{\lambda}^{\text{BC}} = -2.5 \lg \exp(-\tau_{\lambda}^{\text{BC}}), \quad (10)$$

即对于年轻恒星(寿命 $< 10^7$ yr), 其尘埃消光使用(10)式; 对于年老恒星(寿命 $> 10^7$ yr), 其尘埃消光使用(9)式. 此外, 由于L-Galaxies得到的SFH中年轻恒星占比很少, 故在本文中暂不考虑恒星诞生云的消光.

2.3.2 尘埃再辐射

如前所说, 在估计了尘埃吸收的能量之后, 根据能量守恒, 这部分能量在红外部分再辐射(忽略散射). 基于总的红外光度决定红外光谱的形状这一假设, 我们可以用红外部分的光谱能量分布模板来描述尘埃辐射波段部分的光度函数.

有两种基本的方法来构建红外光谱的模板. 第一种是使用尘埃模型以及标准辐射转移方程的数

值或解析解来创建模板库, 并与近邻宇宙下的观测光谱进行比较来校准. 这种方法是由Desert等人于1990年开创的^[60], 并且后续有许多学者在此基础上进行发展^[30–31, 58]. Desert等人于1990年提出了尘埃辐射的3个主要来源: 多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)、非常小的尘粒和大的尘粒^[60]. 尘粒由石墨和硅酸盐组成, 每种成分的热特性由尺寸分布和热力学状态决定. 假设大的尘粒处于接近热平衡状态, 那么它们的辐射可以描述为修改的黑体光谱. 而小的尘粒和多环芳烃可能处于热平衡和单光子加热之间的中间状态, 容易受到温度波动的影响, 并且它们的辐射光谱比修改后的黑体光谱宽得多. 详细的尺寸分布使用自由参数建模, 参数由对应模型符合观测约束来校准, 例如消光曲线、观测到的红外颜色和局部星系的红外光谱.

第二种方法是直接使用观测到的一系列星系的SED模板^[34–35, 61–62]. 他们根据已发布的ISO (The Infrared Space Observatory)、IRAS (Infrared Astronomical Satellite)和NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer, NICMOS)数据以及之前未发布的IRAC (Infrared Array Camera)、MIPS (Multi-Band Imaging Photometer for Spitzer)和IRS (The InfraRed Spectrograph)数据构建了详细的SED模板, 模拟了基于单个黑体具有与波长相关发射率的远红外SED. 表1展示了几个不同的SED模板所涵盖的波长范围以及红外光度范围.

表 1 不同SED模板的基本信息
Table 1 Summary of different SED templates

Name	Wavelength/ μm	IR luminosity [$\lg(L_{\text{IR}}/L_{\odot})$]	Dust mass [$\lg(M_{\text{dust}}/M_{\odot})$]	Num
Chary & Elbaz ^[34]	$0.1 - 3 \times 10^5$	8.09 – 13.57	/	105
Dale & Helou ^[35]	0.36 – 1100	8.43 – 13.55	/	105
Rieke et al. ^[62]	$4.02 - 3 \times 10^5$	9.75 – 13.00	/	14
Safarzadeh et al. ^[37]	30.07 – 806.47	7.49 – 13.13	5.85 – 9.14	159

图2是在给定总红外光度的情况下,不同模版的SED比较(黑色实线为文献[34]的SED模板,黑色虚线为文献[35]的SED模板,灰色实线为文献[62]的SED模板,黑色点线为文献[37]的SED模板),同时分别随机选取了starduster模拟计算得出的10条SED(彩色实线),其中starduster的10条SED是在指定总红外光度值附近随机选取得到的.图2可以看到,100 μm 以前包含了以PAH、大尘粒、小尘粒为主的3种辐射源,各个SED模板对3种辐射源的处理方式不同导致了在100 μm 波段以前SED的差异.以Rieke等人的模板^[62]为例,PAH以及近红外辐射(即17 μm 附近之前)都比较少,在更亮总红外光度下的SED愈发明显,更亮的光度意味着它们的UV也更亮,也就是正在诞生恒星,而诞生恒星会伴随着一些PAH的谱线特征,这说明Rieke的模板中对于恒星诞生星系在红外波段的处理相较其他模板有较大差异.对于starduster来说,在 $\lambda < 10 \mu\text{m}$ 处明显相比其他模板高估了对应的光度,10–100 μm 相较其他模板低估了对应的光度, $\lambda > 100 \mu\text{m}$ 则稍稍高于其他模板,可以理解为在总红外光度确定的情况下, starduster相较各个模板数据在 $\lambda > 10 \mu\text{m}$ 向右平移了.我们猜测可能是starduster的尘埃温度相较SED模板的尘埃有效温度设定略低,因温度较高的尘埃成分的辐射会增强了中红外的整体尘埃SED,并有助于将辐射峰转移到更短的波长^[63].

3 结果

3.1 紫外到光学波段

我们首先展示了 $z=0$ 时在静止参考系下从FUV (far-ultraviolet)到NIR (near-infrared)的光度函数.在图3中,我们展示了使用GALEX的FUV和NUV (near-ultraviolet)、SDSS的u、g、r、i、z共5个波段、2MASS的Ks波段以及IR的光度函数(如图中给出的标注信息).

整体来看,经验模型与观测数据非常吻合,只是略微高估了GALEX FUV和NUV波段中最暗星系的数量.可以看到使用机器学习的starduster模型在紫外波段的亮端明显高估了星系的数目,显然是由于starduster的尘埃消光不够,这也可以从IR的光度函数中看到,总红外光度明显低于观测值.starduster中关于尘埃消光部分是基于Trayford等人2020年的工作^[64],故我们单独把消光曲线在V波段(5500 $\text{\AA}$)的消光值作为尘埃面密度($\Sigma_{\text{dust}} = \frac{M_{\text{dust}}}{2\pi r_{\text{dust}}^2}$,其中 r_{dust} 为尘埃盘半径)的函数与其模拟值(取中位数)^[64]进行比较,结果如图4.若是我们将星系的观测角度均视为侧向(edge-on),消光参数的分布与模拟结果一致,表明消光是足够的,不过这显然是不合理的.而给定每个星系一个随机的观测角度,此时可见随机观测角度得到的消光比模拟值稍微小了一些.

需要注意的一点是,图3可看出starduster与未消光的经验模型相比略亮.这是因为二者在将恒星形成历史输入到星族合成模型进行计算时,对星系的恒星年龄的设置有所不同,进而导致得到的星系光谱略有不同.简单来说,L-Galaxies记录的每个星系的恒星形成历史描述的是该星系在不同年龄 $\{t_1, t_2, \dots\}$ 分别有多少恒星质量 $\{m_1, m_2, \dots\}$,而starduster在计算星系光谱时,先增加一个初始年龄 $\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$,即有 m_1 质量的一批恒星在 t_0-t_1 年龄之间均匀分布,以此类推.而这与经验模型的处理方式相比,显然会有更多年轻的恒星,故而导致starduster较之经验模型会更亮一些.

尽管如此, starduster相比经验模型,在IR部分的光度函数物理意义更自洽,因为starduster的IR表现的是尘埃吸收的内禀能量,并不受限于星系倾斜角度的变化,那么它在红外波段的光度函数会有更准确的物理解释.而经验模型对尘埃的吸收能量(即总红外光度)受限于倾斜角度,这一点我们也可以从(9)式看出来.

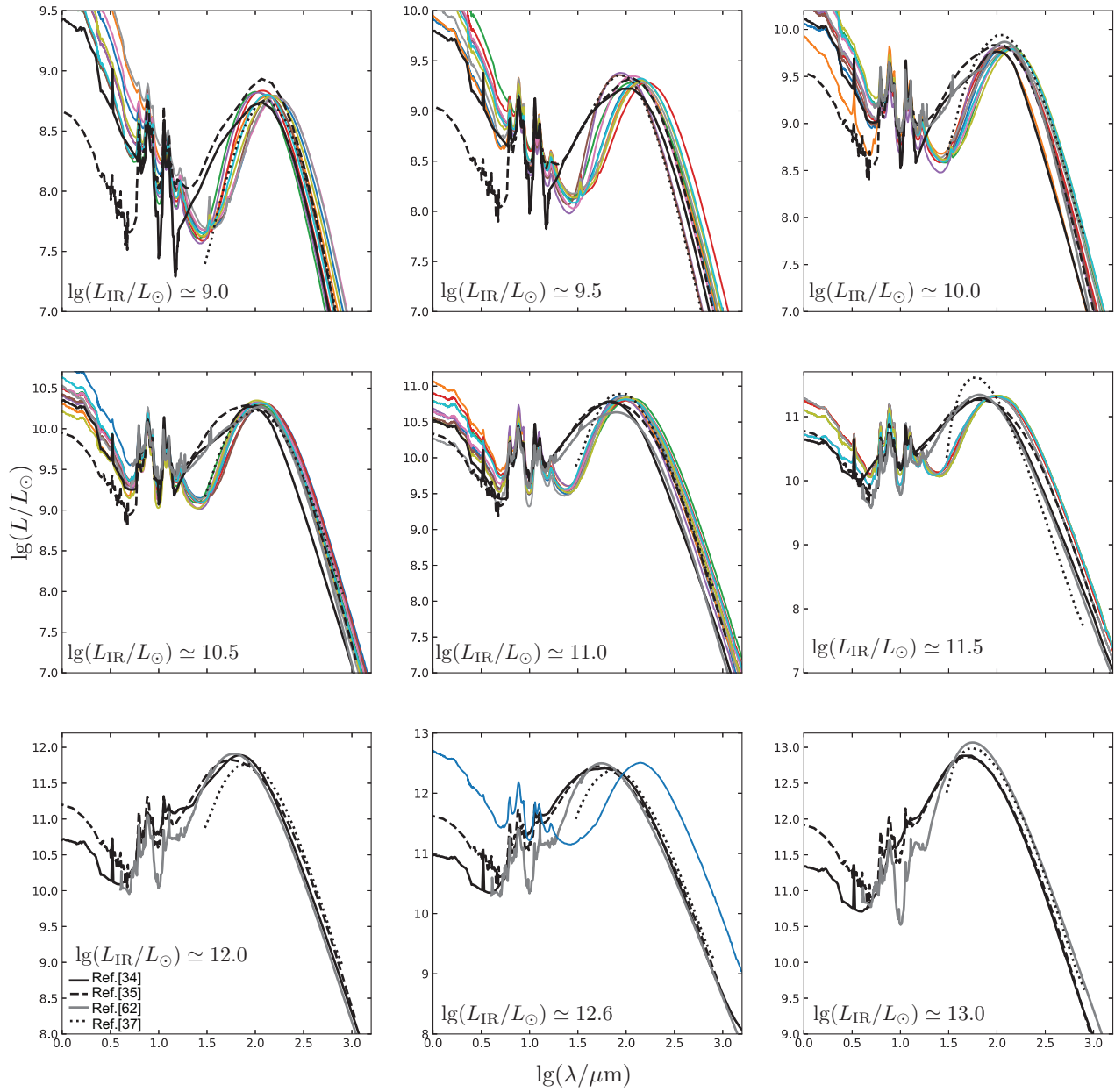


图 2 尘埃再辐射的SED模板比较(Chary等人模板^[34]使用黑色实线, Dale等人模板^[35]使用黑色虚线, Rieke等人模板^[62]使用灰色实线, Safarzadeh等人模板^[37]使用黑色点线), starduster模拟计算得出的10条SED (彩色线), 图中展示了总红外光度分别为 $10^9 L_\odot$ 、 $10^{9.5} L_\odot$ 、 $10^{10} L_\odot$ 、 $10^{10.5} L_\odot$ 、 $10^{11} L_\odot$ 、 $10^{11.5} L_\odot$ 、 $10^{12} L_\odot$ 、 $10^{12.6} L_\odot$ 、 $10^{13} L_\odot$ 的SED.

Fig. 2 Comparison of the dust emission templates of Chary et al.^[34] (solid black line), Dale & Helou^[35] (dashed black line), Rieke et al.^[62] (solid gray line), Safarzadeh et al.^[37] (dotted black line), and ten random SEDs simulated from starduster (solid colorful lines). The nine panels show the dust emission templates used in this work for bolometric IR luminosities of $10^9 L_\odot$, $10^{9.5} L_\odot$, $10^{10} L_\odot$, $10^{10.5} L_\odot$, $10^{11} L_\odot$, $10^{11.5} L_\odot$, $10^{12} L_\odot$, $10^{12.6} L_\odot$, $10^{13} L_\odot$.

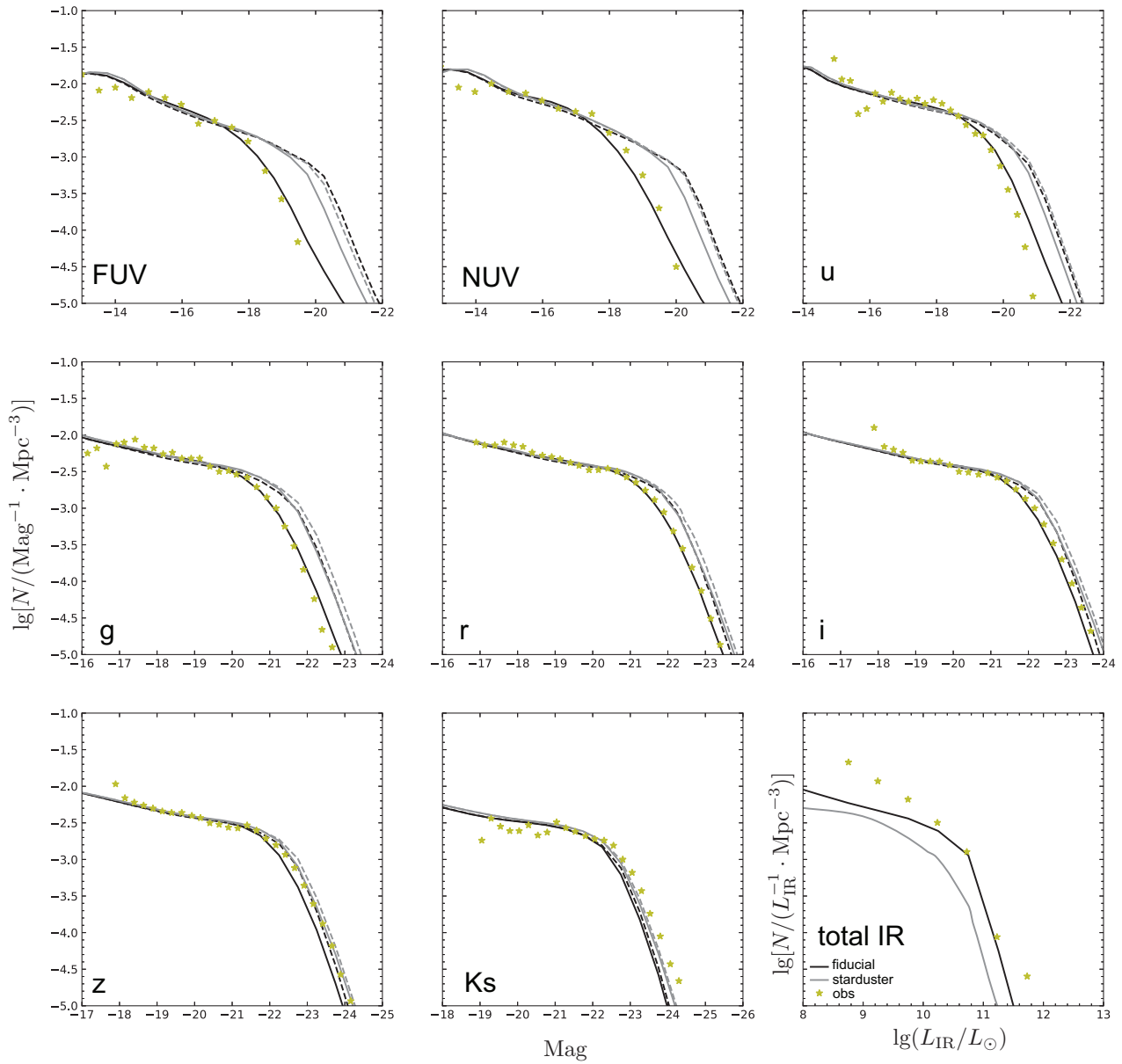


图 3 $z = 0$ 时各个波段(FUV、NUV、SDSS (u, g, r, i, z)、Ks 以及总红外)的光度函数且所有的星系观测倾角为随机角度。其中黑色虚线和黑色实线分别是经验模型未经尘埃消光与尘埃消光后的结果, 灰色虚线和灰色实线分别是 starduster 模型未经尘埃消光与尘埃消光后的结果, 右下子图中黑色实线和灰色实线分别为经验模型和 starduster 的总红外光度的光度函数。图中黄色星标为观测数据, 其中 FUV 和 NUV 来自 Wyder 等^[65], u, g, r, i, z 和 Ks 来自 Bell 等^[66], 总红外光度来自 Rodighiero 等^[67]。

Fig. 3 Luminosity functions at $z = 0$ in the FUV, NUV, SDSS (u, g, r, i, z), and Ks bands, as well as the total IR (8–1000 μm), and all the galaxies are observed as random angle. The solid (dash) black line is our empirical model with (without) dust recipe, and similarly, the solid (dash) gray line shows the result of the starduster model with (without) dust recipe. The black and gray lines in the lower right panel are total IR calculated by our empirical and starduster models, respectively. The yellow star at each panel is from observation data, FUV and NUV panels are from Wyder et al.^[65], u, g, r, i, z, Ks are from Bell et al.^[66], and total IR data is from Rodighiero et al.^[67].

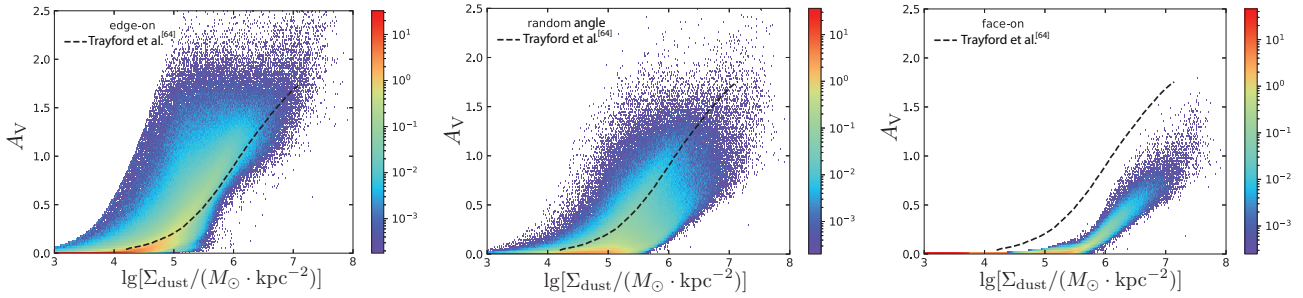


图4 消光参数 A_V 作为尘埃面密度的函数, 色图表示starduster的 A_V 随着尘埃面密度的增大而增大, 色图越红, 该处的星系数密度越大. 同样的尘埃面密度下, 显然观测倾角越大(侧向), 消光越严重. 其中黑色虚线为Trayford等^[64]在随机角度下的模拟数据中位数.

Fig. 4 The A_V value of galaxies as a function of their average dust surface density Σ_{dust} . The underlying color map shows that starduster's A_V becomes larger as dust density increases, which indicates that the reddest has the highest number density of the galaxy. For a given dust density, more edge-on (higher inclination) galaxies also tend to have a higher attenuation curve. The dashed black line is simulated median data in random angle from Trayford et al.^[64].

3.2 红外波段

本节主要展示经过尘埃再辐射的红外波段的光度函数. 图5、6展示了我们的模型在静止参考系下 $z = 0$ 处Spitzer IRAC 3、4、5、8 μm 波段, JWST MIRI 11、15、21 μm 波段, Spitzer MIPS 24 μm , Herschel PACS 70、100、160、250、350、500 μm 波段以及JCMT 850 μm 波段下的光度函数. 灰色实线展示了starduster在红外各个波段的光度函数结果, 其他颜色实线展示了经验模型分别使用不同的红外光谱模板得到的各波段光度函数. IRAC 3、4、5 μm 波段的经验模型中, 使用Chary等人的SED模板^[34]与观测数据基本符合, 仅在暗端星系数量不足. 而Dale等人的模板^[35]得到的结果在3、4 μm 波段整体都低估了星系数目, 在4、8 μm 波段对暗端的预测略不足. 在波长更长的远红外波段中, 经验模型使用的SED模板表现相似, 除了暗端的情况, 在中等及亮端的光度函数都能够与观测数据较好地符合, 而Dale等人的模板^[35]整体高估了在850 μm 波段的星系数目. 经验模型使用不同红外SED模板在光度函数上表现出的微小差异与图2中SED的差别是相对应的. 以Dale等人的模板^[35]为例, 图2可以看到在指定总红外光度 $L_{\text{IR}}^{\text{tot}} < 10^{11} L_{\odot}$ 时, 在 $\lambda < 5 \mu\text{m}$ 时对应光度较小,

在图5中表现为3、4 μm 波段处暗端星系数目的低估; 在 $\lambda \sim 1000 \mu\text{m}$ 附近的光度总是略微高于其他模板, 这就对应图6中在850 μm 波段下无论是相较于其他模板还是观测数据其整体都高估星系数目.

使用starduster模型得到的光度函数整体趋势与观测数据保持一致, 从图2结合已有分析, 对于给定的总红外亮度, 在 $\lambda < 10 \mu\text{m}$ 处明显相比其他模板高估了对应的光度, 而在20–100 μm 相较于其他模板又低估了对应的光度, 在 $\lambda > 100 \mu\text{m}$ 则与其他模板表现差异不大. 故从图5的红外部分光度函数来看, 在IRAC波段, starduster跟其他模板类似, 相较模板仅在亮端稍稍高出; 在JWST的中红外20 μm 附近的波段, starduster的光度函数整体总是低于各个模板; 在25–70 μm 波段, 结合前后波段, 我们可以合理猜测, starduster的光度函数整体仍总是低于各个模板, 但是随着波长的增大, 与各个模板的差距会逐渐缩小; 在Herschel波段, starduster跟其他模板差异不大, 只是在拐折处略低. 但是具体到暗端starduster的预测与观测有稍大的偏差. 至于850 μm 波段, starduster与Dale模板类似, 在图2中, $\lambda \sim 1000 \mu\text{m}$ 附近的光度总是略高, 这就对应应在850 μm 波段下starduster相较观测数据整体都高估星系数目.

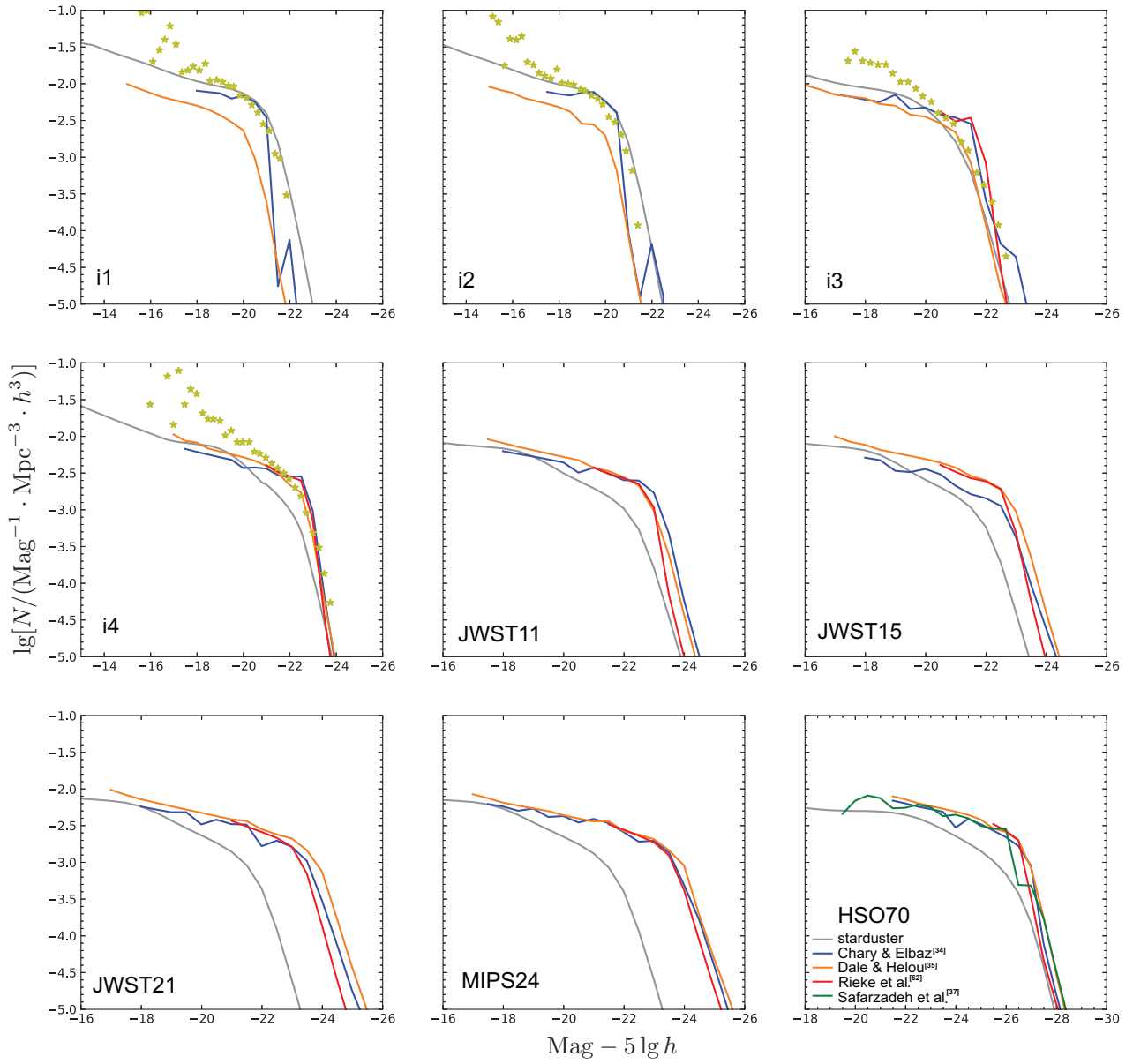


图 5 $z = 0$ 时各个波段的光度函数且所有的星系观测倾角为随机角度。其中灰色实线代表 starduster 模型，蓝色、橘色、红色和绿色分别展现了使用 Chary 等^[34]、Dale 等^[35]、Rieke 等^[62] 和 Safarzadeh 等^[37] 的 SED 模板得到的结果。图中黄色星标为观测数据，其中 i1、i2、i3、i4 的观测数据来自 Vlahakis 等^[68]。

Fig. 5 Luminosity functions at $z = 0$ for the Spitzer IRAC band $3.6 \mu\text{m}$ (i1), $4.5 \mu\text{m}$ (i2), $5.8 \mu\text{m}$ (i3) and $8 \mu\text{m}$ (i4), the JWST MIRI band $11 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, $21 \mu\text{m}$, the Spitzer MIPS band $24 \mu\text{m}$, the Herschel PACS band $70 \mu\text{m}$ as labeled in each panel, and all the galaxies are observed as random angle. The solid gray line in each panel is our starduster model. Solid blue, orange, red, and green show the results with Chary & Elbaz^[34], Dale & Helou^[35], Rieke et al.^[62] and Safarzadeh et al.^[37], respectively. The yellow star at each panel is from observation data, i1, i2, i3, and i4 panels are from Vlahakis et al.^[68].

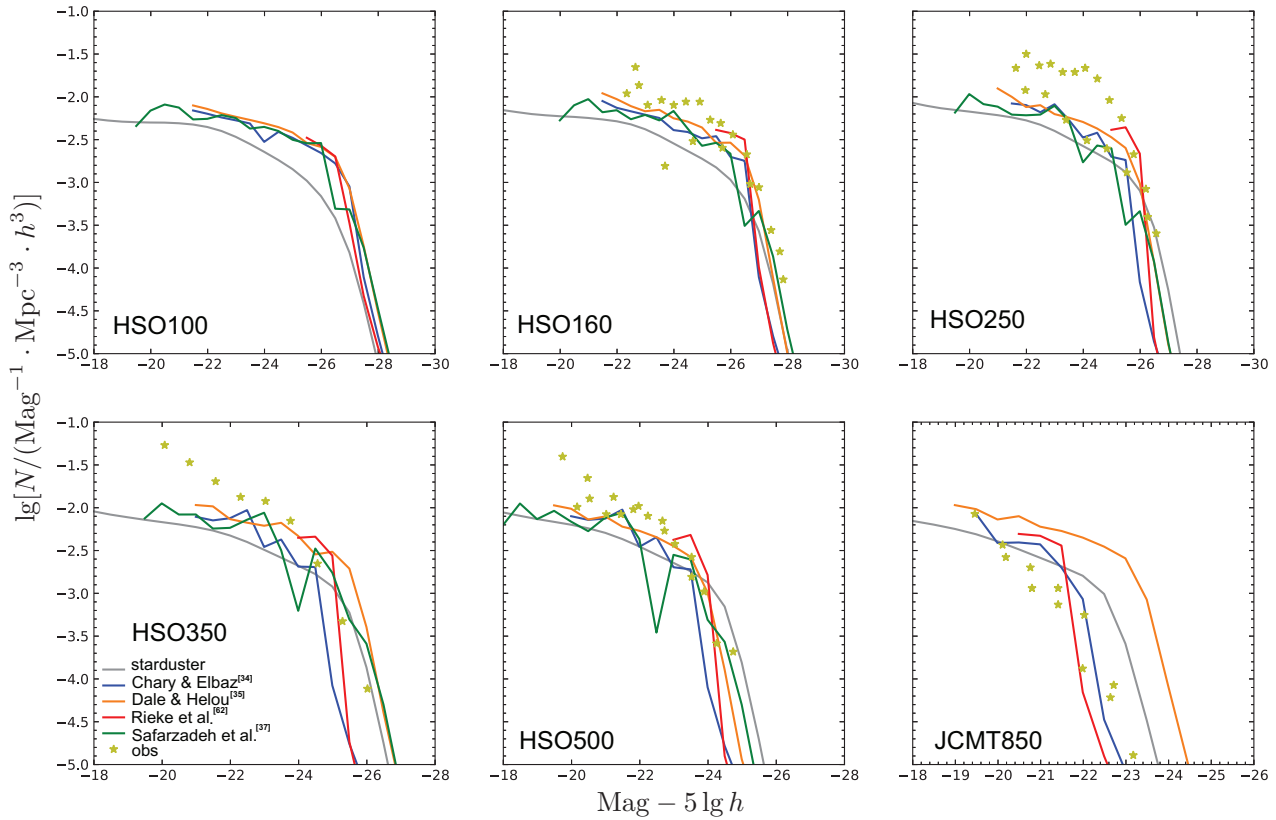


图 6 $z = 0$ 时各个波段的光度函数且所有的星系观测倾角为随机角度。其中灰色实线代表starduster模型, 蓝色、橘色、红色和绿色分别展现了使用Chary等^[34]、Dale等^[35]、Rieke等^[62]和Safarzadeh等^[37]的SED模板得到的结果。图中黄色星标为观测数据, 其中160 μm 和250 μm 观测数据来自Dunne等^[69], 350 μm 和500 μm 观测数据来自Negrello等^[70], JCMT 850 μm 的观测数据来自Dunne等^[69]。

Fig. 6 Luminosity functions at $z = 0$ for the Herschel PACS band 100 μm , 160 μm , SPIRE band 250 μm , 350 μm , 500 μm and the JCMT 850 μm as labeled in each panel, and all the galaxies are observed as random angle. The solid gray line in each panel is our starduster model. Solid blue, orange, red, and green show the results with Chary & Elbaz^[34], Dale & Helou^[35], Rieke et al.^[62] and Safarzadeh et al.^[37], respectively. The yellow star at each panel is from observation data, 160 μm and 250 μm panels are from Dunne et al.^[69], 350 μm and 500 μm panels are from Negrello et al.^[70], JCMT 850 μm panel is from Dunne et al.^[69].

4 讨论

Guiderdoni等人早在1998年就率先在LCDM模型下将半解析模型与尘埃消光和再辐射的建模相结合^[30]。在后续的研究中, Fontanot等人的工作^[25]结合了GRASIL模型^[16], 他们的优点在于尘埃再辐射的SED是根据假定的尘埃特性和预测的辐射场自洽计算的。Devriendt等^[58]和Somerville等^[71]的工作将简单的几何模型与尘埃的红外/亚毫米辐射SED模板结合。但是模板的缺点在于^[54]:

1. 模板是从近邻宇宙的观测数据推导或校准

的;

2. 模板形状取决于总红外光度。

这就导致模板不能很好地应用于高红移宇宙。若未来继续探索高红移宇宙下星系的多波段函数以及更好地理解哪些物理过程影响了红外光谱的形状, 我们可以从两方面入手: 一是结合流体模拟下的辐射转移模型, 如SKIRT^[21]、SUNRISE(Submillimeter molecUlar liNe suRveys in dIstant duSty galaxiEs)^[17–18]等。二是应用观测数据更丰富, 包含了更高红移和类型更多的星系的模板^[7, 72–74]。

Baugh等^[24]发现半解析模型结合GRASIL的

方式^[23-24, 75-77]未能再现足够数量的明亮亚毫米星系(submillimeter galaxy, SMG). 因此, 他们对前人的模型进行了一些修改以期改善:

1. 采用恒定恒星形成时间尺度, 从而在高红移星系中有更多的气体;

2. 在主并合与次并合中采取有效的星暴模式.

但是Somerville等人的工作^[14]提到, 这种做法将在高红移产生大量的亮星暴星系. 此外, Baugh等人在星暴中采用了头重脚轻(top-heavy)的恒星初始质量函数, 这将导致每单位质量的恒星形成除了会产生更多的紫外线外, 还会产生更多的金属和尘埃^[24]. 结果显示, 要想重现星系在亚毫米波段的数密度, 需要将上述几个修改结合起来, 才可能在同一模型下再现高红移下的紫外和光学光度函数. Lacey等^[76]也认为, 需要头重脚轻的IMF才能重现Spitzer观测中红外LF (luminosity function) 的演化.

在我们的文章中, 并未采用可变的IMF, 仍旧是常规的Chabrier的IMF^[48], 能够重现总红外光度函数, 不过会低估红外波段的暗端星系数目, 我们猜测这与模拟的分辨率太低有关, 分辨率太低导致小质量星系不足, 这将会导致暗端星系数目不够. 通过提高模拟分辨率, 半解析模型可以更好地捕捉暗端星系的形成和演化, 从而更准确地预测它们的数密度.

宇宙学流体动力学模拟本身通常并不包含关于尘埃的处理(如EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments)), Camps等^[78]和Trayford等^[79]在模拟结果之后把尘埃加入到其中, 在考虑了尘埃的吸收、散射和再辐射之后预测星系的紫外线到亚毫米光度, 研究了低红移处光学波段颜色^[79]和FIR波段颜色^[78]. Baes等^[80]结合SKIRT辐射转移模型^[78]提出Eagle低估了FUV波段的尘埃衰减, 原因可能是恒定的尘埃金属比或星系和尘埃的球形几何结构假设过于简单^[81-82]以及EAGLE-SKIRT后处理过程中恒星形成区子网格处理的限制.

本文中starduster在处理尘埃质量时同样采用了恒定的尘埃金属比, 虽然尘埃-恒星质量分布与模拟基本符合, 但是却和前文Baes等^[80]所描述的

一致, 同样低估了消光. Li等^[83]使用SIMBA (Simulating Baryons and AGN)流体力学模拟预测了星系在 $z = 0 \rightarrow 6$ 的尘埃演化, 其尘埃质量函数在 $z = 0$ 时与观测符合得很好. 他们发现星系的尘埃-金属比并不是恒定的, 尘埃-气体比与金属丰度在恒星形成星系有密切的正相关关系, 但是在熄灭星系中却没有关联. 我们推测, 如果我们在半解析模型中能够跟踪尘埃形成和破坏的演化过程, 那么预测得到的尘埃质量可能会更加符合观测结果. Popping等^[51]采用半解析模型^[84]来追踪尘埃演化, 并得到了尘埃特性有关的一系列结果, 这些结果表明尘埃-金属的比例与星系本身以及星系内气体的状态密切相关. 因此, 我们需要进一步完善模型, 以期获得更准确的尘埃质量预测.

另外, Salim等人在2020年的综述中^[82]指出对于尘埃的分布研究, 简单的几何形状假设会得到较陡峭的尘埃衰减曲线, 而具有块状灰尘的复杂的几何形状会得到较平坦的尘埃衰减曲线. 我们猜测如果将尘埃的密度分布改为各向同性^[85], 相较目前的结果, 或许会对最终的消光结果有所改善. 而且, 在实际的星系中, 星系以及尘埃的几何形状并非理想的球形对称结构, 有限的空间分辨率会导致我们对星际介质的分布描述有系统误差^[80].

总之, 到目前为止, 在多波段SED的模拟中, 我们可以在紫外到红外部分与观测得到一致的结果, 不过却在重现SMG暗端数量方面存在一些困难.

5 总结与展望

本工作中, 我们展示了是如何预测 $z = 0$ 处星系从远紫外到远红外的光谱能量分布及其结果. 我们的预测基于L-Galaxies的星系形成半解析模型, 其中包括气体冷却、恒星形成、超新星反馈、金属富集、AGN 反馈等一系列物理过程, 从中我们可以得到恒星形成历史、金属富集历史、核盘尺度、核盘质量等一系列星系的物理性质. 我们首先用Bruzual和Charlot在2003年建立的光谱库^[15]预测了星系的内禀光谱, 然后使用两种简单但是物理明确的方式预测 $z = 0$ 处静止参考系下星系被尘埃消光之后从紫外到红外波段的光度函数.

在starduster的机器学习模型中, 我们使用尘

埃-金属气体质量比固定与太阳系相等的假设^[54]得到尘埃的质量(图1). 考虑到尘埃是弥散在气体中, 同时假设冷气体的半质量半径为尘埃盘的半径, 将其作为该模型的一部分输入. 考虑了尘埃衰减和再辐射的物理特点, 通过模拟尘埃辐射转移, 根据星系的几何参数和恒星形成历史预测星系的多波段SED.

在经验模型中, 基于CF2000^[59]提出的“二成分”模型, 年轻的恒星被致密的诞生云覆盖, 年老一些的恒星在稍弥散的ISM中, 即尘埃衰减曲线的表现与恒星的年龄有关. 另外我们根据文献[38]令尘埃衰减的物理量光深依赖于星系的金属丰度与星系中的平均氢柱密度, 从而得到从紫外到光学部分被尘埃消光后的光度函数. 另外, 我们假设被尘埃吸收的星光能量会全部再辐射到红外部分, 又已知总红外光度决定了红外波段SED的形状^[40], 进而利用一系列不同的红外光谱模板预测了红外波段的光度函数.

经验模型使用的SED模板在指定总红外光度下的比较展示在图2, 因各个模板对辐射成分的处理不同, 差异主要体现在近红外. 图2同时也展现了从starduster预测结果中指定总红外光度下随机抽取的SED, 在 $\lambda < 10 \mu\text{m}$ 处相比其他模板明显高估了对应的光度, $10\text{--}100 \mu\text{m}$ 相较其他模板低估了对应的光度, $\lambda > 100 \mu\text{m}$ 则略高于其他模板. 相当于在总红外光度确定的情况下, starduster相较各个模板数据在 $\lambda > 10 \mu\text{m}$ 向右平移了, 由此产生的差异对红外波段光度函数造成的影响如图5–6所示.

我们发现要想使starduster的UV波段光度函数与观测符合, 需要继续增强消光(图3), 因starduster中的尘埃消光曲线数据与Trayford等人2020年工作^[64]类似, 我们把二者在V波段的消光数值随尘埃面密度的变化放到一起比较(图4), 同样发现starduster需要增强消光. 消光不足带来的后果也体现在其总红外光度的预测与观测相比明显整体偏低(图3). 我们会在将来对尘埃的分布进一步完善, 相信这会对尘埃消光有所改善. 而经验模型在UV以及光学波段能够很好地对星系消光, 从而重现这些波段的光度函数(图3).

至于红外部分的光度函数, 经验模型计算得出

的总红外光度结合不同的红外SED模板, 除了暗端的星系数目不足外, 各个模板在红外各个波段的表现差异不大. 值得一提的是Chary等人的模板^[34]在红外的各个波段能够与观测相对较好地符合(图5–6). starduster虽然低估了总红外光度, 但是这不影响它在红外波段的总体趋势, 除了在暗端同样低估星系数目外, 它能较好地预测红外各个波段在拐折以及明亮端的星系数密度(图5–6). 在接下来的工作中, 我们将进一步完善半解析模型和staduster消光部分的模型, 以期更准确地预测星系的多波段光度函数.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高. 感谢与邱逸盛、陈瑶鑫、所兴袍许多有益的讨论.

参考文献

- [1] Driver S P, Norberg P, Baldry I K, et al. A&G, 2009, 50: 12
- [2] Scoville N, Aussel H, Brusa M, et al. ApJS, 2007, 172: 1
- [3] Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. ApJS, 2011, 197: 36
- [4] Davies L J M, Robotham A S G, Driver S P, et al. MNRAS, 2018, 480: 768
- [5] Conroy C. ARA&A, 2013, 51: 393
- [6] Casey C M, Berta S, Béthermin M, et al. ApJ, 2012, 761: 140
- [7] Magnelli B, Popesso P, Berta S, et al. A&A, 2013, 553: A132
- [8] Madau P, Dickinson M. ARA&A, 2014, 52: 415
- [9] Kauffmann G, White S D, Guiderdoni B. MNRAS, 1993, 264: 201
- [10] Cole S, Aragon-Salamanca A, Frenk C S, et al. MNRAS, 1994, 271: 781
- [11] Somerville R S, Kolatt T S. MNRAS, 1999, 305: 1
- [12] Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A, et al. MNRAS, 1999, 303: 188
- [13] Cole S, Lacey C G, Baugh C M, et al. MNRAS, 2000, 319: 168
- [14] Somerville R S, Primack J R, Faber S. MNRAS, 2001, 320: 504
- [15] Bruzual G, Charlot S. MNRAS, 2003, 344: 1000
- [16] Silva L, Granato G L, Bressan A, et al. ApJ, 1998, 509: 103
- [17] Jonsson P, Cox T, Primack J R, et al. ApJ, 2006, 637: 255
- [18] Jonsson P. MNRAS, 2006, 372: 2

- [19] Jonsson P, Primack J R. *NewA*, 2010, 15: 509
- [20] Baes M, Verstappen J, De Looze I, et al. *ApJS*, 2011, 196: 22
- [21] Camps P, Baes M. *A&C*, 2015, 9: 20
- [22] Camps P, Baes M. *A&C*, 2020, 31: 100381
- [23] Granato G L, Lacey C G, Silva L, et al. *ApJ*, 2000, 542: 710
- [24] Baugh C M, Lacey C G, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2005, 356: 1191
- [25] Fontanot F, Monaco P, Silva L, et al. *MNRAS*, 2007, 382: 903
- [26] Mathis J, Mezger P, Panagia N. *A&A*, 1983, 128: 212
- [27] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S. *ApJ*, 1989, 345: 245
- [28] Ferrara A, Bianchi S, Cimatti A, et al. *ApJS*, 1999, 123: 437
- [29] Calzetti D, Armus L, Bohlin R C, et al. *ApJ*, 2000, 533: 682
- [30] Guiderdoni B, Hivon E, Bouchet F R, et al. *MNRAS*, 1998, 295: 877
- [31] Devriendt J, Guiderdoni B. *A&A*, 2000, 351: A363
- [32] Hatton S, Devriendt J E, Ninin S, et al. *MNRAS*, 2003, 343: 75
- [33] Blaizot J, Guiderdoni B, Devriendt J E G, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 571
- [34] Chary R, Elbaz D. *ApJ*, 2001, 556: 562
- [35] Dale D A, Helou G. *ApJ*, 2002, 576: 159
- [36] Dale D A, Helou G, Magdis G E, et al. *ApJ*, 2014, 784: 83
- [37] Safarzadeh M, Hayward C C, Ferguson H C, et al. *ApJ*, 2016, 818: 62
- [38] Guiderdoni B, Rocca-Volmerange B. *A&A*, 1987, 186: 1
- [39] Lacey C, Guiderdoni B, Rocca-Volmerange B, et al. *ApJ*, 1993, 402: 15
- [40] Sanders D, Mirabel I. *ARA&A*, 1996, 34: 749
- [41] Fontanot F, Somerville R S, Silva L, et al. *MNRAS*, 2009, 392: 553
- [42] Qiu Y, Kang X. *ApJ*, 2022, 930: 66
- [43] Henriques B M B, White S D M, Thomas P A, et al. *MNRAS*, 2015, 451: 2663
- [44] Henriques B M, Yates R M, Fu J, et al. *MNRAS*, 2020, 491: 5795
- [45] Yates R M, Henriques B M, Fu J, et al. *MNRAS*, 2021, 503: 4474
- [46] Ayromlou M, Kauffmann G, Yates R M, et al. *MNRAS*, 2021, 505: 492
- [47] Springel V, White S D, Jenkins A, et al. *Nature*, 2005, 435: 629
- [48] Chabrier G. *PASP*, 2003, 115: 763
- [49] De Geyter G, Baes M, Fritz J, et al. *A&A*, 2013, 550: A74
- [50] Fioc M, Rocca-Volmerange B. *A&A*, 2019, 623: A143
- [51] Popping G, Somerville R S, Galametz M. *MNRAS*, 2017, 471: 3152
- [52] Vijayan A P, Clay S J, Thomas P A, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 4072
- [53] Triani D P, Sinha M, Croton D J, et al. *MNRAS*, 2021, 503: 1005
- [54] Lacey C G, Baugh C M, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2016, 462: 3854
- [55] Lagos C d P, Robotham A S G, Trayford J W, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 4196
- [56] Fu J, Kauffmann G, Huang M L, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 1531
- [57] De Lucia G, Blaizot J. *MNRAS*, 2007, 375: 2
- [58] Devriendt J, Guiderdoni B, Sadat R. *A&A*, 1999, 350: 381
- [59] Charlot S, Fall S M. *ApJ*, 2000, 539: 718
- [60] Desert F X, Boulanger F, Puget J L. *A&A*, 1990, 237: 215
- [61] Lagache G, Dole H, Puget J L, et al. *ApJS*, 2004, 154: 112
- [62] Rieke G H, Alonso-Herrero A, Weiner B, et al. *ApJ*, 2009, 692: 556
- [63] Liang L, Feldmann R, Kereš D, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 1397
- [64] Trayford J W, Lagos C d P, Robotham A S G, et al. *MNRAS*, 2020, 491: 3937
- [65] Wyder T K, Treyer M A, Milliard B, et al. *ApJ*, 2005, 619: L15
- [66] Bell E F, McIntosh D H, Katz N, et al. *ApJS*, 2003, 149: 289
- [67] Rodighiero G, Vaccari M, Franceschini A, et al. *A&A*, 2010, 515: A8
- [68] Vlahakis C, Dunne L, Eales S. *MNRAS*, 2005, 364: 1253
- [69] Dunne L, Eales S, Edmunds M, et al. *MNRAS*, 2000, 315: 115
- [70] Negrello M, Clemens M, Gonzalez-Nuevo J, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 1309
- [71] Somerville R S, Gilmore R C, Primack J R, et al. *MNRAS*, 2012, 423: 1992
- [72] Elbaz D, Dickinson M, Hwang H, et al. *A&A*, 2011, 533: A119
- [73] Berta S, Lutz D, Santini P, et al. *A&A*, 2013, 551: A100
- [74] Ciesla L, Boquien M, Boselli A, et al. *A&A*, 2014, 565: A128
- [75] Swinbank A, Lacey C, Smail I, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 420
- [76] Lacey C G, Baugh C M, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2008, 385: 1155
- [77] Lacey C G, Baugh C M, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2010, 405: 2

- [78] Camps P, Trayford J W, Baes M, et al. MNRAS, 2016, 462: 1057
- [79] Trayford J W, Camps P, Theuns T, et al. MNRAS, 2017, 470: 771
- [80] Baes M, Trčka A, Camps P, et al. MNRAS, 2019, 484: 4069
- [81] Narayanan D, Davé R, Johnson B D, et al. MNRAS, 2018, 474: 1718
- [82] Salim S, Narayanan D. ARA&A, 2020, 58: 529
- [83] Li Q, Narayanan D, Davé R. MNRAS, 2019, 490: 1425
- [84] Somerville R S, Hopkins P F, Cox T J, et al. MNRAS, 2008, 391: 481
- [85] De Looze I, Fritz J, Baes M, et al. A&A, 2014, 571: A69

The SED of Present-day L-Galaxies from the Far-ultraviolet to the Far-infrared

WEI Li-ping¹ LUO Yu^{2,3} KANG Xi^{1,2}

(1 *Institute for Astronomy, School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310058*)

(2 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023*)

(3 *National Basic Discipline Public Science Data Center, Beijing 100190*)

ABSTRACT The semi-analytical model of galaxy formation in L-Galaxies has successfully predicted many galaxy properties. In this paper, we use L-Galaxies to simulate physical results such as the star formation history of galaxies. Considering the dust attenuation and re-radiation features, combined with the results SKIRT (Stellar Kinematics Including Radiative Transfer) radiative transfer simulation as the training data of the deep learning model starduster, we can predict galaxies' multi-band spectral energy distribution. The dust extinction of starduster is slightly insufficient, resulting in mildly higher than the observation data from FUV (far-ultraviolet) to optical, and at the longer wavelength, the number density of galaxies at the bright end is well reproduced, but under-predict the number of faint galaxies slightly. However, taking the empirical dust extinction combined with the infrared spectral energy distribution template as the empirical model to obtain the luminosity function from the FUV to the FIR (far infrared), the dust attenuation effect is quite good. And we find it in excellent agreement with observation at the UV (ultraviolet) band. Except that the number of galaxies at the faint end cannot be reproduced well, the luminosity functions at infrared are predicted accurately.

Key words galaxy: dust attenuation, multi-band, luminosity function, spectral energy distribution