

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

星系的多波段观测与 SED 拟合方法综述

袁方婷^{1,2}, 郑振亚^{1,2}, 姜春艳^{1,2}, 朱帅儒^{1,2}, 林如秋^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 星系的辐射覆盖从 X 射线到射电的广泛波段, 不同波段反映恒星形成、尘埃吸收与发射、星云辐射以及活动星系核 (AGN) 等物理过程。通过多波段观测数据和光谱能量分布 (SED) 拟合分析方法, 我们能够整合这些信息, 推导星系的关键物理性质参数。本文对星系的多波段观测和 SED 拟合分析方法进行总结, 梳理了从 X 射线到射电各波段的主要辐射来源及代表性观测手段, 并介绍了 SED 拟合方法的基本原理及其在推导恒星质量、恒星形成率等物理参数中的应用, 旨在为读者提供星系多波段数据综合分析的参考。

关 键 词: 星系辐射; 多波段观测; 光谱能量分布 (SED); SED 拟合

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引 言

天文学是观测的科学。随着观测技术的不断进步, 天文观测已经由光学向全谱电磁波发展。不同谱段的观测为我们提供了星系的整体面貌, 对了解星系的性质起到关键作用。本文将从星系多波段观测出发, 介绍多波段数据为我们带来的星系性质信息, 以及如何使用现有的大量多波段数据, 对星系性质进行定量的分析。

2 多波段天文学基础

2.1 电磁辐射

天文观测依赖于对天体电磁辐射的接收。电磁辐射从短波到长波可以分为 γ 射线, X 射线, 紫外, 光学, 红外和射电部分。 γ 射线波长短至原子核大小, 性质更接近粒子。而射电波

: 2025 年 12 月 16 日; : 2025 年 12 月 16 日

: 本研究由中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究经费支持, 课题编号 CMS-CSST-2025-A06, CMS-CSST-2025-A17, CMS-CSST-2025-A10。感谢审稿人的认真审阅和诸多建设性意见。

: 袁方婷, yuanft@shao.ac.cn

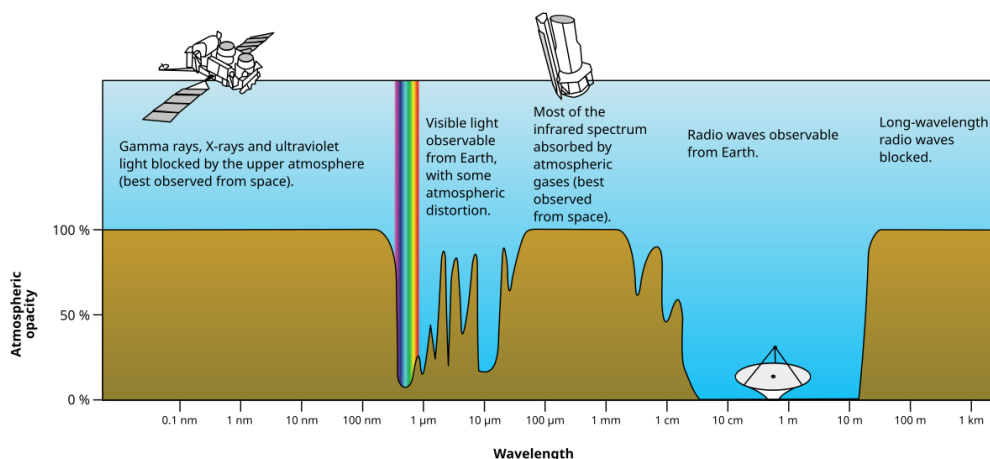


图 1 地球大气对电磁波的不透明度随波长的变化。其中，电磁波可到达地面的几个波段，如可见光、射电等被称为大气窗口。图片来源：NASA public domain.

长的长度可以到达米级，和宏观物体相当，主要展现波性。星系是由恒星、黑洞、气体以及尘埃等成分组成的系统。正因为星系包含了多种成分，其辐射能谱波长范围很广，大多数星系的能谱覆盖从 X 射线到射电波段。

2.2 大气窗口

对于地面设备，天体辐射需要穿过大气层才能被探测到。但是大气对于一些波段的电磁波并不透明，导致这些波段无法在地面进行观测。图1展示了大气对不同电磁波段的透过率曲线。能够通过大气层到达地面的波段，如射电波段和光学波段，被称为“大气窗口”。对于这些波段，我们可以通过地面望远镜获得天体的辐射信息。而对于一些波段，大气是不透明的，如远红外 ($20\mu\text{m}$ – 1mm)、紫外 ($912\text{\AA}$ – $3500\text{\AA}$) 等，这些波段的观测必须在高于大气层部分进行。

理想情况下，望远镜的分辨率由其衍射极限决定，可用公式 $\theta = 1.22\lambda/D$ 计算。其中， θ 是艾里斑 (Airy Pattern) 中主极大到第一级极小的距离， λ 为观测波长， D 为望远镜口径 (直径)。如果两个点源信号的中心极大之间的距离大于 θ ，我们认为这两个源是可分辨的，反之则不可分辨。该分辨率定义方式为瑞利判据 (Rayleigh Criterion)。在实测中，我们通常测量点扩散函数的半高全宽 (FWHM, Full Width at Half Maximum)。艾里斑的 FWHM 为 $1.03\lambda/D$ (见 [1])。

空间望远镜在没有大气湍动 (seeing) 干扰的条件下，可以充分发挥光学系统的潜力，在许多情况下接近或达到衍射极限分辨率，从而获得高质量的观测数据。相比之下，地面望远镜虽然在建设、维护和升级上更为灵活，但受到大气湍动的限制，在未采用特殊校正技术时往往难以达到自身的衍射极限分辨率。不过，随着自适应光学 (Adaptive Optics) 技术的发展，一些大型地面望远镜 (如欧洲南方天文台的甚大望远镜 VLT、凯克望远镜 Keck) 在近红外波段已经能够实现接近衍射极限的成像，大大提升了地基观测的分辨率。近年来，空

间望远镜在星系天文学中的作用日益突出，例如哈勃空间望远镜 (HST) 在可见-紫外波段的深场成像，詹姆斯·韦布空间望远镜 (JWST) 在近、中红外波段的高分辨率观测，赫歇尔望远镜在远红外波段获取的恒星形成区图像，以及普朗克卫星在微波波段的全天区测绘，都极大推动了天文学研究的进展。

3 星系多波段观测数据及分析方法

我们对星系进行的观测可以分为测光观测和分光观测，所获得的数据产品对应于星系图像和光谱。在本文中，我们着重讨论星系在不同波段的图像观测。我们将对以下两部分内容进行介绍：1) 不同波段的观测能够告诉我们星系的哪些信息？2) 如何从星系的观测中推算星系的物理性质？

3.1 星系在不同波段的观测

星系是由恒星、黑洞、气体以及尘埃等成分组成的系统，其辐射能谱范围非常广，主要覆盖从 **X 射线** 到射电部分。星系各个成分辐射的主导波段不同，因此特定波段的观测往往可以体现星系中某种成分的信息。以星系 M51 为例（图2），其在 **X 射线** 观测到射电观测下展现出不同的面貌。以下我们对各个波段能够反映的星系信息进行介绍。同时，我们也将对不同波段的望远镜进行一定的总结。

3.1.1 X 射线

X 射线 对应的波长范围为 1-100Å。**X 射线** 常用能量单位表征，对应能量为 0.1-10keV。**X 射线** 的辐射主要为连续谱。其连续谱的辐射来源于星系中的热气体。在热气体中，**X 射线** 的主要辐射机制是韧致辐射 (bremsstrahlung)，即电子在离子电场作用下被减速时损失动能，从而辐射出 **X 射线** 光子。此外，热气体中还存在复合辐射 (free-bound emission)，即自由电子被离子俘获进入束缚态时产生的辐射。这种辐射机制在气体温度较低 ($T < 10^6$ K) 时尤为显著。除热气体外，双星系统和活动星系核 (AGN) 的吸积盘也能够产生 **X 射线** 辐射。其主要机制为吸积过程中产生的热辐射。

X 射线 无法在地面进行观测，必须使用空间设备。较为著名的 **X 射线** 望远镜成像设备列举如表1。

3.1.2 极紫外 (EUV)

极紫外辐射 (Extreme-Ultraviolet, 缩写为 EUV, 约 100-1210 Å) 处于远紫外与软 X 射线之间，包含了氢原子的电离辐射波长 (912 Å)，在电离过程研究中具有核心地位。然而，在实际天文观测中，EUV 光子面临严重的吸收问题：一方面，地球大气对该波段完全不透明，任何观测必须依赖空间望远镜；另一方面，宇宙中普遍存在的中性氢和氦对 EUV 光子有很高的吸收截面，使得 EUV 辐射无法直接抵达观测者。因此，直接的 EUV 探测主要集中在太阳和银河系内的高温恒星、白矮星与致密天体，例如 EUVE 卫星的巡天观测对理解局部等离子体辐射做出了重要贡献。

在河外星系研究中，较远的星系由于红移效应，静止波长处于 EUV 波段的电离连续体



图 2 M51 在各个波段下的图像，按照从长波到短波的顺序排列。射电波段显示冷气体的分布，主要分布在中心和旋臂上。红外显示温度较低的恒星和尘埃辐射。光学波段展现了大部分恒星的分布以及尘埃吸收带的条纹。这些吸收的位置对应红外发射的位置。紫外相比其他波段，团块状结构更多，主要显示近期形成的年轻恒星以及旋臂上的恒星形成区。X 射线则表征了高电离的热气体分布，主要集中在星系中心部分。图片来源：NASA/University of Chicago。

表 1 常用 X 射线成像卫星概览。

名称	发射时间	波段范围
ROSAT	1990	0.1–2.4 keV
Chandra	1999	0.2–10keV
XMM-Newton	2000	0.2–10keV
Integral	2002	3keV–10MeV
Swift	2004	15–150keV
Suzaku	2005	0.2–600keV
NuSTAR	2012	3–79keV
eROSITA	2014	0.2–10keV
HXMT (慧眼)	2017	1–250keV
EP(爱因斯坦探针)	2024	0.3–10kev
SVOM	2024	0.5–120 keV

和发射线特征被移入近紫外或可见光波段，从而能够通过地基望远镜或空间紫外、光学仪器进行探测。例如，HST/COS **紫外光谱仪** [2, 3] 在中低红移星系中可以探测到 Lyman 极限甚至更短波处的辐射，而在更高红移处，EUV 光子红移到可见光波段，可以利用 VLT、Keck 等地基 8–10 m 级望远镜对星系的电离辐射进行观测。

通过红移后 EUV 辐射的探测，天文学家能够深入研究星系的电离性质及其在宇宙演化中的作用。首先，电离连续谱和谱线能够约束星系内部的电离参数，进而判断电离源是恒星形成还是 **AGN** 主导。其次，测量星系电离光子逃逸**比例** (f_{esc}) 对于理解早期宇宙的再电离过程至关重要，它决定了年轻星系能否为大尺度中性 IGM 的电离提供足够能量。EUV 辐射特征还与反馈过程紧密相关，例如星系风和气体外流的形成，这些机制会显著影响气体循环、恒星形成效率以及金属和尘埃的分布。因此，EUV 波段是研究星系电离性质、反馈过程和宇宙再电离历史的重要窗口。

在观测方面，银河系和河外天体 EUV 波段的系统探测主要依赖 Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE) 及少数其他卫星 (表2)。其中，EUVE 是 NASA 于 1992 年发射的第一颗完全致力于 EUV 天文学的卫星，覆盖波段 7–76nm。它完成了全天巡天，编制了包含 801 个源的星表，并首次在该波段探测到银河系外天体。EUVE 的观测为白矮星、恒星大气和星际介质 (**ISM**) 的研究提供了关键数据，奠定了 EUV 天文学的重要基础。

不同于恒星及星系领域，EUV 波段在太阳物理领域有更丰富的成像和光谱观测，如 SOHO/EIT[4]，SDO/AIA[5]，SDO/EVE[6]，Solar Orbiter/EUI[7] 等。

表 2 主要河外/银河系天体 EUV 观测任务。

任务/仪器	时间	波段范围 (Å)
Apollo–Soyuz EUV telescope[8]	1975	~40–155
ROSAT/WFC[9]	1990–1999	60–200
ALEXIS[10]	1993–2005	130–186
EUVE[11]	1992–2001	70–760

3.1.3 紫外-光学-近红外 (UV-optical-NIR)

紫外 (UV) -光学 (optical) -近红外 (NIR) 波段是比 **X 射线** 波长更长的辐射谱段。紫外波段的波长范围为 912–3500Å，**光学波段的波长范围为 3500–7500Å**，**近红外则为 0.75–5μm**[12]。将这几个波段综合考虑的原因是这些波段的辐射由恒星主导，是显示星系恒星辐射特征的谱段，也是星系性质分析中最常被使用的波段。

这些波段的连续谱辐射来源主要为恒星。恒星的连续谱辐射可看作黑体谱。由维恩定律 (Wien's Law, $\lambda_{\text{max}} = 2900[\text{K} \cdot \mu\text{m}]/T[\text{K}]$) 可知恒星温度越高，其辐射峰值对应的波长越短。除了恒星之外，AGN 吸积盘的热辐射也覆盖这些波段。强射电源伴随的喷流 (如 M87) 则主要通过同步辐射对这些波段产生贡献。

除连续谱辐射外，UV-optical-NIR 波段往往具有明显的发射线。这些发射线主要来源于星系中的 HII 区。HII 区是大质量恒星形成的场所。理论上，HII 区包含中心的辐射源，也就

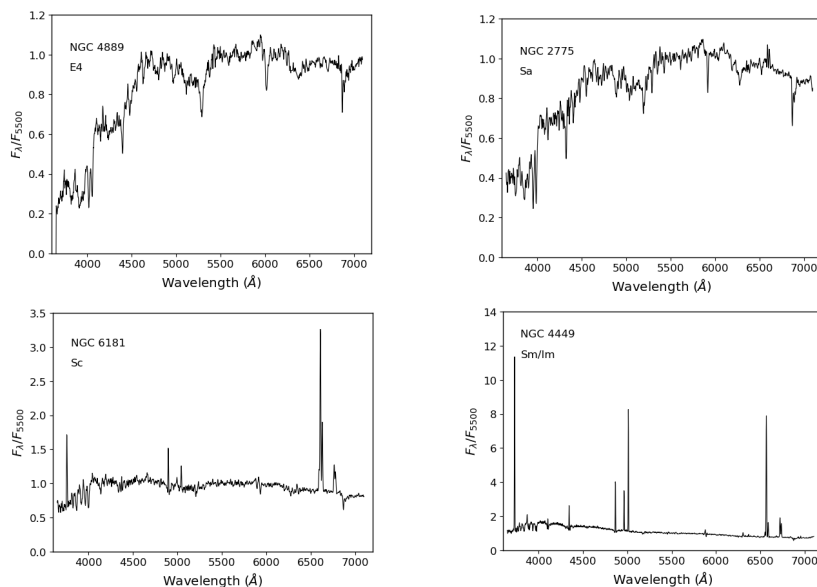


图 3 不同类型星系的光学光谱示例。光谱中包含连续谱、发射线以及吸收线特征。椭圆星系 (E4) 以红色连续谱和吸收线为主；旋涡星系 (Sa) 仍以吸收谱占主导，但可见弱的窄发射线；较为晚型的旋涡星系 (Sc) 星系显示出明显的发射线特征；而不规则星系 (Sm/Im) 则以蓝色连续谱和强发射线为特征。图片改编自参考文献 [13, 14]。

是大质量恒星，以及周围的气体。这些气体的主要成分为氢。由于大质量恒星的辐射，其周围的 HII 气体被电离，形成 HII 主导的区域。HII 区中，自由电子被离子捕获，并从较高能级跃迁到较低能级，产生大量的复合线。这些发射线包括 H、He 线以及金属线（如 [OIII], [NII] 等），对测量星系物理性质起到重要作用。

星系在 UV-optical-NIR 波段能谱上也具有吸收线，这些吸收线主要来源于恒星大气的吸收，即来自恒星自身光谱。也有部分吸收线来源于 ISM 或星系际介质 (IGM)，这些吸收线往往处于紫外波段。

综上所述，星系在 UV-optical-NIR 波段的光谱包含连续谱、发射线和吸收线。图3展示了几个典型的星系光谱 [13]。

UV-optical-NIR 波段的观测方面，光学波段具有大气窗口，可以在地面进行观测，所以发展得最早，具有大量望远镜和观测数据。在表3中，我们列举现有的大型望远镜和著名的空间望远镜。其中有些望远镜不仅能够覆盖光学波段，也能够覆盖部分紫外和近红外波段。有些地面望远镜，如 VLT，甚至可在中红外波段 ($\sim 10\mu\text{m}$ 或 $\sim 20\mu\text{m}$) 进行一定观测。空间望远镜中，JWST 的波长覆盖范围更偏向于红外部分，为 $0.6\text{-}28.3\mu\text{m}$ 。

表 3 光学波段代表性望远镜。

名称	启用时间	口径	位置
Keck (2 telescopes)	1990/1996	10m	夏威夷, 美国
VLT (4 telescopes)	1998	8.2m	安托法加斯塔, 智利
Subaru	1999	8.2m	夏威夷, 美国
Gemini (North/South)	1999/2000	8.1m	夏威夷, 美国/帕琼峰, 智利
Magellan (2 telescopes)	2000	6.5m	阿塔卡马, 智利
Large Binocular Telescope	2005	8.4m (双镜)	亚利桑那, 美国
Gran Telescopio CANARIAS	2007	10.4m	加那利岛, 西班牙
LAMOST (郭守敬望远镜)	2008	4m	河北兴隆, 中国
WFST (墨子巡天望远镜)	2023	2.5m	青海冷湖, 中国
Vera C. Rubin Observatory (LSST)	2025	8.4m	帕琼峰, 智利
HST	1990	2.4m	近地轨道
Gaia	2013	1.45m	L2 点
JWST	2022 ^①	6.5m	L2 点
Euclid	2023	1.2m	L2 点
CSST	2027(预计)	2m	近地轨道

地面望远镜可以观测到部分近紫外波段 (波长 $> 3000\text{\AA}$)，更短波长的紫外观测需要在空间进行。目前的紫外观测相对于光学和近红外较为落后。空间紫外设备除 HST 外基本为小于米级的设备。表4列举了部分常用的紫外望远镜。

表 4 代表性紫外卫星。

名称	发射时间	口径	波段范围
IUE	1978	45cm	1150–3200 $\text{\AA}$
FUSE	1999	4 $\times$ 35cm	905–1187 $\text{\AA}$
GALEX	2003	50cm	1344–2831 $\text{\AA}$
Swift UVOT	2004	30cm	1700–6500 $\text{\AA}$
HST	2009	2.4m	815–3200 $\text{\AA}$ (COS 设备) > 2000 $\text{\AA}$ (WFC 设备) >1150 $\text{\AA}$ (STIS 设备)
AstroSat	2015	37.5cm	1300–1800 $\text{\AA}$, 2000–3000 $\text{\AA}$
CSST	2027(预计)	2m	> 2200 $\text{\AA}$

由于近红外波段介于光学和中远红外之间，其设备大多与光学设备和中远红外设备重合。以上提到的光学望远镜也可用于近红外观测，我们将在红外部分对其他近红外波段观测进行阐述。

^①2021 年 12 月 25 日发射成功，2022 年 7 月正式观测。

3.1.4 中红外-远红外-亚毫米 (MIR-FIR-submm)

在星系的中红外 (MIR)–远红外 (FIR)–亚毫米 (submm) 波段, 主导辐射源为 ISM 中的多环芳香烃分子 (PAH, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) 以及尘埃颗粒。PAH 分子能够吸收紫外波段的高能光子, 并在中红外波段通过特征谱线和连续辐射重新释放能量。除了 PAH 之外, 星系中的尘埃颗粒也在紫外和光学等波段吸收辐射, 并在红外至亚毫米波段以热辐射形式进行再辐射。根据尘埃颗粒大小的不同, 其辐射特性存在显著差异: 小颗粒尘埃由于无法维持热平衡, 吸收单个光子后会发生瞬态加热并随机 (stochastic) 辐射, 其能量主要分布在近红外和中红外波段。而大颗粒尘埃能够达到近似热平衡状态, 从而产生接近黑体谱的连续辐射。不同环境中的尘埃呈现不同的温度。普通星系的弥散介质中尘埃温度约为 15–25K, 恒星形成区中约为 40–60K [15, 16]。星暴星系和超亮红外星系 (ULIRGs) 中与星暴活动相关的尘埃成分温度约为 30–60K。某些星系中还存在一个额外的温尘埃成分, 温度大约为 150–250K (峰值位于约 $25\ \mu\text{m}$ 的中红外波段), 该成分可能是由中心的 AGN 加热产生的 [12, 17]。

从成分上看, 星系中的尘埃主要由硅酸盐颗粒和石墨颗粒组成。硅酸盐尘埃在 $9.7\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$ 附近表现出明显的特征谱带, 而石墨尘埃则具有更平滑的连续谱特征。这些不同成分和粒径的尘埃共同决定了星系在红外到亚毫米波段的辐射性质, 也为研究 ISM 的组成、加热机制及星系的尘埃能量平衡提供了重要信息。这些辐射特征构成了红外光谱能量分布 (SED) 建模的物理基础 [18, 19]。

中红外波段也具有有一些发射线, 主要的发射线来源于 PAH 分子的辐射。在远红外、亚毫米波部分, 较为显著的发射线包括 [CII] $158\ \mu\text{m}$ 、CO 各跃迁线、[OIII] $88\ \mu\text{m}$ 等。图4展示了星系中远红外波段辐射的几个主要成分, 即硅尘埃辐射、石墨尘埃辐射以及 PAH 辐射。

中远红外观测和光学观测所用探测器有所区别, 需要低温制冷以降低热噪声, 保证对红外信号的灵敏响应。中红外波段虽然存在一些大气窗口, 能够在地面观测, 但观测条件要求严苛。因此, 中远红外的观测大多在空间进行。

亚毫米波段的观测部分可通过空间望远镜完成 (如 Herschel 望远镜), 但高分辨率和高灵敏度观测主要依赖地面站点, 例如阿塔卡马高原的 ALMA 阵列、夏威夷的 SMA 等。理想的台址通常选在高原或高海拔地区, 以确保环境干燥、气候条件稳定, 并远离城市光污染。除上述的阿塔卡马高原和夏威夷外, 南极大陆、印度喜马拉雅的 Hanle 天文台, 以及我国的冷湖和雪山牧场等地, 也是亚毫米波观测的重要基地。较著名的望远镜列举如表5。这些望远镜的观测也延伸到光学近红外以及毫米波段。

3.1.5 射电

射电波长范围往往定义为 1mm 到 1m 之间。其连续谱辐射来源为相对论性电子在星系磁场中运动产生的同步辐射、由低温尘埃贡献的黑体辐射以及 HII 区中电子产生的自由-自由辐射 (图5)。普通星系的射电连续谱成分与恒星形成活动密切相关: 自由-自由辐射来自 HII 区中年轻大质量恒星周围的电离气体, 而同步辐射则来自超新星遗迹中被加速到相对论速度的电子。在 AGN 中, 射电连续谱主要由中心黑洞驱动的喷流或激波产生的同步辐射

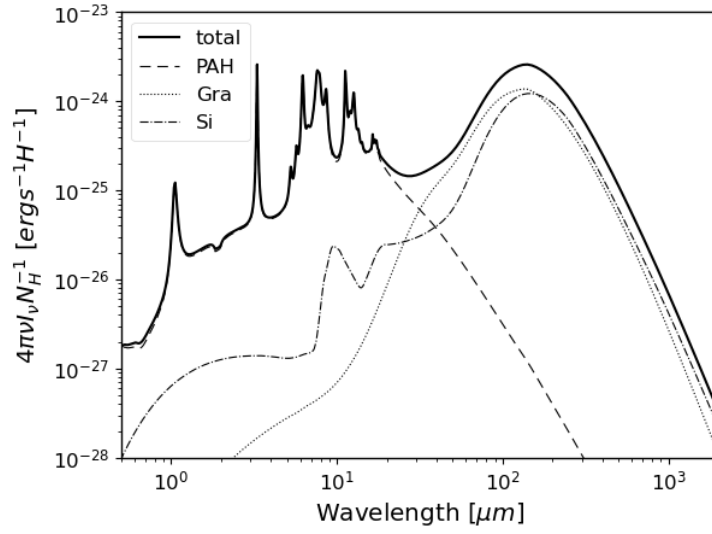


图 4 中远红外及亚毫米波段辐射的主要成分。图中模型包含 PAH 辐射, 硅 (Si) 尘埃辐射以及石墨尘埃 (Gra) 辐射。图片模型来自文献 [18], 参考 [20]。

表 5 常用中远红外及亚毫米波望远镜。

名称	启用时间	波段范围
IRAS	1983	8-120 μm
COBE (DIRBE)	1989	1.25-240 μm
ISO	1995	2.5-240 μm
Spitzer	2003	3-180 μm
AKARI	2006	2-180 μm
Herschel	2009	55-671 μm
WISE	2009	2.5-30 μm
SOFIA	2010	0.3-1600 μm
JWST	2022	0.6-28 μm
JCMT	1987	0.4-1.4mm
SMA	2003	0.717-1.67mm
APEX	2004	0.2-1.5mm
ALMA	2013	0.32-3.6mm
雪山牧场亚毫米波望远镜 (XSMT)	预计 2027-2028	0.2-1.5mm

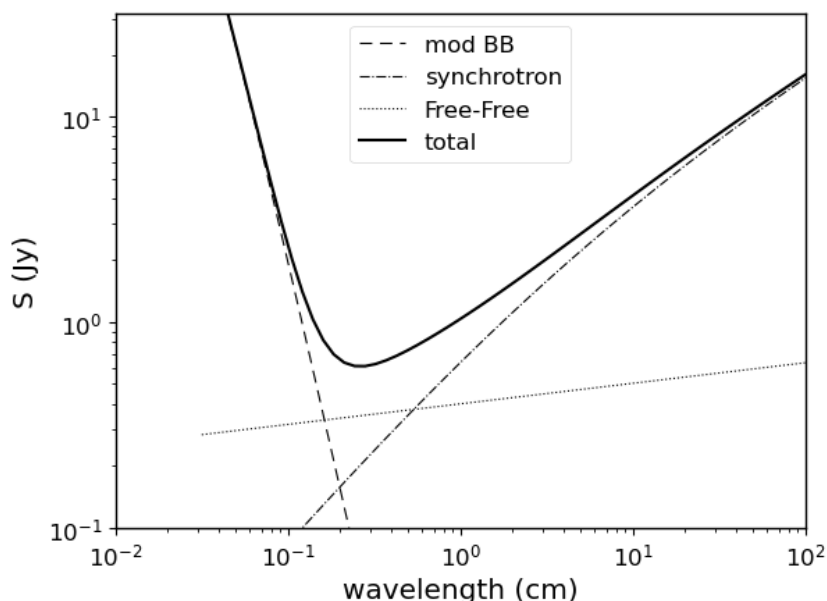


图 5 射电波段辐射的主要成分, 以星暴星系 M82 为例。冷尘埃修正黑体辐射 (mod BB) 的瑞利金斯端主导短波部分 (虚线), 自由-自由跃迁 (free-free) 主导 1mm–1cm 的部分 (点线), 而同步辐射 (synchrotron) 则主导 $>1\text{cm}$ 的部分 (点划线)。图片参考 [12]。

主导。射电光度是 AGN 研究中的重要参数。根据射电光度的不同, AGN 可分为射电噪 (radio-loud) 和射电宁静 (radio-quiet) 两类。

射电部分也存在著名的发射线: HI 的 21cm 谱线。该谱线为精细结构线, 由基态 H 原子的电子在两个自旋状态之间的跃迁导致, 是 HI 气体的重要示踪体。另外, 从约 1mm 波段开始, 存在低能级 CO 分子跃迁谱线 (如 $\text{CO } J=1 \rightarrow 0$, $J=2 \rightarrow 1$ 等) 和其他分子谱线 (比如 $\text{HCN}(J=1 \rightarrow 0)$ 等)。其中, $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 谱线是估计河外星系中分子氢含量时最常用的分子气体示踪线。而其他 ^{12}CO 的转动跃迁谱线, 以及如 $\text{HCN}(J=1 \rightarrow 0)$ 等谱线, 也经常被用于示踪更高密度的分子气体。这些谱线对于研究分子云核心中最致密气体的含量与空间分布十分重要。

射电波段的优势在于可以利用地面观测。由于射电波长较长, 干涉观测被广泛应用在射电波段。因此, 射电观测设备不仅包括大型单天线, 还包括大量天线组成的干涉阵列, 即将两台或多天天线的电磁波信号进行相关与合成, 形成比单天线分辨率更高的图像。因此, 虽然单个天线口径有限, 多天天线的阵列组合却可以组成一个巨大的虚拟天线, 其口径等效为阵列中任意两台天线之间的最大距离 (最长基线), 对于地面阵列可接近地球直径, 显著提升对星系结构、AGN、分子云等目标的分辨能力。

一些射电望远镜列举如表6。分布在地球各个位置的射电天线可以进行联动形成甚长基线干涉网 (VLBI)。欧洲、加拿大、美国、智利、俄罗斯、中国、韩国、日本、墨西哥、澳大利亚和泰国设有多个 VLBI 阵列。其中, 欧洲 VLBI 网络 (EVN) 汇集了欧洲最大的射电

望远镜和欧洲以外的一些射电望远镜（比如我国的天马望远镜），是世界上最灵敏的 VLBI 阵列之一。美国的甚长基线阵列（VLBA）由十台专用的 25 米望远镜组成，是最大的专用 VLBI 阵列。EVN 和 VLBA 的组合构成了全球 VLBI 网络。这些阵列中的望远镜也可以与地基 VLBI 天线（如 HALCA 或 Spektr-R）配合，获得极长基线观测。由于空间分辨率和基线长度相关，VLBI 能够实现微角秒级的细节成像。典型的例子是事件视界望远镜（Event Horizon Telescope, EHT），它将全球多个毫米与亚毫米观测站（如 ALMA、SMA、IRAM 30m 等）组成一个地球尺度的虚拟望远镜，在 230 GHz 频率下实现了约 $20 \mu\text{as}$ 的角分辨率，并成功对 M87* 和 Sgr A* 黑洞的事件视界阴影进行成像。这一成果展示了干涉技术在获得极端高分辨率方面的独特优势，是近年多波段天文领域最重要的进展之一。

表 6 射电望远镜及阵列概览。

名称	启用时间	波长范围	地点
单天线			
Jodrell Bank Lovell Telescope	1957	300 MHz–5 GHz	柴郡，英国
Parkes Telescope	1961	0.7–26 GHz	帕克斯，澳大利亚
Arecibo	1963	300MHz–10GHz	阿雷西沃，波多黎各
Effelsberg Telescope	1972	408MHz–86GHz	巴特明斯特艾费尔，德国
IRAM 30m	1984	70–350 GHz	格拉纳达，西班牙
德令哈 13.7 米毫米波望远镜	1990	80–115 GHz	青海，中国
Green Bank Telescope	2000	290MHz–115GHz	西弗吉尼亚州，美国
天马 (TMRT)	2012	1–50GHz	上海，中国
天眼 (FAST)	2016	70MHz–3GHz	贵州，中国
阵列			
VLA/JVLA	1980	1.0GHz–50GHz	新墨西哥州，美国
VLBA	1993	0.3GHz–96GHz	华盛顿，美国
GMRT	2000	150 MHz–1.5 GHz	普纳，印度
LOFAR	2012	10–230MHz	荷兰等欧洲国家
ALMA	2011	84–950 GHz	阿塔卡马高原，智利
NOEMA	2016	70–350 GHz	普罗旺斯，法国
MeerKAT	2018	0.58–14.5 GHz	卡鲁，南非
FAST 核心阵	建设中	70 MHz–3 GHz	贵州，中国
SKA	建设中	50 MHz–15 GHz	南非/澳大利亚

3.2 星系性质的多波段分析方法

由上所述，单个波段（如 **X 射线**、光学或红外等）可以对星系某些性质进行一定限制，但这些性质之间具有关联。通过对多波段数据的综合分析，可以使我们能够更好地约束物理

量,从而更全面地了解星系性质。目前常用的多波段分析方法为 SED 拟合。这种方法通过比对星系 SED 模型和观测数据,对星系性质参数进行测量。SED 拟合在星系研究中被广泛应用,但在拟合中仍有很多细节需要注意和深入探索。本节我们将对 SED 拟合的基本原理进行介绍。更多关于 SED 拟合方法的内容可见 sedfitting.org 和 [21] 等。

该网站中分类整理了各种 SED 拟合程序。常用的程序包括 CIGALE^①, MAGPHYS^②, Prospector^③, BAGPIPES^④等。每种程序在星族合成、能量平衡以及贝叶斯推断等方面各有侧重。其中, CIGALE 基于能量平衡假设,提供了多种可组合的星族合成、尘埃衰减与红外尘埃辐射模块,适用于 UV–FIR (可扩展至 X 射线和射电波段) 多波段数据的分析; MAGPHYS 采用严格的能量平衡框架,将尘埃吸收与红外辐射统一进行建模,并以预先计算的模型库实现快速参数估计,是星系整体 SED 拟合的经典工具; Prospector 结合 FSPS (Flexible Stellar Population Synthesis) 与灵活的非参数 SFH,通过马尔科夫链蒙特卡洛 (MCMC) 等方法实现完整的贝叶斯后验推断,在参数估计的准确性与不确定性量化方面具有优势; BAGPIPES 则提供高度模块化的星系光谱,可模拟从星族、星云发射到尘埃与 IGM 吸收等多种物理过程,适用于光谱与成像数据的联合拟合。用户可根据不同需求进行选择。

SED 拟合首先需要通过星系性质建立模型光谱。星系的模型光谱构建主要考虑恒星、尘埃、气体以及 AGN 部分。我们将从这几个方面介绍如何建立星系的模型光谱。随后,我们将介绍如何将模型和实际观测数据进行比对,从而获得星系性质参数。

3.2.1 星族合成方法

其中,第一个需要考虑的也是最主要的成分为恒星成分。恒星辐射主要由星族合成方法 (Stellar Population Synthesis, SPS) 进行计算。星族合成的第一步也是最基础的一步是建立简单星族 (Simple Stellar Population, SSP)。SSP 由同时诞生并具有相同初始化学组分的一组恒星构成。其光谱可以通过以下公式进行计算 [21]:

$$f_{\text{SSP}}(t, Z) = \int_{m_{\text{lo}}}^{m_{\text{up}}(t)} f_{\text{star}}[T_{\text{eff}}(M), \log g(M)|t, Z] \Phi(M) dM, \quad (1)$$

其中, f_{star} 是恒星光谱。给定年龄 t 和金属丰度 Z , 恒星光谱由该恒星的有效温度 T_{eff} 和重力场参数 g 决定。 $\Phi(M)$ 为初始质量函数,表明这个星族诞生时的质量分布。从上述公式可知,我们需要恒星演化途径以及恒星光谱来确定一个 SSP 的 SED。理论上可以计算出恒星演化的路径 (图6)。而恒星光谱库既可由理论计算得出 (如 Kuruz 模型 [22] 等), 也可以通过实际观测进行收集 (如 MILES^⑤等 [23]), 不同分辨率的光谱库见文献 [24] 图 2 所示。

^①<https://cigale.lam.fr>

^②<https://www.iap.fr/magphys/>

^③<https://prospect.readthedocs.io/en/stable/>

^④<https://bagpipes.readthedocs.io/en/latest/>

^⑤<https://research.iac.es/proyecto/miles/>

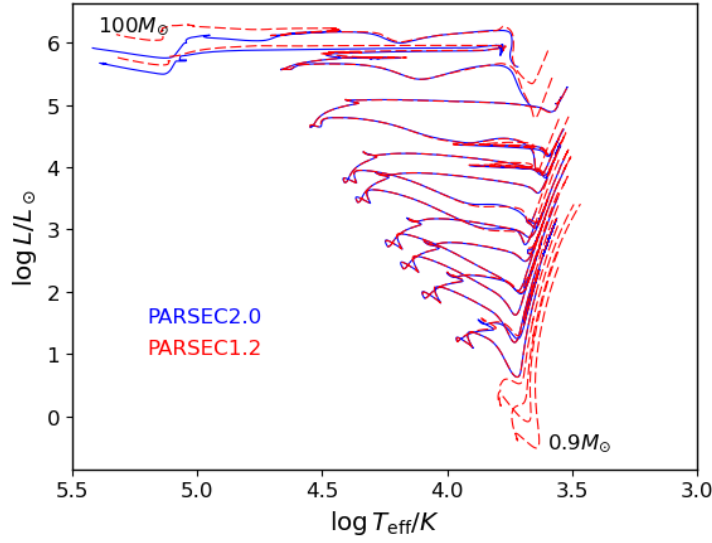


图 6 恒星在赫罗图上的演化路径（红色虚线和蓝色实线分别使用 PARSECv1.2 和 PARSECv2.0 Non-rotating 模板库 [25, 26]）。

构建了 SSP 之后，考虑到星系中的恒星通常具有不同的形成时间和不同的化学组分，我们可以建造更接近星系星族情况的模型，也就是**复合星族 (Composite Stellar Population, CSP)**。CSP 的概念较为广义，其不仅包含恒星成分，还对尘埃消光进行了一定考虑。根据 Conroy 等 (2013) 中的表达 [21]:

$$f_{\text{CSP}}(t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \int_{Z=0}^{Z=Z_{\text{max}}} \left(\text{SFR}(t-t') P(Z, t-t') f_{\text{SSP}}(t, Z) e^{-\tau_d(t')} + A f_{\text{dust}}(t', Z) \right) dt' dZ, \quad (2)$$

其中的积分变量是星族年龄 t' 和金属丰度 Z 。随时间变化的尘埃消光由尘埃光学深度 $\tau_d(t')$ 描述，尘埃辐射则包含在函数 f_{dust} 中。归一化常数 A 通过平衡尘埃吸收与尘埃再辐射的总光度来确定。

$\text{SFR}(t)$ 为恒星形成历史 (SFH)，也就是星系的恒星形成率 (SFR，即每年形成多少太阳质量的恒星) 随时间演化的历史。在实际工作中，我们对星系的 SFH 仍然缺乏准确的认知，目前我们常常假设某种函数形式对 SFH 进行近似。常用的函数形式包括常函数，指数函数，以及延迟的指数函数等 (见 [27])。 $P(Z, t)$ 则为恒星的金属丰度分布。CSP 模型中对金属丰度的处理通常比对 SFH 的处理更加简化。广泛被采用的简化方式是 $P(Z, t)$ 替换为 δ 函数，即假设整个 CSP 具有单一的金属丰度。

3.2.2 尘埃

在复合星族的构建中，我们除了考虑恒星，还需考虑 ISM 中的尘埃部分。星系中的尘埃虽然只占 ISM 的极小部分，但对星系整体辐射起到不可忽视的作用。其一方面吸收或散射紫外、光学部分的辐射，另一方面在红外进行再辐射，改变了星系的能谱形状。在公式2中，尘

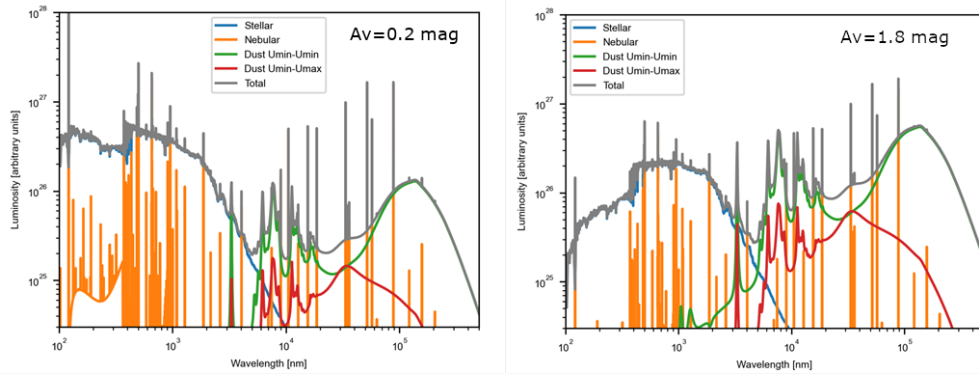


图 7 尘埃消光由 0.2 星等 (左) 增加到 1.8 星等 (右) 时, 星系能谱的紫外和光学部分下降, 而红外部分上升。

埃对恒星辐射的吸收 (或散射) 用因子 $e^{-\tau_d(t')}$ 表示, 其中 $\tau_d(t')$ 为尘埃的有效光深。在星系研究中, 光深和波长相关。这两者之间的相关关系称为消光律 (Extinction Law) 或者减光律 (Attenuation Law)^①。根据定义, 光深 τ_λ 和常用的消光星等 A_λ 的关系为: $A_\lambda = 1.086\tau_\lambda$ 。在星系研究中, 常用的减光律有 Calzetti Law[28] 形式, Charlot & Fall (2001) 形式 [29], 以及 Noll et al. (2009) 给出的修正 Calzetti Law 的形式 [30] 等。

星系中的尘埃颗粒吸收光子后, 在红外进行辐射。通过对尘埃颗粒大小分布以及尘埃成分等的理论, 可以建立尘埃辐射的模型, 包括 Dale & Helou (2002)[31], Draine & Li (2007)[18], Dale et al. (2014)[32] 等。根据能量平衡原理, 我们常用的一个基本假设是: 尘埃吸收的能量等于其辐射的能量。也就是说尘埃在紫外、光学等波段的消光越大, 那么红外辐射的光度就越大, 如图7所示。通过这种能量平衡假设, 我们可以在建立 CSP 时将星系从紫外到红外的部分结合起来, 形成星系跨越紫外、光学以及远红外的能谱模型。

3.2.3 星云辐射和发射线

星云辐射是星系辐射的重要组成部分。在早期工作中, 由于发射线等值宽度 (EW) 和宽波段滤光片的波长覆盖范围相比较小很多, 因此往往忽略发射线对宽波段流量的影响。但 De Barros, Schaerer & Stark (2014) 的工作指出, 高红移星系中约 65% 具有强发射线, 这些强发射线可以对宽波段流量造成影响, 从而影响星系性质的测量 [33]。这一方面是因为高红移星系具有显著的恒星形成活动, 其发射线较低红移处星系具有更高的流量, 另一方面是因为高红移处红移作用明显, 宽波段的观测波长覆盖范围 $\Delta\lambda$ 对应静止波长范围为 $\Delta\lambda/(1+z)$, 相对变窄 $(1+z)$ 的因子, 造成发射线在宽波段中的比重增加。这两方因素导致对于一些星系, 特别是高红移星系而言, 发射线的影响在 SED 拟合中不可忽略。

^①关于减光 (Attenuation) 和消光 (Extinction) 的详细区别可参考https://dust-extinction.readthedocs.io/en/stable/dust_extinction/extinction.html。

3.2.4 AGN 辐射

AGN 在星系的各个波段都有一定的辐射。在建立星系辐射模型时,也需要考虑 AGN 的贡献。可以通过 AGN 辐射模型和 AGN 辐射在星系辐射中的比例在星系的模型能谱中引入 AGN 成分。以 Fritz 等人 (2006) 的 AGN 模型为例 [34],该模型假设了 AGN 周围的尘埃环带分布,通过尘埃环的形状和与 AGN 相对位置的参数,获得 AGN 辐射能谱。

3.2.5 模型拟合-获取星系性质参数

根据上述成分建立星系模型后,我们需要将这些模型和星系的观测数据进行量化的比较,获取星系物理性质参数。在工作中,我们常采用 χ^2 的方法进行拟合。具体方法参考 Salim et al. (2007)[35] 的公式,比较模型 i 和观测之间的差异:

$$\chi^2 = \sum_X \left[\frac{F_{\text{obs},X} - a_i F_{\text{mod},i,X}}{\sigma(F_{\text{obs},X})} \right]^2. \quad (3)$$

其中, X 表示各个观测波段,例如 GALEX 的 FUV 和 NUV, SDSS 的 u, g, r, i, z 波段等; $F_{\text{obs},X}$ 为波段 X 的观测流量, $\sigma(F_{\text{obs},X})$ 为相应的不确定度; $F_{\text{mod},i,X}$ 为模型 i 在波段 X 的预测流量, a_i 为缩放因子,用于匹配模型与观测的总体亮度。最佳模型即为使 χ^2 最小的模型。于是对 a_i 求导,可以获得最佳模型:

$$a_i^* = \sum_X \left[\frac{F_{\text{obs},X} F_{\text{mod},i,X}}{\sigma^2(F_{\text{obs},X})} \right] / \sum_X \left[\frac{F_{\text{mod},i,X}}{\sigma(F_{\text{obs},X})} \right]^2. \quad (4)$$

值得注意的是,在拟合中其实只有一个变量 a_i ,需要和星系的物理参量进行区分 [35]。

由于 SED 拟合涉及多参数,不同物理参数可能产生相似的 SED,导致参数间存在强简并。例如,恒星年龄、金属丰度以及尘埃消光的简并。再比如在红外波段,不同尘埃加热强度和 PAH 质量比的组合也可能导致相似的红外 SED。这类参数简并是 SED 拟合的共性问题,尤其在波段数量有限或信噪比不高的情况下更为显著。虽然最佳拟合模型在一定程度上可以反映星系的物理性质,但它无法揭示参数之间的简并关系,也无法提供参数不确定性的估计。

在 SED 拟合中,贝叶斯方法被广泛用于估计星系的物理参数及其不确定性。该方法通过对每一组模型参数计算似然函数,并结合先验信息得到后验概率分布,从而对各参数进行边缘化处理(对其他参数积分),获得概率密度函数(PDF)。参数的最优值通常取后验分布的均值或中位数,误差由 PDF 的标准差或置信区间衡量。贝叶斯分析不仅能够量化参数的可靠性,还能揭示参数之间的简并性或约束不足。在多参数 SED 拟合中,贝叶斯方法相比单一最佳模型,能够提供更稳健、可信的物理参数估计。

3.3 非参数 SED 拟合方法

在 SED 拟合中,参数化的 SFH 虽然能描述大多数星系的演化,但在一些真实观测中无法复现真实的 SFH。这一方面是由于观测对 SFH 的约束较弱,不同的 SFH 模型均符合观测,无法获得可靠的 SFH;另一方面是由于星系存在突然爆发和快速淬灭等复杂活动,参数化 SFH 无法描述这种过程。

这些问题的解决方式之一为使用“非参数方法”(non-parametric methods) [36–40], 即不对 SFH 预设固定的函数形式, 而是划分为若干不等宽的时间段, 并在每个时间段内自由拟合恒星质量或 SFR。

相比参数化方法, 非参数方法具有更高的灵活性, 可描述更复杂(比如多次爆发式)的恒星形成过程。研究认为, 它们能显著减少由模型假设带来的偏差, 使得恒星质量、年龄和 SFR 的估计更为可靠 [40, 41]。目前很多工作已经应用非参数方法对 SED 进行分析, 近期也发展出与机器学习结合的快速推断技术 [42, 43]。

但是, 非参数方法自由度更高, 计算成本更大, 并高度依赖先验设置。在实际应用中, 参数化与非参数方法各有优劣, 需要根据科学目标和数据特性进行选择。

4 多波段观测分析方法的应用

本章介绍实际研究中常用的多波段观测分析方法, 并通过实例展示如何利用多波段拟合来深入理解星系的物理性质。

4.1 强发射线星系恒星质量的测量

恒星质量被认为是星系最基本的物理量之一, 在决定其形成与演化过程中起着核心作用。传统的恒星质量估算通常依赖质量–光度比, 特别是近红外波段, 由于星系总质量主要由年老恒星主导, 该方法能够提供相对稳健的测量。然而, 单一波段的测量难以全面反映星族的复杂性。为了获得更加可靠和精确的恒星质量估计, 需要结合多波段观测, 对星系的 SED 进行综合拟合与约束。

Lin 等近期的工作涉及对低红移绿豌豆星系 (Green Peas) 及 JWST 小红点类似体的分析 [44, 45], 研究这些强发射线星系中黑洞质量与恒星质量的关系。其中, 黑洞质量由 $H\alpha$ 发射线推导获得, 而恒星质量的测定则是需要重点解决的问题。为此, 他们结合了紫外 GALEX、光学 SDSS 和红外 WISE 的多波段数据来约束恒星质量。

该工作中 SED 分析的特殊性在于必须考虑强发射线的影响。这类星系的发射线(如 $[O\ III]\ \lambda\lambda 4959, 5007$ 和 $H\alpha$) 对宽波段光度贡献显著, 从而可能导致拟合结果产生偏差(图8)。因此, 他们在分析中采取了两种处理方式: (1) 使用包含发射线的模型进行拟合; (2) 在宽波段测光中剔除发射线贡献。

需要指出的是, 强发射线对 SED 拟合的影响不仅限于单个波段的光度偏差, 还会随着红移变化而系统性地影响不同波段的测量结果, 从而在星系性质推导中引入不确定性。对于有光谱数据的样本, 可以通过直接扣除发射线来精确修正; 而在缺乏光谱的情况下, 采用包含发射线的模型是更为可行的选择。两种方法各有优势与局限, 但在强发射线星系研究中对这一效应加以考虑是必要的。

该工作通过使用 CIGALE [27, 30, 46] 对宽线候选体的 SED 进行建模, 从而推导其恒星质量。拟合中假设延迟型 SFH (delayed SFH), 主星族的指数衰减时标 (τ_{main}) 与年龄 (t_{main}) 均假设在 100–12000 Myr 的范围。星族合成采用 Bruzual and Charlot [47] (BC03)

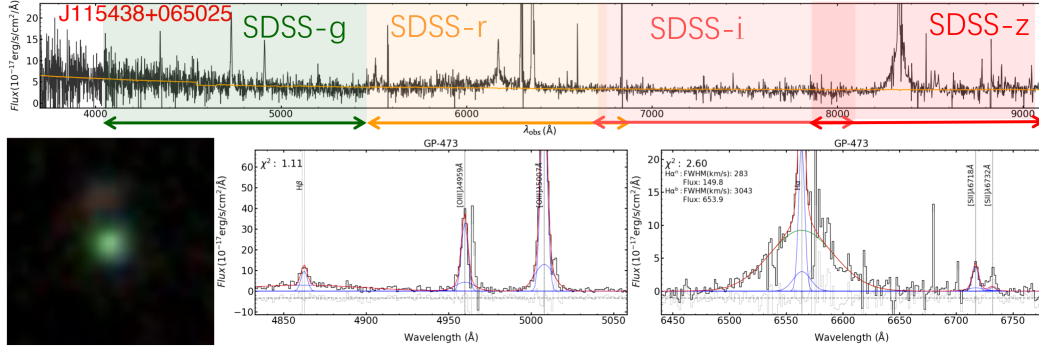


图 8 特殊星系 Green Peas 中的发射线非常强，对宽波段流量有很强影响，给 SED 拟合结果带来偏差。

模型，并使用 Chabrier [48] 的初始质量函数 (IMF)，同时考虑了 3 种恒星金属丰度 (0.02、0.2、 $0.4Z_{\odot}$)。

他们在模型中加入 CLOUDY 发射线模板 [49] 以描述星云发射，其中电离参数 U 固定为 $\log U = -2.0$ 。 U 是电离参数 q_{ion} 的无量纲形式 ($U = q_{\text{ion}}/c$, c 是光速)，可以反映电离光子数密度相对于气体数密度的比例，用于描述 HII 区的电离强度。尘埃消光采用 Charlot 和 Fall (2000) [29] 的衰减定律来分别处理气体与恒星的消光；尘埃红外辐射部分则使用 Dale 和 Helou 等人 [31, 32] 的模板。考虑到宽线候选体中 AGN 贡献可能较高，他们进一步引入了 Stalevski 等人 (2016)[50] 的 AGN 模型，并设定 AGN 分数在 0–0.5 之间变化。

上述参数组合最终产生了约 10^7 以上个模型的参数网格，用于对 SED 进行拟合与约束，成功获取了这些星系的恒星质量测量。

4.2 星系 SFR 的测量

Yuan、Zhu 等工作涉及对一类高红移特殊星系—莱曼连续谱 (LyC) 星系—进行 SFR 分析 [51, 52]。这类星系是一类能够释放大量的电离光子的星系，通常伴随着剧烈的恒星形成活动，因此往往属于星暴星系。因此，它们在 SFH 和电离辐射特性上，与一般的恒星形成星系可能存在一定差异。对于典型的恒星形成星系，其 SFR 与恒星质量之间存在紧密的相关性，形成所谓的“主序” (Main Sequence)。然而，对于红移约 3 的 LyC 星系，它们是否仍然位于这一主序关系上，是该工作需要探讨的问题。

该工作同样利用 CIGALE 对红移 $z \sim 3$ 的莱曼连续谱辐射星系进行多波段 SED 拟合，以推导其 SFR 和恒星质量。但在拟合中，这些星系需要一些和普通星系不同的处理。

首先，高红移的 SED 拟合和低红移的一个重要区别在于需要对 IGM 吸收进行考虑。CIGALE 采用平均的 IGM 吸收 [53] 进行计算，虽然可以对 IGM 进行一定约束，但不适用于精确建模。因此该工作没有使用观测到的 HST 紫外波段 F225W, F275W 以及 F336W 的流量，而是通过其他波段的拟合结果和这些观测进行比较来对 IGM 吸收进行约束。

另一个需要特别考虑的方面是星云辐射。这些莱曼连续谱星系中，大量电离光子逃逸出星系，并没有对发射线辐射产生贡献。考虑莱曼连续谱光子逃逸比例 f_{esc} 。星云光谱由归一

化的发射线模板根据**电离参数** U 与金属丰度 Z 选取, 并按电离光子数进行缩放, 同时修正光子逃逸效应。修正因子 k 定义为:

$$k = \frac{1 - f_{\text{esc}} - f_{\text{dust}}}{1 + \alpha_1(T_e)/\alpha_B(T_e) \times (f_{\text{esc}} + f_{\text{dust}})}, \quad (5)$$

其中 α_B 与 α_1 分别为基态重组率 (recombination rates), 取 $T_e = 10^4$ K 时的数值 [27, 54]。在拟合中假设 $f_{\text{dust}} = 0$ [e.g., 55] (莱曼连续谱不受尘埃影响)。电离参数设定为 $\log U = -2.5$, 对应 $\log q_{\text{ion}}/\text{cm s}^{-1} = 8.0$, 和已知 LyC 星系的测量值保持一致 [56]。这些设定使得 SED 拟合能够在考虑强发射线与 LyC 逃逸效应的同时, 合理地约束高红移特殊星系的物理性质。

4.3 星系参数的可靠性检验

SED 拟合本质上是一个多参数耦合过程。多个物理量 (恒星质量、SFH、金属丰度、尘埃消光、星云发射和 AGN 成分) 共同决定星系的 SED, 但这些参数常常存在简并性, 使得不同的物理情景可能产生相似的 SED。结果的可靠性不仅取决于拟合方法 (如贝叶斯分析或 χ^2 最小化), 还严重依赖于观测数据的波段覆盖和精度, 以及模型假设本身 (星族模型、尘埃消光曲线等)。因此, SED 拟合虽然是研究星系物理性质的有力工具, 但必须注意其复杂性和潜在的不确定性。

一方面, 我们可以进行贝叶斯分析。通过计算每个模型的概率, 我们可以获得每个参数的概率密度分布函数 (PDF)。通过检验 PDF 分布情况, 对所得参数的误差进行估算 (图9)。但如果分布不是高斯曲线, 则说明该参数**可能**没有被正确确定 [57]。

一种更直接的方法是通过模拟星系样本 (mock catalogue) 来检验参数估计的可靠性 [59]。总体策略是针对每组数据构建一个专门的模拟样本。我们不仅知道这些模拟星系在各个波段的光度, 还清楚其真实的消光参数和 SFH 等参数。

举例来说, CIGALE 程序使用如下过程来构建模拟样本。首先, 对真实数据运行 SED 拟合代码, 并通过简单的 χ^2 最小化方法确定每个目标的最佳拟合模型。这样每个目标都对应一个 SED。第二, 对于每个最佳模型, 获取各观测波段的模拟流量, 并在流量上加入一个随机误差, 该误差服从标准差 σ 的高斯分布。这样就得到一个模拟星系表格, 其观测波段与真实星系一致。最后, 将对这些模拟数据再次运行 SED 拟合程序, 将得到的物理参数与模型本征参数进行比较。如果所得结果和模型本征参数相关性很好, 则可判断 SED 拟合对该参数估计较为可靠, 可用于后续分析。反之则说明该参数不能被很好约束, 应在后续分析中排除 (图10)。

通过上述贝叶斯分析和模拟星系样本的方法, 可以对多波段 SED 分析中的参数约束力进行有效检验, 从而更清晰地识别哪些物理量能够被稳健地确定, 哪些则存在较大不确定性。这一认识提醒我们, 在利用 SED 拟合进行星系多波段研究时, 需要既发挥其综合优势, 又保持对潜在偏差和局限性的谨慎态度。

4.4 具有空间分辨的 SED 分析

在研究星系的物理性质时, 整体的 SED 拟合往往只能得到平均意义上的参数, 而无法揭示星系内部不同区域的差异。然而, 星系由核球、盘、旋臂和外围晕等成分组成, 这些区

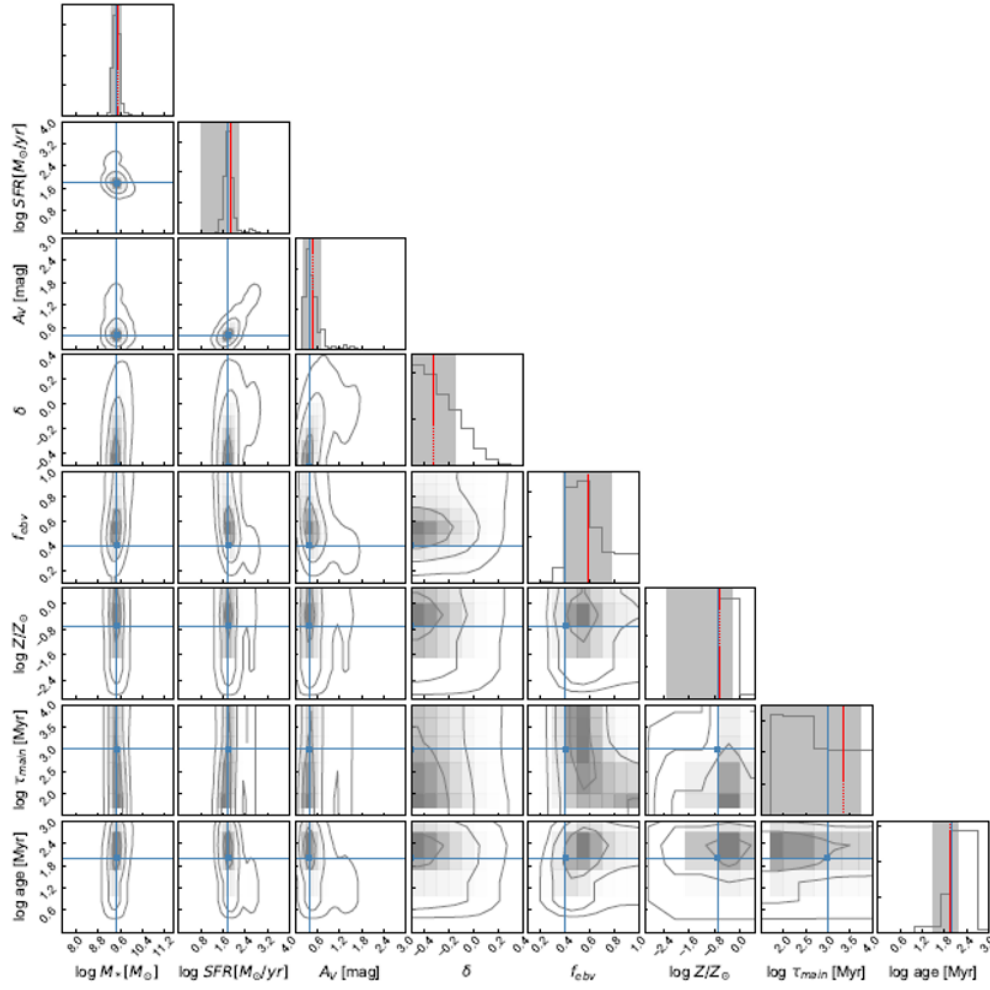


图 9 SED 拟合结果的 PDF 分布。图中包含了二维 PDF (观察参数简并性) 以及一维 PDF (观察分布形状)。蓝色线表示用于生成该组样本的实际参数值。在一维直方图中, 红色虚线为参数的估计值, 阴影部分表示 1σ 不确定度。在二维分布图中, 不同轮廓线分别对应 1、2、 3σ 置信区间。可以根据分布来估算参数的平均值和误差。图片来源于工作 [58]。

域的 SFH、金属丰度、尘埃含量和可能的 AGN 活动往往存在显著不同。为了深入理解星系的形成与演化过程, 有必要将星系分解为空间分辨的成分, 分别进行 SED 拟合, 从而获得在不同空间尺度上的物理量分布。

在具体操作中, 需要特别注意图像分辨率的处理。不同波段的数据来自不同的望远镜, 其空间分辨率和像素尺度常常不同。如果不进行统一处理, 会引入系统性偏差。因此, 空间分辨的 SED 分析通常需要将所有图像卷积到相同的 PSF, 并重采样到一致的像素尺度后再进行拟合。

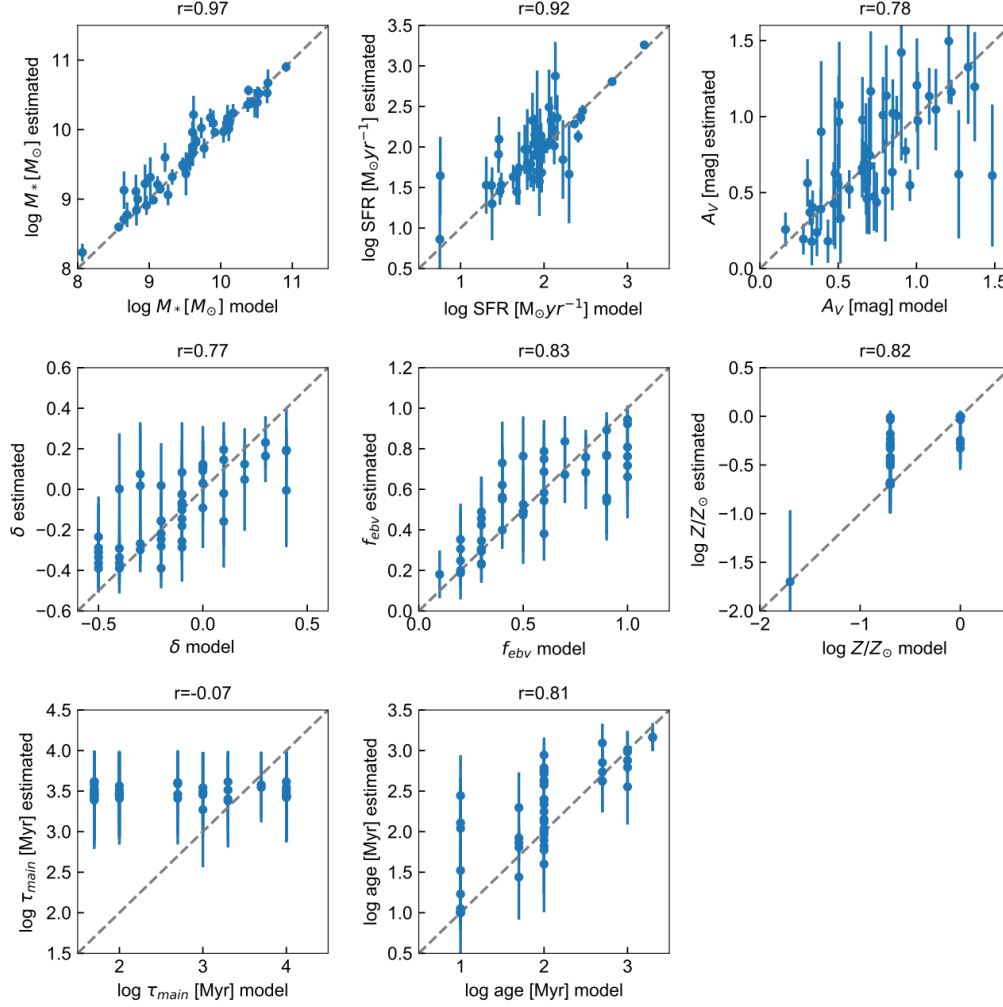


图 10 模拟样本 SED 拟合的结果。每幅图对应本文所考虑的一个输出参数。横轴表示模型的真实值，纵轴表示对模拟数据应用 SED 拟合方法得到的结果；每个点的误差棒表示贝叶斯分析给出的标准误差。每幅图上方标注了线性皮尔逊相关系数 (r)。我们发现恒星质量 M_* 和 SFR 的结果和模型参数具有非常好的相关性 ($r > 0.9$)。参数 f_{ebv} 、年龄 age 以及金属丰度 Z 也得到了较好的约束 ($r > 0.8$)。而 V 波段消光 A_V 和 δ 的估计结果相对不够理想，但仍能在一定程度上被约束 ($0.7 < r < 0.8$)。恒星形成的时间尺度参数 τ_{main} 则完全无法被约束，其相关系数 $r \sim 0$ [58]。

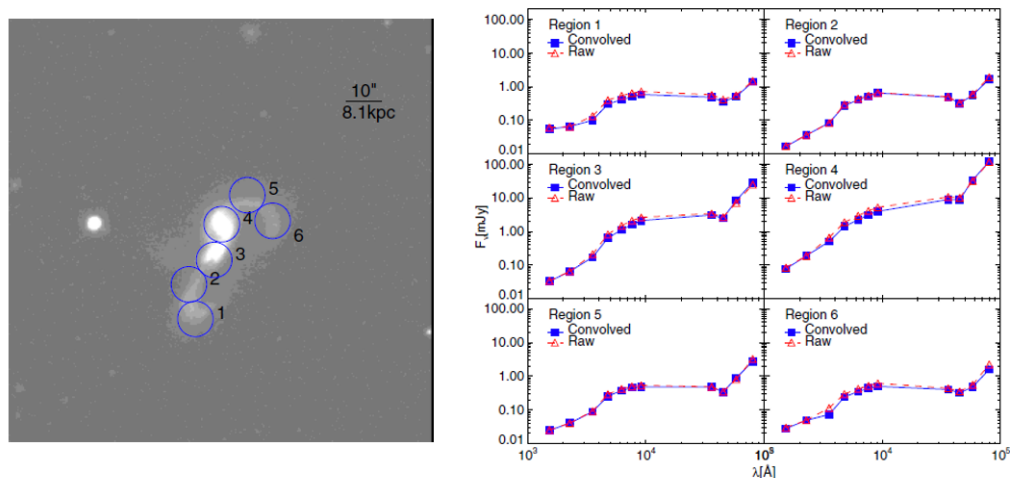


图 11 左：将星系 Mrk848 的图像进行分解。右：对不同部分分别进行 SED 拟合。三角形表示由原始分辨率图像得到的 SED；方形表示将图像与 NUV 的 PSF 卷积并将分辨率降至 $6''$ 后得到的 SED。可以看出，核心区域 (Region 3 与 Region 4) 的 SED 形状显著比其他区域更陡。核心区域的红外辐射明显强于其他区域，这表明核心区域具有更活跃的恒星形成活动以及更强的尘埃消光 [60]。

Yuan 等在 2018 年的工作中对并合星系 Mrk848 进行了图像分解，将其分为 6 个部分，对这几个部分从紫外到红外的 SED 及光谱进行了详细分析 [60] (图11)。由于不同波段的空间分辨率不一致，为了在不同波段之间匹配光度测量，需要将各波段的图像转换到相同的分辨率。此工作选择 GALEX NUV 图像 (分辨率最差, $\sim 6''$) 作为参考。调整图像分辨率的具体步骤为：首先将所有图像对齐到相同的 WCS 坐标系，并将像素尺寸重采样为 GALEX NUV 波段图像的像素大小 ($1.5''$)，保持图像的表面亮度不变。然后使用 Aniano 等 (2011) [61] 提供的卷积核，将所有图像的点扩散函数 (PSF) 退化到 GALEX NUV 波段的大小。这种方法保证了不同波段测光的一致性，从而能够对该星系各个区域的物理性质进行可靠的比较和分析。

除了将星系分为不同区域，更激进的方法是对星系图像的每个像素进行 SED 分析。比如在 Boquien 等 (2012) [62] 的工作中，作者针对赫歇尔基准巡天 (Herschel Reference Survey) 中 7 个接近 face-on 的旋涡星系，对从远紫外到远红外的多波段观测数据进行了逐像素 (pixel-by-pixel) 建模。通过这种逐像素的 SED 拟合方法，能够在空间上分辨星系内部不同区域的紫外本征颜色差异及消光性质，并进一步检验星系为何偏离星暴星系的经验关系。作者还将同样的拟合策略应用到 58 个旋涡星系的整体光度上，以验证结果的普适性。该研究表明，逐像素 SED 拟合是一种强有力的手段，既能约束局部物理参数，又能揭示星系整体偏离经验关系的物理原因。随着多波段观测数据的日益丰富，逐像素 SED 拟合方法正日益成为揭示星系内部物理差异和结构演化的重要工具。

5 挑战与未来方向

尽管多波段观测和 SED 分析在星系研究中取得了显著进展,但仍面临诸多挑战与限制。首先,模型的准确性仍是关键问题。现有 **SSP** 模型在处理复杂恒星系统时存在局限,例如双星系统的比例会显著改变星族 SED,尤其在紫外和 EUV 波段的输出上影响明显 [63–66]。这直接影响了对年轻恒星、星云发射和 SFR 的约束。同样,恒星自转也对星族模型造成影响 [67–69]。同时, EUV 波段观测数据仍然稀缺,使得对高能光子逃逸、ISM 的电离状态及 LyC 逃逸率等物理量的推断存在较大不确定性。此外,尘埃消光曲线、星族年龄分布以及金属丰度的空间梯度等因素,都会在多参数拟合中引入简并性,从而增加 SED 分析结果的不确定性。因此,提高 SSP 模型对复杂恒星系统的描述能力、获取更完整的紫外至 EUV 观测数据,以及开发更精确的消光和金属丰度模型,仍然是当前的挑战。

另一方面,人工智能 (AI) 和大数据技术的发展为多波段观测分析提供了新的可能性。深度学习、卷积神经网络 (CNN) 以及图神经网络 (GNN) 等方法,可用于星系图像的自动分割、结构识别和像素级测光,这为逐像素 SED 拟合提供了高效的数据预处理手段 [70]。AI 方法还能通过模式识别发现传统方法难以捕捉的复杂关系,例如 SFR、尘埃分布与金属丰度之间的非线性联系 [71]。此外,生成对抗网络 (GAN) 和自监督学习等技术在模拟训练数据生成、光度重建及观测缺失波段填补方面展现出潜力 [72]。未来,将 AI 技术与物理模型结合,不仅可以提升 SED 拟合的效率,还可能缓解参数简并性问题,为研究星系的形成与演化提供更加精准和全面的物理图像。

总的来看,多波段 SED 分析在揭示星系物理性质方面有巨大潜力,但要充分发挥其优势,需要同时解决模型精度限制、观测数据不足以及参数简并等问题,同时积极探索 AI 等新兴技术在多波段数据分析中的应用前景。

6 总结和展望

本文回顾了星系从 **X 射线到射电** 各波段的主要辐射来源及机制,梳理了相关观测手段和代表性望远镜,并详细介绍了 SED 分析方法在星系物理性质研究中的应用。通过多波段观测和 SED 拟合,研究者可以有效推导星系的恒星质量、SFR、尘埃含量及星云性质等关键参数,从而揭示星系结构和演化过程的内在规律。本文还通过具体案例展示了 SED 分析在高红移特殊星系、强发射线星系以及逐像素分析等方面的应用,说明多波段观测结合精细建模能够显著提升对星系物理特性的理解。正如 Binney and Merrifield [73] 所言:“星系是构成宇宙的砖块”,对星系的全面理解是认识宇宙结构、演化及其物理规律的基础。总体而言,多波段观测与 SED 分析为星系研究提供了强有力的工具,使我们能够从不同尺度、不同波段获得对星系和宇宙的整体认知。

参考文献：

- [1] RIEKE G H. Measuring the Universe: A Multiwavelength Perspective. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012
- [2] Green J C, Froning C S, Osterman S, et al. *ApJ*, 2012, 744(1): 60
- [3] Osterman S, Green J, Froning C, et al. *Ap&SS*, 2011, 335(1): 257–265
- [4] Delaboudinière J P, Artzner G E, Brunaud J, et al. *Sol. Phys.*, 1995, 162(1-2): 291–312
- [5] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. *Sol. Phys.*, 2012, 275(1-2): 17–40
- [6] Woods T N, Eparvier F G, Hock R, et al. *Sol. Phys.*, 2012, 275(1-2): 115–143
- [7] Rochus P, Auchère F, Berghmans D, et al. *A&A*, 2020, 642: A8
- [8] Bowyer C S. Apollo-Soyuz test project Extreme Ultraviolet Telescope MA-083. [S.l.]: California Univ., Berkeley. Space Sciences Lab.
- [9] Truemper J. *Advances in Space Research*, 1982, 2(4): 241–249
- [10] Priedhorsky W C, Bloch J J, Smith B W, et al. In: Golub L, ed. X-ray instrumentation in astronomy II. 1988. . [S.l.]: [s.n.] , Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, vol. 982
- [11] Bowyer S, Malina R F. In: Malina R F, Bowyer S, eds. Extreme Ultraviolet Astronomy. . [S.l.]: [s.n.] , 1991: 397
- [12] BOSELLI A. A Panchromatic View of Galaxies. Weinheim: Wiley, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527640256>
- [13] Kennicutt R C, JR. *ARA&A*, 1998, 36: 189–232
- [14] Kennicutt R C, JR. *ApJS*, 1992, 79: 255
- [15] da Cunha E, Charlot S, Elbaz D. *MNRAS*, 2008, 388(4): 1595–1617
- [16] Popescu C C, Tuffs R J, Völk H J, et al. *ApJ*, 2002, 567(1): 221–236
- [17] Sanders D B, Mirabel I F. *ARA&A*, 1996, 34: 749
- [18] Draine B T, Dale D A, Bendo G, et al. *ApJ*, 2007, 663(2): 866–894
- [19] Draine B T, Aniano G, Krause O, et al. *ApJ*, 2014, 780(2): 172
- [20] Popescu C C, Tuffs R J, Dopita M A, et al. *A&A*, 2011, 527: A109
- [21] Conroy C. *ARA&A*, 2013, 51(1): 393–455
- [22] Kurucz R L. In: Barbuy B, Renzini A, eds. The Stellar Populations of Galaxies. 1992. . [S.l.]: [s.n.] , IAU Symposium, vol. 149
- [23] Sánchez-Blázquez P, Peletier R F, Jiménez-Vicente J, et al. *MNRAS*, 2006, 371(2): 703–718
- [24] Walcher J, Groves B, Budavári T, et al. *Ap&SS*, 2011, 331(1): 1–51
- [25] Chen Y, Bressan A, Girardi L, et al. *MNRAS*, 2015, 452(1): 1068–1080
- [26] Costa G, Shepherd K G, Bressan A, et al. *A&A*, 2025, 694: A193
- [27] Boquien M, Burgarella D, Roehlly Y, et al. *A&A*, 2019, 622: A103
- [28] Calzetti D, Arnus L, Bohlin R C, et al. *ApJ*, 2000, 533(2): 682–695
- [29] Charlot S, Fall S M. *ApJ*, 2000, 539(2): 718–731
- [30] Noll S, Burgarella D, Giovannoli E, et al. *A&A*, 2009, 507(3): 1793–1813
- [31] Dale D A, Helou G. *ApJ*, 2002, 576(1): 159–168
- [32] Dale D A, Helou G, Magdis G E, et al. *ApJ*, 2014, 784(1): 83
- [33] de Barros S, Schaerer D, Stark D P. *A&A*, 2014, 563: A81
- [34] Fritz J, Franceschini A, Hatziminaoglou E. *MNRAS*, 2006, 366(3): 767–786
- [35] Salim S, Rich R M, Charlot S, et al. *ApJS*, 2007, 173(2): 267–292
- [36] Cid Fernandes R, Mateus A, Sodré L, et al. *MNRAS*, 2005, 358(2): 363–378
- [37] Tojeiro R, Heavens A F, Jimenez R, et al. *MNRAS*, 2007, 381(3): 1252–1266
- [38] Iyer K, Gawiser E. *ApJ*, 2017, 838(2): 127
- [39] Carnall A C, Leja J, Johnson B D, et al. *ApJ*, 2019, 873(1): 44
- [40] Leja J, Carnall A C, Johnson B D, et al. *ApJ*, 2019, 876(1): 3
- [41] Iyer K G, Pacifici C, Calistro-Rivera G, et al. arXiv e-prints, 2025: arXiv:2502.17680
- [42] Lovell C C, Acquaviva V, Thomas P A, et al. *MNRAS*, 2019, 490(4): 5503–5520
- [43] Gao Z, Peng Y, Wang K, et al. *ApJ*, 2025, 979(1): 66

- [44] Lin R, Zheng Z Y, Yuan F T, et al. Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 2024, 67(10): 109811
- [45] Lin R, Zheng Z Y, Jiang C, et al. ApJ, 2025, 980(2): L34
- [46] Burgarella D, Buat V, Iglesias-Páramo J. MNRAS, 2005, 360(4): 1413–1425
- [47] Bruzual G, Charlot S. MNRAS, 2003, 344(4): 1000–1028
- [48] Chabrier G. PASP, 2003, 115(809): 763–795
- [49] Ferland G J, Porter R L, van Hoof P A M, et al. , 2013, 49: 137–163
- [50] Stalevski M, Ricci C, Ueda Y, et al. MNRAS, 2016, 458(3): 2288–2302
- [51] Yuan F T, Zheng Z Y, Jiang C, et al. ApJ, 2024, 975(1): 53
- [52] Zhu S, Yuan F T, Jiang C, et al. ApJ, 2024, 974(1): L20
- [53] Meiksin A. MNRAS, 2006, 365(3): 807–812
- [54] Ferland G J. PASP, 1980, 92: 596–602
- [55] Steidel C C, Bogosavljević M, Shapley A E, et al. ApJ, 2018, 869(2): 123
- [56] Nakajima K, Ouchi M. MNRAS, 2014, 442(1): 900–916
- [57] Walcher C J, Lamareille F, Vergani D, et al. A&A, 2008, 491(3): 713–730
- [58] Yuan F T, Burgarella D, Corre D, et al. A&A, 2019, 631: A123
- [59] Giovannoli E, Buat V, Noll S, et al. A&A, 2011, 525: A150
- [60] Yuan F T, Argudo-Fernández M, Shen S, et al. A&A, 2018, 613: A13
- [61] Aniano G, Draine B T, Gordon K D, et al. PASP, 2011, 123(908): 1218
- [62] Boquien M, Buat V, Boselli A, et al. A&A, 2012, 539: A145
- [63] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2002, 336(2): 449–466
- [64] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2003, 341(2): 669–691
- [65] Zhang F, Han Z, Li L, et al. MNRAS, 2005, 357(3): 1088–1103
- [66] Eldridge J J, Stanway E R. MNRAS, 2012, 419(1): 479–489
- [67] Maeder A, Meynet G. ARA&A, 2000, 38: 143–190
- [68] Maeder A, Meynet G. Reviews of Modern Physics, 2012, 84(1): 25–63
- [69] Choi J, Dotter A, Conroy C, et al. ApJ, 2016, 823(2): 102
- [70] Dieleman S, Willett K W, Dambre J. MNRAS, 2015, 450(2): 1441–1459
- [71] Euclid Collaboration, Bisigello L, Conselice C J, et al. MNRAS, 2023, 520(3): 3529–3548
- [72] Reiman D M, Göhre B E. MNRAS, 2019, 485(2): 2617–2627
- [73] Binney J, Merrifield M. Galactic Astronomy. [S.l.]: [s.n.] , 1998

Review of Galaxy Multi-wavelength Observations and SED Fitting Methods

YUAN Fang-Ting^{1,2}, Zheng Zhen-Ya^{1,2}, Jiang Chunyan^{1,2}, Zhu Shuairu^{1,2}, Lin Ruqiu^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory for Astrophysics, Shanghai 200234, China)

Abstract: The radiation of galaxies spans a wide range of wavelengths from X-rays to radio, with different bands tracing physical processes such as star formation, dust absorption and emission, nebular radiation, and active galactic nuclei. By combining multiwavelength observations with spectral energy distribution (SED) fitting methods, we can accurately derive key physical parameters of galaxies. In this review, we summarize multiwavelength

observations and SED fitting techniques, introducing the main radiation sources and representative observational facilities across the X-ray to radio bands. We also present the basics of SED fitting and its applications in deriving physical parameters such as stellar masses and star formation rates. We aim to provide a comprehensive reference for multiwavelength galaxy data analysis.

Key words: galactic radiation; multiwavelength observations; spectral energy distribution (SED); SED fitting