

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.02.05

中红外波段星系电离特性研究

刘伟哲^{1,2}, 郝 蕾¹

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中红外高电离发射线 [O IV](25.9 μm) 的产生机制尚不明确。利用简单的光致电离模型, Hao 等人 (2009) 初步分析发现, 当星暴星系模型给出的 [Ne III]/[Ne II] 值与观测相当时, 其给出的 [O IV]/[S III] 值却比观测值低约 4 个量级。[O IV]/[S III], [S IV]/[S III], [Ne III]/[Ne II] 等中红外发射谱线比值及其变化趋势, 以及其与 ITERA package 中提供的各类更新的光致电离模型比较, 是进一步探索星暴星系中 [O IV] 发射来源的一种有效途径。观测数据与电离模型计算结果的比较表明, Hao 等人 (2009) 中提出的中红外发射线诊断图 [O IV]/[S III] 对 [S IV]/[S III] 中的分支结构能分别较好地与 AGN 与星暴星系光致电离模型相吻合。这些星暴星系模型所产生的 [O IV] 发射的强度与电离光谱中大于 4 Ryd 段的相对光子流量呈紧密正相关, 单独考虑 Wolfe-Rayet 星的辐射对电离光谱的贡献足以解释星暴星系中的 [O IV] 发射线; 而对于 [O IV]/[S III] 对 [Ne III]/[Ne II] 诊断图, 模型仍很难解释观测结果, 特别是星暴星系分支: 当由模型计算出的 [O IV]/[S III] 值与观测相当时, 其给出的 [Ne III]/[Ne II] 值相比于观测仍明显偏高。如果考虑上述发射线均来自具有单一密度与电离参数的发射区, 那么 [Ne III]/[Ne II] 值与电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率密切相关。

关键词: 光致电离; 星暴星系; BCD; 活动星系核; 极亮红外星系

中图分类号: P145.91 **文献标识码:** A

1 引 言

星系的形成与演化是现代天体物理研究中的重要课题之一。对不同星系活动性的研究是了解星系形成与演化过程的重要内容之一。不同星系的活动性主要与两类因素有关: 一类是星系中心超大质量黑洞吸积作用产生的巨大能量释放, 另一类则是星系中剧烈的恒星形成活动。在观测上, 前者的观测证据是大量活动星系核 (AGN) 的发现, 后者的观测证据主要为星暴星系等恒星形成星系。星系核区的星暴活动和正在吸积的超大质量黑洞常常共同存在, 这在极亮红外星 (ULIRG) 中得到了较好的证明^[1, 2]。因此, 诊断星系中心能量来源成为星系

收稿日期: 2016-07-15; 修回日期: 2016-12-22

资助项目: 国家自然科学基金 (11473305); 中国科学院战略性先导专项 B 类 (XDB09030200)

通讯作者: 郝蕾, haol@shao.ac.cn

性质研究中的重要内容。

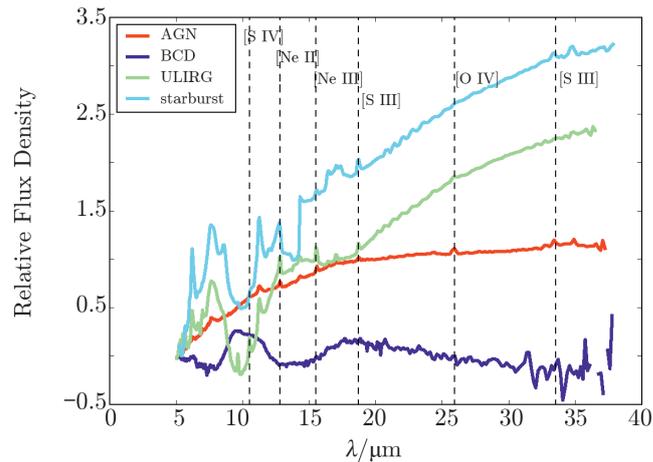
AGN 与恒星形成活动会产生大量高能光子电离星际介质, 因此估计星系中电离场的特性对决定星系中心主要能量来源至关重要。AGN 的辐射能来自于其中心的超大质量黑洞吸积周围的恒星和气体, 其产生的高能电离光子比大质量恒星和恒星团更多, 因此通过光致电离能得到更多的高电离态离子。通过测量处于不同电离态离子的发射线的相对强度, 可以判断参与光致电离的高能光子的比例, 进而区分 AGN 和恒星形成活动对光致电离的贡献。在星系环境中, 影响发射线强度的物理参数较多, 使用单一的发射线强度进行研究时, 难以打破各物理参数之间的简并。消除这些简并的最好方法, 就是利用两组不同的发射线比作图, 这种图被称为发射线比诊断图。处于不同电离级的元素的发射线的比值与入射电离光谱的谱型直接相关, 具有不同电离场的星系在发射线比诊断图上很容易被区分开。发射线比值图作为探究星际电离场的重要工具, 一直被广泛使用。在光学波段, 经典的 BPT 图^[3] 经常被用来诊断星系中心的能量主要来自恒星形成活动还是 AGN 活动。

在星暴星系中活跃的恒星形成区和活动星系核中的核周区域(星系中心几百秒差距范围内)常常存在严重的尘埃消光, 使得来自中心的星暴活动或者剧烈的核吸积过程产生的能量主要在中远红外波段发射。同时, 随着 Spitzer、Herschel 等太空红外望远镜的发射升空, 大量红外波段的观测数据为细致研究星暴星系、ULIRG 与 AGN 提供了新的途径。其中, 中红外波段的精细结构谱线成为了研究星系中电离场的重要工具。来自于处于不同电离态的不同元素的中红外发射线, 成为探测星系电离场的优良探针。[Ne II](12.8 μm), [Ne III](15.5 μm), [S IV](10.5 μm), [S III](18.7 μm) 等中红外发射线在近年来的研究中被广泛使用。例如, Inami 等人 (2013)^[4] 利用中红外发射线强度和比值, 探索了亮红外星系中 AGN 和星暴活动主导时电离参数的差异, 以及激波过程引起的电离在亮红外星系中的重要性。Tommasin 等人 (2010)^[5] 利用 [Ne V]/[Ne II] 对 [O IV]/[Ne II] 诊断图研究了 I 型和 II 型 AGN 中 AGN 成分在红外辐射中所占比重以及对电离的贡献; 此外, 他们还研究了 I 型和 II 型 AGN 的中红外发射线光度函数并指出二者没有显著区别。表 1 列举了常见的中红外发射线。图 1 展示了 AGN、BCD、ULIRG 和星暴星系的典型中红外连续谱和发射线特征。

表 1 常见中红外发射线

发射线名称	[Ar III]	[S IV]	[Ne II]	[Ne III]	[S III]	[O IV]	[S III]
波长/ μm	9	10.5	12.8	15.5	18.7	25.9	33.3
电离能/eV	27.6	34.8	21.6	41.0	23.3	54.9	23.3

Hao 等人 (2009) 利用 Spitzer 上搭载的 IRS 光谱仪拍摄的高分辨率光谱, 研究了 AGN、ULIRG、星暴星系以及蓝致密矮星系 (BCD) 中电离场的物理特性^[6]。BCD 是一类光学颜色偏蓝 ($M_B < -18$ mag)、结构致密(光学波段直径小于或约等于 1 kpc)、光度较低的矮星系, 其内部具有剧烈的恒星形成活动^[7, 8]。以往的研究已经很好地表明, 恒星辐射光谱随着金属丰度降低而变硬, 即高能段辐射流量相对增强(例如 Campbell 等人^[9]的研究)。因此, BCD 中的电离场应比一般星暴星系的更硬。Hao 等人 (2009) 年选取了近邻宇宙中的蓝致密



注：图中光谱为 NGC5548、IIZW40、Mrk273 和 M82 的 Spitzer 低分辨率光谱，分别代表 AGN、BCD、ULIRG 和星暴星系。我们以静止波长 $6 \mu\text{m}$ 处的流量密度为基准对四个源的光谱进行了归一化。此外，图中虚线对应常见的中红外发射线。图中光谱均取自 Spitzer Heritage Archive (<http://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>)。

图 1 AGN、BCD、ULIRG 和星暴星系的中红外光谱示例

矮星系、ULIRG、AGN 和星暴星系的代表样本，用以探究不同的物理参数条件下，恒星形成星系中的电离场与 AGN 辐射主导的电离场的物理特性的异同。她们提出了以纵坐标为 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ ($25.9 \mu\text{m}$)/ $[\text{S III}]$ ($33.3 \mu\text{m}$)，横坐标为 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ ($15.5 \mu\text{m}$)/ $[\text{Ne II}]$ ($12.8 \mu\text{m}$) 的线比诊断图 (见文献 [6] 中图 1)。图中的样本分成两支，典型的 AGN 和含有 AGN 成分的 ULIRG 占据了有较高 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 的一支，而 BCD 和纯星暴星系则占据 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 较低的一支。相同的分支结构也存在于纵坐标为 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ ，横坐标为 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ ($10.5 \mu\text{m}$)/ $[\text{S III}]$ ($18.7 \mu\text{m}$) 的图中 (见文献 [6] 中图 3)。这种分支结构的存在，表征了恒星形成星系与 AGN 中电离场的不同特性，对诊断星系中心能量来源提供了又一种新的判据。

然而，星系中中红外波段不同电离态的发射线的来源仍然是一个尚未定论的问题。其中，诸如 $[\text{O IV}]$ ($25.9 \mu\text{m}$) 这样的高电离发射线的存在本身就是一个十分有趣的问题，因为产生这类发射线往往需要许多极端条件。以 $[\text{O IV}]$ ($25.9 \mu\text{m}$) 为例，其需要的电离势能为 54.9 eV ，刚好高于 $[\text{He II}]$ 的电离能，因此不能从主序恒星电离的氢二区中产生。一个可能的解释是 $[\text{O IV}]$ 发射是由于 AGN 的贡献，因为 AGN 能产生较硬的电离场，能轻易电离 O^{3+} 。然而，至少对一部分星暴星系而言，它们中的 $[\text{O IV}]$ 发射不可能源自 AGN 活动^[10]。此外，该发射线在星暴星系中普遍存在，其产生机制应当与星暴活动有关^[6]。一种可能的解释是， $[\text{O IV}]$ 是由 Wolf-Rayet 星电离产生^[11]。Wolf-Rayet 星是极大质量的恒星 (质量大于 20 倍太阳质量) 演化的晚期阶段。这类恒星比主序恒星更热，能产生大量足够电离 O^{3+} 的高能光子。然而，Wolf-Rayet 星的观测特征，例如宽的 $[\text{He II}]$ 4686 发射，在很多具有明显 $[\text{O IV}]$ 发射的星暴星系中尚未被测到。目前的研究对于星暴星系中 $[\text{O IV}]$ 发射是否由 Wolf-Rayet 星产生尚无定论。

根据不同的电离机制建立不同的电离模型, 并将这些电离模型与观测数据相比较, 是探索星系中诸如 $[\text{O IV}](25.9 \mu\text{m})$ 这样的高电离中红外发射线的另一种方法。在 Hao 等人 (2009) 的研究中^[6] 中, 她们利用 STARBURST99 星族合成模型和 CLOUDY 辐射转移模拟程序, 模拟了单次星暴活动导致的光致电离, 对星系中 $[\text{O IV}]$ 发射的来源进行了初步探索。她们发现, 模型预言了 $[\text{O IV}]$ 发射的产生与星系中 Wolf-Rayet 星的出现相关, 因为依照模型计算, 可观的 $[\text{O IV}]$ 发射只在 Wolf-Rayet 星存在的阶段才能被观测到。然而, 在比较由光致电离模型计算得到的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 以及 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 的比值时, 当模型产生与观测相似的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值时, 模型预言的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值将比观测值低整整 4 个量级。这种显著差异的存在难以解释。显然, 为了进一步探究并解释上述模型计算值与观测值之间的差异, 同时探索星暴星系以及其他星系中 $[\text{O IV}]$, $[\text{Ne III}]$ 等中红外发射线的产生机制, 我们应当系统地分析现有的不同电离模型并与观测数据进行比较。

在前人的研究工作中, 多种星暴星系光致电离模型以及 AGN 光致电离模型被建立, 并不断发展完善。其中, 具有代表性的包括 Kewley 等人建立的星暴星系模型^[12], Groves 等人建立的 AGN 模型等^[13, 14]。简单而言, 光致电离的物理内涵是高能光子电离中性气体, 因此, 光致电离模型主要由两部分组成, 分别是入射电离光谱模型和辐射转移过程。对于星暴星系, 先利用星族合成模型 (如 STARBURST99^[24]) 计算由恒星和恒星团产生的电离光谱, 再将该光谱作为输入量导入辐射转移程序 (如 MAPPINGS III^[15]) 计算各发射线流量。对于 AGN 模型, 一般假设产生的电离光谱为绝对流量和斜率不同的幂律谱, 再将该电离光谱作为输入量导入辐射转移程序计算发射线流量。

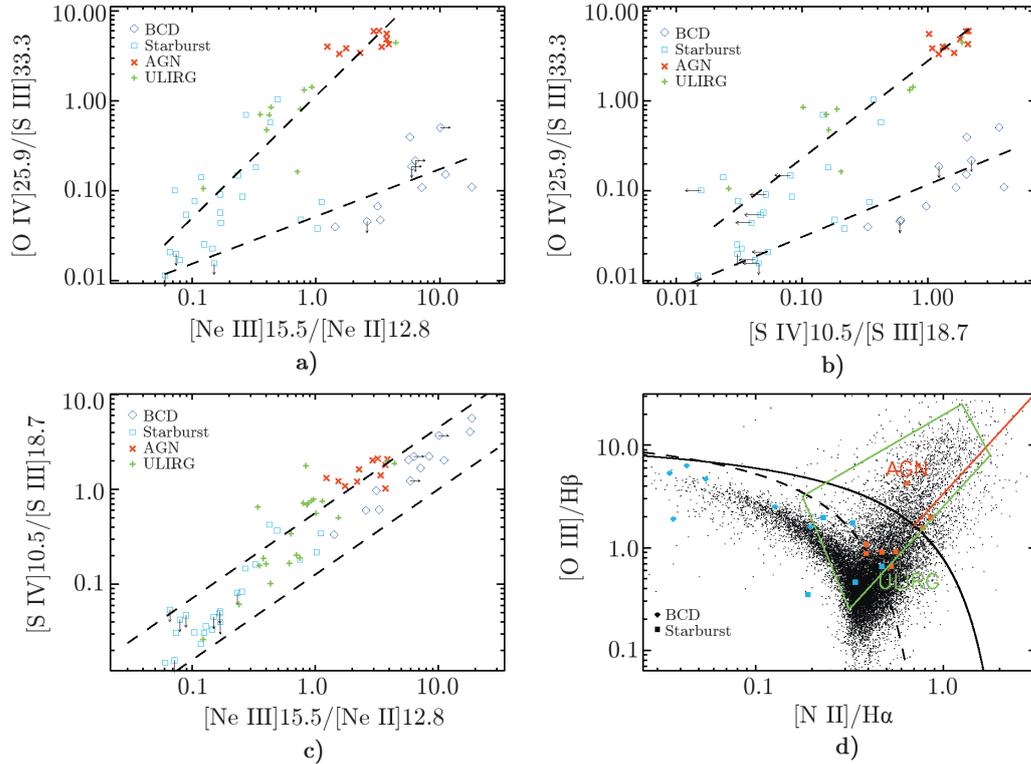
本文基于 Hao 等人 (2009)^[6] 的工作, 利用 SPITZER 红外波段和 SDSS 光学波段的观测数据, 以及 ITERA package^[16] 中提供的不同光致电离模型, 对不同物理条件下的星系电离场进行了进一步探究。正文的第二章简单介绍了文中使用的观测数据; 第三章介绍了文中涉及的不同的光致电离模型; 第四章对不同光致电离模型与观测数据之间的异同进行了详细的比较; 第五章对第四章中论及的问题开展了进一步分析讨论; 第六章是对整篇文章的总结。

2 观测数据

本文的观测数据在 Hao 等人 (2009)^[6] 文中已有详细介绍, 这里进行简单的说明。本文的观测样本主要包括: AGN、BCD、ULIRG 和星暴星系。BCD 的观测数据来自 Spitzer 太空望远镜的高分辨光谱观测, 观测样本取自 Wu 等人 (2006)^[17], 共 12 个源, 暗弱的源和没有典型 BCD 特征的源均未被选取; AGN 样本均选自 Hao 等人 (2009) 中的 I 型 AGN^[6], 包括类星体和 I 型赛弗特星系, 此处选择的 AGN 样本虽然不是一个完备的样本, 但却能很好地代表近邻宇宙中 AGN 发射的典型特征; 星暴星系样本均取自 Bernard 等人 (2009)^[18]; ULIRG 样本取自 Farrah 等人 (2007)^[19]。

在图 2 中, 我们重新绘制了 Hao 等人 (2009) 文章中的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 图、 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 图、 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 以及光学波段的 BPT

图, 图中数据点的测量误差与各符号的大小具有相当量级。选取 $[O\text{IV}]/[S\text{III}]$ 是因为 O^{3+} 和 S^{2+} 电离能相差较大, 并且这两条线均位于 Spitzer 望远镜 IRS LH module 中, 可以不受孔径效应的影响。 $[Ne\text{III}]$ 、 $[Ne\text{II}]$ 是 Ne 元素不同电离态的发射线, 两种电离态电离能相差较大, 选取 $[Ne\text{III}]/[Ne\text{II}]$ 值除了使发射线比值不受孔径效应影响之外, 还能排除元素丰度对发射线比值的影响。此外, 采用 $[S\text{IV}]/[S\text{III}]$ 值也是基于与选取 $[Ne\text{III}]/[Ne\text{II}]$ 值相同的原因。



注: a), b), c) 中不同颜色和形状的符号分别代表不同类型的星系。在 d) 中, 符号的两种颜色代表星暴星系与 BCD 在前面三幅图中的位置, 即橙色的符号表示这些点在前面三幅图的两支中靠上的一支, 绿色的符号表示这些点在前面三幅图的两支中靠下的一支; 此外, AGN 一般位于该图中黑色实线与红色实线之上的区域^[20]; 典型的 ULIRG 在 BPT 图中所处位置为图中绿色方框区域, 该区域我们根据 Hou 等人 (2009)^[21] 中图 5 的数据确定。

图 2 Hao 等人 (2009) 中的中红外发射线诊断图

首先, 在 $[O\text{IV}]/[S\text{III}]$ 对 $[Ne\text{III}]/[Ne\text{II}]$ 图和 $[O\text{IV}]/[S\text{III}]$ 对 $[S\text{IV}]/[S\text{III}]$ 图中, 观测样本呈现明显的分支结构, AGN, ULIRG 以及含有 AGN 成分的星暴星系占据 $[O\text{IV}]$ 较高的一支而 BCD 和纯的星暴星系占据 $[O\text{IV}]$ 较低的一支, 图中虚线表示经验确定的两支的分布趋势。AGN 和 BCD 中光致电离的能量来源不同: 前者为中心黑洞吸积活动产生的高能辐射, 而后者是大质量恒星产生的辐射。定性而言, 前者产生的高能光子更多, 因而处于高电离态的 $[O\text{IV}]$ 发射更强。上述分支结构的产生正是表征了 AGN 活动与恒星形成活动的不同特征。在图 $[S\text{IV}]/[S\text{III}]$ 对 $[Ne\text{III}]/[Ne\text{II}]$ 中, 不同样本之间没有明显的界限, 这表

明 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 和 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 对星系电离场的敏感性不如 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 。此外, Hao 等人 (2009)^[6] 文中也指出, $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 图和 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 图中, 不同星系在两支的分布对应于其在 BPT 图中的分布, 即 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 较高的星系主要位于 BPT 图中的 AGN 区域, 而 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 较低的星系主要位于 BPT 图中的恒星形成区域。

3 电离模型

本文中所使用的电离模型, 均来自 ITERA package^[16] (<http://www.brentgroves.net/itera.html>), 它整合了目前为止使用较多的不同的星暴星系光致电离模型以及 AGN 光致电离模型。下面对本文中涉及到的各类光致电离模型进行比较详细的介绍。

3.1 星暴星系模型

本文使用的星暴星系主要分为两类, 分别为 Kewley 等人 (2001)^[12] 中的模型 (简称 Kewley (2001) 模型) 和 Levesque 等人 (2010)^[22] 中的模型 (简称 Levesque (2010) 模型)。

3.1.1 Kewley (2001) 模型

该类模型考虑了 PEGASE 2^[23] 和 STARBURST99^[24] 两种星族合成模型产生恒星辐射场的情况。恒星的演化历史包括从零龄主序开始到渐近巨星支 (AGB), 再到后渐近巨星支 (pAGB) 等一系列阶段, 而上述两种模型最主要的区别即在于考虑的恒星演化历史不同。PEGASE 2 采用的是 Padova track^[25], 而 STARBURST99 采用的则是 Geneva track^[26]。两者的具体区别参见 Schaller 等人 (1992)^[26] 文章中的图 5 和 Bressan 等人 (1993)^[25] 文章中的图 7。在恒星大气模型的使用上, PEGASE 2 采用了 Lejeune 等人 (1997)^[27] 恒星大气模型并包括了 Clegg 和 Middlemass^[28] 行星状星云核的模型。STARBURST99 也采用了 lejeune 等人 (1997)^[27] 的平行平面层大气模型但并未加入 Clegg 和 Middlemass (1987) 中的行星状星云核的模型, 而是在处理具有强星风的恒星时采用了延展恒星大气模型^[29]。PEGASE 2 与 STARBURST99 的另外一个重要区别是对有效温度大于 50 000 K 的恒星的处理上, 前者是利用行星状星云核的模型来估计 Wolf-Rayet stars 的大气模型, 而后者则是直接采用了 Wolf-Rayet stars 的大气模型, 这直接影响了计算得出的恒星入射谱能量分布 (SED)。此外, 相较于 PEGASE 2 模型, STARBURST99 模型在处理 EUV 波段的 SED 时考虑的物理模型更加复杂, 更加适合模拟星暴星系中恒星产生的入射 SED。之后, 由上述模型计算出的恒星入射 SED 被作为输入量导入 MAPPINGS III 辐射转移模拟程序^[15], 用以计算各发射线流量。该模拟程序考虑了自洽的尘埃物理模型与化学演化模型。在计算过程中, 程序主要考虑的与尘埃有关的物理过程包括尘埃对光子的吸收、尘埃的电离以及尘埃的光电加热过程。

Kewley (2001) 模型中采用了所有恒星一次爆发形成和连续不断的星暴活动两种恒星形成历史, 且星暴时间为 8 Ma 时, 星系的辐射达到平衡态, 恒星产生的电离光谱不再发生变化的假设^[12]。对于 Kewley (2001) 星暴星系模型, ITERA package 只记录了星暴 8 Ma 时星系辐射到达平衡态的发射线流量, 而没有记录之前时段的流量。因此, 对于该类模型, 我们

无法对 [OIV] 发射随星暴时间产生的变化进行研究。在 8 Ma 时, 只有利用 STARBURST99 并假设了连续不断的星暴活动的一类模型具有 [OIV] 发射线。因此, 在本文之后的讨论中, 对于 Kewley (2001) 模型, 我们只讨论基于 STARBURST99 并假设连续星暴活动的光致电离模型得到的结果。

该模型中的可调物理参数有 3 个, 分别是电离参数、金属丰度、电子数密度。其中, 电离参数表征了参加光致电离的总入射光子流量与被电离区域氢原子数密度的比值。Kewley 等人指出, 上述模型在解释观测数据时遇到的主要问题是, 其产生的 EUV 波段 ($1 \sim 4$ Ryd) 的高能光子流量偏低。她们提出在使用的恒星大气模型中引入金属引起的连续吸收可能是解决该方法之一^[12]。

3.1.2 Levesque (2010) 模型

该模型采用了更新的 STARBURST99 星族合成模型与新的 MAPPINGS III 辐射转移模拟程序^[22]。

新的 STARBURST99 模型采用的恒星大气模型分为两部分: 对于恒星年龄小于 3 Ma, O 型星主导星系光度时, 采用的是 PauldrachHiller 恒星大气模型^[30], 其中包括了 WMBASIC 星风模型^[30]; 而对于之后的 Wolf-Rayet 星主导的阶段, 则采用了 CMFGEN 恒星大气模型^[31]。上述两类恒星大气模型在考虑大气的不透明度时, 均在严格的非热动平衡条件下加入了金属元素引起的吸收, 而 Kewley (2001) 模型^[12]并未考虑这一效应。恒星大气中金属元素引起的不透明性使得恒星产生的 EUV 波段的电离光谱更硬, 这是 Levesque (2010) 模型与 Kewley (2001) 模型的主要区别之一。

同 Kewley (2001) 星暴模型一样, Levesque (2010) 模型也考虑了两种恒星形成历史, 即全部恒星一次性爆发形成和保持连续不断的星暴活动过程两种。除此之外, 新的 STARBURST-99 模型在处理恒星演化历史时也采用了 Geneva track, 但不同的是, 对于大质量恒星的演化模型, 它假设了较高的恒星质量损失率^[32], 总体而言, 该模型中假设的大质量恒星的质量损失率是 Kewley (2001) 模型中的两倍, 这也是该模型与 Kewley (2001) 模型的另一个区别。

新的 MAPPINGS III 模型^[33]与之前的版本的主要区别在于, 它重新考虑了更为合理的尘埃物理模型。该模型对尘埃的吸收效应, 尘埃的电离以及光电加热过程有了更为精细的处理。ITERA package 中使用的 Levesque (2010) 模型的可变物理参数有 4 个, 分别是恒星形成的时间、电离参数、金属丰度与氢原子数密度。

3.2 Groves (2004) AGN 模型

该类 AGN 模型模拟了窄线区中的光致电离与辐射转移过程, 可分为两种^[13, 14]。一种是经典的, 考虑窄线区中没有尘埃的 AGN 光致电离模型; 另一种是窄线区中富尘埃的, 辐射压力主导的 AGN 光致电离模型。这两种模型均采用简单的幂律谱来表征 AGN 的电离光谱, 且均利用 MAPPINGS III 作为辐射转移计算程序。

观测数据表明窄线区中存在强的冕发射线^[34], 这些冕线的存在要求电离参数和辐射压力均非常大, 而这和其他观测得到的相对低电离的发射线强度对电离参数与辐射压力的限制存

在矛盾^[13]。在经典的、无尘埃的 AGN 模型中, 窄线区的电离参数与辐射压力范围不能同时满足上述两类发射线的产生条件, 这使得其难以同时解释观测中测量得到的不同电离态的元素的发射线的相对强度。

为了自洽解释观测得到的窄线区中冕发射线与相对低电离的发射线的相对强度, 一种新的、考虑富尘埃环境和辐射压主导的模型被提出。它在前述无尘埃模型的基础上, 引入了窄线区中尘埃的存在对光致电离过程的影响。尘埃能吸收电离光子, 同时具有光电加热效应。尘埃的存在会显著影响电离参数与辐射压力范围, 而使得模型在理论上能同时满足冕发射线与相对低电离的发射线产生的物理条件。此外, 有观测证据支持窄线区中确实存在尘埃成分^[35], 这进一步加强了在 AGN 窄线区模型中加入尘埃成分的合理性。

对于富尘埃的、辐射压力主导的 AGN 模型, 在处理尘埃的物理模型时, Groves (2004) 模型选用了与太阳周围的尘埃性质相符合的最简单的尘埃组成、丰度与尘埃尺寸分布函数, 这虽然与 AGN 中尘埃的物理性质有较大差异, 但仍有助于估计尘埃对窄线区发射线相对强度的影响。在模拟中考虑窄线区尘埃对发射线相对强度的影响时, 在选取了一定的尘埃组成、丰度与尘埃尺寸分布函数之后, 还需要讨论不同的物理过程。对窄线区发射线相对强度起主要影响的物理效应主要包括尘埃对光子的吸收与散射、尘埃的光电加热效应、辐射压力效应以及尘埃的破坏过程^[36]。尘埃对气体的光电加热效应是影响 H II 区温度结构的重要因素^[37]。在 MAPPING III 程序中计算该效应时, 不同的尘埃质量区间被分开计算, 使得不同大小的尘埃能处于不同的电离状态, 这比之前的所有尘埃均处于同一电离状态的模型更符合物理实际。辐射压力对模型的影响主要发生在高电离参数的物理环境中。在等离子体中, 辐射压力主要分为两部分, 一是由光致电离过程导致的, 另一部分则是由尘埃对光子的吸收导致的。

ITERA package 中, 该类模型的可变参数有 4 个, 分别是氢原子数密度、金属丰度、AGN 电离 SED 的斜率以及电离参数。

在表 2 中, 我们列出本文中使用的各类光致电离模型的主要特征。

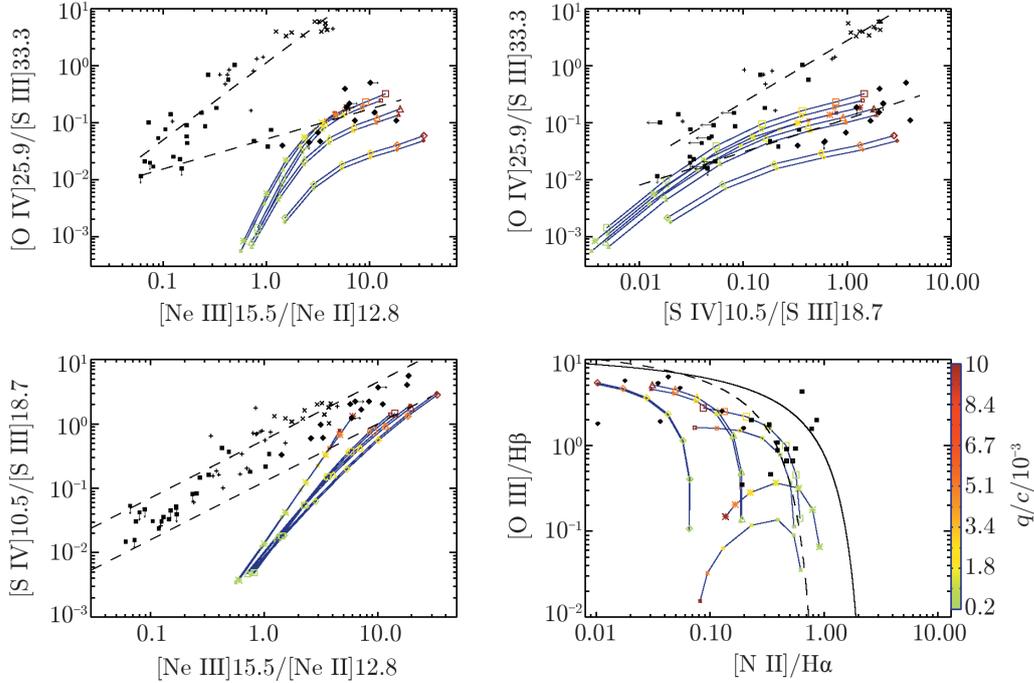
表 2 本文涉及的光致电离模型特征

星暴星系模型名称	恒星大气模型	恒星形成历史	是否考虑大气中金属引起的吸收
Kewley (2001)	Lejeune(1997)	连续	否
Levesque (2010)	PauldrachHiller	连续/单次星暴	是
AGN 模型名称	辐射转移程序	是否辐射压强主导	窄线区是否有尘埃
Groves (2004)AGN 模型一	MAPPINGS	否	无
Groves (2004)AGN 模型二	MAPPINGS	是	有

4 模型与观测数据的比较

4.1 Kewley (2001) 星暴模型

在图 3 中, 我们将观测数据与 Kewley (2001) 星暴星系模型绘制在与图 2 中相同的线比图上并进行比较。其中, 观测数据由不同的黑色实心符号表示, 模型值则用彩色线表示。



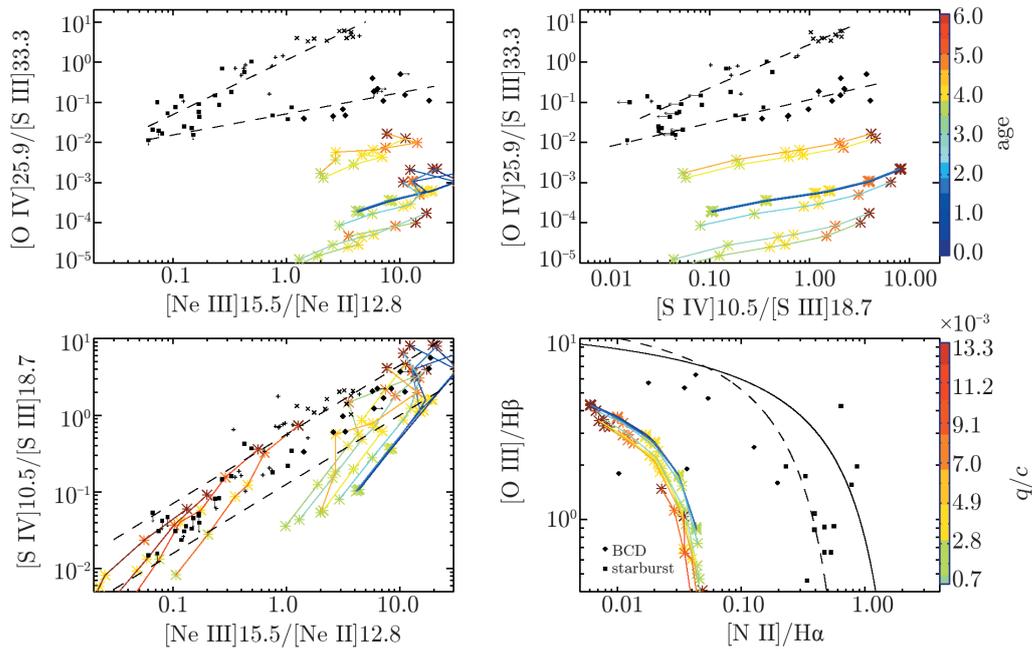
注: 彩色符号的不同形状分别代表模型的不同金属丰度。具体而言, 菱形代表 $0.2Z_{\odot}$, 三角形代表 $0.4Z_{\odot}$, 方形代表 Z_{\odot} , “X”型代表 $2Z_{\odot}$ 。彩色符号的不同大小表示模型对应的数密度。具体而言, 大的符号代表 350 cm^{-3} , 小的符号代表 10 cm^{-3} 。不同符号的颜色代表模型的不同电离参数, 与右下角的颜色棒相对应。黑色的符号与图 2 中观测值相对应。

图 3 Kewley (2001) 模型与观测数据的比较

在 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 图中, 模型能很好地匹配观测数据分支结构中 BCD 和星暴星系所在的一支。但是, 在考虑模型提供的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值与观测符合的前提下, 在 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 图中, 模型计算得到的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值比观测值高。具体而言, 对于 BCD, 模型计算值略高于观测值, 而对于星暴星系, 模型计算值则明显偏高。总体而言, 在 BCD 这一支中, $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值越低的源, $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 的观测值与模型计算值的差异越大, 差异达到约 1 个量级。在 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 图中, 也表明模型计算的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值与观测值存在明显差异。同样地, 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 越低的星暴星系, 观测值与模型计算值的差异也越大。而在 BPT 图中, 模型能较好地覆盖典型的恒星形成星系与 BCD 所在区域。

4.2 Levesque (2010) 星暴模型

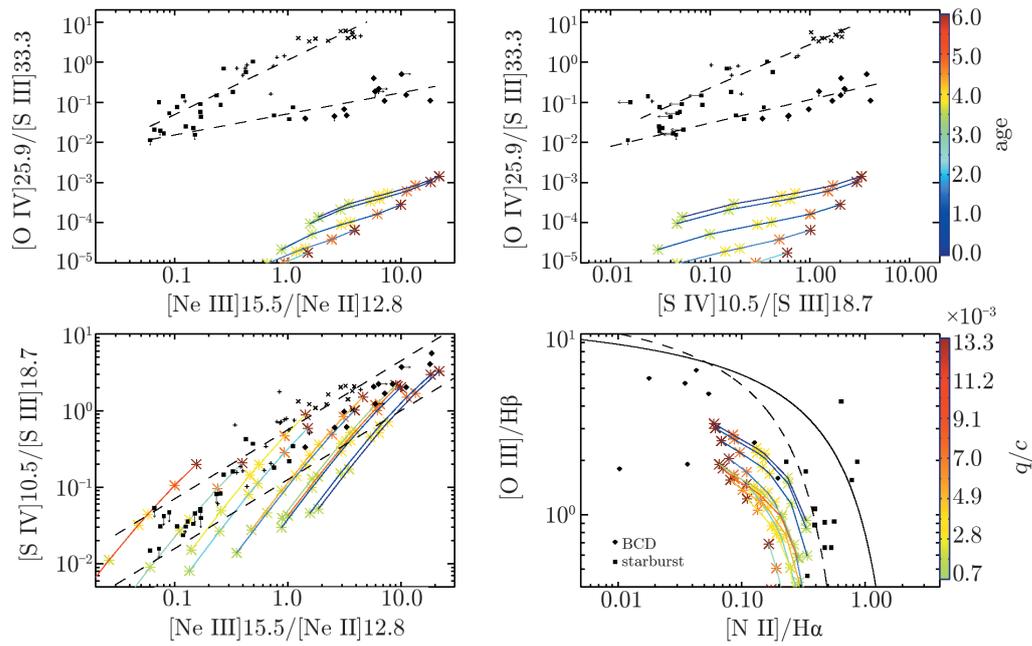
在图 4 和图 5 中, 该类模型假设了全部恒星在零龄时一次爆发性形成的恒星形成历史。图 4 比较了贫金属的星暴模型与观测数据中 BCD 所在的一支。在 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图中, 模型能很好地覆盖观测数据所在区域。但是, 在 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图和 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图中, 模型计算值与观测数据之间存在差异, 模型计算得到的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值比观测数据小约 1 个量级。在图 5 中, 我们换用了富金属的星暴模型, 模型计算得到的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值与观测数据差异更大, 前者比后者至少小两个量级。综合上述三个诊断可看到, 该模型与 Kewley (2001) 模型明显不同, 它极大地低估了 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 的值而不是高估 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 的值。



注: 图中不同形状黑色符号与图 2 对应, 分别代表不同类型的星系; 彩色的线条与 * 号为 Levesque (2010) 一次爆发星暴星系模型, 模型的金属丰度为 $0.4Z_{\odot}$, 数密度为 100 cm^{-3} 。图中右上方颜色棒对应图中线条的颜色, 代表自星暴开始发生起的时间, 右下方的颜色棒对应 * 号的颜色, 代表模型中不同的电离参数。黑色的符号与图 2 中观测值相对应。

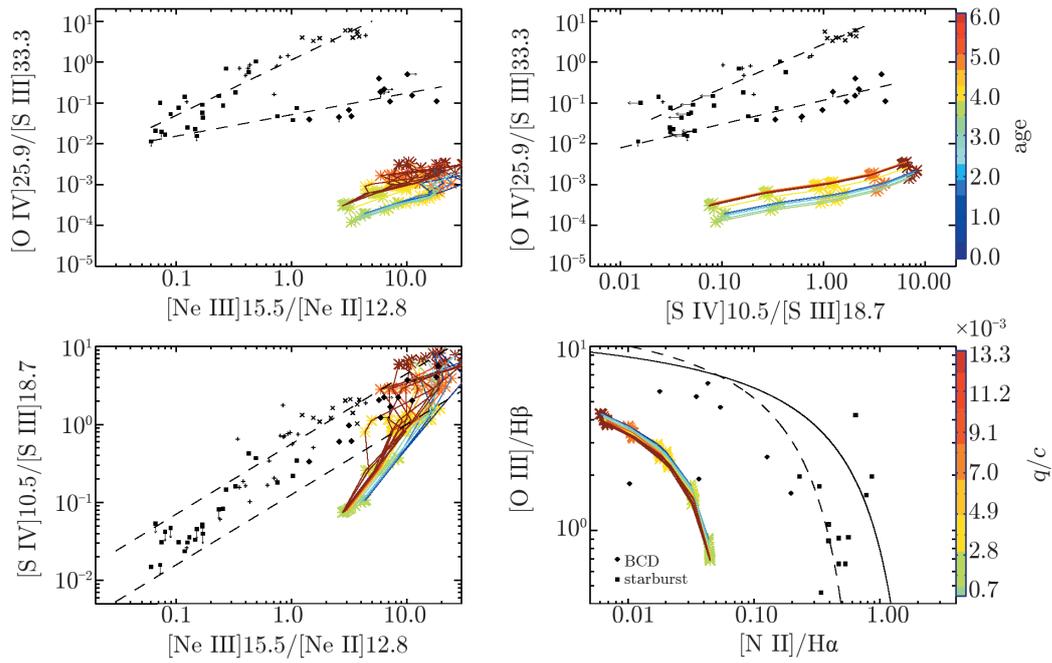
图 4 贫金属的一次爆发 Levesque (2010) 模型与观测数据的比较

在图 6 和图 7 中, 该类模型假设了恒星连续形成的恒星形成历史。在图 6 中, 我们采用了贫金属丰度的星暴模型。在 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图中, 模型能很好地产生与观测数据相似的线比, 但从 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图和 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图中可以发现, 模型计算得到的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值比观测值低至少一个量级。在图 7 中, 同样地, 富金属丰度的星暴模型难以解释观测数据, 结合 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图, $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图和 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图, 可以发现模型既产生了过多的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$, 又难以产生足够的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 。



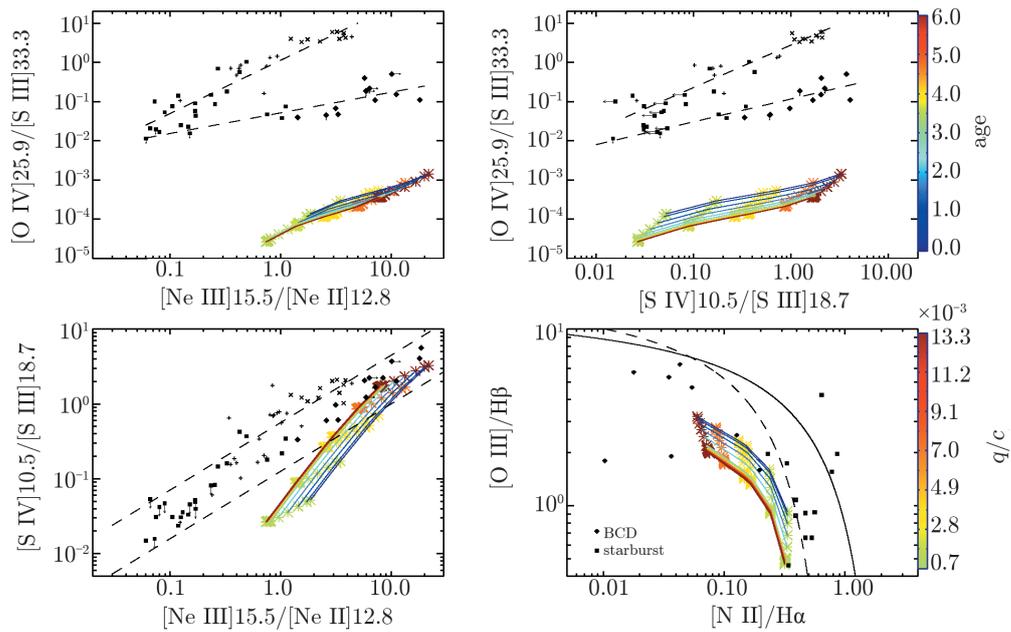
注：模型的金属丰度为 Z_{\odot} ，数密度为 100 cm^{-3} 。其他说明同图 4。

图 5 富金属的一次爆发 Levesque (2010) 模型与观测数据的比较



注：图中彩色的线条与 * 号为 Levesque (2010) 连续星暴的星暴星系模型，模型的金属丰度为 $0.4Z_{\odot}$ ，数密度为 100 cm^{-3} 。其他说明同图 4。

图 6 贫金属的连续星暴 Levesque (2010) 模型与观测数据的比较



注: 图中彩色的线条与 * 号为 Levesque (2010) 连续星暴的星暴星系模型, 模型的金属丰度为 Z_{\odot} , 数密度为 100 cm^{-3} 。其他说明同图 4。

图 7 富金属的连续星暴 Levesque (2010) 模型与观测数据的比较

4.3 Groves (2004) AGN 模型

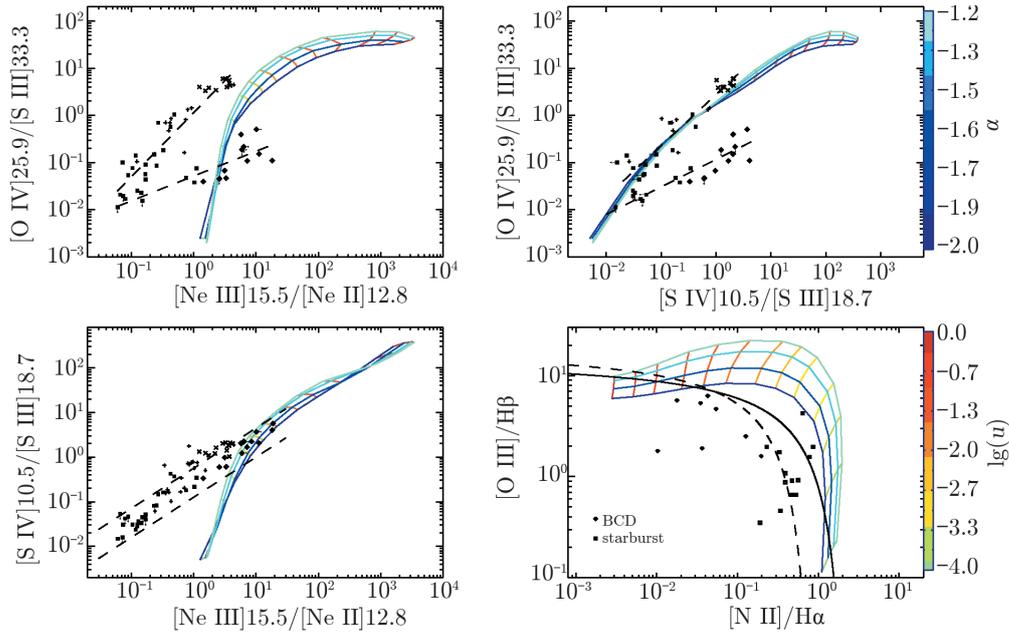
如第二部分中说明过的, 这类模型分为两类: 一类是经典的, 窄线区中没有尘埃的 AGN 模型 (见图 8); 另一类是窄线区中富尘埃的, 辐射压力主导的 AGN 模型 (见图 9)。在图 8 和图 9 中, 我们分别选取了由上述两类 AGN 模型计算出的线比值与观测数据进行比较。

在图 8 中的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图中, 模型能很好地匹配观测数据中 AGN 所在的一支。但是, 在 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图和 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图中, 模型计算出的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值比观测值略高。在 AGN 所在的一支上, 对于 AGN, AGN 模型计算值略高于观测值, 对于 ULIRG, AGN 模型计算值则明显高于观测值。总体而言, 在 AGN 所在的一支中, $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 或者 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 越低的源, 模型计算出的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值比观测值高得越多, 差异最大时模型计算的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值比观测值高出约 3~4 倍。

在图 9 中, 从 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 的发射线比值图可以看出, 该模型也能很好地匹配观测数据得到的 AGN 的发射线比值。该模型与观测数据中 AGN 所在的一支之间的差异与图 8 中相似, 即模型产生了过多的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值, $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 或者 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 越低的源, 模型计算出的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值比观测值高得越多, 差异最大时模型计算得到的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值比观测数据也高出 1 个量级左右。这一差异与图 3 中的差异相当。

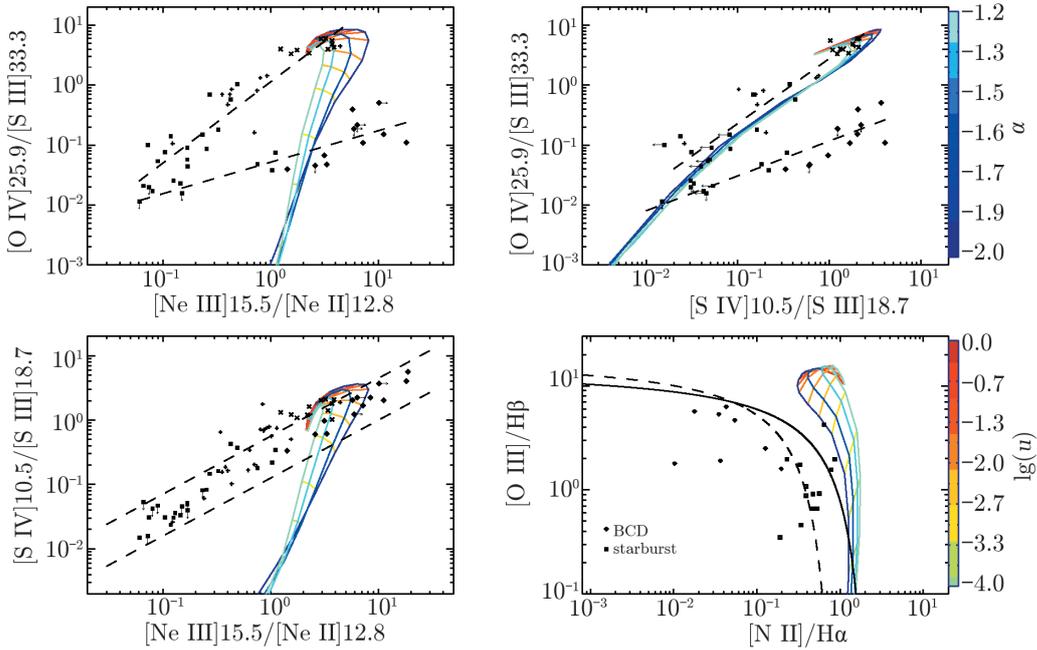
4.4 小结

在本部分中, 我们对不同模型与观测数据进行比较。总体而言, AGN 模型和 Kewley



注：金属丰度为 Z_{\odot} ，数密度为 $10\ 000\ \text{cm}^{-3}$ 。模型网格的颜色与图右边的颜色棒相对应，分别表示模型的 AGN 连续谱的谱指数以及电离参数。

图 8 Groves (2004) 中标准的、无尘埃的 AGN 模型与观测数据的比较



注：金属丰度为 Z_{\odot} ，数密度为 $10\ 000\ \text{cm}^{-3}$ 。其他说明同图 8。

图 9 Groves (2004) 中富尘埃的、辐射压强主导的 AGN 模型与观测数据的比较

(2001) 星暴模型能分别很好地解释 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图中观测数据形成的上下两支。但是在包含 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 的图中, 与观测数据相比, AGN 模型与 Kewley (2001) 星暴模型均高估了 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 的值。对于 AGN 与 BCD, 该差异很小; 对于 ULIRG, 该差异较大; 对于星暴星系, 这一差异尤为明显。而对于 Levesque (2010) 星暴模型, 问题却更多表现在与观测数据相比, 该模型不能产生足够的 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值。

5 讨 论

5.1 模型与观测表现出基本相同的分支结构

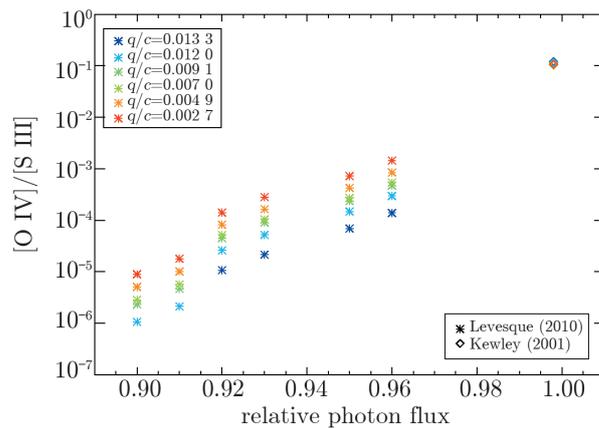
在图 2 中, $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 图和 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 图观测数据呈现出两支分布, AGN、ULIRG 和含有 AGN 成分的星暴星系构成 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值较高的一支, BCD 和纯的星暴星系则构成 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值较低的一支。对于 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 对 $[\text{SIV}]/[\text{SIII}]$ 诊断图, AGN 模型 (见图 8 和图 9) 和 Kewley (2001) 星暴模型 (见图 3) 能很好地解释这种分支结构, 这表明现有理论模型中对于 AGN 活动与星暴活动中 $[\text{OIV}]$, $[\text{SIII}]$, $[\text{SIV}]$ 等发射线的来源的认识是基本正确的, 也佐证了上述中红外发射线比值图对区分 AGN 活动与恒星形成活动具有明确的物理意义: 由 AGN 活动产生的电离光谱比由大质量恒星和恒星团产生的光谱更硬, AGN 与恒星形成活动产生的 $[\text{OIV}]$ 发射的强度的观测值与理论值相当。与此相对的, 上述模型产生的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值高于观测值。具体而言, AGN 模型的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值略高于观测, 星暴星系模型的 $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ 值明显高于观测。这很可能是由于这些模型预言了过多的 $[\text{NeIII}]$ 发射。对此, 我们将在 5.3 节中详细讨论。

5.2 星暴星系中 $[\text{OIV}]$ 发射的来源

O^{3+} 的电离能比 He^+ 的电离能略高, 它不可能产生于主序恒星周围的 HII 区。对于观测到的星暴星系与 BCD 具有的 $[\text{OIV}]$ 发射, 一种可能的解释是它由温度非常高的恒星激发, 例如 Wolf-Rayet stars^[38]。此外, 也有研究认为星暴星系与 BCD 中的 $[\text{OIV}]$ 发射与其中的激波过程有直接关系^[10]。

同时考虑 Kewley (2001) 模型与 Levesque (2010) 模型可以发现, 星暴星系中 $[\text{OIV}]$ 发射的强度与电离光谱中大于 4 Ryd 段的光子流量密切相关。我们定义电离光谱中大于 4 Ryd 段的电离光子流量为电离光谱中 4 Ryd ~8 Ryd 段的总积分流量, 1-4 Ryd 段电离光子流量为电离光谱中 1 Ryd~4 Ryd 段的总积分流量。两者的比值为电离光谱中大于 4 Ryd 段电离光子相对于 1-4 Ryd 电离段光子的相对流量。如图 10 所示, 我们比较了不同模型的电离光谱中大于 4 Ryd 段电离光子相对于 1-4 Ryd 电离段光子的相对流量与 $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 的关系。从图中可以清楚地看到, $[\text{OIV}]/[\text{SIII}]$ 值与大于 4 Ryd 段的光子相对流量呈明显的正相关: 电离光谱中大于 4 Ryd 段光子的相对流量越大, $[\text{OIV}]$ 发射的相对强度越强。因此, 综合考虑 Kewley (2001) 模型与 Levesque (2010) 模型可以发现, $[\text{OIV}]$ 发射的强度与电离光谱大于 4 Ryd 段光子的相对流量直接相关。

Kewley 等人 (2001)^[12] 中图 1 至图 3 均表明, 在星族模型中 Wolf-Rayet 星出现的同一时



注：金属丰度为 Z_{\odot} ，其中 q/c 表示模型对应的电离参数。

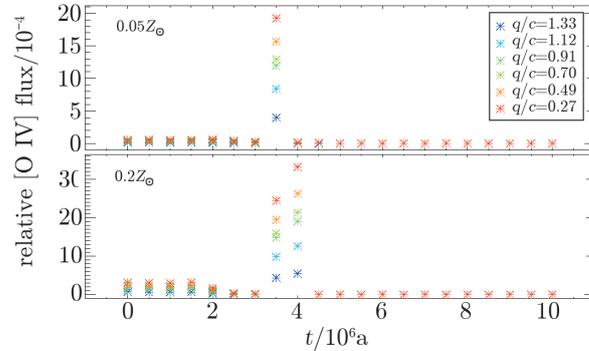
图 10 Levesque (2010) 模型以及 Kewley (2001) 模型中 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值随电离光谱中大于 4 Ryd 段光子相对流量的变化趋势

期，STARBURST99 给出的电离光谱中大于 4 Ryd 段的电离光子的相对流量明显增强，远大于 Levesque (2010) 模型。与此同时，该模型在对应时刻给出的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值也与观测符合。因此，单独考虑 Wolf-Rayet 星对电离光谱的贡献就能使得大于 4 Ryd 段的电离光谱的相对流量增强到观测值所要求的水平。单独考虑 Wolf-Rayet 星的光致电离而不引入激波过程提供的电离就能提供足够多的电离 O^{3+} 的光子，星暴星系中被普遍观测到的 $[\text{O IV}]$ 发射线可以由普遍存在的 Wolf-Rayet 星提供，而不需要假设其中普遍存在激波过程引起的电离。

相比于 Kewley (2001) 星暴星系模型，Levesque (2010) 星暴星系模型中的电离光谱中大于 4 Ryd 段的相对流量偏小，这直接导致了该类模型预言的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值远小于观测值，模型计算得到的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值与观测值的差异最小时仍有两个量级。由前述可知，这很可能是由 Levesque (2010) 对大气模型的改进引起。与 Kewley (2001) 模型中的恒星大气模型只考虑了 H 和 He 造成的大气吸收不同，在 Levesque (2010) 模型中，由于采用的恒星大气模型均加入了大气中由金属元素造成的连续不透明性，使得部分具有更高能量 (大于 4 Ryd) 的电离光子被吸收并在较低能量的 EUV 波段重新发射。Levesque (2010) 星暴星系模型中对恒星大气的改进，使得模型中恒星产生的辐射中用于电离产生 O^{3+} 的大于 4 Ryd 段的电离光子的相对流量显著减少，因而由模型计算得到的 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值比观测数据明显偏低。

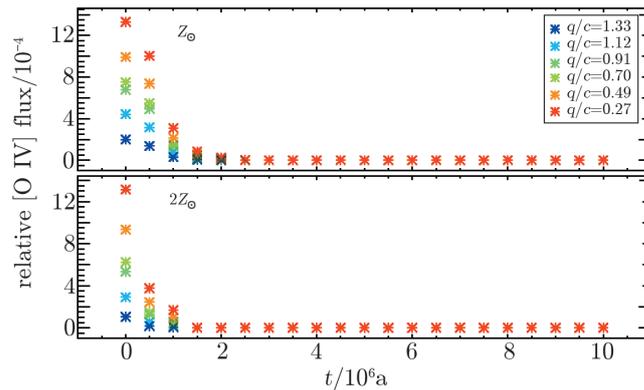
此外，虽然 Levesque (2010) 模型中 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值远低于观测值，但其仍在一定程度上支持 Wolf-Rayet 星作为星暴星系中 $[\text{O IV}]$ 发射线的来源。由于 Wolf-Rayet 星在大于 4 Ryd 段的贡献更多，其受到大气模型中金属引起的连续吸收的影响更大。如图 11 和图 12 所示，比较不同金属丰度的模型中 $[\text{O IV}]$ 辐射随时间的变化可以发现：在低金属丰度时， $[\text{O IV}]$ 发射线在对应 Wolf-Rayet 星出现的时间段陡然增加，这直接证明了可观的 $[\text{O IV}]$ 发射线可以由 Wolf-Rayet 星产生，但由于大气模型中 O 元素等金属引起的连续吸收，Wolf-Rayet 提供的用于电离星际介质产生 $[\text{O IV}]$ 线的电离光子已显著减少，因此 $[\text{O IV}]$ 发射线的流量显著低

于观测值。而在较高金属丰度时, 大气模型中 O 元素等金属引起的连续吸收更强, 直接导致 Wolf-Rayet 星产生的用于电离星际介质产生 [O IV] 发射线的电离光子基本被其大气吸收, 因此在对应 Wolf-Rayet 星出现的时间 (太阳金属丰度时为 3 到 5 Ma, 两倍太阳金属丰度时为 4 到 6 Ma) 无法观测到 [O IV] 发射线的陡然增加。



注: 其中 q/c 表示模型对应的电离参数。

图 11 低金属丰度 Levesque (2010) 模型中 [O IV] 相对于 $H\beta$ 的流量随时间的变化趋势



注: 其中 q/c 表示模型对应的电离参数。

图 12 高金属丰度 Levesque (2010) 模型中 [O IV] 对于 $H\beta$ 的流量随时间的变化趋势

5.3 [Ne III]/[Ne II] 值在模型与观测数据之间的差异

由 4.3 节可知, 比较 AGN 模型和 Kewley (2001) 星暴模型, 我们可以发现, 模型计算得到的 [O IV]/[S III] 值与观测值符合较好, 但 [Ne III]/[Ne II] 值普遍比观测数据高。具体而言, 对于 AGN 与 BCD, 模型计算值比观测值略高; 而对星暴星系, 观测值与模型计算值差异较大, 模型计算值普遍比观测值大约 1 个量级。

AGN 往往与星系核区星暴活动同时存在, 一个最好的例证是前人在研究中发现了一批 ULIRG 中存在 AGN^[1]。因此, AGN 与 ULIRG 中的中红外发射线观测流量, 很可能包含一

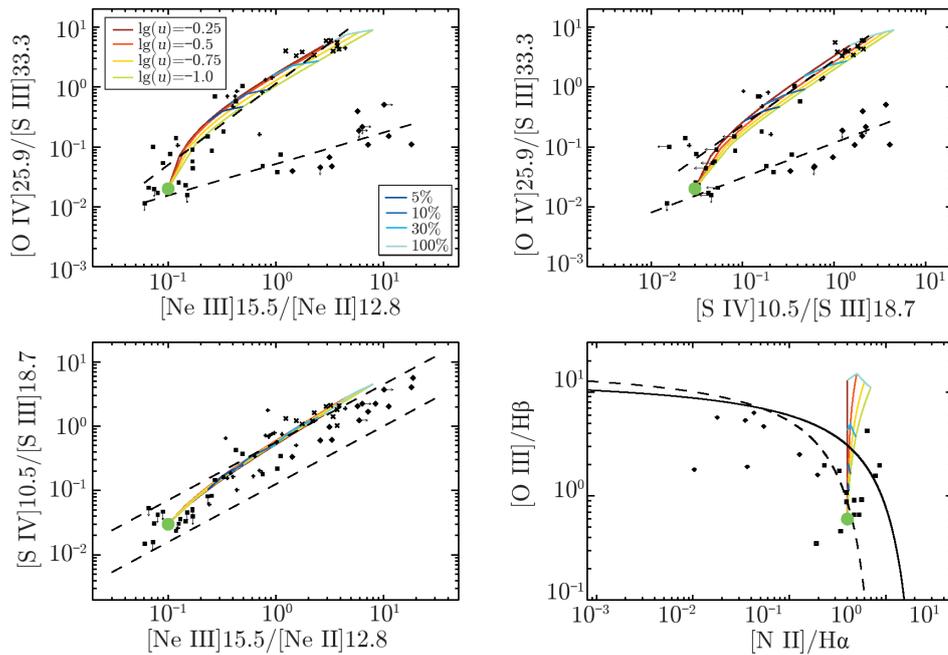
部分星暴活动的贡献。如图 2 所示, 星暴星系中的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值明显低于 AGN, 对于本文中研究的占据 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 图中 AGN 一支的 AGN 和 ULIRG, 若考虑星暴活动贡献了一部分测量得到的 $[\text{Ne III}]$ 和 $[\text{Ne II}]$ 发射线的流量, 则可以自然解释 AGN 模型预言的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值高于实际观测值这一事实。

我们通过将 AGN 模型给出的发射线流量与星暴星系的发射线流量按比例混合, 来探索 AGN 中星暴活动对观测的中红外发射线比值的影响。以 $[\text{Ne III}]$ 发射线为例, 我们用图 2 中 BCD 一支中的星暴星系的 $[\text{Ne III}]$ 发射线流量的平均值表示典型的星暴活动的发射线流量, 记为 $[\text{Ne III}]_{\text{sb}}$, AGN 模型预言的 $[\text{Ne III}]$ 流量记为 $[\text{Ne III}]_{\text{AGN}}$, 则总的 $[\text{Ne III}]$ 流量为 $[\text{Ne III}]_{\text{total}} = a \times [\text{Ne III}]_{\text{sb}} + (1 - a) \times [\text{Ne III}]_{\text{AGN}}$ 。其中 a 表征星暴活动对发射线流量贡献的比例, 取值为 $0 \sim 1$ 。 $a=0$ 时发射线流量全部来自 AGN 模型, $a=1$ 时表明发射线流量全部来自星暴活动。我们将其他各发射线也按照相同的方法进行计算, 然后计算出对应的发射线比值, 并和 AGN 一支的观测值进行比较。如图 13 中所示, 我们以富尘埃的 AGN 模型为例, 假定 AGN 的幂律谱斜率为 -1.6 , 选取四种典型的电离参数 ($\lg(u) = -0.25, -0.5, -0.75, -1$), 分别与图中彩色线条的颜色对应。图中每条彩色线条表示线比值随着 AGN 模型中星暴活动贡献的改变 (即 a 从 1 到 0 变化) 的变化趋势。图中的绿色实心圆代表仅有星暴活动贡献时, 即 $a = 1$ 时的线比值。从该点开始, 沿着每条彩色线, 星暴活动的贡献 (即 a 值) 逐渐减小到零。从这些图中可以看出, 在逐步加入星暴活动的贡献后, AGN 模型给出的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值的变化趋势能很好地符合观测数据的变化趋势。同时, 加入星暴活动贡献的 AGN 模型给出的 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值仍然能很好地符合观测数据。因此, AGN 中星暴活动对如 $[\text{Ne II}]$, $[\text{Ne III}]$ 等发射线的贡献可能是导致 AGN 模型预言的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值高于观测值的原因。

然而, 对于星暴星系, 观测得到与模型预言的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值之间的差异最为明显。类似的差异在 Perez-Montero 和 Vilchez (2009)^[39] 及 Morisset 等人 (2004)^[40] 文章中也有所论及。他们发现对于 H II 星系, 相比于观测到的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值, 由电离模型计算得到的比值也偏高 (详见文献 [39] 中图 1 的右图)。星暴星系中 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 观测值远低于光致电离模型预期, 我们在下文中对这一差异进行着重讨论。

对于此种差异, Meléndez 等人 (2014)^[41] 中给出了一种可能的解决办法。他们提出一类 two-zone AGN 模型和 two-zone 星暴星系模型。其中 two-zone 分别包括一个低密度 ($10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)、高电离度 ($-3 < \lg(U) < 0$) 的物质截止的电离区域, 和一个高密度 ($10^4 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$)、低电离度 ($-5 < \lg(U) < -3$) 的辐射截止区域。低密度、高电离度的区域以发射 $[\text{O IV}]$, $[\text{Ne III}]$ 为主, 而高密度、低电离度的区域以发射 $[\text{Ne II}]$ 为主。利用这种 two-zone 模型计算得到的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值与 AGN 的观测值符合得更好, 同时也能很好地符合星暴星系中 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 的观测值。

虽然这种 two-zone 模型能更好地解释现有的观测数据, 但是该模型的一个重要不足点是, 现有的观测证据并不支持如此高密度的电离云团在星暴星系中普遍存在。H II 区中典型的密度在 100 cm^{-3} 左右, 此外, 现有研究也只在银河系中为数不多的几个 H II 区中心观测到相对高的电子密度 ($10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)^[42]。前述观测到的 H II 区的密度小于上述 two-zone



注: 金属丰度为 Z_{\odot} , 数密度为 $10\,000\text{ cm}^{-3}$ 。该图以富尘埃 AGN 模型为例。图中绿色实心圆表示单纯由星暴活动提供的线比值, 彩色实线表示在 AGN 模型预言的发射线流量基础上加入星暴活动对发射线流量的贡献后的线比值分布。从绿色实心圆开始, 沿着每条彩色线条, 星暴活动的贡献逐渐减小, 最终降为零。其中, AGN 模型均假设 AGN 幂律谱谱指数为 -1.6 , 图中红色至嫩黄色的线条的颜色代表模型的电离参数, 不同深浅的蓝色线条表征混合模型中星暴星系的贡献比例。

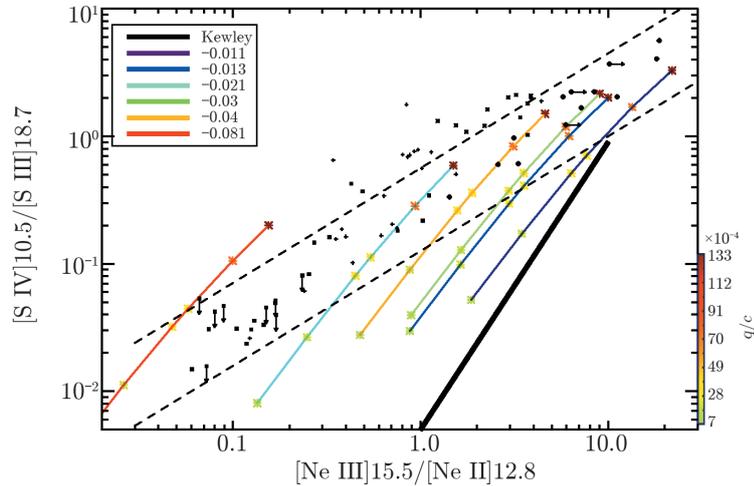
图 13 AGN 中星暴活动对观测到的 AGN 发射线比值的影响

模型中高密度、低电离区的密度。这些观测事实无疑对上述通过引入 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 发射为主的高密度低电离云团来降低 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值的光致电离模型的合理性提出了疑问。因此, 我们对在不引入高密度、低电离的 $[\text{Ne II}]$ 发射区的前提下, 也能解释 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值的可能性进行了进一步探索。

Ne 原子和 Ne^+ 的电离能分别为 21.6 eV 和 41.0 eV, 电离光谱中 21.6~41.0 eV 段的斜率直接影响 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值。通过 Levesque 等人 (2010)^[22] 文中图 1 可以发现, 以 0.2 倍和 1 倍太阳金属丰度的一次星暴模型为例, 随着星暴后时间的增加, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率逐渐降低。从图 5 和图 6 中可以看出, 对于 Levesque (2010) 的一次星暴模型, 总体而言, 除电离光谱中出现 Wolf-Rayet 星的特征 (电离光谱中大于 60 eV 段出现明显鼓包, 见文献 [22] 中的图 1) 时外, $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值也随着星暴后时间的增加而逐渐降低。因此, 电离光谱中 21.6~41.0 eV 段的斜率可能与 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值直接相关。除此之外, 当电离光谱中出现 Wolf-Rayet 星的贡献时, $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 的比值相应变大, Wolf-Rayet 星对电离光谱的贡献也会对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值造成影响。

对此, 我们以太阳金属丰度为例进行具体分析。图 14 给出了电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率的改变对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值以及 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值的影响, 图 15 展示了 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$

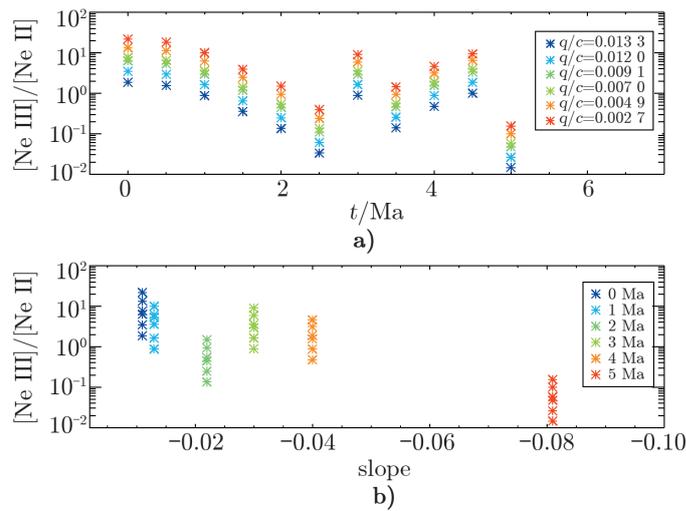
值随电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率和星暴年龄的变化趋势。在图 14 中, Levesque (2010) 模型由彩色线条和符号表示, 其中线条的颜色表征模型对应的 21.6~41.0 eV 段电离光谱的斜率, 符号的颜色与右下角颜色棒对应, 表征模型的电离参数; Kewley (2001) 模型给出的线比的平均值则由黑色粗实线表示。对于 Levesque (2010) 模型, 综合两图可以发现, 当电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率逐渐减小时, 对应的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值也逐渐降低, 当斜率降至 $-2 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 左右以下时, 模型预言值与观测水平相当。然而, 当电离光谱中的 Wolf-Rayet 星特征出现, 但电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率变化不大时 (对应星暴年龄为 3~4 Ma, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率约为 $-3 \times 10^{-9} \sim -4 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$), $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值又相应变大。当电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率继续下降至 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 左右, 虽然此时电离光谱中仍有明显的 Wolf-Rayet 星特征, 模型预言的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值重新降至与观测水平相当。此外, 在 Kewley (2001) 星暴星系模型中, 其电离光谱在 21.6~41.0 eV 段的斜率在 $-1.05 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 左右, 远高于上述斜率上限 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$, 而在图 14 和图 15 中也可以看出, Kewley (2001) 星暴星系模型给出的 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值也显著高于观测值。



注: 图中不同形状黑色符号与图 2 对应, 分别代表不同类型的星系; 彩色的线条与 * 号为 Levesque (2010) 一次星暴星系模型, 模型的金属丰度为太阳金属丰度, 数密度为 100 cm^{-3} 。图中左上方图例对应图中不同彩色直线的颜色, 表示 21.6~41.0 eV 段电离光谱斜率。此外, 黑色粗实线表示 Kewley (2001) 模型的平均位置。对应的平均斜率为 $-1.05 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 。右下方的颜色棒对应不同 * 号的颜色, 代表模型中不同的电离参数。

图 14 21.6~41.0 eV 段电离光谱斜率对不同线比值的影响

上述分析表明, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率是影响 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值的主要因素。此外, Wolf-Rayet 星对电离光谱的贡献也能对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值造成一定影响。在无 Wolf-Rayet 星存在和有 Wolf-Rayet 星存在时, 分别保持电离光谱 21.6~41.0 eV 段斜率低于某一特定值是使模型与观测相符的关键。具体而言, 当 Wolf-Rayet 星未出现时, 斜率应保持在 $-2 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 以下; 当 Wolf-Rayet 星出现时, 斜率应保持在 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$



注: 模型的金属丰度为太阳金属丰度。a) 中数据点颜色代表不同电离参数 (即图例中 q/c); b) 中数据点颜色模型对应的星暴时间。

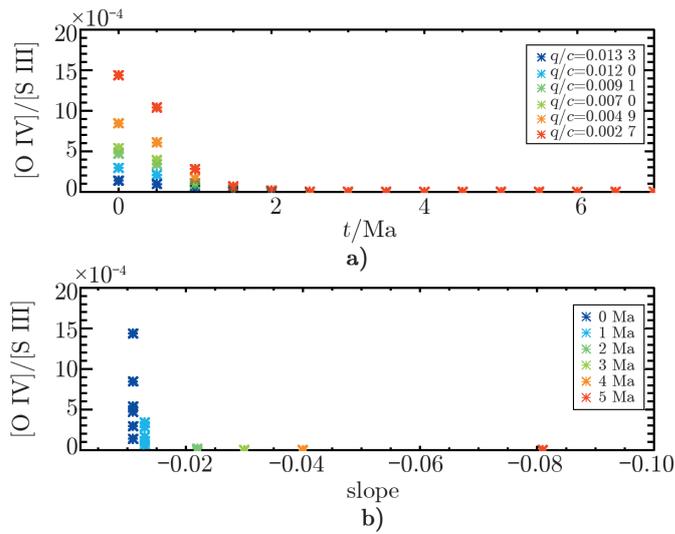
图 15 Levesque (2010) 模型中 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值分别随星暴时间 (图 a)) 和 21.0 eV~41.0 eV 段电离光谱斜率 (图 b)) 的变化趋势

以下。

对于 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值, 虽然其随电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率降低而减弱, 但在保持除该斜率之外的其他条件一定时, 对于一定的斜率变化, $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值的变化明显小于 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值, 前者约为后者的二分之一。与此同时, 相比于 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值, $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值受电离参数的影响较大, 在保持除电离参数之外的其他条件一定时, 对于一定的电离参数的改变, $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值的变化约是 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值的两倍。因此, $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值受电离参数变化的影响远大于受电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率变化的影响。不论电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率是否低于上述上限, 通过调整模型的电离参数, Levesque (2010) 模型给出的 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值仍能与观测值相当。

此外, O^{3+} 的电离能远大于 41.0 eV, 因此对于 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值, 其主要应与电离光谱中大于 4 Ryd, 即大于 54.4 eV 段的流量有关, 而不应受电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率变化影响。从图 16 中可以看出, 星暴开始后 2 Ma 到星暴开始后 5 Ma, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率从 $-2 \times 10^{-9} \sim -8 \times 10^{-9}$ 发生大范围变化时, $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 始终等于零; 而在星暴开始至星暴后 1 Ma, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段斜率维持在 -0.01 到 -0.013 之间基本不变时, $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值却发生较大变化, 差异最大时下降了约 70%。这证明 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值确实基本不受电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率影响。

综上所述, 电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率主要影响 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ 值, 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ 值的影响则相对较弱, 对 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值无影响。又由 5.2 节分析可知, 模型中引入 Wolf-Rayet 星的贡献能提供足够的 $[\text{O IV}]$ 发射, 使 $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 值与观测符合。因此, 通过降低



注：模型的金属丰度为太阳金属丰度。a) 中数据点颜色代表不同电离参数 (即图例中 q/c)；b) 中数据点颜色模型对应的星暴时间。

图 16 Levesque 模型中 $[O\ IV]/[S\ III]$ 值分别随星暴时间 (图 a)) 和 21.0 eV~41.0 eV 段电离光谱斜率 (图 b)) 的变化趋势

电离光谱 21.6~41.0 eV 段的斜率至 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 以下，是使得星暴星系模型给出的 $[Ne\ III]/[Ne\ II]$ 值与观测符合，而又不影响其他线比值如 $[S\ IV]/[S\ III]$ ， $[O\ IV]/[S\ III]$ 与观测符合的另一新思路。

Levesque 等人 (2010)^[22] 探索了恒星自转效应对电离光谱的影响，详见文献 [22] 中图 12。通过比较引入恒星自转与不引入恒星自转时的电离光谱，他们发现在其他条件都相同时，前者的电离光谱在大于 4 Ryd 段的能谱比后者硬很多，即可以电离 O^{3+} 的大于 4 Ryd 的电离光子显著增多，可使得 $[O\ IV]$ 发射大大增强。与此同时，对于 21.6~41.0 eV 段的电离光谱，前者与后者斜率一致，可使得 $[Ne\ III]/[Ne\ II]$ 值保持不变。因此，通过在 Levesque (2010) 模型中引入恒星的自转效应，原则上既能满足 21.6~41.0 eV 段的斜率低于 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ ，使得 $[Ne\ III]/[Ne\ II]$ 值与观测匹配，又能保证产生足够强的 $[O\ IV]$ 发射使得模型给出的 $[O\ IV]/[S\ III]$ 值也与观测匹配。未来的工作应当进一步探索引入恒星自转效应对电离光谱的影响，以及进一步测试这一改进能否使模型预言的上述中红外线比值与观测符合。

6 总 结

研究星系电离场的特性是了解星系形成与演化的基础之一。本文基于 Hao 等人 (2009)^[6] 中的工作，结合光学与红外波段的观测数据，利用 ITERA package 中提供的各类光致电离模型与激波模型，对不同星系的光致电离特性进行了探究，得到的主要结论如下。

通过将观测数据与 Kewley (2001) 星暴模型以及 AGN 模型进行比较, 我们发现 Hao 等人 (2009)^[6] 中提出的 [O IV]/[S III] 对 [S IV]/[S III] 中红外发射线诊断图的分支结构能分别较好地用上述光致电离模型进行解释。通过综合分析 Kewley (2001) 模型与 Levesque (2010) 两种星暴模型与观测数据, 我们发现, 星暴星系中普遍存在的 [O IV] 发射与电离光谱中大于 4 Ryd 段电离光子的相对流量呈紧密的正相关。对星暴星系光致电离模型中 Wolfe-Rayet 星对大于 4 Ryd 段电离谱有显著贡献的模型, Wolf-Rayet 星的出现能显著增强大于 4 Ryd 段电离光子的相对流量, 从而使模型预言的 [O IV]/[S III] 与观测相符。因此, 单独考虑 Wolf-Rayet 星的光致电离而不引入激波过程提供的电离就能提供足够电离 O^{3+} 的光子, 星暴星系中被普遍观测到的 [O IV] 发射线可以由普遍存在的 Wolf-Rayet 星提供, 而不需要假设其中普遍存在激波过程引起的电离。

然而, 当光致电离模型计算出的红外波段的 [O IV]/[S III] 值与观测相符合时, [Ne III]/[Ne II] 值却仍比观测偏高。其中, 对于 AGN 与 BCD, 差异较小; 对于星暴星系, 模型与观测差异最大, 由模型计算值比观测值高出至少 1 个量级。结合光致电离模型于 [O IV]/[S III] 对 [S IV]/[S III] 图符合良好的事实, 我们认为星暴星系难以拟合观测数据的问题在于其预言了太高的 [Ne III]/[Ne II] 值, 而不在于其提供的 [O IV] 发射线不足。

在 Meléndez 等人 (2014)^[41] 文中, 他们通过引入 two-zone 模型解决这一问题。他们认为现有模型中考虑的电离云团只考虑了相对低密度、高电离参数的发射区。通过在模型中加入一个具有高密度、低电离参数的以 [Ne II] 发射为主的区域, 可以使得模型与观测符合良好。但该类模型存在的问题是, 现有的观测数据并未发现模型假设的高密度云团存在的直接证据。我们发现在不引入上述高密度、低电离发射区时, [Ne III]/[Ne II] 值与 21.6~41.0 eV 电离光谱段的斜率有直接对应关系, [Ne III]/[Ne II] 值随斜率的增加而降低。因此, 保持该段电离光谱斜率在 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 以下, 是使得 [Ne III]/[Ne II] 值与观测相符的有效办法。

综上所述, 为使光致电离模型与观测数据相符, 既要保证电离光谱大于 4 Ryd 段的相对光子流量足够大, 使得 [O IV] 发射流量与观测相符, 又要保持电离光谱在 21.6~41.0 eV 段的斜率位于 $-8 \times 10^{-9} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ 以下, 从而产生与观测相符的 [Ne III]/[Ne II] 值。通过在星暴星系光致电离模型中引入恒星的自转效应, 是同时满足上述两种条件的一个可能途径。

参考文献:

- [1] Genzel R, Lutz D, Sturm E, et al. ApJ, 1998, 498: 579
- [2] Armus L, Charmandaris V, Bernard-Salas J, et al. ApJ, 2007, 656: 148
- [3] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. PASP, 1981, 93: 5
- [4] Inami H, Armus L, Charmandaris V, et al. ApJ, 2013, 777: 156
- [5] Tommasin S, Spinoglio L, Malkan M A, et al. ApJ, 2010, 709: 1257
- [6] Hao L, Wu Y, Charmandaris V, et al. ApJ, 2009, 704: 1159
- [7] Thuan T X, Martin G E. ApJ, 1981, 247: 823
- [8] Gil de Paz A, Madore B F, Pevunova O. ApJS, 2003, 147: 29
- [9] Campbell A, Terlevich R, Melnick J. MNRAS, 1986, 223: 811

- [10] Lutz D, Spoon H W W, Rigopoulou D, et al. *ApJ*, 1998, 505: L103
- [11] Schaerer D, Stasińska G. *A&A*, 1999, 345: L17
- [12] Kewley L J, Dopita M A, Sutherland R S, et al. *ApJ*, 2001, 556: 121
- [13] Groves B A, Dopita M A, Sutherland R S. *ApJS*, 2004, 153: 9
- [14] Groves B A, Dopita M A, Sutherland R S. *ApJS*, 2004, 153: 75
- [15] Sutherland R S, Dopita M A. *ApJS*, 1993, 88: 253
- [16] Groves B A, Allen M G. *New Astronomy*, 2010, 15: 614
- [17] Wu Y, Charmandaris V, Hao L, et al. *ApJ*, 2006, 639: 157
- [18] Bernard-Salas J, Spoon H W W, Charmandaris V, et al. *ApJS*, 2009, 184: 230
- [19] Farrah D, Bernard-Salas J, Spoon H W W, et al. *ApJ*, 2007, 667: 149
- [20] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. *MNRAS*, 2003, 346: 1055
- [21] Hou L G, Wu X B, Han J L. *ApJ*, 2009, 704: 789
- [22] Levesque E M, Kewley L J, Larson K L. *AJ*, 2010, 139: 712
- [23] Fioc M, Rocca-Volmerange B. *A&A*, 1997, 326: 950
- [24] Leitherer C, Schaerer D, Goldader J D, et al. *ApJS*, 1999, 123: 3
- [25] Bressan A, Fagotto F, Bertelli G, et al. *A&AS*, 1993, 100: 647
- [26] Schaller G, Schaerer D, Meynet G, et al. *A&AS*, 1992, 96: 269
- [27] Lejeune T, Cuisinier F, Buser R. *A&AS*, 1997, 125: 229
- [28] Clegg R E S, Middlemass D. *MNRAS*, 1987, 228: 759
- [29] Schmutz W, Leitherer C, Gruenwald R. *PASP*, 1992, 104: 1164
- [30] Pauldrach A W A, Hoffmann T L, Lennon M. *A&A*, 2001, 375: 161
- [31] Hillier D J, Miller D L. *ApJ*, 1998, 496: 407
- [32] Meynet G, Maeder A, Schaller G, et al. *A&AS*, 1994, 103: 97
- [33] Dopita M A, Fischera J, Sutherland R S, et al. *ApJ*, 2006, 647: 244
- [34] Kraemer S B, Crenshaw D M. *ApJ*, 2000, 544: 763
- [35] Tomono D, Doi Y, Usuda T, et al. *ApJ*, 2001, 557: 637
- [36] Dopita M A, Groves B A, Sutherland R S, et al. *ApJ*, 2002, 572: 753
- [37] Maciel W J, Pottasch S R. *A&A*, 1982, 106: 1
- [38] Crowther P A, Pasquali A, De Marco O, et al. *A&A*, 1999, 350: 1007
- [39] Pérez-Montero E, Vílchez J M. *MNRAS*, 2009, 400: 1721
- [40] Morisset C, Schaerer D, Bouret J C, et al. *A&A*, 2004, 415: 577
- [41] Meléndez M, Heckman T M, Martínez-Paredes M, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 1358
- [42] Osterbrock D E, Ferland G J. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. 2006

Study of the Photoionization Properties of Galaxies in Mid-infrared

LIU Wei-zhe^{1,2}, HAO Lei¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The source of high ionization emission line [O IV](25.9 μm) is still not clear. The preliminary analysis in Hao et al.(2009) found that when the [Ne III]/[Ne II] ratio given by

the models is comparable to observation, the $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ ratio given by the models are four order of magnitudes lower than the observed value. In this study, we analyze the ratios of mid-infrared emission lines like $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$, $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$, $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ and their systematic trend with different changing parameters, by combining the observation data in Hao et al.(2009) with the updated photoionization models in the ITERA package. Through the comparison between the observation and models, we find that the two-branch configuration in the mid-infrared diagnostic diagram $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ can be matched by the AGN and starburst models well separately. We find that the strength of $[\text{O IV}]$ emission in these starburst models is closely related to the relative photon flux with energy larger than 4 Ryd in the ionization spectra. The contribution from Wolf-Rayet stars alone can provide enough $[\text{O IV}]$ emission to explain the observation. As for the $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ diagram, the models can not explain the observation well, especially for the starburst branch: when the $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ value in the models is comparable to the observation, the $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ in models are still higher than that from observation. Combining with the fact that models match observation well in $[\text{O IV}]/[\text{S III}]$ 对 $[\text{S IV}]/[\text{S III}]$ diagram, we think the reason why starburst models can not explain observation could be that the models predict higher $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$, but not that they can not generate enough $[\text{O IV}]$ emission. We find that if we only consider that emission comes only from a zone with uniform density and ionization parameter, $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ correlates closely with the spectrum index in the ionization spectrum ranging from 21.6 eV to 41.0 eV.

Key words: photoionization; Starbursts; BCD; Active Galactic Nuclei; ULIRG