doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.04

高红移低光度活动星系核的研究进展

刘辰旭^{1,2},郝蕾^{1,2}

(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: 低光度活动星系核 (Low-Luminosity AGN,简称为 LLAGN) 指比斯隆数字化巡天第三期 SDSS-III/BOSS 类星体 (quasar, QSO) 暗大约 1 ~ 2 mag 的活动星系核,如g 波段探测极限达到 23 ~ 24 AB mag,约对应 $M_g[z=3] \approx -24 \sim -23$ mag。现有的高红移巡天中包含的 LLAGN 样本还比较有限。从测光巡天和光谱巡天两方面总结已经开展的包含高红移 ($z \approx 3$) LLAGN 样本的深场星系巡天项目,并简单介绍一个刚刚开展的 HETDEX 巡天项目 (该巡天项目将观测到约 10⁴ 个 I 型 LLAGN,其 $z \approx 3$, g < 24 mag)。从光度函数、成团性以及爱丁顿吸积率等方面 对目前高红移 LLAGN 的研究进行了总结。由于高红移 AGN 成团性的研究较为有限,为了更好 地解释成团性研究的科学意义,也对低红移 AGN 在成团性方面的研究进行了介绍。

关 键 词:高红移星系;低光度活动星系核;星系演化;宇宙大尺度结构 中图分类号:P157.6 **文献标识码:**A

1 引 言

近 20 年来,越来越多的测光巡天和光谱巡天为我们提供了大量的测光红移和光谱红移, 使我们能更细致地绘制宇宙全景图像。尤其是 SDSS 巡天为我们带来了上百万星系的三维空 间定位,使科学家们可以从各方面对近邻宇宙进行充分的研究,如宇宙大尺度结构、星系的 统计性质、近邻大星系的内部结构、动力学、恒星形成过程、超大质量黑洞 (supermassive black holes, SMBH) 的吸积过程等,但构建完整全面的星系形成和演化历史的图像离不开对 高红移宇宙的探索。

近邻宇宙中,星系中央 SMBH 被发现和其宿主星系核球的各方面性质紧密相关,称为 "共同演化"效应 (比如著名的 $M_{\rm BH} - \sigma_*$ 关系^[1-3],其中 $M_{\rm BH}$ 是黑洞质量, σ_* 是核球恒星的 速度弥散,这一相关性覆盖了数个量级的黑洞质量)。由此可以推测,星系中央黑洞和其宿主 星系核球恒星从周围富气体环境吸积物质很可能共同发生,并在同一时期达到峰值。SMBH

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-12-12 资助项目: 国家自然科学基金 (11473305) 通讯作者: 郝蕾, haol@shao.ac.cn

1期

质量急剧增长的时期也是 AGN 数目最丰富的时期,大约在红移 $z \approx 2.5$ 附近,在更高或更低 红移端 AGN 数目均有所下降^[4-9]。因此,研究在这个红移附近的 AGN,既有助于我们了解 SMBH 的演化历史,也能帮助我们更清晰地认识其宿主星系的演化过程。

目前为止,科学家们对高红移 ($z \approx 3$) 宇宙中 AGN 的研究主要局限在测光选择出的 QSO 样本中,因其具有点源和亮度高等特点,更易在巡天项目中被选择观测。SDSS-III/BOSS 经 过预先颜色选源,给出了目前最大的 QSO 样本 (2.15 < z < 3.5),其探测极限为 g < 22 mag 或 $r < 21.85 \text{ mag}^{[10]}$ (对应 $M_{r,g}[z=3] \approx -25 \text{ mag}$), 一共观测到了约 30 万条 QSO 光谱, 其 中约 16 万 QSO 在 2.15 < z < 3.5 范围内。但通过对光度函数的研究,我们知道这些较亮 的 QSO 仅占整个 AGN 族群中很少的一部分,比 LLAGN 的空间密度低 1~2个数量级。 本文关注的 LLAGN 样本比 SDSS-III/BOSS QSO 至少暗 1~2 mag, g 波段探测极限达到 23~24 AB mag 或更暗。

在搜寻高红移 LLAGN 方面,X 射线波段因其强穿透性,有着独特的优势。目前最深的 X 射线巡天 Chandra Deep Field (CDF) 对南北天各 0.1 deg² 的天区分别进行了 7 Ms 和 2 Ms 的深度曝光,给出了约 10^3 个 0 < z < 5 的 X-ray AGN 样本。光学深场测光巡天一般需要结 合多波段数据,尤其是 X 射线或者后期光谱观测才能认证 AGN。现有的深场星系测光或光 谱巡天面积一般小于 2 平方度,每个巡天包含的高红移 LLAGN 样本数量仅约 100 个。

光谱可以提供丰富的发射线信息,从而将观测源分成星系和 AGN^[11-15]。AGN 在光 学波段的发射线特征表现为两种不同的类型: I 型活动星系核既有窄发射线 (半高全宽 FWHM < 1000 km/s),同时也可以观测到宽发射线 (FWHM > 1000 km/s);而 II 型活 动星系核只有窄发射线,观测不到宽发射线。Antonucci 在 1993 年^[16]提出了活动星系核统 一模型,即I型AGN和II型AGN本质上相同,只是观测角度不同: II型活动星系核的 尘埃环结构同视线方向夹角偏小,导致中央吸积盘和宽发射线区被尘埃环遮蔽,因此只能观 测到窄线,宽线则由于被尘埃遮蔽而观测不到;I型活动星系核同视线方向之间的夹角偏大, 因此同时可以看到宽发射线和窄发射线。观测上, I型 AGN 可以通过宽线认证; II 型 AGN 因为具有高电离度,因此可以通过发射线比 (如 [O III]/Hβ 和 [N II]/Hα 等,详见 BPT 图相 关参考文献^[11-15])将其和其他发射线星系(比如恒星形成星系)区分开。但高红移光学光谱覆 盖范围中一般不包含通常用来认证 II 型 AGN 的 [O III], [N II], [S II], [O I] 等发射线,因此 高红移通常只通过宽线认证 I 型 AGN。但也有通过 C IV 来选择高红移 II 型 AGN 的 (例如 2.2.1 小节中介绍的 LBG 巡天^[17]),这个方法有其物理意义,但是现在理论还不成熟,暂时 仅用来选择高红移 II 型 AGN 的候选体 (详见 2.2.1 小节)。

光度函数是描述天体的空间密度随光度之间的变化关系,研究 AGN 的光度函数的形状 和演化可以用来限定 SMBH 的演化模型。在近邻宇宙中,光学波段选择出的 I 型活动星系 核的光度函数已经得到较好的研究^[18]。红移在 2 以上的宇宙中, Ross 等人^[9]利用 SDSS-III DR9 给出了大约两万个类星体 (2.2 < z < 3.5, i < 21.8 mag ($M_i[z = 3] \approx -25 \text{ mag}$))的 光度函数的研究。高红移下光度函数的亮端可以被 QSO 很好地限定,然而在低亮度端 (g > 22 mag),约对应 $M_g[z = 3] > -25 \text{ mag}$)还没有大样本 LLAGN 光度函数的研究,光度 函数暗端斜率、密度以及演化还不能被很好地限制。

在现代宇宙学中,观测到的星系分布同暗物质之间的关系是一个很基础的问题,因为这 一关系可以帮助我们利用观测到的重子物质分布来研究暗物质的分布。现有的星系形成模型 假设星系都在暗物质晕中形成和演化^[19],因此,我们可以利用暗物质晕来建立宇宙中的亮暗 物质之间的关系。有很多方法可以将星系同暗物质晕之间联系起来。一个很直观的方法是将 复杂的恒星形成和演化的流体力学模拟^[20, 21] 同 N 体模型给出的暗物质晕并合历史^[22-25] 相 结合,从而得到星系分布。但由于我们对星系形成演化过程的了解非常有限,导致利用上述 方法不能很好地重现观测到的星系分布。但是反过来,结合观测到的 AGN 成团性和宇宙学 模型给出的暗物质晕分布,我们可以对星系,尤其是超大质量黑洞的形成和演化有更好的认 识。在低红移宇宙中,SDSS 巡天给出了丰富的 AGN-galaxy 之间相关性的研究成果^[26, 27]; 在高红移方面,活动星系核光学波段巡天主要集中在颜色选择出来的类星体样本,颜色选 源导致巡天中包含的星系样本严重不完备。因此现有的高红移 AGN 成团性研究主要集中在 AGN-AGN 之间的相关性^[28, 29];对于 AGN-galaxy 之间的相关性,目前只有 Adelberger 和 Steidel (2005)^[30]利用 LBG 巡天的 10³ 个恒星形成星系和 10² 个 AGN 进行过研究。我们将 在 3.2 节中详细介绍活动星系核成团性方面的研究进展。

本文中,我们将从深度测光巡天和深度光谱巡天两个方面简单介绍目前包含高红移 (*z* ≈ 3) LLAGN 样本的深度星系巡天项目 (两个 X 射线深场巡天、四个光学/近红外测光深 场巡天、两个光谱深场巡天) 和一个刚刚开展的大型盲光谱巡天项目 (第 2 章)。我们将在第 3 章中回顾科学家们利用现有巡天项目对 QSO 以及 LLAGN 的光度函数 (第 3.1 节)、成团性 (第 3.2 节) 和爱丁顿吸积率 (第 3.3 节) 三方面的研究成果。最后我们在第 4 章中总结了目前 高红移 LLAGN 的研究进展和未来趋势。

2 高红移深场星系巡天中的 LLAGN 样本

在过去的 20 多年中,随着空间望远镜和大口径地面望远镜的不断投入使用,人们逐渐可 以通过多波段深场巡天的手段追溯星系以及 AGN 随红移的演化历程。X 射线因具有穿透性 强和受宿主星系星光污染少的特点,非常适合搜寻高红移低光度 AGN,X 射线 AGN 在图像 中呈现为点源。目前有很多 X 射线望远镜 (如 Chandra、XMM-Newton 等空间望远镜) 开展 了此方面的工作,我们将在第 2.1.1 节中介绍其中最深的两个巡天: CDF-N/S 和 SXDS。

此外,在光学/近红外波段,有很多测光巡天利用哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 的深场测光数据,结合其他大型地面望远镜 (如 8 m 级 Subaru、VLT 等望远 镜),探索了 2 < z < 4 的宇宙。这些巡天的天区覆盖面积都很小 (小于 2 deg²),优点是多 波段数据丰富,但这也导致彼此重叠严重 (见图 1),认证的 AGN 样本相互包含。光学测光 巡天中认证 AGN 样本的方法主要是通过和 X 射线样本匹配或后期光谱跟踪观测来实现,样 本都很小 (约小于 10²)。第 2.1.2 节中我们选择了其中有代表性的 H-HDF-N、CANDELS、 COSMOS 以及 COMBO-17 巡天作介绍。

高红移下 ($z \approx 3$)的深度光谱巡天只有 LBG 和 VVDS 星系巡天,并且其中包含的



 Right Ascension

 b)

 注: a) 北天,以 $\alpha_{J2000} = 12h37$ min, $\delta_{J2000} = +62°10'$ 为中心,0.4 deg² H-HDF-N 巡天 R 波段图像 ^[31],

 红色方形表示 K_s 波段覆盖天区 ^[32],黄色表示早期中心 H-HDF-N 天区 ^[33],青色表示 CDF-N 天区 ^[34, 35],

 蓝色表示 GOODS-N 天区 ^[36]; b) 南天,MYSYC 天区 K 波段图像 ^[37], 黑色实线轮廓表示 MUSYC 样本

 所有波段 (UBVRIz'JK) 覆盖区域 (去掉了许多严重被亮星影响的小区域),灰色实线轮廓表示有 H 波段测光数

 据的天区。该天区中包括很多著名的巡天:GEMS ^[38](密集点线)、原始 CDFS 天区 ^[39](短虚线围成的圆形)、

 GOODS HST/ACS 光学图像 (细长虚线围成的长方形)和 HST/ISAAC 近红外图像 (短虚线区域)、K20 巡

 天^[40](粗长虚线围成的长方形)和 HUDF 巡天 ^[41](灰色实线菱形区域)。右下是 K20 巡天的放大图,右上是其中

 2''×2''天区进一步的细节图 ^[37]。

图 1 南北半球多波段测光巡天集中的天区

AGN 样本也很小 (约 10²),此外还有一个刚刚开展的 HETDEX 项目将为我们提供一个 约 10⁴ 的高红移 LLAGN 样本,我们将在第 2.2 节中对这些巡天进行简单的介绍。表 1 列出了这些巡天的一些基本信息,并同时列出了广泛被研究的 Schneider 等人 (2010) 综 合 SDSS-I&II 两期项目选出的 105 783 个光谱认证的 QSO 样本 ($i \leq 20.5$ mag,相当于 $M_i[z = 3] \leq -26.5$ mag)^[42],其中大部分 QSO 红移 z < 2, SDSS-III/BOSS 极大增加了 z > 2 类星体的探测数量 (g, r < 22 mag^[10],相当于 $M_g[z = 3] \approx -25$ mag), Alam 等人 (2015)^[43] 结合 SDSS-I&II&III 给出了目前最大的类星体样本 DR12,包含 294 512 条独立类 星体光谱,其中约 16 万 QSO 在 2.15 < z < 3.5 红移区间内。

2.1 深度测光巡天

2.1.1 X 射线深场巡天

1) CDF-N/S

CDF-S (the Chandra Deep Field-South)^[47] 是目前为止最深的 X 射线巡天,有光学对 应体的源显示,其深度可达 $R \leq 27$ (5 σ ; AB mag)。从 1999 年 10 月 15 日开始,截止到 2010 年 7 月 22 日,利用 Chandra X 射线空间望远镜对南天以 $\alpha_{J2000.0} = 03h32min28.06s$, $\delta_{J2000.0} = -27^{\circ}48'26''.4$ 为中心, 0.129 deg² 大小的天区,进行了 54 次,一共 4 Ms 的曝光, 使用的相机是 ACIS-I (the Advanced CCD Imaging Spectrometer imaging array)。4 Ms 样本 给出了 740 个 X 射线源,其中软 X 射线波段 (0.5~2 keV) 探测极限为 1.1×10^{-24} J·cm⁻²·s⁻¹, 探测到 583 个 AGN;硬 X 射线波段 (2~8 keV) 探测极限为 1.1×10^{-23} J·cm⁻²·s⁻¹, 探测 到了 358 个 AGN (见表 1)。2016 年,CDF-S 释放了其 7 Ms 的数据,给出了 3.5 < z < 6.5的 2076 个 X 射线源 (不在本文重点讨论的红移范围内,因此此处不详细介绍,感兴趣的读 者可参考文献^[58])。

CDF-N (the Chandra Deep Field-North)^[34, 35] 是仅次于 CDF-S,目前第二深的 X 射线巡 天项目。有光学对应体的源显示,其深度达到 $R \leq 26$ (5 σ ; AB mag)^[35]。从 1999 年 11 月 13 日到 2002 年 2 月 22 日,利用 Chandra X 射线空间望远镜对北天以 $\alpha_{J2000.0} = 12h36min45.7s$, $\delta_{J2000.0} = +62^{\circ}13'58''.0$ 为中心,0.124 deg² 大小的天区,进行了 20 次观测,一共 2 Ms 的曝 光,使用的相机也是 ACIS-I。软 X 射线波段 (0.5~2 keV) 探测极限为 2.8×10^{-24} J·cm⁻²·s⁻¹, 探测到了 402 个 AGN;硬 X 射线波段 (2~8 keV) 探测极限为 2.1×10^{-23} J·cm⁻²·s⁻¹,探 测到了 307 个 AGN(见表 1)。

2) SXDS

SXDS (Subaru/XMM-Newton Deep Survey)^[48, 59] 是重要的多波段巡天之一,从射电波 段覆盖到 X 射线。巡天覆盖面积约 1 deg²,中心为 RA = 02h18min, DEC = -05d00min(J2000)。X 射线数据由 XMM-Newton 空间望远镜上的 EPIC 观测,软 X 射线波段 (0.5~2 keV) 探测极限为 6.8×10^{-23} J·cm⁻²·s⁻¹,探测到了 725 个 AGN;硬 X 射线波段 (2~10 keV) 探测极限为 2.7×10^{-22} J·cm⁻²·s⁻¹,探测到了 569 个 AGN(见表 1)。光学测光数据由 Subaru/Suprime-Cam 观测,5 个波段的观测深度分别可达 B = 28.4 mag, V = 27.8 mag, $R_c = 27.7$ mag, i' = 27.7 mag 和 z' = 26.6 mag。

| | | | 表 1 高 | 红移深场巡天中 | "的活动星系核样本 | | | | |
|--|---------------------------|------------------------------|--|--------------------------|---|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------|
| 巡夭项目 | 覆盖天区/ deg ² | $N_{ m AGN}$ | 极限星等/极限流量 | 红移范围 | 望远镜/相机 | 口径 /m | 巡天类型 | 波段/ 波长范围 | 参考 文献 |
| CDF-N | 0.124 | 402 | $2.8 \times 10^{-24} \mathrm{~J} \cdot \mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ | 0.1 < z < 5.2 | Chandra/ACIS | 1.2 | 测光 | $0.5{\sim}2~{ m keV}$ | [44, 45] |
| I | I | 307 | $2.1 	imes 10^{-23} \ { m J} \cdot { m cm}^{-2} \cdot { m s}^{-1}$ | Ι | Ι | I | Ι | $2{\sim}8~{\rm keV}$ | [44, 46] |
| CDF-S | 0.129 | 583 | $1.1 \times 10^{-24} \mathrm{~J\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}}$ | I | Ι | I | 测光 | $0.5{\sim}2~{\rm keV}$ | [47] |
| I | Ι | 358 | $1.1 	imes 10^{-23} \ J \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ | I | I | Ι | I | $2{\sim}8~{\rm keV}$ | [47] |
| SXDS | 1.02 | 725 | $6.8 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ | 0 < z < 5 | $XMM-Newton/EPICs^{a}$ | · 0.7 ^a | 测光 | $0.5{\sim}2~{ m keV}$ | [48] |
| I | I | 569 | $2.7 	imes 10^{-22} \ { m J} \cdot { m cm}^{-2} \cdot { m s}^{-1}$ | I | I | I | I | $2{\sim}10~{\rm keV}$ | [48] |
| H-HDF-N | 0.4 | 462 | U, B, V, R < 26 AB mag | $0 < z < 5^{b}$ | Subaru/Suprime-Cam ^c | 8.3° | 测光 | UBVRIz'HK' | [31, 33] |
| CANDELS | 0.22/0.03 | 200/30 | $H_{ m AB} < 27.0/27.7$ | $1.5 < z < 2.5^{\rm d}$ | HST/WFC3&ACS ^e | 2.4 | 测光 | $\rm UV$ -optical-IR ^e | [49, 50] |
| COSMOS | 2 | 约 1 700 ^f | $I_{\rm F814W} < 27.8 \ (5\sigma; {\rm AB \ mag})$ | 3 >> % | HST/ACS | 2.4 | 测光 | $\rm UV{\sim}Mid{-}IR^g$ | [51 - 54] |
| COMBO-17 | 0.78 | 192 | 17 < R < 24 mag | $1.2 \sim 4.8$ | MPG-ESO/WFI | 2.2 | 中带测光 | $350{\sim}930~{ m nm}$ | [55] |
| LBG | 0.38 | 29 | $19 < R_{\rm AB} < 25.5 \text{ mag}$ | $2 \sim 4$ | Keck/LRIS | 10 须 | 光 + 光谱 | $4\ 500{\sim}6\ 500\ {\rm \AA}$ | [17] |
| VVDS | 1.1 / 0.6 | 130 | $17.5 < I_{\rm AB} < 22.5/24.0~{\rm mag}$ | $0\sim 5$ | VLT/VIMOS | × | 光谱 | 5 500~9 500 Å | [56] |
| HETDEX | 420 | 约 10 ⁴ | g < 24 mag | $1.9 \sim 3.5$ | HET/VIRUS | 10 | 光谱 | 3 500~5 500 Å | [57] |
| SDSS-I&II | $9 \ 376$ | 约 10 ⁵ | $14.9 < i < 22.4 \text{ mag}^{h}$ | 0.1 < z < 5.5 | Sloan | 2.5 狈 | 光 + 光谱 | 3 800~9 200 Å | [42] |
| SDSS-III/ BOSS | 9 376 | 294 512 | $g \leqslant 22 	ext{ mag}$ 或 $r \leqslant 21.85 	ext{ mag}$ | $0.1 < z < 5.5^{\rm i}$ | Sloan | 2.5 | 光谱 | $3 \ 600{\sim}10 \ 400 \ { m \AA}$ | . [43] |
| 注: a SXDS 关 | 3多波段巡天 | 5. 并非单一 | -望远镜, 其中 X 射线数据来自于 0 | .7m XMM-New | ton/EPICs 观测,光学波段 | 法自于 8 | 3.3 m Subarı | 1/Suprime-Cam 3 | 见测。 |
| ₽ H-HDF-N ₩ | 《 天中虽然一 | -部分天体组 | 【移可以达到 5 左右, 但其中绝大部。 | $ \dot{A} z < 1.6, 参见$ | 参考文献 [31] 中的图 4。 | | | | |
| ° н-нDF-N 头 | 1多望远镜多 | :波段巡天, | 此处只列出了主要望远镜 Subaru f | 的口径,详见第2. | .1.2 节。 | | | | |
| d CANDELS | 巡天本身的: | 红移范围为 | 1.5 < z < 8, 表格中列出的 1.5 < | < z < 2.5 指的是: | 其中 X 射线 AGN 的红移范 | 围。 | | | |
| • CANDELS : | 巡天使用了 | HST 两个ì | 没备上的三个照相机: ACS/WFC | 的光学波段: WF | 'C3/IR 的红外波段; WFC: | 3/UVIS | 的紫外/光学? | 皮段。详情见 2.1.2 | ÷₽ |
| f COSMOS 巡 | (天的约 170 | $00 \uparrow \mathrm{AGN}$ | 中, 绝大部分 z < 2, 仅有 < 100 | 个 AGN 分布于 | $z \approx 3$, $\mathbb{R}\mathbb{R}$ 3. | | | | |
| ^g COSMOS $\stackrel{\text{g}}{=}$ | 王要为 HST | 巡天,但天 | 医内有大量多波段数据可以用来联合 | 合确定测光红移, 1 | 详情参见第 2.1.2 小节中相关 | 主文字介绍 | na | | |
| h 虽然 SDSS-L 个 QSO ^[42] 。 | &II 可探测 | $ i \approx 22.^{\epsilon} $ | 1 mag 的类星体, 但在整个约 10 ⁵ (| QSO 样本中,只 | 有 1 341 个源分布在 i > 20 | .5 mag, | 暗于 $i = 21$. | .0 mag 的区域更是 | 仅有 183 |
| ¹ 虽然仅从红移: 一半类星体 (16 | 范围来看 B· 万)位于2 | OSS 巡天和 .15 $\leq z \leq$ | □ SDSS-I&II 相似, 但 BOSS 巡天 3.5 内, 而 SDSS-I&II 类星体则大 | そ旨在増加 z > 2 <市分在近邻字宙中 | 的被观测天体数密度,因此 ^p P.。 | 百个巡天的 | り 实际红移分 ⁴ | 后非常不同, BOSS | 巡天中有 |
| | · _ / • / | | | | | | | | |

59

2.1.2 光学/近红外深场巡天

光学测光巡天对 LLAGN 的认证主要还是依赖同 X 射线深场巡天的匹配以及后期深度光 谱观测数据。

1) H-HDF-N

H-HDF-N (Hawaii Hubble Deep Field North)^[31, 33] 是北天的一个光学近红外巡天,覆盖天区以 $\alpha_{J2000} = 12h37min$, $\delta_{J2000} = +62°10'$ 为中心,大小为 0.4 deg²,其中包含了多波段数据非常丰富的 GOODS-N (Great Observatories Origins Deep Survey North)天区,以及 2.1.1 小节中介绍的 CDF-N 天区 (见图 1)。Capak 等人 (2004)^[33] 给出了早期 0.2 deg²的光学波段测光样本,B、V、R、I、z'波段数据来自 8.3 m Subaru/Suprime-Cam, 5σ 探测极限分别为 26.9、26.8、26.6、25.6、25.4 (AB mag); U 波段来自 4 m KPNO, 5σ 探测极限为 27.1 AB mag; HK' 波段数据来自 2.2 m UH, 5σ 探测极限为 22.1 AB mag。Yang等人 (2004)^[31] 综合总结了 0.4 deg² 天区的观测,并且在光学波段的基础上结合了 0.85 m Spitzer/IRAC 3.6、4.5、5.6、8.0 µm 近红外的公开数据,给出了最终的测光红移样本,样本包含 131 678 个天体。Yang 等人 (2004)^[31] 将 H-HDF-N 同 2 Ms CDF-N X 射线样本^[34] 匹配,认证了 462 个非恒星 X 射线天体 (AGN 候选体)(见表 1),其中 281 个 AGN 有光谱红移(见参考文献 [31] 中的表 2)。虽然 H-HDF-N 样本中一部分天体红移可以达到约 5,但其中绝大部分 z < 1.6,见参考文献 [31] 中的图 4。

2) CANDELS

CANDELS (the Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey)^[49,50] 是由哈勃空间望远镜 (HST) 进行的紫外到近红外深场测光巡天,共包含两个设备上的 3 个照 相机拍摄的 9 个波段: ACS/WFC 拍摄的光学波段 F606W、F814W 和 F850LP,分别相当 于 V、I、z 波段;WFC3/IR 拍摄的红外波段 F105W、F125W 和 F160W,分别相当于 Y、 J、H 波段;WFC3/UVIS 拍摄的紫外/光学波段 F275W、F336W 和 F350LP,相当于 UV 至 W 波段。巡天包含宽场和深场两种模式:深场巡天面积为 125 arcmin²,在 GOOS-N/S 天 区内,5 σ 点源探测极限为 H = 27.7 AB mag;宽场巡天面积为 800 arcmin²,除 GOODS 天 区外,另外包含 EGS 天区 (Extended Groth Strip)、COSMOS 天区 (下一小节中会详细介绍 COSMOS 巡天)和 UDS 天区 (Ultra-deep Survey),这三块天区的一小部分 (具体天区覆盖范 围见参考文献 [50] 中的表 5),5 σ 点源探测极限为 $H \gtrsim 27.0$ AB mag。CANDELS 旨在记录 星系演化生命中的前三分之一时间,对应红移大约为 8 ~ 1.5,预计将拍摄到超过 25 万个遥 远星系。通过同 X 射线观测数据匹配,已认证出深场巡天中有 30 个 X 射线 AGN^[49],深场 和宽场巡天一共有 200 个 X 射线 AGN^[49],其红移范围为 1.5 < z < 2.5 (见表 1)。

3) COSMOS

COSMOS (the Cosmic Evolution Survey)^[51] 是覆盖天区最大的 HST 巡天, 深度达 $I_{F814W} < 27.8$ (5 σ ; AB mag)。巡天以 RA = 10h00min28.6s, DEC = +02d12min21.0s(J2000) 为中心, 面积达 2 deg²。COSMOS 天区中除 HST/ACS 测光数据外,还有丰富的 多波段数据, Ilbert 等人 (2009)^[52] 总结了从 UV 到中红外 30 个宽、中、窄波段的测光数 据,给出了 607 617 个天体的测光红移。UV 波段来自 GALEX (Galaxy Evolution Explorer), 光学近红外数据来自 Subaru、Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT)、United Kingdom Infrared Telescope 和 National Optical Astronomy Observatory,中红外来自 Spitzer/IRAC。 XMM-Newton 观测了 COSMOS 天区,探测到 1 800 个 X 射线源^[53],其中 1 555 个被认证为 X 射线 AGN^[54],通过 SED 拟合可将其分成 I/II 型 AGN^[53],602 个 I 型 X 射线 AGN (430 个有光谱红移,172 个只有测光红移),953 个 II 型 X 射线 AGN (402 个有光谱红移,551 个 只有测光红移)。此外,Bongiorno 等人 (2012)^[54] 仅通过光学光谱利用 zCOSMOS 亮光谱巡 天^[60]额外认证了 105 个 II 型光学 AGN。这约 1 700 个 AGN 的红移分布如图 2 所示,由图 可见,大部分 AGN 仍然分布在 z < 2 区间,只有少数 AGN(少于 100)可以达到 $z \approx 3$ 。



注: 空心直方图对应光谱 + 测光红移,实心直方图仅对应光谱红移分布。

图 2 COSMOS 巡天中 AGN 的红移分布情况^[53]

4) COMBO-17

COMBO-17 巡天项目 (Classifying Objects by Medium-Band Observations in 17 Filters)^[55] 是一个中带测光巡天项目,它一共包含三块天区,覆盖 0.78 平方度。该项目的初衷是提供一 个样本大小约为 50 000 的星系样本,并同时给出精确的测光红移和谱能量分布 (SED)。观测 自 2000 年 1 月开始,大约持续了两年时间,由 MPG/ESO 位于智利 La Silla 的 2.2m 级望远 镜上的 Wide Field Imager (WFI) 进行。17 个滤波片覆盖的波长范围为 350 ~ 930 nm,其中 12 个是半高全宽大约为 10 000 km/s 的中带滤波片,因此 COMBO-17 的测光红移比传统的 更加精确 ($\sigma_z \approx 0.03$)。 COMBO-17 巡天是通过拟合中带测光得到的低分辨率"模糊光谱"的办法来将活动星系 核与其他的一些源,如恒星、恒星形成星系等,区分开来的,没有后续光谱认证。中带滤波 片 10 000 km/s 的半高全宽可以比较好地匹配到类星体的发射线,因此比单纯的形态认证更 加准确。类星体拟合模板采用的是 SDSS 巡天中类星体的模板光谱库^[61],图 3 给出了三个 范例活动星系核的中带滤波谱和相应的最优拟合模板光谱。COMBO-17 最终一共探测到 192 个 1 < z < 5, 17 < R < 24 mag 的低亮度活动星系核。COMBO-17 的 192 个 AGN 的红移 和 R 波段的星等分布如图 4 所示,图中 R > 22 mag 范围内有丰富的 AGN 分布,由此可见 COMBO-17 巡天包含了数目较为可观的暗于 SDSS-III/BOSS QSO 的 LLAGN。



注:绿色的数字表示这三个活动星系核的红移。每个滤波谱数据点上画的横向误差棒是该滤波片的带宽,纵向的误差棒是 1σ 的流量误差。绿色的线是在该红移处的最优拟合模板光谱。由于对 B 和 R 波段的重复观测,因此有时 同一个源可以在同一个滤波片显示不同的流量。

图 3 三个范例活动星系核的滤波谱^[55]

2.2 深度光谱巡天

2.2.1 LBG 巡天

LBG 巡天 (The Lyman Break Galaxy survey)^[17] 包含了 16 块独立的天区,一共覆盖 0.38 平方度。测光观测包括 4 个波段 (UGRI),由 P200 (Palomar 5.08m telescope), WHT (William Herschel 4.2m telescope), LCO (Las Campanas Observatory du Pont 2.5m telescope), NTT (ESO 3.6m New Technology Telescope) 和 KPNO (Kitt Peak 4m Mayall telescope) 来完成。

作者利用测光观测的颜色数据选择出 2 440 个亮于 $R_{AB} = 25.5$ mag 的 LBG 星系候选体 (约比 SDSS-III/BOSS QSO 暗 3 ~ 4 mag)。通过模拟作者发现,只有大约一半的候选体 (1



图 4 COMBO-17 巡天探测到的 192 个活动星系核的红移和 R 波段星等分布^[55]

344 个天体)的本征颜色显示它们真实的红移 ($z \approx 3$),并用 Keck 望远镜对这些源进行了光 谱观测,最终认证了 988 个平均红移为 $\langle z \rangle = 2.99 \pm 0.29$ 的高红移天体,其中有 29 个被认证 为活动星系核,13 个 I 型 AGN 和 16 个 II 型 AGN(比 SDSS-I&II QSO 暗 5 ~ 6 mag)。

下面介绍利用约1000 个 LBG 星系中的光谱认证活动星系核的办法。如果某个星系的光 谱有任何一条发射线的半高全宽 (FWHM) 大于2000 km/s,那么这个星系就被归为宽线活 动星系核 (I型 AGN)。窄线活动星系核 (II型 AGN) 的判别是:没有任何一条发射线是宽线 (FWHM > 2000 km/s),并且他们的强莱曼阿尔法发射线有明显的 C IV λ1549 发射线伴 随。通过高电离发射线的存在来判别选择窄线活动星系核可能有些主观,但是这种选择办法 也不无道理:在观测上大家发现绝大部分 LBG 都没有可探测到的 CIV 和 HeII 发射线特征, 即使在莱曼阿尔法线很强的时候也很难探测到这两条发射线;这可能是因为如果没有活动星 系核中心吸积盘提供的高能光子,单靠星云产生的光子很难将分子光致电离到如此高的电离 度。表 2 介绍了这两种不同的活动星系核的性质。

| 表 2 $z \approx 3$ 附近的 LBG 样本中的活动星系核的性质 | | | | | |
|---|--------------------|------------------|--------------------|--|--|
| 性质 | type I AGN | type II AGN | $LBGs^{a}$ | | |
| N | 13 | 16 | 959 | | |
| 红移 | 3.03 ± 0.35 | 2.67 ± 0.35 | 2.99 ± 0.30 | | |
| $\langle R \rangle^{\rm b}/{\rm mag}$ | 23.3 | 24.4 | 24.6 | | |
| R范围/mag | $20.6 {\sim} 24.8$ | $22.6{\sim}25.4$ | $22.8 {\sim} 25.5$ | | |
| 注: * 排除了被认定为 AGN 的 LBG 星系; | | | | | |
| ^b R 表示观测波长在 6 830 Å处的 AB 星等。 | | | | | |

图 5 给出了 LBG 样本中的 I 型和 II 型活动星系核的平均光谱。平均光谱是把每个源在 静止坐标系下的光谱按照它们各自在 1 600~1 800Å处的连续谱归一化,然后取所有光谱的平 均值。图 5 a) 给出了 LBG 巡天中 13 个 I 型活动星系核的平均光谱。作为比较,图 5 a) 同 时给出了其他工作中满足 LBG 巡天中的颜色选择条件但是更亮 (V ≈ 18 mag) 的类星体的 平均光谱^[62, 63],这些亮类星体的平均 UV 光度大约是 LBG 中活动星系核的 100 倍。我们可 以明显地看出 LBG 巡天中的 LLAGN 和那些比它们亮 100 倍的类星体的光谱形状十分相似。 而且我们可以明显地看到"Baldwin"效应:随着连续谱光度的减少,C IV 发射线强度增加 的效应。图 5 b) 给出了 LBG 巡天中 16 个 II 型活动星系核的平均光谱。



注: a) 蓝色光谱是 13 个 I 型活动星系核的平均光谱,红色的光谱 (按比例缩放过的) 是一个比 LBG 中的活动星系核样本在 UV 光度亮 100 倍的类星体样本的平均光谱^[62,63]; b) 16 个窄线活动星系核的平均光谱。

图 5 LBG 巡天中 I 型和 II 型活动星系核的平均光谱^[17]

LBG 巡天帮助我们在很多方面更好地认识了高红移宇宙中的低亮度活动星系核,包括 AGN 的成团性^[30]、黑洞辐射的爱丁顿比、活动星系核在星系一生中的存在时标、光度函 数^[64]等方面,我们在介绍高红移 LLAGN 的主要科学成果时将会逐项讨论 (见第3章)。

2.2.2 VVDS

VLT (甚大望远镜) 是欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, ESO) 在智利建造的大型光学望远镜,由四台相同的 8.2 m 大型光学望远镜组成。VIMOS (VIsible Multi-Object Spectrograph) 是 VLT 上面的一个多目标观测的光谱仪。VVDS^[65] (VIMOS-VLT DEEP Survey) 就是在 VLT 望远镜上利用 VIMOS 光谱仪进行的一个深度光谱巡天。

VVDS 的光谱观测分两种视场,一种是宽视场,探测星等范围是 17.5 < *I*_{AB} < 22.5 mag (深度和 SDSS III/BOSS 相近),覆盖天区 1.1 平方度,探测到了 9 440 个星系 (其中包含 56 个活动星系核^[66]);另外一种是深视场,探测的星等范围是 17.5 < *I*_{AB} < 24.0 mag,覆盖天区 0.6 平方度,探测到了 11 564 个星系 (其中包含 74 个活动星系核^[66],比 SDSS-III/BOSS QSO 暗约 2 mag,比 SDSS-I&II 暗约 4 mag)。观测的波长覆盖范围是 5 500~9 500 Å,分辨率约为 33 Å。

1) 活动星系核的选择

VVDS 巡天是一个纯星等限制的盲巡天,没有任何颜色、形态的预先选源过程,因此比 颜色选择的样本更加完善,并且每个源都有自己的光谱数据。VVDS 的选源过程^[65, 67, 68] 是 先利用夏威夷的 CFHT 望远镜,对特定的天区持续拍摄图像,然后再利用 VLT 上的 VIMOS 对特定星等范围内 (17.5 < *I*_{AB} < 24.0) 被 CFHT 采集到的源进行光谱拍摄。关于活动星系核 的选择^[56], VVDS 只研究了宽线活动星系核 (type I AGNs) (当只有窄发射线时,受到光谱 覆盖范围的限制,很难将 AGN 活动同星爆活动区分开)。他们选择 I 型活动星系核的办法是 拟合光谱,如果一个源有一条或者一条以上的宽线 (*FWHM* > 1 000 km/s),那么该源就是 I 型活动星系核。图 6 显示了在 VVDS 的波长范围内,可被探测到的宽发射线种类随红移的 变化。



注: 实线给出的是活动星系核可产生的主要宽发射线在不同红移下的观测波长值,预计在 I 型活动星系核中至少 观测到这些发射线中的一条。预计只能探测到一条宽发射线的红移范围由灰色的阴影区域给出。在黑色的阴影区 域,预计无法探测到任何 I 型活动星系核,因为在这个红移窗口,观测波长范围内不包含任何一条活动星系核可 能发射出的宽线。在白色的红移窗口处,预计探测到至少两条宽发射线。右侧展示了只能探测到一条宽发射线的观 测波长范围。Hβ 和 Lyα 没有给出是因为这两条线不会被单独地探测到宽线,在同一红移区间内,如果这两条线 被探测到宽线,那么应该还有别的线也被探测到宽线特征。

图 6 VVDS 巡天观测波长范围内 AGN 强宽发射线的可见度随红移的变化^[56]

2) 高红移 LLAGN 的平均光谱与高红移 SDSS 类星体的比较

Gavignaud 等人 (2006) (以下简称为 G06)^[56] 比较了 VVDS 选出的高红移低光度 I 型活 动星系核的平均光谱和 SDSS 高红移类星体的平均光谱 (由 2 200 个 0.4 < z < 4.8, -26.5 < M_r < -18.0 mag 的类星体光谱计算而出^[61])。他们按照 Francis 等人 (1991)^[69] 的办法得到了 静止坐标系下的平均光谱。图 7 显示了 VVDS 巡天中的活动星系核和 SDSS 中的活动星系核 的平均光谱。我们可以看到 VVDS LLAGN 的 Lya 发射线强度高于 SDSS QSO,而 VVDS LLAGN 的 Ha 发射线强度又明显低于 SDSS QSO。他们利用洛仑兹函数拟合宽线,高斯函数拟合窄线,也进一步量化地证实了上述结果。他们认为造成上述分歧的原因是 VVDS 在 1 200 Å以下和 5 050 Å以上的波长范围,只有少于 10 个光谱对最终的平均光谱有贡献,所以 这两部分数据点的误差应该比较大。另外一方面,C IV 和 Mg II 两条线测出的等值宽度表明 VVDS LLAGN 发射线强度高于 SDSS QSO,这是由 Baldwin 效应^[70] 造成的。



注: 上图显示了 VVDS 巡天 115 个有确定光谱红移的高红移低光度 I 型活动星系核和 SDSS 巡天中 2 200 个高 红移类星体的平均光谱,分别由黑线和绿线表示。下图显示了为平均光谱做出贡献的源的个数随波长的分布。

图 7 VVDS 巡天中 I 型活动星系核的平均光谱^[56]

从整体连续谱形状来比较 VVDS 巡天中的 LLAGN 和 SDSS 巡天中的 QSO,我们可以 看到 VVDS 活动星系核的平均光谱比 SDSS 的红,尤其是以 $\lambda > 3~000$ Å的波长范围特别显 著。这可能是由于宿主星系对光谱的污染,造成了 VVDS 活动星系核平均光谱的红化效应。 这和他们对 VVDS 选出的低光度活动星系核的颜色研究相符,G06 发现这些低光度活动星系 核颜色整体上偏红。为了验证 VVDS 活动星系核的光谱被宿主星系污染的假说,他们从所有 VVDS 活动星系核中剔除了图像中显示展源特性的活动星系核,只保留点源,然后再对纯点 源的低光度活动星系核做平均光谱。他们发现,这些点源活动星系核的连续谱的确比整个活 动星系核样本的连续谱蓝。当然,点源 AGN 仍受宿主星系污染,只是因为相对宿主星系较 亮,所以相对污染小一些。

然后,G06 从 VVDS 活动星系核的平均连续谱中减除了 SDSS 活动星系核的平均连续 谱,来进一步验证 VVDS 观测到的光谱中包含有宿主星系的光谱成分。VVDS 的平均连续谱 是通过先拟合发射线,然后将发射线从观测到的光谱中扣除,再做平均光谱后得到的。图 8 显示了 VVDS-SDSS 连续谱之差。为了比较方便,图中还用红线画出了 VVDS 数据给出的早型星系模板光谱^[71]。图中两个光谱大体形状的吻合进一步证明了 VVDS 的活动星系核平均光谱的红端很可能严重地受到了宿主星系的影响。



注: 图中黑线表示从 VVDS 的活动星系核连续谱中扣除了 SDSS 活动星系核的连续谱之后剩余的差。为了比较, 图中红色的线给出了 VVDS 巡天中给出的早型星系的模板光谱。



2.2.3 HETDEX 巡天

HETDEX (the Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment) 暗能量巡天是一个旨 在精确给出 $z \approx 3$ 处哈勃膨胀因子 (H(z)) 和角直径距离 ($D_A(z)$) 的莱曼阿尔法发射线星系 (Ly α Emitter, LAE) 巡天项目。该项目预计将于 2017 年利用美国麦克唐纳天文台 9.2 m 级 Hobby-Eberly 望远镜 (HET) 上的 VIRUS 光谱仪 (Visible IFU Replicable Unit Spectrograph) 进行,观测方式为盲光谱巡天 (不经过任何颜色、形状等预先选源过程)。覆盖天区大小为 420 deg²,填充因子为 1/7,有效覆盖天区约为 60 deg²。

HET 望远镜视场直径为 22′, 由包含 75 个独立积分视场光谱仪 (IFU) 单元的 VIRUS 积 分视场光谱仪阵列覆盖 (如图 9 所示)。每个 IFU 单元由 448 根光纤组成, 视场大小约为 0.22 平方角分,填充因子约为 1/3。望远镜一次曝光最多可以获取约 3 万条独立光谱 (波长覆盖范围为 350 ~ 550 nm,分辨率为 $R \approx 800$)。当然,因为是盲观测,这 3 万多条光谱中有很大一部分为天光光谱。通过大约 1 400 h 的观测 (超过 100 个观测夜,分 3 ~ 4 年进行),预计一共可以探测到大约 100 万个 1.9 < z < 3.5 的 LAE 星系 (5 σ)。

因为 HETDEX 是一个盲巡天,所以在探测 LAE 的同时不可避免地会观测到同一天区 的活动星系核。我们可以通过发射谱线 (如 Lyα)的宽度来判断活动星系核的光谱 (即探测



注: a) 为 HET 望远镜圆形视场,直径为 22′,由包含 75 个独立 IFU 单元的 VIRUS 积分视场光谱仪阵列覆盖。 b) 放大展示了每个 IFU 单元,由 448 根光纤组成,视场大小约为 0.22 平方角分,填充因子约为 1/3。因此,望 远镜一次曝光可以获取约 3 万条独立光谱。此图摘自 Hill 于 2005 年在 Waikoloa DE Workshop 上做的报告。

图 9 VIRUS 光谱仪视场填充示意图

I 型 AGN, *FWHM* > 1 000 km/s), AGN 的强宽发射线在 HETDEX 波长覆盖范围内随 红移的可见度变化如图 10 所示。预计按照这一方法可以探测到约 10⁴ 个 1.9 < *z* < 3.5 的 I 型 LLAGN。这种方法可以筛选出那些发射线强而连续谱弱的 AGN,因此,能够探测到 比 SDSS 类星体样本深得多的 AGN ($g \approx 24 \text{ mag}^{[57]}$,比 SDSS-I&II QSO 大约暗 4 mag,比 SDSS-III/BOSS 大约暗 2 mag),将为高红移 LLAGN 研究提供有重要统计意义的样本。



注: 实线给出的是 AGN 可产生的主要宽发射线在不同红移处的观测波长值,我们也预计在 I 型活动星系核中至 少观测到这些发射线中的一条。

图 10 HETDEX 巡天观测波长范围内强发射线随不同红移的可见度

2.2.4 其他大口径望远镜上进行的中等红移 ($z \approx 1$) 的深度光谱巡天项目

大口径望远镜在深度光谱巡天项目中具有明显优势,本小节前面介绍欧南天文台利用 8 m 级 VLT 望远镜进行的 VVDS 高红移 ($z \approx 3$) 深度光谱巡天,以及麦克唐纳天文台利用 9.2 m HET 望远镜刚刚开展的 HETDEX 高红移光谱巡天,除此之外,国际上一些其他大口 径望远镜还做了中等红移 ($z \approx 1$) 深度光谱巡天。 DEEP2 (DEIMOS/DEEP) 巡天项目^[72] 是在夏威夷 10 m 凯克望远镜 (Keck Telescope) 上进行的 $z \approx 1$ 深度巡天项目 ($R_{AB} < 24.1$ mag),由美国加州大学伯克利分校 (UC Berkeley)、加州大学圣克鲁斯分校 (UC Santa Cruz) 和夏威夷大学合作完成。相比 VVDS 巡天,该项目关注的红移稍低 (0.7 < z < 1.5),但是样本总体更大 (利用 DEIMOS 光谱仪给出了 5 万 个低亮度星系的光谱红移,大约是 VVDS 光谱巡天的 2.5 倍),光谱分辨率更高 ($R \approx 5$ 000, 大约是 VVDS 的 20 倍)。与 VVDS 盲光谱巡天观测模式不同,DEEP2 巡天经过 BRI 波段 测光数据预先选源。巡天覆盖天区大小为 2.8 平方度,光谱覆盖范围为 6 500 ~ 9 100 Å,光 谱红移通过 [O II] 3 727 Å双线定出。

PRIMUS 巡天 (PRIsm MUlti-object Survey)^[73, 74] 是目前最大的中等红移 (0.6 < z < 1.2) 暗星系 ($i_{AB} < 23.5 \text{ mag}$) 巡天,在智利 Las Campanas 天文台 6.5 m 麦哲伦望远镜 (Magellan I Baade Telescope) 上进行。覆盖天区面积为 9.1 平方度,光谱分辨率 $R \approx 40$ (是 VVDS 巡天 的 1/5),一共给出了 13 万个星系的光谱红移 (约为 VVDS 的 6 倍)。

3 科学成果

3.1 光度函数

光度函数 (LF) 指单位光度范围内 (ΔM) 某种天体的空间密度 $\Phi(M)$ 。科学家们通常用 两段幂律函数 (2PL) 的形式来拟合并研究离散的 LF 观测数据点 (见图 11):

$$\Phi(L,z) = \frac{\Phi_L^*}{(L/L^*)^{-\alpha} + (L/L^*)^{-\beta}} \quad , \tag{1}$$

其中, L^* 和 Φ_L^* 是 2PL 两个不同斜率段拐点的横纵坐标值, Φ_L^* 称为特征空间密度, L^* 称为特征光度, α 和 β 分别表示暗端斜率和亮端斜率。上式也可被改写成绝对星等的形式:

$$\Phi(M,z) = \frac{\Phi_M^*}{10^{0.4(\alpha+1)(M-M^*)} + 10^{0.4(\beta+1)(M-M^*)}} \quad .$$
⁽²⁾

首先,研究 AGN 的光度函数可以直观地给出 LLAGN 和 QSO 的相对空间分布情况,如 图 11 所示。Bongiorno 等人 (2007)^[66](以下简称为 B07) 在图中总结了第 2 章中介绍的两个深 度光谱巡天 (LBG 巡天、VVDS 巡天) 和一个深度中带测光巡天 (COMBO-17 巡天)LLAGN 在 2.1 < *z* < 3.6 区间内的 LF,并同时显示了该红移处的 QSO。图中可见 LLAGN 和 QSO 在双指数函数拟合中分别对应两个不同的斜率段,LLAGN 空间密度明显高于 QSO。图中 VVDS 巡天 ^[66](实心圆点) 同 COMBO-17 巡天 ^[55](空心五角星) 符合得较好,但这两者同 LBG LLAGN 的光度函数 ^[64](空心圆点) 相差较大 (这可能是由于 LBG 巡天中只有 13 个 I 型 AGN,每个光度函数点可能只由一两个源的观测数据得出,误差较大造成的)。

其次,通过研究 AGN 的 LF,我们还可以了解 AGN 对宇宙再电离的贡献程度。宇宙从大爆炸后经历了电离、复合和宇宙再电离 (reionization) 过程。宇宙再电离的能量来自于 星系际的宇宙高能电磁背景辐射,观测显示宇宙 X-ray 背景辐射 (X-ray Background, XRB) 主要由中红移中等光度 AGN 提供^[76](详见第 3.1.2 节),类似地可以推测,活动星系核对



注: 实心圆点表示 VVDS LLAGN 在 2.1 < z < 3.6 范围内的 LF^[66], 空心圆点对应 LBG LLAGN 在 z = 3 处的 LF^[64], 空心五角星给出了 COMBO-17 LLAGN 的 LF^[55]。 图中同时还显示了其他高红移巡天项 目中 QSO 的 LF: Warren 等人 (1994)^[5] (米字图形) 和 SDSS^[8] (空心方点)。其中, SDSS 数据的红移范围是 3.6 < z < 3.9, 已经通过 Pei (1995)^[75] 的光度演化模型转化到 z = 3 处。 图中所有线表示最优 2PL 拟合结 果: 粗的部分表示观测样本光度覆盖范围内, 细的部分表示按最优拟合外推的区域。

图 11 静止坐标系下 1 450 Å处 LBG, VVDS, COMBO-17 等巡天中 AGN 的光度函数^[66]

宇宙弥散 UV 背景辐射的贡献也不可忽视,但具体贡献程度还需要更细致的定量分析。氢 再电离的能量可以由类星体和大质量恒星提供,和氢的再电离过程不同,氦的第二次电离 (He⁺ → He⁺⁺) 只能由类星体产生的硬 UV 辐射供给^[64], $z \approx 3$ 的类星体中观测到的 He II 的 Gunn Peterson 效应 (背景类星体连续谱中观测到很多前景天体产生的吸收线的现象) 说明 氦的第二次电离在这一时期发生。研究 $z \approx 3$ 处 AGN 的光度函数可以帮助我们研究 AGN 对 宇宙 UV 背景辐射的贡献大小 ($\rho_{\text{UV}} = \int_{\text{UV}} L\Phi(L) dL$ (J·s⁻¹·Mpc⁻³))。

3.1.1 光度函数演化模型

光度函数演化模型是光度函数随红移演化的具体形式,按照不同红移下 2PL 光度函数的 形状是否发生变化可归为两类。(1) LF 形状不变 (亮暗两端斜率均不变),只是拐点 (L^*, \varPhi_L^*) 位置发生变化的演化模型。比如,纯光度演化模型 (pure luminosity evolution, PLE) 认为不 同红移处 LF 只发生横坐标方向的移动,纯密度演化模型 (pure density evolution, PDE) 认 为不同红移处 LF 只发生纵坐标方向的移动,光度和密度演化模型 (Independent Luminosity And Density Evolution, ILDE or LADE) 认为不同红移的 LF 在横纵坐标方向都会发生移动。 (2) LF 的形状会随着红移变化的模型。比如依赖光度的密度演化模型 (luminosity dependent density evolution, LDDE),该模型比较复杂,总的来说仍然是一种密度演化模型,即随 着红移降低,天体的数密度增加,但密度的变化按照某种具体形式依赖于光度(详见公式 (3)-(5))。下面介绍如何通过拟合观测到的光度函数来判断 AGN 符合哪一种光度演化模型。

前面讲述的 PLE 模型、PDE 模型和 LDDE 模型在数学上的区别在于公式中的自由参量 $(L^* \ \pi \Phi_L^*)$ 随红移的变化关系:

(1) 纯光度演化 PLE 模型指在不同红移下,式 (2) 中的自由参量 Φ_M^* 不随红移变化, 但是自由参量 M^* 随红移按一定规律变化。通常人们取 $M^*(z) = M^*(0) - 2.5(k_1z + k_2z^2)$, 其中 k_1, k_2 和 $M^*(0)$ 是自由参量,亮端斜率 β 随红移变化可以忽略。观测发现暗端斜率 α 随红移增加而明显增加,因此,人们通常利用修正的 PLE 模型来处理这一演化现象^[77]: $\alpha(z) = \alpha(0) + Az$ 。该模型中所有自由参量为 $\alpha(0), A, M^*(0), k_1, k_2$ 和 Φ_M^* 。

(2) 纯密度演化 PDE 模型中, M^* 是不随红移变化的自由参量, 但 Φ_M^* 随红移按一定规 律变化。通常的形式是: $\Phi_M^*(z) = \Phi_M^*(0) \cdot 10^{(k_{1D}\cdot z + k_{2D}\cdot z^2)}$, 其中 k_{1D} , k_{2D} 和 $\Phi_M^*(0)$ 是自由 参量。

(3)最后一种依赖光度的密度演化 LDDE 光度函数演化模型稍微复杂一点,具体来讲, M*仍然是个不随红移变化的自由参量,但 Φ*随红移按一定的规则变化,并且变化规则同光 度之间不是独立关系。具体数学形式如下:

$$\Phi^*(M, z) = \Phi^*(M, 0) \cdot e_d(z, M) \quad , \tag{3}$$

其中,

$$e_d(z, M) = \begin{cases} (1+z)^{p_1} & (z \le z_c) \\ e_d(z_c)[(1+z)/(1+z_c)]^{p_2} & (z > z_c) \end{cases},$$
(4)

并且,

$$z_c(M) = \begin{cases} z_{c,0} \cdot 10^{-0.4\gamma(M-M_c)} & (M \ge M_c) \\ z_{c,0} & (M < M_c) \end{cases}.$$
(5)

自由参量是 $p1, p2, \gamma, z_{c,0}, M_c$ 和 $\Phi^*(0)$ 。

B07 分别用三种光度函数演化模型拟合了不同红移区间 B 波段 LF 的变化,如图 12 所示,暗端利用 VVDS 的观测数据,亮端利用 SDSS 的数据。作为对比,红色点划线显示了 Richards 等人 (2006)^[77] 只利用亮端 SDSS 的数据拟合的光度函数,可以明显看到,由于缺少暗端观测数据,Richards 等人 (2006) 的拟合曲线在暗端的趋势和 VVDS 的观测数据之间 存在明显差异。B07 采用的三种光度函数演化模型在 z > 1.5 的四个红移区间内都能较好 地同时刻画出 VVDS 在暗端给出的数据和 SDSS 在亮端给出的数据 (只有蓝色虚线对应的 PLE + PDE 模型在 3.0 < z < 4.0 区间低估了暗端 AGN 的数密度,其余拟合结果均很好)。我们需要特别注意的是,在红移 1.0 < z < 1.5 区间内,LDDE 演化模型 (黑色实线) 要明显 好于 PLE 演化模型 (绿色短虚线)和 PLE + PDE(蓝色长虚线),而在这个红移区间,暗端每 个数据点所包含的活动星系核数目远多于其他红移区间,因此这个红移区间的权重应当最大,所以 LDDE 演化模型比起另外两种能更好地表达观测到的光度函数随红移演化的规律。这一点在表 3 中通过 χ^2 进一步体现了出来。



注:不同红移区间内,VVDS LLAGN^[66] (实心点) + SDSS DR3 QSO^[77] (空心点) 样本 B 波段的光度函数。 红色点划线是 Richards 等人 (2006)^[77] 只利用 SDSS DR3 QSO 拟合的结果。其他线都是同时利用 VVDS 和 SDSS 的数据拟合出来的最优光度函数演化模型,绿色代表 PLE 模型,蓝色是将 PLE + PDE 模型,黑色是 LDDE 模型。三种拟合的各个参数值由表 3 给出。

| | | | | [0.0] |
|------|-----------------|-------|--------------|-------|
| 图 12 | VVDS LLAGN+SDSS | OSO B | 波段光度函数随红移的变化 | [66] |

| | VVDS+SDSS-PLE α | VVDS+SDSS-PLE+PDE | | VVDS+SDSS-LDDE |
|----------|------------------------|-------------------|-----------|----------------|
| α | -3.83 | -3.49 | α | -3.29 |
| β | -1.38 | -1.40 | β | -2.0 |
| M^* | -22.51 | -23.40 | M^* | -24.38 |
| k_{1L} | 1.23 | 0.68 | p1 | 6.54 |
| k_{2L} | -0.26 | -0.073 | p2 | -1.37 |
| A | 0.26 | - | γ | 0.21 |
| k_{1D} | — | -0.97 | $z_{c,0}$ | 2.08 |
| k_{2D} | _ | -0.31 | M_c | -27.36 |
| Φ^* | 9.78E - 7 | 2.15E - 7 | Φ^* | 2.79E - 8 |
| χ^2 | 130.36 | 91.4 | χ^2 | 64.6 |
| ν | 69 | 68 | ν | 67 |

表 3 利用 VVDS+SDSS-DR3 在红移 0 < z < 4 范围内的数据得到的三种演化模型的最优拟合参数结果

Miyaji 等人 (2015)^[76](以下简称为 MYJ15) 综合总结了 Swift BAT 到 CDFS 等多个 X 射 线巡天的约 3 200 个 X 射线 AGN 样本,研究了 X 射线 LF(XLF) 随红移的演化模型,也发 现 LDDE 模型可以较好地同时描述各个红移区间内的 XLF(见图 13)。他们发现暗端斜率 α 在 z = 0.6 处发生明显变化:所有 z < 0.6 区间内, $\alpha \approx 1$;所有 z > 0.6 区间内, $\alpha \approx 0.5$, 这与 B07 的拟合结果 ($1 \le z \le 3.5$ 内, $\alpha \approx 0.45$) 吻合得很好。亮端斜率除在 0.6 < z < 0.8和 1.0 < z < 1.2两个区间内 $\beta \approx 2$ 外,在其余红移区间内均为常数 $\beta \approx 2.7$ 。



注:不同红移区间下的 2~10 keV 的 XLF。实线假设每个红移区间独立且符合 2PL 形式的拟合结果,点 线对应 LDDE 光度函数演化模型对所有红移区间的拟合结果。每个红移区间,同时用粉色和棕色虚线表示 0.015 < *z* < 0.2 和 2.0 < *z* < 2.4 区间的最优 2PL 拟合结果,用以作为对比。

图 13 X-ray 光度函数随红移的变化^[76]

3.1.2 AGN 数密度演化及 X 射线背景辐射

将不同红移处的光度函数沿着横坐标积分,可以研究 AGN 空间密度随红移的演化趋势。 B07 通过积分图 12,研究了不同亮度 ($-22.0 < M_B < -20.0 mag, -24.0 < M_B < -22.0 mag, -26.0 < M_B < -24.0 mag, M_B < -26.0 mag)$ 光学 AGN 的空间密度演化规律 (见图 14)。我 们可以看到,每种亮度 AGN 的空间密度随着红移的变化总是有一个峰值,这个峰值所在的 红移的位置随着 B 波段光度的减小而减小,即高光度 AGN 形成于早期宇宙,低光度 AGN 形成于低红移宇宙。在共同演化模型("co-evolution"^[1],黑洞质量和宿主星系质量成正相关)框架下,上述结论支持"cosmic downsizing"假说——大质量星系主要形成于高红移宇宙,小质量星系主要形成于低红移宇宙。



注:不同亮度范围 (-22.0 < $M_{\rm B}$ < -20.0 mag, -24.0 < $M_{\rm B}$ < -22.0 mag, -26.0 < $M_{\rm B}$ < -24.0 mag 和 $M_{\rm B}$ < -26.0 mag) 内的活动星系核空间密度演化随红移的变化。虚线是模型的红移适用范围被延展后的样子。

图 14 活动星系核空间密度随红移的演化 [66]

MYJ15^[76] 也通过将图 13 积分,研究了 X 射线 AGN 空间密度的演化 (如图 15 a) 所示), 类似 B07 利用光学 AGN 得到的结论,他们也看到了"cosmic downsizing"现象。此外, X 射线 AGN 演化过程中有个特别的"三段演化"特征:三个 lg $L_X > 43$ 区间, X 射线 AGN 的空间密度在演化过程中均有一个"平原"区域——在 $z \approx 1 \sim 2$ 处分别有一段时间空间密 度几乎不发生变化,在更高红移和更低红移的宇宙中 AGN 空间密度分别呈现明显的增长和 下降趋势。上述现象可能是由于不同时期 X 射线 AGN 的主要触发机制 (燃料供给机制)不同 造成的,我们将在第 3.1.3 节中进一步讨论。图 15 b)给出了不同光度红移下的 X 射线 AGN 对 2~10 keV 的 XRB ($\rho_x = \int_x L\Phi(L)dL J \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-3}$)的贡献情况,图中显示 $z \approx 1$ 处 43 < lg L_X < 44 的 AGN 和 $z \approx 2$ 处 44 < lg L_X < 45 的 AGN 对 XRB 贡献最大,这也和 Ueda 等人 (2014)^[78] 利用 4 039 个 X 射线 AGN 得到的结论完美符合。 3.1.3 不同红移下 X 射线 AGN 的触发机制

MYJ15 在图 15 a) 中发现的 X 射线 AGN 空间密度"三段演化"的特征很可能与不同时 期 X 射线 AGN 的触发机制相关,因此他们将观测数据同 Draper 和 Ballantyne (2012)^[79] 理 论模型进行了对比。Draper 和 Ballantyne (2012)^[79] 不直接以宇宙学模拟为基础,他们使用 了简单的星系数密度随恒星质量的演化模型,并假设长期演化和并合触发的 AGN 服从同光 度相关的函数。图 16 显示,"三段演化"过程中红移 $z \approx 1 \sim 2$ "平原"区域的 X 射线 AGN

40 $\lg e / 10^{-7} h_{70} \cdot J \cdot s^{-1} \cdot M pc^{-3}$ $\lg \rho / h_{70}^{-3} \cdot \mathrm{Mpc}^{-3}$ 38 $\lg\,L_{\rm X}$ Total (42~46) . $42.0 {\sim} 43.0$ -8 $44.0 \sim 45.0$ 3 segment PL-model $45.0 \sim 46.0$ LDDE model 36_1^{\lfloor} 1 $\overline{2}$ 3 6 7 $\overline{2}$ 4 6 451 1+z1+za) b)

注: a) 不同光度的 X 射线 AGN 空间密度随红移的变化。实线表示用三段幂律函数 (3-PL) 拟合每个光度区间的 数据点,点线表示 LDDE 模型的拟合结果。b) 不同光度 X 射线 AGN 贡献的 2~10 keV 发射率随红移的变化。

图 15 X射线 AGN 空间密度以及 $2\sim10$ keV 发射率随红移的演化 ^[76]

数密度和并合触发 AGN 的数密度吻合得较好,同时低红移 (*z* < 1) X 射线 AGN 数密度下降 区域和长期演化触发的 AGN 数密度也比较符合,说明这两个时期的 X 射线 AGN 很可能分 别由并合和长期演化两种触发机制主导。



注:不同颜色的数据点表示不同光度 X 射线 AGN 空间密度随红移变化的观测值,点划线、虚线和实线分别对应 Draper 和 Ballantyne (2012)^[79] 模型中的不同 AGN 触发机制,并合、长期演化和前两者之和。

图 16 X 射线 AGN 空间密度演化和 AGN 触发机制理论模型的对比^[76]

3.2 活动星系核的成团性

研究活动星系核的成团性可以在不同尺度上让人们从不同方面了解活动星系核的本质。从宇宙学大尺度 (几到几十个 Mpc) 上来讲,我们知道 AGN 同星系一样都可以较好地示踪宇宙中暗物质的分布,尤其是在较高红移处 (z > 2),由于类星体比较亮从而更容易被望远镜探测,研究 QSO 的成团性实现了对高红移宇宙学大尺度结构的观测 (例如著名的SDSS-III/BOSS 巡天项目)。另一方面,很多工作发现星系的光度与星系所在暗物质晕的质量 (M_{halo}) 之间有很强的相关性,说明星系的形成同大尺度结构息息相关。著名的 $M_{BH} - \sigma_*$ 关系告诉我们活动星系核的演化同宿主星系之间也是密不可分^[1]。由此科学家们推断 AGN 的光度 (L_{AGN}) 同 M_{halo} 之间可能也存在相关性。随着近年来巡天样本的不断增大,科学家们实现了将 AGN 样本细分成不同光度的子样本并研究 L_{AGN} 和 M_{halo} 之间的相关性。同星系在这方面的研究结果相反,科学家们并没有发现两者之间的强相关,我们将在本小节中以 Shen 等人 (2009, 2013)^[28, 80] 的工作为例,进行详细介绍。此外,通过 AGN 的成团性还可以估计 AGN 的偏差因子 b_A 、所在暗物质晕的质量 M_{halo} 、AGN 在卫星星系 (satellite galaxy)中的比例以及检验宇宙学类星体模型 (Halo Occupation Model, HOD, for QSOs) 等,我们也将在下文中以 Shen 等人 (2013)^[80] 的工作 (以下简称为 Shen13) 为例详细介绍。

从小尺度结构上来讲 (小于 1 Mpc),目前科学家们对活动星系核的触发机制还不是很清楚,有两种被广泛接受的理论:一种是通过星系盘的不稳定性形成的一些不对称结构,比如棒结构,帮助星系外围的冷气体耗散角动量,从而将气体转移到中心 SMBH 的引力势范围内,实现对活动星系核的触发 (长期演化);另一种是通过星系和星系之间的相互作用产生的潮汐扰动,帮助星系外围的冷气体耗散角动量,从而触发中心 SMBH 的强烈吸积活动 (并合)。研究 AGN 在小尺度结构的成团性可以有效地帮助人们认识究竟上述两种机制哪一种是AGN 的主要触发机制。从模拟的角度,有很多流体力学模拟支持第二种理论可以有效地触发 QSO 的活动^[81,82]。但是从观测的结果来看,很多研究的结论并不一致,本文中我们不仔细讲述。对这方面有兴趣的读者可以阅读 Gatti 等人 (2015)^[83] 的文章,他们利用半解析模型对 AGN 的触发机制做了深入的探讨,并同观测的成团性比较,但是他们发现这两种触发机制都可以很好地重现观测数据。

本文中我们仅从大尺度结构的角度总结现有的观测研究结果,但是由于高红移 LLAGN 的巡天过少、样本过小 (约 10²,详见第 2 章),对 AGN 成团性的研究十分有限 (只有 LBG 巡天在这方面给出了讨论^[30]),为了更好地展示 AGN 成团性研究的科学意义,本小节将不局 限于对高红移 LLAGN 研究的讨论。我们将从 QSO 成团性 (既包括低红移,也包括高红移) 研究入手,总结现有 AGN 成团性研究的科学成果,然后再简单介绍目前仅有的一个对 $z \approx 3$ 处 LLAGN 成团性的研究: LBG 巡天对于 $M_{\rm BH}$ 和 $M_{\rm halo}$ 关系进行的探索^[30]。

3.2.1 两点相关函数和偏差因子

科学家们通常使用两点相关函数 (TPCF) 来定量地描述天体的成团性。两点投影相关函数 $w(\theta)$,可通过下式计算^[84]:

$$1 + w_p(\theta) = \frac{DD(\theta)}{RR(\theta)} \quad , \tag{6}$$

其中, $DD(\theta)$ 和 $RR(\theta)$ 分别为观测样本和随机样本星系对数随角距离 θ 的变化函数。考虑 到星系在宇宙中的实际分布是三维的,因此引入红移空间相关函数 $\xi_s(r_p, r_\pi) = \frac{DD(r_p, r_\pi)}{RR(r_p, r_\pi)} - 1^{[85]}$,其中, r_p 和 r_π 分别表示星系对投影距离和视线距离。 ξ_s 和投影相关函数之间的关系为 $w_p(r_p) = 2\int_0^\infty dr_\pi\xi_s(r_p, r_\pi)$ 。有时,即使巡天中每个星系都有可靠的光谱红移,为了消除红 移畸变效应 (RSD),科学家们通常仍将 ξ_s 沿视线方向积分研究投影相关函数;但实际操作中 不可能从 0 积分到 ∞ ,模拟发现积分到 $r_{\pi,\max} = 70 h^{-1}$ ·Mpc 即可有效地将 RSD 效应减小 到最低。

在研究 AGN 的成团性时,相比于星系,AGN 的分布十分稀疏,因此受实际 AGN 观测 样本大小的限制,AGN 自相关函数 ACF 统计误差较大。研究 AGN-galaxy 之间的交叉相关 函数 CCF 时,可以通过急剧增加星系对数目有效地减少统计误差:

$$\xi_s(r_p, r_\pi) = \frac{AG(r_p, r_\pi)}{AR(r_p, r_\pi)} - 1 \quad , \tag{7}$$

其中 AG 和 AR 分别表示 AGN-galaxy 对数以及 AGN-随机星系对数。

偏差因子是某种特定重子物质和宇宙整体物质成团性之间的相对关系,定义式如下:

$$w_p = w_{p,\text{matter}} b^2 \quad , \tag{8}$$

其中 $w_{p,\text{matter}}$ 为宇宙中所有物质的相关函数,通常可用模型中的暗物质代替计算。 w_p 和 b 对应某种重子物质的相关函数和偏差因子:如果公式中 w_p 带入星系样本的相关函数,则 b 对应星系的偏差因子 b_G ;如果 w_p 对应 QSO 样本,则 b 为 QSO 的偏差因子 b_Q ;如果使用的是星系和类星体的交叉相关函数,则对应计算结果为 $b_{\text{QG}}(b_{\text{QG}}^2 \approx b_Q b_G)^{[80]}$ 。 3.2.2 低红移 AGN 的成团性研究

Shen13 采用 SDSS DR10 CMASS 星系样本以及 SDSS-I/II QSO 样本^[42](见表 1) 研 究了 $z \approx 0.5$ 的 AGN 成团性。为匹配两个样本的红移范围,作者对两者均做了红移限制 (0.3 < z < 0.9)。两样本共同覆盖 4 122 deg² 天区,星系样本大小为 349 608,QSO 样本大小 为 8 198。图 17 a) 显示了 SDSS I/II QSO 同 CMASS 星系之间的交叉相关函数,可以很好 地用幂律函数 $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$ 拟合 (图中黑色点划线和蓝色虚线)。通过用线性偏差模型 (红 色线段) 拟合 $r_p = 4 \sim 16 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 区间内的相关函数 (公式 (8), $w_{p,\text{matter}}$ 取自文献 [86]), 得到 QSO-galaxy 交叉相关的偏差因子 $b_{\text{QG}} = 1.70 \pm 0.06$,由 CMASS 样本 $b_{\text{G}} = 2.10 \pm 0.02$, 可以估计出 $b_{\text{Q}} \approx 1.38 \pm 0.10$ 。 $r_p < 4 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 时,卫星星系的影响显著 (本小节下面的 介绍中会详细讨论); $r_p > 16 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 时,飛余的 RSD 效应影响了观测数据的准确性 (见 3.2.1节)。

在引言中我们介绍了星系中央 SMBH 的演化同宿主星系息息相关^[1-3],黑洞质量 M_{BH} 同宿主星系核球的恒星质量 M_{bulge} 之间有明显的正相关关系^[1]。观测发现星系的质量同其 成团性之间有明显的相关性,说明大尺度环境在星系形成和演化的过程中起着不可忽视的 作用。因此,黑洞质量同大尺度环境之间也存在着潜在的相关性。假定所有类星体都以相 同的爱丁顿比辐射 (或者爱丁顿比 λ_{Edd} 分布很集中),那么观测上就可以通过检查类星体的



注: a) SDSS-I/II QSO 和 CMASS 星系之间的两点投影交叉相关函数。黑线和蓝线给出了两种最优幂律拟合结果,黑线中幂律指数 γ 是自由参数,蓝线的拟合固定了指数 $\gamma_{\rm fix} = 1.7$ 。红色线段是最优线性偏差模型拟合结果 (仅拟合了 $r_p = 4 \sim 16 \ h^{-1} \cdot {\rm Mpc}$)。b) $b_{\rm Q}$ 随类星体光度的变化。其中黑色圆点表示整个 QSO 样本的 $b_{\rm Q}$,红色方点和绿色圆点分别对应两种将整个 QSO 样本划分成不同光度的子样本的分类方法。黑色实线表示 CFHT-LS 星系样本得到的 0.4 < z < 0.6 处 $b_{\rm G}$ 随星系光度的变化趋势。为了展示方便,实线被归一化到黑色 圆点。

图 17 低红移光学 QSO 的两点相关函数及其成团性随光度的变化^[80]

光度同成团性之间的关系来定量地分析黑洞的演化同大尺度结构之间是否存在明显的关联 $(L_{QSO} \xrightarrow{\lambda_{Edd} \equiv const} M_{BH} \leftrightarrow M_{gal} \leftrightarrow M_{halo})_{\circ}$

为了探讨上述问题, Shen13 将 SDSS I/II QSO 样本按照两种不同方案分成四个不同光度的子样本:一种方案每个子样本光度没有交集,但红移范围却不同 (见图 17 b)中 div2); 另外一种方案,所有子样本的红移范围完全相同但是子样本之间的光度却有交集 (见图 17 b)中 div1)。对于每个光度下的子样本,Shen13 均作出了相应的交叉相关函数,并拟合得到了 对应的 b_Q。如图 17 b)所示,可以看到 b_Q与类星体光度 L_Q之间的相关性很弱,即类星体成 团性对类星体光度的依赖很弱。作为对比,图中同时还用黑色实线显示了 CFHT-LS 星系巡 天样本 (0.4 < z < 0.6)的偏差因子 b_G 随星系光度 L_G 之间的变化关系,可以看出星系的成团 性和星系光度之间有较强的相关性,随着光度增加,星系成团性越高。上述结果说明大尺度 结构在星系的演化历史中起着重要的作用,但是对星系中央 SMBH 光度演化过程的影响不是 很明显。这可能是因为黑洞所在的尺度和宇宙大尺度结构之间相差的量级过于悬殊,导致两 者之间并不像黑洞和宿主星系之间有明显的"共同演化"迹象,但也有可能是由于类星体的 爱丁顿比分布不够集中造成的。

Krumpe 等人 (2015)^[87] 利用 0.16 < z < 0.36 的 X 射线 AGN 讨论了 X 射线 AGN 成团 性和 M_{BH} 之间的关系,他们发现两者之间相关性较弱,但质量最大 30% 的 AGN 的成团性 显著高于质量最小 30% 的 AGN (2.7 σ),即大质量 AGN 倾向于形成于大质量的暗物质晕中。 他们还进一步研究了 X 射线 AGN 成团性和爱丁顿比之间的关系,发现两者之间几乎没有任 何关系,即高吸积率的 SMBH 不一定存在于高密度的环境中。



注:各种颜色的实心点表示 AGN/QSO 样本,空心点和绿色短竖线段对应不同的星系样本,图中的测量值和数据来自参考文献 [28,88–98],三条点线 (dotted line) 表示模拟估计出的 M_{halo} 对应的偏差因子随红移的变化,从上到下依次对应 $M_{\text{halo}} = (16, 4, 1) \times 10^{12} h^{-1} \cdot M_{\odot}$ 。三条虚线 (dashed line) 表示以三个不同真实 QSO 观测数据点为起点 (一个橘色方点、一个蓝色方点、一个紫色正三角) 按照 passive evolution 预计得到的偏差因子演化轨迹。

图 18 不同样本的偏差因子与红移之间的关系^[80]

研究偏差因子 b_Q 还可以估计 M_{halo} , Shen13 便结合宇宙学流体力学模拟估计了低红 移光学 QSO 所在的暗物质晕质量 (见图 18)。其中宇宙学流体力学模拟包含了从宇宙大 爆炸开始的暗物质宇宙学演化模型和在暗物质晕中利用流体力学方法模拟的星系随红移 生长的过程。从图 18 中可以看到 Shen13 的测量值 (黑色实心方点) 落在 Tinker 模拟的 $M_{halo} = 4 \times 10^{12} h^{-1} \cdot M_{\odot}$ 对应的 b - z 演化轨迹上^[95] (点线)。值得注意的是几乎所有不同 观测波段选择出来的 AGN 在各种红移下都落在 $10^{12} \sim 10^{13} h^{-1} \cdot M_{\odot}$ 之间。然而 M_{halo} 随 着红移降低应该明显增长,因此类星体所在的暗物质晕的质量在不同红移下大致相同的现象 说明低红移的 QSO 很可能不是高红移 QSO 的后代。另一方面值得注意的是,在同一红移处 (比如 $z \approx 0.5$),星系对应的 $M_{halo} \approx 10^{13} h^{-1} \cdot M_{\odot}$ (黑色空心方点),成团性高于 QSO (黑色 实心方点)。注意到以 $z \approx 1$ 的一个 QSO 为起点 (紫色正三角点) 的 passive evolusion 模型 (虚线) 预言这个 QSO 在 $z \approx 0.5$ 处 M_{halo} 也将演化为约 $10^{13} h^{-1} \cdot M_{\odot}$,说明低红移星系有 可能是高红移 QSO 演化的后代。

Shen13 利用现有的经典暗物质晕占有分布模型 (HOD model) 对观测到的交叉相关函数 进行了拟合分析。HOD 模型同宇宙学流体力学模型的区别是,HOD 模型只模拟暗物质随红 移的演化过程,并不模拟星系在暗物质晕中的流体力学生长过程。主要有两种经典 HOD 模 型来模拟中心 QSO 和卫星 QSO 随 *M*_{halo} 的变化关系,此处我们不详述,将其分别简称为 5 参数 HOD 模型和 6 参数 HOD 模型^[99,100]。图 19 给出了这两种 HOD 模型对交叉相关函数 的拟合结果。从图 19 a) 中可以看出 5 参数 HOD 模型可以很好地重现出观测到的交叉相关 函数,此外,图中虽未给出,但是 6 参数模型也可几乎同等有效地重现出观测得到的交叉相 关函数。这说明经典的 HOD 模型之间有很高的简并度,仅仅通过相关函数的观测结果并不 能打破不同 HOD 模型之间的简并。



注: a) 5 参数 HOD 模型对交叉相关函数的拟合结果,实线表示考虑了红移畸变效应 (RSD),虚线表示不考虑 RSD 效应。b) 5 参数 HOD 模型最优拟合得出的暗物质晕占比函数,黑色实线对应所有类星体,红色点线对应 中心星系中的类星体,蓝色虚线对应卫星星系中的类星体,阴影区域对应 MCMC 过程得到的 1σ 误差。c) 与 b) 相同,但对应 6 参数 HOD 模型拟合结果。d) 卫星星系中类星体数目占总类星体数目的分布函数,细线对应 5 参 数 HOD 模型,粗线对应 6 参数 HOD 模型。虚线分别对应两种不同 HOD 模型相应的 1σ 位置 (两条虚线中间 的面积占总面积的 68.3%)。e) 5 参数 HOD 模型最优拟合结果对应的 QSO 空间数密度随 M_{halo} 的变化关系, 点线对应中心星系中类星体的分布情况,虚线对应卫星星系中类星体的分布情况,实线是二者之和,即所有类星体 的分布情况。f) 与 e) 相同,但是对应 6 参数 HOD 模型的最优拟合结果。

图 19 SDSS-I/II QSO 样本和 CMASS 星系之间交叉相关函数的 HOD 模拟结果^[80]

图 19 b) 和 c) 中分别给出了 5 参数和 6 参数 HOD 模型最优拟合相关函数后给出的暗物 质晕占比函数 (Occupation Function)。图中可以明显看出相比于中心类星体 (点线),卫星类 星体 (虚线) 主要分布在大质量的暗物质晕中。从这两个子图中可以进一步算出卫星类星体占 总类星体数目的百分比 (f_{sat}),图 19 d) 中给出了 f_{sat} 的概率分布函数,从图中可以看出两 种不同 HOD 模型下都有 $f_{sat} < 10\%$,说明卫星类星体的占比较低。将图 19 b) 和 c) 分别乘 以暗物质晕质量函数可得到图 19 e) 和 f),这两个子图给出了两种 HOD 模型下的 QSO 空间 密度随暗物质晕质量的分布情况。图中显示卫星星系 (虚线) 对空间密度的贡献主要集中在 大质量暗物质晕中,并且它们对总的空间密度分布的贡献是不可忽略的。在 HOD 模型之外 Shen13 还进一步利用模拟星系样本对相关函数进行了拟合分析,同样发现卫星类星体的百分 比大约为 10% 左右。并且卫星类星体对相关函数的贡献主要集中在 $r_p < 1$ Mpc 的小尺度范 围,如果没有卫星类星体的贡献,相关函数将不再是指数函数的形状,在小尺度上斜率将极

大程度地变平。

3.2.3 高红移 AGN 的成团性研究

1) 高红移 AGN-AGN 两点自相关研究

Shen 等人 (2009)^[28] 利用 SDSS DR5 的 77 429 个光谱认证的 $M_i < -22.0$ 的 I 型活动星 系核样本^[101] 作为母样本选出了他们用于研究 AGN-AGN 成团性的样本。大约一半的活动星 系核满足 Richards 等人 (2002)^[102] 给出的采样算法,可以用来构成各向均匀的成团性样本, 作者最终采用的成团性样本满足如下选择条件: z < 2.9 处极限星等为 i = 19.1 mag; z > 2.9 处,极限星等为 i = 20.2 mag。最终这个各向同性的成团性样本包含 38 208 个类星体,覆盖 红移范围为 0.1 < z < 5.3,覆盖天区约 4 000 deg²。

图 20 中给出了活动星系核成团性同光度之间的关系。图 20 a) 和 b) 给出的是较亮的 50% 的类星体 (红点) 与剩下 50% 较暗类星体 (蓝点) 的相关函数的比较,图 20 c) 和 d) 中 给出的是亮度在前 10% 的类星体 (红点) 与剩下 90% 的类星体 (蓝点) 相关函数的比较。尽 管从下面两幅子图中可以看到最亮的 10% 的类星体比其他的类星体成团性高,但是上面两幅 子图显示,将类星体样本分为亮度不同数目、相同的两等分时,光度和成团性之间的相关性 并不明显。

这里需要注意的是, Shen 等人 (2009)^[28] 因为只做了 QSO 样本内部的自相关函数, 而 不是 AGN-galaxy 之间的交叉相关函数, 所以统计总样本大小有限。为了减小统计误差, 作 者通过增大统计类星体红移范围 (0.1 < z < 5.3)的办法增加样本大小, 而大红移范围可能会 在光度和成团性相关性的研究中带来简并效应, 削弱光度和成团性之间可能存在的相关性; 因此, 如果能在一个较小的红移范围内研究 AGN-galaxy 成团性将可以有效地解决红移简并 和统计样本总体数目有限的问题。然而在高红移下 (2 < z < 4), SDSS-III/BOSS QSO 样本 因受颜色选择效应影响, 包含的星系样本完备性很差; 而包含 LLAGN 样本的星系巡天数目 有限, 并且巡天中包含的 LLAGN 样本大小又很小 (约 10² 个 AGN), 因此目前高红移下的 AGN-galaxy 交叉相关性研究较为有限。

2) 高红移下 AGN-galaxy 交叉相关研究

Steidel 等人 (2002)^[17] 利用 2.1 小节介绍的包含 29 个活动星系核的约 1 000 个 $\langle z \rangle \approx 2.96$ 的 LBG 星系样本,粗糙地评估了小尺度 ($\delta z = 0.0085, \delta \theta = 200'$)范围内活动星系核周围的 星系密度和非活动星系核 (non-AGN LBGs) 周围的星系密度,发现在窄线活动星系核周围的 星系密度是非活动星系核周围星系密度的 0.96 ± 0.24 倍。 I 型活动星系核周围星系的密度比 非活动星系核周围密度高 1.58 ± 0.33 倍。上述粗糙的估计结果说明,窄线活动星系核的成团 性和 non-AGN LBGs 的成团性非常相近,而 I 型活动星系核的成团性比正常的 LBG 略高。 Steidel 等人 (2002)^[17] 所用样本过小,因此统计误差偏大,所得出的结论有待进一步利用高 红移大样本星系巡天验证 (如 HETDEX 巡天即将为我们提供的约 10⁶ 个星系和约 10⁴ 个 I 型 AGN)。目前近邻宇宙内,在大尺度上 (大于 10 Mpc) 并没有发现 I/II 型 AGN 的环境有明显 差异 ^[103];在小尺度上 (小于 100 kpc), Jiang 等人 (2016)^[104] 通过研究 SDSS 活动星系核样 本发现, II 型 AGN 和普通星系周围星系密度相近,是 I 型 AGN 的 3 倍,同 Steidel 等人



注: a) 和 b) 中, bright 和 faint 样本分别为使用总样本在不同红移下的中位光度为界限,将样本分为 50% 和 50% 的两部分。c) 和 d) 中,使用总样本在不同红移下前 10% 的亮度值为界限,将样本分为 10% 的最亮的子样本和余下的 90% 较暗子样本。红色的点给出的是最亮的 10% 的样本同较暗的 90% 样本之间的成团性,蓝色给出的是较暗的 90% 的子样本同自身的成团性。实线给出的是指数函数模型给出的最优拟合结果。虚线是未扣除负数区间的最优拟合结果^[28]。左侧是红移空间相关函数,右侧是投影角相关函数。

图 20 活动星系核成团性与光度之间的关系^[28]

(2002)^[17] 的高红移结果刚好相反。

Adelberger 和 Steidel (2005)^[30] 将上述 LBG 星系样本同 $\langle z \rangle \approx 2.25$ 略低红移的 LBG 样本结合,构成了一个 1.5 < z < 3 的含有 79 个 I 型活动星系核的约 1 600 个星系的样本。作者利用这个样本的成团性计算出的相关长度 r_0 同 GIF-LCDM 标准宇宙学数值模拟^[105] 估计出的 r_0 作比较,估计暗物质晕的质量 M_{halo} 。利用 I 型活动星系核的宽线线宽和连续谱光度估计 $M_{\rm BH}$,作者研究了 $M_{\rm halo} - M_{\rm BH}$ 关系,如图 21 所示。大质量的黑洞符合上述任何一种演化模型,因此小质量的黑洞在限制不同演化模型上有非常重要的作用。但图中显示,小质

量的数据点几乎不与任何一个演化模型相符,这可能是由于这项工作的样本过小,统计误差 过大造成的。



注: $\langle \lg M_{halo} | \lg M_{BH} \rangle$ 是在一个给定的 $\lg M_{BH}$ 下的平均 $\lg M_{halo}$ 值。点给出的是观测数据,不同曲线表示不 同模型给出的理论预计。实线说明 $M_{BH} - M_{halo}$ 关系随红移没有变化,本征弥散可以忽略。点线说明没有演化, 在固定的 M_{halo} 处有 1 dex 的 M_{BH} 弥散。虚线说明 z = 0 处的关系按照 $(1 + z)^{5/2}$ 的比例因子演化。点划线 说明红移为 3 的关系^[106]。

图 21 红移 $z \approx 2.5$ 处黑洞质量与暗物质晕质量之间的关系 ^[30]

并且我们注意到,图中所有线给出的演化模型中 M_{halo} 和 M_{BH} 之间都有明显的相关性, 而两个不同光度的观测点显示黑洞质量和暗物质晕之间的相关性并不明显。但是我们知道两 个数据点总数有限,误差棒很大,并不能严格说明现有的模型是错误的。期待将来更大样本 的高红移观测可以对高红移下 M_{halo} 和 M_{BH} 之间的潜在关系给出更好的限定。

3.3 超大质量黑洞吸积历史

近邻宇宙中人们发现 SMBH 和其宿主星系的质量之间有明显的相关性^[1-3],说明两者的 形成和演化息息相关。今天的 *M*_{BH} 都是通过早期宇宙中黑洞的吸积过程累积而来,因此研 究中高红移下 SMBH 的吸积情况对研究星系的形成和演化有重要的意义。

黑洞吸积活动的强弱程度可以由爱丁顿比来定量地衡量: $\epsilon = L_{\rm bol}/L_{\rm Edd}$ (有时也用 $\lambda_{\rm Edd}$ 表示),其中 $L_{\rm bol}$ 是热光度, $L_{\rm Edd}$ 是爱丁顿光度。假设球对称吸积,爱丁顿光度是吸积天体所能达到的最大光度,此时辐射压和引力达到平衡, $L_{\rm Edd} = 4\pi G M_{\rm BH} m_p c/\sigma_T \approx$ $1.3 \times 10^{31} \left(\frac{M_{\rm BH}}{M_{\odot}} \right) \, {\rm J/s} = 3.3 \times 10^4 \left(\frac{M_{\rm BH}}{M_{\odot}} \right) L_{\odot}$,即可以通过黑洞质量 $M_{\rm BH}$ 直接计算 出爱丁顿光度。 $M_{\rm BH}$ 可以通过 I 型 AGN 的宽发射线线宽来估计:假设宽发射线区 云团的运动是维里的,则有 $M_{\rm BH} = f \frac{R\Delta V^2}{G}$,其中 ΔV 可以从宽发射线的半高全宽 (FWHM)得到, R 是宽线区的尺度,G 是引力常量,f 是同宽线区几何形状相关的 修正量 (一般约为 1)。由反响映射法 (reverbration mapping),人们经验地发现连续谱光 度同宽线区半径 R 有相关关系,带入维里化关系,科学家们推出了 $M_{\rm BH}$ 与不同宽发 射线线宽的经验关系。高红移研究中通常利用 Mg II λ 2798 和 C IV λ 1550 来估计黑洞质 量 (宽发射线可见度与红移之间的关系与巡天波长范围相关,见图 6 和图 10),经验公 式^[107, 108]分别是: lg $\frac{M_{\rm BH}}{M_{\odot}}$ = lg $\left(\left[\frac{FWHM}{1\ 000\ {\rm km/s}} \right]^2 \left[\frac{\lambda L_{\lambda}(3\ 000\ {}^{A})}{10^{37}\ {\rm J/s}} \right]^{0.62} \right)$ + 6.51 和 lg $\frac{M_{\rm BH}}{M_{\odot}}$ = lg $\left(\left[\frac{\sigma}{1\ 000\ {\rm km/s}} \right]^2 \left[\frac{\lambda L_{\lambda}(1\ 350\ {}^{A})}{10^{37}\ {\rm J/s}} \right]^{0.53} \right)$ + 6.73 (公式摘自 Gavignaud 等人 (2008)^[109] 中公式 (1) 和 (2))。 $L_{\rm bol}$ 较难直接得到,需要全波段测光数据,尤其对于本文重点关注的 LLAGN 族群,很难在 X 射线或光学以外的波段被探测到,通常只能通过对单色波段光度假设一个矫正 因子来估测,例如 $L_{\rm bol} \approx 9\lambda L_{\lambda}(5\ 100\ {\rm A})$ 。由定义我们知道爱丁顿比反映了活动星系核吸积 相对于黑洞自身质量的剧烈程度,活动星系核吸积越剧烈,爱丁顿比就越大。当爱丁顿比为 1 时,称为爱丁顿极限,即辐射压和引力达到平衡。

Kollmeier 等人 (2006)^[110] 研究了 AGES 巡天 (AGN and Galaxy Evolution Survey) 探测 到的 0.3 < z < 4 的 407 个 AGN 样本,光学探测极限为 R < 21.5,AGN 的热光度范围为 $L_{bol} \approx 10^{38} \sim 10^{40} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。他们发现该样本 AGN 的爱丁顿比分布可以很好地用对数正态分 布拟合,峰值位于 $\lambda_{\text{Edd}} \approx 0.25$ 处。图 22 显示了 0.5 < z < 4 范围内 AGN 的爱丁顿比分布 情况,图中可见高红移 AGN 整体比低红移 AGN 的爱丁顿比略高一点,尤其在 z > 2 区间, 只有两个 AGN 具有 $\lambda_{\text{Edd}} < 0.1$ 。z < 1.5 的 AGN 爱丁顿比分布较广,有接近爱丁顿极限的, 也有不少 $\lambda_{\text{Edd}} < 0.1$ 。图 23 给出了不同 M_{BH} 和红移区间的爱丁顿比分布情况,图中可以明 显看到,对于固定的黑洞质量,爱丁顿比分布非常集中,接近爱丁顿极限,尤其是每个子图 在 $\lambda_{\text{Edd}} = 0.3 \sim 0.1$ 区间内的 AGN 数目都有非常显著的下降。Kollmeier 等人 (2006)^[110] 认 为,这说明 SMBH 的质量大部分积累于近爱丁顿比吸积状态下,此外,黑洞吸积强弱与黑洞 质量的强相关性说明,吸积过程与星系尺度的物理过程关系不大,是由黑洞自身决定的。

Nobuta 等人 (2012)^[111] 利用 SXDS 巡天研究了 $z \approx 1.4$ 的 AGN 爱丁顿比空间分布,如 图 24 所示,可以看出 $z \simeq 1.4$ 的 AGN,其空间分布在 $\lg \lambda_{Edd} = -0.6$ 处达到密度峰值,对 应 $\lambda_{Edd} = 0.25$,和 Kollmeier 等人 (2006)^[110] 利用 0.3 < z < 4 的 AGN 样本得到的结果刚 好符合。另外,近邻宇宙中 AGN 爱丁顿比分布 (细虚线) 的拐点位置也在 $\lg \lambda_{Edd} = -0.6$ 附 近,但近邻 AGN 整体爱丁顿比明显低于 $z \approx 1.4$ 的 AGN 样本,从 $\lambda_{Edd} = 0.1$ 到 0.01,近邻 AGN 空间密度一直呈现快速增长趋势。

Steidel 等人 (2002)^[17] 粗略地估计了 LBG 巡天中 $z \approx 3$ 的 AGN 爱丁顿比。假定活动 星系核的统一模型成立,即 I 型活动星系核是没有被遮蔽的 AGN,以及共同演化理论正确, 并且高红移下 $M_{\rm BH} - M_{\rm bulge}$ 关系和近邻宇宙的关系一致—— $M_{\rm BH} \simeq 2 \times 10^{-3} M_{\rm bulge}$,结合 Shapley 等人 (2001)^[114] 计算的 LBG 星系的恒星质量,可以预计到 LBG 巡天中 $M_{\rm BH}$ 分布是 以 $3 \times 10^7 \ M_{\odot}$ 为中心,分布在 $2 \times 10^6 \ M_{\odot} \cong 2 \times 10^8 \ M_{\odot}$ 之间。如果这些黑洞是以爱丁顿 极限进行辐射的,那么它们预期的星等范围应该是 $R \approx 20.0 \sim 24.7$ mag,和 LBG 巡天实际 观测到的 I 型活动星系核的星等范围 ($R = 20.6 \sim 24.8$ mag,见表 2) 十分相近。因此,可以 认为这些 LBG 巡天 $z \approx 3$ 的 AGN 大致是以接近爱丁顿极限的程度在吸积物质,增加自身质 量,这和 Kollmeier 等人 (2006)^[110] 结论相符。

Gavignaud 等人 (2008)^[109] 利用 VVDS 巡天中 I 型 AGN 的光谱观测参数计算了它们 的爱丁顿比。图 25 中显示了 VVDS 巡天中黑洞质量和热光度的关系,还有爱丁顿比和热



注:不同颜色的数据点代表不同红移下的 AGN,实线对应爱丁顿极限的位置,虚线对应爱丁顿比 $\epsilon = 0.1$,点的 形状表示黑洞质量的估计基于不同发射线:空心三角、星号和实心方块分别对应 H β , Mg II, C IV。



光度之间的关系。虚线和实线分别标注了爱丁顿比为 0.1 和 1 的位置。类似图 22 显示的 0.3 < z < 4 AGN,图 25 中 VVDS AGN 也大部分处于爱丁顿比为 0.1 ~ 1 范围,但对于 lg L_{bol} < 45.7 子样本,大约四分之一 AGN 位于 ϵ < 0.1 区域,和 Kollmeier 等人 (2006)^[110] 得到的爱丁顿比小于 0.1 的 AGN 数目非常少这一结论略有出入。这可能是由于 VVDS 巡天 比 AGES 巡天深超过 2 mag,可以探测到更多暗弱小质量的 AGN 造成的,从图 25 b)可看 到,越低光度的 AGN 爱丁顿比越小这一较弱的趋势。

以上研究均表明,红移越高的 AGN,相对于自身黑洞质量的吸积过程越剧烈。首先, VVDS 巡天图 25 中 C IV 对应的 AGN(黑色方点) 大约在 $z = 2.5 \sim 5$ 红移范围内, Mg II 对应的 AGN(红色原点) 大约在 $z = 1 \sim 2.5$ 红移范围内 (VVDS 不同发射线可见度随红移 分布详见图 6),图 25 显示 C IV AGN 的爱丁顿比整体略高于 Mg II AGN;其次,Nobuta 等人 (2012)^[111] 也发现 $z \approx 1.4$ 的 AGN (实心圆点) 比近邻宇宙 (细虚线) 明显更为活跃 (见 图 24)。但对于高红移宇宙中 $\lambda_{\rm Edd} < 0.1$ 的 AGN 百分含量,各个研究工作的结论并不一致: Kollmeier 等人 (2006)^[110] 和 Steidel 等人 (2002)^[17] 都认为 $z \approx 2 \sim 3$ 的 AGN 在以近爱丁顿 极限的程度吸积物质, $\lambda_{\rm Edd} < 0.1$ 的 AGN 比例很低;但 Gavignaud 等人 (2008)^[109] 认为这 一阶段的 AGN(lg $L_{\rm bol} < 45.7$)中 1/4 仍处于 $\lambda_{\rm Edd} < 0.1$ 的"半饥饿"状态。



注:从左到右分别对应黑洞质量范围: $M_{\rm BH} = 10^7 \sim 10^8, 10^8 \sim 10^9, 10^9 \sim 10^{10} M_{\odot}$,从上到下分别对应红移范围:3 < z < 4,2 < z < 3,1 < z < 2。实线直方图表示对样本做了不完备性改正后的 407 个 AGN 的爱丁顿比分布情况,虚线直方图对应改正前的原始样本。箭头指示了每个子图中第一个达到光学流量极限 AGN 的位置。阴影区域表示光学选择完全无法探测的区域。每个子图底边上的实心原点对应 SDSS 流量探测极限。

图 23 不同黑洞质量和红移下的爱丁顿比直方图^[110]



注: 实心点表示 SXDS 巡天每个 $\lambda_{\rm Edd}$ 区间段 I 型 AGN 的空间密度,红色粗线表示 Schecheter 拟合,粗点线 表示对数正态分布拟合。蓝色细线对应 SDSS $z \approx 1.4$ I 型的 AGN 爱丁顿比分布 ^[112],上下两条线围出了 1 σ 区域。细虚线给出了近邻宇宙中 I 型 AGN 的爱丁顿比空间分布 ^[113]。

图 24 $z \simeq 1.4$ 的 I 型 AGN 爱丁顿比空间密度函数 [111]



注:a) 黑洞质量随热光度的分布。b) 爱丁顿比随热光度的分布。实线和虚线分别表示爱丁顿比是 1 和 0.1 的位 置。黑色方形的点的黑洞质量是由 C IV 线测得的,红色的圆形点的黑洞质量是由 Mg II 线测得的。误差棒的大 小和发射线宽度测量的不确定度相关。

图 25 VVDS 巡天中黑洞质量、爱丁顿比分别与热光度之间的关系^[109]

总结与展望 4

我们从测光和光谱两方面回顾,总结了目前为止高红移 (z ~ 3) 深场巡天中的 LLAGN 样本 (详见表 1),这些巡天项目的共同特点是覆盖天区小 (约小于 2 deg²),包含 $z \approx 3$ 的 AGN 总数少 (约 10²)。虽然 SDSS-III/BOSS 巡天极大地增加了现有 2 < z < 4 红移范围的 类星体总数以及覆盖天区面积,但 BOSS 深度比文中提到的光学深度巡天大约浅1~2 mag, 这可能会极大地限制对 LLAGN (如 $q \approx 23 \sim 24$ AB mag) 科学的探索 (SDSS 最终类星体样 本 DR12Q 近 30 万 QSO 于 2016 年 8 月刚刚释放^[10],很多相关研究可能仍在进行中)。未来 3~5 年内, HETDEX 盲光谱深度巡天将为我们带来 420 deg² 内 1.9 < z < 3.5 的 10^4 个 I 型 AGN 以及 10⁶ 个 Lvα 发射线星系,将极大地促进天文学家对星系以及其中的超大质量黑洞 的演化历程的研究,此外,相比 BOSS 巡天受预先颜色选源选择效应的影响,HETDEX 盲 光谱巡天的特点将极大降低选择效应带来的统计误差。

现有对光学和 X 射线 AGN 样本光度函数的研究发现, AGN 光度函数的形状随红移发 生演化,尤其是暗端斜率随红移降低明显变陡,整体演化可以用 LDDE 模型描述 (见 3.1.1 节)。不同亮度 AGN 随红移的演化不同,亮度高的 AGN 倾向于形成在较早期宇宙,低光度 AGN 形成于低红移宇宙中,这一观测结果侧面支持了"cosmic downsizing"假说。MYJ15 发现 X 射线 AGN 随红移的空间密度演化呈现"三段演化"特征:高红移 AGN 空间密度随 红移降低而升高;在中红移 (z ≈ 1 ~ 2) 范围内,数密度达到峰值,并保持在这个较高的水 平很长一段时间;在低红移处,随着红移降低,空间密度下降(见3.1.2节)。通过和理论模 型对比, MYJ15 发现中红移"平原"区持续高 AGN 空间密度段和并合主导的 AGN 演化符 合较好,低红移段的密度下降区段和以长期演化为主导 AGN 触发机制的模型符合较好 (见

87

3.1.3 节)。进一步对 XRB 的探索表明,中红移中等光度的 AGN($z \approx 1$ 处 43 < lg L_X < 44 和 $z \approx 2$ 处 44 < lg L_X < 45) 是宇宙 2~10 keV 背景辐射的主要来源。

在成团性方面 (见 3.2 节), 低红移宇宙中的相关研究很丰富。Shen13 利用 SDSS I/II QSO 样本 (约 10⁵ 个) 发现 AGN 光度与成团性之间相关性很弱,这说明尽管星系的演化过 程和大尺度环境息息相关,但大尺度环境对 SMBH 演化的影响可能并不大。但 Krumpe 等 人 (2015)^[87] 发现,质量最大的 30% 的 X 射线 AGN 比最小 30% 的 X 射线 AGN 的成团性高 (2.7σ),这可能表示大尺度环境对 SMBH 的演化有一定作用,但由于观测数据各方面误差较 大,如爱丁顿比分布范围不集中,黑洞和宿主星系之间的相关性不够紧密等因素,可能会抹 平 SMBH 和大尺度环境之间的相关性,使之不易被探测。此外,不同红移 QSO 所在暗物质 晕质量相近 ($10^{12} \sim 10^{13} h^{-1} \cdot M_{\odot}$),高红移 QSO 随着红移降低会演化成近邻的普通星系。 卫星 QSO 比例很小 (f_{sat} < 0.1),且仅在大质量暗物质晕中 (见 3.2.2 节)。在高红移宇宙,由 于深场星系巡天中的 AGN 样本很小,大样本 BOSS QSO 巡天颜色选源过程又偏重于 QSO, 高红移 AGN-galaxy 成团性的研究相对缺乏。Shen 等人 $(2009)^{[28]}$ 研究了 0.1 < z < 5.3 范 围内 QSO-QSO 的相关性,和低红移一样,他们也没有发现明显的 QSO 光度与成团性之 间的相关性,但类似低红移下 Krumpe 等人 (2015)^[87] 的发现, Shen 等人 (2009)^[28] 也观测 到最亮 10% 的 QSO 比剩余 90% 的 QSO 成团性高一些。高红移仅有的利用 LBG 巡天对 AGN-galaxy 相关性的研究也表明 $M_{\rm BH}$ 和 $M_{\rm halo}$ 之间相关性不大,但所用 AGN 样本过小 (10² 个),覆盖天区过小 (0.38 deg²),数据点误差过大,有待于更大覆盖天区、更大样本的 巡天 (比如未来的 HETDEX 巡天) 给出误差精度更高的相关性检验。此外, Adelberger 和 Steidel (2005)^[30] 还利用 LBG 估计了 $z \approx 2$ 的 AGN 在小尺度上的聚集程度,发现 II 型 AGN 近邻星系密度和普通 LBG 星系相同,低于 I 型 AGN,这与近邻星系的研究结果刚好相反; Jiang 等人 (2016)^[104] 研究 SDSS AGN 也发现 II 型 AGN(小于 100 kpc 内) 成团性与普通星 系相同,是 I型 AGN 的 3 倍。这可能说明 I/II 型 AGN 之间有演化关系,也可能仅仅是 LBG 巡天样本过小、误差过大造成的。

关于超大质量黑洞的吸积历史(见 3.3 节),总结前人工作,我们发现高红移 AGN 的吸积过程整体上有比低红移 AGN 更剧烈的趋势(本文中提到的 AGN 样本红移最高为 VVDS 巡天中 C IV 探测的 $z \approx 2.5 \sim 5$ 样本),但各自红移区间爱丁顿比 λ_{Edd} 分布弥散较大,不同 红移间的区别不是很明显(见图 22 和图 25)。在高红移处,不同研究工作对处于 $\lambda_{Edd} < 0.1$ 的"半饥饿"状态下的 AGN 的百分比有争议:Kollmeier 等人(2006)^[110]和 Steidel 等人(2002)^[17] 均认为这种低吸积状态的 AGN 所占比例很少,大部分 AGN 都在以近爱丁顿比的 水平积累 SMBH 的质量;但 Gavignaud 等人(2008)^[109]认为有 1/4 lg $L_{bol} < 45.7$ 的 AGN 处于这种"半饥饿"状态。我们认为这两种说法之间未必矛盾:首先,热光度 L_{bol} 的估计误差很大,尤其是对于 LLAGN,通常很难收集到全波段数据,只能靠在单波段光度上假设矫 正因子的手段来估计(Hopkins 等人(2007)^[115]给出了一个基于大量观测的经验模型来模拟 AGN SED 随 L_{bol} 的变化);其次,Gavignaud 等人(2008)^[109]所用 VVDS 巡天比 Kollmeier 等人(2006)^[110]AGN 样本深超过 2 mag,会探测到更多 LLAGN,而低光度 AGN 倾向于有更 小的 λ_{Edd} ,且测量误差更大导致分布弥散更大(图 25 b)),Kollmeier 等人(2006)^[110]AGN 样

本中"半饥饿"AGN 较少可能是选择效应造成的;最后,Steidel 等人 (2002)^[17]所用 LBG 样本小,并且估计过程过于粗糙且假设过多 (详见 3.3 节),也可能对结论产生一定影响。

未来的高红移 HETDEX 巡天 (2 < z < 4, g < 24 mag) 可以同时在 420 deg² 观测到 10⁴ 个 AGN 和 10⁶ 个 LAE 星系,比现有深场巡天中的 AGN 样本大 100 倍左右,可以帮助我们 比现在更精确地研究高红移活动星系核的演化状态,从光度函数、成团性、爱丁顿比等方面 给出更加具有统计意义的观测数据。

致谢

感谢两位审稿人认真负责地审稿,提出了很多能够帮助本文更好更完整地介绍"高红移 低光度活动星系核研究进展"的意见,尤其是两位审稿人都提出了应该对 X-ray AGN 的相 关研究进行介绍,因此我们重新架构了文章,使整个物理图像可以被更好地梳理和呈现。

参考文献:

- $[1]\,$ Kormendy J, Ho L C. ARA&A, 2013, 51: 511
- $\left[2\right]$ Gebhardt K, Bender R, Bower G, et al. ApJ, 2000, 539: L13
- $[3]\,$ Ferrarese L, Merritt D. ApJ, 2000, 539: L9
- [4] Boyle B J, Shanks T, Croom S M, et al. MNRAS, 2000, 317: 1014
- [5] Warren S J, Hewett P C, Osmer P S. ApJ, 1994, 421: 412
- [6] Schmidt M, Schneider D P, Gunn J E. AJ, 1995, 110: 68
- [7] Kennefick J D, Djorgovski S G, de Carvalho R R. AJ, 1995, 110: 2553
- [8] Fan X, Strauss M A, Schneider D P, et al. AJ, 2001, 121: 54
- [9] Ross N P, McGreer I D, White M, et al. ApJ, 2013, 773: 14
- [10] Pâris I, Petitjean P, Ross N P, et al. ArXiv e-prints, 2016
- [11] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. PASP, 1981, 93: 5
- [12] Veilleux S, Osterbrock D E. ApJS, 1987, 63: 295
- [13] Kewley L J, Dopita M A, Sutherland R S, et al. ApJ, 2001, 556: 121
- [14] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. MNRAS, 2003, 346: 1055
- [15] Kewley L J, Groves B, Kauffmann G, et al. MNRAS, 2006, 372: 961
- [16] Antonucci R. ARA&A, 1993, 31: 473
- [17] Steidel C C, Hunt M P, Shapley A E, et al. ApJ, 2002, 576: 653
- [18] Hao L, Strauss M A, Fan X, et al. AJ, 2005, 129: 1795
- $\left[19\right]$ White S D M, Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341
- [20] Vogelsberger M, Genel S, Springel V, et al. MNRAS, 2014, 444: 1518
- $[21]\,$ Skibba R A, Coil A L, Mendez A J, et al. ApJ, 2015, 807: 152
- $\left[22\right]$ Bower R.G, Benson A.J, Malbon R, et al. MNRAS, 2006, 370: 645
- $[23]\,$ Croton D J, Springel V, White S D M, et al. MNRAS, 2006, 365: 11
- $\left[24\right]$ Somerville R S, Hopkins P F, Cox T J, et al. MNRAS, 2008, 391: 481
- $\left[25\right]$ Guo Q, White S, Boylan-Kolchin M, et al. MNRAS, 2011, 413: 101
- [26] Kauffmann G, White S D M, Heckman T M, et al. MNRAS, 2004, 353: 713
- [27] Li C, Kauffmann G, Wang L, et al. MNRAS, 2006, 373: 457
- [28] Shen Y, Strauss M A, Ross N P, et al. ApJ, 2009, 697: 1656
- $\left[29\right]$ Myers A D, Brunner R J, Nichol R C, et al. ApJ, 2007, 658: 85

- [30] Adelberger K L, Steidel C C. ApJ, 2005, 627: L1
- [31] Yang G, Xue Y Q, Luo B, et al. ApJS, 2014, 215: 27
- [32] Wang W H, Cowie L L, Barger A J, et al. ApJS, 2010, 187: 251
- [33] Capak P, Cowie L L, Hu E M, et al. AJ, 2004, 127: 180
- [34] Alexander D M, Bauer F E, Brandt W N, et al. AJ, 2003, 126: 539
- [35] Xue Y Q, Luo B, Brandt W N, et al. ApJS, 2016, 224: 15
- [36] Giavalisco M, Ferguson H C, Koekemoer A M, et al. ApJ, 2004, 600: L93
- [37]~ Taylor E N, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJS, 2009, 183: 295
- $[38]~{\rm Rix}$ H W, Barden M, Beckwith S V W, et al. ApJS, 2004, 152: 163
- $[39]\,$ Giacconi R, Zirm A, Wang J, et al. ApJS, 2002, 139: 369
- $\left[40\right]$ Cimatti A, Mignoli M, Daddi E, et al. A&A, 2002, 392: 395
- [41] Beckwith S V W, Stiavelli M, Koekemoer A M, et al. AJ, 2006, 132: 1729
- [42] Schneider D P, Richards G T, Hall P B, et al. AJ, 2010, 139: 2360
- [43] Alam S, Albareti F D, Allende Prieto C, et al. ApJS, 2015, 219: 12
- [44] Trouille L, Barger A J, Cowie L L, et al. ApJS, 2008, 179: 1
- [45] Hasinger G, Miyaji T, Schmidt M. A&A, 2005, 441: 417
- [46] Hasinger G. A&A, 2008, 490: 905
- [47] Xue Y Q, Luo B, Brandt W N, et al. ApJS, 2011, 195: 10
- [48] Akiyama M, Ueda Y, Watson M G, et al. PASJ, 2015, 67: 82
- [49] Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. ApJS, 2011, 197: 35
- [50] Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. ApJS, 2011, 197: 36
- [51] Scoville N, Abraham R G, Aussel H, et al. ApJS, 2007, 172: 38
- [52] Ilbert O, Capak P, Salvato M, et al. ApJ, 2009, 690: 1236
- [53] Brusa M, Civano F, Comastri A, et al. ApJ, 2010, 716: 348
- [54] Bongiorno A, Merloni A, Brusa M, et al. MNRAS, 2012, 427: 3103
- [55] Wolf C, Wisotzki L, Borch A, et al. A&A, 2003, 408: 499
- [56] Gavignaud I, Bongiorno A, Paltani S, et al. A&A, 2006, 457: 79
- [57] Hao L, Schulze A, HETDEX Collaboration. American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2012, 219: 424
- [58] Vito F, Gilli R, Vignali C, et al. MNRAS, 2016, 463: 348
- [59] Ueda Y, Watson M G, Stewart I M, et al. ApJS, 2008, 179: 124
- [60] Lilly S J, Le Brun V, Maier C, et al. ApJS, 2009, 184: 218
- [61] Vanden Berk D E, Richards G T, Bauer A, et al. AJ, 2001, 122: 549
- [62] Sargent W L W, Steidel C C, Boksenberg A. ApJS, 1989, 69: 703
- [63] Stengler-Larrea E A, Boksenberg A, Steidel C C, et al. ApJ, 1995, 444: 64
- [64] Hunt M P, Steidel C C, Adelberger K L, et al. ApJ, 2004, 605: 625
- [65] Le Fèvre O, Vettolani G, Garilli B, et al. A&A, 2005, 439: 845
- [66] Bongiorno A, Zamorani G, Gavignaud I, et al. A&A, 2007, 472: 443
- [67] Le Fèvre O, Mellier Y, McCracken H J, et al. A&A, 2004, 417: 839
- [68] Le Fèvre O, Vettolani G, Paltani S, et al. A&A, 2004, 428: 1043
- $\left[69\right]$ Francis P J, Hewett P C, Foltz C B, et al. ApJ, 1991, 373: 465
- [70] Baldwin J A. ApJ, 1977, 214: 679
- [71] Contini T. In: Le Brun V, Mazure A, Arnouts S, et al, eds. The Fabulous Destiny of Galaxies: Bridging Past and Present. France: EdP-Sciences, 2006: 515
- [72] Davis M, Faber S M, Newman J, et al. In: Guhathakurta P, ed. Discoveries and Research Prospects from 6- to 10-Meter-Class Telescopes II. Bellingham: SPIE, 2003: 161
- [73] Coil A L, Blanton M R, Burles S M, et al. ApJ, 2011, 741: 8
- [74] Cool R J, Moustakas J, Blanton M R, et al. ApJ, 2013, 767: 118
- [75] Pei Y C. ApJ, 1995, 438: 623

- $[76]\,$ Miyaji T, Hasinger G, Salvato M, et al. ApJ, 2015, 804: 104
- [77] Richards G T, Strauss M A, Fan X, et al. AJ, 2006, 131: 2766
- [78] Ueda Y, Akiyama M, Hasinger G, et al. ApJ, 2014, 786: 104
 [79] Draper A R, Ballantyne D R. ApJ, 2012, 751: 72
- [80] Shen Y, McBride C K, White M, et al. ApJ, 2013, 778: 98
 [81] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. ApJS, 2006, 163: 1
- [82] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. Nature, 2005, 433: 604
- [83] Gatti M, Lamastra A, Menci N, et al. A&A, 2015, 576: A32
- [84] Peebles P J E. The large-scale structure of the universe. Princeton: Princeton University Press, 1980: 1
- [85] Davis M, Peebles P J E. ApJ, 1983, 267: 465
- [86] Eisenstein D J, Hu W. ApJ, 1999, 511: 5
- [87] Krumpe M, Miyaji T, Husemann B, et al. ApJ, 2015, 815: 21
- [88] White M, Myers A D, Ross N P, et al. MNRAS, 2012, 424: 933
- [89] Krumpe M, Miyaji T, Coil A L, et al. ApJ, 2012, 746: 1
- [90] Cappelluti N, Ajello M, Burlon D, et al. ApJ, 2010, 716: L209
- [91] Hickox R C, Jones C, Forman W R, et al. ApJ, 2009, 696: 891
- [92] Zehavi I, Zheng Z, Weinberg D H, et al. ApJ, 2011, 736: 59
- [93] Padmanabhan N, White M, Norberg P, et al. MNRAS, 2009, 397: 1862
- [94] Parejko J K, Sunayama T, Padmanabhan N, et al. MNRAS, 2013, 429: 98
- $\left[95\right]$ Tinker J L, Weinberg D H, Zheng Z, et al. ApJ, 2005, 631: 41
- [96] Fry J N. ApJ, 1996, 461: L65
- [97] Mo H J, White S D M. MNRAS, 1996, 282: 347
- [98] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. ApJS, 2008, 175: 356
- [99] Zheng Z, Berlind A A, Weinberg D H, et al. ApJ, 2005, 633: 791
- [100] Zheng Z, Coil A L, Zehavi I. ApJ, 2007, 667: 760
- [101] Schneider D P, Hall P B, Richards G T, et al. AJ, 2007, 134: 102
- [102] Richards G T, Fan X, Newberg H J, et al. AJ, 2002, 123: 2945
- [103] Liu C X, Pan D C, Hao L, et al. ApJ, 2015, 810: 165
- [104] Jiang N, Wang H, Mo H, et al. ArXiv e-prints, 2016
- [105] Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A, et al. MNRAS, 1999, 303: 188
- [106] Di Matteo T, Croft R A C, Springel V, et al. ApJ, 2003, 593: 56
- [107] McLure R J, Dunlop J S. MNRAS, 2004, 352: 1390
- [108] Vestergaard M, Peterson B M. ApJ, 2006, 641: 689
- [109] Gavignaud I, Wisotzki L, Bongiorno A, et al. A&A, 2008, 492: 637
- [110] Kollmeier J A, Onken C A, Kochanek C S, et al. ApJ, 2006, 648: 128
- [111] Nobuta K, Akiyama M, Ueda Y, et al. ApJ, 2012, 761: 143
- [112] Shen Y, Kelly B C. ApJ, 2012, 746: 169
- [113] Schulze A, Wisotzki L. A&A, 2010, 516: A87
- [114] Shapley A E, Steidel C C, Adelberger K L, et al. ApJ, 2001, 562: 95
- [115] Hopkins P F, Richards G T, Hernquist L. ApJ, 2007, 654: 731

Studies of High-Redshift Low-Luminosity AGNs

LIU Chen-xu^{1,2}, HAO Lei^{1,2}

(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 studies of Active Galactic Nuclei (AGNs) at high redshifts ($z \approx 3$) have been mostly limited to color selected quasars (QSOs). QSOs are bright and have point-like morphologies, making them easy to be selected in imaging surveys. However, QSOs are the minorities in the full AGN population, as is well studied in the luminosity function of AGNs. The majority of the AGN population—the low-luminosity AGNs (hereafter LLAGNs)—remains largely inaccessible. Throughout this paper, we refer to AGNs that are at least one or two magnitudes fainter than the SDSS-III/BOSS QSOs as LLAGNs. Particularly, the surveys with LLAGNs should be 23 ~ 24 AB mag deep in g-band ($-24 \leq M_g[z=3] \text{ mag}^{-1} \leq -23$) or deeper (the limiting magnitude for the SDSS-III/BOSS survey is r < 21.85 mag or g < 22 mag^[10]. LLAGNs are important, for example, for the purpose of constraining the faint end of the luminosity function of AGNs, studying the differences in the fueling mechanisms between weak and strong AGNs, and exploring the potential relationship between supermassive black holes and the large-scale structure in which their host galaxies reside. The sky coverages and the sample sizes of current deep surveys that contain LLAGNs at $z \approx 3$ are limited ($\lesssim 2 \deg^2$, $\simeq 10^2$). In this paper, we present both photometric and spectroscopic surveys that include LLAGN samples at $z \simeq 3$. We also introduce the HETDEX survey, which will be online in 2017 and will observe more than 10^4 low-luminosity type 1 AGNs at 2 < z < 4. We summarize these surveys according to their luminosity functions, clustering, and Eddington ratios. To better show the power of studies on the clustering of AGNs, we include the results of the clustering of LLAGNs at low redshifts, in addition to those at high redshifts, that are based on relatively limited samples.

Key words: high-redshift galaxies; Low-Luminosity AGN; galaxies evolution; large-scale structure of universe