

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.03.06

# 高和低红移活动星系核 C IV 宽线区动力学

高 珊, 王慧元

(中国科学技术大学 天文学系, 合肥 230026)

**摘要:** 基于斯隆巡天的高红移类星体以及 IUE 和 HST 低红移活动星系核光谱样本, 仔细分析 C IV 的等值宽度、半高全宽、蓝移不对称参数和活动星系核吸积状态之间的相关性。结果得到, 当爱丁顿比  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 0.1$  时, CIV 发射线类似于低电离线, 接近位力化状态; 而  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} > 0.1$  时, 呈现出明显的外流特征。这表明  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} > 0.1$  时, 辐射压对宽线区云团运动状态的影响变得比较重要。

**关 键 词:** 活动星系核; 发射线; 线轮廓

**中图分类号:** P157.6      **文献标识码:** A

## 1 背景简介

宽发射线区 (broad line region, BLR) 是活动星系核 (active galactic nuclei, AGN) 的最重要观测特征之一, 其动力学状态的研究有助于测量 AGN 的基本参数 (如黑洞质量、吸积率)。而 AGN 的动力学结构对 AGN 本身的结构特点、发射线的产生机制以及这些结构随着黑洞吸积的演化同样至关重要。

致力于这方面的研究工作有很多。首先, 基于反响映射<sup>[1-8]</sup>方法所得到的时延与发射线宽的关系<sup>[9-11]</sup>, 给出了一个支持 BLR 做位力运动的有力证据。但是由于 RM 数据很少, 选取的样本有限, 其结论不能代表整个 AGN 群体。不过其他方面的研究, 尤其是基于 PG 类星体的主成分分析研究<sup>[12, 13]</sup>揭示低电离发射线 (例如 H $\beta$ ) 的宽度与主成分 (与黑洞吸积率和质量相关) 有着紧密的联系, 这暗示低电离线发射区的运动状态是引力主导的。Richards 等人<sup>[14]</sup>利用 SDSS 类星体数据, 仔细研究了 Mg II 宽线相对于 [O III] 窄线的运动状态, 发现这两者之间的速度差异很小。由于 [O III] 窄线产生于很大尺度上, 受类星体辐射影响相对

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-12-05

资助项目: 国家自然科学基金 (11733004, 11421303, 11890693, 11522324)

通讯作者: 王慧元, whywang@ustc.edu.cn

较小,被认为没有显著的系统性速度<sup>①</sup>,所以可以当作基准。这直接表明,对于大多数类星体而言,其低电离线发射区基本上没有系统性的额外速度问题,位力运动的假设是可靠的。这里需要特别说明的是,在少数极端 AGN 中,低电离线也发现了系统性的速度分量。

而对于高电离线,情况则变得相对复杂。首先低红移的部分 AGN 的反映映射结果显示,这些 AGN 的高电离线区也是在做位力化运动<sup>[9, 10]</sup>。不过值得注意的是,低红移反映映射观测的源通常倾向于光度较低的 AGN,可能存在系统性的偏差。Baskin 和 Laor<sup>[15]</sup>基于低红移 PG 类星体样本的研究发现,相对低电离的 H $\beta$ ,高电离的 C IV 线轮廓存在明显的不对称性,倾向于蓝边过剩,而且峰值也比 H $\beta$  倾向于蓝移;这些结果暗示 C IV 线发射区可能有一部分来自于外流(或者尘埃遮蔽效应)。Richards 等人<sup>[14, 16]</sup>研究了高红移( $z = 2 \sim 4$ )的类星体,发现其 C IV 发射线比 Mg II 线有更明显的蓝移,并且光度越高蓝移越强,电离连续谱越弱蓝移越强,而且蓝移与 C IV 的等值宽度反相关;这些特性与宽吸收线类星体中的外流特征非常相似<sup>[17-19]</sup>,暗示 C IV 蓝移来自于外流气体。

Wang 等人<sup>[20]</sup>同样研究了高红移( $z \approx 2$ )类星体的 C IV 发射线蓝移特性,将 Mg II 发射线作为基准并与 C IV 线做详细的比较。他们发现 C IV 发射区在动力学状态上确实与被认为是引力束缚的 Mg II 发射区存在明显不同,除了速度差异之外,在各种相关性上也存在显著区别。并且 C IV 的蓝移特性与爱丁顿比(类星体热光度除以爱丁顿光度)存在很强的正相关<sup>[21]</sup>。这些研究结果强烈支持 C IV 线来源于辐射压驱动的外流。当爱丁顿比较小时, C IV 发射线与 Mg II 发射线类似,呈现出引力束缚的特征;而当爱丁顿较大时, C IV 发射线区被外流主导。这些结果说明这两种发射线区同时存在于活动星系核中,并且随着爱丁顿比的变化而朝着相反的方向变化。在随后的研究中, Wang 等人<sup>[22, 23]</sup>进一步发现, C IV 蓝移与类星体的金属丰度以及红外光度存在强相关,这为外流的辐射驱动又增添了额外的证据。受这些研究激励, Shin 等人<sup>[24]</sup>利用低红移样本进行了类似的研究,同样发现 C IV 蓝移属性与爱丁顿比以及类星体金属丰度存在明显的相关性。

这些研究表明,除了位力化的成分,类星体里面普遍存在的外流确实能够产生显著的宽发射线,而且外流的强弱由吸积过程来调节,并依赖于活动星系核吸积率<sup>[25-27]</sup>。因此,研究宽线区的动力学结构,还有助于了解这两类结构(位力化运动的宽线区与外流)之间的关系以及它们之间是否存在互相转化。而研究外流本身又有着更广泛的意义:现在的星系形成研究中普遍把外流当做活动星系核一种重要的反馈机制,认为其可以驱散或者加热寄主星系中的气体,并抑制寄主星系中的恒星形成<sup>[28]</sup>。

然而,无论高红移类星体还是低红移 AGN 的研究都有其局限性,因此并不能完整描述整个 AGN 群体的行为方式。一个最主要的因素是,这两类样本占据了不同且有限的参数空间。例如低红移样本由于需要观测到紫外发射线 C IV,通常只有紫外卫星(例如 IUE 和 HST)有相关数据,所以样本有限,而且通常是低光度、低爱丁顿比(或者低吸积率)的 AGNs。对于高红移(例如  $z \approx 2$ )的源, C IV 线由于宇宙学红移而成为可见光,可以被地面望远镜直接观测到;因此通过大规模光谱红移巡天,可以得到很多数据。但是由于距离遥

<sup>①</sup>目前也有不少研究发现 [O III] 线有显著蓝移,但是其往往都有一个没有蓝移的核心成分。

远, 通常观测到的 AGNs 都是高光度的类星体, 而且爱丁顿比也通常很高。

因此, 更加深入全面地了解 AGN 宽线区的动力学结构, 尤其是位力化区域与外流之间的相互关系, 以及它们与类星体吸积机制之间的关联, 对研究发射线形成以及黑洞质量测量都有重要的帮助。我们需要一个在各类参数空间跨度足够大的样本来进行系统的研究。基于此, 我们把低红移和高红移数据结合起来, 尝试对以上问题进行深入的探讨。本文结构如下, 第 2 章介绍样本的选取以及谱线拟合, 第 3 章介绍我们的主要结果, 第 4 章对全文进行总结。本文采用的是标准宇宙学模型:  $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ 。

## 2 活动星系核的样本选择和发射线测量

本文将利用高红移和低红移的 AGN 数据, 在一个较大的参数空间范围内研究活动星系核宽发射线区的动力学特性。接下来, 我们将详细介绍样本选取方式以及谱线拟合过程, 各种谱线参数的计算和活动星系核基本参数的计算。我们的高红移样本主要来源于 SDSS 的观测, 而低红移样本主要来自于 IUE 和 HST 卫星的观测数据。

高红移样本的母样本来自于 SDSS DR5 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 5)<sup>[29]</sup> 中  $1.7 < z < 2.25$  的 Type I 类星体样本。选择这个红移范围是为了保证这些源有可靠的 C IV 线和 Mg II 线的测量数据。满足这一选取条件的类星体一共有 8 540 个。为了保证拟合结果的可靠性, 我们将光谱在  $1\,450\sim 1\,600 \text{ \AA}$  (C IV) 以及  $2\,700\sim 2\,900 \text{ \AA}$  (Mg II) 的信噪比限定在 12 以上, 并且剔除了宽吸收线类星体 (broad absorption line QSO, 简称 BAL QSOs)<sup>[30]</sup>。满足以上限定条件的类星体一共有 1 625 个。

在 Wang 等人<sup>[20]</sup> 研究工作的基础上, 我们采用 BAI (blueshift and asymmetry index) 来描述 C IV 发射线的蓝移属性。BAI 定义为 C IV 蓝端 (波长小于 C IV 双线实验室静止坐标系下波长  $1\,549.06 \text{ \AA}$ ) 流量与总流量的比值。我们采用 Hewett 和 Wild<sup>[31]</sup> (此后简称 HW10) 计算出的红移, 将光谱转换到静止坐标系进行分析。HW10 是通过采用一个仔细构建的模板拟合互相关的观测谱所得到, 求出的红移精度得到了提高。我们采用参考文献 [20] 中的方法对 C IV 进行拟合, 首先将连续谱的窗口定在  $1\,440\sim 1\,460 \text{ \AA}$ ,  $1\,680\sim 1\,700 \text{ \AA}$ , 用幂律函数进行拟合; 然后, 将 C IV 波段附近的流量减去幂律谱流量的剩余流量后, 再用两个高斯函数来拟合。这种方式经过观测检验, 可以很好地拟合大部分的光谱, 但对小部分拟合得不好。因此, 我们用卡方  $\chi^2/\text{dof} > 1.5$  进行取舍的限定, 排除了拟合不好的源。基于上述拟合, 我们对 C IV 的半高全宽 (*FWHM*)、等值宽度 (*EW*)、BAI、单色光度  $L_{1450}$  ( $1\,450 \text{ \AA}$  的光度, 光度单位为  $10^{-7} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 进行了测量。

对于 Mg II, 我们采用参考文献 [32] 中的方法进行拟合。首先, 我们对一个无特征的幂律连续谱和 Fe II 的多重发射线谱同时进行拟合, 得到所谓的赝连续谱。其中 Fe II 来源于 Tsuzuki 等人<sup>[33]</sup> 对 1ZW1 的测量所得到的半经验模板, 在 Mg II 所在波段, 由于 Mg II 发射线的影响, 而无法可靠地分解出 Fe II 的成分, 故模板采用了 CLOUDY 光致电离模型<sup>[34]</sup> 进行计算。在去除了伪连续谱之后, 对 Mg II 附近的剩余流量进行拟合, Mg II  $\lambda 2\,796, 2\,803$

Å双线的宽成分用缩减为5个参数的 Gauss-Hermite 的级数轮廓进行拟合<sup>[35]</sup>, 窄成分的双线分别采用一个单独的高斯成分进行拟合。因为 Mg II 线是双线, 且双线距离有 800 km/s, 所以无论窄线还是宽线, 我们都用双成分来拟合; 在拟合过程中, 我们把两条线的宽度绑定在一起。为了确保拟合数据的可靠性, 我们舍弃了  $\chi^2/\text{d.o.f} > 2.5$  的源。半高全宽通过对 Gauss-Hermite 模型中的 Mg II 2 796 单线进行测量获得, 并利用拟合连续谱计算单色光度  $L_{3000}$  (3 000 Å 的光度)。基于 Mg II 相关测量数据, 采用 Wang 等人<sup>[32]</sup> 的黑洞质量计算公式计算黑洞质量。为了计算每个源的爱丁顿比  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ , 我们假设常数热改正获得热光度  $L_{\text{bol}} = 5.9 L_{3000}$ <sup>[36]</sup>, 其中  $L_{\text{Edd}}$  为爱丁顿光度。经过拟合挑选, 满足以上所有拟合条件的源为 1 188 个。我们发现, 即使包含拟合不好的源, 我们的结果也没有发生改变。

低红移的活动星系核样本总共 72 个, 一共有两大来源。其中一部分来源于 Peterson 等人<sup>[3]</sup> 列出的 35 个低红移有反响映射结果的样本。其中有 Mg II 数据的源一共是 29 个, 其中 16 个来自 HST 的光谱, 13 个来自 IUE 的光谱。Wang 等人<sup>[32]</sup> 已经对这些源的 Mg II 光谱进行了细致的拟合测量, 采用与高红移样本相同的方法。

为了获得这些源的 C IV 光谱, 我们在 IUE 的数据库中搜寻这 29 个源的观测数据<sup>①</sup>。为叙述方便, 我们将这一部分样本称为 IUE 样本。我们发现 3 个源的 IUE 光谱质量太差或者有宽吸收线成分, 导致不能使用, 这些源被我们从样本中剔除出去。由于低红移的源数目很少, 所以除了上述 3 个光谱质量太差的被剔除掉, 我们并没有采用一个额外的信噪比限制。除去有反响映射结果的源, 我们也尝试过从 IUE 数据库中获取其他具有 C IV 和 Mg II 光谱数据的源, 期望组成更全面的样本。但我们发现这些源的 Mg II 数据信噪比通常太差, 无法获得可靠的拟合结果, 因此最终我们的 IUE 样本只有 26 个源。

我们对这 26 个 IUE 光谱进行了详细的拟合, 采用的方法与高红移样本的一样。结果发现, 双高斯函数可以很好地拟合 C IV 发射线, 也有 4 个源存在明显的较窄或者较浅的吸收成分。为了很好地拟合 C IV 发射线, 我们在拟合过程中手动对吸收部分进行了屏蔽。在之后的图形中, 这些源将会用不同的符号来进行标记。这 26 个源的 C IV 发射线的  $BAI$ ,  $FWHM(\text{C IV})$  和  $EW(\text{C IV})$  以及  $L_{1450}$  都列在表 1 中。我们也把 Wang 等人<sup>[32]</sup> 算出的  $FWHM(\text{Mg II})$ ,  $M_{\text{BH}}$ ,  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  列在了表 1 中。

第二部分为低红移样本, 我们称之为 HST 样本, 来源于 Kuraszkiewicz 等人<sup>[37, 38]</sup> 列出的 394 个活动星系核的 HST 的 FOS 光谱<sup>②</sup>。首先我们选取其中既包含 C IV 又包含 Mg II 的光谱, 这样我们一共得到了 35 个源。我们将其中的 Seyfert 1.8, Seyfert 1.9, Seyfert 2.0, Liner, BL Lac 和 BAL QSOs 剔除, 一共剩下 21 个源, 我们将这部分样本称为 HSTa 样本。

对 C IV 和 Mg II 线所采用的拟合方法与之前的样本完全一致, 所以不再重复说明。与 IUE 样本处理方式相似, 对于某些有吸收但是不严重的源, 我们手动屏蔽有吸收的波段, 这样的源有 2 个, 在后续的结果中对这些源也有特殊符号标识。最终测量的 C IV 的  $BAI$ ,

<sup>①</sup>网址: <http://archive.stsci.edu/iue/search.php>

<sup>②</sup>注意, 有些源已经经过多次观测。在对 FOS 谱进行选源之后, 我们也对 HST 分辨率较高的 COS 谱进行了相应的选择, 最终没有发现可以用的光谱。

表 1 IUE 样本根据拟合结果计算所得的参数值

源名称	$BAI(CIV)$	$EW(CIV)$ /Å	$FWHM(CIV)$ /km·s <sup>-1</sup>	$FWHM(Mg II)$ /km·s <sup>-1</sup>	$\lg L_{1450}$	$\lg M_{BH}$ / $M_{\odot}$	$L_{bol}/L_{Edd}$
3c120	0.477 81	133.31	3 375.37	3 074	43.559 94	7.744 3	0.082 99
3c390.3	0.591 96	230.29	6 538.70	7 884	43.329 93	8.4579	0.003 17
Akn120	0.488 82	89.97	4 322.95	4 377	44.252 20	8.176 1	0.064 91
fairall9	0.539 56	116.50	3 120.14	3 769	44.170 39	8.406 5	0.066 13
Mrk110	0.353 13	292.06	2 619.52	2 355	43.674 90	7.399 7	0.069 79
Mrk279	0.481 26	103.43	5 993.71	4 441	44.100 61	7.542 8	0.032 19
Mrk335	0.523 35	75.32	2 684.35	1 878	44.270 38	7.152 3	0.155 67
Mrk509	0.503 00	120.91	5 515.22	3 357	44.416 62	8.155 3	0.105 03
Mrk79	0.588 19	138.65	4 593.72	4 597	43.801 48	7.719 3	0.024 84
Mrk817	0.527 15	87.88	4 214.17	4 053	44.114 95	7.693 7	0.044 44
NGC3516	0.510 65	90.03	8 307.30	3 699	44.080 59	7.630 4	0.016 32
NGC3783	0.523 70	142.45	3 110.36	2 524	44.196 81	7.474 2	0.042 49
NGC4051	0.473 35	55.57	2 655.45	1 322	43.643 78	6.198 7	0.015 76
NGC4151	0.526 96	128.38	7 751.79	3 849	45.160 97	7.659 9	0.009 26
NGC4593	0.485 50	141.21	4 008.92	3 140	43.594 56	6.991 2	0.015 85
NGC5548	0.521 80	176.45	4 435.28	4 756	44.121 35	7.815 6	0.010 54
NGC7469	0.473 79	78.48	3 567.64	3 061	44.193 14	7.086 4	0.043 84
PG0026+129	0.530 83	70.79	3 838.90	1 104	44.060 11	8.840 7	0.164 68
PG0844+349	0.470 42	51.28	3 698.35	3 045	43.847 44	7.965 7	0.118 92
PG1211+143	0.568 63	60.59	2 666.60	1 626	43.999 07	8.164 4	0.428 24
PG1226+023	0.581 53	39.96	4 267.10	3 098	44.753 95	8.947 4	0.731 05
PG1229+204	0.522 87	69.53	3 790.85	3 884	43.918 61	7.864 5	0.074 25
PG1426+015	0.511 36	52.14	4 751.24	5 997	44.218 87	9.113 3	0.076 88
PG1613+658	0.492 09	86.31	6 076.23	7 753	43.759 70	8.445 6	0.055 26
PG1617+175	0.516 10	63.28	4 948.52	5 102	43.452 09	8.773 8	0.068 67
PG2130+099	0.528 47	65.76	2 658.12	2 174	43.927 20	7.579 8	0.202 40

注: 其中灰色背景的为 C IV 有显著吸收的源。表格中  $FWHM(Mg II)$ ,  $M_{BH}$ ,  $L_{bol}/L_{Edd}$  来自于文献 [32]。

$FWHM(C IV)$  和  $EW(C IV)$  以及  $L_{1450}$ , 基于 Mg II 光谱拟合获得的  $FWHM(Mg II)$ ,  $M_{BH}$ ,  $L_{bol}/L_{Edd}$  列在了表 2 中。

在 Kuraszkiwicz 等人<sup>[37, 38]</sup>所给出的 394 个 HST 的 FOS 光谱中, 一些只有 C IV 光谱, 而无 Mg II 光谱。我们将其与 SDSS DR7<sup>[39]</sup>进行匹配从而获得 Mg II 光谱数据, 筛选匹配过程如下: 首先, 删除 191 个不包含 C IV 波段 (1 440 Å~1 700 Å) 的光谱; 其次, 去除红移大于 1.7 的 24 个高红移样本 (因为我们之前已经有足够的此类样本); 再次, 丢弃与 Wang 等人<sup>[32]</sup>采用的 29 个源相重叠的源的光谱, 这样的光谱有 17 个; 接着, 我们将剩下的 162 个光谱的坐标与 SDSS DR7 的类星体的坐标进行匹配, 匹配半径为 3", 得到对应的 32 个活动星系核; 最后, 我们要求红移大于 0.4, 确保 SDSS 谱中 Mg II 拟合波段的完整呈现, 并且

表 2 HSTa 样本根据拟合结果计算所得的参数值

源名称	$BAI(C\ IV)$	$EW(C\ IV)$ /Å	$FWHM(C\ IV)$ /km·s <sup>-1</sup>	$FWHM(Mg\ II)$ /km·s <sup>-1</sup>	$\lg L_{1450}$	$\lg M_{BH}$ / $M_{\odot}$	$L_{bol}/L_{Edd}$
0405-1308ra	0.430 22	109.76	3 300.73	3 229.39	45.368 02	8.687 5	0.382 40
0420-5456ra	0.433 54	148.98	1 415.77	1 881.72	41.318 10	6.392 9	0.008 58
0906+1646ra	0.506 17	221.74	5 637.92	6 483.96	44.745 05	8.798 0	0.058 04
0950+3926oa	0.505 30	73.92	3 740.85	4 326.83	45.185 72	8.642 7	0.157 93
1030+3102oa	0.530 01	114.87	3 111.20	5 846.90	44.968 02	8.670 3	0.070 56
1117+4413oa	0.535 58	96.58	4 816.79	3 992.17	44.586 03	8.474 0	0.115 19
1118+4025oa	0.615 97	53.31	4 874.84	3 051.09	44.945 6	8.267 6	0.196 83
1119+2119oa	0.610 91	67.31	3 810.87	2 649.90	45.557 29	8.487 5	0.487 99
1139+6547ra	0.573 79	68.08	3 383.42	4 834.13	46.097 54	9.266 3	0.459 47
1252+5634ra	0.476 85	98.97	3 126.40	2 930.93	44.891 07	8.244 4	0.207 14
1256-0547ra	0.529 40	17.56	6 626.94	5 487.81	45.354 98	9.167 6	0.200 14
1323+6541oa	0.595 70	70.68	3 156.49	2 674.51	44.895 95	8.227 1	0.238 52
1354+1805oa	0.621 81	82.40	4 121.58	3 175.38	44.853 04	8.280 5	0.177 03
1405+2555oa	0.651 70	46.57	4 758.61	2 269.02	45.304 58	8.241 8	0.446 61
1427+2632oa	0.558 91	113.02	9 120.42	7 126.70	45.297 59	9.136 6	0.101 41
1547+2052ra	0.478 60	162.18	4 757.45	5 365.23	45.194 96	8.842 3	0.125 58
1559+3501oa	0.566 08	85.33	2 307.77	1 239.05	43.308 93	6.939 5	0.125 32
1627+5522oa	0.554 14	65.95	3 859.52	3 954.48	45.006 58	8.481 3	0.144 44
2203+3145ra	0.641 60	38.59	4 04.29	3 826.57	45.685 8	8.875 3	0.368 06
2254+1136ra	0.545 77	87.44	4 785.52	3 951.30	45.323 67	8.807 1	0.261 56
2254-1734oa	0.488 35	266.08	4 050.89	4 668.07	44.365 34	8.286 4	0.054 84

注：其中灰色背景的为有显著吸收的源。

去除一些 BAL QSOs 和光谱信噪比非常差的源。最终 C IV 谱线来源于 HST, Mg II 来源于 SDSS DR7 的源一共为 25 个, 为叙述方便, 我们将这部分称为 HSTb 样本。我们采用与之前完全一样的拟合方法拟合 C IV 和 Mg II 线, 对于其中 5 个有吸收但是不严重的源, 手动屏蔽有吸收的波段。相关拟合结果和计算所得参数列在表 3 中。

### 3 宽线区动力学结构及对发射线的影响

#### 3.1 活动星系核谱线参数、光度和吸积率分布

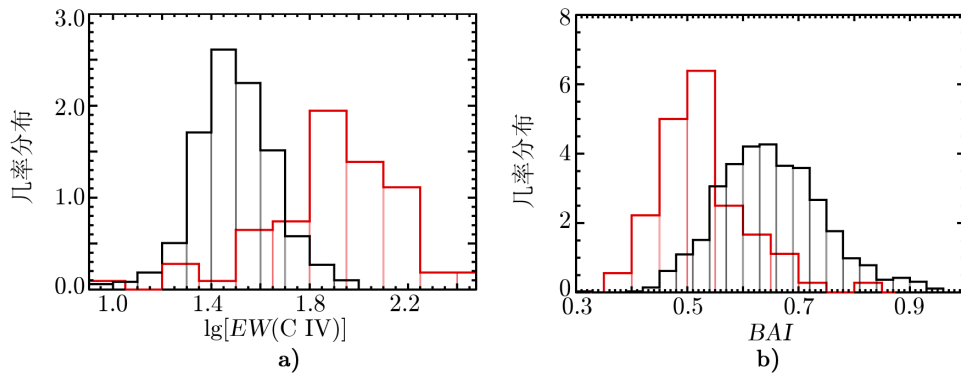
首先, 我们分别计算并给出高红移样本和低红移样本各个参数的分布情况。由于高红移样本和低红移样本在数量上的巨大差异, 并且选取方式也很不相同, 我们把这两个样本分开计算。我们给出 C IV 等值宽度和  $BAI$  的几率分布 (见图 1), 如预期一样, 高红移类星体有更小的  $EW(C\ IV)$  和更大的蓝移参数  $BAI$ 。

在图 2 中, 我们给出 C IV 和 Mg II 线的半高全宽的分布情况。与  $EW$  和  $BAI$  不同, 高

表 3 HSTb 样本根据拟合结果计算所得的参数值

源名称	$BAI(C\text{ IV})$	$EW(C\text{ IV})$ / $\text{\AA}$	$FWHM(C\text{ IV})$ / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$FWHM(\text{Mg II})$ / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\lg L_{1450}$	$\lg M_{\text{BH}}$ / $M_{\odot}$	$L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$
0744+3753ra	0.518 99	66.89	5 643.33	7 385.98	45.654 06	9.410 3	0.152 96
0745+3142ra	0.487 82	112.45	4 836.35	5 795.76	45.481 07	9.263 3	0.226 79
0840+1312ra	0.431 72	105.56	4 704.46	3 413.69	45.134 96	8.464 5	0.178 28
0853+4349ra	0.693 60	48.96	5 218.86	2 409.42	45.509 71	8.568 5	0.648 73
0927+3902ra	0.424 26	79.08	4 653.82	3 987.92	45.863 30	9.010 4	0.391 79
1003+6813ra	0.679 77	35.59	7 331.95	3 427.43	45.960 33	9.197 3	0.952 03
1010+4132ra	0.471 18	93.85	3 691.31	4 844.76	46.041 28	9.171 4	0.315 37
1052+6125oa	0.422 91	66.57	7 052.70	5 397.57	45.568 80	8.964 8	0.141 41
1058+1951oa	0.501 57	173.41	3 533.28	4 511.23	45.893 54	9.190 2	0.408 46
1107+1628ra	0.431 08	78.22	4 728.61	4 275.69	46.137 24	9.050 9	0.348 46
1114+4037ra	0.462 87	175.20	5 169.23	9 535.65	45.355 50	9.444 3	0.076 49
1121+1236oa	0.456 28	104.24	4 920.34	5 232.17	45.204 63	8.825 0	0.112 58
1148+1054ra	0.495 20	42.41	4 519.84	6 793.87	45.278 54	9.238 3	0.132 51
1159+2914oa	0.462 75	9.61	4 380.30	2 976.95	46.215 60	8.953 9	0.831 71
1254+1141ra	0.639 99	29.65	4 866.08	2 678.72	45.961 73	8.816 8	0.834 46
1301+5902ra	0.843 61	21.70	7 666.32	2 883.65	46.024 26	8.870 1	0.755 09
1307+0642oa	0.514 36	135.54	5 024.56	6 816.90	45.326 50	9.212 7	0.123 63
1308+3005ra	0.540 75	34.80	5 275.26	4 031.37	45.996 06	9.065 2	0.430 12
1321+2847oa	0.707 84	33.71	4 233.75	1 939.57	45.740 81	8.422 9	0.893 17
1331+3030oa	0.690 65	19.34	2 652.73	2 252.84	45.807 79	8.617 5	0.889 48
1348+2622oa	0.625 08	33.09	4 683.76	2 262.55	45.137 18	8.192 4	0.329 93
1357+1919ra	0.444 29	90.82	2 642.88	3 377.84	45.913 72	9.021 4	0.663 51
1613+3412ra	0.354 87	48.64	4 935.71	3 368.51	46.094 69	9.118 8	0.837 32
1620+1736ra	0.493 51	85.21	4 984.00	6 684.96	45.699 17	9.200 1	0.127 42
1642+3948oa	0.414 16	136.35	4 226.97	4 037.50	45.267 34	9.158 6	0.530 96

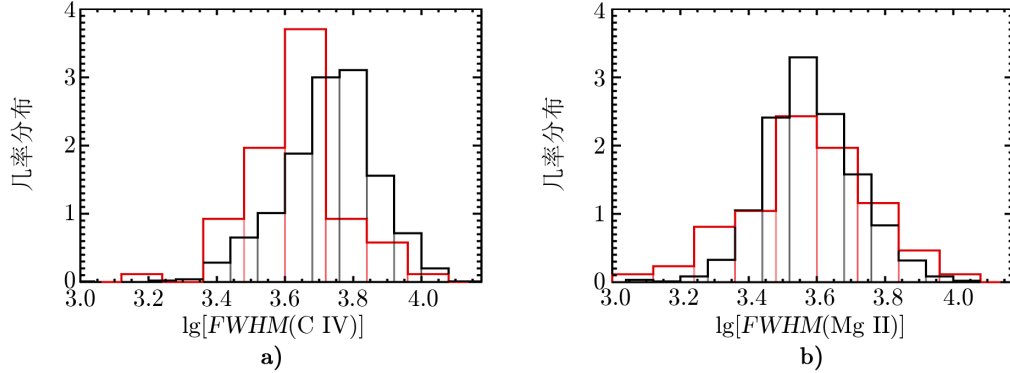
注: 其中灰色背景的为有显著吸收的源。



注: 黑色为高红移类星体, 红色为低红移活动星系核。

图 1 C IV 等值宽度 ( $EW(C\text{ IV})$ ) 与蓝移不对称指数 ( $BAI$ ) 的几率分布

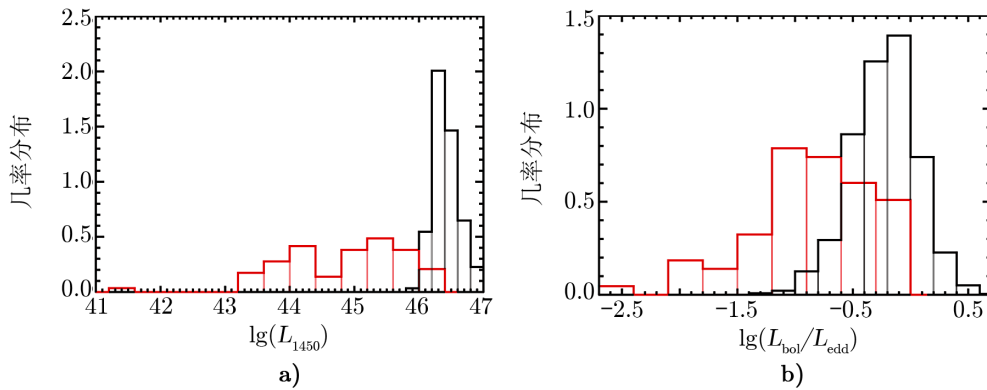
红移和低红移样本在这两个参数上差异并不显著。在  $FWHM(C\ IV)$  上, 高红移类星体系统性略高于低红移活动星系核。在  $FWHM(Mg\ II)$  上, 两个样本的差异更小, 低红移活动星系核的分布略宽一些。



注: 黑色为高红移类星体, 红色为低红移活动星系核。

图2 C IV 半高全宽 ( $FWHM(C\ IV)$ ) 与 Mg II 半高全宽 ( $FWHM(Mg\ II)$ ) 的几率分布

在图3中, 我们给出  $1450\ \text{\AA}$  光度 ( $L_{1450}$ ) 和爱丁顿比 ( $L_{bol}/L_{Edd}$ ) 的分布情况。可以看到, 低红移 AGNs 和高红移类星体在光度上基本上没有重叠。低红移 AGN 的光度系统性偏低是可以理解的, 因为它们距离我们更近。爱丁顿比反应的是中心黑洞的吸积辐射效率, 两个样本之间也存在明显的差异。基于  $L_{bol}/L_{Edd}$  的计算公式, 其差异主要是由光度差异所导致。如图3所示, 把两个样本结合起来确实能够明显地扩充样本的参数空间, 从而使得我们的研究能够涵盖更广泛状态的活动星系核, 进而具有更好的代表性。



注: 黑色为高红移类星体, 红色为低红移活动星系核。

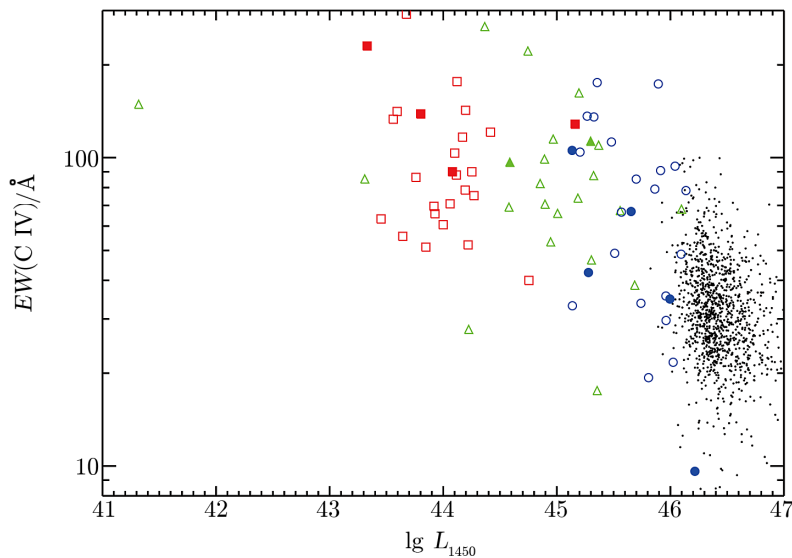
图3 活动星系核光度 ( $L_{1450}$ ) 和爱丁顿比 ( $L_{bol}/L_{Edd}$ ) 的几率分布

### 3.2 C IV 发射线的 Baldwin 效应

图4给出  $EW(C\ IV)$  与  $L_{1450}$  的关系。与之前的研究类似, C IV 发射线表现出很明显



的 Baldwin 效应——光度越高, 等值宽度越低<sup>[40, 41]</sup>; 这也自然解释了两个样本在  $EW(C\ IV)$  分布上的差异 (见图 1 和图 3)。我们采用 spearman 相关检验对两者的相关性进行了定量的计算和检验 (见表 4)。这里必须提到的是, 由于高红移和低红移样本的数量存在明显差异, 样本选择方式也非常不同, 如果对整体样本进行计算, 其结果必然被数量占据优势的高红移样本所主导, 导致结果出现系统的偏差, 所以为了得到更客观的相关性分析结果, 我们在表 4 中对高低红移样本分别进行了计算。为了理解 Baldwin 效应的物理起源, 人们尝试研究了  $EW(C\ IV)$  与其他变量, 尤其是 AGNs 本征变量的相关性。人们发现, 发射线等值宽度 (不仅限于 C IV 线) 不仅与光度相关, 也与爱丁顿比、黑洞质量以及 AGN 的电离连续谱谱指数相关, 甚至有些发射线 (例如 N V) 还与金属丰度相关。一种可能的解释是, 电离连续谱谱型和光度或者吸积率等参数相关: 当光度/吸积率变高时, 电离连续谱谱型变软, 因此发射线辐射相对连续谱变弱, 进而等值宽度变小, 这一点被光电离模型很好地拟合<sup>[42]</sup>。该模型还预期  $EW(C\ IV)$  与  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  以及电离连续谱谱型有关, 相关证据也被发现<sup>[43-45]</sup> (见图 5), 同时也得到了单个源中发现的所谓内禀 Baldwin 效应<sup>①</sup>的进一步支持。不过内禀 Baldwin 效应与 Baldwin 效应在斜率上的显著差异暗示可能还受其他机制影响。



注: 图中黑点为高红移样本, 红色的方块为低红移的 IUE 样本, 绿色的三角为低红移的 HSTa 样本, 蓝色的圆圈为低红移的 HSTb 样本。而低红移样本中, 实心的数据点表示 C IV 发射线有可能影响测量结果的吸收或光谱质量较差的源。

图 4 C IV 等值宽度 ( $EW(C\ IV)$ ) 与 1450 Å 光度 ( $L_{1450}$ ) 的分布

发射线强度与爱丁顿比的关系还能通过另外一种方式建立。辐射可能驱动发射线云团, 因此发射线区结构与吸积率相关。在高吸积率/爱丁顿比的类星体中, 其较低柱密度的发射线云团不易存在, 容易被驱动转换成外流<sup>[20, 46, 47]</sup>。而低柱密度云团更容易产生高电离线,

<sup>①</sup>所谓内禀 Baldwin 效应指的是单个源的光度变化时, 其发射线等值宽度也随着变化<sup>[49]</sup>。

表4 各参数的相关性系数

图片序号	参数	样本	$r_s$	$\rho_s$
图4	$EW(C\ IV)$ 和 $\lg L_{1450}$	高红移样本	-0.266	$1.12e-20$
		低红移样本	-0.377	$1.08e-03$
图5	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $EW(C\ IV)$	高红移样本	-0.199	$4.04e-12$
		低红移样本	-0.619	$6.71e-9$
图6	$BAI(C\ IV)$ 和 $EW(C\ IV)$	高红移样本	-0.494	$3.99e-74$
		低红移样本	-0.425	$1.95e-4$
图7a)	$EW(C\ IV)$ 和 $\lg L_{1450}$ ( $0.4 < BAI < 0.6$ )	高红移样本	-0.216	$3.55e-5$
		低红移样本	-0.122	$3.60e-1$
图7b)	$EW(C\ IV)$ 和 $\lg L_{1450}$ ( $BAI > 0.6$ )	高红移样本	-0.223	$9.37e-11$
		低红移样本	-0.734	$6.54e-3$
图8a)	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $EW(C\ IV)$ ( $0.4 < BAI < 0.6$ )	高红移样本	0.047	$3.77e-1$
		低红移样本	-0.445	$4.63e-4$
图8b)	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $EW(C\ IV)$ ( $BAI > 0.6$ )	高红移样本	-0.132	$1.42e-4$
		低红移样本	-0.601	$3.86e-2$
图9	$BAI(C\ IV)$ 和 $FWHM(C\ IV)$	高红移样本	0.326	$8.29e-31$
		低红移样本	0.126	$2.90e-1$
图10	$BAI(C\ IV)$ 和 $FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	-0.487	$1.30e-71$
		低红移样本	-0.238	$4.37e-2$
图11	$FWHM(C\ IV)$ 和 $FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	0.130	$6.66e-6$
		低红移样本	0.533	$1.42e-6$
图12	$BAI(C\ IV)$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	0.631	$9.48e-133$
		低红移样本	0.372	$1.30e-3$
图13	$FWHM(C\ IV)$ 和 $EW(C\ IV)$	高红移样本	-0.433	$2.53e-58$
		低红移样本	-0.103	$3.88e-1$
图14	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $BAI(C\ IV)$	高红移样本	0.540	$5.97e-91$
		低红移样本	0.262	$2.65e-2$
图14	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $BAI(C\ IV)$ ( $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$ )	整体样本	0.053	$7.80e-1$
图14	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $BAI(C\ IV)$ ( $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$ )(无3C390.3)	整体样本	0.166	$3.89e-1$
图15	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	0.647	$6.91e-142$
		低红移样本	0.311	$7.87e-3$
图15	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$ ( $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$ )	整体样本	-0.321	$8.37e-2$
图15	$L_{bol}/L_{Edd}$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$ ( $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$ )(无3C390.3)	整体样本	-0.404	$2.96e-2$
图16	$\lg L_{1450}$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	0.197	$7.32e-12$
		低红移样本	0.018	$8.80e-1$
图17	$M_{BH}$ 和 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$	高红移样本	-0.520	$3.14e-83$
		低红移样本	-0.343	$3.19e-3$

注：表中计算结果按照文中的图片顺序展示，其中  $r_s$  为 spearman 相关系数， $\rho_s$  为其对应不相关概率。

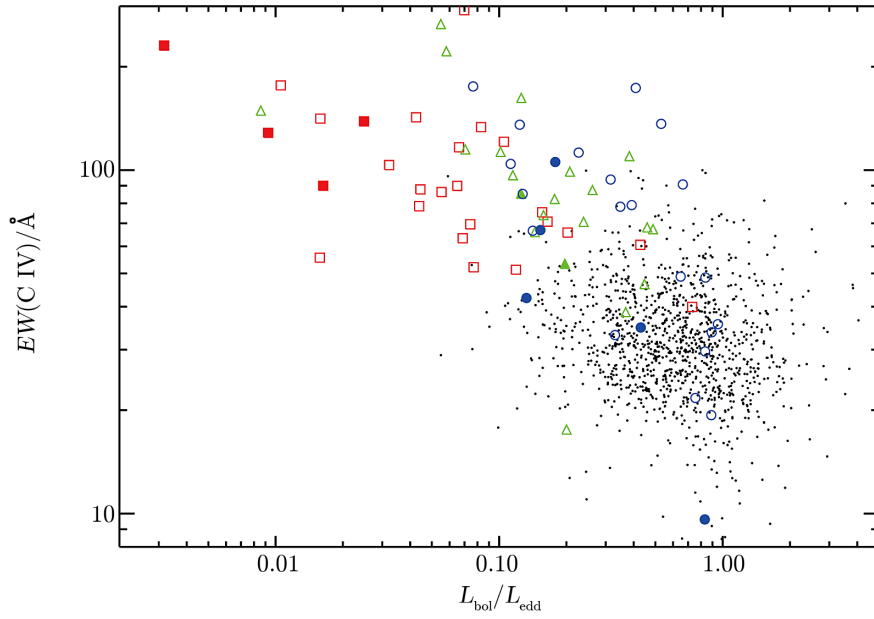


图 5 C IV 等值宽度 ( $EW(C\text{ IV})$ ) 与爱丁顿比 ( $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ ) 的分布 (标示与图 4 相同)

高柱密度云团相对更容易产生低电离线。这一过程自然也产生了 Baldwin 效应, 而且其强弱依赖于发射线的电离程度, 这也与观测相符<sup>[48]</sup>。在这种模型下, 人们预测  $EW(C\text{ IV})$  不但与  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  有关, 还可能与发射区的物理条件和动力学性质有关。

当然实际情况下, 这两种机制可能同时起作用。为了有一个较全面的了解, 我们还计算出  $EW(C\text{ IV})$  与  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  的关系, 如图 5 所示。可以看到,  $EW(C\text{ IV})$  与  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  存在明显的反相关性, 该关系与之前的研究结果相似<sup>[41, 43]</sup>。不过我们的研究在  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  上横跨近 4 个量级, 明显高于之前研究所探讨的范围。Xu 等人<sup>[41]</sup> 只用高红移数据, 发现  $L_{1450}-EW(C\text{ IV})$  关系比  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}-EW(C\text{ IV})$  关系强, 这与我们的高红移的结果是一致的 (相关系数分别为  $-0.266$  和  $-0.199$ , 见表 4)。但是我们的低红移数据显示  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}-EW(C\text{ IV})$  相关性远强于  $L_{1450}-EW(C\text{ IV})$  的相关性 (相关系数分别为  $-0.377$  和  $-0.619$ , 见表 4), 显示爱丁顿比是更重要的主导因素。高红移类星体的结果很可能是由它们的参数空间范围有限所导致。我们也研究了  $EW(C\text{ IV})$  与  $M_{\text{BH}}$  的关系, 发现相关性明显弥散很多, 所以黑洞质量应该不是一个主导的参数。

在图 6 中, 我们还给出  $EW(C\text{ IV})$  与外流强度的指标 ( $BAI$ ) 的关系。与 Wang 等人<sup>[20]</sup> 的结果类似, 我们发现, C IV 发射线随着外流变强而变弱 (具体的相关系数见表 4)。在低红移源中, 少数  $BAI$  较大的 AGNs, 其  $BAI-EW(C\text{ IV})$  关系与高红移数据符合得很好, 表明我们高低红移的数据测量一致。而对于大部分  $BAI \approx 0.5$  的 AGNs (即紫外外流很弱时), 相对于高红移样本,  $EW(C\text{ IV})$  出现了明显更广的变化范围。我们很自然会问一个有意思的问题: 对于这些外流弱的源, Baldwin 效应以及类似相关性是否还存在? 外流强与外流弱的源

的 Baldwin 效应是否有区别? 探索这些对于我们研究发射线的形成有重要的意义。因此我们把源分为两大类: (1)  $0.4 < BAI < 0.6$ , 代表外流弱的样本; (2)  $BAI > 0.6$ , 代表外流强的样本。在图 7 和 8 中, 我们给出这两个样本中  $L_{1450}-EW(C\text{ IV})$  与  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}-EW(C\text{ IV})$  的分布。

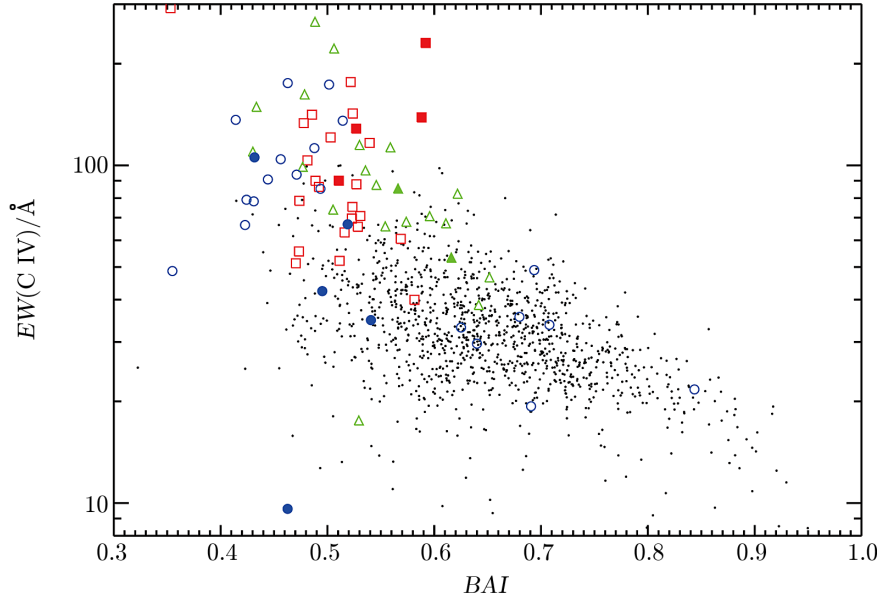
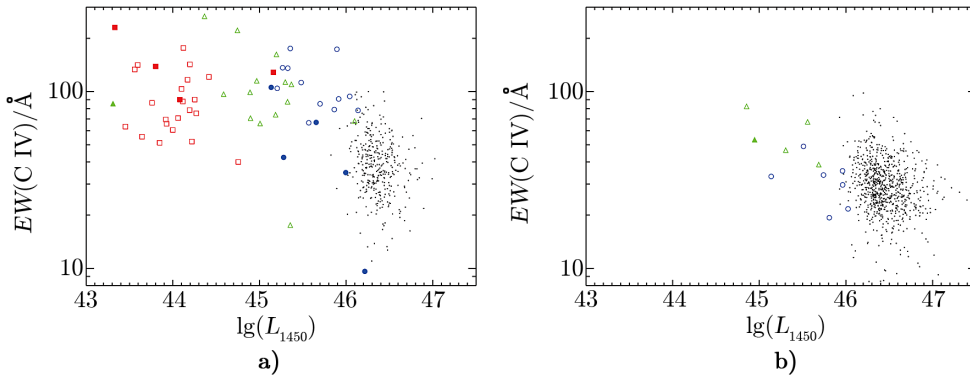


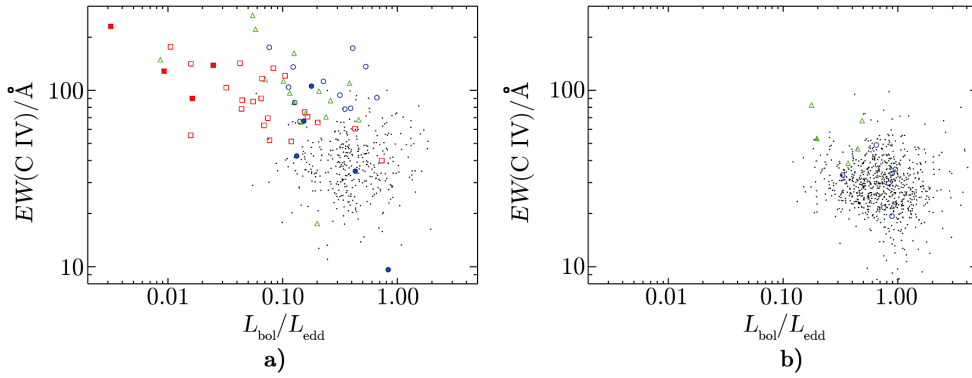
图 6 C IV 等值宽度 ( $EW(C\text{ IV})$ ) 与外流参数 ( $BAI$ ) 的分布 (标示与图 4 相同)



注: 标示类似于图 4, a) 为  $0.4 < BAI < 0.6$  的样本, b) 为  $BAI > 0.6$  的样本。

图 7 C IV 等值宽度 ( $EW(C\text{ IV})$ ) 与  $1450\text{ \AA}$  光度 ( $L_{1450}$ ) 的分布

在两个子样本中,  $L_{1450}-EW(C\text{ IV})$  和  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}-EW(C\text{ IV})$  的相关性都发生了显著变化。对于强外流样本, 由于其参数空间有限, 虽然相关性检验对某些子样本给出显著相关信号 (见表 4), 但并不能得到可靠结论。对高红移弱外流样本,  $L_{1450}-EW(C\text{ IV})$  弱相关



注: 标示类似于图 4, a) 为  $0.4 < BAI < 0.6$  的样本, b) 为  $BAI > 0.6$  的样本。

图 8 C IV 等值宽度 ( $EW(C IV)$ ) 与爱丁顿比的分布 ( $L_{bol}/L_{Edd}-EW(C IV)$ )

性基本没变, 而  $L_{bol}/L_{Edd}-EW(C IV)$  的弱相关基本消失了。对低红移弱外流样本,  $L_{1450}-EW(C IV)$  几乎不相关, 但是  $L_{bol}/L_{Edd}-EW(C IV)$  相关性依然很强 (相关系数为  $-0.445$ , 见表 4)。此外, 如果我们限定一个较窄的  $L_{1450}$  或者  $L_{bol}/L_{Edd}$  范围, 依然可以看到明显的  $EW(C IV)$  对于外流强弱 ( $BAI$ ) 的依赖。综合这些结果, 并考虑到高红移样本参数空间的范围较窄, 我们认为爱丁顿比和外流强度对于发射线产生都有显著影响, 光度影响最小; 这暗示上面提到的光致电离模型和外流模型可能同时在影响发射线的产生。因此发射线区的动力学状态对于发射线的辐射有重要的影响。

### 3.3 外流与位力化结构

我们基于已测量到的动力学参数对发射线区的动力学状态进行直接的分析。现在有 3 个重要的动力学方面的参数:  $BAI$ ,  $FWHM(C IV)$  和  $FWHM(Mg II)$ 。Wang 等人<sup>[20]</sup>发现, 在高红移时, C IV 和 Mg II 宽线在各种参数空间中分布形式完全不同; 结果暗示 C IV 和 Mg II 线来源于不同的动力学结构。为了深入理解 AGNs 的宽线区动力学状态, 我们采用与 Wang 等人<sup>[20]</sup>相似的方法。在图 9, 10 和 11 中, 我们展示了这 3 个动力学参数之间的关系。

首先, 我们可以看到, 在高红移类星体中,  $FWHM(C IV)$  与  $BAI$  有一定的正相关性 (相关系数为  $0.326$ ), 但是弥散相当大; 这表明, 在这些源中,  $FWHM(C IV)$  在一定程度上反应了外流的速度场。相反,  $FWHM(Mg II)$  与  $BAI$  存在明显的反相关性 (相关系数为  $-0.487$ ), 由爱丁顿比的计算公式, 我们可推出,  $L_{bol}/L_{Edd}$  与  $FWHM(Mg II)$  反相关, 所以  $FWHM(Mg II)$  与  $BAI$  的反相关很可能是  $L_{bol}/L_{Edd}$  与  $BAI$  正相关的自然产物, 这一点可以参考 Wang 等人<sup>[20]</sup>的详细研究。最后,  $FWHM(C IV)$  和  $FWHM(Mg II)$  基本上看不到明显的相关性, 这些结果与 Wang 等人<sup>[20]</sup>的结果一致; 也说明在高红移 AGNs 中, C IV 和 Mg II 来自于不同动力学状态的发射区。

而在低红移 AGNs 中, 我们通常看到不同的结果 (见表 4): 首先,  $FWHM(C IV)$  与  $BAI$  几乎无关, 同样的,  $FWHM(Mg II)$  与  $BAI$  的关系也相对变弱; 其次,  $FWHM(C IV)$  与  $FWHM(Mg II)$  显示出明显的正相关性 (相关系数为  $0.533$ )。两个半高全宽与  $BAI$  的关系

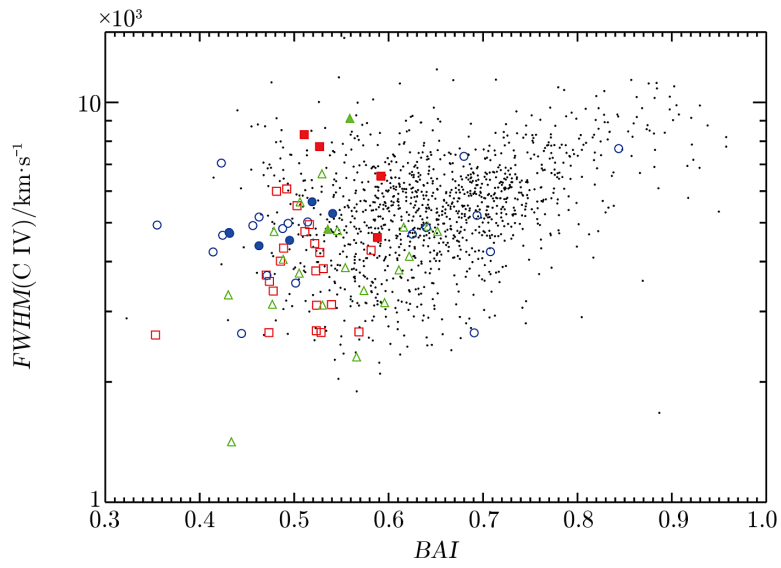


图 9 C IV 半高全宽 ( $FWHM(C\ IV)$ ) 与外流参数 ( $BAI$ ) 的分布 (标示类似于图 4)

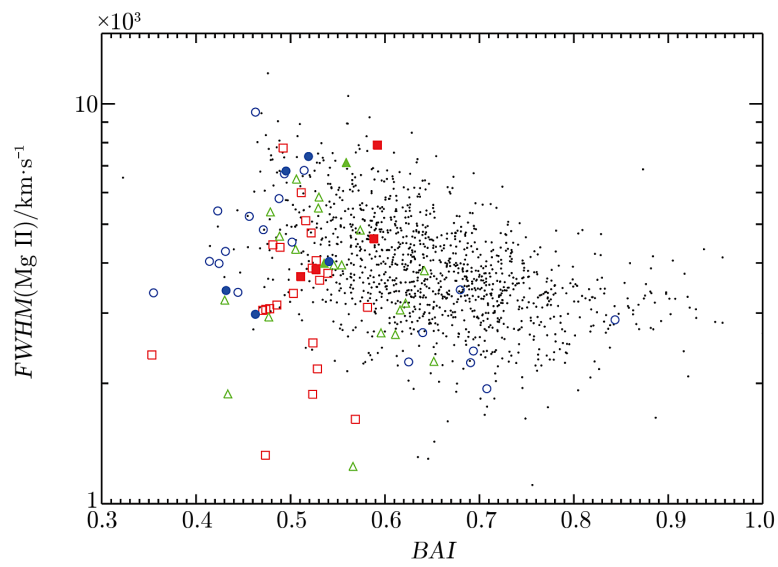


图 10  $FWHM(Mg\ II)$  与外流参数 ( $BAI$ ) 的分布 (标示类似于图 4)

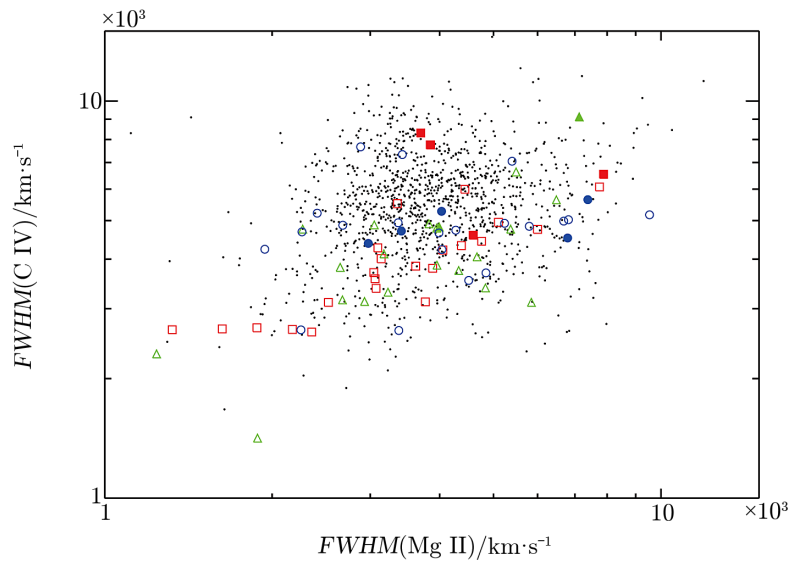


图 11 C IV 半高全宽 ( $FWHM(C\ IV)$ ) 与 Mg II 半高全宽 ( $FWHM(Mg\ II)$ ) 的分布 (标示类似于图 4)

较弱, 主要原因可能是由于低红移源中外流通常较弱, 其  $BAI$  参数范围非常有限, 所以难以看出高红移源中的强相关性; 其次是  $FWHM(C\ IV)$  在低红移源中已经代表了不同于高红移源的属性 (见下面的分析)。低红移源中,  $FWHM(C\ IV)$  与  $FWHM(Mg\ II)$  展现出较强的正相关性, 这强烈暗示, 这两个发射线来自于动力学状态类似的发射区——位力化的区域。这一点与高红移类星体正好相反。不论在高红移源还是低红移源, 大部分 Mg II 发射线来自于位力化结构<sup>[14, 16]</sup>, 所以 Mg II 发射线反映了引力主导下的物质运动。为了进一步理解这一点, 我们在图 12 中显示了所有 AGNs 的  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  随着  $BAI$  的变化。 $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  可以作为 C IV 发射线区偏离引力束缚的指标。我们看到, 对于高红移源,  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  与  $BAI$  有很强的正相关性 (相关系数为 0.631), 这可以很好地用外流辐射区来解释; 而对于低红移 AGNs, 由于其  $BAI$  约为 0.5, 所以外流很弱, 其 C IV 宽度比 Mg II 宽度系统性稍微偏高一点, 整体而言差异不大。

额外的证据来源于等值宽度与半高全宽的比较。在图 13 中, 我们给出  $EW(C\ IV)$  随着  $FWHM(C\ IV)$  的变化。对于高红移样本,  $EW(C\ IV)$  随着  $FWHM(C\ IV)$  的增加而减小; 而对于低红移样本, 除了少数几个 AGNs 和高红移样本占据了相似的参数空间外, 大部分 AGNs 明显占据不同的参数空间。我们还发现低红移样本有一个较弱但是清晰的趋势:  $EW(C\ IV)$  随着  $FWHM(C\ IV)$  的增加而增加, 这是一个与高红移类星体完全相反的趋势。相关性检验显示低红移样本没有相关性 (见表 4), 这可能是低红移样本中有一部分与高红移样本类似, 占据相同的参数空间导致的。可见红移不是产生两个样本差异的主要因素, 内禀的物理过程才是 (见后续的分析)。

而对于高红移类星体, 其  $EW(Mg\ II)$  随着  $FWHM(Mg\ II)$  的增加而增加 (见文献 [20] 中图 2)。这一点与低红移的 C IV 发射线相似, 而与高红移的 C IV 发射线相反。

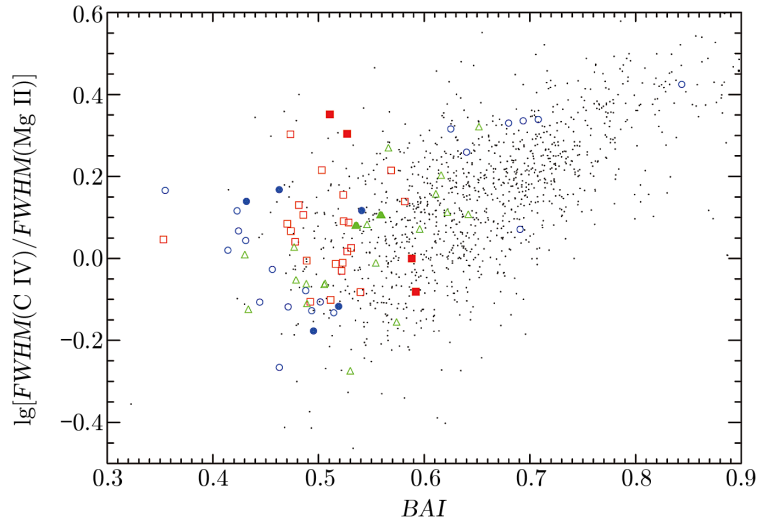


图 12  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  与  $BAI$  的分布 (标示类似于图 4)

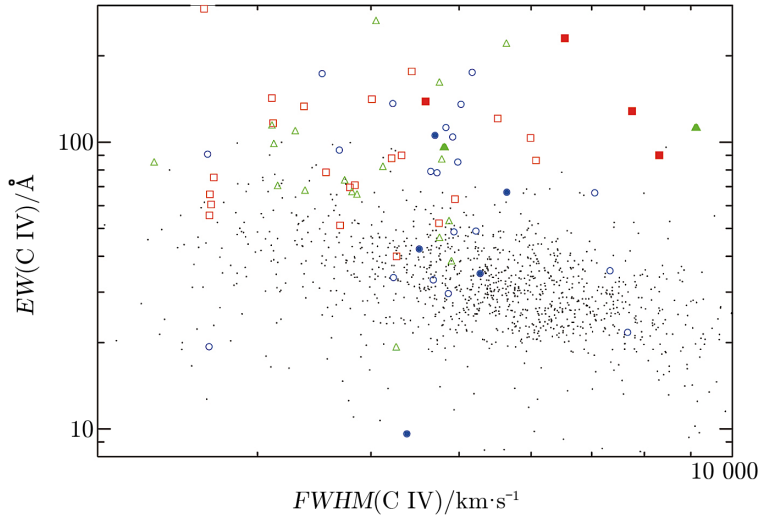


图 13  $C\ IV$  等值宽度 ( $EW(C\ IV)$ ) 与半高全宽 ( $FWHM(C\ IV)$ ) 的分布 (标示类似于图 4)

这些结果可以用外流加位力化结构模型以及 3.2 节中的发射线强度相关性来合理地解释。无论是在高红移源还是低红移源, AGNs 中的  $Mg\ II$  发射线区基本可以被认为是处于位力化的状态中。由爱丁顿比的计算公式, 我们可得到,  $L_{bol}/L_{Edd}$  与  $FWHM(Mg\ II)$  反相关。而又由于  $L_{bol}/L_{Edd}$  与等值宽度反相关 (见图 5), 所以可以自然得到  $FWHM(Mg\ II)$  与  $EW(Mg\ II)$  的正相关关系。对于低红移 AGNs, 如果其  $C\ IV$  线也处于位力化的状态, 那我们也自然可以获得  $FWHM(C\ IV)$  与  $EW(C\ IV)$  的正相关关系。因此, 低红移  $FWHM(C\ IV)$ - $EW(C\ IV)$  与  $FWHM(Mg\ II)$ - $EW(Mg\ II)$  的关系可以作为一个有效的证据, 表明这些低红移的源中,  $FWHM(C\ IV)$  与  $FWHM(Mg\ II)$  一样, 反映了引力主导下的位力化运动,  $C\ IV$



发射线区确实系统地处于位力化状态。这实际上与图 11 中的结论一致。Peterson 和 Wandel<sup>[9, 10]</sup> 基于反响映射方法找到了更加直接有效的证据, 表明低红移的高电离线是满足位力化假设的。但需要注意的是, 由于需要大量的观测时间, 他们的工作实际上只是基于很少一部分反响映射 AGNs, 也就个位数的量级。我们的结果虽然只是一个间接的证据, 但却是基于更大的样本所得出来的结论。

对于高红移类星体,  $FWHM(C\ IV)$  与  $EW(C\ IV)$  的反相关是可以理解的。因为这些源的 C IV 发射区中, 外流已经变得相当普遍, 所以  $FWHM(C\ IV)$  已经不能够用来描述引力主导的位力化运动, 而是反映了外流的动力学状态 (见图 9)。而如图 6 所示 (也可见第 3.2 节的相关讨论), 外流越强 ( $BAI$  越大) 则  $EW(C\ IV)$  越弱, 所以可以很自然地得到  $FWHM(C\ IV)$  与  $EW(C\ IV)$  的反相关性。

那么紧接着一个重要的问题就是, 到底是什么因素导致了不同的样本中宽线区 (尤其是高电离 C IV 宽线区) 的系统性差异? 或者换句话说, 在什么样的状态下, C IV 发射线区开始从低红移的位力化状态转向高红移的外流运动状态? Wang 等人<sup>[20]</sup> 的结果显示, 活动星系核的吸积过程 (基于爱丁顿比刻画的) 是其中的一个重要因素, 我们在图 14 中展示了  $L_{bol}/L_{Edd}$  与  $BAI$  的关系。与 Wang 等人<sup>[20]</sup> 一致的是, 高红移类星体展现出非常强的正相关性, 表明吸积越强的类星体, 外流特征越明显。低红移 AGNs 中, 有一部分也展示了类似的特性; 但是大部分都没有明显的外流特征 ( $BAI \approx 0.5$ ), 而且  $BAI$  与  $L_{bol}/L_{Edd}$  没有相关性。非常有趣的是, 这个临界点发生在  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  的位置处。我们也单独对  $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$  的样本做了 spearman 相关性分析, 发现这部分样本并无明显相关; 这表明外流 (确切地说, 是可辐射紫外发射线的外流) 的产生有一个重要的条件, 就是  $L_{bol}/L_{Edd} > 0.1$ 。

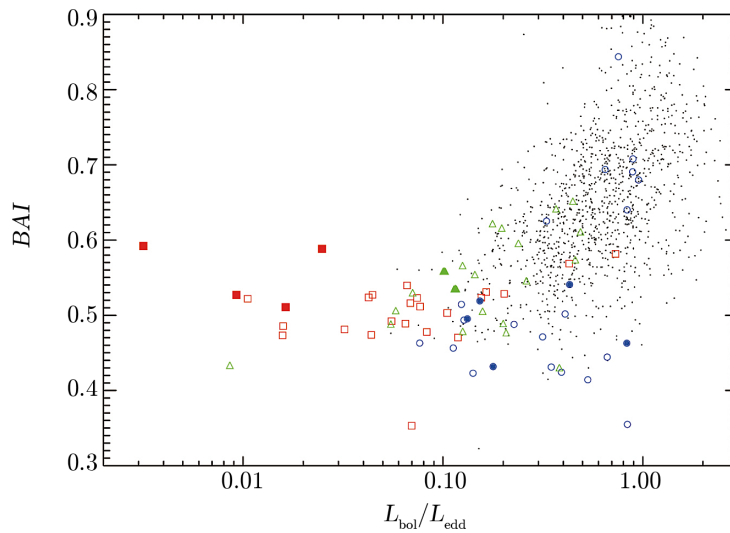


图 14 爱丁顿比 ( $L_{bol}/L_{Edd}$ ) 与外流参数 ( $BAI$ ) 的分布 (标示类似于图 4)

另外一个重要的描述外流的参量是  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$ 。在有外流的情况

下, 这个量可以用来衡量 C IV 区相对于位力化运动的偏离。在图 15 中, 我们给出  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  随着  $L_{bol}/L_{Edd}$  变化的趋势。类似于  $L_{bol}/L_{Edd}$ -BAI 关系, 这个关系也存在显著的双相过程, 而且转折点同样发生在  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  处。这强烈地暗示, 随着吸积率的升高, 宽线区的动力学结构发生了突变, 突变点就在  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  的位置处。当  $L_{bol}/L_{Edd} > 0.1$  时,  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  随着  $L_{bol}/L_{Edd}$  的增加而增加, 这是可以理解的, 因为爱丁顿比描述的是辐射相对于引力的强弱, 而  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  描述的是外流运动相对于引力主导运动的比, 当外流是辐射驱动时, 此关系就容易解释。

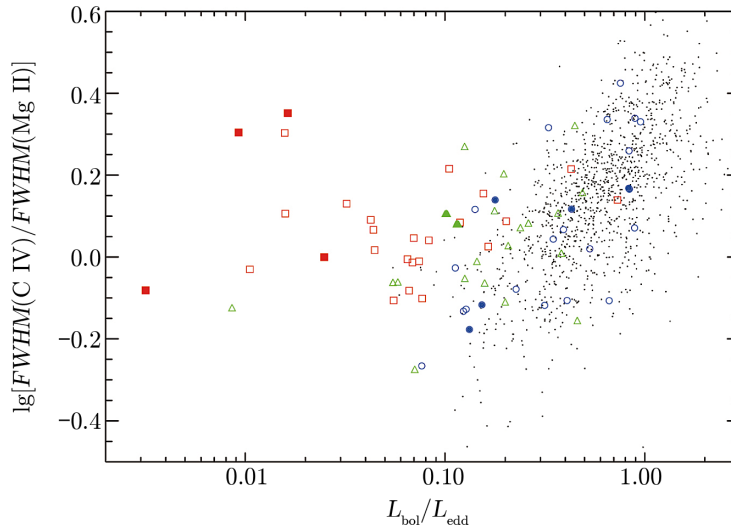


图 15  $L_{bol}/L_{Edd}$  与  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  的分布 (标示类似于图 4)

有意思的是, 当  $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$  时, 我们发现一个微弱的反相关趋势; 对  $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$  这部分样本的 spearman 相关系数的计算结果也反应了这种趋势, 但这种相关性并不完全可靠 (见表 4)。值得注意的是, 由于 3c390.3 具有双峰轮廓, 所以我们也做了去除这个源之后的相关性分析, 相关系数从  $-0.321$  变为  $-0.404$ , 不相关概率从  $0.0837$  变为  $0.0296$ 。相关性变得显著了。但这里需要强调的是, 鉴于目前的样本数量较少, 这种相关性仍需要后期更多数据的检验。当  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  时, 两条线统计上宽度相当<sup>[20]</sup>。在一个完全由引力主导的系统中, 由于 C IV 发射线来自于内区, 所以其运动速度应该比 Mg II 发射线宽。我们的结果暗示, 随着辐射越来越强, C IV 发射区虽然还是引力主导, 但是越来越外移, 向 Mg II 发射区靠近。当  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  时, C IV 发射区与 Mg II 发射区重叠。  $L_{bol}/L_{Edd}$  再增加, 辐射 UV 发射线的外流产生。然而必须强调, 我们现在的数据有限, 而且质量也并不是很大, 所以需要更多更精确的数据来检验这一论点。

我们还研究了  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  与光度 ( $L_{1450}$ ) 以及黑洞质量 ( $M_{BH}$ ) 的关系 (见图 16 和 17)。可以看到,  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  与光度基本不相关或者相关性很弱 (见表 4), 更不用说两相的状态;  $FWHM(C\ IV)/FWHM(Mg\ II)$  与黑洞质量有强相

关, 有意思的是, 两个样本似乎在质量相同位置处遵循不同的趋势。我们猜测这可能是一种选择效应, 因为对  $M_{\text{BH}}$  和  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  采用的计算方式导致两个参数是兼并, 有可能部分引起此类效应。我们将研究黑洞质量对此类效应的影响。

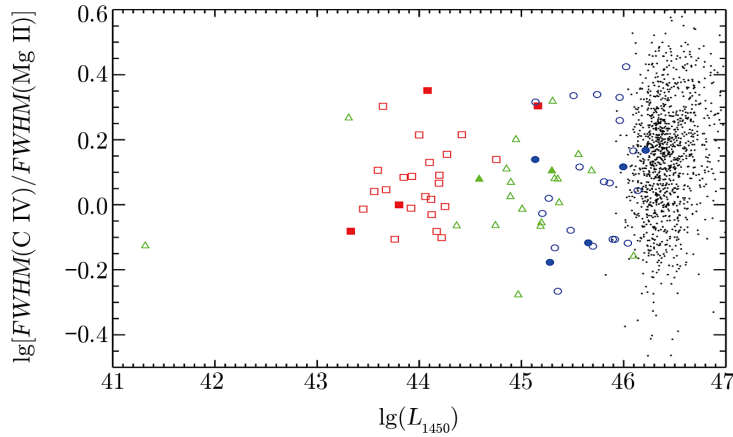


图 16 光度 ( $L_{1450}$ ) 与  $FWHM(\text{C IV})/FWHM(\text{Mg II})$  的分布 (标示与图 4 相同)

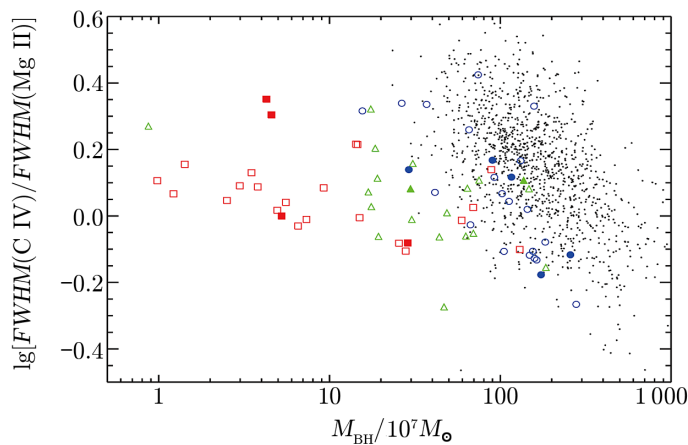


图 17 黑洞质量 ( $M_{\text{BH}}$ ) 对  $FWHM(\text{C IV})/FWHM(\text{Mg II})$  (标示与图 4 相同)

我们的结果对于测量黑洞质量也有帮助。对于高红移类星体, 由于 Mg II 线已经移出了观测者的光学波段, 很多研究者就用 C IV 线来测量黑洞质量。基于我们的结果显示, 高红移类星体普遍具有高爱丁顿比 (也即  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} > 0.1$ ), 这意味着他们的 C IV 发射线都有明显的外流成分, 甚至是被外流成分主导的; 这不但会导致黑洞质量测量的不确定性增大, 更重要的是, 会产生系统性的偏差。从图 12 中可以看到,  $FWHM(\text{C IV})/FWHM(\text{Mg II})$  会随着  $BAI$  的增加而增加; 所以基于单光谱黑洞质量测量方法, 如果光度给定 (相当于发射区半径给定), 那么  $BAI$  大的源, 其  $FWHM(\text{C IV})$  相对于基准的  $FWHM(\text{Mg II})$  偏大, 对应测量到的黑洞质量偏大, 因此爱丁顿比会偏低。虽然现在很多研究对基于 C IV 测量质量的方法进行了修正, 但是这些修正往往是对高红移样本的一个整体修正, 并没有仔细考虑对于

C IV 发射线蓝移不对称的依赖, 所以即使平均质量精确度提高, 但是系统性的偏差并没有被消除。又由于  $BAI$  与爱丁顿比有很强的相关性, 因此, 如果基于 C IV 发射线测量黑洞质量, 那么测量质量的偏差也将与爱丁顿比有着系统性的相关。这些效应主要发生在高红移的类星体当中, 因此, 那些基于 C IV 发射线测量的黑洞质量和吸积率所得出的关于高红移类星体的研究结论, 需要特别谨慎对待。

## 4 总 结

长期以来人们得出一致结论, 活动星系核的宽发射线区可能处于不同的动力学状态下: 一种是引力主导的运动状态, 也称作位力化状态; 另一种是外流状态。宽线区的动力学状态对于我们了解活动星系核的吸积过程、活动星系核结构以及黑洞质量测量等都有着重要的意义。在本文中, 我们详细研究了活动星系核宽发射线区, 尤其是以 C IV 为代表的高电离线发射区的动力学状态, 这些动力学状态对发射线的影响, 以及动力学状态与活动星系核吸积过程的关系。

为了能够更加全面地研究这些效应, 需要研究样本覆盖足够大的参数空间。因此, 我们首先从 SDSS 类星体样本中选取了红移为 1.7~2.25 的高红移样本, 然后利用 IUE 和 HST 的紫外观测数据选取了低红移样本。我们用蓝移不对称参数 ( $BAI$ ) 来衡量 C IV 发射线外流的强弱, 并测量了这条线的等值宽度 ( $EW$ ) 和半高全宽 ( $FWHM$ )。我们测量了 Mg II 发射线的半高全宽, 并利用单光谱黑洞质量测量方法估算了活动星系核的黑洞质量和爱丁顿比。我们选择的样本在光度、C IV 蓝移参数、C IV 等值宽度等参数空间中有很大的覆盖范围。

利用获得的发射线参数, 我们详细研究了这些参数之间的关系以及其与活动星系核基本参数 (例如光度、黑洞质量和爱丁顿比) 的关系。我们证实了之前的结果: 高红移类星体中, C IV 发射线与 Mg II 发射线在参数空间中往往表现出不同的行为模式, 例如在  $FWHM-BAI$  参数空间和  $FWHM-EW$  参数空间都表现出不同的趋势; 这表明 C IV 与 Mg II 发射线处于不同的动力学状态。我们又进一步发现, 在低红移活动星系核,  $FWHM(C IV)$  与  $FWHM(Mg II)$  存在明显的正相关, 而且其  $FWHM-EW$  关系与 Mg II 发射线完全一致。这表明低红移活动星系核中, C IV 线与 Mg II 线处于一致的动力学状态。这一点其实从 C IV 发射线的  $BAI$  参数的分布上就可以得到直接的佐证, 即 C IV 发射线外流在高红移时较强而在低红移时较弱。

为了进一步理解高、低红移活动星系核的差异, 我们研究了  $BAI$  参数与爱丁顿比的关系, 发现两个红移样本在一起形成了一个两相分布模式。在  $L_{bol}/L_{Edd} < 0.1$  时,  $BAI$  与  $L_{bol}/L_{Edd}$  没有关系, 而在  $L_{bol}/L_{Edd} > 0.1$  时, 两者存在非常强的正相关; 这表明发射线的动力学状态在  $L_{bol}/L_{Edd} \approx 0.1$  处发生了转变。我们也研究了  $FWHM(C IV)/FWHM(Mg II)$  与  $L_{bol}/L_{Edd}$  的关系, 同样发现了这一临界爱丁顿比。在  $L_{bol}/L_{Edd} > 0.1$  时,  $FWHM(C IV)/FWHM(Mg II)$  随着  $L_{bol}/L_{Edd}$  的增加而增加,  $FWHM(C IV)/FWHM(Mg II)$  在这时实际上反映了外流导致的运动速度与引力束缚状态对应的运动速度比值。有意思的

是当  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 0.1$  时, 这两者之间存在微弱的反相关; 这可以用引力主导下的分层结构随着爱丁顿比的增加而变得无法区分来解释。然而, 我们必须强调, 这一推测有赖未来更多更加可靠的数据来检验。我们的结果还表明, 利用 C IV 发射线来测量活动星系核质量, 不仅统计误差增加, 而且存在系统性的风险; 这种方法造成的质量偏差与 BAI 以及活动星系核爱丁顿比存在明显相关性, 这一偏差对于高红移类星体尤其显著。

### 参考文献:

- [1] Blandford R D, McKee C F. ApJ, 1982, 255: 419
- [2] Peterson B M. PASP, 1993, 105: 247
- [3] Peterson B M, Ferrarese L, Gilbert K M, et al. ApJ, 2004, 613: 682
- [4] Kaspi S, Brandt W N, Maoz D, et al. ApJ, 2007, 659: 997
- [5] Bentz M C, Walsh J L, Barth A J, et al. ApJ, 2009, 705: 199
- [6] Shen Y, Greene J E, Ho L C, et al. ApJ, 2015, 805: 96
- [7] Grier C J, Trump J R, Shen Y, et al. ApJ, 2017, 851: 21
- [8] Du P, Zhang Z X, Wang K, et al. ApJ, 2018, 856: 6
- [9] Peterson B M, Wandel A. ApJ, 1999, 521: L95
- [10] Peterson B M, Wandel A. ApJ, 2000, 540: L13
- [11] Onken C A, Peterson B M. ApJ, 2002, 572: 746
- [12] Boroson T A, Green R F. ApJS, 1992, 80: 109
- [13] Boroson T A. AAS, 2002, 201: 9801B
- [14] Richards G T, Vanden Berk D E, Reichard T A, et al. AJ, 2002, 124: 1
- [15] Baskin A, Laor A. MNRAS, 2005, 356: 1029
- [16] Richards G T, Kruczek N E, Gallagher S C, et al. AJ, 2011, 141: 167
- [17] Ganguly R, Brotherton M S, Cales S, et al. ApJ, 2007, 665: 990
- [18] Fan L L, Wang H Y, Wang T, et al. ApJ, 2009, 690: 1006
- [19] Zhang S, Wang H, Wang T, et al. ApJ, 2014, 786: 42
- [20] Wang H, Wang T, Zhou H, et al. ApJ, 2011, 738: 85
- [21] Sun M, Xue Y, Richards G T, et al. ApJ, 2018, 854: 128
- [22] Wang H, Zhou H, Yuan W, Wang T. ApJ, 2012, 751: L23
- [23] Wang H, Xing F, Zhang K, et al. ApJ, 2013, 776: L15
- [24] Shin J, Nagao T, Woo J H. ApJ, 2017, 835: 24
- [25] Sulentic J W, Marziani P, Dultzin-Hacyan D. ARA&A, 2000a, 38: 521
- [26] Sulentic J W, Zwitter T, Marziani P, Dultzin-Hacyan D. ApJ, 2000b, 536: L5
- [27] Marziani P, Sulentic J W, Plauchu-Frayn I, del Olmo A. ApJ, 2013, 764: 150
- [28] Silk J, Rees M J, A&A, 1998, 331: L1
- [29] Schneider D P, Hall P B, Richards G T, et al. AJ, 2007, 134: 102
- [30] Scaringi S, Cottis C E, Knigge C, Goad M R. MNRAS, 2009, 399: 2231
- [31] Hewett P C, Wild V. MNRAS, 2010, 405: 2302
- [32] Wang J G, Dong X B, Wang T G, et al. ApJ, 2009, 707: 1334
- [33] Tsuzuki Y, Kawara K, Yoshii Y, et al. ApJ, 2006, 650: 57
- [34] Ferland G J, Korista K T, Verner D A, et al. PASP, 1998, 110: 761
- [35] van der Marel R P, Franx M. ApJ, 1993, 407: 525
- [36] McLure R J, Dunlop J S. MNRAS, 2004, 352: 1390
- [37] Kuraszekiewicz J K, Green P J, Forster K, et al. ApJS, 2003, 143: 257

- [38] Kuraszkiewicz J K, Green P J, Crenshaw D M, et al. ApJS, 2004, 150: 165  
[39] Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. ApJS, 2009, 182: 543  
[40] Baldwin J A. ApJ, 1977, 214: 679  
[41] Xu Y, Bian W H, Yuan Q R, Huang K L. MNRAS, 2008, 389: 1703  
[42] Korista K, Baldwin J, Ferland G. ApJ, 1998, 507: 24  
[43] Baskin A, Laor A. MNRAS, 2004, 350: L31  
[44] Bachev R, Marziani P, Sulentic J W, et al. ApJ, 2004, 617: 171  
[45] Wu J, Vanden Berk D E, Brandt W N, et al. ApJ, 2009, 702: 767  
[46] Dong X B, Wang T G, Wang J G, et al. ApJ, 2009, 703: L1  
[47] Ferland G J, Hu C, Wang J M, et al. ApJ, 2009, 707: L82  
[48] Dietrich M, Hamann F, Shields J C, Constantin A, et al. ApJ, 2002, 581: 912  
[49] Kong M Z, Wu X B, Wang R, et al. A&A, 2006, 456: 473

## The Dynamics of C IV Broad Emission Line Region in Low and High Redshift AGN Samples

GAO Shan, WANG Hui-yuan

(Department of Astronomy, University of Science and Technology, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In this paper, we present a detailed study on the dynamics of C IV broad emission line region, and its implication to the line formation and its connection to the accretion processes. Our AGN sample is composed of two subsamples, one is taken from SDSS (high-redshift sample), and the other is taken from the IUE and HST observation (low-redshift sample). We use a blueshift and asymmetry index (*BAI*) of C IV line to indicate the outflow strength, we also measure the equivalent width (*EW*) and full width at half-maximum (*FWHM*). We confirm previous results: in high-redshift sample, C IV and Mg II behave in an opposite way in the *FWHM-BAI* and *FWHM-EW* parameter spaces. This indicates that the two emission line regions have very different dynamics. We find that, in low redshift sample, the *FWHMs* of the two lines have a clear and positive correlation, and C IV and Mg II exhibit the same trend in *FWHM-EW* parameter space. It means that the two lines are produced in the regions with similar dynamics. Our further analysis shows that, as  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 0.1$ , *BAI* is almost independent of  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ ; while  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} > 0.1$ , *BAI* increases strongly with  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ . Similar two-phase behavior is also found in the relation between  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  and  $FWHM(\text{C IV})/FWHM(\text{Mg II})$ .

**Key words:** active galactic nuclei; emission lines; line profiles