



论文

类星体径向和横向的 Mg^+ 吸收研究

陈哲耕, 陈志福*, 王志文, 庞婷婷

广西民族大学数学与物理学院, 南宁 530006

* 联系人, E-mail: zhichenfu@126.com

收稿日期: 2022-06-15; 接受日期: 2022-07-21; 网络出版日期: 2022-11-22

广西自然科学基金 (编号: 桂科 AD19245136, 2019GXNSFFA245008)、国家自然科学基金 (编号: 12073007)、广西民族大学科学研究计划 (编号: 2018KJQD01) 和广西壮族自治区大学生创新创业项目 (编号: 202010608056) 资助

摘要 地球上靠近的两个高红移类星体 (也称为背景类星体) 与低红移类星体 (也称为前景类星体) 组成一对类星体对. 本文利用斯隆数字巡天光谱数据, 获得 22 对类星体对, 其前景类星体的径向方向 (视线方向) 和横向方向 (垂直视线方向) 都探测到成协的 $\text{Mg II}\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线, 其中, 横向方向的吸收线通过背景类星体光谱探测, 径向方向的吸收线通过前景类星体光谱探测. 这 22 对类星体对在前景类星体处的投影距离范围是 101.7–473.9 kpc. 研究发现, 前景类星体横向方向的 $\text{Mg II}\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线由前景类星体宿主星系晕的吸收介质主导, 但是径向方向的吸收线可能起源于类星体外流、宿主星系以及宿主星系晕. 如果径向方向的吸收线起源于类星体宿主星系或宿主星系晕, 其吸收线强度、宽度和相对类星体中心的视向速度都与横向方向的吸收线类似. 但是, 如果径向方向的吸收线起源于类星体外流, 其吸收线强度、宽度和相对类星体中心的视向速度在较高概率上都可能与横向方向的吸收线不同.

关键词 类星体, 吸收线, 横向, 径向**PACS:** 95.85.-e, 95.80.+p, 98.54.-h, 98.58.-w

1 引言

类星体是目前人类观测到的、最明亮的遥远天体之一, 是典型的活动星系. 类星体的光度主要来源于类星体中心很小尺度的核区, 并且其光度远超过整个类星体宿主星系的光度. 类星体中心核区的连续谱辐射穿越类星体自身外流介质、宿主星系中的星际介质、宿主星系晕, 以及与类星体自身不存在密切物理联系的、在类星体视线方向上的前景介质, 均可能在类星体光谱中形成吸收标志, 即类星体吸收线. 因此, 类星

体吸收线是研究类星体中心周围气体物理状态、丰度、动力学等的重要工具, 是研究星系的形成与演化的重要手段.

近些年来, 利用斯隆数字巡天^[1](Sloan Digital Sky Survey) 的大样本类星体吸收线光谱数据, 我们研究团队^[2–4]及国际上一些星系形成与演化的研究团队^[5–9], 通过大样本分析类星体径向方向 (即类星体视线方向) 的 $\text{Mg II}\lambda\lambda 2796, 2803$ 或 $\text{C IV}\lambda\lambda 1548, 1551$ 成协窄吸收线 (宽吸收线 (Broad Absorption Lines, BALs) 通常定义为, 低于连续谱 10% 水平的连续吸收的宽度大

引用格式: 陈哲耕, 陈志福, 王志文, 等. 类星体径向和横向的 Mg^+ 吸收研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 259811
Chen Z G, Chen Z F, Wang Z W, et al. Mg^+ absorptions on the radial and transverse directions of quasars (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 259811, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0237

于 2000 km s^{-1} 的吸收特征; 窄吸收线 (Narrow Absorption Lines, NALs) 通常定义为, 吸收线宽度小于几百 km s^{-1} 的吸收特征; 迷你型宽吸收线 (mini-BALs) 通常定义为宽度位于宽吸收线和窄吸收线之间的吸收特征), 统计研究了类星体径向方向的吸收特性, 发现吸收体的吸收特征 (如电离水平、吸收强度、相对类星体中心的多普勒速度、成团性、光变特征和机制等) 与类星体内禀特征存在很强的相关性 (例如, 吸收云团的电离态和外流速度均与类星体中心光度正相关, 内流或外流吸收线的本质特征与类星体的环境密切相关, 等等). 尤其是通过深入研究类星体径向方向的宽吸收线, 国内外大量的研究团队 [5,10-16] 研究发现宽吸收线的特性与类星体内禀特征之间的关系很紧密, 例如, 宽线吸收线的光变由类星体中心辐射变化主导, 宽吸收线的加速与类星体辐射压有关, 宽吸收线类星体的占比与类星体的射电形态、射电辐射强度等存在比较密切的关系, 类星体宿主星系恒星活动特性亦与宽吸收线性质有关. 同时, 借助类星体径向方向的吸收特征, 我们研究团队 [17] 研究发现, 在类星体演化进程中, 类星体中心的外流对类星体周围的恒星形成存在显著的负反馈作用.

因为类星体宿主星系以及宿主星系晕的气体密度比较低, 面亮度也比较暗, 同时类星体具有高红移特征, 必须借助大口径望远镜的深度曝光或者大样本光谱叠加的方式才可以观测到宿主星系晕的辐射特征 [18-20]. 因此, 受观测设备的限制, 很难直接获得类星体 (尤其是 I 型类星体) 横向方向的气体的内禀特征. 高红移的类星体视线在到达观测者之前, 穿越低红移类星体中心周围的气体介质, 很可能在高红移类星体的光谱中产生吸收标志 [20-22]. 通过这些吸收标志, 可以研究低红移类星体横向方向的气体的内禀特征. 这些高红移类星体 (也称为背景类星体) 和低红移类星体 (也称为前景类星体), 通常称为类星体对. 最近十多年以来, 越来越多的研究工作 [18,21,23-30] 利用高红移的背景类星体穿越低红移的前景类星体或星系横向方向的介质而形成的吸收线特性, 统计研究前景类星体或星系的内禀特征与吸收线特征的关系, 相关工作发现了类星体/星系横向方向的气体吸收线强度、电离水平和探测率等特性, 与类星体/星系中心光度、吸收云团相对类星体/星系中心的距离、吸积盘转轴的倾角等存在比较显著的相关性. 借助这些背景类星体光谱

在前景类星体/星系处产生的吸收线特征, 在一定程度上也限制了类星体/星系周围气体的元素丰度、电离水平、温度和电子密度等.

本文利用斯隆数字巡天的大样本类星体光谱数据, 通过类星体对同时研究前景类星体在径向和横向方向的 Mg^+ 吸收特性, 了解径向和横向两个方向吸收的异同.

2 类星体对样本和光谱分析

2.1 类星体对样本构建

斯隆数字巡天的类星体光谱观测获得的光谱波长覆盖范围大约是 $3700\text{--}10000 \text{ \AA}$, 光谱分辨率大约是 $R = 2000$. 根据斯隆数字巡天第 16 次释放 (DR16) 的光谱数据 [31], 其一共观测获得约 75 万个类星体的光谱, 这些类星体主要分布在红移 $0.5 < z < 3$ 范围内. 根据斯隆数字巡天类星体光谱观测的波长覆盖范围、光谱分辨率、类星体的红移分布范围和 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收线的波长, 斯隆数字巡天的类星体光谱适合于研究 Mg^+ 吸收 [2,7,32].

根据斯隆数字巡天的类星体光谱覆盖范围、 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收线的波长、类星体宿主星系晕的大概尺度以及结合适合于分析 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收线的光谱信噪比, 本文通过以下条件构建类星体对样本.

(1) 为了尽量排除背景类星体 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 成协吸收线的影响, 要求前景类星体红移必须小于背景类星体红移 6000 km^{-1} .

(2) 在前景类星体 $\text{Mg II}\lambda 2800$ 发射线 $\pm 6000 \text{ km s}^{-1}$ 范围内的光谱中值信噪比 $S/N \geq 3$; 在背景类星体光谱中, 在前景类星体红移处 $\pm 6000 \text{ km s}^{-1}$ 范围内的光谱中值信噪比也需要满足 $S/N \geq 3$.

(3) 在随动坐标系中, 前景类星体在背景类星体视线上固有投影距离 (d_p , Transverse Proper Distance) 满足 $d_p \leq 500 \text{ kpc}$.

(4) 为了排除 $\text{Ly}\alpha$ 森林 ($\text{Ly}\alpha$ Forest) 吸收线对分析 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收线的影响, 只在背景类星体光谱中 $\text{Ly}\alpha \lambda 1216$ 发射线红端搜索 $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收线.

综合以上条件, 本文一共获得 10025 个类星体对的研究样本.

2.2 Mg II λ 2796, 2803 吸收线光谱分析

本文利用典型的 3 次样条插值叠加多个高斯函数的方式拟合每个类星体的背景连续谱 [2-4, 32, 33], 如图 1 中的红色实线. 对每一个可能的 Mg II λ 2796, 2803 吸收线, 本文利用双高斯函数拟合 (如图 1 中的绿色实线) 得到吸收线的红移、强度 (W_r , 静止坐标系的等值宽度)、半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 等吸收线的基本参数. 本文要求每一个 Mg II λ 2796, 2803 吸收线的置信水平必须满足 $W_r^{\lambda 2796} \geq 3\sigma_w$ 和 $W_r^{\lambda 2803} \geq 2\sigma_w$. 同时, 本文要求每一对类星体对, 在前景类星体 Mg II λ 2800 发射线 $\pm 3000 \text{ km s}^{-1}$ 范围内必须探测到至少一个满足置信水平的 Mg II λ 2796, 2803 吸收线, 除非出现高速的 Mg II λ 2796, 2803 宽吸收线或者迷你型宽吸收线; 在背景类星体光谱中, 在前景类星体红移处 $\pm 1500 \text{ km s}^{-1}$ 范围内也必须探测到至少一个满足置信

水平的 Mg II λ 2796, 2803 吸收线. 综合以上条件, 本文一共获得 22 对类星体对, 在其前景类星体和背景类星体光谱中都探测到满足条件的前景类星体 Mg II λ 2796, 2803 成协吸收线, 对应的类星体和吸收线主要参数见表 1.

3 结果和讨论

本文一共获得 22 对类星体, 在其前景类星体径向方向和横向方向同时探测到 Mg II λ 2796, 2803 吸收线. 这 22 对类星体对在前景类星体处的投影距离分布如图 2 所示. 由图 2 和表 1 可以清楚地看到, 横向吸收云团与前景类星体中心的投影距离都大于 100 kpc. 前期的研究工作利用 SDSS 的类星体对探测前景类星体横向方向的吸收线 [27], 在前景类星体处的投影距离小于 100 kpc 的范围内探测到少量的吸收线, 但是本研究工作在投影距离小于 100 kpc 的范围内并没有探测到 Mg II λ 2796, 2803 吸收线. 其中的原因主要包括两方面: 第一, 本文的样本构建显著不同于前期研究工作, 其中最主要的差别是, 本文要求同时在前景类星体横

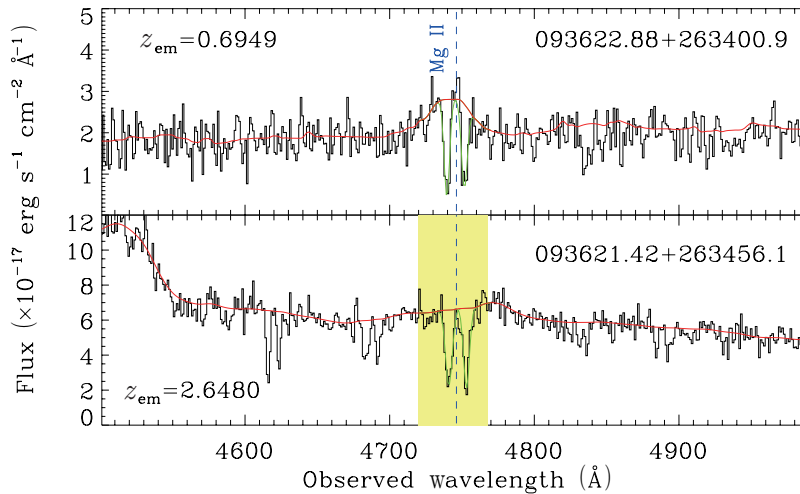


图 1 (网络版彩图) 类星体对光谱. 上图为前景类星体 093622.88 + 263400.9 的光谱, 其红移为 $z_{\text{em}} = 0.6946$; 下图为背景类星体 093621.42 + 263456.1 的光谱, 其红移为 $z_{\text{em}} = 2.6480$. 红色实线为拟合的背景连续谱, 绿色实线为双高斯函数拟合的 Mg II λ 2796, 2803 吸收线, 蓝色虚线代表前景类星体 Mg II 发射线的位置, 黄色阴影标明在背景类星体光谱中、属于前景类星体吸收产生的 Mg II λ 2796, 2803 吸收线的观测波长覆盖范围

Figure 1 (Color online) The spectra of quasar pairs. Upper panel is the spectra of foreground quasar 093622.88 + 263400.9 with $z_{\text{em}} = 0.6946$, and the lower panel is the spectra of background quasar 093621.42 + 263456.1 with $z_{\text{em}} = 2.6480$. Red solid-lines are the fitting pseudo-continuum, green solid-lines are the Mg II λ 2796, 2803 absorption lines fitting with two Gaussian functions, blue dash-line labels the position of Mg II emission line of foreground quasar, and the shaded yellow region labels the wavelength range considered to associate an Mg II λ 2796, 2803 absorption doublet to the foreground quasar.

表 1 类星体对吸收线参数^{a)}Table 1 Absorption line parameters of quasar pairs^{a)}

序号	类星体名字	PlateID	MJD	FiberID	类星体红移	吸收线红移	W_r^{12796} (Å)	W_r^{12803} (Å)	角距离 (arcsec)	投影距离 (kpc)	备注
1F	005046.76+214517.1	7617	56949	66	1.4330	1.4314	0.66 ± 0.10	0.40 ± 0.08	20.5	173.2	
1B	005045.31+214512.9	7620	56904	492	1.9350	1.4340	1.23 ± 0.29	0.93 ± 0.46	—	—	
2F	010349.19+001827.4	7874	57279	618	1.6502	1.6426	2.19 ± 0.32	2.03 ± 0.26	53.9	456.8	
2B	010348.99+001733.6	693	52254	552	1.9300	1.6465	3.10 ± 0.74	3.09 ± 0.61	—	—	
3F	010850.77+270708.8	6255	56240	930	1.5235	1.5084	5.11 ± 0.55	3.59 ± 0.41	12.0	101.7	mini-BALs
3B	010851.64+270712.0	6258	56238	534	2.6600	1.5229	3.13 ± 0.45	2.36 ± 0.29	—	—	
4F	012629.27+314344.5	7728	58138	270	1.0449	1.0384	1.13 ± 0.24	0.84 ± 0.14	46.0	371.9	
4B	012631.50+314308.2	6596	56331	842	3.2160	1.0405	1.34 ± 0.44	1.13 ± 0.21	—	—	
5F	022321.91+022143.5	4265	55505	374	0.8399	0.8287	1.26 ± 0.15	1.04 ± 0.14	17.0	129.8	
5B	022322.66+022156.2	9421	58081	677	1.3705	0.8426	0.89 ± 0.15	0.61 ± 0.14	—	—	
6F	072927.51+270352.5	11086	58401	770	0.6184	0.6187	1.72 ± 0.49	1.49 ± 0.49	66.4	450.5	
6B	072928.15+270458.4	11086	58401	768	0.8517	0.6197	0.82 ± 0.17	0.44 ± 0.18	—	—	
7F	081546.08+550130.0	1871	53384	627	0.9460	0.9414	4.13 ± 0.80	3.04 ± 0.82	34.1	269.6	mini-BALs
7B	081550.04+550128.0	3701	55540	828	1.4287	0.9474	1.70 ± 0.20	1.34 ± 0.17	—	—	
8F	081740.41+494610.5	7309	56991	291	1.1516	1.1532	2.00 ± 0.20	1.71 ± 0.21	42.9	353.6	
8B	081743.08+494536.3	7318	56990	548	1.8693	1.1537	1.98 ± 0.49	1.84 ± 0.53	—	—	
9F	090138.51+583859.2	8197	57064	237	0.6411	0.6398	0.61 ± 0.16	0.67 ± 0.14	40.6	279.8	
9B	090142.27+583927.3	484	51907	356	1.7984	0.6396	0.52 ± 0.11	0.52 ± 0.18	—	—	
10F	093622.88+263400.9	11704	58514	650	0.6949	0.6949	2.38 ± 0.38	2.30 ± 0.42	58.6	417.7	
10B	093621.42+263456.1	5791	56255	590	2.6480	0.6954	2.27 ± 0.29	2.06 ± 0.24	—	—	
11F	105915.93+393948.2	4625	55632	692	1.7446	1.7481	0.41 ± 0.11	0.18 ± 0.08	51.3	434.1	
11B	105911.96+394011.4	8820	57449	734	1.8037	1.7479	0.35 ± 0.09	0.37 ± 0.09	—	—	
12F	114515.72+503533.5	6684	56412	880	1.1288	1.1319	1.05 ± 0.16	0.40 ± 0.10	46.9	385.2	
12B	114512.25+503500.2	7400	57134	988	1.3994	1.1282	0.82 ± 0.21	0.61 ± 0.13	—	—	
13F	113223.27+514607.9	8159	57064	764	1.3896	1.3918	1.55 ± 0.26	1.73 ± 0.29	48.7	410.5	
13B	113222.19+514655.6	6690	56416	486	1.8201	1.3908	2.18 ± 0.28	2.02 ± 0.29	—	—	
14F	124935.14+333800.1	10250	58472	730	1.4845	1.4764	0.87 ± 0.25	0.46 ± 0.20	50.5	427.4	
14B	124939.07+333747.7	6485	56342	598	1.9440	1.4908	1.53 ± 0.31	1.24 ± 0.31	—	—	
15F	125137.60+351909.3	8869	57481	453	1.2673	1.2658	2.38 ± 0.39	2.06 ± 0.45	56.7	473.9	
15B	125135.10+351821.5	3974	55320	558	3.0550	1.2619	1.74 ± 0.53	1.75 ± 0.57	—	—	
16F	144510.20+575008.9	8411	57875	696	1.2682	1.2656	0.85 ± 0.16	0.83 ± 0.16	19.4	162.1	
16B	144512.28+574958.9	6806	56419	288	3.4300	1.2703	1.94 ± 0.57	1.32 ± 0.36	—	—	
17F	151830.03+004257.7	4011	55635	362	0.9180	0.9153	0.92 ± 0.18	1.53 ± 0.26	53.7	421.0	
17B	151833.48+004312.2	4014	55630	958	2.4550	0.9116	1.11 ± 0.35	0.87 ± 0.30	—	—	
18F	154657.59+450820.2	8508	57845	634	1.3070	1.3088	4.37 ± 0.97	4.52 ± 1.06	39.2	328.8	mini-BALs
18B	154654.56+450842.9	6042	56101	642	1.6868	1.3068	0.30 ± 0.07	0.31 ± 0.10	—	—	
19F	155651.79+394551.4	10734	58280	740	0.8699	0.8708	1.94 ± 0.33	1.59 ± 0.33	18.1	139.7	
19B	155650.41+394542.8	5192	56066	724	0.9423	0.8669	1.94 ± 0.08	1.70 ± 0.07	—	—	
20F	235340.90+303344.6	6498	56565	438	0.6629	0.6507	2.60 ± 0.53	1.40 ± 0.51	27.4	192.0	mini-BALs
20B	235342.08+303407.5	6512	56567	798	1.3960	0.6620	0.54 ± 0.06	0.44 ± 0.08	—	—	
21F	235812.17+090307.5	11277	58450	634	1.9160	1.9165	2.37 ± 0.32	2.06 ± 0.32	34.4	289.4	
21B	235812.35+090341.8	6152	56164	936	2.4600	1.9188	1.78 ± 0.24	1.40 ± 0.19	—	—	
22F	235859.54+235231.2	7665	57328	512	1.3044	1.3020	0.82 ± 0.10	0.85 ± 0.15	42.4	355.4	
22B	235858.16+235309.1	7597	56973	983	1.5970	1.3063	0.80 ± 0.24	0.84 ± 0.33	—	—	

a) 在第一列中, 前景类星体和背景类星体分别用“F”和“B”表示。

向方向和径向方向都探测到吸收线, 但是前期研究工作仅仅在前景类星体横向方向探测吸收线. 第二, 也是最主要的原因, 即类星体中心辐射不是各向同性, 类星体径向方向的气体的电离参数显著高于横向方向, 导致在横向方向距离小于 200 kpc 范围内, 横向方向低电离态吸收线的探测率远远高于径向方向, 并且横向距离越小, 两个方向的吸收线探测率差别越大 [34, 35].

本文样本中的 22 对类星体对的前景类星体, 均为

I 型类星体, 因此前景类星体吸积盘转轴不会太大, 从而导致类星体宿主星系盘侧向观测者. 因此, 前景类星体的吸积盘转轴指向的空间分布不是完全随机的. 再结合横向吸收云团与前景类星体中心的距离都大于 100 kpc, 横向的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收很可能主要起源于前景类星体宿主星系晕, 而与前景类星体宿主星系盘或者外流很可能无直接的密切关系.

宽吸收线和迷你型宽吸收线通常被认为是起源于

类星体的外流介质的吸收^[36,37],但是窄吸收线既可以起源于类星体外流介质,也可以起源于宿主星系中的星际介质以及宿主星系晕介质的吸收,即宽吸收线

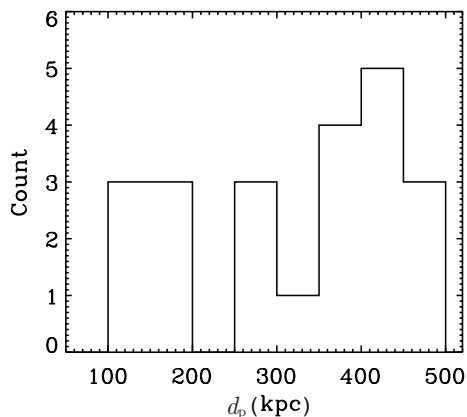


图 2 类星体对在前景类星体红移处的投影距离分布

Figure 2 The distribution of the projected distances of quasar pairs at foreground quasars.

和迷你型宽吸收与窄吸收线可能具有不同的吸收起源. 不同的起源, 吸收云团可能具有不同的气体密度、电离态以及气体动力学等, 因此, 起源于不同地方的吸收云团的吸收线可能具有不同的吸收线特征, 如吸收线强度和宽度. 结合上面的分析, 前景类星体横向方向的吸收线很可能是由宿主星系晕主导的, 但是类星体的外流、类星体宿主星系以及宿主星系晕, 这三者都可能是前景类星体径向的吸收线的起源. 图 3(a) 展示了前景类星体横向和径向 $\text{Mg II } \lambda 2796, 2803$ 吸收线的 FWHM (吸收线的 FWHM 是指 $\text{Mg II } \lambda 2796, 2803$ 双吸收线中其中一条吸收线的宽度) 的分布, 其清楚地表明, 有 4 个前景类星体在径向方向的吸收线的宽度 $\text{FWHM} > 500 \text{ km s}^{-1}$, 而其余的径向方向的吸收线以及横向方向所有吸收线的宽度 $\text{FWHM} < 350 \text{ km s}^{-1}$. 根据吸收线类型的分类, 一般情况下, $\text{Mg II } \lambda 2796$ 吸收线的宽度明显大于 300 km s^{-1} 的吸收线, 通常被划分为迷你型宽吸收线 (mini-BALs). 由这个分类和图 3(a) 可以清楚地看到, 在 500 kpc 的投影距离范围内, 前景类星体在横向方向的所有吸收线均属于窄吸收线. 同时, 横向方向所有吸收线的宽度 $\text{FWHM} < 350 \text{ km s}^{-1}$ 说明横向方向的吸收线很可能是由前景类星体宿主星系本身的吸收气体主导, 而与宿主星系的卫星星系或者宿主星系所在的星系团中的气体没有密切的关系. 然而, 在径向方向的吸收线, 除了窄吸收线, 也

有迷你型宽吸收线. 这说明相对于横向方向, 径向方向吸收线的起源更复杂, 其中的一部分吸收线很可能由前景类星体外流主导. 除此之外, 由图 3 也可以清楚地看到, 如果前景类星体径向方向的吸收线属于窄吸收线, 那么这些吸收线的宽度与横向方向的吸收线类似.

宿主星系以及宿主星系晕中的云团围绕类星体中心进行的开普勒运动速度, 通常只有几百 km s^{-1} , 但是外流和内流中的云团, 其相对类星体中心黑洞的多普勒速度的范围比较大^[2-4,10,36,38,39]. 图 3(b) 展示了横向 (黑色圆点) 和径向 (蓝色或红色五角星) 的吸收线相对前景类星体的视向速度分布. 根据前期研究工作的大样本统计结果^[2,4], 来自类星体宿主星系以及宿主星系晕中云团的吸收, 其吸收线通常属于窄吸收线, 并且其相对类星体中心黑洞的视向速度通常只有几百 km s^{-1} . 视向速度大于 500 km s^{-1} 的径向方向的吸收线, 无论是迷你型宽吸收线还是窄吸收线, 其都很可能是由类星体外流吸收介质主导^[2,4,7], 即其与横向方向的吸收线具有不同的起源. 因此, 视向速度大于 500 km s^{-1} 的径向方向的吸收线, 其吸收线宽度在较高概率上不同于横向方向的吸收线. 在图 3 中, 7 个视向速度大于 500 km s^{-1} 的径向方向吸收线, 其中 43% (3 个) 的径向方向吸收线属于迷你型宽吸收线, 其吸收线宽度显著不同于横向方向的吸收线. 同时, 对于所有的窄吸收线和迷你型宽吸收线, 其横向方向和径向方向吸收线的视向速度差异都小于 3000 km s^{-1} , 说明产生两个方向的吸收线的气体云团可能都位于相同的星系团内部. 这里需要注意的是, 所有横向方向的吸收线以及 18 个径向方向的窄吸收线, 它们的宽度 $\text{FWHM} < 350 \text{ km s}^{-1}$, 说明它们可能是由前景类星体宿主星系或宿主星系晕内部吸收气体主导, 但是径向方向 4 个迷你型宽吸收线的宽度 $\text{FWHM} > 500 \text{ km s}^{-1}$, 说明它们很可能由前景类星体外流吸收主导.

图 3(c) 展示了前景类星体横向和径向 $\text{Mg II } \lambda 2796, 2803$ 吸收线的等值宽度的分布, 其清楚地表明, 如果前景类星体径向方向的吸收线属于迷你型宽吸收线, 则其吸收线强度显著大于横向方向的吸收线 (等值宽度偏差大于 2.5σ 置信水平); 如果前景类星体径向方向的吸收线属于窄吸收线, 则其吸收线强度与横向方向的吸收线类似 (等值宽度偏差小于 2σ 置信水平). 结合图 3 和吸收线的光谱图, 如果前景类星体

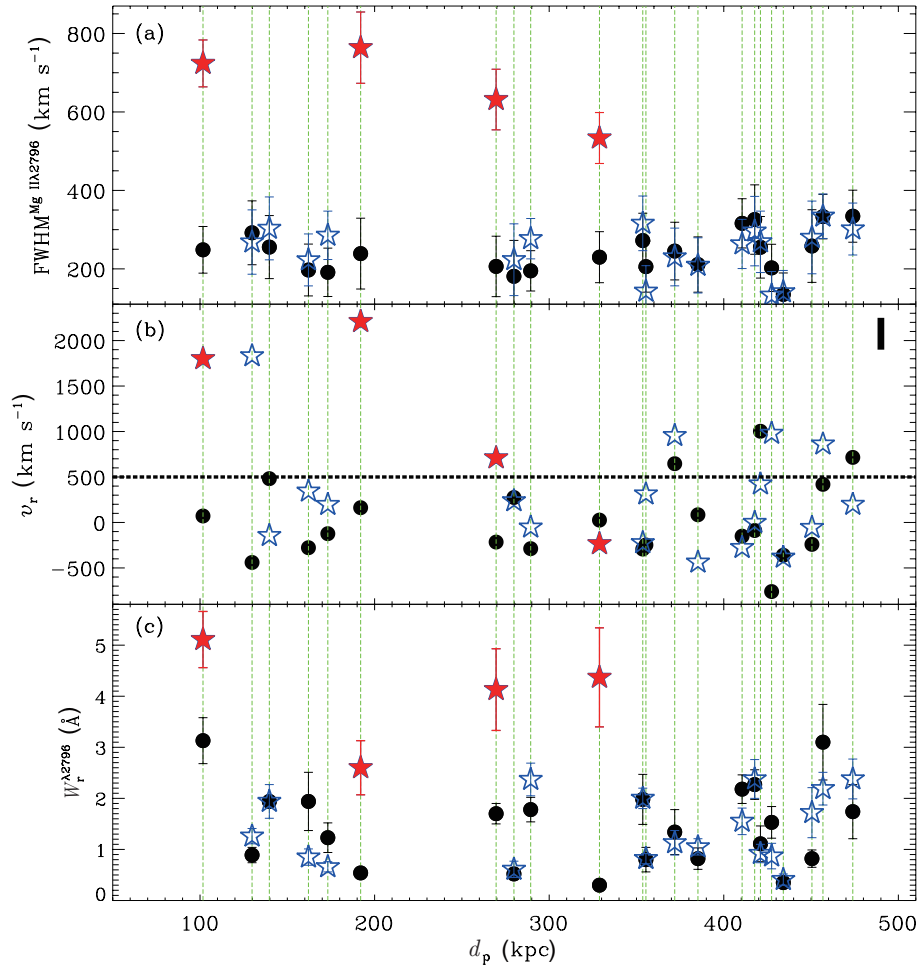


图 3 (网络版彩图) 黑色圆点代表横向方向的吸收线, 蓝色空心或红色实心五角星代表径向方向的吸收线, 其中红色五角星表明径向方向的吸收线为迷你型宽吸收线. (a) 吸收线半峰全宽 ($\text{FWHM}_{\text{Mg II}\lambda 2796}$) 与类星体对的投影距离的关系. (b) 吸收线相对前景类星体的视向速度与类星体对在前景类星体红移处的投影距离的关系, 右上角的短直线代表视线方向的典型误差 $\sim 350 \text{ km s}^{-1}$ [7], 水平虚线标注了视向速度为 500 km s^{-1} 的位置. (c) $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ 吸收强度的分布

Figure 3 (Color online) Black points represent the absorption lines along the transverse direction, and blue unfilled or red filled stars represent the absorption lines along radial direction, where red symbols are for the mini-BALs. (a) The $\text{FWHM}_{\text{Mg II}\lambda 2796}$ of absorption lines versus the projected distances of quasar pairs. (b) Relationship between the projected distances of quasar pairs and the velocities of absorption lines along sightlines relative to foreground quasars. The short thick line on the top right corner is the typical error $\sim 350 \text{ km s}^{-1}$ [7] of the velocities of absorption lines along sightlines. The horizontal dash-line labels the position of $v_r = 500 \text{ km s}^{-1}$. (c) The distributions of the $\text{Mg II}\lambda 2796, 2803$ absorption lines.

在径向和横向方向的吸收线都属于窄吸收线以及径向方向吸收线视向速度小于 500 km s^{-1} 的情况下 (无论径向方向吸收线起源于何处), 则两个方向的吸收线具有类似的宽度、强度以及视向速度, 这表明它们可能具有类似的速度结构, 同时也表明了视向速度小于 500 km s^{-1} 的径向方向窄吸收线, 很可能主要由类星体宿主星系以及宿主星系晕中的吸收介质主导 [2,5,40], 即很可能与横向方向的吸收线具有相同的起源. 但是需要注意的是, 如果需要更确切地比较吸收线的速度

结构, 必须获得高分辨率的光谱, 在本文中利用 SDSS 的光谱, 无法更进一步比较窄吸收线的速度结构.

综合以上分析, 若类星体径向方向和横向方向的吸收线都起源于类星体宿主星系或者宿主星系晕, 其都很可能具有相似的强度、宽度和视向速度. 若径向方向吸收起源于类星体外流, 则其吸收线强度、宽度和视向速度都有较高概率不同于横向方向的吸收线.

4 结论

本文利用斯隆数字巡天类星体光谱数据, 一共获得了 22 对在前景类星体的横向方向和径向方向都探测到成协的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线的类星体对. 统计研究发现, 类星体对在前景类星体处的投影距离都大于 100 kpc, 横向方向的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线均为窄吸收线, 并且前景类星体均属于 I 型类星体, 因此, 前景类星体横向方向的吸收线很可能由前景类星体宿主星系晕内吸收介质主导.

在前景类星体径向方向, 其中 4 个前景类星体探测到的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线属于迷你型宽吸收线, 其余 18 个前景类星体探测到的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线都属于窄吸收线. 相对前景类星体的视向速度小于 500 km s^{-1} 的径向方向的窄吸收线, 其很可能是由类星体宿主星系和

宿主星系晕吸收主导, 因此, 这些窄吸收线的强度、宽度和相对类星体的视向速度都与横向方向吸收线类似. 相对前景类星体的视向速度大于 500 km s^{-1} 的径向方向的吸收线, 特别是吸收线的宽度 $\text{FWHM} > 500 \text{ km s}^{-1}$ 的情况下, 其很可能由前景类星体外流吸收主导, 因此, 吸收线的强度、宽度和相对类星体的视向速度在较高概率上不同于横向方向的吸收线.

综合分析, 如果前景类星体横向方向的吸收线和径向方向的吸收线都起源于类星体宿主星系和宿主星系晕, 那么两个方向的吸收线具有相似的强度、宽度和相对类星体的视向速度; 如果径向方向的吸收线由类星体外流吸收主导, 而横向方向的吸收线由宿主星系和宿主星系晕吸收主导, 那么两个方向的吸收线在较高概率上具有不同的强度、宽度和相对类星体的视向速度.

参考文献

- 1 York D G, Adelman J, Anderson Jr J E, et al. The Sloan digital sky survey: Technical summary. *Astron J*, 2000, 120: 1579–1587
- 2 Chen Z F, Huang W R, Pang T T, et al. The associated absorption features in quasar spectra of the Sloan digital sky survey. I. Mg II absorption doublets. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 235: 11
- 3 Chen Z F, Qin H C, Gui R J, et al. The variable Mg II narrow absorption line systems. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 250: 3
- 4 Chen Z F, Gu Q S, Zhou L, et al. Narrow C IV absorption doublets on quasar spectra of the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 462: 2980–2989
- 5 Nestor D, Hamann F, Rodríguez Hidalgo P. The quasar-frame velocity distribution of narrow C IV absorbers. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 386: 2055–2064
- 6 Vanden Berk D, Khare P, York D G, et al. Average properties of a large sample of $z_{\text{abs}} \sim z_{\text{em}}$ associated Mg II absorption line systems. *Astrophys J*, 2008, 679: 239–259
- 7 Shen Y, Ménard B. On the link between associated Mg II absorbers and star formation in quasar hosts. *Astrophys J*, 2012, 748: 131
- 8 Rodríguez Hidalgo P, Khatri A M, Hall P B, et al. Survey of extremely high-velocity outflows in Sloan digital sky survey quasars. *Astrophys J*, 2020, 896: 151
- 9 Chen C, Hamann F, Ma B, et al. Absorption-line environments of high-redshift BOSS quasars. *Astrophys J*, 2020, 902: 57
- 10 He Z, Wang T, Zhou H, et al. Variation of ionizing continuum: The main driver of broad absorption line variability. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 229: 22
- 11 He Z, Liu G, Wang T, et al. Evidence for quasar fast outflows being accelerated at the scale of tens of parsecs. *Sci Adv*, 2022, 8: 3291
- 12 Yi W, Brandt W N, Hall P B, et al. Variability of low-ionization broad absorption-line quasars based on multi-epoch spectra from the Sloan digital sky survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 242: 28
- 13 Wethers C F, Kotilainen J, Schramm M, et al. Star formation in luminous LoBAL quasars at $2.0 < z < 2.5$. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 498: 1469–1479
- 14 Lu W J, Lin Y R. Narrow absorption lines complex I: One form of broad absorption line. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 474: 3397–3402
- 15 Lu W J, Lin Y R. Velocity shift of Mg II and Al III broad absorption lines in quasar SDSS J134444.33+315007.6. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2020, 499: L58–L61
- 16 Nair A, Vivek M. Fraction of broad absorption line quasars in different radio morphologies. *Mon Not R Astron Soc*, 2022, 511: 4946–4962
- 17 Chen Z, He Z, Ho L C, et al. Evidence for the connection between star formation rate and the evolutionary phases of quasars. *Nat Astron*, 2022, 6: 339–343

- 18 Hennawi J F, Prochaska J X, Cantalupo S, et al. Quasar quartet embedded in giant nebula reveals rare massive structure in distant universe. [Science](#), 2015, 348: 779–783
- 19 Lujan Niemeyer M, Komatsu E, Byrohl C, et al. Surface brightness profile of Lyman- α halos out to 320 kpc in HETDEX. [Astrophys J](#), 2022, 929: 90
- 20 Sandrinelli A, Falomo R, Treves A, et al. The circum-galactic medium of quasars: Transverse and line-of-sight absorptions. [Astrophys Space Sci](#), 2020, 365: 176
- 21 Farina E P, Falomo R, Scarpa R, et al. The extent of the Mg II absorbing circumgalactic medium of quasars. [Mon Not R Astron Soc](#), 2014, 441: 886–899
- 22 Findlay J R, Prochaska J X, Hennawi J F, et al. Quasars probing quasars. X. The quasar pair spectral database. [Astrophys J Suppl Ser](#), 2018, 236: 44
- 23 Hennawi J F, Prochaska J X, Burles S, et al. Quasars probing quasars. I. Optically thick absorbers near luminous quasars. [Astrophys J](#), 2006, 651: 61–83
- 24 Steidel C C, Erb D K, Shapley A E, et al. The structure and kinematics of the circumgalactic medium from far-ultraviolet spectra of $z \approx 2 - 3$ galaxies. [Astrophys J](#), 2010, 717: 289–322
- 25 Prochaska J X, Hennawi J F. Quasars probing quasars. III. New clues to feedback, quenching, and the physics of massive galaxy formation. [Astrophys J](#), 2009, 690: 1558–1584
- 26 Kacprzak G G, Churchill C W, Murphy M T, et al. Probing the circumgalactic medium of active galactic nuclei with background quasars. [Mon Not R Astron Soc](#), 2015, 446: 2861–2869
- 27 Johnson S D, Chen H W, Mulchaey J S. On the origin of excess cool gas in quasar host haloes. [Mon Not R Astron Soc](#), 2015, 452: 2553–2565
- 28 Landoni M, Falomo R, Treves A, et al. Circumgalactic medium of quasars: C IV absorption systems. [Mon Not R Astron Soc](#), 2016, 457: 267–271
- 29 Rahmani H, Péroux C, Schroetter I, et al. A Lyman limit system associated with galactic winds. [Mon Not R Astron Soc](#), 2018, 480: 5046–5059
- 30 Wu Y, Cai Z, Neeleman M, et al. A [C II] 158 μm emitter associated with an O I absorber at the end of the reionization epoch. [Nat Astron](#), 2021, 5: 1110–1117
- 31 Lyke B W, Higley A N, McLane J N, et al. The Sloan digital sky survey quasar catalog: Sixteenth data release. [Astrophys J Suppl Ser](#), 2020, 250: 8
- 32 Nestor D B, Turnshek D A, Rao S M. Mg II absorption systems in sloan digital sky survey QSO spectra. [Astrophys J](#), 2005, 628: 637–654
- 33 Quider A M, Nestor D B, Turnshek D A, et al. The pittsburgh sloan digital sky survey Mg II quasar absorption-line survey catalog. [Astron J](#), 2011, 141: 137
- 34 Hennawi J F, Prochaska J X. Quasars probing quasars. II. The anisotropic clustering of optically thick absorbers around quasars. [Astrophys J](#), 2007, 655: 735–748
- 35 Jalan P, Chand H, Srianand R. Probing the environment of high- z quasars using the proximity effect in projected quasar pairs. [Astrophys J](#), 2019, 884: 151
- 36 Murray N, Chiang J, Grossman S A, et al. Accretion disk winds from active galactic nuclei. [Astrophys J](#), 1995, 451: 498
- 37 Elvis M. A structure for quasars. [Astrophys J](#), 2000, 545: 63–76
- 38 Chen Z F, Gu M, He Z, et al. Detections of inflowing gas from narrow absorption lines at parsec scales. [Astron Astrophys](#), 2022, 659: A103
- 39 Chen C, Hamann F, Ma B, et al. A catalog of high-velocity C IV mini-broad absorption lines in the VLT-UVES and Keck-HIRES archives. [Astrophys J](#), 2021, 907: 84
- 40 Wild V, Kauffmann G, White S, et al. Narrow associated quasi-stellar object absorbers: Clustering, outflows and the line-of-sight proximity effect. [Mon Not R Astron Soc](#), 2008, 388: 227–241

Mg⁺ absorptions on the radial and transverse directions of quasars

CHEN ZheGeng, CHEN ZhiFu*, WANG ZhiWen & PANG TingTing

School of Mathematics and Physics, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China

Two quasars close in the celestial sphere but with evidently distinct systemic redshifts constitute a quasar pair. Using the quasar spectra gathered by the Sloan Digital Sky Survey, this research obtained 22 quasar pairs, where the associated Mg II λ 2796, 2803 absorption lines at a close systemic redshift are identified along the transverse direction toward the background quasar and the radial direction toward the foreground quasar for each of the pairs. In the transverse direction, we observe that the Mg II λ 2796, 2803 detected would be dominated by the halos of foreground quasars, while the Mg II λ 2796, 2803 detected in the radial direction can be originated in quasar outflows, host galaxies, and halos. If the absorption lines originated in quasar host galaxies or halos, the relative velocities along the sightline and the strengths and widths of the absorption lines detected in the radial direction are consistent with those detected in the transverse direction. However, all the relative velocities along the sightline and the strengths and widths of the outflow absorption lines detected in the radial directions are likely different from those detected in the transverse directions.

quasars, absorption lines, transverse direction, radial direction

PACS: 95.85.-e, 95.80.+p, 98.54.-h, 98.58.-w

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0237](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0237)