

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.04.03

# 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 的吸收线研究

黄红艳<sup>1</sup>, 谢照华<sup>1</sup>, 彭 瑞<sup>1</sup>, 杜雷鸣<sup>1</sup>,  
谭 灿<sup>1</sup>, 刘小鹏<sup>1</sup>, 顾敏峰<sup>2</sup>

(1. 云南师范大学 物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500; 2. 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 基于 SDSS (Sloan Digital Sky Survey, 斯隆数字巡天) DR15 (The Data Release 15, 第 15 期数据) 的光谱, 分析引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 两个像 (A 和 B 像之间的角距离约为  $3.73''$ ) 的光谱。通过 C IV  $\lambda\lambda 1548 \text{ \AA}$ ,  $1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$  吸收双线, 在 A、B 两个像的光谱上证实得到两个 C IV 吸收线系统和两个 Mg II 吸收线系统。在引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A、B 两个像的光谱上 C IV 吸收线系统没有明显的差异 (吸收线等值宽度差异的置信水平  $N_{\Delta W} < 3$ ), 吸收体在视线方向上的横向尺度  $D_{\text{tra}} \approx 127.5 \text{ pc}$ , 相对类星体的速度  $\beta_s < 0.06$ , 两视线上的吸收体可能是来源于类星体同一区域的本征吸收体。但是, 两个 Mg II 吸收线系统在两个像光谱上存在明显的差异 ( $N_{\Delta W} > 3$ ): A 像光谱上只存在红移为  $0.8311 \pm 0.0003$  的 Mg II 吸收线系统, 吸收体的  $D_{\text{tra}} \approx 21.319 \text{ kpc}$ ; 而 B 像光谱上只存在系统红移为  $0.6711 \pm 0.0061$  的 Mg II 吸收线, 吸收体的  $D_{\text{tra}} \approx 26.280 \text{ kpc}$ 。

**关键词:** 引力透镜类星体; 吸收线; 认证; 光谱

**中图分类号:** P145.2 **文献标识码:** A

## 1 引 言

引力透镜类星体是指有引力透镜成像的类星体, 从类星体到观测者的视线方向上, 光线经过一个大质量的前景天体 (透镜天体) 时被引力偏折, 使得观测者看到两个或多个目标源的虚像<sup>[1]</sup>。根据背景光源成像扭曲程度的大小, 引力透镜可分为弱引力透镜效应和强引力透镜效应<sup>[2]</sup>, 而类星体被前景引力透镜扭曲后, 可形成“多图像类星体” (Multiply-imaged quasars), 或者“爱因斯坦环” (Einstein rings)<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-02-20

资助项目: 国家自然科学基金 (U1431123, 10978019); 云南省科技计划项目 (2019FB009)

通讯作者: 谢照华, zhxie007@126.com

类星体的光线穿过传播途中的星际物质或星系际物质而到达观测者, 部分波长的能量被其原子吸收, 从而在光谱上留下凹槽形状的吸收谱线。根据吸收线与类星体的关系, 吸收线可分为两类: 一类是本征吸收线, 由气体直接形成, 该气体与类星体或类星体的寄主星系有关; 另一类是中介吸收线, 由在类星体与观测者之间的星系或星系介质产生。本征吸收线根据吸收线的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 可分为三种类型,  $FWHM \geq 2000$  km/s 的称为宽吸收线 (broad absorption lines, BALs)<sup>[4, 5]</sup>,  $500 < FWHM < 2000$  km/s 的称为微型宽吸收线 (mini-broad absorption lines, mini-BALs)<sup>[6, 7]</sup>,  $FWHM \leq 500$  km/s 的称为窄吸收线 (narrow absorption lines, NALs)<sup>[8, 9]</sup>。

利用引力透镜类星体多个像光谱上的吸收线, 可研究吸收物质的内部结构、大小<sup>[10-13]</sup>和动力学等<sup>[14, 15]</sup>。Koyamada 等人<sup>[13]</sup>利用具有两个像的 13 个引力透镜类星体光谱中证认得到 63 条高电离吸收线和 99 条低电离吸收线, 用于研究环星系介质 (circum-galactic medium, CGM) 的内部结构。他们求出同一条吸收线只存在于一个透镜像中的比例, 低电离吸收线的比例 (约 16%) 大于高电离吸收线的比例 (约 2%); 并估算了吸收体在两个视线上的横向尺度  $D_{\text{tra}}$  的范围, 为 0.1~10 kpc。他们根据高/低电离吸收线在两个视线方向上的差异随  $D_{\text{tra}}$  的变化, 建立了用于研究 CGM 内部结构的椭圆函数模型, 给出了 CGM 尺度的下限为 500 kpc。Misawa 等人<sup>[14]</sup>对观测引力透镜类星体 SDSS J1029+2623 两个像 (角距离 22.5'') 的光谱进行三次分析, 发现在两个视线上没有相同红移的窄吸收线系统, 这意味着窄吸收线对应的吸收体横向尺度小于两个视线上的横向尺度  $D_{\text{tra}}$ 。2018 年, 他们<sup>[15]</sup>对引力透镜类星体 SDSS J1001+5027 的两个成像 (角距离 2.86'')<sup>[16, 17]</sup>进行两个时期的观测, 发现窄吸收线系统中红移为 0.8716 的 Mg II 吸收系统表现出较为明显的变化,  $D_{\text{tra}} \approx 7$  kpc, 他们认为这可能由中介吸收体的运动所造成。此外, 他们还利用引力透镜类星体 SDSS J1001+5027 光谱中的 C IV 宽吸收线研究外流气体, 发现两个视线方向上的外流气体云相隔约 330 pc, 两个时期的光谱上 C IV 宽吸收线有明显的变化, 他们认为这可能是由气体运动造成的, 气体围绕类星体的动力学速度不小于 18 000 km/s。由此可知, 引力透镜类星体不同像光谱上的吸收线差异, 有利于研究吸收体的结构、性质和大小。

本文利用 C IV  $\lambda\lambda 1548 \text{ \AA}$ ,  $1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$  吸收双线系统拟合引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 光谱的窄吸收线系统, 比较、分析吸收线在两个不同的成像光谱中吸收线的红移及等值宽度的差异。本文第 2 章介绍引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 的基本信息, 第 3 章介绍证认引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 光谱的方法和光谱分析讨论的结果, 第 4 章进行简单的总结。本文使用的宇宙学常数分别是  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_k = 0$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$  和  $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

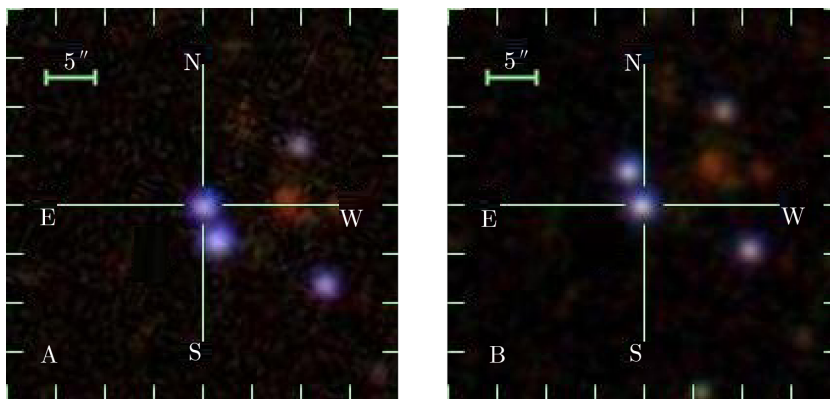
## 2 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112

最先发现引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 是在 2003 年, Inada 等人<sup>[18, 19]</sup>从 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR5 (The Data Release 5, 第五期数据) 中得到初步的候选

源 SDSS J1004+4112, 并申请凯克望远镜 (the Keck I telescope)<sup>[20]</sup> 和斯巴鲁望远镜 (the Subaru telescope of the National Astronomical Observatory)<sup>[21]</sup>, 进行更深入观测, 以确定数据的可靠性。他们发现强引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 具有 4 个成像, 较大的 2 个像的分离角为  $14.62''$ , 较小的 2 个像的分离角为  $3.73''$ , 起透镜作用的是一个星系群, 其中以  $z_l=0.6799\pm 0.0001$  为中心, 附近有 2 个较暗的星系, 红移为  $z_l=0.6751\pm 0.0001$ 。2005 年, Inada 等人<sup>[22]</sup> 申请哈勃空间望远镜 (the Hubble Space Telescope) 观测, 发现引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 其实具有 5 个成像, 第 5 个像与透镜天体之间的角距离只有  $0.2''$ , 先前的望远镜分辨率较低, 并且被透镜星系掩盖, 所以第 5 个像未能识别出来。

引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 被收录于 SQLS (SDSS Quasar Lens Search)<sup>[23, 24]</sup>。SQLS 是一个基于 SDSS 数据调查引力透镜类星体的项目。SQLS 基于 SDSS 的类星体星表得到引力透镜类星体的候选源, 再由夏威夷大学 2.2 m 望远镜 (the University of Hawaii 2.2 m Telescope, 简称 UH88) 对类星体的前景星系进行检测<sup>[25, 26]</sup>, 并确定出引力透镜类星体候选者。现已发布了 62 个引力透镜类星体, 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 是其中之一。此外, 该源还被 CfA-Arizona Space Telescope LEns Survey (CASTLES Survey)<sup>[27]</sup> 和 Gravitationally Lensed Quasar Database (GLQ Database)<sup>[28]</sup> 收录, 特别是 GLQ Database, Lemon 等人<sup>[29-31]</sup> 调查了各大巡天望远镜, 将已知的引力透镜类星体和候选源重新用 Gaia 的观测数据确定出来 218 个引力透镜类星体, 后续还会持续更新。

引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 具有 5 个分离的透镜成像, 其中 2 个像之间 (A 和 B) 的角距离为  $3.73''$ , 它在 SDSS 中的观测图像, 如图 1 所示。引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 的红移  $z_{em} = 1.734\pm 0.002$ <sup>[18, 19]</sup>, 因为起透镜作用的是一个星系群, 后来的研究中, 透镜的红移都取 Inada 等人给出的星系群中起透镜作用的红移值 ( $z_l = 0.68$ )<sup>[24, 27, 28]</sup>。在 SDSS 中, A, B 2 个成像光谱的观测日期 (MJD) 分别为 52 672, 67 389, 2 个像的赤经 (RA)、赤纬 (Dec) 分别是  $10\text{h } 04\text{min } 34.92\text{s}, +41^\circ 12' 42.79''$  和  $10\text{h } 04\text{min } 34.80\text{s}, +41^\circ 12' 39.26''$ 。



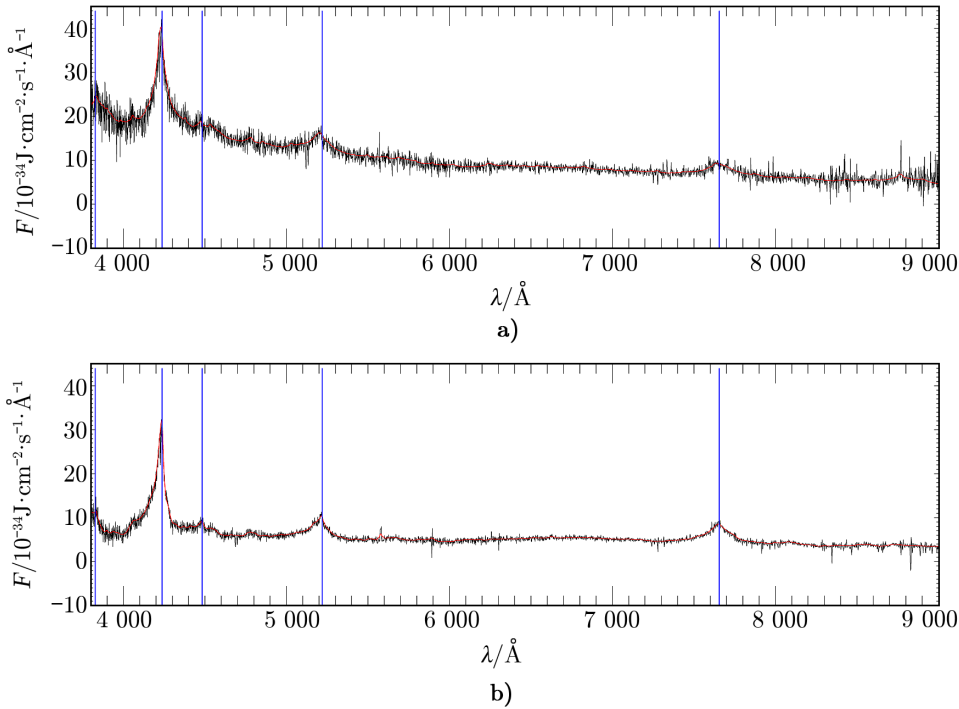
注: A 表示光谱 spec-1217-52672-0065 的测光图, 图像中心位置为  $10\text{h } 04\text{min } 34.92\text{s}, +41^\circ 12' 42.79''$ ; B 表示光谱 spec-8302-57389-0489 的测光图, 图像中心位置为  $10\text{h } 04\text{min } 34.80\text{s}, +41^\circ 12' 39.26''$ 。

图 1 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 的 SDSS 观测图像

### 3 光谱分析

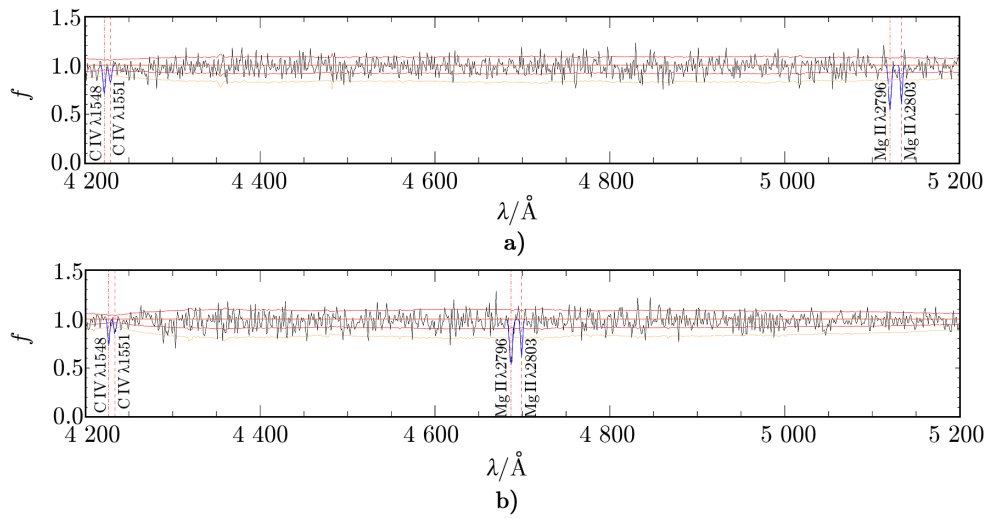
引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A, B 2 个像的光谱来自 SDSS DR15 (The Data Release 15)<sup>[32]</sup>, 光谱的信噪比分别是 11.00 和 10.69, 红移分别为  $1.738 \pm 0.00041$  和  $1.731 \pm 0.00018$ 。由于 A 像的光谱 (MJD = 52672) 是 SDSS 早期的数据, 早期的光谱红移测量, 因为 C IV 发射线拟合有 0.002 的偏差<sup>[33, 34]</sup>, 所以 A, B 像的光谱红移统一取 Inada 等人<sup>[18, 19]</sup> 测量所得的红移  $z_{\text{em}} = 1.734 \pm 0.002$ 。

伪连续谱是除了吸收线以外的原始光谱曲线拟合结果, 所以我们在拟合吸收线前, 先对光谱进行伪连续谱的拟合。在观测坐标系中, 我们采用迭代三次样条函数的方式拟合伪连续谱, 为了减少吸收线和剩余天光线的影响, 在拟合中排除掉大于  $3\sigma$  的数据点<sup>[35-37]</sup>。光谱的伪连续谱拟合结果如图 2 所示。对光谱流量进行归一化后, 用高斯拟合 C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803 \text{ \AA}$  窄吸收双线系统<sup>[17, 38]</sup>, 拟合结果如图 3 所示。我们在观测坐标系下拟合吸收线, 而后将拟合数据结果转换至静止坐标系下, 数据结果如表 1 所示。



注: a) 表示 A 像光谱 spec-1217-52672-0065 的伪连续谱拟合图; b) 表示 B 像光谱 spec-8302-57389-0489 的伪连续谱拟合图。黑色线表示光谱的谱线; 红色的线表示伪连续谱; 蓝色竖直线表示发射线位置, 从左到右的发射线分别为: SiIV  $\lambda 1400 \text{ \AA}$ , CIV  $\lambda 1550 \text{ \AA}$ , HeII  $\lambda 1640 \text{ \AA}$ , CIII  $\lambda 1908 \text{ \AA}$  和 MgII  $\lambda 2800 \text{ \AA}$ 。

图 2 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 光谱的伪连续谱拟合图



注: a) 为 A 像光谱 spec-1217-52672-0065 的吸收线拟合图; b) 为 B 像光谱 spec-8302-57389-0489 的吸收线拟合图。f 为归一化后的流量; 黑色的线是归一化后的光谱; 红色实线是  $\pm\sigma$  误差线; 橙色实线是  $-2\sigma$  误差线; 红色的竖直虚线是吸收线的线心位置, 精确位置已在表 1 列出; 蓝色的线是拟合的高斯轮廓。

图 3 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 的吸收线拟合结果

表 1 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 吸收线的认证结果

吸收元素	A 像 MJD=52 672				$N_{\Delta W}$
	$z_{\text{abs1}}$	线心位置 /Å	$N_{a1}$	$W_{r1}$ /Å	
C IV $\lambda 1548$	$1.726\ 9 \pm 0.000\ 5$	4 221.71	5.28	$0.37 \pm 0.05$	
C IV $\lambda 1551$	$1.726\ 9 \pm 0.000\ 5$	4 228.75	3.22	$0.24 \pm 0.05$	
MgII $\lambda 2796$	$0.676\ 1 \pm 0.006\ 1$	—	—	—	
MgII $\lambda 2803$	$0.676\ 1 \pm 0.000\ 3$	—	—	—	
MgII $\lambda 2796$	$0.831\ 1 \pm 0.000\ 3$	5 120.31	5.87	$0.96 \pm 0.12$	
MgII $\lambda 2803$	$0.831\ 1 \pm 0.000\ 3$	5 133.37	5.17	$0.63 \pm 0.12$	
吸收元素	B 像 MJD=57 389				$N_{\Delta W}$
	$z_{\text{abs2}}$	线心位置 /Å	$N_{a2}$	$W_{r1}$ /Å	
C IV $\lambda 1548$	$1.730\ 2 \pm 0.000\ 5$	4 226.86	6.39	$0.27 \pm 0.03$	1.47
C IV $\lambda 1551$	$1.730\ 2 \pm 0.000\ 5$	4 233.99	3.12	$0.18 \pm 0.04$	0.87
MgII $\lambda 2796$	$0.676\ 1 \pm 0.006\ 1$	4 686.94	4.89	$1.18 \pm 0.17$	6.83
MgII $\lambda 2803$	$0.676\ 1 \pm 0.000\ 3$	4 698.94	4.08	$0.66 \pm 0.14$	4.83
MgII $\lambda 2796$	$0.831\ 1 \pm 0.000\ 3$	—	—	—	7.68
MgII $\lambda 2803$	$0.831\ 1 \pm 0.000\ 3$	—	—	—	5.05

注:  $z_{\text{abs}}$  表示吸收系统红移;  $N_a$  表示吸收线的置信水平 (信噪比);  $W_r$  表示吸收线在静止坐标系下的等值宽度;  $N_{\Delta W}$  表示等值宽度差异的置信水平; “—” 表示 “无” 或 “不显著”。

### 3.1 吸收线证认的基本方法

我们用高斯函数拟合 C IV  $\lambda\lambda 1548 \text{ \AA}$ ,  $1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$  吸收系统<sup>[38, 39]</sup>, 选择证认吸收线深度的置信水平  $N_a > 2$  的吸收线。  $N_a$  反映吸收线证认的可信度,  $N_a$  越大, 吸收线的可信度越高,  $N_a$  的表达式如下:

$$N_a = \frac{S_a}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\frac{\sigma_F^i}{F_c^i})^2}{n}}} \quad , \quad (1)$$

其中,  $F_c$  是伪连续谱的流量,  $\sigma_F$  是归一化前流量的不确定度,  $S_a$  是吸收槽的深度 (即归一化后吸收线的最低点与主成份流量为 1 之间的差值),  $i$  代表数据点序号,  $n$  代表吸收特征附近超过  $\pm 3$  个特征高斯宽度的像素点 ( $\pm 3\sigma$ ) 的数目。

用高斯函数对吸收线的轮廓进行拟合, 计算出静止坐标系下吸收线的等值宽度  $W_r$ , 等值宽度的不确定度  $\sigma_r$  的定义<sup>[38]</sup>:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sum_i p^2 (\lambda_i - \lambda_0) \sigma_f^i}}{(1+z) \cdot \sum_i p^2 (\lambda_i - \lambda_0)} \Delta\lambda \quad , \quad (2)$$

其中,  $\lambda_i$  为数据点的波长,  $p$  为线心  $\lambda_0$  处的高斯轮廓,  $\sigma_f$  为归一化流量的不确定度,  $\Delta\lambda$  为相邻点的间隔,  $z$  为红移。

两个不同成像光谱中吸收线等值宽度差异值的置信水平  $N_{\Delta W} = \Delta W / \sigma_{\Delta W}$ , 其中  $\Delta W = |W_{r2} - W_{r1}|$  为等值宽度差异值, 差异值的不确定度  $\sigma_{\Delta W} = \sqrt{\sigma_{r2}^2 + \sigma_{r1}^2}$ 。  $W_{r1}$ ,  $W_{r2}$  是两个不同成像光谱中吸收线在静止坐标系的等值宽度值,  $\sigma_{r1}$ ,  $\sigma_{r2}$  分别是其等值宽度的不确定度。当  $N_{\Delta W} > 3$  时<sup>[38]</sup>, 两个像光谱的吸收线差异较明显。

Ly $\alpha$  吸收线大量存在于 Lyman 线的蓝端, 除了 Ly $\alpha$  吸收线之外的其他谱线难以证认, 因此不予证认; 此外, 在 SDSS 光谱中  $5\ 580 \text{ \AA}$  和  $6\ 700 \text{ \AA}$  红端的 OH band 区域存在很强的天光线残差, 也不予证认。我们只证认 Mg II 和 C IV 窄吸收线系统, 其他窄吸收线系统或宽吸收线都不予证认。我们给出引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 光谱的吸收线证认结果, 如表 1 所示。

吸收线对应的吸收体相对类星体的速度  $\nu_s$  表示为<sup>[38]</sup>:  $\beta_s = \frac{\nu_s}{c} = \frac{(1+z_{em})^2 - (1+z_{abs})^2}{(1+z_{em})^2 + (1+z_{abs})^2}$ , 其中  $z_{em}$  表示类星体红移,  $z_{abs}$  表示吸收体红移,  $c$  表示光速。Chen 等人<sup>[38, 39]</sup> 在 3524 个类星体中证认得到 3580 个 C IV 吸收系统和 1809 个 Mg II 吸收系统, 统计  $\beta_s$  的范围, 发现大多数 C IV 吸收体  $\beta_s < 0.06$ <sup>[38]</sup>, 而 Mg II 吸收体主要集中在  $\beta_s < 0.02$  区域<sup>[39]</sup>, 他们认为吸收体离类星体较近, 可能是来源于类星体相关的本征吸收体。因此, 后来的研究用 Chen 等人的统计结果作为判据, C IV 吸收体的  $\beta_s > 0.06$  或 Mg II 吸收体的  $\beta_s > 0.02$  时, 吸收体是与类星体无关的中介吸收体。而吸收体相对透镜天体的速度表示为:  $\beta_l = \frac{v_l}{c} = \frac{(1+z_l)^2 - (1+z_{abs})^2}{(1+z_l)^2 + (1+z_{abs})^2}$ , 其中  $z_l$  表示透镜天体的红移。相同地, 当 C IV 吸收体  $|\beta_l| < 0.06$  或者 Mg II 吸收体  $|\beta_l| < 0.02$  时, 吸收体距离透镜天体较近, 可能是透镜天体的本征吸收体, 否则是与透镜天体无关的吸收体。

对于吸收体在视线方向上横跨的尺度  $D_{\text{tra}}$ , 我们采用 Koyamada 等人<sup>[13]</sup>的公式, 当  $z_1 < z_{\text{abs}}$  时,  $D_{\text{tra}} = \theta \frac{D_{\text{ol}} D_{\text{aq}}}{D_{\text{lq}}} \frac{1+z_1}{1+z_{\text{em}}}$ ; 当  $z_1 > z_{\text{abs}}$  时, 则  $D_{\text{tra}} = \theta D_{\text{oa}}$ , 其中角距离  $\theta$  为  $3.73''$ ,  $D$  表示角直径距离, 下标 o, a, l 和 q 分别表示观测者、吸收体、透镜天体和类星体。数据结果如表 2 所示。

表 2 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 吸收线的相关数据

A 像 MJD=52 672				B 像 MJD=57 389			
$z_{\text{abs1}}$	$\beta_s$	$ \beta_l $	$D_{\text{tra1}}$ /kpc	$z_{\text{abs2}}$	$\beta_s$	$ \beta_l $	$D_{\text{tra2}}$ /kpc
1.726 9±0.000 5	0.003	0.450	0.166	1.730 2±0.000 5	0.001	0.451	0.089
0.676 1±0.006 1	—	—	—	0.676 1±0.006 1	0.454	0.002	26.280
0.831 1±0.000 3	0.381	0.086	21.319	0.831 1±0.000 3	—	—	—

注:  $z_{\text{abs}}$  表示吸收线的红移,  $\beta_s$  表示吸收体相对类星体的速度,  $|\beta_l|$  表示吸收体相对透镜天体的速度,  $D_{\text{tra}}$  表示吸收体在视线方向上的横向尺度, “—”表示“无”或“不显著”。

### 3.2 吸收线的证认结果

引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 两个像光谱 MJD 分别是 52 672 (A 像) 和 57 389 (B 像), 类星体红移为  $z_{\text{em}} = 1.734 \pm 0.002$ 。我们用 C IV  $\lambda\lambda 1548 \text{ \AA}$ ,  $1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$  吸收双线系统在两个像的光谱中证认出了 2 个 C IV 吸收线系统和 2 个 Mg II 吸收线系统。对于 C IV 吸收线系统, 对应的吸收体相对类星体的速度  $\beta_s < 0.06$ , C IV 吸收线系统属于本征吸收线。C IV 吸收体比较靠近类星体, 在 A, B 两个像的光谱上, 吸收线等值宽度差异  $N_{\Delta W} < 3$ , 红移值相差约 0.003 3, 吸收体在视线方向上横跨的尺度  $D_{\text{tra}} \approx 127.5 \text{ pc}$ 。

而对于 Mg II 吸收线系统,  $\beta_s > 0.02$ , 属于干预吸收线, 对应的吸收体偏离类星体较远。Mg II 吸收线的等值宽度在两个像的光谱上差异  $N_{\Delta W} > 3$ , 红移为  $0.676 1 \pm 0.006 1$  的 Mg II 吸收线系统在 A 像光谱上不显著, 吸收体的  $D_{\text{tra}}$  为 26.280 kpc; 而红移为  $0.831 1 \pm 0.000 3$  的 Mg II 吸收线系统在 B 像光谱上没有显示, 吸收体的  $D_{\text{tra}}$  为 21.319 kpc。红移为  $0.676 1 \pm 0.006 1$  的 Mg II 吸收体离透镜天体比较近, 吸收体相对透镜天体的速度  $|\beta_l| = 0.002 < 0.02$ ; 而 A 像上的 Mg II 吸收体的  $|\beta_l| > 0.02$ , 离透镜天体比较远。

### 3.3 吸收线差异的分析

2004 年, Oguri 等人<sup>[19]</sup>在引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A, B 两个像的光谱上简单证认而得到 3 个 Mg II 吸收线系统, A 像的光谱上证认得到红移为 0.833 和 1.022 两个吸收线系统, B 像的光谱上证认得到系统红移为 0.676, 吸收线在静止坐标下的等值宽度  $\gtrsim 0.5 \text{ \AA}$ , 但是没有分析吸收线差异和吸收线的来源, 也没有列出 C IV 吸收线的证认。本文在 A, B 两个像的光谱上证认 Mg II 和 C IV 吸收线系统, 并分析两个像光谱之间的吸收线差异, 以及吸收线可能的来源。我们在 A 像上没有证认得到红移为 1.022 的 Mg II 吸收线系统, 可能是因为该吸收系统比较弱, 容易受到光谱信噪比高低的影响。

引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A, B 两个像的视线方向上, 距离类星体越远, 视线上分得越开。对于 C IV 吸收系统, C IV 吸收体在视线方向上横跨的尺度  $D_{\text{tra}}$  约 127.5 pc。两个视线上吸收线等值宽度差异不明显 ( $N_{\Delta W} < 3$ ), 而吸收体红移相差约 0.0033, 与类星体红移误差 0.002 接近。所以, 我们认为引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A, B 两个像光谱上的 C IV 吸收线系统红移相近, 很可能来源于同一个吸收体, 两个视线方向上穿过的吸收体性质相同。此外, C IV 吸收体相对类星体的速度  $\beta_s < 0.06$ , 可能与类星体有关, 引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 A, B 两个像光谱上的 C IV 吸收体可能都来源于类星体的同一区域。

对于 Mg II 吸收线系统而言, Mg II 吸收体距离类星体较远 ( $\beta_s > 0.02$ ), A, B 两个像上 Mg II 吸收线的等值宽度存在明显的差异 ( $N_{\Delta W} > 3$ ), 两个 Mg II 吸收线系统的红移分别为  $0.8311 \pm 0.0003$  和  $0.6761 \pm 0.0061$ , 吸收体在视线方向上横跨的尺度  $D_{\text{tra}}$  分别为 21.319 和 26.280 kpc。红移为  $0.8311 \pm 0.0003$  的 Mg II 吸收线系统只在 A 像光谱上存在, 而红移为  $0.6761 \pm 0.0061$  的 Mg II 吸收线系统只在 B 像光谱上存在; 这可能是由于引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 两个视线方向上的 Mg II 吸收系统来源于不同的吸收体。在 B 像的光谱上, Mg II 吸收体相对透镜天体的速度  $|\beta_1| = 0.002 < 0.02$ , 距离透镜天体相对较近, 吸收体可能来源于透镜天体的本征吸收体。而 A 像上的 Mg II 吸收体的  $|\beta_1| = 0.086 > 0.02$ , 距离透镜天体相对较远, 可能来源于其他星系介质或星系际介质。

关于吸收体的横向尺度, 前人的研究<sup>[10-14]</sup>认为, 在引力透镜两个像的视线方向上, 同一个吸收线系统只存在于一个透镜像中, 可能是对应的吸收体较小, 所以只有一个视线穿过了吸收体, 而另一个视线没有穿过吸收体。Misawa 等人<sup>[14]</sup>分析引力透镜类星体 SDSS J1029+2623 两个像 (角距离 22.5") 的光谱, 发现窄吸收线系统在两个视线上没有相同的红移, 这说明窄吸收线对应的吸收体横向尺度小于在视线上的横向尺度  $D_{\text{tra}}$ 。但是, 如果在两个像的光谱中的吸收线红移相同, 这说明吸收体的横向尺度可能大于在视线方向上的横向尺度  $D_{\text{tra}}$ 。我们的结果与前人的研究相似。基于在引力透镜类星体 SDSS J1004+4112 视线方向上吸收体的分布, Mg II 吸收线在 A, B 两个像上没有相同的红移, 所以 Mg II 吸收体的横向尺度可能小于  $D_{\text{tra}}$ , 而 C IV 吸收线在 A, B 两个像上的红移相同, C IV 吸收体的横向尺度可能大于  $D_{\text{tra}}$  (约 127.5 pc)。

## 4 结论

在引力透镜 SQLS 中得到呈现四个像的引力透镜类星体 SDSS J1004+4112, 我们在 SDSS DR15 中下载了其中两个成像 (A 和 B 像) 的光谱。通过 C IV  $\lambda\lambda 1548 \text{ \AA}$ ,  $1551 \text{ \AA}$  和 Mg II  $\lambda\lambda 2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$  窄吸收双线系统证认得到两个 C IV 吸收线系统和两个 Mg II 吸收线系统。我们的结论如下:

(1)  $\beta_s < 0.06$  的 C IV 吸收线属于本征吸收线, 对应的吸收体接近类星体, 可能与类星体有关。吸收线在两个视线方向上的差异相对较小 ( $N_{\Delta W} < 3$ )。两个视线方向上 C IV 吸收



体可能来源于同一个吸收体, 两个视线方向上穿过的吸收体性质相同, 可能都来源于类星体的同一区域, 吸收体的横向尺度可能大于  $D_{\text{tra}}$  (约 127.5 pc)。

(2) Mg II 吸收线属于中介吸收线 ( $\beta_s > 0.02$ ), 两个 Mg II 吸收系统的红移分别为  $0.8311 \pm 0.0003$  和  $0.6761 \pm 0.0061$ , 吸收体在视线方向上横跨的尺度  $D_{\text{tra}}$  分别为 21.319 kpc 和 26.280 kpc。两个 Mg II 吸收线在两个像光谱上的吸收强度都存在明显差异 ( $N_{\Delta W} > 3$ ), 红移  $0.8311 \pm 0.0003$  和  $0.6761 \pm 0.0061$  的 Mg II 吸收系统分别只存在于 A 和 B 像光谱上。这可能是由于两个视线方向上的 Mg II 吸收系统来源于不同的吸收体, 吸收体的横向尺度可能小于  $D_{\text{tra}}$ 。

(3) B 像上的 Mg II 吸收体 (红移为  $0.6761 \pm 0.0061$ ) 距离透镜天体相对较近 ( $|\beta_1| < 0.02$ ), 该吸收可能来源于透镜天体的本征吸收体。而 A 像上的 Mg II 吸收体 (红移为  $0.8311 \pm 0.0003$ ), 既与类星体无关 ( $\beta_s > 0.02$ ), 也与透镜天体无关 ( $|\beta_1| > 0.02$ ), 该吸收体可能来源于其他星系介质或星系际介质。

### 参考文献:

- [1] 武向平. 天体物理学报, 1990, 9: 224
- [2] 朱宗宏, 袁启荣, 何香涛. 天文学进展, 1997, 15: 158
- [3] Benjamin R A, Danly L. ApJ, 1997, 481: 764
- [4] Misawa T, Charlton J C, Eracleous M, et al. ApJS, 2007b, 171: 1
- [5] Misawa T, Charlton J C, Eracleous M. ApJ, 2014, 792: 77
- [6] Ganguly R, Brotherton M S. ApJ, 2008, 672: 102
- [7] Misawa T, Eracleous M, Charlton J C, et al. ApJ, 2007a, 660: 152
- [8] Weymann R J, Morris S L, Foltz C B, et al. ApJ, 1991, 373: 23
- [9] Hamann F, Kaplan K F, Rodríguez H P, et al. MNRAS, 2008, 391: L39
- [10] Smette A, Robertson J G, Shaver P A, et al. A&A, 1995, 113: 199s
- [11] Ellison S L, Ibata R, Pettini M, et al. A&A, 2004, 414: 97E
- [12] Stern J, Hennawi J F, Prochaska J X, et al. APJ, 2016, 830: 87
- [13] Koyamada S, Misawa T, Inada N, et al. APJ, 2017, 851: 88
- [14] Misawa T, Saez C, Charlton J C, et al. APJ, 2016, 525: 25
- [15] Misawa T, Inada N, Oguri M, et al. ApJ, 2018, 854: 69
- [16] Oguri M, Inada N, Hennawi J F, et al. APJ, 2005, 622: 106
- [17] 潘彩娟, 黄红艳, 黄伟荣, 等. 天文学进展, 2019, 37: 63
- [18] Inada N, Oguri M, Pindor B, et al. Nature, 2003, 426: 810
- [19] Oguri M, Inada N, Keeton C R, et al. APJ, 2004, 605: 78
- [20] Oke J B, Cohen J G, Carr M, et al. PASP, 1995, 107: 375O
- [21] Miyazaki S, Komiyama Y, Sekiguchi M, et al. PASJ, 2002, 54: 833M
- [22] Inada N, Oguri M, Keeton C R, et al. PASJ, 2005, 57: L7
- [23] Misawa T, Inada N, Ohsuga K, et al. APJ, 2013, 145: 48
- [24] Oguri M, Inada N, Strauss M A, et al. The Astronomical Journal, 2012, 143: 120
- [25] Cristian E R, Oguri M, Yosuke M, et al. MNRAS, 2016, 458: 2
- [26] Anupreeta M, Oguri M, Kayo I, et al. MNRAS, 2016, 456: 1595
- [27] Kochanek C S, Falco E E, Impey C, Lehar J, McLeod B and Rix H-W with CASTLES Survey. <https://www.cfa.harvard.edu/castles/>, 2015
- [28] Lemon C A, Auger M W, McMahon R G and Kposov S E with Gravitationally Lensed Quasar Database.

- <https://web1.ast.cam.ac.uk/ioa/research/lensedquasars/>, 2019
- [29] Lemon C A, Auger M W, McMahon R G, et al. MNRAS, 2017, 472: 5023
- [30] Lemon C A, Auger M W, McMahon R G, et al. MNRAS, 2018, 479: 5060
- [31] Lemon C A, Auger M W, McMahon R G. MNRAS, 2019, 483: 4242
- [32] Aguado D S, Ahumada R, Almeida A. APJS, 2019, 240: 23A
- [33] Hewett P C, Wild V. MNRAS, 2010, 405: 2302
- [34] Bolton A S, Schlegel D J, Aubourg E, et al. The Astronomical Journal, 2012, 144: 144
- [35] Lu W-J, Lin Y-R. MNRAS, 2018a, 474: 3397
- [36] Lu W-J, Lin Y-R. ApJ, 2018b, 863: 186
- [37] Huang H-Y, PAN C-J, LU W-J, et al. MNRAS, 2019, 487: 2818
- [38] Chen Z-F, Gu Q-S, Chen Y-M, et al. MNRAS, 2015, 450: 3904
- [39] Chen Z-F, Gu Q-S, Chen Y-M, et al. APJS, 2015, 221: 32

## Research of the Absorption Lines of Gravitational Lensing Quasar SDSS J1004+4112

HUANG Hong-yan<sup>1</sup>, XIE Zhao-hua<sup>\*1</sup>, PENG Rui<sup>1</sup>, DU Lei-ming<sup>1</sup>, TAN Can<sup>1</sup>,  
LIU Xiao-peng<sup>1</sup>, GU Min-feng<sup>2</sup>

*(1. Yunnan normal university, Academy of Physics and Telecommunication Engineering, Yunnan Kunming 650500, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** Based on Data Release 15 (DR15) of Sloan Digital Sky Survey (SDSS) published data, we analyzed the spectra of the two images of gravitational lensing Quasar SDSS J1004+4112 in the SQLS (SDSS Quasar Lens Search). The redshift of quasar is  $1.734 \pm 0.002$ . We recognize two C IV and two Mg II narrow absorption systems in the spectra of two images. The C IV absorption systems are alike in the spectra of the two images, but the two Mg II absorption systems are very different. The Mg II absorption system with redshift of  $0.8311 \pm 0.0003$  only exist in spectrum of A image, while another Mg II absorption system with redshift of  $0.6711 \pm 0.0061$  only exist in B image. If they exist in the both images, their physical separations in the transverse direction ( $D_{\text{tra}}$ ) are 21.319 and 26.280 kpc, respectively. We thought that the differences of Mg II absorption systems are probably from the different absorbers in the two images of SDSS J1004+4112, and the sizes of these absorbers may be smaller than  $D_{\text{tra}}$ . The velocity of Mg II absorber with redshift of  $0.6711 \pm 0.0061$  relative to lens is  $|\beta_1| < 0.02$ , therefore the absorber maybe root in the intrinsic absorber of lens galaxy. In addition, the Mg II absorber with redshift of  $0.8311 \pm 0.0003$  maybe come from other interstellar medium or intergalactic medium, because  $|\beta_1| > 0.02$  and  $\beta_s > 0.06$ .

**Key words:** gravitational lensing quasar; absorption line; fitting/identification; spectra