

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.01.05

# 引力透镜类星体SDSS J1001+5027 吸收线证认

潘彩娟<sup>1</sup>, 黄红艳<sup>2</sup>, 黄伟荣<sup>3</sup>, 陆伟坚<sup>1</sup>, 农卫警<sup>1</sup>, 林樱如<sup>1</sup>,  
陆美美<sup>1</sup>, 姚敏<sup>1</sup>, 姚知考<sup>1</sup>

(1. 百色学院, 百色 533000; 2. 云南师范大学 物理与电子信息学院, 昆明 650500; 3. 广州大学 物理与电子工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 基于斯隆数字化巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)第12期数据(data release 12, DR12)的光谱, 分析引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像的光谱。两个像光谱的红移分别为 $1.84132 \pm 0.00024$ 和 $1.84545 \pm 0.00012$ , 透镜天体红移约为0.415。通过证认可靠的C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$ 或Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线的方法, 证认出A, B两个像的光谱中红移分别为 $1.60677 \pm 0.00012$ ,  $0.87140 \pm 0.00007$ 和 $0.41455 \pm 0.00006$ 的3个吸收系统。从3个吸收系统共证认出27条窄吸收线。测量27条窄吸收线的等值宽度, 再通过分析、比较3个吸收系统在A, B两个像光谱中吸收线的数量及等值宽度的差异, 给出了3个吸收系统在引力透镜类星体SDSS J1001+5027视线方向可能的分布示意图。

**关键词:** 引力透镜类星体; 吸收线; 证认; 光谱

**中图分类号:** P158      **文献标识码:** A

## 1 引言

引力透镜效应是广义相对论的一个重要预言。光子在经过引力场附近时将发生偏折, 其效果与光学透镜非常相似。一个引力透镜系统通常由背景天体和透镜天体组成。透镜天体使背景天体发出的光线弯曲, 其结果是使观测者看到背景天体的多重像, 或者使观测者看到背景天体的视轮廓和视亮度增大<sup>[1]</sup>。

根据背景天体成像扭曲的程度, 引力透镜一般分为弱引力透镜和强引力透镜。弱引力透镜不会引起多重像现象, 像的扭曲程度也相当微弱<sup>[2-5]</sup>。强引力透镜会引起多重像现象, 而

---

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-11-11

资助项目: 国家自然科学基金(113630011); 广西自然科学基金(2017GXNSFAA198348)

通讯作者: 黄红艳, 936499587@qq.com

且像的大小、位置和亮度都会发生明显变化。在强引力透镜系统中，如果透镜天体不能被看作点源，而且背景天体和透镜天体刚好在视线方向重合，那么，观测者就可以观测到爱因斯坦环或爱因斯坦十字；如果透镜天体可以被看作点源，那么，任意一个背景天体都对应两个像，这两个像分别位于点源两侧，其中一个位于爱因斯坦环内，另一个位于爱因斯坦环外<sup>[6, 7]</sup>。

引力透镜类星体是指被透镜化的类星体，即在引力透镜系统中背景天体属于类星体。自从1979年Walsh等人<sup>[8]</sup>首次发现引力透镜类星体Q0957 + 561后，引力透镜类星体的研究逐渐成为热门课题。目前，人们已经发现了100多个强引力透镜类星体。关于强引力透镜类星体的研究主要有：利用强引力透镜大样本，通过建立模型来约束宇宙状态方程，并对宇宙曲率进行研究<sup>[9-11]</sup>；用图像的方法研究透镜模型<sup>[9, 12, 13]</sup>；通过观测引力透镜不同成像之间的时间延迟效应推算出哈勃常数<sup>[14-16]</sup>；利用引力透镜类星体研究类星体的外流<sup>[17, 18]</sup>；利用强引力透镜统计学研究星系的形成和演化<sup>[19-21]</sup>，以及检验后牛顿参数<sup>[22, 23]</sup>等。但是，目前利用引力透镜类星体不同像的吸收线来研究透镜附近吸收物质分布的工作还比较少。Misawa等人<sup>[24]</sup>利用引力透镜类星体SDSS J1029+2623的两个像的光谱吸收线，研究了邻近宽吸收线(broader proximity absorption line, PAL)的短时间变化，以限制类星体的外流位置和中心黑洞的电子密度，并讨论了这些限制对类星体外流物质的三维结构的影响。Koyamada等人<sup>[25]</sup>利用13个引力透镜类星体光谱的吸收线，研究了星系周围介质的内部结构，给出的环银星系介质(circum-galactic medium, CGM)的下限为500 kpc。Misawa等人<sup>[24]</sup>和Koyamada等人所用的光谱分辨率都相对较低，并且证认出的吸收线也不够完备。本文使用SDSS光谱数据，其分辨率相对较高，因此证认出的吸收线相对较多。

类星体是目前人类所发现的距离最遥远的天体之一，其具有高红移和高光度等特点。类星体的光线在到达观测者之前，其某些波长的能量已被传播途中的星际物质或星系际物质的原子吸收，因而在光谱上留下凹槽形状的吸收谱线。通过研究类星体的吸收线，人们可以研究吸收物质的物理属性，了解宇宙中暗物质的分布、宇宙元素丰度及其形成过程等<sup>[26-28]</sup>。引力透镜类星体光线经过引力透镜天体附近，并穿过途中的吸收物质，这为我们研究引力透镜天体附近的吸收物质分布提供了可能。

本文将通过证认引力透镜类星体SDSS J1001+5027两个像的吸收线情况，研究该引力透镜系统的背景天体及透镜天体附近吸收体的分布情况。第2章介绍引力透镜类星体SDSS J1001+5027的基本信息；第3章介绍证认引力透镜类星体SDSS J1001+5027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。本文使用的宇宙学参数分别是 $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_k = 0$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ 。

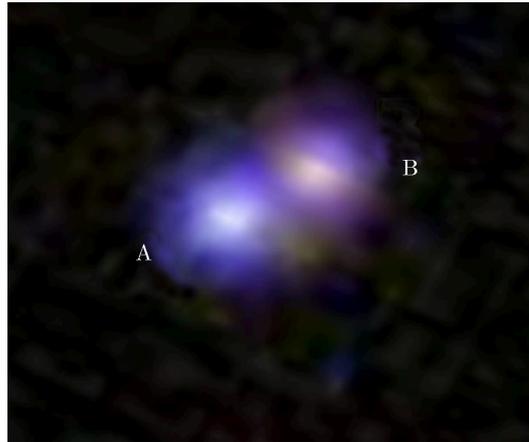
## 2 引力透镜类星体SDSS J1001+5027

斯隆数字化巡天类星体透镜搜索(SDSS Quasar Lens Search, SQLS)是一个系统的引力透镜类星体巡天，它基于SDSS<sup>[29]</sup>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, UH88)<sup>[30]</sup>对类星体的前景星系进行检测, 并确定出被透镜化的类星体候选源。

SQLS发布了62个引力透镜类星体<sup>[31]</sup>, 其中约2/3是新发现的引力透镜类星体<sup>[32]</sup>, 10多个源在SDSS中有光谱记录。引力透镜类星体SDSS J1001+5027就来自其中。

Oguri 等人<sup>[33]</sup>根据图像分离情况和光谱性质, 识别出SDSS J1001+5027是强引力透镜类星体。它具有两个大角度分离的像, 且两个像的光谱具有相同的性质。该透镜天体的红移约为0.415<sup>[34]</sup>, 两个像的图像分离角度为2.86''<sup>[33]</sup>, 其赤经(RA)和赤纬(Dec)分别为10h01min28.61s, +50°27'56.90"和10h01min28.35s, +50°27'58.41", 较亮的像为A, 较暗的像为B, 其观测图像如图1所示<sup>[33]</sup>。



注: A 为光谱spec-1006-52708-0455的测光图; B 为光谱spec-7282-56660-0754的测光图。

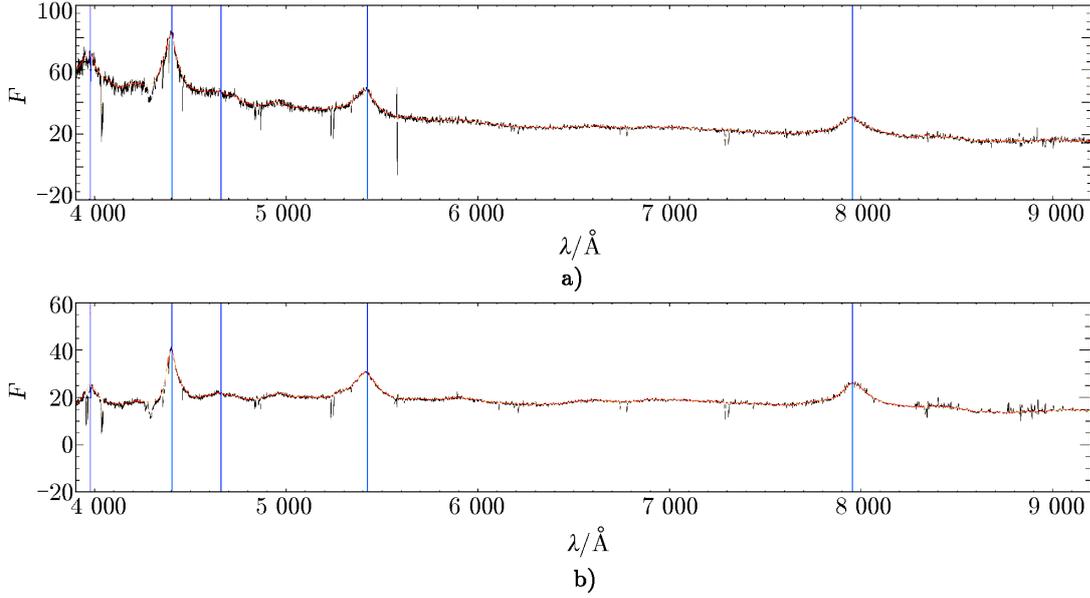
图 1 引力透镜类星体SDSS J1001+5027的观测图像<sup>[33]</sup>

Oguri 等人<sup>[33]</sup>的研究表明, 引力透镜类星体SDSS J1001+5027的透镜系统比较复杂, 在大尺度范围内, 靠近类星体和透镜天体的区域存在多个星系。此外, 他们还检测到该类星体附近及其透镜天体附近有星系密度增大的现象。

### 3 光谱分析

我们从SDSS DR12网站(<https://dr12.sdss.org/basicSpectra>)下载了引力透镜类星体SDSS J1001+5027两个像的光谱, 其名称分别为spec-1006-52708-0455和spec-7282-56660-0754, 光谱的红移分别为 $1.841\ 32 \pm 0.000\ 24$ 和 $1.845\ 45 \pm 0.000\ 12$ , 光谱的信噪比分别为37.38和23.00, 光谱覆盖范围为3 800~9 200 Å, 分辨率为1 800~2 100 Å。观测坐标系下的光谱如图2所示。

在观测坐标系中, 我们对发射线和幂律谱等成分进行伪连续谱拟合, 结果如图2中红色曲线所示。对光谱流量进行归一化后, 我们利用证认C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  或Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$  窄吸收双线的方法<sup>[35]</sup>, 首先证认了C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  或Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$  窄吸收双



注: a) A的光谱; b) B的光谱。横坐标 $\lambda$ 为观测波长; 纵坐标 $F$ 为流量。黑色线是光谱; 红色线是连续谱; 蓝色竖线表示类星体不同元素的发射线位置, 左起分别为Si IV  $\lambda 1400-3977.30$ , C IV  $\lambda 1550-4403.44$ , He II  $\lambda 1640-4659.13$ , Ci II  $\lambda 1908-5423.3$ , Mg II  $\lambda 2800-7954.6$ 。

图 2 引力透镜类星体SDSS J1001+5027两个像的光谱

线, 并由此定出吸收系统的红移; 然后, 我们寻找该系统其他可能的窄吸收线; 最后, 我们用高斯函数对吸收线轮廓进行拟合, 并测量了吸收线的等值宽度。

### 3.1 证认的基本方法及数据结果

我们选择吸收线深度的置信水平(即信噪比) $N_s > 2$ 的吸收线进行证认。

$$N_s = \frac{S_{\text{abs}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left(\frac{\sigma_f^i}{F_c^i}\right)^2}{M}}}, \quad (1)$$

其中,  $\sigma_f$ 为归一化前流量的不确定度,  $F_c$ 为伪连续谱流量,  $M$ 为在吸收特征周围超过 $\pm 3$ 个特征高斯宽度( $\pm 3\sigma$ )的像素点数目,  $i$ 为数据点序号,  $S_{\text{abs}}$ 为吸收坑的深度(即归一化后吸收线的最低点与主成分流量1之间的差值)。置信水平 $N_s$ 反映吸收线的可信度,  $N_s$ 越大, 吸收线的可信度越高。

证认出吸收系统后, 我们使用高斯函数对吸收线的轮廓进行拟合, 并通过高斯模型的积分得出静止坐标下吸收线的等值宽度 $W$ 。等值宽度的不确定度 $\sigma$ 定义为<sup>[35]</sup>:

$$(1 + Z)\sigma = \frac{\sqrt{\sum_i P^2(\lambda_i - \lambda_0)\sigma_i'^2}}{\sum_i P^2(\lambda_i - \lambda_0)} \Delta\lambda, \quad (2)$$

其中,  $Z$ 是红移,  $\lambda_i$ 为数据点的波长,  $\lambda_0$ 为谱线的实验室波长,  $P$ 为线芯 $\lambda_0$ 处的高斯轮廓,  $\Delta\lambda$ 为相邻点的间隔,  $\sigma_{f_i}$ 为归一化流量的不确定度。等值宽度变化量 $\Delta W = W_2 - W_1$ ,

变化量的不确定度 $\sigma_{\Delta W} = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}$ , 等值宽度变化量的置信水平 $N_{\Delta W} = \Delta W/\sigma_{\Delta W}$ 。 $W_1$ 和 $W_2$ 是两个不同成像光谱中吸收线在静止坐标系的等值宽度,  $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 是静止坐标系下等值宽度的不确定度。

由于莱曼线的蓝端存在大量Ly $\alpha$ 吸收线, 因此, 难以可靠地证认和测量出Ly $\alpha$ 线以外的其他谱线。此外, 在SDSS光谱中, 5 580 Å和6 700 Å红端的羟基波段的区域存在很强的天光线残差, 因此我们不证认Ly $\alpha$ 森林波段和天光线严重波段的吸收线。我们只对存在C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  或Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$  窄吸收双线的系统进行证认, 其他的窄吸收系统或宽吸收线都不予证认。证认得到的引力透镜类星体SDSS J1001+5027窄吸收线系统数据见表1。

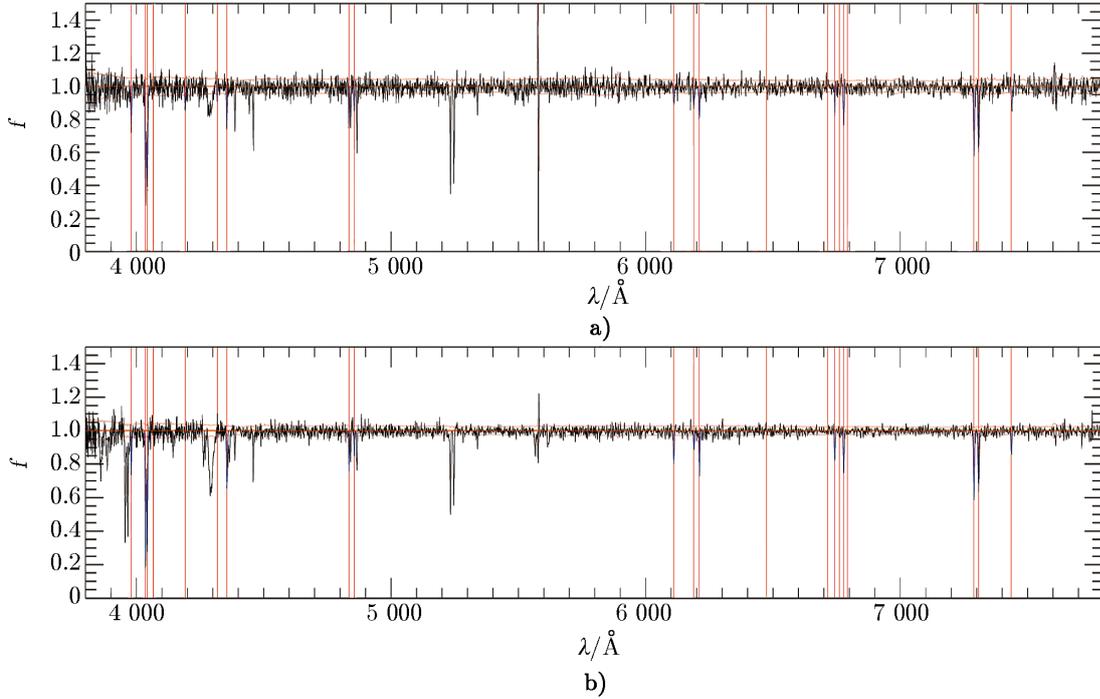
表 1 引力透镜类星体SDSS J1001+5027 3个吸收系统的相关数据

$Z_{\text{abs}}$	吸收线元素	线芯位置/Å $N_s$ $W_1/\text{Å}$			线芯位置/Å $N_s$ $W_2/\text{Å}$			$N_{\Delta W}$
		$MJD = 52\,708$			$MJD = 56\,660$			
1.60677±	Si II $\lambda 1526$	3978.5	4.85	0.39 ± 0.05	3978.9	5.72	0.30 ± 0.03	-1.54
0.00012	C IV $\lambda 1548$	4036.0	13.67	1.20 ± 0.05	4035.0	19.15	1.22 ± 0.04	0.31
	C IV $\lambda 1551$	4039.7	11.91	1.14 ± 0.04	4041.7	16.00	1.11 ± 0.05	-0.471
	Fe II $\lambda 1608$	4192.0	2.97	0.23 ± 0.05	4192.0	—	—	-4.60
	Al II $\lambda 1671$	4354.5	5.31	0.35 ± 0.04	4354.5	7.07	0.65 ± 0.03	6.00
	Al III $\lambda 1855$	4834.5	5.45	0.31 ± 0.04	4833.8	8.25	0.26 ± 0.03	-1.00
	Al III $\lambda 1863$	4854.2	3.31	0.23 ± 0.05	4854.9	5.06	0.17 ± 0.03	-1.03
	Fe II $\lambda 2344$	6110.0	2.18	0.20 ± 0.05	6109.6	3.47	0.31 ± 0.03	1.89
	Fe II $\lambda 2374$	6189.0	3.1	0.24 ± 0.05	6188.4	4.37	0.18 ± 0.04	-0.94
	Fe II $\lambda 2383$	6210.7	4.47	0.35 ± 0.06	6210.1	9.56	0.38 ± 0.03	0.45
	Fe II $\lambda 2587$	6742.0	4.97	0.16 ± 0.03	6741.4	8.20	0.30 ± 0.03	3.30
	Fe II $\lambda 2600$	6777.3	6.44	0.37 ± 0.05	6776.7	11.51	0.40 ± 0.03	0.51
	Mg II $\lambda 2796$	7289.0	10.58	0.77 ± 0.04	7288.0	17.95	0.69 ± 0.03	-1.60
	Mg II $\lambda 2803$	7307.7	10.04	0.71 ± 0.06	7306.7	15.68	0.62 ± 0.03	-1.34
	Mg I $\lambda 2853$	7438.0	2.13	0.23 ± 0.06	7435.5	2.09	0.24 ± 0.03	0.15
0.87140±	Fe II $\lambda 2344$	4386.3	4.93	0.44 ± 0.05	4386.0	3.63	0.29 ± 0.03	-2.60
0.00007	Fe II $\lambda 2374$	4443.0	4.34	0.27 ± 0.05	4443.4	1.91	0.13 ± 0.04	-2.19
	Fe II $\lambda 2383$	4459.5	9.04	0.67 ± 0.05	4459.0	10.60	0.48 ± 0.03	-3.26
	Fe II $\lambda 2587$	4841.0	5.45	0.45 ± 0.07	4840.5	6.80	0.29 ± 0.04	-1.98
	Fe II $\lambda 2600$	4866.3	9.57	0.64 ± 0.06	4865.8	8.50	0.49 ± 0.04	-2.08
	Mn II $\lambda 2594$	4855.0	2.94	0.30 ± 0.07	4855.0	2.84	0.23 ± 0.04	-0.87
	Mg II $\lambda 2796$	5233.3	16.34	1.09 ± 0.05	5233.0	20.49	1.03 ± 0.04	-0.94
	Mg II $\lambda 2803$	5246.7	14.55	1.05 ± 0.06	5246.4	17.52	0.81 ± 0.04	-3.33
	Mg I $\lambda 2853$	5339.0	3.14	0.31 ± 0.06	5338.9	2.23	0.18 ± 0.03	-1.94
0.41455±	Mg II $\lambda 2796$	3955.0	—	—	3956.0	17.10	1.76 ± 0.07	25.10
0.00006	Mg II $\lambda 2803$	3965.1	—	—	3966.1	15.91	1.67 ± 0.07	23.90
	Mg I $\lambda 2853$	4035.0	15.25	2.05 ± 0.07	4036.0	18.10	1.96 ± 0.04	-1.12

注:  $Z_{\text{abs}}$ 表示吸收系统红移。

### 3.2 C IV $\lambda\lambda 1548, 1551$ 吸收系统的证认

在流量归一化的光谱中,我们在观测坐标系波长为4036.0 Å和4039.7 Å处证认出C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  窄吸收双线,并确定吸收系统的红移是 $1.60677 \pm 0.00012$ 。然后我们对该吸收系统的所有窄线进行证认,共证认出15条吸收线,其位置如图3的红色竖线所示。利用高斯函数对吸收坑的轮廓进行拟合,结果如图3的蓝色曲线所示。测量得到的吸收线的等值宽度值详见表1。



注: a) A的光谱; b) B的光谱。横坐标 $\lambda$ 是观测波长;纵坐标 $f$ 是归一化的流量。黑色线是归一化光谱;红色竖线是吸收线位置,左起分别为Si II  $\lambda 1526-3979.1$ , C IV  $\lambda 1548-4035.1$ , C IV  $\lambda 1551-4041.9$ , C I  $\lambda 1560-4066.7$ , Fe II  $\lambda 1608-4192.2$ , C I  $\lambda 1657-4318.6$ , Al II  $\lambda 1670-4354.7$ , Al III  $\lambda 1855-4834.1$ , Al III  $\lambda 1863-4855.1$ , Fe II  $\lambda 2344-6109.9$ , Fe II  $\lambda 2374-6188.7$ , Fe II  $\lambda 2383-6210.4$ , Fe II  $\lambda 2484-6474.3$ , Mn II  $\lambda 2576-6714.0$ , Fe II  $\lambda 2587-6741.8$ , Mn II  $\lambda 2594-6760.9$ , Fe II  $\lambda 2600-6777.0$ , Mn II  $\lambda 2606-6792.2$ , Mg II  $\lambda 2796-7288.3$ , Mg II  $\lambda 2803-7307.1$ , Mg I  $\lambda 2853-7435.9$ ;蓝色线是拟合的高斯轮廓。

图3 引力透镜类星体SDSS J1001+5027 红移为1.606的C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  吸收系统的拟合谱线

C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$ 吸收系统( $Z_{\text{abs}} = 1.60677 \pm 0.00012$ )在A和B两个像的光谱中均可以证认出15条相同元素的吸收线,且等值宽度变化量的置信水平 $N_{\Delta W}$ 比较小,其平均值是0.02。虽然Fe II  $\lambda 1608$ 只在A像(简化儒略日期 $MJD = 52708$ )的光谱中观测到,但其等值宽度为 $(0.23 \pm 0.05)$  Å,信噪比 $N_s$ 也仅为2.97。因此我们认为,在误差范围内,C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$ 吸收系统( $Z_{\text{abs}} = 1.60677 \pm 0.00012$ )的A和B两个像的光谱的吸收强度基本相同。

根据吸收体来源的不同,吸收线一般分为内禀吸收和插入吸收。内禀吸收由光源自身

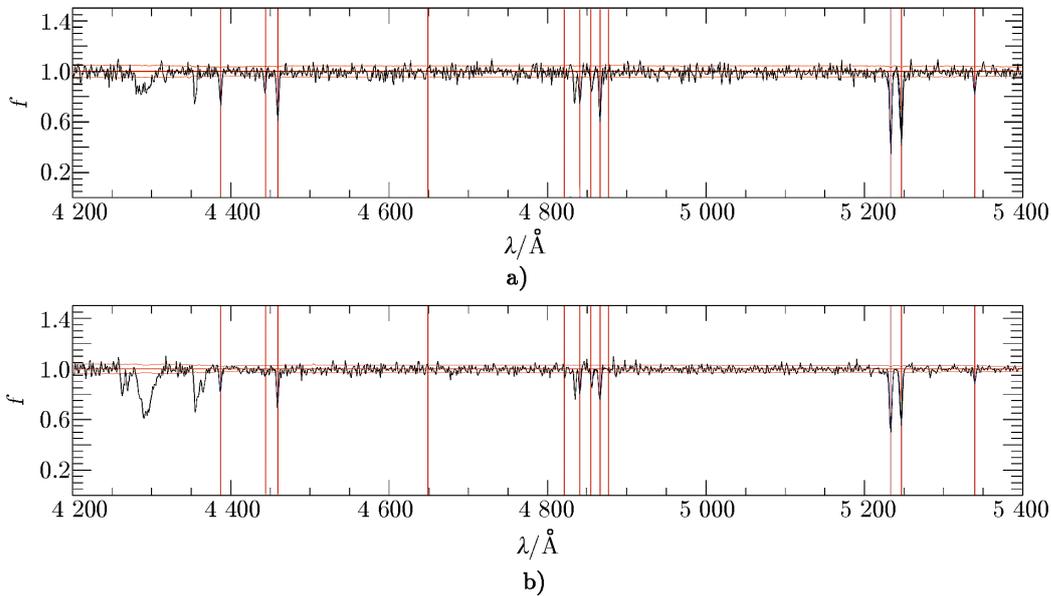
物质的吸收引起; 插入吸收由光路方向上的云团或者其他星系物质吸收引起。C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  吸收系统的吸收线红移处于透镜天体与背景天体之间( $Z_l < Z_{\text{abs}} < Z_s$ )。由于该吸收系统既不处于类星体附近, 也不处于透镜天体附近, 因此, 我们认为C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  吸收系统( $Z_{\text{abs}} = 1.60677 \pm 0.00012$ )是插入吸收, 该吸收由A, B 光路上其他云团或其他星系的吸收物质引起。

### 3.3 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收系统的证认

利用证认Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$  窄双吸收线的方法, 我们在流量归一化的光谱中证认出了两个吸收系统, 其红移分别是 $0.87140 \pm 0.00007$ 和 $0.41455 \pm 0.00006$ 。

#### 3.3.1 吸收红移 $0.87140 \pm 0.00007$ 系统

引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像光谱中均可以证认出吸收红移为 $0.87140 \pm 0.00007$ 的系统, 而且从A, B 两个像光谱均证认出9 条吸收线, 其位置见图4。



注: a) A的光谱; b) B的光谱。横坐标 $\lambda$ 是观测波长; 纵坐标 $f$ 是归一化的流量。黑色线是归一化光谱; 红色竖线是吸收线, 左起分别为Fe II  $\lambda 2344-4387.1$ , Fe II  $\lambda 2374-4443.7$ , Fe II  $\lambda 2383-4459.3$ , Fe I  $\lambda 2484-4648.8$ , Mn II  $\lambda 2576-4820.9$ , Fe II  $\lambda 2587-4840.9$ , Mn II  $\lambda 2594-4854.6$ , Fe II  $\lambda 2600-4866.2$ , Mn II  $\lambda 2606-4877.1$ , Mg II  $\lambda 279.6-5233.3$ , Mg II  $\lambda 2803-5246.7$ , Mg I  $\lambda 2853-5339.2$ ; 蓝色线是拟合的高斯轮廓。

图4 引力透镜类星体SDSS J1001+5027 红移为 $0.871$ 的Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收系统的拟合谱线

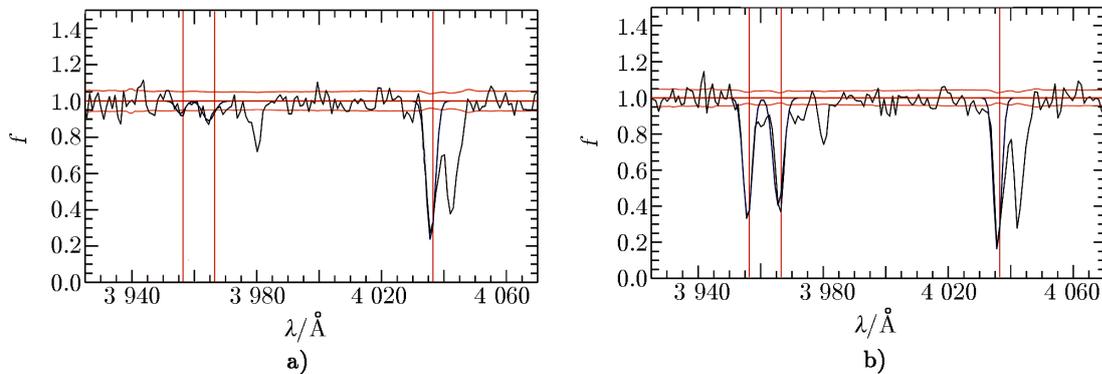
从表1可以看出, 该吸收线的等值宽度变化量的置信水平 $N_{\Delta W} < 0$ , 9条吸收线的 $N_{\Delta W}$ 的平均值是 $-2.13$ , 说明A像( $MJD = 52708$ )谱线吸收线的等值宽度均大于B像( $MJD = 56660$ )谱线吸收线的等值宽度。因此我们认为, 这9条吸收线有相同的变化趋势, 在 $\Delta MJD = 3952$  d内, 吸收系统 $0.87140 \pm 0.00007$ 的吸收线等值宽度均变小。在观测波长 $4855.0 \text{ \AA}$ 处可证认出Mn II  $\lambda 2594$ , 它与在吸收红移 $1.60677 \pm 0.00012$ 系统证认的Al III  $\lambda 1863$ 的位置

重合, 这可能是Mn II  $\lambda 2594$  与Al III  $\lambda 1863$  混合的吸收线。

该吸收系统红移 $Z_{\text{abs}} = 0.871$  处于透镜天体( $Z_l = 0.415$ ) 和背景天体( $Z_s = 1.843$ )之间。该吸收系统既不处于类星体附近, 也不处于透镜天体附近, 因此我们认为, 吸收红移 $0.87140 \pm 0.00007$ 系统也是插入吸收, 该吸收也是由A, B光路上其他云团或其他星系的吸收物质引起的。

### 3.3.2 吸收红移 $0.41455 \pm 0.00006$ 系统

引力透镜类星体SDSS J1001+5027的B像( $MJD = 56660$ )光谱中, 观测波长 $3955.0 \text{ \AA}$ 和 $3965.1 \text{ \AA}$ 处有一对非常明显的Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线, 其信噪比分别为17.10和15.91, 吸收系统的红移是 $0.41455 \pm 0.00006$ 。但在A像( $MJD = 52708$ )光谱中却没有显示Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收双线, 如图5所示。此外, 在观测波长 $4035.0 \text{ \AA}$ 处可证认出Mg I  $\lambda 2853$ , 这与吸收红移 $1.60677 \pm 0.00012$ 系统中证认的C IV  $\lambda 1548$ 位置重合。这可能是Mg I  $\lambda 2853$ 与C IV  $\lambda 1548$ 混合的吸收坑。在误差范围内, 我们证认得到的吸收系统的红移数值与Inada等人<sup>[34]</sup>证认的该透镜天体的红移0.415是一致的。



注: a) A的光谱; b) B的光谱。横坐标 $\lambda$ 是观测波长; 纵坐标 $f$ 是归一化的流量。黑色线是归一化光谱; 红色竖线是吸收线位置, 左起分别为Mg II  $\lambda 2796-3956.3$ , Mg II  $\lambda 2803-3966.5$ , Mg I  $\lambda 2853-4036.4$ ; 蓝色线是拟合的高斯轮廓。

图5 引力透镜类星体SDSS J1001+5027红移为0.414的Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收系的拟合谱线

吸收红移 $0.41455 \pm 0.00006$ 系统的3条吸收线都属于低电离吸收线。低电离吸收体一般由小尺度的云组成, 并且它们一般分布在高电离区域<sup>[25]</sup>。如果该吸收系统的红移近似等于透镜天体红移 $0.415$ <sup>[34]</sup>, 那么, 我们有理由认为, 吸收红移为 $0.41455 \pm 0.00006$ 处的吸收物质很可能是透镜天体的内禀吸收物质。

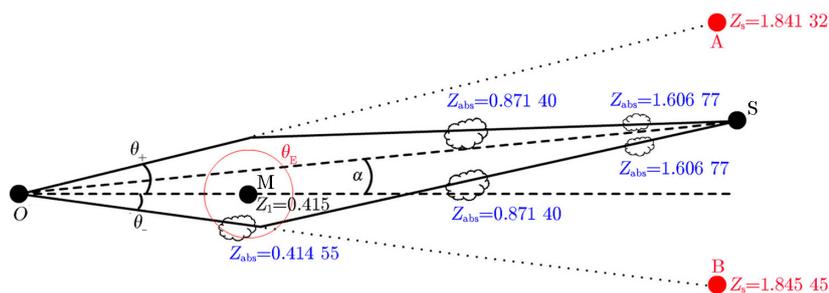
### 3.4 引力透镜附近吸收物质的分布

我们证认的引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像的3个吸收系统的红移数值, 与Koyamada等人<sup>[25]</sup>利用测光方法证认的这3个吸收系统的红移数值基本相同, 但在这3个吸收系统中, Koyamada等人<sup>[25]</sup>共证认出14条吸收线, 而我们却证认得到了27条吸收线, 因此我们认为, 多条吸收线等值宽度的变化情况更能反映吸收线的性质及分布情况。

尽管引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像光谱的 $MJD$ 分别是52 708和56 660, 观测时间相差10.82 a, 且两个像的视线方向不同, 但在吸收红移 $1.606 77 \pm 0.000 12$ 系统和 $0.871 40 \pm 0.000 07$ 系统, A, B 两个像光谱中都能找到红移、谱线元素和谱线数量相同的吸收系统, 因此我们认为, 在这两个不同像的光谱中吸收系统很可能对应着同一个吸收体, 或者两个吸收体具有相同的性质。此外, 吸收红移 $0.871 40 \pm 0.000 07$ 系统的9条吸收线的等值宽度存在同步变弱现象, 这可能是吸收体的电离程度发生改变引起的, 也可能是同一吸收体在不同区域的元素丰度不同引起的, 或者是吸收体相对于透镜系统处于运动中, 且该吸收体逐渐偏离视线范围引起的。

在B像( $MJD = 56 660$ )光谱中可以证认出 $0.414 55 \pm 0.000 06$ 吸收系统, 并且该吸收系统的红移近似于引力透镜红移( $Z_l = 0.415$ )<sup>[34]</sup>。Inada 等人<sup>[34]</sup>用UH88重新观测, 得到透镜天体的红移为0.415。由于透镜天体的信号太弱, 无法得到红移的误差<sup>[31, 33]</sup>, 所以不能排除我们证认得到的 $0.414 55 \pm 0.000 06$ 吸收系统是透镜天体内禀的吸收体所导致。除了误差导致的差异外, 吸收系统红移与透镜天体红移的微小差异, 可能是吸收体相对于透镜天体在视线上的相对运动所导致, 也可能是吸收体与透镜天体间宇宙学距离的差异所导致。该吸收系统红移与透镜天体红移的差异, 如果看成是吸收体与透镜天体之间视线方向的相对速度, 则由公式 $\beta = v/c = ((1 + Z_l)^2 - (1 + Z_{abc})^2)/((1 + Z_l)^2 + (1 + Z_{abc})^2)$  (其中,  $\beta$ 为多普勒速度,  $v$ 为吸收体朝着观测者的速度,  $c$ 为光速)可以计算出, 吸收体与透镜天体的相对速度为95 km/s。如果看成是视线方向的距离, 则由哈勃公式可以推算出, 吸收体与透镜天体的距离是1 900 kpc。因此我们认为, 该吸收系统红移与透镜天体红移的差异更可能是相对运动导致的。A, B两个像的图像分离角度为 $2.86''$ <sup>[33]</sup>, 两个像的观测时间相差10.82 a。在较早观测的A像( $MJD = 52 708$ )中并没有发现该吸收体, 而在B像( $MJD = 56 660$ )中却出现Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线。我们认为, 这可能是吸收强度分布导致的, 或者是因该吸收体可能正进入视线范围内导致的。

综合上述分析, 并根据点源透镜天体背景光源两个像的位置关系<sup>[5, 7]</sup>, 即A像位于爱因斯坦环外, B像位于爱因斯坦环内, 我们可以得出如图6所示的3个吸收系统在引力透镜类星体SDSS J1001+5027视线方向可能的分布示意图。



注:  $O$ 为地球观测点,  $M$ 为透镜天体(即前景天体),  $S$ 为背景天体。 $\theta_+$ 为图像A与光轴之间的夹角,  $\theta_-$ 为图像B与光轴之间的夹角,  $\theta_E$ 为透镜天体的半径,  $\alpha$ 为背景天体与光轴之间的夹角。

图 6 引力透镜类星体SDSS J1001+5027光路方向上的吸收物质分布图

## 4 结 论

通过证认可靠的C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  或Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$  窄吸收双线的方法, 我们在引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像光谱中, 证认出吸收红移 $1.60677 \pm 0.00012$ ,  $0.87140 \pm 0.00007$  和 $0.41455 \pm 0.00006$ 的3个吸收系统。通过测量吸收线等值宽度, 我们得出如下结论:

(1)吸收红移 $1.60677 \pm 0.00012$ 系统在A, B两个像光谱中均可以证认出15条相同元素的吸收线, 其中8条的 $N_{\Delta W} < 0$ , 7条的 $N_{\Delta W} > 0$ 。在 $\Delta MJD = 3952$  d内, 15条吸收线的等值宽度变化置信水平的平均值是0.02。

(2)吸收红移 $0.87140 \pm 0.00007$ 系统在A, B两个像的光谱中均可以证认出9条相同元素的吸收线, 而且吸收线的等值宽度变化置信水平 $N_{\Delta W} < 0$ , 其平均值是-2.13。我们发现, 在观测波长 $4855.0 \text{ \AA}$ 处的吸收坑, 可能是Mn II  $\lambda 2594$ 与吸收系统红移为 $1.60677 \pm 0.00012$ 的Al III  $\lambda 1863$ 混合的吸收坑。

(3)在误差范围内, 吸收系统红移 $0.41455 \pm 0.00006$ 近似等于透镜天体红移( $Z_1 = 0.415$ )。在B像( $MJD = 56660$ )光谱中可以证认出Mg II  $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线, 其静止坐标等值宽度分别为 $(1.76 \pm 0.07) \text{ \AA}$ 和 $(1.67 \pm 0.07) \text{ \AA}$ ,  $N_s$ 分别为17.10和15.91。在观测波长 $4035.0 \text{ \AA}$ 处的吸收坑, 可能是Mg I  $\lambda 2853$ 与红移为 $1.60677 \pm 0.00012$ 的吸收系统的C IV  $\lambda 1548$ 混合的吸收坑。

(4)通过分析、比较3个吸收系统在A, B两个像光谱中吸收线的数量及等值宽度的差异, 我们给出了3个吸收系统在引力透镜类星体SDSS J1001+5027视线方向可能的分布示意图。

我们的结果表明, 如果能在相同的时间内对引力透镜类星体SDSS J1001+5027的A, B两个像的光谱进行观测, 将更有利于对该类星体视线方向可能的物质分布的研究。我们计划申请中国的望远镜观测时间, 对引力透镜类星体的两个像进行观测, 以获取更多的信息, 做进一步研究。另外, 随着引力透镜数据的释放, 自动证认引力透镜吸收线的工作也是我们未来的工作重点。

### 参考文献:

- [1] 武向平. 天体物理学报, 1989, 09: 03
- [2] Paczynski B. ApJ, 1986, 304: 1
- [3] Paczynski B. Acta Astron, 1995, 45: 345
- [4] Paczynski B. ARA&A, 1996, 34: 419
- [5] 向守平, 冯珑珑. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 245
- [6] 杨晓峰. 天文学进展, 2011, 29: 04
- [7] Wambsganss J. Living Reviews in Relativity, 1998, 1: 12
- [8] Walsh D, Caswell R, Weymann R. Nature, 1979, 279: 381

- [9] Xia J-Q, Yu H, Wang G-J, et al. ApJ, 2017, 834: 75
- [10] Cao S, Biesiada M, Gavazzi R, et al. ApJ, 2015, 806: 185
- [11] Cao S, Pan Y, Biesiada M, et al. JCAP, 2012, 3: 016
- [12] Cao S, Biesiada M, Yao M, et al. MNRAS, 2016, 461: 2192
- [13] Spilker J S, Marrone D P, Aravena M, et al. ApJ, 2016, 826: 112
- [14] Rhee G. Nature, 1991, 350: 211
- [15] Refsdal S. MNRAS, 1964, 128: 307
- [16] Grogin N A, Narayan R. ApJ, 1996, 464: 92
- [17] Misawa T, Inada N, Oguri M, et al. AJ, 2014, 794: L20
- [18] Misawa T, Inada N, Ohsuga K, et al. ApJ, 2013, 145: 48
- [19] Chae K-H, Mao S. ApJ, 2003, 599: L61
- [20] Mao S. ApJ, 1991, 380: 9
- [21] Rix H W, Maoz D, Turner E L, et al. ApJ, 1994, 435: 49
- [22] Cao Y, Chen J, Fan J-H. eprint arXiv: 1711. 06397
- [23] Cao S, Li X, Biesiada M, et al. ApJ, 2017, 835: 92
- [24] Misawa T, Cristian S, Jane C, et al. ApJ, 2016, 825: 25
- [25] Koyamada S, Misawa T, Inada N, et al. ApJ, 2017, 851: 88
- [26] Benjamin R, Danly L. ApJ, 1997, 481: 764
- [27] Metcalf R. ApJ, 2005, 629: 673
- [28] Philipp R. ApJ, 2012, 750: 165
- [29] York D, Adelman J, Anderson J, et al. AJ, 2000, 120: 1579
- [30] Rusu C, Oguri M, Minowa Y, et al. MNRAS, 2016, 458: 2
- [31] Oguri M, Inada N, Strauss M, et al. AJ, 2012, 143: 120
- [32] More A, Oguri M, Kayo I, et al. MNRAS, 2016, 456: 1595
- [33] Oguri M, Inada N, Hennawi J, et al. ApJ, 2005, 622: 106
- [34] Inada N, Oguri M, Shin M, et al. AJ, 2012, 143: 119
- [35] Chen Z-F, Gu Q-S, Chen Y-M, et al. ApJ, 2015, 221: S32

## Identification of the Absorption Line of Gravitational Lensing

### Quasar SDSS J1001+5027

PAN Cai-juan<sup>1</sup>, HUANG Hong-yan<sup>2</sup>, HUANG Wei-rong<sup>3</sup>, LU Wei-jian<sup>1</sup>,  
NONG Wei-jing<sup>1</sup>, LIN Ying-ru<sup>1</sup>, LU Mei-mei<sup>1</sup>, YAO Min<sup>1</sup>, YAO Zhi-kao<sup>1</sup>

*(1. Baise University, Baise 533000, China; 2. Yunnan normal university, Academy of Physics and Telecommunication Engineering, Kunming 650500, China; 3. Guangzhou University, School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou 510006, China)*

**Abstract:** The spectra of the two images of the gravitational lensing quasar SDSS J1001+5027 A and B are analyzed based on the spectra of the Data Release 12 (DR12) of Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The redshifts of the two images are  $1.84132 \pm 0.00024$  and  $1.84545 \pm 0.00012$  respectively, and the redshift of the lensing galaxy is about 0.415. By identifying the

C IV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  or the Mg II  $\lambda\lambda 2796, 1551$  double narrow absorption lines, the red shifts of A and B images were identified as three absorption systems of  $1.60677 \pm 0.00012$ ,  $0.87140 \pm 0.00007$  and  $0.41455 \pm 0.00006$ . Twenty-seven narrow absorption lines were identified by three absorption systems. The equivalent width values of the twenty-seven narrow absorption lines were measured. The differences of the numbers and equivalent widths of the absorption lines in the A and B image spectra of the three absorption systems were analyzed and compared. The possible distribution of three absorption systems in the line of sight direction of gravitational lensing quasar SDSS J1001+5027 is given.

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