

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.10

类星体强引力透镜 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统证认

潘彩娟, 杨婕, 韦相龙

(百色学院, 百色 533000)

摘要: 基于 SDSS 类星体透镜搜寻 (SQLS) 数据, 挑选出 21 个至少具有两个像的强引力透镜类星体源, 其光谱红移 z_s 范围是 1.01856 ~ 2.91598。利用 SDSS 最新的 DR18 光谱数据, 在观测波长 3800 ~ 9200 Å 范围内搜寻 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统。通过对两条光谱分别进行归一化处理和吸收线拟合, 共证认出 42 个 Mg II $\lambda\lambda$ 窄吸收线系统, 它们的吸收线红移 z_{abs} 范围是 0.4146 ~ 1.9418。研究发现, 81%(17/21) 的 z_{abs} 与其他研究者估测的透镜天体红移 z_1 或居间天体红移 z 近似相等, 或在他们估测的范围内。因此, 通过 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统的证认, 可以有效揭示视线方向上可能影响透镜效应的细节, 对类星体强引力透镜候选系统的搜寻及透镜天体红移的估测具有重要意义。

关键词: 类星体; 透镜红移; 窄吸收线系统

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引言

类星体 (quasar, QSO) 是宇宙中最明亮的天体之一, 其发出的光在传播过程中受到星际物质分布的影响, 不仅会发生路径偏折, 其连续光谱也会被吸收。当类星体发出的光经过大质量天体中心区域附近时, 由于受其引力场的作用而发生明显偏折, 导致类星体的视轮廓和视亮度明显增强, 甚至出现像的强烈扭曲或产生多重像, 这种现象被称为类星体强引力透镜效应 (strong gravitational lensing, SGL)。当类星体的光经过冷暗介质时, 由于冷暗介质对光的吸收作用, 其吸收特征将在类星体连续光谱中形成吸收坑, 不同种类、不同红移的介质对应不同的吸收线系统。高红移类星体光谱中可能存在多个吸收线系统。

类星体强引力透镜系统一般由背景源、透镜天体和观测者构成。类星体体积虽小, 但具

收稿日期: 2023-09-29; 修回日期: 2024-11-15

资助项目: 国家自然科学基金 (12463003); 广西自然科学基金 (2025GXNSFAA069632)

通讯作者: 杨婕, 549194155@qq.com

有极高的辐射光度，即使在宇宙学距离上也容易被探测到，由于其高红移的特性，类星体非常适合作为引力透镜系统的背景源。强引力透镜效应的透镜天体通常为星系或星系团^[1-3]，它们质量密度高、面积大，可以高度放大背景类星体，其中心区域可能是非重子暗物质或黑洞，他们一般没有光学对应体。目前地面望远镜无法通过光谱或图像观测的方法直接对透镜天体中心区域进行测量。

类星体强引力透镜系统的搜寻是一项困难、耗时的复杂工作^[2, 3]。首先需要获得大量的高红移类星体样本；其次确定透镜化物体的概率，确定引力透镜系统候选体；最后根据类星体图像分离角度，确定类星体和透镜天体的红移。迄今为止，观测到类星体强引力透镜效应的事例较少，已知的透镜天体是通过光学或射电选定物体的后续分析发现的，通过“形态选择”、“颜色选择”等算法来确定透镜天体的候选体，根据星等、颜色、类星体图像之间的光谱通量比或星系的光谱来估测透镜天体的红移^[4, 5]。由于透镜天体光度相对较弱，它们的发射线或光度等容易受到背景天体的干扰，这给确认类星体强引力透镜系统候选体带来一定的困难。

在讨论类星体强引力透镜效应时，通常把影响透镜效应作用的天体集中在一个透镜天体上，用单透镜模型来解析透镜效应^[6, 7]。但除了受主透镜天体的影响外，光传播过程中的暗物质团块、矮星系或恒星等都有可能改变透镜的焦散结构^[8, 9]，这些成分可能具有不同的红移，虽然它们对透镜效应的贡献不是主导，但视线沿途上其他天体或物体的累积效应不能忽略。

当类星体发生强引力透镜效应时，两个像或多个像的光线不仅从主透镜天体中心附近区域经过，而且也可能从影响其透镜效应的其他天体中心附近经过，其光谱中可能携带有这些区域气体介质的吸收特征。Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线是类星体光谱中常见的吸收线，它属于低电离吸收双线，吸收强度大，具有相对容易分辨的吸收轮廓，其特征波长落在地面光学望远镜覆盖的光谱范围内^[10-12]，容易在光谱中识别出来；相对 C IV $\lambda\lambda 1548, 1551$ 吸收线而言，Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 更靠近星系的核心区^[13]。因此，通过 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 的证认来搜寻视线沿途可能影响透镜效应的天体以及其位置的估测，具有重要意义。

2 样本选择

斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 是地面上最成功的巡天项目之一，它已对全天三分之一的天区进行了巡天，获得了数十万类星体的光谱数据，目前已发布第五阶段 (SDSS-V) 第一份数据——DR18。SDSS 类星体透镜搜寻 (SDSS quasar lens search, SQLS)^① 旨在从 SDSS 类星体光谱样本中发现透镜化类星体，目前已获得 62 个强引力透镜类星体。SDSS 光谱波长覆盖范围是 $3600 \sim 10400 \text{ \AA}$ ，分辨率是 $R = \lambda/\Delta\lambda \approx 1300 \sim 2500$ ^[14, 15]。尽管在 SQLS 数据中，强引力透镜类星体的源相对较少，但由于强引力透镜具有多视角观测和多重像的特征，而且类星体的光线从透镜天体中心附近区域经过，因此在 SDSS 光谱中

^①<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sdss/sqls/>

可以高效地分辨类星体光谱中的 Mg II $\lambda\lambda$ 窄吸收线。

我们基于 SQLS 选择透镜系统, 选择至少具有两个像的强引力透镜类星体源。在 SDSS DR18 网站^①下载光谱数据, 若两条光谱具有相同或相近红移、相同或相似的光谱形状, 信噪比 $S/N \geq 7.6$, 而且至少有一条光谱在 $3800 \sim 9200 \text{ \AA}$ 范围内存在 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线, 则被选出。如此, 我们筛选出 21 个强引力透镜类星体, 类星体红移范围是 $1.01856 \sim 2.91598$ 。SQLS 公布 13 个透镜的红移范围是 $0.311 \sim 0.748$, 21 个类星体强引力透镜系统的相关数据如表 1 所示。

3 基本方法

SDSS 类星体光谱一般由幂律连续谱、Fe II 连续谱、发射线和吸收线叠加而成。在证认 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 之前, 首先需要通过三次样条函数和高斯函数拟合光谱的连续谱, 并对光谱进行归一化处理^[16, 17], 然后才能对 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线进行证认。

3.1 窄吸收双线红移的确定

不同的元素具有不同的特征波长, 在不同的参考系中特征波长不同。根据元素在观测坐标系中的波长可以确定吸收体的红移:

$$z_{\text{abs}} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

式中, λ_0 为静止坐标系波长, λ 为观测坐标系波长。

Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 是吸收双线, λ_{01} 、 λ_{02} 分别表示其在静止坐标系中左右线芯的位置, λ_1 、 λ_2 分别表示在观测坐标系中左右线芯的位置, 由式 (1) 可以得到:

$$\begin{cases} \lambda_1 = (1 + z_{\text{abs}})\lambda_{01} \\ \lambda_2 = (1 + z_{\text{abs}})\lambda_{02} \end{cases}. \quad (2)$$

由式 (2) 可以得到:

$$z_{\text{abs}} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_{02} - \lambda_{01}} - 1, \quad (3)$$

其中, $\lambda_{02} - \lambda_{01}$ 是 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 在静止坐标系中左右线芯的距离, $\lambda_2 - \lambda_1$ 是在观测坐标系中左右线芯的距离。吸收元素相同, 其对应的双吸收线在静止坐标系中的距离也一定。因此, 测量出 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 双吸收线在观测坐标系中左右线芯的距离 $\lambda_2 - \lambda_1$, 根据式 (3), 则可得到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 双吸收线的红移 z_{abs} 。

3.2 窄吸收双线的置信水平

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。 N_s 的计算为:

^①<https://dr18.sdss.org/optical/spectrum/search>

表 1 21 个类星体强引力透镜系统相关参数

| Lensed QSO | plate-mjd-fiberid | z_s | S/N | z_1 |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-------|---------|
| SDSS J0246-0825 | 0456-51910-0144 | 1.68588 ± 0.000143 | 22.11 | 0.723 |
| | 7058-56593-0419 | 1.68625 ± 0.000154 | 47.46 | |
| SDSS J0904+1512 | 2434-53826-0559 | 1.827 ± 0.000201 | 26.4 | — |
| | 5295-55978-0976 | 1.82644 ± 0.00017 | 32.76 | |
| SDSS J0924+0219 | 0475-51965-0331 | 1.5228 ± 0.000265 | 13.46 | 0.394 |
| | 15265-59292-04592659648 | 1.52553 ± 0.000185 | 24.1 | |
| SDSS J1001+5027 | 1006-52708-0455 | 1.84132 ± 0.000245 | 24.56 | 0.415 |
| | 7282-56660-0754 | 1.84563 ± 0.00012 | 37.51 | |
| SDSS J1004+4112 | 1217-52672-0065 | 1.73817 ± 0.000408 | 11 | 0.68 |
| | 8302-57389-0489 | 1.731 ± 0.000179 | 11.14 | |
| SDSS J1021+4913 | 0873-52347-0560 | 1.72163 ± 0.000183 | 10.47 | (0.451) |
| | 0873-52674-0526 | 1.72068 ± 0.000186 | 7.89 | |
| SDSS J1029+2623 | 2353-53794-0139 | 2.18177 ± 0.000496 | 12.8 | 0.58 |
| | 6464-56309-0782 | 2.21243 ± 0.00025 | 18.87 | |
| SDSS J1054+2733 | 2359-53800-0212 | 1.44956 ± 0.000411 | 40.73 | — |
| | 2359-53826-0212 | 1.44851 ± 0.000522 | 38.13 | |
| SDSS J1131+1915 | 3170-54907-0637 | 2.91598 ± 0.000135 | 31.94 | — |
| | 5879-56047-0232 | 2.91563 ± 0.000076 | 22.68 | |
| SDSS J1206+4332 | 1448-53120-0567 | 1.79068 ± 0.000266 | 11.12 | (0.748) |
| | 8372-57787-0354 | 1.79362 ± 0.000291 | 20.52 | |
| SDSS J1216+3529 | 1999-53503-0404 | 2.01660 ± 0.000524 | 9.93 | — |
| | 10246-58171-0583 | 2.00555 ± 0.000245 | 10.74 | |
| SDSS J1304+2001 | 2617-54502-0359 | 2.17198 ± 0.000112 | 18.51 | 0.373? |
| | 5860-56046-0210 | 2.17367 ± 0.000093 | 24.77 | |
| SDSS J1322+1052 | 1698-53146-0137 | 1.70710 ± 0.000236 | 11.81 | — |
| | 5426-55987-0960 | 1.71696 ± 0.000298 | 16.63 | |
| SDSS J1349+1227 | 1701-53142-0523 | 1.72044 ± 0.000246 | 21.93 | — |
| | 5443-56010-0316 | 1.71756 ± 0.000242 | 27.09 | |
| SDSS J1353+1138 | 1702-53144-0397 | 1.62661 ± 0.000169 | 41.94 | — |
| | 5443-56010-0081 | 1.62856 ± 0.000149 | 42.5 | |
| SDSS J1650+4251 | 0631-52054-0380 | 1.54025 ± 0.000594 | 15.56 | (0.577) |
| | 0631-52079-0369 | 1.53955 ± 0.000421 | 25.49 | |
| Q0142-100 | 0664-52174-0186 | 2.72880 ± 0.000174 | 38.23 | 0.491 |
| | 7183-56658-0397 | 2.72439 ± 0.000176 | 57.94 | |
| HS0810+2554 | 1266-52709-0219 | 1.50987 ± 0.000099 | 49.43 | — |
| | 4463-55868-0879 | 1.44810 ± 0.000434 | 8.44 | |
| Q0957+561 | 7084-56624-0526 | 1.41606 ± 0.000221 | 37.22 | 0.36 |
| | 8188-57348-0946 | 1.41712 ± 0.000229 | 35.31 | |
| PG1115+080 | 1617-53112-0467 | 1.73299 ± 0.000112 | 47.13 | 0.311 |
| | 5369-56272-0394 | 1.73239 ± 0.000173 | 16.69 | |
| B1152+199 | 2515-54180-0141 | 1.01856 ± 0.000132 | 36.02 | 0.439 |
| | 5881-56038-0872 | 1.01857 ± 0.000057 | 42.41 | |

注: Lensed QSO 是类星体引力透镜源; plate-mjd-fiberid 是光谱名; z_s 是光谱红移; S/N 是光谱信噪比; z_1 是透镜红移, 其中“—”表示尚无明确的透镜红移数值。 S/N 、 z_s 采用 SDSS DR18 网站数据; z_1 采用 SQLS 公布数据, 括号中的透镜红移表示它们是根据类星体光谱中的吸收线估算的。

$$N_s = \frac{S_{\text{abs}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\sigma_f^i / F_C^i)^2 / M}}, \quad (4)$$

其中, S_{abs} 表示吸收坑的深度 (即归一化后吸收线的最低点与主成分流量 1 之间的差值), σ_f^i 为归一化前流量的不确定度, F_C^i 为伪连续谱流量, i 为数据点序号, M 为在吸收特征周围超过 ± 3 个特征高斯宽度 ($\pm 3\sigma$) 的像素点的数目。

使用 Chen 等人^[17]的方法, 我们对置信水平 $N_s > 2$ 的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收双线进行证认。

3.3 窄吸收双线轮廓拟合

确定 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线红移后, 通过一对高斯函数拟合窄吸收双线的轮廓, 由高斯模型积分得出静止坐标系下等值宽度 W_r , 其不确定度 σ 的计算式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i P^2(\lambda_i - \lambda_0) \sigma_i'^2}{\sum_i P^2(\lambda_i - \lambda_0)}} \Delta\lambda, \quad (5)$$

其中, λ_i 为数据点的波长, P 为线芯 λ_0 处的高斯轮廓, $\Delta\lambda$ 为相邻点的间隔, σ_i' 为归一化流量的不确定度。

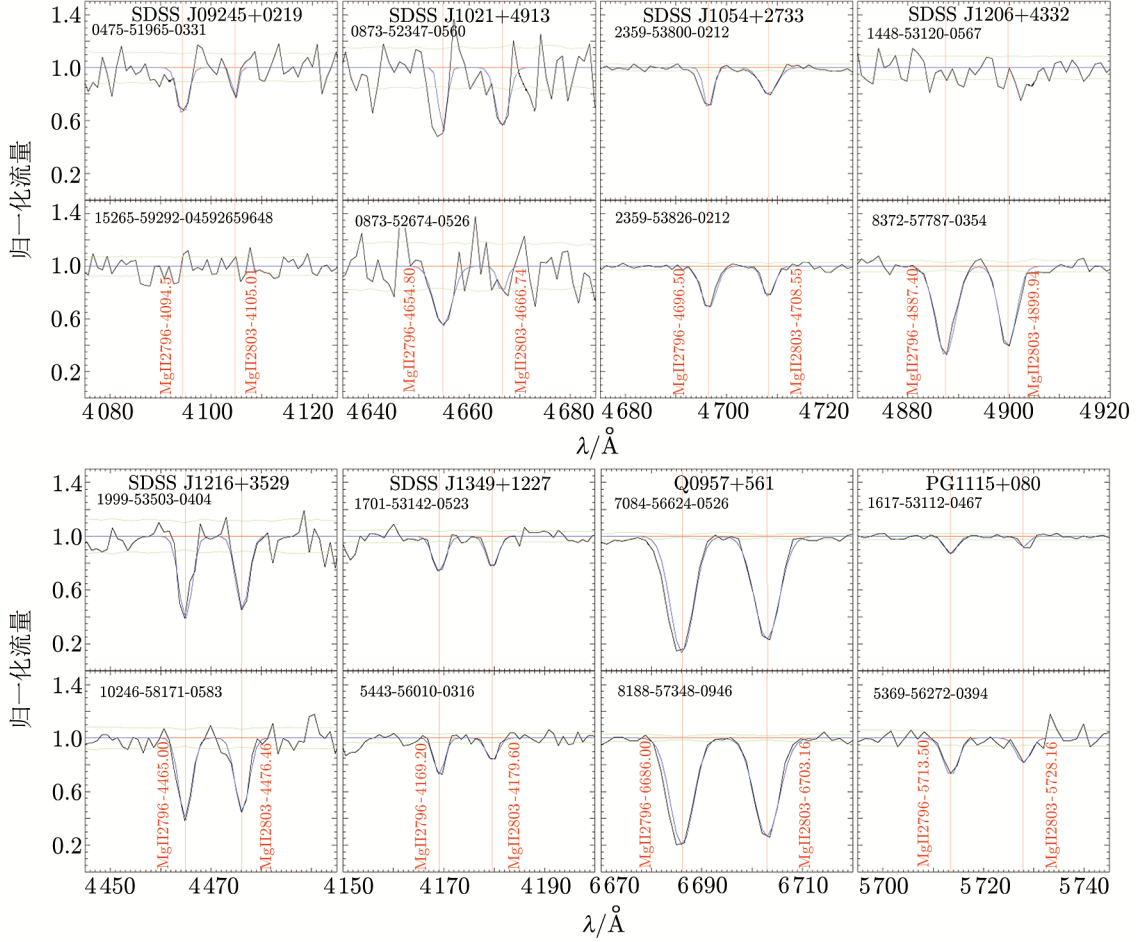
在静止坐标系中, 两条光谱的等值宽度值分别为 W_1 和 W_2 , 等值宽度的变化量为 $\Delta W = W_2 - W_1$, 变化量的不确定度 $\sigma_{\Delta W} = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}$, σ_1 和 σ_2 是两条光谱等值宽度的不确定度。

两条光谱等值宽度的差异值置信水平 $N_\sigma = \Delta W / \sigma_{\Delta W}$, 差异值置信水平 N_σ 是两条光谱吸收线等值宽度差异的可信度。

4 证认数据

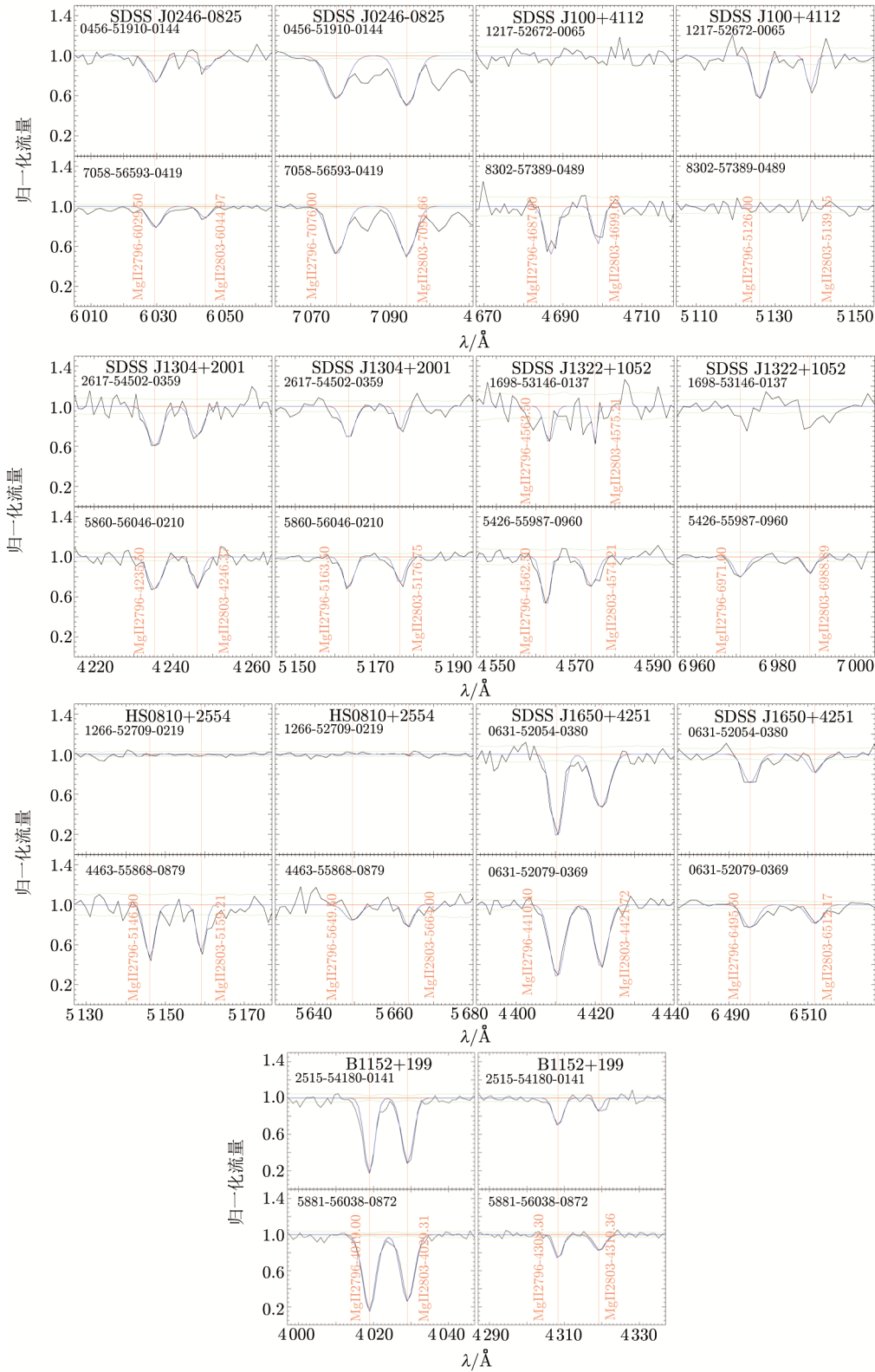
对光谱进行幂律连续谱、Fe II 连续谱、发射线成分扣除, 并对光谱进行归一化处理后, 我们在观测波长 3800 ~ 9200 Å 范围内搜寻 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线, 对可能的吸收线系统用一对高斯函数进行拟合, 图 1-4 展示了 Mg II 窄吸收线系统的拟合结果。

在 3800 ~ 9200 Å 范围内共证认出 42 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 吸收线系统红移 z_{abs} 的范围为 0.4146 ~ 1.9418, 其中 33 个吸收线系统在两条光谱中均能证认得到, 9 个吸收线系统只在其中一条光谱中证认得到。这 33 个吸收线系统的等值宽度值 $W_1^{\lambda 2796}$ 范围为 0.20 ~ 2.68, 吸收强度的平均值约为 0.97; 根据 $W_1^{\lambda 2796}$ 是否大于 0.3 Å 的判据^[18], 其中 31 个吸收线系统为强吸收 ($W_1^{\lambda 2796} \geq 0.3$), 2 个为弱吸收 ($W_1^{\lambda 2796} < 0.3$)。9 个吸收线系统的等值宽度值范围为 0.30 ~ 1.95, 吸收强度的平均值约为 0.95; 这 9 个吸收线系统均为强吸收 ($W_1^{\lambda 2796} \geq 0.3$)。Mg II $\lambda\lambda$ 窄吸收线系统证认相关数据见表 2。



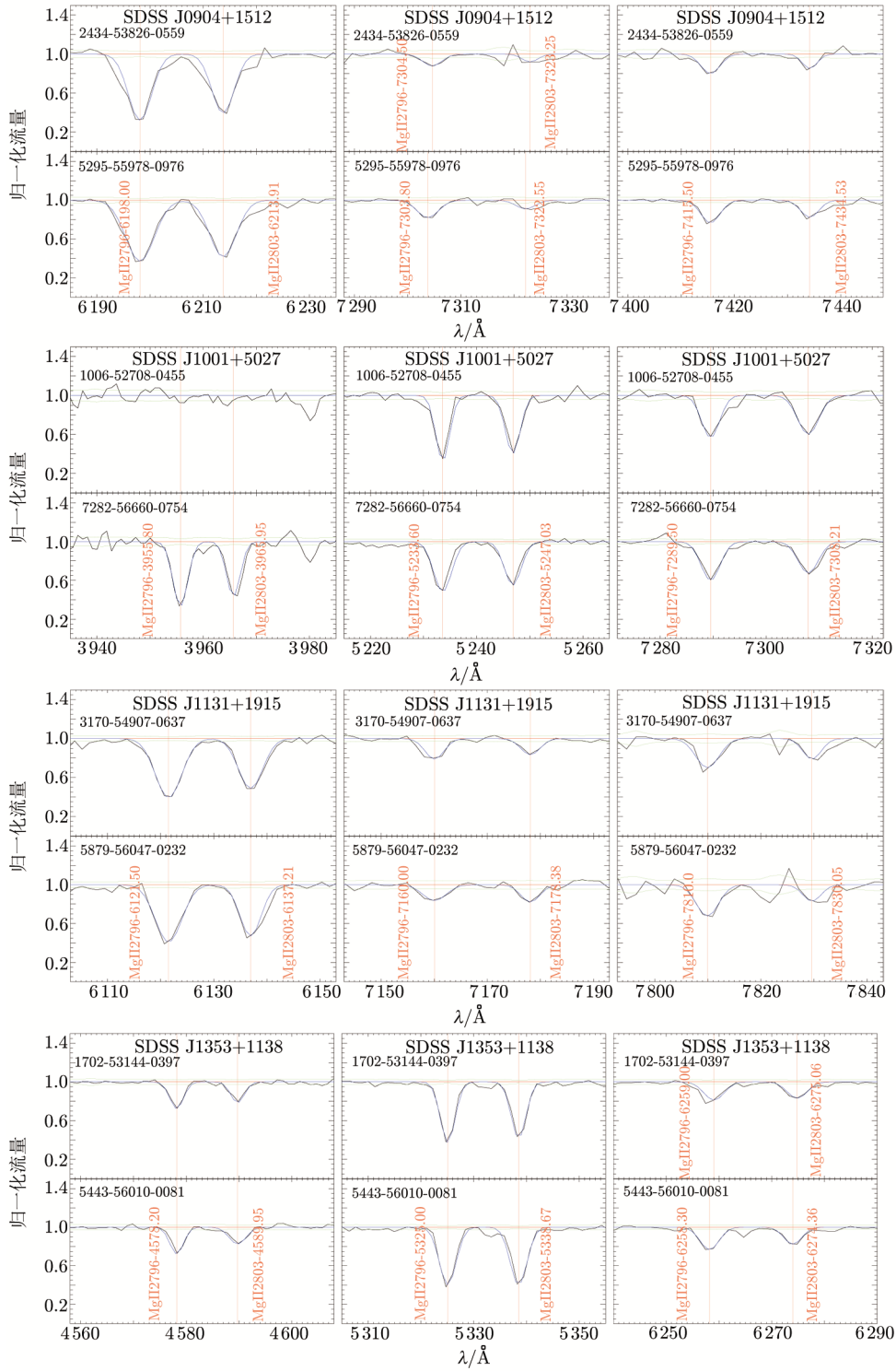
注：横坐标是观测波长，纵坐标是归一化流量。黑色线是归一化的光谱，红色竖直线是吸收线位置。

图 1 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统拟合结果



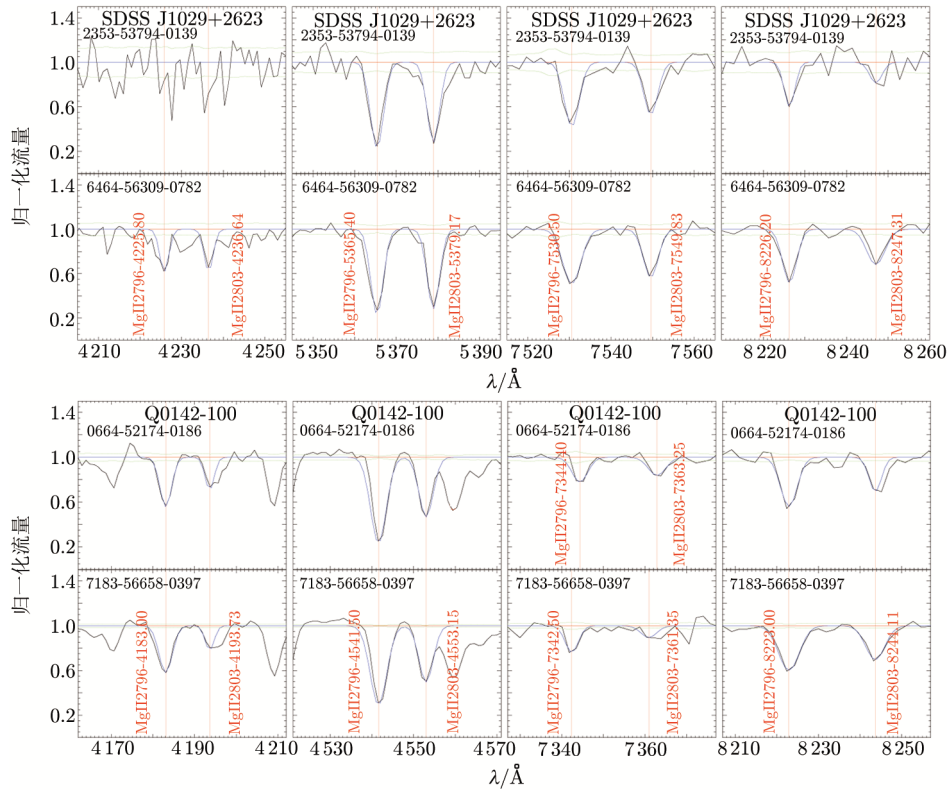
注: 横坐标是观测波长, 纵坐标是归一化流量。黑色线是归一化的光谱, 红色竖直线是吸收线位置。

图 2 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统拟合结果



注：横坐标是观测波长，纵坐标是归一化流量。黑色线是归一化的光谱，红色竖直线是吸收线位置。

图 3 3 个 Mg II $\lambda\lambda$ 2796,2803 窄吸收线系统拟合结果



注: 横坐标是观测波长, 纵坐标是归一化流量。黑色线是归一化的光谱, 红色竖直线是吸收线位置。

图 4 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统拟合结果

表 2 Mg II $\lambda\lambda$ 2796,2803 窄吸收线系统认证相关数据

| Lensed QSO | Mg II $\lambda\lambda/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_1/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_2/\text{\AA}$ | N_σ | z_{abs} |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------|-------|------------------|----------------------|-------|------------------|------------|------------------|
| SDSS J0246-0825 | 2 796 | 6 029.50 | 5.29 | 0.65 \pm 0.04 | 6 029.50 | 10.49 | 0.51 \pm 0.01 | -3.40 | 1.156 2 |
| | 2 803 | 6 044.97 | 3.65 | 0.32 \pm 0.04 | 6 044.97 | 6.55 | 0.23 \pm 0.01 | -2.18 | |
| | 2 796 | 7 076.50 | 12.16 | 1.11 \pm 0.03 | 7 076.50 | 23.54 | 1.05 \pm 0.01 | -1.90 | 1.530 6 |
| | 2 803 | 7 094.66 | 14.39 | 1.15 \pm 0.02 | 7 094.66 | 26.45 | 1.03 \pm 0.01 | -5.37 | |
| SDSS J0904+1512 | 2 796 | 6 198.00 | 18.15 | 1.69 \pm 0.02 | 6 198.00 | 21.56 | 1.92 \pm 0.02 | 8.13 | 1.216 5 |
| | 2 803 | 6 213.91 | 17.49 | 1.44 \pm 0.02 | 6 213.91 | 21.33 | 1.64 \pm 0.02 | 7.07 | |
| | 2 796 | 7 304.50 | 3.04 | 0.21 \pm 0.02 | 7 303.80 | 6.04 | 0.34 \pm 0.02 | 4.60 | 1.612 2/1.611 9 |
| | 2 803 | 7 323.25 | 2.25 | 0.11 \pm 0.02 | 7 322.55 | 2.85 | 0.15 \pm 0.02 | 1.41 | |
| | 2 796 | 7 415.50 | 5.81 | 0.34 \pm 0.02 | 7 415.50 | 8.95 | 0.40 \pm 0.01 | 2.68 | 1.651 9 |
| | 2 803 | 7 434.53 | 4.31 | 0.20 \pm 0.01 | 7 434.53 | 6.95 | 0.28 \pm 0.01 | 5.66 | |
| SDSS J0924+0219 | 2 796 | 4 094.50 | 2.98 | 0.68 \pm 0.07 | — | — | — | — | — |
| | 2 803 | 4 105.01 | 2.16 | 0.26 \pm 0.04 | — | — | — | — | 0.464 2 |
| SDSS J1001+5027 | 2 796 | — | — | — | 3 955.80 | 16.24 | 1.66 \pm 0.02 | — | 0.414 6 |
| | 2 803 | — | — | — | 3 965.95 | 13.94 | 1.31 \pm 0.02 | — | |
| | 2 796 | 5 233.60 | 15.17 | 1.18 \pm 0.02 | 5 233.60 | 20.09 | 1.18 \pm 0.01 | 0 | 0.871 6 |
| | 2 803 | 5 247.03 | 15.04 | 1.12 \pm 0.02 | 5 247.03 | 17.69 | 0.96 \pm 0.01 | -7.16 | |
| | 2 796 | 7 289.50 | 9.61 | 0.71 \pm 0.02 | 7 289.50 | 15.68 | 0.69 \pm 0.01 | -0.89 | 1.606 8 |
| | 2 803 | 7 308.21 | 10.09 | 0.76 \pm 0.02 | 7 308.21 | 14.86 | 0.59 \pm 0.01 | -7.60 | |
| SDSS J1004+4112 | 2 796 | — | — | — | 4 687.00 | 4.81 | 1.07 \pm 0.07 | — | 0.676 1 |
| | 2 803 | — | — | — | 4 699.03 | 3.53 | 0.63 \pm 0.05 | — | |
| | 2 796 | 5 126.00 | 5.52 | 0.93 \pm 0.05 | — | — | — | — | — |
| | 2 803 | 5 139.15 | 4.04 | 0.46 \pm 0.04 | — | — | — | — | 0.833 1 |

(表 2 续表)

| Lensed QSO | Mg II $\lambda\lambda/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_1/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_2/\text{\AA}$ | N_σ | z_{abs} | |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------|------------------|---|
| SDSS J1021+4913 | 2 796 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | 2 803 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | 4 654.80 | 3.48 | 0.60 \pm 0.06 | 4 654.80 | 2.51 | 1.23 \pm 0.15 | 3.90 | 0.664 6 | |
| SDSS J1029+2623 | | 4 666.74 | 2.62 | 0.90 \pm 0.10 | 4 666.74 | 1.06 | 0.27 \pm 0.08 | -4.92 | | |
| | | $mjd=52\ 347$ | | | | | | | | |
| | | $mjd=52\ 674$ | | | | | | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 5 365.40 | 8.49 | 1.62 \pm 0.06 | 5 365.40 | 16.45 | 1.51 \pm 0.02 | -1.74 | 0.918 7 | |
| | | 5 379.17 | 7.83 | 1.41 \pm 0.06 | 5 379.17 | 15.25 | 1.41 \pm 0.02 | 0.00 | | |
| | | 7 530.50 | 6.04 | 0.97 \pm 0.04 | 7 530.50 | 6.56 | 1.00 \pm 0.03 | 0.60 | 1.693 0 | |
| | | 7 549.83 | 6.80 | 0.74 \pm 0.03 | 7 549.83 | 8.84 | 0.72 \pm 0.02 | -0.55 | | |
| | | 8 226.20 | 4.10 | 0.44 \pm 0.03 | 8 226.20 | 9.73 | 0.70 \pm 0.02 | 7.21 | 1.941 8 | |
| | 8 247.31 | 2.04 | 0.24 \pm 0.04 | 8 247.31 | 6.56 | 0.42 \pm 0.02 | 4.02 | | | |
| SDSS J1054+2733 | | $mjd=53\ 794$ | | | | | | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 4 696.50 | 11.82 | 0.44 \pm 0.01 | 4 696.50 | 11.44 | 0.71 \pm 0.02 | 12.07 | 0.679 5 | |
| | | 4 708.55 | 8.28 | 0.51 \pm 0.02 | 4 708.55 | 7.77 | 0.42 \pm 0.01 | -4.02 | | |
| | | $mjd=53\ 800$ | | | | | | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 6 121.50 | 23.54 | 1.74 \pm 0.02 | 6 121.50 | 18.22 | 1.69 \pm 0.03 | -1.39 | 1.189 1 | |
| | | 6 137.21 | 19.33 | 1.35 \pm 0.02 | 6 137.21 | 15.96 | 1.21 \pm 0.02 | -4.95 | | |
| SDSS J1131+1915 | 2 796 | 7 160.00 | 6.69 | 0.37 \pm 0.02 | 7 160.00 | 3.73 | 0.35 \pm 0.03 | -0.55 | 1.560 5 | |
| | 2 803 | 7 178.38 | 5.36 | 0.29 \pm 0.02 | 7 178.38 | 4.08 | 0.31 \pm 0.03 | 0.55 | | |
| | 2 796 | 7 810.00 | 6.98 | 0.59 \pm 0.03 | 7 810.00 | 5.07 | 0.61 \pm 0.04 | 0.40 | 1.792 9 | |
| | 2 803 | 7 830.05 | 5.32 | 0.33 \pm 0.02 | 7 830.05 | 3.40 | 0.26 \pm 0.02 | -2.47 | | |
| | | $mjd=54\ 907$ | | | | | | | | |
| | | $mjd=56\ 047$ | | | | | | | | |
| SDSS J1206+4332 | | $mjd=53\ 826$ | | | | | | | | |
| | | $mjd=53\ 800$ | | | | | | | | |
| | | $mjd=53\ 120$ | | | | | | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 4 887.50 | 15.61 | 1.95 \pm 0.03 | 4 887.50 | 15.61 | 1.95 \pm 0.03 | — | 0.747 8 | |
| SDSS J1216+3529 | | $mjd=57\ 787$ | | | | | | | | |
| | | $mjd=58\ 171$ | | | | | | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 4 465.00 | 5.31 | 1.25 \pm 0.07 | 4 465.00 | 8.39 | 1.25 \pm 0.04 | 0.00 | 0.596 7 | |
| | | 4 476.46 | 4.57 | 1.13 \pm 0.08 | 4 476.46 | 7.27 | 1.22 \pm 0.05 | 0.95 | | |

(表 2 续表)

| Lensed QSO | Mg II $\lambda\lambda/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_1/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_2/\text{\AA}$ | N_σ | z_{abs} |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------|-------|------------------|----------------------|-------|------------------|------------|------------------|
| SDSS J1304+2001 | 2 796 | 4 235.50 | 5.42 | 1.19 \pm 0.06 | 4 235.50 | 7.73 | 0.92 \pm 0.04 | -3.74 | 0.514 7 |
| | 2 803 | 4 246.37 | 4.50 | 0.79 \pm 0.06 | 4 246.37 | 7.51 | 0.66 \pm 0.03 | -1.94 | |
| | 2 796 | 5 163.50 | 5.74 | 0.65 \pm 0.03 | 5 163.50 | 8.77 | 0.60 \pm 0.02 | -1.39 | 0.846 5 |
| | 2 803 | 5 176.75 | 5.08 | 0.34 \pm 0.02 | 5 176.75 | 8.96 | 0.43 \pm 0.02 | 3.18 | |
| SDSS J1322+1052 | 2 796 | 4 563.50 | 2.94 | 0.67 \pm 0.07 | 4 562.50 | 6.15 | 0.86 \pm 0.04 | 2.36 | 0.631 9/0.631 6 |
| | 2 803 | 4 575.21 | 3.20 | 0.35 \pm 0.04 | 4 574.21 | 4.04 | 0.67 \pm 0.05 | 5.00 | |
| | 2 796 | — | — | — | 6 971.00 | 4.17 | 0.30 \pm 0.02 | — | 1.492 9 |
| | 2 803 | — | — | — | 6 988.89 | 3.80 | 0.20 \pm 0.02 | — | |
| SDSS J1349+1227 | 2 796 | 4 169.20 | 5.92 | 0.57 \pm 0.03 | 4 169.20 | 7.93 | 0.50 \pm 0.02 | -1.94 | 0.490 9 |
| | 2 803 | 4 179.60 | 5.27 | 0.47 \pm 0.03 | 4 179.60 | 4.75 | 0.34 \pm 0.02 | -3.61 | |
| | 2 796 | 4 578.20 | 10.30 | 0.55 \pm 0.02 | 4 578.20 | 10.92 | 0.55 \pm 0.01 | 0.00 | 0.637 2 |
| | 2 803 | 4 589.95 | 7.69 | 0.43 \pm 0.02 | 4 589.95 | 6.79 | 0.43 \pm 0.02 | 0.00 | |
| SDSS J1353+1138 | 2 796 | 5 325.00 | 23.71 | 1.16 \pm 0.01 | 5 325.00 | 25.08 | 1.26 \pm 0.01 | 7.07 | 0.904 3 |
| | 2 803 | 5 338.67 | 21.66 | 1.08 \pm 0.01 | 5 338.67 | 24.73 | 1.26 \pm 0.01 | 12.73 | |
| | 2 796 | 6 259.00 | 9.69 | 0.40 \pm 0.01 | 6 258.30 | 10.44 | 0.46 \pm 0.01 | 4.24 | 1.238 3/1.238 0 |
| | 2 803 | 6 275.06 | 7.38 | 0.36 \pm 0.01 | 6 274.36 | 7.91 | 0.34 \pm 0.01 | -1.41 | |
| SDSS J1650+4251 | 2 796 | 4 410.40 | 10.60 | 2.12 \pm 0.05 | 4 410.40 | 15.82 | 2.09 \pm 0.03 | -0.51 | 0.577 2 |
| | 2 803 | 4 421.72 | 6.92 | 1.78 \pm 0.07 | 4 421.72 | 14.02 | 1.71 \pm 0.03 | -0.92 | |
| | 2 796 | 6 495.50 | 4.83 | 0.56 \pm 0.03 | 6 495.50 | 6.65 | 0.45 \pm 0.02 | -3.05 | 1.322 9 |
| | 2 803 | 6 512.17 | 3.39 | 0.34 \pm 0.03 | 6 512.17 | 5.40 | 0.39 \pm 0.02 | 1.39 | |
| Q0142-100 | 2 796 | 4 183.00 | 12.65 | 1.04 \pm 0.02 | 4 183.00 | 24.07 | 1.12 \pm 0.01 | 3.58 | 0.495 9 |
| | 2 803 | 4 193.73 | 7.92 | 0.53 \pm 0.02 | 4 193.73 | 11.76 | 0.40 \pm 0.01 | -5.81 | |
| | | | | | | | | | |

(表 2 续表)

| Lensed QSO | Mg II $\lambda\lambda/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_1/\text{\AA}$ | Center/ \AA | N_s | $W_2/\text{\AA}$ | N_σ | z_{abs} |
|-------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------|----------------------------|
| Q0142-100 | 2 796 | 4 541.50 | 31.76 | 2.25 \pm 0.01 | 4 541.50 | 60.24 | 2.19 \pm 0.01 | -4.24 | 0.624 1 1.626 4/1.625 7 |
| | 2 803 | 4 553.15 | 22.20 | 1.40 \pm 0.01 | 4 553.15 | 43.41 | 1.32 \pm 0.01 | -5.66 | |
| | 2 796 | 7 344.40 | 4.07 | 0.40 \pm 0.02 | 7 342.50 | 7.77 | 0.36 \pm 0.02 | -1.41 | |
| | 2 803 | 7 363.25 | 4.96 | 0.32 \pm 0.02 | 7 361.35 | 5.19 | 0.19 \pm 0.01 | -5.81 | |
| | 2 796 | 8 223.00 | 11.23 | 0.75 \pm 0.01 | 8 223.00 | 19.01 | 0.85 \pm 0.01 | 7.07 | |
| 2 803 | 8 244.11 | 9.80 | 0.39 \pm 0.01 | 8 244.11 | 14.91 | 0.60 \pm 0.01 | 14.85 | | |
| | | $mjd=52\ 709$ | | | $mjd=55\ 868$ | | | | |
| HS0810+2554 | 2 796 | — | — | — | 5 146.00 | 5.22 | 0.95 \pm 0.06 | — | 0.840 3 |
| | 2 803 | — | — | — | 5 159.21 | 4.82 | 0.70 \pm 0.05 | — | |
| | 2 796 | — | — | — | 5 649.50 | 1.32 | 0.37 \pm 0.09 | — | |
| | 2 803 | — | — | — | 5 664.00 | 1.92 | 0.34 \pm 0.06 | — | |
| | | $mjd=56\ 624$ | | | $mjd=57\ 348$ | | | | |
| Q0957+561 | 2 796 | 6 686.00 | 35.00 | 2.09 \pm 0.01 | 6 686.00 | 31.34 | 1.92 \pm 0.01 | -12.02 | 1.391 0 |
| | 2 803 | 6 703.16 | 31.17 | 2.01 \pm 0.01 | 6 703.16 | 29.07 | 1.92 \pm 0.01 | -6.36 | |
| | | $mjd=53\ 112$ | | | $mjd=56\ 272$ | | | | |
| PG1115+080 | 2 796 | 5 713.50 | 5.84 | 0.20 \pm 0.01 | 5 713.50 | 4.69 | 0.51 \pm 0.03 | 9.80 | 1.043 2 |
| | 2 803 | 5 728.16 | 3.61 | 0.10 \pm 0.01 | 5 728.16 | 3.24 | 0.32 \pm 0.03 | 6.96 | |
| | | $mjd=54\ 180$ | | | $mjd=56\ 038$ | | | | |
| B1152+199 | 2 796 | 4 019.00 | 21.11 | 2.02 \pm 0.02 | 4 019.00 | 27.92 | 2.68 \pm 0.01 | 29.52 | 0.437 2 0.540 7 |
| | 2 803 | 4 029.31 | 17.44 | 2.02 \pm 0.03 | 4 029.31 | 25.09 | 2.33 \pm 0.02 | 8.60 | |
| | 2 796 | 4 308.30 | 8.30 | 0.65 \pm 0.02 | 4 308.30 | 9.40 | 0.52 \pm 0.02 | -4.60 | |
| | 2 803 | 4 319.36 | 3.95 | 0.21 \pm 0.02 | 4 319.36 | 6.33 | 0.54 \pm 0.02 | 8.48 | |

注: Lensed QSO 是类星体引力透镜源, Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 是静止坐标系左右线芯位置, Center 是观测坐标系左右线芯位置, N_s 是吸收线的位置信水平, W_1 、 W_2 是两条光谱等值宽度值, N_σ 是两条光谱等值宽度差异的可信度, z_{abs} 表示吸收线的红移, mjd 即表 1 中“plate-mjd-fiberid”的“mjd”, 代表光谱名。“—”表示吸收线不显著或 $N_s < 2$ 。

5 结果与讨论

透镜天体红移受到多重和复杂的观测偏差的影响。基于 FJ 关系 (Faber-Jackson relation, FJ) 或引力透镜统计估测的透镜红移过于宽泛^[19, 20]。我们将 z_{abs} 与其他研究者估测的透镜天体红移 z_1 或居间天体红移 z 的数值进行近似值讨论, 或与他们估测的透镜红移范围进行比较。

5.1 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统

在 3800 ~ 9200 Å 范围内, 8 个源 (SDSS J0924+0219、SDSS J1021+4913、SDSS J1054+2733、SDSS J1206+4332、SDSS J1216+3529、SDSS J1349+1227、Q0957+561、PG1115+080) 证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 其中 6 个源在两条光谱中均证认得到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 2 个源只在一条光谱中证认得到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统。

5.1.1 SDSS J0924+0219

SDSS J0924+0219 在 51965 光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.4642。表 1 给出其透镜天体红移为 0.394。Eigenbrod 等人^[21]通过测量透镜系统中众多恒星吸收线的平均红移, 估测主透镜星系红移约为 0.394 ± 0.001 。Inada 等人^[22]估测透镜红移分布范围为 0.2 ~ 1。0.4642 与 Eigenbrod 等人^[21]估测的主透镜红移相差 0.0702, 且在 Inada 等人^[22]估测的透镜红移分布范围内。

5.1.2 SDSS J1021+4913

SDSS J1021+4913 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.6645。该吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]证认得到的 0.664545 近似相等。表 1 中其透镜天体红移为 0.451。Pindor 等人^[23]观测显示, 在两个类星体图像之间存在一个透镜星系, 他们估测透镜星系红移范围是 0.45 ~ 1.25, 0.6645 在此范围内。

5.1.3 SDSS J1054+2733

SDSS J1054+2733 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.6795; 该吸收线系统红移与 Zhu 和 Ménard^[11]、Kayo 等人^[24]分别证认的 0.679430、0.6794 近似相等。Kayo 等人^[24]对透镜星系 G1 进行了观测, 由于 $R-I$ 的颜色太蓝, 而无法匹配红移 ($R-I$) 的数值, 测量的红移 (FJ) 约为 0.23, 该红移数值的经典误差约为 0.1。0.6795 与此文献红移数值相差较大, 但 0.6795 在 Inada 等人^[22]估测的透镜红移分布范围内。

5.1.4 SDSS J1206+4332

SDSS J1206+4332 在一条光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.7478。该吸收线系统红移与 Oguri 等人^[25]、Agnello 等人^[26]在 B 像光谱证认得到的 0.748 近似相等。表 1 中其透镜天体红移为 0.748。Oguri 等人^[25]认为 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线与透镜星系 G1 成协, 因此估测透镜星系 G1 红移约为 0.748。根据恒星吸收特征, Agnello 等人^[26]测得主偏转星系的红移约为 0.745。Rusu 等人^[27]认为透镜系统似乎有三个

透镜星系, 其中主透镜 G1 的红移 $z_1 \approx 0.748$, 星系 G2 被确定为 $z_1 \geq 0.7$ 的高红移星系。0.747 8 与 Oguri 等人^[25]、Rusu 等人^[27] 估测的透镜星系 G1 红移近似相等。

5.1.5 SDSS J1216+3529

SDSS J1216+3529 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.596 7。Oguri 等人^[28] 根据透镜星系的颜色和星等, 估测透镜红移 $z_1 \approx 0.55$ 。Rusu 等人^[27] 估测透镜星系 G1、G2、G3 红移 $z_1 \approx 0.55$ 。吸收线系统 0.596 7 与他们的文献估测的透镜天体红移近似相等。

5.1.6 SDSS J1349+1227

SDSS J1349+1227 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.490 9。Kayo 等人^[24] 通过颜色选择法, 估测透镜星系红移 (FJ)、红移 ($R-I$) 分别约为 0.63、0.66, 红移 (FJ) 和红移 ($R-I$) 的典型不确定度约为 0.1。0.490 9 在 Inada 等人^[22] 估测的透镜红移分布范围内。

5.1.7 Q0957+561

Q0957+561 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 1.391 0。该吸收线系统与 Cooke 等人^[29] 证认得到的 1.391 1 近似相等。表 1 中其透镜天体红移为 0.36。Fadely 等人^[30] 推测类星体宿主星系红移约为 1.41。1.391 与此文献的结果近似相等。

5.1.8 PG1115+080

PG1115+080 在两条光谱中均能证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 1.043 2。该吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11] 证认得到的 1.043 26 近似相等。表 1 中其透镜星系红移为 0.311。Christian 等人^[31] 将光度测量与红移星系的合成颜色进行比较, 证明该透镜红移可能在 0.3 ~ 0.45 范围内。Kochanek^[19] 估测的透镜星系红移约为 0.37 ± 0.18 或 0.48 ± 0.22 。Chen 等人^[32] 对透镜的子结构进行探测分析, 认为视线上所有物体透镜的累积效应可能是显著的。尽管 1.043 2 与其他研究者推测的透镜红移数值相差较大, 但不能排除 1.043 2 对透镜效应的可能影响。

5.2 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统

在 3 800 ~ 9 200 Å 范围内, 7 个源 (SDSS J0246-0825、SDSS J1004+4112、SDSS J1304+2001、SDSS J1322+1052、SDSS J1650+4251、HS0810+2554、B1152+199) 均证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统。其中, 5 个源在两条光谱上均能证认到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统, 2 个源只在一条光谱中证认得到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统。

5.2.1 SDSS J0246-0825

SDSS J0246-0825 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别为 1.156 2、1.530 6。1.530 6 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Inada 等人^[34] 分别证认的 1.531 09、1.531 近似相等。表 1 中其透镜天体红移为 0.723。Inada 等人^[34] 根据两个类星体光谱中的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线红移和星系表观星等, 估计透镜星系的红

移 z_1 约为 0.724; Eigenbrod 等人^[35] 根据透镜星系的光谱测量透镜红移约为 0.724 ± 0.002 。1.156 2、1.530 6 吸收线系统与其他研究者估测的透镜天体红移相差较大。

5.2.2 SDSS J1004+4112

SDSS J1004+4112 在 57 389 光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.676 1; 在 52 672 光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.833 1。0.676 1 吸收线系统与 Oguri 等人^[33] 证认的 0.676 近似相等; 0.833 1 系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Oguri 等人^[33] 分别证认的 0.833 127、0.833 近似相等。表 1 中其透镜天体红移为 0.68。Inada 等人^[34] 认为透镜天体由红移分别为 0.680、0.675、0.675 的 G1、G2、G3 这 3 个星系构成, 从而形成了以 0.68 为中心的 5 个像的透镜效应。Oguri 等人^[33]、Inada 等人^[36] 测得中心星系 G1 红移约为 0.680, 根据透镜附近星系深度图像及光谱, G2、G3 星系红移均为 0.675^[33]。0.676 1 吸收线系统与表 1 中的红移、Oguri 等人^[33]、Inada 等人^[36] 的透镜天体红移近似相等。

5.2.3 SDSS J1304+2001

SDSS J1304+2001 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.514 7、0.846 7。0.846 7 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11] 证认的 0.846 496 近似相等。表 1 中其透镜天体的红移为 0.373。Kayo 等人^[24] 确认透镜天体是星系 G1、G2, 他们估测透镜星系团的红移 ($R - I$) 约为 0.46, 典型不确定性约为 0.1。这与 0.514 7 吸收线系统红移近似相等。

5.2.4 SDSS J1322+1052

SDSS J1322+1052 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.631 9/0.631 6、1.492 9。Oguri 等人^[28] 根据透镜星系的颜色和星等, 估计透镜红移 (FJ) 值 $z_1 \approx 0.55$ 。Rusu 等人^[27] 探测到 G1、G2、G3、G4、G5, 红移光度值估测 $z_1 \approx 0.55$ 。考虑到 Oguri 等人^[28] 估计方法误差约为 0.1, 0.631 6 吸收线系统与 Rusu 等人^[27]、Oguri 等人^[28] 估测的透镜天体红移近似相等。

5.2.5 SDSS J1650+4251

SDSS J1650+4251 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别为 0.577 2、1.322 9。0.577 2 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Morgan 等人^[37] 分别证认的 0.577 139、0.577 近似相等, 1.322 9 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11] 证认的 1.322 9 相等。表 1 中其透镜星系的红移为 0.577。Morgan 等人^[37] 在类星体的光谱中检测到一个很强的金属吸收线系统, 表明其透镜红移可能为 0.577。因此, 0.577 2 吸收线系统与此文献近似相等。

5.2.6 HS0810+2554

HS0810+2554 在 55 868 光谱中证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.840 4、1.020 3。Mosquera 和 Kochanek^[5] 根据类星体图像分离和透镜星系概率分布, 估测透镜星系的红移约为 0.89。0.840 4 与此文献相差 0.059 6, Oguri 等人^[28] 方法估计误差约为 0.1, 因此, 可认为两者近似相等。

5.2.7 B1152+199

B1152+199 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 红移分别约为 0.437 2、0.540 7。这 2 个吸收线系统红移分别与 Zhu 和 Ménard^[11] 证认的 0.437 168、0.540 791 近似相等。表 1 中其透镜星系的红移为 0.439。Myers 和 Rusin^[38] 给出的透镜红移约为 $0.438 6 \pm 0.000 8$, Toft 等人^[39] 探测到 $z_1 \approx 0.44$ 的透镜星系。0.437 2 吸收线系统与表 1 中的红移、Myers 和 Rusin^[38]、Toft 等人^[39] 的透镜天体红移近似相等。

此外, Metcalf^[40] 研究表明, 在 B1152+199 视线上存在小尺度结构; Zhang 等人^[41] 研究表明, 主透镜星系西边的某星系在透镜系统中的作用不可忽视。因此, 我们推测 0.540 7 也可能对透镜效应有贡献。

5.3 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统

在 3 800 ~ 9 200 Å 范围内, 4 个源 (SDSS J0904+1512、SDSS J1001+5027、SDSS J1131+1915、SDSS J1353+1138) 证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统。其中 3 个源在两条光谱上均能证认到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统; 1 个源在一条光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 其他 2 个吸收线系统在两条光谱中均能证认得到。

5.3.1 SDSS J0904+1512

SDSS J0904+1512 在两条光谱中均能证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 1.216 5、1.612 2/1.611 9、1.651 9。1.216 5 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Kayo 等人^[24] 分别证认的 1.216 38、1.216 8 近似相等, 1.612 2、1.651 9 与 Zhu 和 Ménard^[11] 证认的 1.612 34、1.651 72 近似相等。Kayo 等人^[24] 估测透镜星系 G1 的红移 ($R - I$) 约为 0.54, 与我们证认得到的 3 个系统红移相差较大。

5.3.2 SDSS J1001+5027

SDSS J1001+5027 在 56 660 光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.414 6; 在两条光谱中均能证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.871 6、1.606 8。0.414 6 吸收线系统与 Misawa 等人^[42]、潘等人^[43] 分别证认的 0.414 7、0.414 55 近似相等, 0.871 6 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Misawa 等人^[42]、潘等人^[43] 分别证认的 0.871 532、0.871 6、0.871 40 近似相等, 1.606 8 吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、潘等人^[43] 分别证认的 1.606 76、1.606 77 近似相等。表 1 中其透镜星系的红移约为 0.415。Inada 等人^[22] 通过光谱测量, 确定主透镜红移约为 0.415; Rusu 等人^[27] 研究显示星系 G1、G2 为透镜天体; Misawa 等人^[42] 研究表明 0.871 6 的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统可能与前景的一个星系有关联。0.414 6 和 0.871 6 吸收线系统与表 1 中的红移、Inada 等人^[22]、Misawa 等人^[42] 的透镜天体红移近似相等。

5.3.3 SDSS J1131+1915

SDSS J1131+1915 在两条光谱中均能证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 1.189 1、1.560 5、1.792 9。1.189 1 与 Kayo 等人^[24] 在一条光谱中证认的 Fe II 吸收线红移 $1.189 0 \pm 0.000 5$ 近似相等。Kayo 等人^[24] 用 UH88 和斯巴鲁望远镜拍摄

SDSS J1131+1915 图像, 在他们的图 2 中显示透镜星系 G1, 由于该透镜星系暗弱而无法估测该星系的参数。Rusu 等人^[27]利用 FJ 关系, 估测透镜星系红移 z_1 约为 0.3, 与我们的结果相差较大。

5.3.4 SDSS J1353+1138

SDSS J1353+1138 在两条光谱中均能证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.637 2、0.904 3、1.238 3/1.238 0。这 3 个吸收线系统与 Zhu 和 Ménard^[11]、Inada 等人^[44]分别证认的 0.637 173、0.904 270、1.238 08 和 0.637、0.904、1.238 近似相等。Inada 等人^[44]根据类星体图像之间的扩展物体图像, 估测透镜星系红移可能是 0.3, 同时他们在红移 0.637、0.904、1.238 处探测到 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统, 并认为它们可能来自居间星系。Rusu 等人^[27]检测到额外的恒星成分 G1、G2。0.637 2、0.904 3、1.238 3 吸收线系统与 Inada 等人^[44]估测的居间星系红移近似相等。

5.4 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统

在 $3\ 800 \sim 9\ 200\ \text{\AA}$ 范围内, 2 个源 (SDSS J1029+2623、Q0142-100) 证认得到 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统。其中 1 个源在两条光谱上均能证认得到 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统; 1 个源的一条光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 其他 3 个吸收线系统在两条光谱中均能证认得到。

5.4.1 SDSS J1029+2623

SDSS J1029+2623 在 56 309 光谱中证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移约为 0.511 2; 在两条光谱中均能证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.918 7、1.693 0、1.941 8。0.511 2 与 Misawa 等人^[45]证认的 0.511 1 近似相等, 0.918 7 与 Zhu 和 Ménard^[11]、Misawa 等人^[45]分别证认的 0.918 641、0.918 7 近似相等, 1.693 0、1.941 8 分别与 Zhu 和 Ménard^[11]证认的 1.692 96、1.941 93 近似相等。我们在两条光谱中证认得到的 3 个吸收线系统, Zhu 和 Ménard^[11]只在 53 794 光谱中证认得到。

表 1 中其透镜天体的红移为 0.58。Napier 等人^[46]在该类星体视线上探测到红移约为 0.511 1 的星系。Acebron 等人^[47]在星团的中心区域发现另外的星系, 他们认为这些星系可以对整个透镜模型产生显著的扰动, 他们从光谱上确认了 63 个星系团或星系红移, 其中 0.918 3 与我们证认的 0.918 7 近似相等。因此, 0.511 1、0.918 7 吸收线系统分别与 Napier 等人^[46]、Acebron 等人^[47]的透镜天体红移近似相等。

此外, Misawa 等人^[45]在 B 像探测到 C IV 吸收线红移约为 1.692 4, 在 A 像探测到 Si IV 吸收线红移约为 1.942 0, 他们的研究表明, 这些吸收线与类星体物理相关。因此, 1.692 8、1.941 8 吸收线系统与 Misawa 等人^[45]的吸收线近似相等。

5.4.2 Q0142-100

Q0142-100 在两条光谱中均能证认得到 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 系统红移分别约为 0.495 9、0.624 1、1.626 4/1.625 7、1.940 8。0.495 9 与 Lehar 等人^[48]探测到的 0.49 近似相等, 1.626 4/1.625 7、1.940 8 分别与 Zhu 和 Ménard^[11]探测的 1.626 43、1.940 67 近似相等。我们在两条光谱中探测到的 4 个吸收线系统, 其中 3 个吸收线系统分别与 Zhu

和 Ménard^[11]、Lehár 等人^[48]的结果近似相等, 但他们只在一条光谱中探测, 而且他们也没有探测到 0.624 1 吸收线系统。

表 1 中其透镜天体的红移为 0.491。Surdej 等人^[49]发现其透镜星系红移约为 0.49; Eigenbrod 等人^[35]从透镜星系的光谱确认透镜天体红移的最佳估计值约为 0.491 ± 0.001 ; Cooke 等人^[29]在 Q0142-100 光谱中发现红移 1.626 50 处的阻尼 Ly α 系统。Koptelova 等人^[50]测量透镜星系 G 红移约为 0.49, 并对透镜星系附近的星系 G1、G2、G3 进行了研究, 他们认为红移 1.63 处的星系碰撞参数较大。因此, 0.495 9、1.626 4 吸收线系统分别与表 1 中的红移、Surdej 等人^[49]、Cooke 等人^[29]估测的透镜天体红移近似相等。

6 结 论

我们对强引力透镜类星体 21 个源的两条光谱进行证认, 共获得 42 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 其中 8 个源证认得到 1 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 7 个源证认得到 2 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 4 个源证认得到 3 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 2 个源证认得到 4 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 吸收线系统红移范围为 0.4146 ~ 1.9418。我们证认的 42 个 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统, 其中 30 个与其他研究人员得到的红移数值近似相等, 即 71%(30/42) 的 z_{abs} 与其他研究人员在一条光谱或一个像的光谱中的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线系统红移数值或其他吸收线红移数值近似相等。

我们将这 21 个源得到的数值与其他研究人员估测的透镜天体红移数据进行比较, 发现 81%(17/21) 的 z_{abs} 与其他研究者估测的透镜天体红移或居间天体红移近似相等, 或在他们估测的范围内。

Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统证认需要的参数相对较少, 且对暗弱吸收体红移的估测具有相对高的精度, 由于透镜效应对视线上任何地方的团块都很敏感, 即使是小质量的卫星也会对透镜效应有扰动。因此, 通过 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 窄吸收线系统证认, 不仅可以探测视线沿途上可能影响透镜效应的其他小尺度、小质量的天体, 而且对类星体强引力透镜系统的进一步完善和透镜天体红移的估测具有重要意义。

致谢

衷心感谢两位审稿专家的审阅与宝贵意见, 这些建设性的意见使得本文在写作质量及内容完整性上均得到了提升。

参考文献:

- [1] Petrillo C E, Tortora C, Vernardos G, et al. MNRAS, 2018, 484: 3879
- [2] Perera D, Williams L L R, Liesenborgs J, et al. MNRAS, 2024, 527: 2639
- [3] Claeskens J F, Surdej J. A&ARv, 2002, 10: 263
- [4] Inada N, Oguri M, Rusu C E, et al. AJ, 2014, 147 (6): 153
- [5] Mosquera A M, Kochanek C S. ApJ, 2011, 738: 96
- [6] Dai X, Kochanek C S, Chartas G, et al. ApJ, 2010, 709: 278

- [7] Bate N F, Floyd D J E, Webster R L, et al. *ApJ*, 2011, 731: 71
- [8] Keeton C R, Gaudi B S, Petters A O. *ApJ*, 2003, 598: 138
- [9] Shu Y, Bolton A S, Kochanek C S, et al. *ApJ*, 2016, 824: 86
- [10] Misawa T, Tytler D, Iye M, et al. *AJ*, 2002, 123: 1847
- [11] Zhu G, Ménard B. *ApJ*, 2013, 770: 130
- [12] Quider A M, Nestor D B, Turnshek D A, et al. *AJ*, 2011, 141: 137
- [13] Bergeron J, Boissé P. *A&A*, 1991, 243: 344
- [14] Eisenstein D J, Weinberg D H, Agol E, et al. *AJ*, 2011, 142: 72
- [15] Aihara H, Allende P C, An D, et al. *ApJS*, 2011, 193: 29
- [16] Chen Z F, Qin Y P, Pan C J, et al. *ApJS*, 2014, 210: 7
- [17] Chen Z F, Gu Q S, Chen Y M. *ApJS*, 2015, 221: 32
- [18] 陈志福. 博士论文. 南京: 南京大学, 2019: 4
- [19] Kochanek C S. *ApJ*, 1992, 384: 1
- [20] Rusin D, Kochanek C S, Norbury M, et al. *ApJ*, 2001, 557: 594
- [21] Eigenbrod A, Courbin F, Dye S, et al. *A&A*, 2006, 451: 747
- [22] Inada N, Oguri M, Shin Min-Su, et al. *AJ*, 2012, 143: 119
- [23] Pindor B, Eisenstein D J, Gregg M D, et al. *AJ*, 2006, 131: 41
- [24] Kayo I, Inada N, Oguri M, et al. *AJ*, 2010, 139: 1614
- [25] Oguri M, Inada N, Hennawi J F, et al. *ApJ*, 2005, 622: 106
- [26] Agnello A, Sonnenfeld A, Suyu S H, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 3830
- [27] Rusu C E, Oguri M, Minowa Y, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 2
- [28] Oguri M, Inada N, Clocchiatti A, et al. *AJ*, 2008, 135: 520
- [29] Cooke R, Pettini M, Steidel C C, et al. *MNRAS*, 2010, 409: 679
- [30] Fadely R, Keeton C R, Nakajima R, et al. *ApJ*, 2010, 711: 246
- [31] Christian C A, Crabtree D, Waddell P. *ApJ*, 1987, 312: 45
- [32] Chen J, Kravtsov A V, Keeton C R. *ApJ*, 2003, 592: 24
- [33] Oguri M, Inada N, Keeton C R, et al. *ApJ*, 2004, 605: 78
- [34] Inada N, Burles S, Gregg M D, et al. *AJ*, 2005, 130: 1967
- [35] Eigenbrod A, Courbin F, Meylan G. *A&A*, 2007, 465: 51
- [36] Inada N, Oguri M, Falco E E, et al. *PASJ*, 2008, 60: L27
- [37] Morgan N D, Snyder J A, Reens L H. *AJ*, 2003, 126: 2145
- [38] Myers S T, Rusin D. *AJ*, 1999, 117: 2565
- [39] Toft S, Hjorth J, Burud I. *A&A*, 2000, 357: 115
- [40] Metcalf B R. *ApJ*, 2002, 580: 696
- [41] Zhang M, Yuan Q, Liu J Y. *MNRAS*, 2022, 511: 1085
- [42] Misawa T, Inada N, Oguri M, et al. *ApJ*, 2018, 854: 69
- [43] 潘彩娟, 黄红艳, 黄伟荣, 等. *天文学进展*, 2019, 37(01): 63
- [44] Inada N, Oguri M, Becker R H, et al. *AJ*, 2006, 131: 1934
- [45] Misawa T, Saez C, Charlton J C, et al. *ApJ*, 2016, 825: 25
- [46] Napier K, Sharon K, Dahle H, et al. *ApJ*, 2023, 959: 134
- [47] Acebron A, Grillo C, Bergamini P, et al. *ApJ*, 2022, 926: 86
- [48] Lehár J, Falco E E, Kochanek C S, et al. *AJ*, 2000, 536: 584
- [49] Surdej J, Magain P, Swings J P, et al. *Nature*, 1987, 329(22): 695
- [50] Koptelova E, Chiueh T, Chen W P, et al. *A&A*, 2014, 566: A36

Identification of Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ Narrow Absorption Line Systems in the Spectra of Strongly Lensed Quasars

PAN Caijuan, YANG Jie, WEI Xianglong

(Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: Based on the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Quasar Lens Search (SQLS) data, 21 strong gravitational lensing quasar sources with at least two images were selected, with their spectral redshift ranging from 1.018 56 to 2.915 98. Using the latest SDSS DR18 spectral data, Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ narrow absorption line systems were searched for in the observational wavelength range of 3 800~9 200 Å. By normalizing the two spectra separately and fitting the absorption lines, 42 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ narrow absorption line systems were identified, with their absorption line redshift z_{abs} ranging from 0.414 6 to 1.941 8. The study found that 81% (17/21) of the z_{abs} are approximately equal to or fall within the range of the lensing galaxy redshift z_1 or the intervening galaxy redshift z estimated by other researchers. Therefore, the identification of Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ narrow absorption line systems can effectively reveal details that may affect the lensing effect along the line of sight, which is of great significance for the search of strong gravitational lensing quasar candidate systems and the estimation of lensing galaxy redshifts.

Key words: quasar; lens redshift; narrow absorption line system