

中国科学技术大学

博士学位论文



类星体外流的吸收线与发射线研究

作者姓名: 刘文娟
学科专业: 天体物理
导师姓名: 周宏岩 教授
完成时间: 二零一五年十月

University of Science and
Technology of China
A dissertation for
doctor's degree



Absorption- and Emission Lines of Outflows in Active Galactic Nuclei

Author :	Wenjuan Liu
Speciality :	Astrophysics
Supervisor :	Prof. Hongyan Zhou
Finished Time :	October, 2015

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: _____ 签字日期: _____

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

公开 保密 _____ 年

作者签名: _____ 导师签名: _____

签字日期: _____ 签字日期: _____

摘要

在活动星系核 (Active galactic nuclei, AGN) 对星系的反馈作用中, 外流是最常见的形式。15%~30% 的射电宁静类星体紫外光谱中有较大蓝移速度的宽吸收线 (Broad absorption Lines, BALs) 特征; 此外, 在类星体 (QSO) 光谱中, C_{IV}、[O_{III}] 等高电离发射线普遍呈现出蓝端过剩的不对称谱线轮廓, 研究者认为这种蓝端过剩成分即产生于外流气体。数值模拟研究结果表明: AGN 的外流是黑洞-星系核球关系 (e.g., $M_{\text{BH}} - \sigma_*$) 得以建立的关键因素。近些年来, 对近邻 AGN 的观测也直接证实了 AGN 驱动的外流可以到达 kpc 甚至 10 kpc 尺度。然而由于目前的观测能力所限, 只有极个别很邻近的 AGN 的外流得到了空间分辨的观测。对于绝大部分 AGN 而言, 还不能开展这种直接的、定量的观测。因此, 找到一条能大规模地、定量地研究外流气体物理性质的方法亟为重要。

在我博士研究生期间, 我们尝试从两个方面实现上述目的。一方面, 我们在 SDSS/BOSS 巡天光谱数据库中系统性地寻找 He I* BAL 类星体, 以便利用 He I* 吸收线的测量优势测定外流气体的物理性质; 另一方面, 我们试图将外流所产生的吸收线和发射线结合起来对外流的性质加以限定。具体如下:

(1) 数值模拟研究表明, 当外流的动能损失率 $\dot{E}_k \geq 0.05L_{\text{Edd}}$ 时才能对星系尺度产生较大影响。简单的量级估算显示, 满足以上条件需要气体柱密度达到 $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 。换言之, 柱密度大的低电离宽吸收线 (LoBAL) 类星体对研究黑洞与寄主星系的共同演化非常重要。目前研究 LoBALs 的困境在于常见的 C_{IV}、Mg II 吸收线在高柱密度下极易饱和, 因而无法准确地测量吸收气体的柱密度 N_{H} 及其他物理性质。为了解决这个问题, 我们着眼于前人关注较少但非常有用 He I* 吸收线。He I* 的多重吸收线分布在紫外到近红外波段, 且在很高柱密度的条件下都不饱和。这不仅有利于测量吸收离子柱密度, 还可以用来诊断视线方向上气体的部分覆盖情况。此外, 光致电离模型计算显示, He I* 吸收线产生于气体的氢电离波前附近, 所以即使没有探测到 He I* 吸收线也可以此限定气体柱密度的上限。我们发展了一套有效探测较弱吸收线的方法, 在前人发表的 Mg II BAL 类星体样本中首次系统地搜寻了 He I* $\lambda 3889$ BAL 类星体。我们在 285 个 Mg II BAL 类星体中探测到 101 个 He I* $\lambda 3889$ BAL 类星体, He I* 吸收线出现的比例达到 35.4%。此外, 我们发现该比例强烈依赖于光谱信噪比, 在 $S/N > 30$ 时 He I* 的探测比例高达 90% 以上。这表明 Mg II LoBAL 类星体光谱中普遍存在 He I* 吸收线。联合利用 He I* 和其他离子吸收线可以有效地限定气体的柱密度 N_{H} 、电离参数 U 和密度 n_{H} , 进而可以确定外流气体与黑洞的距离, 并且以此计算出外流气体的质量损失率和动能率, 而目前人们只对少数 BAL 类星体进行过这样的估算。He I* BAL 样本的意义在于它使得较大规模定量分析 AGN 宽吸收线外流气体成为可能。此外, 利用 He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 吸收线的波长位置优势, 我们在

SDSS/BOSS 光谱数据库中找到 19 个 $z < 0.3$ 的低红移 BAL 类星体。

(2) 长期以来，人们对 AGN 发射线外流和吸收线外流的研究都是分开进行的。尽管之前也有工作注意到 BAL 类星体和有 C_{IV} 发射线蓝移的类星体在统计性质上有诸多相似之处，但是一直缺乏此方面的系统研究。在实际应用上，吸收线和发射线在限定气体性质方面有各自的优势。通过吸收线，我们可以精确地测量视线方向上气体的速度、柱密度，但无法限定外流气体的整体性质如外流对电离光源的覆盖比例；发射线反映的是气体的整体性质，可用于估计发射气体的几何和质量等，缺点是所需要考虑的发射区情况更为复杂。因此有必要将吸收线和发射线结合起来研究外流气体。我们在此方面做了一些尝试。我们分别研究了两个典型个例，J1634+2049 和 J1110+1930。J1634+2049 是一个低红移 ($z_{\text{em}} = 0.1293$) 亮红外环星系，发现于我们的低红移 He I* BAL 样本。其紫外、光学和近红外光谱上既有明显的 He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 和 Na I D 宽吸收线，也在诸多发射线上表现出明显的蓝移成分。我们用光致电离模型分别分析了吸收线和发射线外流，发现二者的密度和电离参数的范围非常相似。这暗示吸收线和发射线可能由同一外流气体产生。我们通过发射线确定了外流气体的覆盖因子，通过吸收线确定了气体的柱密度和速度，最后估算了外流的动能率和质量损失率。J1110+1930 是一个中等红移 ($z_{\text{em}} = 2.512$) 的部分遮蔽类星体。它的特别之处在于，尘埃环将远紫外波段的核连续谱和宽发射线严重消光，使得尘埃环之外的外流所产生的 O VI、N V、C IV 等紫外发射线显露出来。此外，光学 [O III] 线的蓝移也与 C IV 等紫外发射线相同。我们利用发射线的线比并结合光致电离模型较好地限定了外流气体的物理性质。值得注意的是该发射线外流成分的等值宽度非常小，如果没有尘埃环对宽线区云团的遮蔽，外流所产生的发射线将淹没在宽发射线中。因此，我们发现了另一种有效途径，即可以利用尘埃环的部分遮蔽效应来广泛地研究 AGN 外流。

关键词：活动星系核，超大质量黑洞，反馈，外流，发射线，吸收线，He I* 吸收线

ABSTRACT

Among the various feedback mechanisms of active galactic nuclei (AGN) to the host galaxies, AGN outflows are the most common one. The outflows produce broad absorption lines (BALs) of large blueshifted velocity offsets present in the ultraviolet spectra of 15–30% radio-quiet quasars, as well as blue excess components in the asymmetric profiles of emission lines (particularly the high-ionization ones). Moreover, according to the numerical simulations, AGN outflows are regarded as the key agent to establish the famous $M_{\text{BH}}-\sigma_*$ relationship between central supermassive black holes and the bulges of their host galaxies. Recently direct imaging observations have revealed that AGN outflows can be driven as far as onto the spatial scales of 1–10 kpc. Yet, unfortunately, due to the limit of current facilities, only a few nearest AGNs have been able to be observed by such direct, spatially resolved observation. Thus it is urgent to find an approach to carry out direct, quantitative studies on the physical conditions of the outflows for a large number of AGNs.

To this end, during these years of pursuing my PhD degree we have accomplished two projects: (1) systematically finding out He I* BAL QSOs and exploiting the merits of He I* BALs to measure properties of the outflowing gas, and (2) constraining the physical conditions of the outflowing gas by taking advantage of both the emission lines and absorption lines produced in the outflows.

(1) Previous numerical simulations showed that AGN outflows impact significantly the host galaxies only when the loss rate of the kinetic energy of the outflows $\dot{E}_k \geq 0.05L_{\text{Edd}}$; after a rough calculation, it requires an outflowing gas of $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. In other words, it is very important to study the low ionization absorption line (LoBAL) quasars whose outflows are of large column density. It is however difficult to study LoBALs in this respect because the common lines such as C IV and Mg II are so easy to get saturated in high- N_{H} outflows. In order to address this problem, we take a new way to exploit He I* absorption lines that are very useful, but hard to identify and thus seldom used in the literature. As the He I* atoms have much small abundance, He I* absorption multiplet lines, which spans in a wide wavelength from the UV to NIR, are not easy to get saturated; this enables the measurement of high column density and the diagnostics of the partial covering situation of the outflow along the line of sight. Besides, as photoionization calculations demonstrated, He I* absorption lines are mainly produced in the layer tightly around the Hydrogen ionization front inside the gas slab, so even in the case of non-detection they can be used to estimate the upper limit to the column density. We have developed a set of procedure to find weak He I* BALs (currently in samples

of Mg II LoBAL quasars), systematically for the first time. In 285 Mg II BAL quasars, we find 101 (35.4%) having He I* λ 3889 BALs. The fraction depends strongly on the spectral S/N, reaching > 90% when S/N > 30. This suggests that (almost) all Mg II BAL quasars should have He I* BALs. By jointly using He I* and other absorption lines, we can determine the gas properties such as N_{H} , ionization parameter U and density n , and further the distance to the AGN central engine, and finally the rate of kinetic energy injection and the mass loss rate of the outflow. To date this can be applied to only a few AGNs. Being of the principal merit, this sample of He I* BAL quasars enables the first large-scale quantitative analysis of the physical condition of AGN outflows. In addition, He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830 lines being in the optical and NIR, we compiled from the SDSS/BOSS spectral data set the first homogenous sample of 19 low- z BAL quasars at $z < 0.3$.

(2) For long the outflow-produced emission lines and absorption lines are treated separately. Although the similarity—in an ensemble sense—between the BALs and the blueshifted components of C IV emission lines was occasionally noticed in the literature, no specific study has been performed on both the blueshifted absorption and emission lines of individual AGNs simultaneously. From the theoretical perspective, it is yet a natural picture for the outflows to produce both emission lines and absorption lines, which is well illustrated by photoionization modelling. In practice, both emission and absorption lines have their own advantages to determine the physical parameters of the outflowing gas. The absorption lines trace the gas along the sightline, giving accurate measurement of the LOS velocity and column density of the outflow, yet is not able to constrain the global properties of the outflow (e.g., the covering factor of the outflow to the AGN central engine). Instead, the emission lines reflect the global properties such as the geometry and mass of the outflow, yet have the weakness of involving too many parameters integrated together. Thus it is necessary to use both complementarily, which is illustrated in our pilot studies of two cases, J1634+2049 and J1110+1930, as follows. J1634+2049 is a low-redshift IR-bright, ringed galaxy ($z_{\text{em}} = 0.1293$), compiled in our sample of low-redshift He I BAL quasars. There are prominent He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830, Na I D BALs in its spectrum, besides apparent blueshifted components of its various emission lines. Using photoionization program CLOUDY to model their respective absorption lines and emission lines, we find that the line-emitting gas and absorbing gas share a well constrained parameter space in terms of density (n) and ionization parameter (U), which suggests that both emission and absorption lines are produced by the same outflowing gas. We thus combine the covering factor as derived from the emission lines and the column density and velocity derived from the absorption lines, and estimate the rate of the kinetic energy injection and the mass loss rate of the outflow in

ABSTRACT

this AGN. J1110+1930 is a partially obscured quasar at a moderate redshift ($z = 2.512$), with a special merit that the AGN torus obscures the FUV continuum and broad emission lines seriously so that the emission lines originated from the outflow exterior to the scale of the torus are present evidently in the observed spectrum (such as the rest-frame O VI, N V and C IV emission lines). Besides, the [O III] $\lambda 5007$ emission line has a blueshifted component similar to the outflowing component in those UV lines. Using the aforementioned technique of comparing the line ratios with respect to the CLOUDY modeling, we determine the physical properties of the outflowing gas. It is worthy of noting that the restframe equivalent widths of the outflow-produced UV lines are rather small, and thus without the partial obscuration of the torus the outflow emission would be completely overshadowed by the normal BLR lines. Hence, in this second case we find another powerful approach, namely taking advantage of the partial obscuration of the torus, to study the properties of the outflows in a large population of AGNs.

Keywords: active galactic nucleus; supermassive black hole; feedback; outflow; emission line; absorption line; He I* absorption line

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	VII
表格索引	XI
插图索引	XIII
第一章 绪论	1
1.1 AGN 对星系的反馈作用	3
1.1.1 AGN 的反馈形式以及观测事实	3
1.1.2 AGN 的寄主星系性质以及与 AGN 活动的联系	6
1.1.3 辐射模式和射电模式	8
1.1.4 两种反馈模式下 AGN 吸积的气体供给	11
1.2 AGN 的发射线外流和吸收线外流	14
1.2.1 AGN 宽吸收线外流	16
1.2.2 AGN 发射线外流的统计研究	22
1.3 我们的工作	24
第二章 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 类星体样本研究: He I^* 多重吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的普遍性	31
2.1 引言: 为什么研究 He I^* 吸收线?	31
2.2 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 类星体样本的编制以及光谱配对法	37
2.2.1 目前发表的 Mg II 宽吸收线类星体样本	37
2.2.2 用光谱配对法 (pair-matching method) 测量类星体 Mg II 宽吸收线	39
2.2.3 用光谱配对法寻找 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 类星体样本	44
2.2.4 光谱配对法的可靠性	47
2.3 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的比例	54
2.3.1 从样本中得到的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 的比例	54
2.3.2 信噪比还是光度?	55
2.3.3 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线在 Mg II BAL 中普遍存在的证据支持	56
2.4 He I^* 吸收线的物理图像	59
2.5 He I^* 吸收线的应用	65
2.5.1 个例研究: 利用 He I^* 吸收线推导吸收气体物理性质	65
2.5.2 利用 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线寻找低红移 Mg II BAL 类星体	66

2.6 小结	69
第三章 SDSS J163459.82+204936: 亮红外环星系的发射线与吸 收线外流研究	71
3.1 引言: J1634+2049 —— 研究黑洞与星系共同演化的实验室	71
3.2 多波段数据分析	72
3.2.1 SDSS J1634+2049 测光与光谱观测数据	72
3.2.2 SDSS J1634+2049 的宽波段谱能量分布	73
3.2.3 SDSS 图像分析	76
3.2.4 光学-近红外光谱分析	77
3.2.5 中红外光谱分析	88
3.3 结果与讨论	91
3.3.1 黑洞质量与吸积率	91
3.3.2 寄主星系	91
3.3.3 星系环和伴星系	92
3.3.4 外流气体的物理性质	95
3.4 小结	103
第四章 SDSS J111017.13+193012.5: 用尘埃环作为“日冕仪” 探测类星体强发射线外流	105
4.1 引言	105
4.2 观测数据以及数据分析	105
4.2.1 光谱和测光观测	105
4.2.2 被严重红化的宽波段 SED	105
4.2.3 发射线分析	106
4.3 结果与讨论	109
4.3.1 黑洞质量与吸积率	109
4.3.2 发射线外流的物理参数	112
4.3.3 产生遮蔽的尘埃以及外流的动能率	116
4.4 小结	119
第五章 总结与展望	121
5.1 总结	121
5.2 后续工作	123

参考文献	127
附录 A Mg II 及 He I^* BAL 类星体样本测量结果	133
A.1 Mg II BAL 类星体样本吸收线和发射线测量结果	133
A.2 He I^* BAL 类星体样本吸收线的测量结果	153
A.3 He I^* BAL 类星体样本中有近红外光谱观测的源	170
附录 B Mg II 、 He I^* BAL 类星体样本的其他结果	173
B.1 未包含在 Mg II BAL 类星体样本中的特殊 BAL 类星体	173
B.2 Mg II BAL 类星体样本中被 SDSS/BOSS 重复观测的源	173
致 谢	179
研究生在读期间发表的学术论文与取得的研究成果	183

表格索引

2.1 He I* 各能级吸收线以及其他常见吸收线信息	35
2.2 前人单独发表的 He I* BALs 的物理参数	35
2.3 Low- z BAL AGNs	69
3.1 测光数据	73
3.2 GALFIT 二维分解结果	78
3.3 发射线测量参数	85
3.4 不同成分的 Balmer 减幅	85
3.5 中红外波段主要发射线测量结果	90
3.6 外流的物理参数	102
4.1 各波段测光数据	106
4.2 J1110+1930 发射线测量参数	111
A.1 Mg II BAL 类星体样本 Mg II 吸收线测量参数	134
A.2 Mg II BAL 类星体样本的紫外连续谱、发射线测量结果	142
A.3 Mg II BAL 类星体样本中 $z < 0.8$ 源的光学连续谱以及发射线性质 测量结果	150
A.4 He I* $\lambda 3889$ 吸收线测量结果	154
A.5 He I* $\lambda 3189$ 吸收线测量结果	168
A.6 He I* BAL 类星体的近红外观测信息	170
B.1 未包含在父样本中特殊 Mg II BAL 类星体	174
B.2 Mg II BAL 类星体样本中被 SDSS/BOSS 重复观测的源	174

插图索引

- 1.1 由动力学方法测量的黑洞质量与 K 波段核球光度 L_K 以及核球恒星速度弥散 σ_* 的相关性。红色点表示经典核球，黑色点表示椭圆星系。本图取自 Kormendy & Ho (2013) 中图 16。 2
- 1.2 图中显示了平均黑洞吸积率与恒星形成率随着红移的变化。其中黑洞增长曲线（黑色实线）来自 Shankar et al. (2009)，图中的两种恒星形成率曲线分别来自 Fardal et al. (2007)（点划线）和 Hopkins & Beacom (2006)（虚线）。灰色阴影代表恒星形成率的 3σ 误差，来自 Hopkins & Beacom (2006)。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 1。 2
- 1.3 (a) Suzaku 观测到的 IRAS F11119+3257 的 9.82 keV 处的吸收线。(b)由 Herschel-PACS 观测到的 IRAS F11119+3257 的 OH $119\mu\text{m}$ 分子吸收线。吸收线的平均速度为 $1000 \pm 200 \text{ km s}^{-1}$ 。(c)IRAS F11119+3258 中靠近吸积盘的软 X-ray 超高速外流与到达星系尺度的 OH 分子外流的动量流 (dP/dt) 的比较。图中显示了以 L_{AGN}/c 归一化的动量损失率 dP/dt 随外流速度的变化。 v_{in} 表示 X-ray 外流速度。红色五角星代表 F11119+3258 外流，其中速度小的代表分子 OH 外流，速度大的代表 X-ray 外流。蓝色圆点代表其他 AGN 的 X-ray 外流的测量结果，绿色和黑色三角形分别代表其他 AGN 的 OH 和 CO 分子外流测量结果。黑色实线、点线、虚线和点-划线分别代表不同 v_{in} 的外流的动能保持不变的情况下所预言的趋势。灰色水平线代表外流在动量保持不变情况下的趋势。以上三图分别取自 Tombesi et al. (2015) 中图 1、2、3。 5

1.4 (a) Mrk 231 的 6 keV 处吸收的归一化谱。黑色三角形代表 <i>Chandra</i> 的观测数据, 红色圆点代表 <i>NuSTAR</i> 的观测数据。(b) 中性气体以及分子气体外流相对于 X-ray 超高速外流动量损失率比值 $\dot{P}_{\text{OF}}/\dot{P}_{\text{UFO}}$ 。其中, HCN 外流的测量结果取自 Aalto et al. (2015), OH 外流的测量结果取自 González-Alfonso et al. (2014), NaI D 吸收线外流测量结果取自 Rupke & Veilleux (2011), CO 的测量结果来自 Feruglio et al. (2015)。(c) Mrk 231 起源于吸积盘盘风的外流与分子外流的比较。图中显示了用 L_{AGN}/c 归一化的动量损失率 dP/dt 随外流速度的变化。 v_{in} 表示 X-ray 高速外流速度。红色五角星代表 Mrk 231 的外流计算结果, 速度小的代表其 NaI D、OH、CO、HCN 外流 (符号对应于 (b) 图), 速度大的代表其 X-ray 外流。黑色方块代表 IRAS F11119+3258 的测量结果 (见图 1.3)。以上三图分别取自 Feruglio et al. (2015) 中图 14、16。	5
1.5 从左至右分别为 II 型类星体 SDSS J0319-0019 的 [O III] 外流的表面亮度, 径向速度以及速度宽度 W_{80} (即为包括发射流量的 80% 时所对应的速度宽度, 以 km s^{-1} 为单位) 的二维分布。本图取自 Liu et al. (2013) 中图 9。	6
1.6 SDSS 主星系样本在恒星质量(M_*)和单位恒星形成率($\text{sSFR}=\text{SFR}/M_*$)平面上的分布。灰色轮廓表示所有星系的体积加权的分布, 颜色由深到浅代表分布逐渐增高。由图可以看到, 星系分布表现为两个序列, 即恒星形成星系和红星系。红色和蓝色的轮廓分别表示高吸积率 AGN 星系 ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}>0.01$) 和低吸积率 AGN 星系 ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}<0.01$) 在 M_* - sSFR 平面上的分布。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 2。	7
1.7 AGN 每单位恒星质量下的光度随星系质量、恒星质量表面密度、星系光谱上 4000Å 跃变的变化。蓝色实线代表由 [O III] 发射线光度估计的 AGN 的热光度 (L_{rad}), 红色实线代表射电喷流的机械能光度 (L_{mech}), 黑色实线代表二者之和。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 16。	8
1.8 辐射模式和射电模式下 AGN 核区结构示意图。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 3。	10
1.9 根据反馈模式对 AGN 进行的分类。蓝色字体描述了每种 AGN 的典型特征。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 4。	10
1.10 外流和喷流对星系影响的示意图。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 7。	11
1.11 近邻宇宙中 ($r \lesssim 300 \text{ Mpc}$) 的 SMBH 质量与吸积率的分布图。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 1。	12

- 1.12 与触发 SMBH 吸积相关的大尺度过程：富气体星系的主并合 (wet merger)、久期演化和热暗物质晕吸积。其中，第三种过程是低激发态射电噪 AGN 的黑洞的主要增长模式。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 2。 13
- 1.13 (a) NGC1097 的 [N II] ($6300 - 6850 \text{ \AA}$) 的 IFU 观测。左图为由原始观测数据得到的速度分布；中图为星系盘速度模型；右图为原始数据扣除星系盘速度后得到的速度残差，图中的白色点代表旋臂结构。(b) NGC1097 的 H₂ 发射线的 IFU 观测。左边第二幅图表示 H₂ 的原始数据得到的速度分布；第三幅图表示星系盘速度模型；最右边的图为原始数据扣除星系盘速度后得到的速度残差。a、b 两图分别取自 Fathi et al. (2006) 中的图 2 和 Davies et al. (2009) 中的图 5。 15
- 1.14 (a) 不同强度的吸收线示意图。从上到下分别为较弱的吸收线、线心开始饱和的吸收线以及线心开始饱和、线翼明显增长的吸收线。(b) 吸收线生长曲线示意图。生长曲线的三个阶段对应于 (a) 中吸收线的三种情况。本图取自 Bradt (2004) 中图 11.14 和 11.16。 19
- 1.15 BAL 和非 BAL 类星体的统一图像示意图。本图取自 Elvis (2000) 中图 1。 22
- 1.16 (a) 和 (b) 取自 Wang et al. (2011) 中图 4。图中红色、橙色、绿色和蓝色实线依次代表随着 C IV BAI 的增加，Mg II 以及 C IV 发射线的合成谱。(c) 取自 Zhang et al. (2011) 图 3，表示不同的爱丁顿比下的 [O III] 发射线的合成谱。 24
- 1.17 密度为 $n_{\text{H}} = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 的外流气体在相对于典型 SMBH (质量为 $10^8 M_{\odot}$ 、光度为 $\sim 6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 不同距离 ($0.1 - 1000 \text{ pc}$) 处的电离结构图。每幅子图中，上图表示不同电离度的离子占该元素的比例 (如 H⁺ 的比例计算为 $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}}$) 随着气体的柱密度/厚度的变化。氢元素和氦元素的电离结构决定了外流气体的主要电离结构，在图中黑色实线下的灰色阴影区域表示 H II 区，黑色虚线下的白色区域代表 H I 区；灰色斜点线阴影区域代表 He III 区，灰色点区域代表 He II 区，灰色点划线下的白色区域代表 He I 区域。右侧纵坐标表示外流气体的电子温度，浅蓝色虚线代表温度随着气体的柱密度/厚度的变化趋势。另外，图中的 HeI2³S (红色实线) 的比例实际很小，为了显示需要统一乘以了 10^5 。下图为不同离子的柱密度随着气体柱密度/厚度的变化。 25
- 1.17 (续) 密度为 $n_{\text{H}} = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 的气体的电离结构图。 26
- 1.18 不同密度的外流气体在距离典型 SMBH (质量为 $10^8 M_{\odot}$ 、光度为 $\sim 6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 10 pc 处的电离结构图。图例与图 1.17 一致。 27

1.18 (续) 不同密度的外流气体在距离典型 SMBH 10 pc 处的电离结构图。	28
1.19 相对 SMBH 不同距离处的气体的不同发射线等值宽度在 $n_{\text{H}} - N_{\text{H}}$ 平面上的分布。 <i>Cloudy</i> 模型中假设气体对于中心电离光源均匀且完全覆盖。实际情况中气体对于光源的覆盖因子 f_c 通常比 1 小, 在这种情况下各发射线的等值宽度可以估计为 $EW_{\text{model}} \times f_c$ 。	29
1.19 (续) 等值宽度在 $n_{\text{H}} - N_{\text{H}}$ 平面上的分布。	30
2.1 光致电离模型预言的常见类星体宽吸收线的光深 $\log \tau(v)$ 随电离参数 $\log U$ 以及 $\log N_{\text{H}} - \log U$ (N_{H} 为吸收气体的氢柱密度) 的变化。各个图上黑色实线表示光深 $\tau(v) = 1$ 所对应的 $\log U$ 和 $\log N_{\text{H}} - \log U$ 。对于共振吸收线如 C IV, C III] 以及 O VI 在相对较低的柱密度下就开始变为光学厚, 而 PV, He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 则在较高柱密度下也将保持光学薄而不易饱和。本图取自 Leighly et al. (2011) 中图 15。	32
2.2 氦原子的能级图 (Grotrian diagram)。图左表示单重态 He I 各能级, 图右表示三重态 He I 各能级。本图取自 Tennyson (2005) 中图 5.2。	33
2.3 四个已经发表的 He I* 吸收线类星体的各吸收线归一化流量图。左上图为 NVSS J2359-1241, 该图取自 Arav et al. (2001) 图 4; 右上图为 SDSS J0802+5513, 该图取自 Ji et al. (2015) 图 6; 左下图为 AKARI J1757+5907, 该图取自 Aoki et al. (2011) 图 3; 右下图为 FBQS J1151+3822, 该图取自 Lucy et al. (2014) 图 9。	36
2.4 这个维恩图表示 T06, G09, Z10 三个样本的相互覆盖程度。三个样本中所用来比较的源是按照统一的标准选取 (见 §2.2.1)。图中阴影区域上的数字表示其所在的各弧形所围成的最小的封闭区域中的源的个数, 而这个区域表示样本之间的关系。	38
2.5 FBQS J1151+3822 的近红外光谱以及另外 5 条与之相似的类星体近红外光谱。这 5 条光谱分别做了归一化并且用一个四阶多项式调整连续谱形状使之匹配 FBQS J1151+3822。本图取自 Leighly et al. (2011) 图 2。	40
2.6 用光谱配对法拟选择类星体宽吸收线的流程图。蓝色实线表示吸收线谱经 Savitsky-Golay 方法进行 5 点平滑 (自由度为 2) 后的谱。	43

- 2.7 图中显示了六个宽吸收线类星体的 $\text{Mg II}\lambda 2798$ 以及 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 宽吸收线的拟合情况。红色的实线表示这些可以接受的本征光谱模型的均值，即光谱配对法得到的最佳模型。绿色的点线表示该源 $\text{Mg II}\lambda 2798$ 或者 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 区域由光谱配对法选出的可以接受的本征光谱模型，因此绿色点的弥散则反映了系统误差。这六个源中的 J0745+1818, J0802+5513, J0840+3633 以及 J1044+3656 都是 FeLoBAL 类星体，结合图 2.8 来看，这些源在不同样本中所测得的 v_{\min} 和 v_{\max} 有较大差异。 44
- 2.8 我们的拟合结果与前人 (T06, G09, Z10) 的比较。左边的图中，红色的点表示 T06, G09, Z10 中共同探测到的源；蓝色的点表示样本中的 FeLoBAL 类星体；绿色的点表示图 2.7 中展示的六个类星体。右边的图是不同样本拟合结果的直方图比较。 45
- 2.9 左图：对 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 样本中的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线和 Mg II 吸收线的各测量量的比较。右图：吸收线的各测量量的归一化的直方图。 46
- 2.10 通过测试得到的等值宽度相对误差 ($\frac{EW_0-EW_i}{EW_i}$) 在相同 S/N, d_{abs} 以及 W_{abs} 下的归一化分布。黑色实线和红色虚线分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。左图为 Mg II 的测试结果，右图为 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的测试结果。 49
- 2.11 每个测试格点 ($S/N, d_{\text{abs}}$) 中的 Mg II 吸收线的相对误差 $\frac{EW_0-EW_i}{EW_i}$ 的分布图。在所有的图中，绿色的虚线表示分布的均值，基本都接近于 0；蓝色，橙色和灰色的点线分别表示该分布 1σ (标准偏差), 2σ 和 3σ 的位置；红色的虚线表示 1.6σ ，这个值对应于该分布 $\sim 90\%$ 的置信水平。我们选择这个值作为这个格点的测量的总相对误差 (σ_{tot}/EW)。我们注意到，除了信噪比最低、深度最浅的格点以外， $\frac{EW_0-EW_i}{EW_i}$ 在其他格点中的分布都接近于高斯轮廓。 50
- 2.12 通过测试得到的 Mg II 总相对误差 (σ_{tot}/EW , 系统相对误差 (σ_{sys}/EW ,) 系统误差占总误差的比例 $\sigma_{\text{sys}}/\sigma_{\text{tot}}$ 以及吸收线探测效率 (f_{det}) 随着 S/N , d_{abs} , W_{abs} 的变化趋势。上下两图分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。 51
- 2.13 通过测试得到的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 总相对误差 (σ_{tot}/EW , 系统相对误差 (σ_{sys}/EW , 系统误差占总误差的比例 $\sigma_{\text{sys}}/\sigma_{\text{tot}}$ 以及吸收线探测效率 (f_{det}) 随着 S/N , d_{abs} , W_{abs} 的变化趋势。上下两图分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。 52
- 2.14 从观测样本中得到的不同宽度的吸收线 (Mg II , $\text{He I}^*\lambda 3889$) 归一化合成谱。 53

2.15 基于测试得到的吸收线等值宽度总相对误差 σ_{tot}/EW (图 i, ii) 和探测比例 f_{det} (图 iii, iv) 在 $S/N-d_{\text{abs}}$ 平面的分布。图 i, iii 为高斯轮廓的测试结果, ii, iv 为使用真实吸收轮廓的测试结果。红色和蓝色五角星分别表示 Mg II BAL 样本和 He I* $\lambda 3889$ 样本的测量结果, 与测试结果做对比。	53
2.16 He I* $\lambda 3889$ BAL 在 Mg II BAL 中的比例随光谱信噪比的变化趋势。误差棒代表 $f(\text{He I}^* \text{Mg II})$ 的 1σ 误差, 通过 bootstrap 方法得到。	54
2.17 基于测试得到的光谱配对法对 He I* $\lambda 3889$ BAL 探测率。	55
2.18 a 图: $f(\text{He I}^* \text{Mg II})$ 随类星体光度 $L_{\lambda}(3000 \text{ \AA})$ 的变化趋势。b 图: Mg II BAL 类星体样本光谱信噪比与类星体光度的关系。两条水平点线范围内的源构成第一个子样本, 垂直虚线范围内的源构成第二个子样本。c、d 图: 第一个子样本的 $f(\text{He I}^* \text{Mg II})$ 随光度、信噪比的变化趋势。e、f 图: 第二个子样本的 $f(\text{He I}^* \text{Mg II})$ 随光度、信噪比的变化趋势。	57
2.19 通过光谱叠加提升光谱信噪比后发现的四个有 He I* $\lambda 3889$ 吸收线的类星体。每个源的 SDSS DR7 光谱和叠加后的光谱对比如图所示。红色实线表示由光谱配对法推断的被吸收的本征光谱。	58
2.20 将 Mg II BAL 样本中没有探测到 He I* $\lambda 3889$ BAL 的源按照 He I* $\lambda 3889$ 区域 ($3500-4000 \text{ \AA}$) 的信噪比分成三组。将每个组内的 Mg II (下三图) 和 He I* $\lambda 3889$ (上三图) 归一化谱叠加。黑色实线表示非 He I* $\lambda 3889$ BAL 的叠加结果; 作为对比, 灰色点线表示 He I* $\lambda 3889$ BAL 的叠加结果。	59
2.21 Mg II BAL 类星体样本中, 探测到和没有探测到 He I* $\lambda 3889$ BAL 的类星体的 Mg II 吸收线测量参数 (EW , d_{abs} , W_{abs} , v_{max}) 分布图。黑色实线和灰色阴影分别代表探测到和没有探测到 He I* $\lambda 3889$ BAL 的 Mg II BAL 类星体。“K-S pro” 表示 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验的结果。	60
2.22 Mg II BAL 类星体样本中, 探测到和没有探测到 He I* $\lambda 3889$ BAL 的类星体的发射线以及连续谱性质比较。黑色实线和斜线阴影分别代表探测到和没有探测到 He I* $\lambda 3889$ BAL 的 Mg II BAL 类星体, 灰色阴影表示非 BAL 类星体。	61
2.23 MF87 SED 和 UV-soft SED 的对比, 两者热光度一致。SED 上方标注的是产生常见的吸收线离子 (如 Mg^+ , C^{3+}) 的所需的电离能。	62

- 2.24 不同条件 (U, n_{H}) 下, Mg II 、 He I^* 离子柱密度 $N_{\text{Mg II}}$ 、 $N_{\text{He I}^*}$ 以及 $N_{\text{Mg}^+}/N_{\text{He I}^*}$ 随 N_{H} (亦即气体厚度) 的变化趋势。图中不同颜色的实线表示不同密度 n_{H} 下的模型计算结果; 图中不同密度的模型在一起成捆状, 表示不同的电离参数 U , 从左到右分别为: $\log U = -2.0, -1.8, -1.5, -1.2, -1.0, -0.7, -0.5$ 和 -0.3 。 62
- 2.25 由给定 $d_{\text{abs}, \text{Mg II}}$ 的 Mg II 吸收线推断 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线 $d_{\text{abs}, \text{He I}^*}$ 的模拟过程示意图 (从子图 i 到子图 iv)。本图以 $\log n_{\text{H}} (\text{cm}^{-3}) = 7$, $\log U = -1.5$, 宽度为 $\sim 2000 \text{ km s}^{-1}$ 的 Mg II 的吸收线轮廓以及对应的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线轮廓为例。详细见正文 §2.4。 63
- 2.26 由 *Cloudy* 光致电离模型计算得出的 Mg II 和 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线深度的对应关系。左图中, 黑色点表示给定 Mg II 吸收线深度时由模型得到的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线深度。灰色点表示由 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 得到的测量结果 (见图 2.9)。中间和右边的图与左图类似, 不同的颜色分别标识出 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线深度所对应的电离参数 U 和气体密度 n_{H} 。 64
- 2.27 *Cloudy* 光致电离模型给出的 $n_{\text{H}} = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 的气体在不同电离度 ($\log U = -2, -1.2, -0.5$) 下, C IV (蓝色), Mg II (绿色) 以及 He I^* (红色) 随气体氢总柱密度 N_{H} (即气体厚度) 的变化趋势。不同颜色的水平阴影条纹分别表示在深度为 0.05 时, Mg II (绿色)、 $\text{He I}^*\lambda 3889$ (红色)、 $\text{He I}^*\lambda 10830$ (棕色) 所对应的离子柱密度, 这表明光谱配对法探测到的离子柱密度的下限。条纹的宽度表示不同宽度的 Mg II 、 He I^* 吸收线轮廓导致的微小差异。 64
- 2.28 左图: 光谱配对法对 FBQS J0840+3633 的 Mg II 、 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889, 3189$ 吸收线 (黑色实线) 的本征光谱的拟合结果。绿色点线表示对各吸收线区域的本征光谱的可接受的拟合, 红色实线表示由各吸收线所有可接受的拟合得到的平均谱。蓝色实线表示 AGN 的幂律连续谱。右图: 各条吸收线的归一化谱。右边第二幅图上, 灰色的点线表示假设完全覆盖情况下, 由 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 推得的 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 吸收线轮廓。 67
- 2.29 第一幅图中, 黑色、蓝色、绿色点分别表示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889, 3189$ 吸收线的观测流量以及其 1σ 误差。由部分覆盖模型反解出 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889, 3189$ 的吸收线轮廓分别由灰色、蓝色、绿色实线表示。第二、三、四幅图分别表示由部分覆盖模型得到的 He I^* 吸收线的 τ 、 C_f 以及 $dN_{\text{He I}^*}$ 的速度轮廓。 68

- 2.30 FBQS J0840+3633 的最佳拟合模型（红色实线），该模型是根据 *Cloudy* 光致电离模型生成的光谱。匹配的最佳模型参数为 $\log U = -1.7$, $\log n_{\text{H}} (\text{cm}^{-3}) = 7.5$, $\log N_{\text{H}} (\text{cm}^{-2}) = 22$ 。黑色实线表示 FBQS J0840+3633 的原始光谱，绿色实线表示由光谱配对法得到的没有吸收的本征光谱，蓝色实线表示被红化的 AGN 幂律连续谱。 69
- 3.1 上图：J1634+2049 的宽波段 SED。各波段数据（红色）已经进行了银河系消光改正，并且转换到静止坐标系。黑色实线表示光学、近红外以及中红外光谱。灰色点线表示类星体平均谱（具体见正文）；橙色、紫色以及绿色虚线分别表示用银河系（MW）、大麦云（LMC）以及小麦云（LMC）消光曲线红化的类星体平均谱。浅蓝色点线表示 Mrk 231 的宽波段 SED（在 $2\mu\text{m}$ 处归一调整到 J1634+2049 的流量水平）。下图：J1634+2049 的 V 波段光变。灰色圆点代表从 Catalina Sky Survey 中得到的原始测光数据，蓝/黑色点表示同一天的原始测光点的平均值。 74
- 3.2 J1634+2049 的 g 、 r 、 i 波段以及三个波段合成的 SDSS 图像。最左边一列图像表示每个波段的 SDSS 的原始图像，中间一列表示最佳的 GALFIT 模型（PSF + Sérsic），最右边一列表示扣掉 GALFIT 模型后的残差。所有的图像均调整到一致方向：图像上方表示北，图像左边表示东。黑色实线表示 $10''$ 尺度，对应于实际物理尺度为 $\sim 23.1 \text{ kpc}$ 。绿色多边形区域表示星系外围的环状结构，在 GALFIT 拟合时被屏蔽掉。 76
- 3.3 上图：J1634+2049 的 SDSS r 波段图像 GALFIT 拟合结果的一维表面亮度分布。PSF（蓝色实线）代表 AGN 核区； $n = 4$ 的 Sérsic 函数（红色虚线）代表寄主星系。黑色实线表示 PSF + Sérsic 的拟合结果。黑色点以及误差棒表示观测数据及其 $\pm 1\sigma$ 误差。下图：表示实际数据扣掉拟合模型后的残差。 78

- 3.4 J1634+2049 静止坐标光谱 ($3000 \text{ \AA} - 3 \mu\text{m}$) 的详细分解。黑色实线表示由 SDSS ($3350-8150 \text{ \AA}$)，DBSP ($2900-9200 \text{ \AA}$) 以及 TripleSpec ($8600-2.2 \mu\text{m}$) 合并的观测谱。其公共部分的光谱按照信噪比加权。蓝色圆点表示从 SDSS 图像上得到的 $3''$ 孔径内的 u 、 g 、 r 、 i 、 z 的测光 (见 § 3.2.3 以及表 3.2)；绿色和紫色菱形分别 $3''$ 孔径内分解得到的 PSF 和 Sérsic 成分；橙色和棕色圆点表示由 2MASS J 、 H 、 K 和 WISE $W1$ 测光转换得到的流量。图中的光谱以及测光都经过银河系消光改正。绿色实线代表红化的核连续谱，使用的是 LMC 消光曲线， $E_{B-V} = 0.41$ ；灰色实线代表来自尘埃环内边缘的黑体谱，温度为 1394 K 。紫红色实线代表年老星族 (9 Gyr) 的连续谱，淡紫色实线代表严重红化的年轻星族 (127 Myr; $E_{B-V} = 2.2$) 的连续谱，蓝色实线代表年轻和年老星族合起来的总恒星成分的流量。 79
- 3.5 图 a、b、c、d 分别表示宽线单高斯、宽线双高斯、宽线单高斯 + 外流、宽线双高斯 + 外流模型拟合 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 发射线的结果 (详见 § 3.2.4.2)。所有模型中窄发射线轮廓都用单高斯。图 e 表示假设 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的宽成分和窄成分分别有相同轮廓的拟合结果。图 d 表示 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的最佳拟合模型。 82
- 3.6 左上、右上、左下、右下四幅图分别表示 $\text{H}\beta + \text{H}\gamma + \text{Fe II}$ 、 $\text{H}\alpha + [\text{N II}] + [\text{S II}]$ 、 $\text{He I} \lambda 10830 + \text{P}\gamma$ 以及 $\text{P}\alpha$ 区域的发射线最佳拟合模型。各图中红色、绿色实线分别代表分解得到的宽发射线和窄发射线。橙色实线代表蓝移的外流成分。青色实线代表 Fe II 发射线。 83
- 3.7 J1634+2049 各发射线的蓝移成分。图中，红色虚线代表每条发射线的拟合的总轮廓；蓝色实线代表各发射线中没有速度移动的部分；绿色点线和橙色点划线分别代表窄和宽的蓝移成分 (见 § 3.2.4.2 和 § 3.3.4.2 的讨论)。紫色和橄榄色虚线分别表示 -900 km s^{-1} 和 0 km s^{-1} 位置。 86

- 3.8 左图由上到下分别展示 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 、 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 和 Na I D 的归一化吸收线谱。图中蓝色实线代表用 Voigt 轮廓拟合各发射线的结果。左上图中青色点划线代表假定完全覆盖情况下由 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 轮廓推测的 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 轮廓形状。右图由上到下第一幅图展示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 的归一化谱(灰色点)以及 1σ 误差。红色和紫色三角分别表示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 由原始归一化谱每三个点合并为一个点后的归一化谱。红色和紫色虚线表示用 § 3.2.4.3 中提到的方法定出覆盖因子 C_f 和光深 τ_{3889} 后计算出来的 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 的归一化轮廓。下面三幅图分别表示 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的光深、吸收气体视线上对中心光源的覆盖因子 C_f 以及 He I^* 柱密度随着速度的变化。 87
- 3.9 亮红外星系的 $\text{EW}(\text{PAH } 6.2\mu\text{m})$ vs. 硅酸盐吸收强度诊断图。图中的星系被分为九个子类，在图中用不同的颜色标识。圆点表示 ULIRG 和 HyLIRG，三角形表示星暴星系，方块表示 Seyfert 星系和 QSO，菱形表示其他红外星系。本图取自 Spoon et al. (2007) 中图 1。我们把 J1634+2049 的测量结果（红色五角星）也标识在图中。 89
- 3.10 PAHFIT 对 J1634+2049 中红外光谱（静止坐标系 $5-33 \mu\text{m}$ ）的拟合结果。黑色圆圈以及误差棒代表观测谱以及 1σ 误差；灰色实线表示分解得到的不同温度的尘埃热辐射；紫色实线表示分解得到的恒星星光；红色实线代表尘埃 + 星光的总连续谱；棕色实线代表通过拟合而得到 PAH 发射线；蓝色实线代表原子和分子发射线。绿色实线表示上述各分解成分之和。该拟合模型采用的消光为假设恒星形成区的恒星、气体和尘埃充分均匀混合，如水平点线所示，对应于右侧轴。 90
- 3.11 (a) J1634+2049 以及其伴星系 C1、C2 的 SDSS 图像。图中蓝线表示丽江 2.4 m 望远镜观测时所放置的狭缝位置, $\text{PA}=86^\circ$ 。(b) 上图展示使用丽江 2.4 m 望远镜观测的 J1634+2049 的低分辨光谱（黑色）。同时我们也显示了其 SDSS 光谱（灰色）作为比较。中图展示使用丽江 2.4 m 望远镜观测的 C1 星系的光谱（黑色）。蓝色圆点代表 C1 的 SDSS u, g, r, i, z 的测光。红色实线代表从 SWIRE 光谱模板库 (Polletta et al. 2007) 中选择的 5 Gyr 的椭圆星系光谱模板。下图展示的是用网格搜寻的方法给椭圆星系模板不同的红移拟合 C1 光谱的 $\delta\chi^2$ 。如图所示，C1 的最佳红移为 $z = 0.1276 \pm 0.0004$ 。 94

3.12 J1634+2049 吸收线外流的光致电离模型, 模型假定太阳丰度。上面三幅图展示了模型计算初始时使用的无尘埃模型, 下面三幅图表示经过迭代的最佳尘埃模型。图中红色和蓝色虚线分别表示模型输出的 He I^* 和 Na I 的柱密度。红色和蓝色阴影区域分别代表从 J1634+2049 中测量的 N_{HeI^*} 和 N_{NaI} 及其 1σ 误差范围所对应的模型中的参数 ($N_{\text{H}-U}$) 区域。紫色和绿色点划线分别代表 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 的柱密度上限。与此对应, 紫色和绿色点线分别代表 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 柱密度上限减去 3σ 误差, 以表示 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 柱密度上限的置信水平并指示其柱密度在 $N_{\text{H}-U}$ 平面上减小的方向。图中空心方块以及误差棒代表光致电离确定的外流的最佳参数。	97
3.13 J1634+2049 的发射线外流的光致电离模型, 假定太阳丰度且不考虑尘埃。不同的子图代表不同截止柱密度的模型结果。绿色和紫红色虚线代表模型输出的 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。绿色和紫红色实线代表 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 测量的上限 (见 § 3.3.4.2), 绿色和紫红色实线所围成的封闭区域为 J1634+2049 发射线外流可能的参数区域。	99
3.14 由图 3.12 的最佳尘埃模型直接输出的发射线线比 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。各图例与图 3.13 相同。	100
3.15 用 UV-soft 与 J1634+2049 观测数据匹配以计算电离光子数。图中黑色实线表示 J1634+2049 的光谱数据, 红色圆点表示其测光数据。绿色实线代表 UV-soft SED, 在 J1634+2049 的 WISE W1 ($3.4\mu\text{m}$) 处归一。绿色虚线代表用 LMC 消光曲线红化后的 UV-soft SED。灰色点线代表 QSO 的平均谱。	101
4.1 主图表示由非同时观测的测光数据 (圆点; 见表 4.1) 以及 SDSS 和 TirpleSpec 光谱 (黑色实线) 构成的 J1110+1930 的宽波段 SED。观测数据已经进行了银河系消光改正并且调整到静止坐标系中。灰色点线代表类星体的平均谱, 由 Vanden Berk et al. (2001) (光学)、Glikman et al. (2006) (近红外) 和 Netzer et al. (2007) (中红外-远红外) 的各波段平均谱合并得到。类星体平均谱在 $\sim 2\mu\text{m}$ 处归一。绿色实线代经 SMC 消光曲线 (Pei 1992) 红化的类星体平均谱, $E_{\text{B-V}} = 0.46$ 。主图中右下角的子图表示 J1110+1930 V 波段的光变。Catalina Sky Survey 从 2005 年 4 月 9 日开始对 J1110+1930 的 V 波段进行了光变监测 (MJD: 53469–56461), 到目前为止共有 257 次观测。灰色圆点代表从 Catalina Sky Survey Data Release 2 (CSDR2) 中得到的原始测光数据。蓝色和橙色圆点分别代表将同一天、同一年的观测数据合并后的数据点。	107

4.2 对 J1110+1930 紫外-光学光谱 (静止系波长 1000–7000 Å) 中连续谱和发射线的详细分解结果。黑色实线代表由 SDSS 光谱 (1100–2950 Å), BOSS 光谱 (1000–2950 Å) 以及 TripleSpec 光谱 (2900–7000 Å) 的合并光谱。不同光谱见公共的波长部分根据 S/N 加权合并。褐色点线代表由 SMC 消光曲线红化的幂律连续谱, 色余为 $E_{B-V}^{nucleus} = 0.41$ 。橙色虚线代表较为平坦的远紫外连续谱。浅蓝色实线代表每条发射线的总拟合轮廓。紫色实线代表紫外和光学的 Fe II 发射线。红色实线代表蓝移的 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ 双线。绿色实线代表 H α 、H β 等没有蓝移的宽发射线, 所有的宽发射线成分的轮廓都假定与 H α 相同。中间的图中的两幅子图分别是 Al III 和 Mg II 考虑了宽线成分的拟合结果。	110
4.3 J1110+1930 紫外到光学不同发射线的蓝移成分。灰色虚线指示 0 速度处。C IV $\lambda 1549$ 、N V $\lambda 1240$ 以及 Si IV $\lambda 1397$ +O VI $\lambda 1402$ 的红色短线指示在 C IV $\lambda 1549$ 观测到的额外的蓝移成分在不同高电离线中的相应位置。	111
4.4 AGN 周围气体的电离结构图。图中展示的是 Z_\odot , $\log U = -1$, $\log n_H = 10 \text{ cm}^{-3}$ 的气体中各元素的电离比例随着气体厚度的变化。本图取自 Hamann et al. (2002) 中图 1。	113
4.5 图 a: 光致电离模型给出的发射线线比随着金属丰度的变化。实线、点线和虚线分别代表不同的 SED。本图取自 Hamann et al. (2002) 中图 5。图 b: 用不同线比得到的金属丰度随 BAL 的变化。本图取自 Wang et al. (2012) 中图 4。	113
4.6 Cloudy 输出的不同金属丰度、不同电离参数下的发射线线比 (Si IV+O IV)/[O III]、C IV/[O III] 以及 C II/[O III] 与气体数密度的关系。图中绿色实线代表 J1110+1930 上述线比的测量值, 绿色点线代表线比测量值的 1σ 误差。不同符号代表不同电离参数的模型。图中所示的是 $N_H = 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 的情况, 其他柱密度的线比与图中所示的情况类似。	115
4.7 上图表示 Cloudy 输出的在金属丰度 $Z_\odot \sim 15Z_\odot$, $10^6 \leq n_H \leq 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $22 \leq \log N_H \leq 24 \text{ cm}^{-2}$ 条件下 O VI/C IV 线比与电离参数的关系。下图表示在金属丰度 $Z_\odot \sim 15Z_\odot$, $10^6 \leq n_H \leq 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $\log U = -0.6$, -0.5 条件下 Mg II/C II 线比与气体柱密度的关系。上图中深蓝色实线代表上述 O VI/C IV 的测量值, 深蓝色点线代表线比测量的误差。下图中深蓝色实线分别代表假设 Mg II 有宽线成分和没有宽线成分情况下的 Mg II 外流成分的拟合值 (见图 4.2), 这两种情况对应着 Mg II 外流流量的上下限。深蓝色点线分别代表上述两种情况下 Mg II/C II 的误差。	116

4.8 由发射线线比 O _{VI} /[O _{III}]、O _{VI} /C _{IV} 、Mg _{II} /C _{II} 和 C _{IV} /C _{II} 得到的最佳模型参数: $5Z_{\odot}$, $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 。	117
4.9 由最佳光致电离模型 $5Z_{\odot}$, $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 预测的 C ⁺³ 、Mg ⁺ 、He I 2 ³ S 离子柱密度。	118
A.1 He I* λ 3889 BAL 类星体样本中未探测到 He I* λ 3189 吸收线的拟合效果。	157
A.1 (续)	158
A.1 (续)	159
A.1 (续)	160
A.1 (续)	161
A.2 He I* λ 3889 BAL 类星体样本中探测到 He I* λ 3189 吸收线的拟合效果。	161
A.2 (续)	162
A.2 (续)	163
A.2 (续)	164
A.2 (续)	165
A.2 (续)	166
A.2 (续)	167
A.3 He I* BAL 类星体样本中四个有近红外光谱观测的源。	171
A.4 六个有 UV 或者 NIR 光谱观测的低红移 He I* BAL 类星体。其中 SDSS J130534.49+181932.8 虽然没有近红外光谱观测, 但是其 HST COS 远紫外光谱显示在 Mg II 以及 He I* λ 3889 相同速度处有很强的 C IV 宽吸收线。	171
A.5 两个 Mg II 宽吸收线较弱而 He I* 和 C IV 吸收线较强的 BAL 类星体。	172
B.1 十三个谱形奇特的 Mg II BAL 类星体。图中显示的是经 5 点平滑后的光谱。	173
B.2 SDSS J14264704.7+401250.8 的 Mg II 吸收线和 He I* λ 3889 吸收线光变。	174
B.3 三个 Mg II 吸收线有明显光变的类星体。	177

第一章 绪论

类星体 (QSO, quasar) 是宇宙中一类奇特的天体，因其看起来类似于恒星而得名。类星体非常致密，寄居于星系中心很小的尺度内 ($< 1 \text{ pc}$)，但是它可以在从射电到 X-ray 频率范围内持续辐射出惊人的能量。其全波段光度在 $10^{44}\text{--}10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ 之间，超过了整个星系中恒星辐射的光度。类星体的巨大能量来源于超大质量黑洞 (Super massive black hole, SMBH) 吸积周围物质时释放出的引力能。类星体和其低光度版本 Seyfert 星系，以及 LINER、射电星系等存在 SMBH 吸积活动的天体被统称为活动星系核 (Active galactic nuclei, AGN)。自 1963 年第一颗类星体 3C273 被 Schmidt (1963) 证认以来，五十多年间人们对 AGN 的各个方面进行了广泛而深入的研究，拓宽了人类对 AGN 性质的了解。最初，研究者将 AGN 作为研究高能物理过程的良好实验室。随着研究的深入，人们发现星系环境对 AGN 的触发和演化有重要的影响 (e.g., Balick & Heckman 1982)。稍晚，一系列重要的观测事实使人们也逐渐意识到 AGN 对于决定星系核球的恒星质量有主导作用。这些事实包括：(1) 近二十年来的观测证据表明超大质量黑洞广泛地存在于星系中心 (e.g., Kormendy & Richstone 1995; Kormendy & Gebhardt 2001; Richstone et al. 1998)，且黑洞质量 M_{BH} 与椭圆星系和盘星系的经典核球的速度弥散 σ_* ，核球质量 M_{bulge} 以及核球光度 L_{bulge} 有紧密的相关性 (e.g., Kormendy & Richstone 1995; Kormendy & Gebhardt 2001; Kormendy & Ho 2013; Richstone et al. 1998, 见图 1.1)；(2) 宇宙中黑洞增长历史与恒星形成历史非常相似。图 1.2 展示了体积平均的黑洞吸积率和恒星形成率随红移变化的趋势。在 $z=0\text{--}1$ 之间，二者均呈现增长趋势，且都在 $z \sim 2\text{--}3$ 达到峰值。(3) 光度最高的星暴星系中往往有迹象表明存在严重遮蔽的 AGN，如著名的极亮红外星系 Arp 220；另一方面，AGN 的寄主星系也往往显示出最近发生或正在进行的恒星形成活动 (e.g., Kauffmann et al. 2003a)，典型的星系如 Mrk 231 以及本文将要介绍的 SDSS J163459.82+204936 (见第三章)。以上结果都提示我们，AGN 活动也许是星系演化过程中的重要组成部分。超大质量黑洞通过释放能量 (辐射、动能) 的方式来影响星系中的气体进而对星系演化产生影响，这种过程叫做 AGN 的反馈。

AGN 的反馈 (具体而言是 AGN 的外流) 正是这篇博士论文所研究的内容。在绪论这一章中，我们将概述近年来与 AGN 外流相关的研究。§ 1.1 主要介绍研究 AGN 反馈对于了解星系演化的重要意义，为本文提供一个宏观图像。我们概述了 AGN 的两种主要反馈形式 (外流、喷流) 和主要观测事实，以及两种反馈形式所对应的不同反馈模式。在 § 1.2 中我们将视线的焦点集中在有关 AGN 外流的研究上。外流包括吸收线外流和发射线外流。在 § 1.2.1 中我们首先概述了 AGN 宽吸收线的判定、测量方法以及如何利用吸收线来确定吸收气体的物理性

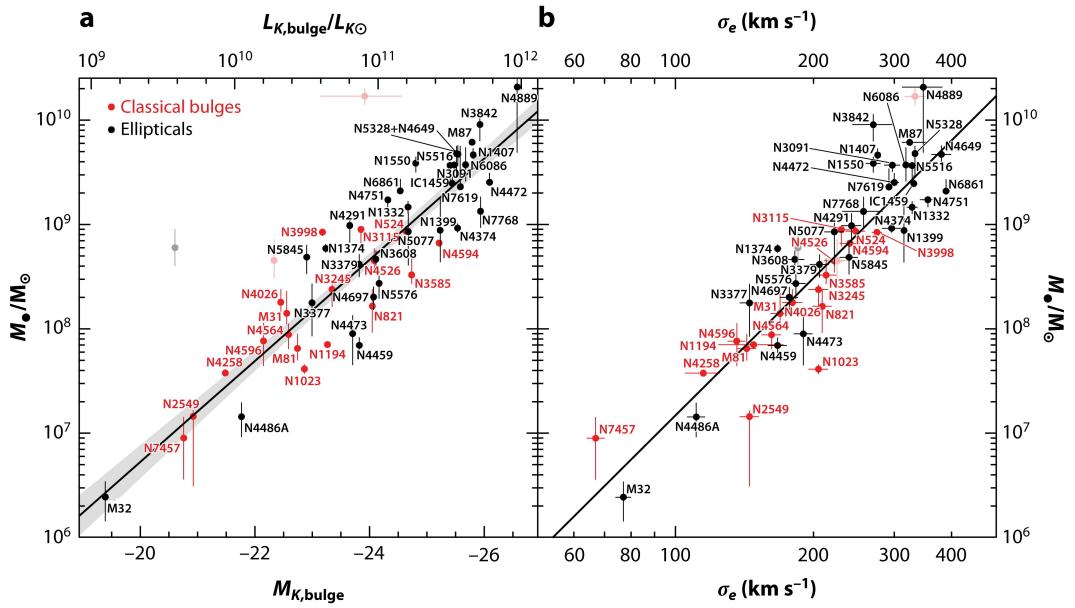


图 1.1 由动力学方法测量的黑洞质量与 K 波段核球光度 L_K 以及核球恒星速度弥散 σ_* 的相关性。红色点表示经典核球，黑色点表示椭圆星系。本图取自 Kormendy & Ho (2013) 中图 16。

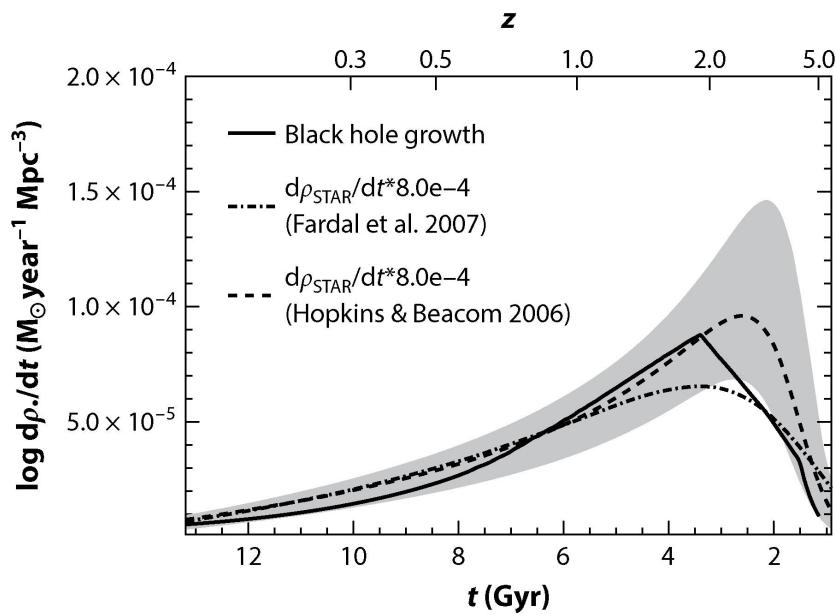


图 1.2 图中显示了平均黑洞吸积率与恒星形成率随着红移的变化。其中黑洞增长曲线（黑色实线）来自 Shankar et al. (2009)，图中的两种恒星形成率曲线分别来自 Fardal et al. (2007)（点划线）和 Hopkins & Beacom (2006)（虚线）。灰色阴影代表恒星形成率的 3σ 误差，来自 Hopkins & Beacom (2006)。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 1。

质；其次我们简述了宽吸收线类星体的主要统计性质。在 § 1.2.2 中我们概述了 AGN 的宽发射线 CIV 和窄发射线 [O III] 外流的现有统计研究结果。最后，我们在 § 1.3 中简述了外流气体产生发射线和吸收线的物理机制即光致电离过程，并概述了目前 AGN 外流研究中所遇到的问题，这是我在攻读博士学位期间开展研究工作的起点。

1.1 AGN 对星系的反馈作用

与星系相比，黑洞所处的尺度非常小，但是 AGN 反馈却可以影响整个星系，这表明 AGN 通过反馈释放的能量非常大。我们可以通过简单的量级估计来理解这个问题。根据星系核球的恒星速度弥散 σ_* 以及核球的恒星质量 M_{bulge} ，可以推知核球的引力束缚能为 $E_{\text{bulge}} \approx M_{\text{bulge}} \sigma_*^2$ 。假设吸积盘吸积过程中的辐射效率为 10%，则黑洞在其增长过程中累计释放的能量为 $E_{\text{BH}} \sim 0.1 M_{\text{BH}} c^2$ 。星系的实测结果表明，星系的速度弥散 σ_* 很少超过 400 km s^{-1} 。由 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 关系， $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}} \approx 5 \times 10^{-3}$ (Kormendy & Ho 2013)。故可推知 $E_{\text{BH}}/E_{\text{bulge}} \gtrsim 280$ 。由此可见 SMBH 在增长的过程中累计释放出来的能量远大于星系的引力束缚能，因此有可能把星系中的气体排除在星系之外，而星系没有了气体就无法形成新的恒星。

1.1.1 AGN 的反馈形式以及观测事实

AGN 的主要反馈形式有外流和喷流。外流的主要观测事实有：(1) $\sim 15\text{--}30\%$ 的射电宁静类星体的紫外光谱上表现出连续吸收 2000 km s^{-1} 以上且有很大蓝移的 CIV 及其他离子的吸收线 (e.g., Allen et al. 2011; Hewett & Foltz 2003; Reichard et al. 2003b)，其中蓝移速度最大的可以达到 0.2–0.3 倍光速 (e.g. Hamann et al. 2013; Korista et al. 1992; Weymann et al. 1991)。外流的质量损失率亦可以达到每年上百个太阳质量 (e.g., Dunn et al. 2010)。Maiolino et al. (2012) 报道了一颗 $z = 6.42$ 的类星体的 [C II] 发射线外流，该外流的质量损失率达到 $\dot{M} > 3500 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ 。(2) *Herschel* 对极亮红外星系 (Ultraluminous infrared galaxies, ULIRGs) 的远红外光谱观测发现，这些源普遍有蓝移 1000 km s^{-1} 以上的 OH 分子吸收线，研究者认为这种高速的 OH 分子外流是由 AGN 驱动的 (Spoon et al. 2013; Sturm et al. 2011)。IRAS F11119+3257 是其中一个典型的个例，Tombesi et al. (2015) 对该源做了详细的研究。软 X-ray 波段的观测发现该源在 9 keV 处有 $\sim 0.3c$ 蓝移的吸收特征，如此高速的外流毋庸置疑应起源于 AGN 吸积盘盘风且距离黑洞很近。此外，其远红外光谱上也有蓝移 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 的 OH 分子吸收线，Tombesi et al. (2015) 测定该分子外流与 SMBH 的距离为 $\sim 300 \text{ pc}$ ，且分子外流的动能率相当于 AGN 总光度的 $\sim 2\%$ ，因此分子外流应当也是起源于 AGN 的。当起源于 AGN 吸积盘的外流气体运动到较大尺度时与星际介质相互作用会产生激波，这会导致外流能量或动量上的衰减。当产生激波的气体可以有效冷却时，外流的大部分

动能会以激波冷却的方式耗散掉，这种情况下外流的动量保持不变。而当产生激波的气体无法有效冷却时，外流的动能无法有效耗散，这种情况下外流的动能保持恒定。[Tombesi et al. \(2015\)](#) 从能量和动量的角度考察了以上两种外流，发现二者的能量与外流的 AGN 所预测的一致（见 [图 1.3](#)），由此可以推断 X-ray 的高速外流和距黑洞较远的分子外流实际上是 AGN 大尺度外流的一部分。另一个观测证据更为丰富的个例是 Mrk 231。Mrk 231 在其光学和紫外光谱上不仅有 Mg II、Ca II、Fe II 以及 He I* 等电离吸收线（e.g., [Leighly et al. 2014; Rupke et al. 2002](#)），还有中性的 Na I D 吸收线（[Forster et al. 1995; Leighly et al. 2014; Rupke et al. 2002](#)）。[Rupke & Veilleux \(2011\)](#) 利用 Gemini 望远镜对 Mrk 231 的 Na I 吸收线开展了空间分辨的观测。他们通过测量得到该中性外流气体的最大速度为 $\sim 1100 \text{ km s}^{-1}$ ，外流的质量损失率为 $420 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。射电观测结果也显示该源在 kpc 的尺度上有速度 $\sim 750 \text{ km s}^{-1}$ 的 CO、HCO+、HCN 和 HNC 的分子外流（[Aalto et al. 2012, 2015; Cicone et al. 2012; Feruglio et al. 2010, 2015](#)），其外流损失率为 $\sim 700 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。此外，由 *Herschel* 空间望远镜观测的远红外光谱也显示 Mrk 231 有明显蓝移的 OH 分子吸收线，吸收线的最大速度达到 1000 km s^{-1} 以上（[González-Alfonso et al. 2014; Spoon et al. 2013; Sturm et al. 2011](#)），与 CO 等发射线的速度大体相当。综合上述观测结果，[Feruglio et al. \(2015\)](#) 的研究确认 Mrk 231 的不同电离度的外流在能量上也有类似于 IRAS F11119+3257 的结果（见 [图 1.4](#)），因此这些外流同样也是由 AGN 驱动的大尺度外流的不同部分。（3）近几年来，人们对一些 II 型 AGN 的 [O III] 发射线进行了高分辨的 IFU (Integral Field Unit) 观测。观测发现了 $\sim 10 \text{ kpc}$ 尺度上的 [O III] 高速外流。[Greene et al. \(2011\)](#) 利用长缝光谱上的空间信息对 15 个 II 型类星体的 [O III] 发射线进行分析。他们发现有较大线宽 ($300\text{--}1000 \text{ km s}^{-1}$) 的 [O III] 发射线分布在整个星系尺度范围。[Liu et al. \(2013\)](#) 利用 Gemini 望远镜上的 IFU 设备对 11 个 $z \sim 0.5$ 的射电宁静 II 型类星体做了观测并测量了 $[\text{O III}] \lambda 5007$ 发射线的空间分布和速度分布。他们发现 [O III] 发射线在星系尺度 ($> 10 \text{ kpc}$) 都可以探测到，且有很大的视向速度（最高可以达到 1000 km s^{-1} ），[O III] 外流的动能率可达到 $4 \times 10^{44} \text{--} 3 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ ，如此高的能量表明外流应该起源于 AGN 吸积盘的盘风。最极端的个例如 [图 1.5](#) 所示。此外，[Harrison et al. \(2014\)](#) 也利用 Gemini 上的 IFU 对 16 个 $z < 0.2$ 的 II 型 AGN 的 [O III] 发射线做了观测。这些 II 型 AGN 的光度比 [Liu et al. \(2013\)](#) 所选的源低一个量级，但他们也发现这些源的 [O III] 外流可以延伸到 $10\text{--}20 \text{ kpc}$ 尺度，且视向速度可以达到 $510\text{--}1100 \text{ km s}^{-1}$ 。此外他们也发现有着最极端外流速度的源为 ULIRGs。观测事实（2）和（3）是 AGN 外流作用于星系中星际介质（ISM）的直接的证据。

喷流是从超大质量黑洞的邻近区域产生的具有相对论性速度的准直结构。射电 AGN 产生的喷流已经在射电、X-ray 以及光学波段有很多直接的观测，如 M87。射电 AGN 产生的喷流有单侧的也有双侧的。准直的喷流可以延伸到 10 kpc

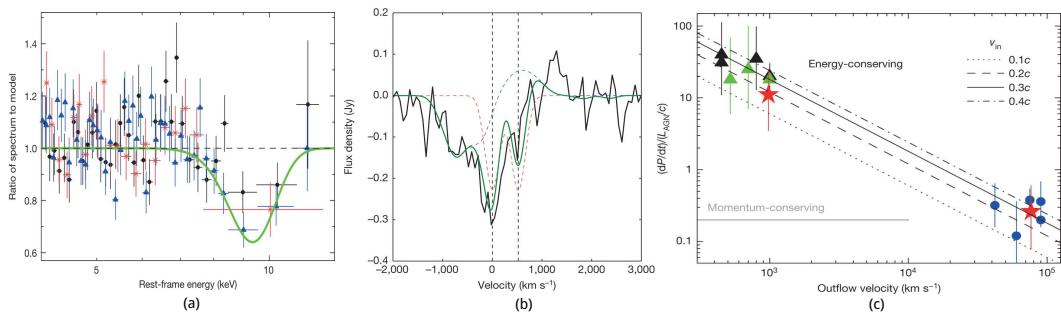


图 1.3 (a) Suzaku 观测到的 IRAS F11119+3257 的 9.82 keV 处的吸收线。(b) 由 Herschel-PACS 观测到的 IRAS F11119+3257 的 OH 119 μm 分子吸收线。吸收线的平均速度为 $1000 \pm 200 \text{ km s}^{-1}$ 。(c) IRAS F11119+3258 中靠近吸积盘的软 X-ray 超高速外流与到达星系尺度的 OH 分子外流的动量流 (dP/dt) 的比较。图中显示了以 L_{AGN}/c 归一化的动量损失率 dP/dt 随外流速度的变化。 v_{in} 表示 X-ray 外流速度。红色五角星代表 F11119+3258 外流，其中速度小的代表分子 OH 外流，速度大的代表 X-ray 外流。蓝色圆点代表其他 AGN 的 X-ray 外流的测量结果，绿色和黑色三角形分别代表其他 AGN 的 OH 和 CO 分子外流测量结果。黑色实线、点线、虚线和点-划线分别代表不同 v_{in} 的外流的动能保持不变的情况下所预言的趋势。灰色水平线代表外流在动量保持不变情况下的趋势。以上三图分别取自 Tombesi et al. (2015) 中图 1、2、3。

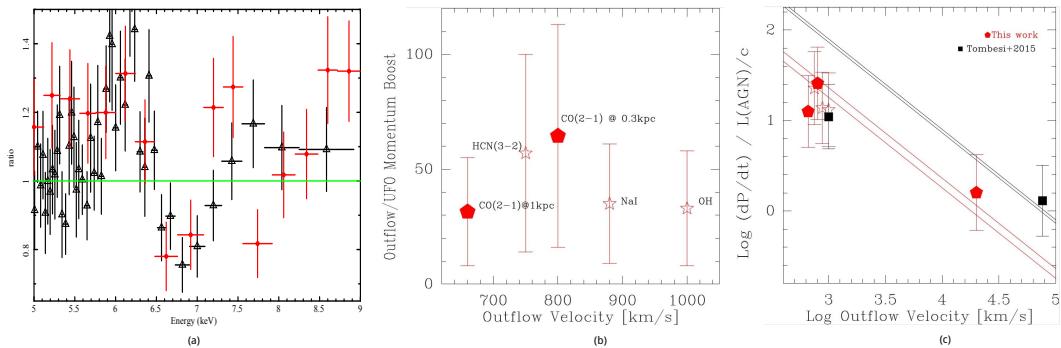


图 1.4 (a) Mrk 231 的 6 keV 处吸收的归一化谱。黑色三角形代表 *Chandra* 的观测数据，红色圆点代表 *NuSTAR* 的观测数据。(b) 中性气体以及分子气体外流相对于 X-ray 超高速外流动量损失率比值 $P_{\text{OF}}/P_{\text{UFO}}$ 。其中，HCN 外流的测量结果取自 Aalto et al. (2015)，OH 外流的测量结果取自 González-Alfonso et al. (2014)，NaID 吸收线外流测量结果取自 Rupke & Veilleux (2011)，CO 的测量结果来自 Feruglio et al. (2015)。(c) Mrk 231 起源于吸积盘风的外流与分子外流的比较。图中显示了用 L_{AGN}/c 归一化的动量损失率 dP/dt 随外流速度的变化。 v_{in} 表示 X-ray 高速外流速度。红色五角星代表 Mrk 231 的外流计算结果，速度小的代表其 NaID、OH、CO、HCN 外流（符号对应于 (b) 图），速度大的代表其 X-ray 外流。黑色方块代表 IRAS F11119+3258 的测量结果（见图 1.3）。以上三图分别取自 Feruglio et al. (2015) 中图 14、16。

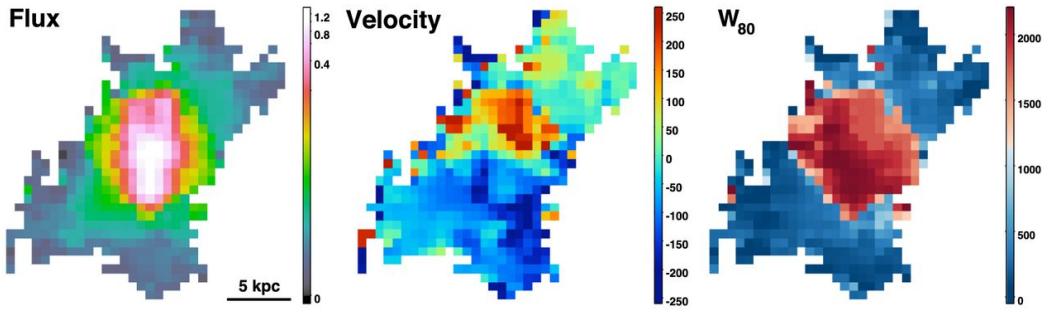


图 1.5 从左至右分别为 II 型类星体 SDSS J0319-0019 的 [O III] 外流的表面亮度，径向速度以及速度宽度 W_{80} （即为包括发射流量的 80% 时所对应的速度宽度，以 km s^{-1} 为单位）的二维分布。本图取自 Liu et al. (2013) 中图 9。

甚至 Mpc 尺度，最后与延展的射电瓣相连。射电瓣结构尺度非常大，且与中心黑洞的距离可达到 kpc 尺度，靠喷流源源不断注入相对论性电子来维持。喷流与星际/星系介质相遇会产生激波，激波一方面可以加热星际/星系际介质，一方面使喷流减速。大尺度的喷流通常发生在星系团中心的巨椭圆星系中。X-ray 观测表明在星系团中有大量热气体，且在 X-ray 波段表现出空洞（Cavity）或者气泡（bubble）结构。这些热气体被认为是由大尺度喷流加热的。

1.1.2 AGN 的寄主星系性质以及与 AGN 活动的联系

寄主星系是超大质量黑洞所处的外部环境，星系中的气体多少影响着黑洞吸积活动。前人利用 SDSS 数据对星系性质研究发现星系主要呈两大类（e.g., Heckman & Best 2014; Kauffmann et al. 2003b; 见图 1.6）：第一类星系的质量较小，有明显的恒星形成过程，恒星质量表面密度较低，星光的聚集度 (R_{90}/R_{50}) 也比较小，星系形态多为晚型星系，被称之为蓝星系；第二类星系的质量较大，星系中的恒星形成活动几乎停止，恒星质量表面密度较高，星光聚集度较大，星系形态为早型星系，被称之为红星系。图中把有 AGN 活动的星系按照黑洞吸积率分为 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} > 0.01$ 和 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 0.01$ 两类。高吸积率 AGN 的寄主星系比低吸积率 AGN 的寄主星系的颜色偏蓝。而星系质量最大、单位恒星形成率最低的那一端全部由低吸积率 AGN 占据。研究发现有 AGN 活动的星系的颜色大部分都处于蓝星系和红星系之间的颜色区域，即所谓的“绿谷（green valley）”（Martin et al. 2007; Nandra et al. 2007; Schawinski et al. 2007）。一种可能的解释是 AGN 的反馈吹散了星系中的气体，使得恒星形成活动减弱，加快了星系从蓝星系到红星系的演化过程。但是这种说法有很大的不确定性，如无法确定这些星系是否有尘埃遮蔽现象（e.g., Brammer et al. 2009），也有研究表明这是由选择效应造成的（Xue et al. 2010）。Zhou et al. (2005) 在 SDSS DR2 中找到 74 个有 poststarburst 特征的宽线 AGN（即 Q+A 星系），他们发现一半以上的 Q+A 星系同时是窄线 Seyfert I 型星系（Narrow line Seyfert I, NLS1）。NLS1 是一类宽发射线 FWHM 较小 ($\geq 2000 \text{ km s}^{-1}$)、吸积率很高的 AGN，通常被认为处于黑洞增长的快速阶段。

Q+A 星系样本的吸积率明显高于普通用光学选的类星体样本，这暗示恒星形成对于 AGN 活动有促进作用。根据星系光谱定出的星族年龄，他们推测 AGN 活动可能比星暴活动滞后几百个 Myr。[Davies et al. \(2007\)](#) 对 9 个近邻 Seyfert 星系做了空间分辨的近红外 AO+IFU 观测，发现 AGN 核区在最近 10–300 Myr 内发生过短时标的恒星形成活动，并确定黑洞吸积活动相对恒星形成有 ~ 100 Myr 的时延。[Wild et al. \(2010\)](#) 对 400 个近邻 Seyfert 星系的核区星暴和 AGN 吸积活动研究之后发现超大质量黑洞增长相对于恒星形成活动有 ~ 250 Myr 的时延。这些结果间接表明 AGN 和星系中的恒星形成活动有联系。更为直接的观测证据来自于[Page et al. \(2012\)](#)，他们利用 *Herschel* 对由 X-ray 选出的 $z = 1–3$ 的 AGN 进行了亚毫米波段观测。他们发现有剧烈恒星形成的 AGN 的 X-ray 光度都小于 10^{44} erg s $^{-1}$ 。这表明高光度的 AGN 会抑制寄主星系中的恒星形成，而高光度的 AGN 通常有很强的外流。

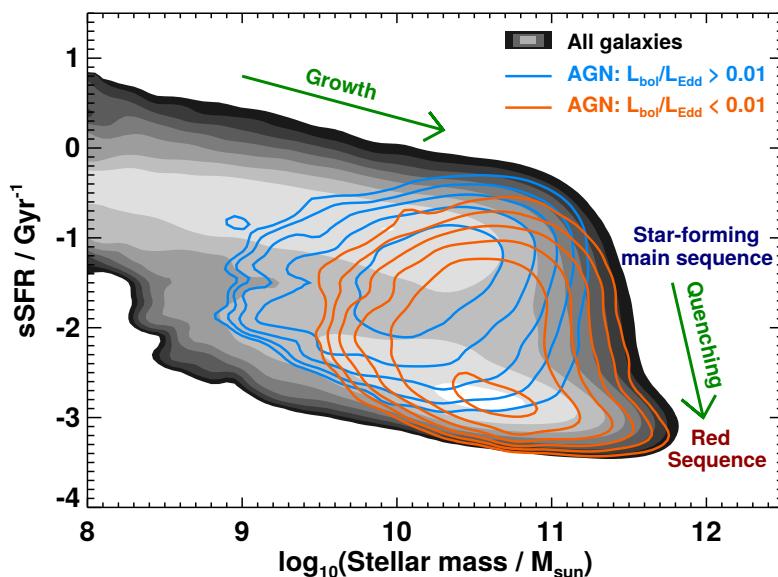


图 1.6 SDSS 主星系样本在恒星质量 (M_*) 和单位恒星形成率 ($s\text{SFR}=\text{SFR}/M_*$) 平面上的分布。灰色轮廓表示所有星系的体积加权的分布，颜色由深到浅代表分布逐渐增高。由图可以看到，星系分布表现为两个序列，即恒星形成星系和红星系。红色和蓝色的轮廓分别表示高吸积率 AGN 星系 ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}>0.01$) 和低吸积率 AGN 星系 ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}<0.01$) 在 M_* -sSFR 平面上的分布。本图取自 [Heckman & Best \(2014\)](#) 中图 2。

另一方面，研究发现有不同反馈形式的 AGN 的寄主星系也有很大不同。[图 1.7](#) 显示了 AGN 释放的源于有外流或喷流的能量与其寄主星系性质（星系质量、恒星质量表面密度和 4000Å 跃变，表示为 D_{4000} ）的关系。图中 L_{rad} 代表 AGN 的辐射能，与外流密切相关。AGN 的外流起源于 AGN 吸积盘的盘风，受辐射压驱动，因而外流和 AGN 的光度以及吸积率有关。 L_{mech} 代表射电喷流的机械能，直接表征喷流的强度。在高星系质量、高恒星质量表面密度以及高 D_{4000} 情况下， L_{mech} 变得显著，而 L_{rad} 则呈下降趋势。由此可以看出，有外流和喷流的 AGN 的寄主星系显著不同。有射电喷流的 AGN 的星系质量很大，由年老星

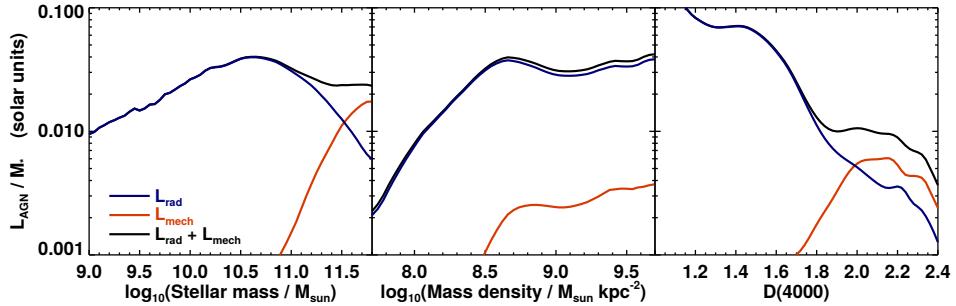


图 1.7 AGN 每单位恒星质量下的光度随星系质量、恒星质量表面密度、星系光谱上 4000Å 跃变的变化。蓝色实线代表由 [O III] 发射线光度估计的 AGN 的热光度 (L_{rad})，红色实线代表射电喷流的机械能光度 (L_{mech})，黑色实线代表二者之和。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 16。

族主导，且星系中气体较少，鲜有恒星形成活动，因此可以认为这些星系已经停止增长。观测上不少有强射电喷流的星系是处于星系团中心的巨椭圆星系。而有较强外流的 AGN 的星系质量比较适中，星系中冷气体多，有恒星形成活动，星系仍在增长。

1.1.3 辐射模式和射电模式

综上，产生外流和喷流的 SMBH 的吸积状态以及寄主星系都有明显差异，这暗示 AGN 产生外流和喷流的物理机制迥异。因此人们将二者归纳为两种反馈模式，即辐射模式 (radiative mode) 和射电模式 (radio mode)。辐射模式又称为类星体模式 (quasar mode) 或者盘风模式 (wind mode)，对应于能量输出方式以电磁波辐射为主的类星体或者 Seyfert 星系。这类 AGN 的吸积率较高 ($E_{\text{bol}}/E_{\text{Edd}} \approx 1$)，星系质量适中。AGN 活动产生的外流会携带巨大能量将星系中的冷气体吹散，从而对星系演化产生影响。射电模式也称为维持模式 (maintenance mode) 或者喷流模式 (jet mode)，主要对应与中等射电光度的射电星系以及 LINER。这类 AGN 的黑洞质量大，吸积率低且会产生喷流；其星系为质量很大的椭圆星系，恒星成分主要以年老星族为主且很少有恒星形成活动的迹象。但值得注意的是，有一类特殊高激发态的射电噪类星体，其吸积率很高，有很强的外流，但同时也有很高的射电光度和较强的喷流。

图 1.8 表示辐射模式和射电模式下 AGN 核区结构示意图。超大质量黑洞吸积周围的星际介质。星际介质由于携带角动量在下落过程中会形成围绕黑洞旋转的盘状结构，即吸积盘。下落的气体通过粘滞和摩擦释放引力能。对于辐射模式的 AGN，围绕在其超大质量黑洞周围的是几何薄，光学厚的吸积盘。吸积盘径向的温度梯度导致吸积盘不同半径处的热辐射的峰频不同，从而产生光学到极紫外/软 X-ray 光子。吸积盘周围是温度很高的冕，冕区中的高能电子对吸积盘内区辐射出紫外光子进行多次逆康普顿散射产生非热的 X-ray 辐射。吸积盘外存在大量气体，从吸积盘发出的软 X-ray、紫外/光学连续谱可以加热、电离这些气体。

从而产生发射线。AGN 的光谱中有两套谱线宽度明显不同的发射线，宽发射线的典型线宽为几千公里每秒，而窄发射线的典型线宽几百公里每秒。这两种发射线分别来自于宽线区 (Broad line region; BLR) 和窄线区 (Narrow line region; NLR)。宽线区在吸积盘外，其物理尺度为 $\sim 0.1 - 1$ pc。观测表明 AGN 宽发射线中只有允许线，由此可以推断宽线区云团的密度较大，为 $10^8 - 10^{11}$ cm $^{-3}$ 。窄线区距离吸积盘较远，物理尺度为 100 pc – 1 kpc。AGN 的窄发射线中有 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ 、[N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$ 等禁线出现，表明其密度较低，为 $10^2 - 10^6$ cm $^{-3}$ 。在宽线区和窄线区之间存在富含尘埃和分子气体的环状结构，称为尘埃环 (Torus)，其内半径由尘埃的升华半径决定。尘埃环很厚，其柱密度可达到 $10^{23} - 10^{25}$ cm $^{-2}$ ，尘埃环中的尘埃吸收 AGN 的核连续谱发出较强的红外热辐射。在观测上，AGN 根据其光学光谱中有/无宽发射线分为 I 型 AGN 和 II 型 AGN。AGN 统一模型 (e.g., Antonucci 1993) 认为 I 型和 II 型 AGN 本征上是相同的，只是由于观测的视角效应才有不同的特征。尘埃环是光学厚的，会遮蔽更靠内的宽线区，因此当我们从不同视角看 AGN 时会得到不同的光谱。当我们从极向方向看 AGN，可以在光学紫外波段看到 AGN 完整的发射特征，包括较蓝的核连续谱、宽发射线、窄发射线，这种情况下看到的是 I 型 AGN；当我们从侧向角度去看 AGN，看到的是 II 型 AGN。在这种视角下，宽发射线被尘埃环遮蔽、核连续谱被消光，I 型 AGN 中被强核连续谱湮没的星系特征也显露出来，窄发射线因为在尘埃环外围也可以被看到。在红外波段也可以观测到比 I 型 AGN 更强的尘埃热辐射以及硅酸盐的吸收。因此 II 型 AGN 又被称为被遮蔽的 AGN。

射电模式 AGN 的黑洞吸积模式与辐射模式 AGN 非常不同。如图 1.8 图 b 所示，其几何薄、光学厚的吸积盘在内半径处被截断甚至完全消失，取而代之的是几何厚、光学薄的结构。这种结构以对流主导，且气体进入黑洞视界的时标比辐射冷却的时间短，因此这种盘的辐射效率很低，被称为 ADAF (advection-dominated accretion flows) 或者 RIAF (radiatively inefficient accretion flows)。这种吸积模式在观测上往往与相对论性喷流相联系，但值得注意的是在部分吸积率很高的射电类星体中也观测到了功率很强的喷流。

图 1.9 展示了近邻宇宙中的 AGN 根据其反馈类型进行的分类以及每种 AGN 的典型观测特征。

图 1.10 显示了两种反馈模式对于星系的影响。AGN 驱动的外流被认为与星系中 $M_{\text{BH}}-\sigma_*$ 、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 的关系建立有关。大致物理图像是：AGN 的高光度产生的辐射压以及吸积盘风产生的外流将 AGN 核区甚至星系尺度的气体吹散，终止了黑洞吸积以及星系中的恒星形成。假设黑洞以爱丁顿光度¹吸积，所产生的辐射压以动量反馈的方式吹走寄主星系中的气体。假设星系中气体所占的质量比例为 f_g ，可以推导出 $M_{\text{BH}} = \frac{f_g \sigma^4 \sigma_T}{\pi G^2 m_p}$ （详细推导过程见 Fabian 2012; King & Pounds

¹ 被黑洞吸积的气体在下落过程中同时受到引力和辐射压的影响，当引力和辐射力产生平衡时达到的光度被称为类星体的爱丁顿光度，为 $L_{\text{Edd}} = 4\pi GM_{\text{BH}}m_p c / \sigma_T$ 。其中 M_{BH} 代表黑洞质量， m_p 代表质子质量， σ_T 代表汤姆逊散射截面。

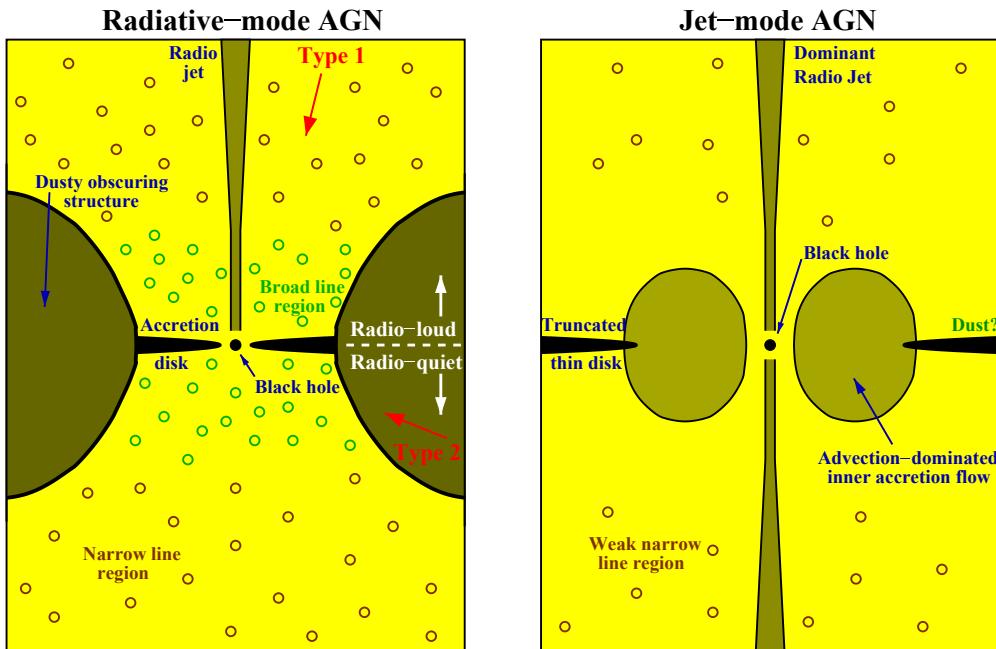


图 1.8 辐射模式和射电模式下 AGN 核区结构示意图。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 3。

		$L/L_{\text{Edd}} \lesssim 0.01$	$L/L_{\text{Edd}} \gtrsim 0.01$
Jet mode		Radiative mode	
		Type 2	Type 1
↑	Low-excitation radio source	High-excitation radio source	Radio-loud QSO
*	* Very massive early-type galaxy	* Massive early-type galaxy	Host galaxy properties like high-excitation radio source, but with addition of:
*	* Very massive black hole	* Massive black hole	* Direct AGN light
*	* Old stellar population; little SF	* Old stellar population with some on-going star formation	* Broad permitted emission lines
*	* Moderate radio luminosity	* High radio luminosity	* Sometimes, beamed radio emission
*	* FR1 or FR2 radio morphology	* Mostly FR2 morphology	
*	* Weak (or absent) narrow, low ionisation emission lines	* Strong high-ionisation narrow lines	
↓	AGN LINER	Type 2 QSO / Seyfert 2	Radio Quiet QSO / Seyfert 1
*	* Massive early-type galaxy	* Moderately massive early-type disk galaxy with pseudo-bulge	Host galaxy properties like Type-2 QSO and Seyfert 2, respectively, but with addition of:
*	* Massive black hole	* Moderate mass black hole	* Direct AGN light
*	* Old stellar population; little SF	* Significant central star-formation	* Broad permitted emission lines
*	* Weak, small-scale radio jets	* Weak or no radio jets	* Bias towards face-on orientation
*	* Moderate strength, low-ionisation narrow emission lines	* Strong high-ionisation narrow lines	
*		* QSOs more luminous than Seyferts	
↑	Light dominated by host galaxy		Direct AGN light

图 1.9 根据反馈模式对 AGN 进行的分类。蓝色字体描述了每种 AGN 的典型特征。本图取自 Heckman & Best (2014) 中图 4。

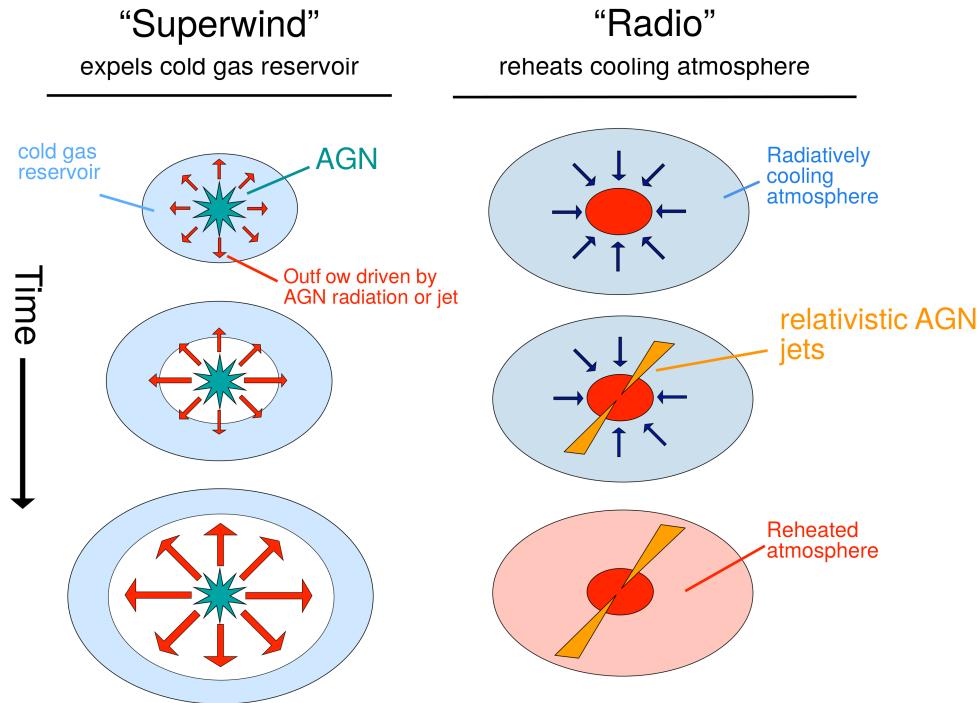


图 1.10 外流和喷流对星系影响的示意图。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 7。

2015)。射电模式 AGN 产生的大尺度喷流会持续加热星系团中的热气体，这个过程有效地阻止了热气体冷却后进入星系中发生过多的恒星形成。维持反馈模式建立起来的黑洞和核球的关系，因此也叫维持模式 (e.g., Fabian 2012; Heckman & Best 2014)。

1.1.4 两种反馈模式下 AGN 吸积的气体供给

前面提到过，超大质量黑洞以吸积星际介质的方式来增长并释放巨大的能量。黑洞吸积率可表示为

$$\dot{M}_{\text{BH}} = \frac{L_{\text{bol}}}{\eta c^2} , \quad (1.1)$$

式中， η 代表吸积过程中将吸积物质转化为辐射能的效率，其典型值为 0.1 (Peterson 1997)； L_{bol} 代表 AGN 辐射的热光度； c 代表光速。在 AGN 的研究中，通常也用爱丁顿比，即热光度与爱丁顿光度的比值 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ 来表征吸积率的大小。在近邻宇宙 ($z \lesssim 0.1$) 中，不同 AGN 的吸积率差异很大，从 $10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 到 $1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 。研究表明近邻宇宙中 AGN 的爱丁顿比主要分布在 10^{-6} – 10^{-3} 。该分布在高吸积率端呈长尾状，也就是说高吸积率（爱丁顿比）的源很少（见 Heckman et al. 2004 中图 3，以及 Ho 2008 中图 9）。图 1.11 表示在距离地球 300 Mpc 内的宇宙中 AGN 的爱丁顿比（吸积率）和黑洞质量的分布。此外，一个重要的观测事实是，随着红移的增高，高吸积率、高光度 AGN 的数目显著增多；AGN 的平均吸积率在 $z = 2 \sim 3$ 时达到峰值（见图 1.2）。

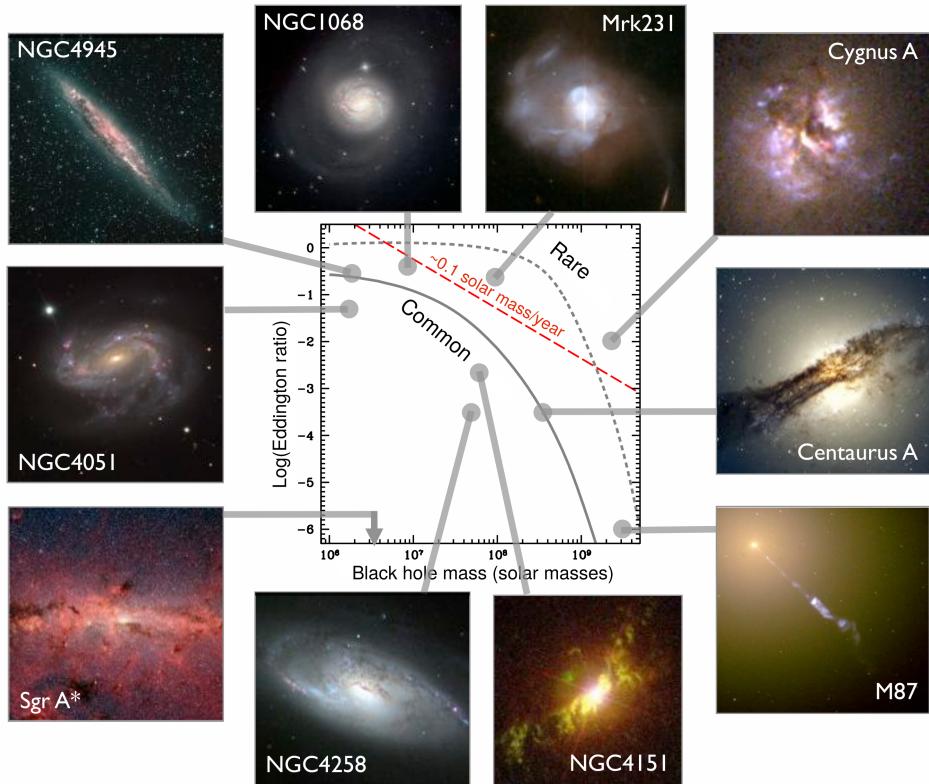


图 1.11 近邻宇宙中 ($r \lesssim 300$ Mpc) 的 SMBH 质量与吸积率的分布图。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 1。

黑洞的增长、AGN 的反馈依赖于黑洞对周围气体的吸积，然而气体是如何从寄主星系甚至星系团尺度进入黑洞周围区域 ($r < 0.1$ pc) 仍然是当前 AGN 以及星系研究中热烈讨论的问题。目前认为，触发 AGN 活动的方式有三种（见图 1.12），分别是富气体的星系并合/相互作用、盘星系的久期演化以及通过吸积星系团中的热气体（包括球对称吸积以及吸积暗物质晕中冷却的热气体）。前两者主要对应于辐射模式的 AGN，第三种则是射电模式的 AGN 的吸积模式。前两种触发方式与黑洞增长、星系演化息息相关，是我们重点关注的问题。

冷暗物质宇宙学模型 (CDM) 的主要观点是，在宇宙早期小的暗物质晕先形成，并通过相互并合形成大暗物质晕。重子物质向暗物质形成的引力势阱中下落，并在此过程中产生激波同时以辐射的方式冷却，最后形成星系。而星系也伴随着暗物质晕的并合过程增长。数值模拟结果表明盘星系并合或者相互作用会使盘结构瓦解最终形成椭圆星系 (Barnes & Hernquist 1992; Toomre & Toomre 1972; Toomre 1977)。如果是两个富含气体的盘星系并合，那么引力矩会驱使气体向星系中心聚集并触发剧烈的恒星形成 (Barnes & Hernquist 1992)，而这些气体或者星暴后大质量恒星产生的星风也可以进一步进入超大质量黑洞所在的区域触发黑洞吸积活动。而在观测方面，近邻宇宙中的大多数 ULIRGs 都表现出并合迹象 (e.g., Sanders et al. 1988; Sanders & Mirabel 1996)。ULIRGs 的红外光度可达到 $10^{12} L_{\odot}$ ，这表明 ULIRGs 星系中富含尘埃。ULIRGs 的红外光度来自

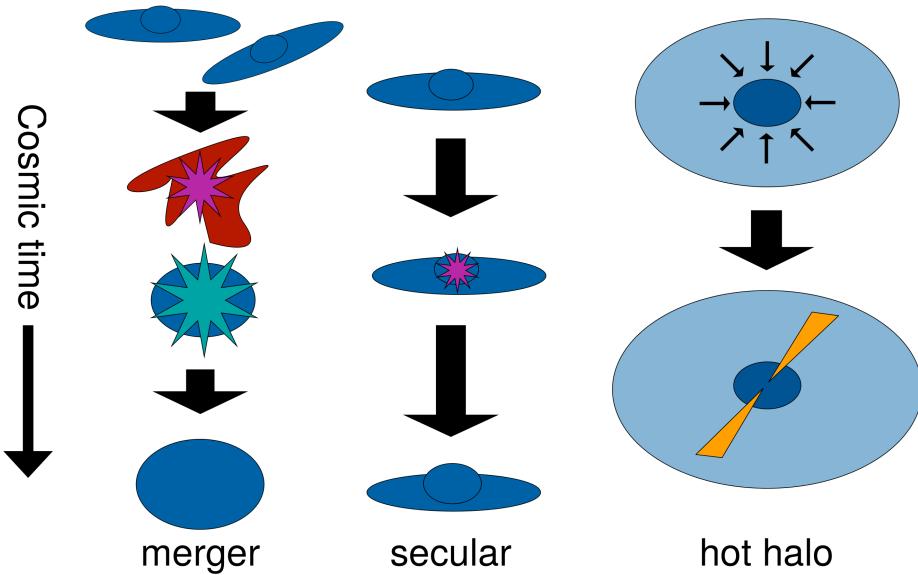


图 1.12 与触发 SMBH 吸积相关的大尺度过程：富气体星系的主并合 (wet merger)、久期演化和热暗物质晕吸积。其中，第三种过程是低激发态射电噪 AGN 的黑洞的主要增长模式。本图取自 Alexander & Hickox (2012) 中图 2。

星系中的恒星形成或者 AGN，在不同的源中二者贡献的比例有所不同，但大多数情况下恒星形成的贡献居多。ULIRGs 中既有几乎完全由恒星形成主导的星系，如 NGC7714；也有由恒星形成主导且类星体被完全遮蔽的情况，如 Arp220、NGC4418；还有不少在光学、紫外波段表现出明显的 AGN 特征的星系，如前面提到的 Mrk 231 和 IRAS F11119+3257。[Sanders et al. \(1988\)](#) 首先提出，ULIRGs 是并合星系从恒星形成主导的阶段向类星体演化过程中富含尘埃的阶段。综合观测事实以及数值模拟方面的研究结果 (e.g., [Hopkins et al. 2006, 2008](#))，并合的星系由 ULIRGs 阶段到正常类星体、最后到恒星形成较少的椭圆星系的演化图像逐渐形成。

然而在 $z \lesssim 0.1$ 的宇宙中，星暴星系以及高光度、高吸积率的 AGN 并不多见。大多数正在增长的黑洞的质量介于 $10^5\text{--}10^7$ 之间（见 [Greene & Ho 2007a](#) 得到的黑洞质量函数，图 7）。HST 观测显示这些中等质量黑洞的寄主星系大多数是质量较小的盘星系，且大多数星系的核球是伪核球 ([Greene & Ho 2004, 2007b](#))，这表明这些星系都没有经历过并合或者强相互作用。[Wild et al. \(2007\)](#) 基于 SDSS 数据对 $0.01 < z < 0.07$ 的近邻星系的统计研究也表明大部分正在增长的超大质量黑洞的寄主星系在较近的时期并没有发生过并合或者强相互作用，其恒星形成历史也较为平静。[Reichard et al. \(2009\)](#) 研究了星系形态的不对称性后发现，不对称性与年轻星族有较强的相关性，这表明星系并合对于触发星系中的恒星形成活动有很大影响。然而对大部分星系而言，星系形态的不对称性在活动星系和正常星系中在统计上没有显著差别。但值得注意的是 AGN 活动性越强，其寄主星系的不对称性越高。因此当前宇宙中超大质量黑洞的触发以及增长并非主要

通过星系并合/相互作用来实现。

盘星系中的非轴对称结构如星系棒、旋臂会对星系中的气体产生扰动，驱使气体进入 $\sim 0.1\text{--}1\text{ kpc}$ 的AGN核区(e.g., Kormendy & Kennicutt 2004)。最直接的观测证据来自对Seyfert I型星系NGC1097的IFU观测(见图1.13)。Prieto et al. (2005)首先在VLT望远镜观测的高分辨近红外图像上发现了距星系中心300 pc处的旋臂结构，该旋臂可以向内延伸到 $\sim 10\text{ pc}$ 尺度；Fathi et al. (2006)和Davies et al. (2009)分别对NGC1097进行了光学、近红外IFU观测，并分别通过[N II]和H₂追踪到正以 $\sim 50\text{ km s}^{-1}$ 的速度沿着旋臂向星系中心运动的气体流。Davies et al. (2009)根据H₂发射线的测量计算出NGC1097的内流率为 $1.2 M_{\odot}\text{ yr}^{-1}$ 。棒、旋臂结构在Seyfert星系中普遍存在。HST对 $z < 0.35$ 的AGN的寄主星系进行的高分辨成像观测表明， $\sim 1/3$ 的星系有棒结构(Jiang et al. 2011b; Kormendy & Ho 2013)。关于NLS1寄主星系的研究发现，大部分NLS1的寄主星系是盘星系且有伪核球(Mathur et al. 2012; Orban de Xivry et al. 2011)，此外较高比例($> 50\%$)的NLS1星系中有棒结构(Crenshaw et al. 2003; Ohta et al. 2007)。综上，在近邻宇宙中，大部分AGN的寄主星系都是质量比较小的盘星系，没有并合迹象，触发AGN活动的气体来自于盘星系中的旋臂或星系棒等动力学不稳定结构。此外，在大质量星系中并合星系比例较高；最高质量的星系、最高光度的AGN基本上都有星系并合或者强相互作用的迹象，因此这些AGN的触发是通过并合实现的。

前面提到过在 $z \sim 0\text{--}1$ 之间AGN的体积平均吸积率和星系的体积平均恒星形成率随红移的增加而快速上升，高光度AGN和星系的比例明显提高，并在 $z \sim 2\text{--}3$ 达到峰值。这表明AGN活动以及星系演化过程是随着红移强烈演化的。目前流行的解释是冷暗物质宇宙学模型所说的，星系伴随着暗物质晕通过并合增长，在红移 $z \sim 2\text{--}3$ 时候并合率达到最高。星系并合过程为星系以及SMBH提供了丰富的气体，触发星系的恒星形成以及黑洞吸积。随着时间的流逝，之前通过并合形成的大质量星系、大质量黑洞的气体逐渐耗尽。而另一方面，由于星系的并合率下降，气体的供给减少，因此星系以及黑洞的活动性很弱，在很早的时期就停止增长了。但令人惊奇的是，在低红移宇宙($z \lesssim 1$)中，小质量星系的恒星形成活动和小质量黑洞的吸积活动反常增强，这种现象被称为Cosmic downsizing(Cowie et al. 1996; Heckman et al. 2004)。这种反常增长是通过通过久期演化的方式实现的。目前对于高红移宇宙中的AGN寄主星系的观测比较困难，因此还没有非常明确的研究结果，但是观测发现随着红移的增加，ULIRGs的数目显著提高(Le Floc'h et al. 2005)，这也许可以给我们一些提示。

1.2 AGN的发射线外流和吸收线外流

外流现象在AGN中较为普遍，表现为有较大蓝移的宽吸收线和发射线。AGN产生的紫外、光学到近红外的吸收线和发射线外流是本博士论文的主要

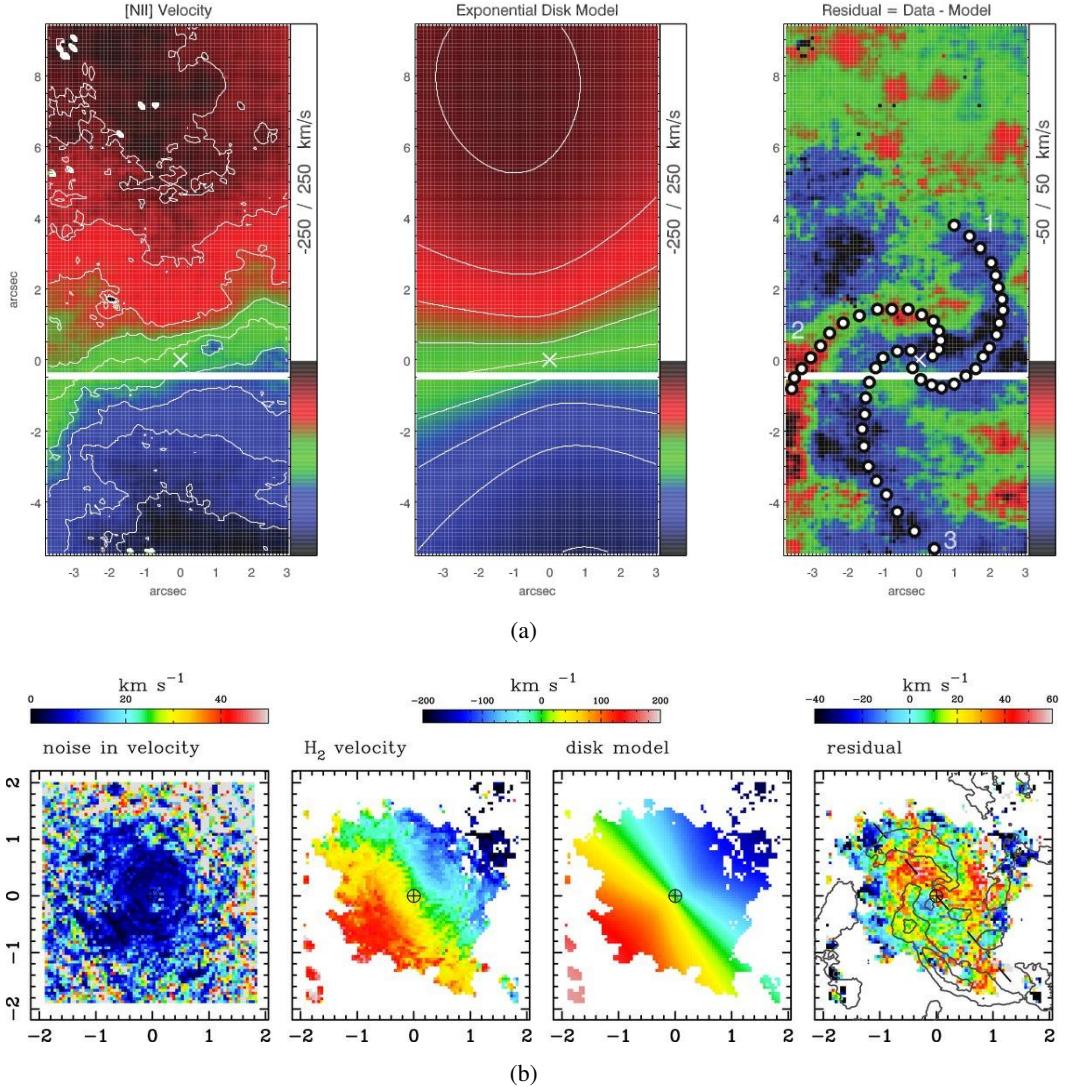


图 1.13 (a) NGC1097 的 $[N\text{ II}]$ ($6300-6850 \text{ \AA}$) 的 IFU 观测。左图为由原始观测数据得到的速度分布；中图为星系盘速度模型；右图为原始数据扣除星系盘速度后得到的速度残差，图中的白色点代表旋臂结构。(b) NGC1097 的 H_2 发射线的 IFU 观测。左边第二幅图表示 H_2 的原始数据得到的速度分布；第三幅图表示星系盘速度模型；最右边的图为原始数据扣除星系盘速度后得到的速度残差。a、b 两图分别取自 Fathi et al. (2006) 中的图 2 和 Davies et al. (2009) 中的图 5。

研究内容。

1.2.1 AGN 宽吸收线外流

当观测者视线方向上有吸收云团穿过，背景的光源就会被云团中的离子和尘埃吸收。AGN 光谱中有诸多吸收特征。根据云团相对于类星体的位置，这些吸收线可以分为本征吸收系统和插入吸收系统。产生本征吸收的云团来自 AGN 核区或者寄主星系，与 AGN 有直接的物理联系；插入吸收产生于 AGN 辐射到地球的传播路径上云团的吸收，天文学家常借助这种方式研究宇宙中的物质分布。AGN 的本征吸收线相对于发射线常有较大的蓝移速度（吸收最大速度可达 $0.2-0.3c$ ）和较大的速度宽度 ($|v_{\max} - v_{\min}| > 2000 \text{ km s}^{-1}$)，这类吸收线被称为宽吸收线 (Broad absorption line; BAL)。这表明 BAL 产生于高速而连续的外流气体。从能量来源来看只有 AGN 才有可能驱动如此高速且如此大速度差异的外流。前面已经提到，有直接的观测证据表明 AGN 驱动的外流可以携带着巨大的能量注入星际环境中对星系产生影响，这正是我们所关注的。因此研究 AGN 的宽吸收线一方面可以让我们进一步了解 AGN 产生外流的物理机制，另一方面可以对 AGN 的反馈对星系的作用、黑洞-核球关系的建立过程做更加细致的研究。

1.2.1.1 AGN 宽吸收线的分类以及判定标准

§ 1.1.1 中已经提到，在光学选类星体中有 $\sim 15-30\%$ 的类星体的紫外波段出现连续吸收 2000 km s^{-1} 以上的高电离 C_{IV} BAL。除了 C_{IV} 吸收线，BAL 类星体通常还显示 O_{VI} $\lambda 1035$ 、N_V $\lambda 1240$ 、Si_{IV} $\lambda 1397$ 等高电离的离子吸收线，以及 He_{I*} $\lambda\lambda 3189, 3889, 10830$ 、Al_{III} $\lambda 1857$ 、Fe_{III} 等中等电离度离子吸收线，还有 Mg_{II} $\lambda 2798$ 、Fe_{II}、Ca_{II} H&K 等低电离度离子吸收线，在 ULIRGs 中甚至可以探测到中性 Na_I D 吸收线和 OH 等分子吸收线。此外，越来越多射电宁静类星体在软 X-ray 波段探测到了超高电离度、蓝移速度为 $0.1-0.3c$ 的离子吸收特征，这种外流被称为 Ultrafast outflow (UFO) (见 King & Pounds 2015 的综述)。

传统上对 AGN 的宽吸收线的研究集中在紫外波段的吸收线。根据吸收离子的电离势，BAL 类星体分为三类：(1) 高电离宽吸收线类星体 (HiBAL QSO)，即存在高电离吸收线的类星体，常以 C_{IV} 吸收线为判断依据。(2) 低电离宽吸收线类星体 (LoBAL QSO)，既存在高电离吸收线也存在低电离吸收线的类星体，这里主要指 Mg_{II} 吸收线。这类源在 BAL 类星体中占 $\sim 15\%$ ，在类星体中占 $1-2\%$ (Trump et al. 2006)。(3) 铁低电离宽吸收线 (FeLoBAL QSO)，即存在 Fe_{II}、Fe_{III} 吸收特征的 LoBAL QSO。

Weymann et al. (1991) 第一次对 BAL 类星体做了样本分析，并且引入了对 C_{IV} BAL 的定量化判别标准，即 “Balnicity Index (BI)”，具体表达式为：

$$BI \equiv \int_{v_l=3000}^{v_u=25000} [1 - \frac{f(-v)}{0.9}] C dv, \quad (1.2)$$

式中, $f(-v)$ 为归一化的光谱流量, v 为吸收线相对于其本征波长的速度, 负值表示速度是蓝移的。无量纲因子 C 表示权重, 当连续的吸收特征低于该波长处本征连续谱流量的 10% 并且吸收宽度超过 2000 km s^{-1} 时 $C = 1$, 其他情况下 $C = 0$ 。吸收线吸收的本征连续谱由拟合过程中的模型确定。10% 的吸收深度是为了避免光谱信噪比较低或者由于模型的不确定性带来的影响, 而规定连续吸收宽度大于 2000 km s^{-1} 则是为了排除窄吸收线。另外, 积分的起始速度 $v_l = 3000 \text{ km s}^{-1}$ 则是为了避免当 C IV 吸收线在光谱上距 C IV 宽发射线很近时发射线线翼对 BI 的贡献。 $BI = 0$ 表示没有 BAL, 如果 $BI > 0 \text{ km s}^{-1}$, 不仅表示存在 BAL 吸收, 还可以衡量 BAL 的吸收强度。由此可见 BI 实际上是一种修正的吸收线等值宽度。然而定义 3000 km s^{-1} 为积分的起始速度则排除了一些蓝移速度较小的吸收线。再者, Al III, Mg II 等电离度较低的吸收线的蓝移速度以及吸收宽度往往小于 C IV 等高电离吸收线 (Gibson et al. 2009; Trump et al. 2006; Voit et al. 1993), 因此以上宽吸收线的定义对于低电离吸收线并不适用。后续对于 BAL 的统计研究工作基于 BI 的定义对积分起始速度、连续吸收线宽度做了调整, 具体见 Zhang et al. (2010) 中表 1。为了更好地判别低电离吸收线, Hall et al. (2002) 将积分起始速度调整为 0 km s^{-1} , 并将吸收宽度调整为 450 km s^{-1} , 同时取消了吸收深度大于 10% 的限制。调整后的判定式被称为“Absorption Index (AI)”。随后 (Trump et al. 2006) 重新将 AI 定义为,

$$AI \equiv \int_{v_l=0}^{v_u=29000} [1-f(-v)] C' dv \quad (1.3)$$

类似于 BI, $f(-v)$ 为归一化的光谱流量, v 为吸收线相对于其本征波长的速度, 负值表示速度是蓝移的。 C' 表示权重, 当连续的吸收特征低于该波长处本征连续谱流量的 10% 并且吸收宽度超过所规定的最小宽度 $\delta v = 1000 \text{ km s}^{-1}$ 时 $C' = 1$, 其他情况下为 0。AI 本质上相当于吸收槽的等值宽度。

1.2.1.2 利用 AGN 宽吸收线确定外流的物理参数

AGN 的宽吸收线是定量研究 AGN 外流的有效手段。在本节中, 我们主要介绍类星体宽吸收线的测量方法以及如何利用宽吸收线确定吸收气体物理性质。

吸收线的速度轮廓 吸收线是由于处于视线方向上的吸收气体对于背景光源的吸收而产生的。由于吸收气体本身并不均匀且有速度差异, 因此不同速度处的光深是不同的。假设背景光源的本征流量为 $I_0(\lambda)$, 则被吸收后的残余流量为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-\tau(\lambda)}, \quad (1.4)$$

因此吸收线的轮廓直接反映了吸收气体在视线方向上的速度结构。需要注意的是, 我们得到的光深轮廓实际上是经过仪器展宽的轮廓即表观光深, 如果光谱分辨率不够高会导致很多速度结构没有分辨出来。另外, 如果多

根吸收线有相似的蓝移速度以及速度轮廓，那么几乎可以确定这些吸收线产生于同一团气体。

吸收离子柱密度的测量 吸收离柱密度是 AGN 宽吸收线研究中最重要的物理量之一。确定宽吸收线的离子柱密度的方法如下：

(1) 当光谱的分辨率足够高、吸收线全部分辩且吸收线没有饱和时，可以直接从表观光深积分

$$N_{ion} = \frac{m_e c}{\pi e^2 f \lambda} \int \tau(v) dv = \frac{3.7679 \times 10^{14}}{f \lambda} \int \tau(v) dv \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad (1.5)$$

式中， λ 是吸收线的实验室波长， f 为振子强度， v 的单位是 km s^{-1} 。表观光深为 $\tau \approx -\ln(I_r)$ ，这里 I_r 代表吸收线的归一化残余流量。当仪器分辨率不足或者吸收线饱和时，通过直接积分得到的表观柱密度只是真实柱密度的下限。如果同一种离子有两根或者多根吸收线且 $f\lambda$ 差异足够大，我们可以使用表观光深法 (AODM) 得到真实的吸收柱密度，具体见 [Savage & Sembach \(1991\)](#)。

(2) 生长曲线法。谱线的展宽包括自然展宽、多普勒展宽和碰撞展宽。自然展宽是本征的，服从洛伦兹分布；多普勒展宽是由离子的热运动和湍流引起，服从高斯分布；碰撞展宽由粒子之间的相互碰撞引起，因此与气体的体密度有关，由于星际气体的体密度通常很低，因此碰撞展宽可以忽略。实际观测到的吸收线轮廓是自然展宽的洛伦兹轮廓与多普勒展宽的高斯轮廓的卷积，被称为 Voigt 轮廓 ([Carswell et al. 1984; Hjerting 1938](#))。Voigt 轮廓的线心部分由高斯轮廓主导，线翼部分由洛伦兹轮廓主导。吸收线的强度通常用等值宽度 (equivalent width, EW) 表示，生长曲线反映的就是吸收线的等值宽度随着柱密度的变化，可分为三个阶段 (见图 1.14)：(1) 当柱密度较小即吸收云团是光学薄时，吸收线等值宽度随着柱密度线性增长，即 $EW \propto N$ 。(2) 当柱密度逐渐增大、吸收线线心 (即中心频率) 开始饱和时，吸收线等值宽度随着柱密度的增加缓慢增加，此时 $EW \propto \sqrt{\ln N}$ ；(3) 当柱密度足够高时，吸收线较弱的线翼也开始显著增长，此时 $EW \propto \sqrt{N}$ 。

吸收气体覆盖因子的测量 当类星体宽吸收线外流距离吸积盘较近时，可能存在对背景光源部分覆盖的情况。确定吸收气体在视线方向上的覆盖因子对于准确测量吸收离子柱密度以及粗略估计吸收气体的几何很重要。通常我们用产生于同种离子的相同下能级的多重吸收线来诊断气体部分覆盖情况。这种多重吸收线的光深比例由其振子强度决定，因此当我们知道其中一根吸收线的强度，很容易推知在完全覆盖情况下其他吸收线的强度。如果测量到的多重线的线比与预测值不相符，那么很可能有部分覆盖的情况存在。最简单的部分覆盖情况是均匀部分覆盖，即假定对于同一吸收线，气体不

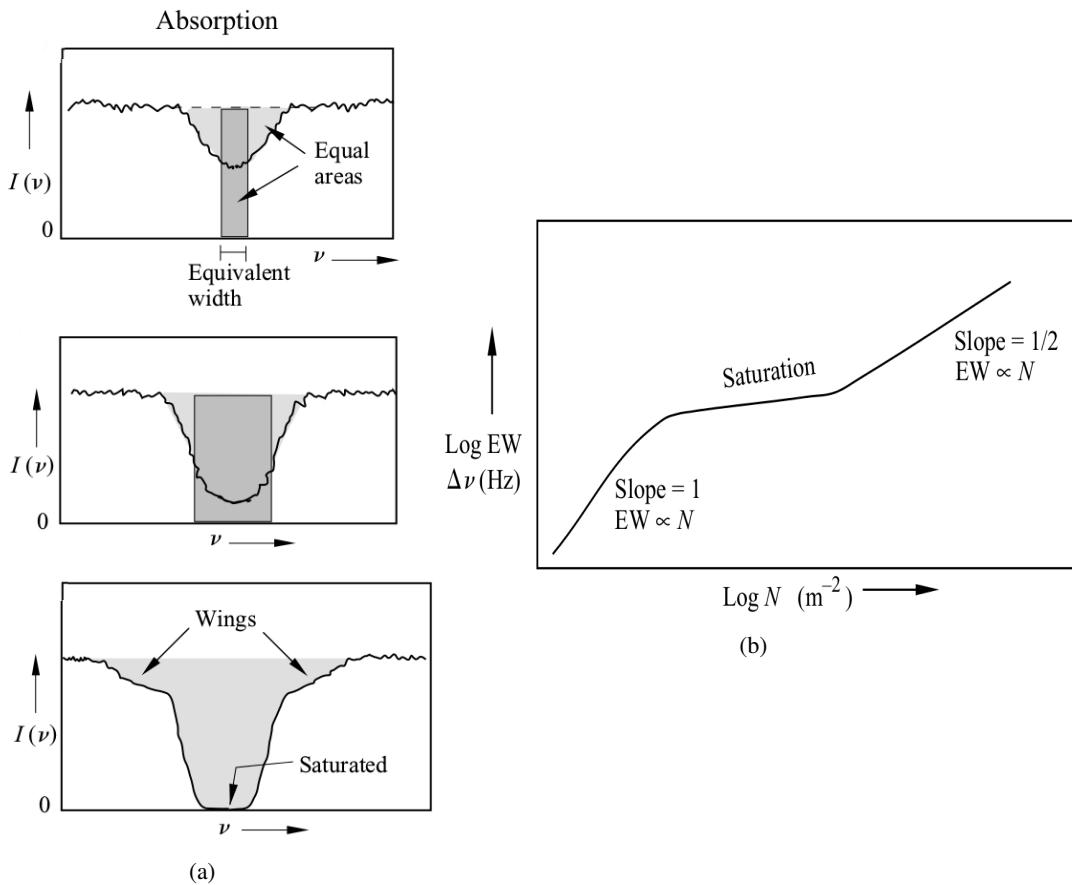


图 1.14 (a) 不同强度的吸收线示意图。从上到下分别为较弱的吸收线、线心开始饱和的吸收线以及线心开始饱和、线翼明显增长的吸收线。(b) 吸收线生长曲线示意图。生长曲线的三个阶段对应于 (a) 中吸收线的三种情况。本图取自 Bradt (2004) 中图 11.14 和 11.16。

同位置处的光深是相同的。这种情况下，假设气体对光源的覆盖比例为 C_f ，观测到的归一化残余流量 $I(v)/I_0(v)$ 可以表示为

$$\frac{I(v)}{I_0(v)} = (1 - C_f(v)) + C_f(v)e^{-\tau(v)} . \quad (1.6)$$

常见的类碱金属离子吸收线如 O IV, N V, C IV, Si IV, Mg II 吸收线都是双线且其光深比为 2: 1。我们可以利用同种离子相同下能级的两根线组成一个方程组来确定 C_f 以及 τ 。而实际情况下，气体往往是不均匀的，这导致不同位置处的光深 $\tau(x,y)$ 是有差异的，这种情况下观测到的吸收线流量 $I(v)$ 可以表示为

$$I(v) = \int \int I_0(v)(x,y,v) e^{-\tau_v(x,y)} \frac{dxdy}{A} , \quad (1.7)$$

其中， $A = \int dxdy$ 表示被覆盖区域的投影面积。在这种情况下需要假定 $\tau_v(x,y)$ 的分布，详细讨论见 Hamann & Sabra (2004)。

利用光致电离模型确定外流气体物理性质 基于对吸收线的测量，我们可以借助光致电离模型计算对吸收气体的物理性质做一些限定。常用的光致电离模

型计算程序有 *Cloudy* (Ferland et al. 1998)、*Mappings III* (Allen et al. 2008) 以及 *Xstar* (Kallman & Bautista 2001)。在模型计算中，我们可以指定气体的粒子数密度 (n_{H})、柱密度 (N_{H})、气体的元素丰度、入射 SED 和光度或电离光子数、气体与中心光源的距离、气体的电离参数 U 、气体的湍流等。我们通过将测量得到的吸收线柱密度与模型输出的结果对比来确定气体的 n_{H} , U 和 N_{H} 以及其他所需要的物理参量²。

电离参数 U 代表着气体的电离状态，定义如下：

$$U = \frac{Q_{\text{H}}}{4\pi R^2 n_{\text{H}} c}, \quad (1.8)$$

其中 c 代表光速； R 代表气体与背景光源的距离； Q_{H} 代表入射连续谱中可以电离氢原子的光子数，可表示为

$$Q_{\text{H}} = \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} d\nu, \quad (1.9)$$

U 是一个很有用的参量，不仅可以表征气体的电离状态，而且可以在确定气体密度 n_{H} 的情况下通过 U 计算出气体与电离光源的距离，进而结合气体柱密度计算出外流的动能率以及质量损失率。而了解外流所携带的动能对于评估 AGN 反馈对寄主星系的影响非常重要。较为准确地测定气体密度的方式有两种，一种是通过离子的激发态吸收线，另一种是通过吸收线的光变。在给定温度下离子激发态与基态的布居数之比对 n_{e} 较为敏感，而电子密度 n_{e} 是对电离气体的 n_{H} 的很好近似。常见的激发态吸收线有 Fe II*、Si II*、C II* 等（具体应用可参考 e.g., Borguet et al. 2012a; Ji et al. 2015 等）。AGN 核连续谱的光变会引起吸收气体电离状态发生变化并导致原来的电离-复合平衡被打破。当气体密度比较高时，气体会迅速响应电离连续谱的变化并在新的流量水平上建立新的电离-复合平衡。当气体密度比较低时，电子和离子之间的碰撞较少，因此建立新的平衡需要较长的时间。因此可以通过吸收线相对与连续谱的光变来确定气体的密度（详细见 Krolik & Kriss 1995; Nicastro et al. 1999 以及这种方法在 Mrk 509 上的应用 Kaastra et al. 2012）。除此之外，其他对密度依赖的吸收线也可以用来估计气体密度的上下限，如氢 Balmer 吸收线的产生需要 $n_{\text{H}} \gtrsim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ (Ji et al. 2012; Leighly et al. 2011)。

确定外流的平均动量率、动能率以及质量损失率 假设外流气体分布在一个以吸积盘为中心、对吸积盘部分覆盖的壳层，那么外流气体的总质量为：

$$M = 4\pi R^2 \Omega \mu m_{\text{p}} N_{\text{H}} \quad (1.10)$$

²因为宇宙中的气体氢元素的丰度最高，所以这里所说的吸收体的粒子数密度以及总柱密度均指气体中氢元素的数密度以及总柱密度。

式中 Ω 代表吸收气体对吸积盘的覆盖比例； m_p 表示质子质量， μ 表示外流气体中每个质子的平均分子权重，这里取 1.4； N_H 代表外流气体的氢总柱密度。气体从吸积盘到距离 R 的时标为 $t \sim R/v$ ，因此外流气体的平均质量损失率和平均动量、动能流分别为

$$\dot{M} = \frac{M}{t} = 4\pi R \Omega \mu m_p N_H v , \quad (1.11)$$

$$\dot{p} = \dot{M}v = 4\pi R \Omega \mu m_p N_H v^2 , \quad (1.12)$$

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{M}v^2 = 2\pi R \Omega \mu m_p N_H v^3 , \quad (1.13)$$

这里气体对于吸积盘的覆盖因子 Ω 有很大的不确定性，大多数情况下没有很好的办法对每个源都估计覆盖因子，只能退而求其次用 AGN 中出现 BAL 的比例来代替。吸收线固然可以对于吸收气体的性质做很好的测量，但严格地说从吸收线得到的只是来自一条视线方向上的气体的信息。而利用发射线可以很好地估计气体的整体性质。因此如果产生吸收线的外流同时产生了发射线，我们可以利用发射线有效地估计外流气体的整体覆盖因子。在第三章中，我们介绍了一个光谱中同时探测到吸收线和发射线外流的 BAL 类星体 J1634+2049，这两种外流的密度以及电离度都很接近，可以认为是来自同一外流气体。因此我们通过发射线定出外流气体的整体覆盖因子。

1.2.1.3 宽吸收线类星体的性质

为了解 BAL 类星体的起源，已经有大量的工作对 BAL 类星体和非 BAL 类星体的各方面性质做了对比。[Weymann et al. \(1991\)](#) 对两种类星体做了对比后发现二者的紫外发射线和连续谱性质没有显著差别，除了 LoBAL 类星体的连续谱明显红于 HiBAL 类星体以及非 BAL 类星体的连续谱；随后[Reichard et al. \(2003a\)](#)用更大的 BAL 类星体样本得到相同的结论。此外，相关研究表明 BAL 类星体和非 BAL 类星体的中红外、远红外 SED 也没有显著差别([Cao Orjales et al. 2012; Gallagher et al. 2007](#))。[Shen et al. \(2008\)](#) 对 BAL 类星体的成团性做了研究，发现 BAL 类星体的成团性与非 BAL 类星体相比没有显著不同。BAL 类星体和非 BAL 类星体显著的差别在于软 X-ray 辐射，HiBAL QSO 的软 X-ray 比非 BAL 类星体弱，而 LoBAL 类星体的软 X-ray 比 HiBAL 类星体弱(e.g., [Gibson et al. 2009; Green & Mathur 1996](#))。有观测证据表明 BAL 类星体的软 X-ray 辐射较弱是由于存在高柱密度的 ($N_H > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) 吸收体吸收了软 X-ray 光子，而其本征辐射并不弱(e.g., [Brinkmann et al. 1999; Gallagher et al. 2006](#))。基于以上观测事实，人们用统一模型来解释上述现象。统一模型认为 BAL 和非 BAL 类星体并无本质的不同。每个类星体都有产生 BAL 的外流气体，该气体覆盖了类星体吸积盘的某个立体角。当我们的视线方向穿过该气体时，就看到了吸收线(见图 1.15)。

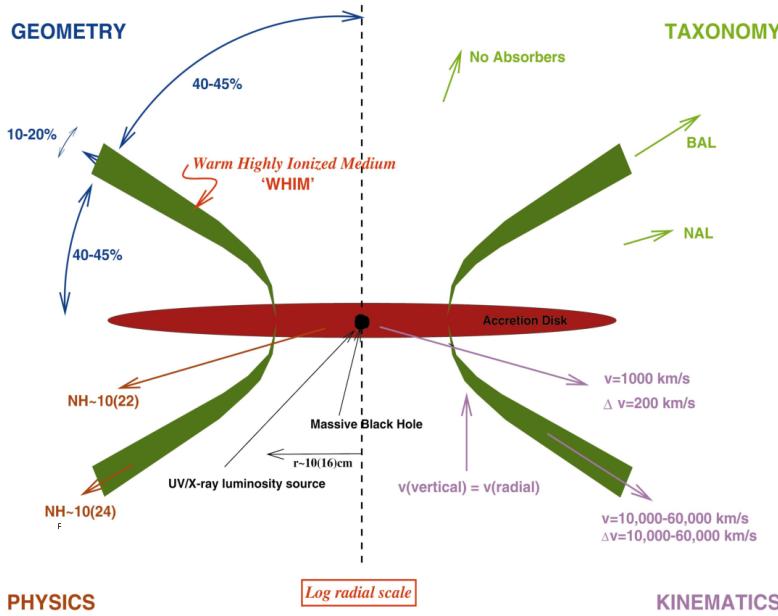


图 1.15 BAL 和非 BAL 类星体的统一图像示意图。本图取自 Elvis (2000) 中图 1。

尽管统一模型可以很好地解释以上大部分观测现象，然而仍有一些观测事实不能简单地用视角效应来解释。统计研究发现 BAL 类星体是一类黑洞吸积率较高、黑洞质量偏大的 AGN (Boroson 2002)。Ganguly et al. (2007) 对 HiBAL 类星体的研究发现接近爱丁顿吸积率的 AGN 中出现 BAL 的比例比低爱丁顿比的 AGN 中高。Zhang et al. (2010) 在 Mg II LoBALs 中也发现了类似的现象。此外，Reichard et al. (2003b) 和 Richards (2006) 发现相比于非 BAL 类星体，BAL 类星体的 C IV 发射线有更大的蓝移速度以及更小的等值宽度，这些都暗示 BAL 现象与高吸积率相关。另一方面，LoBALs 特别是 FeLoBALs 仍然有问题亟待解决。前面提到过 LoBAL 类星体有比 HiBAL 类星体和非 BAL 类星体更红的连续谱，这表明 LoBAL 类星体中有更多的尘埃。而统计发现红外选的类星体中 LoBAL 类星体的比例明显高于它们在一般类星体中的比例 ($\sim 37\%$ ；见 Glikman et al. 2012)。此外，中、远红外的观测表明相当比例的 FeLoBAL 类星体是 ULIRGs (Farrah et al. 2007a, 2012)。如 § 1.1 中所述，多数 ULIRGs 都有并合迹象，在 AGN 通过并合演化图景中，ULIRGs 是并合星系向正常类星体最后到椭圆星系演化过程中的早期阶段。因此有人提出 LoBAL 类星体特别是 FeLoBAL 类星体可能对应于类星体在上述演化过程中的一个阶段。

1.2.2 AGN 发射线外流的统计研究

长期以来人们都注意到 AGN 光谱中高电离发射线与低电离发射线有所不同。

大样本统计研究发现高电离宽发射线 C IV 的轮廓的峰值相对于低电离宽发射线 Mg II 有较大的蓝移，并且呈现蓝端过剩的不对称谱线轮廓 (e.g., Richards et al. 2002, 2011; Wang et al. 2011)。Wang et al. (2011) 在研究 C IV 时引入了 BAI

(blueshift and asymmetry index) 因子, 即 C_{IV} 发射线轮廓中 1549.06Å 以蓝的流量与 C_{IV} 总流量的比值。这个量同时考虑了 C_{IV} 的蓝移以及发射线的不对称性。他们发现 C_{IV} 的 BAI 因子与 EW 呈反相关, 这一点与 Richards et al. (2011) 发现的 C_{IV} 的 EW 与 C_{IV} 的蓝移呈反相关一致。C_{IV} 的 BAI 因子与爱丁顿比有很强的正相关, 爱丁顿比越高 C_{IV} 的轮廓越不对称。高吸积率 AGN 和低吸积率 AGN 的 C_{IV} 发射线的统计规律有很大不同: 高吸积率下 C_{IV} 的 FWHM 与 BAI 呈正相关, 与 EW 呈反相关; 低吸积率下 C_{IV} 的上述相关性消失, 这与低电离 Mg II 发射线的行为相似, 而 Mg II 发射线发射区通常被认为是在引力束缚下做开普勒运动的。这表明 C_{IV} 发射线的蓝边不对轮廓可物理地被分解为两个成分: 对称的“core”成分和额外的“blue wing”成分。“core”成分通常被认为来自于绕着黑洞做开普勒运动的云团, 其线心速度与系统红移相符; “blue wing”成分则来自 AGN 驱动的外流气体。此外, Richards et al. (2011) 以及 Kruczak et al. (2011) 都发现在紫外光度一致的情况下, C_{IV} 的蓝移速度越大, AGN 的 X-ray 辐射越弱。Wang et al. (2013) 利用 SDSS 光谱以及 WISE 的中红外测光研究了 $z \sim 2$ 的非 BAL 类星体的 C_{IV} 发射线外流和其近红外辐射的关系。他们发现近红外 ($1-4\mu\text{m}$) 的谱指数 β_{NIR} 与 AGN 的性质 (核光度、黑洞质量和爱丁顿比) 没有相关性, 而是与 C_{IV} 的 BAI 因子以及 FWHM 有正相关, 而且这种相关性随着爱丁顿比的增大而显著增强。这暗示 C_{IV} 外流气体中可能包含尘埃, 或 C_{IV} 外流可能直接与尘埃环或星际介质相互作用。

另一方面, 研究发也发现一半以上 AGN 的高电离窄发射线 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ 相对于 [S II]、[N II] 等低电离窄线有蓝移或蓝端过剩的不对称轮廓 (e.g., Boroson 2005; Zhang et al. 2011)。统计研究发现 [O III] 蓝移大的源都是爱丁顿比高的源 (如 NLS1s), 但是 [O III] 的蓝移与爱丁顿比在统计上并没有很紧的相关性 (Boroson 2005; Komossa et al. 2008)。这个结果在 Zhang et al. (2011) 的工作中得到进一步的证实。Zhang et al. (2011) 将 SDSS DR4 中 I 型 AGN 的 [O III] 分解为“core”成分和“blue wing”成分, 并分别做了统计分析。他们发现 [O III] 的 core 成分的 EW(core) 与 [O III] 整体轮廓的蓝移有较强的反相关性。然而 [O III] 的 EW/蓝移速度与 AGN 核连续谱光度 L_{5100} 、爱丁顿比以及黑洞质量只有较弱的相关性, 这表明 [O III] 并不完全由 AGN 主导, 寄主星系的星际介质环境可能对于 [O III] 有重要的影响。此外, Zhang et al. (2013) 对 AGN [O III] 发射线和中红外性质的关系做了研究。他们发现中红外的覆盖因子 CF_{MIR} ($=L_{\text{MIR}}/L_{\text{bol}}$) 与 AGN 爱丁顿比没有明显相关性, 但是与 [O III] 的 $L_{\text{wing}}/L_{\text{bol}}$ 有很强的相关, 且 WISE W4 ($22\mu\text{m}$) 的覆盖因子与 $L_{\text{wing}}/L_{\text{bol}}$ 的相关性最强。这暗示 [O III] 外流中可能包含温的尘埃。

从以上关系的比较中我们不难发现 C_{IV} 和 [O III] 的行为有相似性。首先, 二者都有较为普遍的相对于低电离线蓝移现象或者蓝边过剩的不对称性谱线轮廓。其次, 发射线蓝移最大的源都倾向于出现在吸积率最高的 AGN 中。第三, 二者都表现为蓝移越大, 等值宽度越弱, 更确切地说是 core 成分的等值宽度越弱

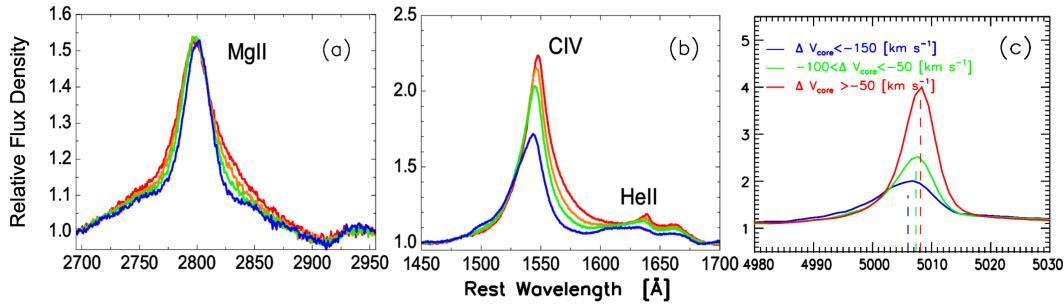


图 1.16 (a) 和 (b) 取自 Wang et al. (2011) 中图 4。图中红色、橙色、绿色和蓝色实线依次代表随着 CIV BAI 的增加, Mg II 以及 CIV 发射线的合成谱。(c) 取自 Zhang et al. (2011) 图 3, 表示不同的爱丁顿比下的 [O III] 发射线的合成谱。

(见图 1.16)。这些相似性暗示二者之间有某种联系。Zamanov et al. (2002) 注意到 CIV 和 [O III] 的联系, 他们在低红移 AGN 中找到七个 [O III] 蓝移 250 km s^{-1} 以上的源, 并发现这些源的 CIV 都有较大的蓝移。这暗示宽发射线外流与窄发射线外流有运动学联系, AGN 的外流很可能是从 AGN 的内区一直延伸到窄线区的大尺度外流。

此外, 通过比较有 CIV 发射线外流的类星体与 CIV BAL 类星体的性质, 我们也可以发现二者之间有相似性。首先, CIV BAL 倾向于出现在高吸积率的类星体中; CIV 发射线的蓝移和不对称性与 AGN 的爱丁顿比有较强的正相关性。其次, 更为直接的联系是, BAL 类星体的 CIV 发射线有更大的蓝移速度以及更小的等值宽度。第三, BAL 类星体的软 X-ray 辐射较弱; 类星体的 CIV 发射线蓝移越大, α_{ox} 的值越负, 即软 X-ray 辐射越弱。第四, 高吸积率下 CIV 发射线的 BAI 因子与近红外谱指数 β_{NIR} 呈较强的正相关性, 而 Zhang et al. (2014) 也发现 CIV BAL 的速度和 BI 值与 β_{NIR} 也有中等的正相关关系。这些相似性强烈暗示产生蓝移的 CIV 发射线与蓝移的吸收线是由相同的外流气体产生的, 只是由于视角原因导致某些源的吸收线没有看到。

1.3 我们的工作

AGN 外流气体产生发射线或吸收线主要涉及光致电离过程。外流气体中氢元素是最丰富的元素, 因此氢的电离主导着外流气体的电离结构, 其次是氦元素。外流气体受 SED 照射, SED 中能量大于 13.6 eV 的光子主要被气体中的氢电离吸收, 产生大量的电离氢和电子。此外, 光子超出 13.6 eV 的能量转化为光电子的动能。电子与电子、电子与离子的碰撞一方面提高并维持了气体中的温度, 另一方面电子与离子之间的碰撞会使离子电离或激发。由于氢、氦以及其他元素对电离光子的吸收, 电离光子从受照面开始随着气体的厚度的增加逐渐减少, 气体的温度也逐渐降低。如果气体足够厚, 电离光子耗尽, 氢将不会被电离, 这时我们就会在外流气体中探测到中性氢、低电离金属离子甚至分子的发射线或者吸收线。

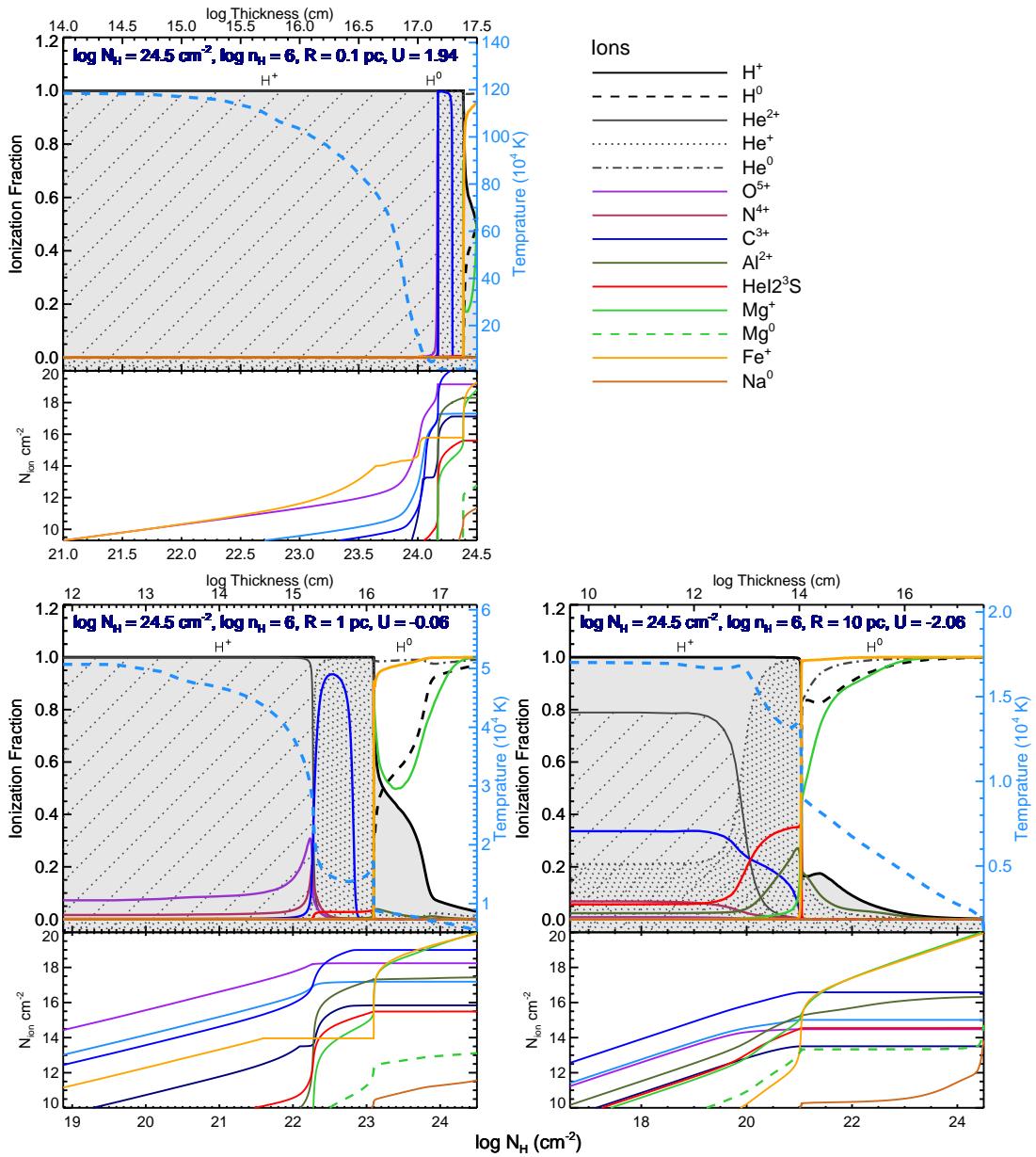


图 1.17 密度为 $n_H = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 的外流气体在相对于典型 SMBH (质量为 $10^8 M_\odot$ 、光度为 $\sim 6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 不同距离 ($0.1 - 1000 \text{ pc}$) 处的电离结构图。每幅子图中，上图表示不同电离度的离子占该元素的比例 (如 H^+ 的比例计算为 n_{H^+}/n_H) 随着气体的柱密度/厚度的变化。氢元素和氦元素的电离结构决定了外流气体的主要电离结构，在图中黑色实线下的灰色阴影区域表示 HII 区，黑色虚线下的白色区域代表 HI 区；灰色斜点线阴影区域代表 HeIII 区，灰色点区域代表 HeII 区，灰色点划线下的白色区域代表 HeI 区域。右侧纵坐标表示外流气体的电子温度，浅蓝色虚线代表温度随着气体的柱密度/厚度的变化趋势。另外，图中的 HeI^{2^3}S (红色实线) 的比例实际很小，为了显示需要统一乘以了 10^5 。下图为不同离子的柱密度随着气体柱密度/厚度的变化。

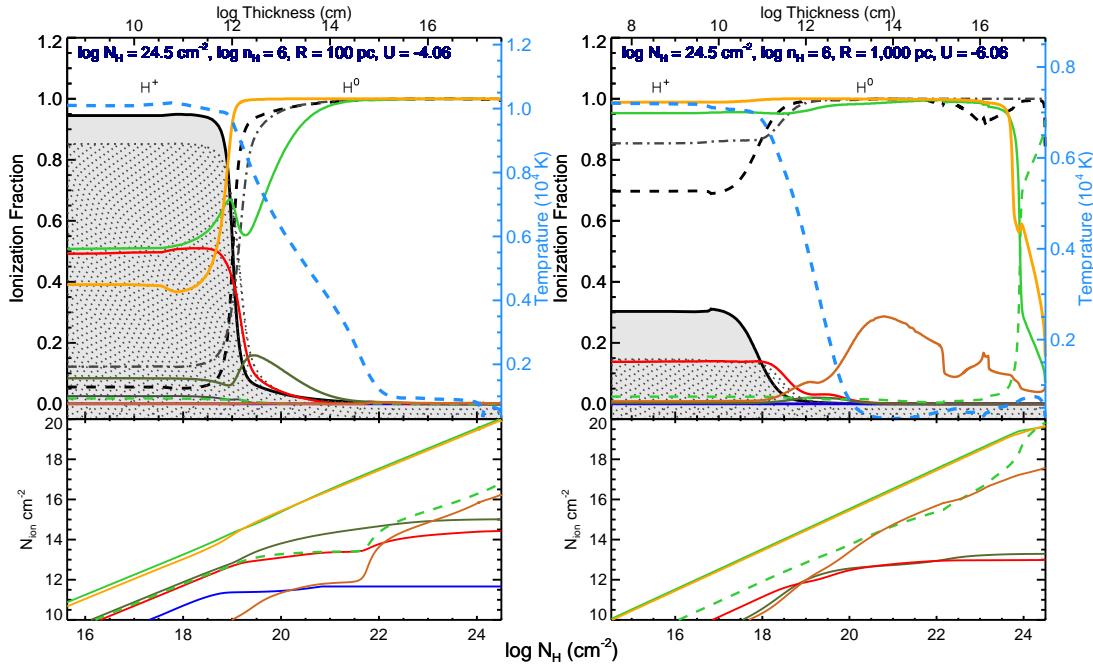


图 1.17 (续) 密度为 $n_H = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 的气体的电离结构图。

由以上分析可知，在外流气体中看到何种发射线或者吸收线，最关键的是电离状态。根据式 1.8，电离参数与 AGN 的 SED、气体离子数密度以及气体与电离光源的距离有关。我们利用 *Cloudy* 对相对于 AGN 不同距离处的外流做了简单的光致电离计算。我们假设 SMBH 的质量为 $10^8 M_\odot$ ，爱丁顿比为 0.5。因此黑洞的爱丁顿光度为 $1.26 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ ，热光度为 $6.3 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ 。我们假设外流为最简单的几何形态，即平均密度为 n_H ，柱密度（即厚度）为 N_H 的均匀平板状气体，并将外流气体设定在相对于中心光源不同的距离处。在计算中，我们假设外流气体的元素丰度为太阳丰度，并采用 *Cloudy Hazy* 中给出的由黑体“大蓝包”叠加幂律连续谱构成的 SED ($T = 15000 \text{ K}$, $\alpha_{\text{ox}} = -1.4$, $\alpha_{\text{uv}} = -0.5$, $\alpha_x = -1$; 详细见 § 2.4)。计算中各参数 (n_H 、 N_H 和 r) 范围的设置考虑现有的观测结果，具体如下： $\log n_H$ 范围设为 $2 \leq \log n_H \leq 12$ ，以 1 的步长增加；柱密度的范围设为 $20 \leq \log N_H \leq 24.5$ ，以 0.5 的步长增加；距离 r 的范围是 $0.01 \text{ pc} - 10 \text{ kpc}$ ，以 5 倍的步长增加。需要注意的是这里采用的这种矩形的网格中有的参数组合是不合理的，如距离中心光源 $r = 0.01 \text{ pc}$ 处的 10^2 cm^{-3} 的气体，当其柱密度为 10^{24} cm^{-2} 时，尺度则达到百 pc，远大于其距离。而对实测的吸收线的分析可知气体的尺度一般远小于气体与黑洞的距离（见表 2.2 以及 Dunn et al. 2010 中表 10）。图 1.17 显示了密度为 10^6 cm^{-3} 的外流气体在不同位置处的电离结构图。外流气体距离电离光源越近电离参数越大。在距离很近 ($r \lesssim 0.1 \text{ pc}$) 的时候，外流气体的氢元素几乎全被电离，甚至氦元素大部分都以 He^{2+} 形式存在，只有在柱密度极大、气体密度高的情况下才有可能出现 H_1 区。因此在这种近距离情况下，外流气体出现的都是极高电离的吸收线，如软 X-ray 波段的吸收以及紫外的 O VI、N V 等。

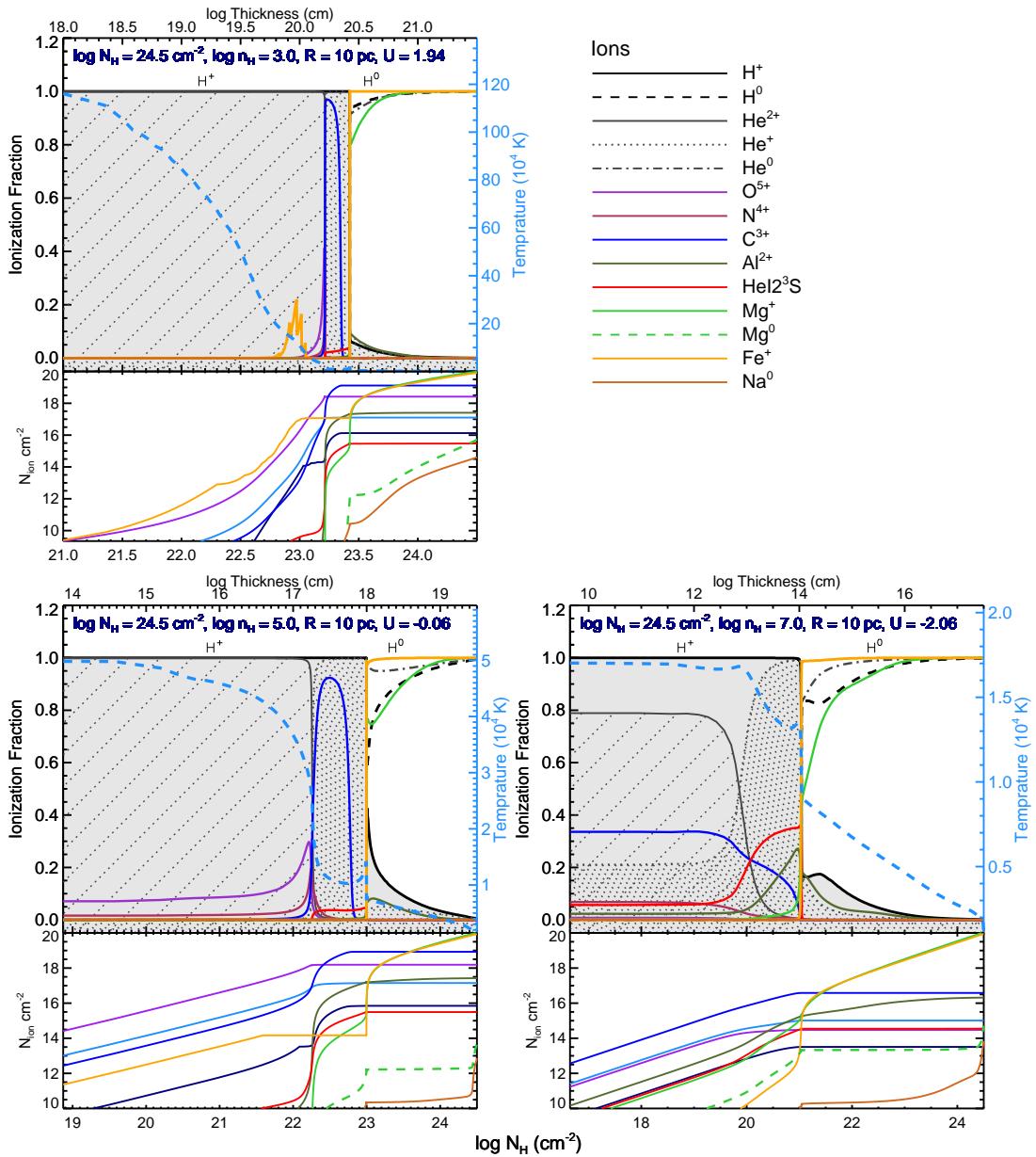


图 1.18 不同密度的外流气体在距离典型 SMBH (质量为 $10^8 M_\odot$ 、光度为 $\sim 6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 10 pc 处的电离结构图。图例与图 1.17 一致。

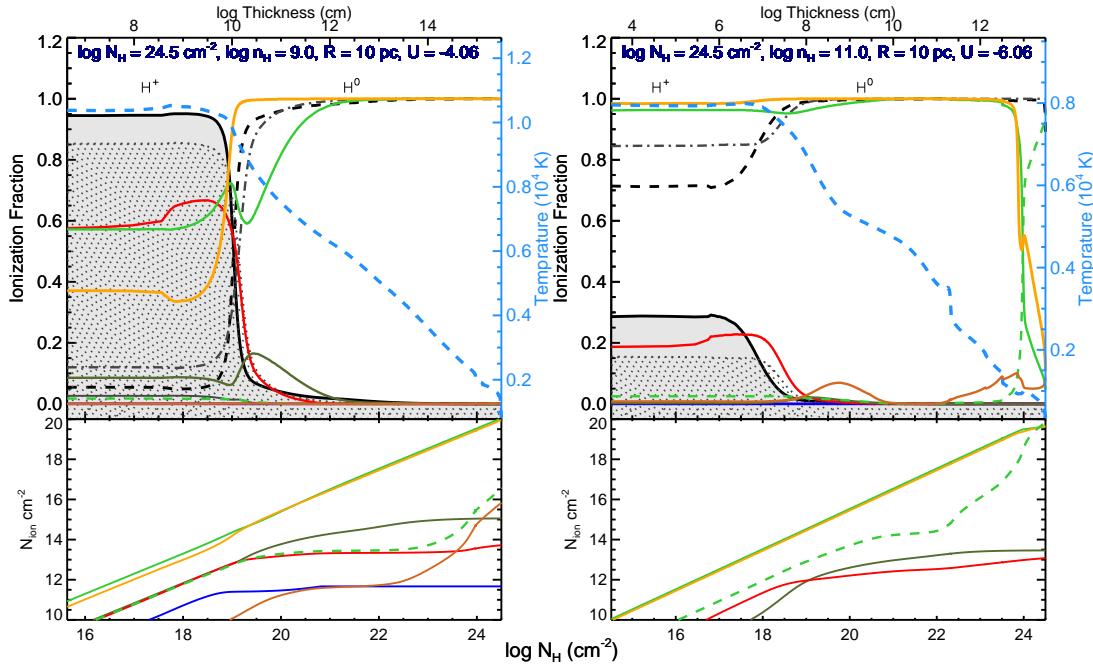


图 1.18 (续) 不同密度的外流气体在距离典型 SMBH 10 pc 处的电离结构图。

随着距离的增加，电离参数迅速减小 ($U \propto r^{-2}$)，外流气体中的 H_I 区以及 He_{II} 区范围增加，电离度稍低的 C_{IV}、Si_{IV} 吸收线变得重要起来，而低电离吸收线 Al_{III}、Mg_{II} 等也在柱密度大的气体中也开始出现。当气体距离黑洞达到窄线区尺度 (100 pc – 1 kpc) 时，气体电离度很低，气体中的 H_{II} 区很小，以 H_I 区主导。这时气体中的高电离吸收线较弱，而低电离吸收线如 Mg_{II}、Fe_{II} 很强，电离度更低的 Ca_{II} 以及中性 Na_I 吸收线也变得显著。另一方面，由式 1.8 可知，相同的电离参数下气体的距离与密度是简并的。图 1.17 显示了在 10 pc 处不同密度的气体的电离结构图，气体密度的增大与距离的增大有相似的效果。

在讨论 AGN 对星系的反馈的效果时，往往需要考虑反馈的动能。数值模拟研究结果显示，若要 AGN 的外流对寄主星系产生有效影响，外流的能量须达到 0.5–5% L_{Edd} (Hopkins & Elvis 2010; Scannapieco & Oh 2004)。由式 1.13 可知外流的动能率与气体的 N_{H} 、 v^3 成正比，在这里我们有兴趣了解柱密度为多少的外流气体在反馈中是重要的。根据观测结果，在 $r < 0.1 \text{ pc}$ 时，外流的速度可达到 $\sim 10000 \text{ km s}^{-1}$ (如 NGC4151, King & Pounds 2015)。假设黑洞质量为 $10^8 M_{\odot}$ ，外流气体的覆盖因子为 0.5，则 $\dot{E}_{\text{k}} > 0.05 L_{\text{Edd}}$ 需要 $N_{\text{H}} \sim 3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 。在 $r \sim 1 - 100 \text{ pc}$ 时，外流气体的速度一般为几千公里每秒，则 $\dot{E}_{\text{k}} > 0.05 L_{\text{Edd}}$ 需要气体达到 $N_{\text{H}} \sim 10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 。而当 $r > 100 \text{ pc}$ 时，外流气体的速度一般为几百到一千公里每秒，此时 $\dot{E}_{\text{k}} > 0.05 L_{\text{Edd}}$ 需要满足 $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 。由此可见，柱密度大的气体在 AGN 对星系的反馈中较为重要，而柱密度大的吸收线外流气体往往对应于 LoBAL 类星体。然而目前研究 LoBAL 类星体外流的一个困境是 C_{IV}、Mg_{II} 等常见吸收线在大的柱密度下容易饱和 (见 § 2.1)，而饱和的吸收线在测量离子柱密度时是无

力的。这篇博士论文的第一个工作正是为了解决这个问题而开展的。我们着眼于一类前人关注较少但是非常有用 He I^* 吸收线。 He I^* 吸收线由 He I 亚稳态 2^3S 产生，与 C IV 、 Mg II 等离子吸收线相比， He I^* 在很高的柱密度下不易饱和。而且 He I 2^3S 可产生多重吸收线，如 $\text{He I}^*\lambda\lambda 2946, 2830, 3189, 3889, 10830$ ，联合使用这些吸收线有利于确定吸收气体的柱密度和覆盖因子。另一方面，由图 1.17 以及图 1.18 所示的电离结构可知， He I^* 吸收线主要产生于氢的电离波前附近。因此若在 AGN 光谱中显著探测到 He I^* ，则可由此判断该外流气体中已经产生电离波前。反之，即使没有在 AGN 光谱中探测到 He I^* 吸收特征，也可以此判断该外流气体是光学薄的，并大致估计该外流气体柱密度的上限。

我们的研究工作所关注的第二方面是外流气体产生的发射线。§ 1.2.2 中已经提到，BAL 类星体和有发射线外流的类星体的性质在统计上有相似性，这暗示蓝移的发射线和蓝移的吸收线可能由同一外流气体产生。图 1.19 显示了 Cloudy 模型输出的发射线等值宽度 EW_{model} 在 $n_{\text{H}} - N_{\text{H}}$ 平面上的分布。模型中假定气体对于中心电离光源均匀且完全覆盖。在实际情况中气体对于光源的覆盖因子 f_c 往往比 1 小，在这种情况下各发射线的等值宽度可以估计为 $EW_{\text{model}} \times f_c$ 。如图所示，即使假设覆盖因子为 0.1，常见的发射线如 $\text{Ly}\alpha$ 、 C IV 以及 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 在较宽的参数范围内都会有较大的发射强度。而对于禁线 $[\text{O III}]$ 在外流气体距离 SMBH 较远 (>100 pc) 且密度为 $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 之间也有很大的等值宽度。利用吸收线可以准确测量气体在视线方向上的速度、柱密度以及密度，然而对于确定气体对中心光源的覆盖比例则无能为力。在估计外流气体的动能、质量损失率时，通常用类星体中出现 BAL 的比例来估计覆盖因子，然而这有很大的不确定性。利用发射线却很好地做到这一点。在第三章中我们对此做了尝试。此外，发射线外流本身也可以直接用来测定气体性质。在本文第四章中我们成功地利用外流的发射线确定了 J1110+1930 的外流气体的物理性质。

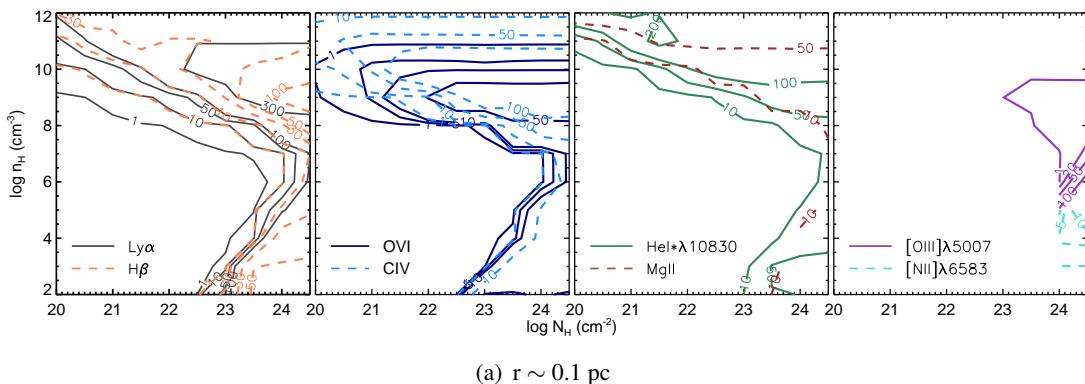
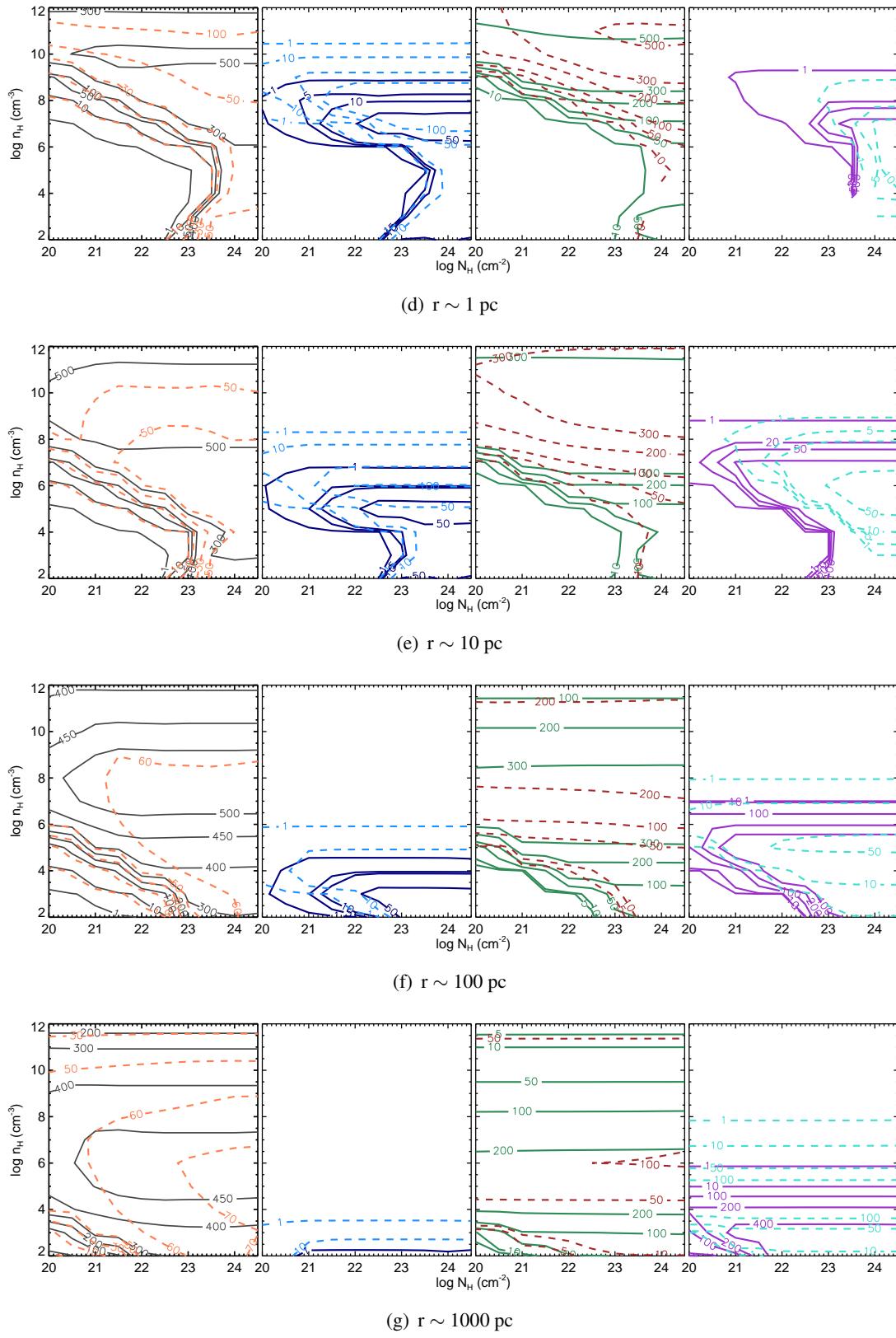


图 1.19 相对 SMBH 不同距离处的气体的不同发射线等值宽度在 $n_{\text{H}} - N_{\text{H}}$ 平面上的分布。
Cloudy 模型中假设气体对于中心电离光源均匀且完全覆盖。实际情况中气体对于光源的覆盖因子 f_c 通常比 1 小，在这种情况下各发射线的等值宽度可以估计为 $EW_{\text{model}} \times f_c$ 。

图 1.19 (续) 等值宽度在 $n_{\text{H}} - N_{\text{H}}$ 平面上的分布。

第二章 He I* λ 3889 BAL 类星体样本研究：He I* 多重吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的普遍性

2.1 引言：为什么研究 He I* 吸收线？

绪论中已经介绍过，我们可以通过研究类星体的宽吸收线获得关于类星体外流的丰富信息，如外流气体的径向速度，吸收离子柱密度，外流气体的电离状态以及密度。基于这些物理量，我们可以进一步推断出外流气体于中心黑洞的距离，进而推算出整个外流气体的动能。然而，常见的类星体宽吸收线，如 C IV, Si IV, Al III, Mg II 等，在吸收线测量方面有以下劣势。

1. 这些吸收线在高柱密度条件下非常容易饱和。如图 2.1 所示，常见的吸收线如 C IV, O VI 在较低氢柱密度下就开始饱和。

2. 两根及以上由同一离子的相同下能级产生的吸收线可以用来诊断吸收气体在视线方向上的覆盖情况，准确地定出吸收气体的覆盖因子 (Arav et al. 2005; Hall et al. 2003; Hamann & Sabra 2004)。但如果两根线相邻很近，在吸收宽度较大时就会严重混合，这种情况下我们就无法确定吸收气体的覆盖因子。常见的吸收线如 C IV $\lambda\lambda$ 1548, 1550, Si IV $\lambda\lambda$ 1393, 1402, Mg II $\lambda\lambda$ 2796, 2803 都属于这种情况。

3. 常见的吸收线都集中在紫外波段，低红移 ($z < 0.3$) 的宽吸收线类星体无法通过地面观测证认，必须通过空间紫外光谱观测，因此目前证认的低红移宽吸收线类星体比较少。

我们将从 He I* 吸收线入手研究宽吸收线类星体。相比之下，He I* 吸收线则弥补了以上吸收线的缺点。下面我们来详细介绍产生 He I* 吸收线的物理机制。氦元素是宇宙中除氢元素外最丰富的元素，占宇宙中总元素质量的 $\sim 24\%$ 。氦原子由两个质子，两个中子以及两个电子组成。在宇宙中，氦元素以原子 (He I)，一次电离 (He II) 和两次电离 (He III) 形式存在。氦原子的能级如图 2.2 所示，氦原子有两套能级结构。一套是单重态，对应于两个电子，自旋方向相反 ($2S + 1 = 1$) 的情况，其谱线都是单线；另一套是三重态，对应于两个电子自旋方向相同 ($2S + 1 = 3$) 的情况，其谱线大多是三线，例如由三重态 2^3S 态跃迁到 2^3P 的谱线真空波长分别为 10832.06 Å, 10833.22 Å, 10833.31 Å。两套能级之间的跃迁是电偶极禁戒的。在三重态能级中没有主量子数 $n = 1$ 的状态，因此氦的第一激发态 He I 2^3S 即为三重态能级中的最低能级。由于 He I 2^3S 到基态 He I 1^1S 的跃迁是电偶极禁戒的，故 He I 2^3S 的能级寿命很长，为 7870 sec (Hodgman et al. 2009)。像 He I 2^3S 态这种情况被称为亚稳态，本文中标记为 He I*。同为亚稳态的还有 He I 2^1S ，能级寿命为 19.7 msec (van Dyck et al. 1971)。值得注意的是 He I* 与氦原子基态 1^1S 之间能量差很大，为 19.77 eV，所以也很难通过碰撞激发由 1^1S 产生 2^3S 。He I 2^3S 主要通过 He⁺ 离子复合而产生并保持布居数。另一方面，处于复合电离平衡中的 2^3S 的布居主要通过以下途径减少。(1) 由于 2^3S 的能级寿命很长，因此

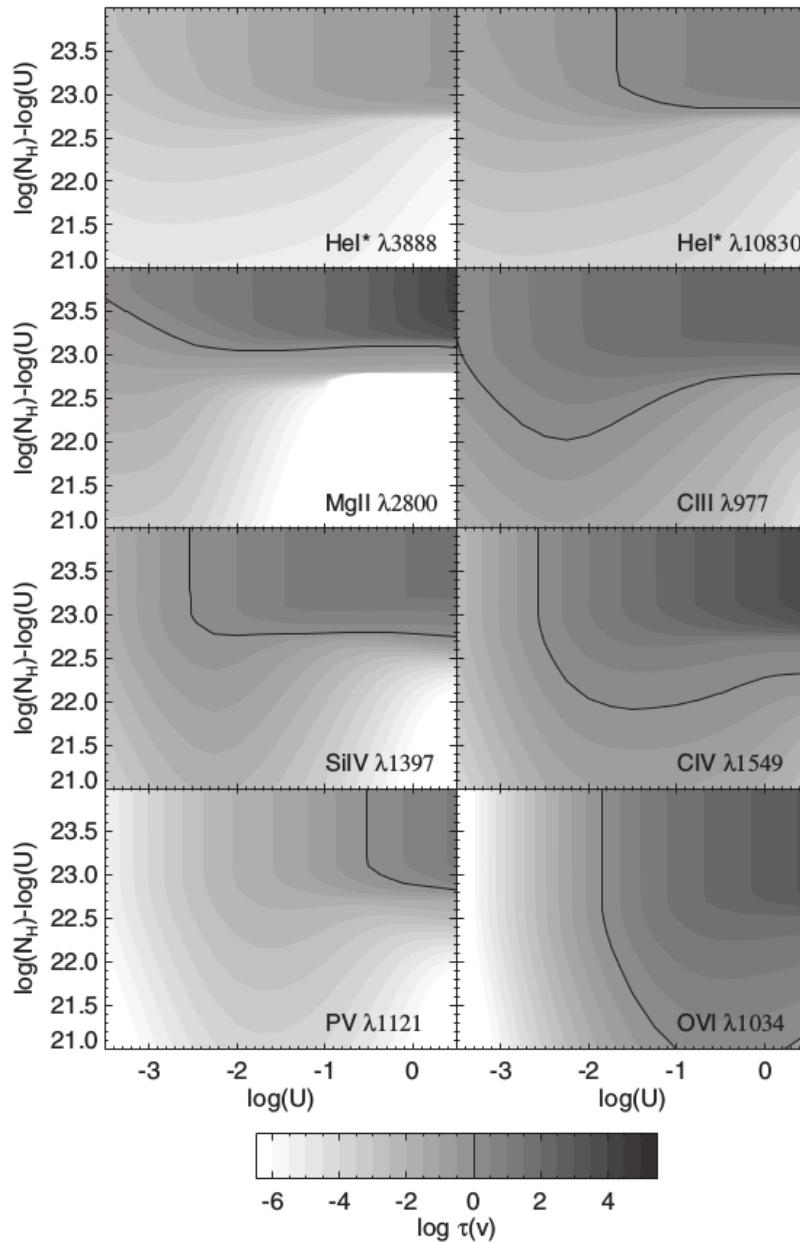


图 2.1 光致电离模型预言的常见类星体宽吸收线的光深 $\log \tau(v)$ 随电离参数 $\log U$ 以及 $\log N_H - \log U$ (N_H 为吸收气体的氢柱密度) 的变化。各个图上黑色实线表示光深 $\tau(v) = 1$ 所对应的 $\log U$ 和 $\log N_H - \log U$ 。对于共振吸收线如 C IV, C III] 以及 O VI 在相对较低的柱密度下就开始变为光学厚，而 PV, He I* λ 3889, 10830 则在较高柱密度下也将保持光学薄而不易饱和。本图取自 [Leighly et al. \(2011\)](#) 中图 15。

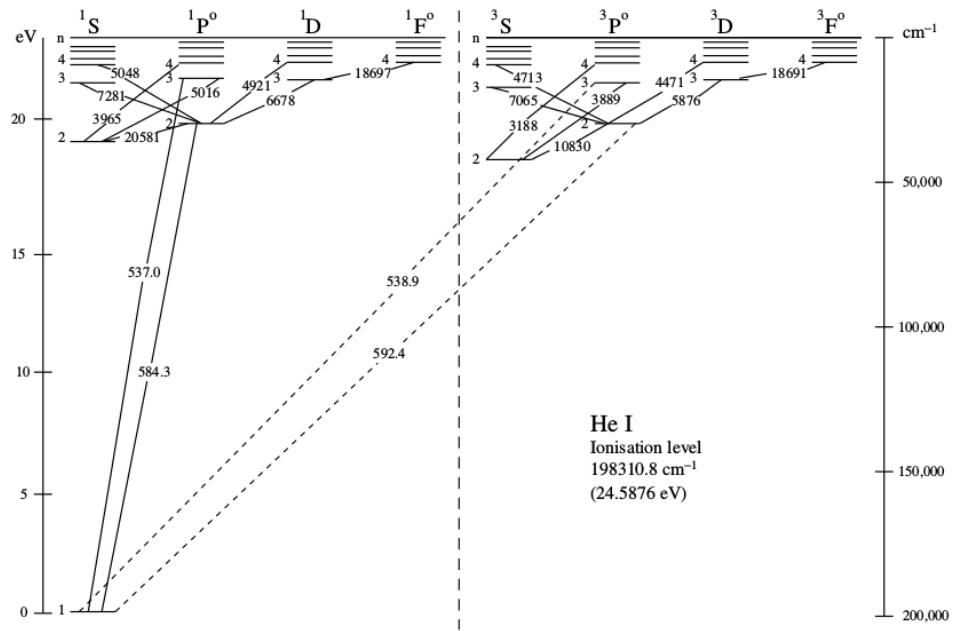


图 2.2 氦原子的能级图 (Grotrian diagram)。图左表示单重态 He I 各能级，图右表示三重态 He I 各能级。本图取自 [Tennyson \(2005\)](#) 中图 5.2。

2^3S 有很大可能经电子碰撞激发到能量相近的单重态 2^1S 和 2^1P 。（2）在气体温度超过 20000 K 的情况下， 2^3S 的碰撞电离过程开始变得显著 ([Clegg 1987](#))。（3）电离 He I 2^3S 到 He^+ 所需要的能量为 4.77 eV，因此 He I 2^3S 可以被 $\lambda \leq 2600 \text{ \AA}$ 的光子电离。综上，He I 2^3S 的能级平衡方程为：

$$n_{\text{He}^+} n_e \alpha_T = n_{2^3S} [A_{21} + n_e (q_{2^3S, 2^1S} + q_{2^3S, 2^1P}) + n_e q_{ci} + \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{a_{\nu} L_{\nu}}{4\pi r^2 h \mu}] , \quad (2.1)$$

其中，方程左边表示 He^+ 复合为 2^3S 的过程， n_{He^+} 为 He^+ 的数密度， n_e 为电子数密度， α_T 为由 He^+ 复合到 He I 三重态所有能级的总复合系数。方程右边 n_{2^3S} 为 He I 2^3S 的数密度。右边第一项表示由 He I 2^3S 自发跃迁到 He I 基态 1^1S ， A_{21} 表示这个禁戒跃迁的爱因斯坦系数，为 $1.26 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ([Osterbrock & Ferland 2006](#))。He I 2^3S 的临界密度 $n_c \sim 4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ($T \sim 10000 \text{ K}$) ([Osterbrock & Ferland 2006](#))，因此在密度较高时，这个过程可以忽略。右边第二项表示 2^3S 经电子碰撞到 He I 单重态。 $q_{2^3S, 2^1S}$ 和 $q_{2^3S, 2^1P}$ 分别是由 He I 2^3S 碰撞激发到 He I 单重态 2^1S 和 2^1P 碰撞速率系数。右边第三项表示 He I 2^3S 被碰撞电离，式中 q_{ci} 表示 2^3S 的碰撞电离速率系数。右边第四项表示 He I 2^3S 被光致电离，式中 a_{ν} 表示 He I 2^3S 的光致电离截面， L_{ν} 表示光子频率为 ν 的单色光度， r 表示气体与中心光源的距离， h 表示普朗克常数， ν_0 为 He I 2^3S 电离能 4.77 eV 所对应的光子频率。

我们研究的 He I* 吸收线产生于 He I 2^3S 吸收光子向 He I 2^3P^o , 3^3P^o , 4^3P^o 等更高的激发态跃迁，相应地产生 10830, 3889, 3189 Å 等吸收线。 He^+ 是 He 原子被能量大于 24.6 eV 的光子电离产生的，因此 He I* 吸收线所需的电离度较高。这些吸收线在光谱上从近红外到紫外分布范围很广，因此相互之间不会混合。利用

He I* 多重吸收线，我们可以有效地诊断吸收气体对中心光源的覆盖情况，定出覆盖因子。另一方面，即使对于低红移的源，也可以通过地面观测 He I* 吸收线，从而认证低红移的宽吸收线类星体。由图 2.1，我们发现相比于其他吸收线 He I* 吸收线在高柱密度条件下较难饱和，这个现象可以做如下理解。前面已经介绍，吸收线的光深 (τ) 与离子的振子强度 (f_{ik}) 以下正比关系 $\tau \propto f_{ik} \lambda N_{\text{ion}}$ 。在同一吸收气体内（假定太阳丰度）， $N_{\text{C}}/N_{\text{H}} \approx 2.69 \times 10^{-4}$ ， $N_{\text{He}}/N_{\text{H}} \approx 8.5 \times 10^{-2}$ 。假设 C³⁺ 占碳元素的比例为 0.65，则 $N_{\text{CIV}}/N_{\text{H}} \approx 1.75 \times 10^{-4}$ ，C IV $\lambda\lambda 1548.2, 1550.8$ 的振子强度分别为 0.19, 0.095，则 $\tau_{\text{CIV}} \sim 0.077/N_{\text{H}}$ 。对于 He I 2³S 而言，Clegg (1987) 给出 N_{2^3S}/N_{He^+} 随着电子密度以及温度的关系，

$$\frac{N(2^3S)}{N_{\text{He}^+}} = \frac{5.79 \times 10^{-6} T_4^{-1.19}}{1 + 3110 T_4^{-0.51} n_e^{-1}}, \quad (2.2)$$

其中 T_4 表示以 10^4 K 为单位的温度。此关系在温度 $8000 < T < 20000$ K 下是很好的近似。在 $T \sim 10000$ K, $N_{2^3S}/N_{\text{He}^+} \sim 5.8 \times 10^{-6}$ ，因此 N_{2^3S}/N_{H} 最多为 5×10^{-7} 。进而得到 He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 的光深分别为 $1.2 \times 10^{-4}/N_{\text{H}}$ 和 $2.9 \times 10^{-3}/N_{\text{H}}$ ，远小于 C IV。因此当吸收线饱和时，通过 He I* $\lambda 10830$ 和 He I* $\lambda 3889$ 测得的柱密度分别是 C IV 吸收线测量的 26 倍和 600 倍以上。我们将 He I* 各能级以及 C IV, Mg II 吸收线的信息总结在表 2.1 中。

在我们的 He I* 吸收线样本工作之前，只有 11 个 He I* 吸收线类星体被报道，分别为：SDSS J030000.56+004828.0 (Hall et al. 2002, 2003), SDSS J080248.18+5513 28.9 (Ji et al. 2015), SDSS J110645.05+193929.1 (Borguet et al. 2013), FBQS J1151+3 822 (Leighly et al. 2011; Lucy et al. 2014), LBQS 1206+1052 (Ji et al. 2012), NGC 4151 (e.g., Anderson 1974; Storchi-Bergmann et al. 2009), Mrk 231 (e.g., Leighly et al. 2014; Rudy et al. 1985), IRAS 14026+4341 (Jiang et al. 2013), SDSS J151249.29+11 1929.36 (Borguet et al. 2012a, 2013), AKARI J1757+5907 (Aoki et al. 2011), NVSS J23 59–1241 (Arav et al. 2001, 2008; Bautista et al. 2010; Brotherton et al. 2001; Korista et al. 2008)。我们将其中 9 个已很好限定了外流气体物理参数的源总结在表 2.2 中。通过检查 11 个源的吸收线，我们发现它们在显示 He I* 吸收线的同时，在相同蓝移速度处都有较强的 Mg II 吸收线（见图 2.3）。这强烈提示我们 He I* 吸收线和 Mg II 吸收线之间存在很强的物理联系。因此，作为合理的起点，我们从目前已有的最完备的 Mg II 宽吸收线类星体样本出发寻找 He I* 吸收线。

表 2.1 He I* 各能级吸收线以及其他常见吸收线信息

Ion	$\lambda(\text{\AA})^a$ Vacuum	f_{ik}^b	E_{low}	E_{up}	g_{low}	g_{up}
			cm^{-1}	cm^{-1}		
He I*	2764.63	0.004	159856	196027	3	9
He I*	2829.91	0.007	159856	195193	3	9
He I*	2945.96	0.012	159856	193801	3	9
He I*	3188.67	0.028	159856	191217	3	9
He I*	3889.75	0.064	159856	185565	3	9
He I*	10833.1	0.539	159856	169087	3	9
Mg II	2796.35	0.608	0	35761	2	4
Mg II	2803.53	0.303	0	35669	2	2
Al III	1854.72	0.561	0	53917	2	4
Al III	1862.79	0.279	0	53683	2	2
C IV	1548.20	0.190	0	64592	2	4
C IV	1550.77	0.095	0	64484	2	2
Si IV	1393.76	0.513	0	71749	2	4
Si IV	1402.77	0.255	0	71288	2	2
N V	1238.82	0.156	0	80722	2	4
N V	1242.80	0.078	0	80463	2	2
P V	1117.98	0.450	0	89447	2	4
P V	1128.01	0.221	0	88652	2	2
O VI	1031.91	0.133	0	96908	2	4
O VI	1037.61	0.066	0	96375	2	2

^a He I* 吸收线来源于 He I 2³S 对光子的吸收，因此观测到的吸收线实际上由三套吸收线形成。此处各 He I* 吸收线的 λ 是由三个吸收能级的波长根据振子强度加权平均计算而来。

^b 各 He I* 吸收线的 f_{ik} 是三套吸收线的振子强度之和

注：以上数据来自 Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2014), NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.2) [On line], 可以从以下网址获得 <http://physics.nist.gov/asd> [2015, January 22], National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

表 2.2 前人单独发表的 He I* BALs 的物理参数

Object	z	$\log N_{\text{H}}$ (cm^{-2})	$\log U$	$\log n_e$	$\log N_{\text{HeI}*}$	$r(\text{kpc})$	Ref.
SDSSJ0300+0048	0.89				≤ 14.9		1
SDSSJ0802+5513	0.664	21~21.5	-1.8	5	14.73	0.1~0.25	2
SDSSJ1106+1939	3.038	$22.1^{+0.3}_{-0.1}$	$-0.5^{+0.3}_{-0.2}$	$4.1^{+0.14}_{-0.37}$	$14.68^{+0.23}_{-0.02}$	$0.32^{+0.20}_{-0.14}$	3
FBQSJ1151+3822	0.335	21.7~21.9	-1.5	5.5~8	14.9	0.0072~0.127	4,5
LBQ SJ1206+1052	0.396	21~22	> -1.5	6~8	15.01		6
Mrk231	0.042	22.7	-0.5	3.75	14.96	~ 0.1	7,8
SDSSJ1512+1119	2.106	$21.9^{+0.1}_{-0.1}$	$-0.9^{+0.1}_{-0.1}$	$5.4^{+2.70}_{-0.60}$	$14.84^{+0.03}_{-0.01}$	0.3~0.01	3,9
AKARI J1757+5907	0.615	> 20.82	>-2.15	3.8	14.2	>3.7	10
NVSSJ2359-1241	0.868	20.556	-2.418	4.4	14.14 ± 0.3	1.3 ± 0.4	11~14

(1) Hall et al. (2003); (2) Ji et al. (2015); (3) Borguet et al. (2013); (4) Leighly et al. (2011); (5) Lucy et al. (2014); (6) Ji et al. (2012); (7) Rudy et al. (1985); (8) Leighly et al. (2014); (9) Borguet et al. (2012a); (10) Aoki et al. (2011); (11) Arav et al. (2001); (12) Arav et al. (2008); (13) Korista et al. (2008); (14) Bautista et al. (2010)

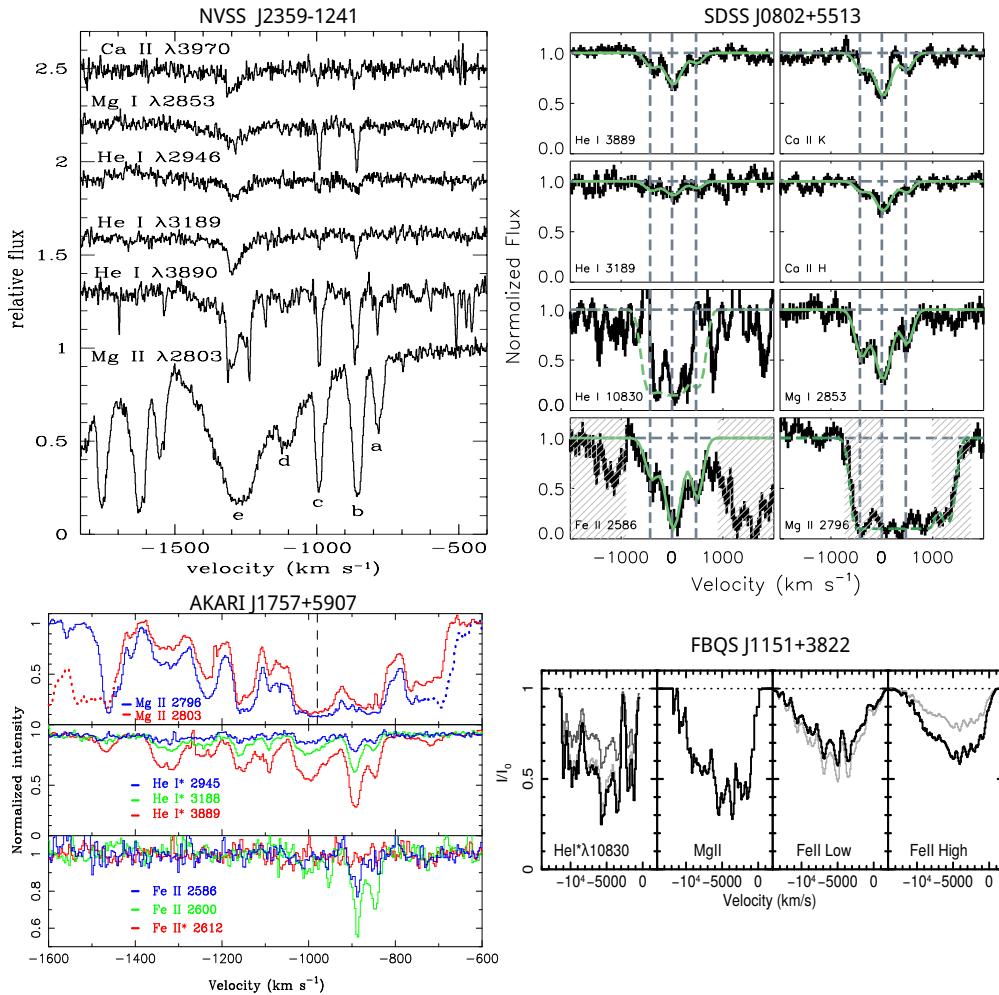


图 2.3 四个已经发表的 He I* 吸收线类星体的各吸收线归一化流量图。左上图为 NVSS J2359-1241，该图取自 Arav et al. (2001) 图 4；右上图为 SDSS J0802+5513，该图取自 Ji et al. (2015) 图 6；左下图为 AKARI J1757+5907，该图取自 Aoki et al. (2011) 图 3；右下图为 FBQS J1151+3822，该图取自 Lucy et al. (2014) 图 9。

2.2 He I* λ 3889 BAL 类星体样本的编制以及光谱配对法

2.2.1 目前发表的 Mg II 宽吸收线类星体样本

基于本章引言部分的介绍，我们将在 Mg II LoBAL 类星体样本中系统性地寻找 He I* λ 3889 吸收线。在目前发表的诸多研究宽吸收线类星体的样本工作中，研究 C IV 吸收线的居多，而研究 Mg II 吸收线的较少。其中只有以下三个工作在 Sloan 数字巡天计划 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS: York et al. 2000) 光谱数据库中系统地证认了 Mg II LoBAL，分别是：Trump et al. (2006, 以下简称 T06), Gibson et al. (2009, 以下简称 G09) 和 Zhang et al. (2010, 以下简称 Z10)。T06 在 SDSS DR3 的类星体样本 (Schneider et al. 2005) 中证认了 4784 个包括 C IV 和 Mg II 吸收线在内的 BAL 类星体。类似地，G09 在 SDSS DR5 的类星体样本 (Schneider et al. 2007) 中证认了 5039 个 BAL 类星体。Z10 在 SDSS DR5 的类星体样本 (Schneider et al. 2007) 中证认了 68 个红移为 $0.4 \leq z \leq 0.8$ 的 Mg II LoBAL 类星体¹。值得注意的是这三个样本在编制的过程中使用了不同的拟合方法和不完全相同的 BAL 判断标准来证认宽吸收线类星体。在正式编制父样本之前，我们对这三个样本做了详细的检查和比较。

我们首先比较 T06, G09, Z10 对 BAL 的判定标准。G09 样本采用了 *BI* (见式 1.2) 来判定 BAL 特征，该定义要求吸收槽连续吸收的宽度大于 2000 km s^{-1} 。所不同的是他们将积分的起始速度修正为 $v_l = 0 \text{ km s}^{-1}$ ，这样可以避免遗漏某些蓝移速度较低的 BAL 类星体，特别是对于 Al III, Mg II 等电离度较低的吸收线。T06 引入了 *AI* 来判定 BAL 特征 (见式 1.3)，该定义要求吸收槽连续吸收的宽度大于 1000 km s^{-1} 。Z10 在选取低红移 Mg II LoBAL 类星体样本时采用了两个标准。首先，Z10 要求类星体的光谱信噪比 $S/N > 7$ 以排除低光谱质量带来的测量的不确定性。其次，Z10 同样采用了基于 T06 的 *AI* 的判定标准，并且根据 Mg II 吸收线的特点对 *AI* 做了修正。为了避免 Fe II 的吸收对 Mg II BAL 的 *AI* 计算带来污染，他们定义积分的速度上限为 $v_u = 20000 \text{ km s}^{-1}$ 。同时他们将最小的速度宽度 δv 定义为 1600 km s^{-1} 。这个值是通过对红移为 $1.45 < z < 2.2$ 的类星体样本分析得到的。对于这个红移区间中的源，SDSS 光谱可以同时覆盖 C IV BAL 和 Mg II LoBAL。他们采用不同的 δv 来选取这部分样本中的 Mg II LoBAL，如果选出来的 Mg II BAL 类星体也同时有 C IV BAL，那么这个选择是正确的。他们发现 $\delta v \sim 1600 \text{ km s}^{-1}$ 是一个可以兼顾样本正确率和完备度的值。

其次，我们对 T06, G09, Z10 的 Mg II LoBAL 类星体样本分别进行匹配以检查样本之间的差异。在本工作中，我们所关心的 Mg II LoBAL 类星体的红移为 $0.4 \leq z \leq 1.35$ ，这样可以保证 Mg II 吸收线和 He I* 吸收线都在 SDSS 的光谱范围内 ($3800 - 9200 \text{\AA}$)。为了更公平地比较这三个样本，我们采用以下标准在三个样本中选取源做比较：(1) 仅选取 SDSS DR3 释放的光谱数据；(2) 光谱平均信

¹Z10 只发表了 68 个 $0.4 \leq z \leq 0.8$ 的 Mg II LoBAL 类星体，我们使用相同的拟合方法和选择标准将其样本红移范围扩大到 $0.4 \leq z \leq 1.35$ ，在 SDSS DR5 中共选出 175 个 Mg II LoBAL 类星体。

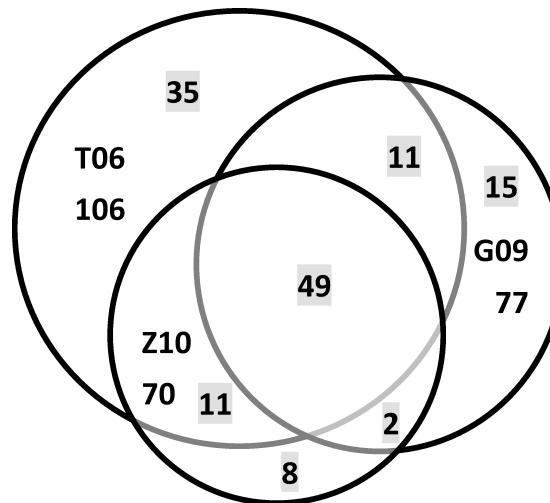


图 2.4 这个维恩图表示 T06, G09, Z10 三个样本的相互覆盖程度。三个样本中所用来比较的源是按照统一的标准选取（见 §2.2.1）。图中阴影区域上的数字表示其所在的各弧形所围成的最小的封闭区域中的源的个数，而这个区域表示样本之间的关系。

噪比 $> 7 \text{ pixel}^{-1}$; (3) Mg II 吸收线宽度大于 2000 km s^{-1} ²。这是根据 T06, G09, Z10 的判定标准得到的最严格的 BAL 判据。根据以上标准我们在 T06, G09, Z10 中分别选出 106, 77, 70 个 Mg II LoBAL 类星体。三个比较样本之间的覆盖程度如图 2.4 所示。三个比较样本共有 134 个源，其中只有 49 个源是三个样本所共有的。T06 中 33%，G09 中 19.5%，Z10 中 11.4% 的源没有被其他两个样本探测到。

这三个样本的不一致性反映了由于各自拟合方法而导致的样本选取的不完备，而拟合方法的不确定性主要来自如何推断被离子（如 Mg⁺）吸收的“本征”光谱（包括类星体核连续谱和/或发射线）。已发表的 BAL 类星体样本工作主要采用以下两种方法。基于类星体紫外到光学连续谱的相似性 (e.g., Richards et al. 2001; Vanden Berk et al. 2001)，采用某种类星体合成谱作为模板通过最小 χ^2 拟合 BAL 候选源 (e.g., Reichard et al. 2003a, T06)。这种方法的优点在于模型简单且拟合速度快。但是，就 BAL 类星体的光谱特征而言，不同的源之间的差异明显，具体表现在核连续谱的谱形，宽发射线的轮廓，FeII 发射线丛（伪连续谱）的强度，巴尔末连续谱的强度等等。因此，只用单一的类星体合成谱很难将所有的 BAL 候选源拟合好。另一种常用的方法是用对光谱每个成分用参数化的解析模型进行最小 χ^2 拟合 (e.g., Tolea et al. 2002, G09, Z10)，具体为用单幂律、折断的幂律谱或者多项式拟合核连续谱，用单个或多个高斯轮廓、洛伦兹轮廓拟合发射线，用经验的或者解析的 Fe II 发射线模板 (e.g., Boruson & Green 1992; Dong et al. 2011) 拟合 Fe II 发射线丛。这种方法的优点在于对每条光谱都灵活对待，而且拟合速度比较快。但另一方面，对某些特征较少的成分（如巴尔末连续谱）则很难通过这种拟合方法很好地限定（见 Wang et al. 2009）。特别地，目前常用的类星体 Fe II 发射线经验模板都是根据 I Zw 1 的 Fe II 发射线来的（见 Dong et al. 2011

²这里的 Mg II 吸收线宽度是基于 §2.2.2 所描述的方法对 Mg II 吸收线所做的测量

的讨论），而不同类星体光谱中的 Fe II 发射线的差异非常大，显然仅使用 I Zw 1 类型的 FeII 模板很难将所有类星体的 Fe II 发射线拟合好。另外，使用这两种方法虽然都可以找到一个 χ^2 最小、统计形式上最优的拟合，但是这个最优拟合得到的不一定是真正的被吸收的“本征”光谱。而且这些方法也都没有考虑拟合方法的系统误差。

综上讨论，我们需要更优化的方法来确定 BAL 类星体的未被离子吸收的本征光谱。对于较弱的吸收线如 He I* λ 3889，准确地确定本征光谱尤为重要。[Leighly et al. \(2011\)](#) 在测量 FBQS J1151+3822 近红外光谱的 He I* λ 10830 吸收线时，在几十条无吸收的类星体近红外光谱中找到 5 条与 FBQS J1151+3822 充分相似的光谱来确定其被 He I* λ 10830 吸收的本征光谱。他们选择与 FBQS J1151+3822 没有吸收的光谱区域匹配最好且信噪比最高的模板 PHL 1811 作为本征光谱（见图 2.5），同时将其他三条匹配较好的模板与最佳模板的差距（~5%）作为系统误差。类似地，[Zhang et al. \(2014\)](#) 针对类星体 C IV 宽吸收线发展了一套利用无吸收特征的类星体光谱匹配 BAL 候选者来确定被吸收的本征光谱的方法，即“光谱配对法”（“pair-matching method”）。这种方法在消光曲线的研究中广泛使用（e.g., [Wang et al. 2012](#)）。观测数据显示 BAL 类星体普遍比正常类星体的连续谱偏红，这表明 BAL 类星体受到的尘埃消光比较大，但是两者之间的发射线轮廓非常相似（e.g., [Ganguly et al. 2007](#); [Weymann et al. 1991](#)）。因此只要正常类星体的数目足够多，我们总可以找到一个或者多个与 BAL 类星体光谱除吸收线以外其他特征足够相似的正常类星体做为模板。He I* λ 3889 吸收线比 C IV, Mg II 吸收线弱很多。为了更好地测量这种弱吸收特征，我们改进了光谱配对法，使之可以更加适合 He I* λ 3889 吸收线，并可以合理地估计每个源的系统误差。我们对该方法做了系统测试，评估了这个方法的测量精度和吸收线探测效率。

2.2.2 用光谱配对法（pair-matching method）测量类星体 Mg II 宽吸收线

我们将 T06, G09, Z10 样本中的所有 Mg II LoBAL 类星体集合起来，共得到 351 个 Mg II LoBAL。在本小节中，我们用新改进的光谱配对法测量这 351 个 Mg II LoBAL，并基于我们的测量和判定标准确定父样本。这样一来可以将新的测量和前人的测量做对比，检验光谱配对法。另外，用相同的方法处理 Mg II 和 He I* λ 3889 吸收线，便于之后的分析比较。这里我们使用 SDSS DR7 数据库中的光谱³。在正式分析处理吸收线之前，我们做了如下的光谱预处理：根据银河系消光图（[Schlegel et al. 1998](#)）和消光曲线（[Fitzpatrick 1999](#)）对观测光谱进行了银河系消光改正；根据类星体的红移（这里采用[Hewett & Wild 2010](#)给出的红移）把光谱从观测者坐标系改正到静止系。

下面我们来详细介绍光谱配对法，这种方法主要包括以下步骤。

³ 下载地址 http://das.sdss.org/spectro/ss_tar_26/ ;SDSS DR7 释放的光谱数据是由第 26 版 SDSS 数据处理软件处理的

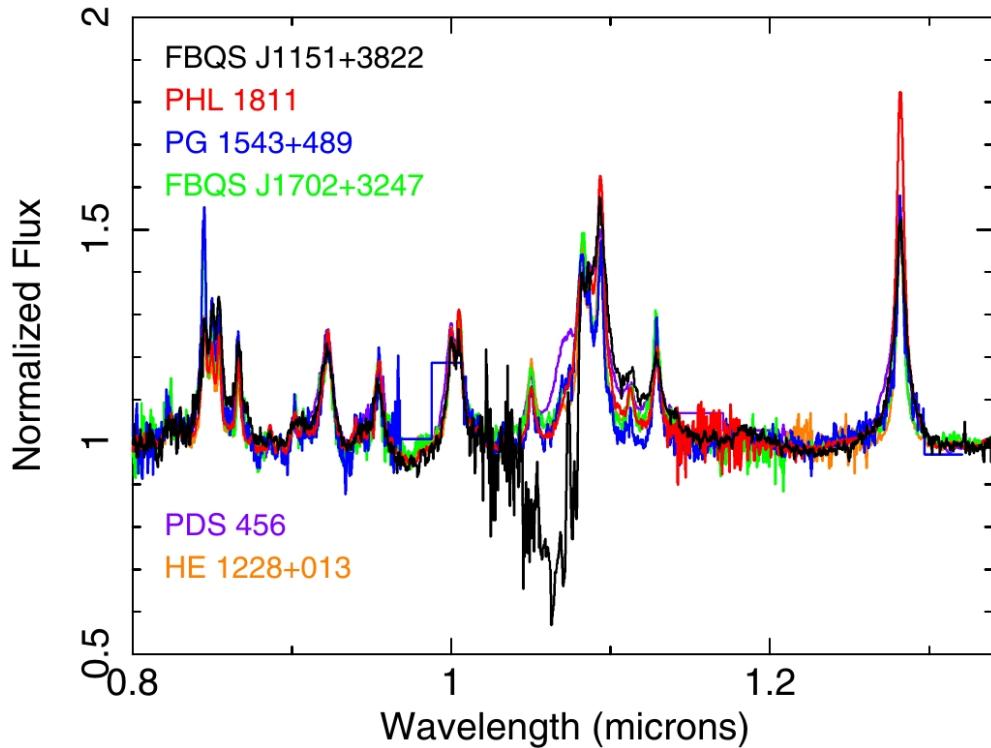


图 2.5 FBQS J1151+3822 的近红外光谱以及另外 5 条与之相似的类星体近红外光谱。这 5 条光谱分别做了归一化并且用一个四阶多项式调整连续谱形状使之匹配 FBQS J1151+3822。本图取自 Leighly et al. (2011) 图 2。

选择无吸收特征的类星体光谱作为模板库 我们从 SDSS DR7 的类星体样本 (Schneider et al. 2010) 中按照以下标准选择无明显吸收特征的类星体光谱作为模板。(1) 只选择 $0.4 \leq z \leq 2.2$ 的类星体以保证 Mg II λ 2798 发射线在 SDSS 的光谱波长覆盖范围内。(2) 我们利用 SDSS 给出的误差计算光谱上每个 pixel 的信噪比 (S/N)。我们只选择在 $2400 - 3000 \text{ \AA}$ 范围内中值 $S/N > 25 \text{ pixel}^{-1}$, 且经肉眼检查没有吸收特征的类星体。最终我们选出 1343 个类星体作为模板。

将每一个 Mg II LoBAL 类星体候选源遍历模板库中所有的模板 对于每一个 BAL 候选源的光谱 ($f_{\text{obj}}(\lambda)$), 我们都用模板库中的每一条模板去拟合一次。由于我们只是证认 Mg II λ 2798 宽吸收线, 因此在拟合中仅考虑 $2400 - 3200 \text{\AA}$ 的光谱。在拟合时, 我们将每一条模板谱 ($f_t(\lambda)$) 都乘以一个二阶多项式, 以此调整模板谱和 BAL 候选源之间由于尘埃消光不同或者流量水平差异而导致的连续谱谱形的差别, 最终得到最佳拟合 ($f_{t'}(\lambda)$), 具体表示如下:

$$f_{\text{obj}}(\lambda) = f_{t'}(\lambda) = f_t(\lambda) \cdot (a + b\lambda + c\lambda^2), \quad (2.3)$$

这里 a, b 和 c 在拟合中作为自由参量。在拟合过程中, 我们屏蔽了 BAL 候选源光谱中被 SDSS 光谱处理程序标记的坏像素。由于本征光谱是通过对无吸收区域光谱的拟合推断而来, 因此在拟合中需要屏蔽宽吸收线区域。但

是吸收线的精确宽度 W_{abs} 是要通过与拟合的本征光谱比较才能得到，因此只能通过迭代来不断逼近真实情况直到收敛。不同 BAL 候选源的 Mg II 吸收线的宽度、位置都不完全相同，因此在初次拟合时，我们粗略地将所有候选源光谱中 $2613 - 2809 \text{ \AA}$ 区域统一屏蔽，这个范围对应于相对 Mg II $\lambda 2798$ 吸收线 $-19910 - 1100 \text{ km s}^{-1}$ 的区域。按照下文所述的迭代过程，经过每一次迭代我们都可以对每个 BAL 候选源得到更精确的 Mg II 吸收线屏蔽范围即吸收线的宽度 W_{abs} ，直到 W_{abs} 收敛为止。在每一次迭代拟合后，每个 BAL 候选源都被 1343 个模板拟合了一次，也就是说有 1343 个拟合结果。对于每个拟合结果，我们都计算了 χ^2 ，并选出其中满足 $\chi^2 \leq 1.5$ 的拟合结果作为“可接受的拟合”。一般而言，每个 BAL 候选源都有 20 个以上的“可接受的拟合”。但是如果某些源 Mg II 周围有很显著的 Fe II 吸收特征或者 Fe II 发射线比较奇怪，这时可接受的拟合的数目会小于 20 个。在这种情况下，我们将单独针对这些源手动地屏蔽这些特征直到我们得到 20 个以上可接受的拟合为止。利用这些可接受的拟合 ($f_{t,i}$)，我们合成了一条平均模型谱 ($f_{\text{model}}(\lambda)$)，并得到归一化谱：

$$I(\lambda) = \frac{f_{\text{obj}}(\lambda)}{f_{\text{model}}(\lambda)} \quad (2.4)$$

随后，我们首先利用 Savitsky-Golay 平滑方法进行 5 点平滑（自由度为 2） $I(\lambda)$ 以降低噪声和未分辩的吸收特征。对于无吸收的区域 ($2400 - 2600 \text{ \AA}$ 和 $2900 - 3000 \text{ \AA}$)，归一化谱应当满足 $I(\lambda) \approx 1$ 。这个区域中 $I(\lambda)$ 的涨落（均方根 rms）也很好地代表了归一化谱的噪声水平。吸收线的最大速度 (v_{max}) 和最小速度 (v_{min}) 的位置由 $I(\lambda)$ 及其噪声水平共同决定。经过尝试，我们定义吸收线的吸收区域 W_{abs} 为满足 $I(\lambda) < 1 - 2 \text{ rms}$ 的连续吸收范围，相应地吸收区域的左右边界分别为 v_{max} 和 v_{min} ⁴。同时，我们定义吸收线的深度 d_{abs} 为吸收槽内最深的位置与 1 之间的差，即 $1 - I(\lambda)_{\text{min}}$ 。每次迭代得到的 W_{abs} 都作为下一次迭代中吸收线的屏蔽区域。当前后两次迭代得到的 W_{abs} 和 d_{abs} 变化不超过 10% 时，我们认为达到收敛。对于大部分源，两次迭代即可满足收敛条件。

如 §2.2.1 所述，前人对于 C IV、Mg II 吸收线的研究中一般以 $I(\lambda)$ 低于 10% 作为真实的吸收的判定标准。但正如我们对该方法测试后所得到的结果所示，这个标准并不适用于像 He I* λ 3889 这样的弱吸收特征。我们采用的判定标准则根据每个源的光谱质量和拟合误差水平来确定，逻辑上更加合理。

判定并且测量 BAL 特征 经过上述迭代过程，每个 BAL 候选源都有 $\gtrsim 20$ 个 $\chi^2 \lesssim 1.5$ 的拟合结果。我们认为这些拟合结果在模型上都是合理的，都可以被平

⁴Mg II $\lambda 2798$ 吸收线以真空波长 2798.75 \AA 处为零速度点；He I* λ 3889 吸收线以真空波长 3889.74 \AA 处为零速度点

等地接受。虽然更通常的做法是选择 χ^2 最小的拟合结果作为最佳拟合，但是根据我们对此方法的测试，最小 χ^2 的拟合模型不一定是真正的本征光谱。因为不论哪一种拟合方法都是由无吸收的光谱区域推测被吸收的光谱，对于类星体光谱而言，不同波长处的光谱之间并没有明确的关系。所以这些 $\chi^2 \lesssim 1.5$ 的拟合结果在模型上可以认为是不可区分的，即都是合理的。

对于这样每个可接受的模型 $f'_{t,i}$ ，宽吸收线的吸收体静止系等值宽度 (EW) 可计算为：

$$EW_i = \int_{\lambda_l}^{\lambda_u} [1 - I_i(\lambda)] d\lambda , \quad (2.5)$$

式中， λ_u 和 λ_l 分别表示 v_{\max} 和 v_{\min} 所对应的波长， $I_i(\lambda) = f_{\text{obj}}(\lambda)/f'_{t,i}(\lambda)$ 。我们对所有 EW_i 计算了平均值和标准方差，其中平均值 \overline{EW} 是对于真实的吸收线 EW 的一个合理估计，而标准方差则反映了这种方法的系统误差 σ_{sys} 。另一方面，我们也对每个 EW_i 估计其统计误差 ($\sigma_{n,i}$)。 $\sigma_{n,i}$ 主要来自于光谱的随机噪声和拟合过程中的误差，我们采用 T06 中所使用的方法计算。类似于 EW_i ，我们用所有 $\sigma_{n,i}$ 的均值 (σ_n) 作为对总体的统计误差的估计。结合系统误差和统计误差，吸收线 EW 的总测量误差可表示为：

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{sys}}^2 + \sigma_n^2} \quad (2.6)$$

基于以上的计算，我们设定以下的判据以判定 BAL，

1. $EW \geq 2\sigma_{\text{total}}$ (吸收强度判据)，
2. $|v_{\max} - v_{\min}| \geq 1600 \text{ km s}^{-1}$ (吸收线宽度判据)。

整个拟合流程见图 2.6。根据上述流程和选择标准，我们在 351 个候选源中选出 285 个 Mg II BAL 类星体，排除了 53 个源。另外 13 个源谱形奇特，无法用我们所选的光谱模板很好地拟合。这 13 个源不包含在我们的父样本中并单独汇总于表 B.1，其中三个源作为罕见的类星体已经被 Hall et al. (2002) 细致地研究。在图 2.7 中，我们展示了用上述方法对六个 BAL 类星体确定的吸收线的本征光谱。图中包括 Mg II λ 2798 和 He I* λ 3889 区域。在这六个类星体中有四个是 FeLoBAL 类星体。FeLoBAL 类星体的 Mg II λ 2798 周围有 Fe II 吸收线的污染，因此确定 Mg II 吸收线的吸收边界 (v_{\max}, v_{\min}) 很依赖于所定出的本征光谱的位置。如图所示，我们的光谱配对法可以较好地找到吸收线的本征光谱。这六个源也标识在图 2.8 中（绿色点）。在图 2.8 中，我们将我们的测量结果与 T06, G09, Z10 的测量 (EW/AI , v_{\max} , W_{abs} 和 d_{abs}) 结果做了直接对比。我们的结果与前人的结果基本相符，尤其是 T06, G09, Z10 所共同探测到的源（红色点）。结果差异最大的测量量是 FeLoBAL 类星体（蓝色点）的最大速度。

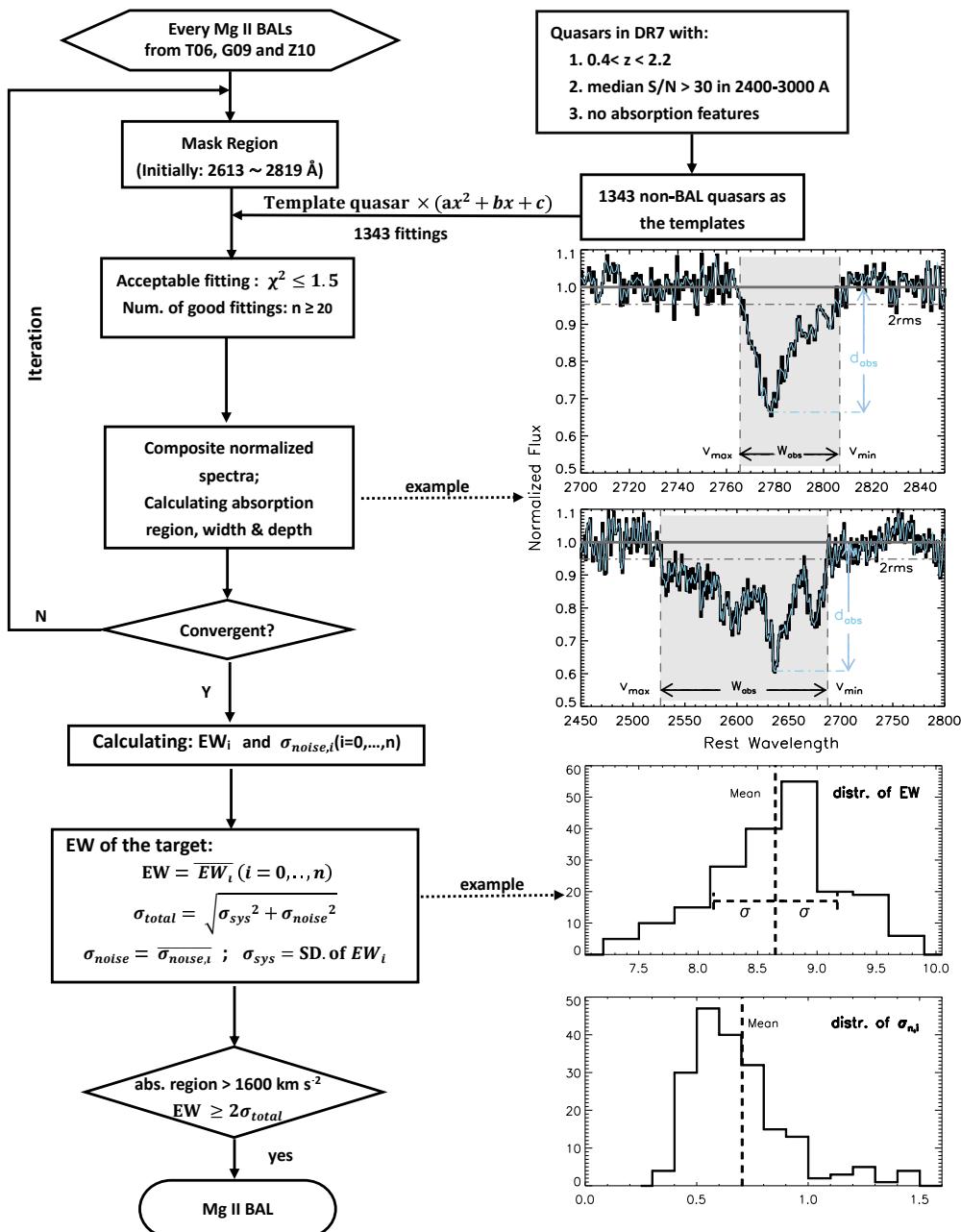


图 2.6 用光谱配对法拟选择类星体宽吸收线的流程图。蓝色实线表示吸收线谱经 Savitsky-Golay 方法进行 5 点平滑（自由度为 2）后的谱。

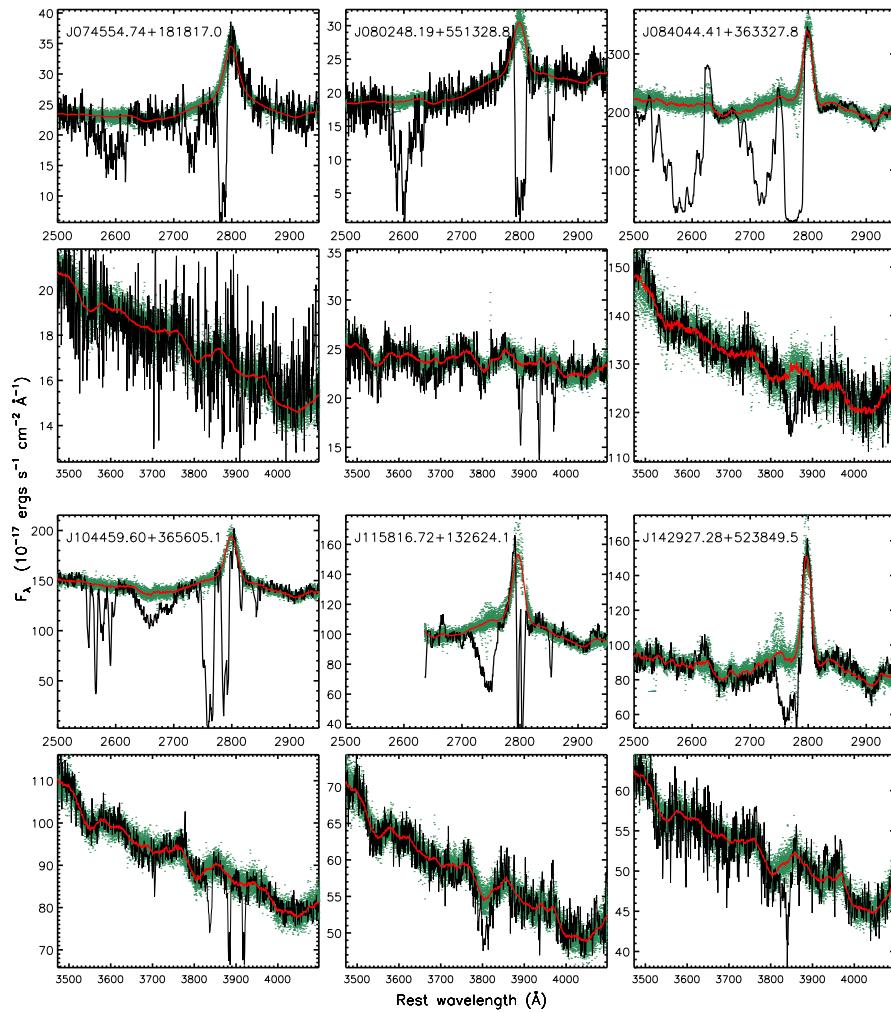


图 2.7 图中显示了六个宽吸收线类星体的 Mg II λ 2798 以及 He I* λ 3889 宽吸收线的拟合情况。红色的实线表示这些可以接受的本征光谱模型的均值，即光谱配对法得到的最佳模型。绿色的点线表示该源 Mg II λ 2798 或者 He I* λ 3889 区域由光谱配对法选出的可以接受的本征光谱模型，因此绿色点的弥散则反映了系统误差。这六个源中的 J0745+1818, J0802+5513, J0840+3633 以及 J1044+3656 都是 FeLoBAL 类星体，结合图 2.8 来看，这些源在不同样本中所测得的 v_{\min} 和 v_{\max} 有较大差异。

2.2.3 用光谱配对法寻找 He I* λ 3889 BAL 类星体样本

基于上述 285 个 Mg II LoBAL 类星体，我们将同样利用光谱配对法在其中寻找 He I* λ 3889 吸收线。选择过程与 Mg II 吸收线的选择过程类似，但是我们根据 He I* λ 3889 区域的特征在选择模板、屏蔽吸收区域和判定标准方面做了适当调整，具体如下。我们在 SDSS DR7 类星体样本 (Schneider et al. 2010) 中挑选满足以下条件的类星体光谱：(1) 红移范围为 $0.4 \leq z \leq 1.35$ ；(2) 光谱中 $3500 - 4000$ \AA 中值信噪比满足 $S/N > 25 \text{ pixel}^{-1}$ ；(3) 经检查没有明显吸收特征的源。最终我们选出 316 个符合条件的类星体光谱模板。由于部分类星体在 $3500 - 4000$ \AA 区域中有较强的 [O III] 和 [Ne III] 发射线，这些线会对之后的拟合产生影响，我们对这些模板光谱的 [O III] 和 [Ne III] 发射线进行局部拟合并将其扣掉。具体做法为

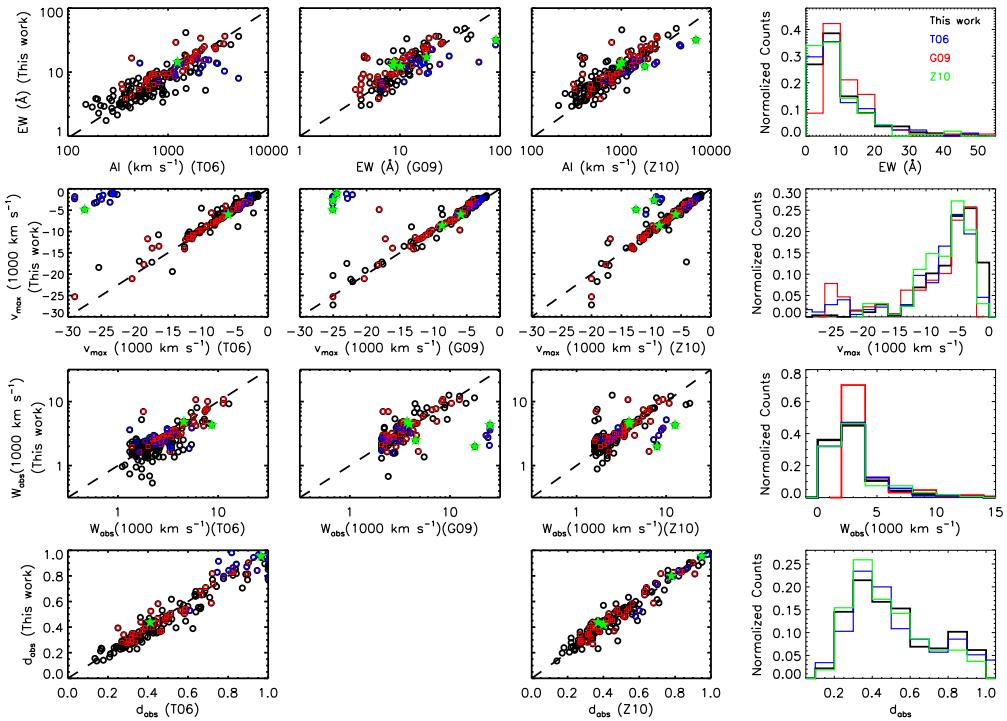


图 2.8 我们的拟合结果与前人 (T06, G09, Z10) 的比较。左边的图中，红色的点表示 T06, G09, Z10 中共同探测到的源；蓝色的点表示样本中的 FeLoBAL 类星体；绿色的点表示图 2.7 中展示的六个类星体。右边的图是不同样本拟合结果的直方图比较。

我们用一阶或二阶多项式拟合发射线局部连续谱，用单个或者双高斯轮廓拟合 [O II] 和 [Ne III] 发射线。与拟合 Mg II 吸收线相似，我们只拟合 He I^{*}λ3889 邻近的区域即 3500–4000 Å。在拟合过程中，我们仔细地屏蔽 Mg II LoBAL 光谱中的 [O II] 和 [Ne III] 发射线，同时我们也屏蔽了 SDSS 光谱数据中标注的坏点。另一方面，类星体光谱在 3500–4000 Å 内也可能会有 Ca II λ3949, 3969 吸收线或者高阶巴尔末吸收线，如果这些线也出现的话，我们也同样将其仔细地屏蔽。同样地，我们在拟合过程中不断迭代吸收线的屏蔽区域。在 § 2.1 中我们提到，在我们工作之前发表的 11 个有 He I^{*} 吸收线的类星体都在相同速度处有 Mg II 吸收线，因此我们将 Mg II 吸收线的范围作为 He I^{*} 的初始屏蔽区间。迭代过程和 Mg II LoBAL 相同，见 § 2.2.2 以及 图 2.6。对每个 He I^{*}λ3889 吸收线候选源，我们选出 $\chi^2 \leq 1.5$ 的拟合结果，并且计算了 He I^{*}λ3889 吸收线的 v_{\min} , v_{\max} , d_{abs} , EW 以及 σ_{total} 。在判定是否有 He I^{*}λ3889 吸收线时，我们首先采用了 § 2.2.2 中所述的“吸收强度判据”。Mg II 的“吸收线宽度判据”并不适用于 He I^{*}λ3889 吸收线，在典型的电离参数 (U) 和氢总柱密度 (N_{H}) 条件下，He I^{*}λ3889 吸收线的光深远小于 Mg II (见 Leighly et al. 2011 以及 图 2.1)，因此观测到的 He I^{*}λ3889 吸收线宽度比 Mg II 吸收线小。尽管观测到的 He I^{*}λ3889 吸收线的宽度较窄，但是 He I^{*}λ3889 吸收线无疑与 Mg II 吸收线是有物理联系的，这从吸收线的蓝移位置可以推断。因此，He I^{*}λ3889 吸收线的起源是类星体的外流，我们仍可以称之为 He I^{*} BAL。最后，我们肉眼检查了以上述过程挑选出的有 He I^{*}λ3889 吸收线

的 SDSS 光谱。如果在同样速度处发现 He I* λ 3189 吸收线或者更高阶的 He I* 吸收特征，则可以直接证明我们选出的源的确是 He I* λ 3889 吸收线。我们排除了一些疑似受 H9, H10 或者 H11 等高阶巴尔末吸收线污染的源。最终，我们在 285 个 Mg II LoBAL 类星体中找到了 101 个有 He I* λ 3889 吸收的类星体。

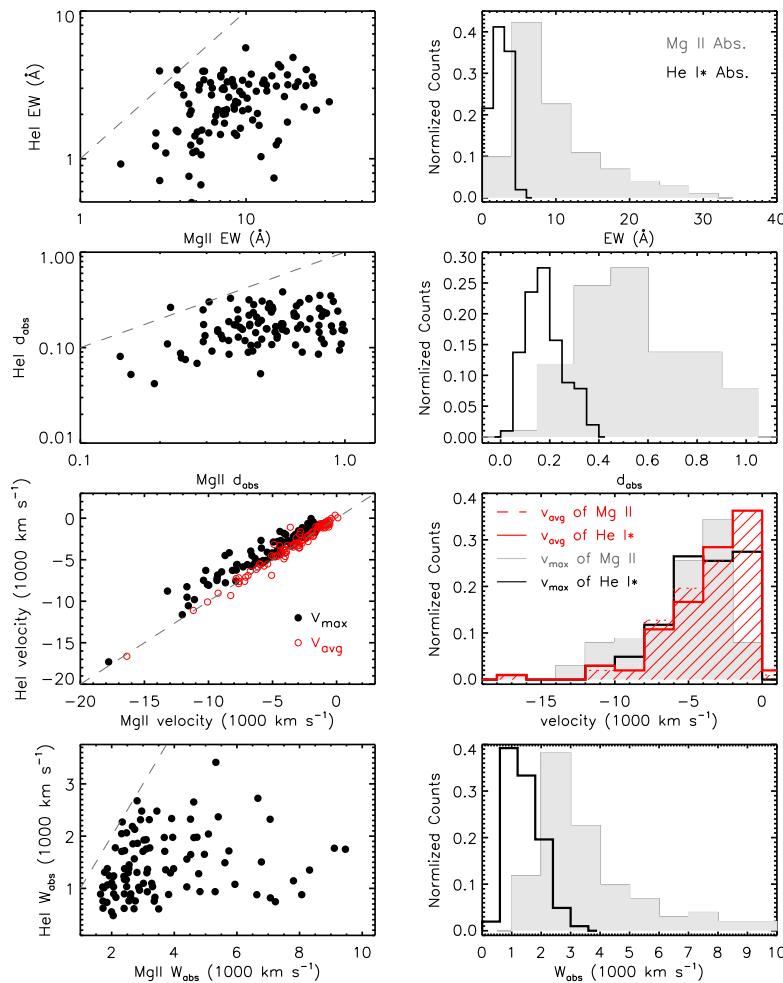


图 2.9 左图：对 He I* λ 3889 BAL 样本中的 He I* λ 3889 吸收线和 Mg II 吸收线的各测量量的比较。右图：吸收线的各测量量的归一化的直方图。

基于上述测量，我们比较了 He I* λ 3889 吸收线和 Mg II λ 2798 吸收线的测量结果（见图 2.9）。我们发现，两者的质心速度 v_{avg} 非常一致，而且弥散很小。这再次表明两者之间有很强的动力学联系。但是，He I* λ 3889 吸收线的 EW, d_{abs} , v_{max} 和 W_{abs} 比 Mg II 吸收线小。这可以解释为，He I* λ 3889 的吸收线光深远比 Mg II 吸收线小（见图 2.1），且此处测量到的 Mg II 宽吸收线是 Mg II $\lambda\lambda$ 2796, 2803 的混合。

我们进一步用光谱配对法在 He I* λ 3889 BAL 类星体中挑选 He I* λ 3189 吸收线。最终通过“吸收强度判据”选出 52 个源。值得注意的是，He I* λ 10830 的光深 ($\tau \propto \lambda f_{ik} N_{\text{ion}}$) 是 He I* λ 3889 吸收线的 23.5 倍（见表 2.1），故其吸收强度要远大于 He I* λ 3889。如果我们通过 He I* λ 10830 吸收线寻找 He I* 吸收，探测比率

应该远大于目前所得到的。我们对探测到的 5 个源做了近红外观测，都如预期观测到了 He I* λ 10830 吸收线，这也证明我们对于 He I* λ 3889 的探测是真实的。具体细节见附录。

2.2.4 光谱配对法的可靠性

为了验证光谱配对法的可靠性，我们对此方法做了一系列测试。这些测试主要针对以下三个方面：影响吸收线测量的因素，探测吸收线的效率（特别要考虑所选样本的完备性）以及测量精度（包括总误差 σ_{tot} 和系统误差 σ_{sys} ，见 § 2.2.2）。

首先，根据 BAL 的传统定义 *BI* 或者 *AI*（见 § 2.2.1）可推知，吸收线的深度 d_{abs} 和吸收宽度 W_{abs} 会影响吸收线的判定。另外，光谱信噪比 S/N 也是影响吸收线测量的重要因素。因此我们在接下来的测试中以上述三个因素为控制变量。即把光谱配对法应用于每个格点 ($S/N, d_{\text{abs}}, W_{\text{abs}}$)，并检查这种方法在不同给定条件下的探测效率和测量精度。

我们的测试基于蒙特卡罗方法，分别对 Mg II 吸收线和 He I* λ 3889 吸收线的选择流程做了测试，具体过程如下。我们在 SDSS DR7 类星体样本 (Schneider et al. 2010) 中，在四个光谱信噪比区间各随机挑选 200 条没有吸收特征的类星体光谱。这四个信噪比区间分别为 5–10, 15–20, 25–30 和 35–40，覆盖了 Mg II LoBAL 样本的光谱信噪比范围。我们在这些没有吸收特征的光谱上添加吸收深度为 d_{abs} 、宽度为 W_{abs} 的吸收线。为了简单起见，我们首先假定宽吸收线为高斯轮廓，这样吸收线的真实 EW_0 可以由 d_{abs} 和 W_{abs} 直接确定。根据 § 2.2.2 对 Mg II LoBAL 样本的测量结果（见图 2.9），我们设定 d_{abs} 的范围为 [0.05, 0.1–0.9]，其中 0.1 到 0.9 以 0.1 的步长增加，共十个格点； W_{abs} 分别取 1600, 2000, 4000, 6000, 8000 和 10000 km s⁻¹。同时由于 Mg II LoBAL 的 v_{avg} 主要分布在 -10000–0 km s⁻¹，因此我们把吸收线的蓝移的位置固定在 -5000 km s⁻¹。我们在每个格点 ($S/N, d_{\text{abs}}, W_{\text{abs}}$) 中都生成 200 条有 Mg II 宽吸收线的光谱，而且计算出每条光谱中吸收线的准确等值宽度 (EW_0)。然后我们按照光谱配对法的流程（见 § 2.2.2）去拟合并挑选这些模拟的 Mg II LoBAL。

通过以上测试，我们一方面可以了解光谱配对法的对 Mg II 吸收线的探测效率，另一方面可以通过比较 EW 的真值 (EW_0) 和测量值 (EW_i) 来衡量拟合的相对误差。这里我们所使用的相对误差的形式为 $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 。在正常情况下不同格点中的源的相对误差构成的分布应当是以 0 为均值的对称分布。图 2.10(a)、2.10(c) 和 2.10(e) 分别展示的是在相同的 S/N , d_{abs} 和 W_{abs} 情况下 Mg II 吸收线的 $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 的归一化分布图。除了 $d_{\text{abs}} = 0.05, 0.1$ 的分布，其他情况的分布基本上都是对称的。经进一步仔细比较可以发现，光谱信噪比越高，吸收线深度越深，相对误差的分布就越“锐”。但吸收线宽度的变化对于相对误差的分布影响则不显著，仅在 $W_{\text{abs}} = 10000 \text{ km s}^{-1}$ 情况下相对误差的弥散略有增大。这暗示随着光谱信噪比的提高以及吸收线深度的加大，光谱配对法的测量精度迅速提升，但

是光谱配对法对吸收线的宽度并不敏感。因此，我们暂时把吸收线宽度这个因素暂时忽略，检查相对误差在 $(S/N, d_{abs})$ 的分布情况。如图 2.11 所示，对于大部分 $(S/N, d_{abs})$ 格点而言， $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 的分布接近于高斯分布。每个格点中 $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 分布的弥散反映了光谱配对法在相应的条件（即格点所代表的 S/N 和吸收线深度）下测得的 EW 的总相对误差，即 σ_{tot}/EW (σ_{tot} 以及 σ_{sys} 的定义见 2.2.2 以及 图 2.6)。对于每个格点 $(S/N, d_{abs})$ ，我们采用该分布 90% ($\sim 1.6\sigma$) 的置信水平（图 2.11 中红色虚线）代表该格点的 σ_{tot}/EW ，我们没有采用常见的 $\sim 1\sigma$ 代表该格点的 σ_{tot}/EW ，这是因为 90% 这个值可以较好地匹配 Mg II LoBAL 样本实测的误差水平。我们把每个格点中所有光谱测量得到的 $\sigma_{sys,i}$ 的均值 $\overline{\sigma_{sys,i}}$ 作为该格点的系统误差 σ_{sys} 。每个格点中选出的 Mg II 吸收线的数目与该格点中放入的光谱数目比值则反映了光谱配对法的探测比例 f_{det} 。综上， σ_{tot}/EW ， σ_{sys} 和 f_{det} 分别反映了将光谱配对法应用于该光谱信噪比、该吸收深度的吸收线中的精度，系统误差以及对吸收线的探测效率。由于光谱配对法对 W_{abs} 不敏感，格点 $(S/N, d_{abs}, W_{abs})$ 中等值宽度相对误差的分布与 $(S/N, d_{abs})$ 大致相同，以上定义的 σ_{tot}/EW ， σ_{sys} 和 f_{det} 在 $(S/N, d_{abs}, W_{abs})$ 中同样适用。

图 2.12(a) 显示的是 Mg II 的 σ_{tot}/EW ， f_{det} ， σ_{sys} 和 σ_{sys}/EW 随 S/N ， d_{abs} ， W_{abs} 的变化趋势图。我们可以清楚地看到 σ_{tot}/EW 随着 S/N 和 d_{abs} 的增加而显著减小， f_{det} 则随着 S/N 和 d_{abs} 的增加而显著提高。 σ_{sys}/EW ， f_{det} 同 W_{abs} 没有显著的依赖关系，因此， W_{abs} 不是影响光谱配对法的主导因素，这与我们从 图 2.10 中得到的结论一致。然而，系统相对误差 σ_{sys}/EW 对 S/N 和 W_{abs} 依赖关系不明显，仅随着 d_{abs} 的增加而明显降低。同时我们也注意到，系统误差占总误差的比例 $\sigma_{sys}/\sigma_{tot}$ 与三个因素均有关，即 $\sigma_{sys}/\sigma_{tot}$ 随着 S/N 、 W_{abs} 的增大而提高，随着 d_{abs} 的增大而减小。这是因为在光谱质量好，吸收线较深的时候，测量的随机误差较小，因而 $\sigma_{sys}/\sigma_{tot}$ 提高；而吸收线越宽，吸收线所吸收的本征光谱的波长范围也越大，与之匹配的类星体模板在这个区域的差异性也可能越大，因此系统误差增大。在大部分情况下 $\sigma_{sys}/\sigma_{tot}$ 都小于 30%。

除了高斯轮廓，我们也同样采用了从 Mg II LoBAL 类星体样本中获得的真实的 Mg II 吸收轮廓做测试。我们把 Mg II LoBAL 类星体样本的源按照测得的 Mg II LoBAL 的宽度 W_{abs} 分成 6 个组。这 6 个组的宽度为 $[1000 - 1800, 1800 - 2500, 3000 - 5000, 5000 - 7000, 7000 - 9000, >9000] \text{ km s}^{-1}$ ，基本与高斯轮廓的宽度相对应。然后我们把每个组中的 Mg II LoBAL 按照测量的 v_{avg} 改正到 0 km s^{-1} 处，然后按照信噪比加权平均做成合成谱（见图 2.14(a)）。以这六条吸收线合成谱做模板，我们重复上述测试过程，测试所得结果见 图 2.12(b)。经过比较我们可以发现，用 Mg II 实际轮廓的测试结果与用高斯轮廓的几乎相同。这说明光谱配对法对吸收线的轮廓是不敏感的。

我们对 He I* λ 3889 BAL 也基于上述相同的过程进行测试。在对 He I* λ 3889 测试中，我们采用的光谱信噪比的格点与 Mg II BAL 测试的格点相同； d_{abs} 分别

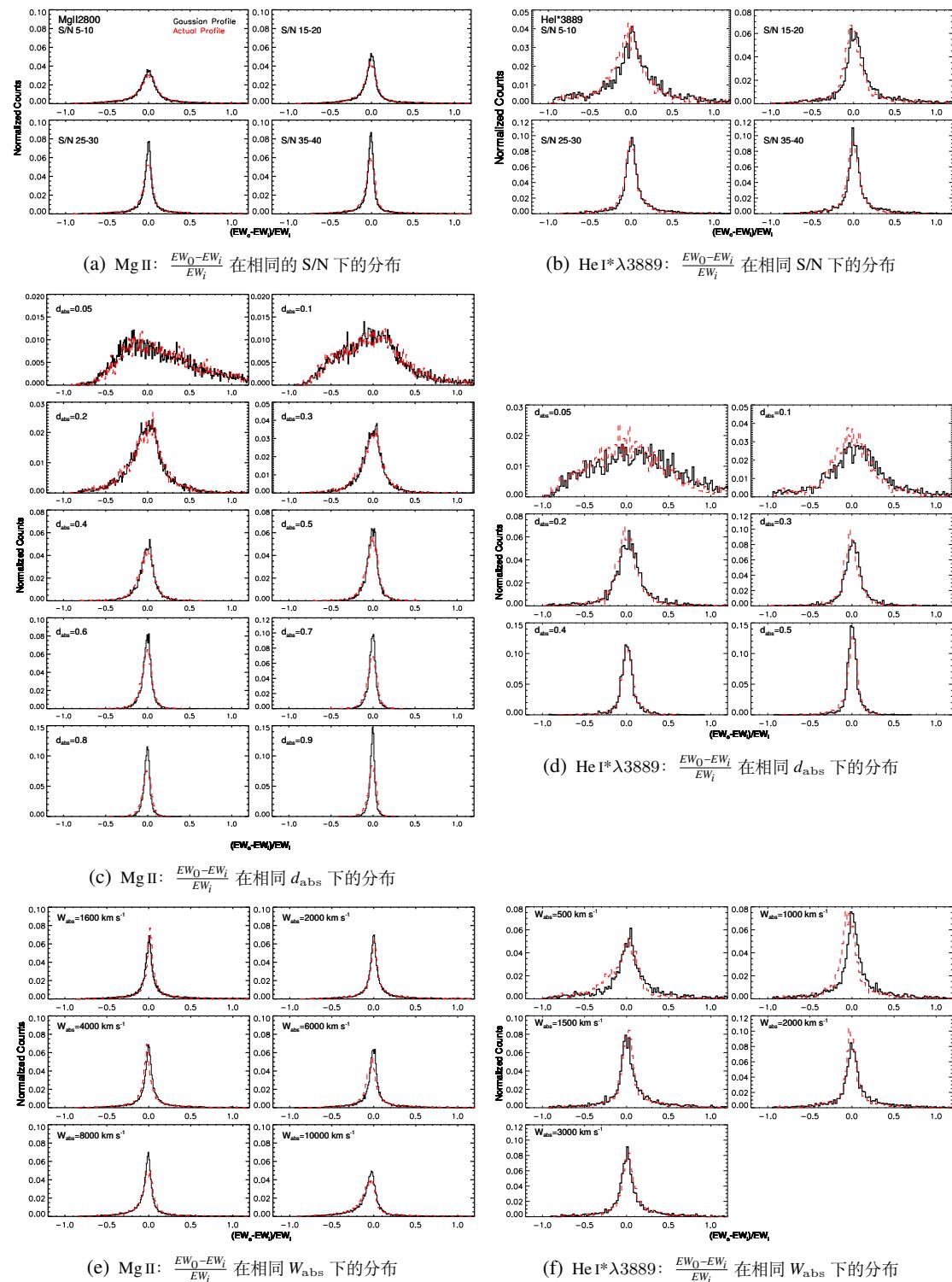


图 2.10 通过测试得到的等值宽度相对误差 ($\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$) 在相同 S/N, d_{abs} 以及 W_{abs} 下的归一化分布。黑色实线和红色虚线分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。左图为 Mg II 的测试结果，右图为 He I* λ 3889 的测试结果。

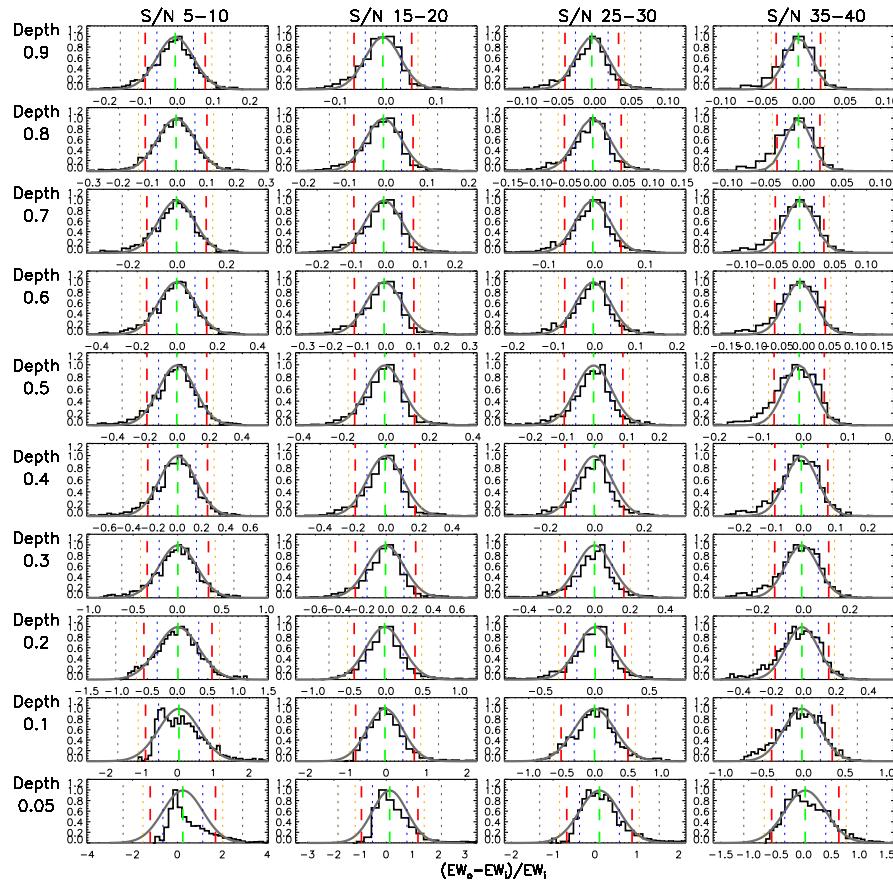
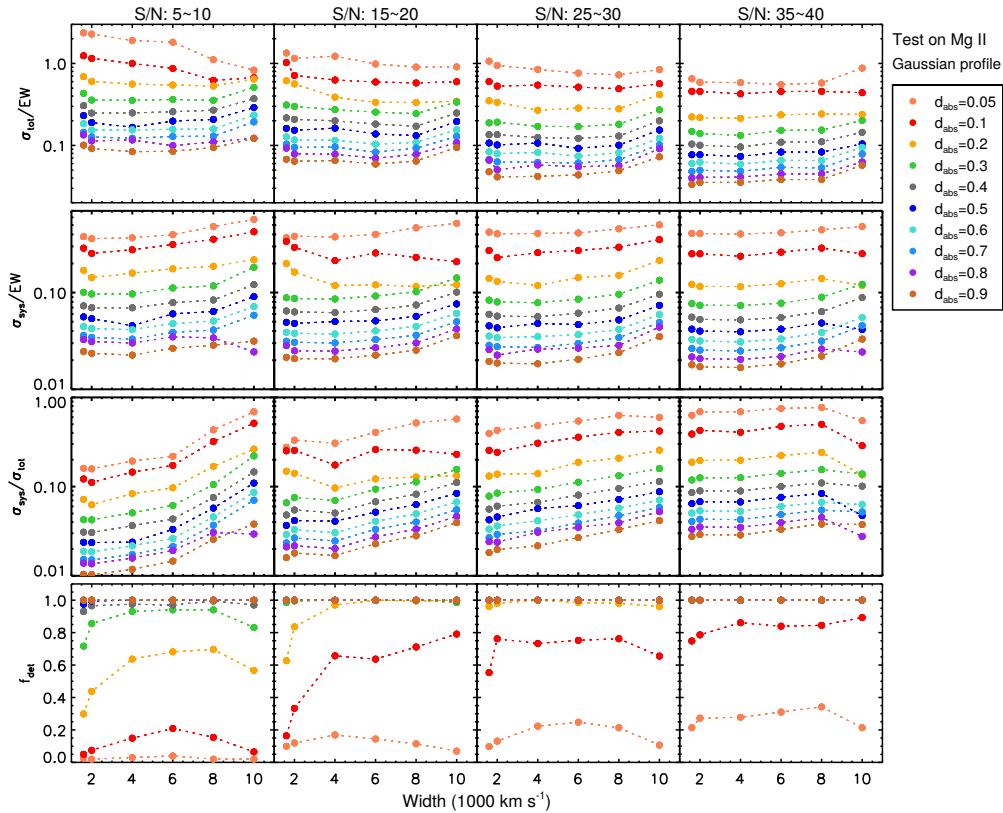


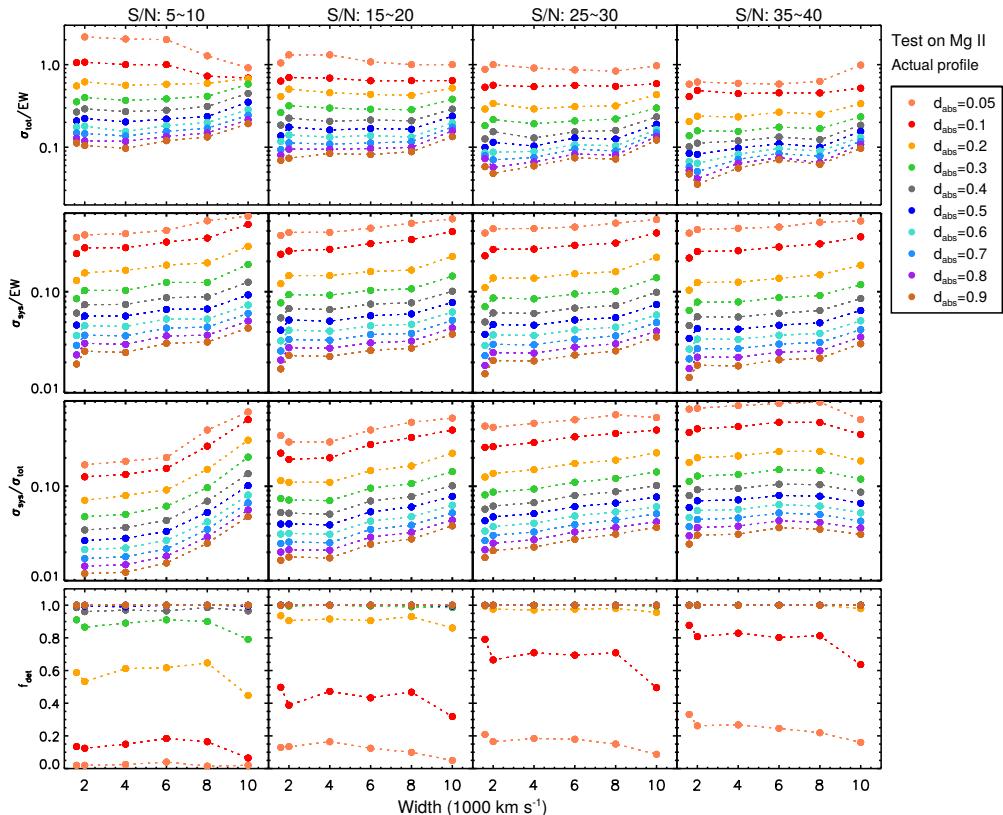
图 2.11 每个测试格点 ($S/N, d_{\text{abs}}$) 中的 Mg II 吸收线的相对误差 $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 的分布图。在所有的图中，绿色的虚线表示分布的均值，基本都接近于 0；蓝色，橙色和灰色的点线分别表示该分布 1σ (标准偏差), 2σ 和 3σ 的位置；红色的虚线表示 1.6σ ，这个值对应于该分布 $\sim 90\%$ 的置信水平。我们选择这个值作为这个格点的测量的总相对误差 (σ_{tot}/EW)。我们注意到，除了信噪比最低、深度最浅的格点以外， $\frac{EW_0 - EW_i}{EW_i}$ 在其他格点中的分布都接近于高斯轮廓。

取 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5; W_{abs} 分别取 500, 1000, 1500, 2000 和 3000 km s^{-1} 。我们将加入的 He I* λ 3889 吸收线的质心蓝移速度也固定在 -5000 km s^{-1} 。除了使用高斯轮廓，我们也从 He I* λ 3889 样本中合成了不同宽度的 He I* λ 3889 吸收线轮廓，见图 2.14(b)。最终测试结果见图 2.13，He I* λ 3889 吸收线等值宽度相对误差对 S/N , d_{abs} 和 W_{abs} 的分布分别见图 2.10(b), 2.10(d), 2.10(f)。由图比较可知 He I* λ 3889 的测试结果与 Mg II 的几乎相同，除了 He I* λ 3889 的 $\sigma_{\text{sys}}/\sigma_{\text{tot}}$ 的比例更高且对 d_{abs} 的依赖关系不像 Mg II 吸收线的那么明显。

综上，经过测试我们得到使用光谱配对法探测 Mg II 和 He I* λ 3889 宽吸收线的主要结论是，光谱信噪比和吸收线深度是影响光谱配对法的两个主要因素。光谱信噪比越高，吸收线越深，光谱配对法的探测效率越高，相对误差越小。在 $S/N-d_{\text{abs}}$ 平面上，我们分别对 Mg II 和 He I* λ 3889 吸收线做 σ_{tot}/EW 以及 f_{det} 的等高线图，见图 2.15。通过这张图我们可以在了解光谱信噪比和吸收线深度的情况下推断出光谱配对法的测量精度和探测效率。在高信噪比 ($S/N \geq 35$) 或者较

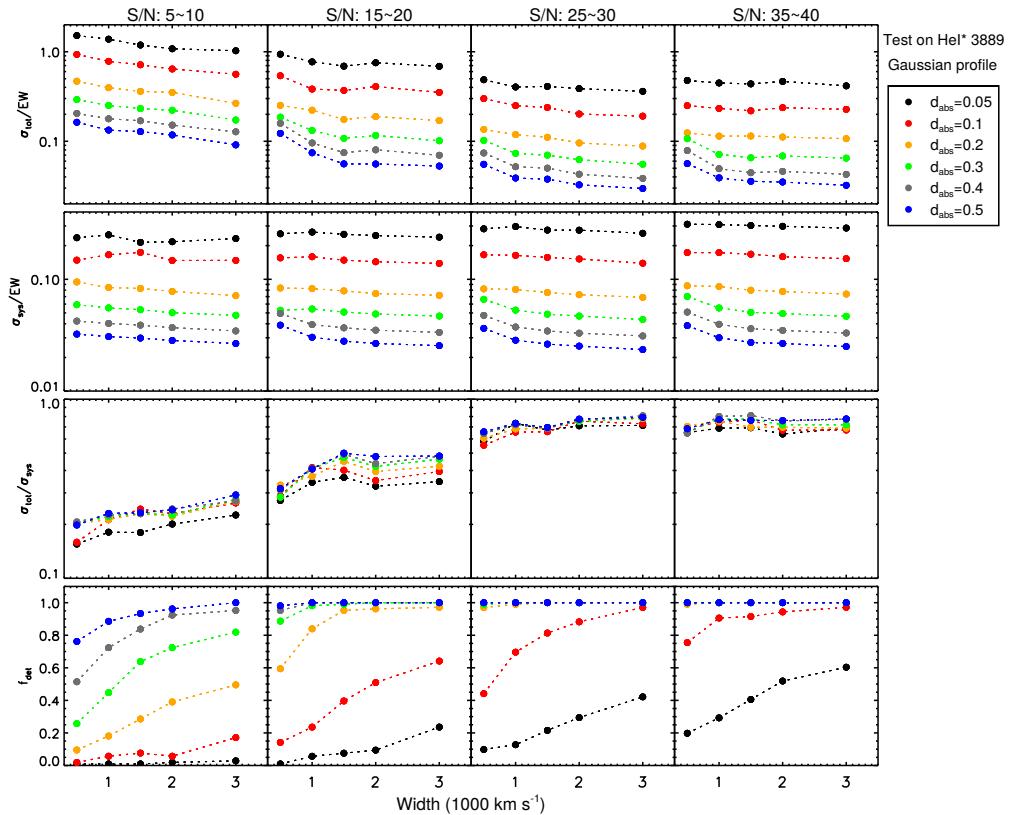


(a) 假设 Mg II BAL 为高斯轮廓的测试结果

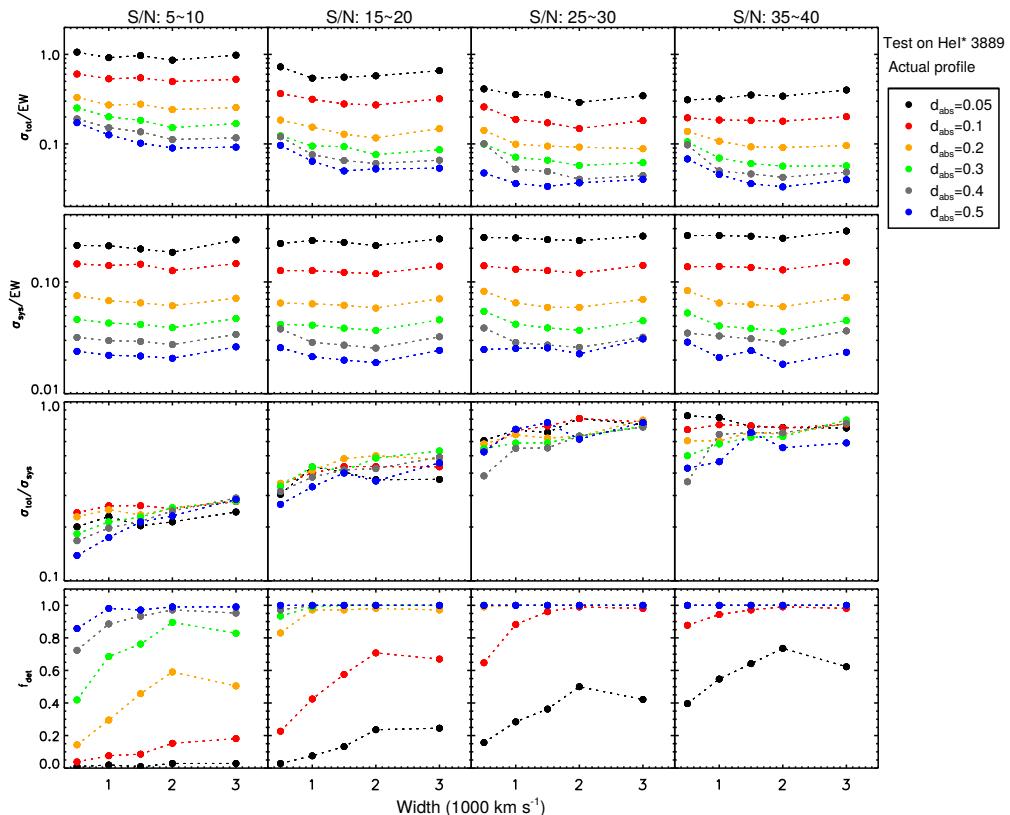


(b) 使用 Mg II BAL 的真实轮廓的测试结果

图 2.12 通过测试得到的 Mg II 总相对误差 (σ_{tot}/EW), 系统相对误差 (σ_{sys}/EW), 系统误差占总误差的比例 $\sigma_{sys}/\sigma_{tot}$ 以及吸收线探测效率 (f_{det}) 随着 S/N, d_{abs} , W_{abs} 的变化趋势。上下两图分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。



(a) 假设 He I* λ 3889 BAL 为高斯轮廓的测试结果



(b) 使用 He I* λ 3889 BAL 的真实轮廓的测试结果

图 2.13 通过测试得到的 He I* λ 3889 总相对误差 (σ_{tot}/EW , 系统相对误差 (σ_{sys}/EW , 系统误差占总误差的比例 $\sigma_{\text{sys}}/\sigma_{\text{tot}}$ 以及吸收线探测效率 (f_{det}) 随着 S/N, d_{abs} , W_{abs} 的变化趋势。上下两图分别表示使用高斯轮廓和真实吸收轮廓的测试结果。

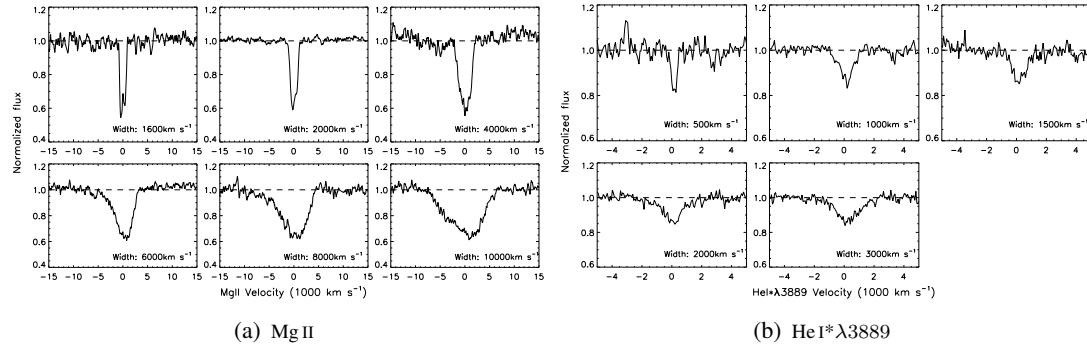


图 2.14 从观测样本中得到的不同宽度的吸收线 (Mg II、He I* λ 3889) 归一化合成谱。

大吸收深度 ($d_{\text{abs}} \geq 0.5$) 的情况下，该方法找到的 BAL 几乎为完备的。即使对于 $S/N \sim 15$, $d_{\text{abs}} \sim 0.15$, 探测比例仍然在 60% 左右，这表明该方法适宜于探测较弱的吸收线。另外，我们在图中也发现 Mg II 和 He I* λ 3889 吸收线在 $S/N-d_{\text{abs}}$ 平面的左下角（即信噪比最低、深度最浅的部分）有相似的弧形边缘，这正表明了光谱配对法的对于吸收线的探测极限。

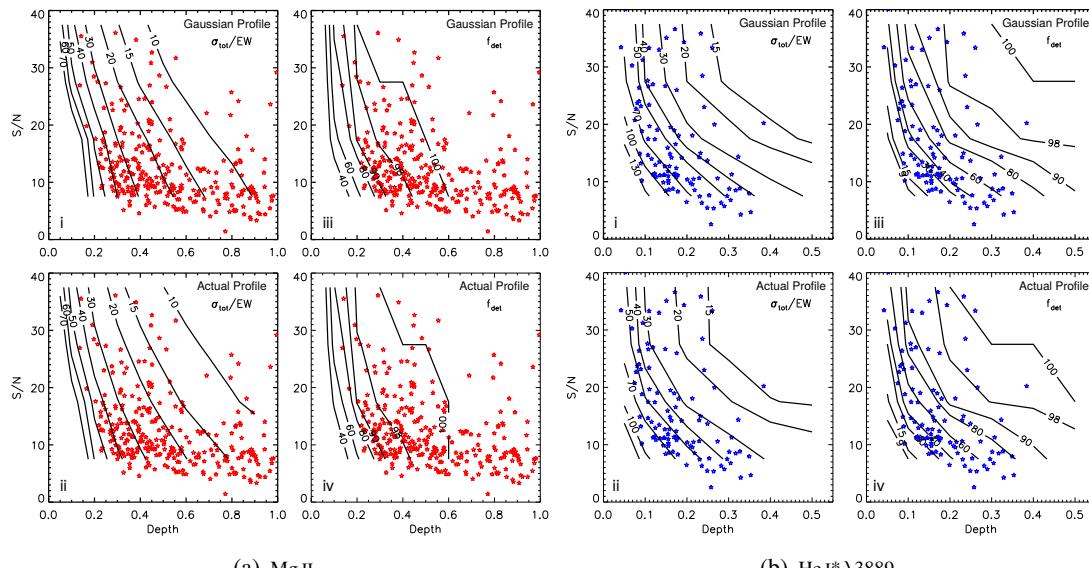


图 2.15 基于测试得到的吸收线等值宽度总相对误差 σ_{tot}/EW (图 i, ii) 和探测比例 f_{det} (图 iii, iv) 在 $S/N-d_{\text{abs}}$ 平面上的分布。图 i, iii 为高斯轮廓的测试结果, ii, iv 为使用真实吸收轮廓的测试结果。红色和蓝色五角星分别表示 Mg II BAL 样本和 He I* λ 3889 样本的测量结果，与测试结果做对比。

最后，我们简单地讨论一下光谱配对法的错选问题。对于 He I* λ 3889 吸收线，最可靠的验证办法是检查我们所选的 He I* λ 3889 BAL 是否也有其他 He I* 吸收线，如 He I* λ 3189, He I* λ 10830。在我们选出的 101 个 He I* λ 3889 BAL 中，我们在 52 个源中探测到了 He I* λ 3189。我们还对 101 个中的 6 个源进行近红外观测，并且都看到了明显的 He I* λ 10830 吸收。因此我们推断错选概率应该不是很大，但是更准确的比例需要更多的近红外观测。Mg II 的错选比例可以通过探测

C IV 吸收线来判断。对于特定红移段 ($1.45 < z < 2.2$) 的源，我们可以直接通过 SDSS 光谱探测 C IV 吸收线来验证。而对于 $z < 1.45$ 的源，例如我们的 Mg II LoBAL 样本 ($0.4 \leq z \leq 1.35$)，则需要进一步的紫外观测。

2.3 He I* λ 3889 吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的比例

2.3.1 从样本中得到的 He I* λ 3889 BAL 的比例

在上一节中，我们在 285 个 Mg II LoBAL 类星体中找出 101 个源有 He I* λ 3889 吸收线，约占 Mg II LoBAL 样本的 35.5%。由于在我们工作之前只报道了 11 个 He I* BAL 类星体，如此高的比例是意料之外的。

§2.2.4 中对光谱配对法的测试结果显示，影响该方法探测吸收线的主要因素有两个，分别是光谱信噪比和吸收线深度。基于以上结果，我们来分别检查 He I* λ 3889 在 Mg II BAL 类星体中的比例 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 。我们把 Mg II BAL 样本根据光谱信噪比分成四个组： $S/N < 10$, $10 < S/N < 20$, $20 < S/N < 30$ 以及 $30 < S/N < 50$ ，然后计算每个组中的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 。这里的光谱信噪比是指 He I* λ 3889 附近 (3700–4000 Å) 的中值信噪比，同时我们以每组中 S/N 的均值作为该组 S/N 的代表值。 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的误差可通过 bootstrap 方法来确定，过程如下。对于每个组，我们从中随机地选取相当数目的源然后计算 $f_i(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 。我们将此过程重复 100 次， $f_i(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的标准差即为该组 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的 1σ 误差。

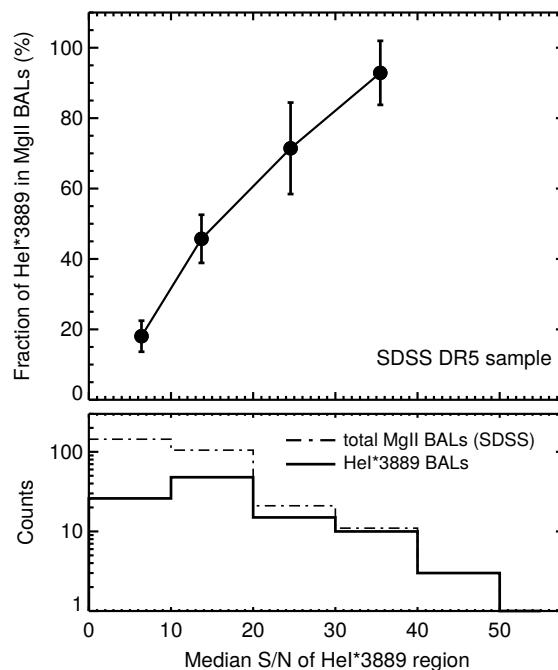


图 2.16 He I* λ 3889 BAL 在 Mg II BAL 中的比例随光谱信噪比的变化趋势。误差棒代表 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的 1σ 误差，通过 bootstrap 方法得到。

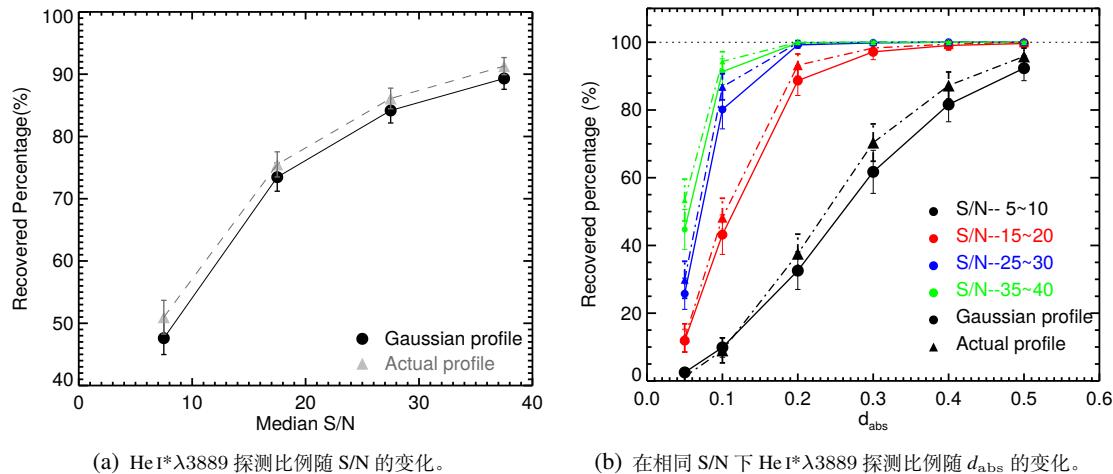


图 2.17 基于测试得到的光谱配对法对 He I* λ 3889 BAL 探测率。

图 2.16 显示 Mg II LoBAL 类星体样本中观测得到的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随着光谱 S/N 的变化趋势。由图可知, $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随着 S/N 的提升而单调增加, 从 $S/N \sim 6.5$ 时的 18.1% 到 $S/N \sim 35.5$ 时的 92.9%。作为比较, 图 2.17(a) 显示了由模拟(见 §2.2.4)得到的 He I* λ 3889 的探测效率 f_{det} 随 S/N 的变化趋势。与图 2.16 对比可知, 观测到的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 与模拟得到的 f_{det} 都随着 S/N 的提升而单调地增加。值得注意的是, 在最高信噪比处 ($S/N > 30$), 观测得到的比例与测试结果给出的比例非常一致。而在低信噪比处, 测试给出的比例远高于观测到的比例。这个现象可以做如下理解。图 2.17(b) 显示在相同 S/N 下, He I* λ 3889 的探测率随着吸收线的深度的增大而增加。对于吸收深度 $d_{\text{abs}} \geq 0.5$ 时, 即使在最低的信噪比下, 光谱配对法对 He I* λ 3889 的探测都是完备的。但是根据我们对 He I* λ 3889 BAL 样本的测量, He I* λ 3889 的 d_{abs} 集中在 0.2 附近, 很少能达到 0.5 (见图 2.9)。因此, He I* λ 3889 吸收线深度的真实分布应当为较浅的吸收居多, 较深的吸收很少。而我们在测试中使用的模拟样本所有给定的量都是均匀的, 因而测试结果给出的低信噪比下的 He I* λ 3889 的探测比例比观测到的高。另一方面, 在最高信噪比时, 即使吸收线深度只有 0.05, 探测比例仍然可以达到 $\sim 50\%$ 。因此, 在高信噪比条件下, 使用光谱配对法可以近乎完备地探测到所有 He I* λ 3889。所以在高信噪比端, 从样本中得到的比例基本无偏地反映了 He I* λ 3889 的真实比例。我们可以由此推断 He I* λ 3889 在 Mg II LoBAL 中的真实比例达到 90% 以上。也就是说, 只要光谱信噪比足够高, 就能在大部分 Mg II LoBAL 中探测到 He I* λ 3889。

2.3.2 信噪比还是光度？

对于红移相近的类星体而言, 其光度越高, 观测到的光谱的信噪比就越高, 因此 S/N 和类星体光度在某种程度上是简并的。前人对于 C IV、Mg II BAL 类星体样本的研究工作也发现 C IV、Mg II BAL 类星体在类星体中出现的比例随着 S/N 或光度的增加而上升 (e.g., G09, Z10)。Ganguly et al. (2007) 认为光度最高的

类星体倾向于显示 BAL 特征。那么对于 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ ，光谱信噪比和类星体光度哪个是主要因素呢？如果是前者，表明 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 仅仅受测量影响；如果是后者， $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 就成为一个涉及到类星体性质的物理问题。如图 2.18 a 显示， $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 同样也随着类星体光度 $L_\lambda(3000 \text{ \AA})$ 的增加而上升，但是在不同光度段上升幅度有所差异；图 2.18 b 显示 Mg II BAL 类星体样本 S/N 和 $L_\lambda(3000 \text{ \AA})$ 的关系，每个 S/N 值都对应一个最小光度值。为了清楚地理解 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的主导因素，我们做了以下简单的测试。在 Mg II LoBAL 类星体样本所覆盖的光度范围内，我们在尽可能窄的光度区间中选出一个子样本，以检测 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 对 S/N 的依赖。类似地，在 Mg II LoBAL 类星体样本所覆盖的信噪比范围内，我们在尽可能窄的 S/N 区间中选出一个子样本，以检测 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 对光度的依赖。首先，我们把类星体光度在 $45.4 < \text{Log}L_\lambda(3000 \text{ \AA}) < 46 \text{ erg s}^{-1}$ 范围内的 184 个源（如图 2.18 b 点线所示的范围）作为第一个子样本。选择这个光度区间是因为在此光度区间内 S/N 的跨度最宽，且样本量足够让我们做统计分析。如图 2.18 c 所示，这个子样本的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 和光度基本没有依赖关系。而该样本 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 与 S/N 仍然有很强的依赖关系，与父样本情况相同（见图 2.16）。第二个子样本如图 2.18 b 中虚线所示的范围，由满足 $5 < \text{S/N} < 11$ 的源组成。选择这个 S/N 区间是因为此区间内类星体的光度跨度最大。如图 2.18 f 所示，这个子样本的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随着 S/N 的提高而缓慢地增加。但是仍可以近似认为 S/N 对 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的影响不大。然而如图 2.18 e 所示， $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 与光度没有任何相关性。以上结果表明，影响 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 的主要因素是光谱信噪比，而不是光度⁵。

2.3.3 He I* λ 3889 吸收线在 Mg II BAL 中普遍存在的证据支持

在 § 2.3.1 中我们论证了 He I* λ 3889 吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中真实比例和观测比例问题。He I* λ 3889 吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的真实比例可达到 90% 以上，而目前得到的平均比例只有 35.5%，这是因为光谱信噪比较低时，弱的 He I* λ 3889 吸收线湮没在噪声中使得我们无法探测。由这个结论我们可以得到以下两个推论：(1) 对于在 Mg II LoBAL 类星体样本中光谱信噪比较低且没有探测到 He I* λ 3889 吸收线的源，当其光谱信噪比提高以后，我们应当在大多数源的光谱上探测到 He I* λ 3889 吸收线。(2) 探测到和没有探测到 He I* λ 3889 吸收线的 Mg II LoBAL 类星体性质应当没有区别。

在本小节中我们将分别验证以上推论。对于第一个推论，我们通过两种途径验证：一种是检查在 SDSS 或者 SDSS-III/BOSS (Ahn et al. 2014) 中有重复观测的源，通过叠加多条光谱的方式提高信噪比；另一种是把信噪比低且没有探测

⁵ 值得注意的是，He I* BAL 在 Mg II BAL 中的比例与 BAL 在整个类星体光谱中的比例是不完全相同的两个问题。事实上，He I* 吸收线和 Mg II 吸收线之间有很强的物理联系，这在光致电离模型计算中可以得到验证（见 § 2.4），因此 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 可能只是个探测问题。而类星体中出现宽吸收线的比例则涉及很多因素，如是否有高速外流产生吸收线，吸收气体是否在我们的视线方向上，吸收线是否足够强可以探测等等。

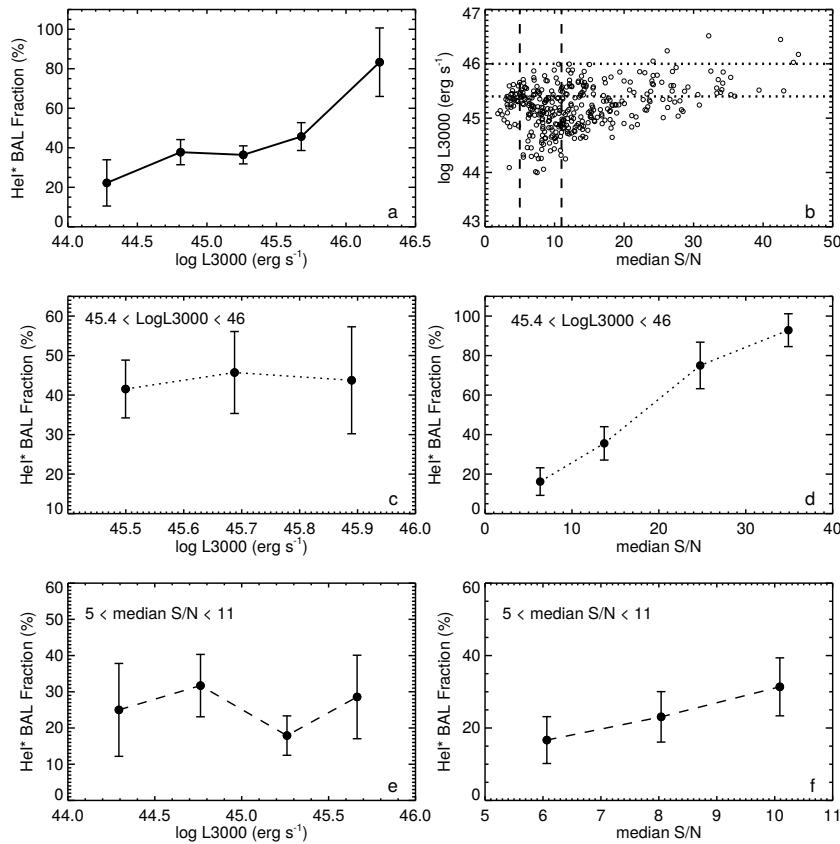


图 2.18 a 图： $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随类星体光度 $L_\lambda(3000 \text{ \AA})$ 的变化趋势。b 图： Mg II BAL 类星体样本光谱信噪比与类星体光度的关系。两条水平点线范围内的源构成第一个子样本，垂直虚线范围内的源构成第二个子样本。c、d 图：第一个子样本的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随光度、信噪比的变化趋势。e、f 图：第二个子样本的 $f(\text{He I}^*|\text{Mg II})$ 随光度、信噪比的变化趋势。

到 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的 Mg II LoBAL 类星体光谱直接叠加。在 Mg II LoBAL 类星体样本，有 61 个源在 SDSS 光谱数据库或在 SDSS-III/BOSS (DR10) 中有重复观测（这些源信息汇总在表 B.2 中，其中一些有吸收线光变的源在 § B.2 中有相关介绍），其中有 34 个没有在 SDSS DR7 光谱上探测到显著的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线。我们知道，将重复观测的光谱叠加起来可以有效地提高信噪比。更有利的是 BOSS 的光谱曝光时间比 SDSS 长一倍，因此其信噪比一般是 SDSS DR7 光谱信噪比的 $\sqrt{2}$ 倍。我们将同一个源的所有光谱以信噪比作为权重叠加。在上述 34 个源中，21 个源的叠加后的光谱的信噪比大于 15。根据我们的测试结果，此时的光谱质量可以让我们有效地探测到 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线。我们把光谱配对法应用到这 21 个源的叠加光谱上，最后在 4 条光谱上探测到 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线（见图 2.19）。其他 17 个源中，有 5 个源的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 区域对应于 Mg II 吸收线的光谱处有很强的 $[\text{Ne III}]\lambda 3869$ 发射线的污染而无法探测。另外 4 个源的 Mg II 吸收线轮廓宽且浅。由图 2.9 所示， $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的深度一般远小于 Mg II 吸收线，因此这 4 个源的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的深度应当更浅而没有探测到。对于其余 8 个源，我们在叠加的光谱上也没有发现 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的迹象。

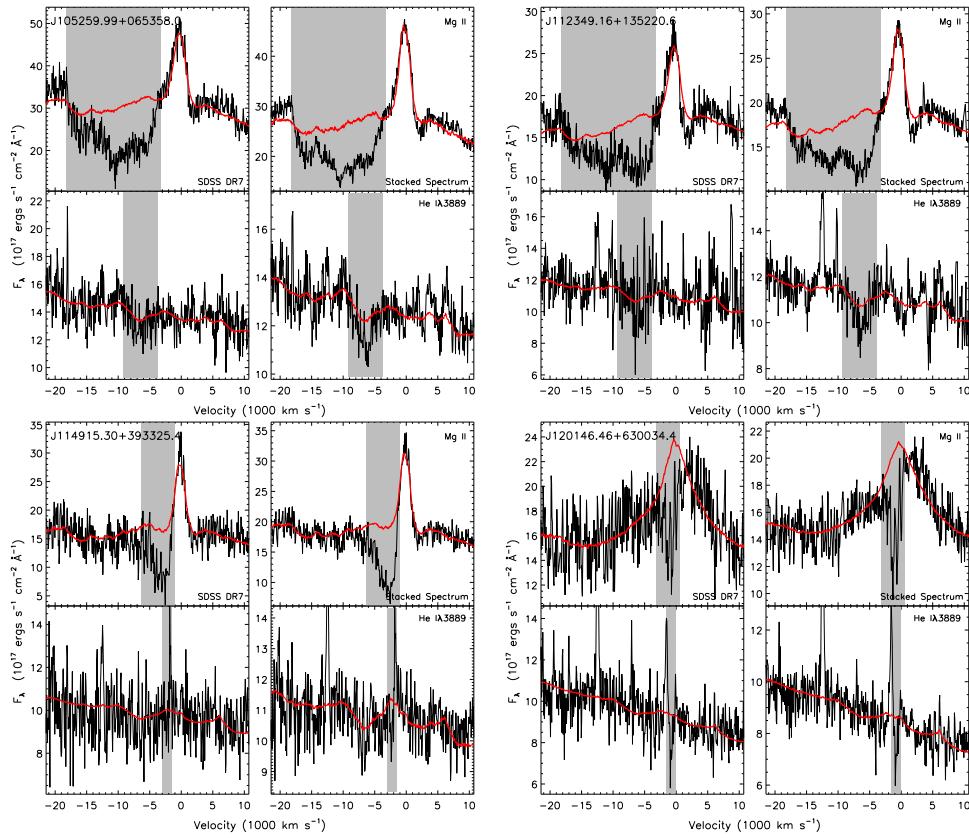


图 2.19 通过光谱叠加提升光谱信噪比后发现的四个有 He I* λ 3889 吸收线的类星体。每个源的 SDSS DR7 光谱和叠加后的光谱对比如图所示。红色实线表示由光谱配对法推断的被吸收的本征光谱。

更进一步，我们把 Mg II LoBAL 类星体样本中没有探测到 He I* λ 3889 吸收线的源按照 He I* λ 3889 区域（3500–4000 Å）的光谱信噪比分成三组，分别为 $0 < \text{S/N} < 10$ 、 $10 < \text{S/N} < 20$ 和 $\text{S/N} > 20$ 。我们把每个组中 Mg II 和 He I* λ 3889 的归一化光谱分别叠加。在叠加时，我们把吸收线的蓝移按照测得的 Mg II 吸收线质心速度 (v_{avg}) 修正。叠加结果如图 2.20 所示。作为对比，我们在图中也显示了 He I* λ 3889 BAL 类星体的吸收线归一化谱的叠加结果。对于低信噪比的 Mg II LoBAL 类星体光谱，尽管在单条光谱上没有探测到 He I* λ 3889 吸收线，但是叠加后的光谱则清晰地看到 He I* λ 3889 吸收特征，其深度 $d_{\text{abs}} \leq 0.05$ 。如图 2.15 所示，这么浅的吸收线只有在信噪比非常高的情况下才能有效探测到。我们也注意到叠加得到的吸收线深度随着信噪比的提高而减小。这是因为信噪比越高，我们所找到的 He I* λ 3889 吸收线越完备，这种情况下只有吸收深度非常小的源才会被遗漏。以上两个结果有利地支持第一个推论。

为了验证第二个推论，我们通过比较 Mg II LoBAL 类星体样本中两类源（He I* λ 3889 和非 He I* λ 3889 BAL 类星体）的发射线以及 Mg II 吸收线性质来验证。图 2.21 显示 Mg II BAL 类星体样本中探测到和没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的类星体的 Mg II 吸收线测量参数（EW, d_{abs} , W_{abs} , v_{max} ）的分布，我们没有

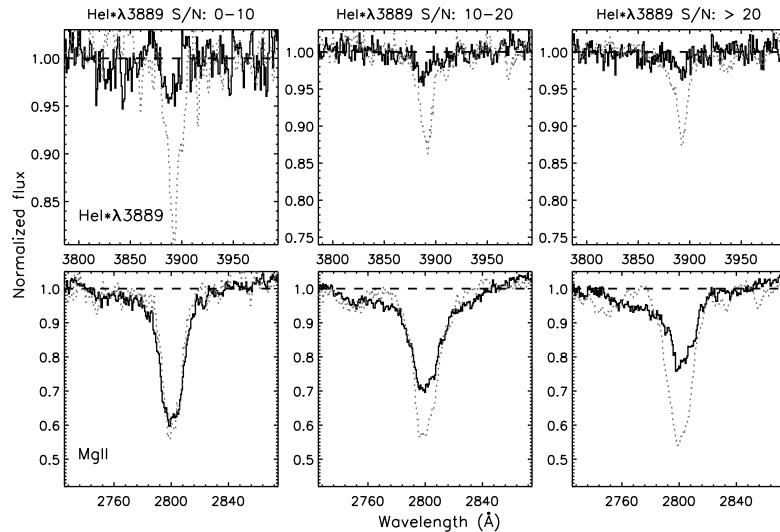


图 2.20 将 Mg II BAL 样本中没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的源按照 He I* λ 3889 区域 (3500–4000 Å) 的信噪比分成三组。将每个组内的 Mg II (下三图) 和 He I* λ 3889 (上三图) 归一化谱叠加。黑色实线表示非 He I* λ 3889 BAL 的叠加结果；作为对比，灰色点线表示 He I* λ 3889 BAL 的叠加结果。

发现两类 Mg II BAL 的分布有显著差别。同时我们也对两者进行了 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验，所有的 P_{null} 都大于 0.01，这也表明两类 Mg II LoBAL 类星体没有差别。我们分别使用 Wang et al. (2009) 发展的类星体近紫外光谱拟合程序以及 Dong et al. (2008) 发展的类星体光学光谱拟合程序仔细地拟合了 Mg II LoBAL 类星体样本的紫外和光学的连续谱和发射线，拟合结果汇总在表 A.2 中。如图 2.22 所示，He I* λ 3889 和非 He I* λ 3889 BAL 类星体在光学和紫外光度，Mg II、H β 发射线线宽，Fe II 发射线等值宽度、[O III] 等值宽度以及连续谱的斜率都没有显著差异，同时 K-S 检验结果也表明这一点。因此，Mg II LoBAL 类星体样本中探测到 He I* λ 3889 和没有探测到 He I* λ 3889 吸收线的两类源在吸收线、发射线以及连续谱性质都没有显著差异。作为比较，我们在图 2.22 也显示了非 BAL 类星体相应的连续谱、发射线的分布。这些非 BAL 类星体是通过匹配 Mg II LoBAL 类星体样本的红移和光度从 SDSS DR7 类星体样本中选出来的。K-S 检验显示，BAL 和非 BAL 类星体在发射线线宽、Fe II 等值宽度等方面稍有不同。而两者之间最显著的差异在连续谱斜率 $\beta[3k, 4k]$ ，LoBAL 类星体的紫外连续谱明显比非 BAL 类星体红，这个结果与前人得到的结果相符。

2.4 He I* 吸收线的物理图像

在 §2.3 中，我们在实测上证明了 He I* 吸收线在 Mg II LoBAL 类星体中的普遍性。这一节中，我们将通过光致电离模型计算来解释 He I* 和 Mg II 吸收线之间的联系。我们考虑最简单的几何，即假设一团平板状、分布均匀的气体被类星体核连续谱照亮后的辐射转移情况。在光致电离模型中，描述该气体的基本物理参数为元素丰度，数密度 n_{H} (cm^{-3})，氢的总柱密度 N_{H} (cm^{-2}) 以及电离参数 U 。

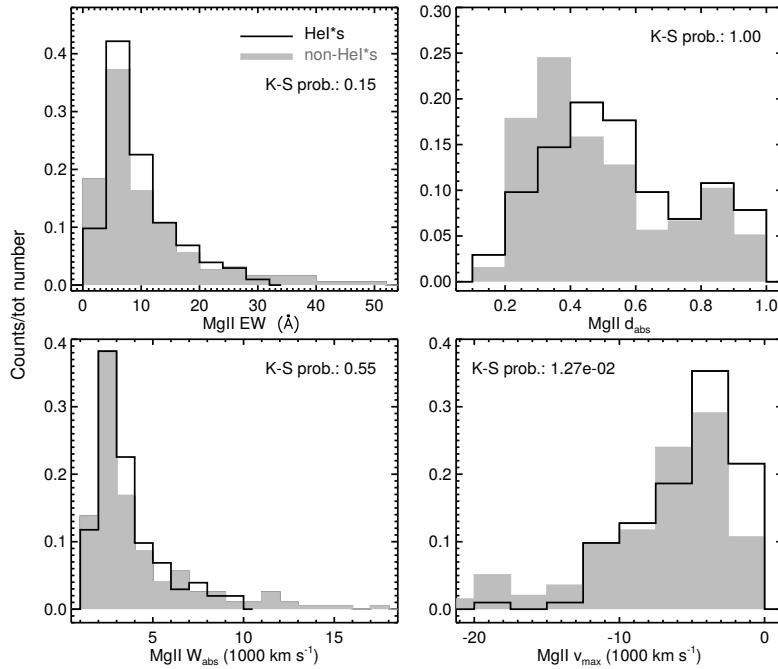


图 2.21 Mg II BAL 类星体样本中，探测到和没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的类星体的 Mg II 吸收线测量参数 (EW, d_{abs} , W_{abs} , v_{max}) 分布图。黑色实线和灰色阴影分别代表探测到和没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的 Mg II BAL 类星体。“K-S pro”表示 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验的结果。

在 He I* BAL 类星体样本中，He I* λ 3889 和 Mg II 吸收线的强度参差不齐，其中部分源也同时有电离度更低的 UV Fe II, Ca II, 氢巴尔末甚至中性的 Na I D 吸收线。由于产生这些吸收线的离子的电离势有很大差异，而且它们存在所需的密度也不同，因此虽然这些源的外流气体都产生 Mg II 和 He I* BAL，但是吸收气体的物理条件非常不同。参考前人对 He I* BAL 个源的详细研究结果（见表 2.2），其吸收气体的密度范围在 $10^{3.75} \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ，电离参数的范围是 $10^{-2.45} \sim 10^{-0.5}$ 。为了使光致电离模型充分地覆盖 He I* λ 3889 BAL 样本的参数范围，我们在使用 *Cloudy* (c13.03, Ferland et al. 1998) 计算光致电离模型网格时，设置其密度范围在 $3 \leq \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \leq 9$ ，以 1 为步长增加；设置其电离参数范围在 $-2.5 \leq \log U \leq -0.5$ 。考虑到样本中有的源出现 UV Fe II 等低电离吸收线，因此我们将模型的截止氢柱密度 N_{H} 设定为 10^{24} cm^{-2} ，即采用光学厚的模型使得电离气体中有足够的部分电离区产生低电离吸收线。另外，所有模型的元素丰度都假设为太阳丰度且不考虑尘埃 (e.g., Arav et al. 2001; Ji et al. 2015)。入射的 AGN 谱能量分布 (SED) 对外流气体的电离结构和温度分布有非常重要的影响。最常使用的 AGN SED 是由 Mathews & Ferland (1987) 给出的 SED (以下简称 MF87)，在 *Cloudy* 中以 Table AGN 的形式给出。然而，对射电宁静类星体的紫外和 X-ray 波段的观测结果显示，这些源的远紫外连续谱比 MF87 SED 预言的“软”(见 Dunn et al. 2010, § 4.2)。因此我们采用 *Cloudy Hazy* 手册中给出由黑体“大蓝包”叠加幂律连续谱构成的 SED，其参数具体如下： $T = 15000 \text{ K}$, $\alpha_{\text{ox}} = -1.4$, $\alpha_{\text{uv}} = -0.5$, $\alpha_x = -1$ 。

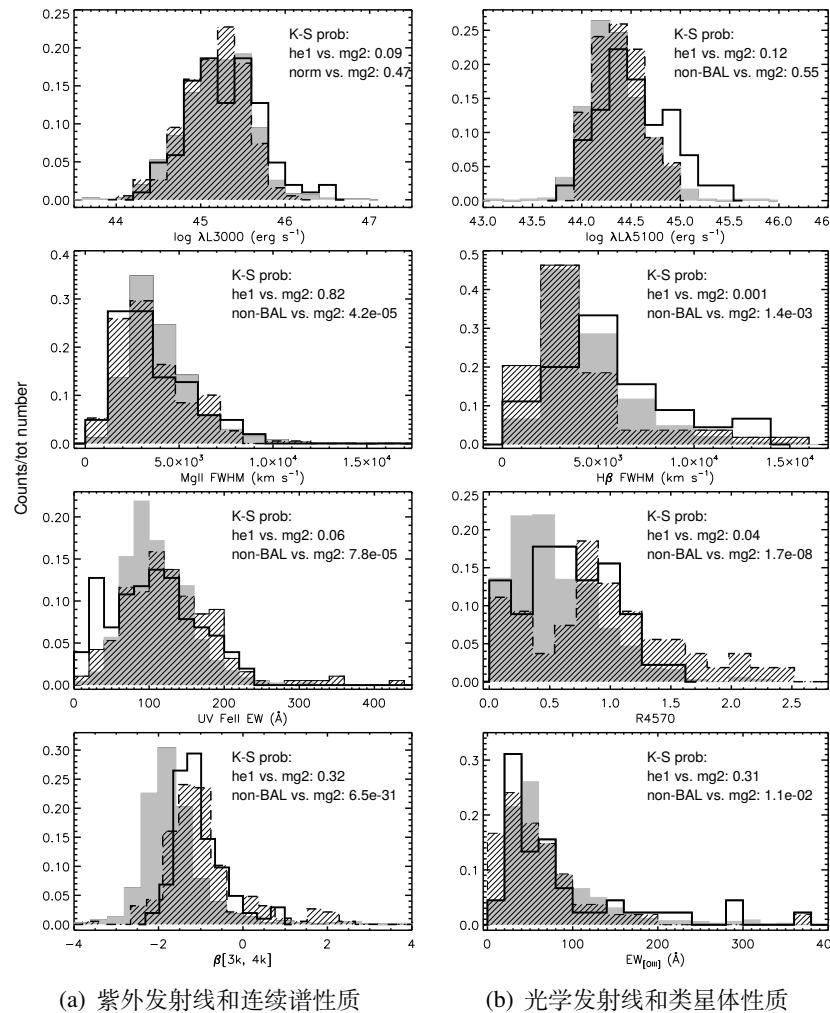


图 2.22 Mg II BAL 类星体样本中，探测到和没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的类星体的发射线以及连续谱性质比较。黑色实线和斜线阴影分别代表探测到和没有探测到 He I* λ 3889 BAL 的 Mg II BAL 类星体，灰色阴影表示非 BAL 类星体。

图 2.23 显示了这种 SED 与 MF87 SED 的对比。相比于 MF87 SED，上述 SED 的峰值在 ~ 1 Rydberg，明显比 MF87 SED 更红，我们因此称其为 UV-soft SED。

图 2.24 展示了不同物理条件 (U, n_{H}) 下，Mg II 以及 He I* 离子柱密度随 N_{H} 的变化趋势。可以看到，Mg II 和 He I* 在氢电离波前附近的行为完全不同： $N_{\text{Mg II}}$ 在氢电离波前前后急剧增长； $N_{\text{HeI*}}$ 在氢电离波前持续增长，而在过了波前以后停止增长。这个结果与 Arav et al. (2001, 见其图 7) 以及 Ji et al. (2015, 见其图 9) 的结果一致。因而随着吸收气体逐渐变厚 He I* 和 Mg II 吸收线将依次出现。另外，图中一个显著的特点是相同 U 但不同 n_{H} 的模型得到的离子柱密度聚集成捆，而不同 U 的模型结果则彼此分开。这表明 $N_{\text{Mg II}}$ 和 $N_{\text{HeI*}}$ 对气体的电离状态而不是对密度更加敏感，这也与 Ji et al. (2015) (见其图 10) 得到的结论相符。

我们接下来试图把 He I* λ 3889 BAL 样本的测量结果 (d_{abs}) 与模型计算的结果 (N_{ion}) 联系起来。为了简化讨论，我们假设吸收气体对中心光源是完全覆盖的且吸收线没有饱和，这种情况下该吸收线对应的离子柱密度 N_{ion} 可以直接由表

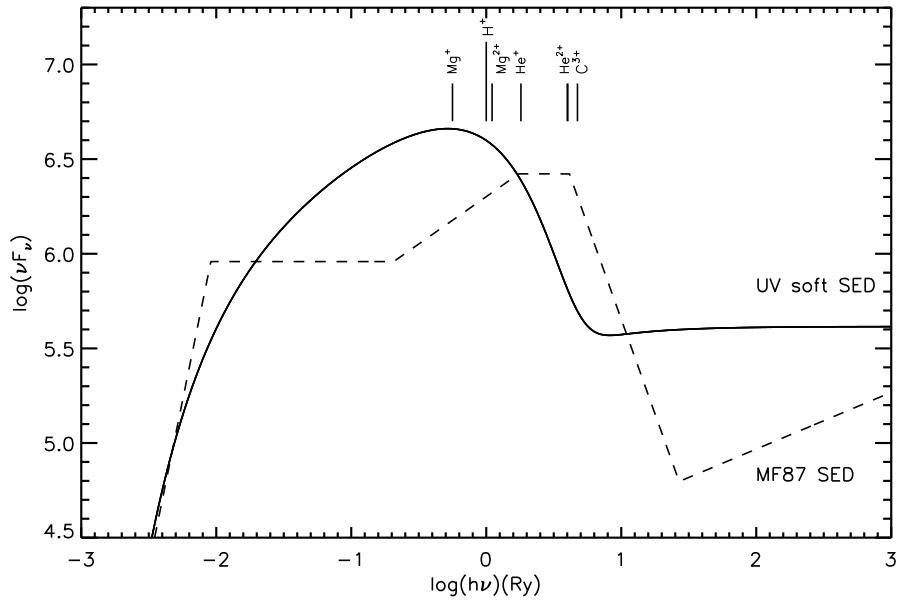


图 2.23 MF87 SED 和 UV-soft SED 的对比，两者热光度一致。SED 上方标注的是产生常见的吸收线离子（如 Mg^{+} , C^{3+} ）的所需的电离能。

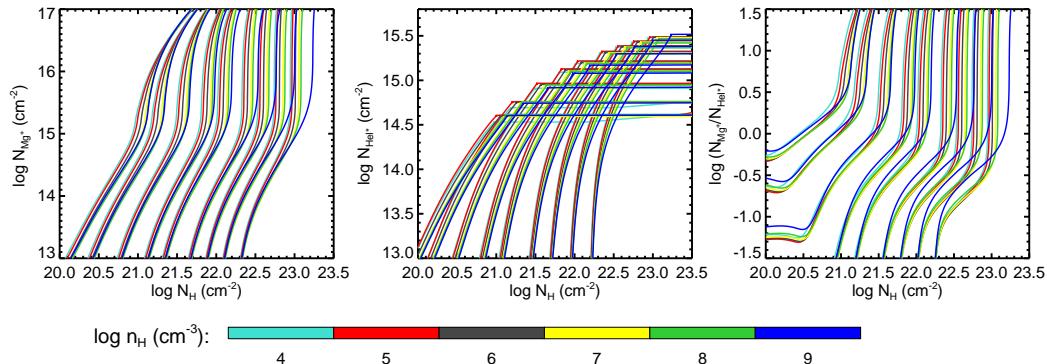


图 2.24 不同条件 (U, n_H) 下, $Mg II$ 、 $He I^*$ 离子柱密度 $N_{Mg II}$ 、 $N_{He I^*}$ 以及 $N_{Mg^{+}}/N_{He I^*}$ 随 N_H (亦即气体厚度) 的变化趋势。图中不同颜色的实线表示不同密度 n_H 下的模型计算结果; 图中不同密度的模型在一起成捆状, 表示不同的电离参数 U , 从左到右分别为: $\log U = -2.0, -1.8, -1.5, -1.2, -1.0, -0.7, -0.5$ 和 -0.3 。

观光深 τ 根据式 1.5 计算得到。反之, 当给定 τ 的轮廓, 在 N_{ion} 已知的情况下, I_r 的深度亦可以由此反推出来。我们希望在给定 $Mg II$ 吸收线深度 $d_{abs, Mg II}$ 的情况下, 利用 $N_{Mg II}$ 和 $N_{He I^*}$ 的对应关系, 我们可以粗略地推断出 $He I^*\lambda 3889$ 吸收线的深度 $d_{abs, He I^*}$, 即得到 $d_{abs, Mg II}$ 与 $d_{abs, He I^*}$ 的关系。为了实现这个目标, 我们还需要得到 $Mg II$ 吸收线和 $He I^*\lambda 3889$ 吸收线的光深 τ 的关系。然而如图 2.9 所示, 尽管 $He I^*\lambda 3889$ 和 $Mg II$ 吸收线的质心速度 v_{avg} 非常一致, 但谱线宽度和深度却非常不同。因此我们试图从样本中粗略地得到 $Mg II$ 和 $He I^*\lambda 3889$ 吸收线的 τ 的对应关系。我们把 $He I^*\lambda 3889$ BAL 类星体样本根据 $Mg II$ 吸收线宽度 (W_{abs}) 分成四组: $1600 < W_{abs} (\text{km s}^{-1}) < 2500$, $2500 < W_{abs} (\text{km s}^{-1}) < 3500$, $3500 < W_{abs} (\text{km s}^{-1}) < 4500$ 和 $W_{abs} (\text{km s}^{-1}) > 5000$ 。我们把每组中的 $Mg II$ 和 $He I^*\lambda 3889$ 吸收线归

一化谱分别根据其 v_{avg} 改正到 0 km s^{-1} 处，按照信噪比加权得到该宽度范围下的吸收线合成谱。这样我们粗略地得到不同宽度下 Mg II 吸收线轮廓以及相应的 He I* λ 3889 吸收线轮廓。利用这 4 组吸收线模板，我们进行以下模拟过程。首先，我们由观测所得的 Mg II 吸收线轮廓生成有不同吸收深度 $d_{\text{abs,MgII}}$ 的新轮廓⁶，其次，根据新轮廓计算出 N_{MgII} ，并结合模型计算结果，对于每个模型 (n_{H}, U) 由 N_{MgII} 得到对应的 $N_{\text{HeI}*}$ 。最后，利用与 Mg II 吸收线轮廓对应的 He I* λ 3889 轮廓生成相同物理条件下的 He I* λ 3889 吸收线，并测量出其 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 。图 2.25 展示了在 $\log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) = 7.0$, $\log U = -1.5$ 模型下的上述模拟过程。图 2.26 显示了由模拟得到的 $d_{\text{abs,MgII}}$ 与 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 的关系。如左图所示，模拟得到的 $d_{\text{abs,MgII}}-d_{\text{abs,HeI}*}$ 的关系与观测结果非常相符。在中间的图中，不同颜色的点标识出 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 所对应的 U ，可以看到 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 根据 U 而分层；电离度越高，相同 $d_{\text{abs,MgII}}$ 所对应的 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 越大。类似地，右图中不同颜色的点识出 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 所对应的 n_{H} 。但是，不同的 n_{H} 所对应的 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 并没有太大差别，这再次表明 He I* 吸收线对 U 敏感而对 n_{H} 不敏感。

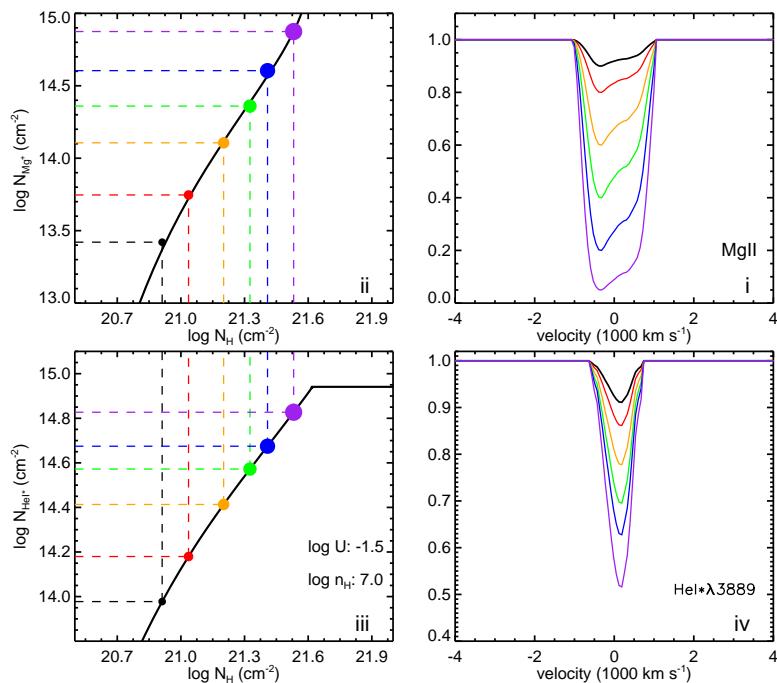


图 2.25 由给定 $d_{\text{abs,MgII}}$ 的 Mg II 吸收线推断 He I* λ 3889 吸收线 $d_{\text{abs,HeI}*}$ 的模拟过程示意图(从子图 i 到子图 iv)。本图以 $\log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) = 7$, $\log U = -1.5$, 宽度为 $\sim 2000 \text{ km s}^{-1}$ 的 Mg II 的吸收线轮廓以及对应的 He I* λ 3889 吸收线轮廓为例。详细见正文 §2.4。

图 2.27 显示 $n_{\text{H}} = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 的气体在不同电离度 ($\log U = -2, -1.2, -0.5$) 下的电离结构。图中显示了 C IV, Mg II 和 He I* 三种离子的柱密度随气体 N_{H} (即气体厚度) 和 U 的变化。在 N_{H} 较小 ($< 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) 时，氢的电离波前没有充分形成，此时低电离吸收线的柱密度如 N_{MgII} 很小，且随着 U 的增大而减少。而当气体足够

⁶吸收线的归一化谱与光深的关系为 $\tau = -\ln(I_r)$ 。在把 Mg II 吸收线模板调整为所需要深度的吸收线时，应当保持与原来模板的各速度间的光深的比例关系是一致的。

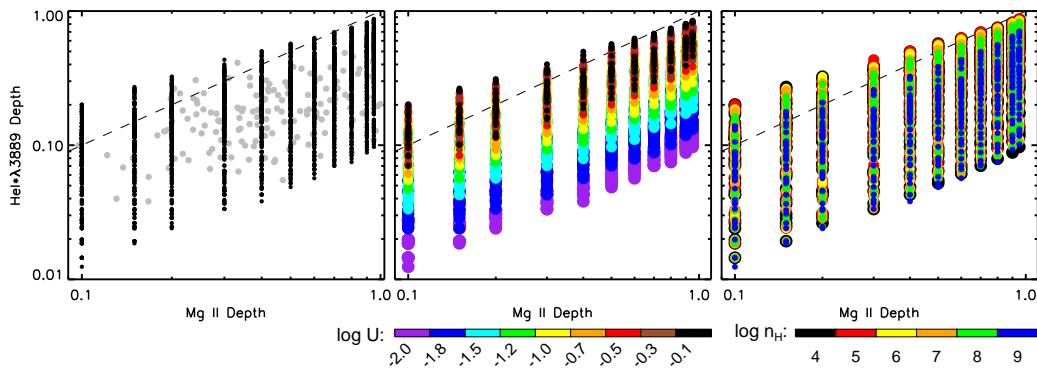


图 2.26 由 *Cloudy* 光致电离模型计算得出的 Mg II 和 He I* λ 3889 吸收线深度的对应关系。左图中，黑色点表示给定 Mg II 吸收线深度时由模型得到的 He I* λ 3889 吸收线深度。灰色点表示由 He I* λ 3889 得到的测量结果（见图 2.9）。中间和右边的图与左图类似，不同的颜色分别标识出 He I* λ 3889 吸收线深度所对应的电离参数 U 和气体密度 n_H 。

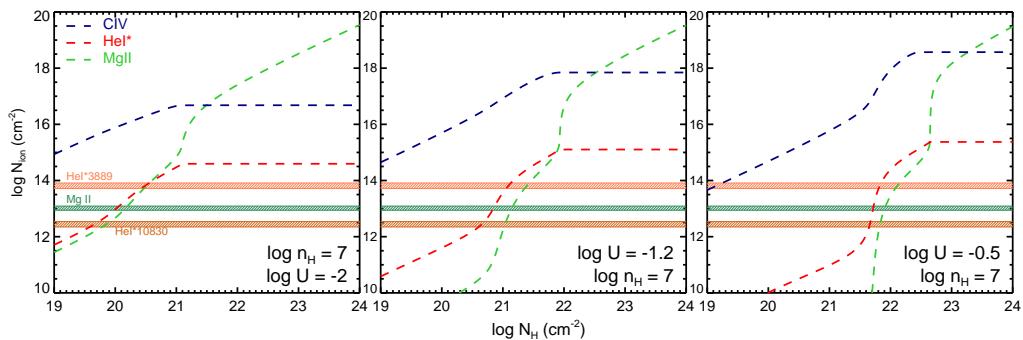


图 2.27 *Cloudy* 光致电离模型给出的 $n_H = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 的气体在不同电离度 ($\log U = -2, -1.2, -0.5$) 下，C IV（蓝色）、Mg II（绿色）以及 He I*（红色）随气体氢总柱密度 N_H （即气体厚度）的变化趋势。不同颜色的水平阴影条纹分别表示在深度为 0.05 时，Mg II（绿色）、He I* λ 3889（红色）、He I* λ 10830（棕色）所对应的离子柱密度，这表明光谱配对法探测到的离子柱密度的下限。条纹的宽度表示不同宽度的 Mg II、He I* 吸收线轮廓导致的微小差异。

厚、 N_H 较大 ($> 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) 时，高电离线和低电离线都可以探测到。根据图 2.15， $d_{\text{abs}} \sim 0.05$ 是光谱配对法的探测极限。基于图 2.26 中对 He I* λ 3889 吸收线深度的模拟，我们有兴趣来检查 $d_{\text{abs}} \sim 0.05$ 时所对应的 N_{ion} 和 N_H 。图 2.27 中的红色、棕色和绿色的阴影分别表示 He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830 和 Mg II 吸收线 $d_{\text{abs}} \sim 0.05$ 时所对应的离子柱密度。当 N_H 逐渐增大，在光谱上首先可以被探测到的是 He I* λ 10830 吸收线。在低电离度状态 ($\log U = -2$) 下 Mg II 比 He I* λ 3889 吸收线先被探测到。而在高电离度状态 ($\log U = -0.5$) 下，He I* λ 3889 比 Mg II 先被探测到。这个序列解释了 He I* 吸收线在 Mg II BAL 类星体中如此普遍。如果通过近红外的 He I* λ 10830 去探测，He I* 吸收线的探测比例会更高。另一方面，图 2.26 和图 2.27 也告诉我们存在一类 BAL 类星体，光谱上有明显的 He I* 吸收线，但是其 Mg II 吸收线非常弱。事实上我们也的确找到了这种类型的类星体，SDSS J0352-

0711, J1413+4400 以及 J0936+5331, 详情见附录 § A.3。SDSS J0352-0711 的 Mg II 吸收线较弱, 因而并没有被 T06, G09 和 Z10 收录在其样本内。然而如 图 A.5 显示, 其 C IV, He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830 吸收线都很明显。类似地, 在低红移 BAL 类星体 J1413+4400 和 J0936+5331 的光谱中也没有 Mg II 吸收特征, 但是有较强的 C IV, He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830 吸收线。

2.5 He I* 吸收线的应用

2.5.1 个例研究：利用 He I* 吸收线推导吸收气体物理性质

在 § 2.1 中已经介绍, He I* 吸收线在确定外流气体的物理性质上具有其他吸收线所没有的优势。这一小节我们以 FBQS J0840+3633 为例来展示 He I* 吸收线在确定外流气体物理性质方面的应用。

FBQS J0840+3633 是一个红移为 $z = 1.23$ 的 FeLoBAL 类星体, 它在紫外波段表现出非常丰富的吸收线特征。[de Kool et al. \(2002\)](#) 详细地研究了其 Keck/HIRES 高分辨紫外光谱 (静止系波长为 1800–2900 Å)。根据他们的测量, 该源的紫外吸收线覆盖了 -700 – -3500 km s^{-1} 的速度范围, 且主要包括两个成分, 中心位置分别在 -900 和 -2800 km s^{-1} 。这两个成分的物理性质有显著的不同。低速气体的密度较低 ($n_{\text{H}} < 500 \text{ cm}^{-3}$) 且与中心的 AGN 相距较远 ($\sim 230 \text{ pc}$)。高速气体的密度远高于低速气体 ($> 10^8 \text{ cm}^{-3}$)。[de Kool et al. \(2002\)](#) 利用 FBQS J0840+3633 的 Keck/HIRES 光谱中没有探测到 He I* λ 2830 吸收线这一事实估计了高速外流气体的氢总柱密度 N_{H} 的上限 ($N_{\text{H}} \leq 2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) 以及电离参数的上限 ($\log U < -1.8$)。

SDSS 于 2001 年 12 月 20 日观测了 FBQS J0840+3633, 得到一条平均信噪比为 34, 静止系波长覆盖范围为 1700–4200 Å 的光谱。我们在其 SDSS 光谱上探测到了明显的 He I* $\lambda\lambda$ 3889, 3189 吸收线, 并且将其收录到 He I* λ 3889 BAL 样本中。此外, 我们于 2014 年 1 月 17 日利用 P200 望远镜的 TripleSpec 光谱仪对该源进行了近红外光谱观测 (见 § A.3)。[图 2.28](#) 中左图显示了使用光谱配对法对 Mg II, He I* $\lambda\lambda$ 3189, 3889, 10830 吸收线的本征光谱的拟合结果。其中, 对 Mg II, He I* $\lambda\lambda$ 3189, 3889 的拟合过程如 § 2.2.2 所述。而在对 He I* λ 10830 的拟合时, 我们从 [Glikman et al. \(2006\)](#)、[Riffel et al. \(2006\)](#) 和 [Landt et al. \(2008\)](#) 近红外光谱样本中选出 76 条高信噪比没有吸收的光谱作为模板。由此图以及 [图 2.30](#) 可以看到, Mg II、Al III、Fe II 等吸收线底部平坦、已经严重饱和, 不能有效地确定吸收气体的柱密度。然而, 上述吸收线虽然已经严重饱和, 但是其底部的流量并不是 0, 这表明吸收气体以外的部分仍有其他成分的辐射。此外 He I* λ 10830 吸收线的残余流量比对应速度处的 He I λ 10830 宽发射线的贡献还大。我们由此可以推断出吸收气体应该在宽线区以内, 并只覆盖了吸积盘的辐射。因此我们在做归一化吸收线谱前先扣除宽发射线的贡献, 然后对 AGN 的幂律谱进行归一, 结果如 [图 2.28](#) 右图所示。我们借助 He I* 吸收线来确定吸收线的物理性质。He I* λ 10830 的光深 ($\propto \lambda f_{\text{ik}} N_{\text{ion}}$) 是 He I* λ 3889 的 23.5 倍, 在吸收气体对中心光源完全覆盖

的时候，由 He I* λ 3889 的吸收线轮廓可以推知 He I* λ 10830 的轮廓，如图 2.28 右图二中灰色点线所示。然而观测到的 He I* λ 10830 吸收线比预测的轮廓要弱，这表明吸收气体只是部分覆盖了中心光源。假设吸收气体对中心光源的覆盖的比例为 C_f ，且覆盖的部分有相同的光深，则观测得到的归一化谱可以用式 1.6 表示。对于 He I* $\lambda\lambda$ 10830, 3889, 3189 每条吸收线都可以有如此表达，形成一个方程组，且三条吸收线的 τ 的比例为 23.5:1:0.33。我们借鉴 Leighly et al. (2011) 的方法，给 τ_{3889} 和 C_f 很密集的网格，这样对于每组给定的 (τ_{3889}, C_f) 都能计算出相应的 R_{10830} 、 R_{3889} 和 R_{3189} 。随后，我们将计算值和实际的观测值对比，即计算每个速度处三条吸收线的 χ^2 ， $\sqrt{D_{10830}^2 + D_{3889}^2 + D_{3189}^2}$ ，这里 D 表示计算得到的值和实际观测值的差。这样对于每个速度处，我们都找到最佳的 (τ_{3889}, C_f) ，并根据二维 $\delta\chi^2$ 分布计算出 1σ 误差。由上述 $\tau_{3889}(v)$ ， $C_f(v)$ ，我们进而计算出 He I* 的柱密度随速度的变化 $dN_{\text{HeI}*}(v)$ ，结果如图 2.29 所示。对 $dN_{\text{HeI}*}(v)$ 在吸收线的速度范围内 (-4500 – -1200 km s^{-1}) 进行积分，我们得到 He I* 的柱密度为 $\log N_{\text{HeI}*} = 14.9 \pm 0.07 \text{ cm}^{-2}$ 。平均覆盖因子为 $\sim 50\%$ 。由 § 2.4 的模型计算我们知道 He I* 在氢电离波前之后停止增长，而且对电离参数很敏感。因此，在气体足够厚、氢电离波前充分形成的情况下，He I* 的柱密度和电离参数非常强的依赖关系，见 Ji et al. (2015) 中的图 10。而 FBQS J0840+3633 有非常强的低电离 Fe II 吸收线，因此可以推断这个源的吸收气体是光学厚的。因此，根据 Ji et al. (2015) 的图 10，吸收气体的电离参数 $\log U$ 应当介于 -1.7 和 -1.5 之间。由式 2.2， $n_{\text{HeI}2^3S}/n_{\text{HeII}} \sim 6 \times 10^{-6}$ 。假设氦元素主要以 He^+ 形式存在，则氢的总柱密度下限可以估计 $N_{\text{H}} \approx 1.36 \times 10^{21}$ 。

下面我们通过光致电离模型来进行详细计算。这里我们采用光谱合成的方法来确定吸收线的物理参数，过程如下。我们假定所有吸收线的 $C_f(v)$ 和 $\tau(v)$ 轮廓都如图 2.29 所示，根据 Cloudy 所计算出的吸收线的离子柱密度生成相应的吸收线轮廓。然后把这些吸收线轮廓加到利用光谱配对法找到的没有吸收的本征光谱上以生成 FBQS J0840+3633 的合成光谱，我们将诸多 Cloudy 的模型中找到的与观测光谱匹配最好的合成光谱作为吸收气体的物理参数。最后我们得到匹配最好的物理参数为 $\log U = -1.7$ ， $\log n_{\text{H}} (\text{cm}^{-3}) = 7.5$ ， $\log N_{\text{H}} (\text{cm}^{-2}) = 22$ ，如图 2.30 所示。

2.5.2 利用 He I* λ 3889 吸收线寻找低红移 Mg II BAL 类星体

目前虽然已经发现很多 BAL 类星体，但是已经证认的低红移 BAL 类星体仍然非常稀少。这是因为证认 BAL 类星体主要是依靠探测是否有 C IV、Mg II 等紫外吸收线。但对于低红移的源，紫外波段的观测非常困难。由于大气透过率的原因在地面上难以观测比 3100 \AA 更蓝的波段，因此必须通过空间紫外观测来证认。然而空间紫外观测非常昂贵，观测机会有限。开展对低红移的 BAL 类星体的研究很有意义。利用低红移 BAL 类星体的距离近的优势，我们可以对其开展

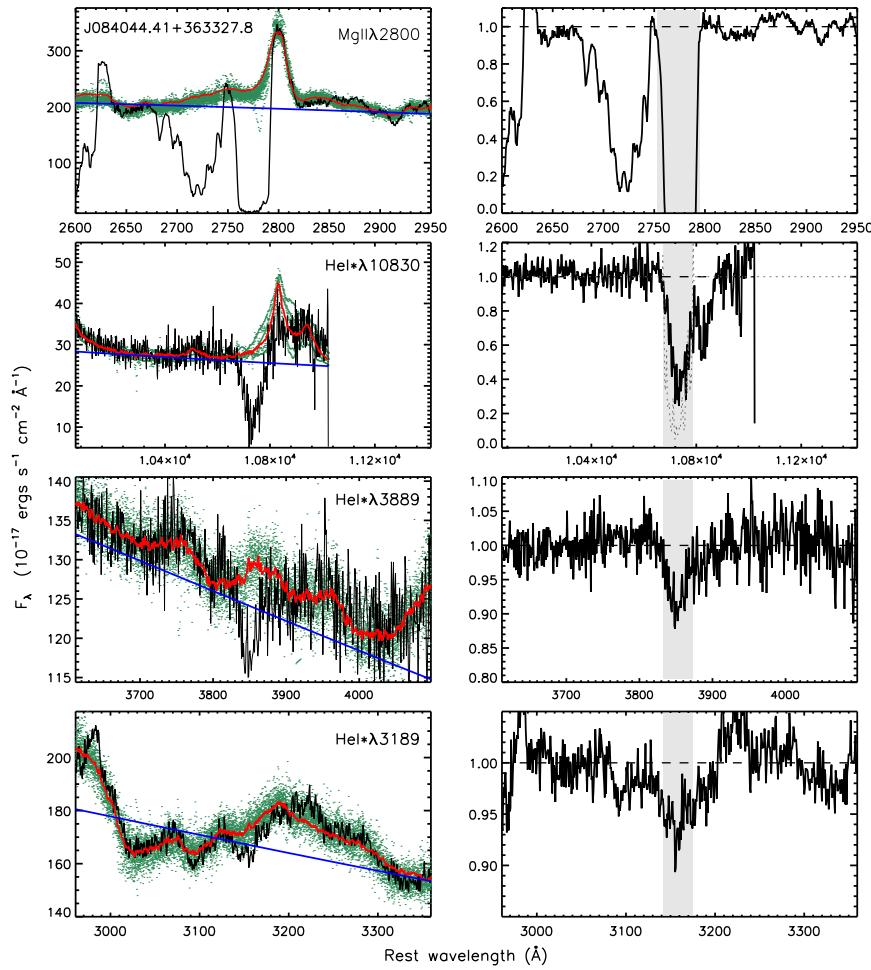


图 2.28 左图：光谱配对法对 FBQS J0840+3633 的 Mg II、He I* $\lambda\lambda$ 10830, 3889, 3189 吸收线（黑色实线）的本征光谱的拟合结果。绿色点线表示对各吸收线区域的本征光谱的可接受的拟合，红色实线表示由各吸收线所有可接受的拟合得到的平均谱。蓝色实线表示 AGN 的幂律连续谱。右图：各条吸收线的归一化谱。右边第二幅图上，灰色的点线表示假设完全覆盖情况下，由 He I* λ 3889 推得的 He I* λ 10830 吸收线轮廓。

空间分辨的观测，一方面研究 BAL 的寄主星系的性质，另一方面让我们有机会了解类星体外流与星际介质的相互作用。再者，我们可以直接利用低红移 BAL 在光学波段的光谱特征，如窄发射线可以用来确定 ISM 的温度和密度，宽发射线可以用来确定类星体黑洞质量。

在这一小节，我们通过探测 He I* λ 3889 吸收线来寻找低红移 BAL 类星体。我们基于 SDSS-I, II 和 III 的类星体样本 (Pâris et al. 2014; Schneider et al. 2010) 寻找红移 $z \leq 0.3$ 的 BAL 类星体。He I* λ 3889 吸收线的选取流程仍然按照 §2.2.3 中所述的步骤。这些候选者没有 Mg II 吸收线作为 He I* λ 3889 吸收线的位置参考，从而增加了证认的难度。根据中等红移 He I* 吸收线样本的测量结果（见图 2.9），He I* λ 3889 吸收线比 Mg II 吸收线的宽度窄，但是基本上都大于 1000 km s^{-1} 。因此我们在这里对 He I* λ 3889 设定一个宽度限制，即 $|\nu_{\max} - \nu_{\min}| > 800 \text{ km s}^{-1}$ 。另

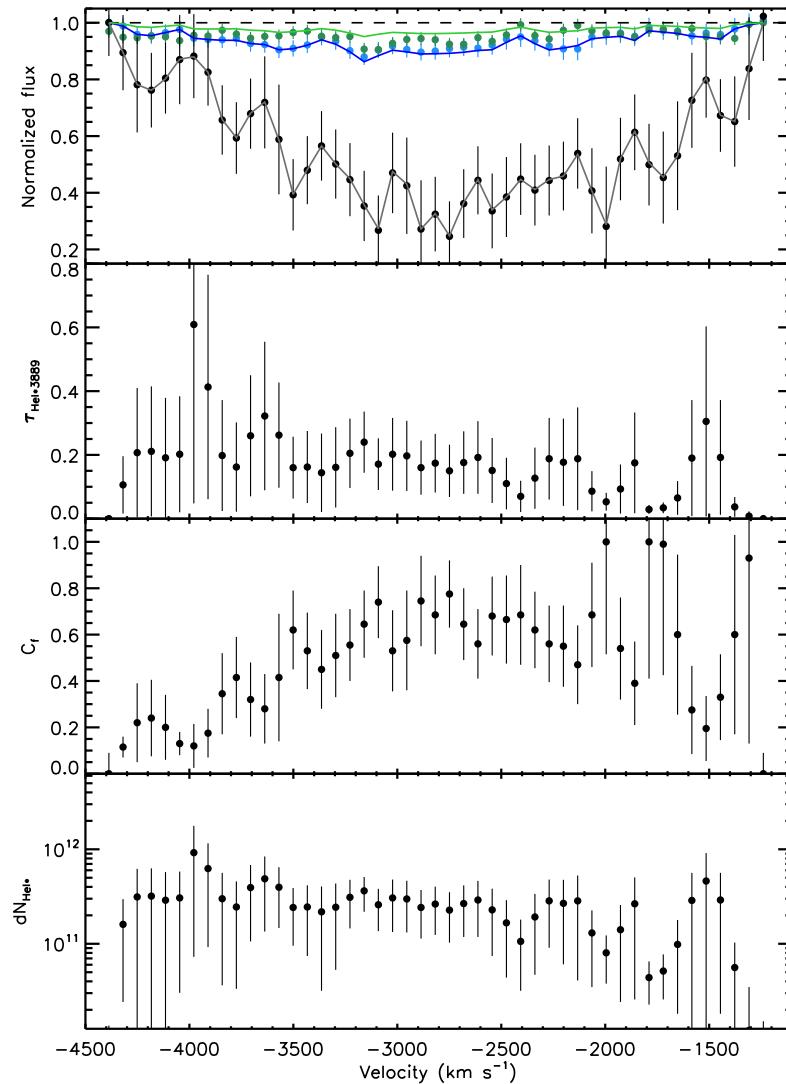


图 2.29 第一幅图中，黑色、蓝色、绿色点分别表示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889, 3189$ 吸收线的观测流量以及其 1σ 误差。由部分覆盖模型反解出 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889, 3189$ 的吸收线轮廓分别由灰色、蓝色、绿色实线表示。第二、三、四幅图分别表示由部分覆盖模型得到的 He I^* 吸收线的 τ 、 C_f 以及 dN_{HeI^*} 的速度轮廓。

外，低红移的类星体一般光度较低，光谱中来自星光成分高阶巴尔末吸收线的污染也较为严重。我们在选择时优先选择光谱中出现更高阶的 He I^* 吸收线的候选者。此外，我们把所有含高阶巴尔末吸收线的源全部剔除。最后，我们共找到 19 个低红移 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 类星体，见表 2.3。

由于我们在这里采用的是最保守的选择标准，因此 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 的实际数目应当更多一些。对于 SDSS 光谱， $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 在 Mg II BAL 的探测率为 35% (§2.3.1)。如果用这个比例推算，在低红移类星体样本中应当有 ~ 54 个 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL 类星体。我们在此使用的低红移类星体 ($z \leq 0.3$) 中共有 2539 个源，故 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的比例为 2.13%，这与 Mg II LoBAL 类星体的比例相似⁷。

⁷ 观测到的 CIV BAL 在类星体中的比例为 $\sim 15\%$ (e.g., Hewett & Foltz 2003; Reichard et al. 2003b, G09)。

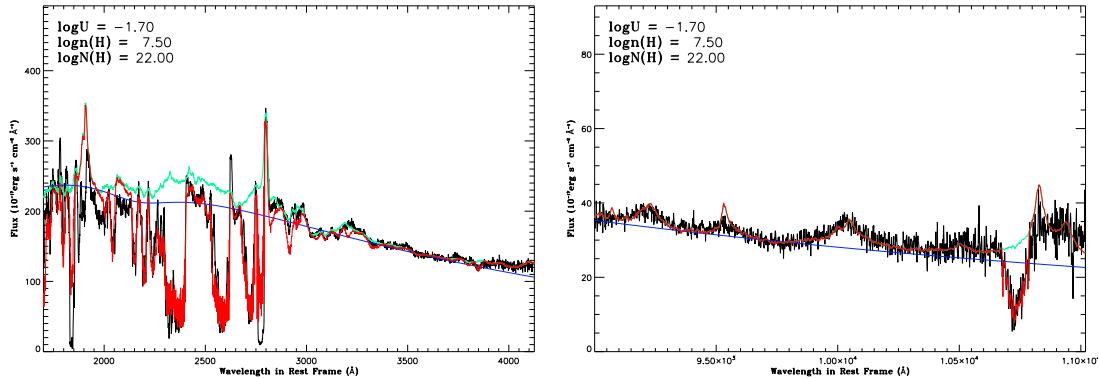


图 2.30 FBQS J0840+3633 的最佳拟合模型（红色实线），该模型是根据 *Cloudy* 光致电离模型生成的光谱。匹配的最佳模型参数为 $\log U = -1.7$, $\log n(H)$ (cm^{-3}) = 7.5, $\log N(H)$ (cm^{-2}) = 22。黑色实线表示 FBQS J0840+3633 的原始光谱，绿色实线表示由光谱配对法得到的没有吸收的本征光谱，蓝色实线表示被红化的 AGN 幕律连续谱。

在这 19 个低红移 He I* λ 3889 BAL 类星体中，我们使用 Palomar Hale 望远镜上的 TripleSpec 光谱仪对其中 5 个源进行了近红外观测。这五个源分别是 SDSS J0752+1935, SDSS J0936+5331, SDSS J1535+5644, SDSS J1634+2049 和 SDSS J2220+0109。在这五个源的近红外光谱上都显示出明显的 He I* λ 10830 吸收线。详细的观测细节以及近红外光谱见附录 § A.3。另外，我们对其中的 SDSS J1634+2049 进行了详细的研究，见第三章。

表 2.3 Low- z BAL AGNs

SDSS Name	z	Spectrum	He I* λ 3889 EW (Å)	He I* λ 3889 d_{abs}	He I* λ 3889 $v_{\text{max}}(\text{km s}^{-1})$	He I* λ 3889 $v_{\text{min}}(\text{km s}^{-1})$	He I* λ 3889 $v_{\text{avg}}(\text{km s}^{-1})$	He I* λ 3889 S/N
J013117.14+162535.5	0.274	55833-5137-627	2.54±0.68	0.27	-1805	-291	-897	15.19
J014219.00+132746.5	0.267	51820-0429-303	3.17±0.35	0.23	-621	553	-57	26.49
J075217.84+193542.2	0.117	52939-1582-612	1.78±0.23	0.10	-661	444	-94	43.72
J081527.29+445937.4	0.268	51877-0439-034	3.06±0.65	0.14	-3398	-515	-2180	17.89
J081542.53+063522.9	0.244	52934-1295-580	1.98±0.72	0.09	-5106	-1485	-3303	21.14
J081652.88+241612.5	0.276	52962-1585-178	0.70±0.25	0.06	-7291	-6278	-6790	28.11
J092247.03+512038.0	0.161	52247-0766-614	0.95±0.32	0.06	-7421	-6611	-7035	26.16
J093653.84+533126.8	0.228	52281-0768-473	1.20±0.22	0.11	-1404	-302	-851	34.85
J101325.43+221229.4	0.275	53739-2365-389	0.69±0.36	0.07	-7524	-6647	-7099	29.39
J105311.38+261522.6	0.249	53793-2357-388	1.32±0.27	0.16	-1249	-422	-826	20.85
J113804.88+400118.9	0.292	53466-1972-484	1.48±0.50	0.22	-838	-218	-503	12.01
J130534.49+181932.8	0.118	54479-2603-443	1.86±0.13	0.24	-1023	-196	-563	34.66
J130712.33+340622.5	0.148	53476-2006-628	2.21±0.30	0.16	-1856	-66	-896	21.18
J134704.91+144137.6	0.135	53858-1776-612	1.39±0.19	0.16	-7510	-6498	-6996	41.80
J140136.63+041627.2	0.164	52339-0856-010	0.84±0.27	0.09	-7479	-6399	-6918	24.73
J153539.25+564406.5	0.208	52072-0617-352	2.82±0.21	0.20	-1939	-425	-984	25.86
J163459.82+204936.0	0.129	53224-1659-542	4.70±0.49	0.34	-4498	-2860	-3638	15.53
J215408.71-002744.4	0.218	52078-0371-106	2.75±0.58	0.17	-2438	-307	-1211	17.68
J222024.58+010931.2	0.213	52140-0375-361	5.44±0.36	0.42	-1672	-88	-724	31.15

2.6 小结

我们在 SDSS/BOSS 巡天光谱数据库中系统性地搜寻 He I* λ 3889 BAL 以便利用 He I* 吸收线的测量优势测定吸收气体的物理性质，取得的主要进展如下：

LoBAL 类星体在 CIV BAL 类星体中占 $\sim 15\%$ (e.g., Weymann et al. 1991)。

(1) 基于 T06, G09, Z10 发表的 Mg II BAL 类星体样本，我们采用光谱配对法编制了一个 $0.4 \leq z \leq 1.35$ 的均匀 Mg II BAL 类星体样本，包含 285 个源。

(2) 我们在 285 个 Mg II BAL 类星体中探测到 101 个 He I* λ 3889 BAL 类星体，将之前的 He I* BAL 类星体的数目提高了一个量级。随后我们又用同样的方法在 He I* λ 3889 BAL 类星体中探测到 52 个有 He I* λ 3189 吸收线的源。我们利用 Palomar 5m 望远镜对其中部分源做了近红外光谱观测，如预期观测到了 He I* λ 10830 吸收线。He I* λ 3189 和 He I* λ 10830 的有效探测都证实了我们对 He I* λ 3889 吸收线探测的可靠性。

(3) He I* λ 3889 在 Mg II BAL 类星体中出现的平均比例为 35.4%，而且该比例随着光谱信噪比的提升而迅速提高。特别地，当平均 $S/N > 30$ 时，He I* λ 3889 吸收线的探测比例达到 90% 以上。这表明 He I* 吸收线在 Mg II BAL 类星体中是普遍存在的。

(4) 我们用光致电离模型解释了 He I* 吸收线在 Mg II BAL 类星体中的高探测比例，即 He I* 吸收线主要产生于吸收气体的电离波前处，而 Mg II 吸收线产生于电离波前之后。

(5) He I* 吸收线在测量吸收气体性质方面有很多优势：有多重吸收线且不易饱和，可准确地测量气体的总柱密度；多重吸收线也可诊断视线方向上吸收气体对中心电离光源的覆盖情况；He I* 吸收线对电离参数敏感而对密度不敏感，可用于诊断气体的电离参数。我们借助 FBQS J0840+3633 展示 He I* 在测量吸收线方面的优势。

(6) He I* 吸收线中振子强度最大的 He I* $\lambda\lambda$ 3889, 10830 分布在近紫外和近红外，可用来寻找罕见的低红移 BAL 类星体。我们在 SDSS/BOSS 光谱数据库中探测到了 19 个新的 $z < 0.3$ 的 He I* λ 3889 BAL 类星体。

(7) 在吸收线测量技术方面，我们将在消光曲线研究中广泛使用的光谱配对法 (pair-matching method) 应用于探测较弱的 He I* λ 3889 吸收线。我们将其光谱配对法的流程完善以更好地探测弱吸收线，并在测量中评估了系统误差。我们对该方法做了一系列测试以验证其探测效率和测量精度。测试结果表明光谱配对法的测量精度和探测效率依赖于光谱的信噪比 (S/N) 和吸收线深度 d_{abs} 。换言之，在我们知道了 S/N 和 d_{abs} 就可以预测该方法的精度和对吸收线的探测比例。

第三章 SDSS J163459.82+204936: 亮红外环星系的发射线与吸收线外流研究

3.1 引言: J1634+2049 —— 研究黑洞与星系共同演化的实验室

黑洞与其寄主星系的联系是星系研究中一个非常重要的课题, 其联系主要有两个方面, 一是星系中的气体如何为黑洞吸积活动提供物质供给, 二是黑洞的反馈是否影响寄主星系以及如何影响。绪论中已经介绍, 辐射反馈模式下气体从星系尺度进入黑洞周围区域的方式有两种, 一种是星系并合或者相互作用, 另一种是盘星系通过旋臂或棒等动力学不稳定结构的久期演化。对近邻宇宙中星系和 AGN 的观测表明, 近邻宇宙中 AGN 的寄主星系大部分都是质量较小的盘星系, 主要通过久期演化的方式为黑洞吸积供给气体。但是以这种方式增长的 AGN 大部分都是光度偏低的 Seyfert 星系。而近邻宇宙中质量最大的星系、光度最高的类星体 (如 ULIRGs) 都有星系并合或者相互作用的迹象, 这暗示星系并合/相互作用是触发星系中恒星形成以及 AGN 活动的高效途径。此外, 观测表明星系和 AGN 活动随红移有强烈的演化效应 (见图 1.2), 红移 2–3 的 AGN 的活动性远比当前宇宙中的 AGN 强。目前广为接受的冷暗物质 (CDM) 模型认为并合是高红移宇宙中星系增长和触发 AGN 的最主要途径。然而从观测方面, 星系并合触发恒星形成的直接观测证据很多, 但是星系并合触发 AGN 的直接观测证据却很少 (Fabian 2012; Heckman & Best 2014)。另外, 星系动力学模拟表明星系并合后会形成椭圆星系或有经典核球的盘星系。 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系指的就是黑洞质量与椭圆星系以及盘星系中经典核球速度弥散之间的相关性。目前认为 AGN 外流与 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系的建立有关。然而目前人们对于触发 AGN 活动以及反馈的细节目前仍然不清楚。这些物理过程的细节并不能完全通过对于星系和类星体样本的统计研究 (如相关性分析) 以及目前的数值模拟 (e.g., Hopkins et al. 2006; Veilleux et al. 2009) 来了解。更直接的方式是通过对处于过渡阶段的罕见的个源 (e.g., Mrk 231) 进行细致的研究。

在本章中, 我们对 SDSS J163459.82+204936.0 进行了多波段的细致分析。这个源是一个低红移 ($z = 0.1293$) 类星体, 首先被 *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS) 探测到。在光学、近红外光谱上 J1634+2049 表现出典型的 I 型 AGN 特征, 且连续谱被严重红化; 在中红外光谱上有明显的 PAH 发射线, 红外光度 (8–11 μm) 为 $\sim 10^{11.96} L_\odot$; 星系的外围有明显的环状结构, 其周围的一个邻近小星系已经被我们的光学光谱证明与 J1634+2049 有相近的红移, 我们推测这个小星系与 J1634+2049 发生过碰撞, 并形成了环; 此外, 我们在其光学、近红外光谱上探测到了 $\text{He I}^*\lambda\lambda 3889, 10830$ 以及 Na I D 宽吸收线, 并收录到我们的低红移 He I^* BAL 样本 (见 § 2.5.2) 中; J1634+2049 也有非常显著的发射线外流, 光致电离模型计算表明其物理性质与吸收线外流非常一致。综合所有以上特征, J1634+2049

是一个典型的处于从红外亮的富尘埃星系向正常类星体演化的过渡阶段的天体。

3.2 多波段数据分析

3.2.1 SDSS J1634+2049 测光与光谱观测数据

J1634+2049 从紫外到远红外有丰富的光谱观测数据。2004 年 8 月 7 日, SDSS 对 J1634+2049 进行了第一次光谱观测, 曝光时间为 3072 s, 其光谱覆盖范围为 3800–9200 Å。SDSS 光谱处理程序给出的红移为 0.1286 ± 0.0014 , 我们根据其 $[\text{S II}] \lambda\lambda 6716, 6731$ 窄发射线重新测定红移为 $z_{\text{em}} = 0.1293 \pm 0.0007$ 。

为了把 J1634+2049 的光谱尽可能地向近红外和近紫外端延伸, 我们于 2014 年 4 月 23 日利用 Palomar 5 m *Hale* 望远镜上的 *Double Specgraph* (DBSP) 对其进行了两次 300 s 的曝光。根据当晚的视宁度, 我们使用了宽度为 1''.5 的狭缝。光谱分为两段, 蓝端 (3150–5700 Å) 使用 600/4000 光栅, 得到的光谱分辨率为 ~ 4.13 Å; 红端 (7800–10200 Å) 使用 600/10000 光栅, 得到的光谱分辨率为 ~ 4.2 Å。一维光谱的抽取按照 IRAF 标准流程处理。

我们在 SDSS 图像上发现 J1634+2049 的西面有两个邻近的小星系(见图 3.2), 其颜色与 J1634+2049 相似。由 SDSS 提供的这两个小星系的测光红移分别为 0.224 ± 0.0421 、 0.283 ± 0.0781 。鉴于通过测光确定红移的方法有较大的不确定性, 我们怀疑二者的红移可能与 J1634+2049 的红移接近。另外, J1634+2049 星系外围有环状结构, 可能与星系碰撞有关, 我们非常好奇这两个邻近的星系是否与 J1634+2049 曾经发生过相互作用。为了测定这两个邻近星系的红移, 我们利用丽江 2.4 m 望远镜上的 *Yunnan Faint Object Spectrograph and Camera* (YFOSC) 于 2015 年 3 月 13 日对它们进行了两次 2400 s 曝光。我们根据当晚视宁度采用 1''.8 狹缝并将狹缝旋转了 86° 以同时拍到 J1634+2049 和两个邻近的星系(见图 3.11(a)中的狹缝方向)。我们采用 G10 (150 mm^{-1}) 光栅, 得到波长范围为 3400–10000 Å、分辨率 $R \sim 760$ 的光谱。我们按照 IRAF 标准流程处理抽取了一维光谱。

我们使用 Palomar 5 m *Hale* 望远镜上的 *TripleSpec* 光谱仪于 2012 年 4 月 15 日对 J1634+2049 进行了近红外光谱观测。我们采用 A-B-B-A 狹缝位置切换模式对其进行 4 次 120 s 曝光, 并在随后以同样方式拍摄了两颗标准星。我们利用 IDL 程序 SpexTool (Cushing et al. 2004) 抽取近红外光谱, 并根据 Vacca et al. (2003) 所述的方法利用相应的 IDL 程序进行了流量定标和大气吸收改正。

J1634+2049 的中红外光谱由 *Spitzer* (Werner et al. 2004) 空间望远镜上搭载的 *Infrared Spectrograph* (IRS; Houck et al. 2004) 于 2008 年 4 月 30 日观测 (PI: Lei Hao, program ID: 40991), 得到一条波长范围为 5–35 μm 的低分辨 ($R \sim 100$) 光谱。本文中, 我们使用了 “Cornell Atlas of *Spitzer*/IRS Sources”¹ (CASSIS v7;

¹The Cornell Atlas of *Spitzer*/IRS Sources (CASSIS) is a product of the Infrared Science Center at Cornell University, supported by NASA and JPL. <http://cassis.astro.cornell.edu/atlas/>

Lebouteiller et al. 2011) 提供的已经处理好的 IRS 光谱。

此外, J1634+2049 有充分的多波段的测光数据, 汇总于表 3.1 中。

表 3.1 测光数据

波段	星等 / 流量	设备	观测时间 (UT)	参考文献
FUV	21.75 ± 0.46 mag	GALEX	2006-12-23	1
NUV	20.47 ± 0.17 mag	GALEX	2006-12-23	1
petrosian <i>u</i>	18.94 ± 0.04 mag	SDSS	2003-06-23	2, 3
petrosian <i>g</i>	17.76 ± 0.01 mag	SDSS	2003-06-23	2, 3
petrosian <i>r</i>	16.95 ± 0.01 mag	SDSS	2003-06-23	2, 3
petrosian <i>i</i>	16.30 ± 0.01 mag	SDSS	2003-06-23	2, 3
petrosian <i>z</i>	16.07 ± 0.01 mag	SDSS	2003-06-23	2, 3
<i>J</i>	14.65 ± 0.04 mag	2MASS	1997-06-09	4
<i>H</i>	13.45 ± 0.03 mag	2MASS	1997-06-09	4
<i>K_s</i>	12.25 ± 0.03 mag	2MASS	1997-06-09	4
<i>W1</i>	10.73 ± 0.02 mag	WISE	2010-05-29	5
<i>W2</i>	9.72 ± 0.02 mag	WISE	2010-05-29	5
<i>W3</i>	7.07 ± 0.02 mag	WISE	2010-02-21	5
<i>W4</i>	4.61 ± 0.02 mag	WISE	2010-02-21	5
IRAC $8\mu\text{m}^{\text{a}}$	0.035 ± 0.001 Jy	<i>Spitzer</i>	2008-04-30	6
IRAS $12\mu\text{m}$	0.085 ± 0.019 Jy	IRAS	1991-05-30	7
IRAC $16\mu\text{m}^{\text{a}}$	0.067 ± 0.002 Jy	<i>Spitzer</i>	2008-04-30	6
IRS $22\mu\text{m}^{\text{a}}$	0.110 ± 0.003 Jy	<i>Spitzer</i>	2008-04-30	6
MIPS $24\mu\text{m}^{\text{a}}$	0.114 ± 0.003 Jy	<i>Spitzer</i>	2008-04-30	6
IRAS $25\mu\text{m}$	0.141 ± 0.018 Jy	IRAS	1991-06-06	7
IRAS $60\mu\text{m}$	0.559 ± 0.045 Jy	IRAS	1991-03-08	7
AKARI $65\mu\text{m}$	0.239 Jy	AKARI	2011-09-08	8
AKARI $90\mu\text{m}$	0.579 ± 0.060 Jy	AKARI	2011-09-11	8
IRAS $100\mu\text{m}$	1.172 ± 0.199 Jy	IRAS	1991-04-11	7
AKARI $140\mu\text{m}$	1.468 ± 1.753 Jy	AKARI	2001-09-11	8
1.4 GHz	21.97 ± 0.147 mJy	FIRST	1998-10-07	9

(1) Morrissey et al. (2007); (2) York et al. (2000) (3) Abazajian et al. (2009);
(4) Skrutskie et al. (2006) (5) Wright et al. (2010); (6) Houck et al. (2004)
(7) Moshir et al. (1992); (8) Doi et al. (2009) (9) Becker et al. (1994)

^a 此处使用的是根据 *Spitzer* IRS 光谱得到的合成星等, 数据从 NASA/IPAC *Spitzer* IRS 数据库获得, http://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-dd?catalog=irs_enhv211

3.2.2 SDSS J1634+2049 的宽波段谱能量分布

我们利用 J1634+2049 的多波段光谱以及测光数据得到其宽波段 SED, 见图 3.1。图中所示的数据已经根据银河系消光图 (Schlegel et al. 1998) 和消光曲线 (Fitzpatrick 1999) 进行了银河系消光改正。由于这些数据观测时间跨度较大, 我们在对 J1634+2049 的宽波段 SED 分析前先检查它们是否受光变影响。从 2005 年 4 月 19 日开始 (MJD: 53469–56590), Catalina Sky Survey 对 J1634+2049 进行了 272 次测光观测。我们从 Catalina surveys Data Release 2 (CSDR2) 中获得数据, 并且把每天的测光数据做平均 (见图 3.1)。J1634+2049 在 V 波段长时标上显示

出 ~ 0.2 mag 的光变，不过这样幅度的光变对我们接下来的关于 SED 以及光谱的分析并没有很大的影响。

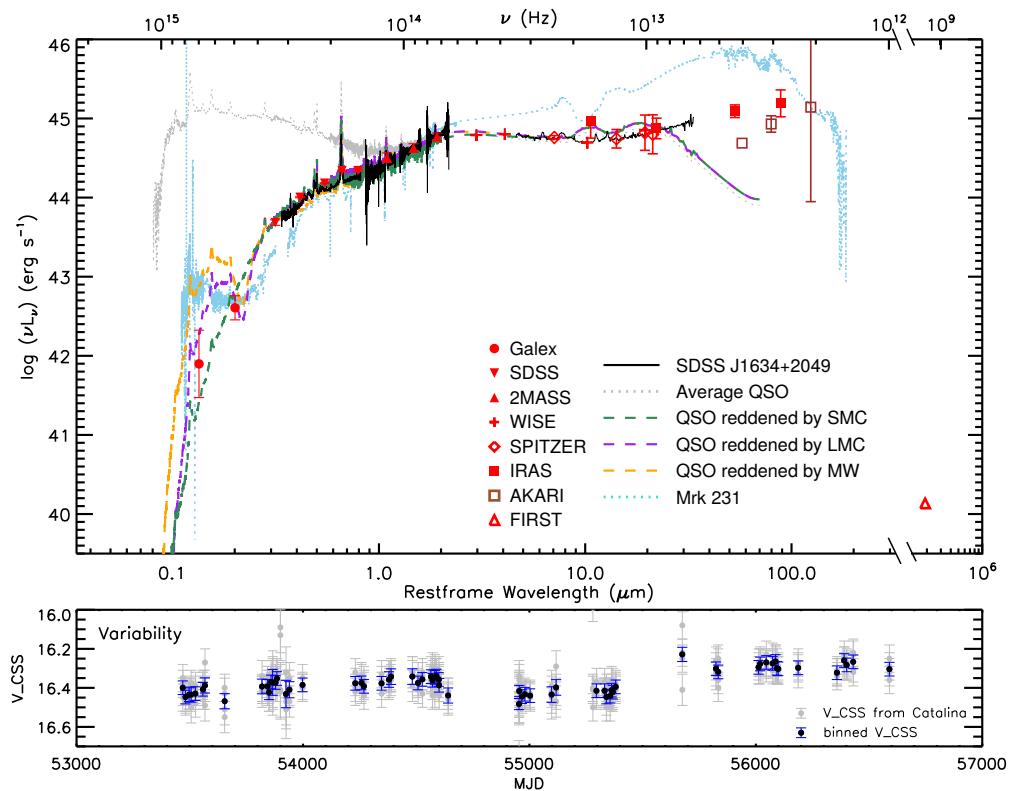


图 3.1 上图: J1634+2049 的宽波段 SED。各波段数据 (红色) 已经进行了银河系消光改正，并且转换到静止坐标系。黑色实线表示光学、近红外以及中红外光谱。灰色点线表示类星体平均谱 (具体见正文); 橙色、紫色以及绿色虚线分别表示用银河系 (MW)、大麦云 (LMC) 以及小麦云 (SMC) 消光曲线红化的类星体平均谱。浅蓝色点线表示 Mrk 231 的宽波段 SED (在 $2\mu\text{m}$ 处归一调整到 J1634+2049 的流量水平)。下图: J1634+2049 的 V 波段光变。灰色圆点代表从 Catalina Sky Survey 中得到的原始测光数据，蓝/黑色点表示同一天的原始测光点的平均值。

作为比较，我们把 QSO 的平均谱也画在图 3.1 的上方子图中。图中所用的 QSO 平均谱的紫外到光谱波段取自 [Vanden Berk et al. \(2001\)](#)，近红外波段取自 [Glikman et al. \(2006\)](#)，远红外波段取自 [Netzer et al. \(2007\)](#)。与平均谱相比，J1634+2049 的 SED 有很明显的红化；从 K 波段到中红外 ($5-10\mu\text{m}$)，J1634+2049 SED 与 QSO 平均谱相似；在远红外波段，J1634+2049 相对于 QSO 平均谱有明显过剩。我们分别用银河 (MW) 消光曲线 ([Fitzpatrick 1999](#)) ($E_{B-V} = 0.64$)，小麦云 (SMC) 消光曲线 ([Pei 1992](#)) ($E_{B-V} = 0.61$) 和大麦云 (LMC) 消光曲线 ([Misselt et al. 1999](#)) ($E_{B-V} = 0.66$) 对 QSO 平均谱进行红化以匹配 J1634+2049。MW 消光曲线取 $R_v = 3.1$ ，LMC 消光曲线取 $R_v = 2.6$ ([Weingartner & Draine 2001](#))。在光学和近红外波段，应用三种消光曲线所得结果的差别很小，因此很难区分哪种消光曲线更适用于 J1634+2049。但考虑到近紫外和远紫外的测光点（尽管没有紫

外光谱), LMC 消光曲线的结果与 J1634+2049 更接近。因此我们在下文的讨论中统一采用 LMC 型消光作为 J1634+2049 的星系消光类型。

Sanders & Mirabel (1996) 对于 8–1000 μm 的红外光度的定义为

$$\begin{aligned} f_{\text{ir}} &= 1.8 \times 10^{-14} (13.48f_{12} + 5.16f_{25} + 2.58f_{60} + f_{100}) [\text{W m}^{-2}] \\ L(8-1000\mu\text{m}) &= 4\pi D_L^2 f_{\text{ir}} [L_\odot] \end{aligned} \quad (3.1)$$

式中 f_{12} , f_{25} , f_{60} , f_{100} 分别是 IRAS 在 12、25、60 和 100 μm 处的流量密度, 单位为 Jy。我们根据这个定义利用 IRAS 的测光数据得到 J1634+2049 的红外光度为 $\log L_{\text{IR}}(L_\odot) = 11.96 \pm 0.03$, 这个值非常接近于 ULIRGs 的定义²。Schweitzer et al. (2006) 对于 PG 类星体的研究表明其大部分远红外光度是来自恒星形成过程而非 AGN 贡献。假设 J1634+2049 的红外光度全部由恒星形成贡献, 那么根据 Kennicutt (1998) 对于红外光度和恒星形成率的定标关系 $SFR(M_\odot \text{ yr}^{-1}) = 4.5 \times 10^{-44} L_{\text{IR}}(\text{erg s}^{-1})$, J1634+2049 的恒星形成率上限是 $SFR = 161 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ 。此外, 假定射电谱指数 α_r ($F_\nu \propto \nu^{\alpha_r}$) 为 -0.5, 根据 $P_{1.4\text{GHz}} = 4\pi D_L^2 f_{\text{int}} / (1+z)^{1+\alpha_r}$ 我们由 FIRST 1.4 GHz 射电观测数据计算得到 k 改正后的射电功率为 $P_{1.4\text{GHz}} = 9.14 \times 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ 。

此外, 在图 3.1 中, 我们也显示了 Mrk 231 的 SED。该 SED 由 Mrk 231 的不同波段的光谱合并而成。远紫外 (1150–1450 Å) 光谱由 *Hubble Space Telescope Cosmic Origins Spectrograph* (COS) 观测, 使用的光栅为 G130M; 近紫外 (1600–3200 Å) 光谱由 *HST* 上 *Faint Object Spectrograph* (FOS) 观测, 使用的光栅为 G190 和 G270³。光学 (3750–7950 Å) 光谱来自 Kim et al. (1995)。近红外光谱来自于我们在 2013 年 2 月 23 日利用 *Hale* 望远镜的 *TripleSpec* 对 Mrk 231 进行的近红外光谱观测。远红外光谱来自 Brauher et al. (2008)。我们对这些光谱进行了银河系消光改正, 并且根据测光数据来合并不同波段的光谱。在图 3.1 中, 我们将 Mrk 231 的 SED 乘以一个因子使其流量在 2 μm 处与 J1634+2049 相同。Mrk 231 红移为 $z = 0.04$, 是最近的 ULIRG 类星体。其红外总光度为 $3.6 \times 10^{12} L_\odot$, 热光度为 $\sim 1.5 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$, 恒星形成率为 $170 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ (Veilleux et al. 2013)。绪论中已经介绍了 Mrk 231 丰富的 AGN 外流吸收线, 包括电离气体吸收如 Mg II、Fe II、He I*、Ca II (e.g., Leighly et al. 2014; Rupke et al. 2002), 中性气体吸收如 Na I (Forster et al. 1995; Leighly et al. 2014; Rupke et al. 2002)、H I (Teng et al. 2013), 甚至分子气体吸收如 OH (Spoon et al. 2013)、CO (Feruglio et al. 2015)。Mrk 231 已经成为研究 AGN 在星系尺度的反馈、ULIRG 向正常类星体过渡阶段的原型。J1634+2049 与 Mrk 231 有许多共同之处, 如红外光度都很高, 都有中性 Na I 的吸

² 我们注意到 AKARI 的测光流量比 IRAS 的低。我们检查了 IRAS 和 AKARI 的数据质量, IRAS 四个波段 (12、25、60、100 μm) 的数据质量被标记为 1、3、3、2, AKARI 三个波段 (65、90、140 μm) 的数据质量为 1, 3, 1。“3”代表数据质量最佳, “2”代表数据质量基本可靠, “1”代表该流量只可作为上限。因此 IRAS 25、60、100 μm 的数据都是可靠的, AKARI 的 90 μm 的数据是可靠的。此外 IRAS 流量与 *Spitzer/IRS* 中红外光谱外推趋势比较一致, 因此我们使用 IRAS 流量来估计红外光度

³ 以上 *HST* 的光谱数据从 *HST* 数据库获得, <http://archive.stsci.edu/hst/search.php> 获得。

收等，因此我们将此二者的 SED 作对比。由图 3.1 可以看出，相比于 J1634+2049，Mrk 231 在近紫外到光学波段的连续谱更红。另一方面，Mrk 231 在中红外到远红外波段有更明显的过剩，且在 $9.7 \mu\text{m}$ 处有更深的硅酸盐吸收。

3.2.3 SDSS 图像分析

SDSS 于 2003 年 6 月 23 日对 J1634+2049 在 u, g, r, i, z 五个波段进行了测光观测。尽管 SDSS 对每个波段只曝光了 54 s，但是由于它采取了独特的漂移式扫描的观测模式 (Gunn et al. 1998)，使得其图像的平场非常精确。此外，SDSS 图像的视场较大，有利于确定星系周围的天光背景和误差，这决定了我们可以探测到的表面亮度极限。对于大多数星系而言，利用 SDSS 图像可探测到的表面亮度极限可以达到 $\mu_r \approx 27 \text{ mag arcsec}^{-2}$ (e.g., Erwin et al. 2008; Jiang et al. 2013; Pohlen & Trujillo 2006)。在 SDSS 图像中（见图 3.2），J1634+2049 呈椭圆形且没有旋臂特征，表明它是一个椭圆/椭球或者正向的 S0 星系；在星系的外围有一个低表面亮度的环状结构。

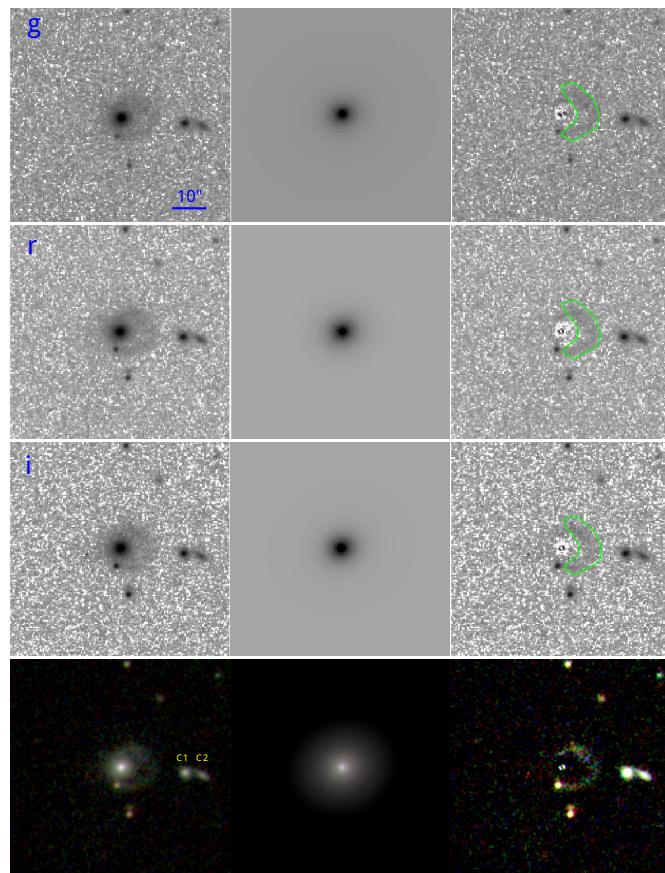


图 3.2 J1634+2049 的 g, r, i 波段以及三个波段合成的 SDSS 图像。最左边一列图像表示每个波段的 SDSS 的原始图像，中间一列表示最佳的 GALFIT 模型 (PSF + Sérsic)，最右边一列表示扣掉 GALFIT 模型后的残差。所有的图像均调整到一致方向：图像上方表示北，图像左边表示东。黑色实线表示 $10''$ 尺度，对应于实际物理尺度为 $\sim 23.1 \text{ kpc}$ 。绿色多边形区域表示星系外围的环状结构，在 GALFIT 拟合时被屏蔽掉。

我们利用 GALFIT (Peng et al. 2002, 2010) 实现 J1634+2049 的 AGN 和寄主星系的二维分解⁴。这不仅帮助我们了解 J1634+2049 的寄主星系性质，而且有助于随后的连续谱分解 (cf. Jiang et al. 2013)。AGN 核区的二维面亮度分布呈一个点源形状，可以用 PSF 来描述。利用 SDSS 图像视场大的优势，我们在 J1634+2049 的周围找到一颗没有饱和的亮星作为图像的 PSF。寄主星系的二维轮廓则由 Sersic (1968) $r^{1/n}$ 来描述，

$$\Sigma(r) = \Sigma_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}, \quad (3.2)$$

式中 r_e 表示有效半径， Σ_e 表示 r_e 处的表面亮度， n 表示 Sérsic 指数。常数 b_n 使得 r_e 以内的积分光度为星系积分到无穷远得到的总光度的一半。当 $n = 1$ 时，Sérsic 函数成为指数形式，一般用来描述盘结构； $n = 4$ 时 Sérsic 函数则表现为 de Vaucouleurs 律，一般用来描述星系核球结构。我们用 PSF + Sérsic 模型拟合 J1634+2049。首先我们将所有的参数放开拟合，然而这样得到的 Sérsic 指数 $n > 10$ ，这是不合理的。因此，我们把 Sérsic 指数分别固定到 $n = 4, 3, 2, 1$ 进行拟合 (见, Jiang et al. 2013)。除了 u 波段 (J1634+2049 在 u 波段由 AGN 成分主导)，其他四个波段的最佳拟合模型均为 $n = 4$ 。我们也试图在模型中增加盘成分即用 PSF + Sérsic + Disk 拟合方案，但是没有得到收敛的结果。在拟合中，天光背景设为自由拟合参量，同时我们把 J1634+2049 外围的环 (见图 3.2 中绿线包围的区域) 以及由 SDSS 或 Sextractor (Bertin & Arnouts 1996) 证认出来的其他天体 (如恒星、星系) 都屏蔽掉。 g, r, i 的最终拟合结果见表 3.2。图 3.3 表示 J1634+2049 在 r 波段表面亮度径向分布的最佳二维拟合。另外，由于 SDSS 光谱是光纤光谱，光纤的孔径为 $3''$ 。为了便于下文中的连续谱分解，我们也在图像上取相应的孔径分别得到 PSF 和 Sérsic 成分的流量。我们还得到了星系外围的环状结构以及伴星系在不同波段的流量，见表 3.2。

3.2.4 光学-近红外光谱分析

3.2.4.1 连续谱的分解

根据图 3.2，J1634+2049 是一个延展的源。§ 3.2.1 所述的 SDSS、DBSP、NIR 光谱是由不同仪器在不同时间观测的，因此所使用的狭缝/光纤孔径有所不同。然而我们发现这三条光谱的流量非常一致。特别是 DBSP 和 SDSS 光谱的公共部分几乎一致。由图 3.3 所示，J1634+2049 的表面亮度在 $r > 1''$ 迅速下降，因此 $r > 1''.5$ 区域的寄主星系在光谱中所占的比例很小。再者，尽管这些光谱是不同时观测的，但是考虑到由图 3.1 下栏所示的 Catalina V 波段光变监测数据所示，光变的幅度很小。

⁴利用 GALFIT 处理 SDSS 图像由已投稿文章 Liu et al. (2015b) 的合作者蒋凝承担。

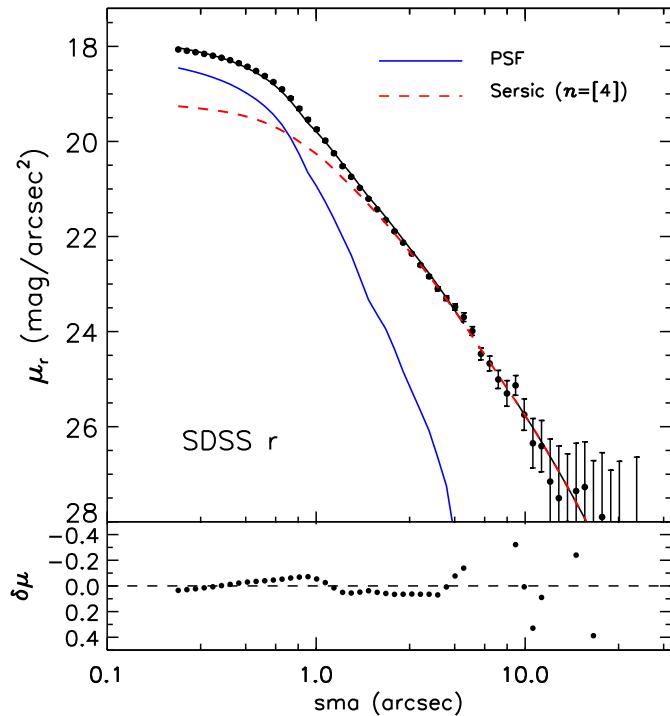


图 3.3 上图: J1634+2049 的 SDSS r 波段图像 GALFIT 拟合结果的一维表面亮度分布。PSF (蓝色实线) 代表 AGN 核区; $n = 4$ 的 Sérsic 函数 (红色虚线) 代表寄主星系。黑色实线表示 PSF + Sérsic 的拟合结果。黑色点以及误差棒表示观测数据及其 $\pm 1\sigma$ 误差。下图: 表示实际数据扣掉拟合模型后的残差。

表 3.2 GALFIT 二维分解结果

Band	Component	m^a	M^b	m (in $3''$) ^c	M (in $3''$) ^d	n^e	$r(''/kpc)^f$
SDSS g	PSF	18.68	-20.49	18.74	-20.43		
	Sérsic	17.95	-21.22	19.13	-20.04	4	2.41/5.56
	Ring	19.85	-19.32				
	C1	19.98	-19.15			3.32	0.55/1.26
SDSS r	PSF	18.16	-20.93	18.24	-20.85		
	Sérsic	17.02	-22.07	17.99	-22.07	4	1.82/4.20
	Ring	18.91	-20.18				
	C1	18.95	-20.10			2.46	0.49/1.13
SDSS i	PSF	17.51	-21.53	17.56	-21.48		
	Sérsic	16.52	-22.52	17.29	-21.75	4	1.21/2.80
	Ring	18.43	-20.61				
	C1	18.61	-20.40			2.34	0.45/1.03

^a 各成分的积分星等, 使用的是 Vega 星等系统。该星等没有经过银河系消光改正。星系环的星等从残差图像上计算出来。

^b 各成分经消光改正后的绝对星等。

^c 为了与 SDSS $3''$ 孔径的光纤光谱比较, 我们计算了各成分 $3''$ 孔径内的积分 Vega 星等。

^d 经消光改正后的 $3''$ 孔径内的绝对星等。

^e Sérsic 指数

^f 以角秒为单位的 Sérsic 成分的有效半径, 以及所对应的物理尺度 (kpc)

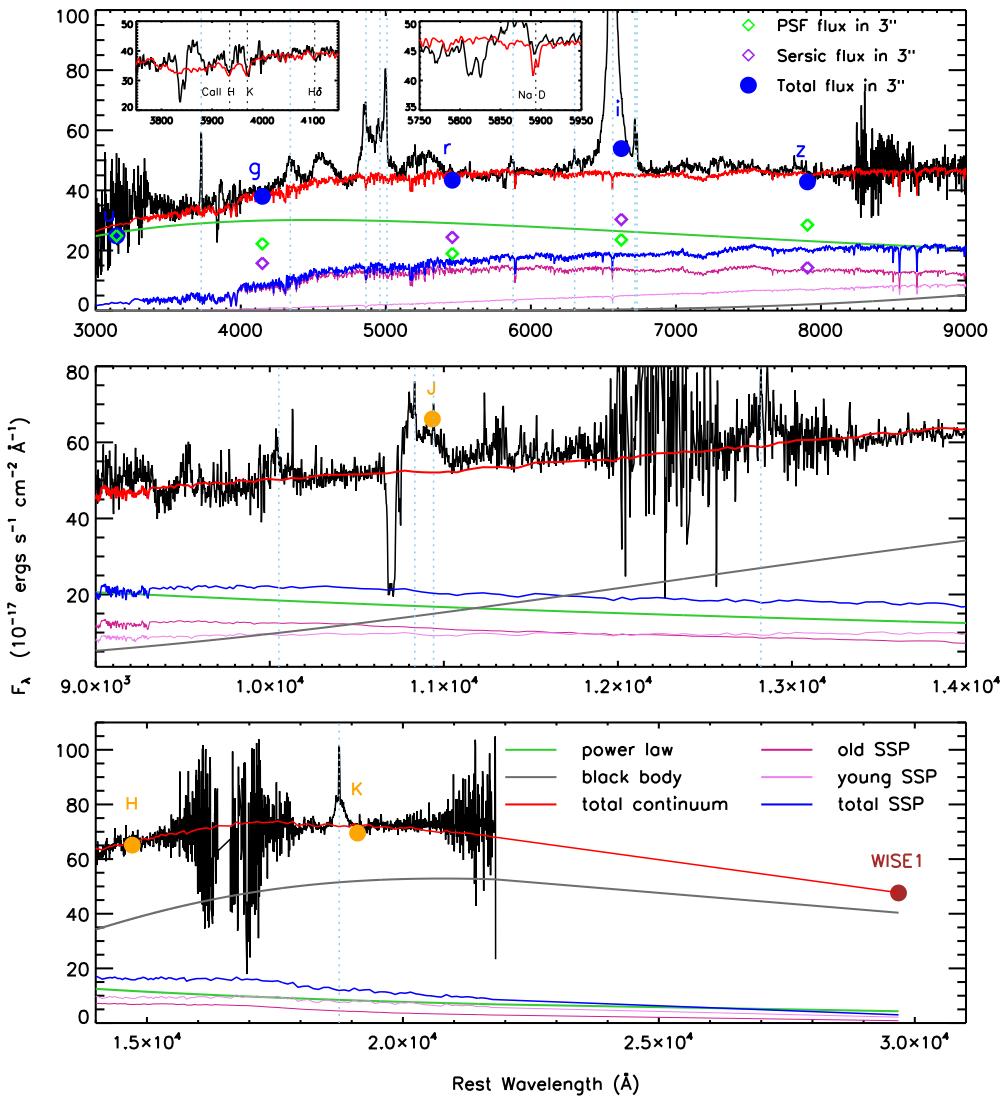


图 3.4 J1634+2049 静止坐标光谱 ($3000 \text{ \AA} - 3 \mu\text{m}$) 的详细分解。黑色实线表示由 SDSS ($3350 - 8150 \text{ \AA}$)，DBSP ($2900 - 9200 \text{ \AA}$) 以及 TripleSpec ($8600 - 2.2 \mu\text{m}$) 合并的观谱。其公共部分的光谱按照信噪比加权。蓝色圆点表示从 SDSS 图像上得到的 $3''$ 孔径内的 u 、 g 、 r 、 i 、 z 的测光 (见 § 3.2.3 以及 表 3.2)；绿色和紫色菱形表分别 $3''$ 孔径内分解得到的 PSF 和 Sérsic 成分；橙色和棕色圆点表示由 2MASS J 、 H 、 K 和 WISE W1 测光转换得到的流量。图中的光谱以及测光都经过银河系消光改正。绿色实线代表红化的核连续谱，使用的是 LMC 消光曲线， $E_{B-V} = 0.41$ ；灰色实线代表来自尘埃环内边缘的黑体谱，温度为 1394 K。紫红色实线代表年老星族 (9 Gyr) 的连续谱，淡紫色实线代表严重红化的年轻星族 (127 Myr; $E_{B-V} = 2.2$) 的连续谱，蓝色实线代表年轻和年老星族合起来的总恒星成分的流量。

图 3.4 展示了由 DBSP、SDSS 和 NIR 光谱合并后的光谱。三条光谱的公共部分根据 S/N 加权合并。首先我们先从整体上分析 J1634+2049 的 AGN 核成分和寄主星系的星光成分。根据表 3.2 的 g 、 r 、 i 波段 SDSS 图像的二维分解结果，在 $3''$ 孔径内 PSF (AGN) 成分分别占 g 、 r 、 i 波段辐射的 59%、44%、44%。 u 和 z 波段 SDSS 图像的响应较差，但仍然可以粗略估计 PSF 成分在 z 波段的贡献为 67%，在 u 波段近似为 100%。此外，根据二维分解的结果，Sérsic (寄主星系) 成分的颜色 ($g-r, r-i$) 为 (0.93, 0.5)，这表明寄主星系的主导星族年龄大于 10 Gyr (Bruzual & Charlot 2003)。J1634+2049 的光谱上有典型的 AGN 特征，如强的宽发射线、蓝移很大的宽吸收线。相比之下，除了有较弱的 Ca II H & K 和 Na I D 吸收线，星光成分几乎没有显著的特征。再者，远红外的高光度以及中红外 PAH 发射特征表明 J1634+2049 刚刚经历过剧烈的恒星形成活动，这暗示有年轻星族的存在。而紫外和光学连续谱显著消光以及较大的 Balmer 窄发射线减幅 (见表 3.4) 表明恒星形成区域是被尘埃严重遮蔽的。我们利用恒星形成率来粗略估计年轻星族受尘埃消光的下限。根据 § 3.2.5 所述的对 PAH 的测量，我们得到可靠的恒星形成率为 $141 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。而根据 $SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L(\text{H}\alpha)(\text{erg s}^{-1})$ (Kennicutt 1998)，我们推断 H II 区产生的 H α 光度为 $1.78 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 。然而观测到的 H α 窄发射线光度只有 $1.88 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ 。H α 窄发射线可能来源于 AGN 和 H II 区，假设它都来自于 H II 区，可得到 H II 区消光的上限为 $A_{H\alpha} = 4.9$ 。应用 § 3.2.2 所述的 LMC 消光曲线，可得到年轻星族的 $E_{B-V} \sim 2.6$ 。最后，前人的研究表明在 K 波段通常有起源于热尘埃的黑体辐射，温度在 $\sim 1500 \text{ K}$ 左右 (Barvainis 1987; Elvis et al. 1994; Glikman et al. 2006; Landt et al. 2011)。

根据以上对光谱各成分的分析，我们采用以下模型来分解连续谱：

$$F_{\lambda} = C_{\text{nucleus}}(E_{B-V}^{\text{nucleus}}, \lambda) \lambda^{\alpha} + C_{\text{bb}} B_{\lambda}(T_{\text{dust}}) + C_{\text{host},1} \text{SSP}(\geq 2 \text{Gyr}) + \\ C_{\text{host},2}(E_{B-V}^{\text{host}}, \lambda) \text{SSP}(\leq 1 \text{Gyr}), \quad (3.3)$$

式中 F_{λ} 代表静止坐标系下的观测光谱；核区连续谱的本征谱指数 α 固定为 -1.7， $B_{\lambda}(T_{\text{dust}})$ 表示尘埃的黑体辐射；年轻和年老的星族成分用 Bruzual & Charlot (2003) 合成的简单星族 (simple stellar population；简称 SSP) 模板来拟合。我们把 SSP 的金属丰度固定在太阳丰度 ($Z = 0.02$)。基于上一段的分析，我们选用 SSP 模板库中 30 个年龄在 50 Myr – 1 Gyr 的 SSP 拟合年轻星族，用 28 个年龄在 5 Gyr – 12 Gyr 的 SSP 拟合年老星族，并且在拟合中遍历所有的 SSP 模板组合以找到最佳匹配。我们调用 IDL 程序 MPFIT (Markwardt 2009) 进行上述模型拟合，将 C_{nucleus} 、 $C_{\text{host},1}$ 、 $C_{\text{host},2}$ 、 C_{bb} 、 E_{B-V}^{nucleus} 、 E_{B-V}^{host} 和 T_{dust} 作为拟合中的自由参数。如图 3.1 所示，利用 LMC 消光曲线进行 $E_{B-V} = 0.66$ 的红化后，QSO 平均谱可以较好地符合 J1634+2049，因此我们在拟合中设 E_{B-V}^{nucleus} 的初值为 0.66，且可在 0.3 – 0.8 之间自由变化。 E_{B-V}^{host} 的初始值设为 2.6，根据由窄线 Balmer 减幅定出的 E_{B-V} (见表 3.4)，我们令其在 1.0 – 3.0 之间变化。另外，根据 GALFIT 二维分解的结果，在 r 波段 ($\lambda_{\text{obs}} \sim 6165 \text{ \AA}$) 我们令幂律谱的比例在 0.4 – 0.6 之间浮动。

上述拟合最后得到 SSP 的年龄分别为 127 Myr 和 9 Gyr, $E_{\text{B-V}}^{\text{nucleus}} = 0.41$, $E_{\text{B-V}}^{\text{host}} = 2.2$, $T_{\text{dust}} = 1394 \text{ K}$ 。如图 3.4 所示, 核连续谱和星光成分的分解基本与二维分解的结果相符。此外, 起源于尘埃环内缘的热尘埃辐射的黑体谱在 K 波段 ($\lambda_{\text{obs}} \sim 2.2 \mu\text{m}$) 和 WISE W1 波段 ($\lambda_{\text{obs}} \sim 3.3 \mu\text{m}$) 应当是主导的辐射。因此我们将拟合结果外推到 W1, 发现与观测数据符合得很好。星光的两个 SSP 成分可以较好地符合 Ca II H & K 以及 H δ 吸收线, 但是高估了 Na I D 吸收线的强度。这种差异可能主要是由于 Na I D 吸收线附近的 He I $\lambda 5876$ 发射线的污染, 当然也不能排除来源于 SSP 分解的误差。

上述分解的不确定性主要在两个星族之间的分解。我们通过做以下检查来确定分解的可靠性。(1) 我们遍历 28 个年老 (5 Gyr–12 Gyr) SSP 模板, 对于每个年老星族模板根据最小 χ^2 找到最佳的年轻 (50 Myr–1 Gyr) 的 SSP 模板。我们发现这 28 个最佳的年轻星族的年龄在 80–210 Myr。(2) 同样地, 我们遍历 30 个年轻 SSP 模板, 对于每个年轻 SSP 模板根据最小 χ^2 找到最佳的年老 SSP 模板。这 30 个最佳年老 SSP 模板的年龄都在 8–11 Gyr。(3) 更进一步, 由于 Ca II H & K 和 H δ 吸收线是由年老星族主导的, 因此我们对吸收区域 (3900–4050 Å) 单独计算 χ^2_{abs} 以更好地限定年老星族的年龄。对于每个年轻 SSP, 最小 χ^2_{abs} 所对应的年老 SSP 年龄与 (2) 中的结果稍有出入, 但是年龄范围仍在 8–11 Gyr。由此可以看到这两个星族的年龄可以很好地分开。不过值得注意的是, 以上检查并没有考虑 $E_{\text{B-V}}^{\text{host}}$ 的设定, 消光的大小对于分解结果有较大影响。

3.2.4.2 发射线

本小节中我们来拟合 J1634+2049 的发射线特征。如图 3.4 所示, J1634+2049 的发射线主要在四个区域: H β + [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ + Fe II, H α + [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$ + [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$, P γ + He I $\lambda 10830$ 以及 P α (由于 P β 和 P γ 发射线的信噪比很低, 故没有考虑)。

P α 是氢 Paschen 线系中最强的发射线, 而且相对于其他氢发射线较为孤立。因此 P α 的轮廓可以用来做模板来拟合 P γ + He I $\lambda 10830$ 区域 (Landt et al. 2008)。H α 是氢 Balmer 线系中最强的发射线, 通常与 [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$ 混合, 且 H α 宽发射线的红端常受 [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$ 影响。但是因为 H β 和 H γ 发射线相比于 H α 较弱, 且受强的 Fe II 发射线丛的污染, 因此 H α 仍可作为拟合 H β 、H γ 发射线轮廓的模板 (e.g., Dong et al. 2008; Zhou et al. 2006)。因此我们首先拟合 P α 和 H α 发射线。由于 P α 更加孤立, 我们开始时期望用 P α 作为拟合 P γ 和 Balmer 线的模板。但我们经粗略比较后发现, J1634+2049 的 P α 和 H α 轮廓不完全一致, P α 宽线红端的线翼相对于 H α 有一定的过剩。我们首先对 P α 和 H α 分别进行拟合。

P α 发射线的宽成分和窄成分对比鲜明, 因此可以很容易地分解开。开始时, 我们用单高斯轮廓分别拟合 P α 的宽成分和窄成分; 同时我们用一阶多项式去微调局部连续谱。随后, 我们尝试将用双高斯轮廓拟合 P α 的宽成分, 如果拟合得

到的 χ^2 显著减小且用 F 检验得到 $p \leq 0.05$, 我们就采用双高斯拟合模型。对于 $\text{H}\alpha + [\text{N II}] + [\text{S II}]$ 区域, 同样地我们开始也用单高斯轮廓拟合 $\text{H}\alpha$ 、 $[\text{N II}]$ 和 $[\text{S II}]$ 的每个窄成分以及 $\text{H}\alpha$ 的宽成分。 $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 6583$ 双线的轮廓假定为一样, 其流量比固定为理论值 2.96。 $[\text{S II}]\lambda\lambda 6716, 6731$ 双线的轮廓在拟合中也假定为一样。同样地, 我们用一阶多项式调整 $\text{H}\alpha$ 区域的局部连续谱。随后, 我们也尝试用双高斯拟合 $\text{H}\alpha$ 的宽成分, 如果 χ^2 显著减小且 F 检验得到 $p \leq 0.05$ 则采用新的模型。[图 3.5](#) 中左边两栏表示用上述模型分别拟合 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 发射线。单高斯轮廓可以很好地拟合 $\text{P}\alpha$ 的窄成分; 对于 $\text{P}\alpha$ 的宽成分, 双高斯模型略好于单高斯模型。在 $\text{H}\alpha + [\text{N II}] + [\text{S II}]$ 区域, 单高斯轮廓可以很好地拟合 $\text{H}\alpha$ 的窄成分以及 $[\text{N II}]$ 、 $[\text{S II}]$ 窄发射线。对于 $\text{H}\alpha$ 宽成分, 单高斯和双高斯模型的 χ^2 分别为 7.89 和 1.94, 可见双高斯模型的拟合结果明显优于单高斯模型。尽管上述用单高斯模型拟合窄发射线、双高斯模型拟合氢线宽成分得到很好的结果(见[图 3.5](#)中的 b1 和 b2), 但是我们仍然注意到 $\text{P}\alpha$ 轮廓并不对称, 其蓝端有微弱的尖状过剩, 此外我们发现拟合得到 $\text{H}\alpha$ 的宽成分的中心波长有明显的蓝移。因此我们在 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的模型中添加一个高斯成分拟合这个“额外的”成分。[图 3.5](#) 中 c1, d1 和 c2, d2 分别展示了 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的拟合结果, 其 χ^2 相比于 b1、b2 有显著的减小。而且在没有绑定 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的新成分的中心波长的情况下, 我们得到二者的线心的位置却很一致, 分别为 935 km s^{-1} 和 974 km s^{-1} 。此外, 我们也尝试假设 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的宽成分和窄成分轮廓分别相同, 将其轮廓绑定起来拟合, 结果如[图 3.5](#)中 e1 和 e2 所示, 拟合效果不尽人意。根据以上不同模型的比较, 我们采用[图 3.5](#)中 d1 和 d2 所示的拟合方案。

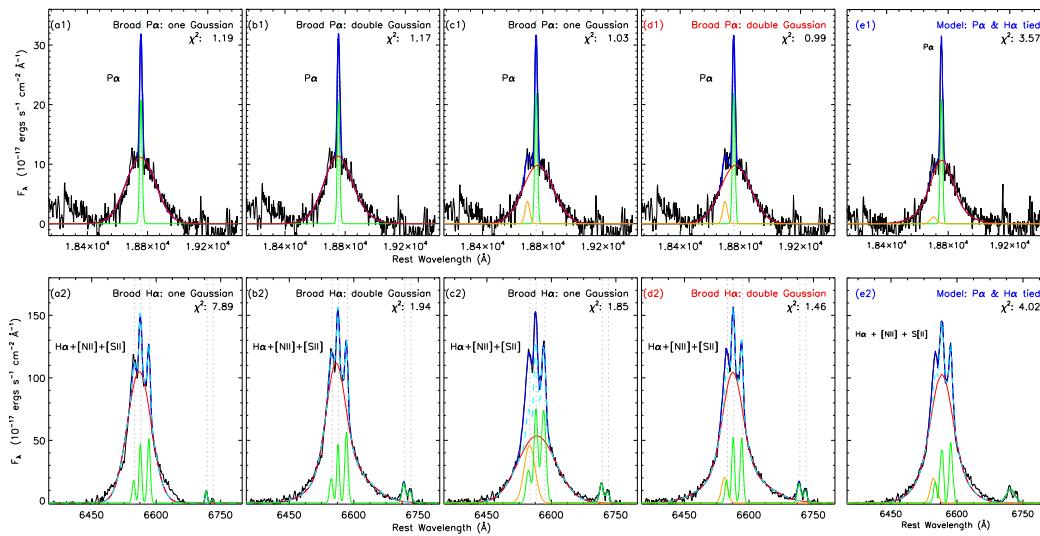


图 3.5 图 a、b、c、d 分别表示宽线单高斯、宽线双高斯、宽线单高斯 + 外流、宽线双高斯 + 外流模型拟合 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 发射线的结果(详细见 § 3.2.4.2)。所有模型中窄发射线轮廓都用单高斯。图 e 表示假设 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的宽成分和窄成分分别有相同轮廓的拟合结果。图 d 表示 $\text{P}\alpha$ 和 $\text{H}\alpha$ 的最佳拟合模型。

$\text{P}\gamma$ 发射线与 $\text{He I}\lambda 10830$ 发射线严重混合, 同时 $\text{He I}\lambda 10830$ 发射线的蓝端线

翼也受 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 吸收线的影响，这增加了谱线分解的难度。我们用 $\text{P}\alpha$ 作为模板拟合 $\text{P}\gamma$ 。具体而言，我们假定 $\text{P}\gamma$ 的窄成分、宽成分以及“额外”成分分别和 $\text{P}\alpha$ 相应成分的轮廓相同，在拟合中使得它们的线宽一致，中心波长间隔按照实验室波长的间隔锁定，只允许 $\text{P}\gamma$ 各成分的流量变化。 $\text{He I}\lambda 10830$ 发射线在蓝端也显示额外的成分，其峰值的蓝移与 $\text{P}\alpha$ 的类似。这个有明显尖峰的成分还有很大一部分 $\text{He I}\lambda 10830$ 的流量也是蓝移的。 $\text{He I}\lambda 10830$ 的电离势为 24.6 eV，是高电离发射线。与低电离宽发射线相比，高电离宽发射线如 C IV 除了有受黑洞引力束缚的开普勒转动成分以外，还有明显的外流成分 (Wang et al. 2011)。我们借鉴 Wang et al. (2011) 对 C IV 的处理方式，用 $\text{P}\alpha$ 作为模板拟合 $\text{He I}\lambda 10830$ 中的开普勒转动成分，用一个高斯轮廓拟合外流成分。在拟合时，我们仔细地屏蔽受 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 的吸收线影响的区域。最佳拟合结果如图 3.6 所示，约化 χ^2 为 1.15，

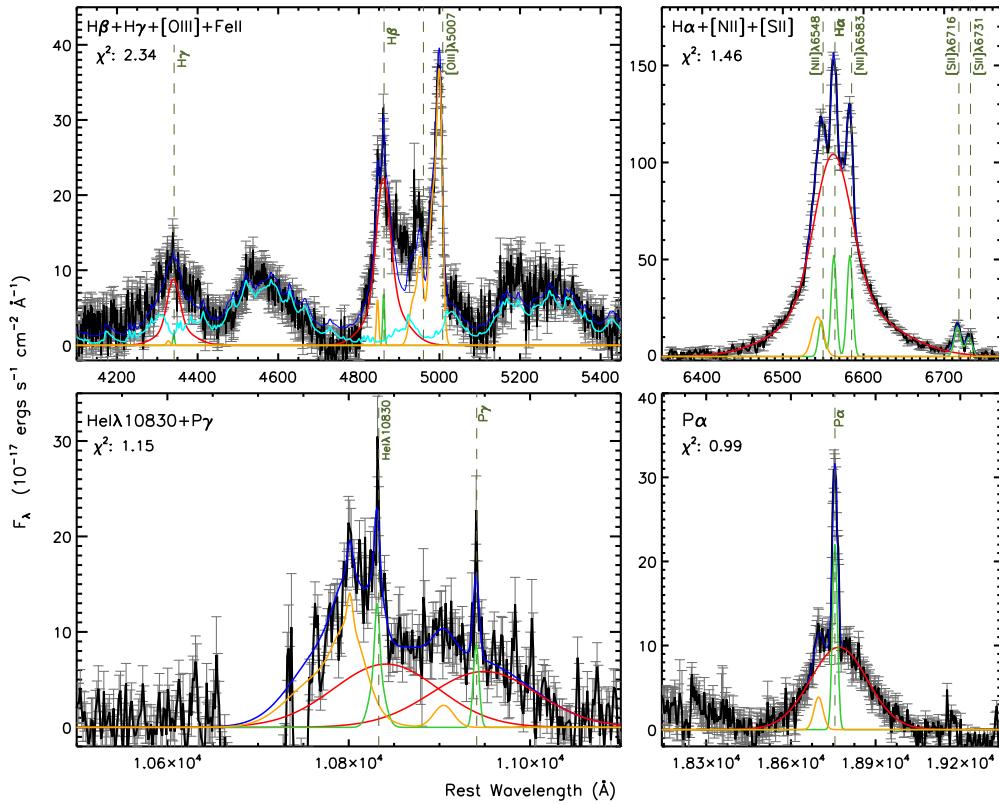


图 3.6 左上、右上、左下、右下四幅图分别表示 $\text{H}\beta + \text{H}\gamma + \text{Fe II}$ 、 $\text{H}\alpha + [\text{N II}] + [\text{S II}]$ 、 $\text{He I}\lambda 10830 + \text{P}\gamma$ 以及 $\text{P}\alpha$ 区域的发射线最佳拟合模型。各图中红色、绿色实线分别代表分解得到的宽发射线和窄发射线。橙色实线代表蓝移的外流成分。青色实线代表 Fe II 发射线。

在 $\text{H}\beta$ 以及 $\text{H}\gamma$ 区域 ($4,200 - 5050 \text{ \AA}$)， $\text{H}\beta$ 、 $\text{H}\gamma$ 和 $[\text{O III}]$ 发射线与光学 Fe II 发射线严重混合在一起。我们以 $\text{H}\alpha$ 发射线为模板拟合 $\text{H}\beta$ 和 $\text{H}\gamma$ ，在拟合中规定 $\text{H}\beta$ 、 $\text{H}\gamma$ 的宽成分和窄成分的线宽与 $\text{H}\alpha$ 一致，且将 $\text{H}\beta$ 和 $\text{H}\gamma$ 的中心波长相对于 $\text{H}\alpha$ 中心波长的间隔按照实验室波长的间隔锁定。我们在 $\text{H}\beta$ 发射线轮廓上看到明显的蓝移的成分，其蓝移与 $\text{P}\alpha$ 、 $\text{H}\alpha$ 以及 $\text{He I}\lambda 10830$ 一致。在拟合中

我们用单高斯拟合该成分。 $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ 双线的轮廓整体上有明显的蓝移。我们用双高斯轮廓分别拟合 $\lambda 5007$ 和 $\lambda 4959$ 并假定双线的轮廓一致。双线的流量比固定为理论值 2.98。我们按照 Dong et al. (2008) 的方法来拟合 Fe II 发射线。Dong et al. (2008) 采用的 Fe II 解析模板基于 (Véron-Cetty et al. 2004) 对 I Zw 1 的 Fe II 发射线的测量。该模板分为两套，一套是在 I Zw 1 光谱上表现为 Fe II 宽发射线，一套是在 I Zw 1 光谱上表现为 Fe II 窄发射线。拟合时假设每套 Fe II 发射线中的各线没有相对速度移动且相对强度固定。宽、窄 Fe II 发射线的线宽假定和 $H\beta$ 的宽、窄成分一致。图 3.6 中左上图显示了最佳拟合结果， χ^2 为 2.34。但是如图所示，假定 $H\beta$ 和 $H\alpha$ 的发射线轮廓完全一致的方案不能很好地拟合 $H\beta$ 区域， $H\beta$ 的实际轮廓在红端相对于 $H\alpha$ 轮廓有明显过剩，即所谓的 $H\beta$ 的“red-shelf”。这种现象在 Seyfert I 星系中较为常见 (e.g., Meyers & Peterson 1985; Véron et al. 2002)，过剩的流量可能来自 Fe II opt42 ($\lambda 4924, 5018, 5169$) 或来自于较强的 He I $\lambda 4922, 5016$ 宽发射线 (见 Véron et al. 2002)。

基于以上分析，我们发现 $P\alpha$ 、 $P\gamma$ 、 $\text{He I}\lambda 10830$ 、 $H\alpha$ 和 $H\beta$ 都有一个统一的蓝移为 $\sim 900 \text{ km s}^{-1}$ 的成分。此外， $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ 的整体轮廓都是蓝移的。我们也检查了其他发射线，发现 $\text{He I}\lambda 5876$ 、 $[\text{Ne III}]\lambda 3869$ 以及 $[\text{O II}]\lambda 3727$ 也有相似的蓝移成分，如图 3.7 所示。 $\text{He I}\lambda 5876$ 产生于氦三重态 $3^3D - 2^3P^0$ 的跃迁，而 $\text{He I}\lambda 10830$ 产生于氦三重态 $2^3P^0 - 2^3S$ 的跃迁。因此，我们假定 $\text{He I}\lambda 5876$ 的轮廓与 $\text{He I}\lambda 10830$ 一致，用 $\text{He I}\lambda 10830$ 的轮廓拟合 $\text{He I}\lambda 5876$ 。在 § 3.3.4.2 中我们将利用光致电离模型研究发射线外流的物理参数。以上发射线拟合得到的参数汇总在表 3.3 中。

利用氢的宽发射线、窄发射线和外流成分的线比 (如 $H\alpha/H\beta$) 可以分别定出相应发射区的尘埃消光。Dong et al. (2008) 得到 AGN 宽线区的 $H\alpha/H\beta$ 的本征值为 3.06。AGN 窄线区的 $H\alpha/H\beta$ 本征值通常取 3.1 (Gaskell & Ferland 1984; Halpern & Steiner 1983)。而 $P\alpha/H\beta$ 在 AGN 的不同环境下其本征值均接近于 Case B 得到的值 ~ 0.34 (Gaskell & Ferland 1984)。在表 3.4 中，我们列出了宽、窄发射线以及外流的 $H\alpha/H\beta$ 和 $P\alpha/H\beta$ 的测量值，相应的 E_{B-V} 是在假定 LMC 消光曲线 ($R_v = 2.6$) 情况下得到的。可以发现，宽发射线和外流受到的红化比较一致，而窄发射线受到的红化明显比前两者大很多，这表明窄发射线所在的区域的尘埃遮蔽情况更严重。

3.2.4.3 吸收线

J1634+2049 的光学-近红外光谱上有蓝移速度较大的 $\text{He I}^*\lambda\lambda 3889, 10830$ 、 Na I D 宽吸收线，在本小节中我们将对其进行测量。在测量吸收线之前，需要确定被离子吸收前的 AGN 光谱然后得到吸收线的归一化光谱。根据前人研究结果，目前所有被充分研究的 BAL 类星体的外流气体都在窄线区以内，因此我们首先把光谱中的窄发射线以及 § 3.2.4.1 中分解得到的星光成分减去。剩下的三个成分分别

表 3.3 发射线测量参数

Emission Line	Centroid ^a (Å)	FWHM ^b (km s ⁻¹)	Flux (10 ⁻¹⁷ erg s ⁻¹ cm ⁻²)
[O II] $\lambda 3727$ (narrow)	3727.39 \pm 0.21	491 \pm 5	184 \pm 3
[O II] $\lambda 3727$ (outflow)	3720.19 \pm 2.22	738 \pm 5	89 \pm 8
H γ (broad) ^c	4342.43	2955	487 \pm 25
H γ (narrow) ^e	4340.74	343	8 \pm 5
H γ (out)	4327.58	737	7 \pm 9
H β (broad) ^c	4863.52	2955	1378 \pm 14
H β (narrow) ^e	4861.63	343	42 \pm 3
H β (outflow)	4846.50	737	58 \pm 5
[O III] $\lambda 5007$	4992.80 \pm 0.32	1707 \pm 18	1043 \pm 12
[O I] $\lambda 6300^g$	6299.87 \pm 0.53	421	61 \pm 6
H α (broad)	6565.74 \pm 0.18	2955 \pm 12	8719 \pm 66
H α (narrow)	6563.18 \pm 0.03	343 \pm 5	427 \pm 8
H α (outflow)	6543.30 \pm 0.13	737 \pm 20	351 \pm 17
[N II] $\lambda 6583$	6583.05 \pm 0.03	370 \pm 4	458 \pm 6
[S II] $\lambda 6716$	6716.42 \pm 0.12	421 \pm 10	148 \pm 5
[S II] $\lambda 6731^g$	6730.80	421	106 \pm 4
HeI $\lambda 10830$ (broad)	10840.33 \pm 1.48	3803 \pm 44	994 \pm 53
HeI $\lambda 10830$ (narrow)	10831.33 \pm 0.45	178 \pm 12	162 \pm 25
HeI $\lambda 10830$ (outflow ⁿ)	10801.14 \pm 0.33	140 \pm 23	21 \pm 7
HeI $\lambda 10830$ (outflow ^b)	10782.34 \pm 0.33	1612 \pm 23	764 \pm 37
P γ (broad) ^d	10948.39	3803	874 \pm 34
P γ (narrow)	10940.50 \pm 0.31	204 \pm 18	69 \pm 10
P γ (outflow)	10907.00	575	50 \pm 11
P α (broad)	18768.64 \pm 0.20	3803 \pm 103	2484 \pm 79
P α (narrow)	18755.96 \pm 0.19	310 \pm 11	486 \pm 13
P α (outflow)	18697.69 \pm 1.64	575 \pm 75	146 \pm 16

^a 静止系真空波长。^b 该宽度已经扣除了仪器展宽。^c 采用 H α 宽成分的发射线轮廓。^d 采用 P α 宽成分的发射线轮廓。^e 采用 H α 窄成分的发射线轮廓。^f 采用 P α 窄成分的发射线轮廓。^g 采用 [S II] $\lambda 6716$ 的发射线轮廓。

表 3.4 不同成分的 Balmer 减幅

Decrement	Component	Value	E _{B-V}
H α /H β ^a	broad	6.33 \pm 0.08	0.64 \pm 0.01
H α /H β ^b	narrow	10.17 \pm 0.75	1.05 \pm 0.06
H α /H β ^b	outflow(narrow)	6.05 \pm 0.60	0.60 \pm 0.09
P α /H β ^c	broad	1.80 \pm 0.06	0.66 \pm 0.01
P α /H β ^c	narrow	11.57 \pm 0.90	1.39 \pm 0.03
P α /H β ^c	outflow(narrow)	2.52 \pm 0.35	0.79 \pm 0.05

^a 宽线区 H α /H β 的本征值为 3.06, 见 Dong et al. (2008).^b 窄线区 H α /H β 的本征值为 3.1, 见 Dong et al. (2008).^c AGN 环境下 P α /H β 的本征值为 0.34, 见 Gaskell & Ferland (1984).

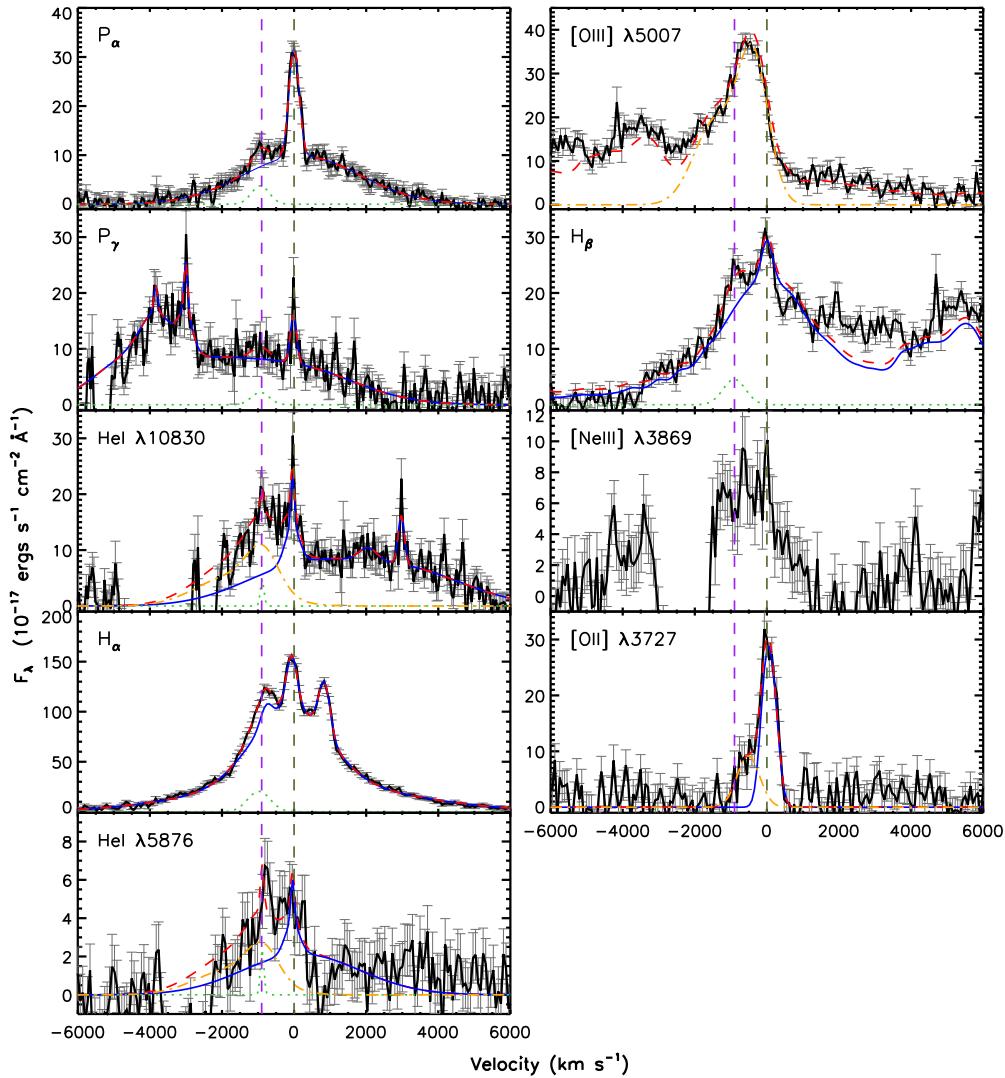


图 3.7 J1634+2049 各发射线的蓝移成分。图中，红色虚线代表每条发射线的拟合的总轮廓；蓝色实线代表各发射线中没有速度移动的部分；绿色点线和橙色点划线分别代表窄和宽的蓝移成分（见 § 3.2.4.2 和 § 3.3.4.2 的讨论）。紫色和橄榄色虚线分别表示 -900 km s^{-1} 和 0 km s^{-1} 位置。

为核连续谱、宽发射线以及起源于尘埃环内缘的热尘埃的黑体谱。 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 和 Na I D 处分别在近紫外和光学波段，不受热尘埃的黑体谱影响。因此不确定性较大的是 $\text{He I}^*\lambda 10830$ ，其归一化方式取决于吸收气体是否覆盖了宽发射线区或者尘埃环。我们注意到 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 吸收线的底部是平的，这表明该吸收线已经饱和，因此在归一化后， $\text{He I}^*\lambda 10830$ 底部的残余流量应当为 0。如图 3.4 所示，我们发现在扣除星光成分后， $\text{He I}^*\lambda 10830$ 的底部流量基本上为 0，因此我们推断吸收气体应该在尘埃环之外，并且采用这种归一化方案。

图 3.8 的左图中上、中、下三栏分别表示速度空间下的 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 和 Na I D 吸收线。在 SDSS 光谱中， $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线分成两个吸收槽，中心速度分别为 -4100 km s^{-1} （图 3.8 左中图的吸收槽 A）和 -3400 km s^{-1} （图 3.8 左中图的吸收槽 B），总体速度覆盖范围为 $-5000--2800 \text{ km s}^{-1}$ 。TripleSpec 光谱

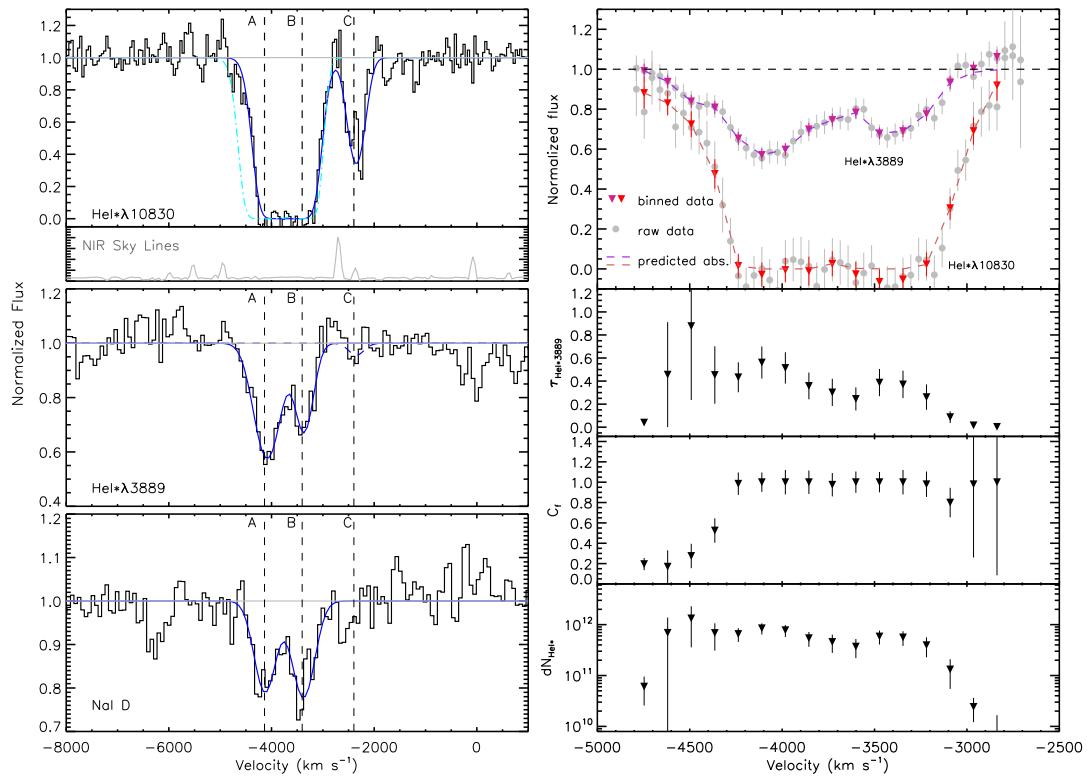


图 3.8 左图由上到下分别展示 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 、 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 和 Na I D 的归一化吸收线谱。图中蓝色实线代表用 Voigt 轮廓拟合各发射线的结果。左上图中青色点划线代表假定完全覆盖情况下由 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 轮廓推断的 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 轮廓形状。右图由上到下第一幅图展示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 的归一化谱（灰色点）以及 1σ 误差。红色和紫色三角分别表示 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 由原始归一化谱每三个点合并为一个点后的归一化谱。红色和紫色虚线表示用 § 3.2.4.3 中提到的方法定出覆盖因子 C_f 和光深 τ_{3889} 后计算出来的 $\text{He I}^*\lambda\lambda 10830, 3889$ 的归一化轮廓。下面三幅图分别表示 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的光深、吸收气体视线上对中心光源的覆盖因子 C_f 以及 He I^* 柱密度随着速度的变化。

上, $\text{He I}^*\lambda 10830$ 的吸收线吸收范围为 $-5000--2000 \text{ km s}^{-1}$, 也分为两个吸收槽(图 3.8 左上图的吸收槽 A+B 和 C)。§ 2.1 已经介绍, $\text{He I}^*\lambda\lambda 3889, 10830$ 吸收线是由氦三重态 2^3S 吸收光子向 2^3P 和 3^3P 态跃迁而产生, 因此二者应当有相同的速度结构。 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 的最强的吸收槽对应于 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的 A 和 B 吸收槽, 其平坦的底部表明它已经饱和。 $\text{Na I D}\lambda\lambda 5890, 5896$ 吸收线也主要分为两个成分, 其速度分别对应于 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收槽 A 和 B。中性钠的电离势较小, 容易被电离, 因此 Na I D 吸收线的存在暗示吸收气体的柱密度很大。 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 的吸收槽 C 在 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 和 Na I D 对应速度处只有很弱的特征。

我们用 Voigt 轮廓 (Carswell et al. 1984; Hjerting 1938) 拟合这些吸收线轮廓, 如图 3.8 蓝色实线所示。Voigt 轮廓使用 XIDL 软件包中的 x_voigt 程序来实现⁵。由于 $\text{He I}^*\lambda\lambda 3889, 10830$ 的光深 τ ($\propto \lambda f_{ik} N_{\text{ion}}$) 之比为 1:23.5, 故在完全覆盖的情况下二者的归一化吸收线谱关系为 $R_{10830} = R_{3889}^{23.5}$ 。图 3.8 左上图中青色虚线表示由 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收轮廓推断出的 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 轮廓。该轮廓的红端线翼与实际轮

⁵<http://www.ucolick.org/~xavier/IDL/>

廓符合地很好，但是蓝端线翼差距较大。这表明在吸收线低速端，吸收气体对于中心光源是完全覆盖的，但是在高速端只有部分覆盖。基于以上推理，我们尝试利用 $\text{He I}^*\lambda\lambda 3889, 10830$ 推断出吸收气体的覆盖因子。假设简单覆盖模型，即气体覆盖的部分是均匀覆盖的，则观测得到的归一化谱可表达为式 1.6。尽管 SDSS 光谱和 TripleSpec 光谱的分辨率不足以让我们精细地研究吸收线的速度轮廓，但是由此得到的 C_f 的趋势是可信的。因此我们把归一化吸收线谱上每三个点合并为一个点以提高信噪比，对合并后的点进行计算。我们采用 § 2.5.1 中详细介绍的方法得到每个速度处的 $\tau_{3889}(v)$, $C_f(v)$ 和 $dN_{\text{He I}^*}(v)$ ，结果如图 3.8 中右图所示。吸收气体的覆盖因子在 $v < 4300 \text{ km s}^{-1}$ 处接近 1，而在 $v > 4300 \text{ km s}^{-1}$ 处开始下降。在吸收线覆盖的速度范围内 $C_f(v)$ 平均为 0.82, $\log N_{\text{He I}^*}(\text{cm}^{-2}) = 15.01 \pm 0.16$ 。假设 Na I D 吸收线的覆盖因子轮廓与 He I* 吸收线一致，则可以得到 Na I 的柱密度为 $\log N_{\text{Na I}}(\text{cm}^{-2}) = 13.31 \pm 0.21$ 。

3.2.5 中红外光谱分析

图 3.10 展示了 J1634+2049 的中红外光谱，由图可见光谱上有明显的多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon 缩写为 PAH) 发射特征⁶，同时光谱谱型在长波处持续上升，与恒星形成星系相似⁷。在光谱上我们在 $9.7 \mu\text{m}$ 处没有看到明显的硅酸盐吸收特征，为此我们用 Spoon et al. (2007) 对于 $9.7 \mu\text{m}$ 硅酸盐吸收的定义定量测量其表观吸收强度，该定义如下

$$S_{\text{sil}} = \ln \frac{f_{\text{obs}(9.7\mu\text{m})}}{f_{\text{cont}}(9.7\mu\text{m})}, \quad (3.4)$$

式中 $f_{\text{obs}(9.7\mu\text{m})}$ 表示 $9.7\mu\text{m}$ 处观测的流量密度， $f_{\text{cont}(9.7\mu\text{m})}$ 表示 $9.7\mu\text{m}$ 处的连续谱流量密度。使用 Spoon et al. (2007) 所述的方法，我们用幂律谱形式在 $5.5 - 14.0 \mu\text{m}$ 之间插值以估计 $f_{\text{cont}(9.7\mu\text{m})}$ 。我们得到 J1634+2049 的 $S_{\text{sil}} \sim 0.01$ ，这表明这个源几乎没有硅酸盐吸收特征。有趣的是，J1634+2049 的 SED 以及氢发射线的减幅均表明该源的尘埃遮蔽很严重，而硅酸盐吸收与尘埃特征紧密联系。在 Spoon et al. (2007) 中图 1 (见图 3.9) 中所示的 $\text{EW}(\text{PAH } 6.2\mu\text{m})$ vs. S_{sil} 的平面上，星系分为对角线分支和水平分支。我们根据 J1634+2049 的测量信息 ($\text{EW}(\text{PAH } 6.2\mu\text{m}) = 0.050 \pm 0.003$, $S_{\text{sil}} \sim 0.01$) 将其添加进图 3.9 中 (见图中红色五角星)，J1634+2049 处于水平分支的 1A 分类中。Mrk 231 亦属于此分类，但是其 $S_{\text{sil}} \sim -0.65$ 比 J1634+2049 更强，而 $\text{EW}(\text{PAH } 6.2\mu\text{m}) \sim 0.01$ 比 J1634+2049 更弱。Spoon et al. (2007) 认为图中两个分支反映了这些星系中 AGN 核区的尘

⁶PAH 是直径一般为几埃、包含上百个碳原子的大分子，在中红外 ($3 - 19 \mu\text{m}$) 可以产生很强的发射线 (Abazajian et al. 2009; Leger & Puget 1984)。PAH 分子广泛存在于 H II 区周围的光致解离区 (photodissociation region；简称 PDR)，被附近的年轻恒星发出的紫外或光学光子加热后产生辐射，因此与正在进行或者不久前发生的恒星形成活动相联系 (Li & Draine 2001)

⁷对于恒星形成星系，中红外光谱蓝端以年老的、较冷的恒星星光主导；中红外中等波长处以较热的颗粒较小的尘埃辐射主导；中红外长波波段以冷尘埃的热辐射主导 (Smith et al. 2007)。

埃分布的不同。对角线分支的星系的核区尘埃较为均匀地分布在 AGN 周围，将 AGN 完全包裹，因此 AGN 的光透射出来产生很深的硅酸盐吸收；水平分支的星系的核区尘埃主要是成块的（clumpy），因此只产生很浅的硅酸盐吸收。具体到 J1634+2049，根据 Balmer 发射线线比（见表 3.4），我们发现窄发射线受到的红化比宽发射线以及连续谱的严重。这暗示我们该源的核区的尘埃可能是成块的或者核区并没有被尘埃完全包裹。此外，在其中红外谱上有较强的 [Ne III] 12.8 μm 和 [Ne III] 15.6 μm ，但是没有探测到更高电离度的 [Ne V] 14.3 μm 以及 O VI 25.89 μm ，这也暗示了 AGN 对红外光谱的贡献并不是很高。

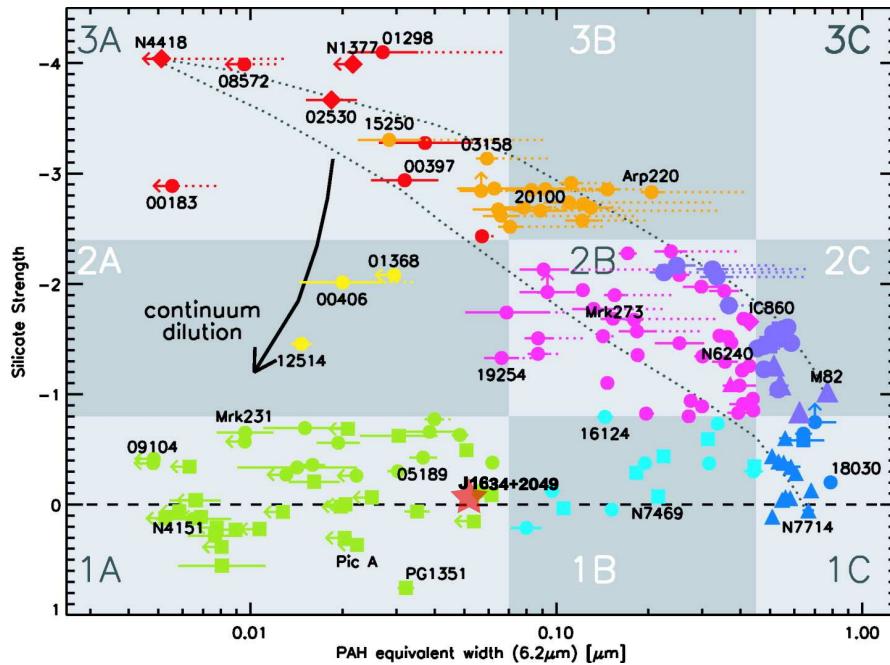


图 3.9 亮红外星系的 EW(PAH 6.2 μm) vs. 硅酸盐吸收强度诊断图。图中的星系被分为九个子类，在图中用不同的颜色标识。圆点表示 ULIRG 和 HyLIRG，三角形表示星暴星系，方块表示 Seyfert 星系和 QSO，菱形表示其他红外星系。本图取自 Spoon et al. (2007) 中图 1。我们把 J1634+2049 的测量结果（红色五角星）也标识在图中。

我们用中红外光谱分解程序 PAHFIT (v1.2) (Smith et al. 2007) 来拟合中红外光谱。根据上文的分析，AGN 对中红外的贡献不是很高，因此我们在拟合中假设产生吸收的尘埃与恒星形成区是充分混合的。图 3.10 展示了 J1634+2049 的中红外光谱以及由 PAHFIT 得到的最佳拟合模型。中红外各发射线的测量汇总在表 3.5 中。PAH 的光度为 $\log L_{\text{PAH}} (\text{erg s}^{-1}) = 43.64 \pm 0.02$ ，占这个源总红外光度的 1.2%。由 Farrah et al. (2007b) 给出的 PAH 光度与恒星形成率的定标关系

$$SFR(M_{\odot}, \text{yr}^{-1}) = 1.18 \times 10^{-41} L(\text{PAH } 6.2\mu\text{m} + \text{PAH } 11.2\mu\text{m}), \quad (3.5)$$

我们得到恒星形成率为 $SFR_{\text{PAH}} = 141 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 。根据 Rieke et al. (2009) 得到的 SFR 与 24 μm 光度的定标关系，对于 $L_{\text{IR}} \geq 10^{11} L_{\odot}$ 的星系有以下定标，

$$SFR = 7.8 \times 10^{-10} L(24 \mu\text{m}, L_{\odot}) (7.76 \times 10^{-11} L(24 \mu\text{m}))^{0.048}, \quad (3.6)$$

我们得到 $SFR_{24\mu m} = 143 M_\odot \text{yr}^{-1}$ 。由于 AGN 对于中红外的贡献较小，因此 $24\mu m$ 的光度基本上来自于恒星形成。 $SFR_{24\mu m}$ 与 SFR_{PAH} 非常一致，而且在 § 3.2.2 中由红外总光度估计的 SFR 的上限也不矛盾。因此我们在文章中采用由 PAH 估计的恒星形成率。

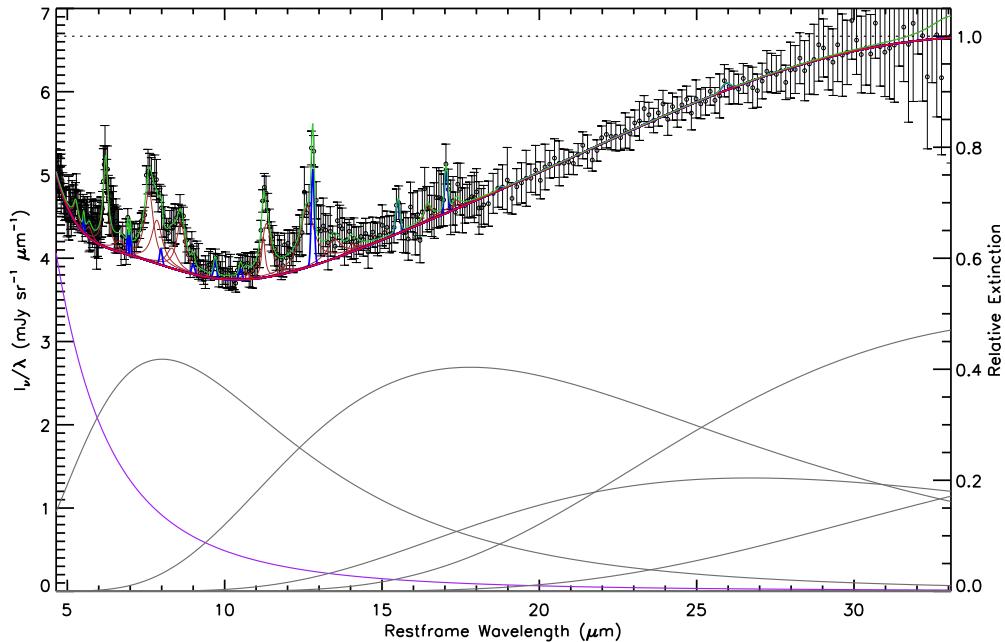


图 3.10 PAHFIT 对 J1634+2049 中红外光谱（静止坐标系 $5-33\mu m$ ）的拟合结果。黑色圆圈以及误差棒代表观测谱以及 1σ 误差；灰色实线表示分解得到的不同温度的尘埃热辐射；紫色实线表示分解得到的恒星光；红色实线代表尘埃 + 星光的总连续谱；棕色实线代表通过拟合而得到 PAH 发射线；蓝色实线代表原子和分子发射线。绿色实线表示上述各分解成分之和。该拟合模型采用的消光为假设恒星形成区的恒星、气体和尘埃充分均匀混合，如水平点线所示，对应于右侧轴。

表 3.5 中红外波段主要发射线测量结果

Emission Line	Intensity ($10^{-20} \text{ W cm}^{-2}$)	EW (μm)
PAH $6.2\mu m$	1.47 ± 0.09	0.050
PAH $7.7\mu m$ complex	3.06 ± 0.16	0.135
PAH $8.3\mu m$	0.57 ± 0.12	0.028
PAH $8.6\mu m$	1.08 ± 0.08	0.055
PAH $11.3\mu m$ complex	1.25 ± 0.08	0.085
PAH $12.0\mu m$	0.10 ± 0.09	0.007
PAH $12.6\mu m$ complex	1.44 ± 0.14	0.106
PAH $13.6\mu m$	0.43 ± 0.10	0.033
PAH $16.4\mu m$	0.13 ± 0.07	0.011
PAH $17\mu m$ complex	0.34 ± 0.25	0.029
[NeII] $\lambda 12.8\mu m$	0.32 ± 0.03	0.034
[NeIII] $\lambda 15.6\mu m$	0.12 ± 0.03	0.014

3.3 结果与讨论

3.3.1 黑洞质量与吸积率

基于 AGN 宽线区云团维里化假设, 黑洞质量可以通过 $M_{\text{BH}} = fR_{\text{BLR}}\Delta V^2/G$ 来估算, 其中 f 因子依赖于宽线区的几何结构、动力学以及倾角, R_{BLR} 表示宽线区的半径, ΔV 表示该半径处的云团的开普勒速度。对为数不多的 AGN 的反响映射 (Reverberation Mapping) 研究发现宽线区尺度与 AGN 光度有相关性, 即 $R_{\text{BLR}} - L$ 关系。对于单次观测的光谱, R_{BLR} 可以直接利用该关系由 AGN 光度推断出; 而 ΔV 通常用宽发射线的半高全宽来代替。利用表 3.3 中所列的 $\text{H}\alpha$ 宽线的测量结果, 我们选用 Xiao et al. (2011) 中公式 6 估计 J1634+2049 的黑洞质量。该公式是基于 Bentz et al. (2009) 得到的较新的 $R_{\text{BLR}} - L$ 关系 $R_{\text{BLR}} \propto L^{0.519^{+0.063}_{-0.066}}$ 并结合 Greene & Ho (2005) 得到的 L_{5100} 和 $L_{\text{H}\alpha}$ 的关系得到的, 具体形式如下,

$$\log\left(\frac{M_{\text{BH}}}{M_{\odot}}\right) = 6.40^{+0.09}_{-0.07} + (0.45 \pm 0.05) \log\left(\frac{L_{\text{H}\alpha}}{10^{42} \text{ ergs}^{-1}}\right) + (2.06 \pm 0.06) \log\left(\frac{\text{FWHM}(\text{H}\alpha)}{10^3 \text{ km s}^{-1}}\right), \quad (3.7)$$

我们首先把直接测量的 $\text{H}\alpha$ 宽线光度根据由宽线 Balmer 减幅得到的宽线的色余 $E_{\text{B-V}}$ 进行消光改正, 得到 $L_{\text{H}\alpha} = 1.5 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 。联合 $\text{FWHM}(\text{H}\alpha) = 2955 \text{ km s}^{-1}$, 中心黑洞质量估计为 $M_{\text{BH}} = 7.94 \times 10^7 M_{\odot}$ 。

利用 § 3.2.4.1 中得到的对 J1634+2049 核连续谱的最佳拟合, 我们可以估计 5100 Å 处的单色光度。根据核连续谱的色余的最佳拟合值 0.42, 假定 LMC 消光曲线, 得到消光改正后的 5100 Å 单色光度为 $L_{5100} = 2.47 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ 。作为检查, 我们也利用 Greene & Ho (2005) 得到的 $L_{5100} - L_{\text{H}\alpha}$ 关系通过 $L_{\text{H}\alpha}$ 反推 L_{5100} , 得到 $L_{5100} = 2.49 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$, 二者非常一致。利用 L_{5100} 的热改正关系 $L_{\text{bol}} \approx 9L_{5100}$ (Elvis et al. 1994; Kaspi et al. 2000), 得到 $L_{\text{bol}} = 2.22 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ 。根据由 $\text{H}\alpha$ 宽线估计的黑洞质量, 计算得到 J1634+2049 的爱丁顿光度为 $L_{\text{edd}} = 1.0 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ 。进而我们可以估计 J1634+2049 的爱丁顿比 (Eddington Ratio) 为 $L_{\text{bol}}/L_{\text{edd}} = 0.22$ 。此外, 基于以上热光度, 根据式 1.11 计算出黑洞吸积率为 $0.4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。

3.3.2 寄主星系

对 J1634+2049 的 SDSS 图像二维分解结果 (见 § 3.2.3) 表明 J1634+2049 的寄主星系是一个早型星系。连续谱分解结果 (§ 3.2.4.1) 表明该星系由年龄为 $\sim 9 \text{ Gyr}$ 的年老星族主导, 其质光比为 $M/L_V \approx 5.2 M_{\odot}/L_{\odot,V}$ (Bruzual & Charlot 2003)。我们将分解得到的年老星族卷积 Joson V 波段透过曲线得到该成分在 V 波段的光度 $L_V = 9.24 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$, 进而导出寄主星系的质量 $M_{\text{host}} = 1.34 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。

对 J1634+2049 SED 和中红外光谱的分析以及对其紫外到近红外连续谱的分解都表明这个源不久前或者正在发生剧烈的恒星形成活动, 并且新形成的年轻星族被尘埃严重地遮蔽。在光学图像上, 我们很难看到任何恒星形成的迹象。根

据紫外到近红外连续谱分解，在 5100 \AA 处年轻星族的成分占连续谱总体辐射的比例 $\lesssim 5\%$ 。假设LMC消光，通过连续谱分解拟合得到其色余为 $E_{B-V} \approx 2.2$ 。年轻星族的星光被如此严重地消光，因此我们只能通过中红外的PAH发射线和很高的远红外光度推测年轻星族的存在。我们注意到由氢窄发射线测量得到的减幅大于宽发射线以及外流的减幅，这表明窄发射线区受到的尘埃遮蔽比AGN宽线区以及外流气体严重（见表3.4）。这揭示了J1634+2049中尘埃分布的一些线索。由于窄发射线既可能来自AGN的窄线区，也可能来自HII区，因此我们首先通过BPT图（Baldwin et al. 1981; Kauffmann et al. 2003a; Kewley et al. 2006）来判定光学波段观测的窄线的来源。由表3.3所列的测量结果，光学窄发射线的线比如下： $\log(H\beta/[O\text{ III}]\lambda 5007) \approx 0.86^8$ ， $\log([N\text{ II}]\lambda 6583/H\alpha) \approx 0.03$ ， $\log([S\text{ II}]\lambda\lambda 6716, 6731/H\alpha) \approx -0.13$ ，和 $\log([O\text{ I}]\lambda 6300/H\alpha) \approx -0.85$ 。根据BPT图，J1634+2049被划分为Seyfert星系，表明其光学窄发射线主要来自AGN环境，而来自HII区的窄发射线则由于尘埃遮蔽被严重地消光了。如我们所知，近红外波段受到尘埃消光的影响应该小于光学波段，我们猜测Pa窄发射线中可能有相当比例来自HII区，接下来我们试图估计这个比例。根据BPT图的诊断，我们假定H β 窄线全部来自AGN窄线区，利用根据窄线H α /H β 推出的色余 $E_{B-V} = 1.05$ （见表3.4），消光改正后的H β 流量为 $1.3 \times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}\text{ \AA}^{-1}$ 。在AGN环境中，Pa/H β 的比值基本接近于其Case B情况 ~ 0.34 （Gaskell & Ferland 1984）。因此，AGN贡献的（未被消光的）Pa的流量为 $4.4 \times 10^{-15}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}\text{ \AA}^{-1}$ 。同时，我们用H α /H β 得到的AGN窄线区的色余 E_{B-V} 改正Pa估计Pa的未被消光的总流量为 $7.3 \times 10^{-15}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}\text{ \AA}^{-1}$ 然而由于HII区的消光远大于AGN窄线区，用此色余改正导致HII区贡献的流量被低估，因此这里估计的Pa未被消光的总流量只是一个保守估计值。由此，我们可以推断Pa中来自AGN贡献的比例的上限为61%，即超过39%的流量是由恒星形成活动贡献的。

3.3.3 星系环和伴星系

§3.2.3中已经提到，从SDSS图像上看在J1634+2049的西侧有两个弱的小星系（见图3.11(a)中C1和C2）。它们距离J1634+2049中心的投影距离为 $18''.5$ 和 $19''.1$ ，在红移 $z = 0.1293$ 处分别对应于35.7和44.0 kpc的实际物理距离。我们用丽江高美古2.4 m望远镜上的YFOSC对这两个星系以及J1634+2049通过转动狭缝的方式同时进行光学光谱观测（详细见§3.2.1中的描述）。图3.11(b)展示了YFOSC拍摄的J1634+2049以及C1的光学光谱。由于C2星系太弱，我们没有得到有效的光谱。图3.11(b)的上栏显示的是J1634+2049的YFOSC光谱（黑色）和SDSS光谱（灰色）的对比，二者的主要特征都基本对齐，这表明YFOSC光谱的波长定标是可靠的，这对于接下来确定C1的红移非常重要。图3.11(b)的

⁸ 由于[O III] $\lambda 5007$ 的发射线轮廓有整体蓝移（见图3.7），但是其他窄发射线如H β 、[N II]等并没有蓝移。因此我们在这里只计算了[O III] $\lambda 5007$ 发射线轮廓中 $-500 - 500\text{ km s}^{-1}$ 范围内的流量，这个区域正对应于H β 的发射线轮廓范围。

中栏显示 C1 的光学光谱及其测光。由图可见 SDSS 的测光数据与光谱符合很好，表明其流量定标也是可靠的。C1 的光谱上有星光吸收特征但没有发射线，其连续谱在蓝端较低，表明它是个以年老星族主导的早型星系。为了确定它的红移，我们用 SWIRE 光谱模板库 (Polletta et al. 2007) 中的星系模板去匹配观测谱。经过粗略比较，我们采用 5 Gyr 的椭圆星系模板。由于光谱没有明显的发射线和吸收线特征，我们只能采用网格搜寻的方法来决定红移，过程如下。我们设定红移的搜寻网格范围是 $0.11 < z < 0.15$ ，以 0.0001 为间隔，共 500 个格点。在每个格点下，星系模板根据所给的红移调整到观测者坐标系，并且根据 C1 的银河系消光色余给星系模板以消光。接着我们用红化的星系模板拟合 C1 的光谱并且计算出相应的 χ^2 。用以上方式我们得到了 $\delta\chi^2$ (即 $\chi^2 - \chi^2_{\min}$) 随着红移格点的变化曲线，如图 3.11(b) 的下栏所示。 χ^2 的最小值所对应的红移为 $z = 0.1276$ 。根据 $\delta\chi^2$ 的分布，红移的 1σ 误差为 0.0004。J1634+2049 的红移为 $z = 0.1293$ ，因此 C1 和 J1634+2049 非常有可能存在动力学联系，二者在视线方向 (LOS) 的速度差为 $\approx 451 \text{ km s}^{-1}$ 。为了估计 C1 的星系质量，我们也用 Joson V 波段透过曲线得到该成分在 V 波段的光度 $L_V = 7.8 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ 。虽然 C1 的光谱和 5 Gyr 的星系模板符合得很好，但是考虑到光谱的信噪比较低，真实的情况仍然有很大不确定性。此外，C1 测光的颜色 ($g-r, r-i$) 为 (1.03, 0.34)，和 J1634+2049 寄主星系的颜色比较接近，因此 C1 的星系年龄很可能大于 9 Gyr。对于太阳丰度下，年龄介于 5–12 Gyr 的星族，其质光比 M/L_V 介于 3.36 到 6.68 之间 (Bruzual & Charlot 2003)。因此 C1 的恒星质量范围为 $7.3 \times 10^9 - 1.45 \times 10^{10} M_\odot$ 。

图 3.2 展示 J1634+2049 外围有一个明显的椭圆形的环状结构。其长轴为 $\sim 14''$ ，对应于 32.3 kpc；短轴为 $\sim 12''.7$ ，对应于 29.4 kpc。J1634+2049 的寄主星系并不在环的中心。§ 3.2.3 中我们测量了环在各个波段的总流量（见表 3.1），其颜色 ($g-r, r-i$) 为 (0.94, 0.48)，与 J1634+2049 的寄主星系的颜色 (0.93, 0.5) 几乎一致，这暗示环上的星族成分与寄主星系的星族可能一致。综上，我们把从 J1634+2049 分解出的星光成分调整到环的测光流量的水平，用 Joson V 波段透过曲线卷积调整后的光谱得到 V 波段光度 $L_{V,\text{ring}} = 1.9 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ ，进而计算出环的恒星质量 $M_{\text{ring}} = 2.9 \times 10^{10} M_\odot$ 。

目前有以下几种理论解释环星系的形成和演化：(1) 盘星系和质量至少为盘星系 1/10 的子弹星系发生迎面碰撞 (e.g., Lynds & Toomre 1976; Mapelli et al. 2008; Mapelli & Mayer 2012; Smith et al. 2012; Theys & Spiegel 1977; Toomre 1978)；(2) 在没有伴星系的情况下，Lindblad 共振作用可以在核区周围形成一个光滑的环 (Buta et al. 1999)；(3) AGN 吸积导作用形成极环星系 (Bournaud & Combes 2003)。J1634+2049 的环状结构以及其伴星系 C1 支持第一种模型，即星系外围的环产生于不久前 C1 与 J1634+2049 发生的迎面碰撞。而环与寄主星系极为相似的颜色也支持这种形成历史。数值模拟研究表明星系环产生于星系碰撞后引起的径向传播的密度波，由恒星或冷气体或二者混合形成 (Lynds & Toomre 1976;

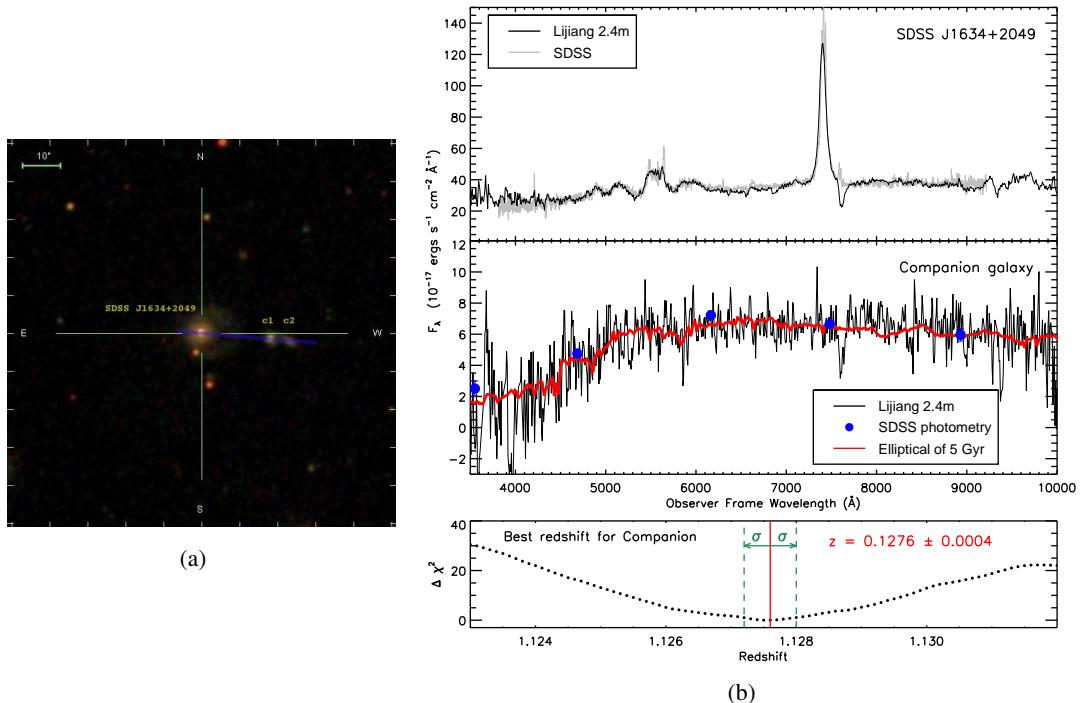


图 3.11 (a) J1634+2049 以及其伴星系 C1、C2 的 SDSS 图像。图中蓝线表示丽江 2.4 m 望远镜观测时所放置的狭缝位置, PA=86°。(b) 上图展示使用丽江 2.4 m 望远镜观测的 J1634+2049 的低分辨光谱 (黑色)。同时我们也显示了其 SDSS 光谱 (灰色) 作为比较。中图展示使用丽江 2.4 m 望远镜观测的 C1 星系的光谱 (黑色)。蓝色圆点代表 C1 的 SDSS u 、 g 、 r 、 i 、 z 的测光。红色实线代表从 SWIRE 光谱模板库 (Polletta et al. 2007) 中选择的 5 Gyr 的椭圆星系光谱模板。下图展示的是用网格搜寻的方法给椭圆星系模板不同的红移拟合 C1 光谱的 $\delta\chi^2$ 。如图所示, C1 的最佳红移为 $z = 0.1276 \pm 0.0004$ 。

Mapelli et al. 2008; Mapelli & Mayer 2012; Theys & Spiegel 1977; Toomre 1978, e.g.,)。J1634+2049 星系偏离环的中心, 这种构形属于 Theys & Spiegel (1977) 提出的 RN 型分类。数值模拟研究表明这种偏心环可以由星系间偏离中心的碰撞产生 (e.g., Lynds & Toomre 1976; Mapelli & Mayer 2012; Wu & Jiang 2015), 且环的椭率与星系碰撞的倾角相关 (见 Wu & Jiang 2015 中公式 7)。J1634+2049 星系环的椭率 $\epsilon \equiv 1 - b/a \approx 0.09$, a 和 b 表示星系环在天球上投影的长轴和短轴。由此可见, 星系环的椭率很小, 可以推测星系碰撞的倾角也较小。此外, 碰撞参数 (即子弹星系与盘星系之间的最小距离) 对于形成的环的形态有重要的影响: 碰撞参数越大, 最后形成的环的不对称性越大, 且环的中心更偏离星系; 当碰撞参数过大时, 将不会形成环而是形成旋臂结构 (见 Toomre 1978 图 5)。综上, 我们可以推测 C1 与 J1634+2049 碰撞时稍微有些偏离 J1634+2049 的对称轴, 而且其速度方向与 J1634+2049 的对称轴夹角不大。

接下来我们来讨论 C1 和 J1634+2049 的质量比。数值模拟研究显示子弹星系与盘星系的质量比应当大于 1:10 (Hernquist & Weil 1993; Horellou & Combes 2001)。然而根据 C1 和 J1634+2049 的光度推出来的星系质量比只有 ~ 0.05 –

0.1 的计算。但是此处我们要考虑的是星系的动力学质量。目前，在观测以及数值模拟方面都有关于早型星系的暗物质比例的详细研究 (e.g., Deason et al. 2012; Wu et al. 2014)。一般而言，对于早型星系，星系质量越大，在较大半径处 (如 5 倍有效半径 r_e) 的暗物质比例越大。对于恒星质量为 $\sim 2 \times 10^{11} M_\odot$ 的早型星系，其暗物质比例为 $\approx 0.6 - 0.8$ 。J1634+2049 的总质量由此估计为 $\approx 0.5 - 1.0 \times 10^{12} M_\odot$ 。一直以来，人们普遍认为矮星系是暗物质主导的，然而矮星系的暗物质的比例目前还不是非常确定。由于伴星系 C1 的光度仅略高于矮椭圆星系的光度 ($3 \times 10^9 L_\odot$)，我们通过较大半径的将矮星系的恒星质量/暗物质晕质量关系 (见 Miller et al. 2014 中图 6 以及 Wu & Kroupa 2015 中图 4) 粗略估计 C1 的暗物质比例。C1 的总质量估计为 $\sim 3 \times 10^{11} M_\odot$ 。C1 与 J1634+2049 的动力学质量比 $> 1 : 10$ ，因此 C1 与 J1634+2049 发生碰撞产生观测到的星系环这个假设是合理的。

前面已经提到，J1634+2049 和 C1 之间的径向速度差为 $\sim 451 \text{ km s}^{-1}$ 。然而由于二者之间垂直于视线方向上的相对速度很难估计，因此二者之间的实际 (三维) 相对速度并不清楚。然而 C1 到 J1634+2049 星系中心在天球上的投影距离大于星系环的半径，因此可以推断 C1 相对于 J1634+2049 在天球上的投影速度比星系环扩散的投影速度大。我们借用研究较充分的环星系 Auriga's wheel 的结果，该星系环的扩散速度为 $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ (Smith et al. 2012)。该星系与 J1634+2049 有相似之处：环中心的星系都是椭圆星系；星系质量接近，由颜色以及光度推出的 Auriga's wheel 的椭圆星系质量为 $\sim 1.1 \times 10^{11} M_\odot$ ；环的中心都偏离环中的椭圆星系。如果 J1634+2049 的环的扩散速度与 Auriga's wheel 的星系环一致的话，则 C1 与 J1634+2049 的相对速度应当 $\gtrsim 493 \text{ km s}^{-1}$ ，进而可以简单估算 C1 到 J1634+2049 的三维距离为 $r_h \sim 80 \text{ kpc}$ 。这样 C1 与 J1634+2049 的碰撞时标可以粗略估计为 $t_{\text{cross}} \approx r_h/v_{3D} \approx 160 \text{ Myr}$ 。由于动力学摩擦并没有考虑在内，因此实际时标应当小于这个值。

3.3.4 外流气体的物理性质

在近紫外到近红外光谱上 (静止坐标系 3000–21000 Å)，J1634+2049 显示有的很强蓝移的 He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 和 Na I D 宽吸收线。同时，在 Pa、H α 、H β 以及 He I $\lambda\lambda 5876, 10830$ 上我们均探测到速度为 $\sim -900 \text{ km s}^{-1}$ 的发射线蓝移成分，而高电离窄发射线 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ 和 [Ne III] $\lambda 3869$ 的谱线轮廓则表现出整体蓝移的情况。在本小节中，我们利用光致电离模型来分析确定吸收线外流以及发射线外流的物理参数。

3.3.4.1 吸收线外流

产生 He I* 吸收线和 Na I D 吸收线的物理条件非常不同。由 § 2.1 的介绍可知 He I* 是由 He $^+$ 复合到亚稳态 He I 2^3S 态，He I 2^3S 态吸收光子跃迁到三重态更高

能级而产生的。氦原子被电离为 He^+ 所需的光子能量至少为 24.6 eV，因此 He I^* 的产生需要电离度较高的物理环境。 Na I D 产生于中性钠原子的吸收。而钠原子的化学性质非常活跃，且其电离势仅为 5.14 eV，因此很容易被电离。在典型的 AGN 环境下， Na I D 吸收线很难出现。只有在外流云团中很厚、温度较低的部分，由于靠近电离光源的气体和尘埃把能量较高的光子都滤掉，中性钠才能存在。在 § 3.2.4.3 中我们对 He I^* 以及 Na I D 吸收线的主要部分吸收线槽 A+B（见图 3.8）进行了测量，分别得到该吸收槽的离子柱密度 $\log N_{\text{He I}^*}(\text{cm}^{-2}) = 15.01 \pm 0.16$ 和 $\log N_{\text{Na I}}(\text{cm}^{-2}) = 13.31 \pm 0.21$ 。另一方面，低电离吸收线 Ca II H \& K 吸收线通常与 Na I 一起出现， Ca II H \& K 吸收线产生于 Ca^+ ，由能量 $h\nu \geq 6.11 \text{ eV}$ 的光子电离 Ca 原子产生而被 $h\nu \geq 11.8 \text{ eV}$ 的光子电离。 $N_{\text{Na I}}/N_{\text{Ca II}}$ 经常作为 ISM 云团的尘埃耗散的指标 (e.g., Ben Bekhti et al. 2012; Kondo et al. 2006; Welsh et al. 1990)，这是因为钠元素在尘埃中的耗散很小，而钙元素的尘埃耗散则很严重 (Savage & Sembach 1996)。在 J1634+2049 的紫外光谱上我们没有发现明显的 Ca II H \& K 吸收线。这很可能是由于 Ca 元素的尘埃耗散比 Na 元素严重。我们以 Na I D 吸收线的轮廓为模板对 Ca II H 处的归一化谱进行拟合，估计 Ca II 的柱密度上限为 $\log N_{\text{Ca II}}(\text{cm}^{-2}) = 12.9$ 。此外，我们也没有探测到明显的 Balmer 吸收线。光致电离模型计算显示，Balmer 吸收线出现在密度较大的物理条件下 ($n_{\text{H}} \geq 10^8 \text{ cm}^{-3}$) (Ji et al. 2012; Leighly et al. 2011)，因此即使没有探测到 Balmer 吸收线也非常有用，可以给 J1634+2049 的吸收线气体的密度设一个上限。用与估计 Ca II 柱密度同样的方法，我们得到 $n = 2$ 的 H I 的柱密度上限为 $\log N_{\text{H}(n=2)} = 12.6 \text{ cm}^{-2}$ 。

我们用 *Cloudy* (c13.03; Ferland et al. 1998) 计算光致电离模型来确定 He I^* 和 Na I D 吸收线的物理条件。与 § 2.4 中的模型几何以及参数设置基本一致，我们假设一团数密度为 n_{H} ，总柱密度为 N_{H} 的平板状均匀气体，被类星体的连续谱照射。类星体的 SED 采用 § 2.4 中所述的 UV-soft SED。以上的分析表明吸收气体中混合着尘埃，因此在模型中需要考虑尘埃的影响，包括尘气比和某些金属元素的尘埃耗散。目前 J1634+2049 的有限的紫外数据倾向于 J1634+2049 的尘埃消光类型是 LMC 型消光（见 § 3.2.2），这需要今后的紫外光谱来确认，但在模型计算中我们沿用该结果。在模型计算中我们采用 *Cloudy* 中自带的 ISM 尘埃模型，假设外流云团的总元素丰度（气体 + 尘埃）为太阳丰度，因此外流云团中的气体丰度随尘气比而变化。然而由于 *Cloudy* 的尘埃模型并没有考虑气相中和耗散到尘埃中的元素的质量守恒。为了保证 *Cloudy* 模型的外流气体的丰度为太阳丰度，我们手动地根据尘埃中的元素设定气体中相应元素的丰度。但是，*Cloudy* 的 ISM 尘埃模型中只有 C、Si、O、Mg 以及 Fe 元素，为了使得模型中包括 Ca 和 Na 元素，我们同时也使用了 *Cloudy* 自带的金属元素耗散模型，以气体中的 Ca 和 Na 按照剩余 10^{-4} 和 0.2 比例耗散。除了元素丰度，尘气比 ($A_{\text{V}}/N_{\text{H}}$) 也是需要考虑的参量。根据 Balmer 宽、窄发射线线比 ($\text{H}\alpha/\text{H}\beta$)、假设 LMC 型消光曲线 ($R_{\text{V}} = 2.6$)，分别得到 A_{V} 为 1.62 和 2.65。我们简单地取其中值，令模型中云

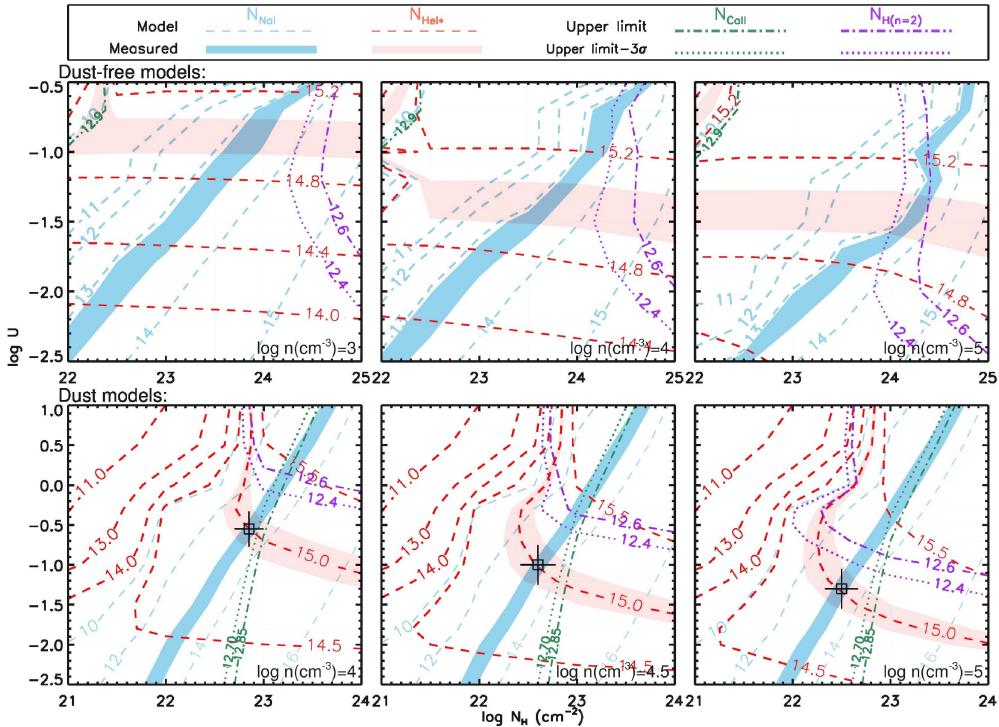


图 3.12 J1634+2049 吸收线外流的光致电离模型，模型假定太阳丰度。上面三幅图展示了模型计算初始时使用的无尘埃模型，下面三幅图表示经过迭代的最佳尘埃模型。图中红色和蓝色虚线分别表示模型输出的 He I^* 和 Na I 的柱密度。红色和蓝色阴影区域分别代表从 J1634+2049 中测量的 $N_{\text{He I}^*}$ 和 $N_{\text{Na I}}$ 及其 1σ 误差范围所对应的模型中的参数 ($N_{\text{H}}-U$) 区域。紫色和绿色点划线分别代表 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 的柱密度上限。与此对应，紫色和绿色点线分别代表 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 柱密度上限减去 3σ 误差，以表示 $\text{H}(n=2)$ 和 Ca II 柱密度上限的置信水平并指示其柱密度在 $N_{\text{H}}-U$ 平面上减小的方向。图中空心方块以及误差棒代表光致电离确定的外流的最佳参数。

团的消光 $A_V = 2$ 。吸收气体的总柱密度 N_{H} 可以通过将模型与实际测量的 Na I D 、 He I^* 柱密度以及没有探测到的 Ca II 和 Balmer 吸收线比较在参数空间中限定。

我们的计算从无尘埃 (dust-free) 的模型开始，以提供一个初始的吸收气体总柱密度 N_{H} 。然后我们计算出初始的尘气比 A_V/N_{H} 并将这个值放到第二轮考虑尘埃的 *Cloudy* 模型计算中。考虑尘埃的 *Cloudy* 模型的配置如前文所述，然后得到新的 N_{H} 。之后我们用新的 N_{H} 放入下一轮 *Cloudy* 计算中，直到 N_{H} 收敛。在每次迭代中，*Cloudy* 计算网格如下： $-2.5 \leq \log U \leq 1.0$ ， $3 \leq \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \leq 7$ ， $21 \leq \log N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) \leq 25$ 。

图 3.12 表示在 $N_{\text{H}}-U$ 平面上，*Cloudy* 模拟得到的离子柱密度与这些离子的测量值的比较。上三图表示初始的无尘埃模型，下三图表示最佳的尘埃模型。在无尘埃模型中，我们没有考虑 $N_{\text{Ca II}}$ ，因为真实情况中 Ca 有尘埃耗散导致测量值远小于该模型预测值。即使如此，如图所示，该模型已经可以很好地限制气体的密度范围为 $10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。同时我们得到初始柱密度为 $N_{\text{H}} \sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ，初始尘气比为 $A_V/N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-2}$ ，该值为大麦云尘气比 ($2 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-2}$, Weingartner & Draine 2001) 的 1.7%。下三图表示迭代计算收敛的尘埃模型 (黑色方块)，合适

的参数 ($\log n_{\text{H}}$, $\log N_{\text{H}}$, $\log U$) 分别为 $(4, 22.85 \pm 0.15, -0.55 \pm 0.22)$, $(4.5, 22.6 \pm 0.18, -1.0 \pm 0.25)$ 和 $(5, 22.5 \pm 0.17, -1.3 \pm 0.25)$ 。

3.3.4.2 发射线外流

前面提到过 J1634+2049 也表现出发射线外流特征, 如图 3.7 所示, 这些蓝移表现出以下特点: (1) J1634+2049 发射线中的复合线 $\text{P}\alpha$ 、 $\text{P}\gamma$ 、 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 以及 $\text{He I} \lambda \lambda 5876, 10830$ 都有蓝移为 $\sim -900 \text{ km s}^{-1}$ 的成分, 这些线的蓝移成分均表现为线宽较窄 (改正仪器展宽后, $\text{FWHM} \lesssim 650 \text{ km s}^{-1}$) 的尖峰状轮廓。特别是 $\text{H}\beta$ 和 $\text{He I} \lambda 10830$ 的蓝移成分与 0 速度处的起源于宽线区以及窄线区的谱线成分可以很好地分开而不依赖于分解。(2) 禁线 $[\text{O II}] \lambda \lambda 3727, 3729$ 、 $[\text{O III}] \lambda \lambda 4959, 5007$ 和 $[\text{Ne III}] \lambda 3869$ 也显示出蓝移的谱线。其中高电离线 $[\text{O III}]$ 双线以及 $[\text{Ne III}]$ 都表现出谱线轮廓整体蓝移, 而 $[\text{O II}]$ 双线则表现为一般的较弱的蓝翼 (blue wing)。而更低电离度的禁线如 $[\text{N II}]$ 、 $[\text{S II}]$ 以及 $[\text{O I}]$ 则没有表现出明显的蓝移成分。值得注意的是这些禁线都没有如以上复合线的蓝移成分的轮廓, 这表明复合线中的蓝移成分对应于密度较大的区域。(3) 对于高电离复合线 $\text{He I} \lambda \lambda 5876, 10830$ 除了前面所述的窄而尖的蓝移为 $\sim -900 \text{ km s}^{-1}$ 的轮廓, 还有 $\text{FWHM} \approx 1600 \text{ km s}^{-1}$ 的速度更大且强度也更大的外流成分。同时高电离禁线的外流也有蓝移速度大、线宽更宽的特征, 且其速度也与 $\text{He I} \lambda \lambda 5876, 10830$ 的外流成分接近。根据 $[\text{O III}]$ 的临界密度 ($n_e \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$), 可以推知这个外流成分的气体密度较小且电离度较高。

由上面的分析可知 J1634+2049 的发射线外流的速度结构比较复杂。这里我们只考虑在高电离线中出现的较强且较宽的外流, 这个外流成分的强度明显大于复合线中出现的外流成分。为了定量地确定上述发射线外流气体的物理性质, 我们利用 § 3.3.4.1 中计算的 *Cloudy* 光致电离模型与观测的发射线强度比相比较。如前所述 J1634+2049 的光谱受尘埃消光严重影响, 因此我们最好使用波长位置接近的发射线条比以减少尘埃消光影响。此外, 两条发射线的电离势应当有一定差距, 这样线比对电离势比较敏感。综上考虑, 我们使用线比 $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I} \lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。这里 $[\text{O III}]$ 的流量只考虑速度 $\leq -500 \text{ km s}^{-1}$ 以蓝的部分 ($\pm 500 \text{ km s}^{-1}$ 内的流量代表 $[\text{O III}]$ 的维里成分, 见脚注 8 中的说明) 以得到可靠的 $[\text{O III}]$ 外流的流量, $\text{He I} \lambda 10830$ 的外流流量见表 3.3。我们在 $\text{H}\beta$ 和 $\text{P}\gamma$ 中没有探测到相应成分的宽发射线外流, 这也许是因为 $\text{H}\beta$ 和 $\text{P}\gamma$ 的该外流成分太弱。我们用 $\text{H}\beta$ 和 $\text{P}\gamma$ 上窄的外流成分的流量作为宽发射线外流成分的流量上限, 因此 $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I} \lambda 10830/\text{P}\gamma$ 的下限分别为 12.75 ± 1.12 和 15.28 ± 3.44 。我们首先考虑无尘埃模型, 从该模型中输出模型预测的 $[\text{O III}] \lambda 5007$ 、 $\text{H}\beta$ 、 $\text{He I} \lambda 10830$ 以及 $\text{P}\gamma$ 并计算线比。图 3.13 显示无尘埃模型输出的 $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I} \lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。紫色实线和绿色实线分别为观测得到的 $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I} \lambda 10830/\text{P}\gamma$ 的下限, 两条线围成的区域即为

外流发射线气体可能的参数范围。由图可见，发射线外流气体的柱密度范围为 $\log 19 < N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) < 23$ 。尽管柱密度 N_{H} 变动范围很大，但是气体的密度 n_{H} 却只在 $4 \leq \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \leq 6$ 范围内变动，与 § 3.3.4.1 中确定的吸收线外流气体密度非常接近。由此我们推测发射线外流和吸收线外流气体实际上是同一气体。基于上述推测，我们换用 § 3.3.4.1 中的最佳尘埃模型（见 图 3.13 中的下三图）。图 3.14 显示截止柱密度为 $N_{\text{H}} = 10^{22.5} \text{ cm}^{-2}$ 和 $N_{\text{H}} = 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 的尘埃模型结果，其柱密度范围与吸收线外流的结果相对应。如图所示，发射线外流的合适的参数范围为 $3.5 \lesssim \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \lesssim 5.5$ 、 $-1.8 \lesssim \log U \lesssim -0.7$ ，与吸收线外流的参数范围非常接近，支持发射线外流和吸收线外流为同一气体的假设。结合吸收线物理参数的结果，最终确定的外流气体的物理参数范围是 $4 < \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \lesssim 5$ ， $22.5 \lesssim \log N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) \lesssim 22.9$ ， $-1.3 \lesssim \log U \lesssim -0.7$ 。

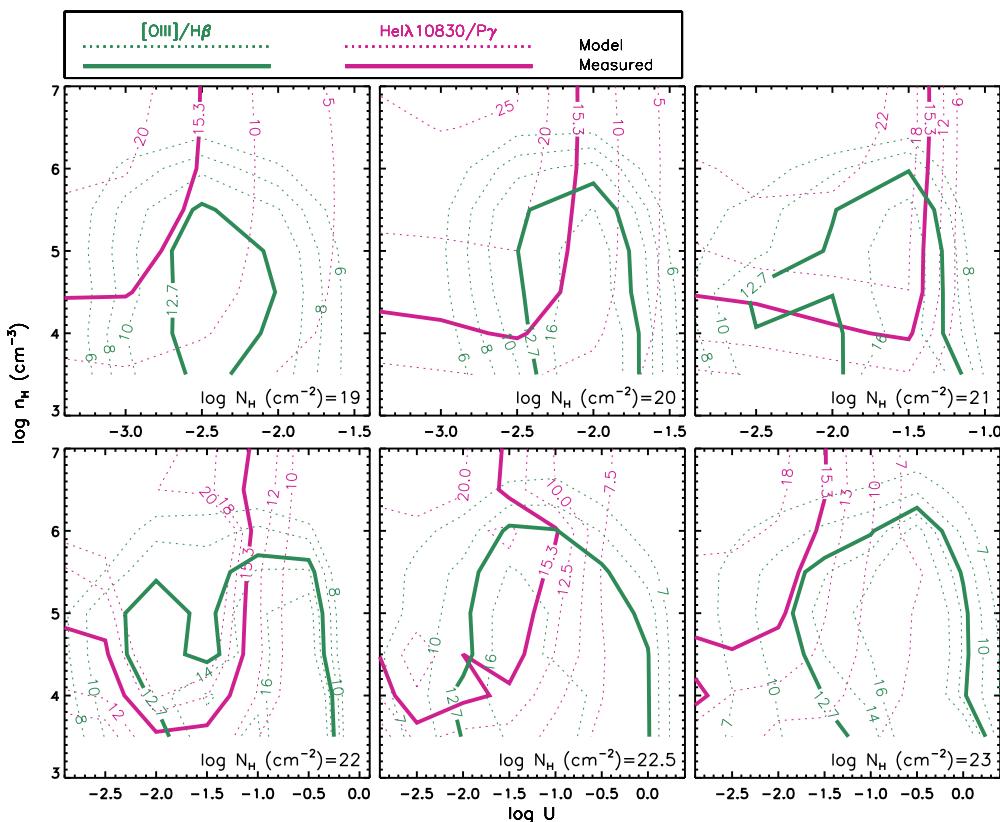


图 3.13 J1634+2049 的发射线外流的光致电离模型，假定太阳丰度且不考虑尘埃。不同的子图代表不同截止柱密度的模型结果。绿色和紫红色虚线代表模型输出的 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。绿色和紫红色实线代表 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 测量的上限（见 § 3.3.4.2），绿色和紫红色实线所围成的封闭区域为 J1634+2049 发射线外流可能的参数区域。

3.3.4.3 外流的动能率以及质量损失率

根据 § 3.3.4.1 和 § 3.3.4.2 的分析，我们发现吸收线外流气体的密度和发射线外流气体的密度非常接近且电离参数范围也基本一致，因此我们推测蓝移的吸

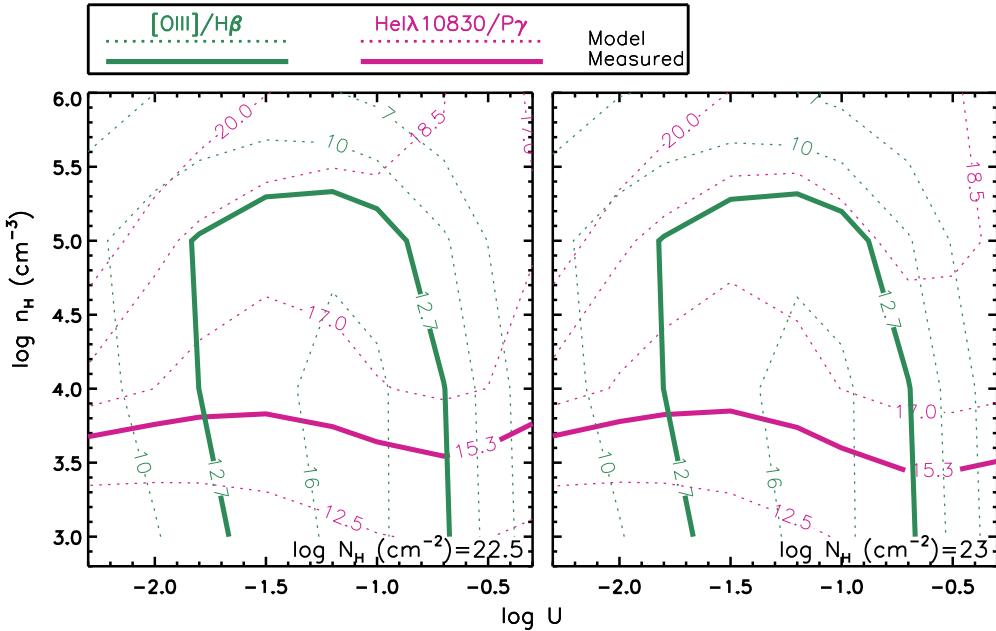


图 3.14 由图 3.12 的最佳尘埃模型直接输出的发射线线比 $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ 和 $\text{He I}\lambda 10830/\text{P}\gamma$ 。各图例与图 3.13 相同。

收线和发射线可能起源于同一团外流气体。如果是这样，那么我们可以利用发射线和吸收线各自的优势较为准确地确定外流气体的动能率。具体而言，吸收线指示的是我们视线方向上的外流气体的物理性质，可以准确地确定视线方向上的速度（梯度）以及总柱密度 (N_{H})；发射线指示的是外流气体整体的性质，可以更好地确定外流气体对于中心电离光源的覆盖因子。

首先，我们先确定外流气体与中心电离光源的距离 R 。根据电离参数的定义（见式 1.8），确定 R 需要知道电离参数 U 、密度 n_{H} 以及中心光源所发出的可电离氢原子的光子数 Q_{H} 。光致电离模型确定的气体密度为 $\log n_{\text{H}} \sim 4\text{--}5 \text{ cm}^{-3}$ ，电离参数为 $-1.3 \lesssim \log U \lesssim -0.7$ 。为了估计 Q_{H} ，我们把 UV-soft SED 根据 WISE W1 的流量调整到 J1634+2049 的光度水平（见图 3.15），然后在 SED 上对 $h\nu \geq 13.6 \text{ eV}$ 的光子积分，最终得到电离光子数 $Q_{\text{H}} = 4.2 \times 10^{55} \text{ photons s}^{-1}$ 。我们对整个 SED 的能量积分，得到其热光度为 $L_{\text{bol}} = 4.3 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ ，与 § 3.3.1 中用 5100Å 估计的结果一致。将 Q_{H} 、 n_{H} 和 U 代入式 1.8 中即可计算 R ， R 的范围是 48–70 pc（见表 3.6）。对 AGN 的尘埃环的近红外干涉观测研究证实尘埃环的尺度为 $\sim 10 \text{ pc}$ (Burtscher et al. 2013)。因此根据以上确定的外流气体的距离，外流气体应当在尘埃环之外。这与 § 3.2.4.3 的归一化分析结果一致。

如果外流气体的厚度 (ΔR) 与其距离 R 相比足够薄 ($\Delta R/R \ll 1$)，且对中心电离光源的覆盖因子为 Ω ，则质量损失率 (\dot{M}) 以及动能率 (E_k) 可以分别由式 1.11 以及 式 1.13 计算出。这里所用的速度 v 来自直接由吸收线测量得到的加权平均速度。根据 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 的吸收轮廓， $v = -3837 \text{ km s}^{-1}$ 。我们注意到吸收线外流的速度远大于发射线外流的速度。这个现象可以由外流气体的自遮挡效

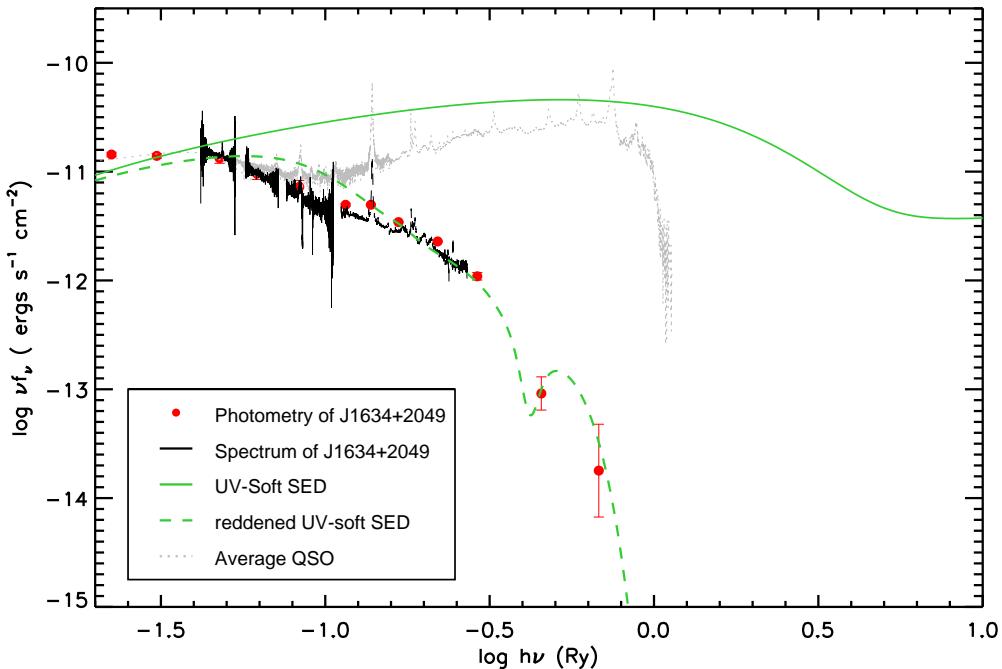


图 3.15 用 UV-soft 与 J1634+2049 观测数据匹配以计算电离光子数。图中黑色实线表示 J1634+2049 的光谱数据，红色圆点表示其测光数据。绿色实线代表 UV-soft SED，在 J1634+2049 的 WISE W1 ($3.4\mu\text{m}$) 处归一。绿色虚线代表用 LMC 消光曲线红化后的 UV-soft SED。灰色点线代表 QSO 的平均谱。

应解释。我们视线方向上的吸收气体是外流气体中不能被电离光源照射到的那一面，且其速度是沿着视线方向朝我们这边运动，因此从吸收线上测量的速度应当最接近外流气体的真实速度。由于外流气体很厚，因此中心光源的光几乎无法投射，我们观测到的外流发射线实际上是外流气体被中心光源照射且没有被遮挡的一面发出的，因此其速度在我们视线方向上的分量小于发射线速度。

接下来我们用发射线的等值宽度估计外流气体对中心光源的覆盖因子 (Ω)。*Cloudy* 模型输出的是发射线等值宽度是 $\Omega = 1$ 的情况下的值，因此我们用发射线等值宽度的观测值和 *Cloudy* 模型输出值的比来估算外流气体的 Ω 。理论上讲，选用复合发射线如 $\text{He I}\lambda 10830$ 更有利，但是 $\text{He I}\lambda 10830$ 发射线的蓝端线翼受 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 影响严重。我们这里用 $[\text{O III}]$ 发射线外流来估计 $\text{EW}([\text{O III}])$ ，这里 $[\text{O III}]$ 外流的流量与 § 3.3.4.2 中类似仍然只考虑速度 $< -500 \text{ km s}^{-1}$ 的部分，连续谱的流量为 § 3.2.4.1 分解的核连续谱 5007\AA 的流量。由于 $[\text{O III}]\lambda 5007$ 处发射线和连续谱都收到尘埃消光的影响，因此我们需要对连续谱和发射线分别进行消光改正。由 § 3.2.4.1 分解得到连续谱的 $E_{B-V}^{nuclei} = 0.41$ 。对于 $[\text{O III}]$ 、 $\text{He I}\lambda 10830$ 等 § 3.3.4.2 中所述高电离发射线外流没有办法直接测量对其所受的尘埃消光进行估计。然而由于复合线外流中有 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 发射线，因此我们可以通过 Balmer 减幅的方法来估计其尘埃消光（见表 3.4）。这个外流成分受到的尘埃红化与宽线区发射线接近。我们已经知道 $[\text{O III}]$ 、 $\text{He I}\lambda 10830$ 发射线外流的位置在尘埃环之外、窄线区以内，所以我们推测它所受的尘埃消光应当也与宽线区的接近。在这里我们

假设 [O III] 外流所受到的尘埃消光与复合线外流的一致，则其色余 $E_{B-V} = 0.60$ 。消光改正后的 $EW([O\text{ III}])$ 为 41.7\AA 。密度 $n = 10^{4.5}\text{ cm}^{-3}$ 和 $n = 10^5\text{ cm}^{-3}$ 的 *Cloudy* 最佳模型中输出的 $EW([O\text{ III}])$ 分别为 82\AA 和 142\AA 。因此外流气体对中心电离光源的覆盖因子在 $n = 10^{4.5}\text{ cm}^{-3}$ 时为 50.7%，在 $n = 10^5\text{ cm}^{-3}$ 时为 29.3%。由此我们根据式 1.11 和式 1.13 分别计算出外流的质量损失率和动能率，见表 3.6。我们在表中列了 $n = 10^4$ 、 $10^{4.5}$ 、 $n = 10^5\text{ cm}^{-3}$ 的计算结果。其中 $n = 10^4\text{ cm}^{-3}$ 在 *Cloudy* 模型确定的吸收线-发射线外流物理参数范围的边缘（见 § 3.3.4.2）。而如计算结果显示，该密度下的结果并不合理。

表 3.6 外流的物理参数

$\log n_H$ (cm^{-3})	$\log N_H$ (cm^{-2})	$\log U$	v km s^{-1}	R (pc)	Ω (%)	$\log L_{\text{Bol}}$ (ergs s^{-1})	\dot{M} ($M_{\odot}\text{yr}^{-1}$)	$\log \dot{E}_k$ (ergs s^{-1})	\dot{E}_k/L_{Bol} (%)
4.0 ^a	22.85	-0.55	-3837	64.1	≥ 100	45.6	2513	46.1	272
4.5	22.6	-1.0	-3837	60.6	50.1	45.6	676	45.5	73.2
5.0	22.5	-1.3	-3837	48.1	29.3	45.6	247	45.1	26.7

^a 注： $n_H = 10^4\text{ cm}^{-3}$ 在外流气体的物理参数允许范围的边缘。

3.4 小结

在本章中，我们详细研究了一个观测性质丰富的低红移 ($z = 0.1293$) 亮红外 BAL 类星体 J1634+2049。对 J1634+2049 的光学图像的分析表明 J1634+2049 是一个椭圆星系，星系外围有一个明显的环结构，且环的颜色与星系颜色非常接近。对 J1634+2049 周围的小星系 C1 的光谱证认表明 C1 的红移为 $z_{\text{C1}} = 0.1276$ ，由此可计算出 C1 与 J1634+2049 的视向速度的差异为 $\sim 451 \text{ km s}^{-1}$ 。结合星系动力学模拟的结果，我们推测 C1 和 J1634+2049 曾发生过碰撞，星系环就是在碰撞中产生的。J1634+2049 的红外光度达到 $10^{11.96} L_{\odot}$ ，暗示该源可能有很强的恒星形成活动。其中红外光谱上有明显的 PAH 辐射，我们用 PAH 定出的恒星形成率为 $141 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。J1634+2049 的近紫外、光学和近红外波段则显示出典型的 AGN 特征，我们在其光谱上探测到明显的 $\text{He I}^* \lambda \lambda 3889, 10830$ 和 Na I D 吸收线。而且，我们发现 J1634+2049 的诸多发射线如 $\text{H}\alpha, \text{H}\beta, \text{Pa}, \text{He I} \lambda 10830, [\text{O III}]$ 以及 $[\text{O II}]$ 等都有很明显蓝移成分。我们首先对吸收线和发射线外流分别利用光致电离模型测定了外流气体的物理性质，发现吸收线外流和发射线外流的物理参数非常相似，这暗示蓝移的吸收线和发射线可能来自同一外流气体。我们将二者联合使用定出外流气体的参数范围是 $4 < \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \lesssim 5$, $22.5 \lesssim \log N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) \lesssim 22.9$, $-1.3 \lesssim \log U \lesssim -0.7$ ，并确定外流气体与黑洞相距 $\sim 50-65 \text{ pc}$ 。我们利用外流产生的发射线确定外流气体的覆盖因子，用吸收线确定外流的速度以及柱密度，最终测定 J1634+2049 外流的动能率达到 $10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ 以上，质量损失率达到每年上百太阳质量。J1634+2049 与 Mrk 231 有很多类似的性质。如二者都有很高的红外光度，较大的恒星形成率。J1634+2049 中同样也有明显的中性 Na I D 吸收线。我们推测在 J1634+2049 中也可以探测到 OH、CO 等分子吸收线。如果有更好的 IFU 观测，对于 J1634+2049 也可以探测到空间分辨的分子外流。

第四章 SDSS J111017.13+193012.5: 用尘埃环作为“日冕仪”探测类星体强发射线外流

4.1 引言

部分遮蔽类星体是一类有趣的类星体。由于核区的辐射被尘埃严重消光但又没有被完全遮蔽，使得我们可以同时研究类星体核区以及核区之外的性质，如寄主星系。在本章中我们将介绍利用尘埃环对类星体连续谱和发射线的部分遮蔽这个特性来研究类星体的发射线外流的一个典型个例 J1110+1930。

4.2 观测数据以及数据分析

4.2.1 光谱和测光观测

到目前为止，SDSS 2.5 m 望远镜已经对 J1110+1930 进行了三次光学光谱观测。前两次观测分别于 2008 年 1 月 3 日和 2008 年 3 月 4 日进行，曝光时间分别为 1200 s 和 13803 s，得到的光谱波长覆盖范围均为 3800–9200 Å。这两条光谱在 SDSS DR7 ([Abazajian et al. 2009](#)) 光谱数据库中释放。第三次观测由 SDSS 望远镜的 BOSS 巡天于 2012 年 4 月 24 日进行，曝光 3603 s，得到的光谱覆盖范围是 3650–10140 Å。该光谱数据由 SDSS/BOSS DR10 ([Ahn et al. 2014](#)) 发表。J1110+1930 的近红外光谱观测由 Palomar 5 m Hale 望远镜上的 *TripleSpec* 光谱仪于 2014 年 1 月 17 日观测。我们采用 A-B-B-A 狹缝位置切换模式对其进行了 4 次 120 s 曝光。其流量定标星也用同样的模式紧接着 J1110+1930 进行了观测。我们利用 IDL 程序 SpexTool ([Cushing et al. 2004](#)) 抽取了近红外光谱，流量定标和大气吸收改正则根据 [Vacca et al. \(2003\)](#) 所描述的方法用相应的 IDL 程序处理。

此外 SDSS、2MASS 以及 WISE 也对 J1110+1930 进行了测光观测，数据汇总在 [表 4.1](#) 中。

4.2.2 被严重红化的宽波段 SED

[图 4.1](#) 显示了由 J1110+1930 (静止系) 紫外到光学光谱以及多波段测光数据构建的宽波段 SED。图中所示的数据已经根据银河系消光图 ([Schlegel et al. 1998](#)) 和消光曲线 ([Fitzpatrick 1999](#)) 进行了银河系消光改正。我们检查了 Catalina Sky Survey 对 J1110+1930 从 2005 年 4 月 9 日到现在的 257 次 V 波段的光变监测数据，发现该源在短时标 (一年内) 有 0.5 星等以内的光变，但在长时标没有明显的光变 (见 [图 4.1](#))。

从整体上看，J1110+1930 的 SED 非常“红”：具体表现为红外波段光度较高，越往蓝端光度越低，在 3500–2000 Å 之间迅速地下降，而在 $\lambda < 2000$ Å 时又开始变平。为了便于比较，我们将类星体平均谱 (图中灰色点线；具体见 § 3.2.2) 在 $2\mu\text{m}$ 处归一并调整到 J1110+1930 的光度水平。我们发现 J1110+1930 的 WISE

表 4.1 各波段测光数据

Band	Magnitude mag	Obs. Data (UT)	Facility	Reference
psf <i>u</i>	21.542±0.115	2005-04-02	SDSS	1,2
psf <i>g</i>	20.579±0.023	2005-04-02	SDSS	1,2
psf <i>r</i>	20.611±0.034	2005-04-02	SDSS	1,2
psf <i>i</i>	20.117±0.028	2005-04-02	SDSS	1,2
psf <i>z</i>	19.126±0.039	2005-04-02	SDSS	1,2
<i>J</i>	16.872±0.190	1998-01-30	2MASS	3
<i>H</i>	15.832±0.177	1998-01-30	2MASS	3
<i>K_s</i>	14.607±0.078	1998-01-30	2MASS	3
<i>W1</i>	13.862±0.028	2010-05-29	WISE	4
<i>W2</i>	12.587±0.026	2010-05-29	WISE	4
<i>W3</i>	8.690±0.027	2010-05-28	WISE	4
<i>W4</i>	6.595±0.069	2010-05-28	WISE	4

(1) York et al. (2000); (2) Abazajian et al. (2009); (3) Skrutskie et al. (2006); (4) Wright et al. (2010)

W3 (静止系 $3.4\mu\text{m}$) 和 *W4* (静止系 $6.3\mu\text{m}$) 与类星体平均谱相符，在 $\sim 3\mu\text{m}$ 及其蓝端，J1110+1930 的 SED 比类星体平均谱低。前人的研究表明类星体的内消光更符合 SMC 型消光曲线 (e.g. Richards et al. 2003)。因此我们采用 SMC 型消光曲线把类星体平均谱以 $E_{\text{B-V}} = 0.46$ 红化。如图中绿色实线所示，红化后的类星体平均谱在波长 $> 2000 \text{ \AA}$ 的部分与 J1110+1930 符合得很好。而 J1110+1930 在 2000 \AA 蓝端急剧地变平，这个成分与红化的平均谱不符，更像是一个“额外”的成分。我们仔细地检查该成分，光谱上没有明显的 O、B 型恒星光谱特征，如强的 Ly α 吸收线以及 C II $\lambda 1335$ 、C IV $\lambda 1549$ 等金属吸收线，因此排除了这个成分来自于恒星星光的可能性。那么该成分只能来自于 J1110+1930 的 AGN 核区。而且，其紫外光谱上有很强的 N V、C IV 等高电离发射线，这些线只能产生于 AGN 环境。如图 4.1 所示，我们给相应波段的类星体的平均谱微弱的红化 (SMC 型消光曲线, $E_{\text{B-V}} = 0.05$)，可以基本符合 J1110+1930 远紫外光谱的谱形。与 J1110+1930 类似，Mrk 231 的紫外 SED 被严重消光但在 $\lambda < 2400 \text{ \AA}$ 也显示出一个“额外”的未被红化的成分 (见 Veilleux et al. 2013 中图 3)。Veilleux et al. (2013) 根据 Mrk 231 最新的 *HST COS* 光谱认为这个额外的成分是来自于吸积盘的热辐射。

4.2.3 发射线分析

根据 BOSS 光谱中的诸多紫外发射线，BOSS 光谱处理程序给出 J1110+1930 的红移为 $z_{\text{em}}=2.504\pm0.00013$ 。然而基于 TripleSpec 近红外光谱中的 H α 发射线，我们发现几乎所有的紫外发射线都有明显的蓝移，因此我们根据 H α 发射线重新确定了 J1110+1930 的红移为 $z_{\text{em}}=2.512\pm0.00048$ ，并在接下来的分析中都采用这个红移。

图 4.2 展示了 J1110+1930 的不同波段的光谱，该光谱由 SDSS、BOSS 和 TripleSpec 光谱合并而成，其公共波长部分按照光谱 S/N 加权。远紫外 1000–2000 \AA 的光谱上，连续谱较弱，谱型平坦，强发射线如 N V $\lambda 1240$ 、C IV $\lambda 1549$

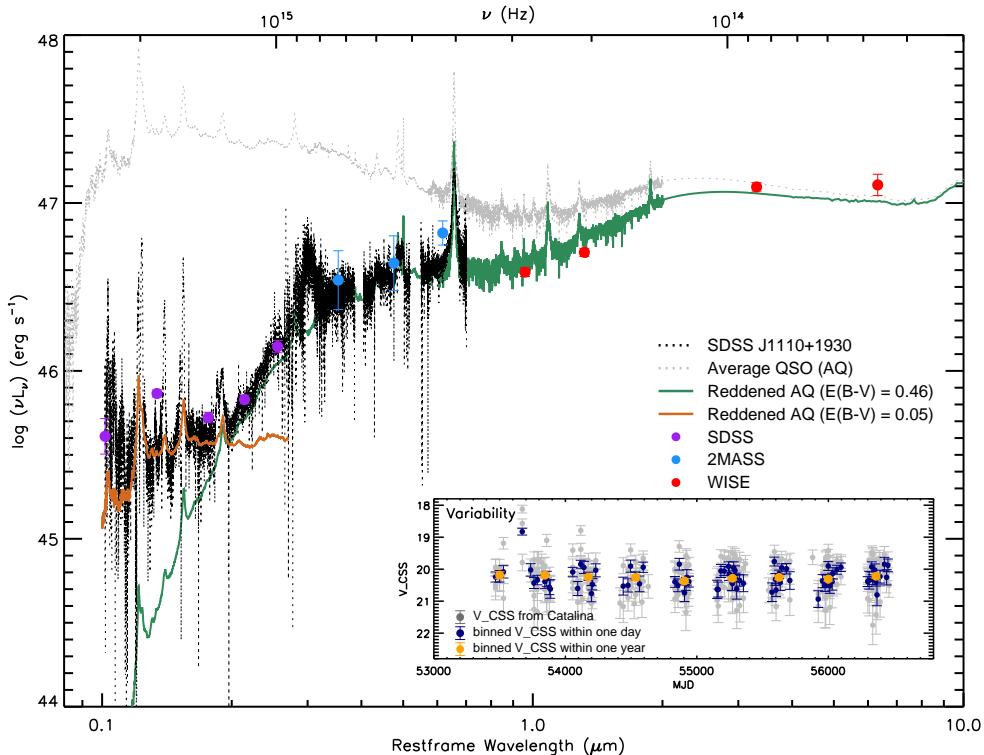


图 4.1 主图表示由非同时观测的测光数据（圆点；见表 4.1）以及 SDSS 和 TIRPLESPEC 光谱（黑色实线）构成的 J1110+1930 的宽波段 SED。观测数据已经进行了银河系消光改正并且调整到静止坐标系中。灰色点线代表类星体的平均谱，由Vanden Berk et al. (2001)（光学）、Glikman et al. (2006)（近红外）和Netzer et al. (2007)（中红外-远红外）的各波段平均谱合并得到。类星体平均谱在 $\sim 2 \mu\text{m}$ 处归一。绿色实线代经 SMC 消光曲线 (Pei 1992) 红化的类星体平均谱， $E_{\text{B-V}} = 0.46$ 。主图中右下角的子图表示 J1110+1930 V 波段的光变。Catalina Sky Survey 从 2005 年 4 月 9 日开始对 J1110+1930 的 V 波段进行了光变监测（MJD：53469–56461），到目前为止共有 257 次观测。灰色圆点代表从 Catalina Sky Survey Data Release 2 (CSDR2) 中得到的原始测光数据。蓝色和橙色圆点分别代表将同一天、同一年的观测数据合并后的数据点。

等是主要特征。此处连续谱用一条水平直线拟合。从 2000\AA 开始向红端延伸，J1110+1930 的连续谱逐渐上升。根据上一节中对 J1110+1930 整体 SED 的分析，我们采用经 SMC 消光曲线 (Pei 1992) 红化的幂律连续谱来拟合 $2000 - 7000 \text{\AA}$ 的连续谱。

$$F_\lambda = C_{\text{nucleus}}(E_{\text{B-V}}^{\text{nucleus}}, \lambda) \lambda^\alpha, \quad (4.1)$$

拟合时幂律连续谱的本征谱指数 α 设为 -1.7。拟合结果收敛于 $E_{\text{B-V}}^{\text{nucleus}} = 0.41$ 。

由图 4.2 可以看到，J1110+1930 的光谱是以发射线为主导的。在图 4.3 中，我们把 J1110+1930 的紫外以及光学的主要发射线在速度空间做对比。最显著的特征是，相对于 H α ，[O III] 以及紫外发射线 Nv、CIV、AlIII、MgII 等都有明显的蓝移，且蓝移速度均为 $\sim -1000 \text{ km s}^{-1}$ 。另外，这些紫外宽发射线的轮廓与 H α 明显不同，其线宽比 H α 窄，且发射线轮廓表现出不对称性。由此可知这些蓝移

的发射线的来源不同于 $\text{H}\alpha$ 。

在拟合各发射线前，我们首先将拟合得到的连续谱从光谱中减去以得到发射线谱。各发射线拟合过程具体如下。

1. $\text{H}\alpha$ 发射线 由图可知， $\text{H}\alpha$ 发射线线宽较宽，轮廓比较对称，而 $\text{H}\alpha$ 的窄成分以及常见的窄发射线 [$\text{N}\,\text{II}$]、[$\text{S}\,\text{II}$] 则探测不到。我们尝试用单高斯轮廓拟合 $\text{H}\alpha$ 宽线，同时采用一阶多项式来微调 $\text{H}\alpha$ 区域的局部连续谱，拟合得到约化卡方为 $\chi^2 = 1.99$ 。随后我们也尝试用双高斯轮廓拟合 $\text{H}\alpha$ 宽线， χ^2 减小为 1.13，因此我们采用双高斯拟合结果。

2. $\text{H}\gamma+\text{H}\beta+[\text{O}\,\text{III}]$ 区域 在此区域 ($4200\text{--}5050\text{\AA}$)， $\text{H}\beta$ 与 $[\text{O}\,\text{III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ 以及 $\text{Fe}\,\text{II}$ 线丛混合在一起。我们检查后发现 $\text{H}\beta$ 和 $\text{H}\gamma$ 发射线也是宽成分主导的，窄成分几乎看不到。而且 $\text{H}\beta$ 的蓝翼与 $\text{H}\alpha$ 相应速度处的轮廓比较符合，因此在拟合时我们假定 $\text{H}\beta$ 、 $\text{H}\gamma$ 和 $\text{H}\alpha$ 的轮廓一致，具体而言是设定发射线的线宽和线心的移动一致，调整不同发射线的流量。此外 $[\text{O}\,\text{III}]$ 双线的轮廓不对称且整体上有蓝移，因此我们用双高斯轮廓分别拟合 $\lambda 5007$ 和 $\lambda 4959$ 。拟合时假定双线的轮廓一致且流量比 $\lambda 5007/\lambda 4959$ 固定为理论值 2.98。[Boroson & Green \(1992\)](#) 把强 $\text{Fe}\,\text{II}$ 线发射天体 IZ w1 中的光学 $\text{Fe}\,\text{II}$ 发射线作为原型构建了一个经验模板。我们用高斯卷积的方法把该模板展宽为不同宽度，即宽度为 $1000\text{--}10000\text{ km s}^{-1}$ 以 100 km s^{-1} 为间隔，共 91 个宽度。拟合 $\text{H}\beta+[\text{O}\,\text{III}]$ 区域时，对于给定的每个 $\text{Fe}\,\text{II}$ 线宽，我们都将上述各成分的模型同时拟合，在这 91 次拟合中找 χ^2 最小的模型。最佳拟合结果收敛于 $\text{Fe}\,\text{II}$ 宽度为 3500 km s^{-1} ，约化卡方为 $\chi^2=1.31$ ，拟合效果见图 4.2。

3. 紫外发射线 前面已经提到，紫外发射线的特点是相对于 $\text{H}\alpha$ 都有蓝移，谱线宽度比 $\text{H}\alpha$ 窄且轮廓不对称。这些紫外发射线在 0 km s^{-1} 的流量很少，表明这些线中类似于 $\text{H}\alpha$ 的宽发射线成分的贡献几乎可以忽略。另一方面，J1110+1930 的 SED 表明该源的尘埃消光比较严重。我们用 Blamer 减幅 $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ 来估计宽发射线的消光。根据 [Dong et al. \(2008\)](#)，宽线区的本征 Blamer 减幅为 3.06。根据测量，J1110+1930 的 $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ 为 6.71 ± 0.17 ，假定 SMC 型消光曲线，我们计算得到其色余为 $E_{\text{B}-\text{V}}^b = 0.85\pm0.03$ 。在这种情况下， $\text{C}\,\text{IV}$ 波长处的消光达到 11.1 星等，这表明 J1110+1930 的宽发射线已经被严重地消光了，进一步表明我们在拟合时可不考虑远紫外发射线的宽发射线成分。 $\text{O}\,\text{VI}\lambda 1035$ 、 $\text{N}\,\text{V}\lambda 1240$ 、 $\text{C}\,\text{II}\lambda 1335$ 以及 $\text{C}\,\text{IV}\lambda 1549$ 在光谱上较为孤立易于测量。由于不需要考虑这些发射线类似于 $\text{H}\alpha$ 的宽发射线成分，因此对于这些线的拟合不涉及分解过程，我们对这四根线分别用 2–3 个高斯进行唯象拟合。另外，紫外波段中有一些区域的发射线混合较为严重很难分解，如 $\text{Si}\,\text{IV}\lambda 1397+\text{O}\,\text{IV}]\lambda 1402$ 、 $\text{Al}\,\text{III}\lambda 1857+\text{Si}\,\text{III}]\lambda 1892+\text{C}\,\text{III}]\lambda 1909$ 。对于 $\text{Si}\,\text{IV}\lambda 1397$ 和 $\text{O}\,\text{IV}]\lambda 1402$ ，我们不试图去分解这两根线，而是将这两条发射

线作为整体用双高斯轮廓拟合。在 J1110+1930 光谱中 $\text{Al III} \lambda 1857$ 发射线相对于 $\text{Si III} \lambda 1892 + \text{C III} \lambda 1909$ 较为孤立可以单独分解拟合，因此我们用双高斯轮廓对其拟合。另外，我们注意到在 $\text{Si III} \lambda 1892 + \text{C III} \lambda 1909$ 蓝移的发射线下有明显宽成分，该成分相对 $\text{C III} \lambda 1909$ 的 0 km s^{-1} 处没有移动。我们首先猜测这个成分来自于紫外 Fe II 发射线。我们采用 Vestergaard & Wilkes (2001) 的紫外 Fe II 模板与之比较后发现 Fe II 模板并没有类似特征，即使将模板展宽后也不符合，因此这种可能性被排除。在 $\sim \lambda 1950$ 波长处，宽发射线受到的消光稍小，因此这个宽成分有可能是 Al III 、 C III 或 Si III 来自宽线区的维里化成分。如果是这种情况，我们假定三条发射线都有宽发射线成分且假定其轮廓与 $\text{H}\alpha$ 宽线的轮廓相同，并用双高斯轮廓拟合 Al III 的蓝移成分，结果如图 4.2 中间子图中模型 2 所示。这样，添加/不添加宽发射线成分的两种模型拟合的 Al III 蓝移成分的流量可以分别作为该成分流量的下限和上限。对于 Mg II 发射线，由于 Mg II 周围的紫外 Fe II 发射线也较强，因此我们采用 Vestergaard & Wilkes (2001) 的紫外 Fe II 模板拟合 Fe II 发射线。 Mg II 发射线受到消光的影响也应当小于 C III ，其消光为 $A_{\lambda 2800} = 5.4 \text{ mag}$ ，因此对于 Mg II 发射线我们也考虑以上两种模型。第一种是认为 Mg II 的宽发射线不明显，用双高斯轮廓拟合整个 Mg II 发射线轮廓；第二种是假定 Mg II 的宽成分与 $\text{H}\alpha$ 轮廓一致，用 $\text{H}\alpha$ 发射线轮廓拟合 Mg II 宽成分，用双高斯轮廓拟合 Mg II 的蓝移成分。

以上谱线测量参数汇总在表 4.2 中，拟合效果见图 4.2。

此外，如图 4.3 中红色短线所示，我们注意到在 $\lambda \sim 1515 \text{ \AA}$ 处有一个明显的发射成分，距 $\text{C IV} \lambda 1549 \sim -6000 \text{ km s}^{-1}$ 。然而我们对照类星体平均谱（见 Vanden Berk et al. 2001 中图 6 以及表 2）并没有发现与之对应的发射线。同时我们在 $\text{Si IV} \lambda 1402$ 蓝端相同速度处也发现了类似的成分。因此我们猜测这个成分对应于 J1110+1930 中高电离发射线的速度更高的外流。我们注意到 $\text{Ly}\alpha$ 的谱线轮廓与其他的发射线明显不同，有出两个成分。其中一个在 $\text{Ly}\alpha$ 的 0 速度处，另一个在 $\text{Ly}\alpha$ 蓝端 -1500 km s^{-1} 处。在 0 速度处的成分线宽很窄，只有 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ ，远小于 $\text{H}\alpha$ 的宽线成分线宽。因此这个 $\text{Ly}\alpha$ 成分应当不是来自于宽线区的发射线。另一方面， $\text{Ly}\alpha$ 的 0 速度处恰好是 N V 发射线蓝端 $\sim -6000 \text{ km s}^{-1}$ 处，基于以上分析我们猜测该成分是 N V 发射线对应的高速外流成分。

4.3 结果与讨论

4.3.1 黑洞质量与吸积率

我们基于 $\text{H}\alpha$ 的测量根据 Xiao et al. (2011) 中公式 6 估计 J1110+1930 的黑洞质量（具体见 § 3.3.1 中式 3.7）。我们首先根据由宽线 Balmer 减幅得到的宽线的色余 $E_{B-V} = 0.85 \pm 0.03$ 对直接测量的 $\text{H}\alpha$ 宽线光度进行消光改正，计算得到

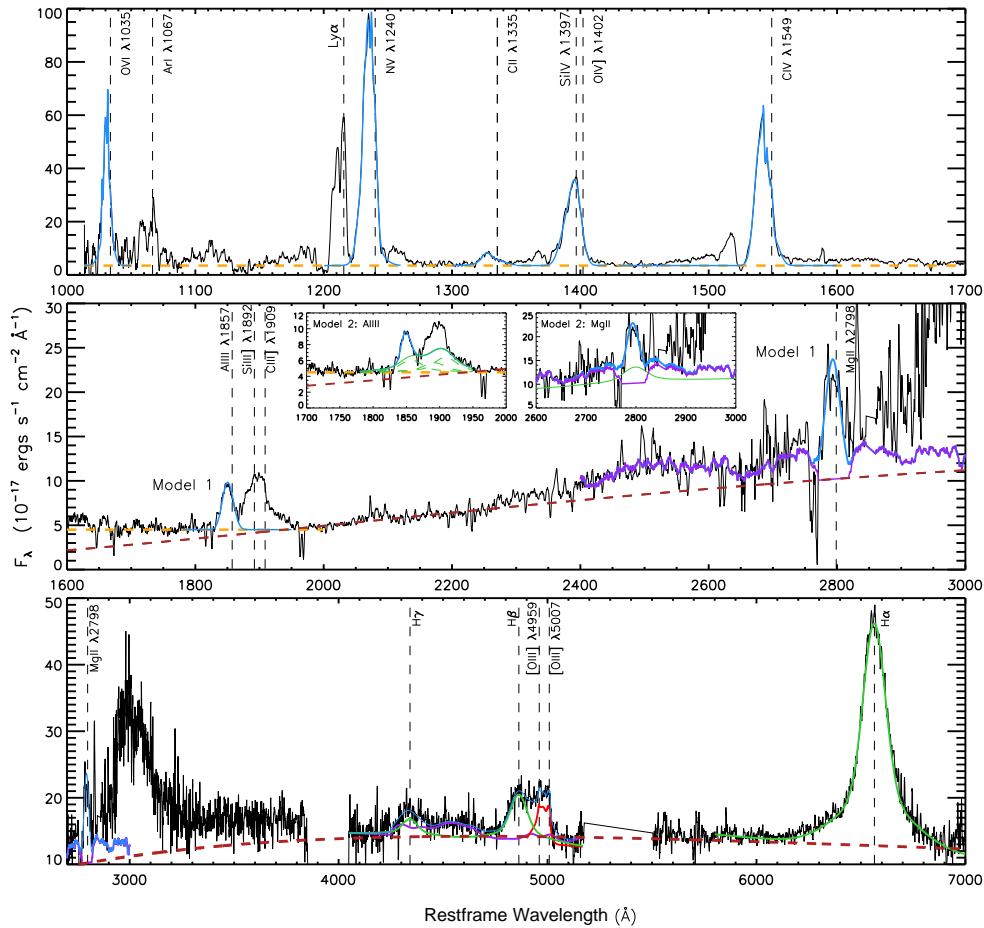


图 4.2 对 J1110+1930 紫外-光学光谱（静止系波长 $1000 - 7000 \text{ \AA}$ ）中连续谱和发射线的详细分解结果。黑色实线代表由 SDSS 光谱 ($1100 - 2950 \text{ \AA}$)，BOSS 光谱 ($1000 - 2950 \text{ \AA}$) 以及 TripleSpec 光谱 ($2900 - 7000 \text{ \AA}$) 的合并光谱。不同光谱见公共的波长部分根据 S/N 加权合并。褐色点线代表由 SMC 消光曲线红化的幂律连续谱，色余为 $E_{\text{B-V}}^{\text{nucleus}} = 0.41$ 。橙色虚线代表较为平坦的远紫外连续谱。浅蓝色实线代表每条发射线的总拟合轮廓。紫色实线代表紫外和光学的 Fe II 发射线。红色实线代表蓝移的 $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ 双线。绿色实线代表 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 等没有蓝移的宽发射线，所有的宽发射线成分的轮廓都假定与 $\text{H}\alpha$ 相同。中间的图中的两幅子图分别是 Al III 和 Mg II 考虑了宽线成分的拟合结果。

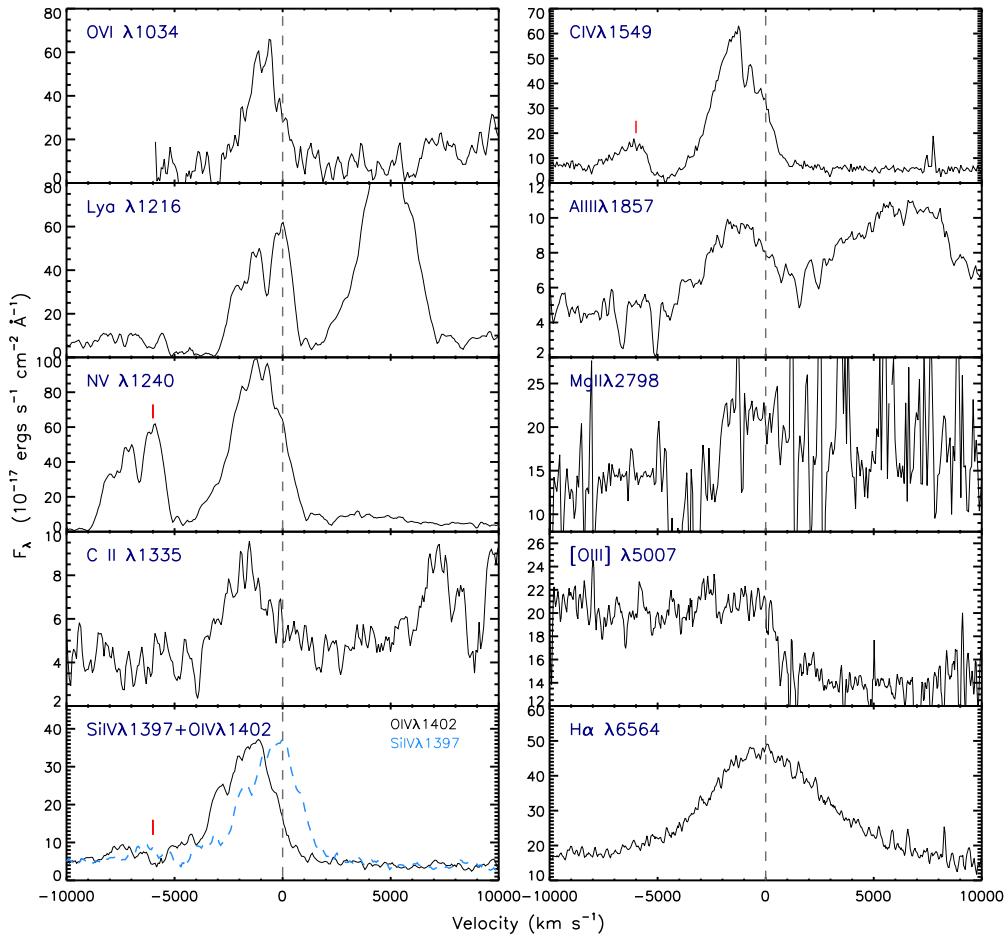


图 4.3 J1110+1930 紫外到光学不同发射线的蓝移成分。灰色虚线指示 0 速度处。 $\text{C IV}\lambda 1549$ 、 $\text{N V}\lambda 1240$ 以及 $\text{Si IV}\lambda 1397+\text{O VI}\lambda 1402$ 的红色短线指示在 $\text{C IV}\lambda 1549$ 观测到的额外的蓝移成分在不同高电离线中的相应位置。

表 4.2 J1110+1930 发射线测量参数

Emission Line	Centroid Å	FWHM km s ⁻¹	Flux $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
$\text{O VI}\lambda 1035$	1031.05 ± 1.00	1182 ± 12	379 ± 5
$\text{N V}\lambda 1240$	1235.13 ± 1.01	2634 ± 8	1093 ± 3
$\text{C II}\lambda 1335$	1330.00 ± 1.00	2772 ± 151	75 ± 3
$\text{Si IV} + \text{O IV}]$	1393.72 ± 1.02	3002 ± 25	476 ± 3
$\text{C IV}\lambda 1549$	1542.61 ± 1.00	2275 ± 13	736 ± 6
$\text{Al III}\lambda 1857^1$	1850.72 ± 1.00	3278 ± 149	114 ± 3
$\text{Al III}\lambda 1857^2$	1854.27 ± 1.02	2042 ± 63	56 ± 2
$\text{Mg II}\lambda 2798^1$	2793.34 ± 1.00	2977 ± 15	398 ± 11
$\text{Mg II}\lambda 2798^2$	2796.25 ± 1.01	2874 ± 12	276 ± 10
$\text{H}\gamma$	4342.10	6608	380 ± 27
$\text{H}\beta$	4863.14	6608	1012 ± 24
$[\text{O III}]\lambda 5007$	4980.10 ± 2.95	3578 ± 116	337 ± 21
$\text{H}\alpha$	6565.43 ± 1.00	6607 ± 28	6790 ± 61

¹ 由模型 1 得到的外流。

² 由模型 2 得到的外流。

$H\alpha$ 宽线的本征光度为 $2.08 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ 。联合 $H\alpha$ 的宽线宽度, $\text{FWHM}(H\alpha) = 6607 \text{ km s}^{-1}$, 最后计算得到 $M_{\text{BH}} = 10^{10.03} M_{\odot}$ 。根据小节 4.2.3 中的核连续谱的拟合结果, 5100 \AA 的消光改正后的单色光度为 $L_{\lambda 5100} = 1.29 \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ 。作为检查, 我们也利用 Greene & Ho (2005) 得到的 $L_{\lambda 5100} - L_{H\alpha}$ 关系通过 $L_{H\alpha}$ 得到 $L_{\lambda 5100} = 1.28 \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$, 二者非常接近。利用 $L_{\lambda 5100}$ 的热改正关系 $L_{\text{bol}} \approx 9L_{\lambda 5100}$ (Elvis et al. 1994; Kaspi et al. 2000), 得到 $L_{\text{bol}} = 1.16 \times 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ 。根据 J1110+1930 的黑洞质量, J1110+1930 的爱丁顿光度为 $1.36 \times 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, 因此其爱丁顿比为 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} = 0.86$ 。假定黑洞吸积效率因子 η 为 0.1, 根据式 1.11, 计算得到黑洞吸积率为 $205 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。

4.3.2 发射线外流的物理参数

J1110+1930 的外流成分中有电离势各异的发射线, 包括电离势高达 $\sim 100 \text{ eV}$ 的 O VI、N V 发射线, 电离势达到 $\sim 50 \text{ eV}$ 的 O IV]、C IV 发射线, 电离势为 $\sim 30 \text{ eV}$ 的 [O III]、Si IV 以及更低电离度的 C III]、Al III、Si III], 甚至有电离势低于 H 原子 13.6 eV 的低电离 C II、Mg II 发射线。尽管这些发射线电离度相差很大, 但是它们都表现出近乎一致的蓝移速度, 这暗示产生这些发射的外流气体有相近的运动学结构。我们利用光致电离模型计算分析这些发射线时本着由简到繁的原则, 首先从最简单的几何出发开始分析, 即假设外流云团的密度和对中心光源的覆盖因子是均匀分布的。如果基于这种假设可以得到收敛的、与定性分析相符的物理参数, 这表明这种假设大致上是合理的; 如果得不到收敛的结果, 表明发射区的几何非常复杂, 需要进一步考虑云团的密度、柱密度、覆盖因子的分布。

根据 J1110+1930 外流所产生的发射线的特征, 我们可以在进行具体模型计算之前对其外流气体做一些定性的判断。首先我们注意到蓝移的发射线中有禁线 [O III], 而 [O III] 的临界密度 $\approx 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 因此外流气体的平均密度不会太高。其次, 前面提到蓝移的发射线中有电离度极高的发射线 O VI、N V, 所需的电离能分别为 114 eV 和 97.8 eV , 因此我们推测外流气体受光照面的电离度应该很高。另一方面, 蓝移的发射线中也有低电离发射线 C II、Mg II, 其电离势分别为 11.26 eV 和 7.65 eV , 二者都产生于部分电离区。C II 和 Mg II 的出现表明外流气体的柱密度比较大 (气体的电离结构可参考图 4.4, 亦可见图 1.17)。

根据上述简单分析, 我们用 Cloudy (c13.03) 计算光致电离模型时所采用的网格是: $-2.5 \leq \log U \leq 0.5$, $3 \leq \log n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3}) \leq 10$, $21 \leq \log N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) \leq 24$, 这些参数网格均以 0.5 为步长递增。计算时我们假设数密度为 n_{H} 、总柱密度为 N_{H} 的平板状气体; AGN 的 SED 采用 §2.4 中所述的 UV-soft SED。我们也注意到 J1110+1930 的 N v $\lambda 1240$ 发射线异常地强, 其线比 N v $\lambda 1240$ /C IV $\lambda 1549$ 为 1.49 ± 0.013 , N v $\lambda 1240$ /(C IV $\lambda 1549$ +O VI $\lambda 1034$) 为 0.98 ± 0.007 。Hamann et al. (2002) 对类星体宽线区的金属丰度的研究表明发射线线比 N v $\lambda 1240$ /C IV $\lambda 1549$, N v $\lambda 1240$ /(C IV $\lambda 1549$ +O VI $\lambda 1034$) 是表征发射线区金属丰度的良好探针(见图 4.5(a))。

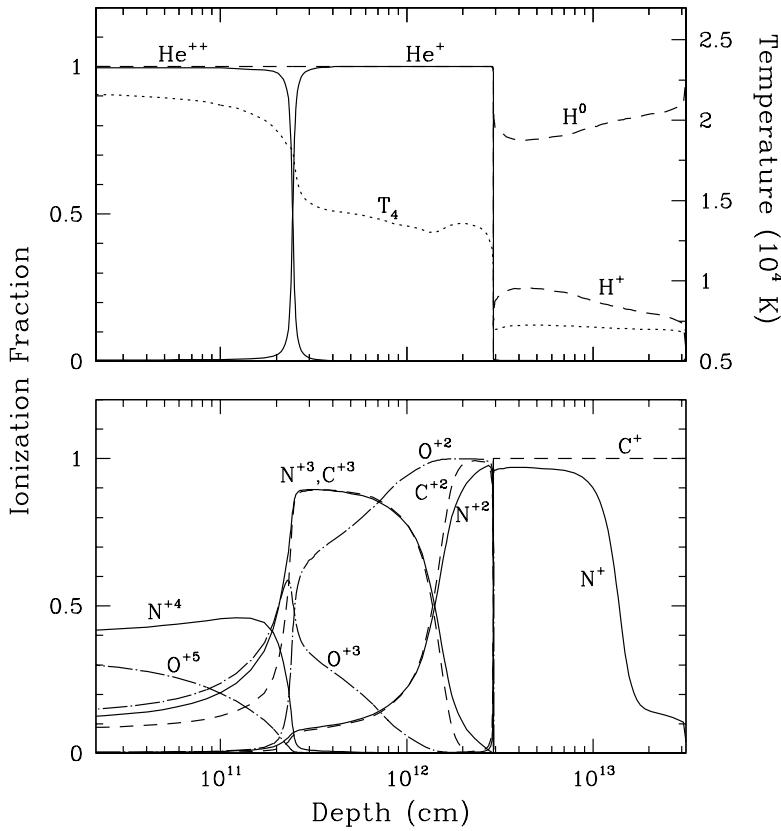


图 4.4 AGN 周围气体的电离结构图。图中展示的是 Z_{\odot} , $\log U = -1$, $\log n_H = 10 \text{ cm}^{-3}$ 的气体中各元素的电离比例随着气体厚度的变化。本图取自 Hamann et al. (2002) 中图 1。

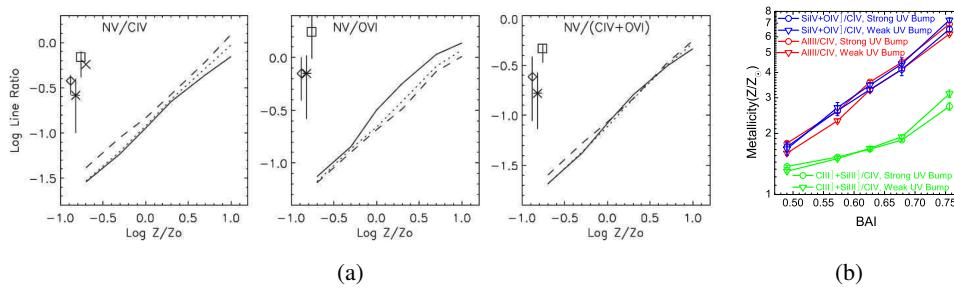


图 4.5 图 a: 光致电离模型给出的发射线线比随着金属丰度的变化。实线、点线和虚线分别代表不同的 SED。本图取自 Hamann et al. (2002) 中图 5。图 b: 用不同线比得到的金属丰度随 BAL 的变化。本图取自 Wang et al. (2012) 中图 4。

根据图 4.5(a)中所示的对宽线区的计算结果推知 J1110+1930 外流的金属丰度为太阳丰度的 10 倍左右。另一方面, Wang et al. (2012) 发现 CIV 外流的 BAI 因子(见 § 1.2.2) 越大, 外流气体的金属丰度越高(见图 4.5(b))。J1110+1930 的 CIV 发射线的 BAI 因子为 0.87, 因此由图 4.5(b)可以推知 J1110+1930 外流的金属丰度也在 10 倍太阳丰度左右。但是, 上述发射线线比都是基于宽线区的发射线, 假设 LOC (Locally optimally emitting clouds, Baldwin et al. 1995) 模型计算得到的。一方面宽线区的密度较大, 在 $10^8\text{--}10^{12}$ 之间; 另一方面宽线区的几何状况可能和外流气体完全不同, 因此以上关系并不完全适合 J1110+1930 的外流气体。但是这起码提示我们 J1110+1930 的外流气体的金属丰度可能比较高。因此, 在利用 Cloudy 进行计算时, 我们也尝试了超太阳丰度的情况, 分别设气体的元素丰度为 $1 Z_{\odot}$, $2 Z_{\odot}$, $5 Z_{\odot}$, $10 Z_{\odot}$ 和 $15 Z_{\odot}$ 。

我们先尝试利用对单参数敏感的发射线线比来依次限定 n_{H} 、 U 和 N_{H} 的范围。图 4.6 显示的是由 Cloudy 输出的柱密度为 $N_{\text{H}} = 10^{23}\text{cm}^{-2}$ 的气体, 在不同金属丰度和电离参数情况下, 发射线线比 $(\text{Si IV}+\text{O IV})/\text{[O III]}$ 、 $\text{C IV}/\text{[O III]}$ 以及 $\text{C II}/\text{[O III]}$ 与气体数密度的关系。尽管模型的参数范围很大, 但是这些线比与 J1110+1930 的测量值的交点所对应的密度都在 $10^6\text{--}10^8 \text{ cm}^{-3}$ 范围内。我们也注意到有的模型与测量值有两个交点, 另外一个交点对应的密度为 $10^2\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。在这样的低密度下我们应当可能探测到较强的 $[\text{O II}]\lambda 3727$ 发射线(临界密度 $\approx 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$), 但是在 J1110+1930 的光谱中我们并没有探测 $[\text{O II}]$ 。其次在低密度下 C IV 、 Mg II 发射线的等值宽度较小(见图 1.19)。综合以上两点我们排除了密度更低的情况。

确定了气体密度的范围, 我们可以在 $U\text{-}N_{\text{H}}$ 空间内上利用其他发射线线比确定气体的电离参数和柱密度。 O VI 和 C IV 都是高电离线, 产生于气体中靠近光界面、柱密度比较小的区域, 因此对截止柱密度不是很敏感。而这两者又有 $\sim 50 \text{ eV}$ 的电离能差异, 故而对电离参数比较敏感。此外, 由于 C 和 O 元素都是 α 元素, 因此两者元素丰度的比值对于气体的金属丰度不敏感, 因此 $\text{O VI}/\text{C IV}$ 可以很好地确定外流气体的电离参数。如图 4.7 所示, 在不同金属丰度、密度和柱密度下, $\text{O VI}/\text{C IV}$ 与观测值的交点所对应的 $\log U$ 比较恒定, 除了在太阳丰度下交点范围在 $-0.55\text{--}-0.2$ 之间, 其他金属丰度下均为 $-0.65\text{--}-0.55$ 之间。 Mg II 和 C II 都是低电离发射线, 在气体中柱密度较大的区域产生, 因此二者可以用来决定气体的柱密度。同时 Mg II 和 C II 的电离势有一定的差别, 对于电离参数有一定的依赖性。因此在确定了密度、电离参数的范围后, 我们可以利用 $\text{Mg II}/\text{C II}$ 来限定气体的柱密度。如图 4.7 所示, $\text{Mg II}/\text{C II}$ 与观测值的交点都在 $N_{\text{H}} \approx 10^{23}\text{cm}^{-2}$ 左右。

根据以上分析所定出的参数范围: $10^6 \leq n_{\text{H}} \leq 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $10^{-7} \leq U \leq 10^{-5}$, $10^{22.8} \leq N_{\text{H}} \leq 10^{23}$, 我们在此范围内将光致电离模型的网格计算得更密集一些以定出确定的物理参数。图 4.8 显示的是我们由发射线线比 $\text{O VI}/\text{[O III]}$, $\text{O VI}/\text{C IV}$, $\text{Mg II}/\text{C II}$ 和 $\text{C IV}/\text{C II}$ 确定的最佳模型参数: $5Z_{\odot}, n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 。尽管四个线比没有严格意义上的交点, 但是考虑到外流气体本身并非严格均匀,

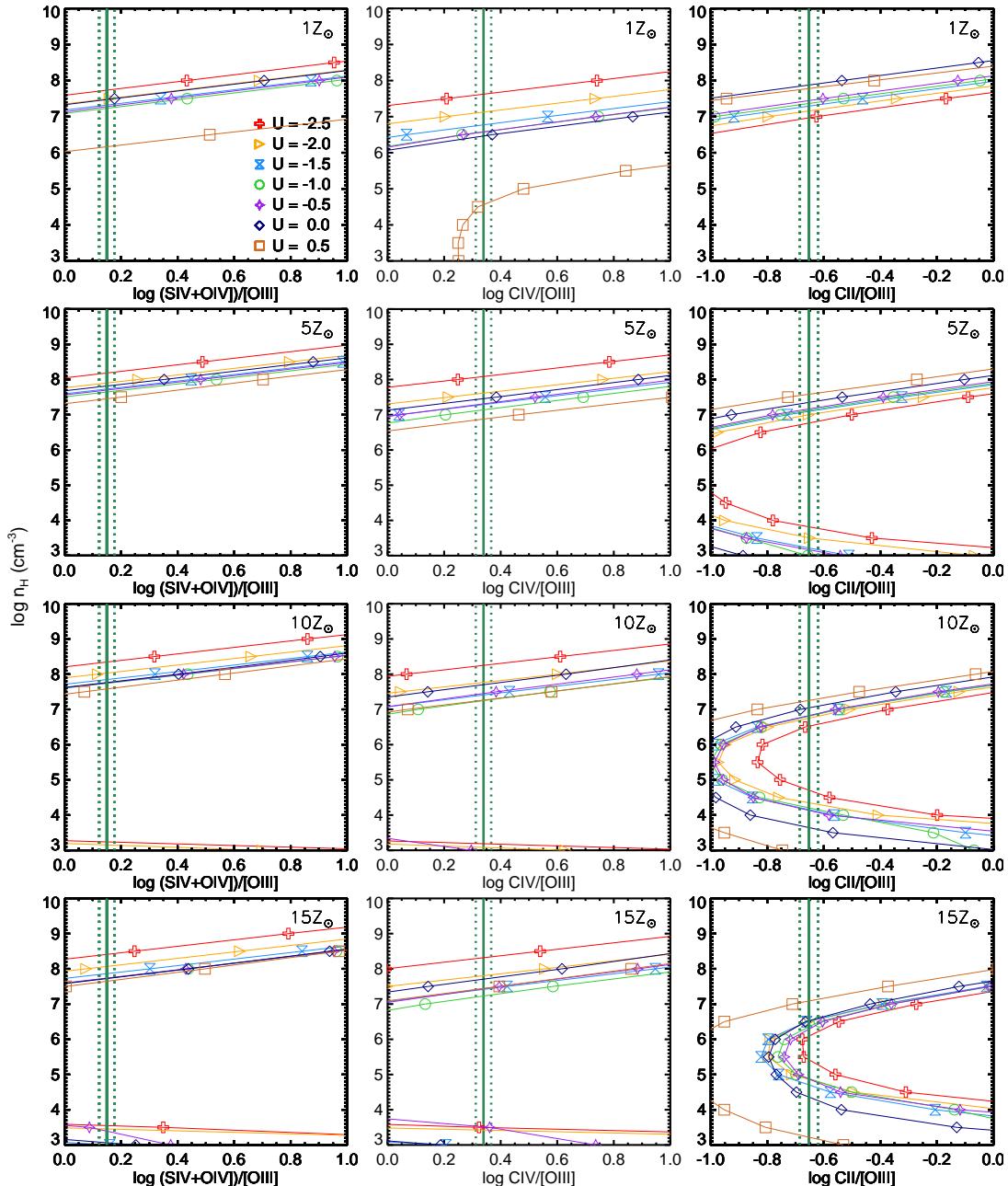


图 4.6 Cloudy 输出的不同金属丰度、不同电离参数下的发射线线比 $(\text{Si IV} + \text{O IV})/\text{[O III]}$ 、 $\text{C IV}/\text{[O III]}$ 以及 $\text{C II}/\text{[O III]}$ 与气体数密度的关系。图中绿色实线代表 J1110+1930 上述线比的测量值，绿色点线代表线比测量值的 1σ 误差。不同符号代表不同电离参数的模型。图中所示的是 $N_{\text{H}} = 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 的情况，其他柱密度的线比与图中所示的情况类似。

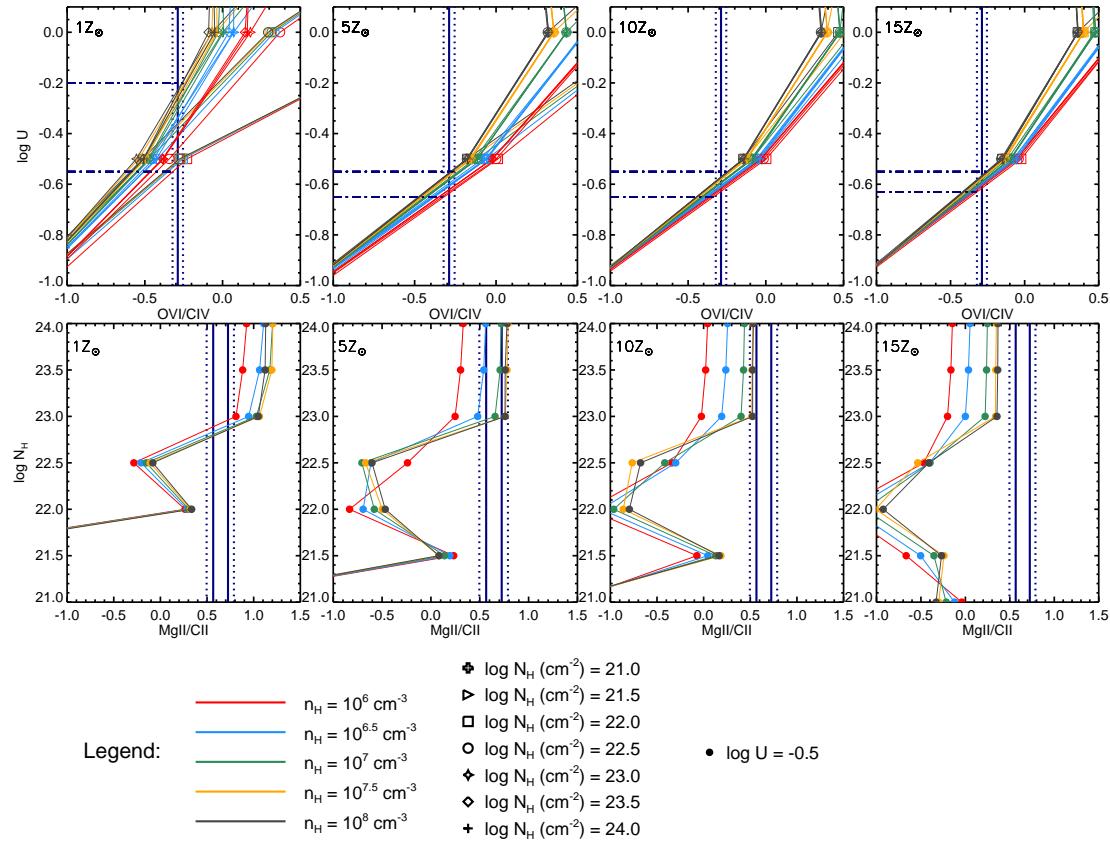


图 4.7 上图表示 *Cloudy* 输出的在金属丰度 $Z_\odot \sim 15Z_\odot$ 、 $10^6 \leq n_H \leq 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、 $22 \leq \log N_H \leq 24 \text{ cm}^{-2}$ 条件下 O VI/C IV 线比与电离参数的关系。下图表示在金属丰度 $Z_\odot \sim 15Z_\odot$ 、 $10^6 \leq n_H \leq 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、 $\log U = -0.6, -0.5$ 条件下 Mg II/C II 线比与气体柱密度的关系。上图中深蓝色实线代表上述 O VI/C IV 的测量值，深蓝色点线代表线比测量的误差。下图中深蓝色实线分别代表假设 Mg II 有宽线成分和没有宽线成分情况下的 Mg II 外流成分的拟合值（见图 4.2），这两种情况对应着 Mg II 外流流量的上下限。深蓝色点线分别代表上述两种情况下 Mg II/C II 的误差。

不同电离度的发射区的密度总会有一些差异，这个结果是可以接受的。我们注意到，在相同的 (n_H, U, N_H) 条件下，Mg II/C II 和 C IV/C II 对金属丰度比较敏感。这个结果不仅与之前的分析相符，还确定了气体金属丰度。值得注意的是，在所有的发射线中 N v $\lambda 1240$ 的规律与模型预期的并不相符，即使在 5 倍太阳丰度下。N v 发射线异常强的另一种可能性是由于外流气体中 N^{4+} 对 Ly α 光子的共振散射 (Surdej & Hutsemekers 1987)。Wang et al. (2010) 利用蒙特卡洛模拟证实共振散射会使得测量到的 N v $\lambda 1240$ 发射线平均增强 ~ 2 倍。我们推测 J1110+1930 异常强 N v 发射线可能是由于高金属丰度和共振散射共同作用的结果，然而要得到更明确的结果需要更为深入的研究。

4.3.3 产生遮蔽的尘埃以及外流的动能率

由图 4.1 可知 J1110+1930 是典型的部分遮蔽类星体，其核连续谱受尘埃消光较为严重。同时，由 Balmer 宽线的减幅 H α /H β 亦可知宽发射线也受到尘埃消光

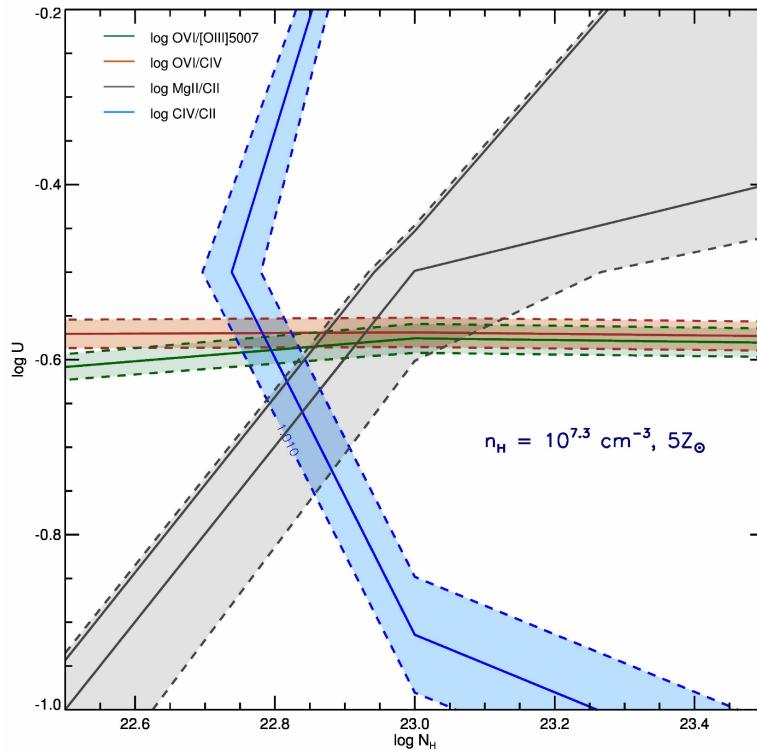


图 4.8 由发射线线比 $\text{O VI}/[\text{O III}]$, $\text{O VI}/\text{C IV}$, $\text{Mg II}/\text{C II}$ 和 $\text{C IV}/\text{C II}$ 得到的最佳模型参数: $5Z_{\odot}$, $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 。

的影响。因此我们推测产生遮蔽的尘埃应当在宽线区之外。由于 J1110+1930 的光谱中缺乏窄发射线, 我们无法直接判断尘埃是来自在窄线区尺度之外的大尺度尘埃还是来源于在宽线区和窄线区之间的尘埃环。但另一方面, J1110+1930 远紫外的蓝移的发射线中有 O IV 、 N V 、 C IV 等高电离发射线, 因此应当起源于 AGN 吸积盘产生的外流。然而从远紫外有如此强的蓝移的发射线来看, 外流并没有受到尘埃消光影响。因为即使只有较弱的消光, 也会对远紫外产生较大影响。例如, 在 SMC 型消光曲线下, 即使 $E_{\text{B-V}}$ 只有 0.1, 在 1200 \AA 处的消光也达到 $A_{\lambda} = 1.77$ 星等。因此尘埃应当在宽线区之外、外流气体之内。只要我们确定了外流气体的位置, 也就可以推测尘埃的位置。总体而言, 因为有尘埃恰好遮蔽了来自宽线区的强发射线, 强的紫外宽发射线被严重红化, 尘埃之外的发射线外流得以清晰地显露出来。根据式 1.8 我们可以估计外流气体相对于黑洞的距离。首先我们把 UV-soft SED 的流量调整到 J1110+1930 的 WISE W3 的流量水平, 然后在 SED 上对 $h\nu \geq 13.6 \text{ eV}$ 的光子积分, 最终得到电离光子数 $Q_{\text{H}} = 1.34 \times 10^{58} \text{ photons s}^{-1}$ 。由式 1.8 计算得到外流气体的距离 $R = 27.3 \text{ pc}$, 与尘埃环的位置相当。由此我们可以推断产生遮蔽的尘埃正是类星体的尘埃环。

最后, 我们利用光致电离模型得到的最佳模型参数根据式 1.13 和式 1.11 计算外流的动能率和质量损失率。首先, 我们用发射线的等值宽度来估计外流气体对中心光源的覆盖因子 (Ω)。Cloudy 模型输出的发射线等值宽度均为 $\Omega=1$ 情

况下的值，因此我们可以用观测得到的发射线等值宽度与输出的值的比例来估计 Ω 。由前面的分析我们得知外流气体没有受到尘埃消光影响，且紫外的连续谱是由散射而来的连续谱。发射气体面对的连续谱应该是类星体的本征核连续谱，这里本征核连续谱由图 4.2 中红化的连续谱经 SMC 消光改正后确定，色余为 $E_{B-V}^{\text{nucleus}} = 0.41$ 。由此外流发射线等值宽度可计算为发射线流量除以红化改正后的核连续谱。我们分别用观测信噪比最高的 $[\text{O III}]$ 、 C IV 、 Si IV+O IV 发射线估算覆盖因子。 $[\text{O III}]$ 、 C IV 、 Si IV+O IV 的观测等值宽度分别为 7.33 、 3.23 、 1.80 \AA ，模型预测的等值宽度分别为 174.43 、 104.51 、 21.76 \AA 。因此由以上三组线得到的覆盖因子分别为 4.2% 、 3.1% 和 8.2% 。我们取其平均值作为对 Ω 的最终估计，得到 5.2% 。由图 4.3，外流发射线的蓝移均为 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 。根据式 1.11 计算的到外流损失率为 $\sim 25.8 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ，根据式 1.13 计算得到外流的动能率为 $3.25 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 。

值得注意的是这里估计的外流动能率以及质量损失率可能是低估的。我们是应当从一个倾斜的角度观测外流气体的，因此由发射线测得的速度并非是外流气体的最大速度。我们也检查了由最佳模型预测的 C^{+3} 、 Mg^+ 、 $\text{He I}2^3\text{S}$ 离子柱密度 $\log N_{\text{ion}}$ ，如图 4.9 所示。由此可见，如果外流气体在我们的视线方向上，我们应当可以探测到很强的吸收特征。我们在光谱中的确看到有吸收线出现的迹象，如 Mg II 发射线蓝端有较窄的蓝移 $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$ 的吸收特征。

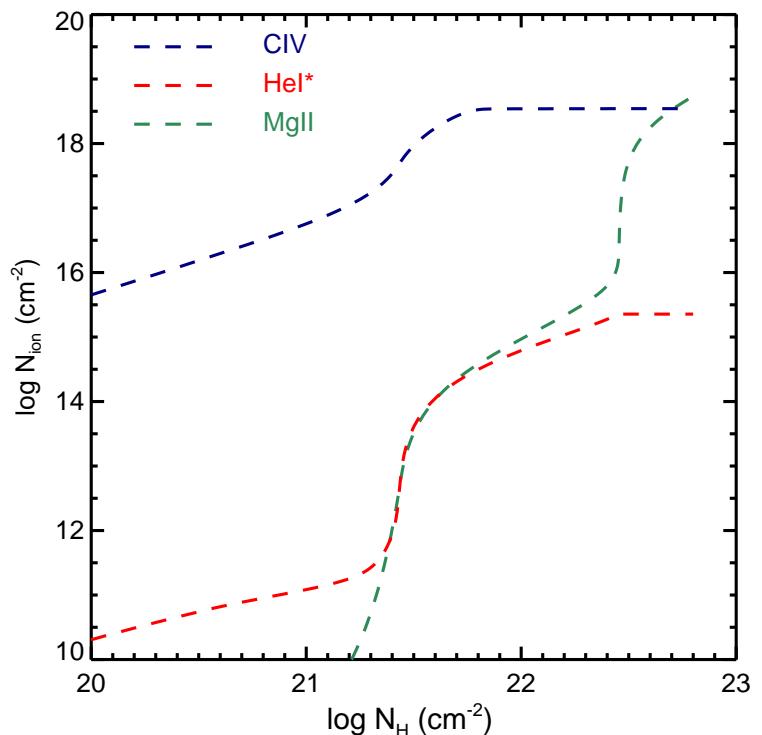


图 4.9 由最佳光致电离模型 $5Z_{\odot}$, $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 预测的 C^{+3} 、 Mg^+ 、 $\text{He I}2^3\text{S}$ 离子柱密度。

4.4 小结

在本章中，我们对一个中等红移 $z_{\text{em}} = 2.512$ 的类星体 J1110+1930 的发射线外流进行了研究。J1110+1930 的 SED 呈现出很强的尘埃消光特征，是一个部分遮蔽类星体。它的光学波段表现出正常的宽发射线特征，紫外波段出现很强且较窄的发射线以及散射连续谱。我们发现这些紫外发射线以及光学 $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ 都呈现一致的 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 的蓝移，表明这些发射线来自 AGN 的外流。

J1110+1930 外流产生的发射线众多且电离势差距很大，此外该源的 N V 发射线异常的强，暗示外流气体可能是超太阳丰度的。因此在计算光致电离模型时要考虑 N_{H} 、 n_{H} 、 U 和金属丰度四个参数。我们通过一些特殊的发射线线比并结合光致电离模型首先定性地推測了 J1110+1930 外流气体的 N_{H} 、 n_{H} 、 U 的范围，然后再寻找最佳解。具体步骤如下：

(1) $[\text{O III}]$ 发射线的出现给外流气体的密度一个很强的限制，通过比较发射线线比 $\text{C IV}/[\text{O III}]$, $\text{C II}/[\text{O III}]$ 和 $\text{Si IV+O IV}/[\text{O III}]$ 的理论线比和实际测量值，我们确定气体的密度在 $10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 之间。

(2) $\text{C IV}/\text{O VI}$ 对金属丰度、气体密度、柱密度的依赖很小，而对电离参数较为敏感，我们由此确定了气体的电离参数在 $10^{-6.5} - 10^{-5.5}$ 之间。

(3) 在气体密度、电离参数的范围确定的情况下，我们利用低电离线线比 Mg II/C II 确定了气体的柱密度为 $10^{22.5} - 10^{23.0} \text{ cm}^{-2}$ 。

(4) 最后我们利用线比 $\text{O VII}/[\text{O III}]$, O VII/C IV , Mg II/C II 和 C IV/C II 在 $U - N_{\text{H}}$ 平面上的交集最终确定外流气体的物理参数为 $5Z_{\odot}$, $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$, $U = 10^{-0.6}$ 。

通过以上步骤确定的物理参数，我们计算出外流气体与黑洞的距离为 27.3 pc ，外流气体对中心电离光源的覆盖因子只有 $\sim 5.2\%$ 。由此我们计算出外流的质量损失率为 $\sim 25.8 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ，动能率为 $3.25 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 。

另一方面，根据 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 宽发射线线比我们发现宽发射线也有较强的消光，另一方面而紫外发射线则几乎没有消光，由此可以推断遮蔽尘埃介于宽线区与外流气体之间。根据外流气体的位置，我们可以确定遮蔽尘埃为类星体的尘埃环。

综上，我们通过一个较为特殊的视角观测 J1110+1930。视线方向从尘埃环的边缘穿过，因而观测到的 J1110+1930 的连续谱和发射线经历了尘埃消光，紫外的强连续谱和发射线均被压低，这样使得我们有机会清晰地观测到与尘埃环尺度相当的外流产生的发射线。这些蓝移的发射线的相对强度虽然较大，但是其等值宽度实际上非常小。测量得到的 C IV 、 Si IV+O IV 的等值宽度分别只有 3.23 和 1.8 \AA ，而类星体平均谱中测得的来自宽线区的 C IV 和 Si IV+O IV 的等值宽度分别为 23.8 和 8.9 \AA ([Vanden Berk et al. 2001](#))。在正常情况下，这些发射线会淹没在强的紫外连续谱以及来自宽线区的发射线中而无法有效分解。因此尘埃的部分遮蔽为探测发射线外流提供了有利条件。

第五章 总结与展望

5.1 总结

本学位论文系统地介绍了我在博士研究生期间完成的关于 AGN 外流产生的吸收线和发射线的三个研究工作。

我们在绪论中概述了 AGN 对星系的两种反馈作用（包括外流和喷流）的主要观测事实，回顾了前人对辐射模式和射电模式 AGN 以及其寄主星系的研究结果。随后我们将视线聚焦于 AGN 外流，分别简述了 BAL 类星体的统计性质、宽吸收线的判定和测量方法，类星体的 CIV 和 [OIII] 发射线外流的统计研究结果。绪论最后一部分简述了 AGN 外流气体产生发射线和吸收线的基本物理机制，即光致电离过程。我们用最简单的光致电离模型计算展示了在典型类星体 ($M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$, $L_{\text{bol}} = 6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 辐射场下，不同密度 (n_{H})、柱密度 (N_{H}) 的气体在相对于黑洞不同距离 (r) 处的电离结构。决定气体电离结构的主要因素是电离参数 U 。根据式 1.8, $U \propto n_{\text{H}}^{-1} r^{-2}$ ，因此随着距离的增大，外流气体的电离参数迅速减小。当外流距离黑洞很近 (0.01 – 0.1 pc) 时气体的电离度很高，会产生电离度极高的吸收线和发射线。当外流距离黑洞 1 – 100 pc 时，电离参数适中，厚的气体不能被完全电离，部分电离区大量存在。这时会看到较强的 CIV、Al III、Mg II 等光学、紫外常见的吸收线。当外流距离黑洞 100–1 kpc 时，外流气体中的 HII 区范围较小，电离结构由 HI 区主导，较厚的气体中甚至会出现较冷的分子区。这时我们会在外流中探测到很强的 Mg II、Fe II、Ca II 等低电离吸收线，以及 Mg I、Na ID 等中性吸收线甚至分子吸收线。以上图像正是我们研究工作的起点。

我们的研究工作主要围绕 AGN 外流所产生的吸收线和发射线两个方面开展。第二章介绍了我们在 SDSS/BOSS 巡天光谱数据库中系统性地搜寻 He I* BAL 类星体的工作。我们基于前人发表的 Mg II BAL 类星体样本搜寻 He I* $\lambda 3889$ BAL 类星体，并在此过程中发展了一套探测较弱吸收线的有效方法。我们在 285 个 Mg II BAL 类星体中探测到 101 个 He I* $\lambda 3889$ BAL 类星体，He I* 出现的比例达到 35.4%。我们发现该探测比例强烈依赖于光谱信噪比 (S/N)。当 $S/N > 30$ 时，He I* 的探测比例高达 90% 以上。这表明 Mg II LoBAL 类星体中普遍存在 He I* 吸收线。He I* 吸收线是测量吸收气体性质的利器。实践证明，联合利用 He I* 和其他离子吸收线可以有效地限定气体的 N_{H} 、 U 和 n_{H} ，并可以进一步限定气体相对于黑洞的距离，最终计算出外流气体的质量损失率 \dot{M} 和动能率 \dot{E}_{k} 。目前只有少数 BAL 类星体可以做到这一点。因此 He I* BAL 的探测对于今后定量研究 AGN 的外流反馈、评估外流对星系的影响有很重要的意义。此外，我们充分利用 He I* $\lambda 3889, 10830$ 吸收线的波长位置优势，在 SDSS/BOSS 光谱数据库中找到 19 个 $z < 0.3$ 的低红移 BAL 类星体。低红移 BAL 类星体较为罕见，但是对于研究 BAL 类星体的寄主星系有着不可替代的作用。

长期以来人们对 AGN 发射线外流和吸收线外流的研究都是分开进行的。尽管之前也有工作注意到 BAL 类星体和有 C IV 发射线蓝移的类星体在统计性质上有诸多相似之处，但是一直缺乏此方面的系统研究。而受核连续谱照射的外流气体既可产生吸收线又可产生发射线是一个很自然的物理图像，光致电离模型计算清晰地证实了这一点。我们试图从这个角度来研究 AGN 外流。尽管吸收气体可以很准确地测定外流气体的 N_{H} 、 n_{H} 、 U 和 r ，然而我们无法通过吸收线估计外流气体对吸积盘的覆盖比例。由于缺乏有效手段，通常用 AGN 中的 BALs 的比例来推测覆盖因子，这是在计算外流的动能率和质量损失率时一个最大的不确定因素。而更好的方法是通过外流产生的发射线的等值宽度并结合光致电离模型来计算覆盖因子。我们在对 J1634+2049 的外流的研究过程中对此做了尝试。J1634+2049 选自我们的低红移 He I* BAL 样本，是一个 $z = 0.1293$ 的亮红外星系。我们通过中红外的 PAH 发射线定出其恒星形成率为 $141 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。J1634+2049 在紫外到近红外光谱上显示出典型的 AGN 特征，既有很强的 $\text{He I}^* \lambda \lambda 3889, 10830$ 及在 BAL 类星体光谱中较为罕见的 Na I D 宽吸收线，又在诸多发射线包括 H α 、H β 、P α 、He I $\lambda \lambda 5876, 10830$ 、[O III]、[Ne III]、[O II] 上表现出蓝移 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 外流成分。我们通过光致电离模型分别对吸收线外流和发射线外流做了分析，发现二者的电离参数和密度较为接近，这暗示蓝移的发射线和吸收线可能产生于相同的外流气体。我们将二者联合使用确定了外流气体的参数范围： $4 < \log n_{\text{H}} \lesssim 5$ ， $22.5 \lesssim \log N_{\text{H}} \lesssim 22.9$ ， $-1.3 \lesssim \log U \lesssim -0.7$ ，并进而计算出气体与黑洞的距离为 $\sim 50 - 65 \text{ pc}$ 。我们利用蓝移的发射线确定了外流的覆盖因子。基于以上物理参数，我们计算出 J1634+2049 外流的动能率达到 $10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ 以上，质量损失率达到每年上百太阳质量。我们对 J1634+2049 的 SDSS 光学图像做了二维分解，结果显示 J1634+2049 的 Sérsic 指数为 4，表明 J1634+2049 的星系是一个早型星系。此外，我们在其光学图像看到了星系外围有环结构，而且环的颜色与星系主体相同。我们对 J1634+2049 周围的小星系进行了光谱观测，并证实其红移与 J1634+2049 的红移接近，为 $z = 0.1276$ 。综上我们推测 J1634+2049 与其周围的小星系曾发生过碰撞，星系环就是星系碰撞的结果。星系间的相互作用触发了 J1634+2049 中的恒星形成活动，很可能进而触发了 AGN 活动。J1634+2049 正处于从 ULIRGs 向正常星系的演化过程中。

J1110+1930 是一个红移为 2.512 的半遮蔽类星体。这个类星体的特别之处在于，尘埃环将远紫外波段的核连续谱和宽发射线严重消光，这使得尘埃环之外的外流产生的 O VI、N V、C IV 等发射线显露出来。此外，光学 [O III] 发射线的蓝移也与 C IV 等紫外发射线相同。我们借助这样一个特殊的视角对 J1110+1930 的发射线外流性质做了详细分析，并很好地确定了外流气体的物理性质。最终确定的外流气体的物理参数为 $5Z_{\odot}$ ， $n_{\text{H}} = 10^{7.3} \text{ cm}^{-3}$ ， $N_{\text{H}} = 10^{22.8} \text{ cm}^{-2}$ ， $U = 10^{-0.6}$ 。我们计算出外流气体与黑洞的距离为 27.3 pc，且外流气体对中心电离光源的覆盖因子为 $\sim 5.2\%$ 。由此我们计算出外流的质量损失率为 $\sim 25.8 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ，动能率

为 $3.25 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 。同时我们注意到该发射线外流的等值宽度非常小，如果没有尘埃环的遮蔽，外流产生的发射线将湮没在宽发射线中。J1110+1930 表明我们可以借助尘埃环的部分遮蔽效应来广泛研究 AGN 的外流。

5.2 后续工作

我们的 He I* 样本工作证明了 He I* 吸收线在 Mg II BAL 类星体中的普遍性。另一方面，我们不仅通过光致电离模型论证，也借助对 FBQS J0840+3633 以及 J1634+2049 吸收线的实例分析充分展示了 He I* 在吸收线测量上的优势。我们在后续工作中将利用 He I* BAL 样本对 AGN 外流进行更深入的研究，主要包括以下几个方面。

利用 He I* 吸收线对较大 BAL 样本的外流气体做定量研究 目前我们组已经成功地将 He I* 吸收线应用于若干个 BAL 类星体外流性质的研究中 (e.g., 本文对 J1634+2049 以及 FBQS J0840+3633 的分析以及 Ji et al. 2012, 2015)。这些使我们充分相信，利用 He I* 吸收线并结合 Mg II、Fe II、Ca II、Na ID 等离子吸收线可以很好地限定 He I* 样本中绝大部分源的外流气体的性质。为了实现这个目标，我们首先需要对这些源进行后续的近红外光谱观测以得到其 He I* $\lambda 10830$ 吸收线。单独利用 He I* $\lambda\lambda 3889, 10830$ 以及其他更高阶的 He I* 吸收线就可以定出外流气体的 He I* 2^3S 离子柱密度、电离参数和覆盖因子。如果再结合 Mg II、Fe II、Ca II 以及 Na ID 等电离度更低的吸收线则可以对外流气体的总柱密度 N_H 加以限定。在此基础上，如果可以确定气体密度，就能进一步对外流气体定位，进而估算外流的动能率和质量损失率。然而在吸收线测量中，确定气体密度是比较困难的事情。一个最有效的方法是利用 Fe II*、C II* 等激发态离子吸收线。在我们找到的这 101 个 He I* BAL 类星体中有不少是 FeLoBAL 类星体，如果我们有机会进一步观测到 Fe II 或其他元素的激发态吸收线，我们就可以准确地确定这些源的密度。不过，即使没有离子激发态吸收线，我们也可以借助其他对密度敏感的吸收线来估计密度的上下限。例如氢的 Balmer 吸收线需要 $n_H > 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 的环境，若没有探测到该线则表明气体的密度不会太高。有了外流气体的位置、动能率、质量损失率我们可以评估 AGN 外流对于星系的影响。特别地，如果我们可以对一个均匀而完备的大样本做上述测量，就可以结合 AGN 以及寄主星系的其他性质对外流做综合分析。此外，了解 BAL 类星体气体的柱密度和密度也对于研究 AGN 周围的气体分布有重要的意义。

基于 SDSS DR7/DR12 光谱数据扩大现有 He I* BAL 样本 目前我们的样本仅是基于 SDSS DR5 光谱数据，现在 SDSS/BOSS 已经释放了 12th Data Release (DR12) 光谱数据，因此我们有必要扩大 He I* 吸收线样本 (J. Zhou et al. 2015, in preparation)。

利用 He I* 吸收线寻找低红移 BAL 类星体 传统上，寻找 BAL 类星体主要依靠 C IV、Mg II 等紫外吸收线的探测。对于低红移 ($z < 0.3$) AGN，若要观测其静止系紫外波段则需要空间观测，观测代价十分昂贵。He I* 多重吸收线中振子强度最大的 $\text{He I}^*\lambda\lambda 3189, 3889, 10830$ 吸收线分布在紫外到近红外波段。这使我们利用地面望远镜来证认更多的低红移 BAL 成为可能。近邻 BAL 类星体对于研究 BAL 现象有着不可替代的作用。我们可以通过对近邻 BAL 类星体开展高分辨成像或 IFU 观测来研究 BAL 类星体的寄主星系以及 AGN 外流的空间分布，这对于我们真正了解 AGN 外流与其寄主星系的相互作用并进而了解 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系的建立过程有重要意义。在 § 2.5.2 中我们已经利用光谱配对法在 SDSS/BOSS 中找到 19 个 $z < 0.3$ 的 $\text{He I}^*\lambda 3889$ BAL，并通过 TAP 申请到了 3 夜 Palomar 5m 望远镜 Triplespec 观测时间；此外我们也对该样本中的 J1634+2049 进行了详细的研究。后续研究正在逐项展开。我们也希望今后有机会对这些源开展进一步 IFU 观测。然而，利用 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线寻找 BAL 类星体会丢掉 $\text{He I}^*\lambda 3889$ 较弱的源，因此使用 $\text{He I}^*\lambda 10830$ 是一个更好的选择。如果我们有机会开展近红外 J 波段的光谱巡天，我们就有可能找到 $z < 0.2$ 的 LoBAL 类星体的完备样本。

对 J1634+2049 外流的研究中，我们同时考虑了外流产生的吸收线和发射线。由于缺乏有效手段，人们以往在估计外流气体对中心光源的覆盖因子时，通常用 BAL 类星体在类星体中出现的比例来估计，这在原理上有很大的不确定性。利用外流发射线可以更准确地估计外流的覆盖因子。我们考虑对类似于 J1634+2049 的同时有发射线外流和吸收线外流的 BAL 类星体开展进一步研究。

J1110+1930 是我们通过部分遮蔽类星体研究利用 AGN 外流的一个尝试。外流气体内的尘埃消光可以把强紫外宽发射线和连续谱遮蔽，使我们可以不受干扰地研究外流气体，但同时又在光学、近红外为我们留下一扇研究核区性质的窗户。我们可以在 SDSS/BOSS 光谱巡天中大规模寻找类似于 J1110+1930 的类星体，对这一类有趣的 AGN 开展后续研究 (Q. Tian et al. 2015, in preparation)。

以上是我们根据 AGN 外流本身特点、从外流测量的角度出发对后续工作的安排。另一方面，从 AGN 对星系的反馈以及星系对 AGN 的气体供给、 $M - \sigma_*$ 关系建立的角度出发，我们有兴趣开展以下工作。

绪论中已经介绍辐射反馈模式下气体从星系尺度进入黑洞周围区域的方式有两种，一种是星系并合或者相互作用，另一种是盘星系通过旋臂或棒等动力学不稳定结构的久期演化。对近邻宇宙中的星系和 AGN 的观测表明，近邻宇宙中的有核活动的星系大部分都是质量较小的盘星系，主要通过久期演化的方式为黑洞吸积供给气体。而近邻宇宙中质量最大的星系、光度最高的类星体（如 ULIRGs）普遍显示出星系并合或者相互作用的迹象。目前观测到黑洞-星系核球的关系 ($M_{\text{BH}} - \sigma_*$, $M - L_{\text{bulge}}$) 主要是指超大质量黑洞与椭圆星系或盘星系中经典核球的关系。而星系动力学模拟表明星系并合后会形成椭圆星系或有经典核球

的盘星系。而小质量盘星系的核球大部分是伪核球 (pseudobulges; cf. Kormendy & Kennicutt 2004)。伪核球与经典核球不同, 表现出很多星系盘的特征, 经常与旋臂、盘、棒、环等结构联系在一起, 且在结构上比较扁平。从表面亮度分布来看, 伪核球的 Sérsic 指数 $n \lesssim 2$, 而经典核球的 Sérsic 指数 $n \sim 4$ 。Hu (2008) 对比了伪核球星系以及早型星系的 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系, 发现二者有明显不同; Kormendy et al. (2011) 研究了用动力学方法测量的黑洞质量与其寄主星系中伪核球的 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系, 他们发现该关系明显偏离黑洞与经典核球的 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系。此外, Jiang et al. (2011b) 也发现伪核球中的 $M_{\text{BH}} - L_{\text{bulge}}$ 关系与经典核球中该关系明显不同。Kormendy & Ho (2013) 基于这些观测事实推测黑洞与星系的共同增长 (即 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系) 主要发生在通过主并合增长的星系中; 而通过久期演化的小质量盘星系的情况可能是星系和黑洞分别演化。

目前, 研究者普遍认为 $M_{\text{BH}} - \sigma_*$ 关系的建立与类星体外流有关。目前只在两类 AGN 中直接观测到星系尺度的 AGN 外流, 一类是 ULIRGs, 另外一类是低红移宇宙中光度较高的 II 型 AGN (见 § 1.1.1)。ULIRGs 无疑是通过主并合或者强星系相互作用而来, 而光度较高的 II 型 AGN 的寄主星系大部分是早型星系。目前, 还没有对于由久期演化形式增长的小质量盘星系的 AGN 外流的系统研究。NLS1s 星系是一类吸积率很高、黑洞质量较小的星 AGN, 被认为处于黑洞快速增长的阶段。观测表明, NLS1s 的寄主星系大部分为盘星系且有伪核球。我们在之前的研究中已经注意到 BAL 中有相当比例的源是 NLS1。在我们所使用的 Mg II BAL 样本的 285 个源中, 有 49 个源的 $\text{H}\beta$ FWHM $< 2000 \text{ km s}^{-1}$ ¹。此外, NLS1s 中有不少源的 [O III] 发射线整体有很大的蓝移, 这类极端的源被称为 “[O III] blue outlier”, 这显然也与 AGN 外流相关。因此, NLS1s 中的 AGN 外流现象并不罕见, 且光度较高易于观测。我们认为 NLS1s 是目前研究近邻宇宙中小质量黑洞与星系演化关系的理想对象 (S. Zhang et al. 2015, in preparation)。

(U)LIRGs 是低红移宇宙中具有极高红外光度的天体。不少 (U)LIRGs 的紫外-光学波段表现出典型的 AGN 特征。另外相关研究也发现 FeLoBALs 中出现 ULIRGs 的比例较高。目前, (U)LIRGs 的多波段观测数据比较充分。最近, 越来越多的直接观测证据表明 AGN 外流会有效影响到星系尺度, 最典型的例子如绪论中提到的 Mrk 231 以及 IRAS F11119+3257。在 ULIRGs 既有机会在 X-ray 波段观测到超高速外流吸收线, 也能在紫外、光学探测到 C IV、Mg II、Fe II 等离子吸收线, 还能观测到中性以及分子吸收线。不同电离度的吸收线与外流气体相对中心光源的距离密切相关。以往我们研究的往往是 AGN 外流的某一部分, 而实际上 AGN 的外流可能是从内而外的大尺度外流, 因此 (U)LIRGs 的多波段观测数据让我们有机会从整体上研究 AGN 的外流, 并了解 AGN 外流与星际介质的相互作用情况。我们有兴趣对 ULIRGs 和 LIRGs 中的光学-紫外吸收线并结合 X-ray 以及红外、射电方面的数据开展综合研究 (X. Pan et al. 2015, in preparation)。

¹这里的 $\text{H}\beta$ 发射线的 FWHM 是根据 Wang et al. (2009) 中公式 6 由 Mg II 发射线 FWHM 计算而来的。

参考文献

- [1] Aalto, S., Garcia-Burillo, S., Muller, S., et al. 2012, *A&A*, 537, A44
- [2] Aalto, S., Garcia-Burillo, S., Muller, S., et al. 2015, *A&A*, 574, A85
- [3] Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- [4] Ahn, C. P., Alexandroff, R., Allende Prieto, C., et al. 2014, *ApJS*, 211, 17
- [5] Allamandola, L. J., Tielens, A. G. G. M., & Barker, J. R. 1985, *ApJ*, 290, L25
- [6] Allen, J. T., Hewett, P. C., Maddox, N., Richards, G. T., & Belokurov, V. 2011, *MNRAS*, 410, 860
- [7] Allen, M. G., Groves, B. A., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., & Kewley, L. J. 2008, *ApJS*, 178, 20
- [8] Alexander, D. M., & Hickox, R. C. 2012, *New A Rev.*, 56, 93
- [9] Anderson, K. S. 1974, *ApJ*, 189, 195
- [10] Antonucci, R. 1993, *ARA&A*, 31, 473
- [11] Aoki, K., Oyabu, S., Dunn, J. P., et al. 2011, *PASJ*, 63, 457
- [12] Arav, N., Brotherton, M. S., Becker, R. H., et al. 2001, *ApJ*, 546, 140
- [13] Arav, N., Kaastra, J., Kriss, G. A., et al. 2005, *ApJ*, 620, 665
- [14] Arav, N., Moe, M., Costantini, E., et al. 2008, *ApJ*, 681, 954
- [15] Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *PASP*, 93, 5
- [16] Baldwin, J., Ferland, G., Korista, K., & Verner, D. 1995, *ApJ*, 455, L119
- [17] Balick, B., & Heckman, T. M. 1982, *ARA&A*, 20, 431
- [18] Barnes, J. E., & Hernquist, L. 1992, *ARA&A*, 30, 705
- [19] Barvainis, R. 1987, *ApJ*, 320, 537
- [20] Bautista, M. A., Dunn, J. P., Arav, N., et al. 2010, *ApJ*, 713, 25
- [21] Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1994, *Astronomical Data Analysis Software and Systems III*, 61, 165
- [22] Bertin, E., & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- [23] Ben Bekhti, N., Winkel, B., Richter, P., et al. 2012, *A&A*, 542, A110
- [24] Bentz, M. C., Peterson, B. M., Netzer, H., Pogge, R. W., & Vestergaard, M. 2009, *ApJ*, 697, 160
- [25] Bennert, N., Canalizo, G., Jungwiert, B., et al. 2008, *ApJ*, 677, 846
- [26] Borguet, B. C. J., Edmonds, D., Arav, N., Benn, C., & Chamberlain, C. 2012, *ApJ*, 758, 69
- [27] Borguet, B. C. J., Edmonds, D., Arav, N., Dunn, J., & Kriss, G. A. 2012, *ApJ*, 751, 107
- [28] Borguet, B. C. J., Arav, N., Edmonds, D., Chamberlain, C., & Benn, C. 2013, *ApJ*, 762, 49
- [29] Boroson, T. A., & Green, R. F. 1992, *ApJS*, 80, 109
- [30] Boroson, T. A. 2002, *ApJ*, 565, 78
- [31] Boroson, T. 2005, *AJ*, 130, 381
- [32] Bournaud, F., & Combes, F. 2003, *A&A*, 401, 817
- [33] Bradt, H. 2004, *Astronomy Methods : a Physical Approach to Astronomical Observations*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004 ISBN 0521535514,
- [34] Brammer, G. B., Whitaker, K. E., van Dokkum, P. G., et al. 2009, *ApJ*, 706, L173
- [35] Brauher, J. R., Dale, D. A., & Helou, G. 2008, *ApJS*, 178, 280
- [36] Brinkmann, W., Wang, T., Matsuoka, M., & Yuan, W. 1999, *A&A*, 345, 43
- [37] Brotherton, M. S., Arav, N., Becker, R. H., et al. 2001, *ApJ*, 546, 134
- [38] Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- [39] Burtscher, L., Meisenheimer, K., Tristram, K. R. W., et al. 2013, *A&A*, 558, A149
- [40] Buta, R., Purcell, G. B., Cobb, M. L., et al. 1999, *AJ*, 117, 778
- [41] Cao Orjales, J. M., Stevens, J. A., Jarvis, M. J., et al. 2012, *MNRAS*, 427, 1209
- [42] Carswell, R. F., Morton, D. C., Smith, M. G., et al. 1984, *ApJ*, 278, 486
- [43] Ciccone, C., Feruglio, C., Maiolino, R., et al. 2012, *A&A*, 543, A99
- [44] Clegg, R. E. S. 1987, *MNRAS*, 229, 31P
- [45] Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., & Cohen, J. G. 1996, *AJ*, 112, 839
- [46] Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., & Gabel, J. R. 2003, *AJ*, 126, 1690
- [47] Cushing, M. C., Vacca, W. D., & Rayner, J. T. 2004, *PASP*, 116, 362
- [48] Davies, R. I., Müller Sánchez, F., Genzel, R., et al. 2007, *ApJ*, 671, 1388
- [49] Davies, R. I., Maciejewski, W., Hicks, E. K. S., et al. 2009, *ApJ*, 702, 114
- [50] de Kool, M., Becker, R. H., Arav, N., Gregg, M. D., & White, R. L. 2002, *ApJ*, 570, 514

- [51] Deason, A. J., Belokurov, V., Evans, N. W., & McCarthy, I. G. 2012, *ApJ*, 748, 2
- [52] Dietrich, M., Appenzeller, I., Vestergaard, M., & Wagner, S. J. 2002, *ApJ*, 564, 581
- [53] Doi, Y., Etxaluze Azkonaga, M., White, G., et al. 2009, The Next-Generation Infrared Space Mission: SPICA, 4018
- [54] Dong, X., Wang, T., Wang, J., et al. 2008, *MNRAS*, 383, 581
- [55] Dong, X.-B., Wang, J.-G., Ho, L. C., et al. 2011, *ApJ*, 736, 86
- [56] Dunn, J. P., Bautista, M., Arav, N., et al. 2010, *ApJ*, 709, 611
- [57] Elvis, M., Wilkes, B. J., McDowell, J. C., et al. 1994, *ApJS*, 95, 1
- [58] Elvis, M. 2000, *ApJ*, 545, 63
- [59] Erwin, P., Pohlen, M., & Beckman, J. E. 2008, *AJ*, 135, 20
- [60] Fabian, A. C. 2012, *ARA&A*, 50, 455
- [61] Fardal, M. A., Katz, N., Weinberg, D. H., & Davé, R. 2007, *MNRAS*, 379, 985
- [62] Farrah, D., Lacy, M., Priddey, R., Borys, C., & Afonso, J. 2007, *ApJ*, 662, L59
- [63] Farrah, D., Bernard-Salas, J., Spoon, H. W. W., et al. 2007, *ApJ*, 667, 149
- [64] Farrah, D., Urrutia, T., Lacy, M., et al. 2012, *ApJ*, 745, 178
- [65] Fathi, K., Storchi-Bergmann, T., Riffel, R. A., et al. 2006, *ApJ*, 641, L25
- [66] Ferland, G. J., Korista, K. T., Verner, D. A., et al. 1998, *PASP*, 110, 761
- [67] Feruglio, C., Maiolino, R., Piconcelli, E., et al. 2010, *A&A*, 518, L155
- [68] Feruglio, C., Fiore, F., Carniani, S., et al. 2015, arXiv:1503.01481
- [69] Fitzpatrick, E. L. 1999, *PASP*, 111, 63
- [70] Forster, K., Rich, R. M., & McCarthy, J. K. 1995, *ApJ*, 450, 74
- [71] Gallagher, S. C., Brandt, W. N., Chartas, G., & Garmire, G. P. 2002, *ApJ*, 567, 37
- [72] Gallagher, S. C., Hines, D. C., Blaylock, M., et al. 2007, *ApJ*, 665, 157
- [73] Gallagher, S. C., Brandt, W. N., Chartas, G., et al. 2006, *ApJ*, 644, 709
- [74] Ganguly, R., Brotherton, M. S., Cales, S., et al. 2007, *ApJ*, 665, 990
- [75] Gaskell, C. M., & Ferland, G. J. 1984, *PASP*, 96, 393
- [76] Gibson, R. R., Jiang, L., Brandt, W. N., et al. 2009, *ApJ*, 692, 758
- [77] Glikman, E., Helfand, D. J., & White, R. L. 2006, *ApJ*, 640, 579
- [78] Glikman, E., Urrutia, T., Lacy, M., et al. 2012, *ApJ*, 757, 51
- [79] González-Alfonso, E., Fischer, J., Graciá-Carpio, J., et al. 2014, *A&A*, 561, A27
- [80] Green, P. J., & Mathur, S. 1996, *ApJ*, 462, 637
- [81] Greene, J. E., & Ho, L. C. 2004, *ApJ*, 610, 722
- [82] Greene, J. E., & Ho, L. C. 2005, *ApJ*, 630, 122
- [83] Greene, J. E., & Ho, L. C. 2007, *ApJ*, 667, 131
- [84] Greene, J. E., & Ho, L. C. 2007, *ApJ*, 670, 92
- [85] Greene, J. E., Zakamska, N. L., Ho, L. C., & Barth, A. J. 2011, *ApJ*, 732, 9
- [86] Gunn, J. E., Carr, M., Rockosi, C., et al. 1998, *AJ*, 116, 3040
- [87] Guyon, O., Sanders, D. B., & Stockton, A. 2006, *ApJS*, 166, 89
- [88] Hall, P. B., Anderson, S. F., Strauss, M. A., et al. 2002, *ApJS*, 141, 267
- [89] Hall, P. B., Hutsemékers, D., Anderson, S. F., et al. 2003, *ApJ*, 593, 189
- [90] Halpern, J. P., & Steiner, J. E. 1983, *ApJ*, 269, L37
- [91] Hamann, F., Korista, K. T., Ferland, G. J., Warner, C., & Baldwin, J. 2002, *ApJ*, 564, 592
- [92] Hamann, F., & Sabra, B. 2004, AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey, 311, 203
- [93] Hamann, F., Chartas, G., McGraw, S., et al. 2013, *MNRAS*, 435, 133
- [94] Harrison, C. M., Alexander, D. M., Mullaney, J. R., & Swinbank, A. M. 2014, *MNRAS*, 441, 3306
- [95] Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., et al. 2004, *ApJ*, 613, 109
- [96] Heckman, T. M., & Best, P. N. 2014, *ARA&A*, 52, 589
- [97] Hernquist, L., & Weil, M. L. 1993, *MNRAS*, 261, 804
- [98] Hjerting, F. 1938, *ApJ*, 88, 508
- [99] Hewett, P. C., & Foltz, C. B. 2003, *AJ*, 125, 1784
- [100] Hewett, P. C., & Wild, V. 2010, *MNRAS*, 405, 2302
- [101] Ho, L. C. 2008, *ARA&A*, 46, 475
- [102] Hodgman, S. S., Dall, R. G., Byron, L. J., et al. 2009, *Physical Review Letters*, 103, 053002
- [103] Hopkins, A. M., & Beacom, J. F. 2006, *ApJ*, 651, 142
- [104] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2006, *ApJS*, 163, 1
- [105] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., & Kereš, D. 2008, *ApJS*, 175, 356
- [106] Hopkins, P. F., & Elvis, M. 2010, *MNRAS*, 401, 7
- [107] Horellou, C., & Combes, F. 2001, *Ap&SS*, 276, 1141

- [108] Houck, J. R., Roellig, T. L., van Cleve, J., et al. 2004, *ApJS*, 154, 18
- [109] Hu, J. 2008, *MNRAS*, 386, 2242
- [110] Ji, T., Wang, T.-G., Zhou, H.-Y., & Wang, H.-Y. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 369
- [111] Ji, T., Zhou, H., Jiang, P., et al. 2015, *ApJ*, 800, 56
- [112] Jiang, N., Ho, L. C., Dong, X.-B., Yang, H., & Wang, J. 2013, *ApJ*, 770, 3
- [113] Jiang, P., Zhou, H., Ji, T., et al. 2013, *AJ*, 145, 157
- [114] Jiang, Y.-F., Greene, J. E., & Ho, L. C. 2011, *ApJ*, 737, L45
- [115] Jiang, Y.-F., Greene, J. E., Ho, L. C., Xiao, T., & Barth, A. J. 2011, *ApJ*, 742, 68
- [116] Kaastra, J. S., Detmers, R. G., Mehdić, M., et al. 2012, *A&A*, 539, A117
- [117] Kallman, T., & Bautista, M. 2001, *ApJS*, 133, 221
- [118] Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., et al. 2000, *ApJ*, 533, 631
- [119] Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., et al. 2003, *MNRAS*, 346, 1055
- [120] Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., et al. 2003, *MNRAS*, 341, 54
- [121] Kennicutt, R. C., Jr. 1998, *ARA&A*, 36, 189
- [122] Kerr, R. P. 1963, *Physical Review Letters*, 11, 237
- [123] Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, *MNRAS*, 372, 961
- [124] Kim, D.-C., Sanders, D. B., Veilleux, S., Mazzarella, J. M., & Soifer, B. T. 1995, *ApJS*, 98, 129
- [125] King, A., & Pounds, K. 2015, *ARA&A*, 53, 115
- [126] Kondo, S., Kobayashi, N., Minowa, Y., et al. 2006, *ApJ*, 643, 667
- [127] Komossa, S., Xu, D., Zhou, H., Storchi-Bergmann, T., & Binette, L. 2008, *ApJ*, 680, 926
- [128] Korista, K. T., Weymann, R. J., Morris, S. L., et al. 1992, *ApJ*, 401, 529
- [129] Korista, K. T., Bautista, M. A., Arav, N., et al. 2008, *ApJ*, 688, 108
- [130] Kormendy, J., & Richstone, D. 1995, *ARA&A*, 33, 581
- [131] Kormendy, J., & Gebhardt, K. 2001, *20th Texas Symposium on relativistic astrophysics*, 586, 363
- [132] Kormendy, J., & Kennicutt, R. C., Jr. 2004, *ARA&A*, 42, 603
- [133] Kormendy, J., Bender, R., & Cornell, M. E. 2011, *Nature*, 469, 374
- [134] Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, *ARA&A*, 51, 511
- [135] Krolik, J. H., & Kriss, G. A. 1995, *ApJ*, 447, 512
- [136] Kruczek, N. E., Richards, G. T., Gallagher, S. C., et al. 2011, *AJ*, 142, 130
- [137] Landt, H., Bentz, M. C., Ward, M. J., et al. 2008, *ApJS*, 174, 282
- [138] Landt, H., Elvis, M., Ward, M. J., et al. 2011, *MNRAS*, 414, 218
- [139] Lebouteiller, V., Barry, D. J., Spoon, H. W. W., et al. 2011, *ApJS*, 196, 8
- [140] Le Floc'h, E., Papovich, C., Dole, H., et al. 2005, *ApJ*, 632, 169
- [141] Leger, A., & Puget, J. L. 1984, *A&A*, 137, L5
- [142] Leighly, K. M., Dietrich, M., & Barber, S. 2011, *ApJ*, 728, 94
- [143] Leighly, K. M., Terndrup, D. M., Baron, E., et al. 2014, *ApJ*, 788, 123
- [144] Li, A., & Draine, B. T. 2001, *ApJ*, 554, 778
- [145] Liu, G., Zakamska, N. L., Greene, J. E., Nesvadba, N. P. H., & Liu, X. 2013, *MNRAS*, 436, 2576
- [146] Lucy, A. B., Leighly, K. M., Terndrup, D. M., Dietrich, M., & Gallagher, S. C. 2014, *ApJ*, 783, 58
- [147] Lynds, R., & Toomre, A. 1976, *ApJ*, 209, 382
- [148] Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, *AJ*, 115, 2285
- [149] Maiolino, R., Gallerani, S., Neri, R., et al. 2012, *MNRAS*, 425, L66
- [150] Mapelli, M., Moore, B., Ripamonti, E., et al. 2008, *MNRAS*, 383, 1223
- [151] Mapelli, M., & Mayer, L. 2012, *MNRAS*, 420, 1158
- [152] Markwardt, C. B. 2009, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*, 411, 251
- [153] Martin, D. C., Wyder, T. K., Schiminovich, D., et al. 2007, *ApJS*, 173, 342
- [154] Mathews, W. G., & Ferland, G. J. 1987, *ApJ*, 323, 456
- [155] Mathur, S., Fields, D., Peterson, B. M., & Grupe, D. 2012, *ApJ*, 754, 146
- [156] McConnell, N. J., & Ma, C.-P. 2013, *ApJ*, 764, 184
- [157] Merritt, D., & Ferrarese, L. 2001, *ApJ*, 547, 140
- [158] Meyers, K. A., & Peterson, B. M. 1985, *PASP*, 97, 734
- [159] Miller, S. H., Ellis, R. S., Newman, A. B., & Benson, A. 2014, *ApJ*, 782, 115
- [160] Misselt, K. A., Clayton, G. C., & Gordon, K. D. 1999, *ApJ*, 515, 128
- [161] Morrissey, P., Conrow, T., Barlow, T. A., et al. 2007, *ApJS*, 173, 682

- [162] Moshir, M., Kopman, G., & Conrow, T. A. O. 1992, Pasadena: Infrared Processing and Analysis Center, California Institute of Technology, 1992, edited by Moshir, M.; Kopman, G.; Conrow, T. a.o.,
- [163] Nandra, K., Georgakakis, A., Willmer, C. N. A., et al. 2007, *ApJ*, 660, L11
- [164] Netzer, H., Lutz, D., Schweitzer, M., et al. 2007, *ApJ*, 666, 806
- [165] Nicastro, F., Fiore, F., Perola, G. C., & Elvis, M. 1999, *ApJ*, 512, 184
- [166] Ohta, K., Aoki, K., Kawaguchi, T., & Kiuchi, G. 2007, *ApJS*, 169, 1
- [167] Orban de Xivry, G., Davies, R., Schartmann, M., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 2721
- [168] Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, 2nd. ed. by D.E. Osterbrock and G.J. Ferland. Sausalito, CA: University Science Books, 2006,
- [169] Page, M. J., Symeonidis, M., Vieira, J. D., et al. 2012, *Nature*, 485, 213
- [170] Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., et al. 2014, *A&A*, 563, A54
- [171] Pei, Y. C. 1992, *ApJ*, 395, 130
- [172] Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *AJ*, 124, 266
- [173] Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2010, *AJ*, 139, 2097
- [174] Peterson, B. M. 1997, *An introduction to active galactic nuclei*, Publisher: Cambridge, New York Cambridge University Press, 1997 Physical description xvi, 238 p. ISBN 0521473489,
- [175] Polletta, M., Tajer, M., Maraschi, L., et al. 2007, *ApJ*, 663, 81
- [176] Pohlen, M., & Trujillo, I. 2006, *A&A*, 454, 759
- [177] Prieto, M. A., Maciejewski, W., & Reunanen, J. 2005, *AJ*, 130, 1472
- [178] Reichard, T. A., Richards, G. T., Schneider, D. P., et al. 2003, *AJ*, 125, 1711
- [179] Reichard, T. A., Richards, G. T., Hall, P. B., et al. 2003, *AJ*, 126, 2594
- [180] Reichard, T. A., Heckman, T. M., Rudnick, G., et al. 2009, *ApJ*, 691, 1005
- [181] Richards, G. T., Fan, X., Schneider, D. P., et al. 2001, *AJ*, 121, 2308
- [182] Richards, G. T., Vanden Berk, D. E., Reichard, T. A., et al. 2002, *AJ*, 124, 1
- [183] Richards, G. T., Hall, P. B., Vanden Berk, D. E., et al. 2003, *AJ*, 126, 1131
- [184] Richards, G. T. 2006, arXiv:astro-ph/0603827
- [185] Richards, G. T., Kruczak, N. E., Gallagher, S. C., et al. 2011, *AJ*, 141, 167
- [186] Richstone, D., Ajhar, E. A., Bender, R., et al. 1998, *Nature*, 395, A14
- [187] Riffel, R., Rodríguez-Ardila, A., & Pastoriza, M. G. 2006, *A&A*, 457, 61
- [188] Rieke, G. H., Alonso-Herrero, A., Weiner, B. J., et al. 2009, *ApJ*, 692, 556
- [189] Rudy, R. J., Stocke, J. T., & Foltz, C. B. 1985, *ApJ*, 288, 531
- [190] Rupke, D. S., Veilleux, S., & Sanders, D. B. 2002, *ApJ*, 570, 588
- [191] Rupke, D. S. N., & Veilleux, S. 2011, *ApJ*, 729, L27
- [192] Sanders, D. B., Soifer, B. T., Elias, J. H., et al. 1988, *ApJ*, 325, 74
- [193] Sanders, D. B., & Mirabel, I. F. 1996, *ARA&A*, 34, 749
- [194] Savage, B. D., & Sembach, K. R. 1991, *ApJ*, 379, 245
- [195] Savage, B. D., & Sembach, K. R. 1996, *ARA&A*, 34, 279
- [196] Scannapieco, E., & Oh, S. P. 2004, *ApJ*, 608, 62
- [197] Schawinski, K., Kaviraj, S., Khochfar, S., et al. 2007, *ApJS*, 173, 512
- [198] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- [199] Schmidt, M. 1963, *Nature*, 197, 1040
- [200] Schneider, D. P., Hall, P. B., Richards, G. T., et al. 2005, *AJ*, 130, 367
- [201] Schneider, D. P., Hall, P. B., Richards, G. T., et al. 2007, *AJ*, 134, 102
- [202] Schneider, D. P., Richards, G. T., Hall, P. B., et al. 2010, *AJ*, 139, 2360
- [203] Schweitzer, M., Lutz, D., Sturm, E., et al. 2006, *ApJ*, 649, 79
- [204] Sersic, J. L. 1968, Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968,
- [205] Shankar, F., Weinberg, D. H., & Miralda-Escudé, J. 2009, *ApJ*, 690, 20
- [206] Shen, Y., Strauss, M. A., Hall, P. B., et al. 2008, *ApJ*, 677, 858
- [207] Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, *AJ*, 131, 1163
- [208] Smith, J. D. T., Draine, B. T., Dale, D. A., et al. 2007, *ApJ*, 656, 770
- [209] Smith, R., Lane, R. R., Conn, B. C., & Fellhauer, M. 2012, *MNRAS*, 423, 543
- [210] Spoon, H. W. W., Marshall, J. A., Houck, J. R., et al. 2007, *ApJ*, 654, L49
- [211] Spoon, H. W. W., Farrah, D., Lebouteiller, V., et al. 2013, *ApJ*, 775, 127
- [212] Storchi-Bergmann, T., McGregor, P. J., Riffel, R. A., et al. 2009, *MNRAS*, 394, 1148
- [213] Sturm, E., González-Alfonso, E., Veilleux, S., et al. 2011, *ApJ*, 733, L16
- [214] Surdej, J., & Hutsemekers, D. 1987, *A&A*, 177, 42
- [215] Teng, S. H., Veilleux, S., & Baker, A. J. 2013, *ApJ*, 765, 95

- [216] Tennyson, J. 2005, Astronomical spectroscopy : an introduction to the atomic and molecular physics of astronomical spectra, by J. Tennyson. Imperial College Press advanced physics texts, vol. 2 London: Imperial College Press, 2005 ISBN 1860945295,
- [217] Theys, J. C., & Spiegel, E. A. 1977, ApJ, 212, 616
- [218] Tolea, A., Krolik, J. H., & Tsvetanov, Z. 2002, ApJ, 578, L31
- [219] Tombesi, F., Meléndez, M., Veilleux, S., et al. 2015, Nature, 519, 436
- [220] Toomre, A., & Toomre, J. 1972, ApJ, 178, 623
- [221] Toomre, A. 1977, Evolution of Galaxies and Stellar Populations, 401
- [222] Toomre, A. 1978, Large Scale Structures in the Universe, 79, 109
- [223] Trump, J. R., Hall, P. B., Reichard, T. A., et al. 2006, ApJS, 165, 1
- [224] Tsuzuki, Y., Kawara, K., Yoshii, Y., et al. 2006, ApJ, 650, 57
- [225] Wang, H., Wang, T., Yuan, W., et al. 2010, ApJ, 710, 78
- [226] Wang, H., Wang, T., Zhou, H., et al. 2011, ApJ, 738, 85
- [227] Wang, H., Zhou, H., Yuan, W., & Wang, T. 2012, ApJ, 751, L23
- [228] Wang, H., Xing, F., Zhang, K., et al. 2013, ApJ, 776, L15
- [229] Wang, J.-G., Dong, X.-B., Wang, T.-G., et al. 2009, ApJ, 707, 1334
- [230] Wang, J.-G., Zhou, H.-Y., Ge, J., et al. 2012, ApJ, 760, 42
- [231] Weingartner, J. C., & Draine, B. T. 2001, ApJ, 548, 296
- [232] Welsh, B. Y., Vedder, P. W., & Vallerga, J. V. 1990, ApJ, 358, 473
- [233] Werner, M. W., Roellig, T. L., Low, F. J., et al. 2004, ApJS, 154, 1
- [234] Weymann, R. J., Morris, S. L., Foltz, C. B., & Hewett, P. C. 1991, ApJ, 373, 23
- [235] Wild, V., Kauffmann, G., Heckman, T., et al. 2007, MNRAS, 381, 543
- [236] Wild, V., Heckman, T., & Charlot, S. 2010, MNRAS, 405, 933
- [237] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, AJ, 140, 1868
- [238] Wu, X., Gerhard, O., Naab, T., et al. 2014, MNRAS, 438, 2701
- [239] Wu, X., & Kroupa, P. 2015, MNRAS, 446, 330
- [240] Wu, Y.-T., & Jiang, I.-G. 2015, ApJ, 805, 32
- [241] Vacca, W. D., Cushing, M. C., & Rayner, J. T. 2003, PASP, 115, 389
- [242] van Dyck, R. S., Johnson, C. E., & Shugart, H. A. 1971, Phys. Rev. A, 4, 1327
- [243] Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., et al. 2001, AJ, 122, 549
- [244] Veilleux, S., Rupke, D. S. N., Kim, D.-C., et al. 2009, ApJS, 182, 628
- [245] Veilleux, S., Trippe, M., Hamann, F., et al. 2013, ApJ, 764, 15
- [246] Véron, P., Gonçalves, A. C., & Véron-Cetty, M.-P. 2002, A&A, 384, 826
- [247] Véron-Cetty, M.-P., Joly, M., & Véron, P. 2004, A&A, 417, 515
- [248] Vestergaard, M., & Wilkes, B. J. 2001, ApJS, 134, 1
- [249] Voit, G. M., Weymann, R. J., & Korista, K. T. 1993, ApJ, 413, 95
- [250] Xiao, T., Barth, A. J., Greene, J. E., et al. 2011, ApJ, 739, 28
- [251] Xue, Y. Q., Brandt, W. N., Luo, B., et al. 2010, ApJ, 720, 368
- [252] York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E., Jr., et al. 2000, AJ, 120, 1579
- [253] Zamanov, R., Marziani, P., Sulentic, J. W., et al. 2002, ApJ, 576, L9
- [254] Zhang, K., Dong, X.-B., Wang, T.-G., & Gaskell, C. M. 2011, ApJ, 737, 71
- [255] Zhang, K., Wang, T.-G., Yan, L., & Dong, X.-B. 2013, ApJ, 768, 22
- [256] Zhang, S., Wang, T.-G., Wang, H., et al. 2010, ApJ, 714, 367
- [257] Zhang, S., Wang, H., Wang, T., et al. 2014, ApJ, 786, 42
- [258] Zhou, H., Wang, T., Dong, X., Wang, J., & Lu, H. 2005, Mem. Soc. Astron. Italiana, 76, 93
- [259] Zhou, H., Wang, T., Yuan, W., et al. 2006, ApJS, 166, 128

附录 A Mg II 及 He I* BAL 类星体样本测量结果

A.1 Mg II BAL 类星体样本吸收线和发射线测量结果

本文的父样本是从过去发表的 Mg II BAL 类星体样本Trump et al. (2006) (T06), Gibson et al. (2009) (G09) 以及Zhang et al. (2010) (Z10) 中（共 351 个源）选择而来。我们利用光谱配对法在这三个样本中选出了 285 个符合条件的源作为父样本。由光谱配对法测量 Mg II BAL 类星体的结果见表 A.1。

此外，我们测量了所有 Mg II BAL 类星体的紫外连续谱和发射线性质。我们在测量中使用了由 Wang et al. (2009) 为测量 Mg II 发射线以及紫外连续谱的而发展的自动处理程序。拟合时主要考虑的成分有幂律连续谱，紫外 Fe II 发射线、巴尔末连续谱以及 Mg II 发射线。以下是处理程序对各成分的具体处置方法：(1) 紫外核连续谱由单一幂律函数拟合，谱型根据已知的受发射线影响较小的连续谱窗口确定。(2) 目标源的紫外 Fe II 发射线用以 I Zw 1 的紫外铁发射线为原型的经验铁线模板(Tsuzuki et al. 2006) 拟合。为了匹配目标源紫外 Fe II 发射线的宽度和速度移动，拟合程序在拟合中将 Fe II 模板用高斯卷积并在速度空间中移动。(3) 对于巴尔末连续谱，处理程序假设该成分由温度均匀的光学厚云团发射而来，采用 Dietrich et al. (2002) 给出的形式。(3) Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 双线中的每一根线都试图分解为宽成分和窄成分。其中宽成分的轮廓用 5 个参数高斯-厄米特函数拟合，而窄成分则假设为单高斯轮廓。拟合结果汇总在表 A.2。

对于 $z < 0.8$ 的 Mg II BAL 类星体，SDSS 光谱覆盖了其静止系光学波段，我们拟合了这些源的静止系光学连续谱和发射线。我们在测量中使用了由 Dong et al. (2008) 发展的类星体光学光谱处理程序“qso_modelling”。这些 Mg II BAL 类星体光学光谱有以下特点：连续谱由核连续谱主导，其寄主星系的星光的贡献可以忽略；巴尔末宽发射线以及 [O III] 等高电离窄发射线很强；光学 Fe II 发射线很强且严重混合在一起形成“伪”连续谱。qso_modelling 在拟合时对这些成分的处理方法如下：(1) AGN 连续谱假设为单一幂律函数，由受发射线影响较小的连续谱窗口确定。(2) 宽发射线由 4 个高斯拟合，窄发射线由 1–2 个高斯拟合。(3) 光学 Fe II 发射线采用两套解析的 Fe II 发射线模板。该发射线模板由 Véron-Cetty et al. (2004) 从 I zW 1 的光学 Fe II 发射线分解而来，分别对应于宽 Fe II 成分和窄 Fe II 成分。拟合时假设每套模板内的 Fe II 相对线强与 I Zw 1 相同，且各线之间没有移动。Fe II 宽成分的线宽假设与 H β 宽成分的线宽一致，Fe II 窄成分假设与 [O III] 或其他窄发射线相同。拟合结果汇总在表 A.3。

表 A.1 Mg II BAL 类星体样本 Mg II 吸收线测量参数

SDSS Name	z	Spectrum	$Mg\text{ II}$ EW (Å) (4)	$Mg\text{ II}$ AI (km s $^{-1}$) (5)	$Mg\text{ II}$ d_{obs} (6)	$Mg\text{ II}$ $v_{\text{max}} (\text{km s}^{-1})$ (7)	$Mg\text{ II}$ $v_{\text{min}} (\text{km s}^{-1})$ (8)	$Mg\text{ II}$ $v_{\text{avg}} (\text{km s}^{-1})$ (9)	$Mg\text{ II}$ S/N (10)	Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J000009.26+151754.5	1.197	52251-0751-354	10.15 ± 0.86	1282 ± 0.80	-4104	-126	-1457	9.1	T06,Z10	
J002623.78+135523.5	1.319	52233-0753-002	24.81 ± 1.71	2547 ± 0.45	-17685	-6550	-11943	14.0	T06,G09,Z10	
J004610.17+000449.7	0.826	52199-0691-494	4.92 ± 1.2	391	0.33	-1846	567	-699	10.3	Z10
J005722.48+010101.8	1.146	51783-0395-417	3.75 ± 0.66	420	0.40	-5249	-3001	-4204	11.3	T06,Z10
J010352.46+003739.7	0.705	51816-0396-471	5.34 ± 0.44	556	0.28	-11571	-8433	-10071	23.7	T06,G09,Z10
J000009.26+151754.5	1.197	52251-0751-354	10.15 ± 0.86	1282 ± 0.80	-4104	-126	-1457	9.1	T06,Z10	
J002623.78+135523.5	1.319	52233-0753-002	24.81 ± 1.71	2547 ± 0.45	-17685	-6550	-11943	14.0	T06,G09,Z10	
J004610.17+000449.7	0.826	52199-0691-494	4.92 ± 1.2	391	0.33	-1846	567	-699	10.3	Z10
J005722.48+010101.8	1.146	51783-0395-417	3.75 ± 0.66	420	0.40	-5249	-3001	-4204	11.3	T06,Z10
J010352.46+003739.7	0.705	51816-0396-471	5.34 ± 0.44	556	0.28	-11571	-8433	-10071	23.7	T06,G09,Z10
J011117.34+142653.6	1.155	51821-0423-310	4.51 ± 0.51	510	0.39	-4427	-2652	-3614	20.3	T06
J013816.16+140431.6	0.877	51882-0426-494	6.25 ± 1.08	657	0.64	-5167	-2850	-4050	6.6	T06
J013853.94-101125.7	1.305	52145-0663-217	7.86 ± 1.07	702	0.29	-10090	-5311	-7844	16.8	T06,G09,T06
J014012.07+130241.8	1.188	51882-0426-081	8.30 ± 1.21	887	0.55	-4994	-2196	-3697	5.4	T06,G09
J014534.36+143136.9	0.636	51820-0429-372	4.67 ± 0.84	517	0.50	-1888	-29	-1016	10.1	T06
J014950.96-010314.1	1.082	51793-0402-260	4.69 ± 0.50	467	0.25	-9342	-5841	-7640	27.3	T06,Z10
J015636.03+135121.3a	1.129	51900-0427-354	7.70 ± 0.83	877	0.73	-4044	-2267	-3209	10.0	T06,Z10
J015636.03+135212.3b	1.129	51900-0427-354	5.06 ± 0.95	456	0.54	-6420	-4793	-5603	10.0	T06,Z10
J020105.14+000617.9	1.205	51871-0403-593	6.47 ± 0.76	643	0.34	-3684	-1827	-3167	23.4	T06,G09,Z10
J023102.49-083141.2	0.587	51908-0454-582	5.36 ± 0.91	552	0.30	-4939	-1660	-3167	12.9	T06,G09,Z10
J023115.64-093333.6	0.555	51908-0454-017	3.84 ± 0.82	400	0.43	-2064	-136	-1197	6.9	T06
J023445.76-085908.5	1.275	51909-0455-238	10.36 ± 1.92	1072	0.37	-9980	-4043	-7174	11.4	T06,Z10,G09
J024220.10-085332.7	0.800	51910-0456-291	4.58 ± 0.72	500	0.36	-4601	-2211	-3372	11.4	T06
J024254.66-072205.6	1.217	51910-0456-378	15.48 ± 0.62	1615	0.94	-2517	28	-1311	14.0	T06,G09,Z10
J025206.66+000903.3	0.597	51871-0409-553	10.32 ± 1.56	946	0.59	-3052	387	-1386	4.9	T06,G09,Z10
J025204.17+010710.5	1.223	51816-0410-321	41.41 ± 5.46	2914	0.88	-19516	-16259	-16259	3.9	T06
J025754.90-072449.5	1.023	51901-0457-547	5.95 ± 1.15	658	0.54	-3146	-468	-1915	9.6	T06,Z10
J025813.67-0111347.2	1.165	52614-1068-004	5.13 ± 1.32	449	0.35	-13531	-11346	-12448	9.2	G09
J033438.28-071149.0	0.635	51910-0461-074	6.13 ± 0.29	726	0.45	-7821	-5728	-6706	30.9	T06
J073122.84+430241.0	0.975	53312-1865-044	5.61 ± 1.22	432	0.31	-6701	-3578	-4881	9.6	Z10
J074554.74+181817.0	1.054	52939-1582-256	12.30 ± 0.73	1329	0.80	-3971	-613	-1887	12.0	G09,Z10
J075325.52+414842.9	1.349	51882-0435-408	3.36 ± 0.88	341	0.38	-4192	-1867	-3026	15.8	T06
J075927.12+363431.5	0.983	52238-0757-474	15.20 ± 1.61	1606	0.50	-8378	-1311	-4118	10.6	T06,G09,Z10
J080248.19+551328.8	0.664	53384-1871-440	17.03 ± 0.52	809	0.94	-1123	-1434	96	11.7	G09
J080525.11+274321.8	0.895	52581-0929-571	4.75 ± 0.67	557	0.77	-2075	-79	-953	7.9	T06
J080559.43+563025.8	0.982	53386-1872-311	11.53 ± 1.03	1225	0.57	-4931	-1445	-3263	8.5	G09,Z10
J080934.64+254837.9	0.545	52670-1205-588	7.28 ± 0.70	402	0.53	-1993	1388	-113	19.1	Z10,T06
J080957.38+181804.4	0.969	53319-1923-023	25.61 ± 0.64	2279	0.97	-6028	-701	-2881	23.6	Z10
J081312.61+432640.1	1.090	52207-0547-274	3.13 ± 0.87	364	0.38	-1862	66	-1051	13.9	T06

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s^{-1}) (4)	Mg II d_{abs} (5)	Mg II v_{max} (km s^{-1}) (6)	Mg II v_{min} (km s^{-1}) (7)	Mg II v_{avg} (km s^{-1}) (8)	Mg II S/N (9)	Mg II Ref. (10)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J081314.80+385720.4	0.925	52254-0759-133	2.92 ± 1.12	273	0.23	-5482	-3440	-4417	9.0	T06,Z10
J081655.34+074311.5	0.645	53083-1757-423	3.39 ± 0.68	367	0.25	-5593	-2663	-4288	14.0	Z10
J081819.29+562307.6	0.989	53386-1872-105	9.91 ± 0.70	1308	0.76	-5263	-405	-2147	13.8	G09,Z10
J081820.31+20046.1	0.986	53327-1925-085	3.79 ± 0.72	406	0.29	-2844	-785	-1843	16.4	Z10
J082052.63+01521.4	1.163	52264-0760-085	2.42 ± 0.57	286	0.24	-7145	-4911	-5974	12.5	T06
J082231.53+231152.0	0.653	53317-1926-546	7.18 ± 0.77	681	0.48	-2393	638	-917	28.6	G09,Z10
J082525.55+352005.7	0.945	52668-1197-350	4.70 ± 1.03	480	0.33	-5113	-2590	-3829	8.1	T06,Z10
J083000.35+343238.7	0.740	52668-1197-098	3.38 ± 0.91	363	0.28	-6756	-4451	-5665	9.2	T06
J083522.77+424258.3	0.807	52232-0762-085	7.40 ± 0.48	627	0.83	-2247	508	-529	24.2	T06
J083525.98+435211.3	0.568	52232-0762-175	29.15 ± 1.07	2950	0.39	-29297	-12066	-19729	24.6	T06,G09,Z10
J083613.23+280512.1	0.743	52964-1587-350	48.22 ± 2.11	4917	0.74	-18005	-5394	-11113	9.1	G09,Z10
J084041.05+504107.7	1.130	51875-0445-515	5.42 ± 0.47	576	0.60	-2717	-650	-1757	11.3	G09
J084044.41+363327.8	1.235	52320-0864-149	31.79 ± 0.23	3403	0.95	-5025	-508	-2695	45.0	T06,G09,Z10
J084440.80+250253.2	1.001	53347-1930-036	8.55 ± 0.98	872	0.42	-8832	-4509	-6518	11.3	Z10
J084638.50+225753.8	0.840	53379-2085-315	14.56 ± 1.34	1424	0.57	-8224	-4029	-6138	7.0	G09,Z10
J084716.03+373218.0	0.453	52323-0865-094	17.85 ± 2.55	1738	0.36	-17133	-9275	-13699	11.6	Z10
J084824.14+034542.3	0.699	52224-0564-575	5.26 ± 1.01	540	0.47	-1825	311	-816	10.9	T06,G09
J084953.70+021709.4	1.112	52224-0564-010	3.84 ± 0.98	313	0.27	-4046	-2269	-3149	12.4	T06,G09,Z10
J085007.76+081056.4	1.141	52972-1299-354	6.70 ± 0.78	713	0.67	-2912	-714	-1849	12.3	G09
J085040.44+333500.6	1.055	52701-1210-175	5.36 ± 2.06	531	0.35	-10058	-6701	-8399	6.0	T06
J085053.12+445122.4	0.542	52605-0897-359	3.85 ± 0.53	432	0.21	-5767	-2566	-4032	27.6	T06
J085215.65+492040.8	0.567	51993-0351-274	8.63 ± 0.75	1004	0.85	-2198	-133	-1137	8.7	T06,Z10
J085357.88+463350.6	0.549	52238-0764-248	6.10 ± 0.58	658	0.44	-4403	-1187	-3055	18.9	T06,Z10
J090035.42+071811.9	1.210	52674-1191-329	5.53 ± 1.07	618	0.48	-10459	-7847	-9247	8.3	T06,G09
J090056.89+021702.6	0.830	51913-0469-575	8.46 ± 1.04	784	0.66	-2595	710	-685	7.8	T06
J090132.62+233257.7	0.845	53401-2086-209	10.26 ± 1.18	667	0.40	-5568	-2090	-3711	10.5	Z10
J090154.96+380534.4	1.038	52705-0936-498	11.55 ± 0.95	1116	0.32	-11771	-5464	-8376	19.6	T06,Z10
J090321.30+244928.0	1.235	53401-2086-466	28.53 ± 5.05	2040	0.85	-23611	-17954	-20731	4.4	G09
J090825.06+014227.7	1.002	51924-0471-499	8.94 ± 0.91	886	0.32	-12119	-7104	-9727	16.2	T06,G09,Z10
J091146.06+403501.0	0.441	52668-1200-015	27.31 ± 2.16	2915	0.67	-9793	-1663	-5529	5.3	T06
J091214.02+424740.5	1.327	52674-1201-384	9.28 ± 1.78	566	0.35	-11721	-8450	-10223	11.8	T06,G09,Z10
J091854.48+583339.6	1.315	51907-0484-598	10.35 ± 0.99	575	0.87	-1316	-1101	-4	8.8	T06
J092035.59+524006.2	0.793	51999-0553-612	4.43 ± 1.38	365	0.63	-1170	555	-405	8.6	T06
J092157.62+103539.0	0.548	53050-1740-170	19.19 ± 1.54	2068	0.55	-10212	-2983	-6137	7.7	G09,Z10
J092241.08-001729.6	0.707	52000-0474-167	2.14 ± 0.55	235	0.25	-3094	-898	-2049	18.7	T06
J092515.40+493539.8	1.294	52637-0900-447	3.78 ± 1.06	250	0.23	-7725	-5563	-6566	14.9	T06,G09
J092928.63+324129.8	0.776	53386-1941-404	4.48 ± 0.70	503	0.20	-10335	-5425	-8154	17.6	Z10
J093034.79+570520.6	0.637	51911-0452-210	3.57 ± 0.63	391	0.23	-10718	-7705	-9022	12.6	T06,Z10
J093228.56+555344.8	0.878	51991-0556-251	15.24 ± 0.81	1659	0.65	-8975	-3359	-5663	12.4	T06,G09,Z10
J093759.60+455801.8	0.429	52672-1202-330	4.21 ± 0.96	464	0.39	-2297	527	-837	12.3	Z10

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (4)	Mg II d_{abs} (5)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (6)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (8)	Mg II S/N (9)	Mg II Ref. (10)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
J093919.87+440449.5	1.307	52672-1202-124	2.28 ± 0.75	217	0.25	-8519	-6701	16.2	T06		
J093953.44+033229.7	0.927	52266-0570-310	4.51 ± 0.76	376	0.31	-6438	-4607	8.1	T06		
J094225.42+565613.0	0.833	52253-0357-359	26.85 ± 1.87	2446	0.37	-19779	-8861	-14480	14.1	T06	
J094355.00+560649.0a	1.055	52253-0357-299	10.75 ± 0.71	980	0.89	-2059	352	-743	8.3	T06,G09,T06	
J094355.00+560649.0b	1.055	52253-0357-299	3.71 ± 1.01	366	0.45	-4994	-3223	-4117	8.3	T06,G09,T06	
J094443.13+065207.4	0.695	52710-0993-535	14.73 ± 0.98	1575	0.48	-9285	-2650	-6739	40.8	T06,G09,Z10	
J094759.66+120537.7	1.287	53053-1742-624	5.99 ± 0.79	626	0.50	-4260	-1730	-2877	13.0	Z10,G09	
J094939.93+393642.9	0.654	52765-1277-337	36.17 ± 2.99	3743	0.71	-12346	-3469	-7424	4.1	T06,G09	
J095057.56+542919.4	1.194	52282-0769-507	14.36 ± 1.41	1442	0.68	-5631	-1536	-3588	7.1	T06,G09	
J09514.91+131639.5	1.009	52305-1744-362	13.84 ± 1.38	1489	0.43	-8847	-3092	-5887	7.6	G09,Z10	
J100552.24+025902.4	0.908	52235-0501-562	3.28 ± 0.49	343	0.33	-3666	-1818	-2699	18.6	T06	
J101139.21+415639.7	1.201	53034-1357-324	14.44 ± 3.15	1301	0.81	-17143	-13274	-15144	5.2	G09	
J101151.95+542942.6	0.536	52652-0945-028	5.01 ± 1.33	532	0.46	-2563	-363	-1620	5.7	T06	
J101203.31+492148.2a	0.739	52706-1007-127	5.38 ± 0.60	585	0.48	-2721	-178	-1294	14.8	T06,G09,Z10	
J101203.31+492148.2b	0.739	52706-1007-127	7.58 ± 0.98	712	0.32	-7946	-3542	-5816	14.8	T06,G09,Z10	
J101302.06+361510.7	0.836	53357-1954-406	11.71 ± 1.46	1468	0.46	-11686	-3882	-7610	9.2	Z10	
J102021.21+121909.1	0.480	53062-1746-215	38.08 ± 4.47	3894	0.74	-20399	-8030	-13827	6.2	G09,Z10	
J102036.10+602339.0	0.994	52370-0771-011	26.59 ± 1.29	1883	0.97	-3218	-1744	-619	6.8	T06,G09,Z10	
J102225.67+602630.2	1.173	52316-0559-447	5.61 ± 0.98	571	0.28	-7780	-4600	-6045	10.9	T06,Z10	
J102249.27+130125.0	1.217	53062-1746-151	22.52 ± 1.10	2378	0.88	-6345	-2260	-4133	7.2	G09	
J102802.35+592906.7	0.536	52316-0559-582	10.13 ± 0.83	1063	0.71	-2557	126	-1163	9.1	T06,G09,Z10	
J102839.11+450009.4	0.585	52990-1429-401	6.73 ± 0.68	693	0.45	-2324	85	-1069	32.7	G09,Z10	
J102943.75+370127.2	1.344	53415-1957-601	7.05 ± 1.05	678	0.80	-1512	211	-611	6.0	G09	
J103036.93+312028.8	0.876	53440-1959-121	10.95 ± 0.39	1165	0.69	-6485	-3564	-5084	22.1	G09,Z10	
J103110.64+395322.3	1.081	52998-1428-608	4.99 ± 0.52	552	0.48	-5516	-2654	-4009	17.3	Z10	
J103113.38+344613.5	0.942	53385-1958-635	6.99 ± 0.71	736	0.54	-2961	-1514	-1514	13.1	G09	
J103255.37+083503.2	0.894	52734-1240-316	9.52 ± 0.66	1021	0.53	-4657	-962	-2918	21.0	T06,G09,Z10	
J103621.60+393701.6	0.802	53002-1430-555	8.91 ± 0.96	921	0.55	-3686	228	-1537	31.7	G09,Z10	
J103739.61+501505.7	0.947	52354-0875-511	5.31 ± 0.98	587	0.32	-3996	-224	-2147	8.7	T06	
J103824.47+010538.9	0.773	51913-0274-205	10.46 ± 1.25	445	0.85	-1331	1294	107	5.8	T06	
J103929.00+472436.9	1.110	52620-0962-492	16.78 ± 2.29	1714	0.37	-18147	-9984	-13720	8.6	T06,G09,Z10	
J103933.38+035200.4	0.916	52339-0578-294	5.55 ± 1.25	587	0.43	-5894	-341	-4620	6.1		
J104035.07+623329.5	1.174	52376-0773-181	3.09 ± 0.94	345	0.31	-6852	-4480	-5588	9.3	G09	
J104116.79+035111.4	1.246	52367-0577-017	3.25 ± 1.01	359	0.33	-4852	-2806	-3871	5.2	T06,Z10	
J104132.96+513657.0	0.735	52649-1010-294	5.20 ± 0.69	499	0.17	-10098	-4844	-7539	19.8	T06	
J104210.43+501609.1	0.789	52354-0875-583	11.94 ± 0.53	1287	0.86	-3612	-732	-2383	18.1	T06,G09,Z10	
J104459.60+365605.1a	0.701	53463-2090-329	10.44 ± 0.29	1113	0.82	-2123	80	-1129	29.2	G09,Z10	
J104459.60+365605.1b	0.701	53463-2090-329	17.76 ± 0.22	1786	1.00	-5736	-3013	-4283	29.2	G09,Z10	
J104459.60+365605.1c	0.701	53463-2090-329	11.34 ± 0.61	1057	0.24	-18137	-10574	-14369	29.2	G09,Z10	
J104705.08+590728.4	0.392	52427-0949-326	6.18 ± 1.62	501	0.51	-1688	726	-527	6.4	G09	

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (5)	Mg II d_{abs} (6)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (8)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (9)	Mg II S/N (10)	Ref. (11)
J104838.65+603933.1	1.274	52295-0561-514	3.84 ± 0.95	406	0.30	-9085	-6731	-7813	9.9	T06,Z10
J104845.83+353110.7	1.011	53463-2090-131	4.52 ± 0.41	500	0.45	-4285	-2235	-3230	20.6	Z10
J105102.78+52049.8	0.543	52649-1010-556	4.06 ± 1.57	511	0.46	-2497	-159	-1326	9.3	T06,G09
J105259.99+065358.0	0.724	52670-1001-080	33.96 ± 1.62	3883	0.52	-17034	-3903	-9687	11.9	T06,G09,Z10
J105404.72+042939.3	0.579	52338-0579-072	2.86 ± 1.11	326	0.39	-2013	-293	-1159	4.6	T06
J105638.08+494943.3	1.148	52669-0876-110	1.75 ± 0.28	171	0.14	-12043	-10180	-11179	35.5	T06
J105748.63+611010.8	1.274	52286-0774-278	7.88 ± 1.37	801	0.89	-10103	-7959	-9245	8.2	T06
J105823.13+600805.6	1.071	52286-0774-289	4.29 ± 0.6	444	0.27	-10800	-7923	-9480	15.3	T06,Z10
J110108.43+515021.9	0.968	52353-0877-402	4.91 ± 0.49	581	0.24	-11676	-6856	-9251	23.0	T06,Z10
J110440.82-000441.6	1.344	51908-0277-077	9.54 ± 1.13	1035	0.57	-6164	-1252	-3276	12.6	T06,Z10,G09
J110810.99+355927.4	1.062	53466-2034-513	4.96 ± 0.95	530	0.36	-4893	-2162	-3556	8.2	T06,G09
J110839.62+532721.4	0.878	52652-1011-035	18.55 ± 1.44	1342	0.95	-2750	899	-632	4.4	T06,Z10
J111013.79+523607.2	1.009	52649-1012-259	3.01 ± 0.55	232	0.14	-10726	-8453	-9560	26.9	T06,Z10
J111040.48+433821.3	1.230	53061-1364-154	6.32 ± 1.04	677	0.34	-4975	-1559	-3316	10.7	G09,Z10
J111628.00+434505.8	0.801	53061-1364-095	6.73 ± 0.52	710	0.33	-6364	-2416	-4166	22.6	Z10
J112349.16+135220.6	0.928	53383-1753-093	26.66 ± 2.19	2765	0.44	-14895	-3582	-8448	10.7	G09,Z10
J112632.81+430938.5	0.436	53062-1365-036	9.50 ± 0.86	939	0.84	-2374	311	-853	8.5	Z10
J112730.71+423039.0	0.531	53055-1443-374	16.87 ± 3.00	1015	0.29	-22313	-16237	-19031	10.0	G09,Z10
J112822.42+482310.1	0.541	52642-0966-203	13.33 ± 0.90	1306	0.36	-5868	913	-2228	18.5	T06,Z10
J112828.31+011337.9	0.893	51992-0512-123	14.33 ± 0.75	1011	0.84	-2304	1838	-338	11.2	T06,G09,Z10
J112901.71+050617.0	1.282	52642-0837-400	13.84 ± 1.50	1477	0.91	-5547	-1795	-3885	6.6	T06,G09
J112912.27+422853.9	0.582	53055-1443-415	4.18 ± 0.67	411	0.27	-6995	-4148	-5438	10.6	Z10
J113349.81+361027.3	1.158	53468-2113-608	17.1 ± 1.67	1767	0.56	-8960	-3549	-6377	8.3	G09
J113355.22+111208.8	0.763	53083-1607-298	14.95 ± 1.56	1441	0.35	-13062	-4207	-8465	12.8	Z10
J113704.85+055240.4	0.915	52378-0838-328	5.24 ± 0.96	581	0.41	-6614	-2738	-4363	10.6	T06
J113807.83+531231.6a	0.790	52367-0880-404	2.11 ± 0.44	222	0.26	-2084	-571	-1445	-2236	T06,Z10
J113807.83+531231.6b	0.790	52367-0880-404	8.50 ± 0.51	916	0.66	-4543	-4552	-2221	-3391	T06,G09
J113940.42+451207.0	1.141	53083-1367-454	22.39 ± 1.18	2306	0.55	-13199	-3735	-7642	16.7	G09,Z10
J114033.47+150701.7	1.250	53386-1755-589	7.41 ± 0.92	790	0.48	-4960	-1544	-3118	12.5	G09,Z10
J114043.62+532438.9	0.530	52734-1015-085	9.51 ± 0.64	1031	0.68	-3557	-745	-2236	8.7	T06,G09,Z10
J114111.61-014306.6	1.266	52282-0328-417	3.88 ± 0.69	463	0.29	-4552	-1406	-2911	36.1	T06,G09
J114209.01+070957.7	0.497	53383-1621-306	16.62 ± 2.23	1392	0.39	-19365	-12564	-16162	13.3	G09
J114516.73+493259.4	1.158	52636-0967-558	9.20 ± 1.13	954	0.44	-8245	-3163	-5528	16.4	T06,G09
J114600.32+504734.0a	1.081	52636-0967-562	6.64 ± 0.80	604	0.31	-5564	-2360	-3988	19.1	T06,G09,Z10
J114600.32+504734.0b	1.081	52636-0967-562	5.68 ± 0.66	574	0.34	-9737	-6849	-8234	19.1	T06,G09,Z10
J114740.33+373438.9	1.297	53442-1997-143	33.23 ± 2.57	3398	0.55	-17699	-6159	-12531	9.0	G09
J114754.36+040638.4	1.174	52373-0839-096	2.75 ± 0.91	287	0.23	-7372	-5208	-6252	9.5	T06
J114915.30+393325.4	0.630	53386-1970-137	21.49 ± 1.85	1764	0.63	-6076	-1369	-3500	6.6	G09,Z10
J115010.81+480844.3	1.190	53080-1446-333	7.05 ± 1.28	509	0.29	-6945	-3825	-5365	10.9	Z10
J115511.93+465903.7	1.298	53080-1446-161	6.13 ± 0.63	643	0.44	-5939	-3286	-4726	15.6	G09,Z10

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (5)	Mg II d_{abs} (6)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (8)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (9)	Mg II S/N (10)	Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J115553.87+012427.6	1.010	52051-0515-043	16.17 ± 0.48	1838	0.83	-5852	-2172	-4017	15.8	T06,G09,Z10
J115816.72+132624.1	0.440	53144-1610-562	12.59 ± 0.67	1277	0.42	-9228	-3924	-6266	24.6	G09,Z10
J115832.28+044208.3	0.896	52375-0841-193	4.63 ± 0.63	490	0.24	-7828	-4105	-5932	17.0	T06,Z10
J115852.87-004301.9	0.983	519304-0285-189	15.83 ± 0.62	961	0.97	-1253	-113	-123	7.5	Z10,G09
J115923.85+415246.7	1.200	53120-1447-068	3.88 ± 0.35	400	0.28	-9503	-6951	-8034	22.6	T06,G09
J1120049.55+632211.8	0.887	523337-0778-377	9.85 ± 0.53	1024	0.89	-1804	332	-823	8.8	T06,G09
J1120146.46+630034.4	0.659	523337-0778-439	7.06 ± 1.87	618	0.47	-2876	1258	-812	8.2	T06
J120337.91+153006.6	1.218	53467-1764-412	32.85 ± 2.42	3307	0.45	-21653	-7527	-14109	24.0	G09,Z10
J120813.42+023015.1	1.182	52024-0517-509	2.84 ± 0.49	279	0.16	-17791	-14983	-16373	58.9	T06
J120924.07+103612.0	0.395	52723-1229-489	5.41 ± 0.51	357	0.38	-2199	280	-940	34.9	G09
J120928.11+003511.6	0.610	51999-0286-594	9.65 ± 3.23	940	0.77	-3560	-886	-2576	1.4	T06
J121113.38+121937.3	0.465	53149-1612-179	12.27 ± 1.15	1341	0.80	-3864	-504	-1975	9.6	G09,Z10
J121303.40-014450.9	0.613	52367-0332-579	7.70 ± 0.68	709	0.68	-4088	-2037	-3028	12.3	Z10,T06
J121441.42-000137.8	1.046	52023-0287-514	36.34 ± 2.30	3705	0.54	-18003	-6272	-12449	8.6	T06,G09,Z10,T06
J121806.00+101920.6	1.089	52672-1230-483	8.91 ± 1.42	899	0.81	-2097	314	-833	4.9	T06
J121907.89-005609.2	0.638	52000-0288-132	13.64 ± 1.49	1320	0.88	-3210	-808	-1975	3.6	T06,G09
J122020.29+575637.6	1.307	52791-1315-498	13.92 ± 2.22	1330	0.82	-8465	-4749	-6722	5.1	T06
J122043.21-013215.3	0.448	52313-0333-540	7.31 ± 0.93	712	0.68	-1648	213	-698	4.9	Z10
J122305.79+085651.4	1.091	52725-1231-246	2.95 ± 0.80	316	0.32	-2896	-974	-2136	11.2	T06
J122424.17+593528.5	0.899	52409-0955-033	3.46 ± 1.19	381	0.35	-4626	-2030	-3432	8.4	T06
J122614.97+120925.4	0.871	53120-1614-145	7.38 ± 0.80	796	0.58	-2693	-287	-1353	15.8	Z10
J122703.19+50356.2	0.765	52644-0971-459	5.96 ± 0.73	663	0.66	-2134	-138	-1114	8.4	T06
J122847.60+490431.8	0.954	52644-0971-094	8.04 ± 1.23	869	0.28	-9791	-4872	-7124	8.5	T06,G09,Z10
J123218.09+410637.9	1.326	53433-1984-363	14.37 ± 1.09	1454	0.70	-3753	506	-1419	11.8	G09,Z10
J124300.87+153510.6	0.562	53502-1769-584	12.83 ± 0.66	1153	0.84	-2117	986	-657	13.5	G09,Z10
J125057.57+402100.2	0.607	53431-1985-596	19.46 ± 1.73	2089	0.91	-8024	-1498	-4017	7.3	Z10
J125507.12+634423.8	1.067	52316-0601-043	27.65 ± 1.99	2822	0.54	-22653	-11582	-16543	9.4	T06,G09,Z10
J130006.47+653201.7	1.192	52072-0602-321	8.06 ± 1.50	780	0.48	-10736	-6172	-8484	9.8	T06
J130444.12+052820.8	0.935	52439-0849-582	6.26 ± 0.78	626	0.78	-2906	-640	-2002	7.2	G09
J130741.12+503106.4	0.695	52753-1281-361	20.61 ± 0.86	2171	0.82	-5901	-157	-2884	13.2	T06,G09,Z10
J130952.89+011950.6	0.547	52295-0525-250	5.08 ± 1.12	397	0.44	-1833	718	-416	26.9	T06
J131323.25+151309.6a	1.262	53089-1772-627	3.50 ± 0.37	342	0.28	-5046	-3070	-4171	26.6	Z10,G09
J131323.25+151309.6b	1.262	53089-1772-627	7.64 ± 0.69	784	0.31	-11096	-5792	-8264	26.6	Z10,G09
J131433.19+471457.7	0.873	53062-1461-431	4.94 ± 1.09	527	0.42	-3509	-1041	-2461	9.4	G09
J131637.26+003636.0	0.930	51985-0295-080	16.57 ± 1.46	896	0.44	-3854	4303	101	20.3	T06,G09,Z10
J131703.87+614228.5	1.344	52325-0783-040	4.22 ± 1.42	369	0.39	-7271	-5445	-6497	8.7	T06
J131823.75+123812.5	0.589	53142-1697-600	16.12 ± 0.94	1688	0.88	-4558	-1274	-2817	8.8	G09,Z10
J132114.42+020225.0	0.582	52312-0526-157	5.48 ± 0.96	624	0.43	-5413	-2413	-3844	8.9	T06,G09,Z10,T06
J132401.53+032020.6	0.926	52312-0526-609	13.67 ± 1.22	1298	0.84	-3398	521	-1146	7.9	G09,T06
J132439.32+421604.7	1.020	53112-1462-524	10.32 ± 0.93	1100	0.90	-3372	-765	-1937	7.7	G09,Z10

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (5)	Mg II d_{abs} (6)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (8)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (9)	Mg II S/N (10)	Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J133014.48+413244.9	1.146	53091-1464-339	4.23 ± 0.60	490	0.42	-6689	-3976	-5388	16.6	Z10
J133603.65+511733.6	1.327	53433-1669-339	5.43 ± 0.96	569	0.51	-7002	-5107	-6072	11.4	Z10
J133833.82+034522.2	1.301	52374-0853-048	15.66 ± 0.97	967	0.94	-1567	917	-211	9.2	T06,Z06
J133936.69+111949.2	0.650	53502-1700-101	4.15 ± 0.97	550	0.39	-6888	-3766	-5571	9.3	Z10
J134127.40+002050.5	0.722	51671-0299-464	3.56 ± 0.99	298	0.28	-2847	-1063	-2016	12.3	T06,G09,Z10
J134410.43+533525.8	0.827	52725-1042-549	6.34 ± 0.99	598	0.30	-7362	-4042	-5789	12.8	T06,G09,Z10
J134415.75+331719.1	0.687	53503-2024-346	7.04 ± 0.97	768	0.61	-2284	263	-813	10.4	Z10
J134450.16-015843.0	0.958	52433-0913-381	14.88 ± 1.35	1549	0.51	-11459	-5146	-8064	9.2	T06,G09,Z10
J134830.78-0153357.8	0.816	52721-0914-353	21.47 ± 1.62	2300	0.56	-13613	-6739	-9833	7.0	T06,G09
J134938.48+475530.1	1.104	52736-1284-551	11.22 ± 1.06	1121	0.31	-13063	-5363	-8769	19.6	T06,Z10,G09
J134951.56+040407.2	1.032	52375-0855-229	3.13 ± 0.79	323	0.24	-6341	-3146	-4891	17.4	T06,G09,Z10
J135226.34+025459.4	1.222	52026-0530-588	3.0 ± 0.80	325	0.22	-4525	-2408	-3405	13.4	G09,Z10
J135418.26+589355.9	0.791	52668-1158-521	8.51 ± 1.11	871	0.64	-3626	-1228	-2534	7.8	T06,G09
J135546.11+431819.8	1.318	52822-1346-378	9.55 ± 1.18	814	0.40	-10091	-5990	-8085	12.7	T06,G09,Z10
J135750.89+632446.2	1.347	52353-0605-392	9.78 ± 1.04	1007	0.31	-8089	-1702	-4499	14.4	T06,G09
J140025.53-012957.0a	0.584	52443-0915-380	6.80 ± 0.79	442	0.49	-1649	1666	-259	10.8	T06,G09,Z10
J140025.53-012957.0b	0.584	52443-0915-380	27.16 ± 1.66	2801	0.60	-25636	-15798	-20042	10.8	T06,G09,Z10
J140115.74+621857.1a	0.645	52353-0605-147	10.88 ± 1.53	671	0.86	-4006	-2366	-3198	4.8	T06,G09
J140115.74+621857.1b	0.645	52353-0605-147	9.15 ± 1.27	747	0.73	-7865	-6111	-7095	4.8	T06,G09
J140332.86+133218.7	1.093	53178-1704-195	9.24 ± 0.49	972	0.89	-3350	-881	-1896	15.7	G09,Z10
J141513.20+634037.2	1.334	51988-0499-306	3.85 ± 1.14	352	0.32	-5785	-3404	-4774	16.9	T06,G09
J141555.07+582632.8	1.261	52338-0788-054	4.96 ± 0.82	477	0.41	-2776	-647	-1872	11.8	T06,G09
J142010.28+604722.3	1.345	52365-0606-110	17.82 ± 1.62	1805	0.88	-3571	-622	-2148	9.2	G09
J142110.71+035439.8	0.831	52049-0584-190	6.73 ± 1.26	658	0.56	-3671	-1616	-2751	5.2	T06,G09
J142116.23+052525.3	0.926	52049-0584-404	8.29 ± 0.63	875	0.72	-5719	-3679	-4793	8.2	T06,G09
J142647.47+401250.8	0.749	52797-1349-484	4.66 ± 0.95	429	0.58	-3460	-1749	-2734	9.0	T06,G09
J142649.24+02517.7	0.529	52049-0584-004	4.68 ± 0.82	549	0.39	-3258	-95	-2197	9.4	T06,Z10
J142927.28+523849.5	0.595	52781-1327-343	14.32 ± 0.87	1528	0.44	-7761	-1091	-3911	20.9	T06,G09,Z10
J143144.91+391910.2	1.091	52797-1349-257	4.77 ± 0.92	345	0.43	-1524	-476	-537	16.2	T06,Z10
J143303.27+403105.1	0.446	52797-1349-484	5.35 ± 0.93	580	0.52	-3447	-910	-2242	7.7	Z10
J143826.73+642859.8	1.222	51988-0499-623	9.92 ± 0.95	1039	0.32	-10271	-3591	-6706	24.4	T06,Z10,G09
J143828.63+452108.6	0.427	52731-1288-628	6.73 ± 2.57	743	0.27	-10313	-495	-7472	12.7	G09,Z10
J144222.02+524143.2	1.037	52781-1327-550	7.69 ± 1.23	646	0.53	-4354	-1618	-2826	8.3	T06,G09,Z10
J144317.71-020933.0a	1.045	52411-0920-232	4.19 ± 0.70	462	0.44	-4219	-2169	-3123	9.6	T06,Z10
J144337.71-020933.0b	1.045	52411-0920-232	1.95 ± 1.00	189	0.25	-13008	-11550	-12311	9.6	T06,Z10
J144342.21-025430.6	0.777	52411-0920-258	8.76 ± 0.73	954	0.98	-3145	-1500	-2336	7.6	T06
J144436.58+425508.6	1.101	52734-1289-087	6.44 ± 0.72	688	0.34	-7807	-4288	-5931	13.8	T06,G09,Z10
J144627.41+353453.5	0.922	53116-1383-188	6.86 ± 0.54	740	0.45	-3032	-560	-1833	20.1	G09,Z10
J144642.26+45630.9	0.738	53466-1675-168	14.43 ± 1.52	1520	0.43	-9722	-1933	-5360	10.3	G09,Z10
J144759.19+356833.5	0.953	53116-1383-260	6.56 ± 0.89	723	0.34	-5817	-1999	-4106	13.7	Z10

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (4)	Mg II d_{abs} (5)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (6)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (8)	Mg II S/N (9)	Mg II Ref. (10)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J144903.18+503018.1	0.609	52786-1328-215	6.05 ± 1.12	871	0.37	-6047	-927	-3102	7.8	T06,Z10
J145333.01+002943.6	1.291	51994-0309-433	6.70 ± 1.45	654	0.62	-1644	701	-727	7.2	T06
J145503.95+511539.8	1.277	52786-1328-615	7.23 ± 0.86	773	0.78	-2917	-1134	-1951	8.0	T06
J145549.84+013018.3	1.321	52380-0921-490	4.65 ± 0.88	495	0.45	-5799	-4750	-4750	9.5	G09,Z10
J145724.00+452157.8	0.718	53147-1676-449	21.59 ± 1.41	2257	0.41	-14325	-5034	-9780	15.2	T06,G09,Z10
J145736.70+523454.6	0.638	52674-1164-184	20.59 ± 1.09	2131	0.39	-12151	-2104	-6325	16.4	T06,G09,Z10
J145836.73+433015.5	0.760	52734-1290-601	8.45 ± 1.10	895	0.36	-6969	-2345	-4606	9.1	T06,G09,Z10
J150525.51-023853.8a	1.159	52426-0922-084	3.57 ± 0.80	266	0.27	-4762	-2921	-3916	9.2	T06,Z10
J150525.51-023853.8b	1.159	52426-0922-084	7.32 ± 0.94	756	0.45	-8679	-5577	-6911	9.2	T06,Z10
J150847.41+340437.7	0.788	53108-1385-173	7.31 ± 0.41	762	0.51	-2676	-213	-1289	26.7	G09,Z10
J151053.63+574055.1	1.037	52079-0612-424	17.86 ± 0.75	1925	0.40	-11460	-2350	-6208	18.0	T06,G09,Z10,T06
J151225.67+585752.2	0.791	52345-0613-298	13.64 ± 2.00	610	0.92	-1242	1245	72	4.4	T06,G09
J151545.34+031745.0	0.780	52022-0591-250	8.01 ± 1.18	893	0.79	-3421	-1503	-2416	4.8	T06
J151548.67+430420.5	0.527	53148-1677-027	5.62 ± 1.05	594	0.52	-3528	-1198	-2213	6.1	Z10
J152200.76+035017.0	0.838	52022-0591-617	7.51 ± 1.10	667	0.58	-2261	287	-981	9.5	Z10
J152356.26+034457.6	1.172	52025-0592-443	3.75 ± 0.65	364	0.39	-5888	-4258	-5135	12.6	T06
J152438.79+411543.0	1.230	53433-1678-106	45.73 ± 2.75	452	0.59	-30388	-14544	-21195	16.8	G09,Z10
J153036.83+370439.2	0.417	53144-1401-367	19.84 ± 0.75	2082	0.58	-8707	-1647	-4467	16.1	G09,Z10
J153133.53+452841.6	1.022	52781-1332-245	5.93 ± 0.94	431	0.53	-1314	-420	-420	8.3	T06
J153646.88+511555.2	1.132	52378-0795-295	17.76 ± 0.87	1910	0.82	-7807	-2717	-4945	13.4	T06,G09,Z10
J1555905.39+250407.2	0.933	53523-1655-085	7.00 ± 0.75	736	0.58	-2256	-192	-1337	9.1	Z10
J160018.68+021331.3	1.191	52023-0595-041	7.89 ± 2.04	815	0.91	-5272	-2134	-3532	4.7	G09
J160329.72+502722.2	0.638	52375-0620-126	7.03 ± 0.83	740	0.49	-4836	-2174	-3567	8.4	T06,G09,Z10
J160628.06+290333.8	0.434	53496-1578-115	3.10 ± 0.85	332	0.23	-3200	-867	-1990	12.6	Z10
J160721.27+511510.6	0.776	52375-0620-637	6.12 ± 0.97	814	0.45	-7292	-3220	-5405	10.2	T06,Z10
J161425.17+375210.7	0.553	52764-1056-569	3.01 ± 0.39	323	0.19	-6643	-3929	-5375	30.9	T06
J161500.79+491045.4	1.280	52054-0622-607	5.87 ± 0.93	582	0.30	-6480	-3082	-4788	13.5	T06
J161515.58+46931.9	0.986	52377-0624-377	8.47 ± 0.75	912	0.46	-6213	-2605	-4269	14.1	T06,G09,Z10
J161740.36+421357.9	1.285	52753-1171-447	3.39 ± 0.65	452	0.32	-6125	-2927	-4422	13.8	T06
J162016.29+411544.1	1.286	52753-1171-603	8.25 ± 0.70	882	0.52	-2976	-365	-1619	12.5	T06,Z10,G09,T06
J162639.79+270155.5a	0.826	52822-1408-176	2.01 ± 0.75	211	0.30	-4340	-2770	-3634	7.5	T06
J162639.79+270155.5b	0.826	52822-1408-176	3.91 ± 0.95	347	0.36	-6646	-4748	-5796	7.5	T06
J162653.20+325406.3	0.951	52520-1058-289	3.57 ± 1.21	325	0.30	-3954	-1971	-3003	8.5	Z10
J163255.46+420407.8	0.728	52379-0816-569	5.20 ± 0.85	551	0.40	-3236	-559	-2016	10.7	T06,Z10,T06
J163513.51+213859.6	0.683	53174-1571-121	9.53 ± 1.33	1003	0.32	-8886	-2722	-5784	8.5	Z10
J163656.84+364340.4	0.852	52782-1174-337	23.06 ± 0.87	2463	0.90	-7303	-2684	-4748	8.1	T06,G09,Z10
J163825.67+462934.7	1.219	52144-0627-137	18.21 ± 1.02	1881	0.43	-15475	-7773	-11533	16.0	T06,G09,Z10
J164447.19+311437.2	0.690	52781-1340-002	4.21 ± 0.65	464	0.33	-4770	-1695	-3459	11.9	T06
J164721.01+410659.3	0.918	52050-0630-455	4.37 ± 0.91	418	0.28	-5987	-3608	-4868	11.4	T06,G09,Z10
J164745.04+355732.9	0.942	52409-0819-299	5.56 ± 0.98	600	0.53	-2550	-74	-1077	8.9	T06

表 A.1 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	Mg II EW (Å) (3)	Mg II AI (km s ⁻¹) (4)	Mg II d_{abs} (5)	Mg II v_{max} (km s ⁻¹) (6)	Mg II v_{min} (km s ⁻¹) (7)	Mg II v_{avg} (km s ⁻¹) (8)	Mg II S/N (9)	Mg II S/N (10)	Ref.
(1)	(2)										
J165225.39+21.5830.7	0.447	52885-1415-231	15.69 ± 1.80	1523	0.60	-8132	-3731	-6020	4.9	Z10	
J165236.27+190526.3	1.090	531172-1567-341	5.46 ± 1.22	634	0.57	-5849	-3195	-4614	5.3	G09	
J165238.29+41.4035.4	0.844	52079-0631-181	12.70 ± 0.69	1137	0.97	-2548	827	-468	5.5	T06,Z10	
J170010.82+39545.8	0.577	52079-0633-482	5.10 ± 1.26	688	0.35	-6974	-3172	-4896	6.7	T06,Z10	
J170330.23+324201.8	0.636	52426-0973-108	4.33 ± 1.06	520	0.36	-2782	-170	-1612	7.7	T06	
J170341.82+383944.7	0.554	52071-0632-632	11.53 ± 1.45	1139	0.54	-4954	-229	-2944	5.8	T06,Z10	
J171032.23+214451.3	0.867	53177-1689-069	9.95 ± 0.62	1064	0.73	-2623	336	-1451	11.7	Z10	
J172042.43+273455.1	1.230	52431-0980-165	4.12 ± 1.60	438	0.59	-5331	-3357	-4379	5.5	T06	
J204333.20-001104.2	0.544	52435-0981-044	22.98 ± 1.03	2443	0.83	-10388	-2069	-5076	13.8	T06,G09,Z10	
J210704.93-011044.0	1.348	52431-0985-124	3.74 ± 1.03	396	0.28	-6078	-3222	-4655	13.6	G09,Z10	
J210757.67-062010.6	0.644	52174-0637-610	13.26 ± 0.43	1213	0.80	-2597	846	-820	25.7	T06,G09,Z10	
J212017.00+004841.7	1.288	52523-0987-408	4.27 ± 0.41	449	0.20	-8578	-5135	-6840	28.5	T06,Z10,G09	
J214118.78-070957.4	0.869	52824-1177-484	11.98 ± 1.55	1028	0.74	-4431	-1902	-3021	6.9	T06,G09,Z10	
J220601.82-073312.1	0.900	52468-0717-580	12.68 ± 0.77	1345	0.83	-3100	-629	-1833	7.7	T06,G09,Z10	
J220931.92+125814.5	0.814	52519-0735-501	25.11 ± 0.97	2359	0.47	-12000	-3931	-7869	14.5	T06,G09,Z10	
J222609.49+010600.9	0.986	52873-1103-601	12.83 ± 1.19	1318	0.91	-2373	173	-1139	3.3	G09	
J223424.10+005227.1	0.884	52143-0376-615	9.29 ± 0.96	869	0.34	-8377	-3775	-6042	10.9	T06,G09,Z10	
J224028.14-003813.1	0.658	53261-1901-298	15.69 ± 0.91	1718	0.79	-4601	-77	-1780	21.7	G09,Z10	
J232533.72-085857.9	0.807	52203-0645-620	6.89 ± 1.99	598	0.44	-5547	-2891	-4064	6.4	T06	
J232550.73-002200.4	1.011	51818-0383-142	9.50 ± 0.56	1038	0.58	-3887	-872	-2302	17.5	T06,G09,Z10	
J233635.75-010733.7	1.303	51821-0384-011	4.80 ± 0.96	435	0.27	-6571	-3992	-5268	11.9	T06	
J234157.24-094616.9	1.340	52553-0647-036	2.72 ± 0.82	286	0.23	-6763	-4662	-5833	15.8	T06	
J235718.32-090314.2	1.179	52143-0650-321	28.07 ± 3.77	2701	0.77	-18446	-11556	-14539	7.3	T06	
J235843.48+134200.2	1.135	52235-0750-202	6.89 ± 0.71	724	0.37	-11229	-7549	-9318	14.2	T06,G09,Z10	

注释:

(1) 各源的 SDSS 名称, 以 hhmmss.ss+ddmmss.s (J2000) 命名。同一个源名称后加 a/b/c
后缀表示该源的 Mg II 吸收线有多个吸收槽。

(2) 由发射线定出的红移。

(3) 分析时所使用的 SDSS 光谱, 以 mid-plate-fiberid 命名。

(4) Mg II 吸收线的等值宽度以及误差, 误差的定义见 § 2.2.2。

(5) Mg II 吸收线的 AI, 这里 AI 采用 Zhang et al. (2010) 所给的定义。

(6) Mg II 吸收线的深度, 具体定义见图 2.6。

(7) Mg II 吸收线相对于零速度处的最大速度。Mg II λ2798 吸收线以真空波长 2798.75 Å
处为零速度点。

(8) Mg II 吸收线相对于零速度处的最小速度。

(9) Mg II 吸收线的加权平均速度。

(10) 光谱 2400–3000 Å 的中值信噪比。
(11) Mg II BAL 类星体的来源, T06 表示 Trump et al. (2006), G09 表示 Gibson et al.
(2009), Z10 表示 Zhang et al. (2010)。

表 A.2 Mg II BAL 类星体样本的紫外连续谱、发射线测量结果

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	FWHM(Mg II ^b) km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^n)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(11)
J000009.26+151754.5	1.197	-1.30	45.40	-15.93	-14.40	2435	-14.68	-15.61	0.51
J002623.78+135523.5	1.319	5.03	45.39	-15.95	-13.47	2812	-14.38	-15.92	0.46
J004610.17+000449.7	0.826	-1.65	44.96	-15.93	-14.48	7771	-14.39	9.16	0.03
J005722.48+010101.8	1.146	-1.27	45.52	-15.74	-13.91	3239	-14.36	-15.94	0.33
J010352.46+003739.7	0.705	-0.75	45.43	-15.34	-13.08	2747	-13.66	-15.77	0.50
J011117.34+142653.6	1.155	-0.25	45.76	-15.64	-13.77	4131	-14.19	-15.91	0.39
J013816.16+140431.6	0.877	-1.17	44.93	-15.98	-13.97		-16.69		0.20
J013853.94-101125.7	1.305	-1.56	45.47	-15.90	-13.69	2081	-14.39	-15.53	0.84
J014012.07+130241.8	1.188	45.20	-15.98	-13.90	-14.65	3036	-14.65	-15.76	0.35
J014534.36+143136.9	0.636	-0.94	44.63	-15.99	-13.93	1984	-14.93	7.80	0.35
J014950.96-010314.1	1.082	-1.44	45.85	-15.26	-13.14	2622	-14.01	8.68	0.90
J015636.03+155212.3	1.129	-1.40	45.40	-15.90	-13.59	3035	-14.25	-16.12	0.29
J020105.14+000617.9	1.205	-2.23	45.88	-15.40	-13.66	6453	-13.88	-16.33	9.48
J023102.49-083141.2	0.587	-1.70	44.83	-15.65	-13.49	2755	-14.36	-15.60	8.19
J023115.64-093333.6	0.555	-0.74	44.55	-15.96	-14.20	4724	-14.83	-16.22	8.51
J023445.76-085908.5	1.275	-1.44	45.33	-16.05	-13.95	3183	-14.49	-16.06	8.58
J024220.10-085332.7	0.800	-1.62	45.10	-15.75	-13.82	3871	-14.27	-15.97	8.63
J024254.66-072205.6	1.217	-1.36	45.49	-15.85	-13.74	5160	-14.09	-15.39	9.08
J025026.66+000903.3	0.597	1.08	44.41	-16.31	-14.05	862	-14.95	6.96	1.00
J025204.17+010710.5	1.223	1.55	44.97	-16.43	-14.06	4031	-14.91	-16.09	8.59
J025754.90-0722449.5	1.023	-1.56	45.35	-15.77	-13.90	3493	-14.18	-15.12	8.67
J025813.67-011347.2	1.165	-2.64	45.27	-15.98	-13.84	2951	-14.61	8.48	0.33
J033438.28-071149.0	0.635	-1.90	45.55	-15.01	-12.82	3849	-13.50	-14.88	8.86
J073122.84+430241.0	0.975	-0.80	45.17	-15.93	-13.90	7095	-14.44	-15.64	9.19
J074554.74+181817.0	1.054	-0.74	45.44	-15.79	-13.75	2843	-14.47	-16.47	8.54
J075325.52-0114842.9	1.349	-0.79	45.58	-15.86	-13.92	2176	-14.66	-15.68	8.38
J075927.12+363431.5	0.983	-0.47	45.18	-15.98	-13.92	1858	-14.58	-15.93	8.03
J080248.19+551328.8	0.664	0.95	45.02	-15.81	-13.80	1634	-14.44	7.84	0.54
J080525.11+274321.8	0.895	-1.04	44.97	-16.03	-14.12	6835	-14.51	-15.91	9.05
J080559.43+563025.8	0.982	-0.80	45.19	-15.93	-13.88	2284	-14.60	-16.61	8.22
J080934.64+254837.9	0.545	-1.78	45.24	-15.13	-13.46	5940	-13.90	9.07	0.09
J080957.38+181804.4	0.973	-1.28	45.79	-15.28	-13.33	5904	-13.44	9.35	0.13
J081312.61+432640.1	1.090	-2.03	45.38	-15.79	-14.10	5912	-14.31	-16.46	9.14
J081314.80+385720.4	0.925	-1.18	45.04	-15.97	-13.78	2088	-14.85	-16.29	8.06
J081655.34+074311.5	0.645	-1.25	44.96	-15.67	-13.77	3000	-14.35	-16.28	8.33
J081819.29+562307.6	0.989	-1.01	45.42	-15.72	-13.59	5159	-14.09	-15.31	9.04
J081820.31+20046.1	0.986	-1.55	45.37	-15.65	-13.51	3503	-14.03	-15.99	8.68
J082052.63+401521.4	1.163	-2.03	45.48	-15.75	-13.78	4682	-14.36	-15.62	8.99
J082231.53+231152.0	0.653	-1.38	45.47	-15.16	-14.11	7192	-13.67	-15.18	9.36

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J082525.59+354005.7	0.945	-0.85	45.17	-15.93	-14.07	4153	-14.58	-16.41	8.72	0.13
J083000.35+343238.7	0.740	-1.23	44.89	-15.91	-14.15	3848	-14.26	-15.39	8.51	0.12
J083522.77+424258.3	0.807	-1.05	45.57	-15.34	-13.31	2074	-14.04	-15.74	8.33	0.83
J083525.98+435211.3	0.568	-1.28	45.20	-15.25	-12.97	6049	-13.94	-15.93	9.07	0.08
J083613.23+280512.1	0.743	-0.99	44.88	-15.88	-13.63	3352	-14.58	-13.97	8.39	0.17
J084041.05+504107.7	1.130	-1.64	45.37	-15.82	-13.70	5927	-13.97	-13.40	9.14	0.09
J084044.41+363327.8	1.225	-1.13	46.52	-14.86	-12.64	1983	-13.40	-14.44	8.78	2.51
J084440.80+250253.2	1.001	-1.18	45.36	-15.71	-13.59	3468	-14.44	-15.92	8.67	0.27
J084638.50+225753.8	0.840	-1.19	44.96	-15.96	-14.12	4214	-14.60	-14.47	8.63	0.11
J084716.03+373218.0	0.453	-1.72	44.74	-15.46	-13.41	2639	-13.63	-14.43	8.11	0.26
J084824.14+034542.3	0.699	-0.49	44.82	-15.92	-14.41	7207	-14.43	-15.55	9.02	0.03
J084953.70+021709.4	1.112	-1.19	45.29	-15.91	-14.08	7224	-14.41	-16.57	9.27	0.05
J085007.76+081056.4	1.141	-1.10	45.35	-15.93	-13.88	3316	-14.42	-15.45	8.63	0.26
J085040.44+333500.6	1.055	-1.77	45.15	-16.06	-13.76	2389	-14.41	-16.31	8.23	0.38
J085053.12+445122.4	0.542	-1.12	45.24	-15.23	-13.47	4639	-13.97	-16.06	8.86	0.12
J085215.65+492040.8	0.567	-1.16	44.74	-15.72	-14.90	4976	-14.43	-15.24	8.66	0.07
J085335.78+463350.6	0.549	-1.34	44.91	-15.55	-13.31	3267	-14.06	-14.06	8.38	0.18
J090035.42+071811.9	1.210	-1.47	45.36	-15.91	-13.75	2748	-14.64	-14.44	8.46	0.44
J090056.89+021702.6	0.830	-0.55	44.90	-16.07	-13.98	5614	-14.26	-16.28	8.85	0.05
J090132.62+233257.7	0.845	-1.50	45.16	-15.74	-13.70	3035	-14.31	-16.46	8.45	0.28
J090154.96+380534.4	1.038	-1.10	45.73	-15.43	-13.20	4589	-14.02	-15.77	9.10	0.21
J090321.30+244928.0	1.235	-1.33	45.08	-16.20	-14.15	6241	-14.86	-16.53	9.03	0.06
J090825.06+014227.7	1.002	-1.61	45.52	-15.52	-13.51	2432	-14.34	-16.41	8.44	0.72
J091146.06+403501.0	0.441	0.33	44.44	-15.86	-13.62	1744	-14.38	-14.38	7.59	0.32
J091214.02+424740.5	1.327	-1.75	45.40	-15.92	-13.72	2705	-14.55	-15.77	8.47	0.54
J091854.48+583339.6	1.315	-0.44	45.37	-16.11	-15.21	6775	-14.59	-16.35	9.26	0.05
J092035.59+524006.2	0.793	0.09	44.94	-16.09	-14.00	5609	-14.32	-16.25	8.87	0.04
J092157.62+103539.0	0.548	-1.02	44.68	-15.68	-13.62	3020	-14.35	-14.35	8.20	0.20
J092441.08-001729.6	0.707	-1.09	45.32	-15.47	-13.89	3208	-14.04	-14.92	8.58	0.25
J092515.40+493539.8	1.294	2.17	45.59	-15.76	-13.86	4104	-14.51	-16.43	8.93	0.25
J092928.63+324129.8	0.776	-1.35	45.24	-15.54	-13.42	2517	-14.15	-15.50	8.33	0.47
J093034.79+570520.6	0.637	-1.65	45.00	-15.58	-13.44	2588	-14.36	-15.80	8.22	0.34
J093228.56+555344.8	0.878	-0.24	45.11	-15.90	-13.57	2281	-14.27	-15.93	8.17	0.40
J093759.60+4533801.8	0.429	-1.47	44.67	-15.50	-13.96	7441	-13.96	-15.20	8.97	0.03
J093919.87+440449.5	1.307	2.38	45.71	-15.64	-13.93	6733	-14.37	-15.63	9.43	0.11
J093953.44+033229.7	0.927	-0.61	45.06	-15.94	-13.74	1856	-14.47	-15.56	7.97	0.67
J094225.42+565613.0	0.833	-0.69	45.16	-15.84	-13.93	7236	-14.17	-16.02	9.20	0.04
J094355.00+560649.0	1.055	-0.37	45.25	-15.99	-14.12	2270	-14.34	-16.45	8.24	0.43
J094443.13+062507.4	0.695	-1.13	46.03	-14.66	-12.43	2195	-13.45	-14.36	8.62	1.41
J094759.66+120537.7	1.287	-1.34	45.44	-15.93	-13.67	2973	-14.36	-15.46	8.57	0.38

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J094939.93+393642.9	0.654	-1.04	44.32	-16.34	-13.97	1135	-14.88	7.16	0.74	
J095057.56+542919.4	1.194	-2.11	45.22	-16.04	-14.24	1653	-14.85	7.95	1.03	
J095104.91+131639.5	1.009	-1.49	45.16	-15.90	-13.59	1727	-14.44	7.96	0.93	
J100552.24+025902.4	0.908	-1.50	45.32	-15.69	-13.79	5910	-14.06	9.11	0.68	
J101139.21+415639.7	1.201	-1.15	44.92	-16.35	-14.34	4437	-14.87	8.65	0.10	
J101151.95+542942.6	0.536	-0.93	44.30	-16.17	-14.59	2110	-14.78	7.68	0.20	
J101203.31+492148.2	0.748	-1.72	45.20	-15.54	-13.68	6211	-14.41	9.09	0.07	
J101302.06+361510.7	0.836	-1.21	44.89	-15.99	-13.65	1913	-14.53	7.91	0.53	
J102021.21+121909.1	0.480	0.17	44.57	-15.77	-13.49	1384	-14.57	7.46	0.63	
J102036.10+602339.0	0.994	-0.51	45.30	-15.98	-14.45	5053	-14.44	-15.58	9.07	
J102225.67+602630.2	1.173	-1.45	45.50	-15.78	-13.94	2256	-14.87	8.29	0.46	
J102249.27+130125.0	1.217	0.08	45.35	-16.07	-13.76	3400	-14.06	-15.78	8.33	
J102802.33+592906.7	0.536	-1.98	44.74	-15.58	-13.49	2169	-13.90	-14.85	8.30	
J102839.11+450009.4	0.585	-0.95	45.43	-15.05	-12.78	5751	-14.57	-16.36	8.94	
J102943.75+370127.2	1.344	-1.80	45.04	-16.34	-14.43	6227	-13.80	9.31	0.07	
J103036.93+312028.8	0.876	-1.30	45.62	-15.34	-13.31	2004	-14.56	8.33	0.10	
J103110.64+395322.3	1.081	-1.48	45.63	-15.49	-13.45				1.20	
J103113.36+344613.5	0.942	-1.55	45.32	-15.72	-13.73			-15.69		
J103255.37+083503.2	0.894	-0.79	45.66	-15.33	-13.23	3103	-13.65	8.73	0.42	
J103621.60+393701.6	0.802	-1.06	45.71	-15.12	-12.90	2272	-14.07	-15.19	8.48	
J103739.61+501505.7	0.947	-1.22	45.36	-15.67	-14.09	1403	-15.08	7.88	1.59	
J103824.47-010538.9	0.773	1.16	44.63	-16.38	-14.31	5003	-14.66	-16.11	8.60	
J103929.00+474236.9	1.110	0.39	45.32	-15.90	-14.03	3102	-14.70	-16.47	8.55	
J103933.38+035200.4	0.916	-0.57	44.84	-16.23	-13.91	2565	-14.87	-16.62	8.14	
J104035.07+623329.5	1.174	-1.12	45.36	-15.90	-14.34	7100	-14.59	-16.36	9.29	
J104116.79+035511.4	1.246	-0.96	45.54	-15.81	-13.78	2103	-14.45	-15.69	8.33	
J104132.96+513657.0	0.735	-1.53	45.30	-15.47	-13.42	4468	-14.00	-16.03	8.86	
J104210.43+501609.1	0.789	-1.22	45.44	-15.38	-13.45	5533	-14.15	9.12	0.11	
J104459.60+365605.1	0.701	-1.10	45.75	-15.00	-12.79	940	-14.12	7.74	4.99	
J104705.08+590728.4	0.392	-1.83	44.44	-15.62	-13.80	2014	-14.50	-15.36	7.72	
J104838.65+603933.1	1.274	-1.86	45.35	-16.00	-13.95	7061	-14.55	-15.96	9.28	
J104845.83+353110.7	1.011	-1.34	45.85	-15.23	-13.66	2869	-14.22	-15.35	8.76	
J105102.78+525049.8	0.543	-1.36	44.65	-15.79	-14.08	5598	-14.21	-16.18	8.72	
J105259.99+065358.0	0.724	-0.97	44.86	-15.89	-13.29	2349	-14.25	8.07	0.32	
J105404.72+042939.3	0.579	-1.24	44.58	-15.98	-13.99	5335	-14.69	-16.25	8.64	
J105638.08+494943.3	1.148	-1.96	46.24	-14.97	-13.16	4909	-13.50	-15.04	9.43	
J105748.63+610910.8	1.274	-1.96	45.10	-16.30	-14.13	4261	-14.61	-16.03	8.71	
J105823.13+600805.6	1.071	-0.97	45.61	-15.56	-13.54	2088	-14.21	-15.26	8.35	
J110108.43+515021.9	0.968	-1.53	45.69	-15.35	-13.23	3691	-13.87	-14.90	8.89	
J110440.82-000441.6	1.344	1.82	45.45	-15.93	-13.77	2176	-14.69	8.31	0.79	

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J110810.99+355927.4	1.062	-1.02	45.08	-16.04	-13.79	1227	-14.58	-16.13	7.62	1.66
J110839.62+532721.4	0.878	-0.33	44.87	-16.18	-14.12	3323	-14.87	-8.38	0.13	
J111013.79+523067.2	1.009	-1.37	45.78	-15.27	-13.08	2352	-13.95	-15.68	8.55	1.01
J111040.48+433821.3	1.230	-2.38	45.37	-15.91	-13.66	5128	-14.31	-16.78	9.01	0.13
J111628.00+434505.8	0.801	-0.90	45.60	-15.28	-13.17	2691	-14.08	-15.78	8.57	0.53
J112349.16+135220.6	0.928	-1.15	44.32	-16.00	-13.92	7041	-14.58	-16.74	8.74	0.02
J112632.81+430938.5	0.436	0.19	44.65	-15.66	-13.62	941	-14.64	-16.86	7.16	1.32
J112730.71+423039.0	0.531	-1.56	44.66	-15.73	-14.05	3029	-14.44	-15.58	8.19	0.17
J112822.42+482310.1	0.541	-0.60	45.15	-15.33	-13.21	2561	-14.32	-8.30	0.35	
J112828.31+0111337.9	0.893	-0.66	45.25	-15.85	-14.27					
J112901.71+050617.0	1.282	0.82	45.25	-16.24	-14.02	3311	-14.61	-16.59	8.57	0.19
J112912.27+422853.9	0.582	-0.64	44.82	-15.74	-13.55	1989	-14.26	-15.33	7.90	0.40
J113349.81+361027.3	1.158	-0.40	45.22	-16.13	-13.89	2219	-14.59	-8.21	0.44	
J113355.22+111208.8	0.763	-1.50	45.02	-15.72	-13.49	2461	-14.50	-8.19	0.41	
J113704.85+055240.4	0.915	-1.48	45.99	-16.36						
J113807.83+531231.6	0.790	-1.31	45.24	-15.60	-13.82	2163	-14.67	-8.19	0.59	
J113940.42+451207.0	1.141	-1.43	45.57	-15.64	-13.42	2940	-14.28	-8.63	0.47	
J114033.47+150701.7	1.250	-1.25	45.57	-15.78	-14.37	3177	-14.69	-15.83	8.70	0.38
J114043.62+532438.9	0.530	-1.39	44.87	-15.57	-14.04	2222	-14.30	-16.50	8.02	0.35
J114111.61-014306.6	1.266	-1.49	45.99	-15.37	-13.30	3183	-14.15	-15.21	8.92	0.61
J114209.01+070957.7	0.497	-1.41	44.77	-15.52	-13.28	4204	-14.36	-15.60	8.53	0.10
J114516.73+493259.4	1.158	-0.73	45.57	-15.74	-13.65	5407	-14.31	-16.48	9.16	0.12
J114600.32+504734.0	1.084	-1.58	45.50	-15.60	-13.60	3790	-14.49	-15.96	8.82	0.30
J114740.33+373438.9	1.297	2.04	45.20	-16.28	-13.81	3221	-14.69	-15.96	8.52	0.20
J114754.36+040638.4	1.174	-2.50	45.30	-15.92	-14.01	5004	-14.37	-15.78	8.96	0.13
J114915.30+393325.4	0.630	-0.91	44.75	-15.81	-13.71	1231	-14.62	-14.31	7.45	1.15
J115010.81+480844.3	1.190	-3.60	45.37	-15.85	-13.80	2954	-14.55	-16.22	8.53	0.42
J115111.93+465903.7	1.298	-2.37	45.65	-15.72	-13.65	4560	-14.67	-9.05	0.21	
J115553.87+012427.6	1.010	-1.09	45.58	-15.54	-13.66	2571	-14.25	-8.52	0.58	
J115816.72+132624.1	0.440	-1.18	45.04	-15.14	-12.99	2520	-13.80	-14.03	8.22	0.38
J115832.28+044208.3	0.896	-2.08	45.44	-15.50	-13.28	3913	-14.03	-15.03	8.82	0.24
J115852.87-004301.9	0.983	-0.24	45.01	-16.16	-13.93	5196	-14.44	-15.82	8.84	0.06
J115923.83+415246.7	1.200	-1.69	45.89	-15.39	-13.45	4493	-14.04	-15.26	9.17	0.28
J120049.55+632211.8	0.887	-0.48	45.01	-16.03	-13.84	7096	-14.60	-9.11	0.03	
J120146.46+63034.4	0.659	-1.60	44.83	-15.85	-14.60	6381	-14.42	-16.47	8.92	0.04
J120337.91+153006.6	1.218	-1.37	45.83	-15.60	-13.65	6840	-13.96	-15.51	9.50	0.08
J120813.42+023015.1	1.182	-1.36	46.45	-14.78	-12.61	2074	-13.44	-14.33	8.79	2.69
J120924.07+103612.0	0.395	-1.71	45.50	-14.61	-13.10	6339	-13.23	-15.46	9.27	0.09
J120928.11+003511.6	0.610	1.62	44.09	-16.56	-14.41	717	-15.89	-6.64	1.22	
J121113.38+121937.3	0.465	-0.47	44.72	-15.56	-13.31	2183	-14.18	-7.93	0.32	

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J121303.40-014450.9	0.613	-1.04	45.04	-15.54	-13.64	2350	-14.46	-15.90	8.16	0.39
J121441.42-000137.8	1.046	-0.87	44.88	-16.33	-13.49	4425	-14.50	-15.70	8.63	0.08
J121806.00+101920.6	1.089	0.09	45.06	-16.25	-14.29	8289	-14.61	-16.12	9.27	0.02
J121907.80-0005609.2	0.638	0.42	44.46	-16.28	-14.00	1563	-14.87	-16.41	7.51	0.36
J122020.29+575637.6	1.307	2.18	45.14	-16.37	-14.19	2063	-14.76	-16.54	8.10	0.43
J122043.21-013215.3	0.448	-0.95	44.26	-16.01	-14.43	4242	-14.94	-15.22	8.27	0.05
J122305.79+085651.4	1.091	-1.71	45.46	-15.70	-13.71	3367	-14.30	-15.22	8.69	0.33
J122424.17+593528.5	0.899	-1.62	45.10	-15.86	-13.68	3730	-14.33	-16.19	8.60	0.18
J122614.97+120925.4	0.871	-1.11	45.47	-15.58	-13.94	2086	-14.04	-15.69	8.28	0.64
J122703.19+50356.2	0.765	0.79	44.97	-16.02	-13.88	1193	-14.70	-15.86	7.54	0.94
J122847.60+490431.8	0.954	-0.87	45.13	-15.90	-13.80	2671	-14.44	-15.66	8.32	0.34
J123218.09+410637.9	1.326	-0.54	45.51	-15.94	-14.26	10330	-15.18	-16.09	9.69	0.03
J124300.87+153510.6	0.562	-1.19	44.83	-15.63	-13.47	5470	-14.04	-15.84	8.79	0.06
J125057.57+402100.2	0.607	-0.75	44.62	-15.98	-14.07	1986	-15.03	-15.03	7.80	0.32
J125507.12+634423.8	1.067	-1.63	45.07	-16.03	-13.56	5005	-14.51	-15.94	8.84	0.10
J130006.47+653201.7	1.192	-0.93	45.39	-15.88	-14.06	4400	-14.70	-15.79	8.89	0.17
J130444.12+052820.8	0.935	-1.74	45.05	-15.94	-13.87	1087	-14.52	-15.79	7.50	2.00
J130741.12+503106.4	0.695	-0.73	45.17	-15.59	-13.48	6203	-14.52	-15.07	9.07	0.06
J130952.89+011950.6	0.547	-1.47	45.30	-15.12	-13.25	7927	-13.55	-14.65	9.35	0.05
J131323.25+151309.6	1.262	-1.49	46.00	-15.32	-13.35	4524	-14.03	-15.27	9.23	0.32
J131433.19+471457.7	0.873	-1.14	45.06	-15.89	-13.99	1261	-15.03	-16.43	7.63	1.38
J131637.26-003636.0	0.930	-1.42	45.52	-15.48	-13.40	11377	-13.91	-15.66	9.78	0.03
J131703.87+614228.5	1.344	-0.55	45.39	-16.07	-14.04	5564	-14.59	-16.24	9.10	0.09
J131823.73+123812.5	0.589	-0.80	44.68	-15.89	-14.11	1235	-14.81	-15.27	7.41	0.88
J132114.42+020225.0	0.582	0.29	44.47	-16.06	-13.28	2273	-14.36	-16.06	7.84	0.22
J132401.53+032020.6	0.926	-0.09	44.94	-16.13	-13.95	3231	-14.12	-15.95	8.39	0.16
J132439.32+421604.7	1.020	-1.03	45.19	-15.97	-14.46	7467	-14.44	-15.80	9.24	0.04
J133014.48+413244.9	1.146	-1.77	45.69	-15.49	-13.49	3105	-14.08	-14.08	8.74	0.54
J133603.65+511733.6	1.327	-0.54	45.44	-15.93	-13.88	2244	-14.61	-15.74	8.33	0.72
J133833.82+034522.2	1.301	1.88	45.48	-16.00	-13.90	6872	-14.98	-15.70	9.32	0.06
J133936.69+111949.2	0.650	-0.71	44.87	-15.77	-13.52	1180	-14.41	-15.70	7.48	1.28
J134127.40+002050.5	0.722	-0.85	44.90	-15.83	-14.02	1877	-14.58	-15.47	7.89	0.56
J134410.43+535352.8	0.827	-2.40	45.24	-15.61	-13.90	5863	-14.42	-16.02	9.06	0.09
J134415.75+331719.1	0.687	-1.10	45.02	-15.75	-14.01	7014	-14.25	-15.49	9.10	0.04
J134450.16-015843.0	0.958	-1.17	45.10	-15.91	-13.71	1818	-14.56	-15.77	7.97	0.77
J134830.78-015357.8	0.816	-1.04	44.92	-15.96	-13.77	3640	-14.38	-16.54	8.48	0.14
J134938.48+475530.1	1.104	-1.34	45.75	-15.43	-13.33	3112	-14.13	-15.94	8.77	0.52
J134951.56+040407.2	1.032	-1.62	45.60	-15.49	-13.67	4542	-14.24	-15.50	9.02	0.22
J135226.34+024549.4	1.222	-1.57	45.55	-13.91	-13.91	5894	-13.98	-15.78	9.23	0.11
J135418.26+585935.9	0.791	-0.59	44.89	-15.97	-14.10	1296	-15.02	-15.02	7.57	1.07

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J135546.11+431819.8	1.318	0.59	45.59	-15.77	-13.77	6828	-14.36	-15.41	9.38	0.09
J135750.89+632446.2	1.347	-1.10	45.60	-15.88	-13.70	2441	-14.34	-15.50	8.49	0.59
J140025.53-012957.0	0.584	-0.68	44.82	-15.74	-13.47	7143	-14.29		9.02	0.03
J140115.74+621857.1	0.645	0.67	44.68	-16.04	-13.78	4364	-14.59	-15.59	7.77	0.34
J140332.86+133218.7	1.093	-1.30	45.59	-15.61	-13.59	3924	-14.12	-15.66	8.99	0.20
J141513.20+634037.2	1.334	-2.29	45.58	-15.81	-14.03	3363	-14.53	-15.66	8.89	0.27
J141555.07+582632.8	1.261	-1.63	45.52	-15.85	-14.39		-14.76	-15.72	8.72	0.31
J142010.28+604722.3	1.345	-1.87	45.01	-16.49	-14.86					
J142110.71+035439.8	0.831	-1.09	44.68	-16.20	-14.03	2701	-14.57	-16.21	8.10	0.21
J142116.23+052252.3	0.926	-0.40	45.09	-15.99	-14.01	4005	-14.80		8.65	0.12
J142649.47+401250.8	0.749	-1.54	44.97	-15.77	-13.85	2911	-14.43	-15.37	8.31	0.26
J142649.24+032517.7	0.529	-0.90	44.74	-15.67	-13.57	2944	-14.32	-16.06	8.20	0.19
J142927.28+523849.5	0.595	-0.90	45.34	-15.20	-12.89	1592	-13.88		7.98	1.18
J143144.91+391910.2	1.091	-1.33	45.77	-15.46	-14.03	8879	-14.07	-15.37	9.70	0.06
J143303.27+403105.1	0.446	-1.55	44.59	-15.61	-13.55	2885	-14.35	-15.26	8.11	0.18
J143826.73+642859.8	1.222	-1.30	45.70	-15.60	-13.60	2079	-14.31	-15.88	8.40	1.08
J143828.63+452108.6	0.427	-1.51	44.79	-15.34	-13.27	1884	-14.17	-15.28	7.84	0.54
J144222.02+524143.2	1.037	-1.04	45.17	-15.99	-13.93	2680	-14.71	-15.81	8.35	0.33
J144317.71-020933.0	1.050	-0.83	45.40	-15.82	-14.04	3145	-14.79		8.60	0.28
J144342.21-025430.6	0.777	-0.31	44.85	-16.04	-13.73	1263	-14.74		7.53	0.95
J144436.58+42508.6	1.101	-1.50	45.43	-15.69	-13.54	4847	-14.21	-15.28	9.00	0.17
J144627.41+353453.5	0.922	-1.75	45.66	-15.34	-13.74	7358	-14.00	-15.17	9.48	0.08
J144642.26+454630.9	0.738	-1.04	45.05	-15.82	-14.25	1910	-14.56	-16.75	7.99	0.48
J144759.19+350833.5	0.953	-1.36	45.39	-15.63	-13.63	2752	-14.31	-15.40	8.48	0.45
J144903.18+503018.1	0.609	-1.43	44.82	-15.73	-13.78	2022	-14.59	-15.67	7.92	0.44
J145333.01+002943.6	1.291	-1.44	45.25	-16.27	-14.29	2602	-15.02	-16.15	8.36	0.29
J145503.95+51539.8	1.277	0.36	45.32	-16.11	-14.12	2800	-14.62	-15.58	8.46	0.32
J145549.84-013018.3	1.321	0.60	45.34	-16.13	-14.21	4302	-14.60	-16.22	8.85	0.14
J145724.00+452157.8	0.718	-1.19	44.96	-15.79	-13.32	2064	-14.47		8.01	0.46
J145736.70+523454.6	0.638	-1.35	45.14	-15.41	-13.18	2305	-14.00		8.20	0.53
J145836.73+433015.5	0.760	-1.22	45.10	-15.72	-13.81	4207	-14.37	-15.82	8.70	0.13
J150525.51-023853.8	1.159	-0.90	45.43	-15.86	-13.76	2617	-14.42	-15.83	8.46	0.46
J150847.41+340437.7	0.788	-1.27	45.64	-15.21	-14.17	8948	-14.78		9.64	0.05
J151053.63+574055.1	1.037	-0.43	45.68	-15.52	-13.47	2359	-13.97	-15.28	8.50	0.67
J151225.67+583752.2	0.791	1.96	44.40	-16.63	-14.35	1362	-14.83		7.36	0.38
J151545.34+031745.0	0.780	-1.36	44.67	-16.24	-14.16	3317	-14.54		8.27	0.11
J151548.67+4340420.5	0.527	-0.55	44.32	-16.13	-13.87	2029	-14.78	-16.25	7.66	0.22
J152200.76+035017.0	0.838	-1.32	45.07	-15.85	-14.32	5324	-14.84	-16.26	8.89	0.08
J152356.26+034457.6	1.172	-1.67	45.44	-15.78	-13.64	2458	-14.51	-15.86	8.41	0.63
J152438.79+415543.0	1.230	-0.97	45.74	-15.62	-13.45	926	-15.81		7.72	4.97

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J153036.83+370439.2	0.417	-0.89	44.90	-15.26	-13.20	2138	-13.85	8.01	0.42	
J153133.53+452841.6	1.022	-0.85	45.19	-15.97	-13.99	7110	-14.36	9.20	0.05	
J153646.88+515755.2	1.132	-0.96	45.65	-15.63	-13.82	2992	-14.28	8.69	0.42	
J155905.39+2504047.2	0.933	-1.41	45.29	-15.70	-13.77	2126	-14.64	15.94	0.68	
J160018.68+021331.3	1.191	-1.76	45.08	-16.17	-14.15	3082	-15.11	8.42	0.26	
J160329.72+502722.2	0.638	-1.29	44.81	-15.81	-13.98	2920	-14.55	8.23	0.20	
J160628.06+290333.8	0.434	0.16	44.88	-15.40	-13.49	2140	-14.10	8.00	0.34	
J160721.27+515510.6	0.776	-1.91	44.98	-15.81	-13.80	2202	-14.38	8.08	0.45	
J161425.17+375210.7	0.553	-1.54	45.46	-14.94	-12.95	3331	-13.59	14.64	8.68	
J161500.79+491045.4	1.280	-0.85	45.45	-15.91	-13.76	2813	-14.34	15.96	8.53	
J161515.58+465931.9	0.986	-0.94	45.35	-15.79	-13.79	2480	-14.39	15.45	8.37	
J161740.36+421357.9	1.285	-2.25	45.66	-15.68	-13.74	3726	-14.29	15.65	8.88	
J162016.29+415744.1	1.286	-1.19	45.56	-15.85	-14.29	3089	-14.14	16.18	8.67	
J162639.79+270155.5	0.826	-1.43	44.99	-15.87	-13.93	3027	-14.68	16.33	8.36	
J162653.30+325406.3	0.951	-1.45	45.16	-15.89	-13.84	2940	-14.37	8.42	0.28	
J163255.46+420407.8	0.728	-1.28	44.93	-15.89	-14.34	7571	-14.16	15.64	9.12	
J163515.51+213859.6	0.683	-1.04	44.94	-15.73	-13.72	1556	-14.46	15.94	8.33	
J163656.84+364340.4	0.852	-0.31	45.10	-15.90	-13.72	1726	-14.38	16.18	8.67	
J163825.67+462934.7	1.219	-1.28	45.32	-15.92	-13.43	3193	-14.10	15.33	8.24	
J164447.19+311437.2	0.690	-0.88	45.23	-15.54	-13.41	2957	-14.19	15.94	8.46	
J164721.01+410659.3	0.918	-1.69	45.14	-15.82	-13.89	3940	-14.46	16.29	8.66	
J164745.04+355732.9	0.942	-1.89	45.08	-15.92	-13.77	958	-14.91	15.94	7.75	
J165225.39+215830.7	0.447	0.23	44.46	-15.83	-13.61	1046	-14.27	17.26	7.92	
J165236.27+190526.3	1.090	-0.63	45.03	-16.17	-14.08	4294	-14.31	15.57	8.68	
J165238.29+414035.4	0.844	0.28	44.83	-16.23	-14.40	3760	-14.68	14.68	8.46	
J170010.82+395454.8	0.577	-0.43	44.64	-15.91	-13.81	2051	-14.80	16.29	8.66	
J170330.23+324201.8	0.636	-1.49	44.66	-15.95	-13.72	3352	-14.65	16.04	7.40	
J170341.82+383944.7	0.554	0.39	44.66	-15.98	-14.39	3074	-14.53	16.37	8.28	
J171032.23+214451.3	0.867	-1.06	45.13	-15.85	-14.05	1157	-14.85	15.88	7.59	
J172042.43+273455.1	1.230	-1.56	45.06	-16.20	-14.22	2298	-15.04	15.04	8.15	
J204333.20-001104.2	0.544	-0.70	45.09	-15.34	-13.37	2642	-14.16	16.05	8.29	
J210704.93-011044.0	1.348	-4.73	45.62	-15.79	-13.76	3857	-14.28	16.26	8.89	
J210757.67-062010.6	0.644	-0.64	45.40	-15.31	-13.25	4517	-13.46	15.25	8.92	
J212017.00+004841.7	1.288	-0.98	46.00	-15.36	-13.34	6054	-13.82	14.82	9.48	
J214118.78-070957.4	0.869	-0.28	44.84	-16.21	-14.26	2380	-14.85	16.60	8.07	
J220601.82-073312.1	0.900	-0.93	45.12	-15.90	-13.79	1989	-14.77	16.05	8.06	
J220931.92+125814.5	0.814	-0.85	45.24	-15.62	-13.35	2036	-14.24	14.24	8.14	
J222609.49+010600.9	0.986	0.60	44.84	-16.26	-13.92	3361	-14.46	15.97	8.37	
J223424.10+005227.1	0.884	-1.05	45.23	-15.73	-13.50	3307	-14.29	16.29	8.56	
J224028.14-003813.1	0.658	-1.00	45.01	-15.63	-13.53	3805	-14.19	15.87	8.57	

表 A.2 (续)

SDSS Name	z	$\beta_{[3k-4k]}$	$\log L_{3000}$ erg s^{-1}	$\log F_{2500}$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$	$\log F(\text{UV Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\text{FWHM}(\text{Mg II}^b)$ km s^{-1}	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Mg II}^b)$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J232353.72-085857.9	0.807	-1.08	44.80	-16.12	-13.96	4606	-14.43	-16.13	8.62	0.07
J232550.73-002200.4	1.011	-1.30	45.65	-15.48	-13.86	5367	-14.06	-15.33	9.20	0.14
J233635.75-010733.7	1.303	1.82	45.45	-15.96	-14.15	1190	-15.13	-15.13	7.78	2.26
J234157.24-094616.9	1.340	-1.48	45.72	-15.69	-13.84	4309	-14.42	-16.51	9.04	0.25
J235718.32-090314.2	1.179	-1.50	45.31	-15.92	-14.44	3834	-14.53	-14.53	8.73	0.22
J235843.48+134200.2	1.135	-1.15	45.48	-15.73	-13.50	2430	-14.31	-15.54	8.42	0.63

注释：

- (1) 各源的 SDSS 名称, 以 hhmmss.ss+ddmmss.s (J2000) 命名。
 (2) 由发射线定出的红移。
 (3) 3000-4000Å 之间的类星体核连续谱指指数。
 (4) 核连续谱 3000Å 的单色光度。
 (5) 核连续谱 2500Å 的流量。
 (6) 紫外 Fe II 发射线流量。
 (7) Mg II $\lambda 2798$ 发射线窄成分的半高全宽。
 (8) Mg II $\lambda 2798$ 发射线窄成分的流量。
 (9) Mg II $\lambda 2798$ 发射线窄成分的流量。
 (10) 由 Mg II $\lambda 2798$ 线宽根据 Wang et al. (2009) 中公式 10 计算出黑洞质量。
 (11) 爱丁顿比。

表 A.3 Mg II BAL 类星体样本中 $z < 0.8$ 源的光学连续谱以及发射线性质测量结果

SDSS NAME	z	$\log L_{\text{100}}$ erg s^{-1}	$FWHM(\text{H}\beta^{\text{b}})$ km s^{-1}	$\log F(\text{H}\beta^{\text{b}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{H}\beta^{\text{n}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$FWHM(\text{[O III]})$ km s^{-1}	$\log F(\text{[O III]})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Opt.Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J010352.46+003739.7	0.705	44.97	4964	-13.57	-15.54	-13.91	2913	-13.66	8.63	0.15
J014534.36+143136.9	0.636	44.27	7005	-14.37	-15.81	-15.03	803	-14.60	8.45	0.05
J023102.49-083141.2	0.587	44.18	3812	-14.23	-16.36	-14.78	1058	-14.16	8.11	0.08
J023153.64-093333.6	0.555	44.13	5557	-14.27	-16.08	-15.23	707	-14.50	8.27	0.05
J024220.10-085332.7	0.800	44.43	5939	-14.08	-15.37	-14.40	354	-14.50	8.45	0.07
J025026.66+000903.3	0.597	44.45	8448	-14.28	-16.15	-14.53	521	-14.58	8.62	0.05
J033348.28+071149.0	0.635	44.92	4620	-13.53	-14.18	-14.18	527	-13.65	8.58	0.16
J080248.19+551328.8	0.664	44.75	2264	-14.09	-14.98	-14.34	782	-13.84	8.15	0.28
J080934.64+254837.9	0.545	44.54	8778	-13.88	-15.38	-14.62	719	-14.20	8.69	0.05
J081655.34+074311.5	0.645	44.37	3964	-14.19	-16.07	-14.56	992	-14.23	8.23	0.10
J082231.53+231152.0	0.653	44.86	9090	-13.76	-15.05	-13.81	598	-15.24	8.87	0.07
J083000.35+342328.7	0.740	44.44	2030	-14.52	-14.52	-15.24	241	-13.67	7.94	0.22
J083525.98+435211.3	0.568	44.77	2518	-14.20	-15.01	-14.84	747	-14.54	8.21	0.26
J083613.23+280512.1	0.743	44.33	2004	-14.37	-14.88	-15.25	388	-14.21	7.88	0.20
J084716.03+373218.0	0.453	44.62	2539	-13.63	-14.88	-13.74	484	-15.08	8.14	0.22
J084824.14+034542.3	0.699	44.45	4179	-13.95	-15.38	-14.02	522	-15.29	8.29	0.10
J085053.12+445122.4	0.542	44.72	8888	-13.55	-15.80	-14.35	698	-13.78	8.79	0.06
J085215.65+492040.8	0.567	44.25	4917	-14.28	-15.66	-15.01	360	-14.40	8.27	0.07
J088357.88+463350.6	0.549	44.53	4849	-14.06	-14.91	-14.53	1453	-13.98	8.40	0.10
J091146.06+403501.0	0.441	44.12	1614	-14.28	-15.22	-14.64	396	-14.33	7.68	0.20
J092035.59+5724006.2	0.793	44.78	9735	-14.01	-15.53	-14.56	874	-14.79	8.86	0.06
J092157.62+103539.0	0.548	44.05	1680	-14.51	-15.95	-15.31	1126	-14.34	7.66	0.18
J092441.08-001729.6	0.707	44.84	4045	-13.76	-15.48	-14.14	572	-14.38	8.47	0.17
J092928.63+324129.8	0.776	44.68	5212	-14.05	-15.63	-14.72	1611	-13.98	8.51	0.11
J093034.79+570520.6	0.637	44.34	2072	-14.55	-15.39	-15.21	874	-14.25	7.90	0.19
J093759.60+453801.8	0.429	44.08	13451	-13.81	-15.26	-13.97	578	-14.06	8.66	0.02
J094443.13+062507.4	0.695	45.46	5122	-13.20	-15.13	-14.15	3107	-13.36	8.89	0.26
J094939.93+393642.9	0.654	43.95	1330	-14.71	-15.82	-15.16	615	-14.68	7.50	0.20
J101151.95+542942.6	0.536	43.93	1640	-14.35	-15.13	-14.02	412	-15.33	7.59	0.16
J101203.31+492148.2	0.748	44.57	5299	-14.79	-17.00	-15.58	1087	-14.56	8.47	0.09
J102021.21+121909.1	0.480	44.23	2620	-14.39	-15.24	-15.17	1114	-14.16	7.96	0.13
J102802.33+592906.7	0.536	43.93	4313	-14.27	-16.76	-14.85	2186	-14.30	8.05	0.05
J102839.11+450009.4	0.585	45.03	4510	-13.39	-15.00	-14.29	501	-13.78	8.62	0.18
J103824.47-010538.9	0.773	44.52	2088	-14.61	-15.80	-14.46	377	-16.34	8.00	0.24
J104132.96+513657.0	0.735	44.70	5698	-14.10	-15.18	-14.69	4650	-13.92	8.56	0.10
J104210.43+501609.1	0.789	44.89	5828	-14.63	-15.11	-14.86	4186	-14.99	8.67	0.12
J104459.60+365605.1	0.701	45.20	4221	-13.46	-14.27	-14.08	4608	-13.44	8.67	0.24
J104705.08+590728.4	0.392	44.26	8965	-14.06	-15.75	-14.62	415	-14.22	8.56	0.04
J105102.78+525049.8	0.543	44.16	7029	-14.13	-15.01	-15.01	436	-14.59	8.40	0.04

表 A.3 (续)

SDSS NAME	z	$\log L_{5100}$ erg s^{-1}	$FWHM(\text{H}\beta^{\text{b}})$ km s^{-1}	$\log F(\text{H}\beta^{\text{b}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{H}\beta^{\text{n}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$FWHM(\text{OIII})$ km s^{-1}	$\log F([\text{OIII}])$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Opt.FeII})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J105259.99+065358.0	0.724	44.48	2116	-14.15	-15.21	641	-14.19	7.98	0.22	
J105404.72+042939.3	0.579	44.08	7923	-14.25	-14.30	562	-14.63	8.41	0.03	
J12632.81+430938.5	0.436	44.39	3990	-13.94	-14.84	980	-14.03	8.24	0.10	
J12730.71+423039.0	0.531	44.57	2664	-13.96	-15.6	1431	-14.57	8.14	0.19	
J12822.42+482310.1	0.541	44.79	4839	-13.87	-15.75	1478	-13.83	8.53	0.13	
J12912.27+422853.9	0.582	44.28	1197	-14.09	-15.77	1476	-14.15	7.61	0.33	
J13355.22+111208.8	0.763	44.42	4606	-14.63	-16.13	1553	-14.28	8.32	0.09	
J13807.83+531231.6	0.790	44.65	3993	-14.46	-15.91	1483	-14.49	8.37	0.14	
J14043.62+523438.9	0.530	44.31	6397	-13.93	-15.91	1461	-14.11	8.42	0.05	
J14209.01+070957.7	0.497	44.34	2154	-14.47	-15.40	1510	-14.11	7.92	0.19	
J14915.30+39325.4	0.630	44.19	1307	-14.38	-15.53	1469	-14.46	7.61	0.27	
J15816.72+132624.1	0.440	44.59	1788	-13.69	-15.56	1498	-13.66	7.96	0.30	
J120146.46+63034.4	0.659	44.17	11015	-14.21	-15.63	1454	-15.40	8.61	0.03	
J120924.07+103612.0	0.395	44.90	7764	-12.93	-14.45	1322	-14.00	8.81	0.09	
J120928.11+003511.6	0.610	43.99	2663	-14.71	-15.46	1546	-14.52	7.85	0.10	
J121113.38+121937.3	0.465	44.19	3946	-13.73	-15.49	1444	-13.95	8.13	0.08	
J121303.40-014450.9	0.613	44.47	2928	-14.04	-15.43	1472	-14.14	8.13	0.16	
J121907.80-005609.2	0.638	44.00	3183	-14.39	-15.29	1416	-14.27	7.94	0.08	
J122043.21-013215.3	0.448	43.87	10914	-14.16	-15.00	1401	-14.90	8.46	0.02	
J122703.19+505356.2	0.765	44.85	4060	-13.90	-15.05	1435	-14.35	8.48	0.17	
J124300.87+155310.6	0.562	44.40	6862	-13.90	-14.26	1564	-14.52	8.50	0.06	
J130741.12+503106.4	0.695	44.75	4863	-14.14	-16.83	1531	-14.11	8.51	0.12	
J131823.73+123812.5	0.589	44.17	6768	-14.48	-16.33	1533	-15.33	8.38	0.04	
J132114.42+020225.0	0.582	44.07	1548	-14.29	-14.84	1238	-14.22	7.63	0.20	
J133936.69+111949.2	0.650	44.32	2076	-14.28	-15.35	1506	-14.18	7.90	0.19	
J134127.40+002050.5	0.722	44.42	3780	-14.16	-14.74	1600	-14.35	8.23	0.11	
J134415.75+331719.1	0.687	44.36	2028	-13.97	-15.91	1168	-14.79	8.00	0.26	
J135418.26+583935.9	0.791	44.36	2512	-14.23	-15.6	1469	-14.33	8.01	0.16	
J140025.53-012957.0	0.584	44.50	3600	-14.40	-15.26	1520	-15.20	8.25	0.13	
J140115.74+621857.1	0.645	44.36	2691	-14.31	-16.13	1511	-14.30	8.04	0.15	
J142647.47+401250.8	0.749	44.39	13107	-13.91	-15.65	1449	-14.74	8.80	0.03	
J142649.24+032517.7	0.529	44.36	5114	-14.06	-14.94	1714	-14.18	8.34	0.07	
J142927.28+523849.5	0.595	44.84	3034	-13.59	-14.88	1468	-14.33	8.34	0.23	
J143303.27+403105.1	0.446	44.03	3914	-14.18	-16.08	1769	-14.05	8.25	0.07	
J143828.63+452108.6	0.427	44.12	2355	-14.01	-14.68	1404	-14.30	8.04	0.15	
J144342.21-025430.6	0.777	44.36	1571	-14.22	-15.11	1086	-13.97	7.86	0.13	
J144642.26+454630.9	0.738	44.58	5527	-14.39	-14.94	1676	-14.34	7.78	0.27	
J144903.18+503018.1	0.609	44.22	1980	-14.36	-14.88	1280	-14.24	8.49	0.09	
J145724.00+452157.8	0.718	44.55	1889	-14.18	-15.11	1419	-14.45	7.82	0.18	
J145736.70+523454.6	0.638	44.60	3024	-14.30	-15.39	1687	-13.88	7.97	0.28	

表 A.3 (续)

SDSS NAME	z	$\log L_{5100}$ erg s^{-1}	$FWHM(\text{H}\beta^{\text{b}})$ km s^{-1}	$\log F(\text{H}\beta^{\text{b}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{H}\beta^{\text{n}})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$FWHM(\text{O III})$ km s^{-1}	$\log F([\text{O III}])$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log F(\text{Opt.Fe II})$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log M_{\text{BH}}$ M_{\odot}	L/L_{Edd}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J145836.73+433015.5	0.760	44.60	3706	-14.22	-14.98	-14.37	1931	-14.25	8.31	0.14
J150847.41+340437.7	0.788	45.04	6361	-13.10	-14.66	-13.37	713	-14.43	8.79	0.13
J151225.67+585752.2	0.791	44.45	12348	-14.64	-14.06	-14.15	-14.15	-14.15	8.80	0.03
J151545.34+031745.0	0.780	44.29	14057	-14.99	-15.99	-14.75	1059	-14.63	8.78	0.02
J151548.67+430420.5	0.527	44.05	1554	-14.33	-15.74	-14.75	382	-14.36	7.62	0.19
J152036.83+370439.2	0.417	44.42	1408	-13.53	-16.09	-14.35	1258	-13.72	7.76	0.33
J160329.72+502722.2	0.638	44.28	4097	-14.10	-15.87	-14.66	605	-14.53	8.20	0.09
J160628.06+290333.8	0.434	44.64	2232	-13.75	-14.41	-14.41	1133	-13.79	8.09	0.25
J160721.27+515110.6	0.776	44.24	1544	-14.44	-16.03	-15.23	926	-14.34	7.71	0.24
J161425.17+375210.7	0.553	44.93	5502	-13.43	-14.98	-14.20	998	-13.53	8.66	0.13
J163255.46+420407.8	0.728	44.48	13320	-14.09	-16.05	-14.82	1243	-14.52	8.85	0.03
J163513.51+213859.6	0.683	44.25	1934	-14.53	-15.25	-15.25	724	-14.22	7.83	0.19
J164447.19+311437.2	0.690	44.79	3996	-13.87	-16.07	-14.51	337	-13.86	8.44	0.16
J165225.39+215830.7	0.447	44.56	2468	-14.18	-14.96	-14.67	1109	-14.11	8.10	0.21
J170010.82+395545.8	0.577	44.19	1918	-14.86	-15.64	-15.20	281	-14.71	7.79	0.18
J170330.23+324201.8	0.636	44.24	11088	-14.22	-15.98	-14.84	588	-14.80	8.65	0.03
J170341.82+383944.7	0.554	44.43	7083	-14.02	-15.91	-14.57	396	-14.31	8.53	0.06
J204333.20+001104.2	0.544	44.61	2988	-13.89	-15.33	-14.63	1092	-13.86	8.21	0.18
J210757.67-062010.6	0.644	45.03	11389	-13.42	-14.97	-14.00	1105	-13.55	9.06	0.07
J224028.14-003813.1	0.658	44.52	5876	-14.16	-16.28	-15.00	255	-14.43	8.49	0.08

注释:

(1) 各源的 SDSS 名称, 以 hhmmss.ss-ddmmss.s (J2000) 命名。

(2) 由发射线定出的红移。

(3) 核连续谱 5100Å 的单色光度。

(4) H β 发射线宽成分的半高全宽。(5) H β 发射线窄成分的流量。(6) H β 发射线窄成分的流量。

(7) [O III]λ5007 发射线的半高全宽。

(8) [O III]λ5007 发射线的流量。

(9) [O III]λ5007 发射线的流量。

(10) 由 H β 宽发射线宽根据 Wang et al. (2009) 中公式 11 导出的黑洞质量。

(11) 爱丁顿比。

A.2 He I* BAL 类星体样本吸收线的测量结果

我们利用光谱配对法从 285 个 Mg II BAL 类星体中选出 101 个 He I* λ 3889 BAL 类星体，测量结果汇总在表 A.4 中。此外，在这 101 个 He I* λ 3889 BAL 类星体中我们又用同样的方法选出 52 个 He I* λ 3189 BAL 类星体，测量结果汇总在表 A.5 中，拟合效果图见图 A.2。图 A.1 显示了 101 个 He I* λ 3889 BAL 类星体中没有探测到 He I* λ 3189 吸收线的 49 个源的拟合效果。

表 A.4 He I* λ 3889 吸收线测量结果

SDSS Name	z	Spectrum		He I* λ 3889		He I* λ 3889		He I* λ 3889		He I* λ 3889		S/N
		(2)	(3)	EW (Å)	(4)	d _{abs}	(5)	v _{max} (km s ⁻¹)	(6)	v _{min} (km s ⁻¹)	(7)	(8)
000009.26+151754.5	1.197	52251-0751-354	2.57±1.13	0.35	-1821	-445	-1024	4.7				
010352.46+003339.7	0.705	51816-0396-471	0.67±0.29	0.07	-10548	-9614	-10089	30.3				
013816.16+140431.6	0.877	51882-0426-494	3.01±1.33	0.23	-4734	-2687	-3733	7.4				
013853.94-101125.7	1.305	52145-0663-217	2.61±1.08	0.25	-7988	-6707	-7281	5.4				
014950.96-010314.1	1.082	51793-0402-260	0.51±0.21	0.08	-7504	-6897	-7187	20.7				
020105.14+000617.9	1.205	51871-0403-593	1.77±0.82	0.14	-2702	-1673	-2213	11.1				
023102.49-083141.2	0.587	51908-0454-582	1.06±0.51	0.13	-2868	-1771	-2377	13.5				
023153.64-093333.6	0.555	51908-0454-017	4.00±1.43	0.32	-1282	-42	-774	8.5				
023445.76-085908.5	1.275	51909-0455-238	3.20±1.36	0.33	-8079	-7001	-7608	4.3				
024220.10-085332.7	0.800	51910-0456-291	2.00±0.73	0.19	-3894	-2665	-3238	14.2				
073122.84+430241.0	0.975	53312-1865-044	3.92±1.14	0.30	-3962	-2664	-3164	8.8				
074554.74+181817.0	1.054	52939-1582-256	1.03±0.46	0.14	-1962	-1207	-1665	11.2				
075927.12+463431.5	0.983	52238-0757-474	1.24±0.56	0.16	-4160	-3341	-3780	12.7				
080248.19-551328.8	0.664	53384-1871-440	2.64±0.52	0.24	-684	-767	-52	23.0				
080924.64+254837.9	0.545	52670-1205-588	2.00±0.31	0.27	-40	-790	-366	20.0				
080957.38+181804.4	0.969	53319-1923-023	3.25±0.59	0.11	-5257	-1844	-3545	23.4				
081820.31+200046.1	0.986	53327-1925-040	1.56±0.59	0.17	-2271	-1241	-1762	12.4				
082231.53-231152.0	0.653	53317-1926-546	2.96±0.44	0.19	-2367	-442	-1162	34.3				
083522.77+424258.3	0.807	52232-0762-085	1.74±0.20	0.24	-640	-119	-272	28.5				
084044.41+363327.8	1.235	52320-0864-149	2.43±0.45	0.09	-4183	-1858	-3000	31.2				
084824.14-034542.3	0.699	52224-0564-575	1.32±0.52	0.18	-974	-147	-561	18.0				
085053.12-1445122.4	0.542	52605-0897-359	3.16±0.56	0.11	-5335	-3019	-4170	33.3				
085215.65+492040.8	0.567	51993-0551-274	2.44±0.75	0.23	-1554	-315	-907	10.6				
085357.88+463350.6	0.549	52238-0764-248	3.28±0.84	0.17	-4310	-2534	-3321	19.0				
090056.89+021702.6	0.830	51913-0469-575	2.28±0.79	0.27	-1334	-301	-762	10.6				
092157.62+103539.0	0.548	53050-1740-170	4.85±1.92	0.17	-6290	-5546	-5887	8.8				
093228.56-555344.8	0.878	51991-0556-251	3.10±1.29	0.11	-6459	-4969	-5760	14.6				
093759.60+453801.8	0.429	52672-1202-330	2.70±0.63	0.25	-1379	-483	-457	13.7				
094355.00+560649.0_a	1.055	52253-0557-299	3.74±0.88	0.35	-1690	-313	-928	8.0				
094443.13+062307.4	0.695	52710-0993-535	0.74±0.28	0.05	-6840	-5961	-6389	44.3				
100552.24+025002.4	0.908	52235-0501-562	1.09±0.41	0.15	-11385	-10633	-11016	15.9				
101302.06-361510.7	0.836	53357-1954-406	2.03±1.00	0.21	-8225	-7111	-7623	9.8				
102036.10+602339.0	0.994	52370-0771-011	2.13±0.79	0.15	-1959	-308	-1059	11.9				
102839.11+450009.4	0.585	52990-1429-401	2.15±0.28	0.23	-1475	-304	-809	35.8				
102943.75+70127.2	1.344	53415-1957-601	3.58±1.44	0.26	-798	-177	-464	2.6				
103036.93-312028.8	0.876	53440-1959-121	1.83±0.48	0.09	-5580	-3266	-4499	23.2				
103110.64+395322.3	1.081	52998-1428-608	1.13±0.53	0.12	-5083	-4063	-4612	11.4				
103255.37+083303.2	0.894	52734-1240-316	2.11±0.70	0.11	-3951	-2242	-3012	26.6				
103621.60+393701.6	0.802	53002-1430-555	2.40±0.56	0.13	-2704	-367	-1419	33.0				

表 A.4 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	$\text{He I}^*\lambda 3889$ EW (Å) (4)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ d_{abs} (5)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{max}} (\text{km s}^{-1})$ (6)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{min}} (\text{km s}^{-1})$ (7)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{avg}} (\text{km s}^{-1})$ (8)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ S/N (9)
104459.60+365605.1_b	0.701	53463-2090-329	1.77±0.24	0.15	-5100	-3534	-4164	35.1
104705.08+590728.4	0.392	52427-0949-326	2.70±1.11	0.16	-1731	-9	-741	8.6
104845.83+353110.7	1.011	53463-2090-131	0.76±0.33	0.09	-3236	-2757	-3009	18.8
105102.78+525049.8	0.543	52649-1010-556	3.03±1.02	0.14	-2334	-64	-1096	9.9
105404.72+042939.3	0.579	52338-0579-072	1.50±0.65	0.20	-1370	-612	-935	6.5
105638.08+494643.3	1.148	52669-0876-110	0.92±0.24	0.08	-11620	-10555	-11110	23.7
110108.43+515021.9	0.968	52353-0877-402	1.43±0.51	0.08	-9518	-8580	-9031	22.7
11628.00+434505.8	0.801	53061-1364-095	2.12±0.38	0.15	-4847	-2870	-3775	26.7
112822.42+482310.1	0.541	52642-0966-203	2.88±0.84	0.09	-3599	-2094	-2808	24.0
113704.85+055240.4	0.915	52378-0838-328	3.17±1.23	0.16	-4487	-3191	-3829	9.8
113807.83+531231.6_b	0.790	52367-0880-404	2.17±0.86	0.16	-4314	-2607	-3477	14.8
113940.42+451207.0	1.141	53083-1367-454	2.25±0.72	0.13	-8782	-7034	-7880	10.9
114043.62+532438.9	0.530	52734-1015-085	3.40±0.89	0.17	-3327	-651	-2082	11.3
114111.61-014306.6	1.266	52282-0328-417	1.52±0.56	0.12	-4050	-2684	-3260	14.0
115553.87+012427.6	1.010	52051-0515-043	4.19±0.67	0.23	-5216	-3241	-4154	15.0
115816.72+32624.1	0.440	53144-1610-562	3.24±0.64	0.12	-7220	-4851	-6155	27.0
115832.28+044208.3	0.896	52375-0841-193	1.24±0.62	0.09	-6252	-4896	-5588	14.9
120813.42+023015.1	1.182	52024-0517-509	1.22±0.45	0.05	-17312	-16007	-16631	40.1
120924.07+103612.0	0.395	52723-1229-489	1.56±0.27	0.17	-1074	-39	-572	42.6
122043.21+013215.3	0.448	52313-0333-540	3.02±1.31	0.30	-1347	-32	-668	7.5
122614.97+20925.4	0.871	53120-1614-145	2.95±0.31	0.38	-1501	-606	-1121	20.2
122703.19+505556.2	0.765	52644-0971-459	1.50±0.43	0.21	-1284	-733	-998	18.1
124300.87+153510.6	0.562	53502-1769-584	3.41±0.89	0.23	-1336	-596	-266	14.3
130741.12+503106.4	0.695	52753-1281-361	3.32±0.97	0.12	-2675	-959	-1949	17.4
130952.89+011950.6	0.547	52295-0525-250	1.52±0.54	0.11	-431	-329	-20	27.6
131323.25+151309.6_b	1.262	53089-1722-627	2.15±1.07	0.09	-9804	-8867	-9315	10.5
132114.42+020225.0	0.582	52312-0526-157	3.91±1.85	0.22	-4096	-2387	-3259	8.5
132439.32+421604.7	1.020	53112-1462-524	2.17±0.95	0.30	-2683	-1359	-1703	6.8
135226.34+024549.4	1.222	52026-0530-588	3.93±1.14	0.26	-4022	-2245	-3229	5.4
135418.26+585035.9	0.791	52668-1158-521	1.49±0.59	0.22	-2917	-2301	-2583	10.5
140115.74+621857.1_a	0.645	52353-0605-147	2.83±1.00	0.18	-4389	-3435	-3976	8.8
140332.86+133218.7	1.093	53178-1704-195	1.61±0.58	0.17	-2366	-1199	-1733	11.3
142116.23+052522.3	0.926	52049-0584-404	3.27±1.34	0.16	-5219	-3995	-4663	10.2
142647.47+401250.8	0.749	52797-1349-348	2.11±0.88	0.18	-3298	-2277	-2704	11.1
142927.28+523849.5	0.595	52781-1327-343	3.64±0.55	0.18	-5574	-2850	-4098	26.0
143144.91+391910.2	1.091	52797-1349-257	1.10±0.42	0.09	-1086	-18	-497	13.2
144222.02+524143.2	1.037	52781-1327-550	3.32±1.64	0.24	-2690	-560	-1601	6.3
144342.21+025430.6	0.777	52411-0920-258	1.44±0.67	0.18	-2846	-1955	-2388	10.8
144759.19+350833.5	0.953	53116-1383-260	1.95±0.75	0.12	-5385	-4502	-4904	12.9
145836.73+433015.5	0.760	52734-1290-601	3.11±1.11	0.12	-3619	-5591	-4577	11.3

表 A.4 (续)

SDSS Name	z	Spectrum	$\text{He I}^*\lambda 3889$ EW (Å) (4)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ d_{abs} (5)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{max}} (\text{km s}^{-1})$ (6)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{min}} (\text{km s}^{-1})$ (7)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ $v_{\text{avg}} (\text{km s}^{-1})$ (8)	$\text{He I}^*\lambda 3889$ S/N (9)
150525.51-023853.8_b	1.159	52426-0922-084	3.98±1.02	0.28	-7780	-6025	-6895	6.3
150847.41+340437.7	0.788	53108-1385-173	2.12±0.23	0.26	-1140	-175	-664	33.4
151053.63+574055.1	1.037	52079-0612-424	3.17±0.86	0.13	-5460	-3692	-4543	19.0
152290.76+035017.0	0.838	52022-0391-617	2.01±0.79	0.16	-1549	-171	-860	11.0
153036.83+470439.2	0.417	53144-1401-367	3.08±0.62	0.16	-4493	-2170	-3274	19.5
153646.88+515755.2	1.132	52378-0795-095	3.70±0.79	0.21	-5620	-3580	-4640	9.5
155905.39+250047.2	0.933	53523-1655-085	1.46±0.61	0.18	-1338	-442	-966	8.3
160329.72+502722.2	0.638	52375-0620-126	3.68±1.18	0.31	-4539	-2354	-3367	11.3
161425.17+475210.7	0.553	52764-1056-569	0.71±0.33	0.04	-5806	-5196	-5511	33.4
162016.29+415744.1	1.286	52753-1171-603	3.44±0.78	0.29	-1510	-615	-1022	5.7
163255.46+4240407.8	0.728	52379-0816-569	2.93±0.91	0.16	-2937	-1084	-2044	14.2
163656.84+364340.4	0.852	52782-1174-337	4.01±1.12	0.15	-5859	-3205	-4541	12.7
164745.04+355732.9	0.942	52409-0819-299	3.42±1.71	0.25	-2319	-255	-1167	7.6
165225.39+215830.7	0.447	52885-1415-231	4.34±1.60	0.15	-6287	-4727	-5497	8.4
170341.82+383944.7	0.554	52071-0632-632	2.86±0.97	0.15	-4521	-2541	-3592	11.2
171032.23+214451.3	0.867	53177-1689-069	5.64±0.95	0.32	-2117	-362	-1090	14.3
204333.20-001104.2	0.544	52435-0981-044	3.13±0.92	0.11	-7481	-6131	-6879	19.7
210757.67-062010.6	0.644	52174-0637-610	3.16±0.45	0.17	-2161	-319	-770	36.6
214118.78-070957.4	0.869	52824-1177-484	1.68±0.74	0.20	-3519	-2219	-2920	10.4
220931.92+125814.5	0.814	52519-0735-501	3.58±1.14	0.11	-6755	-5876	-6339	17.5
224028.14-003813.1	0.658	53261-1901-298	1.32±0.63	0.09	-2801	-1154	-2041	26.4
232550.73-002200.4	1.011	51818-0383-142	2.72±0.82	0.17	-2769	-1672	-2217	16.6

注释:

(1) 各源的 SDSS 名称, 以 hhmmss.ss-ddmmss.s (J2000) 命名。同一个源名称后加 a/b/c 后缀表示该源的 Mg II 吸收线有多个吸收槽, 对应于表 A.1。

(2) 由发射线定出的红移。

(3) 分析时所使用的 SDSS 光谱, 以 mid-plate-fiberid 命名。

(4) $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的等值宽度以及误差, 误差的定义见 § 2.2.2。

(5) $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线相对于零速度处的最大速度。

(6) $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线相对于零速度处的最小速度。

(7) $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线相对于零速度处的平均速度。

(8) $\text{He I}^*\lambda 3889$ 吸收线的加权平均信噪比。

(9) 光谱 3500-4000 Å 的中值信噪比。

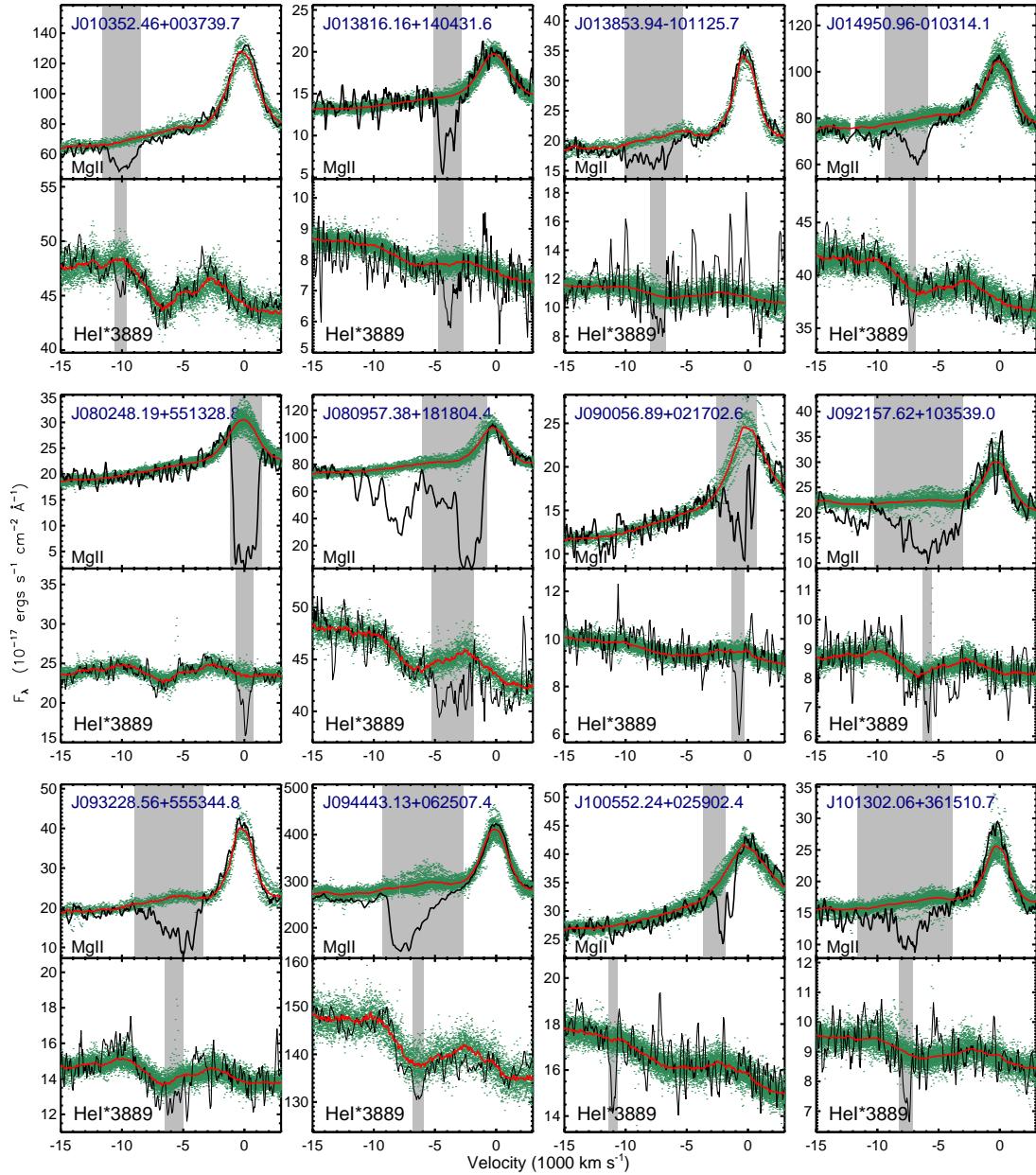


图 A.1 He I* λ 3889 BAL 类星体样本中未探测到 He I* λ 3189 吸收线的拟合效果。

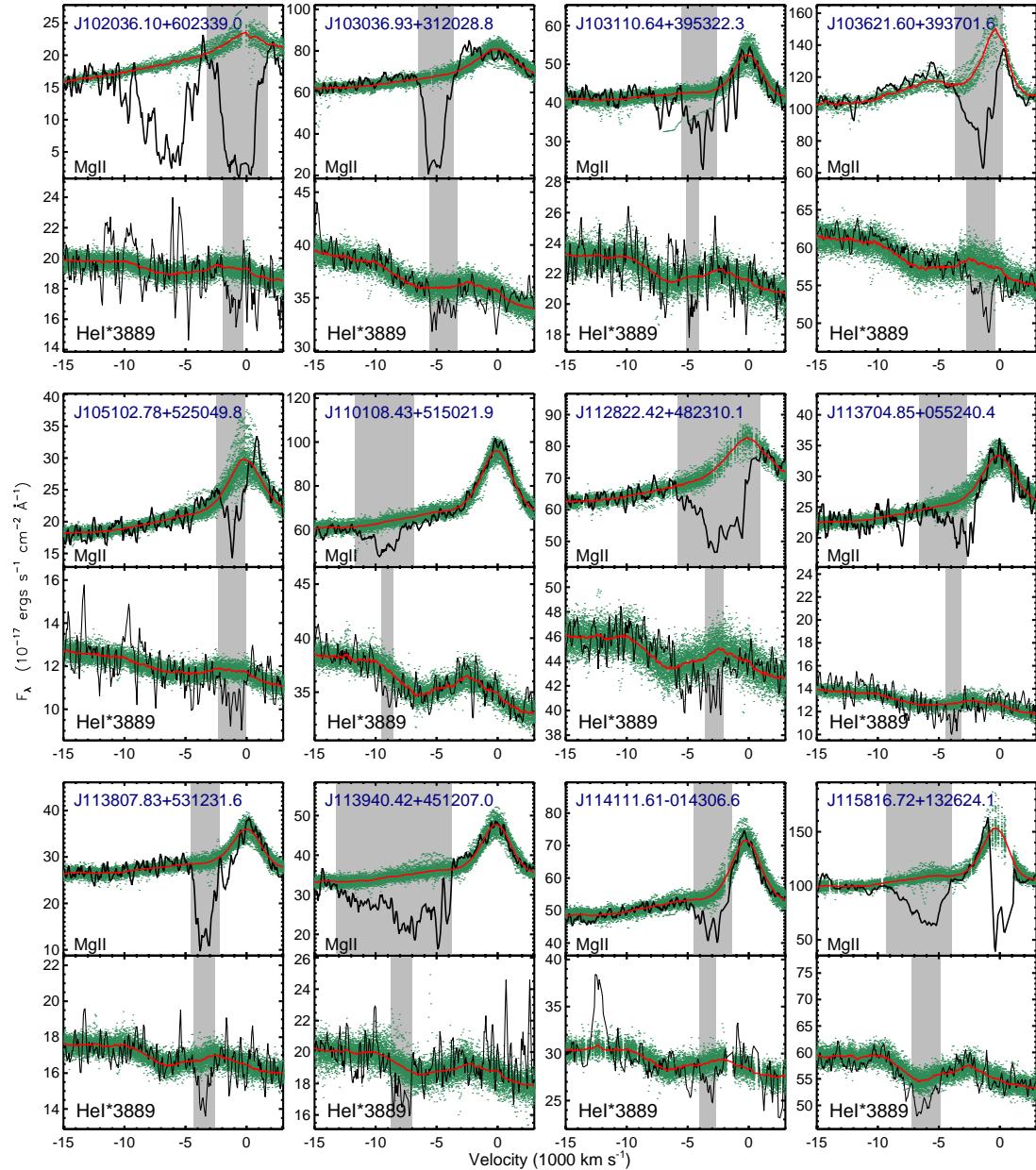


图 A.1 (续)

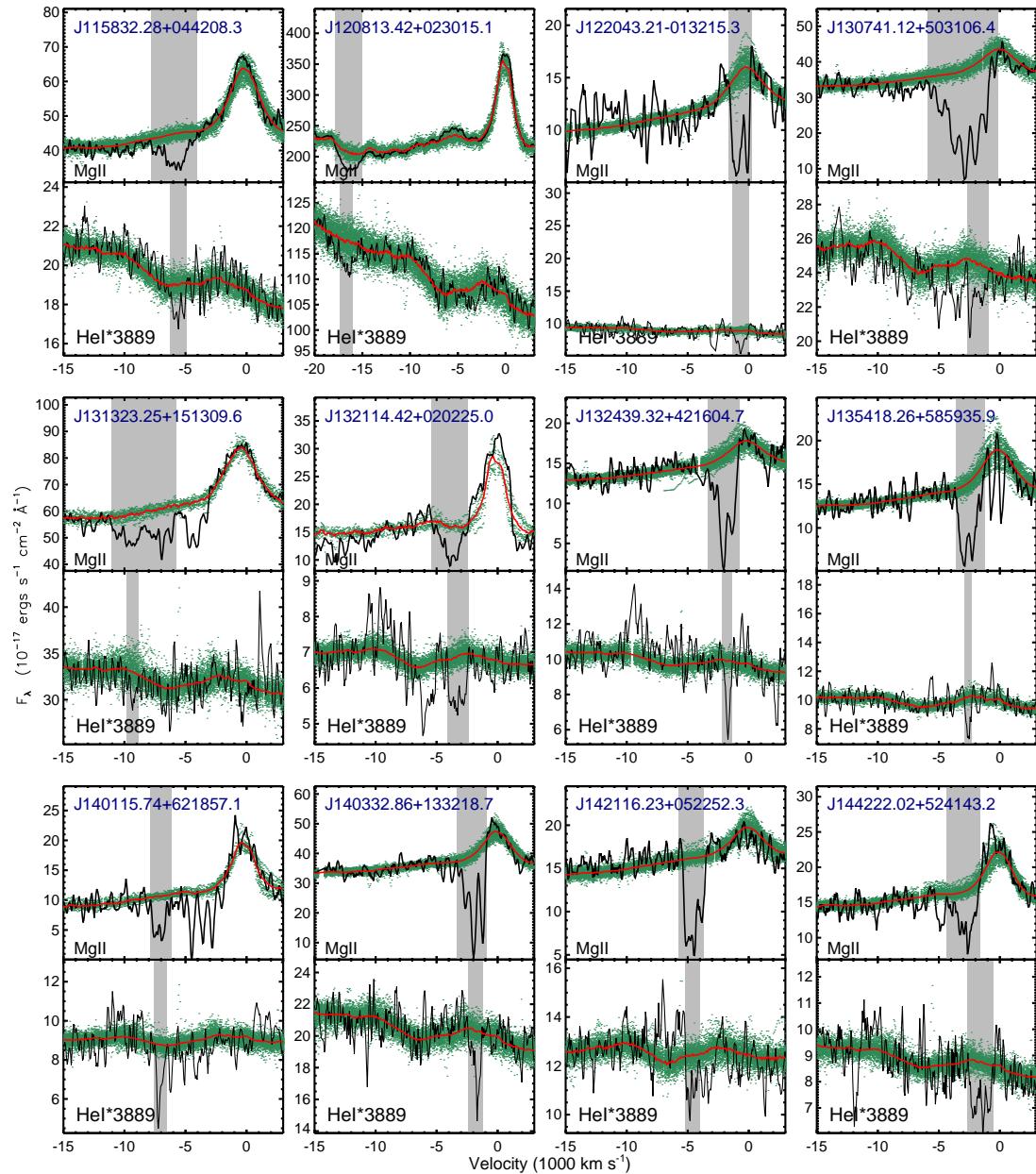


图 A.1 (续)

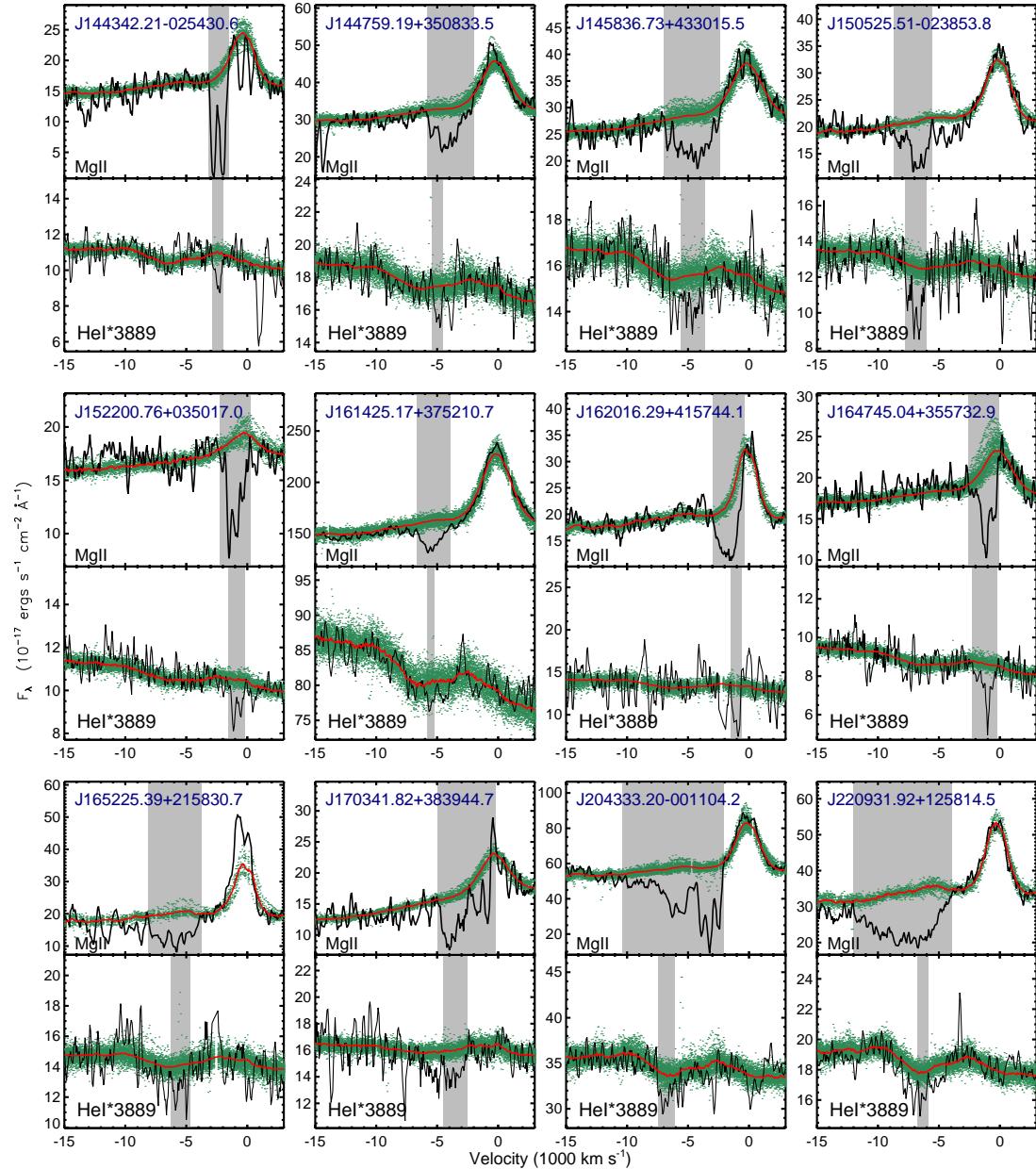


图 A.1 (续)

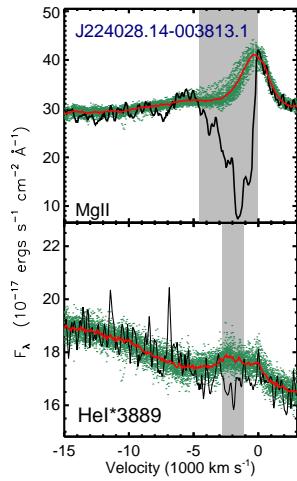


图 A.1 (续)

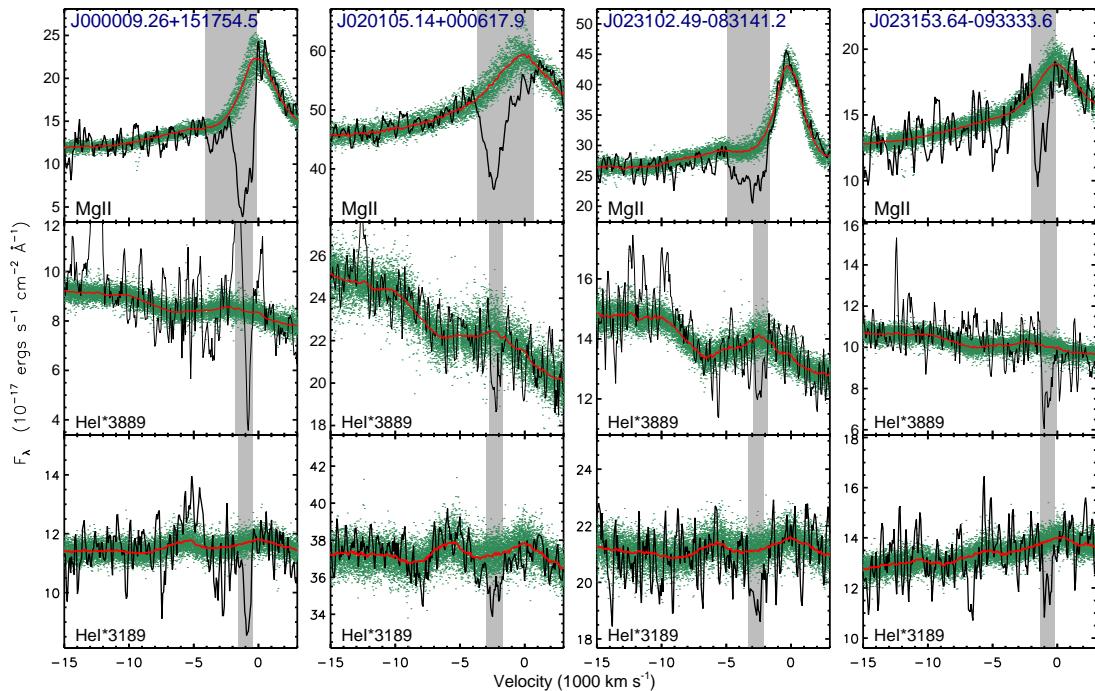


图 A.2 He I* λ 3889 BAL类星体样本中探测到 He I* λ 3189吸收线的拟合效果。

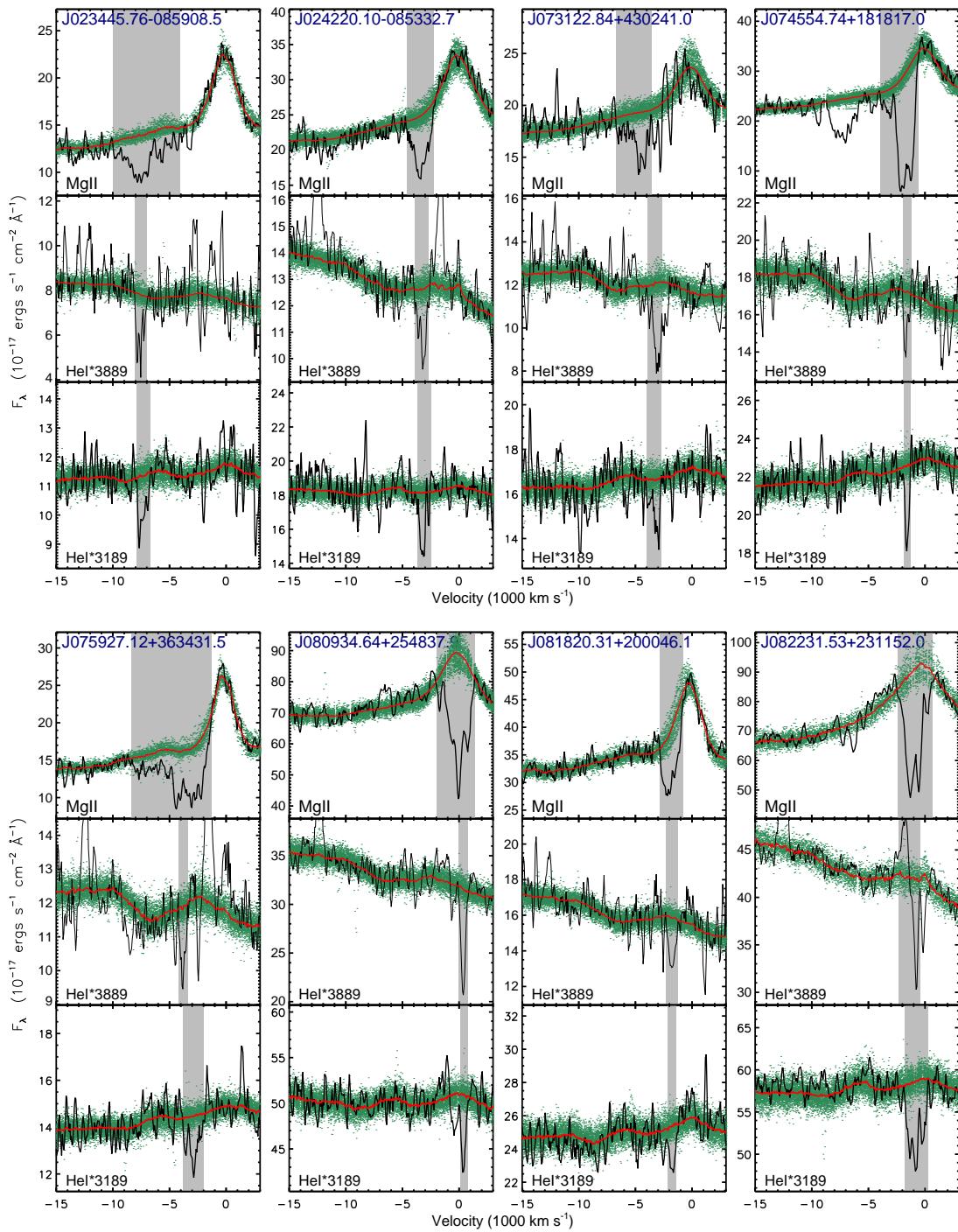


图 A.2 (续)

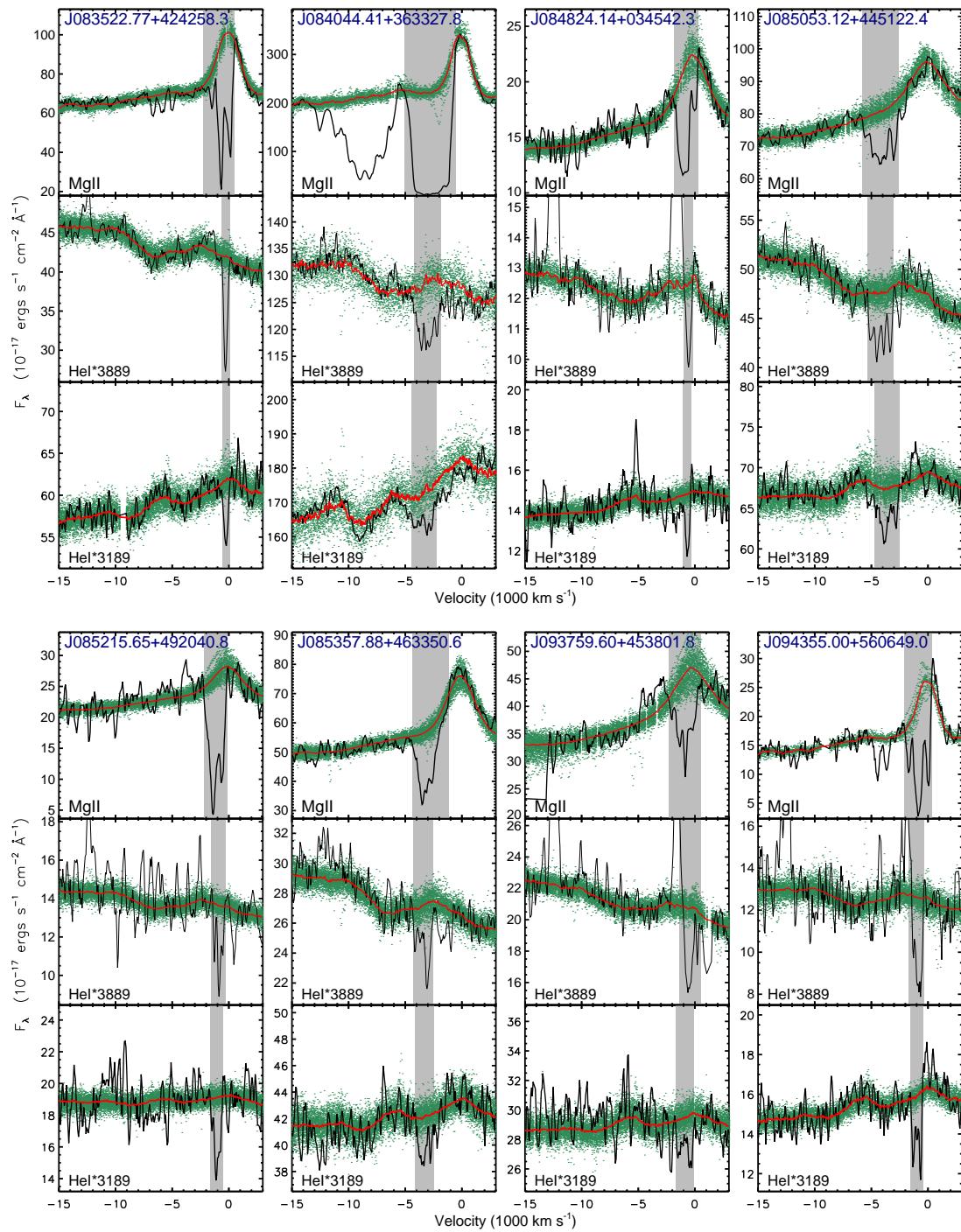


图 A.2 (续)

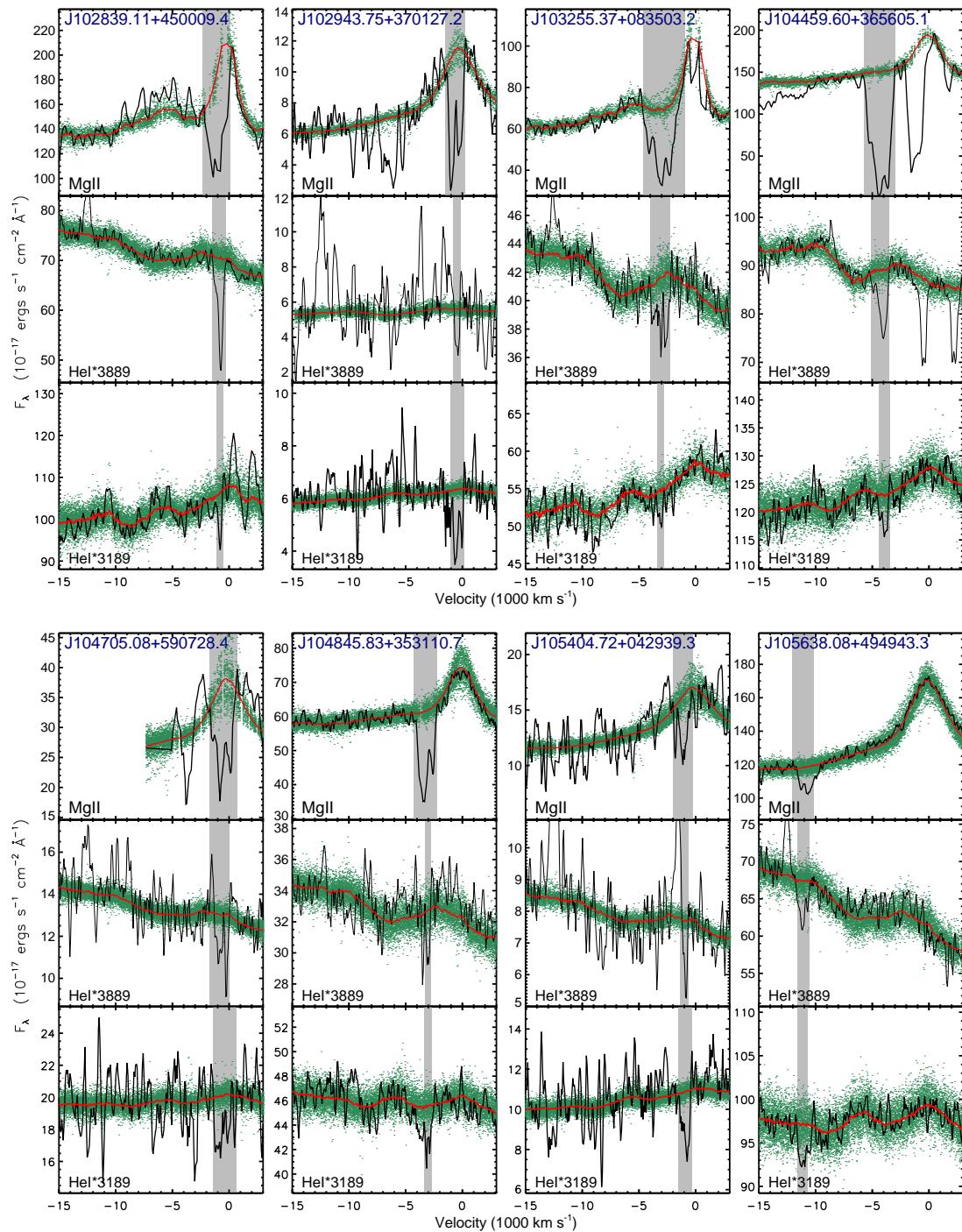


图 A.2 (续)

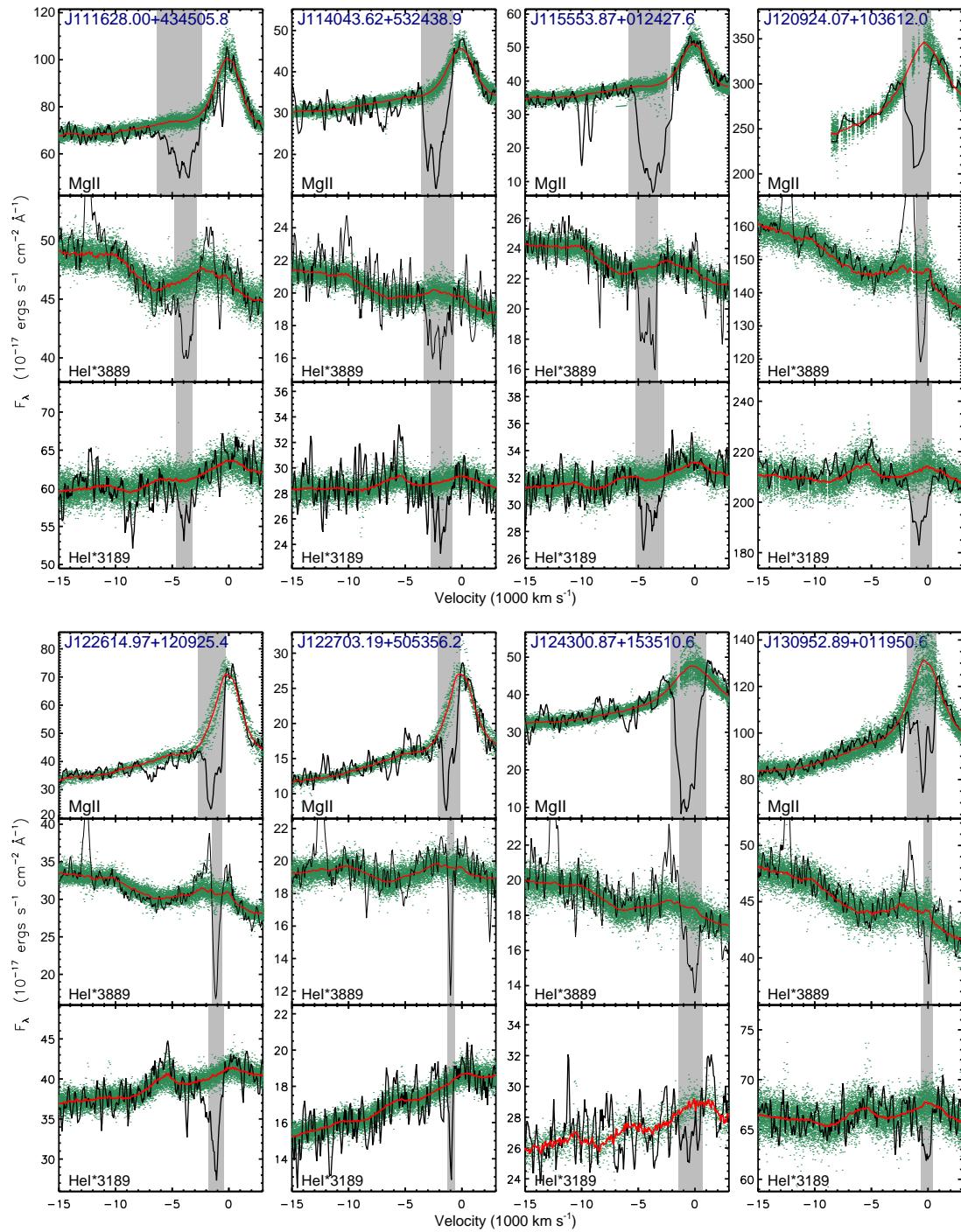


图 A.2 (续)

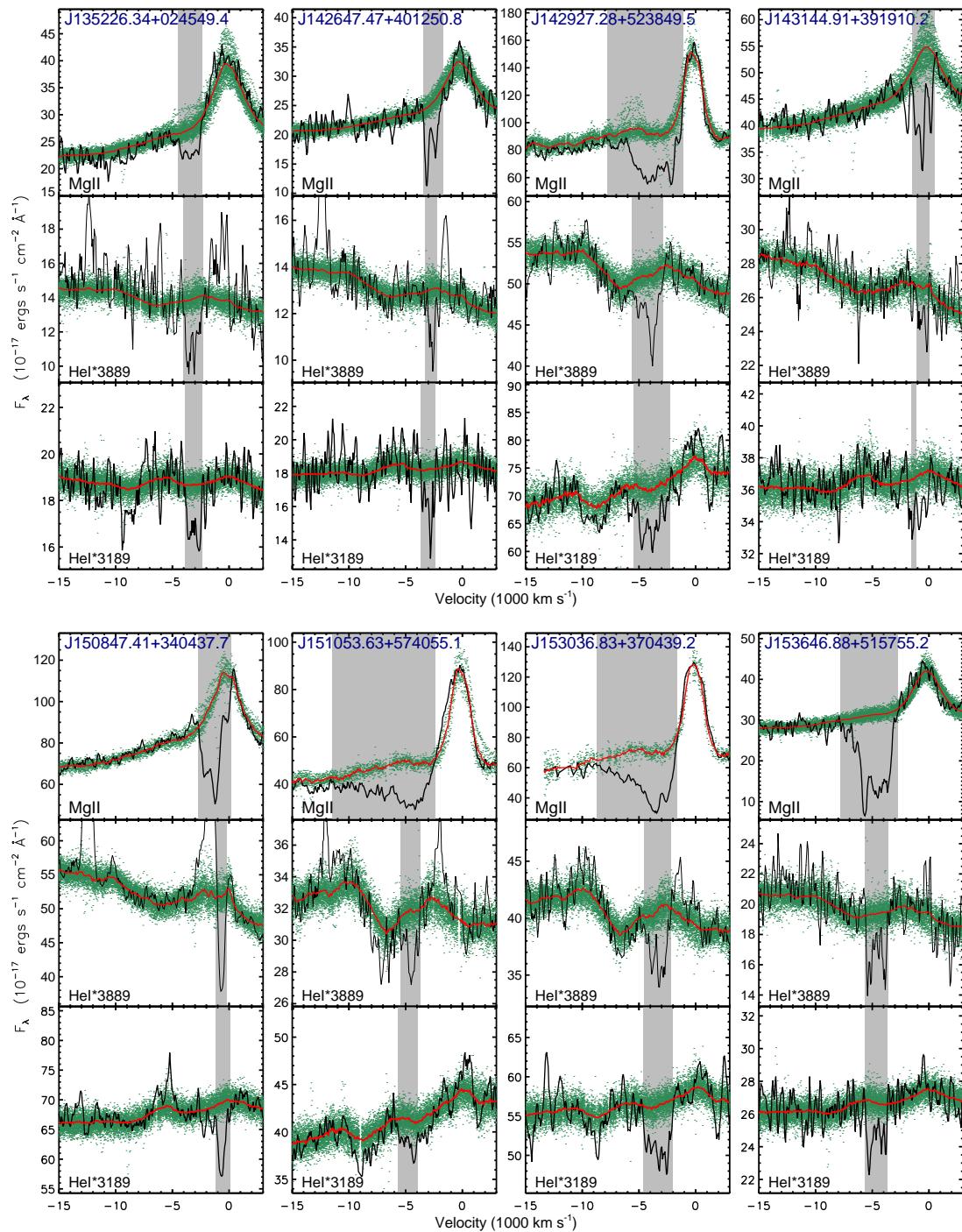


图 A.2 (续)

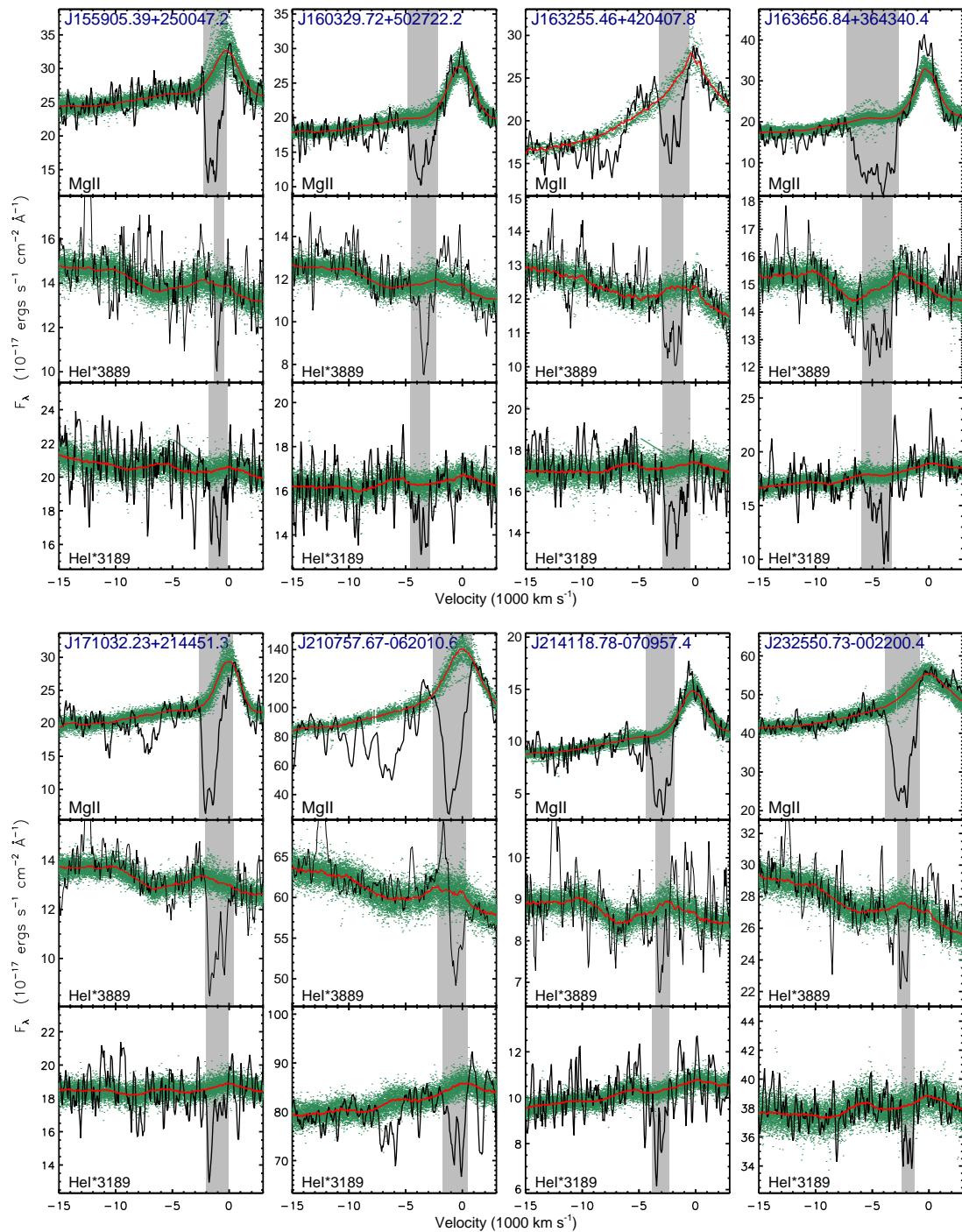


图 A.2 (续)

表 A.5 He I* λ 3189 吸收线测量结果

SDSS Name	z	Spectrum	He I* λ 3189 EW (Å) (4)	He I* λ 3189 d_{abs} (5)	He I* λ 3189 $v_{\text{max}} (\text{km s}^{-1})$ (6)	He I* λ 3189 $v_{\text{min}} (\text{km s}^{-1})$ (7)	He I* λ 3189 $v_{\text{avg}} (\text{km s}^{-1})$ (8)	He I* λ 3189 S/N (9)
(1)	(2)	(3)						
J000009.26+151754.5	1.197	52251-0751-354	1.65 ± 0.68	0.24	-1539	-437	-894	10.6
J020105.14+000617.9	1.205	51871-0403-593	0.76 ± 0.34	0.07	-2968	-1666	-2335	25.0
J023102.49-083141.2	0.587	51908-0454-582	1.20 ± 0.59	0.10	-3339	-2107	-2714	14.1
J023153.64-093333.6	0.555	51908-0454-017	1.15 ± 0.50	0.15	-1343	-241	-766	9.4
J023445.76-085908.5	1.275	51909-0455-238	1.41 ± 0.64	0.16	-7937	-6724	-7380	10.5
J024220.10-085332.7	0.800	51910-0456-291	1.20 ± 0.56	0.19	-3682	-2520	-3153	11.4
J073122.84+430241.0	0.975	53312-1865-044	1.12 ± 0.48	0.13	-4022	-2725	-3269	11.1
J074554.74+181817.0	1.054	52939-1582-256	0.77 ± 0.32	0.14	-1886	-1268	-1583	16.5
J075927.12+363431.5	0.983	52238-0757-474	1.64 ± 0.67	0.14	-3811	-2033	-2932	14.6
J080934.64+254837.9	0.545	52670-1205-588	1.42 ± 0.38	0.12	106	798	404	19.9
J081820.31+20046.1	0.986	53327-1925-040	0.72 ± 0.29	0.10	-2126	-1371	-1735	17.8
J082231.53+231152.0	0.653	53317-1926-546	2.53 ± 0.35	0.15	-1811	-256	-805	24.7
J083522.77+424258.3	0.807	52232-0762-085	0.59 ± 0.17	0.10	-564	58	-249	43.8
J084044.41+363327.8	1.235	52320-0864-149	1.01 ± 0.22	0.07	-4448	-2262	-3325	12.3
J084824.14+0354542.3	0.699	52224-0564-575	0.85 ± 0.41	0.15	-1104	-346	-691	31.5
J085053.12+445122.4	0.542	52605-0897-359	1.55 ± 0.53	0.09	-4716	-2532	-3632	10.8
J085215.65+492040.8	0.567	51995-0551-274	1.67 ± 0.51	0.22	-1615	-54	-2458	20.7
J085357.88+463350.6	0.549	52238-0764-248	1.04 ± 0.37	0.08	-4098	-1715	-901	14.2
J093759.60+453801.8	0.429	52672-1202-330	1.13 ± 0.53	0.08	-1715	-131	-966	12.5
J094335.00+560649.0	1.055	52253-0557-299	1.62 ± 0.52	0.18	-1545	-443	-443	33.3
J102839.11+450009.4	0.585	52990-1429-401	0.49 ± 0.21	0.13	-1054	-503	-806	5.1
J102943.75+370127.2	1.344	53415-1957-601	1.98 ± 0.78	0.37	-997	-176	-452	23.3
J103255.37+083503.2	0.894	52734-1240-316	0.68 ± 0.29	0.07	-3938	-2782	-3094	30.3
J104459.60+365605.1	0.701	53463-2090-329	0.40 ± 0.16	0.05	-4413	-3458	-3936	22.8
J104705.08+590728.4	0.392	52422-0949-326	1.28 ± 0.49	0.18	-1380	690	-474	7.9
J104845.83+355110.7	1.011	53463-2090-131	0.95 ± 0.31	0.08	-3365	-2681	-3030	23.8
J105404.72+042939.3	0.579	52338-0579-072	1.95 ± 0.69	0.26	-1499	-329	-870	5.7
J105638.08+494943.3	1.148	52669-0876-110	0.45 ± 0.18	0.05	-11546	-10681	-11134	36.5
J111628.00+434505.8	0.801	53061-1364-095	1.04 ± 0.25	0.09	-4636	-3204	-3901	10.2
J114043.62+532438.9	0.530	52734-1015-085	2.45 ± 0.67	0.15	-2704	-850	-1873	11.6
J115553.87+012427.6	1.010	52051-0515-043	1.87 ± 0.51	0.12	-5277	-2755	-4074	20.5
J120924.07+103612.0	0.395	52723-1229-489	1.77 ± 0.19	0.10	-1548	383	-662	40.7
J122614.97+120925.4	0.871	53120-1614-145	3.17 ± 0.40	0.28	-1768	-392	-1164	18.1
J122703.19+505356.2	0.765	52644-0971-459	0.85 ± 0.33	0.09	-1276	-657	-1001	10.2
J124300.87+153510.6	0.562	53502-1769-584	1.46 ± 0.36	0.10	-1466	673	-423	14.6
J130952.89+011950.6	0.547	52295-0525-250	0.69 ± 0.20	0.09	-630	405	-103	28.0
J135226.34+025459.4	1.222	52026-0530-588	1.71 ± 0.67	0.13	-3879	-2375	-3077	13.1
J142647.47+401250.8	0.749	52797-1349-348	1.40 ± 0.55	0.14	-3700	-2401	-2974	8.8
J142927.28+523849.5	0.595	52781-1327-343	2.53 ± 0.34	0.14	-5431	-2226	-3954	23.0

表 A.5 (续)

SDSS Name	z	Spectrum		He I* $\lambda 3189$ EW (Å)		He I* $\lambda 3189$ d_{abs}		He I* $\lambda 3189$ $v_{\text{max}} (\text{km s}^{-1})$		He I* $\lambda 3189$ $v_{\text{min}} (\text{km s}^{-1})$		He I* $\lambda 3189$ $v_{\text{avg}} (\text{km s}^{-1})$		He I* $\lambda 3189$ S/N	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
J143144.91+391910.2	1.091	52797-1349-257	1.21 ± 0.41	0.10	-1560	-1147	-1396	20.5							
J150847.41+340437.7	0.788	53108-1385-173	1.46 ± 0.22	0.17	-1202	109	-606	27.3							
J151053.63+574055.1	1.037	52079-0612-424	1.15 ± 0.31	0.09	-5656	-3839	-4706	25.6							
J153036.83+370439.2	0.417	53144-1401-367	2.73 ± 0.39	0.14	-4621	-2025	-3263	19.2							
J153646.88+515755.2	1.132	52378-0795-095	1.78 ± 0.58	0.13	-5613	-3641	-4711	16.9							
J155905.39+250407.2	0.933	53523-1655-085	1.15 ± 0.42	0.17	-1811	-159	-1047	9.6							
J160329.72+502722.2	0.638	52375-0620-126	2.16 ± 0.93	0.17	-4599	-2826	-3596	9.7							
J163255.46+420407.8	0.728	52379-0816-569	2.30 ± 0.76	0.18	-2929	-526	-1858	11.3							
J163656.84+364340.4	0.852	52782-1174-337	5.62 ± 0.95	0.39	-5919	-3266	-4303	9.5							
J171032.23+214451.3	0.867	53177-1689-069	1.46 ± 0.44	0.18	-2041	-45	-1243	12.6							
J210757.67-062010.6	0.644	52174-0637-610	2.41 ± 0.27	0.17	-1741	464	-509	30.2							
J214118.78-070957.4	0.869	52824-1177-484	2.50 ± 0.91	0.25	-3833	-2349	-3236	8.1							
J232550.73-002200.4	1.011	51818-0383-142	0.89 ± 0.30	0.09	-2419	-1320	-1846	21.9							

注释：

(1) 各源的 SDSS 名称，以 hhmmss.ss+ddmmss.s (J2000) 命名。

(2) 由发射线定出的红移。

(3) 分析时所使用的 SDSS 光谱，以 mid-plate-fiberid 命名。

(4) He I* $\lambda 3189$ 吸收线的等值宽度以及误差。(5) He I* $\lambda 3189$ 吸收线的深度。(6) He I* $\lambda 3189$ 吸收线相对于零速度点的最大速度。He I* $\lambda 3189$ 吸收线以真空波长(7) He I* $\lambda 3189$ 吸收线相对于零速度处的最小速度。(8) He I* $\lambda 3189$ 吸收线的加权平均速度。

(9) 光谱 3000–3300 Å 的中值信噪比。

A.3 He I* BAL 类星体样本中有近红外光谱观测的源

为了验证 He I* λ 3889 探测的有效性以及后续研究需要，我们利用 *Hale* 望远镜上的 *TripleSpec* 在 2011 年到 2014 年间陆续对一些 He I* λ 3889 BAL 类星体进行了近红外光谱观测。观测时使用 1'' 狹缝，并采用 A-B-B-A 狹缝位置切换模式以有效地扣除近红外波段很强的天光发射线。对目标源的观测结束后立刻切换到对邻近流量定标星的观测。我们用 IDL 程序 SpexTool (Cushing et al. 2004) 抽取近红外光谱，流量定标和大气吸收改正则根据 Vacca et al. (2003) 所述的方法利用相应的 IDL 程序处理。

观测的源包括：He I* λ 3889 BAL 类星体主样本中的四个源（见图 A.3），分别为 SDSS J074554.74+181817.0, SDSS J080248.19+551328.8, SDSS J084044.41+363327.8 和 SDSS J120924.07+103612.0；低红移 He I* λ 3889 BAL 类星体样本中的五个源（见图 A.4），分别为 SDSS J075217.84+193542.2, SDSS J093653.84+533126.8, SDSS J153539.25+564406.5, SDSS J163459.82+204936.0 和 SDSS J222024.58+010931.2；此外还包括两个由于 Mg II 宽吸收线较弱而 C IV 和 He I* λ 3889 宽吸收线较强的 BAL 类星体（见图 A.5）SDSS J035230.55–071102.3 和 SDSS J141348.33+440014.0，这两个源由于 Mg II 宽吸收线很弱而未被包含在 T06、G09 或 Z10 的 Mg II BAL 类星体样本中。

上述 He I* BAL 类星体的近红外光谱均如预期观测到了 He I* λ 10830 吸收线，证明我们对于 He I* λ 3889 吸收线探测的有效性。另一方面，选择拍摄这些源是因为它们有某些有趣的性质，我们今后将联合使用 He I* 以及其他吸收线对这些源的外流深入分析。

表 A.6 He I* BAL 类星体的近红外观测信息

SDSS Name	z	Obs. data	Exposure time
J035230.55–071102.3	0.965	2012-02-23	180s×4
J074554.74+181817.0	1.054	2014-01-19	240s×4
J075217.84+193542.2	0.117	2013-02-23	120s×4
J080248.19+551328.8	0.664	2011-10-21	300s×4
J084044.41+363327.8	1.235	2014-01-17	180s×4
J093653.84+533126.8	0.227	2013-02-23	180s×4
J120924.07+103612.0	0.395	2013-02-22	180s×4
J141348.33+440014.0	0.090	2014-01-17	180s×4
J153539.25+564406.5	0.208	2013-02-23	180s×4
J163459.82+204936.0	0.129	2012-04-15	120s×4
J222024.58+010931.2	0.213	2011-10-21	300s×4

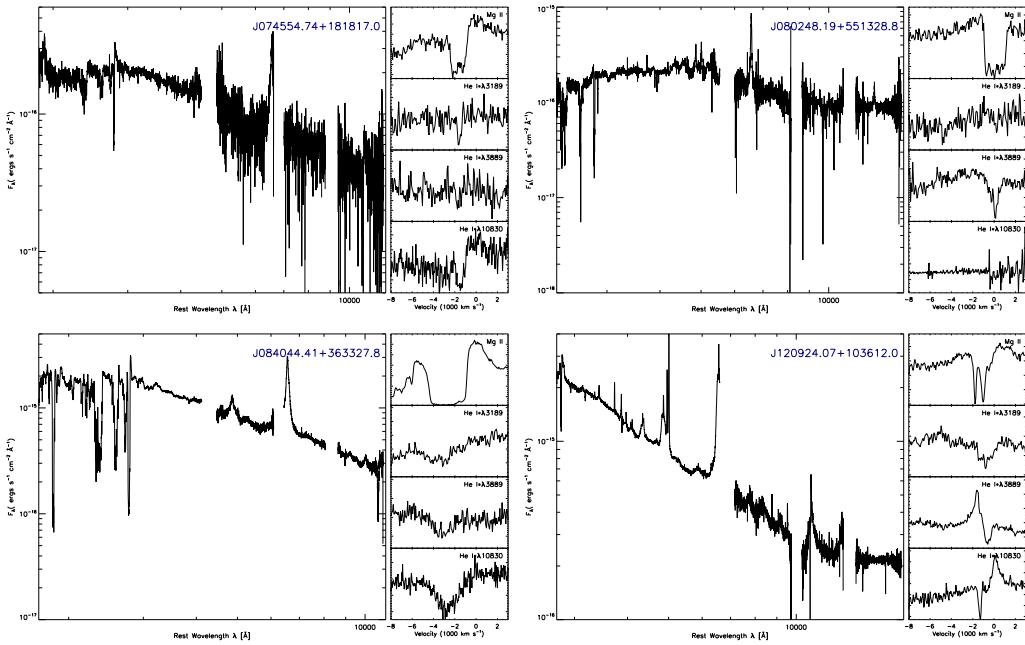
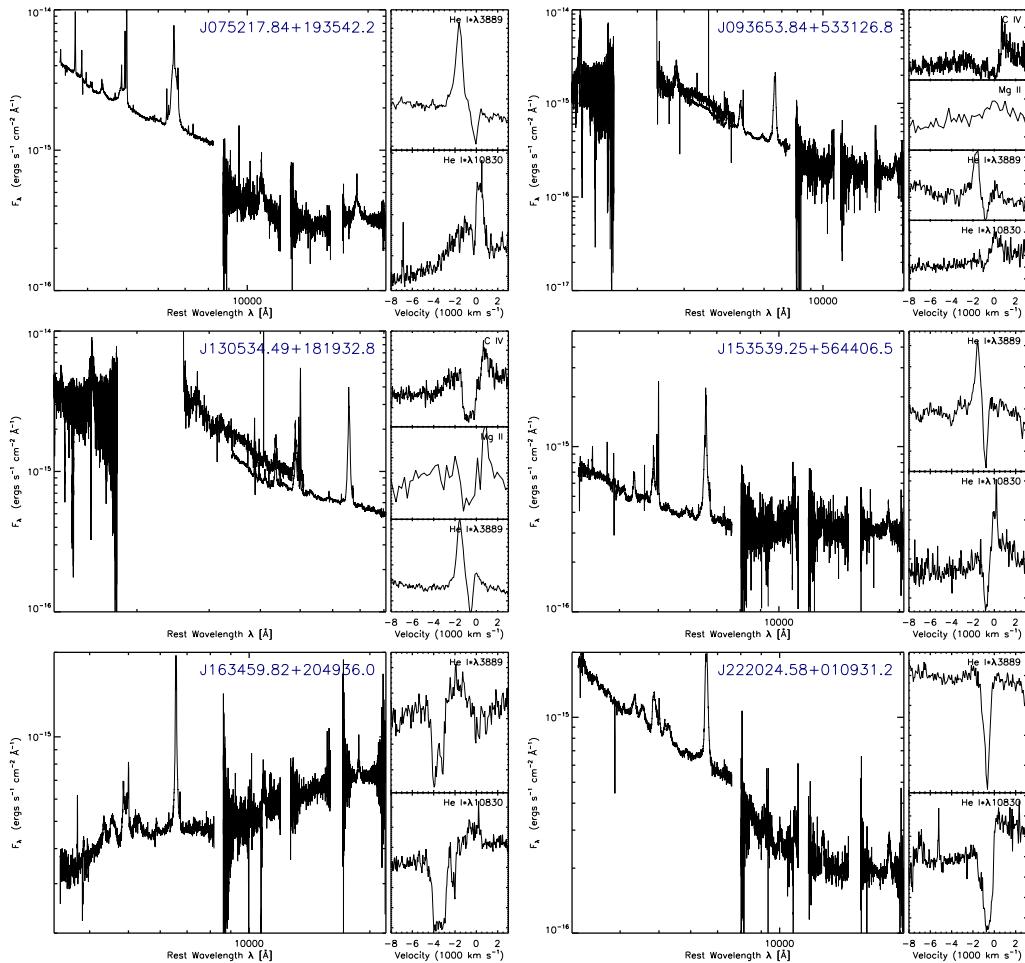


图 A.3 He I* BAL 类星体样本中四个有近红外光谱观测的源。


 图 A.4 六个有 UV 或者 NIR 光谱观测的低红移 He I* BAL 类星体。其中 SDSS J130534.49+181932.8 虽然没有近红外光谱观测，但是其 HST COS 远紫外光谱显示在 Mg II 以及 He I* λ 3889 相同速度处有很强的 C IV 宽吸收线。

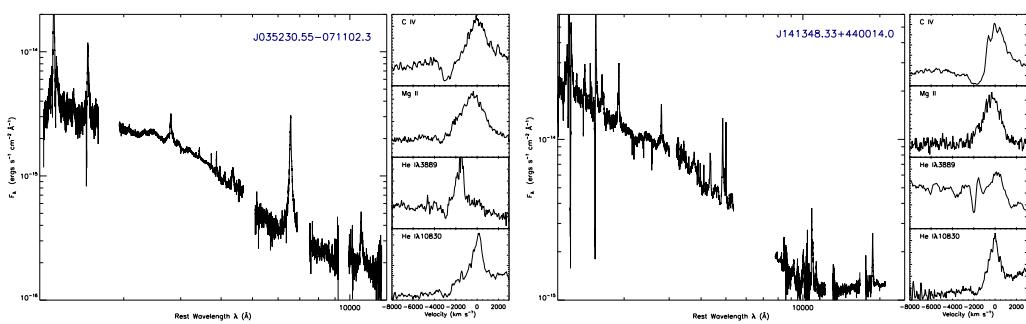


图 A.5 两个 Mg II 宽吸收线较弱而 He I* 和 C IV 吸收线较强的 BAL 类星体。

附录 B Mg II、He I* BAL 类星体样本的其他结果

B.1 未包含在 Mg II BAL 类星体样本中的特殊 BAL 类星体

我们将 T06、G09 和 Z10 的 BAL 类星体样本汇总，得到 351 个 Mg II BAL 类星体候选源，其中有 285 个源被符合我们的 BAL 判断标准，53 个源被剔除。另外还有 13 个谱形奇特的源无法用光谱配对法拟合，因而未包含在我们的父样本中，我们将其单独收录在表 B.1 里。如图 B.1 所示，除了 SDSS J100605.66+051349.0 外，其他 12 个源均可分类为 Mg II BAL。这些源中的 SDSS J010540.75-003313.9，SDSS J030000.57+004828.0 以及 SDSS J112526.12+002901.3 已被 Hall et al. (2002) 作为特殊 BAL 类星体详细地研究。

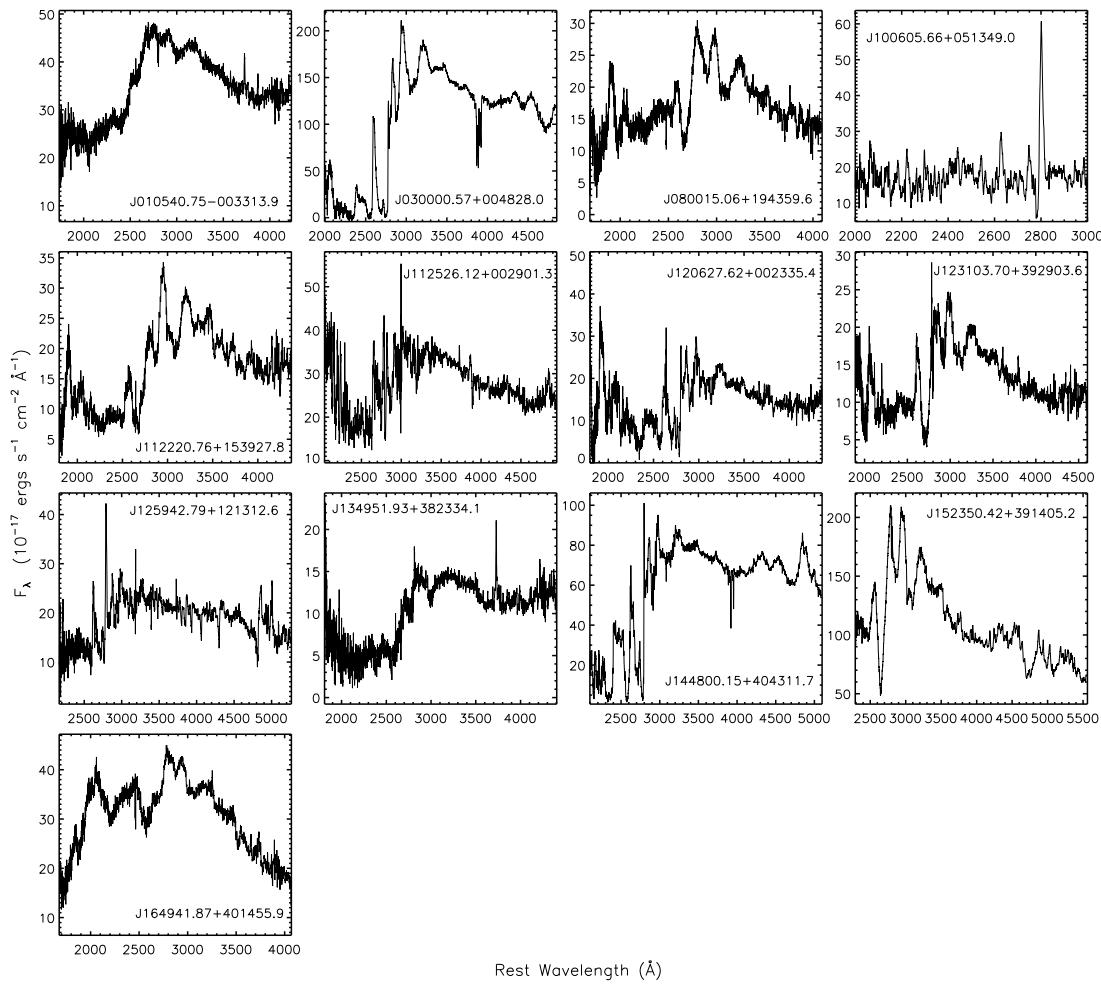


图 B.1 十三个谱形奇特的 Mg II BAL 类星体。图中显示的是经 5 点平滑后的光谱。

B.2 Mg II BAL 类星体样本中被 SDSS/BOSS 重复观测的源

在我们的 Mg II BAL 类星体样本中，61 个源被 SDSS 或 BOSS 进行过重复观测，我们将其具体信息汇总在表 B.2。我们发现其中四个源的吸收线有光变现

表 B.1 未包含在父样本中特殊 Mg II BAL 类星体

SDSS NAME	z	MJD	Plate	Fiberid	He I* Detection	Ref.
J010540.75-003313.9	1.179	51816	0396	156	no	T06
J030000.57+004828.0	0.900	51816	0410	621	yes	T06,G09
J080015.06+194359.6	1.252	53315	1922	474	no	G09,Z10
J100605.66+051349.0	0.968	52641	0996	243	yes	T06,G09
J112220.76+153927.8	1.109	53383	1753	404	no	G09
J112526.12+002901.3	0.863	51614	0281	427	yes	T06,G09
J120627.62+002335.4	1.114	51999	0286	499	yes	T06,G09
J123103.70+392903.6	1.004	53466	1992	529	no	G09
J125942.79+121312.6	0.752	53473	1695	075	yes	G09,Z10
J134951.93+382334.1	1.094	53460	2014	477	no	G09
J144800.15+404311.7	0.808	53119	1397	198	yes	G09
J152350.42+391405.2	0.658	52765	1293	234	no	T06,G09,Z10
J164941.87+401455.9	1.266	52050	0630	482	no	T06,G09

象，这四个源分别为：SDSS J083525.98+435211.3，SDSS J090825.06+014227.7，SDSS J114209.01+070957.7 和 SDSS J14264704.7+401250.8。其中，SDSS J14264704.7+401250.8 的吸收线光变最为显著（见图 B.2）。其他三个源的光变情况如图 B.3 所示。吸收线的光变可能由 AGN 核连续谱光变引起的吸收气体的电离度变化引起，也可能由于外流气体运动导致其对中心光源的覆盖因子发生变化而引起，这需要我们对这些源做进一步研究。

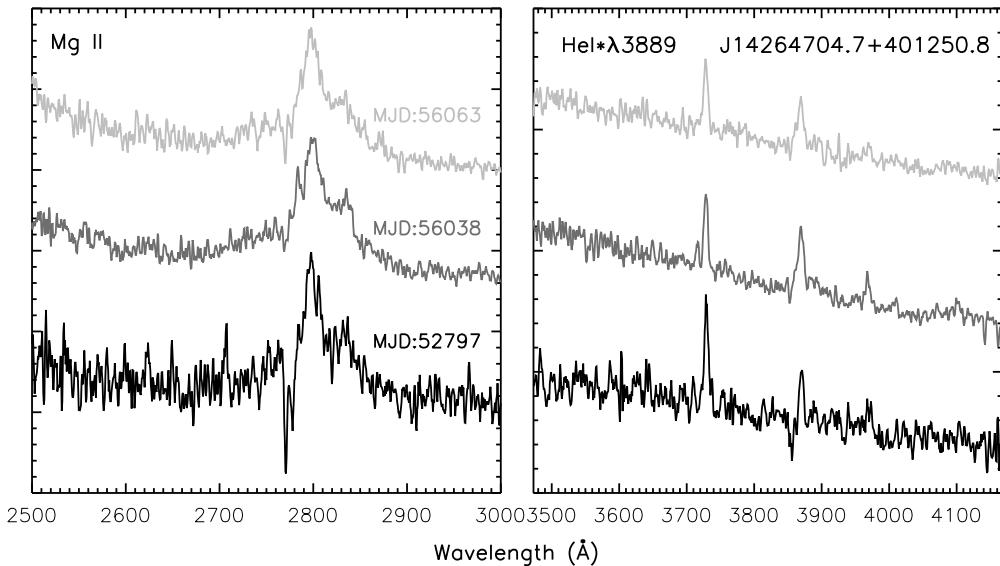
图 B.2 SDSS J14264704.7+401250.8 的 Mg II 吸收线和 He I* λ 3889 吸收线光变。

表 B.2 Mg II BAL 类星体样本中被 SDSS/BOSS 重复观测的源

Object	z	MJD	Plate	Fiberid	Observation Date	Source	He I* Detection ^a
J010352.46+003739.7	0.705	51816	0396	471	2000-09-29	SDSS	1
		53726	2313	384	2005-12-22	SDSS	0
		55214	3736	0522	2010-01-18	BOSS	0
		55475	4226	0600	2010-10-06	BOSS	0
J011117.34+142653.6	1.155	51821	0423	310	2000-10-04	SDSS	1
		55835	5131	0054	2011-10-01	BOSS	0
J014950.96-010314.1	1.082	51793	0402	260	2000-09-06	SDSS	1
		55447	4232	0202	2010-09-08	BOSS	0
J020105.14+000617.9	1.205	51871	0403	593	2000-11-23	SDSS	1
		52179	0701	465	2001-09-27	SDSS	1
		55201	3609	0620	2010-01-05	BOSS	1
J025026.66+000903.3	0.597	51871	0409	553	2000-11-23	SDSS	0

附录 B Mg II、He I* BAL 类星体样本的其他结果

表 B.2 (续)

Object	<i>z</i>	MJD	Plate	Fiberid	Observation Date	Source	HeI* Detection
		52175	0708	394	2001-09-23	SDSS	0
		52177	0707	583	2001-09-25	SDSS	0
		55450	4241	0855	2010-09-11	BOSS	0
J025204.17+010710.5	1.223	51816	0410	321	2000-09-29	SDSS	0
		51877	0410	325	2000-11-29	SDSS	0
J074554.74+181817.0	1.054	52939	1582	256	2003-10-27	SDSS	1
		53437	2074	517	2005-03-08	SDSS	0
		54497	2915	543	2008-02-01	SDSS	0
		55565	4492	0798	2011-01-04	BOSS	0
J075325.52+414842.9	1.349	51882	0435	408	2000-12-04	SDSS	0
		51885	0434	011	2000-12-07	SDSS	0
J075927.12+363431.5	0.983	52238	0757	474	2001-11-25	SDSS	1
		55509	3801	0688	2010-11-09	BOSS	0
J080957.38+181804.4	0.969	53319	1923	023	2004-11-10	SDSS	1
		55585	4493	0632	2011-01-24	BOSS	0
J081312.61+432640.1	1.090	51959	0547	242	2001-02-19	SDSS	0
		52205	0546	449	2001-10-23	SDSS	0
		52207	0547	274	2001-10-25	SDSS	0
J083522.77+424258.3	0.807	52232	0762	085	2001-11-19	SDSS	1
		55924	4683	0338	2011-12-29	BOSS	0
J083525.98+435211.3	0.568	52232	0762	175	2001-11-19	SDSS	0
		55924	4683	0683	2011-12-29	BOSS	0
J090154.96+380534.4	1.038	52705	0936	498	2003-03-07	SDSS	0
		55973	4608	0844	2012-02-16	BOSS	0
J090825.06+014227.7	1.002	51924	0471	499	2001-01-15	SDSS	0
		55540	3819	0234	2010-12-10	BOSS	0
J092035.59+524006.2	0.793	51999	0553	612	2001-03-31	SDSS	0
		52252	0767	321	2001-12-09	SDSS	0
J092157.62+103539.0	0.548	53050	1740	170	2004-02-15	SDSS	1
		55926	5306	0196	2011-12-31	BOSS	0
J094225.42+565613.0	0.833	51991	0556	545	2001-03-23	SDSS	0
		52253	0557	359	2001-12-10	SDSS	0
J094443.13+062507.4	0.695	52710	0993	535	2003-03-12	SDSS	1
		55926	4873	0470	2011-12-31	BOSS	0
J095057.56+542919.4	1.194	52282	0769	507	2002-01-08	SDSS	0
		54530	0769	504	2008-03-05	SDSS	0
J095914.91+131639.5	1.009	53055	1744	362	2004-02-20	SDSS	0
		55982	5328	0528	2012-02-25	BOSS	0
J102943.75+370127.2	1.344	53415	1957	601	2005-02-14	SDSS	1
		53432	1973	235	2005-03-03	SDSS	0
J103255.37+083503.2	0.894	52734	1240	316	2003-04-05	SDSS	1
		55924	5344	0796	2011-12-29	BOSS	0
J104459.60+365605.1	0.701	53463	2090	329	2005-04-03	SDSS	1
		55615	4635	0704	2011-02-23	BOSS	0
J104845.83+353110.7	1.011	53463	2090	131	2005-04-03	SDSS	1
		55615	4635	0136	2011-02-23	BOSS	0
J105259.99+065358.0	0.724	52670	1001	080	2003-01-31	SDSS	0
		55685	4854	0598	2011-05-04	BOSS	1
J111628.00+434505.8	0.801	53061	1364	095	2004-02-26	SDSS	1
		56013	4686	0594	2012-03-27	BOSS	0
J112349.16+135220.6	0.928	53383	1753	093	2005-01-13	SDSS	0
		56003	5370	0688	2012-03-17	BOSS	1
J112828.31+011337.9	0.893	51614	0281	523	2000-03-11	SDSS	0
		51992	0512	123	2001-03-24	SDSS	0
		55630	4730	0172	2011-03-10	BOSS	0
J112901.71+050617.0	1.282	52376	0836	626	2002-04-12	SDSS	0
		52642	0837	400	2003-01-03	SDSS	0
J113349.81+361027.3	1.158	53468	2113	608	2005-04-08	SDSS	0
		55618	4615	0762	2011-02-26	BOSS	0
J114111.61-014306.6	1.266	52282	0328	417	2002-01-08	SDSS	1
		55207	3775	0820	2010-01-11	BOSS	0
J114209.01+070957.7	0.497	53383	1621	306	2005-01-13	SDSS	0
		55955	4848	0546	2012-01-29	BOSS	0
J114915.30+393325.4	0.630	53386	1970	137	2005-01-16	SDSS	0
		55659	4654	0080	2011-04-08	BOSS	1
J115852.87-004301.9	0.983	51663	0285	184	2000-04-29	SDSS	0
		51930	0285	189	2001-01-21	SDSS	0
J120049.55+632211.8	0.887	52320	0777	609	2002-02-15	SDSS	0
		52337	0778	377	2002-03-04	SDSS	0
J120146.46+630034.4	0.659	52337	0778	439	2002-03-04	SDSS	0
		54525	0778	477	2008-02-29	SDSS	0
J122614.97+120925.4	0.871	53120	1614	145	2004-04-25	SDSS	1
		55979	5403	0524	2012-02-22	BOSS	0
J125507.12+634423.8	1.067	52316	0601	043	2002-02-11	SDSS	0
		52320	0782	445	2002-02-15	SDSS	0
J131323.25+151309.6	1.262	53089	1772	627	2004-03-25	SDSS	1
		56033	5424	0206	2012-04-16	BOSS	0
J131823.73+123812.5	0.589	53142	1697	600	2004-05-17	SDSS	0
		56001	5427	0574	2012-03-15	BOSS	0
J132401.53+032020.6	0.926	52312	0526	609	2002-02-07	SDSS	0
		55633	4761	0136	2011-03-13	BOSS	0
J133603.65+511733.6	1.327	53433	1668	593	2005-03-04	SDSS	0
		53433	1669	339	2005-03-04	SDSS	0
J140025.53-012957.0	0.584	52443	0915	380	2002-06-18	SDSS	0
		55363	4038	0558	2010-06-16	BOSS	0
J142010.28+604722.3	1.345	52365	0606	110	2002-04-01	SDSS	0

表 B.2 (续)

Object	<i>z</i>	MJD	Plate	Fiberid	Observation Date	Source	HeI* Detection
J142647.47+401250.8	0.749	52368	0607	293	2002-04-04	SDSS	0
		52797	1349	0348	2003-06-07	SDSS	1
		56038	5171	0532	2012-04-21	BOSS	0
		56063	5170	0928	2012-05-16	BOSS	0
J142927.28+523849.5	0.595	52764	1326	057	2003-05-05	SDSS	1
		52781	1327	343	2003-05-22	SDSS	0
J143144.91+391910.2	1.091	52797	1349	257	2003-06-07	SDSS	1
		56038	5171	0340	2012-04-21	BOSS	0
J143826.73+642859.8	1.222	51988	0499	623	2001-03-20	SDSS	0
		54533	2947	557	2008-03-08	SDSS	0
J144436.58+425508.6	1.101	52734	1289	087	2003-04-05	SDSS	0
		53112	1396	612	2004-04-17	SDSS	0
J145333.01+002943.6	1.291	51666	0309	424	2000-05-02	SDSS	0
		51994	0309	433	2001-03-26	SDSS	0
		52029	0538	202	2001-04-30	SDSS	0
J150847.41+340437.7	0.788	53108	1385	173	2004-04-13	SDSS	1
		55691	4720	0591	2011-05-10	BOSS	0
J152438.79+415543.0	1.230	53433	1678	106	2005-03-04	SDSS	0
		56067	5164	0894	2012-05-20	BOSS	0
J163656.84+364340.4	0.852	52782	1174	337	2003-05-23	SDSS	1
		56048	5195	0930	2012-05-01	BOSS	0
J170341.82+383944.7	0.554	52071	0632	632	2001-06-11	SDSS	1
		54232	2192	058	2007-05-12	SDSS	0
J212017.00+004841.7	1.288	52523	0987	408	2002-09-06	SDSS	0
		55469	4192	0874	2010-09-30	BOSS	0
J220931.92+125814.5	0.814	55825	5142	0341	2011-09-21	BOSS	0
		52519	0735	501	2002-09-02	SDSS	1
J223424.10+005227.1	0.884	55749	5041	0390	2011-07-07	BOSS	1
		52143	0376	615	2001-08-22	SDSS	0
J224028.14-003813.1	0.658	52201	0674	370	2001-10-19	SDSS	0
		53261	1901	298	2004-09-13	SDSS	1
J232550.73-002200.4	1.011	55470	4204	0232	2010-10-01	BOSS	0
		51818	0383	142	2000-10-01	SDSS	1
J233635.75-010733.7	1.303	52199	0681	269	2001-10-17	SDSS	0
		51821	0384	011	2000-10-04	SDSS	0
		52525	0682	202	2002-09-08	SDSS	0

注释:

a “1” 表示在光谱中探测到了 He I* λ 3889 吸收线, “0” 表示没有探测到 He I* λ 3889 吸收线。

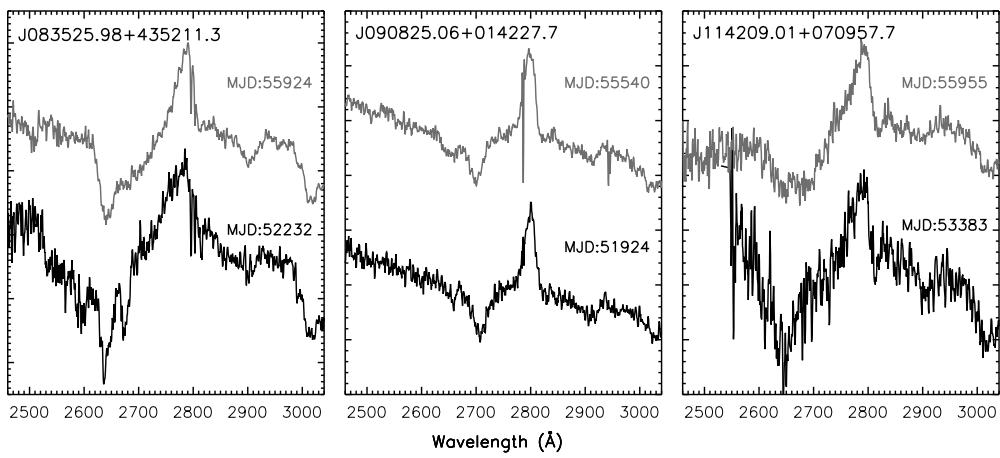


图 B.3 三个 Mg II 吸收线有明显光变的类星体。

致 谢

中秋之夜，月朗风清，在这样一个思乡的时刻我完成了此学位论文的写作。此时独在异乡求学，心中不免有些寂寥和惆怅，而在这学业即将结束的时刻回想二十余年求学路上的艰辛，亦是心潮起伏、感慨万千。长久以来，我的心中埋藏着一个天文梦想。曾经这个梦想距我那么遥远，而今我却有机会完成博士学业，得以从事我渴望的职业。为此，我对一路走来帮助过我的家人、老师和朋友心怀感恩。

首先，我要深深感谢我的授业恩师周宏岩教授。周老师学养深厚，治学严谨而又高屋建瓴，富有智慧而又处事练达。“师者，传道授业解惑也”，六年中，我不仅在科研上逐渐进步而且人变得成熟稳重，这得益于导师的言传身教。六年前我刚进入科大时还是一个懵懂的本科毕业生。由于我是从统计学跨专业考到科大天文系，在物理和专业天文知识上有诸多欠缺，正是周老师六年来尽心尽力的教导引领我走进天文科研之门。从论文的选题到科研论文的写作和修改，从对课题整体图像的理解到数据处理的细节，周老师在方方面面都悉心指导，可谓呕心沥血。最让我感动的是，每当我遇到科研瓶颈需要讨论指导时，不论时间早晚，不论是当面还是电话，周老师都会尽可能地放下手边的工作对我倾囊相授。在我对写文章望而生畏的时候周老师曾鼓励我说“写文章是一种技巧，是技巧就能学会”，这让我建立起只要努力就能进步的信心；在我固执己见的时候周老师告诫我说做学问要时常抱着做“fresh man”的心态，“不要偏爱自己的观点”……这些教诲都让我受益良多。周老师高超的思辨艺术、灵活而不拘泥的科研思维让我叹为观止；他对学术的热忱以及居之无倦的勤勉精神令我感动。周老师品德高尚，敢于担当，品行操守令我钦佩。在学术之外，周老师也经常强调我们要多为别人着想，也曾不止一次教导我提高能力对于维持人品的重要性，他说“人的一分品德要靠十分能力来养”，微言大义让我受用终生。能到周老师门下学习实为人生幸事。

感谢我们 AGN 小组的王挺贵、王慧元老师在我第一次提 TAP 观测申请和初次写文章时提供的指导和帮助。还要感谢 AGN 小组的周又元院士、王俊贤教授以及王春城老师对我科研以及学业上的帮助。犹记得当初 AGN 小组组会上热烈的讨论氛围，让初踏上天文科研之路的我受益匪浅。感谢科大天文系对我的接纳，以及这六年中为我提供的优越学习条件。感谢天文系的张家铝老师、程福臻老师、褚耀泉老师、向守平老师、张杨老师、林宣滨老师、陈次星老师、孔旭老师、袁业飞老师、朱青峰老师、杨建明老师、王宇老师、赵文老师、吴许芬老师等诸位老师在我学业上的帮助和指导。感谢陆山老师、程路华老师、邢蔚然老师、周楠老师以及极地中心天文室的侯峥梅在平常生活上给予我的热心帮助。特别感谢奚玮红老师，感谢奚老师生前对我学习和生活上体贴入微的关心，难以忘

怀当年我们在“饭团”的快乐生活和一起游西湖美好时光。还要感谢中国极地研究中心在我联合培养阶段提供的优越生活、学习条件，在这里我度过了六年研究生生活中最为充实而富有成效的日子。感谢国家天文台的袁为民、刘碧芳老师在我数次去国家天文台访问时的热情接待，以及在我学业上的指导和帮助，特别感谢袁为民老师百忙之中为我修改文章。感谢国家天文台徐达维老师亲自教我学习 IRAF 光谱处理，达维老师的温婉和耐心让初学天文观测的我十分感动。感谢单红光老师在我去云南天文台时的热情款待，并教我学习图像处理，让我在昆明度过了一段非常惬意的时光。感谢兴隆观测基地的观测助手贾俊军和肖锋向我传授观测经验，让我在兴隆数次观测中收获很多。感谢丽江高美古观测基地的常亮和王建国师兄在我使用 2.4m 望远镜观测时给予的帮助和支持。感谢蔡铮、吕建伟、唐梦涛、李日新、王飞格和杨锦怡在我去 MMT 观测时给予的诸多帮助。

在漫长的研究生生活中，离不开各位同窗好友的帮助。感谢师姐肖婷在我刚学光谱处理程序时给我的指导和帮助，以及在我最困难的时光中给予我的安慰和鼓励。感谢姜鹏、纪拓师兄带我去 Palomar 天文台观测，让我第一次有机会使用大望远镜；感谢张少华师兄平日里对我的帮助和开导，让曾经急躁的我平和了很多；感谢田启国师兄，平日里的关心让我感到温暖；感谢史习珩师兄对我使用 Cloudy 的指导和帮助，和他天南海北的聊天增添了我生活中的乐趣。感谢一路相伴的李臻臻、刘博、孙鹿鸣、王淑芬、李歌、潘翔、周俊彦、时雪草、姚苏、刘禾阳，怀念和大家一起讨论、朝夕相处的时光，有你们的陪伴让我在极地中心的生活不再单调。感谢 AGN 小组的蒋凝、杨臣威、刘琼、张锴、窦利明、黄星星、杨欢、史晶晶、高姗、郑振亚、舒新文、刘腾等师兄师弟师姐的诸多帮助和讨论。感谢粟待钦、侯磊、陈洋、李金荣、朱逢尧、汤宁宇、徐生年、马怡秋、祖天龙等同学们一起在 18 楼度过的美好岁月。

除了研究生阶段的老师，我还要感谢我求学过程中所有给予我关怀和帮助的老师，特别感谢初中时代教授我物理的赵燕飞老师。感谢赵老师当年对我在科学上的启蒙和引导，让少年时代的我对科学充满了憧憬和向往，更感谢赵老师多年以来对我的关心和支持。

我要在此拜谢父母多年来的养育之恩。感谢爸爸妈妈给予我无私的爱和默默的支持，感谢他们对我选择的包容和成全。在最无助最灰暗的岁月里，是父母的陪伴和鼓励才让我有勇气度过人生的寒冬。我要拜谢已经仙逝的姥姥和姥爷，感谢二老对我的抚育以及给予我的无私亲情，感谢他们在耄耋之年还接纳转学而归的我，感谢他们对我的宽容和支持，深情厚谊让我此生无以为报。我要感谢诸位亲友在我离开父母转学到介休期间对我的关照，特别感谢姨妈和姨夫在我中学时期对我生活上的照拂。感谢舅舅、舅妈以及诸位表兄、表姐对我多年来的关心和帮助，没有亲友的帮助和支持我无法安心地完成学业。感谢我的先生董小波这几年来在我科研上的帮助、鼓励和鞭策以及生活上的陪伴。

最后，我要感谢我的儿时的天文梦想。立志做“天文学家”的确切时间已经

久不可考，然而一直以来，这个梦想都埋藏在我心中，如一盏温暖的航灯引领着我的成长之路。它点燃了我对科学的热情，充实了我的年少时光，在我面对选择时给予我坚守的决心和勇气。对我而言，它如此深刻地烙印在我的成长轨迹中无法磨灭。

刘文娟

2015 年 9 月 27 日

研究生在读期间发表的学术论文与取得的研究成果

已发表论文：

1. **Liu, Wen-Juan**; Zhou, Hongyan; Ji, Tuo; Yuan, Weimin; Wang, Ting-Gui; Ge, Jian; Shi, Xiheng; Zhang, Shaohua; Jiang, Peng; Shu, Xinwen; Wang, Huiyuan; Wang, Shu-Fen; Sun, Luming; Yang, Chenwei; Liu, Bo; Zhao, Wen. 2015, ApJS, 217, 11
A Comprehensive Study of Broad Absorption Line Quasars. I. Prevalence of HeI Absorption Line Multiplets in Low-ionization Objects*
2. Zhang, Shaohua; Zhou, Hongyan; Wang, Tinggui; Wang, Huiyuan; Shi, Xiheng; Liu, Bo; **Liu, Wenjuan**; Li, Zhenzhen; Wang, Shufen. 2015, ApJ, 803, 58
Strong Variability of Overlapping Iron Broad Absorption Lines in Five Radio-selected Quasars
3. Li, Y.; Yuan, W.; Zhou, H. Y.; Komossa, S.; Ai, Y. L.; **Liu, W. J.**; Boisvert, J. H.. 2015, AJ, 149, 75
An Unobscured Type II Quasar Candidate: SDSS J012032.19-005501.9
4. Ji, Tuo; Zhou, Hongyan; Jiang, Peng; Wang, Tinggui; Ge, Jian; Wang, Huiyuan; Komossa, S.; Hamann, Fred; Zuther, Jens; **Liu, Wenjuan**; Lu, Honglin; Zuo, Wenwen; Yang, Chenwei; Yuan, Weimin. 2015, ApJ, 800, 56
Unshifted Metastable He I Mini-broad Absorption Line System in the Narrow-line Type 1 Quasar SDSS J080248.18+551328.9*
5. Jiang, Peng; Zhou, Hongyan; Ji, Tuo; Shu, Xinwen; **Liu, Wenjuan**; Wang, Jian-guo; Dong, Xiaobo; Bai, Jinming; Wang, Huiyuan; Wang, Tinggui. 2013, AJ, 145, 157
Anomalously Steep Reddening Law in Quasars: An Exceptional Example Observed in IRAS 14026+4341
6. Wu, Xue-Bing; Zuo, Wen-Wen; Yang, Qian; Yi, Wei-Min; Yang, Chen-Wei; **Liu, Wen-Juan**; Jiang, Peng; Shu, Xin-Wen; Zhou, Hong-Yan. 2012, RAA, 12, 1185
Discovery of six high-redshift quasars with the Lijiang 2.4 m telescope and the Multiple Mirror Telescope

7. Li, Zhenzhen; Hao, Lei; Wang, Huiyuan; Ji, Tuo; Shi, Xiheng; Liu, Bo; Zhang, Shaohua; **Liu, Wen-Juan**; Pan, Xiang; Jiang, Peng. Accepted by ApJ

Detection of the Intermediate-width Emission Line Region in Quasar OI 287 with the Broad Emission Line Region Obscured by the Dusty Torus

待发表论文：

1. **Liu, Wen-Juan**; Zhou, Hongyan; Jiang, Ning; Wu, Xufen; Lyu, Jianwei; Shi, Xiheng; Shu, Xinwen; Jiang, Peng; Ji, Tuo; Wang, Jian-Guo; Wang, Shu-Fen; Sun, Luming. Submitted to ApJ

SDSS J163459.82+204936.0: A Ringed Infrared-Luminous Quasar with Outflows in Both Absorption and Emission Lines

2. **Liu, Wen-Juan**, Zhou, Hongyan. Ready to submit to ApJL

SDSS J111017.13+193012.5: Taking the Torus as the Coronagraph to Explore the Strong Emission-line Outflow

3. Zhang, Shaohua; Zhou, Hongyan; Shi, Xiheng; Shu, Xinwen; **Liu, Wen-Juan**; Ji, Tuo; Jiang, Peng; Sun, Luming; Pan, Xiang. Submitted to ApJ

Discovery of Extremely Broad Balmer Absorption Lines in SDSS J152350.42+391405.2