

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.08.01

类星体吸收线速度漂移研究进展

林樱如, 陆伟坚, 覃焕昌, 潘彩娟

(百色学院 百色 533000)

摘要: 外流是一种非常重要的类星体反馈形式, 对了解类星体与寄主星系共同演化有重要意义。收集了研究外流吸收线速度漂移的文献, 对其中的案例数据进行整理, 并对比分析吸收线速度漂移的识别方法、识别难点和产生机制, 探讨了未来研究方向。尽管目前吸收线速度漂移的实测案例有限且物理机制尚不明确, 但随着类星体巡天数据的增长及数据处理技术的进步, 相关研究有望取得突破, 并深化对类星体外流现象的理解, 为星系演化研究提供新视角。

关键词: 类星体; 吸收线; 速度漂移

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引 言

天体物理学领域普遍认为, 在黑洞与星系的共同演化过程中, 活动星系核 (active galactic nucleus, AGN) 反馈发挥着举足轻重的作用^[1-4]。活动星系核通过中心超大质量黑洞吸积产生全波段的电磁辐射, 其具有高光度、小尺度 (致密核区)、多波段光变 (光变时标从数小时到年不等)、不同宽度的发射线 (千到万公里每秒) 等观测特性^[1]。活动星系核独特的观测特性为科学家们提供了深入研究星系演化过程以及此过程中的极端物理事件的窗口^[5]。

在长期观测与研究过程中, 天文学家们将活动星系核进行了分类, 包括类星体 (Quasar)、赛弗特星系 (Seyfert galaxy)、射电星系 (Radio Galaxy)、光学剧变类星体 (Optically Violent Variable Quasar, OVV quasar) 以及蝎虎座 BL 型天体 (BL Lacertae object, BL Lac) 等。其中, 类星体作为 20 世纪 60 年代天文学领域的四大发现之一, 因其极端的亮度与活动特性, 一经发现便迅速成为研究焦点。

通常认为, 产生于类星体中央明亮的吸积盘的外流, 能够与周围的星际介质发生相互作用^[6-14], 最终可能传播至星系范围并形成大规模的外流现象。因此, 外流在星系演化中扮演

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-07-14

资助项目: 广西自然科学基金 (2021GXNSFBA220044; 2025GXNSFAA069632); 国家自然科学基金 (11903002; 12463003)

通讯作者: 陆伟坚, william_lo@qq.com

着至关重要的角色,它们能够将重元素带离寄主星系,从而限制中心超大质量黑洞的增长^[15],并为星际及星系际介质提供能量和动量^[16]。尽管外流的重要性已得到广泛认可,但其形成原因、物理状态、位置、加速机制及三维结构等关键方面仍亟待深入研究。

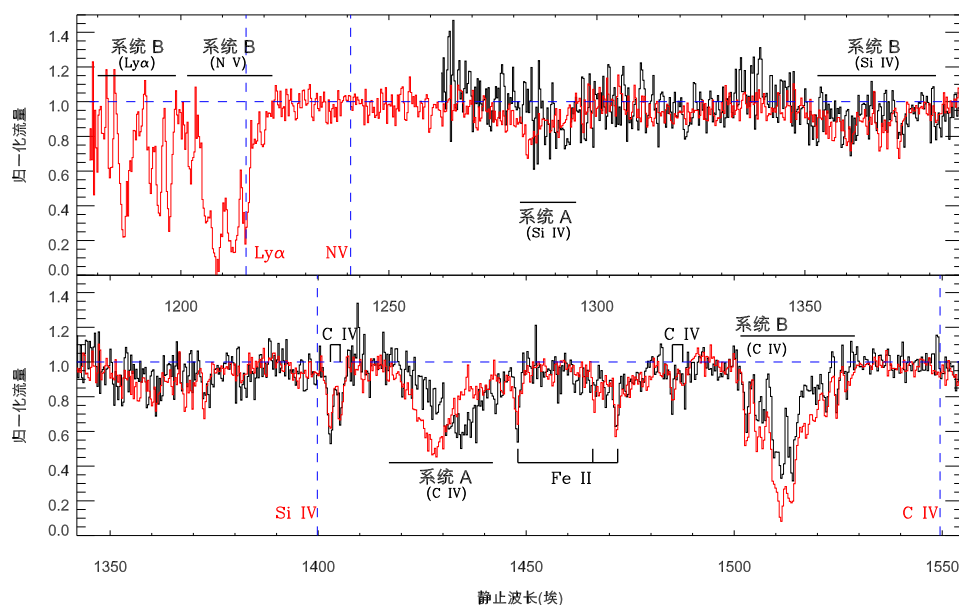
类星体中经常探测到的宽吸收线,是外流存在的有力证据^[17]。紫外波段的宽吸收线大部分表现出蓝移,暗示它们是由正在远离中心源的外流所产生的。除了宽吸收线以外,一些类星体在紫外波段还能探测到窄吸收线。宽和窄吸收线的划分标准通常是半峰全宽 (the full width at half maximum; FWHM) 超过 2000 km/s 的归为宽吸收线,半峰全宽在 500 km/s 以下的归为窄吸收线,而介于两者之间还有一种中等宽吸收线。也有许多研究对宽吸收线和中等宽吸收线不做区分,仅区别窄吸收线与宽吸收线。这主要是因为前者相比于后者往往很难判断是由活动星系核 (AGN) 或恒星形成过程驱动的外流,还是由环星系介质 (CGM)、星系间介质 (IGM) 或前景的吸收气体所产生。

已有研究借助对类星体宽吸收线和中等宽吸收线的分析,揭示外流所携带的巨大动能对寄主星系具有显著的反馈作用。例如,He 等人基于斯隆数字化光谱巡天项目 (SDSS)^[18] 的 915 个宽吸收线光变类星体样本,证实了外流动能对星系演化具有显著影响^[19]。Hamann 等人利用 SDSS-III BOSS 的数据进一步证实了这一结论^[20]。相比之下,窄吸收线外流的相关研究尚显不足。尽管有零星报道探索了个别源的情况,但缺乏基于大样本的系统性的研究来评估其反馈效应。此外,对于外流吸收线的这三种形态 (宽吸收线、窄吸收线和中等宽吸收线) 的形成机制,目前尚无定论,普遍认为是观测者的视线与外流轴心的角度差异^[21] 或者外流不同演化阶段^[22] 所致。

分析外流吸收线强度、轮廓和速度的变化,可能是一种研究类星体外流物理属性的方法,例如能够为外流的结构、位置、动力学等方面提供一些约束条件^[23-25]。已有研究表明,无论是宽吸收线,中等宽吸收线,还是窄吸收线,在数月至数年的时间尺度内,其强度与轮廓的变化屡见不鲜^[25-48]。吸收线强度或轮廓的变化可能源于吸收气体在垂直于视线方向上的运动 (原因 1)^[26-32],或是吸收气体电离状态的转变 (原因 2)^[25, 33-38],亦可能两者共同作用^[49-51]。在原因 1 中,我们把变化时间作为复合时间的上限,就可以算出该吸收气体密度的下限。在原因 2 中,我们可以利用宽吸收线的光变时间来限制吸收体与中心黑洞的距离^[52, 53]。

外流吸收线的强度和轮廓的变化已被证实普遍存在,而其速度漂移的案例还很少^[50, 54-60]。吸收线速度漂移是指吸收线中心波长在连续观测中的整体偏移,过程中吸收线轮廓基本保持不变 (如图 1 所示)。速度漂移可以趋向光谱的红端或蓝端。关于外流吸收线速度漂移的形成机制,学界仍存在争议。尽管有理论提出速度漂移可能源于外流在视线方向上真实的加速/减速,或外流在中心大质量黑洞引力下做圆周运动时穿越视线,但这些理论尚未得到观测数据的充分验证^[50, 54, 61-63]。

当速度漂移反映的是外流真实的加速或减速时,不仅可以揭示外流的运动学特性及动力学机制^[59],还可以对外流作为星系反馈媒介的假说进行验证。例如,星系反馈模型对外流减速的解释是^[1-3],当外流与中心源的距离足够远,就可能与寄主星系物质相互作用,进而可能导致外流的减速 (参见 Leighly 等人^[64])。在这种情况下,相互作用还会改变外流的电离和热状态,从而导致吸收线轮廓的变化。而未观测到减速可能表明外流非常接近中央黑洞,尚未



注: 图中系统 A 的 C IV 宽吸收线存在速度漂移。黑色和红色光谱分别为归一化的两次观测的类星体光谱。

图 1 宽吸收线速度漂移光谱示例

与寄主星系物质发生显著相互作用。对于大多数宽吸收线的平均速度波动保持在 3% 范围内这一统计结果, Grier 等人认为其中的一个原因是宽吸收线云可能尚未行进到足够与周围环境产生显著作用的距离^[59]。要验证这个观点, 我们还需要更多宽吸收线减速的观测数据。近年来还有研究提出, 真正的宽吸收线加速或减速事件可能为类星体变红和弱射电辐射的起源提供独特的见解^[65, 66]。

关于外流吸收线速度漂移的物理机制, 学界仍存在争议。尽管有观点认为这可能是外流物质在视线方向上的真实速度变化, 或由其围绕中心大质量黑洞的圆周运动造成, 但这些解释缺乏确凿的观测证据, 且理论预测与观测存在出入^[50, 54, 61–63]。例如, 研究发现, 宽吸收线的加速度在不同时间尺度上表现不一致, 传统的吸积盘风模型和几何投影效应难以完全解释这一现象^[59]。此外, 有研究发现宽吸收线速度漂移伴随着吸收线等值宽度的协同增强、连续谱减弱和发射线协同增强, 这暗示着中心源辐射可能在这一过程中起到驱动作用^[55, 56]。因此, 外流吸收线速度漂移的复杂机制仍需进一步深入研究。

本文收集吸收线速度漂移的报道, 分别从识别吸收线速度漂移的方法 (第 2 章), 识别吸收线速度漂移的难点 (第 3 章), 速度漂移的案例 (第 4 章), 以及吸收线速度漂移的产生机制 (第 5 章) 这四个方面对该领域的研究成果进行介绍。第 6 章提出未来研究展望, 最后一章进行总结。本文所提“时间”均为类星体静止坐标系时间。

2 宽吸收线速度漂移的识别方法

目前,从光谱数据中识别宽吸收线速度漂移的方法主要有三种:整数像素偏移法、互相关函数与卡方检验结合法以及肉眼观察法。

2.1 整数像素偏移法

Gibson 等人^[67]为每个源设定了 $1\text{\AA}$ 的速度漂移上限,然后除以该源采样时间间隔,得出了加速度的上限。这种方法的局限性有二:其一,仅使用了吸收槽很小的范围进行计算,不能体现完整的宽吸收槽的变化情况;其二,假设一个像素点的速度偏移上限来推导加速度上限值,无法识别出小于一个像素点的漂移值。

2.2 互相关函数与卡方检验结合法

互相关函数 (Cross-correlation Function) 通常用于测量光度曲线上的时间延迟^[68]或系外行星的视向速度^[69]。Grier 等人^[59]将互相关函数与卡方检验方法相结合,用来从大样本中筛选宽吸收线加速/减速候选体。他们设定的筛选条件为:(1)无宽吸收线速度漂移的光谱与后续光谱之间的 p 值小于 0.1,表明该吸收线在这两次观测之间存在显著差异;(2)第一个有宽吸收线速度漂移的光谱与其后续光谱之间的 χ 值和 p 值应满足一定条件,以确保吸收线的速度在两次观测之间的差异具有统计显著性。

互相关函数与卡方检验结合法的优势在于:(1)对速度漂移的敏感性比较高,小于一个像素的漂移值也能检测到;(2)能够把整个(或至少一部分)宽吸收槽视为一个整体来检测,从而识别出该吸收槽的变化是由速度变化导致的,还是由其它因素所致;(3)能够量化误差,进而推导出可靠的速度漂移上限。

需要注意的是,当设置的筛选标准较为严格时,该方法会排除既有速度漂移又有轮廓或强度变化的目标。如上述 Grier 等人^[59]的研究,就利用该方法排除了有轮廓或强度变化的吸收线,只保留纯粹的加速/减速候选体。

2.3 肉眼观察法

肉眼观察法作为最直接和原始的方法,允许研究者基于经验直接识别速度漂移。这种方法避免了因参数设置问题导致的误判,如互相关函数与卡方检验方法可能将同时具有速度漂移和轮廓、强度变化的吸收线排除在外的问题。Lu 和 Lin^[55, 56]和 Yao 等人^[57]均采用了肉眼观察法从类星体光谱中识别出速度漂移的宽吸收线。然而,当面对大量光谱时,肉眼观察法显得耗时且对研究者的专业水平和经验有较高要求。尽管如此,肉眼观察是确认宽吸收线速度漂移不可或缺的步骤。

3 识别宽吸收线速度漂移的难点

在光谱中识别宽吸收线速度漂移可能受到多种因素的影响,如采样次数和间隔、光谱分辨率和信噪比、宽吸收线本身的复杂性,以及需要判断前后两次光谱观测的零点是否漂移(可以借助特征吸收线或发射线如 $[\text{O III}]$)等。

3.1 采样次数和间隔

宽吸收线可能会因为轮廓、吸收强度的变化, 导致在两次观测的光谱上呈现出一次速度漂移, 而如果在多次观测中保持形状不变, 那就可以确认是同一个吸收线发生了速度漂移, 而不是其它类型的变化。因此, 有三次或更多不同时期的观测数据有利于提高所观察到的速度漂移现象的可靠性。其次, 采样间隔需要足够长。Grier 等人的研究表明, 在 2.5 至 5.5 年内, 多数 C IV 宽吸收线的平均速度变化保持在 3% 的范围内^[59]。因此, 如果采样间隔时间不够长, 速度漂移的幅度可能小得不足以被我们发现。

Wheatley 等人^[60] 用一个范例清晰地展示了采样次数和采样间隔对测量速度漂移的影响。Grier 等人从类星体 SDSS J141007.72+541203.6 一年内的 32 次观测数据中发现一个 C IV 宽吸收线的等值宽度发生显著变化^[70]。随后, Hemler 等人从该类星体后续 3 年的观测数据中, 发现该宽吸收线强度稍微减弱, 而等值宽度没有显著变化^[71]。Wheatley 等人新增了该类星体后续 4 年里的 70 个光谱, 发现该宽吸收线既有等值宽度、强度和轮廓变化, 也有速度漂移^[60]。由此例可见, 在样本量小的情况下, 如果采样次数不够多或者采样间隔时间不够长, 很有可能会错过速度漂移候选体。

3.2 光谱分辨率和信噪比的限制

高分辨率光谱对于分析类星体吸收线速度漂移的重要性不言而喻。如本文表一所示, Vilkoviskij 和 Irwin 以及 Rupke 等^[72, 73] 所测算的外流吸收线加速度值, 与其他研究者的工作相比, 小了一两个数量级。这可能是因为前者的光谱具有较高的分辨率和信噪比, 所以能够探测到更细微的速度漂移。高分辨率光谱对于精确测量速度漂移值, 以及研究吸收线的光变、锁线 (line-locking) 等特性都具有重要意义。只有在高分辨率光谱下才可以不依赖于模型、准确地分解 (在中色散光谱看来) 一个 (未饱和的) 宽吸收坑的成分, 这对于验证 line-locking 成分是否真的存在于宽吸收线中至关重要。

3.3 宽吸收线本身的复杂性

识别宽吸收线速度漂移的第三个难点源于宽吸收线本身的复杂性。宽吸收线本身的复杂性首先体现在其可能受到自混合效应的影响, 即蓝端和红端子成分的相互混合可能掩盖速度漂移。在近期的研究中, Wheatley 等人^[60] 展示了如何区分或分解宽吸收线的子成分和测量各自的速度漂移, 并且对比了解析前的整个宽吸收线的速度漂移。

除了自混合效应之外, 十分普遍的吸收线强度、等值宽度或轮廓的变化也可能干扰速度漂移的识别。Filiz 等人发现 50%~60% 的 C IV 和 Si IV 宽吸收线在几年内会发生强度或轮廓变化^[25]。Hemler 等人^[71] 在斯隆反响映射 (the Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping project; SDSS-RM 项目^[74, 75]) 的 27 个类星体中, 发现即使在很短的时间内 (静止坐标 10 天以内), 也有超过一半的类星体存在 C IV 宽吸收线等值宽度的显著变化。当宽吸收线速度漂移与强度、等值宽度或轮廓变化同时发生时, 即使利用长期、高质量和高采样率的光谱数据, 也可能难以准确测量速度漂移的幅度^[76-78]。

此外, 发生了加速的外流, 其呈现在光谱上的吸收线不一定显示出速度漂移。例如当我们视线穿过一束朝着垂直于吸积盘的方向喷出的外流的主体部分时 (如图 10 所示, 参见

Arav 等人的研究^[79]), 在我们视线内的这部分外流可能是连续且速度恒定的。这种情况下尽管外流本身正在加速, 但呈现在光谱上的吸收线可能没有显示出明显的速度漂移^[6, 80, 81]。

4 吸收线速度漂移的案例

4.1 初期零星报道

外流吸收线速度漂移的研究始于 20 世纪初, 初期的研究对象仅是个源。例如 Vilkoviski 和 Irwin^[72], Rupke 等人及 Hall 等人^[63, 73] 分别报道了在 1~5 年内, 加速度为 $0.03\sim 0.1\text{ cm/s}^2$ 的外流宽吸收线。2003 年, Gabel 等人发现了首例经历减速的窄吸收线。他们从 Seyfert 星系 NGC 3783 中, 发现在 9~13 个月内, C IV, Si IV 和 N V 窄吸收线都呈现了减速的现象^[62]。

随后, Gibson 等人^[67] 和 Capellupo 等人^[24] 试图在小样本中探寻宽吸收线速度漂移, 结果未能有所发现。2019 年, Misawa 等人对 6 个类星体的内禀窄吸收线进行了 2.8 至 5.5 年的追踪研究, 同样没有发现明显的速度漂移现象^[82]。尽管如此, 这些研究为理解外流吸收线速度漂移现象提供了一些方法和见解。

4.2 首次成功从大样本搜索到速度漂移

2016 年, Grier 等人^[59] 报道了首个成功从大样本中搜索到宽吸收线速度漂移的工作, 基于从斯隆数字化巡天项目中选的 140 个宽吸收线类星体^[59]。尽管该样本量明显大于之前的研究, 但结果仅发现 3 个存在速度漂移的宽吸收线, 其中两个为加速, 一个为减速。这似乎说明宽吸收线速度漂移的稀缺性。

Grier 等人^[59] 尝试利用经典的盘风模型 (the disk-wind model) 来解释两个加速的宽吸收线的来源。他们利用 Murray 等人^[6] 以及 Murray 和 Chiang^[83] 的盘风模型公式计算出该外流的加速度变化率, 发现该结果与实测值存在出入, 尤其是盘风模型无法解释该加速度的大幅波动。

此外, Grier 等人还基于进一步筛选出的 76 个 C IV 宽吸收线, 得出在 2.5 至 5.5 年内, 多数宽吸收线的平均速度变化幅度不超过 3% 的结论^[59]。

4.3 X 射线亮类星体的速度漂移

2014 年, Joshi 等人^[50] 在两个 X 射线明亮类星体中检测到 C IV 宽吸收线的减速现象。在 3.11 年和 2.34 年内, 这两个 C IV 宽吸收线分别呈现出 -0.7 和 -2.0 cm/s^2 的平均加速度。在他们评估几种主流的速度漂移机制对实测值的解释力, 结合这两个类星体的 X 射线明亮特性, 最终认为众多小的自遮蔽云团沿曲线轨迹的移动是最合理的解释。

2019 年, Joshi 等人^[54] 在另一个 X 射线明亮的类星体中发现红移相同的 C IV 和 Si IV 两个宽吸收线的减速现象。

综合 2014 年和 2019 年的研究, Joshi 等人从这三个源中总结出以下相同点: (1) 减速成分通常具有较高的喷射速度, 超过 $10,000\text{ km/s}$; (2) 在光谱较低速度区间存在其他无速度漂移的吸收线; (3) 光学连续谱没有显著变化。此外, 他们指出, 在 X 射线明亮的类星体

中, 尚未观测到加速的宽吸收线现象。在大样本中对这个发现进行验证, 将有助于我们理解宽吸收线 X 射线亮 (或弱) 类星体的物理起源。

4.4 当时加速度最高的宽吸收外流

Xu 等人^[58] 从类星体 SDSS J1042+1646 分别观测于 2011 年和 2017 年的光谱中发现一个宽吸收线发生了速度漂移。该宽吸收线的速度质心在 3.2 年内从 -19500 km/s 变为 -21050 km/s, 发生了约 -1550 km/s 的漂移, 对应于 1.52 cm/s^2 的加速度。这是当时被报道的吸收线外流加速度的最大值。速度漂移不仅表现在 Ne VIII $\lambda\lambda 770.41, 780.32$ 分开的双峰, 也表现在 O V $\lambda 629.73$ 和 Mg X $\lambda\lambda 609.79$ 和 624.94 吸收双线。Xu 等人在排除光致电离变化以及吸收体进出视线这两种潜在原因后, 判断该速度漂移应归因于外流的加速。

4.5 窄吸收线速度漂移

2020 年, Yao 等人^[57] 首次报道了一个窄吸收线系统 (包括 C IV $\lambda\lambda 1548, 1551$ 和 N V $\lambda\lambda 1239, 1243$) 同时发生等值宽度变大和速度漂移现象, 基于类星体 SDSS J143530.49+142338.4 两次观测的光谱。鉴于连续谱的显著减弱, 他们推测, 外流电离状态的变化可能是导致该吸收系统等值宽度变大的一个原因。对于该吸收系统发生速度漂移的原因, Yao 等人进行了初步的分析。然而, 受限于仅有两次 SDSS 观测数据, 他们尚无法明确其背后的具体机制。

4.6 首例低电离宽吸收线速度漂移

2020 年, Lu 和 Lin^[56] 在类星体 SDSS J134444.33+315007.6 中, 发现 Mg II 和 Al III 宽吸收线在 3.21 年内, 分别经历了约 -1101 和 -1170 km/s 的速度漂移。这是首次关于低电离宽吸收线速度漂移的报道。此外, 他们还在光谱中识别出其他显著变化特征, 包括连续谱的显著减弱, Mg II、C III 和 Al III 等多条发射线的协同增强, 以及三个 Al III 吸收槽的协同增强。这些变化特征均表明来自背景辐射能量的影响。因此, 他们推断, 在该源中观测到的宽吸收线速度漂移可能来源于中心源辐射压引起的外流在视线方向上的加速度。

4.7 宽吸收线加速度最高的候选体

2021 年, Aromal 等人报道了一个类星体中的两个不同的 C IV 宽吸收线, 其中一个宽吸收线 (较蓝的) 在加速的同时还发生等值宽度的变化, 而另一个宽吸收线 (较红的) 则表现出复杂的轮廓变化^[84]。较红的宽吸收线所包含的三个吸收成分的其中两个, 也显示出加速和等值宽度变化, 而且它们的加速度和等值宽度变化与较蓝的那个宽吸收线的存在相关性。较蓝的宽吸收线在第二与第三次观测之间的加速度为 $8.84 \pm 3.62 \text{ cm/s}^2$, 是目前为止在宽吸收线类星体中发现的最高的加速度。

4.8 首例经历过恒定加速的宽吸收线外流

对于有两次以上的光谱观测数据的源, 通过对比每两次观测之间的速度漂移值, 我们可以发现速度漂移的变化幅度并不恒定。以 Joshi 等人在 2019 年^[54] 的研究为例, 他们测量的类星体 J092345+512710 中 C IV 宽吸收线在第 2 次与第 4 次观测之间的减速率, 比其在第 1 次与第 2 次观测之间的大了约 1.4 倍。同样, Grier 等人^[59] 从类星体 J012415.53-003318.4 三次观测数据中也发现, 宽吸收线的平均加速度在前两次观测之间为 0.9 cm/s^2 , 而在后两次观测之间则降为 0.37 cm/s^2 。

2024 年, Yi 等人报道了 4 个低电离宽吸收线加/减速候选体, 发现其中 3 个候选体的宽吸收线的加速度都是在刚开始阶段急剧增加, 随后趋于平缓。然而, 剩余的一个候选体的宽吸收线轮廓基本保持不变并在 3 次连续的光谱采样中呈现出采样间隔与速度漂移的线性关系, 这是第一例经历过恒定加速的宽吸收线外流^[85]。

最近, Wheatley 等人^[60] 从类星体 SDSS J141007.72+541203.6 长达 8 年的 130 次观测数据中也发现不恒定的外流吸收线加速度。Wheatley 等人^[60] 还做了一个模拟实验, 从这 130 光条谱中, 每次随机抽取 3 条分属不同时期的光谱, 抽取 1000 次时, 只有一次能够通过 Grier 等人^[59] 的宽吸收线加速判据。可想而知出现恒定加速的概率会更低。

表 1 外流吸收线速度漂移的案例集合

类星体名称	时间跨度 ^a (yr)	加速度 ^b (cm/s ²)	速度漂移 ^b (km/s)	离子种类	漂移 方向	吸收线 类型	光谱来源	观测 次数	文献 ^c
Q1303+308	5	-55	-0.035	C IV, N V	加速	宽吸收线	WHT	3	Vilkoviskij 和 Irwin, 2001
Mrk 231	6.6	-125	-0.08	Na I D	加速	宽吸收线	Keck	2	Rupke 等, 2002
NGC 3783	0.73	55	0.1	C IV, N V, Si IV	减速	窄吸收线	HST/STIS	3	Gabel 等, 2003
J024221.87+004912.6	1.39	-70	-0.154	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, UVES	4	Hall 等, 2007
J085551.25+375752.2	3.11	217.6	0.7	C IV	减速	宽吸收线	SDSS, BOSS, IGO/IFOSC	3	Joshi 等, 2014
J091127.61+055054.1	2.34	...	2	C IV	减速	宽吸收线	SDSS, BOSS IGO/IFOSC	5	Joshi 等, 2014
J012415.53-003318.4	2.424	-691	-0.904	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, BOSS, TESS	3	Grier 等, 2016
J013656.31-004623.8	3.655	-752	-0.652	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, BOSS, TESS	3	Grier 等, 2016
J091425.72+504854.9	3.345	1207	1.144	C IV	减速	宽吸收线	SDSS, BOSS, TESS	3	Grier 等, 2016
J092345.19+512710.1	4.15	2126, 1491	1.62, 1.14	C IV, Si IV	减速	宽吸收线	SDSS, BOSS IGO/IFOSC	4	Joshi 等, 2019
J120819.29+035559.4	2.95	-1166	-1.253	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, BOSS	2	Lu 和 Lin, 2019
J1042+1646	3.2	-1550	-1.52	C IV, NV	加速	宽吸收线	HST/COS	2	Xu 等, 2020
J143530.49+142338.4	1.2	-138	-0.36	C IV, NV	加速	窄吸收线	SDSS	2	Yao 等, 2020
J134444.33+315007.6	3.21	-1101, -1170	-1.087, -1.155	Mg II, Al III	加速	宽吸收线	SDSS, BOSS	2	Lu 和 Lin, 2020
J162122.54+075808.4	0.28	-784	-8.84	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, NTT, and SALT	7	Aromal 等, 2021
J141007.72-541203.6	2.337	-683	-1.04	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, HET	~130	Wheatley 等, 2024
J013656.31-004623.8	4.1	-760	-0.74	C IV	加速	宽吸收线	SDSS, HET	5	Yi 等, 2024
J123820.19+175039.1	3.4	257	0.24	Mg II	减速	宽吸收线	SDSS, LJT, HET	4	Yi 等, 2024
J125942.79+121312.6	5.2	-590	-0.48	H γ	加速	宽吸收线	SDSS, LJT, HET	6	Yi 等, 2024
J134444.32+315007.6	3.21	-1120, -980	-1.1, -0.97	Mg II, Al III	加速	宽吸收线	SDSS, LJT, HET	5	Yi 等, 2024

注: ^a 时间跨度采用类星体静止坐标系;
^b 负值对应于加速, 正值对应于减速;
^c Rupke 等和 Gabel 等的目标源为 Seyfert galaxy。
^d 8 年 (观测坐标系) 期间约 130 次观测的速度漂移或加速度的平均值

5 吸收线速度漂移的产生机制

目前,普遍认为导致宽吸收线速度漂移的物理机制主要有以下几种^[61–63]: (1) 外流真实的加速或减速; (2) 外流围绕中心大质量黑洞做圆周运动时视向速度变化; (3) 外流物质电离态和柱密度等物理性质的改变引起的速度漂移等。要指出的是,这些机制尚未取得强有力的观测证据,且理论预测与实际观测存在出入。

5.1 外流的真实加速/减速

在中心源引力的作用下,吸收云团所经历的径向加速/减速,是解释吸收线速度漂移的一种可能机制。要评估该机制能否合理解释观测到的速度漂移,我们可以估算吸收云团与中心源的距离,并将其实际速度与理论预测的逃逸速度进行比较。例如,在 Joshi 等人^[50, 54]研究的三个速度漂移案例中,理论估算的外流逃逸速度远低于实际观测到的速度漂移变化率,因此排除了引力主导外流减速/加速这种机制。需要注意的是,如果要准确估算吸收云团与类星体之间的距离,就需要高信噪比、高分辨率和覆盖多种离子的光谱数据。

研究者还会通过其他方法来推断速度漂移是否来源于外流的真实加/减速。例如, Lu 和 Lin^[55, 56] 在分析类星体 J120819.29+035559.4 中的 C IV 宽吸收线加速现象和类星体 J134444.33+315007.6 中的 Mg II 和 Al III 宽吸收线协同加速现象时,发现这些宽吸收线在发生速度漂移的同时,还出现等值宽度的协同增强、连续谱的明显减弱以及发射线增强的特征。这些特征表明,这些源的外流可能受到中心源辐射的影响,从而推测其宽吸收线的速度漂移可能由中心源辐射驱动的外流加速现象所引发。

Xu 等人^[58] 在对类星体 SDSS J1042+1646 在 2011 年和 2017 年的光谱数据进行分析时,也发现了一个宽吸收线的速度漂移。他们排除了光致电离变化和吸收体进出视线这两种解释,判断所观测到的速度漂移应归因于外流的加速。

5.2 外流物质做曲线运动时穿越视线

在外流物质进行曲线运动的过程中,其运动方向的偏转可能导致吸收线在视线方向上的速度发生变化。此时测量的吸收线速度漂移值实际上只是外流物质沿视线方向的速度分量之变化(参见 Gabel 等人^[62] 的图 3 所示)。

例如, Joshi 等人^[50] 在两个 X 射线亮类星体 (J085551+375752 和 J091127+055054) 中发现两个 C IV 宽吸收线的速度漂移,并认为这种速度漂移可以被外流的曲线运动合理解释。依据是他们估算这些外流的运动路径足够弯曲,足以产生测量到的速度漂移值($\sim 217\text{--}620\text{ km/s/yr}$)。

5.3 外流物理性质的改变

类星体中心源电离状态的变化能够引发外流物质电离态和柱密度等物理性质的变化,从而在光谱上表现为吸收线强度的变化以及可能伴随的速度漂移。Wheatley 等人^[60] 清晰地展示了一个宽吸收线的两个子成分参数(中心/宽度/幅度)的变化对测量整个宽吸收线线心的影响(见该文图 12/16)。

光致电离模型可以作为辅助判断吸收线的强度变化是否来源于中心源电离状态变化的

一种工具。例如, Joshi 等^[50] 尝试利用光致电离模型分析类星体 J091127.61+055054.1 的 C IV 宽吸收线强度变化的原因。在光致电离模型^[44] 中, 根据该类星体的 5 次观测的光谱中均没有 Si IV 或 N V 吸收线, 可以推断这个 C IV 吸收线处于当中心源的电离度降低时, C IV 吸收线将变强的阶段。然而, Joshi 等^[50] 从光谱中得到的结果是, 连续谱和 C IV 吸收线都变弱了。因此, 他们排除了光致电离变化作为该 C IV 吸收线强度变化的原因, 间接排除了光致电离变化作为该 C IV 吸收线速度漂移的原因。

又如, Xu 等^[58] 在研究类星体 SDSS J1042+1646 时, 发现一个宽吸收线在 3.2 年内发生了约-1550 km/s 的速度漂移。他们假设这一变化并非由外流的加速引起, 而是由光致电离的变化导致。在这种机制中, 吸收线的变化由类星体电离量的变化来解释。为了解释这两个静止外流的出现和消失, 要求两次观测的类星体电离态发生显著变化 (电离态具体分析过程见 Xu 等的第 5.1 节^[58])。然而, 该类星体两个光谱上的其它四个吸收线在此期间并没有变化, 包括一些不饱和的双线。由此 Xu 等人排除了光致电离变化这个解释。

5.4 吸积盘旋转产生的几何投影效应

吸积盘的旋转会产生几何投影效应。假设宽吸收线物质是从旋转的吸积盘上发射出来的, 那么随着吸积盘的旋转, 吸收物质在观测者视线方向上的投影位置和速度会发生变化。这种变化会导致观测到的宽吸收线出现速度漂移现象 (例如, 参见 Hall 等人^[86] 的第 5.3 节)。Grier 等人^[59] 尝试用几何投影效应来解释在三个类星体中观测到的宽吸收线的加速/减速现象。他们通过分析吸积盘物质的旋转周期, 来计算能够观测到宽吸收线加速或减速的时间尺度。结果发现, 在观测期间吸积盘相对于观测者的视线方向并未发生显著的旋转, 因此由吸积盘旋转产生的几何投影效应导致该宽吸收线速度漂移的可能性较小。

6 研究展望

由上述研究进展可见, 当前关于外流吸收线速度漂移的研究存在两大局限: 一是实测案例稀少, 仅有十几例; 二是速度漂移背后的物理机制尚未明确, 主流的几种机制也还缺乏强有力的实测证据支持。基于这些不足, 本文对该领域未来研究方向提出以下几点展望。

6.1 拓展重复观测样本

由表 1 可见, 目前发现的速度漂移的案例仅有十几例, 这么少的实测案例无疑限制了对于速度漂移的进一步研究。所幸的是我们正处于一个巡天项目发展迅猛的时代。例如斯隆数字化巡天 (SDSS) 项目, 截止第 16 期, 已经释放了超过 75 万个类星体的光谱。我国的郭守敬望远镜 (LAMOST) 巡天也已经观测到超过 7 万个类星体。在诸如 SDSS 和 LAMOST 这类大型巡天项目中被重复观测的类星体, 可以组成搜寻宽吸收线速度漂移的大样本。

Grier 等人^[59] 做出了目前唯一成功从较大样本中搜索到吸收线速度漂移的工作, 但他们把研究对象局限于至少被观测三次的类星体, 这很大程度上限制了搜索范围。结果只从 140 个类星体中搜索到 3 例速度漂移案例。当然了, Grier 等人的目的是筛选出外流加速候选体, 而非只是寻找有速度漂移的案例, 因此设定较为严格的筛选标准是合理的。而如果要搜索到

更多速度漂移案例,我们建议将搜索范围拓展到只有两次观测的类星体。先从只有两次观测的类星体样本中搜索到速度漂移候选体后,再对这些候选体进行更多次、高分辨率观测,相对直接从至少三次观测样本中进行搜索,前者成功率会高一些,有助于构建具有统计学意义的宽吸收线速度漂移样本。

6.2 与锁线观测特征的综合研究

锁线 (Line-locking) 现象是基于吸收线气体云的多普勒效应提出的概念,指的是两个外流吸收体在视线方向上平行移动,且它们的速度差与特定离子双线的间距一致^[87–89]。研究这一现象对于理解类星体中的辐射驱动外流的物理机制至关重要,因其被视为辐射驱动外流的独特标志^[88, 89]。然而,辐射驱动机制是如何导致吸收线发生锁线现象的,至今尚无定论。有研究者通过建立模型来对锁线现象的来源进行解释:一是 Scargle 等人提出的“S73 模型”^[88],二是 Braun 和 Milgrom 提出的“BM89 模型”^[89]。但这两个模型均尚未得到观测数据的强有力支持^[90, 91]。S73 模型是一个稳态模型,要求锁线系统中向外和向内的力几乎相等^[88],意味着不会出现速度漂移。而 BM89 模型则是一种非稳态模型,不要求锁线系统向外和向内的力相等,而只要求“锁”在一起的各个子成分的加速度之差几乎保持不变,因此 BM89 模型预言呈现锁线的吸收线可能会同时出现速度漂移^[89]。那么我们在搜索速度漂移的同时也辨认锁线观测特征,将可以对 S73 和 BM89 模型进行验证,并揭示辐射驱动外流的物理机制。

6.3 吸收线光变特性的综合分析

分析类星体吸收线等值宽度的光变,对于研究外流的空间分布、速度结构以及电离结构,具有不容忽视的作用^[19, 33, 92]。类星体吸收线等值宽度光变是类星体的常见观测特征^[38, 71, 91, 93–99],目前认为其产生机制主要有以下两种:一是吸收体横穿视线的运动^[26],二是吸收体电离态的变化^[34]。这两种机制均为理解外流的起源提供了宝贵线索^[26, 34, 39],并对探究外流物理条件具有重要意义。例如,在第一种机制下,我们可以利用宽吸收线光变的时间来限制吸收体到中心黑洞的距离^[52, 53]。在第二种机制下,我们可以把光变的时间设为外流气体的复合时标 (recombination timescale) 的上限,由此可以算出吸收体密度的下限。

有研究基于斯隆巡天的类星体光谱样本^[38, 93, 95, 96],发现吸收线等值宽度的变化与类星体 UV 连续谱的变化之间存在显著的反相关关系。这一发现表明,大部分吸收线等值宽度的变化来源于吸收体电离态对中心源光变的响应。

此外,He 等人利用斯隆巡天项目的近千个类星体的光谱样本,对外流的尺度和动力学光度分布进行了深入探讨^[19]。这一研究揭示了利用吸收线等值宽度的光变来测定外流尺度的巨大潜力。因此,将吸收线速度漂移与光变特性相结合的研究策略,将为我们深入理解外流的起源和加速过程,以及外流对星系演化的影响提供新的视角和工具。

7 总结

本文梳理了类星体吸收线速度漂移的研究文献,从四个方面——宽吸收线速度漂移探测方法、搜索难点、案例以及产生机制——综述了当前的研究进展。相关研究有利于揭示外流

的结构、位置、动力学特性以及类星体内部复杂的物理环境。

遗憾的是, 我们目前对宽吸收线速度漂移的理解还不够。首先, 实测案例的稀少限制了我们对该现象的认识, 截至目前, 仅有十几个案例被报道。其次, 尽管有几种解释速度漂移的物理机制被提出, 但均未得到强有力的观测数据支持。

基于上述不足, 本文对未来类星体吸收线速度漂移的研究方向提出了展望。随着类星体巡天观测数据的累积和技术的进步, 我们期待吸收线速度漂移的研究能够进一步拓展和深化, 不仅能够为类星体的外流动力学模型提供更多的数据支撑, 还能够为揭示类星体内部复杂的物理过程提供新线索。最终, 这一领域的研究成果将有助于我们更全面、更深入地理解类星体的本质和演化历程。

致谢

衷心感谢两位审稿人的悉心审阅与宝贵意见, 使得本文在写作质量及内容完整性上均得到了提升。

参考文献:

- [1] Silk J, Rees M J. *A&A*, 1998, 331: L1–L4
- [2] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433: 604–607
- [3] Fabian A C. *ARA&A*, 2012, 50: 455–489
- [4] Kormendy J, Ho L C. *ARA&A*, 2013, 51(1): 511–653
- [5] Harrison C M, Ramos Almeida C. *Galaxies*, 2024, 12(2): 17
- [6] Murray N, Chiang J, Grossman S A, et al. *ApJ*, 1995, 451: 498
- [7] Proga D, Kallman T R. *ApJ*, 2004, 616: 688–695
- [8] Dyda S, Davis S W, Proga D. *MNRAS*, 2024
- [9] Zubovas K, King A. *ApJ*, 2012, 745(2): L34
- [10] Faucher-Giguère C A, Quataert E. *MNRAS*, 2012, 425(1): 605–622
- [11] King A, Pounds K. *ARA&A*, 2015, 53: 115–154
- [12] Hopkins P F, Torrey P, Faucher-Giguère C A, et al. *MNRAS*, 2016, 458(1): 816–831
- [13] Arav N, Liu G, Xu X, et al. *The Astrophysical Journal*, 2018, 857(1): 60. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aab494>
- [14] Costa T, Pakmor R, Springel V. *MNRAS*, 2020, 497(4): 5229–5255
- [15] Ostriker J P, Choi E, Ciotti L, et al. *ApJ*, 2010, 722(1): 642–652
- [16] Springel V. *MNRAS*, 2005, 364(4): 1105–1134
- [17] Allen J T, Hewett P C, Maddox N, et al. *MNRAS*, 2011, 410: 860–884
- [18] York D G, Adelman J, Anderson J E, JR., et al. *AJ*, 2000, 120: 1579–1587
- [19] He Z, Wang T, Liu G, et al. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 265
- [20] Hamann F, Herbst H, Paris I, et al. *MNRAS*, 2019, 483(2): 1808–1828
- [21] Weymann R J, Morris S L, Foltz C B, et al. *ApJ*, 1991, 373: 23–53
- [22] Lípari S L, Terlevich R J. *MNRAS*, 2006, 368(3): 1001–1015
- [23] Barlow T A. *Time Variability of Broad Absorption-Line QSOs*[D]. [S.l.]: University of California System, 1993

-
- [24] Capellupo D M, Hamann F, Shields J C, et al. MNRAS, 2012, 422: 3249–3267
- [25] Filiz Ak N, Brandt W N, Hall P B, et al. ApJ, 2013, 777(2): 168
- [26] Hamann F, Kaplan K F, Rodríguez Hidalgo P, et al. MNRAS, 2008, 391(1): L39–L43
- [27] Krongold Y, Binette L, Hernández-Ibarra F. ApJ, 2010, 724(2): L203–L206
- [28] Hall P B, Anosov K, White R L, et al. MNRAS, 2011, 411(4): 2653–2666
- [29] Capellupo D M, Hamann F, Shields J C, et al. MNRAS, 2013, 429: 1872–1886
- [30] Chen Z F, Li M S, Huang W R, et al. MNRAS, 2013, 434: 3275–3282
- [31] Shi X H, Jiang P, Wang H Y, et al. ApJ, 2016, 829(2): 96
- [32] Rogerson J A, Hall P B, Rodríguez Hidalgo P, et al. MNRAS, 2016, 457: 405–420
- [33] Wang T, Yang C, Wang H, et al. ApJ, 2015, 814: 150
- [34] Hamann F, Kanekar N, Prochaska J X, et al. MNRAS, 2011, 410(3): 1957–1974
- [35] Chen Z F, Qin Y P. ApJ, 2015, 799: 63
- [36] Misawa T, Eracleous M, Charlton J C, et al. ApJ, 2007, 660(1): 152–166
- [37] Arav N, Chamberlain C, Kriss G A, et al. A&A, 2015, 577: A37
- [38] Lin Y R, Pan C J, Lu W J. Research in Astronomy and Astrophysics, 2024, 24(2): 025016
- [39] Filiz Ak N, Brandt W N, Hall P B, et al. ApJ, 2012, 757: 114
- [40] Welling C A, Miller B P, Brandt W N, et al. MNRAS, 2014, 440(3): 2474–2497
- [41] Misawa T, Charlton J C, Eracleous M. ApJ, 2014, 792: 77
- [42] Hamann F, Barlow T A, Beaver E A, et al. ApJ, 1995, 443: 606–616
- [43] Barlow T A, Sargent W L W. AJ, 1997, 113: 136
- [44] Hamann F, Barlow T A, Junkkarinen V. ApJ, 1997, 478: 87–93
- [45] Ganguly R, Charlton J C, Eracleous M. ApJ, 2001, 556: L7–L10
- [46] Narayanan D, Hamann F, Barlow T, et al. ApJ, 2004, 601: 715–722
- [47] Wise J H, Eracleous M, Charlton J C, et al. ApJ, 2004, 613: 129–150
- [48] Misawa T, Eracleous M, Charlton J C, et al. ApJ, 2005, 629: 115–130
- [49] Hamann F, Simon L, Rodríguez Hidalgo P, et al. In: Chartas G, Hamann F, Leighly K M, eds. AGN Winds in Charleston. 2012. . [S.l.]: [s.n.] , Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 460
- [50] Joshi R, Chand H, Srianand R, et al. MNRAS, 2014, 442: 862–869
- [51] Yi W, Brandt W N, Hall P B, et al. ApJS, 2019, 242(2): 28
- [52] Moe M, Arav N, Bautista M A, et al. ApJ, 2009, 706: 525–534
- [53] Capellupo D M, Hamann F, Shields J C, et al. MNRAS, 2011, 413: 908–920
- [54] Joshi R, Srianand R, Chand H, et al. ApJ, 2019, 871: 43
- [55] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2019, 887(2): 178
- [56] Lu W J, Lin Y R. MNRAS: Letters, 2020, 499(1): L58–L61. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa158>
- [57] Yao M, Pan C J, LU W J, et al. ApJ, 2020, 891(1): 95
- [58] Xu X, Arav N, Miller T, et al. ApJS, 2020, 247(2): 40
- [59] Grier C J, Brandt W N, Hall P B, et al. ApJ, 2016, 824: 130
- [60] Wheatley R, Grier C J, Hall P B, et al. ApJ, 2024, 968(2): 49
- [61] Hall P B, Anderson S F, Strauss M A, et al. ApJS, 2002, 141(2): 267–309
- [62] Gabel J R, Crenshaw D M, Kraemer S B, et al. ApJ, 2003, 583(1): 178–191
- [63] Hall P B, Sadavoy S I, Hutsemekers D, et al. ApJ, 2007, 665: 174–186
- [64] Leighly K M, Terndrup D M, Baron E, et al. ApJ, 2014, 788: 123
- [65] Klindt L, Alexander D M, Rosario D J, et al. MNRAS, 2019, 488(3): 3109–3128
- [66] Calistro Rivera G, Alexander D M, Rosario D J, et al. A&A, 2021, 649: A102
- [67] Gibson R R, Brandt W N, Schneider D P, et al. ApJ, 2008, 675: 985–1001
- [68] Peterson B M, Ferrarese L, Gilbert K M, et al. ApJ, 2004, 613(2): 682–699
- [69] Latham D W, Mazeh T, Stefanik R P, et al. Nature, 1989, 339(6219): 38–40
- [70] Grier C J, Hall P B, Brandt W N, et al. ApJ, 2015, 806: 111
- [71] Hemler Z S, Grier C J, Brandt W N, et al. ApJ, 2019, 872: 21

-
- [72] Vilkoviskij E Y, Irwin M J. MNRAS, 2001, 321: 4–10
- [73] Rupke D S, Veilleux S, Sanders D B. ApJ, 2002, 570: 588–609
- [74] Shen Y, Brandt W N, Dawson K S, et al. ApJS, 2015, 216(1): 4
- [75] Shen Y, Grier C J, Horne K, et al. ApJS, 2024, 272(2): 26
- [76] Kriss G A, Mehdipour M, Kaastra J S, et al. A&A, 2019, 621: A12
- [77] Yi W, Timlin J. ApJS, 2021, 255(1): 12
- [78] Byun D, Arav N, Hall P B. ApJ, 2022, 927(2): 176
- [79] Arav N, Korista K T, de Kool M, et al. ApJ, 1999, 516(1): 27–46
- [80] de Kool M. In: Arav N, Shlosman I, Weymann R J, eds. Mass Ejection from Active Galactic Nuclei. 1997. . [S.l.]: [s.n.] , Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 128
- [81] Proga D, Stone J M, Kallman T R. ApJ, 2000, 543: 686–696
- [82] Misawa T, Eracleous M, Charlton J C, et al. ApJ, 2019, 870: 68
- [83] Murray N, Chiang J. ApJ, 1997, 474(1): 91–103
- [84] Aromal P, Srianand R, Petitjean P. MNRAS, 2021, 504(4): 5975–5991
- [85] Yi W, Hall P B, Yuan Z, et al. ApJS, 2024, 271(2): 61
- [86] Hall P B, Brandt W N, Petitjean P, et al. MNRAS, 2013, 434: 222–256
- [87] Milne E A. MNRAS, 1926, 86: 459–473
- [88] Scargle J D. ApJ, 1973, 179: 705–719
- [89] Braun E, Milgrom M. ApJ, 1989, 342: 100–104
- [90] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2020, 895(2): L44
- [91] Lin Y R, Lu W J. ApJ, 2020, 899(2): 155. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aba9db>
- [92] He Z, Wang T, Zhou H, et al. ApJS, 2017, 229(2): 22
- [93] Lu W J, Lin Y R, Qin Y P, et al. MNRAS, 2017, 468: L6–L10
- [94] Lu W J, Lin Y R. MNRAS, 2018, 474: 3397–3402
- [95] Lu W J, Lin Y R, Qin Y P. MNRAS, 2018, 473(1): L106–L110. +<http://dx.doi.org/10.1093/mnras1/slx176>
- [96] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2018, 862(1): 46. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aaca31>
- [97] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2019, 883(1): 30. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab3a39>
- [98] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2019, 881(2): 105
- [99] Huang H Y, Pan C J, Lu W J, et al. MNRAS, 2019, 487(2): 2818–2823

Research Progress on Velocity Shifts of Quasar Absorption Lines

LIN Ying-Ru, LU Wei-Jian, QIN Huan-Chang, PAN Cai-Juan

(Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: Outflows serve as a crucial feedback mechanism in quasars, playing a significant role in understanding the co-evolution of quasars and their host galaxies. This paper collects and organizes literature on the research of velocity shifts in outflow absorption lines, compares and analyzes the identification methods, challenges, and generation mechanisms of such velocity shifts, and discusses potential future research directions. While current empirical cases of absorption line velocity shifts are limited and their underlying physical mechanisms remain unclear, the growth of quasar survey data and advancements in data processing techniques are expected to lead to breakthroughs in related research, deepening our understanding of quasar outflows and providing new perspectives for galaxy evolution studies.

Key words: quasar; absorption line; velocity shift