高红移类星体的观测

江林华^①, 吴学兵^{①②*}, 王然^①, 王飞格^{①②}, 樊晓晖^{③①}

① 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871;

② 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;

③ Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

* 联系人, E-mail: wuxb@pku.edu.cn

2015-04-21 收稿, 2015-06-26 接受, 2015-07-31 网络版发表

国家自然科学基金(11373008, 11443002)资助

摘要 在宇宙大爆炸后10亿年以内的高红移(红移大于6)类星体为我们研究早期宇宙提供了重要的探针, 这也使得对高红移类星体的观测研究成为星系宇宙学前沿研究领域的一大热点. 本文对高红移类星体观测研究的重要性及其宇宙学意义, 利用光学和近红外波段的观测发现早期宇宙中光度最高和中心黑洞质量最大的高红移类星体, 以及利用亚毫米、毫米和射电波段观测对高红移类星体寄主星系所开展的研究等进行了较全面地总结, 并对这一领域未来的研究前景与挑战进行了展望.

关键词

高红移
类星体
大质量黑洞
宇宙再电离
寄主星系

类星体是20世纪60年代天文学四大发现之一. 它们大多在光学波段看起来形态与银河系内的恒星类似, 但实际上是宇宙尺度上具有极高光度的天体. 类星体的巨大能量来源于其中心超大质量黑洞对周围物质的吸积. 由于它们在从射电到X射线的全波段都有极高的能量辐射, 因此即使非常遥远的类星体也很容易被现代的望远镜和仪器探测到. 比如目前已知的最远类星体处于宇宙学红移 $z=7.08$ 处^[1], 即130亿光年外. 那时的宇宙年龄不到8亿年, 也就是当前宇宙年龄的6%左右. 所以高红移类星体是研究早期宇宙最有力的工具之一. 本文中高红移主要指红移 $z=6$ 左右或者更大, 也就是那时的宇宙正处于宇宙再电离时期.

1 高红移类星体的重要性及其宇宙学意义

类星体的结构可以用活动星系核的“统一”模型^[2]来理解. 其中心大质量黑洞周围有一个几何薄但光学厚的吸积盘. 类星体从紫外到近红外的连续谱辐射主要来自该吸积盘. 更高能的X射线来自靠近中

心附近的逆康普顿散射, 或者高温气体的热辐射. 吸积盘的外面是产生宽发射线的“宽线区”. 该区域气体被中心黑洞的引力所束缚, 所以宽发射线的线宽可以用来估计黑洞质量. 宽线区的外面是产生窄发射线的“窄线区”. 在更大的尺度上还存在一个尘埃环, 这些尘埃吸收高能光子并且在红外波段再辐射. 此外, 在类星体中射电喷流也比较常见. 由此可见类星体产生包含从X射线到射电的多波段辐射.

由于类星体的演化与其中心黑洞和寄主星系密切相关, 对高红移类星体的研究有助于了解早期大质量黑洞的形成与增长、以及星系的形成和演化. 人们已对部分红移大于5.7的高光度类星体进行了较详细的多波段观测. 观测表明这些类星体的能谱分布和低红移类星体并没有显著不同, 也许唯一的例外是其热尘埃的辐射^[3]. 例如, X射线的观测表明无论是X射线的能谱分布还是光学对X射线的强度比, 高红移类星体都与低红移类星体相似^[4~6]. 近红外光谱观测发现高红移类星体宽线区的金属丰度达到或超过太阳金属丰度, 而且与低红移类星体接近. 这意味

引用格式: 江林华, 吴学兵, 王然, 等. 高红移类星体的观测. 科学通报, 2015, 60: 2387–2395

Jiang L H, Wu X B, Wang R, et al. Observational studies on high-redshift quasars (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2387–2395, doi: 10.1360/N972015-00430

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00430>

着它们的寄主星系在前10亿年内已经发生过剧烈的恒星形成和元素合成^[7-9]. 这些高红移类星体的黑洞质量已达数十亿太阳质量, 并且吸积率接近爱丁顿极限(由辐射压与引力的平衡所给出)^[7,8,10], 这说明早期大质量黑洞增长得极快. 如何在宇宙大爆炸后10亿年内将黑洞长到数十亿太阳质量, 这已成为一个难以解释的重要理论问题, 对现有的黑洞形成和增长理论提出了挑战. 另外, 从远红外到射电的观测也为研究高红移类星体的寄主星系及其恒星形成和尘埃性质提供了丰富的信息^[11-13], 为我们研究早期宇宙中黑洞与星系的演化关联提供了机遇.

高红移类星体对了解早期宇宙, 尤其是宇宙再电离, 具有重要的意义. 宇宙再电离发生于大约128亿年前(红移6~12). 之前的宇宙相对均匀并且一片“黑暗”(又称为宇宙黑暗时期), 那时的星际介质为中性. 在这黑暗时期的末期宇宙大尺度结构开始形成, 带来了第一代恒星、星系和大质量黑洞的形成. 这些天体重新“点亮”(电离)宇宙, 这就是宇宙再电离. 它伴随着第一代天体的形成, 是宇宙演化中最重要的时期之一, 因此对宇宙再电离的研究能为天文学带来深远的影响. 再电离发生的峰值在红移 $z \sim 9$ 左右, 结束于 $z \sim 6$ 左右. 前者的证据来自对宇宙微波背景辐射偏振的测量^[14], 后者的主要证据来自对高红移类星体的观测^[15]. 高红移类星体的光谱中包含了关于早期宇宙状态的丰富信息. 当红移接近再电离时期, 星际介质中的中性成分急剧上升, 这导致类星体光谱中Lyman发射带被大大吸收, 甚至被完全吸收. 这种机制为宇宙再电离结束于 $z \sim 6$ 提供了最早和最确凿的证据^[16-18]. 但目前红移6以上的高红移类星体发现的数目还非常少, 对已发现的高红移类星体所作的高分辨率和高信噪比的光谱观测还很缺乏, 这对宇宙再电离过程的进一步细致研究有很大影响.

2 高红移类星体巡天现状

研究高红移类星体首先需要有一个较大样本. 尽管类星体相对普通星系较亮而容易被观测到, 但搜寻高红移类星体却非常困难. 近15年来天文学家们总共才发现(且已发表)80多个红移大于5.7的类星体. 困难主要有两个: 一是高红移类星体的空间密度极低. 类星体的光度函数(空间密度随光度分布)从红移3左右向高红移处指数式递减. 到红移6左右视星等

较亮(z' 波段星等亮于20等)的类星体密度下降至每300~400 deg²才一个类星体. 这意味着需要大面积的多色巡天才能发现这些类星体. 二是在红移6左右, Ly α 发射线已经红移至 z' 波段(中心波长8930 Å), 这给选源和后续证认都带来了困难.

SDSS, 即美国斯隆数字巡天^[19], 开启了高红移类星体的巡天时代. SDSS成像巡天利用一台有142百万像素的相机, 以一种称为drift-scan的模式完成了光学波段从蓝到红5个颜色 $u'g'r'i'z'$ 的测光巡天^[20]. 它总共覆盖约14500平方度的天空^[21]. 至今为止基于SDSS巡天数据发现的高红移类星体近40个, 约占已发表的高红移类星体总数的一半. 其中20个左右发现于SDSS的单个成图数据中^[22-24]. 它们在 z' 波段亮于20星等, 属于光度最高的高红移类星体. 该类星体样本也被研究的最为详细. 另外的12个类星体发现于300平方度的SDSS深场中^[25,26]. 它们比之前的类星体平均暗2个星等左右. 剩下的8个类星体发现于SDSS的重叠天区, 也就是有2次或者以上成像观测的区域^[27]. 它们在 z' 波段亮于20.6星等.

SDSS之后的高红移类星体巡天包括CFHQS^[28]和UKIDSS^[29]等. 加拿大和法国的CFHQS巡天覆盖数百平方度的天区, 并发现了约20个高红移类星体^[30-32]. 这些类星体较暗, 接近或暗于SDSS深场中发现的类星体. 英国UKIDSS在YJHK四个波段的近红外巡天也已发现几个高红移类星体^[1,33,34], 其中包括已知的最遥远($z=7.085$)的类星体. 最近欧美的两个大型巡天项目Pan-STARRS1和 VISTA已经开始发现高红移类星体. Pan-STARRS1覆盖了全天近3/4的天区, 已经发现10多个高红移类星体^[35-37], 包括3个红移在6.5和6.7之间的类星体. VISTA 巡天也已经发现3个红移超过6.5的类星体^[38]. 值得指出的是, 当红移大于6.5时, Ly α 发射线开始离开 z' 波段. 所以搜寻红移大于6.5的类星体需要近红外波段的数据. Pan-STARRS1巡天有比 z' 波段更红的Y波段数据. 而UKIDSS和VISTA本身就是近红外成像巡天, 但它们需要跟光学波段的数据相结合才能发现高红移类星体.

图1显示了至今已发现的红移5以上类星体的红移分布. 图中明显地显示出已有的高红移类星体巡天虽然发现了一批红移5.7以上的类星体, 但在红移5.5左右(5.2~5.7之间)所发现的类星体数目却极为稀少. 原因是红移5.5左右的类星体, 其光学颜色与我

图1 红移大于5的类星体的红移分布

Figure 1 Redshift distribution of quasars with redshifts higher than 5

们银河系中数量众多的晚型恒星极为类似, 因此很难在光学巡天中把红移5.5左右的类星体的候选体选择出来. 这也构成了另一个对高红移类星体观测研究的巨大挑战.

3 光度极大高红移类星体的观测发现

要发现高红移类星体, 首先需要把它们体的候选体从众多的类似恒星的点源中挑选出来, 然后再利用中到大型的望远镜进行光学或近红外光谱观测来进行证认. 由于高红移类星体光谱中最强的发射线 Ly α 线已移到8500埃以外, 因此可以用光学波段 *i*-dropout(*i*'波段缺失)方法在 *i*'-*z*' 与 *z*'-*J* 光学与近红外双色图按一定的选源判据进行高红移类星体候选体的挑选^[22-26].

美国的WISE红外卫星提供了超过一定亮度极限、从3.3~22 μ m的四波段(W1~W4)全天红外测光数据^[39]. 尽管WISE只是一个口径40 cm的小卫星, 但它对红移5以上高红移类星体的探测率超过70%. 因此, 利用WISE红外卫星数据可以帮我们选取高红移类星体. 在利用SDSS光学数据和WISE红外测光数据对已知类星体进行分析的基础上^[40], 我们提出了利用光学和红外测光数据选取高红移类星体候选体的新方法, 即利用光学颜色来区分高红移类星体与低红移类星体, 再利用红外颜色来区分高红移类星体与晚型恒星. 利用此方法我们选取了上百个高红移类星体候选体, 并利用国内2 m级望远镜及国外2~6 m级望远镜开展了发现光度极大高红移类星体的观测研究.

在我们选取候选体的过程中, 一个源SDSS J0100+2802非常特别. 其*i*'波段星等为20.8等, *z*'波段星等为18.3等, 光学的其他波段没有探测到, 但在红外波段看起来较亮. 这些特征与红移6以上的类星体非常符合, 而且利用我们的测光红移程序也估计其红移在6.3左右. 2013年12月底我们使用中国科学院云南天文台丽江2.4 m望远镜拍摄了这个源的第一个光谱, 证实其为一个红移6.2以上的类星体. 2014年1月我们利用美国6.5 m多镜面望远镜(MMT)望远镜和8.4 m大双筒望远镜(LBT)所拍的更高质量的光学光谱进一步证实其红移为6.30(图2). 这一类星体距离我们128亿光年, 发光强度是太阳光度430万亿倍, 比以前发现的光度最大高红移类星体还要亮4倍, 成为早期宇宙中光度最大的类星体^[6].

利用LBT望远镜的高质量光学光谱, 我们可以清楚地看到SDSS J0100+2802 的光谱在Ly α 发射线左端存在明显的Gunn-Peterson吸收槽^[41], 这来自于宇宙再电离时期中性星系际介质的吸收. 利用这一特征, 我们估计这一类星体近邻电离区的大小为7.9 Mpc (1 Mpc为3.26百万光年). 这一尺寸大于所有已知红移6.1以上类星体的近邻电离区大小(如 SDSS J1148 + 5251 为4.9 Mpc)^[15]. 这一结果与SDSS J0100+2802比其他高红移类星体具有更强的紫外辐射光度是相符合的.

由于用于确定中心黑洞质量的宽发射线, 如MgII和CIV, 已红移至近红外波段, 我们申请利用3台国外望远镜, 美国LBT、双子座望远镜(Gemini)和智利的麦哲伦望远镜(Magellan)对这个类星体进行了近红外光谱观测, 最终得到了质量非常好的近红外光谱. 利用近红外光谱中的MgII发射谱线宽度和连续谱光度, 我们可准确地估计出这颗类星体中心黑洞质量为120亿太阳质量. 在与其他高红移类星体进行比较后, 我们确信这一类星体是宇宙早期黑洞质量最大、光度最高的类星体(图3).

这一在宇宙只有9亿年时就存在的、中心黑洞质量为120亿太阳质量、光度超大的类星体的发现对宇宙早期黑洞的形成与增长理论提出了严峻的挑战. 现有的理论认为在黑暗时期结束后早期宇宙第一代天体的形成大约是在大爆炸后3~4亿年, 如果早期黑洞是第一代恒星(质量约100太阳质量)的塌缩而形成的, 它由于快速吸积周围物质导致质量指数增长的时标是约4千万年. 因此, 从第一代天体形成到存

图2 用2.4 m、MMT和LBT望远镜观测的红移为6.3的类星体SDSS J0100+2802的光学光谱以及与以前光度最大的高红移类星体SDSS J1148+5251的比较。最上面两光谱向上方有移动^[6]

Figure 2 The optical spectra of SDSS J0100+2802 obtained by 2.4 m, MMT and LBT telescopes, in comparison with the spectrum of SDSS J1148+5251, the previously known high redshift quasar with the highest luminosity^[6]

图3 红移为6.3的类星体SDSS J0100+2802(红色)与其他高红移类星体(蓝色、棕色、绿色)、低红移类星体(灰点及等轮廓图)的黑洞质量与光度的比较^[6]

Figure 3 The comparisons in black hole masses and luminosities of the quasar of redshift 6.3 (in red) with other high redshift quasars (in blue, brown and green) and low redshift quasars (in grey and black)^[6]

在120亿太阳质量的黑洞这期间只有5~6亿年。即使假设这一黑洞从大爆炸开始后不久就开始增长,不到10亿年也只相当于约25倍的指数增长时标。在如此短的时间里最多能把黑洞增长到几亿倍太阳质量,完全不足以增长到120亿太阳质量。因此,这一

宇宙早期超级黑洞的发现确实难以用现有理论很好地予以解释^[42,43],需要对理论进行进一步地改进。

目前看来,对宇宙早期这一超级黑洞形成的可能途径有以下两种:一是在黑洞增长过程中存在超爱丁顿吸积,即黑洞以一种在单位时间里所吸积的物质超出一般类星体吸积物质几十甚至上百倍的非寻常过程迅速增加其质量;二是该黑洞在形成黑洞之初其种子黑洞的质量就远比第一代恒星塌缩形成的100太阳质量的黑洞重1000倍以上,即具有10万以上太阳质量的种子黑洞。但是,这两种极端情形都还缺乏理论和观测上的有力支持。也有人提出黑洞的合并会加速黑洞质量的增长,但如何做到既能有效地合并黑洞,又能导致类星体的极高光度,目前还没有令人满意的理论解释。

4 高红移类星体寄主星系的观测研究

对近邻宇宙中星系的研究发现,星系中心超大质量黑洞的质量与其所在的寄主星系的核球的质量、光度以及恒星速度弥散之间,存在着很好的相关性^[44]。这意味着超大质量黑洞和寄主星系的早期演化有着紧密的联系。在 $z \sim 6$ 以及更高红移发现的极高光度的类星体,代表着再电离末期形成的第一代超大质量黑洞-星系系统,其中的超大质量黑洞正处于高速吸积、剧烈演化的阶段^[24,27,36]。对它们的进一步观测研究,可对宇宙早期黑洞和寄主星系共同演化的关键性问题给出重要限制:比如这些宇宙早期的类星体寄主星系是如何增长质量的,其中是否存在着剧烈的恒星形成活动?其中是否存在大量的气体,为黑洞和寄主星系的演化提供原料?是否存在中心活动星系核对寄主星系反馈的证据?这些宇宙早期的黑洞-星系系统是否满足与邻近宇宙相同的相关性?随着近十几年来 $z > 5.7$ 的类星体被不断发现,人们开始利用亚毫米、毫米和射电波段望远镜的观测,寻找这些宇宙早期类星体寄主星系中的气体、尘埃和恒星形成活动,从而深入研究这些年轻类星体寄主星系的演化特征,并且寻找超大质量黑洞制约寄主星系演化的证据。

星系中剧烈的恒星形成活动可以有效的加热星系中的尘埃,在远红外波段形成很强的尘埃连续谱辐射,对于 $z > 5.7$ 的星系,尘埃辐射的峰值红移到了亚毫米波段。因此,在亚毫米、毫米波段对大量已知

的 $z \geq 5.7$ 类星体的观测成为搜索其寄主星系恒星形成活动的主要手段。从2003年至今,人们利用詹姆斯韦克望远镜(JCMT)以及IRAM30米望远镜,对约56个 $z \geq 5.7$ 类星体进行了亚毫米波观测,在其中15个源中探测到了尘埃连续谱辐射^[12,45-50]。使用赫歇尔空间望远镜以及加州理工学院的毫米波望远镜的进一步观测指出,这些毫米波明亮的 $z \geq 5.7$ 类星体尘埃温度在40~60 K,远红外光度在几倍于 $10^{12} \sim 10^{13}$ 太阳光度,和近邻宇宙中有着剧烈恒星形成活动的极亮、超亮红外星系相当^[51,52]。如果假设标准的恒星形成初始质量函数,估算出的恒星形成率可以达到几百甚至超过1000太阳质量/年。也就是说,这些毫米波明亮的 $z \geq 5.7$ 类星体中,在中心大质量黑洞高速吸积释放巨大能量的同时,其寄主星系正在进行大规模的恒星形成活动,不断增长质量,它们正处于超大质量黑洞和寄主星系共同演化的阶段。

此外,尘埃连续谱的观测给出寄主星系中尘埃的质量均在 10^8 太阳质量的量级上^[12,49,51,52]。这些尘埃形成于宇宙年龄大约甚至不到1亿年的时间内,而已知的邻近宇宙中主要的尘埃形成机制,即尘埃在小质量恒星演化晚期的星风中形成,需要的演化时标一般在 >1 Gyr。因此,在这些 $z \sim 6$ 类星体的寄主星系中,早期尘埃形成的主要机制很可能与大质量恒星的演化有关^[53,54]。

另一方面,分子CO谱线也在亚毫米、毫米波明亮的 $z \geq 5.7$ 类星体中被探测到。分子CO谱线是研究星系中分子气体质量、分布、和动力学性质的主要探针之一^[55]。对这些宇宙早期类星体的观测结果表明,其寄主星系中存在着大量的分子气体($\sim 10^{10}$ 太阳质量),这些气体为恒星形成提供必需的原料^[56-60]。对光度的分析给出,这些源远红外与分子CO谱线光度的比值与极亮红外星系、亚毫米波星系等这些存在着大量尘埃和剧烈的恒星形成活动的系统的典型取值范围一致。人们进而对其中比较明亮的毫米波探测类星体,SDSS J1148+5251(红移 $z=6.42$)进行了深入观测,探测到了CO(3-2), CO(6-5), CO(7-6)多条谱线^[58]。利用分子CO激发的大速度梯度模型对观测结果进行拟合给出,产生这些CO谱线的分子气体密度在 $10^{4.2} \text{ cm}^{-3}$,运动学温度约为50 K,和星暴星系中探测到一些高激发的气体成分类似(如M82)^[62]。说明这些分子气体主要是被寄主星系中的恒星形成活动激

发的。IRAM毫米波干涉阵列(PdBI)和美国甚大望远镜阵列对SDSS J1148+5251寄主星系中CO(7-6)和CO(3-2)的高分辨率观测给出,这些分子气体大概分布在5 kpc左右的区域内^[56,58](1 kpc为3260光年)。另外,Gallerani等在SDSS J1148+5251中还探测到了CO(17-16)谱线辐射^[61],表明其中还存在着一个由中心活动星系核激发的分子气体成分,成为高阶分子CO辐射的主要来源^[55]。

2009年Walter等利用欧洲PdBI望远镜对SDSS J1148+5251中的[CII]158 μm 精细结构谱线进行了高分辨率的成图观测^[11]。[CII]158 μm 谱线是恒星形成区重要的冷却谱线之一,可以很好地描述星系中恒星形成活动的分布、表面密度、以及气体的面密度、运动学性质等。SDSS J1148+5251的[CII]观测给出其恒星形成率表面密度的峰值大概在每 kpc^2 面积每年1000太阳质量。2012年Maiolino等人^[53,63]对[CII]谱线的高信噪比观测进一步给出,在该系统中,除了已发现的来自中心几个kpc尺度内的恒星形成区的[CII]辐射外,还存在着一个更为延展的[CII]辐射成分,其尺度在16 kpc左右,谱线半高全宽为2000 km/s。这一成分很可能来自于由活动星系核驱动的气体外向流,这一发现成为宇宙早期类星体对寄主星系反馈的重要证据。2012年,我们利用位于智利的阿塔卡玛大型毫米波天线阵列(ALMA)将对[CII]的探测拓展到了其他毫米波明亮的 $z \geq 5.7$ 类星体^[13]。我们在5个红移6的类星体中探测到了明亮的[CII]发射线,在0.6角秒左右的分辨率下,我们分析得到发射线源的尺度在0.3~0.6角秒(图4)。也就是说,和SDSS J1148+5251类似,这些系统中主要的恒星形成活动分布在中心核区几个kpc的范围内。其中3个源发射线的速度分布图延长轴方向显示出明显的速度梯度,这一速度分布显示其气体成分有可能分布在一个旋转的盘状结构上(见图5)。

对 $z \geq 5.7$ 类星体寄主星系中尘埃和气体的观测为人们研究其演化特征提供了重要的线索^[13,64]。通过CO和[CII]的谱线宽度以及辐射区域的尺度,人们可以粗略地估算类星体寄主星系的动力学质量,从而得到中心黑洞与寄主星系质量的比值。目前对于几个毫米波明亮的 $z \geq 5.7$ 类星体的估算给出其黑洞与寄主星系质量的比值比邻近宇宙的典型值高几倍到一个量级左右^[13,64,65]。但是由于缺乏气体分布、动力学性质的详细信息(比如气体是否分布在一个盘上、盘

图4 ALMA观测到的红移 $z=6.13$ 类星体ULAS J1319+0950寄主星系中[CII]发射线的积分流量图。等强度线对应 $[-2, 2, 4, 6, 8, 10, 12] \times 0.18 \text{ Jy Beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ 。图中加号代表类星体的光学位置。二维高斯拟合给出[CII]谱线辐射的尺度(FWHM)大概在 $0.6 \times 0.4 \text{ arcsec}^2$ ，表明类星体中剧烈的恒星形成活动分布在核区几千秒差距的尺度上^[13]

Figure 4 The ALMA integrated flux map of [CII] emission line for ULAS J1319+0950, a quasar with redshift $z=6.13$ ^[13]

的旋转速度、与观测者视线方向夹角等等)，这些估算仍存在着很大的不确定性，还需要更高空间分辨率的观测来予以证实。目前的大型毫米和射电波段的望远镜阵列(如ALMA)有着很高的谱线灵敏度和极强的空间分辨能力，可以探测到宇宙极早期恒星形成星系中分子、原子和电离气体谱线的辐射，同时可将这些辐射在千秒差距(kpc)的尺度上进行分辨。通过进一步的观测，人们将可以详细地测量这些年轻的类星体寄主星系中气体和恒星形成活动的分布、表面密度、气体的典型温度、密度以及速度分布等信息。同时对气体的动力学性质进行深入的研究，对类星体寄主星系的质量给出更准确的测量。这些是我们理解宇宙早期超大质量黑洞与寄主星系共同演化过程的关键。

5 总结与展望

高红移类星体是我们研究早期宇宙的宝贵探针，对高红移类星体的观测研究无疑具有重要的宇宙学意义。发现高红移类星体通常需要利用光学、红外大天区面积的巡天测光数据来选取候选体，并利用中大型望远镜的光学、近红外光谱观测对候选体进行证认。近年来我们在发现极高光度高红移类星体上取

图5 ALMA观测到的红移 $z=6.13$ 类星体ULAS J1319+0950中[CII]发射线的速度分布图。速度分布延长轴方向显示出明显的速度梯度^[13]

Figure 5 The ALMA velocity map of [CII] emission line of ULAS J1319+0950, a quasar with redshift $z=6.13$ ^[13]

得了显著进展，所发现的一个红移6.3、黑洞质量为120亿太阳质量的宇宙早期光度最大类星体对现有的早期黑洞形成与增长理论提出了挑战。利用亚毫米、毫米和射电波段望远镜的观测，我们可以对这些宇宙早期类星体寄主星系中的气体、尘埃和恒星形成活动开展研究，并寻找超大质量黑洞制约寄主星系演化的证据。

目前，高红移类星体研究还面临很多挑战。首先，高红移类星体的发现数目还很少，这给我们开展对它们物理性质的统计研究带来了困难。另一方面，由于高红移类星体主要的观测特征已红移到红外和毫米波段，这使得对它们的高分辨率和高信噪比的细致观测研究即使用目前最好的望远镜也很难开展，导致一些观测结果还有很大的不确定性。但未来十年内国际上即将开展的大型光学与红外巡天，如LSST、WFIRST等，将为我们提供选取更多高红移类星体候选体的机会。而大型的光学/红外精确望远镜，如30 m望远镜(TMT)和巨型Magellan望远镜(GMT)等的建成，将使我们有能力发现数以百计的红移7以上的类星体。可以预期，在不久的将来我们将能利用更多的高红移类星体对早期宇宙的物理性质进行更深入仔细的研究。

参考文献

- 1 Mortlock D J, Warren S J, Venemans B P, et al. A luminous quasar at a redshift of $z=7.085$. *Nature*, 2011, 474: 616–619
- 2 Antonucci R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annu Rev Astron Astr*, 1993, 31: 473–521
- 3 Jiang L, Fan X, Brandt W N, et al. Dust-free quasars in the early Universe, *Nature*, 2010, 464: 380–383
- 4 Steffen A T, Strateva I, Brandt W N, et al. The X-ray-to-optical properties of optically selected active galaxies over wide luminosity and redshift ranges. *Astron J*, 2006, 131: 2826–2842
- 5 Shemmer O, Brandt W N, Vignali C, et al. The X-ray spectral properties and variability of luminous high-redshift active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2005, 630: 729–739
- 6 Shemmer O, Brandt W N, Schneider D P, et al. Chandra observations of the highest redshift quasars from the sloan digital sky survey. *Astrophys J*, 2006, 644: 86–99
- 7 Jiang L, Fan X, Vestergaard M, et al. Gemini near-infrared spectroscopy of luminous $z\sim 6$ quasars: Chemical abundances, black hole masses, and Mg II absorption. *Astron J*, 2007, 134: 1150–1161
- 8 Kurk J D, Walter F, Fan X, et al. Black hole masses and enrichment of $z\sim 6$ SDSS quasars. *Astrophys J*, 2007, 669: 32–44
- 9 De Rosa G, Decarli R, Walter F, et al. Evidence for non-evolving Fe II/Mg II ratios in rapidly accreting $z\sim 6$ QSOs. *Astrophys J*, 2011, 739: 56–69
- 10 Wu X B, Wang F, Fan X, et al. An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30. *Nature*, 2015, 518: 512–515
- 11 Walter F, Riechers D, Cox P, et al. A kiloparsec-scale hyper-starburst in a quasar host less than 1 gigayear after the Big Bang. *Nature*, 2009, 457: 699–701
- 12 Wang R, Wagg J, Carilli C L, et al. Far-infrared and molecular CO emission from the host galaxies of faint quasars at $z\sim 6$. *Astron J*, 2011, 142: 101–110
- 13 Wang R, Wagg J, Carilli C L, et al. Star formation and gas kinematics of quasar host galaxies at $z\sim 6$: New insights from ALMA. *Astrophys J*, 2013, 773: 44–53
- 14 Ade P A R, Aghanim N, Arnaud M, et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. 2015, arXiv:1502.01589
- 15 Fan X, Carilli C L, Keating B. Observational constraints on cosmic reionization. *Annu Rev Astron Astr*, 2006, 44: 415–462
- 16 White R L, Becker R H, Fan X, et al. Probing the ionization state of the Universe at $z>6$. *Astron J*, 2003, 126: 1–14
- 17 Carilli C L, Wang R, Fan X, et al. Ionization near zones associated with quasars at $z\sim 6$. *Astrophys J*, 2010, 714: 834–839
- 18 McGreer I D, Mesinger A, Fan X. The first (nearly) model-independent constraint on the neutral hydrogen fraction at $z\sim 6$. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 3237–3246
- 19 York D G, Adelman J, Anderson J E, et al. The sloan digital sky survey: Technical summary. *Astron J*, 2000, 120: 1579–1587
- 20 Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey. *Astron J*, 2006, 131: 2332–2359
- 21 Ahn C P, Alexandroff R, Allende Prieto C, et al. The ninth data release of the sloan digital sky survey: First spectroscopic data from the SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey. *Astrophys J Suppl S*, 2012, 203: 21–33
- 22 Fan X, Strauss M A, Schneider D P, et al. A Survey of $z>5.7$ quasars in the sloan digital sky survey. II. Discovery of three additional quasars at $z>6$. *Astron J*, 2003, 125: 1649–1659
- 23 Fan X, Hennawi J F, Richards G T, et al. A survey of $z>5.7$ quasars in the sloan digital sky survey. III. Discovery of five additional quasars. *Astron J*, 2004, 128: 515–522
- 24 Fan X, Strauss M A, Richards G T, et al. A survey of $z>5.7$ quasars in the sloan digital sky survey. IV. Discovery of seven additional quasars. *Astron J*, 2006, 131: 1203–1209
- 25 Jiang L, Fan X, Annis J, et al. A survey of $z\sim 6$ quasars in the sloan digital sky survey deep stripe. I. A flux-limited sample at $z_{AB}<21$. *Astron J*, 2008, 135: 1057–1066
- 26 Jiang L, Fan X, Bian F, et al. A survey of $z\sim 6$ quasars in the sloan digital sky survey deep stripe. II. Discovery of six quasars at $z_{AB}>21$. *Astron J*, 2009, 138: 305–311
- 27 Jiang L, McGreer I D, Fan X, et al. Discovery of eight $z\sim 6$ quasars in the sloan digital sky survey overlap regions. *Astron J*, 2015, 149: 188
- 28 Willott C J, Delfosse X, Forveille T, et al. First results from the Canada-France high- z quasar survey: Constraints on the $z=6$ quasar luminosity function and the quasar contribution to reionization. *Astrophys J*, 2005, 633: 630–637
- 29 Warren S J, Hambly N C, Dye S, et al. The United Kingdom Infrared Telescope Infrared Deep Sky Survey first data release. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 375: 213–226

- 30 Willott C J, Delorme P, Omont A, et al. Four quasars above redshift 6 discovered by the Canada-France High- z Quasar Survey. *Astron J*, 2007, 134: 2435–2450
- 31 Willott C J, Delorme P, Reyle C, et al. Six more quasars at redshift 6 discovered by the Canada-France High- z Quasar Survey. *Astron J*, 2009, 137: 3541–3547
- 32 Willott C J, Delorme P, Reyle C, et al. The Canada-France High- z Quasar Survey: Nine new quasars and the luminosity function at redshift 6. *Astron J*, 2010, 139: 906–918
- 33 Venemans B P, McMahon R G, Warren S J, et al. The discovery of the first luminous $z \sim 6$ quasar in the UKIDSS large area survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: 76–80
- 34 Mortlock D J, Patel M, Warren S J, et al. Photometric constraints on white dwarfs and the identification of extreme objects. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 399: 699–714
- 35 Morganson E, De Rosa G, Decarli R, et al. The First High-redshift Quasar from Pan-STARRS. *Astron J*, 2012, 143: 142–149
- 36 Banados E, Venemans B P, Morganson E, et al. Discovery of eight $z \sim 6$ quasars from Pan-STARRS1. *Astron J*, 2014, 148: 14–25
- 37 Venemans B P, Banados E, Decarli R, et al. The identification of z -dropouts in Pan-STARRS1: Three quasars at $6.5 < z < 6.7$. *Astrophys J*, 2015, 801: 11–17
- 38 Venemans B P, Findlay J R, Sutherland W J, et al. Discovery of three $z > 6.5$ quasars in the VISTA Kilo-Degree Infrared Galaxy (VIKING) survey. *Astrophys J*, 2013, 779: 24–36
- 39 Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance. *Astron J*, 2010, 140: 1868–1881
- 40 Wu X B, Hao G, Jia Z, et al. SDSS quasars in the WISE preliminary data release and quasar candidate selection with optical/infrared colours. *Astron J*, 2012, 144: 49–59
- 41 Gunn J E, Peterson B A. On the density of neutral hydrogen in intergalactic space. *Astrophys J*, 1965, 142: 1633–1641
- 42 Volonteri M. The formation and evolution of massive black holes. *Science*, 2012, 337: 544–547
- 43 Alexander T, Natarajan P. Rapid growth of seed black holes in the early universe by supra-exponential accretion. *Science*, 2014, 345: 1330–1333
- 44 Kormendy J, Ho L C. Coevolution (Or Not) of supermassive black holes and Hhost galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 2013, 51: 511–653
- 45 Priddey R S, Isaak K G, McMahon R G, et al. Quasars as probes of the submillimetre cosmos at $z > 5$ - I. Preliminary SCUBA photometry. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 344: L74–L78
- 46 Robson I, Priddey R S, Isaak K G, et al. Submillimetre observations of $z > 6$ quasars. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 351: L29–L33
- 47 Bertoldi F, Carilli C L, Cox P, et al. Dust emission from the most distant quasars. *Astron Astrophys*, 2003, 406: L55–L58
- 48 Petric A O, Carilli C L, Bertoldi F, et al. Sensitive observations at 1.4 and 250 GHz of $z > 5$ QSOs. *Astron J*, 2003, 126: 15–23
- 49 Wang R, Carilli C L, Beelen A, et al. Millimeter and Radio observations of $z \sim 6$ quasars. *Astron J*, 2007, 134: 617–627
- 50 Omont A, Willott C J, Beelen A, et al. The Canada-France High- z Quasar Survey: 1.2 mm observations. *Astron Astrophys*, 2013, 552: 43–47
- 51 Beelen A, Cox P, Benford D J, et al. 350 μm dust emission from high-redshift quasars. *Astrophys J*, 2006, 642: 694–701
- 52 Leipski C, Meisenheimer K, Walter F, et al. Complete infrared spectral energy distributions of millimeter detected quasars at $z > 5$. *Astrophys J*, 2013, 772: L103–L117
- 53 Valiante R, Schneider R, Maiolino R, et al. Quasar feedback in the early Universe: the case of SDSS J1148+5251. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: L60–L64
- 54 Vallini L, Gallerani S, Ferrara A, et al. Far-infrared line emission from high-redshift galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 1567–1572
- 55 Carilli C L, Walter F. Cool gas in high-redshift galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 2013, 51: 105–161
- 56 Walter F, Bertoldi F, Carilli C, et al. Molecular gas in the host galaxy of a quasar at redshift $z = 6.42$. *Nature*, 2003, 424: 406–408
- 57 Carilli C L, Neri R, Wang R, et al. Detection of $1.6 \times 10^{10} M_{\text{Solar}}$ of molecular gas in the host galaxy of the $z = 5.77$ SDSS quasar J0927+2001. *Astrophys J*, 2007, 666: L9–L12
- 58 Riechers D A, Walter F, Bertoldi F, et al. Imaging atomic and highly excited molecular gas in a $z = 6.42$ quasar host galaxy: Copious fuel for an eddington-limited starburst at the end of cosmic reionization. *Astrophys J*, 2009, 703: 1338–1345
- 59 Wang R, Carilli C L, Neri R, et al. Molecular gas in $z \sim 6$ quasar host galaxies. *Astrophys J*, 2010, 714: 699–712
- 60 Wang R, Wagg J, Carilli C L, et al. CO (2-1) line emission in redshift 6 quasar host galaxies. *Astrophys J*, 2011, 739: L34–L39
- 61 Gallerani S, Ferrara A, Neri R, et al. First CO(17-16) emission line detected in a $z > 6$ quasar. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 445: 2848–2853
- 62 Weiss A, Walter F, Scoville N Z. The spectral energy distribution of CO lines in M 82. *Astron Astrophys*, 2005, 438: 533–544

- 63 Maiolino R, Gallerani S, Neri R, et al. Evidence of strong quasar feedback in the early Universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 425: L66–L70
- 64 Willott C J, Bergeron J, Omont A. Star formation rate and dynamical mass of 10^8 solar mass black hole host galaxies At redshift 6. *Astrophys J*, 2015, 801: 123–132
- 65 Walter F, Carilli C, Bertoldi F, et al. Resolved molecular gas in a quasar host galaxy at redshift $z=6.42$. *Astrophys J*, 2004, 615, L17–L20

Observational studies on high-redshift quasars

JIANG LinHua¹, WU XueBing^{1,2}, WANG Ran¹, WANG FeiGe^{1,2} & FAN XiaoHui^{3,1}

¹*Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;*

²*Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

³*Steward Observatory, University of Arizona, Tucson AZ 85721, USA*

The discovery of high-redshift quasars with redshift higher than 6, which exist when the Universe was only 1 billion years after the Big Bang, provides important probes to help us study the early Universe. This makes the observational study of high-redshift quasars becoming a hot topic in the research frontiers of galaxies and cosmology. In this review, we stress the importance and cosmological implications of observational study of high-redshift quasars, introduce our recent discovery of an ultra-luminous quasar with a 12 billion solar mass black hole at redshift 6.3, and summarize the observational results on the host galaxies of high-redshift quasars. In addition, we present our perspectives on the future study and the challenges in this field.

high-redshift, quasar, supermassive black hole, cosmic reionization, host galaxy

doi: 10.1360/N972015-00430