

搜寻高红移类星体*

左文文¹ 吴学兵^{2,3,†}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 北京大学物理学院天文学系 北京 100871)

(3 北京大学科维理天文与天体物理研究所 北京 100871)

2015-07-21 收到

† email: wuxb@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160101

The search for high-redshift quasars

ZUO Wen-Wen¹ WU Xue-Bing^{2,3,†}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(2 Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(3 Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 2015年,以中国天文学家为主的国际研究团队宣布发现了目前已知的宇宙早期发光本领最强、中心黑洞质量最大的类星体。这颗类星体 SDSS J0100+2802 如同一座最明亮的灯塔照亮了人类探索神秘的早期宇宙的道路,它的发现刷新了人类使用2米级望远镜发现高红移类星体的纪录,更对宇宙早期黑洞的成长理论提出了新的挑战。文章将着重介绍:(1)类星体的发现;(2)类星体的本质以及描述其物理性质的参数;(3)研究类星体的重大科学意义;(4)类星体尤其是高红移类星体的搜寻方法;(5)最亮的高红移类星体的发现历程;(6)对今后高红移类星体研究的展望。

关键词 类星体, 黑洞, 高红移, 宇宙早期, 演化

Abstract In 2015, an international team consisting of mainly Chinese astronomers announced the discovery of the most luminous quasar in the early Universe, powered by the most massive black hole known at the time. The discovery of this quasar, named SDSS J0100+2802, set a new record in the discovery of high redshift quasars with 2-meter telescopes, and sheds light just like a lighthouse to help us know more about the early Universe. Moreover, it presents substantial challenges to theories of the formation and growth of black holes in the early Universe. This article will discuss the following topics: (1) the historical discovery of quasars; (2) the nature of quasars and parameters to describe them; (3) the scientific motivation to study quasars; (4) the ways to select quasars, especially high redshift quasars; (5) how we discovered the quasar SDSS J0100+2802; (6) a perspective of future research on high redshift quasars.

Keywords quasar, black hole, high-redshift, early Universe, evolution

1 中国团队的新发现

2015年2月26日,国际顶级期刊《自然》刊登了以中国天文学家为主的国际团队的最新发

现:我们团队利用云南丽江2.4 m望远镜发现了红移为6.3、距离我们128亿光年的超亮类星体,它是目前已知的早期宇宙中最明亮(光度约为430万亿倍太阳光度)、中心黑洞质量最大(约为120亿个太阳质量)的类星体(图1)^[1]。CNN(美国有线电视

* 国家自然科学基金(批准号:11373008;11533001)资助项目



图1 类星体中心黑洞想象图(中国科学院上海天文台李兆丰供图)

新闻网)、华盛顿邮报、路透社、时代杂志、国家地理、发现频道、联合早报、中国日报、人民日报、光明日报、新华网和中国中央电视台等海内外数百家媒体对该工作进行了报道或新闻转载,在国际上引起了较大反响。

就让我们以这一新发现抛“砖”引玉,在本文中对以下问题逐一探讨并做出回答:类星体是什么,是恒星还是星系?类星体何时被第一次发现?它与爱因斯坦的理论有什么渊源?这颗红移为6.3的类星体到底是如何被发现的?它有什么重要意义?它的发现与黑洞成长、黑洞与星系协同演化以及宇宙空间内物质分布的研究有何关系?

2 类星体与黑洞

2.1 黑洞的理论解和类星体的发现

早期的黑洞研究主要依赖于对广义相对论的核心内容——爱因斯坦场方程进行求解。自从1915年爱因斯坦提出广义相对论之后,面对不易求解的爱因斯坦场方程,仍然有相当数量的精确解被相继提出。其中只有一部分精确解具有一定的物理意义,例如1916年卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild)提出的描述不带电静态黑洞的史瓦西解和1963年罗伊·克尔(Roy Kerr)提出的描述不带电旋转黑洞的克尔解等。

20世纪60年代左右,物理学家就已通过推导爱因斯坦场方程发现,当一个星体足够致密时,强大的引力将包括光子在内的所有粒子束缚在时空中的一块被极端扭曲的区域中,因此,这个天体应该是黑的。1967年,美国学者惠勒(John Wheeler)将具有这样性质的天体命名为“黑洞”。尽管大家知道广义相对论做了此预测,却没有认真考虑过黑洞这个概念,直到类星体的发现。

20世纪50年代,人们把在第二次世界大战中发展起来的雷达探测技术应用于天文学研究,引起了射电天文学的迅速发展。天文学家发现,有些天体能发出非肉眼可见的射电辐射(无线电波),这类天体被统称为射电源。1950年,英国剑桥大学天文研究所的科学家把人们发现的射电源汇总编制成表格,其中天体的编号以剑桥(Cambridge)的首字母C打头。后来又出版了这个星表的第三版,即《剑桥射电源第三星表》(*Third Cambridge Catalogue of Radio Sources*),简称为3C表,其中的天体编号以3C作为前缀^[2]。这个表收录的射电源更为完整。

要想知道这些射电源的本质,辨识出它们在可见光波段的“光学对应体”就非常重要。1960年,英国天文学家桑德奇(Allan Sandage)等发现了标号为3C48的射电源的光学对应体,光学图像看起来类似恒星^[3],光学光谱中呈现了一些在恒星光谱中未曾见过的谱线;1962年,标号为3C273的射电源的光学对应体也被发现了,它同样呈点状,类似恒星;1963年美国天文学家施密特(Maarten Schmidt)拍摄了它的光学光谱,并发现其与3C48的光谱相似,同时成功辨认出光谱中最亮的谱线对应的就是红移之后的H元素的发射线,并测得其红移是0.158^[4]。

随后,一些光学性质相似的射电源相继被发现,这类天体由于同时具有光学波段图像类似恒星和隶属于射电源这两个特征,因此被称为“类星射电源”。除了类星射电源之外,天文学家们还发现了一些光学性质相似的天体,但却不发出射电辐射。因为它们的光学像呈蓝色,所以又名“蓝星体”。

不论是“类星射电源”还是“蓝星体”，它们都有一个共同点——光学像类似恒星，但光谱显示它们都是有较大红移的银河系外天体，后来就被统称为“类星体”。

类星体的发现带来了一个难题——类星体的能量之谜。类星体发出的光的强度一般都存在变化(即光变)。从光变的典型时标(也就是时间尺度)，天文学家估计出类星体发出光学辐射的区域很小，只有几光天到几光年。如此小的发光区域，每秒钟释放的能量为什么却比体型比它大几十万甚至千万倍的普通星系每秒释放出的能量还大上千倍？这使天文学家和宇宙学家陷入了沉思，是否在一些理论中已经存在关于类星体性质的一些线索呢？

2.2 黑洞的理论解因类星体而重新被关注

基于类星体的小尺度和大能量，其能量转换效率远不是恒星内部的核反应所能解释的。后来天文学家发现，这可以用中心致密天体周围的物质所释放出的巨大引力能来解释。在排除了多个可能之后，黑洞这一理论上已经存在的推测才重新引起了人们的关注——人们认为最可能的中心致密天体就是超大质量黑洞^[5-7]。

1980年，天文学家发现了3C273周围的星云状物质，从而确定出它的本质——星系^[8]。类星体周围有星云状物质，这说明了黑洞位于星系的中心，黑洞确实存在。这方面的另一证据，已经从邻近的星系中心观测到有大量的物质从中心喷发出来，而这种现象说明了黑洞的存在。

实际上，在20世纪70年代左右，俄罗斯的森亚叶夫(Rashid Alievich Sunyaev)等发现，有大量的恒星是以双星形式存在，即双星系统。如果在一个双星系统中，一颗恒星塌缩形成了黑洞，那另一颗恒星将继续围绕它运动。但因为黑洞无法可见，整个系统看起来好像是一颗恒星孤立地围绕某一轨道运动。另外，他们还证明了，由于黑洞的巨大引力，黑洞将从其伴星上吸引物质，这一过程将产生大量的X射线辐射。他们认为，

如果某些天体符合这两个特征，将表明它们很可能是黑洞的候选体。终于，天文学家在1979年发现这样一个黑洞候选体^[9]。天鹅座X-1所在的天区中发现了X射线辐射，有一颗恒星看起来像是双星中的一颗，却看不到另一伴星。几年之后，天文学家证实了天鹅座X-1正是黑洞所在地。当然这是在类星体引起人们重新关注黑洞这一理论预测的实际可能性之后所发生的事情。

从1915年爱因斯坦场方程的提出，到预言黑洞存在的奇性解的提出，到类星体的发现引发物理学家对探索黑洞存在与否再次充满热情，到第一颗黑洞候选体的证实，到最后类星体本质的最终验明，一路的波澜起伏见证了黑洞从理论预言到普遍认为是实际存在的天体的过程，也正式开启了类星体领域的研究。类星体的本质是什么，这一问题在1963年的答案是：它不是恒星。1980年答案继续推进成：它是星系的中心致密区域，它的能量来源之谜可以用黑洞对物质的吸积来解释。

3 类星体的标准模型及其中心黑洞质量的测量

今天我们知道，类星体的本质不是恒星，也不是普通星系，而是属于“活动星系核”(active galactic nucleus, 简称AGN)这一类的天体，而且是活动性最强的一类活动星系核。尽管普通星系和活动星系的中心都存在质量在百万个太阳质量以上的黑洞，但两者是有差异的——主要在于普通星系的中心黑洞周围没有太多物质供它吞噬，所以普通星系中心的发光强度远远低于活动星系。

目前认为，类星体的结构如图2中的统一模型^[10]所示：中心是超大质量黑洞，黑洞的引力使得周围的物质不断向中心下落，这些物质具有初始角动量，因物质之间的粘滞力使得角动量由内向外转移，从而内层物质逐渐向中心坠落。长此以往，周围的物质像是为中心黑洞系上了一条天文学家称作“吸积盘”的腰带。吸积盘将通过黑体辐射机制发出从紫外到近红外的连续谱辐射。

除了连续谱辐射之外，类星体的光谱中还有宽发射线和窄发射线。一般认为，它们分别产生于吸积盘外面的宽发射线区和更外面的窄发射线区。目前普遍接受的产生发射线的主要机制是光致电离过程，但并非唯一机制，其他模型，例如激波激发模型等，也不能被完全排除。但在这里我们主要探讨光致电离机制，且以宽发射线的产生为例。

光致电离机制认为，吸积盘辐射的高能光子向外传播至宽线区，将电离构成宽线区的孤立气

体小云，产生自由电子和离子，自由电子又会被某个离子俘获，从而发生能级跃迁释放光子，产生原子发射谱线。因此，如果吸积盘提供的电离辐射发生变化，发射线也将随之变化。由于宽线区距离吸积盘有一定的距离，因此发射线的变化与吸积盘连续谱的辐射变化之间存在一定的延迟，相当于光从中心源运动至宽线区小云所需时间。故而，通过分析宽发射线相对于中心源的连续谱辐射的变化的响应，将可以得到宽线区尺度的信息，这种方法被称为反响映射方法(reverberation mapping)。造成类星体能量之谜问题的一方——类星体的小尺寸(几光天到几光年)信息，便是通过这一方法得知。

由于中心黑洞的引力束缚，构成宽线区的孤立气体小云围绕黑洞运动。多普勒效应——孤立气体小云在视线方向上时近时远的运动造成发射线的线心相对于其静止波长蓝移或红移——使得产生于宽线区的发射线被展宽，因此宽发射线的线宽可以用以估计气体小云围绕中心黑洞的旋转速度。

在宽线区之外的更大尺度上，存在一个由尘埃组成的尘埃环。高能光子会在这里被截获，尘埃环将发出红外波段的辐射。

黑洞的性质由质量、自旋和电荷三个参量来决定。目前，黑洞质量的测量方法争议性最小，那么天文学家如何测量出类星体中心的黑洞质量呢？我们知道，如果要测定地球的质量，可通过测量围绕地球旋转的月亮距离地球的远近以及月亮运动的速度，然后根据开普勒定律，就可以从速度与距离这两个参数推算出地球的质量。同样的原理可以被运用到类星体中黑洞质量的估算。

类星体的标准模型^[10]告诉我们，反响映射方法通过分析宽发射线相对于连续谱变化的响应(时间延迟)来确定宽线区的尺寸(时间延迟乘以光速)，即宽线区气体相对于中心黑洞的距离^[11, 12]；宽线区的发射线宽度可用以估计气体小云围绕中心黑洞的旋转速度^[12-14]；综合二者就可以估测出黑洞的质量^[15-19]。

具体到天文观测中，因为需要消耗大量的望

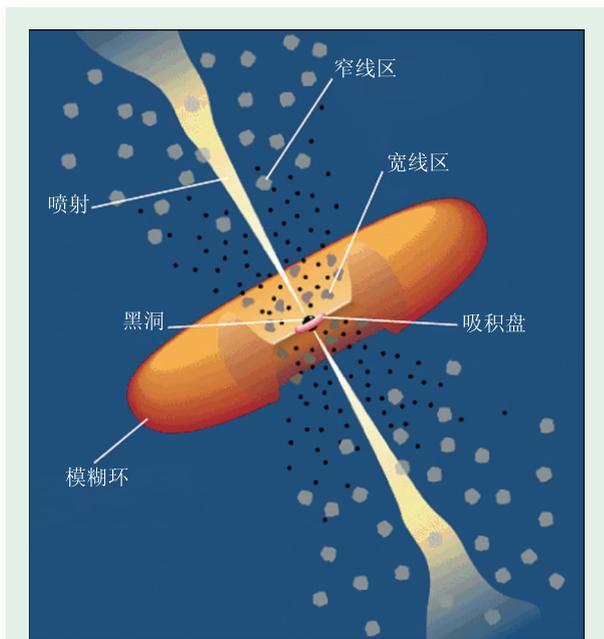


图2 类星体标准模型示意图^[10]

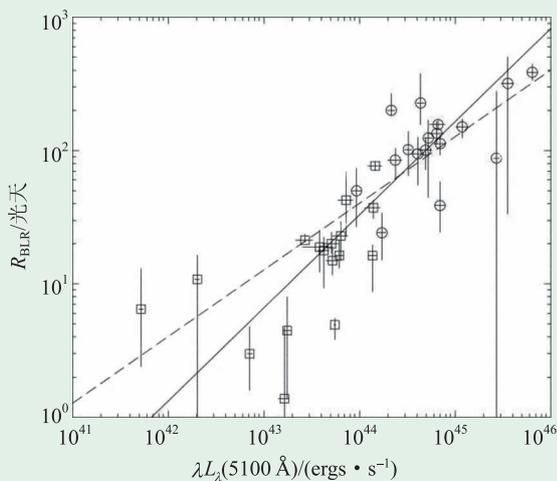


图3 最初获得的宽发射线区尺寸与连续谱在5100 Å处的单色辐射光度之间的经验关系^[11]

望远镜时间来观测获得长时间的光谱监测和光变数据,再由反响映射方法得到宽线区尺寸,观测成本很高。而且由于宇宙膨胀效应,离我们越远的高红移类星体时间延迟越长,也更难实现对它们的反响映射观测。庆幸的是,天文学家利用对数十个邻近类星体的测量得到了宽发射线区尺寸与连续谱单色辐射光度的可靠经验关系^[11, 12](图3),简而言之,即吸积盘高能光子的辐射(即光谱中的连续谱辐射)越强,就能电离越远的气体。

因此,天文学家只要对类星体做了单次光谱观测,通过测量光谱中宽发射线的宽度和连续谱单色辐射光度,就可以得到绕中心黑洞运动的宽线区气体的运动速度和离中心黑洞的距离,从而估测出黑洞的质量。

4 类星体是研究宇宙演化的重要工具

自1963年发现了第一个类星体以来,天文学家们通过大型数字巡天,已经发现了近30万颗类星体,分别分布于宇宙大爆炸之后7亿年至今,对应的宇宙学红移(由于宇宙膨胀,天体在离我们不断远去,导致我们接收到的光比天体本身发出的光的波长更长。二者之差与天体原发光波长之比称为红移)从7.085到0.05。

根据类星体的红移,可以推算出类星体相对地球的距离。根据红移,推算出的距离其实也对应了该天体所处的时空位置。通过一个例子可以更好地说明红移的意义:如果我们知道一个天体的年龄是宇宙大爆炸之后40亿年,而又因为可观测宇宙的总年龄约138亿年,那么我们便知道了今天我们接收到的该天体的光子实际上是98亿年前发出的,它距离我们98亿光年。

有了类星体的距离信息,又根据观测知道类星体看起来是多亮,便可以计算出类星体真实的亮度,即光度。在天文学中光度指天体每秒钟在各个波段释放的总能量。

从类星体的红移跨度范围就可以知道,类星体是迄今发现的最遥远的少数天体之一。目前已

知的类星体样本提供了最大的时间和空间跨度。样本中大部分类星体的重要信息——距离、黑洞质量和光度均可以被估测出来,这为了解宇宙中超大质量黑洞的形成与演化提供了直接和间接的证据,也为研究宇宙在不同时期的结构和演化提供了有利的工具,可作为来自宇宙演化各时期的信使。此外,黑洞质量与它们寄主星系的核球质量、光度或核球内恒星速度弥散之间的统计相关性,表明黑洞的质量增长与星系的演化密切相关^[21, 22]。可以说,通过对类星体的研究,理解超大质量黑洞的质量增长历史,对于研究黑洞与星系的共同演化也具有重要的意义。

5 如何搜寻类星体?

尽管类星体相对普通星系较亮而容易被现代望远镜观测到,但高红移类星体的搜寻却非常困难。接下来,我们将先简要介绍类星体的选源和证认方法。

类星体的选源过程是逐步递进的,主要依靠多色巡天数据。为了筛选出类星体候选体,首先依照类星体在光学像上成点状这一特点排除星系等弥散状天体;其次在所有的点源天体中,由于类星体的紫外超性质——来自黑洞吸积盘的紫外和光学波段辐射强,根据不同波段的颜色来区分恒星和类星体候选体。这当然需要确定筛选标准。如何有一个好的筛选标准呢?

假设你有一个由恒星和类星体组成的大样本,该样本中的天体类别是已知的。你将这一样本随机分成两个子样本,一个子样本称为训练样本,另一个子样本为测试样本。通过分析训练样本中的颜色信息,找到区分已知恒星和已知类星体的标准,然后将这一标准运用至测试样本,检验筛选出的结果。判断筛选出的结果的好坏有两个标准——完整性和有效性^[23]。完整性指从测试样本中筛选出的已知类星体数目/测试样本中类星体总数目,而有效性指从测试样本中筛选出的已知类星体数目/筛选出的“类星体”样本中天体数目。一个好的标准要保证完整性和有效性都

较高。

为类星体选源和证认作出巨大贡献的项目之一便是美国的斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS^[24]), 它完成了光学波段从蓝到红5个颜色 u' 、 g' 、 r' 、 i' 、 z' (中心波长分别为355.1 nm、468.6 nm、616.5 nm、748.1 nm和893.1 nm)的测光巡天^[25], 并利用了数百根光纤对两百多万星系和类星体进行了光谱观测。基于SDSS多色测光数据来进行选源和后期光谱证认, 天文学家们发现了近30万颗类星体^[26], 但其中红移大于5.7的SDSS高红移类星体仅42个^[27-31], 如图4所示。

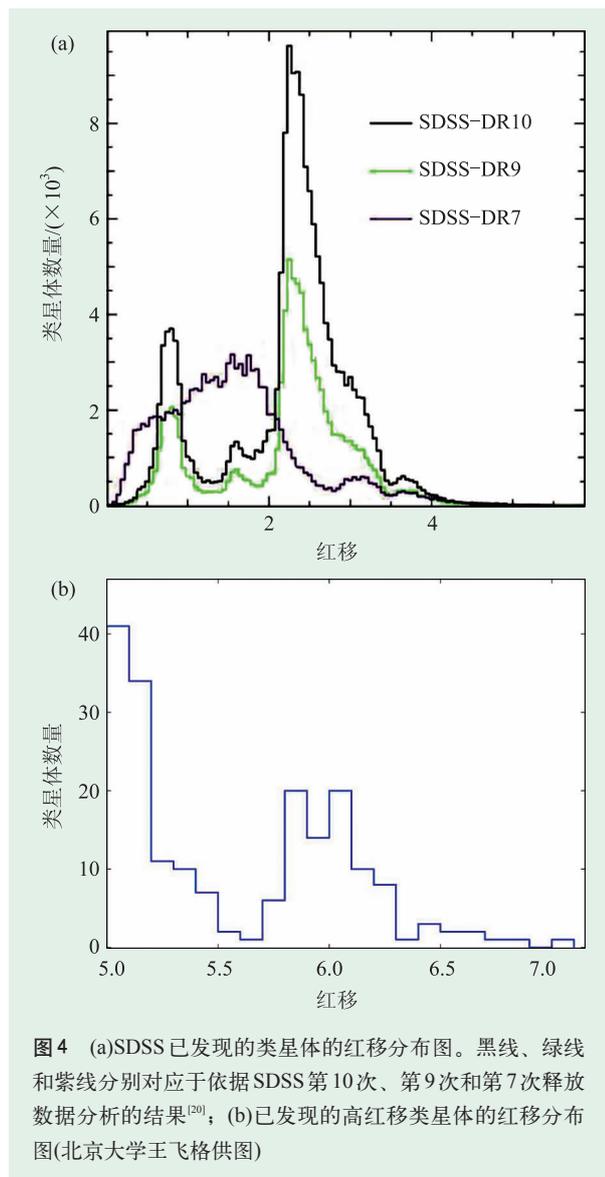


图4 (a)SDSS已发现的类星体的红移分布图。黑线、绿线和紫线分别对应于依据SDSS第10次、第9次和第7次释放数据分析的结果^[20]; (b)已发现的高红移类星体的红移分布图(北京大学王飞格供图)

已发现的高红移类星体数目如此之少, 背后的原因主要有二: 第一, 高红移类星体的空间密度本身就低, 根据类星体的光度函数分布(类星体的空间密度随光度的分布)预计, 红移为6左右时, 较亮的类星体空间密度已下降至每300—400平方度一个类星体。由此可见, 要发现一个高红移类星体, 需要进行大面积的搜寻工作; 第二, 红移为6左右时, 适用于类星体选源的信息, 如Ly α 发射线和静止坐标系下(以该类星体为参考点)紫外和光学波段的强辐射等, 已经被红移至 z' 波段(中心波长8930 Å), 更不用说其他红端的发射线(例如CIV线, MgII线)。单靠光学波段的多色测光数据来完成类星体的选源和光谱认证, 就是难上加难。

继SDSS之后, 可用于高红移类星体候选体筛选的巡天数据大部分关注红外波段, 例如英国红外深空巡天(UK infrared telescope infrared deep sky survey, UKIDSS^[32])和宽视场红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)^[33]。综合SDSS和这些红外波段巡天数据, 能帮助筛选出更多的高红移类星体候选体, 这也是我们团组近些年来开展的主要工作之一。要确认候选体是否为高红移类星体, 还需要用中到大型的望远镜进行光学或近红外光谱观测进行认证。不过, 近些年来天文学家总共才发现(且已发表)100多个红移大于5.7的类星体, 其中红移大于6、距离超过127亿光年的类星体只有40个左右。我们团组这两年来发现了几颗红移大于5.7的类星体^[1, 34], 其中一个源SDSS J0100+2802红移是6.3。

6 发现宇宙早期发光最亮和黑洞质量最大的类星体

如前文所述, WISE红外卫星提供了从3.3 μm 到22 μm 的四个波段(w1到w4)全天红外测光数据^[33]。我们团组综合利用SDSS光学波段和WISE红外波段测光数据, 在对已知的类星体样本颜色信息分析的基础上^[35], 提出了适宜筛选高红移类星体的新方法(图5)。

在进军搜索高红移类星体这一研究领域之前，我们团组积累了筛选类星体候选体、证认类星体的丰富经验。2011年底，云南天文台的丽江2.4米望远镜在完成测试工作后向全国天文界征集观测需求，我们团组提交的“发现红移4以上类星体”的

申请得到批准。在2012年2月底至3月初的6个晚上，我们发现了多个类星体，而且成功地发现了一个红移为4.6的类星体。2013年，我们继续利用丽江2.4米望远镜的观测又发现了几个红移5以上的类星体。在丽江2.4米望远镜上成功的观测坚定了我们寻找更高红移类星体的信心。这也证明了只要找到合适的选源方法选出高红移类星体候选体，我们也可以利用国内2米级望远镜发现高红移类星体。

2米口径限制了我们只能观测亮的高红移类星体候选体，因此我们筛选出的类星体候选体相较于之前发现的高红移类星体更亮。有趣的是，这些亮类星体恰好是之前的国际同行忽略掉的一些候选体，因为亮源是高红移类星体的概率更低，所以通常在筛选候选体时会设置亮度的上限，超过此上限的就会排除在候选体之外。

6.1 前期准备

2013年12月，我们在选择高红移类星体候选体时发现，存在好几个源在各波段的星等特征与红移6以上的类星体非常符合。对于红移6以上的类星体，特征发射线Ly α 从i'波段红移至z'波段，结合类星体的连续谱表现，将预计类星体的亮度在i'波段较暗，而在z'波段以及更红的红外波段较亮。其中SDSS J0100+2802在i'波段星等为20.8等，z'波段星等是18.3等，在其他光学波段均没有探测到，而在红外波段较亮(图6)。我

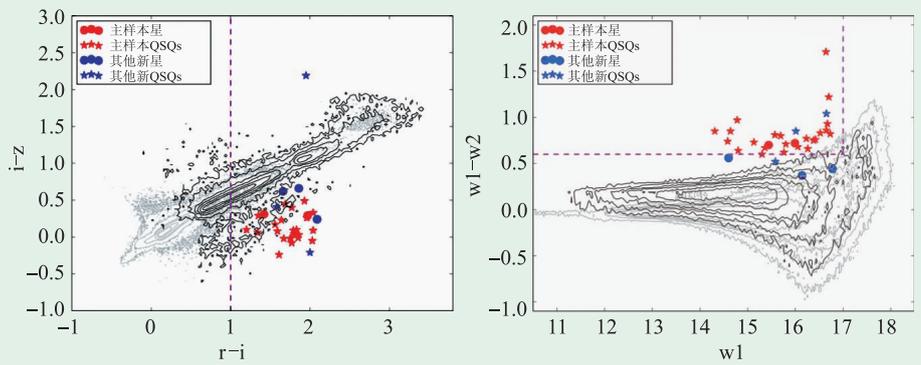


图5 综合SDSS和WISE巡天数据制定的筛选高红移类星体的标准^[34](r, i, z, w1, w2为不同波段的星等)

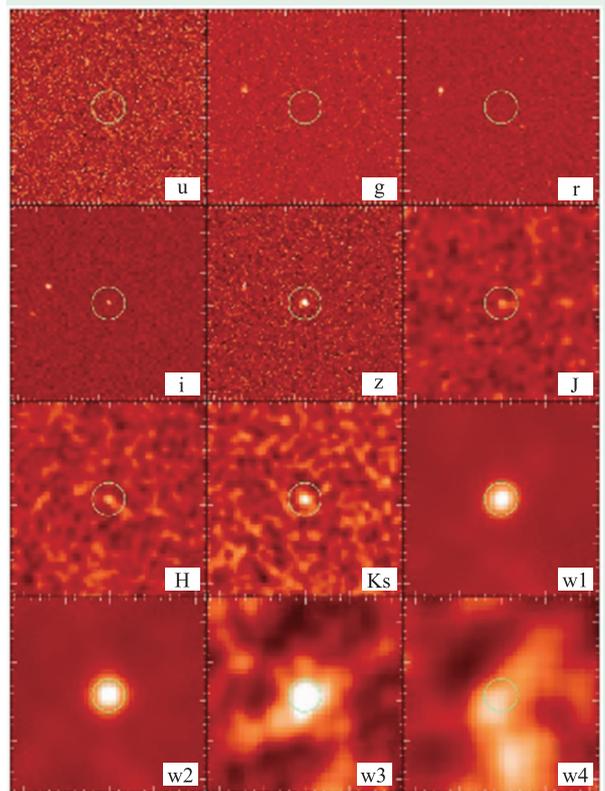


图6 SDSS J0100+2802在从光学到近红外的各个波段上的照片。J、H、Ks、w1、w2、w3和w4波段的中心波长依次为1.21 μm 、1.59 μm 、2.15 μm 、3.4 μm 、4.6 μm 、12 μm 和22 μm ^[1]

们团组基于测光数据，推算出其红移大约在6.3左右。

6.2 国内2.4 m望远镜的观测

要确定该候选体是否是高红移类星体，必须

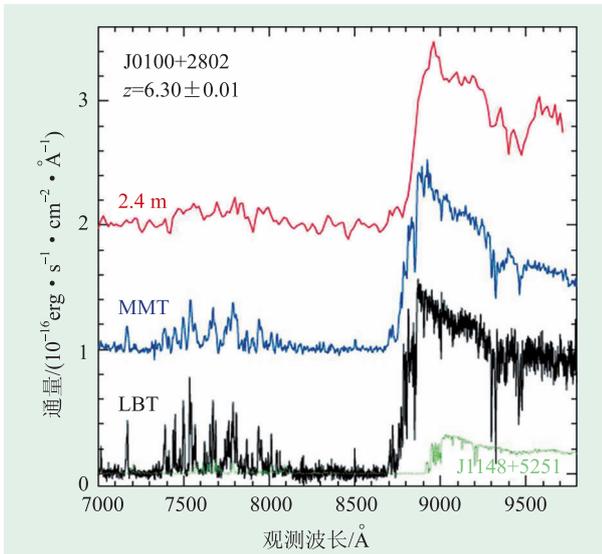


图7 用2.4 m、MMT和LBT望远镜观测的红移为6.3的类星体SDSS J0100+2802的光学光谱以及与以前最亮的高红移类星体SDSS J1148+5251的比较。最上面两光谱向上方有移动^[1]

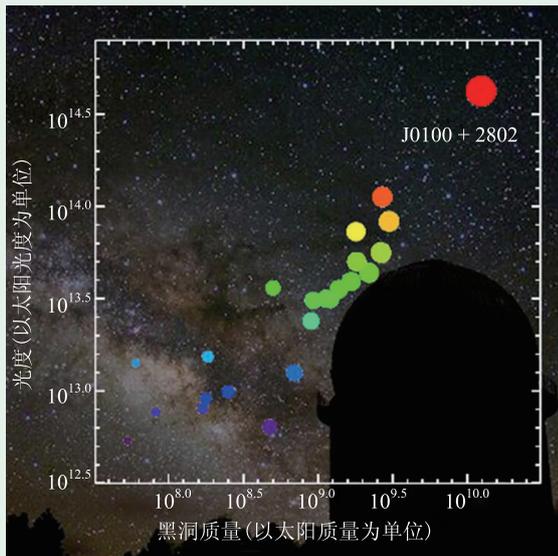


图8 SDSS J0100+2802是宇宙早期光度最高、黑洞质量最大的类星体。背景是丽江2.4米望远镜圆顶及其天空(背景照片来自中国科学院云南天文台,图则由中国科学院上海天文台李兆聿提供)

对其进行光谱观测。2013年12月底,我们使用我国云南天文台丽江2.4米望远镜的最低分辨率光栅拍摄了SDSS J0100+2802的光学光谱。光谱明确显示它是一个类星体,其Ly α 谱线(静止波长为1216 Å)已红移到波长8900 Å处。这一观测结果让我们非常激动,丽江2.4米望远镜的光谱观测证

实它确实是一个红移大于6.2的类星体。

6.3 国际望远镜的后续观测

2014年1月,在与国外合作者联系之后,我们利用美国6.5米多镜面望远镜(MMT)和8.4米大双筒望远镜(LBT)拍摄质量更高的光学光谱,进一步证实了其红移为6.3(图7)。这表明该类星体距离我们128亿光年,根据其观测到的视亮度,我们推算出其真实的发光本领——光度约为太阳光度的430万亿倍,比以前发现的最亮高红移类星体还要亮4倍,成为早期宇宙中最明亮的类星体^[1](图8)。

正如本文第2部分所提及,如果要了解类星体中心黑洞的质量究竟多大,我们需要收集其宽发射线的信息。对于SDSS J0100+2802,它的宽发射线(例如CIV、MgII发射线)已经被红移至近红外波段。因此,随后我们又申请使用3台国外望远镜:美国的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,最终得到了高质量的近红外光谱。通过分析近红外光谱,我们得到两个参量,即黑洞附近吸积盘发出的连续谱辐射光度(与宽发射线区离黑洞的距离密切相关)和能表征宽发射线区气体小云在黑洞引力作用下运动速度的宽发射线线宽。据此,我们推算出这颗类星体的中心黑洞质量为120亿个太阳质量。

6.4 这一发现的重要意义

这颗备受关注的高红移类星体是用中国的2.4米望远镜发现的,这一成果对于中国天文学家是个极大的鼓舞。除去这颗类星体,国际上其他的红移6左右的高红移类星体是利用6米到10米级的望远镜发现的。但综观这颗类星体的发现和确认过程,我们必须意识到国际合作的重要性和国内外观测设备存在的差距。高红移类星体候选体的筛选,依赖于国际上大型的光学和近红外巡天提供的测光数据;后期的进一步证认和近红外光

谱,是与国际同行合作使用6米、8米级的望远镜拍摄获得的。目前,国内用于高红移类星体发现的望远镜还只是2米级的,而国外是6米、8米和10米级口径的望远镜,差距极大。不过,我国已越来越重视天文事业的发展,对天文观测设备将给予更大的支持。今后还需要国内天文同仁齐心协力,在有明确科学目标的指引下,迅速建设国内有竞争力的天文观测设备。

在科学上,这颗类星体的发现,对已有的宇宙早期黑洞形成和演化理论提出了挑战。这一类星体红移6.3,对应于宇宙大爆炸之后9亿年,离我们有128亿光年的距离。如果将我们的宇宙比作一位100岁的老人,那么当宇宙还是个6岁的孩子时,这颗类星体就存在了。它中心的黑洞质量为120亿个太阳质量,相当于一个6岁大的孩子就已经是个几百斤的大胖子,非常难以理解。已有的理论认为,超大质量黑洞是由一些非常小的种子黑洞,通过吞噬周围的气体物质成长。成长之后的黑洞质量多大,取决于种子黑洞是多大以及种子黑洞是如何吞噬周围物质。

对于种子黑洞,普遍认为它是第一代恒星演化的最终产物,质量大约是1000个太阳质量。而第一代恒星约形成于宇宙大爆炸之后4亿年,这就表明我们发现的这颗黑洞是从1000个太阳质量的种子黑洞经过5亿年“吃”气体成长到120亿太阳质量的“胖子”。

而根据现有理论,一个黑洞即使始终保持爱丁顿吸积率(最大程度的吸积率,当被吞噬物质所形成的向外辐射压力与黑洞对物质的引力相平衡时对应的黑洞吸积率)来吞噬物质以增加质量,至少要花3000万年才能使质量翻倍。可以预想,1000个太阳质量的种子黑洞经过5亿年的爱丁顿吸积,质量也只增加到约1亿倍太阳质量,远远小于此类星体具有的比太阳重120亿倍的黑洞质量。

如果种子黑洞不是由第一代恒星形成,而是直接由气体团块直接塌缩形成黑洞,那么其种子黑洞质量也许可以达到百万太阳质量,从而将可能解决宇宙早期形成的超大质量黑洞的难题。但问题在于,上述关于种子黑洞的形成机制还仅是

理论猜测阶段,并没有得到观测的证实;而且黑洞保持长时间的爱丁顿吸积这一假设也是存在问题的,因为光辐射压与引力之间的平衡,黑洞仅能阶段性地以最大吸积率吞噬物质,爱丁顿吸积时标大约在1000万至1亿年之间^[5]。

综上所述,我们的发现给目前的宇宙早期黑洞形成和演化提出了挑战。实际上,类似的挑战曾经也在其他同行的工作中出现,他们发现质量达30亿个太阳质量的黑洞形成于宇宙大爆炸之后10亿年之内^[36]。这些发现并没有完全推翻现有的黑洞形成和演化理论,而是意味着这些理论需要改进。目前看来在以下两方面需要进一步研究:(1)宇宙早期形成的黑洞“种子”的质量可能远远大于以往的估计;(2)大质量黑洞吞噬周围物质使自己成长的速度可能远远超过以往的认识。

另一个重要的科学意义是,作为早期宇宙中最亮的类星体,它发出的光子在到达我们地球上的望远镜之前,已历经128亿年的“沧桑”。它们穿过128亿光年的宇宙,在经过漫漫长路中的星际物质时可能会部分被吸收,从而在光谱中表现成众多的吸收线。这些特征将有助于我们研究从极早期宇宙到近邻宇宙的物质分布和宇宙整体结构^[37, 38]。如果没有包括我们发现的这一类星体在内的高红移类星体,没有这些比星系更明亮的宇宙“探照灯”,我们在探索遥远宇宙信息的道路上将更加艰难。

7 高红移类星体研究展望

如本文在第2部分中提及,近邻宇宙中的星系研究表明,星系中心超大质量黑洞的质量与其所处寄主星系的核球性质之间具有很好的相关性,这表明黑洞的质量增长与星系的早期演化密切相关^[21, 22]。

一般情况下,核球质量更大的星系中心存在一个质量更大的黑洞,反过来亦如此。在宇宙早期发现的这些明亮的高红移类星体,为研究宇宙早期黑洞和星系的演化提供了重要的样本。正如我们所发现的这颗类星体,其超大黑洞质量是否

对应于大质量的星系核球呢? 如果在宇宙早期星系的成长与黑洞质量的增加是协同的, 那么将期待该寄主星系中含有几十万亿太阳质量的恒星和气体, 这与近邻宇宙的大质量星系的气体、恒星含量相当。其寄主星系的性质到底如何? 恒星形成状况如何? 是否符合共同演化所预测的性质? 要回答这些问题, 都需要对这些最遥远类星体的极为暗弱的寄主星系进行进一步的观测分析研究。

而理论上亟待解决的问题也有很多, 例如: 种子黑洞是如何形成的? 宇宙早期黑洞是如何增长的? 黑洞和其寄主星系在宇宙早期是否协同演化?

要解决这些问题, 在观测研究上天文学家还需要大型望远镜发现更多的高红移类星体, 从而

进行有效的统计研究。未来十年内国际上的大型光学和红外巡天(如LSST等)将为类星体候选体的筛选提供重要的数据库。对于已发现的高红移类星体, 天文学家需要借助大型望远镜提供多波段的高分辨率数据进行黑洞性质分析和寄主星系研究。在建的和正在计划的大型望远镜, 如30米望远镜(TMT)等, 将有助于我们发现更多的更高红移类星体, 极大地帮助我们更好地了解宇宙早期的物理性质。当然, 这些探索也会促进对早期宇宙理论研究的开展, 为宇宙学数值模拟提供更合理的参数限制, 同时也为理论的进一步发展提出挑战和促进。对早期宇宙理论研究的进展同样也将解释对高红移宇宙观测中发现的难题, 提出进一步验证的可能性, 指导天文学家进一步观测取证。

参考文献

- [1] Wu X B, Wang F, Fan X *et al.* *Nature*, 2015, 518: 512
- [2] Edge D O, Shakeshaft J R, McAdam W B *et al.* *MmRAS*, 1959, 68: 37
- [3] Matthews T A, Sandage A R. *ApJ*, 1963, 138: 30
- [4] Schmidt M. *Nature*, 1963, 197: 1040
- [5] Salpeter E E. *ApJ*, 1964, 140: 796
- [6] Zel'dovich Y B. *Soviet Physics Doklady*, 1964, 9: 195
- [7] Lynden-Bell D. *Nature*, 1969, 223: 690
- [8] Wyckoff S, Gshren T, Morton D C *et al.* *ApJ*, 1980, 242: 59
- [9] Sunyaev R A, Trümper J. *Nature*, 1979, 279: 506
- [10] Urry C. AGN Unification: An Update. G. T. Richards and P. B. Hall(editors). *AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey*, volume 311 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2004, p. 49
- [11] Kaspi S, Smith P S, Netzer H *et al.* *ApJ*, 2000, 533: 631
- [12] Peterson B M, Ferrarese L, Gilbert K M *et al.* *ApJ*, 2004, 613: 682
- [13] Peterson B M, Wandel A. *ApJL*, 1999, 521: 95
- [14] Peterson B M, Wandel A. *ApJL*, 2000, 540: 13
- [15] Greene J E, Ho L C. *ApJ*, 2005, 630: 122
- [16] Vestergaard M, Peterson B M. *ApJ*, 2006, 641: 689
- [17] McGill K L, Woo J, Treu T *et al.* *ApJ*, 2008, 673: 703
- [18] Vestergaard M, Osmer P S. *ApJ*, 2009, 699: 800
- [19] Zuo W, Wu X B, Fan X *et al.* *ApJ*, 2015, 799: 189
- [20] Pâris I, Petitjean P, Aubourg E *et al.* *A&A*, 2014, 563: 54
- [21] Gebhardt K, Bender R, Bower G *et al.* *ApJL*, 2000, 539: 13
- [22] Ferrarese L, Merritt D. *ApJL*, 2000, 539: 9
- [23] McLeod C L, Brooks K, Ivezić Ž *et al.* *ApJ*, 2011, 728: 26
- [24] York D G, Adelman J, Anderson J E *et al.* *AJ*, 2000, 120: 1579
- [25] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J *et al.* *AJ*, 2006, 131: 2332
- [26] Alam S, Albareti F D, Prieto C A *et al.* *ApJS*, 2015, 219: 12
- [27] Fan X, Strauss M A, Schneider D P *et al.* *AJ*, 2003, 125: 1649
- [28] Fan X, Hennawi J F, Richards G T *et al.* *AJ*, 2004, 128: 515
- [29] Fan X, Strauss M A, Richards G T *et al.* *AJ*, 2006, 131: 1203
- [30] Jiang L, Fan X, Annis J *et al.* *AJ*, 2008, 135: 1057
- [31] Jiang L, Fan X, Bian F *et al.* *AJ*, 2009, 138: 305
- [32] Warren S J, Hambly N C, Dye S *et al.* *MNRAS*, 2007, 375: 213
- [33] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K *et al.* *AJ*, 2010, 140: 1868
- [34] Wang F G, Wu X B, Fan X *et al.* *ApJL*, 2015, 807: L9
- [35] Wu X B, Hao G, Jia Z *et al.* *AJ*, 2012, 144: 49
- [36] Mortlock D J, Warren S J, Venemans B P *et al.* *Nature*, 2011, 474: 616
- [37] Gunn J E, Peterson B A. *ApJ*, 1965, 142: 1633
- [38] Fan X, Carilli C L, Keating B. *ARAA*, 2006, 44: 415