



发现最古老的超大质量黑洞

吴学兵^{1,2}

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;

2. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871

E-mail: wuxb@pku.edu.cn

美国《科学新闻》(Science News)杂志网站在2021年12月20日的报道中, 梳理了2021年度令人惊奇的六大科学纪录^[1], 其中天文学家发现的迄今最古老的巨大黑洞(即红移为7.642的类星体J0313-1806中心质量为16亿倍太阳质量的黑洞)名列榜首(图1), 这些新发现拓展了科学研究的极限和人类的想象力. 本文将对这一发现迄今最古老巨大黑洞的研究过程及其科学意义进行简要解读, 并对今后相关研究进行展望.

黑洞是宇宙中最神秘的天体, 也是爱因斯坦广义相对论预言的产物. 2019年4月, 事件视界望远镜(Event Horizon Telescope)国际合作团队公布了利用全球8个毫米波望远镜组成的干涉阵列拍摄的近邻星系M87中心黑洞的首张照片, 引起举世轰动^[2,3]. 2020年度诺贝尔物理学奖授予了从事黑洞形成理论研究和银河系中心黑洞观测研究的3名科学家^[4], 再次展现了黑洞研究的重要科学价值. 黑洞在宇宙中普遍存在, 已成为科学界共识. 那么, 宇宙中最古老的黑洞年龄有多大? 质量有多重? 它又是如何形成的呢? 天文学家在2021年1月发表的一项观测研究成果对这些问题给出了最新的答案^[5].

1 破纪录的发现

最古老的黑洞是在宇宙诞生后不久就形成的. 由于大爆炸后的宇宙膨胀, 最早形成的天体存在于离我们最遥远的宇宙, 也就是早期宇宙中. 在如此遥远的距离上发现它们十分困难, 但幸运的是有些古老的黑洞位于其周围有足够气体供给的类星体中心, 这些类星体由于黑洞周围气体吸积盘内释放出的巨大能量而非常明亮^[6], 以至于有些在地球上也能被观测到. 搜寻这些宇宙中最遥远的类星体(也称高红移类星体, 红移越大表明距离越远)就成为天文学家发现其中心最古老黑洞的重要手段.

著名华裔天文学家、美国亚利桑那大学樊晓晖教授领导的国际合作团队(包括北京大学的几位成员)一直从事发现最遥远高红移类星体的观测研究. 2015年, 以北京大学为主的团队成员发现了红移为6.3的宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量最大(约120亿倍太阳质量)的类星体J0100+2802^[7]. 近年来, 亚利桑那大学领导的团队开展了发现红移7以上(即宇



吴学兵 北京大学物理学院天文学系主任、科维理天文与天体物理研究所副所长, 中国天文学会副理事长. 研究领域包括类星体与活动星系核、黑洞天体物理、观测宇宙学等.

宙大爆炸后8亿年之内)最遥远类星体的观测研究. 2020年, 他们曾发现一个红移为7.52、中心黑洞质量为15亿倍太阳质量的类星体J1007+2125^[8]. 该类星体离我们的距离仅次于以欧洲科学家为主的团队在2018年发现的红移为7.54、中心黑洞质量为8亿倍太阳质量的类星体J1342+0928^[9](亚利桑那大学部分成员也参与了这一发现).

2021年1月20日, 亚利桑那大学领导的团队在《天体物理学杂志快报》(Astrophysical Journal Letters)发表论文, 报道发现了一个红移为7.64的类星体J0313-1806, 刷新了已知宇宙中距离最高的高红移类星体新纪录^[5]. 该团队利用智利的麦哲伦望远镜、双子座南天望远镜和美国夏威夷的双子座北天望远镜、凯克望远镜, 对J0313-1806进行了近红外波段的光谱观测. 这些口径6.5~10 m的大型地面望远镜多次观测叠加后的光谱如图2下部分所示. 从中可见, 静止波长分别为1216和2798 Å的Ly α 和MgII发射线已红移到观测波长约10500和24100 Å处, 因此这一类星体的红移应在7.6以上. 该类星体光谱还在静止波长1350 Å附近存在很强的宽吸收线特征, 显示有速度高达每秒数万公里的高速外流物质以风的形式从该类星体喷出. 图2上部分的光学-红外波段图像也显示, 在y、z的光学长波波段该类星体不可见, 但在J、K近红外波段和W1、W2中红外波段则可被探测到, 这都符合高红移类星体的典型观测特征.

为精确确定这一最遥远类星体的红移并研究其宿主星系的特性, 该研究团队还利用智利的阿塔卡玛大型毫米波/亚



图1 (网络版彩色)拥有迄今发现的最古老黑洞的类星体J0313-1806示意图^[1]. 中心黑洞周围为明亮的吸积盘, 并存在高速外流的风. 来源: 美国 OIRLab/NSF/AURA/J. da Silva

Figure 1 (Color online) A cartoon illustration of the quasar J0313-1806 with the oldest black hole discovered so far^[1]. The central black hole is surrounded by a luminous accretion disk and produces the high-velocity outflow wind. Credit: US OIRLab/NSF/AURA/J. da Silva

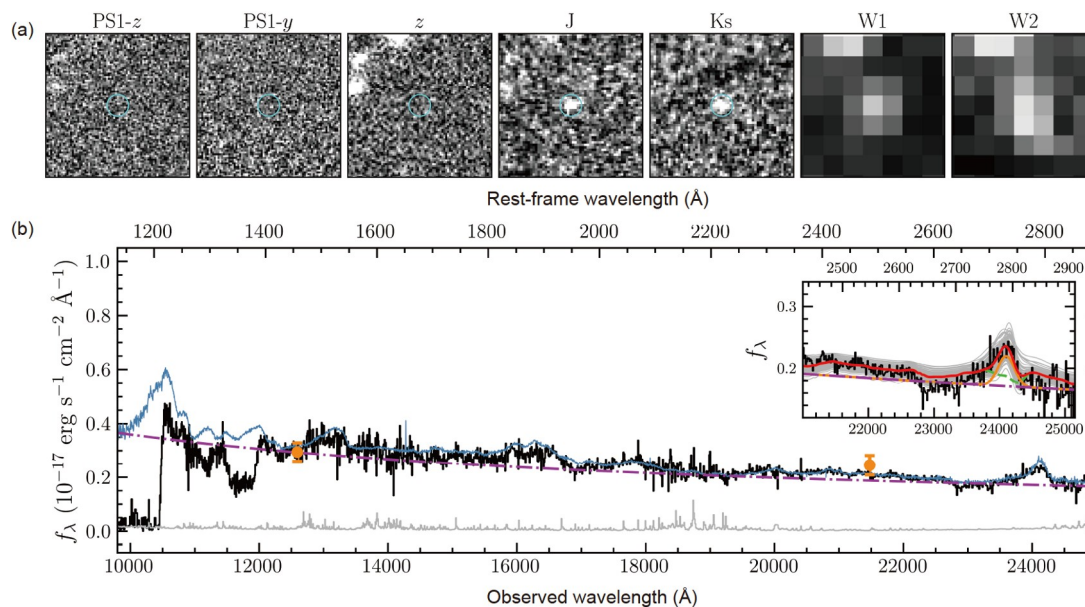


图2 (网络版彩色)类星体J0313-1806的光学-红外波段图像(a)和近红外波段光谱(b)^[5]. (b)中, 左端最下面两条曲线分别为进行过银河系消光改正后的该类星体光谱和误差. 点虚线为拟合的连续谱. 实心圆点是由J、K波段测光给出的流量值. 左端最上面曲线是在静止波长下作为比较的红移为2的类星体合成谱. 插图给出了对该类星体MgII发射线的光谱拟合

Figure 2 (Color online) The optical/infrared images (a) and near-infrared spectrum (b) of quasar J0313-1806^[5]. The two bottom lines on the left represent the quasar spectrum and errors after the Galactic extinction corrections. The dot dashed line represents the fitted continuum. Solid circle points mark the photometric flux densities of the J and K bands. As a comparison, the top line on the left represents the composite spectrum of a quasar at redshift $z=2$ in the rest frame. The inset shows the MgII emission line fitting

毫米波阵列望远镜(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)对其进行了尘埃连续谱和一次电离碳[CII]发射线的观测. 结果显示, 该类星体宿主星系拥有高达每年200多个太阳质量的恒星形成率, 对观测结果的光谱拟合给出了

其更精确的红移值为7.642. 这一创纪录的类星体红移值显示该类星体存在于宇宙年龄为6.7亿年时, 离我们距离约130亿光年, 而其中中心黑洞也是迄今为止发现的最古老的黑洞. 它的年龄比先前的纪录保持者、红移为7.54的类星体J1342

+0928还要早2000万年. 按距离推算, 其发光强度相当于太阳发光功率的36万亿倍.

2 最古老黑洞的质量及其形成

利用图2光谱中探测到的Mg II发射线宽度(半高全宽FWHM为3670 km/s)和连续谱强度, 该研究团队基于一些普遍使用的经验关系估算出类星体J0313-1806的中心黑洞质量为16亿倍太阳质量, 这比此前已知的最古老类星体J1342+0928的黑洞还要重两倍. 在宇宙年龄只有6.7亿年时(相当于现在宇宙年龄的5%, 现在宇宙年龄为137亿年), 就存在质量为16亿倍太阳质量的黑洞, 这非常让人吃惊. 这么重的黑洞又是如何在如此短时间内形成的?

对宇宙早期的黑洞形成, 先前一种普遍接受的解释是, 宇宙早期第一代恒星(也称星族III恒星)在其寿命结束时经过超新星爆发后形成种子黑洞^[10]. 这些黑洞随后通过长时间地合并和吸积周围物质, 逐渐成长为超大质量黑洞. 但第一代恒星的质量只有约1000倍太阳质量, 只能形成几百倍太阳质量重的种子黑洞(图3最下面阴影区域), 它们在宇宙仅仅几亿年的时间内是无法成长到16亿倍太阳质量的. 另一种基于致密恒星星团内大质量恒星塌缩的黑洞形成理论预言也只能形成几千倍太阳质量的种子黑洞^[11](图3中间阴影区域), 同样无法解释16亿倍太阳质量黑洞的形成. 目前看来, 早期宇宙中这类超大质量黑洞很可能是通过其他方式形成的, 比如很可能是大量原始的冷氢气直接坍缩成一个几万甚至几十万倍太阳质量的种子黑洞^[12](图3最上面阴影区域), 然后再通过最高效地吸积周围物质迅速增长其质量(图3最上面曲线), 这样才可能解释类星体J0313-1806中16亿倍太阳质量的最古老黑洞的形成. 其实早在2015年, 北京大学领导的团队发现的红移为6.3的宇宙早期发光最亮的类星体J0100+2802中心就存在重约120亿倍太阳质量的黑洞^[7], 已对当时的黑洞形成理论构成了挑战. 新发现的红移为7.642的类星体J0313-1806在更远的距离上, 其最古老的黑洞成长的时间更短. 如果其16亿倍太阳质量的黑洞通过最高效地吸积物质增长质量, 到红移6.3时其质量将超过120亿倍太阳质量, 因此它对目前的宇宙早期超大质量黑洞形成理论带来了更大的挑战. 这些发现意味着, 基于第一代恒星演化的传统黑洞形成理论无法解释宇宙年龄很小时质量非常大的这类黑洞的形成, 而巨大冷氢气直接坍缩形成更大质量种子黑洞的理论模型可能会提供更好的解释^[13].

3 展望

亚利桑那大学领导的团队发现的红移为7.642、拥有最古老的超大质量黑洞的类星体J0313-1806是已知最遥远的类星体, 它不仅对我们理解最早的黑洞如何形成非常重要, 而且对理解宇宙年龄在几亿年时的宇宙再电离阶段(红移12~6)的物理性质也至关重要. 宇宙再电离是宇宙的最后一个主要

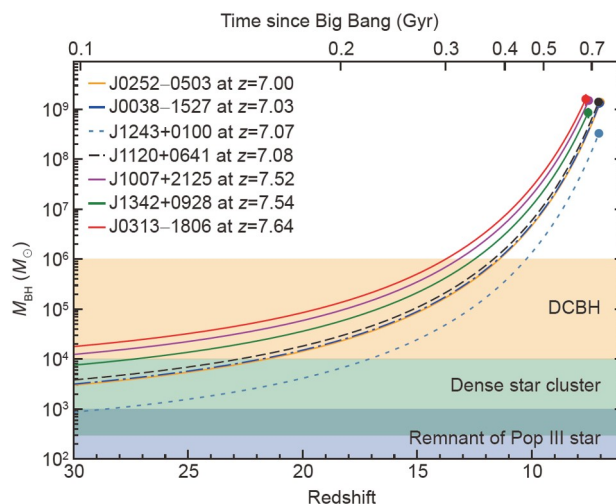


图3 (网络版彩色)宇宙早期红移为7以上类星体的黑洞质量和其最快速的质量增长过程^[5]. 最上面的曲线表示红移最大类星体J0313-1806中心最古老黑洞的质量增长过程, 要求红移为30时, 其种子黑洞质量必须在10000倍太阳质量以上. 3种理论模型中, 只有冷氢气直接坍缩黑洞(DCBH)模型能够满足

Figure 3 (Color online) The black hole masses and their quickest growth ways for quasars with redshifts beyond 7 in the early Universe^[5]. The top line represents the growth of the oldest black hole in the most distant quasar J0313-1806, which requires a seed black hole with the mass exceeding 10000 solar masses at redshift $z=30$. Among three theoretical models, only the direct collapse black hole (DCBH) model of the cold hydrogen gas is viable

相变阶段, 而明亮的高红移类星体是为数不多的能够用来追踪并研究宇宙再电离的天体之一. 目前红移7以上的几个类星体的光谱测量给出当时宇宙中性氢的比例在0.2以上, 比红移6处类星体光谱测量给出的 10^{-4} 以上的中性氢比例高很多, 显示出宇宙再电离时期中性氢比例随红移的快速演化^[8]. 对最高红移类星体J0313-1806更详细的光谱测量正在进行中, 希望不久能给出其中性氢比例的准确测量结果.

光谱分析还显示, 类星体J0313-1806存在以高速风的形式快速流出的物质, 风速高达光速的20%. 这种极端高速外流释放的能量足以影响整个类星体宿主星系的恒星形成, 这是已知的宇宙中类星体影响其宿主星系成长的最早例子, 也使得类星体J0313-1806成为未来大型地面和空间天文望远镜观测的一个非常重要的目标.

此外, J0313-1806的宿主星系正经历着快速的恒星形成, 产生新恒星的速度比银河系快200多倍. 拥有强烈的恒星形成、巨大的发光强度和高速的外流等特征, 使得类星体J0313-1806成为了解早期宇宙中超大质量黑洞及其宿主星系成长的最有希望的一个自然实验室. 未来对它的深入观测, 除了可以直接研究宇宙中最早超大质量黑洞如何形成之外, 还将让我们更多地了解类星体高速外流对其宿主星系的影响以及早期宇宙中最庞大的星系是如何形成和演化的.

2021年12月25日, 期待已久的詹姆斯·韦布空间望远镜

(简称韦布望远镜)终于发射成功,奔向日地系统的第二拉格朗日点。半年之后,韦布望远镜将在光学和红外波段对最遥远的宇宙开展最激动人心的观测。发现最古老黑洞的亚利桑那大学领导的团队经批准已获得韦布望远镜约200 h的观测

时间,将对宇宙再电离时期的类星体和超大质量黑洞开展红外图像和光谱观测,有望取得再破世界纪录的科学发现,为我们揭示宇宙早期黑洞成长和星系形成与演化的更多奥秘。

推荐阅读文献

- 1 Engelhaupt E. 6 surprising records science set in 2021. *Science News*, 2021-12-20, <https://www.sciencenews.org/article/surprising-science-records-superlatives-2021>
- 2 Akiyama K, Alberdi A, Alef W, et al. First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *Astrophys J*, 2019, 875: L1
- 3 Wu X B. The science and technology behind the first black hole image in history (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2082–2086 [吴学兵. 史上首张黑洞照片的科学与技术. 科学通报, 2019, 64: 2082–2086]
- 4 Yuan F. Theoretical foundation and observational test for black holes: Interpretation of the Nobel Prize in Physics 2020 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 4161–4167 [袁峰. 黑洞的理论基础与观测检验—2020年度诺贝尔物理学奖解读. 科学通报, 2020, 65: 4161–4167]
- 5 Wang F, Yang J, Fan X, et al. A luminous quasar at redshift 7.642. *Astrophys J Lett*, 2021, 907: L1
- 6 Zuo W W, Wu X B. The mystery of quasar power (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1157–1163 [左文文, 吴学兵. 类星体的能量之谜. 科学通报, 2016, 61: 1157–1163]
- 7 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
- 8 Yang J, Wang F, Fan X, et al. Pōniuā'ena: A luminous $z = 7.5$ quasar hosting a 1.5 billion solar mass black hole. *Astrophys J*, 2020, 897: L14
- 9 Bañados E, Venemans B P, Mazzucchelli C, et al. An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral universe at a redshift of 7.5. *Nature*, 2018, 553: 473–476
- 10 Madau P, Rees M J. Massive black holes as population III remnants. *Astrophys J*, 2001, 551: L27–L30
- 11 Portegies Zwart S F, Baumgardt H, Hut P, et al. Formation of massive black holes through runaway collisions in dense young star clusters. *Nature*, 2004, 428: 724–726
- 12 Begelman M C, Volonteri M, Rees M J. Formation of supermassive black holes by direct collapse in pre-galactic haloes. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2006, 370: 289–298
- 13 Inayoshi K, Visbal E, Haiman Z. The assembly of the first massive black holes. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2020, 58: 27–97

Summary for “发现最古老的超大质量黑洞”

The discovery of the oldest supermassive black hole

Xue-Bing Wu^{1,2}

¹ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: wuxb@pku.edu.cn

On December 20, 2021, the website of *Science News* summarized “6 surprising records science set in 2021”, including the oldest black hole discovered by astronomers. These new findings extend the limits of scientific research and the imagination of human beings. Here we present a brief introduction to the discovery of the oldest black hole in the early Universe and its importance in science, and give some prospects of the related studies in the future.

Quasars are luminous active galactic nuclei with supermassive black holes (SMBHs) in their centers, accreting the surrounding gas and emitting huge power. Distant quasars are unique tracers to study the formation of the earliest SMBHs and the history of cosmic reionization. On January 14, 2021, in a paper appeared in the *Astrophysical Journal Letters*, an international team led by Dr. Feige Wang, Dr. Jinyi Yang and Prof. Xiaohui Fan at University of Arizona reported the discovery of a luminous quasar J0313-1806 at redshift 7.64. This discovery breaks the former redshift record, 7.54 for the quasar J1342+0928, making J0313-1806 the most distant quasar discovered so far, with a distance of about 13 billion light years from us. The near-infrared spectra taken with several largest ground based telescopes reveal the existence of a black hole of 1.6 billion solar masses in the center of J0313-1806. It becomes the oldest black hole in the early Universe, with the age of only 670 million years after the Big Bang.

How can a black hole grow to 1.6 billion solar masses within 670 million years (only about 5% of the universe’s current age)? The discovery of the oldest black hole provides the most serious challenge to the current understanding of the black hole formation and growth. SMBHs are thought to grow from smaller seed black holes that accrete the surrounding matter. The popular idea is that the seed black holes formed through the collapse of the first generation massive stars (or population III stars), but this can only make the seed black holes up to a few hundred solar masses in most cases, or up to a few thousand solar masses for the extreme cases in the dense stellar clusters. However, even if we assume that J0313-1806’s seed black hole grew as fast as possible, it would have needed a starting mass of at least 10000 solar masses at redshift 30. Among the theoretical models currently known, only the direct collapse black hole (DCBH) model involving the vast amounts of primordial cold hydrogen gas can provide a possible explanation.

In addition, J0313-1806 also shows many important features. The rest-frame UV spectrum exhibits broad absorption troughs, which are thought to be produced by the extremely high-velocity outflows launched from the accretion disk around the central black hole. These outflows have a maximum velocity up to 20% of the speed of light, and can provide strong feedbacks to affect the star formation in the quasar host galaxy due to the extremely high kinetic power. J0313-1806’s host galaxy has a very rapid star formation process, with the star formation rate 200 times higher than the Milky Way. Together with its huge luminosity of 36 trillion times higher than the Sun, J0313-1806 has become one of the most important targets to study the formation and growth of the supermassive black holes, as well as their influences on the host galaxies in the early Universe.

There will be more observations on the oldest black hole in the near future. The James Webb Space Telescope (JWST) was successfully launched on December 25, 2021. The team who discovered the oldest black hole has been awarded the JWST time of more than two hundred hours. More surprising discoveries are expected to be revealed by the future JWST observations on the most distant black holes, galaxies and quasars in the epoch of cosmic reionization.

black hole, quasar, redshift, accretion, cosmic reionization

doi: [10.1360/TB-2022-0082](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0082)