

走近天文之一

揭开黑洞的神秘面纱

左文文[†]

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2020-02-24收到

† email: wenwenzuo@shao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200311

1 引言

于我们，黑洞是个既陌生又熟悉的话题。熟悉的是，它经常出现在科幻作品中，被描述成拥有着吸尘器般巨大吸引力、隐身的贪婪怪兽。陌生的是，黑洞究竟是什么，天文学家们如何“看”到黑洞，为什么要研究黑洞。请随笔者一起揭开黑洞的神秘面纱。

2 黑洞是什么？

最简单的黑洞模型是个不带电也不转动的黑洞。这个模型最早是德国物理学家史瓦西于1916年计算出来，因此得名史瓦西黑洞模型。在史瓦西黑洞模型中，中心是时空被无限弯曲、密度无限大的奇点；黑洞的形成使时空被事件视界(event horizon)分成隔离的两部分，物质和光可以从视界外进入视界

内，但反过来就不行。黑洞的视界内，引力很强，以至于连光都无法逃离，这也是它得名“黑洞”的主要原因。

史瓦西黑洞的事件视界半径等于 $2GM/c^2$ ，其中 G 为万有引力常数， c 是光速， M 指黑洞质量，这说明视界的大小取决于黑洞的重要参数——质量。黑洞质量越大，视界半径就越大。如果一个史瓦西黑洞质量是1倍太阳质量，那么它的视界半径就只有3 km。换句话说，如果你能把我们的太阳压缩到3 km那么大，太阳内的物质和发出的光都无法逃离，最终这些物质将不断收缩塌陷，直至被挤压到奇点处，成为一个黑洞。

要完整描述一个黑洞，就只需要知道三个参量：质量、电荷和角动量，便知道了一切。这就是著名的“黑洞无毛定理”。相较于最简单

的黑洞模型——史瓦西模型，更复杂的黑洞模型就是那种带电的黑洞，不仅带电还在转动的黑洞。这些都是理论模型，而宇宙中的黑洞很可能是复杂的，转动的、有质量的黑洞，很可能大多是不带电的。

如图1所示，根据质量，天文学家们将宇宙中的黑洞分成三类：恒星级质量黑洞、中等质量黑洞和超大质量黑洞。恒星级质量黑洞，几倍—几百倍太阳质量；超大质量黑洞，几百万倍太阳质量以上；而中等质量黑洞，质量位于两者之间。

恒星级质量黑洞，普遍认为是大质量恒星演化到晚期，发生超新星爆炸之后留下的残骸。而超大质量黑洞是源于更小质量的黑洞的合并和自身吞噬物质吃东西成长起来的。黑洞的起源和成长并非已经解决的问题，还有很多谜题未解开，比如如果宇宙早期的黑洞种子是恒星级质量黑洞，靠它们自己狂吃东西，是没法在几亿年间长成超大质量黑洞的，但是我们却实实在在看到了120多亿年前的超大质量黑洞^[1]，这便是宇宙早期的超大质量黑洞的来源之谜。一个随之而来的问题是，我们是如何知道宇宙中黑洞的存在并找到它们的呢？以下笔者将列举4类代表性证据给大家呈现。

3 黑洞是黑的吗？如何“看”到黑洞呢？

就像我们看不见风，但却能通过风吹动树叶来判断风的存在。对



图1 致密天体的质量范围(图片来源于NASA)

于黑洞，也同样如此。它的强引力对周围的恒星、气体会产生影响，我们可以通过观测这种影响来“看”到黑洞。

3.1 恒星的运动透露了黑洞的踪迹

我们身处的太阳系是银河系中三千多亿个恒星系统中的普通一员。距离我们26万光年之外，在银河系中心人马座A* (Sgr A*)区域就潜伏着一个超大质量黑洞。这便是恒星的运动揭示了黑洞存在的典型证据之一。另一个典型证据是，天文学家们发现，研究某些恒星呈现的周期性运动能帮助找到恒星级黑洞的候选体。2019年，中国科学院国家天文台刘继峰、张昊彤研究团队依托郭守敬望远镜(LAMOST)的巡天优势，通过研究恒星光谱体现的运动来推测是否存在伴星和伴星是否为黑洞，成功发现了一颗迄今为止质量最大的恒星级质量黑洞^[9]。

2009年，一个国际天文学家团队根据长达16年的红外观测，得到了其中28颗恒星的轨道(图2)，发现它们在围绕着一个看不见的天体转动。在银河系中心周围的众多恒星中，编号为S2的恒星最值得一提，它每15.56年转一圈，因此16年内能看到它完整的周期，S2离Sgr A*最近时仅有17光时，相当于天王星和太阳之间距离的4倍。这也意味着那看不见的天体尺寸不到17光时，但拥有的质量却达430万倍太阳质量^[2]。2017年，该团队根据长达25年的观测，已经确定了40颗恒星的轨道，根据其中17颗恒星的轨道分析，以更低的误差计算出银河系中心黑洞质量为428万倍太阳质量^[3]。另一个致力于测量银河系中心黑洞质量的重要团队根据20多年的观测数据，得出了类似的

黑洞质量估计^[4]。

在如此小的区域内，却拥有400多万倍太阳质量，难以找到其它类天体具有这样的性质。天文学家们认为该证据表明银河系中心就潜伏着一个超大质量黑洞。这便是恒星的运动揭示了黑洞存在的典型证据之一。另一个典型证据是，天文学家们发现，研究某些恒星呈现的周期性运动能帮助找到恒星级黑洞

的候选体。2019年，中国科学院国家天文台刘继峰、张昊彤研究团队依托郭守敬望远镜(LAMOST)的巡天优势，通过研究恒星光谱体现的运动来推测是否存在伴星和伴星是否为黑洞，成功发现了一颗迄今为止质量最大的恒星级质量黑洞^[9]。

3.2 “小尺寸大光度”型电磁辐射暴露了黑洞

除了这颗新发现的恒星级质量黑洞外，迄今为止，天文学家仅在银河系发现了约20颗恒星级黑洞，这些黑洞都是通过黑洞吸积伴星气体所产生的X射线来识别的。

我们将重点介绍一类活跃吃东西的超大质量黑洞——类星体(图3)。类星体的光学图像看起来类似恒星，但并不是恒星。它的本质也不是普通星系，而是属于活动星系核这一类天体，而且是活动性最强的活动星系核。活动星系核，即活动星系的核心。虽然普通星系与活动星系的中心普遍认为都存在质量在百万个太阳质量以上的大质量黑洞，但两者的差异主要是普通星系的中心黑洞周围并没有太多物质供

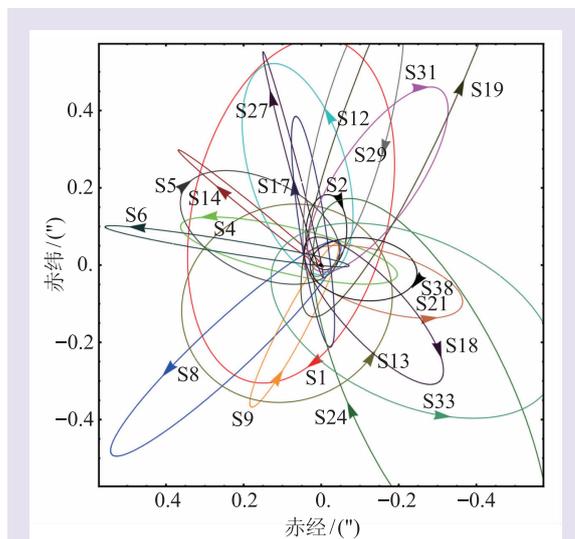


图2 Sgr A*周围1角秒范围内的已证认出的恒星轨道示意图(图片来源于 Gillessen et al. 2009)

它吸积，所以普通星系中心的发光强度远远低于活动星系。

太阳的光度是每秒钟释放385亿亿焦耳的能量，相当于10亿吨TNT爆炸释放的能量，或者50万个原子弹爆炸产生的能量。与之对比的是，银河系的总光度约是太阳光度的360亿倍，一个典型类星体的光度是银河系总光度的上千倍。也就是说，如果类星体的发光区域比作一个黄豆那么大，普通星系就相当于一个直径5万米的球体，但这颗黄豆比这个球体每秒钟发出的能量还要强很多。

基于类星体的小尺寸和大能量，能量转换效率远不是恒星内部核反应所能解释的。后来天文学家发现，可以用中心致密天体周围的物质所释放出的引力能来解释，并且中心致密天体最可能是超大质量黑洞。在黑洞强引力的作用下，周围的气体就会向黑洞下落，在距离黑洞几倍到几万倍事件视界的地方形成吸积盘。被黑洞吸积的物质损失的势能转化为光和热，取决于黑洞的转动慢快，辐射转化效率高达

6%到40%^[6]。

3.3 黑洞的成长过程让我们“听”见黑洞

2015年9月14日协调世界时09:50:45, 激光干涉引力波观测站(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)的两个引力波探测器几乎同时探测到一个短暂的引力波信号, 引力波源是13亿光年之外的两个恒星级质量黑洞的碰撞并合^[7]。这是人类第一次直接探测到引力波, 也是人类第一次探测到双黑洞的并合, 是对爱因斯坦广义相对论的又一伟大见证。截至2020年2月20日, LIGO和Virgo共发现了11次引力波事件信号(图4), 其中10次对应于双恒星级黑洞的并合, 1次对应于双中子星的并合。

借助并合, 更小的黑洞成长为更大的黑洞。几乎在每个大质量星系的中心都存在一个超大质量黑洞, 宇宙中也不乏星系并合的观测证据, 星系并合的后期, 便是两者中心超大质量黑洞的并合。未来激光干涉空间天线(Laser Interferometer Space Antenna)和中国的空间引力波探测计划“太极计划”等将致力于探测来自于超大质量黑洞并合产生的更低频引力波信号。



图3 超大质量黑洞(图片制作:李兆聿, 背景图片来源于NASA和Misti Mountain Observatory)

3.4 给黑洞拍照让我们直接“看”见黑洞

以上列举的证据属于间接“看”见黑洞, 天文学家们希望能更直接地“看”到黑洞, 拍摄到黑洞的照片。根据爱因斯坦广义相对论预言, 吸积盘内区或喷流的光会被强引力弯曲, 产生强引力透镜效应, 鉴于黑洞的自旋及与观测者视线方向的不同, 在距离黑洞中心2.4—2.6倍事件视界半径处形成光环, 使得里面就像阴影, 称作黑洞阴影。

银河系中心的黑洞Sgr A*和65亿光年之外的M87星系中的超大质量黑洞M87*是根据理论推算, 我们从地球上看过过去光环尺寸最大的两个黑洞, 理论预计的光环尺寸分别约50微角秒和40微角秒。值得一提的是, 由于对M87中央黑洞质量的不同测量方法(气体动力学与恒星动力学)所得结果差了近2倍, 意味着黑洞阴影的大小有可能小于40微角秒, 甚至低于此次EHT所能分辨的能力极限。要知道, 从地球上看到满月的尺寸约为30角分(1角分等于60角秒), 50微角秒就相当于从地球上看到月球上一个橘子大小的物体。

为了拍摄到黑洞的首张照片, 天文学家们使用一种名为甚长基线干涉测量(VLBI)的技术, 将分布在全球6地的8台望远镜联网组成一个如地球大小的“虚拟”望远镜——事件视界望远镜(Event Horizon Telescope,

EHT), 并经多年准备后, 于2017年4月顺利针对M87*和Sgr A*开展了在1.3 mm波长处的VLBI成像观测。这一“虚拟”望远镜观测具有极高的分辨本领, 达到的角分辨率约20微角秒。在大量细致的后期数据分析之后, 成功“捕获”M87*的黑洞影像, 并于2019年4月10日正式发布^[8]。

这张照片呈现的光环和光环所包围的阴影, 与爱因斯坦理论预言相符, 在强引力场下验证了广义相对论的正确, 也为黑洞的存在提供了更加直接的证据。

4 为什么要研究黑洞?

了解了上述四种典型的“看”到黑洞的证据, 即将要揭晓这些研究的动机, 即我们为什么要研究黑洞。黑洞是宇宙中常见的天体, 几乎每个有核球的大质量星系中心都有一个超大质量黑洞, 也不乏大量恒星级质量黑洞, 还有应该存在但还未找到确认候选体的中等质量黑洞。它就在那里, 它的秘密等着人类去发现。

要想回答银河系中心的超大质量黑洞是否曾经影响过银河系中的恒星形成, 虽然我们没法自身时空穿越到几十亿甚至百亿年前去目睹发生的事情, 但天文学研究允许我们以一种间接的方式回到从前。

天文学家们将视野投向其它星系, 近水楼台先得月, 首先观测比较近的星系。当然, 如果从我们日常的角度来看, “近”也不近, 毕竟离我们最近的一个大星系也是距离我们250多万光年之外。天文学家发现, 至少在近邻星系中, 黑洞质量越大, 它所居住的星系也具有更大质量的核球(图5), 核球里恒星

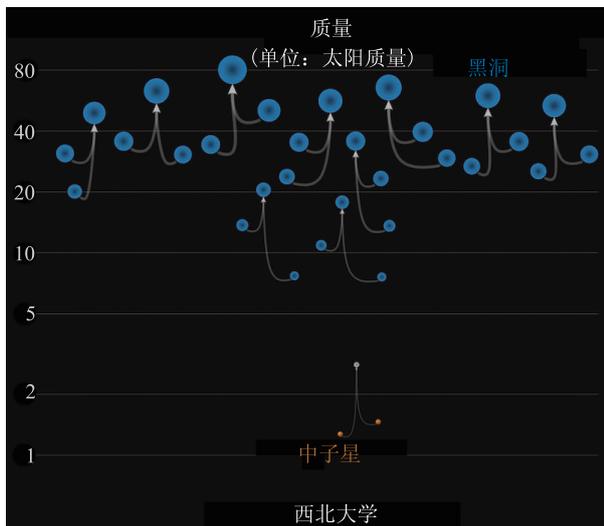


图4 LIGO和Virgo在第一轮和第二轮观测中发现的确信引力波事件(图片版权:LIGO-Virgo/西北大学/Frank Elavsky)

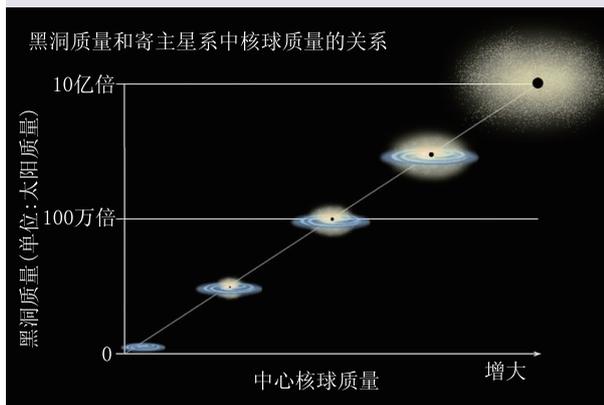


图5 黑洞质量和寄主星系核球质量之间的关系(图片版权:K. Cordes, S.Brown.STScI)

的运动也具有更大的多样性,有的运动得快,有的运动得慢。这一现象预示了黑洞和星系像是“约好”似地协同演化^[9]。

那是不是宇宙早期的黑洞都是这样的呢?如果某天体距离我们100光年,表明你此刻看到它的光是源于100年前;如果某天体距离我们千万光年,那你看到的可就是千万光年前的它。反过来想,如果那些天体上也存在生命,且观测到了地球,那么7千万光年外的星系上的生物将会发现地球是个恐龙横

行的行星。从实用的观点看,黑洞的研究并不能为人们的经济生活带来直接的改变。但是换个角度看,探索黑洞会驱动技术的发展,引力波的探测和黑洞照片的拍摄成功克服了无数的技术难关。上述四类“看”到黑洞的方法无不对探测设备的灵敏度、分辨本领等提出高要求,无不对数据处理和分析的工具寄予更高的要求。为了实现这样的需求,人们必须在高精度光学元件、电荷耦合元件、大功率稳频激光器、计算机超算等方面不断突破现有的水平,实现提升,这

行的行星。

为了知道宇宙早期的黑洞是不是和星系存在共同演化,就可以去观测更古老的星系。类星体就像宇宙中明亮的灯塔,获得不同年龄的类星体黑洞样本,就能帮助回答这个问题。

除此之外,研究宇宙早期的类星体,由于它的光在经过漫漫长路中时被星际物质所吸收,因此在我们得到的光谱中表现为众多的吸收线特征,是星际物质留给我们的“脚印”。这些特征为我们研究从极早期宇宙到近邻宇宙的物质分布和整体结构提供了前所未有的帮助^[10]。

些成果不仅最终有助于诸如黑洞这类基础研究,还将有助于提升技术和工程水平。

5 总结

黑洞是什么,如何“看”到黑洞,为什么要研究黑洞,这些大问题远不是上述内容所能全部囊括的,实际上,还有一系列问题等着解决:黑洞种子是如何形成的,它具有多大的质量?宇宙早期黑洞如何吞噬周围的物质?超大质量黑洞如何增长?星系如何形成和演化?黑洞和它的寄主星系在宇宙早期为什么不是共同演化的?

改用康德曾经说过的一段话,我们对黑洞的思考越是深沉和持久,它们的神奇就会充溢我们的的心灵。在宇宙的浩瀚剧场中,地球只是一个极小的舞台。这个舞台上的人们在好奇心的驱动下,凭借着智慧和努力“看”到黑洞;黑洞为我们研究其自身的形成和演化、它们与寄主星系之间的关系,以及宇宙的历史等提供了重要的研究载体。在黑洞的探索之路上继续前行。

参考文献

- [1] Wu *et al.* Nature, 2015,518:512
- [2] Gillessen S *et al.* ApJ, 2009, 692:1075
- [3] Gillessen S *et al.* ApJ, 2017, 837:30
- [4] Ghez A M *et al.* ApJ, 2008, 689:2044
- [5] Liu J F *et al.* Nature, 2019, 575:618
- [6] King A R, Pringle J E. MNRAS, 2006, 373:90
- [7] Abbott B P *et al.* PRL, 2016, 116:6
- [8] The Event Horizon Telescope Collaboration. ApJS, 2019, 875:1
- [9] Kormendy J, Ho L. ARA&A, 2013, 51:511
- [10] Delubac T *et al.* A&A, 2015, 574:59