

黑洞的观测证据

吴学兵

(北京大学物理学院天文学系 100871)

黑洞是爱因斯坦广义相对论预言的产物,也是宇宙中真实存在的最神秘和最具魅力的天体之一。1915年11月,爱因斯坦发表广义相对论。仅过了一个月,德国科学家史瓦西就给出了静态、球对称情况下爱因斯坦场方程的解。这个解有一个极为特殊之处,就是在中心某个半径(后被称为史瓦西半径)内的任何信息都无法被外面的观测者探测到,这一视界半径的大小与中心质量成正比。1939年9月,美国物理学家奥本海默等从爱因斯坦广义相对论得出大质量恒星在引力作用下会持续收缩,形成具有强引力的物体,连光都不会从中逃脱。后来,美国物理学家惠勒把这种连光线都不能从中逃脱的物体称为“黑洞(black hole)”。1963年,新西兰数学家克尔得到了旋转黑洞的数学解,黑洞的视界半径除依赖于质量外,其实还依赖于它旋转的快慢,快速旋转的黑洞其视界半径更小。用于描述黑洞的参数除了质量和自旋外,还有电荷。后来英国科学家彭罗斯和霍金的研究认为任何坍陷成黑洞的物体都会形成一个奇点,在这个奇点上,传统的物理定律失效。霍金还提出了黑洞的蒸发理论,黑洞能量的损失率与其质量的平方成反比。

虽然黑洞是基于广义相对论的一个理论预言,但在真实的宇宙中是否确实存在黑洞呢?在过去60多年里,天文学家不断在寻找宇宙中存在不同质量黑洞的观测证据。下面,让我们从以下六个方面,回顾一下黑洞的观测证据到底有哪些?

1. X射线双星与恒星级黑洞

过去一个世纪里,天体物理研究领域的一大成就是对恒星的演化有了充分的理解,发现恒星演化

的结局主要取决于它的质量。一般质量小于8倍太阳质量的恒星(包括太阳本身)其结局会成为一颗白矮星(其最大质量约为1.4倍太阳质量,即钱德拉塞卡极限),即由于电子简并压来平衡引力形成的致密天体。质量在8到25倍太阳质量之间的恒星其结局会成为一颗中子星,一种比白矮星更为致密、靠中子简并压来平衡引力的致密天体。质量大于25倍太阳质量的恒星其结局会成为黑洞,因为在这些大质量恒星演化后期经历超新星爆发后,其残余质量仍然会大于中子星的质量上限(约为3.2倍太阳质量,即奥本海默极限),导致中子简并压无法抗衡引力从而只能进一步塌缩而形成黑洞。

既然大质量恒星死亡时会变成黑洞,那么我们银河系中就有数千亿个恒星,其中很多大质量恒星已经死亡,因此在银河系中就可能存在上亿个质量在3.2倍太阳质量以上和几十倍太阳质量以下的恒星级黑洞。孤立的恒星级黑洞由于自身并不发光,因此非常难以观测。但如果一个恒星级黑洞和另一个正常的恒星组成双星系统,黑洞就可通过吸积伴星的物质在黑洞周围形成吸积盘并发出X射线,从而可以被X射线卫星探测到,这类双星系统被称为X射线双星。

自20世纪70年代至今,随着X射线天文学的迅速发展,X射线天文卫星已发现了20多个黑洞X射线双星以及20多个候选体,其中最有名的是天鹅座X-1(Cygnus X-1)。它产生的X射线辐射极为明亮,这些X射线并非来自黑洞或其可见的伴星,而是由黑洞吸积恒星物质形成的吸积盘产生的。天文学家通过观测那颗可见伴星(蓝超巨星)的运动轨迹和速度,估算出Cygnus X-1系统中看不见的天体

的质量,计算结果约为太阳质量的21倍。再考虑到其X射线光度变化的时标很短(约1毫秒),意味着该看不见天体的尺度很小,因此它只能是一个恒星级黑洞(图1)!有趣的是,霍金曾与研究黑洞的美国天体物理学家索恩立下字据打赌说Cygnus X-1不是黑洞,当然最后的结果只能是霍金签字认输。

天文学家不仅可以利用黑洞X射线双星中伴星的运动测得黑洞的质量(一般为几倍到几十倍太阳质量,质量下限至少超过3.2倍太阳质量),还利用观测到的X射线性质(如X射线连续谱、反射成分的6.4keV铁K α 线等)测量了20多个X射线双星中黑洞的自旋,并发现这些X射线双星中喷流射电辐射的大小与黑洞自旋的快慢存在相关性。这些研究为X射线双星中存在恒星级黑洞提供了非常可靠的观测证据。

2. 黑洞并合的引力波探测

广义相对论认为,物质的引力会引起时空的弯曲。物质加速运动时会使时空的曲率产生变化,从而以波的形式向外以光速传播能量,这种波就是引力波。引力波也被形象地称为弯曲时空中的涟漪,但引力波导致的形变效应极弱($\sim 10^{-21}$),如一千米长的距离,形变只有 10^{-18} 米,因此非常难以探测。

恒星质量的双星系统在满足一些极端条件时也可能会演化形成两个致密天体构成的系统,如双白矮星、双中子星和双黑洞,这样的两个致密天体在相互绕转时的加速运动会产生引力波。20世纪70年代,科学家发现了由旋转的中子星即脉冲星组成的双脉冲星系统,两个中子星的绕转轨道半径不断缩小,转速越来越快。在长达20年的射电观测中,美国科学家赫尔斯和泰勒发现两个中子星的绕转轨道半径变化的观测结果与产生引力波带走能量的理论预言完美相符,从而间接验证了引力波的存在,这一研究也被授予1993年诺贝尔物理学奖。

能否直接探测到这些双中子星和双黑洞系统产生的引力波呢?美国科学家建立了两个分别由相互垂直的长度4千米双臂构成的激光干涉引力波天文台(LIGO),经过多年努力,终于在2015年9月14日成功探测到了引力波。LIGO相隔3500公里的两个站点均接收到同样的信号,这一引力波是由两个质量为36和29倍太阳质量的黑洞绕转且最终合并时发出的(图2),合并后的黑洞质量为62倍太阳质量,这一过程中有3倍太阳质量的等效能量被转化为引力波带走,这一重要发现直接验证了双黑洞合并产生的引力波,因此美国科学家韦斯、索恩和巴里什获得了2017年诺贝尔物理学奖。

迄今为止,美国LIGO和欧洲VIRGO、日本

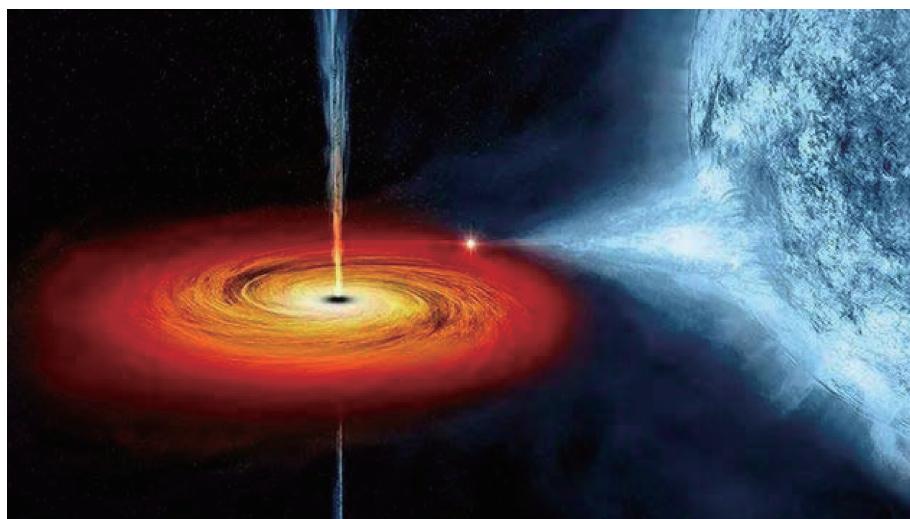


图1 黑洞X射线双星Cygnus X-1示意图。左边为黑洞、吸积盘和喷流,右边为蓝色伴星

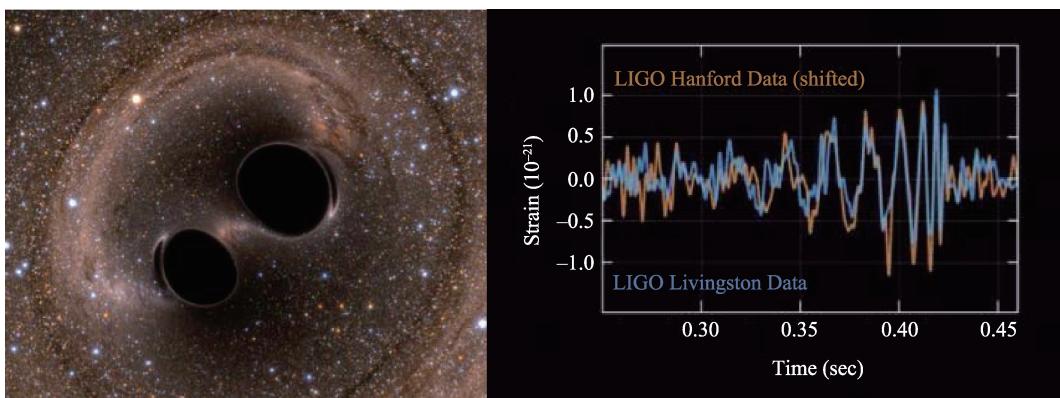


图2 左图为双黑洞绕转合并的示意图。右图为 LIGO 两个站点探测到的引力波信号

KAGRA 引力波天文台一起组成合作组织已经探测到几百例双黑洞合并产生的引力波事件和数例双中子星、中子星-黑洞系统产生的引力波事件，这些探测也为大质量恒星级黑洞甚至质量超过百倍太阳质量的中等质量黑洞的存在提供了观测证据。我国科学家利用世界上最大的单口径射电望远镜—中国天眼 FAST 开展的脉冲星计时阵(CPTA)观测，与世界上其他射电望远镜一起探测到了可能的纳赫兹引力波背景信号，这些纳赫兹引力波很可能是由宇宙中众多的超大质量黑洞并合所产生的。

3. 类星体中的超大质量黑洞

20世纪50年代，雷达探测技术被用于天文学研究来探测来自宇宙的射电源。英国剑桥大学的天文学家很快就发现了几百个宇宙射电源，并汇编成表，最著名的是3C射电源表。科学家们很想知道这些射电源到底是什么天体？利用光学望远镜寻找这些射电源的光学对应体成为当时非常重要的一项工作。天文学家们发现一些射电源光学对应体的型态看起来非常类似恒星，他们把这些“类星射电源”称为类星体。但这些类星体的光学光谱具有不同于恒星的强而宽的发射线，而且波长与恒星的谱线也很不相同。1963年，加州理工学院的科学家施密特发现类星体3C273的谱线其实是来自于波长红移后的氢和氧等元素，因此这些类星体根本不是银河系内的恒星，而是具有较大红移的遥远

星系核心的天体。这些遥远类星体巨大的能量来源也肯定不是普通恒星中的热核反应。1964年，苏联科学家泽尔多维奇和美国科学家萨尔皮特在类星体发现不久就独立提出超大质量黑洞(质量超过百万倍太阳质量)可能存在于星系的中心，这些“怪兽”级黑洞不断吸积周围气体而释放出巨大能量，从而形成类星体。这一大胆的解释奠定了类星体的物理基础。1969年，英国科学家林登贝尔提出围绕黑洞运动的吸积盘概念并计算了黑洞吸积的辐射强度，进一步确认类星体巨大能量的来源是被超大质量黑洞吸积的物质释放出来的引力能。如今，超大质量黑洞的吸积模型成了类星体和活动星系核能源机制的标准模型(图3)。

既然类星体中心存在超大质量黑洞，那么有没有办法给这些超大质量黑洞“称重”呢？天文学家找到了一种名为“光谱反响映射”的方法。类星体



图3 类星体中心超大质量黑洞与吸积盘示意图

光谱中存在强而宽的发射线,发射线的宽度可反映黑洞吸积盘外面宽发射线区气体的运动速度。此外,利用对类星体的长期光谱监测得到的宽发射线和连续谱强度的光变曲线,可以通过计算两者的时间延迟得到宽发射线区到中心黑洞的半径。通过宽发射线区的半径和速度,就可以计算得到类星体中心黑洞的质量。在过去30多年间,包括我国科学家在内的诸多团队已观测到了100多个类星体和活动星系核的黑洞质量。在此基础上,天文学家们总结出了发射线区半径和连续谱光度之间的经验关系,应用这一关系可从类星体单次光谱观测得到的连续谱光度估计出发射线区半径,再加上发射线宽度给出的运动速度,就能够得到类星体的黑洞质量。目前天文学家已发现近百万个类星体,包括利用我国郭守敬望远镜LAMOST发现的3万多个类星体,这些类星体的中心黑洞质量大多分布在从千万到百亿倍太阳质量的范围内。我国天文学家也发现了宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量高达120亿倍太阳质量的类星体,并得到韦布红外空间望远镜观测证实,对研究超大质量黑洞的起源和演化作出了贡献。

4. 银河系中心的大质量黑洞

除了类星体等辐射能量巨大的活动星系的中心存在超大质量黑洞外,正常星系的中心是否也存在大质量黑洞呢?1969年,英国科学家林登贝尔指出一旦类星体中心的黑洞周围没有物质可以被黑洞吸积时,它们就会变成“死亡”的类星体,也就成为了不活跃的正常星系。因此,许多正常星系中心也都会存在质量高达百万到几十亿倍太阳质量的超大质量黑洞。1971年林登贝尔和英国科学家瑞斯还论证了银河系中心应存在一个超大质量黑洞,并提出利用射电波段的甚长基线干涉技术应能确定银河系中心黑洞的大小。但在观测上实现这一点仍然充满挑战,因为需要超高空间分辨率的观测才能给出令人信服的结果,而且我们所在的太阳系就在银河系中,在观测银河系中心的视线方向上会

有众多星际气体和尘埃的遮挡,需要使用先进的技术来克服这些因素的影响。

近30年来,利用激光导星和计算机控制望远镜镜面形状的自适应光学技术发展迅速,已普遍应用于地面大型望远镜的红外波段天文观测中。通过自适应光学技术可有效消除地球大气对地面望远镜观测的影响,获得高达0.01角秒的空间分辨率。基于这一技术,德国天文学家根泽尔和美国天文学家盖兹领导的欧美团队分别利用位于智利的4台8米甚大望远镜和美国夏威夷的2台凯克望远镜对银河系中心(人马座A*)附近约30颗恒星进行了长达20多年的红外波段监测。这些恒星都围绕着银河系中心做椭圆轨道运动,其中最靠近银河系中心的恒星S2在不到16年的时间内就完成了一个完整的运行轨道(图4)。通过对这些恒星运动的轨道半径和速度的精确测量,两个团队都得出了相互一致的结论,即银河系中心存在质量为400万倍太阳质量的不可见的致密天体。在排除其他所有可能性后,这一大质量的致密天体只能是黑洞。由于对银河系中心恒星运动的观测确定大质量黑洞存在的决定性贡献,根泽尔和盖兹两人与研究黑洞奇点的英国数学物理学家彭罗斯一起分享了2020年诺贝尔物理学奖。

除了银河系外,天文学家利用地面大型光学望远镜在20世纪80年代就开始对几个非常近邻的正常星系如M31和M32的中心区域开展了光谱观测,试图利用吸收线光谱示踪的气体运动来得到中心黑洞存在的证据,但鉴于空间分辨率有限,结果有很大不确定性。直到1990年哈勃空间望远镜发射后,这一情况才得以显著改善。哈勃望远镜具有高达0.1角秒的空间分辨率,观测能力往往比地面望远镜高上10倍,它在1995年后对一些近邻星系中心恒星和电离气体的观测得到了这些星系中心超大质量黑洞更准确的质量。与这些近邻星系中心黑洞的测量相比,天文学家对银河系中心的观测因为采用了自适应光学技术可以达到0.01角秒的空间分辨率,比哈勃望远镜的空间分辨率还高10倍,

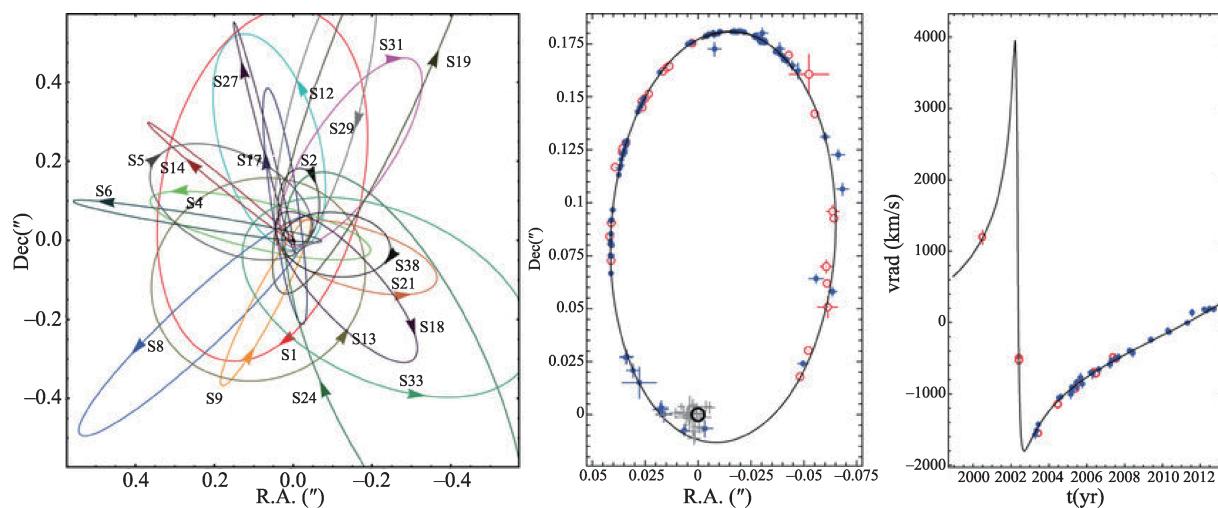


图4 围绕银河系中心人马座A*的20个恒星运动轨道、最靠近中心的S2恒星轨道及其视向速度变化图，显示银河系中心存在质量为4百万太阳质量的不可见致密天体(黑洞)

因此所得到的银河系中心黑洞质量的结果仍是最为可靠的。

5. 黑洞的直接成像

眼见为实，天文学家可否直接拍摄到黑洞的照片呢？虽然黑洞自己不发光，但由于周围会有被黑洞吸积的物质形成的明亮吸积盘，只要分辨率足够高，就应该能拍摄到被发光的盘或环包围的黑洞阴影，这将成为黑洞视界面存在的直接证据。长期以来，拍摄黑洞照片就是天文学家的一个梦想！

对近邻星系中心超大质量黑洞的直接成像是近年来黑洞研究方面取得的最具突破性的进展，实现这一成像需要高达几十微角秒的空间分辨率。2019年4月10日，由世界上200多位天文学家组成的事事件视界望远镜(EHT)国际合作团队公布了在2017年4月利用全球8个毫米波望远镜组成的全球EHT甚长基线干涉阵列拍摄的首张黑洞照片，引起举世轰动。这一黑洞位于距离地球5000万光年的椭球星系M87中心，照片上可直接看到黑洞的“阴影”和环绕着黑洞阴影但亮度南北不对称的光环。这是天文学家利用地球直径大小的望远镜阵列得到至今最高的空间分辨率(20微角秒)所拍摄的毫米波段天体的照片，其中的阴影直接证明了黑洞的存

在。EHT的8个望远镜的干涉得到了更为准确的M87星系中心离地球的距离为5.48千万光年，根据阴影大小得到M87中心黑洞的质量为65亿倍太阳质量。

2022年5月12日，EHT国际合作团队又公布了2017年4月同样利用EHT干涉阵列拍摄的银河系中心超大质量黑洞的照片，从照片上仍然可看到黑洞的阴影和环绕着黑洞阴影的光环。阴影的大小也证实了银河系中心存在质量为400万倍太阳质量的超大质量黑洞。眼见为实，这些黑洞照片让人类从视觉上感受到了超大质量黑洞的存在(图5)。我国由中国科学院上海天文台牵头，有十多位科学家参加了这些黑洞照片的拍摄工作，作出了重要贡献。2023年4月上海天文台科学家还领衔国际团队宣布利用全球毫米波望远镜阵列在3.5毫米波段首次将M87中心黑洞的阴影以及其周围吸积流和喷流形成区呈现在同一张照片上，给出了M87黑洞的“全景照”，为了解黑洞周围环境中的不同物理过程提供了重要信息。

6. 中等质量黑洞和原初黑洞

中等质量黑洞是指质量介于恒星级黑洞(质量为几倍到近百倍太阳质量)和超大质量黑洞(质量为

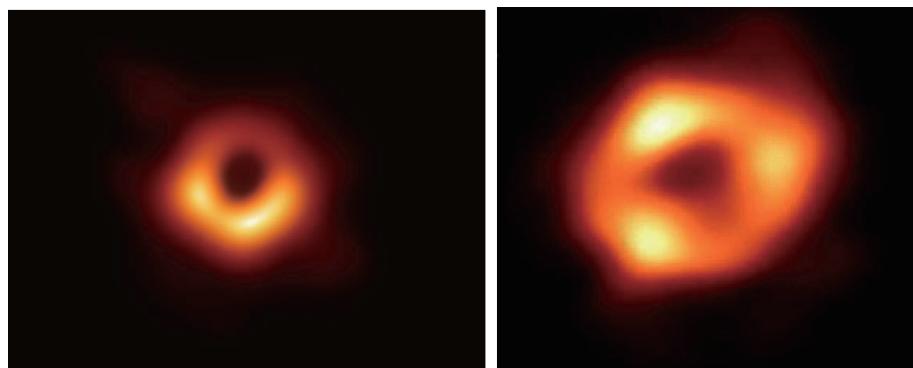


图5 事件视界望远镜(EHT)国际合作团队拍摄的M87星系和银河系中心黑洞的照片

百万倍到百亿倍太阳质量)之间的黑洞,质量一般为一百到几十万倍太阳质量。虽然目前对中等质量黑洞的研究远不如恒星级黑洞和超大质量黑洞,但很多科学家认为中等质量黑洞在宇宙中是应该存在的。因为它们是超大质量黑洞的种子,一些中等质量黑洞会通过不断吸积周围物质以及与其他黑洞并合从而可形成超大质量黑洞。最近十多年对一些红移6以上的高红移类星体的观测显示其中心存在十亿甚至百亿倍太阳质量的黑洞,在宇宙不到十亿年的时间里如何让黑洞质量增长到这么大?科学家的研究表明这些高红移类星体中心的超大质量黑洞很难通过第一代恒星死亡后形成的一百或几百个太阳质量的种子黑洞增长形成,而需要种子黑洞是质量为几千到几万倍太阳质量的中等质量黑洞。这些几千倍太阳质量以上的中等质量黑洞很可能是来自宇宙早期巨分子云的直接塌缩而形成的。最近科学家宣布美国LIGO探测到迄今最大质量的黑洞碰撞合并事件。在被命名为GW231123的合并事件中,两个质量分别约为100倍和140倍太阳质量的黑洞合并,产生一个质量约为225倍太阳质量的黑洞,这一发现为中等质量黑洞的存在提供了进一步的观测证据。

此外,对一些近邻星系的X射线观测发现了一些极亮X射线源(ULX),其发光强度超过了恒星级致密天体(如中子星和恒星级黑洞)的极限。一个可能的解释是这些极亮X射线源的中心天体质量比中子星和恒星级黑洞更大,比如质量是一千倍到几

万倍太阳质量的中等质量黑洞。这些中等质量黑洞可能是在致密的恒星星团中形成的,但目前在星团中搜寻中等质量黑洞的观测努力还没有给出令人信服的结果。近年来,天文学家试图在一些质量较小的星系(星系质量小于十亿或百亿倍太阳质量)中心观测搜寻中等质量黑洞,的确在约十个近邻星系中心发现了存在黑洞质量小于百万甚至十万倍太阳质量的可能动力学证据(图6),也在一些低质量活动星系核中心发现可能存在十万倍太阳质量黑洞的迹象,但这些还都需要更多观测的进一步证实。

还有一类黑洞被认为是在宇宙极早期形成的,被称为原初黑洞。在宇宙大爆炸的初期,由于快速膨胀和密度涨落,在宇宙高度不均匀的某些地方,当密度扰动超过临界值时就会产生引力塌缩,从而

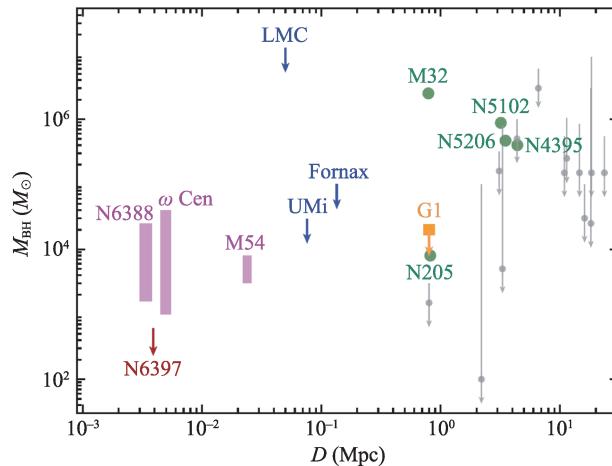


图6 一些低质量恒星系统和近邻星系可能存在的中等质量黑洞的质量测量结果或上限(单位为太阳质量),横坐标为到地球距离(1Mpc 约为326万光年)

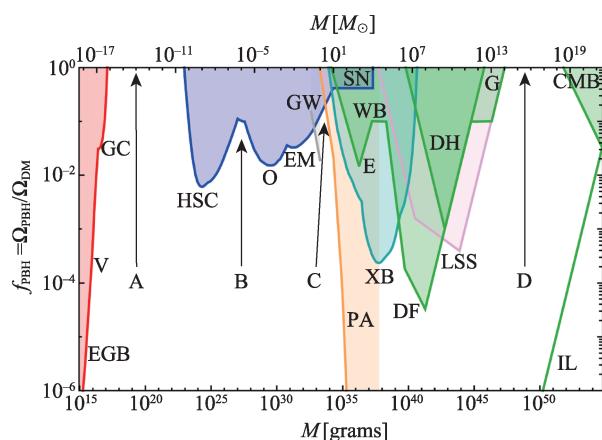


图 7 原初黑洞最可能存在的四个质量范围(A,B,C,D), 阴影部分是被各种理论与观测排除的区域。纵坐标为原初黑洞与暗物质的能量密度比

形成原初黑洞。其质量大约为 $10^{15}(t/10^{-23}s)g$, 其中 t 为大爆炸后的宇宙年龄。因此原初黑洞可能具有很宽的质量范围, 在宇宙极早期的普朗克时间 ($10^{-43}s$) 和 1s 之间形成的原初黑洞, 其质量范围可能为 $10^{-5}g$ 到 10 万太阳质量。由于黑洞存在霍金辐射的蒸发效应, 在宇宙年龄 $10^{-23}s$ 之前形成质量小于 $10^{15}g$ 的原初黑洞至今已经蒸发, 因此无法被观测到。考虑到各种理论和观测的限制, 最可能存在的原初黑洞大概在四个质量范围: 10^{17} 到 $10^{23}g$, 10^{-6} 倍太阳质量左右, 1 倍太阳质量左右, 10^{14} 到 10^{18} 倍太阳质量。除最后一种外, 原初黑洞的质量可能会远小于恒星级黑洞, 但其形成时间却要早得多。有些原初黑洞通过强大引力长期吸积周围的物质, 其质量可能增长到与恒星级黑洞相当甚至超出。一些科学家甚至认为 LIGO 引力波天文台等探测到的超过 100 倍太阳质量的黑洞不太可能是大质量恒星死亡时产生的, 而更可能来源于原初黑洞。因此, 如何从观测上区分哪些黑洞是原初黑洞已成为一大难题。此外, 原初黑洞也被一些科学家认为可能作为宇宙暗物质的候选体之一, 但如何从观测上去验证这一假设显然还是一个远未解决的问题。

黑洞是广义相对论预言的产物, 也是被观测证实在宇宙中真实存在的天体。以上我们总结了在不同天体中存在黑洞的观测证据, 包括 X 射线双星中存在的恒星级黑洞, 黑洞并合的引力波探测, 类星体中的超大质量黑洞, 银河系中心的大质量黑洞以及黑洞的直接成像等。同时, 也对目前还缺乏研究的中等质量黑洞和原初黑洞的一些研究进展进行了介绍。未来, 随着更多地面和空间多波段和多信使大型观测设备的投入运行, 我们对各种黑洞系统的详细观测将会更进一步, 必将为我们揭示更多关于宇宙中黑洞的奥秘。

致谢

作者在本文撰写过程中得到苟利军、黄庆国、郭恒潇等学者的大力帮助, 特此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] C. S. Reynolds, Observational Constraints on Black Hole Spin, Annual Review of Astronomy and Astrophysics[J], 2021, 59:117.
- [2] B. P. Abbott, et al, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Physics Review Letters[J], 2016, 116: 061102.
- [3] 左文文, 吴学兵, 类星体的能量之谜, 科学通报[J], 2016, 61: 1157.
- [4] A. M. Ghez, et al, Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits, Astrophysical Journal[J], 2008, 689(2):1044.
- [5] R. Genzel, et al, The Galactic Center Massive Black Hole and Nuclear Star Cluster, Reviews of Modern Physics[J], 2010, 82(4):3121.
- [6] The Event Horizon Telescope Collaboration, et al, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, Astrophysical Journal Letters[J], 2019, 875: L1.
- [7] The Event Horizon Telescope Collaboration, et al, First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way, Astrophysical Journal Letters[J], 2022, 930:L12.
- [8] J. E. Greene, et al, Intermediate-Mass Black Holes, Annual Review of Astronomy and Astrophysics[J], 2020, 58: 257.
- [9] B. Carr, F. Kuhnel, Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments, Annual Review of Nuclear and Particle Science[J], 2020, 70: 355.