

# 认识黑洞的首个直接“视觉”证据

左文文<sup>†</sup>

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2019-04-25 收到

<sup>†</sup> email: wenwenzuo@shao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190502

## The first direct visual evidence of a black hole

ZUO Wen-Wen<sup>†</sup>

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

**摘要** 2019年4月10日,由黑洞事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)合作组织协调召开新闻发布会,全球多地同时发布了黑洞的首个直接“视觉”证据。作为人类捕获的首张黑洞照片,它展示了5500万光年外的椭圆星系M87中心超大质量黑洞的图像,看到了黑洞“阴影”和周围环绕的新月状光环。EHT的此次观测结果从强引力场的角度验证了爱因斯坦广义相对论,有助于研究黑洞的吸积以及喷流的产生。文章着重介绍为什么给黑洞“拍照”,选择哪些黑洞模特“拍照”,如何给黑洞“拍照”,获得的数据经过怎样的后期处理和分析才能生成大家看到的“照片”;此外还将介绍在此次合作项目里的中国贡献,最后对黑洞高分辨率成像领域进行展望。

**关键词** 黑洞, 视界, 广义相对论, 事件视界望远镜

**Abstract** On April 10, 2019, in coordinated press conferences across the globe, the Event Horizon Telescope (EHT) collaboration unveiled the image of a supermassive black hole at the heart of Messier 87 (M87), an elliptical galaxy 5.5 million light years away from us. This first direct visual evidence shows us a spherical black hole "shadow" and a crescent ring-line structure around the shadow, consistent with the prediction of Einstein's theory of general relativity. The EHT observations verify general relativity from the point of view of the strong gravitational field, and also help us to study the black hole's accretion and jets. This article will focus on why, which, and how black holes should be imaged, as well as describe the data reduction and data analysis. We further review the contributions of the Chinese astronomers in this collaborative project, and the prospects for future high-resolution imaging of black holes.

**Keywords** black hole, event horizon, general relativity, Event Horizon Telescope

如果要评选出2019年最有价值和最受期待的照片,那么非图1这张照片莫属。它是人类拍摄的首张黑洞照片,对应的是5500万光年外的椭圆星系M87中心的超大质量黑洞M87<sup>\*</sup>的阴影图片。这张图片由事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)于2017年4月拍摄,2年后“冲洗”出来。

2019年4月10日通过协调召开全球新闻发布

会,事件视界望远镜项目组发布了这张黑洞照片。作为超大黑洞的初个直接视觉证据,它不仅直接确认了黑洞的存在,从强引力场的角度验证了爱因斯坦广义相对论,也有助于研究黑洞的吸积以及喷流的产生。

下面我们一起来了解这张“黑洞写真”的小秘密。

## 1 看不见的黑洞,如何证明它存在?

一百多年前,1915年,爱因斯坦提出广义相对论,将引力视为时空弯曲的效应<sup>[1]</sup>。爱因斯坦的引力场方程是广义相对论最凝练的数学表达,场方程等号的一侧反映了时空的弯曲情况,用爱因斯坦张量描述;另一侧是时空中的物质能量分布,用能动量张量描述。因此引力场方程可以理解为,物质能量分布决定了时空如何弯曲,时空弯曲决定了物质如何运动。一年之后,德国物理

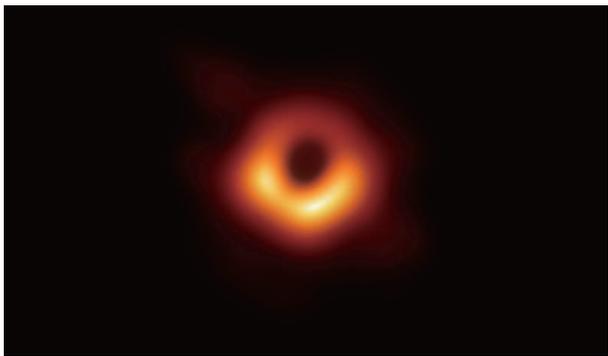


图1 M87星系中心超大质量黑洞(M87)的图像。图中心的暗弱区域即为“黑洞阴影”,周围的环状不对称结构是由于强引力透镜效应和相对论性集束(beaming)效应造成的。由于黑洞的旋转效应,图片上显示了上(北)下(南)的不对称性(图片来源: EHT)

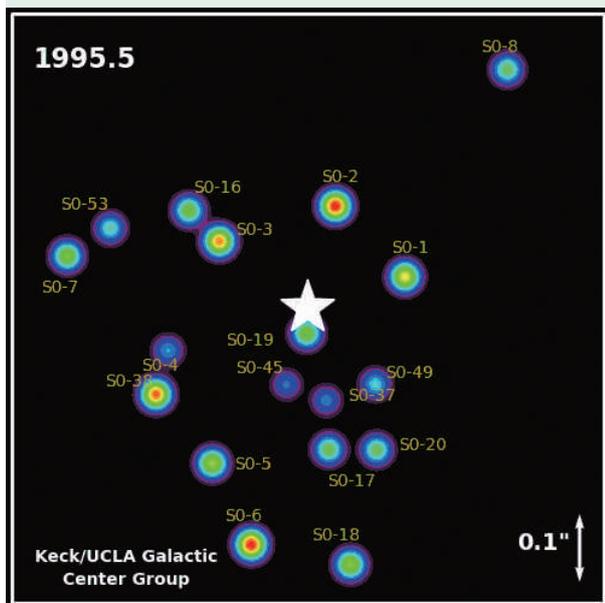


图2 银心附近恒星的运动截图(图片来源: Keck/UCLA Galactic Center Group)

学家卡尔·史瓦西就得到了第一个精确解,描述了没有自旋的球对称天体的引力场方程的解。这便是史瓦西黑洞的稳定静态解,理论预言了黑洞的存在。理论预言,一个小而重的物体能隐藏在事件视界(event horizon)之内,在视界内,其引力强大到连光都无法逃脱,这个物体就是黑洞<sup>[2]</sup>。几乎所有的星系中心都存在黑洞,在那里它们可以成长到太阳质量的数百万或者数十亿倍<sup>[3]</sup>。

在这次拍照前,主要有三类代表性证据可以表明黑洞存在:

(1)恒星、气体的运动透露了黑洞的踪迹。黑洞有强引力,对周围的恒星、气体会产生影响,可以通过观测这种影响来反推黑洞的存在。例如,根据对银河系中心区域的28颗恒星长达16年的观测显示,这些恒星在围绕着一个不可见的天体转动,该不可见天体在小于0.002光年的区域内拥有的质量达410万倍太阳质量(图2)。鉴于难以找到其他类天体具有这样的性质,天文学家们认为该观测证据证明了银河系中心超大质量黑洞的存在<sup>[4]</sup>。

(2)根据黑洞吸积物质发出的光来判断黑洞的存在。在黑洞强引力的作用下,周围的气体就会向黑洞下落。由于气体具有一定的角动量,因此在距离黑洞几倍到几万倍事件视界的地方形成一个发光的腰带——吸积盘。以超大质量黑洞为例,如果把黑洞的吸积盘区域比作一个黄豆,普通星系就相当于一个身高5万米的巨人,虽说黄豆般大小的活跃黑洞比巨人般的星系小千万倍,但每秒钟发出的能量却比星系强很多。这种小尺寸、大能量的性质使我们推断它很可能是黑洞<sup>[5]</sup>。

(3)黑洞成长的过程“看”见黑洞。LIGO探测的五次引力波都对应对了恒星级质量黑洞的并合事件,见证了更小的黑洞借助并合成长为更大黑洞的过程。这类引力波的发现,也是我们推断黑洞存在的证据之一<sup>[6]</sup>。

以上都是间接的证据,而要想直接“看”到黑洞,天文学家希望拍到更靠近黑洞中心的照片,比如拍摄到黑洞的事件视界附近。

## 2 给黑洞“拍照”的理论预言

广义相对论预言，因为黑洞的存在，周围时空被引力弯曲，气体物质朝向中心运动。气体下落至黑洞的过程中，由于气体具有角动量，在黑洞周围形成了吸积盘。下落物质的引力能转化为光和热，中心气体被加热至数十亿度，辐射的波段范围从伽马射线到光学、射电波段均存在。这一过程中质量转化为辐射能的效率很高，能达到6%至40%，而太阳内部核聚变所实现的质量转化能量的效率只有0.7%。观测表明，黑洞在吸积气体的同时，还会向外发出强烈的物质和能量喷流。

一百年前，爱因斯坦广义相对论提出后不久，便有科学家探讨了黑洞周围的光线弯曲现象。根据吸积流的温度，黑洞周围的吸积盘可以分成冷吸积盘和热吸积盘模型<sup>[7]</sup>。冷吸积盘模型具有几何薄、光学厚的特点，主要辐射机制是黑体辐射，辐射效率高，所以吸积流温度偏低。而热吸积盘模型具有几何厚、光学薄的特点，主要辐射机制包括同步辐射(相对论性电子在磁场中加速运动产生的辐射)、韧致辐射(电子在电场中加速产生的辐射)、康普顿辐射(光子与具有更高能量的电子发生碰撞获得能量所产生的辐射)等，辐射效率低，所以吸积流温度高。

20世纪70年代，James Bardeen及Jean-Pierre Luminet等人对于一个具有冷吸积盘的黑洞，计算出光子捕获半径约2.6倍视界半径，遥远观测者看到的黑洞图像接近于一个嵌在吸积盘图像中的细圆环(图3)<sup>[8, 9]</sup>。

20世纪90年代，Heino Falcke等天文学家们首次基于广义相对论下的光线追踪程序，预言对于具有几何厚、光学薄吸积盘的黑洞(我们银河系中心的黑洞Sgr A\*接近于这样的模型)，受黑洞强引力场的影响，黑洞吸积或喷流产生的辐射光受事件视界附近的引力弯曲和光子捕获，造成黑洞就像沉浸在一片类似发光气体的明亮区域内，事件视界看起来就像阴影，阴影周围环绕着新月状

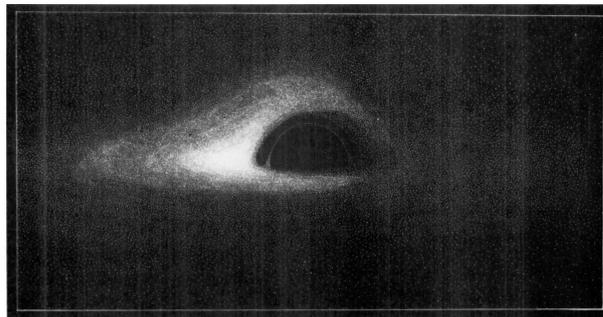


图3 一种理论模型预言的具有冷吸积盘模型的黑洞图像<sup>[9]</sup>

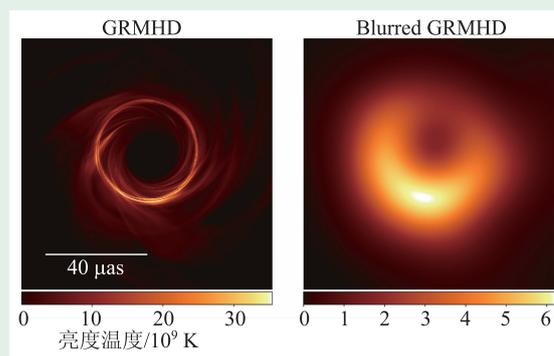


图4 左图：基于广义相对论磁流体学数值模拟(GRMHD)的黑洞阴影，预言将会看到一个近似圆形的暗影被光环包围；右图：为了模拟利用EHT观测到的图像，对左图进行了半高全宽为20微角秒(uas)的卷积(图片中的空间尺寸可参考长度比例尺，亮度温度由图中示意温度展示)<sup>[13]</sup>

的光环。鉴于黑洞的自旋以及与观测者视线方向的不同，光环半径对应引力透镜的光子环半径——2.4(快速自旋的黑洞)—2.6倍(没有自旋的史瓦西黑洞)史瓦西半径<sup>[10]</sup>。

后来，更多科学家针对黑洞成像开展了大量的吸积流和辐射转移的广义相对论数值模拟研究，均预言黑洞阴影的存在(图4)<sup>[11-13]</sup>。因此，对黑洞阴影的成像能够提供黑洞存在的直接“视觉”证据。

给黑洞拍照，有三个科学意义：(1)对黑洞阴影的成像将能提供黑洞存在的直接“视觉”证据，能在强引力场下验证广义相对论，看看观测结果是否与理论预言一致。(2)有助于理解黑洞是如何“吃东西”的。黑洞阴影区域非常靠近黑洞吸积盘的极内部区域，综合这里的信息和之前观测获得的吸积盘更外侧的信息，就能更好地重构这个物理过程。(3)有助于理解黑洞喷流的产生和

方向。某些朝向黑洞下落的物质在被吞噬之前，会由于磁场的作用，沿着黑洞的转动方向向外产生喷流。之前收集的信息多是更大尺度上的，科学家难以知道在靠近喷流产生的源头处发生了什么<sup>[13]</sup>。若能对黑洞暗影进行拍摄，就能助天文学家一臂之力。

### 3 此次拍照的黑洞模特

由于黑洞阴影外侧的光环看起来的尺寸大小(角尺寸)主要与两个因素有关——实际大小、黑洞到地球的距离，所以在望远镜拍照能力有限的情况下，想要拍摄一张好照片，一定要找一个“靠谱”的拍照模特，它的角尺寸要看起来很大。而黑洞光环的实际大小与黑洞的质量有关，黑洞质量越大，黑洞光环越大；再综合距离因素，你会发现选择临近的超大质量黑洞是个明智之选。银河系中心的黑洞 Sgr A\* 和星系 M87 的中心黑洞 M87\* 便是两个好模特<sup>[14]</sup>。

Sgr A\* 是地球上能够观测到的角尺寸最大的黑洞，质量是  $(410 \pm 60)$  万倍太阳质量<sup>[15]</sup>，对应的视界半径是 1300 多万千米，其光环半径约 2.6 倍视界半径，即 3300 多万千米。它到地球的距离是 26000 光年，故光环的角尺寸约为 0.00005 角秒(50 微角秒；1 角秒相当于 100 万微角秒)。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)。

对于黑洞 M87\*，根据恒星动力学观测结果估计的质量约 66 亿倍太阳质量<sup>[16]</sup>，而根据气体动力学的观测结果估计其质量约 35 亿倍太阳质量<sup>[17]</sup>。按照 66 亿倍太阳质量来计算的话，尽管质量比 Sgr A\* 大了约 1600 倍，但其距离 5500 万光年却远了 2000 多倍，使其成为第二大黑洞，黑洞光环的大小约 40 微角秒。按照 35 亿倍太阳质量估算，黑洞光环的大小约 20 微角秒。

后文将提及，此次拍摄 M87\* 的 EHT 的分辨率是 25 微角秒。因此从这个角度看，M87\* 的阴影拍摄成功真是幸运。如果 M87\* 的质量是 35 亿倍太阳质量，EHT 将无法成功捕获它的照片。反过

来，此次黑洞照片的捕获也帮助确定了 M87\* 黑洞的质量是  $(65 \pm 9)$  亿倍太阳质量<sup>[18]</sup>。

### 4 给黑洞拍照的事件视界望远镜

拍摄黑洞照片用到的望远镜的灵敏度和分辨本领很重要，这也是描述望远镜实力的两大要素。灵敏度强调探测微弱射电源的能力；而分辨本领反映了区分天球上两个靠得很近的射电点源的能力，用刚刚能分辨的两点间张角  $\theta$  来表示， $\theta$  与观测波长和望远镜口径有关， $\theta$  越小，表示分辨本领越高。两者均对射电望远镜的口径提出了要求：望远镜的口径越大，其灵敏度越高，分辨本领越强。除了与望远镜的口径有关，分辨本领还和观测波段有关。同样口径的望远镜，观测波长越长， $\theta$  越大，对应的分辨本领越低。

由于射电望远镜所接收光的波长是可见光波长的成千上万倍，为了达到同样的分辨率，射电望远镜要比光学望远镜大千、万倍。因此，口径为百米级的射电望远镜所能达到的分辨率甚至还远不及爱好者们使用的光学望远镜。

天文学家对高分辨率的渴求，并没有止步于射电望远镜单天线。射电干涉技术的成功实施使得望远镜阵列的角分辨率相较于单独每架望远镜更高，灵敏度也更高。所谓 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 技术，就是当相隔两地的两架射电望远镜同时观测来自同一天体的射电波，根据各自独立的时间标准，将天体的射电波记录下来，然后再将这两个记录一起送入处理机进行相关处理，最终分析获取该天体的射电辐射强度和位置。VLBI 网络便是利用这一技术，让处于不同地理位置的多个射电望远镜联合起来，组成一个望远镜观测网络，来解决射电望远镜实现高分辨本领的难题<sup>[19]</sup>。VLBI 的角分辨率由望远镜间最大间距(最长基线)决定。假定观测波段为 1 毫米，一个长度为 1 万千米的基线能获得约 21 微角秒的分辨本领。

要成功成像必须要求所有望远镜在时间上完全同步，当 EHT 的每个望远镜都能在时间上同步

时，记录到的信号就能被完美地修正聚焦。如果镜面不稳定，譬如会振动的话，反射的光线将无法准确聚焦。EHT利用氢原子钟来确保时间纪录的稳定性。原子钟能精准到每数亿年才有一秒的误差。值得一提的是，该VLBI技术也成功应用于我国嫦娥探月工程的探测器的精准定位。

为了捕获第一张黑洞图像，由来自包括中国在内的超过200名科学家达成了“事件视界望远镜”(Event Horizon Telescope, EHT)这一重大国际合作计划。EHT观测所利用的技术就是毫米波VLBI，目前其工作波段在1.3 mm，并且将有望扩展到0.8 mm<sup>[20, 21]</sup>。

参与此次观测的包括位于世界6个地点的8个台站(Atacama Pathfinder Experiment, APEX; Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA; IRAM 30-meter Telescope; South Pole Telescope, SPT; James Clark Maxwell Telescope, JCMT; Large Millimeter Telescope, LMT; Submillimeter Array, SMA; Submillimeter Telescope, SMT)，其中由于位置的限制，位于南极的SPT望远镜无法观测到M87\*(图5)。

## 5 黑洞“拍照”基于的电磁波段

根据理论预言，黑洞周围气体在1 mm附近的辐射强度最高，而且1 mm附近是个比较干净的观测窗口，被同步自吸收等过程影响的程度大大减弱，黑洞周围气体的辐射变得透明<sup>[22]</sup>。2017年EHT观测Sgr A\*和M87\*基于的窗口便是1.3 mm，未来还希望用0.8 mm。

既然理论预言出的照片很早便存在，VLBI技术也并非近十年才有的，为何黑洞照片现在才诞生呢？主要瓶颈其实在观测窗口——1 mm左右。这种对观测波段的极高要求，也就意味着对望远镜性能的极高要求。

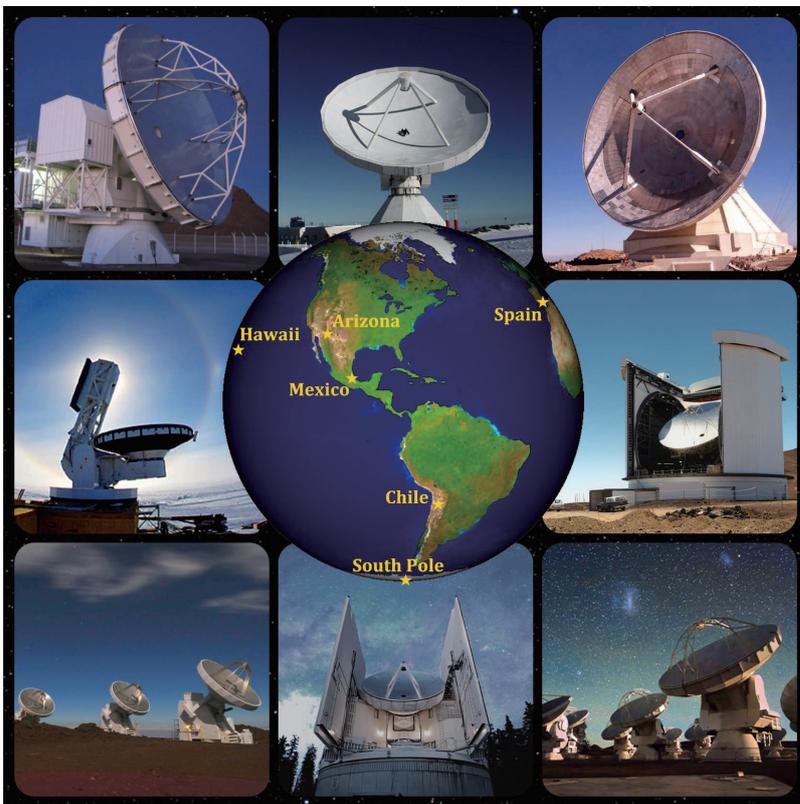


图5 参与EHT观测的8个VLBI台站，其中由于位置限制，南极的SPT望远镜无法观测到M87\*(图片来源：EHT)

EHT的每架射电望远镜本质上就是一架大口径的抛物面天线。为了保证射电望远镜的天线在观测波段内正常观测，天线的加工精度必须足够高，其偏离抛物面的程度最多只能与观测波长相差5%。因此，可以预想，观测毫米波比观测厘米波所要求的天线加工精度更高，加工难度更大。大家也不难发现，参与EHT的8台望远镜有效口径大多为十几米，最大不过73米。

由于EHT此次观测的波段在1.3 mm，容易受地球大气的水汽影响，因此这些亚毫米波望远镜分布在高海拔地区，包括夏威夷和墨西哥的火山、亚利桑那州的山脉、西班牙的内华达山脉、智利的阿塔卡马沙漠以及南极点。

## 6 复杂的相关数据处理和后期数据分析

在这次拍摄黑洞照片的过程中，多台设备同时观测和记录，然后将数据汇总到一起分析。

2017年4月份的观测中,8个台站在5天观测期间共记录约3500 TB的数据(1 TB等于1024 GB,相当于500小时的高清电影)<sup>[23]</sup>。因为数据量过于庞大,不可能靠网络传递,所以EHT用专用的充氮硬盘来记录每个望远镜的原始观测数据,再把硬盘寄回数据处理中心。

超级计算机需要获取相同的信号到达两个望远镜的时刻差(时延)及其随时间的变化快慢(时延率),校正射电波抵达不同望远镜的时间差,最后综合两个望远镜的位置信息、信号的强度以及上述两个参数——时延、时延率,就可以对该天体的射电辐射强度和位置进行综合处理分析,最终捕获首张黑洞图像。这个过程的数据量之多,处理难度之大都是前所未有的。即使现在人类的运算能力已经非常强大,这张照片还是花费了近两年时间“冲洗”。终于在今年4月10日晚发布了首张黑洞照片。

黑洞周围的亮环接近圆形,偏离度小于10%。亮环直径为 $42\pm 3$ 微角秒,根据已知的距离5500万光年,推知其直径约1000亿千米。圆环内部即黑洞阴影所在的区域并非完全黑暗,内外的亮度比值小于1:10。周围的环状不对称结构是由于强引力透镜效应和相对论性喷流的集束效应(beaming)所造成的。根据喷流与视线方向的夹角为 $17^\circ$ <sup>[24]</sup>,在共转盘的假设下,从南北的亮度不对称性可以推出,图像下方的物质朝向观测者运动



图6 科学家们在JCMT观测室工作的情景(图片提供:高峰,上海天文台)

(从地球看过去做顺时针转动)。这与电离气体在20 s差距(即3500倍视界半径)的尺度上的运动特征一致<sup>[17, 25]</sup>,也与VLBI在7 mm处观测到的转动性质一致<sup>[24]</sup>。

通过比较数据生成的黑洞图片与广义相对论磁流体力学的数值模拟结果,确证了M87中心黑洞的存在,并估计出黑洞质量为 $65\pm 9$ 亿倍太阳质量<sup>[12, 18]</sup>。

## 7 全球项目中的中国贡献

在此次事件视界望远镜(EHT)对黑洞阴影、光环的高分辨率成像研究中,中国科学家没有缺席。根据EHT项目组发表于《天体物理学杂志通讯》(*Astrophysical Journal Letters*, *ApJL*)的六篇文章的作者列表,参与此国际合作项目的科研人员达200名之多,其中,来自中国大陆的学者有16人,分别为上海天文台8人,云南天文台1人,高能物理所1人,南京大学2人,北京大学2人,中国科学技术大学1人,华中科技大学1人。另外,还有部分来自中国台湾地区的学者。

中国科学家长期关注高分辨率黑洞观测和黑洞物理的理论与数值模拟研究,在EHT国际合作形成之前,就已开展了多方面具有国际显示度的相关工作。此次EHT合作,中国科学家在早期EHT国际合作的推动、EHT望远镜观测时间的申请、组成EHT的望远镜之一——詹姆斯韦望远镜(James Clerk Maxwell Telescope, JCMT)的运营及观测(图6)、针对EHT望远镜的后期数据处理和结果理论分析等方面做出了贡献。

自2015年2月起,JCMT由中国科学院天文大科学中心参与的一个合作机构(EHT共有13个合作机构)运营,而中科院天文大科学中心由中国国家天文台、紫金山天文台和上海天文台共同成立。上海天文台牵头组织协调国内学者通过该EHT合作机构参与此次EHT项目合作。

虽然位于中国大陆的射电望远镜未参与正式观测,但在前期联合观测(2017年3—5月的全球联合观测)中,上海65米天马望远镜(图7)和新疆

南山25米射电望远镜作为东亚VLBI网成员共同参与了密集的毫米波VLBI协同观测,为最终的M87\*黑洞成像提供了总流量的限制<sup>[20]</sup>。



图7 上海65米天马望远镜(图片来源:上海天文台)

## 8 总结与展望

参与EHT观测的上海天文台专家一致表示,对M87\*黑洞的顺利成像绝不是EHT的终点站:一方面,对于M87\*观测结果的分析还能更加深入,从而获得黑洞周围的磁场性质,对理解黑洞周围的物质吸积及喷流形成至关重要;另一方面,大家翘首以待的银河系中心黑洞Sgr A\*的照片也要出炉了。

EHT是一个多年国际合作的结果,科学家们提供了研究宇宙中最极端天体的新方法。EHT的建设和今天宣布的观测结果源于数十年观测、技术和理论工作的坚持和积累。这与来自世界各地的研究人员的密切合作是分不开的,是全球团队合作的典范。

想要利用VLBI技术构成一个等效口径足够

大、灵敏度足够高的望远镜,需要在全世界各地广泛地分布着足够多的这类望远镜。过去十年中,技术的突破、新射电望远镜不断建成并加入EHT项目、算法的创新等,终于让天文学家们打开了一扇关于黑洞和黑洞视界研究的全新窗口。

EHT项目本身还将继续“升级”,随着后续更多观测台站(如Northern Extended Millimeter Array和Kitt Peak National Observatory)的加入,以及数据质量(灵敏度)的提升,让我们一起期待,未来看到M87\*和Sgr A\*的更高清照片,发现照片背后的黑洞奥秘。

总之,既然已经拍到第一张黑洞照片,更高清黑洞成像的春天还会远吗?

## 参考文献

- [1] Einstein A. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften. Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1915
- [2] Schwarzschild K. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften. Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1916
- [3] Kormendy J, Richstone D. ARA&A, 1995, 33: 581
- [4] Gravity Collaboration, Abuter R, Amorim A *et al.* A&A, 2018, 615:L15
- [5] Wu X B *et al.* Nature, 2015, 518: 512
- [6] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 061102
- [7] Yuan F, Narayan R. ARA&A, 2014, 52: 529
- [8] Bardeen J M. Black Holes. New York: Gordon and Breach, 1973. 215
- [9] Luminet J P. A&A, 1979, 75: 228
- [10] Falcke H, Melia F, Agol E. ApJL, 2000, 528: L13
- [11] Broderick A E, Loeb A. MNRAS, 2005, 363: 353
- [12] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L1
- [13] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L5
- [14] de Gasperin F, Orrù E, Murgia M *et al.* A&A, 2012, 547: A56
- [15] Ghez A Z *et al.* ApJ, 2008, 689: 1044
- [16] Gebhardt K, Adams J, Richstone D *et al.* ApJ, 2011, 729: 119
- [17] Walsh J L, Barth A J, Ho L C *et al.* ApJ, 2013, 770: 86
- [18] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L6
- [19] Rogers A E E *et al.* Science, 1983, 219: 51
- [20] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L2
- [21] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L4
- [22] Yuan F, Markoff S, Falcke H. A&A, 2002, 383: 854
- [23] The EHT Collaboration. ApJL, 2019, 875: L3
- [24] Walker R C, Hardee P E, Davies F B *et al.* ApJ, 2018, 855: 128
- [25] Ford H C, Harms R J, Tsvetanov Z I *et al.* ApJL, 1994, 435: L27