史上首张黑洞照片的科学与技术

吴学兵^{1,2}

1. 北京大学物理学院天文系, 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

黑洞是爱因斯坦广义相对论预言的产物, 也是宇宙中最神秘的天体. 2019年4月10日, 事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)国际合作团队公布了利用全球的8个毫米波望远镜组成的干涉阵以约20微角秒的分辨率拍摄的首张黑洞照片, 直接测量了射电星系M87中心黑洞的阴影和黑洞周围光环的大小, 得到了M87中心黑洞的质量为65亿太阳质量(1太阳质量= 1.9891×10^{30} kg), 引起举世轰动. 下面对获取史上首张黑洞照片的技术、过程和所得结果的科学意义进行简要解读, 并对今后相关研究的一些可能进展进行展望.

1 首张黑洞照片的发布

在长期的等待之后, 2019年4月10日北京时间晚上9点, 由世界上二百多位天文学家(其中16位来自中国大陆)组成的事件视界望远镜国际合作团队在全球六地(比利时布鲁塞尔、智利圣地亚哥、中国上海和台北、日本东京和美国华盛顿)同时举办新闻发布会, 公布了利用全球8个毫米波望远镜组成的事件视界望远镜干涉阵列拍摄的首张黑洞照片. 这一黑洞位于距离地球5500万光年(1光年= 9.4607×10^{15} m)的椭圆星系M87中心, 图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^[1](图1). 虽然图片看起来还有些模糊, 但这却是天文学家至今最高的分辨率获得的毫米波段黑洞天体的照片, 其中的阴影与“中心存在超大质量黑洞”的预言是一致的, 这是一个了不起的科学成就!

4月10日, EHT国际合作团队还在 *Astrophysical Journal Letters* 上同时发表了6篇与首张黑洞照片相关的论文^[1-6], 分别对黑洞阴影、望远镜阵列和仪器、数据处理与定标、黑洞成像、不对称光环的起源和中心黑洞质量6个方面进行了详细介绍.

2 望远镜阵列与分辨率

对于黑洞成像, 要求最高的是分辨率. EHT国际合作团队确定了两个近邻的超大质量黑洞作为观测目标, 即银河系中心的超大质量黑洞(人马座A*)和巨椭圆星系M87中心的超大质量黑洞(M87*). 天文学家们利用恒星动力学

吴学兵 北京大学物理学院天文学系主任、教授, 中国天文学会副理事长. 2005年国家杰出青年科学基金获得者, 2015年中国天文学会首届黄润乾天体物理基础研究奖获得者. 带领团队发现宇宙早期质量最大的黑洞, 成果入选2015年度中国科学十大进展、中国高等学校十大科技进展, 获2017年教育部自然科学一等奖.

和气体动力学方法已得到这两个超大质量黑洞的质量分别约为400万太阳质量和60亿太阳质量, 它们距离地球分别约为2.5万光年和5000万光年. 根据史瓦西半径($R=2GM/c^2$), 可推算其黑洞视界面的角大小(直径)只有分别约20微角秒和14微角秒, 而理论上推算出的黑洞阴影外的光环的角大小约为5倍史瓦西半径. 因此, 要分辨黑洞阴影和光环, 需要把望远镜的角分辨率提高到至少几十微角秒. 这是一个非常大的挑战, 因为著名的哈勃空间望远镜的角分辨率也只有0.05角秒.

望远镜可分辨的角大小正比于观测波长和望远镜口径之比(λ/L). 要提高分辨率, 需要使用较短的观测波长和增加望远镜的口径, 但单个望远镜的口径总是有限的. 为

图1 EHT国际合作团队公布的星系M87中心黑洞照片^[1]
Figure 1 Image of the black hole in the center of galaxy M87 released by the EHT collaboration^[1]

了提高角分辨率, EHT 团队使用 1974 年诺贝尔物理学奖获得者马丁·赖尔发明的综合孔径成像方法和后来科学家们在此基础上发展的甚长基线干涉技术, 将位于北美洲 (SMA, JCMT, SMT, LMT)、南美洲 (ALMA, APEX)、欧洲 (PV) 和南极 (SLT) 的 8 台毫米波望远镜组成干涉阵^[3](图 2). 其基线长度 (即望远镜阵列所覆盖区域的等效直径) L 约 1 万千米, 与地球直径相当, 并利用 1.3 mm 波长 (对应频率范围为 227~229 GHz) 作为观测波长, 使得 EHT 的角分辨率达到空前的 20 微角秒, 从而具备了拍摄银河系中心和星系 M87 中心超大质量黑洞照片的能力^[2]. 而且在这 8 台望远镜中, 位于智利的 ALMA 本身就是由 54 个 12 m 和 12 个 7 m 口径的望远镜组成的毫米波干涉阵, 其有效口径达到 73 m, 远大于其他 7 台望远镜的口径. 它的加入使得 EHT 的探测灵敏度得到大幅提升, 有能力对黑洞周围物质在毫米波段暗弱的发光进行成像.

3 黑洞照片的阴影、光环与黑洞质量

2017 年 4 月 5, 6, 10, 11 日, EHT 的 8 台望远镜对星系 M87 中心黑洞进行了 4 天观测, 数据量达到 10 PB. 观测数据被 4 个独立的团队分别利用两种不同方法进行初始处理, 再经过复杂的处理流程, 利用 3 种不同的成像工具得到最后的图像^[3,4](图 3(a)~(d)). 其实, EHT 国际合作团队

也利用各种理论模型产生的模拟图像得到了利用 EHT 的 20 微角秒分辨率预计得到的图像. 观测得到的最终图像与考虑黑洞广义相对论效应的磁流体动力学 (general relativistic magneto-hydrodynamics, GRMHD) 数值模拟得到的预

图 2 (网络版彩色) EHT 用来拍摄首张黑洞照片的 8 台望远镜地点分布^[3]

Figure 2 (Color online) Locations of 8 telescopes used to take the first black hole image by EHT^[3]

图 3 (网络版彩色) EHT 4 天观测经数据处理得到的最后图像 (a~(d))^[3,4]; 观测图像 (e)、理论模拟图像 (f) 及其在 20 微角秒分辨率时的预计图像 (g)^[5]

Figure 3 (Color online) Final images of 4-day observations after data analyses (a)~(d)^[3,4]; observed image (e), simulated image (f) and blurred simulated image at a resolution of 20 micro-arcseconds (g)^[5]

计图像非常类似^[5](图3(e)~(g)), 证实在研究黑洞附近物质的运动和辐射时必须考虑这些物理过程。

4天的观测结果均显示出黑洞阴影和不对称光环。光环直径的测量平均值为42微角秒, 与此对应的黑洞引力半径的角大小($\theta_g=GM/Dc^2$)为3.8微角秒。EHT 8个望远镜的干涉也得到了更为准确的M87星系中心离地球的距离, 为16.8兆秒差距(即5480万光年), 因此可得到M87中心黑洞的质量为65亿太阳质量^[1,6]。这一结果与以前天文学家利用恒星动力学方法测量得到的M87中心黑洞质量(66亿太阳质量)相符^[7], 但明显不同于之前用气体动力学方法得到的结果(35亿太阳质量)^[8], 说明后者的测量方法很可能存在问题。

4 首张黑洞照片的科学意义

EHT国际合作团队利用地球大小的基线干涉所得到的毫米波段极高角分辨率, 首次直接探测到M87星系中心的黑洞阴影以及环绕其的不对称光环, 用直接成像的方法证明了宇宙中黑洞的存在, 为爱因斯坦广义相对论提供了在强引力场中的又一验证。这是黑洞研究历史上一个极为重要的里程碑。

同时, 这也是第一次根据黑洞照片上阴影和环绕光环的大小直接给出黑洞质量的测量值。M87星系中心黑洞质量为65亿太阳质量的结果证明了以前利用恒星动力学方法测量结果的可靠性, 对气体动力学观测给出的小约1倍的质量结果提出了质疑。这也促使天文学家们思考获得黑洞质量的现有方法中哪些还存在问题, 对这些问题的解决将有助于他们利用各种方法获得对更多超大质量黑洞的准确的质量测量。

在毫米波段观测到的黑洞阴影外发光亮环所呈现出的不对称结构, 对理解黑洞附近物质的吸积过程和辐射机

制非常重要。光环的不对称来自于物质的高速旋转和相对论效应, 其结构和角大小与这些物理过程以及黑洞的自旋密切相关。此外, 所探测到的毫米波段辐射应来自于电子在磁场中的同步加速辐射, 对这些辐射的细致分析将提供关于黑洞附近磁场的宝贵信息。

首张黑洞照片拍摄的是最靠近M87中心黑洞视界的区域, 这一区域(约几倍到几十倍史瓦西半径)通常也被认为是产生M87星系跨越数百万光年的相对论性大尺度喷流的根源。长期以来, 对喷流起源“根部”的物理性质都只是理论猜测。而黑洞照片直接拍摄到这一区域, 为研究喷流的产生机制, 包括物质来源、相对论电子和磁场, 提供了重要帮助。

5 未来的可能进展

EHT在2017年的观测中使用8台毫米波望远镜, 在2018年及以后又有3台望远镜参加EHT的观测, 即位于格林兰岛的GLT、法国的NOEMA和美国的KP望远镜^[2](图4)。GLT靠近北极, 它的加入进一步扩大了EHT的基线长度。法国的NOEMA望远镜类似于智利的ALMA望远镜, 是由12个15m的毫米波望远镜构成的阵列, 它的加入将有助于进一步提高EHT的探测灵敏度。未来EHT的工作波长可能会从目前的1.3mm缩短到亚毫米, 这将有助于进一步提高EHT的角分辨率。这些进展将使得EHT的分辨率和灵敏度均得以提高, 为更清楚地拍摄更多超大质量黑洞的照片提供条件。

EHT国际合作团队下一次公布的黑洞照片将是银河系中心超大质量黑洞的照片。由于太阳系位于银河系内距离银河系中心约2.5万光年的银盘上, 观测银河系中心黑洞的方向与观测M87星系中心黑洞大为不同。银河系中心到我们视线方向上将有更多恒星与物质分布, 它们的存在

图4 (网络版彩色)参加过、正参加和即将参加EHT的多台望远镜在全球的分布^[2]

Figure 4 (Color online) Locations of the telescopes which joined, are joining and will join the EHT^[2]

肯定会影响到拍照的效果, 因此对图像处理技术也提出了更高的要求. M87是射电星系, 属于活动星系核的一类, 有极强的射电辐射和高能辐射. 而银河系属于正常的宁静星系, 中心的辐射相比M87更弱. 因此, 对银河系中心黑洞的成像将告诉我们更多关于宁静星系中心黑洞附近的物理性质.

也许不久的将来, 人类将考虑把与 EHT 类似的毫米波干涉阵扩展到空间甚至月球上. 这样可使望远镜的基线

长度从目前地球上的 1 万千米扩大到几十万千米, 从而将望远镜的分辨率提高到小于 1 个微角秒. 毫无疑问, 分辨率的大幅提高将会为我们提供关于超大质量黑洞的更清晰的图片, 从而得到更精确的黑洞质量和自转参数, 并对黑洞周围物质的吸积物理和喷流机制给出更清晰的答案. 衷心期待我国作为空间大国, 能在未来空间和月基毫米波望远镜干涉阵列的建设和科学研究上作出我国主导的重要贡献.

推荐阅读文献

- 1 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L1
- 2 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. II. Array and instrumentation. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L2
- 3 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. III. Data processing and calibration. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L3
- 4 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L4
- 5 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. V. Physical origin of the asymmetric ring. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L5
- 6 The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. VI. The shadow and mass of the central black hole. *Astrophys J Lett*, 2019, 875: L6
- 7 Gebhardt K, Adams J, Richstone D, et al. The black hole mass in M87 from Gemini/NIFS adaptive optics observations. *Astrophys J*, 2011, 729: 119
- 8 Walsh J L, Barth A J, Ho L C, et al. The M87 black hole mass from gas-dynamical models of space telescope imaging spectrograph observations. *Astrophys J*, 2013, 770: 86

Summary for “史上首张黑洞照片的科学与技术”

The science and technology behind the first black hole image in history

Xuebing 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 April 10, 2019, the first black hole image in history was released by the Event Horizon Telescope (EHT) collaboration involving more than 200 astronomers, including 16 from the Chinese mainland. This image was captured using EHT at an angular resolution of 20 microarcseconds, and it shows the shadow of the black hole and the surrounding photon ring at the center of the radio galaxy M87 at a distance of 55 million light years from the Earth, which enabled the derivation of the black hole mass of 6.5 billion solar masses.

EHT uses the very long baseline interferometry technology to combine eight telescopes worldwide to form a virtual telescope with a baseline of ten thousand kilometers (approximately the size of the Earth), which enables an angular resolution to reach as high as 20 microarcseconds at the 1.3-millimeter wavelength (with a frequency range of 227–229 GHz). The observations of the central black hole of the nearby radio galaxy M87 were conducted on April 5, 6, 10, and 11 of 2017. After careful data reduction and image processing over the last two years, the first image of the M87 black hole was released. It directly shows the black hole shadow surrounded by an asymmetric photon ring with a diameter of approximately 42 microarcseconds, consistent with the blurred simulated image from a general relativistic magneto-hydrodynamics simulation at an angular resolution of 20 microarcseconds. With the more accurate distance of 54.8 million light years measured via the EHT, the size of the black hole shadow directly enabled a mass measurement of the black hole in M87 of 6.5 billion solar masses. This is consistent with the previous estimation of 6.6 billion solar masses based on stellar dynamics; however, it is inconsistent with the result of 3.5 billion solar masses based on gas dynamics, implying the problems in the previous measurement of the gas dynamics.

The first imaging of the black hole shadow directly confirms the prediction of Einstein's theory of general relativity with respect to black holes. It provides the measurement of the black hole mass together with the fundamental knowledge of how matter accretes onto the black hole and how the relativistic jet is produced in the vicinity of the black hole event horizon.

The EHT collaboration will release its next image of the supermassive black hole in the center of the Milky Way galaxy soon. The differences between the black hole images in M87 and the Milky Way may enable us to understand the differences in the physical processes surrounding black holes between an active galaxy (such as M87) and a normal galaxy (such as the Milky Way). In the future, we hope that the space- and moon-based millimeter-wavelength telescopes will be constructed and will join the efforts to reach angular resolutions of less than 1 microarcsecond, which will provide us with more powerful facilities to capture clearer images of many black holes in the Universe. As a superpower in space, China is expected to contribute more to both technology and science for future research on black holes.

black hole, event horizon, interferometry, accretion, jet

doi: 10.1360/TB-2019-0009