事件视界望远镜对近邻星系 M87 中心超大质量黑洞的成像观测

袁业飞*, 唐泽源

中国科学技术大学物理学院天文学系, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: yfyuan@ustc.edu.cn

2019年4月10日21时, 天文学家公布了人类首次拍摄到的近邻椭圆星系 M87 中心黑洞在 1.3 mm 波段的成像观测结果, 看到黑洞视界的阴影, 直接证明了黑洞的存在. 黑洞是广义相对论关于时空和引力理论的伟大理论预言. 直接证明黑洞的存在, 不仅可以检验广义相对论的正确性, 而且可以研究黑洞强引力场中的物理过程, 解释相应的天文现象. 黑洞与其他天体最本质的区别是它存在事件视界. 事件视界是黑洞周围弯曲时空中的一个单向的、与外部观测者存在因果联系区域的最后边界. 在视界及其内部, 即使光也不能逃逸出来. 在简要介绍广义相对论基本思想和黑洞的概念之后, 我们将详细解读本次“事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)”对 M87 星系中心黑洞 M87* 的成像观测结果, 并对未来工作进行展望.

1 广义相对论和黑洞

1915年11月25日, Einstein^[1]向普鲁士科学院提交了一篇名为《引力场方程》的论文, 标志着广义相对论的正式建立. 在爱因斯坦场方程发表的当年, Schwarzschild^[2]就得到了场方程的第一个严格解, 该度规描述的是引力质量为 M 的球对称天体在其外部周围产生的弯曲时空的性质. 在史瓦西坐标 $\{x^\mu\}(\mu=0, 1, 2, 3)=\{t, r, \theta, \varphi\}$ 下, 该时空线元如下:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2), \quad (1)$$

即时空度规为 $g_{\mu\nu} = \text{diag}\{-(1-2M/r), +(1-2M/r)^{-1}, r^2, r^2\sin^2\theta\}$ ($G=c=1$).

如果引力质量 M 集中于 $r=0$ 一点(奇点), 则该天体就是经典广义相对论预言的非转动黑洞——史瓦西黑洞^[3]. 黑洞最本质的特征是它存在事件视界. 视界面是四维时空中的一个曲面 $f(x^\mu)=0$, 该曲面上任一点的光锥与该面相切:

$$g^{\mu\nu} \frac{\partial f}{\partial x^\mu} \frac{\partial f}{\partial x^\nu} = 0. \quad (2)$$

袁业飞 中国科学技术大学物理学院天文学系教授, 中国天文学会常务理事. 曾任中国科学技术大学天文学系执行主任, 中国天文学会空间天文和高能天体物理专业委员会主任. 2017 年获国家杰出青年科学基金资助. 研究领域为相对论天体物理, 具体包括黑洞基本参数测量、黑洞视界附近强引力场中流体动力学和辐射过程, 以及强引力场中的辐射转移.

因此, 黑洞视界面是与外部观测者有因果联系区域的最后边界. 对于史瓦西黑洞, 视界面为 $f(x^\mu)=r-2M=0$, 即视界面的坐标半径——史瓦西半径 R_s 为

$$R_s = 2M = 2.95 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ km}. \quad (3)$$

在三维平直空间——欧几里得空间中, 一个不受任何外力作用的质量为 m 的自由粒子的拉格朗日量仅含动能项^[4]:

$$L = T = \frac{1}{2} m \delta_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt}, \quad (4)$$

其中 δ_{ij} 是欧几里得空间的度规, 重复指标 $i, j=1, 2, 3$ 代表对空间的维度求和——爱因斯坦约定. 根据广义协变原理, 一个不受任何外力作用的质量为 m 的自由粒子的拉格朗日量^[5-7]为

$$L = \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda}, \quad (5)$$

其中 λ 为粒子沿着其四维空间的轨迹——测地线 $x^\mu(\lambda)$ 的曲线参数. 对有质量粒子, 可以取 $\lambda=\tau$. 对光子来说, 由于

$d\tau=0$, 因此, 我们要求 $g_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda} = 0$. 将自由粒子的拉格朗日量代入欧拉-拉格朗日方程, 得到光子在黑洞周围时

空中的运动方程为

$$\theta = \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

$$i = \frac{E}{1 - \frac{2M}{r}}, \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = \frac{L}{r^2}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \dot{r}^2 = \frac{1}{2} E^2 - V_{\text{eff}}(r), \quad V_{\text{eff}}(r) = \frac{L^2}{2r^2} - \frac{ML^2}{r^3}, \quad (9)$$

其中 E, L 为两个运动积分. 如果粒子能跑到无穷远处, 则 E 和 L 分别为无穷远处观测者所测量到的粒子单位质量的能量和角动量.

通过引入新的仿射参数 $\tilde{\lambda} = L\lambda$, 同时引入碰撞参数 $b = L/E$, 无质量粒子(光子)的径向运动方程为

$$\dot{r}^2 = \left(\frac{dr}{d\tilde{\lambda}} \right)^2 = \frac{1}{b^2} - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2M}{r} \right). \quad (10)$$

分析表明, 光子在 $r_{\text{ph}} = 3M$ 处存在一个不稳定的圆轨道, 相应的临界碰撞参数 $b_c = \sqrt{27}M$. 从图 1 和方程(10)可以看出, 黑洞视界附近($R_s < r \leq r_{\text{ph}}$)的光子如果想逃逸黑洞到达无穷远处, 它应具有的最大碰撞参数为 $b_c = \sqrt{27}M$. 因此, 从黑洞视界附近辐射出来的光子, 被无穷远处观测者看到的表观大小为 $\sqrt{27}M$, 这就是所谓的光子环的半径, 也就是黑洞阴影的大小^[6]. 这次事件视界望远镜(Event Horizon

图 1 (网络版彩色)光子在史瓦西黑洞时空中径向运动时的等效势. 势能最高点的位置为光子圆轨道半径 $r_{\text{ph}} = 3M$, 势能最大值为 $V_{\text{eff}}(r_{\text{ph}}) = 1/b_c^2$, 其中 $b_c = \sqrt{27}M$ 为视界附近($R_s < r \leq r_{\text{ph}}$)的光子逃离黑洞强引力场到达无穷远处应具备的最大碰撞参数, 也是光子环半径之外($r \geq r_{\text{ph}}$)的光子避免被黑洞俘获的最小碰撞参数

Figure 1 (Color online) Effective potential for the radial motion of photons in Schwarzschild spacetime. The maxima shows the radius of the circular orbit of photon: $r_{\text{ph}} = 3M$, and the maximal potential is $V_{\text{eff}}(r_{\text{ph}}) = 1/b_c^2$, here $b_c = \sqrt{27}M$ is the maximal impact parameter for photons within photon radius ($R_s < r \leq r_{\text{ph}}$) to escape from the strong gravity to infinity, and it is also the minimal impact parameter for photons outside photon radius ($r \geq r_{\text{ph}}$) to avoid being captured by black hole

Telescope, EHT)观测到的近邻星系 M87 中心超大质量黑洞 (M87*)阴影的大小近似为该值(真实的黑洞可能是旋转的).

2 M87*黑洞吸积流的理论模型

黑洞是广义相对论理论预言的一种天体, 黑洞到底是否存在? 只有天文观测才能给出答案. 通过多波段的电磁辐射观测, 天文学家发现了两大类黑洞候选体. 一类是质量低于 $100M_\odot$ 的恒星级黑洞, 它们起源于大质量恒星演化的晚期, 一般存在于 X 射线双星系统中. 另一类质量超过 $10^6 M_\odot$, 称为(超)大质量黑洞, 一般存在于星系中心. 还有一类是质量介于两者之间的所谓中等质量黑洞, 可能存在于超亮 X 射线源中, 不过目前还存在争议^[8,9]. 通过引力波的观测, 也探测到了较大质量的恒星级双黑洞的合并. 不过, 这些观测都是间接观测. 黑洞与其他天体最根本的区别就是它存在事件视界. 因此, 直接给黑洞拍照, 拍到黑洞的阴影, 才是找到黑洞存在的最直接的证据.

M87*是近邻的巨椭圆星系中心的超大质量黑洞, 其质量约为 $6.2 \times 10^9 M_\odot$. 观测表明, M87*属于低光度的活动星系核. 黑洞的吸积率比较低, 约为 10^{-5} 爱丁顿吸积率, 从而导致吸积流的密度比较低. 当被吸积的等离子体落入黑洞视界附近的时候, 释放引力能, 使得离子的温度达到维里化温度^[10]:

$$T_i \sim 0.3 T_{\text{vir}} = 0.3 \left(\frac{m_p c^2}{k_B} \right) \left(\frac{r_g}{3r} \right) = 1.1 \times 10^{12} \left(\frac{r_g}{r} \right) \text{K}, \quad (11)$$

其中引力半径定义为 $r_g = M$. 由于吸积流的密度比较低, 离子和电子的库伦碰撞概率比较低, 离子不能有效地将能量传递给电子. 因此, 吸积流中离子和电子处于不同的温度, 电子的温度要低一些. 而吸积流的辐射主要来自电子的同步辐射, 因此吸积流的辐射效率比较低, 该吸积模式被称为低辐射效率吸积流^[11]. 假设辐射区的尺度为 $r \sim 5r_g$, 且气压和磁压近似相等, 电子温度约为离子温度的 $1/3$: $T_i \sim 3T_e$. 结合观测到的亮环在 1.3 mm 的亮温度($\sim 6 \times 10^4 \text{ K}$), 吸积流中电子数密度和磁场强度为 $n_e \sim 2.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $B \sim 4.9 \text{ G}$, 进一步估计黑洞的吸积率为 $\dot{M} \sim 2 \times 10^{-5} \dot{M}_{\text{Edd}}$ ^[10].

以上是根据 M87*的观测结果估计的黑洞吸积流基本特性. 在广义相对论磁流体(general-relativistic magnetohydrodynamic, GRMHD)数值模拟过程中, 需要自洽地求解在黑洞视界附近弯曲时空中双温的等离子体动力学演化及其辐射转移. 所有的 GRMHD 模拟的初始条件一般都采用弱磁化位于赤道面附近的等离子体环(torus). GRMHD 模拟具有两个关键参数: 黑洞的自旋(a_*)和穿过一个黑洞视界半球面的绝对磁通量 Φ_{BH} , 无量纲化后的磁通量为 $\varphi \equiv \Phi_{\text{BH}} (\dot{M} r_g^2 c)^{-1/2}$. 在模型库中, 主要有两大类模型, 一类是 $\varphi \sim 1$ 的比较正常的磁流体力学模型; 另一类是 $\varphi \sim 15$ 的所谓的强磁盘(magnetically arrested disk, MAD). 通过 GRMHD 模拟得到吸积流的动力学演化之后, 需要采用弯

曲空间中光线追踪法得到观测到的理论图像,并进一步与仪器卷积,得到 EHT 应该看到的理论图像,最终与 EHT 观测结果进行比较^[10].

3 EHT 对 M87*的首次成像观测

尽管黑洞不发光也不反射光,原则上我们无法看到黑洞,但是,如果黑洞附近有辐射光源,它会投影产生黑洞的阴影.早期有很多理论工作研究了黑洞强引力场中的几何光学^[12,13],并计算了不转黑洞的阴影的形状^[14,15]. de Vries^[16]计算了更一般的转动、带电黑洞的阴影.

为了成功地给黑洞拍照,需要选择黑洞的阴影在天球面上的张角最大的黑洞候选体.假设黑洞的质量为 M ,离地球的距离为 D ,则黑洞的光子环半径在天球面上的张角为

$$\theta_{\text{ph}} = \frac{\sqrt{27}GM}{c^2 D} = 18.8 \left(\frac{M}{6.2 \times 10^9 M_{\odot}} \right) \left(\frac{D}{16.9 \text{ Mpc}} \right)^{-1} \mu\text{as}, \quad (12)$$

这里已经取了 M87*黑洞的参数作为基准值.作为比较,在表 1 中,还给出了银心黑洞(Sgr A*)以及银河系中著名的 X 射线双星天鹅座 X1(Cyg X-1)的值.可以看出, Sgr A*和 M87*的阴影在天球面上的张角最大.银河系中虽然存在大量的恒星级黑洞,但是由于它们的质量比较小,而且由于它们的辐射主要在 X 射线波段,而目前 X 射线望远镜的成像精度还很低,对恒星级黑洞进行成像观测还遥遥无期.因此,给黑洞拍照,最佳源就是 Sgr A*和 M87*^[17-19].

选好源之后,该用什么样的望远镜给 Sgr A*和 M87*拍照呢?望远镜的分辨率 $\Delta\theta=1.22\lambda/D_T$,其中 λ 是观测波长, D_T 是望远镜的口径.显然观测波长越短,望远镜的口径越大,望远镜的分辨率就越高.目前在地球上分辨率最高的望远镜就是甚长基线干涉仪(very-long-baseline interferometry, VLBI),即将分布在地球上的射电望远镜进行联网观测,随着地球的自转,等价于得到一个虚拟的地球尺度口径的望远镜,这就是著名的综合孔径技术.本次公布的黑洞照片就是 2017 年利用全球 8 座毫米波望远镜组成的事件视界望远镜中的 7 座在 1.3 mm 波长对 M87*的观测结果. EHT 本质上是毫米波的 VLBI.另外,由于星系中等离子体对射电辐射的散射正比于观测波长的平方,观测波长越短,我们就越有望看到黑洞阴影本征大小.为什么用 EHT 给 Sgr A*和 M87*拍照还有一个很重要的原因就是, Sgr A*和 M87*是吸积率比较低的黑洞吸积系统,吸积流的密度比较低,是几何厚、光学薄的高温等离子体,主要的辐射

机制是相对论电子在磁场中的同步辐射,在毫米波波段,辐射比较强.虽然观测波长越短越好,但是在构建这个虚拟望远镜时需要利用氢脉泽将观测信号降频后再处理,当频率太高时信号损失比较严重.另外,大气效应对更短波长观测影响也比较大.综合考虑之后本次观测定在 1.3 mm,在这个波长处角分辨率可以达到约 25 μas .

作为干涉仪, EHT 观测到的其实就是两个站点之间的复可见度函数.复可见度函数是被观测源亮度分布 $I(x, y)$ 的傅里叶变换:

$$v(u, v) = \iint e^{-2\pi i(ux+vy)} I(x, y) dx dy, \quad (13)$$

其中 (x, y) 是天球面上的角坐标, (u, v) 是以波长为单位的基线的投影坐标.随着地球的自转,一对观测站点在 (u, v) 就扫描出一小段曲线.根据干涉理论,参与 EHT 观测的望远镜越多,望远镜的分布越广, (u, v) 覆盖越密集、越均匀,则成像质量就越高.

2019 年 4 月 10 日 21 时, EHT 合作组在全球六地(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)同时召开全球新闻发布会,发布了人类首张黑洞照片——M87*在 1.3 mm 的成像观测.相关的 6 篇 EHT 合作组文章以美国《天体物理快报》(*The Astrophysical Journal Letters*)专辑的形式同时在线^[10,20-24].根据前面的讨论,当黑洞被一个透明的发射区域包围时,由于光线在引力场中的弯曲效应——引力透镜效应和光子俘获效应,黑洞在观测上将出现一个暗的阴影.黑洞阴影的大小与黑洞周围的时空性质密切相关.视黑洞的参数不同(质量和自旋),黑洞阴影的半径在 4.8~5.2 r_g 之间,形状不会偏离圆形太远.对于史瓦西黑洞,阴影半径为 $\sqrt{27}M$,形状为正圆形.

激动人心的是,此次 EHT 的确观测到了 M87*中心致密射源为一个非对称的、直径约为 $42 \pm 3 \mu\text{as}$ 的亮环,亮环与中心阴影区域的亮度比大于 10:1.使用不同的校准和图像重建方案,得到的亮发射环的直径和宽度在不同日期进行的 4 次不同观测中基本保持稳定.总的来说,观测到的图像与广义相对论预测的转动黑洞(克尔黑洞)的阴影的预期一致.亮环的亮度不对称性可以用相对论性集束(beaming)效应来解释.根据刘维尔定理,光线在传播过程中,其在某个频率 ν 处的辐射强度 I_ν 与频率的三次方之比是运动积分—— I_ν/ν^3 为常数.由于被吸积的气体落入黑洞视界附近非常深的引力势阱中,势能转化为动能,等离子体围绕黑洞旋转速度接近光速.如果吸积流的角动量方向与观测者的视线方向的夹角不为零,则朝向观测者运动的等离子体辐射频率增加.根据刘维尔定理,辐射强度增加,观测表现就比较亮.反之,背离观测者运动的等离子体辐射频率降低,辐射强度下降,观测表现就较暗.将观测得到的图像与大量广义相对论磁流体力学模拟结果,进一步加上通过弯曲空间中光线追踪法得到的黑洞阴影的理论图像相比较,得到中心黑洞的质量为 $M=(6.5 \pm 0.7) \times$

表 1 黑洞阴影在天球面上的张角

Table 1 Angular sizes of black hole shadows on the celestial sphere

黑洞	$M/M_{\odot}$	$D(\text{kpc})$	$\theta_{\text{ph}}(\mu\text{as})$
M87*	$\sim 6.2 \times 10^9$	$\sim 1.69 \times 10^4$	18.8
Sgr A*	$\sim 4.1 \times 10^6$	~ 7.9	26.7
Cyg X-1	~ 15	~ 1.9	4.06×10^{-4}

$10^9 M_{\odot}$ 。该结果与之前通过恒星动力学方法测量的 M87* 的质量 ($6.2^{+1.1}_{-0.6} \times 10^9 M_{\odot}$) 基本一致。结合强引力场中的引力透镜效应、引力红移效应、转动时空的坐标拖曳效应以及相对论集束效应, 从亮环的不对称性分析, 假设吸积流与黑洞自转的方向一致, 得到黑洞自转的方向背离地球, 与视线方向的夹角约为 17° 。

EHT 对 M87* 首次成像观测结果的重要意义在于: 证明了广义相对论的正确性; 找到了黑洞视界存在的直接证据; 为星系中心存在超大质量黑洞提供了有力的证据; 使得研究强引力场中的物理过程成为可能。

4 展望

EHT 对 M87* 在 1.3 mm 首次成像观测只是一个开始,

很多工作正在进行之中。正在开展的工作主要集中在两个方面。在观测方面, 观测波长将更短, 达到 0.8 mm; 参加 EHT 的毫米/亚毫米波的射电望远镜将更多, (u, v) 覆盖更充分, 成像质量更高; 射电偏振包含了吸积流磁场和几何位型的信息, 对理解吸积流的动力学和辐射非常重要, 目前偏振观测也在进行之中; 特别是大家都非常期待 Sgr A* 的成像观测结果。在理论方面, 受计算技术和计算资源的限制, 目前广义相对论的磁流体力学数值模拟还不包括辐射转移。为了更真实地描述吸积流的动力学和辐射, 需要发展高效、快速和经济的辐射磁流体力学模拟程序。相信在未来的几年内, 有望取得更大的进展。未来更精确的观测将有助于进一步检测黑洞周围时空的性质, 对验证爱因斯坦场方程有重要的意义。

致谢 感谢国家自然科学基金(11725312)资助。

推荐阅读文献

- 1 Einstein A. Die feldgleichungen der gravitation. Sitzungsberichte Königlich Preußischen Akademie Wissenschaften (Berlin), 1915, 844–847
- 2 Schwarzschild K. On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory. Sitzungsberichte Königlich Preussischen Akademie Wissenschaften (Berlin), 1916, 189–196
- 3 Ruffini R, Wheeler J A. Introducing the black hole. Phys Today, 1971, 24: 30
- 4 Landau L D, Lifshitz E M. Mechanics. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1969
- 5 Weinberg S. Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1972
- 6 Shapiro S L, Teukolsky S A. Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects. New York: Wiley-Interscience, 1983
- 7 Carroll S M. Spacetime and Geometry. An Introduction to General Relativity. San Francisco: Addison Wesley, 2004
- 8 Yuan Y F. Relativistic astrophysics (in Chinese). Mod Phys, 2015, 27: 9–15 [袁业飞. 相对论天体物理. 现代物理知识, 2015, 27: 9–15]
- 9 Meier D L. Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm. Berlin: Springer-Verlag, 2012
- 10 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. V. Physical origin of the asymmetric ring. Astrophys J Letts, 2019, 875: L5
- 11 Yuan F, Narayan R. Hot accretion flows around black holes. Annu Rev Astron Astrophys, 2014, 52: 529–588
- 12 Cunningham C T, Bardeen J M. The optical appearance of a Star orbiting an extreme Kerr black hole. Astrophys J, 1972, 173: L137
- 13 Cunningham C T, Bardeen J M. The optical appearance of a Star orbiting an extreme Kerr black hole. Astrophys J, 1973, 183: 237–264
- 14 Lunmet J P. Image of a spherical black hole with thin accretion disk. Astron Astrophys, 1979, 75: 228–235
- 15 Falcke H, Melia F, Agol E. Viewing the shadow of the black hole at the galactic center. Astrophys J, 2000, 528: L13–L16
- 16 de Vries A. The apparent shape of a rotating charged black hole, closed photon orbits and the bifurcation set A4. Class Quant Grav, 2000, 17: 123–144
- 17 Shen Z Q, Lo K Y, Liang M C, et al. A size of ~ 1 AU for the radio source Sgr A* at the centre of the Milky Way. Nature, 2005, 438: 62–64
- 18 Huang L, Cai M, Shen Z Q, et al. Black hole shadow image and visibility analysis of Sagittarius A. Mon Not Roy Astron Soc, 2007, 379: 833–840
- 19 Yuan Y F, Cao X, Huang L, et al. Images of the radiatively inefficient accretion flow surrounding a Kerr black hole: Application in Sgr A*. Astrophys J, 2009, 699: 722–731
- 20 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. Astrophys J Letts, 2019, 875: L1
- 21 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. II. Array and instrumentation. Astrophys J Letts, 2019, 875: L2
- 22 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. III. Data processing and calibration. Astrophys J Letts, 2019, 875: L3
- 23 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. Astrophys J Letts, 2019, 875: L4
- 24 The EHT Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The shadow and mass of the central black hole. Astrophys J Letts, 2019, 875: L6

Summary for “事件视界望远镜对近邻星系 M87 中心超大质量黑洞的成像观测”

First EHT images of the supermassive black hole residing in the center of nearby galaxy M87

Yefei Yuan* & Zeyuan Tang

Department of Astronomy, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author, E-mail: yfyuan@ustc.edu.cn

In 1915, Albert Einstein published his famous field equation of gravitation, which marked the formal establishment of general relativity. Shortly after the publication of Einstein's field equation, Karl Schwarzschild found its first solution, which describes the curved spacetime outside of a spherically symmetric object with gravitational mass M . If the gravitational mass M is concentrated at one point, i.e., the singularity, then the object is a non-rotating black hole—a Schwarzschild black hole. The most essential feature of a black hole is the existence of event horizon which is a one-way causal boundary in spacetime, that is, the most inner region linking with a distant observer at infinity. Even light can not escape from the event horizon of a black hole. For Schwarzschild black hole, the size of its horizon is proportional to its gravitational mass: $R_s=2M$ ($G=c=1$). Due to the effects of the curved spacetime, such as the gravitational lensing and photon capture at the event horizon, the apparent radius of a black hole shadow is about $\sqrt{27}M$. For a rotating black hole, the size of its shadow also depends on its spin, so the radius of the black hole shadow is between $4.8M$ and $5.2M$. The massive black holes in the center of Milky Way and the nearby giant elliptical galaxy M87 (Sgr A* and M87*) are the two biggest ones on the celestial sphere, and the angular sizes of their shadows are about 26.7 and 18.8 μas , respectively. Multi-wavelength observations show that both Sgr A* and M87* swallow surrounding gas with a very low accretion rate, the radio emission from Sgr A* and M87* is mainly due to the synchrotron emission from hot plasma orbiting around their event horizons.

The Event Horizon Telescope (EHT), a global very-long-baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm, has a theoretical diffraction-limit resolution of $\sim 25 \mu\text{as}$, so Sgr A* and M87* are first two targets of EHT. At 21:00 on April 10, 2019 (Beijing Time), the first EHT image of M87* was released. It shows an asymmetric bright emission ring with a diameter of $(42\pm 3) \mu\text{as}$ with a central depression which is the black hole shadow as we expected. The asymmetry in brightness in the ring is mainly due to the effect of the relativistic beaming of rotating plasma near the event horizon of black hole. The EHT image of M87* clearly shows the black hole shadow for the first time, and directly demonstrates the existence of black hole in our Universe. Black holes are theoretical predictions of general relativity which is the great successful theory of spacetime. Direct proof of the existence of black holes can not only verify the validity of general relativity, but also be benefit to study the physical processes in strong gravitational field near the event horizon of black holes, and understand the corresponding astronomical phenomena. In this paper, after a brief introduction to the basic ideas of general relativity and the concept of black holes, we will read the imaging observations of the central black hole M87* in the center of galaxy M87 by EHT, and look forward to the future work.

black hole shadow, Event Horizon Telescope, magnetohydrodynamics (MHD), M87, photon ring

doi: 10.1360/N972019-00373