

渐近安全引力下的黑洞阴影和光环*

李慧玲[†] 黄雨萌 杨承宇

(沈阳师范大学物理科学与技术学院, 沈阳 110034)

(2023年7月29日收到; 2023年8月28日收到修改稿)

重点讨论了薄盘吸积与渐近安全 (asymptotically safe, AS) 引力修正参数对黑洞阴影和光环的影响. 对于薄盘吸积, 黑洞的暗区就是黑洞的阴影, 而明亮的光环则是由直接像、透镜环和光子环组成的. 对于吸积盘辐射源比强度, 考虑了3个不同辐射轮廓模型. 对辐射起始于最内圆轨道的二阶衰减函数模型, 直接像、透镜环和光子环可以明显区分. 直接像对黑洞光环亮度贡献最大, 透镜环对光环亮度贡献很小, 而光子环的贡献几乎可以忽略, 且对应观测强度的峰值随AS引力参数的增加而减小, 即对应光环亮度随修正参数的增大而变暗. 对于辐射起始于光子球半径的三阶衰减函数模型, 透镜环和光子环叠加在直接像上, 使观测强度出现新的极值. 这一极值随AS引力修正参数的增加而增加, 且使得黑洞光环的亮度更亮. 对辐射起始于事件视界的反三角衰减函数模型, 透镜环和光子环在直接像上的叠加范围更大, 观测到的光环更宽, 且AS引力参数值越小, 透镜环和光子环越难区分, 黑洞光环的亮度越大. 总之, 研究表明, 黑洞阴影半径的大小随AS修正参数的增加而减小, 对于不同的AS引力修正参数, 辐射源光强度、尤其是观测强度的辐射轮廓存在显著差异, 导致黑洞的阴影和亮环明显不同.

关键词: 黑洞阴影, 光环, 透镜环, 渐近安全引力**PACS:** 04.70.-s, 04.20.-q, 04.25.-g**DOI:** 10.7498/aps.73.20231233

1 引言

2019年, 事件视界望远镜合作组织合成了第一张超大质量黑洞 M87* 图像^[1], 这使得黑洞的研究更具有现实意义. 通过发布的图片可以看到, 在黑洞周围有一个明亮的环, 即黑洞光环. 尽管黑洞光环最早出现在1979年 Luminet^[2] 模拟的图像, 但是更为基础的理论可以追溯到1973年 Bardeen^[3] 的研究中, 甚至在1959年的 Darwin^[4] 也发现了关于光环的描述. 最近, 在爱因斯坦-麦克斯韦标量模型中发现, 多毛黑洞周围的光环在一定的参数范围内可以非常宽, 并且它由多个不同亮度的同心圆组成^[5]. 基于黑洞光环普遍干涉的特征, Gralla 等^[6] 提出了用一种新的强场广义相对论测

试方法来研究光环形状. Himwich 等^[7] 还讨论了长干涉基线上光环相应的偏振的普遍特征. 此外, 准-黑洞时空的光环与时空稳定性问题也得到了详尽的讨论^[8].

在发布的 M87* 黑洞图像的照片中除了光环外, 还可看到光环内有一片暗区, 即黑洞的阴影 (与常规阴影区分, 一般可称为内阴影). 早期的研究表明, 存在一条与黑洞阴影和光环密切相关的特殊曲线, 被巴丁称为明显边界, 即临界曲线. 来自临界曲线的光线渐近接近一束光子轨道. 史瓦西黑洞的束缚光子轨道半径是 $r = 3M$, 而临界曲线是一表观半径 (入射参数) $b_c = 3\sqrt{3}M$ ^[3,9] 的圆. 常规的黑洞阴影为临界曲线的内部. 研究发现非旋转黑洞的阴影是圆形的, 并且 M2-branes 数可以控制非旋转黑洞阴影的大小, 但是在某些模空间区域表

* 国家自然科学基金 (批准号: 11703018) 和辽宁省教育厅高等学校基本科研项目 (批准号: LJKM20221474) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: LHL51759@126.com

现出的旋转解是心脏形状的扭曲图形^[10]. 另一方面, 由于黑洞引力场强, 会吸收周围的物质而形成吸积盘, 这样吸积盘可成为黑洞附近明亮的光源. 黑洞附近时空是弯曲的, 由于黑洞引力场中的弯曲效应, 从吸积盘发出的部分光子可以被黑洞捕获, 由此人们看到被吸积盘照亮的黑洞投影的像有一片黑暗的区域, 即黑洞的阴影 (内阴影). 受黑洞照片的激发, 近年来, 带有吸积盘的黑洞的阴影已引起了人们极大的兴趣. 根据文献^[9], 黑洞阴影的半径和形状依赖于吸积盘的模型及发生辐射的位置. 当所考虑模型是吸积盘作为光源, 其辐射在某一内部边缘停止时, 主要暗区就是边缘的表现位置. 当辐射延伸到视界 (到视界处停止), 主要暗区 (黑洞的内阴影) 就是视界的表现位置. 而临界曲线 (常规的黑洞阴影) 对这种吸积盘下的黑洞图像的主要暗区不能起决定性的作用. 光学薄吸积盘包围的黑洞的图像通常显示为中心亮度显著下降 (即黑洞阴影) 和狭窄的光环, 这与广义相对论预测一致^[11]. Chael 等^[11] 对黑洞内阴影的观察指出, 对于位于赤道平面延伸到视界的光学薄盘, 对应图像中的暗区将缩成一更小的区域, 即内阴影. 利用数值逆向光线追踪法, 由吸积盘照亮的 Kerr-Melin 黑洞的观测表现也得到了深入的探究. 结果发现: 在黑洞图像中可以清晰地展现直接像、透镜像、内阴影和临界曲线这四类曲线特征, 且临界曲线和内阴影曲线存在显著差异, 可以利用它们估算黑洞的磁场^[12]. 对于不同薄盘吸积模型下, 暗物质及暗能量对黑洞内阴影的影响已得到了充分的研究^[13,14]. 对于几何和光学厚的吸积盘而言, 通过研究发现, 黑洞阴影随吸积盘质量的增加而变得更加扁长^[15]. 总之, 近年来, 黑洞阴影和光环已引起了国内外专家的广泛关注^[16-28].

黑洞是广义相对论经典场方程的解, 它经历了引力塌缩的时空区域. 在事件视界内, 方程的解受到奇点影响. 由于在量子场理论框架内描述引力面临着广义相对论不可重整特性的缺点, 由此人们提出了圈量子引力^[29-32] 和弦理论^[33,34]. 而解决这种问题的另一个建议就是渐近安全 (asymptotically safe, AS) 引力, 这是由 Weinberg^[35] 首次提出的引力方案. 最近 Bonanno 和 Reuter^[36] 通过使用重整化群改进了 AS 引力下的黑洞度规. 研究表明, 对 AS 引力下的黑洞, 修正参数可对黑洞的热力学和相变产生重要影响^[37]. 关于 AS 引力下黑洞其他特

征的评论可参见文献^[38-41]. 本文重点探讨薄盘吸积与修正参数对 AS 引力下黑洞阴影和光环的影响.

2 黑洞的光线偏折

在 AS 引力下修正的史瓦西黑洞度规可以表示为^[35]

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

式中, m 是黑洞质量; φ 是外事件视界水平方位角的总变化; ξ 是 AS 引力下的修正参数, 当 $\xi = 0$ 时, 度规将退回到史瓦西黑洞. 由方程 $1 - 2mr/(r^2 + \xi) = 0$ 得到两个解, 即

$$r_{\pm} = m \pm \sqrt{m^2 - \xi}, \quad (2)$$

其中, r_- 和 r_+ 分别代表内外视界半径, 为了保证黑洞存在事件视界, 要求 $0 \leq \xi \leq m^2$. 为研究 AS 引力下黑洞光线偏折的规律, 引入拉格朗日方程:

$$\frac{d}{d\chi} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}^\mu} \right) = \frac{\partial L}{\partial x^\mu}, \quad (3)$$

式中, χ 是仿射参量; \dot{x}^μ 是四速度; L 是拉氏量,

$$L = \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu = \frac{1}{2} \left[- \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi} \right) \dot{t}^2 + \frac{\dot{r}^2}{1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi}} + r^2 (\dot{\theta}^2 + \sin^2 \theta \dot{\varphi}^2) \right]. \quad (4)$$

一般来说, 我们关注的是赤道平面内的光的偏折, 即 $\theta = \pi/2$ 和 $\dot{\theta} = 0$. 考虑到拉格朗日方程中不显含 t 和 φ , 即

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0. \quad (6)$$

与它们对应的守恒量 E 和 J , 即总的能量和总的角动量. 再结合 (1) 式、(3) 式和 (4) 式, 可以得到时间、方位角和四速下的径向分量的表达式如下:

$$\dot{t} = \frac{1}{b \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi} \right)}, \quad (7)$$

$$\dot{\varphi} = \pm 1/r^2, \quad (8)$$

$$\dot{r}^2 + \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi} \right) = \frac{1}{b^2}, \quad (9)$$

其中 (8) 式的“-”号和“+”号分别表示方位角沿着顺时针和逆时针方向. 上面重新定义仿射参数 $\chi \rightarrow \chi/|J|$, 并且定义 $b = |J|/E$ 为入射参数. 引入 $U(r)$ 代表有效势, 通过改写 (9) 式可有:

$$\dot{r}^2 + U(r) = 1/b^2, \quad (10)$$

$$U(r) = \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi} \right). \quad (11)$$

对于光子球, 光在赤道平面的运动满足 $\dot{r} = 0$ 和 $\ddot{r} = 0$, 这样得到

$$U(r) = 1/b^2, \quad (12)$$

$$U'(r) = dU(r)/dr = 0, \quad (13)$$

基于 (12) 式和 (13) 式, 得到光子球的半径 r_p 和光子球处的入射参数 b_p . 当 ξ 取不同值时, 对应 r_+ , r_p 和 b_p 的大小如表 1 所列 (本文为数值计算方便, 取 $m = 1$), 显然 r_+ , r_p 和 b_p 都随 ξ 的增大而减小.

图 1 给出了 $\xi = 0.05$ 和 $\xi = 0.9$ 的有效势随黑洞半径变化图像. 可以看出, 在事件视界处有效势消失, 而在光子球处, 有效势达到最大值, 随后又随着 r 的增大而减小. 当光沿着径向运动时, 有效势将影响它的运动轨迹. 在区域 1, 光遇到势垒后向外辐射; 在区域 2, 光渐近地接近光子球, 由于角速度是非零的, 光绕着黑洞旋转很多次; 在区域 3, 光将继续向内运动, 没有势垒的阻碍, 进入黑洞内

部. 根据运动方程, 结合 (8) 式和 (9) 式, 可得光的运动轨迹为

$$\frac{dr}{d\varphi} = \pm r^2 \sqrt{\frac{1}{b^2} - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi} \right)}. \quad (14)$$

令 $w = 1/r$, 代入 (14) 式, 得到

$$\frac{dw}{d\varphi} = \sqrt{\frac{1}{b^2} - w^2 \left(1 - \frac{2mw}{1 + w^2\xi} \right)} \equiv H(w). \quad (15)$$

根据 (15) 式可以得到光的轨迹. 如图 2 所示, 光从右侧向黑洞运动, 在区域 3 (即 $b < b_p$, 与图中灰色线对应), 光由于没有遇到势垒, 进入到黑洞内部; 在区域 2 (即 $b = b_p$, 与图中蓝色线对应), 光围绕黑洞旋转多次; 在区域 1 (即 $b > b_p$, 与图中橘色线对应), 由于势垒作用, 光轨迹发生偏折, 不能进入黑洞. 这与图 1 相对应.

3 AS 引力下具有薄盘吸积的黑洞阴影和光环

本文考虑具有光学薄和几何薄的吸积盘. 薄盘吸积的一个重要特征是黑洞阴影周围明亮的光环来自直接像、光子环和透镜环的贡献^[3]. 可根据光的运动轨迹区分直接像、光子环和透镜环. 本节详细讨论薄盘吸积与 AS 引力修正参数对黑洞阴影 (本文指吸积盘内边界形成的像——内阴影) 和光环的影响.

表 1 不同 ξ 下事件视界 r_+ 、光子球半径 r_p 和光子球处入射参数 b_p

Table 1. Event horizon r_+ , photon sphere radius r_p , and incident parameters at the photon sphere b_p for different ξ .

	$\xi = 0.01$	$\xi = 0.05$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.9$
r_+	1.99499	1.97468	1.94868	1.83666	1.63246	1.31623
r_p	2.99443	2.97192	2.9432	2.821	2.60777	2.32892
b_p	5.19037	5.16701	5.13731	5.0121	4.79933	4.53738

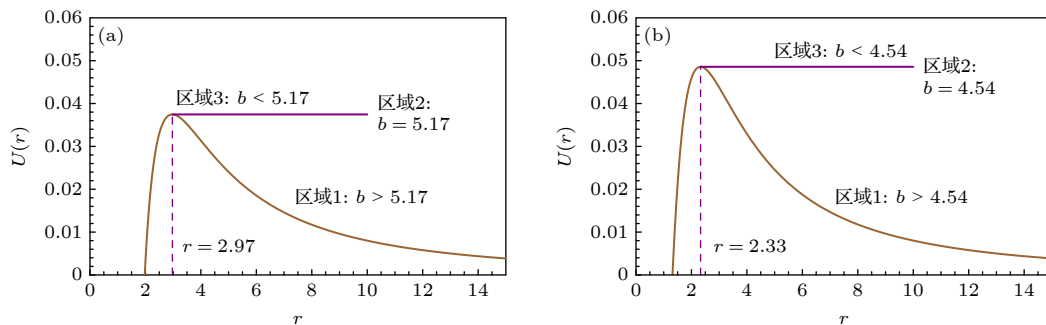


图 1 在 AS 引力下的黑洞的有效势图像, 区域 1 对应 $U(r) < 1/b_p^2$, 区域 2 对应 $U(r) = 1/b_p^2$, 区域 3 对应 $U(r) > 1/b_p^2$: (a) $\xi = 0.05$, (b) $\xi = 0.9$

Fig. 1. In the effective potential image of the black hole under AS gravity, region 1 corresponds to $U(r) < 1/b_p^2$, region 2 corresponds to $U(r) = 1/b_p^2$, and region 3 corresponds to $U(r) > 1/b_p^2$: (a) $\xi = 0.05$, (b) $\xi = 0.9$.

3.1 修正参数对黑洞光轨迹的影响

本节使用 $n = \varphi/2\pi$ 定义轨道分数来区分光轨迹. 在这里, 分别用绿色、橘色和紫色的线来表示直接像、透镜环和光子环对应的光线. 根据文献 [3] 的定义, 这些光线分别与赤道平面相交一次、两次和两次以上, 也就是直接像 (direct image) 对应 $n < 3/4$, 透镜环 (lensing ring) 对应 $3/4 < n < 5/4$, 而光子环 (photon ring) 对应 $n > 5/4$. 对于 $\xi = 0.05$ 和 $\xi = 0.9$ 的情况, 直接像、光子环、透镜环的入射参数 b 的范围如 (16) 式和 (17) 式所示.

$$\xi = 0.05 \begin{cases} \text{Direct image: } n < 0.75, & b \notin (4.981, 6.145), \\ \text{Lensing ring: } 0.75 < n < 1.25, & b \in (4.981, 5.158) \text{ or } (5.200, 6.150), \\ \text{Photon ring: } n > 1.25, & b \in (5.158, 5.200), \end{cases} \quad (16)$$

$$\xi = 0.9 \begin{cases} \text{Direct image: } n < 0.75, & b \notin (4.068, 5.826), \\ \text{Lensing ring: } 0.75 < n < 1.25, & b \in (4.068, 4.483) \text{ or } (4.627, 5.826), \\ \text{Photon ring: } n > 1.25, & b \in (4.483, 4.627). \end{cases} \quad (17)$$

3.2 AS 引力下观测的比辐射强度

下面研究薄盘吸积下观察者的观测光强度. 这里考虑吸积盘在静态世界线的静止坐标系下发出各向同性的光, 并且考虑吸积盘位于黑洞赤道平面, 静止观察者位于无穷远处. 将辐射源吸积盘的比辐射强度和辐射频率用 $I_c(r)$ 和 ν_c 表示, 观察者的观测比强度和频率表示为 $I'_o(r)$ 和 ν . 根据刘维尔定理 I_c/ν_c^3 是沿着光线守恒的, 观测强度可以写成

$$I'_o(r) = \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi}\right)^{3/2} I_c(r). \quad (18)$$

通过对所有频率的比辐射强度进行积分, 得到辐射强度的总和为

$$\begin{aligned} I &= \int I'_o(r) d\nu = \int \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi}\right)^2 I_c(r) d\nu_c \\ &= \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi}\right)^2 I_c(r), \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $I_c(r) = \int I_c(r) d\nu_c$ 为光在吸积盘附近比辐射

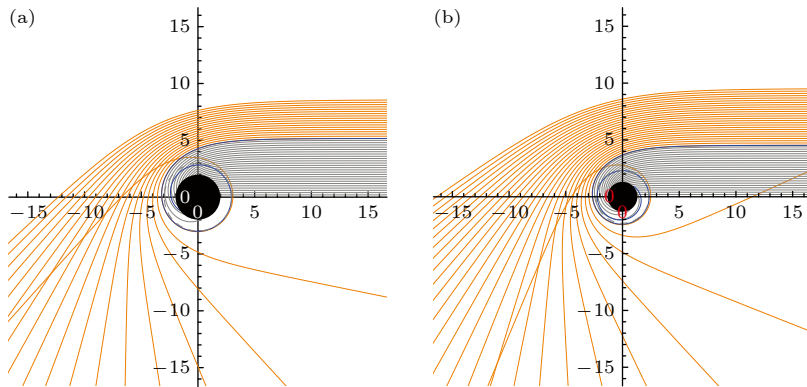


图 2 极坐标 (r, φ) 下和光轨迹图像. 蓝线代表 $b = b_p$, 灰线代表 $b < b_p$, 橙色线代表 $b > b_p$. 所有光线的入射参数的间距为 0.2, 黑洞用黑色实心圆盘表示 (a) $\xi = 0.05$; (b) $\xi = 0.9$

Fig. 2. Tracks of light ray in polar coordinates (r, φ) . Blue line represents $b = b_p$, gray line represents $b < b_p$, and orange line represents $b > b_p$. The impact parameters for all rays have a spacing of 0.2, black holes are represented by black disks: (a) $\xi = 0.05$; (b) $\xi = 0.9$.

强度的总和. 如果光与赤道平面相交, 反向追踪光的轨迹可以发现, 光在吸积盘的辐射中获得亮度. 对于 $3/4 < n < 5/4$, 光会在黑洞附近弯曲, 并从黑洞的背面穿过到达吸积盘的另一侧. 因此, 它会有两次与赤道平面相交并且从吸积盘中获得额外的亮度. 对于 $n > 5/4$, 光会在黑洞附近弯曲更多, 此时, 光会穿过赤道平面三次或三次以上, 进而从吸积盘中吸收到更多的亮度. 因此, 观察者的观测强度是所有穿过赤道平面的光观测强度的总和, 即

$$I(r) = \sum_N \left(1 - \frac{2mr}{r^2 + \xi}\right)^2 I_c \Big|_{r=r_N(b)}, \quad (20)$$

其中, $r_N(b)$ 为转移函数, 表示视界外光第 N 次穿过赤道平面的径向位置.

转移函数描述了径向坐标 r 与入射参数 b 之间的关系. 转移函数的斜率 dr/db 是缩小因子. 图 4 显示了不同修正参数 ξ 下的转移函数图像. 绿线、橘线和紫线分别代表第一次 ($N=1$)、第二次 ($N=2$) 和第三次 ($N=3$) 与赤道平面相交的转移函数. 第一次相交的转移函数对应于吸积盘的直接像, 由于斜率接近 1, 所以直接像图像的轮廓是红移源的轮廓. 第二次相交的转移函数对应于透镜环 (起始入射参数 b 接近临界值 b_c), 在这种情况下, 由于斜率比 1 大得多, 所以观察者看见盘背面

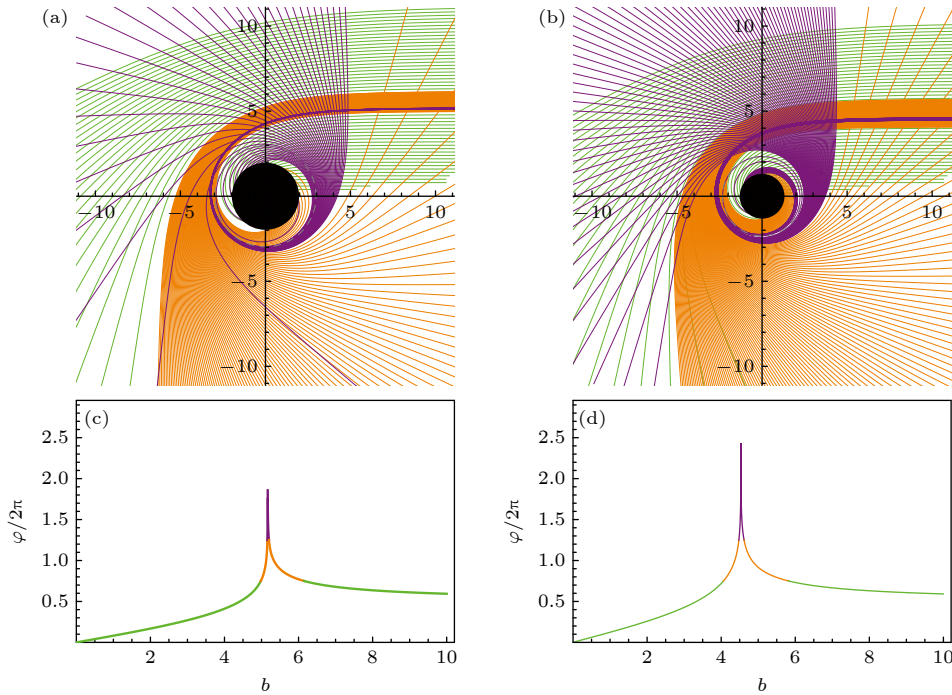


图 3 (a), (b) 极坐标 (r, φ) 下光的运动轨迹; (c), (d) $n = \varphi/2\pi$ 与 b 之间的关系. 对于直接像 (绿色)、透镜环 (橘色) 和光子环 (紫色) 对应的光线, 入射参数的间距分别为 $1/5$, $1/100$, $1/1000$. 黑色的圆盘代表黑洞 (a), (c) $\xi = 0.05$; (b), (d) $\xi = 0.9$

Fig. 3. (a), (b) Trajectory of light in the polar coordinate (r, φ) ; (c), (d) relationship between $n = \varphi/2\pi$ and b . For the direct radiation (green), lensing ring (orange) and photon ring (purple), the spacing of the collision parameters is $1/5$, $1/100$ and $1/1000$ respectively. Black disks represent black holes: (a), (c) $\xi = 0.05$; (b), (d) $\xi = 0.9$.

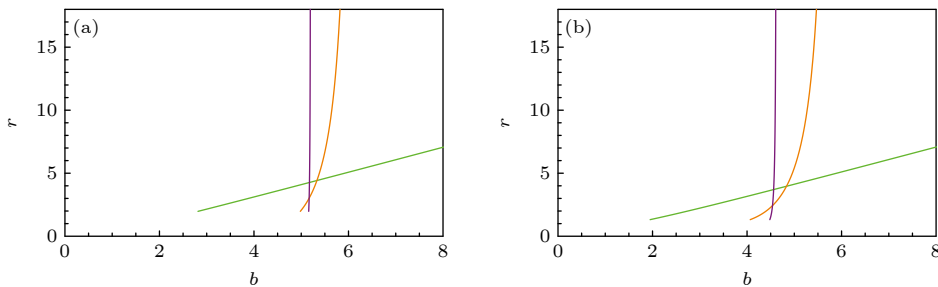


图 4 不同 ξ 下的转移函数图像 (a) $\xi = 0.05$; (b) $\xi = 0.9$

Fig. 4. Transfer function image for different values of ξ : (a) $\xi = 0.05$; (b) $\xi = 0.9$.

是一个高度缩小的图像. 最后, 光子环对应于第三次相交的转移函数, 在这种情况下, 当 $dr/db \rightarrow \infty$ 时, 图像是极度缩小的. 因此, 光子环对总亮度的贡献极其微小.

3.3 AS 引力下黑洞的阴影、透镜环和光子环

当给出吸积盘辐射的强度, 并得到转移函数后, 可以在 (20) 式的基础上进一步得到观察者的观测强度. 在本节中, 以下面 3 个由薄盘吸积物质作为辐射源的不同辐射轮廓模型为例, 研究 AS 引力下黑洞的阴影和光环. 模型 1 为辐射起始于最内圆轨道附近的二阶衰减函数模型:

$$I_e(r) = \frac{1}{[r - (r_{\text{ISCO}} - 1)]^2}, \quad (21)$$

其中, r_{ISCO} 是最内稳定圆轨道半径, 当 $r > r_{\text{ISCO}}$ 时成立, 否则 $I_e(r) = 0$.

图 5(a) 和图 5(d) 表示吸积盘辐射的光强度 I_e 随径向坐标半径 r 的变化, 图 5(b) 和图 5(e) 表示观察者的观测强度 $I(r)$ 随入射参数 b 的变化. 首先考虑 $\xi = 0.05$ 的情况, 在图 5(a) 中, 可以看到辐射比强度 I_e 在 $r = 6 \text{ m}$ 附近达到峰值, 然后急剧下降直到趋于 0. 在图 5(b) 中, 透镜环的辐射峰值对应 $5.4 \text{ m} < b < 6.0 \text{ m}$ 的区域, 而光子环则是 $b = 5.1 \text{ m}$ 附近的尖峰. 直接像的轮廓和辐射源辐射的轮廓类似, 但是由于引力透镜的作用, 直接像图像的峰值在 $b = 6.9 \text{ m}$ 附近开始急剧衰减到 0, 与图 5(c) 的黑洞图像相对应. 观测者的观测强度主要来自直接像, 并且观测强度随着径向坐标的增加逐渐减小; 透镜环则是黑洞阴影上很窄的光圈, 它对观察者的观测强度只贡献了很小的一部分; 而光子环则需要放大图像才能被发现, 因而它对总亮度的贡献可以忽略不计. 对于 $\xi = 0.9$ 的情况, 由图 5(d) 可见, 辐射源

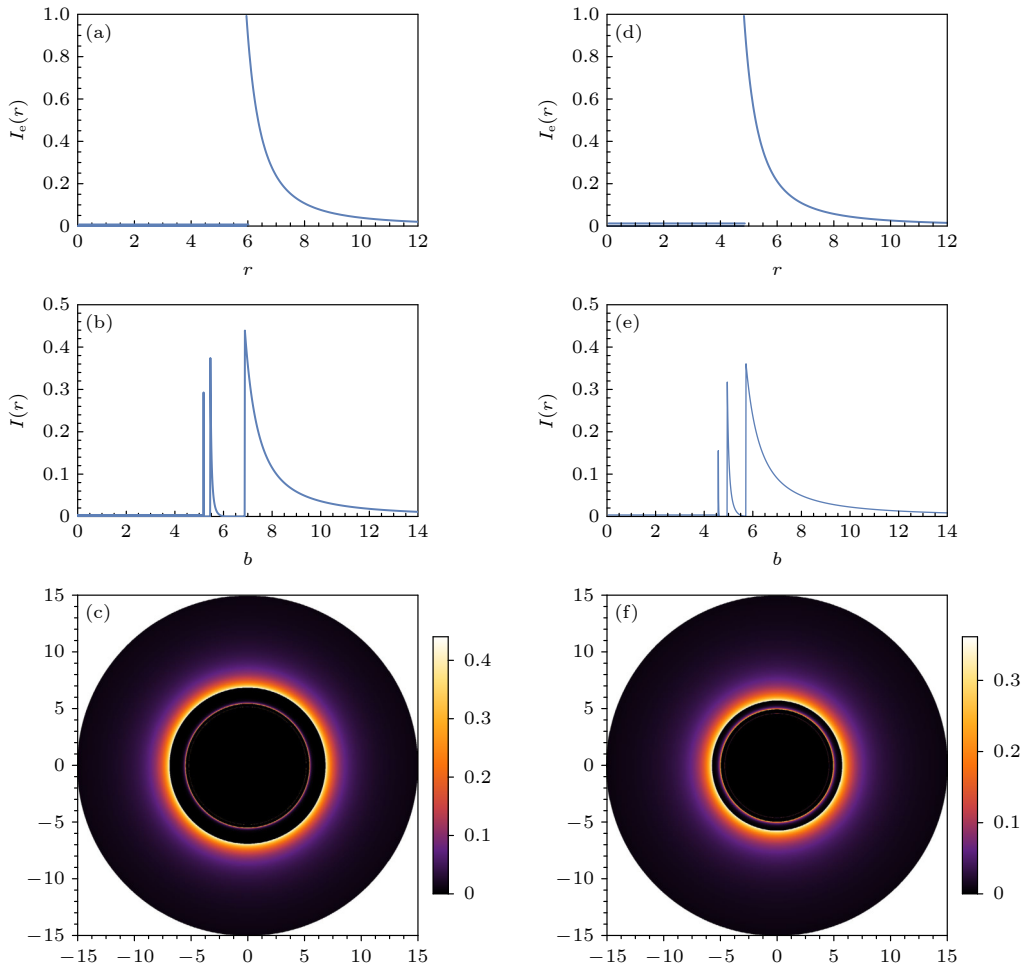


图 5 模型 1 下的吸积盘辐射强度轮廓 (a), (d), 观察者的观测强度轮廓 (b), (e) 以及黑洞图像 (c), (f) (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$

Fig. 5. Under model 1, the specific intensity profile of accretion disk (a), (d), observed intensity profile (b), (e), as well as the black hole image (c), (f): (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$.

的强度 I_e 在 $r = 4.8$ m 附近达到峰值, 并急速下降直到 0. 由图 5(e) 可见, 透镜环在 $4.9 \text{ m} < b < 5.7 \text{ m}$ 之间, 光子环出现在 $b = 4.6$ m 附近, 直接像的峰值大约出现在 $b = 5.7$ m 附近, 然后开始衰减. 以 $\xi = 0.05$ 和 $\xi = 0.9$ 为例进行比较, 由图 5 可以明显发现, AS 引力修正参数 ξ 越大, 黑洞阴影半径越小, 且光子环、透镜环和直接像对应的观测强度的峰值也随修正参数 ξ 的增加而减小, 即修正参数变化影响着黑洞阴影及光环亮度的大小.

考虑模型 2 是三阶衰减模型, 它在光子球半径附近发生辐射,

$$I_e(r) = \frac{1}{[r - (r_p - 1)]^3}, \quad (22)$$

当 $r > r_p$ 时成立, 否则 $I_e(r) = 0$.

对于 $\xi = 0.05$ 的情况, 在图 6(a) 中, 吸积盘比辐射强度 I_e 峰值出现在 $r = r_p = 2.97$ m 附近, 并急

剧下降直到 0. 在这种情况下, 引力红移对观测强度有显著影响. 与之前讨论的情况不同, 在图 6(b) 中可以发现, 在观测强度图像中, 直接像使观测强度先达到一个峰值, 并且随着 b 的增大, 观测强度减小, 大约在区域 $5.2 \text{ m} < b < 5.6 \text{ m}$ 之间, 透镜环和光子环叠加在直接像上, 使观测强度出现一个新的峰值. 尽管总的观测强度主要是由直接像贡献的, 但是透镜环和光子环也贡献了一部分的观测强度. 对于 $\xi = 0.9$ 的情况, 如图 6(d) 可知, 辐射源 I_e 峰值同样出现在光子球半径 $r = r_p = 2.32$ m 附近, 并急剧下降直到 0. 从图 6(e) 看出, 透镜环和光子环的叠加出现在 $4.5 \text{ m} < b < 5.1 \text{ m}$ 之间. 由于修正参数 ξ 的改变, 光子环和透镜环半径发生改变, 光环亮度也发生改变. 由图 6(c) 与图 6(f) 可见, 黑洞阴影半径大小随 ξ 的增加而减小. 对比图 6(b) 与图 6(e) 可知, 观测比强度极大值与次极大值出现

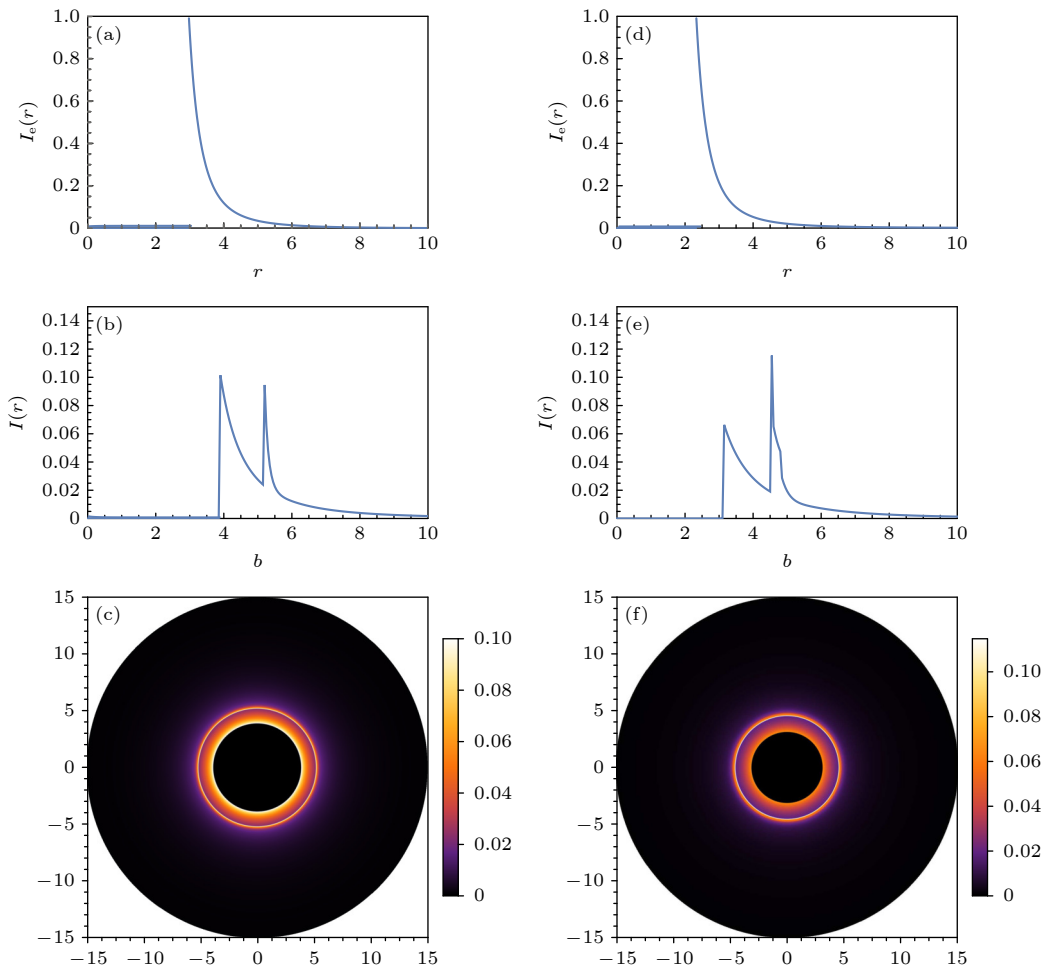


图 6 模型 2 下的吸积物质比辐射强度轮廓 (a), (d), 观察者的观测强度轮廓 (b), (e) 以及黑洞图像 (c), (f) (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$

Fig. 6. Under model 2, the specific intensity profile of accretion disk (a), (d), the observed intensity profile (b), (e), as well as the black hole image (c), (f): (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$.

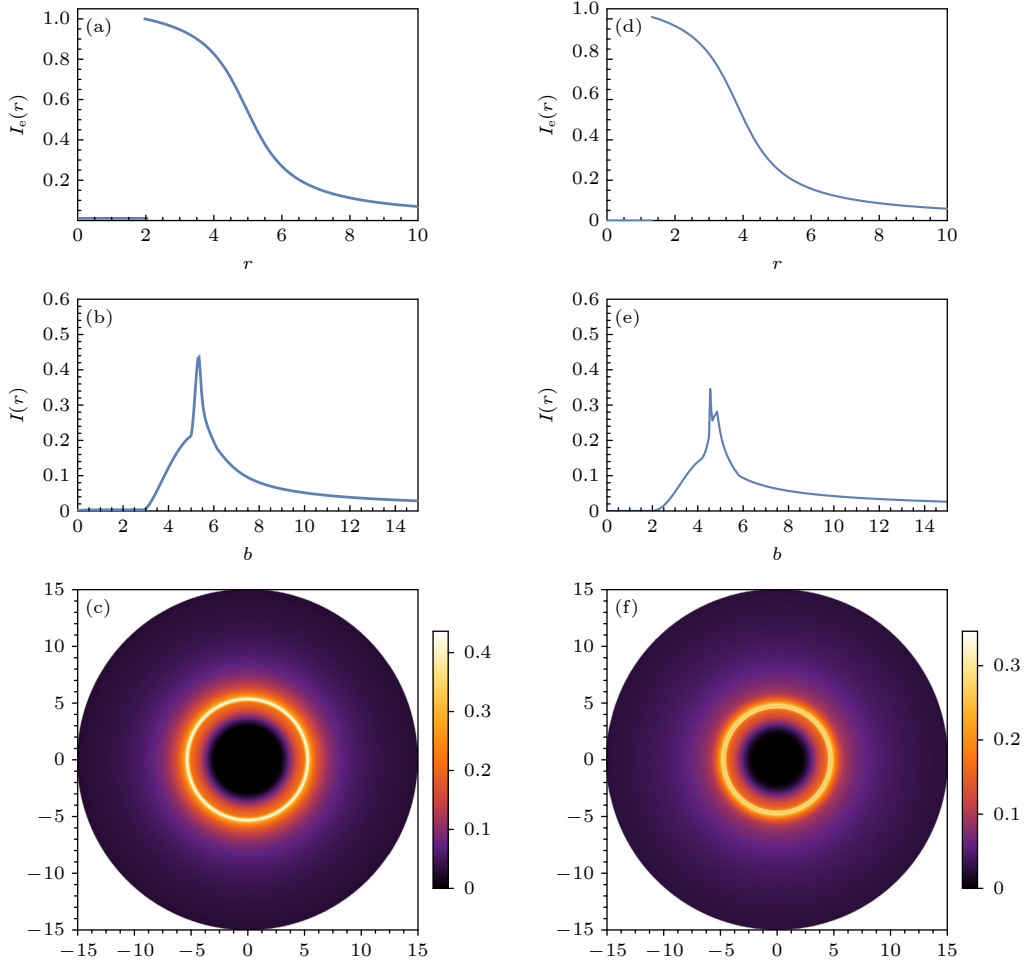


图 7 模型 3 下辐射源吸积盘比辐射强度轮廓 (a), (d), 观察者的观测强度轮廓 (b), (e) 以及黑洞图像 (c), (f) (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$

Fig. 7. Under the model 3, the specific intensity profile of accretion disk (a), (d), the observed intensity profile (b), (e), as well as the black hole image (c), (f): (a)–(c) $\xi = 0.05$; (d)–(f) $\xi = 0.9$.

先后顺序恰好相反. 当 $\xi = 0.05$ 时, 由图 6(b) 可见, 观测强度在直接像时先达到最大值, 而后在透镜环与光子环叠加处出现了次极大值, 即对应图 6(c) 黑洞亮环先达到最亮再变暗, 而后再达到较亮再变暗. 而当 $\xi = 0.9$ 时, 由图 6(e) 可见, 最大值与次极大值相差较大, 观测强度在直接像先到达次极大值, 而后透镜环与光子环叠加在直接像处达到最大值, 也就是对应黑洞图像 (图 6(f)) 亮环先较亮再变暗而后达到最亮再变暗.

模型 3 是辐射源吸积盘在事件视界附近发生辐射的反三角函数衰减模型:

$$I_e(r) = \frac{\pi/2 - \arctan[r - (r_{\text{ISCO}} - 1)]}{\pi/2 - \arctan r_p}, \quad (23)$$

当 $r > r_+$ 时成立, 否则 $I_e(r) = 0$.

图 7(a)–(c) 对应 $\xi = 0.05$ 的情况, 吸积盘辐射的峰值出现在 $r = 1.97 \text{ m}$ 附近, 与图 5 和图 6 不

同, 比辐射强度没有急剧下降, 而是缓慢下降. 透镜环和光子环也叠加在直接像上, 但与模型 2 相比, 透镜环和光子环的叠加在直接像的范围更大, 重叠区域的观测强度急剧增加, 这使得光环表现为一个更宽更亮的亮环. 在这个模型中, 透镜环和光子环的贡献更突出, 但贡献最大的依旧是直接像. 对于 $\xi = 0.9$, 直接像贡献了大部分的观测强度, 透镜环和光子环也有明显贡献. 相比于 $\xi = 0.05$, 光子环和透镜环没有完全叠加在一起, 可以区分透镜环和光子环的峰值. 且观测比强度的最大值随 AS 引力修正参数的增加而降低, 对应黑洞图像亮环的亮度随 ξ 的增加而变暗.

4 结 论

本文研究了在 AS 引力背景下, 薄盘吸积对黑洞周围光强度的影响, 以及修正参数 ξ 的值如何影

响黑洞的阴影和光环. 为研究光线偏折规律, 引入了拉格朗日方程, 通过求解时间、方位角以及四速度, 得到光在赤道平面的运动轨迹以及黑洞周围有效势的变化. 选择不同的 AS 修正参数 ξ 时, 黑洞事件视界、光子球半径以及入射参数都发生改变, 当修正参数 ξ 增大时, 它们的值也随之增大.

为研究黑洞吸积盘比辐射强度和观测强度变化, 引入 3 个不同的吸积辐射比强度轮廓模型. 在第一个二阶衰减函数模型中, 可以发现直接像对观测强度影响最大, 透镜环的影响很小, 而光子环的影响几乎可以忽略不计; 且黑洞阴影的半径、观测强度的峰值都随 AS 引力修正参数的增加而减小. 在第二个三阶衰减函数模型中, 透镜环和光子环共同叠加在直接像上, 使观测强度出现一个新的峰值, 这一峰值随 AS 引力修正参数的增加而增加. 对于不同的 AS 引力修正参数, 光子环和透镜环半径不同, 观测强度的最大值和次极大值出现的先后次序相反, 黑洞光环的亮度也明显不同. 虽然观察者观测强度大部分还是由直接像贡献的, 但是透镜环和光子环也有贡献. 在最后一个反三角函数衰减模型中, 透镜环和光子环在直接像上的叠加范围更大, 这使得光环表现为一个更宽的亮环, 相比于前两个吸积辐射轮廓模型, 在这个模型中, 光子环和透镜环的贡献更突出, 但贡献最大的依然是直接像. 对于不同的修正参数, 光子环和透镜环叠加情形也完全不同, 且黑洞阴影半径随修正参数的增加而减少, 黑洞光环的亮度峰值随修正参数的增加而变小.

从 3 个不同的吸积盘比强度辐射轮廓模型的图像中, 可以清晰地发现, 由于 AS 引力修正参数的不同, 吸积盘辐射源的比辐射强度、观察者的观测强度及黑洞的图像明显不同. 由此可见, AS 引力修正参数对黑洞阴影和光环产生了重要影响.

参考文献

[1] Akiyama K, Alberdi A, Alef W, et al. 2019 *Astrophys. J.* **875** L1
 [2] Luminet J P 1979 *Astron. Astrophys.* **75** 228
 [3] Bardeen J M 1973 *Black Holes* (New York: Gordon and Breach) pp215–239

[4] Darwin C G 1959 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **249** 180
 [5] Gan Q, Wang P, Wu H, et al. 2021 *Phys. Rev. D* **104** 044049
 [6] Gralla S E, Lupsasca A, Marrone D P 2020 *Phys. Rev. D* **102** 124004
 [7] Hinwisch E, Johnson M D, Lupsasca A, et al. 2020 *Phys. Rev. D* **101** 084020
 [8] Guo M, Zhong Z, Wang J, et al. 2022 *Phys. Rev. D* **105** 024049
 [9] Gralla S E, Holz D E, Wald R M 2019 *Phys. Rev. D* **100** 024018
 [10] Perlick V, Tsupko O Y, Bisnovatyi-Kogan G S 2015 *Phys. Rev. D* **92** 104031
 [11] Chael A, Johnson M D, Lupsasca A 2021 *Astrophys. J.* **918** 6
 [12] Hou Y, Zhang Z, Yan H, Guo M, Chen B 2022 *Phys. Rev. D* **106** 064058
 [13] Zeng X X, Zhang H Q 2020 *Eur. Phys. J. C* **80** 1058
 [14] Zeng X X, He K J, Li G P 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 290411
 [15] Cunha P V P, Eiro N A, Herdeiro C A R, Lemos J P S 2020 *JCAP* **03** 035
 [16] Li P C, Guo M, Chen B 2020 *Phys. Rev. D* **101** 084041
 [17] Zeng X X, Zhang H Q, Zhang H 2020 *Eur. Phys. J. C* **80** 1
 [18] He K J, Guo S, Tan S C, et al. 2022 *Chin. Phys. C* **46** 085106
 [19] Zeng X X, Li G P, He K J 2022 *Nucl. Phys. B* **974** 115639
 [20] Li G P, He K J 2021 *Eur. Phys. J. C* **81** 1018
 [21] Gao S J, Guo M Y, Ma Y G, et al. 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **52** 270002 (in Chinese) [高思杰, 郭敏勇, 马永革等 2022 *中国科学* **52** 270002]
 [22] Yuan Y F, Tang Z Y 2019 *Sci. Bull.* **64** 2072 (in Chinese) [袁业飞, 唐泽源 2019 *科学通报* **64** 2072]
 [23] Wu X B 2019 *Sci. Bull.* **64** 2082 (in Chinese) [吴学兵 2019 *科学通报* **64** 2082]
 [24] Chakhchi L, El Moumni H, Masmar K 2022 *Phys. Rev. D* **105** 064031
 [25] Broderick A E, Tiede P, Pesce D W, et al. 2022 *The Astrophys. J.* **927** 6
 [26] Broderick A E, Pesce D W, Gold R, et al. 2022 *Astrophys. J.* **935** 61
 [27] Guo Y, Miao Y G 2022 *Nucl. Phys. B* **983** 115938
 [28] Palumbo D C M, Wong G N 2022 *Astrophys. J.* **929** 49
 [29] Ashtekar A 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2244
 [30] Ashtekar A 1987 *Phys. Rev. D* **36** 1587
 [31] Ashtekar A, Baez J, Corichi A, et al. 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 904
 [32] Perez A 2003 *Classical Quantum Gravity* **20** R43
 [33] Green M B, Schwarz J H 1984 *Phys. Lett. B* **149** 117
 [34] Candelas P, Horowitz G T, Strominger A, et al. 1985 *Nucl. Phys. B* **258** 46
 [35] Weinberg S 1979 *In General Relativity: An Einstein Centenary Survey* (Cambridge: Cambridge University Press) pp790–831
 [36] Bonanno A, Reuter M 1999 *Phys. Rev. D* **60** 084011
 [37] Ma M S 2014 *Phys. Lett. B* **735** 45
 [38] Yang R 2015 *Phys. Rev. D* **92** 084011
 [39] Cai Y F, Easson D A 2010 *JCAP* **09** 002
 [40] Zuluaga F H, Sánchez L A 2021 *Eur. Phys. J. C* **81** 1
 [41] Bambi C 2013 *Phys. Rev. D* **87** 107501

Shadow and photon ring of black hole in asymptotically safe gravity*

Li Hui-Ling[†] Huang Yu-Meng Yang Cheng-Yu

(College of Physics Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

(Received 29 July 2023; revised manuscript received 28 August 2023)

Abstract

In this paper, we discuss the influence of thin disk accretion and asymptotically safe (AS) gravity correction parameters on the shadow and photon ring of black hole. For the thin disk accretion, the dark region is the shadow of the black hole, and the bright photon ring is composed of direct image, lensing ring, and photon ring. For the specific intensity of the radiation source of the accretion disk, we consider three different emission profile models. For the second-order attenuation function model in which the emission starts from the innermost circular orbit, direct image, lensing ring, and photon ring can be clearly distinguished. The direct image contributes most of the brightness, and the lensing ring contributes a small portion, while the contribution of the photon ring can almost be ignored. And the observed corresponding intensity peak decreases with the increase of the AS gravity parameter, that is, the corresponding brightness of the photon ring darkens as correction parameter increases. For the third-order attenuation function model in which the emission begins at the radius of the photon sphere, lensing ring and photon ring are superimposed on the direct radiation. Thus a new extreme value of the observed intensity emerges, and the extreme value increases with the increase of the AS gravity parameter, which leads to a brighter observed photon ring. For the anti-trigonometric attenuation function model in which the radiation starts from the event horizon, the superposition range of lensing ring and photon ring on the direct radiation becomes larger, which makes photon ring wider. The smaller the AS gravity parameter, the more difficult it is to distinguish between the lensing ring and photon ring, and the brighter the photon ring turns. In short, the results show that the shadow radius decreases with the increase of the AS correction parameter. For different AS gravity correction parameters, the light intensities of emission source, especially emission profiles of the observed intensity are significantly different, resulting in obvious differences in observed emission intensity between the shadow of the black hole and the bright photon ring of the black hole.

Keywords: black hole shadow, photon ring, lensing rings, asymptotically safe gravity

PACS: 04.70.-s, 04.20.-q, 04.25.-g

DOI: [10.7498/aps.73.20231233](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231233)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11703018) and the Basic Science Research Project of Education Department of Liaoning Province, China (Grant No. LJKM20221474).

[†] Corresponding author. E-mail: LHL51759@126.com



渐近安全引力下的黑洞阴影和光环

李慧玲 黄雨萌 杨承宇

Shadow and photon ring of black hole in asymptotically safe gravity

Li Hui-Ling Huang Yu-Meng Yang Cheng-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 010401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231233

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231233>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

引力彩虹时空中Kerr黑洞的熵谱和面积谱

Entropy spectrum and area spectrum of Kerr black hole in gravity's rainbow

物理学报. 2018, 67(6): 060401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172374>

非对易施瓦西黑洞的热力学及其量子修正

Thermodynamics and its quantum correction of non-commutative Schwarichild black hole

物理学报. 2019, 68(20): 200401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191054>

超透镜聚焦光环的产生及其在冷分子光学囚禁中的应用

Generation of focusing ring of metalens and its application in optical trapping of cold molecules

物理学报. 2021, 70(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210443>

Kiselev黑洞的热力学性质和物质吸积特性

Thermodynamic properties and matter accretion properties of Kiselev black hole

物理学报. 2019, 68(6): 060402 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182055>

洛伦兹破缺理论与Vaidya黑洞弯曲时空中的Dirac粒子隧穿辐射特征

Lorentz-violating theory and tunneling radiation characteristics of Dirac particles in curved spacetime of Vaidya black hole

物理学报. 2019, 68(19): 190401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190437>

完美吸收体、电磁“黑洞”以及内置完美匹配层的吸收特性

Absorption characteristics of perfect absorber, electromagnetic “black hole” and inner perfectly matched layer

物理学报. 2020, 69(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200110>