

ИЗОБРАЖЕНИЕ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ, ОСВЕЩЕННОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ЭКРАНОМ

© 2024 г. Е. В. Михеева^{1,*}, С. В. Репин^{1,**}, В. Н. Лукаш^{1,***}

¹ Астрономический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*E-mail: helen@asc.rssi.ru

** E-mail: sergerepin1@gmail.com

***E-mail: lukash@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.07.2023 г.

После доработки 01.12.2023 г.

Принята в печать 27.12.2023 г.

Предложена модель поверхности, освещающей черную дыру (“параболический экран”), которая позволяет естественным способом избежать появления краевых эффектов, связанных с фотонами, движущимися вдоль плоскости освещающего черную дыру экрана. Распределение температуры вдоль радиуса соответствует распределению для релятивистского диска (диска Новикова-Торна). Показано, что структура формирующейся тени черной дыры существенно отличается от случая, когда источником фотонов является удаленный экран, поскольку в рассмотренной модели фотоны, подвергшиеся сильному гравитационному линзированию черной дыры, излучаются “обратной” стороной экрана, которая в отсутствие черной дыры не была бы видна. В приближении тонкого экрана построены изображения тени Шварцшильдовской черной дыры в случаях, когда угол между осью симметрии освещающего экрана и направлением на наблюдателя составляет 5°, 30°, 60° и 80°. Для Керровской черной дыры изображения приведены для углов 60° и 80°.

Ключевые слова: черные дыры

DOI: 10.31857/S0004629924010012 EDN: LGETWU

1. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование теней черных дыр (ЧД) — важная проблема современной астрофизики. Первоначально оно носило, главным образом, иллюстративный характер, позволяя делать предсказания Общей теории относительности более наглядными, но по мере развития наблюдательной базы исследовательский интерес сместился в сторону построения теней ЧД с учетом инструментальных ограничений — шумов, разрешения, частот наблюдения и пр. Параллельно шло развитие представлений о физических условиях в аккреционных дисках и джетах, подсвечивающих ЧД.

Многочисленные факторы делают задачу построения и восстановления изображения тени ЧД довольно сложной, в результате чего к настоящему моменту имеются восстановленные (на основе наблюдательных данных) изображения только двух ЧД — M87* [1] и SgrA* [2]. Этот короткий список планируется дополнить за счет активных сверхмассивных ЧД с большими угловыми размерами, наблюдения которых будут проводиться на более высоких частотах (≈ 350 ГГц) и при больших проекциях баз, причем последнее условие будет достигнуто выводом телескопа за пределы Земли.

Зависимость изображения (и возможность его восстановления) тени ЧД от многих параметров подогревает интерес к моделированию теней, в котором количество таких параметров минимизировано, с целью выявить влияние на изображение ограниченного числа величин. Главными факторами, влияющими на вид тени ЧД, являются сильное гравитационное линзирование фотонов в поле ЧД и вид источника фотонов, подсвечивающих ЧД.

Ранее нами уже была рассмотрена задача о моделировании тени ЧД, в которой она освещается удаленным экраном, излучающим в полусферу [3]. Как было показано, в этом случае:

- ЧД проявляет себя как *гравитационная линза* для прямых лучей, исходящих от экрана к наблюдателю, что приводит к формированию яркого кольца снаружи темной тени ЧД.
- Внутри тени формируются более слабые *фотонные кольца* [4], образованные фотонами, обошедшими ЧД несколько раз. Яркость колец зависит от величины спина ЧД и наклона оси вращения ЧД к лучу зрения.

В данной работе, логически продолжающей [3], в качестве источника фотонов рассмотрен экран,

являющийся моделью аккреционного диска, но отличающийся некоторыми упрощающими задачу построения тени положениями. Плоскость симметрии экрана лежит в экваториальной плоскости ЧД. Он является безмассовым, не обладает собственным вращением; огибающая вертикального сечения экрана может быть описана параболой, сам экран является оптически толстым, а излучаемые фотоны характеризуются температурой, которая зависит от радиальной координаты r , что приводит к новым свойствам изображений ЧД. Как и в [3], для построения фотонных траекторий была численно решена система из шести обыкновенных дифференциальных уравнений (см. также [5] и ссылки там же). Отметим, что использованный метод вычисления сингулярных интегралов для численного интегрирования уравнений геодезических был предложен ранее в работах [6, 7].

По постановке задачи данная работа сходна с пионерской работой [8], где также была рассмотрена задача о виде тени Шварцшильдовской черной дыры, освещенной тонким диском. За прошедшие годы в области построения теней черных дыр — не только с метрикой Шварцшильда, но и в более общих случаях — были получены новые результаты (см. обзор [9] и ссылки там же). Современные вычислительные возможности позволяют проследивать сложные траектории фотонов [10] и, таким образом, моделировать детальные изображения теней и строить карты относительных интенсивностей разных участков изображений для последующего использования карт в определении масс и спинов черных дыр.

2. ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ ЭКРАН

В предположении безмассового экрана метрика пространства-времени вокруг ЧД имеет вид:

$$ds^2 = K dt^2 - \frac{dr^2}{K} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2),$$

$$K \equiv 1 - \frac{r_s}{r}, \quad (1)$$

где r — радиус кривизны 2-сферы с координатами $\theta \in (0, \pi)$, φ , r_s — радиус Шварцшильда, $\theta = \pi/2$ — плоскость симметрии экрана.

Рассмотрим в качестве источника фотонов поверхность осесимметричного тороподобного облака, которое в вертикальном разрезе имеет форму параболы (рис. 1). Такая форма излучательной поверхности позволяет естественным образом отсечь фотоны, рождающиеся на больших значениях радиуса. Между координатами x и y , характеризующими положение точки на параболе, существует связь:

$$x = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{y^2}{b} \right), \quad (2)$$

где b — параметр параболы, связанный с величиной ее “раскрытия”. Координаты x и y представлены в единицах $2r_0$ и записаны в виде $x = R \sin \theta$ и $y = R \cos \theta$, где $R = r/2r_0$ — безразмерный радиус, r_0 — радиальная координата внутреннего края экрана. Ось y на рис. 1 совпадает с осью симметрии диска. Внутренний край экрана имеет координату $x = 1/2$. Наличие щели между световой поверхностью (*light surface*) ЧД и экраном,

$$r_0 \geq 2r_{ls}, \quad (3)$$

где $r_{ls} = 3r_s/2$ — минимальный радиус круговой орбиты для фотонов, позволяет фотонам обращаться вокруг ЧД. Фотоны, прошедшие внутрь световой поверхности, падают на ЧД и не могут развернуться к наблюдателю (темный круг на рис. 1). Область между ЧД и экраном полностью прозрачна¹.

Поскольку координаты экрана состоят только из переменных метрики 2-сферы ЧД (см. ур-е (1)), форма экрана (огибающая зоны, закрашенной светло-серым на рис. 1) может быть параметризована следующим образом:

$$R \cos \beta = B - b, \quad R \sin \beta = \pm \sqrt{2b \left(B - \frac{1}{2} - b \right)}, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{\pi}{2} - \theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $B = \sqrt{R^2 + b + b^2}$. В искривленном пространстве-времени ЧД эти уравнения связывают угловую координату любой точки профиля экрана над центральной проскостью диска с радиусом кривизны в данной точке, r , с параметром толщины диска b , т.е. $\beta = \beta(R, b)$. При этом координаты декартовой системы отсчета (x, y) , связанной с ЧД, могут использоваться как координаты радиуса-вектора $\vec{R} = (x, y)$ с $x = R \cos \beta$ и $y = R \sin \beta$, для которых выполняются соотношения $R = \sqrt{x^2 + y^2}$, $B = x + b$ и др.

3. ВЛИЯНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЭКРАНА НА СТРУКТУРУ ТЕНИ ЧД

Построенная модель позволяет увидеть, какие части экрана ответственны за яркость разных участков изображения ЧД в зависимости от величины параметра толщины b и распределения температуры экрана $T(R)$.

¹ Данное предположение носит модельный характер и может не выполняться в зависимости от физических условий вблизи черной дыры (структуры аккреционных потоков), см. дискуссию в [9].

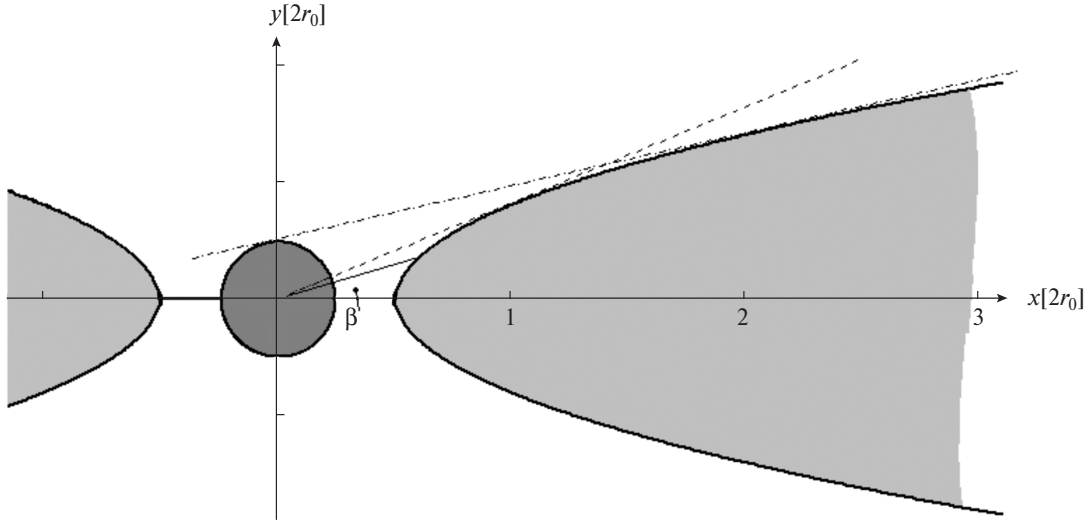


Рис. 1. Схема излучающего экрана в окрестности ЧД. ЧД расположена в начале координат, темно-серая зона соответствует области пространства, ограниченной орбитами фотонов на минимальной устойчивой орбите для случая Шварцшильдской черной дыры. Светло-серая область соответствует внутренней области экрана. На этом рисунке $r_{ls} = r_0/2$, $R_{ls} = 1/4$, $b = 1/2$.

Максимальный угол экрана над плоскостью $y=0$ (рис. 1) растет с ростом параметра толщины, $|\beta| \leq \beta_0 \equiv \arctg \sqrt{b}$. Его величина является решением уравнения

$$\frac{\partial \beta}{\partial R} = 0, \quad (5)$$

имеющим вид

$$\begin{aligned} x &= 1, \\ |y| &= \sqrt{b} = \beta_0, \\ R &= \sqrt{1+b} = \frac{1}{\cos \beta_0}. \end{aligned} \quad (6)$$

В дальнейшем часть экрана с $|x| \leq 1$ будем называть краем экрана, а остальную его часть с $|x| > 1$ — собственно экраном. Сам экран по радиальному компоненту мы будем считать протяженным.

Следует различать собственно изображение ЧД, образованное фотонами, подвергшимися сильному гравитационному линзированию поля ЧД, и изображение диска, образованное фотонами, прошедшими “напрямую”, т.е. теми, для которых эффект гравитационного линзирования был слабым. Изображение последних мы будем называть “гало”. Таким образом, граница тени и (внешнего по отношению к тени) гало формируется фотонами прямого излучения края диска, незначительно линзированными ЧД в силу малых отклонений траекторий лучей, идущих от открытой части экрана к наблюдателю. В этом смысле наличие темной области в центральной части экрана, которое по внешним признакам тоже можно назвать “тенью”, не связано

с ЧД — это свойство самого экрана¹. О наличии ЧД можно судить только по внутренним кольцам изображения, образованным фотонами, обходящими ЧД по световой сфере один и более раз с соответствующим уменьшением радиуса и яркости колец. В этом смысле, как и в работах [10, 9], мы различаем “истинное” изображение черной дыры и ее более протяженную тень.

Изображения ЧД, помещенных в относительно “толстые” диски с $\sqrt{b} \geq l \simeq 2R_{ls} = r_{ls}/r_0$, формируются из фотонов с края экрана ($x \leq 1$). В построении изображений ЧД с “тонкими” дисками с $\sqrt{b} < l \leq 1/2$ участвуют все фотоны экрана с $x \leq 2l^2/b$. Дополнительные фотоны диска усиливают яркость внутренних колец: фотоны сначала двигаются вдоль радиуса ($\varphi \simeq \text{const}$ при $x > 1$), а затем поворачивают к наблюдателю вдоль световой сферы ЧД (где φ может изменяться при $x < 1$). Максимальный радиус области собирания фотонов изображения с поверхности экрана обратно пропорционален толщине тонкого диска²:

² ЧД внутри тени там могло и не быть. Гравитационное поле ЧД не может существенно изменить яркость гало и границу тени: лучи гало приходят из открытой части экрана к наблюдателю независимо от ЧД, все остальные фотоны, проходящие через сильное гравитационное поле, поворачиваясь вокруг ЧД, не могут попасть к наблюдателю в качестве лучей гало в силу формы параболического экрана.

<> Пусть $\alpha = \beta - \arcsin(l/R)$ — это угол относительно центральной плоскости диска импульса фотона в точке его излучения и приходящего к наблюдателю через щель $r \in (r_{ls}, r_0)$. Максимальный радиус экрана, фотоны которого образуют

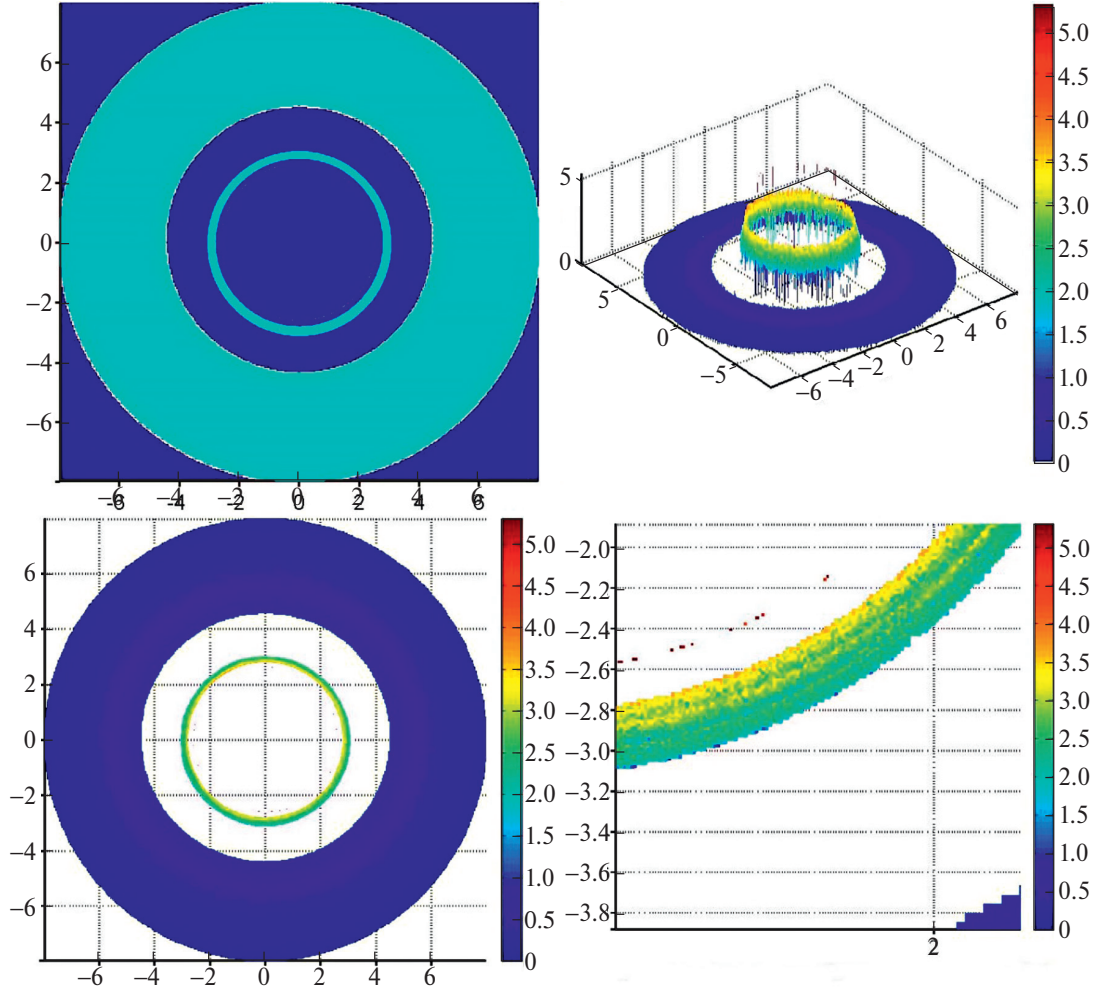


Рис. 2. Тень Шварцшильдовской черной дыры. Угол между осью симметрии экрана и направлением на наблюдателя составляет 5° . Детали (см. текст).

более яркий внешний круг главного фотонного кольца изображения, находится как корень уравнений

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R} = 0: \quad \frac{x-1}{\sqrt{2x-1}} = \frac{aB}{\sqrt{B^2-c}}, \quad (7)$$

$$a = \frac{l}{\sqrt{b}}, \quad c = b + b^2 + l^2,$$

$$(x-x_1)(x-x_2) = c \left(\frac{x-1}{x+b} \right)^2, \quad (8)$$

$$x_{1,2} = \sqrt{1+a^2} (\sqrt{1+a^2} \pm a) = \frac{\sqrt{b+l^2} (\sqrt{b+l^2} \pm l)}{b}.$$

При $a < 1$: $x \simeq x_1 \simeq \frac{1}{x_2} \simeq \frac{R}{\sqrt{1+b}} \simeq \frac{|y|}{\sqrt{b}} \simeq 1+a$. При $a > 1$:

$x \simeq x_1 \simeq R \simeq 2a^2$, $x_2 \simeq \frac{1}{2}$, $|y| \simeq 2l$. Второе решение ($x \simeq x_2$)

относится к фотонам края экрана, образующим более слабый внутренний круг главного фотонного кольца изображения.

$$x = R = \frac{2l^2}{b} \gg 1, \quad |y| = 2l \leq 1.$$

Все внутренние кольца изображения фокусируются вблизи световой сферы ЧД, их общая площадь меньше площади гало. С уменьшением толщины экрана светимость внутренних колец растет относительно внешнего гало: фотоны колец приходят со всего диска и линзируются в сильном неоднородном гравитационном поле, тогда как во внутреннюю часть гало попадают только прямые фотоны открытого края диска.

Отдельно следует сказать о главном (первом) фотонном кольце внутри тени: его яркость может превышать все остальные кольца ЧД, включая и гало. Лучи главного внутреннего кольца приходят к наблюдателю с обратной стороны диска, поворачиваясь при этом на угол $\sim \pi/2$. В пределе плоского диска ($b \rightarrow 0$) образующие фотоны для внутренних колец тени собираются со всего экрана. При этом

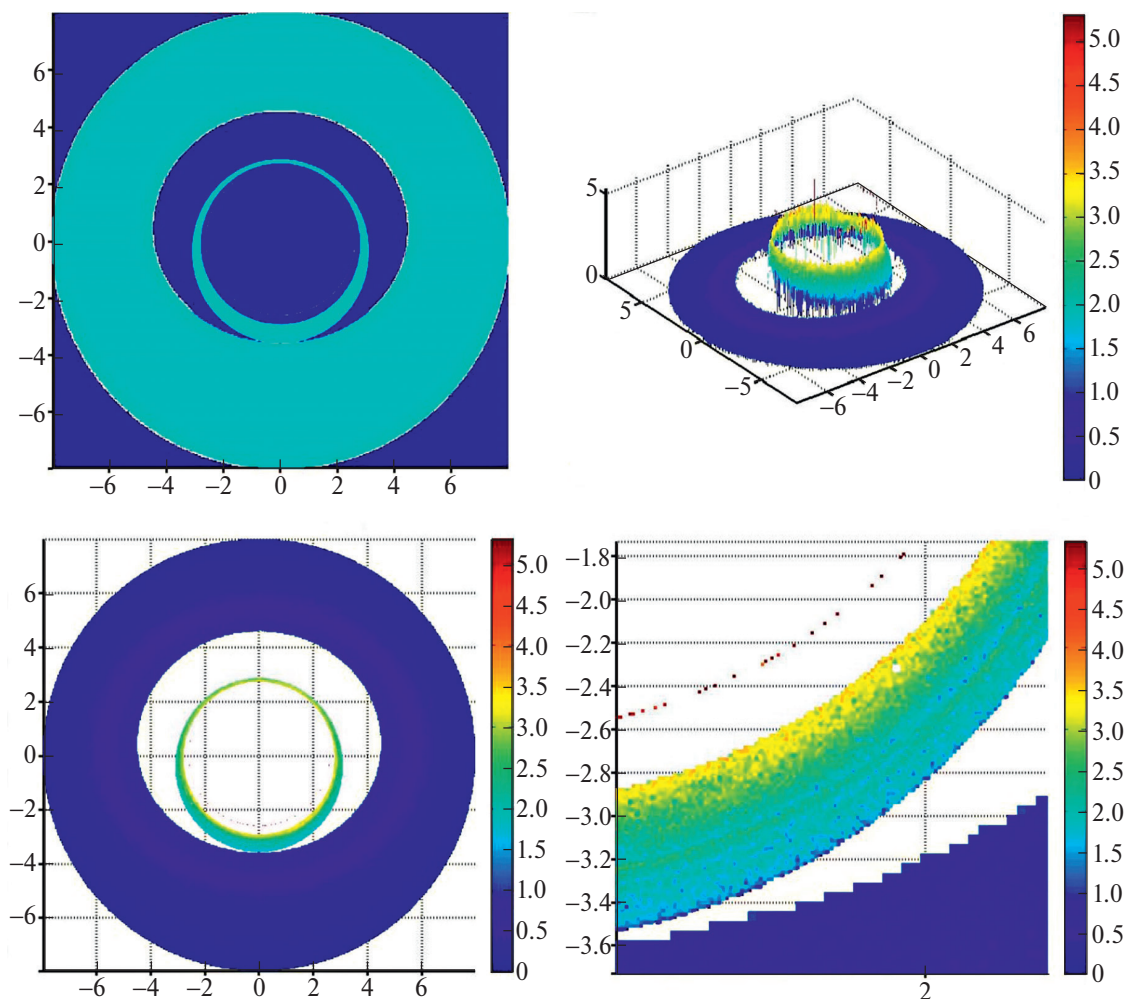


Рис. 3. Тень Шварцшильдовской черной дыры. Угол между осью симметрии экрана и направлением на наблюдателя составляет 30° .

угол поворота лучей для первого кольца ограничен, что и приводит к усилению его яркости относительно других колец изображения. Этот эффект усиления яркости может быть использован для проверки геометрических моделей дисковой аккреции в сильном гравитационном поле. На первом шаге мы проверим его в численной модели изображений ЧД в пределе тонкого диска. Далее мы перейдем к изображениям кервовой ЧД с осью вращения, перпендикулярной к плоскости диска, для разных значений угла между спином ЧД и лучом зрения.

4. ПРИБЛИЖЕНИЕ ТОНКОГО ЭКРАНА

В приближении $b \rightarrow 0$ параболический экран вырождается в плоский. Как и ранее в [3], при решении задачи о построении геодезических предполагается, что каждая точка поверхности экрана излучает фотоны в полусферу. Следуя ранее разработанной методологии, были построены изображения теней, приведенные на рис. 2–5.

Для построения каждого изображения ЧД было построено 4 миллиона траекторий фотонов. При расчете предполагалось, что экран не вращается, а фотоны не испытывают гравитационного красного смещения, и было принято, что излучаемые экраном фотоны имеют температуру, чья зависимость от радиуса совпадает с аналогичной зависимостью для релятивистского диска (диска Новикова–Торна [11]). Излучательная способность обеих сторон экрана идентична. Некоторые неоднородности цвета на рисунках обусловлены численными эффектами и особенностями стандартных графических программ, использованных для построения изображений.

Каждый из рис. 2–5 состоит из четырех панелей. Сверху слева дано схематическое изображение тени: если из пикселя приходит хотя бы один фотон, пиксель окрашен в голубой цвет, если фотонов нет — в синий. Слева снизу показана относительная интенсивность излучения от разных участков тени ЧД

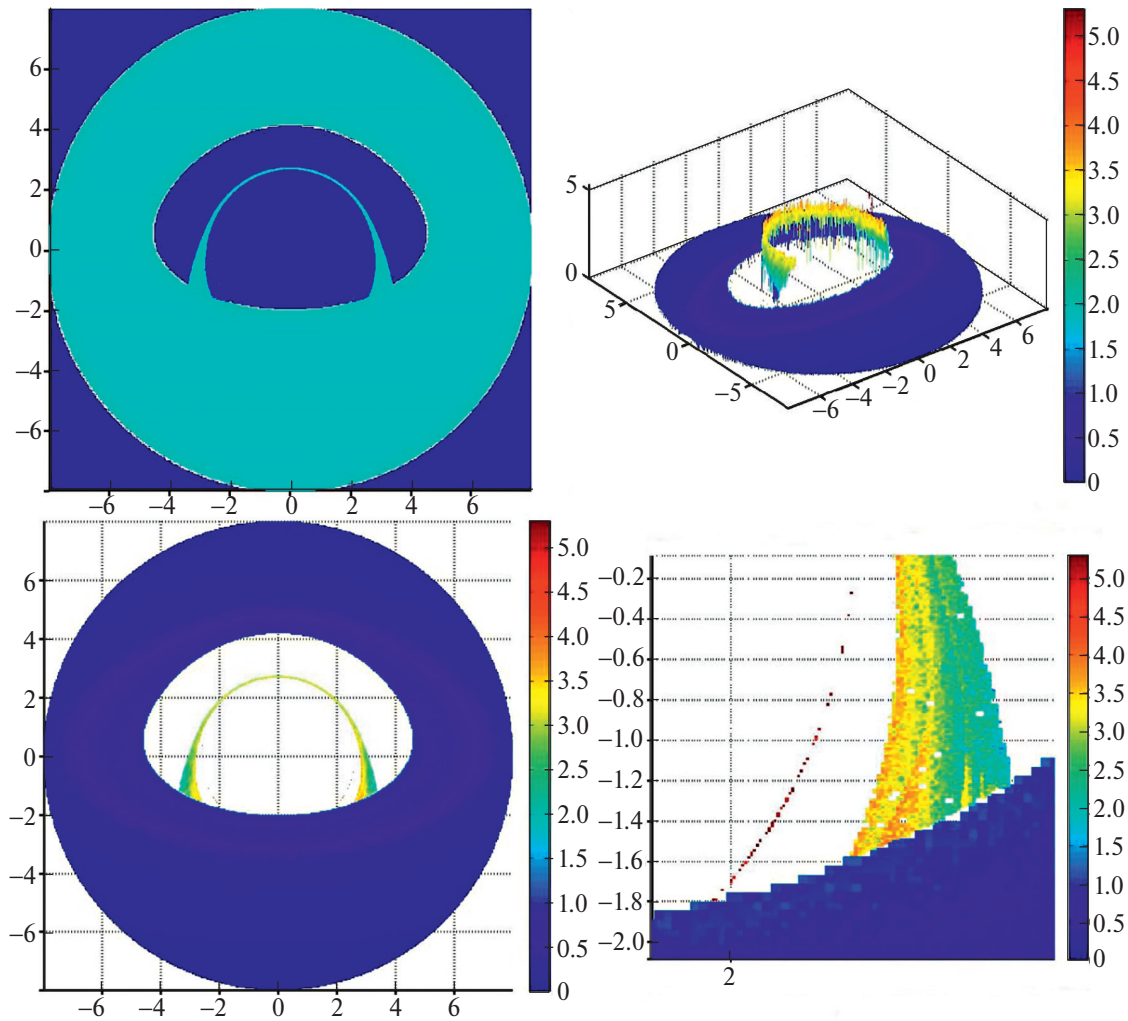


Рис. 4. Тень Шварцшильдовской черной дыры. Угол между осью симметрии экрана и направлением на наблюдателя составляет 60° .

в логарифмическом масштабе. Справа сверху изображение с нижней левой панели искусственно наклонено для лучшей визуализации, по вертикальной оси отложена относительная интенсивность излучения в логарифмическом масштабе. На нижней правой панели дано увеличенное в несколько раз изображение участка с фотонными кольцами. Рис. 2–5 различаются тем, под каким углом наблюдатель видит экран. В первом случае (рис. 2) угол между осью симметрии экрана и направлением на наблюдателя составляет 5° , на последующих трех рисунках он равен 30° , 60° и 80° .

Особый интерес для теоретического анализа представляет верхняя левая панель рисунков, для исследования возможностей наблюдения построенных изображений — нижняя левая.

На рис. 2 визуально можно выделить три кольца разной ширины. Внешнее широкое кольцо образовано фотонами, приходящими от экрана “напря-

мую”, т. е. излученными стороной экрана, обращенной к наблюдателю. В рамках ранее введенной терминологии мы называем его “гало”. Внутренний край гало имеет координату $x = 1/2$ (рис. 1). Среднее кольцо образовано фотонами, подвергшимися сильному гравитационному линзированию и прошедшими через щель между световой поверхностью ЧД и внутренним краем экрана, т. е. это фотоны, излученные обратной стороной экрана, которую было бы нельзя увидеть, если бы не гравитационное линзирование. Это первое (главное) фотонное кольцо. Наконец, внутреннее кольцо образовано фотонами, излученными стороной, обращенной к наблюдателю, но совершившими облет ЧД, т. е. угол их поворота в поле ЧД $\sim 3\pi/2$. При увеличении числа рассчитанных геодезических, а также масштаба рисунка, становятся заметны и другие кольца, образованные малочисленными фотонами, совершившими облет ЧД с еще большими углами поворота.

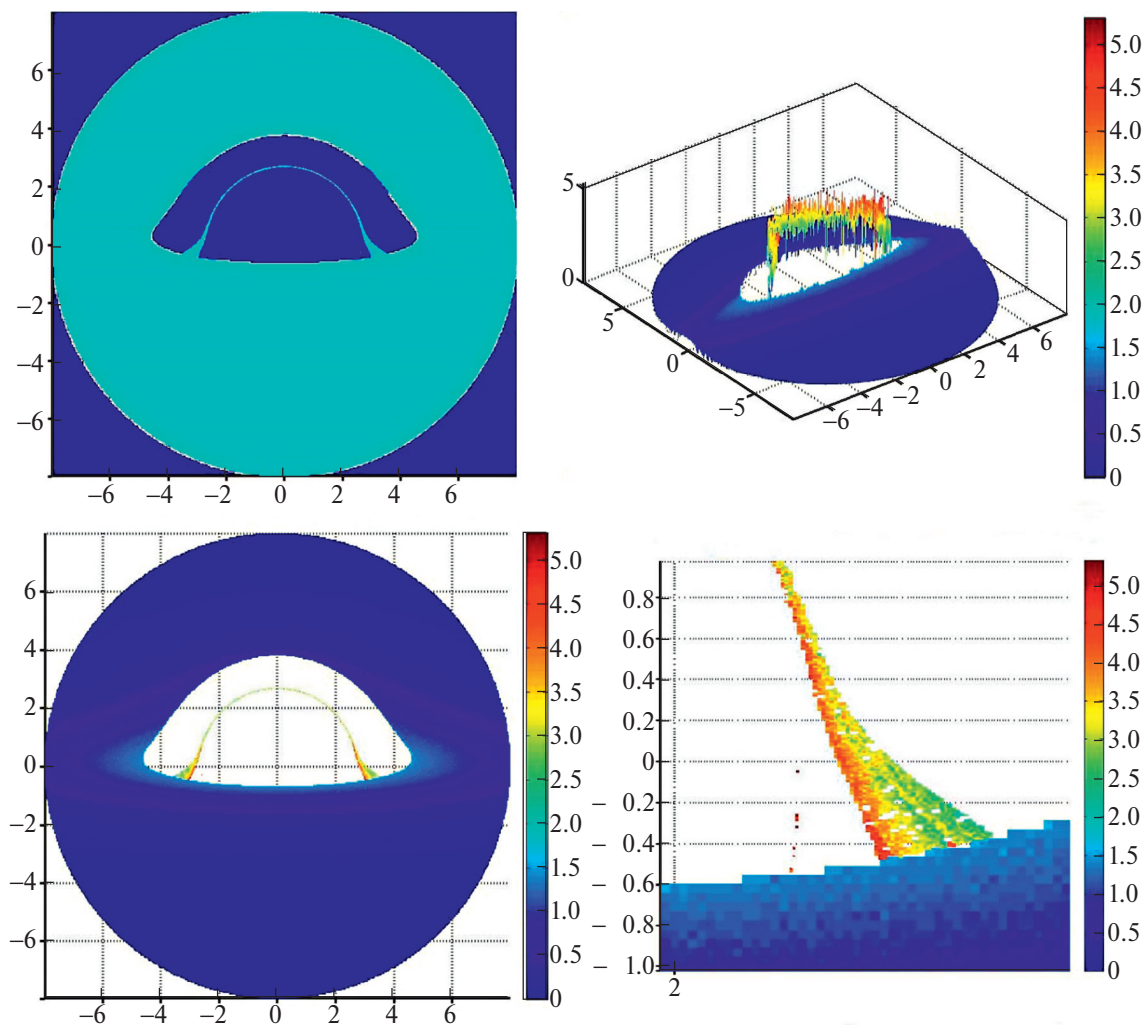


Рис. 5. Тень Шварцшильдовской черной дыры. Угол между осью симметрии экрана и направлением на наблюдателя составляет 80° .

Для того чтобы сделать изображение тени ЧД более приближенным к реальной картине, было учтено, что каждый пиксель изображения содержит разное количество фотонов. Левая нижняя панель рис. 2–5 отображает относительную интенсивность излучения. Видно, что для гало она медленно спадает по мере увеличения радиуса, что соответствует падению температуры для релятивистского диска. Правая верхняя панель позволяет проиллюстрировать различие интенсивностей фотонного кольца и гало, видно, что их отношение составляет примерно три порядка. Нижняя правая панель позволяет рассмотреть фотонное кольцо более подробно и увидеть, что его внешний (более близкий к гало край) имеет гораздо большую интенсивность, чем внутренний.

При увеличении угла между осью симметрии экрана и лучом зрения фотонное кольцо приближается к внутреннему краю гало, но не сливается с ним

из-за различия в интенсивностях, т. е. кольцо трансформируется в серп. При больших значениях угла основной поток оказывается сосредоточен в двух разнесенных областях.

4.1. Керровская черная дыра

Аналогичные расчеты были проведены для керровской ЧД, ось вращения которой совпадает с осью симметрии экрана, с безразмерным параметром вращения $a = 0.9982$. В случае когда угол между осью вращения ЧД и направлением на наблюдателя невелик, эффекты, привносимые вращением, мало заметны. Рис. 6 и 7 иллюстрируют случаи, когда вышеупомянутый угол равен 60° и 80° соответственно. Как и следовало ожидать, фотонное кольцо становится асимметричным, зависящим от спина.

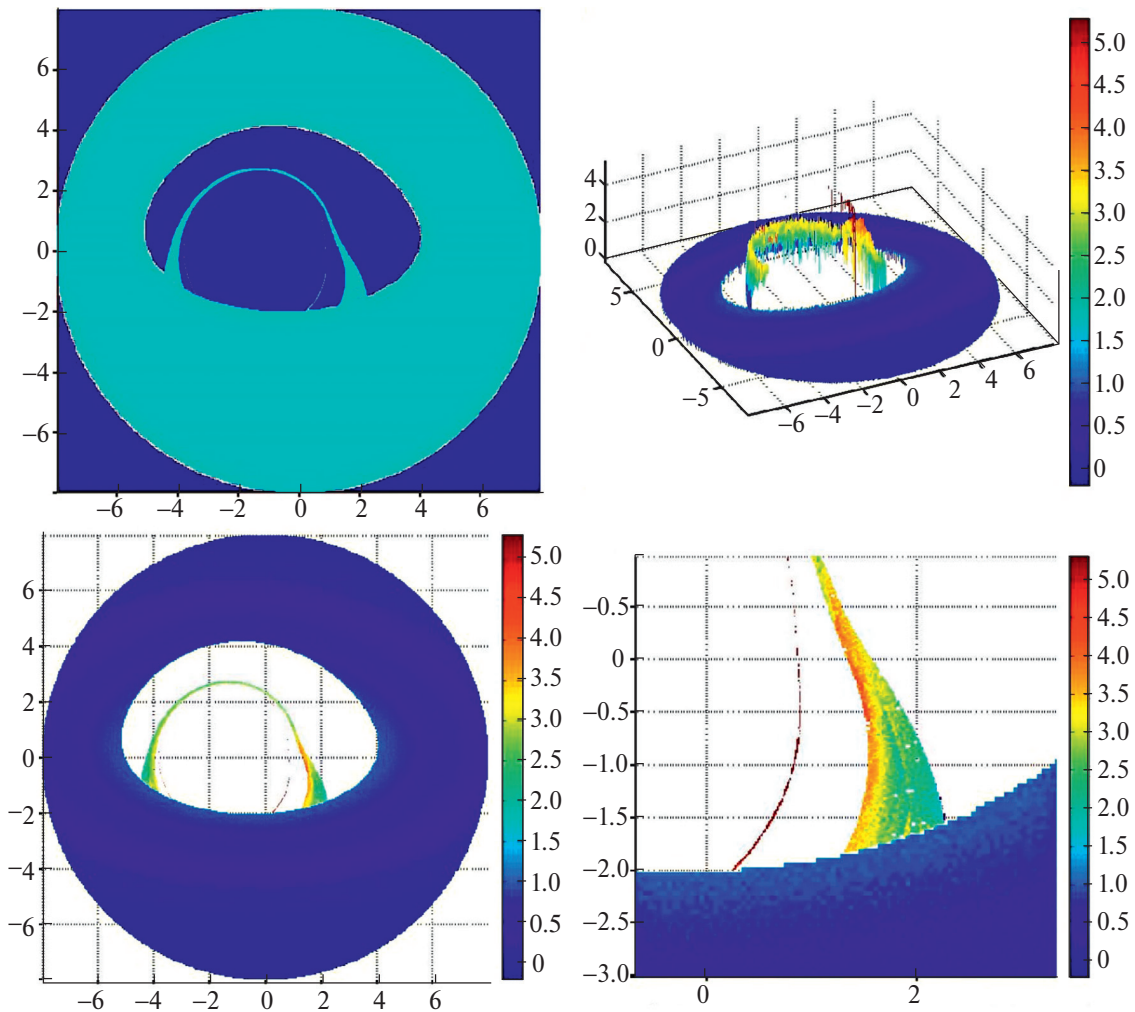


Рис. 6. Тень черной дыры Керра. Угол между осью вращения ЧД и направлением на наблюдателя составляет 60° .

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По различным аспектам теней ЧД в последние годы было опубликовано множество работ. Они касаются построения геодезических фотонов, методов восстановления изображений из интерферометрических наблюдательных данных, тому, какие орбиты для телескопов, вынесенных в космос, являются предпочтительными и т. д. Иногда затрагивается и вопрос определения того, что, собственно, следует называть тенью черной дыры и насколько удачен этот термин. Наиболее общее определение (темная область в центральной части источника, где должно было бы излучать центральное тело, если бы оно имело обычные свойства) не вполне удовлетворительно, поскольку оставляет “за кадром” источники с нетривиальным спектральным распределением. Не вдаваясь в подробности, можно представить себе объект, излучающий в основном в области высоких частот, но наблюдаемый в области

низких. В этом случае можно ожидать появление темного пятна на ярком фоне, образованном низкочастотным излучением. Также логически кажется не вполне приемлемым называть “изображением” отсутствие фотонов, которые и приносят информацию об объекте. Поэтому иногда в литературе применительно к тени ЧД появляется термин “силуэт”. Впервые применительно к теням черных дыр он был использован в работе [12], данный термин не получил большого распространения, но упоминался в широко цитируемой работе [13]. Авторы обзора [9] используют этот термин для описания структуры изображения черной дыры в зависимости от источников фотонов, которые формируют изображение.

В данной работе нами была рассмотрена академическая задача о формировании изображения ЧД, окруженной излучающим экраном (модельным диском). По сравнению с пионерской работой [8] нами была построена не только общая структура

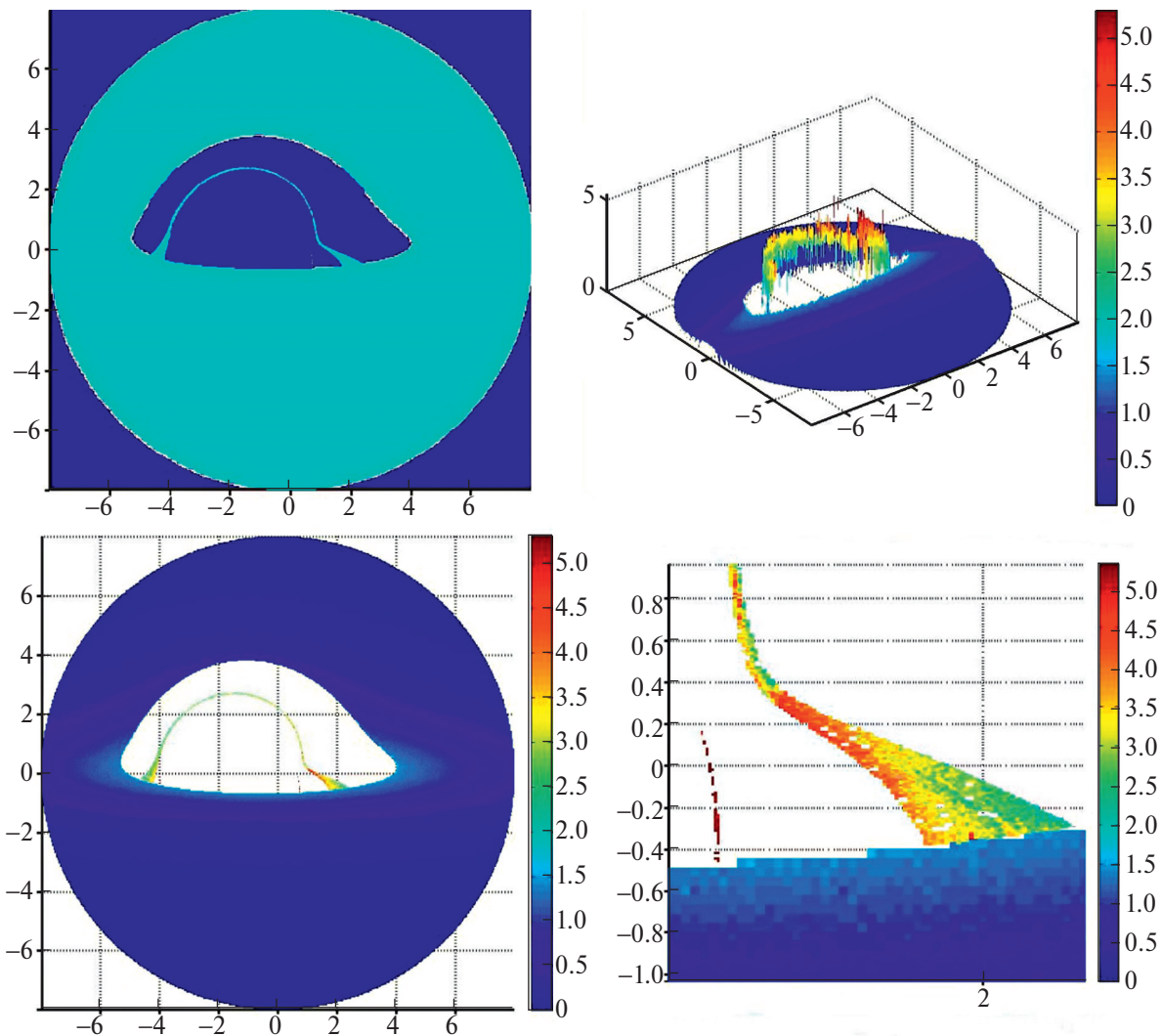


Рис. 7. Тень черной дыры Керра. Угол между осью вращения ЧД и направлением на наблюдателя составляет 80° .

тени (верхняя левая панель на рис. 2–7), но и распределение относительной интенсивности по изображению (левая нижняя и правая верхняя панели рис. 2–7), а также представлено более детальное изображение фотонного кольца (нижняя правая панель на рис. 2–7). В отличие от изложенного в работах [14, 15] наше внимание было сосредоточено на расчете относительных интенсивностей разных частей изображений ЧД, поскольку именно их используют при моделировании теней с учетом частоты наблюдения, времени накопления сигнала и реализуемого в ходе интерферометрических измерений покрытия ($u - v$)-плоскости. В работе было показано, что граница яркой и темной зон образована фотонами, приходящими из внутреннего края модельного диска, и в этом смысле граница тени ЧД и ее размер определяются внутренним радиусом экрана, а не ЧД. Характерной чертой изображения, указывающего на наличие ЧД, являются фотонные

кольца (кольцо) — очень узкие кольцообразные структуры с высокой (относительно экрана) интенсивностью, что согласуется с введенным в статье [10] разделением изображения ЧД на “истинное” изображение и тень. Полученная в нашем исследовании картина слабо зависит от распределения температуры по экрану (см. незначительное увеличение интенсивности вблизи внутреннего края “гало” на рис. 2–7), но существенно от угла, под которым виден модельный диск. Если этот угол мал, так что наблюдатель видит экран примерно с полюса, то изображение слабо зависит от момента вращения ЧД, если угол велик, то фотонное кольцо превращается в асимметричный фотонный серп.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

С. В. Репин благодарит Р. Е. Бересневу, О. Н. Суменкову и О. А. Косареву за возможность плодотворной работы над этой задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **875**(1), id. L4 (2019).
2. *K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, J. C. Algaba, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **930**(2), id. L12 (2022).
3. *Е. В. Михеева, С. В. Репин, В. Н. Лукаш*, *Астрон. журн.* **97**, 555 (2020).
4. *M. D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, G. N. Wong, et al.*, *Science Advances* **6**(12), eaaz1310 (2020), arXiv:1907.04329 [astro-ph].
5. *А. Ф. Захаров, С. В. Репин*, *Астрон. журн.* **76**, 803 (1999).
6. *А. Ф. Захаров*, *Астрон. журн.* **68**, 58 (1991).
7. *A. F. Zakharov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **269**, 283 (1994).
8. *J. P. Luminet*, *Astron. and Astrophys.* **75**, 228 (1979).
9. *В. И. Докучаев, Н. О. Назарова*, *Успехи физ. наук* **190**, 627 (2020).
10. *В. И. Докучаев, Н. О. Назарова*, *ЖЭТФ* **155**, 677 (2019).
11. *I. D. Novikov and K. S. Thorne*, *Black holes (Les astres occlus)*, edited by C. DeWitt and B. DeWitt (N.Y.: Gordon and Breach, 1973), p. 343.
12. *G. H. George*, *J. Royal Astron. Soc. Canada* **84**, 28 (1990).
13. *A. E. Broderick and A. Loeb*, *Astrophys. J.* **697**, 1164 (2009).
14. *V. I. Dokuchaev and N. O. Nazarova*, *Universe* **6**, 154 (2020).
15. *V. I. Dokuchaev and N. O. Nazarova*, *General Relativ. and Gravit.* **53**, id. 83 (2021).

IMAGE OF A BLACK HOLE ILLUMINATED BY A PARABOLIC SCREEN

E. V. Mikheeva^a, S. V. Repin^a, V. N. Lukash^a

^a*Astrospace Center of P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

A model of an illuminating black hole surface (“parabolic screen”) is proposed. This allows to avoid in a natural way the appearance of edge effects related with photons moving along the screen plane. The temperature distribution along the radius corresponds to the corresponding distribution for a relativistic disk (Novikov-Thorne disk). It is shown that the structure of the formed black hole shadow essentially differs from the case when the source of photons is a distant screen, since in the considered model the photons, subjected to strong gravitational lensing of the black hole, are emitted by the “backward” side of screen, which would not be visible in the absence of the black hole. In the thin screen approximation, shadow images are constructed for the Schwarzschild black hole in the cases when the angle between the symmetry axis of the illuminating screen and the direction to the observer is equal to 5, 30, 30 and 80 angular degrees, similar images for the Kerr black hole are constructed for the cases of 60 and 80 angular degrees.

Keywords: black holes