



Видимые изображения невидимых черных дыр

Вячеслав Докучаев¹ и Наталья Назарова^{2,3}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy

³Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA), Trieste Italy

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2021

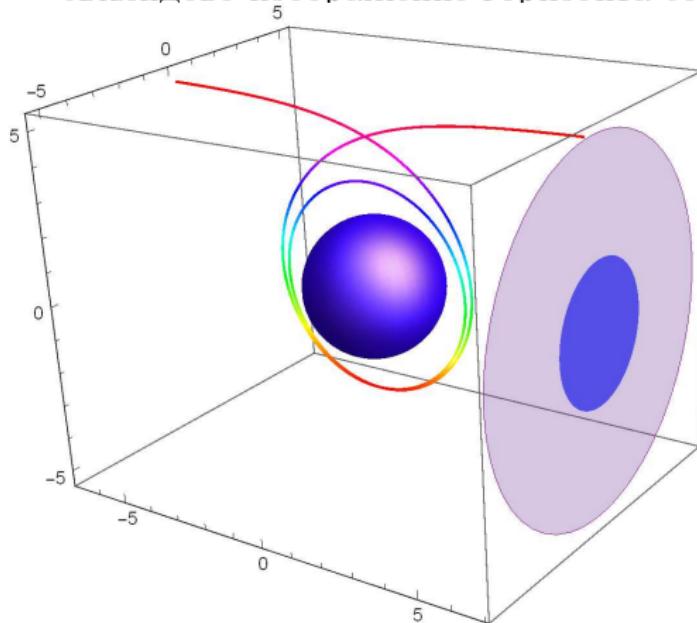
Астрофизическая Ситуация 1. Удаленный фон

Пурпурная область — классическая тень черной дыры

$\stackrel{\text{def}}{=}$ сечение захвата черной дырой фотонов от удаленного фона.

В случае черной дыры Шварцшильда $r_{sh} = 3\sqrt{3} \approx 5.2$

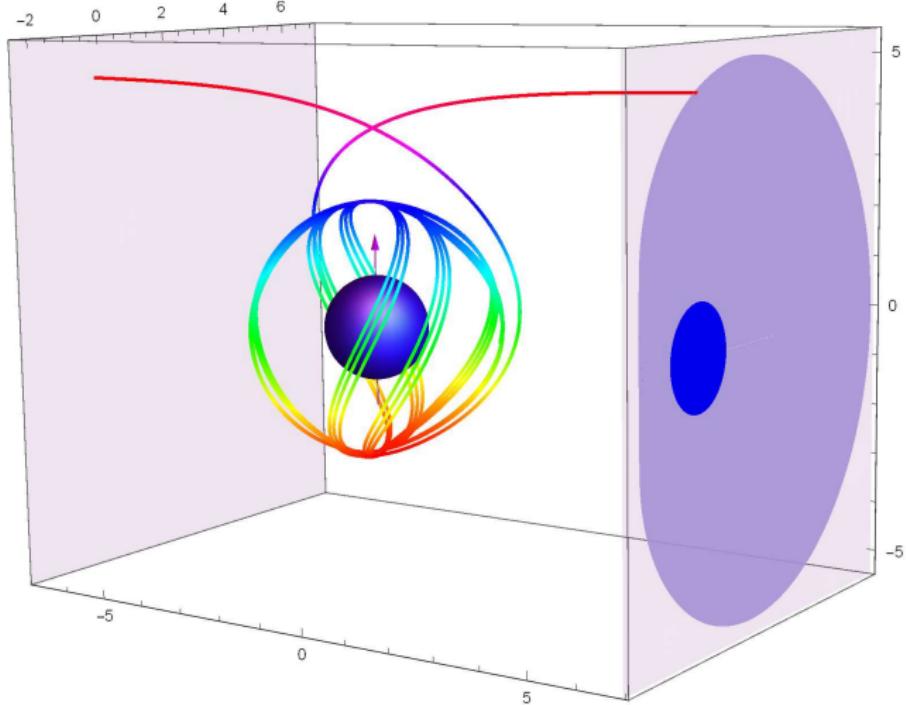
Синий диск — евклидово изображение горизонта событий $r_h = 2$



Показана траектория фотона вблизи границы классической тени черной дыры с точкой поворота (фотонной сферой) при $r_{ph} = 3$

Пурпурная область — классическая тень черной дыры Керра: $a = 1$

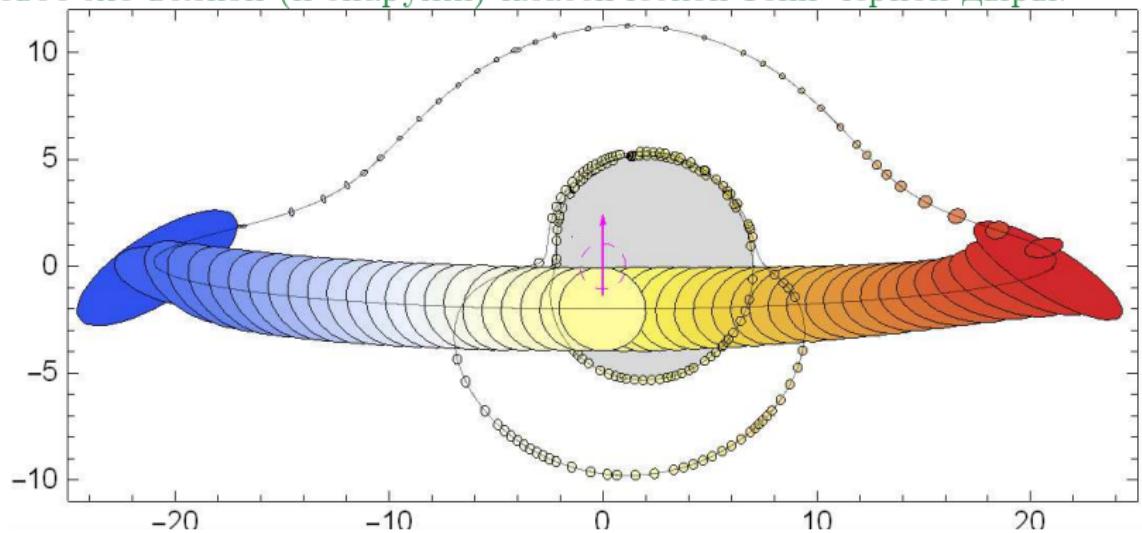
Синий диск внутри тени — эвклидово изображение горизонта событий $r_h = 1$



Многоцветная 3D-кривая — траектория фотона вблизи границы классической тени с точкой поворота $r_{\min} = r_{ph} = 1 + \sqrt{2}$ и прицельными параметрами $\lambda = 0$ и $q = \sqrt{11 + 8\sqrt{2}} \approx 4.72$

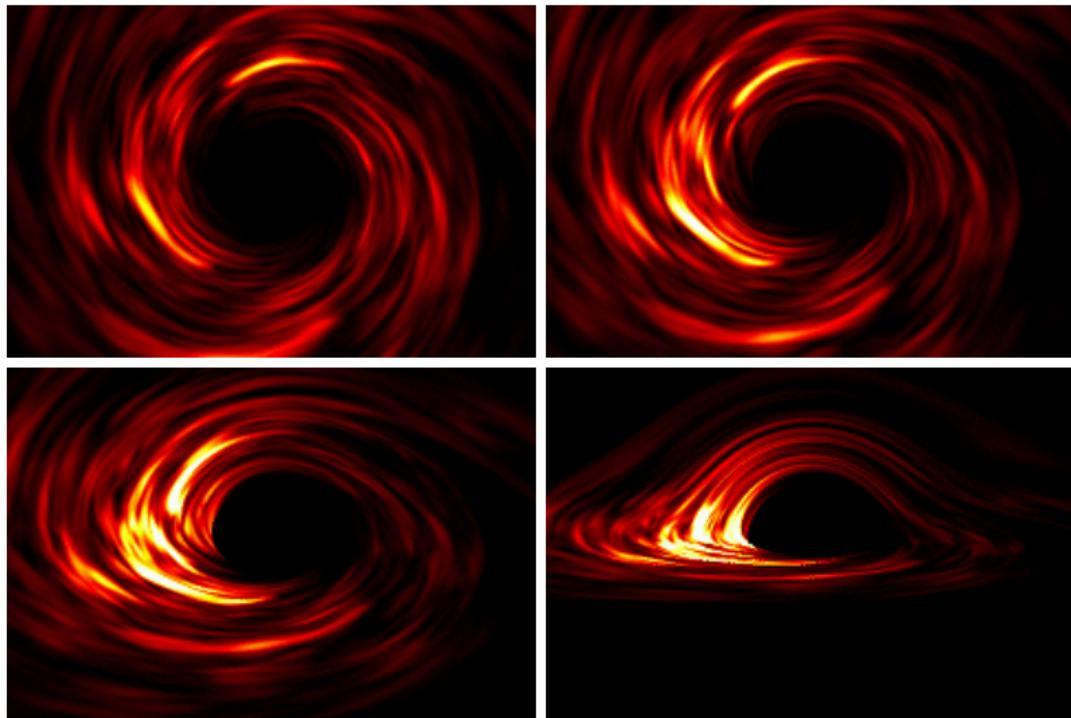
Компактная звезда на экваториальной круговой орбите вблизи SgrA* с радиусом $r_s = 20\text{MG}/c^2$,

наблюдалась удаленным телескопом (Миллиметрон) с учетом сдвига частоты фотонов (гравитационное красное смещение и Допплер эффект) и линзированной деформации формы звезды. Через дискретные интервалы времени показано прямое изображения звезды, а также первое и второе световое эхо вблизи (и снаружи) классической тени черной дыры.



Астрофизическая Ситуация 2. Фон вблизи горизонта

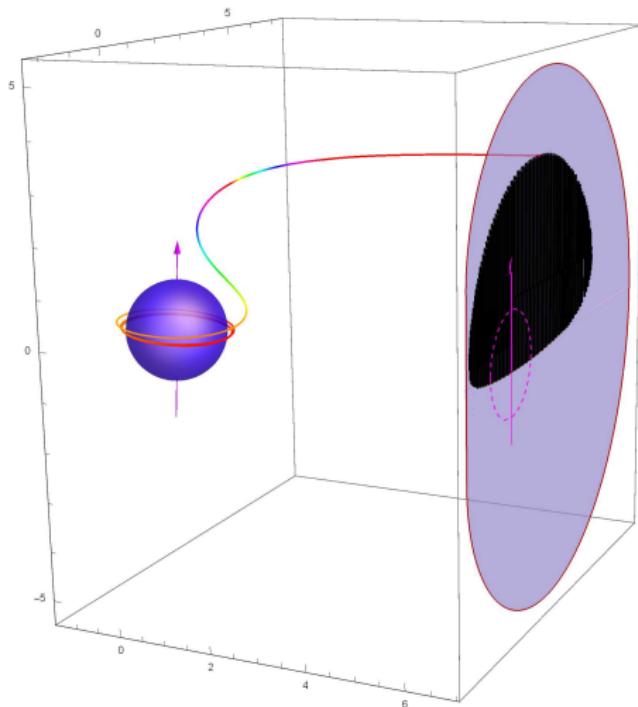
Излучение из области внутри фотонных сфер: $r_h \leq r \leq r_{ph}$



$\text{K}\alpha$ линия железа 6.4 кэВ

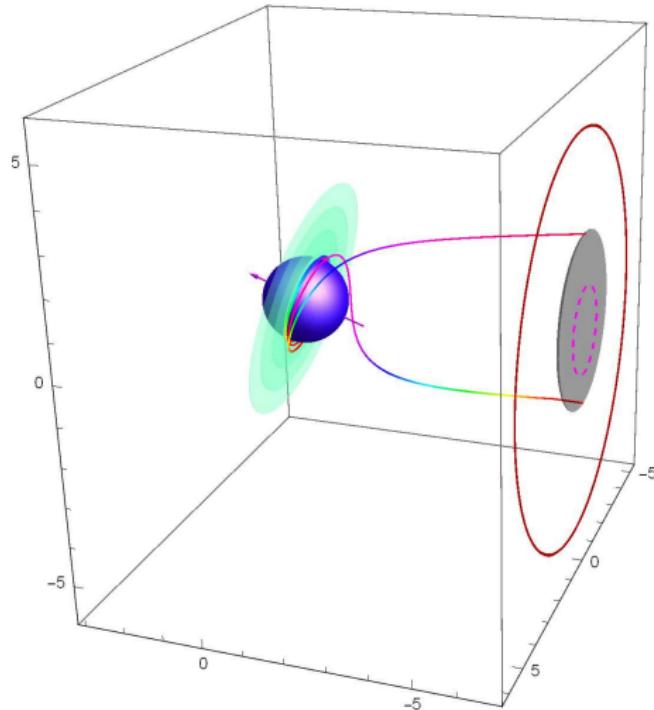
Armitage & Reynolds 2003

Силуэт горизонта событий черной дыры (черная область), при излучении внутренней части аккреционного диска, примыкающей к горизонту событий черной дыры Керра ($a = 0.9982$). Удаленный наблюдатель находится при $\theta_0 = 82.2^\circ$ (случай SgrA*). Показана траектория фотона с $\lambda = -1.49$, $q = 3.63$, $r_s = 1.01 r_h$, $r_h = 1$



Зеленый овал — тонкий аккреционный диск вокруг M87*

Фотоны стартуют на радиусе $r_s = 1.01 r_h$, $r_h \approx 1$, $a = 0.99$, $\theta_0 = 17^\circ$

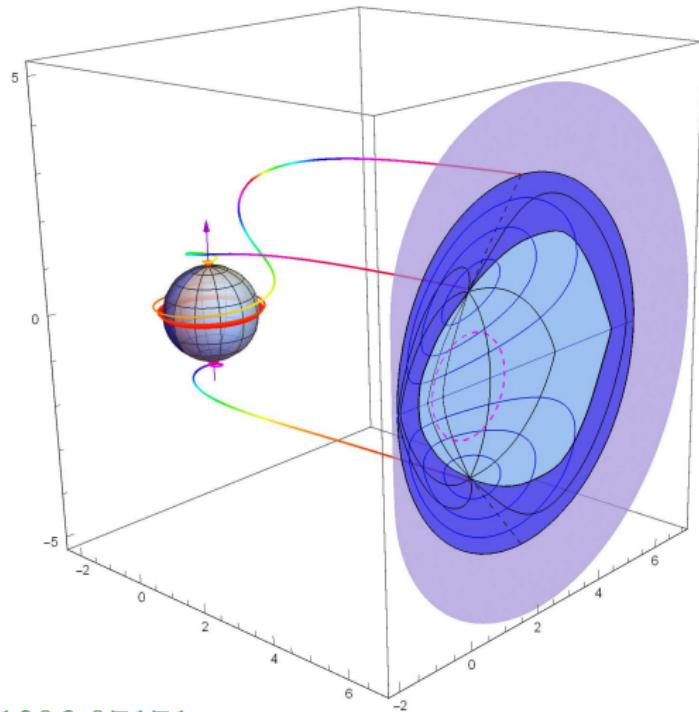


Темная область — силуэт южной полусфера горизонта событий

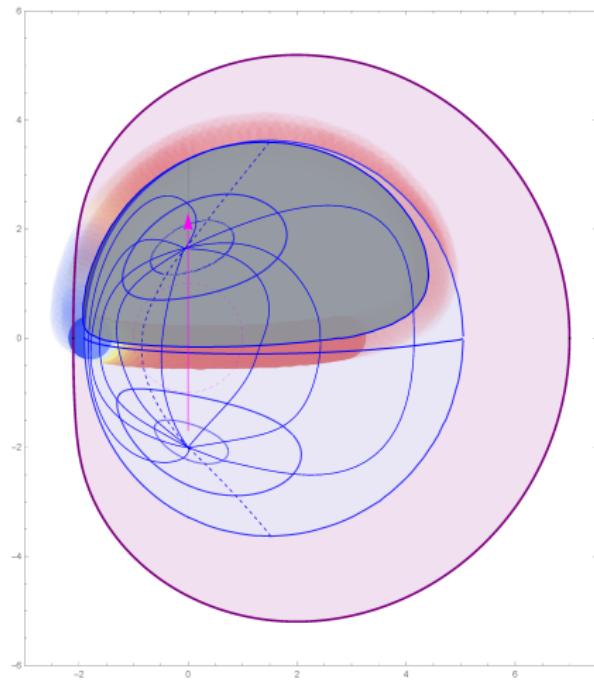
Замкнутая пурпурная кривая — граница классической тени

Силуэт полного глобуса горизонта событий SgrA*

Показаны траектории фотонов, стартующих вблизи горизонта событий черной дыры и задающих изображение горизонта событий внутри классической тени черной дыры Керра ($a = 1$). Черная дыра видна одновременно со всех сторон!



Силуэт полного глобуса горизонта событий SgrA*
Черная дыра видна одновременно со всех сторон!

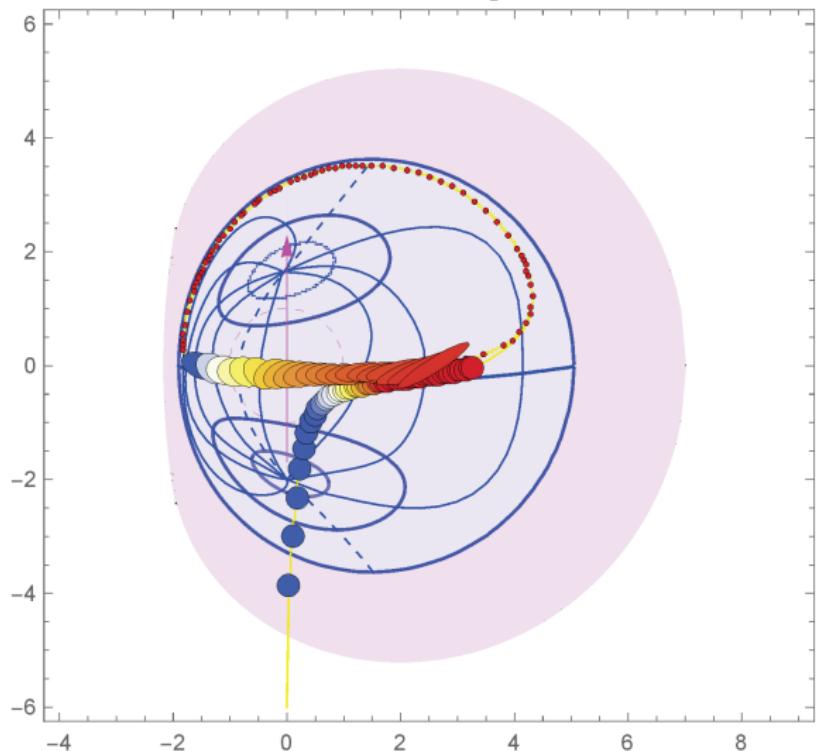


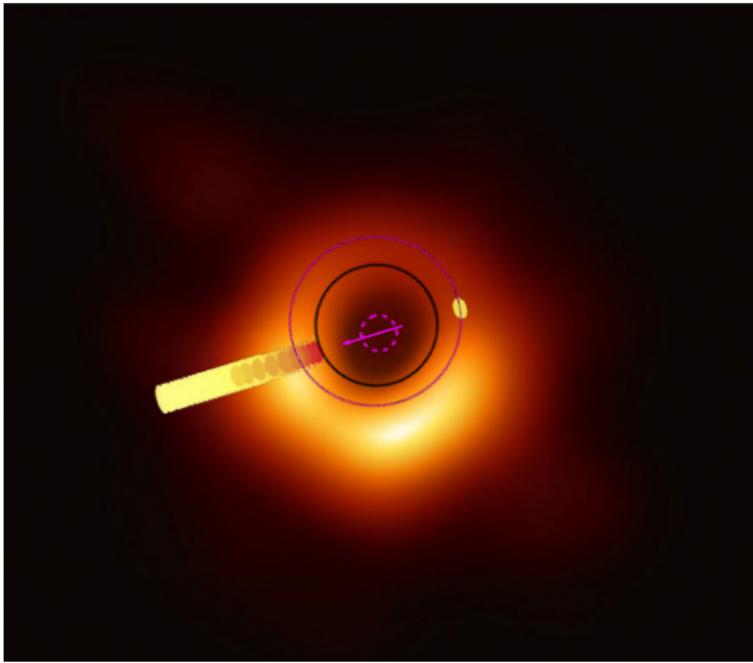
Темная область — изображение северной полусфера глобуса горизонта событий, подсвеченного тонким аккреционным диском
VD, Natalia Nazarova & Vadim Smirnov arXiv:1903.09594

Гравитационное линзирование компактного источника с параметрами

$\gamma = 1, \lambda = q = 0$, падающего на черную дыру SgrA* со спином $a = 0.9982$

Удаленный наблюдатель находится на широте $\cos \theta = 0.1$





Прямое изображение и два первых световых эха яркого пятна, движущегося от горизонта событий в направлении оси вращения M87*, показанные через дискретные интервалы времени

Пурпурная замкнутая кривая — граница классической тени

Черная замкнутая кривая — граница изображения горизонта событий черной дыры в модели тонкого аккреционного диска

Темная область — изображение горизонта событий

Прямое доказательство существования черных дыр!!

Виден тёмный силуэт горизонта событий

(тень черной дыры не видна)



Темный силуэт — линзированное изображение южной полусфера горизонта событий

Контур темного силуэта — линзированное изображение экватора на глобусе горизонта событий

Телескоп Гризонта Событий (Event Horizon Telescope): Прямым доказательством существования черных дыр является наблюдение объекта с размером, меньшим его горизонта событий

Утверждения и Выводы: Даёшь Миллиметрон!

- ★ Классическая тень черной дыры наблюдается в случае яркого фона, расположенного вне световых сфер
- ★ Силуэт горизонта событий виден в случае яркого фона внутри световых сфер вблизи горизонта событий черной дыры (горячий аккреционный диск)
- ★ На изображении M87* наблюдается темный силуэт горизонта событий, но не классическая тень черной дыры
- ★ В ближайшем будущем единственным уникальным способом проверки теории гравитации в режиме сильного поля будет детальное наблюдение изображений черных дыр.

См. детали в ArXiv: [2010.01885](https://arxiv.org/abs/2010.01885), [2007.14121](https://arxiv.org/abs/2007.14121), [1911.07695](https://arxiv.org/abs/1911.07695),
[1906.07171](https://arxiv.org/abs/1906.07171), [1903.09594](https://arxiv.org/abs/1903.09594), [1812.06787](https://arxiv.org/abs/1812.06787), [1804.08030](https://arxiv.org/abs/1804.08030), [1802.00817](https://arxiv.org/abs/1802.00817)

См. анимации в YouTube: youtu.be/zQzC-lVgdjg
youtube.com/watch?v=P6DneV0vk7U
youtu.be/fps-3frL0AM youtu.be/7j8f_vlTul8