



# Изследване на наблюдателните характеристики на компактните обекти, описвани от решението на Зипой-Ворхис, с помощта на обратен рейтрейсинг – сенки и тънки акреционни дискове

Гергана Даскалова



## Абстракт

Event Horizon Telescope отбелязва нова ера в гравитационните изследвания, правейки възможно тестването на силния режим на гравитацията в електромагнитния канал. Получените досега резултати показват добро съвпадение с черна дупка на Кер, но настоящата резолюция не изключва по-екзотични обекти. В този контекст изследваме решението на Зипой-Ворхис, което представлява един от т.нар. *имитатори на черни дупки*.

## $\gamma$ -метрика. Компактен обект с масов квадруполен момент

Разглеждайки аксиално-симетрично статично разпределение на материята получаваме т.нар.  $\gamma$ -метрика (още решение на Зипой-Ворхис). Това е двупараметрично семейство решения на полевите уравнения, свързано по непрекъснат начин с решението на Шварцшилд чрез *параметъра на аксиална деформация*  $\gamma$ , където  $\gamma = 1$  възстановява решението на Шварцшилд. Линейният елемент в координати на Ерез-Розен е:

$$ds^2 = -Fdt^2 + F^{-1} [Gdr^2 + Hd\theta^2 + (r^2 - 2Mr) \sin^2 \theta d\phi^2],$$

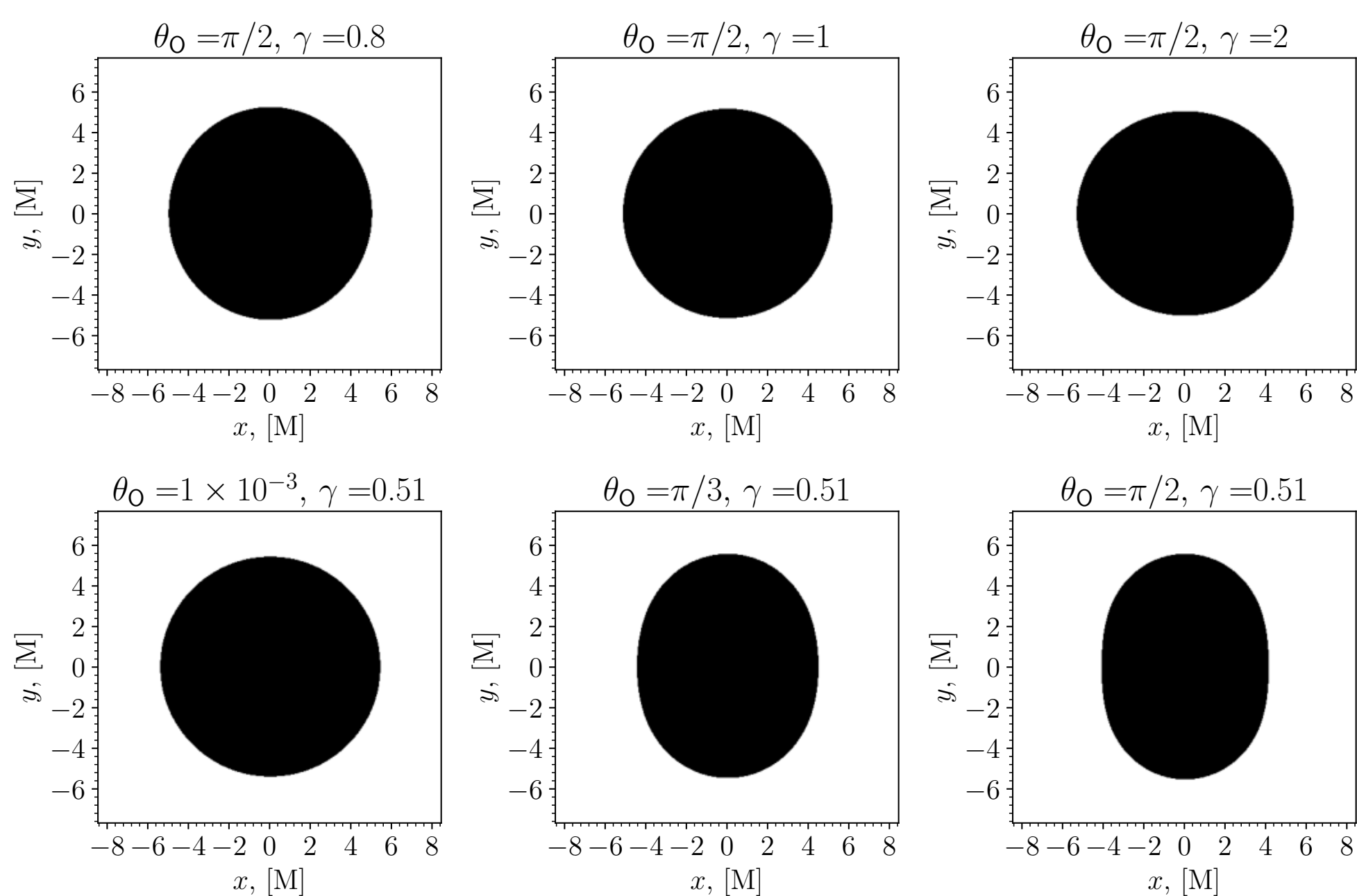
където

$$F = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^\gamma, \quad G = \left(\frac{r^2 - 2Mr}{r^2 - 2Mr + M^2 \sin^2 \theta}\right)^{\gamma^2 - 1}, \quad H = \frac{(r^2 - 2Mr)^\gamma}{(r^2 - 2Mr + M^2 \sin^2 \theta)^{\gamma^2 - 1}}.$$

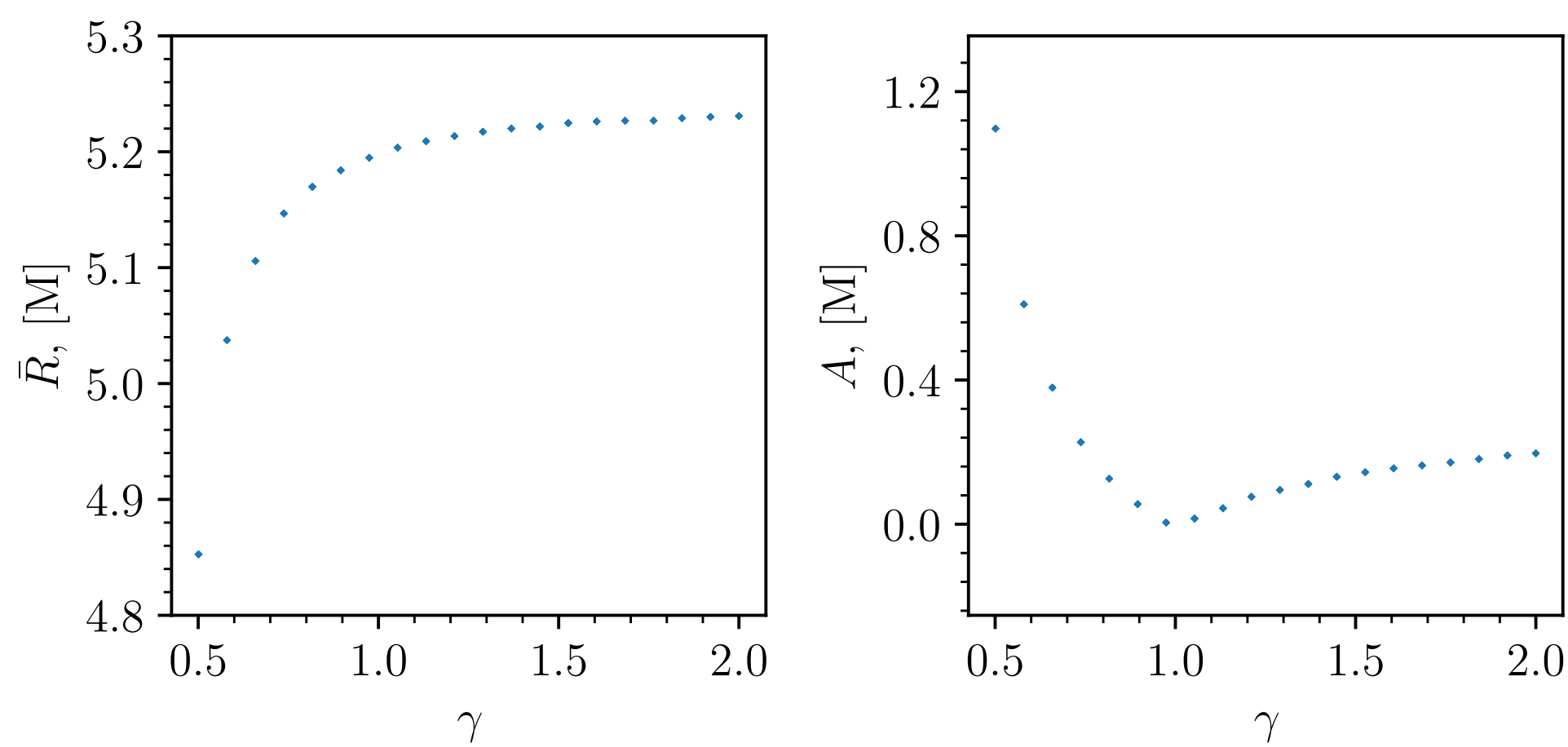
Параметърът  $M$  е свързан с ADM масата на обекта чрез  $M_{\text{ADM}} = \gamma M$ . Решението има масов квадруполен момент от вида  $M_2 = -M^3(\gamma - 1)\gamma(\gamma + 1)/3$ , който е причина за наличието на голи сингулярности за всички стойности на  $\gamma \neq 1$ .

## Числено получаване на сенките и анализ на формата им

Сянката на компактен обект представлява проекцията му, формирана от гравитационния лъзнинг на електромагнитното лъчение в близост до обекта, върху небесната сфера на наблюдателя. Формата и размерите ѝ зависят от параметрите на решението ( $M$ ,  $\gamma$ ) и от ъгъла на инклинация на наблюдателя  $\theta_O$ , както показват числените симулации на фиг.(1). За количествено описание на сенките въвеждаме два параметъра – среден радиус  $\bar{R}$  и параметър на асиметрия  $A$ , който показва степента на отклонение на сянката от окръжност, – фиг.(2).



Фигура 1. Сенките на компактния обект на Зипой-Ворхис за различни стойности на  $\gamma$  (горният ред) и различни ъгли на инклинация на наблюдателя  $\theta_O$  (долният ред).



Фигура 2. Среден радиус  $\bar{R}$  и параметър на асиметрия  $A$  за различни стойности на  $\gamma$ .

## Модел на акреционен диск на Новиков-Торн

Моделът на Новиков-Торн описва тънък оптически плътен диск и е сред най-простите модели, позволяващи аналитично описание. Поради тънката си структура, моделът е напълно геометричен и опростява задачата до движение на частиците от плазмата по стабилни кръгови геодезични орбити в екваториалната равнина. Излъчването на диска се определя от кинематичните характеристики на частиците, които го съставят (кеплерова скорост  $\Omega$ , енергия  $E$  и ъглов момент  $L$ ).

Локално измереният поток  $F(r)$  е алгебричен израз спрямо радиуса  $r$ , а профилът му за решението на Зипой-Ворхис е показан на фиг.(3).

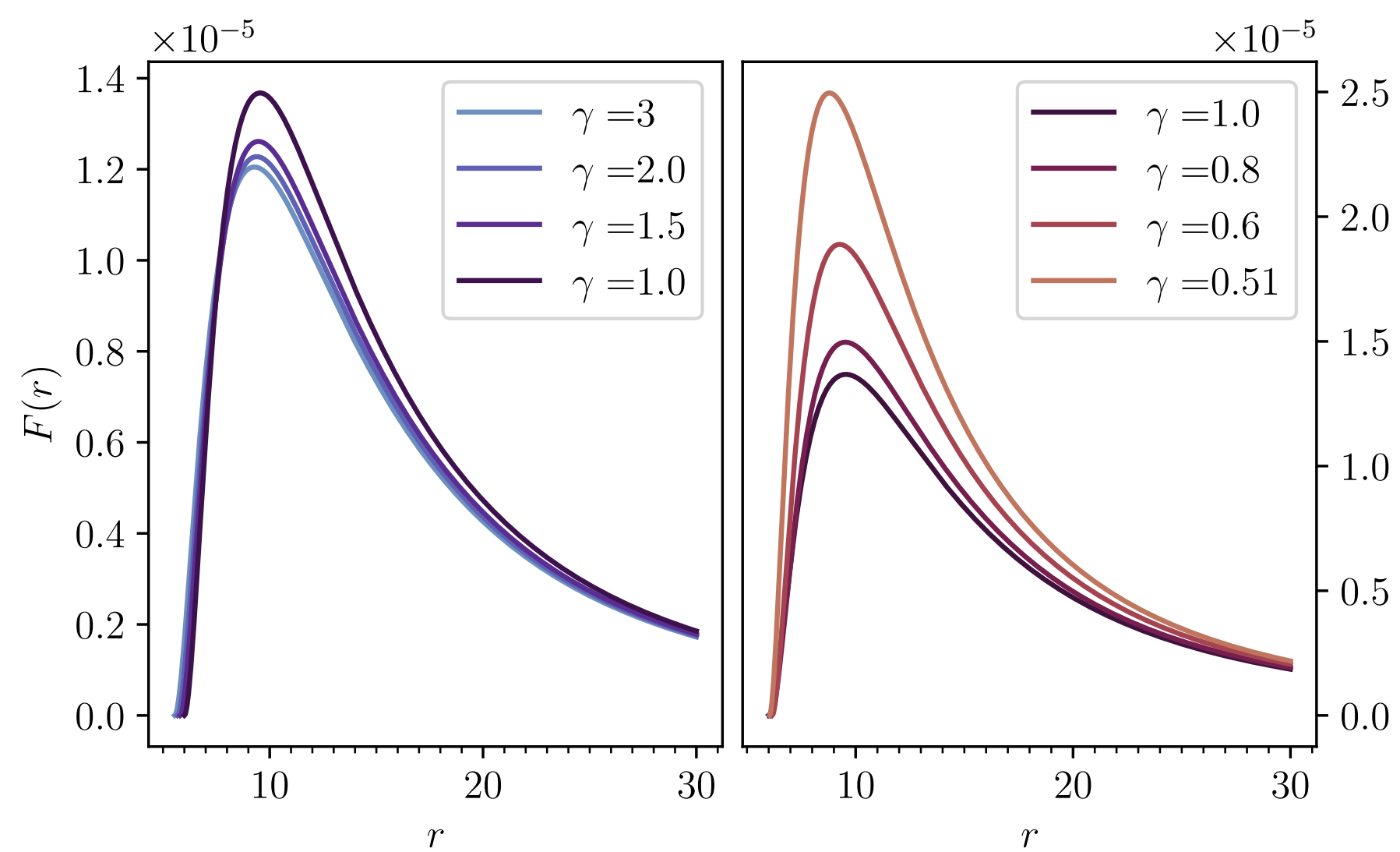
Червеното отместване се дава от следния израз:

$$1 + z = \frac{1 + D\Omega}{\sqrt{-g_{tt} - 2\Omega g_{t\phi} - \Omega^2 g_{\phi\phi}}},$$

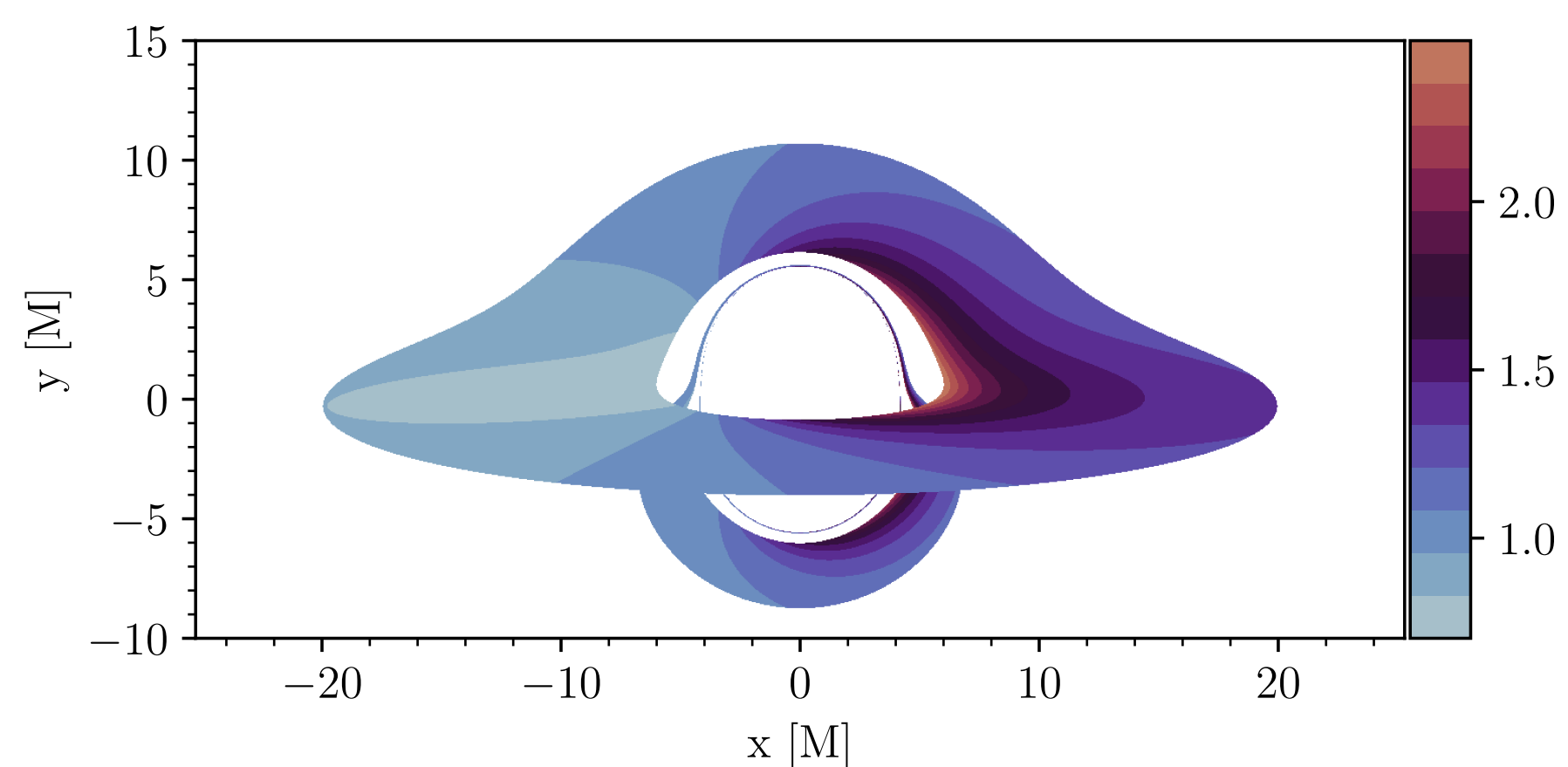
където  $D = L/E$  е прицелният параметър на фотона.

Наблюдаваният поток  $F_{\text{obs}}$  се различава от локалния поради гравитационното червено отместване:

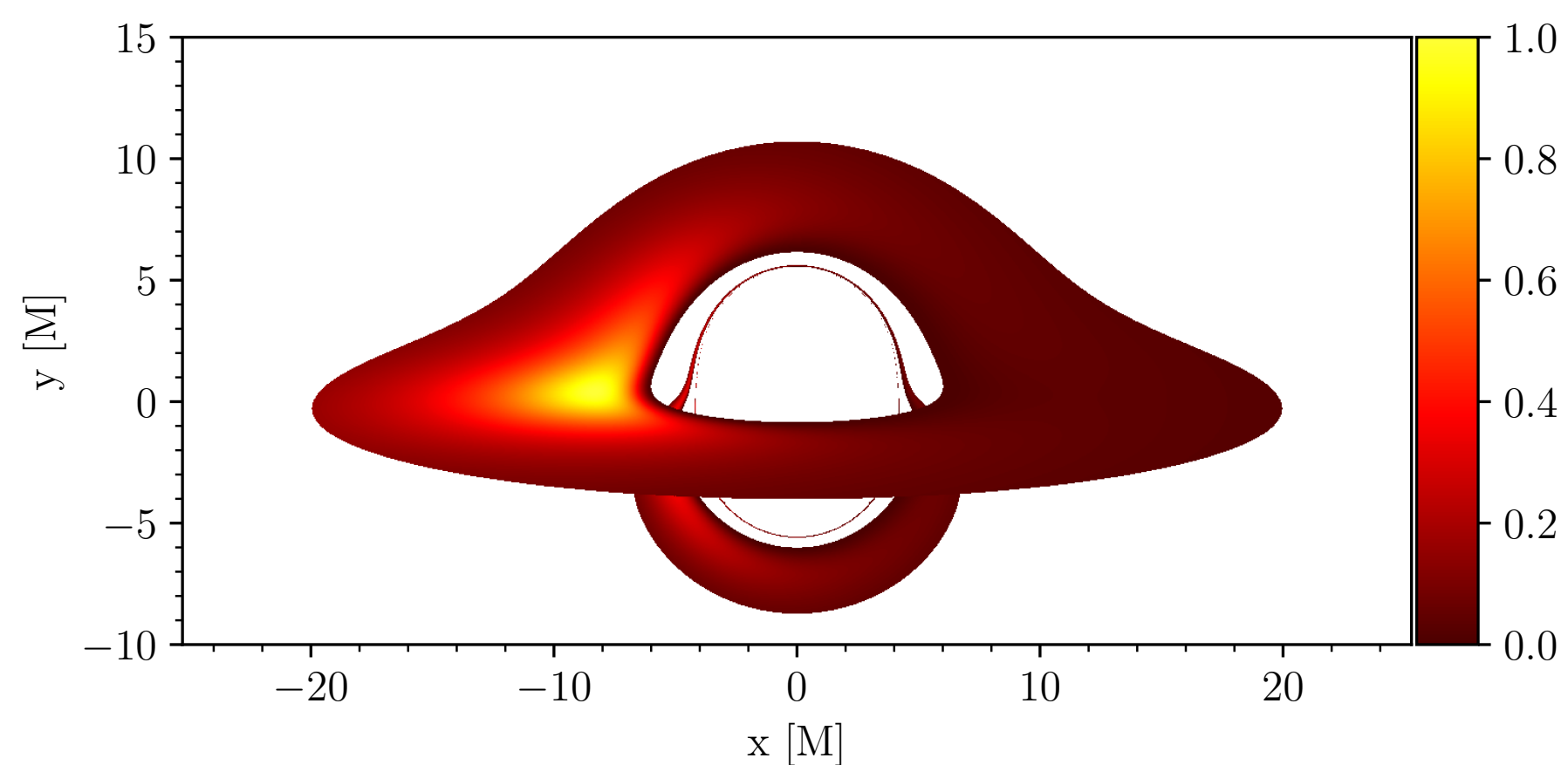
$$F_{\text{obs}} = \frac{F(r)}{(1 + z)^4}$$



Фигура 3. Профил на локално измерения поток  $F(r)$  за различни стойности на  $\gamma$ .



Фигура 4. Червено отместване  $1 + z$  за компактен обект с  $\gamma = 0.51$ ,  $r \in [6, 20]$  и  $\theta_O = 80^\circ$ .



Фигура 5. Наблюдаемият нормиран поток за компактен обект с  $\gamma = 0.51$  с  $r \in [6, 20]$  и  $\theta_O = 80^\circ$ .