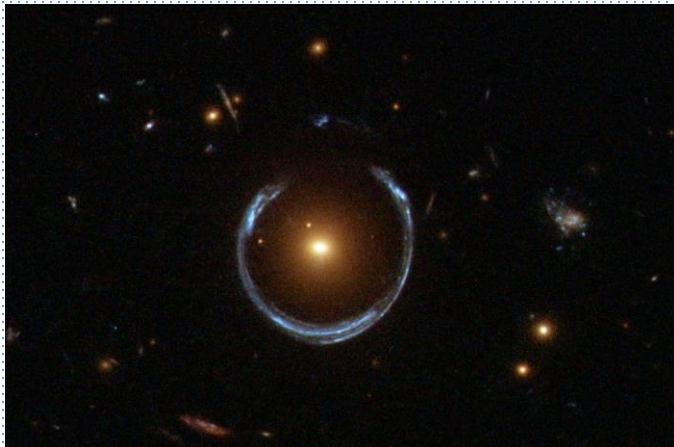
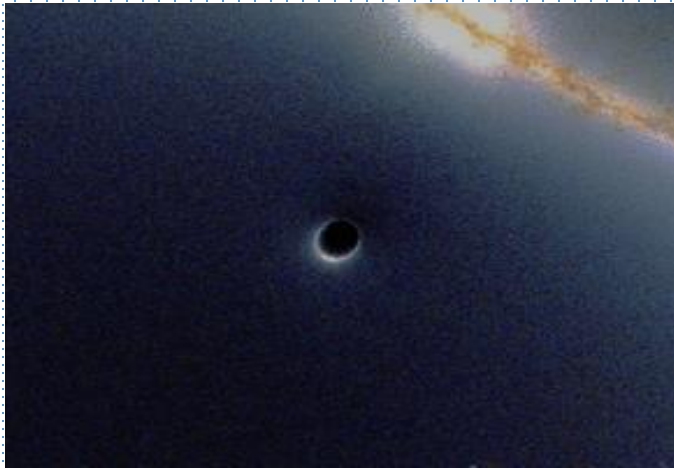


# სინათლის მოძრაობა გრავიტაციულ ველში

გრიგოლ ფერაძე

# გრავიტაციულ ველში მოძრაობისას სინათლე გადაიხრება სწორხაზოვანი მოძრაობიდან



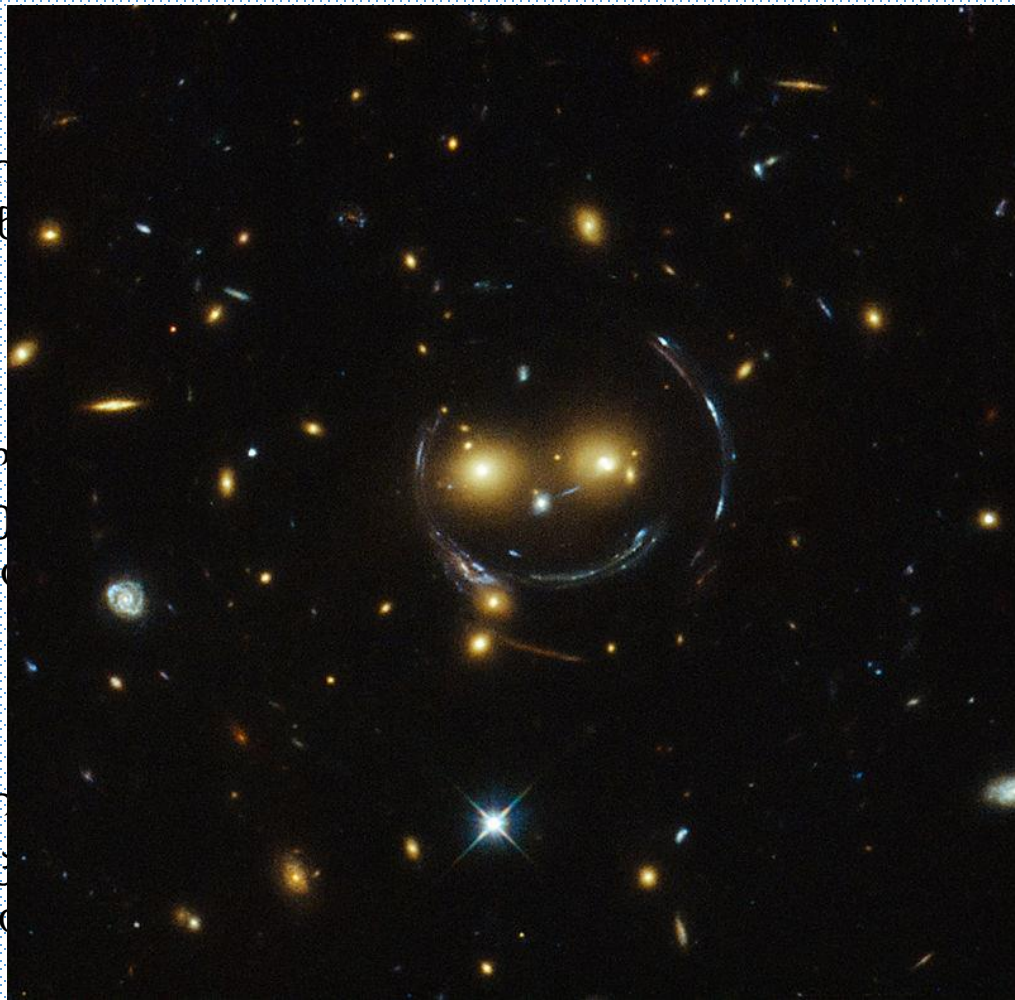
სინათლის გამრუდების ყველაზე თვალსაჩინო მაგალითია გრავიტაციული ლინზები. კავენდიშმა 1784 წელს იწინასწარმეტყველა სინათლის გამრუდება გრავიტაციის გავლენით. 1919 წელს ედინგტონმა მზის სრული დაბნელებისას ფონური ვარსკვლავების გადახრით დაადასტურა სინათლის გამრუდების ეფექტი. გალაქტიკების გრავიტაციული ლინზირება იწინასწარმეტყველეს Orest Khvolson (1924) და Frantisek Link (1936)-მა, ხოლო 1979 წელს დააკვირდნენ პირველ ლინზირების ეფექტს (Twin QSO" SBS 0957+561)





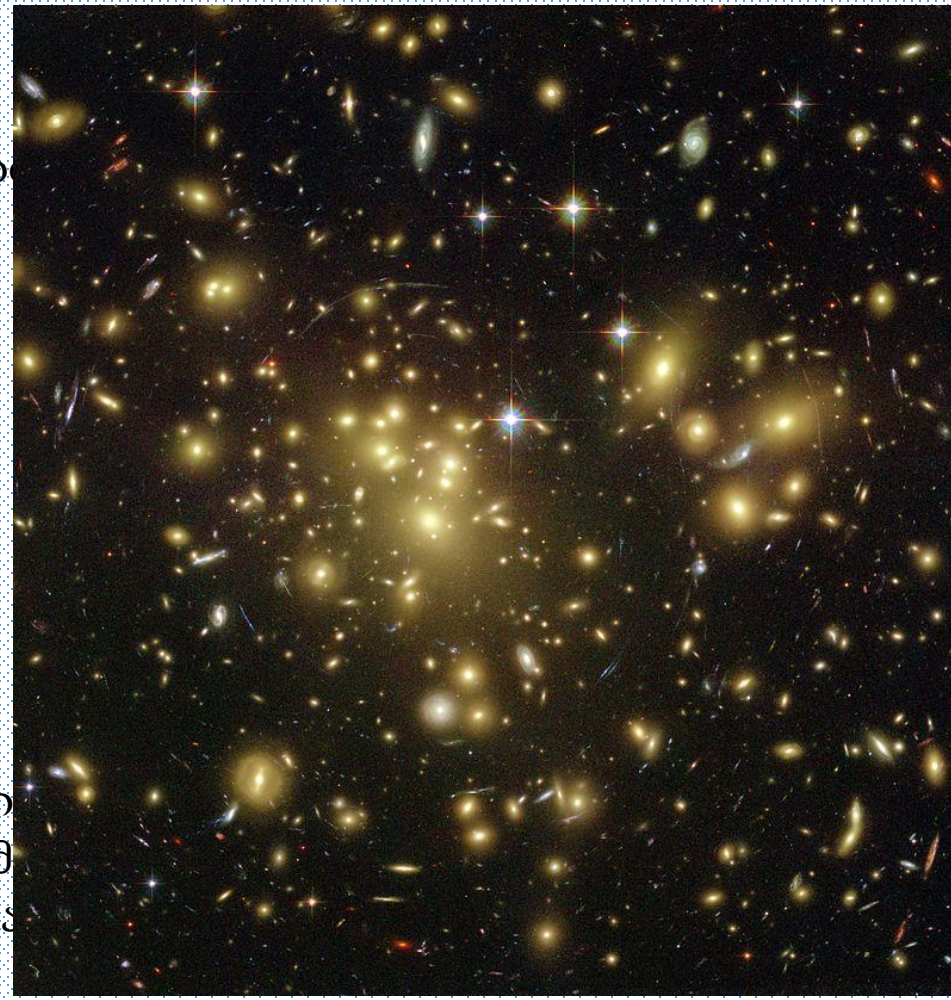
## არსებობს სამი სახის ლინზირება:

- ხილულია, თაღებშია
- ლინზირებულია
- მცირე მანძილზეა



NASA/ESA Hubble Space Telescope, SDSS J1038+4849

- ი, თაღებშია
- ლინზირებულია
- მცირე მანძილზეა



NASA/ESA Hubble Space Telescope, Abell 1689

# მოდრაობა ძლიერ გრავიტაციულ ველში

განვიხილოთ შავი ხვრელის შვარცსშილდის მსგავსი ხვრელი

- შვარცსშილდის ხვრელის სტაბილური წრიული ტრაექტორიის რადიუსი
- $r_s = \frac{2GM}{c^2}$  ეს შავი ხვრელის მოთავსებულის მისი შვარცსშილდის რადიუსის შიგნით შავი ხვრელი ეწოდება.

$$r = \frac{3GM}{c^2}$$

ფოტონების სტაბილური წრიული ტრაექტორიის, „ფოტონების სფეროს“ რადიუსი.  
(ტრაექტორია არასტაბილურია)

**სანტერესო ფაქტი:** ნებისმიერი სიმკვრივის მატერიას შეუძლია შექმნას შავი ხვრელი, თუკი მისი ზომა საკმარისად დიდი გახდება. (შვარცსშილდის რადიუსი იზრდება მასის პროპორციულად, ხოლო ფიზიკური რადიუსი მასის კუბური ფესვის პროპორციულად, რის გამოც შვარცსშილდის რადიუსი „გადაასწრებს ფიზიკურ რადიუსს“)

## შვარდსშილდის შავი ხვრელი

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

$$\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 = r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{c}{r \sin\theta} \sqrt{1 - \frac{R_s}{r}}$$

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^r u^\mu u^\nu = 0.$$

$$\Gamma_{tt}^r = \frac{BB'}{2}, \Gamma_{rr}^r, \Gamma_{\theta\theta}^r, \Gamma_{\phi\phi}^r = -Br \sin^2\theta$$

$$\frac{dr}{d\tau}, \frac{d^2 r}{d\tau^2}, \frac{d\theta}{d\tau} = 0 \quad \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = \frac{c^2 R_s}{2r^3 \sin^2\theta} \quad B' = \frac{dB}{dr}, B = 1 - \frac{R_s}{r}$$

$$c\sqrt{\frac{R_s}{2r}} = c\sqrt{1 - \frac{R_s}{r}}$$

$$r = \frac{3}{2}R_s$$

**სანტერესო ფაქტი:** ცენტრიფუგალური ძალა დამოკიდებულია ფოტონების სფეროს მიმართ სხეულის მდებარეობაზე. თუ სხეული ფოტონების სფეროს გარეთაა, უფრო სწრაფი ბრუნვა იწვევს ძალის გაზრდას, ფოტონების სფეროზე სხეულის წონა სიჩქარისგან დამოუკიდებელია, ხოლო სფეროს შიგნით სიჩქარის გაზრდა წონის გაზრდას იწვევს.



# კერის შავი ხვრელი

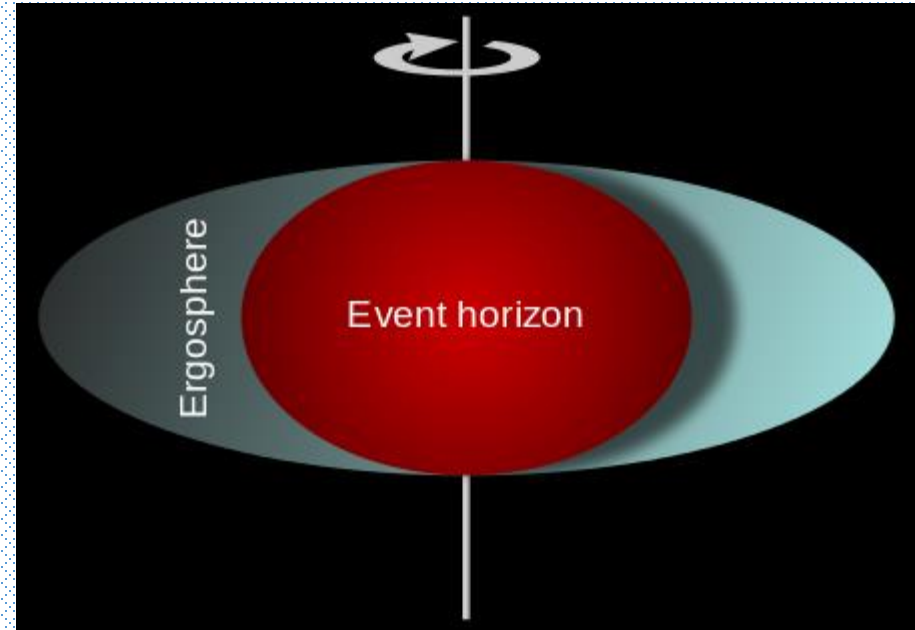
იგივე მბრუნავი შავი ხვრელი

კერის შავ ხვრელს არ ახასიათებს სფერული სიმეტრია მსგავსად შვარდსშილდის შავი ხვრელისა.

კერის შავ ხვრელს აქვს ორი ფოტონების სფერო:

- მბრუნავი შავი ხვრელის მიმართლებით
- მბრუნავი შავი ხვრელის საწინააღმდეგო მიმართულებით

$a$  - იმპულსის მომენტი

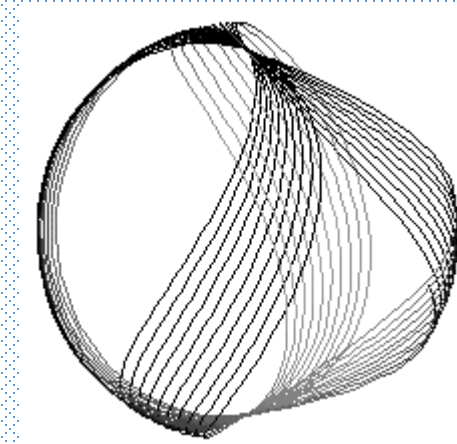
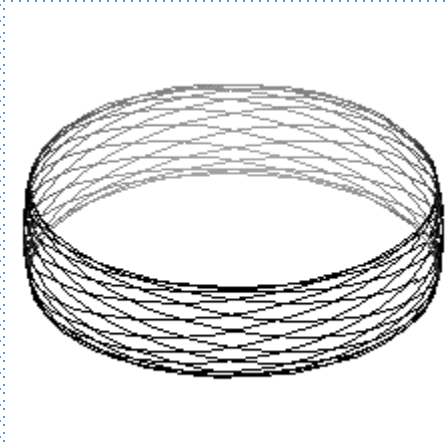
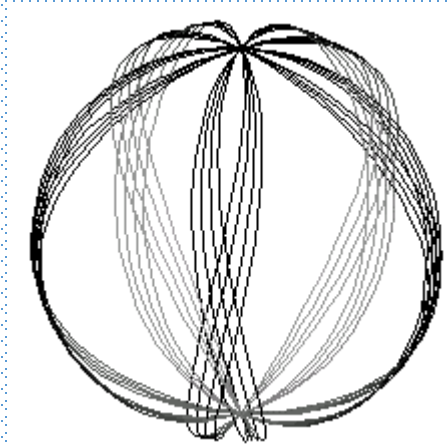
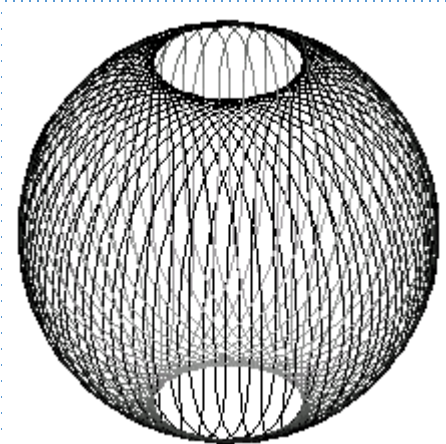
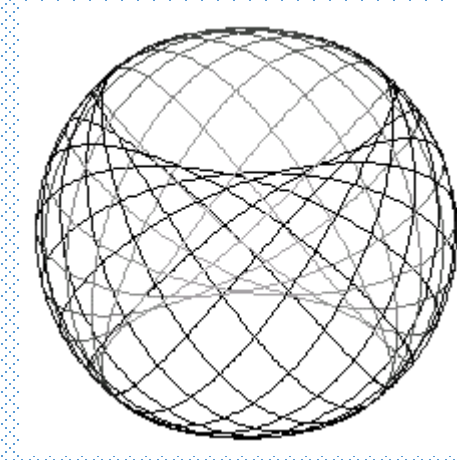
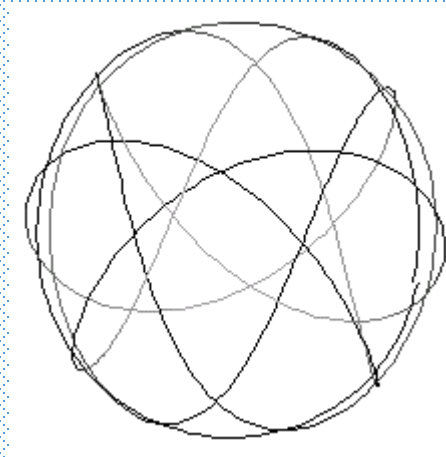


$$r_1 \equiv 2M \left[ 1 + \cos \left( \frac{2}{3} \arccos \left( -\frac{|a|}{M} \right) \right) \right]$$
$$r_2 \equiv 2M \left[ 1 + \cos \left( \frac{2}{3} \arccos \left( \frac{|a|}{M} \right) \right) \right]$$

როცა  $a = 0$   $r_1 = r_2 = 3M$

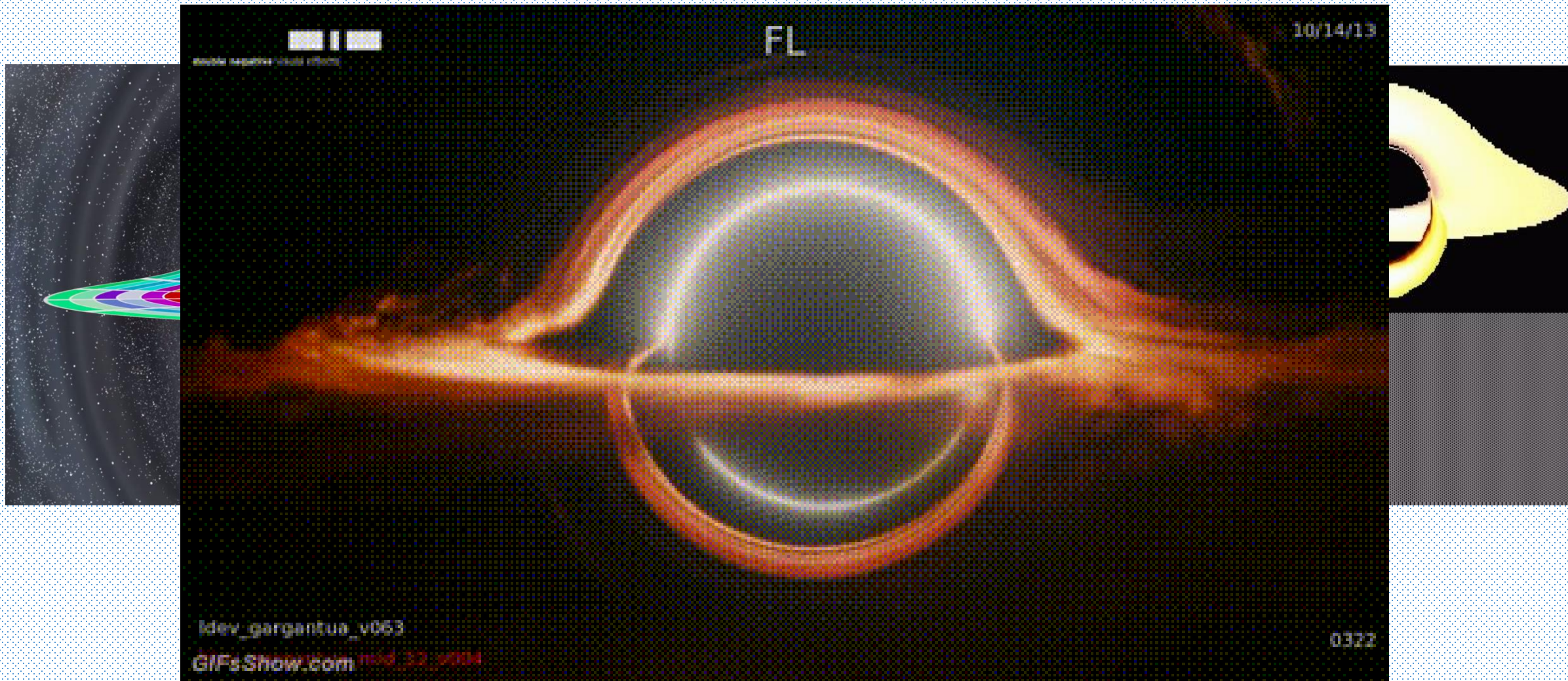
## კერის შავი ხვრელი

კერის შავი ხვრელის ირგვლივ ფოტონებს გააჩნია მრავალი ტრაექტორია, რომლების მის იმპულსის მომენტზე და კარტერის მუდმივაზეა დამოკიდებული. ტრაექტორიები არასტაბილურია რადიუსის შემფოთების მიმართ.



$$C = p_\theta^2 + \left( \frac{L}{\sin \theta} \right)^2$$

# კერის შავი ხვრელი მზრუნავი დისკით





# მადლობა ყურადღებისთვის

<http://www.physics.nus.edu.sg/~phyteoe/kerr/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild\\_radius](https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_radius)