



Gole singularnosti kao konkurencija crnim rupama

Miljenko Čemeljić

College of Astronomy and Natural Sciences, SGMK
Nicolaus Copernicus Superior School, Torun & Warsaw

&

Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish
Academy of Sciences, Warsaw

&

Institute of Physics, Silesian University in Opava, Czech
Republic

&

Academia Sinica IAA Visiting Scholar, Taipei, Taiwan

&

Centar Izvrsnosti za Astronomiju, Varaždin



SILESIA
UNIVERSITY
INSTITUTE OF PHYSICS
IN OPAVA



ETC Hrvatska | European Talent
Centre Croatia

- Više od sto godina crnih rupa i golih singularnosti
- Promatrački materijal, Event Horizon Telescope (EHT)
- Zašto su gole singularnosti opet zanimljive astronomima
- Numeričke simulacije u Općoj relativnosti i pseudo-Newtonian potencijalu
- Sažetak

Naziv “crne rupe” je zvučan, ali zavaravajući. Ne radi se o “rupama”, bar ne o praznim: zapravo su to vrlo gusti objekti, velika masa je skupljena u malom volumenu. Brzina bijega za te objekte je veća od brzine svjetlosti!

Mogućnost njihova postojanja nije neka nova vijest: znamo da je Romer 1676 prilično točno izmjerio konačnu brzinu svjetlosti promatrajući Jupiterove satelite-za to je bio potreban teleskop, zemaljske udaljenosti su premale za primitivne metode mjerenja brzine svjetlosti-osim ako znamo optiku, ali onda ćemo već imati i teleskop... Od pojma konačnosti brzine svjetlosti nije daleko do gorespomenute brzine bijega i zaključka da bi objekti dovoljno velike mase mogli zadržati svjetlost-tako je zaključivao još John Michell 1783: ***“If the semi-diameter of a sphere of the same density as the Sun in the proportion of five hundred to one, and by supposing light to be attracted by the same force in proportion to its [mass] with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.”***

Iz nevidljivosti takvih objekata slijedio je prvi opis kao “tamne zvijezde”. Taj inspirativni opis se pokazao kao fizikalno netočan: u Einsteinovoj gravitaciji zakrivljenost prostor-vremena uzrokuje zakrivljenost putanje zrake svjetlosti koja ne mijenja brzinu. Ali činjenica da su ti objekti tamni ostaje- John Wheeler je takve objekte u predavanju 1968 nazvao “crne rupe” i taj naziv je ostao do danas.

Osnovne činjenice o crnim rupama (NASA web)



CLOSEST.

The nearest known black hole, called Gaia BH1, is about 1,500 light-years away.

FARTHEST.

The most distant black hole detected, at the center of a galaxy called QSO J0313-1806, is around 13 billion light-years away.

03

BIGGEST.

The most massive black hole observed, TON 618, tips the scales at 66 billion times the Sun's mass.

04

SMALLEST.

The lightest-known black hole is only 3.8 times the Sun's mass. It's paired up with a star.

05

SPAGHETTIFICATION.

A real term that describes what happens when matter gets too close to a black hole. It's squeezed horizontally and stretched vertically, resembling a noodle.

06

SPIN.

All black holes spin. The fastest-known – named GRS 1915+105 – clocks in at over 1,000 rotations per second.

07

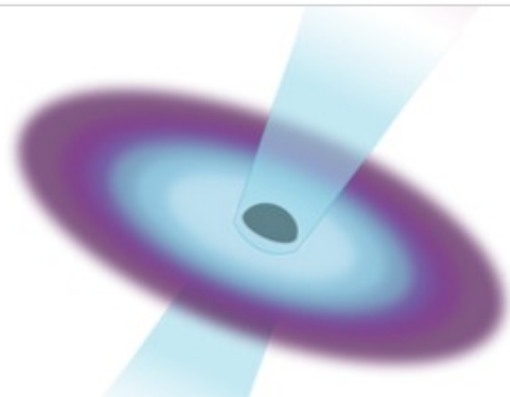
PARTICLE ACCELERATORS.

Monster black holes at the centers of galaxies can launch particles to near light speed.

08

GRAVITY'S THE SAME.

If you replaced the Sun with a black hole of the same mass, the solar system would get a lot colder, but the planets would stay in their orbits.



09

STAR BOOMS.

One type of black hole is born when massive stars run out of fuel and explode in supernovae.

10

NOT SO RARE.

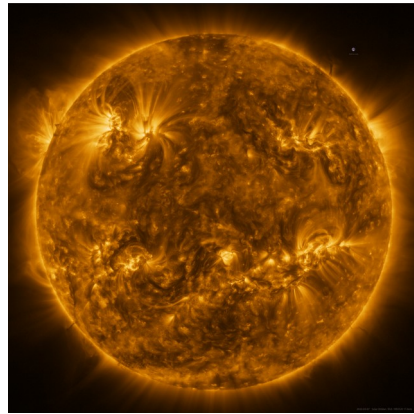
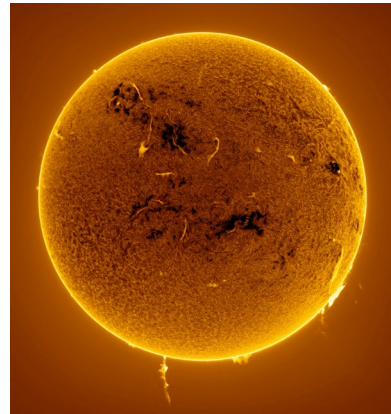
Most Milky Way-sized galaxies have monster black holes at their centers. Our is called Sagittarius A* (pronounced ey-star), and it's 4 million times the Sun's mass.

Gole singularnosti isto nisu neka novost: rješenja jednadžbi iz kojih su “iskočile” su objavljena gotovo istovremeno sa teorijom relativnosti (1916) i Schwarzschildovim rješenjima za nerotirajuću crnu rupu (1916), prvi je bio Reissner (1916), koji je dao rješenja za električki nabijene, nerotirajuće crne rupe, a uskoro su ih stigli i drugi, među kojima je bio i Nordström (1918), pa se takve objekte danas naziva Reissner-Nordströmovim (RN) golim singularnostima.

Slijedeći korak je došao tek 1960-tih, sa rješenjima za rotirajuće, nenabijene (Kerr 1963) i nabijene (Kerr-Newman, 1965) crne rupe. Wrlo brzo rotirajuće crne rupe mogu postati gole singularnosti i bez naboja, što je fizikalno realističnije-crne rupe je teško električki nabiti, općenito je prihvaćeno da bi morale biti električki neutralne. To je bio i glavni razlog zašto ta rješenja, iako jednostavna, nisu poznatija, ostajala su kao vježba za nadobudne-izveo sam ih na par stranica za vježbu Christoffelovih simbola, preporučam doktorantima za osvježavanje Opće teorije relativnosti-ali na papiru, bez upotrebe Maple ili sličnih računarskih paketa.

Reissner-Nordstrom rješenja, koja su relativno jednostavna, su ipak korisna jer su matematički po mnogim svojstvima istovjetna sa mnogo kompliciranijim rješenjima za rotirajuće objekte. Zato smo ih krenuli proučavati u pseudo-Newtonovskom pristupu, da možemo brže raditi simulacije i napraviti prve provjere ideja, koje onda možemo dalje detaljnije proučavati u relativističkim simulacijama, koje su zahtjevnije.

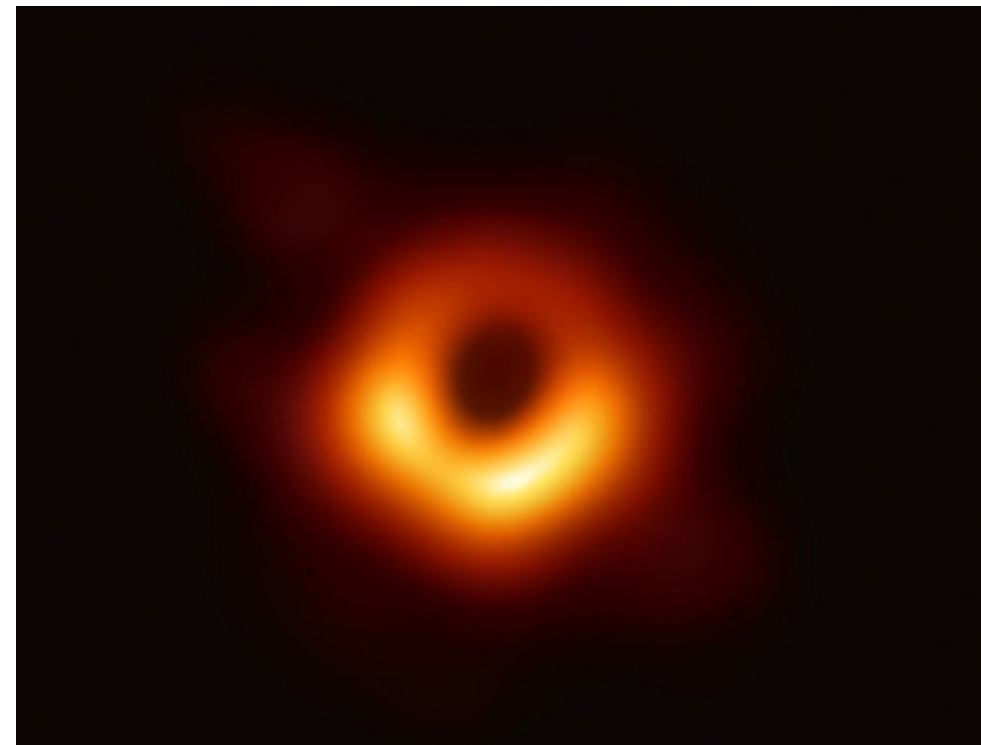
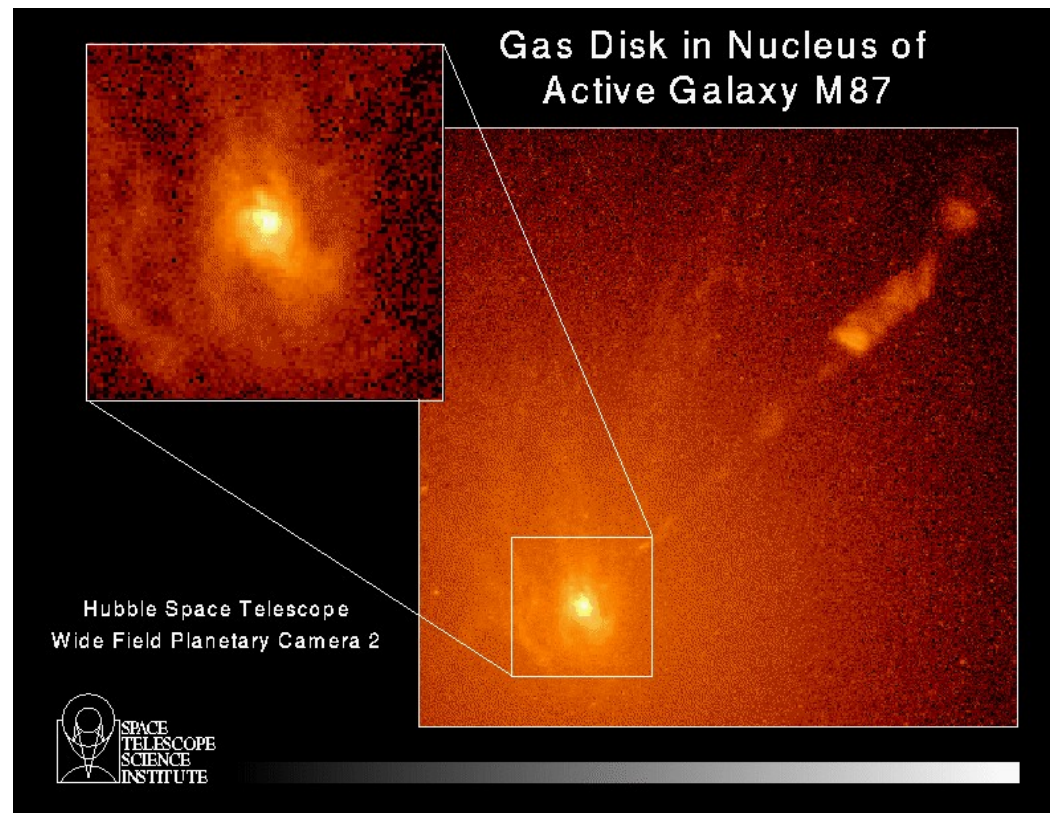
Kako vidimo crne rupe?



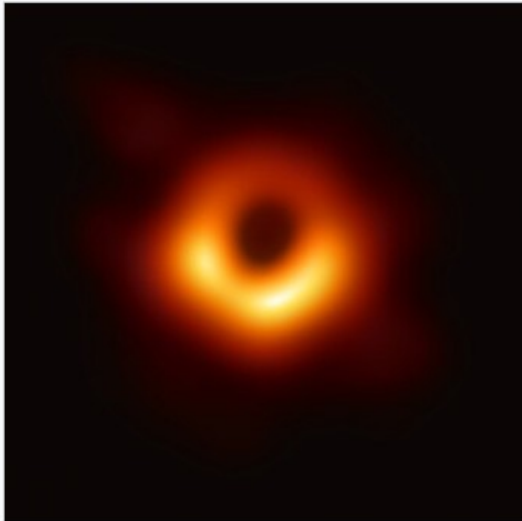
Sunce je Sunce je Sunce i prepoznati ćemo ga na slici. Sa Zemlje, druge zvijezde će izgledati drugačije, jer su mnogo dalje i nemamo baš takav vidik kao za Sunce.

Možemo se potruditi i interferometrijom doći dosta blizu, ali još nismo ni blizu nečemu kao ove slike.

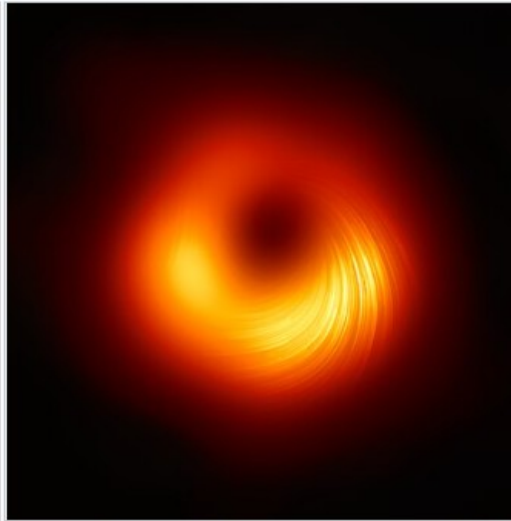
Galaksije su MNOGO udaljenije, a crne rupe su, po definiciji, crne, dakle jedino što bi mogli vidjeti je sjaj materije oko njih, koja ako upada u njih svijetli (pa vidimo “sjenu” crne rupe), ili npr. područja lansiranja jetova kod aktivnih jezgri galaksija (Active Galactic Nuclei=AGN). Supermasivna crna rupa u M87 je toliko velika ($6.5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$) da smo prvo pogledali nju, a ne centar naše Galaksije ($5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$), iako je na 55 miliona svj.godina od nas. Skale: vrući disk plina koji rotira oko SMBH je na oko 25 000AU (Pluton je na oko 40AU), jet je dug oko 5000 svj.god. PRVA SLIKA BH, EHT(2017)



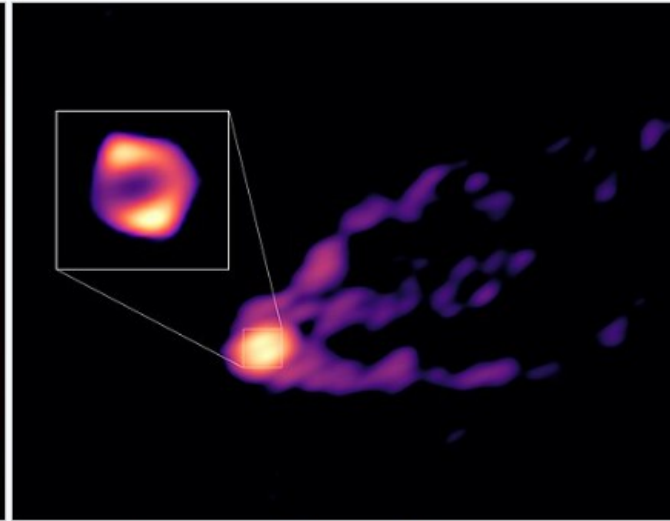
Supermassive black hole M87* [\[edit\]](#)



The [Event Horizon Telescope](#) image of the core of M87 using 1.3 mm [microwaves](#). The central dark spot is the shadow of M87* and is larger than the black hole's [event horizon](#).



A view of the M87* supermassive black hole released by the Event Horizon Telescope Collaboration with lines overlaid to mark the orientation of polarization of the magnetic field



A view of the jet and shadow of M87's black hole. Observations from the Global Millimetre VLBI Array (GMVA), the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), and the Greenland Telescope.^[70]

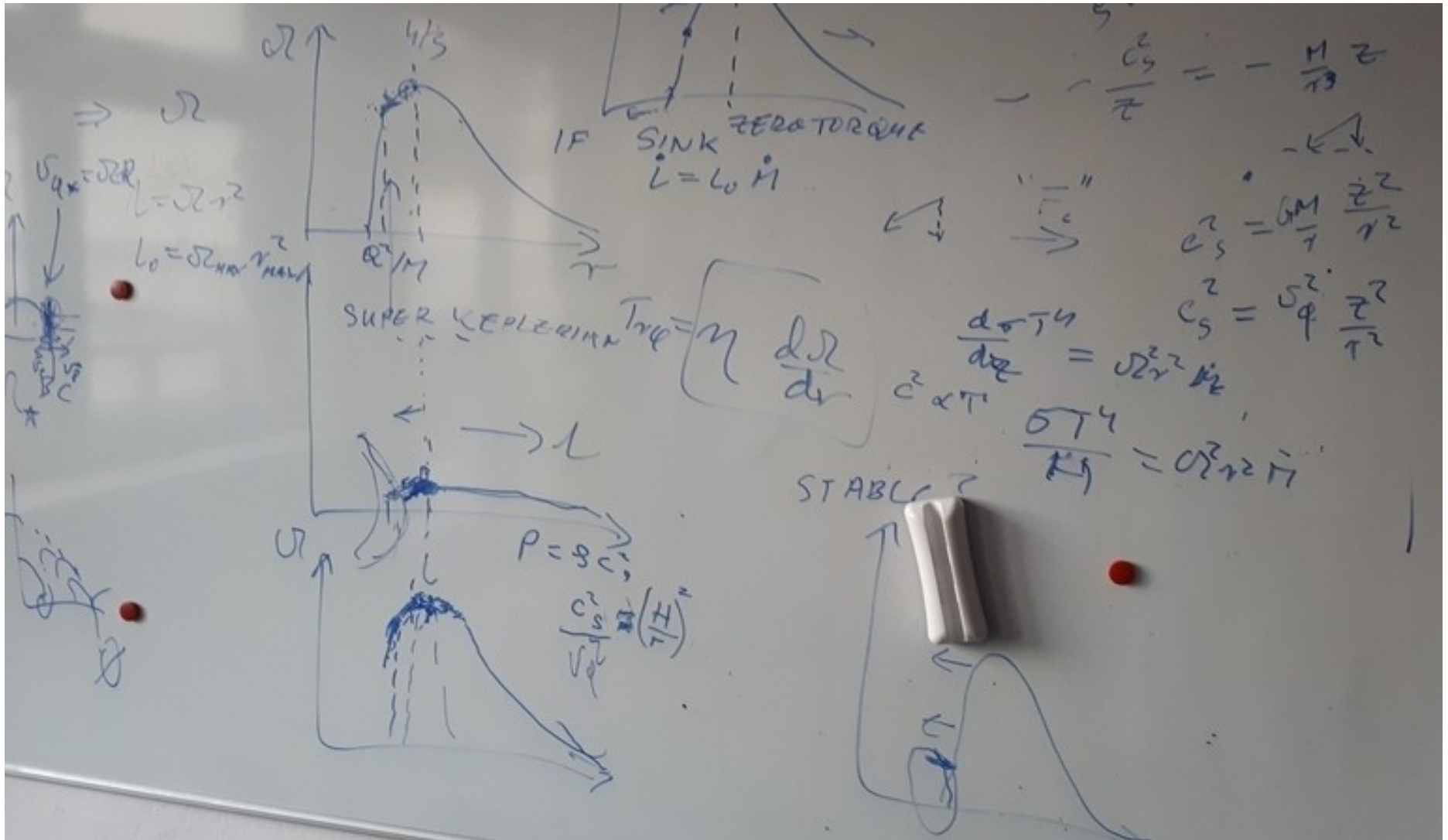
Ovo su nabolja promatranja koja imamo, ali nisu dobivena fotografijom ili radioteleskopom, nego kombinacijom numeričkih simulacija i promatranja. Zato je rezultat ovakvih promatranja uvelike ovisan o pretpostavkama modela korištenog u numeričkim simulacijama. Za ovu crnu rupu iskorišten je model rotirajuće crne rupe. Ali, prema onom što sad znamo, slika bi izgledala isto da je u crnom dijelu gola singularnost!

Napravljeno je mnogo modela crnih rupa, ali ne baš toliko mnogo modela golih singularnosti. Zato je sada to vrlo aktivno područje za numeričke simulacije. Teorijska podloga je uglavnom napravljena kad i Opća teorija relativnosti...uz neke manje dodatke prošlih desetak godina. Simulacije su tek krenule. Sve su rađene kodovima koji rješavaju Einsteinove jednačbe i traže dosta računalnog vremena, jer moraju biti napravljene u dobroj rezoluciji, da se dobije vjerodostojan disk.

Ako se iskoristi približno rješenje za metriku, moguće je brže napraviti više simulacija.

To je nešto za mene. [I vlak Uherske Hradište-Katowice.]

Bi li rješenja za gole singularnosti izgledala kao rješenja za crne rupe?



Prva analitička rješenja za metrike u Općoj teoriji relativnosti

Schwarzschildova metrika (1916) za nerotirajuće crne rupe:

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

Reissner-Nordstrom metrika za nerotirajuće električki nabijene crne rupe i, ako $Q > M$, gole singularnosti (1916, 1918):

$$ds^2 = f(r) dt^2 - \frac{1}{f(r)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta^2 d\phi^2), \quad (13)$$

$$\text{with } f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} \equiv 1 - 2\frac{M}{r} + q^2 \frac{M^2}{r^2}. \quad (14)$$

Q is the electric charge of the gravitating body, and we define the dimensionless charge parameter $q = Q/M$.

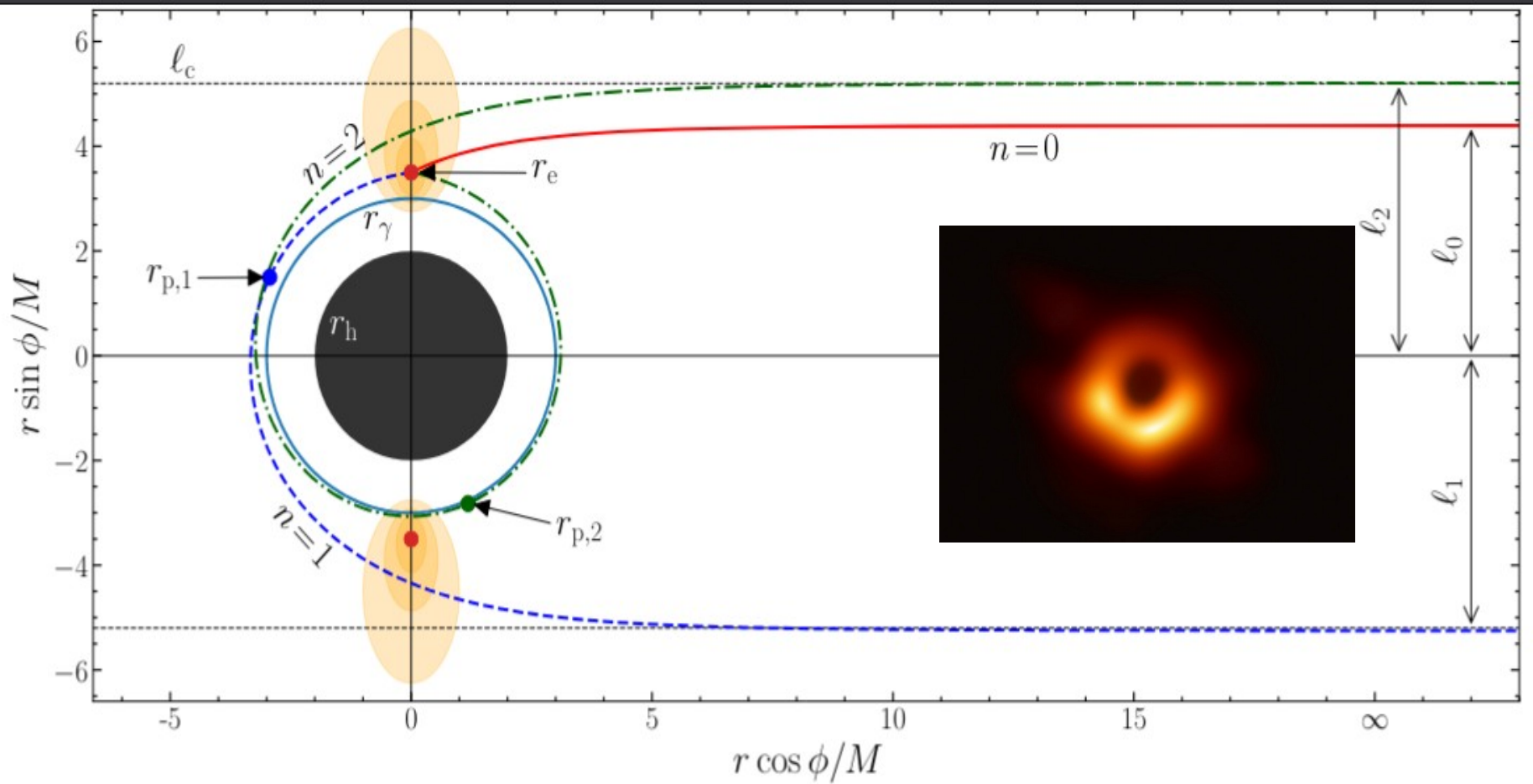


FIG. 1. A simple model of the emission around a spherically symmetric static black hole. The observer is located to the right, at $r \rightarrow \infty$, viewing the accretion disk face-on. Black hole has a horizon radius r_h , there is a photon sphere located at r_γ (blue circle). The emission from the accretion disk (represented with orange ellipses) is dominated by the flux emitted at the effective radius r_e . The photons emitted at r_e may reach the observer along infinite number of trajectories, corresponding to adding half loops around the photon sphere. First 3 such trajectories are shown. They correspond to the direct image ($n = 0$), and first and second photon ring ($n = 1$ and $n = 2$). Radii of n -th photon rings in the observer's plane converge rapidly to the critical impact parameter, $l_n \rightarrow l_c$, which defines the critical curve on the observer's screen.

Analitička rješenja za gole singularnosti u GR

U modelu za promatranja Sgr A* EHT kolaboracija je prepostavila rotirajuću crnu rupu, a u Mishra et al. (2024, MNRAS, 530, 3038) prepostavka NkS dovodi do mogućnosti da vidimo rotirajući torus oko područja nulte gravitacije.

3042 *R. Mishra, R. S. S. Vieira, and W. Kluźniak*

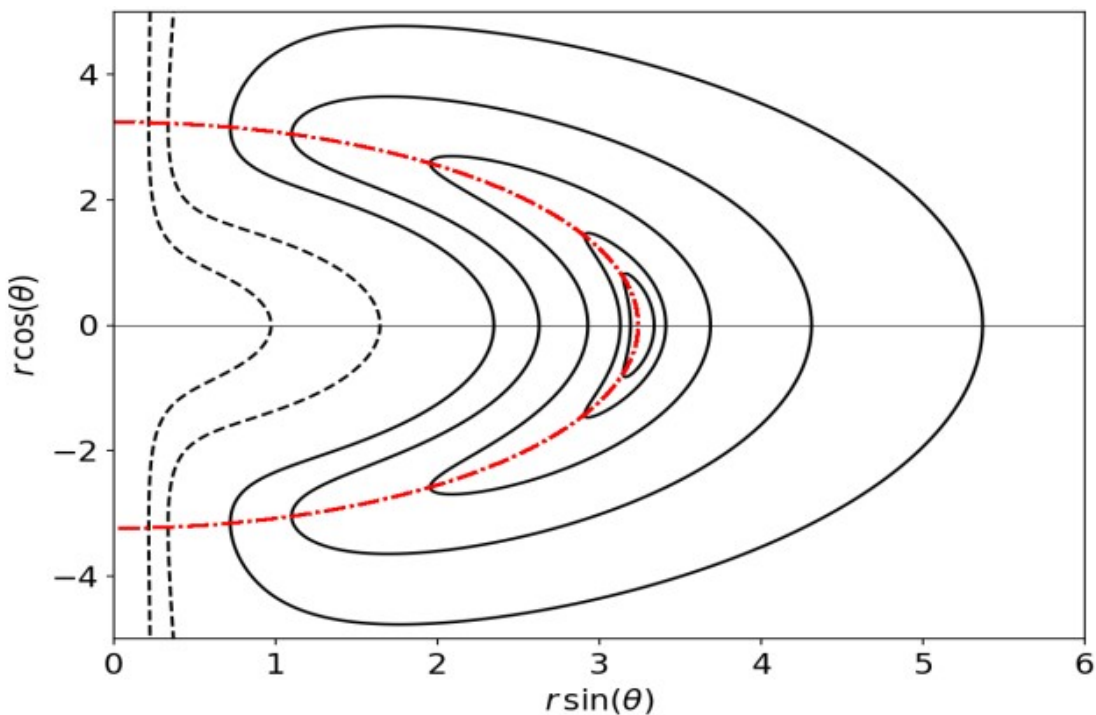


Figure 4. Equilibrium tori around RN naked singularity with $Q/M=1.8$ with $l_0 < l_{\Omega_{\max}}$. L

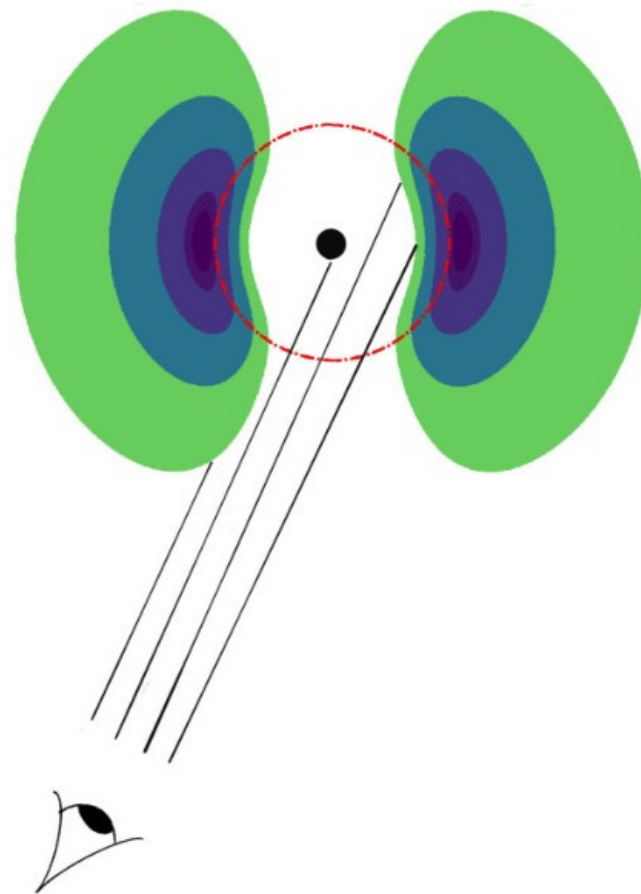
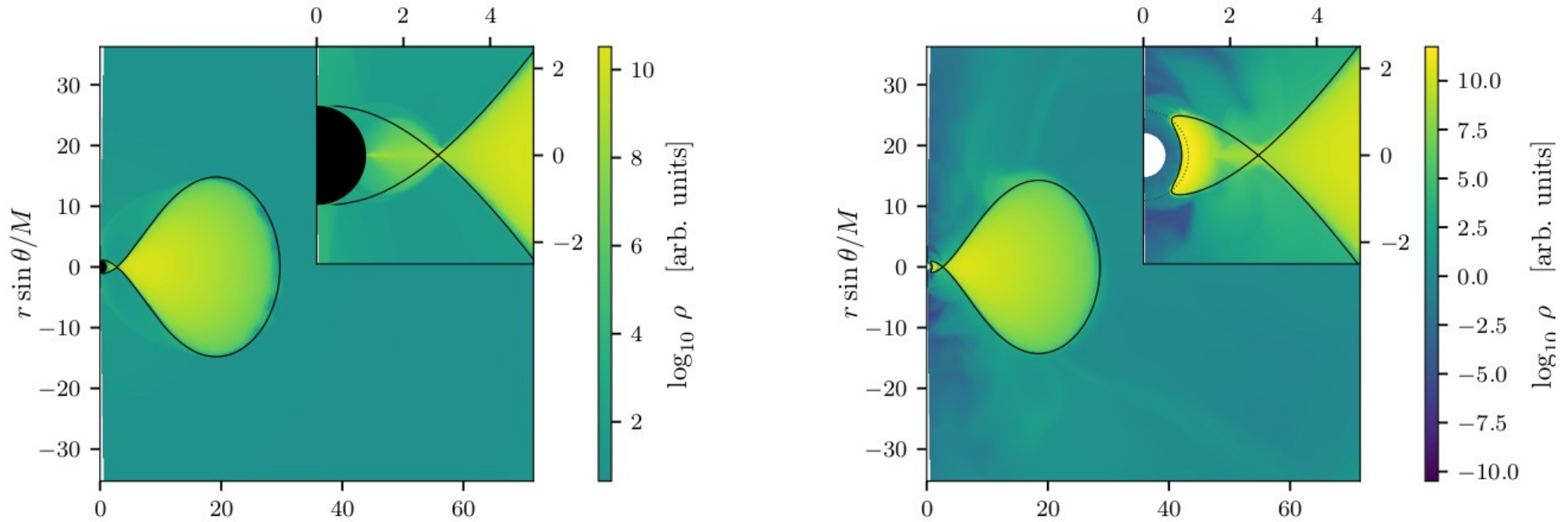


Figure A1. Contours of equipotential fluid surfaces around RN naked singularity with charge $Q/M = 1.8$ and specific angular momentum $l = 0.7$. The zero gravity sphere has been indicated as dotted-dashed line.

Rješenja za crne rupe i gole singularnosti u GR simulacijama (tačno!)



Logaritam gustoće u lokalnom sustavu za Reissner-Nordström BH ($Q/M = 0.99$, lijevo) i NkS ($Q/M = 1.02$, desno). Simulacije GR kodom KORAL. Rješenja se jako razlikuju (Kluźniak & Krajewski, 2024).

Rješenja za gole singularnosti u simulacijama sa pseudo-potencijalom (približno!)

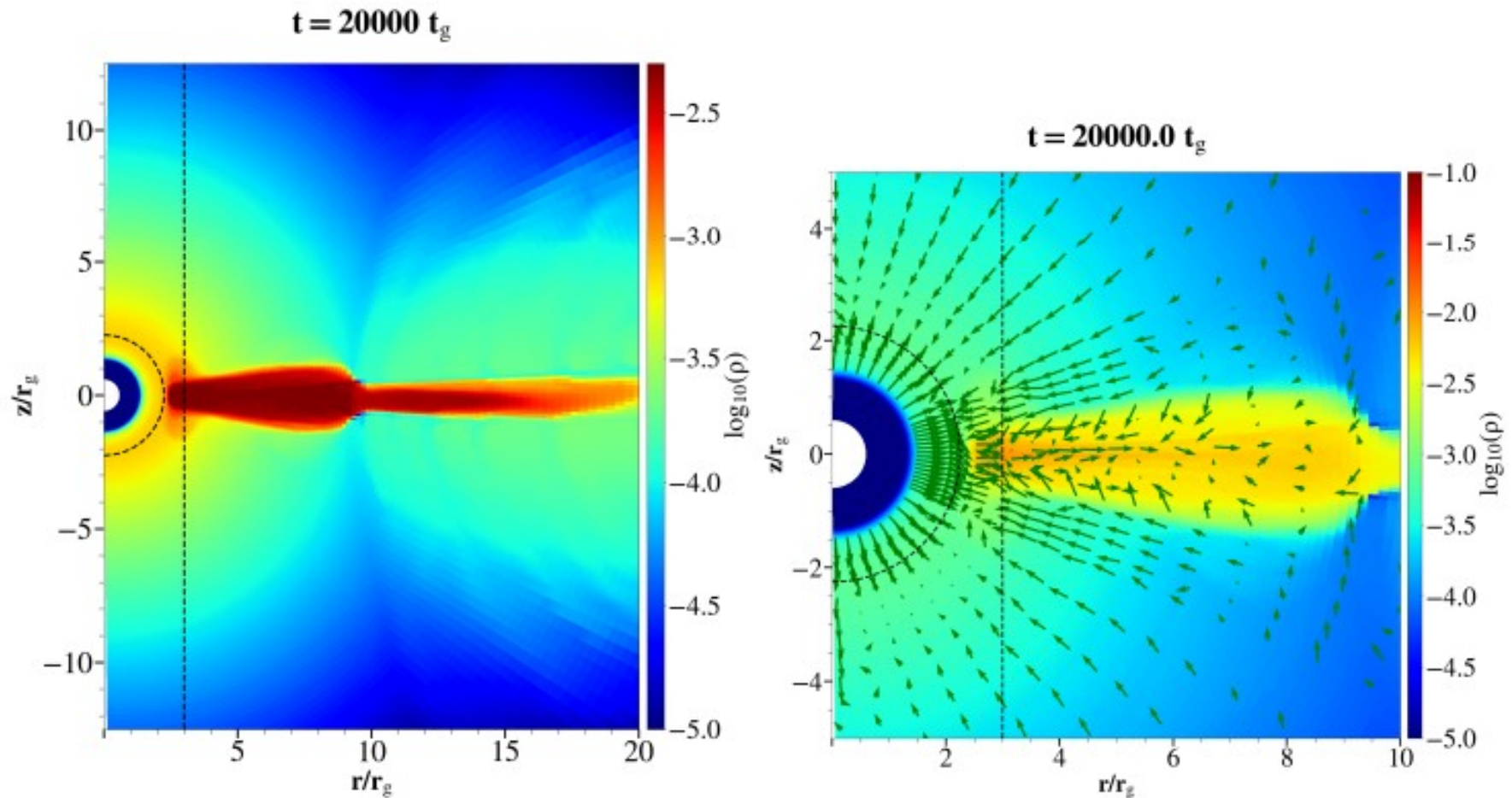


Fig. 2. Gas density in the simulation with $q = 1.5$. *Left panel:* a snapshot result at $t=20000 t_g$, where $t_g = r_g/c$. The zero-gravity radius r_0 is marked with the dashed half-circle and the radius, $4r_0/3$, at which test-particle Ω attains a maximum is marked with the straight black dashed line. *Right panel:* a zoom into the inner region of the accretion flow, obtained as an average over the time interval of $t \in [19000, 21000] t_g$. Poloidal gas velocity vectors are indicated with green arrows.

Položaj maksimuma orbitalne frekvencije testne čestice u simulacijama sa pseudo-potencijalom

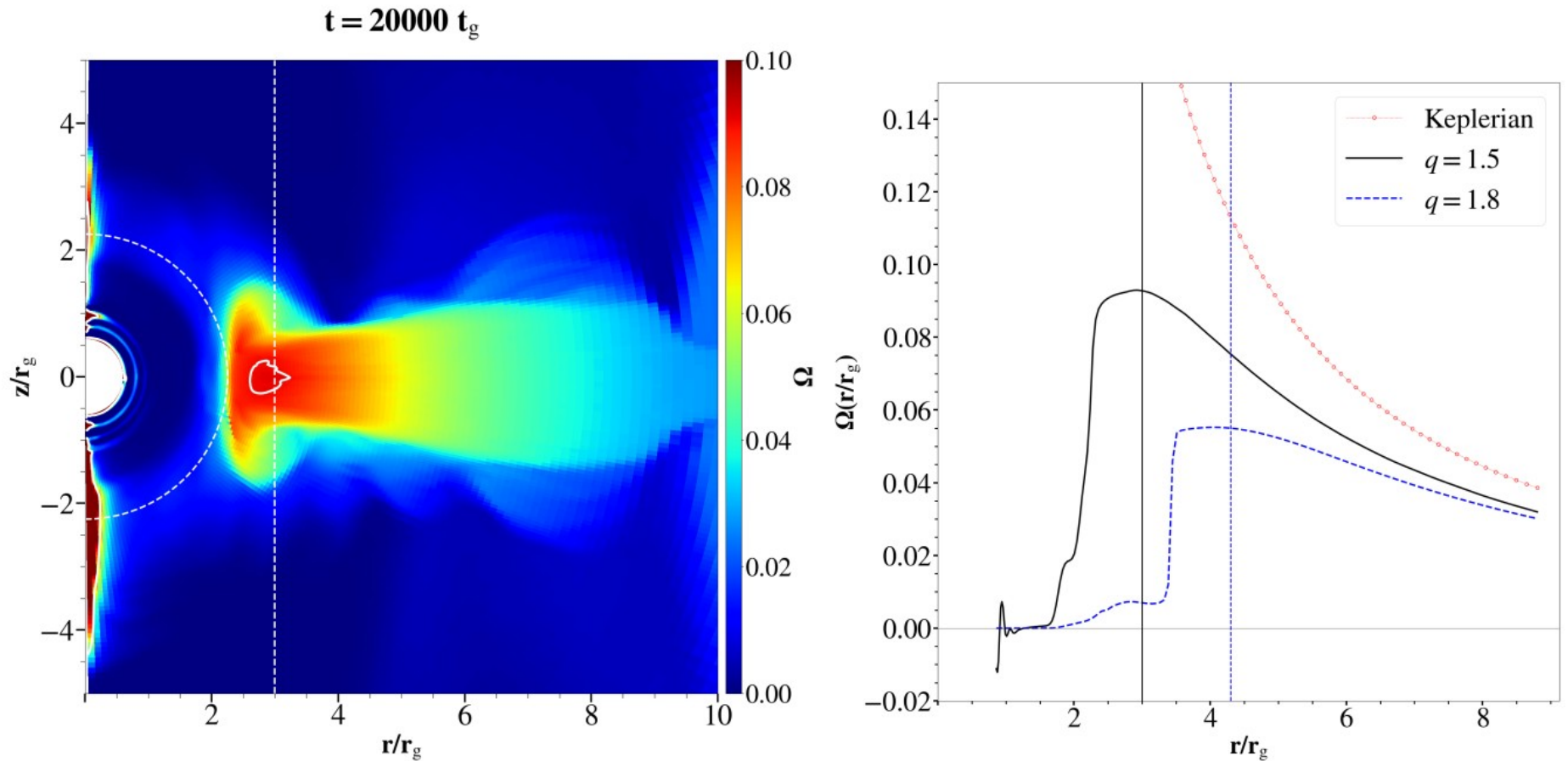


Fig. 3. *Left panel:* the angular velocity $\Omega = v_\phi/(r \cos \theta)$, in the linear color grading at $t = 20000 t_g$ in our simulation with $q = 1.5$. The contour of $\Omega = 0.09/M$ within which the test-particle orbital frequency value of Ω_{\max} at $r/M = 4q^2/3$ is located is shown with the white solid curve. *Right panel:* $\Omega(r)$ in the equatorial plane for the RN metric with $q = 1.5$ and 1.8 , in solid (black) and dashed (blue) lines, respectively. The dotted (red) line follows the Schwarzschild profile of ΩM , and is given for comparison. Vertical lines in the corresponding styles indicate the radial positions of Ω_{\max} test-particle orbital values for $q = 1.5$ and $q = 1.8$. MW: does it make sense to indicate the location of r_0 as well? Maybe with black/blue

Karakteristične udaljenosti za gole singularnosti u simulacijama sa pseudo-potencijalom ($q=1.5$)

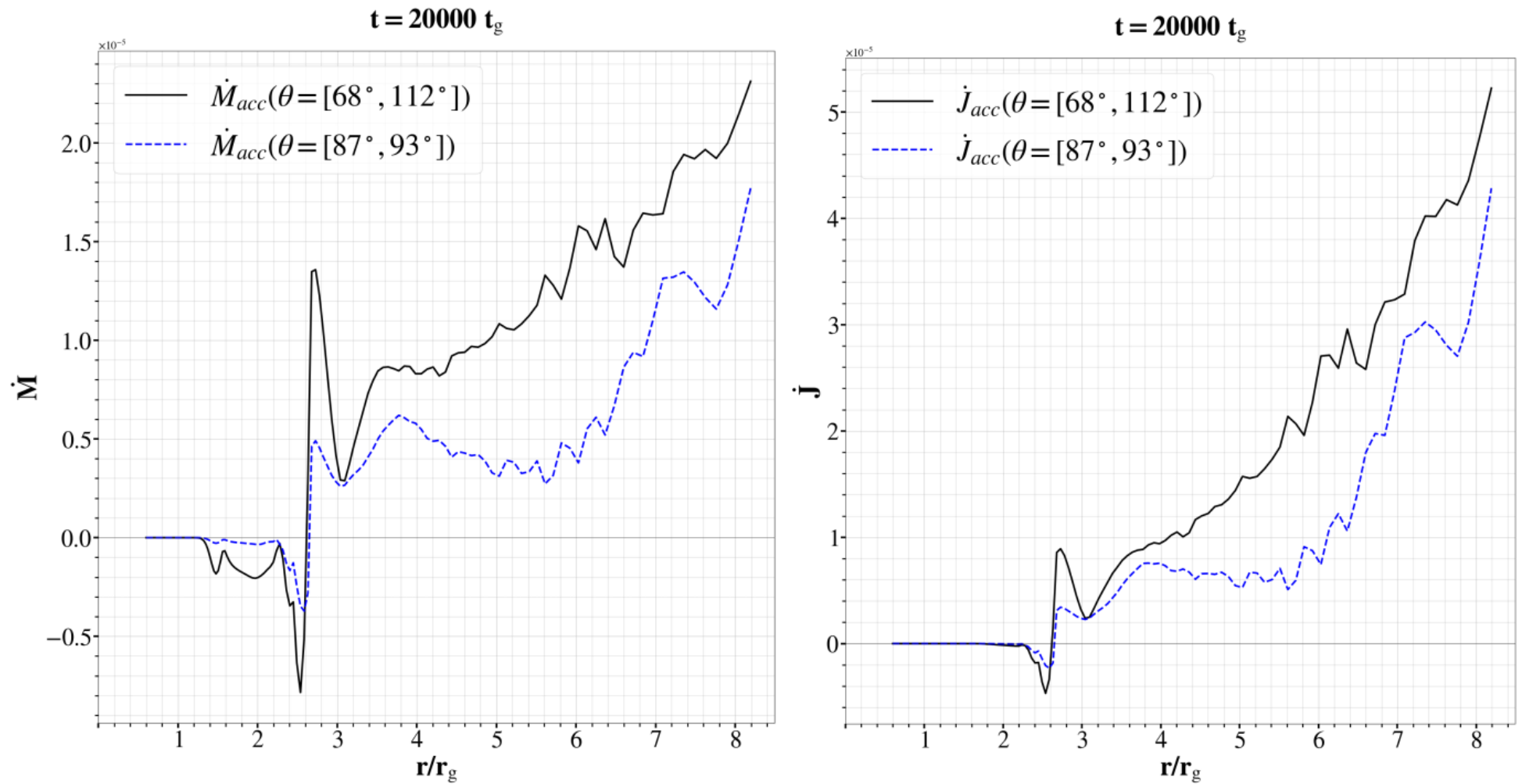


Fig. 4. Values of \dot{M} and \dot{J} computed in two co-latitudinal intervals as assigned in the legends, in dependence of radial distance from the origin in the simulation from Fig. 2, obtained as an average over the time interval of $t \in [19000, 21000] t_g$. MW: Can't the panels be of the same size?

Bi li rješenja za gole singularnosti izgledala kao rješenja za crne rupe?

Kluźniak & Krajewski (2024): U GR simulacijama formira se toroidalna struktura s presjekom oblika polumjeseca blizu sfere nulte gravitacije. Istovremeno, jaki i brzi istjeci materije su prisutni čak i u rješenjima bez magnetskog polja=RN singularnosti potiču stvaranje jetova i istjeka materije. Nužno je usporediti sliku unutrašnje toroidalne strukture sa promatranjima Sgr A* kolaboracije EHT.

U slučaju crnih rupa u našim simulacijama, sav materijal je apsorbiran unutar horizonta događaja. Jetovi i istjecanje materijala su mogući samo u prisustvu magnetskog polja i zračenja ili za rotirajuće crne rupe.

Na širenje zračenja u blizini gole singularnosti može značajno utjecati materija koja se kreće oko nje. To može biti važno pri proučavanju golih singularnosti. Konkretno, slike gole singularnosti mogu biti modificirane neprozirnim materijalom u snažnim istjecanjima materijala i unutarnjem torusu oblika polumjeseca. Evolucija gole singularnosti također može biti različita od predviđene.

Većina prijašnjih studija o akreciji na gole singularnosti pretpostavljala je da će se fluid koji napušta akrecijski disk (kroz graničnu stabilnu orbitu, ako je prisutna) dodavati na golu singularnost, mijenjajući joj masu i kutnu količinu gibanja i druge parametre. Za sferno simetrične gole singularitete koje ovdje razmatramo, to ne djeluje moguće.

- Treba napraviti serije simulacija golih singularnosti i upotrijebiti ih kao model za tvorenje slike M87 i Sgr A*.

Sažetak

- Više od sto godina crnih rupa i golih singularnosti
- Promatrački materijal, Event Horizon Telescope (EHT)
- Zašto su gole singularnosti opet zanimljive astronomima
- Numeričke simulacije u Općoj relativnosti i pseudo-Newtonovskom potencijalu pokazuju da bi se gole singularnosti morale bitno razlikovati od crnih rupa. Provjeriti!

Hvala!

