

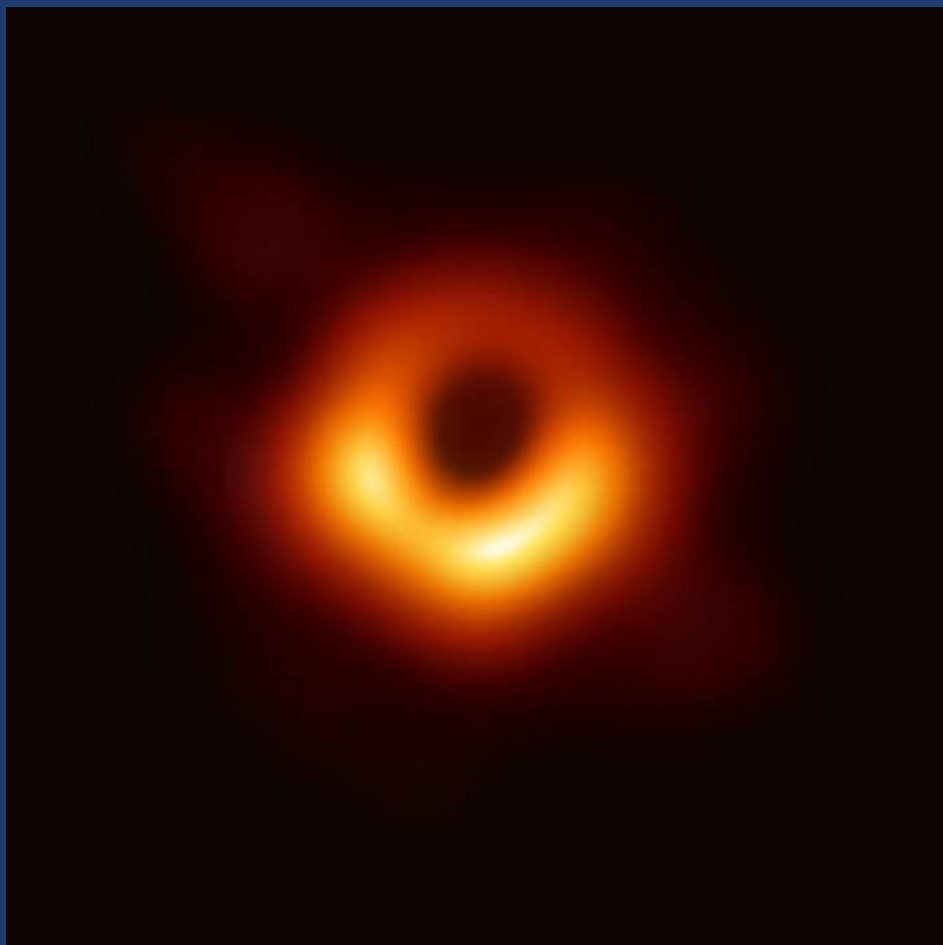
SAŠO GROZDANOV

TERMODINAMIKA ČRNIH LUKENJ

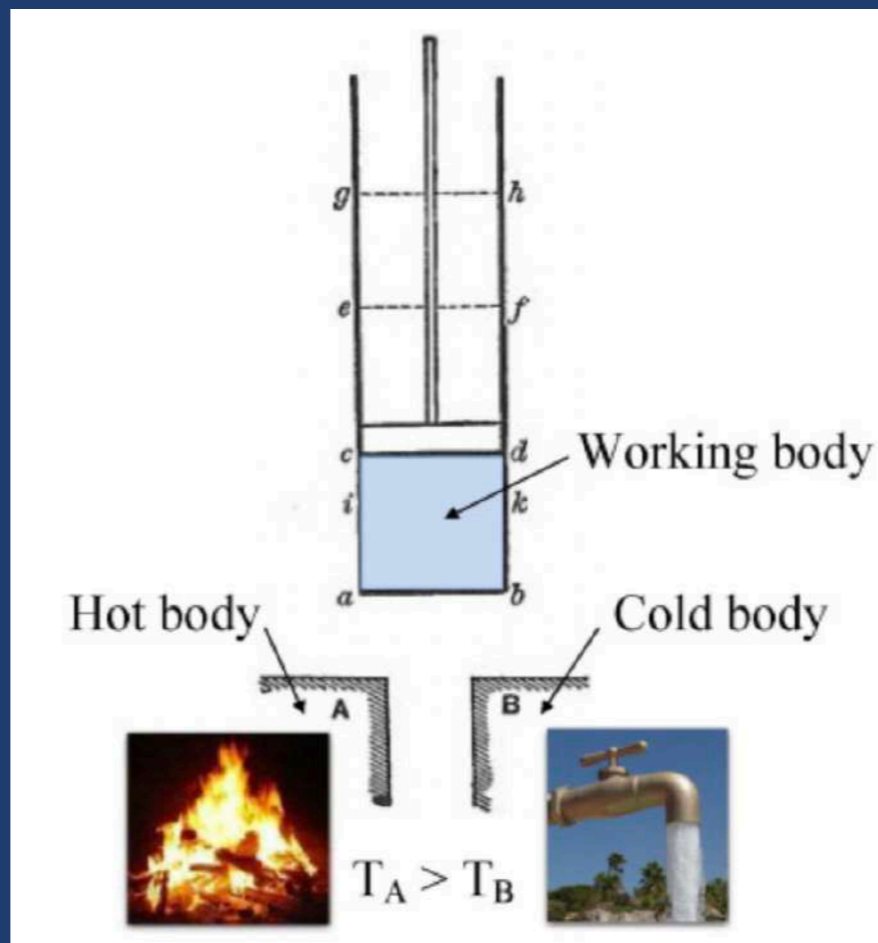
LJUBLJANA, 27.10.2022

ČRNA LUKNJA

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



[Event Horizon Telescope (EHT)]



termodinamika



hologram

PLAN

- relativnost in prostor-čas
- splošna teorija relativnosti in črne luknje
- opazovalni dokazi za obstoj črnih lukenj
- termodinamika
- holografija

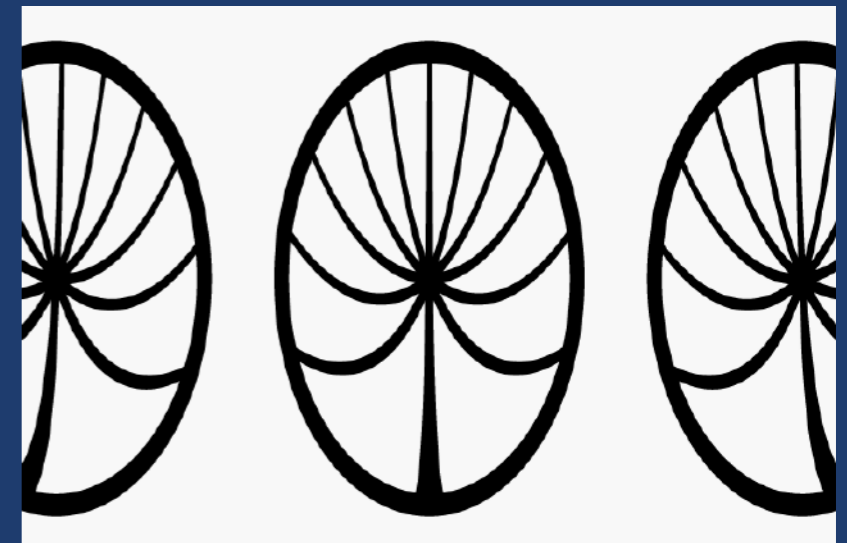
RELATIVNOST IN PROSTOR-ČAS

POSEBNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- Einsteinova teorija iz leta 1905, ki je bazirala na delu Maxwella, Poincaréja, Minkowskega, Lorentz, ...
- v klasični, ne-relativistični fiziki je čas absoluten: vsi **opazovalci** ga izkusijo enako
- svet je **relativističen** in čas ni absoluten: interval med **dogodkoma** traja različno dolgo
- kaj pa je absolutno za vse opazovalce?
hitrost svetlobe: $c = 1,080,000,000$ km/h
- pri 'veliki' (konstantni) hitrosti se **razdalje krčijo** in **čas podaljša**
- primer:
paradoks dvojčkov



[Leiden, Nizozemska]



[animacije: Thierry Dugnonle]

POSEBNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- Lorentzove transformacije (spremembe koordinatnega sistema)

$$\begin{aligned}t' &= \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \\x' &= \gamma (x - vt) \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

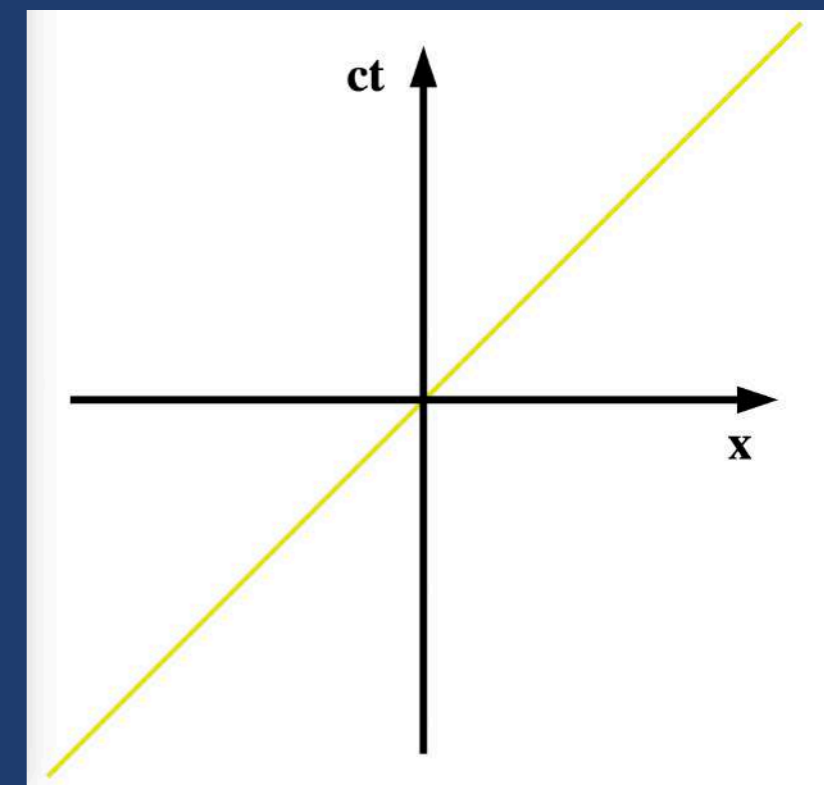
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- slavna posledica

$$E = mc^2$$

- prostor Minkowskega - ne-Evklidska geometrija

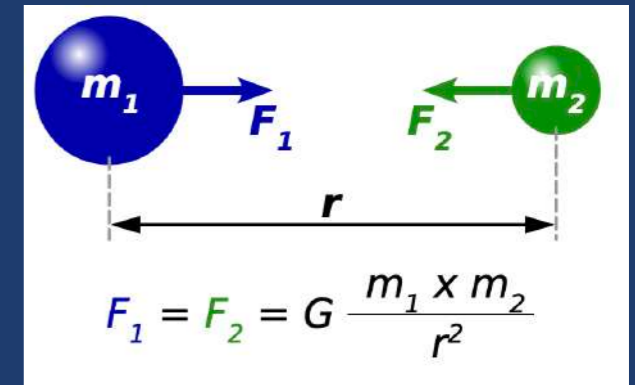
$$(\Delta s)^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$



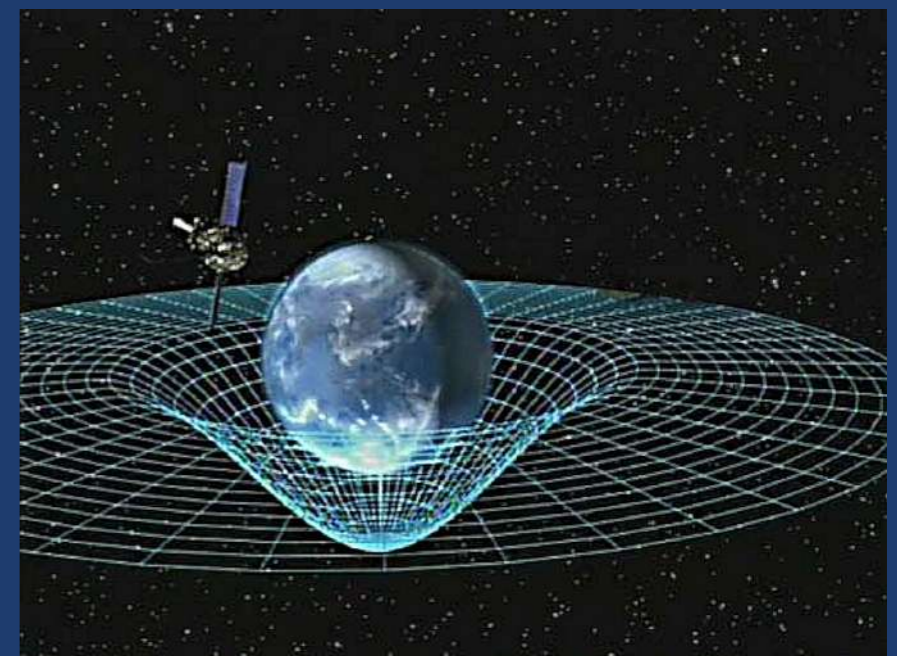
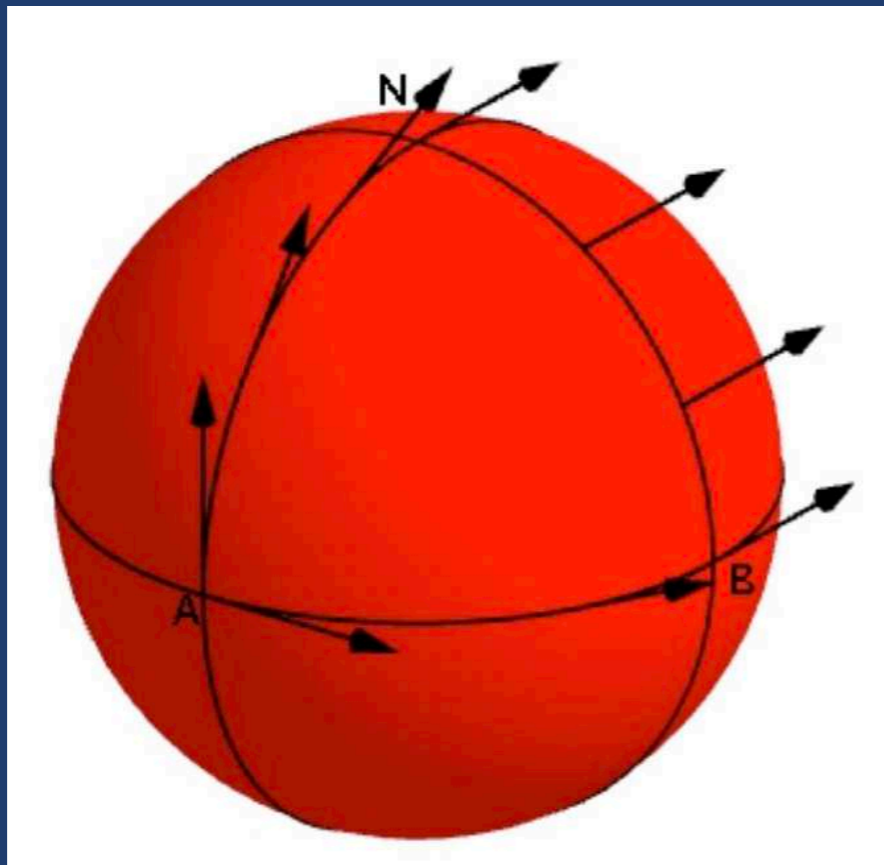
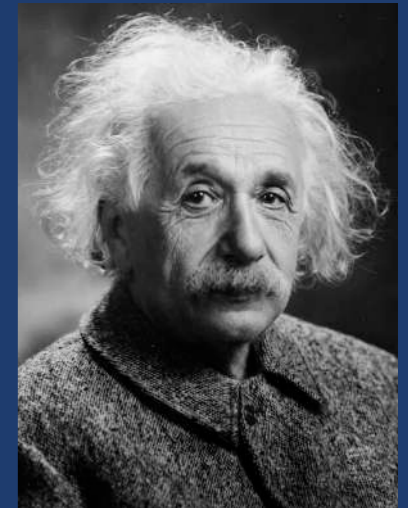
SPLOŠNA TEORIJA
RELATIVNOSTI IN ČRNE LUKNJE

SPLOŠNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- Newtonova gravitacija
- Einstein je relativistično teorijo formuliral leta 1915
- **GRAVITACIJA = GEOMETRIJA** prostora-časa

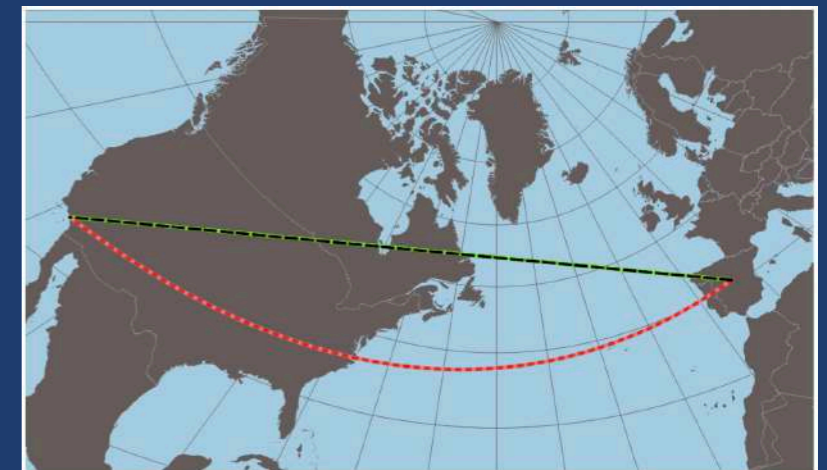
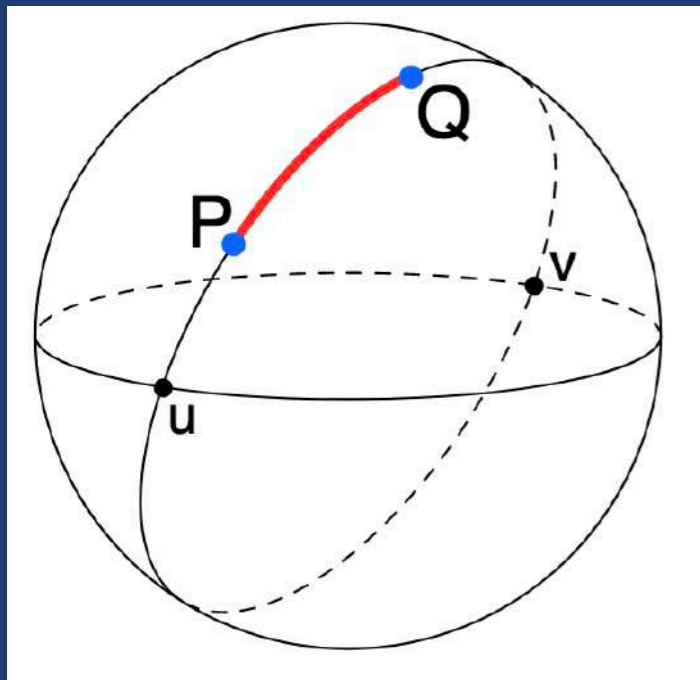


[slika: Dna-Dennis; WikiCommons]



SPLOŠNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- delci potujejo po najkrajših možnih poteh v tem prostoru-času: **geodetka**
- **prosti pad**
- v ravnem prostoru je to ravna črta
- na krogli je to 'veliki' krog (na karti lahko izgleda neintuitivno)



- geometrija je lahko zelo komplicirana

SPLOŠNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- Einsteinova enačba

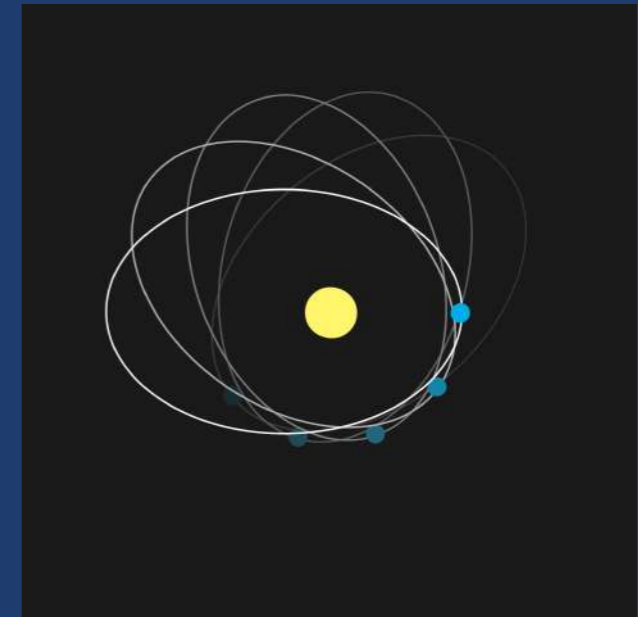
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

'mera' ukrivljenosti
geometrije

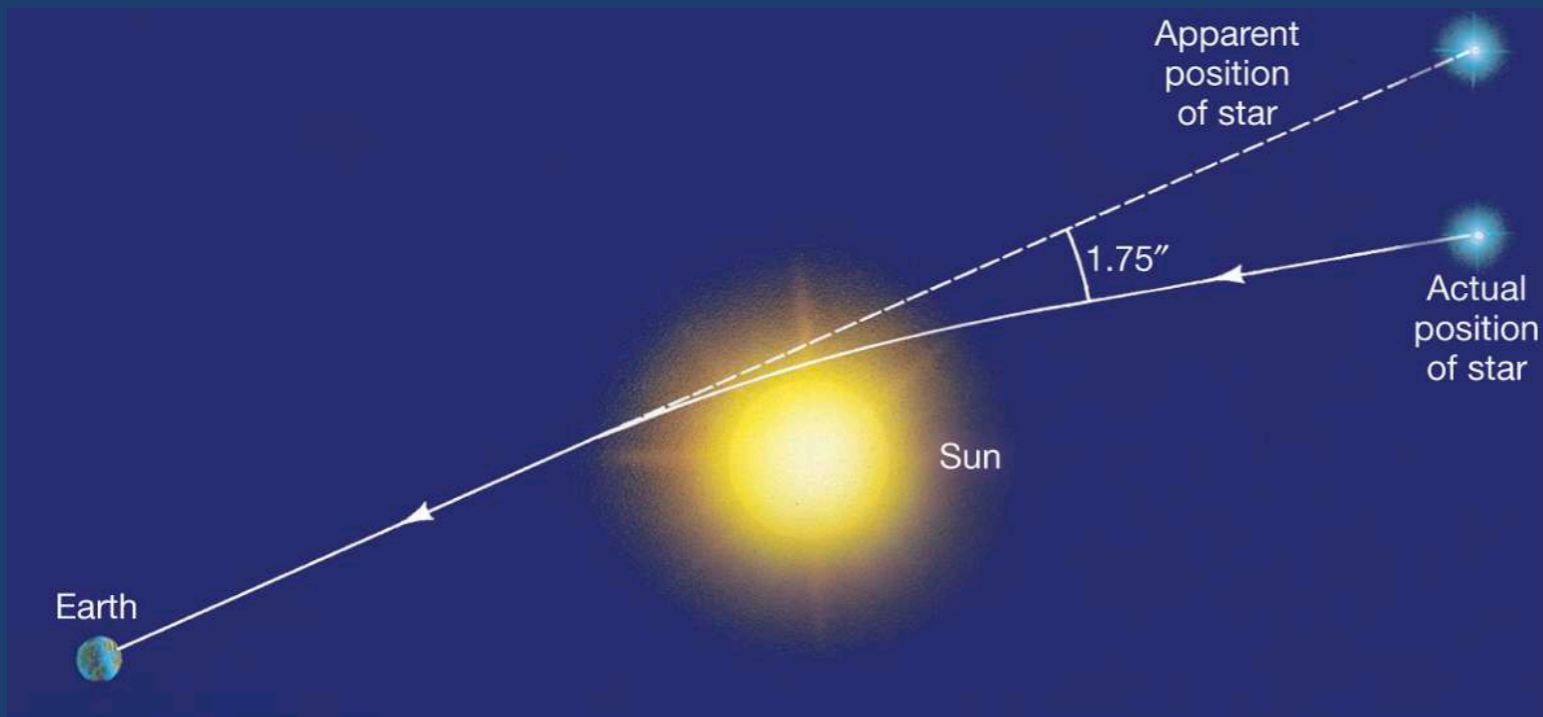
energija/masa
materije

POSLEDICE GRAVITACIJE KOT UKRIVLJENOSTI

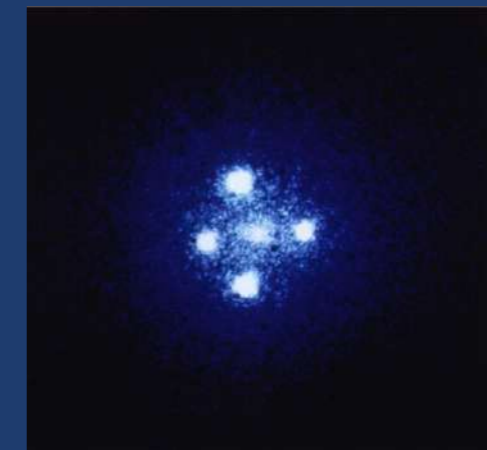
- spremembe trajektorij planetov
Newton-Kepler: elipse
splošna relativnost: elipse 'rotirajo'
primer: Merkurjev perihelij



- ukrivljanje poti svetlobe



[slika: G. Weinstein; Pearson Education, Inc. (2011)]



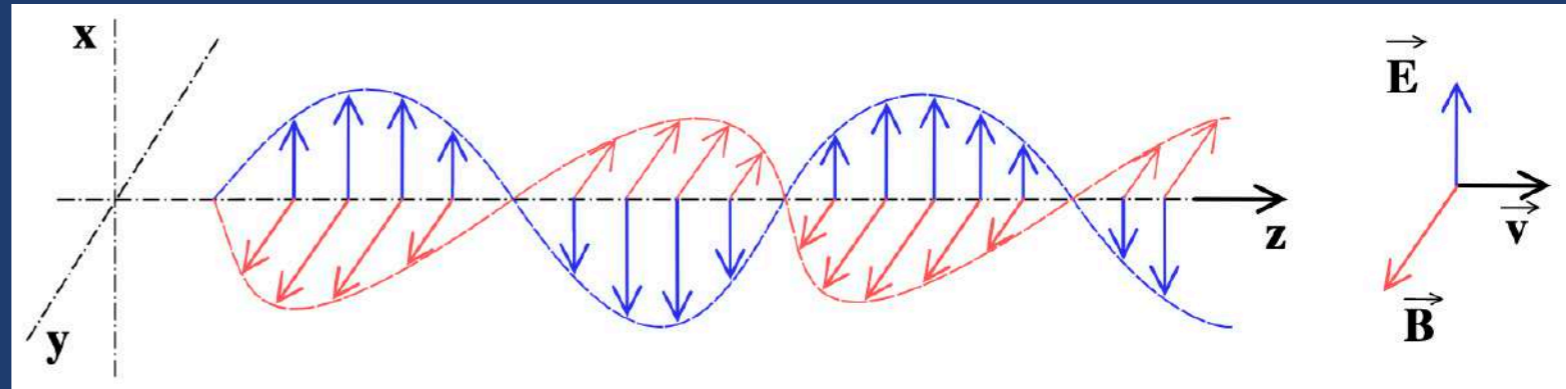
[Einsteinov križ]



[Einsteinov prstan]

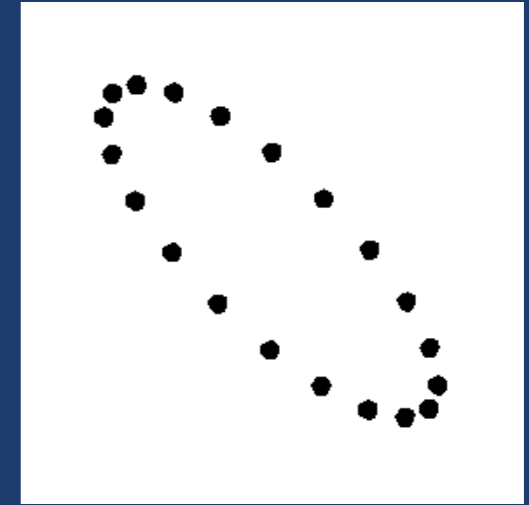
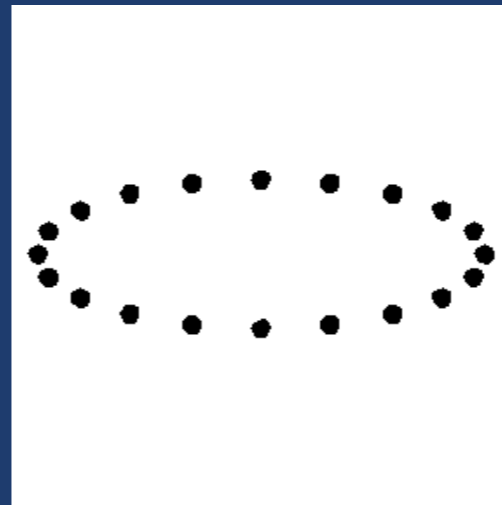
GRAVITACIJSKI VALOVI

- svetloba je valovanje, ki potuje s konstantno svetlobno hitrostjo



[slika: SuperManu; WikiCommons]

- gravitacija je valovanje, ki prav tako potuje s svetlobno hitrostjo



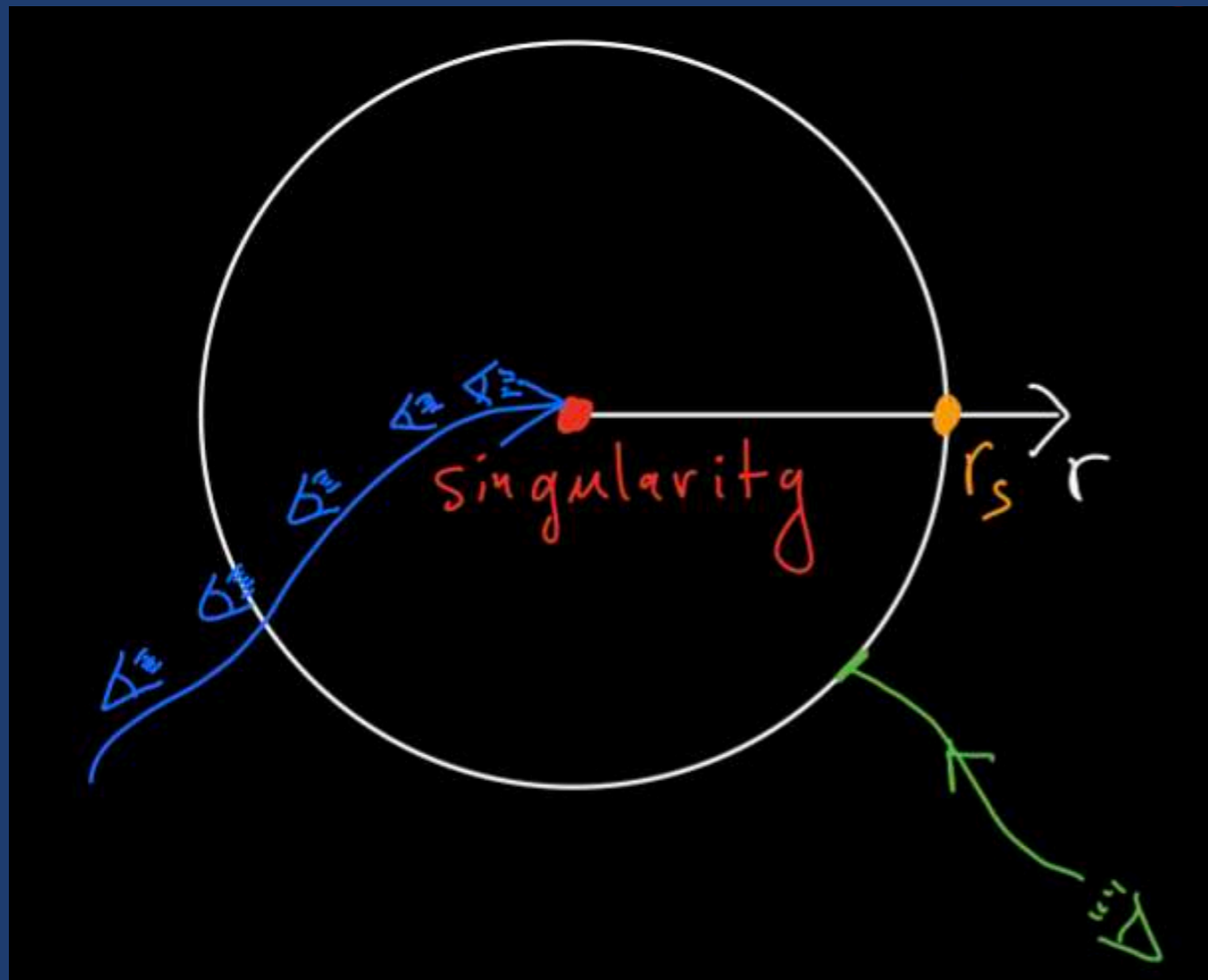
- 'nosilci' sile: fotoni in gravitoni [kvantna mehanika]



ČRNE LUKNJE

- sferično simetrična rešitev – Schwarzschildova črna luknja (1915)

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



$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

dogodkovno obzorje ali
'event horizon'

Laplace (1796):
temna zvezda

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{d}}$$

ČRNE LUKNJE

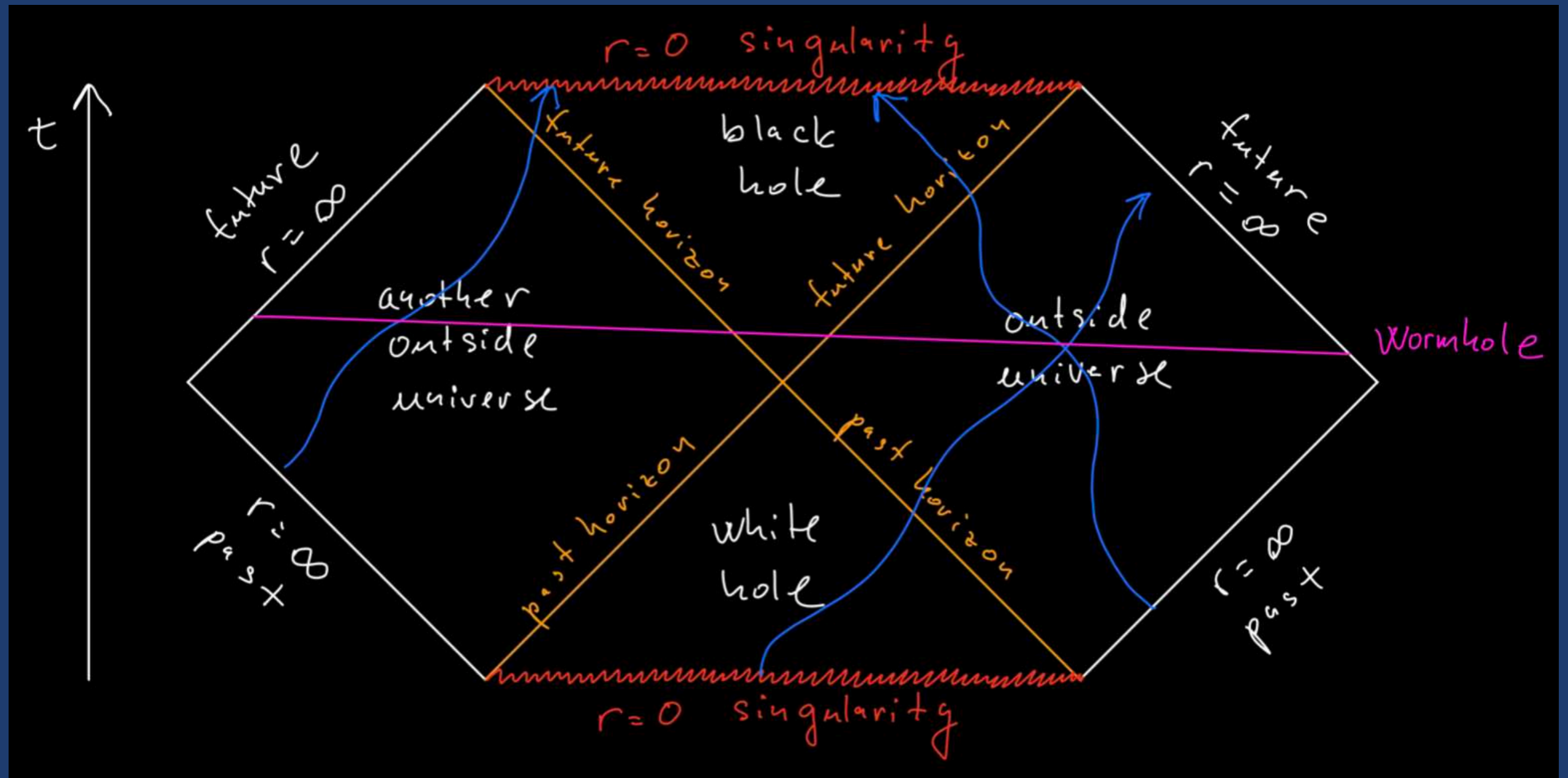
- gravitacijsko lečenje galaksije za črno luknjo zaradi ukrivljanja svetlobe



[video: Urbane Legend (Alain r); WikiCommons]

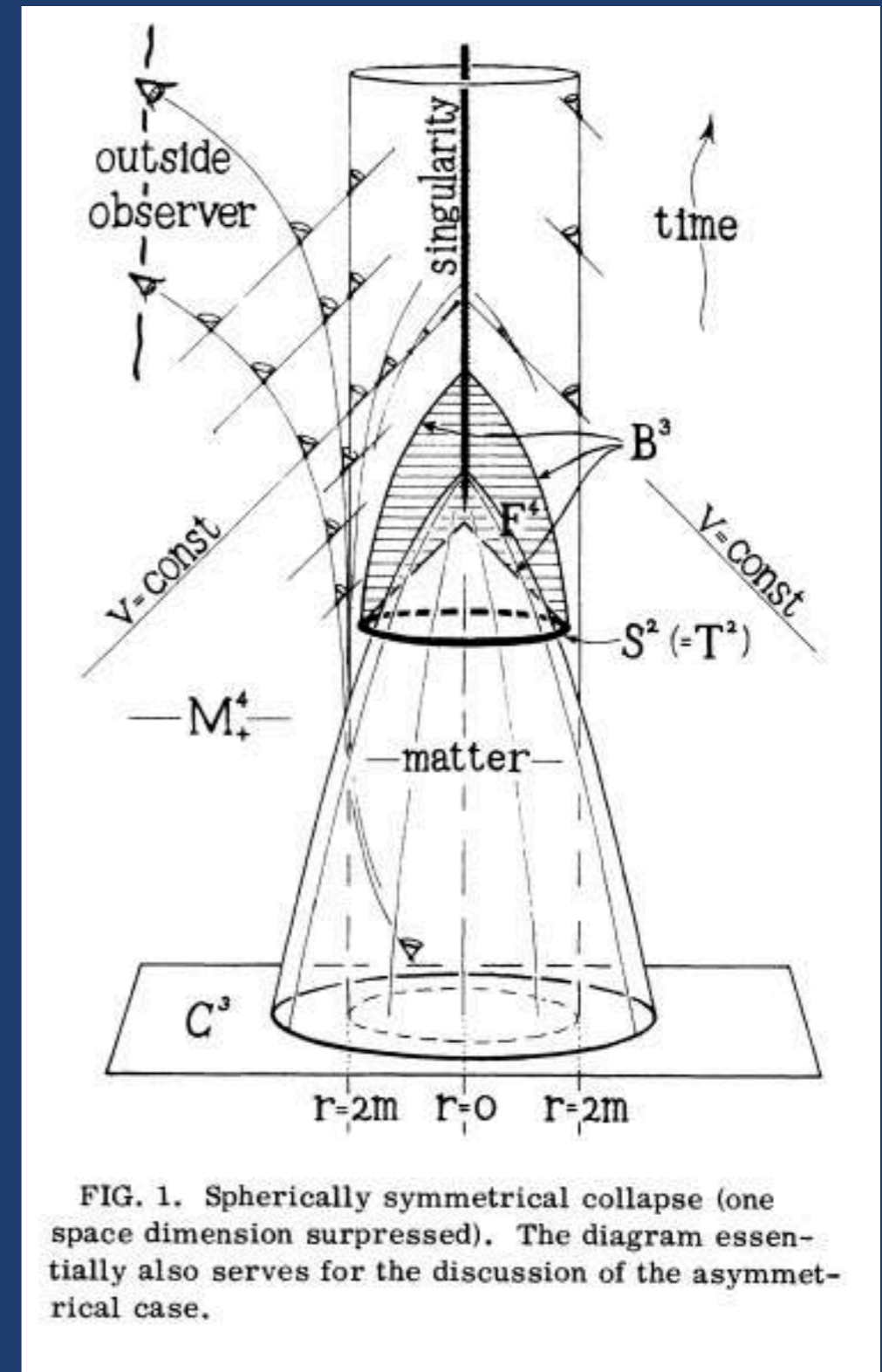
ČRNE LUKNJE

- črna luknja je več kot črna luknja:
dva zunanja prostora, bela luknja, črvina (kvantna prepletenost $ER = EPR$)



ČRNE LUKNJE

- kako ustvarimo črno luknjo?
 - standardno: kolaps materije je generičen (dokler masa vsaj 2 - 4 mase Sonca)
 - manj standardno: brez materije (vakuum), samo z gravitacijo
- singularnost je vedno skrita za obzorji (cosmic censorship conjecture)
- črne luknje so najbolj 'univerzalni' objekti v fizik



[Penrose (1965)]

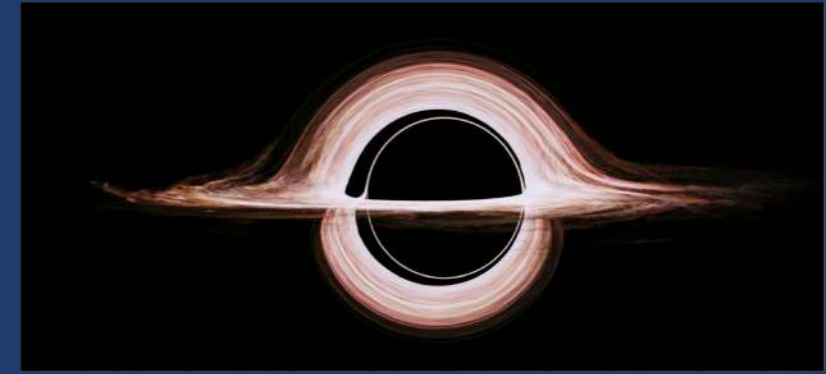
Nobelova nagrada 2020

ČRNE LUKNJE

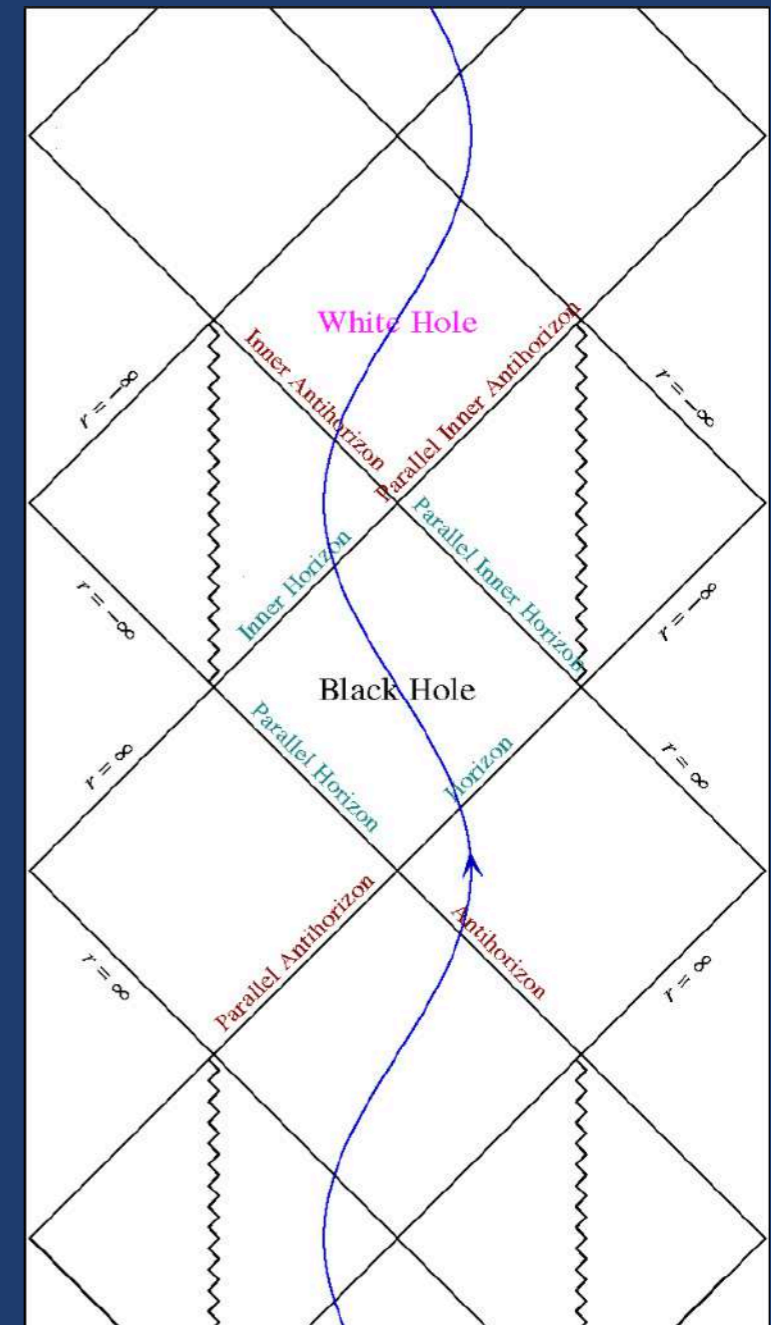
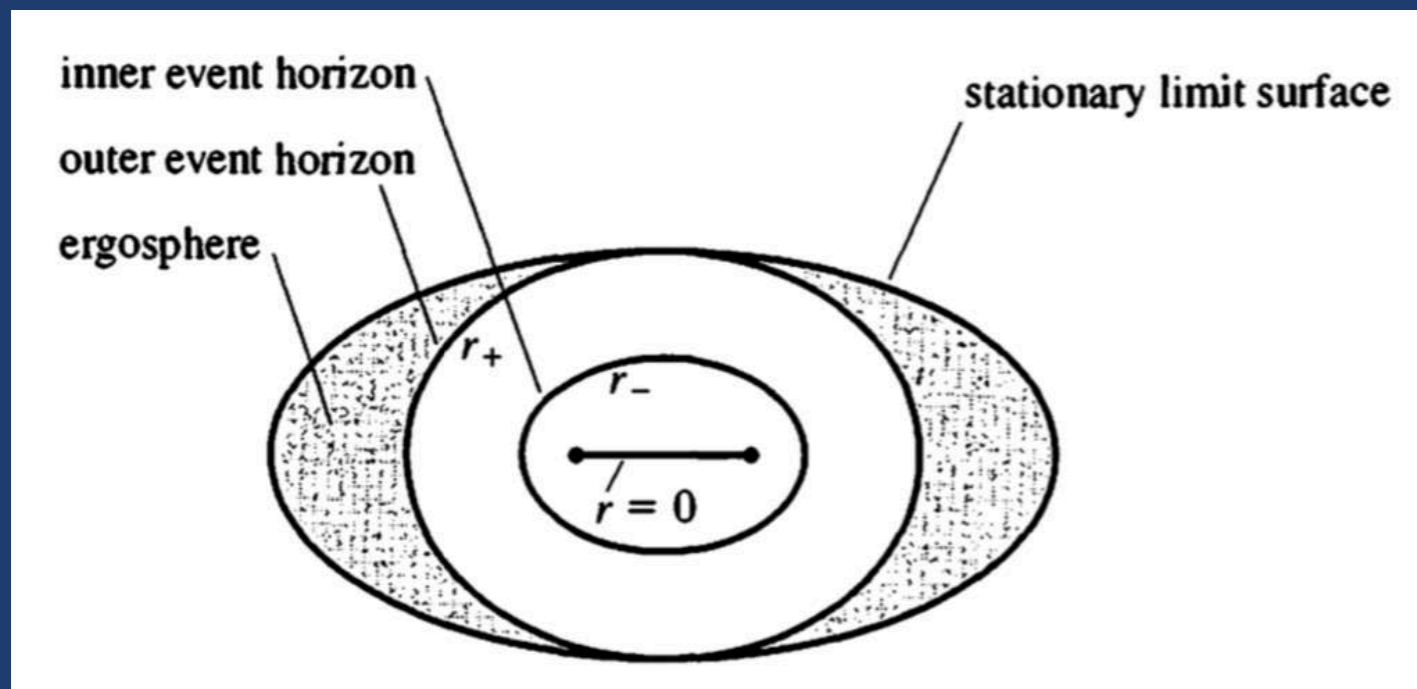
- 'no-hair' teorem:
obstaja zelo omejeno število različnih tipov črnih lukenj



Kerrova črna luknja



[film Interstellar]



OPAZOVALNI DOKAZI ZA
OBSTOJ ČRNIH LUKENJ

TRK DVEH ČRNIH LUKENJ



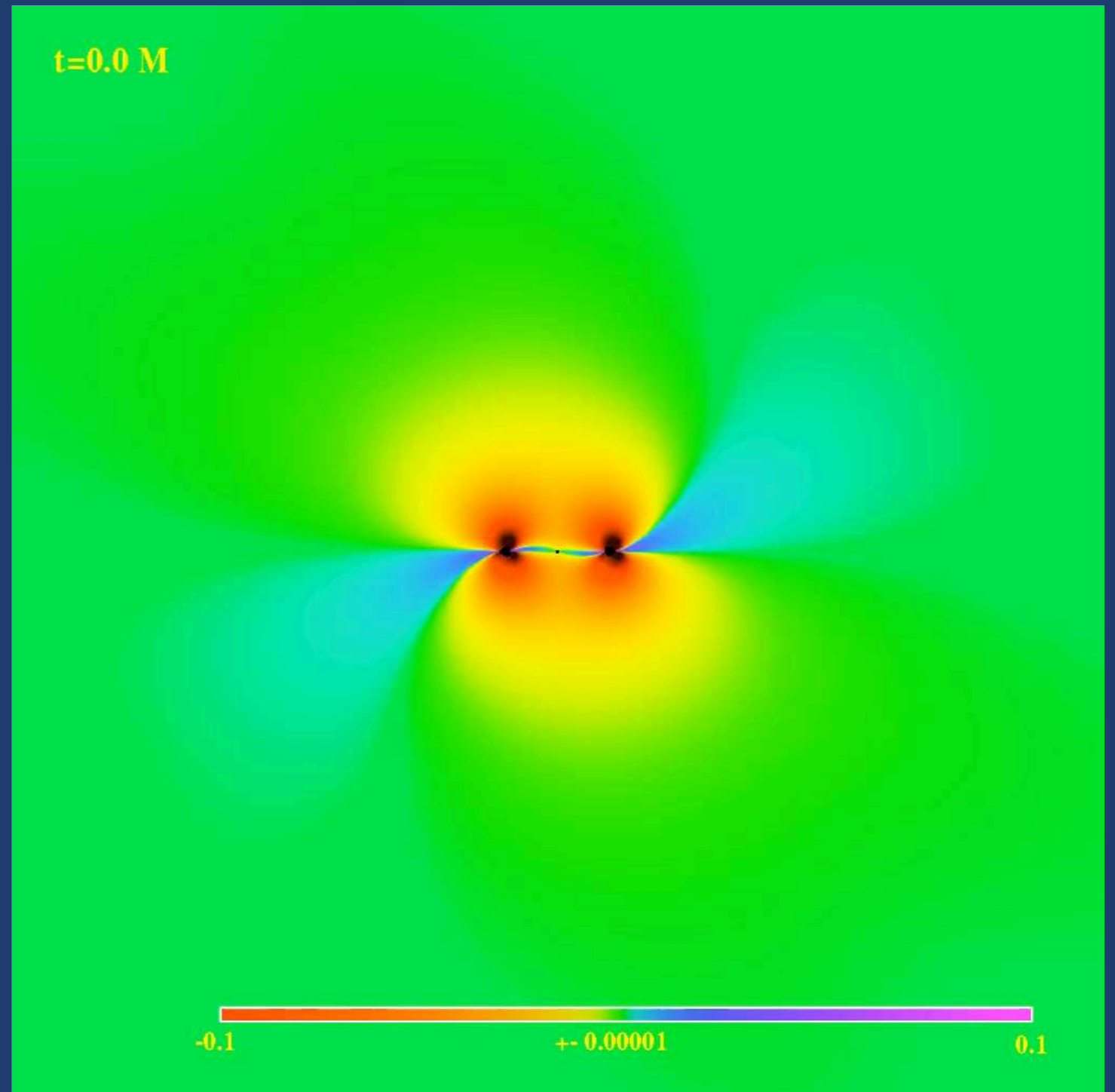
gravitacijsko lečenje

[SXS Collaboration; https://www.youtube.com/watch?v=Zt8Z_uzG71o&t=1s]

TRK POVZROČI GRAVITACIJSKE VALOVE

- gravitacijski valovi
- simulacija z enačbami splošne relativnosti

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$



[F. Pretorius; <https://physics.princeton.edu/~fpretori/>]

... KI JIH ZNAMO IZMERITI!

dolžina roke: 4km

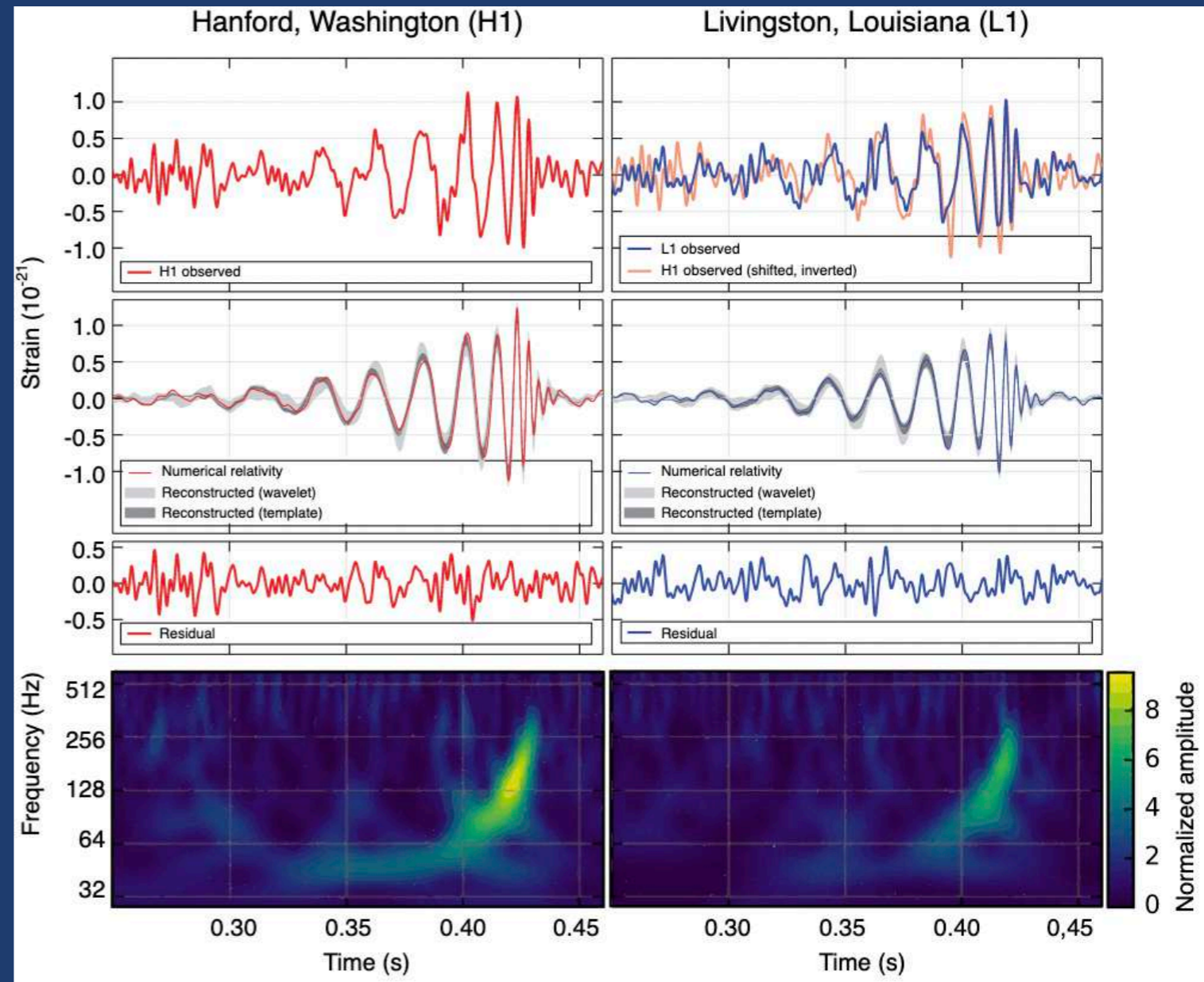
- 1. opažen trk dveh črnih lukenj: 29 in 36 mas Sonca
- prva detekcija gravitacijskih valov:
GW150914
[LIGO/VIRGO]



čas med signaloma: 7ms

TRK POVZROČI GRAVITACIJSKE VALOVE

- 1. opažen trk dveh črnih lukenj: 29 in 36 mas Sonca
- prva detekcija gravitacijskih valov:
GW150914
[LIGO/VIRGO]

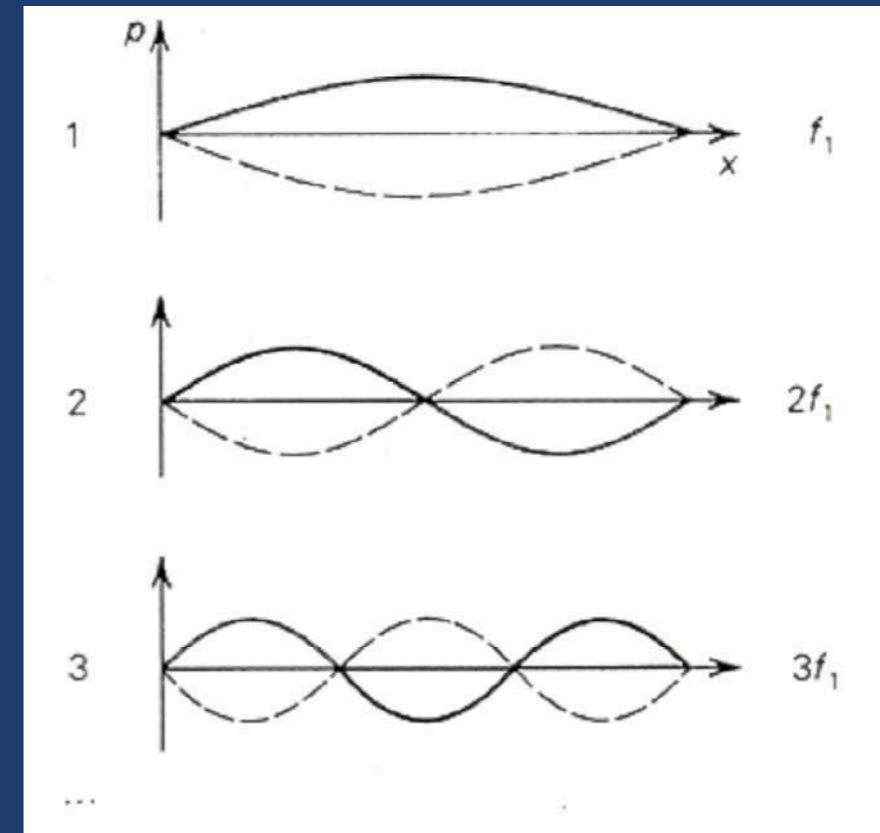


[B.P. Abbott, et.al.; PRL (2016)]

OPOMNIK: NIHANJE

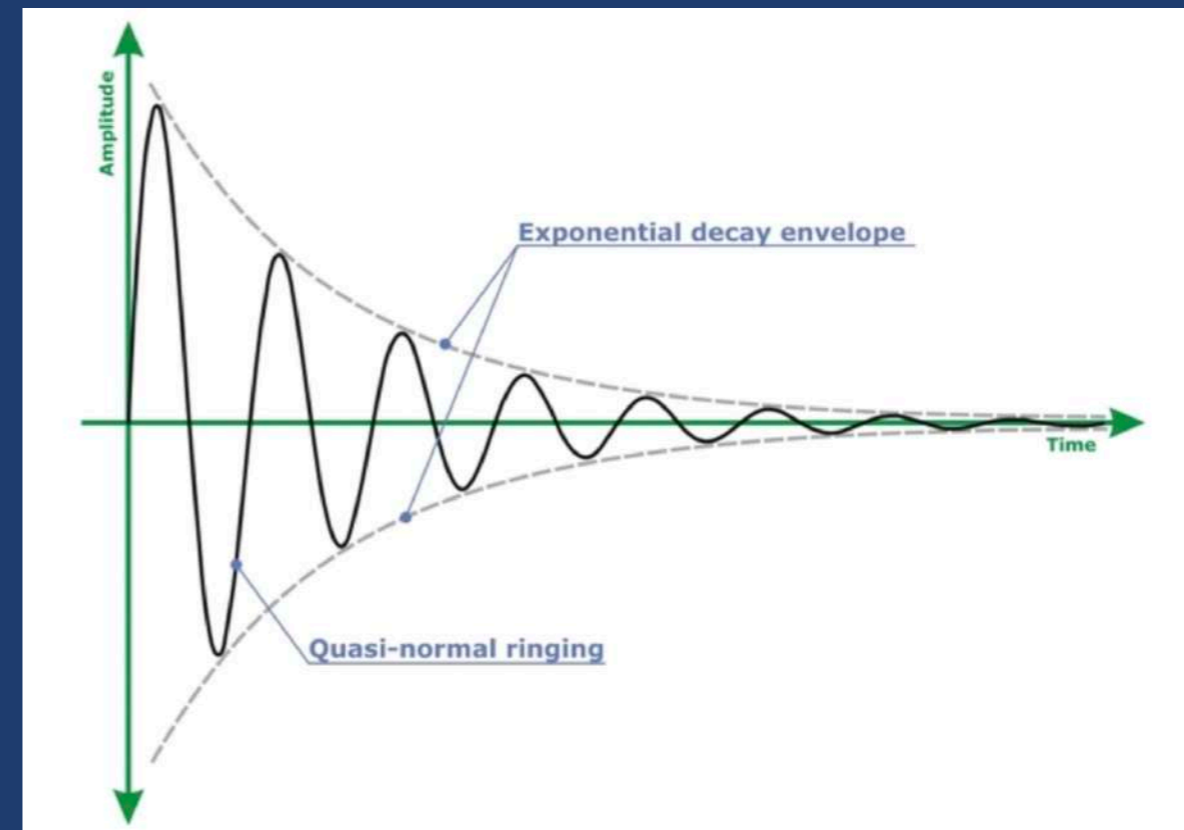
- `normalno'
Hermitiski operator v QM

$$\omega \in \mathbb{R}$$



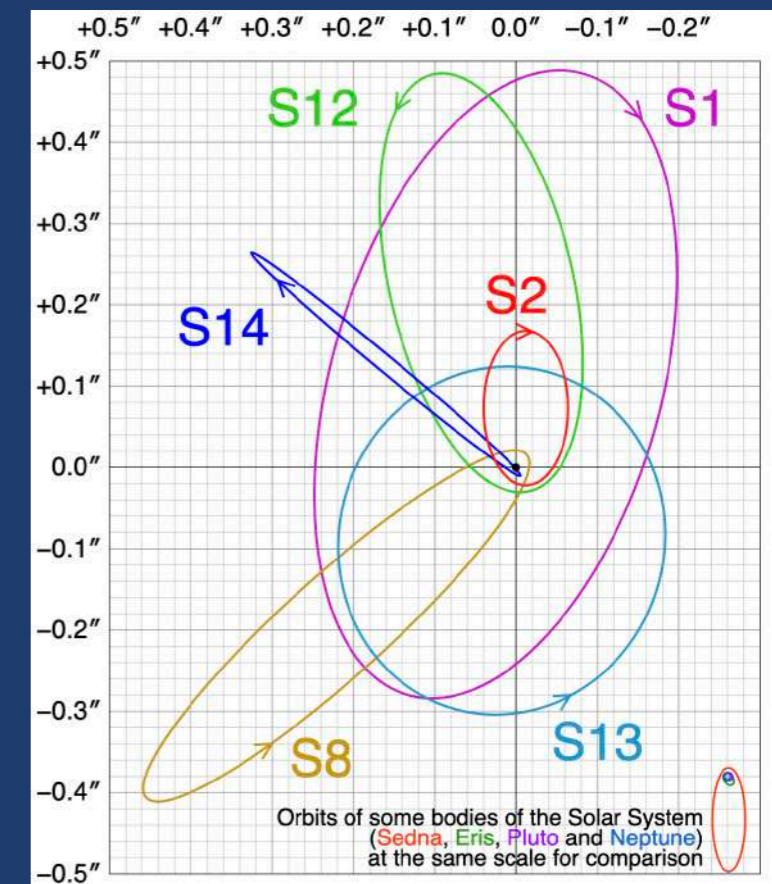
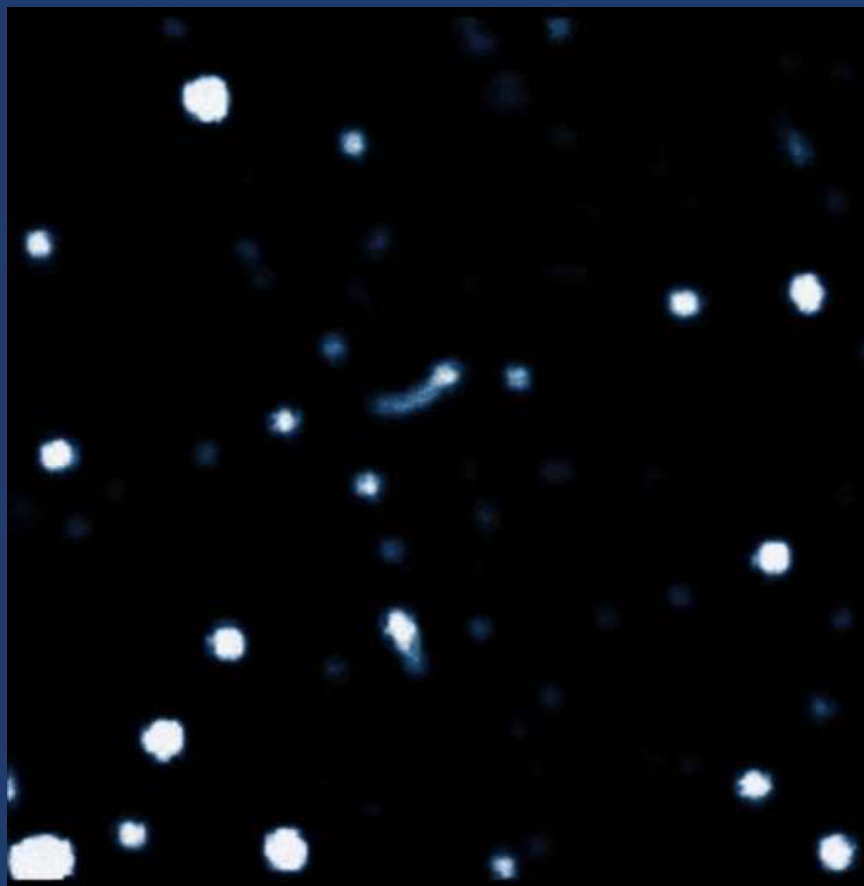
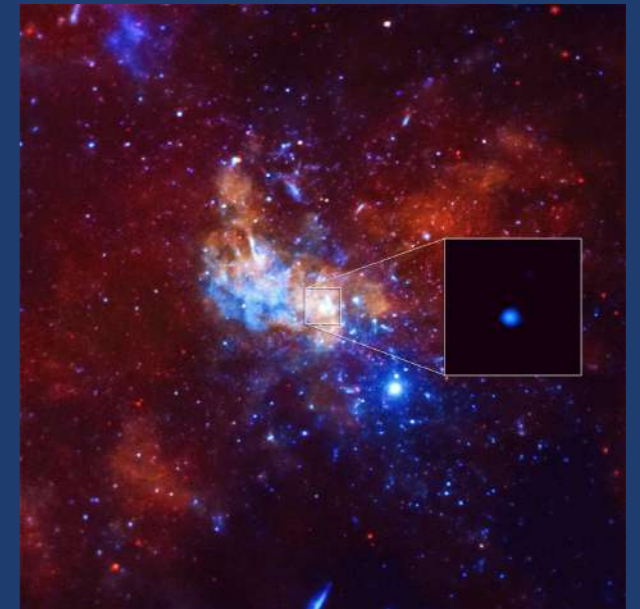
- `kvazi-normalno'
ne-Hermitiski operator

$$\omega \in \mathbb{C}$$



ČRNE LUKNJE SO V CENTRIH GALAKSIJ

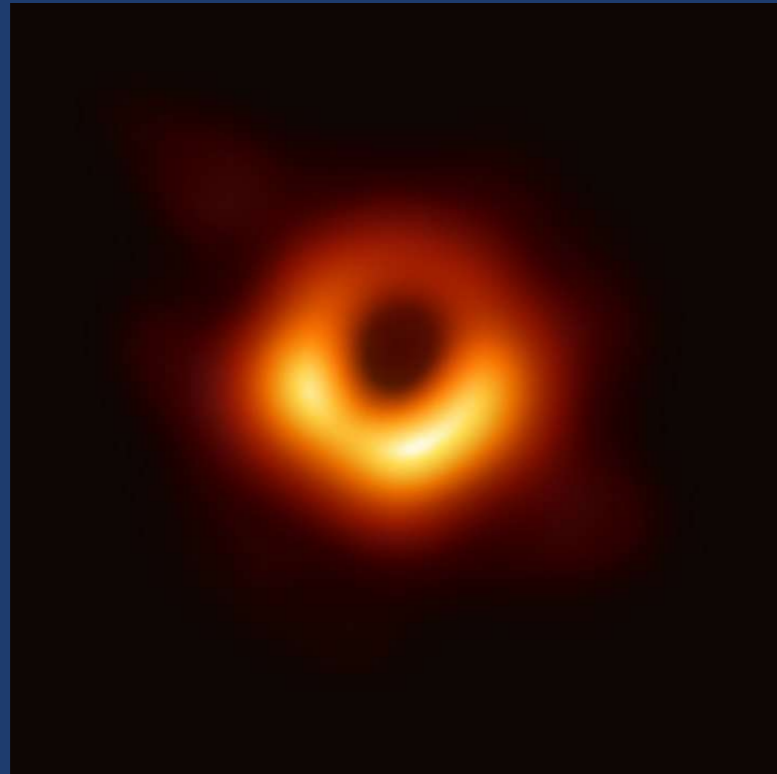
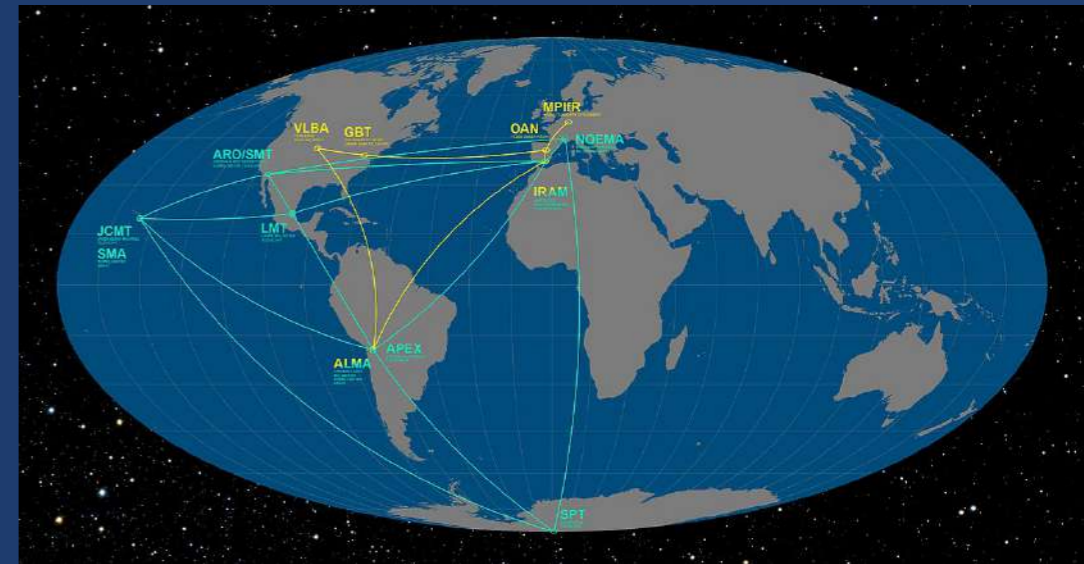
- center naše galaksije (Rimske ceste):
Sagittarius A* je (supermasivna) črna luknja oddaljena 25,640 svetlobnih let, z maso 4 milijone mas Sonca
- centri 'vseh' galaksij so črne luknje



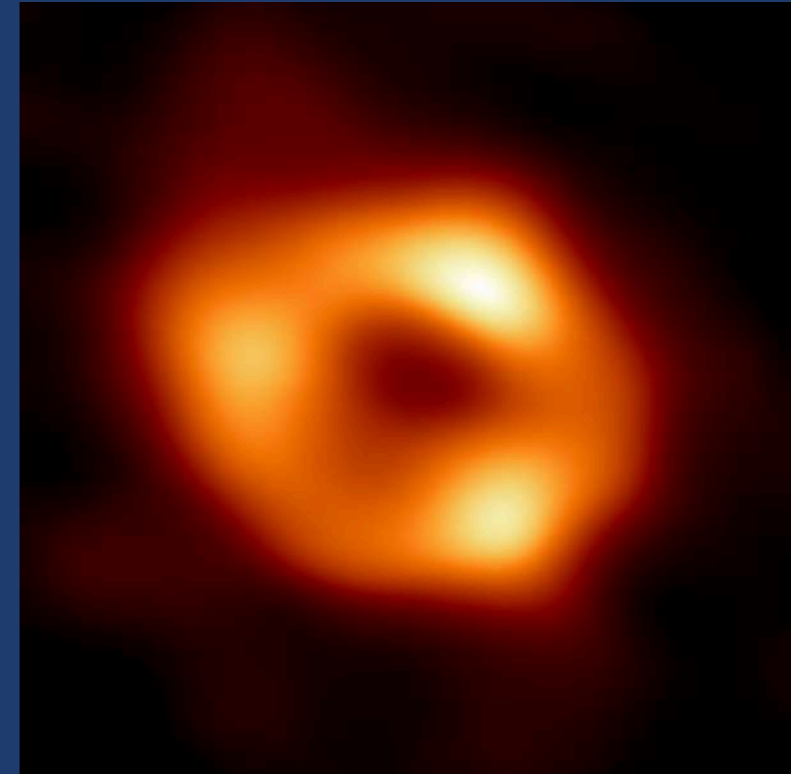
[F. Eisenhauer, et.al.,
The Astrophysical Journal (2005)]

FOTOGRAFIJA ČRNE LUKNJE

- Event Horizon Telescope (EHT)
- radijski valovi
- M87* z maso 6.5 milijard mas Sonca na razdalji 53 milijonov svetlobnih let



1. fotografija [10.4.2019]

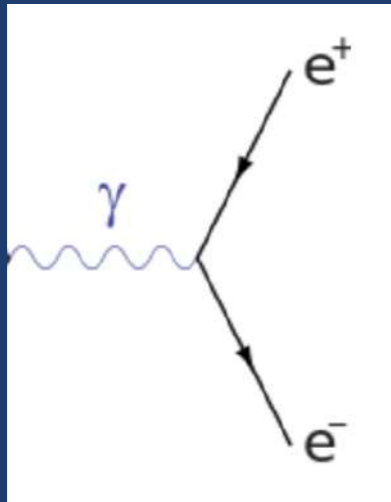


črna luknja v Rimski cesti
(Sagittarius A*)

TERMODINAMIKA

SEVANJE IN TEMPERATURA

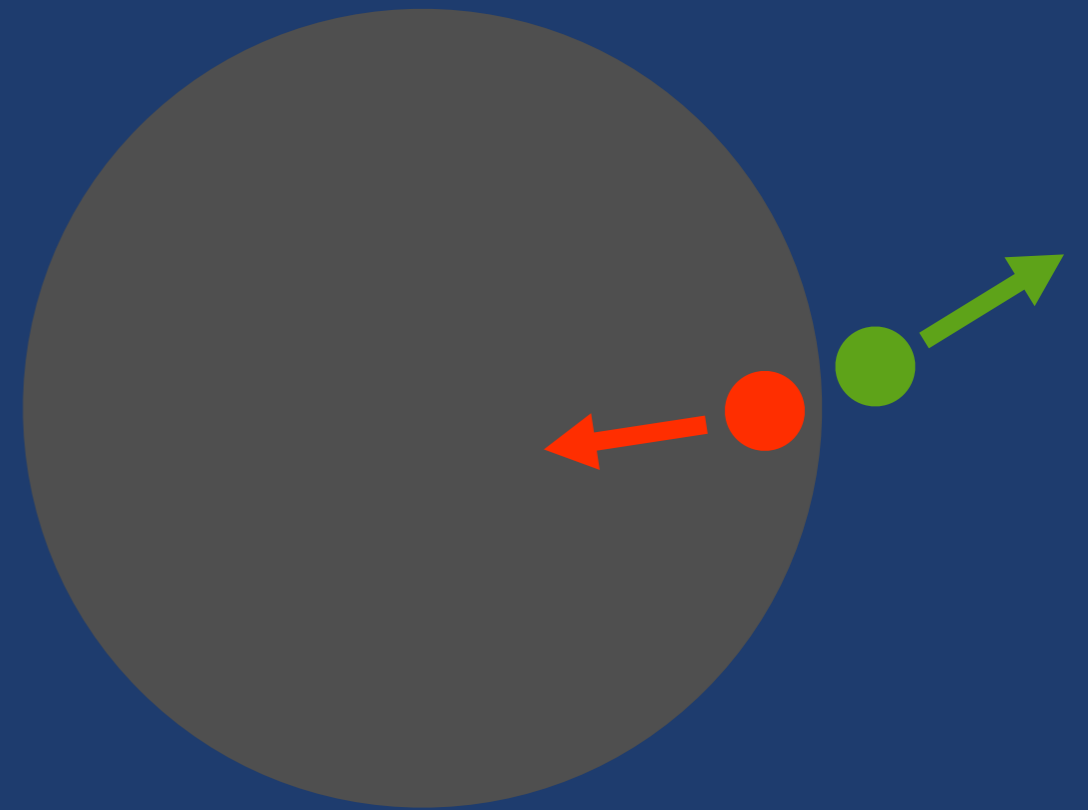
- črne luknje niso črne
kvantni efekt kreacije parov



- Hawkingovo sevanje

- Sagittarius A* temperatura
= cca. 10^{-14} K

- Hawkingov paradoks in unitarnost



površinska
gravitacija

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} = \frac{\kappa}{2\pi}$$

$$T = 6.0 \times 10^{-8} K \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right)$$

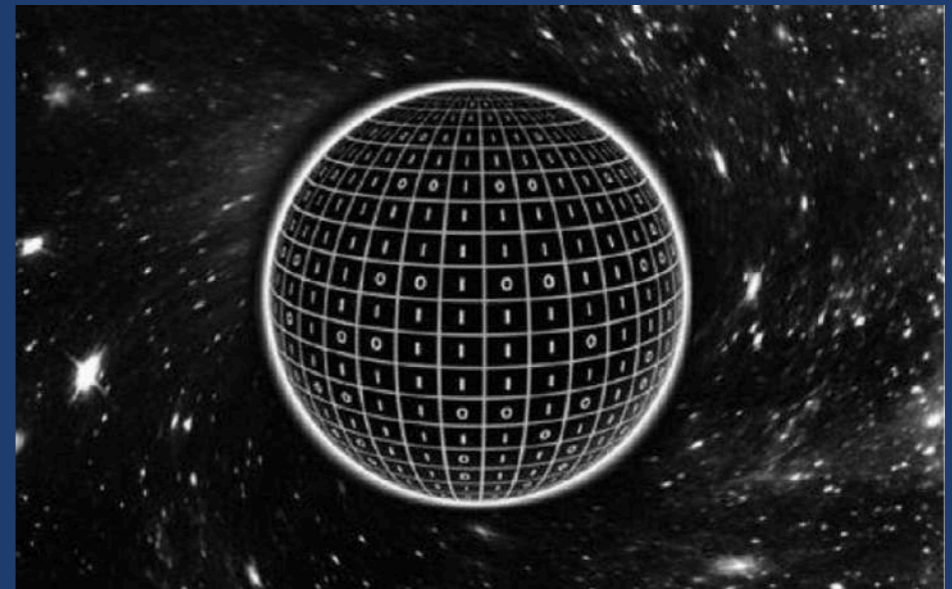
ENTROPIJA

- Boltzmannova entropija (informacija)
- Bekenstein-Hawking formula in površina
- maksimalna entropija
- hologram in
holografski princip ['t Hooft, ...]

$$S = k_B \ln \Omega$$

$$S = \frac{c^3}{G\hbar} \frac{A}{4}$$

$$S \leq \frac{c^3}{G\hbar} \frac{A}{4}$$

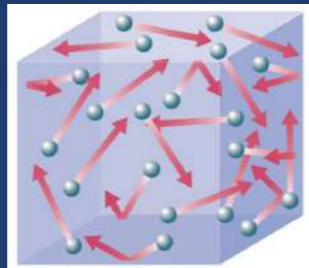


[slika: Bakker, van der Schaar]

ZAKONI TERMODINAMIKE

- črne luknje se obnašajo kot popolna termodinamska telesa

| | TERMODINAMIKA | ČRNE LUKNJE |
|---|---|---|
| 0 | v ravnovesju je $T = \text{const.}$ | v ravnovesju je $\kappa = \text{const.}$ $\left[T = \frac{\kappa}{2\pi} \right]$ |
| 1 | $dE = TdS - dW$ | $dM = \frac{\kappa}{8\pi G}dA + \Omega dJ$ $\left[S = \frac{A}{4G}, E = M \right]$ |
| 2 | entropija narašča: $\frac{dS}{dt} \geq 0$ | površina narašča: $\frac{dA}{dt} \geq 0$ |
| 3 | končen proces ne omogoča $T = 0$ | končen proces ne omogoča $\kappa = 0$ |

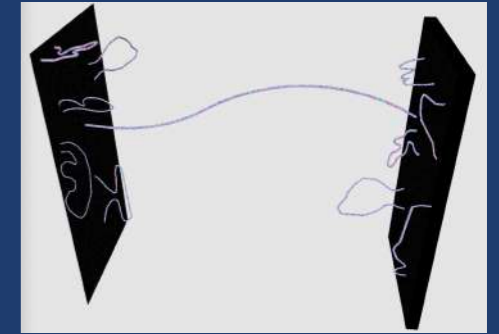
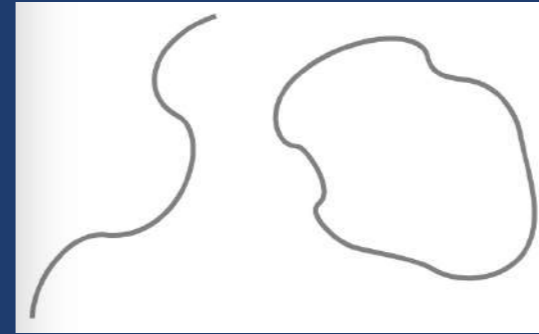


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

HOLOGRAFIJA

TEORIJA STRUN IN HOLOGRAFIJA

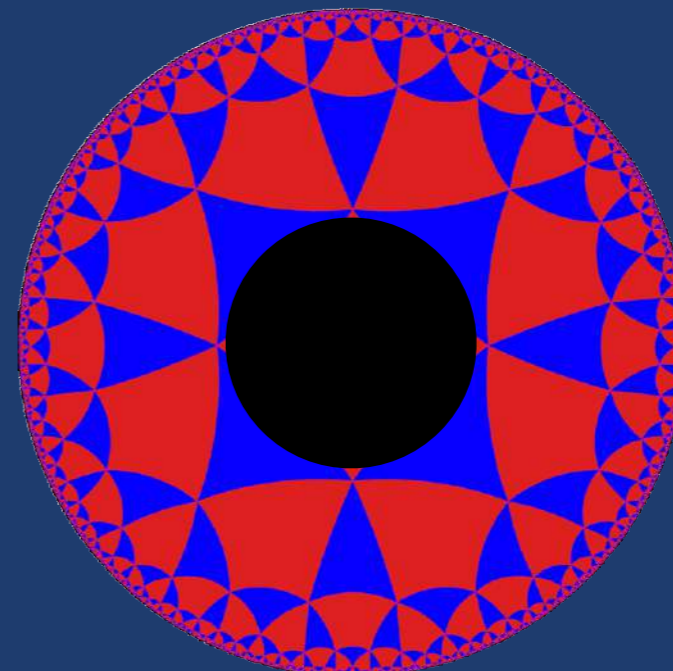
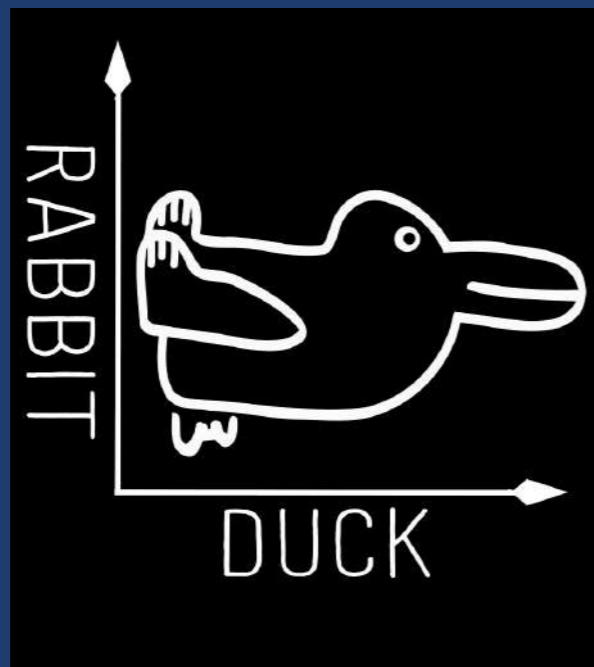
- teorija strun je kvantna teorija gravitacije



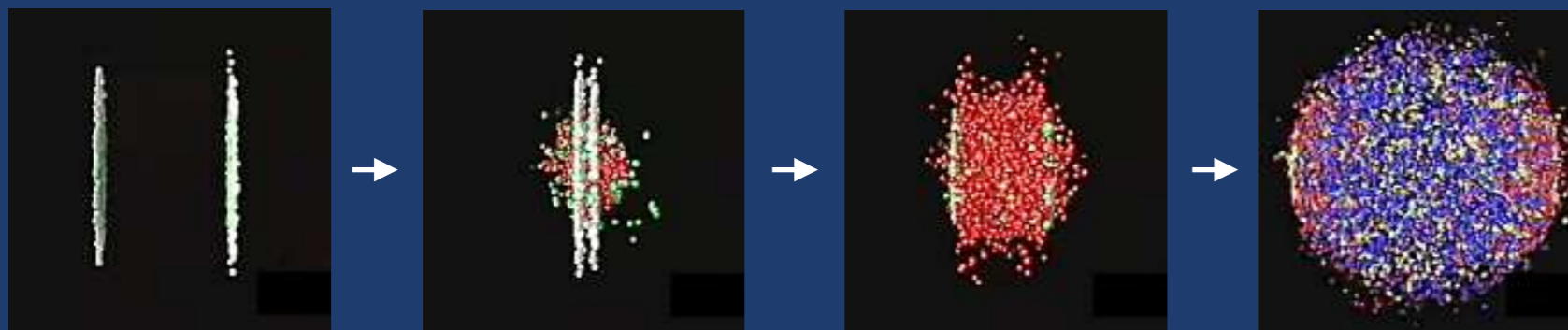
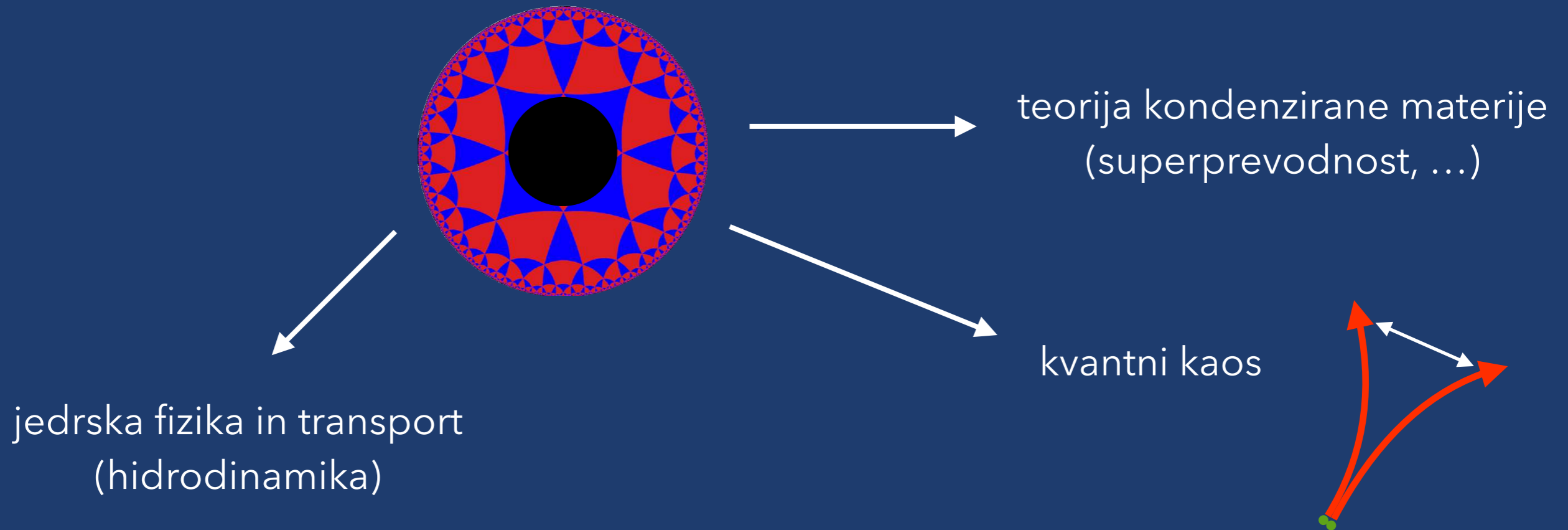
... in kandidatka za 'teorijo vsega':

elektromagnetizem + šibka + močna + ... + gravitacija + ostali delci

- AdS/CFT dualnost [Maldacena, ...]



APLIKACIJE HOLOGRAFIJE



$$t \sim 10^{-23} \text{ seconds}$$

$$T \sim 3 \times 10^{12} \text{ Kelvin}$$

$$B \lesssim 10^{15} \text{ Tesla}$$

črne luknje so v vsem najboljše!

HVALA!

