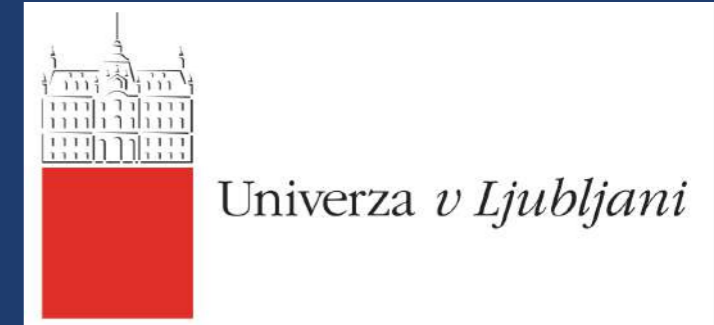




SAŠO GROZDANOV

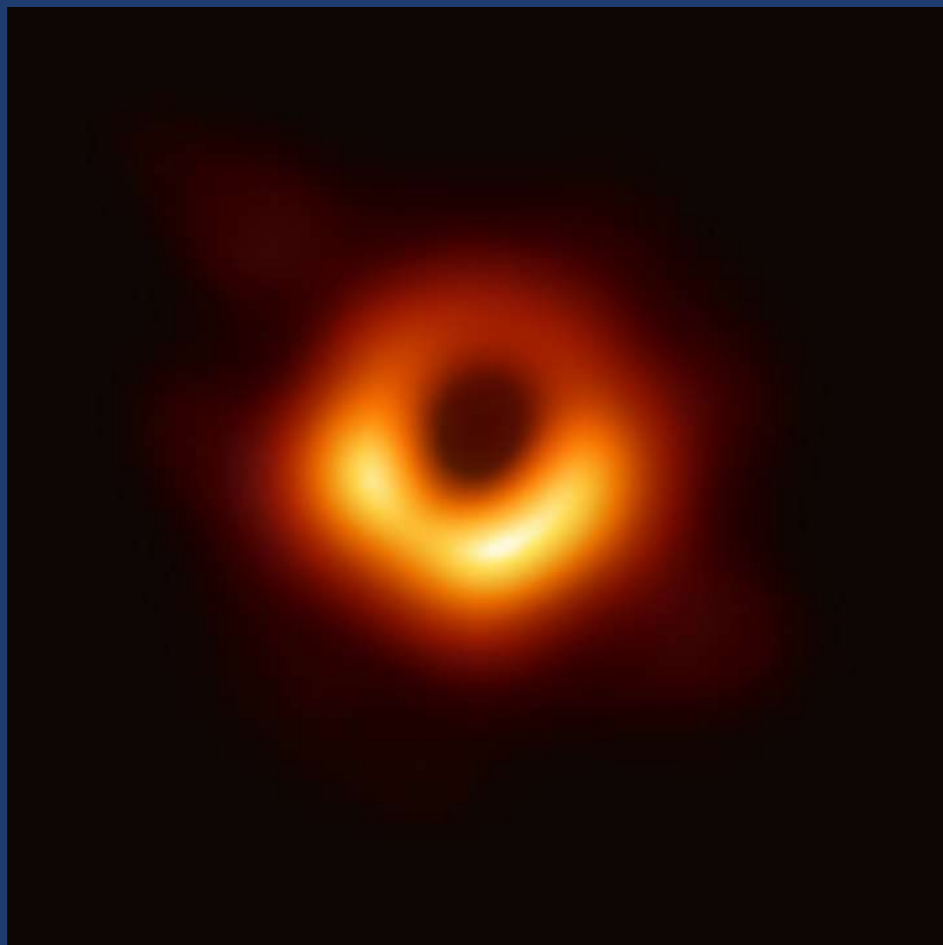


# ČRNE LUKNJE IN HOLOGRAFIJA

LJUBLJANA, 13.10.2022

# 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)]



HOLOGRAM

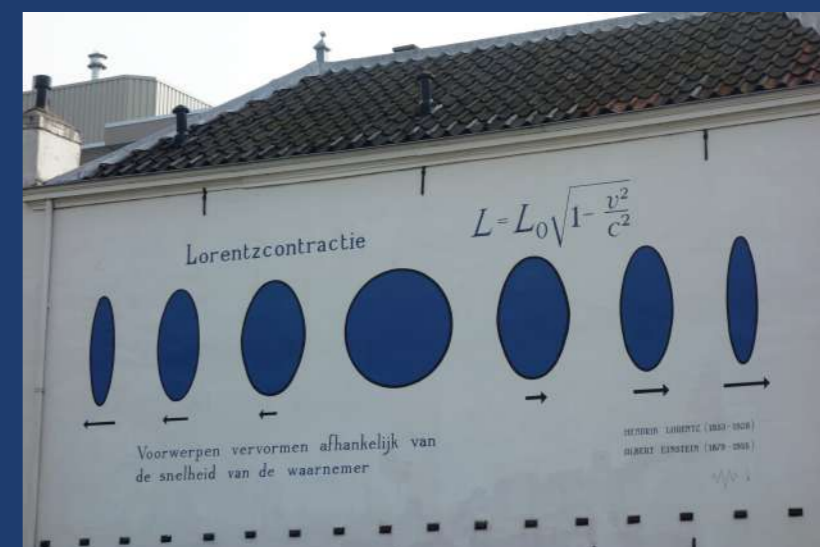
# PLAN

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

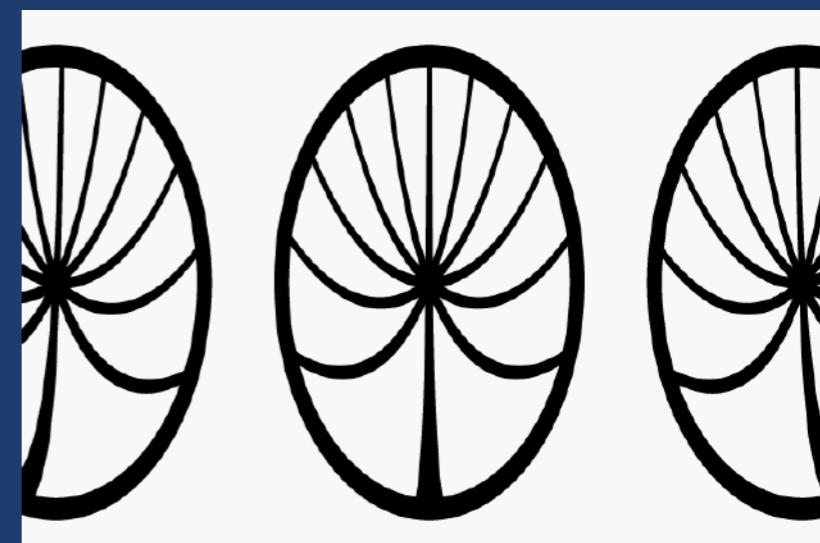
# RELATIVNOST IN PROSTOR-ČAS

# 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
- slavna posledica:  $E = mc^2$



[Leiden, Nizozemska]

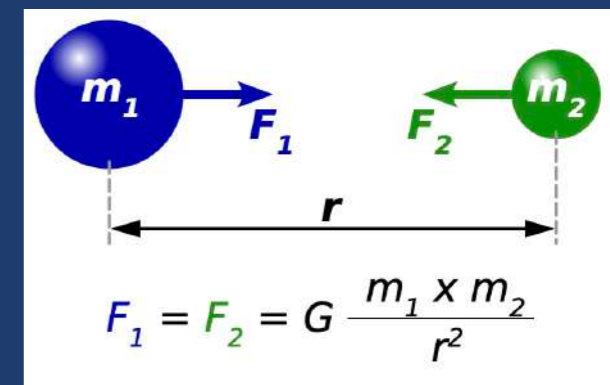


[animacije: Thierry Dugnonle]

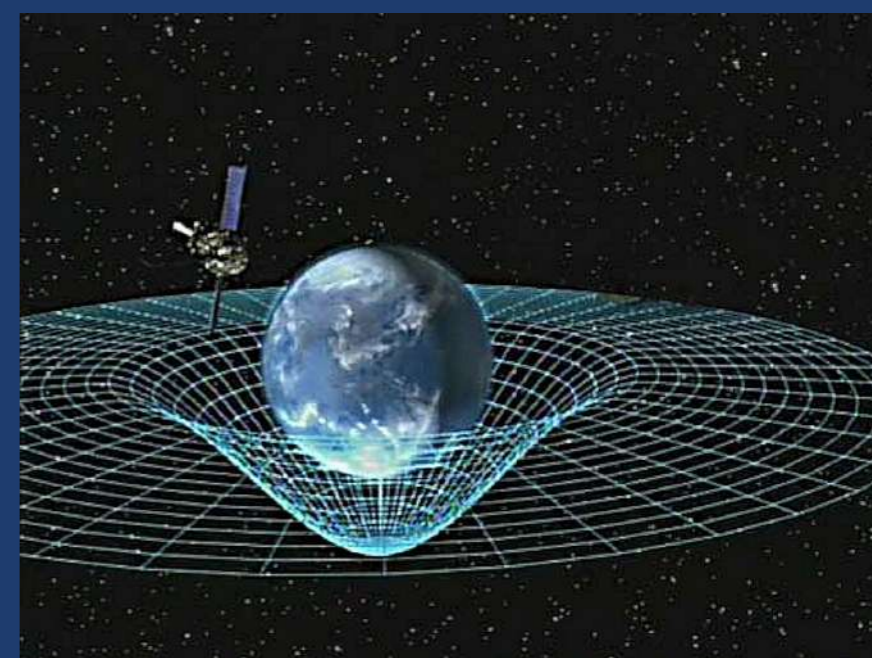
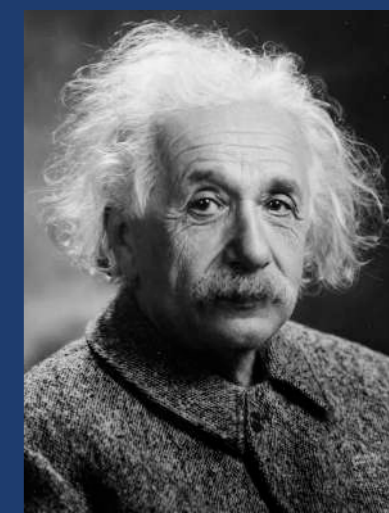
SPLOŠNA TEORIJA  
RELATIVNOSTI IN ČRNE LUKNJE

# SPLOŠNA TEORIJA RELATIVNOSTI

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



[slika: Dna-Dennis; WikiCommons]



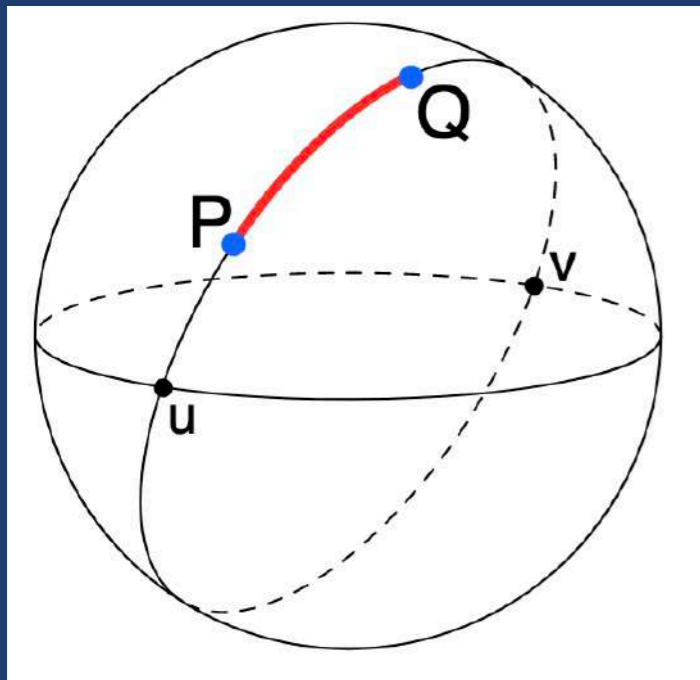
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

'mera' ukrivljenosti  
geometrije

energija/masa  
materije

# 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)

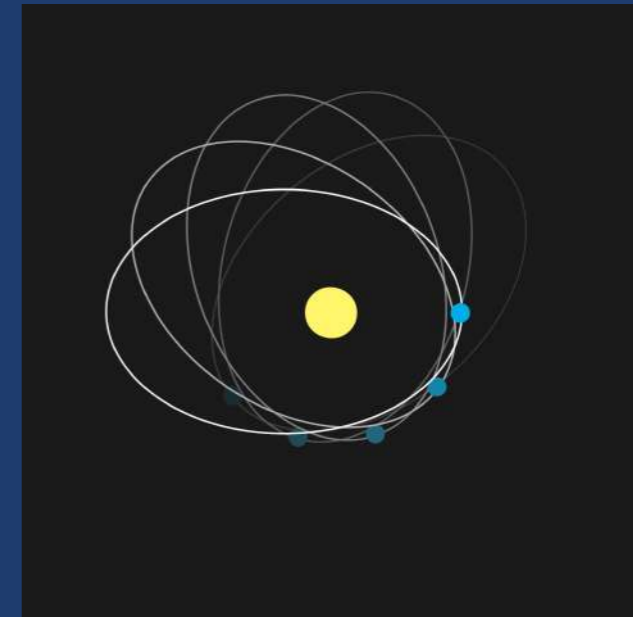


- geometrija je lahko zelo komplicirana

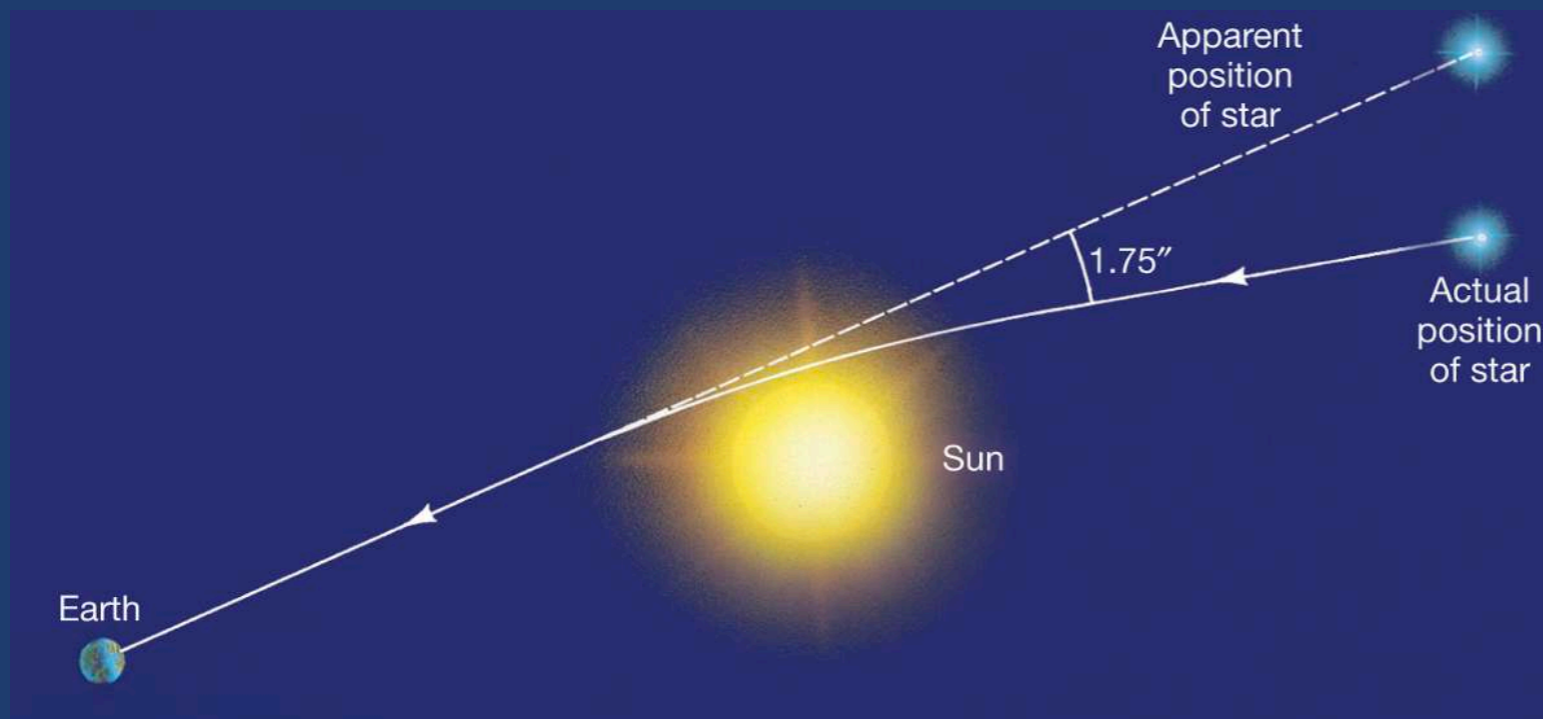


# POSLEDICE GRAVITACIJE KOT UKRIVLJENOSTI

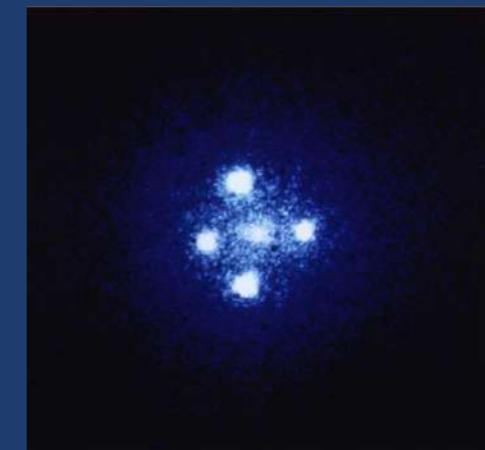
- spremembe trajektorij planetov  
Newton-Kepler: elipse  
splošna relativnost: elipse 'rotirajo'  
primer: Merkurjev perihelij



- ukrivljanje poti svetlobe



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



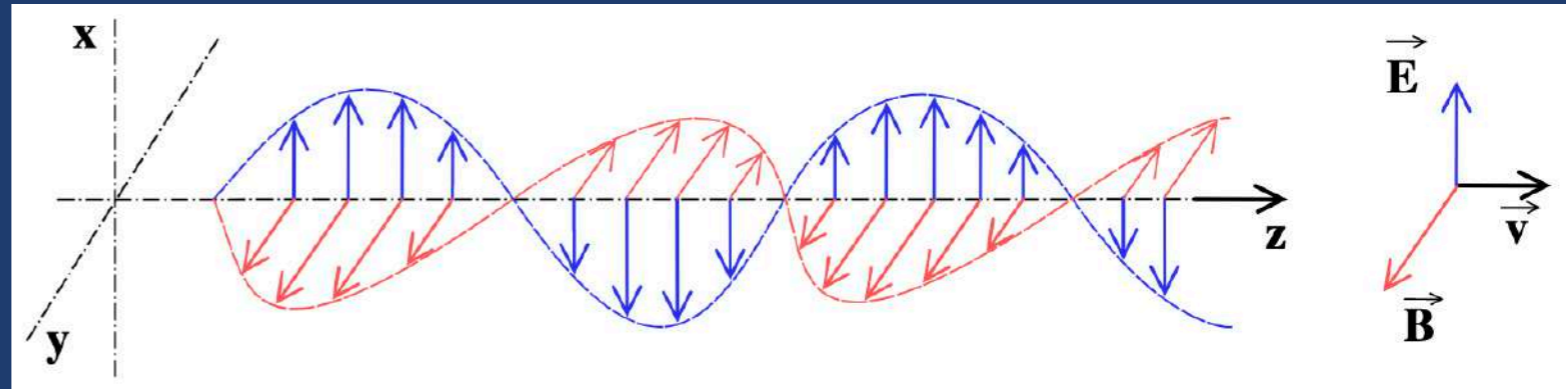
[Einsteinov križ]



[Einsteinov prstan]

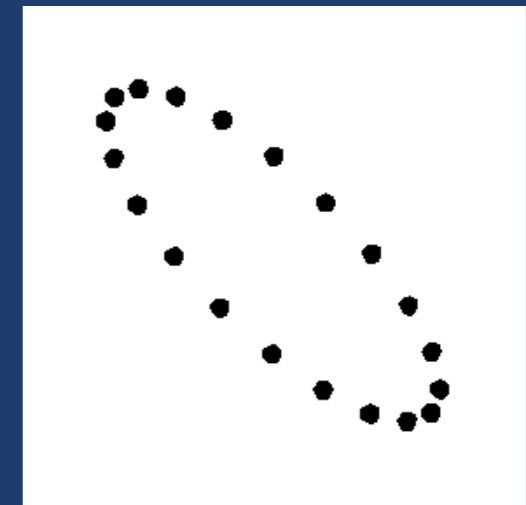
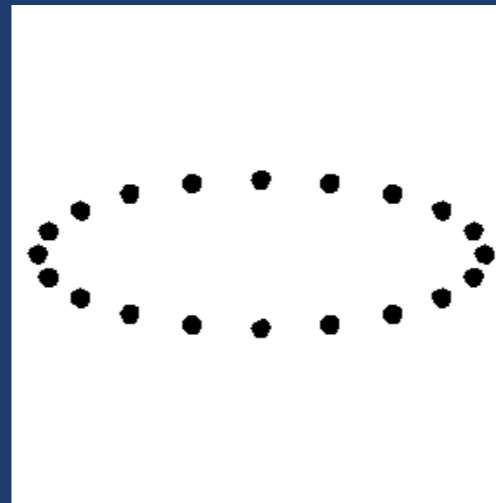
# GRAVITACIJSKI VALOVI

- svetloba je valovanje, ki potuje s konstantno svetlobno hitrostjo



[slika: SuperManu; WikiCommons]

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



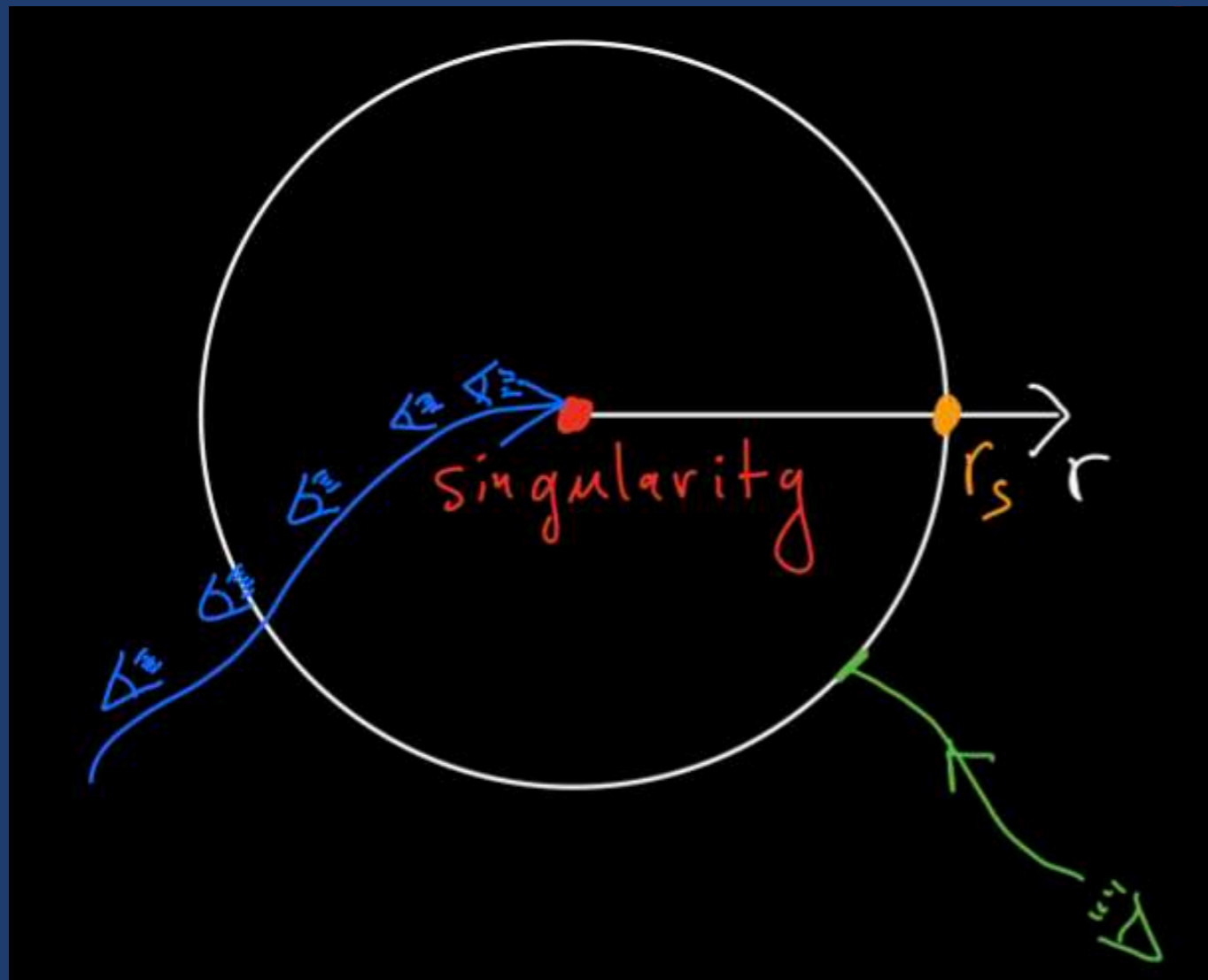
- 'nosilci' sile: fotoni in gravitoni [kvantna mehanika]



# 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

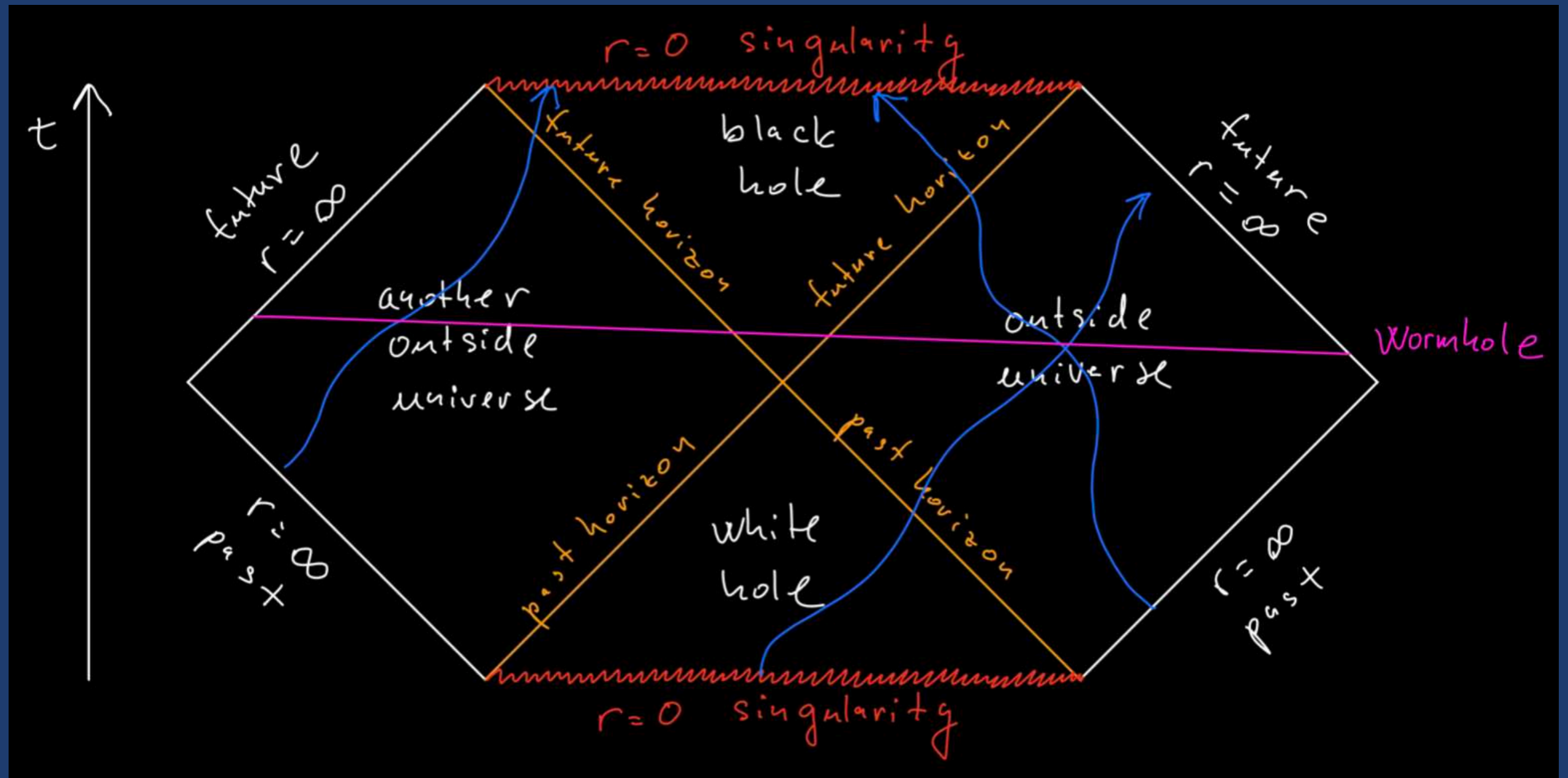
- gravitacijsko lečenje galaksije za črno luknjo zaradi ukrivljanja svetlobe



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

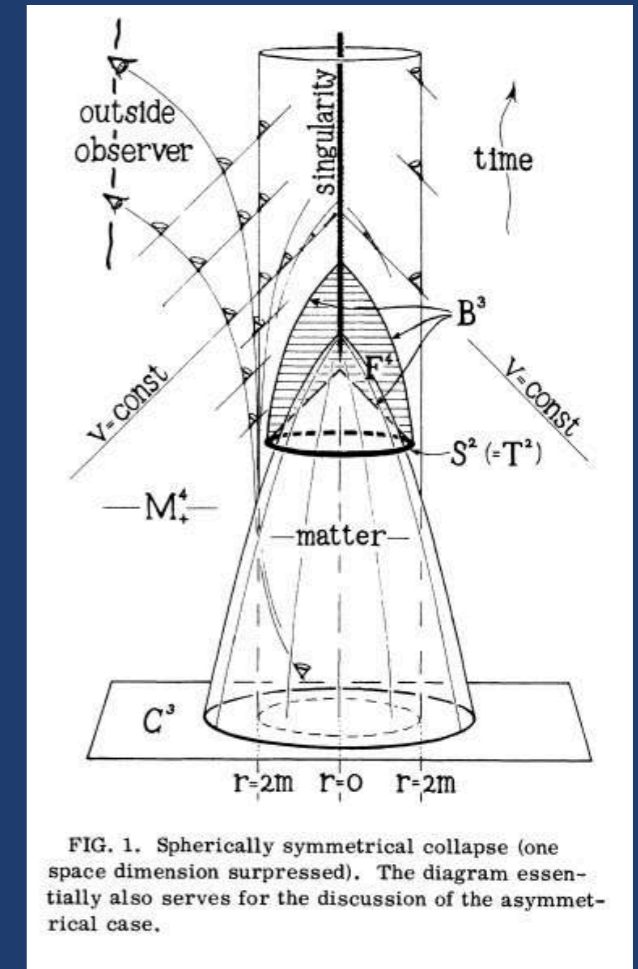
# ČRNE LUKNJE

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



# ČRNE LUKNJE

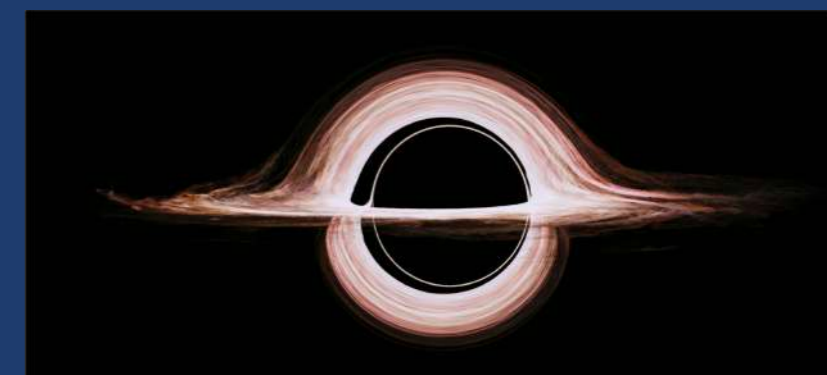
- kako ustvarimo črno luknjo?
  - standardno: kolaps materije je generičen (dokler masa vsaj 2 - 4 mase Sonca)
  - manj standardno: brez materije (vakuum), samo z gravitacijo
- črne luknje so najbolj 'univerzalni' objekti v fiziki
- 'no-hair' teorem: obstaja zelo omejeno število različnih tipov črnih lukenj



[Penrose (1965)]

Nobelova nagrada 2020

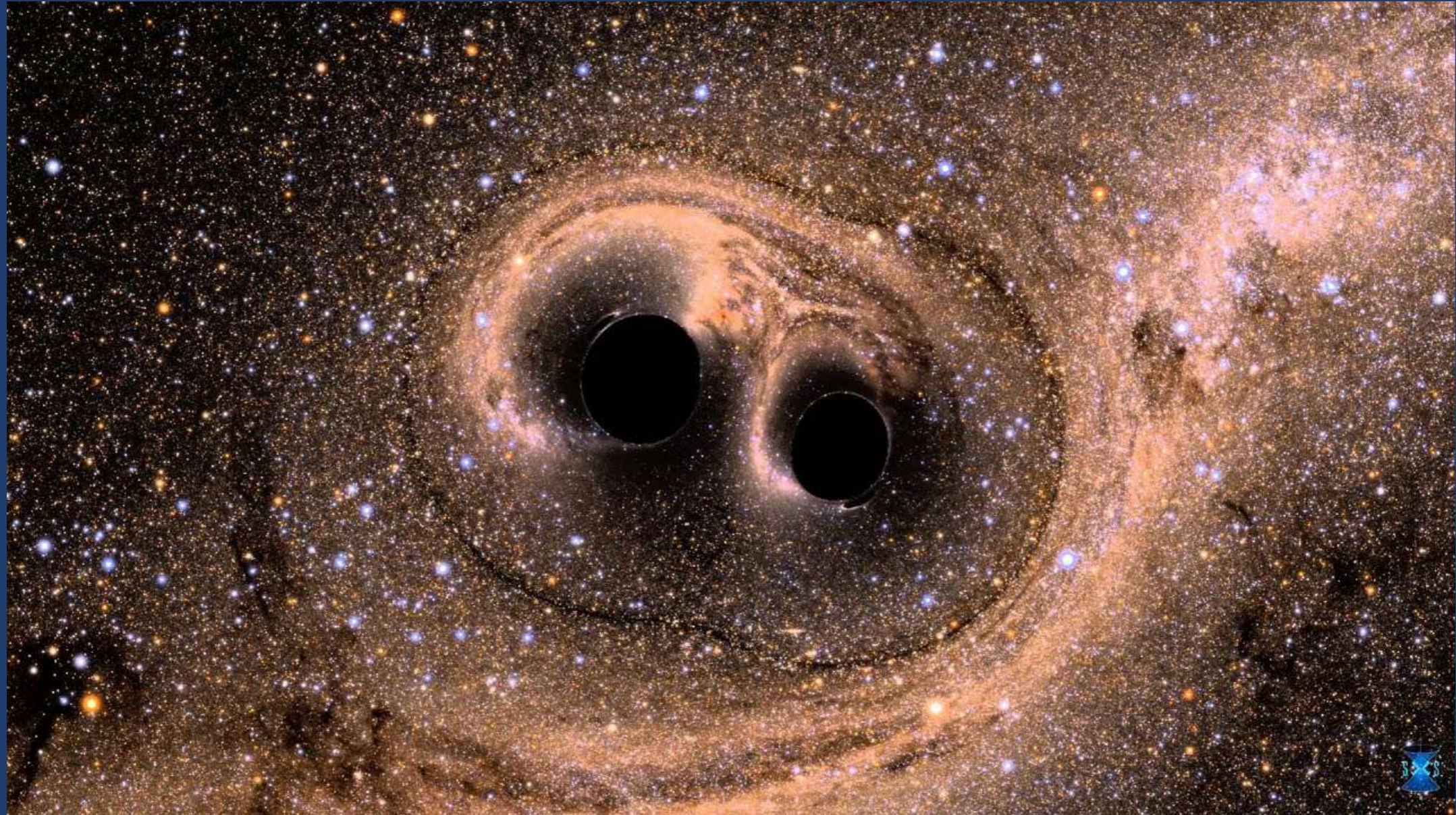
Kerrova črna luknja



[film Interstellar]

OPAZOVALNI DOKAZI ZA  
OBSTOJ ČRNIH LUKENJ

# TRK DVEH ČRNIH LUKENJ



gravitacijsko lečenje

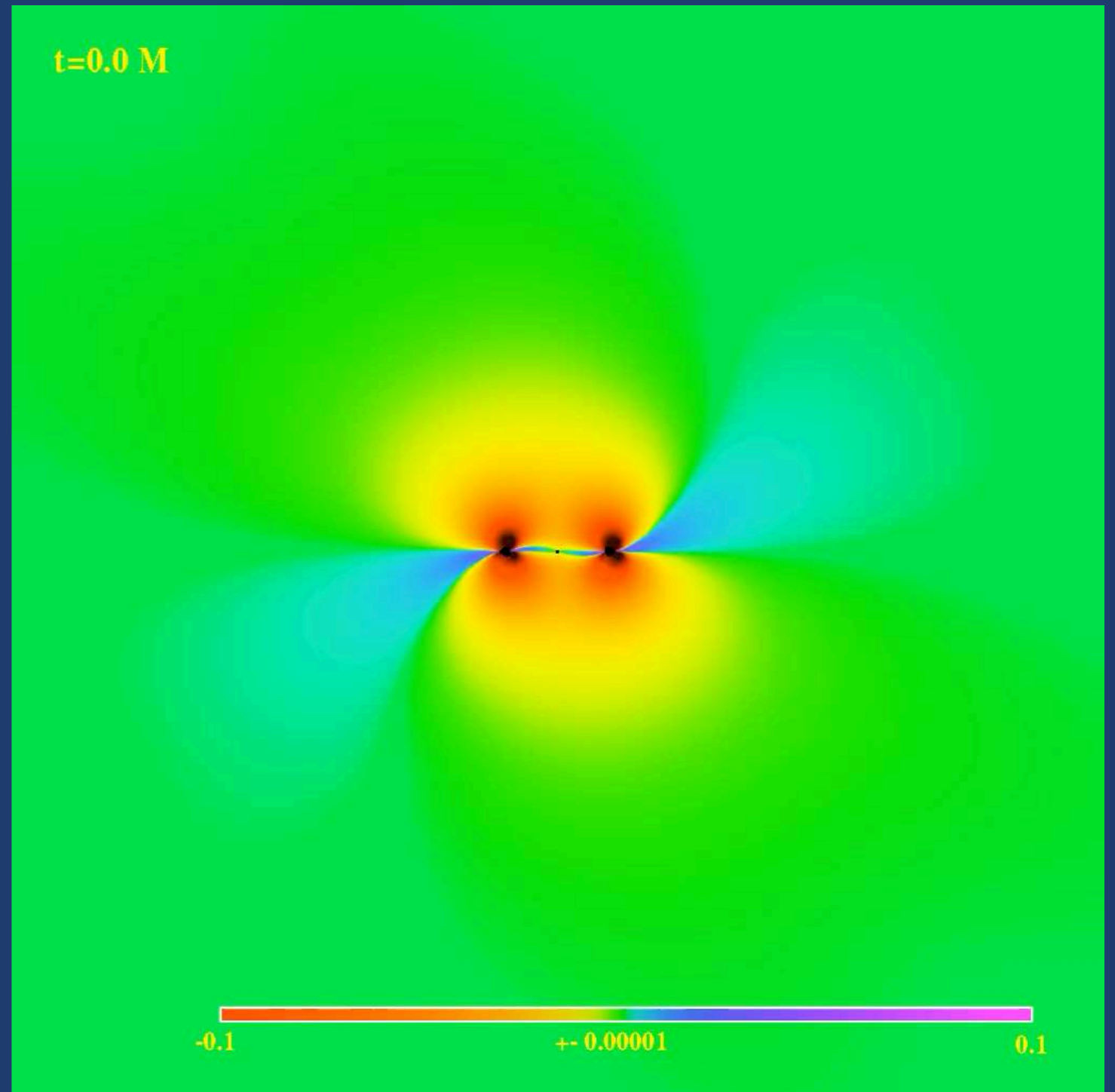
[SXS Collaboration; [https://www.youtube.com/watch?v=Zt8Z\\_uzG71o&t=1s](https://www.youtube.com/watch?v=Zt8Z_uzG71o&t=1s)]



# 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

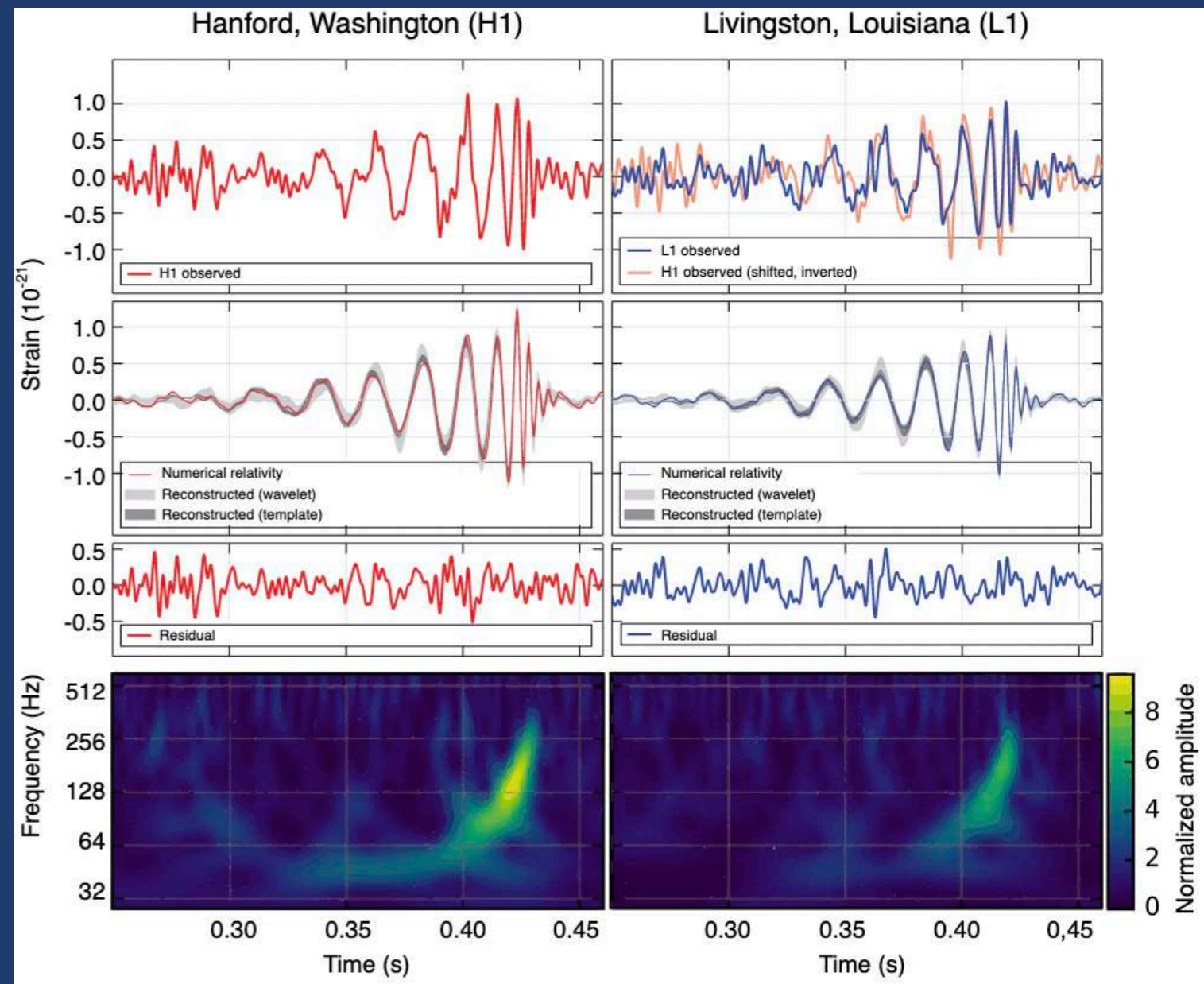
- 1. opažen trk dveh črnih lukenj: 29 in 36 mas Sonca
- prva detekcija gravitacijskih valov:  
**GW150914**  
[LIGO/VIRGO]



čas med signaloma: 7ms

# TRK POVZROČI GRAVITACIJSKE VALOVE

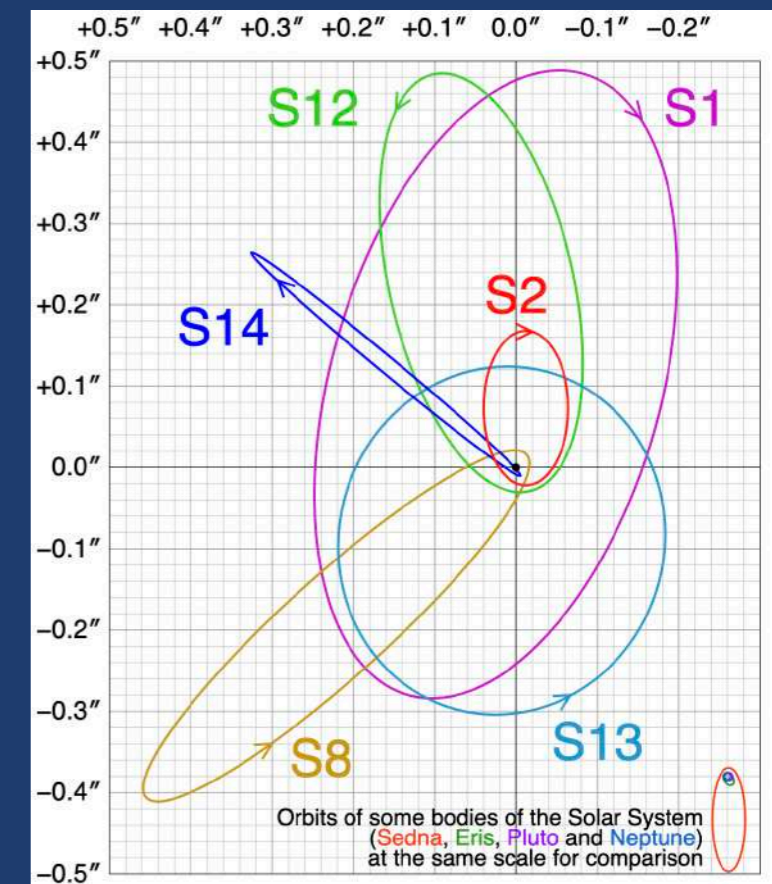
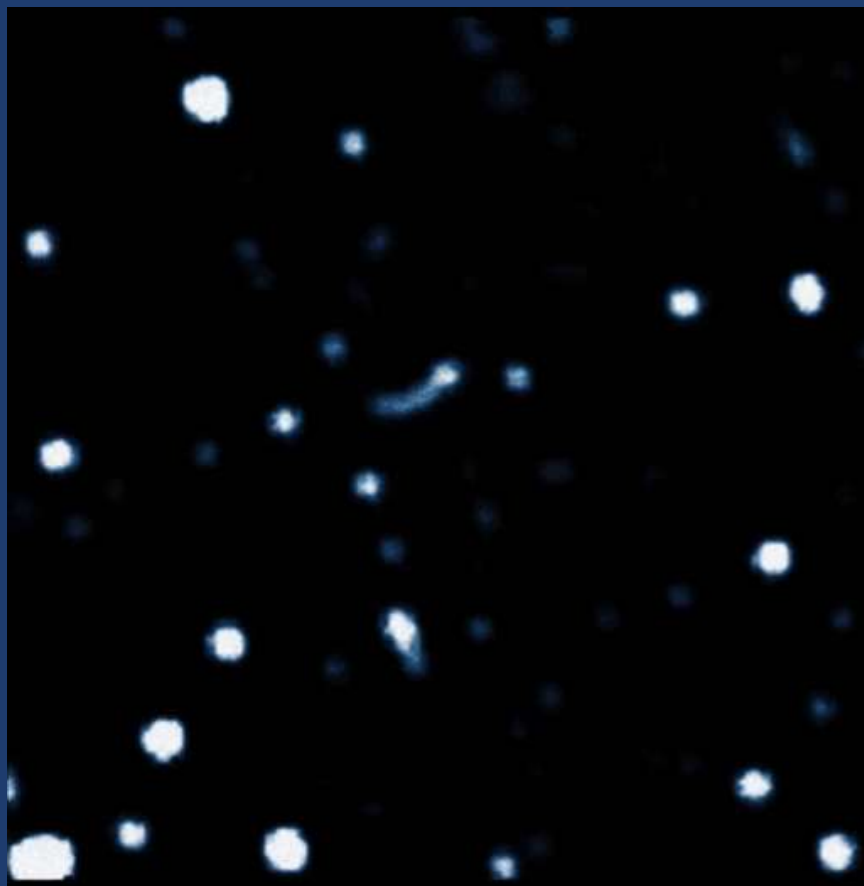
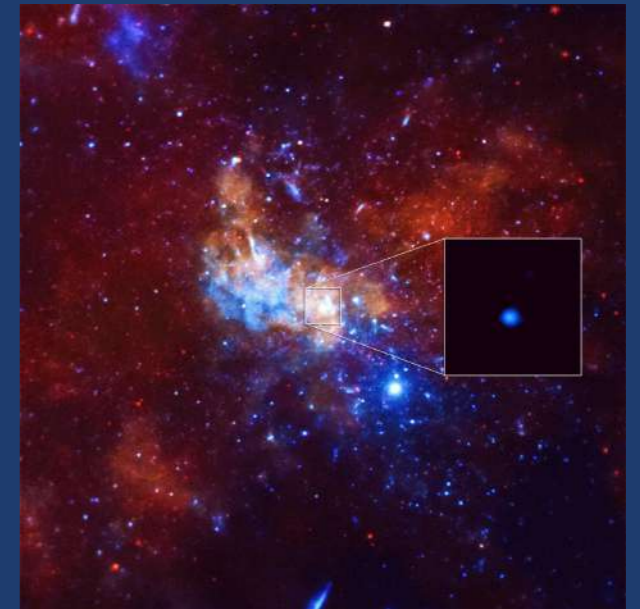
- 1. opažen trk dveh črnih lukenj: 29 in 36 mas Sonca
- prva detekcija gravitacijskih valov:  
**GW150914**  
[LIGO/VIRGO]



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

# ČRNE LUKNJE SO V CENTRIH GALAKSIJ

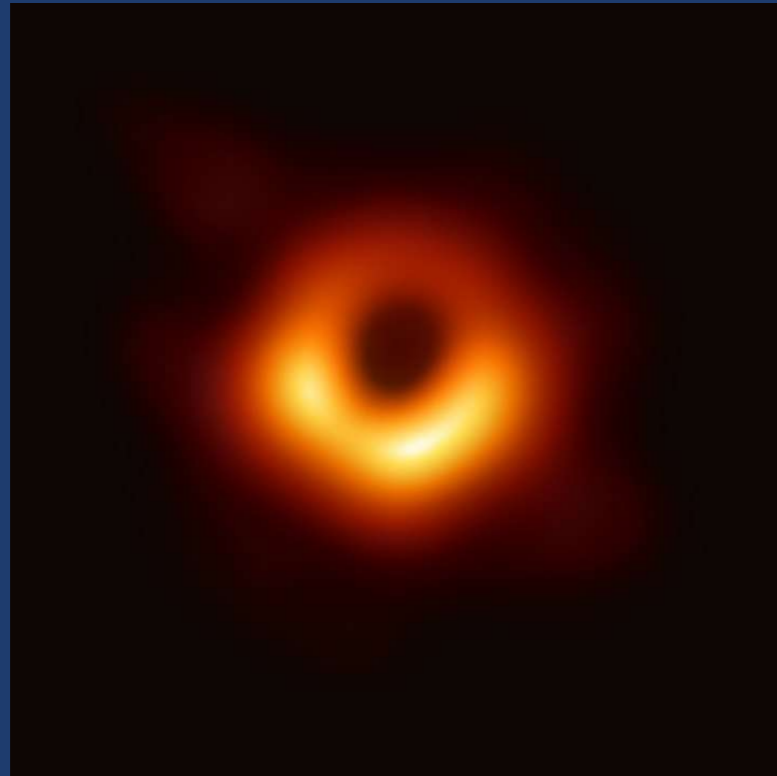
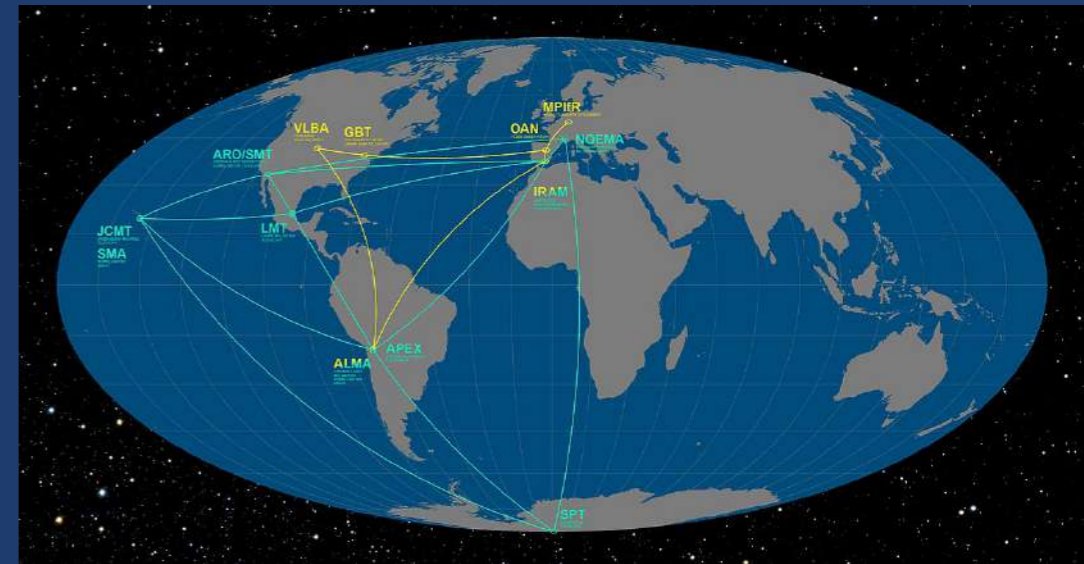
- center naše galaksije (Rimske ceste):  
Sagittarius A\* je (supermasivna) črna luknja oddaljena 25,640 svetlobnih let, z maso 4 milijone mas Sonca
- centri 'vseh' galaksij so črne luknje



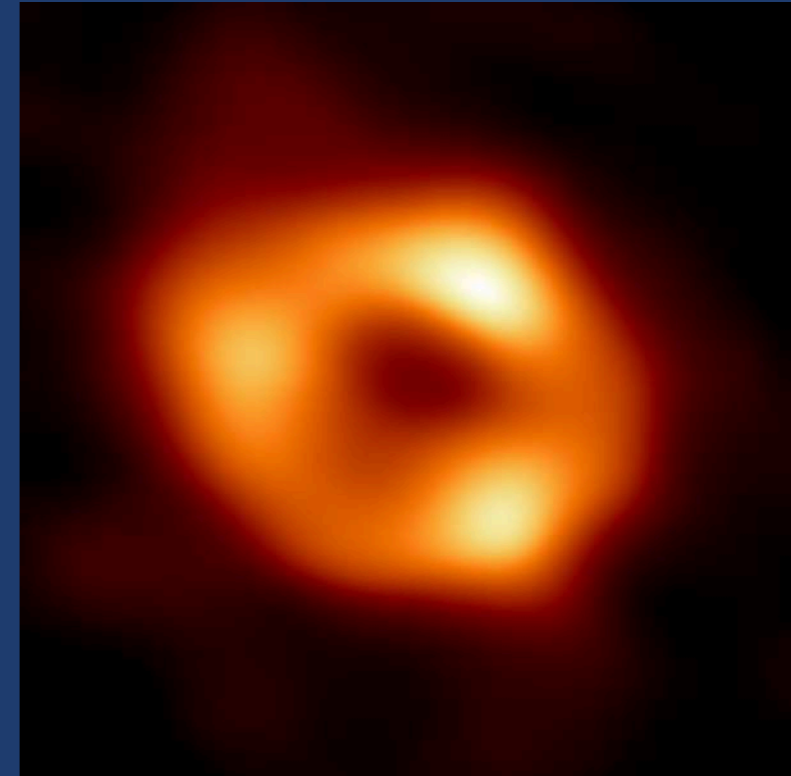
[F. Eisenhauer, et.al.,  
The Astrophysical Journal (2005)]

# 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\*)

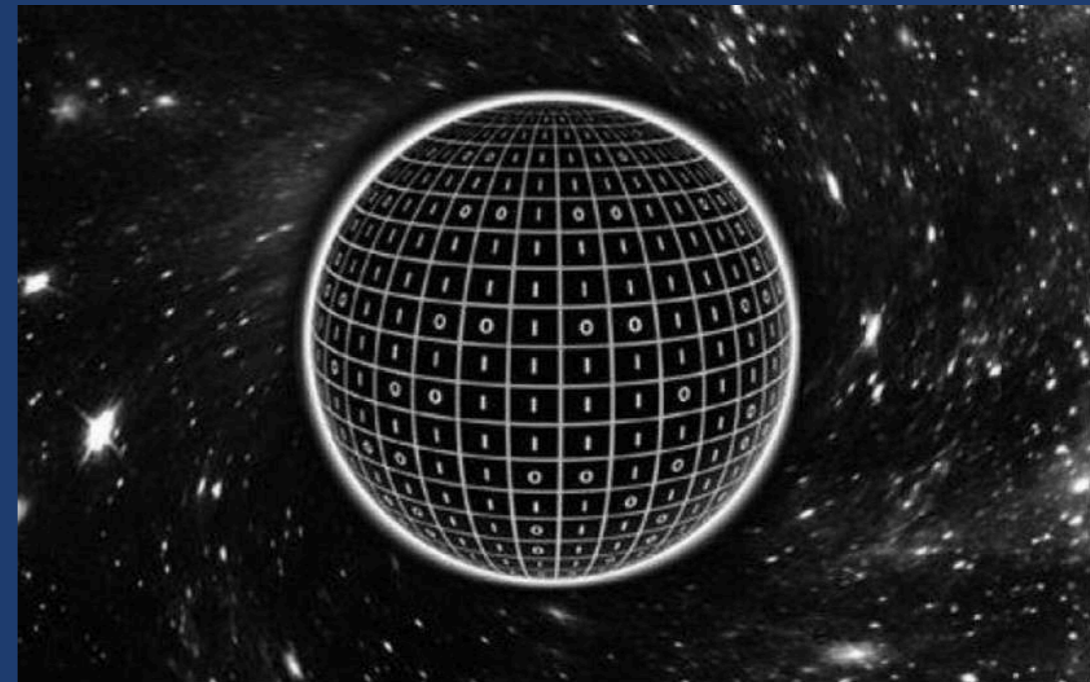
HOLOGRAFIJA

# ČRNE LUKNJE IN KVANTNA GRAVITACIJA

- črne luknje sevajo s temperaturo – **Hawkingovo sevanje**  
za Sagittarius A\* je temperatura cca.  $10^{-14}$  K
- črne luknje se obnašajo kot termodinamska telesa
- entropija je proporcionalna površini in ne volumnu
- Bekenstein-Hawking formula

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

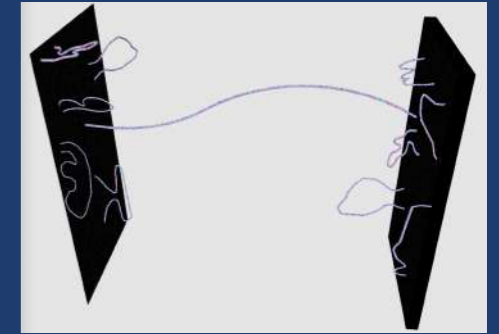
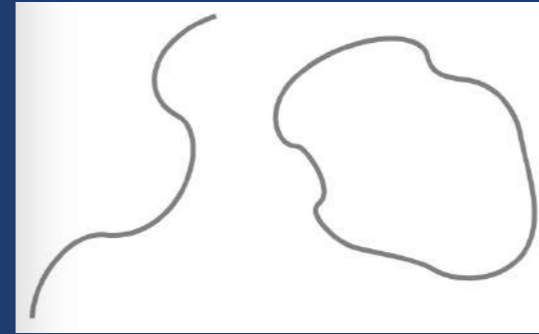
- maksimalna entropija (informacija)
- **hologram in hologrfski princip** [’t Hooft, ...]



[slika: Bakker, van der Schaar]

# TEORIJA STRUN IN HOLOGRAFIJA

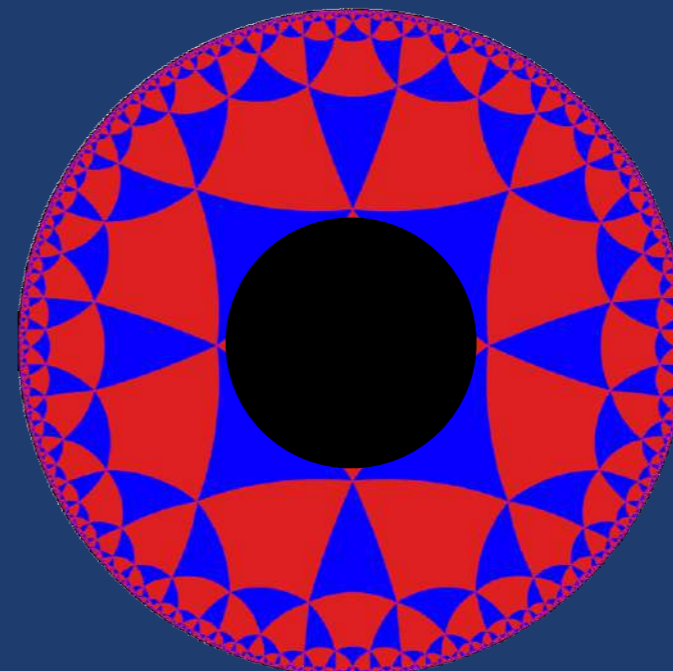
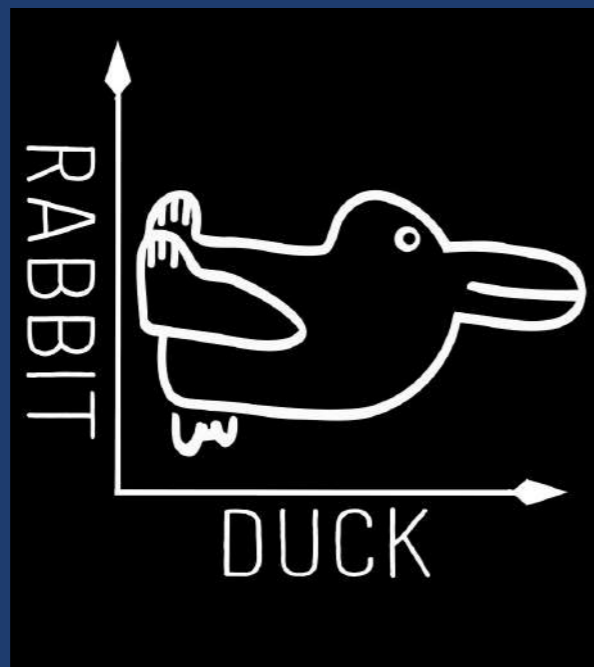
- teorija strun je kvantna teorija gravitacije



... in kandidatka za 'teorijo vsega':

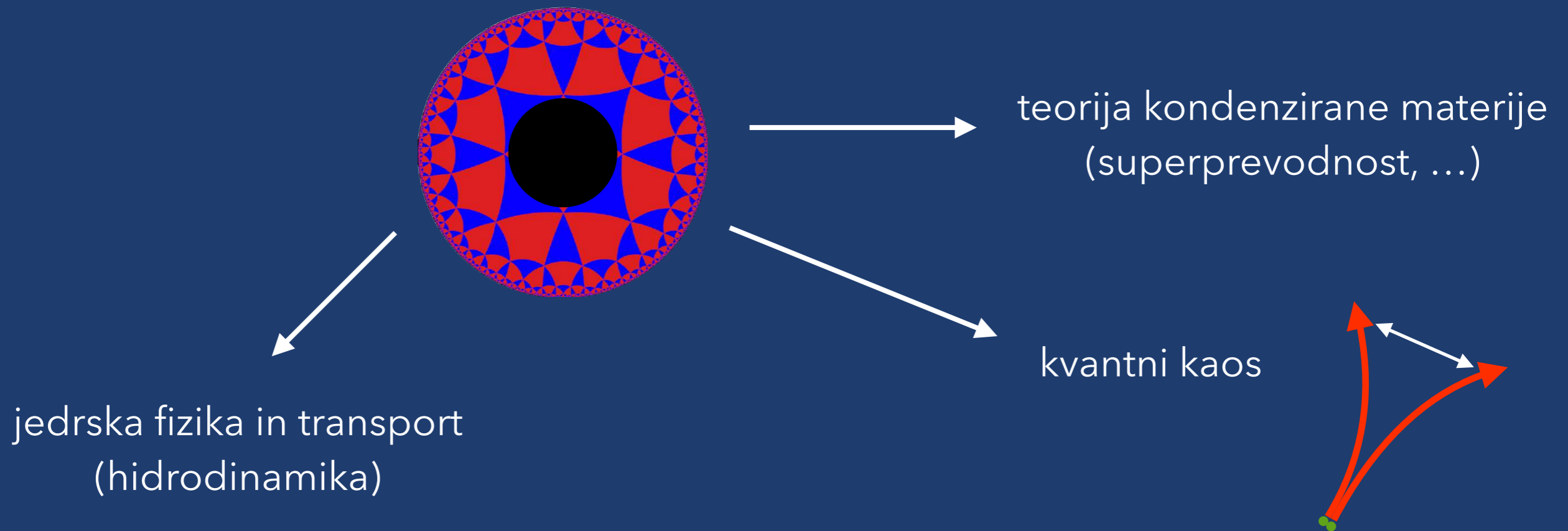
elektromagnetizem + šibka + močna + ... + gravitacija + ostali delci

- 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!

