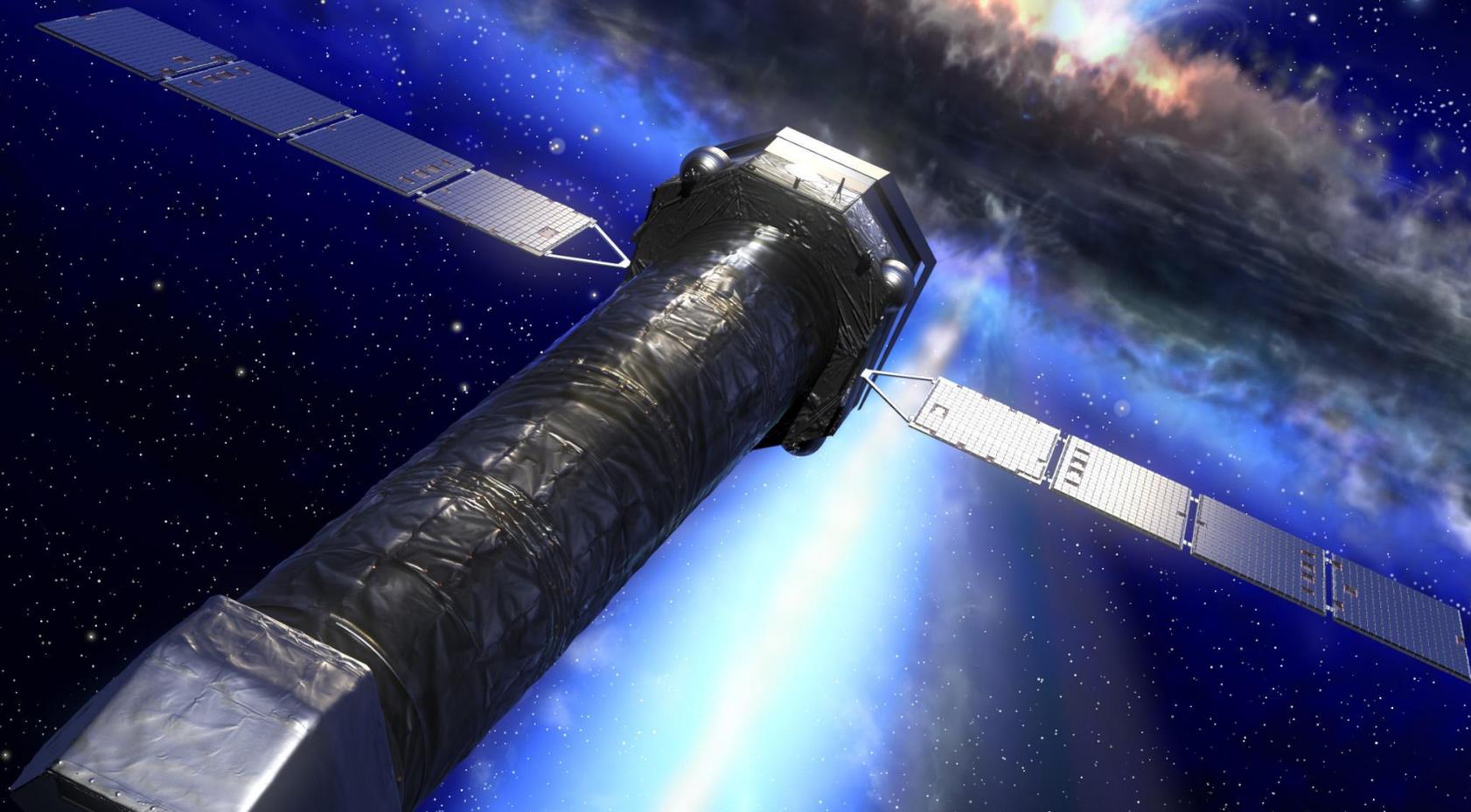


Evropské mise LISA a newATHENA: jak vznikly superhmotné černé díry?



Jiří Svoboda
Astronomický ústav AV ČR
*Přírodovědecká fakulta,
Masarykova univerzita, Brno,
25. března 2025*

Astronomický ústav Akademie věd ČR

Pražská pobočka

Observatoř v Ondřejově

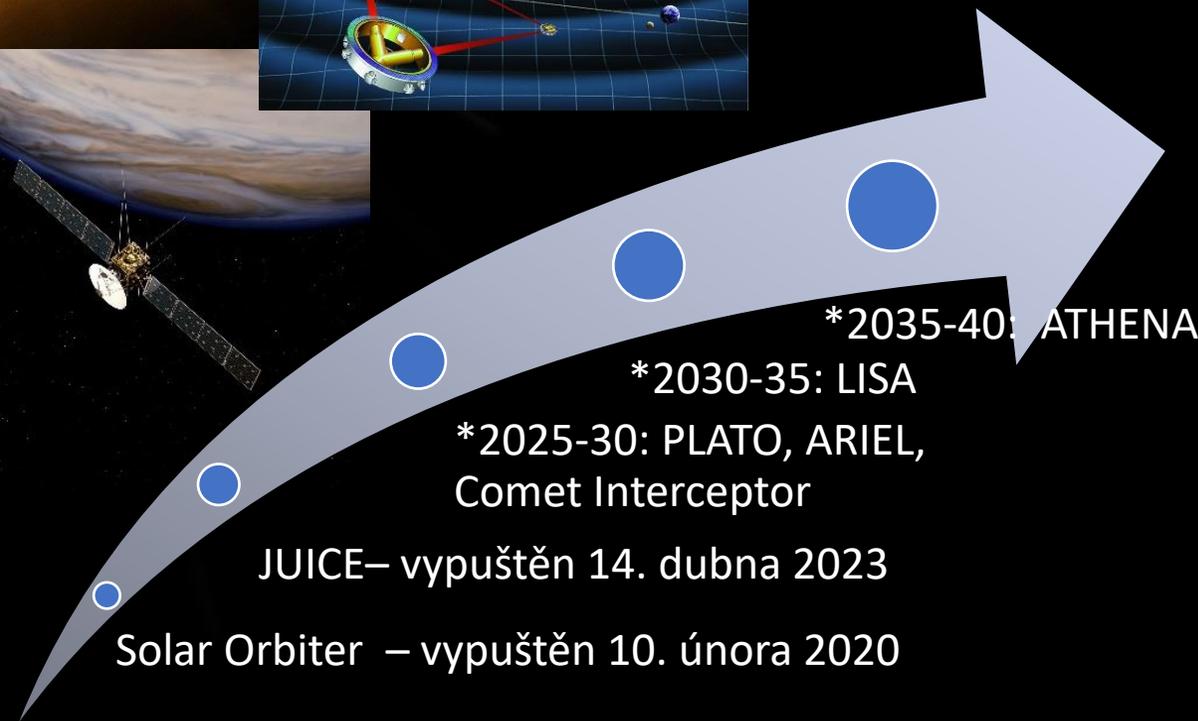
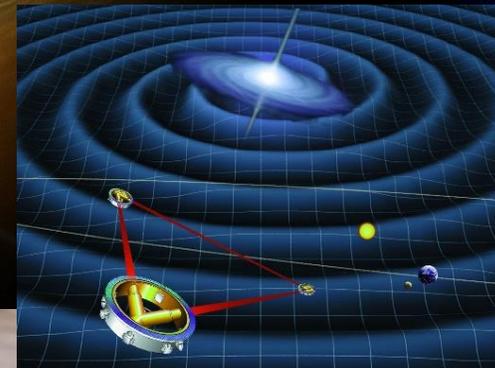
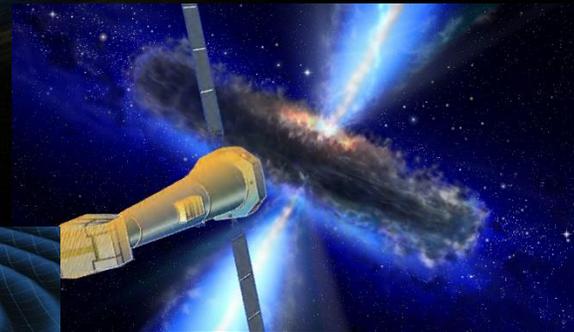
Oddělení galaxií a planetárních systémů

- Pražská relativistická skupina



Strategie AV 21 – Vesmír pro lidstvo

- 12 ústavů AV ČR
- 21 výzkumných témat
- mezinárodní vědecké kosmické projekty
- spolupráce s průmyslem, státní správou a univerzitami



Co víte o černých dírách ve vesmíru?



© IRAP/CNRS/UT3/CNES/Fab&Fab.

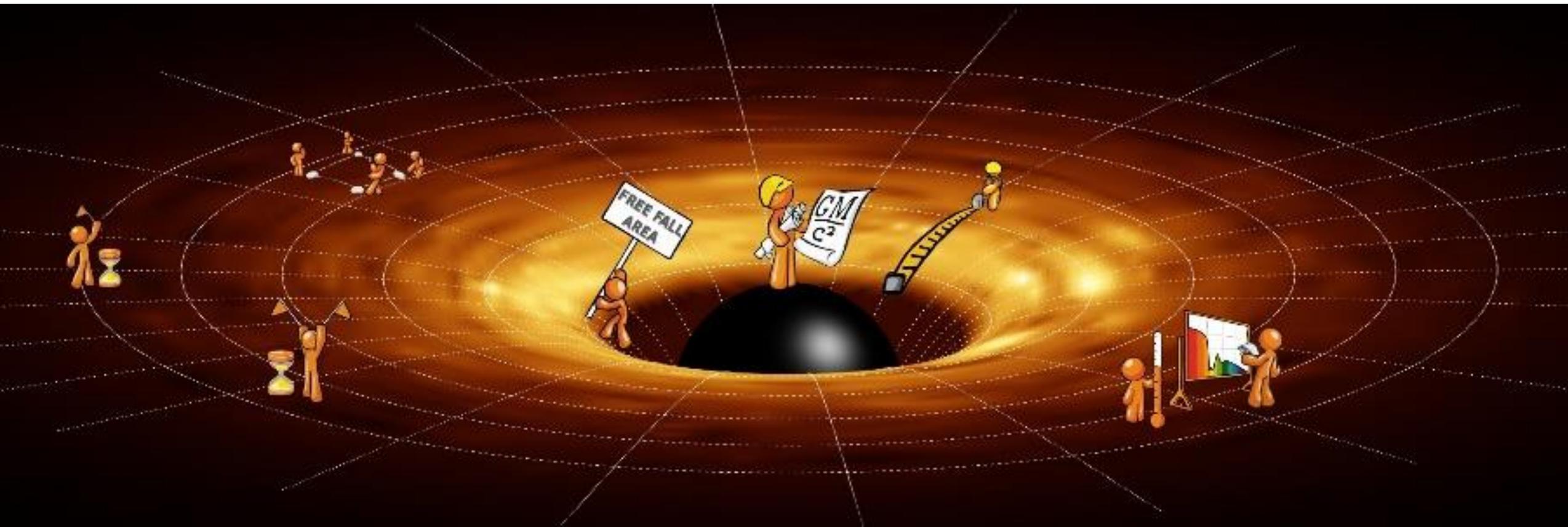
Umělecká představa akrece hmoty na černou díru

Co víte o černých dírách ve vesmíru?

- mají silnou gravitaci...
- cokoli dovnitř spadne, nedostane se ven...

Černé díry

- jsou ohraničené tzv. **horizontem událostí**, zpod kterého se nedostane nic ani světlo



Co víte o černých dírách ve vesmíru?

- mají silnou gravitaci...
- cokoli dovnitř spadne, nedostane se ven...
- ...a to ani světlo

–takže nemohou být vidět?



Kredit: Michal Bursa,
Astronomický ústav AV ČR

První snímek černé díry
v M87 (Event Horizon
Telescope, duben 2019)



Vraťme se ale ještě zpět v čase...



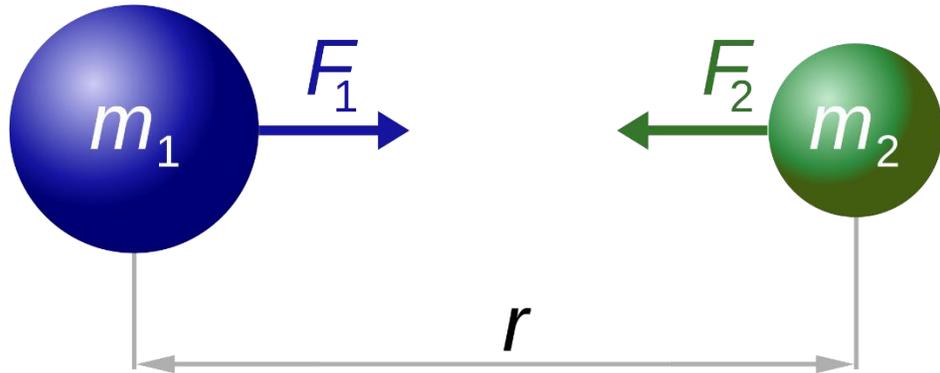
2023

1687

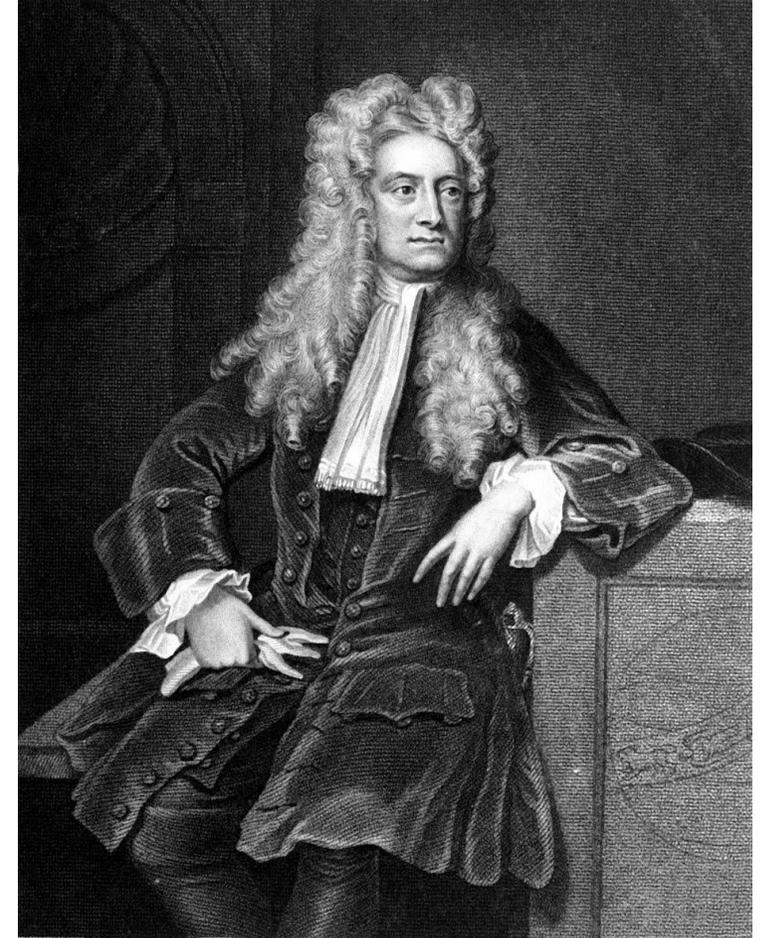


Newtonův gravitační zákon

- Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)
 - 3 pohybové zákony
 - gravitační zákon
 - základy klasické mechaniky



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$



Kosmická rychlost

- první = rychlost, kterou může těleso kroužit okolo Země, aniž by spadlo na její povrch
- druhá (parabolická) = úniková rychlost, jakou musí získat těleso, aby se vymanilo z gravitačního pole (Země: 11,2 km/s)

$$\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{Mm}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Prvotní ideje o černých dírách

- mohou existovat velmi hmotné hvězdy, které nevidíme?
- světlo má konečnou rychlost ($c \approx 300\,000$ km/s)
- co když je úniková rychlost $>$ rychlost světla?

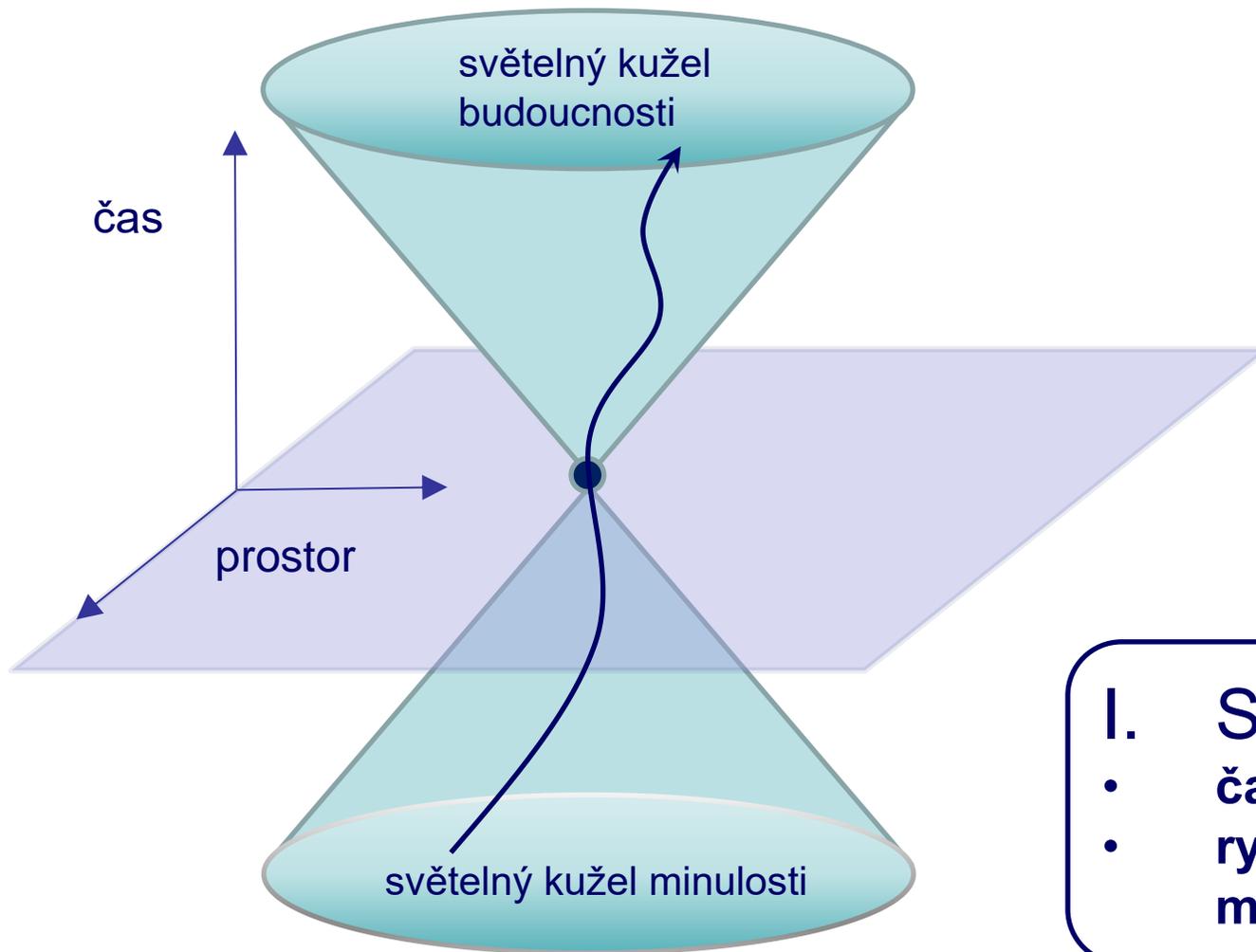
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

když je hmotnost M příliš velká,
přesněji poměr M/r ,
pak úniková rychlost $v > c$!



John Michell, 1783

Černé díry a teorie relativity



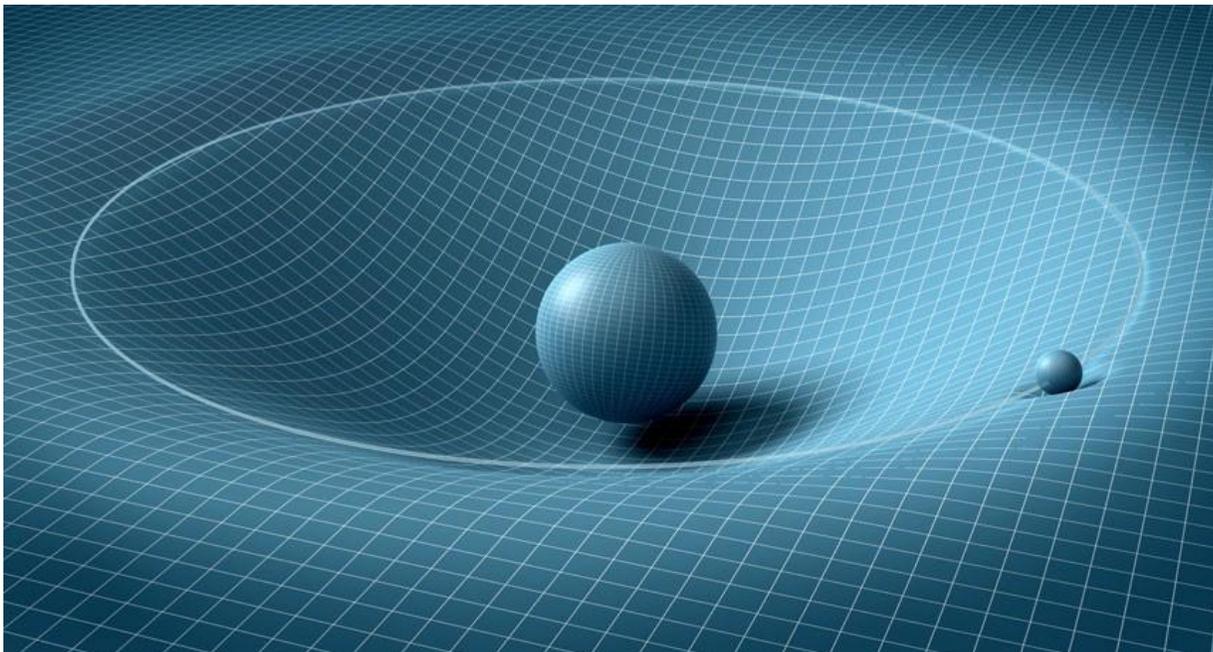
Albert Einstein

- I. Speciální teorie relativity (1905)
 - čas není absolutní
 - rychlost světla je konečná a maximální možná (přibližně 300 000 km/s)

Černé díry a teorie relativity

II. Obecná teorie relativity (1915)

- **gravitaci** lze popsat jako **zakřivení prostoročasu**
- hmota určuje, jak se má prostoročas zakřivovat a prostoročas určuje, jak se má hmota pohybovat



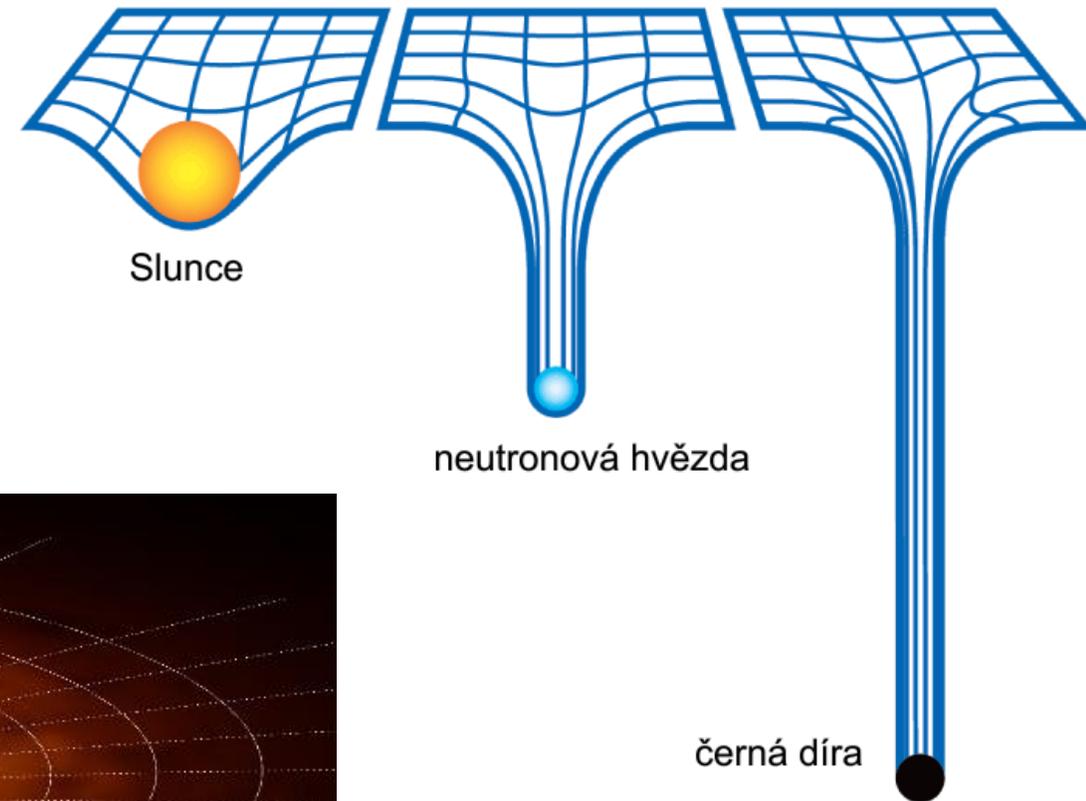
Albert Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Černé díry a teorie relativity

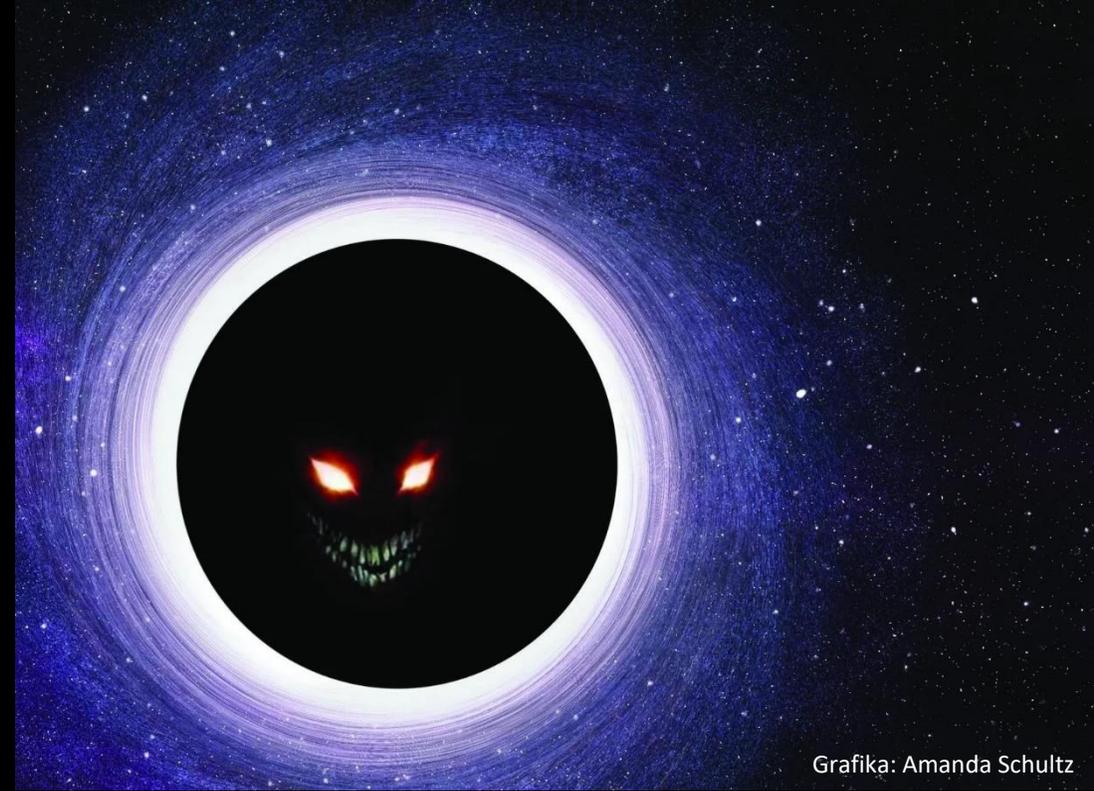
Co se stane, když bude mnoho hmoty v malém objemu?

- velké hustotě brání atomové vazby, tlak záření (v nitrech hvězd), kvantová fyzika (tlak elektronů a neutronů)
- vše ale jen do určité míry



Kredit: Michal Bursa, Astronomický ústav AV ČR

horizont událostí: $R = \frac{(2)GM}{c^2}$

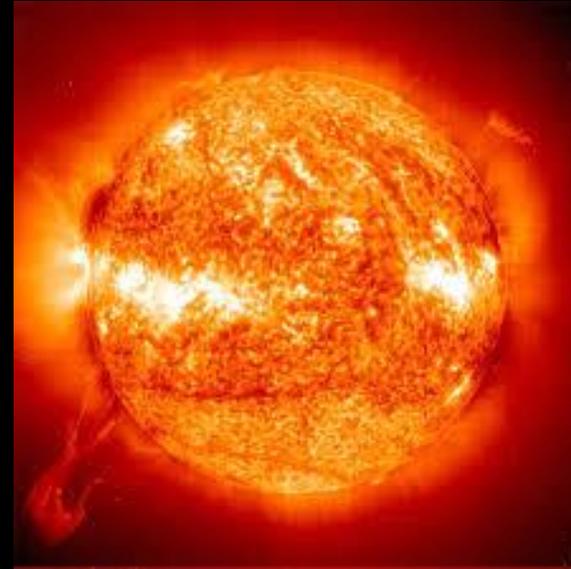
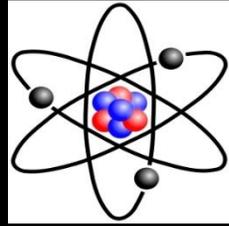


Grafika: Amanda Schultz

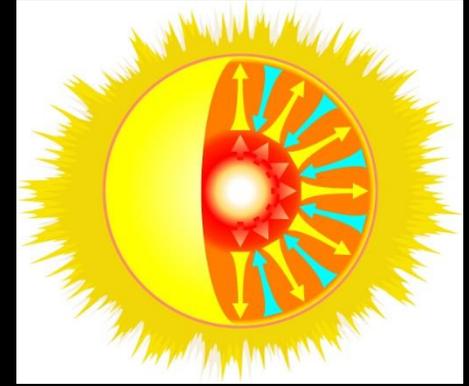
Může se Země nebo Slunce jen tak
zhroutit v černou díru?



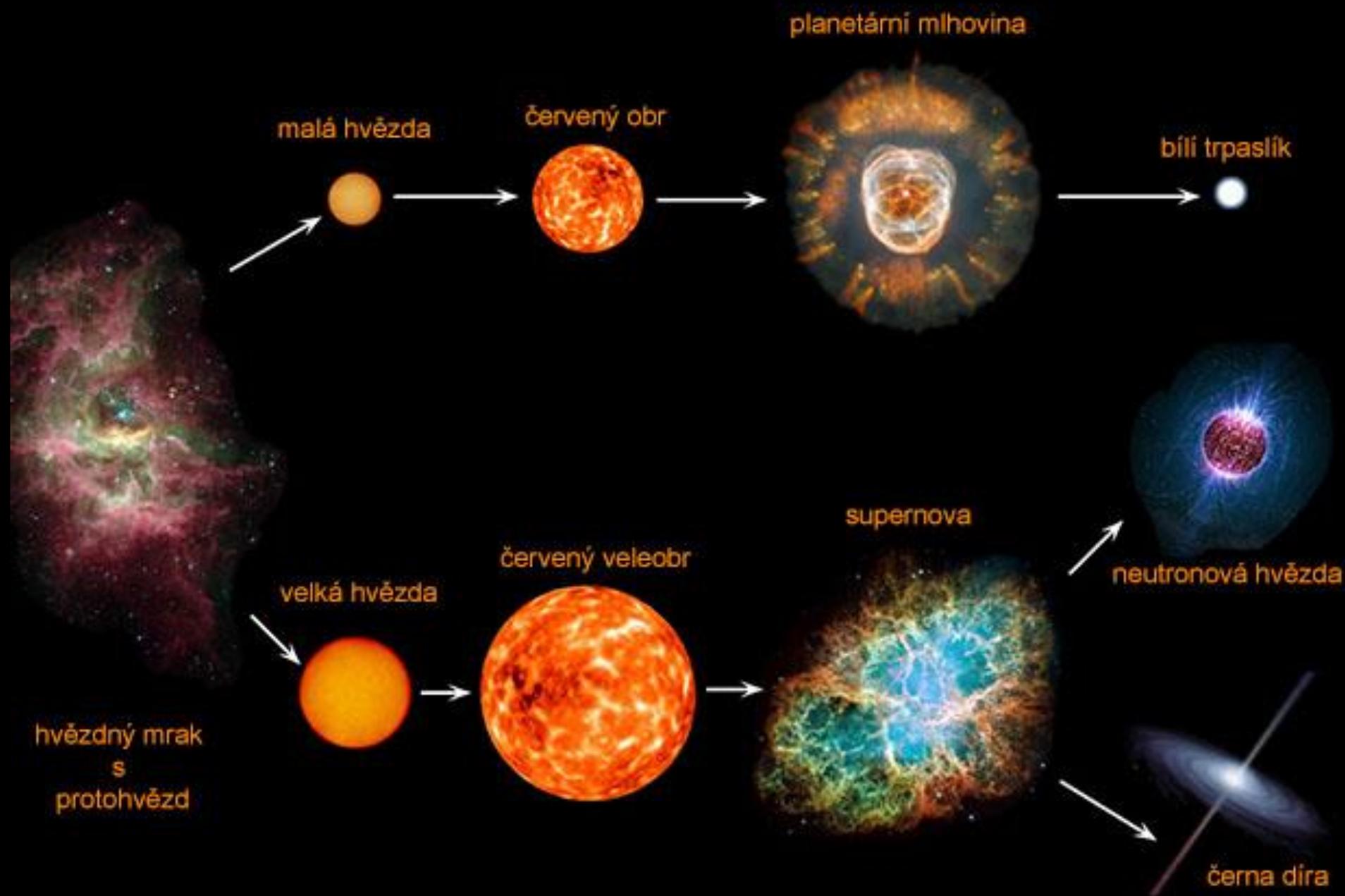
Země

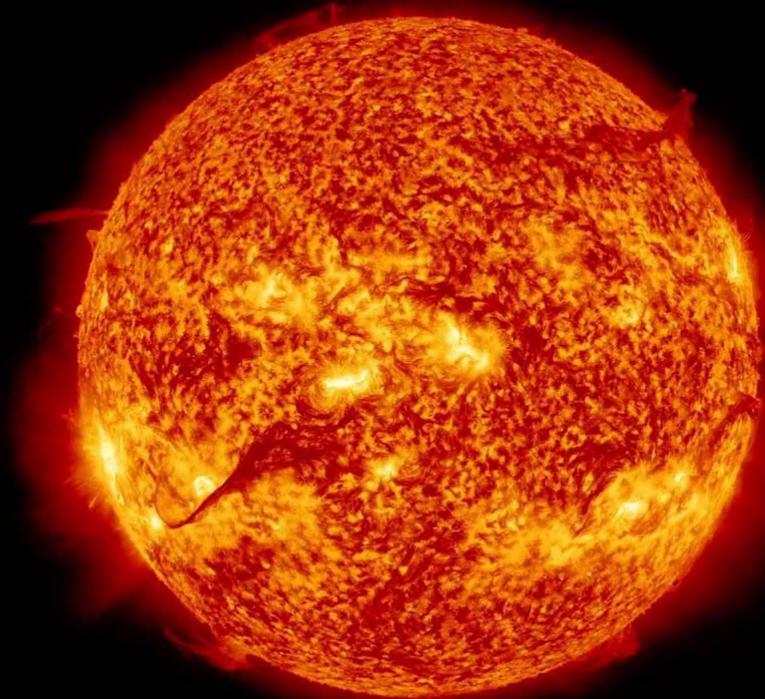


Slunce



Život Hvězdy

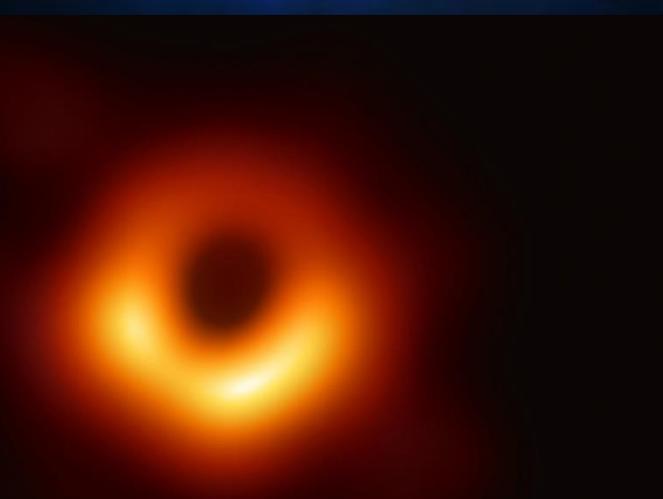
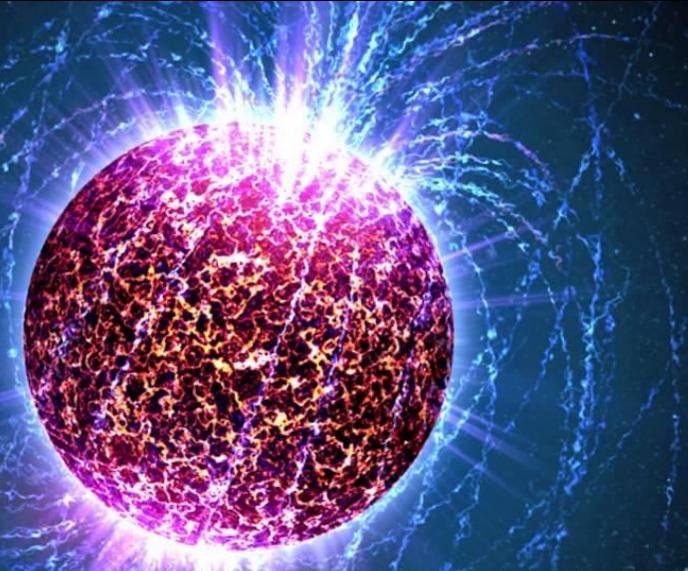




bílý trpaslík
100 000 °C
velikost jako Země



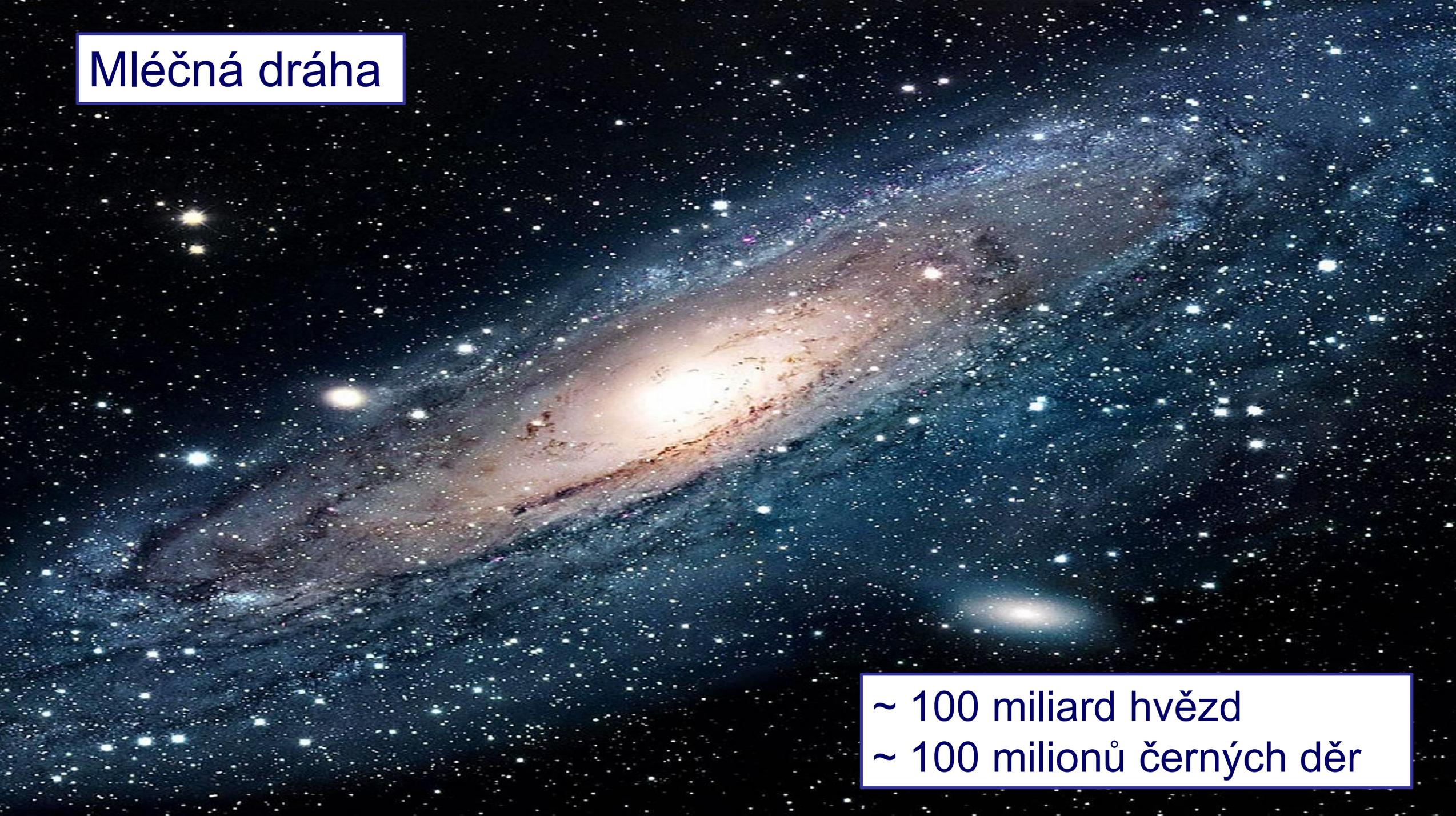
$p^+ + e^- \rightarrow n^0$
neutronová hvězda
miliony °C
velikost jako Praha



The background of the image is a deep space scene filled with stars of various colors and sizes. A prominent feature is a large, diffuse structure of light, possibly a galaxy or a nebula, that stretches across the upper right and middle sections of the frame. The colors range from dark blues and purples to bright whites and yellows. The overall effect is a vast, cosmic landscape.

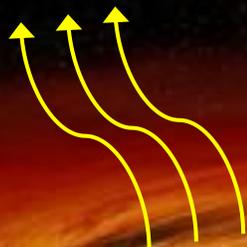
Opravdu existují
černé díry?
Kde je ve vesmíru
hledat?

Mléčná dráha



~ 100 miliard hvězd

~ 100 milionů černých děr



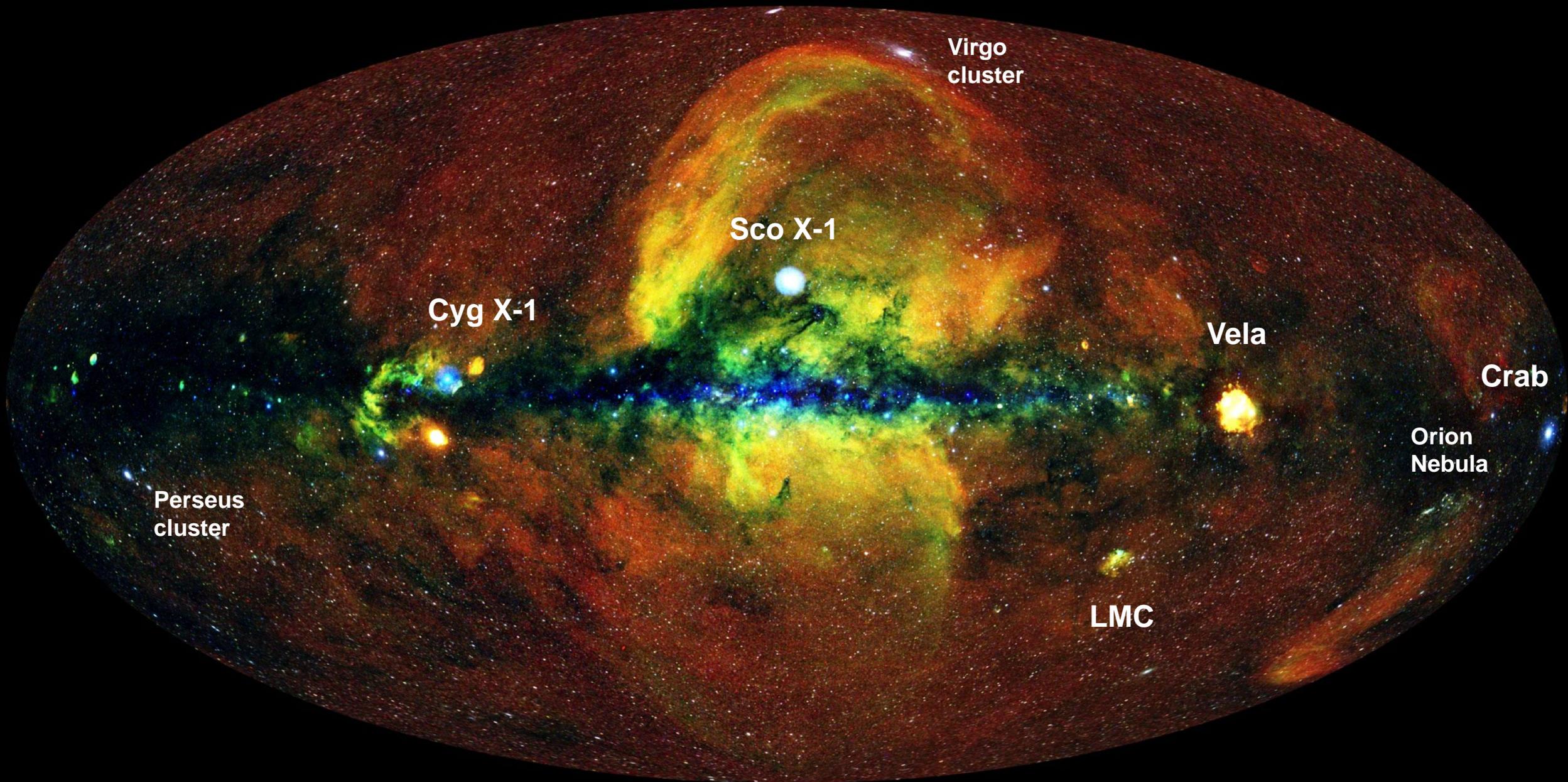
rentgenová dvojhvězda
Cygnus X-1 (obj. 1964)



velikost Slunce



XMM-Newton
Kredit: ESA



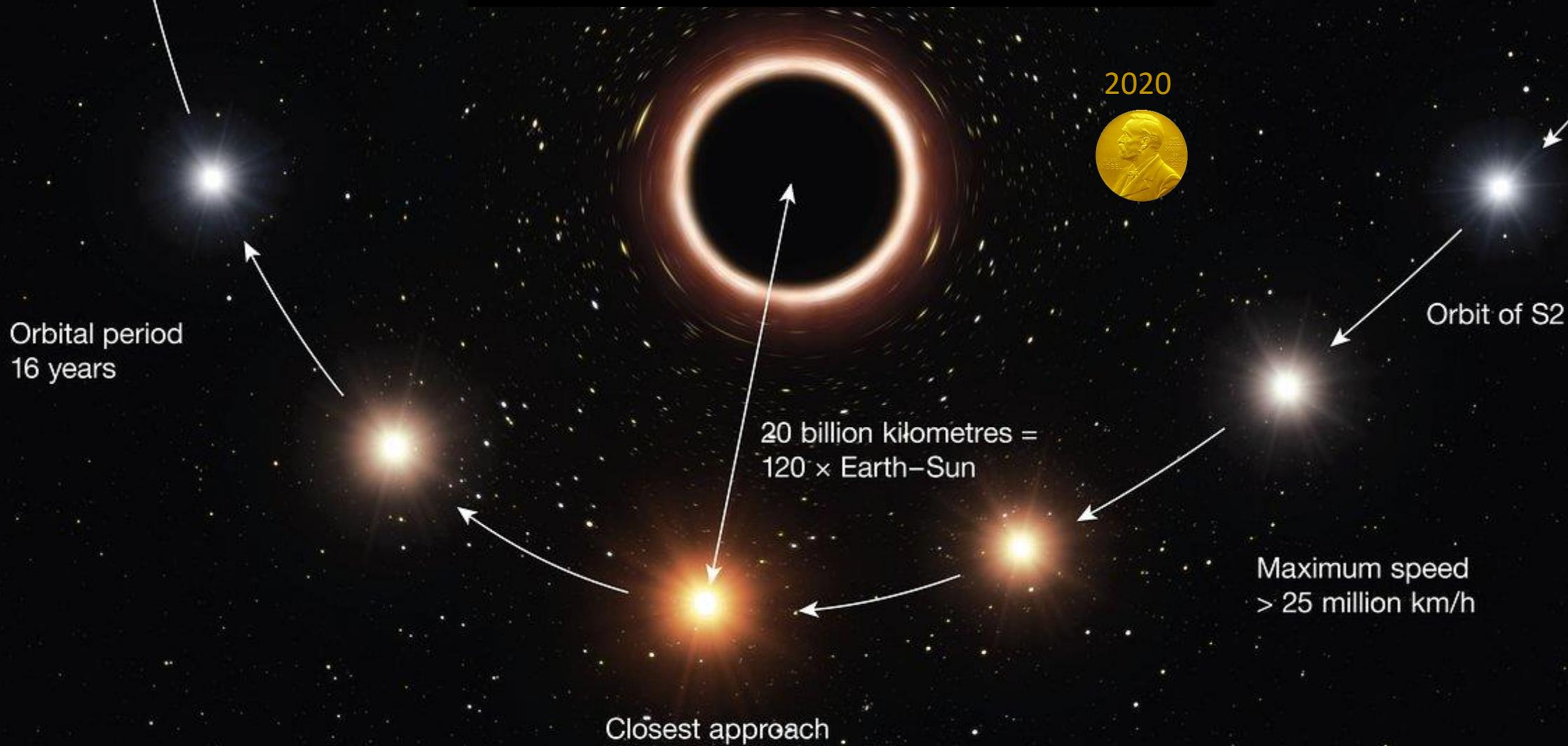
rentgenová mapa oblohy, eROSITA (červen 2020)



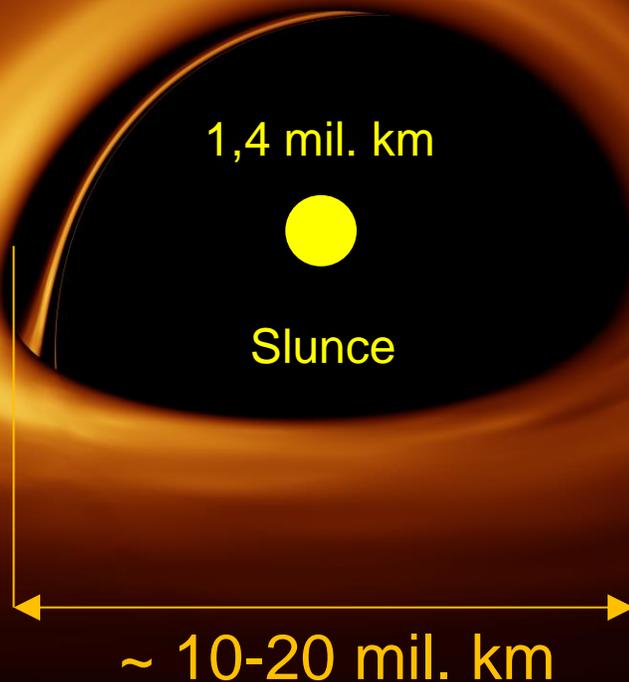


Černá díra v centru naší Galaxie, Sgr A*

4 milióny hmot Slunci

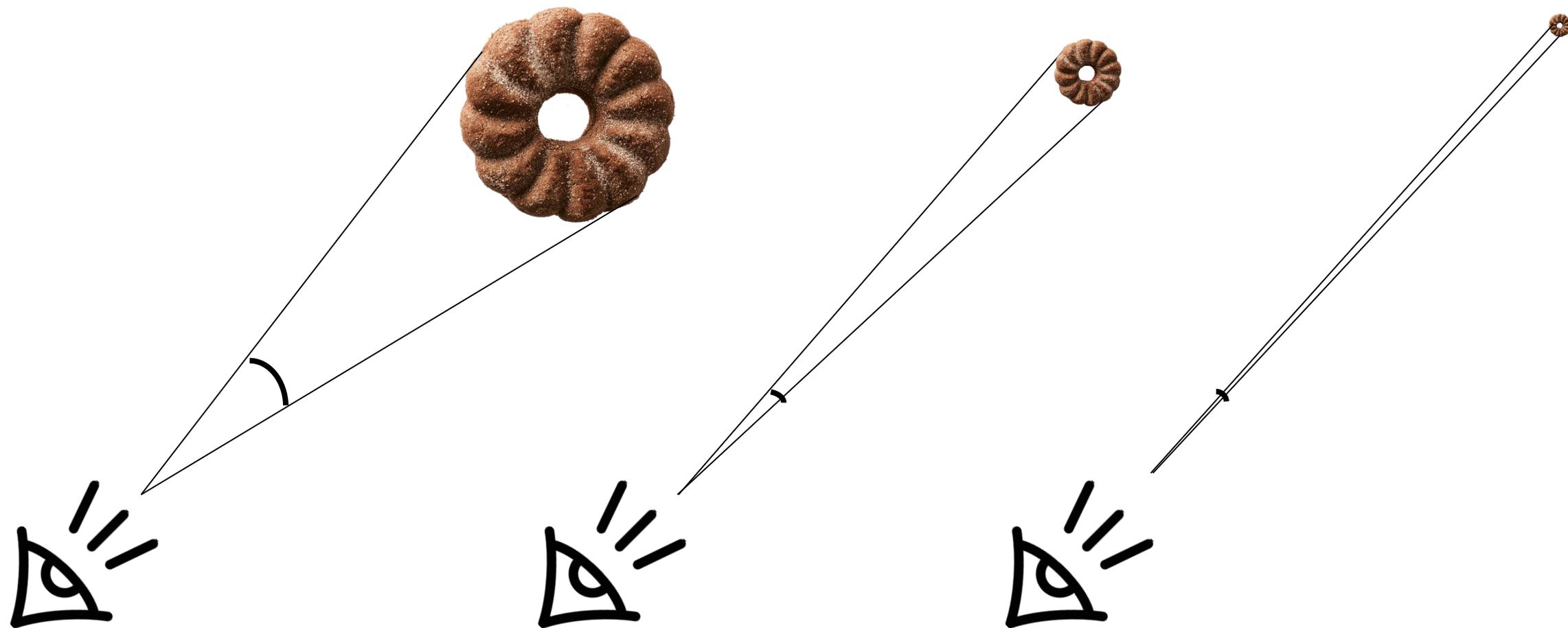


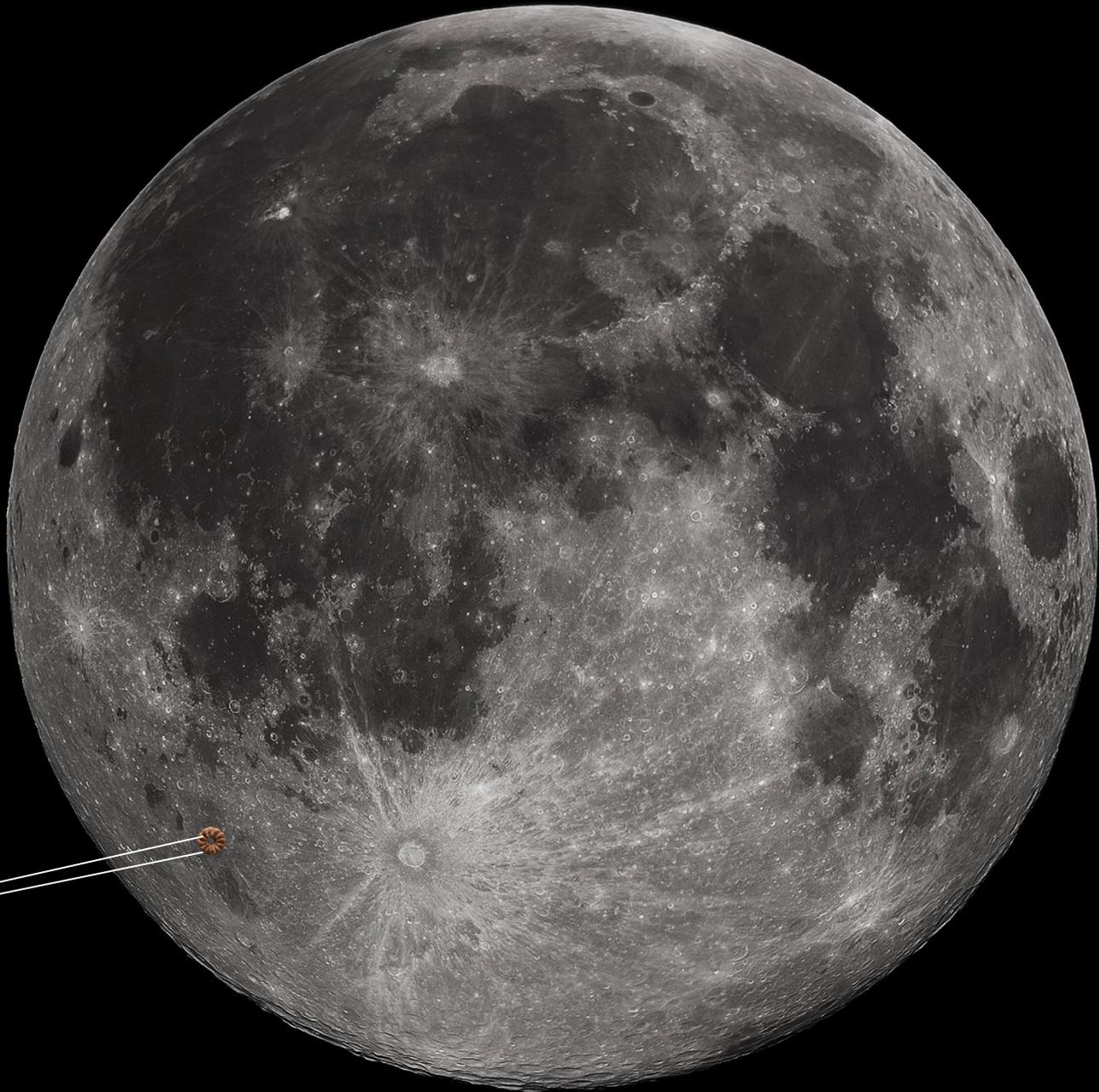
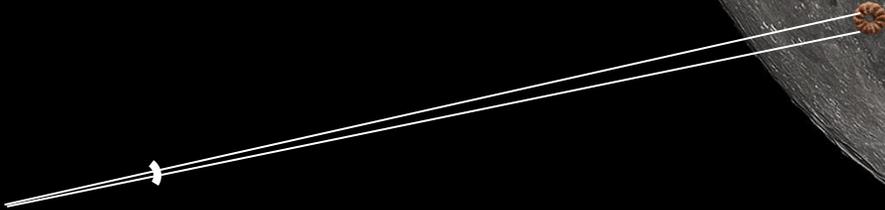
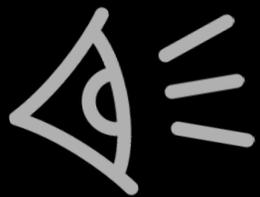
Merkur



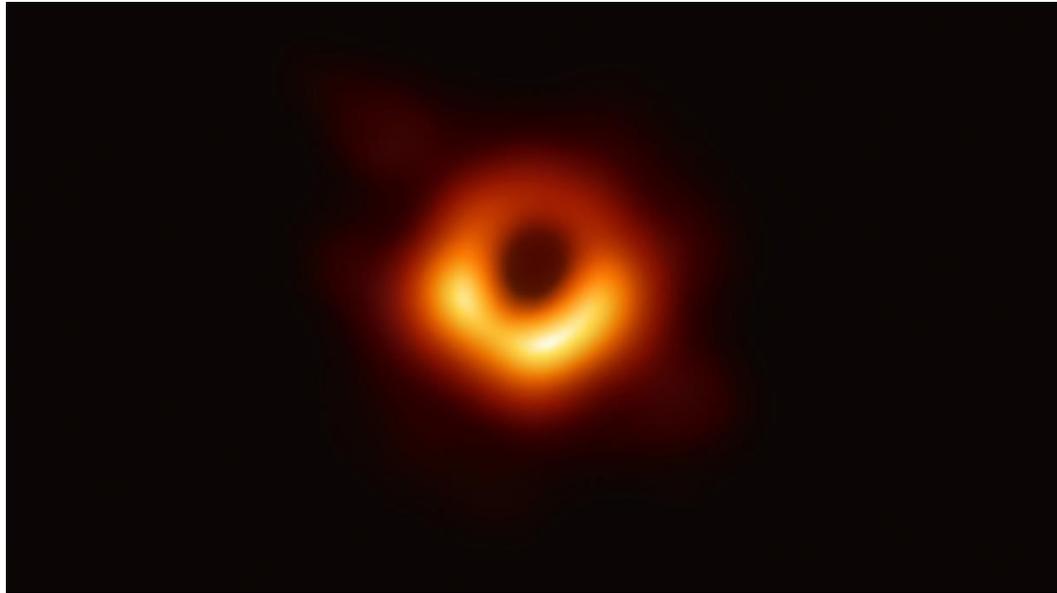
Jak je černá díra ve středu Galaxie velká?

Úhlová velikost

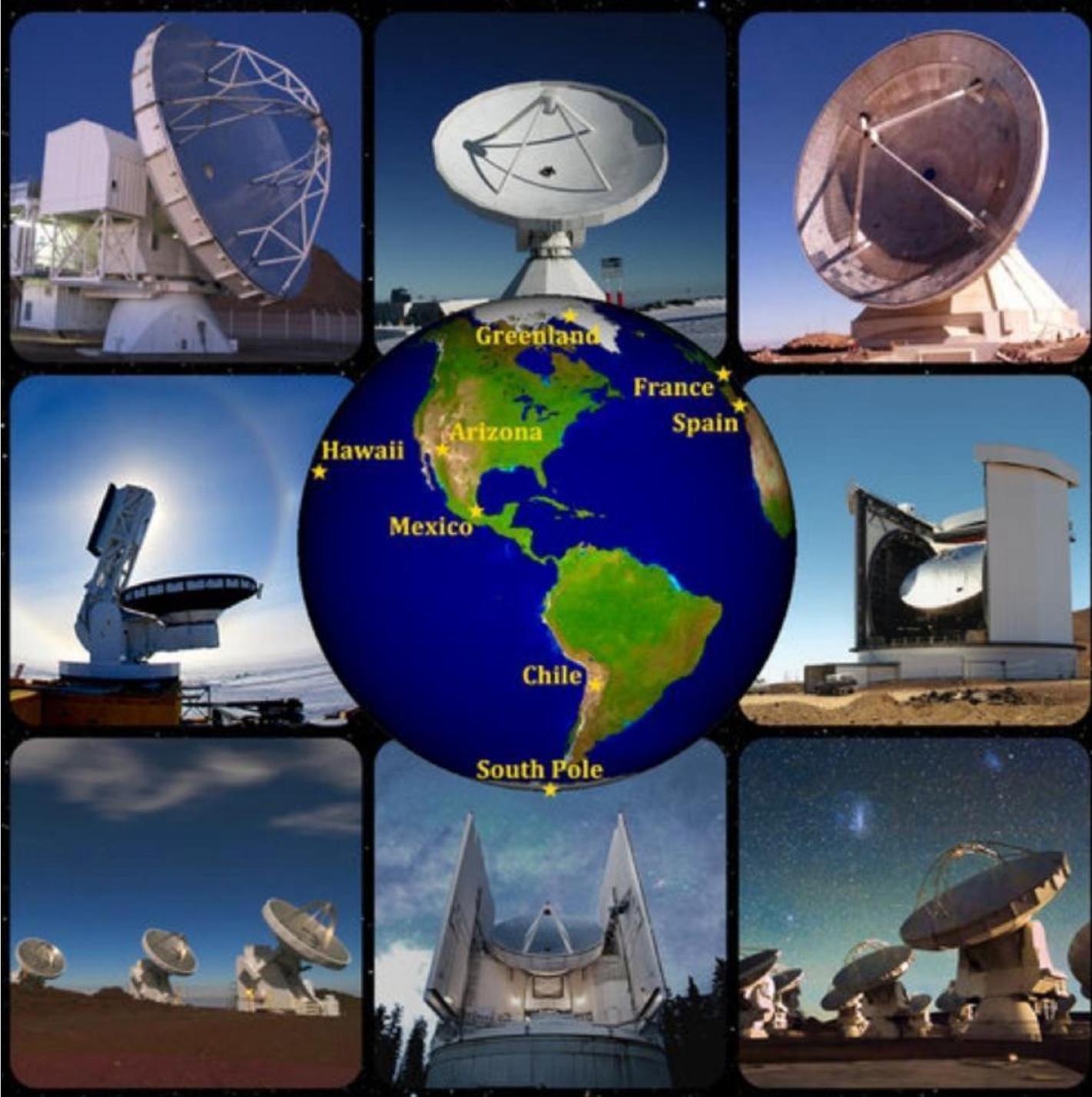




Event Horizon Telescope



- celosvětová síť teleskopů (včetně Evropské jižní observatoře, ESO)
- data pořízena v dubnu 2017
- ohromné množství dat převezeno do výpočetních center a zpracováno čtyřmi nezávislými týmy
- snímek publikován 10. dubna 2019

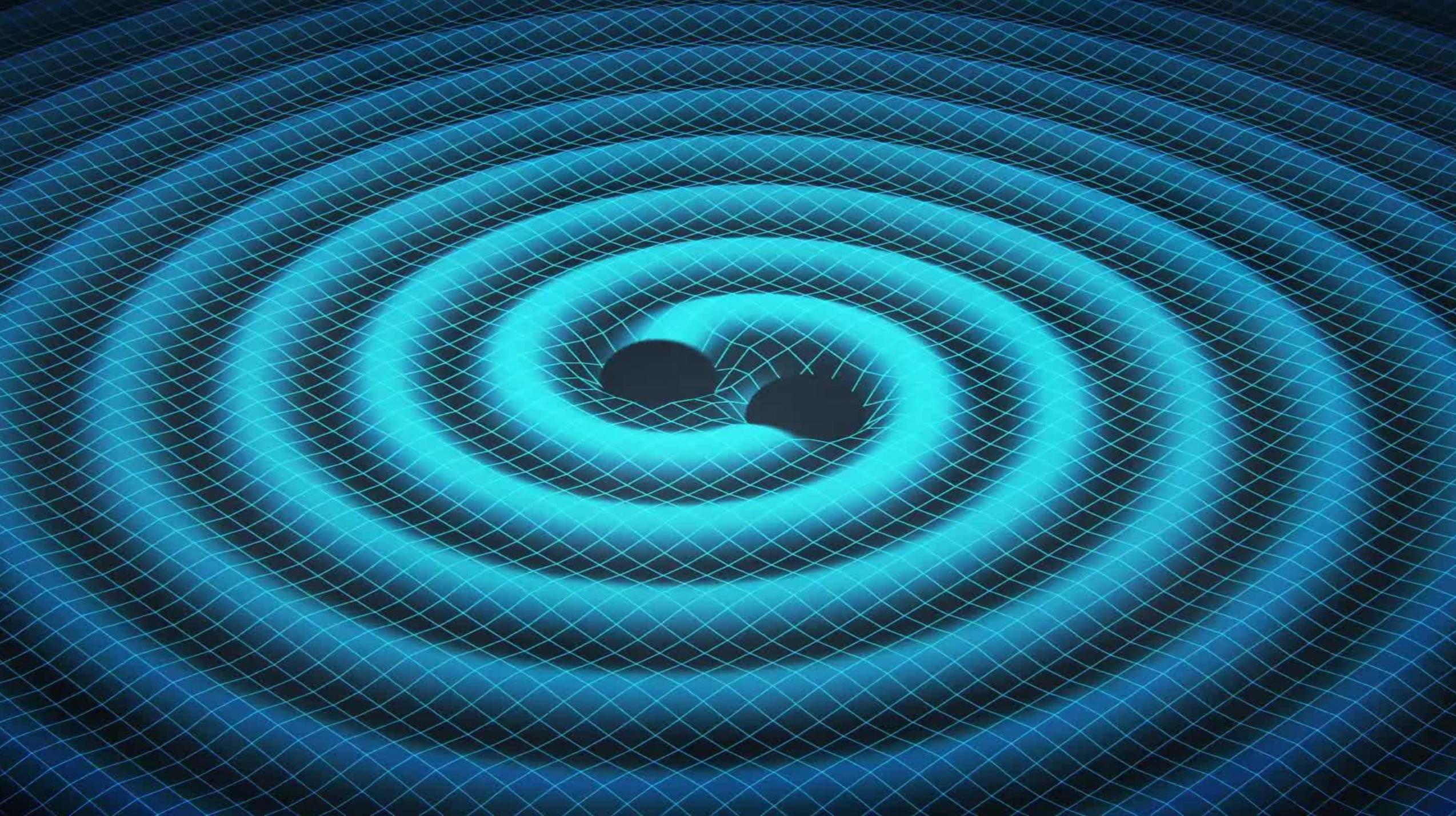


Aktivní galaktické jádro M87



První snímek černé díry





GW 150914

$$M_1 = 36 \pm 5 M_{\odot}$$

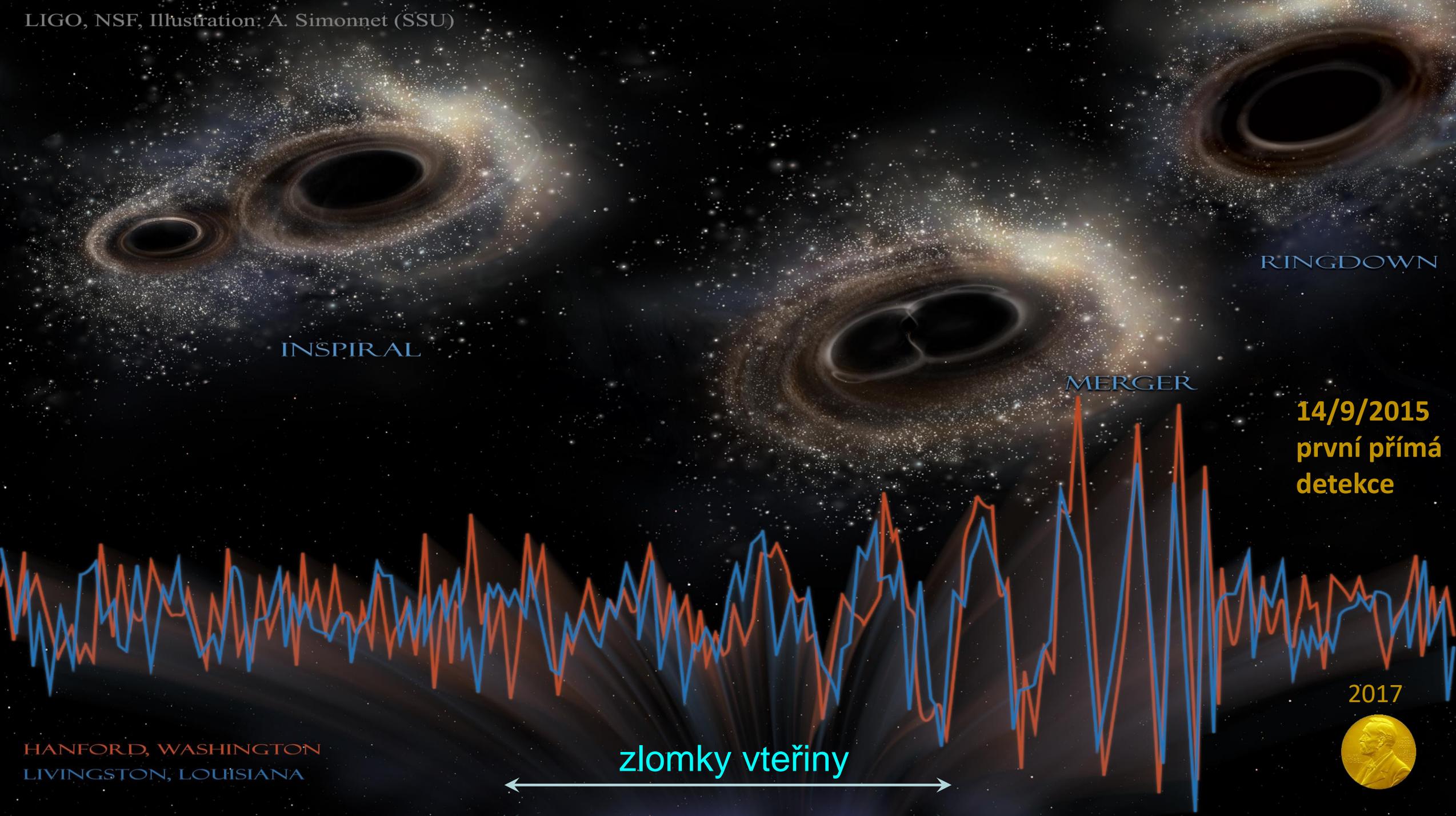
$$M_2 = 29 \pm 4 M_{\odot}$$

$$M = 62 \pm 4 M_{\odot}$$

$$\Delta E = 3 \pm 0.5 M_{\odot} c^2$$

$$a = 0.67 \pm 0.05 \text{ GM}/c$$

$$D = 410 \pm 180 \text{ Mpc}$$



INSPIRAL

MERGER

RINGDOWN

14/9/2015
první přímá
detekce

2017



HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

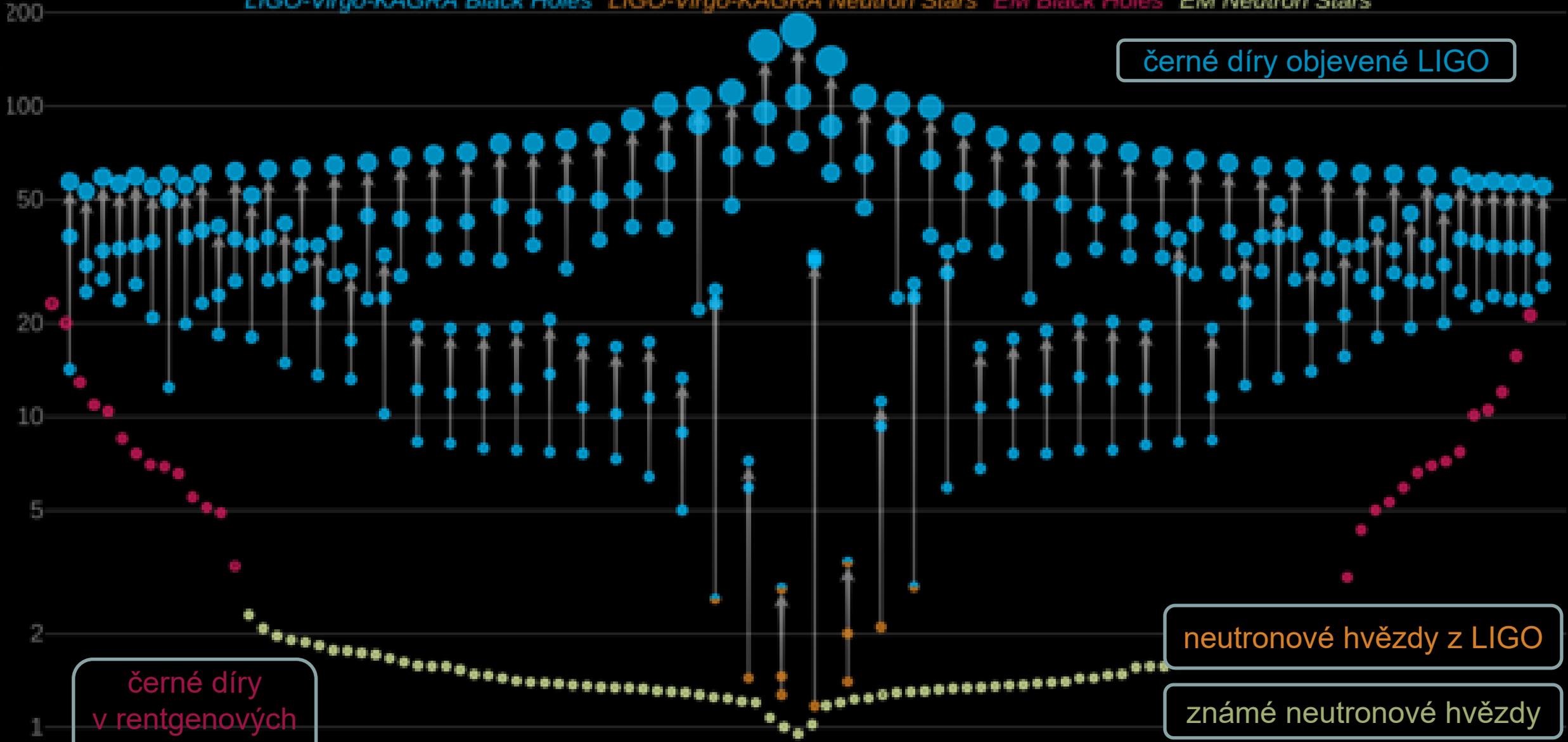
zlomky vteřiny



Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars

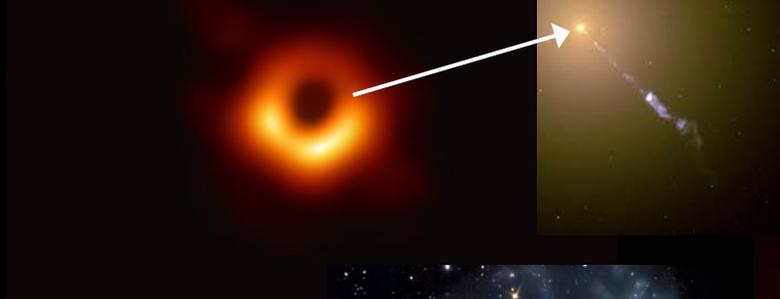
hmotnost [v násobcích hmotnosti Slunce]



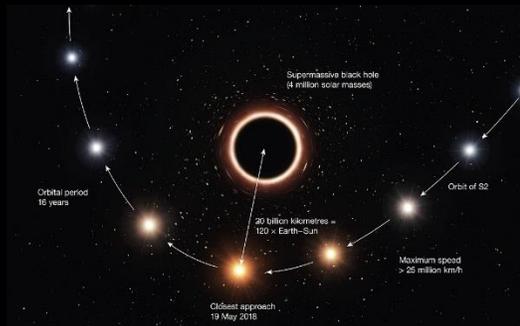
hmotnost

[v násobcích hmotnosti Slunce]

miliardy hmot Sluncí



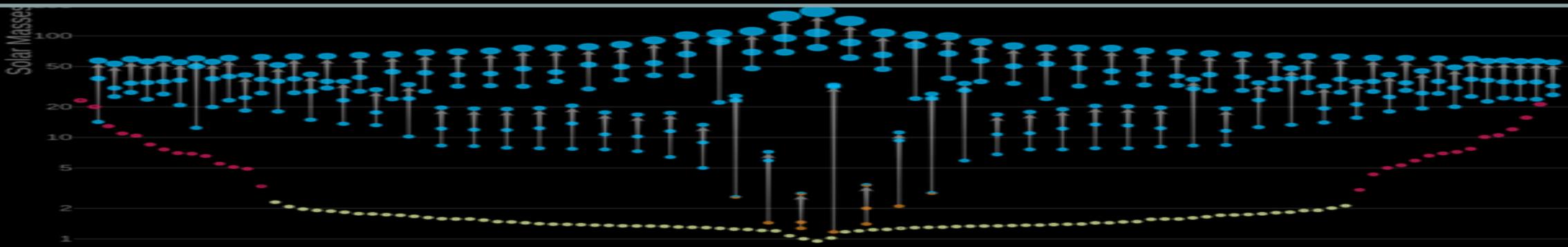
milióny hmot Sluncí



stovky hmot Sluncí

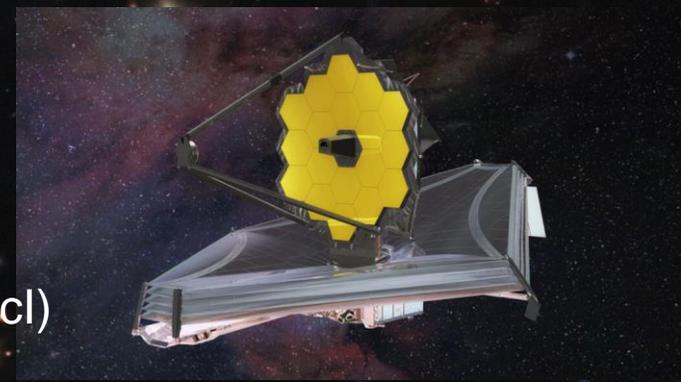


?





JWST hluboký snímek (NASA/ESA/STScI)



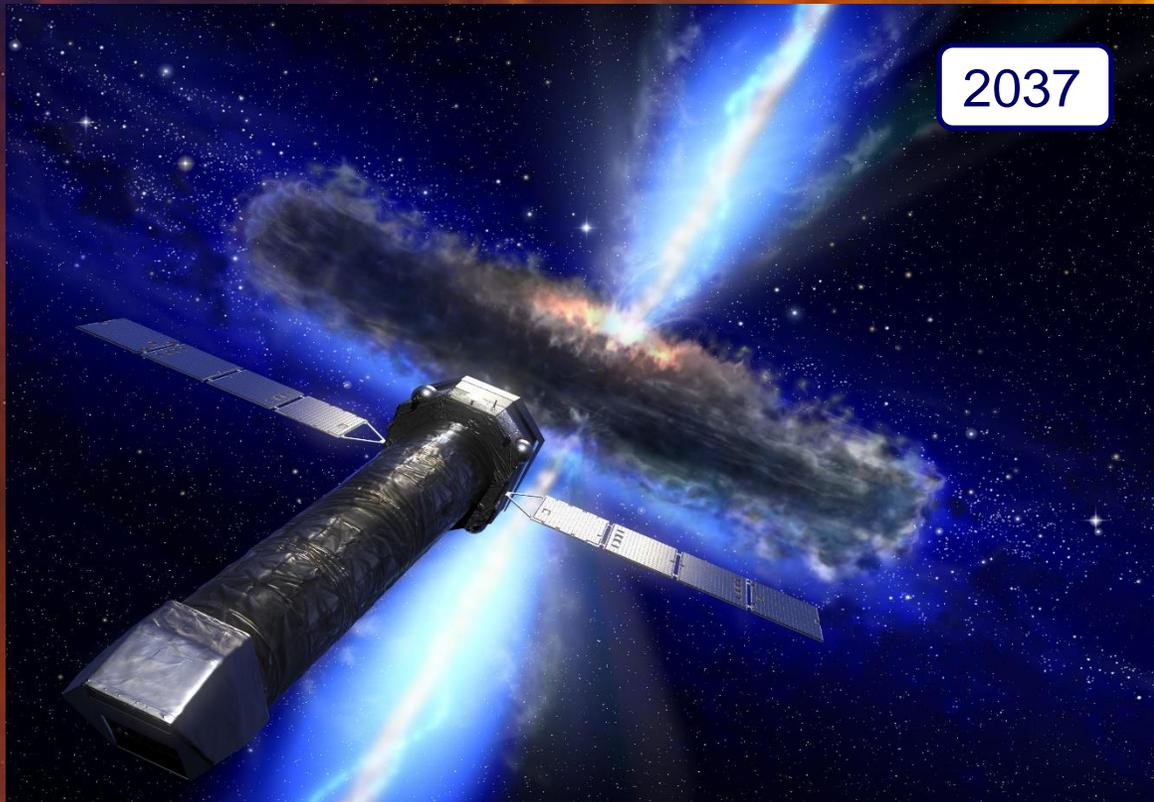
Jak vznikly superhmotné černé díry?



Jak vznikly superhmotné černé díry?

ATHENA

Advanced Telescope for High Energy Astronomy



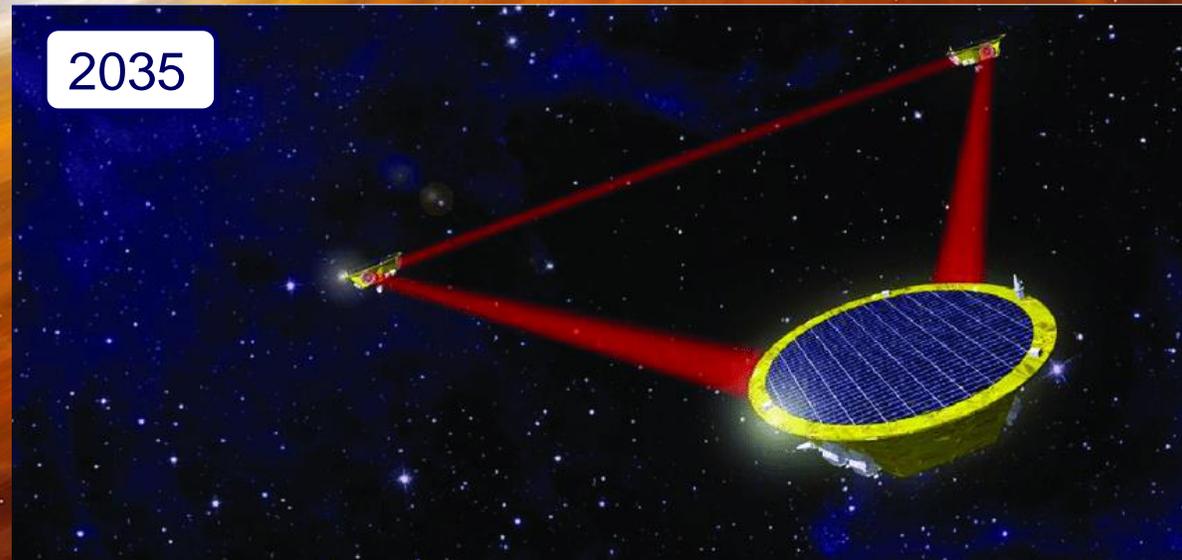
 **esa**
European Space Agency



LISA

Laser Interferometer Space Antenna

2035



LISA – plánovaná velká
gravitační observatoř ESA
25. ledna 2024 - adopce mise



SPEKTRUM GRAVITAČNÍCH VLN

Observatoře
& experimenty

Experiment
na Zemi



Observatoř ve vesmíru



Pulsar timing array



Polarizace kosmického
mikrovlnného pozadí



Časové škály

milisekundy

sekundy

hodiny

roky

miliardy let

Frekvence (Hz)

100

1

10^{-2}

10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

10^{-16}

Kosmické fluktuační vlny v raném vesmíru

Kosmické
zdroje



Supernova



Pulzar



Kompaktní objekt
padající do super-
masivní černé díry



Splynutí supermasivních černých děr



Splynutí neutronových
hvězd v jiných galaxiích



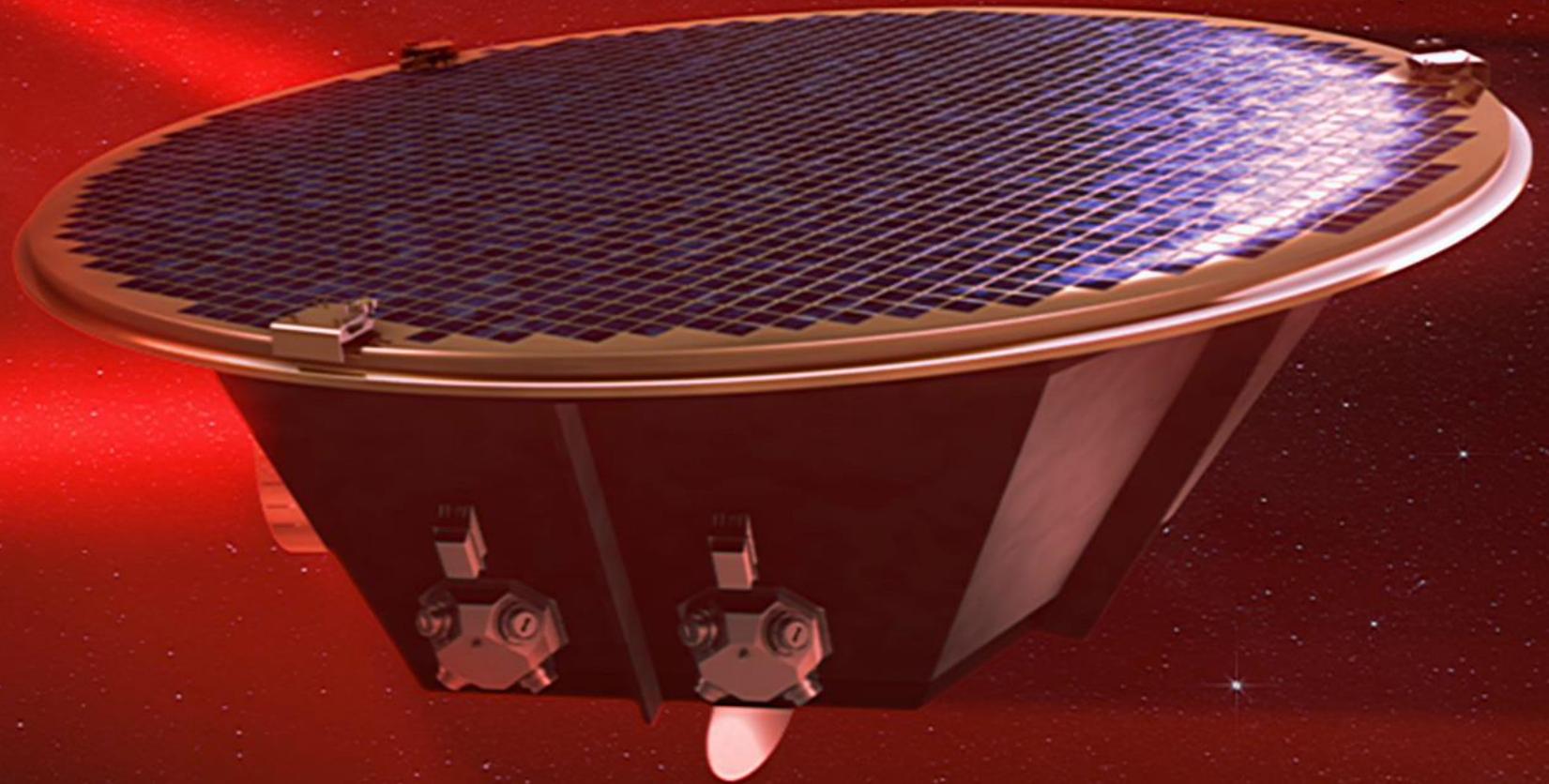
Splynutí stelárních černých děr
v jiných galaxiích



Splynutí bílých trpaslíků
v naší galaxii

LISA

- laserový svazek se musí trefit na **vzdálenost 2,5 milionů km**
- **ESA + NASA + JAXA**
- ČR: mechanismy na optickou lavici pro výběr zdroje laserového svazku

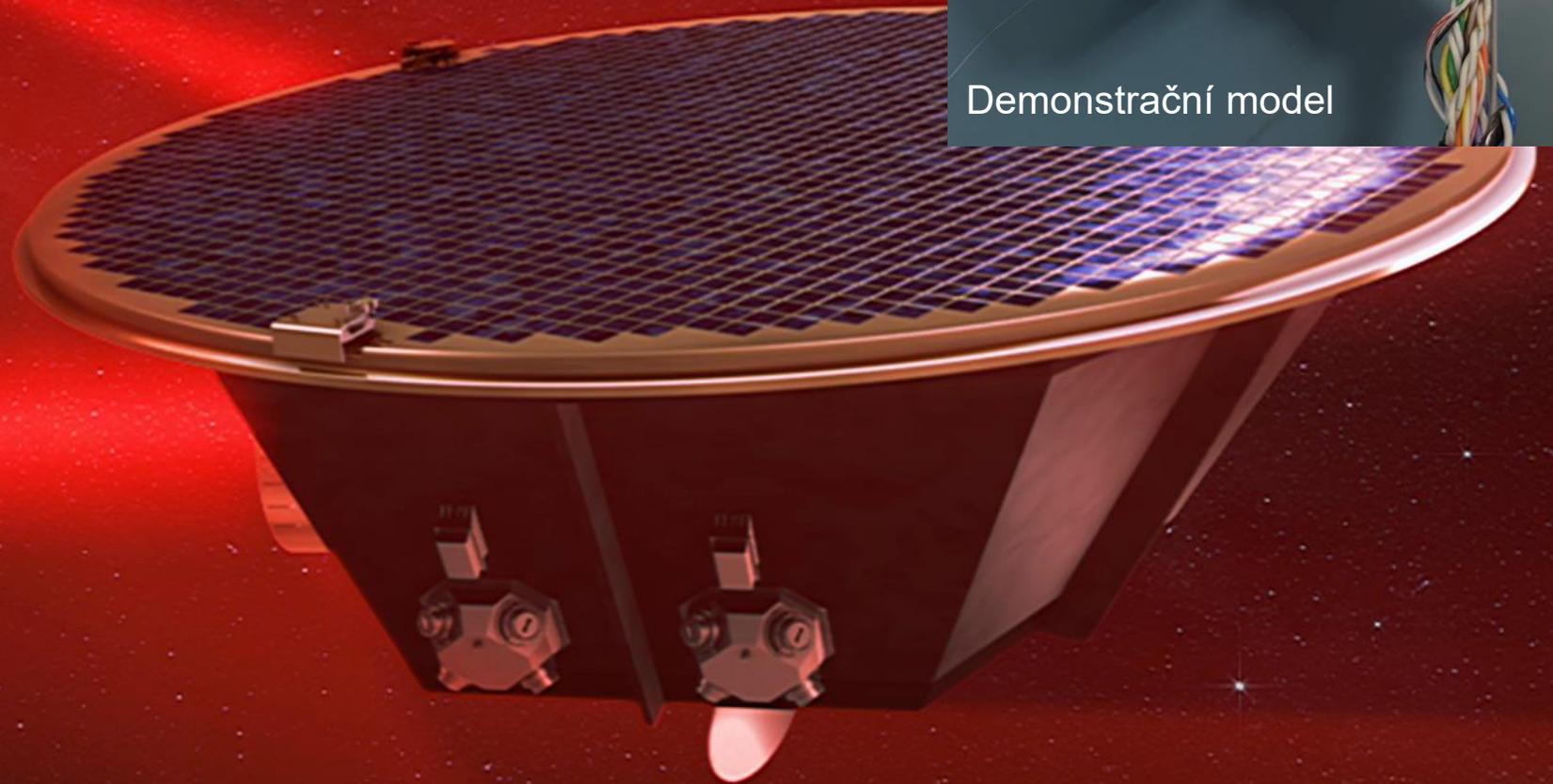
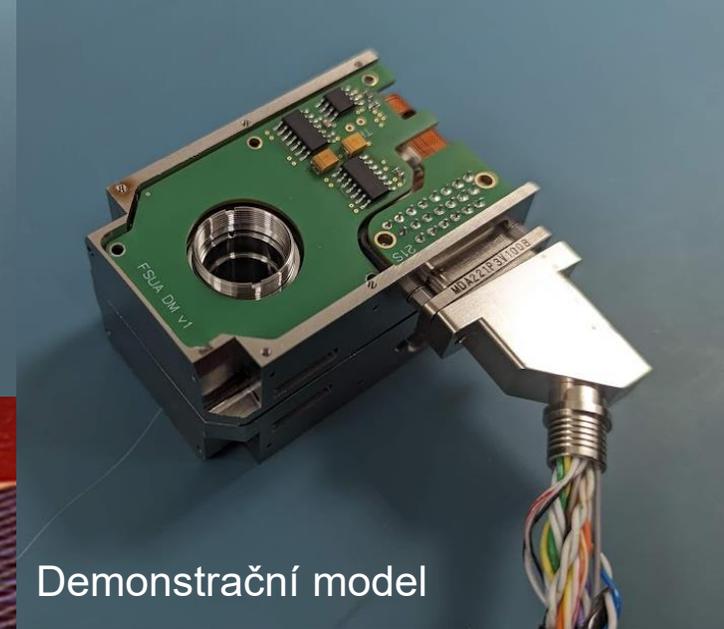
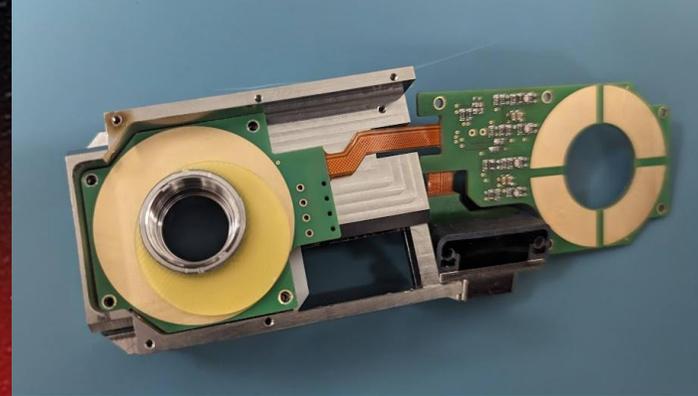


LISA – optická lavice

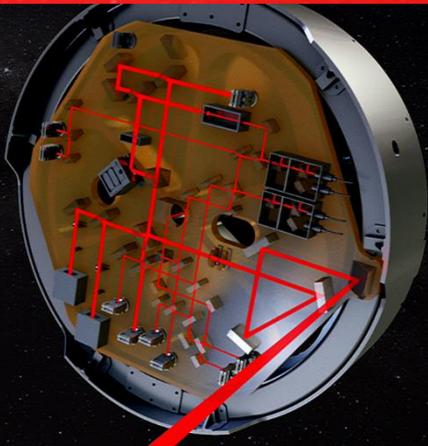


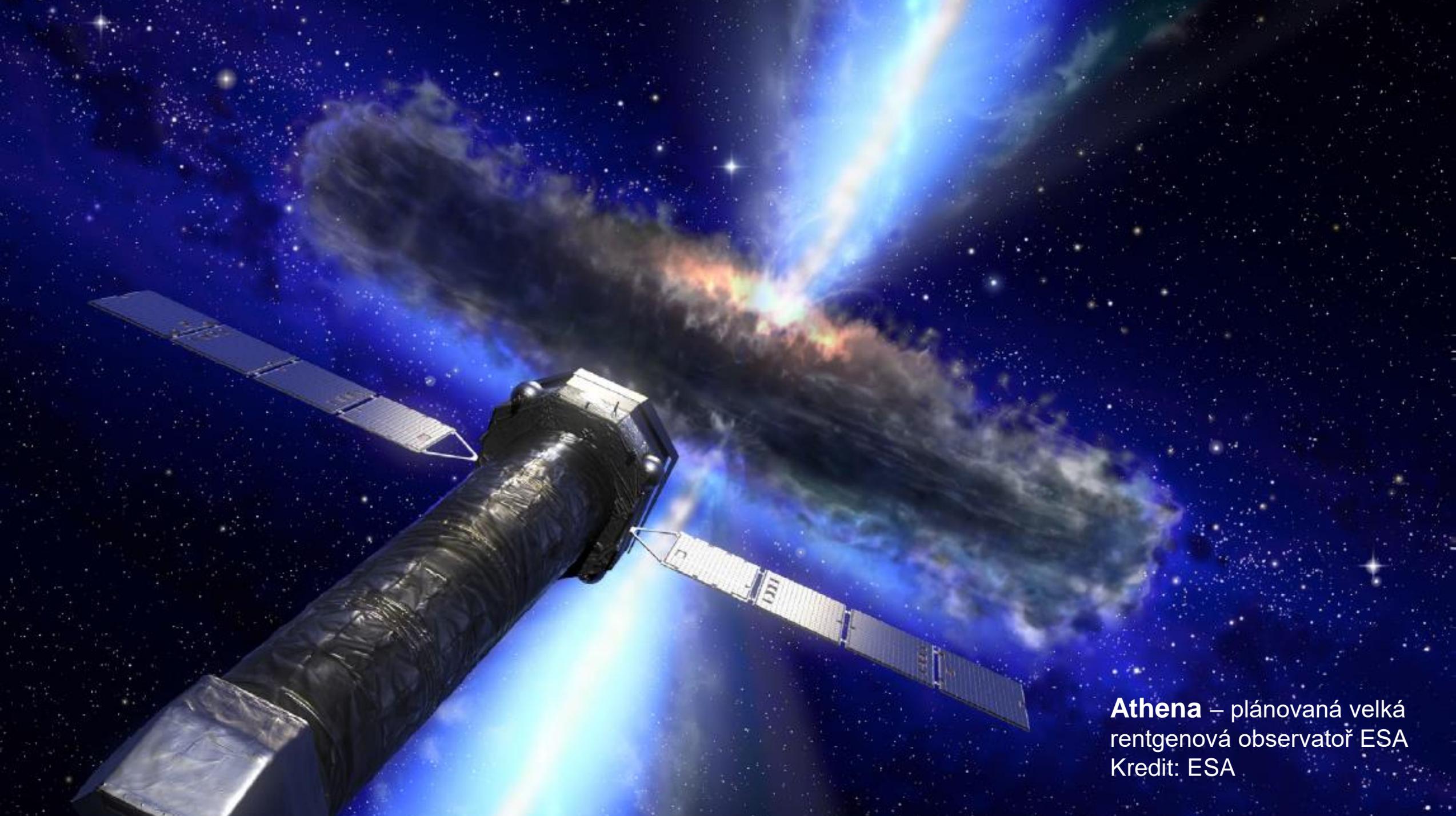
LISA – český příspěvek

- přepínač zdroje laserového paprsku, tzv. Fibre Switch Unit Actuator (FSUA)



LISA – optická lavice



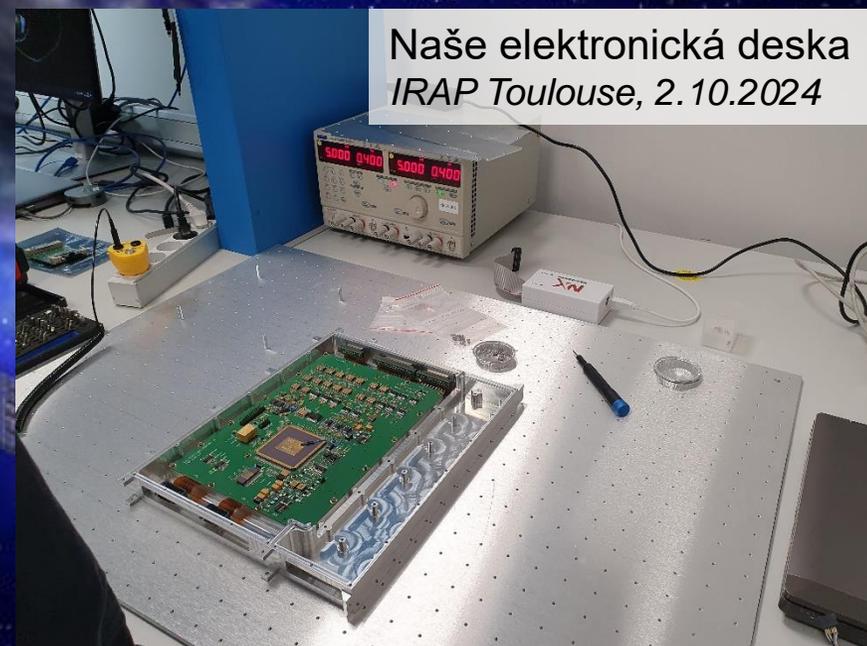


Athena – plánovaná velká
rentgenová observatoř ESA
Kredit: ESA

ATHENA – plánovaná velká rentgenová observatoř ESA



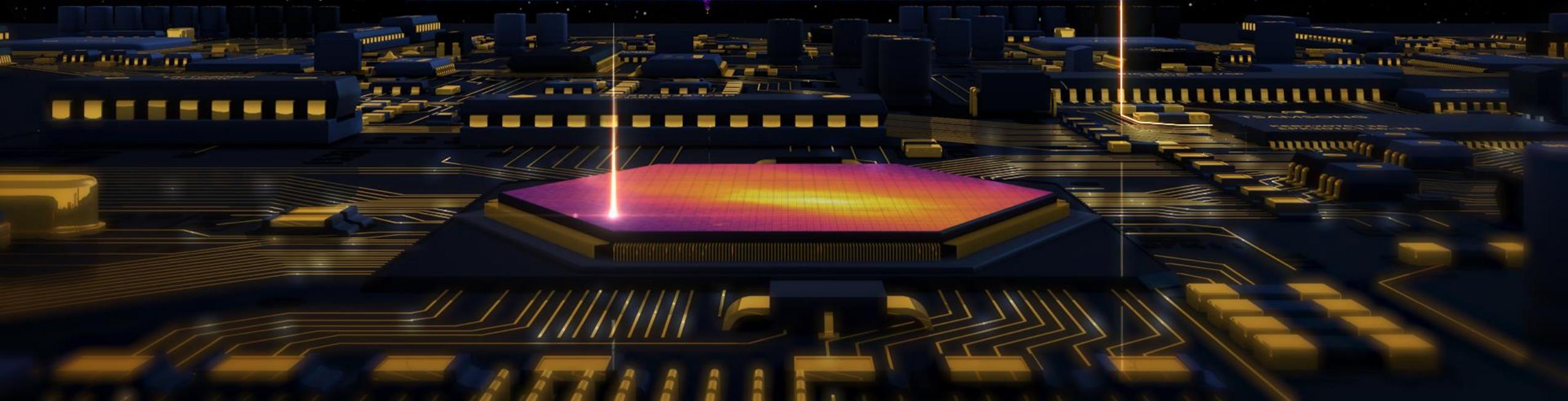
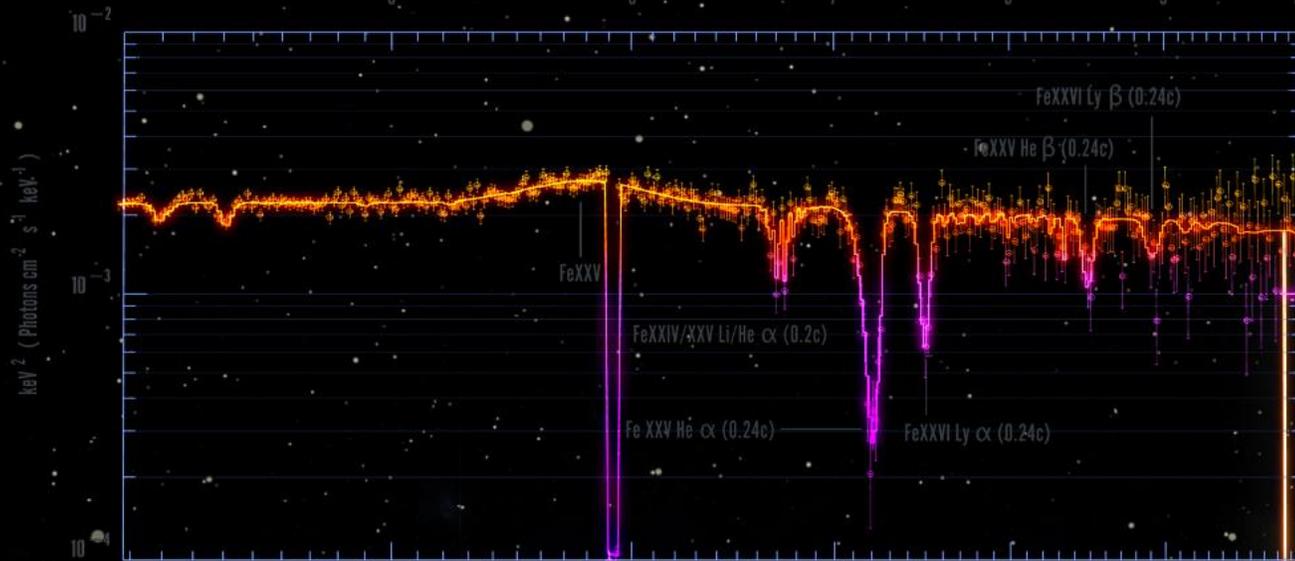
Přístroj X-ray Integral Field
Unit (X-IFU)
ČR: podíl na vědecké
přípravě a vývoji elektroniky



Naše elektronická deska
IRAP Toulouse, 2.10.2024

ATHENA – český podíl

- ústavy AV ČR (ASU, ÚFA), spolupráce s průmyslem
- vývoj citlivé elektroniky
- plánovaná adopce mise: 2027



Závěr

- černé díry
 - předpovězeny teorií relativity
 - objeveny rentgenovou astronomií
 - známe 2(-3) hlavní typy černých děr podle hmotnosti:
 - vzniklé kolapsem těžkých hvězd, v rentgenových dvojhvězdách
 - vznikající srážkami hvězdných ČD, pozorované gravitačními vlnami
 - superhmotné černé díry v centrech galaxií (včetně té naší, NC 2020)
 - původ superhmotných černých děr odhalí dvě plánované velké kosmické mise ESA: ATHENA a LISA
 - **ČR součástí obou projektů!**



STRATEGIE AV21



Jiří Svoboda a kol.

Evropské kosmické mise s českou účastí

VÝZKUMNÝ PROGRAM

VESMÍR PRO LIDSTVO

Novinka
Nakladatelství
Academia



Jiří Svoboda a kol. Evropské kosmické mise s českou účastí

Publikace vznikla v rámci
výzkumného programu Strategie AV21
Vesmír pro lidstvo.

Tato knížka pojednává o jednotlivých kosmických misích Evropské kosmické agentury (European Space Agency, ESA) a českém příspěvku k nim. Představuje také mise budoucnosti – zkoumání planet mimo Sluneční soustavu a mise PLATO a Ariel, mise plánované k Venuši a v neposlední řadě také dvě velké plánované mise, které si kladou za cíl odhalit, jak vznikly superhmotné černé díry v centrech galaxií. Ve všech těchto projektech je Česká republika významně zastoupena.

Ke stažení
www.academia.cz/strategie-AV21/

