



Černé díry všemi smysly

Jiří Svoboda

Astronomický ústav AV ČR
*Astronomie aneb blíže ke hvězdám VIII,
Masarykova univerzita, Brno, 30.10.2019*



Hvězdárna v Ondřejově

Astronomický ústav AV ČR

- Oddělení galaxií a planetárních systémů v Praze na Spořilově
- Pražská relativistická skupina
- 15.-16. listopadu dny otevřených dveří

T | Ý | D | E | N | V | T

19

**TÝDEN VĚDY
A TECHNIKY
AKADEMIE VĚD
ČESKÉ REPUBLIKY**

11-17/11/2019

WWW.TYDENVEDY.CZ



Něco o mém výzkumu...

- černé díry různých velikostí
 - výzkumný projekt Sjednocení černých děr napříč hmotností
 - juniorský vědecký tým (Abhijeet Borkar IND, Daniel Kynoch VB, Peter Boorman VB)
- rentgenová astronomie
 - aktivní galaxie, rentgenové dvojhvězdy, galaxie s překotnou tvorbou hvězd (například tzv. hráškové nebo borůvkové galaxie)
- kosmické mise
 - účast ČR na přípravě vědeckých přístrojů pro kosmické mise
 - zejména ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou ESA

Vesmír pro lidstvo

- výzkumný program Strategie Akademie věd ČR
- celkem 11 ústavů AV ČR, 11 společně řešených témat
- spolupracující univerzity a průmysloví partneři
- <http://www.vesmirprolidstvo.cz>



Černé díry – prvotní ideje

- mohou existovat velmi hmotné hvězdy, které nevidíme?
- světlo má konečnou rychlost (300 000 km/s)
- co když je úniková rychlost větší než **rychlost světla**?

Černé díry – prvotní ideje

- mohou existovat velmi hmotné hvězdy, které nevidíme?
- světlo má konečnou rychlost (300 000 km/s)
- co když je úniková rychlost větší než **rychlost světla**?

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

když je M příliš velké, pak $v > c$!

John Michell, 1783



Teorie relativity

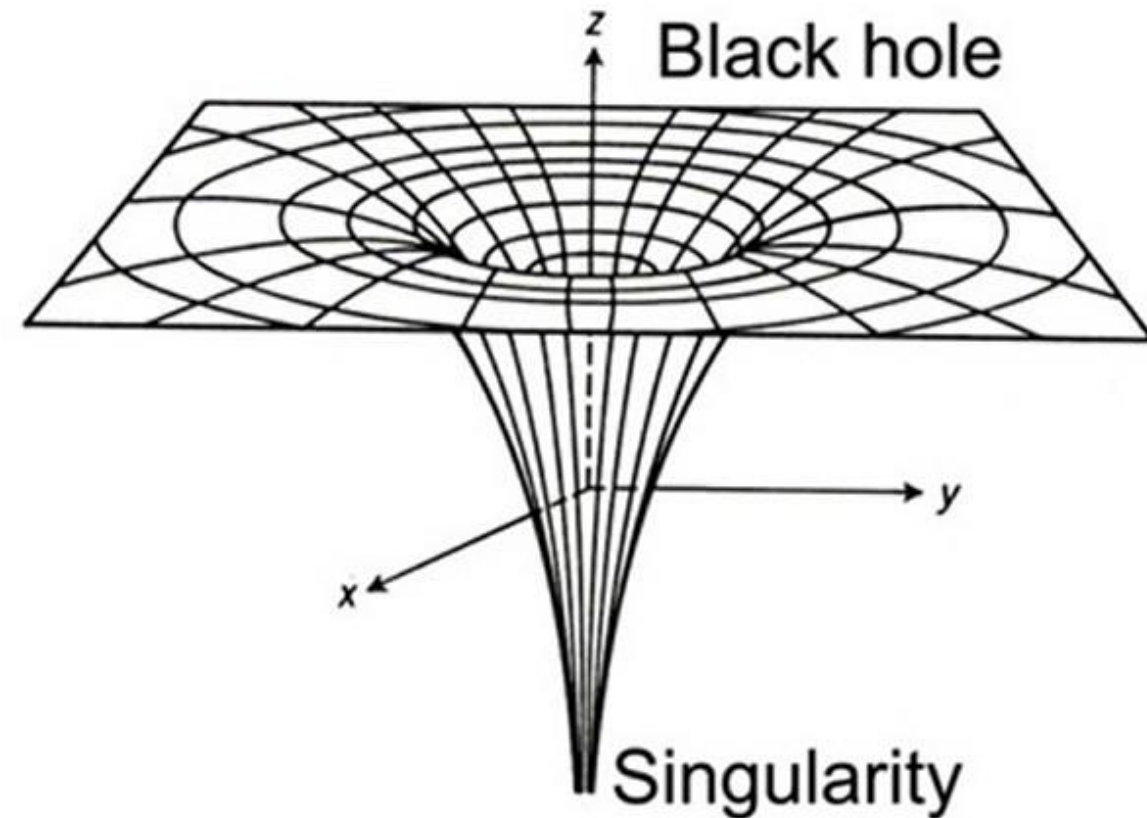
- Einsteinova teorie relativity
 - speciální (1905) – rychlost světla je konečná
 - obecná (1915) – gravitační pole je zakřivením prostoročasu
 - světlo není gravitací přitahováno (nemá hmotnost), ale světelné paprsky jsou ovlivněny přítomností gravitačního pole, tzv. gravitační ohyb světla, A. Einstein (1911-12 v Praze)



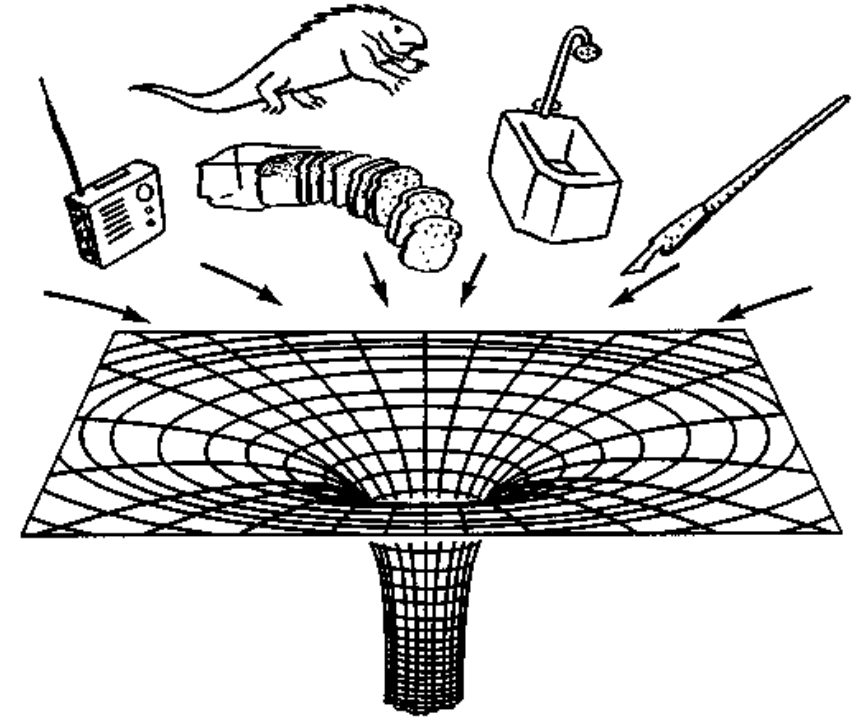
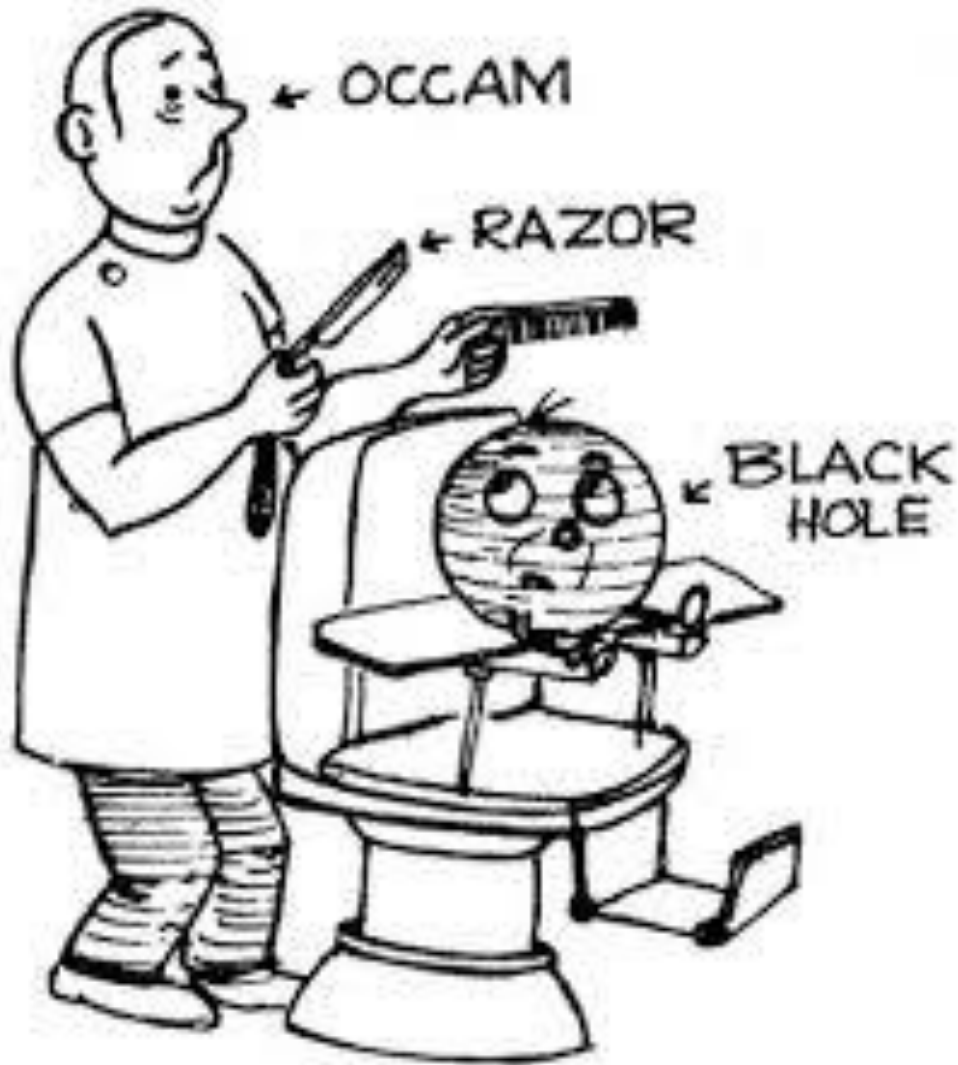
Albert Einstein

Černé díry jako singularity v řešení Einsteinových rovnic

- řešení Einsteinových rovnic – existence singularit, kolem kterých je oblast, odkud nelze uniknout, jen dál padat do středu
 - 1916, K. Schwarzschild, statické (nerotující) řešení
 - 1963, R. Kerr, rotující černá díra



Černé díry nemají vlasy



- tzv. „no-hair theorem“ (J. Wheeler)
- černá díra nemá vlasy, má pouze:
 - **hmotnost**
 - **rotaci** (spin)
 - **náboj** (ten se ale rychle neutralizuje)

Velikost černé díry

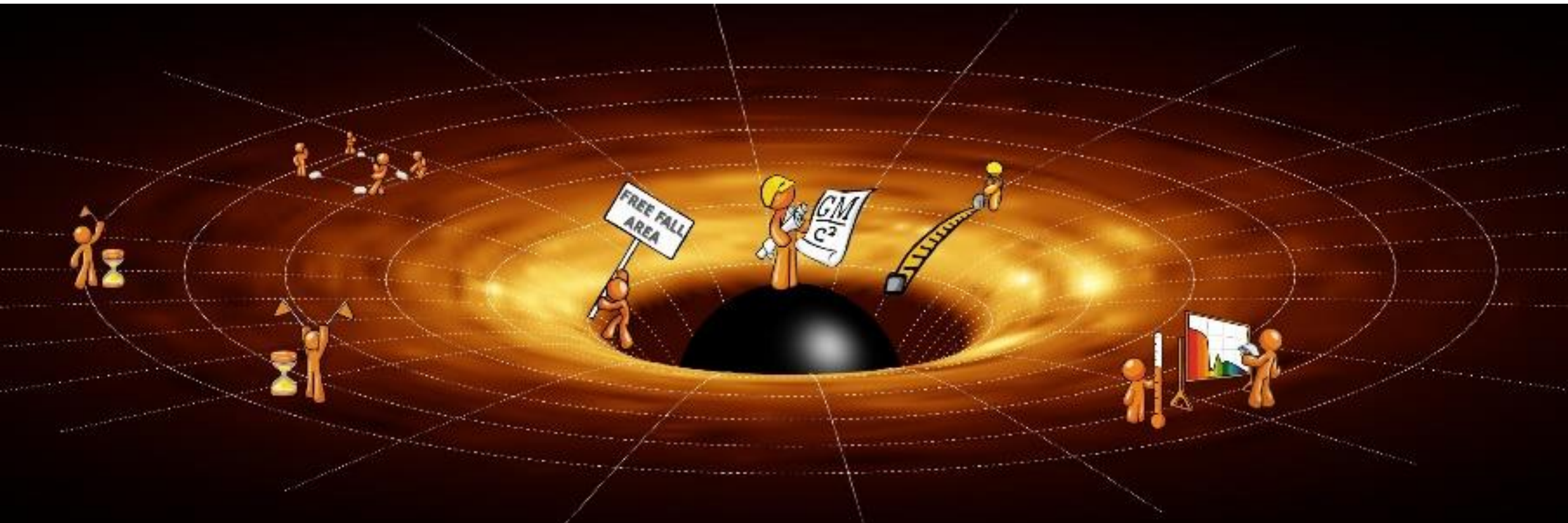
- odvíjí se od **hmotnosti**

- gravitační poloměr: $R = \frac{(2)GM}{c^2}$




Černé díry

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





Kredit: Michal Bursa,
Astronomický ústav AV ČR



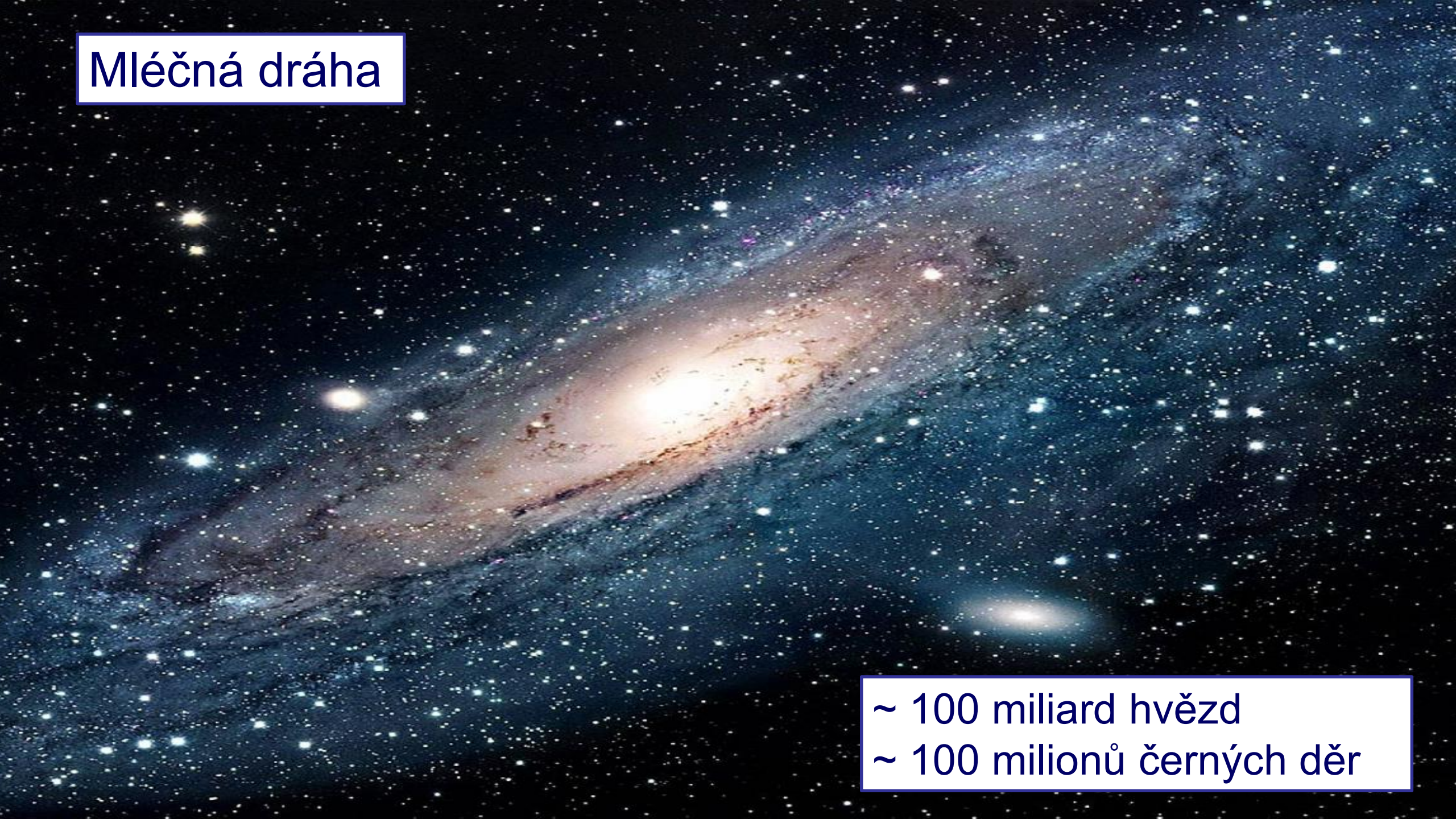
Opravdu existují
černé díry?
Kde je ve vesmíru
hledat?

Mléčná dráha



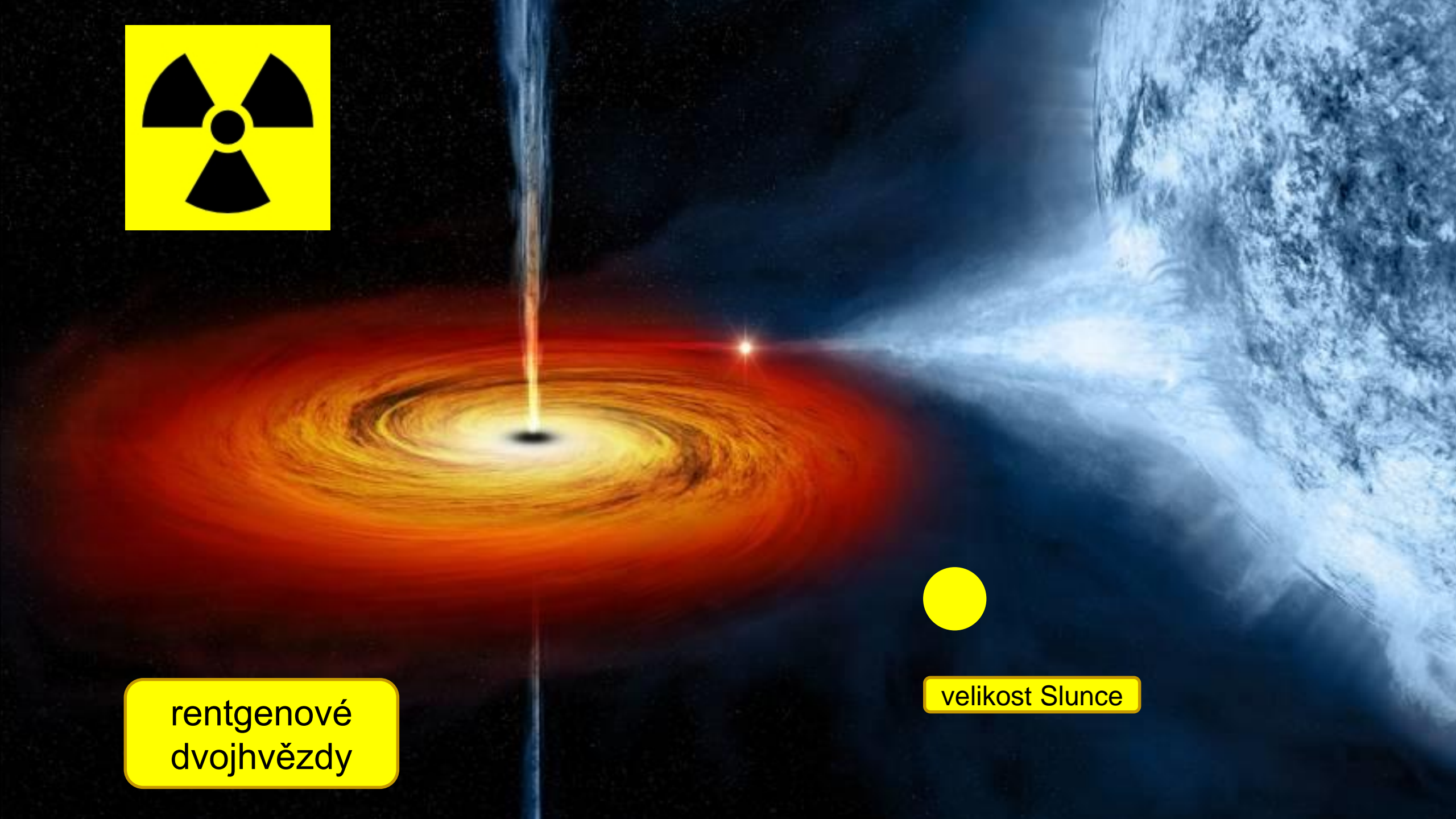
~ 100 miliard hvězd

Mléčná dráha



~ 100 miliard hvězd
~ 100 milionů černých děr

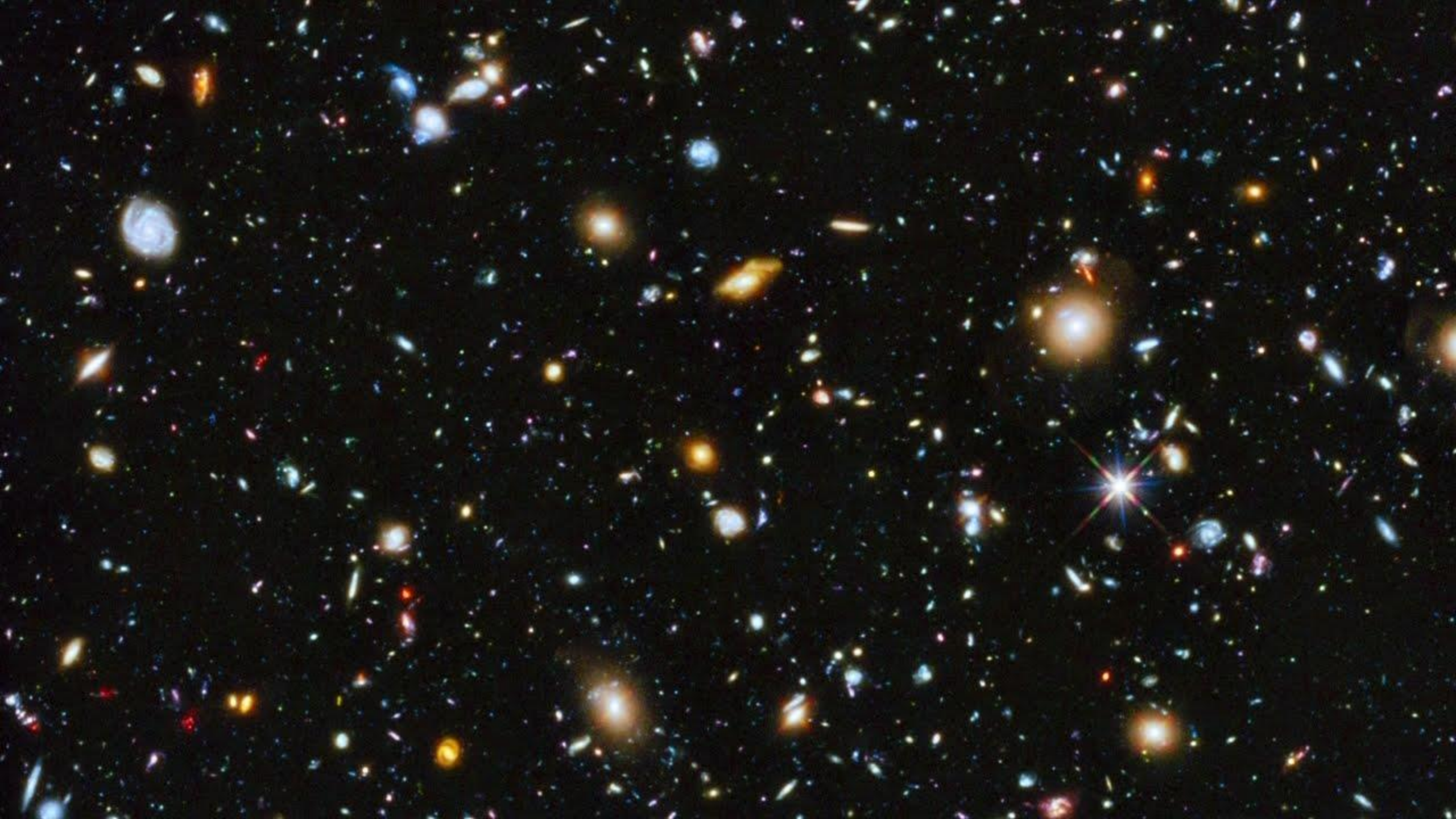
jak ale černé díry objevit?



rentgenové
dvojhvězdy



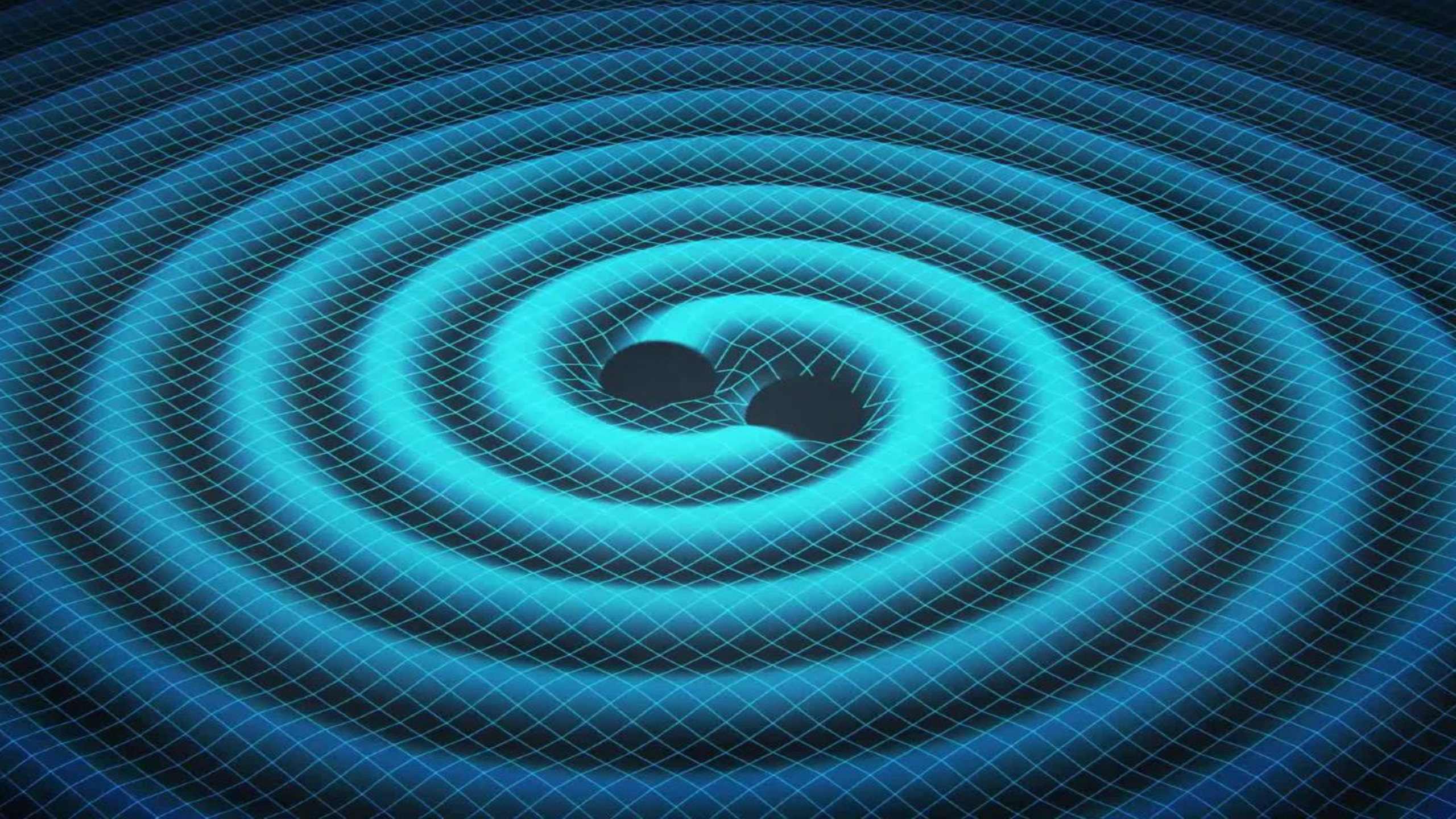
velikost Slunce



Aktivní galaktická jádra

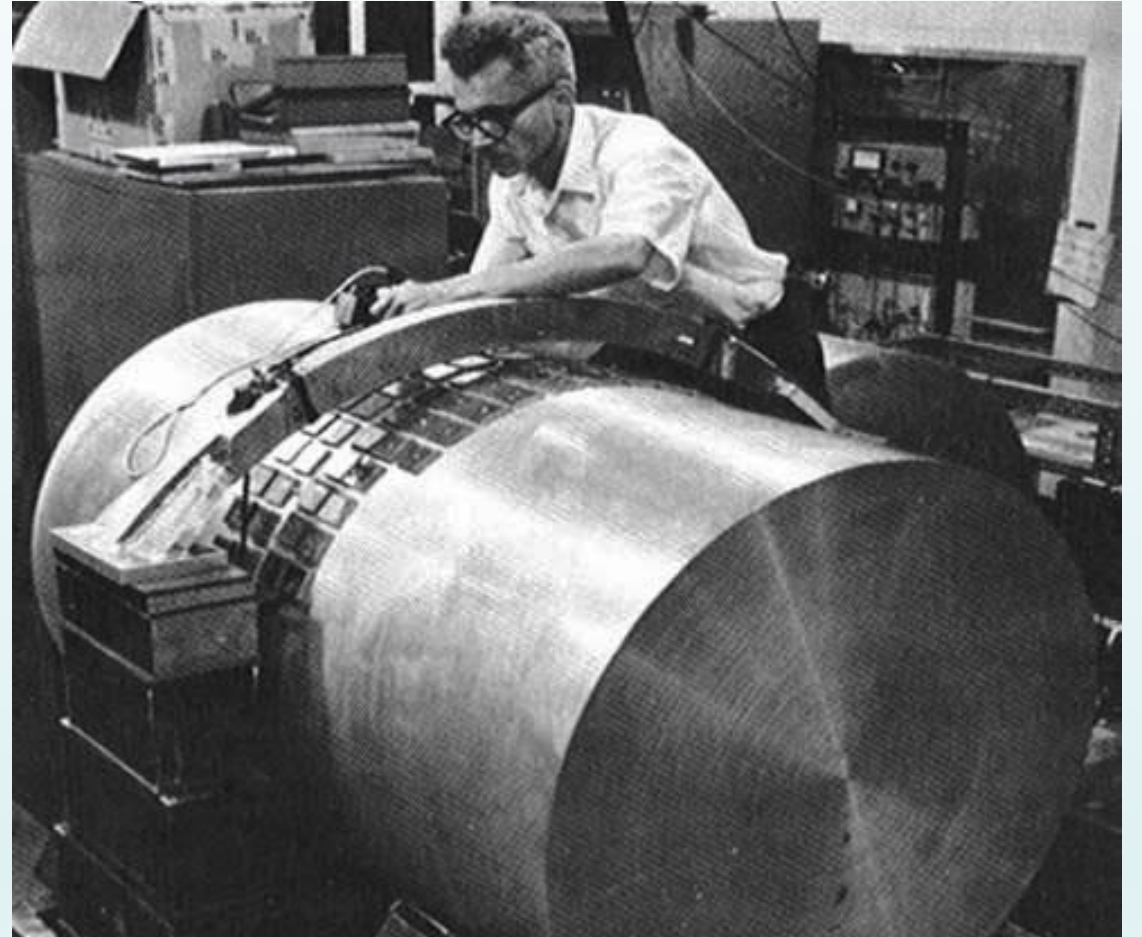
- jejich svítivost je mnohonásobně vyšší než u normálních galaxií
 - nejslabší aktivní galaktická jádra mají o více než osm řádů silnější zářivý výkon než Sgr A* (naše Galaxie není považována za aktivní galaxii)
- záření pochází z velmi malé oblasti uvnitř ($\ll 1 \text{ pc}^3$)
- na **super-hmotné černé díry** (10^5 - 10^{10} hmotnosti Slunce) v centru dochází k **mimořádné akreci hmoty**
 - akreční tok dosahuje až hmotnosti jednoho Slunce za rok

SUPERMASSIVE BLACK HOLES



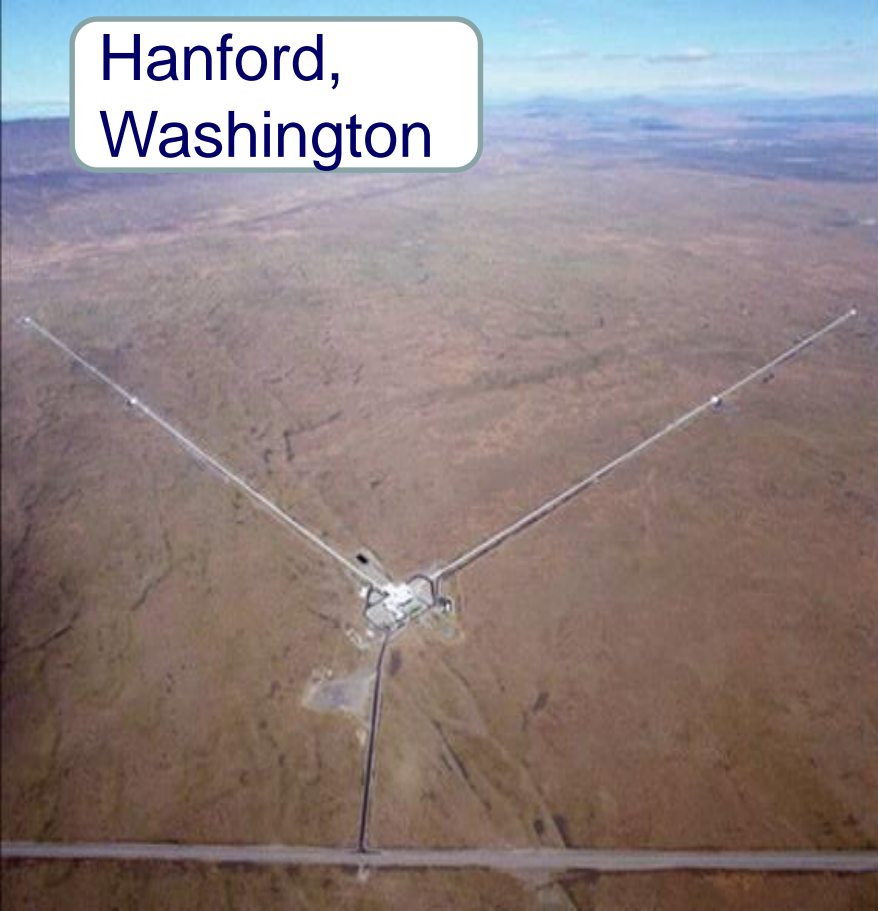
Detekce gravitačních vln

- první pokusy již na konci 50.let



J. Weber, rezonanční detektor, 1965

Hanford,
Washington



Laser Interferometer
Gravitational-Wave
Observatory (LIGO)

Livingston,
Louisiana



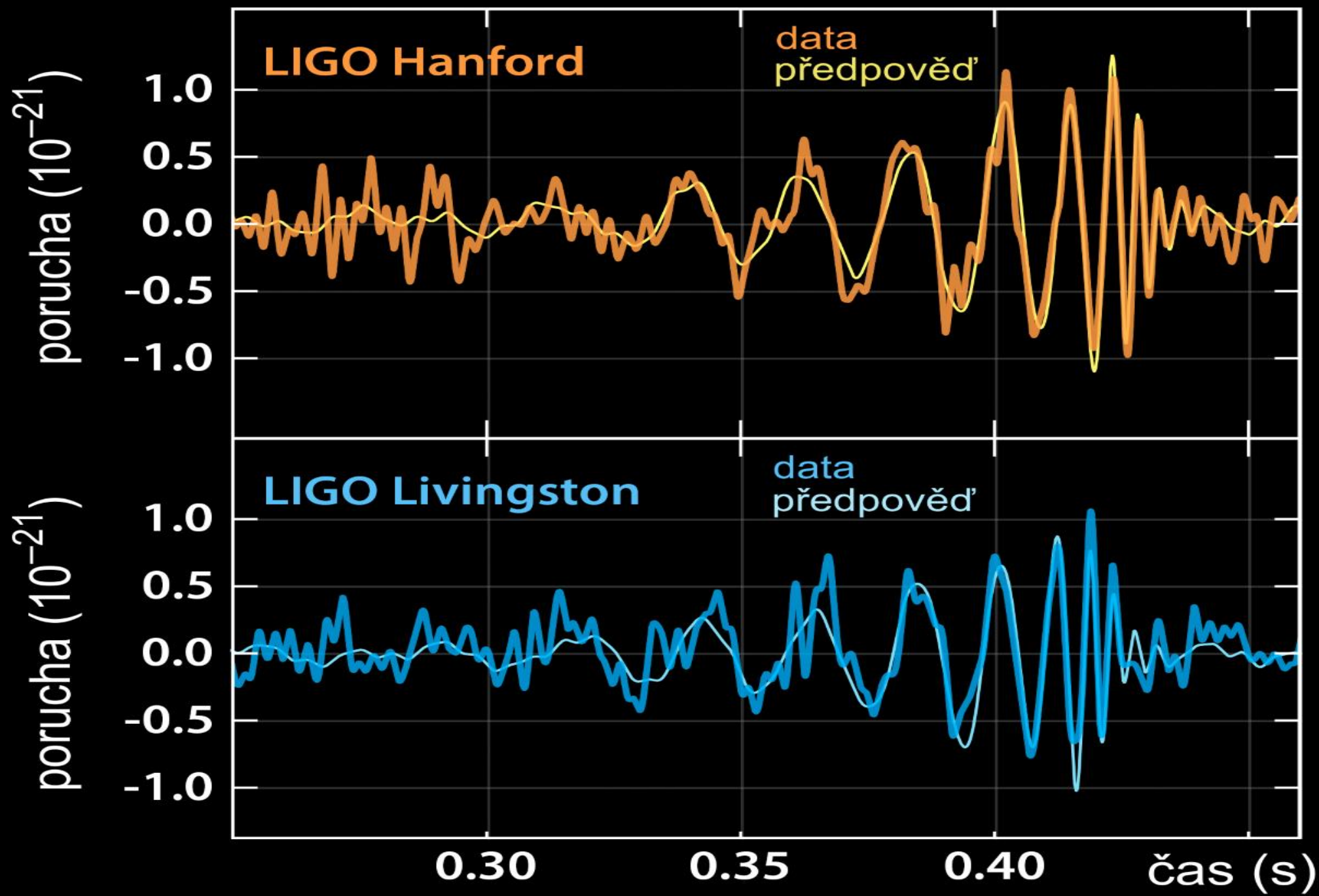
Hanford,
Washington

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)



Livingston,
Louisiana



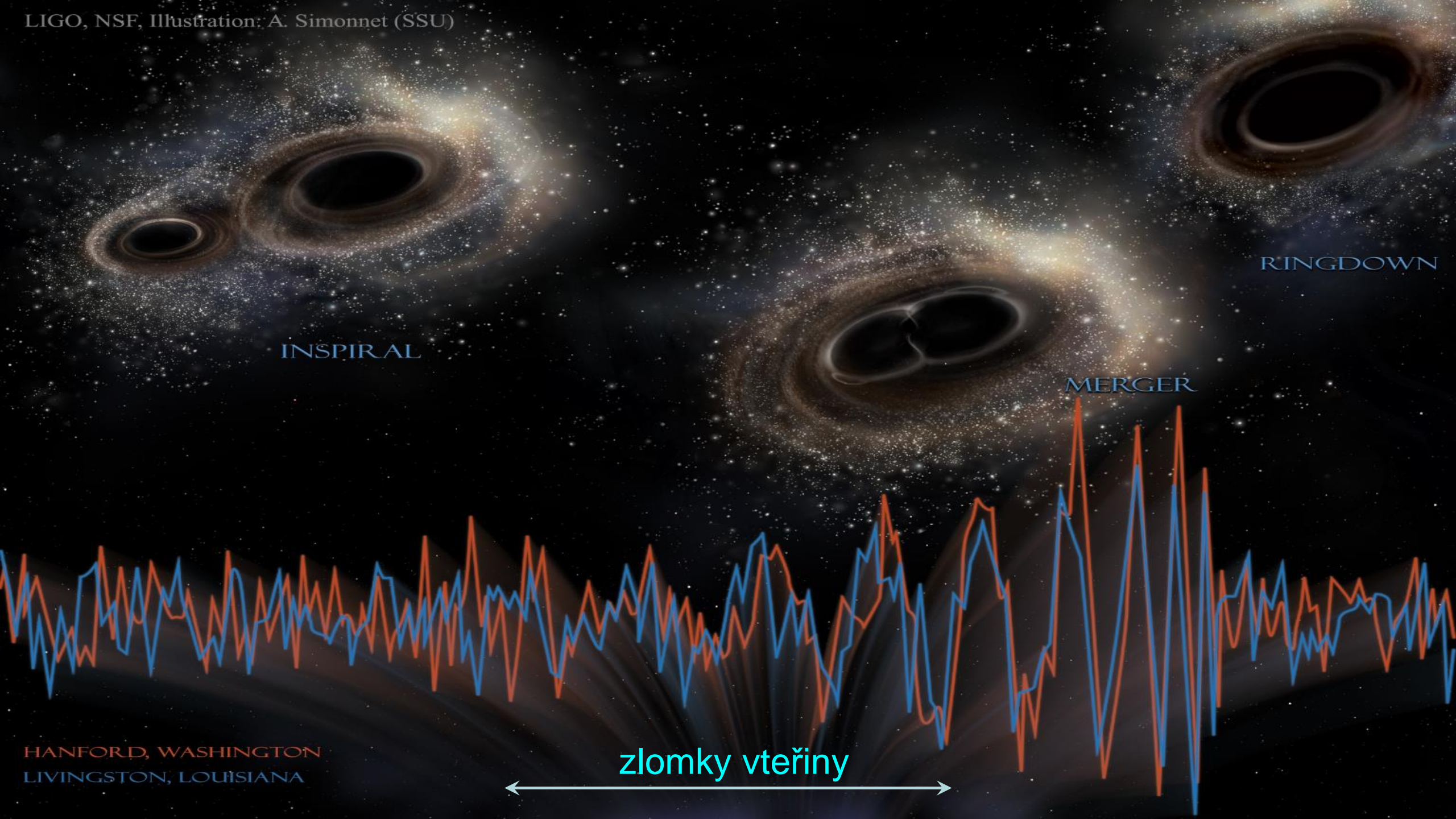




Scale of Effect Vastly Exaggerated

GW 150914

$M_1 = 36 \pm 5 M_{\odot}$
 $M_2 = 29 \pm 4 M_{\odot}$
 $M = 62 \pm 4 M_{\odot}$
 $\Delta E = 3 \pm 0.5 M_{\odot} c^2$
 $a = 0.67 \pm 0.05 \text{ GM}/c$
 $D = 410 \pm 180 \text{ Mpc}$



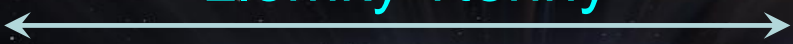
INSPIRAL

MERGER

RINGDOWN

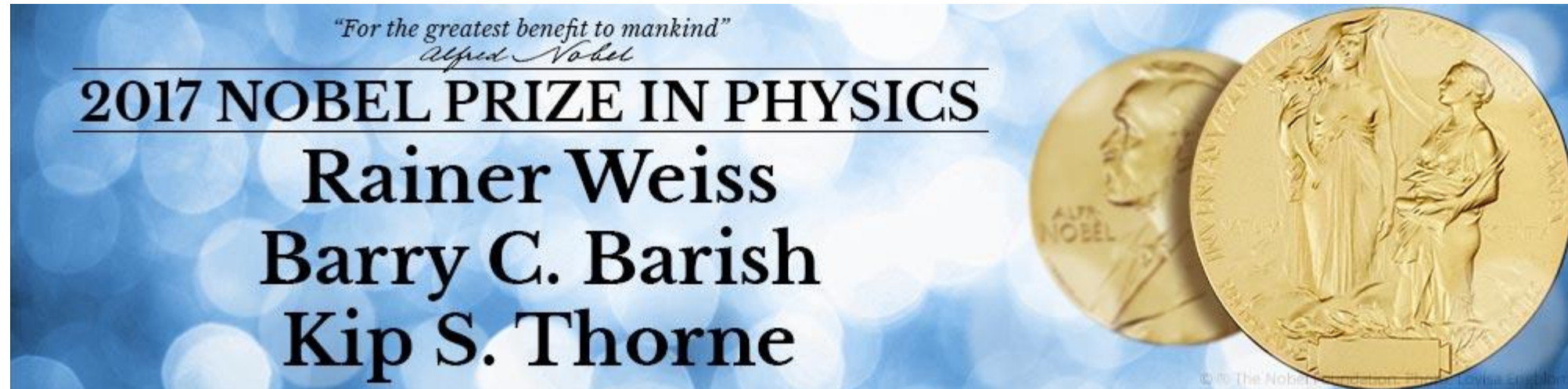
HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

zlomky vteřiny



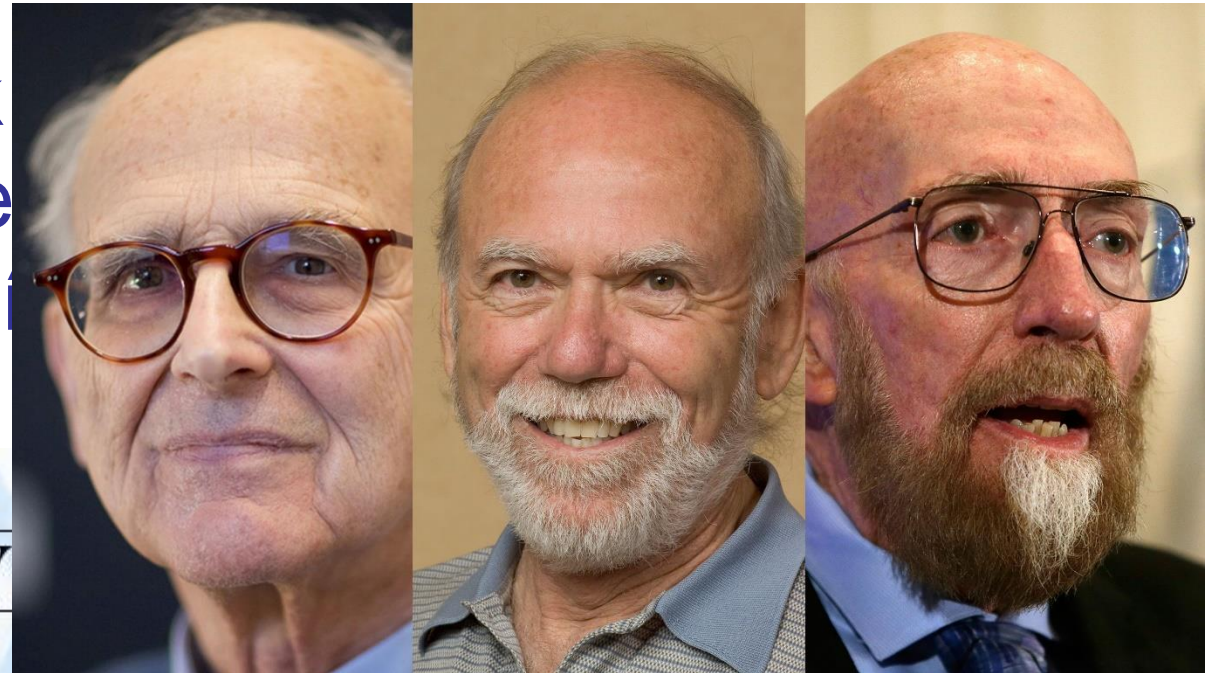
Nobelova cena za fyziku 2017

- za rozhodující příspěvek k vybudování detektoru LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) a pozorování gravitačních vln



Nobelova cena za fyziku 2017

- za rozhodující příspěvek k LIGO (Laser Interferometer Observatory) a pozorování



"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

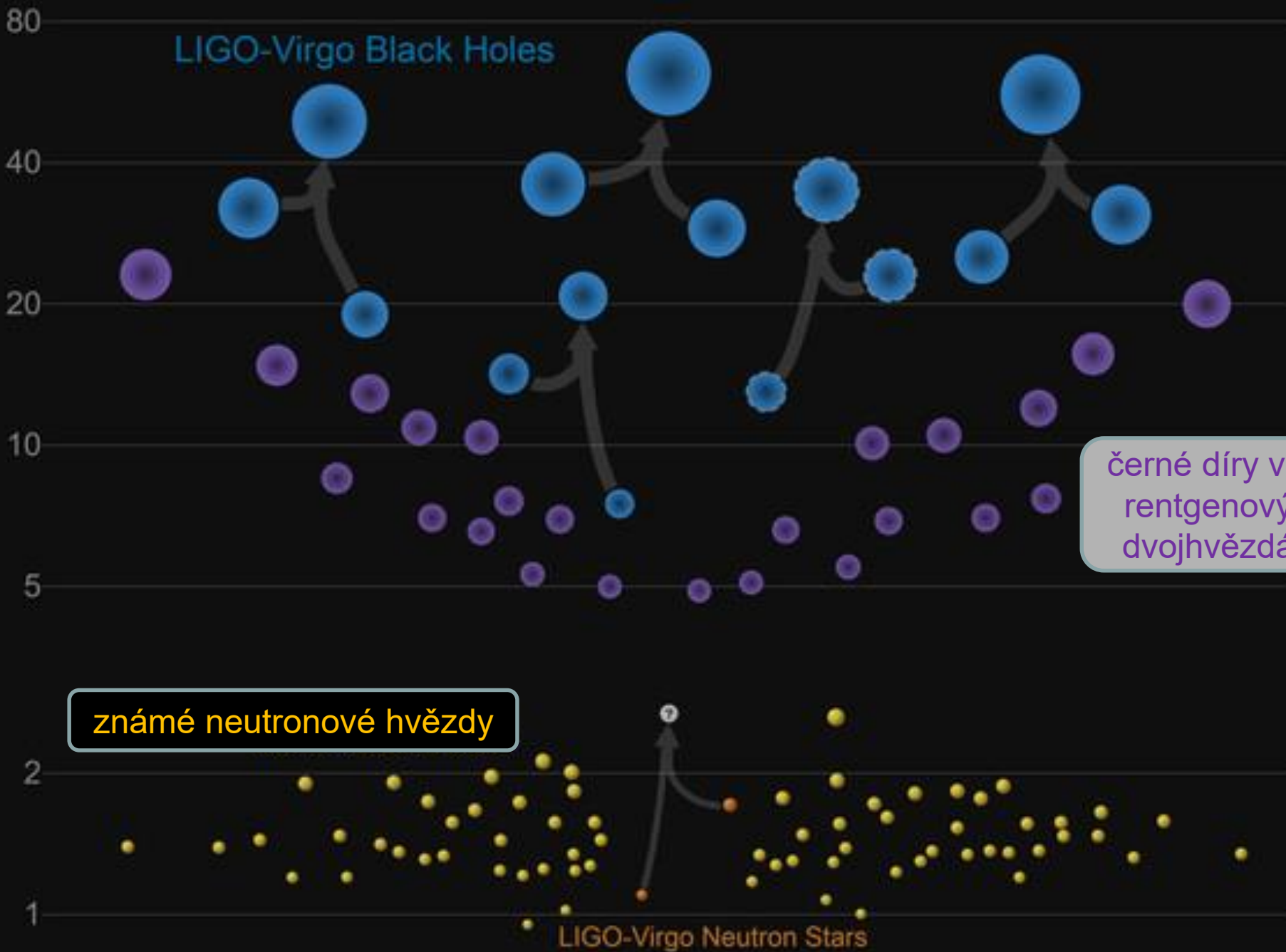
**Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne**



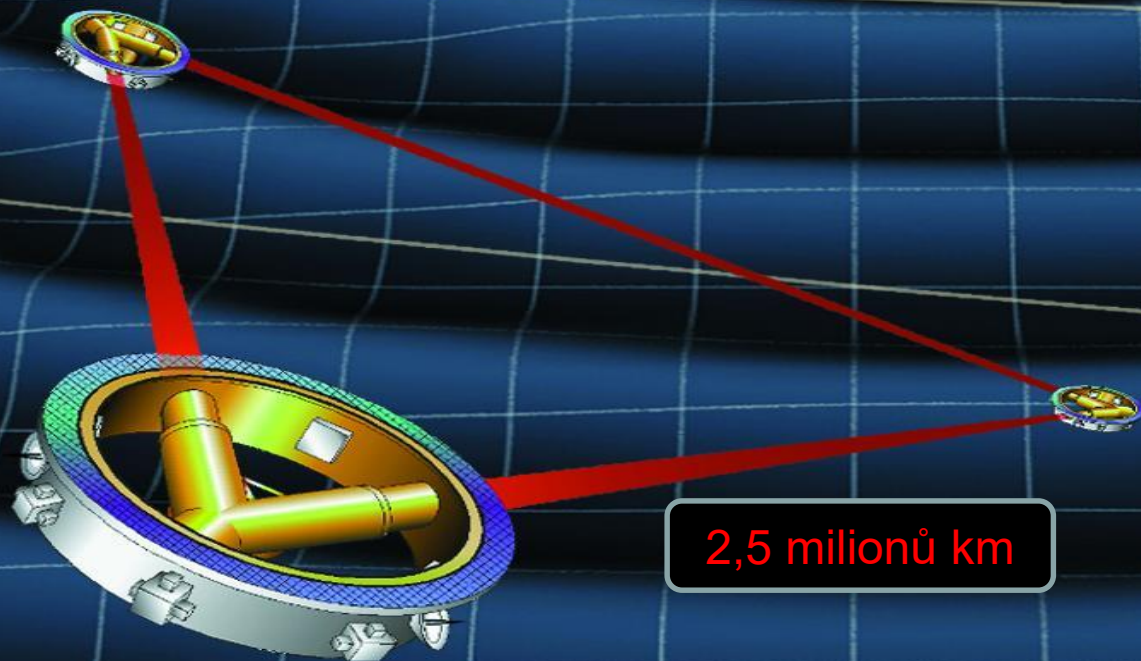
© The Nobel Prize in Physics 2017

hmotnost

[v násobcích hmotnosti Slunce]



vesmírná mise
Evropské kosmické
agentury LISA



2,5 milionů km

zdroje

perioda

frekvence

detektory

kvantové fluktuace raného vesmíru

dvojice obřích černých děr

dvojice kompaktních hvězd

objekty zachycené obří černou dírou

supernovy

miliardy roků

roky

hodiny

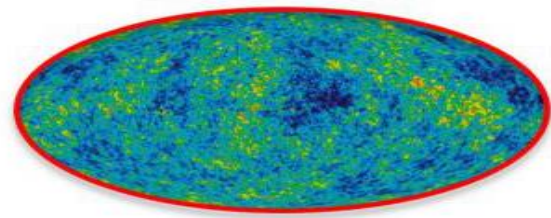
sekundy

ms



10^{-16} 10^{-14} 10^{-12} 10^{-10} 10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^0 10^2 (Hz)

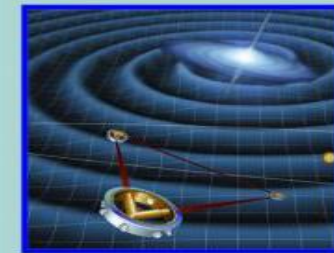
polarizace reliktního záření



síť pulzarů

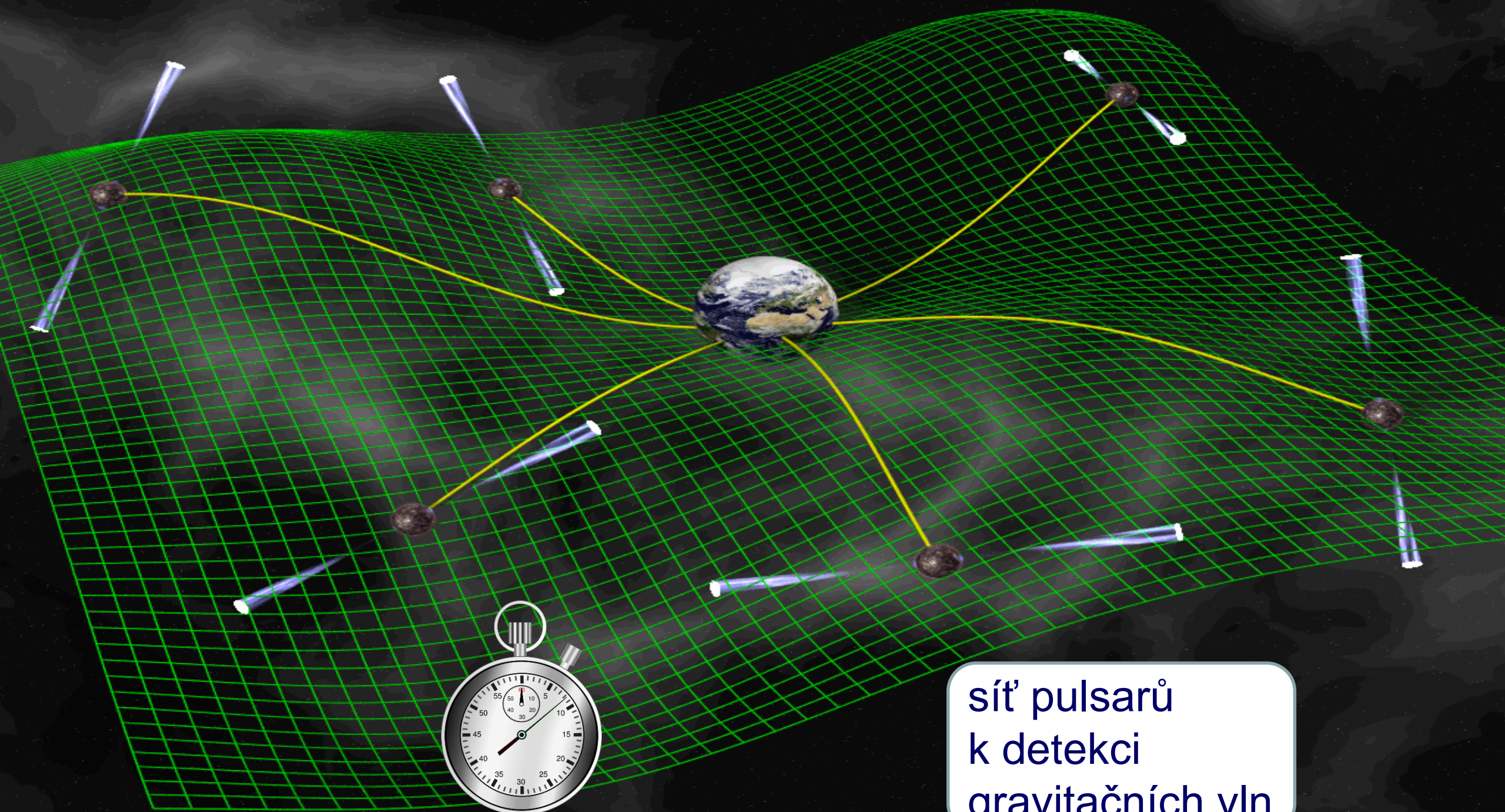


vesmírné interferometry



pozemské interferometry





síť pulsarů
k detekci
gravitačních vln

Černé díry ve vesmíru existují,
můžeme je i spatřit dalekohledem?

Stelární vs. superhmotná černá díra



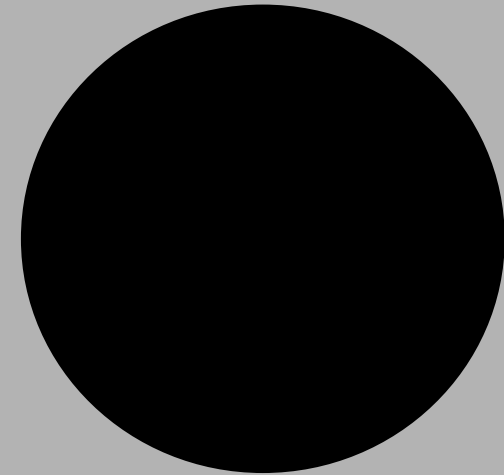
Cyg X-1

hmotnost: $15 M_{\odot}$

vzdálenost: 6000 světelných let

průměr: 45 km

úhlová velikost: 10^{-4} μ arcsec



Sgr A*

hmotnost: 4 milióny M_{\odot}

vzdálenost: 18 000 světelných let

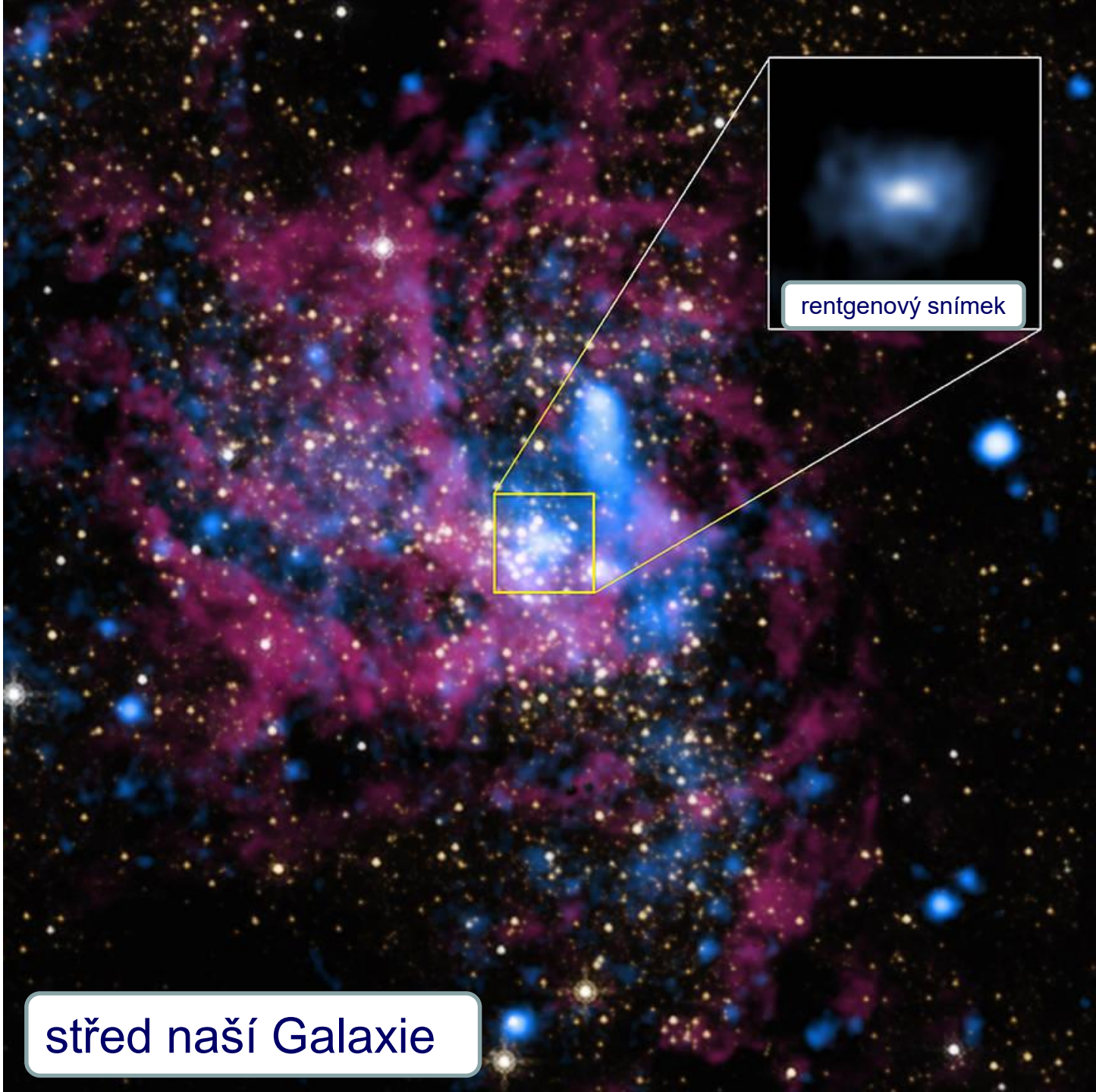
průměr: 13 milionů km

úhlová velikost: 54 μ arcsec



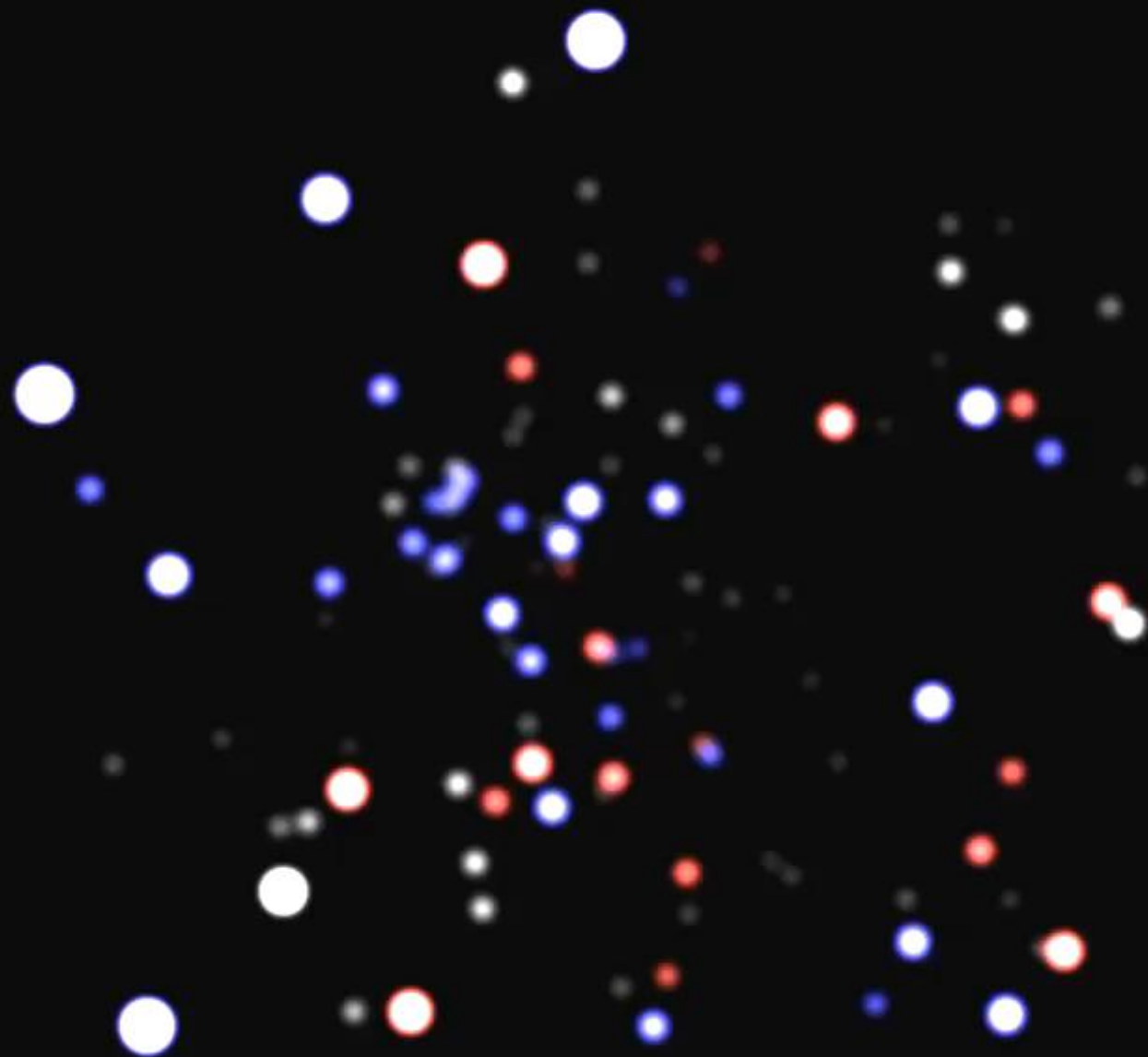
Mléčná dráha

Sgr A*



rentgenový snímek

střed naší Galaxie

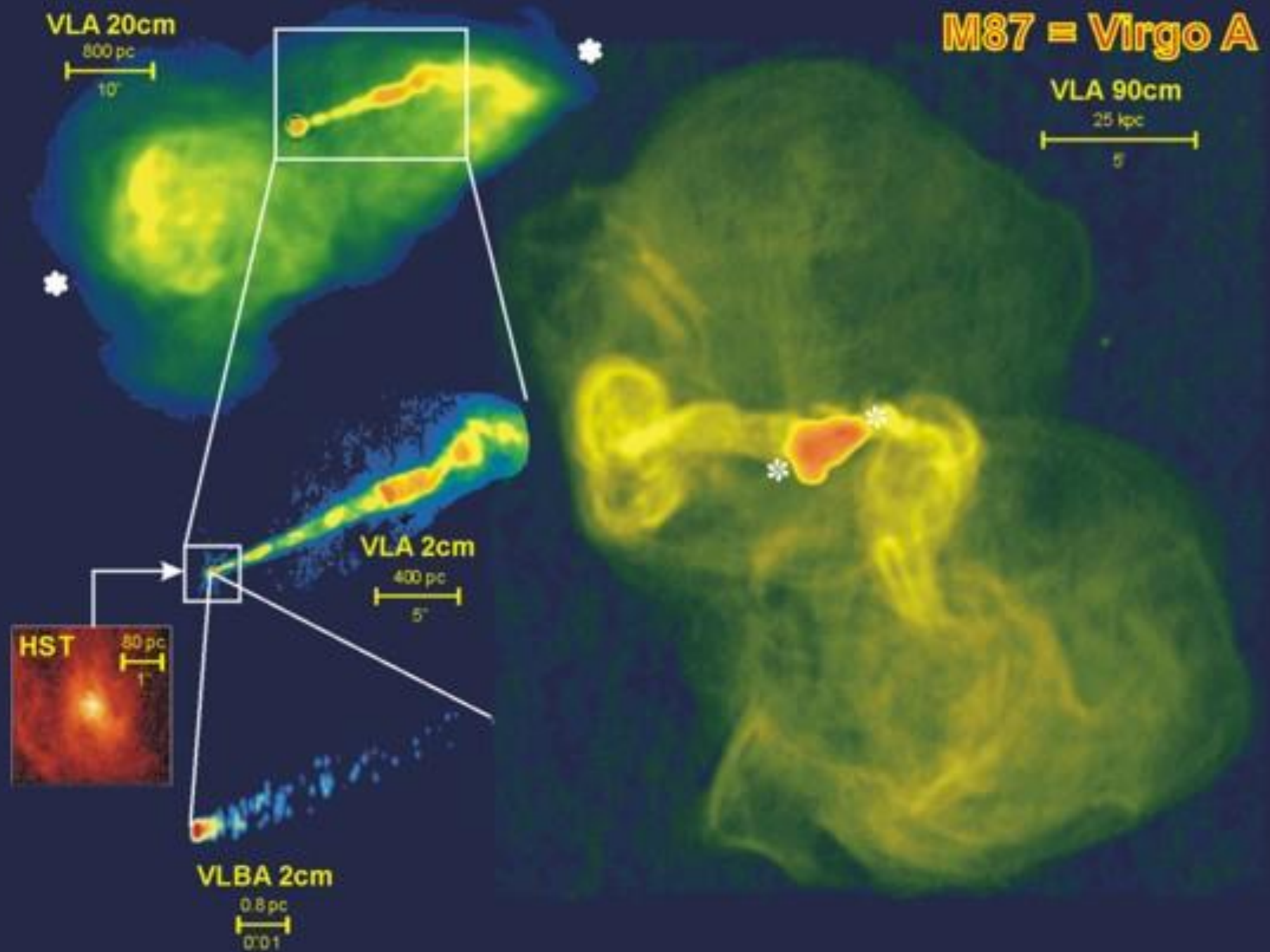


Sgr A*

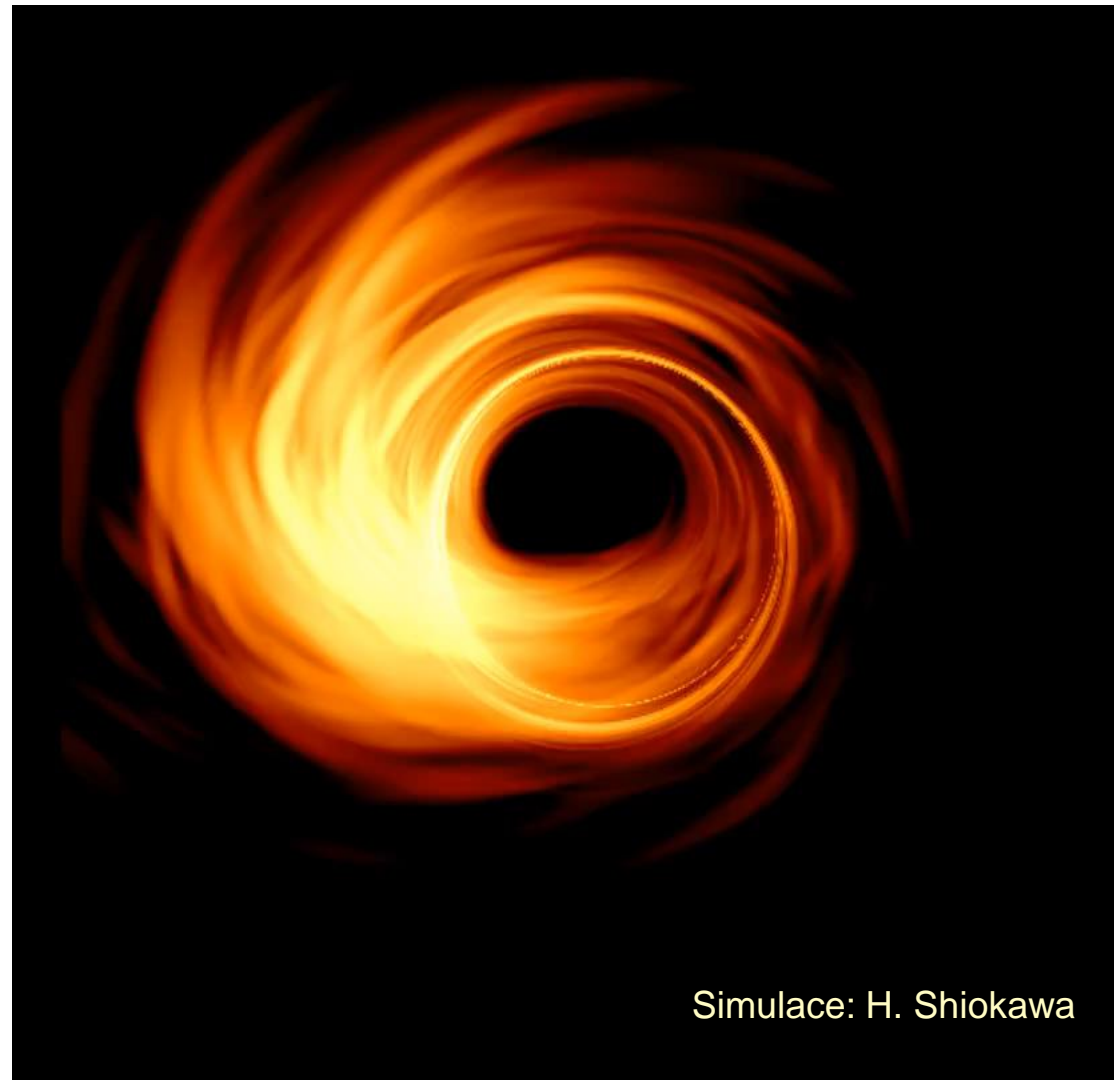
- hmotnost $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ (Ghez+2008)
- akreční tok $\leq 10^{-8} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$
- luminozita $\sim 100 L_{\odot} \sim 10^{33} \text{ erg/s}$ (Baganoff+2003, Yusef-Zadeh+2010)
- vzdálenost 25 640 světelných let, úhlová velikost $2\sqrt{27} \left(\frac{GM_{BH}}{c^2 D} \right) \sim 54 \mu\text{arcsec}$

M 87

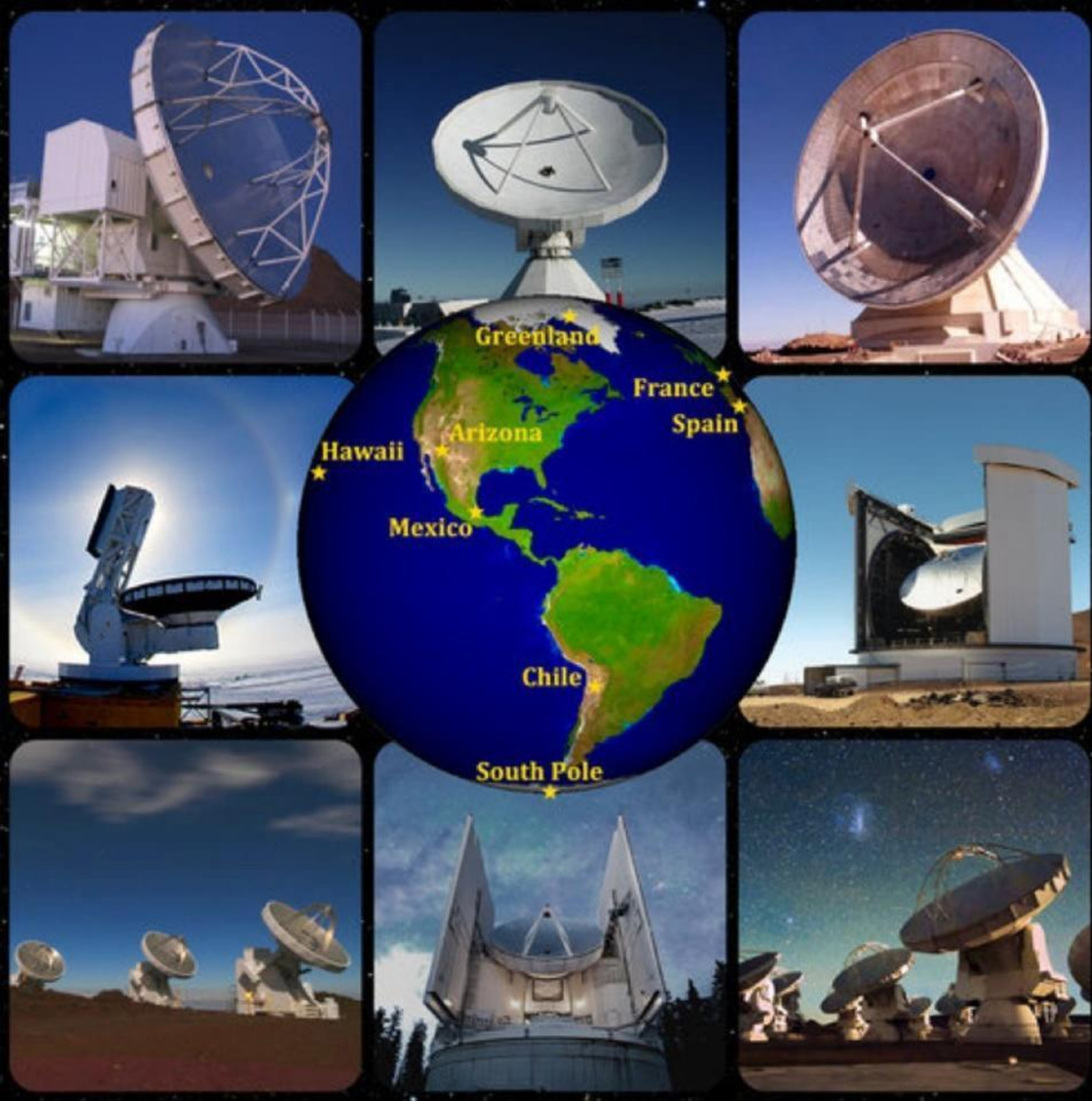
- masivní eliptická galaxie v Kupě galaxií v Panně
- hmotnost černé díry $\sim 7 \times 10^9 M_{\odot}$ (Oldham & Auger, 2016)
- akreční tok $< 1 M_{\odot}/10\text{yr}$ (90 M_{Z}/den) (Di Matteo+2002, Moscibrodzka+2016)
- luminozita $\sim 10^{42} \text{ erg/s}$, relativistický výtrysk
- vzdálenost 53 900 000 světelných let, úhlová velikost: 38 μarcsec



Event Horizon Telescope



Simulace: H. Shiokawa





První snímek černé
díry v M87 (EHT)



Budoucí perspektiva metody interferometrie

- interferometrie využívá kombinaci více dalekohledů
- v současnosti nejvhodnější je vlnová délka v sub-mm oblasti
- snímek první černé díry v M87
 - data pořízena v dubnu 2017, ohromné množství dat převezeno do výpočetních center a zpracováno 4 nezávislými týmy
 - snímek publikován 10. dubna 2019
- budoucnost
 - brzy snímek Sgr A*
 - možná interferometrie v rtg oblasti?
 - návrh takové mise součástí ESA Voyage 2050 (Jiří Svoboda a Michal Bursa z ČR součástí asi 25-členného týmu), právě diskutováno v Madridu

Závěr

- černé díry lidé nejprve vymysleli ve svých úvahách (Michel, Einstein, Schwarzschild, Wheeler, Kerr,...)
- pak zjistili jejich existenci (rentgenové dvojhvězdy, aktivní galaxie)
- následně je slyšeli (gravitační vlny detekované v roce 2015)
- aby je nakonec v roce 2019 i poprvé „vyfotili“ (Event Horizon Telescope)

Děkuji za pozornost!!!

jiri.svoboda@asu.cas.cz