

Obecná teorie relativity a dnešní obraz vesmíru

Jiří Podolský

Ústav teoretické fyziky
Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzita Karlova v Praze

Velké Meziříčí

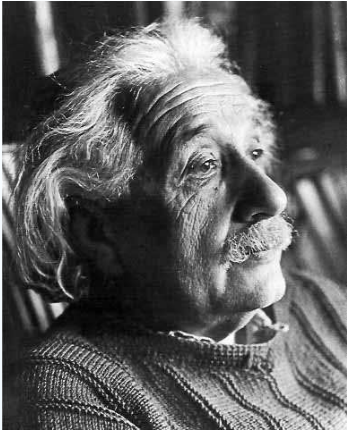
24. 8. 2010

Obecná teorie relativity a dnešní obraz vesmíru

aneb

Einsteinova teorie gravitace a její astronomické aplikace

obecná relativita alias Einsteinova teorie gravitace



Albert Einstein

Praha (duben 1911 – červenec 1912)

Curych (červenec 1912 – březen 1914)

Berlín listopad 1915:

**prostor ani čas nejsou neměnné,
protože hmota je deformuje**

- geometrie prostoročasu je určena hmotným obsahem
a naopak, podstatou gravitačních jevů je že
- hmota se volně pohybuje v neeuklidovské geometrii

Einsteinovy rovnice gravitačního pole:

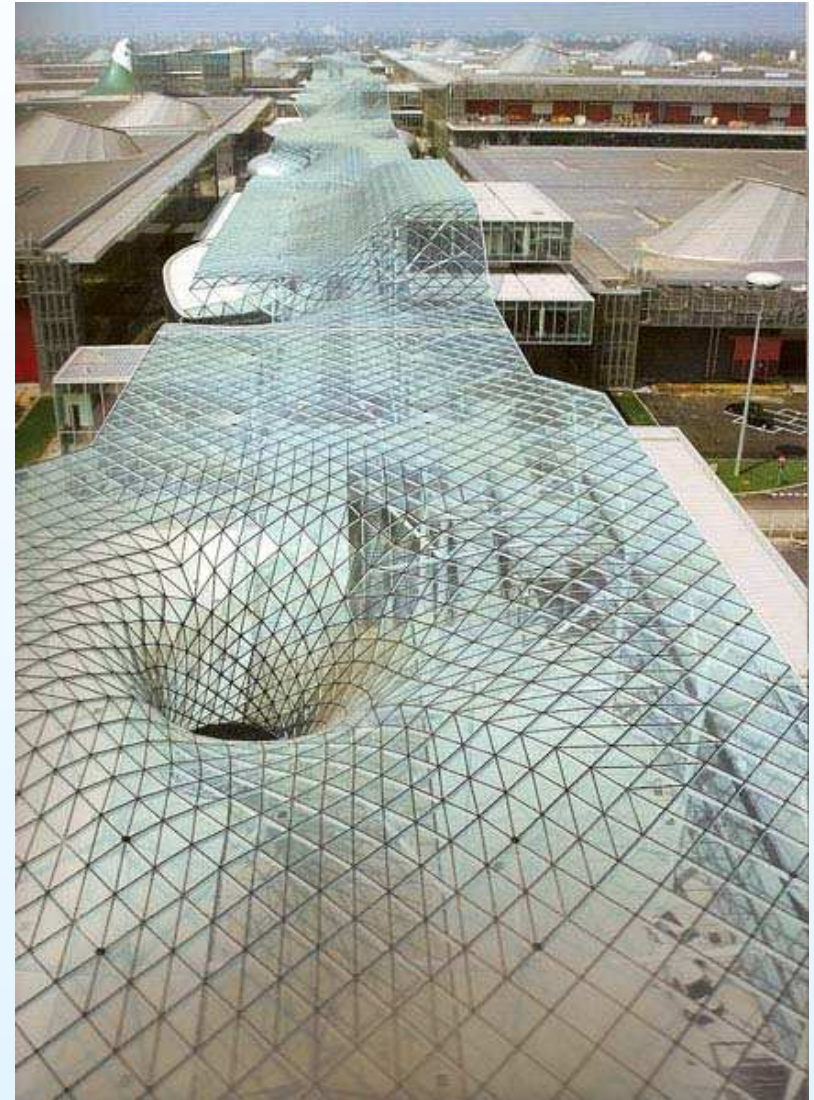
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

↑
metrika

geometrie

↑
tenzor energie-hybnosti

hmota



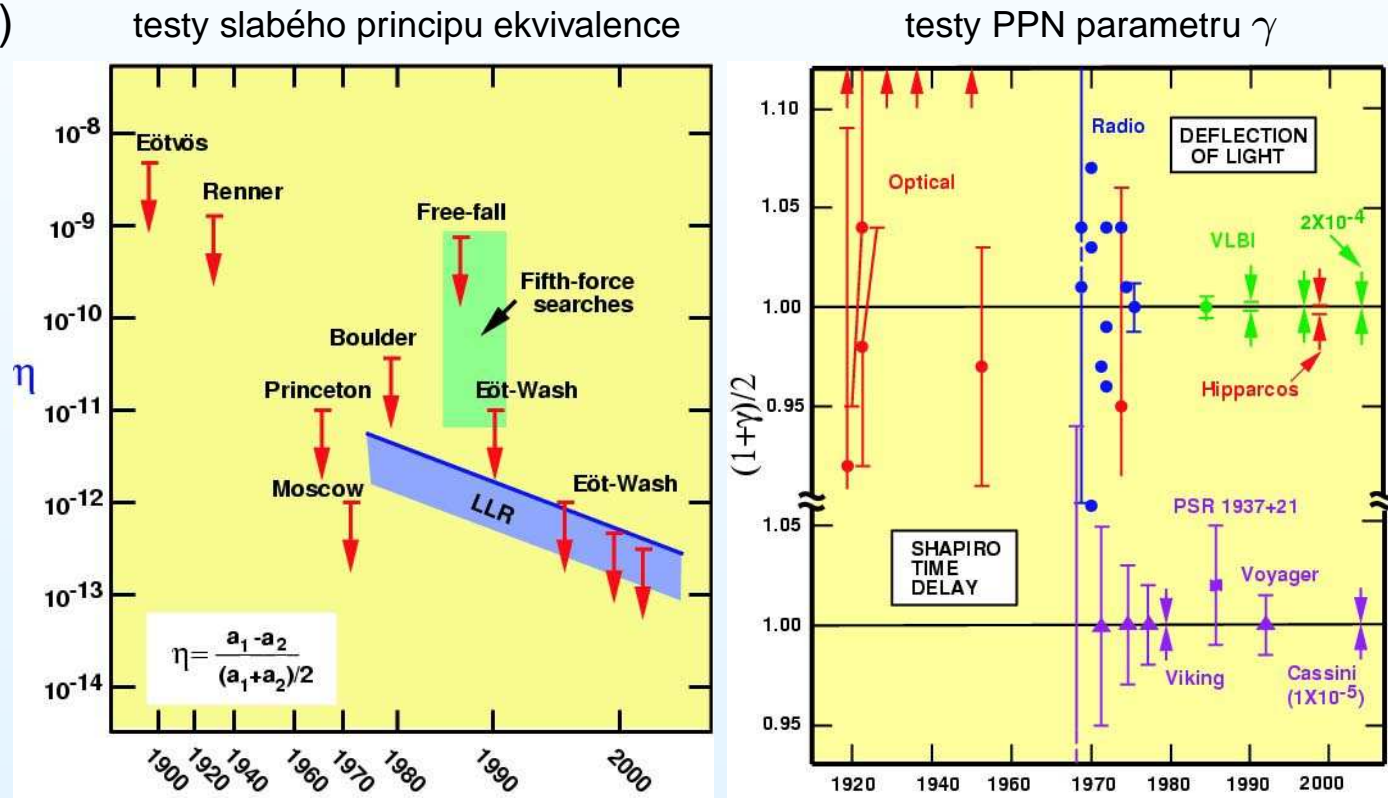
Massimiliano Fuksas, 2005
(Nový veletržní areál, Milán, Itálie)

testy obecné teorie relativity

klasické testy:

dodnes stovky dalších precizních ověření, například:

- ohyb paprsků (1,75")
- stáčení orbit (43")
- rudý posuv



zdroj: Clifford M. Will, *Living Rev. Relativity*, **9** (2006) 3

dnešní experimentální hodnoty PPN parametrů

parametr	horní mez	efekt	měření
$\gamma - 1$	4×10^{-4} 2×10^{-5}	ohyb paprsků časové zpoždění	radiointerferometrie sledování Cassini
$\beta - 1$	3×10^{-3}	stáčení perihelia	helioseismologie
ξ	10^{-3}	pozemské slapy	gravimetrie
α_1	10^{-4}	polarizace orbit	vzdálenost Měsíce
α_2	4×10^{-7}	precese spinu	rotace Slunce
α_3	4×10^{-20}	zrychlení pulsarů	statistika \dot{P} pulsarů
ζ_2	4×10^{-5}	binární pulsary	\ddot{P} pro PSR 1913+16
ζ_3	10^{-8}	Newtonův 3. zákon	zrychlení Měsíce

γ míra zakřivení prostoročasu

β míra nelinearity pole

ξ privilegovanost míst

α_i privilegovanost směrů

ζ_i nezachování celkové hybnosti

parametrický post-newtonovský formalismus (Nordtvedt a Will)

obecná relativita: všechny parametry jsou přesně 0

binární pulsary

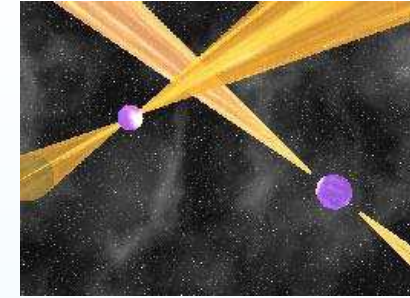
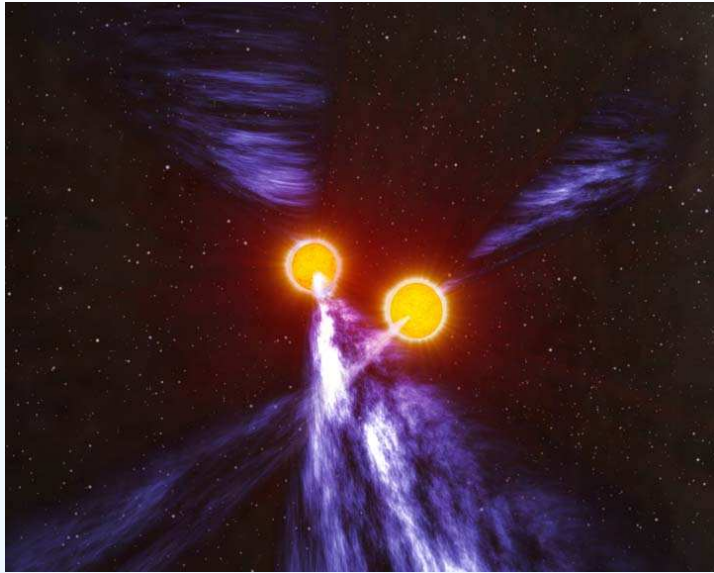
system dvou neutronových hvězd obíhajících velmi blízko sebe
významné testy obecné relativity v silných gravitačních polích:



		stáčení dráhy:	přibližování po spirále:
PSR B1913+16	(1974)	4,2 ° za rok	3,5 m za rok
PSR J0737+3039	(2003)	16,9 ° za rok	2,6 m za rok

dvojitý pulsar PSR J0737+3039

obě složky pozorujeme jako pulsary, navíc dochází k zákrytům!



$$m_A = 1,337 M_{\odot}$$

$$P_A = 0,023 \text{ s}$$

$$m_B = 1,250 M_{\odot}$$

$$P_B = 2,773 \text{ s}$$

$$T = 2,454 \text{ hod}$$

$$e = 0,087779$$

$$i = 88^{\circ}$$

$$a = 878 \text{ tis. km}$$

zákryt 30 s když A prochází za B

⇒ mapování magnetosféry

unikátní relativistická laboratoř:

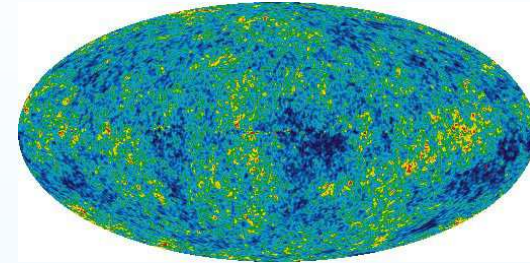
- stáčení dráhy $16,9^{\circ}$ za rok
- přibližování po spirále $2,6 \text{ m}$ za rok
- rudý posuv rotační periody $0,38 \text{ ms}$
- časové zpoždění $90 \mu\text{s}$
- geodetická precese rotačních os: perioda 75 let (A) a 71 let (B)

závěr: Einsteinově teorii můžeme zatím opravdu důvěřovat

hlavní aplikace obecné teorie relativity

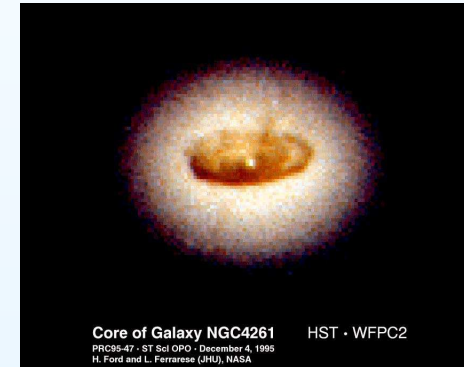
- **kosmologie:** globální modely vesmíru

studium struktury a evoluce kosmu



- **černé díry:** relativistická astrofyzika

supernovy, akreční disky
obří černé díry v centrech galaxií
gravitační čočky

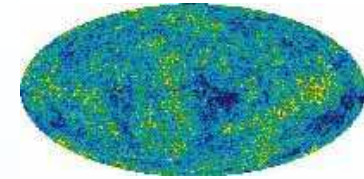


- **gravitační vlny:** kosmologické i astrofyzikální

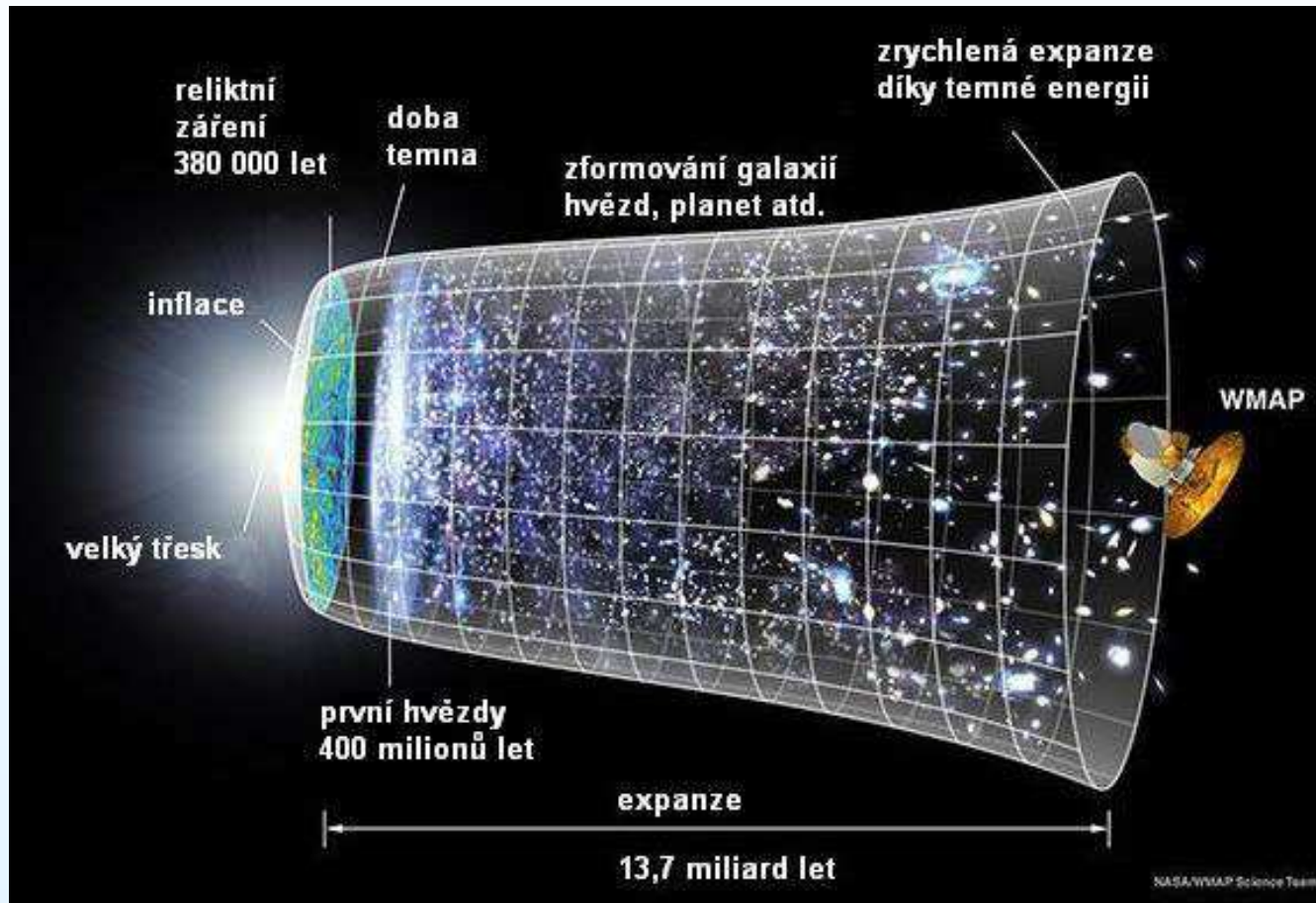
rozvlnění prostoročasové geometrie
vzniklé při explozích, kolapsech a srážkách



kosmologie

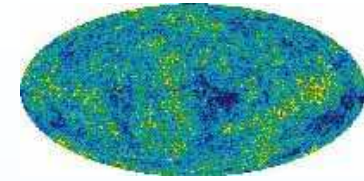


dnešní model vesmíru: FLRW Λ CDM



- globálně homogenní a izotropní prostor expandující 13,7 mld let z velkého třesku
- dnes dominantní kosmologická konstanta (72 %) a nebaryonová temná hmota (23 %)

stručné dějiny kosmologie 20. století



první modely a pozorování (1917-1929)

- Einstein (1917): model statického vesmíru – zavedení Λ jako “antigravitace”
- de Sitter (1917): rozpínající se prázdný vesmír s Λ
- Friedmann (1922): model rozpínajícího se vesmíru s hmotou
- Lemaître (1927): “prvotní atom” - zrod teorie velkého třesku
- Hubble a Humason (1929): rudý posuv spekter galaxií → vesmír se rozpíná

souboj teorií velkého třesku a stacionárního vesmíru (1949-1965)

Gamow, Alpher, Herman versus Hoyle, Gold, Bondi

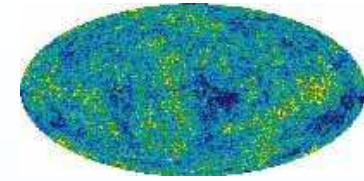
- pochopení nukleosyntézy prvků: (30.-50. léta)
- zpřesnění stáří vesmíru: Baade (1952), Sandage (1958)
- prokázání evoluce vesmíru: rádiové galaxie Ryle (1961), kvasary Schmidt (1963)
- existence reliktního mikrovlnného záření: Penzias a Wilson (1965)

triumf teorie velkého třesku a obecné teorie relativity

souhlasí s řadou nezávislých přesných pozorování

struktura a stáří kosmu, zastoupení prvků, reliktní záření: COBE (1989), WMAP (2001)

přesné prostoročasy v kosmologii



FLRW modely (Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker a další, 20. léta):

prostor je homogenní a izotropní (má 6 symetrií) \Rightarrow konstantní křivost

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

$k = 0, +1, -1$ odpovídá geometrii E^3, S^3, H^3

expanze vesmíru popsána funkcí $R(t)$, jež řeší rovnici

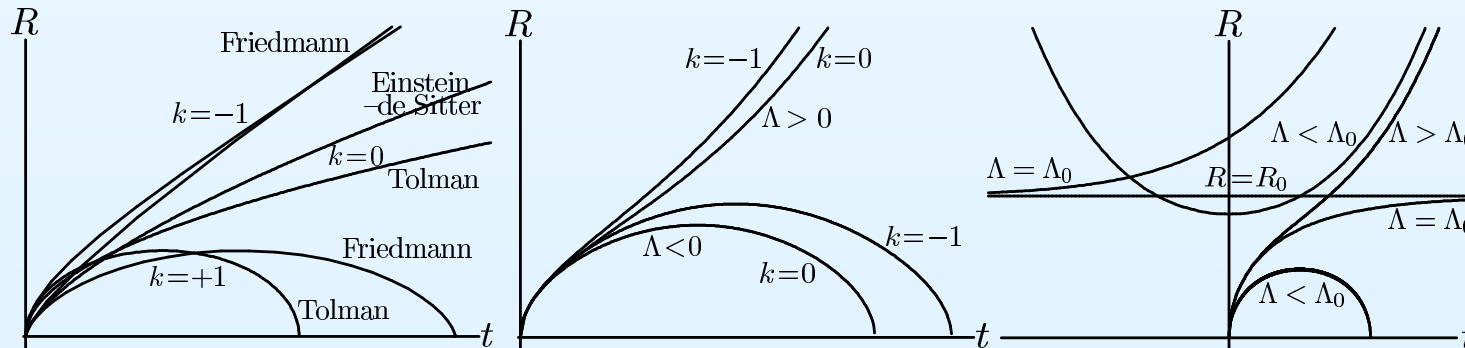
$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\text{prach}}{R^3} + \frac{\text{záření}}{R^4} \right)$$

↑
kosmologická
konstanta

↑
křivost
prostoru

↑
hustota hmoty

typická řešení: expanze z velkého třesku v $R = 0$ (singularita), $R(t \rightarrow \infty) \sim \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t\right)$



struktura, evoluce a zánik hvězd

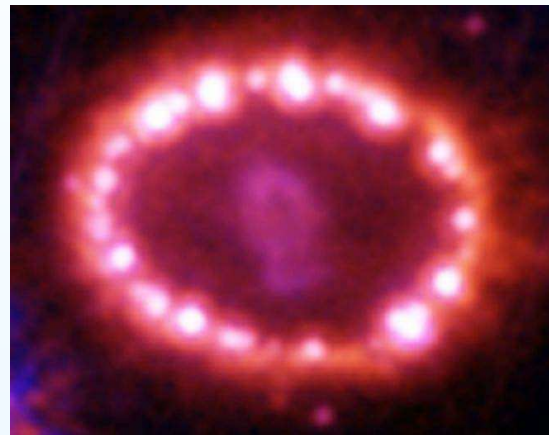


bílý trpaslík



planetární mlhovina Helix

neutronová hvězda



supernova 1987A

černá díra

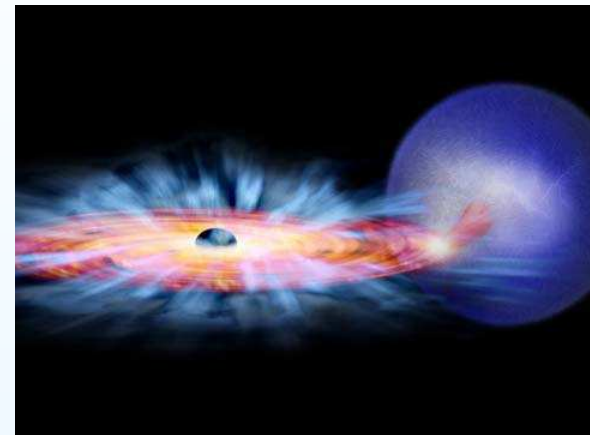
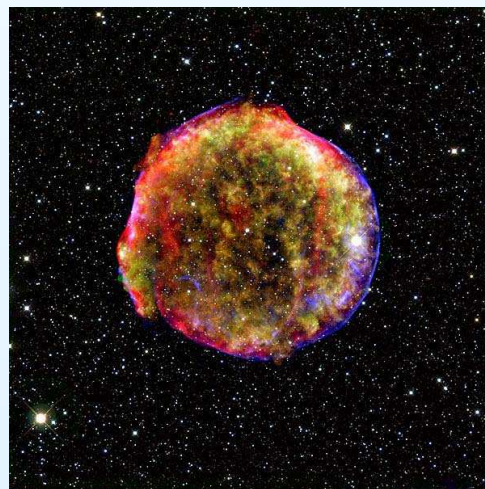
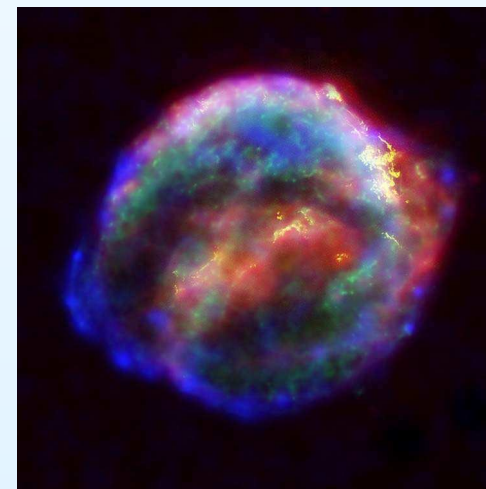


schéma binární soustavy

výbuch supernovy



Tychonova supernova (1572)

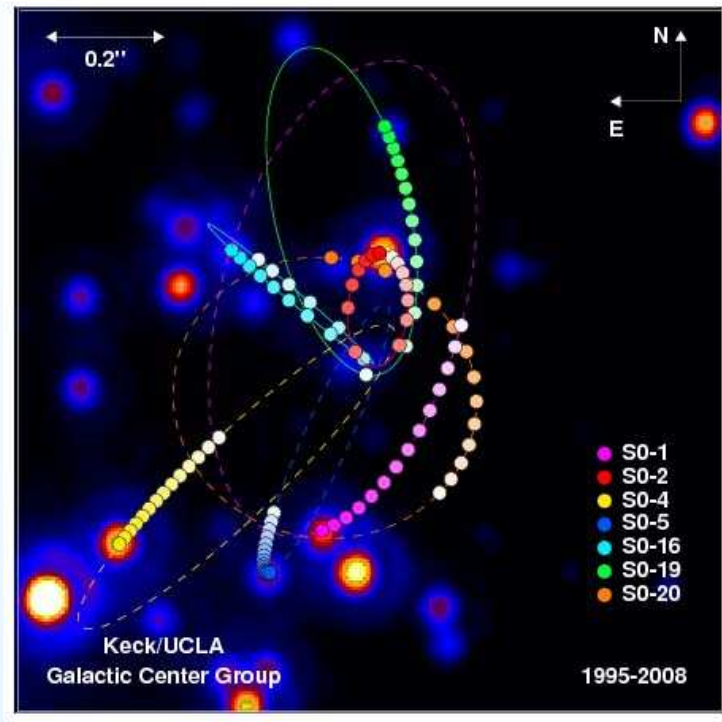


Keplerova supernova (1604)

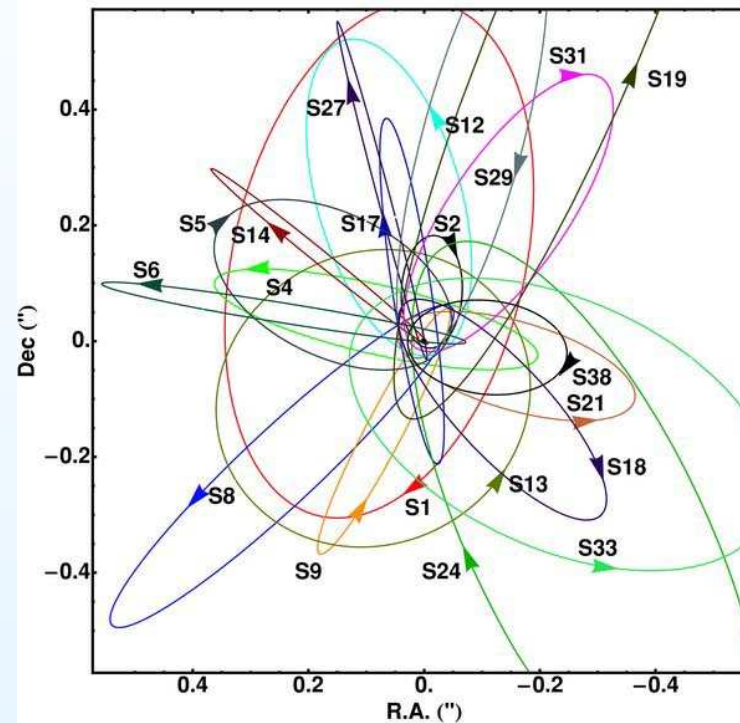
černé díry jsou v centru většiny galaxií



velká rychlost pohybu hvězd blízko centra naší Galaxie (Sgr A*):

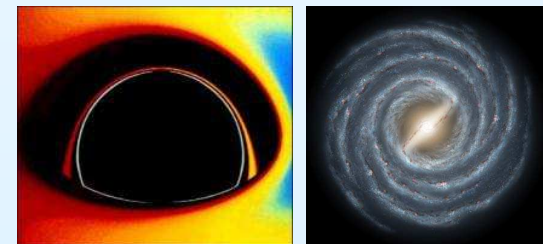


zdroj: Ghez et al. (2008)



zdroj: Gillessen et al., *ApJ*, **692** (2009) 1075

v centru Galaxie je černá díra hmotnosti $4 \times 10^6 M_{\odot}$

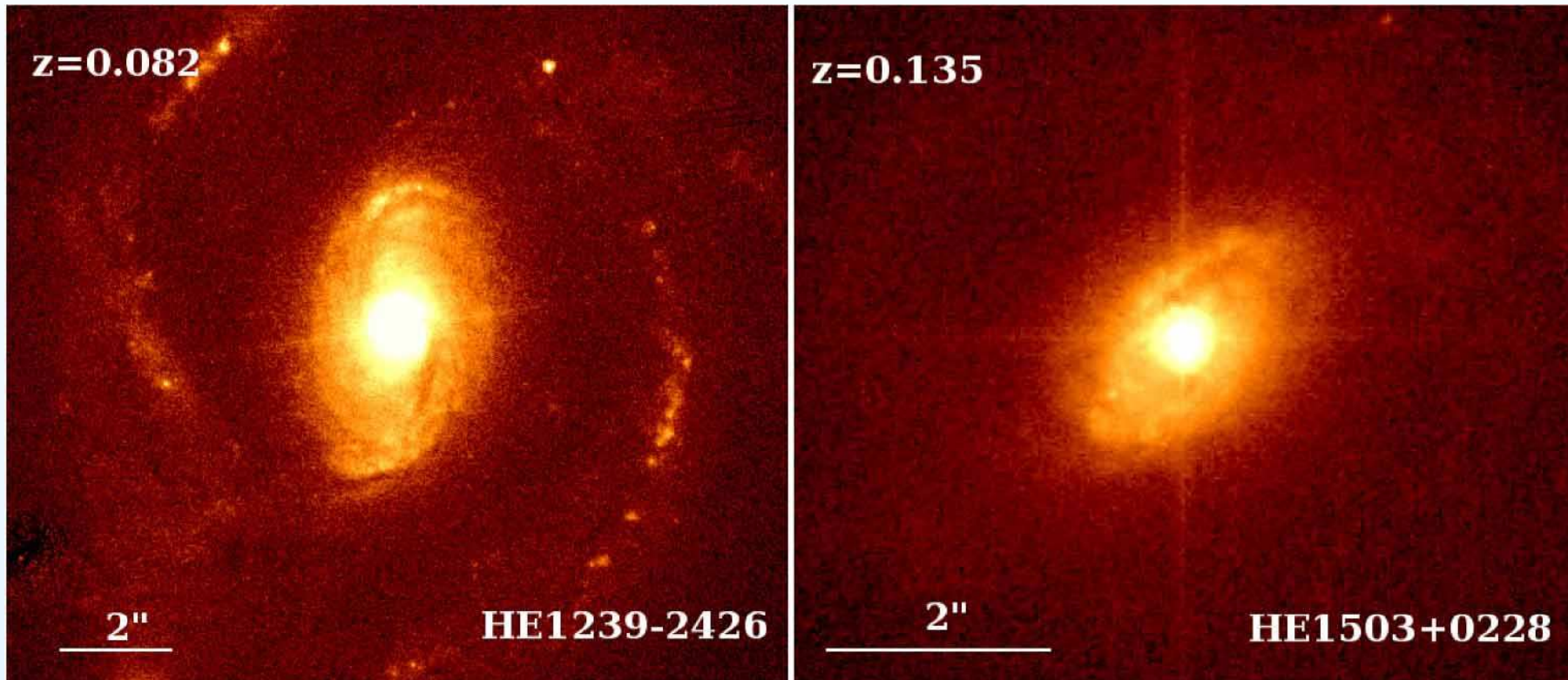


kvasary



objeveny v roce 1963 (3C 273)

nedávno prokázáno, že kvasary jsou **jádra nesmírně vzdálených aktivních galaxií:**



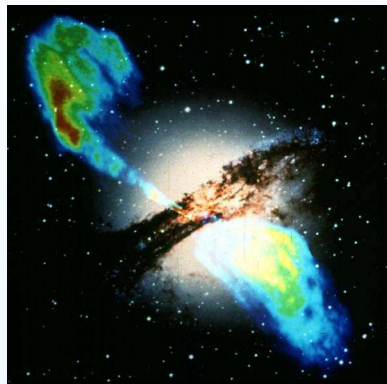
Two Quasars with Their Host Galaxy
(HST)

ESO PR Photo 28a/05 (September 14, 2005)

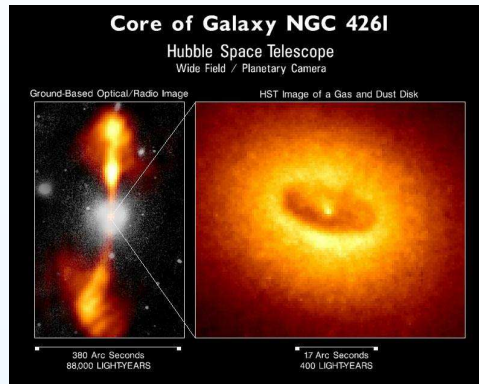
© ESO



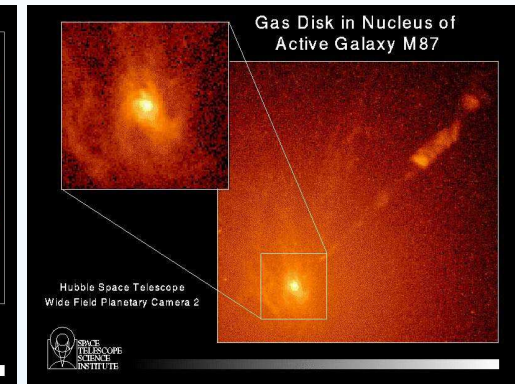
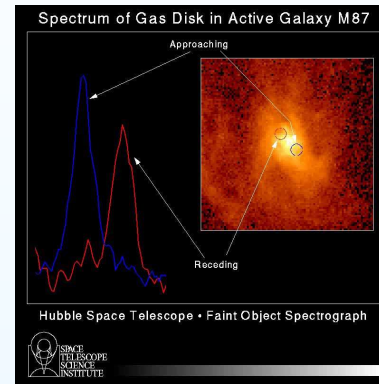
aktivní galaxie s výtrysky



Centaurus A



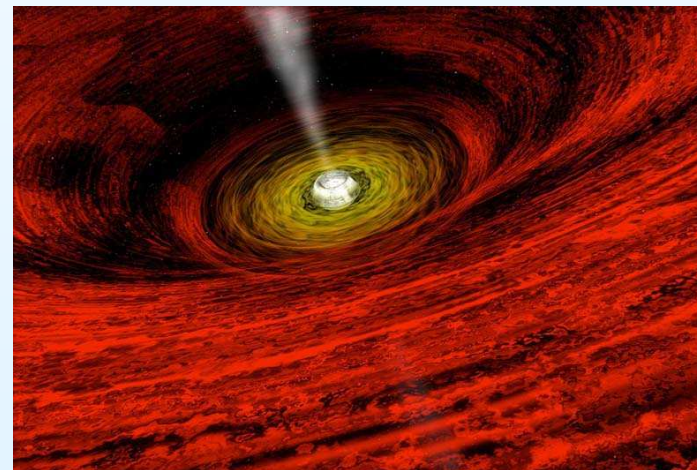
NGC4261



M87

centrum kvasaru či aktivní galaxie:
obří černá díra + akreční disk + výtrysky

$$\sim 10^9 M_{\odot}$$



přesné černoděrové prostoročasy



Schwarzschild (1916): **hmotnost m** (sféricky symetrické gravitační pole)

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

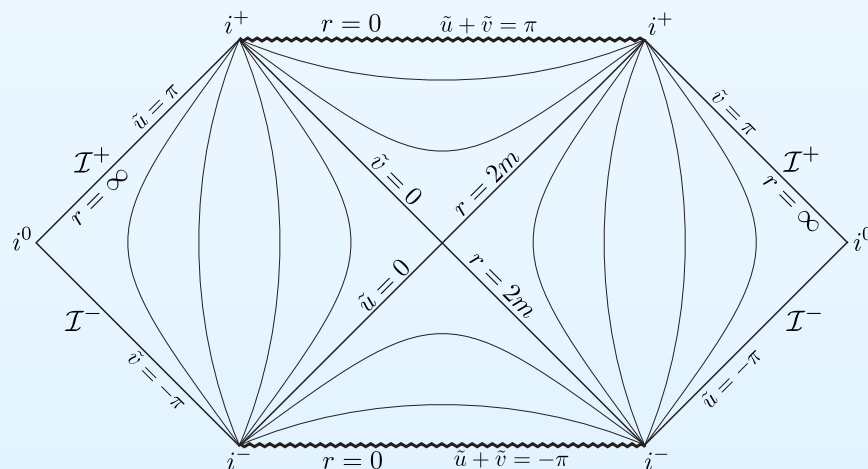
Reissner–Nordström (1916,18): **náboj e**

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

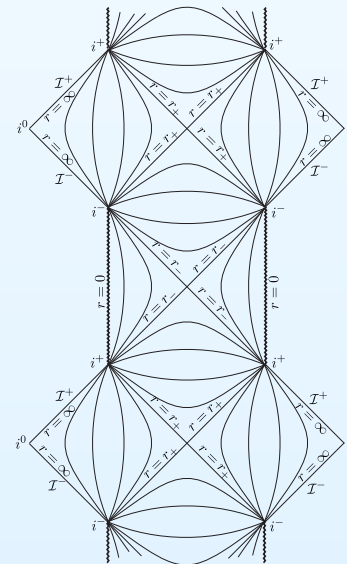
Kerr (1963): **rotace a** (axiálně symetrické stacionární pole)

$$ds^2 = - \frac{\Delta}{\rho^2} \left(dt - a \sin^2 \theta d\phi\right)^2 + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\rho^2} \left(a dt - (r^2 + a^2) d\phi\right)^2$$

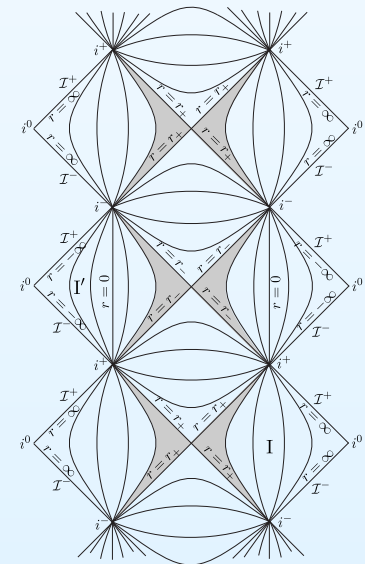
$$\Delta = r^2 + a^2 - 2mr, \quad \rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$$



Schwarzschild



Reissner–Nordström

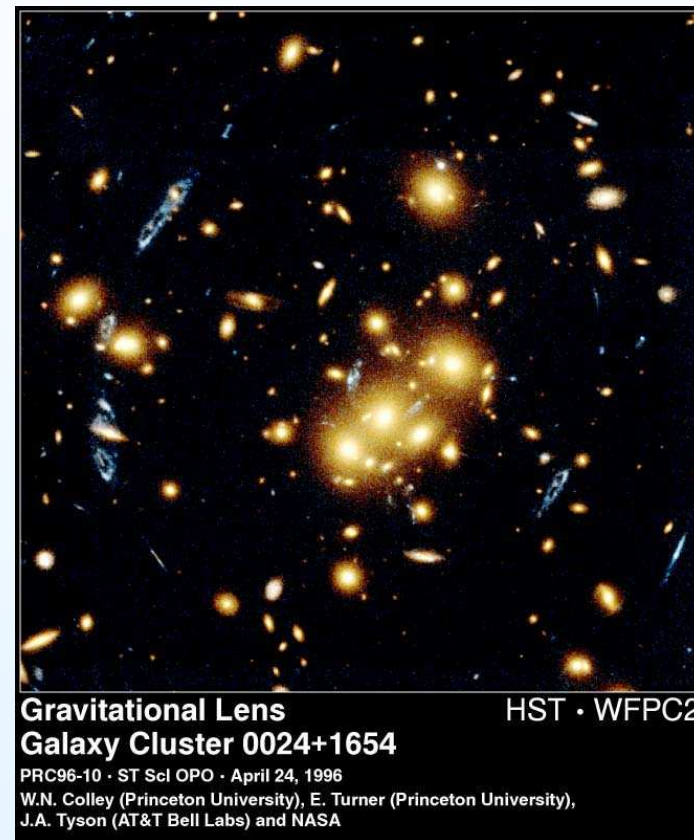
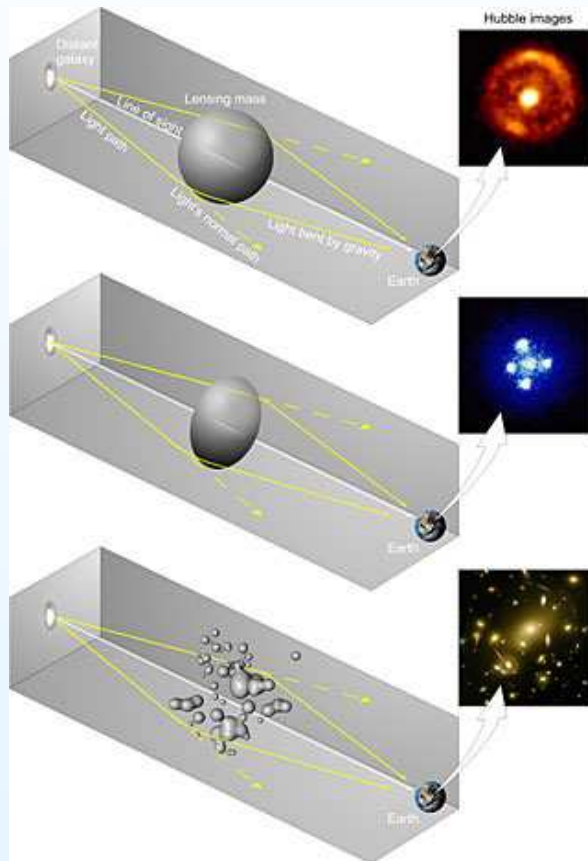


Kerr

gravitační čočky



ohyb světelných paprsků v okolí hmotných objektů:



dnes běžná astronomická pozorovací technika:

umožňuje mapovat rozložení hmoty (včetně nesvítící),

pozorovat vzdálené galaxie a kvasary, objevovat exoplanety atd.

gravitační vlny



periodické změny křivosti prostoročasu šířící se rychlostí světla

Einstein (1916), řešení linearizovaných rovnic: příčné vlny, 2 polarizace



vlnostrój Concentric Wave, Martin Smith, 2007 (Harley Gallery, Welbeck, Anglie)

zdroje gravitačních vln

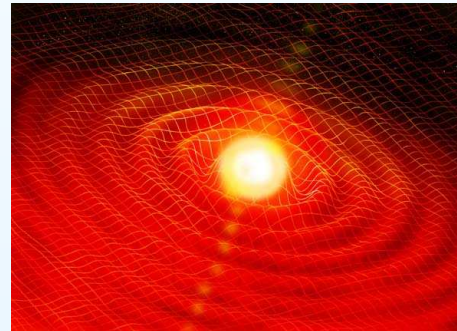


každý zrychlený nesférický pohyb hmoty, zejména:

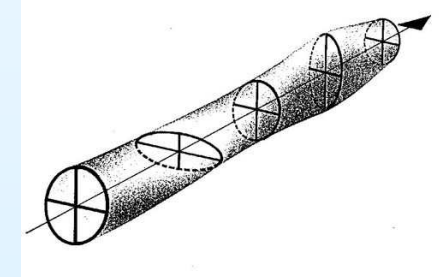
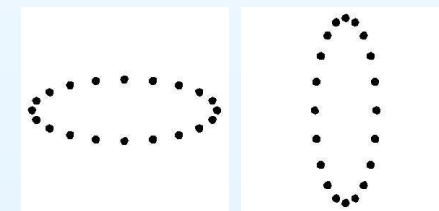
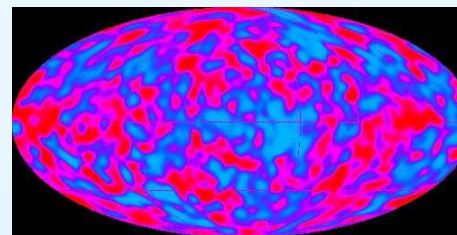
- **kompaktní dvojhvězdy**



- **supernovy**



- **velký třesk**



gravitační vlny jsou nesmírně slabé:

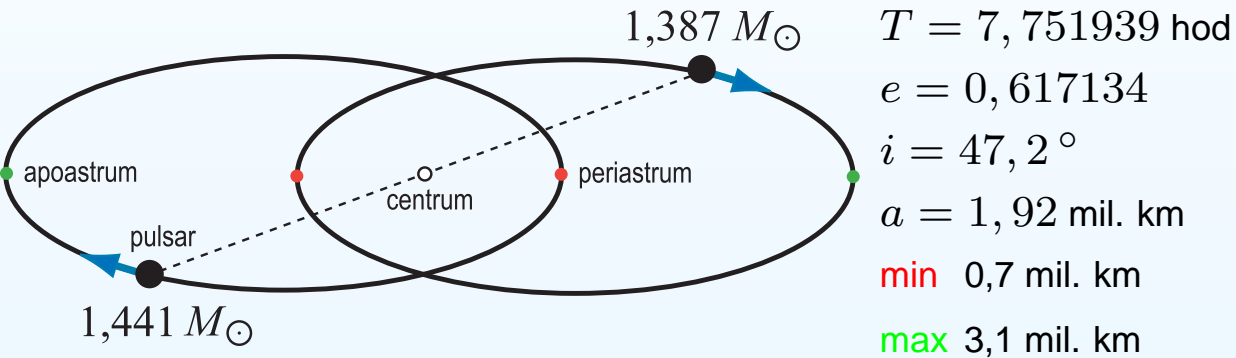
$$h = \frac{\Delta L}{L} < 10^{-21}$$



PSR B1913+16: nepřímý důkaz gravitačních vln

pulsar v těsném dvojném systému, sledovaný od roku 1974:

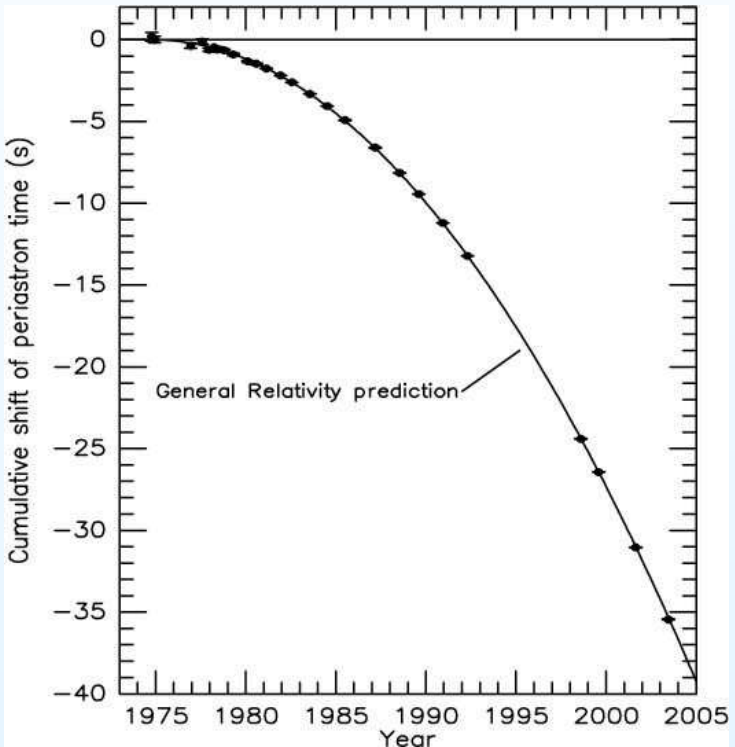
binární systém s PSR B1913+16 vyzařuje gravitační vlny



obě neutronové hvězdy se spirálovitě přibližují o 3,1 mm při každém oběhu
→ zkracování T o $76 \mu\text{s/rok}$, protože gravitační vlny odnášejí energii

pozorování zcela souhlasí s předpovědí teorie relativity:
chyba menší než 0,2%

Hulse a Taylor: Nobelova cena za fyziku, 1993



zdroj: Weisberg J. M. a Taylor J. H.,
ASP Conf. Ser., **328** (2005) 25

detektory gravitačních vln



interferometry kilometrových rozměrů



LIGO (Hanford, USA)



VIRGO (Pisa, Itálie)

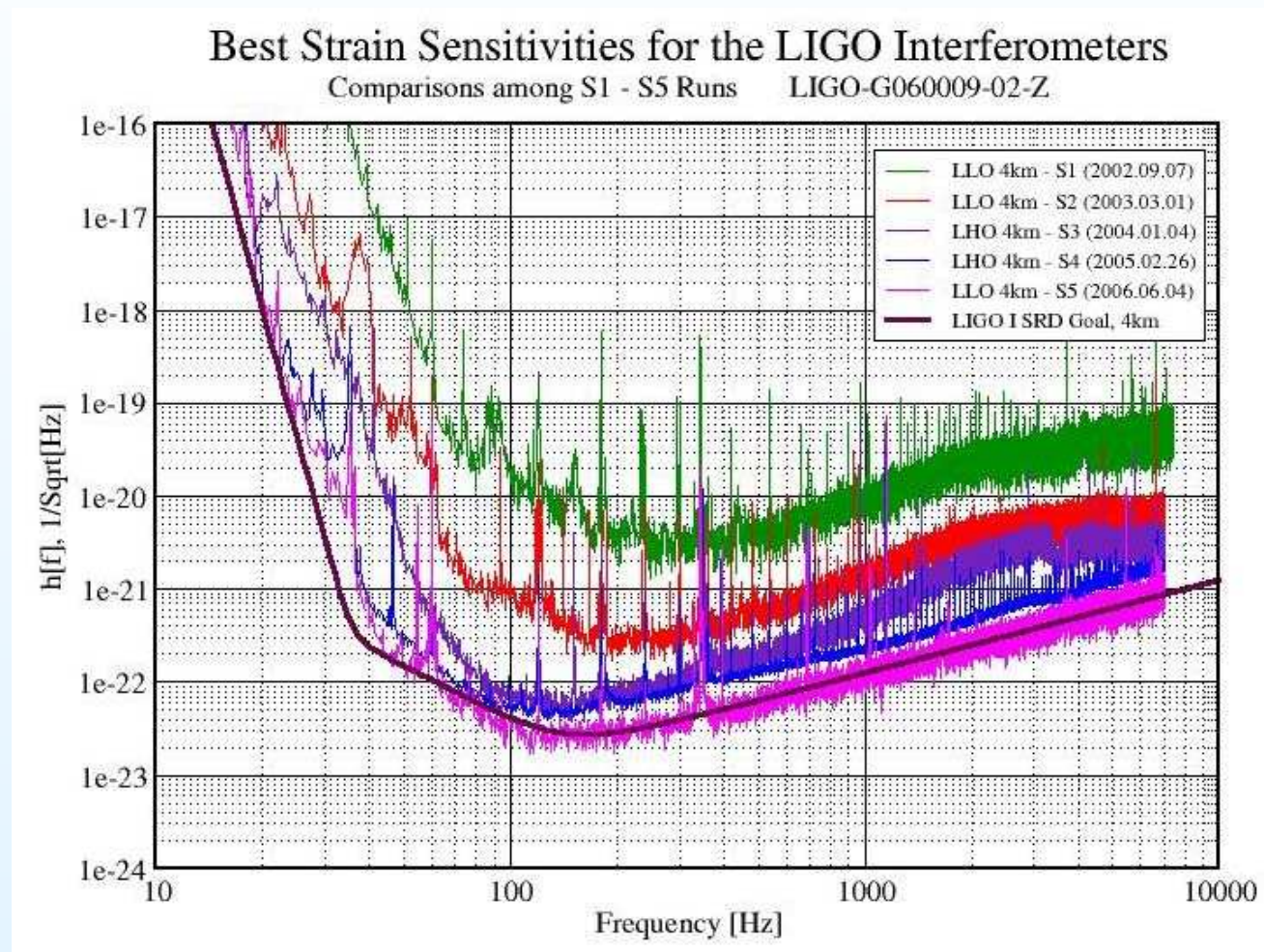


cíl: přímo změřit vlny křivosti generované vzdálenými vesmírnými objekty

detekce gravitačních vln: příběh s otevřeným koncem



citlivost detektorů stále roste, již je lepší než 10^{-21} :



gravitační vlny přesto zatím detekovány nebyly ...

současný stav a výhledy



od r. 2002 uskutečnil LIGO, VIRGO a další detektory 5 cyklů vědeckých měření S1-S5

poslední analyzované S5 (11/2005-9/2007)

↓ 2008: **Enhanced LIGO** 2x citlivější laser 35W

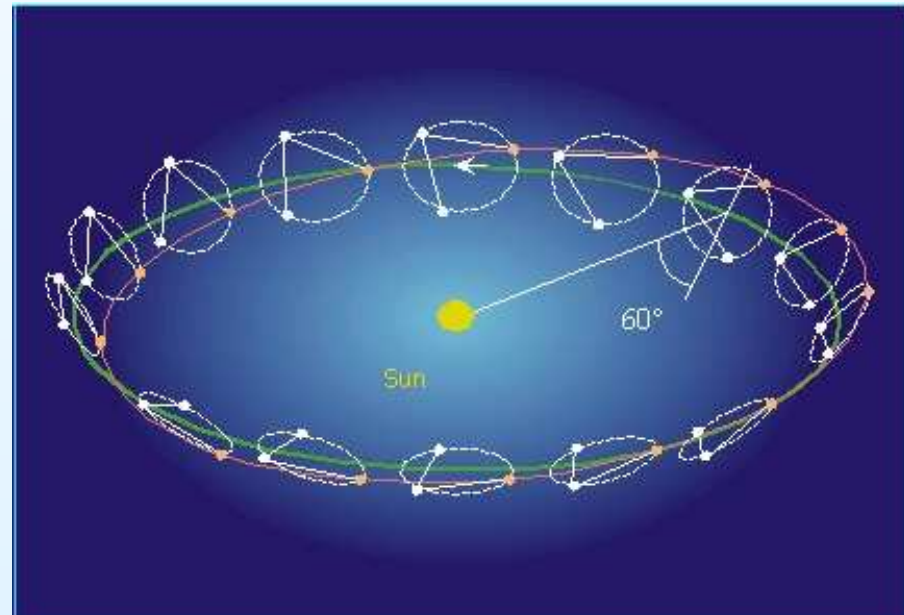
nyní probíhá měření S6 (7/2009-12/2010)

↓ 2014: **Advanced LIGO** 8x citlivější laser 180W, zrcadla 40 kg

$$h \sim 10^{-23}$$

další naděje: LISA v kosmickém prostoru

- obří interferometr ESA a NASA
- 3 družice ve vrcholech trojúhelníka
- strany 5 milionů km
- oběh kolem Slunce 1 AU, sklon 60°
- bezsilová trajektorie

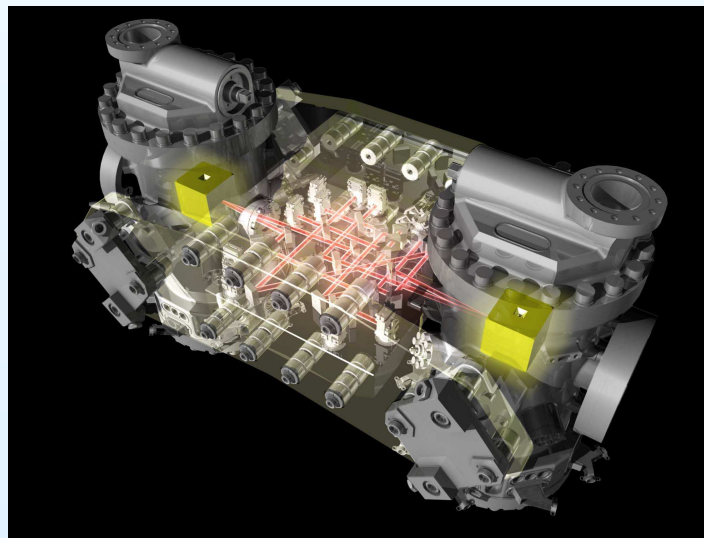
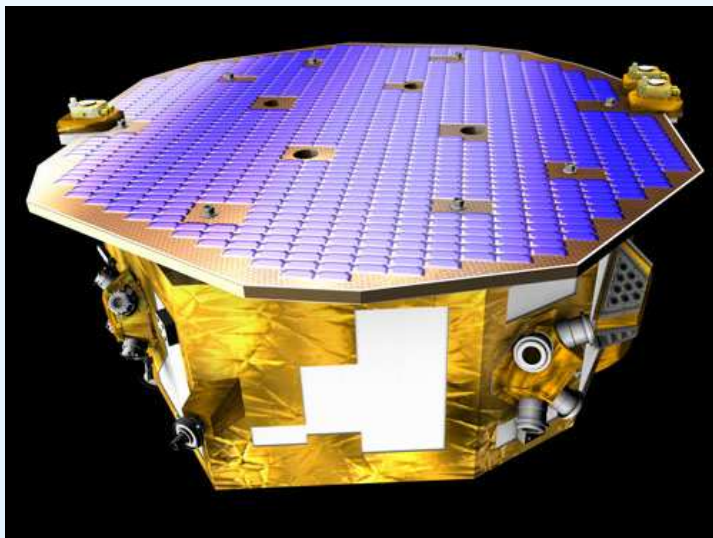


LISA



- testovací tělesa: krychle 46 mm (Pt a Au)
- korekční trysky o tahu μN
- lasery 1 W, Cassegrainovy teleskopy \varnothing 40 cm
- frekvenční rozsah 0,1 mHz – 0,1 Hz
- 1,5 miliardy eur
- rok 2020 ?

technologický průkopník LISA Pathfinder (Předvoj LISY):



- librační bod L1
- 1,5 mil km od Země
- roční mise
- start 2011

držme palce ...