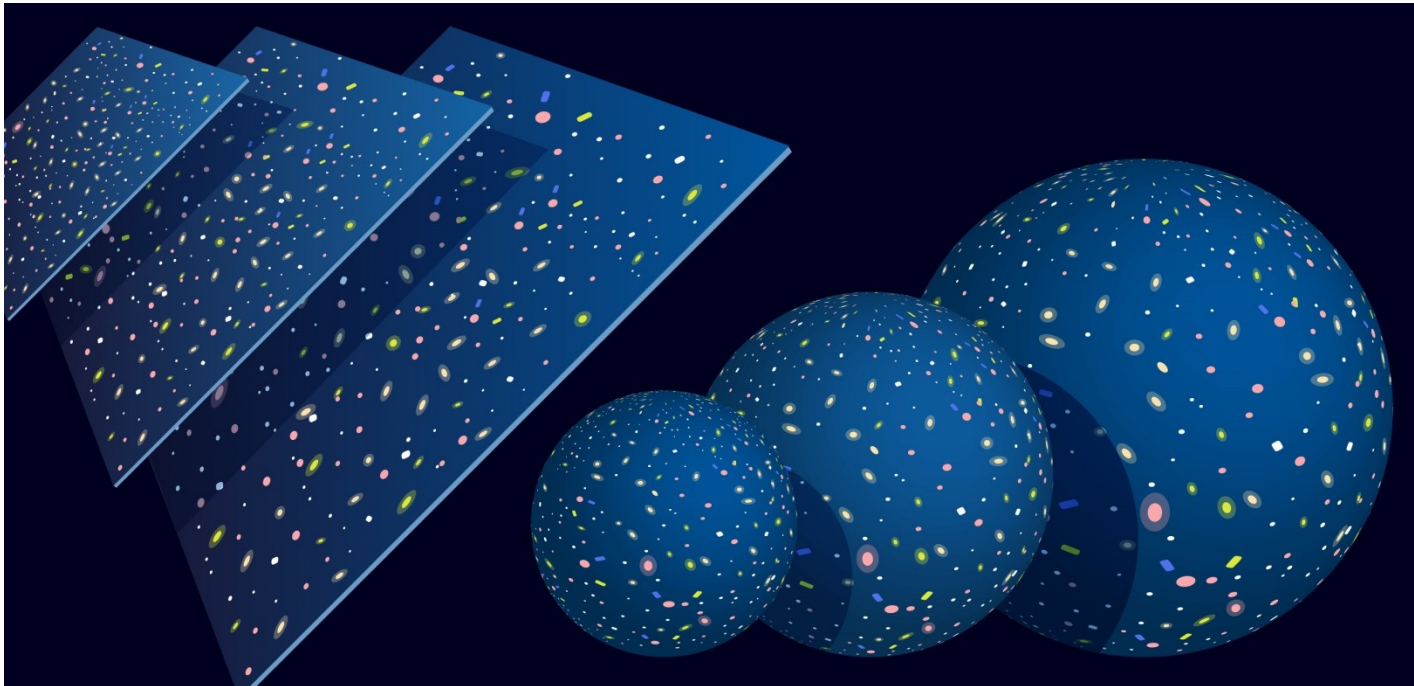
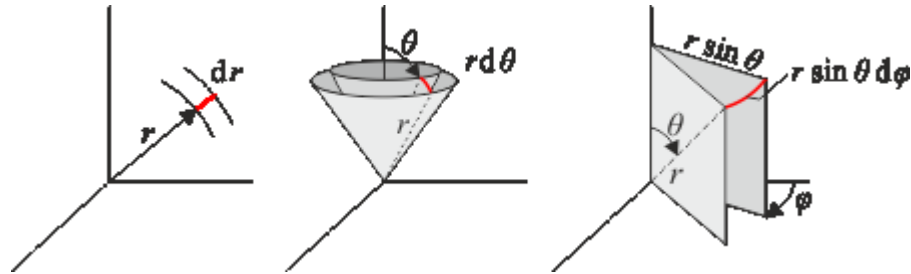


OTR základní představy



OTR Einstein 1915

Principy:

- Rovnost tíhové a setrvačné hmotnosti
- Ekvivalence gravitačních a setrvačných sil
- Obecná kovariance (rovnice mají stejný tvar ve všech vztažných soustavách)

Matematika

souřadnice $x^i = \dots = 0 \ 1 \ 2 \ 3$

metrika $ds^2 = \dots g_{ik} dx^k dx^l$ s - délka světočáry měřená hodinami

geodetiky - nejpřímější čáry $\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma_{\dots}^i \frac{dx^k}{ds} \frac{dx^l}{ds} = 0$

křivost – tenzor křivosti $R_{iklm}^i(g, \partial \dots \partial^2 \dots)$

Einsteinovy rovnice

$$G_{ik}(g, \partial \dots \partial^2 \dots) - \dots = \dots$$

Einsteinův tenzor

kosmologická konstanta

Tenzor energie-hybnosti

Schwarzschildovo řešení Einsteinových rovnic v okolí sféricky symetrického hmotného objektu.



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

Time Dilation

Radial Length Contraction

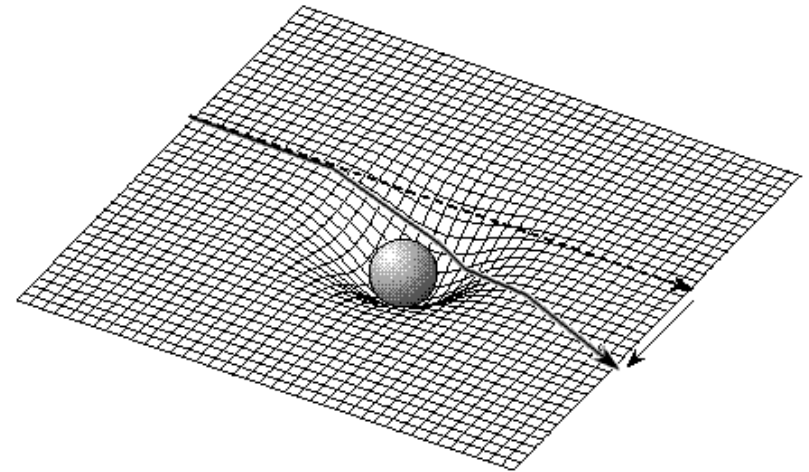
Invariant Line Element

Schwarzschild Radius

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

Úspěchy OTR

- Posuny perihelů planet a satelitů
- Odchylka světla v blízkosti masivních těles
- Spektrální posuny
- Ovlivnění časových intervalů
- Precese setrvačníků
- Gravitační vlny
- Astrofyzika a kosmologie



FLRW metrika

homogenní a izotropní vesmír $ds^2 = dt^2 - a^2 d\Sigma^2$

$$d\Sigma^2 = dt^2 + \frac{1}{1 - k r^2} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

$k = +1$	Riemann
$k = 0$	Eukleides
$k = -1$	Lobačevskij

Základní modely:

Einsteinův statický vesmír	$\dot{a} = 0$	$\ddot{a} \neq 0$	$\Lambda = 0$	$\Omega = 1$	$R = 1$
de Sitterův stacionární vesmír	$\dot{a} = 0$	$\ddot{a} \neq 0$	$\Lambda \neq 0$	$\Omega = 0$	$R = \frac{3}{\Lambda}$
Friedmannův (obecně)	$\dot{a} \neq 0$	$\ddot{a} \neq 0$	$\Lambda = 0$	libovolné	
Einstein-de Sitterův vesmír	$\dot{a} = 0$	$\ddot{a} = 0$	$\Lambda \neq 0$	$\Omega = 0$	$R = \frac{2}{3\Lambda}$
Milneho vesmír	$\dot{a} = 0$	$\ddot{a} = 0$	$\Lambda \neq 0$	$\Omega = -1$	$R = \frac{3}{\Lambda}$
Λ -CDM vesmír	$\dot{a} \neq 0$	$\ddot{a} \neq 0$	$\Lambda \neq 0$	$\Omega = 0$	$R = \frac{2}{3} \frac{\Lambda}{\Lambda}$

Teoretické charakteristiky

ρ hustota hmotnosti vesmíru

$K = \frac{1}{R^2}$ křivost prostoru (3D)

λ kosmologická konstanta

Observační parametry

$$\Omega = \frac{8\pi}{3H^2} \rho \quad \rho = \frac{3}{8\pi} \dots$$

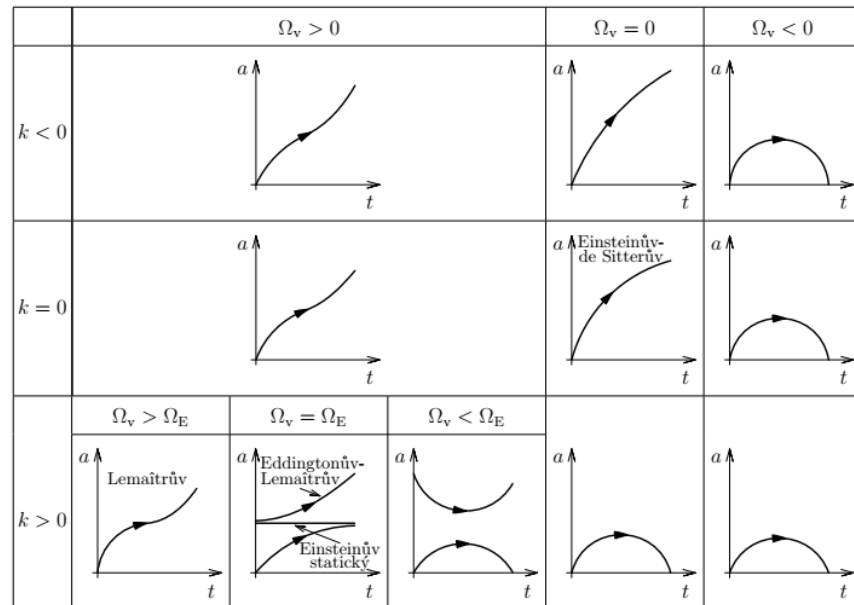
← parametr hustoty

$$H = \frac{dR}{dt}$$

Hubbleova konstanta

$$q = -\frac{d^2R}{R dt^2}$$

decelerační parametr



Obr. 3.17: Klasifikace Friedmannových kosmologických modelů (zpracováno podle [8, 129])

Dnes uznávané hodnoty

$$\rho = 9.5 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$$

$$H = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$q = -0.35$$

$$\Omega = 1.0023 \pm 0.0055$$

$$\rho + \dots = \dots$$

$$\rho_{\dots} = \frac{3\pi^2}{8\pi}$$

$$\frac{\rho_{\dots}}{\rho_{\dots}} = 0.04$$

$$\rho_{\dots}$$

$$\frac{\rho_{\dots}}{\rho_{\dots}} = 0.23$$

$$\rho_{\dots}$$

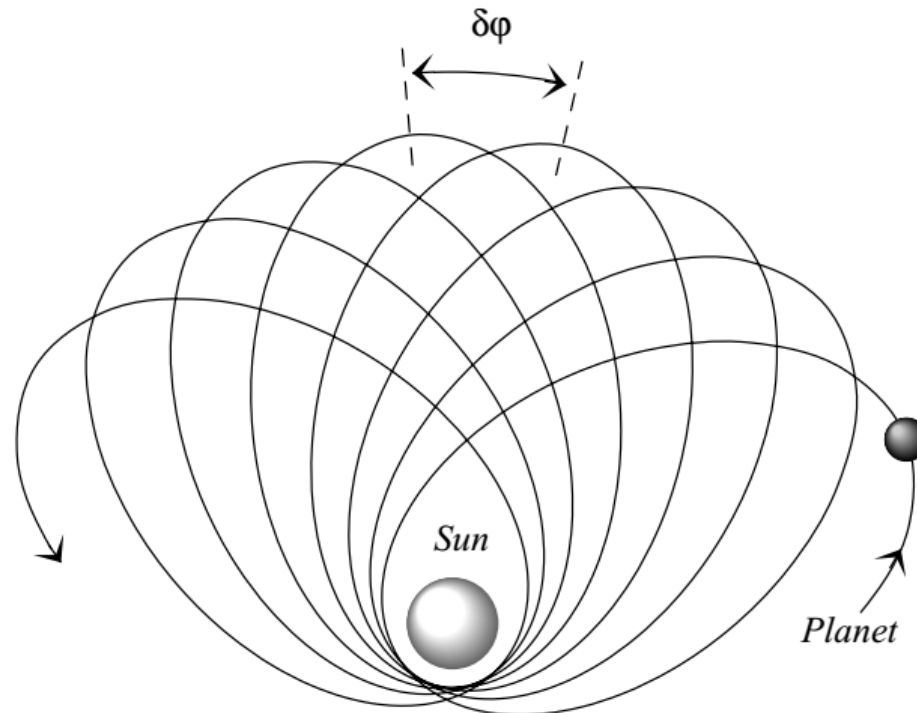
$$\frac{\rho_{\dots}}{\rho_{\dots}} = 0.74$$

$$\rho_{\dots}$$

Proč věříme TR, Základní testy OTR

1. Stáčení orbit oběžnic

Merkur (Le Verrier, 1859) asi o $43''$ za století rychleji než odpovídá Newton.zákonu. OTR pozorovanou hodnotu vysvětlila (1 %).
Dnes potvrzeno u řady jiných objektů.



Per century:

Mercury: 43".03

Venus: 8".3

Earth: 3".8

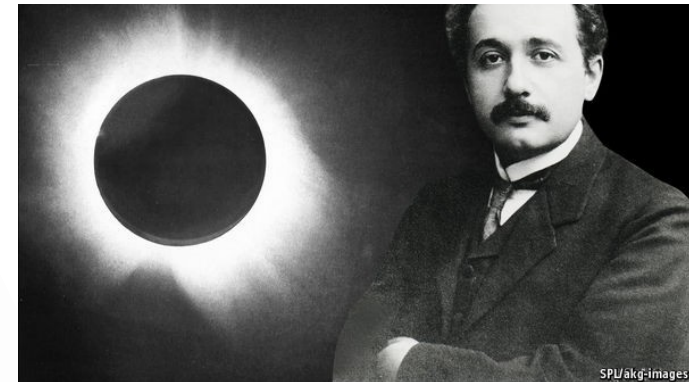
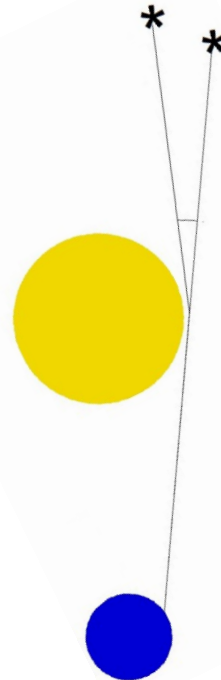
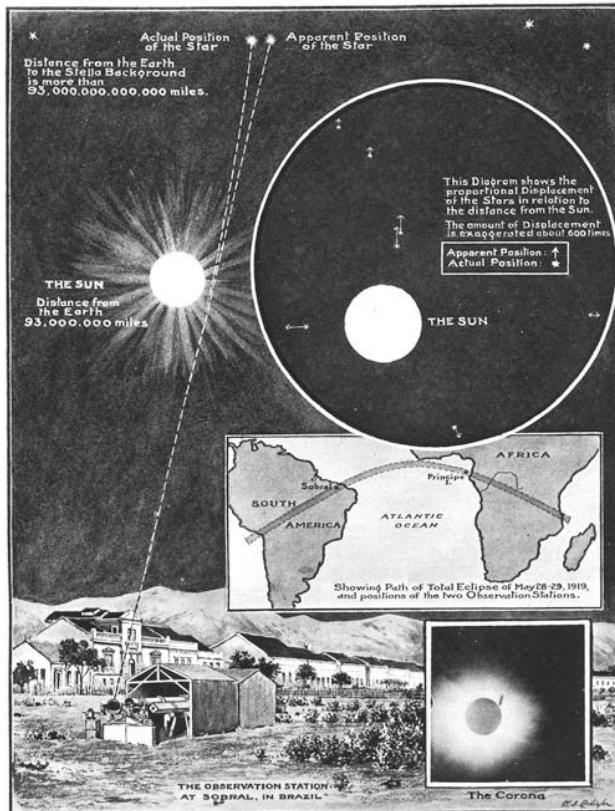
Základní testy OTR

2.Ohyb světla v gravitačním poli

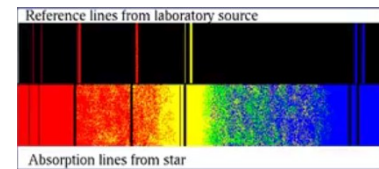
Einstein (1915) odchylna polohy hvězdy na okraji disku Slunce 1,75“

Zatmění 1919: A. Eddington (1,6 2,0)“.

Dnes je k dispozici mnohem více přesnějších dat.



Základní testy OTR



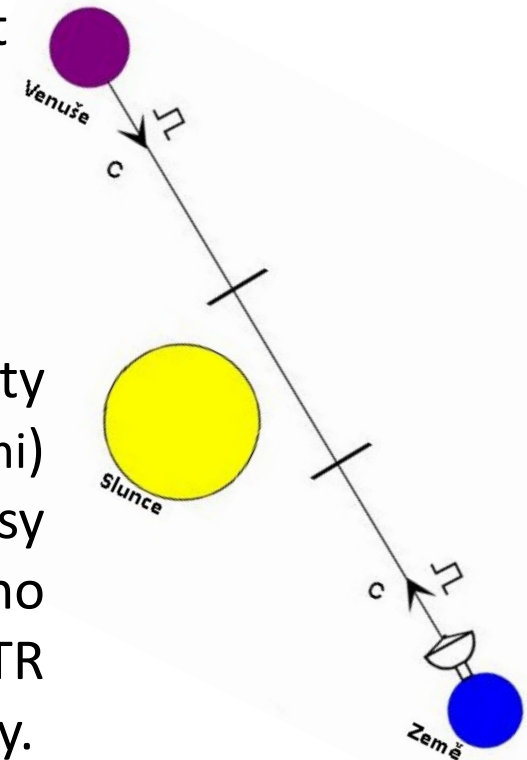
3. Gravitační červený posuv

Rozdíl potenciálu gravitačního pole posouvá spektrální čáry k červenou konci spektra, pro povrch Slunce $z = 2,1 \cdot 10^{-6}$.

Předpověď potvrdil Pound-Rebka (1959) experiment

4. Shapirovo zpoždění v silném gravitačním poli

Shapiro (1964): ve chvíli, kdy se vnitřní planety (Merkur a Venuše) nacházejí (pro pozorovatele na Zemi) poblíž konjunkce se Sluncem, probíhají rádiové pulsy ze Země při cestě tam i zpět oblastmi silného gravitačního potenciálu Slunce a jsou ve shodě s OTR zpožděny o měřitelnou hodnotu řádu 0,1 milisekundy.

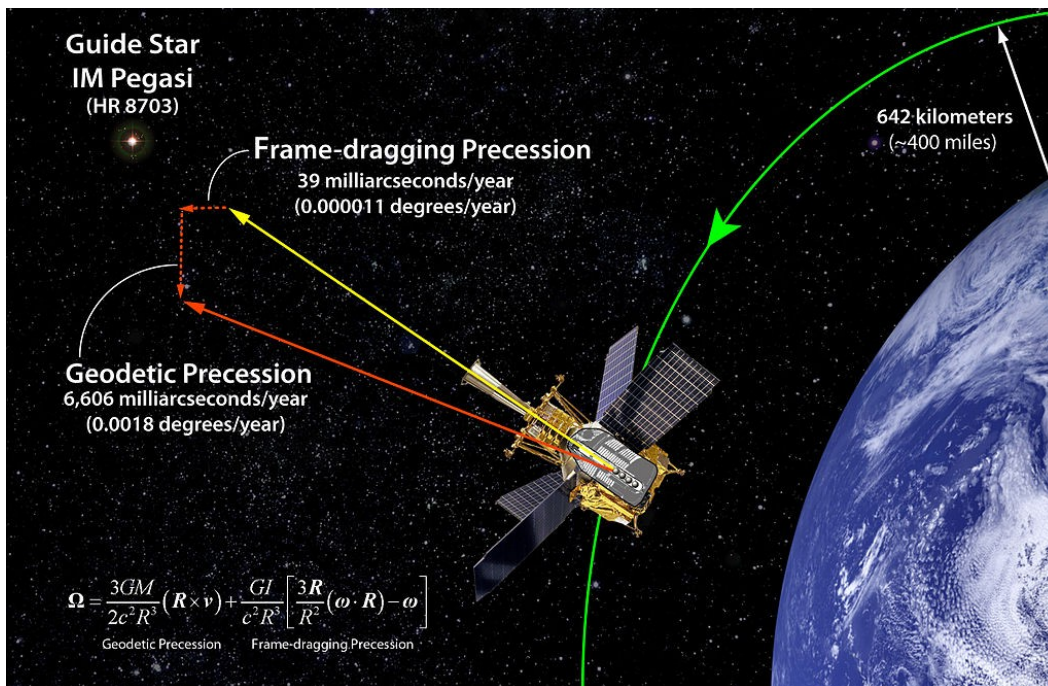


Základní testy OTR

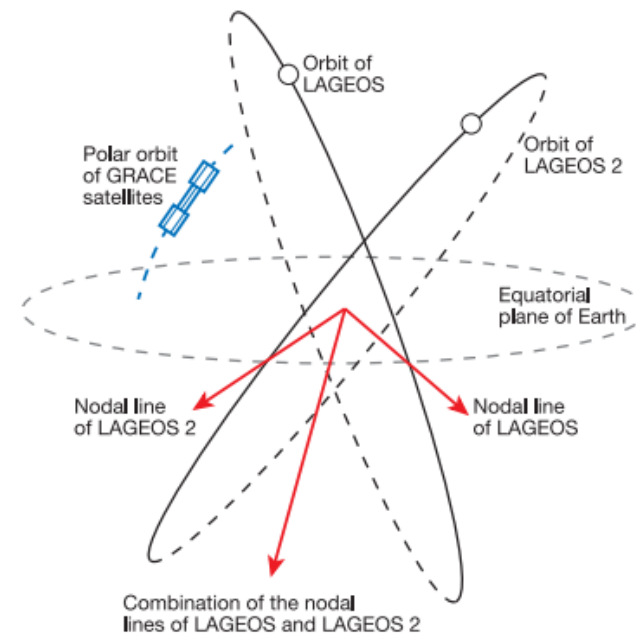
5. Zakřivení prostoročasu v okolí Země

Družice Gravity Probe-B, satelity LAGEOS - dva efekty OTR

- geodetická precese
- efekt LenseůvThirringův – strhávání IS



2004-2011



2012 - 2015