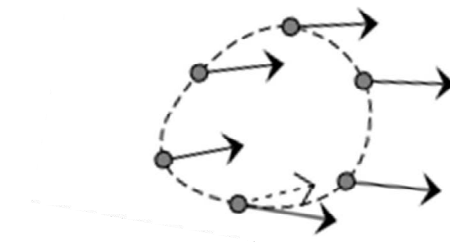
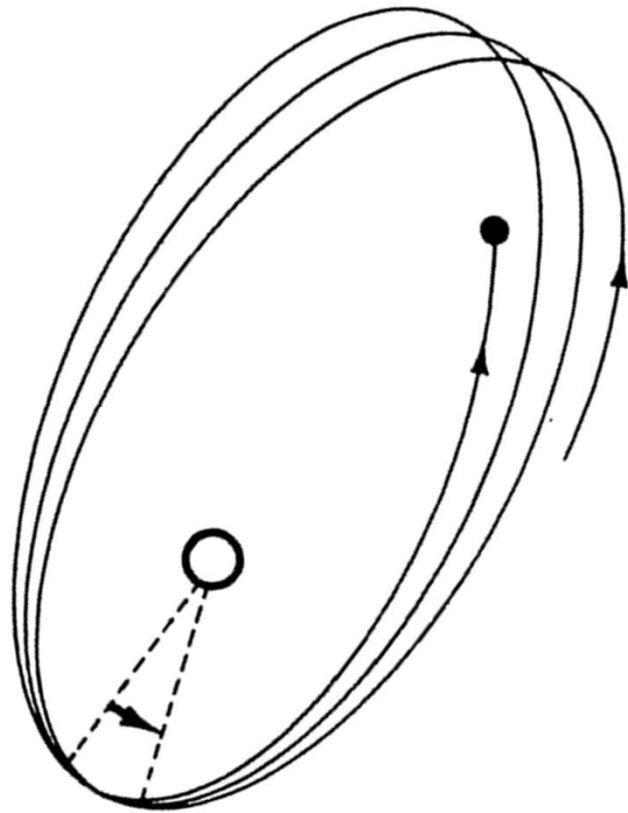


Co nevíte o Teorii relativity



Prostoročas

Tři základní pojetí:

Newton (17.století)

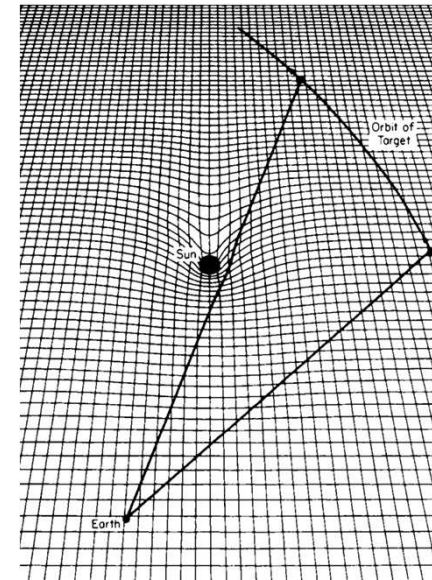
Hmota ← Prostor + Čas

Einstein STR (1905)

Hmota ← Prostoročas

Einstein OTR (1915)

Hmota ↔ Prostoročas



Teorie relativity se zabývá geometrií prostoročasu
a důsledky, které z toho plynou pro fyziku

Metrika

Metrika vyjadřuje vzdálenosti (intervaly) v čtyřrozměrném prostoru událostí

souřadnice x^0, x^1, x^2, x^3

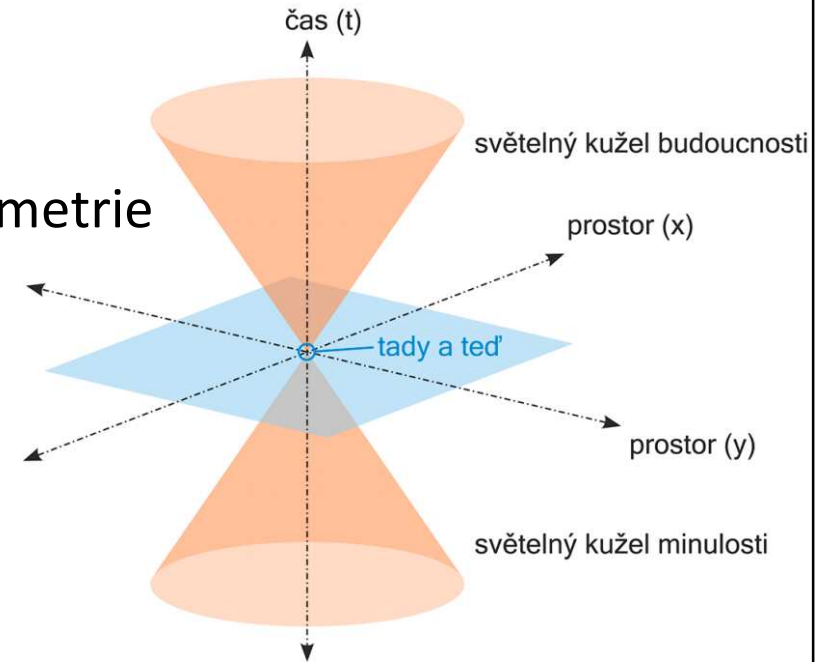
Kvadrát intervalu v Minkowskiho souřadnicích
v nezakřiveném prostoru – pseudoeukleidovská geometrie

$$s^2 = c^2 t^2 - (x^2 + y^2 + z^2)$$

v křivočarých souřadnicích:

$$ds^2 = \sum g_{ik}(x^j) dx^i dx^k$$

metrické koeficienty
(10 fcí souřadnic)



Délka světočáry spojující události A, B (v časových jednotkách)

$$\tau = \frac{1}{c} \int_A^B ds$$

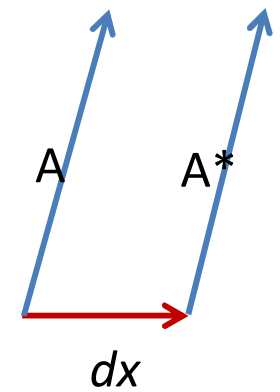
τ se měří ideálními hodinami

Konexe

pravidlo pro paralelní přenos vektorů mezi různými body

$$A^{i*} = A^i - \Gamma_{kl}^i A^k dx^l$$

složky konexe



Geodetická (nejpřímější) čára má rovnici:

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma_{kl}^i \frac{dx^k}{ds} \frac{dx^l}{ds} = 0$$

Souvislost metriky a konexe

V relativistické fyzice nejpřímější = nejdelší

$$\Gamma_{kl}^i = \frac{1}{2} g^{is} \left(\frac{\partial g_{sk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{sl}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{kl}}{\partial x^s} \right) = \Gamma_{lk}^i \quad (40 \text{ fcí souřadnic})$$

inverzní matice ke g_{ik}

Veličiny Γ charakterizují zakřivení souřadnic, nikoliv samotného prostoročasu. Fyzikální význam – síly působící na volnou částici.

Einsteinova *nejšťastnější* myšlenka: setrvačné a gravitační síly jsou totožné: pohyby částic jsou geodetikami v nezakřiveném i zakřiveném prostoročase

Křivost

$$\Delta C^i = R^i{}_{jkl} A^j B^k C^l$$

rozdíl mezi přenesenými vektory

$$R^i{}_{jkl} = \frac{\partial \Gamma^i{}_{lj}}{\partial x^k} - \frac{\partial \Gamma^i{}_{jk}}{\partial x^l} + \Gamma^i{}_{ks} \Gamma^s{}_{jl} - \Gamma^i{}_{ls} \Gamma^s{}_{jk}$$

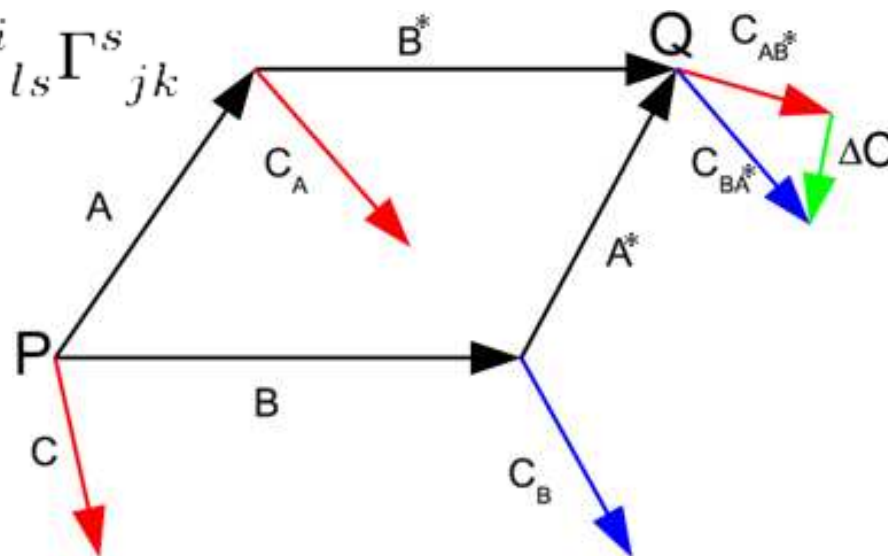
Riemannův tenzor křivosti

$$R_{jl} = R^i{}_{jil}$$

Ricciho tenzor

$$R = g^{jl} R_{jl}$$

Skalární křivost



Nenulovost tenzoru křivosti, t.j. křivost prostoročasu má za následek sbíhání a rozbíhání geodetických čar, slapové jevy (přílivy a odlivy).

Gravitace je zakřivení prostoročasu působené hmotami a jejich pohybem.

STR, OTR, Einsteinovy rovnice

STR - nezakřivený prostoročas, metrika v Minkowskiho souřadnicích, t.j. v inerciálních soustavách spojených Lorentzovou transformací

OTR - obecně zakřivený prostoročas, metrika závisí na souřadnicích, Einsteinovy rovnice spojují geometrii s hmotou

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

tenzor energie hybnosti

Metaprincip STR: Ve všech inerciálních soustavách mají fyzikální zákony stejný tvar. V neinerciálních soustavách je vyjádření fyzikálních zákonů složitější.

Metaprincip OTR: Fyzikální zákony mají stejný tvar **ve všech soustavách**. Metrické koeficienty se považují za proměnné, ovlivněné chováním hmoty.

OTR se dnes chápe jako Einsteinova teorie gravitace.

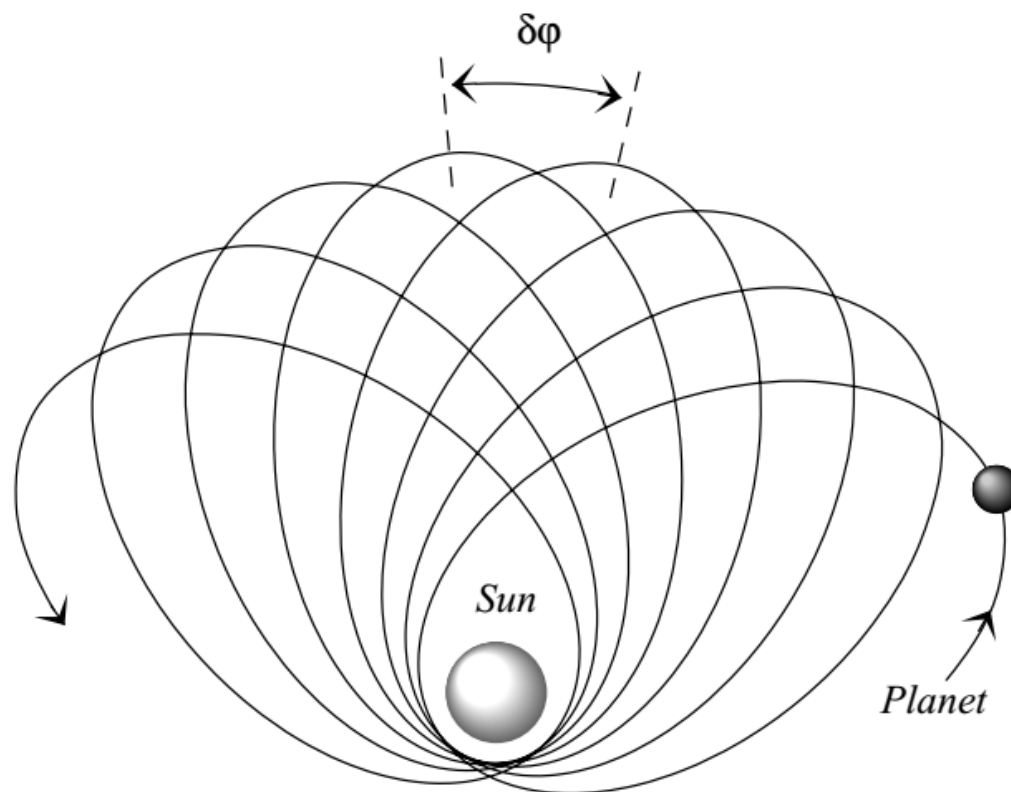
OTR přechází v STR v malém okolí události.

Analogie přechodu mezi neeukleidovskou a eukleidovskou geometrií

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

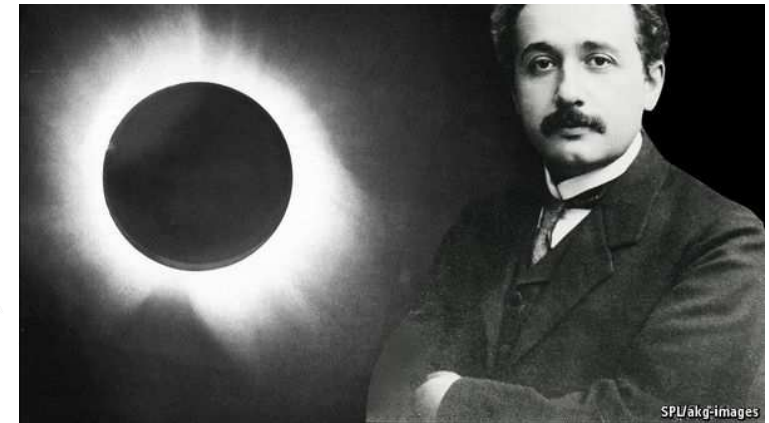
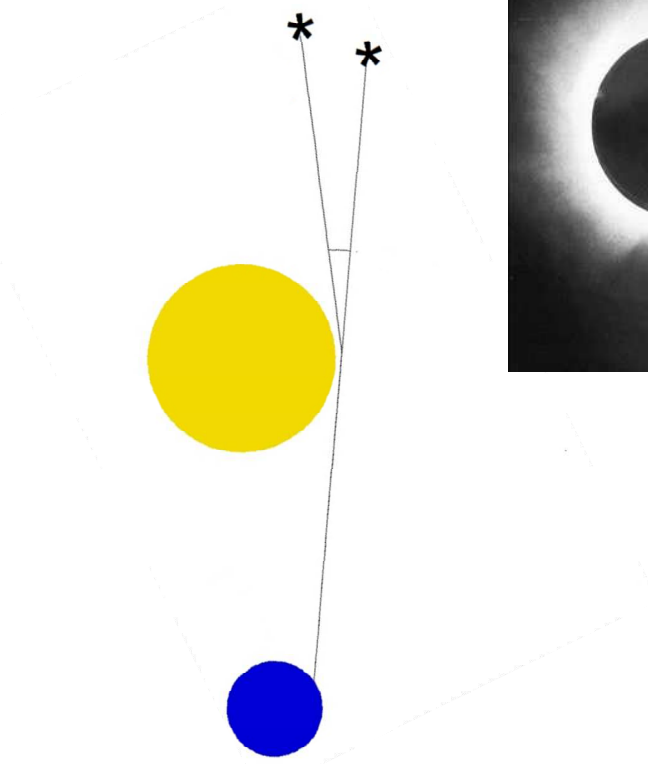
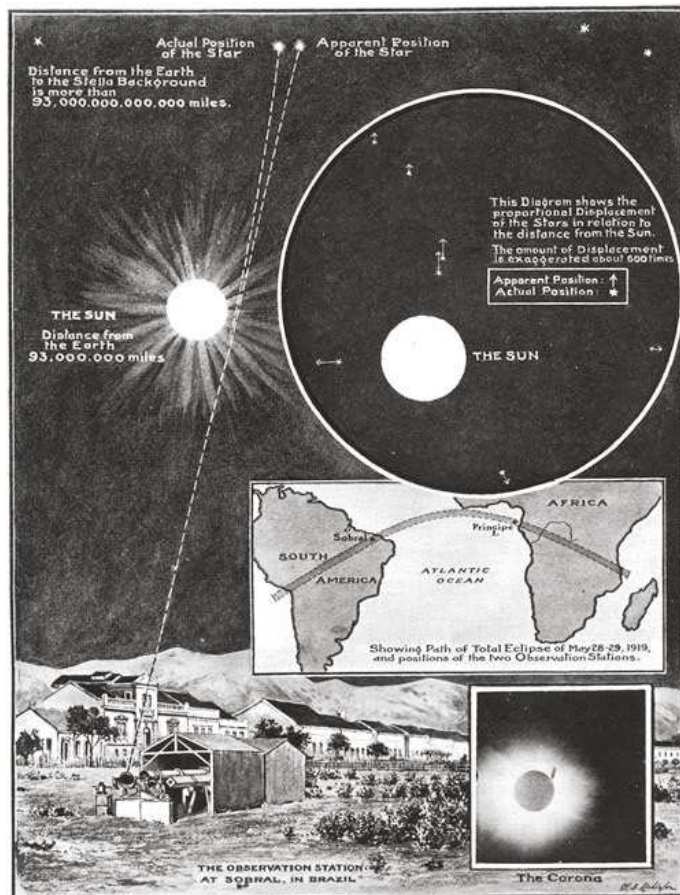
Základní testy OTR

2.Ohyb světla v gravitačním poli

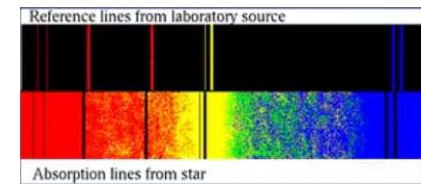
Einstein (1915) odchylna polohy hvězdy na okraji disku Slunce 1,75“

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

Dnes je k dispozici mnohem více přesnějších dat.



Základní testy OTR



3. Gravitační červený posuv

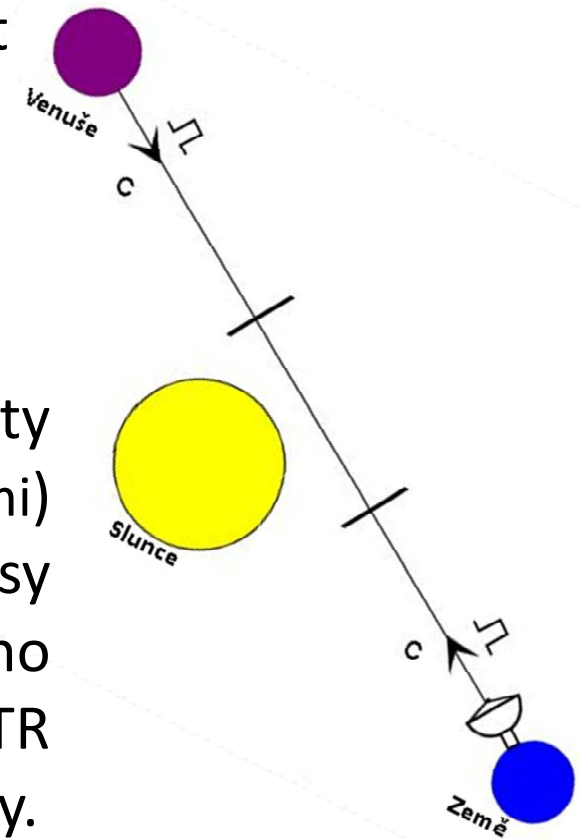
Rozdíl potenciálu gravitačního pole posouvá spektrální čáry k červenému konci spektra, pro povrch Slunce ☀ $z = 2,1 \cdot 10^{-6}$.

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

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.

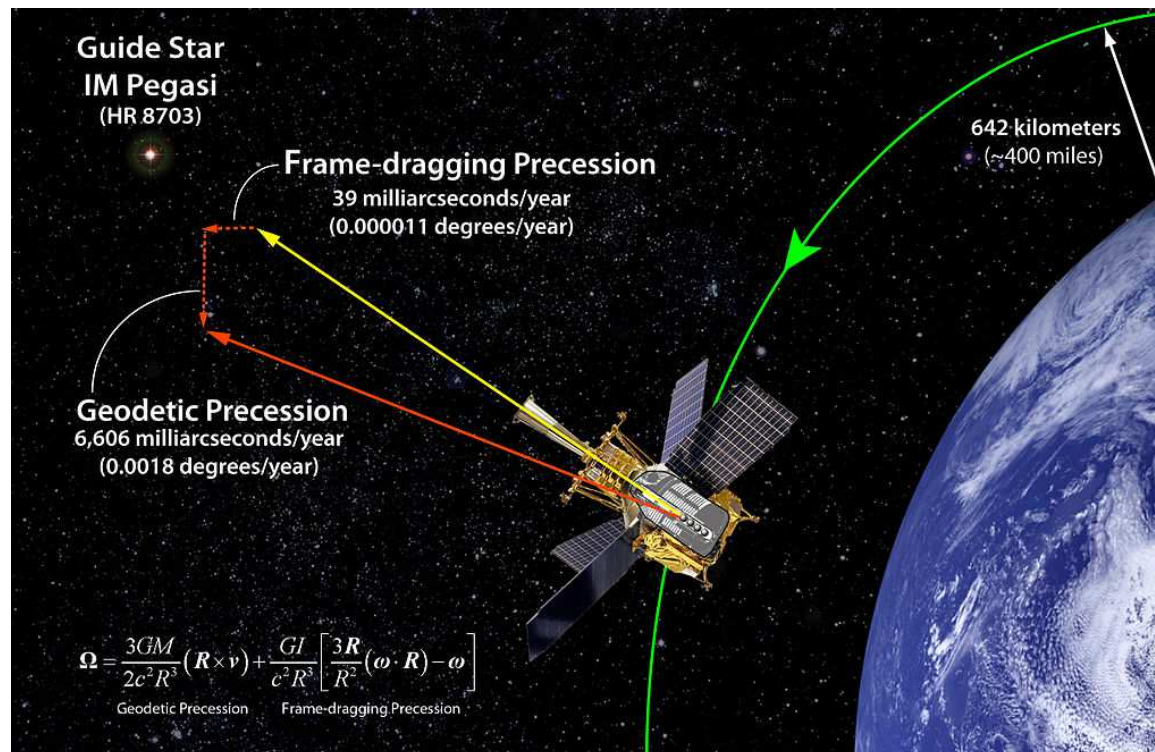


Základní testy OTR

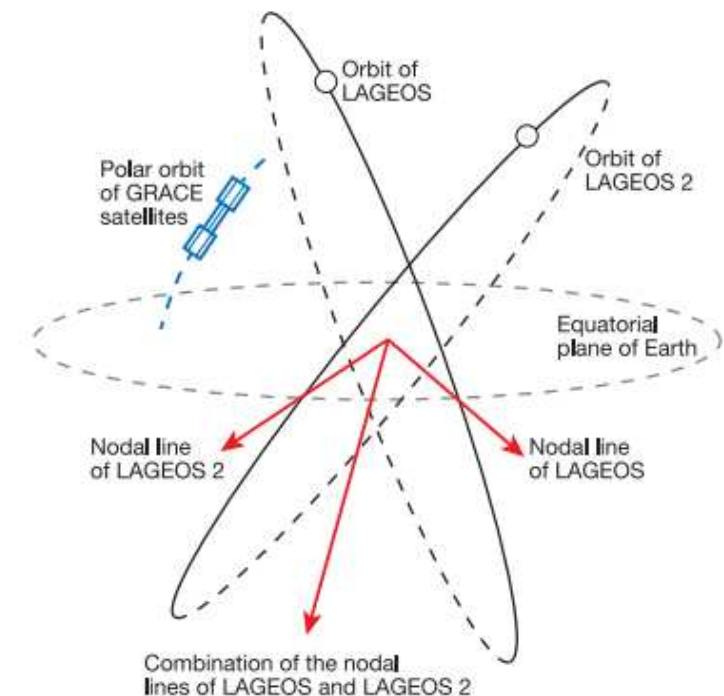
5. Zakřivení prostoročasu v okolí Země

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

- geodetická precese
- efekt LenseůvThirringův – strhávání IS



2004-2011



2012 - 2015

Čas v Teorii relativity

2 významy času v TR:

Souřadnicový čas t – časová souřadnice události

Vlastní čas τ - délka světočáry sledovaného objektu

$$d\tau = \frac{ds}{c} = \frac{\sqrt{g_{ik} dx^i dx^k}}{c} = \sqrt{\left(\sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} - \frac{\vec{\gamma}\vec{u}}{c} \right)^2 - \frac{u^2}{c^2}} dt$$

$$\varphi = \frac{c^2 (g_{00} - 1)}{2} \quad \text{skalární potenciál}$$

$$\gamma_\alpha = \frac{-g_{\alpha 0}}{\sqrt{g_{00}}} \quad \text{vektorový potenciál}$$

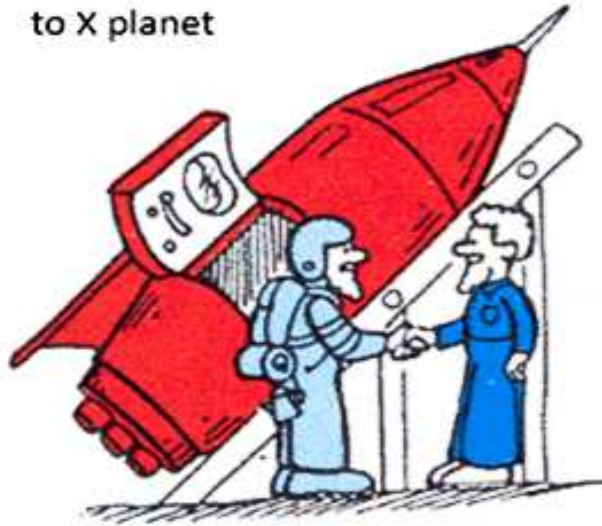
$$u^2 = \gamma_{\alpha\beta} u^\alpha u^\beta \quad \text{kvadrát rychlosti objektu} \quad \gamma_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta} + \gamma_\alpha \gamma_\beta \quad \text{prostorová metrika}$$

$$\vec{a} = -\text{grad}\varphi - c \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} \frac{\partial \vec{\gamma}}{\partial t} \quad \text{pohybová rovnice}$$

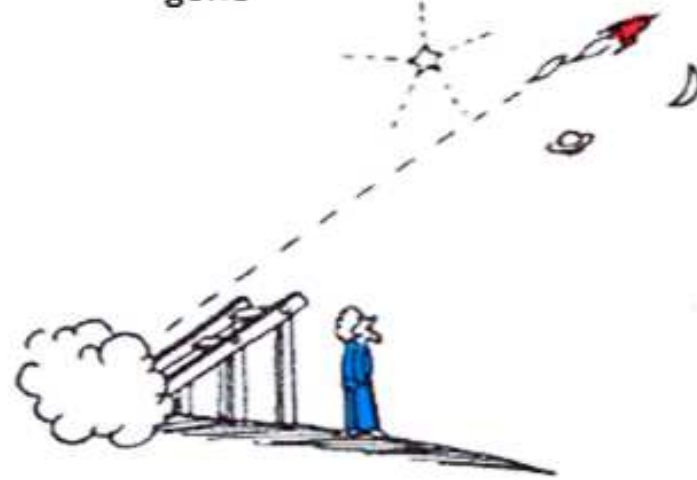
Paradox hodin

Rozdílná délka světočar spojující události A a B

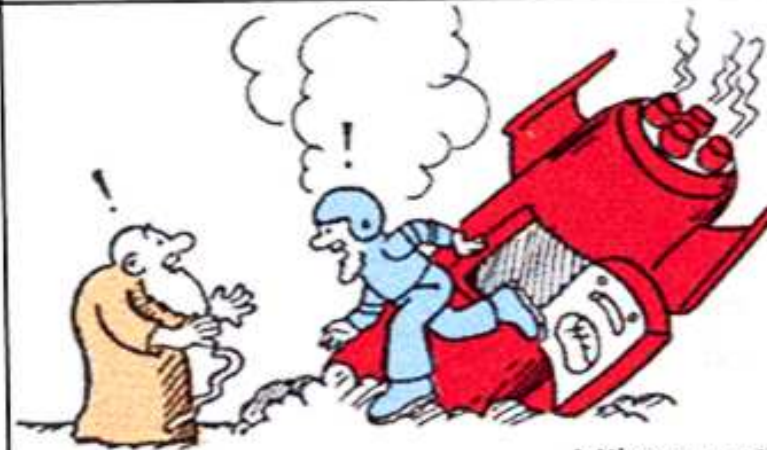
Miko leaves the Earth
to X planet



Miki is watching his
gone



Miki is waiting his back



Miko surprises with
Miki's age

Paul G.Hewitt

Plyne čas?

Dynamické pojetí času:

Š.Markuš: „ Dynamická teorie času prezentuje realitu světa jako neopakovatelnou minulost, pomíjející přítomnost a očekávanou budoucnost“.

Statické pojetí času:

Eliot: „Čas přítomný a čas minulý jsou snad oba zastoupeny v čase budoucím a čas budoucí je obsažen v čase minulém.

Je-li všechn čas přítomen věčně, všechn je nevykupitelný“.

Dilema

Eddington: „Při jakémkoliv pokusu přemostit oblast duchovní a fyzikální zkušenosti zaujímá čas klíčové postavení.“

Einstein: „Prožívání zážitku nemůže zachránit to, co věda popírá.“

Wheeler: „Máme se připravit na to, že se objeví nová stavba základů fyziky, která čas úplně odstraní? Ano, protože čas je opravdu v krizi.“

A co dál?

Mezi OTR a kvantovou fyzikou je stále nepřekonaná propast

Dva vrcholy fyziky:

Standardní model elementárních částic

Standardní kosmologický model

Podaří se nalézt jejich syntézu?

