

# Filosofie a OTR

podzim2024

# Fyzika 20.století

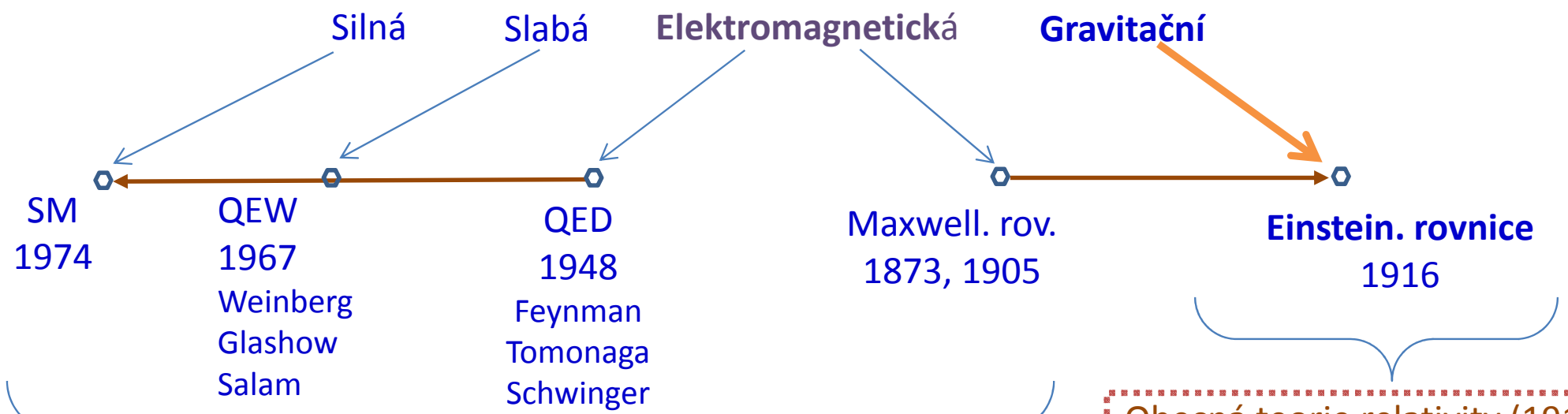
## Mikrosvět

Kvantová teorie – hmota  
Planck, Schrödinger,  
Heisenberg, Bohr, Dirac (1900-1930)

## Makrosvět a vesmír

Teorie relativity – prostor a čas  
STR (1905) → OTR (1915)

### 4 Interakce



Higgsův boson  
Předpověď 1964  
Objev 2012  
Nobel.cena 2013

Speciální teorie relativity (1905)

Obecná teorie relativity (1916)

**Gravitační vlny**  
Předpověď 1916  
Objev 2015  
Nobel. cena 2017

# Prostoročas

Tři základní pojetí:

Newton (17.století)

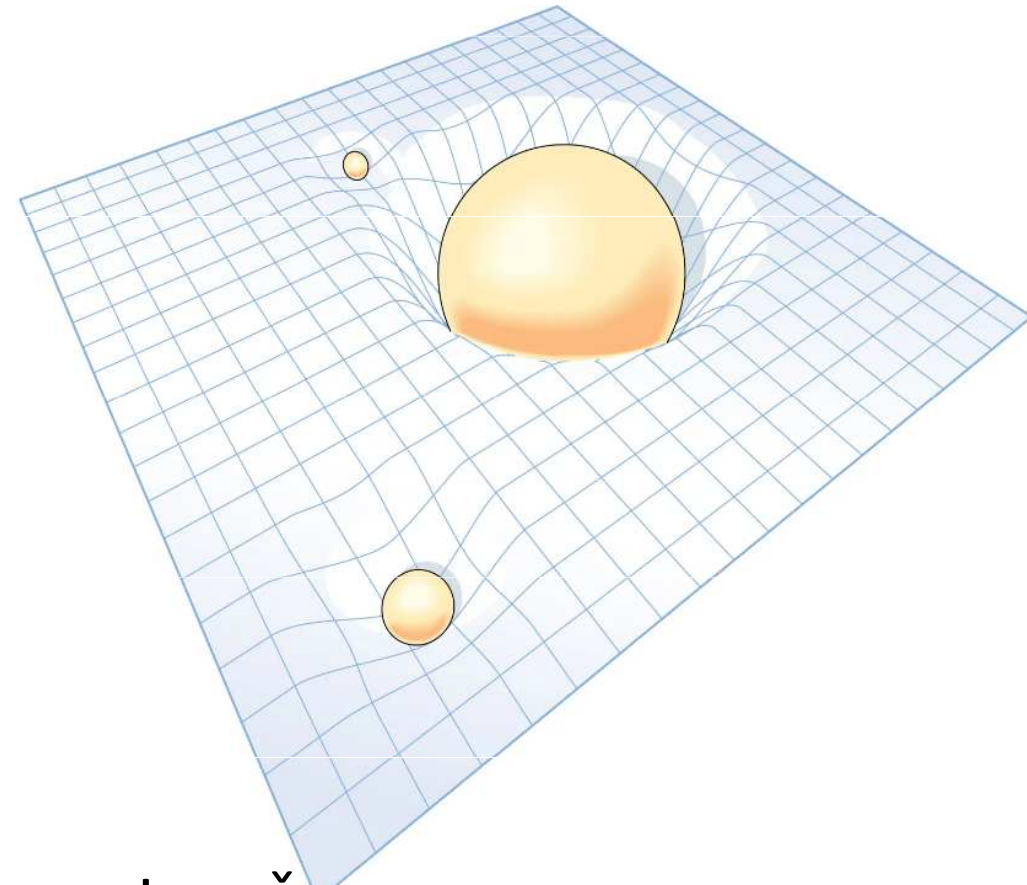
Hmota  $\leftarrow$  Prostor + Čas

Einstein STR (1905)

Hmota  $\leftarrow$  Prostoročas

Einstein OTR (1915)

Hmota  $\leftrightarrow$  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 Minkowskioho souřadnicích  
v nezakřiveném prostoru – pseudoeukleidovská geometrie

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

v křivočarých souřadnicích:

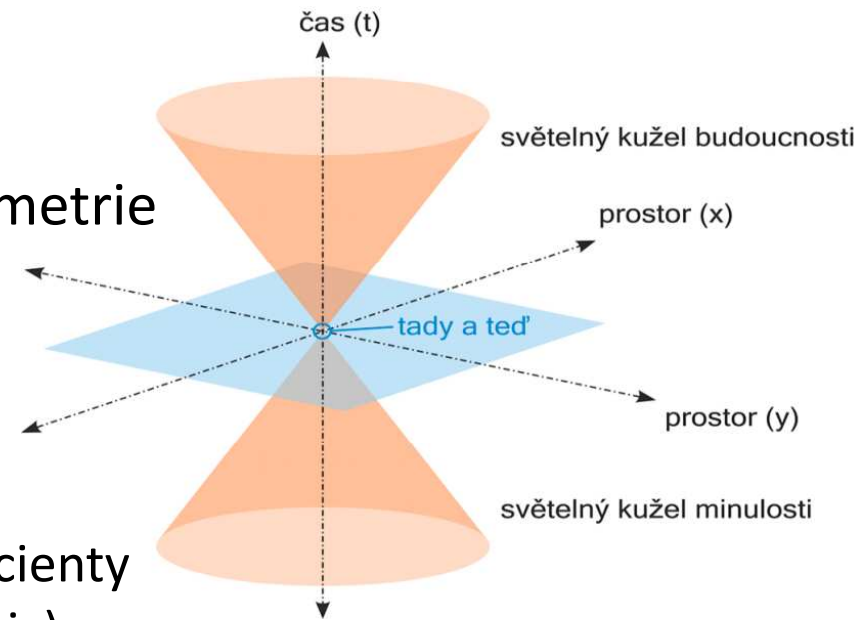
$$ds^2 = \sum g_{ik}(x^j) dx^i dx^k$$

metrické koeficienty  
(10 řád souřadnic)

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

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

$\tau$  se měří ideálními hodinami

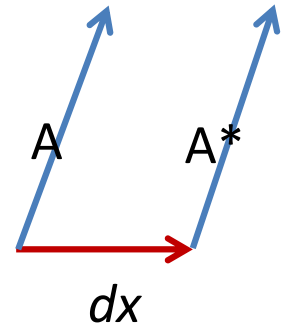


# Konexe

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 nejprímější = 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  $\Gamma$  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

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

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

Riemannův tenzor křivosti

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



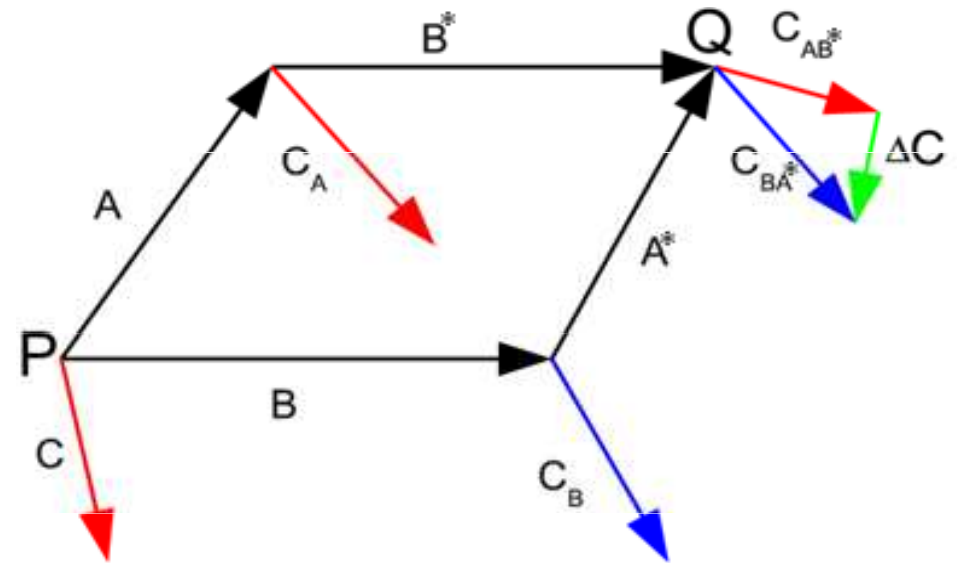
Ricciho tenzor

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



Skalární křivost

rozdíl mezi přenesenými vektory



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 rce spojují geometrii s hmotou

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

tenzor energie hybnosti

**Metaprincip STR:** Ve všech inerc.soustavách mají fyzikální zákony stejný tvar.  
V neinerc.soustavách je vyjádření fyz.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.

Analogie přechodu mezi neeukleidovskou a eukleidovskou geometrií

## Filosofické dilema

- **Presentismus** – reálná je pouze přítomnost

*Eddington*: To nejpodstatnější na čase je, že plyne. Ke geometrickému pojetí obsaženému ve světě Minkowského je třeba něco přidat, máme-li mít kompletní obraz světa, jak ho známe (*Nature of the Physical World* 1928)

*Herakleitos, Bergson, Popper, ...*

- **Eternalismus** – všechna umístění v čase jsou stejně reálná

*Einstein*: Pro nás věřící fyziky je rozdíl mezi minulostí, přítomností a budoucností pouze iluze, třebaže velmi neodbytná (soukromý dopis 1955)

*Parmenides, Leibniz, Spinoza, ...*

### **Přidružené otázky:**

Může být čas adekvátně představován prostorem ? (*Bergson*).

Absolutní determinismus? (*Spinoza*). Věčný návrat? (*Nietzsche*).



# Co znamená zakřivení prostoru?

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k$$

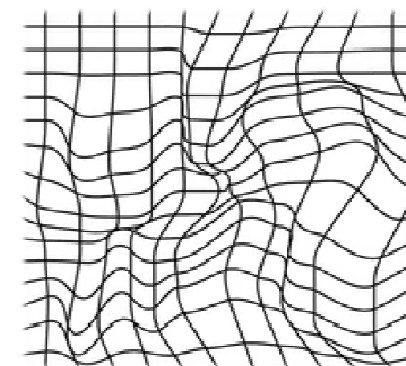
interval jako fce souřadnice

$$g_{ik} = g_{ki} = g_{ik}(x^j)$$

metrické koeficienty

$$x^j = (x, y, z, ct) = (x^\alpha, x^4)$$

prostorčasové  
souřadnice



$$d\sigma^2 = \gamma_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$$

prostorový interval

$$\gamma_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta} + \gamma_\alpha \gamma_\beta$$

obecně metrika prostoru se liší od metriky řezu  
prostorčasem pro konstantní čas

$$\gamma_\alpha = \frac{g_{\alpha 4}}{\sqrt{-g_{44}}}$$

Pozor:  $g_{ik}$  obecně závisí na čase, tedy s časem se mění i prostorová metrika  $\gamma_{\alpha\beta}$ .

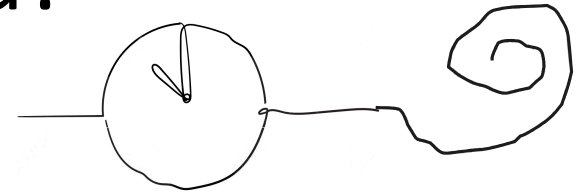
Integrál  $d\sigma$  závisí na tom, po jaké světočáře mezi událostmi se bude počítat.

$$u^2 = \gamma_{\alpha\beta} u^\alpha u^\beta$$

kvadrát rychlosti se počítá z prostorové geometrie

„V OTR klasický pojem vzdálenosti ztrácí smysl“ *Landau, Lifšic*

# Co znamená zakřivení času?



$$d\tau = \frac{ds}{c} = \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{2\varphi}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{u^i \gamma_i}{c} \right]^2 - \frac{u^2}{c^2} \right\}^{\frac{1}{2}} dt$$

vztah mezi **vlastním časem  $\mathcal{T}$**  a **souřadnic. časem  $t$**

$$g_{44} = - \left( 1 + \frac{2\varphi}{c^2} \right)$$

nezakřivený čas – nulové potenciály (stav beztlíže), lze vždy dosáhnout, např. v kosmologii je zakřiven pouze prostor ale nikoliv čas

$$\gamma_\alpha = \frac{g_{\alpha 4}}{\sqrt{-g_{44}}}$$

*Einstein:*

„Prostoročas je absolutní, ale prostor i čas jsou relativní.“

$$a_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial x^i} - c \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} \frac{\partial \gamma_i}{\partial t}$$

$a_i$  zrychlení

$$u^2 = \gamma_{\alpha\beta} u^\alpha u^\beta$$

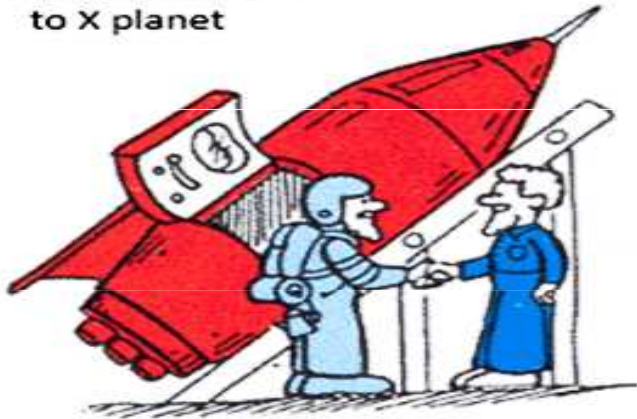
kvadrát rychlosti



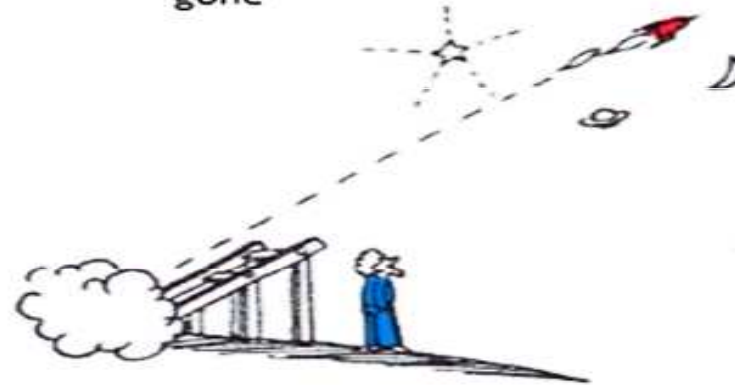
# Paradox hodin

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*

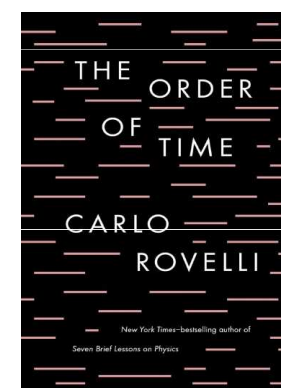
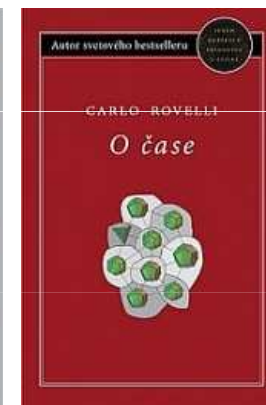
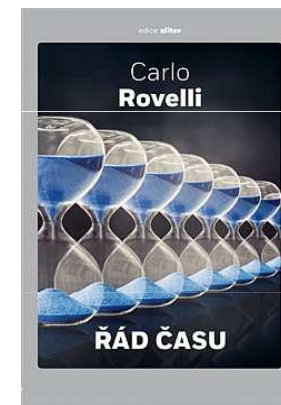
# Je v nížinách víc času než na horách?

„Země je obrovská masa a ve své blízkosti zpomaluje čas. Více v nížinách a méně na horách, protože hory jsou vzdálenější od Země“. C.Rovelli, *O čase*, 2017

Gravitační dilatace času je jev, kdy v místě se silnějším gravitačním polem (přesněji v místě s vyšším gravitačním potenciálem) je tok času zpomalen oproti okolnímu světu, kde je gravitační potenciál nižší.



Wikipedie, 2023



**Všetečná otázka:** Co je tedy rozhodující pro zpomalování času:

**Potenciál? Intenzita? Vzdálenost?**