

# Vzník a vývoj vesmíru

Rikard von Unge

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky  
Masarykova Univerzita

30.12.2017



## Princip souřadnicové invariance

Fyzika nezávisí na volbě souřadnic



## Princip souřadnicové invariance

Fyzika nezávisí na volbě souřadnic



## Princip maximálního vlastního času

Nezrychlený pozorovatel vždy měří nejdelší čas



## Princip souřadnicové invariance

Fyzika nezávisí na volbě souřadnic



## Princip maximálního vlastního času

Nezrychlený pozorovatel vždy měří nejdelší čas

# Co je to zrychlení?

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Co je to zrychlení?

Zrychlení je to, co měříme svými smartfony!

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Co je to zrychlení?

Zrychlení je to, co měříme svými smartfony!



# Malý experiment (plán)

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

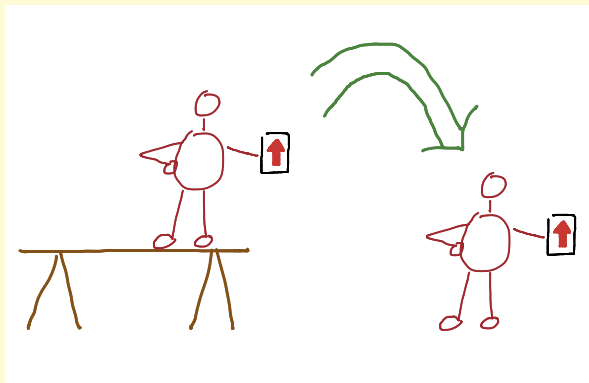
Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit





# Malý experiment (data)

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unger

Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

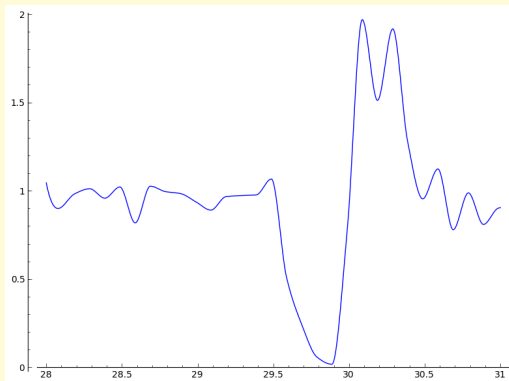
Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Ze Země na Měsíc, Jules Verne, (1870)

Od toho okamžení, kdy zem opustili, zmenšovala se jejich vlastní váha, jakož i váha koule a všech předmětů v ní uzavřených postupem neustálým. Ačkoliv nebyli s to, ustanoviti tento zponenáhlý byt váhy na předmětech v kouli obsažených, musil přece nastati okamžik kde jim, na nich samých a na věcech, jichž do rukou brali, nedostatek váhy musil se státi znatným.

....

Posud nebyli cítili plný nedostatek tíže, ač jim umenšení její bylo patrné, však tohoto dne, okolo jedenácté hodiny dopoledne, vyšinula se sklenice Nikolovi z ruky a zůstala v povětří viseti, jakoby ji neviditelná ruka udržovala! ? Ah! vykřikl Ardan, již ho máme ten bod obojetný, to bude ted' švanda! A popadnuv co v rukou měl, nádobí, láhve, nástroje položil je do vzduchu a vše zůstalo tam vězeti, kam to umístil.

....

–Je-li to možná? je-li to k víře podobno? křičel Ardan; není! a přece jest to pravda! jaký bychom to mohli býti model pro nanebevzetí! – Však ten záznak nebude dlouho trvat, pravil Barbikan; **jestli koule obojetný bod přeletí, přitáhne nás měsíc opět k podlaze.** – A budeme potom choditi po stropě, doložil Ardan. – Nikoliv, vysvětloval Barbikan, těžiště naší koule nachází se pod podlahou a přitažlivost měsíce je zponenáhla k sobě obrátí. – To se nám také všechno nohama vzhůru obrátí, mínil Ardan. – Toho se nestrachuj, podotkl Nikol, nic se nepřevrátí, neb přešnutí koule stane se velmi pomalu. – Tak jest, dodal Barbikan, **bude to ještě nějaký čas trvati, než se koule zcela převrátí, dříve však musíme minouti rozdělovací čáru zemské a měsíční tíže.**

....

Tento výjev zrušené tíže trval asi hodinu. **Cestovatelé cítili, že je nová síla opět k podlaze přitahuje** a Barbikan pozoroval, jak se strop válcové koule zponenáhla od dráhy uchyluje a těžší spodek její k měsíci se blíží; přitažlivost měsíce nabývala tedy převahy nad přitažlivostí zemskou. Nastalo tedy padání koule k měsíci, posud sice zcela neznamenné, neb při volném pádu neobnášelo by víc než 590 tisícín jedné čárky za sekundu, avšak zponenáhla se stávalo znatnějším, vrchol koule obrátil se k zemi a rychlostí přibývajícím měla již až na měsíc dopadnouti. Nic nepřekáželo již št'astnému vykonání znamenité pouti a Nikol i Ardan sdíleli tedy plným srdcem radost, kteráž z tváře Barbikana zářila.

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Ze Země na Měsíc, Jules Verne, (1870)

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge



Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

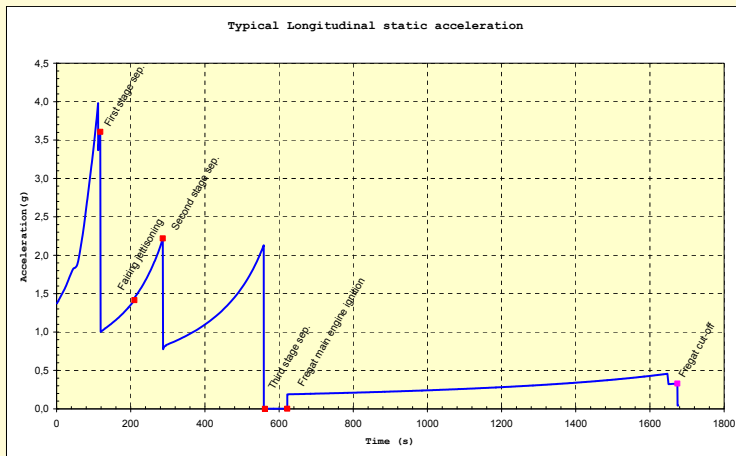
Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

# Let rakety

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge



Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# The vomit comet

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

**Zrychlení**

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Co je to čas?

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Uнге

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

**Čas**

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



# Co je to čas?

Čas je to, co měříme svými smartfony!

Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

**Čas**

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

# Co je to čas?

Čas je to, co měříme svými smartfony!



Vznik a vývoj  
vesmíru

Rikard von Unge

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit







## Princip souřadnicové invariance

Fyzika nezávisí na volbě souřadnic

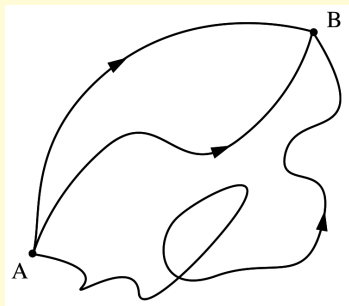


## Princip maximálního vlastního času

Nezrychlený pozorovatel vždy měří nejdelší čas

# Různí pozorovatelé, různé časy

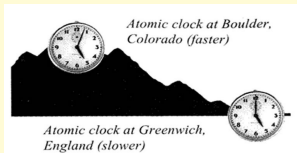
Tři lidé opustí bod A současně a setkají se potom současně v bodu B. Cestou měří vzdálenost, kterou ujdou, a dobu, za kterou vzdálenost urazí.



Obecně platí, že nejenom jejich vzdálenosti, ale i jejich časy se budou lišit.

# Důkazy?

Mezinárodní atomový čas (TAI, temps atomique international) je souřadnicový čas definovaný pomocí atomových hodin. Údaje z více než 200 atomových hodin (EAL, Echelle Atomique Libre) se **od roku 1977 relativisticky (kvůli započtení gravitační dilatace času) přepočítávají z vlastního času hodin na rotující geoid (střední hladinu moře)**. Jeho plynutí tak není závislé ani na periodě rotace Země ani na výšce umístění atomových hodin, jako u lokálního měření atomového času. Tento čas představuje v současné době nejpřesnější dosažitelnou časovou stupnici. (Wikipedia)



## article

*Nature* **268**, 301 - 305 (28 July 1977); doi:10.1038/268301a0

## Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit

J. BAILEY<sup>1</sup>, K. BORER<sup>2</sup>, F. COMBLEY<sup>3</sup>, H. DRUMM<sup>4</sup>, F. KRIENEN<sup>5</sup>, F. LANGE<sup>6</sup>, E. PICASSO<sup>7</sup>, W. VON RUDEN<sup>8</sup>, F. J. M. FARLEY<sup>9</sup>, J. H. FIELD<sup>10</sup>, W. FLEGEL<sup>11</sup> & P. M. HATTERSLEY<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Daresbury Laboratory, Warrington, Lancashire, UK

<sup>2</sup>Physikalisches Institut, Universität Bern, Bern, Switzerland

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Sheffield, Sheffield, UK

<sup>4</sup>European Organization for Nuclear Research, Geneva

<sup>5</sup>European Organization for Nuclear Research, Geneva

<sup>6</sup>Institut für Physik der Universität Mainz, Mainz, FRG

<sup>7</sup>European Organization for Nuclear Research, Geneva

<sup>8</sup>Institut für Physik der Universität Mainz, Mainz, FRG

<sup>9</sup>Royal Military College of Science, Shrivenham, Wiltshire, UK

<sup>10</sup>European Organization for Nuclear Research, Geneva

<sup>11</sup>European Organization for Nuclear Research, Geneva

<sup>12</sup>Department of Physics, University of Birmingham, Birmingham, UK

The lifetimes of both positive and negative relativistic ( $\gamma = 29.33$ ) muons have been measured in the CERN Muon Storage Ring with the results  $\tau^+ = 64.419 (58) \mu\text{s}$ ,  $\tau^- = 64.368 (29) \mu\text{s}$ . The value for positive muons is in accordance with special relativity and the measured lifetime at rest: the Einstein time dilation factor agrees with experiment with a fractional error of  $2 \times 10^{-3}$  at 95% confidence. Assuming special relativity, the mean proper lifetime for  $\mu^-$  is found to be  $\tau_0^- = 2.1948(10) \mu\text{s}$  the most accurate value reported to date. The agreement of this value with previously measured values of  $\tau_0^+$  confirms CPT invariance for the weak interaction in muon decay.

Obecná teorie  
relativity

Principy  
Zrychlení  
Čas

Důkazy  
Matematické  
pomůcky  
Gravitace

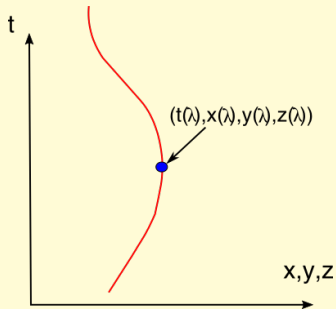
Kosmologie

Modely  
Fyzika

Laboratoř vesmíru

Ingredience  
Mícháme a necháme  
vařit

Fyzikální děje popisujeme v čtyřdimenzionálním prostoru.



Čtyři reálné funkce parametru  $\lambda$  úplně popisují pohyb jednoho pozorovatele.

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

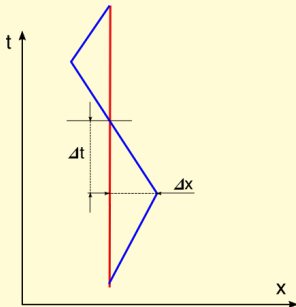
Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

Časy a délky měříme **metrikou**

$$(\Delta s)^2 = (\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$



Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

**Matematické  
pomůcky**

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

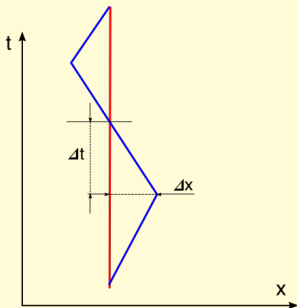
Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

Časy a délky měříme **metrikou**

$$(\Delta s)^2 = (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$$



$$(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 \leq (\Delta t)^2 \leq (\Delta t)^2 + (\Delta x)^2$$

**Nezrychlený pozorovatel měří nejdelší čas!**

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

**Matematické  
pomůcky**

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

**Homogenita** (vesmír vypadá všude stejně) a **Isotropnost** (vesmír vypadá stejně ve všech směrech) znamená, že metrika nemůže vypadat jinak než

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

Metrika závisí jenom na jednu neznámou funkci o jedné proměnné  $a(t)$ . Je to škálovací faktor. Všechny délky jsou úměrné  $a(t)$ .

$$L = a(t) \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}$$

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

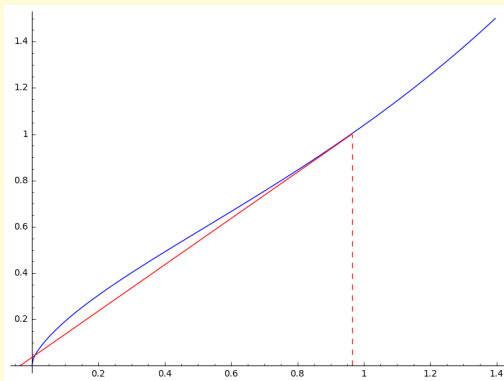
Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit





Znalostí  $a(t)$  známe celý vývoj vesmíru od začátku do konce.  
Takto vypadá škálovací faktor pro náš vesmír.



Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

**Modely**

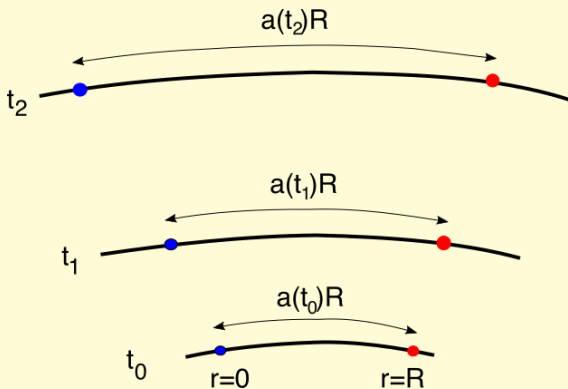
Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

# Rychlost expanze ( $k=0$ )



Relativní rychlost je úměrná  $R$

$$v = R\dot{a}$$

# Hubblův parametr

Důležitý pojem, Hubblův parametr:  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ .

$$v_0 = R\dot{a}(t_0) = \underbrace{Ra_0}_{\text{vzdálenost}} \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)_{t=t_0}$$

Relativní rychlost mezi námi a vzdáleným objektem je úměrná dráze  $Ra_0$  a konstanta úměrnosti je Hubblův parametr  $H_0$ .

Nejpřesnější hodnota Hubblova parametru je

$$H_0 = 67.8 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$$

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

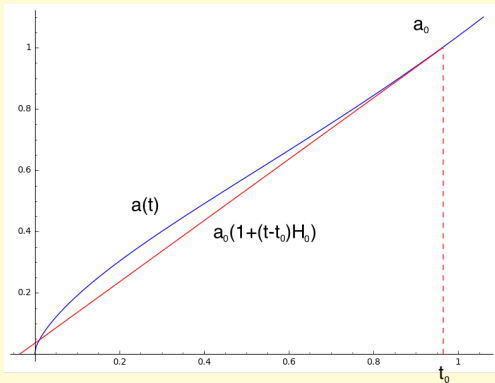
Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



Stáří vesmíru se jednoduše počítá

$$1 + (t_{VT} - t_0)H_0 = 0 \Rightarrow t_0 - t_{VT} = \frac{1}{H_0}$$

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

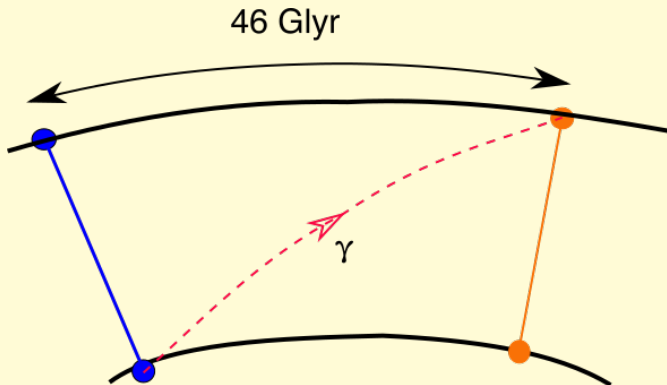
Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit



Momentálně vidíme světlo pocházející ze zdrojů *ted'* vzdálené  $46 \cdot 10^9$  světelných let.

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

Mícháme a necháme  
vařit

Různé typy hmot mají různé časové závislosti

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \left( \frac{a_0}{a(t)} \right)^{3(1+w)}$$

kde

$$w = \begin{cases} \frac{2}{3} & \text{Nerelativistická hmota} \\ \frac{1}{3} & \text{Záření} \\ 0 & \text{Prach} \\ -1 & \text{Kosmologická konstanta} \end{cases}$$

Řešením Einsteinových rovnic zjistíme  $a(t)$ , a tím popis celého jednoho vesmíru od začátku do případného konce

Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

**Ingredience**

Mícháme a necháme  
vařit



Obecná teorie  
relativity

Principy

Zrychlení

Čas

Důkazy

Matematické  
pomůcky

Gravitace

Kosmologie

Modely

Fyzika

Laboratoř vesmírů

Ingredience

**Mícháme a necháme  
vařit**