

# III

# ROZPÍŇÁNÍ PROSTORU

# TEORIE RELATIVITY

= Hledání absolutního prostoru:

mechanika: inerciální soustava - soustava podezřelá z abs. prostoru

elektrodynamika:  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  ... Rychlost světla v Etheru

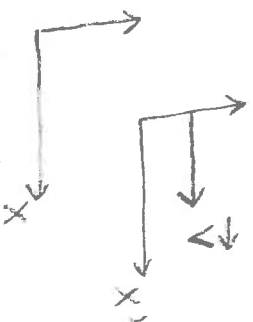
Absolutní prostor = soustava, kde se světlo pohybuje rychlostí  $c$

= Michelson (1880 - 1887): Měření rychlosti světla ve směru pohybu Země a ve směru kolmém - STEJNÝ VÝSLEDEK

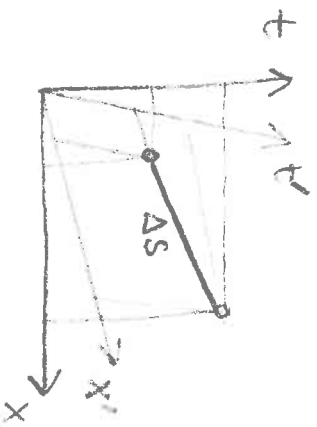
= Lorentzovy transformace  $\Rightarrow$  Dilatace času a kontrakce délek

$$\Delta t' = \Delta t \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta x' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Delta x$$



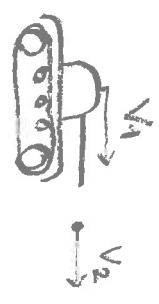
= Einstein (1905) - "O elektrodynamice pohybujících se těles" (Annalen der Physik)  
 $\rightarrow$  prostor + čas  $\rightarrow$  prostorčas



$$(\Delta s)^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 \dots \text{invariant}$$

→ Rychlost světla je ve všech inerciálních soustavách stejná

→ Pravidlo skládkání rychlostí



$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

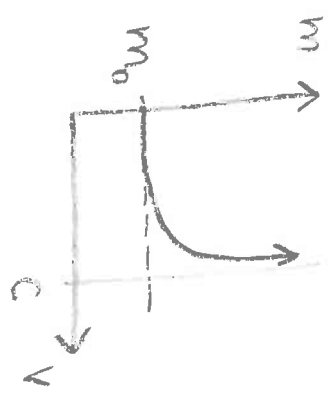
Př:  $v_1 = v_2 = c/2$

$$v = \frac{c}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{4}{5}c$$

→ Ekvivalence hmoty a energie

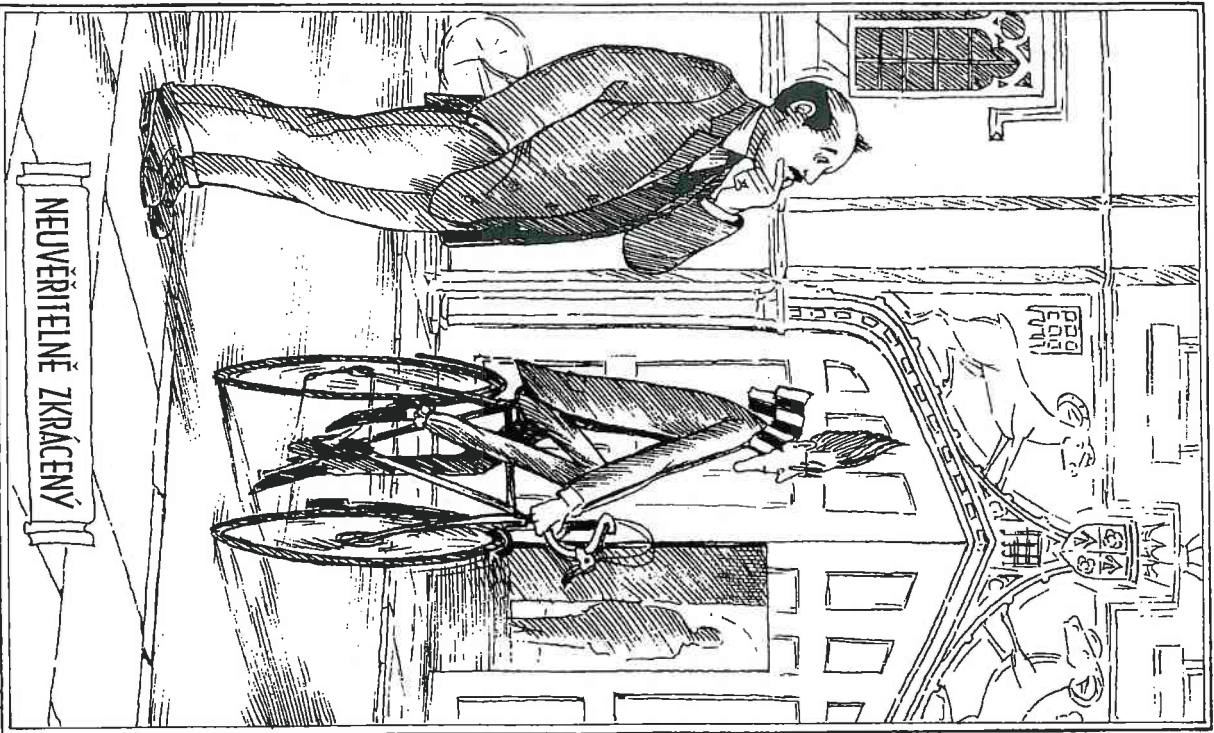
$$E = mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

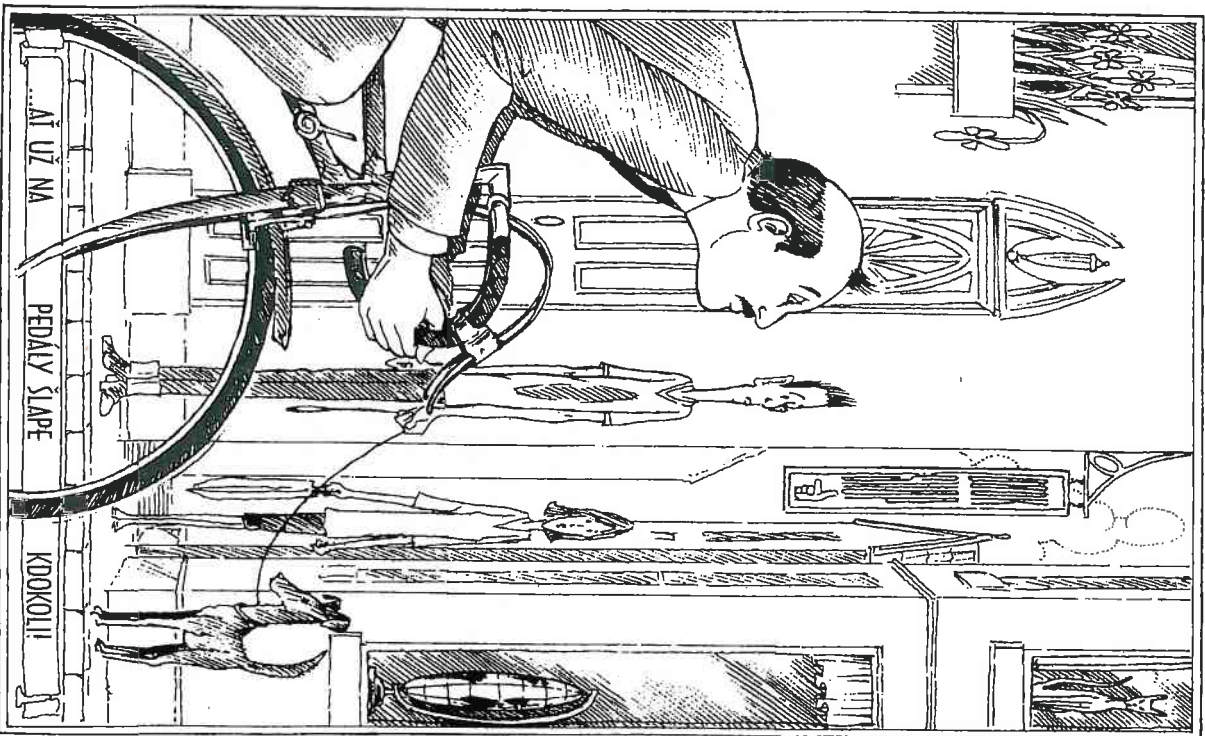


ROVNOPRÁVNOST INERCIÁLNÍCH SOUSTAV...

a la G. Gamow: "Pan Tompkins v říši divů"



NEUVĚŘITELNĚ ZKRÁCENÝ



...A! UŽ NA

PEDÁLY ŠLAPE

KDOKOJI!

# TEORIE GRAVITACE

Aristoteles - padání na Zemi

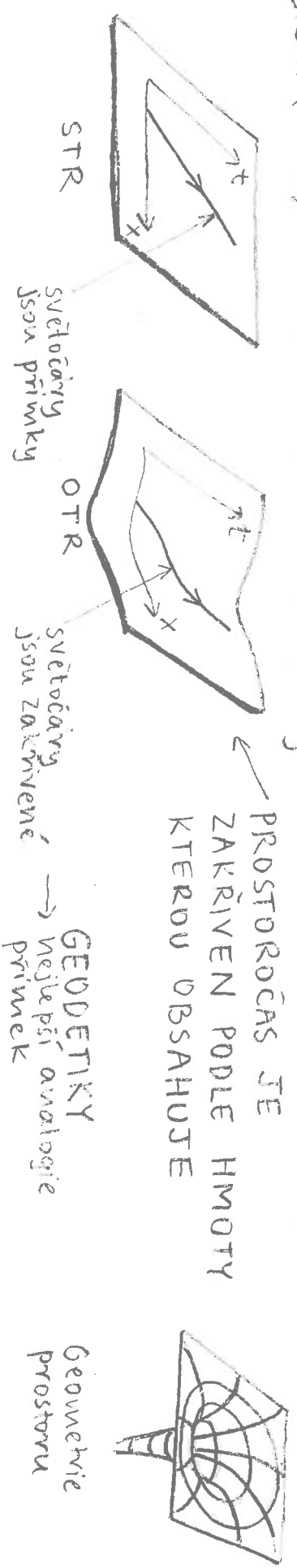
Kepler - "Jak by to bylo na Měsíci?"  
 (sen aneb lunární astronomie) ,  $\frac{T^2}{a^3} = konst$

Newton - Zákon všeobecné gravitace

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- Okamžité
- Působení na dálku
- Ekvivalence gravitační a setrvačné hmotnosti

Einstein (1915) - Obecná teorie relativity



Einsteinovy rovnice:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^2} \pi_{\alpha\beta}$$

Tensor energie a hybnosti  
ROZLOŽENÍ HMOTY

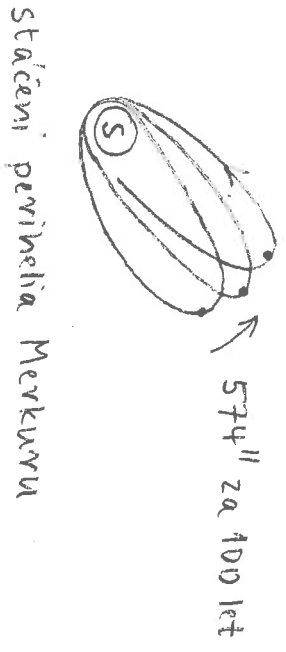
Pozn Newton:  $m_1 a_1 = \sum_{j \neq 1} \frac{G m_1 m_j}{r_{1j}^2}$

$G_{\alpha\beta}$  = Einsteinův tensor

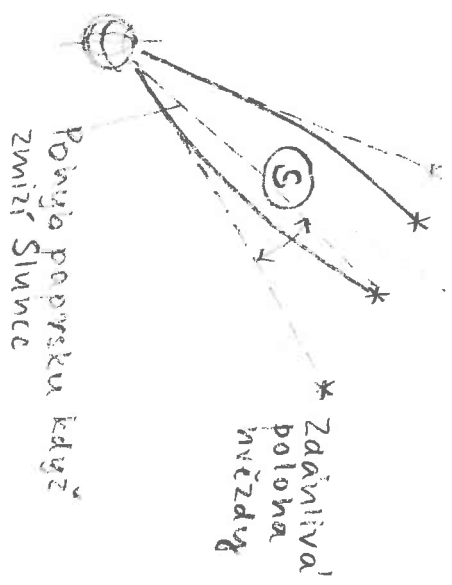
GEOMETRIE  $\Rightarrow$  Pohyb hmoty, světla

Předpovědi OTR (ověřené)

1 Planety se nepohybují po přesné uzavřených eliptických drahách



2. Zakřivení světelných paprsků v gravitačním poli



... Arthur Eddington

zatmění Slunce 1919

Princův ostrov - blízko západní Afriky

# Einsteiniův vesmír

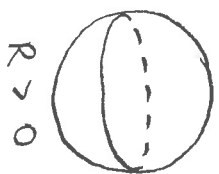
## Čtyři síly ve vesmíru

	Relativní velikost	Uměrnost	Dosah(m)
Gravitační	1	$1/r^2$	$\infty$
Elektromagnetická	$10^{36}$	$1/r^2$	$\infty$
Slabá jaderná	$10^{25}$	$1/r^5 - 1/r^7$	$10^{-18}$
Silná jaderná	$10^{38}$	$1/r^7$	$10^{-15}$

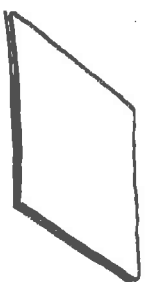
- ← veškerá hmota
- ← elektrický náboj (proud)
- ← leptony, kvarky, neutrina ( $\beta$ -rozpad)
- ← nukleony v jádře atomů.

⇒ Jediná síla kosmologického dosahu je gravitační ⇒ **OTR**

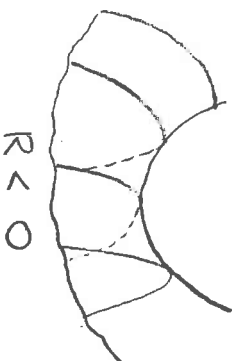
■ Kosmologický princip  $\equiv$  Vesmír je izotropní a homogenní – látka ve vesmíru:  
 ⇒ Prostor má konstantní křivost – pouze 3 možnosti



$R > 0$



$R = 0$



$R < 0$

... analogie ve dvourozměrném prostoru

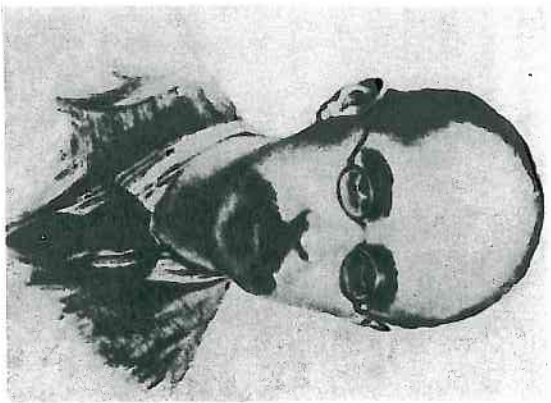
■ Vesmír by nebyl statický ⇒ Zavedení kosmologického členu

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

... vzájemně odpuzování 'slabé'

"Zavázána výjma na formální kraše teorie"

# DYNAMICKÝ VESMÍR



Alexandr Friedmann (1922)

Matematický přístup = Všechna řešení Einsteinových kosmologických rovnic (včetně  $\Lambda = 0$ )

⇒ vesmír se vyvíjí!

EINSTEIN: „Výsledky týkající se nestacionárního světa, které jsou současně práce se mi zdají podezřelé. Ve skutečnosti se ukazuje, že zde uvedené řešení nespĺňuje rovnice OTR“

Georges Lemaître

1923 Vysvěten na kněze ( „Existují dvě cesty jak se dobrat pravdy“  
Rozhodl jsem se vydat oběma“ )

1925 Nezávisle objevil Friedmannovy výsledky

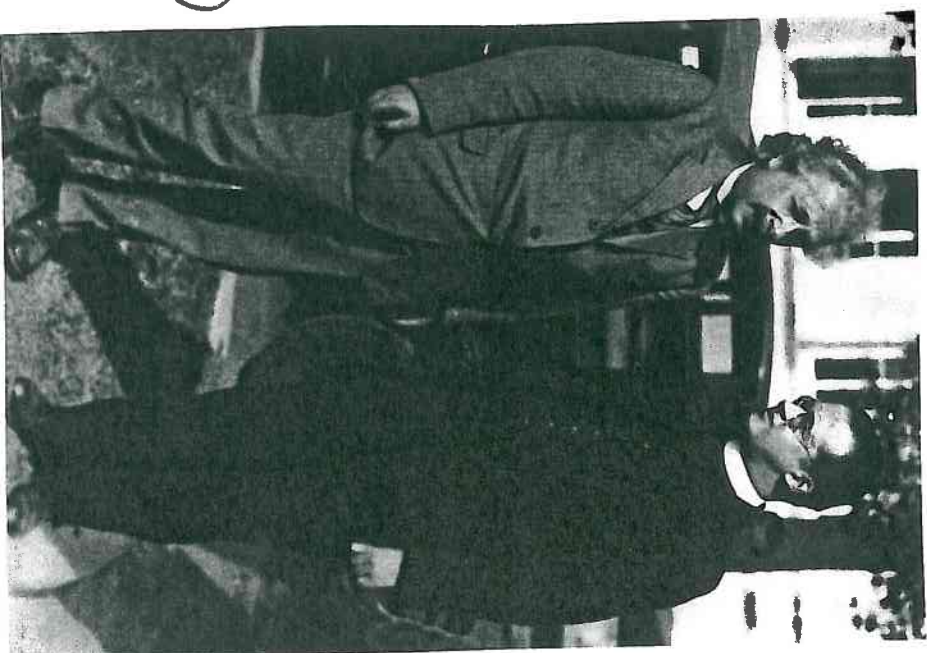
Fyzikální přístup = Fyzikální důsledky pro  
historii kosmu

– Vesmír začal v malé oblasti ⇒ PRVOTNÍ ATOM

– vznik vesmíru – analogie s radioaktivním rozpadem

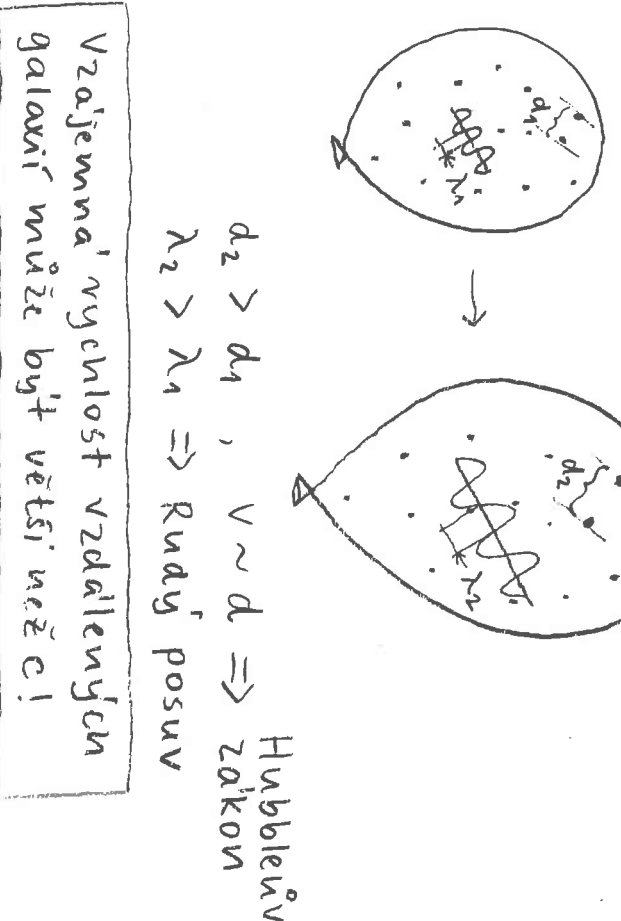
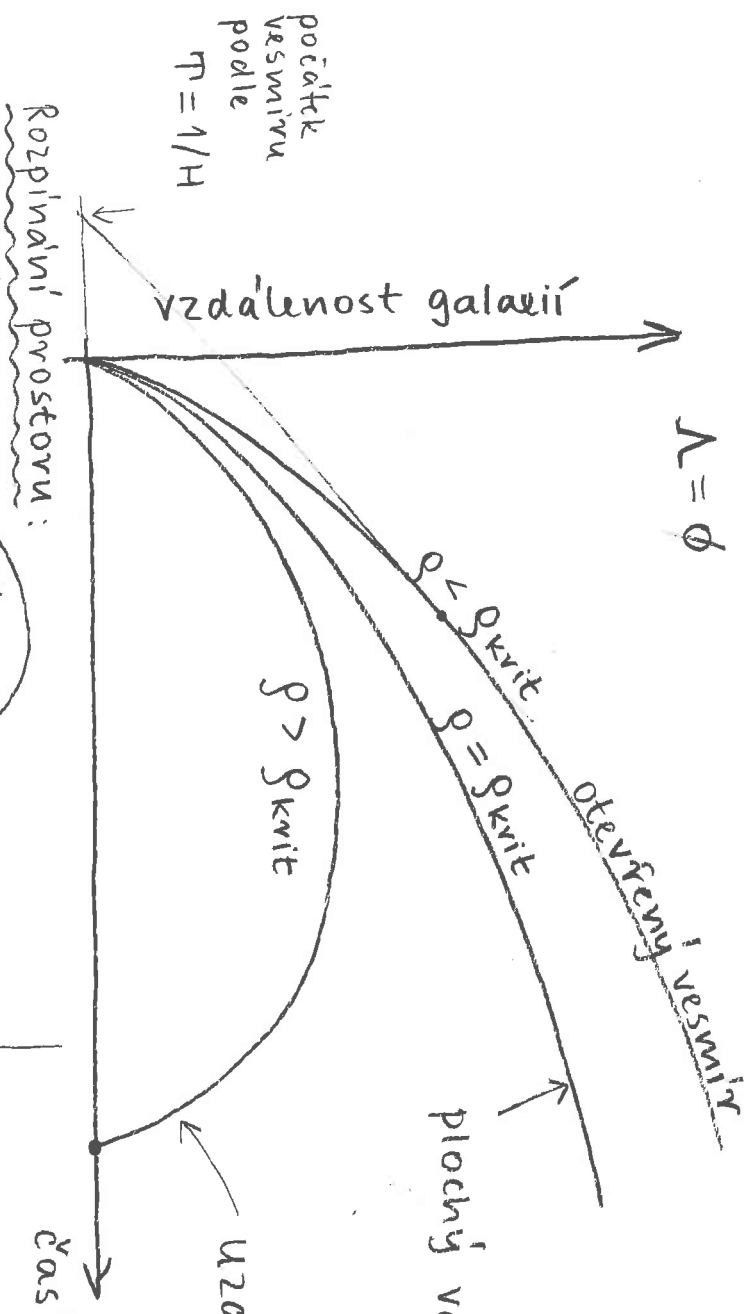
(V. Hess, 1912 – Detekce částic v balonu ve výšce 6km)

Einstein: „Vaše výpočty jsou správné, ale vaše fyzika je ohavná“





# Rozpínání prostoru



Vzájemná rychlost vzdálených galaxií může být větší než  $c$ !

→ Rozpíná se celý prostor galaxie se vůči němu téměř nehybou

uzavřený vesmír

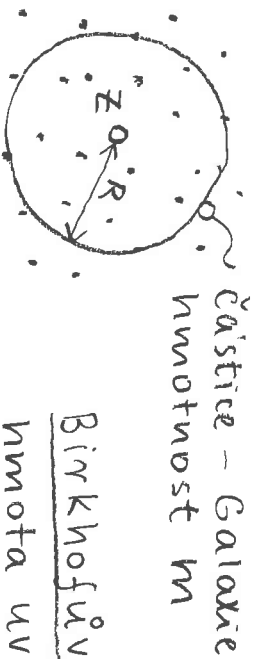
$\rho > \rho_{krit}$  ... uzavřený vesmír prostorově konečný

$\rho \geq \rho_{krit}$  ... otevřený vesmír prostorově nekonečný

Po objevu Hubbleova zákona se Einstein přiklonil k teorii rozpínajícího se vesmíru. Zavedení kosmologické konstanty  $\Lambda$  nazval největší chybou svého života.

## V jakém vesmíru žijeme?

Odvození kritické hustoty:



Birkhoffův teorém  $\Rightarrow$  na částici působí pouze hmota uvnitř koule (příspěvky vnějšíku se odečtou)

Potenciální energie:  $E_p = -\frac{GMm}{R} = \frac{4}{3}\pi R^2 G m \rho$

Kinetická energie:  $E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m H^2 R^2$

Celková energie  $E = E_p + E_k = \left(\frac{1}{2} H^2 - \frac{4}{3} \pi \rho G\right) m R^2 = \text{konst}$

$E < 0$  : konečný vesmír

$E = 0$  : asymptoticky nekonečný vesmír  $\Rightarrow \rho = \rho_c =$

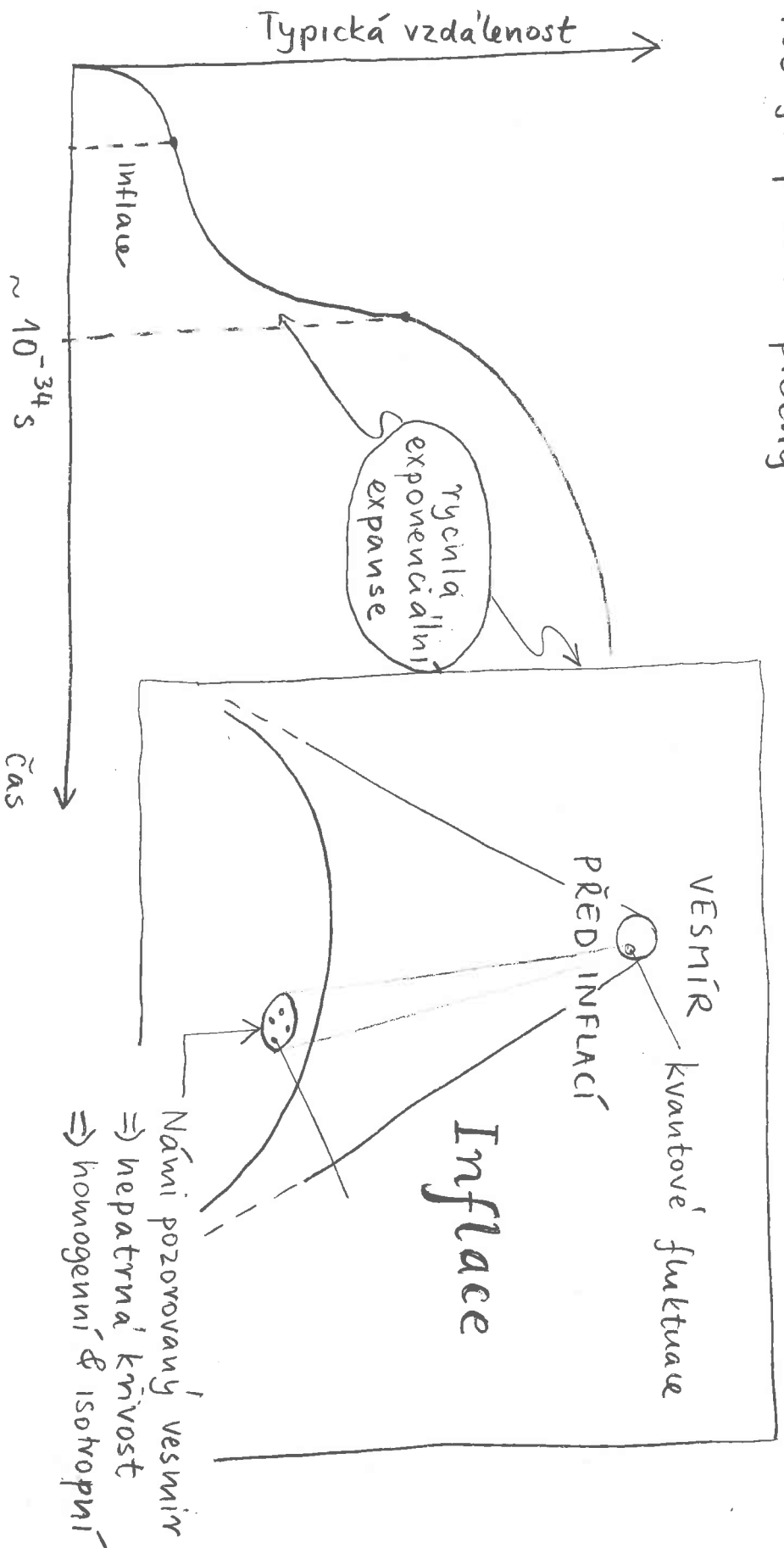
$E > 0$  : Nekonečný vesmír

$\downarrow$   
 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Mpc}$   
 $\frac{3 H^2}{8 \pi G} = 4.7 \times 10^{-24} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$   
 $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{2.7 \text{ nukleonů}} \text{m}^3$

# INFLACE

## PROBLÉMY STANDARDNÍ TEORIE VELKÉHO TŘESKU:

- ▣ Proč je vesmír homogenní & izotropní? (PROBLÉM HORIZONTU)
- ▣ Proč je prostor plochý?



→ Alan Guth (6. XII. 1979), Andreas Albrecht, Paul Steinhard, Andrej Linde