

# Minulost a budoucnost rozpínajícího se vesmíru

**Zdeněk Mikulášek**

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky  
Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně

# Rozměry vesmíru

Zprvu: vesmír je celý viditelný, končí sférou stálic. Rozměry: pár poloměrů Země

1850 první úspěšná měření vzdálenosti nejbližších hvězd – vesmír  $> 10^5$  světelných let



Začátek 20. století, většina soudila: vesmír  $\equiv$  Galaxie

20. léta 20. století E. Hubble ukázal: spirální mlhoviny - hvězdné soustavy podobné naší **Galaxii**  $\rightarrow$  vesmír se rozrostl na miliardy sv. let.

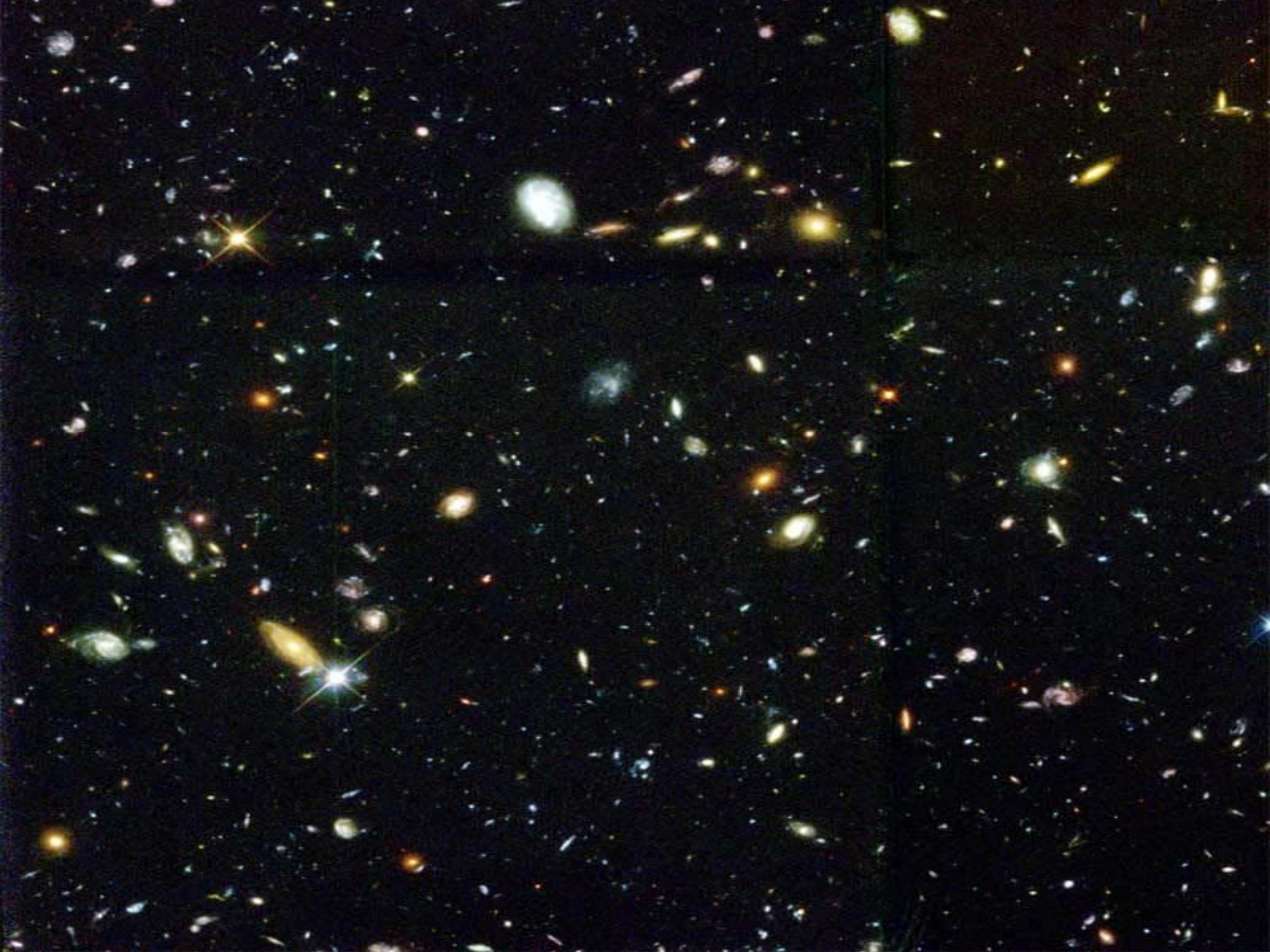
# Dalekohled: „stroj času“

Důsledek konečné rychlosti světla:

$$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Pohled do hlubin vesmíru je současně  
pohledem do hlubin jeho minulosti

Hubbleův kosmický dalekohled dohlédne  
až do doby, kdy vznikaly galaxie –  
vše zachyceno na mnohahodinové  
expozici - tzv. *hlubokém poli*.



# Vzdálenosti vesmírných objektů

Základem měření paralaxy bližších hvězd – náročné, přelom znamená družice Hipparcos → změřila vzdálenosti milionu hvězd →

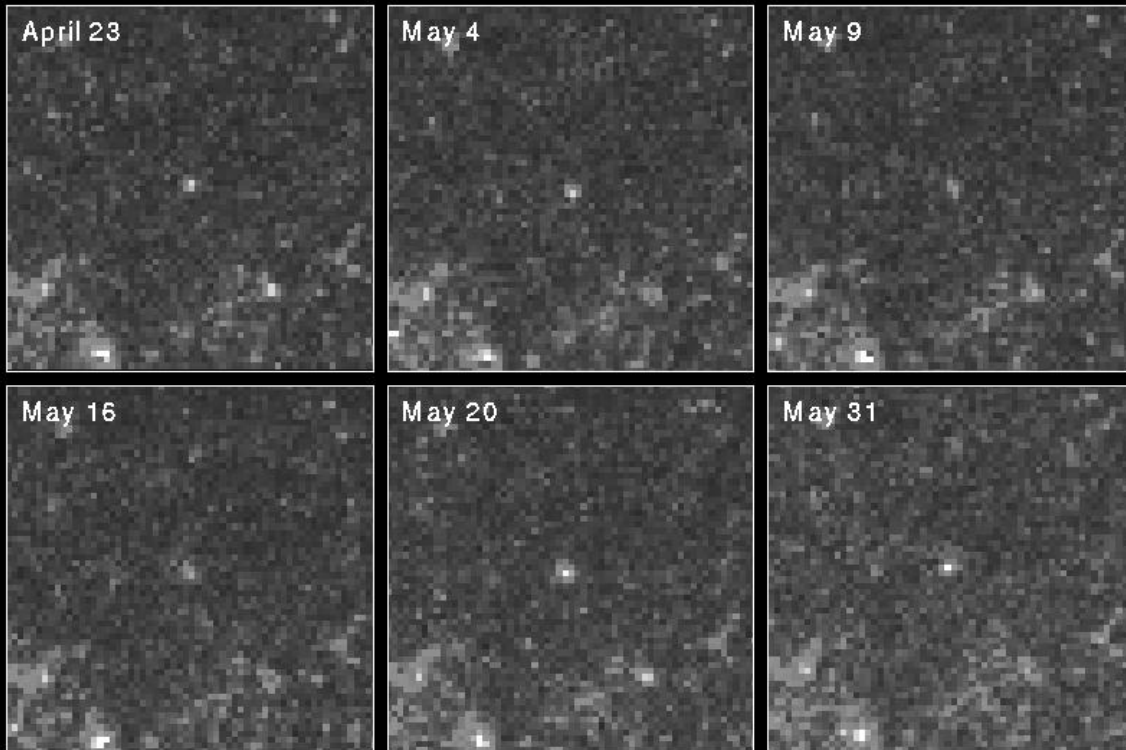
kalibrace zářivého výkonu tzv. *standardních svíček*.

Nejdůležitější - *cefeidy* ( $P-L$ ), *supernovy Ia*.

- Pro galaxie sofistikované metody: Tullyova-Fisherova, fluktuace jasnosti, Sjunjajevův efekt.

## Cepheid Variable Star in Galaxy M100

HST-WFPC2



Stěžejní úkol  
Hubbleova  
dalekohledu  
tyto metody  
spolu navázat  
– studiem  
cefeid  
v bližších  
galaxiích →

poměrně spolehlivé určování vzdálenosti velice vzdálených galaxií.

# Rozpínání vesmíru

Statičnost a věčnost – zcela přirozený atribut vesmíru až do začátku 20. stol.

Vesto Slipher – galaxie (mlhoviny) jeví červený posuv čar. Edwin Hubble: posuv  $z$  je úměrný vzdálenosti  $r$  - důsledek rozpínání prostoru (vesmíru).

Hubbleova-de Sitterova konstanta,  $H_0 = V/r$ , rozměr km/s/Mpc, v SI  $s^{-1}$  – definuje okamžité tempo rozpínání,  $\tau = 1/H$  – odhad stáří vesmíru, který expanduje bez zrychlení. Poslední měření:  $H = (74 \pm 2) \text{ km/s/Mpc} \approx \tau = 1/H = 13 \text{ miliard let}$ .

Lze tedy čekat, že s tím, jak vesmír stárne, bude hodnota Hubbleovy konstanty klesat!

# Kosmologický červený posuv, povaha rozpínání

Kosmologický červený posuv - důsledkem natažení fotonu při jeho cestě rozpínajícím se prostorem: vesmír se od vyslání fotonu zvětšil  $(z+1)$ krát, všechny vidíme  $(z+1)$ krát zpomalené.

Vzdálenosti ve vesmíru se zvětšují 1/14 mld/rok, v jednom  $\text{m}^3$  ročně přibude asi  $0,2 \text{ mm}^3$  nového prostoru.

Vesmír se nikam nerozpíná, nese si svůj prostor sebou, není to tedy analogie exploze.

**Střed rozpínání neexistuje!** Vesmír je izotropní

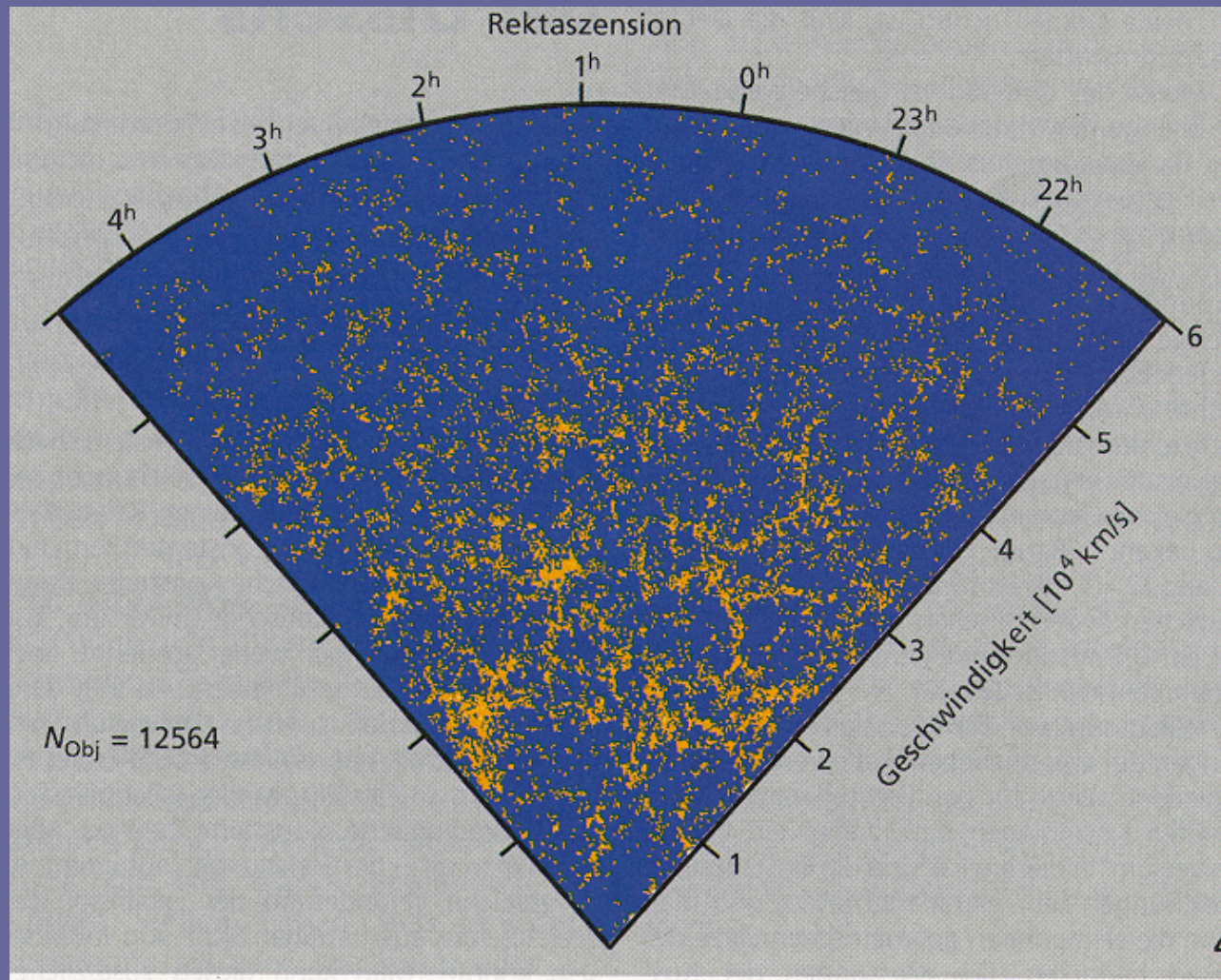


V minulosti byly všechny body vesmíru u sebe, vesmír má svůj počátek v čase – **velký třesk**.

Nejvzdálenější objekty – aktivní jádra galaxií – kvasary + supernovy Ia, vzdálenosti vyjadřované v  $z$ ,  $z < 11,1$ .

Dohlédneme však ale až k  $z = 1400$ ! – **reliktní záření**, hlouběji je už vesmír neprůhledný.

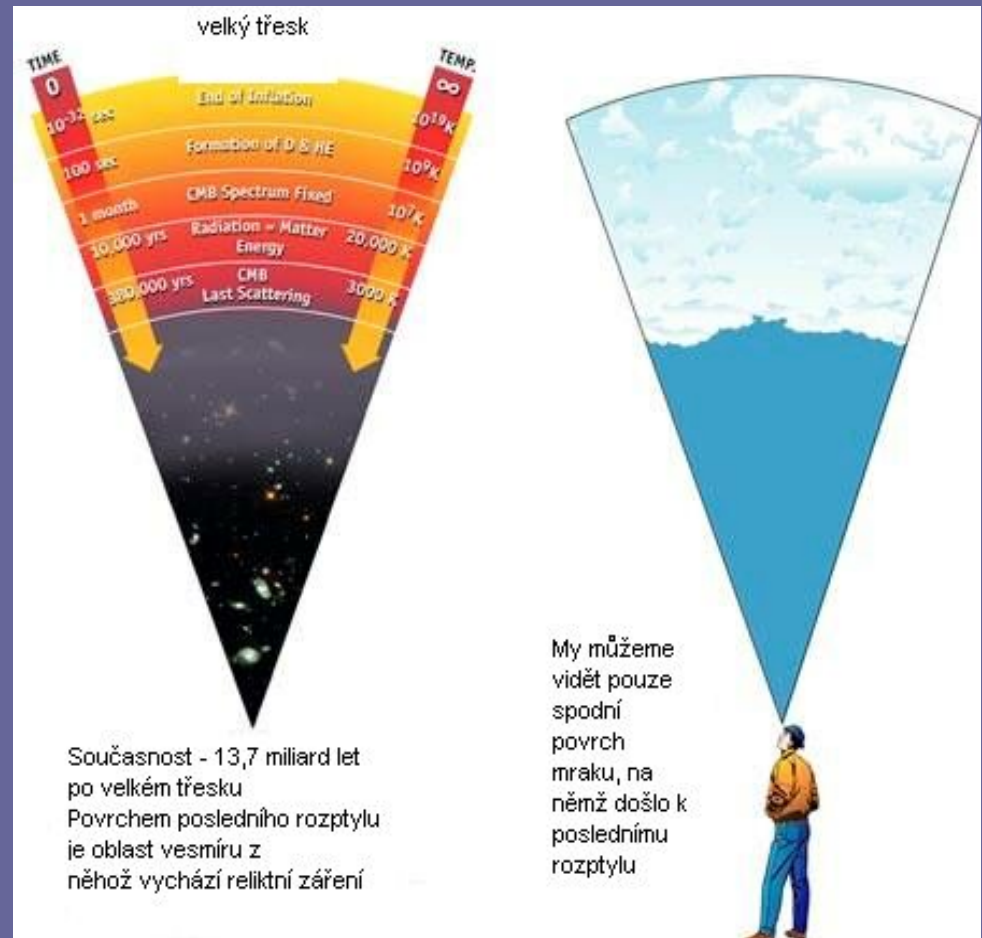
Kosmologický posuv – nejspolehlivější míra vzdálenosti – pomocí něj řada odhalení, např. šokující **buněčná struktura vesmíru**.



# Kosmologický horizont

Objem pozorovatelného vesmíru je konečný:  $c$  krát stáří vesmíru. Na okraji vidíme objekty velice mladé,  $v \rightarrow c$ .

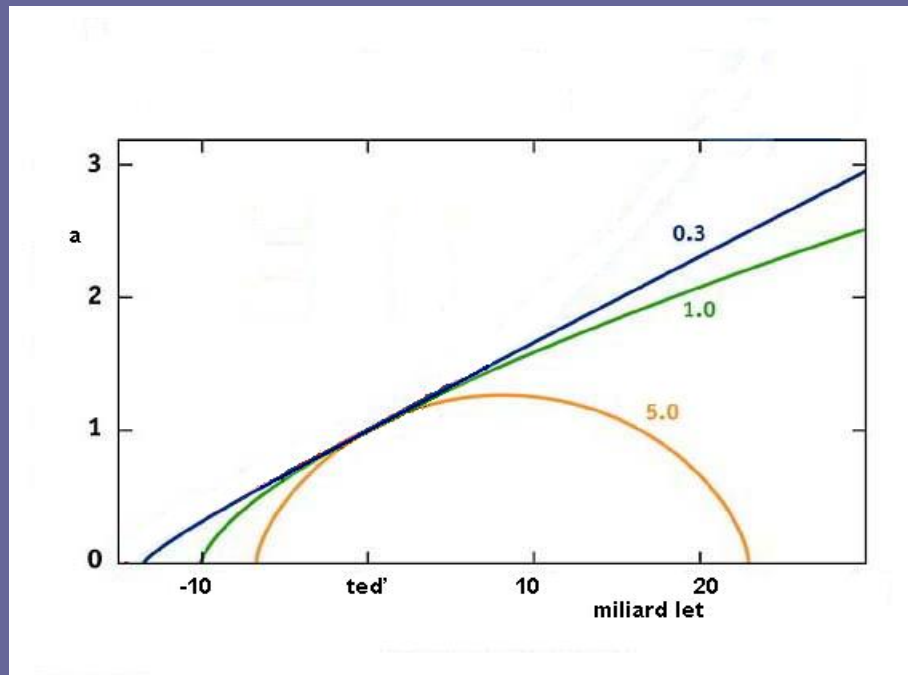
Objekty s  $v > c$  viditelné nejsou, nijak nás neovlivňují.



I viditelné objekty mohou z horizontu zmizet!

# Standardní model vesmíru

Vesmír rovnoměrně vyplněn inertní gravitačně interagující látkou – gravitace je pro vývoj vesmíru určující silou. Teorie gravitace: obecná teorie relativity, ale i Newtonova gravitace



První modely z OTR  
Friedman, de Sitter.  
Dokázali mj.: vesmír  
je nestatický, buď  
se rozpíná nebo  
hroutí. Tlak  
nedůležitý – no grad

Analogie – vrh předmětu v gravitačním poli  
vzhůru: typy řešení eliptický, parabolický a  
hyperbolický vesmír – boj mezi setrvačností a  
zbrzdující gravitační silou  $F \sim -R^2$

A. Einstein ve snaze o podržení stacionarity  
zavádí tzv. **kosmologickou konstantu  $\Lambda$**  – její  
existenci rovnice OTR připouštějí. Má povahu  
odpudivé gravitace vakua:  $F \sim R$  – zajistil by jí  
ovšem jen vratkou stabilitu.

Einstein po objevu rozpínání vesmíru:

„Kosmologická konstanta byl můj největší omyl“,  
v tom se ale krutě mýlil!

# Osud vesmíru

záleží na vývoji jeho rozpínání - škálovací faktor  $a$ .  
Budoucí vývoj - řešením rovnic obecné teorie relativity.  
Musíme znát tempo rozpínání i v minulosti.

Nezbytné informace lze získat i kritickým sledováním  
tempa rozpínání blízkého i vzdáleného vesmíru.

Současné tempo rozpínání a očekávanou dynamiku  
udává Hubbleova konstanta  $H$  a decelerační parametr  
 $q$ .  $H$  určuje i velikost tzv. kritické hustoty vesmíru:

$$H_0 = \frac{\dot{a}}{a}, \quad q_0 = -\frac{1}{H_0^2} \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\ddot{a} a}{\dot{a}^2}.$$

$$\rho_{k0} = \frac{3H_0^2}{8\pi K} = 9,2 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3} = 8,3 \cdot 10^{-10} \text{ Jm}^{-3}. \quad \Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{k0}}.$$

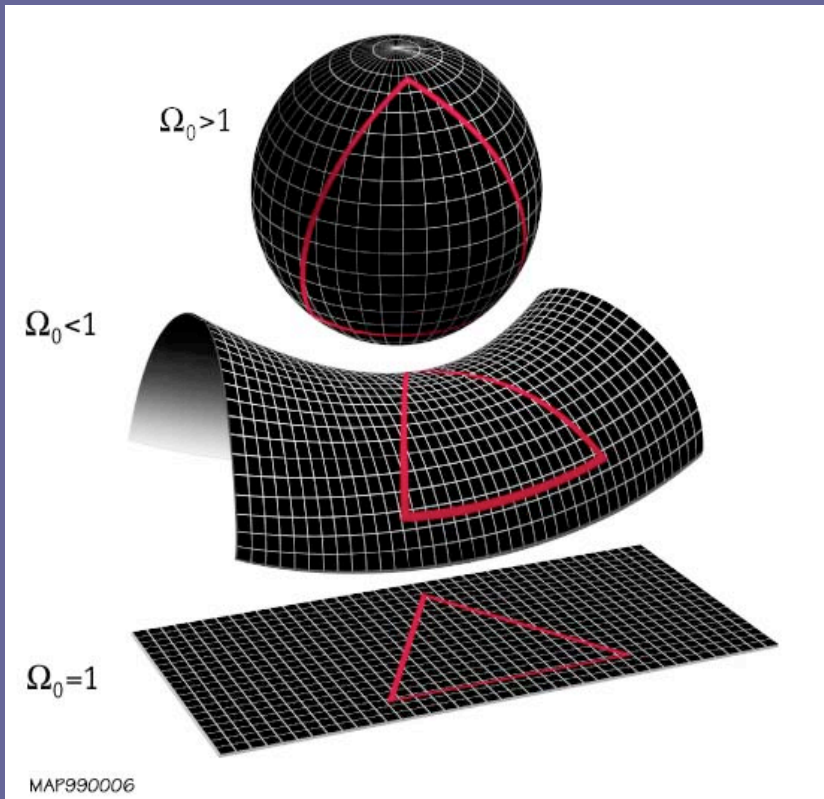
# Friedmanovy modely vesmíru

Gravitační teorie – OTR bez kosmologické konstanty. Expandující vesmír – vlastnosti závisejí hustotě a tempu rozpínání. Všechna řešení mají počátek rozpínání.

**Elipsoidický vesmír** –  $\Omega_0 > 1$  - konečný objem, uzavřen sám v sobě, má kladnou křivost.

Tempo rozpínání stále klesá, po čase se vesmír začne hroutit ( $q > \frac{1}{2}$ ) a vše jednou skončí opak velkého třesku - *velkým křachem*. Čas se zastaví.

Další cykly ale už nebudou!



**Parabolický vesmír,**  
 $\Omega_0 = 1, q = \frac{1}{2}$ ,  
nekonečný vesmír,  
plochý (euklidovský),  
v  $t = \infty$  se rozpínání  
zastaví.

Stáří vesmíru:  $\tau_0 =$   
 $2/3/H_0 = 8,6$  mld let.

**Hyperbolický vesmír,**  $\Omega_0 < 1$ , nekonečný objem,  
záporná křivost. Tempo rozpínání klesá ( $q < \frac{1}{2}$ ),  
ale nezastaví se. Gravitace látky ve vesmíru  
nedokáže rozpínání zastavit.



# Pozorovatelské testy

- Vesmír je zřejmě velice plochý ( $\Omega_0 = 1$ ) , ale jeho baryonová hustota činí sotva 5% kritické.
- Nejstarší hvězdy ve vesmíru mají 13,5 mld let, což zřetelně víc, než kolik připouštějí klasické modely vývoje vesmíru.
- Decelerační parametr  $q$  stanovený z pozorování supernov Ia je záporný! Žádná decelerace, ale akcelerace rozpínání. H. konstanta je konstantní.

**Něco nám tu nesouhlasí!**