

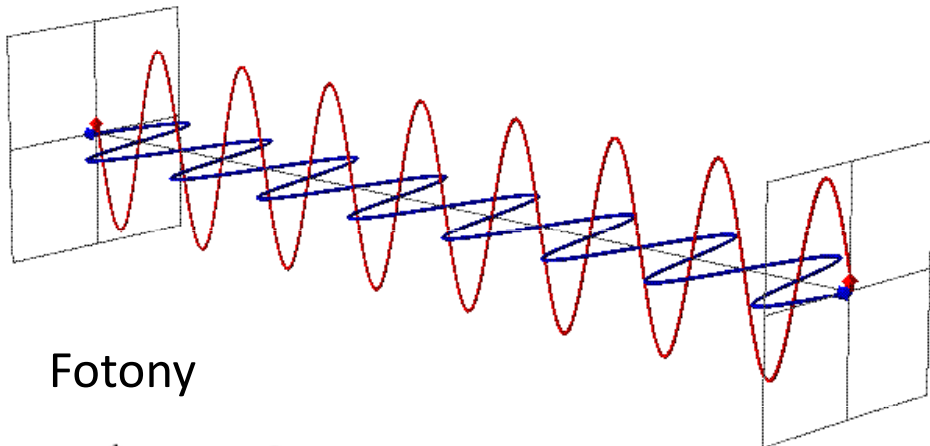


Neviditelné světlo  
posel z vesmíru

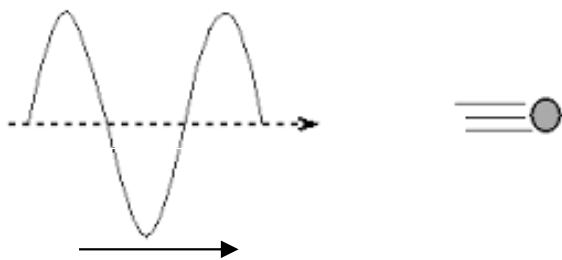
# Co je světlo?



## Elektromagnetické vlnění



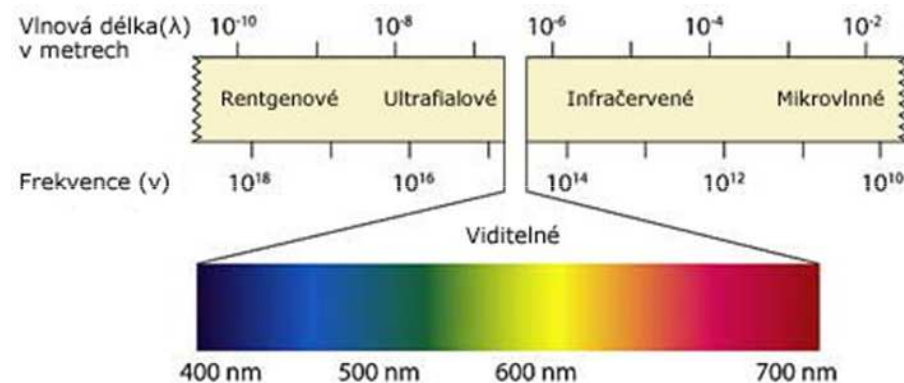
## Fotony



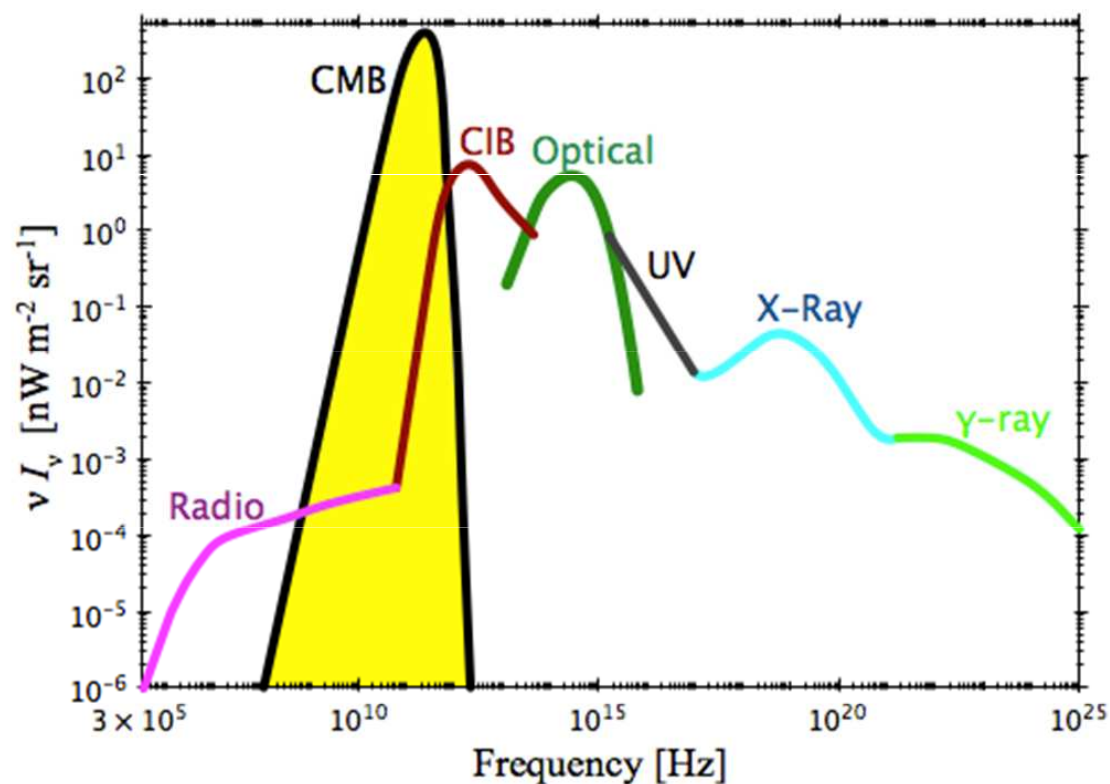
$$c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1} \text{ (přesně)}$$

## Konečná rychlost světla

(vesmírná archeologie - pohled do vesmírné dálky)



## Místo viditelného světla ve spektru



elmg vlnění, na kterém září Vesmír





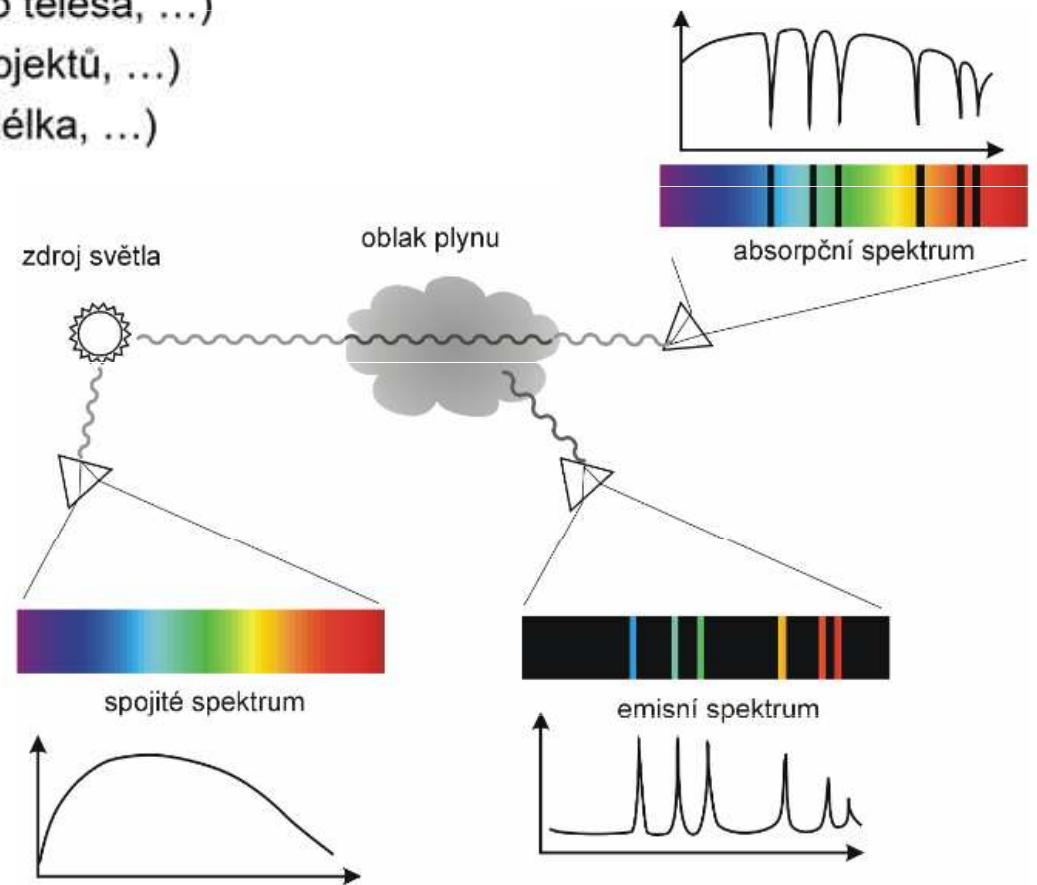
# Záření kosmických objektů

- Informace, které dostáváme z kosmického prostoru, jsou založeny na příjmu a analýze světla
- Základní data o kosmických objektech
  - směr, odkud záření přichází (poloha zářícího tělesa, ...)
  - množství kvant záření (tok záření, jasnost objektů, ...)
  - kvalitativní vlastnosti záření (barva, vlnová délka, ...)

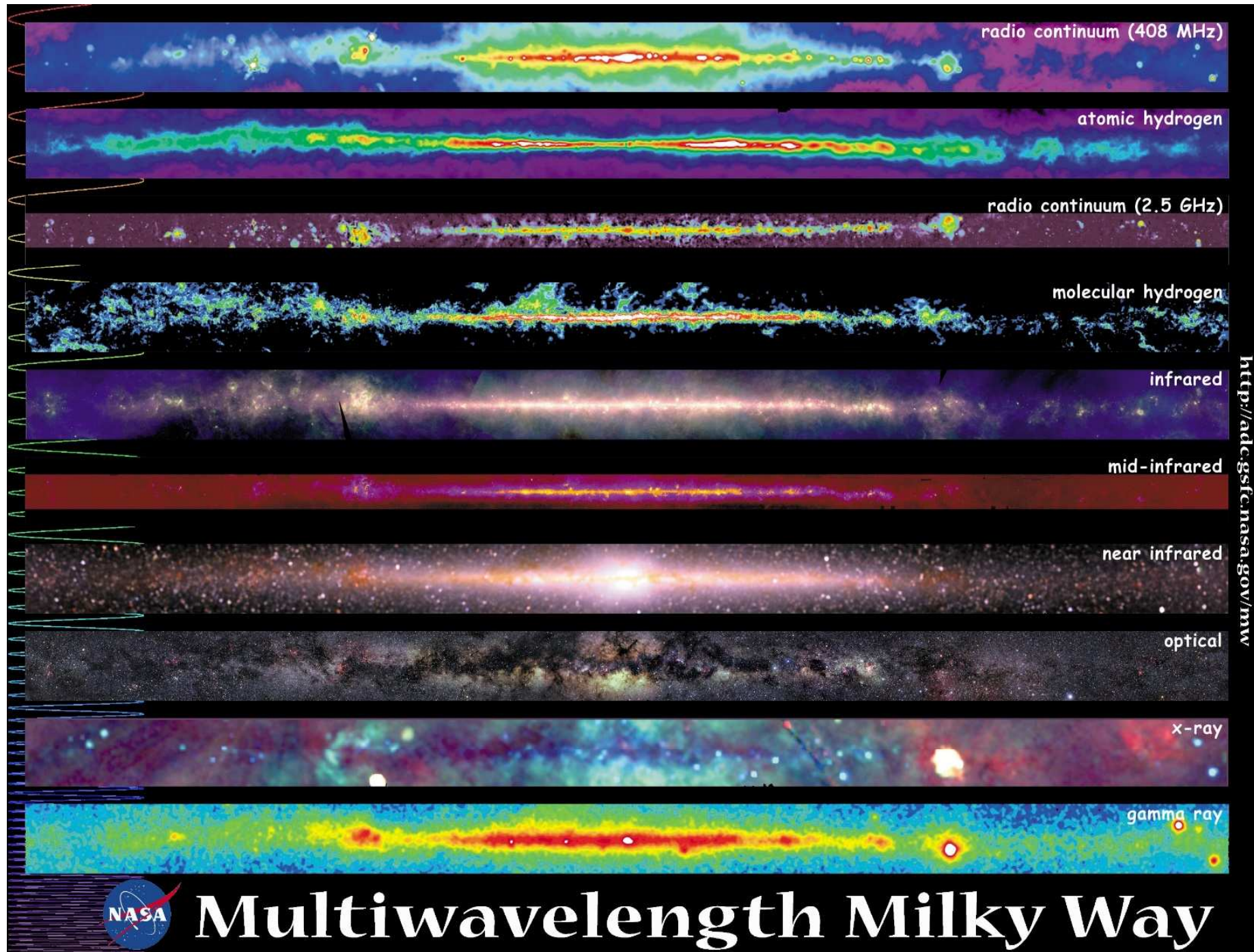
- Spektrální analýza je nezbytnou součástí astrofyzikálního výzkumu
- Ze spektra záření daného tělesa se určuje složení tělesa a dále např. jeho stáří, atd.

## Základní veličiny

- vlnová délka  $\lambda$
- frekvence  $f$
- rychlost světla  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$



# Mléčná dráha v různých spektrálních oborech





# Spektrum vodíku

- Ve vesmíru je to nejrozšířenější prvek, proto se jeho emisní nebo absorpční spektrum objevuje často ve spektrogramech různých kosmických objektů
- Základní série spektra atomu vodíku – opět známé z atomové fyziky

Hydrogen Absorption Spectrum



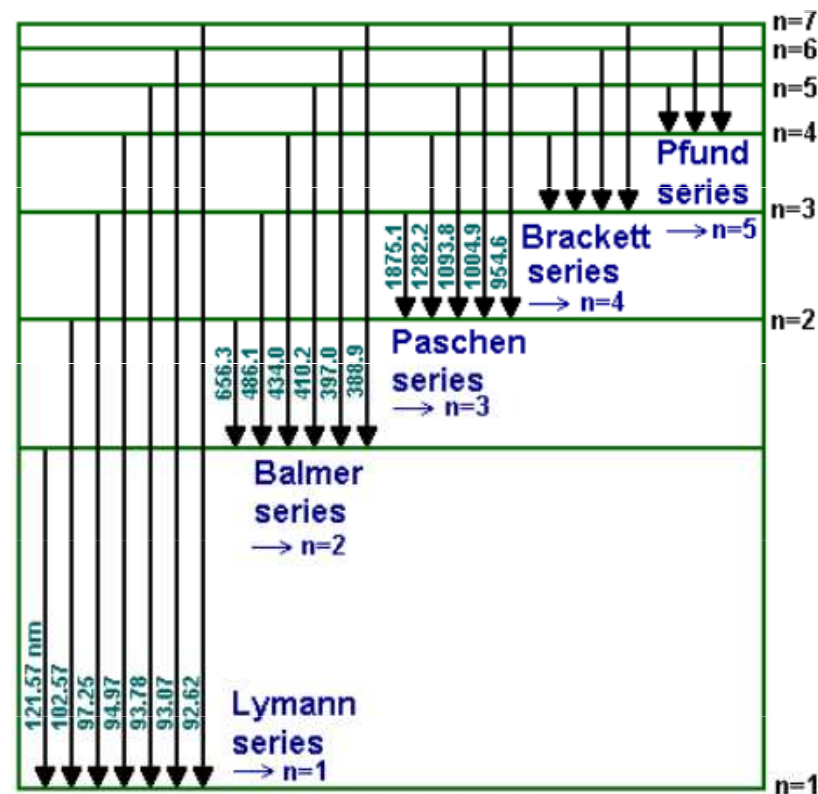
Hydrogen Emission Spectrum



400nm

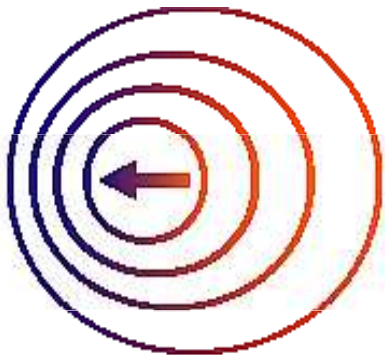
700nm

H Alpha Line  
656nm  
Transition N=3 to N=2



# Světlo ...

## Vliv Dopplerova jevu na barvu světla



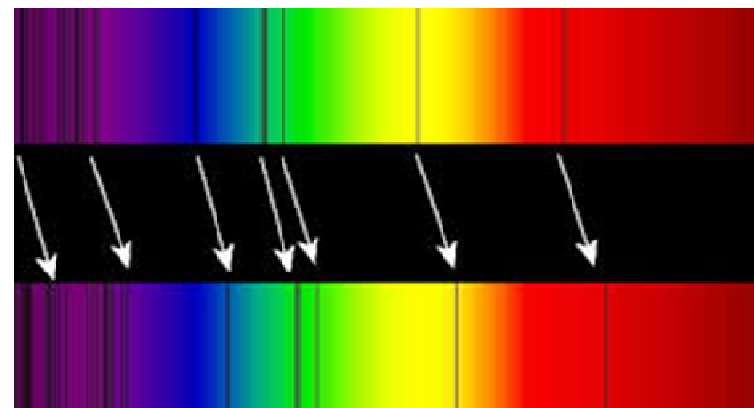
zdroj se pohybuje k pozorovateli,  
 $f$  roste,  $\lambda$  se zkracuje

zdroj se pohybuje pryč od pozorovatele  
 $f$  klesá,  $\lambda$  se prodlužuje

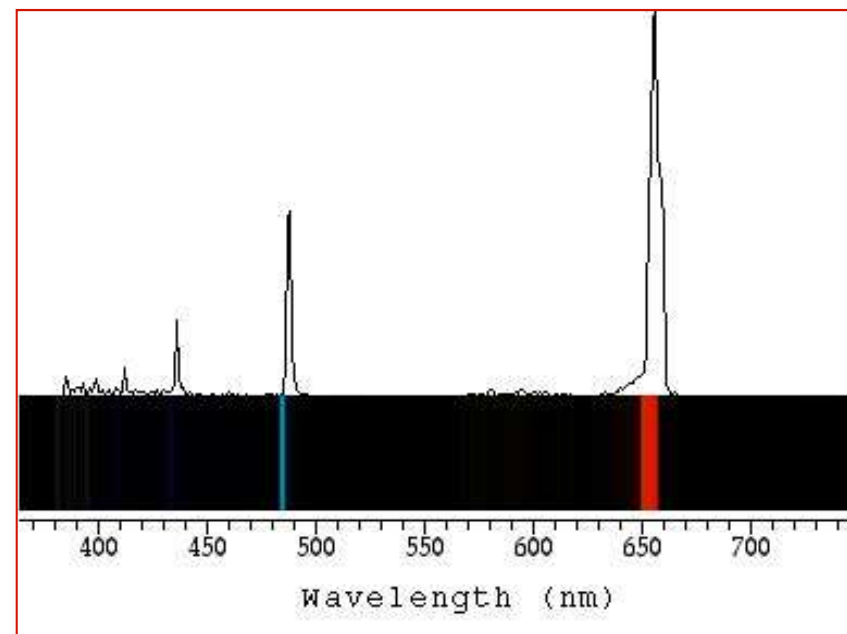
Typická  
červená čára  
656nm  
vodíku



Vodíkový výboj v laboratoři



Sestava čar ve spektru  
je otiskem prvku



# Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker



Prostor je **homogenní** a **izotropní** (má 6 symetrií) → konstantní křivost

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

$k=0, +1, -1$  odpovídá geometrii  $E^3, S^3, H^3$

**Expanze vesmíru** popsána funkcí  $R(t)$ , jež řeší rovnici

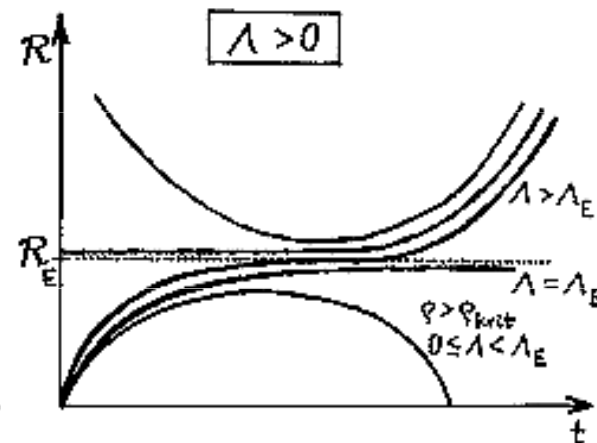
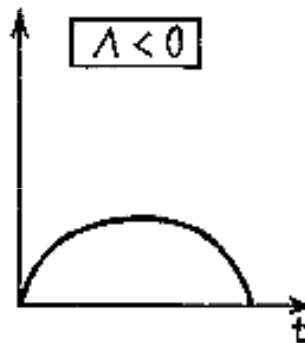
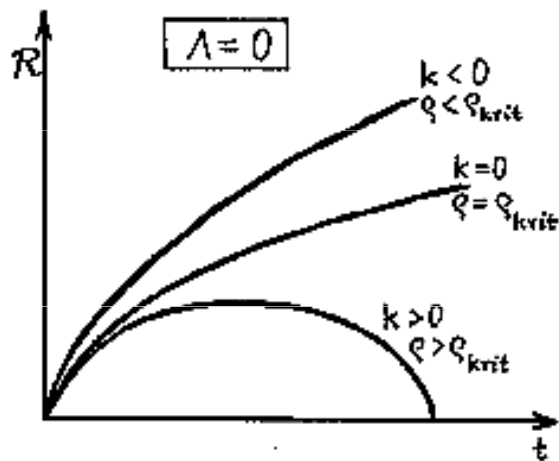
$$\left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{\Lambda}{3} + \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi G}{3c^4} \left( \frac{A}{R^3} + \frac{B}{R^4} \right)$$

kosmologická  
konstanta

křivost  
prostoru

hustota látky + hustota záření

Typická řešení: expanze z velkého třesku  $R=0$  (*singularita*),  $R(t \rightarrow \infty) \propto \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} ct\right)$

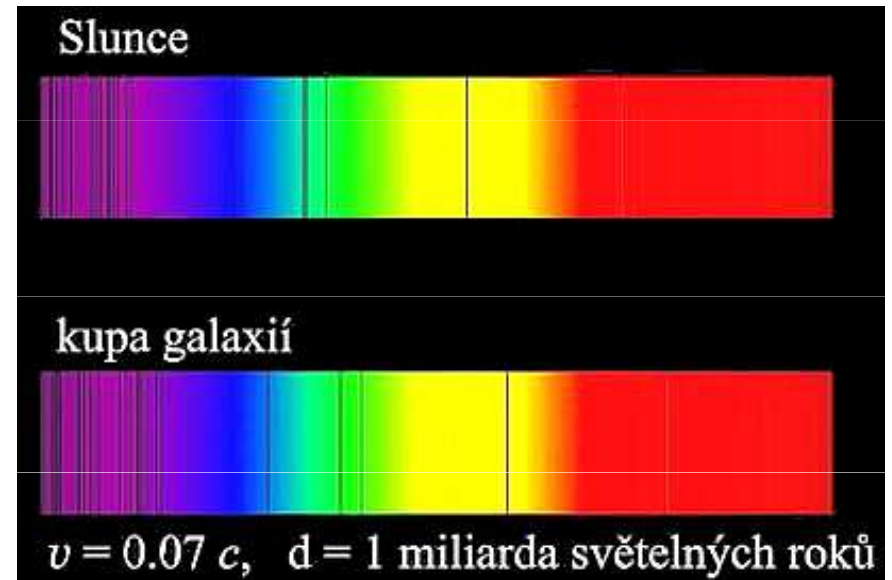


# Etapa potvrzení

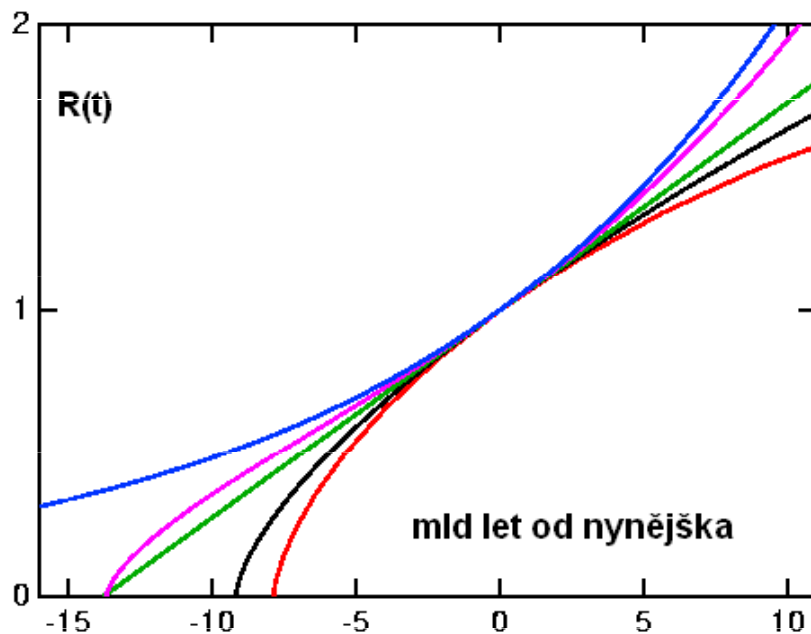
Podstatná role světla - **červený** posuv z Hubble, závislost rychlostí  $g$ . na vzdálenosti

$$v = H \cdot d$$

Pozorovací data a kosmologické parametry



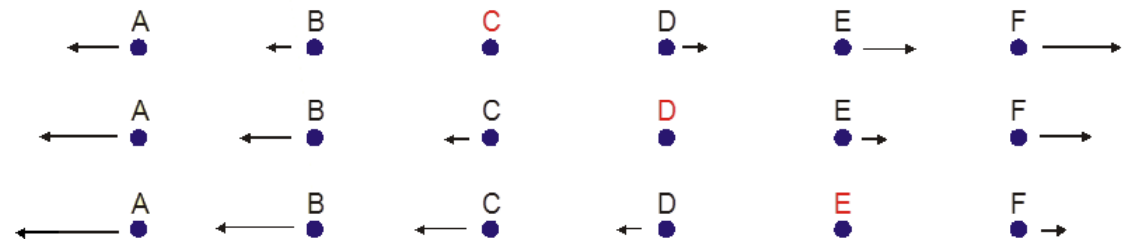
Závislost škálového faktoru  $R$  na čase.



Charakteristiky expanze vesmíru:

„rychlost“ ->  $H$  Hubbleova konstanta  
 „zrychlení“ ->  $q$  decelerační parametr

$$H = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad q = - \frac{d^2 R}{dt^2} \frac{1}{RH^2}$$

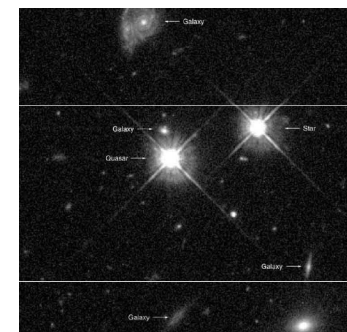
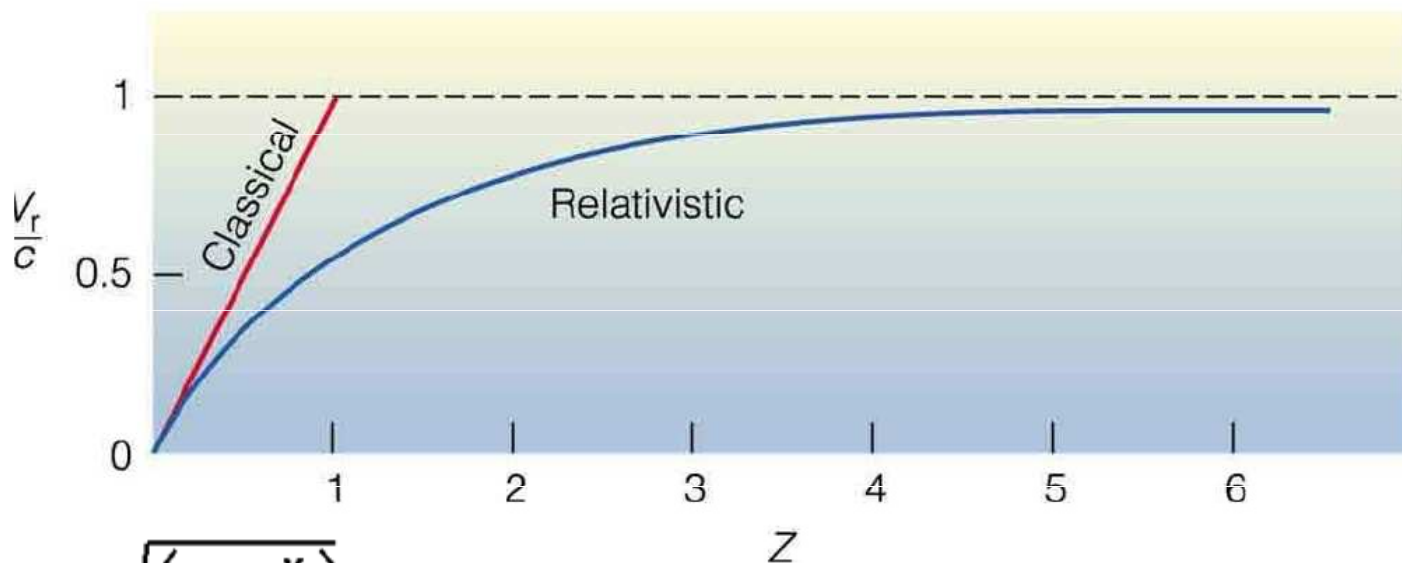




Kosmologický (Dopplerův) jev - vzdalování vysílače od přijímače rozpínáním vesmíru

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = z \quad z \approx \frac{v}{c}$$

zdroj se vzdaluje od pozorovatele rychlostí mnohem menší než rychlost světla  $c$



quasar

$$z = \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}} - 1$$

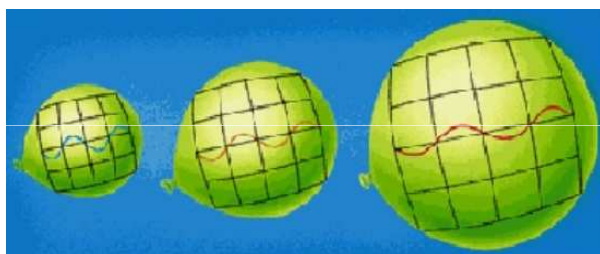
Parametr  $z$  souvisí s  $R$  výrazem

$$1 + z = \frac{\lambda_{observed}}{\lambda_{emitted}} = \frac{R(t_0)}{R(t)} = \frac{1}{R(t)}$$

pro  $v \sim c$

kde pro současnost je  $R_0 = 1$ .

Např. pokud se posun objektu změří  $z = 3$ , pak  $R = 1/4$  vidíme, že vesmír se od doby, kdy světlo opustilo tento objekt, rozrostl čtyřikrát.



Pokud se zdroj vzdaluje od pozorovatele rychlostí  $v$ , která je mnohem menší než rychlost světla ( $v \ll c$ ), je červený posun dán

$$z \approx \frac{v}{c}$$

V klasickém Dopplerově efektu není frekvence zdroje modifikována, jen recesivní pohyb způsobuje iluzi nižší frekvence.

Úplnější popis Dopplerova červeného posuvu vyžaduje vzít do úvahy relativistické účinky spojené s pohybem zdrojů blízkých rychlosti světla.

Stručně řečeno, objekty pohybující se blízko rychlosti světla zažívají odchylky od výše uvedeného vzorce kvůli časové dilataci speciální relativity, která lze napravit zavedením Lorentzova faktoru  $\gamma$  do klasického Dopplerova vzorce takto (pro pohyb pouze v zorném poli)

$$(\vartheta = 0^\circ), \quad 1 + z = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \gamma. \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{dt}{d\tau}$$
$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

---

$$\vartheta = 90^\circ \quad 1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Dopplerovy posuny udávají rychlost recese hvězd nebo galaxií, v praxi se tato rychlost vyjadřuje pomocí rychlosti světla  $c$  a parametru  $z$ :  $v = z \cdot c$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1 \quad \beta = \frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

Největší změřené č. posuny mají kvasary:  $z = 0,16$  až  $3,53$ , což odpovídá rychlosti recese  $0,15c$  až  $0,91c$ .

$z$  v sobě rovněž zahrnuje  $R$  vesmíru v době, kdy bylo světlo emitováno pozorovaným objektem. Parametr  $z$  souvisí s  $R$  výrazem

$$1 + z = \frac{\lambda_{observed}}{\lambda_{emitted}} = \frac{R(t_0)}{R(t)} = \frac{1}{R(t)}$$

kde pro současnost je  $R_0 = 1$ .

Např. pokud se č. posun objektu se změří  $z = 3$ , pak  $R = 1/4$  a vidíme, že vesmír se od doby, kdy světlo opustilo tento objekt, rozrostl o čtyřikrát.

Vlnová délka přijímaného záření se zvětšila čtyřikrát, protože prostor se během průchodu z emitujícího objektu rozšířil čtyřikrát.

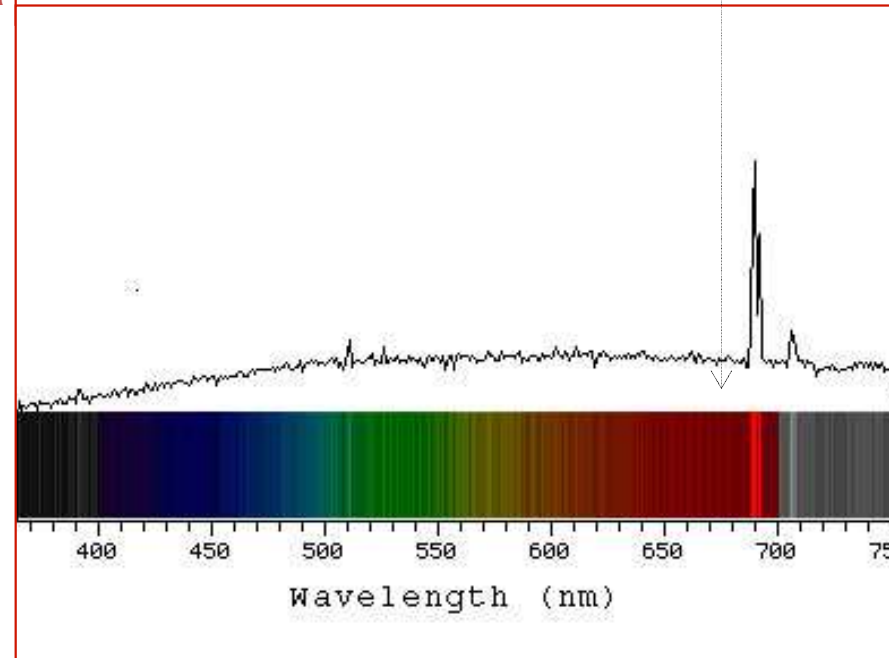
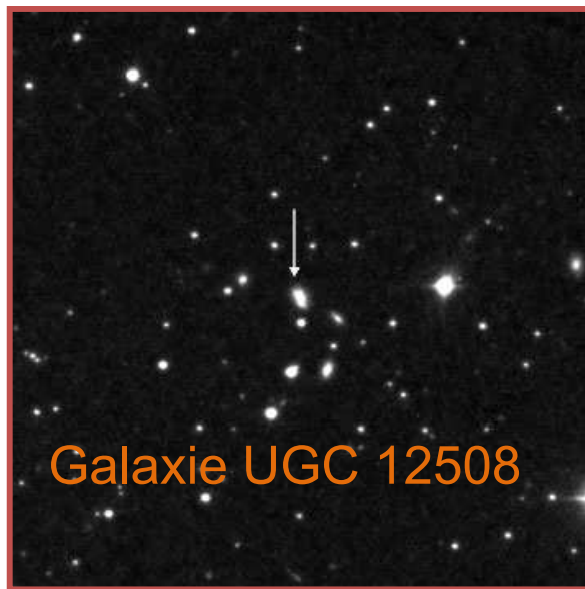
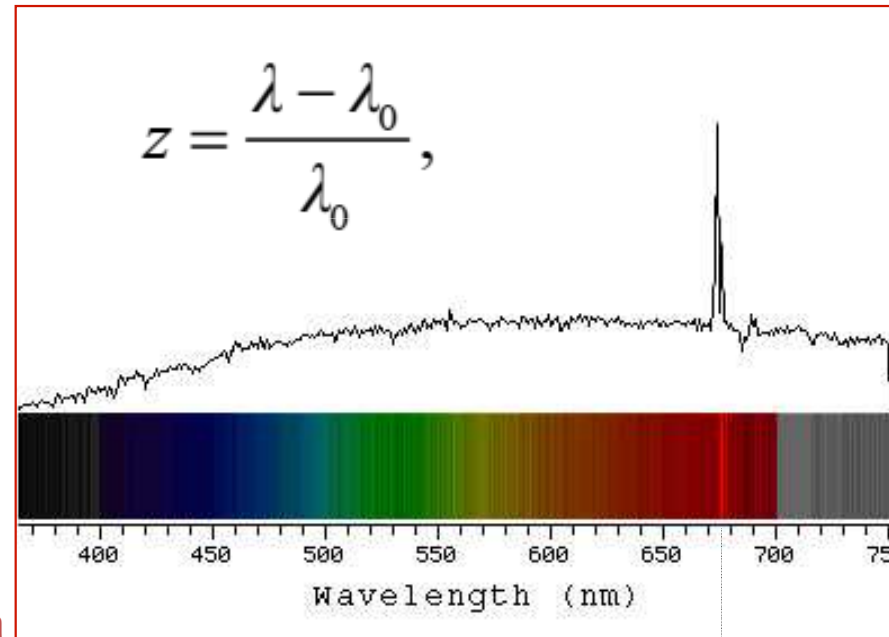
Při velkých hodnotách  $z$  je redshift dán hlavně kosmologickým redshiftem a není platným měřítkem skutečné recesivní rychlosti objektu vůči nám.

$$\rho_m = \frac{\rho_{m,0}}{R^3} = \rho_{m,0}(1+z)^3$$

Parametr  $z$  lze také používat k posouzení hustoty látky ve srovnání s hustotou  $\rho_0$  nyní



## Rudý – červený posuv $z$ – důkaz rozpínání vesmíru

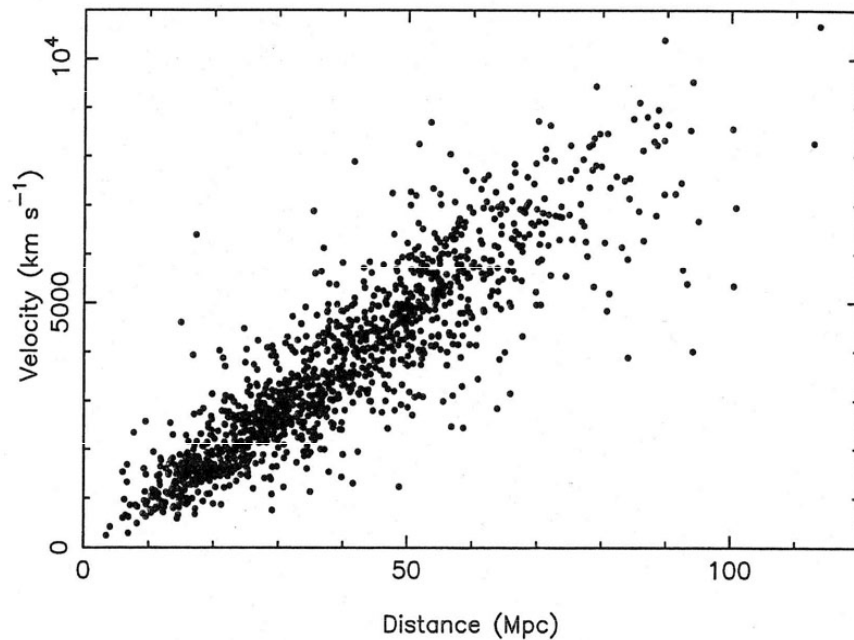


Vzdálenější galaxie vykazují větší rudý posuv vykazují, rychlost jejich vzdalování roste se vzdáleností.

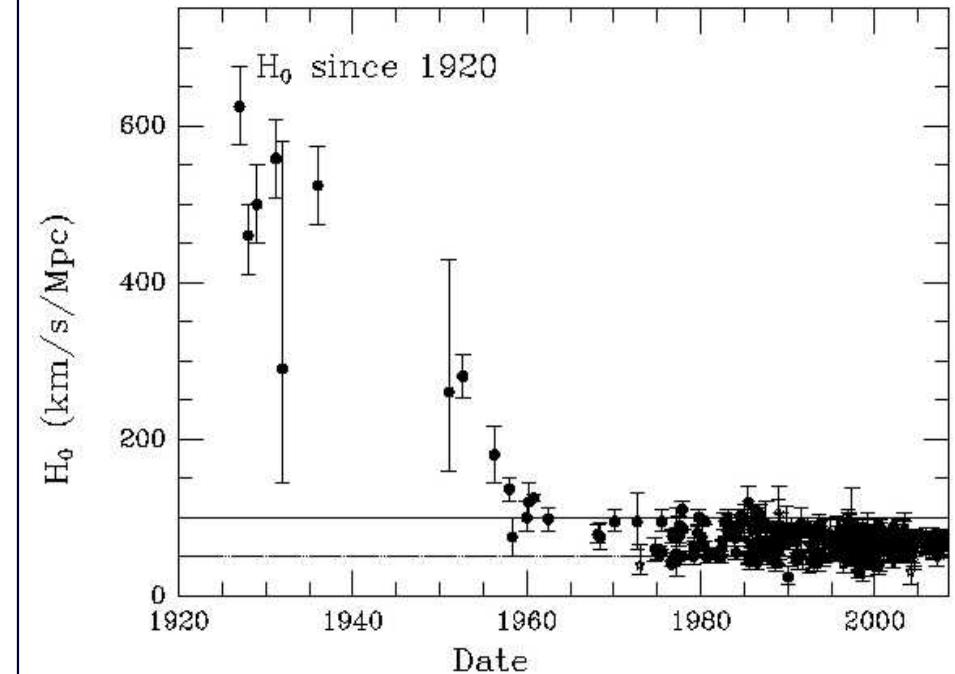
Rychlost vzdalování galaxií (a při malých vzdálenostech i rudý posuv) je úměrná vzdálenosti

Experimentální ověření  $v = H \cdot d$

Zpřesňování měření Hubbleovy konstanty



**Figure 2.5** A plot of velocity versus estimated distance for a set of 1355 galaxies. A straight-line relation implies Hubble's law. The considerable scatter is due to observational uncertainties and random galaxy motions, but the best-fit line accurately gives Hubble's law. [The  $x$ -axis scale assumes a particular value of  $H_0$ .]

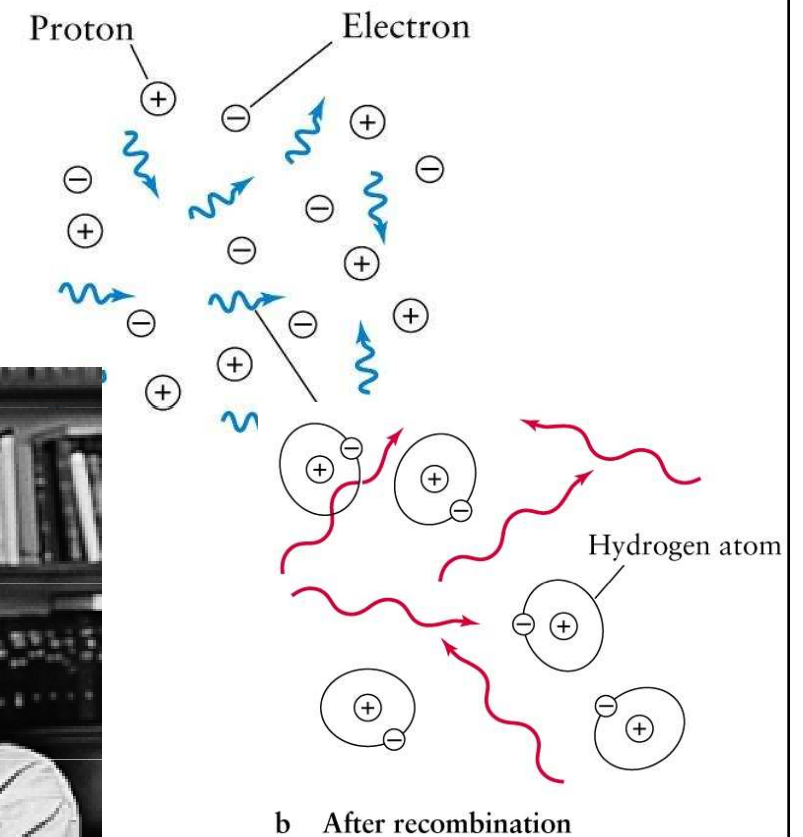
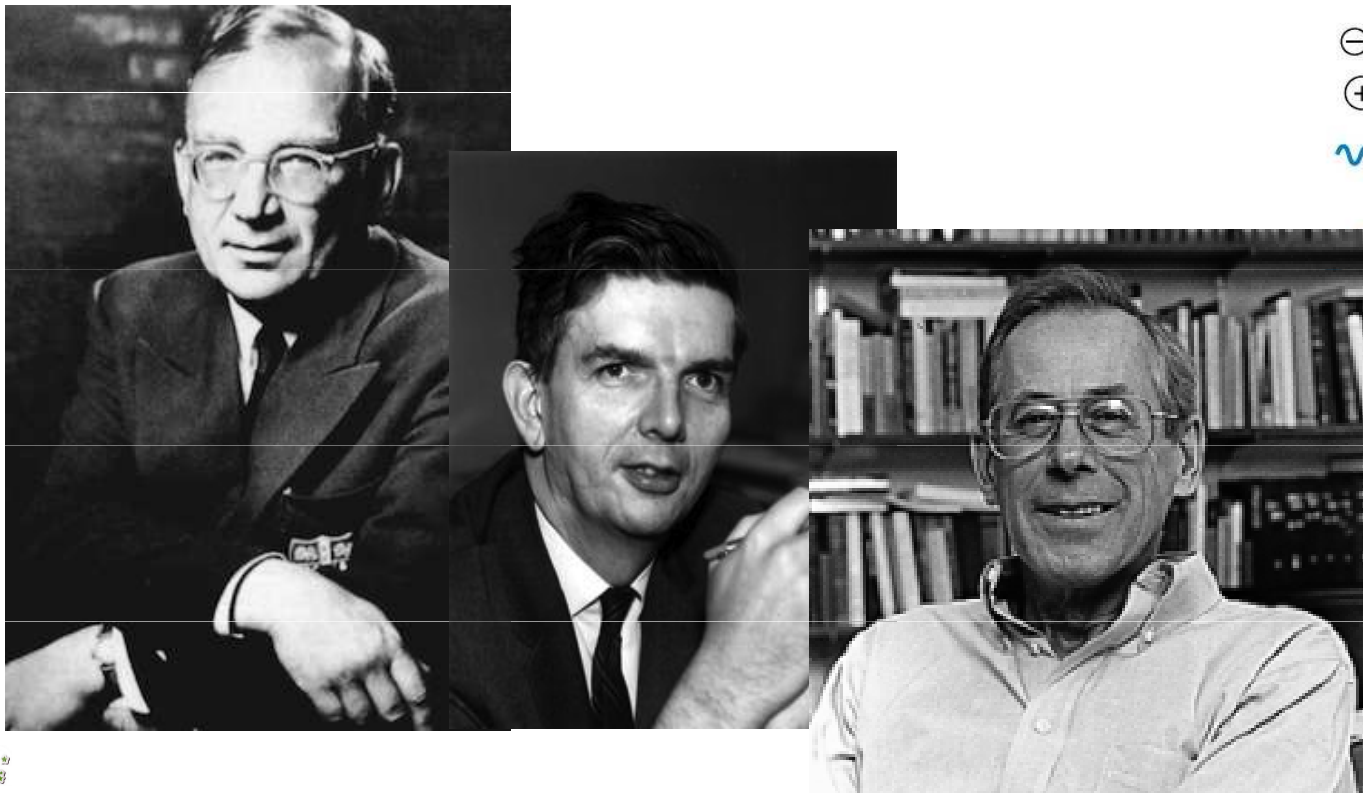
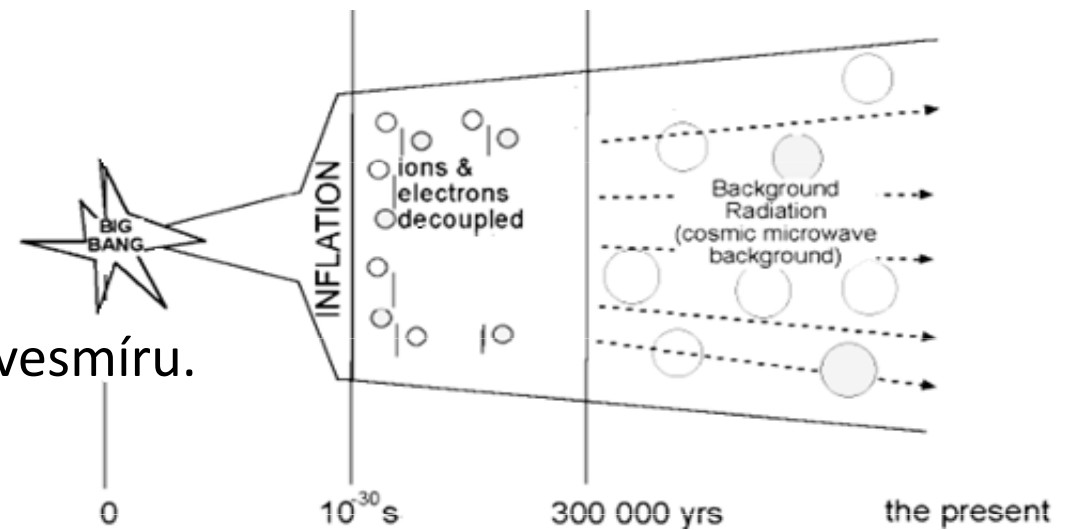


ze studia anizotropií reliktního záření

$$H = 0,71 \pm 0,04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

## II. Etapa

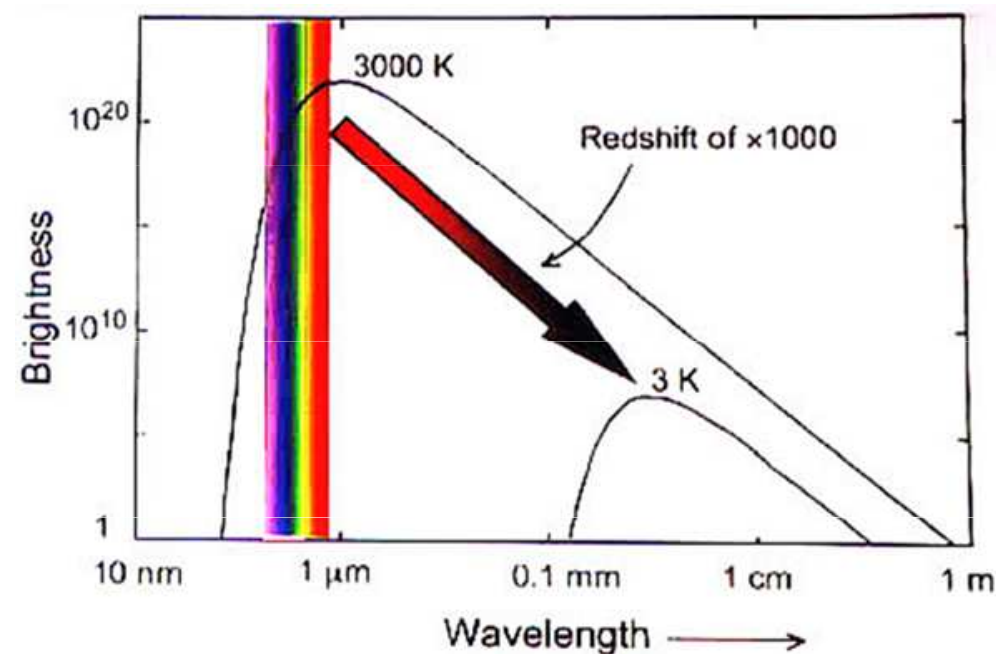
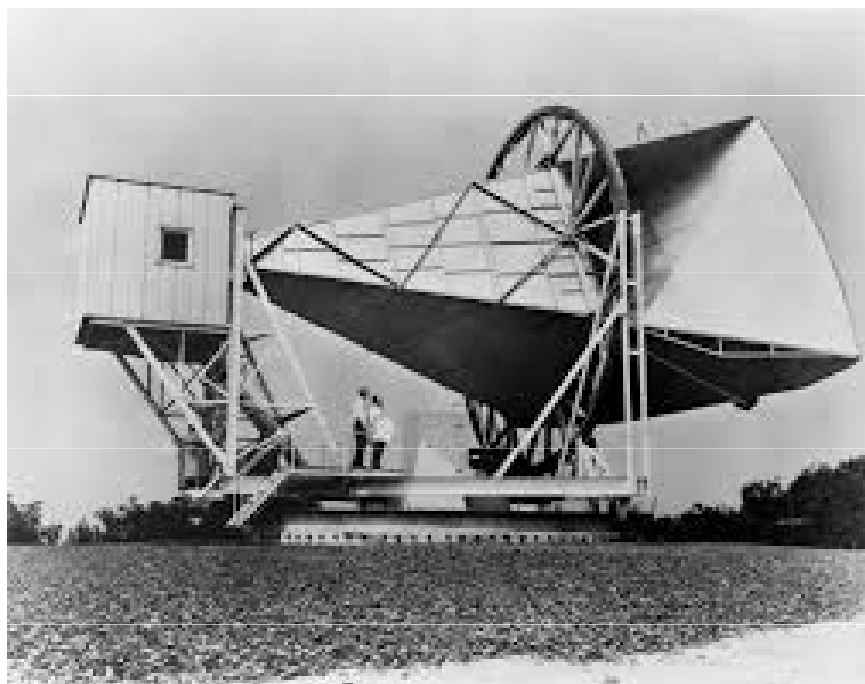
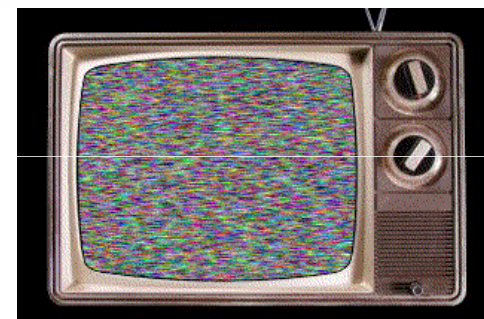
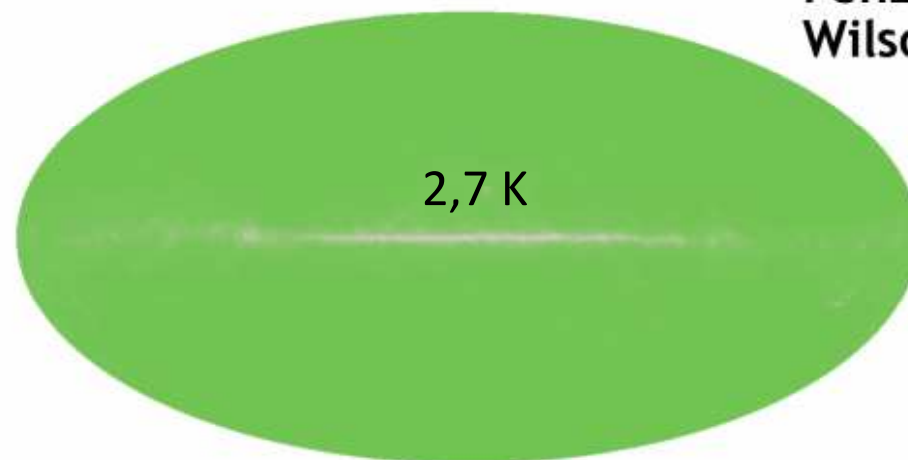
- Vznik prvků ve vesmíru.
- Světlo jako dominantní faktor v raném vesmíru.
- Reliktní záření, odtržení světla od látky,
- Rekombinace a reionizace





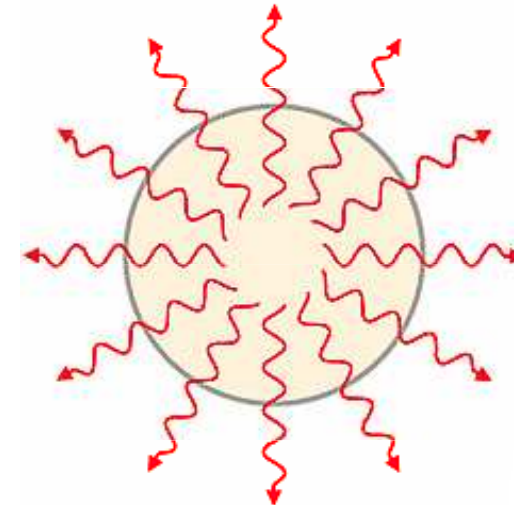
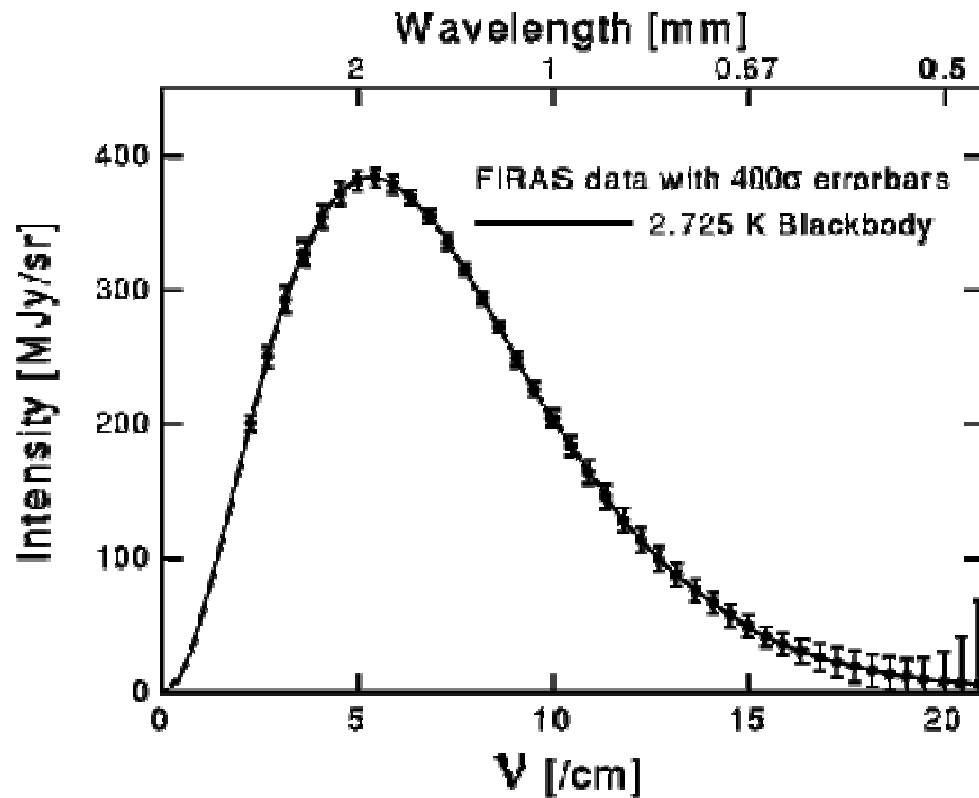
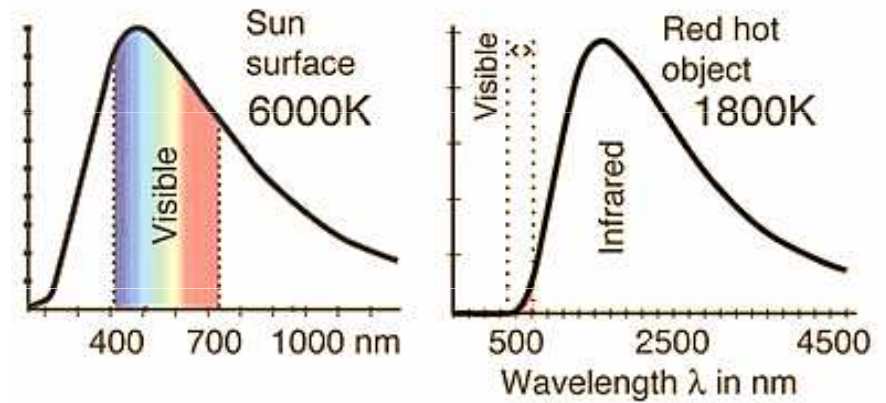
## II. Etapa potvrzení

- Druhá etapa kosmologie (potvrzení).
- Penzias a Wilson, historie objevu.
- Co nám říká reliktní záření.
- Zpřesňování kosmologických parametrů umožňující dojít k realistickému modelu,
- Průhled do raných fází vývoje vesmíru.



# Analýza reliktního záření

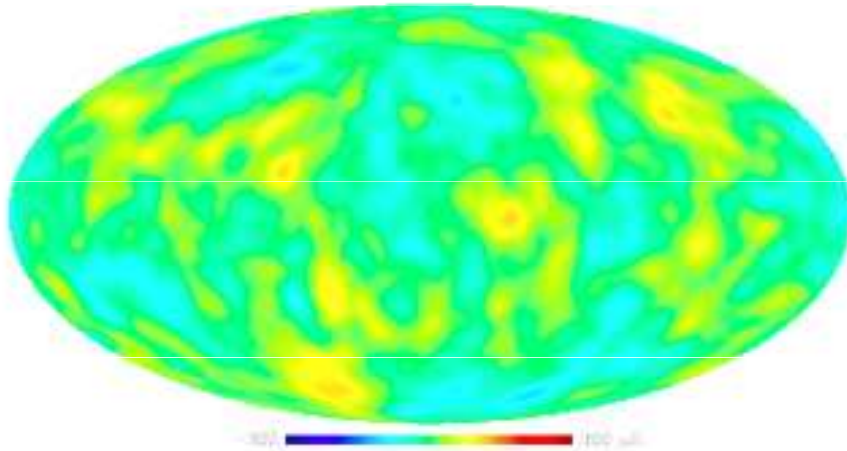
## Potvrzena Planckova křivka



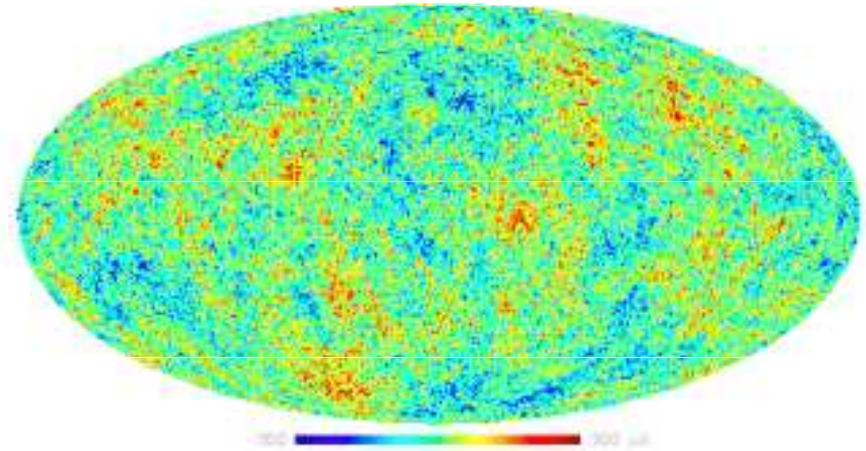


## Nehomogenity reliktního záření

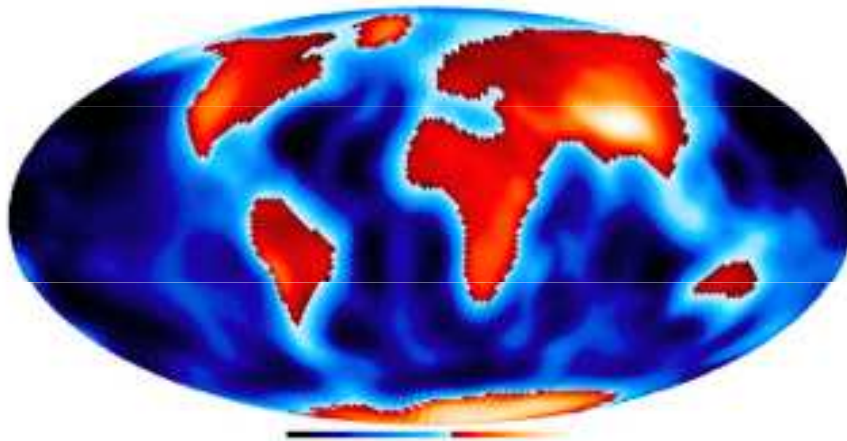
Odfiltrování vlivů záření galaxie a pohybu sluneční soustavy a Země.



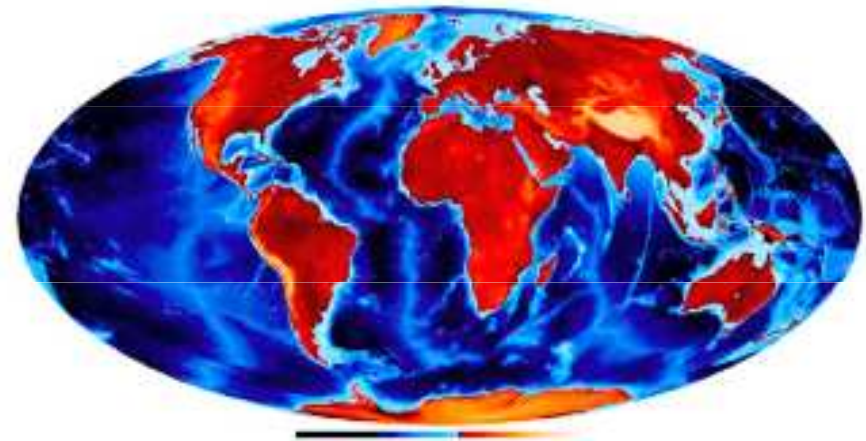
COBE



WMAP & Planck



Cosmic Background Explorer



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe







# Revealing the Cosmic Microwave Background



planck



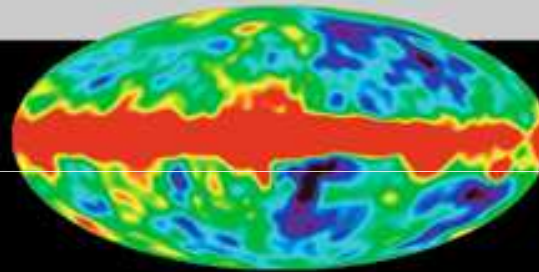
1965



**Penzias a Wilson**

objev šumu z konce  
Velkého třesku

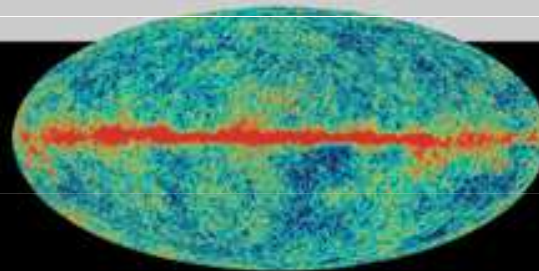
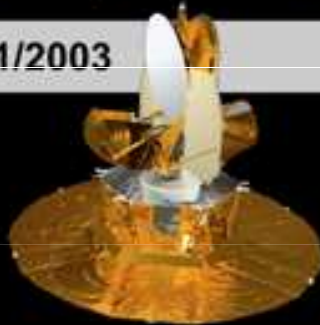
1989/1992



**COBE**

jde o záření černého tělesa  $T = 2,73 \text{ K}$   
objev fluktuací (anizotropie)  
 $\Delta T = 30 \mu\text{K}$ ,  $\Delta \varphi = 7^\circ$

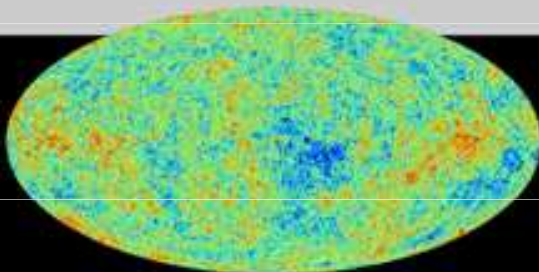
2001/2003



**WMAP**

stanovení základních  
parametrů Vesmíru  
 $\Delta T = 20 \mu\text{K}$ ,  $\Delta \varphi = 15'$

2009/2011

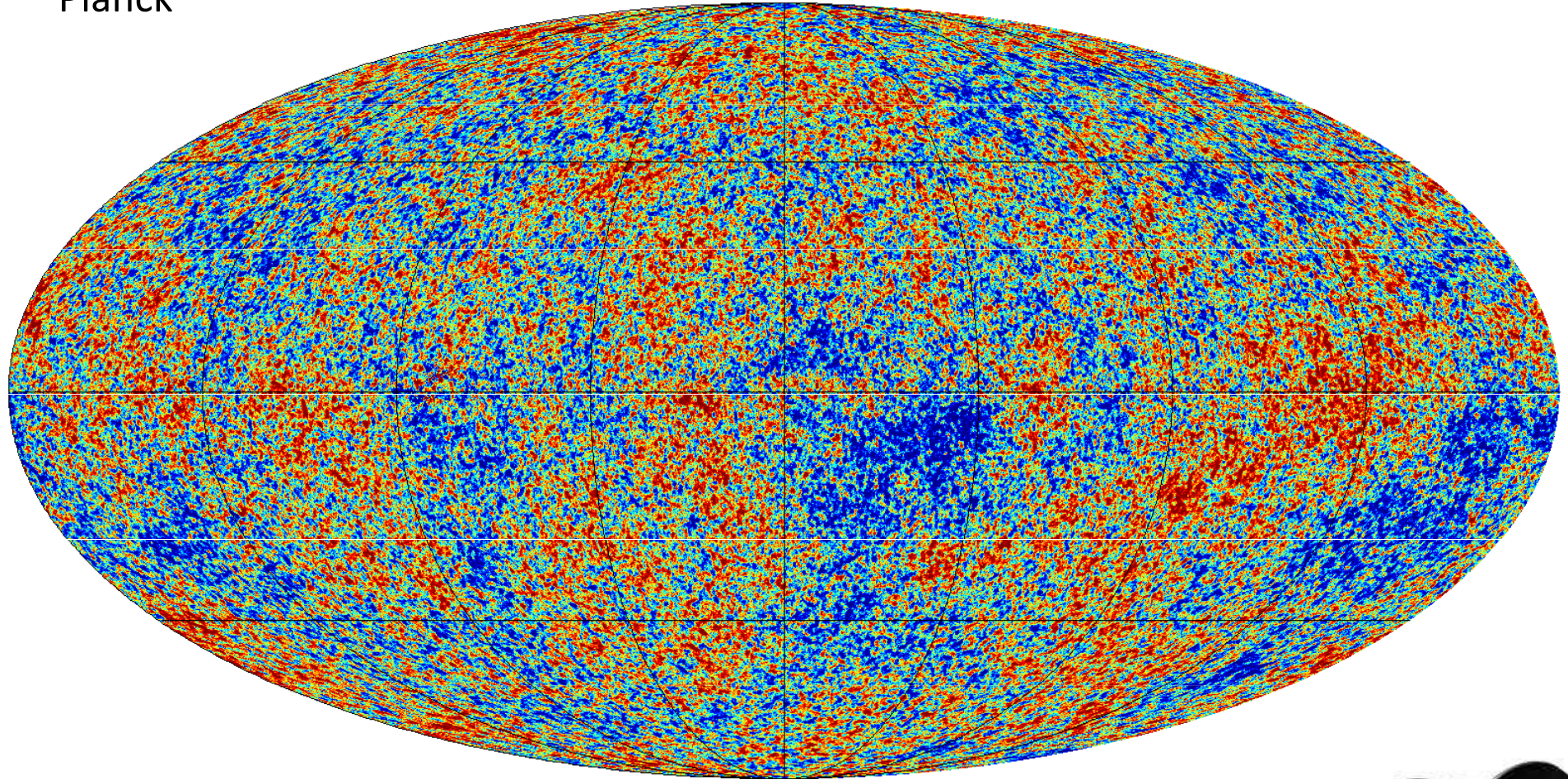


**Planck**

$\Delta T = 2 \mu\text{K}$ ,  $\Delta \varphi = 5'$



Planck

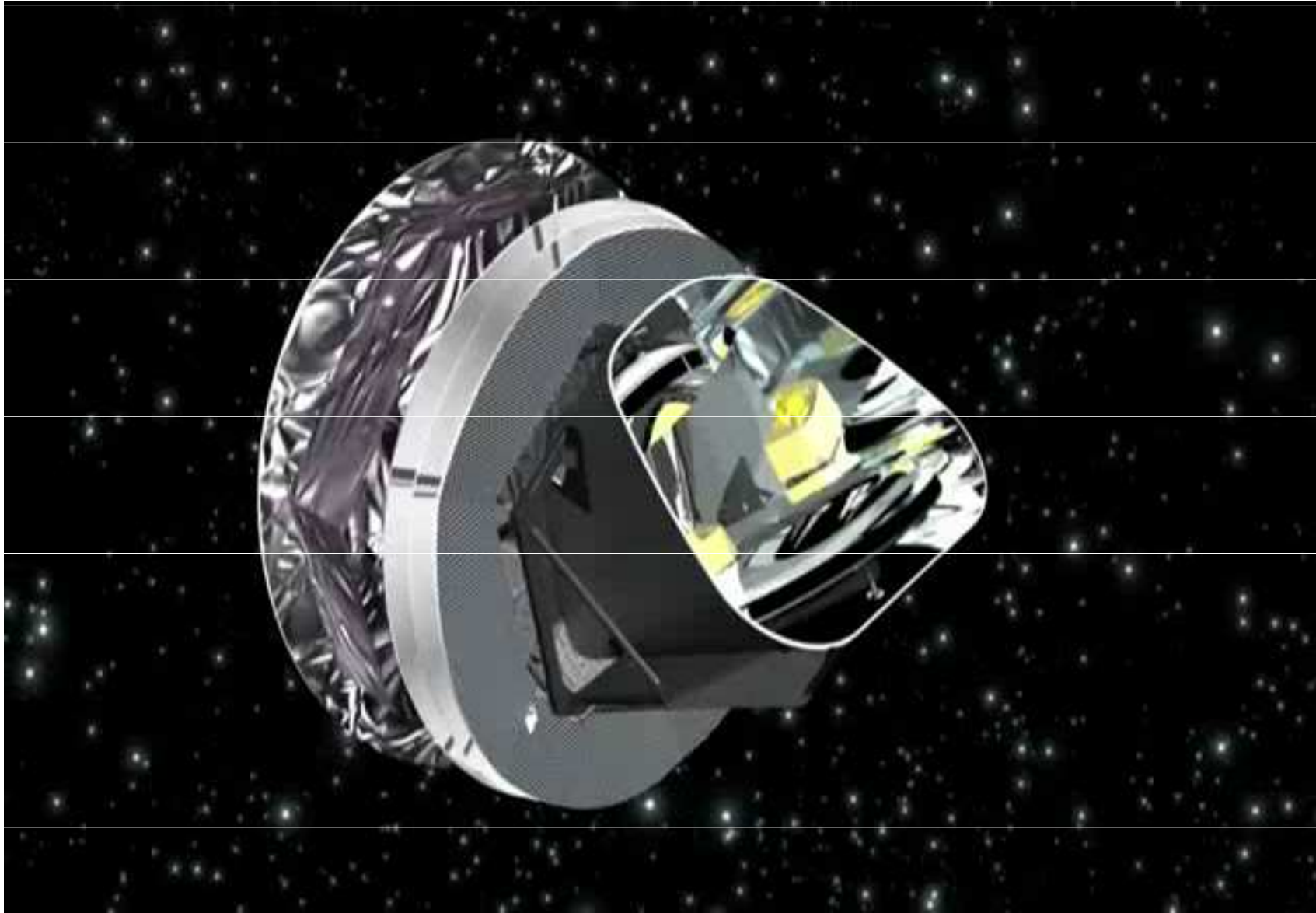


-677  1409 uK\_cmb

$$-\frac{\Delta T_{\text{photon}}}{T_{\text{photon}}} \rightarrow \frac{\Delta \rho_{\text{plasma}}}{\rho_{\text{plasma}}}$$



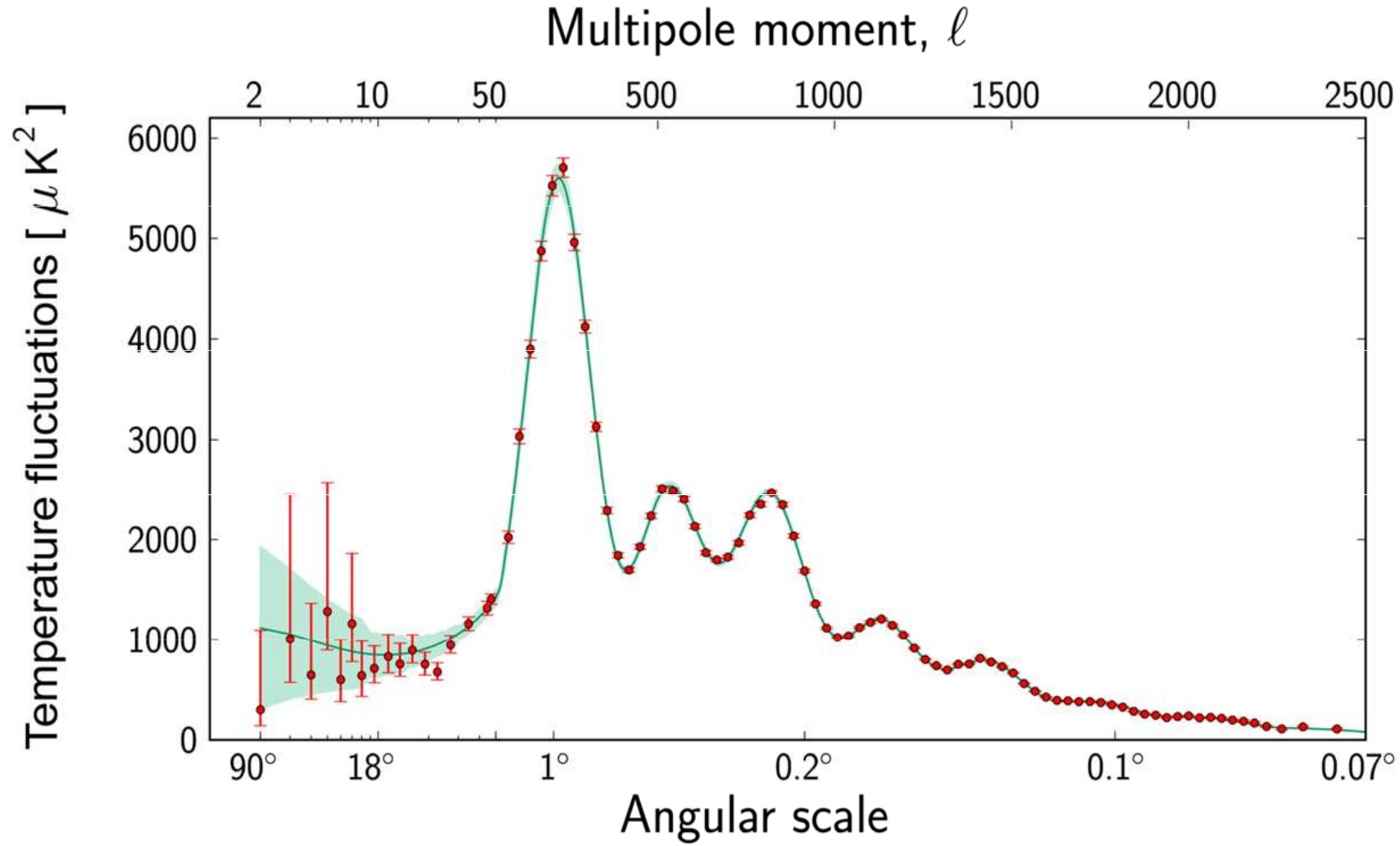




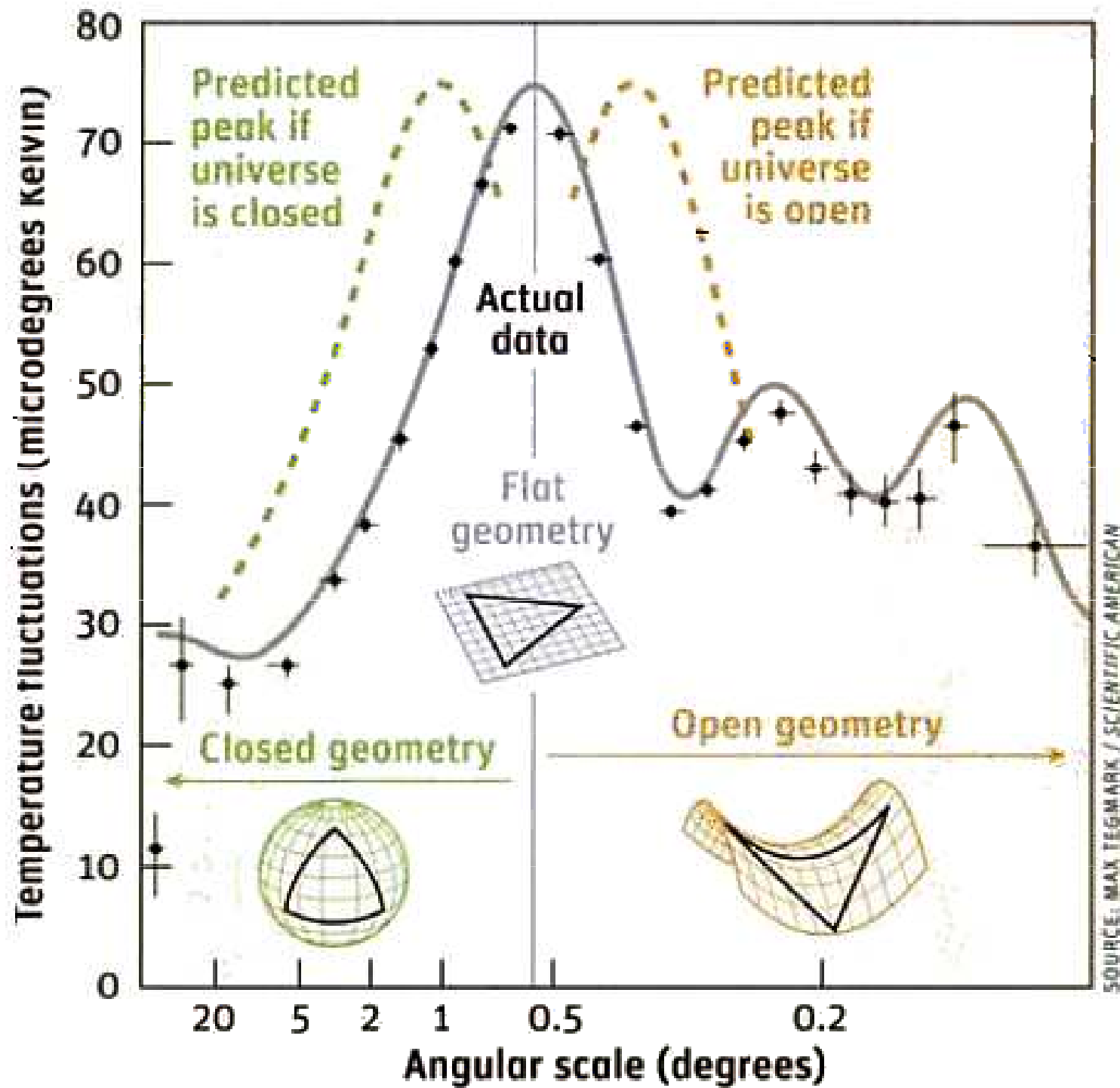
Práce sondy „skenující“ Planck



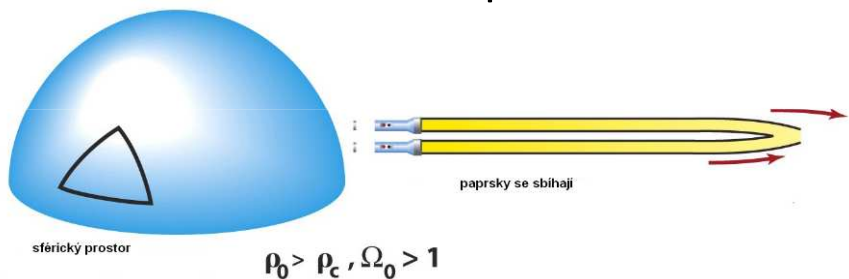
# Závislost četnosti nehomogenit na úhlovém rozlišení (hrby).



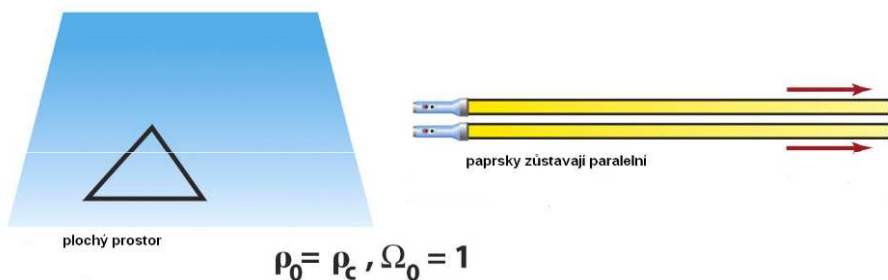
Animace grafu



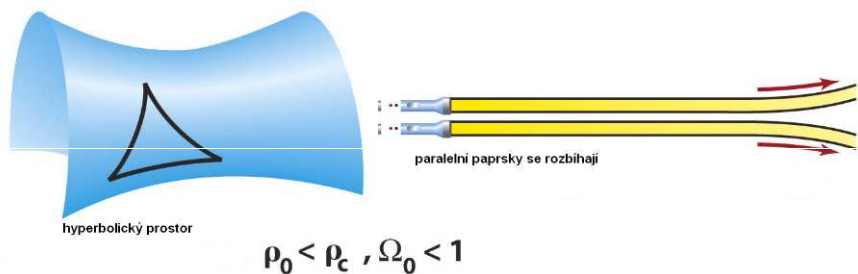
# Obraz teplotních fluktuací závisí na geometrii vesmíru



Je-li  $\rho_0 > \rho_c$ , a hustotní parameter  $\Omega_0 > 1$ ,  
vesmír je uzavřený a prostor je sférický

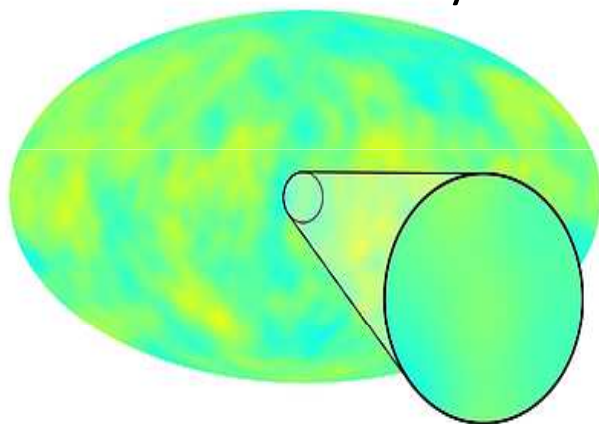


Je-li  $\rho_0 = \rho_c$ , a hustotní parameter  $\Omega_0 = 1$ ,  
prostor je plochý

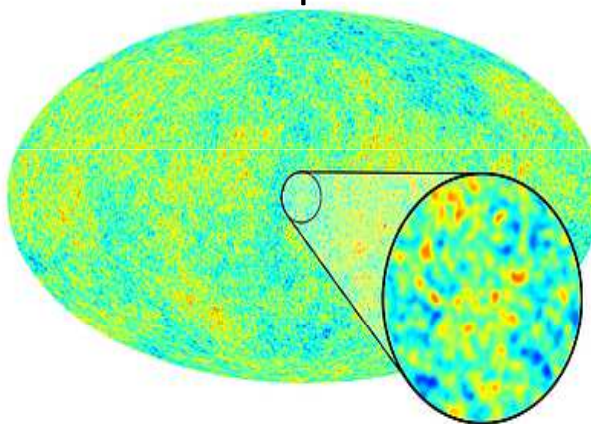


Je-li  $\rho_0 < \rho_c$ , a hustotní parameter  $\Omega_0 < 1$ ,  
vesmír je otevřený a prostor je hyperbolický

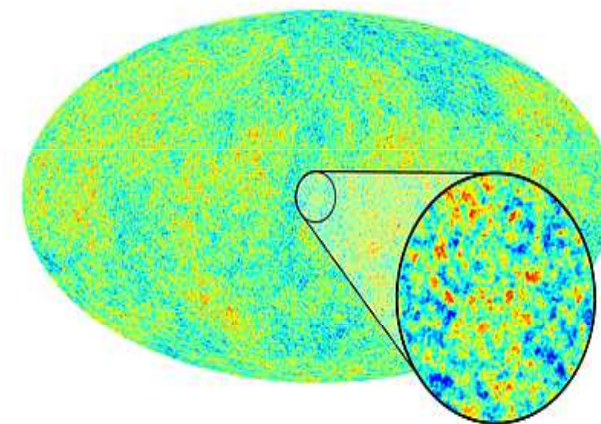
## Vyhodnocování anizotropií



COBE



WMAP



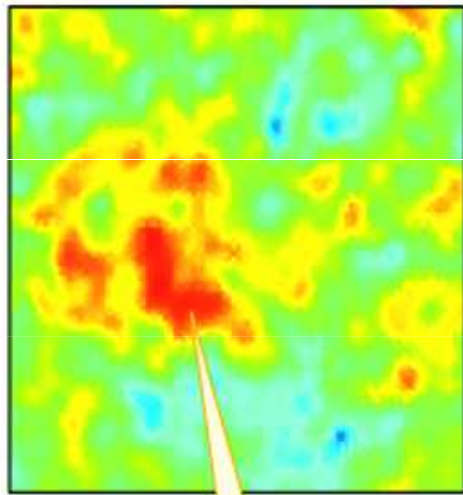
Planck



Zdánlivý úhel, to, jak vidíme skvrnu, závisí na geometrii vesmíru.

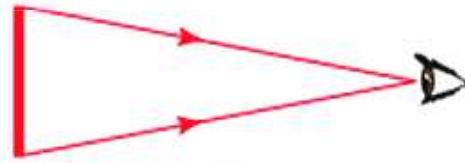


Je-li vesmír uzavřený,  
paprsky se ohýbají  
k sobě

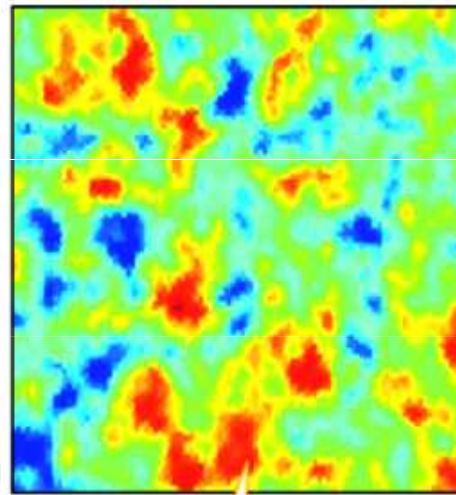


(a)

... výsledkem je, že skvrny  
se nám jeví větší než  
doopravdy jsou

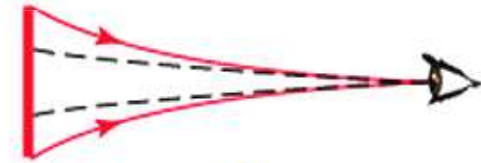


Je-li plochý, původní úhel  
se zachovává

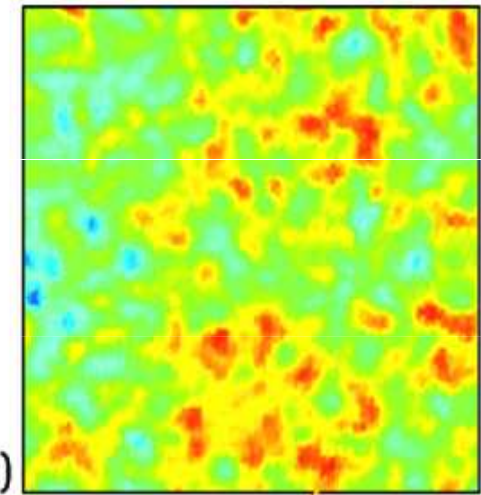


(b)

... skvrny vidíme v  
odpovídající velikosti



Je-li otevřený, paprsky  
se ohýbají od sebe

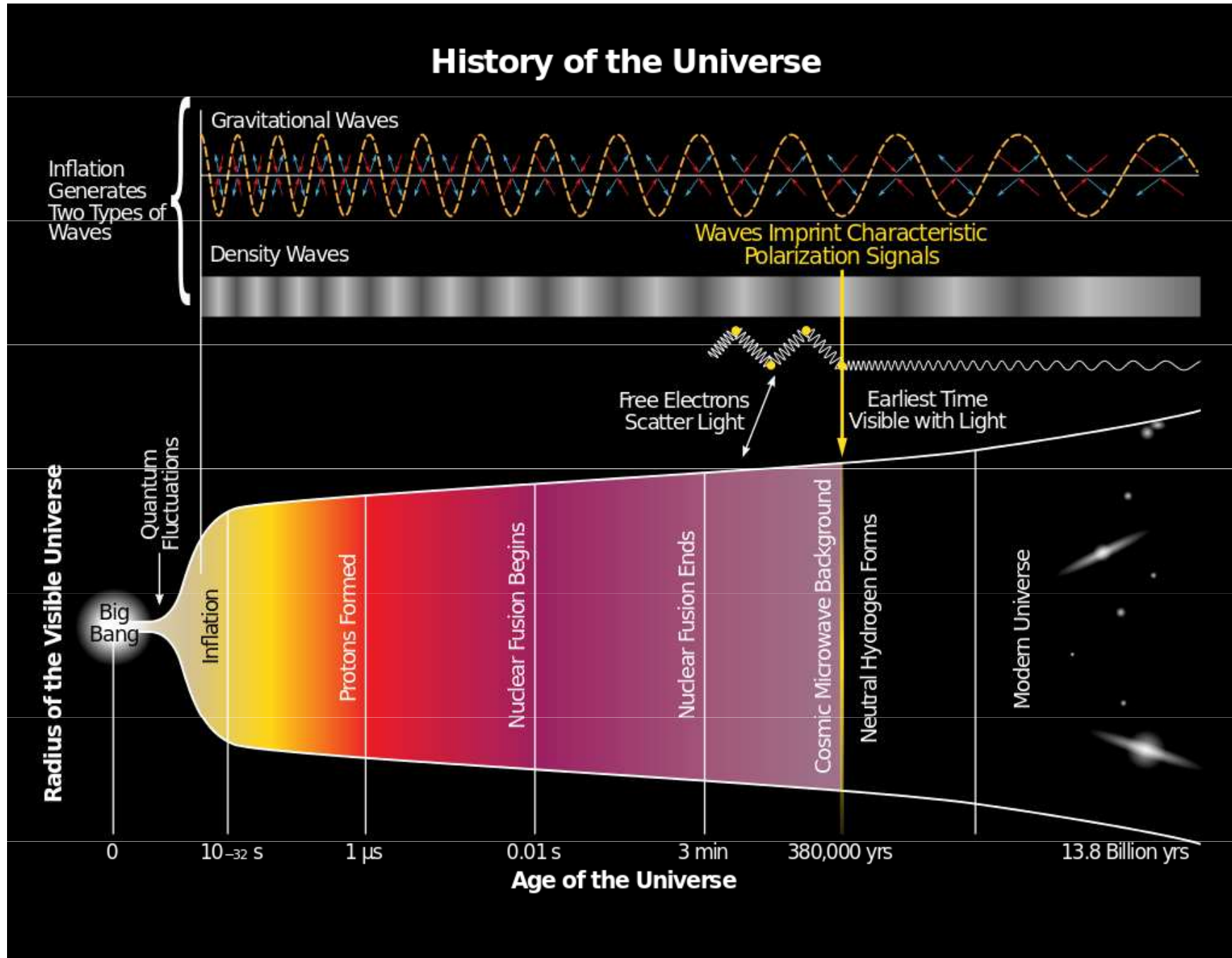


(c)

... skvrny se nám jeví  
menší, než jaké skutečně  
jsou

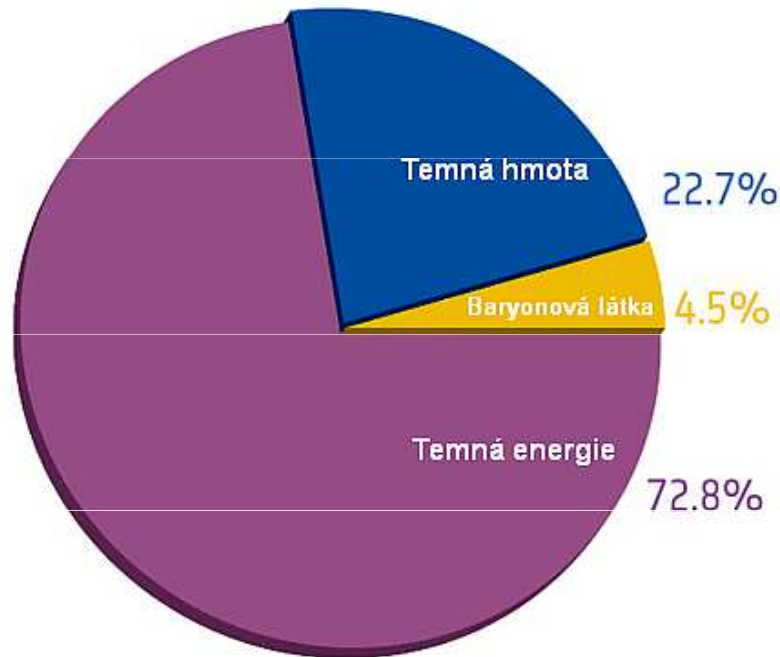
# Polarizace

- Polarizace reliktního záření. Co to je a co nám říká. Inflační fáze, gravitační vlny.

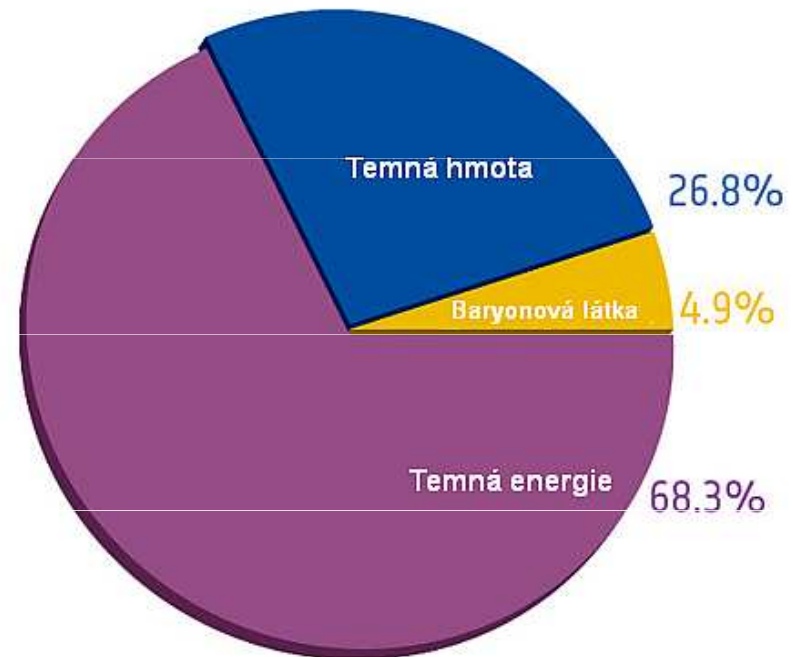




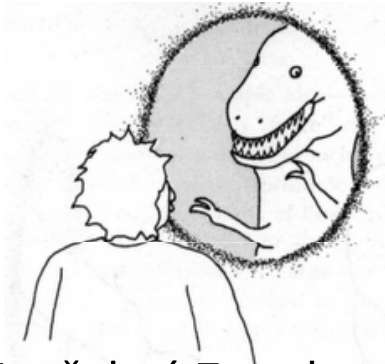
# Na závěr



před Planckem



po Planckovi



**Hubbleova konstanta  $H (71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$**   
**Stáří Vesmíru  $13,798 \pm 0.037$  miliard let**

Ty však, ó Zarathustro,  
chtěl jsi všech věcí viděti pozadí a dno: tak ti již nezbývá než stoupati přes sebe samého,  
vzhůru, výš, až i své hvězdy budeš míti pod sebou!





ABS

BICEP2/Keck

SPIDER

EBEX

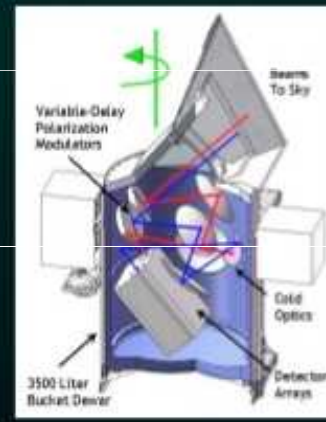
Polarbear



QUIJOTE

POLAR-1

PIPER



ACTPol

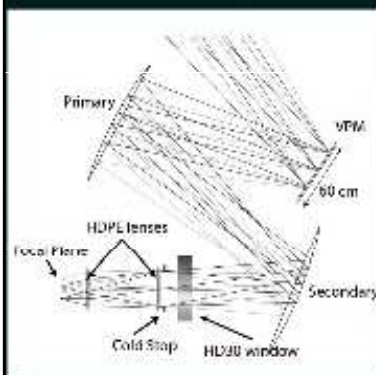
SPTpol



Planck



CLASS



GroundBIRD

QUBIC

